

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2009.01122

利用 RZWQM-CERES 模拟华北平原农田土壤水分动态及其对作物产量的影响

房全孝¹ 于强² 王建林¹

¹青岛农业大学农学与植物保护学院, 山东青岛 266109; ²中国科学院地理科学与资源所, 北京 100101

摘要: 农业系统模型是农业生产多元目标优化管理的重要工具, 但由于系统模型过程复杂, 参数众多, 校正和验证工作一直是模型研究的重点和难点。本文利用 RZWQM (Root Zone Water Quality Model)与 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)的结合模型 RZWQM-CERES 模拟土壤水分及作物产量进行了参数优化和验证, 结果表明, RZWQM-CERES 在禹城站和栾城站模拟不同灌溉处理土壤贮水量与测定值呈相似的变化趋势, 均方根差(RMSE)分别为 2.38~2.70 cm 及 3.49~3.73 cm; 作物产量模拟结果与实测值对土壤水分的响应趋势一致($R^2 = 0.83^{***}$, $n = 22$), 其中在禹城站模拟小麦和玉米产量的 RMSE 分别为 550 kg hm⁻²和 580 kg hm⁻², 栾城站模拟小麦产量的 RMSE 为 670 kg hm⁻²。以上结果表明 RZWQM-CERES 可作为华北平原模拟和分析土壤水分对作物产量影响的有效工具。本文初步建立了一套适合华北平原作物生产的模型参数, 为利用 RZWQM-CERES 建立农田水分优化调控策略奠定了基础, 并探讨了模型评价过程中应注意的问题。

关键词: RZWQM-CERES; 华北平原; 模型参数; 土壤水分; 作物产量

Simulating Soil Water Dynamics and Its Effects on Crop Yield Using RZWQM-CERES in the North China Plain

FANG Quan-Xiao¹, YU Qiang², and WANG Jian-Lin¹

¹College of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266019, China; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Agricultural system model is an important tool for optimizing multi-objective managements and decisions in agriculture. However, due to the complex process with multiple parameters in the model, calibration and validation for system model are difficult. In the paper, the hybrid model RZWQM (Root Zone Water Quality Model)-CERES (Crop Environment Resource Synthesis) was calibrated and validated for simulating soil water dynamics and crop yield under various irrigation levels at Yucheng and Luancheng Experimental Stations in the North China Plain. The results showed that the root mean standard error (RMSE) and mean relative error (MRE) of simulated soil water storage in the 0–120 cm layer across different treatments at Yucheng Experimental Station ranged from 2.38 to 2.70 cm and from 2.8 to 3.3%, respectively. The RMSE and MRE of simulated leaf area index across treatments were ranged from 0.43 to 0.73 and from –12.8 to 4.2%, respectively, and the RMSE and MRE of simulated grain yield ranged from 550 to 580 kg ha⁻¹ and from –0.6 to 7.6 %, respectively. At Luancheng Experimental Station, the RMSE and MRE of simulated soil water storage in the 0–120 cm layer ranged from 3.49 to 3.73 cm and from –0.6 to 10.0 %, respectively. The RMSE and MRE of simulated grain yield were 670 kg ha⁻¹ and –6.6%, respectively. Generally, the simulated and measured grain yields showed similar responses to soil water changes across the irrigation treatments ($R^2 = 0.83^{***}$, $n = 22$). Above results indicate that RZWQM-CERES can be used as a tool to simulate and investigate the effects of soil water on crop yield in the wheat-maize cropping system in the areas. The reasonable model parameters established for the cropping system are the basis of model application for optimizing multi-objective managements and decisions in agriculture. The model parameterization, model mechanism and its flexibility were also discussed.

Keywords: RZWQM-CERES; North China Plain; Model parameterization; Soil water; Crop yield

本研究由国家自然科学基金项目(30800164 和 30871485), 中国科学院知识创新项目(KZCX-SW-317-02), 2007 年青岛市软科学研究计划课题资助。

第一作者联系方式: E-mail: fqx01@163.com

Received(收稿日期): 2008-08-27; Accepted(接受日期): 2009-03-17.

保护农业生态环境和提高作物产量是现代农业生产可持续发展的基本要求^[1]。华北平原作为重要的粮食生产基地, 农业水资源匮乏和水分利用效率低下等问题日益突出^[2], 严重威胁着农业可持续发展和水资源可持续利用。前人许多研究为该地区农业水资源高效利用和改善水环境提供了重要的理论依据和技术支持^[3-8], 但试验结果在不同地区和年际之间变异较大^[9-10], 很难推广应用。要有效解决这些问题, 必须综合考虑作物、气候、土壤变异及其相互作用对作物产量和生态环境的影响。农业系统模型整合了土壤-作物-大气系统内的基本过程和大量试验结果, 是评价和扩展试验结果的重要手段^[11], 但由于农业系统模型结构和过程复杂, 参数众多, 校正难度大, 严重限制了模型的应用和推广^[12]。近年来国内农业模型在模型参数校正^[13-15]、农田水分和氮素动态模拟^[16-17]及其管理应用^[18-19]等方面发展迅速。国外农业模型逐步向农业资源利用和环境保护等方面深入, 最近由美国农业部开发的 RZWQM (Root Zone Water Quality Model)^[20], 在模拟农田水分和养分循环方面具有明显优势, 已成为评价农业水资源和生态环境的有力工具^[21]。Ma 等^[22]通过 RZWQM 与 CERES (Crop Environmental Resource Synthesis)^[23]中小麦和玉米生长模块结合, 增强了 RZWQM 模拟作物生长及其与环境关系的能力, 在美国西部大平原地区得到了较好的验证和应用^[24]。Yu 等^[25]对 RZWQM 的水分和氮素模块进行校正分析, 但该模型还没有在华北平原不同土壤水分条件下(不同灌溉制度)进行验证评价, 特别是在不同气候和土壤条件下的评价和优化还有待深入研究。本研究利用不同站点的节水灌溉试验数据对模型模拟土壤水分动态、作物生长(叶面积指数)及产量形成进行验证, 评价模型在华北平原不同区域的适应能力, 并建立适合华北平原农业生产的模型参数, 为利用模型优化农田水资源并加以高效利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验方法

1.1.1 禹城实验站水分池试验 试验于 2001—2003 年在中科院禹城实验站水分池内进行, 2 个小麦-玉米连作周期。试验设 4 个处理: 处理 1 (III) 在拔节、挑旗和开花期灌溉, 处理 2 (IIN) 在拔节和挑旗期灌溉, 处理 3 (INN) 在拔节期灌溉, 处理 4 (NNN) 为不灌水处理。4 次重复, 其他管理措施同大田管理。土

壤为中壤土, 土壤肥力中等以上, 耕层土壤含有机质 1.40%、全氮 0.08%、全磷(P_2O_5) 0.30%、全钾(K_2O) 2.08%。冬小麦品种为 93-52(品系), 基本苗为 250 万株 hm^{-2} , 玉米为农大 108, 基本苗为 66 000 株 hm^{-2} 。试验详细管理措施见 Fang 等^[7]。

1.1.2 栾城实验站水分池试验 栾城实验站位于河北省栾城县, 气候条件与禹城相似, 年降雨量较禹城低。试验于 1998—2001 年进行, 共 3 个小麦-玉米连作周期。设 4 个水分处理, 即充分供水处理(III)、返青期水分胁迫处理(NII)、灌浆期水分胁迫处理(IIN)和干旱处理(NNN), 重复 3 次, 其他管理措施与大田一致。冬小麦品种为高优 503, 播量为 135 $kg\ hm^{-2}$, 玉米品种为掖单 21, 基本苗为 6 万株 hm^{-2} 。试验详细描述见 Zhang 等^[4]。

1.2 数据测定

1.2.1 土壤水分测定 用中子仪测定土壤水分体积分含量。每个小区中部安装中子管, 深度为 120 cm, 测定时每层间隔 10~20 cm, 每 5~7 d 观测一次, 降水和灌水后加测, 在冬小麦越冬期间, 20~30 d 观测 1 次。灌水量在每次灌溉时利用出水表记录。

1.2.2 作物叶面积测定 冬小麦叶面积 10~15 d 取样测定一次, 越冬期不测定, 同时调查小麦群体密度和作物生育期。玉米叶面积采用定株活体测定, 采用 LI-3000 便携式叶面积仪, 选择有代表性的植株做好标记进行测定。

1.2.3 作物产量和生物量测定 在作物成熟期选取代表性样点收获地上部测定作物产量和生物量。

1.2.4 农田常规气象要素测定 在禹城和栾城实验站气象观测场, 分别对常规气象要素进行观测, 包括逐日最高气温、最低气温、大气相对湿度、太阳辐射、风速、降雨量等, 作为模型的驱动变量。

1.2.5 模型输入 农田管理(作物种植、收获、施肥、灌溉日期以及耕作等措施)记录作为模型的输入。

2 模型结构与参数确定

2.1 RZWQM-CERES 模型结构

RZWQM 是由美国农业部农业系统研究所开发的模型。模型以两个时间尺度进行模拟^[20], 一是以日为时间步长, 计算养分、有机肥以及灌溉和耕作方式对农业生产系统的影响, 同时确定潜在蒸散以及土壤表层蒸发和作物蒸腾; 二是以小时为步长, 模拟土壤水分运移过程, 主要包括土壤水分的再分

配, 化学物质的传输、入渗和径流以及杀虫剂的淋失、热量传输以及植物氮素吸收等^[20]。模型的主要过程包括: (1) 水文和化学传输过程中最重要的是土壤水分传输, 包括降雨及灌溉水的下渗、通过土壤剖面的重新分配、作物对水分的吸收和蒸发等过程; (2) 养分循环过程, 包括土壤剖面中的碳氮转化, 并结合许多模型的功能, 如作物残茬和土壤有机质库过程, 还增加了一些关于土壤微生物及其与环境的作用的基本理论^[26]; (3) 植物生长过程包括群体动态、植物生长及与环境因子相互作用等^[27]。

本文中作物模拟采用的是 CERES 模型中的作物生长发育模块, RZWQM-CERES 模型在结合 CERES 时尽量保证 CERES 中小麦和玉米生长发育模块的完整性, 以更好地实现其完整功能^[22]。在 RZWQM-CERES 中 RZWQM 为 CERES 提供土壤水分、温度、养分以及农田潜在蒸散等数据, 作为 CERES 模拟作物生长发育所需的环境要素, 而 CERES 通过模拟作物生长发育过程得到作物水分利用、养分吸收以及作物生长参数等数据, 作为 RZWQM 计算土壤水分平衡、养分平衡的数据来源, 这样通过数据交换将两个模型结合起来, 对于 RZWQM 而言 CERES 为其提供了一个更有力的作物生长模拟模块, 增强了模型模拟和评价农田管理对作物生产以及生态环境影响的功能, 对于 CERES 而言, RZWQM 为其提供了一个模拟评价土壤环境

和水环境的工具。

2.2 模型参数确定

2.2.1 土壤参数的确定

土壤参数主要包括土壤水力学参数和养分参数, 一般在田间试验条件下很难全部获得, 多数情况是利用试验数据进行校正和优化。土壤水力学参数包括植物可获得土壤水分的上限(压力为 33 kPa 时土壤含水量)和下限(压力为 1 500 kPa 时土壤含水量)、土壤水分饱和和导水率以及土壤中根系分布系数。RZWQM 模型利用 Brooks-Corey 方程可估算不同土壤类型(11 种类型)的土壤水力学参数^[20,28], 为获取模型参数提供了重要途径。两个试验站点的土壤质地、容重和田间持水量(33 kPa)通过田间测定直接作为模型的参数值(表 1), 在栾城实验站没有测定土壤颗粒组成, 根据土壤质地由模型估算获得^[4-5]。土壤饱和和导水率由模型参数估算获取作为, 模型校正的初始参数值, 根据两个试验站点测定的土壤水分动态数据校正土壤饱和和导水率和根系分布系数(参数校正方法见 2.2.3 部分)。

土壤养分参数主要包括土壤不同碳、氮库的数量及其相互转化系数^[20]。模型中土壤碳库按分解速度, 分为慢(slow)、中(medium)和快(fast) 3 种有机质库。与土壤 C/N 转化相关的微生物库分为 3 种类型, 即需氧异养微生物库、自养微生物库、厌养异养微生物库^[27]。本研究没有考虑土壤氮素对作物生长发育的影响, 但是为了尽可能接近田间实际情况, 对

表 1 禹城和栾城实验站土壤特性和模型参数^a

Table 1 Soil parameters used in RZWQM-CERES at Yucheng and Luancheng Experimental Stations^a

土壤层次 Soil layer	粘粒 Clay (%)	粗沙 Sandy (%)	粉沙 Silt (%)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	土壤水分饱和和导水率 Saturated hydraulic conductivity (cm h ⁻¹)	田间持水量 Field water capacity at 33 kPa (cm ³ cm ⁻³)	根系分布参数 Root distribution
禹城实验站 Yucheng Experimental Station							
0-10 cm	22.1	12.8	65.1	1.27	6.00	0.245	1.00
10-40 cm	21.7	12.3	66.0	1.32	3.50	0.265	0.72
40-80 cm	18.9	24.9	56.2	1.40	1.00	0.315	0.15
80-100 cm	16.8	26.2	57.0	1.41	0.28	0.326	0.02
100-120 cm	19.7	16.3	64.0	1.39	0.28	0.326	0.01
栾城实验站 Luancheng Experimental Station							
0-20 cm	20.0	15.0	65.0	1.41	2.59	0.250	1.00
20-35 cm	20.0	20.0	60.0	1.51	1.32	0.270	0.75
35-65 cm	25.0	15.0	60.0	1.47	0.30	0.320	0.30
65-95 cm	25.0	15.0	60.0	1.51	0.30	0.330	0.15
95-120 cm	25.0	15.0	60.0	1.54	0.10	0.350	0.01

^a 土壤参数中土壤水分饱和和导水率和根系分布参数通过校正获得, 其他参数由田间测定数据和模型估算获得(2.2.1 部分)。

^a Soil saturated hydraulic conductivity and root distribution were calibrated based on the measured data and other soil parameters were measured or estimated by the model (2.2.1).

模型的养分参数进行了估算。首先根据两个试验站点的有机质含量确定 3 种有机质库分别为 85%、10% 和 5%，由于没有微生物数据库测定数据，模型中 3 个微生物数据库分别设定为 50 000、500 和 5 000 有机体 g^{-1} 土壤^[20]。根据 Ma 等^[29]的方法，利用历史气象条件和相同管理措施下可获得稳定的土壤微生物库，通过此校正可满足本研究要求。

2.2.2 作物遗传参数确定 RZWQM 中原来的作物生长模块可以模拟多种作物^[28]，本文对结合到 RZWQM 中的 CERES-Wheat 和 Maize^[22]模块进行参数校正，其中小麦品种参数包括春化作用特性(PIV)、光周期特性(PID)、灌浆期特性(P5)、籽粒数特性(G1)、潜在灌浆速率(G2)、花期潜在单茎穗重(G3)和出叶间隔特性(PHINT)共 7 个参数；玉米品种参数包括幼苗期生长特性(P1)、光周期敏感特性(P2)、灌浆期特性(P5)、玉米的单株最大穗粒数(G2)、潜在灌浆速率(G3)及 PHINT 共 6 个参数^[14,30]。本研究首先将于强等^[25]在华北平原的结果作为作物参数的初始值，利用试错法调试小麦参数 PIV、PID、P5 和 PHINT 以及玉米参数 P1、P2、P5 和 PHINT，优化作物生长发育时期，然后调试小麦参数 G1、G2 和 G3 以及玉米参数 G2 和 G3，优化作物产量和生物

量的模拟效果(表 2)，参数校正方法见 2.2.3 部分。

2.2.3 模型校正过程和评价指标 根据模型开发者的建议首先校正模型的土壤水分模块，然后校正土壤 C/N 模块，最后校正作物参数模块^[27]。利用两个试验站点的高水处理(III)测定的土壤水分动态(5~7 d 一次)、叶面积指数(10~15 d 一次，仅在禹城站测定)、作物产量和生物量数据对模型参数进行校正，其他处理的数据用于模型验证。校正过程中模拟效果的统计评价是模型参数优化的关键，不同统计指标都有优缺点^[31]，本文在校正过程中利用归一化误差(均方根差/平均值)进行参数优化和筛选^[22]，通过不断改变参数值以减小模拟结果和测定结果的差异，当归一化误差数值最小时所得到的参数作为模型的最终校正结果(表 1 和表 2)。在模型验证过程中利用 4 个评价指标用来评价模型的模拟效果：(1)模拟和实测结果的均方根差(RMSE)；(2)模拟结果的相对误差(MRE)；(3)决定系数(R^2)；(4)模型有效系数(E)^[31]，当 E 值为 1 时模型模拟效果最优。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) 100\% \quad (2)$$

表 2 RZWQM-CERES 在禹城和栾城实验站的作物参数校正结果(括号内数据为校正范围)

Table 2 Crop genetic coefficients modified for wheat and maize used by RZWQM-CERES at Yucheng and Luancheng Experimental Stations (values in parentheses are the range used in model calibration)

作物 Crop	作物参数 Crop parameters	禹城实验站 Yucheng Station	栾城实验站 Luancheng Station
		品种 93-52 Cultivar 93-52	品种高优 503 Cultivar Gaoyou 503
小麦 Wheat	春化作用特性 PIV	3.0 (0.5–6.0)	3.0 (0.5–6.0)
	光周期特性 PID	1.5 (0–3.0)	0.5 (0.0–3.0)
	灌浆期特性 P5	–4.0 (–6.0–1.0)	–2.0 (–6.0–1.0)
	籽粒数特性 G1	4.5 (2.0–8.0)	5.5 (2.0–8.0)
	潜在灌浆速率 G2	2.0 (1.0–5.0)	1.2 (1.0–3.0)
	花期潜在单茎穗重 G3	2.0 (1.5–2.0)	1.4 (1.0–2.0)
	出叶间隔特性 PHINT	80 (65–90)	80 (65–90)
		品种农大 108 Cultivar Nongda 108	品种掖单 20 Cultivar Yedan 20
玉米 Maize	幼苗期生长特性 P1	260 (200–350)	230 (180–300)
	光周期敏感特性 P2	1.0 (0.8–2.0)	0.8 (0.5–1.5)
	灌浆期特性 P5	620 (500–800)	650 (500–800)
	单株最大穗粒数 G2	800 (600–900)	850 (600–900)
	潜在灌浆速率 G3	8 (6.0–12.0)	8 (6–12)
	出叶间隔特性 PHINT	50.0 (35–65)	50.0 (35–65)

For wheat: PIV: vernalization parameter; PID: photoperiod parameter; P5: relative grain filling duration parameter; G1: kernel number parameter; G2: kernel filling rate parameter; G3: non-stressed stem dry weight parameter; PHINT: phyllochron interval parameter. For maize: P1: Juvenile phase parameter; P2: photoperiod parameter; P5: grain filling duration parameter; G2: maximum possible kernel number parameter; G3: grain filling rate parameter; PHINT: phyllochron interval parameter.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})(P_i - P_{avg})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - P_{avg})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \quad (4)$$

其中 P_i 是第 i 个模拟值, O_i 是第 i 个观测值, O_{avg} 和 P_{avg} 分别是观测平均值和模拟平均值, n 是观测值或模拟值的个数。

3 结果与分析

3.1 模型校正结果

模型在禹城站模拟不同层次土壤水分的 RMSE 从 $0.036 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (0~30 cm) 降低到 $0.018 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (90~120 cm)(表 3), 表现为土壤水分的模拟结果随着土壤深度的增加逐步改善, 在土壤表层模拟效果最差。在栾城实验站模拟结果呈现相似的趋势(表 3)。土壤表层特别是 0~10 cm 土壤含水量模拟效果较差的一个可能原因就是利用中子仪测定该层次土壤水分时存在较大的误差^[32-33], Yu 等^[25]在华北平原模拟土壤水分时也得到相似的结果。

模型在禹城站模拟 2001—2003 年土壤贮水量 (0~120 cm) 结果与观测值呈相似的变化趋势 ($R^2 = 0.82$, 图 1-A), 其 RMSE 为 2.70 cm (MRE=3%), 模

型的有效系数为 0.48 (表 4)。在栾城实验站 1998—2001 年土壤贮水量的模拟结果较禹城站模拟结果稍差(表 5 和图 1-B), RMSE、MRE、 R^2 及 E 分别为 3.38 cm、-1.5%、0.69 和 0.32。方差分析表明模型在两个实验站点模拟土壤水分结果(处理 III)和观测值之间都没有显著差异($P < 0.01$)。

土壤水分模拟校正之后, 对土壤氮素模块进行了简单的校正, 见 2.2.1 部分。然后对 RZWQM-CERES 中的作物参数进行了校正, 结果表明, 在禹城实验站作物生物量和产量的模拟值与观测值的 MRE 分别在 -2.2~5.1% 和 -11.6~8.2% 之间, RMSE 分别为 450 kg hm^{-2} 和 380 kg hm^{-2} 。在禹城站叶面积指数的模拟值与观测值具有相似的变化趋势(图 2), 不同作物生育期内决定系数 (R^2) 在 0.77~0.99 之间, MRE、RMSE 以及模型有效系数分别在 -0.37~15.1%、230~810 kg hm^{-2} 以及 0.12~0.95 之间(表 4)。在栾城试验站的模拟结果较禹城实验站稍差, 作物生物量和产量的模拟结果的 MRE 和 RMSE 都高于禹城站点的结果(表 5)。这些模拟结果与 Yu 等^[25]以及 Hu 等^[34]在华北平原的模拟结果相似。

3.2 模型验证结果

在模型参数校正的基础上, 利用两个实验站的其他试验资料对模型进行了验证和评价(表 3、表 4 和表 5)。结果表明, 在禹城试验站模拟不同层次土壤水分的 RMSE 与校正结果相似, 随着土壤深度的增加模拟效果逐渐改善(表 3)。0~120 cm 土壤贮水量

表 3 RZWQM-CERES 在禹城和栾城实验站模拟不同处理土壤水分含量 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) 结果与实测值的均方根差

Table 3 Root mean square error (RMSE) of simulated soil water ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) in different soil layers by RZWQM-CERES at Yucheng and Luancheng Experimental Stations

地点 Site	处理 Treatment	土壤层次 Soil layer			
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm
禹城站 Yucheng Station	III(Calibration)	0.036	0.036	0.030	0.018
	IIN	0.046	0.039	0.018	0.015
	INN	0.046	0.038	0.036	0.014
	NNN	0.033	0.040	0.041	0.013
	平均 Mean	0.042	0.039	0.032	0.014
栾城站 Luancheng Station	III(Validation)	0.056	0.043	0.043	0.045
	NII	0.051	0.036	0.064	0.066
	IIN	0.075	0.046	0.040	0.042
	NNN	0.044	0.027	0.038	0.045
	平均 Mean	0.057	0.036	0.047	0.051

III(Calibration): irrigation applied at jointing, booting and flowering stages of wheat; IIN: irrigation applied at jointing and booting stages of wheat; INN: irrigation applied at jointing stage of wheat; NNN: no irrigation.

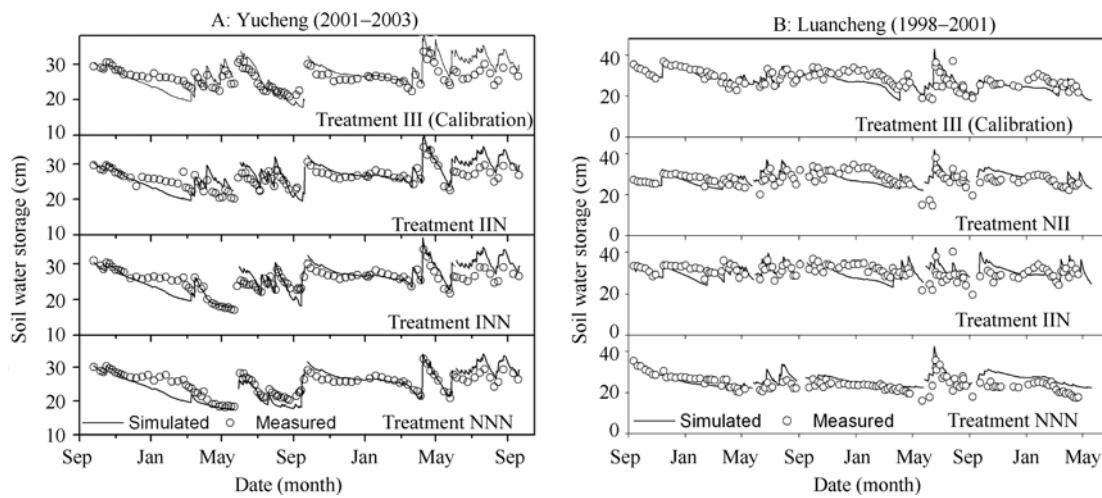


图 1 利用 RZWQM-CERES 在禹城(A)和栾城(B)实验站在不同水分条件下模拟 0~120 cm 土壤贮水量(cm)的结果与实测值对比分析
 Fig. 1 Comparison between measured and simulated soil water storage in the 0-120 cm layer over time by RZWQM-CERES at Yucheng (A) and Luancheng (B) Ecological Stations

表 4 RZWQM-CERES 在禹城实验站模拟不同灌溉条件下 0~120 cm 土壤贮水量、作物叶面积指数、生物量及产量模拟值与实测值对比分析

Table 4 Comparisons between measured and simulation soil water storage in the 0-120 cm layer, leaf area index (LAI), biomass, and yield by RZWQM-CERES at Yucheng Experimental Station

项目 Item		观测值 Observed ± SD	模拟值 Simulated ± SD	相对误差 MRE(%)	R ²	均方根误差 RMSE	有效系数 E
模型校正结果 Calibration results(III)							
土壤贮水量 Soil water storage (cm)	III (2001-2003)	26.28 ± 2.65	27.08 ± 4.26	3.0	0.82	2.70	0.48
叶面积指数 Leaf area index	Wheat (2001-2002)	2.50 ± 1.00	2.63 ± 0.74	4.1	0.82	0.55	0.65
	Maize (2002)	1.88 ± 0.71	1.87 ± 0.95	-0.37	0.89	0.43	0.78
	Wheat (2002-2003)	2.90 ± 0.94	3.16 ± 1.12	15.1	0.77	0.81	0.12
	Maize (2002)	3.25 ± 1.17	3.08 ± 1.05	-4.4	0.99	0.23	0.95
生物量 Biomass (×10 ³ kg hm ⁻²)	Wheat (2001-2002)	12.80	13.48	5.1	0.98	0.45	
	Maize (2002)	10.57	10.63	0.6			
	Wheat (2002-2003)	13.14	13.16	0.1			
	Maize (2002)	15.47	15.14	-2.2			
产量 Grain yield (×10 ³ kg hm ⁻²)	Wheat (2001-2002)	4.94	5.35	7.5	0.93	0.38	
	Maize (2002)	4.07	4.43	8.2			
	Wheat (2002-2003)	4.60	4.41	-4.4			
	Maize (2002)	6.73	6.03	-11.6			
模型验证结果 Validation results(IIN, INN, NNN)							
土壤贮水量 Soil water storage (cm)	IIN (2001-2003)	26.18 ± 2.69	27.04 ± 3.56	3.3	0.77	2.41	0.19
	INN (2001-2003)	25.47 ± 3.13	25.76 ± 4.06	1.1	0.81	2.38	0.41
	NNN (2001-2003)	25.58 ± 3.25	24.37 ± 4.52	-2.8	0.88	2.53	0.47
叶面积指数 Leaf area index	Wheat	2.13 ± 0.82	1.97 ± 1.02	-12.8	0.71	0.73	0.19
	Maize	2.56 ± 1.15	2.66 ± 1.06	4.2	0.93	0.43	0.87
生物量 Biomass (×10 ³ kg hm ⁻²)	Wheat (2001-2002)	10.76 ± 2.69	10.05 ± 2.23	-5.8	0.98	1.88	0.39
	Maize (2002)	12.88 ± 2.63	13.99 ± 2.50	8.8	0.95	1.37	0.02
产量 Grain yield (×10 ³ kg hm ⁻²)	Wheat (2001-2002)	3.76 ± 1.25	3.72 ± 1.38	-0.6	0.90	0.55	0.77
	Maize (2002)	5.62 ± 1.25	6.04 ± 1.28	7.6	0.94	0.58	0.20

缩写同表 3。Abbreviations as in Table 3.

表 5 RZWQM-CERES 在栾城实验站模拟不同水分条件下 0~120 cm 土壤贮水量、生物量及产量结果与实测值对比分析
Table 5 Comparisons between measured and simulation soil water storage in the 0~120 cm layer, biomass and yield by RZWQM-CERES at Luancheng Experimental Station

项目 Item		观测值 Observed \pm SD	模拟值 Simulated \pm SD	相对误差 MRE (%)	R^2	均方根误差 RMSE	有效系数 E
模型校正结果 Calibration (III)							
土壤贮水量 Soil water storage (cm)	III (1998–2001)	28.44 \pm 4.11	28.02 \pm 4.39	-1.5	0.69	3.38	0.32
生物量 Biomass ($\times 10^3$ kg hm^{-2})	Wheat (1998–1999)	10.93	12.58	15.1	0.97	1.56	
	Wheat (1999–2000)	11.07	12.62	14.0			
	Wheat (2000–2001)	10.45	12.25	17.2			
	Maize (2000)	9.76	10.91	11.8			
产量 Grain yield ($\times 10^3$ kg hm^{-2})	Wheat (1998–1999)	4.71	5.30	12.6	0.96	0.48	
	Wheat (1999–2000)	4.62	5.23	13.2			
	Wheat (2000–2001)	4.75	5.05	6.3			
	Maize (2000)	3.88	4.19	8.0			
模型验证结果 Validation (IIN, NII, NNN)							
土壤贮水量 Soil water storage (cm)	NII (1998–2001)	27.60 \pm 3.49	28.24 \pm 3.24	2.3	0.76	3.49	-0.03
	IIN (1998–2001)	31.13 \pm 3.04	30.92 \pm 3.37	-0.6	0.89	3.67	-0.51
	NNN (1998–2001)	24.20 \pm 3.63	26.61 \pm 3.60	10.0	0.69	3.73	-0.05
生物量 Biomass ($\times 10^3$ kg hm^{-2})	Wheat (1998–2001)	8.88 \pm 2.04	9.41 \pm 2.88	5.7	0.88	1.46	0.83
产量 Grain yield ($\times 10^3$ kg hm^{-2})	Wheat (1998–2001)	4.04 \pm 1.05	3.79 \pm 1.51	-6.6	0.93	0.67	0.85

缩写同表 3。Abbreviations as in Table 3.

的模拟值与观测值呈相似的变化趋势(图 1-A, 3 个处理的决定系数分别为 0.77、0.81 和 0.88), 较好地反映了不同灌溉量和降雨量对土壤水分含量的影响, 模型有效系数在 0.19~0.47 之间(表 4)。在栾城实验站的验证结果较禹城站稍差, 不同层次土壤水分含量模拟结果的 RMSE 稍高于禹城站点的模拟结果, 但与校正结果相近, 随土壤深度的增加模拟效果逐渐改善(表 3)。土壤 0~120 cm 贮水量的模拟值和观测值随时间变化呈相似的变化趋势(图 1-B, 3 个处理的决定系数分别为 0.76、0.89 和 0.69), RMSE 值高于禹城站点的模拟结果, 模型有效系数为负值(表 5), 当综合 3 个处理后所得到的 E 值为 0.31, 与校正结果相近。模型有效系数接近或小于 0 说明模型的模拟结果与观测数值的平均值具有相似的模拟效果, 在 Yu 等^[25]和 Hu 等^[35]研究中也报道 E 值小于 0。方差分析结果表明不同处理之间的土壤水分模拟结果或观测结果都存在显著差异($P < 0.01$)。

模型在禹城实验站模拟的叶面积指数与观测值随时间呈相似的趋势变化(图 2), 小麦季和玉米季的决定系数分别为 0.71 和 0.93, RMSE 分别为 0.73 和

0.43, MRE 分别为-12.8%和 4.2%(表 4)。小麦叶面积指数模拟结果较玉米季模拟结果差, 主要原因是严重干旱处理(NNN)小麦季的模拟值明显低于实测值(图 2), 说明在严重干旱胁迫下模型模拟作物对土壤水分干旱的响应需要进一步的改善。

在两个实验站点模型模拟的生物量和产量与观测值具有较好的一致性, R^2 在 0.88~0.98 之间(表 3 和表 4)。作物产量的模拟值与观测值对土壤水分变化的响应具有较好的一致性($R^2 = 0.83^{***}$, $n=22$), 同时方差分析表明不同处理的产量模拟值或观测值都存在显著差异($P < 0.001$), 这与土壤水分的模拟结果一致, 以上结果表明模型可以用来模拟和评价该地区不同水分条件对作物产量的影响。在禹城实验站的模拟结果(表 4)表明小麦生物量和产量都低于观测值(MRE 分别为-5.8%和-0.6%), 而玉米生物量和产量模拟结果的相对误差分别为 8.8%和 7.6%, 这与叶面积指数模拟结果一致(图 2)。两个站点作物产量和生物量模拟结果与校正结果相近, 其中作物产量模拟结果的 RMSE 在 550~670 kg hm^{-2} 之间, 生物量模拟结果的 RMSE 在 1 370 ~ 1 880 kg hm^{-2} 。

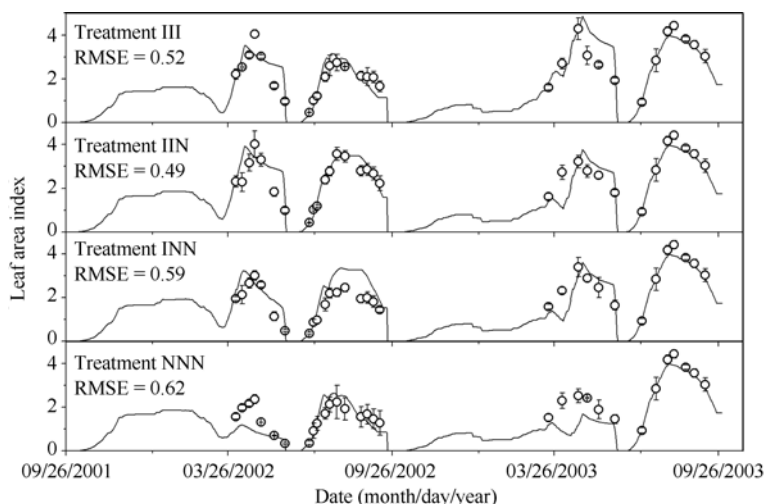


图 2 RZWQM-CERES 在禹城实验站模拟不同灌溉条件下作物叶面积指数动态与实测值对比分析
Fig. 2 Comparisons between measured and simulated leaf area index across crop seasons by RZWQM-CERES at Yucheng Experimental Station

4 结论与讨论

本研究结果表明 RZWQM-CERES 模型能够较好地模拟不同站点(禹城站和栾城站)土壤水分动态变化,作物产量的模拟结果与实测值对土壤水分变化的响应呈相似的趋势变化($R^2 = 0.83^{***}$, $n=22$),可作为华北平原农田水分优化管理决策工具,用来模拟华北平原不同水分条件对小麦-玉米生产系统的影响,建立合理的灌溉策略,提高作物水分利用效率和保护农业生态环境。下一步应该对模型中土壤氮素模块进行校正,验证模型在不同土壤氮素条件下模拟土壤氮素平衡、作物生长及产量形成的有效性和适应性。

由于农业系统模型结构和过程复杂,在提高模型机理性的同时,增加了模型校正和应用难度,因此系统模型的校正工作一直是模型研究的重点和难点^[24,35],本研究初步建立了一套适合华北平原小麦-玉米两熟生产的模型参数,为模型在该地区的应用奠定了基础。同时发现模型评价过程中的一些问题,需在今后研究中注意,如:(1)模型参数的确定,目前对模型参数的校正一般采用试错法(trial and error method)(Godwin 等)^[36],所获得的参数未必就是最优的,充其量是合理的,一定程度上限制了模型的应用和推广;(2)严重水分胁迫下模拟产量与实测值差距较大,这与国外一些研究结果一致^[29,37],说明严重水分胁迫下作物生长模拟还需从机理上进一步改善;(3)尽管对土壤氮素有所考虑,但可能与田间实际情况差异较大,如果对模型的 C/N 模块进行详细校正,有可能明显改善模拟效果;(4)作为一元模

型(one dimensional model)在模拟水分和养分传输过程中与现实还存在一定差距。

References

- [1] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2003, 4: 671-677
- [2] Liu C M, Yu J J, Kendy E. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain. *Water Int*, 2001, 26: 265-272
- [3] Zhang J H, Sui X Z, Li B, Su B L, Li J M, Zhou D X. An improved water-use efficiency of winter wheat grown under reduced irrigation. *Field Crops Res*, 1998, 59: 91-98
- [4] Zhang Y Q, Kendy E, Yu Q, Liu C M, Shen Y J, Sun H Y. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agric Water Manage*, 2004, 64: 107-122
- [5] Zhang X Y, Chen S, Liu M Y, Pei D, Sun H Y. Improved Water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain. *Agron J*, 2005, 97: 783-790
- [6] Li J M, Inanaga S, Li Z, Eneji A E. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. *Agric Water Manage*, 2005, 76: 8-23
- [7] Fang Q X, Chen Y H, Yu Q, Ou-Yang Z, Li Q Q, Yu S Z. Much improved irrigation use efficiency in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. *J Integr Plant Biol*, 2007, 49: 1517-1526
- [8] Fang Q X, Yu Q, Wang E L, Chen Y H, Zhang G L, Wang J, Li L H. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. *Plant Soil*, 2006, 284: 335-350
- [9] Wang H X, Liu C M, Zhang L. Water-saving agriculture in China: An overview. *Adv Agron*, 2002, 75: 135-171

- [10] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agric Water Manage*, 2004, 69: 115–133
- [11] Thomas R S, Seligman N G. Crop modeling: from infancy to maturity. *Agron J*, 1996, 88: 698–704
- [12] Boote K J, Jones J W, Pickering N B. Potential uses and limitations of crop models. *Agron J*, 1996, 88: 704–716
- [13] Jiang M(江敏), Jin Z-Q(金之庆), Gao L-Z(高亮之), Ge D-K(葛道阔), Shi C-L(石春林). Validation and modification of CERES-Wheat model in winter wheat production region of China. *Jiangsu J Agric Sci* (江苏农学院报), 1998, 19(3): 64–67 (in Chinese with English abstract)
- [14] Li J(李军), Shao M-A(邵明安), Fan T-L(樊廷录), Wang L-X(王立祥). Databases creation of crop growth model DSSAT3 on the loess plateau region of China. *Agric Res in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2001, 19(1): 120–126 (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhang Y-H(张艳红), Ma Y-L(马永良), Liao S-H(廖树华). Method of optimizing maize variety parameters in the CERES-maize simulation model. *J Chin Agric Univ* (中国农业大学学报), 2004, 9(4): 24–29 (in Chinese with English abstract)
- [16] Jin L(金梁), Hu K-L(胡克林), Li B-G(李保国), Gong Y-S(龚元石). Coupled simulation on crop growth and soil water-heat-nitrogen transport II. Model validation and application. *J Hydraulic Eng* (水利学报), 2007, 38(8): 972–980 (in Chinese with English abstract)
- [17] Cheng X-R(成向荣), Huang M-B(黄明斌), Shao M-A(邵明安). Simulation of soil moisture dynamics in croplands using SHAW model in the semi-arid region of the Loess Plateau. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2007, 23(11): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- [18] Chen Y(陈研), Hu K-L(胡克林), Feng L(冯凌), Li B-G(李保国). Optimal management of water and nitrogen for winter wheat based on simulation model in soil-plant system in agricultural field. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2007, 23(6): 55–60 (in Chinese with English abstract)
- [19] Xue C-Y(薛昌颖), Yang X-G(杨晓光), Deng W(邓伟), Zhang Q-P(张秋平), Yan W-X(闫伟兄), Wang H-Q(王化琪), Bouman B A M. Establishing optimum irrigation schedules for aerobic rice in Beijing using ORYZA2000 model. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2008, 24(4): 76–82 (in Chinese with English abstract)
- [20] Ahuja L R, Johnsen K E, Rojas K W. Water and chemical transport in soil matrix and macropores In: Ahuja L R, Rojas K W, Hanson J D, Shafer M J, Ma L, eds. *Root Zone Water Quality Model*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, CO, 2000. pp 13–50
- [21] Ma L, Ahuja L R, Ascough II J C, Shaffer M J, Rojas K W, Malone R W, Cameira M R. Integrating system modeling with field research in agriculture: Applications of Root Zone Water Quality Model (RZWQM). *Adv Agron*, 2000, 71: 233–292
- [22] Ma L, Hoogenboom G, Ahuja L R, Ascough II J C, Saseendran S A. Evaluation of the RZWQM-CERES-Maize hybrid model for maize production. *Agric Syst*, 2006, 87: 274–295
- [23] Ritchie J T. Soil water balance and plant water stress. In: Tsuji G Y, Hoogenboom G, Thornton P K, eds. *Understanding Options for Agricultural Production*, Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. pp 41–55
- [24] Ma L, Malone R W, Heilman P, Jaynes D L, Ahuja L R, Saseendran S A, Kanwar R S, Ascough II J C. RZWQM simulated effects of crop rotation, tillage, and controlled drainage on crop yield and nitrate-N loss in drain flow. *Geoderma*, 2007, 140: 260–271
- [25] Yu Q, Saseendran S A, Ma L, Flerchinger G N, Green T R, Ahuja L R. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth models in RZWQM. *Agric Syst*, 2006, 89: 457–477
- [26] Hansen S, Shaffer M J, Jensen H E. Developments in modeling nitrogen transformations in soil. In: Bacon P E ed. *Nitrogen Fertilization in the Environment*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1995. pp 83–107
- [27] Hanson J D, Rojas K W, Shaffer M J. Calibrating the Root Zone Water Quality Model. *Agron J*, 1999, 91: 171–177
- [28] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper 3. Colorado State Univ, Fort Collins, CO, USA, 1964. pp 1–15.
- [29] Ma L, Nielsen D C, Ahuja L R, Kiniry J R, Hanson J D, Hoogenboom G. An evaluation of RZWQM, CROPGRO, and CERES-maize for responses to water stress in the Central Great Plains of the U. S. In: Ahuja L R, Ma L, Howell T A, eds. *Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer*. Boca Raton, FL. CRC Press. 2001. pp 119–148
- [30] Tsuji G Y. *DSSAT35 User's Guide*. Vol. 1–3. University of Hawaii, 1998
- [31] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimate model validation. *Water Resour Res*, 1999, 35: 233–241
- [32] Wu L S, Chen W, Baker J M, Lamb J A. Evaluation of the Root Zone Water Quality Model using field-measured data from a sandy soil. *Agron J*, 1999, 91: 177–182
- [33] Jaynes D B, Miller J G. Evaluation of the Root Zone Water Quality Model using data from Iowa MESA. *Agron J*, 1999, 91: 192–200
- [34] Hu C S, Saseendran S A, Green T R, Ma L, Li X X, Ahuja L R. Evaluating N and water management in a double cropping system using RZWQM. *Vadoze Zone J*, 2006, 5: 493–505
- [35] Ahuja L R, Ma L. Parameterization of agricultural system models: Current approaches and future needs. In: Ahuja L R, Ma L, Howell T A, eds. *Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer*. New York: Lewis Publ. 2002. pp 273–316
- [36] Godwin D C, Ritchie J T, Singh U, Hunt L. *A User's Guide to CERES Wheat-V2.10*. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, 1989
- [37] Malone R W, Ma L, Ahuja L R, Rojas K W. Evaluation of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM): A review. In: Parsons J E, Thomas D L, Huffman R L, eds. *Agricultural non-point Source Water Quality Models: Their use and application*. Southern Cooperative Series Bulletin #398 2001. <http://s1004.okstate.edu/S1004/Regional-Bulletins/Modeling-Bulletin/RZWQM2-word.html>