

# 基于 APSIM 模型的地膜覆盖与露地 种植条件下旱地小麦灌浆过程模拟

张仕林<sup>1</sup>,程宏波<sup>1</sup>,柴守玺<sup>2</sup>,马建涛<sup>2</sup>,  
柴雨葳<sup>2</sup>,王彦萍<sup>2</sup>,高甜甜<sup>2</sup>,张博<sup>2</sup>

(1.甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃兰州 730070; 2.甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院,甘肃兰州 730070)

**摘要:**准确模拟小麦籽粒干物质积累过程可为调控小麦生产提供技术支持。基于 APSIM 模型模拟数据和大田实测数据同步研究旱地冬小麦籽粒干物质积累过程,并在模型验证的基础上分析积温对小麦籽粒干物质积累过程的影响。APSIM-Wheat 模型模拟地膜覆盖和露地种植在灌浆期各阶段粒重和籽粒灌浆速率的决定系数大于 0.92,归一化均方根误差小于 16.25%,有效性指数大于 0.91,表明 APSIM-Wheat 模型在研究区模拟小麦灌浆过程具有较好的拟合度和适应性。地膜覆盖种植优于露地种植,两年度模型模拟地膜覆盖籽粒干物质日积累量模拟值高于露地 5.23%,田间实测地膜覆盖的最大灌浆速率平均高于露地 10.46%,快增期平均灌浆速率高于露地 13.68%,千粒重平均高于露地 2.50%。Logistic 进一步分析表明,地膜覆盖种植有利于提前最大灌浆速率的时间,减少灌浆渐增期、缓增期的持续时间;其次,积温通过影响籽粒干物质日积累量进而影响灌浆速率,在灌浆期大气日积温、土壤日积温与籽粒干物质日积累量均呈极显著正相关关系。

**关键词:**小麦;灌浆;APSIM 模型;积温

**中图分类号:**S512.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:**A

## Simulation of grain filling process of dryland wheat under plastic film mulching and open field cultivation based on the APSIM model

ZHANG Shilin<sup>1</sup>, CHENG Hongbo<sup>1</sup>, CHAI Shouxi<sup>2</sup>, MA Jiantao<sup>2</sup>,  
CHAI Yuwei<sup>2</sup>, WANG Yanping<sup>2</sup>, GAO Tiantian<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science/College of Agronomy,  
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** A precise simulation of wheat dry matter accumulation process may provide technical support to regulate wheat production. The data simulated by APSIM model and the field data were used to study dryland winter grain dry matter accumulation process simultaneously. Based on the model validation, the effect of accumulated temperature on wheat grain dry matter accumulation process was analyzed. The APSIM-Wheat model simulated plastic film mulching and open field planting with the coefficient of determination greater than 0.92 for grain weight and grain filling rate at each stage of grain filling. The normalized root mean square error was less than 16.25%, and the effectiveness index was greater than 0.91, indicating that the APSIM-Wheat model had a good fit and adaptability in simulating the wheat grain-filling process in the study area. Plastic film mulching was better than open field planting. The simulated value of the dry matter accumulation of mulching grains simulated by the model was 5.23% higher than that of the open field planting in the two-year model simulation. The maximum filling rate of the field measured in the field was on average 10.46% higher than that of the open field. The average grouting rate in the rapid growth period was 13.68% higher than that in the open field. The average in fast increase period was 13.68%

higher than that in the open field. The thousand-grain weight was on average 2.50% higher than that of the open field. Logistic further analysis showed that the plastic film mulching planting was beneficial to advance the time of the maximum grouting rate and reduce the duration of the pyramid period and slowly increase period. Secondly, the accumulated temperature affected the grain filling rate by affecting the daily accumulation of grain dry matter. During the grain filling period, the daily accumulated temperature of the atmosphere and the soil had a very significant positive correlation with the daily accumulation of grain dry matter.

**Keywords:** wheat; grain; APSIM model; accumulated temperature

小麦产量受品种、环境和栽培措施等多种因素影响,籽粒干物质积累是产量形成的基础,而灌浆决定着小麦的千粒重和最终产量,对小麦产量形成和品质具有重要意义。研究表明灌浆速率和灌浆持续时间是影响小麦粒重的关键因子,受遗传特性和环境因素的影响,且环境效应的影响大于基因效应<sup>[1-4]</sup>。环境效应对灌浆过程具有不同影响,有研究者认为环境因子是通过影响灌浆速率进而影响粒重<sup>[5]</sup>,如裴雪霞等<sup>[6]</sup>、温红霞等<sup>[7]</sup>研究表明播期和种植密度对灌浆速率的影响较大但对灌浆持续时间的影响较小;有研究者认为是通过影响灌浆持续时间<sup>[8]</sup>,如苗永杰等<sup>[9]</sup>、韩占江等<sup>[10]</sup>研究多个小麦品种的灌浆特性,认为灌浆速率比较稳定,而灌浆持续时间易受环境因素的影响,赵凯男等<sup>[11]</sup>研究多种覆盖方式下土壤水热变化对小麦灌浆特性的影响,表明地膜覆盖的增温保墒效应有利于延长灌浆快增期的持续时间并缩短灌浆持续时间,从而提高整个灌浆阶段的平均灌浆速率,进而实现增产的目的。

目前关于小麦籽粒灌浆过程的研究方法多采用 Logistic 方程<sup>[12-14]</sup>和 Richards 方程<sup>[15-16]</sup>,研究内容主要集中于播期、密度、水肥和栽培措施等对小麦籽粒灌浆特性的影响,而日积温对小麦灌浆过程影响的研究则鲜有报道,APSIM-Wheat 模型将光合生产和干物质积累分配作为小麦籽粒干物质积累的主要来源,以积温、水分和养分作为影响作物物候期发展的限定因素,能够较好地解释积温对小麦籽粒干物质积累过程的影响。因此,本试验评价 APSIM-Wheat 模型对地膜覆盖和露地种植旱地小麦灌浆过程的适应性,同时探究日积温对籽粒灌浆过程的影响,以期对旱地小麦高产稳产和农业可持续性发展提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2017—2018 年(简称 2018 年)、2018—2019 年(简称 2019 年)在甘肃省定西市通渭县甘肃

农业大学试验基地进行,该区为黄土丘陵典型的雨养农业区。土壤类型为黄绵土,属半干旱气候,作物一年一熟,年均气温 7.2℃,无霜期 120~170 d,年蒸发量>1 500 mm,多年平均降水量约 390.6 mm,其中约 60%集中在 6—9 月。本试验中 2018 和 2019 年冬小麦生育期内降水量分别约 345.10 mm 和 269.90 mm,有效降水量(≥5 mm)分别约为 219.20 mm 和 208.40 mm。

### 1.2 试验设计

本研究以冬小麦品种‘陇中 2 号’为供试材料,设置地膜覆盖种植(PM)和无覆盖露地种植(CK)2 个处理,各处理小区面积均为 30 m×6 m,每个处理 3 次重复,采用随机区组排列。具体试验处理如下:(1)地膜覆盖种植(PM):旋耕整地,耧平后覆膜,地膜幅宽和厚度分别为 120 cm 和 0.1 mm,膜面覆土 1 cm,膜上播种 5 行,穴播小麦,行距 20 cm;(2)露地对照种植(CK):旋耕整地,耧平后平作,条播行距 20 cm。各处理播种量、施肥量、田间管理一致,播种量为 225 kg·hm<sup>-2</sup>,施纯氮 120 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>,均作为基肥在旋耕整地时一次性施入,生育时期内不再追肥。在开花期进行 1~2 次“一喷三防”作业。

初花期在每小区选择同天开花且穗长相、长势和大小基本一致、无病虫害的单茎 120 个挂牌标记,从开花后 7 d 开始每隔 3 d(2018 年为每隔 5 d)取样一次,遇雨延后 1 d 或 2 d,直至完全成熟。从每小区每次取样 10 穗带回室内,将籽粒放置在 105℃烘箱内杀青 20 min,而后置于 75℃环境烘至恒重,计算千粒重及灌浆速率。采用 iButton 温度记录仪,设置为连续间隔 2 h 记录监测土壤 5 cm、10 cm 和 20 cm 3 个土层昼夜温度变化。

### 1.3 研究方法

APSIM(Agricultural Production Systems sIMulator)模型主要有土壤、水、氮、作物残留、作物生长和作物发育模块,各模块间由逐日气象数据驱动的作物-土壤系统进行数据交互<sup>[17]</sup>,应用范围已经扩展到温室气体排放、水肥协同调控、气候风险评估及农

业可持续发展等领域<sup>[18-19]</sup>。本研究对 APSIM-Wheat 模型进行本土化设计,进而评价其在模拟地膜覆盖(SPM)和露地种植(SCK)旱地小麦灌浆过程的适应性,同时探究影响小麦灌浆过程的作用因子。

1.3.1 数据来源 气象数据来源于甘肃省气象局,收集实验点 2017—2019 年的基础气象资料,建立 APSIM-Wheat 模型所需的气象数据库,逐日数据包

括最高和最低气温(℃)、太阳辐射量(MJ·m<sup>-2</sup>)、降水量(mm)。逐日太阳辐射量无法直接获取,使用日照时间转换算法获取<sup>[20]</sup>。土壤属性数据由田间测定,同时参考李广等<sup>[21]</sup>人在黄土丘陵区 APSIM-Wheat 模型适应性研究积累,经过转换得到适用于本研究区的土壤属性数据。作物属性数据通过采用穷举试错法和二分法多次试错并参考 Zhao 等<sup>[22]</sup>和何亮等<sup>[23]</sup>人的研究得到,如表 1 所示。

表 1 小麦模块的初始参数值

Table 1 The initial parameter value of the wheat module

参数类别 Parameter	定义 Definition	单位 Unit	参数值 Value
vern_sens	作物春化敏感性指数 Crop vernalization sensitivity index		2.8
tt_end_of_juvenile	出苗到拔节期积温 Accumulated temperature from emergence to jointing stage	℃·d	545.0
grains_per_gram_stem	每茎的谷粒质量 Kernel number per stem weight at the beginning of grain filling	g	28.0
potential_grain_filling_rate	潜在灌浆速率 Potential grouting rate	g·grain <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	0.0024
photop_sens	作物光周期敏感性指数 Sensitivity index of crop photoperiod		3.6
max_grain_size	最大谷粒质量 Maximum grain size	g	0.042
tt_floral_initiation	始花期的积温 Accumulated temperature at the beginning of flowering	℃·d	398
tt_flowering	开花期的积温 Accumulated temperature at flowering stage	℃·d	337
tt_start_grain_fill	灌浆期的积温 Accumulated temperature during grouting	℃·d	338

1.3.2 模型有效性检验 本研究选择检验模型有效性的指标包括决定系数  $R^2$ 、均方根误差  $RMSE$ 、归一化均方根误差  $NRMSE$  和模型有效性参数  $M_E$ 。模型的模拟值和实测值间的吻合程度受模型的准确度和实测误差的共同影响。 $R^2$ 反映了模型模拟值相对于实测值的真实偏差,其范围在 0~1 之间,越接近 1 说明模型模拟趋势性越好,反之越差。 $RMSE$ 反映了模型模拟值相对实测值的绝对误差量, $NRMSE$ 反映了模型模拟值相对实测值的相对误差量, $RMSE$ 和  $NRMSE$ 越小说明模拟值与实测值之间的一致性越好。一般认为  $NRMSE < 20\%$  时模拟效果较好。 $M_E > 0.5$  时,说明模型的模拟效果良好,检验模型有效性指标计算方法如下<sup>[24]</sup>:

$$RMSE = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(OBS_i - SIM_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$NRMSE = 100 \times \frac{\left[ \sum_{i=1}^n \frac{(OBS_i - SIM_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}}{OBS_{mean}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i^2)} \quad (3)$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - OBS_{mean})^2} \quad (4)$$

式中, $OBS_i$ 为实测值, $SIM_i$ 为模拟值, $OBS_{mean}$ 为实测的平均值

#### 1.4 Logistic 模型统计方法

应用 Logistic 方程对籽粒干物质积累过程进行拟合并计算相应的灌浆特征参数,进而分析积温与籽粒干物质积累间的关系。Logistic 方程为  $W = A / (1 + Be^{-CX})$ ,其中  $X$  为开花后的积温(℃·d), $W$  为花后千粒重(g), $A$ 、 $B$  和  $C$  为模型参数,由方程一阶导数和二阶导数推导出灌浆参数<sup>[25-26]</sup>。

灌浆高峰开始日期的积温  $X_1 = (\ln B - 1.317) / C$

灌浆高峰结束日期的积温  $X_2 = (\ln B + 1.317) / C$

花后粒重  $W$  达 99% 时的积温  $X_3 = (\ln B + 4.59512) / C$

灌浆速率最大时的积温  $X_{max} = \ln B / C$

#### 1.5 数据整理与分析

采用 Microsoft Excel 对试验数据进行整理并用 SPSS 20.0 进行回归分析和相关性分析。采用 SigmaPlot 14.0 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型有效性检验

采用校准后的 APSIM-Wheat 模型对 2018 年和 2019 年不同覆盖处理下冬小麦籽粒灌浆过程进行模拟,并将模型模拟数据与田间实测数据进行有效性验证。由表 2 可见,2018、2019 年度的灌浆速率、粒重模拟值与实测值呈线性正相关关系。其中 AP-

SIM-Wheat 模型对粒重的模拟效果最佳,  $RMSE = 0.7027 \sim 3.6097 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1}$ 、 $NRMSE = 2.4400\% \sim 15.9126\%$ 、 $M_E = 0.9912 \sim 0.9968$ 、 $R^2 = 0.9935 \sim 0.9972$ 。APSIM-Wheat 模型对籽粒灌浆速率的模拟效果较好, 模拟值与实测值间  $RMSE = 0.1614 \sim 0.2110 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $NRMSE = 12.5506\% \sim 16.2592\%$ 、 $M_E = 0.9124 \sim 0.9551$ 、 $R^2 = 0.9245 \sim 0.9878$ 。APSIM-Wheat 模型对灌浆速率和粒重的模拟精度较高, 模拟值和实测值间的一致性和趋势性

均较高。可以用于研究地膜覆盖和露地种植下旱地冬小麦灌浆过程的模拟分析。

## 2.2 旱地冬小麦粒重动态变化

如图 1 所示, 各处理粒重随时间的动态变化均呈“S”型曲线增长, 根据各阶段灌浆速率的不同可将灌浆时期分为渐增期、快增期和缓增期。2018、2019 年灌浆渐增期分别持续约 12 d、14 d, 处理间此阶段籽粒干物质积累对粒重贡献率无明显差异, 但年际间差异较大(图 2), 2018、2019 年渐增期籽粒干

表 2 测定指标及检验模型模拟效果指标

Table 2 Measurement index and test model simulation effect index

测定指标 Measurement index	年份 Year	处理 Treatment	拟合方程 Fitting equation	$RMSE$ ( $\text{g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} / \text{g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$NRMSE$ /%	$M_E$	$R^2$
粒重 Grain weight	2018	CK	$y = 0.9788x + 0.4621$	0.7027	2.4400	0.9968	0.9972
		PM	$y = 1.0103x + 0.4012$	1.1344	3.8691	0.9915	0.9950
	2019	CK	$y = 0.9524x + 0.4721$	2.8760	13.5936	0.9943	0.9935
		PM	$y = 1.0394x - 0.2958$	3.6097	15.9126	0.9912	0.9949
均值 Mean				2.0807	8.9538	0.9935	0.9952
灌浆速率 Grouting rate	2018	CK	$y = 0.9436x + 0.1192$	0.2110	16.2592	0.9311	0.9345
		PM	$y = 1.0705x + 0.1192$	0.1614	12.5506	0.9551	0.9878
	2019	CK	$y = 1.0288x - 0.0512$	0.2106	15.9669	0.9124	0.9245
		PM	$y = 0.8659x + 0.2031$	0.2035	14.5770	0.9349	0.9414
均值 Mean				0.1966	14.8384	0.9334	0.9471

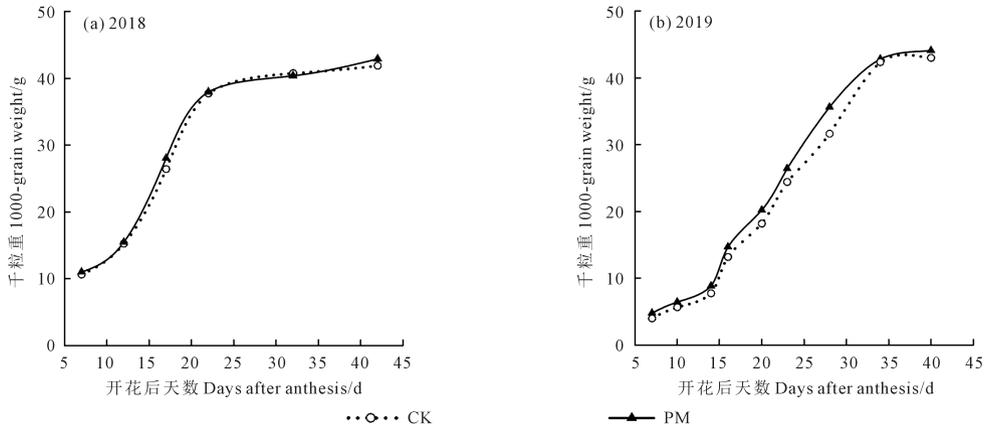


图 1 2018、2019 年地膜覆盖 (PM) 和露地 (CK) 处理小麦粒重动态变化

Fig.1 Dynamic changes of wheat grain weight under plastic film (PM) and open field (CK) treatments in 2018 and 2019

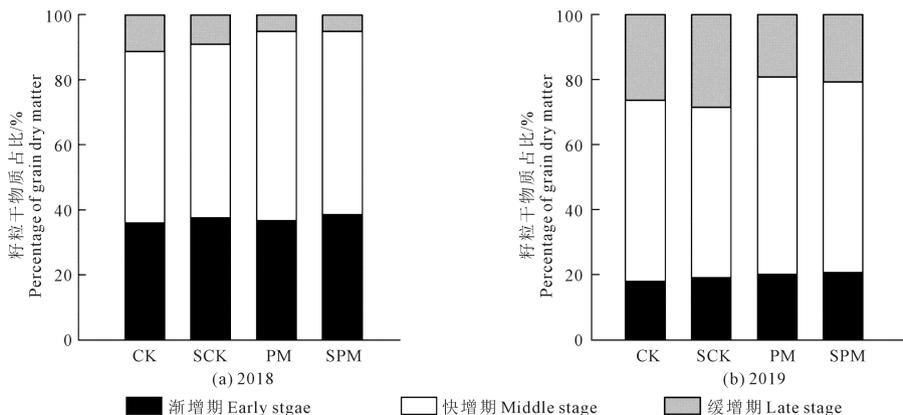


图 2 2018、2019 年灌浆各阶段籽粒干物质积累量占比

Fig.2 Percentage of dry matter accumulation of grains of at each stage of filling in 2018 and 2019

物质积累对粒重贡献率分别为 36.74%、19.57%。2018、2019 年灌浆快增期分别持续约 16 d、14 d,此阶段对粒重贡献率表现为地膜覆盖大于露地,2018、2019 年地膜覆盖快增期对粒重贡献率分别为 57.03%、60.64%,露地分别为 52.20%、55.53%。2018、2019 年灌浆缓增期分别持续约 4 d、6 d,此阶段对粒重贡献率表现为地膜覆盖小于露地处理,2018、2019 年地膜覆盖占总粒重的 9.17%、19.20%,露地占总粒重的 11.45%、26.39%。

2018 和 2019 年中地膜覆盖处理小麦千粒重高于无覆盖处理且 2019 年高于 2018 年。2018 年地膜覆盖和露地种植处理千粒重分别为 42.93 g 和 41.90 g,2019 年分别为 44.10 g 和 43.01 g,2018 年地膜覆盖和露地种植的千粒重模型模拟值分别为 42.30 g 和 40.78 g,2019 年分别为 46.10 g 和 45.34 g。2018、2019 年中地膜覆盖高出露地 2.46%、2.53%,模拟值高出 3.73%、1.68%;2019 年较 2018 年地膜覆盖和露地种植处理的千粒重实测值分别提高 2.66%和 2.73%,模拟值提高 11.18%和 8.98%。

如图 3 所示,粒重变化趋势、阶段粒重占比和千粒重实测值与模拟值基本一致。其中对于粒重的动态变化  $M_E$  和  $R^2$  均大于 0.99,  $RMSE$ 、 $NRMSE$  的最值分别为  $3.609 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1}$  和 15.91%,表明 APSIM-Wheat 可用来描述小麦粒重的动态变化。

### 2.3 对旱地冬小麦灌浆特性

由图 4 可见灌浆速率随时间推进呈正态变化。2018、2019 年渐增期的平均灌浆速率分别为  $1.32$ 、 $0.62 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;快增期的平均灌浆速率和最大灌浆速率处理间、年际间均存在差异,总体表现为 2018 年大于 2019 年,地膜覆盖大于露地种植,具体为 2018、2019 年的地膜覆盖处理快增期的平均灌浆速率为  $2.45$ 、 $1.91 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,露地为  $2.12$ 、 $1.71 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ;2018、2019 年地膜覆盖处理小麦最大灌浆速率为  $2.51$ 、 $2.75 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,露地为  $2.27$ 、 $2.50 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。缓增期平均灌浆速率总体表现为 2019 年大于 2018 年,露地种植大于地膜覆盖,具体为 2018、2019 年地膜覆盖缓增期的平均灌浆速率为  $0.35$ 、 $1.20 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,露地为  $0.95$ 、 $1.78 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2018、2019 年度中地膜覆盖处理小麦最大灌浆速率及快增期平均灌浆速率均高于露地,最大灌浆速率分别增加 10.57%、10.35%,快增期平均灌浆速率分别增加 15.40%、11.97%。年际间因气候条件不同灌浆速率存在差异,2019 年地膜覆盖和露地种植处理最大灌浆速率高于 2018 年,分别高出 9.73%、9.95%。

灌浆速率实测值与模拟值的  $M_E$  和  $R^2$  最小值分别为 0.9124 和 0.9245,  $RMSE$  和  $NRMSE$  最大值分别为  $0.2110 \text{ g} \cdot 1000\text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  和 16.2592%,表明 APSIM-Wheat 模型可用于模拟小麦灌浆速率。在模型模拟灌浆速率时影响数据间一致性的主要因素是灌浆峰值和灌浆缓增期,如图 5 所示(见 208 页),具体表现为灌浆峰值错位,模型模拟的缓增期持续时间偏短导致灌浆速率偏大。

### 2.4 环境因子对旱地冬小麦粒重的影响

因田间管理措施一致,影响灌浆期籽粒干物质日积累量的主要环境因子是水分和温度。以日步长输出 2018、2019 年度籽粒干物质日积累量和根际(0~20 cm)土壤日含水量,分析土壤日含水量、大气日积温与土壤日积温与小麦籽粒干物质日积累间的相关性(图 6、7,见 209、210 页),结果表明,两年土壤日含水量与籽粒干物质日积累量无相关性( $r = -0.27$ 、 $r = 0.08$ ),大气日积温与籽粒干物质日积累量呈极显著正相关( $r = 0.67$ 、 $r = 0.56$ ),土壤日积温与籽粒干物质日积累量呈极显著正相关( $r = 0.66$ 、 $r = 0.69$ )。2018、2019 年是丰水年,模型模拟和田间实测的地膜覆盖和露地灌浆期土壤含水量均无明显差异,表明在土壤含水量相同的条件下,土壤温度是影响灌浆期籽粒干物质日积累量的主要环境因子。地膜覆盖较露地显著提高灌浆阶段的平均土壤日积温,2018、2019 年分别高出  $0.87^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $0.98^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,地膜覆盖的平均籽粒干物质日积累量高于露地,2018、2019 年分别高出 5.41%、5.05%。具体来看,两年在灌浆渐增期、快增期、缓增期地膜覆盖的土壤平均积温高于露地,2018 年分别高出  $0.84^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $0.96^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $1.09^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,2019 年高出  $0.84^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $0.67^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $1.18^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ,而地膜覆盖的籽粒干物质日积累量在灌浆各阶段均高出露地 5%左右,且年际间无明显差异。

积温作为步长单位比天作为步长单位更能够反映作物生长发育的真实进程,能够避免由于天气条件复杂变化带来的模拟误差。用 Logistic 方程以开花后的大气积温、土壤积温分别作为自变量,粒重为因变量进行拟合分析,可以很好的描述不同覆盖处理下粒重与积温间的关系( $R^2 > 0.97$ )。由表 3 可见(见 210 页),2018、2019 年在完成渐增期( $X_1$ )、缓增期( $X_3 - X_1$ )、达到最大灌浆速率( $X_{\max}$ )以及完成灌浆所需的大气积温、土壤积温均为地膜覆盖小于露地,表明所需的时间也小于露地。模型模拟数据用 Logistic 分析积温与粒重间的关系是其表现结果与实测数据间的趋势一致,但数据间的一致性存在差异。

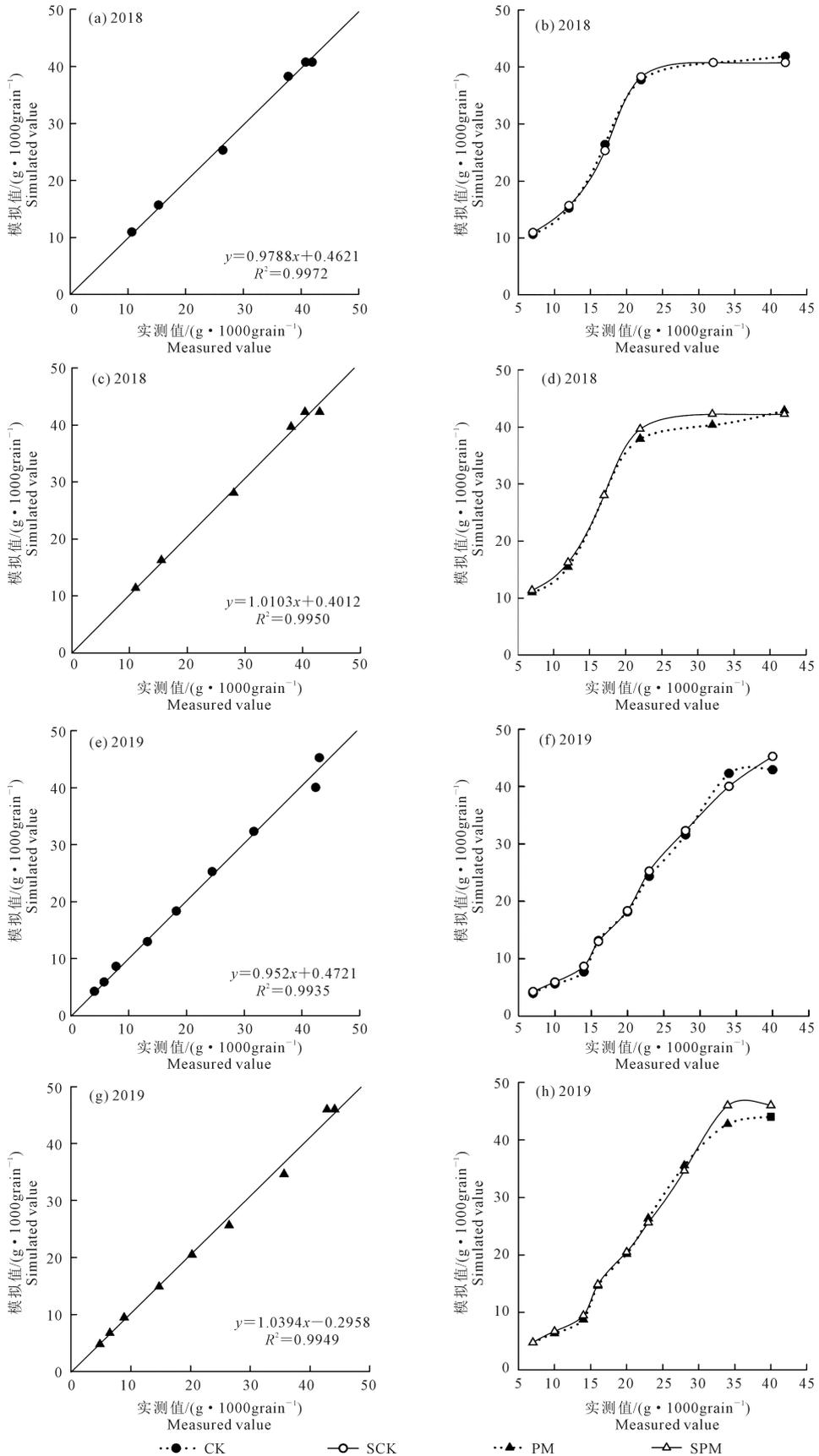


图 3 2018、2019 年不同处理千粒重变化模拟

Fig.3 Simulation of dynamic change of 1000-grain weight in different treatments in 2018 and 2019

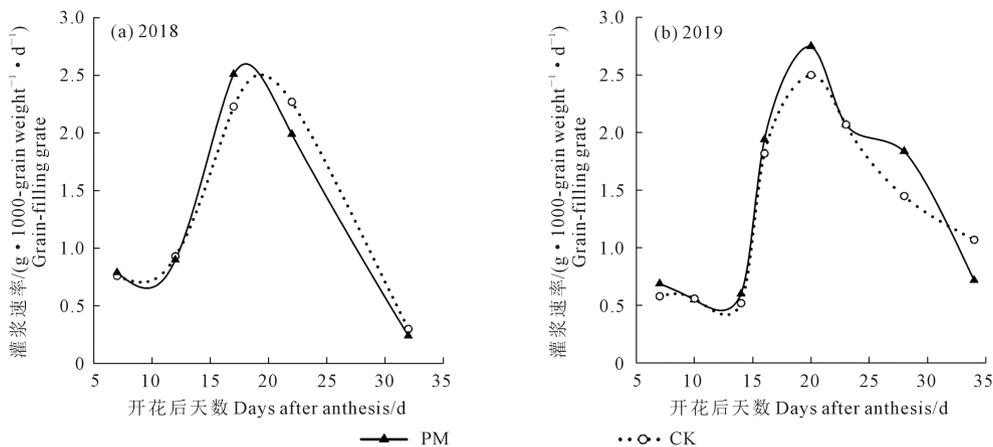


图 4 2018、2019 年地膜覆盖和露地处理小麦灌浆速率

Fig.4 Grain-filling rate of mulching and open field treatment wheat in 2018 and 2019

## 3 讨论

### 3.1 覆盖对小麦粒重的影响

两年度模型模拟以及田间试验均表明,地膜覆盖种植的小麦粒重高于露地种植,其原因为地膜覆盖的小麦在灌浆快增期的最大灌浆速率及平均灌浆速率高于露地种植,在该阶段籽粒干物质积累量较露地种植显著提高。结合 Logistics 进一步分析大气积温、土壤积温和粒重间的关系,结果表明,地膜覆盖种植在灌浆各阶段达到最大灌浆速率、完成灌浆所需的大气积温、土壤积温均小于露地,表明地膜覆盖种植有利于提前最大灌浆速率的时间,减少灌浆渐增期、缓增期的持续时间,进而实现增产,这与赵凯男等<sup>[11]</sup>和王振峰等<sup>[27]</sup>的研究结果类似。

### 3.2 影响小麦灌浆的环境因子

在灌浆期籽粒干物质日积累量与大气日积温、土壤日积温显著正相关,但大气积温对籽粒干物质日积累量的影响略大于土壤积温,而大气温度影响土壤积温,即日积温越高籽粒干物质日积累量越大,反之亦然。地膜覆盖的土壤积温高于露地,导致灌浆期地膜覆盖的籽粒干物质日积累量高于露地,而籽粒干物质日积累量是形成籽粒灌浆速率和粒重的基础,最终地膜覆盖的产量高于露地,该结果与赵凯男等<sup>[11]</sup>研究一致。惠海滨等<sup>[28]</sup>通过研究灌水量对小麦产量的影响表明充足的土壤水分可提高小麦灌浆期旗叶、籽粒中蔗糖和可溶性糖的代谢活性,进而显著增加籽粒产量,保持充足的土壤水分有利于小麦灌浆;赵凯男等<sup>[11]</sup>、陈紫薇等<sup>[29]</sup>在干旱地区地膜覆盖对小麦灌浆特性的研究中表明地膜覆盖具有保墒提墒、提高土壤水分利用率的作用,同时促进小麦生长发育以及养分的吸收和利

用,从而提高作物产量。以上研究均表明土壤水分会影响小麦灌浆,而在 2018、2109 年本研究区属于丰水年,模型模拟和田间实测的地膜覆盖和露地灌浆期土壤含水量均无明显差异,土壤日含水量与籽粒干物质日积累量无显著性关系,仅土壤积温存在差异,结果表明在相同的土壤水分条件下土壤积温是影响灌浆的主要环境因素。

### 3.3 APSIM-Wheat 模型对小麦灌浆过程的适应性

传统的田间试验方法研究小麦籽粒干物质积累过程具有局限性,影响因子较多、干扰性较大,而采用作物生长模型方法研究能定量研究单一环境影响因子的影响以及多因子间的互作效应。在本研究中,经过校准和验证的 APSIM-Wheat 模型对地膜覆盖和露地种植下的小麦灌浆过程具备较高的解释性。两年度的本研究区模型模拟与田间实测灌浆速率和粒重间  $RMSE$ 、 $NRMSE$ 、 $M_E$ 、 $R^2$  值如表 2 所示,各项检验模型模拟效果指标均达到较高水平,模型模拟值与实测值间的趋势性与一致性较高,在本研究区具有较好的拟合度和适应性,另一方面该模型也存局限性,与杨月等<sup>[30]</sup>、聂志刚等<sup>[31]</sup>研究小麦籽粒蛋白质含量和籽粒干物质积累的研究结果类似。APSIM-Wheat 模型在模拟小麦灌浆生育时期的时间点与田间试验实际观测时间点存在误差<sup>[32-34]</sup>,2018、2019 年模拟值较实测值分别提前 8、6 d。分析其原因认为 APSIM-Wheat 模型中生育期的进程依赖于积温驱动,达到设定积温阈值模型结束当前生育时期进入下一生育时期,而在实际田间实验中因植株个体差异开花时间不统一,一般以田间 50% 的小麦开花认为进入开花期,因这种差异导致模型模拟中作物开花时间与田间实际开花时间不一致;其次在灌浆缓增期持续时间模型模拟与

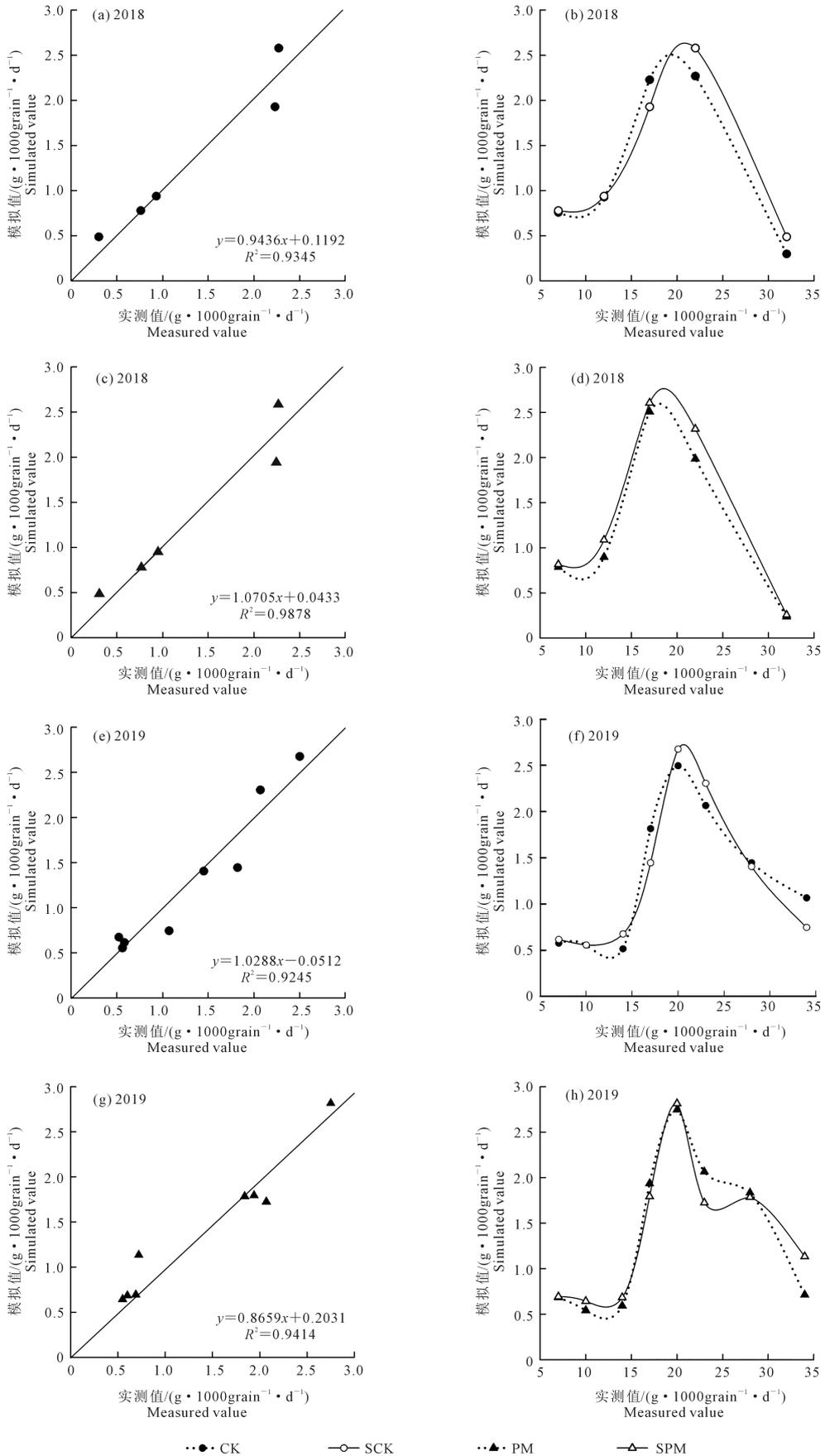
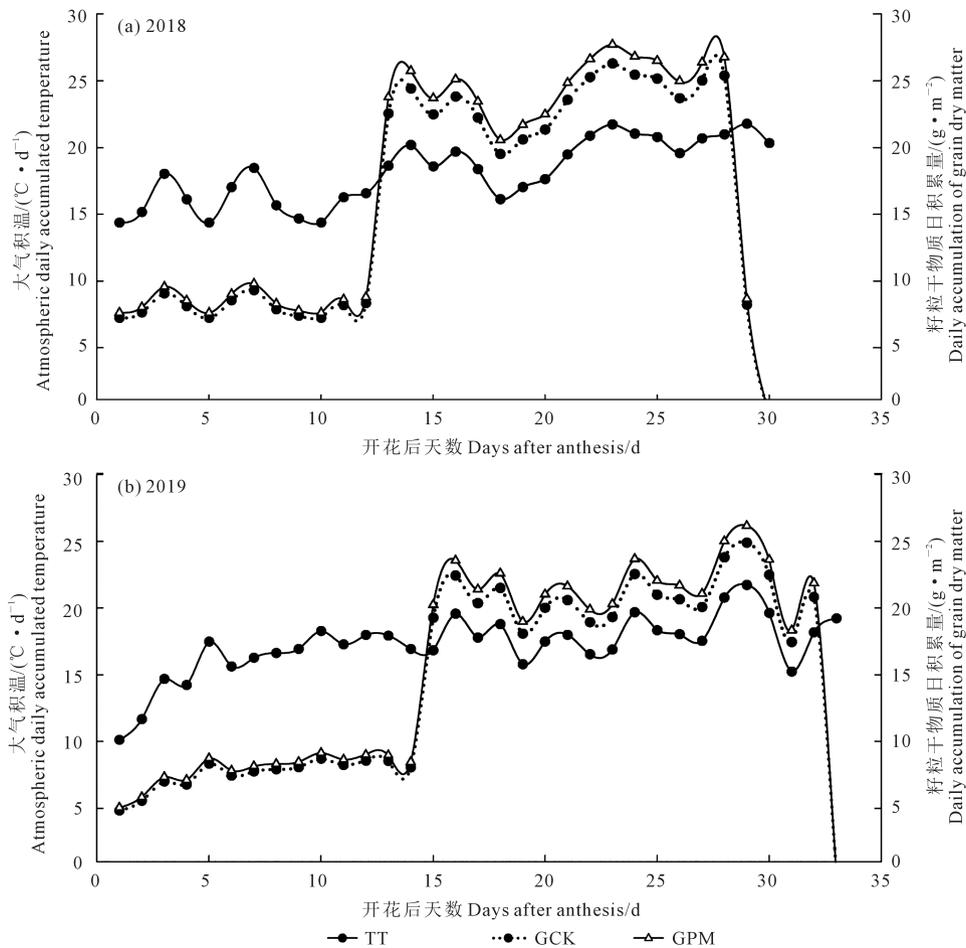


图 5 2018、2019 年不同处理籽粒灌浆速率变化模拟

Fig.5 Simulation of grain-filling rate in different treatments in 2018 and 2019



注:TT:大气积温;GCK:模型模拟露地种植籽粒干物质日积累量;GPM:模型模拟地膜覆盖种植籽粒干物质日积累量。

Note: TT: Atmospheric daily accumulated temperature; GCK: The model simulates the daily accumulation of dry matter in the grains grown in the open field; GPM: The model simulates the daily accumulation of dry matter in the grains planted in the plastic film mulching.

图 6 2018、2019 年大气积温与籽粒干物质日积累量相关性

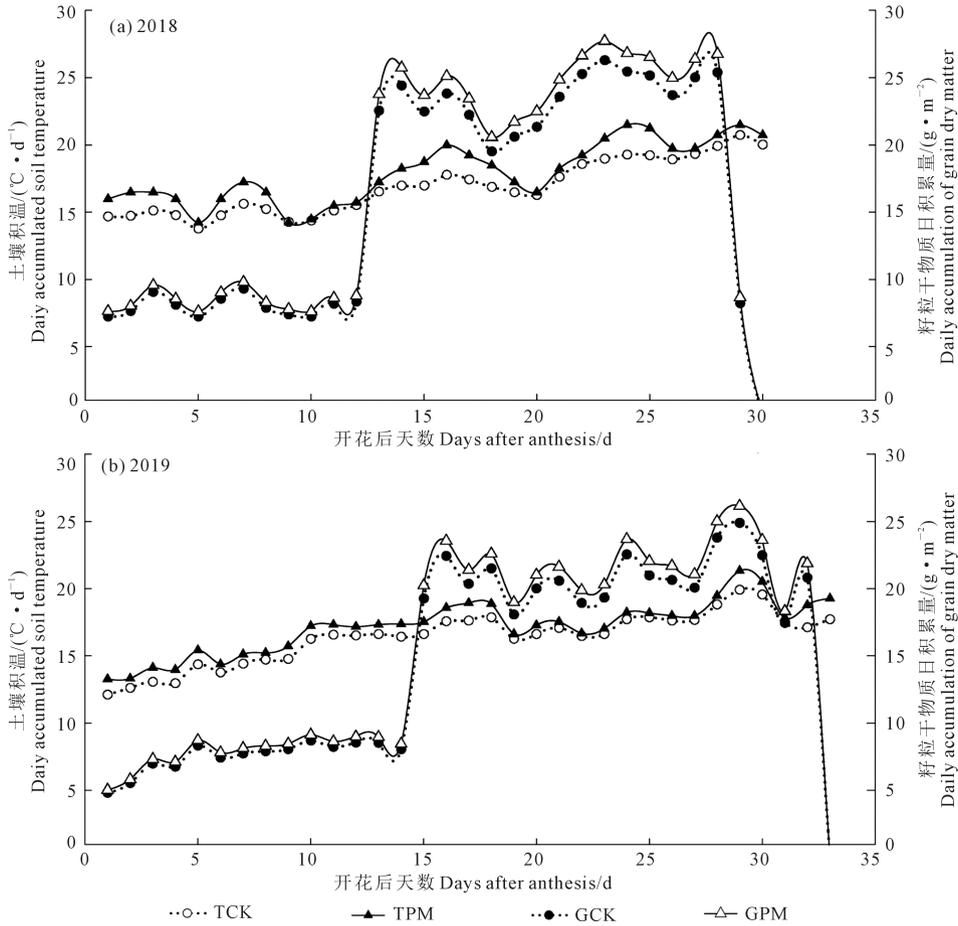
Fig.6 Correlation between atmospheric daily accumulated temperature and daily accumulation of grain dry matter in 2018 and 2019

田间实测存在差异,在模型模拟过程中缓增期持续 2~3 d,而田间实测灌浆缓增期持续 4~6 d,可能是取样过程中人为的选择植株偏绿的个体不能有效的代替群体生长发育状态,而模型模拟以群体为对象,忽略个体差异。

本文仅对地膜覆盖和露地种植下小麦的灌浆过程进行分析研究,重点分析了影响灌浆的环境因子以及 APSIM-Wheat 模型对灌浆过程的模拟适应性和吻合度;其次,籽粒干物质日积累量和逐日土壤含水量是由 APSIM-Wheat 模型模拟输出,并非田间实际测得,模拟过程中忽略田间杂草管理、病虫害等情况及其差异性对小麦生长发育影响。

## 4 结 论

本研究通过大田试验和 APSIM 模型模拟同步研究旱地冬小麦籽粒干物质积累过程,得出 APSIM-Wheat 模型对地膜覆盖和露地种植旱地冬小麦灌浆过程的模拟精度较高,有很好的适应性,可以借助 APSIM-Wheat 模型研究影响灌浆的各种因子。结果表明,积温(大气日积温、土壤日积温)在渐增期和快增期与籽粒干物质日积累量显著正相关,积温越高籽粒干物质日积累量越大,因大气温度影响土壤积温,地膜覆盖在灌浆阶段平均土壤日积温较露地显著提高,致使地膜覆盖在灌浆期的籽粒干物



注: TCK: 露地土壤日积温; TPM: 地膜覆盖土壤日积温; GCK: 模型模拟露地种植籽粒干物质日积累量; GPM: 模型模拟地膜覆盖种植籽粒干物质日积累量。

Note: TCK: Daily accumulated temperature of open soil; TPM: Daily accumulated temperature of soil covered in the plastic film mulching; GCK: The model simulates the daily accumulation of dry matter in the grains grown in the open field; GPM: The model simulates the daily accumulation of dry matter in the grains planted in the plastic film mulching.

图 7 2018、2019 年土壤积温与籽粒干物质日积累量相关性

Fig.7 Correlation between daily accumulated soil temperature and daily accumulation of grain dry matter in 2018 and 2019

表 3 2018、2019 年籽粒灌浆过程的 Logistic 方程拟合  
Table 3 Logistic equation fitting of grain-filling process in 2018 and 2019

指标 Index	年份 Year	处理 Treatment	参数 Parameters							R <sup>2</sup>
			A	B	C	X <sub>1</sub> /(°C · d)	X <sub>2</sub> /(°C · d)	X <sub>3</sub> /(°C · d)	X <sub>max</sub> /(°C · d)	
大气积温 Atmospheric accumulated temperature	2018	CK	1.037	26.398	7.580	156.37	265.54	628.96	253.74	0.9980
		SCK	1.052	25.554	7.570	153.98	263.41	627.19	251.56	0.9930
		PM	1.021	22.150	7.626	127.34	225.64	550.09	230.33	0.9890
		SPM	1.023	25.337	7.665	136.25	233.55	556.85	239.10	0.9960
	2019	CK	1.098	38.141	6.571	221.69	350.55	785.60	347.31	0.9890
		SCK	1.094	30.014	5.970	218.85	361.63	839.53	357.12	0.9960
		PM	1.078	30.227	6.796	192.91	300.57	697.04	296.86	0.9880
		SPM	1.098	28.842	6.466	198.21	311.80	728.32	307.72	0.9780
土壤积温 Accumulated soil temperature	2018	CK	1.035	14.642	6.242	136.21	276.03	725.34	253.74	0.9990
		SCK	1.054	13.854	6.146	132.74	275.21	731.07	251.56	0.9940
		PM	1.015	14.846	6.474	123.91	249.73	654.49	230.33	0.9980
		SPM	1.040	15.030	6.539	123.77	248.26	649.08	239.10	0.9970
	2019	CK	1.394	32.131	4.490	246.33	401.62	922.80	347.31	0.9980
		SCK	1.419	28.890	4.184	251.29	418.47	977.24	357.12	0.9980
		PM	1.179	26.826	5.276	198.79	336.35	794.65	296.86	0.9930
		SPM	1.253	25.623	4.877	210.05	359.11	854.66	307.72	0.9860

注: CK: 露地种植; SCK: 模型模拟露地种植; PM: 地膜覆盖种植; SPM: 模型模拟地膜覆盖种植。

Note: CK: Open field planting; SCK: Model simulates open field planting; PM: Plastic film mulching planting; SPM: Model simulating plastic film mulching planting.

质日积累量,灌浆期的最大灌浆速率、快增期的平均灌浆速率均高于露地,同时地膜覆盖较露地缩短渐增期和缓增期的持续时间进而实现增产。

### 参 考 文 献:

- [1] DARROCH B A, BAKER R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. *Crop Science*, 1990, 30(3): 525-529.
- [2] DU B B, WANG Q F, SUN G L, et al. Mapping dynamic QTL dissects the genetic architecture of grain size and grain filling rate at different grain-filling stages in barley[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 18823.
- [3] 高翔,董剑,庞红喜.小麦高产品种籽粒灌浆与粒重的关系[J].西北农业学报,2002,11(3):33-35.  
GAO X, DONG J, PANG H X. Relationship of grain-filling and grain weight in high-yield wheat varieties[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2002, 11(3): 33-35.
- [4] 吴晓丽,汤永禄,李朝苏,等.四川盆地小麦籽粒的灌浆特性[J].作物学报,2014,40(2):337-345.  
WU X L, TANG Y L, LI C S, et al. Characteristics of grain filling in wheat growing in Sichuan Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(2): 337-345.
- [5] 冯素伟,胡铁柱,李淦,等.不同小麦品种籽粒灌浆特性分析[J].麦类作物学报,2009,29(4):643-646.  
FENG S W, HU T Z, LI G, et al. Analysis on grain filling characteristics of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4): 643-646.
- [6] 裴雪霞,王姣爱,党建友,等.播期对优质小麦籽粒灌浆特性及旗叶光合特性的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(1):121-128.  
PEI X X, WANG J A, DANG J Y, et al. Characteristics of grain filling and flag leaf photosynthesis of high-quality wheat under different planting dates[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2008, 16(1): 121-128.
- [7] 温红霞,冯伟森,段国辉,等.不同播种密度对冬小麦灌浆特性及产量的影响[J].江西农业学报,2009,21(12):23-25.  
WEN H X, FENG W S, DUAN G H, et al. Effects of different planting densities on grain-filling characteristics and yield of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(12): 23-25.
- [8] 李世清,邵明安,李紫燕,等.小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J].西北植物学报,2003,23(11):2031-2039.  
LI S Q, SHAO M A, LI Z Y, et al. Review of characteristics of wheat grain fill and factors to influence it[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(11): 2031-2039.
- [9] 苗永杰,阎俊,赵德辉,等.黄淮海区小麦主栽品种粒重与籽粒灌浆特性的关系[J].作物学报,2018,44(2):260-267.  
MIAO Y J, YAN J, ZHAO D H, et al. Relationship between grain filling parameters and grain weight in leading wheat cultivars in the yellow and huai rivers valley[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(2): 260-267.
- [10] 韩占江,郝庆炉,吴玉娥,等.小麦籽粒灌浆参数变异及与粒重的相关性分析[J].种子,2008,27(6):27-30.  
HAN Z J, GAO Q L, WU Y E, et al. Variation of parameters of grain filling and correlation analysis with grain weight in wheat[J]. *Seed*, 2008, 27(6): 27-30.
- [11] 赵凯男,常旭虹,张赵星,等.地膜覆盖对小麦土壤水热状况及灌浆特性的影响[J].麦类作物学报,2018,38(10):1237-1245.  
ZHAO K N, CHANG X H, ZHANG Z X, et al. Effect of mulching on the moisture and temperature of soil and grain-filling characteristics of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(10): 1237-1245.
- [12] 刘红杰,倪永静,任德超,等.不同基因型冬小麦籽粒灌浆特征及其与千粒重的关系[J].中国农业气象,2019,40(10):630-636.  
LIU H J, NI Y J, REN D C, et al. Grain filling characters and its correlation with 1000-grain weight in different winter wheat varieties[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(10): 630-636.
- [13] 陈炜,邓西平,聂朝娟,等.不同栽培模式下两个旱地小麦品种籽粒灌浆特性与产量构成分析[J].水土保持研究,2010,17(3):240-244.  
CHEN W, DENG X P, NIE Z J, et al. The grain-filling characteristics and yield components of two wheat varieties under different cultivating models[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(3): 240-244.
- [14] 梁雪齐,李玲,杨志刚,等.株行配置对南疆冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响[J].麦类作物学报,2021,41(4):448-456.  
LIANG X Q, LI L, YANG Z G, et al. Effect of plant and row spacing on grain filling characteristics and yield of winter wheat in southern Xinjiang[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(4): 448-456.
- [15] 李翠,赵伟洁,刘瑞,等.水分胁迫对糜子物质运转和籽粒灌浆特性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):20-27.  
LI C, ZHAO W J, LIU R, et al. Effects of water stress on dry matter translocation and grain filling characteristics in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 20-27.
- [16] 高星,李永祥,杨明涛,等.基于高密度遗传图谱的玉米籽粒灌浆特性遗传解析[J].中国农业科学,2017,50(21):4087-4099.  
GAO X, LI Y X, YANG M T, et al. Genetic dissection of grain filling related traits based on a high-density map in maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(21): 4087-4099.
- [17] ASSENG S, FOSTER I, TURNER N C. The impact of temperature variability on wheat yields[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 997-1012.
- [18] 任新庄.旱地春小麦产量形成对气候变化响应的模拟分析[D].兰州:甘肃农业大学,2017.  
REN X Z. The simulation analysis of spring wheat yield forming to response of climate change [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [19] 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: 52-75.
- [20] 吕硕.气候变化对吉林梨树县春玉米的影响及品种适应研究[D].北京:中国农业大学,2016.  
LYU S. Analysis of impacts of climate change on spring maize and adaptation in maize cultivars in Lishu Jilin [D]. Beijing: Chinese Agricultural University, 2016.
- [21] 李广,黄高宝, BELLOTTI W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J].生态学报,2009,29(5):2655-2663.  
LI G, HUANG G B, BELLOTTI W, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2655-2663.
- [22] ZHAO G, BRYANB 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: 1-11.