

华北地区不同灌溉条件下 CERES-Wheat 模型模拟效果的系统分析

周丽丽 刘克 赵雪 赵茜 廖树华* 周顺利*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘要 以冬小麦石家庄8号为材料,对华北平原不同灌溉处理下应用 CERES-Wheat 模型模拟节水栽培冬小麦生育时期、产量与产量构成因素、生物量、土壤水分含量、土壤硝态氮含量和地上部吸氮量的效果进行了系统分析。结果表明:在节水及不灌溉条件下,CERES-Wheat 模型对冬小麦生育时期、产量、生物量的模拟效果良好;在高水分灌溉条件下,模型对生育时期的模拟效果良好,对其他性状的模拟效果不够理想,并且模型过高估计了灌溉对产量的贡献率。该模型可以模拟不同灌溉处理土壤水分动态变化基本特征,但稳定性有待提高。模型对不同灌溉处理 2 m 土体土壤硝态氮含量的模拟效果较好,对吸氮量的模拟效果较差。要提高模型的系统性精度,需要在模型机制上进一步改进。

关键词 CERES-Wheat 模型;灌溉水平;产量与产量构成因素;生物量;土壤水分;吸氮量;土壤硝态氮;模拟效果
中图分类号 S 513 **文章编号** 1007-4333(2016)06-0108-09 **文献标志码** A

Integrative analysis on the simulated results of CERES-Wheat model under different water regimes in North China Plain

ZHOU Li-li, LIU Ke, ZHAO Xue, ZHAO Qian, LIAO Shu-hua*, ZHOU Shun-li*

(College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Winter wheat cultivar Shijiazhuang 8 was taken as research material, the growth and development stage, yield and yield components, biomass, soil water content, soil nitrate content and nitrogen uptake amount of CERES-Wheat model under different irrigation conditions in North China Plain were analyzed integratively. The results showed that the simulation effects of growth and development stage, yield and biomass were very good under water saving and rainfed conditions. However, it was only good in the simulation of growth and development stage, but not other biological characteristics under the excessive irrigation treatment, and the model overestimated the contribution of irrigation amount on yield. In conclusion, the CERES-Wheat model can simulate the dynamic change of soil water under different irrigation conditions, but its stability needs to be improved. Furthermore, the performance of the CERES-Wheat model was good in the simulation of soil nitrate amount in 2 m depth soil profile, but not in plant nitrogen uptake amount. Therefore, further modification is needed to improve the systemic precision of the model.

Keywords CERES-wheat model; irrigation level; yield and yield components; biomass; soil water; plant nitrogen uptake amount; soil nitrate amount; simulation effect

作物生长模拟模型是利用计算机技术,将作物与生态环境因子联系起来,建立相应的数学模型,从而动态量化的研究和模拟分析作物生长过程^[1]。CERES 模型建立于 20 世纪 70 年代,是 DSSAT 系统

中应用的模型之一^[2]。CERES-Wheat 模型在国际上有广泛而深入的研究^[3],并被应用于小麦的产量预测以及气候变化对小麦产量的影响等方面的分析^[4-7]。

在我国,CERES-Wheat 模型的研究主要围绕

收稿日期:2015-10-22

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201203031、201303133)

第一作者:周丽丽,博士研究生,E-mail:lily8085@163.com

通讯作者:周顺利,教授,主要从事作物栽培生理研究,E-mail:zhoushl@cau.edu.cn

廖树华,副教授,主要从事作物栽培信息化研究,E-mail:sergzl@cau.edu.cn

产量及生长等进行模拟,并对其区域适用性等进行评价。曹阳等^[8]应用 CERES-Wheat 模型对 1962—2010 年干旱对中国冬小麦产量影响的时空变化趋势进行了分析。刘峰等^[9]将 CERES-Wheat 模型与遥感数据结合构建同化系统,初步认为该模型可用于小麦长势的监测。李军等^[10-11]也做了大量研究工作,对 CERES 模型在黄土高原地区的适用性进行了评价。王伟等^[12]根据多年试验数据对 CERES-Wheat 模型在北京地区的适用性进行评价。刘占锋等^[13]利用 CERES-Wheat 模型对不同品种小麦的生态适应性进行了评价,为品种区域试验和良种推广提供决策依据。

CERES-Wheat 模型在输出产量及产量构成因素等性状的同时,可以同步输出生育时期、生物量、土壤水分及氮吸收利用等多项指标的模拟结果,但国内对模型的评价研究主要集中在对产量的模拟效果方面,较少对水分、氮吸收利用特性等方面的预测能力进行系统评价,而水氮吸收利用特性等的准确预测对于进一步应用模型来优化生产中水氮管理措施,提高水氮利用效率非常重要。此外,关于 CERES-Wheat 模型在不同栽培管理模式下的预测能力的研究也较少,尤其对 CERES-Wheat 模型对不同灌溉水平下的应用效果的研究,国内尚未见报道。国外有研究表明,CERES-Wheat 模型在水氮供应充足条件下的模拟效果良好,而在水分亏缺情况下,模型的模拟效果需要进一步评价^[14]。

本研究利用 DSSAT4. 5^[15]系统中的 CERES-Wheat 模型对华北平原不同灌溉处理条件下冬小麦

产量、生物量、2 m 土体土壤水分含量、土壤硝态氮含量与吸氮量等指标的模拟效果进行综合分析,旨在对不同水分管理条件下应用 CERES-Wheat 模型模拟预测当地小麦产量及水氮吸收利用特性等指标的可行性进行系统评价。

1 材料与方 法

1.1 试验方法及数据来源

本研究于 2007—2009 年在河北省沧州市中国农业大学吴桥实验站进行。冬小麦采用节水栽培管理^[16],供试品种为石家庄 8 号,播种量 300 kg/hm²,底肥施磷二铵 300 kg/hm²,尿素 225 kg/hm²,硫酸钾 225 kg/hm²,硫酸锌 22.5 kg/hm²。在播前灌足底墒水的基础上,灌溉处理根据当年降雨情况,2007—2008 年度设置 3 个水分处理,具体灌溉量和灌溉时间为:T0 为生育期不灌溉,T1 为拔节期灌水 75 mm,T3 为起身期、孕穗期和花后 20 d 分别灌水 90、80、90 mm;2008—2009 年度设置 4 个水分处理,具体灌溉量和灌溉时间为 T0 为生育期不灌溉,T1 为拔节期灌水 70 mm,T2 为拔节期、扬花期分别灌水 65、110 mm,T3 为起身期、孕穗期和扬花期分别灌水 75、90、100 mm。每个处理 3 次重复。田间详细栽培管理措施及数据采集信息参见文献^[17]。

1.2 试验地土壤概况

试验地土壤为冲击型盐化潮土,模型中土壤参数文件中涉及的基础地力指标,土壤质地参数值见表 1。

表 1 试验地土壤质地及土壤肥力指标

Table 1 Soil texture and several soil fertility indexes of the experimental field

土层深度/ cm Soil depth	土壤质地 Soil texture			全氮/% Total nitrogen content	有机质/ (mg/kg) Organic matter	土壤容重/ (g/cm ³) Bulk density	pH
	粘粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sand				
0~20	8.80	79.10	12.10	0.06	1.04	1.45	8.10
20~40	11.80	78.10	10.10	0.05	0.85	1.41	8.20
40~60	10.80	81.10	8.10	0.04	0.69	1.42	8.20
60~80	15.20	75.90	8.90	0.04	0.66	1.43	8.30
80~100	19.00	76.30	4.70	0.04	0.64	1.41	8.30
100~120	15.70	80.70	3.60	0.01	0.17	1.40	8.10
120~140	16.70	81.20	2.10	0.01	0.13	1.38	8.00
140~160	23.20	76.30	0.50	—	0.10	1.37	8.20
160~180	24.80	71.30	3.90	—	0.04	1.45	8.30
180~200	25.60	69.20	5.20	—	0.03	1.43	8.10

1.3 气象数据计算方法

气象数据采用吴桥县气象局逐日观测数据,包括:日最高温度、最低温度、降雨量、日照时数。模型所需太阳辐射值采用国内常用的埃斯屈朗经验公式由日照时数计算而来^[18-19]。

1.4 品种参数校正

CERES-Wheat 模型的品种参数有 7 个,分别是 P1V(春化作用系数)、P1D(光周期系数)、P5(灌浆期特征参数)、G1(穗粒数系数)、G2(穗粒重系数)、G3(穗数系数)和 PHINT(出叶间隔特征参数)。应用 DSSAT 软件包中的 GENCALC (Genotype Coefficient Calculator) 程序以及实测数据估计,对模型的品种参数进行校正^[21]。本研究利用 2008—2009 年试验数据进行模型品种参数的校正,以 2007—2008 年试验数据进行模型模拟效果的验证。经过校正,石家庄 8 号品种参数 P1V、P1D、P5、G1、G2、G3、PHINT 分别为:33.23、75.06、573.5、22.66、36.18、2.415、75。

1.5 统计分析

生育时期、产量以及产量构成因素模拟值与实测值之间的关系采用偏差、均方根误差(RMSE)和标准均方根误差(NRMSE)进行评价。

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

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} / \bar{O} \quad (2)$$

其中: N 为样本数; P_i 为模拟值; O_i 为实测值; \bar{O} 为实测值的平均值。模拟值与实测值的 RMSE 和 NRMSE 越小,表明模型的预测能力越好。模拟效果评价标准分为四个等级:极好(NRMSE 值 < 10%);较好(10% < NRMSE 值 < 20%);合适(20% < NRMSE 值 < 30%);较差(NRMSE 值 > 30%)^[6,20]。

生物量、土壤水分含量、吸氮量以及 2 m 土体土壤硝态氮含量动态模拟值与实测值之间的关系采用配对 T 检验进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉条件下冬小麦主要生育时期、产量及产量构成因素的模拟效果分析

在模型品种参数校正的基础上,对冬小麦主要生育时期、产量及产量构成因素等进行了模拟。模

型预测值与实测值的对比分析结果表明(表 2),2 个年份各水分处理开花期和成熟期的预测值与实测值基本吻合;对不同水分处理下产量和产量构成因素的模拟值与实测值进行综合评价发现,除 2008—2009 年产量性状的 NRMSE 值为 20.0%,其他性状的模拟效果均处于较好与极好水平,说明用 CERES-Wheat 模型对产量和产量构成因素模拟是合适的,但是 RMSE 值较大。而就产量的模拟效果来看,2 个年份 T3 处理的产量模拟值与实测值的偏差较大(表 2),这可能是导致综合评价时 RMSE 和 NRMSE 值较大的原因。在不包括 T3 处理的情况下对 2008—2009 年产量模拟值与实测值 RMSE 和 NRMSE 值进行计算,结果为 529 和 8.0,模拟效果极好。以上分析结果表明,CERES-Wheat 模型可以用于吴桥地区不灌溉和节水灌溉(T1 和 T2 处理)条件下冬小麦产量预测,但对高灌溉水分条件下产量的模拟效果较差。

2.2 不同灌溉条件下冬小麦生物量的模拟效果分析

对 2007—2009 年不同灌溉条件下冬小麦不同生育时期地上部生物量的模拟值与实测值进行对比分析,结果如图 1 所示。不灌溉(T0)以及节水条件下(T1 和 T2),生物量模拟值与实测值的整体趋势吻合度良好;高水分灌溉条件下(T3),生物量模拟值高于实测值,2 个年份的结果表现一致。对 2 个年份地上部生物量模拟值与实测值进行配对 T 检验, P 值分别为,2007—2008 年 0.172(T0)、0.135(T1)、0.040(T3);2008—2009 年 0.805(T0)、0.747(T1)、0.333(T2)、0.029(T3)。在高水分灌溉处理条件下(T3),2 个年份生物量模拟值与实测值之间均有显著性差异($P \leq 0.05$),其它水分处理条件下则差异不显著,表明高水分灌溉条件下 CERES-Wheat 模型对生物量的模拟效果较差。

2.3 不同灌溉条件下土壤水分动态变化的模拟效果分析

利用 CERES-Wheat 模型,对不同灌溉条件下冬小麦 0 至 2 m 土体土壤贮水量的动态变化进行了模拟分析(图 2)。从图 2 可以看出,土壤贮水量模拟值与实测值接近 1:1 线,说明模型可以较好地模拟土壤贮水量的动态变化特征。对 2 个年份土壤贮水量模拟值与实测值进行配对 T 检验, P 值分别为,2007—2008 年 0.093(T0)、0.026(T1)、0.187

(T3), 2008—2009 年 0.577 (T0)、0.054 (T1)、0.097(T2)、0.284(T3), 其中大部分 *P* 值变化范围为大于 0.05, 但小于 0.1, 表明模型可以对 2 m 土体土壤贮水量进行预测, 但不够稳定。

表 2 冬小麦主要生育时期、产量及产量构成因素 CERES-Wheat 模型模拟值与实测值的对比分析

Table 2 Comparison analysis of the measured value and the simulated value derived from CERES-Wheat model in growth and development stage, yield and yield components of winter wheat

指标 Index	年份 Year	水分处理 Water treatment	模拟值 Simulated value	实测值 Measured value	偏差 Deviation	均方根误差 RMSE	相对均方根 误差/% NRMSE
开花期 Anthesis	2007—2008	T0	208	209	-1		
		T1	208	209	-1		
		T3	208	209	-1		
	2008—2009	T0	207	207	0		
		T1	207	207	0		
		T2	207	207	0		
T3		207	207	0			
成熟期 Maturity	2007—2008	T0	241	241	0		
		T1	241	241	0		
		T3	241	241	0		
	2008—2009	T0	240	237	3		
		T1	240	237	3		
		T2	240	237	3		
T3		240	237	3			
穗数/m ⁻² Ear number	2007—2008	T0	637	597	40(6.7)		
		T1	713	722	-9(-1.3)	53	7.8
		T3	792	710	82(11.6)		
	2008—2009	T0	609	619	-10(-1.6)		
		T1	698	872	-174(-20.0)	101	13.0
		T2	731	828	-97(-11.7)		
T3		839	802	37(4.6)			
穗粒数 Seeds per ear	2007—2008	T0	25.8	23.2	2.6(11.2)		
		T1	28.2	26.9	1.3(4.8)	2.5	9.8
		T3	29.6	26.4	3.2(12.1)		
	2008—2009	T0	19.7	23.0	-3.3(-14.4)		
		T1	29.5	27.2	2.3(8.5)	2.7	10.4
		T2	28.1	27.8	0.3(1.1)		
T3		30.5	26.8	3.7(13.8)			

表2(续)

指标 Index	年份 Year	水分处理 Water treatment	模拟值 Simulated value	实测值 Measured value	偏差 Deviation	均方根误差 RMSE	相对均方根 误差/% NRMSE
千粒重/g 1 000-kernel weight	2007—2008	T0	36	43.0	-7.0(-16.3)	4.4	11.0
		T1	36	37.3	-1.3(-3.5)		
		T3	36	38.5	-2.5(-6.5)		
	2008—2009	T0	36	39.1	-3.1(-7.9)	2.6	7.4
		T1	36	34.6	1.4(4.1)		
		T2	36	34.0	2.0(5.9)		
产量/ (kg/hm ²) Yield	2007—2008	T0	5 947	6 293	-346(-5.5)	809	11.7
		T1	7 287	7 325	-38(-0.5)		
		T3	8 504	7 147	1 357(19.0)		
	2008—2009	T0	4 335	5 214	-879(-16.9)	1 338	20.0
		T1	7 455	7 547	-92(-1.2)		
		T2	7 423	7 179	244(3.4)		
2008—2009	T3	9 281	6 768	2 513(37.1)			

注: The value in bracket (%) = Deviation/Measured value × 100. T0: 小麦生育期间不灌水; T1: 拔节期灌水 2007—2008 年为 75 mm、2008—2009 年为 70 mm; T2: 2008—2009 年拔节期、扬花期分别灌水 65、110 mm; T3: 2007—2008 年起身期、孕穗期和花后 20d 分别灌水 90、80 和 90 mm, 2008—2009 年起身期、孕穗期和扬花期分别灌水 75、90、100 mm。

Note: T0: no irrigation during wheat growth period of 2007—2008 and 2008—2009. T1: 75 and 70 mm irrigation at jointing stage of 2007—2008 and 2008—2009. T2: 65 and 110 mm irrigation at jointing stage and anthesis stage of 2008—2009, respectively. T3: 90, 80 and 90 mm irrigation at regrowing stage, booting stage and 20 days after anthesis respectively of 2007—2008; 75, 90, and 100 mm irrigation at regrowing stage, booting stage and anthesis stage of 2008—2009, respectively. The same below.

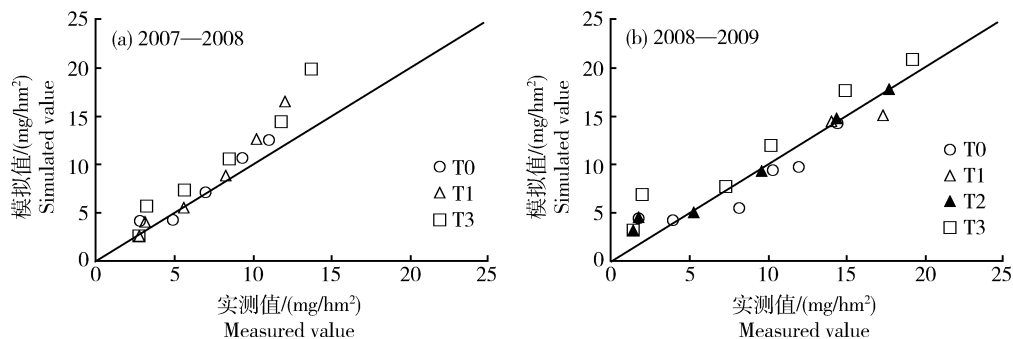


图1 不同灌溉条件下冬小麦地上部生物量模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparison of simulated value and measured value of winter wheat biomass under different water regimes

对 2 m 土体土壤水分含量的动态变化进行分层模拟, 模拟值与实测值的对比分析结果见图 3 (2007—2008) 和图 4 (2008—2009), 图中峰值点为

降雨或灌溉后的模拟结果。从图中可以看出, CERES-Wheat 模型可以模拟出不同灌水处理下各土层土壤水分含量的变化特征, 但稳定性有待提高。

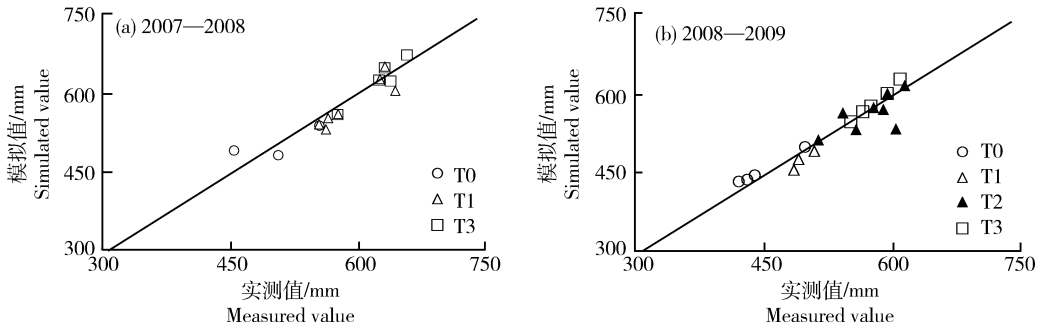
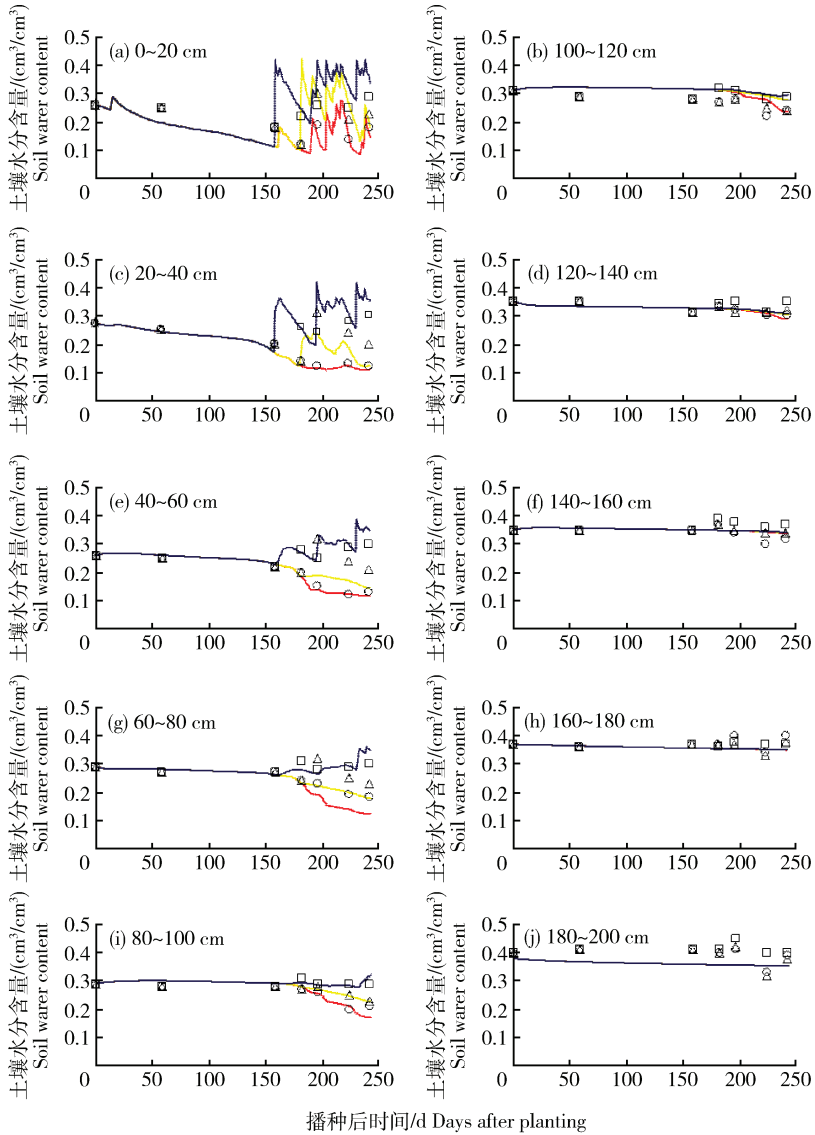


图 2 不同灌溉条件下 2 m 土体土壤贮水量模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated value and measured value of soil water storage amount in 2 m depth soil profile under different water regimes



— T0 模拟值 Simulated value of T0 — T1 模拟值 Simulated value of T1 — T3 模拟值 Simulated value of T3
 □ T0 实测值 Measured value of T0 △ T1 实测值 Measured value of T1 ○ T3 实测值 Measured value of T3

图 3 2007—2008 年不同灌溉条件下不同土层土壤水分含量模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated value and measured value of soil water content of different soil layer under different irrigation conditions in 2007—2008

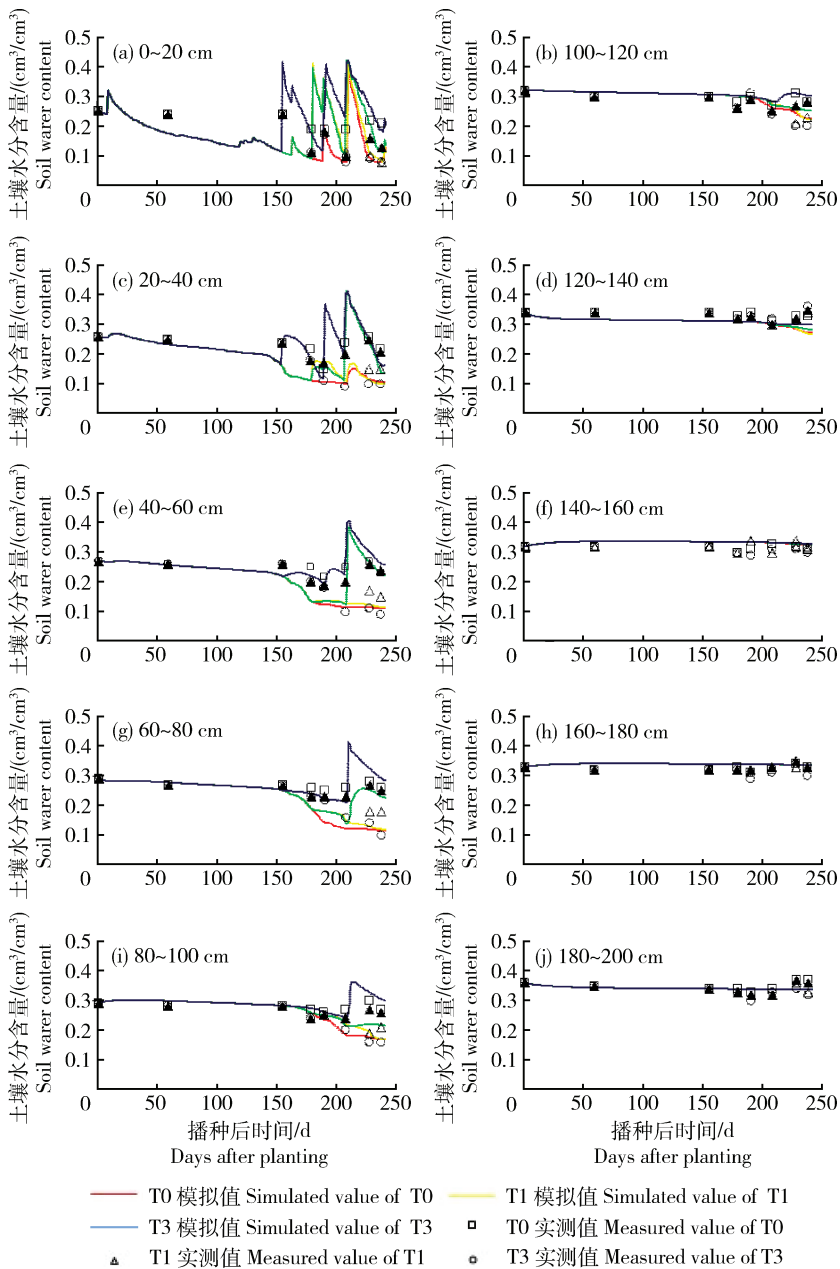


图4 2008—2009年不同灌溉条件下不同土层土壤水分含量模拟值与实测值对比
Fig. 4 Comparison of simulated value and measured value of soil water content of different soil layer under different irrigation conditions in 2008—2009

2.4 不同灌溉条件下冬小麦吸氮量及土壤硝态氮含量的模拟效果分析

对2008—2009年不同灌水条件下冬小麦不同生育时期吸氮量及2 m土体土壤硝态氮含量进行了模拟,模拟值与实测值的对比分析结果见图5。从图5可以看出,模型对冬小麦吸氮量的模拟效果较差,对2 m土体土壤硝态氮含量模拟效果较好,但总体上呈现出模拟值高于实测值的趋势。对模拟值与实测值进行配对T检验,不同灌溉条件下冬小

麦吸氮量 P 值分别是0.003(T0)、0.002(T1)、0.006(T2)、0.585(T3),表明不灌溉(T0)、节水灌溉(T1、T2)模拟值与实测值之间差异显著,高水分灌溉处理下(T3)模拟值与实测值差异不显著;不同灌溉条件下2 m土体土壤硝态氮含量 P 值分别是0.175(T0)、0.218(T1)、0.251(T2)、0.930(T3)。以上结果表明,4个灌水处理下CERES-Wheat模型对冬小麦吸氮量的模拟效果较差,对土壤硝态氮含量的模拟效果较好。

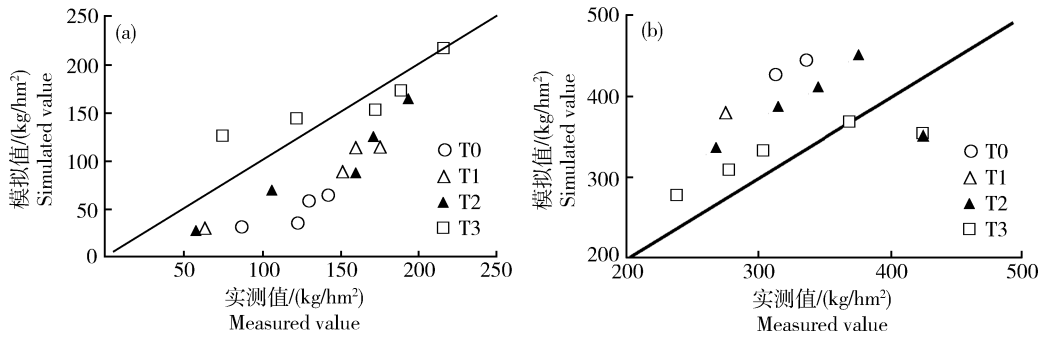


图 5 不同灌溉条件下冬小麦吸氮量(a)和 2 m 土体土壤硝态氮含量(b)模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated value and measured value of plant nitrogen uptake amount (a) and soil nitrate amount in 2 m depth soil profile (b) under different irrigation conditions in winter wheat

3 讨论

水、肥(氮肥)管理在作物生产管理中处于核心地位。水、氮精确定量管理不仅与作物产量密切相关,也是提高水肥利用效率、实现作物绿色生产的必然要求。对作物生长与产量形成、水分和氮素吸收利用的系统精确模拟,是利用模型指导作物水氮管理的根本。华北平原冬小麦生长期间的平均需水量远远高于同期有效降水量^[22],灌溉是保证华北平原小麦产量的重要措施,充分了解模型对本地区不同灌溉条件下冬小麦生长与产量形成及水、氮吸收利用的预测能力是十分必要的。

本研究针对 CERES-Wheat 模型在不同灌溉条件下冬小麦上的应用效果进行了系统评价。研究结果表明:在节水灌溉及不灌溉处理下经过品种参数校正后的模型可以较好地模拟吴桥地区节水栽培冬小麦产量、生物量等指标;但是在高水分灌溉处理下,该模型高估了产量、生物量等指标,这可能与品种参数设置以及特定栽培管理措施有关。目前模型品种参数校正包含的 7 个参数中,除 P1V(春化作用系数)、P1D(光周期系数)和 PHINT(出叶间隔特征参数)外,其他几个参数主要与生殖器官(籽粒)的形成有关,反映营养器官形成特征的参数不足。本研究采用的节水省肥高产栽培技术,可能对高水分灌溉条件下模型的模拟精度有影响,需要考虑特定条件对冬小麦生长发育与产量形成的影响,以提高模型的模拟准确性;另一方面,经过品种参数校正后的模型可以模拟吴桥地区冬小麦生产中不同土层土壤水分含量以及 2 m 土体土壤硝态氮含量的基本特征,但稳定性不高,说明当前的 CERES-Wheat 模型可以对吴桥地区冬小麦生产中的多指标进行预

测,但精确度还有待于进一步提高,这可能是由于单纯的品种参数校正只考虑了品种变化对产量、生物量等指标的影响,没有考虑到对水氮吸收利用方面的影响。另外,CERES-Wheat 模型建立时所用品种的水氮吸收利用特性,和本研究所选品种的水氮吸收利用特性可能存在差异,例如根系的吸水特性、氮素的吸收利用特性等,因此对模型的模拟效果产生影响,而本研究中没有考虑这方面的问题。因此,在今后的研究中应考虑对模型的水分模块、氧分模块进行改进,通过引入一些反映品种吸水特性和根系特性的组分来让模型的模拟效果更准确,以期实现模型对产量、水氮等多指标的同步精确模拟,使模型能更加适用于华北平原冬小麦的生产管理,这也是未来精准农业发展的基础。

4 结论

CERES-Wheat 模型对节水灌溉及不灌溉冬小麦的生育时期、产量、产量构成因素、生物量等的预测精度较高,但对高水分灌溉条件下这些指标的预测能力较差;模型可以较好地模拟不同灌溉水平下 2 m 土体土壤贮水量和分层土壤水分含量的动态变化趋势,但稳定性和精确度都有待进一步提高;模型可以较好地模拟 2 m 土体土壤硝态氮含量,但对冬小麦吸氮量的模拟效果较差。

要提高模型的系统性精度,仅靠调整品种参数很难实现,需要考虑品种的水氮吸收利用特性、根系特性等性状,并在模型机制上进一步校正。

参 考 文 献

[1] 曹卫星. 国外小麦生长模拟研究的进展[J]. 南京农业大学学

- 报,1995,18(1):10-14
- Cao W X. Progress and perspective in wheat growth simulation research[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1995,18(1):10-14 (in Chinese)
- [2] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003,18(3/4):235-265
- [3] 罗毅,郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报,2008,24(5):307-312
- Luo Y, Guo W. Development and problems of crop models[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008,24(5):307-312 (in Chinese)
- [4] Bakhsh A, Bashir I, Farid H, Wajid S A. Using CERES-Wheat model to simulate grain yield production function for Faisalabad, Pakistan, conditions [J]. *Experimental Agriculture*, 2013(15):1560-8530
- [5] Bannayan M, Crout N M J, Hoogenboom G. Application of the CERES-Wheat model for within-season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003(95):114-125
- [6] Dettori M, Cesaraccio C, Motronic A, Spano D, Duce P. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy [J]. *Field Crops Research*, 2011(120):179-188
- [7] Mavromatis T. Pre-season prediction of regional rainfed wheat yield in Northern Greece with CERES-Wheat[J]. *Theoretical Applied Climatology*, 2014,117:653-665
- [8] 曹阳,杨婕,熊伟,武永峰,冯灵芝,杨晓光. 1962—2010年潜在干旱对中国冬小麦产量的影响的模拟分析[J]. 农业工程学报,2014,30(7):128-139
- Cao Y, Yang J, Xiong W, Wu Y F, Feng L Z, Yang X G. Simulation of winter wheat yield influenced by potential drought in China during 1962—2010[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(7):128-139 (in Chinese)
- [9] 刘峰,李存军,董莹莹,王芊,王纪华,黄文江. 基于遥感数据与作物生长模型同化的作物长势监测[J]. 农业工程学报,2011,27(10):101-106
- Liu F, Li C J, Dong Y Y, Wang Q, Wang J H, Huang W J. Monitoring crop growth based on assimilation of remote sensing data and crop simulation model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011,27(10):101-106 (in Chinese)
- [10] 李军,王立祥,邵明安,樊廷录. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报,2001,16(2):161-165
- Li J, Wang L X, Shao M A, Fan T L. Simulation of wheat potential productivity on Loess Plateau region of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001,16(2):161-165
- [11] 李军,王立祥,邵明安,樊廷录. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J]. 作物学报,2002,28(4):555-560
- Li J, Wang L X, Shao M A, Fan T L. Simulation of maize potential productivity in the loess plateau region of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002,28(4):550-560 (in Chinese)
- [12] 王伟,黄义德,黄文江,李存军,王娴. 作物生长模型的适用性评价及冬小麦产量预测[J]. 农业工程学报,2010,26(3):233-237
- Wang W, Huang Y D, Huang W J, Li C J, Wang X. Applicability evaluation of CERES-Wheat model and yield prediction of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010,26(3):233-237 (in Chinese)
- [13] 刘占锋,张建平,于兵. 利用作物模拟模型辅助决策小麦新品种推广初探[J]. 农业工程学报,2004,20(4):149-151
- Liu Z F, Zhang J P, Yu B. New approaches to wheat cultivars extension assisted by crop simulation model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004,20(4):149-151 (in Chinese)
- [14] Timsina J, Humphreys E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review [J]. *Agricultural Systems*, 2006(90):5-31
- [15] Hoogenboom G, Jones J W, Wilkens P W, Porter C H, Boote K J, Hunt L A, Singh U, Lizaso J L, White J W, Uryasev O, Royce F S, Ogoshi R, Gijsman A J, Tsuji G Y, Koo J. Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) version 4.5.0.0[CD]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2012
- [16] 王志敏,王璞,李绪厚,李建民,鲁来清. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术. 中国农业科技导报,2006,8(5):38-44
- Wang Z M, Wang P, Li X H, Li J M, Lu L Q. Principle and technology of water-saving fertilizer-saving high-yielding and simple cultivation in winter wheat [J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2006,8(5):38-44
- [17] 刘克,张敏洁,秦欣,周顺利. 不同水分处理对当季冬小麦及后茬夏玉米生长与产量的影响[J]. 作物杂志,2010(5):70-73
- Liu K, Zhang M J, Qin X, Zhou S L. Effects of different water treatments on dry matter accumulation and yield of winter wheat and following summer maize[J]. *Crops*, 2010(5):70-73
- [18] 范柯伦,沃尔夫. 农业生产模型—气候、土壤和作物[M]. 杨守春,王涌清,陈同斌,译. 北京:中国农业科技出版社,1990:65
- Fan Kelun, Wolff. *The Agricultural Production Model: Climate, Soil and Crops*[M]. Yang S C, Wang Y Q, Chen T B, translated. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1990:65
- [19] 戴明宏,陶洪斌,廖树华,王利纳,王璞. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报,2008,24(4):30-36
- Dai M H, Tao H B, Liao S H, Wang L N, Wang P. Estimation and analysis of maize potential Productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008,24(4):30-36 (in China)
- [20] Ji J M, Cai H J, He J Q, et al. Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2014,144:1-10
- [21] Hunt L A, Pararajasingham S, Jones J W, Hoogenboom G, Imamura D T, Ogoshi R M. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments [J]. *Agronomy Journal*, 1993,85:1090-1094
- [22] 龚元石,陆锦文, Huwe B, Allison B. 华北平原主要农作物灌溉需水量的估算[J]. 北京农业大学学报,1993,19(Z1):82-91
- Gong Y S, Lu J W, Huwe B, Allison B. Estimation of irrigation water requirements for main crops in North China Plain [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis* 1993,19(Z1):82-91 (in China)