

网络出版时间:2024-11-19

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20241118.1149.005

基于 APSIM 模型的不同降水年型下春小麦 水氮管理模式优化研究

伍露¹,程陈²,杨霏云¹,樊栋樑¹,罗蒋梅¹,韩佳芮¹,王天舒¹,郭尔静¹

(1. 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081;2. 丽水学院生态学院,浙江丽水 323000)

摘要:为优化不同降水年型下春小麦高产稳产和高效利用水氮资源的管理决策方案,利用 2009—2012 年内蒙古自治区额尔古纳市上库力农场试验站与拉布大林农场试验站春小麦(内麦 19)的试验观测资料,确定 APSIM-wheat 模型中小麦生长发育关键参数;基于校准后的 APSIM-wheat 模型模拟分析 1967—2017 年雨养条件下春小麦生长发育过程,并依据降水量划分了 3 种降水年型(干旱、平水和湿润年型),根据土壤水分亏缺指数(soil water deficit on photosynthesis, SWD_{ef})确定最优水分管理时期;设计 8 个灌溉量梯度(15、30、45、60、90、120、150 和 180 mm)和 13 个施 N 量梯度(30、45、60、75、90、105、120、150、180、210、240、270 和 300 $kg \cdot hm^{-2}$)情景模式,结合水氮管理决策的遴选关键指标[水分利用效率(water use efficiency, WUE)、氮肥利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)和产量],探究不同气候年型下最优春小麦水氮管理模式。结果表明:(1)校准后的 APSIM-wheat 模型春小麦发育期模块(出苗期、抽穗期和成熟期)模拟值与观测值的均方根误差(root mean square error, RMSE)在 1.17~3.64 d 范围内,归一化均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)在 0.82%~1.90% 范围内;产量模块模拟值与观测值的 RMSE 为 371.50 $kg \cdot hm^{-2}$, NRMSE 为 8.54%,说明 APSIM-wheat 模型可以较好地反映不同降水年型下小麦的动态生长发育过程。(2)雨养条件下春小麦分蘖期—拔节期、拔节期—抽穗期和抽穗期—开花期的 SWD_{ef} 较低,且在生育期内仅灌溉一次的前提下,拔节期灌溉可以减轻干旱胁迫并显著提高产量。(3)干旱、平水和湿润年型春小麦拔节期最优水氮管理模式分别为灌溉量 60 mm 和施氮量 105 $kg \cdot hm^{-2}$ 、灌溉量 60 mm 和施氮量 120 $kg \cdot hm^{-2}$ 、灌溉量 30 mm 和施氮量 150 $kg \cdot hm^{-2}$,其产量分别为 4 810.96±551.43、5 378.06±768.86 和 6 421.33±454.09 $kg \cdot hm^{-2}$ 。

关键词: APSIM-wheat 模型;气候年型;春小麦;产量;水分利用效率;氮素利用效率;管理模式

中图分类号:S512.1;S314

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)01-0103-09

Optimization of Water and Nitrogen Management Mode for Spring Wheat under Different Precipitation Year Types Based on APSIM Model

WU Lu¹, CHENG Chen², YANG Feiyun¹, FAN Dongliang¹, LUO Jiangmei¹,

Han Jiarui¹, WANG Tianshu¹, GUO Erjing¹

(1. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China;

2. College of Ecology, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China)

Abstract: In order to optimize the management decision-making scheme for high and stable yield of spring wheat and efficient utilization of water and nitrogen resources under different precipitation year types, the key parameters for wheat growth and development in the APSIM-wheat model based on the experimental data of spring wheat (Neimai 19) at the Shangkulini Farm Experimental Station and the Labudalin Farm Experimental Station in Eerguna City of Inner Mongolia Autonomous Region from 2009 to 2012 were determined. Using the calibrated APSIM-wheat model, the growth and develop-

收稿日期:2023-11-01 修回日期:2024-01-23

基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J053);国家自然科学基金项目(32101294)

第一作者 E-mail: duyulu5566@163.com(伍露)

通讯作者 E-mail: yangfy@cma.gov.cn(杨霏云)

ment process of spring wheat under rain-fed conditions from 1967 to 2017 was simulated and analyzed. Three precipitation types(dry, normal, and wet) were identified based on precipitation, and the optimal water management periods were determined using the soil water deficit on photosynthesis (SWD_{ef}). Scenario models were designed with eight irrigation gradients(15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, and 180mm) and thirteen N fertilization gradients(30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 150, 180, 210, 240, 270, and 300 $kg \cdot hm^{-2}$), and combined with key indicators for water and nitrogen management decision-making(water use efficiency, nitrogen use efficiency, and yield), the optimal water and nitrogen management modes for spring wheat under different precipitation types were explored. The results showed that:(1)The root mean square error(RMSE) of the simulated values of the spring wheat development stage module(emergence, heading, and maturation) in the calibrated APSIM-wheat model ranged from 1.17 to 3.64 days, and the normalized root mean square error(NRMSE) ranged from 0.82% to 1.90%. The RMSE and NRMSE between the simulated and observed values of the yield module were 371.50 $kg \cdot hm^{-2}$ and 8.54%, respectively, indicating that the APSIM-wheat model can well reflect the dynamic growth and development process of wheat under different precipitation types.(2)The SWD_{ef} during spring wheat tillering stage to jointing stage, jointing stage to heading stage, and heading stage to anthesis stages under rain-fed conditions were relatively lower, and under the premise of only one irrigation during the growth stage, irrigation during the jointing stage could alleviate drought stress and significantly improve yield.(3)The optimal water and nitrogen management modes during the jointing stage for spring wheat under wet, normal, and dry precipitation types were irrigation of 60 mm and N fertilization of 105 $kg \cdot hm^{-2}$, irrigation of 60 mm and N fertilization of 120 $kg \cdot hm^{-2}$, and irrigation of 30 mm and N fertilization of 150 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively. The corresponding yields were $4\ 810.96 \pm 551.43\ kg \cdot hm^{-2}$, $5\ 378.06 \pm 768.86\ kg \cdot hm^{-2}$, and $6\ 421.33 \pm 454.09\ kg \cdot hm^{-2}$.

Keywords: APSIM-wheat model; Climate year types; Spring wheat; Yield; Water use efficiency; Nitrogen use efficiency; Management mode

内蒙古干旱引水灌区是中国春小麦主产区之一^[1],该区灌溉系统落后、灌排工程不配套和用水管理措施不当等因素导致农业水资源利用效率较低^[2-3],加上全球气候变暖的影响,春小麦需水关键期得不到有效灌溉,致使小麦关键发育阶段(拔节期—开花期)时间缩短,从而降低了穗粒数和产量。合理的水氮管理模式可以有效实现农业资源高效利用和小麦增产稳产^[4-5],鉴于此,探讨水肥一体化的最优管理时期和管理模式尤为重要。

APSIM 模型克服了传统试验时空局限性、研究对象单一性、试验周期长等缺点,通过“插—拔”式结构构建作物生长、土壤水分和土壤氮素模块,方便用户通过情景设计方式优化水氮管理模式^[6-7]。在优化灌溉管理模式方面,APSIM 模型可评估作物不同发育阶段灌溉分配对产量、生物量和水分利用效率的影响^[8];也可分析作物不同生长阶段水分亏缺指数,模拟不同灌溉制度情况下作物产量、水分利用效率^[9]。在优化施肥管理

模式方面,APSIM 模型可模拟作物产量、生物量和生育期土壤水分含量,得出最佳施肥模式^[10]。通过对比土壤类型和潜在小麦产量,可利用 APSIM 模型确定最优土壤氮管理策略^[11]。在优化水肥耦合管理模式方面,通过设定降水和施氮梯度,明确水氮调控对春小麦产量的影响,利用 APSIM 模型确定自然降水条件下小麦产量达到最佳所需含氮量^[12]。Chaki 等^[13]综合评估了 APSIM 模型在不同耕作方式、栽培模式、残留物、氮含量和灌溉情景下的响应,明确了东部恒河平原水稻—小麦种植系统的保护性栽培管理模式。Li 等^[14]利用 APSIM 模型提高了华北平原小麦—玉米双作系统水氮管理的潜力,并将其应用于模拟作物产量和 N_2O 的排放。虽然 APSIM 模型在水氮管理模式研究方面已取得突出成果,但针对降水年际波动较大地区各种降水年型条件下旱地小麦水氮管理模式的研究还少见报道。

本研究利用 2009—2012 年内蒙古自治区额

尔古纳市上库力农场试验站与拉布大林农场试验站春小麦的试验观测资料,确定 APSIM-wheat 模型中小麦生长发育关键参数,基于模型模拟的春小麦生长季内多年(1967—2017)土壤水分亏缺指数(soil water deficit on photosynthesis, SWD_{ef})确定最优水肥管理时期,将气象数据划分为干旱、正常和湿润 3 种年型,结合水肥利用效率和产量等遴选关键指标,最终确定不同气候年型下春小麦最优水氮管理模式,为春小麦产量风险管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

收集 2009—2012 年内蒙古自治区额尔古纳市(120.19°E, 50.24°N, 海拔 614 m)上库力农场试验站(T1)与拉布大林农场试验站(T2)春小麦试验数据资料,T1 前茬为夏翻地,T2 前茬为油菜地。供试小麦品种为内麦 19,生育期约为 97 d,平均籽粒产量在 3 000~5 500 kg·hm⁻² 之间,播种期为 5 月上旬,T1 比 T2 站点播种期提前 2~5 d,其中 T1 生长季内无灌溉(雨养模式),常规施肥模式为种肥(二铵+尿素),年均折合纯氮量为 146 kg·hm⁻²,T2 常规模式为每生长季灌溉 1 次(60~80 mm),常规施肥模式与 T1 一致,2009—2011 年平均折合纯氮量为 169 kg·hm⁻²,而 2012 年年均折合纯氮量为 285 kg·hm⁻²。试验小区面积为 200 m²,土壤类型为黑钙土(pH 为 7.52~8.11),耕层有机质含量为 22.3 g·kg⁻¹,全氮含量为 1.78 g·kg⁻¹。本研究收集的 1967—2017 年(共计 51 年)气象数据、小麦发育期数据(出苗期、抽穗期和成熟期)和产量数据用于模型校准,观测标准参照《农业气象观

测规范》^[15],其中气象数据来自中国气象局官方网站(<https://www.cma.gov.cn/>),包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时间、风速和相对湿度等。

利用 2009—2012 年 2 个试验站点的基础土壤参数(表 1)和 APSIM-wheat 模型 V7.9 定量模拟小麦的生长发育过程,调用了模型的系统控制模块、管理模块、作物生长模块、气候模块和土壤模块^[12,16]。模型参数调整顺序依次为发育期、辐射利用效率、最大灌浆速率和最大籽粒重等模型参数,模拟目标使产量模拟的误差最小,由此确定模型中品种参数(表 2)。

1.2 土壤水分亏缺指数

采用与春小麦光合作用和干物质积累分配相关的参数量化不同发育阶段的土壤水分亏缺指数^[17],进一步模拟比较 1967—2017 年雨养条件下春小麦各发育阶段(播种期—分蘖期、分蘖期—拔节期、拔节期—抽穗期、抽穗期—开花期、开花期—灌浆期和灌浆期—成熟期)的 SWD_{ef} ,通过比较不同发育阶段相同灌溉量下的产量差异,以明确关键灌溉发育阶段。相关指标计算公式如下:

$$SWD_{ef} = \sum_{d=1}^m \frac{SWD_{pd}}{m} \quad (1)$$

$$SWD_{pd} = \frac{SW_s}{SW_d} \quad (2)$$

$$SW_s = \sum_{i=1}^n (SW_i - ll_i) \cdot kl_i \quad (3)$$

$$kl_i = 0.027 + 0.001 \cdot clay_i \quad (4)$$

$$SW_d = Q_p \cdot \frac{VPD}{a_{CO_2} \cdot TE_{crop}} \quad (5)$$

$$Q_p = I \cdot RUE \cdot f_s \cdot f_c \quad (6)$$

式中, m 为发育期天数(d); SWD_{pd} 为第 d 天的土壤水分亏缺模拟值(mm·mm⁻¹); SW_s 为根

表 1 APSIM-wheat 模型基础土壤参数

Table 1 Basic soil parameters of APSIM-wheat model

土层深度 Soil layer/cm	田间持水量 Field capacity/ (mm·mm ⁻¹)	作物水分下限 Plant moisture lower limit/(mm·mm ⁻¹)	饱和含水量 Saturated water content/(mm·mm ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	风干土 Airdried soil/ (mm·mm ⁻¹)	土壤导水程度 Soil hydraulic conductivity ability
0~5	0.255	0.113	0.395	1.27	0.06	0.5
5~15	0.266	0.124	0.398	1.29	0.06	0.5
15~30	0.280	0.138	0.404	1.32	0.10	0.5
30~60	0.293	0.151	0.409	1.37	0.151	0.5
60~100	0.291	0.151	0.408	1.43	0.151	0.5
100~200	0.279	0.141	0.403	1.49	0.141	0.5

表 2 APSIM-wheat 模型关键参数及具体数值
Table 2 Key parameters and specific values of APSIM-wheat model

参数名称 Parameter	简称 Abbreviation	单位 Unit	参数值 Parameter value
春化系数 Vernalization coefficient	ver_sens	—	1.5
光周期系数 Photoperiod coefficient	photo_sens	—	3
出苗—青年结束积温 Emergence to end of juvenile stage accumulated temperature	tt_end_of juvenile	°C · d	320
青年结束—小花分化积温 End of juvenile to floral differentiation stage accumulated temperature	tt_floral initiation	°C · d	395
灌浆阶段积温 Grouting stage accumulated temperature	tt_start_grain_fill	°C · d	595
辐射利用效率 Radiation use efficiency	RUE	g · MJ ⁻¹	1.74
潜在灌浆速率 Potential grouting rate	potential_grain_filling rate	g · d ⁻¹	0.002
最大籽粒重 Maximum grain weight	max_grain_size	g	0.041

区供水量 (mm); SW_d 为第 d 天作物需水量 (mm); n 为作物根系到达的土层; SW_i 为第 i 层土壤水分含量 (mm); ll_i 为第 i 层凋萎湿度下的土壤水分含量 (mm); kl_i 为从第 i 层吸收的可用土壤水分的分数, 是土壤—根系互作的经验参数, l 是根密度 ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$), k 是土壤扩散系数 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$), 对于高根密度的 0~20 cm 土层的 kl 值为 0.1, 20~120 cm 土层的 kl 值由公式 (4) 计算; clay_i 为第 i 层黏土含量; Q_p 为每日潜在干物质生产量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); VPD 为饱和水汽压差 (hPa); TE_{crop} 为地上生物量蒸腾效率系数, 设为 $0.006 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$; a_{CO_2} 为大气 CO_2 浓度蒸腾效率调节系数, 从 350 ppm 时 (值为 1) 线性增加到 700 ppm 时 (值为 1.37); I 为截取辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); RUE 为辐射利用效率 ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$); f_s 为温度因子和氮因子的最小值; f_c 为 CO_2 因子, 由 CO_2 浓度和日均温计算得出。

1.3 降水年型划分

本研究区域年度降水波动较大 [变异系数 (coefficient of variation, CV) > 30%], 为方便分析不同降水年型下的最优灌溉管理模式, 本研究根据春小麦生长季 (5—8 月) 的降水量数据, 划分成干旱年、平水年和湿润年。

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{51} y_i \quad (7)$$

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中, \bar{y} 为生长季内 51 年的平均降水量, 为

270.96 mm; y_i 为第 i 年的生长季降水量 (mm)。当 $y_i < \bar{y} - \text{SD}$ 时, 定义为干旱年; 当 $y_i > \bar{y} + \text{SD}$ 时, 定义为湿润年; 当 $\bar{y} - \text{SD} < y_i < \bar{y} + \text{SD}$, 定义为平水年, 其中 SD 为 51 年生长季平均降水量的标准差, 为 84.30 mm。

1.4 情景设计

生产中灌溉次数与生产成本直接相关, 本研究为了提高产量的同时减少生产成本, 参考区域实际灌溉管理决策, 故生长季内仅进行一次灌溉。模型灌溉模式设置 8 个灌溉量梯度: 15、30、45、60、90、120、150 和 180 mm (每个降水年型下模拟 64 次), 通过模拟比较确定不同降水年型下的灌溉水利用效率 (water use efficiency, WUE), 确定各降水年型下的最优灌溉量。生产中氮肥施用较少会影响产量的形成, 而过量的施用氮肥则会造成资源浪费, 因此在最优灌溉量的基础上, 进一步设置 13 个施氮量梯度: 30、45、60、75、90、105、120、150、180、210、240、270 和 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。比较不同施氮量下的氮素利用效率 (nitrogen use efficiency, NUE) 和产量变化, 确定不同降水年型下春小麦最优水氮管理模式。

$$\text{WUE} = \frac{Y_i - Y_r}{I} \quad (9)$$

$$\text{NUE} = \frac{Y_{\text{AF}} - Y_{\text{NF}}}{F} \quad (10)$$

式中, Y_i 为灌溉方式下小麦产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_r 为雨养方式下小麦产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); I 为灌溉量 (mm)。 Y_{AF} 为施氮肥条件下小麦产

量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_{NF} 为不施氮肥条件下小麦产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); F 为氮肥施用量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.5 数据处理

采用 SPSS 26 进行数据分析显著性,若数据符合正态分布,则采用 Duncan 方法比较不同处理的差异显著性;若数据不符合正态分布,则采用非参数检验(卡鲁斯卡尔-沃里斯)进行不同因素显著性分析。利用 Origin 2021 软件进行作图。统计数据主要包括均值(\bar{X})、SD、线性回归系数(α)、截距(β)、决定系数(R^2)、均方根误差(root mean square error, RMSE)^[18-19]、归一化均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)^[18-19]和符合度指数(D)^[18-19]。

2 模型检验与结果分析

2.1 APSIM-wheat 模型验证结果

利用相互独立的 2009—2012 年试验观测数据对模型进行校准,由表 3 可知,校准后的 APSIM-wheat 模型春小麦发育期模块(出苗期、抽穗期和成熟期)模拟值与观测值的 R^2 在 0.69%~0.97 范围内, RMSE 在 1.17~3.64 d 范围内, NRMSE 在 0.82%~1.90% 范围内,符合度指数(D)值在 0.86%~0.98 范围内;产量模块模拟值与观测值的 R^2 为 0.91, RMSE 为 $371.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,

NRMSE 为 8.54%, D 值为 0.95,说明 APSIM-wheat 模型可以较好反映不同降水年型下春小麦的动态生长发育过程,可通过结合情景设计的模拟确定不同降水年型下春小麦最优水氮管理模式。

2.2 春小麦最优水肥管理时期的确定

根据春小麦生长季降水量数据,将 1967—2017 年划分为 8 个干旱年、8 个湿润年和 35 个平水年,为了保证 3 种降水年型的年数一致,筛选出 $\bar{y} \pm 10 \text{ mm}$ 的年份作为平水年,具体降水年型划分见表 4。

由图 1 可知,在雨养条件下,春小麦不同生长发育阶段进行灌溉会影响干旱胁迫程度,由图 1(a)得出,土壤水分亏缺指数大小依次为灌浆期—成熟期(0.84 ± 0.16)、播种期—分蘖期(0.83 ± 0.06)、开花—灌浆期(0.73 ± 0.19)、抽穗期—开花期(0.70 ± 0.21)、拔节期—抽穗期(0.59 ± 0.18)和分蘖期—拔节期(0.58 ± 0.18),分蘖期—拔节期、拔节期—抽穗期和抽穗期—开花期的土壤水分亏缺指数显著低于其他发育阶段。进一步探究不同降水年型中分蘖期、拔节期和抽穗期进行灌溉对小麦产量的影响,由图 1(b)得出,干旱年在春小麦拔节期进行灌溉的产量($5279.86 \pm 773.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)显著高于分蘖期($4904.46 \pm 638.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和抽穗期($4655.71 \pm 872.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

表 3 APSIM-wheat 模型春小麦生长发育模块模拟值与观测值比较验证统计量
Table 3 Comparison and verification statistics of the simulated and observed values of spring wheat growth and development module of APSIM-wheat model

项目 Item	观测值±标准差 $\bar{X}_{\text{obs}} \pm \text{SD}$	模拟值±标准差 $\bar{X}_{\text{sim}} \pm \text{SD}$	样本数 N	斜率 α	截距 β	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	归一化均方根误差 NRMSE/%	符合度 指数 D
出苗期 Emergence period/(DOY)	142.63±4.41	142.50±5.29		0.82	25.93	0.97	1.17	0.82	0.98
抽穗期 Heading period/(DOY)	185.13±5.67	187.00±4.57	8	1.03	-7.00	0.69	3.52	1.90	0.86
成熟期 Maturation period/(DOY)	229.75±8.61	230.75±6.56		1.20	-46.92	0.83	3.64	1.58	0.93
产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	4350.90±780.52	4121.38±955.92	8	0.78	1136.29	0.91	371.50	8.54	0.95

DOY 为一年中的日序,定义每年的 1 月 1 日为 1。

DOY represent the day sequence of a year, with January 1st of each year defined as 1.

表 4 降水年型的划分

Table 4 Classification of precipitation year type

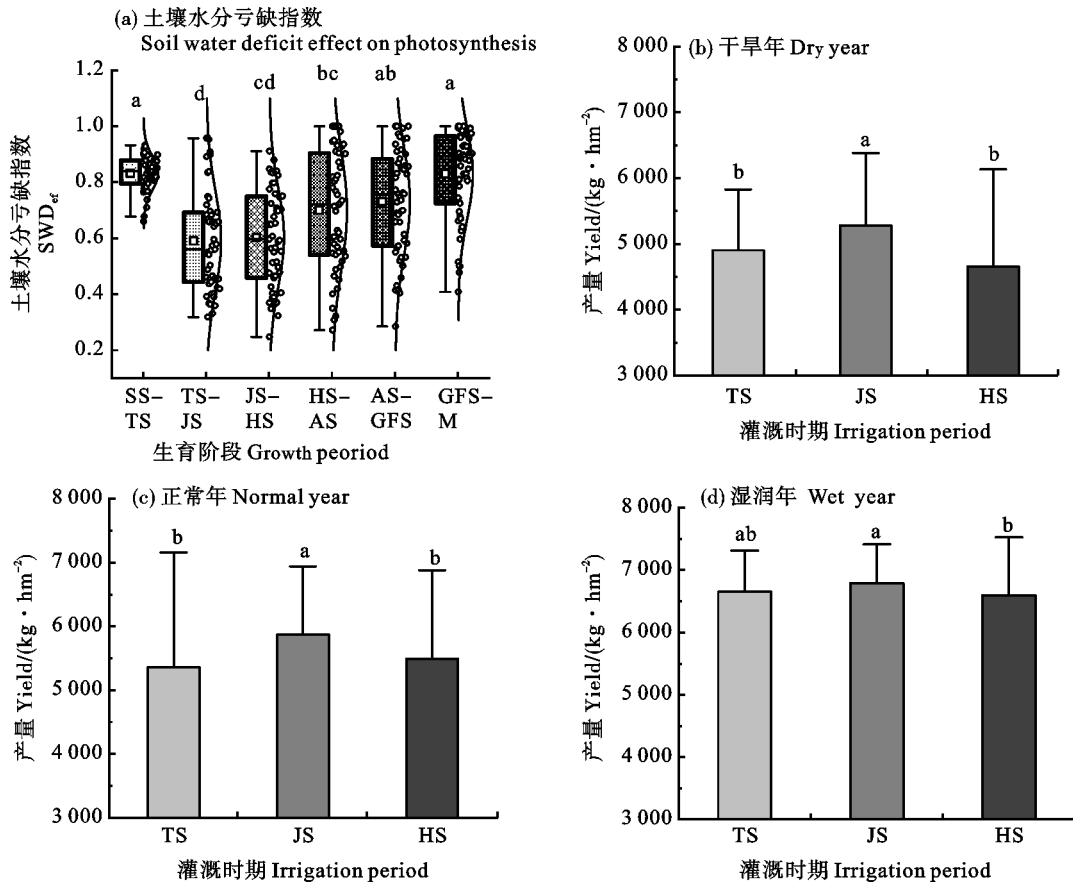
降水年型 Precipitation year type	生育期平均降水量 Average precipitation during the growth stage/mm	年份 Year
湿润年 Wet year	503.9	1977,1984,1988,1989,1990,1996,2013,2014
平水年 Normal year	366.7	1967,1969,1979,1983,1993,2003,2008,2009
干旱年 Dry year	252.3	1968,1975,1994,1995,2000,2001,2004,2007

灌溉;在平水年,拔节期($5\ 872.55 \pm 835.26\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)灌溉春小麦产量显著高于分蘖期($5\ 356.57 \pm 933.97\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和抽穗期($5\ 495.68 \pm 903.86\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)灌溉;在湿润年,拔节期($6\ 790.10 \pm 445.33\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和分蘖期($6\ 652.80 \pm 469.24\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)灌溉春小麦产量显著高于抽穗期($6\ 596.73 \pm 513.14\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)灌溉。故在生长季内仅灌溉一次的前提下,不论何种降水年型,在拔节期进行灌溉不仅可以减缓干旱胁迫程度,还可以显著提高小麦产量。由此,进行不同情景模式下的小麦水肥利用效率和产量的差异分析,筛选出不同降水年型下春小麦最优水氮管理模式。

2.3 不同降水年型下水肥利用效率和产量的差异
由图 2 可知,3 种降水年型条件下,拔节期灌

溉量会影响 WUE, WUE 随灌溉量的增加而降低。在干旱年、平水年、湿润年,春小麦拔节期灌溉量最少分别应设置为 60、60 和 30 mm,其 WUE 分别为 22.95 ± 3.58 、 19.87 ± 9.27 和 $10.20 \pm 3.63\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。随着降水的增多,应减少春小麦拔节期的灌溉量。

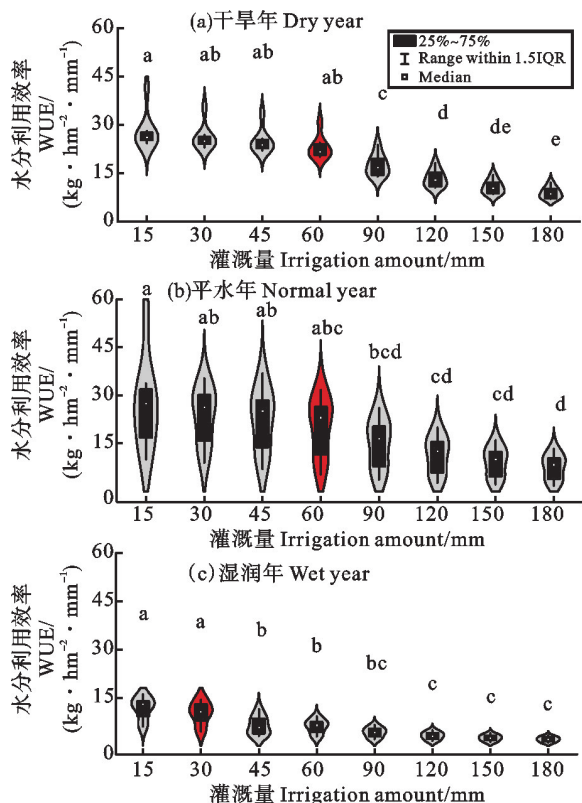
最优拔节期灌溉量确定后要进行拔节期施肥量的确定,由图 3 可知,3 种降水年型条件下, NUE 随拔节期施肥量的增加而减少。在干旱年、平水年、湿润年春小麦拔节期氮肥施用量最多分别设置为 105 、 120 和 $150\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其 NUE 分别为 35.68 ± 4.14 、 36.94 ± 6.91 和 $35.67 \pm 4.45\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着降水的增多,应增加拔节期施氮量。



SS: 播种期; TS: 分蘖期; JS: 拔节期; HS: 抽穗期; AS: 开花期; GFS: 灌浆期; M: 成熟期。箱线图分别代表 1%、25%、75% 和 99% 分位数, 横线代表平均值, 空心正方形代表中值, 空心圆圈代表原始数据。不同字母表示在不同时期在 0.05 水平差异显著。下同。

SS: Seeding stage; TS: Tillering stage; JS: Jointing stage; HS: Heading stage; AS: Anthesis stage; GFS: Grain filling stage; M: Maturity. The box plots show the 1%, 25%, 75%, and 99% quantile, respectively. The line in the middle represents the average value; the hollow black square in the box represents the median value. The hollow circle represents the raw data. Different letters indicate significant differences among different stages at 0.05 level. The same in figures 2-4.

图 1 春小麦不同生育时期 SWD_{et} 及各降水年型下不同时期灌溉对产量的影响
Fig. 1 SWD_{et} of spring wheat on different growing stage and the effect of irrigation at different periods on yield under varied precipitation year types



灰色图代表数据分布, 黑色箱线图分别代表 1%、25%、75% 和 99% 分位数, 白色正方形代表中值。红色小提琴图代表最优处理。

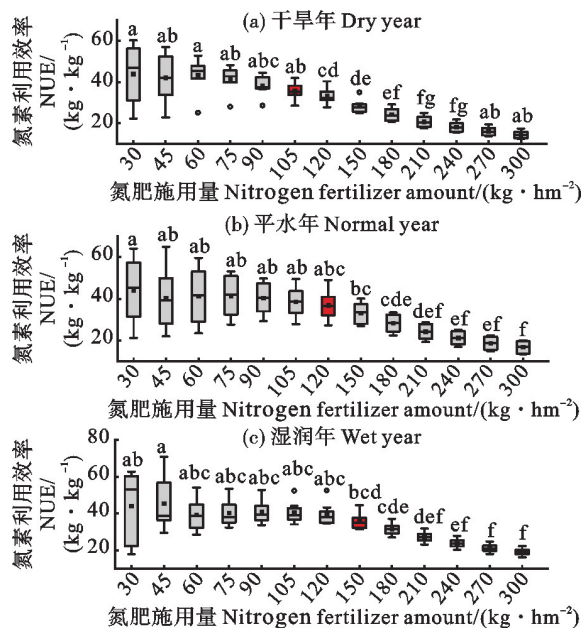
The gray figures indicate data distribution; the black box plots show the 1%, 25%, 75%, and 99% quantile, respectively. The white squares in the box represent the median value. The violin figures in red color indicate the optimum treatment.

图 2 不同降水年型下春小麦拔节期不同灌水量对 WUE 的影响

Fig. 2 Impact of different irrigation amount at jointing stage of spring wheat on WUE under different precipitation year types

在进行不同降水年型下拔节期水肥管理的 WUE 和 NUE 差异分析的结果基础上, 进一步筛选最优水肥一体化模式。随着降水量的增加, 应减少春小麦拔节期的灌水量并增加施氮量。在保证一水灌溉的前提下, 三种年型不施肥小麦产量在 $1\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右, 随着施肥量增加, 产量先增加随后趋于平稳(图 4)。在干旱年, 拔节期施 N 量最多设置为 $105\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量增加至 $4\ 810.96 \pm 551.43\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (产量约提高 350%); 在平水年型中, 拔节期施 N 量最多设置为 $120\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量增加至 $5\ 378.06 \pm 768.86\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (产量约提高 470%); 在湿润年, 拔节期施 N 量最多设置为 $150\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量增加至 $6\ 421.33 \pm 454.09\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (产量约提高 450%)。

综上所述, 在不降低 WUE、NUE 和产量的前提下, 干旱年型下春小麦最优水氮管理模式为



箱线图分别代表 1%、25%、75% 和 99% 分为数, 横线代表平均值, 正方形代表中值。

The box plots show the 1%, 25%, 75%, and 99% quantile, respectively. The line in the middle represents the average value; The black square in the box represents the median value.

图 3 不同降水年型春小麦拔节期施肥量的 NUE 差异分析

Fig. 3 Differential analysis of the impact of fertilization amount at jointing stage of spring wheat on NUE under different precipitation year types

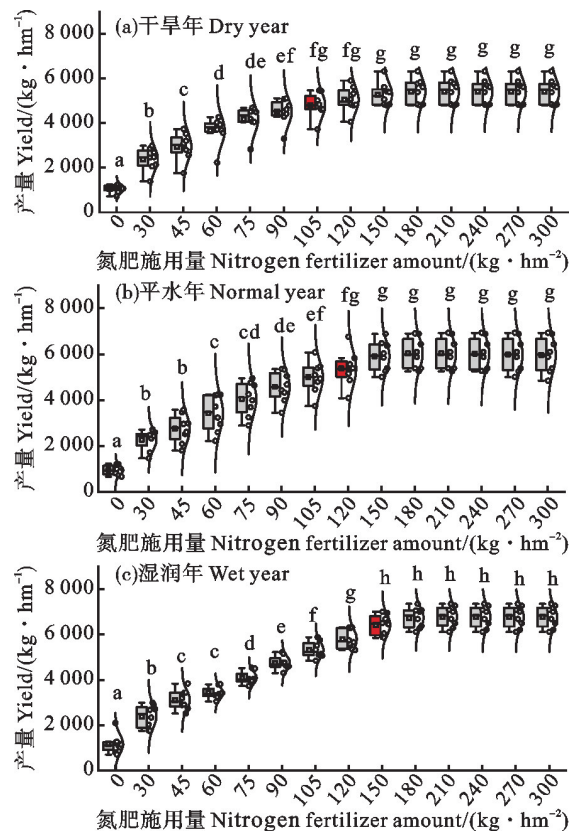


图 4 不同降水年型下春小麦水肥一体化与产量的差异分析

Fig. 4 Analysis on the integration of water and fertilizer and the difference in yield of spring wheat under different precipitation year types

拔节期灌溉量为 60 mm, 施 N 量为 105 kg · hm⁻²; 正常年型下春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 60 mm, 施 N 量为 120 kg · hm⁻²; 湿润年型下春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 60 mm, 施 N 量为 150 kg · hm⁻²。

3 讨论

本研究春小麦发育期模块模拟值与观测值的 NRMSE 在 0.82%~1.90% 范围内, 产量模块的 NRMSE 为 8.54%, 这与前人通过调参验证进行模型精度评估的研究结果相近^[20,21], 说明 AP-SIM-wheat 模型可以较好反映不同气候年型下小麦的动态生长发育过程, 进而可通过结合情景设计的模拟, 以期确定不同降水年型下春小麦最优水氮管理模式。

水分和氮肥是小麦生长最主要的两大限制因子, 且灌溉量和施氮量两者之间既相互协同又相互制约^[5,12]。本研究确定不同降水年型下旱地小麦最优水氮管理时期, 依据降水量将气象数据划分为 3 种降水年型, 结合 SWD_{ef} 确定最优灌溉管理时期, 结果表明, 小麦分蘖期—开花期是 SWD_{ef} 较低的发育阶段, 说明此阶段干旱胁迫较大, 这与前人研究结果一致^[9,23-24]。为了明确不同降水年型下最佳灌溉发育阶段, 本研究细化分蘖期—开花期发育阶段, 同时降低灌溉生产成本提高经济效益, 得出在生长季内仅灌溉一次的前提下, 最优水氮管理时期为拔节期。将水肥利用效率和产量作为遴选标准, 发现干旱年型春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 60 mm, 施 N 量为 105 kg · hm⁻²; 正常年型春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 60 mm, 施 N 量为 120 kg · hm⁻²; 湿润年型春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 30 mm, 施 N 量为 150 kg · hm⁻², 3 种气候年型中湿润年型的产量最高。因此, 限制小麦产量因素的影响程度为水分大于氮肥, 故水分限制条件下提高施肥量并不能增加产量, 这可能与肥料浓度过高导致的“烧苗”、作物抗寒、抗旱、抗倒伏能力降低以及病虫害加剧等因素有关, 同时随着降水量的增加, 应减少灌溉量并增加施氮量, 这与高雪慧等^[25]研究结果一致。

在模型研究内容深度上, 需要利用 APSIM 模型增加对品种、播期、种植密度、水肥等^[28-30]管理措施的动态精准调控, 以期提高模型的应用水平。在模型研究结果精度上, 在应用 APSIM 模

型前, 要进行调参校正, 需要考虑模型参数、多参同效、生态环境等^[31,32]因素对模型精度的影响。

4 结论

在生育期内仅灌溉一次的前提下, 干旱年型春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 60 mm 且施氮量为 105 kg · hm⁻², 其产量为 4 810.96 ± 551.43 kg · hm⁻²; 平水年型春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 60 mm 且施氮量为 120 kg · hm⁻², 其产量为 5 378.06 ± 768.86 kg · hm⁻²; 湿润年型春小麦最优水氮管理模式为拔节期灌溉量为 30 mm 且施氮量为 150 kg · hm⁻², 其产量为 6 421.33 ± 454.09 kg · hm⁻²。

参考文献:

- [1] 贾德彬, 刘艳伟, 张永平, 等. 内蒙古河套灌区春小麦高效用水灌溉制度研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 174.
JIA D B, LIU Y W, ZHANG Y P, *et al.* The study of high efficient irrigation schedule of spring wheat in Hetao Irrigation Region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(5): 174.
- [2] YU R H, LIU T X, XU Y P, *et al.* Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1952.
- [3] 郝芳华, 孙铭泽, 张璇, 等. 河套灌区土壤水和地下水动态变化及水平衡研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 771.
HAO F H, SUN M Z, ZHANG X, *et al.* Dynamic of soil water, groundwater and water balance in Hetao Irrigation Area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3): 771.
- [4] SALEM G S A, KAZAMA S, SHAHID S, *et al.* Impacts of climate change on groundwater level and irrigation cost in a groundwater dependent irrigated region [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 33.
- [5] 张笑培, 王和洲, 周新国, 等. 拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 19.
ZHANG X P, WANG H Z, ZHOU X G, *et al.* Combined impact of irrigation and nitrogen application at the jointing stage on water consumption and water use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 19.
- [6] BERGHUIJS H N C, WEIH M, WERF W V D, *et al.* Calibrating and testing APSIM for wheat-faba bean pure cultures and intercrops across Europe [J]. *Field Crops Research*, 2021, 264: 108088.
- [7] 张萌, 高艳梅, 张永清. 不同播种密度和灌溉管理下冬小麦 APSIM NG 模型的敏感性研究与模型校准验证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 102.
ZHANG M, GAO Y M, ZHANG Y Q. Sensitivity analysis and calibration of the APSIM next-generation model under different irrigation and sowing density in wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(1): 102.
- [8] BERHE A A, KISEKKA I, PRASAD P V V. Assessing wheat yield, biomass, and water productivity responses to growth stage based irrigation water allocation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(1): 107.

- [9]薛佳欣,张鑫,张建恒,等.基于 APSIM 模型小麦-玉米不同灌溉制度作物产量和水分利用效率分析[J].水土保持学报,2021,35(4):106.
XUE J X,ZHANG X,ZHANG J H,*et al.* Analysis of crop yield and water use efficiency of wheat-maize double cropping system under different irrigation systems based on APSIM model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2021,35(4):106.
- [10]尹嘉德,张俊英,侯慧芝,等.基于 APSIM 模型的旱地春小麦产量对施氮量和施氮深度的响应模拟[J].应用生态学报,2022,33(3):775.
YIN J D,ZHANG J Y,HOU H Z,*et al.* Simulation of the responses of spring wheat yield to the rates and depths of nitrogen application in dryland based on APSIM model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2022,33(3):775.
- [11]MEIER E A,HUNT J R,HOCHMAN Z. Evaluation of nitrogen bank, a soil nitrogen management strategy for sustainably closing wheat yield gaps [J]. *Field Crops Research*,2021,261:108017.
- [12]茹晓雅,李广,闫丽娟,等.基于 APSIM 模型模拟水氮调控对旱地春小麦产量的影响[J].草业科学,2019,36(9):2342.
RU X Y,LI G,YAN L J,*et al.* Effect of precipitation and nitrogen application on spring wheat yield in dryland based on APSIM model [J]. *Pratacultural Science*,2019,36(9):2342.
- [13]CHAKI A K,GAYDON D S,DALAL R C,*et al.* How we used APSIM to simulate conservation agriculture practices in the rice-wheat system of the Eastern Gangetic Plains [J]. *Field Crops Research*,2022,275:108344.
- [14]LI J Z,WANG L G,LUO Z K,*et al.* Reducing N₂O emissions while maintaining yield in a wheat-maize rotation system modelled by APSIM [J]. *Agricultural Systems*,2021,194:103277.
- [15]国家气象局编定.农业气象观测规范[M].北京:气象出版社,1993.
National Meteorological Administration. Specification for agricultural meteorological observation [M]. Beijing: China Meteorological Press,1993.
- [16]WU L,FENG L P,ZHANG Y,*et al.* Comparison of five wheat models simulating phenology under different sowing dates and varieties [J]. *Agronomy Journal*,2017,109(4):1280.
- [17]WU L,FENG L P,LI Y Z,*et al.* A yield-related agricultural drought index reveals spatio-temporal characteristics of droughts in Southwestern China [J]. *Sustainability*,2019,11(3):714.
- [18]程陈,冯利平,薛庆禹,等.日光温室黄瓜生长发育模拟模型[J].应用生态学报,2019,30(10):3491.
CHENG C,FENG L P,XUE Q Y,*et al.* Simulation model for cucumber growth and development in sunlight greenhouse [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2019,30(10):3491.
- [19]程陈,董朝阳,黎贞发,等.日光温室芹菜外观形态及干物质积累分配模拟模型[J].农业工程学报,2021,37(10):142.
CHENG C,DONG C Y,LI Z F,*et al.* Simulation model of external morphology and dry matter accumulation and distribution of celery in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2021,37(10):142.
- [20]李艳,薛昌颖,杨晓光,等.基于 APSIM 模型的灌溉降低冬小麦产量风险研究[J].农业工程学报,2009,25(10):35.
LI Y,XUE C Y,YANG X G,*et al.* Reduction of yield risk of winter wheat by appropriate irrigation based on APSIM model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2009,25(10):35.
- [21]GAYDON D S,BALWINDER-SINGH,WANG E,*et al.* Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia [J]. *Field Crops Research*,2017,204:52.
- [22]SHI J C,WU X,WANG X Y,*et al.* Determining threshold values for root-soil water weighted plant water deficit index based smart irrigation [J]. *Agricultural Water Management*,2020,230:105979.
- [23]XU C L,TAO H B,TIAN B J,*et al.* Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat [J]. *Field Crops Research*,2016,196:268.
- [24]杨萌,冯宇鹏,林倩,等.近 30 年吴桥县冬小麦生育期水分亏缺变化趋势分析[J].中国生态农业学报,2015,23(4):482.
YANG M,FENG Y P,LIN Q,*et al.* Study on water deficit trend in the recent 30 years in Wuqiao County, Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2015,23(4):482.
- [25]高雪慧,刘强,王钧.基于 APSIM 模型的陇中旱地春小麦产量对播期、施氮和降水量变化的响应模拟[J].麦类作物学报,2022,42(3):371.
GAO X H,LIU Q,WANG J. Simulation of response of spring wheat yield to sowing date, nitrogen application and precipitation in dryland of longzhong based on APSIM model [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2022,42(3):371.
- [26]SINGH A P,DHADSE K. Economic evaluation of crop production in the Ganges Region under climate change: A sustainable policy framework [J]. *Journal of Cleaner Production*,2021,278:123413.
- [27]赵彦茜,齐永青,朱骥,等. APSIM 模型的研究进展及其在中国的应用[J].中国农学通报,2017,33(18):1.
ZHAO Y X,QI Y Q,ZHU J,*et al.* Research progress of APSIM model and its application in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2017,33(18):1.
- [28]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.
HUANG M X,WANG J,TANG J Z,*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*,2018,34(13):134.
- [29]程陈,李春,李文明,等.园艺作物发育期和采收期模拟模型的最优模拟路径[J].农业工程学报,2023,39(12):158.
CHENG C,LI C,LI W M,*et al.* Optimal path of the simulation model in horticultural crop development and harvest period [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2023,39(12):158.
- [30]伍露,程陈,杨霏云,等.基于 APSIM 模型模拟内蒙古春小麦不同土壤缺水条件下水氮优化管理模式[J].中国农业气象,2024,45(5):461.
WU L,CHENG C,YANG F Y,*et al.* Simulated on water and nitrogen optimization management model under different soil water shortage conditions of spring wheat in Inner Mongolia based on APSIM model [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*,2024,45(5):461.
- [31]ZHAO G,BRYAN B A,SONG X D. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters [J]. *Ecological Modelling*,2014,279:1.
- [32]HE D,WANG E L,WANG J,*et al.* Uncertainty in canola phenology modelling induced by cultivar parameterization and its impact on simulated yield [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,2017,232:163.