

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.019

格点天气预报数据与机理模型耦合的冬小麦干旱预警方法

何亮¹ 钱者东² 靳宁³ 于强^{3,4} 侯英雨¹

(1. 国家气象中心农业气象中心, 北京 100081; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042;

3. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

4. 悉尼科技大学生命科学院, 悉尼 NSW 2007)

摘要: 为了开展大范围的冬小麦干旱预警, 以中国北方冬小麦区为实例, 构建了土壤水分动态预报模型, 结合未来 10 d 高精度天气要素预报、土壤自动水分观测和冬小麦发育期观测数据, 建立了北方冬小麦区干旱预警系统。利用该系统对 2018 年 4—5 月进行逐日的冬小麦干旱预警, 对干旱预警产品的分析表明: 系统对未来 10 d 土壤相对湿度预报的决定系数在 0.63~0.91 之间, 均方根误差在 5.6%~18.2% 之间, 预报时效越近, 准确率越高。从不同的干旱等级预测准确率看, 对于干旱等级较高的重旱和特旱预报准确率较高, 轻旱和中旱的预报准确率略低。该系统基本满足冬小麦干旱预警需求, 对国家级农业气象部门大范围农业干旱监测和预警业务是有益的补充。

关键词: 冬小麦; 干旱预警; 格点; 天气预报; 土壤水分动态模型

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)09-0170-07

Drought Early Warning of Winter Wheat Based on Soil Water Dynamic Model Coupled with Grid Weather Forecast Data

HE Liang¹ QIAN Zhedong² JIN Ning³ YU Qiang^{3,4} HOU Yingyu¹

(1. Agrometeorological Center, National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. School of Life Sciences, University of Technology Sydney, Sydney NSW 2007, Australia)

Abstract: Drought is one of the most serious natural disasters and a threat of food security. It is extremely important to have accurate and timely early warning of drought for prevention and reduction of agricultural disasters. Current method of drought early warning was characterized by weak mechanism, low spatial resolution and lack of crop growth information. A daily crop growth and soil moisture dynamics simulation system using a soil water dynamic model in northern winter wheat zone was constructed. Based on this soil moisture simulation system, a drought early warning system for winter wheat was constructed. Daily drought early warning products from April to May in 2018 were generated by using this warning system. The results showed that forecast accuracy of soil relative moisture in next 10 days was high since its coefficient of determination was 0.63~0.91 and its root mean squared error was 5.6%~18.2%. The closer soil moisture forecast was in time, the more accurate was. Forecast accuracy of drought grades for severe and extreme drought was higher than those of mild and moderate grade. This drought warning system satisfied the needs of drought early warning in national agro-meteorological service department in China. The research result would provide scientific basis for prevention and reduction of agricultural disasters and national drought early warning services.

Key words: winter wheat; drought early warning; grid; weather forecast; soil water dynamic model

0 引言

干旱是一种发生频率高、持续时间长、影响范围

广的自然灾害, 全球超过一半的国家和地区遭受干旱的威胁^[1-2]。干旱是对我国农业生产影响最严重的气象灾害, 平均每年受旱面积约为 2 117 万 hm²,

收稿日期: 2019-02-15 修回日期: 2019-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502402)和国家自然科学基金项目(41705095)

作者简介: 何亮(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事作物模型、农业气象和全球变化研究, E-mail: heliang_hello@163.com

占气象灾害的 60% 左右,因旱灾损失的粮食约占全国粮食损失总量的 50%^[3-5]。加强对农业干旱发生、发展规律的研究,开展有效的农业干旱监测和预警,对保障粮食安全具有重要的现实意义。

农业干旱预警根据农业干旱的成因和发生规律,分析前期的干旱程度,通过选择适用的预警指标,对研究区的气象、土壤、作物生长情况等因子变化进行监测,对干旱发展的各个阶段进行早期辨识,并且结合未来的天气变化,预测未来农业干旱发生的时间、范围和强度,发布干旱开始、发展、缓解、结束等不同发展阶段预警^[16-9]。目前国内外具有代表性的干旱预警和监测系统有美国的干旱监测系统(United States drought monitor, USDM),它由美国国家旱灾减灾中心、美国国家海洋和大气管理局、美国农业部共同创建;其干旱产品基于气候、水文、土壤和遥感等观测产品制作而成。我国的干旱监测预警系统主要包括国家气候中心的气象干旱监测、国家气象中心农业气象中心的农业干旱监测、中国科学院遥感与数字地球研究所发布的遥感干旱监测^[10]等。同时,若干省级气象部门也有一些区域的干旱监测和预警系统研发^[11-13]。从研究层面,众多学者利用气候模式或数值预报信息直接与干旱指数^[14]、水文模型^[15]、农业气象模型^[16]方法来进行干旱预警,这些是近些年干旱监测和预警领域研究的热点^[17-19]。刘建栋等^[16]和邬定荣等^[20]构建小麦叶片光合模型结合区域气候模式对冬小麦进行干旱监测和预警。从上述研究可知,其主要侧重对过去或实时的干旱监测,利用精细化的天气预报进行未来大范围干旱预警研究较少见。当前系统对地面具体作物生长状况监测不足。国家气象中心于 2016 年开始发布空间分辨率为 5 km 的未来 10 d 的全国高精度格点预报要素产品。其次,随着中国气象局土壤水分自动观测网络的建立,利用土壤水分动态模型嵌套未来格点天气预报来预估未来土壤水分动态成为可能。

本研究以北方冬小麦区为例,在全国高精度格网天气预报、土壤水分自动观测、农业气象物候观测数据的基础上,结合目前国家级农业气象干旱监测系统,建立冬小麦土壤水分动态预报系统;在土壤水分预报的基础上,结合农业干旱等级标准,进行冬小麦干旱预警。

1 材料与方法

1.1 土壤水分预报模型

本研究土壤水分预报模型参考 WOFOST 作物模型的土壤水分模块^[21]和 PANIGRAHI 等^[22]研发

的土壤水分动态模型。如图 1 所示,作物土壤层被分成 2 层:根际层和根际下层,根际层是作物根生长的活动层,随着根生长而变深。根际层的日土壤水分平衡方程为

$$S_i R_i = S_{i-1} R_{i-1} + P_i + I_i + \Delta R_i S_{o,i} - D_i - E_{a,i} - Q_i \quad (1)$$

式中 S_i ——第 i 天的根际层土壤水分含量 mm/cm
 R_i ——第 i 天根深 cm
 S_{i-1} ——第 $i-1$ 天的根际层土壤水分含量, mm/cm
 R_{i-1} ——第 $i-1$ 天根深 cm
 P_i ——第 i 天降水量 mm
 I_i ——第 i 天灌溉量 mm
 ΔR_i ——第 i 天日根增长长度 cm
 $S_{o,i}$ ——第 i 天根际下层的土壤水分含量, mm/cm
 D_i ——第 i 天渗漏到根际下层的渗漏量 mm
 $E_{a,i}$ ——第 i 天实际蒸散量 mm
 Q_i ——第 i 天表面径流量 mm
 i ——播种后时间 d

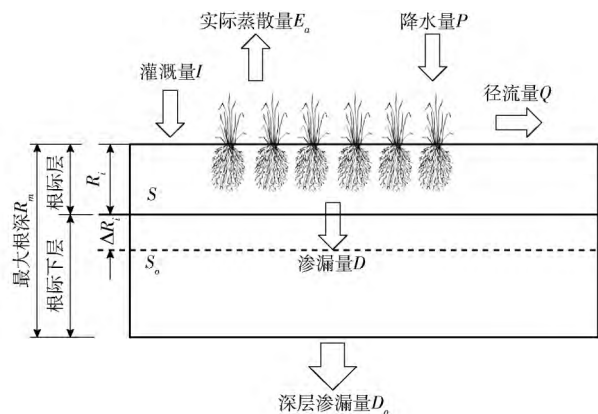


图 1 土壤水分动态模型框架图

Fig. 1 Frame diagram of soil moisture dynamic model

土壤水分平衡方程必须满足以下假设:降水和灌溉是均匀直接地渗入到土壤,不考虑植物截留;土壤水分在土壤中为均匀分布;由于冬小麦区地下水位较低,因此不考虑土壤毛细吸水。

1.1.1 渗漏

日渗漏到根际下层的渗漏量计算公式为

$$D_i = P_i + I_i - Q_i - (F_C - S_{i-1}) R_{i-1} + (F_C - S_{o,i-1}) \Delta R_i \quad (2)$$

式中 F_C ——田间持水量 mm

根际下层的土壤水分含量取决于根际层渗漏的水量,即

$$S_{o,i} = \begin{cases} S_{o,i-1} & (D_i \leq 0) \\ S_{o,i-1} + D_i (R_m - R_i) & (D_i > 0) \end{cases} \quad (3)$$

当 S_{o_i} 大于田间持水量时,水分会从根际下层渗漏,此时根际下层的水分含量为田间持水量,深层渗漏量为

$$D_{o_i} = (F_c - S_{o_i})(R_m - R_i) \quad (4)$$

式中 D_{o_i} ——第 i 天的深层渗漏量, mm

当根深等于最大根深时,此时没有根际下层, S_{o_i} 为 0。

1.1.2 根深模拟

采用文献[23]的方法计算根深

$$R_i = R_m(0.5 + 0.5\sin(3.03t/t_m - 1.47)) \quad (5)$$

式中 t_m ——根生长总周期, d

t ——当前根生长时间, d

1.1.3 径流

根据文献[24]的径流估算公式得

$$Q = \begin{cases} (P - 0.2S_r)^2 / (P + 0.8S_r) & (P > 0.2S_r) \\ 0 & (P \leq 0.2S_r) \end{cases} \quad (6)$$

式中 S_r ——潜在最大截留量, mm

1.1.4 实际蒸散量

在充足的土壤水分条件下,作物潜在蒸散量计算式为

$$E_{p_i} = K_{c_i} E_{o_i} \quad (7)$$

式中 E_{p_i} ——第 i 天的作物潜在蒸散量, mm

K_{c_i} ——第 i 天的作物系数,不同发育阶段的冬小麦作物系数如表 1 所示

E_{o_i} ——第 i 天参考作物蒸散量, mm,其估算方法为 Peman-Moneith 方法^[25]

实际土壤蒸散量计算公式为

$$E_{a_i} = \begin{cases} (S_i - W_p) E_{p_i} / [(1-p)(F_c - W_p)] & (S_i - W_p < (1-p)(F_c - W_p)) \\ E_{p_i} & (S_i - W_p \geq (1-p)(F_c - W_p)) \end{cases} \quad (8)$$

式中 W_p ——土壤凋萎系数, mm

p ——土壤水分消耗因子,与作物类型有关

表 1 冬小麦各月作物系数

Tab.1 Crop coefficient of winter wheat in different months

地区	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
山西省	0.58	0.76	0.40	0.14	0.24	0.58	1.04	1.24	0.84
河北省	0.85	0.92	0.54	0.33	0.24	0.42	1.14	1.42	0.73
河南省	0.63	0.83	0.93	0.31	0.50	0.91	1.40	1.29	0.60
山东省	0.67	0.70	0.74	0.64	0.64	0.90	1.22	1.13	0.83
安徽省	1.18	1.15	1.25	1.13	1.14	1.07	1.16	0.87	0.83
江苏省	1.14	1.14	1.19	0.82	0.91	0.86	1.77	1.43	0.41

1.2 格点天气预报数据和预处理

国家气象中心国家天气预报数据库(National weather forecast database, NWFD)自2016年开始,自上而下发布的未来10d的全国高精度天气预报要素产品,包括最高温度、最低温度、降水量、云量、风速等要素,空间分辨率为5km,空间范围为 $0^\circ \sim 60^\circ N$, $70^\circ \sim 140^\circ E$,降水量和温度等要素的时间分辨率都可达逐时。因土壤墒情预报模型要求输入的气象要素为最低气温、最高气温、相对湿度、风速、降水量和总辐射等资料,根据文献[26]提出的利用温差法计算太阳辐射的公式为

$$R_s = K_{RS} \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a \quad (9)$$

式中 R_s ——太阳总辐射, MJ/($m^2 \cdot d$)

R_a ——天顶辐射, MJ/($m^2 \cdot d$)

T_{max} ——日最高气温, $^\circ C$

T_{min} ——日最低气温, $^\circ C$

K_{RS} ——调整系数,取0.16~0.19

1.3 土壤自动观测站数据和土壤属性数据

本研究用到北方冬小麦区660个土壤水分自动

观测站的数据,其站点分布如图2所示。土壤水分数据采集时间频率为逐小时,采集深度0~100cm,一般测定深度为0~10cm、10~20cm、20~30cm、30~40cm、40~50cm、50~60cm、70~80cm、90~100cm共8个层次。本研究采用08:00的数据作为每日的土壤水分含量观测,由于土壤水分预报模型中只区分根际层和根际下层,利用不同深度的平均土壤水分含量计算得到根际层深度的土壤水分含量。

1.4 农业气象观测数据

189个北方冬小麦农业气象观测站和试验站观测分布如图2所示,主要包括冬小麦物候实时监测数据,观测的发育期有播种、出苗、三叶、分蘖、越冬、返青、起身、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟、成熟期。由于在土壤水分预报模型中需要用到作物系数,其与作物发育期有关,作物实时观测的物候主要用于土壤水分预报模型中的作物系数计算。由于农业气象观测站的数量与土壤自动观测数据的数据不一致,在没有农业气象观测的土壤水分观测站的物候

采用最邻近的农业气象物候观测站的数据。

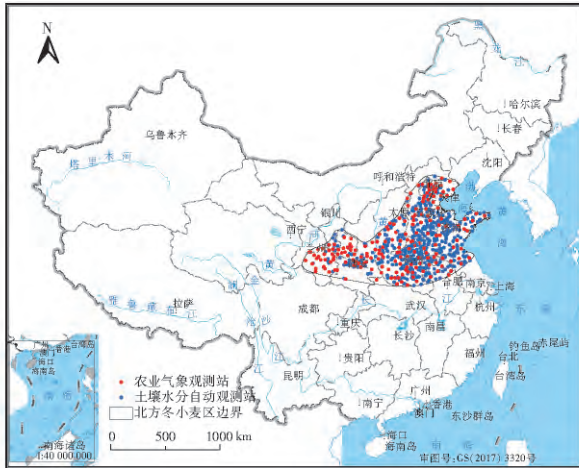


图 2 北方冬小麦区农业气象观测站和土壤水分自动观测站分布

Fig. 2 Distribution of agro-meteorological stations and automatic soil moisture monitoring stations for winter wheat

1.5 干旱等级标准

土壤干旱等级标准参照 GB/T 32136—2015^[27] 农业干旱等级标准,如表 2 所示。

表 2 基于土壤相对湿度(R_{sm})的干旱等级

Tab.2 Drought grades based on soil relative moisture index

干旱等级	土壤相对湿度 /%		
	砂土	壤土	黏土
轻旱	[45, 55)	[50, 60)	[55, 65)
中旱	[35, 45)	[40, 50)	[45, 55)
重旱	[25, 35)	[30, 40)	[35, 45)
特旱	[0, 25)	[0, 30)	[0, 35)

1.6 整体算法流程

整体算法流程如图 3 所示,从中国农业气象业务系统 (Chinese agricultural meteorology service system, CAgMSS) 农业气象土壤自动观测站数据库提取当天的土壤水分观测数据,作为土壤水分平衡模型的初始输入数据;从土壤水力参数数据库读取土壤田间持水量和凋萎系数等参数;从 CAgMSS 作物发育期数据库提取当前作物发育期,计算作物系数,作为土壤水分平衡模型的输入;从 NWFD 格点天气预报数据读取未来 10 d 预报数据,经过转换得到土壤水分平衡模型需要的驱动数据;土壤水分平

衡模型预测未来 10 d 的土壤湿度;根据土壤预测湿度和干旱预警等级标准,得到最后干旱预警等级。整个冬小麦干旱预警系统的数据处理、土壤水分动态模拟模块、结果输出可视化都用 R 语言开发。

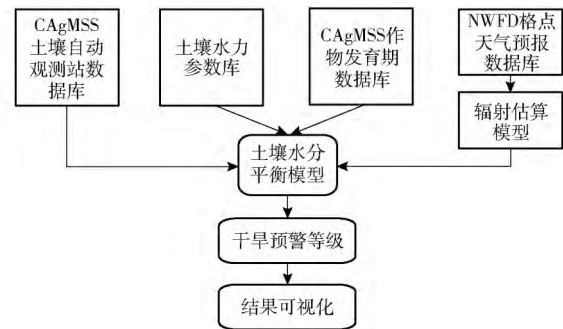


图 3 冬小麦干旱预警系统算法流程

Fig. 3 Flow chart of drought early warning system for winter wheat

1.7 预报准确率检验方法

本研究的土壤相对湿度预报准确率以土壤相对湿度预测值和实测值之间的均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和预报与观测线性拟合方程的决定系数 R^2 (Determination coefficient) 来进行评价。土壤干旱等级准确率为预报的某一干旱等级样本数与实际干旱等级相符数占该等级总样本数百分比。均方根误差计算公式为

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2} \quad (10)$$

式中 E ——均方根误差, %

n ——样本数量

s_i ——土壤相对湿度预测值, %

o_i ——土壤相对湿度观测值, %

2 结果与分析

2.1 未来 10 d 墒情预报准确率

以 2018 年 4—5 月 2 个月为实例,分析了土壤相对湿度和干旱等级预报的准确率情况。利用逐日预报未来 10 d 的土壤相对湿度和实测的墒情进行对比分析,表 3 为未来 10 d 土壤相对湿度预报的准确率,从表 3 可知,土壤相对湿度绝对值的 R^2 在 0.63 ~ 0.91 之间, RMSE 在 5.6% ~ 18.2% 之间,预报时效越临近,其 R^2 和 RMSE 越大,即准确率越高。

表 3 2018 年 4—5 月未来 10 d 土壤相对湿度预报值准确率

Tab. 3 Accuracy of soil relative moisture forecast in future 10 days from April to May of 2018

指标	预报时间/d									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R^2	0.91	0.89	0.86	0.83	0.79	0.77	0.74	0.71	0.67	0.63
RMSE /%	5.6	6.5	7.7	9.1	10.5	12.0	13.5	15.1	16.5	18.2

2.2 未来 10 d 干旱等级预报准确率

4—5 月的土壤干旱等级预报准确率如表 4 所示,从预报时效看,监测时间越短其准确率越高;从

不同的干旱等级预测准确率看,对于干旱等级较高的重旱和特旱预报准确率较高,轻旱和中旱的预报准确率略低。

表 4 2018 年 4—5 月未来土壤干旱等级预报准确率

Tab.4 Accuracy of soil moisture drought grades forecast in next 10 days from April to May of 2018 %

干旱等级	预报时间/d									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
轻旱	85.3	74.2	64.8	54.5	46.3	37.0	30.3	24.2	21.7	18.5
中旱	86.7	77.4	69.7	61.0	52.1	43.2	34.2	27.5	22.0	19.5
重旱	95.2	89.5	76.1	68.9	55.3	48.1	36.8	27.3	22.4	17.0
特旱	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

2.3 应用示例

自 2018 年 4 月 28 日起预报未来 10 d 的土壤相对湿度和土壤干旱等级结果如图 4 和图 5 所示。4 月 29 日陕西省、甘肃省局部有轻旱,由于持续几天预报不下雨,干旱面积逐渐扩大,到 5 月 8 日,陕西

省、甘肃省东部等地轻旱面积扩大,并且局部出现中旱、重旱和特旱。从图 4 和图 5 可以看出,本文构建的土壤预报系统可以对土壤墒情动态变化进行较好地预测,可对土壤干旱等级进行动态预报,为农业干旱进行预警。

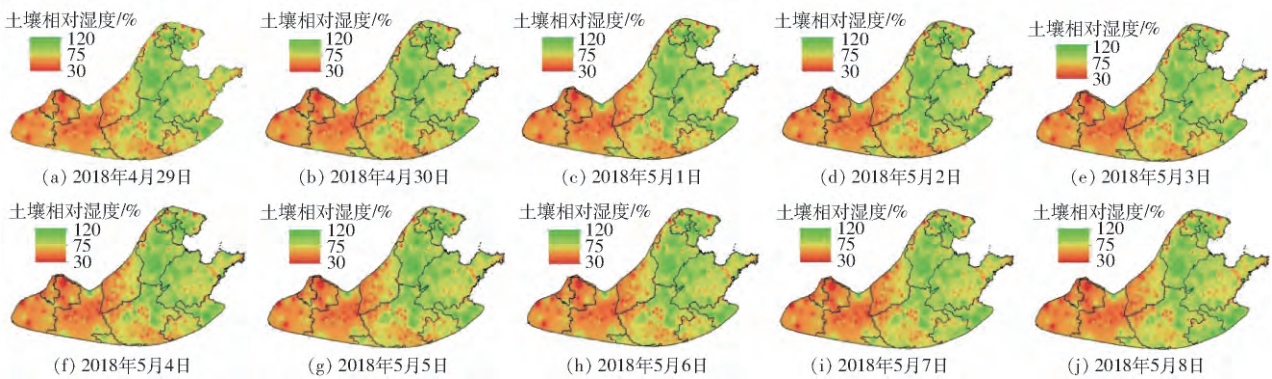


图 4 2018 年 4 月 28 日对未来 10 d 冬小麦区根际层土壤相对湿度的预报

Fig.4 Forecast of soil relative moisture in future 10 days in winter wheat zone on Apr. 28th, 2018

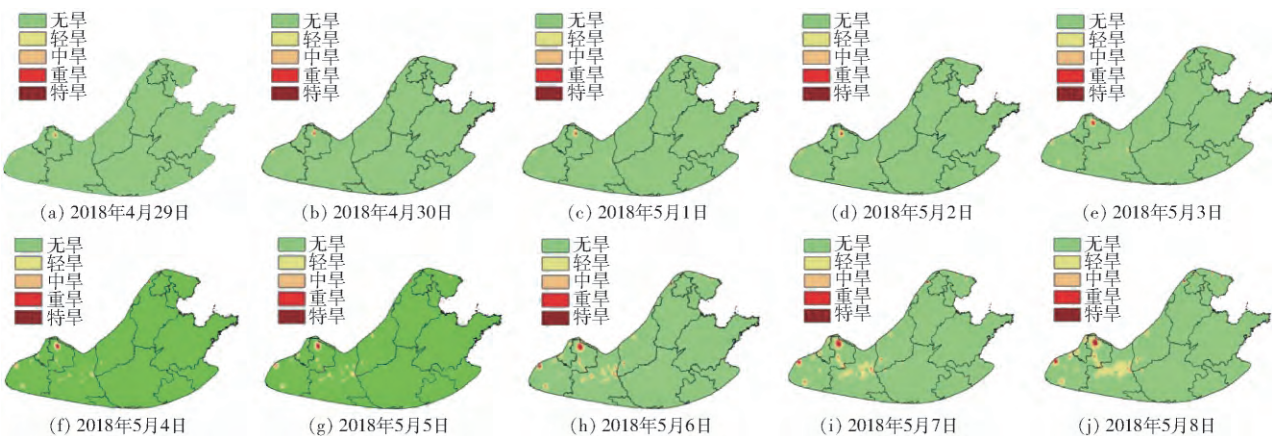


图 5 2018 年 4 月 28 日对未来 10 d 冬小麦干旱等级预警

Fig.5 Early warning of winter wheat drought grade in future 10 days on Apr. 28th, 2018

3 讨论

从模型的构建来看,本研究的土壤水分预报模型从土壤水分平衡的角度出发,结合了作物根系生长,充分考虑了作物的根系吸水情况。但考虑到冬

小麦区的地下水深度较大,因此未将地下水纳入到土壤水分平衡模型中。整个土壤水分预报模型结合了发育期的观测,充分考虑了作物的发育期,来优化蒸发模块中的作物系数,相比纯粹利用作物模型,本文充分利用了观测资料,有利于减少发育期

模拟的误差。土壤分层借鉴了 WOFST 主流模型的根系层和根系下层这种简化的土壤分层, 相比利用 RICHARD 方程等复杂的土壤物理模型更加简化, 有利于提高模型运算的效率。

相比其他土壤水分预报模型或干旱预警模型而言, 本研究利用了最新的高分辨率格点要素天气预报, 正是由于该预报产品的出现, 驱动土壤水分机理预报模型, 使得土壤水分动态机理预报成为可能。相比传统的统计预报, 该方法充分考虑了土壤水分动态、作物吸水等条件。

干旱预警时间越短, 其准确率越高, 这主要是由天气预报准确率决定的, 天气要素预报时间越短, 其准确率也越高。预警系统的不确定性, 即土壤相对湿度预报的不确定性主要来源有两方面: ①预报数据的精度或不确定性。②土壤预报模型的误差。本文模型利用逐日的土壤水分含量作为初始场, 有利于减少模型运行时间变长带来的累积误差。但是模型预报的准确率依赖于天气定量预报的准确性, 尤其是定量预报降水的精度。总而言

之, 本研究结合土壤水分平衡理论, 初步自主构建了土壤水分动态预报模型, 是作物模型的重要组成部分之一, 为以后开展自主作物模型研究奠定了基础。利用该模型, 基本可以对北方冬小麦区进行未来 10 d 的土壤水分动态预报和土壤干旱等级预警。

该预报模型本质还是一个基于站点的模型, 运用到空间中需要空间的土壤水分监测, 未充分发挥格点天气预报的优势, 未来需要结合遥感土壤水分、机理模型、未来天气预报等要素进行格点化土壤水分预报。

4 结束语

利用未来 10 d 的高分辨率格点天气预报要素, 构建了基于机理的土壤水分预报模型, 利用土壤自动水分观测、未来天气预报、作物发育期实测观测数据, 驱动土壤水分预报模型, 对北方冬小麦区域进行了土壤水分预报和干旱等级预警, 结果表明, 该系统基本满足冬小麦干旱预警需求, 对国家级大范围农业干旱监测和预警业务是有益的补充。

参 考 文 献

- [1] WMO. Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges [R]. WMO, 2006.
- [2] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1-2): 202-216.
- [3] 陈方藻, 刘江, 李茂松. 60 年来中国农业干旱时空演替规律研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(4): 111-114.
CHEN Fangzao, LIU Jiang, LI Maosong. Researches on spatial and temporal succession law of agricultural drought in the past 60 years in China [J]. *Journal of Southwest Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 36(4): 111-114. (in Chinese)
- [4] 陈怀亮, 张红卫, 刘荣花, 等. 中国农业干旱的监测、预警和灾损评估 [J]. *科技导报*, 2009, 27(11): 82-92.
CHEN Huailiang, ZHANG Hongwei, LIU Ronghua, et al. Agricultural drought monitoring, forecasting and loess assessment in China [J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(11): 82-92. (in Chinese)
- [5] 李茂松, 李森, 李育慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析 [J]. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 7-10.
LI Maosong, LI Sen, LI Yuhui. Studies on drought in the past 50 years in China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(1): 7-10. (in Chinese)
- [6] MISHRA A K, SINGH V P. Drought modeling—a review [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(1-2): 157-175.
- [7] 徐启运, 张强, 张存杰, 等. 中国干旱预警系统研究 [J]. *中国沙漠*, 2005, 25(5): 785-789.
XU Qiyun, ZHANG Qiang, ZHANG Cunjie, et al. Research on drought early warning system of China [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 785-789. (in Chinese)
- [8] 张晓煜, 杨晓光, 李茂松, 等. 农业干旱预警研究现状及发展趋势 [J]. *干旱区资源与环境* 2011, 25(11): 18-22.
ZHANG Xiaoyu, YANG Xiaoguang, LI Maosong, et al. Review on the agricultural early warning and its development tendency [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(11): 18-22. (in Chinese)
- [9] ZHANG Qi, ZHANG Jiquan, WANG Chuiyi, et al. Risk early warning of maize drought disaster in Northwestern Liaoning Province, China [J]. *Natural Hazards*, 2014, 72(2): 701-710.
- [10] WU Bingfang, MENG Jihua, LI Qiangzi, et al. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's Crop Watch system [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(2): 113-137.
- [11] 张晓月, 李荣平, 焦敏, 等. 农田土壤墒情监测与预报系统研发 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 140-146.
ZHANG Xiaoyue, LI Rongping, JIAO Min, et al. Development of soil moisture monitor and forecast system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(18): 140-146. (in Chinese)
- [12] 陈金华, 杨再强, 杨太明, 等. 安徽省土壤水分监测预测系统 [J]. *应用气象学报*, 2011, 22(2): 249-256.
CHEN Jinhua, YANG Zaiqiang, YANG Taiming, et al. Real time observing and forecasting system for soil moisture in Anhui Province [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 249-256. (in Chinese)

- [13] 刘勇洪,吴春艳,叶彩华,等. 基于网格化信息的北京地区土壤墒情预报服务系统[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 267-272.
LIU Yonghong, WU Chunyan, YE Caihua, et al. Beijing soil moisture prediction service system based on grid information[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(2): 267-272. (in Chinese)
- [14] LAVAYSSE C, VOGT J, PAPPENBERGER F. Early warning of drought in Europe using the monthly ensemble system from ECMWF[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(7): 3273-3286.
- [15] ZHAO Junfang, XU Jingwen, XIE Xingmei, et al. Drought monitoring based on TIGGE and distributed hydrological model in Huaihe River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 553: 358-365.
- [16] 刘建栋,王馥棠,于强,等. 华北地区冬小麦叶片光合作用模型在农业干旱预测中的应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 469-478.
LIU Jiandong, WANG Futang, YU Qiang, et al. Application of the leaf photosynthesis model for forecasting effect of drought on winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(4): 469-478. (in Chinese)
- [17] 王春乙,王石立,霍治国,等. 近10年来中国主要农业气象灾害监测预警与评估技术研究进展[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 659-671.
WANG Chunyi, WANG Shili, HUO Zhiguo, et al. Progress in research of agro-meteorological disaster in China in recent decade[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 659-671. (in Chinese)
- [18] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848.
LIU Xianfeng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Agricultural drought monitor: progress, challenges and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1835-1848. (in Chinese)
- [19] 白雪娇,王鹏新,解毅,等. 基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 345-351.
BAI Xuejiao, WANG Pengxin, XIE Yi, et al. Spatial distribution characteristics of droughts in Guanzhong Plain based on structural similarity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2015 46(11): 345-351. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151147&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.047. (in Chinese)
- [20] 邬定荣,刘建栋,刘玲,等. 基于区域气候模式与作物干旱模式嵌套技术的华北农业干旱监测预测[J]. 科技导报, 2009, 27(11): 33-38.
WU Dingrong, LIU Jiandong, LIU Ling, et al. Monitoring and forecasting of agro-drought in the North China Plain by combining the regional climate model with the crop simulation model[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(11): 33-38. (in Chinese)
- [21] DE WIT A, HENDRIK B, DAVIDE F, et al. 25 years of the WOFOST cropping systems model[J]. Agricultural Systems, 2019, 168: 154-167.
- [22] PANIGRAHI B, PANDA S N. Field test of a soil water balance simulation model[J]. Water Resources Management, 2003, 58(3): 223-240.
- [23] BORG H, GRIMES D W. Depth development of roots with time: an empirical description[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(1): 194-197.
- [24] SHARPLY A N, WILLIAMS J R. EPIC—Erosion/productivity impact calculator: (1) model documentation[R]. USDA Technical Bulletin, No1768, 1990.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [26] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Estimating potential evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1982, 108(3): 223-230.
- [27] GB/T 32136—2015 农业干旱等级[S]. 2015.