

小麦模型算法集成平台构建与算法比较

陈先冠¹ 冯利平¹ 白慧卿¹ 王春雷¹ 王靖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: 为方便小麦模型算法比较与多算法集成模拟,本研究参考国内外主流作物模型 CERES - Wheat、APSIM - Wheat、WheatSM、WOFOST、SWAT 等的主要算法,集成了发育期、生物量、产量形成等模块的多种算法,构建了小麦模型算法集成平台(Wheat model algorithm integration platform, WMAIP)。发育期模块集成了小麦钟模型和热时两种算法;生物量模块集成了群体光合作用、光能利用效率和二氧化碳同化率3种算法;产量形成模块集成了籽粒灌浆、生物量转移和收获指数3种算法。基于模型平台组成了6个具有代表性的模拟模型。利用河北省吴桥县2017—2019年两年播期试验的田间观测数据结合2011—2014年3年播期耦合水分文献资料对模型进行参数校准与验证,并对特定模块的不同算法进行比较。结果表明,各模型的模拟结果与实测值均吻合良好,模拟误差在合理范围之内,其中发育期、地上部生物量、产量和土壤贮水量模拟值和实测值的归一化均方根误差(NRMSE)分别在0.56%~4.00%、16.13%~18.72%、12.48%~18.95%和10.78%~11.63%之间,模型集合的模拟效果优于单一模型。通过算法比较发现,发育期模块中热时法模拟播种至拔节阶段较优,小麦钟模型模拟播种至开花阶段和播种至成熟阶段较优;生物量模块中3种算法均为模拟小麦生物量的较佳模型,但在高辐射条件下,群体光合用法模拟的生物量较高;产量模块中3种算法模拟的产量变化趋势较为一致,但生物量转移法效果略好。该平台集成了特定模块的多种算法,能较好地模拟土壤贮水量和冬小麦的生物学指标,在小麦模型算法比较与改进、集成模拟及气候变化影响评估方面具有较大的应用潜力。

关键词: 小麦;作物模型;算法集成;发育期;生物量;产量

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0237-13 OSID: 

Establishment of Wheat Model Algorithms Integration Platform and Algorithm Comparison

CHEN Xianguan¹ FENG Liping¹ BAI Huiqing¹ WANG Chunlei¹ WANG Jing¹ YU Weidong²

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

Abstract: In order to facilitate the comparison of wheat model algorithms and multi-algorithm integrated simulation, a wheat model algorithm integration platform (WMAIP) was established by referring to the main module algorithms of domestic and foreign mainstream crop models (CERES - Wheat, APSIM - Wheat, WheatSM, WOFOST, SWAT, etc.). The method for simulation phenology integrated two algorithms with “wheat clock” model method and thermal time method based on WheatSM and APSIM - Wheat phenology module, respectively. The method for simulation biomass integrated three algorithms with carbon assimilation (CA), canopy photosynthesis (CP) and radiation use efficiency (RUE) based on WOFOST, APSIM - Wheat and WheatSM biomass modules, respectively. The method for simulation yield formation integrated three algorithms with harvest index (HI), grain filling (GF) and biomass remobilization (BR) based on SWAT, APSIM - Wheat and WheatSM grain yield modules, respectively.

收稿日期: 2021-01-30 修回日期: 2021-03-12
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300201、2016YFD0300105)、中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室开放研究基金项目(AMF201805)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021TC117)
作者简介: 陈先冠(1994—),男,博士生,主要从事作物模型与智慧决策研究,E-mail: chenxianguan@cau.edu.cn
通信作者: 冯利平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业模型、农业气象及气候变化与资源利用研究,E-mail: fenglp@cau.edu.cn

Six representative simulation models were constructed based on the model platform. The parameters of model were calibrated and verified by using field observation data of sowing date experiment from 2017 to 2019 in Wuqiao, Hebei Province and literature data of sowing date coupling irrigation experiment from 2011 to 2014. Finally, different algorithms for specific modules were compared. The results showed that simulated values of different algorithms in each module could be used to represent measured values with a reasonable error range. Therefore, the NRMSE values of phenology, above ground biomass, yield and soil water storage were ranged from 0.56% to 4.00%, from 16.13% to 18.72%, from 12.48% to 18.95% and from 10.78% to 11.63%, respectively. The effect simulated by multi-model platform was better than that of the single model. In the phenology module, the simulation of duration from sowing to jointing by thermal time method was better, while the simulation of durations from sowing to anthesis and from sowing to maturity were poorer than that by “wheat clock” model method. In the biomass module, the three algorithms were the best models to predict the biomass of wheat, but the simulated biomass of CP method was higher under high radiation conditions. In the yield formation module, the variation trend of yield simulated by the three algorithms was consistent, but the simulation results by BR method was rather better than that by others. In general, the WMAIP platform integrated multiple algorithms for specific modules to simulate soil water storage and biological indicators of winter wheat well. The application potential of this platform was great in comparison and improvement of wheat model algorithms, integrated simulation and assessment of climate change impacts.

Key words: wheat; crop model; algorithm integration; phenology; biomass; yield

0 引言

作物模型是利用系统分析和计算机技术,综合作物生理生态、农业气象、土壤和农学等学科研究成果,将作物与其生态环境因子作为整体进行动态的量化分析,能够再现作物生长发育和产量形成的过程。作物模型技术自 20 世纪 60 年代开创以来,经过多年发展,经历了从经验走向机理,从理论走向实践的过程^[1-3]。目前已有一系列的模型产品,如荷兰的 WOFOST^[4]、美国的 DSSAT^[5] 和澳大利亚的 APSIM^[6] 等。近年来,随着国际 AgMIP 项目的开展,作物生长模型研究开始侧重于现有模型的比较、改进和完善^[7]。

基于过程的作物模型可以综合反映基因型、环境和管理措施对作物生长发育的影响,已经广泛用于气候变化影响评估^[8]、作物管理^[9]、品种设计等多个方面^[10-11],但模型模拟存在较大的不确定性^[12-15]。由于建模目标以及对模型机理认知的不同,不同建模者构建的模型不同,从而导致不同模型模拟作物生长发育和产量形成等过程差异较大^[12-15]。气候变化对作物产量的影响评估中,作物模型比气候模式对产量变化的不确定性影响更大,模型结构是气候变化对产量影响不确定性的最主要来源^[14-15]。因此,需要系统地比较不同模型的模拟性能并改进相应算法,以降低模型结构的不确定性。FLEISHER 等^[16]对 9 个马铃薯模型进行比较,评价了不同模型对气候变化的响应,量化了模型的不确定性。RAN 等^[17]发现在充分灌溉和气候年际变异

高的情况下,光能驱动模型 DSSAT 比水分驱动模型 AquaCrop 更适合生物量和产量的模拟。PALOSUO 等^[18]比较了 8 个小麦模型在不同气候条件下的模拟性能,表明没有一个模型能够完美地再现作物生长和产量形成的过程。前人已对作物模型做了大量比较,但由于模型的模拟结果是由多个过程综合影响得到的,而只分析模拟结果(如生物量、产量和叶面积等)很难直接判断模型的哪一部分需要改进,可见目前大部分的模型比较研究只阐明了模型的不确定性,但对模型改进的指导较为有限^[19]。因此,为比较特定过程中不同算法的差异,需要采取控制试验的方式控制模型的各个过程,在单一平台进行算法比较。

通过在单一平台集成特定过程的不同算法,可以促进算法的比较、评估与改进,有利于降低模型结构的不确定性。DONATELLI 等^[20]最先通过重用和组合已有算法构建评估土壤温度的通用框架。JIN 等^[19]进一步采用了“算法集成”的思想,比较了 16 种主要玉米模型的温度胁迫和水分胁迫算法,为降低模型模拟的不确定性和提升产量的模拟精度提供了参考。本研究在模型模块化的基础上,在主要模块中集成多种算法,旨在比较与改进现有的模拟算法、提升模型模拟性能以及提高模型开发效率及质量。本文首先通过参考国内外主流小麦模型 CERES - Wheat^[21]、APSIM - Wheat^[6]、WOFOST^[4]、SWAT^[22]、WheatSM^[23] 的主要模块算法,利用 Python 语言搭建标准平台,将各模块的不同算法整合到平台中;再利用田间试验数据对模型平台进行检验;最

后进行特定模块的算法比较。

1 平台描述

1.1 平台框架

模型平台主要包括气象、土壤水分、土壤养分、土壤温度、发育期、生物量、器官建成、产量形成、田间管理等模块。由于 Python 语言采用模块化设计，方便添加及更新模块，模块之间传递变量简单，本模型平台使用 Python 语言将各个模块有机地结合在一起，各模块不仅可单独运行，也可作为一个整体运行，小麦模型算法集成平台 (Wheat model algorithm integration platform, WMAIP) 框架如图 1 所示。

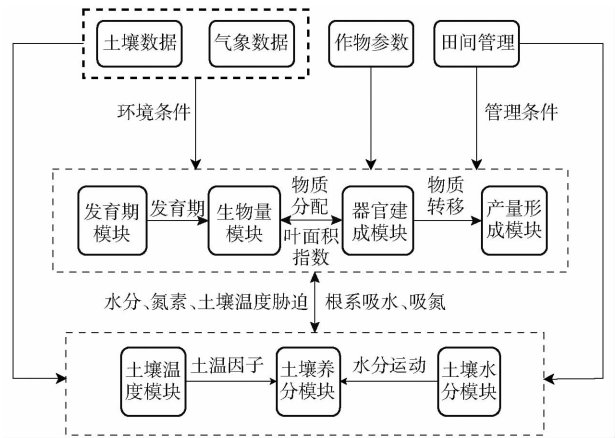


图 1 小麦模型算法集成平台框架

Fig. 1 Schematic of wheat model algorithm integration platform (WMAIP)

1.2 发育期模块

发育期模块包含小麦钟模型法 (Wheat clock, WC) 与热时法 (Thermal time, TT)。

1.2.1 小麦钟模型法

小麦钟模型^[23]表达式为

$$\frac{dM}{dt} = e^k T_E^p P_E^q f_{EC} \quad (1)$$

其中

$$T_E = \begin{cases} \frac{T_{mean} - T_b}{T_o - T_b} & (T_b < T_{mean} \leq T_o) \\ 1 & (T_{mean} > T_o) \\ 0 & (T_{mean} \leq T_b) \end{cases} \quad (2)$$

$$P_E = \begin{cases} \frac{P_L - P_{Lb}}{P_{Lo} - P_{Lb}} & (P_{Lb} < P_L \leq P_{Lo}) \\ 1 & (P_L > P_{Lo}) \\ 0 & (P_L \leq P_{Lb}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 M ——发育期或发育阶段的发育进程，完成时 M 为 1

t ——时间

k ——基本发育系数，由品种自身的遗传特性决定， k 越大，说明该品种发育速度快，

是早熟品种，反之则发育迟缓，表现晚熟

T_E ——温度效应因子，反映温度对小麦发育的非线性影响程度

p ——温度系数，反映品种在某一发育阶段内对温度的敏感性， p 越大，说明在下限到最适温度范围内时，增温对发育速度的促进作用越大，反之则越小

P_E ——光周期效应因子，反映光照对小麦发育的非线性影响程度

q ——光周期反应特征遗传系数，反映某品种在某一发育阶段内对光周期反应的敏感性， q 越大，说明该品种对日长的反应越敏感，反之则越钝感

f_{EC} ——肥料、播种深度等可控栽培措施因子

T_{mean} ——日平均温度， $^{\circ}C$

T_b ——某一阶段内小麦生长发育的下限温度，播种—出苗阶段、出苗—拔节阶段、拔节—开花阶段、开花—成熟阶段分别为 1、3、3、9 $^{\circ}C$

T_o ——发育阶段内小麦生长的最适温度，播种—开花阶段为 20 $^{\circ}C$ ，开花—成熟阶段为 22 $^{\circ}C$

P_L ——每天的光照时长，包括曙暮光在内，h

P_{Lo} ——发育阶段内的最适光照时长，取 18 h

P_{Lb} ——发育阶段内的临界光照时长，取 8 h

本文对小麦钟模型中春化作用的起始阶段进行改进，由原来的出苗期改为播种期计算春化效应。春化效应因子 V_E 为

$$V_E = \begin{cases} \frac{V_T - V_{Tb}}{V_{To1} - V_{Tb}} & (V_{Tb} < V_T \leq V_{To1}) \\ 1 & (V_{To1} < V_T \leq V_{To2}) \\ \frac{V_{Tm} - V_T}{V_{Tm} - V_{To2}} & (V_{To2} < V_T < V_{Tm}) \\ 0 & (V_T \leq V_{Tb}, V_T \geq V_{Tm}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 V_T ——春化温度， $^{\circ}C$

V_{Tb} ——春化下限温度，取 -4 $^{\circ}C$

V_{To1} ——春化最适温度下限，取 3 $^{\circ}C$

V_{To2} ——春化最适温度上限，取 7 $^{\circ}C$

V_{Tm} ——春化上限温度，取 18 $^{\circ}C$

1.2.2 热时法

热时法参考 APSIM - Wheat 发育期模块^[24]，计算公式为

$$T_{T,adj} = \sum (T_{T,\Delta} \min(f_D, f_V)) \quad (5)$$

其中

$$T_{T,\Delta} = \begin{cases} T_c & (0^\circ\text{C} < T_c \leq 26^\circ\text{C}) \\ \frac{26}{8}(34 - T_c) & (26^\circ\text{C} < T_c \leq 34^\circ\text{C}) \\ 0 & (T_c \leq 0^\circ\text{C} \text{ 或 } T_c > 34^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_d = 1 - 0.002R_p(20 - P_L)^2 \quad (7)$$

$$f_v = 1 - (0.005\,454\,5R_v + 0.000\,3)(50 - V) \quad (8)$$

式中 $T_{T,\text{adj}}$ ——光周期和春化作用订正后的热时,℃·d

$T_{T,\Delta}$ ——每天的热时,℃·d

f_d ——光周期影响因子

V ——总春化作用

f_v ——春化作用影响因子

T_c ——日平均冠层温度,℃

R_p ——品种参数,光周期敏感系数

R_v ——品种参数,春化作用敏感系数

春化作用 V_Δ 由日平均冠层温度、日最高温度 T_{max} 和日最低温度 T_{min} 计算得来。

$$V_\Delta = \min\left(1.4 - 0.077\,8T_c, 0.5 + 13.44 \frac{T_c}{(T_{\text{max}} - T_{\text{min}} + 3)^2}\right) \quad (9)$$

当日最高气温大于 30℃ 并且总春化作用 V 小于 10 时,会发生反春化作用 $V_{\Delta,d}$,计算公式为

$$V_{\Delta,d} = \min(0.5(T_{\text{max}} - 30), V) \quad (10)$$

$$\text{其中 } V = \sum (V_\Delta - V_{\Delta,d}) \quad (11)$$

1.3 生物量模块

生物量模块包括二氧化碳同化率法 (Carbon assimilation, CA)、光能利用效率法 (Radiation use efficiency, RUE) 以及群体光合作用法 (Canopy photosynthesis, CP) 3 种算法。

1.3.1 二氧化碳同化率法

二氧化碳同化率法采用 WOFOST 模型的干物质生产算法^[25]

$$W_\Delta = C_e(A - R_m) \quad (12)$$

式中 W_Δ ——日生物量生长速率,kg/(hm²·d)
 C_e ——同化物转化效率系数,取 0.7 kg/kg
 A ——总同化速率,kg/(hm²·d)
 R_m ——维持呼吸速率,kg/(hm²·d)

冠层光合速率采用 Gaussian 3 点积分法,对叶片所在的时间和空间的瞬时同化速率进行积分,求得日总同化速率。相对冠层高度 L 处瞬时总同化速率是光饱和时叶片的 CO₂ 同化速率和所吸收的辐射量的函数,以负指数形式表示为

$$A_L = A_m \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{FF}I_a}{A_m}\right)\right) \quad (13)$$

式中 A_L ——单位叶面积在相对高度 L 处的瞬时总同化速率,kg/(hm²·h)

A_m ——光饱和时叶片的 CO₂ 同化速率,因白天温度不同而异,kg/(hm²·h)

E_{FF} ——单叶片光能利用效率,
(kg/(hm²·h))/(J/(m²·s))

I_a ——吸收的总辐射量,J/(m²·s)

维持呼吸量与日平均温度有关,维持呼吸速率计算公式为

$$R_{m,T} = R_{m,T_r} Q_{10}^{\frac{T_{\text{mean}} - T_r}{10}} \quad (14)$$

$$R_m = R_{m,T} W \quad (15)$$

式中 $R_{m,T}$ ——温度 T 下维持呼吸系数,kg/kg

Q_{10} ——呼吸熵,取 2

T_r ——参考温度,取 25℃

R_{m,T_r} ——参考温度维持呼吸,抽穗前取 0.02 kg/kg,抽穗后取 0.01 kg/kg

W ——总干物质量,kg/hm²

1.3.2 光能利用效率法

光能利用效率法参考 APSIM - Wheat 模型^[24]。在 APSIM - Wheat 中,基于光能利用效率 (RUE) 的概念,光能驱动干物质生产的计算公式为

$$W_\Delta = 10I_i RUE \min(f_{T,\text{poto}}, f_{N,\text{poto}}) f_{W,\text{poto}} f_c \quad (16)$$

式中 I_i ——冠层截获辐射量,MJ/(m²·d)

RUE ——光能利用效率,g/MJ

$f_{T,\text{poto}}$ ——温度胁迫因子

$f_{N,\text{poto}}$ ——氮素胁迫因子

$f_{W,\text{poto}}$ ——水分胁迫因子

f_c ——二氧化碳因子

1.3.3 群体光合作用法

群体光合作用法参考 WheatSM 中的门司公式^[23]

$$P_{Gd} = \frac{P_{\text{max}} D_L}{K_{ec}} \cdot \ln \frac{P_{\text{max}} + 0.47 \frac{I_0}{D_L} P_a K_{ec} (1 - \sigma)}{P_{\text{max}} + 0.47 \frac{I_0}{D_L} P_a K_{ec} (1 - \sigma) \exp(-K_{ec} LAI)} \quad (17)$$

式中 P_{Gd} ——群体光合作用日总量,g/(m²·d)

D_L ——日长,h

P_{max} ——光饱和点下的最大净光合作用速率,g/(m²·h)

P_a ——光响应曲线的初始斜率,表示叶片在弱光条件下的光合能力,g/MJ

I_0 ——太阳总辐射量, MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)
 K_{ec} ——群体消光系数
 σ ——麦田反射率, 取 8 %
 LAI ——叶面积指数

1.4 器官建成模块

1.4.1 物质分配

小麦在生长过程中各个器官(根、茎、叶和穗)的增重与全株的增重的比率称作器官的分配系数, 反映的是各器官的生长分配动态^[23]

$$W_{i,d} = W_{\Delta} f_{i,d} \tag{18}$$

式中 $W_{i,d}$ ——器官 i 在时间 d 的分配量, kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$)
 $f_{i,d}$ ——器官 i 在时间 d 的分配系数

1.4.2 叶面积

叶面积指数采用比叶重法模拟^[25], 比叶重采用 APSIM - Wheat 模型方法计算^[24]

$$LAI = 0.1 W_{L,L} S_{LA} \tag{19}$$

其中
$$S_{LA} = \begin{cases} LAI \frac{S_{LA,\min} - S_{LA,\max}}{5} + S_{LA,\max} & (LAI \leq 5) \\ S_{LA,\min} & (LAI > 5) \end{cases} \tag{20}$$

式中 $W_{L,L}$ ——活叶干物质量, kg/ hm^2
 S_{LA} ——比叶重, m^2/g
 $S_{LA,\max}$ ——最大比叶重, 取 0.027 m^2/g
 $S_{LA,\min}$ ——最小比叶重, 取 0.022 m^2/g

1.4.3 根系生长

根系生长采用 ASSENG 等^[26]提出的方法, 计算公式为

$$R_{LV\Delta,j} = P_{ML} F_{Rml,j} R_{\Delta,j} \tag{21}$$

式中 $R_{LV\Delta,j}$ ——土层 j 根长密度的日增加量, $\text{cm}/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$
 $F_{Rml,j}$ ——土层 j 中的土壤阻力因子
 P_{ML} ——根生物量与根长的转换系数, 取 21 000 cm/g
 $R_{\Delta,j}$ ——土层 j 中根重密度增加量, $\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$

1.5 产量形成模块

产量形成模块包括籽粒灌浆法(Grain filling, GF)、收获指数法(Harvest index, HI)及生物量转移法(Biomass remobilization, BR)。

1.5.1 籽粒灌浆法

籽粒灌浆法参考 APSIM - Wheat^[24]。籽粒数由开花期的茎干物质决定, 有

$$N_g = 0.1 R_g W_s \tag{22}$$

式中 N_g ——籽粒数
 W_s ——开花期的茎干物质量, kg/ hm^2
 R_g ——每克茎干物质的籽粒数

籽粒需碳量计算公式为

$$D_g = N_g R_f h_{g,T_{\text{mean}}} f_{N,\text{grain}} \tag{23}$$

其中
$$h_{g,T_{\text{mean}}} = \begin{cases} 0 & (T_{\text{mean}} \leq 0^\circ\text{C}) \\ \frac{1}{25} T_{\text{mean}} & (0^\circ\text{C} < T_{\text{mean}} < 25^\circ\text{C}) \\ 1 & (T_{\text{mean}} \geq 25^\circ\text{C}) \end{cases} \tag{24}$$

式中 D_g ——籽粒需碳量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 R_f ——潜在灌浆速率, 开花-灌浆始期取 0.001 g/d , 灌浆始期-成熟取 0.002 g/d
 $h_{g,T_{\text{mean}}}$ ——日均温 T_{mean} 对籽粒灌浆影响因子
 $f_{N,\text{grain}}$ ——氮素胁迫对籽粒灌浆的影响因子
最后, 籽粒需碳量被最大籽粒质量限制, 有

$$D_g = \min(D_g, D_{gm}) \tag{25}$$

其中 $D_{gm} = N_g S_{gm} - Q_{meal} \quad (D_{gm} \geq 0)$ (26)

式中 D_{gm} ——籽粒最大需碳量, g/m^2
 Q_{meal} ——籽粒质量, g/m^2
 S_{gm} ——最大籽粒质量, 品种参数, g

1.5.2 收获指数法

收获指数法参考 SWAT 模型^[27], 实际收获指数计算公式为

$$HI_{\text{act}} = (HI_{\max} - HI_{\min}) \frac{f_{W,\text{ave}}}{f_{W,\text{ave}} + \exp(S_1 - S_2 f_{W,\text{ave}})} + HI_{\min} \tag{27}$$

式中 HI_{act} ——实际收获指数
 $HI_{\max}$ ——最大收获指数
 $HI_{\min}$ ——最小收获指数
 $f_{W,\text{ave}}$ ——生长季平均水分胁迫系数
 S_1, S_2 ——水分胁迫影响参数, 分别取 14.3、0.286

1.5.3 生物量转移法

生物量转移法参考 WheatSM 模型^[23]。在生长阶段, 小麦的生物量不断积累并分配给小麦籽粒, 最终形成产量, 其基本模型为

$$Y = \sum_{d=1}^{d_e} T_{er1} W_{\Delta,d} + \sum_{d=d_e+1}^{d_m} T_{er2} W_{\Delta,d} \tag{28}$$

式中 Y ——小麦产量, kg/ hm^2
 d_e ——从播种至小麦抽穗期的时间, d
 d_m ——全生育期时间, d
 T_{er1} ——抽穗前茎鞘存储物向籽粒转运的效率, kg/kg
 T_{er2} ——抽穗后光合产物向籽粒转运的效率, kg/kg
 $W_{\Delta,d}$ ——时间 d 时生物量生长速率, kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$)

1.6 潜在蒸散量

潜在蒸散量的计算公式为

$$ET_c = ET_o K_c \tag{29}$$

式中 ET_c ——潜在蒸散量,mm/d
 K_c ——冬小麦不同发育阶段的作物系数
 ET_o ——作物参考蒸散量,采用 Penman - Monteith 公式^[28]计算,mm/d

1.7 土壤水分模块

土壤水分模块主要参考 ALFASM 模型^[21,29],主要包括冠层截留、地表径流、水分收入、水分入渗、根系吸水、水分再分配等过程。其中水分胁迫因子计算式为

$$f_{W, \text{poto}} = \frac{W_{RWU}}{EP_0} \tag{30}$$

其中
$$W_{RWU} = 10 \sum_{j=1}^N \frac{r_1 \exp(r_2(\theta_{t,j} - \theta_{wp,j}))}{r_3 - \ln R_{LV,j}} R_{LV,j} Z_{\Delta,j} \tag{31}$$

式中 W_{RWU} ——根系吸水量,mm/d
 EP_0 ——潜在蒸腾量,mm/d
 $r_1、r_2、r_3$ ——方程参数,分别取 0.002 67、62、6.68

$\theta_{t,j}$ ——土层 j 的实际含水量,cm³/cm³
 $\theta_{wp,j}$ ——土层 j 的凋萎含水量,cm³/cm³
 $R_{LV,j}$ ——土层 j 的根长密度,cm/cm³
 $Z_{\Delta,j}$ ——土层 j 的厚度,cm
 N ——根系达到的最深土层数

1.8 土壤氮素模块

土壤氮素模块主要参考 CERES - Wheat 模型^[21,30],主要包括有机氮矿化、氮素固定、硝化、反硝化、尿素水解、氮吸收等过程。

1.9 土壤温度模块

土壤温度采用土壤温波方程^[31]

$$T_{Z,t} = T_{\text{mean}} + A_0 \exp\left(-\frac{Z}{D}\right) \sin\omega\left(t - \frac{Z}{D\omega}\right) \tag{32}$$

其中
$$\omega = 2\pi/\tau \tag{33}$$

式中 $T_{Z,t}$ —— Z 深度 t 时刻的土壤温度,℃
 A_0 ——地面温波振幅,即最高温度为 $T_{\text{mean}} + A_0$,最低温度为 $T_{\text{mean}} - A_0$
 ω ——温度曲线的正弦角度
 τ ——周期 Z ——观测深度,m
 D ——土温衰减深度,m

2 田间试验与模型验证

2.1 田间试验

2.1.1 研究区概况

冬小麦分期播种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,海拔 20 m,地下水位 6 ~ 9 m,为暖温带季风气候,多年平均年降水量 542 mm,小麦季平均年降水量 117 mm。试验地土壤类型为黏壤土,0 ~ 200 cm 土体的土壤参数见表 1^[32]。

表 1 试验地土壤剖面物理参数

Tab.1 Physical parameters of soil profiles at experimental field

土层深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	凋萎含水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0 ~ 20	1.34	0.10	0.32	0.41
20 ~ 40	1.40	0.12	0.34	0.42
40 ~ 60	1.49	0.12	0.34	0.42
60 ~ 80	1.46	0.12	0.34	0.42
80 ~ 100	1.48	0.13	0.33	0.42
100 ~ 120	1.45	0.14	0.33	0.42
120 ~ 140	1.48	0.14	0.33	0.42
140 ~ 160	1.42	0.14	0.33	0.42
160 ~ 180	1.48	0.14	0.34	0.43
180 ~ 200	1.50	0.14	0.34	0.43

2.1.2 数据来源

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)、空气相对湿度(%)。

冬小麦分期播种试验于 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。2017 年 10 月—2018 年 6 月小麦生长季降水量为 347 mm,总辐射量为 3 385.2 MJ/m²,日平均温度为 10.6℃,是典型湿润年;2018 年 10 月—2019 年 6 月小麦生长季降水量为 79 mm,总辐射量为 3 576.3 MJ/m²,日平均温度为 10.7℃,是典型干旱年。其中 2017—2018 年分期播种试验设置 5 个播期,每播期 3 个重复,小区面积为 3.6 m × 9 m = 32.4 m²;5 个播期分别为 10 月 6 日(D₁)、10 月 16 日(D₂)、10 月 23 日(D₃)、10 月 30 日(D₄)和 11 月 6 日(D₅),播量分别为 187.5、300、375、375、375 kg/hm²,行距 15 cm,播前浇底墒水,春季浇拔节水,灌水定额 75 mm。2018—2019 年试验增设 1 个播期处理(11 月 13 日,D₆),播量 375 kg/hm²,其他处理同 2017—2018 年试验。

栽培方式参照小麦节水高产栽培技术^[33],一次性施入底肥尿素 225 kg/hm²、磷酸二铵 300 kg/hm²、硫酸钾 225 kg/hm²,春季不再追肥。在小麦生长期间,于越冬期、返青期、起身期、拔节期、孕穗期、开花期、乳熟期、成熟期共 8 个时期在每个小区选取具有代表性的 2 段 0.5 m 小麦植株,在 105℃ 下杀青

30 min,然后在 75℃下干燥至质量不变,计算各时期小麦地上部生物量。收获时每小区取 1.8 m²冬小麦进行测产,自然风干后脱粒测产求得产量,文中的产量均以含水率 13% 计。在上述关键发育期取土,从地表至地下 200 cm 处,每 20 cm 作为一层,采用土钻法取土并用干燥法测定土壤含水量。

利用 WebPlotDigitizer 软件 (<http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>)提取文献中吴桥试验站 2011—2014 年期间利用济麦 22 开展的播期耦合水分试验数据,主要包括关键发育期、地上部生物量和小麦产量。试验采用裂区组设计,以播期为主区,水分副区。4 个播期处理为 10 月 10 日、10 月 20 日、10 月 30 日和 11 月 10 日。3 个水分处理分别为春季不浇水、春季浇拔节水、春季浇拔节水和开花水,每次灌水定额 75 mm^[34]。

2.2 模型构成及参数率定

2.2.1 模拟模型组成

基于模型平台构建了 6 种模拟模型,包括发育期模块 2 种算法、生物量模块 3 种算法及产量形成模块 3 种算法,模拟模型的结构组成如表 2 所示。其中,M1 和 M4 用于发育期算法比较;M1、M2 和 M3 控制了发育期模块和产量形成模块,而生物量模块采用了不同的算法,用于生物量算法比较;M4、M5 和 M6 控制了发育期模块和生物量模块,而产量形成模块采用了不同的算法,用于产量形成算法比较。

表 2 不同模拟模型的结构组成

Tab.2 Structural composition of different simulation models

模型	发育期模块	生物量模块	产量形成模块
M1	小麦钟模型	群体光合作用	生物量转移
M2	小麦钟模型	光能利用效率	生物量转移
M3	小麦钟模型	二氧化碳同化率	生物量转移
M4	热时	光能利用效率	生物量转移
M5	热时	光能利用效率	籽粒灌浆
M6	热时	光能利用效率	收获指数

2.2.2 作物参数率定

利用 Python 包 sopt (<https://github.com/Lyrichu/sopt>) 中的简单遗传算法 (Simple genetic algorithm,SGA) 进行参数自动率定,其中,种群数目参数 population_size 取 30,进化代数参数 generations 取 10,其余参数采用默认值。基于 2011—2012 年、2012—2013 年和 2017—2018 年 3 个年度的试验数据进行调参,运用 2013—2014 年和 2018—2019 年两个年度的试验数据进行模型验证。首先根据试验观测的发育期对发育期模块进行参数率定;然后根

据试验观测的干物质量对生物量模块进行参数率定;最后根据试验观测的产量对产量形成模块进行参数率定(表 3)。

本文利用模型模拟值和实际观测值的均方根误差 (Root mean squared error, RMSE) 作为目标函数^[35]。RMSE 越小,模拟值和观测值之间偏差越小,模拟值与观测值一致性越好,模型模拟结果越准确可靠。

2.3 模型集合及模拟效果评价

采用 6 个模型模拟结果的平均值代表模型集合模拟结果。采用回归系数 (Regression coefficient, b_0)、决定系数 (Coefficient of determination, R^2)、均方根误差 (RMSE) 和归一化均方根误差 (Normalized root mean squared error, NRMSE) 来评价模型的模拟值与实测值的吻合程度。

3 结果与分析

3.1 模型平台参数校准与验证

利用 WMAIP 平台组成的 6 个模拟模型都能较好地模拟土壤贮水量和冬小麦的生物学指标。2 m 深土层土壤贮水量的实测值和模拟值的差别较小,6 个模拟模型的调参结果和验证结果中均方根误差 (RMSE) 分别在 45.6 ~ 49.0 mm 和 55.1 ~ 59.4 mm 之间,归一化均方根误差 (NRMSE) 分别在 7.68% ~ 8.26% 和 10.78% ~ 11.63% 之间(表 4)。6 个模型都能够较好地模拟叶面积指数的动态变化,调参结果和验证结果中 RMSE 分别在 0.58 ~ 0.72 mm²/mm² 和 0.79 ~ 1.34 mm²/mm² 之间,NRMSE 分别在 19.43% ~ 22.28% 和 26.50% ~ 37.75% 之间(表 4,图 2)。6 个模型都能够较好地模拟地上部生物量的动态变化,其中 M1 ~ M4 的调参结果 NRMSE 分别为 11.22%、12.34%、12.28%、11.28%,验证结果中 NRMSE 分别为 18.18%、18.72%、16.13%、17.48% (表 4,图 2)。产量的实测值和模拟值的差别较小,6 个模拟模型的调参结果和验证结果中 RMSE 分别在 946.1 ~ 1 219.8 kg/hm² 和 923.5 ~ 1 402.3 kg/hm² 之间,NRMSE 分别在 12.27% ~ 15.82% 和 12.48% ~ 18.95% 之间(表 4)。模型集合有助于提高地上部生物量和产量的模拟精度,模型集合的调参结果和验证结果中 NRMSE 都小于单个模拟模型。

3.2 发育期算法比较

冬小麦发育期模块的调参结果显示,模型模拟值与观测值之间都具有较好的一致性。其中,小麦钟模型播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期的模拟值和实测值的 RMSE 分别为 3.5、1.4、1.9 d,

表 3 冬小麦品种济麦 22 的遗传参数
Tab.3 Genetic parameters for winter wheat variety Jimai_22

模块	方法	参数	含意	参数范围	取值
发育期	小麦钟模型	k_1	播种—出苗阶段,基本发育系数	-2.5 ~ -1	-2.21
		k_{21}	春化阶段,基本发育系数	-3.5 ~ -2	-2.98
		k_{22}	光周期阶段,基本发育系数	-3.5 ~ -2	-2.71
		k_3	拔节—开花阶段,基本发育系数	-3.5 ~ -2	-2.95
		k_4	开花—成熟阶段,基本发育系数	-3.5 ~ -2	-3.41
		p_1	播种—出苗阶段,温度系数	0.1 ~ 2	1.01
		p_{21}	春化阶段,温度系数	0.1 ~ 2	1.17
		p_{22}	光周期阶段,温度系数	0.1 ~ 2	0.34
		p_3	拔节—开花阶段,温度系数	0.1 ~ 2	1.54
		p_4	开花—成熟阶段,温度系数	0.1 ~ 2	1.54
		q_2	光周期阶段,光周期系数	0.1 ~ 2	0.64
	热时	T_1	出苗—拔节阶段,所需热时,℃·d	100 ~ 500	216
		T_2	拔节—开花阶段,所需热时,℃·d	300 ~ 700	474
		T_3	开花—成熟阶段,所需热时,℃·d	500 ~ 900	683
		R_p	光周期敏感系数	0 ~ 5	4.91
		R_V	春化效应敏感系数	0 ~ 5	1.56
生物量	群体光合作用	P_a	光响应曲线初始斜率,g/MJ	13 ~ 17	16.9
		$P_{\max}$	光饱和点下的最大净光合作用速率,g/(m ² ·h)	2.8 ~ 4.2	3.82
	光能利用效率	RUE	光能利用效率,g/MJ	1.12 ~ 1.36	1.36
	二氧化碳同化率	$A_{\max}$	叶片最大 CO ₂ 同化速率,kg/(hm ² ·h)	28 ~ 42	41.7
		E_{FF}	单叶片光能利用效率,(kg/(hm ² ·h))/(J/(m ² ·s))	0.35 ~ 0.5	0.5
产量形成	籽粒灌浆	R_g	每克茎干物质的籽粒数	10 ~ 40	37
		S_{gm}	最大籽粒质量,g	0.02 ~ 0.06	0.037
	生物量转移	T_{er1}	抽穗前茎鞘存储物向籽粒的转运效率,kg/kg	0.1 ~ 0.5	0.5
		T_{er2}	抽穗后光合产物向籽粒的转运效率,kg/kg	0.5 ~ 1.0	0.8
	收获指数	$HI_{\max}$	最大收获指数	0.1 ~ 0.6	0.47
		$HI_{\min}$	最小收获指数	0.1 ~ 0.6	0.25

表 4 不同模型的调参与验证结果
Tab.4 Calibration and validation results for different simulation model

评价结果	模型	2 m 土层土壤贮水量		叶面积指数		地上部生物量		产量	
		RMSE/ mm	NRMSE/ %	RMSE/ (mm ² ·mm ⁻²)	NRMSE/ %	RMSE/ (kg·hm ⁻²)	NRMSE/ %	RMSE/ (kg·hm ⁻²)	NRMSE/ %
调参结果	M1	45.6	7.68	0.58	19.43	1 275.9	11.22	1 120.7	14.53
	M2	46.6	7.85	0.61	19.81	1 402.9	12.34	1 097.7	14.24
	M3	45.6	7.68	0.60	19.82	1 395.7	12.28	1 219.8	15.82
	M4	49.0	8.26	0.72	22.28	1 281.5	11.28	1 104.8	14.33
	M5	49.0	8.26	0.72	22.28	1 281.5	11.28	1 107.6	14.37
	M6	49.0	8.26	0.72	22.28	1 281.5	11.28	946.1	12.27
	模型集合	47.0	7.92	0.61	19.52	1 214.9	10.69	677.6	8.79
验证结果	M1	55.1	10.78	0.89	28.56	1 927.5	18.18	923.5	12.48
	M2	56.2	10.99	1.10	34.71	1 984.8	18.72	1 265.6	17.10
	M3	54.8	10.71	0.79	26.50	1 710.2	16.13	1 306.7	17.66
	M4	59.4	11.63	1.34	37.75	1 853.1	17.48	1 269.7	17.16
	M5	59.4	11.63	1.34	37.75	1 853.1	17.48	1 291.7	17.45
	M6	59.4	11.63	1.34	37.75	1 853.1	17.48	1 402.3	18.95
	模型集合	57.3	11.20	1.09	32.80	1 669.9	15.75	890.5	12.03

NRMSE 分别为 2.06%、0.69%、0.81% (图 3a);热时法播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期的模

拟值和实测值的 RMSE 分别为 2.6、2.6、1.7 d, NRMSE 分别为 1.50%、1.32%、0.75% (图 3c)。

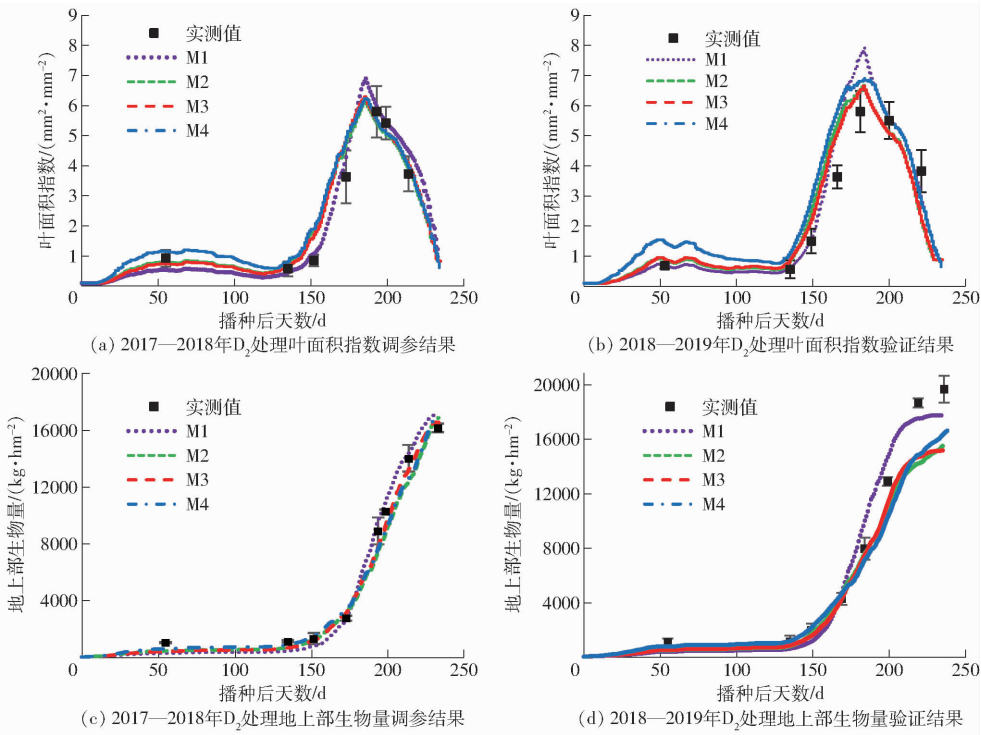


图 2 叶面积指数和地上部生物量的实测值和模拟值比较

Fig. 2 Comparisons of observed and simulated leaf area index and above-ground biomass

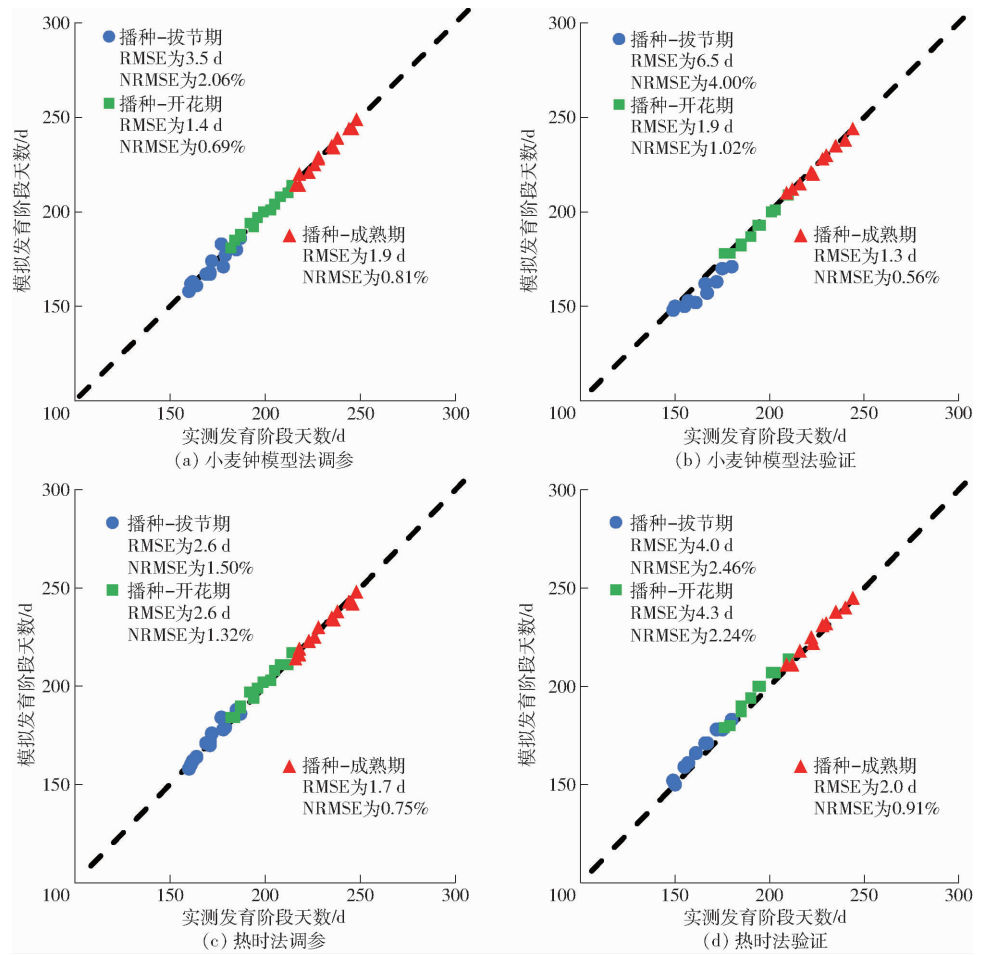


图 3 两种发育期算法的冬小麦发育期调参和验证结果

Fig. 3 Comparison between simulated and observed growth period of winter wheat with “wheat clock” model (CM) and thermal time (TT) approach for calibration and validation

冬小麦发育期模块的验证结果表明,发育期模块的2种算法都能够很好地模拟冬小麦的发育期,热时法模拟播种至拔节阶段较优,小麦钟模型模拟播种至开花阶段和播种至成熟阶段较优。小麦钟模型的播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期模拟值和实测值的RMSE分别为6.5、1.9、1.3 d,NRMSE分别为4.00%、1.02%、0.56%(图3b);热时法的播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期模拟值和实测值的RMSE分别为4.0、4.3、2.0 d,NRMSE分别为2.46%、2.24%、0.91%(图3d)。

3.3 生物量积累算法比较

生物量模块调参结果如图4所示,群体光合作用法生物量模拟值和实测值的回归系数 b_0 和决定

系数 R^2 分别为0.96和0.94;光能利用效率法生物量模拟值和实测值模型的 b_0 和 R^2 分别为0.95和0.94;二氧化碳同化率法生物量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.93和0.94。生物量模块3种算法都能较好地模拟生物量动态,模拟值与实测值有很好的线性关系,可以反映90%以上的生物量变异。

生物量模块的验证结果中,群体光合作用法生物量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.93和0.92;光能利用效率法生物量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.80和0.92;二氧化碳同化率法生物量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.82和0.94。3种生物量算法均为模拟小麦生物量的较佳模型。

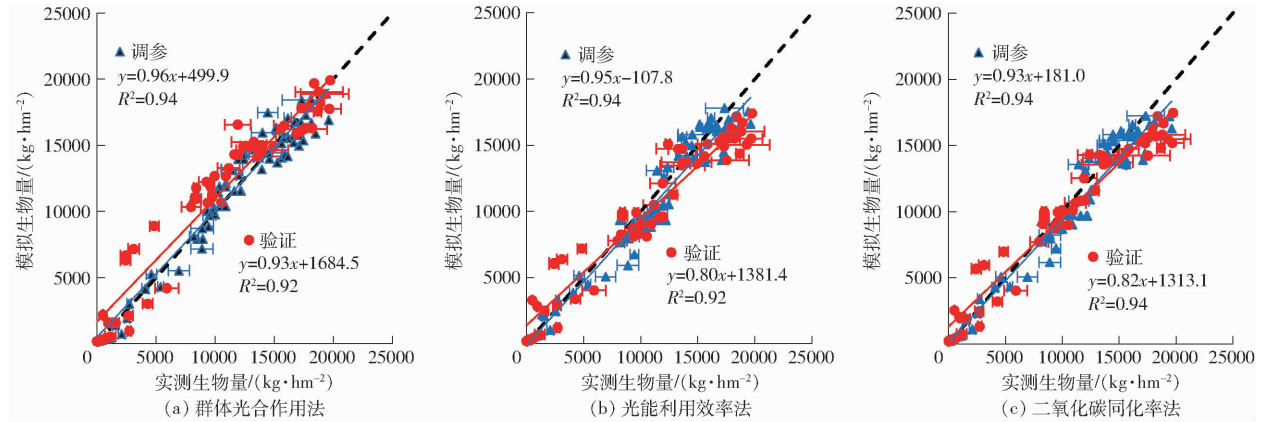


图4 3种生物量算法的冬小麦生物量调参与验证结果

Fig. 4 Comparison between observed and simulated above-ground biomass of winter wheat with different algorithm for calibration and validation

3.4 产量形成算法比较

产量模块调参结果如图5所示,生物量转移法的产量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.51和0.35;籽粒灌浆法的产量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.70和0.31;收获指数法的产量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.63和0.44。3种产量算法都能够捕捉冬小麦不同播期和水分下产量的变化

趋势,但生物量转移法的模拟产量略低于实测产量,而籽粒灌浆法和收获指数法的模拟产量略高于实测产量。

产量形成模块验证结果中,3种算法都能够很好地模拟冬小麦的产量,模拟和实测的NRMSE都在19%以下(表4)。其中,生物量转移法产量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为0.29和0.53;籽粒灌

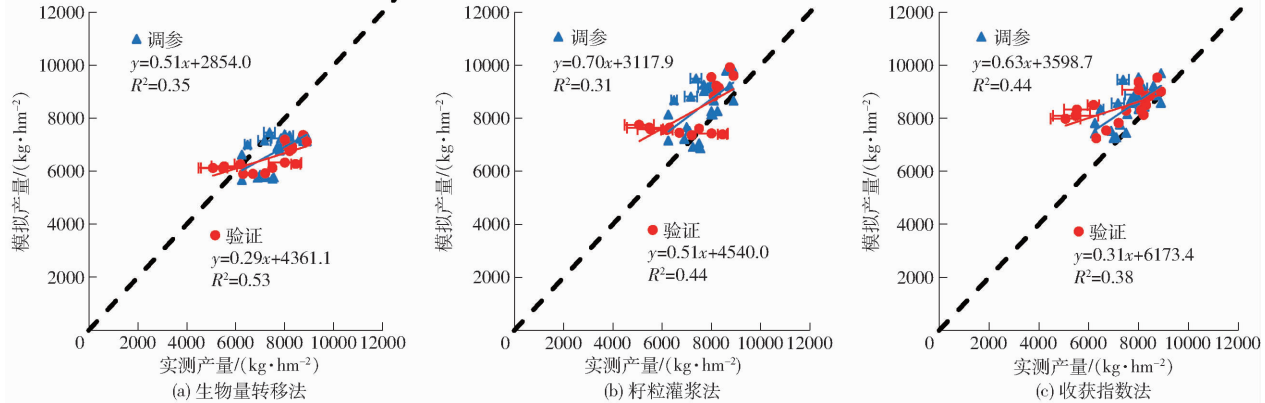


图5 3种产量算法的冬小麦产量调参与验证结果

Fig. 5 Comparison between observed and simulated yield of winter wheat with different algorithms for calibration and validation

浆法的产量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为 0.51 和 0.44；收获指数法的产量模拟值和实测值的 b_0 和 R^2 分别为 0.31 和 0.38（图 5）。3 种产量算法模拟的产量变化趋势较为一致，但生物量转移法效果略好。

4 讨论

本研究集成多模块的多种算法，组成 6 个模拟模型，采用 5 个小麦生长季播期水分的试验数据对模型平台进行测试，表明相同模块不同算法都能够有效模拟冬小麦的发育期、地上部生物量和产量，也能够模拟叶面积指数的动态变化，反映 WMAIP 平台可用于集成多种算法，比较特定过程不同算法的差异。WU 等^[36]发现小麦钟模型在晚播条件下的模拟性能较适期播种差，表明该算法存在一定的不足。由于春化阶段是在小麦出苗后开始，改进前的小麦钟模型模拟超晚播小麦发育期可能会出现无法完成春化作用现象，因此本文针对小麦的发育特性，将春化作用模拟改进为从播种后开始计算^[37-38]，提升了小麦钟模型发育期的模拟能力。热时法和小麦钟模型法都考虑了光周期敏感系数和温度敏感系数，都能较好地模拟小麦发育期。在评价土壤和作物指标的模拟效果时，刘建刚等^[39]认为 NRMSE 小于等于 15% 时模拟效果很好，NRMSE 大于 15% 小于等于 30% 则模拟效果较好，而当 NRMSE 大于 30% 则模拟效果较差。本研究中叶面积指数的调参结果中 NRMSE 在 19.43% ~ 22.28% 之间，调参的效果较好，但验证结果中 NRMSE 在 26.50% ~ 37.75% 之间，主要由干旱条件下模拟效果较差导致，说明需要进一步提高干旱条件下叶面积指数的模拟精度。3 种生物量算法都能较好地模拟冬小麦的生物量动态，在小麦生长中前期，二氧化碳同化率和光能利用效率两种算法模拟的生物量一致性较高，而群体光合作用法模拟的生物量较大；在小麦生长后期，群体光合作用和二氧化碳同化率模拟的生物量表现为增长缓慢，主要由于较低的光合生产与较高的维持呼吸导致，但光能利用效率法模拟的生物量增长较快，主要由于其未单独考虑呼吸作用导致（图 2d）。2017—2018 年小麦生长季，3 种生物量算法差异较小，而 2018—2019 年小麦生长季，群体光合作用法模拟的生物量较光能利用效率法和二氧

化碳同化率法高，表明群体光合作用法在高辐射条件下可模拟出较高的生物量，也反映出在典型气候条件下，不同算法的差异较小，而在极端气候条件下，不同算法的差异较大（图 2c、2d）。3 种产量算法模拟效果相似，主要由于 3 种算法的原理相似，生物量转移法和籽粒灌浆法都考虑花后物质生产以及花前物质转移，而收获指数法主要考虑同化产物在籽粒和营养器官上的分配比例及水分胁迫的影响。与 PALOSUO 等^[18]的研究结果较为一致，在大多数情况下，很难找到无误差或最佳的模型，而模型集合的效果优于单一模型。

另外，在特定过程的不同算法中，存在输入输出的差别，需要统一特定过程的输入输出才能对不同算法进行有效集成，同时今后还需增加试验数据对土壤氮素、根系生长及土壤温度等模块进行验证。

5 结束语

在借鉴国内外作物模型的理论和方法的基础上，对小麦模型进行模块化设计，构建了小麦模型算法集成平台 WMAIP。该平台针对特定模块集成多种算法，有助于现有算法的比较与改进，并且能进一步集成模拟，降低特定过程模拟的不确定性。基于模型平台组成了 6 个具有代表性的模拟模型，采用吴桥试验站 2011—2014 年及 2017—2019 年播期水分试验数据对模型进行参数校准与验证，验证结果表明，特定模块不同算法的模拟值与实测值均吻合较好，模拟误差在合理范围之内，其中发育期、地上部生物量、产量、土壤贮水量模拟值和实测值的归一化均方根误差（NRMSE）分别在 0.56% ~ 4.00%、16.13% ~ 18.72%、12.48% ~ 18.95%、10.78% ~ 11.63% 之间。模型集合的模拟效果优于单一模型。发育期模块中热时法模拟播种至拔节阶段较优，小麦钟模型模拟播种至开花阶段和播种至成熟阶段较优；生物量模块中 3 种算法均为模拟小麦生物量的较佳模型，但在高辐射条件下，群体光合作用法模拟的生物量较高；产量模块中 3 种算法模拟的产量变化趋势较为一致，但生物量转移法效果略好。以上结果表明，WMAIP 平台可用于集成特定模块的多种算法，为算法比较、算法改进以及算法集成模拟提供了一种重要的工具。

参 考 文 献

[1] 张红英, 李世娟, 诸叶平, 等. 小麦作物模型研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 85-93.
ZHANG Hongying, LI Shijuan, ZHU Yeping, et al. Research progress on wheat crop model[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 85-93. (in Chinese)

- [2] 梁浩, 胡克林, 李保国, 等. 土壤-作物-大气系统水热碳氮过程耦合模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 54-66.
LIANG Hao, HU Kelin, LI Baoguo, et al. Coupled simulation of soil water-heat-carbon-nitrogen process and crop growth at soil-plant-atmosphere continuum system and its validation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 54-66. (in Chinese)
- [3] 何亮, 侯英雨, 于强, 等. 不同空间分辨率驱动数据对作物模型区域模拟影响研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 241-251.
HE Liang, HOU Yingyu, YU Qiang, et al. Influence of different resolutions data on regional simulation of crop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 241-251. (in Chinese)
- [4] DE WIT A J W, BOOGAARD H L, FUMAGALLI D, et al. 25 years of the WOFOST cropping systems model[J]. Agricultural Systems, 2019, 168(5): 154-167.
- [5] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4): 235-265.
- [6] 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.
- [7] ROSENZWEIG C, JONES J W, HATFIELD J L, et al. The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170: 166-182.
- [8] LIU Y, WANG E L, YANG X G, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s[J]. Global Change Biology, 2010, 16(8): 2287-2299.
- [9] WANG J, WANG E L, YANG X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. Climatic Change, 2012, 113(3-4): 825-840.
- [10] RAVASI R A, PALEARI L, VESELY F M, et al. Ideotype definition to adapt legumes to climate change: a case study for field pea in Northern Italy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291: 108081.
- [11] WANG C L, FENG L P, WU L, et al. Assessment of genotypes and management strategies to improve resilience of winter wheat production[J]. Sustainability, 2020, 12(4): 1474.
- [12] 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.
- [13] LI T, HASEGAWA T, YIN X Y, et al. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions[J]. Global Change Biology, 2015, 21(3): 1328-1341.
- [14] TAO F L, ROTTER R P, PALOSUO T, et al. Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertainty in climate change impact assessments[J]. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1291-1307.
- [15] 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]. The Journal of Agricultural Science, 2012, 151(6): 813-835.
- [16] FLEISHER D H, CONDORI B, QUIROZ R, et al. A potato model intercomparison across varying climates and productivity levels[J]. Global Change Biology, 2017, 23(3): 1258-1281.
- [17] RAN H, KANG S, HU X, et al. Capability of a solar energy-driven crop model for simulating water consumption and yield of maize and its comparison with a water-driven crop model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287: 107955.
- [18] PALOSUO T, KERSEBAUM K C, ANGULO C, et al. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 35(3): 103-114.
- [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] DONATELLI M, BREGAGLIO S, CONFALONIERI R, et al. A generic framework for evaluating hybrid models by reuse and composition—a case study on soil temperature simulation[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 62: 478-486.
- [21] 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.
- [22] FRANCESCONI W, SRINIVASAN R, PÉREZ-MIÑANA E, et al. Using the soil and water assessment tool (SWAT) to model ecosystem services: a systematic review[J]. Journal of Hydrology, 2016, 535: 625-636.
- [23] 冯利平. 小麦生长发育模拟模型(WHEATSM)的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 1995.
FENG Liping. Study on simulation model of wheat growth and development[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 1995. (in Chinese)
- [24] ZHENG B, CHENU K, DOHERTY A, et al. The APSIM-Wheat module (7.5 R3008)[EB/OL]. [2020-05-01]. <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]. [2020-05-01]. <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-andmodels/WOFOST/Documentation-WOFOST.htm>.
- [26] ASSENG S, RICHTER C, WESSOLEK G. Modelling root growth of wheat as the linkage between crop and soil[J]. Plant and

- Soil, 1997, 190(2): 267–277.
- [27] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation (version 2005) [EB/OL]. [2020–05–01]. <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>.
- [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] 朱玉洁. 紫花苜蓿生长模拟模型(ALFASM)研究[D]. 北京:中国农业大学, 2004.
ZHU Yujie. ALFASM: alfalfa growth simulation model[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [30] 郑秀琴. 对小麦生长模型WheatSM改进研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
ZHENG Xiugin. Study on improvement of crop simulation model WheatSM[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [31] 段若溪, 姜会飞. 农业气象学[M]. 北京:气象出版社, 2013: 58–65.
- [32] ZHAO Z, WANG E, XUE L, 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.
- [33] 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]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2006, 8(5): 38–44. (in Chinese)
- [34] 王彬. 限水灌溉下极端晚播冬小麦的产量形成与水氮利用特征[D]. 北京:中国农业大学, 2016.
WANG Bin. Characteristics of yield formation and water-nitrogen use in extremely-late sown winter wheat with increased seeding rate under limited irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [35] 庄嘉祥, 姜海燕, 刘蕾蕾, 等. 基于个体优势遗传算法的水稻生育期模型参数优化[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2220–2231.
ZHUANG Jiaxiang, JIANG Haiyan, LIU Leilei, et al. Parameters optimization of rice development stages model based on individual advantages genetic algorithm[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2220–2231. (in Chinese)
- [36] WU L, FENG L, ZHANG Y, et al. Comparison of five wheat models simulating phenology under different sowing dates and varieties[J]. Agronomy Journal, 2017, 109(4): 1280–1293.
- [37] 陈满霞, 蒋玉蓉, 於金生. 小麦春化作用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(24): 6–12.
CHEN Manxia, JIANG Yurong, YU Jinsheng. Research progress of vernalization of wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(24): 6–12. (in Chinese)
- [38] 陈先冠, 冯利平, 马雪晴, 等. 不同播期和灌水条件下冬小麦生物量变化与产量模拟[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 349–357.
CHEN Xianguan, FENG Liping, MA Xueqing, et al. Biomass change and yield simulation of winter wheat under different sowing dates and irrigation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 349–357. (in Chinese)
- [39] 刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于DSSAT模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 124–129.
LIU Jian'gang, CHU Qingquan, WANG Guangyao, et al. Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 124–129. (in Chinese)