

基于 DSSAT 模型的冬小麦最优灌溉制度研究

邵光成¹ 王志宇¹ 王小军² 汤树海³ 姚怀柱⁴

(1. 河海大学农业工程学院, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 3. 涟水县水利科学研究所, 淮安 223400; 4. 江苏省农村水利科技发展中心, 南京 210029)

摘要: 为探讨 DSSAT 模型在不同年型冬小麦灌溉制度优化中的可行性, 利用涟水县水利科学研究所 1985—2015 年冬小麦生育期降水资料排频适线, 得到了降水量经验频率分别为 25%、50% 和 75% 对应的设计值, 然后选取淮安站 2001—2016 年期间与 3 种经验频率对应降水量接近的年份作为代表年——2007—2008 年(丰水年)、2006—2007 年(平水年)、2011—2012 年(枯水年)。通过生育阶段和灌溉次数的不同组合, 拟定了 15 种灌溉制度(T1 ~ T15), 借助调参后的 DSSAT 模型对 3 种年型冬小麦灌溉制度进行了模拟。结果表明, 经调试后 DSSAT 品种参数能够较为准确地反映作物的主要遗传特征。在统筹考虑产量、灌溉用水量 and 水分利用效率最优的情况下, 2007—2008 年(丰水年)、2006—2007 年(平水年)、2011—2012 年(枯水年)均宜选取灌溉制度 T3。在 BCC - CSM1.1 气候模式下, 考虑 RCP4.5、RCP8.5 两种情景, 模拟了 2030—2095 年冬小麦水分产量效应, 发现当初始土壤含水率为田间持水率的 60%、80% 时, T3、T6 相对于雨养条件具有一定的优越性。

关键词: 冬小麦; 淮北平原; 灌溉制度; DSSAT 模型; 年型; 适用性

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0289-09

Optimal Irrigation Schedule Based on DSSAT Model for Winter Wheat

SHAO Guangcheng¹ WANG Zhiyu¹ WANG Xiaojun² TANG Shuhai³ YAO Huaizhu⁴

(1. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

3. Lianshui Water Conservancy Research Institute, Huaian 223400, China

4. Jiangsu Province Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to discuss the feasibility of DSSAT model in the optimization of irrigation schedule for winter wheat in different hydrological years, the corresponding design values of precipitation experience frequency of 25%, 50% and 75% were obtained by using the precipitation data of the growth period of winter wheat from 1985 to 2015 in Lianshui Water Conservancy Research Institute. After that the years from 2001 to 2016 in Huaian Station with close corresponding precipitation of three kinds of empirical frequencies were taken as the representative years, and that was 2007—2008 (wet year), 2006—2007 (normal year) and 2011—2012 (dry year). Fifteen irrigation schedules (T1 ~ T15) were drawn up through different combinations of growth stages and irrigation times, and the irrigation schedules were simulated in three hydrological years by using the DSSAT model after the parameter estimation and verification. The results showed that after calibrated, the genetic coefficients of winter wheat could accurately reflect the main genetic characteristics. Considering the yield, irrigation water capacity and the water use efficiency of winter wheat as a whole, it was advisable to select the irrigation schedule T3 from 2007 to 2008 (wet year), from 2006 to 2007 (normal year), and from 2011 to 2012 (dry year). The schedule T3 was irrigated with 50 mm in the regreening period. The irrigation time of wintering, regreening and jointing periods were on December 25, February 20 and March 30, respectively. Under BCC - CSM1.1 climate model, RCP4.5 and RCP8.5 were considered to simulate the water and yield

收稿日期: 2019-05-06 修回日期: 2019-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400208)、江苏“青蓝”工程项目、江苏省“333 高层次人才培养工程”专项资金项目、国家自然科学基金项目(51879072)和江苏省水利科技项目(2017051)

作者简介: 邵光成(1975—),男,教授,主要从事农业水资源高效利用研究,E-mail: sgcln@126.com

effect of winter wheat in 2030—2095 years, and then it was found that when the initial soil moisture content was 60% and 80% of the field capacity, T3 and T6 both had certain feasibility compared with the rainfed conditions.

Key words: winter wheat; Huaibei Plain; irrigation schedule; DSSAT model; hydrological years; applicability

0 引言

小麦是我国主要粮食作物之一,在农业生产和国民经济中占有重要地位^[1]。随着社会经济的快速发展,我国耕地面积不断减少。淮北平原作为主要农业区,稻麦轮作种植冬小麦有利于提高复种指数、增加粮食产量,因此,发展淮北平原区冬小麦生产是保障粮食安全的重要举措。灌溉制度是影响作物产量的重要因素之一,要实现冬小麦高产,对灌溉制度进行优化必不可少。此外,淮北平原是典型的南北气候过渡区,近年来气候变化频繁,对作物生长和产量形成造成很大的影响,因此,研究气候变化对粮食作物生产的影响显得尤为重要。

传统田间试验方法开展冬小麦灌溉制度研究需要耗费大量时间和人力物力,且研究结果单一、局限性较大^[2]。作物生长模拟模型可以根据模型中设置的环境状况和农业管理措施进行产量预测,因此可以将模型应用于灌溉制度的研究。其中 DSSAT (Decision support system for agrotechnology transfer) 模型应用较为广泛,在农作物的生产潜力值估算、作物田间管理决策、气候变化对作物的影响评估等方面,不少学者已开展了相关研究^[3-11]。

目前,关于冬小麦产量及灌溉制度的相关研究^[12-22]大多集中在中国北方地区,对南北过渡区的淮北平原开展的研究较少。为此,本文基于 DSSAT 作物模型,对淮北平原不同年型冬小麦的灌溉制度进行优化,并根据政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次评估报告 (Fifth assessment report, AR5) 提出的 BCC - CSM 1.1 (Beijing climate center climate system model version 1.1) 气候系统模式,阐明最优灌溉制度在不同情景下的适用性,为未来气候变化下淮北平原区冬小麦优质高效生产实践提供理论技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验站概况

试验于 2001—2013 年每年 10 月到次年 6 月的冬小麦生长期在涟水县水利科学研究所 (简称涟水站) 进行,该站位于江苏省淮安市涟水县朱码镇

(119°16'E, 33°47'N) 境内,如图 1 所示。涟水站平均海拔 7.5 m,属于暖温带季风性半湿润气候,多年平均气温 14.8℃,年均气温 5℃ 以上时间 289 d,日照时数 2 280 h,降雨量时间分布不均,年内变化和年际变化较大,多年平均降雨量 979.6 mm,多年平均蒸发量 1 056.8 mm,年均无霜期 213 d,雨日 104 d,年均相对湿度 77%。供试区耕层土质为砂壤土,0~30 cm 土壤容重为 1.4 g/cm³,田间持水率为 28.7% (质量含水率),pH 值为 6.8,有机质质量分数为 2.19%,全氮质量比为 0.98 g/kg。

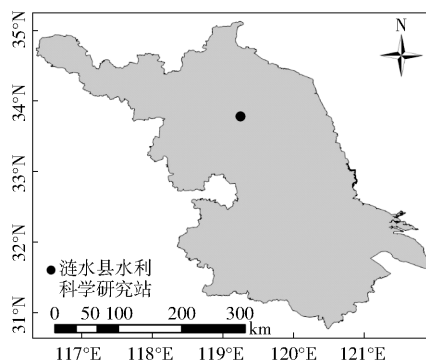


图 1 涟水县水利科学研究所位置图

Fig. 1 Location of Lianshui Water Conservancy Research Institute

1.2 数据来源

本文选用 DSSAT 模型以天为步长模拟冬小麦从播种到收获生长和发育的生理过程。由于缺乏涟水站当地的逐日气象资料,选取典型年时利用涟水站 1985—2015 年冬小麦生育期降水资料排频适线,得到降水量经验频率分别为 25%、50% 和 75% 对应的设计值,然后以距离较近的淮安站 2001—2016 年内与 3 种经验频率对应降水量接近的年份作为代表年。淮安站气象系列选取 2001—2016 年是由于目前中国气象数据网仅记录了 2001 年 1 月—2017 年 3 月的逐日气象资料。

模型所需土壤参数、作物管理数据等来自涟水县水利科学研究所,淮安站逐日气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>),未来情景模拟时 BCC - CSM 1.1 气候系统模式气象数据来源于地球系统网格联盟 (The earth system grid federation, ESGF) 网站 (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5>)。

1.3 研究方法

采用 DSSAT 模型调参与验证、灌溉制度优化和最优灌溉制度适用性评价相结合的方法。在 DSSAT 模型中建立数据文件, 采用试错法对作物品种参数进行调试, 直至模型模拟值与实测值误差达到要求。模拟值与实测值的相对差异程度采用归一化均方根差 N_{RMSE} (Normalized root mean square error, NRMSE) 衡量。该指标是分析模拟产量和实际产量差异的最佳衡量指标。一般认为, $N_{RMSE} < 10\%$ 为极好; $10\% \leq N_{RMSE} < 20\%$ 为好; $20\% \leq N_{RMSE} < 30\%$ 为中等; $N_{RMSE} \geq 30\%$ 为差^[23-25]。

王文佳等^[26] 基于 DSSAT 模型模拟结果发现, 冬小麦生长期越冬期及返青拔节期缺水对产量及经济效益影响较为严重, 灌浆水对产量贡献作用最小。结合涟水站在越冬期、返青期灌水的实际情况, 为进一步优化灌溉制度, 模拟灌水时期增设拔节期和抽穗期。此外, 根据江苏省水利厅《江苏省灌溉用水定额》(苏水农[2015]6 号文件), 徐淮片区涟水县年降水量经验频率为 80% 时小麦的灌溉基本用水定额为 $1\ 184\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, 为保障冬小麦产量, 本文设定最大灌溉定额为 150 mm, 灌水定额为 50 mm, 将冬小麦灌水时期和灌水次数进行组合, 设计 15 种灌溉制度, 见表 1。应用调参后的 DSSAT 模型模拟不同年型、不同灌溉制度下冬小麦产量和田间水分状况, 根据单位面积产量、灌溉用水量 (Irrigation water capacity, IWC) 和水分利用效率 (Water use efficiency, WUE) 3 个指标优选灌溉制度。WUE 计

表 1 灌溉制度设计

灌溉制度	越冬水量	返青水量	拔节水量	抽穗水量	总灌水量
T1	0	0	0	0	0
T2	50	0	0	0	50
T3	0	50	0	0	50
T4	0	0	50	0	50
T5	0	0	0	50	50
T6	50	50	0	0	100
T7	50	0	50	0	100
T8	50	0	0	50	100
T9	0	50	50	0	100
T10	0	50	0	50	100
T11	0	0	50	50	100
T12	50	50	50	0	150
T13	50	50	0	50	150
T14	50	0	50	50	150
T15	0	50	50	50	150

注: T1 为雨养, T2 ~ T5 为灌一水, T6 ~ T11 为灌两水, T12 ~ T15 为灌三水。结合涟水站灌溉实际设定灌水时间分别为: 越冬期 12 月 25 日、返青期 2 月 20 日、拔节期 3 月 30 日、抽穗期 5 月 10 日。

算方法为

$$WUE = \frac{Y}{10ET}$$

式中 Y ——产量, kg/hm^2 ET ——腾发量, mm
 WUE ——水分利用效率, kg/m^3

其中产量和腾发量 (Evapotranspiration, ET) 数据可由 DSSAT 模型运行得到。

为满足研究气候变化的需要, 世界多个机构共同组织实施了国际耦合模式比较计划 (Coupled model intercomparison project, CMIP)。CMIP5 (The fifth phase of the coupled model intercomparison project) 是 2008 年启动的第五阶段计划, 是目前较为全面的气候模式^[27]。CMIP5 评估模式采用温室气体的稳定情景, 具体包括 4 种辐射强迫物质的量浓度排放途径: RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5。试验名称 RCP (Representative concentration pathway) 后的数字代表该情景在 2100 年达到的辐射强迫, 分别约为 8.5、6.0、4.5、2.6 W/m^2 ^[28]。研究表明, 由于 RCP4.5 的优先性大于 RCP6.0^[29-31], 并且 RCP2.6 情景较为理想, 探讨此情景下作物产量变化意义不大, 因此本文考虑 RCP4.5、RCP8.5 两种情景。进一步地, 选取 CMIP5 中的 BCC - CSM1.1 气候模式, 利用双线性插值法将获取的逐日气象数据降尺度到涟水站点, 然后将得到的气象数据输入 DSSAT 模型, 模拟时设定试验受水分限制, 其他管理措施与实践相同, 以此探讨未来条件下灌溉制度的适用性。

2 结果与分析

2.1 模型校验

冬小麦品种参数校正由模型自带的 GLUE (Generalized likelihood uncertainty estimation) 调试程序进行, 率定结果如表 2 所示。

表 2 冬小麦遗传参数

参数	数值
春化敏感系数 PIV/d	35.57
光周期敏感系数 PID	94.81
灌浆期系数 P5/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	707.2
籽粒数系数 G1/g	28.86
标准籽粒重系数 G2/mg	23.52
成熟期标准无肋茎穗质量 G3/g	1.228
出叶间隔特性参数 PHINT/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	60.00

冬小麦 2001—2013 年产量、土壤含水率的模拟值与实测值的比较分别如图 2、3 所示, 其中产量的 N_{RMSE} 为 10.2%, 土壤含水率的 N_{RMSE} 除 2003 年外均

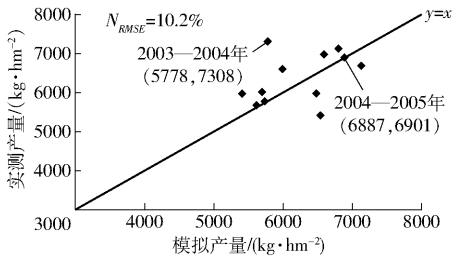


图2 冬小麦模拟产量与实测产量的关系

Fig. 2 Relationship of simulated yield and actual yield of winter wheat

小于30%。结果表明品种参数能够较为准确地反映作物品种的主要遗传特征,可用于进一步研究。另外,可以根据模拟效果较好与较差的2004—2005年、

2003—2004年两个冬小麦生育期内气象因素,如图4所示,对DSSAT模型模拟误差进行估计,此处不展开。

2.2 代表年选取

对涟水站30年冬小麦生育期降雨资料排频适线(图5,图中 E_x 为均值, C_v 为变异系数, C_s 为偏态系数),得到降水量经验频率分别为25%、50%和75%对应的设计值,依次为527.1、435.4、362.5 mm。进一步地,选取淮安站2001—2016年期间与3种经验频率对应降水量接近的年份作为代表年,依次为2007—2008年(丰水年,降水量523.6 mm)、2006—2007年(平水年,降水量445.1 mm)、2011—2012年

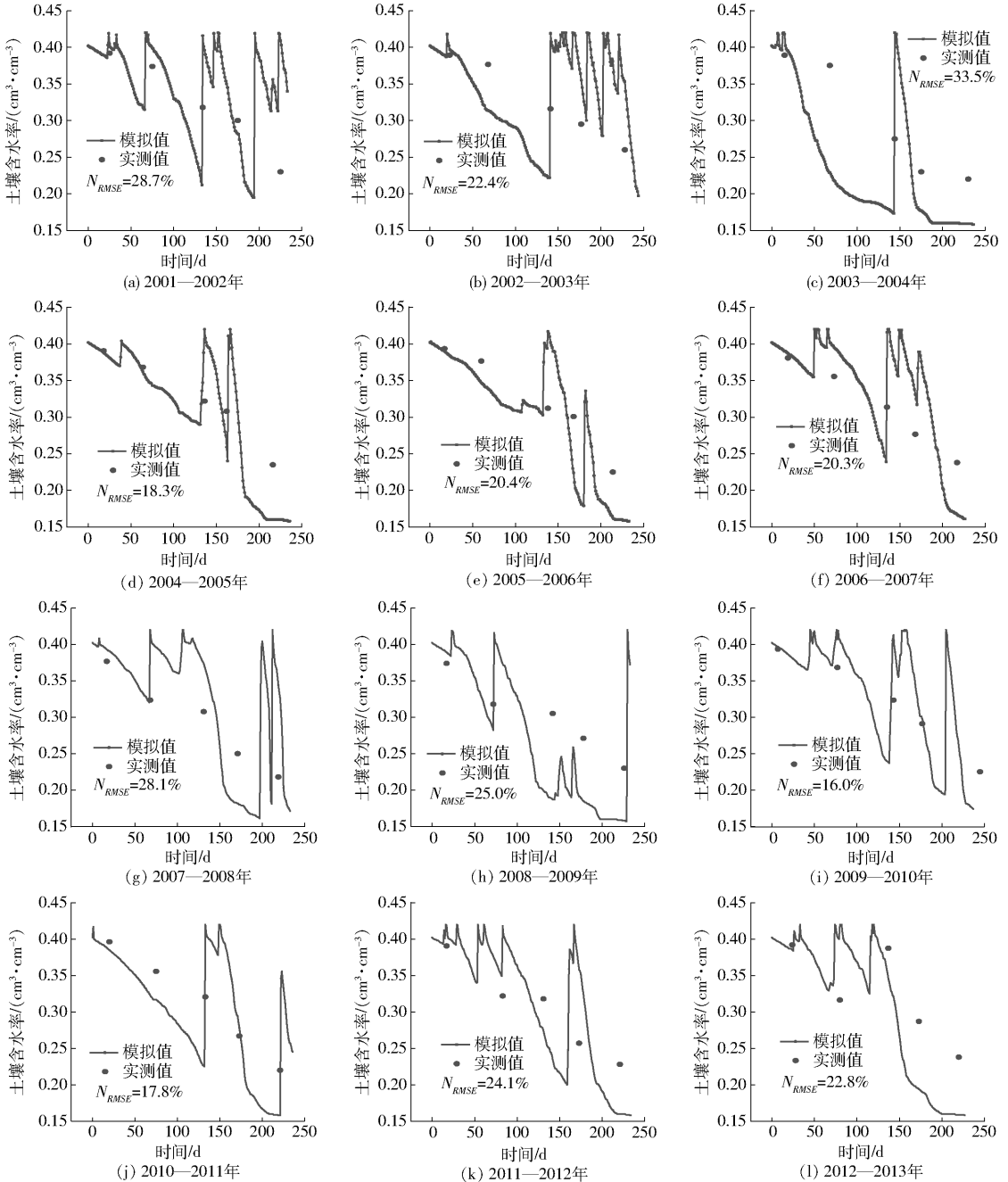


图3 冬小麦土壤含水率模拟值与实测值的关系

Fig. 3 Relationship of simulated and actual soil moisture contents of winter wheat

(枯水年,降水量 353.0 mm)。

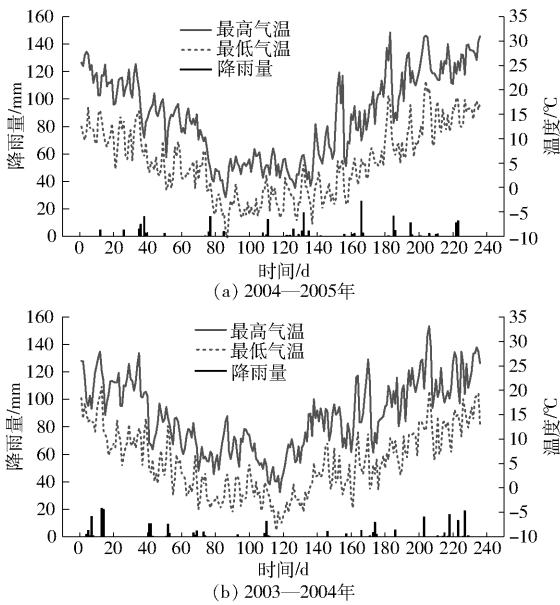


图 4 2004—2005 年、2003—2004 年 2 个冬小麦生育期内气象因素变化曲线

Fig. 4 Curve of meteorological factors during growth periods of winter wheat from 2004 to 2005 and from 2003 to 2004

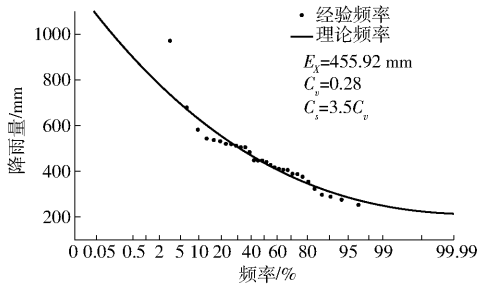


图 5 降雨量排频适线图

Fig. 5 Frequency-aligned map of precipitation discharge

2.3 不同年型下最优灌溉制度

应用 DSSAT 模型模拟 3 种典型年各灌溉制度下冬小麦的生长状况,统筹考虑产量、灌溉用水量 and WUE 3 个因素进行灌溉制度优选。根据不同灌溉条件下冬小麦产量和水分利用效率模拟结果(表 3),2007—2008 年(丰水年)灌溉制度 T3、T6 下冬小麦产量和 WUE 较高,分别为 $6\ 731\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $1.551\ \text{kg}/\text{m}^3$ 以及 $6\ 780\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $1.541\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。2006—2007 年(平水年)灌溉制度 T1 下冬小麦 WUE 最高,为 $1.631\ \text{kg}/\text{m}^3$,灌溉制度 T3 冬小麦产量和 WUE 较高,分别为 $5\ 732\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $1.545\ \text{kg}/\text{m}^3$,各灌溉制度下产量差异不大。2011—2012 年(枯水年)灌溉制度 T1 冬小麦 WUE 最高,为 $2.039\ \text{kg}/\text{m}^3$,灌溉制度 T3 冬小麦产量和 WUE 均较高,分别为 $7\ 188\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $1.882\ \text{kg}/\text{m}^3$,各灌溉制度下产量差异不大。

综合考虑产量、灌溉用水量和 WUE 3 个因素,2007—2008 年(丰水年)、2006—2007 年(平水年)、2011—2012 年(枯水年)均宜选取灌溉制度 T3。

2.4 T3、T6 的适用性

由表 3 可知,灌溉制度 T3、T6 条件下 3 种年型的冬小麦产量和 WUE 均较高。结合实际情况考虑,虽然 T6 所需灌溉用水量较大,但在枯水年 T6 有一定增产效果,且由于 T3 更符合淮北平原区的实际情况,故本文将灌溉制度 T3、T6 与雨养条件进行比较,探讨其在未来情景下的适用性。

由于初始土壤含水率、灌溉制度以及气候因素共同决定土壤水分状况,且本文仅考虑冬小麦水分

表 3 不同灌溉条件下冬小麦产量和水分利用效率模拟结果

Tab. 3 Simulation results of yield and water use efficiency of winter wheat under different irrigation conditions

灌溉制度	2007—2008 年(丰水年)		2006—2007 年(平水年)		2011—2012 年(枯水年)	
	$Y/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$WUE/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$Y/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$WUE/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$Y/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$WUE/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
T1	4 376	1.128	5 691	1.631	7 094	2.039
T2	5 921	1.437	5 614	1.534	7 072	1.938
T3	6 731	1.551	5 732	1.545	7 188	1.882
T4	5 390	1.242	5 691	1.448	7 094	1.787
T5	4 376	1.094	5 691	1.581	7 094	1.801
T6	6 780	1.541	5 608	1.508	7 085	1.855
T7	6 477	1.433	5 614	1.411	7 072	1.746
T8	5 921	1.390	5 614	1.493	7 072	1.725
T9	6 731	1.483	5 732	1.440	7 188	1.779
T10	6 731	1.506	5 732	1.501	7 188	1.687
T11	5 390	1.231	5 691	1.426	7 094	1.612
T12	6 780	1.493	5 608	1.409	7 085	1.749
T13	6 780	1.497	5 608	1.468	7 085	1.663
T14	6 477	1.427	5 614	1.407	7 072	1.582
T15	6 731	1.483	5 732	1.437	7 188	1.612

产量效应,因此需区分不同初始土壤含水率情况进行讨论。根据涟水站当地的种植经验,一般控制冬小麦生育期内土壤含水率在田间持水率的60%~100%,另外根据文献[32],冬小麦在出苗期土壤适

宜含水率为田间持水率的45%~60%,故本文选取初始土壤含水率为田间持水率的80%和田间持水率的60%两种情况讨论。两种初始条件下冬小麦的产量分别见图6、7。

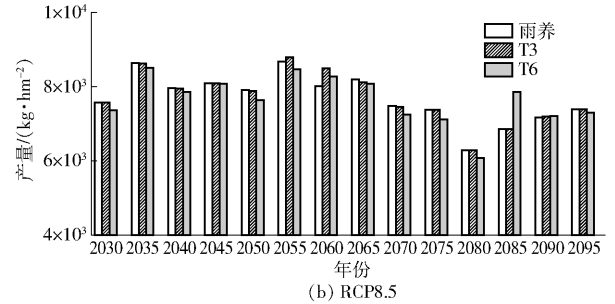
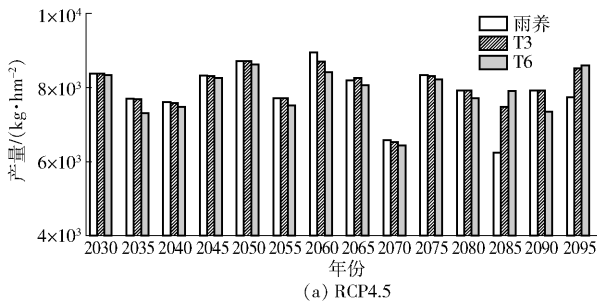


图6 初始土壤含水率为田间持水率的80%时不同灌溉制度的产量

Fig.6 Yield of different irrigation schedules when initial soil moisture content was 80% of field capacity

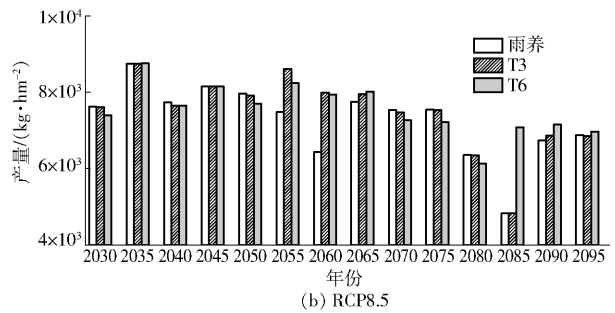
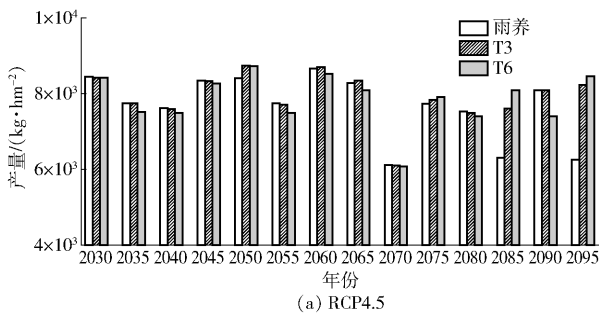


图7 初始土壤含水率为田间持水率的60%时不同灌溉制度的产量

Fig.7 Yield of different irrigation schedules when initial soil moisture content was 60% of field capacity

如图6所示,大多数情况表现为T3、T6和雨养条件下冬小麦产量接近,或T6产量略低。部分情况如RCP4.5情景下2065、2085、2095年,RCP8.5情景下2055、2060、2085年,T3或T6相对于雨养条件具有一定优越性。特别地,RCP4.5情景下2060年雨养条件比T3、T6条件下产量高,可能由于模型设置未考虑排涝降渍的问题,导致灌溉时间不适宜,对冬小麦生长产生了抑制作用,而在该时间段适度的水分胁迫可能会对冬小麦生长有一定促进作用。

如图7所示,RCP4.5情景下2050、2060、2065、2075、2085、2095年,以及RCP8.5情景下2055、2060、2065、2085、2090、2095年,T3或T6相对于雨养条件具有一定优越性。其余情况表现为T3、T6和雨养条件下冬小麦产量接近,或T6产量略低。

T6灌溉定额100mm,T3灌溉定额50mm,相比于雨养而言灌水量较大,但部分情况两种灌溉制度的产量并未显著增加,T6条件下某些年份产量甚至会出现降低的现象。根据刘文茹^[33]的研究结果,未来在中高等排放情景(RCP4.5/RCP8.5)下长江中下游地区年平均降水量总体呈现增加的趋势。出现上述情况可能是由于未来某些年份下,研究区域内降水已经基本可以满足冬小麦生长对水分的需求,

再进行灌水会造成土壤水分过剩,引发渍害,小麦根系活力下降,籽质量降低,从而造成减产^[34]。

由图6、7的模拟结果计算得到不同情景下的冬小麦模拟产量(表4),可以发现,两种情景下初始土壤含水率为田间持水率的60%时灌溉制度T3、T6与雨养条件相比增产效果明显;从总体上看,T3比

表4 不同情景下冬小麦产量比较结果

Tab.4 Comparison results of winter wheat yield under different conditions

情景	初始土壤含水率	灌溉制度	产量	相对雨养
			平均值/ (kg·hm ⁻²)	产量的 变幅/%
RCP4.5	田间持水率的60%	雨养	7 665	
		T3	7 927	3.42
		T6	7 851	2.42
RCP8.5	田间持水率的80%	雨养	7 874	
		T3	7 995	1.54
		T6	7 870	-0.05
RCP4.5	田间持水率的60%	雨养	7 283	
		T3	7 484	2.77
		T6	7 566	3.88
RCP8.5	田间持水率的80%	雨养	7 690	
		T3	7 724	0.44
		T6	7 651	-0.51

T6 产量更高。

3 讨论

本研究模型校验冬小麦产量模拟值与实测值有一定差异,模拟产量偏低,如图 2 所示,可能是由于模型对水分因子比较敏感,而淮北平原区降水充沛,当降水过多时冬小麦根区缺氧,生长受到抑制,导致产量下降。另外本文使用距离较近的淮安站进行代替,客观上也会造成一定误差。图 3 表明冬小麦土壤含水率模拟值与实测值相差较大,一方面可能因为 DSSAT 模型每天仅输出一个土壤含水率,无法得知具体时刻,而一天内土壤含水率在不同时刻可能变化较大,另一方面可能与气象数据的代替有关。

本研究对不同灌溉条件下冬小麦产量和水分利用效率进行模拟,结果发现对于同一种灌溉制度,丰水年产量均低于枯水年产量,部分年份甚至表现为丰水年在 3 种年型下产量最低,造成这种现象的原因是多样的。首先,根据涟水站 2001—2013 年冬小麦生育期内降水量和产量实测数据,发现二者并不呈严格的正相关关系,而所选典型年仅仅是其中的 3 个例子,所以出现丰水年产量低的模拟结果具有一定可能性。此外,丰水年降水较多,而江淮地区多为粘土或粘壤土,透水性能弱,容易发生渍害^[35],在冬小麦产量形成的关键时期,渍害会造成根系活力下降,导致减产^[34]。其次,本文利用淮安站气象数据代替涟水站气象数据,这种近似方法本身具有一定误差。这两种原因的共同作用可能导致了上述的模拟结果。尽管模型模拟存在一定误差,但模型误差在允许范围内,对于优选灌溉制度仍具有一定指

导意义。未来需要进一步改进模型,以提高模型对作物生长的模拟精度。

当气象条件和灌溉模式相同时,不同初始土壤含水率对产量有较大影响,未来可进一步结合初始土壤含水率对灌溉制度进行优化。由于冬小麦生长和发育过程受到诸多不可控因素如光照、降雨、气温等气象因子的影响,而本文制定的不同年型冬小麦最优灌溉制度仅针对特定年份、特定灌溉制度而言,其贡献主要在于提出本地优化灌溉制度的可选途径,为将来农业精准化灌溉提供思路。

4 结论

(1) 在 DSSAT 模型中对作物品种进行调参,模型模拟效果较好,调试后的品种参数较为可靠。

(2) 针对生育阶段和灌溉次数不同组合确定的 15 种灌溉制度(T1 ~ T15),3 种年型下雨养条件产量最低,在统筹考虑产量、灌溉用水量和水分利用效率最优的情况下,2007—2008 年(丰水年)、2006—2007 年(平水年)、2011—2012(枯水年)均宜选取灌溉制度 T3,由此可以指导农业生产。

(3) 针对 T3、T6 的适用性研究发现,初始土壤含水率会影响灌溉制度,进而影响冬小麦产量。当初始土壤含水率为田间持水率的 80% 时,部分未来年份下 T3、T6 相比于雨养条件表现出一定的优越性。当初始土壤含水率为田间持水率的 60% 时,较多的年份下两种灌溉制度与雨养条件相比,表现出较高的优越性。根据不同情景下冬小麦模拟产量的比较结果,选择灌溉制度 T3 可以达到较好的节水增产效果。

参 考 文 献

- [1] 孙晓辉. 小麦高产创建问题及技术对策[J]. 中国农业信息, 2015(1): 33.
- [2] 倪玲. 基于 AquaCrop 模型的冬小麦灌溉制度研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
NI Ling. Irrigation management for winter wheat based on AquaCrop model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [3] 程志强, 蒙继华. 作物单产估算模型研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 402-415.
CHENG Zhiqiang, MENG Jihua. Research advances and perspectives on crop yield estimation models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 402-415. (in Chinese)
- [4] 陈上, 窦子荷, 蒋腾聪, 等. 基于聚类法筛选历史相似气象数据的玉米产量 DSSAT - CERES - Maize 预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 147-155.
CHEN Shang, DOU Zihe, JIANG Tengcong, et al. Maize yield forecast with DSSAT - CERES - Maize model driven by historical meteorological data of analogue years by clustering algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 147-155. (in Chinese)
- [5] 刘文茹, 陈国庆, 刘恩科, 等. 基于 DSSAT 模型的长江中下游冬小麦潜在产量模拟研究[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3219-3229.
LIU Wenru, CHEN Guoqing, LIU Enke, et al. The variations in winter wheat potential yields in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the RCP scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3219-3229. (in Chinese)
- [6] 刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于 DSSAT 模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 124-129.

- LIU Jian'gang, CHU Qingquan, WANG Guangyao, et al. Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 124 - 129. (in Chinese)
- [7] 陈上. 基于历史气象数据和 CERES - Maize 模型的玉米产量预测及灌溉决策方法[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017. CHEN Shang. Yield forecast and irrigation decision for maize based on historical weather data and the CERES-Maize model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [8] 文新亚, 陈阜. 基于 DSSAT 模型模拟气候变化对不同品种冬小麦产量潜力的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 74 - 79. WEN Xinya, CHEN Fu. Simulation of climatic change impacts on yield potential of typical wheat varieties based on DSSAT model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 2): 74 - 79. (in Chinese)
- [9] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT - CERES - Wheat 模型的调参与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 138 - 150. YAO Ning, ZHOU Yuangang, SONG Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT - CERES - Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 138 - 150. (in Chinese)
- [10] 杨晓慧, 黄修桥, 陈震, 等. 基于 DSSAT 模拟的灌溉用水效率评价指标比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 95 - 100. YANG Xiaohui, HUANG Xiuqiao, CHEN Zhen, et al. Evaluation index comparison of different irrigation water use efficiency based on DSSAT simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 95 - 100. (in Chinese)
- [11] HE J Q, CAI H J, BAI J P. Irrigation scheduling based on CERES - Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 19 - 31.
- [12] 李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 33 - 36. LI Quanqi, SHEN Jiayin, ZHAO Dandan. Effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 33 - 36. (in Chinese)
- [13] 徐建文, 梅旭荣, 居辉, 等. 黄淮海地区冬小麦关键生育期不同灌溉水平对产量影响的模拟[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1485 - 1492. XU Jianwen, MEI Xurong, JU Hui, et al. Simulation of winter wheat yield in response to irrigation level at critical crowing stages in the Huang - Huai - Hai Plain[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1485 - 1492. (in Chinese)
- [14] 赵叶萌, 刘晓英, 钟秀丽, 等. 基于产量响应诊断冬小麦水分亏缺适宜土层及其水分阈值[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 147 - 154. ZHAO Yemeng, LIU Xiaoying, ZHONG Xiuli, et al. Determination of soil depth and its water threshold for diagnosing water deficit of winter wheat based on grain yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 147 - 154. (in Chinese)
- [15] 孟兆江, 段爱旺, 高阳, 等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 203 - 212. MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 203 - 212. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161225&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.025. (in Chinese)
- [16] 王书吉, 康绍忠, 李涛. 基于节水高产优质目标的冬小麦适宜水分亏缺模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 111 - 118. WANG Shuji, KANG Shaozhong, LI Tao. Suitable water deficit mode for winter wheat basing objective of water saving as well as high yield and quality[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 111 - 118. (in Chinese)
- [17] 郑珍. 关中地区冬小麦水分产量效应及气候变化条件下产量响应模拟研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. ZHENG Zhen. Effect of limited irrigation on yield and yield response under climate change of winter wheat in the Guanzhong Plain [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [18] 王声锋, 段爱旺, 张展羽, 等. 基于随机降水的冬小麦灌溉制度制定[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 47 - 52. WANG Shengfeng, DUAN Aiwang, ZHANG Zhanyu, et al. Winter wheat irrigation schedule on stochastic precipitation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 47 - 52. (in Chinese)
- [19] 彭致功, 张宝忠, 刘钰, 等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 238 - 246. PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, LIU Yu, et al. Simulation for regional water consumption and optimization of irrigation schedule for winter wheat in North China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 238 - 246. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171129&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.029. (in Chinese)
- [20] 白珊珊, 万书勤, 康跃虎. 华北平原滴灌施肥灌溉对冬小麦生长和耗水的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 269 - 276. BAI Shanshan, WAN Shuqin, KANG Yaohu. Effects of drip fertigation on winter wheat growth and water use in North China Plain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 269 - 276. <http://www.j->

- csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180234&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.034. (in Chinese)
- [21] 于芷婧, 尚松浩. 华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(9):1188-1196.
YU Zhijing, SHANG Songhao. Multi-objective optimization method for irrigation scheduling of crop rotation system and its application in North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1188-1196. (in Chinese)
- [22] 王建东, 龚时宏, 许迪, 等. 灌水模式对冬小麦根系空间分布及多年产量的影响[J]. 水利学报, 2011, 42(10):1239-1246.
WANG Jiandong, GONG Shihong, XU Di, et al. Effects of irrigation models on the space distribution of root system and yield of winter wheat[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1239-1246. (in Chinese)
- [23] CHAKRABORTY D, ELZARKA H. Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics? [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2018, 11(4):433-448.
- [24] JAMIESON P D. A test of the computer simulation model ARC - WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand[J]. Field Crops Res., 1991, 27(4):337-350.
- [25] RINALDI M, LOSAVIO N, FLAGELLA Z. Evaluation and application of the OILCROP - SUN model for sunflower in southern Italy[J]. Agricultural Systems, 2003, 78(1):17-30.
- [26] 王文佳, 冯浩. 基于 CROPWAT - DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6):795-802.
WANG Wenjia, FENG Hao. Water requirement and irrigation systems of winter wheat: CROPWAT - DSSAT model solution in Guanzhong District[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 795-802. (in Chinese)
- [27] 高峰, 蔡万园, 张玉虎, 等. 5 种 CMIP5 模拟降水数据在中国的适用性评估[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6):122-130, 138, 397.
GAO Feng, CAI Wanyuan, ZHANG Yuhu, et al. Evaluation on the applicability of 5 kinds of CMIP5 simulated precipitation data in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 122-130, 138, 397. (in Chinese)
- [28] 辛晓歌, 吴统文, 张洁. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5):69-73.
XIN Xiaoge, WU Tongwen, ZHANG Jie. Introduction of CMIP5 experiments carried out by BCC climate system model[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2012, 8(5):69-73. (in Chinese)
- [29] XU C H, XU Y. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 527-533.
- [30] 林而达, 刘颖杰. 温室气体排放和气候变化新情景研究的最新进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(6):1700-1707.
LIN Erda, LIU Yingjie. Advance in new scenarios of greenhouse gas emission and climate change[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(6): 1700-1707. (in Chinese)
- [31] 陈敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体减排和对中国的挑战[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6):436-442.
CHEN Minpeng, LIN Erda. Global greenhouse gas emission mitigation under representative concentration pathways scenarios and challenges to China[J]. Climate Change Research, 2010, 6(6):436-442. (in Chinese)
- [32] 郭元裕. 农田水利学[M]. 3 版. 北京:中国水利水电出版社, 2007:40-41.
- [33] 刘文茹. 不同 RCP 情景下气候变化对长江中下游稻麦生产潜力的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2017.
LIU Wenru. The research of climate potential productivity of Wheat - Rice in the middle and lower Yangtze River under RCP scenarios [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [34] 赵荣, 张存岭, 陈若礼, 等. 影响淮北地区小麦生产的降水因子分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12):117-120.
ZHAO Rong, ZHANG Cunling, CHEN Ruoli, et al. Influence the precipitation factor analysis of wheat production of area of Huaibei[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(12): 117-120. (in Chinese)
- [35] 盛绍学, 石磊, 张玉龙. 江淮地区冬小麦渍害指标与风险评估模型研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(19):263-268.
SHENG Shaoxue, SHI Lei, ZHANG Yulong. Study on waterlogging disaster index and risk assessment model of winter wheat in Jianghuai region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin 2009, 25(19):263-268. (in Chinese)