

密级:_____

中国科学院研究生院

博士学位论文

气候变化对中国典型地区小麦产量构成和水分
利用的影响

作者姓名: 杨晓亚

指导教师: 于强 研究员 中国科学院地理科学与资源研究所

Dr Mike Wong Land and Water CSIRO

Prof Asseng Senthold University of Florida

学位类别: 理学博士

学科专业: 生态学

培养单位: 中国科学院地理科学与资源研究所

2012年5月

Effect of Climate Change on wheat yield components
and water use in Typical Regions of China

By
Xiaoya Yang

A Dissertation Submitted to
Graduate University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of Doctor of Ecology

Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research,
Chinese Academy of Sciences

May, 2012

致谢

四年的博士生活即将结束，在导师指导、个人努力以及各位老师同学的共同支持帮助下，我在科学研究方面终取得一些可喜的成果。博士论文定稿之际，念及四年既苦且甜的生活，心中充满感激，对所有关心和帮助过我的老师、同学、朋友和亲人表示衷心的感谢。

本论文在导师于强研究员悉心指导下完成，论文的选题、研究内容设计、构思方法选择等方面于老师都进行了认真的指导。于强导师渊博的学识、严谨的治学态度、求实的科学信念，特别是对国际研究前沿热点和国家重大需求问题的敏锐洞察与把握，对本人影响深远。生活中于老师正直的品格、谦虚的为人态度、乐于付出、艰苦朴素的工作作风同样值得我学习。在于老师课题组4年来，我获益最多的是在宽松和融洽的学术氛围中培养了自己独立科研的能力，对生活和自身性格有了更深入的认识，这些获得必将终身受益。

衷心感谢我的另外两位导师 Dr Mike Wong 和 Prof Asseng Senthold (现为美国 Florida 大学的教授)，在澳大利亚联邦科工组织 (CSIRO) 留学期间两位导师给予了我许多帮助。Dr Wong 生活中为人平和风趣，工作中治学严谨，生活上对我的照顾无微不至。Dr Senthold 为人热情，思维敏锐，对论文的设计，模型的验证和运行以及英文论文的修改均给予了许多帮助。同时感谢 CSIRO 的 Kathy Witterwer 在生活中对我的照顾，Nirav Khinashia 在模型运用中的指导。

本文的工作得到了诸多老师的指导和帮助，包括所内的吕昌河研究员，莫兴国研究员，陶福祿研究员，李俊副研究员，张雪芹副研究员，刘恩民高级工程师等，井冈山学院叶子飘教授，北京林业大学同小娟副教授，中国气象科学研究院刘建栋研究员和邹定荣副研究员，青岛农业大学房全孝副教授，美国农业部 Dr. Gregory S. McMaster，悉尼科技大学的陈超、李龙辉和罗群英博士后对论文的内容以及英语语言方面进行了详尽的指导，特别感谢许守华研究助理在科研过程中给予的诸多帮助，以及邢洪涛师兄在论文修改方面的帮助。

感谢研究生部陈力老师、王淑强老师、谭寨璐老师、储小红老师、黄文力老师，水文室陈庆美老师以及医务室和图书馆的各位老师在生活和工作提供的各种便利和帮助。感谢陆佩玲老师在生活中对我的关心和照顾。感谢同课题组肖薇、李晓炜、赵刚、马轩龙、郭利萍、何亮、刘渡、王亚俊等在生活和工作中的帮助。

同时感谢陪伴我走过这一段生活的好朋友，室友刘立涛、施蕾蕾、刘蕾、吕金妹、范兰、殷洁、张彩虹，好友王德梅、马淑敏、李华、陈瑜、张春、范娜，以及在澳洲的好友张爱静、王海丽、陈嵩、王卫光、曾云超、陈军飞、王星、刘文彬、宋小燕、Rex Lau等，和他们的相处非常愉快，感谢他们在生活中对我的帮助。特别感谢我的男友陈专，在生活中和精神上对我的支持和帮助。

最后，感谢我的父母和兄嫂对我学业的支持和鼓励，你们辛苦了。

杨晓亚

2012年5月于地理所

摘要

在气候变化背景下，研究气象因素（太阳辐射、温度和降雨）的变化对小麦产量构成和水分利用的影响对保证我国粮食安全及提高农业资源利用效率均有重要意义。本文利用试验资料研究了中国小麦主产区产量和产量构成因素的关系，及其与相应发育阶段气象因素的关系；并进一步应用农业系统模型模拟分析了我国典型地区气候变化（太阳辐射、温度、降雨量变化）对小麦产量和水分利用的影响。主要结论为：

1. 利用两年的“中国冬小麦新品种动态”中接近 70 个站点的小麦栽培资料，分析了中国冬小麦 4 个主产区产量和产量构成因素的关系，并结合每个站点的气象资料，分析小麦产量和产量构成因素的变化与气象因素的关系。相关和通径分析结果表明穗数对产量的影响最大，千粒重次之，穗粒数对产量的影响较小。相关和逐步回归分析结果表明，产量与出苗至抽穗和抽穗至成熟阶段的日照时数均为正相关且相关系数最大，穗数与出苗至抽穗阶段的最低温度显著负相关与日照时数显著正相关，穗粒数与出苗至抽穗阶段的最低温度显著正相关，千粒重与抽穗至成熟阶段的最高温度显著正相关。产量和穗数分别与生育期和出苗至抽穗期积温正相关，穗粒数和千粒重与其形成阶段积温无显著相关关系。在本文的研究区域，黄淮海区域为高产并且稳产的区域，此区域三个产量构成因素对产量的贡献相同即对产量同等重要。在产量较低的区域，穗数与产量的相关性最高，维持较高的穗数对产量的提高很重要。

2. 利用研究站点连续 3 年的田间试验资料验证了农业生产系统模型 APSIM 的适用性，并利用过去 50 年左右的气候资料模拟分析了气候变化对中国小麦潜在产量和水分利用的影响，结论分别为：

(1) 分别在乌兰乌苏、莎车和东坎试验站验证了 APSIM 模型的适用性，模型能够较好的反应新疆绿洲地区三个站点的小麦叶面积指数和地上生物量的增长动态。可以应用该模型分析新疆绿洲地区气候变化对作物生产的影响。但是，由于模型对新疆地区春季增温快，光照充足的气候条件敏感性不足，模型低估了返青后叶面积指数和地上生物量的增长，造成作物叶面积指数和生物量模拟值较实测值偏低。

(2) 乌兰乌苏和莎车试验站，1955-2006 年间太阳辐射下降和温度升高导致了冬小麦模拟生育期缩短和蒸散量显著下降，乌兰乌苏试验站小麦模拟产量没有明显变化，莎车试验站小麦模拟产量显著下降。东坎试验站 1955-2006 年太阳辐射无变化趋势，最低温度升高；其春小麦产量、生育期和蒸散量的模拟值均无明显变化趋势。乌兰乌苏和莎车试验站产量和蒸散量模拟值与气象因素相关分析结果表明，产量和蒸散量的模拟值与太阳辐射为显著正相关关系，水分利用效率与太阳辐射为显著负相关关系，并且与其他气象因素相比相关系数绝对值最高。同时聚类分析结果表明，太阳辐射与实测蒸散量的关系最密切。

(3) 分别在栾城、盐亭和乌兰乌苏验证了 APSIM 模型的适用性，并分别应用于北京/济南、成都和乌鲁木齐的过去 48 年气候变化对小麦产量和水分利用的影响。北京、济南、成都和乌鲁

木齐 1961-2009 年间小麦生长季的太阳辐射下降趋势分别为-0.061、-0.042、-0.059 和-0.026 MJ m⁻² a⁻¹，最低温度的上升趋势分别为 0.08、0.038、0.034 和 0.047 °C a⁻¹。模拟结果表明过去 48 年北京和济南的小麦模拟产量无明显变化趋势，成都的模拟产量显著下降。太阳辐射的变化解释了成都产量变化的 73.6%。由于最低温度和降雨量的增加，过去 48 年乌鲁木齐的模拟产量显著增加。4 个试点蒸散量模拟值均随着太阳辐射的降低而下降。北京、济南和乌鲁木齐的水分利用效率增加，成都无明显变化。总之，在太阳辐射水平较高的地区，伴随着温度增加的太阳辐射的下降对产量模拟值无显著影响并提高水分利用效率，在太阳辐射水平较低的地区太阳辐射降低使籽粒产量显著下降。

(4) 利用 APSIM 模型模拟研究了北京和成都过去 49 年太阳辐射变化和温度升高单个气象因素变化对小麦产量和水分利用的影响。模拟结果表明辐射水平较低的成都小麦产量对太阳辐射下降更敏感，随着太阳辐射的降低其下降比例显著高于北京。成都温度的升高导致的小麦产量和蒸散量下降均高于北京，表明温度水平较高的地区小麦生产对升温的变化更敏感。太阳辐射降低 10%引起的小麦产量和蒸散量下降量均高于温度增加 1 °C。总之，太阳辐射的下降和温度的升高对太阳辐射水平较低并且温度较高的成都地区的小麦生产的负面影响大于北京地区。

关键词：小麦，产量，产量构成因素，水分利用，气候变化，APSIM

Abstract

Under the condition of climate change, the research on climate elements (solar radiation, temperature and rainfall) variability/change effects on wheat yield formation and water use always is crucial for improving food security and agricultural resources use efficiency. This study researched on the relationship between yield and yield components, and the relationship with climate elements of corresponding developmental phases; and the impact of climate change (including solar radiation, temperature and rainfall changes) on wheat yield and water use was researched by using agriculture system model in typical regions of China. Main conclusions are listed as follows:

1. Two years of data from the Chinese Variety Evaluation Program with nearly 70 experimental sites were used to explore the relationship between grain yield and the three yield components, and which were combined with climate data of each site to analyze the relationship among yield, yield components and climate elements. Path coefficient analysis indicated that across regions spike number per m² (SN) had a slightly greater direct effect on grain yield than 1000-kernel weight (KW), and kernel number per spike (KN) had little effect on grain yield. Correlation and stepwise regression results indicated that yield was most positively related to average sunshine duration from emergence to heading and from heading to maturity. Sunshine duration and maximum daily temperature from emergence to heading mainly determined SN, minimum daily temperature from emergence to heading mainly determined KN, and maximum daily temperature from heading to maturity mainly determined KW. Yield and SN were positively related with thermal time during wheat growth duration and between emergence to heading respectively. KN and KW had no relationship with thermal time of corresponding growth stages. High production environments with consistent yield are those with lower temperatures, greater sunshine duration, and all yield components equally contribute to yield. However, maintaining high SN is important under yield-limiting conditions.

2. Three years experimental data were used to validate the farming systems model APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) at each research site. Then the validated APSIM was used to evaluate past 50 years climate variability/change effects on potential crop yield, evapotranspiration (ET), and water use efficiency of wheat in China. Main conclusions are listed as follows:

(1) APSIM model was validated at Wulanwushu, Shache and Dongkan station respectively. The results showed that the model was able to simulate the dynamics of wheat growth, biomass and yield, and it could be used for analysis the climate change effects on wheat production. The

model tended to underestimate winter wheat leaf area index (LAI) and biomass when temperature increase in spring probably because the model couldn't sensitively reflect the impact of fast temperature and solar radiation increases on the biomass accumulation process of winter wheat in Xinjiang.

(2) Simulated wheat growth duration and evapotranspiration (ET) significantly decreased probably due to solar radiation decrease and temperature increase from 1955 to 2006 at Wulanwushu and Shache station. Simulated wheat yield had no significant change at Wulanwushu station, while simulated yield significantly decreased at Shache station. Solar radiation had no changes trend and temperature increase from 1955 to 2006 at Dongkan station, simulated spring wheat growth duration, wheat yield and ET had no changes trend. Correlation analysis among simulated yield, ET, water use efficiency (WUE) and climate elements showed that solar radiation was positively related with yield and ET, and which was negatively related with WUE. Cluster analysis showed that the variations of ET were mainly determined by solar radiation, nothing to do with the changes in temperature.

(3) APSIM model was validated at Luancheng, Yanting and Wulanwushu respectively, and the validated model was used to research the effects of climate change on wheat yield and water use during past 48 years at Beijing/Jinan, Chengdu and Urumqi respectively. Solar radiation during the wheat season declined by -0.061 , -0.042 , -0.059 and $-0.026 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ at Beijing, Jinan, Chengdu and Urumqi, and minimum temperature increased by 0.08 , 0.038 , 0.034 and $0.047 \text{ }^{\circ}\text{C a}^{-1}$ respectively. Simulated results showed that wheat yield had no significant change at Beijing and Jinan during past 48 years. Simulated yield significantly decreased at Chengdu station. Variation of solar radiation explained 73.6% of changes in grain yield at Chengdu. Simulated grain yields in the Urumqi region increased during the last decades due to increasing minimum temperature and rainfall. Simulated evapotranspiration declined with the decline of solar radiation at these four stations. Water use efficiency increased at Beijing and Urumqi, which had no significant change at Chengdu. Declining solar radiation under high level would have no effect on wheat yield and improve water use efficiency, which under low level of solar radiation would significantly decrease grain yield.

(4) We researched the effects of solar radiation changes and temperature increase on wheat yield and water use respectively at Beijing and Chengdu during past nearly 50 years by using APSIM model. Solar radiation reduction and temperature increase would induce simulated yield and ET decrease. Simulated results showed that when solar radiation decreases yield of Chengdu which had low solar radiation decreased more than Beijing. Wheat yield of Chengdu is more sensitive to the solar radiation reduction. Reduction of simulated yield and ET at Chengdu were greater than Beijing when temperature increase, which showed that wheat growth at Chengdu were more sensitive to temperature increase than Beijing. The reduction of simulated wheat yield

and ET which induced by solar radiation reduction 10% were higher than which induced by temperature increase 1 °C. Solar radiation and temperature changes had different effects on wheat yield and water use under different climate conditions. Wheat production of Chengdu was more sensitive for solar radiation reduction and temperature increase than Beijing.

Keywords: wheat, yield, yield components, water use, climate change, APSIM

摘 要.....	I
Abstract	III
第一章 绪论.....	1
1.1 气候变化和作物生产关系研究的重要意义.....	1
1.2 气候变化对作物生产影响的研究进展.....	2
1.2.1 升温对作物生长发育和产量的影响.....	2
1.2.2 太阳辐射降低及其对产量和水分利用的影响.....	3
1.2.3 蒸发量变化及其对作物水分利用的影响.....	4
1.2.4 CO ₂ 浓度增加对作物生长的影响.....	6
1.3 作物模型研究进展.....	7
1.4 APSIM模型介绍.....	8
1.4.1 APSIM模型简介.....	8
1.4.2 APSIM 模型结构.....	9
1.4.3 APSIM模型组成.....	10
1.4.4 APSIM小麦模块介绍.....	13
1.5 APSIM模型应用.....	18
1.6 研究目的、内容与方法.....	20
1.6.1 研究目的.....	20
1.6.2 研究内容与方法.....	21
第二章 中国主产区小麦产量和产量构成因素的关系.....	23
摘 要.....	23
2.1 引言.....	23
2.2 材料与方法.....	25
2.2.1 试验区域.....	26
2.2.2 田间试验设计.....	26
2.2.3 四个试验区域的气候条件.....	27
2.2.4 数据分析.....	29
2.3 结果.....	30
2.3.1 四个区域试验的产量和产量构成因素.....	30
2.3.2 相关分析结果.....	31
2.3.3 通径系数分析.....	33
2.3.4 产量、产量构成因素和发育期的关系.....	35
2.3.5 产量、产量构成因素和气象因素的关系.....	37
2.3.6 产量、产量构成因素和积温的关系.....	38
2.4 讨论.....	40
2.5 结论.....	41
第三章 APSIM模型在新疆地区的适用性评价.....	43
摘 要.....	43
3.1 引言.....	43
3.2 材料与方法.....	44
3.2.1 试验站概况.....	44
3.2.2 试验数据获取.....	44
3.2.3 模型性能评价指标.....	45

3.2.4 模型敏感性分析.....	46
3.3 模型输入与参数确定.....	46
3.3.1 模型输入资料.....	46
3.3.2 模型参数确定.....	47
3.3.3 模型验证资料与结果输出.....	48
3.4 模型校准与验证.....	48
3.4.1 作物生长动态模拟.....	49
3.4.2 作物产量模拟.....	52
3.4.3 模型的敏感性分析.....	54
3.5 结论.....	54
第四章 气候变化对新疆绿洲区小麦产量和水分利用的影响	56
摘要.....	56
4.1 引言.....	56
4.2 材料与方法.....	57
4.3 研究区域小麦生长季内气候波动/变化	57
4.3.1 太阳辐射计算方法.....	57
4.3.2 年际间小麦生长季内气候波动/变化.....	58
4.4 气候波动/变化对小麦产量和水分利用的影响	61
4.4.1 蒸发皿蒸发量和模拟蒸散量的关系.....	61
4.4.2 气候变化对小麦产量和水分利用的影响.....	61
4.4.3 影响蒸散量变化的主要气象因素.....	64
4.5 结论与讨论.....	65
第五章 太阳辐射降低对小麦产量和水分利用的影响	67
摘要.....	67
5.1 引言.....	67
5.1.1 太阳辐射的变化.....	67
5.1.2 太阳辐射降低对小麦产量和水分利用的影响.....	68
5.2 材料和方法.....	69
5.2.1 研究地点和气候.....	69
5.2.2 试验数据	70
5.2.3 模型的验证.....	72
5.2.4 模拟过去几十年气候变化对小麦产量和水分利用的影响.....	73
5.3 结果.....	73
5.3.1 APSIM模型的表现.....	73
5.3.2 APSIM模型的敏感性分析.....	76
5.3.3 过去几十年观测到的气候变化趋势.....	77
5.3.4 气候变化对小麦生育期和籽粒产量的影响.....	79
5.3.5 气候变化对小麦潜在蒸腾和水分利用的影响.....	80
5.3.6 太阳辐射下降对小麦产量和蒸腾的影响.....	82
5.4 讨论.....	84
5.5 结论.....	85
第六章 太阳辐射和温度变化对小麦产量和蒸散量的单因素影响	86
摘要.....	86
6.1 引言.....	86
6.2 材料和方法.....	87
6.2.1 研究地点	87
6.2.2 模拟实验	87

6.3 结果.....	87
6.3.1 太阳辐射变化对小麦产量和蒸散量的影响.....	87
6.3.2 温度升高对小麦产量和蒸散量的影响.....	88
6.3.2 对比辐射和温度变化对北京和成都小麦生育期、产量和蒸散量的影响.....	90
6.4 结论.....	91
第七章 结论与展望.....	92
7.1 主要结论.....	92
7.2 讨论和展望.....	93
参考文献.....	95
作者简介.....	109

第一章 绪论

1.1 气候变化和作物生产关系研究的重要意义

全球气候变化对生态系统以及社会经济系统产生明显影响,并将继续造成深远而巨大的影响,其中不少影响是负面的(Dobson et al., 1997; Sun et al., 2002; IPCC, 2007)。人类活动引起的温室气体增加是近期观测到的气候变化的主要原因。气候变化体现在气温、降水、太阳辐射等气候要素随时间的趋势变化和年际变化幅度的改变。气候是影响农业生产的自然资源中最重要、也是最活跃的组成部分。农业生产潜力、种植制度、结构布局、水肥管理等各方面均受到辐射、温度、降水等气象因子的波动和变化的影响。作物系统如何应对气候变化对农业生产的影响成为了农业、气象以及生态等领域的重要研究课题。

目前农业占世界经济产出的 5%, 农业工作者占全球劳动力的 22%, 农业用地占土地总面积的 40% (Lotze-Campen, 2011)。在发展中国家, 大约 70% 的人口生活在农村, 农业是最大的经济支柱。大部分世界贫困人口生活在干旱或半干旱地区, 这些地区的气候条件极不稳定。大多数发展中国家位于低纬度地区, 其经济发展依赖农业, 受气候变化的影响强烈, 适应性差。在未来气候变化的条件下, 气候变异和极端气候将在世界范围内增加。研究气候变化对农业生产的影响对促进粮食安全意义重大。未来的农业将和日益扩大的城市和工业生产竞争紧缺的土地和水资源, 提高农业资源利用效率一直处于紧要地位。气候变化将怎样影响农业生产力和可持续性, 需要更多系统和深入的研究工作。

中国是世界上人口最多的发展中国家, 以占全球 7% 的耕地面积养活占世界 22% 的人口 (Tong et al., 2003), 保证粮食生产一直是我国国际民生的首要任务。我国作物生产条件多样, 北方干旱寒冷、南方温暖湿润, 各个区域气候波动/变化均有差异。中国过去几十年观测到的气候变化与全球平均气候变化相似。过去 50 年中国年平均气温增加了 1.1 °C, 过去 100 年增加了 0.5-0.8 °C, 稍微高于同期的全球气温增加量 (Ding et al., 2007)。中国的北部和冬天温度增加最多。我国多数站点的太阳辐射 1960-2000 年间为下降趋势 (Che et al., 2005; Qian et al., 2007)。虽然全国平均年均降雨量无明显变化, 区域变化较明显, 西北部和长江中下游流域的降雨量明显增加, 而北部严重干旱。CO₂ 浓度的增加、辐射降低、高温、降雨格局的改变、可利用水的改变以及天气极端事件 (比如洪水、风暴和干旱) 都会对作物的生长和产量产生积极或消极的影响。虽然单个气象要素的变化对作物的影响已有不少研究, 不同气象要素间复杂的交互作用特别是极端事件对作物的影响还存在很多难题。在水资源短缺和粮食需求一直增加的矛盾状况下, 作物对环境因子的响应研究显得更为重要。

1.2 气候变化对作物生产影响的研究进展

作物生长强烈地依赖于气候条件,气候变化势必对作物的生长发育及产量形成产生重要影响。太阳辐射、温度、光周期及其与基因型的相互作用依次决定了作物的潜在产量(Fischer, 2011)。气候变化引起农业生产不稳定性增加、产量波动大(林而达等, 2003; Hatfield et al., 2011)、作物物候期的变化(Xiao et al., 2008; Karl et al., 2009)。气象因子的变化可以解释籽粒产量接近60%的变化(Chmielewski and Kohn, 1999),过去30年加拿大草原春小麦产量的增加主要归因于气候变化(Qian et al., 2009)。由于各气象要素之间相互联系、相互制约、相互影响的关系,并且作物生长对各个气象要素变化的响应均不相同,气候变化对作物生长的影响是复杂并且不确定的。

1.2.1 升温对作物生长发育和产量的影响

作物在不同的生长阶段对温度的反应不同。每个作物品种均在一定的最高和最低温度范围内生长,并存在生长速率最快的最佳温度。当温度高于最佳温度时,生长速率降低;当温度超出作物的最高温度,生长将停止。高温将加快作物发育,生育期的缩短将导致生育期间的累积光截获减少因而导致潜在产量降低。生殖生长期的高温将影响到花粉活力、受精和籽粒形成从而影响产量。生殖生长阶段的高温对产量的影响大于营养生长阶段。Schlenker and Roberts (2009)在研究气候变化影响时强调了温度对产量的非线性影响,即高于最佳温度导致的产量下降的斜率大于低温对产量的影响。小麦光合作用的最佳温度范围为20-30 °C(Kobza and Edwards, 1987),籽粒产量和单个籽粒生长速率的最佳温度为15 °C(Chowdhury and Wardlaw, 1978)。Pushpalatha et al. (2008)报道当小麦植株暴露在较高温度下时光合速率降低。小麦灌浆期温度增加至25-35 °C时,灌浆期将缩短,产量下降。Prasad et al. (2008)研究了夜间温度变化对小麦生长的影响,表明夜间温度的上升到20 °C以上时,小穗分化、籽粒的大小和数量均会降低。

作物发育期的开始、结束和长度都与温度紧密相关(Chmielewski, 1992)。在作物生长季节中,温度的变化以及作物对温度变化的响应是将来气候变化对作物生产的主要研究方向(Lobell and Burke, 2008)。升温缩短了小麦的灌浆期,因而限制了同化物的生产(Sofield et al., 1977)。Lawlor and Mitchell (2000)报道温度增加1 °C将导致生殖生长阶段缩短6%,籽粒灌浆期缩短5%,因而导致籽粒产量和收获指数的降低。1961-2000年间德国气温增加,植物的物候期提前,尤其春季表现明显;但是植物发育期的改变并没有明显的影响产量形成过程(Chmielewski et al., 2004)。

欧洲九个试点对春小麦的观测结果表明温度每升高1 °C产量将降低6%(Bender et al., 1999)。Lobell and Asner (2003)分析美国1982-1998年温度、降雨和太阳辐射与玉米和大豆产量的关系,发现温度变化可以解释25%玉米和32%的大豆产量的变化,温度每增加1 °C玉米和大豆产量将降低17%;降雨和太阳辐射与产量之间无显著相关关

系。全球尺度上增温 1 °C 小麦产量将下降 5.4% (Lobell and Field, 2007)。一些学者强调了最低温度增加对作物产量的负面影响。Nicholls (1997) 分析了澳大利亚 1952-1992 年间小麦产量和气象因子的关系, 表明 30-50% 小麦产量的变化归因于气候变化, 最低温度的增加是主要的影响因素。1992-2003 年在菲律宾国际水稻研究院, 水稻生长季内的干旱月份 (1-4 月) 最低气温每增加 1°C, 水稻产量下降 15% (Peng et al., 2004)。Lobell et al. (2005) 在墨西哥的 Yaqui Valley 发现 1988-2002 年最低温度 (1 月到 4 月) 的变化最大的解释了小麦产量变化, 最低温度每升高 1 °C 产量将下降 10%, 产量变化与最高温度和太阳辐射的变化无显著相关。

Tao et al. (2006) 分析了 1981-2000 年温度变化对中国作物物候和产量的影响, 结果表明气候变暖的趋势增加了中国东北的水稻和大豆产量, 降低了天津、江苏、安徽、陕西、山西、辽宁和甘肃的玉米产量, 同时降低了湖北、湖南和辽宁的小麦产量 (Tao et al., 2008); 玉米产量受高温和低温变化趋势的影响, 小麦和大豆主要是受低温变化的影响。气候暖干化使黄土高原半干旱雨养农业区小麦生长季提前、生长期缩短 (王位泰等, 2006), 产量下降, 拔节到抽穗期的增温对产量有极显著的负影响 (赵鸿等, 2008)。李长军和刘焕彬 (2004) 分析 1961-1998 年的山东省气候变化特点和冬小麦生产潜力, 表明年、季平均气温呈波动性增暖趋势, 降水量呈减少趋势, 气候变暖有利于生产潜力的提高。徐新良等 (2007) 估算了东北地区 1991-2000 年气候波动对农田生产潜力的影响, 结果显示由于作物生长季内气候变暖和降水减少, 生产潜力普遍降低 6.5%。

由以上研究结果可知, 温度上升导致作物的生育期缩短, 对产量的影响在不同地区效果不同。温度上升增加了呼吸作用, 缩短了作物营养生长期和灌浆阶段, 降低了作物产量。但是仅仅分析逐年的气象因子变化与作物产量的相关关系, 可能会掩盖作物生长过程中对温度变化的真实反应。作物的每个生长阶段对温度的要求不同, 对温度变化的响应也不同。例如小麦的营养生长阶段, 在其可以生长的温度范围内较低的温度有利于穗数和穗粒数的形成, 而在生殖生长阶段较高的温度对光合作用更为有利。详细分析作物每个生长阶段的温度变化趋势, 以及作物这个阶段对温度变化的响应, 可以对最后形成的作物产量做出更详细更合理的解释。

1.2.2 太阳辐射降低及其对产量和水分利用的影响

太阳辐射是地球生物的能量来源, 决定了我们生存环境的气候条件。到达地球表面的太阳能量是决定陆面能量平衡和驱使陆面过程主要因子, 驱动的陆面过程主要包括, 蒸发及与此关联的水文过程、降雪和冰川融化、植物光合作用以及与此相关的陆地碳吸收、以及逐日温度的变化过程等。

不少研究表明全球范围内太阳辐射均出现降低现象, 从 1960 到 1990 年间到达地球表面的太阳光平均下降了 10% 左右 (Liang and Xia, 2005)。中国自 1960 年以来由于工业生产增加的气溶胶, 导致太阳辐射显著下降 (Kaiser and Qian, 2002; Che et al., 2005;

Qian et al., 2007)。云量、大气湿度和大气中的气溶胶是影响到达地面太阳辐射的三大重要因子。近年来, 中国地区总云量变化很小(谢贤群等, 2007), 云量变化不是影响太阳总辐射下降的主要原因。大气中水汽散射和吸收太阳辐射, 减少了到达地面的太阳辐射量。大气中悬浮的极微小颗粒物称为气溶胶, 气溶胶反射和散射太阳短波辐射, 减少了到达地面的太阳辐射。谢贤群等(2007)研究表明, 大气湿度和气溶胶含量增加是导致太阳辐射降低的主要因素。

作物模拟模型是量化研究气候对作物生理和土壤过程影响的一种方式。Chameides et al. (1999) 利用 CERES 3.1 水稻和小麦作物模拟模型, 在 1970s 南京气候条件下, 模拟了太阳总辐射下降对中国水稻和小麦产量的影响, 结果表明由污染导致的全球变暗使小麦产量降低了 5-30%, 水稻降低了 3-21%。Swain et al. (2007) 利用印度历史时期气象资料(1983-2002) 研究表明入射辐射下降了 30% 导致了水稻产量下降了 12%。Chen et al. (2009) 在华北平原研究结果表明由于太阳辐射的下降, 作物的潜在产量和水分需求显著降低。由升温导致的生育期缩短和太阳辐射下降导致的蒸发量降低共同导致了欧洲多个区域小麦水分需求的降低(Supit et al., 2010)。

植株在高光强的条件下, 叶片气孔传导率下降, 气体交换减少; 辐射热负荷的降低可以促使叶片传导率和光合作用的增加。因此伴随着散射辐射比例增加的太阳直接辐射的少量减少, 将显著增加作物的光合作用(Choudhury, 2001; Rodriguez and Sadras, 2007), 进而增加作物生产力。模型的研究结果表明生产力和农田蒸散的下降与辐射的下降成一定比例, 但是一些实验证据并不支持这个结果。由于许多作物的耐阴性以及受到的水分胁迫降低, 作物对辐射变化的敏感性较低, 尤其是在高辐射和干旱气候背景下(Stanhill and Cohen, 2001)。如果其他气象因子的没有变化, 到达地球表面的太阳辐射即使降低 10-20%, 对作物的产量和生产力的影响也很微小。试验研究表明当作物生产力受水分条件限制时, 伴随着散射辐射增加的太阳辐射降低, 不会对生产力产生影响或者使其增加(Yamaguchi et al., 1996)。在湿润的气候条件下, 且植物的辐射热负荷比较低时, 太阳辐射的降低将会导致作物生产力的降低(Wang et al., 1994)。作物水平和蒸散量与太阳辐射紧密相关, 太阳辐射的减少导致蒸散量降低。在不同的气候类型地区, 应区别对待太阳辐射下降对小麦产量和水分利用的影响

1.2.3 蒸发量变化及其对作物水分利用的影响

蒸发既是地表热量平衡的组成部分, 又是水量平衡的组成部分, 是水循环中最直接受土地利用和气候变化影响的一项; 反过来, 蒸发又可减小辐射向感热的转化, 增加空气湿度, 提高最低气温及降低最高气温, 起到调节气候的作用。在全球增温的背景下, 蒸发量却是下降趋势, 对蒸发量下降的原因, 即蒸发量变化与各气象要素变化之间的关系, 国内外学者作了较多研究。

大气蒸发力影响作物的水分需求, 通常可用蒸发皿蒸发量来评估大气蒸发力

(Stanhill, 2002)。过去30-50年,蒸发皿蒸发量以 $-2\sim-5\text{ mm a}^{-2}$ 的速率下降(Groisman et al., 2004; Wu et al., 2006; Burn and Hesch, 2007)。许多研究结果表明,太阳辐射和风速是蒸发皿蒸发量的下降主要影响因素。Roderick et al. (2007) 研究表明澳大利亚观测到的蒸发皿蒸发量的下降主要是由于风速的下降以及一些地区太阳辐射的下降。Xu et al. (2006) 报道中国长江流域对照蒸散量的下降主要归因于风速的下降。Fu et al. (2009) 指出太阳辐射、饱和水汽压差(VPD)和风速是影响蒸发皿蒸发的3个主要因素,在不同的地区3个因素的重要性存在差异。

近年来我国蒸发量变化趋势的研究多有报道。1956-2000年期间,我国水面蒸发量呈显著下降趋势,东部、南部和西北地区下降更多;全国多数地区日照时数、平均风速和温度日较差是引起大范围蒸发量趋向减少的直接气候因子(任国玉和郭军, 2006)。刘波等(2006)认为气温日较差和风速是影响中国北方蒸发皿蒸发的最重要的因子;段春锋等(2011)认为风速是影响我国西北地区参考作物蒸散变化的主要因子,太阳辐射和气温次之;而谢贤群和王菱(2007)报道太阳辐射下降导致潜在蒸发的减小量约占总潜在蒸发减小量的78%左右。张山清和普宗朝(2011)报道受气温上升、日照时数减少、风速减小、相对湿度增大的影响,近48年新疆参考作物蒸散量呈显著减小趋势。不同季节对照发现,中国蒸发皿蒸发量的下降主要表现在春季、夏季和冬季,秋季下降不明显,日照百分率下降从而导致太阳总辐射的下降可能是近年来蒸发皿蒸发量下降的主要原因(曾燕等, 2007)。

不少研究报道指出 VPD 与作物水分生产力之间的密切关系。Bierhuizen and Slayter (1965) 研究了气候因子对植被光合和蒸腾的影响,发现 VPD 与作物水分生产力存在一定的负相关关系, Tanner and Sinclair (1983) 指出可以利用 VPD 比较年际和区域间作物水分生产力特征,陈超等(2009)利用作物模型研究指出 VPD 是影响华北平原作物水分生产力的主要气象因子。Zwart and Bastiaanssen (2004) 分析了 84 篇文献中近 25 年的试验结果得出作物水分生产力随着纬度的降低而升高。Doherty et al. (2010) 在澳大利亚郡尺度上分析了小麦水分利用效率的变化,指出应分析 VPD、辐射、散射辐射和温度的综合影响,并提出应在决定作物产量的关键生育期分析上述影响因子的作用。Tao et al. (2003) 利用中国 1945-1995 年间的气象和土壤水分资料,发现华北平原和东北平原土壤干旱、土壤水分变率大和农业需水增加的趋势,中国西南部农业需水降低、土壤含水量增加,中国东南部的农业需水和土壤含水量没有明显变化趋势。

以上的研究表明,饱和水汽压差与作物水分生产力为负相关关系,即空气干燥潜在蒸发比较强的情况下,作物的水分生产力会降低。干旱地区的农田蒸散量大于湿润地区,因而作物的水分生产力较低。潜在蒸发量的变化对作物蒸腾作用以及作物产量的影响还不明确,在目前的气候变化背景下,研究潜在蒸发量下降对作物水分生产力的影响将进一步对这个问题做出补充解释。

1.2.4 CO₂ 浓度增加对作物生长的影响

过去 50 年大气中的 CO₂ 水平一直增加, 并且在以后的 30 年还会继续增加。大多数作物产量均会随着 CO₂ 浓度的增加而上升。据保守估计, 到 2050 年当前的 CO₂ 浓度 387 μmol mol⁻¹ 将增加到 450 μmol mol⁻¹, 实际增加量将比预估的还要多 (Karl et al., 2009)。研究 CO₂ 浓度对作物的影响, 必须要设计一个 CO₂ 浓度高于大气中浓度的生长系统。各种类型试验的研究结果均表明 CO₂ 浓度升高增加了作物光合作用, 进而提高了作物产量。Long et al. (2006) 研究结果表明, 自由空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 试验中谷物的产量变化 (CO₂ 浓度增至 550 μmol mol⁻¹ 时产量增加约 15%) 低于在密闭室 (CO₂ 浓度增至 660 μmol mol⁻¹ 时产量增加 30%) 的研究结果。

CO₂ 浓度的上升会增加叶子和冠层的光合作用 (尤其是 C₃ 植物), 呼吸作用变化很小。FACE 试验表明当 CO₂ 浓度增加一倍时, C₃ 作物 (例如小麦、水稻和大豆等) 生产力增加 15-25%, C₄ 作物 (例如玉米、高粱和甘蔗等) 将增加 5-10% (Hatfield et al., 2011)。增加的 CO₂ 会在不改变干物质分配的情况下提高生物量, 降低大部分作物的蒸腾作用提高水分利用效率 (Brouder and Volenec, 2008)。CO₂ 浓度与温度的互作研究表明, 在 CO₂ 浓度为 450 mg·g⁻¹ 的环境下, 当温度增加 0.8 °C 时雨养小麦的产量增加, 但当温度增加 1.5 °C 时产量反而减少, 需要补充灌溉来弥补这些负面影响 (Xiao et al., 2005)。但是多数试验是在水分和养分充足的条件下进行, 很少涉及水分和养分胁迫与 CO₂ 浓度增加的联合效应。总之, CO₂ 浓度的增加对作物产量有积极影响 (Parry et al., 2004; Easterling et al., 2007)。

近年来, 不少研究报道了我国气候变化背景下农业气候资源变化以及气候变化对农业生产的综合影响。杨晓光等 (2011) 分析了 1961-2007 年中国农业气候资源时空变化特征, 结果表明我国年均气温为增加趋势, 东北地区增幅最大; 日照时数为下降趋势, 长江中下游地区减幅最多; 全国降水量和参考作物蒸散量总体为减少趋势; 中国气候在全年和喜温作物生长期内总体为暖干趋势, 其中, 喜温作物生长期内西南、华北和东北地区为暖干趋势, 长江中下游、西北和华南地区为暖湿趋势, 喜凉作物生长期内华北地区为暖干趋势, 西北地区为暖湿趋势。我国北部地区 50 年来的平均气温增幅高于全国平均水平, 冬季增温最显著, 最低气温远比最高气温对升温的贡献大; 东北、华北大部、西北东部降水量明显减少, 平均每 10 年减少 20-40 mm, 尤其春夏季减少最明显 (邓振镛等, 2010)。1961-2007 年间, 中国冬小麦全生育期平均缩短 2.2 d 10a⁻¹, 生长季内有效积温和热时间为增加趋势, 太阳辐射和辐热积为下降趋势; 光热资源变化趋势对北部冬麦区和山东中东部黄淮麦区冬小麦生产潜力为负面影响, 其他地区冬小麦生长季内辐热积的增加与生育期缩短对冬小麦生产潜力的正负面影响同时存在, 需要利用作物生长模拟模型对冬小麦潜在产量进行定量估算 (王斌等, 2012)。

1.3 作物模型研究进展

作物模型可以定量描述作物生长发育、产量形成过程及其对环境的响应,可广泛地应用于理解、预测和调控作物生产,逐渐成为农业管理和资源优化的重要工具(Yu et al., 2006)。作物模型的发展主要是借助于对作物生理生态机理认识的不断加深和计算机技术的迅猛发展。作物生长模拟是指对作物一系列生长、发育和产量形成进行综合数值模拟的过程,同时作物的生长过程也是作物有效的利用大气和土壤中各种物质与能量的过程(谢云等, 2002)。

在作物模型研究的早期阶段,主要采用以试验数据为基础的统计分析方法,然而由于作物生长过程中涉及到许多变量,各变量间又存在着复杂的相互作用,这种只能描述现象的方法很难解决问题,于是模型的研究转向基础理论研究(Walker and Splinter, 1971),试图建立比较详尽的理论模型,使其具有普适性或一般性。

荷兰学者早期的作物模型研究注重作物生长过程机理表达,对一些作物过程描述得过于详尽,导致模拟结果往往与实际不相吻合。由于生产上的需要,在八十年代后开始注重模型的实用性研究,作物模拟的研究十分普遍。van Keulen et al. (1982)根据BACROS (Basic Crop Simulation)建立了简单通用的作物模型SUCROS (Simple and Universal Crop Simulator),这是一个以日为步长的模型,模拟作物生长均以冠层光合作用为基础,只需改变参数即可应用于不同作物。由荷兰瓦赫宁根大学开发的WOFOST (World Food Studies)模型是从SUCROS导出的最早面向应用的模型之一(van Diepen et al., 1989),此外,WOFOST模型与作物生长模拟系统(Crop Growth Simulation System-CGMS)相结合,广泛应用于模拟预测欧洲各国多种作物的产量变化(Supit et al., 1994)。Penning de Vries et al. (1989)开发的一年生作物生长模拟模型MACROS (Modules of an Annual Crop Simulator),包含一系列潜在和水分限制情形下的作物生长模拟模块。与SUCROS相比,MACROS保留了更多的综合模型特征。该模型是通用模型,给出了多种作物的参数。在MACROS和SUCROS的基础上,还开发了一系列研究水稻及其行为、水分平衡和生产潜力的水稻模型。

在模型应用阶段,一些既包含动力学或生理学过程,同时也包含以试验为基础的经验式或参数的模型迅速发展起来,被称为基于过程(Process-based)的模型。美国学者在作物生产模拟研究方面通常把“大气-土壤-作物-技术”看作一个综合生态系统,强调模型的综合性、应用性。当前在国际上实用性最广,运用最普遍的是以Ritchie et al.为代表的CERES系列作物模型。与荷兰学者开发的模型不同的是,CERES不是通用模型,它针对不同的作物开发了不同的模型。CERES系列最先发表的是Ritchie et al. (1985)的小麦模型CERES-Wheat,随后Jones et al. (1986)发表了玉米模型CERES-Maize, Ritchie et al. (1987)发表了稻谷模型CERES-Rice等。这些模型具有相似的模拟过程,包括土壤水分平衡、发育时段、作物生长等。IBSNAT (international benchmark transfer)在数据库与模型的基础上建立起一个农业技术转移决策系统DSSAT (decision support system

for agrotechnology transfer) (Tsuji, 1998), 该系统集成包括CERES在内的多个作物生长模拟模型。APSIM是澳大利亚系列作物模型的总称,是将各种不同的作物模型集成到一个公用的平台,将作物模型、牧草生产、残留物降解、土壤水分和营养流及土壤侵蚀组合起来,模拟不同生产系统,并利用一定的规则模拟土壤和作物管理。后续章节中将对该模型做详细介绍。

我国的作物生长模拟研究始于20世纪80年代,先后建立了水稻栽培模拟优化决策系统RCSODS (高亮之等, 1989), 小麦生长发育模型WheatSM (冯利平, 1995), 基于作物-环境-技术关系的小麦生长模拟模型 (曹卫星和罗卫红, 2000), 中国农业系统模型ChinaAgrosys (Wang et al., 2006), 植被界面过程机理模型 (VIP) (Liu et al., 2010) 等。总体来看,我国作物模型研究水平还不高,模型应用还存在重引进,轻验证的问题。

目前的作物生长模型考虑的过程越来越详细,越来越走向对内在机理的深刻认识。模型功能变得越来越强大,可以用于预测作物的生长及产量的形成 (De Wit and van Diepen, 2008), 环境和经济效益的评价 (Yu et al., 2008)、资源的优化管理 (Yu et al., 2006), 以及管理措施的效应 (Malone et al., 2007) 和作物品种的选育 (Hammer et al., 2006)。作物模型与GIS相结合,能够评估分析各地特定的气温、降水、地形、土壤及农田管理措施等对农业生产和环境的影响,已经引起国内外相关领域学者的关注。许多研究都将作物生长模型与RS和GIS技术结合,使作物模型的应用更加广泛 (Ren et al., 2008)。作物模型与GIS、RS等先进技术相结合将是今后的主要方向之一,随着作物模型研究机制不断完善,对田间作物生产及区域农业系统的指导作用将会越来越大,模型区域应用成为当前模型研究的重点。

1.4 APSIM模型介绍

1.4.1 APSIM模型简介

APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) 是澳大利亚系列作物模型的总称,由隶属澳大利亚联邦科工组织 (CSIRO) 和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 (APSRU) 自1991年以来开发研制的农业生产系统模拟模型 (Asseng et al., 1998b; 2000), 是能够模拟农业系统各主要组分的机理模型 (Wang et al., 2003)。APSIM 模型可用于模拟农业系统中作物生长过程及土壤水氮动态,适用于评价农作系统生产潜力及耕作措施的经济效益受气候波动和环境变化的影响 (Keating et al., 2002; Heng et al., 2007)。APSIM模型网站地址为: <http://www.apsim.info/apsim/default.asp>。APSIM模型模拟逐日的作物生长发育、生物量和叶面积指数动态、土壤水分和氮素动态,能够反应气候、灌溉管理以及施肥措施对作物生长动态的影响。

APSIM模型的早期发展受到CERES和由农业技术转化的国际基准站 (IBSNA) 项目发布的GRO模型 (Uehara and Tsuji, 1991) 的影响,之后与农业技术转移决策支持系

统 (DSSAT) 结合起来 (Jones et al., 1998), 模型的发展还受到由Sinclair (1986) 率先提出的作物模拟的现象学方法的影响。APSIM评估产量对管理措施的影响, 并且预测长期农作措施对土壤资源 (如土壤有机质动态、侵蚀、酸化等) 的影响。APSIM模型把各种不同的作物模块集成到一个公用平台 (McCown et al., 1996; Wang et al., 2003)。公用平台的使用使得模型或模块之间的相互比较更加容易。APSIM模型可以让用户通过选择一系列的作物、土壤以及其它子模块来配置自己的作物模型。模块之间的逻辑联系可以非常简单地通过模块的“插拔”功能来规定。APSIM模型并不是针对某特定作物系统的单个模型, 它更是一个模型系统的灵活软件环境 (Asseng et al., 1998b)。APSIM模型能够很好地模拟耕地的连作、轮作、间作以及农林混作效应。

1.4.2 APSIM 模型结构

APSIM模型由5部分组成: 模拟农业系统中生物和物理过程的生物物理模块; 用户定义模拟过程的管理措施和控制模拟过程的管理模块; 各种调用模拟过程“进出”数据的数据输入、结果输出模块; 由土壤条件和气象条件组成的环境模块和驱动模拟过程和控制传递不同模拟信息的中心引擎, 其组成可以用图1.1表示。除核心构成外, APSIM由APSPFRONT、APSIM-explore等组成了用于模型构建、测试和应用的APSIM用户界面,

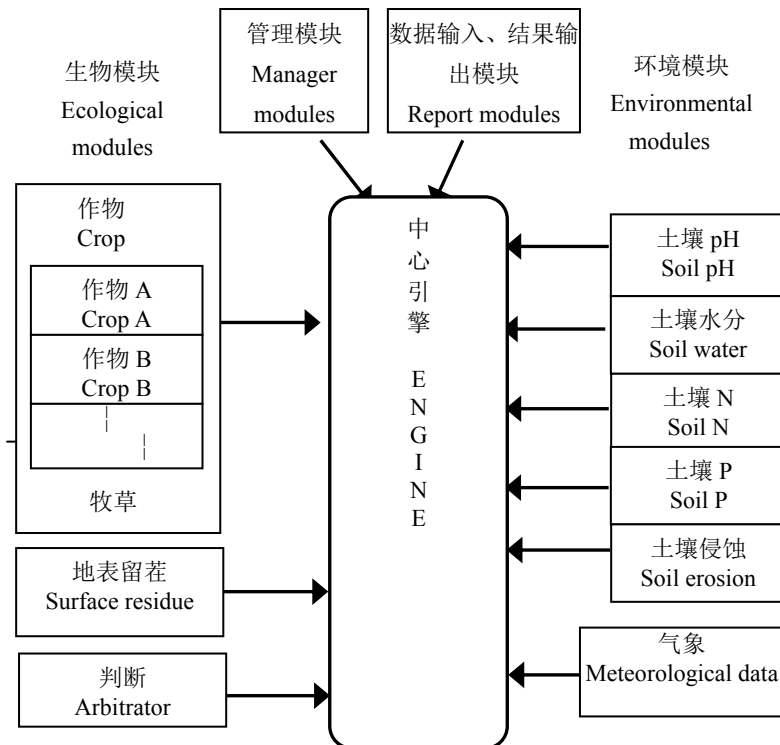


图 1.1 APSIM 模型的结构 (Keating et al., 2003)

Fig 1.1 Diagram of the APSIM simulation framework with separate modules, interfaces and simulation engine (Keating et al., 2003).

通过APSGRAPH、APSIM-Outlook等多种数据库工具显示模拟结果的输出,做进一步数据分析,提供不同模型发展、测试工具和文件工具(APSRUDO、APSTOOL)和为Web用户和开发者的支持设施。

1.4.3 APSIM模型组成

(1) 作物、牧草和森林模块

APSIM包含一系列模拟作物、牧草和森林生长、发育和产量,及其与土壤相互作用的模块。作物模块主要包括小麦、玉米、大麦、油菜、鹰嘴豆、大豆、花生、向日葵和甘蔗等,此外,还包括森林、牧草、杂草、苜蓿、柱花草等模块。作物模块以作物生理过程为基础,以“日”为时间步长响应逐日气象条件、土壤特性和作物管理措施。此模块由早期开发的玉米(Carberry and Abrecht, 1991)、花生(Hammer et al., 1995)、高粱(Hammer and Muchow, 1991)等作物模型发展而来。早期APSIM作物模块的开发沿用已有作物模型的开发思想并对其改进。后期APSIM中所有植被模块采用同一方式描述植被生长、发育规律,主要区别在于阈值和函数形态不同。许多程序已被列入过程子程序中,以供各种作物调用。APSIM模型植被模块的发展方向趋向于模版化,这里模版通常指的是作物模版,但不仅应用于作物(Wang et al., 2003)。所有作物模拟采用相同代码,每一品种通过自己的参数文件进行参数化。

APSIM中物候生长由3基点温度控制,模拟的生命过程分为物候、分蘖和叶面积、根生长、作物水分关系、作物N素状况、植物的衰老和死亡。作物发育阶段的长短由每日温度和光周期决定。用叶的初始生长速率、叶的出现、生长和衰老速率来模拟叶片生长,这些过程均受到温度的影响。地上部生物量的潜在生长基于光截获和作物辐射利用效率来计算,并且受到不适宜的温度、土壤水分和氮素胁迫的限制。籽粒产量是籽粒数量、灌浆速率和在灌浆前茎干物质累积的转运来决定。蒸散量基于每天的辐射和最高最低温度来计算。辐射利用效率可以通过植物光合产物贮存的能量(总生物量)占截获辐射量的百分比计算得到,其中,截获辐射量与总生物量、总辐射量、消光系数及叶面积指数平均值有关;蒸腾效率在模型中以蒸腾效率系数(k)反映,其与总生物量、水汽压差及蒸腾量有关。

(2) 土壤水分模块

APSIM的土壤水模块(Soil Wat)是基于层叠(cascade)水分平衡模型,利用了Jones et al. (1986)开发的CERES、Littleboy et al. (1989)开发的PERFECT模型中水分模块,其子程序结构见图1.2。土壤的水分特征曲线由萎蔫系数(LL15)、作物利用下限(CLL)、最大田间持水(DUL)和饱和体积含水量(SAT)表示。LL15表示水吸力在1.5MPa下的土壤含水量,CLL表示作物能够吸收的最低含水量,DUL表示土壤排除重力水后,保持在土壤中的土壤含水量;SAT表示土壤被水饱和后的含水量。LL15与CLL有所不同,

由于亚表层根际土壤含水量一般高于表层土壤，同一土壤下，不同作物的萎蔫系数相差不大，但因作物而异，而且当存在营养亏缺、作物因延迟播种而生长缓慢时，这一值也会发生变化，采用CLL综合反映了作物和土壤水分的共同特性（Dalglish and Foale, 1998）。

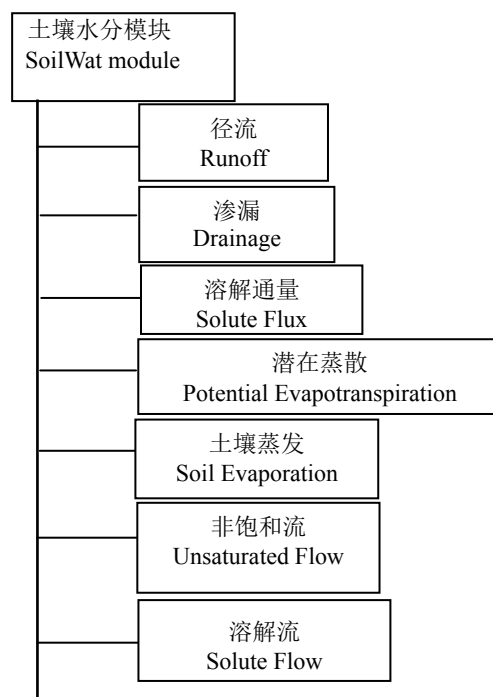


图 1.2 土壤水模块子程序结构（APSIM 程序说明书）

Fig. 1.2 The subroutine structure of SoilWater (APSIM model documentation).

APSIM比CERES和PERFECT改进之处在于：水分模块对水分动态的模拟为逐日、连续的；可以计算逐日每一土壤层中大于DUL的饱和含水量部分，饱和水分移向下层；不同的土壤类型采用不同的土壤扩散系数；非饱和水流可以在邻近层次中运动，直到达到特定的水分梯度为止。不同的土壤类型采用不同的径流曲线，其值从0-100不等，采用了美国农业部USLE模型的径流曲线方法。

土壤蒸发设定分为两个阶段：常数阶段和蒸发速率下降阶段。第一阶段，土壤充分湿润，土壤蒸发速率等于潜在蒸发速率。潜在蒸腾由Priestly and Taylor（1972）修正的平衡蒸发的概念来计算。一旦土壤水分含量低于一个临界值，土壤蒸发速率将低于潜在蒸发速率（进入第二阶段蒸发）。用两个参数：U和cona来描述两个阶段的土壤蒸发。参数U（来自CERES）代表土壤水分供应低于大气需求前的累积蒸发量。U值与土壤质地有关，一般取值范围为6mm（砂质土壤）到12mm（粘质土壤）。第二阶段的土壤蒸发速率是自第一阶段结束后时间的参数。参数cona（来自PERFECT）与时间的平方根一起决定了第二阶段的累积蒸发量： $Es=conat^{1/2}$ 。Cona是与气候、土壤条件有关的参数。

（3）土壤N模块

土壤N模块描述了土壤C和N变化动态。C和N在土壤中的转化示于图1.3中。与CERES模型的主要不同之处在于，把土壤有机质分为土壤微生物及其产物库（Biom）和土壤有机质库（Hum）。不同库之间的物质转化根据C来计算，相应的N流决定于接收库的碳氮比。各个库的碳氮比被设为固定值，Biom库中的碳氮比由初始文件定量，

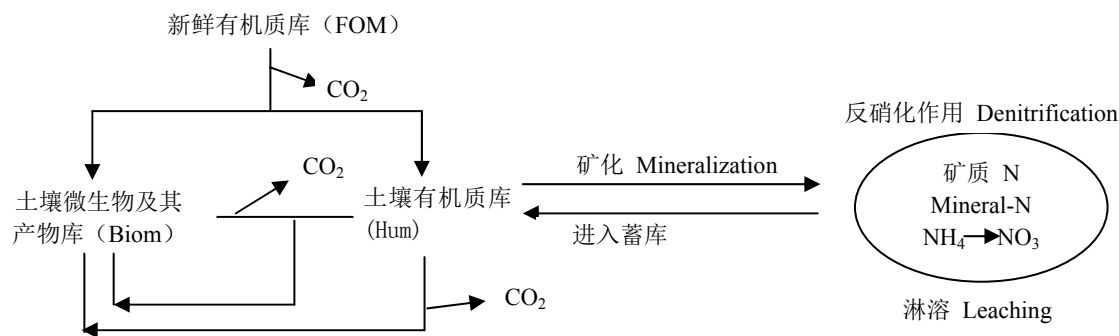


图 1.3 土壤中有有机质和 N 素转化示意图 (APSIM 程序说明书)

Fig. 1.3 Diagram of transformation occurring in each layer (APSIM model documentation)

而Hum中碳氮比则取决于输入的土壤碳氮比。Biom和Hum库的分解由一级动力学过程来计算，其速率稳定性取决于该层土壤温度和水分。新鲜有机质库（FOM）的处理同CERES-Maize（玉米）模型，其分解受碳氮比的影响。速效N的矿质化和固定化决定于N在微生物分解和固定过程中的平衡。硝态氮和氨态氮对进入库蓄过程均有效。有机质库分解产生CO₂向空气中释放并将C转送到Biom和Hum库中。

(4) 地表留茬模块

APSIM中各种作物留茬表示为地表留茬量、留茬盖度和对土壤N的贡献，并汇入地表留茬库中。任何新进入的留茬，模型计算其平均重量后加进系统，计算为现有地表留茬总量。地表留茬计算耕作入土部分和盖度间的关系，沿用了PERFECT模型的计算方法。APSIM改进之处在于注重地表留茬的分解，以及分解对于维持C、N平衡的影响。地表留茬量的减少通过以下几种途径实现：1) 不留茬，如焚烧、打捆，这一行为不改变留茬的碳氮比；2) 通过秸秆还田、耕作，将一部分地表留茬转入一定土壤层次的新鲜土壤有机质库中；3) 就地分解，分解途径类似于土壤N模块中有机质库，从地表开始分解任何进入库蓄的留茬，同时有机碳形成、氨态氮的释放也加入到表层土壤中。地表留茬的分解速率同地表留茬量密切相关。

(5) 管理模块

APSIM管理模块允许用户使用简单的状态、事件、行为和条件逻辑概念来构建管理决策和策略。管理模块存在于APSIM配置中，并控制各个组成部分和整个模拟过程，通过向其它模块传送信息实现其管理功能。管理模块允许用户创建自己的变量，定义这些变量与其它变量之间的函数形式。

APSIM管理模块还可以调用其它模块的行为，主要包括：重置模块值；初始化模块

数据；播种、收获；施肥、灌溉、翻土；计算用户自定义变量、追踪系统状态；报告响应事件或条件逻辑的系统状态等。

1.4.4 APSIM小麦模块介绍

APSIM中小麦模块的发展经历了NWheat, I_wheat和APSIM-Wheat综合模块三个阶段。下面将以NWheat模块为例介绍APSIM中小麦模块的结构和组成。

NWheat 模型的结构图见图 1.4。NWheat 模型在群体水平上模拟逐日小麦生长。模型中的小麦生长响应于气候（温度、降雨和辐射）、土壤水供应和土壤氮。气候、土壤水和氮程序位于其他的 APSIM 模块中（McCown et al., 1996; Probert et al., 1998）。NWheat 模型每天把作物吸收土壤水和氮的数据传递给其他土壤模块来重置这些系统。作物覆盖的信息同样被提供给土壤模块用来计算蒸腾速率和径流。小麦收获后，地上部和根残留从 NWheat 分别传递给 Residue 和 SoilN 模块。

NWheat 模型模拟的过程包括：作物发育，包括发芽、出苗、最末端小穗的发育、开花、穗发育、籽粒灌浆和生理成熟；叶面积发育包括叶数量、叶出现、分蘖、叶片衰老和具体叶面积（specific leaf area）；基于辐射截获和辐射利用效率概念上的光合作用；碳分配，分配至根、叶、叶鞘、茎、穗和籽粒；根向土壤深处的生长和根长密度的发育；作物水需求和吸收；N 吸收以及向植株不同部分的分配；籽粒灌浆期氮和碳的再转运；水和氮的亏缺以及不适宜的温度（包括霜冻）对作物关键生长过程的影响。

NWheat 和 CERES Wheat version 2 中的植物部分相似。主要的修改包括：分解模型，成为独立的植物、土壤水、土壤氮、作物残茬和系统管理等模块，NWheat 模型只涉及到以前的 CERES Wheat 模型的植物程序部分；用可供选择的基于可用土壤水（fasw）程序替换 CERES 中根的水分吸收和土壤水分亏缺的程序，当 $fasw < 0.25$ 时，光合作用受限制，当 $fasw < 0.45$ 时，生长（例如叶面积发育）受限制， $fasw < 1$ 时分蘖开始受限制，并且当 $fasw = 0.5$ 时分蘖停止；作物水分需求通过蒸腾效率决定于干物质生长，而不是像在 CERES 中决定于潜在蒸腾和 LAI；调整了控制霜冻、分蘖、具体叶面积（specific leaf area）、RUE、消光系数、碳在叶、茎和根中分配的公式；新增叶鞘生物量储存；增加了一个高温胁迫因子来阻止最高空气温度大于 $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时叶面积的衰老；每层土壤中根的扩展速率可以被设定为小于最大值（2.2 mm 每个热量单位）来模拟不适宜的土壤物理、化学或者生物条件（例如紧实的区域、线虫）；根部的碳仅来自于分配系数；基于净光合作用累积的基础上计算 RUE，不考虑根呼吸的部分。

NWheat 模块的组成包括发育期、生物量的累积、生物量的分配、生物量的转运、叶发育、叶衰老、水分利用、影响植物生长的水分亏缺、氮的吸收和转运、影响植物生长的 N 亏缺、根的生长和分布、温度胁迫、植株死亡和分离共十四部分，下面为各个部分的详细介绍。

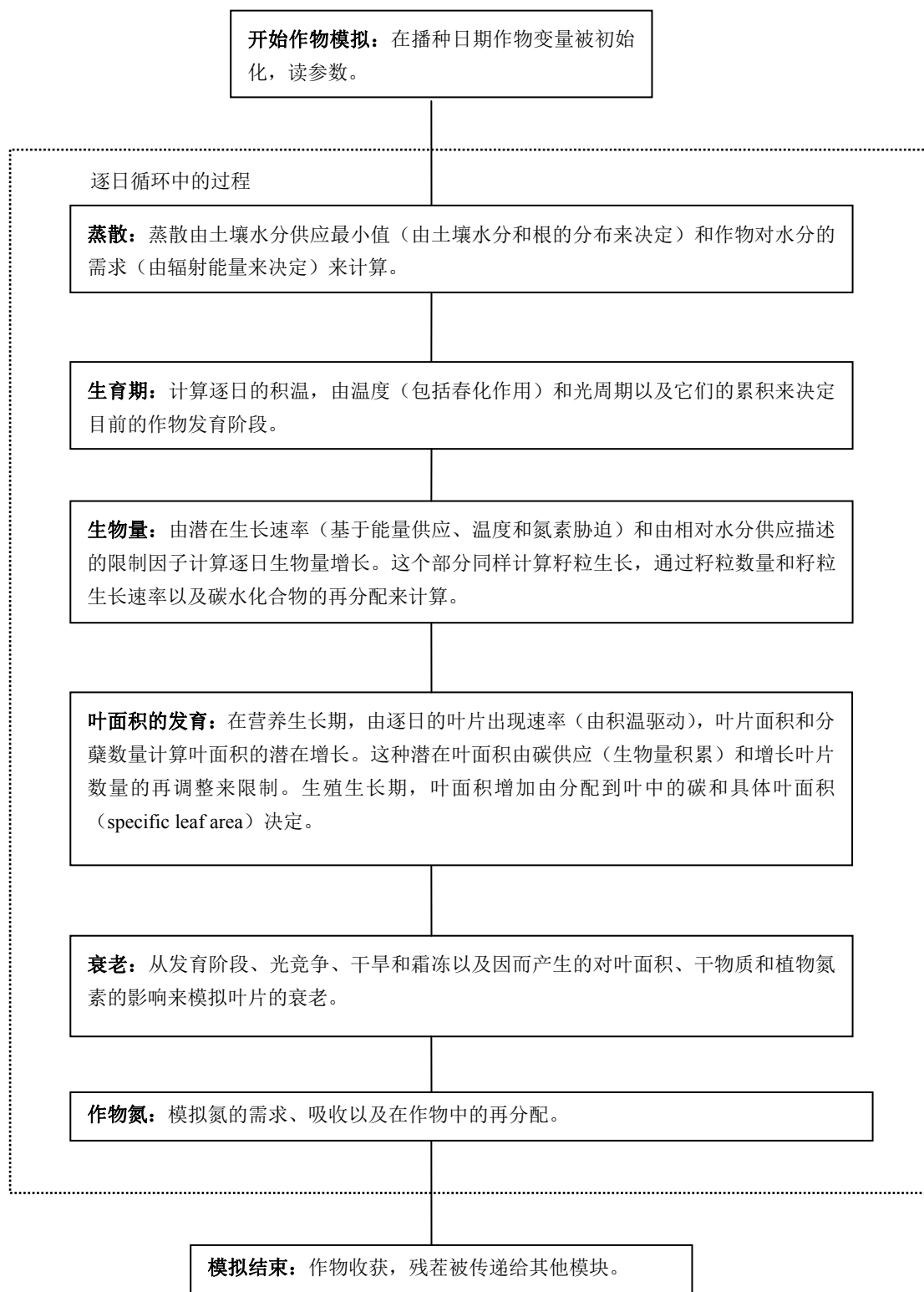


图 1.4 N-wheat 模型的结构图 (Keating et al., 2001)

Fig. 1.4 Outline of the N-wheat model structure (Keating et al., 2001).

(1) 发育期

NWheat 模型中发育期的程序主要来自于 CERES Wheat v2.1 (Ritchie et al., 1985; Ritchie, 1991)。NWheat 模型中有 9 个作物生长阶段 (表 1.1)，每个生长阶段 (除去由土壤水分决定的播种至发芽的阶段) 的开始由积温决定 (由光周期和春花作用调整)。

用图 1.5 (基本温度、最适和最高温度) 中的关系来计算积温, 用最低和最高温度来评估逐日的冠层温度。逐日的积温累积成总的积温, 用来决定每个阶段的持续期。作物生育阶段的持续时间由积温决定 (表 1.1), 从出苗至发芽的时间决定于土壤含水量水平。如果种子播种土层的土壤水分充足, 播种一天后就会发芽。发芽至出苗阶段受到播种深度对积温的影响。积温目标等于在芽直线生长开始前的一个滞后期加上芽生长速率决定的到达土壤表层并且出苗的积温。出苗至穗分化结束的生长阶段持续期由积温决定, 并且受作物品种的光周期 (日长) 和春花作用 (对低温的需求) 调整。其他生育阶段由出叶间隔 (每片叶出现的积温)、固定的积温或者由使用者输入的品种遗传特性决定 (例如 p5 是由使用者输入的, 代表灌浆开始至成熟的积温)。

表 1.1 NWheat 模型中作物的发育阶段 (Keating et al., 2001)

Table 1.1 Stages of crop development simulated in the NWheat module (Keating et al., 2001).

生育阶段	阶段数字	持续期的计算
没有作物出现	7	—
播种至发芽	8	—
发芽至出苗	9	$40 + 1.02 * \text{播种深度}$
出苗至穗分化开始	1	400 (由光周期和春花作用调整)
穗分化开始至营养生长期结束	2	$3 * \text{phylo}(\text{出叶间隔})$
营养生长期结束至穗生长结束	3	$2 * \text{phylo}$
穗生长结束至开始灌浆	4	200
开始灌浆至成熟	5	p5
成熟	6	—

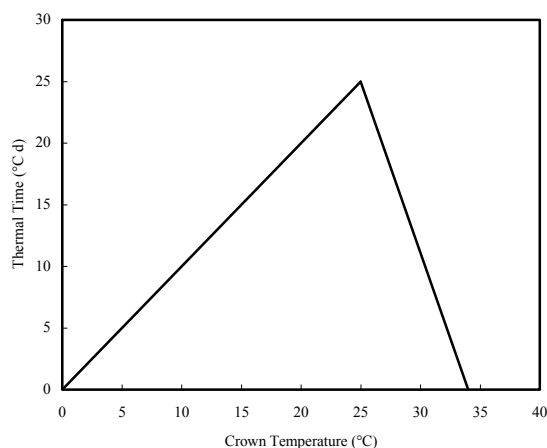


图 1.5 NWheat 中温度对积温累积速率的影响 (Keating et al., 2001)

Fig. 1.5 Effect of temperature on rate of thermal time accumulation in NWheat (Keating et al., 2001).

(2) 生物量的累积 (光合作用)

模型根据光截获和光能利用效率 (RUE) 来计算逐日潜在生物量的增加。逐日的 RUE 根据逐日的太阳辐射来计算 (图 1.6) 不适宜的温度, 水和氮胁迫均能减少潜在生长。

$$\Delta_{\text{drymatter_potential}} = \text{rue} * \text{radiation_interception}$$

辐射截获由叶面积指数和消光系数决定, 消光系数随着行距的变化而变化。作物潜在生长速率受相对水分供应的限制。

$$\Delta_{\text{drymatter_actual}} = \Delta_{\text{drymatter_potential}} * \text{sw_supply}/\text{sw_demand}$$

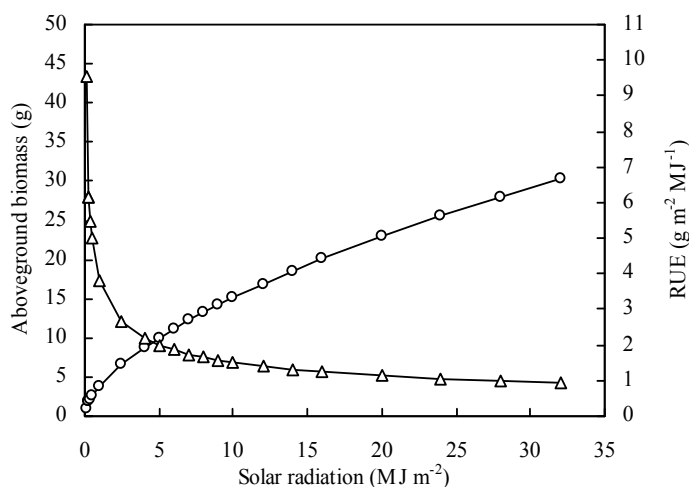


图 1.6 APSIM NWheat 模型中根据太阳辐射计算地上部生物量(○—)和 RUE(△—) (来自于 Asseng Senthold)。

Fig. 1.6 Simulated aboveground biomass (○—) and RUE (△—) using daily solar radiation in APSIM NWheat model.

(3) 生物量的分配

每日的生物量生产以不同的比例分配到植株的五个部分, 在不同的生长阶段比例不同。植株的五个部分包括: 根、叶、叶鞘、茎和籽粒。根每日的生长与地上部的生长成一定的比例, 这个比例在每个生长阶段不同。出苗至穗分化开始阶段, 生物量主要分配于叶面积的生长。到叶中的分配量由设定的具体叶面积 (specific leaf area) 来计算。叶鞘的生长被设定为等于叶片生长量的 80%。剩余的生物量被分配到茎中。穗分化开始至营养生长结束期, 生物量主要分配到茎中。营养生长期结束到灌浆期开始, 所有生物量被分配到茎的生长中。籽粒碳水化合物的需求由籽粒灌浆速率决定, 籽粒灌浆速率决定于籽粒数量和温度。

(4) 生物量的转运

如果籽粒对碳水化合物的需求通过每天生物量分配不能满足, 模型会设定从茎中转运生物量来补缺。NWheat 模型允许总的转运量不超过灌浆期开始时茎重的 20%。

(5) 叶发育

出苗后，每株叶面积和叶数量被初始化，设定初值。叶出现速率由积温通过固定的出叶间隔决定。幼年发育阶段的潜在 LAI 增加由主茎的叶片出现、主茎叶片大小（决定于主茎的叶片数量）、每平方米的植株数量和水、氮对生长的胁迫共同决定。整株的叶面积增加由主茎的叶面积生长和校正的总分蘖数量计算。穗分化开始到营养生长期结束叶面积的增加由分配到叶中的生物量和具体叶面积（specific leaf area）决定。如果某天没有足够的生物量分配到叶中，那么实际 LAI 小于潜在 LAI。

（6）叶衰老

营养生长期结束后的叶片衰老由积温决定。如果 LAI 超过 6，在营养生长期也有可能出现叶片衰老。衰老的程度被限制在不能超过总叶面积的 40%。在土壤水分、氮和温度胁迫的条件下衰老的速率增加。低温低于 -5 °C 时将导致叶面积的增长以每摄氏度 10% 的速率减少。霜冻对作物的影响被限制在分蘖叶面积不能降低到 500 mm² 以下。

（7）水的吸收

作物对水的需求由作物的潜在生长速率计算，潜在干物质的生产由辐射截获和 RUE 计算。使用蒸腾系数把潜在干物质生长转换为水需求。蒸腾系数由蒸腾效率系数和水汽压差来计算。土壤水的供应由根区可利用的土壤水来决定。水的吸收是供应和需求的最小值。

（8）影响植物生长的水分亏缺

计算土壤水分亏缺因子来模拟水分亏缺对不同植物生长过程的影响。计算 3 个水分亏缺因子对应于三个对水分亏缺敏感性不同的植株生长过程：光合作用、细胞生长和分蘖。当 FESW（可利用的土壤水）下降到 0.25 时，限制光合作用的水分因子下降，当 FESW 等于 0 时，限制光合作用的水分因子等于 0。当 FESW 从 0.45 下降到 0.15 时，限制生长的水分因子从 1 变为 0。土壤表层 40 cm 的 FESW 从 0.5 下降到 0 时，限制分蘖的水分因子从 1 变为 0。

（9）氮的吸收和转运

为了计算氮需求，用 RUE 和辐射截获重新计算潜在生物量的生产（不受水、氮和温度胁迫的生长）。潜在生长的干物质根据植株各个部分的需求被分配到各个部分。NWheat 模型对每个植株部分都定义了一个最小和临界 N（没有胁迫）浓度。每个部分的 N 需求尝试着保持在没有胁迫的水平。每天的 N 需求是每个部分已存在生物量的 N 含量与临界 N 含量的差值，加上今天潜在生物量生长保持临界 N 含量对 N 的需求。N 供应的计算方法沿用了 CERES-Maize (Jones and Kiniry, 1986) 和 CERES-Wheat (Ritchie et al., 1985) 中的计算方法。根据每单位根长的潜在吸收速率（根据土壤水分和 N 含量进行了调整）计算每层的最大吸收量。硝态氮和铵态氮的供应都被计算在内。每日的吸收量按总的每日供应量和每日对 N 的需求量的最小值来计算。可供吸收的 N 按植株各个部分对 N 的需求来分配。籽粒中的 N 从植株其他部分转运，并不是直接从土壤中吸收 N 来满足籽粒的需求。其他植株部分将转移 N 直到达到他们定义的最小 N 含量。籽粒 N 需求由籽粒数量和籽粒 N 灌浆速率（依赖于温度）来计算。每日籽粒生长的 C:N

比被限制在 10-80 之间。

(10) 影响植物生长的 N 亏缺

有 4 个 N 可供利用的因子 (0-1)，它们分别控制光合作用、细胞生长、分蘖和衰老。计算茎和叶中 N 含量的比率 (N 亏缺的指标)，然后把这个比率转换成影响每个生长过程的亏缺因子。

$N_cocratio =$

$$(N_cocratio_stover - N_cocratio_stover_min) / (N_cocratio_stover_crit - N_cocratio_stover_min)$$

(11) 根的生长和分布

发芽时根的深度决定于播种深度。发芽和灌浆期之间，根深的增加等于每日的速率 (每个积温单位 2.2 mm) 乘以一个生长因子 (nem) 和这个土层可供利用的土壤水因子。根前部的伸长根据每日生长速率和相对日需水量的利用被降低，因此在生长被限制的阶段根伸长被限制。根深由土壤剖面的深度限制。根的生物量在目前有根的几个土层的分布受三个因子的限制：一个重量因子 (wr)，一个土壤可利用水因子和一个土壤氮因子。用参数具体根长 100000 mm/g 把根的生物量转换为根长。在作物生长过程中根会衰老，每天每层土壤 0.005 长度，衰老的部分立即被分离并转送进 SoilN 模块。收获后所有的根衰老，按新鲜有机物质分布在土层中 (按收获这一天他们在土层中的分布)。

(12) 温度胁迫

在模型中空气温度影响到的生长过程包括：叶面积生长、光合作用、衰老、根的生长和发育期。温度的增加加速了作物的生长，导致生育期缩短。平均温度低于 11 °C 或者高于 24 °C 时，叶面积生长减少。最高温度大于 34 °C 时，加速了叶面积的衰老。当加权平均气温 ($=0.25T_{min} + 0.75T_{max}$) 小于 17 °C 或者大于 19 °C 时，光合作用降低。潜在根的生长为 $2.2 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

(13) 植株死亡

播种后 40 天没有发芽植株将死亡。如果分蘖数量降低到植株数量以下，霜冻会减少植株数量。

(14) 分离

目前，只有衰老的根被设定为分离。根的衰老速率设定在每天 0.5%，所有衰老的根的生物量将会被移除并按新鲜有机物质 (FOM) 传递给 APSIM SoilN 模块。被分离根中的 N 含量被设定为和主要根系统中的一样，这些 N 和有机物质一样被传递给 SoilN 模块。

1.5 APSIM模型应用

目前 APSIM 已经应用到作物管理、土地利用、作物育种、气候变化和区域水平衡各个领域。该模型已广泛应用于多种气候类型条件下的农作系统研究，包括在荷兰的温

带海洋性气候研究施氮措施对籽粒产量、籽粒蛋白质和土壤残留氮的影响 (Asseng et al., 2000); 在西澳大利亚的地中海气候区域研究不同气候情景下小麦水分和氮素利用效率 (Asseng et al., 2001b) 和气候变化对小麦生产的影响 (Ludwig and Asseng, 2006; Ludwig et al., 2009); 在澳大利亚南部研究了气候变化对小麦产量的潜在影响 (Luo et al., 2005); 在中国的华北平原研究气候变化对作物产量和水分需求的影响 (Wang et al., 2008b; Chen et al., 2009; 2010), 以及不同灌溉方案对降低冬小麦产量风险的作用 (李艳等, 2009); 在中国的干旱区黄土高原模拟不同耕作系统下的作物生长和土壤水分 (Chen et al., 2004), 以及降雨量分配对旱地小麦和豌豆产量的影响研究 (李广和黄高宝, 2010)。同时 APSIM 还被用来分析西澳大利亚的小麦产量的时空变化原因 (Wong and Senthold, 2006), 印度西北部地膜覆盖和灌溉措施对小麦产量和水分利用的影响 (Balwinder et al., 2011), 模拟澳大利亚土壤 N_2O 和 CO_2 的排放 (Xing et al., 2011)。

国内外学者应用 APSIM 的小麦模块对小麦生产进行了大量研究。Asseng et al. (1998b) 对 APSIM NWheat 模型在西澳的模拟性能进行了评价, 结果表明模型能较好地模拟小麦地上和地下部的生长动态, 籽粒产量和小麦对土壤水分和氮素的吸收。Asseng et al. (2000) 研究的结果表明 APSIM NWheat 模型能够较好地模拟荷兰温带海洋性气候条件下不同氮肥应用对小麦产量的影响。模型对试验中高产模拟结果较好, 但对低产年份模拟偏差稍大。Asseng et al. (2004) 将 APSIM NWheat 模型模拟结果与田间试验所得结果相结合, 就气温升高、增大水分逆差和提高 CO_2 浓度对小麦生产的影响进行了模拟评估, 结果表明模型能捕捉环境变化对小麦生长发育和产量的影响, 适用于未来气候变化对小麦生产定向影响的研究。Ludwig and Asseng (2006) 利用 APSIM NWheat 模型模拟分析了澳大利亚西南部温度和 CO_2 浓度升高以及 5 中不同的降雨模式对小麦产量和籽粒蛋白质的交互影响, 模拟结果表明高温、 CO_2 浓度升高和降雨的变化对小麦产量的影响是非线性的并且在不同的土壤类型和地点之间差异较大。 CO_2 浓度升高增加了产量, 尤其在干旱的地点; 温度上升在凉爽和湿润的南部区域增加了小麦产量。Ludwig et al. (2009) 利用 APSIM NWheat 模型和 1945-2004 年气候数据研究近年来气候变化对水文和小麦生产的影响。

Reyenga et al. (1999) 运用 APSIM I_wheat 模型模拟 CO_2 浓度上升对澳大利亚南部小麦产量的影响, 结果表明在 CO_2 加倍 (700 ppm) 的情景下小麦平均产量增加, 在各种气候变化情景中高温缓和了 CO_2 对产量的作用并且在降雨量下降的情景下使产量降低。Wang et al. (2003) 研究表明 APSIM-Wheat 模块在昆士兰的三个地点模拟效果良好, 模拟的生物量和产量的 R^2 大于 0.80, RMSD 分别为 162 g m^{-2} 和 74 g m^{-2} , 氮的吸收 R^2 大于 0.75, $RMSD = 2.0 \text{ g m}^{-2}$, 同时在西澳的四个地点可以解释生物量和产量的 66% 的变化。Luo 等 (2005) 运用 APSIM-Wheat (2.0 版本) 模型模拟气候变化对澳大利亚南部小麦产量的影响。苏宁和冯利平 (2005) 利用 APSIM-Wheat 模型进行了北京地区冬小麦生产的气候风险分析。Chen et al. (2009) 利用 APSIM 模型和 1961-2003 年气候数据模拟研究了华北平原太阳辐射和降雨量下降, 温度上升对小麦和玉米产量及水分利用的影响, 表明

由于太阳辐射的下降作物水分需求和潜在产量显著下降。

APSIM模型还广泛应用于不同作物、植被或牧草系统中水土保持、农田水平衡研究。Asseng et al. (2001) 在澳大利亚利用APSIM模型作为管理工具用来控制土壤和地下水盐渍化的发展。Keating et al. (2002) 运用APSIM模型模拟分析了澳大利亚墨累-达令流域不同农作系统下农田水平衡分量特征, 分析了气候对这些农田水平衡分量的影响及其时间变化特征。Verburg and Bond (2003) 利用APSIM模型模拟分析了澳大利亚东南部旱地农业系统农田水平衡特征。李广等 (2009) 利用APSIM模型模拟分析我国黄土丘陵沟壑区不同耕作方式和不同轮作序列的小麦和豌豆产量、生物量及土壤水分的动态变化。

从上述应用研究中可知, APSIM 可以应用于多种的气候和土壤条件下气候变化对农业生产的影响研究。应用作物模型模拟气候变化对作物潜在产量的影响, 能够去除品种及技术改进等其他因素对作物产量的影响, 仅考虑温度、降水等气象因子变化对最终产量的影响。作物模型模拟气候变化对作物产量影响的结果有时存在较大差异, 这是由于模型主要驱动因子的假设变化(例如年内降雨的强度和次数的变化以及温度极值和持续时间的变化), 使模型的输出结果发生较大变化 (Porter and Semenov, 2005)。

1.6 研究目的、内容与方法

太阳辐射、温度和降水是作物生长的重要决定因子。任何单因子的变化对作物生长和水分利用都存在正负两种反馈机制, 而且三因子之间又存在相互影响, 这些相互影响又同时作用于作物生产和水分利用, 因而气候波动/变化对作物产量形成和水分利用的影响非常复杂。试验观测与数学模拟是气候变化对作物生长与产量形成影响的两种主要分析方法。本文分别利用试验资料和作物模型研究分析了气象因素变化对小麦产量构成因素、产量和水分利用的影响。

1.6.1 研究目的

1) 小麦是我国主要粮食作物, 在小麦主产区明确其产量形成过程和影响产量形成的主要气象要素可对小麦生产提供积极建议。本研究的目标为, 评价小麦籽粒产量和产量构成三要素(穗数、穗粒数和千粒重)之间的关系, 研究穗数、穗粒数和千粒重形成期间气象要素对它们的影响, 为不同的小麦生产区域提供提高籽粒产量的有效建议。

2) 西北干旱地区是我国对气候变化响应最敏感的地区, 其温度、降水的变化幅度高于全国平均水平。基于新疆气候变化的背景, 本文研究目标为: 评价干旱地区气候变化对作物生长发育、产量和水分生产力的影响, 分析潜在蒸发量变化对小麦耗水量和水分生产力的影响, 以及太阳总辐射下降对小麦产量的影响; 明确干旱地区决定作物蒸散量的主要气象要素。

3) 由于快速增长的工业导致空气污染, 全球变暗正在成为大部分亚洲国家的主要问题, 将会使中国的小麦产量显著降低。本研究的目的是评价中国不同气候背景下(北京、济南、成都和乌鲁木齐)全球变暗对小麦产量和水分利用的影响。

4) 利用作物模型分析不同气候背景下单个气象因素变化对小麦产量和水分利用的影响, 辅助理解历史时期气候变化对小麦产量和水分利用的影响的模拟结果, 揭示作物模型在不同气候背景下对辐射和温度变化的响应。

1.6.2 研究内容与方法

本文的主要研究内容为利用试验资料研究小麦产量构成因素与产量的关系, 以及各个生育阶段气象因素与产量和产量构成因素的关系; 利用 APSIM 模型模拟分析 1955-2006 年气候变化对新疆绿洲地区小麦产量和水分利用的影响; 利用 APSIM 模型模拟分析 1961-2009 年气候变化对北京、济南、成都和乌鲁木齐地区小麦产量和水分利用的影响; 设置不同的太阳辐射和温度变化情景, 利用 APSIM 在不同气候背景下模拟分析不同气候变化情景对小麦产量和水分利用的影响。详细研究内容和方法如下:

1) 利用2005-2007年国家冬小麦品种试验汇总报告的小麦育种试验的资料, 用相关分析和通径分析等方法分析中国小麦4个主产区(北部平原、黄淮海、长江中下游、长江上游)的小麦产量与三个产量构成因素间的关系, 分别明确4个主产区影响小麦产量高低的主要产量构成因素; 利用中国气象局提供的各个站点的气象资料, 分析小麦产量构成因素和产量与相应生长阶段气象要素的关系。(第二章)

2) 利用新疆三个农业气象试验站小麦生长期间资料校准和验证模型, 利用农业系统模型模拟作物产量形成过程以及作物水分利用对气候变化的响应, 综合分析温度、太阳辐射等气象要素与作物产量形成及水分利用的关系。主要研究内容为: (1) 利用乌兰乌苏、东坎和莎车农业气象站的小麦生长期间资料校准和验证 APSIM 模型, 评价 APSIM 模型在新疆地区的适用性。(第三章) (2) 分析乌兰乌苏、东坎和莎车农业气象试验站历史时期 1955-2006 年小麦生育期间气象要素的变化趋势, 包括最高温度、最低温度、降水、日照以及太阳总辐射的变化。(3) 利用 1954-2006 年的气候资料模拟分析过去 53 年小麦生长发育、产量和耗水量的变化。(4) 分析气象要素变化对小麦生长发育、产量和蒸散量变化的影响, 定量分析干旱地区大气蒸发力下降对作物耗水量及产量的影响。明确影响作物蒸散量的主要气象要素。(第四章)

3) 利用农业系统模型, 分析 1961-2009 年间北京、济南、成都和乌鲁木齐四个点太阳辐射下降对小麦生长, 产量以及水分利用的影响。分析全国各地太阳辐射下降趋势, 选取北京、济南、乌鲁木齐和成都四个不同气候及太阳辐射下降趋势在全国具有代表性的点。整理 1961-2009 年北京、济南、乌鲁木齐和成都四个地点太阳辐射资料, 分析其变化趋势; 分别利用栾城、乌兰乌苏和盐亭三个农业试验站的小麦生长期间资料验证 APSIM 模型, 检验其适用性; 利用 1961-2009 年间北京、济南、乌鲁木齐和成都的气

象资料模拟分析过去 49 年间小麦生长发育、产量和水分利用的变化；分析北京、济南、乌鲁木齐和成都的太阳辐射下降分别对当地小麦生长发育、产量和水分利用的影响。（第五章）

4) 在北京（1961-2009）和成都（1961-2003）历史气候背景下，分别设置辐射-10、+10、+20 和+30%，和温度+1、+2、+3 和+4 °C 变化情景，比较不同气候情景下的模拟结果与原气候背景下模拟结果，检验模型在不同的气候背景下对辐射变化和温度升高的响应。（第六章）

第二章 中国主产区小麦产量和产量构成因素的关系

摘要

冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 在达到最终产量之前易受具有动态交互作用的三个产量构成因素的影响, 三个产量构成因素分别为穗数、穗粒数和千粒重。三个产量构成因素在植株的不同生育阶段发育和生长, 环境条件显著的影响每个因素的形成。理解产量构成因素在不同生长环境中对产量变化的贡献对育种和增产均有重要意义。本研究利用国家冬小麦品种试验的数据, 分析中国冬小麦 4 个主产区产量和产量构成因素的关系。试验数据涉及 2005-2007 年的将近 70 个地点的 26 个品种。采用相关和通径分析来评价籽粒产量和穗粒数、穗数和千粒重的关系。研究结果表明, 产量和产量构成因素在不同的生产区间不同, 在两个生长季度间也存在一定差异。通径分析表明穗数对产量的直接影响最大, 千粒重次之, 穗粒数对产量的直接影响较小。相关和逐步回归分析结果表明产量与日照时数正相关, 穗数变化的 43.7% 决定于出苗至抽穗期间日照时数和最高温度的变化, 穗粒数变化的 43.2% 决定于出苗至抽穗期间最低温度和降雨量的变化, 千粒重变化的 9.8% 决定于抽穗至成熟期间的最高温度变化。产量和穗数分别与生育期和出苗至抽穗期间的积温正相关, 穗数和穗粒数与相应生长阶段积温无相关关系。具有较低的温度、较长的日照时数气候特点的生产区域为高产并且稳产的地区, 在这样的区域三个产量构成因素对产量的贡献相同即对产量同等重要。在低产条件下维持较高的穗数对产量的提高很重要。

关键词: 产量, 产量构成因素, 穗数, 穗粒数, 千粒重, 小麦, 气候

2.1 引言

中国是世界上最大的小麦生产国和消耗国。中国的小麦生产可以划分为 10 个主要的农业生态区 (图 1; 金善宝, 1996; Zhang et al., 2008)。大约有 56% 小麦生产于华北平原 (Zone I) 和黄淮海流域 (Zone II), 26% 生产于长江中下游 (Zone III) 和中国的西南部 (Zone IV)。中国其它区域的小麦生产少于 20%。

小麦产量在不同的生产区域的变化较大。小麦在形成最终产量的过程中受到许多产量构成因素的影响, 因而研究影响产量变化的因素比较困难。构成产量的三个主要因素, 穗数、穗粒数和千粒重之间存在动态相互作用关系 (McMaster, 1997; 2005)。每个产量构成因素按一定的顺序发育, 一些发育过程有重叠并且早发育的过程会影响随后的发

育过程 (e.g., Hamid and Grafius, 1972; 1978; Garcia del Moral et al., 1991; 2003)。一个产量构成因素的增加将会导致另外的构成因素的降低(比如穗数的增加经常会导致穗粒数和粒重的降低)。

在许多环境下粒数的变化通常与产量的变化和增加有关 (Fischer, 2011)。许多报道 (e.g., Fischer, 2007; Miralles and Slafer, 2007; Reynolds et al., 2009) 表明粒数与开花期的穗干重相关。粒数与光热商[PTQ = solar radiation/ (Tmean - 4.5°)]紧密相关, 因而影响粒数的主要气象因子为穗生长期间的太阳辐射和平均温度。低水汽压差和高的散射辐射与总辐射的比值使作物的干物质积累增加, 因而增加了粒数 (Stockle and Kermanian, 2009), 低温对粒数的形成存在重要影响 (Lobell et al., 2005)。

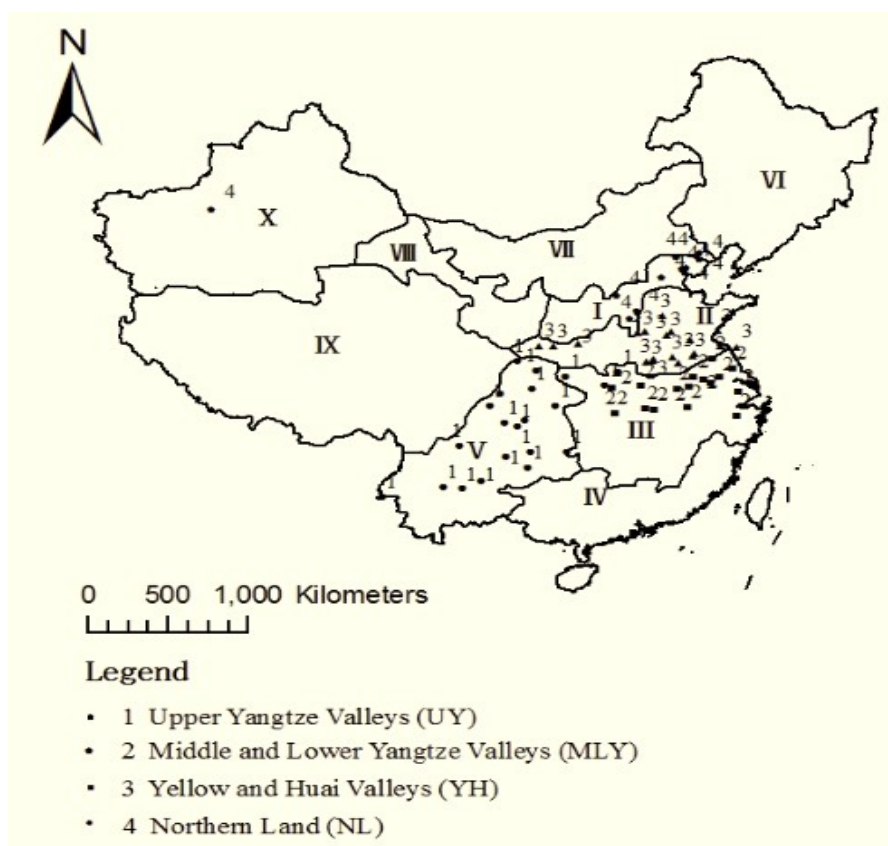


图 2.1 2005-2006 年四个小麦品种区域试验的试验地点。中国十个小麦生产区在图中用罗马数字表示。图中同一个区域试验的试验点用相同的数字表示 (比如 1、2、3、4)。

Fig. 2.1. Location of experimental sites within China used in the study. Ten major agro-ecological wheat production zones in China are denoted by Roman numerals. Experimental sites within a region were denoted by similar numbers (e.g., 1, 2, 3 and 4) on the map.

小麦潜在产量的遗传学进展并没有改变千粒重, 在大多数品种中千粒重和穗粒数存在显著负相关关系 (Fischer, 2007)。Wardlaw and Wrigley (1994) 报道了千粒重受籽粒灌浆期温度的强烈影响, Fischer (1985) 发现了千粒重与灌浆期太阳辐射存在弱正相关关系。

更好的理解产量构成因素的形成过程和他们在不同生长环境下对产量的贡献对育种措施以及管理小麦生产有积极作用。相关和通径分析是育种者的重要工具，用来在小麦产量构成因素复杂的交互作用中分辨可供选择的优良性状（Milligan et al., 1990; Khaliq et al., 2004）。我们利用了“中国冬小麦新品种动态”中的两个生长季度的数据，包含 4 个小麦主产区每年将近 70 个试验点，本文的目的为：（1）评估多种生产环境下籽粒产量和三个产量构成因素间的关系，（2）评估各个阶段气象因子对产量和产量构成因素的影响。

2.2 材料与方方法

新的小麦品种依次通过由国家统一组织的预备试验、区域试验和生产试验后才能在生产上推广和应用。具有较高的产量、稳定的性状和好的抗逆性的品种才能通过区域试验进入生产试验。小麦产量和产量构成因素的数据来自于 2005-07 年小麦生长季的 4 个区域试验，这 4 个区域试验分别位于不同的小麦生产区（图 2.1，表 2.1）。4 个区域

表 2.1 四个区域中 2005-07 年小麦生长季经纬度、海拔、平均出苗密度、土壤质地以及出苗、抽穗和成熟期。

Table 2.1. Range of latitude, longitude, elevation, and mean seedling density, soil texture, and emergence, heading and maturity dates for the four regions during the 2005-06 and 2006-07 growing seasons.

	长江上游 Upper Yangtze Valleys (UY)	长江中下游 Middle and Lower Yangtze Valleys (MLY)	黄淮海 Yellow and Huai Valleys (YH)	北部陆地 Northern Land (NL)
Zone number†	V	III	II	I
Longitude	98 - 112 °E	112 - 120 °E	107 - 120 °E	81 - 119 °E
Latitude	24 - 34 °N	30 - 33 °N	33 - 36 °N	36 - 40 °N
Elevation (m)	90 - 1899	1 - 177	1 - 595	5 - 1016
Mean emergence date (2005)	1 Nov	30 Oct	21 Oct	9 Oct
Mean heading date (2006)	22 Mar	6 Apr	14 Apr	7 May
Mean maturity date (2006)	11 May	23 May	1 Jun	18 Jun
Seedling density m ⁻² (2005-06)	195	233	165	300
Mean emergence date (2006)	3 Nov	28 Oct	14 Oct	6 Oct
Mean heading date (2007)	16 Mar	3 Apr	14 Apr	5 May
Mean maturity date (2007)	11 May	23 May	30 May	15 Jun
Seedling density m ⁻² (2006-07)	205	225	180	343
Soil name	Red soil, Yellow soil	Yellow-brown soil	Brown soil	Cinnamon soil
Soil texture	Silty clay, sandy loam	Sandy clay loam	Silty clay loam, sandy loam	Silty clay loam

† Agro-ecological zone number that experimental regions were located within.

试验由试验地点所在的小麦生产区域来命名。每个区域试验包含 4-6 个品种分布在 10-21 个试验地点（表 2.2）。2005-2006 年和 2006-2007 年的对照品种一样，两年间的新品种有些不一样。两年中的试验地点几乎一样。图 2.1 表示了 2005-06 年的 4 个区域试验的

试验地点。

表 2.2 2005-06 和 2006-07 生长季每个区域的品种和试点地点。一个区域两年的对照品种一致。

Table 2.2. Varieties and number of experimental sites used within each region in the 2005-06 and 2006-07 growing seasons. The same check varieties were used in both years within a region.

Experimental regions	Varieties			Experimental sites	
	Check	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07
长江上游 Upper Yangtze Valleys (UY)	长麦 107	绵 2001-12, 川育 64002, 川 W5436	ML2651, XK027-4, D002	21	20
长江中下游 Middle and Lower Yangtze Valleys (MLY)	扬麦 158	镇 02166, 宁 030119, 镇 02168	南农 04Y10, 宁 030119, 镇 02166	17	17
黄淮海 Yellow and Huai Valleys (YH)	新麦 18	衡观 35, 荔高 6, 新麦 19, 邯 4564,	周 98165, 浏虎 98, 淮麦 0454	19	17
北部陆地 Northern Land (NL)	京东 8 号	轮选 1556, 京农 01-223, 沧麦 119, 长 6452	京农 03-32, 轮选 1556, 京农 01-223, 沧麦 119, 长 6452	12	11

2.2.1 试验区域

表 2.1 列出了 2005-06 和 2006-07 年小麦生长季 4 个试验区域的经纬度、海拔、土壤性质、出苗密度以及出苗、抽穗和成熟期。长江上游区域试验的大部分试验地点分布在西南秋播麦区 (V; 图 2.1)。长江中下游区域试验的所有试验地点分布在长江中下游麦区 (III)，黄淮海区域试验的试验地点分布在黄淮秋播麦区 (II)。北部陆地的试验地点分布在北部秋播麦区 (I)，其中有个试点位于新疆春秋兼播麦区 (X)。

每个区域的平均纬度从长江上游到长江中上游到黄淮海到北部陆地依次升高。播种和出苗期随着纬度的增加而提前，抽穗和成熟期随着纬度的增加而推迟。因此，生长季随着纬度的增加而延长。不同生长季之间出苗密度相似，黄淮海区域的出苗密度最低，而北部陆地的最高。

2.2.2 田间试验设计

小麦品种的国家区域试验在不同地区有统一的设计和执行情况。每个地点的试验由地方农业科学院或者是种子试验站派专人负责。在每个试验地点有统一的标准测量和记录小麦生育期间的生长特性，比如生育阶段、产量构成因素、产量等。

试验采用统一田间试验设计，随机区组、3 次重复。各试点试验设于当地有代表性的田块，试验地块的土壤肥力相同。根据当地的栽培习惯确定播种期、播种密度、耕作

方式、施肥和灌溉管理。这些栽培管理措施均是适应当地的生产条件以取得较高的产量。区域品种试验的小麦生产条件均和当地的小麦生产条件一致，试验地块的小麦产量水平能够代表当地的小麦产量水平。采用除草剂和人工耕作的方法及时清除杂草和预防害虫。

每平方米穗数（文中的产量构成三要素之一，大多数直接称为穗数）的测量方法是在成熟前数田块中央的 1m 长的 1 行的穗数，三次重复。穗粒数是在试验地块随机选取 50 个穗，数籽粒数。千粒重是在每个试验地块中选 1000 粒称重，计算平均值。产量由所有试验地块的收获称重决定，收获面积 13.3 m²。

2.2.3 四个试验区域的气候条件

逐日的气象数据（包括最高、最低和平均温度、降雨量和日照时数）由中国气象局提供，小麦两个生长季共得到 101 组（共 134 组）的气象数据。许多站点没有太阳辐射数据的测量，但是每个点均有日照时数的测量。日照时数是指太阳每天在垂直于其光线的平面上的辐射强度超过或等于 120 W m⁻² 的时间长度。这个阶段每个试验点的气象数据与长期平均值相似。每个试验点逐日的气象数据平均为每个月的价值，一个区域内所有试验点的月平均值再平均为这个区域的月平均值。长江上游、长江中下游、黄淮海和北部陆地 在 2005-06 (a、c、e) 和 2006-07 (b、d、f) 生长季温度、降雨量和日照时数的月平均值均不相同（图 2.2）。4 个区域 11 月到 5 月的温度变化趋势相似（图 2a、b），温度随着纬度的降低而增加。区域之间温度差异最大的月份为 12 月到 2 月。12 月到次年 3 月份是小穗分化和生长的时期，最终决定了粒数的多少。

2005-06 和 2006-07 年生长季，长江中下游的降雨量最高（497 和 489mm），北部陆地最低（71 和 106mm）。两个生长季，4 月和 5 月的降雨量均较高（图 2c、d），籽粒灌浆发生在这个阶段。4 个区域每个月的日照时数大体上随着纬度的增加而增加。

综上所述，每个区域的气象条件可以总结如下。4 个区域中，北部陆地最凉爽干燥，日照时数最高；黄淮海区域较凉爽干燥，日照时数较高；长江上游区域是最温暖，较湿润，日照时数最低；长江中下游区域比北部陆地和黄淮海区域温暖，降雨量最高，日照时数低适中。

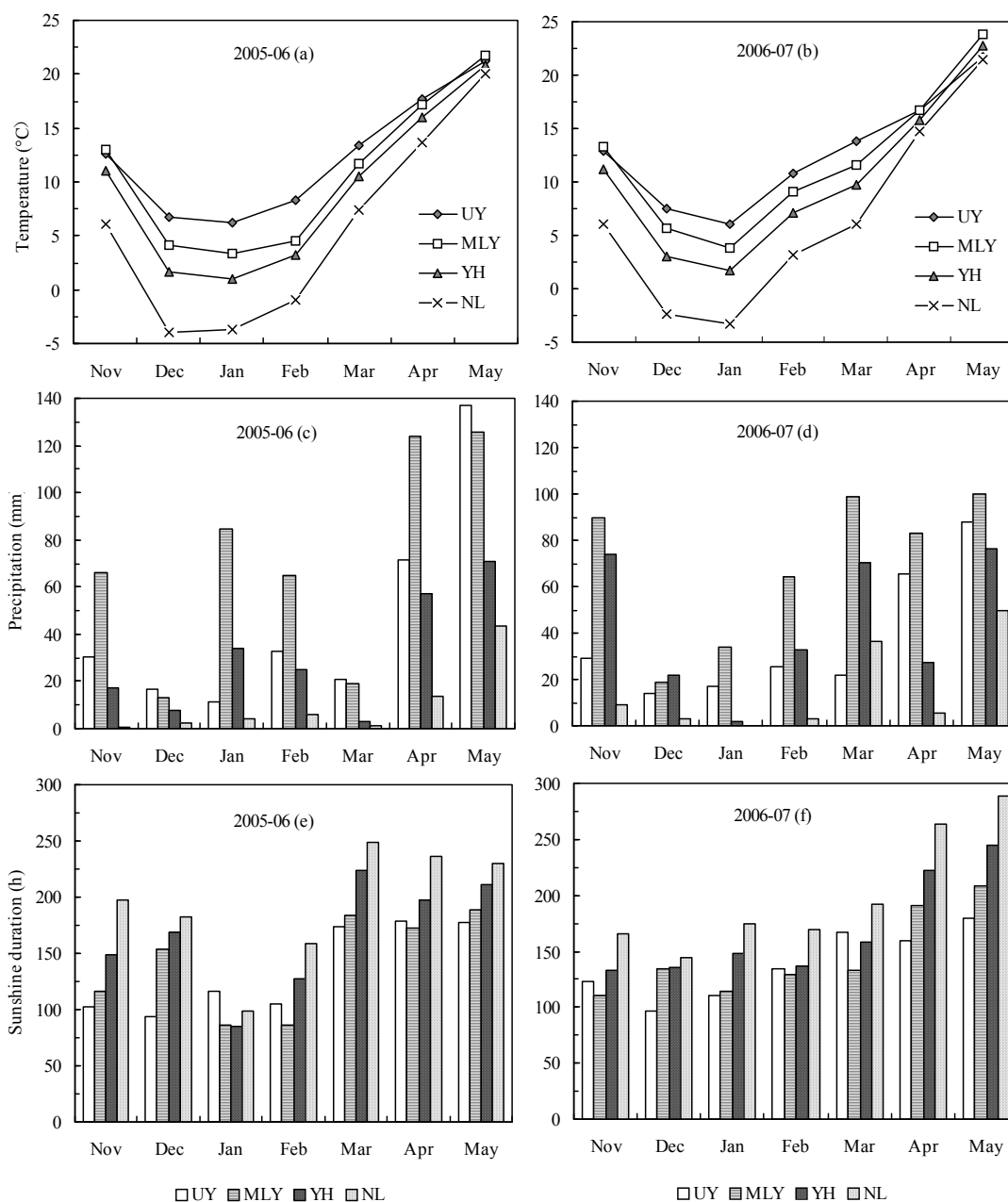


图 2.2 长江上游、长江中下游、黄淮海和北部陆地 2005-06 和 2006-07 年小麦生长季的月平均温度、降雨量和日照时数。每个试验点的月平均数据来自于逐日气象数据，每个区域的月平均基于区域内全部试验点的平均值。

Fig. 2.2. Temperature, precipitation and sunshine duration of each month during wheat growing seasons of 2005-06 (a, c and e) and 2006-07 (b, d and f) at UY, MLY, YH and NL. Daily weather data were summarized for each month in each site, and the monthly mean of the region was based on the mean of the sites within the region.

2.2.4 数据分析

途径分析的作用是把穗数、穗粒数和千粒重与产量间的相关系数 (r_{ij} , 下标表示 4 个性状, 图 2.3) 分解为直接和间接系数。以下的 3 个方程解释了途径系数 (P_{ij}) 的计算方法:

$$r_{14} = P_{14} + r_{12}P_{24} + r_{13}P_{34}$$

$$r_{24} = r_{12}P_{14} + P_{24} + r_{23}P_{34}$$

$$r_{34} = r_{13}P_{14} + r_{23}P_{24} + P_{34}$$

在方程 $r_{14} = P_{14} + r_{12}P_{24} + r_{13}P_{34}$ 中, r_{14} 表示 1 (穗数) 和 4 (产量) 之间的相关系数, P_{14} 表示 1 和 4 之间的直接途径系数, $r_{12}P_{24}$ 表示 1 和 4 通过 2 (穗粒数) 的间接途径系数。同样的定义可以应用于其它公式。

途径系数分析是利用遗传性相关, 把籽粒产量作为因变量, 穗数、穗粒数和千粒重作为自变量来实现。直接途径系数 (P_{14} 、 P_{24} 和 P_{34}) 是穗数、穗粒数和千粒重与产量间回归分析的标准系数。为了满足途径分析的加性原则, 产量和产量构成因素的数据均在分析前作对数转换。利用 SPSS 计算相关系数、回归和产量与产量构成因素的标准系数 (SPSS, 2004)。

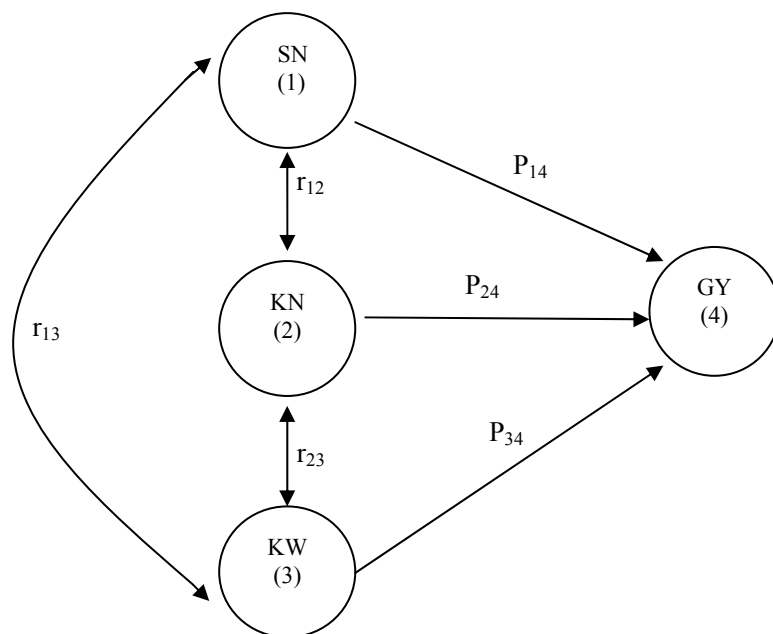


图 2.3 途径系数的图解。表示了 (1) 穗数、(2) 穗粒数、(3) 千粒重和 (4) 产量之间的相互关系。单方向箭头表示途径系数, 双方向箭头表示相关系数。

Fig. 2.3. Path coefficient diagram showing the interrelationships among (1) spike number m^{-2} (SN), (2) kernel number $spike^{-1}$ (KN), (3) kernel weight (KW), and (4) grain yield (GY). Single-headed arrows indicate path coefficients and double-headed arrows indicate simple correlation coefficients.

2.3 结果

2.3.1 四个区域试验的产量和产量构成因素

四个区域两个生长季的产量和产量构成因素最低、最高、平均和变异系数列于表 2.3 中。每个区域的平均产量在两个生长季间相似（差距范围为 13-396 kg ha⁻¹），第二年的产量稍微高一些。两年中，黄淮海和长江上游的产量分别为最高和最低。除了北部陆地区域的产量低于黄淮海区域，产量从南至北依次增加。

表 2.3 在 2005-06 和 2006-07 生长季 4 个试验区域的产量和产量构成因素的最低、最高、平均以及变异系数（CV）。一个区域的每年的值为所有试验点和品种的平均值。

Table 2.3. Minimum, maximum, mean, and coefficient of variation (CV) values for yield and yield components by region during the 2005-2006 and 2006-2007 growing seasons. All experimental sites and varieties were pooled each year within a region.

		长江上游 Upper Yangtze Valleys (UY)		长江中下游 Middle and lower Yangtze Valleys (MLY)		黄淮海 Yellow and Huai Valleys (YH)		北部陆地 Northern Land (NL)	
		2005-06	2006-07	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07
Yield (kg ha ⁻¹)	Min	3225	3724	3973	4496	6267	6054	3864	4938
	Max	8029	9537	7806	9288	10250	9609	11224	9483
	Mean	5701	5992	6008	6404	8110	8097	6347	6687
	CV (%)	20.7	23.5	16.4	16.0	10.3	9.5	20.8	16.0
Spikes (SN) (m ⁻²)	Min	204	232	311	249	360	435	450	373
	Max	573	558	685	589	742	765	941	853
	Mean	365	369	465	444	574	580	603	624
	CV (%)	21.2	21.9	15.9	17.2	12.6	13.0	14.8	16.1
Kernels (KN) (spike ⁻¹)	Min	30.1	30.0	23.1	23.2	28.6	26.0	22.7	20.1
	Max	57.0	59.4	50.2	60.7	44.1	48	45.5	40.7
	Mean	39.8	42.3	38.4	38.2	35.9	36.3	32.0	31.2
	CV (%)	13.2	13.8	13.4	21.2	10.4	13.6	15.2	15.7
1000-kernel weight (KW) (g)	Min	26.8	33.6	31.4	31.4	35.5	29.0	28.0	28.0
	Max	54.8	56.8	49.2	53.9	48.8	52.0	56.8	48.0
	Mean	43.2	44.4	40.8	44.5	40.8	41.9	40.4	40.8
	CV (%)	13.1	9.0	9.3	9.8	7.3	11.3	14.5	11.8

两个生长季间产量构成因素的平均值相似，两年间穗数的差别平均为 4-21 m⁻²，穗粒数的差别为 0.2-2.5 穗⁻¹，千粒重的差别为 0.4-3.7 g（表 2.3）。随着纬度的增加，穗数增加穗粒数降低。千粒重的变化与纬度间无明显关系。

两个生长季中所有区域黄淮海区域籽粒产量最高，产量的变异系数最低（表 2.3）。

两年中几乎所有的区域，穗数的变异系数大于穗粒数和千粒重，表明穗数最易受环境变化的影响。两个生长季中千粒重的变异系数在产量构成因素中最小，表明在不同的环境中千粒重最稳定。黄淮海区域的产量、穗数、穗粒数和千粒重的变异系数在所有区域中最小，表明黄淮海区域的小麦生产在 4 个区域中最稳定。

品种和环境（试点）影响每个试验区域的产量、穗数、穗粒数和千粒重的变化。表 2.4 列出了产量和产量构成因素，品种和环境的方差分别占总方差的比例，四个区域两个生长季中产量和产量构成因素品种的方差均低于环境的方差，表明产量和产量构成因素的变化主要受环境变化的影响。

产量的变化受品种因素的影响较小，其方差占总方差的比例最高值为 6.9%；穗数的变化受品种方差的影响在长江中下游的 2005-06 年和黄淮海的 2006-07 年较大，其他区域和年份均较小；穗粒数的变化受品种方差的影响在长江中下游的 2005-06 年、黄淮海的 2006-07 年和北部陆地较大，其他区域和年份较小；千粒重的变化受品种的影响在长江中下游和黄淮海的 2006-07 年以及北部陆地的 2005-06 年较大，其他区域和年份较小。总之，每个区域和年份产量和产量构成因素品种的方差均明显小于环境的方差，产量和产量构成因素的变化主要受环境变化的影响。

表 2.4 两个生长季四个区域中产量、穗数、穗粒数和千粒重，品种和环境的方差分别占总方差的比例（%）。

Table 2.4 The proportion of variance in varieties and environment to total variance of yield and yield components in four experimental regions and two growing seasons.

		长江上游		长江中下游		黄淮海		北部陆地	
		2005-06	2006-07	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07
Yield	Varieties	0.7	2.3	3.1	1.6	5.3	5.6	3.3	6.9
	Environment	89.7	91.9	87.4	89.1	83.2	70.2	85.7	82.5
Spikes	Varieties	3.2	5.1	19.4	9.3	6.3	30.0	4.6	4.0
	Environment	83.7	88.3	61.6	75.9	66.6	46.7	68.0	74.4
Kernels	Varieties	8.9	18.4	26.7	14.1	12.2	31.8	26.9	34.0
	Environment	61.8	51.0	53.9	72.1	43.4	49.8	39.2	41.7
1000-kernel weight	Varieties	3.8	6.5	4.4	24.1	8.4	22.2	25.8	15.3
	Environment	80.5	68.5	71.8	63.4	55.0	56.0	52.5	65.2

2.3.2 相关分析结果

相关分析分析了 4 个区域的产量和三个产量构成因素的相关关系（表 2.5）。长江上游和北部陆地两年以及黄淮海的 2005-06 年生长季（8 个数据中的 5 个）穗数和籽粒产量为显著正相关关系。产量和穗粒数较少有相关关系，只在第二年的长江上游和长江中

下游有较高的正相关关系（8 个数据中的 2 个）。长江上游的两个年份和长江中下游、黄淮海以及北部陆地的第一年，千粒重和产量为显著正相关关系（8 个数据中的 5 个）。

表 2.5 四个区域 2005-06 和 2006-07 生长季小麦产量和产量构成因素的相关系数。

Table 2.5. Correlation coefficients between yield and yield components in four regions of China during the 2005-06 and 2006-07 growing seasons.

Regions		Spike number m ⁻² (SN)		Kernel number spike ⁻¹ (KN)		Kernel weight (KW)	
		2005-06	2006-07	2005-06	2006-07	2005-06	2006-07
Upper Yangtze Valleys (UY)	Yield	0.658**	0.701**	0.096	0.300**	0.538**	0.339**
	SN			-0.401**	0.109	0.130	-0.001
	KN					0.127	-0.127
Middle and lower Yangtze Valleys (MLY)	Yield	0.225	0.181	0.015	0.422**	0.481**	-0.379**
	SN			-0.322**	0.037	-0.126	-0.347**
	KN					-0.207	-0.665**
Yellow and Huai Valleys (YH)	Yield	0.290**	0.197	0.118	0.225	0.242*	0.171
	SN			-0.319**	-0.429**	-0.408**	-0.412**
	KN					0.002	-0.092
Northern Land (NL)	Yield	0.699**	0.517**	0.132	0.135	0.359**	0.139
	SN			0.107	-0.151	0.053	-0.384**
	KN					-0.271*	-0.079

* Significant at the 0.05 probability level.

** Significant at the 0.01 probability level.

每个区域和年份之间的产量构成因素之间的相关关系不尽相同。例如，长江上游、长江中下游和黄淮海区域的第一年以及黄淮海区域的第二年（8 个数据中的 4 个），穗粒数和穗数为显著负相关关系。千粒重与穗数在以下 4 组数据中为显著负相关关系，黄淮海的第一年和长江中下游、黄淮海和北部陆地的第二年。千粒重与穗粒数仅在两组数据中为负相关关系，分别为北部陆地的第一年和长江中下游的第二年。

分析每个地区三个产量构成因素在对产量的影响，只有长江上游地区产量和三个产量构成因素存在显著相关的关系（6 个数据中的 5 个），穗数与产量的相关系数最高。北部陆地区域穗数与产量的相关系数最高，穗粒数和千粒重与产量间较少有相关关系。长江中下游两年间的相关系数差异较大，但是千粒重均与产量存在显著相关关系，而穗数与产量无相关关系。黄淮海区域的产量和产量构成因素相关关系较少，6 组数据中只有 2 组数据存在相关关系。

2.3.3 通径系数分析

通径系数分析（表 2.6）是为了进一步发掘 4 个区域中籽粒产量和产量构成因素的相关关系。在两个生长季中，除了第二年的长江中下游和黄淮海区域，其他区域和年份穗数和千粒重对籽粒产量的直接影响均大于穗粒数。穗粒数与产量的直接通径系数为 0.13-0.74，最低值出现在长江中下游区域。由于穗数通过穗粒数和千粒重的间接影响为负值，长江中下游和黄淮海区域穗数与产量的相关系数和决定系数均较低。长江上游和北部陆地区域穗数对产量的直接通径系数较高，同样决定系数 R^2 也较高；长江上游的 R^2 第一年和第二年分别为 43%和 49%，北部陆地分别为 49%和 27%。

四个区域中，除了黄淮海区域的第二年，穗粒数对产量的直接影响和相关系数在三个产量构成因素中最低（直接通径系数变化范围为 0.16-0.54）。穗粒数对产量的决定系数 R^2 均较低，最高值出现在第二年的长江中下游地区（18%）。

千粒重对产量的直接影响大于穗粒数（除了第二年的长江中下游和黄淮海区域），低于穗数（除了第一年的长江中下游区域），变化范围为-0.10-0.58。区域之间千粒重对产量的决定系数 R^2 值变化范围为 2-29%，比较大的值出现在第一年的长江上游和长江中下游区域。

由于所有区域和年份（尤其在黄淮海区域）穗数、穗粒数和千粒重相互之间大多数为负相关关系，因为大多数的产量构成因素对产量的间接影响为负值，导致黄淮海区域的产量构成因素与产量之间的相关系数均较小。穗粒数对产量的直接影响被穗数和千粒重的间接影响抵消了，因此穗粒数和产量之间的相关系数均较小（除了第二年的长江中下游区域）。

通径系数分析进一步确认了相关分析结果。除了长江中下游区域（第一年千粒重和第二年的穗粒数对产量的 R^2 最高），所有区域穗数在产量构成三因素中对籽粒产量的直接影响和值均最高。表明各个区域中穗数是影响籽粒产量的主要因素。黄淮海区域穗数、穗粒数和千粒重对产量的直接影响均较高并且值较相似，表明黄淮海区域穗数、穗粒数和千粒重对籽粒产量同等重要。

表 2.6 2005-06 和 2006-07 年生长季分区域的籽粒产量和产量构成因素间的通径系数分析。一个区域内的所有试验点和品种均综合在一个生长季内表示。

Table 2.6. Path coefficient analysis between grain yield and yield components by region during the 2005-06 and 2006-07 growing seasons. All experimental sites and varieties were pooled within a growing season.

Pathway	Upper Yangtze Valleys (UY)			Middle and lower Yangtze Valleys (MLY)			Yellow and Huai Valleys (YH)			Northern Land (NL)		
	2005-06	2006-07	Mean	2005-06	2006-07	Mean	2005-06	2006-07	Mean	2005-06	2006-07	Mean
<i>Spike number m⁻² vs. grain yield</i>												
Direct effect	0.744	0.672	0.708	0.382	0.133	0.258	0.582	0.625	0.604	0.662	0.728	0.695
Indirect effect via:												
Kernel number spike ⁻¹	-0.138	0.03	-0.054	-0.083	0.013	-0.035	-0.096	-0.231	-0.1635	0.017	-0.042	-0.013
Kernel weight	0.052	0	0.026	-0.073	0.035	-0.019	-0.195	-0.197	-0.196	0.019	-0.169	-0.075
Correlation coefficient (r)	0.658	0.701	0.68	0.225	0.181	0.203	0.290	0.197	0.244	0.699	0.517	0.608
Coefficient of Determination (R ² , %)	43.3	49.3	46.3	5.0	3.3	4.15	8.4	3.9	6.2	48.8	26.7	37.8
<i>Kernel number spike⁻¹ vs. grain yield</i>												
Direct effect	0.343	0.275	0.309	0.259	0.350	0.305	0.302	0.538	0.420	0.160	0.280	0.220
Indirect effect via:												
Spike number m ⁻²	-0.298	0.073	-0.1125	-0.123	0.005	-0.059	-0.186	-0.268	-0.227	0.071	-0.110	-0.020
Kernel weight	0.050	-0.048	0.001	-0.121	0.067	-0.027	0.001	-0.044	-0.022	-0.099	-0.035	-0.067
Correlation coefficient (r)	0.096	0.300	0.198	0.015	0.422	0.219	0.118	0.225	0.172	0.132	0.135	0.133
Coefficient of Determination (R ² , %)	0.9	9.0	5.0	0	17.8	8.9	1.4	5.1	3.3	1.7	1.8	1.8
<i>Kernel weight vs. grain yield</i>												
Direct effect	0.397	0.375	0.386	0.583	-0.101	0.241	0.479	0.478	0.479	0.367	0.440	0.404
Indirect effect via:												
Spike number m ⁻²	0.097	0	0.0485	-0.048	-0.046	-0.047	-0.237	-0.258	-0.248	0.035	-0.280	-0.123
Kernel number spike ⁻¹	0.044	-0.035	0.0045	-0.054	-0.233	-0.144	0.001	-0.05	-0.025	-0.043	-0.022	-0.033
Correlation coefficient (r)	0.538	0.339	0.438	0.481	-0.379	0.051	0.242	0.171	0.207	0.359	0.139	0.249
Coefficient of Determination (R ² , %)	28.9	11.5	20.2	23.2	14.4	18.8	5.9	2.9	4.4	12.9	1.9	7.4

2.3.4 产量、产量构成因素和发育期的关系

观测到的产量和产量构成因素在各区域之间随着纬度的增加而变化很可能与区域间不同的发育阶段长度有关系。把对照品种的生育期分为出苗至抽穗和抽穗至成熟两个发育阶段。出苗至抽穗和出苗至成熟的天数随着纬度的增加而增加（图 2.4）。然而抽穗至成熟的天数与纬度没有关系（或者是有稍微的降低）。联系到每个区域的月平均温度（图 2.2），出苗至抽穗（11 月到 4 月份）的温度与发育天数存在明显的负相关关系，4 个区域之间 5 月份（灌浆期）具有相似的平均温度。两年中 5 月份的降雨量随着纬度的增加而降低，增加的水分胁迫很可能是导致灌浆期缩短的一个因素（McMaster 1997; 2005）。

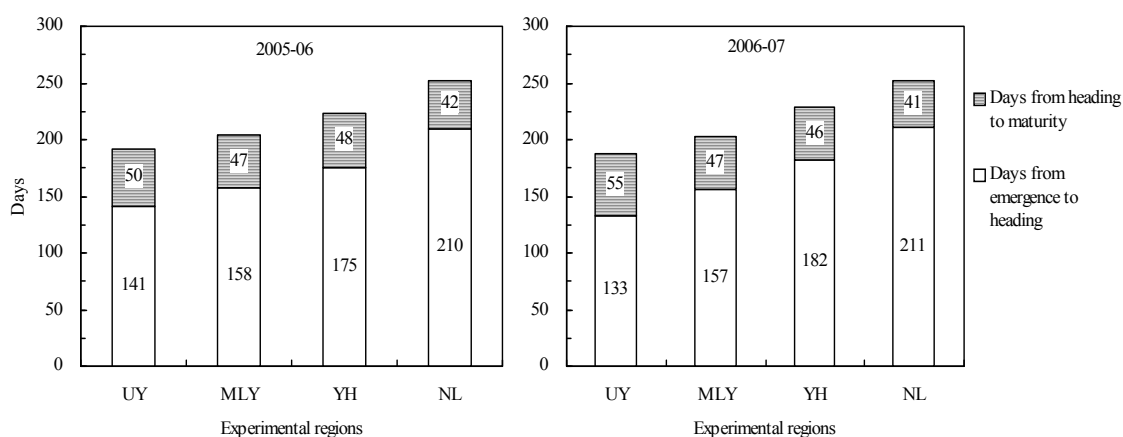


图 2.4 每个区域从出苗至抽穗和抽穗至成熟期的平均天数。图中的值为每个区域的对照品种和 2005-06 和 2006-07 年度的平均值（ $n = 134$ ）。区域按照纬度的增加从左至右排列。

Fig. 2.4. Mean days from emergence to heading and days from heading to physiological maturity by region. Means are for the check varieties used within a site and pool the 2005-06 and 2006-07 growing seasons ($n=134$). Regions are listed by increasingly greater latitude.

两年中四个区域的对照品种的产量和产量构成因素与发育阶段的回归分析示于图 2.5 中。产量与出苗至成熟期的天数存在显著的曲线关系（ $R^2 = 16\%$ ）。当生育期天数小于 225 天左右时，产量与生育期天数正相关，生育期高于 225 天之后，产量有降低趋势。因而，虽然北部陆地区域的生育期最长，但是它的产量低于黄淮海区域。当出苗至抽穗期天数低于 200 天左右时，产量与出苗至抽穗期的天数正相关（ $R^2 = 13\%$ ），高于 200 天时产量有下降趋势。穗数与出苗至抽穗期的天数显著正相关（ $R^2 = 61\%$ ），穗粒数与出苗至抽穗期的天数显著负相关（ $R^2 = 44\%$ ）。由低温导致的出苗至抽穗期的延长，使得小麦在出苗至抽穗阶段接受了较多的光照，生产了较多的干物质，产生了更多的穗数；由于穗粒数和穗数的负相关关系，因而穗粒数与出苗至抽穗期天数负相关。千粒重与抽

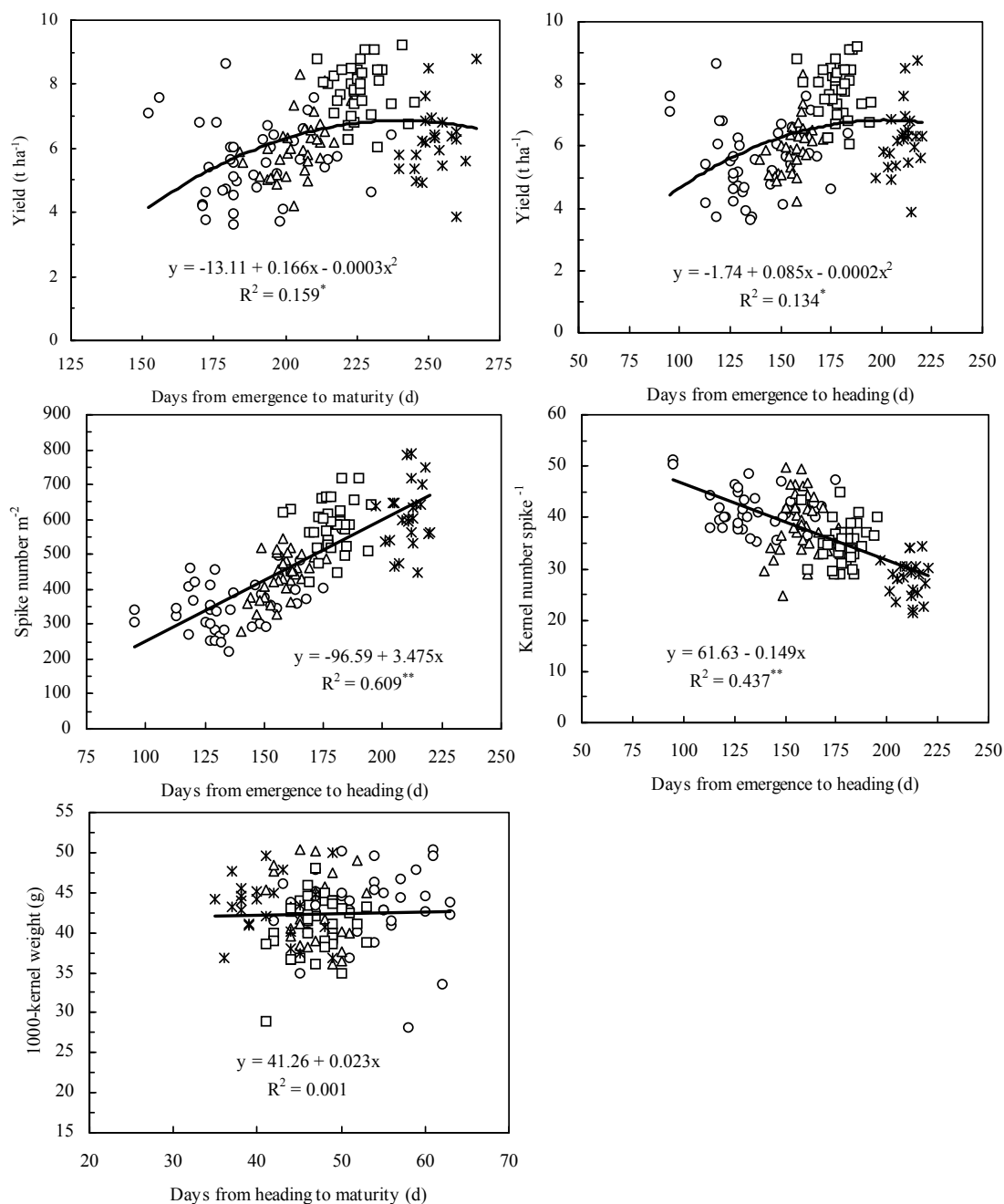


图 2.5 长江上游 (○), 长江中下游 (△), 黄淮海 (□) 和北部陆地 (☆) 的产量和产量构成因素与发育阶段 (出苗至成熟、出苗至抽穗和抽穗至成熟) 的回归分析。回归方程和 R² (*0.05 显著性水平, **0.01 显著性水平) 列于每个图中。选择出的生育阶段为最能影响因变量的阶段。图中数据为每个试验点对照品种的 2005-06 和 2006-07 年的平均值 (n = 134)。

Fig. 2.5. Regressions among yield and yield components with developmental phases (either days from emergence to maturity, emergence to heading, or heading to maturity) at UY (○), MLY (△), YH (□), and NL (☆). Regression equations and R² (* significant at the 0.05 probability level, ** significant at the 0.01 probability level) are listed in each figure. The selected developmental phases are for periods of time thought to most influence the dependent variable. Means are for the check varieties used within a site and pool the 2005-06 and 2006-07 growing seasons (n=134).

穗至成熟期天数无显著相关关系。

2.3.5 产量、产量构成因素和气象因素的关系

各个试验点、区域和年份间的气候均不相同（图 2.2），用每个区域的对照品种研究温度（平均、最高、最低）、降雨量和日照时数与产量和产量构成因素间的关系。由于产量构成因素主要决定于不同的生长阶段，气象变量被分为两个阶段。第一个阶段从出苗到抽穗期，与分蘖阶段、小穗和小花的发育阶段相吻合。第二个阶段从抽穗到成熟期，代表了籽粒灌浆阶段。长江中下游和黄淮海区域的所有试验点以及大部分长江上游的试验点，出苗至抽穗期为 11 月 1 日至 4 月 30 日，抽穗至成熟期为 5 月。长江上游区域的 4 个试验点，出苗至抽穗期为 11 月 1 日至 3 月 31 日，抽穗至成熟期为 4 月。北部陆地的所有试验地点，出苗至抽穗期为 10 月 1 日至 4 月 30 日，抽穗至成熟期为 5 月 1 日至 6 月 30 日。穗数、穗粒数、千粒重、产量与出苗至抽穗阶段的温度、降雨量和日照时数的相关系数列于表 2.7 中。产量与穗数显著正相关，与千粒重和穗粒数无相关关系。产量与最低温度显著负相关，与日照时数显著正相关。穗数与平均温度、最高温度和最低温度显著负相关，与日照时数显著正相关。穗粒数与平均、最高和最低温度显著正相关，与日照时数显著负相关。千粒重和出苗至抽穗期的气象变量间没有显著关系。

表 2.7 产量、穗数 (SN)、穗粒数 (KN) 和千粒重 (KW) 与出苗至抽穗期平均温度 (Tmean)、最高温度 (Tmax)、最低温度 (Tmin)、降雨量 (P) 和日照时数 (SD) 之间的相关系数。四个区域的对照品种和两个生长季放在一起分析 (n = 101)。

Table 2.7. Correlation coefficients (r) among yield, spike number m^{-2} (SN), kernel number spike⁻¹ (KN), kernel weight (KW), daily mean temperature (Tmean), daily maximum temperature (Tmax), daily minimum temperature (Tmin), precipitation (P) and sunshine duration (SD) from emergence to heading of wheat at each experimental site. The check varieties in all regions and both growing seasons were pooled (n = 101).

	SN	KN	KW	Tmean	Tmax	Tmin	P	SD
Yield	0.616**	0.05	-0.056	-0.139	-0.076	-0.196*	-0.309**	0.409**
SN		-0.282**	-0.373**	-0.585**	-0.514**	-0.619**	-0.359**	0.429**
KN			-0.119	0.608**	0.541**	0.627**	0.173	-0.212*
KW				0.139	0.172	0.12	0.022	0.061

* Significant at the 0.05 probability level.

** Significant at the 0.01 probability level.

产量、千粒重与抽穗至成熟期的温度、降雨量和日照时数的相关系数列于表 2.8 中。产量与日照时数显著正相关，千粒重与平均、最高和最低温度显著正相关，与最高温度的相关系数最大。

表 2.8 产量、千粒重 (KW) 与抽穗至成熟期的平均温度 (Tmean)、最高温度 (Tmax)、最低温度 (Tmin)、降雨量 (P) 和日照时数 (SD) 之间的相关系数。四个区域的对照品种和两个生长季放在一起分析 (n = 101)。

Table 2.8. Correlation coefficients among yield, kernel weight (KW), and mean values of daily mean temperature (Tmean), daily maximum temperature (Tmax), daily minimum temperature (Tmin), precipitation (P), and sunshine duration (SD) from heading to maturity of wheat at each experimental sites. The check varieties in all sites and both growing seasons were pooled (n = 101).

	KW	Tmean	Tmax	Tmin	P	SD
Yield	-0.056	-0.02	0.027	-0.094	-0.241*	0.373**
KW		0.233*	0.314**	0.195*	0.053	-0.048

* Significant at the 0.05 probability level.

** Significant at the 0.01 probability level.

采用逐步回归分析进一步探索产量、产量构成因素与出苗至抽穗和抽穗至成熟阶段的气象变量之间的关系 (表 2.9)。日照时数的变化与产量的变化关系最密切, 出苗至抽穗期日照时数对产量的决定系数 $R^2 = 17\%$, 抽穗至成熟期的 $R^2 = 14\%$ 。穗数主要由出苗至抽穗期的日照时数和最高温度决定, $R^2 = 44\%$ 。出苗至抽穗期的气象变量与千粒重之间无显著相关关系, 因此没有千粒重与这个阶段气象变量的线性方程。穗粒数主要由出苗至抽穗期的最低温度和降雨量决定, $R^2 = 43\%$ 。千粒重与抽穗至成熟期的最高温度相关度最高, 然而 R^2 只有 9.8%, 表明千粒重与气象条件的相关性较低。

表 2.9 产量、穗数 (SN)、穗粒数 (KN) 和千粒重 (KW) 与出苗至抽穗期和抽穗至成熟期平均温度 (Tmean)、最高温度 (Tmax)、最低温度 (Tmin)、降雨量 (P) 和日照时数 (SD) 之间的逐步回归分析方程。四个区域的对照品种和两个生长季放在一起分析 (n = 101)。

Table 2.9. Stepwise regression analysis between yield, spike number m^{-2} (SN), kernel number spike⁻¹ (KN), kernel weight (KW), mean temperature (Tmean), maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), precipitation (P) and sunshine duration (SD) from emergence to heading and from heading to maturity. The check varieties in all sites and both growing seasons were pooled (n=101).

Developmental phases	Linear model	R^2
Emergence to heading	Yield = 4.517 + 0.002 SD	0.168**
	SN = 604.6 + 0.242 SD - 23.4 Tmax	0.437**
	KN = 32.49 + 1.519 Tmin - 0.01 P	0.432**
Heading to maturity	Yield = 3.568 + 0.014 SD	0.139**
	KW = 17.8 + 0.853 Tmax	0.098*

2.3.6 产量、产量构成因素和积温的关系

分析对照品种产量和产量构成因素与出苗至抽穗期和抽穗至成熟期的积温的关

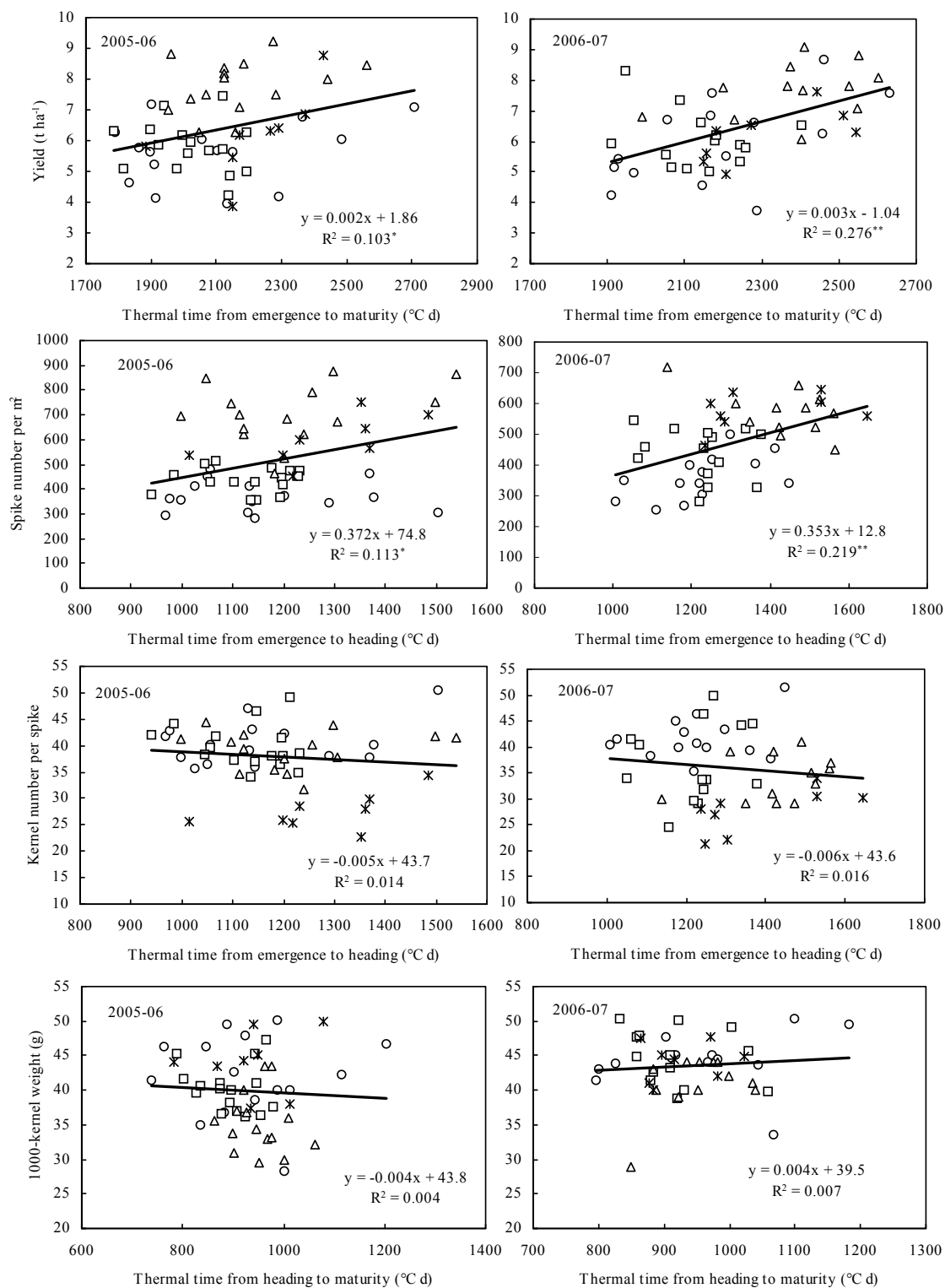


图 2.6 长江上游 (○), 长江中下游 (△), 黄淮海 (□) 和北部陆地 (*) 的产量和产量构成因素与积温 (出苗至成熟、出苗至抽穗和抽穗至成熟阶段积温) 的回归分析。回归方程和 R^2 (*0.05 显著性水平, **0.01 显著性水平) 列于每个图中。选择出的生育阶段为最能影响因变量的阶段。左侧为 2005-06 年小麦生长季数据 (n = 54), 右侧为 2006-07 年数据 (n = 48)。

Fig. 2.6. Regressions among yield and yield components with thermal time (either thermal time from emergence to maturity, emergence to heading, or heading to maturity) at UY (○), MLY (△), YH (□), and NL (*). Regression equations and R^2 (* significant at the 0.05 probability level, ** significant at the 0.01 probability level) are listed in each figure. The selected developmental phases are for periods of time thought to most influence the dependent variable.

系。小麦出苗至抽穗、抽穗至成熟期间每日高于 0 °C 的温度相加得到每个生育阶段内的积温。2005-06 小麦生长季出苗至成熟阶段的积温变化范围为 1786-2706 °C d, 2006-07 年的变化范围为 1909-2630 °C d。出苗至成熟阶段积温与小麦产量为显著正相关关系(图 2.6), 黄淮海区域积温较高因而产量较高, 即使在相同积温下大多数情况黄淮海区域的小麦产量依然高于其他区域的试点。出苗至抽穗阶段的积温与穗数为显著正相关关系, 黄淮海和北部陆地区域的穗数高于其他区域。穗粒数与出苗至抽穗阶段积温无相关关系, 北部陆地的穗粒数明显低于其他区域。千粒重与抽穗至成熟阶段积温无相关关系。

2.4 讨论

本研究中产量和产量构成因素间的关系在研究区域以及两个年份间均有差异。两个生长季中, 大体上产量和穗数随着纬度的增加而增加, 穗粒数则降低, 与千粒重的变化没有关系。通径系数分析表明 4 个区域中穗数对产量的直接影响最大, 千粒重次之, 穗粒数对产量的影响较小。黄淮海区域的产量最高, 变异系数最低, 产量较稳定。并且三个产量构成因素的对产量的直接影响同等重要。其他研究有一些不同结论。例如, Okuyama et al. (2004) 在巴西的 Londrina 对比了 11 个半矮秆春小麦品种, 分析灌水和干旱处理的两个播种期的试验数据, 结果表明籽粒产量与穗数和穗粒数正相关, 与千粒重负相关, 通径分析表明穗数和穗粒数对产量有较大的直接影响, 然而所有处理和年份的结论并不一致。产量构成因素和产量之间的相关关系在不同的水分处理间一致。Sayre et al. (1997) 在墨西哥研究灌溉条件下的 8 个春小麦品种, 结果揭示粒数和籽粒产量间为正相关关系, 千粒重和产量之间无相关关系。Kashif and Khaliq (2004) 在巴基斯坦通过研究 5 个品种报道了与此不同的结论, 穗粒数和千粒重与产量显著正相关, 并且通径分析表明穗粒数对产量有直接正影响, 但是千粒重对产量存在直接负面影响; 穗数与产量无显著相关, 并且对产量存在较大的直接负影响。也许这是由于试验中每行内的株距过大 (15cm), 并不能反映正常株距下的分蘖动态的原因。另外一些研究表明了在多种环境条件下, 显著正相关关系存在于产量与穗数 (e.g., Kumar and Hunshal, 1998 in Hisar, India; Tammam et al., 2000 in Egypt; Munir et al., 2007 in Pakistan), 穗粒数 (e.g., Kumar and Hunshal, 1998; Furkan et al., 2005 in Turkey) 和千粒重 (e.g., Chowdhry et al., 2000 in Pakistan; Tammam et al., 2000) 之间。

我们的研究区域中环境条件和基因型可以部分的解释不同的结果 (Kashif and Khaliq, 2004)。环境条件将会影响小麦的发育并因此影响每个产量构成因素 (e.g., Duggan and Fowler, 2006; McMaster, 1997)。本研究中考虑的主要气象变量包括温度、降雨量和日照时数, 这些变量在每个试验点均有差异。本文利用相关和逐步回归分析来研究气象变量与产量、穗数、穗粒数和千粒重之间的关系 (表 2.7-2.9)。结果表明日照时数的变化能最大的解释产量的变化, 降雨量次之, 温度对产量的影响较小。气象因素与产量构成因素的关系结果表明, 虽然日照时数对穗数和穗粒数依然有影响 (对千粒重没

有影响), 降雨量和温度对三个产量构成因素的影响较大。

出苗至成熟期的天数与产量为曲线关系(曲线顶点约在 225 天; 图 2.5)。出苗至抽穗的天数与穗数为正相关的线性关系, 与穗粒数为负相关的线性关系。这应该是由穗分化时期的延长增加了分蘖。抽穗至成熟期的天数与千粒重没有相关关系, 但是有些文献报道他们之间为正相关的关系 (McMaster, 1997 cites references)。

总结以上研究结果, 可以得出气象变量与产量、穗数、穗粒数和千粒重之间的关系存在联系。温度随着纬度的增加而降低(表 2.1, 图 2.2), 大体上产量是随着纬度的增加而增加(表 2.3)。温度降低同时延长了生育期长度(图 2.4)。北部陆地区域产量的降低(低于黄淮海地区)应该是由该区域温度较低, 虽然生育期最长但是其积温低于黄淮海区域(图 2.6)。所有试验点的产量与降雨量负相关, 与日照时数正相关。温度与穗数负相关, 与穗粒数正相关, 日照时数与穗数和穗粒数的关系与此相反。气象要素与千粒重的关系不明显。由此可得出, 中国小麦产量较高区域的气象特征应为较低的温度、较高的日照时数, 以及从出苗至抽穗较长的天数。

其他一些研究也报道了气象变量对产量和产量构成因素的影响。例如, Garcia del Moral et al. (2003) 观测了西班牙不同温度(凉爽和温暖)和水分(灌溉和旱地)条件下的硬质小麦的产量。通径系数分析表明凉爽和灌溉条件下的籽粒产量主要由千粒重决定, 在温暖气候中(旱地和灌溉)由穗数决定。穗数和穗粒数对籽粒产量有显著的积极贡献, 尤其在干旱条件下。我们的研究结果与此相似, 千粒重是长江中下游地区(降雨量最高的区域)最重要的产量构成因素, 穗数是长江上游(最温暖的区域)和北部陆地(最干旱的区域)最重要的产量构成因素。在墨西哥的西北部温度和太阳辐射是解释产量年度变化的主要气象变量 (Fischer, 2007)。开花前一个月的太阳辐射和平均温度与粒数紧密正相关, 灌浆期间的温度是影响千粒重的主要因子 (Fischer, 1984; Sayre et al., 1997)。最近一些文章强调了最低温度对籽粒产量的影响作用。例如, 最低温度每增加 1 °C 将导致菲律宾的水稻 (*Oryza sativa* L.) 产量下降 15% (Peng et al., 2004), 墨西哥的小麦产量下降 10% (Lobell et al., 2005)。本文研究结果表明日照时数是决定籽粒产量的最重要的气象变量, 温度主要影响了穗和籽粒的形成。5 月份的最高温度与千粒重显著正相关。Garcia del Moral et al. (2003) 和 Duggan and Fowler (2006) 报道在没有胁迫的环境下所有的产量构成因素对产量形成同等重要。本文中黄淮海区域的相关和通径系数分析结果与此相似。

2.5 结论

产量的动态性决定于每个产量构成因素的发育和生长, 产量构成因素形成于不同的发育阶段, 并受环境的影响。本文研究中国不同生产环境下产量和产量构成因素间的关系, 温度、降雨量和日照时数是影响这些关系的主要因子。在高产稳产的生产环境下(黄淮海区域), 所有的产量构成因素对产量的贡献同等重要, 产量构成因素间无补偿作用。

高产区的特点是较低的温度、较高的日照时数和较长的出苗至抽穗期。穗数是三个产量构成因素中最重要的因素，在低产条件下保持穗数对产量很重要。日照时数是影响产量变化的主要气象因素，穗数和穗粒数的变化主要受出苗至抽穗期的温度影响，千粒重受抽穗至成熟期的温度变化影响。

第三章 APSIM模型在新疆地区的适用性评价

摘要

模型的校准和验证以及在研究区域的适用性评价是应用模型研究气候变化对作物生产影响的重要前提。本章介绍了APSIM模型的参数与输入；验证和评价了APSIM模型在新疆绿洲地区模拟作物生产的有效性。在乌兰乌苏、东坎和莎车三个农业气象试验站对APSIM模型对冬小麦和春小麦生长发育和产量进行了校准和验证，在乌兰乌苏站分析了模型对气象因素变化的敏感性。乌兰乌苏位于北疆石河子附近，吐鲁番东坎位于新疆中部，莎车位于新疆南部，代表了新疆地区不同的气候条件。主要结论为，1. 模型能够较好的模拟三个站点的叶面积指数和地上生物量的增长动态。由于模型对新疆地区春季增温快，光照充足的气候条件敏感性不足，模型低估了返青后叶面积指数和地上生物量的增长。2. 气象因素敏感性分析表明，APSIM模型在乌兰乌苏试验站对太阳辐射和温度的改变较敏感，可以应用该模型分析新疆绿洲地区气候变化对作物生产的影响。综上所述，APSIM模型在新疆地区具有较好的适用性，存在对作物的干物质积累及产量的模拟结果较实测值偏低的情况，需要进一步的研究确定原因及解决办法。

3.1 引言

中国是世界上最大的小麦生产国，在华北、东北、西北以及西南均有小麦的种植。保证小麦生产对我国的粮食安全以及国民经济均有重要意义。过去50年为气候变化最明显的50年，温度上升、辐射降低以及降雨格局的变化均存在于各个粮食生产区域。因此研究气候变化对我国粮食生产的影响一直是近年来的热点。

已有许多研究表明农业系统模型是研究气候变化对作物生产力潜在影响的有用工具（Asseng et al., 1997; Keating et al., 2003; Wu et al., 2006）。应用模型研究气候变化对作物生产影响的前提是利用作物生长期间的试验资料，例如叶面积指数和生物量变化动态来校准和验证模型的适用性。APSIM（Agricultural Production Systems Simulator）是澳大利亚系列作物模型的总称，已在澳大利亚、新西兰、菲律宾、荷兰和中国等国家验证应用。APSIM 模型在中国的应用包括，在黄土高原不同耕作方式和不同轮作序列下模拟小麦和豌豆产量、生物量及土壤水分的动态变化（李广等，2009）；在华北平原研究过去 43 年气候变化对作物生长和水分需求的影响（Chen et al., 2009）。在这些地区均已验证 APSIM 模型有较好的适用性。在我国西北干旱区，作物生长依赖于灌溉，作

物耗水量高于内陆平原地区。这个地区的作物生产对气候变化的响应还少有研究，本文利用 APSIM 模型模拟研究气候变化对新疆地区小麦生长和水分利用的影响。本章的目的为利用新疆地区乌兰乌苏、东坎和莎车农业气象试验站小麦生长期间的资料来验证 APSIM 模型，检验其在新疆地区的适用性。

3.2 材料与方

3.2.1 试验站概况

乌兰乌苏农业气象试验站 (44.3 °N, 85.8 °E, a.s.l. 468.2 m) 位于北疆石河子市西侧。北疆平原冬春麦兼种区，年降水量150 mm左右，主要分布在4-6月，对小麦生长需水能起到补充作用，6-7月小麦灌浆成熟期间经常出现30-34 °C高温和干热风现象，影响灌浆成熟，降低粒重。土壤类型主要有荒漠灰钙土、潮土和草甸土等，泉水溢出带有沼泽土和盐土等。土壤有机质含量少数在1%以下，多数为1.2%-1.7%，耕地土壤速效磷不足，含氮较少（王荣栋等，2005）。冬小麦生育期为9月中旬至次年7月初。

东坎农业气象试验站 (42.8 °N, 89.3 °E, a.s.l. -48.7m) 位于新疆北部的吐鲁番盆地。年均蒸发量远大于年均降水量，太阳辐射强，年均日照时数达2940多个小时，年均气温为14.5 °C，夏天气温高达40 °C以上。春小麦生育期为2月中旬至7月中旬。

莎车农业气象试验站 (38.5 °N, 77.3 °E, a.s.l. 1231.2 m) 位于南疆喀什地区。南疆干热冬麦区，绝大部分地区属典型的南疆干热气候，夏季炎热干旱，气候变化剧烈，昼夜温差大，年降水仅20-50 mm。5-6月小麦灌浆成熟期间气候干热，干热风较多。喀什麦区平原土层深厚，质地细、保水保肥能力强。冬小麦生育期为10月上旬至次年6月上旬。

3.2.2 试验数据获取

选取试验数据较全的2000-2003年乌兰乌苏试验站、2003-2005年东坎试验站和2003-2006年莎车试验站小麦生长期间的试验数据校准和验证模型。乌兰乌苏、东坎和莎车站的小麦品种分别为奎东4号、新春2号和新冬20。乌兰乌苏站冬小麦播种日期分别为2000/9/27、2001/9/19、2002/9/27，播种量为150 kg ha⁻¹，每年的4月中旬施尿素300 kg ha⁻¹。东坎试验站春小麦播种日期分别为2003/2/21、2004/2/24、2005/2/22，播种量为180 kg ha⁻¹，每年的4月初施尿素150 kg ha⁻¹。莎车试验站冬小麦每年的播种期分别为2003/10/1、2004/10/9、2005/10/12，播种量为150 kg ha⁻¹，每年的4月中旬施尿素300 kg ha⁻¹。为了避免土壤表层的盐分累积，每次灌溉水量较多。三个试验站的灌水量和时间列于表3.1中。用烘干法测定0-50cm，10cm一层的土壤含水量。太阳辐射、最高和最低温度、降雨量资料由试验站的自动气象站记录。作物生育阶段，叶面积指数 (LAI)、

生物量、产量的观测值和测量值用于校正APSIM模型。

表 3.1 乌兰乌苏、东坎和莎车试验站灌溉日期和灌溉量

Table 3.1. Irrigation amount and dates during field experiments in Wulanwushu planting with winter wheat (2000-2003), Dongkan planting with spring wheat (2003-2005) and Shache planting with winter wheat (2003-2006).

站点	日期	灌溉量	站点	日期	灌溉量
Station	Date	Irrigation amount (mm)	Station	Date	Irrigation amount (mm)
乌兰乌苏	2000/9/26	105	东坎	2003/5/14	120
乌兰乌苏	2000/10/16	90	东坎	2003/5/29	120
乌兰乌苏	2000/11/10	130	东坎	2004/2/24	112
乌兰乌苏	2001/4/15	90	东坎	2004/4/8	120
乌兰乌苏	2001/5/8	105	东坎	2004/4/22	120
乌兰乌苏	2001/5/25	105	东坎	2004/5/10	120
乌兰乌苏	2001/6/12	105	东坎	2004/5/29	120
乌兰乌苏	2001/9/20	90	东坎	2005/2/23	120
乌兰乌苏	2001/10/7	105	东坎	2005/4/4	120
乌兰乌苏	2001/11/14	90	东坎	2005/4/23	120
乌兰乌苏	2002/4/15	90	东坎	2005/5/12	120
乌兰乌苏	2002/5/10	90	东坎	2005/5/28	120
乌兰乌苏	2002/5/25	90	莎车	2003/11/22	105
乌兰乌苏	2002/6/15	90	莎车	2004/4/14	105
乌兰乌苏	2002/9/30	90	莎车	2004/5/17	105
乌兰乌苏	2002/11/10	105	莎车	2004/10/7	125
乌兰乌苏	2003/5/2	90	莎车	2004/11/13	125
乌兰乌苏	2003/5/16	75	莎车	2005/4/6	125
乌兰乌苏	2003/5/26	75	莎车	2005/4/30	105
乌兰乌苏	2003/6/2	75	莎车	2005/6/9	105
乌兰乌苏	2003/6/11	75	莎车	2005/10/11	105
乌兰乌苏	2003/6/18	75	莎车	2005/11/20	125
东坎	2003/2/22	120	莎车	2006/4/19	125
东坎	2003/4/9	120	莎车	2006/5/10	105
东坎	2003/4/26	120	莎车	2006/6/4	105

3.2.3 模型性能评价指标

由于没有统一的指标来评价农业系统模型的模拟性能,本文采用图形分析与统计度量相结合的方法对APSIM模型在新疆地区的适用性进行检验与评价。通过图形来比较LAI、生物量、籽粒产量模拟值与实测值之间的吻合程度,并根据Asseng et al. (1998b, 2000)选择三个统计参数作为检验指标,包括1:1线决定系数 r^2 (表示为: $R^2(1:1)$),该统计指标反映了模型模拟值相对于实测值的真正偏差;斜率(β),该指标反映了模型整体高估或低估实测值的程度, β 值由模拟值与实测值过原点的拟合回归线性方程的截距得到;均方根误差(RMSD),即预测均方根误差(MSEP, Wallach and Goffinet,

1989)，该指标反映了模型模拟值相对实测值的绝对误差量，其计算公式为：

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{MEA}_i - \text{SIM}_i)^2}{n-1}}$$

其中：RMSD 一均方根误差；MEA_i 一实测值；SIM_i 一模拟值；n 一样本个数。

3.2.4 模型敏感性分析

在评价气候变化对作物生产的影响方面，可以通过模型的敏感性分析来判断APSIM模型是否适用。敏感性分析，是在模拟过程中人为地改变某些影响作物生长发育的品种、土壤、气候要素等参数，然后看模拟产量对这些要素变化的响应如何。气象数据的敏感性分析是指在原来每日气象数据的基础上，增加或减少一些百分比，比较气象数据改变前后的模拟结果，分析模拟结果是否合理，以及模型对改变的气候要素的敏感程度如何。通过敏感性分析，可以判断作物模型模拟结果是否符合该地区作物产量对气候要素波动/变化响应的实际情况，并以此衡量模型的可靠性。根据APSIM模型要求的气象参数，分析了气象参数中的太阳辐射、降水和温度三个变量。由于温度起主要作用的是平均温度，因此对模型运行所要求的最高、最低气温同时作降低或升高处理，以达到对平均温度进行改变的目的。

3.3 模型输入与参数确定

本章利用新疆三个试验站点的数据验证APSIM版本的适用性。所利用的模块包括小麦（WHEAT），土壤水分（SOILWAT2），土壤氮素（SOILN2），残茬（RESIDUE）和管理措施（MANAGER）模块。本研究从乌兰乌苏、东坎和莎车三个农业气象试验站点中选择试验数据比较全的连续3年的试验数据来校准和验证模型分别在这三个站点的适用性。分别选择乌兰乌苏2003-2006年冬小麦、东坎2003-2005年春小麦和莎车2003-2006年冬小麦生长季的试验数据来校准和验证模型。

3.3.1 模型输入资料

(1) 土壤资料。APSIM模型设有土壤氮、土壤水、残茬等模块，其中土壤水模块涉及地表径流、排灌、地表蒸发等方面的参数设置。模型土壤参数主要包括水力学参数和物理参数两部分，根据田间实测结果或土壤特性确定。土壤水力学参数包括饱和含水量、田间持水量、凋萎系数、排水系数和径流曲线系数等，土壤物理参数主要包括土壤类型、质地、容重和养分状况等。

(2) 气象资料。气象输入资料包括逐日太阳辐射、最高和最低气温和降水量等，由试验站自动气象观测站测定。

(3) 作物品种参数。作物品种参数包括生育期各阶段的积温、春化系数、光周期、光能利用效率、潜在灌浆速率以及与作物籽粒有关的参数。

(4) 管理措施。管理措施包括播种日期、播种深度、播种量、行距、施肥期、施肥量、灌溉期、灌溉量、作物残茬处理等资料，由田间实测数据得到。

3.3.2 模型参数确定

(1) 土壤参数的确定。土壤水分状况参数包括容重、饱和含水量、田间持水量、凋萎系数、排水系数和径流曲线系数等，由实测结果和试验区土壤特性确定。表3.2给出了APSIM模型在乌兰乌苏、东坎和莎车农业气象试验站确定的土壤剖面层次和土壤参数。由于这三个试验站仅测了0-50cm，每10cm一层的土壤水分含量，50-200cm的土壤水分参数等同于40-50cm的土壤水分参数。模型需要输入的土壤初始含水量，由作物播种前实测土壤含水量确定。试验没有测定土壤养分等土壤物理参数，本文根据相关文献和模型默认值确定该部分参数。

表3.2 APSIM模型在乌兰乌苏、东坎和莎车农业气象试验站土壤水分参数

Table 3.2 Soil hydraulic parameters of the APSIM model at Wulanwushu, Dongkan and Shache Agrometeorology experimental station.

	土壤层次(cm)	土壤质地	容重 (g cm^{-3})	饱和含水量 (mm mm^{-1})	田间持水量 (mm mm^{-1})	凋萎含水量 (mm mm^{-1})
乌兰乌苏	0-10	砂壤土	1.26	0.44	0.33	0.05
	10-20	砂壤土	1.28	0.46	0.33	0.06
	20-30	砂壤土	1.28	0.43	0.30	0.06
	30-40	砂壤土	1.33	0.45	0.30	0.07
	40-200	砂壤土	1.34	0.41	0.26	0.10
东坎	0-10	沙壤土	1.41	0.40	0.25	0.10
	10-20	沙壤土	1.49	0.41	0.23	0.11
	20-30	沙壤土	1.48	0.43	0.23	0.14
	30-40	沙壤土	1.40	0.41	0.22	0.14
	40-200	沙壤土	1.32	0.42	0.21	0.14
莎车	0-10	砂壤土	1.36	0.41	0.23	0.03
	10-20	砂壤土	1.29	0.42	0.22	0.04
	20-30	砂壤土	1.32	0.42	0.22	0.03
	30-40	砂壤土	1.32	0.41	0.24	0.02
	40-200	砂壤土	1.32	0.40	0.23	0.02

(2) 作物遗传参数的确定。作物的遗传参数由作物的生物特性决定，本文利用乌兰

乌苏、东坎和莎车三个农业气象试验站土壤、气象以及作物相关资料，采用“试错法”在计算机上调试、确定作物遗传参数。挑选一个参数而固定其它参数不变，在模型给定或根据参考文献确定的该参数范围内每次增加或减小5%，反复运行作物模型，直到模型模拟值（LAI、生物量和籽粒产量）与实测值的根均方差最小，确定该参数值，然后再采用同样方法确定其它参数，最后确定模型最优参数组合。本文调试确定的三个试验站冬小麦和春小麦品种参数见表3.3。

表3.3 冬小麦品种奎东4号（乌兰乌苏）和新冬20（莎车），以及春小麦品种新春2号（东坎）的品种参数

Table 3.3 Genetic coefficients developed for winter wheat (cultivar Kuidong 4) at Wulanwushu and (cultivar Xindong 20) at Shache station, spring wheat (cultivar Xinchun 2) at Dongkan station.

参数	品种	品种		
		奎东4号	新春2号	新冬20
每叶片发育所需热时 (°C d/leaf appearance)	phyllochron	80.0	55.0	85.0
春化作用系数（1-5，校正范围）	vern_sens	3.0	3.0	3.5
光周期系数（1-5）	photop_sens	3.5	2.0	3.0
灌浆至成熟期积温（°C d）	startgf_to_mat	650	250	650
灌浆期单位单茎干重籽粒数 (kernels g ⁻¹ stem ⁻¹)	grains_per_gram_stem	27.0	27.0	36.0
潜在灌浆速率（g kernel ⁻¹ day ⁻¹ ）	potential_grain_filling_rate	0.0024	0.0025	0.0035

（3）管理参数的确定。管理参数与作物种植管理相关，由品种、播期、播量、播深、灌溉、施肥、耕作等管理措施决定。管理参数还包括运用简单语言定义的一些模块运行规则、计算和信息。所有管理参数数据以自由格式存储于模型管理文件中。

3.3.3 模型验证资料与结果输出

利用三个站点实测的生育期、叶面积指数（LAI）、干物质积累和产量指标验证模型。在 APSIM 模型中可以自设输出结果，本文设置的输出结果和分析项目主要包括冬小麦和春小麦的主要生育日期、LAI、地上生物量、籽粒产量、土壤含水量和作物蒸散量。土壤含水量为三个试验站点设置的作物根区范围内分层土壤贮水量。

3.4 模型校准与验证

分别从三个试验站点中选择试验数据较全的连续三年的试验结果，校准和验证模型。将乌兰乌苏2003-2006年、东坎2003-2005年和莎车2003-2006年的气象、试验期间的灌溉、施肥等管理措施资料输入模型运行，将模拟得到的LAI、地上生物量、籽粒产量与相应的实测值比较来评价模型在研究区域的适用性。

3.4.1 作物生长动态模拟

图3.1为乌兰乌苏、东坎和莎车农业气象试验站小麦叶面积指数变化动态模拟值和实测值的对比结果。三个站点的小麦叶面积指数模拟值基本能反映小麦生长过程中叶面

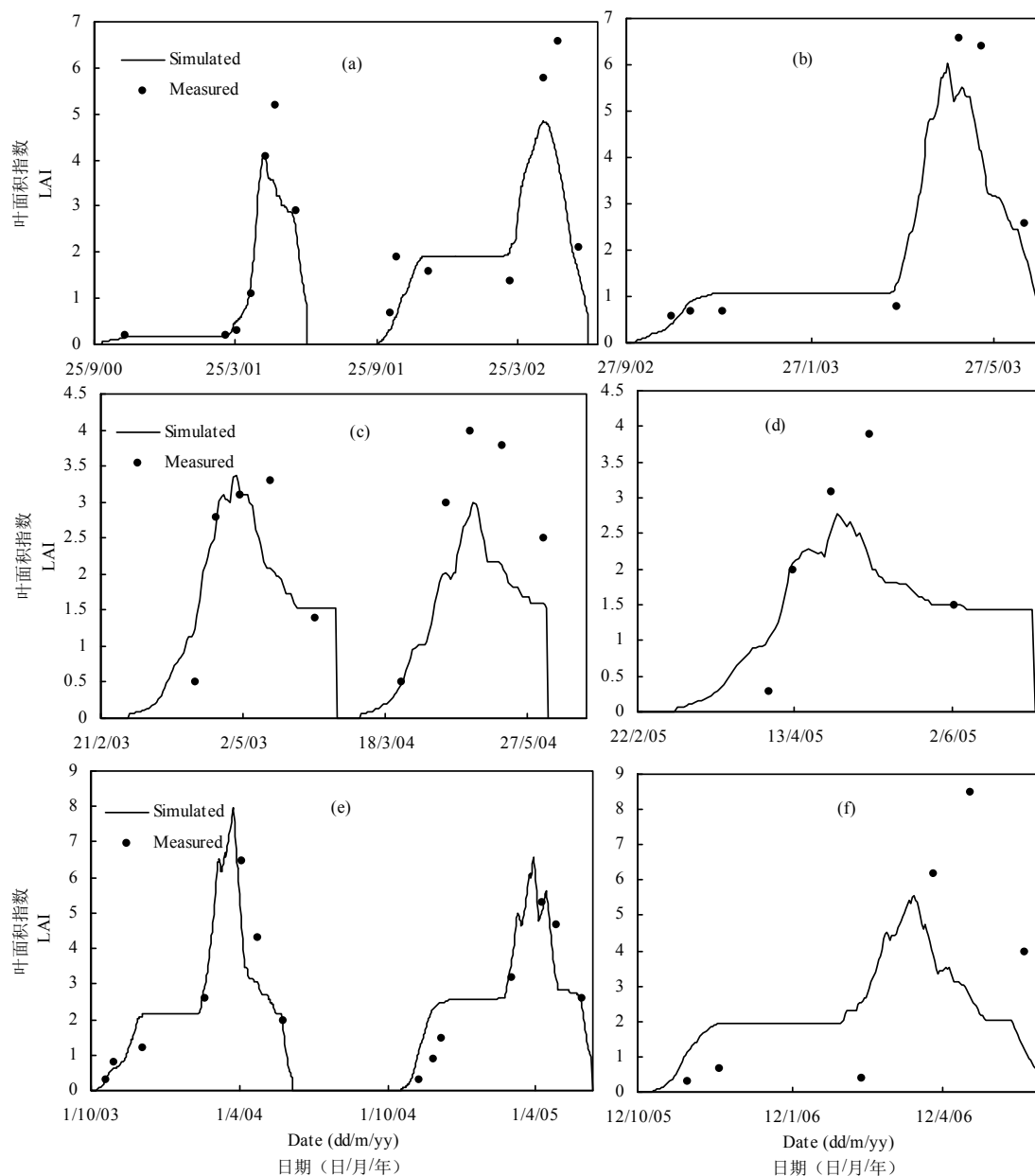


图3.1 小麦叶面积指数模拟值和实测值的比较。乌兰乌苏站2000-2003年冬小麦 (a、b)，东坎站2003-2005年春小麦 (c、d)，莎车站2003-2006年冬小麦 (e、f)。a、c、e分别为三个站点的模型校准，b、d、f为模型的验证。

Fig. 3.1 Comparison of observed and APSIM simulated LAI at Wulanwushu station (a and b), Dongkan station (c and d) and Shache station (e and f). Experimental data from 2000-2002 (winter wheat: a), 2003-2004 (spring wheat: c) and 2003-2005 (winter wheat: e) were used to calibrate the APSIM. Experimental data from 2002 to 2003 (winter wheat: b), 2005 (spring wheat: d) and 2005-2006 (winter wheat: f) were used to validate the APSIM.

积指数的变化动态。对比模型模拟值与实测值，可以看出，三个站点在返青拔节期之前模型模拟值高于实测值，返青拔节期之后模拟值低于实测值。这种明显差异应该归因于新疆地区的气候条件变化特征。乌兰乌苏试验站冬季温度较低，12月和1月份的温度为 $-12.5\sim-16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ （图3.2），叶面积指数在返青期前的生长阶段比较低。温度从2月到4月，增长的较快，以每月 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速度增长。并且3月和4月这个时期光照充足，温度和光照都有利于小麦生长，因此叶面积指数快速增长至较高值。APSIM模型在叶面积指数模拟方面不能敏感的反映新疆地区这种气候变化的特点，所以小麦生长前期LAI模拟值高于实测值，生长后期低于实测值。

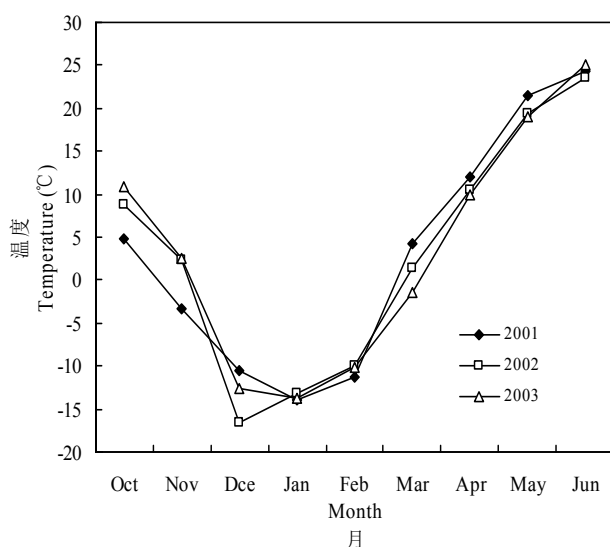


图3.2 乌兰乌苏站2001-2003年间小麦生长期间的月平均温度变化

Fig. 3.2 The average monthly temperature of during winter wheat growth stage from 2001 to 2003 in Wulanwushu Agrometeorology experimental station.

总体上小麦叶面积指数的模拟值低于实测值， β 值为0.78（图3.4）。模型的模拟效果较好， R^2 （1:1）值为0.76，RMSD为0.95。表明模型在新疆这三个站点对叶面积指数的模拟较好。

乌兰乌苏、东坎和莎车三个站点的地上生物量模拟值与实测值的对比结果示于图3.3中。模型模拟的小麦生物量的变化动态基本与实测值吻合，表明模型在新疆地区的这三个站点可以模拟小麦的生长动态。在小麦生长阶段后期，模拟值明显低于实测值；在小麦生长阶段前期，模拟值略低于实测值。模拟值和实测值的这种差异与小麦叶面积指数的模拟值与实测值差异相似，其差异原因相同。

乌兰乌苏、东坎和莎车三个站点地上生物量模拟值与实测值的关系示于图3.4中。总体的模型模拟值低于实测值， β 值为0.79；模拟值与实测值的相关性较好， R^2 （1:1）值为0.94；模型模拟值相对于实测值的绝对误差量RMSD值为 2.10 t ha^{-1} 。这三个统计指标表明，模型模拟效果较好，能反映三个试验站点的小麦地上生物量的变化动态。

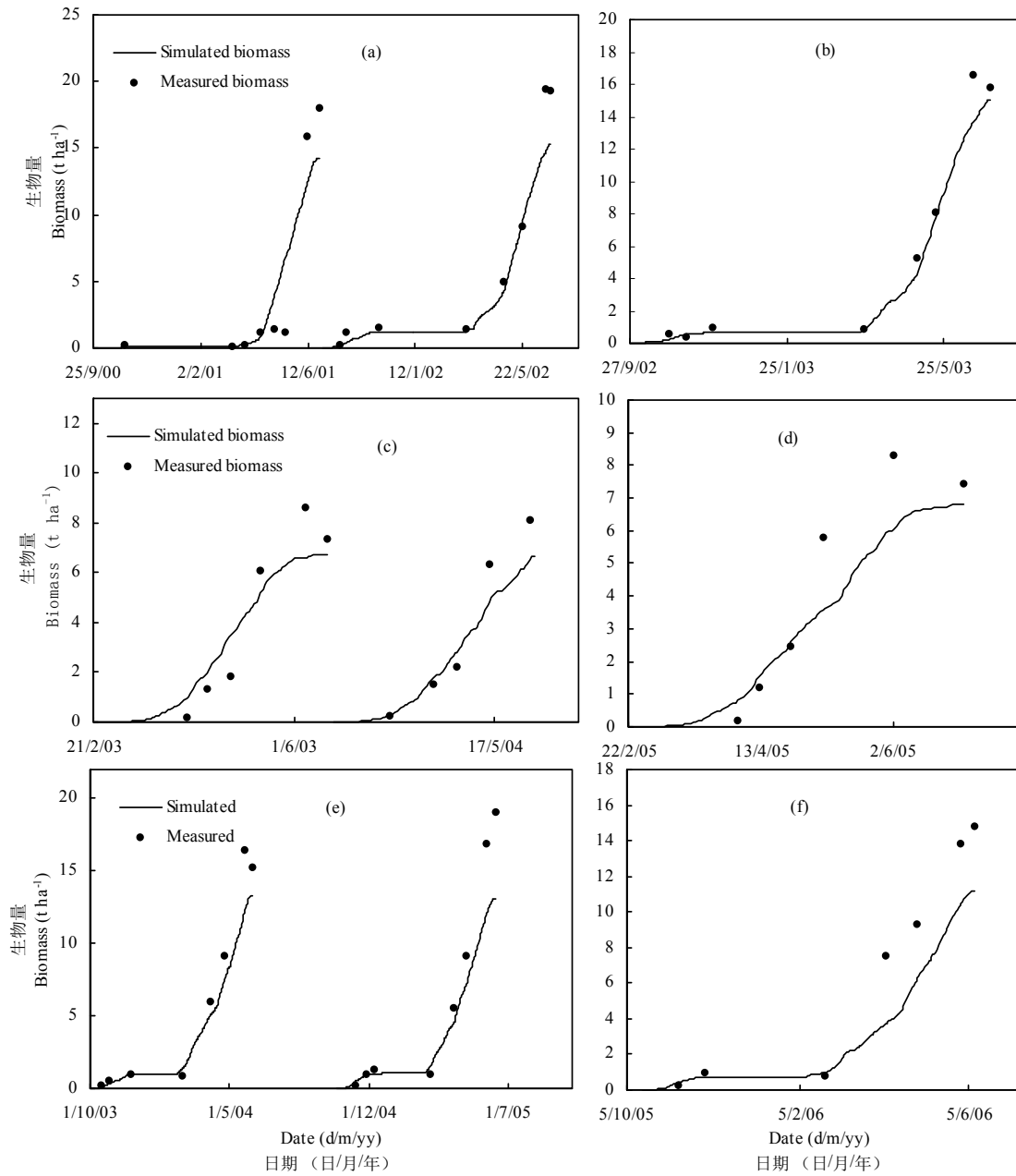


图 3.3 小麦地上生物量模拟值和实测值的比较。乌兰乌苏站2000-2003年冬小麦 (a、b)，东坎站2003-2005年春小麦 (c、d)，莎车站2003-2006年冬小麦 (e、f)。a、c、e分别为三个站点的模型校准，b、d、f为模型的验证。

Fig. 3.3 Comparison of observed and APSIM simulated above-ground biomass at Wulanwushu station (a and b), Dongkan station (c and d) and Shache station (e and f). Experimental data from 2000-2002 (winter wheat: a), 2003-2004 (spring wheat: c) and 2003-2005 (winter wheat: e) were used to calibrate the APSIM. Experimental data from 2002 to 2003 (winter wheat: b), 2005 (spring wheat: d) and 2005-2006 (winter wheat: f) were used to validate the APSIM.

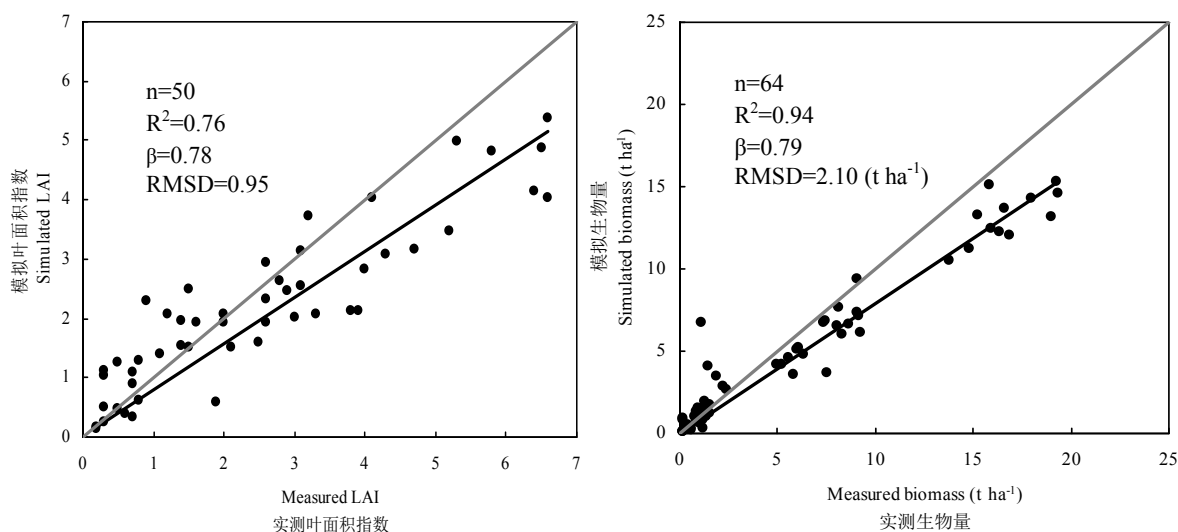


图3.4 乌兰乌苏、东坎和莎车站模拟和实测小麦叶面积指数和生物量的关系

Fig. 3.4 Comparison of observed and simulated values of LAI and biomass of wheat with data from Wulanwushu (2000-2003), Dongkan (2003-2005) and Shache (2003-2006) considered.

3.4.2 作物产量模拟

图3.6为乌兰乌苏、东坎和莎车三个站点的籽粒产量模型模拟值与实测值的比较。除东坎站2004年模拟值与实测值相差较多，其它站点和年份模拟值均与实测值相近。除乌兰乌苏站2003年和东坎站2005年模拟值高于实测值外，其它年份均是模拟值低于实测值，应该是由于在小麦生育后期即小麦快速生长期，叶面积指数和地上生物量的模拟值均明显低于实测值。

图 3.7 为乌兰乌苏、东坎和莎车站小麦籽粒产量模拟值与实测值的关系。模拟值低于实测值， β 值为 0.95， R^2 (1:1) 值为 0.89。模拟值与实测值的绝对误差量 RMSD 为 0.75 t ha^{-1} 。表明模型对小麦籽粒产量的模拟效果较好。

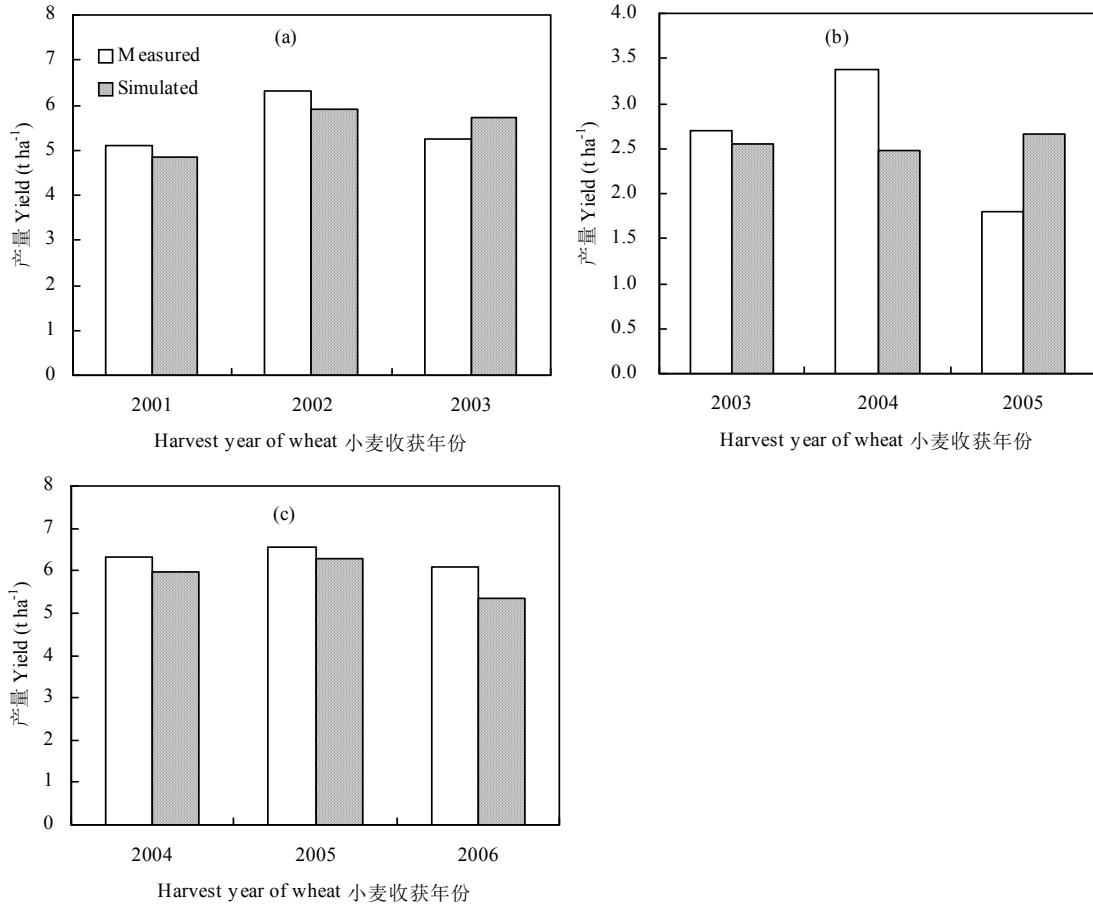


图3.6 乌兰乌苏 (a)、东坎 (b) 和莎车 (c) 站小麦产量模型模拟值与实测值比较

Fig. 3.6 Comparison of observed and APSIM simulated grain yield at Wulanwushu station (a), Dongkan station (b) and Shache station (c).

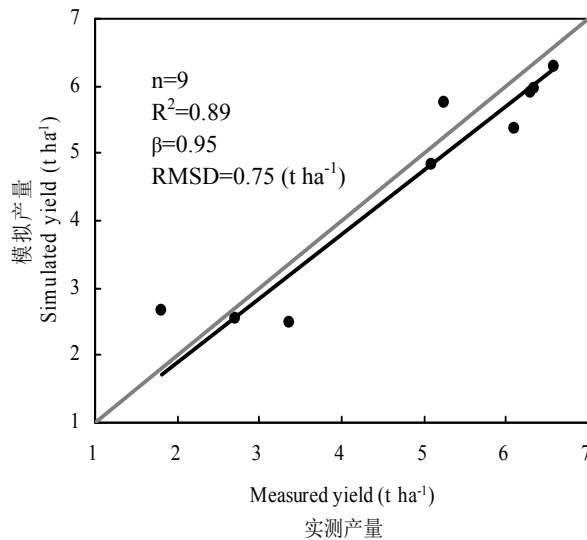


图 3.7 乌兰乌苏、东坎和莎车站模拟和实测籽粒产量的关系

Fig. 3.7 Comparison of observed and simulated values of grain yield of wheat with data from Wulanwushu (2000-2003), Dongkan (2003-2005) and Shache (2003-2006) considered.

3.4.3 模型的敏感性分析

以乌兰乌苏农业气象试验站2000-2003年小麦生长季的气象数据为基础, 逐个改变输入气象参数, 运行APSIM模型, 记录模拟产量, 计算相对敏感度。后续章节将分析乌兰乌苏站小麦生长季1955-2006年间年均太阳辐射、降水、最高和最低温度的变化, 50年间辐射降低了7.6%; 降雨量增加了90 mm, 增加了119.5%; 最高和最低温度分别增加了1.05和3.2 °C。设定太阳辐射±10%, 温度±1 °C, 降雨量±10%, 分析模型的相对敏感度。

表3.4为乌兰乌苏站2001-2003年各个气象要素的改变对模型模拟产量结果的影响。太阳辐射的变化对产量的影响较大, 太阳辐射降低, 光合作用降低导致产量降低, 相反太阳辐射升高, 促进光合作用进而产量升高。温度降低1 °C, 延长了作物的生育期使产量增加; 温度升高1 °C, 产量降低的幅度较高, 为4.10-8.75%, 应该是由于温度升高明显缩短了作物的生育期使作物减产。由于乌兰乌苏属于干旱地区的绿洲, 作物的生长依靠灌溉浇水, 因此降雨量的改变对作物产量的影响较小。由以上结果可以看出, APSIM模型对产量的模拟结果对太阳辐射和温度的改变敏感, 表明APSIM模型适用于在新疆地区评价气候变化对作物生产的影响。

表3.4 乌兰乌苏站APSIM模型气象要素参数敏感性分析

Table 3.4 Sensitivity analysis of APSIM model to meteorological data inputs at Wulanwushu station.

参数	改变量	产量(kg ha ⁻¹)			产量变化(%)		
		2001	2002	2003	2001	2002	2003
标准值	0	4838.4	5903.0	5742.6	0.00	0.00	0.00
太阳辐射	-10%	4477.2	5463.9	5450.1	-7.46	-7.44	-5.09
	+10%	5042.8	6204.6	5992.4	4.22	5.11	4.35
温度	-1 °C	4922.1	6168.6	5776.7	1.73	4.50	0.59
	+1 °C	4415.0	5590.0	5507.4	-8.75	-5.30	-4.10
降水	-10%	4846.0	6092.0	5594.6	0.16	3.20	-2.58
	+10%	4820.9	5812.4	5719.5	-0.36	-1.54	-0.40

3.5 结论

模型的校准和验证以及在研究区域的适用性评价是应用模型研究气候变化对作物生产影响的重要前提。试验观测资料的质量决定模型是否能够得到正确的验证结果。本章介绍了乌兰乌苏、东坎和莎车三个农业气象试验站以及田间试验概况, 田间试验及数据记录均采用国家气象局统一标准。乌兰乌苏位于北疆石河子附近, 吐鲁番东坎位于新疆中部, 莎车位于新疆南部, 代表了新疆地区不同的气候条件。

本章的目的是介绍APSIM模型, 详细验证和评价APSIM模型在新疆绿洲地区模拟作

物生产的有效性。在乌兰乌苏、东坎和莎车三个农业气象试验站对APSIM模型对冬小麦和春小麦生长发育和产量进行了校准和验证,在乌兰乌苏试验站分析模型对气象要素变化的敏感性。结论: 1. 模型能够较好的模拟三个站点的叶面积指数和地上生物量的增长动态。由于模型对新疆地区春季增温快,光照充足的气候条件敏感性不足,叶面积指数和地上生物量的模拟结果均较实测值偏低。2. 气象因素敏感性分析表明, APSIM模型在乌兰乌苏试验站对太阳辐射和温度的改变较敏感,可以应用该模型分析新疆绿洲地区气候变化对作物生产的影响。综上所述, APSIM模型在新疆地区具有较好的适用性,存在对作物的干物质积累及产量的模拟结果较实测值偏低的情况,需要进一步的研究确定原因及解决办法。

第四章 气候变化对新疆绿洲区小麦产量和水分利用的影响

摘要

本章主要内容为分析新疆乌兰乌苏、莎车和东坎试验站 1955-2006 年小麦生育期间的气候变化趋势, 在已验证 APSIM 的基础上(第三章), 利用 APSIM 模型分析研究气候变化在这三个站点对小麦生长和水分利用的影响, 并且利用聚类分析研究影响农田蒸散量变化的主要气象因素。乌兰乌苏和莎车试验站冬小麦生育期间的太阳辐射值均显著降低, 东坎试验站春小麦生育期间的太阳辐射值无明显变化趋势。乌兰乌苏站的最高温度为显著增加趋势, 东坎和莎车试验站无明显变化趋势。三个试验站的最低温度均为明显升高趋势, 且上升速率较大。乌兰乌苏试验站降雨量为显著增加趋势, 东坎和莎车无明显变化趋势, 年际间波动较大。乌兰乌苏和莎车试验站, 1955-2006 年间辐射下降, 温度升高使冬小麦生育期和蒸散量显著下降, 乌兰乌苏试验站小麦产量没有明显变化, 莎车试验站小麦产量显著下降。东坎试验站 1955-2006 年春小麦产量、生育期和蒸散量的模拟值均无明显变化趋势。乌兰乌苏和莎车试验站产量和蒸散量模拟值与气象因素相关分析结果表明, 太阳辐射是影响产量和蒸散量模拟值的变化主要因素; 生育期的变化主要受最高温度的影响, 随着温度的升高而缩短。

4.1 引言

已有越来越多的证据证明气候变化, 气温上升, 降雨模式改变以及极端气候事件发生频率增加(IPCC, 2007)。气候是作物生产和水分利用的主要驱动因子(Mohta and Baier, 2005; Lobell and Field, 2008; Harmse et al., 2009)。温度的增加以及降雨模式的改变将显著影响作物产量和水分利用效率(Kattge and Knorr, 2007)。然而, 气象因子间的相互作用以及它们对作物生产的综合影响较复杂(Dhungana et al., 2006; Walker and Schulze, 2008)。

在研究气候波动/变化对作物生产的潜在影响方面, 基于过程的作物模型被广泛应用(Keating et al., 2003; Thomson et al., 2006; Wu et al., 2006; Wang et al., 2008a, b)。然而作物模型在不同的气候条件和地区的模拟结果差异显著。通过利用水分侵蚀预测模型 WEPP, Zhang and Liu (2005) 研究表明由于降雨量的增加, 在 2070-2099 年间, 黄土高原小麦和玉米的生产力和蒸散量将显著增加。Wang et al. (2009) 利用 APSIM 模型在澳大利亚东南部研究表明温度增加对长时期的水分平衡没有影响, CO₂ 浓度的增加降

低了蒸散量。Chen et al. (2009) 研究表明华北平原在 1961-2003 年间由于太阳辐射的下降作物需水量和潜在产量显著降低。在新疆地区还没有类似研究。

新疆位于中国西北部干旱和半干旱地区，典型的三山夹两盆的地形。新疆地区日温差较大，降雨量和湿度均较低。过去 30 年气候和水循环均发生了重大改变，自从 1980 年以来北疆地区的气候模式向暖湿过渡（施雅风等，2002；2003）。绿洲的作物生长依赖于冰川消融的灌溉水。明确气候波动/变化对作物蒸散量的影响能够帮助新疆地区更有效的利用灌溉水。

本章的目的是：（1）研究气候波动/变化对小麦产量和水分利用的影响，为新疆地区提供高效管理灌溉水的建议；（2）研究不同年份气候条件下蒸散量的变化，明确蒸散量和气象因子间的关系。

4.2 材料与方方法

利用验证后的 APSIM 模型来评价 1955-2006 年间的气候波动/变化对小麦蒸散量、产量和水分利用效率的影响。设定在乌兰乌苏、东坎和莎车三个试验站，1955-2006 年间的所有年份均分别使用同一品种，分别为奎东 4 号、新春 2 号和新冬 20。品种参数均在模型校准和验证阶段得到（详见第三章）。在 APSIM 模型中设定自动灌溉，在小麦生长期间土壤含水量均保持在田间持水量的水平，即三个站点均是在充分灌溉条件下模拟小麦产量和蒸散量。

文中气象资料来自于中国国家气象局。由于缺少乌兰乌苏和东坎试验站 1955-2006 年的气象资料，分别利用相近站点石河子和吐鲁番的 1955-2006 年的气象资料分析小麦生长季内年际间的变化，在文中还是分别用乌兰乌苏试验站和东坎试验站来表示。

分析比较乌兰乌苏试验站 1955-2001 年冬小麦蒸散量的模拟结果与石河子蒸发皿蒸发量的关系，以及 1955-2006 年间的乌兰乌苏、东坎和莎车三个试验站的小麦产量和水分利用模拟结果。采用聚类分析方法来鉴定影响冬小麦生育期内蒸散量的主要气候因子。将冬小麦生育期间的蒸散量、太阳辐射、最高和最低温度、降雨量标准化，用 SPSS 16.0 聚类分析中 k-means 方法完成对数据的聚类分析。

4.3 研究区域小麦生长季内气候波动/变化

4.3.1 太阳辐射计算方法

模型需要输入的气象资料包括太阳辐射、最高和最低温度和降雨量。其中太阳辐射由相应的日照时数根据埃斯屈朗方程（杨守春等，1990）换算而成：

$$R_1 = R_A (a_A + b_A n N^{-1})$$

式中， R_1 ：实际接收的辐射 ($J m^{-2} d^{-1}$)； R_A 值，为假定没有大气时到达地面的辐

射理论值 ($J m^{-2} d^{-1}$) ; a_A : 经验系数; b_A : 经验系数; n : 每日日照时数 (h) ; N : 晴天时每天最长日照时数 (h) 。 R_A 和 N 值与一年中不同日期和纬度呈函数关系, 一般可从现成的表中查到。根据杨守春等 (1990) 书中的列表, 求出 R_A 和 N 值与纬度和日期的关系, 进而实现日照时数到太阳辐射的转换。表4.1提供了一些表征值。

表 4.1 粮农组织采用的埃斯屈朗系数的表征值

Table 4.1 Values of a_A and b_A used by FAO

地区	a_A	b_A
寒带和温带地区	0.18	0.55
干旱的热带地区	0.25	0.45
湿润的热带地区	0.29	0.42

本文中采用的值是 $a_A=0.18$ 、 $b_A=0.55$ 。将这些参数的取值代入公式, 就可以计算出这些站点逐日的太阳辐射数据。

图 4.1为利用2000和2001 年观测的太阳辐射数据与通过日照时数用公式计算得到的辐射的关系图。其相关系数均为0.97。由此可见, 该公式很好反映了吐鲁番农业气象试验站的日照时数与辐射之间的关系, 证明了该公式在新疆地区的适用性较好。

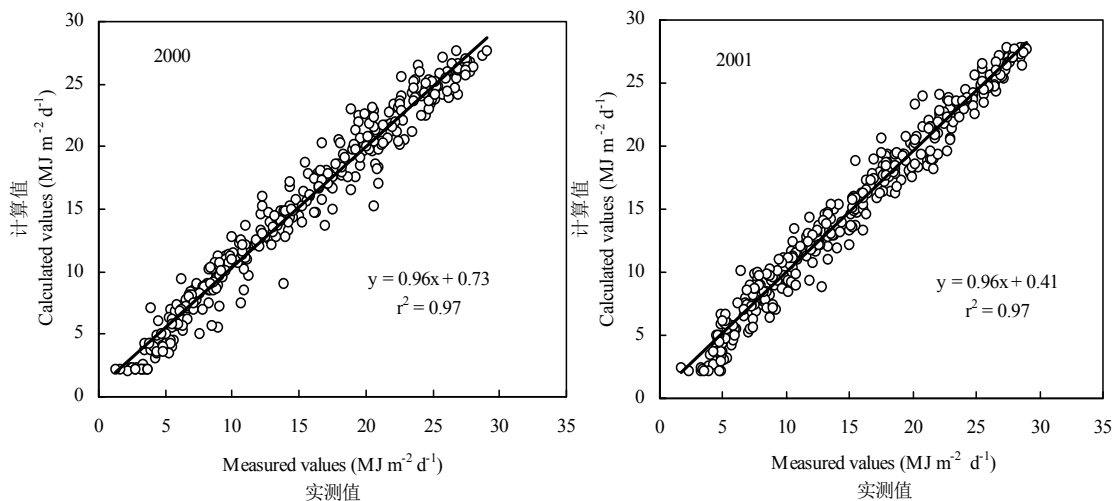


图4.1 吐鲁番气象站2000年和2001年太阳辐射的计算值和实测值比较

Fig. 4.1 Measured and calculated solar radiation at Turpan meteorological station

4.3.2 年际间小麦生长季内气候波动/变化

分析小麦生长季内年际间太阳辐射、降水、最高和最低温度的波动/变化。图 4.2 为乌兰乌苏试验站 1955-2006 年冬小麦生长季内各个气象要素的波动/变化。太阳辐射在 51 年间呈显著下降趋势, 下降速率为 $0.021 MJ m^{-2} a^{-1}$ 。最高和最低温度均是显著上升趋势

势，上升速率分别为 $0.027^{\circ}\text{C a}^{-1}$ 和 $0.064^{\circ}\text{C a}^{-1}$ ，低温的上升速度高于高温。降雨量呈显著上升趋势，速率为 1.8 mm a^{-1} 。

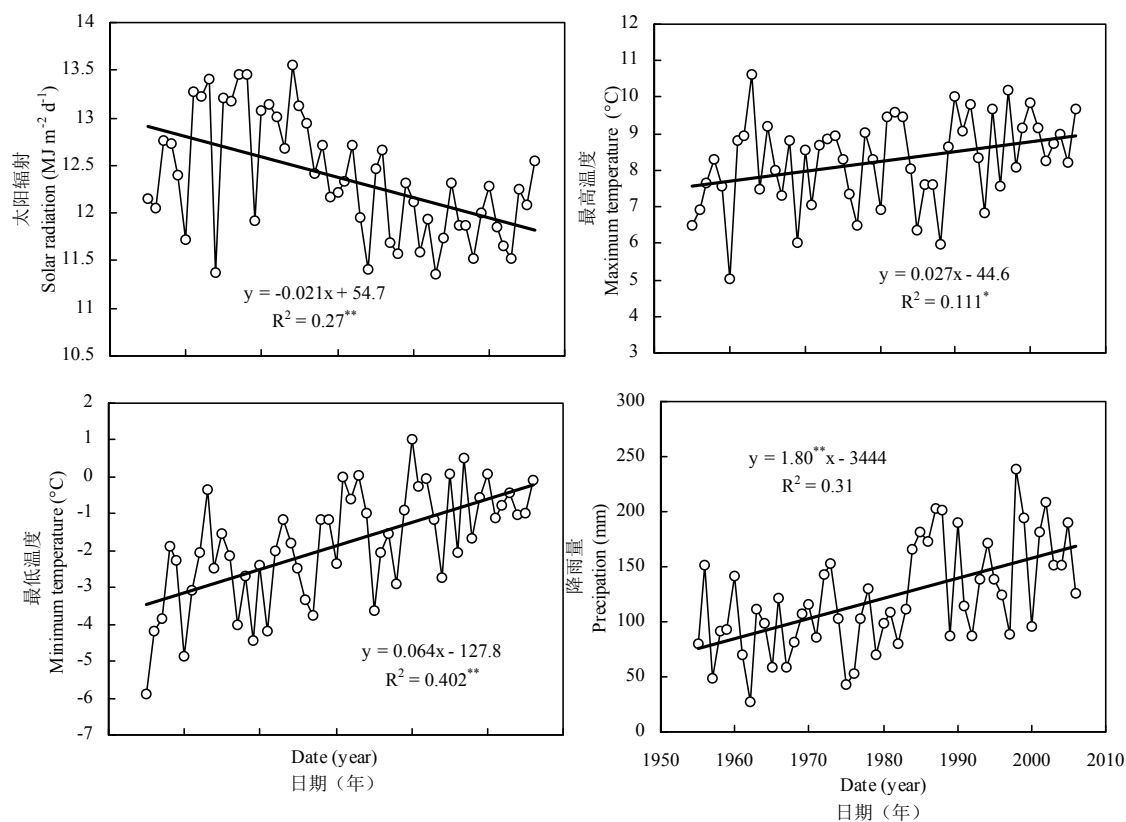


图 4.2 乌兰乌苏试验站 1955-2006 年冬小麦生长季内太阳辐射、最高和最低温度以及降雨量。直线为线性趋势。

Fig. 4.2. Solar radiation, temperature and precipitation of wheat growing seasons at Wulanwushu from 1955 to 2006. Straight lines show the linear trends. **Significant at $p < 0.01$.

图 4.3 为东坎试验站 1955-2006 年间春小麦生长季内气象要素的波动/变化趋势。太阳辐射、最高温度和降雨量均没有明显的变化趋势，年际间波动比较大。最低温度为显著升高的趋势，升高速率为 $0.062^{\circ}\text{C a}^{-1}$ 。

图 4.4 为莎车试验站 1955-2006 年间小麦生长季内各个气象要素的波动/变化趋势。太阳辐射为显著下降的趋势，下降速率为 $0.015\text{ MJ m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。最高温度和降雨量变化趋势不明显，年际间波动比较大。最低温度为显著上升趋势，上升速率为 $0.028^{\circ}\text{C a}^{-1}$ 。

分析以上结果得出，1955-2006 年小麦生育期间的乌兰乌苏和莎车试验站的太阳辐射值均显著降低；东坎试验站为春小麦，种植时期在 2 月底到 6 月中旬，生育期较短，其太阳辐射值无明显变化趋势。乌兰乌苏站的最高温度为显著增加趋势，东坎和莎车试验站无明显变化趋势。三个试验站的最低温度均为显著升高趋势，乌兰乌苏和东坎试验站最低温度上升速率明显高于莎车试验站。乌兰乌苏试验站降雨量为显著增加趋势，东坎和莎车无明显变化趋势，年际间波动较大。

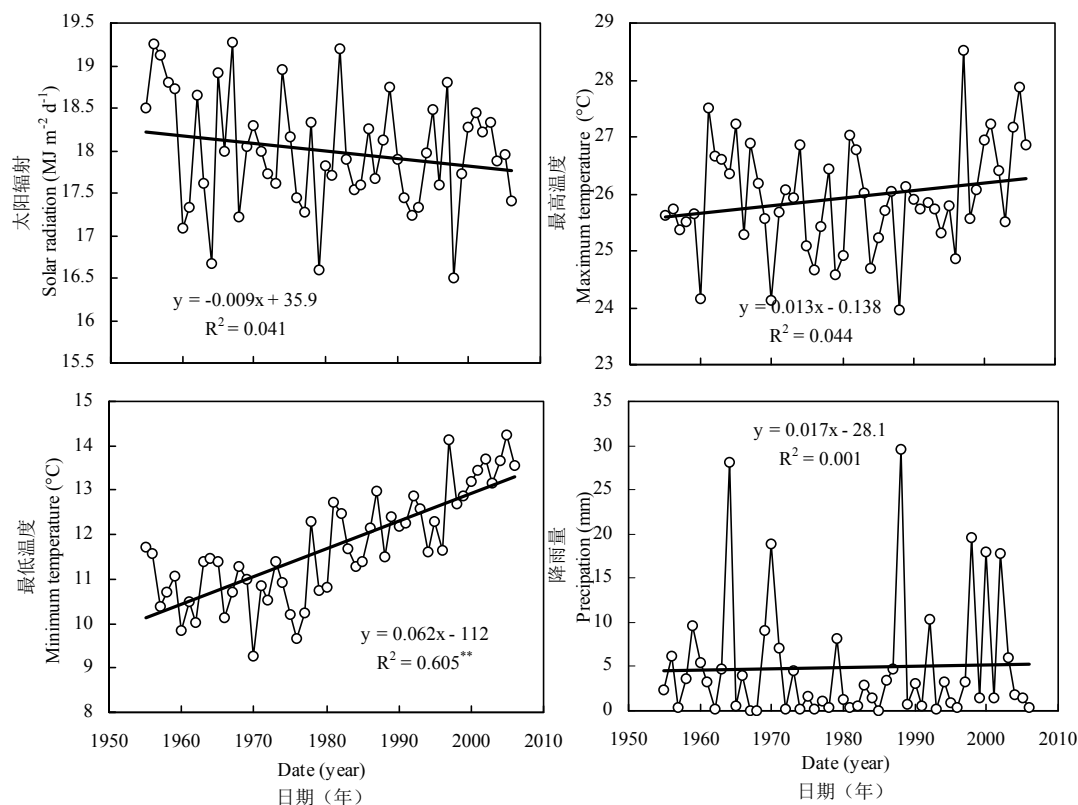


图 4.3 东坎试验站 1955-2006 年冬小麦生长季内太阳辐射、最高和最低温度以及降雨量。直线为线性趋势。

Fig. 4.3. Solar radiation, temperature and precipitation of wheat growing seasons at Dongkan from 1955 to 2006. Straight lines show the linear trends. ******Significant at $p < 0.01$.

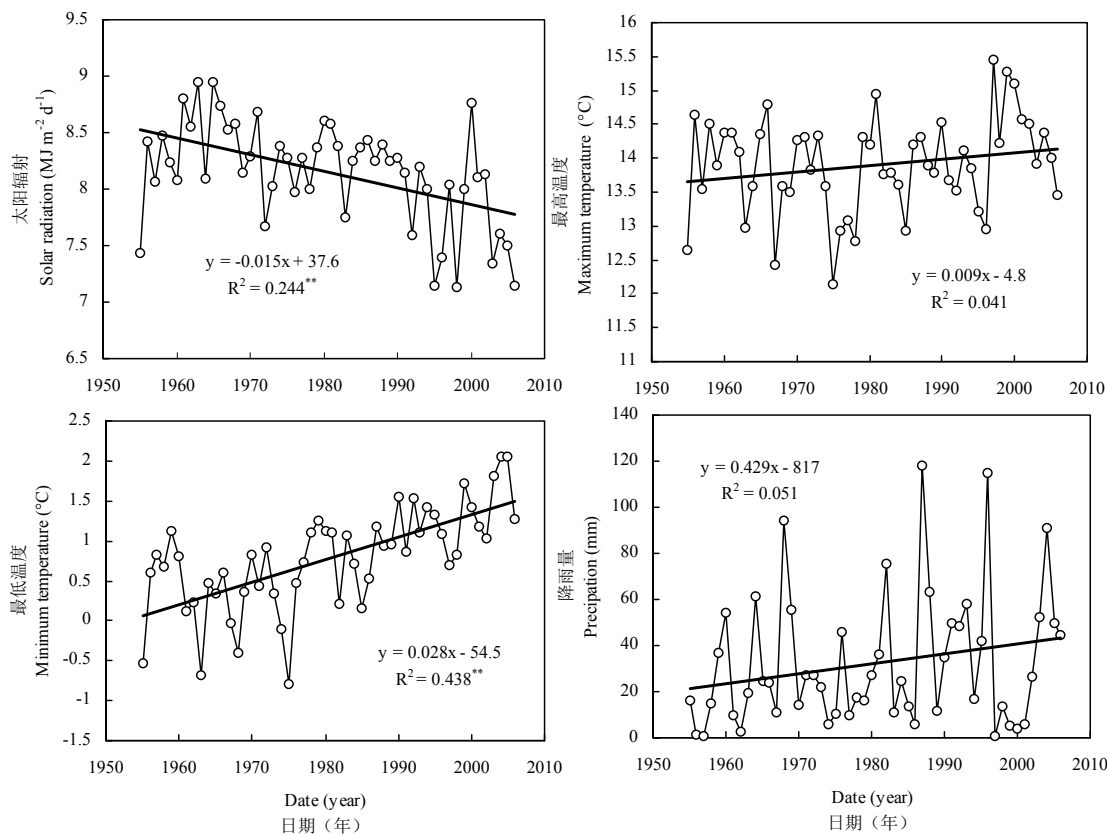


图 4.4 莎车试验站 1955-2006 年冬小麦生长季内太阳辐射、最高和最低温度以及降雨量。直线为线性趋势。

Fig. 4.4. Solar radiation, temperature and precipitation of wheat growing seasons at Shache from 1955 to 2006. Straight lines

show the linear trends. **Significant at $p < 0.01$.

4.4 气候波动/变化对小麦产量和水分利用的影响

4.4.1 蒸发皿蒸发量和模拟蒸散量的关系

由于缺少农田蒸散量的实测值，本文比较模拟蒸散量与蒸发皿蒸发量的关系，来检验模型对农田蒸散量的模拟效果。采用距离乌兰乌苏站较近的石河子气象站的蒸发皿蒸发量数据与乌兰乌苏试验站的模拟蒸散量做对比。分析逐月的月平均模拟蒸散量和蒸发皿蒸发量的关系。

模拟蒸散量和蒸发皿蒸发量为线性显著相关关系 ($p < 0.01$) (图4.4)。表明APSIM模型能够模拟出气候变化对蒸散量的影响。从图中可以看出，模拟蒸散量和蒸发皿蒸发量的关系分为两个阶段，在7月至次年2月，线性关系的斜率为0.108 (图4.4 a)，3月至6月，其斜率为0.655 (图4.5 b)。在7月至10月份，地表没有小麦生长，10月份至次年2月，小麦生育前期，LAI较低，模拟的蒸散量主要是土壤蒸发量，大概为蒸发皿蒸发量的1/10。3月至6月，为小麦的旺盛生长期，LAI较大，模拟的蒸散量超过蒸发皿蒸发量的一半。

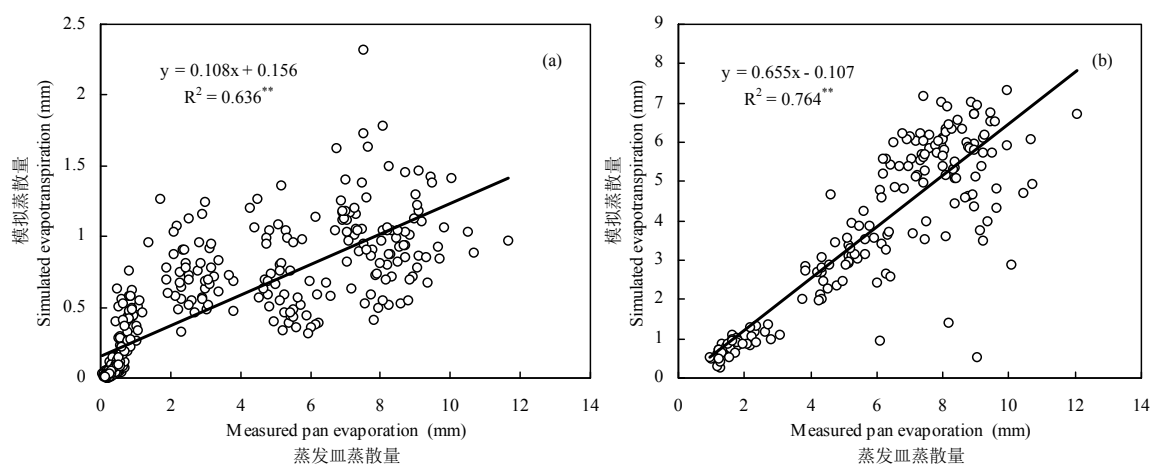


图4.5 石河子蒸发皿蒸发量与乌兰乌苏站模拟蒸散量的关系。a图为1954-2001年从7月至次年2月的逐月月平均数据，b图为1955-2001年3月至6月的月平均数据。

Fig. 4.5 Relationship between measured pan evaporation in Shihezi and simulated evapotranspiration in Wulanwushu, monthly data from July to next February during the period of 1954-2001 (a), monthly data from March to June for 1955-2001 (b). **Significant at $p < 0.01$.

4.4.2 气候变化对小麦产量和水分利用的影响

分析 1955-2006 年乌兰乌苏、东坎和莎车试验站小麦产量、生育期、蒸散量和水分

利用效率模拟值的波动及变化趋势。乌兰乌苏试验站 1955-2006 年冬小麦产量无明显变化趋势（图 4.6），冬小麦生育期为显著下降趋势，下降速率为 0.147 d a^{-1} 。冬小麦生育期间的蒸散量为显著下降趋势，速率为 0.813 mm a^{-1} ；冬小麦水分利用效率无明显变化趋势。表明在乌兰乌苏试验站，1955-2006 年间温度升高导致冬小麦生育期缩短；虽然温度为升高趋势，但是辐射下降和降雨量升高导致冬小麦生育期间的蒸散量显著下降，气候变化趋势对冬小麦产量没有明显影响。

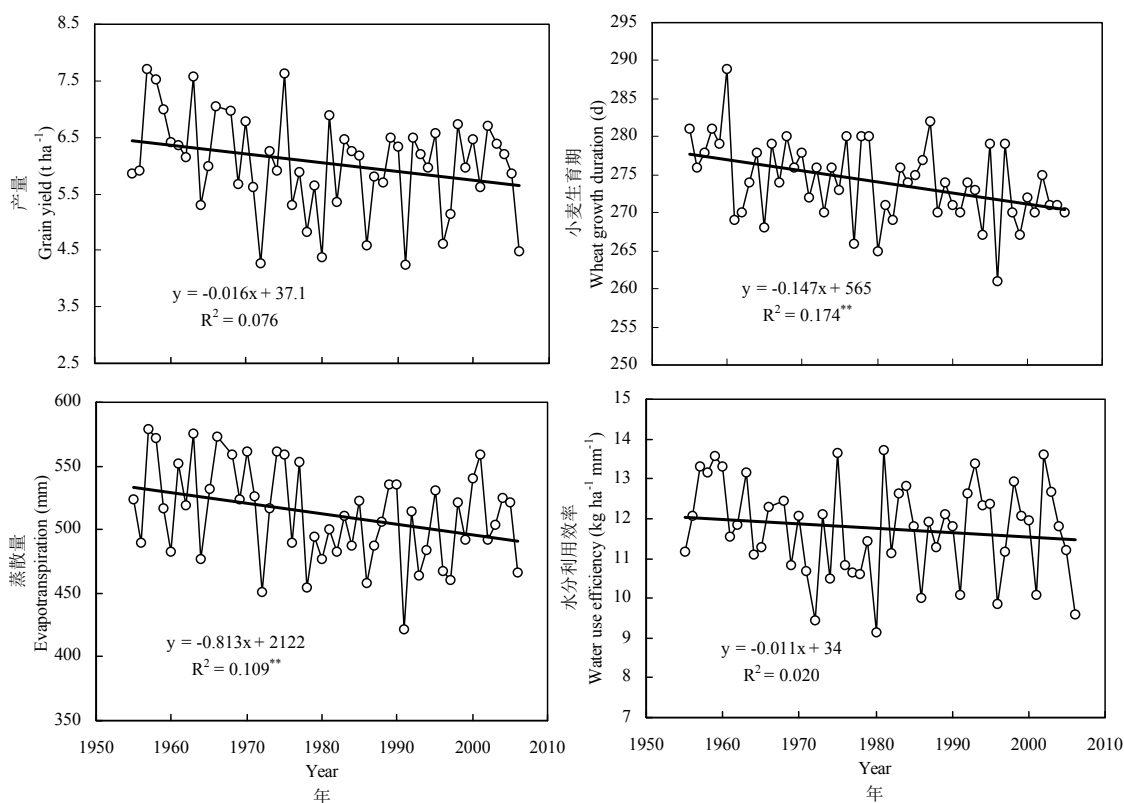


图 4.6 乌兰乌苏站 1955-2006 年小麦产量、生育期、蒸散量的模拟值，以及小麦水分利用率波动/变化趋势

Fig. 4.6. Simulated grain yield, wheat growth duration, evapotranspiration and water use efficiency during winter wheat growing seasons from 1955 to 2006 at Wulanwushu station. Straight lines show the linear trends. ** Significant at $p < 0.01$.

东坎试验站 1955-2006 年春小麦产量、生育期和蒸散量的模拟值均无明显变化趋势（图 4.7）。表明虽然 1955-2006 年间春小麦生育期内最低温度为增加趋势，但是太阳辐射和降雨量没有变化趋势，这种气候变化对春小麦的生产无明显影响。

莎车试验站 1955-2006 年的冬小麦产量为显著下降趋势（图 4.8），下降速率为 $0.009 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ；冬小麦生育期和蒸散量也均为显著下降趋势，下降速率分别为 0.111 d a^{-1} 、 0.557 mm a^{-1} 。水分利用效率年际间波动较大，无明显变化趋势。表明莎车试验站 1955-2006 年最低温度升高导致冬小麦生育期缩短；太阳辐射降低导致产量和蒸散量显著降低，对小麦水分利用效率无明显影响。

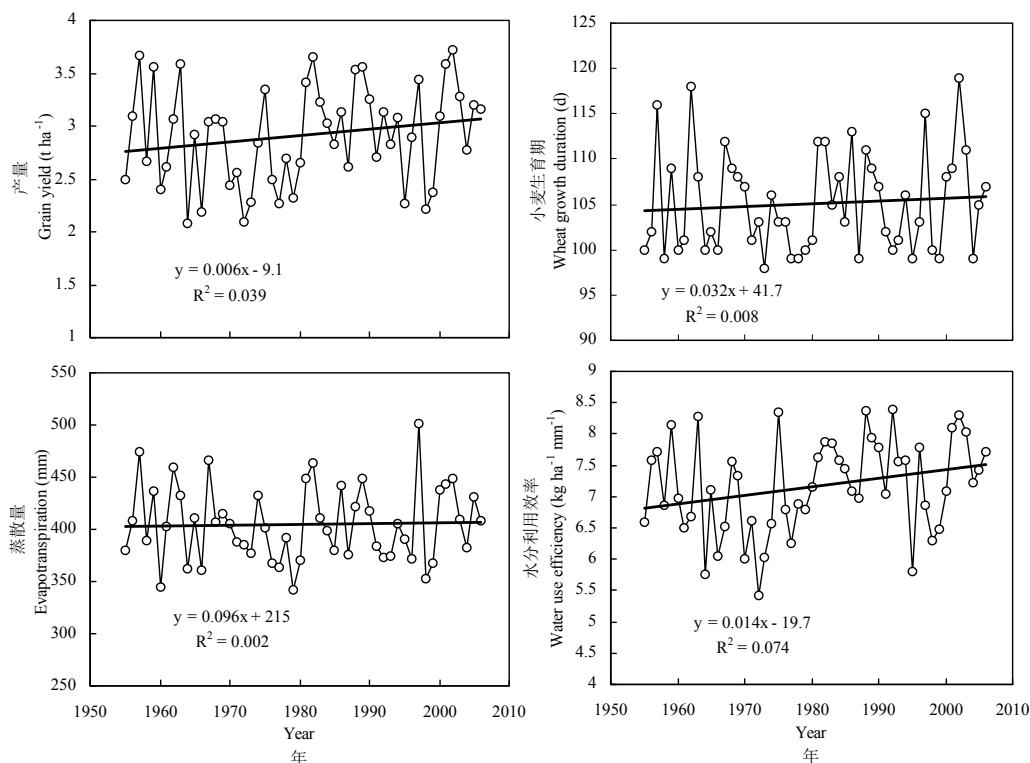


图 4.7 东坎试验站 1955-2006 年小麦产量、生育期、蒸散量的模拟值，以及小麦水分利用率波动/变化趋势
 Fig. 4.7. Simulated grain yield, wheat growth duration, evapotranspiration and water use efficiency during spring wheat growing seasons from 1955 to 2006 at Dongkan station. Straight lines show the linear trends. ** Significant at $p < 0.01$.

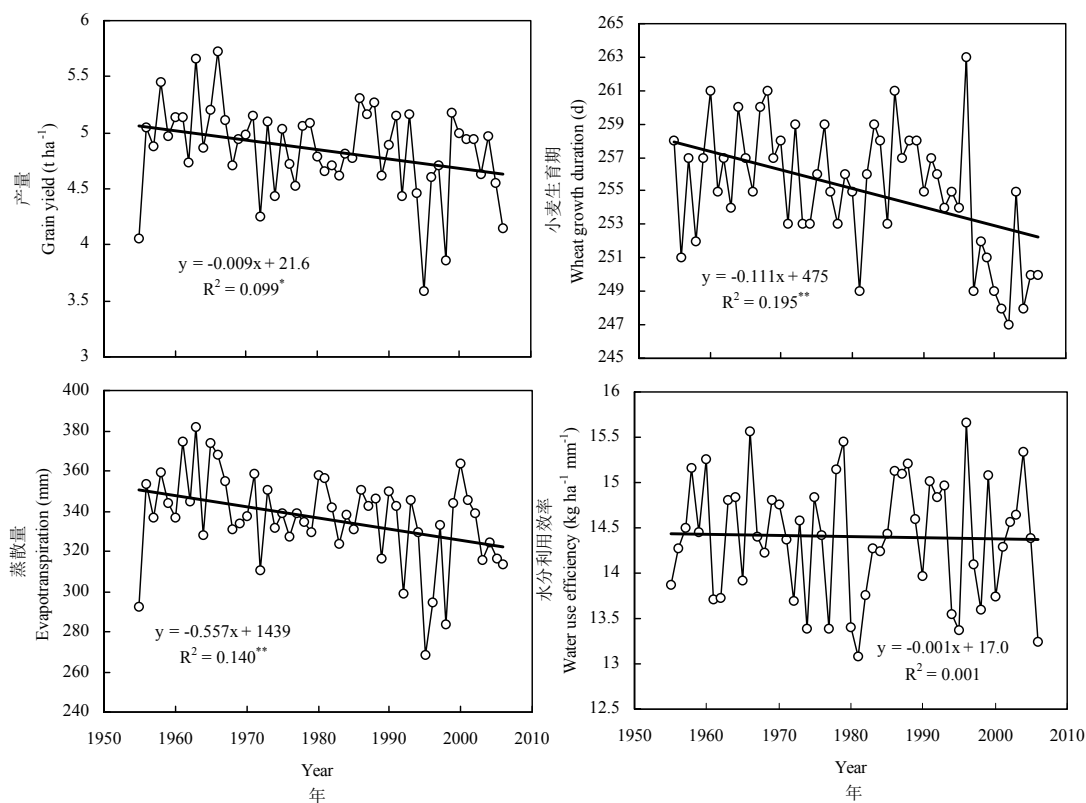


图 4.8 莎车试验站 1955-2006 年小麦产量、生育期、蒸散量的模拟值，以及小麦水分利用率波动/变化趋势
 Fig. 4.8. Simulated grain yield, wheat growth duration, evapotranspiration and water use efficiency during winter wheat growing seasons from 1955 to 2006 at Shache station. Straight lines show the linear trends. ** Significant at $p < 0.01$.

分析乌兰乌苏和莎车试验站 1955-2006 年小麦产量、蒸散量、水分利用效率和生育期与太阳辐射、最高和最低温度和降雨量的相关关系（表 4.2）。产量、蒸散量、水分利用效率和生育期的模拟值的变化与 4 个气象因素间均有显著相关关系。太阳辐射、最高和最低温度以及降雨量之间相关关系显著。从相关系数的大小来看，产量和蒸散量与太阳辐射的相关系数绝对值最大，为正相关关系，因此太阳辐射的下降导致了产量和蒸散量的下降。水分利用效率与太阳辐射和最高温度的相关系数绝对值相近，与太阳辐射为负相关关系与最高温度为正相关关系。生育期与最高温度的相关系数绝对值最大，为负相关关系，随着温度的升高生育期缩短。

表 4.2 乌兰乌苏和莎车试验站 1955-2006 年间小麦产量、蒸散量（ET）、水分利用效率（WUE）和发育期的模拟值与太阳辐射（Ra）、最高温度（Tmax）、最低温度（Tmin）、降雨量的相关系数（n=104）。

Table 4.2 Correlations between simulated wheat yield, evapotranspiration (ET), water use efficiency (WUE) and growth duration (Duration) and solar radiation (Ra), maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), rainfall in wheat season at Wulanwushu and Shache from 1955 to 2006 (n = 104).

	Tmax	Tmin	Rainfall	Yield	ET	WUE	Duration
Ra	-0.897**	-0.767**	0.650**	0.647**	0.951**	-0.784**	0.877**
Tmax		0.874**	-0.732**	-0.576**	-0.875**	0.745**	-0.953**
Tmin			-0.466**	-0.531**	-0.746**	0.585**	-0.835**
Rain				0.398**	0.645**	-0.581**	0.724**
Yield					0.798**	-0.093	0.587**
ET						-0.671**	0.855**
WUE							-0.689**

** Significant at $P < 0.01$.

4.4.3 影响蒸散量变化的主要气象因素

乌兰乌苏和莎车试验站的蒸散量在 1955-2006 年间显著下降，本文采用快速聚类法分析明确影响农田蒸散量变化的主要气象因素。两个试验站 52 个年份分别聚为 4 类（表 4.3）。乌兰乌苏试验站，类别 A、B 和 C、D 相比，太阳辐射高降雨量低的年份蒸散量高，太阳辐射低降雨量高的年份蒸散量低。4 个类别中蒸散量和温度的关系不明显。莎车试验站，随着太阳辐射的增加，蒸散量依次增加，D 类的蒸散量显著低于其余三类，其降雨量显著高于其余三类。由此可见，与蒸散量关系最密切的是太阳辐射，为正比例关系。乌兰乌苏和莎车两个试验站相比，乌兰乌苏试验站的太阳辐射和降雨量高于莎车试验站，平均温度低于莎车站；其冬小麦产量和生育期显著高于莎车站，因此其蒸散量显著高于莎车站。

表 4.3 乌兰乌苏和莎车试验站冬小麦生育期间的蒸散量、太阳辐射、最高和最低温度、平均温度和降雨量。A、B、C、D 代表 4 个不同的类别，n 是每种类别中的年份数

Table 4.3 Mean values of evapotranspiration (ET), solar radiation (Ra), maximum (Tmax) and minimum (Tmin) temperatures, mean temperature (T), and precipitation during winter wheat growth stages. A, B, C, and D represent four different clusters. n is the number of data for each cluster.

	类别		蒸散量	太阳辐射 Ra	最高温度	最低温度	平均温度	降雨量
	Clusters	n	ET (mm)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	T (°C)	Precipitation (mm)
乌兰 乌苏	A	14	544	13.0	9.0	-1.6	3.7	96
	B	10	519	12.7	7.1	-3.7	1.7	77
	C	14	492	11.8	7.3	-2.3	2.5	171
	D	14	487	12.1	9.3	-0.3	4.5	132
莎车	A	10	350	8.6	13.4	-0.1	6.7	27
	B	20	348	8.3	14.5	1.0	7.7	24
	C	13	327	8.0	13.4	0.7	7.1	27
	D	9	306	7.5	13.8	1.5	7.6	64

4.5 结论与讨论

本章研究了气候波动/变化对新疆绿洲地区小麦生长、产量和水分利用的影响。在乌兰乌苏试验站，1955-2006 年冬小麦生长季太阳辐射降低 ($0.021 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)，最高 (0.027 °C a^{-1}) 和最低 (0.064 °C a^{-1}) 温度增加趋势下，在不考虑作物品种改变的充分灌溉条件下，小麦生育期为显著下降趋势 (0.147 d a^{-1})，作物蒸散量以 0.813 mm a^{-1} 的速度下降。在莎车试验站，太阳辐射为显著下降的趋势 ($0.015 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)，最低温度为显著上升趋势 (0.028 °C a^{-1})；冬小麦产量为显著下降趋势 ($0.009 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)，小麦生育期和蒸散量也均为显著下降趋势，下降速率分别为 0.111 d a^{-1} 、 0.557 mm a^{-1} 。这个研究结果与其他相似研究的结果类似。太阳辐射的下降和最低温度的增加将导致印度地区小麦潜在产量的减产 (Pathak et al., 2003; Aggarwal et al., 2003)。

Chen et al. (2009) 在华北平原研究发现从 1961 到 2003 年冬小麦产量下降，水分需求也在下降，下降速率为 2.3 mm a^{-1} 。需水量下降的值高于本文的结果，可能是由于 Chen et al. 的研究区域太阳辐射下降的幅度 ($6.2\text{-}13.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 高于本文的研究站点。Mo et al. (2009) 利用植物界面过程 VIP 模型，设定固定的光合能力，研究发现 1951-2006 年小麦产量显著增加，蒸散量无明显变化。本文在绿洲地区的研究结果为冬小麦的蒸散量显著下降，结果的差异也许是由于本研究中没有考虑 CO_2 浓度的增加。虽然到 2050 年温度的上升和土壤含水量的降低将导致全球作物产量降低， CO_2 浓度上升的肥效作用将抵消这些损失 (Ewert et al., 2002; Long et al., 2006)。

在气象要素变化和 CO_2 浓度增加的情况下，蒸散量的变化是复杂的。前人的研究

结果存在较大差异。由 NCAR 联合陆地模型 (CLM) 模拟的过去半个世纪的新疆地区的实际蒸散量增加, 蒸发皿蒸发量逐年降低 (Liu et al., 2009)。Goyal (2004) 利用彭曼公式计算印度 1971-2002 年的参考作物蒸散量, 结果表明参考作物蒸散量对温度的增加较敏感, 对太阳辐射和风速的增加不敏感。有更多的研究表明过去 50 年相对蒸散量为降低趋势, 主要是由于风速和日照时数的降低 (Tong et al., 2007; Li et al., 2008; Zhang et al., 2009)。在不考虑 CO₂ 浓度增加的本研究的模拟结果表明, 在 1955-2006 年间新疆绿洲地区的小麦蒸散量的变化主要受太阳辐射变化的影响。蒸散作为水分循环的重要环节, 明确其对气象要素变化的响应, 将会影响到作物的水分需求和未来的水资源管理。

第五章 太阳辐射降低对小麦产量和水分利用的影响

摘要

由于工业化进程导致的过去 50 年世界上的许多区域太阳辐射的下降,被称为“全球变暗”。本文利用 APSIM 模型评估了过去几十年太阳辐射下降对小麦产量和水分利用的影响。选北京、济南、成都和乌鲁木齐作为代表中国四种不同气候类型的四个研究站点。过去几十年太阳辐射的下降同时伴随着温度的上升。北京、济南、成都和乌鲁木齐 1961-2009 年间小麦生长季的太阳辐射下降速率分别为-0.061、-0.042、-0.059 和-0.026 MJ m⁻² a⁻¹, 其最低温度均为显著升高趋势。模拟结果表明北京和济南的小麦产量无明显变化趋势,然而成都的模拟产量显著下降。太阳辐射的变化解释了成都产量变化的 73.6%。过去几十年乌鲁木齐的模拟产量显著增加,主要由于最低温度和降雨量的增加。蒸散量模拟值随着太阳辐射的降低而下降。北京、济南和乌鲁木齐的水分利用效率增加,成都无明显变化。在较高水平下的太阳辐射降低对产量无影响并提高水分利用效率,在较低水平下的太阳辐射降低导致籽粒产量显著下降。

关键词: 太阳辐射、小麦产量、蒸散量、水分利用效率、APSIM

5.1 引言

5.1.1 太阳辐射的变化

不少研究表明全球范围内太阳辐射均出现降低现象。Stanhill and Cohen (2001) 研究表明世界范围内太阳辐射以每年 0.27% (0.51 W m⁻² a⁻¹) 的速度 (在 1958、1965、1975 和 1992 年的基础上) 下降,在这篇文章中他们首先提出“全球变暗”这个词来描述大范围内太阳辐射降低的现象。Liepert (2002) 报道在世界范围内分布站点的平均太阳辐射在 1961-1990 年间下降了 7 W m⁻² (4%)。许多报道研究了中国的太阳辐射变化情况。Liang and Xia (2005) 研究发现中国 42 个观测站点中有 38 个在 1961-2000 年间太阳辐射为下降趋势,每年下降 0.33% (约等于 0.5 W m⁻² a⁻¹)。Che et al. (2005) 研究了 1961-2000 年间中国 64 个站点,发现太阳辐射下降趋势为 0.45 W m⁻² a⁻¹, Qian et al. (2007) 报道 1955-2000 年间中国 85 个站点的太阳辐射下降趋势为 0.31 W m⁻² a⁻¹。Shi et al. (2008) 过滤掉不合格的数据后依然发现 1955-2000 年间太阳辐射为 0.25% a⁻¹ 的下降趋势,其中 1961-1989 年间下降趋势最明显为 0.46% a⁻¹。大多数研究者把太阳辐射的降低归因于气溶胶的增加。

不少研究表明太阳辐射在1990年后出现上升趋势。Wild et al. (2005) 分析1992-2002年间世界各地太阳辐射变化, 发现了平均以 $0.66 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的速率上升。中国也在90年代后发现了太阳辐射的上升趋势(Liang and Xia, 2005; Che et al., 2005; Qian et al., 2007; Shi et al., 2008)。另一方面, 在印度太阳辐射一直呈现下降趋势(Padma Kumari et al., 2007), 他们研究了1984-2001年的12个站点, 表明太阳辐射在所有的站点均为下降趋势, 平均每年下降 0.86 W m^{-2} 。

5.1.2 太阳辐射降低对小麦产量和水分利用的影响

太阳辐射对蒸发皿蒸发的影响。在能量限制的环境中太阳辐射是蒸发的主要驱动因素。蒸发皿蒸发量被广泛用来评估潜在蒸发。Roderick and Farquhar (2002) 指出蒸发皿蒸发的下降与1960-1990年间的太阳辐射下降符合。中国的蒸发皿蒸发与太阳辐射近几十年间的变化趋势一致(Liu et al., 2004b; Qian et al., 2007), 1960-1990年为下降趋势, 1990年后呈现上升趋势。Roderick and Farquhar (2004) 指出蒸发皿蒸发量的下降不仅限制在北半球, 在澳大利亚也出现了蒸发皿蒸发量的下降。然而有些研究指出, 除了辐射下降外风速的下降也是蒸发皿蒸发量下降的主要原因(Roderick et al., 2007)。同样, Cohen et al. (2002) 在以色列的研究表明风速和水汽压差的增加比太阳辐射的降低对蒸发皿蒸发量的长期变化影响更大。

太阳辐射的下降和组份变化对植物的生长、蒸散量和水分利用效率具有重要影响。可以利用作物模型定量研究气候对作物生理和土壤过程的影响。Chen et al. (2009) 在华北平原的研究表明由于太阳辐射的下降作物的潜在产量和水分需求显著下降。在欧洲的多个区域小麦的水分需求下降归因于由温度升高导致的生育期的缩短和全球太阳辐射下降导致的蒸发需求的降低(Supit et al., 2010)。一些研究结果表明温度的上升导致了籽粒产量的变化。Alexandrov and Hoogenboom (2000) 在目前的 CO_2 水平下报道, 高温和降雨量降低导致冬小麦产量下降。在印度西北部利用 CERES-wheat 模型模拟雨养条件下小麦产量, 结果表明产量与季节性降雨量高度相关。Lobell and Field (2007) 报道生长季温度和降雨量的变化可以解释全球6种主要作物的平均产量30%的年际变化。

观测到的辐射下降对作物生长和农业生产力的影响。一些模型模拟结果表明作物产量和蒸散量随着辐射的下降成比例的降低, 然而一些试验结果并不支持这个结论。试验结果表明许多作物由于耐阴性和水分胁迫的降低对辐射的变化并不敏感, 尤其在辐射水平较高和气候干旱的条件下(Stanhill and Cohen, 2001)。在高光子通量密度条件下, 叶片光合作用的主要限制因子是 CO_2 浓度; 但是当光子通量密度下降到饱和光的30%时, 光合作用变为光限制(Taiz and zeiger, 1991)。作物在高光强的条件下对太阳辐射的变化不敏感。作物冠层由上下几个叶片层次组成, 辐射在冠层中将由上至下呈指数下降, 光强水平较低时, 冠层光合作用将受到光限制。

在许多地点和时间植株的活性受土壤可用水和植株传输水到叶片的能力的限制。植株在高光强的条件下，叶片气孔传导率下降，气体交换减少。太阳辐射热负荷的降低可以促使叶片传导率和光合作用的增加。理论和试验研究表明伴随着散射辐射比例增加的直接辐射的少量降低，将会显著增加光合作用（Rodriguez and Sadras, 2007），因而增加作物生产力。但是辐射降低同时还伴随着温度升高，降雨模式（量和时间）的变化，小麦生长过程中受到的影响总是这些气象因素的综合作用。

小麦是中国的主要粮食作物。在中国的东北、西北、华北平原和西南均有大面积分布，不同地区的小麦生产受不同的气候因素限制。西北地区较干旱，太阳辐射较高，也许太阳辐射不是限制小麦产量的因素，然而西南地区太阳辐射较低，很可能限制了产量形成。在低光强条件下，光合作用-光响应曲线很陡，作物生长对光强的变化较敏感，但是对接近光饱和点的光强变化不敏感。在不同的温度水平下，温度的增加可能对小麦产量产生不同的影响。

升温和变暗对小麦生长的动态影响是复杂的。本文将研究中国过去几十年在不同气候背景下的气候变暖和全球变暗对小麦产量、蒸散量和水分利用效率的交互影响。本文的目的为：1) 检验和验证 APSIM 模型的适用性，模拟温度和太阳辐射变化的交互影响；2) 量化过去几十年小麦产量和水分利用对气候变化的响应。

5.2 材料和方法

5.2.1 研究地点和气候

选择北京（39.8 °N, 116.5 °E）、济南（36.7 °N, 117 °E）、成都（30.7 °N, 104 °E）和乌鲁木齐（43.8 °N, 87.7 °E）作为历史时期太阳辐射降低对小麦产量和水分利用影响的研究地点。四个地点的太阳辐射以及过去几十年的变化均有各自的特点，代表了中国四种不同气候条件下的太阳辐射变化模式。北京是中国太阳辐射下降最多的城市之一，济南的太阳辐射为下降趋势，下降量低于北京；成都的太阳辐射值较低，下降较多；乌鲁木齐的太阳辐射下降较少。选择这四个地点同时由于这四个站点 1961-2009（成都是 1961-2003 年）完整的气象要素数据，包括逐日的太阳辐射、最大和最小温度以及降雨量。气象数据由中国气象局提供。

图 5.1 为北京、济南、成都和乌鲁木齐四个地点每个月的最大最低温度、太阳辐射和降雨量的平均值。除了 8 月、12 月和 1 月，成都每个月的太阳辐射值低于其他三个试验点，在小麦生长旺季的 3、4、5 月份均明显低于其他试点。从 11 月份至次年 3 月份，最高温度的大小依次为，成都 > 济南 > 北京 > 乌鲁木齐。4 月份至 10 月份，四个地点最高温度相似（乌鲁木齐 4、5、9、10 月份低于其他三个试点）。从 9 月至次年 4 月份，四个试点的最低温度大小排序为，成都 > 济南 > 北京 > 乌鲁木齐。5 月至 8 月，乌鲁木齐的最低温度依然低于其他三个试点。5 月至 10 月的降雨量高于其他月份。

小麦生长旺季的 3、4、5 月份成都的降雨量最高。

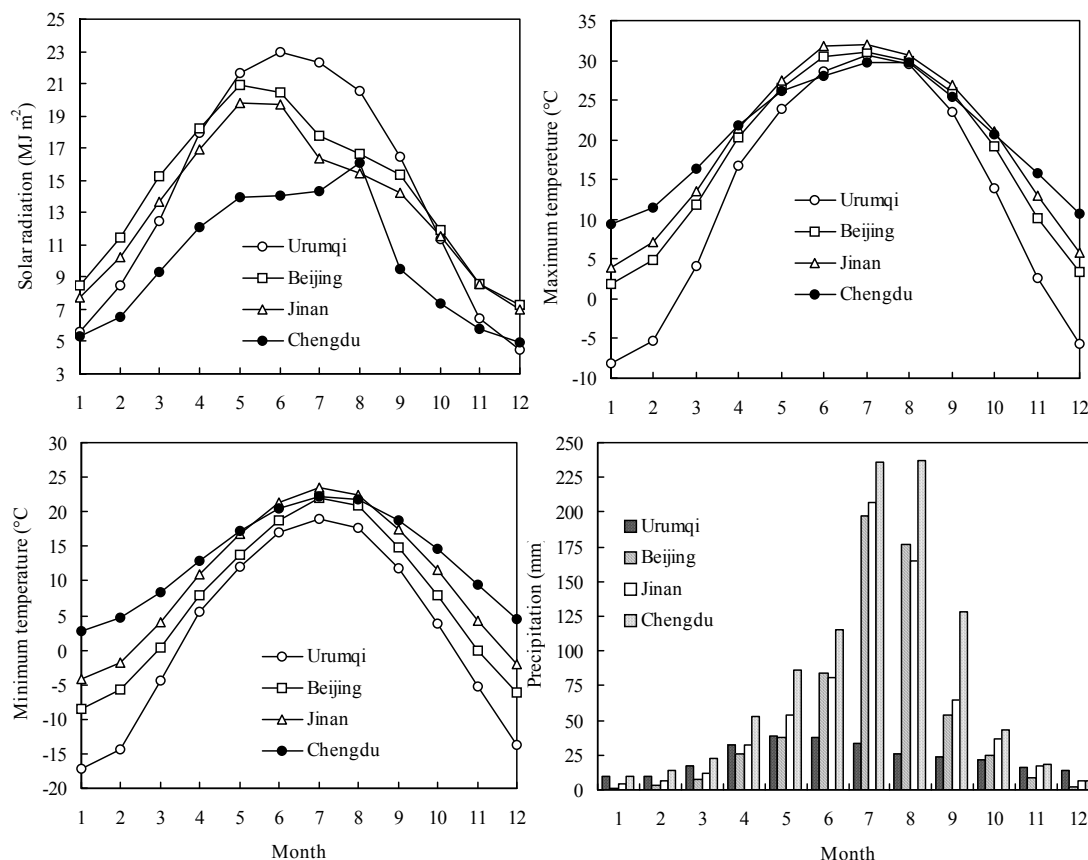


图 5.1 乌鲁木齐（1961-2009）、北京（1961-2009）、济南（1961-2009）和成都（1961-2003）每个月的最大最低温度、太阳辐射和降雨量的平均值。

Fig. 5.1 Every month's mean values of maximum and minimum temperature, solar radiation and precipitation at Urumqi (○—; 1961-2009), Beijing (□—; 1961-2009), Jinan (Δ—; 1961-2009) and Chengdu (●—; 1961-2003).

5.2.2 试验数据

用栾城农业生态试验站（37.9 °N, 114.7 °E）、盐亭农业生态试验站（31.3 °E, 105.5 °N）和乌兰乌苏农业气象试验站（44.3 °N, 85.8 °E）的田间实验数据来验证模型。数据来源见表 5.1。实验观测数据包括小麦生长期间的生育阶段、LAI、生物量、籽粒产量和蒸散量数据。三个试验站的土壤特性，包括土壤密度、饱和含水量、田间持水量和植物可利用水下线列于表 5.2 中。栾城位于北京和济南之间，其模型验证参数可应用于北京和济南过去 49 年模拟分析，盐亭和乌兰乌苏得到的模型参数可分别应用于成都和乌鲁木齐历史时期气候变化对小麦产量和水分利用的模拟研究中。

栾城、乌兰乌苏和盐亭均有 3 年的试验数据用于模型验证，三个地点的播种期、施肥和浇水的日期和量列于表 5.3 中。三个地点的播种期主要是由当地的温度决定，当平均气温降到 10 °C 左右时开始播种。小麦生长期施肥两次，一次在播种期一次在拔节

期左右。当土壤含水量低时会灌水，在盐亭试验站没有灌水。

三个试验站的逐日气象数据，最高和最低温度、太阳辐射和降雨量由自动气象站记录。栾城、盐亭和乌兰乌苏的小麦品种分别为高优 503、01-3507 和奎东 4 号。从采样区随机选取 10 株小麦测量 LAI。把样品在烤箱中烘烤 8-10 个小时得到干物质。栾城试验站每日的实际蒸散量由大型蒸渗仪测定，精度为 0.02 mm。

表 5.1 模型验证的实验数据来源

Table 5.1 Experimental sites used for model calibration.

Location	Latitude	Longitude	Soil type	Yearly rainfall ^a (mm)	Season rainfall ^b (mm)	Years	Source
Luancheng	37.9	114.7	Sandy loam	353	93	1998-2001	Chen C. et al., 2010 Chinese Ecosystem Research Network Yang X.Y. et al., 2011
Yanting	31.3	105.5	Silt loam	770	154	2004-2007	
Wulanwusu	44.3	85.8	Sandy loam	236	179	2000-2003	

^aAverage annual rainfall of four years

^bAverage rainfall of three wheat growth seasons

表 5.2a 栾城试验站土壤密度 (BD)、饱和含水量 (SAT)、田间持水量 (DUL) 和植物可利用水下线 (LL)。

Table 5.2a Soil characteristics at Luancheng, with lower limit for bulky density (BD), saturation (SAT), drained upper limit (DUL), and plant available soil water (LL).

Soil depth (cm)	0-10	10-20	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150
BD (g/cm ³)	1.37	1.37	1.32	1.31	1.34	1.37	1.37	1.37
SAT (mm/mm)	0.44	0.46	0.43	0.43	0.44	0.44	0.48	0.48
DUL (mm/mm)	0.36	0.35	0.33	0.34	0.34	0.34	0.39	0.39
LL (mm/mm)	0.1	0.11	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14

表 5.2b 乌兰乌苏和盐亭试验站土壤密度 (BD)、饱和含水量 (SAT)、田间持水量 (DUL) 和植物可利用水下线 (LL)。

Table 5.2b Soil characteristics at Wulanwusu and Yanting, with lower limit for bulky density (BD), saturation (SAT), drained upper limit (DUL), and plant available soil water (LL).

Soil depth (cm)	Wulanwusu						Yanting					
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-120	120-200	0-10	10-40	40-70	70-100	100-130	130-160
BD (g/cm ³)	1.26	1.28	1.28	1.33	1.34	1.34	1.36	1.4	1.42	1.43	1.45	1.46
SAT (mm/mm)	0.44	0.46	0.43	0.45	0.41	0.41	0.48	0.47	0.46	0.44	0.45	0.44
DUL (mm/mm)	0.33	0.33	0.3	0.3	0.26	0.26	0.42	0.4	0.41	0.39	0.41	0.42
LL (mm/mm)	0.1	0.11	0.14	0.14	0.14	0.14	0.1	0.11	0.11	0.13	0.15	0.16

表 5.3 栾城、乌兰乌苏和盐亭的小麦生长期间的播种期、施肥和灌水日期和量。

Table 5.3 Sowing date, fertilize date and amount, irrigation date and amount at Luancheng, Wulanwusu and Yanting during three wheat growth seasons for APSIM calibration.

	Sowing date	Fertilize date	Fertilize amount (kg ha ⁻¹ NO3 N)	Irrigation date	Irrigation amount (mm)
Luancheng	2 Oct.	25 Sep.	200	1 Dec.	40
		20 Apr.	200	5 Apr.	104
				25 Apr.	102
				10 May.	104
				20 May.	80
Wulanwusu	26 Sep.	25 Sep.	300	27 Sep.	105
		12 Apr.	300	16 Oct.	90
				10 Nov.	130
				15 Apr.	90
				8 May.	105
				25 May.	105
Yanting	27 Oct.	25 Oct.	200	12 Jun.	105
		21 Mar.	200		

5.2.3 模型的验证

每个小麦生长季播种前 5 天土壤剖面的水分和 N 含量按照测量值被初始化。APSIM NWheat 模型没有考虑雪对作物的覆盖影响，0 °C 以下的温度将使叶面积降低。模拟过程中，长时期的 0 °C 以下的温度将会终止作物模拟。为了避免在寒冷冬季作物模拟的终止，把所有低于 0 °C 的温度用 0 °C 替代后进行模拟。

基于三个试验站的田间试验数据，NWheat 模型经验证后小麦参数见表 5.4。控制小麦生育期的参数 (plv, pld, p5) 由观测的小麦开花期和成熟期来调整，控制小麦产量形成的参数 (Grno, Fillrate, stmw) 通过观测的小麦 LAI，生物量和产量来调整。通过参数 sla 可以调整 LAI。决定作物蒸散量的两个土壤参数 U (第一个阶段的土壤蒸发系数) 和 cona (第二个阶段的土壤蒸散系数)，根据三个站点的土壤特性两个值分别设定为 7 和 3.5。

比较三个试验站所有生长季的模拟值与实测值来评价模拟效果。用通过原点的回归直线 (1:1 线) 的斜率和决定系数 (r^2) 以及均方根偏差 (RMSD) 来评价模型的模拟效果。

表 5.4 栾城、盐亭和乌兰乌苏的小麦参数

Table 5.4 wheat parameters at Luancheng (gaoyou 503), Yanting (01-3570) and Wulanwusu (kuidong 4).

Parameter	gaoyou 503	01-3570	kuidong 4
plv: Sensitivity to vernalisation (1-5)	3.5	3.0	3.3
pld: Sensitivity to photoperiod (1-5)	2.8	3.2	2.5
p5: Thermal time (base 0°C) from end-ear growth to maturity (°C d)	560	680	650
Grno: Coefficient of kernel number per stem weight at the 'beginning of grain filling' (kernel (g stem) ⁻¹).	20	25	27
Fillrate: Maximum kernel growth rate (mg kernel ⁻¹ d ⁻¹)	2.0	2.5	2.5
stmwt: Potential final dry weight of a single stem, excluding grain (g stem ⁻¹).	3	3	3
phylo: Phyllochron interval (°C d (leaf appearance) ⁻¹)	95	95	95
sla: specific leaf area	225	245	300

5.2.4 模拟过去几十年气候变化对小麦产量和水分利用的影响

在栾城站验证后的 APSIM 模型应用于北京和济南模拟 1961-2009 年小麦生长和水分利用，盐亭和乌兰乌苏试验站验证后的 APSIM 模型分别用来模拟成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）的小麦生长和水分利用。小麦品种与各个试验站的品种一致。

根据代表了本区域农民耕作措施的试验站的数据，在每年的 275（北京和济南）、300（成都）和 269（乌鲁木齐）天种植小麦。生理成熟期收割小麦。土壤特性使用相对应的农田试验站的土壤特性。在充分灌溉条件下模拟小麦潜在产量和水分利用，利用 APSIM 模型中的自动灌溉功能来实现。没有考虑氮亏缺、病害和虫害等胁迫因素。

5.3 结果

5.3.1 APSIM模型的表现

模型的表现通过对比生育期、LAI、生物量和产量的模拟值和观测值来评价，其表现总结于表 5.5。LAI 和生物量的观测值和模拟值对比经过原点的回归直线的斜率分别为 0.95 和 1，决定系数为 0.84 和 0.93，表明模型可以很好的模拟小麦生育过程中 LAI 和生物量的变化。然而模型在栾城和乌兰乌苏地区冬季对小麦 LAI 和生物量的变化动态模拟和实际值有出入（图 5.2）。由于模型中没有考虑低温雪盖的影响，当温度小于 0 °C 时，小麦 LAI 和干物质将降低，栾城地区 3 个小麦生长季 LAI 均有降低趋势，尤其是 2001 年和 2002 年，接近 0 值，这种变化动态不符合实际小麦生长动态。然而春季升温后，小麦 LAI 和生物量又可以恢复到和实测值相当。在乌兰乌苏地区，由于冬季温度太低，导致模拟终止，把 0 °C 以下的温度用 0 °C 取代之后的模拟结果，可以看到冬季小麦 LAI 和生物量为一恒定值，这种变化和冬季低温小麦停止生长符合。盐亭地区，冬季温度较高，小麦 LAI 和生物量动态模拟值和实测值较符合。模型有些高估了盐亭站的生物量，对乌兰乌苏成熟时的生物量有些低估（图 5.3b）。说明在盐亭，实际中小

麦生物量低于模拟值，而产量水平相似，即盐亭地区小麦的干物质在生殖生长阶段被更多的转运到籽粒中，实际收获指数高；乌兰乌苏的情况与此相反，其收获指数低于模拟值。

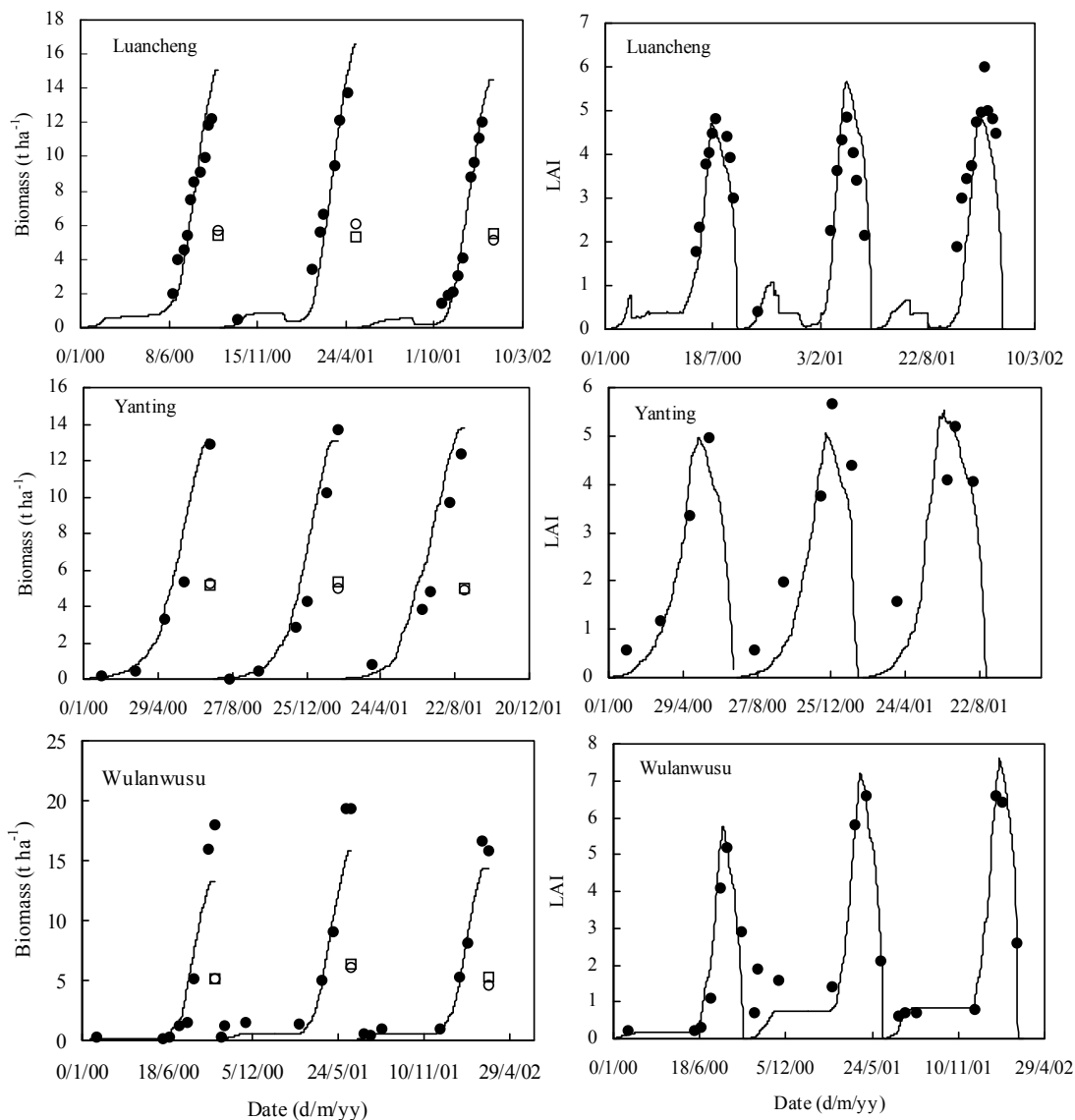


图 5.2 栾城（1998-2001）、盐亭（2004-2007）和乌兰乌苏（2000-2003）生物量和叶面积指数（LAI）模拟值（—）和实测值（●）的对比，以及籽粒产量模拟值（○）和实测值（□）的对比。

Fig. 5.2 Comparisons of simulated (—) and measured (●) biomass and leaf area index (LAI) during wheat growth seasons at Luancheng (1998-2001), Yanting (2004-2007) and Wulanwusu (2000-2003). And comparisons of simulated (○) and measured (□) grain yield at these three stations.

小麦叶面积指数和生物量模拟值和实测值对比通过原点的回归直线的决定系数 (r^2) 和均方根偏差 (RMSD) 分别为 0.84、0.93；0.83、 1.41 t ha^{-1} (表 5.5)，模拟效果较好。小麦产量模拟值和实测值对比通过原点的回归直线的 r^2 为 0.37，斜率(m)为 0.99，在平均值为 5.4 t ha^{-1} 的情况下 RMSD 为 0.39 t ha^{-1} ，模拟结果符合要求。

小麦生长期期间累积蒸散量的模拟值与每日的测量值拟合较好（图 5.3d），在 1998 年 12 月 5 日到 1999 年 4 月 2 日，模拟值有些高于实测值。

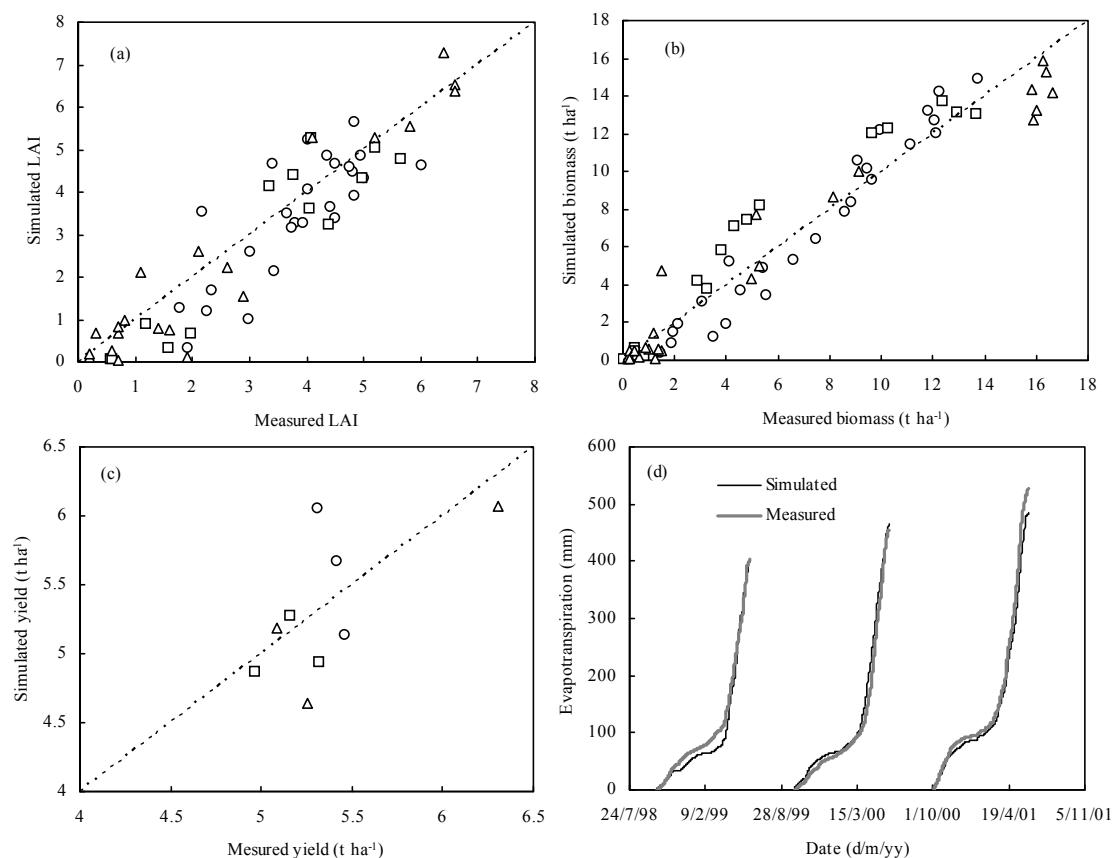


图 5.3 栾城(○)、盐亭(□)和乌兰乌苏(Δ)试验站的小麦 LAI、生物量和产量(a, b and c)的观测值和模拟值对比。虚线是 1:1 线。图 (d) 是栾城站 (1998-2001) 小麦生长期期间，累积 ET 的观测值和模拟值对比。

Fig. 5.3 Observed vs. simulated LAI, biomass and yield of wheat (a, b and c) at Luancheng (○), Yanting (□) and Wulanwusu (Δ) stations. The dotted line is the one-to-one line. Comparison of observed and simulated data of cumulative ET (d) during the wheat growing season (1998-2001) at Luancheng.

表 5.5 APSIM 模型在栾城、盐亭和乌兰乌苏的表现总结。

Table 5.5 Summary of the APSIM model performance at Luancheng, Yanting and Wulanwusu, China.

Model attribute	Number of paired data points	Observed range	r^2 ^a	m ^b	RMSD ^c
Phenology (d) ^d	9	196-277	0.99	1	2.30
LAI	60	0.2-6.6	0.84	0.95	0.83
Biomass (t ha ⁻¹)	66	0.02-16.6	0.93	1	1.41
Yield (t ha ⁻¹)	9	4.97-6.3	0.37	0.99	0.39

^a r^2 for the 1 to 1 line (r^2 (1:1)).

^bSlop of linear regression (forced through origin).

^cRoot mean squared deviation.

^dDays after sowing.

5.3.2 APSIM模型的敏感性分析

敏感性分析指在模拟过程中，人为地改变某些影响作物生长发育的土壤、品种、气候要素等参数，检查模拟产量对因素改变的响应。以下在栾城试验站分析了 APSIM 模型对于输入气象要素的敏感性，包括太阳辐射、最高和最低温度和降雨量。

利用栾城试验站 1998-2001 年气象数据为基础，逐个改变输入气象参数，运行 APSIM 模型，记录模拟产量，计算相对敏感度。后续章节分析了北京（1961-2009）、成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）小麦生长季的气象因素变化趋势。北京、成都和乌鲁木齐小麦生长季的太阳辐射分别降低了 18.9%、27.9%和 9%。北京小麦生长季的高温增加了 1.6 °C，成都和乌鲁木齐无明显变化。北京小麦生长季的低温在 0.2 °C 的基础上增加了 3.9 °C，成都和乌鲁木齐分别增加了 1.5 °C 和 2.3 °C。北京和乌鲁木齐的降雨量分别增加了 66.5%和 213%，成都降雨量无明显变化。因此设定太阳辐射分别降低了 10%、20%和 30%三个等级，高温增加了 1 °C 和 2 °C，低温分别增加了 2 °C 和 4 °C 两个等级，降雨量分别增加了 50%和 100%两个等级。在这些改变的基础上，分别分析模型的相对敏感度。

表 5.6 为栾城站 1998-2001 年各个气象要素的改变对模型模拟产量和耗水量结果的影响。对产量和耗水量影响最大的为太阳辐射的降低，产量和耗水量随着太阳辐射的降低而下降，为线性关系；产量的降低与太阳辐射的降低几乎为 1:1 的关系。最高温度的增加，使产量略微有些降低，使耗水量增加。由于栾城地区冬季温度较低，最低温度的升高使产量增加，而耗水量降低。降雨量的增加对产量几乎没有影响，略微增加了耗水量。由以上结果可知，APSIM 模型对气象要素的改变敏感，可以应用于模拟分析气候变化对小麦产量和水分利用的影响。

表 5.6 栾城站 APSIM 模型气象要素参数敏感性分析

Table 5.6 Sensitivity analysis of APSIM model to meteorological data inputs at Luancheng station.

Parameters	Differences	Yield differences (%)			Evapotranspiration differences (%)		
		1999	2000	2001	1999	2000	2001
Solar radiation	-10%	-8.8	-8.2	-9.1	-6.6	-6.3	-7.4
	-20%	-18.2	-17.2	-19.0	-13.7	-13.0	-15.2
	-30%	-27.9	-26.7	-29.9	-21.1	-20.1	-23.8
Maximum temperature	+1 °C	-1.9	3.1	4.4	1.6	7.7	6.8
	+2 °C	-8.0	-3.8	-0.6	3.3	12.3	7.0
Minimum temperature	+2 °C	5.6	4.8	11.6	-7.6	-4.4	-3.1
	+4 °C	7.9	2.4	6.3	-16.3	-14.9	-13.1
Rainfall	+50%	0.0	0.4	0.0	1.3	3.1	1.8
	+100%	0.1	0.4	0.0	2.5	3.8	3.2

5.3.3 过去几十年观测到的气候变化趋势

表 5.7 列出了北京（1961-2009）、济南（1961-2009）、成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）每年和每个小麦生长季的太阳辐射（Ra）、最高（Tmax）和最低（Tmin）温度以及降雨量的平均值和变化趋势。成都的太阳辐射明显低于其他三个试点。四个试点小麦生长季的太阳辐射均是显著下降趋势，下降趋势分别为-0.061， -0.042， -0.059 和-0.026 MJ m⁻² a⁻¹。图 5.4 为四个站点小麦生长季的太阳辐射和散总比（散射辐射/总辐射）的变化趋势，济南散射辐射实测值在 1991 年后没有观测。图 5.4 中回归直线的方程和决定系数列于表 5.8 中。北京、济南、成都和乌鲁木齐小麦生长季的太阳辐射分别在 1961 年的基础上（13.3、11.9、7.9 和 12.3 MJ m⁻²）降低了 18.9%、15.7%、27.9%和 9%。小麦生长季北京、济南、成都和乌鲁木齐的散总比平均值分别为 46.4%、55.6%、71.7%和 38%。成都和济南的散总比显著增加，成都 43 年间增加了 9.4%，济南 30 年间增加了 23.4%，北京和乌鲁木齐无明显变化。

表 5.7 在北京（1961-2009）、济南（1961-2009）、成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）的小麦生育期和每年的太阳辐射（Ra）、最高（Tmax）和最低（Tmin）温度以及降雨量平均值和变化趋势。根据试验数据北京、济南、成都和乌鲁木齐的小麦生育期分别从 10 月 1 日至次年 6 月 15 日，10 月 1 日至次年 5 月 31 日，11 月 1 日至次年 5 月 15 日和 10 月 1 日至次年 6 月 30 日。

Table 5.7 Average observations and trends in solar radiation (Ra), maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin) and rainfall in wheat season and each year at Beijing (1961-2009), Jinan (1961-2009), Chengdu (1961-2003) and Urumqi (1961-2009). The wheat season of Beijing, Jinan, Chengdu and Urumqi were from 1st October to 15 June of next year, 1st October to 31 May of next year, 1st November to 15 May next year, and 1st October to 30 June of next year respectively according to experimental data.

		Beijing		Jinan		Chengdu		Urumqi	
		Wheat season	Annual	Wheat season	Annual	Wheat season	Annual	Wheat season	Annual
Ra (MJ m ⁻²)	Average	13.3	14.4	11.9	13.4	7.9	9.7	12.3	14.3
	Trend (a ⁻¹)	-0.061	-0.070	-0.042	-0.048	-0.059	-0.068	-0.026	-0.034
	R ²	0.620**	0.673**	0.352**	0.446**	0.514**	0.707**	0.191**	0.327**
Tmax (°C)	Average	13.3	18.0	14.2	19.6	15.1	20.5	7.9	13.0
	Trend (a ⁻¹)	0.033	0.025	0.029	0.016	0.006	0.008	0.019	0.001
	R ²	0.323**	0.230**	0.27**	0.137**	0.005	0.031	0.058	0.000
Tmin (°C)	Average	2.2	7.3	5.0	10.4	7.8	13.2	-1.8	2.7
	Trend (a ⁻¹)	0.080	0.068	0.038	0.026	0.034	0.026	0.047	0.030
	R ²	0.762**	0.730**	0.451**	0.332**	0.308**	0.386**	0.282**	0.180**
Rainfall (mm)	Average	139	621	170	686	164	968	199	281
	Trend (a ⁻¹)	1.421	-3.390	1.637	1.251	-0.539	-5.760**	4.190**	5.570**
	R ²	0.084*	0.065	0.136*	0.008	0.022	0.214**	0.481**	0.503**

**Significant p < 0.01, *Significant p < 0.05.

北京、济南、成都和乌鲁木齐小麦生长季的平均温度分别为 7.8、9.6、11.5 和 3.0 °C。北京和济南的最高温度显著增加，成都和乌鲁木齐无显著变化。四个站点小麦生长季的最低温度均显著增加，北京 49 年在 0.2 °C 的基础上增加了 3.9 °C，济南增加了 1.9 °C，乌鲁木齐 49 年间增加了 1.5 °C，成都 43 年间增加了 2.3 °C，北京增加幅度最大。

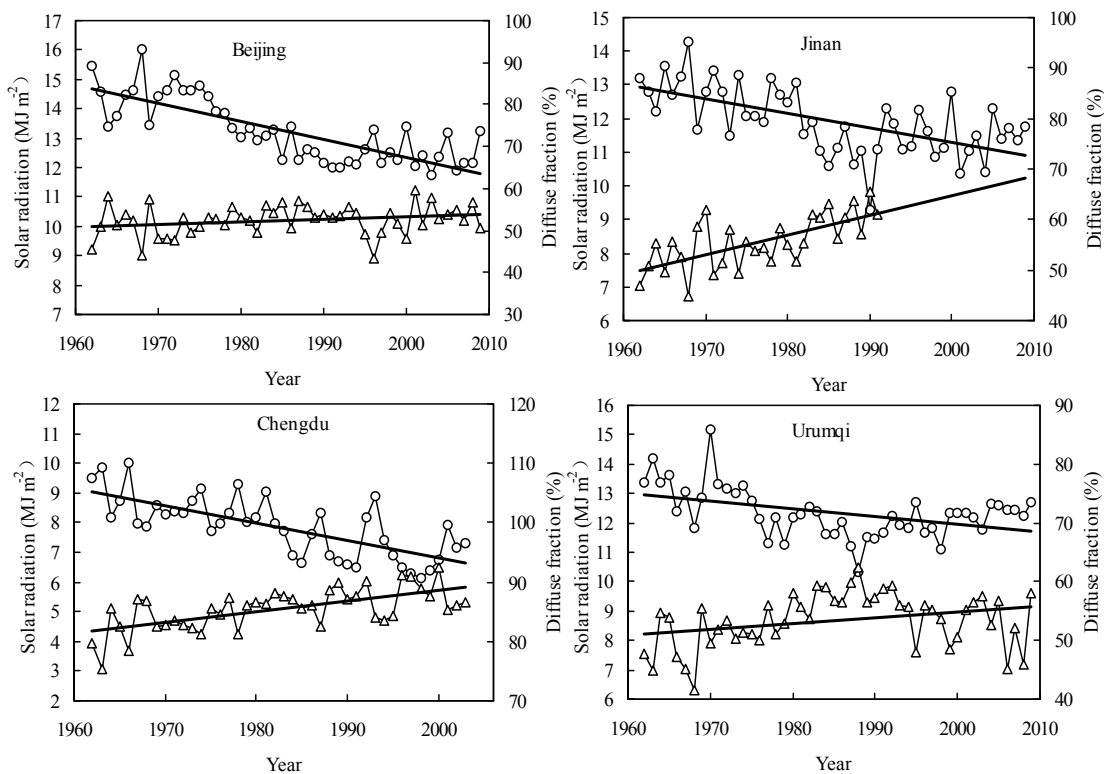


图 5.4 在北京（1961-2009）、济南（1961-2009）、成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）每个小麦生长季的太阳辐射(○—)和散射辐射(△—)占总辐射的比例（济南为 1961-1991）的观测值。直线表示线性趋势，每个回归直线的方程列于表 5.8 中。

Fig. 5.4 Observed average solar radiations (○—) and diffuse fraction (△—) (diffuse radiation/solar radiation) of each wheat growing season at Beijing (1961-2009), Chengdu (1961-2003) and Urumqi (1961-2009). Lines show the linear trend, equation of each linear regression is shown in Table 5.8.

表 5.8 北京（1961-2009）、成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）小麦生育期的太阳辐射和散射辐射占总辐射的比例的观测值的回归直线方程和决定系数。

Table 5.8 Regression analysis of observed solar radiation and diffuse fraction (diffuse radiation/solar radiation) of wheat growing seasons at Beijing (1961-2009), Chengdu (1961-2003) and Urumqi (1961-2009).

Station	Solar radiation (MJ m ⁻²)	R ²	Diffuse fraction (%)	R ²
Beijing	y = -0.061x + 135	0.620**	y = 0.059x - 65.1	0.055
Jinan	y = -0.042x + 96	0.352**	y = 0.39x - 715.03	0.436**
Chengdu	y = -0.059x + 125	0.514**	y = 0.179x - 269	0.396**
Urumqi	y = -0.026x + 64.9	0.191**	y = 0.095x - 136	0.083

**Significant p < 0.01, *Significant p < 0.05.

成都每年的降雨量最大，北京和济南次之，乌鲁木齐最低。乌鲁木齐小麦生长季的

降雨量最大，成都和济南次之，北京最低。北京小麦生长季降雨量 49 年增加了 66.5%，济南增加了 60.8%，乌鲁木齐小麦生长季的降雨量在 96mm 的基础上增加了 205mm，成都无明显变化趋势。

综上所述，四个试点太阳辐射均为显著下降趋势，温度为显著上升趋势。区别在于在什么水平上变化，以及变化量的大小。成都小麦生育期的温度最高，太阳辐射最低，过去 43 年最低温度为上升趋势，太阳辐射为下降趋势，下降量较多；乌鲁木齐的温度最低，太阳辐射较高，并且比较干旱，过去 48 年最低温度和降雨量为上升趋势，太阳辐射为下降趋势，下降量在四个试点中最低；北京和济南的温度低于成都高于乌鲁木齐，最低和最高温度以及降雨量均为显著上升趋势，太阳辐射为显著下降趋势，除降雨量外，北京其他气象要素的变化量均高于济南。

5.3.4 气候变化对小麦生育期和籽粒产量的影响

图 5.5 为北京（1961-2009）、济南（1961-2009）、成都（1961-2003）和乌鲁木齐（1961-2009）小麦生育期和籽粒产量的模拟值变化趋势。回归直线方程和决定系数列于表 5.9 中。小麦生育期大小依次为，乌鲁木齐 > 北京 > 济南 > 成都，其平均值分别为 270、254、236 和 203 天，与小麦生育期间平均温度的大小排序相反，高温促进小麦发育使生育期缩短。北京和济南的小麦生育期在过去 48 年中分别以每年 0.28、0.18 天的速率显著下降（表 5.9），主要由于北京和济南小麦生育期间最高和最低温度的显著增加。成都和乌鲁木齐的小麦生育期无明显变化趋势。

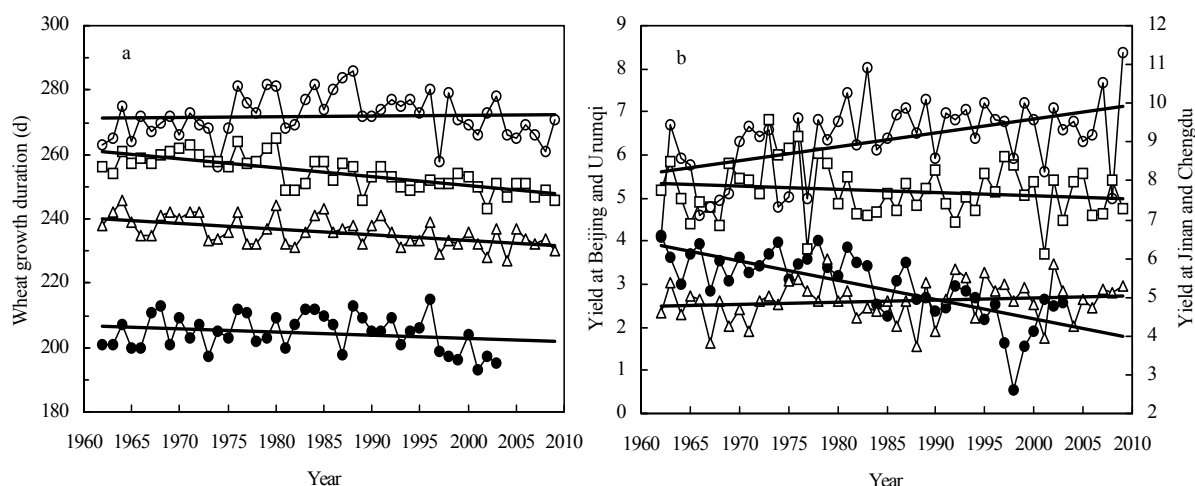


图 5.5 北京(□—; 1961-2009)、济南(△—; 1961-2009)、成都(●—; 1961-2003)和乌鲁木齐(○—; 1961-2009)的生育期(a)和籽粒产量($t\ ha^{-1}$; b)模拟值。图中直线表示线性趋势，每条直线的方程列于表 6.9 中。

Fig. 5.5 Simulated length of growing duration of wheat (a) and grain yields ($t\ ha^{-1}$; b) at Beijing (□—; 1961-2009), Jinan (△—; 1961-2009), Chengdu (●—; 1961-2003) and Urumqi (○—; 1961-2009). Lines show the linear trends, equation of each linear regression is shown in Table 6.9.

表 5.9 北京、济南、成都和乌鲁木齐地区模拟的生育期、籽粒产量、潜在蒸散量 (PET)、蒸散量 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 的回归方程和决定系数 (R^2)。

Table 5.9 Regression analysis of simulated wheat growth duration, grain yield, potential evapotranspiration (PET), evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) at Beijing, Jinan, Chengdu and Urumqi, respectively.

		Linear model	R^2
Wheat growth duration (d)	Beijing	$y = -0.28x + 802$	0.536**
	Jinan	$y = -0.18x + 588$	0.302**
	Chengdu	$y = -0.10x + 405$	0.048
	Urumqi	$y = 0.02x + 229$	0.002
Grain yield ($t\ ha^{-1}$)	Beijing	$y = -0.007x + 19.8$	0.026
	Jinan	$y = 0.006x - 7.6$	0.030
	Chengdu	$y = -0.050x + 104$	0.536**
	Urumqi	$y = 0.032x - 58.0$	0.242**
PET (mm)	Beijing	$y = -2.88x + 6294$	0.654**
	Jinan	$y = -2.09x + 4669$	0.404**
	Chengdu	$y = -2.13x + 4532$	0.541**
	Urumqi	$y = -0.57x + 1705$	0.098*
ET (mm)	Beijing	$y = -2.27x + 4980$	0.457**
	Jinan	$y = -1.22x + 2808$	0.249**
	Chengdu	$y = -2.08x + 4386$	0.591**
	Urumqi	$y = -0.73x + 1921$	0.203**
WUE ($kg\ ha^{-1}\ mm^{-1}$)	Beijing	$y = 0.035x - 58.0$	0.115*
	Jinan	$y = 0.055x - 96.0$	0.207**
	Chengdu	$y = -0.039x + 97.5$	0.057
	Urumqi	$y = 0.090x - 165.9$	0.424**

**Significant $p < 0.01$, *Significant $p < 0.05$.

乌鲁木齐的产量模拟值较高 ($6.4\ t\ ha^{-1}$)，北京、济南和成都的产量相近，其平均值分别为 5.2 、 4.9 和 $5.3\ t\ ha^{-1}$ 。乌鲁木齐的模拟产量年际间波动较大，在过去几十年中显著增加，增加趋势为 $0.032\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ，成都的模拟产量显著降低，趋势为 $0.05\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ 。北京和济南的模拟产量无显著变化。太阳辐射降低会导致产量降低，但是在寒冷地区（北京、济南和乌鲁木齐）最低温度的增加将降低低温寒冷对小麦的负面影响进而增加产量，因此乌鲁木齐的产量为增加趋势，北京和济南无明显变化；而在温度较高的成都，太阳辐射和低温的增加均会导致产量降低，因而过去 43 年中产量大幅下降。

5.3.5 气候变化对小麦潜在蒸腾和水分利用的影响

图 5.6 为北京 (1961-2009)、济南 (1961-2009)、成都 (1961-2003) 和乌鲁木齐 (1961-2009) 的潜在蒸散量 (PET)、蒸散量 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 的模拟值

及变化趋势。每条直线的回归方程和决定系数列于表 5.9 中。成都的 PET 明显低于其他三个试点 (312mm)，北京、济南和乌鲁木齐的 PET 相近，北京和乌鲁木齐略高于济南，分别为 565、571、518 mm。四个站点的 PET 均显著下降，北京、济南和成都的下降趋势为-2.82、-2.09 和-2.25 mm a⁻¹，高于乌鲁木齐 (-0.56 mm a⁻¹) (表 5.9)；主要由于乌鲁木齐的太阳辐射下降趋势低于其他三个试点。成都的模拟 ET 平均值为 267 mm，济南的模拟 ET 为 390 mm，低于北京 (465 mm) 和乌鲁木齐 (468 mm)。ET 的变化趋势与 PET 相似。

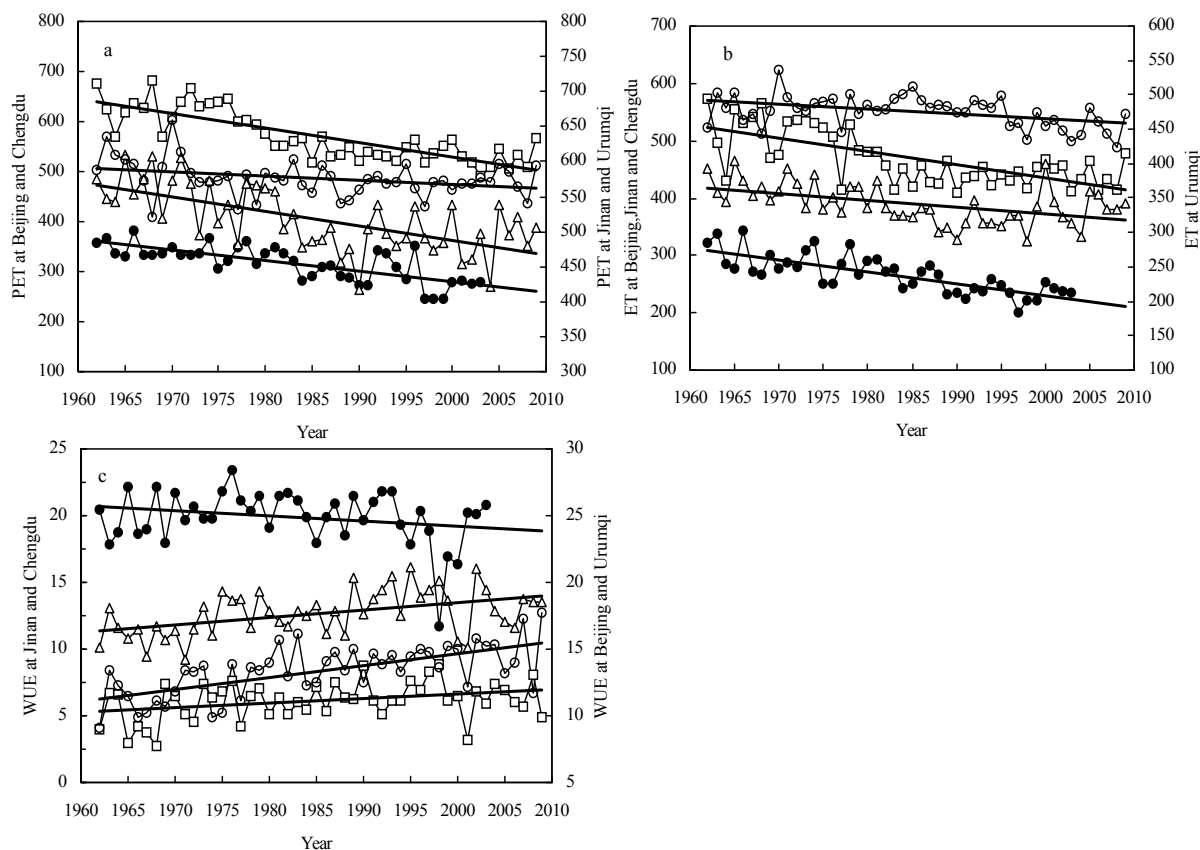


图 5.6 北京(□—; 1961-2009)、济南(Δ—; 1961-2009)、成都(●—; 1961-2003)和乌鲁木齐(θ—; 1961-2009)的潜在蒸散量(PET; mm) (a)、蒸散量(ET; mm) (b)和水分利用效率(WUE; t ha⁻¹ mm⁻¹) (c)的模拟值。图中直线表示线性趋势，每条直线的回归方程列于表 6.9 中。

Fig. 5.6 Simulated potential evapotranspiration (PET; mm) (a), evapotranspiration (ET; mm) (b) and water use efficiency (WUE; t ha⁻¹ mm⁻¹) (c) at Beijing (□—; 1961-2009), Jinan (Δ—; 1961-2009), Chengdu (●—; 1961-2003) and Urumqi (θ—; 1961-2009). Lines show the linear trend, equation of each linear regression is shown in Table 6.9.

北京、济南、成都和乌鲁木齐的模拟 WUE 平均值分别为 11.2、12.7、19.9 和 13.5 kg ha⁻¹ mm⁻¹。成都的 WUE 最高，应该归因于其太阳辐射最低散总比最高导致的较高的 RUE，在湿润的环境下，小麦耗水较少的条件下产量达到较高值，因而 WUE 较高。北京、济南和乌鲁木齐的 WUE 相近，主要由于这三个试点相近的太阳辐射和散总比。成

都的 WUE 在过去 42 年中无明显变化, 成都的产量和 ET 分别下降了 32.4%、28.2%。乌鲁木齐的 WUE 显著增加, 增加趋势为 $0.09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; 乌鲁木齐的籽粒产量增加了 24.2%, ET 下降了 6.2%。北京和济南的 WUE 过去 48 年中显著增加, 趋势分别为 0.04 和 $0.05 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; 北京和济南的产量无明显变化, ET 分别下降了 18.3%、14%。

5.3.6 太阳辐射下降对小麦产量和蒸腾的影响

表 5.10 为北京、成都和乌鲁木齐生育期、产量、ET 和 WUE 模拟值与太阳辐射(Ra)、散总比 (DF)、最高温度 (Tmax)、最低温度 (Tmin) 和降雨量的相关分析。四个站点

表 5.10 北京、济南、成都和乌鲁木齐的生育期 (Duration)、产量 (Yield)、蒸散量 (ET) 和水分利用效率 (WUE) 的模拟值与小麦生育期间的太阳辐射 (Ra)、散总比 (DF)、最高温度 (Tmax)、最低温度 (Tmin) 和降雨量 (rainfall) 的相关分析。

Table 5.10 Correlations between simulated wheat growth duration (Duration), yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) and solar radiation (Ra), diffuse fraction (DF), maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), rainfall in wheat season at Beijing, Jinan, Chengdu and Urumqi.

		DF	Tmax	Tmin	Rainfall	Duration	Yield	ET	WUE
Beijing	Ra	-0.58**	-0.34**	-0.78**	-0.45**	0.58**	0.25	0.85**	-0.39**
	DF		-0.22	0.19	0.36**	-0.06	-0.13	-0.51**	0.23
	Tmax			0.75**	0.03	-0.81**	-0.15	-0.18	0.01
	Tmin				0.29*	-0.84**	-0.10	-0.67**	0.40**
	Rainfall					-0.13	0.12	-0.32*	0.36*
Jinan	Ra		-0.13	-0.51**	-0.38**	0.29*	0.16	0.83**	-0.40**
	Tmax			0.82**	0.04	-0.74**	0.26	-0.10	0.27
	Tmin				0.19**	-0.72**	0.23	-0.50**	0.51**
	Rainfall					-0.26	-0.08	-0.31**	0.14
Chengdu	Ra	-0.79**	0.31*	-0.30	0.12	-0.18	0.86**	0.87**	0.32*
	DF		-0.47**	0.17	0.01	0.31*	-0.63**	-0.77**	-0.08
	Tmax			0.65**	-0.10	-0.92**	-0.01	0.23	-0.31*
	Tmin				0.10	-0.79**	-0.50**	-0.41**	-0.32*
	Rainfall					0.03	0.17	0.08	0.18
Urumqi	Ra	-0.48**	0.39**	0.23	-0.51**	-0.60**	-0.15	0.36*	-0.26
	DF		-0.36*	-0.20	0.51**	0.51**	0.43**	0.15	0.38**
	Tmax			0.91**	-0.07	-0.66**	0.20	-0.16	0.26
	Tmin				0.19	-0.53**	0.34*	-0.33*	0.45**
	Rainfall					0.46**	0.56**	-0.11	0.61**

**Significant $p < 0.01$, *Significant $p < 0.05$.

Ra 和其他气象因素的关系均不相同。由于济南试点散射辐射数据不全, 没有分析散总

比其他因素间的关系。北京、成都和乌鲁木齐 Ra 和 DF 为负相关。北京 Ra 与 Tmax 和 Tmin 为负相关，济南 Ra 与 Tmin 负相关，而在成都和乌鲁木齐 Ra 与 Tmax 为正相关。北京和济南的 Ra 为明显下降趋势，Tmax 和 Tmin 均为明显上升趋势，因而这两个地区的 Ra 和 Tmin 为负相关，温度的增加主要是由于温室气体的增加。成都和乌鲁木齐 Ra 为明显下降趋势，Tmax 无明显变化趋势；其相关分析表明 Ra 与 Tmax 为正相关。太阳辐射与温度的相关性受许多其他因素（CO₂、气溶胶等）的影响，在不同地区分析结果不同。在北京、济南和乌鲁木齐降雨量与 Ra 负相关，与 DF 正相关，而在成都降雨量的变化与其他气象因子的变化无相关关系。

四个站点的小麦生育期均与 Tmax 和 Tmin 负相关，表明小麦生育期变化主要由温度变化决定。北京和济南小麦生育期与 Ra 正相关，在乌鲁木齐为负相关。由于北京和济南过去 48 年中产量没有变化趋势，其产量模拟值与气象因子无相关关系。成都的籽粒产量与 Ra 正相关，与 DF 和 Tmin 负相关。乌鲁木齐的籽粒产量与 DF、Tmin 和降雨量正相关。以上结果表明，在不同的 Ra、温度和降雨量水平下，Ra 的下降和温度的增加对潜在产量的影响均不同。在北京（13.3 MJ m⁻²）和乌鲁木齐（12.3 MJ m⁻²）的 Ra 水平下，伴随着温度增加的 Ra 的下降对北京潜在产量没有显著影响，DF、温度和降雨量的增加促使乌鲁木齐的产量增加；然而在成都（7.9 MJ m⁻²），Ra 的下降、DF 和温度的增加使潜在产量显著下降。

四个站点的 ET 模拟值均与 Ra 正相关，与 Tmin 负相关。北京和济南的 WUE 与 Ra 负相关，与 Tmin 正相关。成都的 WUE 与 Ra 正相关与温度负相关。乌鲁木齐的 WUE 与 DF、Tmin 和降雨量正相关。

表 5.11 为北京、济南、成都和乌鲁木齐的产量和 ET 模拟值与气象因子的线性回归分析，方法为逐步回归。北京和济南的模拟产量无明显变化趋势。成都太阳辐射的变化可以解释籽粒产量模拟值 73.6% 的变化。乌鲁木齐籽粒产量的变化主要决定于降雨量，决定系数为 0.312。

表 5.11 北京、济南、成都和乌鲁木齐的产量和蒸散量的模拟值与太阳辐射/降雨量的回归分析。

Table 5.11 Linear regression model results for simulated yield and ET at Beijing, Jinan, Chengdu and Urumqi.

Dependent	Study sites	Independent	Linear equation	R ²
Yield (t ha ⁻¹)	Beijing	—	—	—
	Jinan	—	—	—
	Chengdu	Solar radiation (MJ m ⁻²)	y = 0.709x - 0.3	0.736**
	Urumqi	Rainfall (mm)	y = 0.006x + 5.2	0.312**
ET (mm)	Beijing	Solar radiation (MJ m ⁻²)	y = 36.7x - 17.5	0.723**
	Jinan	Solar radiation (MJ m ⁻²)	y = 28.4x + 51.4	0.686**
	Chengdu	Solar radiation (MJ m ⁻²)	y = 28.6x + 42.5	0.759**
	Urumqi	Solar radiation (MJ m ⁻²)	y = 9.7x + 355.5	0.133*

*Significant p < 0.01, **Significant p < 0.05.

四个站点 ET 模拟值的变化主要决定于太阳辐射的变化。北京、济南、成都和乌鲁木齐太阳辐射的变化可分别解释 72.3 %、68.6 %、75.9 %和 13.3 % ET 模拟值的变化。当小麦生育期间的太阳辐射降低 1 MJ m^{-2} 时，北京、成都和乌鲁木齐的 ET 将会分别降低 36.4、28.4、28.3 和 9.7 mm。

5.4 讨论

过去几十年在北京、济南、成都和乌鲁木齐均发现了太阳辐射的显著下降趋势，由人类活动导致的气溶胶的增加是辐射下降的主要原因 (Che et al., 2005; Liang and Xia, 2005)。北京、济南和乌鲁木齐 1961-2009 年的太阳辐射下降趋势为 -0.44、-0.33 和 $-0.23\% \text{ a}^{-1}$ ，成都 1961-2003 年的下降趋势为 $-0.62\% \text{ a}^{-1}$ 。其下降趋势与 Liang and Xia (2005) 的报道相似，在北京、成都和乌鲁木齐 1961-2000 年的下降趋势分别为 -0.52、-0.66 和 $-0.33\% \text{ a}^{-1}$ 。四个站点均为变暖的趋势，归因于过去几十年最低温度的增加，与 1956-2005 年地球升温趋势的报道 (IPCC, 2007) 相符合。北京和乌鲁木齐小麦生长季的降雨量显著增加，济南和成都的降雨量没有明显变化。

Lobell and Field (2007) 报道温度每升高 $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 作物产量 (小麦、水稻、玉米、大麦、大豆和高粱) 会下降 0.6-8.9%。Challinor et al. (2003) 指出印度花生 50% 的产量变化归因于 1966-1995 年降雨量的变化。Zhang et al. (2010) 分析试验数据指出水稻产量与太阳辐射正相关，在中国的 20 个试验站研究 13-25 年的产量的变化均由太阳辐射的变化决定。Swain et al. (2007) 利用印度历史时期气象资料 (1983-2002) 研究表明太阳辐射下降了 30%，导致水稻产量下降了 12%。本研究在北京、济南、成都和乌鲁木齐的模拟结果表明，气象因子变化对籽粒产量的影响随不同的气象环境而不同。过去 48 年中北京的模拟产量没有明显变化。Chen et al. (2009) 利用 APSIM 的模拟结果表明北京 1961-2003 年间随着太阳辐射的下降小麦潜在产量显著下降，与本文结果不同。很可能由于使用的 APSIM 不同版本，其计算 RUE 方法的不同导致与本研究的模拟结果差异。现在许多研究已认识到太阳辐射以及它的组成成分 (尤其是散射辐射) 对评估 RUE 的重要性 (Choudhury, 2001; Roderick et al., 2001; Rodriguez and Sadras, 2007)。模型中计算 RUE 的方法，对正确评估太阳辐射变化对籽粒产量的影响很重要，需要更多的研究来改进。成都的模拟产量过去 42 年间下降了 32.4%，太阳辐射的下降可以解释籽粒产量 73% 的变化。乌鲁木齐的籽粒产量在过去 48 年间增加了 27%，主要归因于散总比、温度和降雨量的增加。

一些研究评估了气候变化趋势对蒸散量的影响。Roderick and Farquhar (2006) 分析了北半球过去 50 年蒸发皿蒸发量下降的原因，发现地球太阳辐射的下降导致了蒸散量的下降。Roderick et al. (2007) 研究表明澳大利亚观测到的蒸发皿蒸发量的下降主要是由于风速的下降以及一些地区太阳辐射的下降。Xu et al. (2006) 报道中国长江流域

对照蒸散量的下降主要归因于风速的下降。Tao et al. (2008) 报道中国大部分试验站蒸散量和灌溉使用水将随着温度的增加而降低。我们在北京、济南、成都和乌鲁木齐的蒸散量模拟值均显著下降，主要由于太阳辐射的下降和最低温度的增加。北京、济南、成都和乌鲁木齐太阳辐射的下降分别可以解释蒸散量下降的 72.1%、68.6%、75.5% 和 13.7%。

Rodriguez and Sadras (2007) 报道在澳大利亚东部，小麦开花期的 WUE 从北到南（水汽压差和温度降低，散总比从 0.41 增加至 0.61）增加。Tong et al. (2009) 在华北平原报道由于散射辐射比例的增加阴天的 WUE 高于晴天。以上研究结果与本研究结果中成都（太阳辐射低）的 WUE 高于北京和乌鲁木齐相符。

5.5 结论

中国是世界上最大的小麦生产和消耗国。正在进行的气候变化，尤其是太阳辐射的变化对中国的小麦产量和水分利用产生影响。在中国小麦生产区选取四个代表四种不同气候模式的研究站点来评估太阳辐射的下降对小麦产量和水分利用的影响。模型模拟结果表明，在辐射水平较高温度较低的北京（ 13.25 MJ m^{-2} ）和济南（ 11.9 MJ m^{-2} ），太阳辐射下降和温度的增加对小麦产量没有明显影响；在辐射较高（ 12.34 MJ m^{-2} ）温度较低的乌鲁木齐，其散总比平均值为 38%，低于其他三个试点，散射辐射和温度的增加促进了产量增加；而在辐射水平较低（ 7.85 MJ m^{-2} ）温度较高的成都，太阳辐射的下降和温度的增加导致小麦产量显著下降。由于太阳辐射的下降和最低温度的增加，三个站点的模拟蒸散量显著降低。由于蒸散量的显著下降，北京和乌鲁木齐的 WUE 显著增加。由于成都产量和蒸散量均显著下降，WUE 无明显变化。以上结论表明，在干旱太阳辐射较高的环境下，太阳辐射的下降，尤其是伴随着散射辐射的增加，将会对作物生产力无影响（北京和济南），或者增加作物生产力（乌鲁木齐）；在湿润和低辐射环境下，太阳辐射的下降将降低生产力（成都）。

第六章 太阳辐射和温度变化对小麦产量和蒸散量的单因素影响

摘要

以气候变暖、太阳辐射下降以及降雨格局的变化为主要特征的气候变化显著地影响着农业生产和水分利用。研究不同气象因素对农业生产的影响对于提高作物生长对气候变化的适应能力有重要作用。本章研究了辐射变化（-10%、+10%、+20%和+30%）和温度升高（1 °C、2 °C、3 °C、和 4 °C）对小麦产量和蒸散量的影响。以过去 49 年气象资料为背景，利用 APSIM 模型在北京和成都两个地点分别模拟分析了辐射和温度变化对小麦产量和蒸散量的影响。辐射降低和温度升高均将引起产量和蒸散量的下降。APSIM 模拟结果表明辐射水平较低的成都小麦产量对辐射下降更敏感，下降比例高于北京。成都温度的升高导致小麦产量和蒸散量的下降均高于北京，表明温度水平较高地区的小麦生产对升温变化更敏感。总之，不同气候背景下，辐射和温度的变化对小麦产量和蒸散量的影响不同。

关键词：太阳辐射、温度、产量、蒸散量、APSIM

6.1 引言

作物生长环境一直处于变化中，为了提高农作系统对气候变化的适应力，研究不同气象因素的变化对农业生产的影响具有重要意义。温度升高对作物生长的影响主要在于加快作物发育，缩短作物生育期，因而导致产量降低(Peng et al., 2004; Lobell and Field, 2007)。然而 Van Ittersum et al. (2003) 利用作物模型分析小麦生产力对升温的响应时发现，升温对小麦产量为非线性影响，在粘土条件下初始升温处理（小于 3 °C）提高了产量，之后产量持续下降。当冬季低温限制作物生长的情况下，升温对作物产量具有潜在积极影响。太阳辐射为地球生物的能量来源，太阳辐射的降低将导致作物产量下降(Chen et al., 2009; Supit et al., 2010)。然而不少研究表明，太阳辐射降低和散射辐射比例的增加，将显著提高作物辐射利用效率进而提高作物生产力(Choudhury, 2001; Rodriguez and Sadras, 2007)，辐射热负荷的降低可以提高叶片传导率和促进光合作用的增加。

本文第三章至第五章的内容为利用 APSIM 模型模拟分析过去 50 年气候波动/变化对小麦潜在产量和水分利用的影响。第三章和第四章运用 APSIM 分析西北干旱区气候变化对小麦产量和水分利用的影响。第五章利用 APSIM 分析了不同气候条件下太阳辐射和温度的变化对小麦潜在生长的影响，得出结论为在寒冷干燥的北方地区（北京、济

南), 伴随着温度上升的太阳辐射下降对小麦潜在产量没有影响, 而在温暖湿润的南方地区(成都), 太阳辐射的下降导致产量显著下降。前面各章利用作物模型分析了太阳辐射、温度和降雨量变化对小麦产量和水分利用的综合影响。本章主要目的为分析不同气候背景下, 太阳辐射和温度单因子变化对小麦潜在产量和水分利用的影响。本章在北京和成都过去 49 年的气候背景下, 分别设定太阳辐射+10%、-10%、-20%和-30%, 温度+1 °C、+2 °C、+3 °C 和+4 °C 的气候情景, 模拟结果分别与历史气候下的模拟结果对比, 检验太阳辐射和温度的变化分别对小麦潜在生长的影响, 并对比不同气候背景下模拟试验结果的差异。

6.2 材料和方法

6.2.1 研究地点

选择北京(1961-2009)和成都(1961-2003)两个试点做模型在不同气候背景下的敏感性分析。两个试点的介绍详见第五章。北京为寒冷干燥区, 小麦生长季平均辐射为 13.3 MJ m⁻², 平均温度为 7.8 °C; 成都为温暖湿润区, 小麦生长季平均辐射为 7.9 MJ m⁻², 平均温度为 11.5 °C (表 5.7)。在这两种气候背景下, 伴随着温度升高的太阳辐射下降对小麦潜在生长的影响不同, 北京过去 48 年的潜在产量无明显变化, 而成都过去 42 年的潜在产量显著下降(第五章)。

6.2.2 模拟实验

保持其他气象要素不变, 太阳辐射的变化设置 4 种情景, 分别为+10%、-10%、-20%和-30%, 模拟过去 48 年小麦产量和水分利用变化, 把小麦产量和蒸散量 48 年的模拟值取平均与原气象背景下模拟值的平均值做对比。温度上升的情景分别为+1 °C、+2 °C、+3 °C 和+4 °C, 为保持平均温度上升, 分别在逐日最高和最低温度上加 1 °C、2 °C、3 °C 和 4 °C, 模拟结果与原气象背景下的模拟值对比。

6.3 结果

6.3.1 太阳辐射变化对小麦产量和蒸散量的影响

太阳辐射的降低将导致产量和蒸散量模拟值下降(图 6.1)。北京和成都的产量原始值(气象要素没有改变时的模拟值)相近。成都产量的减少量大于北京, 当辐射下降 30%时, 成都和北京的产量分别下降了 1.25 和 2.28 t ha⁻¹, 下降百分比分别为 42.8%和 24.3%。成都辐射水平低于北京应该是导致下降差异的主要原因。APSIM 模型根据逐日

太阳辐射计算 RUE (图 6.1), 当太阳辐射小于 10 MJ m^{-2} 时, RUE 随着太阳辐射的降低将以更大速率下降。因而导致成都模拟产量下降量和比例均大于北京。

北京的小麦蒸散量高于成都, 其平均值分别为 469 mm 和 267 mm 。小麦蒸散量随着太阳辐射的下降逐步下降, 北京小麦蒸散量的下降量明显大于成都。太阳辐射增加 10% 时, 北京蒸散量增加 6.2%, 成都蒸散量增加 6.3%; 太阳辐射下降 30% 时, 北京和成都蒸散量分别下降 96 mm 和 63 mm , 下降比例分别为 20.4% 和 23.9%。太阳辐射变化情景下, 北京和成都的模拟蒸散量变化比例相似。小麦模拟蒸散量变化与太阳辐射的变化成一定比例, 这个比例不随着气候背景的变化而改变。

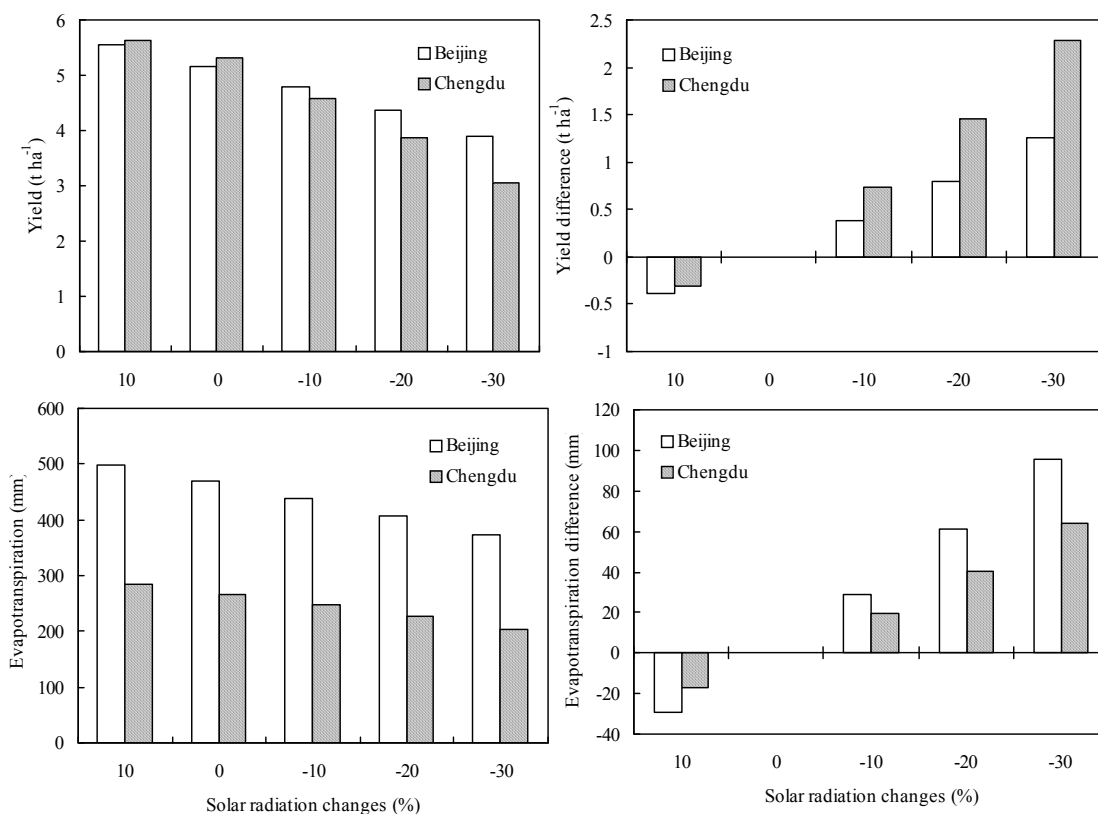


图 6.1 北京 (1961-2009) 和成都 (1961-2003) 太阳辐射变化对 APSIM 模拟产量和蒸散量的影响。图中每个柱代表的值是北京 48 年模拟值的平均值或者是成都 42 年模拟值的平均值。

Fig. 6.1 Effects of solar radiation changes on simulated wheat yield and envapotranspiration using APSIM at Beijing (1961-2009) and Chengdu (1961-2003). Each bar is the average of 48 years of simulations at Beijing or 42 years at Chengdu.

6.3.2 温度升高对小麦产量和蒸散量的影响

北京的生育期高于成都, 其平均值分别为 254 和 204 天。小麦生育期随着温度的升高而下降 (图 6.2), 成都的下降量高于北京, 当温度增加 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 北京生育期减少 19

天，成都生育期减少 23 天，其下降比例分别为 7.2%和 11.1%，相差 3%；温度分别增加 1、2 和 3 °C 时，北京和成都的生育期降低比例的差值均在 3%左右。

随着温度的升高，北京和成都的产量和蒸散量均降低。但是降低的量低于太阳辐射减少时的降低量。温度增加 4 °C，北京和成都的产量分别下降了 0.52 和 1.25 t ha⁻¹，下降百分比分别为 10%和 23.5%。温度每升高一度，北京和成都的小麦产量分别下降 0.1 和 0.3 t ha⁻¹ 左右，下降比例分别为 3%和 5%左右。成都蒸散量的降低量大于北京，当温

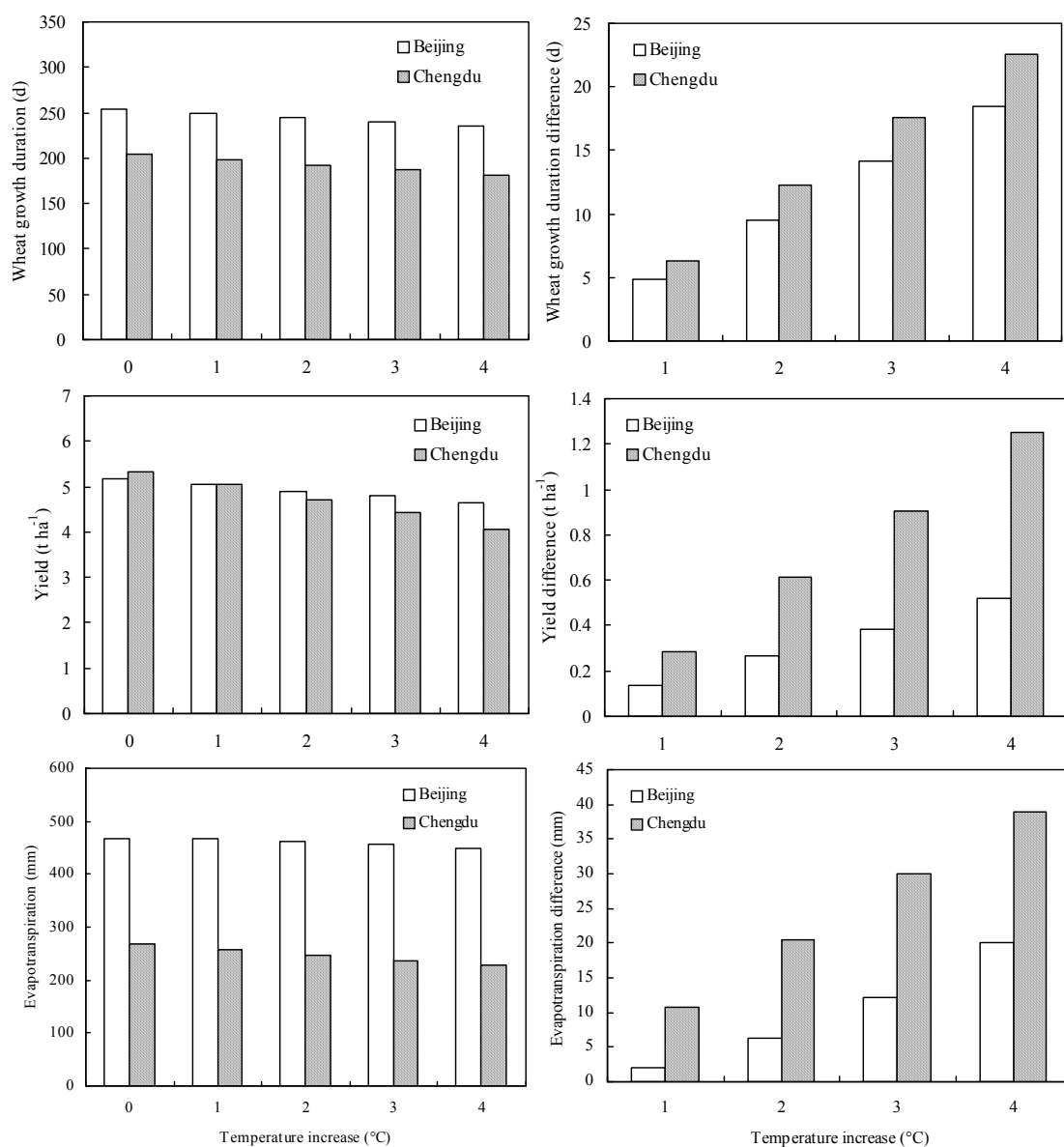


图 6.2 北京（1961-2009）和成都（1961-2003）温度增加对 APSIM 模型模拟生育期、产量和蒸散量的影响。图中每个柱代表的值是北京 48 年模拟值的平均值或者是成都 42 年模拟值的平均值。

Fig. 6.2 Effects of temperature increases on simulated wheat growth duration, wheat yield and evapotranspiration using APSIM at Beijing (1961-2009) and Chengdu (1961-2003). Each bar is the average of 48 years of simulations at Beijing or 42 years at Chengdu.

度增加 4 °C 时，成都和北京的蒸散量分别下降 39 和 20 mm，下降比例分别为 14.6% 和 4.3%。

总之，温度增加相同的量，成都生育期、产量和蒸散量的下降量均高于北京。造成这种结果的原因应该是成都小麦生育期的温度高于北京，其值分别为 11.5 °C 和 7.8 °C，在较高温度基础上温度的增加导致了小麦生育期、产量和蒸散量较大的下降量。成都对太阳辐射的下降和温度的增加比北京地区更敏感，气候变化导致了成都产量显著下降。

6.3.2 对比辐射和温度变化对北京和成都小麦生育期、产量和蒸散量的影响

利用 4 个不同的太阳辐射情景下小麦产量和蒸散量的模拟结果，计算太阳辐射每降低 10% 引起的小麦产量和蒸散量模拟值的绝对和相对变化量的平均值，列于表 6.1 中，温度每上升 1 °C 引起的小麦生育期、产量和蒸散量模拟值的变化计算方法与此相同。由表 6.1 可知，太阳辐射和温度变化对成都地区小麦生育期、产量和蒸散量的影响均高于北京地区。成都地区本身的较高的温度和较低的阳光辐射水平，导致此地区的小麦生产对升温和太阳辐射降低的反应更敏感，因而这个地区的小麦产量下降比例显著高于北京地区。太阳辐射降低 10% 引起的产量和蒸散量下降量明显高于温度升高 1 °C 引起的小麦产量和蒸散量的下降量，表明小麦产量和蒸散量模拟值的变化对辐射降低的响应更敏感。

表 6.1 太阳辐射降低 10% 和温度升高 1 °C，APSIM 分别在北京和成都的生育期、产量和蒸散量模拟值改变量和改变比例。表中每个值均是 4 个情景下的平均值。

Table 6.1 Absolute and relative difference of wheat growth duration, yield and evapotranspiration (ET) simulated by APSIM respectively when solar radiation decrease 10% or temperature increases 1 °C. Each value is average of 4 different climate scenarios.

	Absolute/ Relative difference	Beijing	Chengdu
Solar radiation decrease 10%	Absolute yield difference (t ha ⁻¹)	0.4	0.6
	Relative yield difference (%)	7.9	12.2
	Absolute ET difference (mm)	31.2	20.2
	Relative ET difference (%)	6.7	7.6
Temperature increase 1 °C	Absolute wheat growth duration difference (d)	4.6	5.7
	Relative wheat growth duration difference (%)	1.8	2.8
	Absolute yield difference (t ha ⁻¹)	0.1	0.3
	Relative yield difference (%)	2.5	5.9
	Absolute ET difference (mm)	5	9.7
	Relative ET difference (%)	1.1	3.6

6.4 结论

通过模型的敏感性分析,可以更加清楚的了解模型对气象要素变化的响应。APSIM 模拟结果表明,产量和蒸散量随着太阳辐射的下降而下降,在辐射水平较低的成都太阳辐射的下降导致小麦产量下降比例高于辐射水平较高的北京,成都小麦产量对辐射变化更敏感,太阳辐射将导致该地区小麦产量大幅度下降。两个地区模拟蒸散量随太阳辐射降低的下降比例差异较小,依然是成都的蒸散量下降比例高于北京。

温度升高时,小麦生育期、产量和蒸散量均下降。Ludwig and Asseng (2006) 在澳大利亚地中海气候背景下利用 APSIM 模型研究气候变化对小麦生产的影响,结果表明在粘土条件下,温度升高 2 °C 将稍微提高小麦产量;在气温较高和沙土条件下,升温将导致小麦产量降低。作者解释造成这种结果的原因为,产量相同时粘土条件下小麦的生物量高于沙土条件下,升温后粘土条件下收获指数的提高补偿了由于生育期缩短对小麦产量的降低作用。本研究结果同样表明在不同气候背景下,小麦生产对温度的敏感性不同。在温度水平较高的成都,升温导致的生育期、产量和蒸散量的下降比例均高于温度水平较低的北京。表明成都对温度的变化更敏感。

总之,成都地区的小麦生产对辐射下降和温度升高的响应更敏感。这个结果同时也相应解释了第五章过去 49 年气候变化对成都地区小麦产量和蒸散量模拟值的影响,温度升高和太阳辐射降低的双重影响导致了成都地区小麦产量的显著下降。太阳辐射降低 10%引起的小麦产量和蒸散量模拟值变化明显高于温度升高 1 °C 引起的小麦产量和蒸散量变化,表明在北京和成都两个地区,与温度升高相比,小麦生产对太阳辐射下降的响应更敏感。

第七章 结论与展望

作物生产与环境关系的研究对于提高资源（水分、养分）利用效率、提高作物生产力、辅助作物品种选育、维持农业生产的可持续性、保障粮食安全、促进社会经济的协调发展等方面起着重要作用。小麦是世界的主要粮食作物，中国是小麦的生产和消费大国，各种气候条件下均有小麦种植。本文利用两年的冬小麦新品种种植资料，分析了不同气候条件下小麦产量构成与产量的关系及对产量的贡献，及其与气候条件的关系。对不同地区小麦育种和增产有重要意义。气候变化以辐射降低、温度升高、降水量及频率的变化正影响着作物生产的各个方面。本文从站点尺度，利用作物模型，研究过去 50 年气候变化对新疆绿洲区小麦产量和水分利用的影响；在中国选取典型的辐射下降地区，利用过去 49 年气候资料，研究不同气候背景下伴随着温度升高的辐射降低对小麦产量和水分利用的影响；以北京和成都 49 年的气候资料为基础，设置太阳辐射变化和温度升高的不同情景，模拟小麦产量和蒸散量的变化，分别与原始气候条件下的模拟值做对比，分析模型对辐射变化和温度升高的响应。

7.1 主要结论

农业生产受到气候变化的强烈影响，研究气候变化对小麦产量和水分利用的影响对我国粮食安全问题及提高农业资源利用效率均有重要意义。本文利用试验资料统计分析了中国小麦主产区产量和产量构成因素及其与气象因素的关系；进而利用作物模型模拟分析了我国典型地区气候变化对小麦产量和水分利用的影响。本文主要结论如下：

1. 利用中国冬小麦 4 个主产区接近 70 个站点的两年试验资料，统计分析表明产量和产量构成因素的关系在不同的生产区间不同，在两个生长季度间也存在一定差异。路径分析表明穗数对产量的直接影响最大，千粒重次之，穗粒数对产量的直接影响较小。相关和逐步回归分析结果表明产量与生育期间日照时数正相关，穗数变化的 43.7% 决定于出苗至抽穗期间日照时数和最高温度的变化，穗粒数变化的 43.2% 决定于出苗至抽穗期间最低温度和降雨量的变化，千粒重变化的 9.8% 决定于抽穗至成熟期间的最高温度变化。产量和穗数分别与生育期和出苗至抽穗期积温正相关，穗数和穗粒数与对应生育阶段的积温没有关系。具有较低的温度、较长的日照时数气候特点的生产区域为高产并且稳产的地区，在这样的区域三个产量构成因素对产量的贡献相同即对产量同等重要。在产量水平较低的地区维持较高的穗数对产量的提高很重要。

2. 选择我国气候变化的典型地区，利用田间试验资料验证 APSIM 模型的适用性，结合过去 50 年气候资料，模拟分析气候变化对我国小麦潜在产量和水分利用的影响，主要结论分别为：

(1) 在新疆绿洲地区验证和评价了 APSIM 模型模拟作物生产的有效性, 结果表明模型能较好的模拟乌兰乌苏、东坎和莎车试验站的叶面积指数和地上生物量的增长动态。由于模型对新疆地区春季增温快, 光照充足的气候条件敏感性不足, 模型有些低估了叶面积指数和地上生物量。模拟分析 1955-2006 年气候变化对小麦产量和水分利用的影响, 结果表明乌兰乌苏和莎车试验站, 1955-2006 年间温度升高、太阳辐射下降导致冬小麦生育期和蒸散量显著下降; 乌兰乌苏试验站小麦产量没有明显变化趋势, 莎车试验站小麦产量显著下降。东坎试验站 1955-2006 年春小麦生育期间太阳辐射无变化趋势, 温度升高, 其产量、生育期和蒸散量的模拟值均无明显变化趋势。相关和逐步回归分析表明太阳辐射的变化是影响产量和蒸散量的主要气象因素。

(2) 北京、济南、成都和乌鲁木齐 1961-2009 年间小麦生长季太阳辐射下降趋势分别为 -0.061 、 -0.042 、 -0.059 和 -0.026 $\text{MJ m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最低温度的上升趋势分别为 0.08 、 0.038 、 0.034 和 0.047 $^{\circ}\text{C a}^{-1}$ 。APSIM 模拟结果表明北京和济南的小麦产量无显著变化趋势, 成都的模拟产量显著下降。太阳辐射的变化解释了成都产量变化的 73.6%。由于最低温度和降雨量的增加过去 48 年乌鲁木齐的模拟产量显著增加。四个站点蒸散量模拟值随着太阳辐射的降低而下降。北京、济南和乌鲁木齐的水分利用效率增加, 成都无明显变化。表明在太阳辐射水平较高的地区, 伴随着温度升高的太阳辐射的下降对产量无影响并提高水分利用效率, 在太阳辐射水平较低的地区, 太阳辐射降低使籽粒产量显著下降。

(3) 在过去 49 年气候背景下, 利用 APSIM 模型研究了北京和成都辐射变化和温度升高单个气象因素变化对小麦产量和水分利用的影响。结果表明, 辐射降低和温度升高均引起产量和蒸散量的下降。太阳辐射水平较低的成都地区小麦产量对辐射下降更敏感, 下降比例显著高于北京, 成都地区小麦蒸散量模拟值下降量略高于北京地区。成都温度的升高导致的小麦产量和蒸散量下降均高于北京, 表明温度水平较高的地区小麦生产对升温的变化更敏感。在不同气候背景下, 辐射和温度的变化对小麦产量和蒸散量的影响不同, 温度较高和太阳辐射水平较低的成都地区小麦生产对升温和太阳辐射的降低更敏感。

7.2 讨论和展望

关于小麦产量和产量构成关系研究, 在世界各地均有报道, 然而由于作物品种、栽培措施、气候条件等多方面的影响使得研究结果均不相同。本文在中国小麦主产区, 利用两年的栽培资料, 分析了小麦产量和产量构成因素的关系及其与气象条件的关系, 某种程度上揭示了中国小麦产量构成特性, 对不同生产条件下的小麦增产提出一些建议。但是正如前文所述, 产量和产量构成因素的关系易受各种因素的影响, 还需要更多的试验资料来补充和证实。我国小麦种植面积广, 从西北到东南均有种植, 有利于研究不同的光温水条件对小麦产量和产量构成因素的影响和限制。

尽管已有不少报道从多种尺度研究气候变化对作物生产的影响, 但是气象因素间的

复杂的交互作用以及作物对气候变化的不同的响应, 依然使这个问题成为研究中的热点和难点。气候变化威胁到粮食安全问题, 以及气候变化对农业资源的高效利用和可持续发展的影响是人们关心的重点问题。本文在过去 50 年气候变化的背景下, 利用作物模型模拟分析气候变化对小麦潜在产量和水分利用的影响, 对进一步认识这个问题有一定借鉴作用。然而, 对于作物生产这个复杂的系统, 气候变化对其影响的结论均是在一定的假设和特定的基础上才成立, 因此存在各种不同的结论, 并且结论之间难以讨论和比较。气候变化对作物生产的影响研究, 仍然需要大量的工作进一步深入和发展。作者根据本文研究结果展开如下简单的评论和展望:

1. APSIM 模型在新疆地区的验证过程中, 出现对春季升温后的小麦 LAI 和生物量的模拟值偏低的情况。模型对新疆地区春季升温较快和太阳辐射较强的气候条件不够敏感, 导致低估了小麦生长速率, 同时造成对小麦最终产量的模拟值也偏低。在以后的研究中可以考虑进一步的改进模型, 采用中国的研究结果对作物光合、蒸腾系数等参数进行修订, 使其更好地服务与中国区域的研究。

2. 由于气候变化以及作物生产的复杂性, 气候变化对作物生产的研究往往基于一定的假设或特定的基础, 因而不同环境中得出的结论往往不同或者各有侧重。比如本文中主要揭示了不同气候背景下辐射和温度变化对小麦潜在产量和水分利用的影响, 气候变化方面没有考虑 CO_2 浓度的增加; 由于设置了充分灌溉的条件, 降雨量变化也少有考虑; 小麦生产方面也没有考虑肥料、栽培措施、病虫害的影响。由于气候因素交互作用以及作物生产系统的复杂性, 作物模型研究气候变化对作物生产的影响仍需要更多的试验和机理研究的支持。

3. 作物模型是研究气候变化对作物生产影响的重要工具, 模拟分析得出的所有结论的可靠性主要依赖于作物模型的结构和对作物生理生化过程模拟的合理性。作物模型一直处于改进和完善的过程中。例如模型中根据辐射截获量和辐射利用效率 (RUE) 来计算作物的干物质累积, 因而 RUE 的计算方法对模型计算干物质非常重要。最近不少文献指出总辐射的大小以及散射辐射的比例均会影响到 RUE, 作物模型应给予充分考虑。然而多数模型中根据太阳辐射计算辐射利用效率的公式仍然经验公式, 为提高作物模型的可靠度应开展进一步的试验研究, 改进 RUE 的计算公式。

参考文献

1. Aggarwal, P. K., 2003. Impact of climate change on Indian agriculture. *J. Plant Biology*. 30: 189-198.
2. Asseng, S., Fillery, I.R.P., Anderson, G.C., Dolling, P.J., Dunin, F.X., Keating, B.A., 1998a. Use of the APSIM wheat model to predict yield, drainage, and NO₃ leaching for a deep sand. *Aust. J. Agric. Res.* 49: 363-377.
3. Asseng, S., Fillery, I.R.P., Dunin, F.X., Keating, B.A., Meinke, H., 2001a. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate. I. Temporal and spatial variability. *Aust. J. Agric. Res.* 52: 45-56.
4. Asseng, S., Jamieson, P.D., Kimball, B., Pinter, P., Sayer, K., Bowden, J.W., Howden, S.M., 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crop Res.* 85: 85-102.
5. Asseng, S., Keating, B.A., Fillery, I.R.P., Gregory, P.J., Bowden, J.W., Turner, N.C., Palta, J.A., Abrecht, D.G., 1998b. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. *Field Crop. Res.* 57: 163-179.
6. Asseng, S., Turner, N., Keating, B., 2001b. Analysis of water-and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant and soil*. 233: 127-143.
7. Asseng, S., van Keulen, H., Stol, W., 2000. Performance and application of the APSIM N-wheat model in the Netherlands. *Eur. J. Agron.* 12: 37-54.
8. Balwinder, S., Gaydon, D.S., Humphreys, E., Eberbach, P.L., 2011. The effects of mulch and irrigation management on wheat in Punjab, India-Evaluation of the APSIM model. *Field Crops Res.* 124: 1-13.
9. Bender, J., Hertstein U., Black, C., 1999. Growth and yield responses of spring wheat to increasing carbon dioxide, ozone and physiological stresses: A statistical analysis of 'ESPACE-wheat' results. *Eur. J. Agron.* 10:185-195.
10. Bierhuizen, J.F., Slayter, R.O., 1965. Effect of atmospheric concentration of water vapour and CO₂ in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves. *Agric. Briggs L.J., Shantz, H.L., 1916. Daily transpiration during the normal growth period and its correlation with the weather. J. Agr. Res.* 7: 155-212.
11. Borra's, L., Slafer, G.A., Otegui, M.E., 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Res.* 86: 131-146.
12. Brouder, S.M., Volenc, J.J., 2008. Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. *Physiologia Plantarum*. 133: 705-724.
13. Burn, D. H., Hesch, N. M., 2007. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *J. Hydrol.*, 336: 61-73.

14. Carberry, P.S. Abrecht, D.G., 1991. Tailoring crop models to the semi-arid tropics: In: RC Muchow and JA Bellamy (Eds) Climatic risk in crop production: Models and management in the semi-arid tropics and sub-tropics. Cab International, Wallingford . P. 157-182.
15. Challinor, A., Slingo, J., Wheeler, T., Craufurd, P., Grimes, D., 2003. Toward a combined seasonal weather and crop productivity forecasting system: determination of the working spatial scale. *J. Appl. Meteorol.* 42: 175-192.
16. Chameides, W.L., Yu, H., Liu, S., Bergin, M., Zhou, X., Mearns, L., Wang, G., Kiang, C., Saylor, R., Luo, C., 1999. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 96: 13626-13633.
17. Che, H., Shi, G., Zhang, X., Zhao, J., Li, Y., 2007. Analysis of sky conditions using 40 year records of solar radiation data in China. *Theor. Appl. Climatol.* 89: 83-94.
18. Che, H.Z., Shi, G.Y., Zhang, X.Y., Arimoto, R., Zhao, J.Q., Xu, L., Wang, B., Chen, Z.H., 2005. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961-2000. *Geophys. Res. Lett.* 32.
19. Chen, C., Baethgen, W.E., Wang, E., Yu, Q., 2011. Characterizing spatial and temporal variability of crop yield caused by climate and irrigation in the North China Plain. *Theor. Appl. Climatol.* 1-17.
20. Chen, C., Wang, E., Yu, Q., Zhang, Y., 2009. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961-2003) on crop growth and water demand in the North China Plain. *Clim. Change.* 100: 559-578.
21. Chen, W., Shen, Y.Y., Robertson, M., Probert, M., Bellotti, B., Nan, Z.B., 2004. Simulation of crop growth and soil water for different cropping systems in the Gansu Loess Plateau, China using APSIM, *Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26 September-1 October.*
22. Chmielewski, F.M., Müller, A., Bruns, E., 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agric. For. Meteorol.* 121: 69-78.
23. Chmielewska, F.-M., Kohn, W., 1999. Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agric. For. Meteorol.* 96: 49-58.
24. Choudhury, B., 2001. Modeling radiation-and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. *Agric. For. Meteorol.* 106: 317-330.
25. Chowdhry, M.A., Ali, M., Subhani, G.M., Khaliq, I. 2000. Path coefficients analysis for water use efficiency, evapo-transpiration efficiency and some yield related traits in wheat at different micro environments. *Environ. Ecol.* 9: 906-910.
26. Chowdhury, S.I.C., Wardlaw, I. F. 1978. The effect of temperature on kernel development in cereals. *Aust. J. Agric. Res.* 29: 205-233.
27. Dalgliesh, N.P., Foale, M.A., 1998. Soil Matters-monitoring soil water and nitrogen in dryland farming. *Agricultural Production Systems Research Unit, Toowoomba, Australia.*

28. De Wit, A., Van Diepen, C. 2008. Crop growth modelling and crop yield forecasting using satellite-derived meteorological inputs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 10: 414-425.
29. Dhungana, P., Eskridge, K.M., Weiss, A., Baenziger, P.S. 2006. Designing crop technology for a future climate: an example using response surface methodology and the CERES-Wheat model. *Agric. Syst.* 87: 63-79.
30. Diepen, C.A., Wolf, J., Keulen, H., Rappoldt, C., 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil use and management*. 5: 16-24.
31. Ding, Y., Ren, G., Zhao, Z., Xu, Y., Luo, Y., Li, Q., Zhang, J. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. *Advances in Atmospheric Sciences*. 24: 954-971.
32. Dobson, A.P., Bradshaw, A.D., Baker, A.J.M. 1997. Hopes or the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science*. 277: 515-521.
33. Doherty, A., Sadras, V., Rodriguez, D., Potgieter, A., 2009. Quantification of wheat water-use efficiency at the shire-level in Australia. *Crop and Pasture Science*. 61: 1-11.
34. Duggan, B. L., Fowler, D. B. 2006. Yield Structure and Kernel Potential of Winter Wheat on the Canadian Prairies. *Crop Sci.* 46: 1479-1487.
35. Easterling W.E., Aggarwal P.K., Batima P., Brander K.M., Erda L., Howden S.M., Kirilenko A., Morton J., Soussana J-F, Schmidhuber J., Tubiello F.N., 2007. Food, fibre and forest products. In: ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden, and CE Hanson (eds) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 273–313. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
36. Ewert, F., Rodriguez, D., Jamieson, P., Semenov, M.A., Mitchell, R.A.C., Goudriaan, J., Porter, J.R., Kimball, B.A., Pinter Jr., P.J., Manderscheid, R., Weigel, H.J., Fangmeier, A., Fereres, E., Villalobos, F., 2002. Effects of elevated CO₂ and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93: 249-266.
37. Fischer, R.A., 1984. Growth and yield of wheat. In: W.H. Smith and S.J. Bante, editors, *Potential productivity of field crops under different environments*. International Rice Research Institute, Philippines. p. 129-154.
38. Fischer, R.A., 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105: 447-461.
39. Fischer, R.A., 1996. Wheat physiology at CIMMYT and raising the yield plateau. p. 195-203. In M.P. Reynolds (ed.) *Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers*. CIMMYT, Mexico.
40. Fischer, R.A., 2007. Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *J. Agric. Sci.* 145: 99-113.

41. Fischer, R.A., 2008. The importance of grain or kernel number in wheat: A reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Res.* 105:15-21.
42. Fischer, R.A., 2011. Wheat physiology: a review of recent developments. *Crop & Pasture Science.* 62: 95-114.
43. Fischer, R.A., Turner, N.C., 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 29: 277-317.
44. Fu, G., Charles, S., Yu, J., 2009. A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Clim. Change.* 97: 193-214.
45. Furkan, M.A., Demir I., Yüce S., Akçalıcan R.R., Aykut F., 2005. Research on aegean region triticale variety development studies and relationships among yield and quality components in the development variety and lines. *J. Fac. Agric., Akdeniz Univ.* 18: 251-256.
46. Garcı́a del Moral, L. F., Rharrabti, Y., Villegas, D., Royo, C., 2003. Evaluation of grain yield and its components in durum wheat under Mediterranean conditions: an ontogenic approach. *Agron. J.* 95: 266-274.
47. Garcı́a del Moral, L.F., Ramos J.M., Garcı́a Del Moral M.B., Jimenez-Tejada P., 1991. Ontogenetic approach to grain production in spring barley based on path-coefficient analysis. *Crop Sci.* 31: 1179-1185.
48. Goyal, R.K., 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agric. Water Manag.* 69: 1-11.
49. Grafius, J.E., 1972. Competition for environmental resources by component characters. *Crop Sci.* 12: 364-378.
50. Groisman, P.Y., Knight, R.W., Karl, T.R., Easterling, D.R., Sun, B., Lawrimore, J., 2004. Contemporary changes of the hydrological cycle over the contiguous United States: Trends derived from in situ observations. *J. Hydrometeorol.* 5: 64-85.
51. Hamid, Z.A., Grafius, J.E., 1978. Developmental allometry and its implication to grain yield in barley. *Crop Sci.* 18: 83-86.
52. Hammer G., Cooper M., Tardieu F., Welch S., Walsh S., Van Eeuwijk F., Chapman S., Podlich D., 2006. Models for navigating biological complexity in breeding improved crop plants. *Trends in Plant Sci.* 11(12): 587-593.
53. Hammer, G.L., Muchow, R.C. 1991. Quantifying climatic risk to sorghum in Australia's semi-arid tropics and subtropics: model development and simulation. In *Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for the Semi-arid Tropics and Subtropics*, eds Muchow R.C., Mellamy J.A.C. 16, Wallingford, CAB International, pp. 205-232.
54. Hammer, G.L., Sinclair, T.R., Boote, K.J., Wright, G.C., Meinke, H., Bell, M. J., 1995. A peanut simulation model: I. Model development and testing. *Agron. J.* 87: 1085-1093.

55. Harmsen, E.W., Miller, N.L., Schlegel, N.J., Gonzalez, J.E., 2009. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. *Agric. Water Manag.* 96: 1085-1095.
56. Hatfield, J., Kimball, K., Ziska, B., Izaurralde, L., Ort, R., Thomson, D., Wolfe, A., 2011. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agron. J.* 103: 351-370.
57. Heng, L.K., Asseng, S., Mejahed, K., Rusan, M., 2007. Optimizing wheat productivity in two rain-fed environments of the west Asia-north Africa region using a simulation model. *Eur. J. Agron.* 26: 121-129.
58. Hulme, M. eds. 1996. *Climate Change and Southern Africa*. Norwich, United Kingdom: Climatic Research Unit, University of East Anglia. 104-115
59. IPCC, 2007. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 18.
60. Jones, C., Kiniry, J., 1986. *CERES-Maize: A stimulation model of maize growth and development*. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX, 194.
61. Jones, C.A., Ritchie, J.T., Kiniry, J.R., 1986. Subroutine structure. In: Jones, C.A., Kiniry, J.R. eds. *CERES-Maize-A Simulation Model of Maize Growth and Development*. College Station: Texas A & M University Press. pp. 49-111.
62. Jones, H.G., 1992. In: *Plant and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*, 2nd ed. Cambridge University Press, pp. 428.
63. Jones, J.W., Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Thornton, P.K., Wilkens, P.W., Imamura, D.T., Bowen, W.T., Singh, U., 1998. Decision support system for agrotechnology transfer. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agric. Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 157-177.
64. Kaiser, D., Qian, Y., 2002. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954-1998: Indication of increased haze pollution? *Geophys. Res. Lett.* 29: 2042.
65. Karl, T.R., Melillo J.M., Peterson T.C. (ed.). 2009. *Global climate change impacts in the United States*. Cambridge Univ. Press, New York.
66. Kashif, M., Khaliq, I. 2004. Heritability, correlation and path coefficient analysis for some metric traits in wheat. *Int. J. Agri. Biol.* 6: 138-142.
67. Kattge, J., Knorr, W. 2007. Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species. *Plant Cell Environ.* 30: 1176-1190.
68. Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn,

- D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18: 267-288.
69. Keating, B.A., Gaydon, D., Huth, N.I., Probert, M.E., Verburg, K., Smith, C. J., Bond, W., 2002. Use of modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling Basin, Australia. *Europ. J. Agron.* 18: 159-169.
70. Keating, B.A., Meinke, H., Probert, M.E., Huth, N.I., Hills, I.G., 2001. NWheat: documentation and performance of a wheat module for APSIM. *Tropical Agri. Technical Memo.*
71. Khaliq, I., Parveen, N., Chowdhry, M.A., 2004. Correlation and path coefficient analyses in bread wheat. *Int. J. Agri. Biol.* 4: 633-635.
72. Kobza, J., Edwards, G.E., 1987. Influences of leaf temperature on photosynthetic carbon metabolism in wheat. *Plant Physiol.* 83: 69-74.
73. Kumar, A.B.N., Hunshal, C.S., 1998. Correlation and path coefficient analysis in durum wheats (*Triticum durum* Desf.) under different planting dates. *Crop Res. Hisar*, 16: 358-361.
74. Lawlor, D.W., Mitchell, R.A.C., 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: Wheat. p. 57-80. *In: K.R. Reddy, and H.F. Hodges (ed.) Climate change and global crop productivity.* CAB Int., New York.
75. Li, C.Q., Li, B.G., Hong, K.Q., 2008. Climate change and its effect on reference evapotranspiration and crop water requirement in Hebei Province, China during 1965-1999. *J. Agrometeoro.* 10: 261-265.
76. Li, Y.L., Cui, J.Y., Zhang, T.H., Zhao, H.L., 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China. *Agricultural Water Management.* 61: 1-12.
77. Liang, F., Xia, X., 2005. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000. *Annales Geophysicae.* 23: 2425-2432.
78. Liang, L. Q., Li, L. J., Zhang, L., Li, J. Y., Li, B., 2008. Sensitivity of penman-monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River Basin of northeastern China. *Chinese Geographical Science.* 18: 340-347.
79. Littleboy, M., Silburn, D.M., Freebairn, D.M., 1989. PERFECT-a compute simulation model of productivity erosion runoff functions to evaluate conservation techniques[R]. Brisbane, Australia: Queensland Department of Primary Industries.
80. Liu H., Li X.B., Fischer G., Sun L.X., 2004. Study on the impacts of climate change on China's agriculture. *Climatic Change.* 65: 125-148.
81. Liu, B., Ma, Z.G., Xu, J.J., Xiao, Z.N., 2009. Comparison of pan evaporation and actual evaporation estimated by land surface model in Xinjiang from 1960 to 2005. *J. Geogr. Sci.* 19: 502-512.
82. Liu, S.X., Mo, X.G., Lin, Z.H., Xu, Y.Q., Ji, J.J., Wen, G., Richey, J., 2010. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agric. Water Manag.* 97: 1195-1209.

83. Lobell, D. B., Burke, M. B., 2008. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environ. Res. Lett.* 3: 1-8.
84. Lobell, D.B., Asner, G.P., 2003. Climate and management contributions to recent trends in US Agricultural Yields. *Science*. 299: 1032.
85. Lobell, D.B., Cahill, K.N., Field, C.B., 2007. Historical effects of temperature and precipitation on California crop yields. *Climate Change*. 81: 187-203.
86. Lobell, D.B., Field, C.B., 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* 2: 1-7.
87. Lobell, D.B., Field, C.B., 2008. Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961. *Global Change Biol.* 14: 39-45.
88. Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Matson, P.A., Naylor, R.L., Falcon, W.P., 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Res.* 94: 250-256.
89. Long, S.P., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D.B., Nosberger, J., Ort, D.R., 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*. 312: 1918-1921.
90. Lotze-Campen, H. Climate change, population growth, and crop production: an overview. 2011. In: Yadav, S.S., Redden, R., Hatfield, J.L., Lotze-Campen, H. and Hall, A, editors, *Crop adaptation to climate change*. Wiley Online Library. DOI: 10.1002/9780470960929.fmatter. p. 1-11.
91. Lu P. L., Qiang Yu, Wang, E. L., Liu J. D., 2008. Impacts of climate variability on rice development across Southeast China. *Climate Research*. 36: 79-88.
92. Ludwig, F., Asseng, S., 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agric. Syst.* 90: 159-179.
93. Ludwig, F., Milroy, S.P., Asseng, S., 2009. Impacts of recent climate change on wheat production systems in Western Australia. *Clim. Change*. 92: 495-517.
94. Luo, Q.Y., Bellotti, W., Williams, M., Bryan, B., 2005. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. *Agric. Forest. Meteorol.* 132: 273-285.
95. Malone R.W., Ma L., Heilman P., Karlen D.L., Hatfield J.L., 2007. Simulated N management effects on corn yield and tile-drainage nitrate loss. *Geoderma*. 140: 272-283.
96. McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G, Holzworth, D., Freebairn, D., 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agr. Syst.* 50: 255-271.
97. McMaster, G.S., 1997. Phenology, development, and growth of the wheat (*Triticum aestivum* L.) shoot apex: a review. *Adv. Agron.* 59:63-118.
98. McMaster, G.S., 2005. Centenary review: phytomers, phyllochrons, phenology and temperate cereal development. *J. Agric. Sci. (Camb.)* 143:137-150.
99. McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., Bartling, P.N.S., 1994. Irrigation and culm contribution to yield and yield components of winter wheat. *Agron. J.* 86: 1123-1127.

100. McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., Frank, A.B., 2005. Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. *Aust. J. Agric. Res.* 56: 1277-1288.
101. Meinke, H., Hammer, G.L., Van Keulen, H., Rabbinge, R., 1998. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective III: The integrated wheat model (I-WHEAT). *Eur. J. Agron.* 8: 101-116.
102. Michacel, L.R., Graham, D.F., 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science.* 298: 1410-1411.
103. Milligan, S.B., Gravois, K.A., Bischoff, K.P., Martin, F.A., 1990. Crop effect on genetic relationships among sugarcane traits. *Crop Sci.* 30: 927-931.
104. Miralles, D.J., Slafer, G.A., 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *J. Agri. Sci.* 145: 139-149.
105. Mo, X.G., Liu, S.X., Lin, Z.H., Guo, R.P., 2009. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. *Agric. Ecosyst. Environ.* 134: 67-78.
106. Monteith, J., 1988. Does transpiration limit the growth of vegetation or vice versa? *J. Hydrol.* 100, 57-68.
107. Motha, R.P., Baier, W., 2005. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America. *Climate Change.* 70: 137-164.
108. Munir, M., Chowdhry, M.A., Malik, T.A., 2007. Correlation studies among yield and its components in bread wheat under drought conditions. *Int. J. Agri. Biol.* 9: 287-290.
109. Nicholls, N., 1997. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature.* 387: 484-485.
110. Okuyama, L.A., Federizzi, L. C., Neto, J.F.B., 2004. Correlation and path analysis of yield and its components and plant traits in wheat. *Ciencia Rural, Santa Maria,* 34: 1701-1708.
111. Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., Fischer, G., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socioeconomic scenarios. *Global Environmental Change.* 14: 53-67.
112. Pathak, H., Ladha, Aggarwal, P. K., Peng, S., Das, S., Singh, Y., Singh, B., Kamra, S. K., Mishra, B., Sastri, A. S. R. A. S., Aggarwal, H. P., Das, D. K., Gupta, R. K., 2003. Trends of climatic potential and on-farm yields of rice and wheat in the Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Res.* 80: 223-234.
113. Pathak, H., Wassmann, R., 2009. Quantitative evaluation of climatic variability and risks for wheat yield in India. *Clim. Change.* 93: 157-175.
114. Peng, S.B., Huang, J.L., Sheehy, J.E., Laza, R.M., Visperas, R.C., Zhong, X.H., Centeno, G.S., Khush, G.S., Cassman, K.G., 2004. Rice yield decline with higher night temperature from global warming. *Proc. Nat. Acad. of Sci., USA.* 101: 9971-9975.

115. Penning de vries, F.W.T., Jansen, D.M., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Wageningen: hudoc, 1-211.
116. Porter, J.R., Semenov, M.A., 2005. Crop responses to climatic variation. *Phil Trans R Soc Lond B Biol. Sci.* 360: 2021-2035.
117. Prasad, P.V.V., Pisipati, S.R., Ristic, Z., Bukovnik, U., Fritz, A.K., 2008. Effect of night time temperature on physiology and growth of spring wheat. *Crop Sci.* 48: 2372-2380.
118. Probert, M., Dimes, J., Keating, B., Dalal, R., Strong, W., 1998. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agricultural Systems.* 56: 1-28.
119. Pushpalatha, P., Sharma-natu, P., Ghildiyal, M.C., 2008. Photosynthetic response of wheat cultivar to long-term exposure to elevated temperature. *Photosynthetica.* 46: 552-556.
120. Qian, B., De Jong, R., Warren, R., Chipanshi, A., Hill, H., 2009. Statistical spring wheat yield forecasting for the Canadian Prairies. *Agric. Forest Meteorol.* 149: 1022-1031.
121. Qian, Y., Kaiser, D., Leung, L., Xu, M., 2006. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000. *Geophys. Res. Lett.* 33: L01812.
122. Qian, Y., Wang, W., Leung, L., Kaiser, D., 2007. Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: The role of aerosols. *Geophys. Res. Lett.* 34: L12804.
123. Ren J., Chen Z., Zhou Q., Tang H., 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 10(4): 403-413.
124. Reyenga, P.J., Howden, S.M., Meinke, H., Hall, W.B., 2001. Global change impacts on wheat production along an environmental gradient in South Australia. *Envir. Intern.* 27: 195-200.
125. Reynolds, M., Foulkes, J.M., Slafer, G.A., Berry, P., Parry, M.A.J., Snape, J.W., Angus, W.J., 2009. Raising yield potential in wheat. *J. Expt. Bot.* 60: 1899-1918.
126. Ritchie, J., Godwin, D., Otter-Nacke, S., 1985. CERES-wheat: A user-oriented wheat yield model. Preliminary documentation. AGRISTARS Publication No. YM-U3-04442-JSC-18892. Michigan State University. East Lansing, USA.
127. Ritchie, J.T., 1986. Model inputs. In: Jones C.A., Kiniry J.R. (Eds). *CERES-Maize-A Simulation Model of Maize Growth and Development.* College Station: Texas A & M University Press, 37-48.
128. Ritchie, J.T., 1987. IBSNAT and CERES-Rice model. *Wheat and rice, IRRI,* 271-282.
129. Roderick, M., Farquhar, G., Berry, S., Noble, I., 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia.* 129: 21-30.
130. Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science.* 298: 1410-1411.
131. Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology.* 24: 1077-1090.

132. Roderick, M.L., Farquhar, G.D., 2006. A physical analysis of changes in Australian pan evaporation. Land & Water Australia Technical Report ANU49, The Australian National University, Canberra, Australia.
133. Roderick, M.L., Rotstayn, L.D., Farquhar, G.D., Hobbins, M.T., 2007. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophys. Res. Lett.* 34.
134. Rodriguez, D., Sadras, V., 2007. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand. *Aust. J. Agric. Res.* 58: 287-302.
135. Sayre, K. D., Rajaram, S., Fisher, R.A., 1997. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Sci.* 37: 36-42.
136. Schlenker, W., Roberts, M.J., 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106: 15594-15598.
137. Sinclair, T., Muchow, R., 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy.* 65: 215-265.
138. Sinclair, T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. *Field Crops Res.* 15: 125-141.
139. Sofield, I., Evans, L.T., Cook, M.G., Wardlaw, I.F., 1977. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Aust. J. Plant Physiol.* 4: 785-797.
140. SPSS 13.0 for Windows and SmartViewer. 2004. SPSS Inc., Chicago Ill.
141. Stanhill, G., 2002. Is the class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agric. For. Meteorol.* 112: 233-236.
142. Stanhill, G., Cohen, S., 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.* 107: 255-278.
143. Stockle, C., Kermanian, A.R., 2009. Crop radiation capture and use efficiency: a framework for crop growth analysis. IN: V. Sadras and D. Calderini, editors, *Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy.* Academic Press, London. p. 145-170.
144. Sun, C.Q., Gao, F., Qu, J.S., 2002. Latest knowledge on global climate change. *Nature.* 24: 114-122
145. Supit, I., Hooijer, A.A., van Diepen, C.A., (Eds.) 1994. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Publication EUR 15956 EN of the Office for Official Publications of the E.U. Luxembourg.
146. Supit, I., van Diepen, C., Boogaard, H., Ludwig, F., Baruth, B., 2010. Trend analysis of the water requirements, consumption and deficit of field crops in Europe. *Agric. For. Meteorol.* 150: 77-88.
147. Swain, D.K., Herath, S., Saha, S., Dash, R.N., 2007. CERES-Rice model: Calibration, evaluation and application for solar radiation stress assessment on rice production. *J. Agrometeorol.* 9: 138-148.
148. Tammam, A.M., Ali, S.A., El-Sayed, E.A.M., 2000. Phenotypic, genotypic correlations and path coefficient analysis in some bread wheat crosses. *Assiut J. Agric. Sci.* 31: 73-85.

149. Tanner, C.B., Sinclair, T.R., 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. Amer. Soc. Agron. 1-27.
150. Tao F.L., Yokozawa, M., Liu, J.Y., Zhang, Z., 2008. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends *Clim. Res.* 38: 83-94.
151. Tao, F., Hayashi, Y., Zhang, Z., Sakamoto, T., Yokozawa, M., 2008. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. *Agric. For. Meteorol.* 148: 94-110.
152. Tao, F.L., Yokozawa, M., Hayashi, Y., Lin, E., 2003. Changes in agricultural water demands and soil moisture in China over the last half-century and their effects on agricultural production. *Agric. For. Meteorol.* 118: 251-261.
153. Tao, F.L., Yokozawa, M., Xu, Y.L., Hayashi, Y., Zhang, Z., 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981-2000. *Agric. For. Meteorol.* 138: 82-92.
154. Tao, F.L., Yokozawa, M., Zhang, Z., Hayashi, Y., Grassl, H., Fu, C., 2004. Climatological and agricultural production variability in China in association with East Asia Monsoon and El Niño Southern Oscillation. *Clim. Res.* 28: 23-30.
155. Thomson, A.M., Izaurralde, R.C., Rosenberg, N.J., He, X., 2006. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 114: 195-209.
156. Tong C., Hall C. A. S., Wang H. Q., 2003. Land use change in rice, wheat and maize production in China (1961-1998). *Agric. Ecosyst. Environ.* 95: 523-536.
157. Tong, L., Kang, S.Z., Zhang, L., 2007. Temporal and spatial variations of evapotranspiration for spring wheat in the Shiyang river basin in northwest China. *Agric. Water Manag.* 87: 241-250.
158. Tong, X.J., Li, J., Yu, Q., Qin, Z., 2009. Ecosystem water use efficiency in an irrigated cropland in the North China Plain. *J. Hydrol.* 374: 329-337.
159. Tsuji, G.Y., 1998. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 367-381.
160. Uehara, G., Tsuji, G.T., 1991. Progress in crop modelling in the IBSNAT Project. In: Muchow, R.C. and Bellamy, J.A., Editors, 1991. *Climate Risk in Crop Production: Models and Management for the Semiarid Tropics and Subtropics*, CAB International, Wallingford, pp. 143-156.
161. Van Ittersum, M.K., Howden, S.M., Asseng, S., 2003. Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping systems in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agric. Ecosyst. Env.* 97: 255-273.
162. Van Kenlen, H., 1982. Crop production under semi - arid conditions, as determined by nitrogen and moisture availability. *Simulation Monographs*, Wageningen: Pudoc, 234-251.

163. Verburg, K., Bond, W.J., 2003. Use of APSIM to simulate water balances of dryland farming systems in south eastern Australia. Technical Report 50/03, CSIRO Land and Water, Canberra, Australia.
164. Walker, J.N., Splinter, W.E., 1971. Mathematical Modeling of Plants - Introduction. *Transactions of the Asae*. 14, 945.
165. Walker, N.J., Schulze, R.E., 2008. Climate change impacts on agro-ecosystem sustainability across three climate regions in the maize belt of South Africa. *Agr. Ecosyst. Environ.* 124: 114-124.
166. Wang J., Qiang Yu, Li J., 2006. Simulation of diurnal variations of CO₂, water and heat fluxes over winter wheat with a model coupled photosynthesis and transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 194-219.
167. Wang, E.L., Robertson, M.R., Hammer, G.L., Carberry, P., Holzworth, D., Hargreaves, J., Huth, N., Chapman, S., Meinke, H., McLean, G., 2003. Design and implementation of a generic crop module template in the cropping system model APSIM. *Eur. J. Agron.* 18: 121-140.
168. Wang, E.L., Xu, J.X., Smith, C.J., 2008a. Value of historical climate knowledge, SOIbased seasonal climate forecasting and stored soil moisture at sowing in crop nitrogen management in south eastern Australia. *Agric. Forest Meteorol.* 148: 1743-1753.
169. Wang, E.L., Yu, Q., Wu, D.R., Xia, J., 2008b. Climate, agricultural production and hydrological balance in the North China Plain. *Int. J. Climatol.* 28: 1959-1970.
170. Wang, G.G., Qian, H., Klinka, K., 1994. Growth of *Thuja plicata* seedlings along a light gradient. *Can. J. Bot.* 72: 1749-1757.
171. Wang, J., Wang, E.L., Luo, Q.Y., Kirby, M., 2009. Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia. *Climatic Change.* 96: 79-96.
172. Wardlaw, I.F., Wrigley, C.W., 1994. Heat tolerance in temperate cereals: an overview. *Aust. J. Plant Physiol.* 21: 695-703.
173. Wild, M. 2009. Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.* 114.
174. Wong, M.T.F., Asseng, S., 2006. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of upscaling a crop model. *Plant and soil.* 283: 203-215.
175. Wu, D.R., Yu, Q., Lu, C.H., Hengsdijk, H., 2006. Quantifying production potentials of winter wheat in the North China Plain. *Eur. J. Agron.* 24: 226-235.
176. Wu, S., Yin, Y., Zheng, D., Yang, Q., 2006. Moisture conditions and climate trends in China during the period 1971- 2000. *Int. J. Climatol.* 26: 193-206.
177. Xiao, T.G., Zhang, Q., Yao, Zhao, Y. H., Wang, R., Bai, H., Zhang, F. 2008. Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 127: 37-42.
178. Xing, H.T., Wang, E.L., Smith, C.J., Rolston, D., Yu, Q., 2011. Modelling nitrous oxide and carbon dioxide emission from soil in an incubation experiment. *Geoderma.* 167-168: 328-339.

179. Xu, C., Gong, L., Jiang, T., Chen, D., Singh, V., 2006. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *J. Hydrol.* 327: 81-93.
180. Yu Q., Saseendran S.A., Ma L., Flerchinger G.N., Green T.R., Ahuja L.R., 2006. Modelling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM. *Agric. Syst.* 89: 457-477.
181. Yu Q., Wang E., Simith C.J., 2008. A modeling investigation into the economic and environmental values of 'perfect' climate forecasts for wheat production under contrasting rainfall conditions. *Int. J. Climatol.* 28: 255-266.
182. Zhang, T., Zhu, J., Wassmann, R., 2010. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005). *Agric. For. Meteorol.* 150: 1128-1137.
183. Zhang, X., Ren, Y., Yin, Z.Y., Lin, Z., Zheng, D., 2009. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971-2004. *J. Geophys. Res.* 114, D15105, doi: 10.1029/2009JD011753.
184. Zhang, X.C., Liu, W.Z., 2005. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. *Agric. Forest Meteorol.* 131: 127-142.
185. Zhang, X.K., Xiao, Y.G., Zhang, Y., Xia, X.C., Dubcovsky, J., He, Z.H., 2008. Allelic variation at the vernalization genes *Vrn-A1*, *Vrn-B1*, *Vrn-D1*, and *Vrn-B3* in Chinese wheat cultivars and their association with growth habit. *Crop Sci.* 48: 458-470.
186. Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize, *Agric. Water Manage.* 69: 115-133.
187. 曹卫星, 罗卫红. 2000. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 华文出版社, p, 15-25.
188. 曾燕, 邱新法, 刘昌明, 潘敖大, 高莘. 2007. 1960-2000年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征. *水科学进展.* 18(3): 311-318.
189. 陈超, 于强, 王恩利, 夏军. 2009. 华北平原作物水分生产力区域分异规律模拟. *资源科学.* 31(9): 1477-1485.
190. 邓振镛, 王强, 张强, 倾继祖, 杨启国, 袁志鹏, 刘文婧, 徐金芳. 2010. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施. *生态学报.* 30(22): 6278-6288.
191. 段春锋, 缪启龙, 曹雯. 2011. 西北地区参考作物蒸散变化特征及其主要影响因素. *农业工程学报.* 27(8): 77-83.
192. 冯利平, 1995. 小麦生长发育模拟模型(WheatSM)的研究. 南京: 南京农业大学.
193. 高亮之, 金之庆, 黄耀, 张立中. 水稻计算机模拟模型及其应用之一: 水稻钟模型- 水稻发育的计算机模型. *中国农业气象.* 1989,10: 3-10.
194. 金善宝. 中国小麦学. 中国农业出版社, 北京, 中国. 1996, 441-447.

195. 李广, 黄高宝, William Bellotti, 陈文. 2009. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性. 生态学报. 29(5): 2655-2663.
196. 李广, 黄高宝. 2010. 基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究. 中国生态农业学报. 18(2): 342-347.
197. 李艳, 薛昌颖, 杨晓光, 王靖, 刘园, Enli Wang. 2009. 基于 APSIM 模型的灌溉降低冬小麦产量风险研究. 农业工程学报. 25(10): 35-44.
198. 林而达, 杨修. 2003. 气候变化对农业的影响评价及适应对策. 见: 陈邦柱, 秦大河主编. 气候变化与生态环境研讨会文集. 北京: 气象出版社, 72-77.
199. 刘波, 马柱国, 丁裕国. 2006. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系. 高原气象, 25(5): 840-848.
200. 刘颖杰, 林而达. 2007. 气候变暖对中国不同地区农业的影响. 气候变化研究进展, 3(4):229-233.
201. 任国玉, 郭军. 2006. 中国水面蒸发量的变化. 自然资源学报. 21(1): 31-44.
202. 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土. 24(3): 219-226.
203. 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 张国威, 丁永建, 胡汝骥, 康尔泗. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究. 23(2): 152-164.
204. 孙宁, 冯利平. 2005. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估. 农业工程学报, 21(2): 106-110.
205. 王斌, 顾蕴倩, 刘雪, 罗卫红, 戴剑锋, 张巍, 亓春杰. 2012. 中国冬小麦种植区光热资源及其配比的时空演变特征分析. 中国农业科学. 45(2): 228-238.
206. 王琳, 郑有飞, 于强, 王恩利. 2007. APSIM 模型对华北平原小麦—玉米连作系统的适用性. 应用生态学报, 18 (11): 2480-2486.
207. 王荣栋, 孔军, 陈荣毅, 张伟. 2005. 新疆小麦品质生态区划. 新疆农业科学. 42(5): 309-314.
208. 谢贤群, 王菱. 2007. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化. 自然资源学报. 22(5): 683-691.
209. 谢云, Kiniry J.R. 2002. 国外作物生长模型发展综述. 作物学报. 28(2): 190-195.
210. 杨守春, 王涌清等译, 1990. 范柯伦, 沃尔夫主编, 农业生产模型: 气候、土壤和作物. 中国农业科技出版社.
211. 杨晓光, 李勇, 代姝玮, 刘志娟, 王文峰. 2011. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IX. 中国农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报. 22(12): 3177-3188.
212. 张山清, 普宗朝. 2011. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析. 农业工程学报. 27(5): 73-79.

作者简介

杨晓亚，女，1983年12月19日生于山东省金乡县。2001年考入山东农业大学植物科学与技术专业，2005年获学士学位；同年转入硕士阶段学习，2008年6月获山东农业大学作物栽培与耕作学农学硕士学位；2008年9月至今，在中国科学院地理科学与资源研究所攻读生态学专业博士学位；2010年10月至2011年12月，在澳大利亚联邦科工组织水土研究所（CSIRO Land and Water, Australia），做联合培养博士生。

参加科研项目

1. 国家重点基础研究发展计划（973项目，2009CB421300），干旱区绿洲化、荒漠化过程及其对人类活动、气候变化的响应与调控
2. 国家重点基础研究发展计划（973项目，2010CB428404），气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策
3. 国家自然科学基金基础研究（41171086），华北平原农业生产对气候变化的响应机制及模拟研究

完成论文情况

1. **X. Yang**, Ch. Chen, Q. Luo, L. Li, Q. Yu. 2011. Climate change effects on wheat yield and water use in oasis cropland. *International Journal of Plant Production*. 5 (1): 83-94. (SCI).
2. **Xiaoya Yang**, Gregory S. McMaster, Qiang Yu. Relationships between wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and yield components in varying environments in China. *Crop Science*, in review. (SCI).
3. **Xiaoya Yang**, Asseng Senthold, Mike Ting Fook Wong, Qiang Yu, Jun Li. Quantifying the interactive impacts of global dimming and warming on wheat yield and water use in China. (SCI, 修改中).