

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.025

不同水分胁迫情境下冬小麦生长发育的 RZWQM2 模拟

蒋腾聪^{1,2} 窦子荷^{1,2} 姚宁^{1,2} 冯浩^{2,3} 于强³ 何建强^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所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)

摘要: 为提高水分胁迫条件下作物生长过程的模拟精度,根区水质模型(Root zone water quality model 2, RZWQM2)的开发者改进了原有的水分胁迫指标(Soil water index 1, WSI1)得到2种新的水分胁迫指标 WSI2 和 WSI3。其中, WSI2 用 Nimah and Hanks 方程修正影响光合作用的胁迫系数(Soil water factor, SWFAC)中的根系吸水项; WSI3 则在 WSI2 的基础上加入了土壤蒸发项。为比较上述3种水分胁迫指标模拟水分胁迫条件下冬小麦生长发育的精度,并对其在关中地区的适用性进行评价,首先利用2012—2013年和2013—2014年两年度的冬小麦分段受旱试验对 RZWQM2 模型进行校准和验证,然后分别选取模型中3种不同的水分胁迫因子对2年(2012—2014年)分段受旱试验进行模拟,评价冬小麦的土壤水分动态、蒸腾总量、最终生物量和籽粒产量的模拟效果。结果表明:3种水分胁迫因子能较好地模拟生育后期轻度受旱条件下冬小麦的生长发育过程,但随着受旱程度的加深和受旱时段的提前,模型的模拟精度降低;相较原有水分胁迫因子 WSI1, WSI2 提高了各受旱处理的模拟精度,其中2年生物量的平均 RRMSE 降低了2.84个百分点,籽粒产量的平均 ARE 降低了1.43个百分点,且在越冬期和拔节期受旱处理的模拟精度提高最为明显。综上,现有 RZWQM2 模型对冬小麦受旱处理的模拟还存在一定局限性,可从改善物候期和 ET 模拟精度及加入旱后复水对冬小麦生长的补偿效应等方面进一步研究和改进。如需利用现有模型对水分胁迫条件下冬小麦生长发育过程进行模拟,建议选用 WSI2。

关键词: 冬小麦; 作物模型; 水分胁迫; RZWQM2 模型; 生长发育; 土壤水分

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0205-12

Simulation of Winter Wheat Growth under Different Scenarios of Water Stress with RZWQM2 Model

JIANG Tengcong^{1,2} DOU Zihe^{1,2} YAO Ning^{1,2} FENG Hao^{2,3} YU Qiang³ HE Jianqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to improve its ability to simulate crop growth and yield under different scenarios of soil water stress, the current stress factors of water stress index 1 (WSI1) was modified and two more different indices of WSI2 and WSI3 were created for the root zone water quality model (RZWQM2). The index of WSI2 was based on a modification of the soil water factor (SWFAC) for photosynthesis-related processes in RZWQM2 using daily potential root water uptake calculated by the Nimah and Hanks approach. The index of WSI3 was based on WSI2 but with new terms accounting for the stress due to additional heating of the canopy by unused energy for potential soil evaporation in both the supply and demand terms of WSI2. The RZWQM2 model and these three different water stress indices were evaluated

收稿日期: 2018-01-19 修回日期: 2018-02-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)、陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1611)、西北农林科技大学人才专项资金项目(千人计划)和高等学校学科创新引智计划(111计划)项目(B12007)

作者简介: 蒋腾聪(1992—),男,博士生,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: tongcong_jiang@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 何建强(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

by using the data of soil water, total transpiration, biomass and grain yield obtained from a winter wheat experiment conducted under different water stress scenarios at different growing stages in two consecutive growth seasons of 2012—2013 and 2013—2014. The results showed that these three water stress indices were all able to correctly simulate the dynamic changes of winter wheat growth and soil water content when water stress occurred during the heading and grain-filling stages. However, when water stress occurred earlier and severer, the simulation accuracy became lower. Generally, the water stress index of WSI2 was better than WSI1 under different scenarios, since the relative root mean square error (RRMSE) for biomass was decreased by 2.84 percentage point, and the absolute relative error (ARE) for yield was decreased by 1.43 percentage point, especially when water stress occurred during the wintering and greening stages. In general, there were still some limitations for the RZWQM2 model to simulate winter wheat growth under arid conditions. Thus, the RZWQM2 model can be further improved in the following aspects, such as the response of phenology to soil water stress, the improvement of ET simulation, and the compensation effect of rehydration on winter wheat after long water stress. It was suggested that model users should choose WSI2, if the RZWQM2 model was expected to simulate the response of winter wheat to soil water stress.

Key words: winter wheat; crop model; water stress; RZWQM2 model; growth and development; soil water

0 引言

半干旱地区是我国重要的农业类型区之一,水分是限制该地区农业生产的主要因子^[1]。近年来随着全球气候变暖,作物生长期关键生育期干旱发生频率及强度的增加,给该地区农作物生长发育造成较大影响^[2]。关中地区位于中国西北部,冬小麦是其主要粮食作物之一。该地区秋季雨多、春季干旱,水分亏缺已经成为制约冬小麦稳产、高产的主要因素。因此,探讨受旱条件下冬小麦生境过程,提高水分利用率,发展节水农业,对提高该地区的粮食产量至关重要^[1]。

以往有关水分胁迫的研究以大田试验为主^[3-6],但是试验周期长、成本高,试验结果具有明显的区域性,无法开展大量的重复试验。而作物模型是以作物为研究对象,根据农业系统学与作物科学原理,对作物与环境、经济因子及其关系的量化表达,经校正和验证并达到一定精度后,可用于作物生长发育过程及结果的定量预测、监测、预警与决策支持,以促进作物生产实现高产、优质、高效、生态与安全的目标^[7]。利用作物模型开展“数值模拟试验”对大田试验进行补充,可在某些方面发挥重要作用且已经得到越来越广泛的应用^[8-10]。目前有关小麦生长的模拟模型主要有 Sirius^[11]、AFRCWHEAT2^[12]、APSIM^[13]、DSSAT^[14]和 RZWQM^[15]等。

目前,大多数作物模型都是通过“水分胁迫因子”即水分供需比来描述水分胁迫对作物生长和发育过程的影响,但它们的表达形式有所不同^[16-17]。例如,APSIM 模型以相对有效含水率来描述水分胁迫与氮素固定和物候发育的关系,而以水分供给与需求的比值来描述水分胁迫对光合作用和叶片伸展

的影响^[17];DSSAT 模型则通过比较潜在蒸腾(或植物水分需求)和潜在根系吸水(或植物可吸收的土壤水)之间的大小关系来描述水分胁迫对作物的影响^[17]。然而,现有作物模型对水分胁迫条件下作物生长的模拟仍存在一定的误差,例如,姚宁等^[18]利用 DSSAT 中的 CERES - Wheat 模型模拟旱区冬小麦生长过程时发现,在越冬期和返青期受旱条件下,模拟结果相对较差,且随着受旱时段提前和受旱程度的加重,模拟精度更低。

根区水质模型(RZWQM)是由美国农业部农业系统研究所开发,于 1992 年推出的农业系统和资源管理模型。该模型综合了物理、生物和化学过程,模拟农业生产系统中作物生长及水分、养分和杀虫剂在作物根区的运动和传输^[19]。虽然该模型在各地得到了广泛的应用和验证,但也存在对水分胁迫条件下作物生长模拟精度较低的问题。例如,MA 等^[20]利用 RZWQM 模型模拟大豆生长时发现,严重水分胁迫条件下模拟产量与实测值差距较大;YU 等^[21]利用 RZWQM 模型模拟华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系时发现,冬小麦生长过程中出现水分胁迫时叶面积指数被低估;SASEENDRAN 等^[22]应用 RZWQM 模型时发现,较高的水分胁迫会导致大豆叶面积指数和产量被低估。此外,房全孝等^[23]利用 RZWQM 模型模拟小麦产量时发现,严重干旱处理的小麦叶面积指数模拟值明显低于实测值,该模型模拟作物对严重土壤水分胁迫的响应机制还需进一步改善。

为增强 RZWQM2 模型模拟水分胁迫条件下作物生长的功能,SASEENDRAN 等^[24]于 2014 年在该模型原有水分胁迫因子 WSI1 基础上,提出了两种新的作物水分胁迫因子 WSI2 和 WSI3。其中,WSI2

以 WSI1 为基础,改变了根系吸水项的计算公式; WSI3 则以 WSI2 为基础增加了土壤蒸发项。然而,自新的水分胁迫指数建立以来,还未在我国干旱和半干旱地区进行验证,RZWQM2 模型模拟干旱胁迫条件下冬小麦生长的精度是否相应得到了提高,目前尚不清楚。

因此,本研究比较 RZWQM2 模型提供的 3 种水分胁迫因子,判断新增的水分胁迫因子是否提高 RZWQM2 模型模拟存在水分胁迫时冬小麦生长过程的精度,验证 RZWQM2 模型在我国干旱和半干旱地区的适应性,并选出适用的水分胁迫因子,从而为进一步将该模型应用于我国干旱半干旱地区农业生境系统管理研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 田间试验设计

冬小麦田间分段受旱试验在陕西杨凌西北农林科技大学节水灌溉试验站(108°04'E, 34°17'N,海拔 506 m)大型活动遮雨棚下进行,降雨时关闭遮雨棚,以隔绝降雨对试验的影响。试验小区种植面积为 8 m²,小区间设有埋深为 1.5 m 的聚乙烯塑料隔离层,可防止侧渗。试验区土壤为壤土,0~20 cm 土层土壤 pH 值为 8.14,有机碳质量比 8.20 g/kg,全氮质量比 0.62 g/kg。该地区属于暖温带季风半湿润气候区,降水量年内分布不均。2012—2013 年和 2013—2014 年两年度冬小麦生育期内气温和太阳辐射量动态变化见图 1。

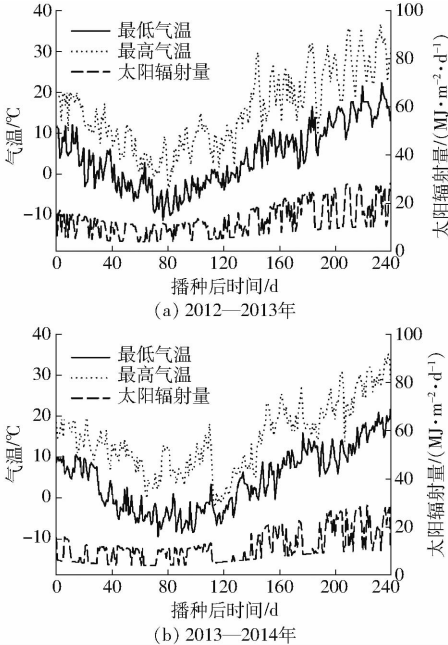


图 1 2012—2013 年和 2013—2014 年两年度冬小麦生育期内逐日气温和太阳辐射量

Fig. 1 Daily temperature and solar radiation in 2012—2013 and 2013—2014 growing seasons of winter wheat

试验因素为灌溉水平和受旱时段。灌溉水平设置灌水定额 40 mm(I1)和 80 mm(I2)2 个水平;受旱时段分为越冬+返青时段受旱(D1)、返青+拔节时段受旱(D2)、拔节+抽穗时段受旱(D3)和抽穗+灌浆时段受旱(D4)4 个水平;对照处理(CK)灌水定额为 80 mm,各生育期全灌水。共计 9 个处理,各处理 3 个重复(表 1)。供试冬小麦品种为“小偃 22”,条播种植,播深 5 cm,行距 25 cm,密度 400 万株/hm²。播种时间为 2012 年和 2013 年的 10 月 15 日,分别于次年 6 月 2 日和 6 月 7 日收获。播前施用 N 140 kg/hm²和 P₂O₅ 50 kg/hm²,生长期内不再追肥。其他试验细节参照姚宁等^[25]的研究。

表 1 冬小麦不同生长阶段受旱试验的灌水处理

Tab.1 Experimental treatments of water stress at different stages of winter wheat						mm
处理	越冬期 (12 月 15 日)	返青期 (3 月 15 日)	拔节期 (4 月 15 日)	抽穗期 (5 月 1 日)	灌浆期 (5 月 15 日)	总灌 水量
CK	80	80	80	80	80	400
I1 D1	0	0	40	40	40	120
I1 D2	40	0	0	40	40	120
I1 D3	40	40	0	0	40	120
I1 D4	40	40	40	0	0	120
I2 D1	0	0	80	80	80	240
I2 D2	80	0	0	80	80	240
I2 D3	80	80	0	0	80	240
I2 D4	80	80	80	0	0	240

1.2 RZWQM2 模型与水分胁迫因子

1.2.1 RZWQM2 模型简介

RZWQM2 模型是一个基于过程的农业系统模拟模型,主要包括 6 个子模块:物理运移模块、化学反应模块、养分循环模块、杀虫剂反应模块、作物生长模块和管理操作模块。其中物理运移模块用 Green - Ampt 方程^[26]描述土壤水分入渗过程; Brooks - Corey (BC) 方程^[27]描述土壤水分特征曲线; Richards 方程^[28]描述分层土壤间土壤水分重分布情况。RZWQM2 模型嵌套了 DASST 4.0 模型^[19],用来模拟作物生长发育过程和最终产量。本文中以 DSSAT 4.0 中的 CERES - Wheat 模块模拟冬小麦的生长过程和最终产量。

1.2.2 RZWQM2 模型中的 3 种不同水分胁迫因子

(1)水分胁迫因子 WSI1

RZWQM2 模型中延用了 DSSAT 4.0 中的水分胁迫因子,即潜在根系吸水量与潜在蒸腾量的比值^[24]。本文将其作为第 1 种水分胁迫因子 WSI1。

在水分充足的条件下,潜在根系吸水量大于潜在蒸腾量,不存在水分胁迫。随着土壤水分被根系

吸收,土壤变干,潜在根系吸水速率下降。在某一阶段达到一个阈值,即膨压因子(I_{TURFAC}),该因子主要影响叶片伸展性生长。对于 C_3 、 C_4 植物,低于膨压因子根系吸收的水分将不能通过渗透调节和细胞壁的扩展来维持膨压,供给细胞分裂和叶片伸展性生长。当潜在蒸腾量等于或超过潜在根系吸水量时,胁迫因子 I_{SWFAC} 被激活,主要影响光合作用及其他与干物质积累相关的过程。模型中这两个因子被作为直接乘数应用于叶片生长和干物质积累的模拟中,参数范围为 1(没有胁迫)到 0(完全胁迫)。相关计算式为

$$I_{\text{TURFAC}} = \frac{P_{\text{TRWUP}}}{P_{\text{RWUEPI}}EP_0} \tag{1}$$

$$I_{\text{SWFAC}} = \frac{P_{\text{TRWUP}}}{EP_0} \tag{2}$$

式中 I_{SWFAC} ——影响光合作用及其他与干物质积累相关过程的水分胁迫因子

P_{TRWUP} ——潜在根系吸水量,mm

P_{RWUEPI} ——物种特性参数

EP_0 ——潜在蒸腾量,mm

其中, P_{RWUEPI} 目前在 DSSAT 中设置为 1.5,表明在潜在根系吸水量为潜在蒸腾量的 1.5 倍时,作物的伸展性生长开始遭受水分胁迫;潜在蒸发蒸腾量(EP_0)用改进的 Shuttleworth – Wallace ET 模型^[29]计算得到。

潜在根系吸水量(P_{TRWUP})由 Ritchie 方程^[30]得到,为

$$P_{\text{TRWUP}} = \sum_{i=1}^N \frac{k_1 \exp(k_2(\theta_{\text{SW}(i)} - \theta_{\text{LL}(i)}))}{k_3 - \ln R_{\text{RLV}(i)}} R_{\text{RLV}(i)} \Delta Z_{(i)} \tag{3}$$

式中 $R_{\text{RLV}(i)}$ ——第 i 层的根长密度,cm/cm³

k_1 ——常数,取 0.001 32

k_2 ——常数,当土壤水排水下限大于等于 0.30 cm³/cm³时, k_2 取 45.0;当土壤水排水下限小于 0.30 cm³/cm³时, $k_2 = 130\theta_{\text{LL}(i)}$

k_3 ——常数,取 7.01

$\theta_{\text{SW}(i)}$ ——第 i 层土壤体积含水率,cm³/cm³

$\theta_{\text{LL}(i)}$ ——第 i 层作物可利用水分下限,cm³/cm³

$\Delta Z_{(i)}$ ——土层 i 的深度,cm

(2)水分胁迫因子 WSI2

由于式(3)基于单根吸水的径向流理论,该理论存在诸多假设^[31]。首先,该理论假设土壤导水率不变,即凋萎系数时的土壤导水率。这一假设在土壤含水率较高时存在很大误差。其次,该理论假设即使在土壤干燥的条件下作物根系和土壤间的水势

梯度也为常数。实际中,根水势随时间变化,水势梯度也在变化^[24]。Nimah and Hanks 方程^[32]是一种计算根系吸水的宏观模型,较式(3)没有上述假设。因此 SASEENDRAN 等^[24]希望通过改用 Nimah and Hanks 方程计算水分胁迫因子中的根系吸水项,以提高水分胁迫的模拟精度,得到第 2 种水分胁迫因子 WSI2。Nimah and Hanks 方程为

$$S_r(z,t) = \frac{(H_r + R_r z - h(z,t) - s(z,t))R(z)K(\theta)}{\Delta x \Delta z} \tag{4}$$

式中 H_r ——根部有效压力水头,cm

R_r ——根阻力项

$h(z,t)$ ——土壤基质水头,cm

$s(z,t)$ ——考虑含盐量的渗透水头,假设为 0 cm

Δx ——根表面到土壤中测量 $h(z,t)$ 点的距离,假设为 1 cm

Δz ——深度增量,cm

$R(z)$ ——有效根密度函数,即为在 Δz 的深度间隔内其有效根与总有效根的比率

$K(\theta)$ ——土壤导水率,cm/h

$S_r(z,t)$ ——根系吸水量,cm

每层瞬时吸水量的累计值即为根系吸水量。通过调节根部有效压力水头(H_r)使总的根系吸水量小于或等于潜在蒸腾量。 $H_r = 15\ 295.8$ cm 时的根系吸水量为潜在根系吸水量。

WSI2 相关计算式为

$$I_{\text{SWFAC}} = \frac{P_{\text{TRWUP-NH}}}{EP_0} \tag{5}$$

$$I_{\text{TURFAC}} = \frac{I_{\text{SWFAC}}}{1.5} \tag{6}$$

式中 $P_{\text{TRWUP-NH}}$ ——通过 Nimah and Hanks 方程计算的潜在根系吸水量,mm

(3)水分胁迫因子 WSI3

当土壤干燥时,用于蒸散的能量较少,因而用于加热土壤、空气和冠层的能量较多,SASEENDRAN 等^[24]将这部分能量导致的作物水分胁迫考虑进水分胁迫因子中。通过修改 WSI2 中 SWFAC 的计算公式(式(5)),即在其分子中加上土壤实际蒸发量,分母中将潜在蒸腾量改为潜在蒸发蒸腾量,提出第 3 种水分胁迫因子 WSI3,即

$$I_{\text{SWFAC}} = \frac{P_{\text{TRWUP-NH}} + E_s}{ET} \tag{7}$$

$$I_{\text{TURFAC}} = \frac{I_{\text{SWFAC}}}{1.5} \tag{8}$$

式中 E_s ——土壤蒸发的可用水量,通过 Richards 方程求解土壤表层垂直向上的水流通量得到,上限为潜在土壤蒸发量,mm

ET ——潜在蒸发蒸腾量,mm

1.3 模型输入数据

模型运行所需的 2012—2014 年逐日气象数据(包括最高气温、最低气温、大气相对湿度、太阳辐射和风速等)由试验地附近的陕西省杨凌国家一般

气象站提供。试验在遮雨棚下进行,故模型中降雨量为 0 mm。模型中土壤质地、颗粒组成及容重由田间试验测得,凋萎系数、田间持水率和饱和度为实测数据,土壤的饱和导水率采用模型默认值(表 2)。模型中最大根深设为 200 cm,根系分布指数为 3.0^[33-34]。因缺乏实测值,且本研究没有考虑氮素对作物生长发育的影响,所以土壤养分数据采用模型默认值。

表 2 试验区初始土壤性质
Tab.2 Initial soil properties of experimental plots

土层深度/ cm	粉粒质量 分数/%	砂粒质量 分数/%	黏粒质量 分数/%	容重/ (g·cm ⁻³)	凋萎含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0~20	18.36	42.29	39.35	1.26	0.12	0.25	0.46
20~40	19.45	43.65	36.90	1.35	0.16	0.26	0.45
40~60	17.40	42.83	39.77	1.30	0.16	0.26	0.44
60~80	16.09	41.99	41.92	1.32	0.14	0.27	0.45
80~100	16.36	42.35	41.29	1.35	0.15	0.26	0.45

研究表明,选取不存在水分亏缺试验处理的数据来校正模型参数较为合理^[18,35]。因此本研究用完全灌水处理(CK)的土壤水分动态、物候期、生物量和产量数据对模型进行校正,其他处理用于模型验证。在模型校正和验证过程中选用模型默认的水分胁迫因子 WSI1。在对 RZWQM2 模型中 CERES-Wheat 模块进行作物品种参数校正时,以姚宁等^[18]得到的“小偃 22”的品种参数作为初始值,利用 RZWQM2 模型自带的 PEST 软件对冬小麦品种参数进行调试(表 3)。模型中作物品种参数反映的是作物品种的遗传特征^[36],因此在利用水分胁迫因子 WSI2、WSI3 对冬小麦生长过程进行模拟时也采用了上述的作物品种参数。

表 3 冬小麦品种“小偃 22”的遗传参数
Tab.3 Genetic parameters of winter wheat cultivar of “Xiaoyan 22”

参数	数值
最适温度条件下通过春化阶段所需天数 P1V/d	63.70
光周期参数 P1D/%	90.41
籽粒灌浆期积温 P5/(℃·d)	612.20
开花期单位株冠质量籽粒数 G1/(粒·g ⁻¹)	23.85
最佳条件下标准籽粒质量 G2/mg	37.45
成熟期非胁迫下单株茎穗标准干质量 G3/g	1.71
完成一片叶生长所需积温 PHINT/(℃·d)	91.81

1.4 3 种水分胁迫值的模拟效果评价

本研究分别用 RZWQM2 模型中 3 种不同的水分胁迫因子对 2 年冬小麦受旱试验进行模拟分析。利用冬小麦主要根系层(20~40 cm)土壤水分动态、蒸腾总量、最终生物量和籽粒产量的模型

输出变量和田间观测值对不同水分胁迫因子的模拟效果进行评价。评价指标为相对均方根误差(RRMSE)和绝对相对误差(ARE)。RRMSE 和 ARE 的值越小,表明模型模拟精度越高,两者的计算公式分别为

$$R_{RMSE} = \frac{R_{MSE}}{O} \times 100\%$$
 (9)

$$A_{RE} = \frac{|S_i - O_i|}{O_i} \times 100\%$$
 (10)

其中
$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$$
 (11)

式中 R_{MSE} ——均方根误差
 S_i ——第 i 个模拟值
 O_i ——第 i 个观测值
 $\overline{O}$ ——观测值的平均值
 n ——实测值的个数

2 结果与分析

2.1 RZWQM2 模型的校正和验证

模型校正和验证后,两年度 CK 处理下 20~40 m 土层内土壤动态含水率的 RRMSE 分别为 13.72% 和 14.05%。各受旱处理土壤含水率模拟值相比,低水水平各处理的模拟精度低于高水水平处理,同一灌水水平下前期受旱各处理的模拟精度低于后期受旱处理。但模拟的各受旱处理下土壤含水率的变化趋势与观测值基本一致,RRMSE 为 7.21%~13.49%,模拟效果整体较好。

从模型校正的结果可以看出,2012—2013 年和 2013—2014 年两年度 CK 处理的开花期和成熟期模

拟值与观测值基本一致(表 4),表明 RZWQM2 模型可以很好地模拟充分供水条件下的冬小麦物候期。而各受旱处理开花期和成熟期的模拟值之间没有差异且分别与同年的对照处理相同,其中 D1 处理下模拟值和实测值物候期最大相差 9 d,表明 RZWQM2 模型没有考虑水分胁迫对冬小麦物候期的影响。

两年度 CK 处理最终生物量和籽粒产量 ARE 的平均值为 8.29% 和 3.62%,模拟精度较高。但各

胁迫处理下冬小麦生物量和籽粒产量的模拟结果相对较差,且模拟误差随受旱时期的提前而增大(表 4),其中 D1 处理严重低估了冬小麦的产量和生物量。2012—2013 年度高水处理 I2D1 的生物量和产量均低于低水处理 I1D1,与实测结果不符。这可能是由于 I2D1 处理的初始含水率低于 I1D1 处理,模型模拟过程中后期高灌水量没能抵消前期水分胁迫对冬小麦生长造成的影响,导致最终产量的下降。

表 4 RZWQM2 模型的校正与验证结果

Tab.4 Results of calibration and verification of RZWQM2 model

	年度	处理	开花期/d		成熟期/d		最终生物量			籽粒产量		
			实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值/ (kg·hm ⁻²)	模拟值/ (kg·hm ⁻²)	ARE/%	实测值/ (kg·hm ⁻²)	模拟值/ (kg·hm ⁻²)	ARE/%
模型	2012—2013	CK	192	191	228	228	18 029	16 503	8.47	8 407	7 858	6.53
校正	2013—2014	CK	196	197	235	234	16 243	17 578	8.22	7 488	7 568	1.07
模型 验证	2012—2013	I1D1	184	191	222	228	11 014	5 562	49.50	5 079	2 621	48.40
		I1D2	185	191	223	228	11 309	5 669	49.87	5 202	2 626	49.53
		I1D3	188	191	224	228	12 110	7 408	38.83	5 626	4 343	22.80
		I1D4	188	191	225	228	11 719	7 587	35.26	5 316	4 052	23.78
		I2D1	184	191	223	228	12 159	4 398	63.83	5 755	2 017	64.95
		I2D2	187	191	224	228	13 401	7 366	45.04	6 682	3 050	54.35
		I2D3	189	191	225	228	13 065	11 310	13.43	6 460	6 769	4.78
		I2D4	190	191	226	228	12 756	12 457	2.34	6 323	7 064	11.71
	2013—2014	I1D1	188	197	229	234	6 432	1 180	81.65	2 927	572	80.44
		I1D2	189	197	229	234	9 129	3 703	59.43	4 375	1 427	67.38
		I1D3	191	197	229	234	10 011	4 153	58.52	4 440	2 127	52.10
		I1D4	192	197	230	234	9 264	4 987	46.17	4 168	2 640	36.66
		I2D1	190	197	230	234	7 438	2 751	63.01	3 503	1 185	66.18
		I2D2	192	197	231	234	12 684	9 628	24.09	5 243	3 254	37.94
		I2D3	194	197	231	234	12 130	12 582	3.72	4 884	6 715	37.50
		I2D4	194	197	231	234	11 066	12 999	17.47	4 733	7 198	52.09

2.2 不同水分胁迫因子的模拟结果比较

2.2.1 3 种水分胁迫因子输出值的模拟结果比较

在用 RZWQM2 模型模拟冬小麦生长发育的过程时,水分胁迫因子的输出值反映作物对水分胁迫的响应。本研究中冬小麦越冬期和拔节期受旱处理下(D1),随着冬小麦的生长,WSI1 最先表现出水分胁迫,然后是 WSI3、WSI2,胁迫强度由大到小依次为 WSI1、WSI3、WSI2,但越冬期末(播种后 120 d)胁迫强度由大到小依次为 WSI3、WSI2、WSI1(图 2a、2b)。其余各处理 3 种水分胁迫因子反映出的受旱时段基本相同且与试验设置基本一致,受旱程度由大到小均为 WSI3、WSI2、WSI1,胁迫程度的差异随受旱时段的推后而减小(图 2,水分胁迫因子范围 0(没有水分胁迫)到 1(完全胁迫))。

2.2.2 土壤水分状况的模拟结果比较

由于冬小麦根系主要生长分布于 20~40 cm,

因此本研究主要对比 3 种水分胁迫因子在该土层的水分模拟状况(图 3)。总体来看,3 种因子对土壤含水率的动态变化模拟效果较好,RRMSE 为 7.17%~13.28%。且 3 种因子模拟的土壤含水率的模拟值变化趋势基本一致,均表现为抽穗期(180 d)之前模拟值低于实测值,此阶段土壤水分的消耗以土壤蒸发为主,间接反映出模型模拟的土壤蒸发偏高;而抽穗期之后模拟值高于实测值,随着作物生长土壤水分主要通过作物蒸腾散失,土壤水分模拟值偏高,反映出模型模拟的作物生长蒸腾量偏低。WSI2 和 WSI3 均采用 Nimah and Hanks 方程计算根系吸水量,两者模拟的土壤含水率一致,相较于 WSI1 偏低,作物生长后期差异明显。

2.2.3 累积蒸腾量的模拟结果比较

从冬小麦累积蒸腾量的模拟值来看,除 D1 处理外,水分胁迫因子 WSI1 最高,WSI2 次之(图 4)。

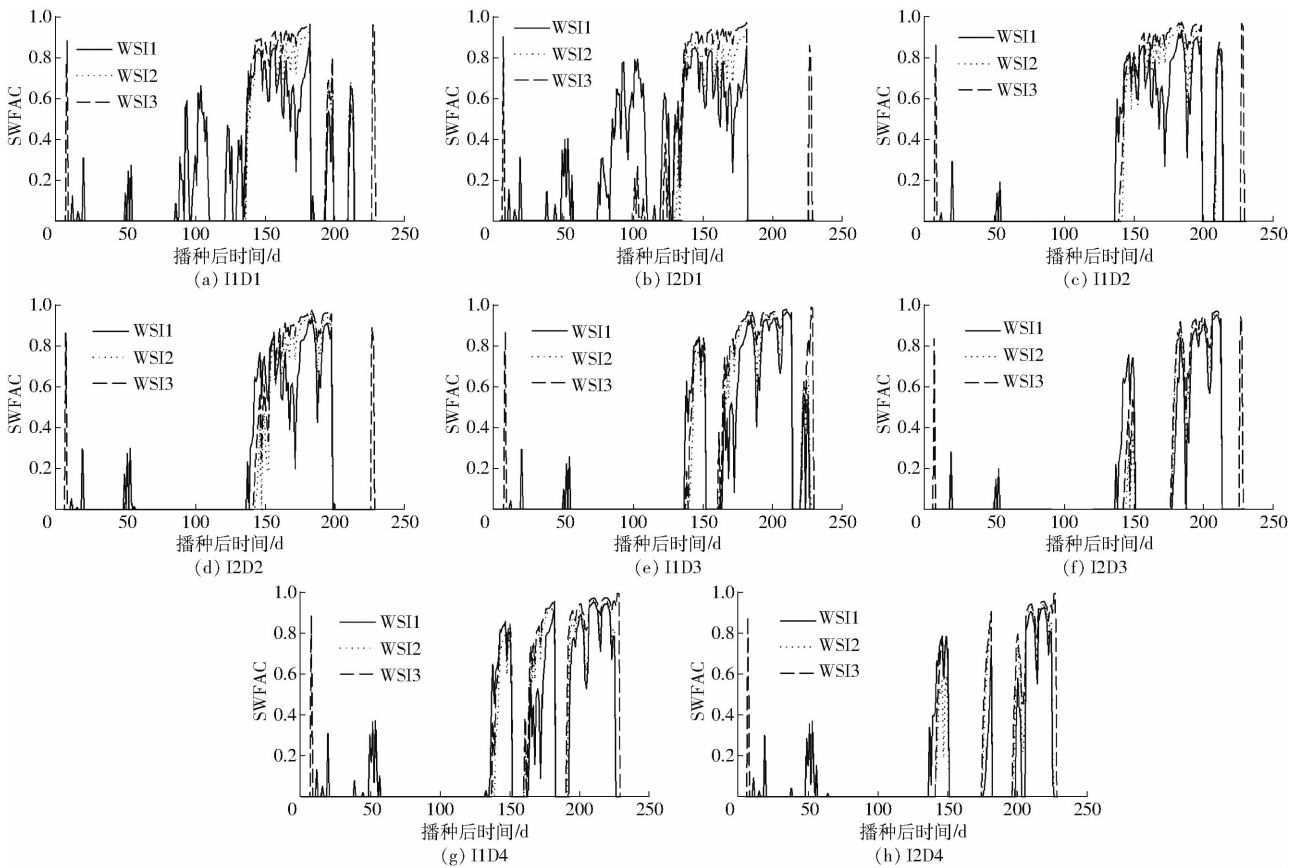


图 2 2012—2013 年度模拟的不同受旱条件下水分胁迫因子 (WSI1、WSI2、WSI3) 的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of SWFAC under different scenarios of water stress in 2012—2013 growing season by using three stress indices of WSI1, WSI2 and WSI3

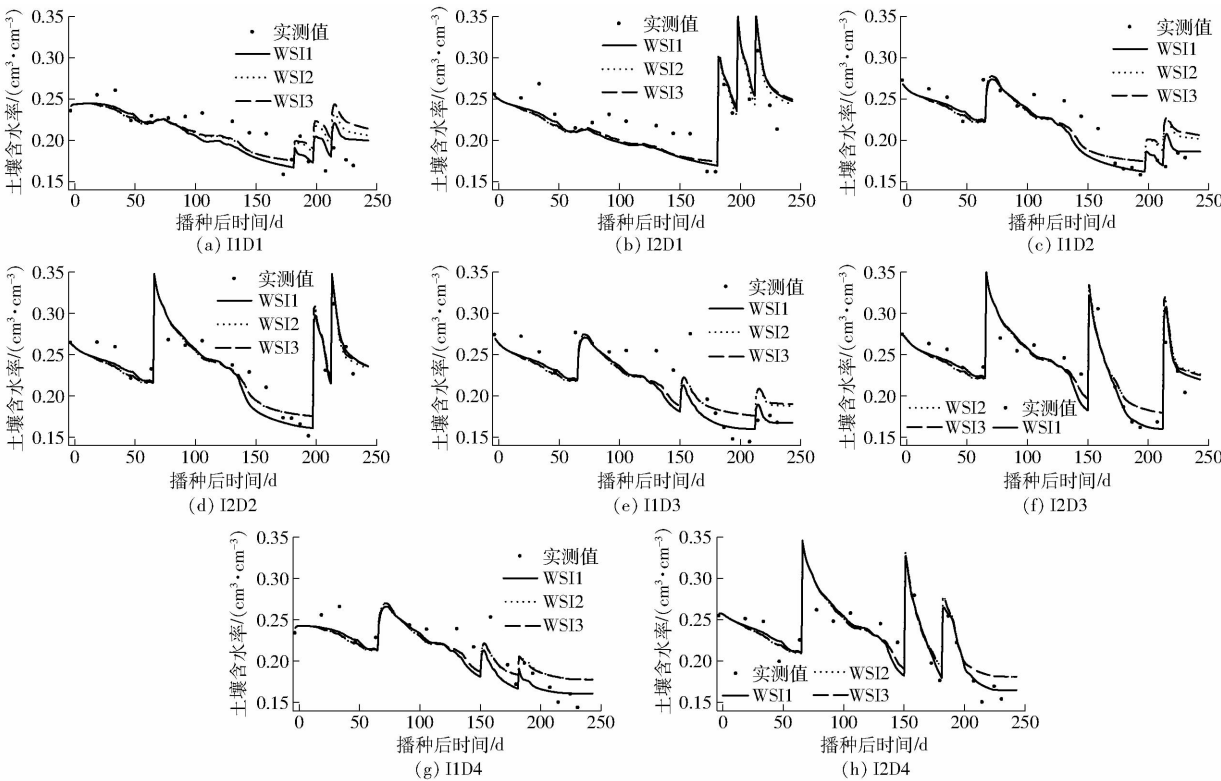


图 3 2012—2013 年度 3 种不同水分胁迫因子 (WSI1、WSI2、WSI3) 下各处理土壤含水率 (20 ~ 40 cm) 的模拟效果比较

Fig. 3 Comparisons of measured and simulated soil moistures (20 ~ 40 cm) under different scenarios of water stress in 2012—2013 growing season by using three stress indices of WSI1, WSI2 and WSI3

实际蒸腾量间接反映了作物对水分的吸收状况, WSI2 和 WSI3 均采用 Nimah and Hanks 方程模拟根系吸水量,但两者的模拟值仍有差异。这是由于 WSI3 考虑了潜热对冠层的影响,通过在 SWFAC 的分子和分母中加入土壤蒸发项,使模拟的水分胁迫程度偏大,造成作物生长状况较差、蒸腾量较小。与其他处理不同的是,D1 处理下 WSI2 模拟的累积蒸腾量最高,其中 I2D1 处理下利用胁迫因子 WSI1、WSI2、WSI3 模拟的 2012—2013 季冬小麦累积蒸腾量分别为 119.5、137.6、101.8 mm。

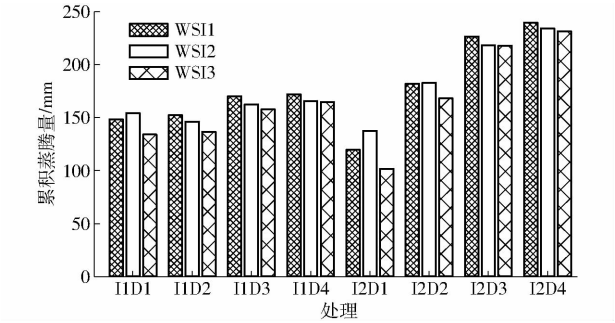


图 4 2012—2013 年度 3 种不同水分胁迫因子 (WSI1、WSI2、WSI3) 下各处理累积蒸腾量

Fig.4 Simulated total transpirations under different scenarios of water stress in 2012—2013 growing season by using three stress indices of WSI1, WSI2 and WSI3

2.2.4 作物生长状况的模拟结果比较

从模型对冬小麦生物量的模拟结果来看,3 种

水分胁迫因子均对高水处理、后期胁迫的处理模拟效果较好,而低水处理、前期受旱的模拟效果较差。且自返青期后(约播后 130 d)生物量模拟值均低于实测值,表明 3 种因子模拟的水分胁迫程度均偏大,对冬小麦生物量的累积抑制作用过强。而三者相比,WSI2 模拟的各胁迫处理下冬小麦生物量结果最优,WSI1 次之,WSI3 较差(图 5)。其中 D1 处理下,WSI2 对生物量的模拟较 WSI1 提高明显,RZWQM2 模型对前期受旱冬小麦生长发育的模拟得到改善。

同生物量的模拟结果类似,3 种水分胁迫因子对产量的模拟精度均表现出随着受旱程度的加深和受旱时段的提前逐渐降低的趋势。三者相比,WSI2 的模拟精度最高,2 年平均 ARE 较 WSI1 降低了 1.43 个百分点,其中 D1 处理的模拟精度改善明显(表 5)。WSI2 对冬小麦产量的模拟效果得到提高,得益于改由 Nimah and Hanks 方程计算水分胁迫因子中的潜在根系吸水项,模拟的水分胁迫相较于 WSI1 历时短,较 WSI3 程度轻,作物累积蒸腾量最大,因而产量的模拟效果得到提高。D3、D4 处理中,低水处理冬小麦产量被低估,WSI1 的模拟精度最高,而高水处理下 WSI3 的模拟精度最高,这是因为 3 种胁迫因子均高估了冬小麦产量,而 WSI3 在 WSI2 的基础上增加了土壤蒸发项,造成模拟的水分胁迫程度增加,使各处理产量的模拟值最接近实测值。

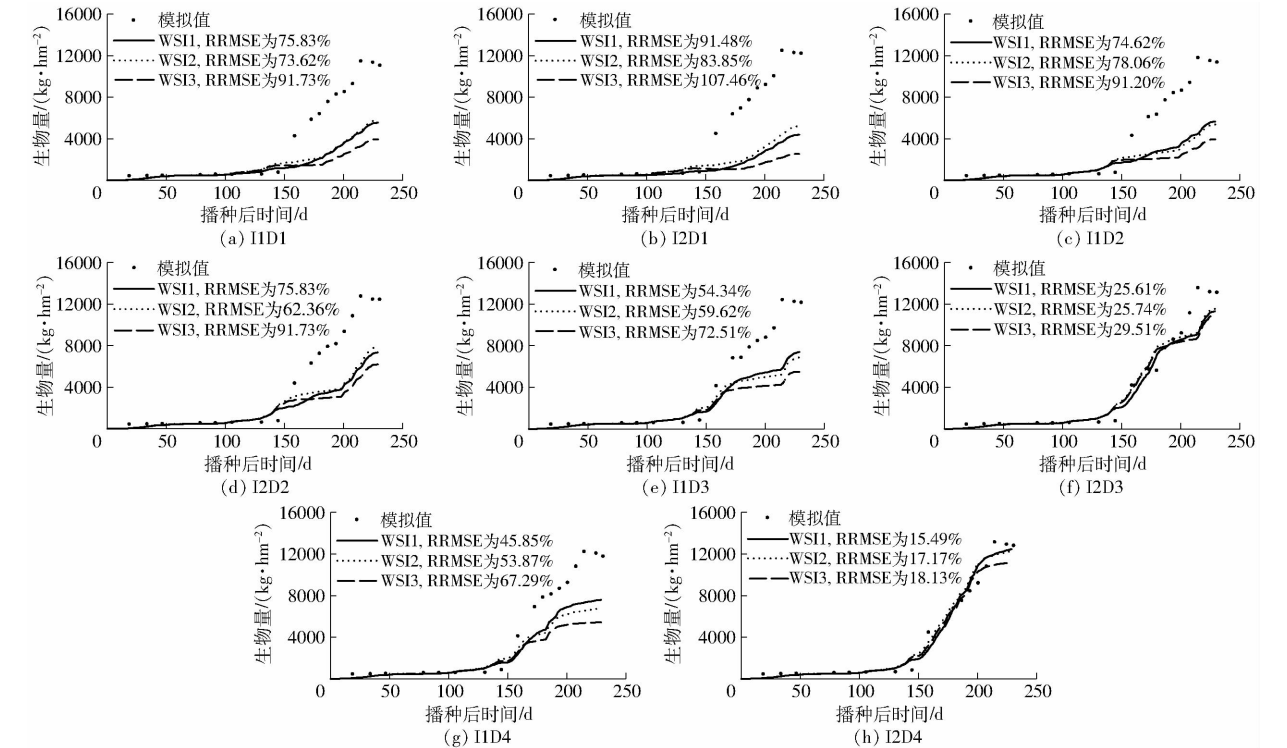


图 5 2012—2013 年度 3 种不同水分胁迫因子 (WSI1、WSI2、WSI3) 下各处理冬小麦生物量的模拟效果比较

Fig.5 Comparisons of measured and simulated winter wheat biomass under different scenarios of water stress in 2012—2013 growing season by using three stress indices of WSI1, WSI2 and WSI3

表 5 3 种水分胁迫因子 (WSI1、WSI2、WSI3) 对不同受旱情境下冬小麦产量模拟效果比较

Tab.5 Comparisons of measured and simulated winter wheat yields under different scenarios of water stress by using three stress indices of WSI1 , WSI2 and WSI3

年度	处理	实测值/ (kg·hm ⁻²)	模拟值/(kg·hm ⁻²)			ARE/%		
			WSI1	WSI2	WSI3	WSI1	WSI2	WSI3
2012—2013	I1D1	5 079	2 621	2 679	1 860	48. 40	47. 26	63. 38
	I1D2	5 202	2 626	2 307	1 768	49. 53	55. 66	66. 02
	I1D3	5 626	4 343	3 894	3 209	22. 80	30. 78	42. 96
	I1D4	5 316	4 052	3 716	2 934	23. 78	30. 09	44. 81
	I2D1	5 755	2 017	2 296	1 267	64. 95	60. 10	77. 98
	I2D2	6 682	3 050	3 042	2 427	54. 35	54. 48	63. 68
	I2D3	6 460	6 769	6 998	6 513	4. 78	8. 33	0. 83
	I2D4	6 323	7 064	6 876	6 033	11. 71	8. 74	4. 58
2013—2014	I1D1	2 927	572	1 060	328	80. 44	63. 79	88. 79
	I1D2	4 375	1 427	1 339	595	67. 38	69. 39	86. 41
	I1D3	4 440	2 127	1 869	1 234	52. 10	57. 91	72. 21
	I1D4	4 168	2 640	2 540	1 688	36. 66	39. 05	59. 51
	I2D1	3 503	1 185	1 500	421	66. 18	57. 18	87. 98
	I2D2	5 243	3 254	2 793	2 056	37. 94	46. 73	60. 79
	I2D3	4 884	6 715	5 512	5 155	37. 50	12. 86	5. 55
	I2D4	4 733	7 198	6 881	6 142	52. 09	45. 37	29. 77
平均值						44. 41	42. 98	53. 45

3 讨论

本研究利用 RZWQM2 模型对 2 a 冬小麦分段受旱试验进行模拟发现,同一年不同受旱条件下的冬小麦开花期和成熟期都一样且与 CK 处理相同,而田间试验表明,干旱胁迫发生得越早、胁迫程度越重,冬小麦的开花期和成熟期越提前。孙宏勇等^[37]的研究也发现整个生育期干旱胁迫能使冬小麦的生育期缩短 5 ~ 8 d。许多研究表明,模型无法模拟不同水分胁迫造成的作物物候期的差异,需要对模型进行相应的改进^[38-40]。因此,模型对水分胁迫造成的作物物候期变化还需进一步研究。

经校正和验证后,RZWQM2 模型可以很好地模拟 CK 处理下冬小麦的生物量和籽粒产量。而三者模拟的生物量和籽粒产量均表现为低水平处理的模拟精度低于高水水平,前期受旱处理的模拟精度低于后期受旱处理。因此 RZWQM2 模型对前期受旱和严重受旱条件下的冬小麦生长过程的模拟还需进一步改进。陈晓远等^[41]的研究表明,不同生育期复水对前期遭受水分胁迫冬小麦的生长及产量均有促进作用,复水后作物的生长受到激发,在茎秆伸长的同时绿叶面积增大,干物质积累增加且更多地向冠部分配,根冠比降低,作物进行补偿生长,其中以拔节期复水的补偿作用最大。ACEVEDO 等^[42]认为,轻度胁迫后复水,植物表现出补偿生长。刘春光^[43]的研究表明,分蘖期适应水分胁迫能力强于拔

节期,且重度胁迫受旱较中度胁迫严重,但复水后小麦生长及生理反应的补偿效应也相对明显。而本研究中 RZWQM2 模型对 D1 处理(越冬期和拔节期受旱,返青期复水)的模拟并没有体现出复水后冬小麦的补偿生长。因此,模型未考虑旱后复水对作物生长的补偿效应,这可能是导致冬小麦前期受旱情境下生物量和籽粒产量被低估的原因之一。

从冬小麦生物量和籽粒产量模拟效果来看,WSI2 较 WSI1 在冬小麦前期受旱处理有所提高;而 WSI3 对冬小麦后期受旱处理的模拟较 WSI1 略有改善。整体来看 WSI2 模拟的各受旱处理下冬小麦的生物量和产量精度最高,其中 2 a 生物量的平均 RRMSE 降低了 2.84 个百分点,籽粒产量的平均 ARE 降低了 1.43 个百分点。水分胁迫对作物生物量和产量的影响主要取决于胁迫的轻重和持续时间。WSI2 在 WSI1 的基础上改由 Nimah and Hanks 方程计算水分胁迫因子中的潜在根系吸水项,改变了水分胁迫历时和程度,模拟的作物累积蒸腾量最大,因而产量和生物量的模拟效果得到提高。而 WSI3 在 WSI2 基础上通过在 SWFAC 的分子分母中加入土壤蒸发项,考虑土壤水分亏缺对冠层温度的影响,进而导致作物遭受水分胁迫。本研究为两个连续生育期持续受旱,受旱时间长,前期受旱处理作物长势差,恢复灌水后水分主要用于土壤蒸发。因此本研究中前期受旱处理下选用 WSI3 计算出水分胁迫值必然偏大。实际模拟结果也是如此,WSI3 模

拟的 SWFAC 较 WSI2 和 WSI1 明显增大,生物量和籽粒产量的模拟效果最差。刘恩民等^[44]的研究也表明,受旱麦田叶面温度的升高受受旱历时和作物生长状况的影响。长期受旱麦田植株发育较差,同等受旱条件下叶面温度升高值小,而受旱处理前一直正常供水麦田植株发育正常,同等受旱条件下叶面温度升高明显。因此,在今后的研究中需将作物受旱历时及作物生长状况对冠层温度升高导致的水分胁迫考虑进水分胁迫因子的计算中。

3 种水分胁迫因子对 20 ~ 40 cm 土层土壤含水率的模拟均呈现抽穗期之前偏低,而抽穗期后偏高的趋势。土壤中水分的散失主要通过蒸发和植株蒸腾进行,这一趋势反映出模型对 ET 模拟的不准确性。DEJONGE 等^[45]认为,要改进 CERES 模型模拟水分胁迫条件下的作物生长过程,应从提高蒸发蒸腾量的模拟精度入手。而从三者模拟的累积蒸腾量来看,蒸腾量是影响水分胁迫条件下作物产量模拟的重要因素。因此,可以考虑通过改进 ET 的模拟精度提高模型对水分胁迫条件下作物生长过程的模拟。

此外,王艳哲等^[46]的研究表明,在水分供应受限制条件下,增施氮肥会降低根冠比,更利于地上干物质的积累和经济产量形成。黄玲等^[47]研究表明,在干旱胁迫初期可通过施氮来提高土壤贮水的利用率。孟兆江等^[48]研究表明,水分调亏复水后有利于增强作物对土壤氮素的吸收利用能力。由于试验设置处理限制,本研究没有考虑氮素对作物生长发育的影响,在水、氮互作条件下模型对作物生长发育的模拟将会发生变化,还需要进一步研究。

4 结 论

(1) 现有 RZWQM2 模型能较好地模拟生育后期轻度受旱条件下冬小麦的生长发育过程,但随着受旱程度的加深和受旱时段的提前,模型的模拟精度降低。

(2) 水分胁迫因子 WSI2 对冬小麦各受旱处理的模拟效果相对较好,突出表现为提高了冬小麦越冬期和返青期受旱条件下生物量、产量的模拟精度。如需利用现有模型对水分胁迫条件下冬小麦生长发育的过程进行模拟,建议水分胁迫因子选用 WSI2。

参 考 文 献

1 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J]. 植物生理学通讯, 1994, 24(1): 61 - 66.

2 孔坚文. 陕西省冬小麦气象灾害风险评估及区划[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014.
KONG Jianwen. Meteorological disaster risk assessment and zonation of winter wheat in Shannxi Province[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014. (in Chinese)

3 於琨, 于强, 罗毅, 等. 水分胁迫对冬小麦物质分配及产量构成的影响[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 105 - 112.
YU Li, YU Qiang, LUO Yi, et al. Effect of water stress on dry-matter partition and yield constitution of winter wheat[J]. Progress in Geography, 2004, 23(1): 105 - 112. (in Chinese)

4 李尚中, 王勇, 樊廷录, 等. 水分胁迫对冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2007(10): 3 - 6.
LI Shangzhong, WANG Yong, FAN Tinglu, et al. Effect of water stress on the growth and yield of winter wheat[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2007(10): 3 - 6. (in Chinese)

5 闫永奎. 华北地区小麦水分胁迫对其生长和籽粒产量的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
YAN Yongkuan. Effects on growth and grain yield of winter wheat under water stress in North China[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011. (in Chinese)

6 杨丽霞, 王仰仁. 水分胁迫对冬小麦耗水量及产量的影响研究[J]. 地下水, 2011, 33(5): 163 - 165.
YANG Lixia, WANG Yangren. Application on surfer software to plotting percentage of moisture isoline map in film hole irrigation[J]. Ground Water, 2011, 33(5): 163 - 165. (in Chinese)

7 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520 - 3528.
CAO Hongxin, ZHAO Suolao, GE Daokuo, et al. Discussion on development of crop models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3520 - 3528. (in Chinese)

8 HE J, CAI H, BAI J. 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.

9 SASEENDRAN S A, AHUJA L R, MA L, et al. Developing and normalizing average corn crop water production functions across years and locations using a system model[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 65 - 77.

10 DING D Y, FENG H, ZHAO Y, et al. Modifying winter wheat sowing date as an adaptation to climate change on the Loess Plateau[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(1): 53 - 63.

11 JAMIESON P D, SEMENOV M A, BROOKING I R, et al. Sirius; a mechanistic model of wheat response to environmental variation[J]. European Journal of Agronomy, 1998, 8(3): 161 - 179.

12 PORTER J R. AFRCWHEAT2: a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen[J]. European Journal of Agronomy, 1993, 2(2): 69 - 82.

- 13 KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 267 – 288.
- 14 JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 235 – 265.
- 15 AHUJA L, ROJAS K, HANSON J. Root zone water quality model: modelling management effects on water quality and crop production[M]. Kansas: Water Resources Publication, LLC, 2000.
- 16 RITCHIE J T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system[J]. *Plant and Soil*, 1981, 58(1): 81 – 96.
- 17 SASEENDRAN S A, AHUJA L R, MA L, et al. Current water deficit stress simulations in selected agricultural system models [M]//AHUJA L R, REDDY V R, SASEENDRAN S A, et al. Response of crops to limited water: understanding and modeling water stress effects on plant growth processes. Madison: American Society of Agronomy, 2008: 1 – 38.
- 18 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)
- 19 AHUJA L R, ROJAS K W, HANSON J D, et al. Root zone water quality model[M]. Highlands Ranch, CO: Water Resources Publishers, 2000.
- 20 MA L, NIELSEN D, AHUJA L, et al. An evaluation of RZWQM, CROPGRO, and CERES-maize for response to water stress in the Central Great Plains[M]//AHUJA L, MA L, HOWELL T A. Agricultural system models in field research and technology transfer. London: Lewis Publishers, 2002: 119 – 148.
- 21 YU Q, SASEENDRAN S, MA L, et al. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 89(2): 457 – 477.
- 22 SASEENDRAN S A, MA L, MALONE R, et al. Simulating management effects on crop production, tile drainage, and water quality using RZWQM – DSSAT[J]. *Geoderma*, 2007, 140(3): 297 – 309.
- 23 房全孝, 于强, 王建林. 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[J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1122 – 1130.
- FANG Quanyao, YU Qiang, WANG Jianlin. Simulating soil water dynamics and its effects on crop yield using RZWQM – CERES in the North China Plain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(6): 1122 – 1130. (in Chinese)
- 24 SASEENDRAN S, AHUJA L, MA L, et al. Enhancing the water stress factors for simulation of corn in RZWQM2[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(1): 81 – 94.
- 25 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(12): 2379 – 2389.
- YAO Ning, SONG Libing, LIU Jian, et al. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2379 – 2389. (in Chinese)
- 26 GREEN W H, AMPT G. Studies on soil physics[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1911, 4(1): 1 – 24.
- 27 BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]//Hydrology Paper 3. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- 28 RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318 – 333.
- 29 FARAHANI H, AHUJA L. Evapotranspiration modeling of partial canopy/residue-covered fields[J]. *Transactions of the ASAE*, 1996, 39(6): 2051 – 2064.
- 30 RITCHIE J T. Soil water balance and plant water stress[M]//TSUJI G Y, HOOGENBOOM G, THORNTON P K. Understanding options for agricultural production. Dordrecht – Boston – London: Kluwer Academic, 1998: 41 – 54.
- 31 GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. *Soil Science*, 1960, 89(2): 63 – 73.
- 32 NIMAH M, HANKS R. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(4): 522 – 527.
- 33 JONES C A, BLAND W, RITCHIE J, et al. Simulation of root growth[M]//HANKS R J, RITCHIE J T. Modeling plant and soil systems. Madison, ASA: 1991: 91 – 123.
- 34 MA L, HOOGENBOOM G, SASEENDRAN S, et al. Effects of estimating soil hydraulic properties and root growth factor on soil water balance and crop production[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 572 – 583.
- 35 房全孝. 根系水质模型中土壤与作物参数优化及其不确定性评价[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 118 – 123.
- FANG Quanyao. Optimizing and uncertainty evaluation of soil and crop parameters in root zone water quality model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(10): 118 – 123. (in Chinese)
- 36 江敏, 金之庆, 葛道阔, 等. CERES – Wheat 模型在我国冬小麦主产区的适用性验证及订正[J]. *江苏农学院学报*, 1998, 19(3): 64 – 67.
- JIANG Min, JIN Zhiqing, GE Daokuo, et al. Validation and modification of CERES – Wheat model in winter wheat production region of China[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 1998, 19(3): 64 – 67. (in Chinese)

- 37 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 不同时期干旱对冬小麦产量效应和耗水特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 13–16.
SUN Hongyong, LIU Changming, ZHANG Yongqiang, et al. Effects of water stress in different growth stage on water consumption and yield in winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 13–16. (in Chinese)
- 38 ANOTHAI J, SOLER C M T, GREEN A, et al. Evaluation of two evapotranspiration approaches simulated with the CSM – CERES – Maize model under different irrigation strategies and the impact on maize growth, development and soil moisture content for semi-arid conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 176: 64–76.
- 39 米娜, 张玉书, 蔡福, 等. 土壤干旱胁迫对作物影响的模拟研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2519–2526.
MI Na, ZHANG Yushu, CAI Fu, et al. Progress in the simulation of drought stress effect on crop production[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2519–2526. (in Chinese)
- 40 刘健, 姚宁, 吝海霞, 等. 冬小麦物候期对土壤水分胁迫的响应机制与模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 115–124.
LIU Jian, YAO Ning, LIN Haixia, et al. Response mechanism and simulation of winter wheat phenology to soil water stress[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 115–124. (in Chinese)
- 41 陈晓远, 罗远培. 不同生育期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 35–37.
CHEN Xiaoyuan, LUO Yuanpei. Compensatory effects of water-recovery during different growth durations on winter wheat under water stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(1): 35–37. (in Chinese)
- 42 ACEVEDO E, HSIAO T C, HENDERSON D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status[J]. Plant Physiology, 1971, 48(5): 631–636.
- 43 刘春光. 水分胁迫及复水对作物生长及养分吸收补偿效应的研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2001.
LIU Chunguang. The compensation effects of recovery of water supply following water stress on crop growth and nutrient uptake [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2001. (in Chinese)
- 44 刘恩民, 于强, 谢贤群. 水分亏缺对冬小麦冠层温度影响的研究[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 23–25.
LIU Enmin, YU Qiang, XIE Xianqun. Effects of water deficiency on canopy temperature of winter wheat[J]. Eco-agriculture Research, 2000, 8(1): 23–25. (in Chinese)
- 45 DEJONGE K C, ASCOUGH J C, ANDALES A A, et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES – Maize model under limited irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 92–103.
- 46 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 282–289.
WANG Yanzhe, LIU Xiuwei, SUN Hongyong, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 282–289. (in Chinese)
- 47 黄玲, 杨文平, 胡喜巧, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 168–174.
HUANG Ling, YANG Wenping, HU Xiqiao, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water consumption characteristics and nitrogen utilization of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 168–174. (in Chinese)
- 48 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. http://www.j-csam.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.
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. (in Chinese)