

基于小麦模型算法集成平台的三种水分胁迫算法比较

陈先冠¹, 冯利平^{1*}, 白慧卿¹, 余卫东²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003)

摘要: 准确模拟水分胁迫并揭示其对作物生长发育过程的影响, 是作物模型应用于田间研究和干旱影响评估的关键。该研究将3种主流水分胁迫算法整合到一个标准平台中, 组成土壤含水率模型 (average Soil Water Content, SWC)、土壤水分供需比模型 (Water Supply to Demand ratio, WS/WD) 和相对蒸腾模型 (Actual to Potential Transpiration ratio, AT/PT) 共3种水分胁迫模拟模型。利用河北吴桥2017—2019年冬小麦水分试验田间观测数据结合2008—2009和2013—2016年水分试验文献资料对模型平台进行参数校准与验证。结果表明, 3种模型的模拟结果与实测值均吻合良好, 地上部生物量、土壤含水率和产量的归一化均方根误差 (Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE) 分别为14.0%~16.5%、5.1%~8.8%和5.4%~7.7%。3种水分胁迫模型模拟的生长季水分亏缺出现的时间和严重程度不同, 但模拟的水分胁迫因子年际间变化一致。雨养条件下, 生长季降水量分别决定了SWC、WS/WD和AT/PT模型模拟的年际间水分胁迫因子变异的56%、56%和39%。灌水对产量具有促进作用, 但灌水量增加会导致灌水利用效率下降。SWC、WS/WD和AT/PT模型模拟枯水年灌四水 (底墒水+起身水+孕穗水+开花水) 处理的产量较不灌水分别高163%、132%和92%, 灌四水处理的灌水利用效率较灌一水 (底墒水) 处理分别低26.8%、12.3%和40.0%。在吴桥县冬小麦水分管理决策中, WS/WD模型最优, SWC模型次之, AP/TP模型较差。研究结果可为提升作物模型在冬小麦干旱影响评估和水分管理方面的可信度提供参考。

关键词: 作物; 参数化; 水分管理; 降水年型; WMAIP; 水分胁迫; 算法比较

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.007

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0047-11

陈先冠, 冯利平, 白慧卿, 等. 基于小麦模型算法集成平台的三种水分胁迫算法比较[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 47-57. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.007 http://www.tcsae.org

Chen Xianguan, Feng Liping, Bai Huiqing, et al. Comparison of three water stress algorithms based on the integration platform of wheat model algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 47-57. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.007 http://www.tcsae.org

0 引言

小麦是世界主要的粮食作物之一, 占世界粮食贸易量的20%, 对保障世界粮食安全发挥着不可替代的作用^[1-2]。水资源已经成为当今世界灌溉农业及早地作物生产力的首要限制因素^[3-4]。干旱导致的供水不足对作物全生育期的生长发育都会产生不利影响, 在营养生长期抑制了根系生长和叶片扩张, 在生殖生长期限制了光合作用、物质分配和产量形成^[5]。在全球气候变化的大背景下, 中国小麦主产区的热量资源变得更加丰富, 而降水资源年际波动大, 有略微下降趋势^[6], 冬小麦的生育期^[7]、生产潜力及其对气候资源的利用也发生了变化^[6], 导致小麦生产面临更大的气候风险, 水分供需之间的矛盾加剧。因此, 准确地评估干旱对农业生产的影响, 对农业防灾减灾和增产增效具有重大的现实意义。

基于过程的作物模型是评估干旱对小麦产量影响

的有效工具, 然而其对于模拟水分胁迫下的小麦生长发育仍有一定的局限性。目前大多数作物模型都缺乏特定胁迫下的试验数据进行模型训练, 导致模拟特定胁迫的算法没有很好地参数化^[8], 因此亟需进行干旱胁迫下的模型校正和验证, 明确模型模拟干旱对作物影响的不确定性, 以保证作物模型的模拟精度和可靠性。Toure等^[9]对CERES、EPIC、Century、Stewart和Sinclair模型比较发现, Century模型能准确模拟地区多年的平均产量, 但对年际间变异解释较弱, EPIC模型模拟干旱年份的小麦平均产量最为准确。Nouna等^[10]研究发现, CERES-maize模型模拟干旱条件下的叶面积指数、地上部生物量和籽粒产量均偏低。姚宁等^[11]研究发现, DSSAT-CERES-Wheat模型在越冬期和返青期水分短缺时, 模拟结果较差, 且随着受旱时段提前和受旱程度加重, 模拟精度下降。蒋腾聪等^[12]评价了RZWQM2模型中的3种水分胁迫指标, 发现模型对冬小麦受旱处理的模拟还存在一定局限性。刘健等^[13]指出DSSAT、RZWQM和APSIM等主要作物模型对水分胁迫下作物物候期的模拟存在不足, 并建立了冬小麦物候期水分胁迫响应函数。可见, 现有的作物模型模拟水分胁迫条件下的作物生长发育和产量形成过程还存在一定的缺陷, 必须对模型中的相应过程进行改进, 以提高模型在干旱条件下的模拟精度。

收稿日期: 2021-06-18 修订日期: 2021-07-18

基金项目: 国家重点研发项目 (2016YFD0300201); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2021TC117)

作者简介: 陈先冠, 博士生, 研究方向为作物模型与智慧决策。

Email: chenxianguan@cau.edu.cn

*通信作者: 冯利平, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业模型、农业气象及气候变化与资源利用。Email: fenglp@cau.edu.cn

尽管水分胁迫的概念很容易定义,但作物模型中水分胁迫的准确定量和表达一直是系统建模中的难点。不同建模人员将水分胁迫抽象为多种算法^[14-15],因此需要系统地比较与评价不同干旱影响模型在不同条件下的模拟性能。Eitzinger 等^[16]对 CERES、WOFOST 和 SWAP 模型模拟的土壤含水量进行比较发现,3 种模型均不能较好地模拟剖面中土壤总含水量,且均高估土壤水分的消耗。Camargo 等^[17]比较了 6 个作物模型模拟的根系吸水,除 CropSyst 模型外,其他模型都缺乏植物对蒸腾的反馈机制,使得高潜在蒸散下模拟的实际蒸腾偏高。Saseendran 等^[14]分析了 5 种主要作物模型,发现这些模型都使用实际与潜在蒸腾或蒸散的比率表示水分胁迫,但都未能准确反映碳同化、蒸腾、能量平衡和气孔行为的耦合过程。Eitzinger 等^[18]发现不同作物模型对干旱胁迫的反应不同。Jin 等^[19]研究发现,不同的水分胁迫算法模拟玉米生长季的缺水模式不同,但模拟年际间产量的变化趋势一致。综上所述,已有研究系统地比较了不同模型模拟土壤含水量、根系吸水的水分胁迫因子差异,但还需要进一步比较不同水分胁迫算法对小麦生长的影响,以提升作物模型在小麦干旱影响评估和水分管理方面的可信度。

多平台的模型比较存在平台结构不确定的问题,不能有效地解释模型优劣的原因,而单一平台的模型比较则无此问题^[17,19]。因此,本文通过在单一平台集成不同水分胁迫算法,组成 3 种水分胁迫模型,并进行不同情景下的模型比较,旨在评价不同算法模拟水分胁迫因子的可靠性,以期利用不同水分胁迫模型制定冬小麦灌溉制度提供依据,并为进一步将该模型平台广泛应用于中国小麦生产管理研究提供支持。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计与数据来源

冬小麦灌水试验在河北省沧州市吴桥县姚庄村中国农业大学吴桥试验站(37°37'N, 116°23'E)进行。试验地点位于海河平原黑龙港地区中部,为暖温带季风气候。海拔 20 m,地下水位 6~9 m,多年平均年降水量 542 mm,小麦季平均年降水量 117 mm^[3]。试验地土壤类型为黏壤土,0~200 cm 土体的土壤参数见表 1^[20-21]。逐日气象资料来自吴桥县气象局,主要包括日最高温度(℃)、日最低温度(℃)、日照时数(h)、日降水量(mm)、平均风速(m/s)以及空气相对湿度(%)。

冬小麦灌水试验于 2017 年 10 月开始至 2019 年 6 月结束,供试品种济麦 22(Jimai 22)为当地主栽品种。在足墒播种条件下设置 7 个灌水处理,每个处理 3 个重复,于 10 月 23 日播种,播量为 375 kg/hm²,行距 15 cm。7 个灌水处理包括不同灌水时期和灌水量水平,分别为不灌水、灌起身水、灌拔节水、灌孕穗水、灌开花水、灌拔节水和开花水、灌起身水、孕穗水和开花水,每次灌水定额 75 mm(采用水表计量并控制水量)。栽培方式均参照小麦节水高产栽培技术^[22],冬小麦每公顷施尿素 225 kg、磷酸二铵 300 kg、硫酸钾 225 kg,均作底肥一次性施入,春季不再追肥。在小麦生长期,每个重复均

在 6 个时期(越冬期、返青期、拔节期、开花期、乳熟期和成熟期)选取具有代表性的 2 段 0.5 m 小麦植株,在 105 ℃下杀青 30 min,然后在 75 ℃下烘干至质量不变,计算各时期小麦地上部生物量。收获时每个重复取 1.8 m² 冬小麦进行测产,自然风干后脱粒测产,文中的产量均以 13%含水率计。在上述关键发育期取土,从地表至地下 200 cm 处,每 20 cm 作为 1 层,采用土钻法取土并用烘干法测定土壤质量含水率。

利用 WebPlotDigitizer 软件(http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/)提取文献中吴桥试验站 2008—2009 和 2013—2016 年试验数据。其中,2008—2009 年试验为品种试验^[20,23],包括济麦 22 等 5 个品种,本文主要选取根系深度动态和根生物量数据(根系测量方法为:于主要发育期在两行麦苗之间按 0~20、>20~40、>40~80、>80~120、>120~160 和>160~200 cm 分层取土样,用自来水进行清洗并人工挑拣出所有根系);2013—2016 年试验为水分试验^[21],包括不灌水处理、5 个灌 1 水处理(起身水、拔节水、孕穗水、开花水、灌浆水)和 6 个灌 2 水处理(起身水+孕穗水、起身水+灌浆水、拔节水+开花水、开花水+灌浆水、孕穗水+灌浆水),灌水定额为 75 mm,供试品种为济麦 22,主要选取关键发育期、叶面积指数、地上部生物量、土壤含水率和小麦产量数据。

表 1 吴桥试验站土壤剖面物理参数^[20-21]
Table 1 Physical parameters of soil profiles at Wujiao experimental station^[20-21]

土层 Soil layer/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	凋萎含水率 Wilting water content/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水率 Field water-hdding capacity/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率 Saturated water content/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0~20	1.34~1.45	0.10~0.21	0.32~0.42	0.41~0.51
>20~40	1.40~1.48	0.12~0.18	0.34~0.40	0.42~0.48
>40~60	1.48~1.49	0.12~0.18	0.34~0.40	0.42~0.47
>60~80	1.46~1.48	0.12~0.17	0.34~0.39	0.42~0.47
>80~100	1.48~1.49	0.13~0.18	0.33~0.39	0.42~0.49
>100~120	1.45~1.48	0.14~0.18	0.33~0.40	0.42~0.49
>120~140	1.48~1.49	0.14~0.18	0.33~0.40	0.42~0.49
>140~160	1.42~1.51	0.14~0.18	0.33~0.40	0.42~0.48
>160~180	1.48~1.50	0.14~0.18	0.34~0.40	0.43~0.48
>180~200	1.50~1.51	0.14~0.18	0.34~0.40	0.43~0.49

1.2 小麦模型算法集成平台

小麦模型算法集成平台(Wheat Model Algorithms Integration Platform, WMAIP)是用于小麦模型算法开发和比较的框架,其针对特定模块集成多种算法,具有平台单一、灵活选择算法和集成模拟等优点,有助于比较现有算法。本研究中小麦模型算法集成平台的基础上,集成 3 种国际主流水分胁迫算法:土壤含水率法(average Soil Water Content, SWC)、相对蒸腾法(Actual to Potential Transpiration ratio, AP/TP)和土壤水分供需比法(Water Supply to Demand ratio, WS/WD),组成 3 种水分胁迫模拟模型,用于水分胁迫算法比较。

1.2.1 发育期

本文依据小麦的生育特性将小麦整个生长发育过程

划分为 4 个生育阶段，即：播种—出苗期，出苗—拔节期，拔节—开花期，开花—成熟期。发育期采用热时法^[24]模拟，计算公式如下：

$$T_{T,adj} = \sum [T_{T,\Delta} \cdot \min(f_D, f_V)] \quad (1)$$

式中 $T_{T,adj}$ 为光周期和春化作用订正后的热时， $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ； $T_{T,\Delta}$ 为每天的热时， $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ； f_D 为光周期影响因子； f_V 为春化作用影响因子^[24]。

1.2.2 光合生产与物质积累

光合生产采用光能利用效率法^[24]模拟，该方法基于辐射利用效率（Radiation Use Efficiency, RUE）的概念，即光能驱动干物质生产。

$$W_{\Delta} = I_i \cdot \text{RUE} \cdot \min(f_{T,poto}, f_{N,poto}) \cdot f_{W,poto} \cdot f_c \cdot 10 \quad (2)$$

式中 W_{Δ} 为日生物量生长速率， $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ ； I_i 为冠层截获辐射量， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ；RUE 为光能利用效率， g/MJ ； $f_{T,poto}$ 为温度胁迫对光合作用的影响因子； $f_{N,poto}$ 为氮素胁迫对光合作用的影响因子，本文未考虑氮素胁迫影响，取值为 1； $f_{W,poto}$ 为水分胁迫对光合作用的影响因子； f_c 为二氧化碳对光合作用的影响因子^[24]。

1.2.3 群体叶面积指数

叶生物量增加量由同化物分配计算，叶生物量衰老量根据叶片受生理老化、水分胁迫、自遮荫、低温胁迫的影响计算，叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）采用比叶重法^[24-25]模拟。

$$\text{LAI} = W_{L,L} \cdot 0.1 \cdot S_{LA} \quad (3)$$

$$S_{LA} = \begin{cases} \frac{(S_{LA,\min} - S_{LA,\max})}{5} \cdot \text{LAI} + S_{LA,\max}, & \text{LAI} \leq 5 \\ S_{LA,\min}, & \text{LAI} > 5 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $W_{L,L}$ 为活叶生物量， kg/hm^2 ； S_{LA} 为比叶重，最大比叶重 $S_{LA,\max} = 0.027 \text{ m}^2/\text{g}$ ，最小比叶重 $S_{LA,\min} = 0.022 \text{ m}^2/\text{g}$ ^[24]。

1.2.4 根系深度

根系深度的日增加量 $D_{\Delta,r}$ (cm/d) 计算公式^[24]如下：

$$D_{\Delta,r} = R_r \cdot f_{rt} \cdot f_{rwa} \cdot \text{XF}_j \quad (5)$$

式中 R_r 为根系深度增长速率，为品种参数，取值为 $3.5 \text{ cm}/\text{d}$ ； f_{rt} 为温度因子； f_{rwa} 为土壤可获得水分因子； XF_j 为土层 j 的根生长因子，取值为 1^[24]。

1.2.5 产量形成

产量形成采用收获指数法^[26]模拟，计算公式如下：

$$\text{HI}_{\text{act}} = (\text{HI}_{\max} - \text{HI}_{\min}) \cdot \frac{f_{W,\text{ave}}}{f_{W,\text{ave}} + \exp(S_1 - S_2 \cdot f_{W,\text{ave}})} + \text{HI}_{\min} \quad (6)$$

式中 HI_{act} 为实际的收获指数； HI_{\max} 和 HI_{\min} 分别为最大和最小收获指数，为品种参数，取值见表 2； $f_{W,\text{ave}}$ 为生长季平均水分胁迫影响光合作用因子，取值为生长季 $f_{W,poto}$ 的均值； S_1 、 S_2 为水分胁迫影响参数，为品种参数，分别取 14.3 和 0.286。

1.2.6 潜在蒸散

冬小麦的潜在蒸散量 ET_c 的计算公式如下：

$$\text{ET}_c = \text{ET}_0 \cdot K_c \quad (7)$$

式中 K_c 为冬小麦不同发育阶段的作物系数，采用联合国粮农组织 FAO-56 推荐的标准作物系数，初始生长期取

0.7，越冬期取 0.4，生育中期取 1.15，成熟期取 0.4^[27]； ET_0 为作物参考蒸散量，采用 Penman-Monteith 公式^[28]计算， mm/d 。

作物潜在蒸腾和土壤潜在蒸发计算公式^[26]如下：

$$\text{EP}_0 = \begin{cases} \text{ET}_c \cdot \frac{\text{LAI}}{3} & 0 \leq \text{LAI} \leq 3 \\ \text{ET}_c & \text{LAI} > 3 \end{cases} \quad (8)$$

$$E_s = \text{ET}_c \cdot \text{cov}_{\text{sol}} \quad (9)$$

$$\text{cov}_{\text{sol}} = \exp(-5 \cdot 10^{-5} \cdot C_V) \quad (10)$$

$$E_{s,\text{adj}} = \min(E_s, \frac{E_s \cdot \text{ET}_c}{E_s + \text{EP}_0}) \quad (11)$$

式中 EP_0 为作物潜在蒸腾量， mm/d ； E_s 为最大土壤潜在蒸发， mm/d ； cov_{sol} 为土壤覆盖指数； C_V 为地上部生物量和残留物， kg/hm^2 ； $E_{s,\text{adj}}$ 为调整后的最大土壤潜在蒸发， mm/d 。

1.2.7 土壤水分运动与水分胁迫因子

土壤水分模块主要包括水分的收入、支出、水分在各层间的分配以及重新分配 4 个主要过程^[29]。其中水分胁迫因子计算公式如下：

1) 土壤含水率法

土壤含水率法 (SWC) 参考 WOFOST^[25]、AquaCrop^[30] 和 STICS^[31] 中的水分胁迫方法。

$$f_{W,poto} = \begin{cases} \frac{\theta_t - \theta_{wp}}{\theta_{ws,poto} - \theta_{wp}}, & \theta_t < \theta_{ws,poto} \\ 1, & \theta_t \geq \theta_{ws,poto} \end{cases} \quad (12)$$

$$f_{W,LAI} = \begin{cases} \frac{\theta_t - \theta_{wp}}{\theta_{ws,LAI} - \theta_{wp}}, & \theta_t < \theta_{ws,LAI} \\ 1, & \theta_t \geq \theta_{ws,LAI} \end{cases} \quad (13)$$

式中 $f_{W,LAI}$ 为水分胁迫对叶片扩张的影响因子； θ_t 为土壤实际含水率， cm^3/cm^3 ； θ_{wp} 为凋萎含水率， cm^3/cm^3 ； $\theta_{ws,poto}$ 为影响光合生产的土壤临界含水率， cm^3/cm^3 ； $\theta_{ws,LAI}$ 为影响叶片扩张的土壤临界含水率， cm^3/cm^3 。

$$\theta_{ws,poto} = (1 - P_{poto}) \cdot (\theta_{fc} - \theta_{wp}) + \theta_{wp} \quad (14)$$

$$\theta_{ws,LAI} = (1 - P_{LAI}) \cdot (\theta_{fc} - \theta_{wp}) + \theta_{wp} \quad (15)$$

$$P_{poto} = P_{\text{given},poto} + 0.04 \cdot (5 - \text{ET}_0) \cdot \lg(10 - 9 \cdot P_{\text{given},poto}) \quad (16)$$

$$P_{LAI} = P_{\text{given},LAI} + 0.04 \cdot (5 - \text{ET}_0) \cdot \lg(10 - 9 \cdot P_{\text{given},LAI}) \quad (17)$$

式中 P_{poto} 和 P_{LAI} 分别为进行光合作用和叶片扩张时易被植物吸收的土壤可获得水比例； θ_{fc} 为田间持水量， cm^3/cm^3 ； $P_{\text{given},poto}$ 为气孔导度阈值，为作物参数，根据试验数据校准为 0.6； P_{LAI} 为叶片扩张阈值，为作物参数，根据试验数据校准为 0.5。

$$T_a = \min(\text{EP}_0, \text{EP}_0 \cdot f_{W,poto}) \quad (18)$$

式中 T_a 为作物实际蒸腾量， mm 。

2) 相对蒸腾法

相对蒸腾法 (AP/TP) 参考 CERES-Wheat 中的水分胁迫方法^[29]。

$$f_{W,poto} = \frac{W_{RWU}}{\text{EP}_0} \quad (19)$$

$$f_{W,LAI} = \frac{W_{RWU}}{1.5 \cdot \text{EP}_0} \quad (20)$$

$$W_{RWU} = \sum_{j=1}^N \frac{r_1 \cdot \exp[r_2 \cdot (\theta_{t,j} - \theta_{wp,j})]}{r_3 - \ln R_{LV,j}} \cdot R_{LV,j} \cdot Z_{\Delta,j} \cdot 10 \quad (21)$$

式中 W_{RWU} 为根系吸水量, mm/d; r_1 为根系吸水参数, 取 0.001 32^[19]; r_2 为根系吸水参数, 当 $\theta_{wp,j} \geq 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, 取 45, 当 $\theta_{wp,j} < 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, 取 $130\theta_{wp,j}$ ^[19]; r_3 为根系吸水参数, 取值为 7.01^[19]; $\theta_{t,j}$ 、 $\theta_{wp,j}$ 分别为土层 j 的实际土壤含水率和凋萎含水率, cm^3/cm^3 ; $R_{LV,j}$ 为土层 j 的根长密度, cm/cm^3 ; $Z_{\Delta,j}$ 为土层 j 的厚度, cm; N 为根系达到的最深土层。

$$T_a = \min(EP_o, W_{RWU}) \quad (22)$$

3) 土壤水分供需比法

土壤水分供需比法 (WS/WD) 参考 APSIM-Wheat 中的水分胁迫方法^[24]。

$$f_{W,poto} = \frac{\min(W_s, W_d)}{W_d} \quad (23)$$

$$f_{W,LAI} = \frac{\min(W_s, W_d)}{1.1 \cdot W_d} \quad (24)$$

$$W_d = \frac{B_{\Delta,r} \cdot VPD}{E_{T,c}} \quad (25)$$

$$W_s = \sum_{j=1}^{N-1} KL_j \cdot Z_{\Delta,j} \cdot (\theta_{t,j} - \theta_{wp,j}) \cdot 10 + \frac{R_{LS,N}}{Z_{\Delta,N}} \cdot KL_N \cdot (\theta_{t,N} - \theta_{wp,N}) \cdot 10 \quad (26)$$

$$T_a = \min(W_d, W_s) \quad (27)$$

式中 W_d 为作物的需水量, mm; $B_{\Delta,r}$ 为潜在光合量^[24], g/m^2 ; $E_{T,c}$ 为蒸腾效率系数, 根据试验数据校准为 $7 \text{ g} \cdot \text{kPa}/\text{kg}$; VPD 为蒸汽压力差, kPa; W_s 为每天的土壤供水量, mm; KL_j 和 KL_N 为土层 j 和土层 N 的作物吸水系数; $Z_{\Delta,N}$ 为土层 N 的厚度, cm; $\theta_{t,N}$ 、 $\theta_{wp,N}$ 分别为土层 N 的实际土壤含水率和凋萎含水率, cm^3/cm^3 ; $R_{LS,N}$ 为土层 N 的根系深度, cm。

1.3 模型组成与参数化

为有效比较不同水分胁迫算法的模拟效果, 同时排除因不同平台中模型结构差异带来的不确定性, 本文将 3 种水分胁迫算法 (SWC、WS/WD 和 AT/PT) 和 WMAIP 平台相耦合, 组成 3 种水分胁迫模型, 分别表示为 SWC 模型、WS/WD 模型和 AP/TP 模型。3 种模拟模型除水分胁迫外, 其余模块均采用相同算法。

基于 2017—2019 两年的试验数据进行调参, 运用 2008—2009 和 2013—2016 四年的水分试验文献资料进行模型验证。根据试验观测的发育期、生物量、产量对发育期模块、生物量模块、产量形成模块进行参数率定 (表 2)。因缺乏拔节期验证资料, 故未对拔节期进行验证。

1.4 模拟情景设定

为充分考虑不同降水年型的影响, 根据降水保证率划分冬小麦生长季 (10 月 10 日—6 月 10 日) 降水年型^[32], 如表 3 所示。基于验证后的 3 种水分胁迫模型分别进行水分胁迫算法比较和灌溉情景模拟。

1.4.1 水分胁迫算法比较

选择长期模拟情景 1981—2019 年、丰水年 2017—2018 年和枯水年 2018—2019 年运行 3 种水分胁迫模拟模型, 模型初始含水率设定为 80% 的田间持水率, 播期为 10 月 15 日, 全生育期不灌水, 比较不同模型在生长季内以及年际间的作物需水量、根系吸水量和水分胁迫因子的差异。

表 2 小麦模型算法集成平台中的冬小麦品种参数 (济麦 22)

参数 Parameter	描述 Description	取值 Value
$T_1/(\text{C} \cdot \text{d})$	出苗-拔节阶段所需热时	216
$T_2/(\text{C} \cdot \text{d})$	拔节-开花阶段所需热时	474
$T_3/(\text{C} \cdot \text{d})$	开花-成熟阶段所需热时	683
R_p	光周期敏感系数	4.91
R_v	春化效应敏感系数	1.56
$RUE/(\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1})$	光能利用效率	1.36
HI_{\max}	最大收获指数	0.51
HI_{\min}	最小收获指数	0.25

表 3 吴桥试验站降水年型划分

Table 3 Division of precipitation year types at Wuqiao experimental station

降水年型 Precipitation year type	降水保证率 Guaranteed rate of precipitation/%	生长季降水量 (平均值) Growing season precipitation (average value)/mm	生长季降水变异系数 Variation coefficient of growing season precipitation/%
枯水年 Dry year	<25	46~93 (73)	18
平水年 Normal year	25~75	94~151 (121)	15
丰水年 Wet year	>75	152~350 (209)	29

1.4.2 灌溉情景

在 1981—2019 年中, 分别进行枯水年、平水年和丰水年灌溉情景模拟。参考吴桥试验站冬小麦节水高产栽培技术, 在 70% 底墒条件下设置不灌水 (W0)、灌底墒水 (W1)、灌底墒水+拔节水 (W2)、灌底墒水+拔节水+开花水 (W3), 灌底墒水+起身水+孕穗水+开花水 (W4), 共 5 个灌水情景, 每次灌水量均为 75 mm。灌水情景下冬小麦均在当地常规播期 (10 月 15 日) 播种, 种植品种为济麦 22, 播种密度为 500 株/ m^2 。

1.4.3 水分利用效率

$$WUE = GY/(10 \cdot ET) \quad (28)$$

式中 WUE 为水分利用效率, kg/m^3 ; GY 为籽粒产量, kg/hm^2 ; ET 为生长季总耗水量, 等于降水量、灌水量和土壤贮水消耗量之和^[21], mm。

1.4.4 灌水利用效率

$$IWUE = (GY - GY_w)/(10 \cdot W_{ir}) \quad (29)$$

式中 $IWUE$ 为灌水利用效率, kg/m^3 ; GY_w 为雨养条件下的籽粒产量, kg/hm^2 ; W_{ir} 为生长季总灌水量, mm。

1.5 统计指标

采用回归系数 (b_0)、决定系数 (R^2)、均方根误

差 (RMSE) 和归一化均方根误差 (NRMSE) 来评价模型模拟值与实测值的吻合程度; 采用变异系数 (CV) 分析水分胁迫因子年际间差异。

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{O_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (30)$$

式中 S_i 为模拟值; O_i 为实测值; O_{avg} 为实测值均值; n 为样本的个数。

2 结果与分析

2.1 模型适应性评价

冬小麦根系深度和根生物量的验证结果显示, 根系深度和根生物量模拟值和实测值的 NRMSE 分别为 10.2% 和 17.1% (图 1a、1b)。冬小麦发育期的调参结果显示, 播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期模拟值和实测值的 NRMSE 分别为 1.7%、2.8% 和 1.5% (图 1c)。冬小麦发育期的验证结果表明, 模型平台能很好地模拟冬小麦的发育期, 其中播种-开花期和播种-

成熟期模拟值和实测值的 NRMSE 分别为 1.2% 和 1.0% (图 1d)。

模型验证结果表明, 不同模型对不同要素的模拟效果优劣不同。其中, 叶面积指数实测值与 SWC、WS/WD 和 AP/TP 模型模拟值的 NRMSE 分别为 29.0%、33.1% 和 26.6%, 表明模型平台虽然可以模拟叶面积指数动态, 但模拟的相对误差较高, AP/TP 模型模拟叶面积指数较优; 地上部生物量实测值与 SWC、WS/WD 和 AP/TP 模型的模拟值的 NRMSE 分别为 14.9%、14.0% 和 16.5%, 表明 WS/WD 模型模拟地上部生物量较优; 土壤含水率实测值与 SWC、WS/WD 和 AP/TP 模型的模拟值的 NRMSE 分别为 8.1%、8.8% 和 5.1%, 表明 AP/TP 模型模拟土壤含水率较优; 产量实测值与 SWC、WS/WD 和 AP/TP 模型的模拟值的 NRMSE 分别为 7.7%、5.4% 和 7.1%, 表明 WS/WD 模型模拟产量较优 (图 2)。总的来说, 3 种模型虽各有优劣, 但都能够较为准确地模拟不同水分处理下冬小麦的生长发育和产量形成过程。

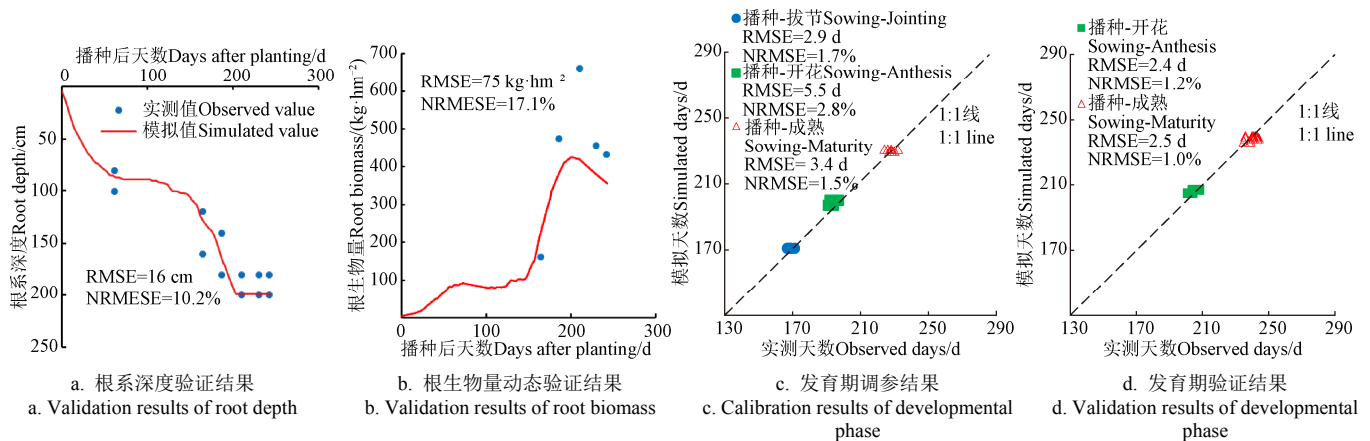


图 1 模型平台冬小麦根系深度、根生物量、发育期模拟值和实测值的比较

Fig.1 Comparison between simulated and observed values of root depth, root biomass, and developmental phase of winter wheat based on model platform

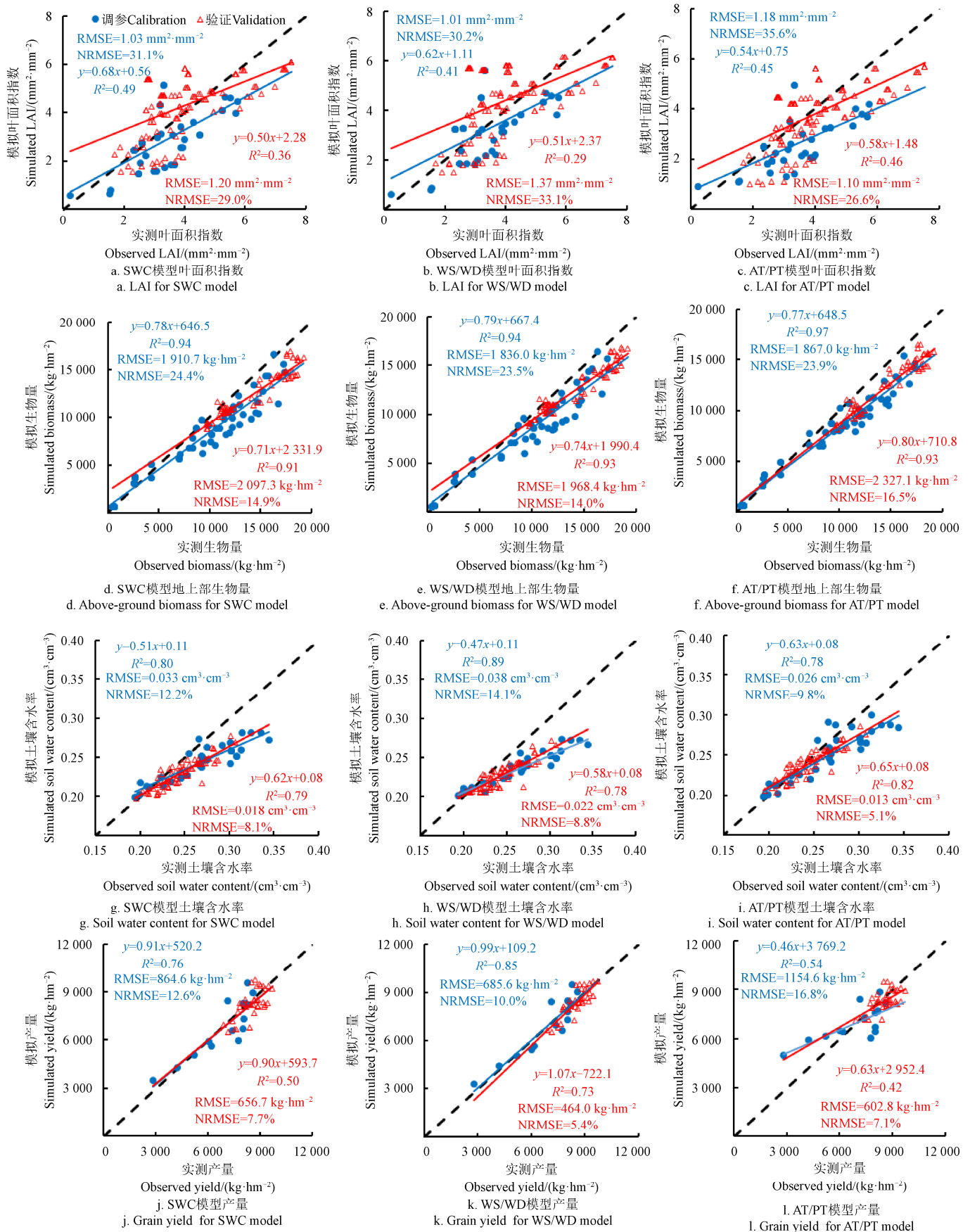
2.2 水分胁迫算法比较

不同模型模拟的生长季作物需水量不同, 但作物需水量年际间的变化趋势较为一致; 枯水年生长季作物需水量较丰水年大。WS/WD 模型模拟的生长季作物需水量最高, SWC 模型次之, AP/TP 模型最低。不同模型模拟的生长季总根系吸水量不同, WS/WD 模型与 SWC 模型的模拟值一致性较高 ($R^2=0.82$); WS/WD 和 SWC 模型模拟的生长季根系吸水量较 AP/TP 模型高 (图 3)。在丰水年, 3 种模型模拟的水分胁迫均较轻, 而在枯水年 3 种模型模拟的水分胁迫均较重, 其中 AP/TP 模型模拟干旱出现的时间较早, WS/WD 模型与 SWC 模型模拟干旱出现的时间较晚。3 种模型模拟年际间水分胁迫因子的变化显示, WS/WD 模型与 SWC 模型模拟的水分胁迫因子有较好的一致性 ($R^2=0.69$), 且模拟的年际间水分胁迫因子变异较大 (CV 分别为 13% 和 10%), AP/TP 模型模拟的水分胁迫因子年际间变异较

小 (CV=4%)。生长季降水量分别决定 SWC、WS/WD 和 AT/PT 模型模拟的年际间水分胁迫因子变异的 56%、56% 和 39%。3 种水分胁迫算法都能对不同年型下的水分胁迫进行模拟, 虽然模拟的生长季内水分亏缺出现时间和严重程度不同, 但模拟的水分胁迫因子年际间变化一致 (图 3)。

2.3 不同年型下灌溉对冬小麦产量、水分利用效率和灌水利用效率的影响

随灌水次数增加, 冬小麦产量呈增加趋势。SWC 模型模拟的枯水年、平水年和丰水年 W4 处理的产量均值分别为 10 137.3、10 524.6 和 10 755.4 kg/hm², 较 W0 处理分别高 163%、105% 和 77%; WS/WD 模型模拟的枯水年、平水年和丰水年 W4 处理的产量均值分别为 9 808.4、9 979.0 和 10 457.5 kg/hm², 较 W0 处理分别高 132%、92% 和 68%; AP/TP 模型模拟的枯水年、平水年和丰水年 W4 处理的产量均值分别为 8 872.3、9 168.1 和 9 565.5 kg/hm², 较 W0 处理



注: SWC 为土壤含水率模型; WS/WD 为土壤水分供需比模型; AT/PT 为相对蒸腾模型; 虚线为 1:1 线。

Note: SWC represent average soil water content model; WS/WD represent water supply to demand ratio model; AT/PT represent actual to potential transpiration ratio model; dashed line represent 1:1 line.

图 2 三种模型冬小麦叶面积指数、地上部生物量、土壤含水率和产量的调参和验证结果

Fig.2 Calibration and validation results of LAI, above-ground biomass, soil water content, and yield of winter wheat with three models

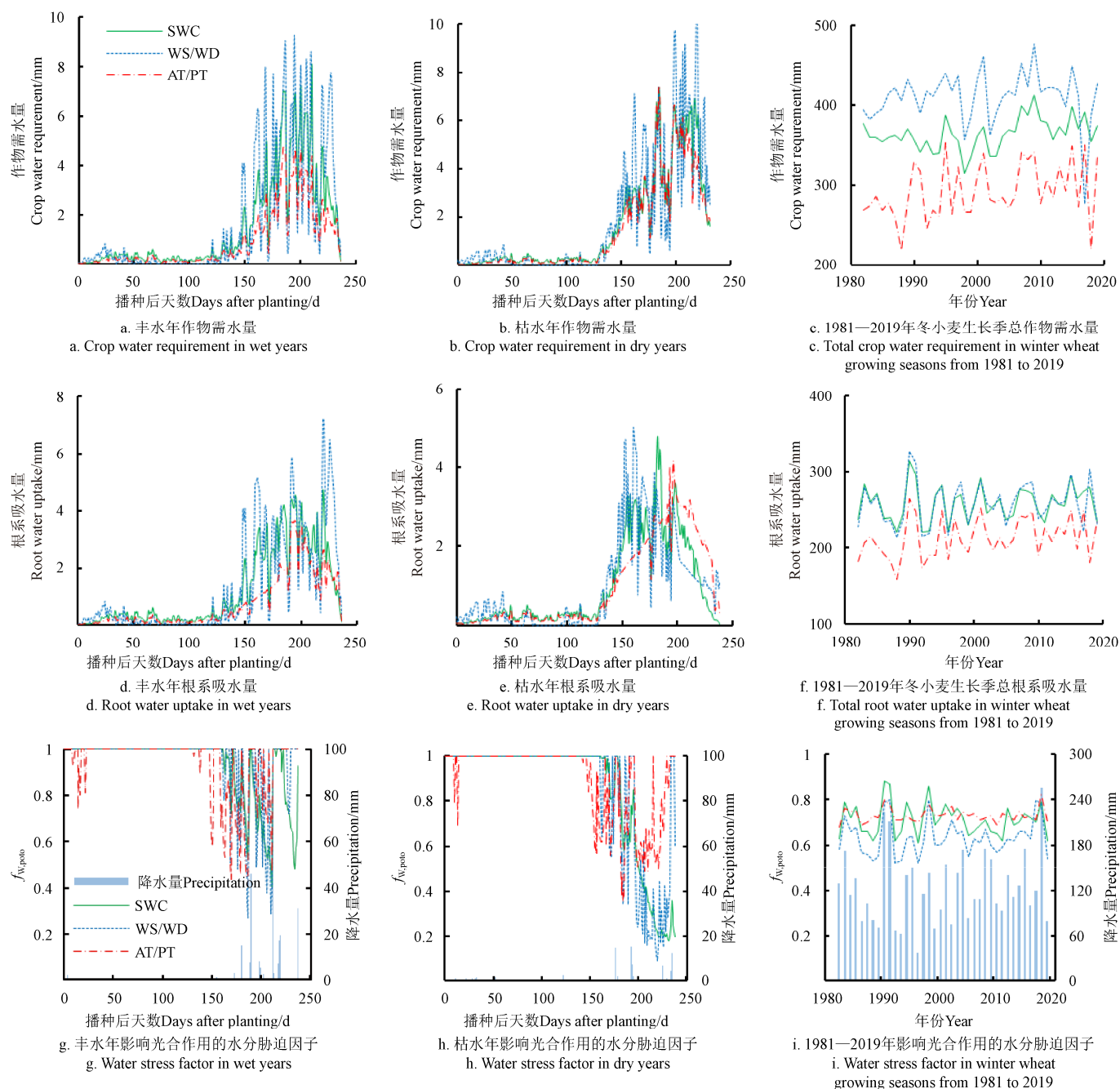


图3 基于不同水分胁迫模型的吴桥县冬小麦作物需水量、根系吸水量和水分胁迫因子 ($f_{w,poto}$) 模拟

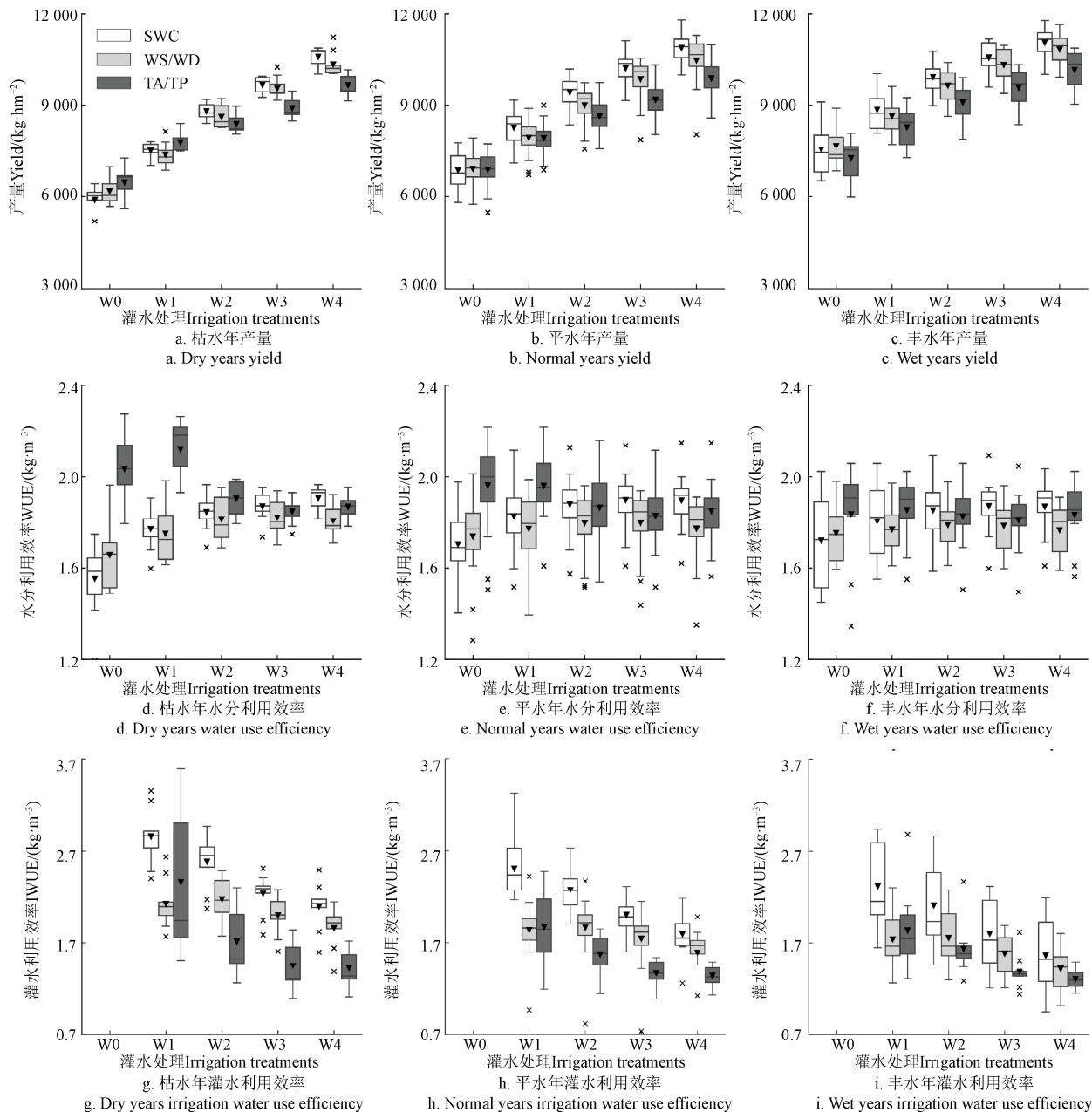
Fig.3 Crop water requirement, root water uptake, and water stress factor ($f_{w,poto}$) simulated by different water stress models in Wujiao County

分别高 92%、78%和 69% (图 4)。3 种模型比较中,除枯水年 W0 和 W1 处理、平水年和丰水年 W0 处理外,SWC 模型模拟的产量最高; AP/TP 模型模拟的产量在枯水年 W0 处理下最高,丰水年 W4 处理最低,表明 AP/TP 模型模拟干旱条件下的水分胁迫较轻,而湿润条件下的水分胁迫较重; WS/WD 模型模拟的产量在其余两者之间。灌水对小麦产量有促进作用,对枯水年的促进作用最大,平水年次之,丰水年最低。

随灌水次数增加,水分利用效率呈先增加后略微下降趋势。SWC 模型模拟结果中,枯水年 W4 处理、平水年 W3 处理和丰水年 W3 处理的水分利用效率最高,均值分别为 1.91、1.90 和 1.87 kg/m^3 ; WS/WD 模型模拟结果

中,枯水年 W3 处理、平水年 W3 处理和丰水年 W2 处理的水分利用效率最高,均值分别为 1.82、1.80 和 1.79 kg/m^3 ; AP/TP 模型模拟结果中,枯水年、平水年和丰水年 W1 处理的水分利用效率都最高,均值分别为 2.12、1.96 和 1.85 kg/m^3 (图 4)。

随灌水次数增加,SWC 和 AP/TP 模型模拟灌水利用效率呈下降趋势,WS/WD 模型模拟灌水利用效率呈先略微增加后下降趋势。SWC、WS/WD 和 AT/PT 模型模拟 W4 处理的灌水利用效率都最低,枯水年较 W1 处理分别低 26.8%、12.3%和 40.0% (图 4)。灌水量增加会导致灌水利用效率下降,灌水量越大,灌水利用效率越低。



注：箱体上下边缘分别代表 25% 和 75% 顺序的数值，箱体外上下边缘分别代表最大值和最小值，箱中横线和三角形分别代表中位数和平均值，箱体上下“x”代表离群值。86% 的产量分组数据、98% 的水分利用效率分组数据和 87% 的灌水利用效率分组数据均符合正态分布。W0 代表不灌水（雨养），W1 代表灌底墒水，W2 代表灌底墒水和拔节水，W3 代表灌底墒水、拔节水和开花水，W4 代表灌底墒水、起身水、孕穗水和开花水。

Note: The upper and lower edges of the box represent values in the order of 25% and 75% respectively; the upper and lower edges outside the box represent the maximum and minimum values respectively; the horizontal line and triangle in the box represent the median and average values respectively; “x” above and below the box represent the outlier. 86% of yield grouping data, 98% of water use efficiency grouping data and 87% of irrigation water use efficiency grouping data all conform to normal distribution. W0 represent no irrigation (rain fed); W1 represent irrigation before sowing; W2 represent irrigation before sowing and at jointing; W3 represent irrigation before sowing, at jointing and at anthesis; W4 represent irrigation before sowing, at upstanding, at booting and at anthesis.

图 4 不同降水年型下水分处理对冬小麦产量、水分利用效率、灌水利用效率的影响

Fig.4 Effects of water treatments on yield, water use efficiency, and irrigation water use efficiency of winter wheat under different precipitation year types

3 讨论

模型评估是其应用的第一步，本研究基于详细的水分试验数据结合文献资料对模型平台在吴桥县的适应性进行了评价，选取了 2008—2009、2013—2016 和 2017—2019 年小麦生长季的数据进行调参和验证，使模型平台能准确模拟冬小麦对不同水分处理和环境条件的响应。基于模型平台组成 3 种水分胁迫模拟模型，调参和

验证结果表明 3 种模型都能够有效地模拟冬小麦发育期、叶面积指数、地上部生物量、土壤含水率和产量，反映模型平台可用于集成多种算法，比较特定过程不同算法的差异以及分析冬小麦生长和产量形成对水分管理的响应。因暂未考虑水分胁迫对冬小麦发育期的影响，因此还不能反映不同水分处理发育期的差异，今后仍需考虑水分胁迫对发育期的影响。3 种水分胁迫模型叶面积的模拟误差在 26.6%~33.1% 之间，模型平台的叶面积指数算

法需要更多精细数据进行评估和改进。

在水分胁迫模型比较中, 由于 SWC 模型是通过根系深度分布的土层平均含水率计算水分胁迫, 而深层土壤含水率高且波动小, 因此 SWC 模型根系可吸收水分较多, 对水分胁迫有一定的低估, 但模拟结果更平滑, 这与 Jin 等的研究结果^[19]一致。AP/TP 模型模拟水分胁迫出现时间较早, 限制了叶面积指数的增长, 导致作物需水量和根系吸水量减少。在湿润条件下, AP/TP 模拟的水分胁迫较重, 而在干旱条件下模拟的水分胁迫较轻, 这与周丽丽等用 CERES-wheat 模型模拟的产量结果^[33]一致。基于蒸腾效率概念的 WS/WD 方法由于作物需水量受辐射以及气温影响, 模拟的水分胁迫波动较大。相较于 SWC 方法, WS/WD 方法模拟的水分胁迫更为严重, 主要由于作物需水较多导致。

华北地区小麦生产的主要限制因素是降水量低且年际变异大。近年来, 为了提高产量和水分利用效率, 该地区推行限水灌溉, 因此如何选择灌水策略是华北地区节水农业的重中之重。本研究中, SWC、WS/WD 和 AP/TP 模型模拟不同灌水条件下冬小麦产量的误差分别为 7.7%、5.4%和 7.1%, WS/WD 模型较优; WS/WD 和 SWC 模型模拟年际间水分胁迫因子与生长季降水量一致性高于 AP/TP 模型; 在灌水情景分析中, WS/WD 模型模拟的枯水年、平水年和丰水年水分利用效率最高的处理分别为 W3、W3 和 W2, SWC 模型分别为 W4、W3、W3, AP/TP 模型均为 W1, 其中 WS/WD 模型的模拟结果与吴桥实验站多年试验结果较为一致^[21]。综合产量模拟误差、水分胁迫因子与降水量的相关性和灌水情景分析表明, 在灌水制度管理方面, WS/WD 模型最优, SWC 模型次之, AP/TP 模型较差。

虽然 3 种水分胁迫模型都能在一定程度上模拟水分胁迫对小麦生长的影响, 但仍具有改进空间。AP/TP 模型表现较差, 要改进其模拟水分胁迫条件下的作物生长过程, 应从提高根系生长、土壤含水率和蒸散量的模拟精度入手, 并且关于根系吸水理论也有待深入研究^[12]。SWC 模型在小麦生长中后期存在低估水分胁迫的问题, 在今后的研究中需要对其改进。WS/WD 模型表现较好, 但本研究中蒸腾效率系数是采用固定值, 有研究表明, 将该系数表示为水分胁迫因子的函数可提高模型模拟精度^[34]。另外, 本研究没有考虑氮素胁迫的影响, 因此水分胁迫与温度胁迫、氮素胁迫对小麦生长发育影响的耦合效应还有待进一步研究。

4 结 论

参考国内外作物模型的理论和方法, 在单一平台集成国内外主流水分胁迫的 3 种算法, 采用 3 种算法组合途径构成了土壤含水率模型 (average Soil Water Content, SWC)、土壤水分供需比模型 (Water Supply to Demand ratio, WS/WD) 和相对蒸腾模型 (Actual to Potential Transpiration ratio, AT/PT), 并进行算法比较和灌水情景模拟, 得到结论如下:

1) 基于模型平台构建的 3 种水分胁迫模型能够较为

准确地模拟不同水分处理下冬小麦的生长发育和产量形成过程, 但模型对叶面积指数和发育期的模拟还有待改进。

2) 3 种水分胁迫算法都能对不同年型下的水分胁迫进行模拟, 虽然模拟的生长季内水分亏缺出现时间和严重程度不同, 但模拟的水分胁迫因子年际间变化一致。雨养条件下, 生长季降水量分别决定了 SWC、WS/WD 和 AT/PT 模型模拟的年际间水分胁迫因子变异的 56%、56%和 39%。

3) 3 种水分胁迫模型模拟灌溉对冬小麦产量、水分利用效率和灌水利用效率的影响既有一致性也有差异性。灌水对产量具有促进作用, 但灌水量增加会导致灌水利用效率下降。SWC、WS/WD 和 AT/PT 模型模拟枯水年灌四水 (底墒水+起身水+孕穗水+开花水) 处理的产量较雨养 (不灌水) 处理分别高 163%、132%和 92%, 灌四水的灌水利用效率较灌一水 (底墒水) 处理分别低 26.8%、12.3%和 40.0%。

4) 在吴桥县冬小麦水分管理决策中, WS/WD 模型最优, SWC 模型次之, AP/TP 模型较差。

[参 考 文 献]

- [1] 张英华, 王志敏, 周顺利, 等. 当前小麦研究的国际热点[J]. 科技导报, 2014, 32(13): 64-69.
Zhang Yinghua, Wang Zhimin, Zhou Shunli, et al. Current hotspots of international wheat research[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(13): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- [2] 孙爽, 杨晓光, 张镇涛, 等. 华北平原不同等级干旱对冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 69-78.
Sun Shuang, Yang Xiaoguang, Zhang Zhentao, et al. Impacts of different grades of drought on winter wheat yield in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(14): 69-78. (in Chinese with English abstract)
- [3] 周丽丽, 梁效贵, 高震, 等. 基于 CERES-Wheat 模型的沧州地区冬小麦需水量分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1320-1328.
Zhou Lili, Liang Xiaogui, Gao Zhen, et al. Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou area using CERES-Wheat model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1320-1328. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马雪晴, 胡琦, 王靖, 等. 基于 SPEI_Kc 的华北平原小麦玉米周年干旱特征分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 164-174.
Ma Xueqing, Hu Qi, Wang Jing, et al. Spatiotemporal variation characteristics of drought trend at annual of wheat-maize in the North China Plain based on SPEI_Kc index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 164-174. (in Chinese with English abstract)
- [5] Chaves M M, Pereira J S, Maroco J, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth[J]. Annals of Botany, 2002, 89(SI): 907-916.
- [6] Li K N, Yang X G, Liu Z J, et al. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59(59): 1-12.

- [7] 肖登攀,陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1539-1545.
Xiao Dengpan, Tao Fulu. Impact of climate change in 1981-2009 on winter wheat phenology in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1539-1545. (in Chinese with English abstract)
- [8] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. Nature, 2013, 500(7462): 287-295.
- [9] Toure A, Major D, Lindwall C. Comparison of five wheat simulation models in southern Alberta[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(1): 61-68.
- [10] Nouna B B, Katerji N, Mastrorilli M. Using the CERES-Maize model in a semi-arid mediterranean environment. evaluation of model performance[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(4): 309-322.
- [11] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 138-150. (in Chinese with English abstract)
- [12] 蒋腾聪, 樊子荷, 姚宁, 等. 不同水分胁迫情境下冬小麦生长发育的 RZWQM2 模拟[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 205-216.
Jiang Tengcong, Dou Zihe, Yao Ning, et al. Simulation of winter wheat growth under different scenarios of water stress with RZWQM2 model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 205-216. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘健, 姚宁, 吝海霞, 等. 冬小麦物候期对土壤水分胁迫的响应制与模拟[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(21): 115-124. (in Chinese with English abstract)
- [14] Saseendran S A, Ahuja L R, Ma L, et al. Current water deficit stress simulations in selected agricultural system models[A]// 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[M]. Madison: American Society of Agronomy, 2008: 1-38.
- [15] Bassu S, Brisson N, Durand J L, et al. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?[J]. Global Change Biology, 2014, 20(7): 2301-2320.
- [16] Eitzinger J, Trnka M, Hosch J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions[J]. Ecological Modelling, 2003, 171(3): 223-246.
- [17] Camargo G G T, Kemanian A R. Six crop models differ in their simulation of water uptake[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 220: 116-129.
- [18] Eitzinger J, Thaler S, Schmid E, et al. Sensitivities of crop models to extreme weather conditions during flowering period demonstrated for maize and winter wheat in Austria[J]. Journal of Agricultural Science, 2013, 151(6): 813-835.
- [19] Jin Z N, Zhuang Q L, Tan Z L, et al. Do maize models capture the impacts of heat and drought stresses on yield? Using algorithm ensembles to identify successful approaches[J]. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3112-3126.
- [20] Zhao Z G, Wang E L, Xue L H, et al. Accuracy of root modelling and its impact on simulated wheat yield and carbon cycling in soil[J]. Field Crops Research, 2014, 165(3): 99-110.
- [21] 徐学欣. 冬小麦节水高产灌溉模式的源-库性能及其协调机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
Xu Xuexin. Performance and Coordination of Source and Sink System in Winter Wheat under Water-Saving and High-Yielding Irrigation Patterns[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5): 38-44.
Wang Zhimin, Wang Pu, Li Xuhou, et al. 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. (in Chinese with English abstract)
- [23] 薛丽华. 不同水分条件对冬小麦根群形成与根-土系统活性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
Xue Lihua. Effect of Different Water Conditions on Root Cluster Formation and Root-Soil System Activity[D]. Beijing: China Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zheng B, Chenu K, Doherty A, et al. The APSIM-Wheat Module (7. 5 R3008)[EB/OL]. 2015-01-08[2020-01-05]. <https://www.apsim.info/wp-content/uploads/2019/09/WheatDocumentation.pdf>.
- [25] de Wit A J W, Boogaard H L, Suipit I, et al. System description of the WOFOST 7.2 cropping systems model[EB/OL]. 2020-01[2020-06-15]. <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-andmodels/WOFOST/Documentation-WOFOST.htm>.
- [26] Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005[EB/OL]. 2005-01[2020-01-05]. <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>.
- [27] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
Liu Yu, Pereira L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(5): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- [28] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [29] Ritchie J T, Otter S. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model[J]. ARS Wheat Yield Project, 1985(38): 159-175.

- [30] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 438-477.
- [31] Brisson N. An analytical solution for the estimation of the critical available soil water fraction for a single layer water balance model under growing crops[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1998, 2(2): 221-231.
- [32] 黄明霞, 王靖, 唐建昭, 等. 基于 APSIM 模型分析播期和水氮耦合对油菜产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 134-143.
Huang Mingxia, Wang Jing, Tang Jianzhao, et al. Analysis of interaction of sowing date, irrigation and nitrogen application on yield of oil sunflower based on APSIM model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(13): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- [33] 周丽丽, 刘克, 赵雪, 等. 华北地区不同灌溉条件下 CERES-Wheat 模型模拟效果的系统分析[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(6): 108-116.
Zhou Lili, Liu Ke, Zhao Xue, et al. Integrative analysis on the simulated results of CERES-Wheat model under different water regimes in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(6): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [34] Inman-Bamber N G, Jackson P A, Stokes C J, et al. Sugarcane for water-limited environments: Enhanced capability of the APSIM sugarcane model for assessing traits for transpiration efficiency and root water supply[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 112-113.

Comparison of three water stress algorithms based on the integration platform of wheat model algorithms

Chen Xianguan¹, Feng Liping^{1*}, Bai Huiqing¹, Yu Weidong²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Drought has posed an ever-increasing impact on agricultural production in recent years. A crop model has widely been an effective tool to explore the effects of drought on agriculture. Accurately simulating water stress in a crop model is a key step to assess the effect of drought impact on crop growth and development in field. In this study, three algorithms of water stress were integrated into a standard platform, where three kinds of water stress models were composed of: average Soil Water Content (SWC), Water Supply to Demand ratio model (WS/WD), and Actual to Potential Transpiration ratio model (AP/TP). The parameters of models were calibrated and verified using field observation data in the irrigation experiment from 2017 to 2019 in Wuqiao, Hebei Province, and literature data of irrigation experiment from 2008 to 2009 and 2013 to 2016. Five irrigation scenarios were designed, including rainfed, one irrigation (75 mm), two irrigations (150 mm), three irrigations (225 mm), and four irrigations (300 mm). The results showed that simulated values fully represented the measured ones with a reasonable error range under different water stress models. Therefore, the normalized root mean squared error (NRMSE) values of root depth, root biomass, anthesis, and maturity were 10.2%, 17.1%, 1.2%, and 1.0%, respectively. The NRMSE values of leaf area index, above-ground biomass, soil water content, and yield under three models ranged from 26.6%-33.1%, 14.0%-16.5%, 5.1%-8.8%, and 5.4%-7.7%, respectively. There was also a difference in the occurrence time and severity of water deficit that was simulated by three water stress models during the wheat growing season. Nevertheless, there was a consistent trend of interannual water stress factors. Furthermore, the factors of water stress simulated by the SWC and the WS/WD model was relatively higher than those by the AP/TP model. The water stress simulated by the three models in wet years was lighter than that in dry years. There was an earlier occurrence of drought that was predicted by the AP/TP model, whereas, the latter by the WS/WD and SWC model. Precipitation during the growing season dominated the variations of water stress factors under rain-fed conditions, which were 56%, 56%, and 39% in the SWC, WS/WD and AT/PT models, respectively. In addition, there were different effects of three water stress models on the winter wheat yield, water use efficiency, and irrigation water use efficiency. Specifically, the grain yield improved greatly, while the water use efficiency increased first and then decreased, whereas, the irrigation water use efficiency decreased under three models, as the irrigation times increased. There was obviously distinguished from the yield, water use efficiency, and irrigation water use efficiency in the three models. Particularly, the trends of irrigation water use efficiency were different under various water treatments. The SWC, WS/WD, and AT/PT models simulated that the yields in four irrigation treatments were 163%, 132% and 92% higher than those of rain-fed treatment, respectively, and the irrigated water use efficiencies under four irrigation treatments were 26.8%, 12.3%, and 40.0% lower than those under one irrigation. The highest water use efficiency simulated by WS/WD was found in the three irrigation treatments in dry years, three irrigation treatments in normal years, and two irrigation treatments in wet years. Correspondingly, the WS/WD model performed the best, while the SWC model was the second, and the AP/TP model was the third, particularly in the water decision-making of winter wheat in Wuqiao County. Consequently, it is vital to fully consider the differences in three algorithms on the wheat growth and development under different water stress, thereby to improving the reliability of crop models on drought impact assessment and water management of winter wheat.

Keywords: crops; parameterization; water management; precipitation year types; WMAIP; water stress; algorithm comparison