

樊玉春, 李 玥, 魏霖静, 等. 三种胡麻生长模型对现蕾期和青果期干旱胁迫响应能力的比较[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 423-433.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.02.015

# 三种胡麻生长模型对现蕾期和青果期干旱胁迫响应能力的比较

樊玉春<sup>1</sup>, 李 玥<sup>2</sup>, 魏霖静<sup>2</sup>, 赵 霞<sup>2</sup>, 周 慧<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学理学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 本研究利用不同胡麻品种、不同干旱程度的大田试验数据, 检验、评估 3 种作物模型干旱胁迫效应算法的精确性, 及其在现蕾期、青果期干旱胁迫处理下对胡麻蒸腾速率、气孔导度、叶面积指数及籽粒产量 4 个指标的模拟预测能力。模拟结果表明, 干旱胁迫使胡麻蒸腾速率、气孔导度、叶面积指数和籽粒产量降低。3 种作物模型干旱胁迫效应算法可以模拟出胡麻生理生化指标在各干旱处理下的变化趋势, 但模拟效果不够理想。3 种干旱胁迫效应算法均低估了籽粒产量。综合考虑, WOFOST 模型干旱胁迫效应算法对籽粒产量、蒸腾速率的模拟效果最好, APSIM 模型干旱胁迫效应算法对气孔导度的模拟效果最好, DSSAT 模型干旱胁迫效应算法对叶面积指数的模拟效果最好。

**关键词:** 胡麻; 作物生长模型; 干旱胁迫; 现蕾期; 青果期

**中图分类号:** S565.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)02-0423-11

## Comparison of responsiveness of three oil flax growth models to drought stress at budding stage and green fruit stage

FAN Yu-chun<sup>1</sup>, LI Yue<sup>2</sup>, WEI Lin-jing<sup>2</sup>, ZHAO Xia<sup>2</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>

(1. College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In this study, the accuracy of drought stress algorithms of three crop models and their ability to simulate and predict four indicators of transpiration rate, stomatal conductance, leaf area index and seed yield of oil flax under drought stress at green fruit stage and budding stage were tested and evaluated using data from field trials with different oil flax varieties and different drought levels. The simulation results showed that drought stress reduced transpiration rate, stomatal conductance, leaf area index and seed yield. The drought stress algorithms of three crop models could simulate the change trends of physiological and biochemical indices of oil flax under every drought treatment, but the simulation was not satisfactory. All three drought stress algorithms underestimated the seed yield. The results indicated that the drought stress algorithm of WOFOST model had the best performance on the simulation of seed yield and transpiration rate, the drought stress algorithm of APSIM model had the best performance on the simulation of stomatal conductance, and the drought stress

algorithm of DSSAT model had the best performance on the simulation of leaf area index.

**Key words:** oil flax; crop growth model; drought stress; budding stage; green fruit stage

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060437、31360315); 甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2020-12); 甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA165)

作者简介: 樊玉春(1997-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 研究方向为应用统计大数据分析。(E-mail) 245309763@qq.com

通讯作者: 李 玥, (E-mail) liyue@gsau.edu.cn

在气候变化的大背景下, 水资源短缺, 干旱是世界粮食安全面临的严重威胁<sup>[1]</sup>, 且全世界迎来水供应

缺乏问题,以及未来粮食需求的增加可能会使干旱更加严重。大量研究结果表明,现蕾期、青果期干旱胁迫会对胡麻生长发育、器官生成、籽粒产量造成不利影响<sup>[2]</sup>。胡麻因其抗旱性强、抗寒性强、耐瘠薄的特点成为了干旱地区重要的经济油料作物,且越来越受到崇尚健康自然的现代消费者青睐<sup>[3]</sup>。干旱是威胁胡麻产量的主要因素,因此,准确预估作物模型对于干旱胁迫下胡麻生长的模拟效果具有重大意义。

作物生长模型是探索全球气候变化背景下作物生产力响应特征及制订相应措施的重要工具<sup>[4]</sup>。康佳等<sup>[5]</sup>基于 APSIM 模型通过控制不同程度干旱胁迫来评估胡麻生理生化及产量对于干旱胁迫的响应,发现该模型具有较高的可行性。李玥等<sup>[6]</sup>采用水驱动作物模型 AquaCrop,模拟、验证胡麻在不同灌溉水平下的生长情况,发现与低灌溉量处理相比,该模型在强化灌溉处理下模拟的胡麻产量更准确,且 FAO 水作物驱动模型具有更高的模拟精度。

何丽等<sup>[2]</sup>发现,胡麻现蕾期的生物产量、气孔导度、蒸腾速率、叶绿素荧光参数等指标与干旱胁迫相关联。对于干旱胁迫的定义虽然简单,但要在建立的作物模型中抽象表达多种干旱胁迫效应算法较为困难。陈先冠等<sup>[7]</sup>利用吴桥县小麦数据测试了 SWC、AT/PT、WS/WD 3 种干旱胁迫模型的表现,结果发现这 3 种干旱胁迫模型对年间水分胁迫因子模拟变化相同,模拟值与实测值相差较小,但没有合理模拟出水分亏缺的发生时间和严重程度。姚宁等<sup>[8]</sup>利用连续 2 季旱田冬小麦数据,通过 DSSAT-GLUE 模块获得不同的参数估计结果,对比确定冬小麦各生理指标模拟值与实测值的差异,结果表明该调参工具具有较好的可靠性和收敛性,但对生长前期的干旱胁迫模拟效果较差,无法准确模拟物候期随水分胁迫的变化。刘健等<sup>[9]</sup>创建新物候期干旱胁迫响应函数,更加明显表现出冬小麦物候期受干旱胁迫的影响,但未考虑物候期对春化作用的影响机制。Chen 等<sup>[10]</sup>对比了 2 个研究地点不同灌溉情境下 SWAT 模型的植物干旱胁迫效应算法,结果发现在缺水灌溉情境下 SWAT 模型对叶面积指数(LAI)的模拟性能降低,并且对产量进行了误差较大的高估。Saseendran 等<sup>[11]</sup>研究了 5 个作物模型,结果发现这些作物模型都没能合理地模拟出蒸腾、碳同化、气孔导度和能量守恒的耦合过程。综上所述,目前较少有利用作物模型模拟干旱胁迫下胡麻

生理指标与籽粒产量的相关研究,且缺少对胡麻现蕾期、青果期 2 个重要物候期的研究。因此,本研究拟通过比较 3 种作物生长模型干旱胁迫效应算法对胡麻蒸腾速率、气孔导度、叶面积指数和籽粒产量的模拟效果,分析明确各干旱胁迫效应算法的优缺点,以为优化、改善干旱胁迫效应算法提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况

试验设在甘肃省兰州市榆中县(35°85'N, 104°12'E)。试验区为温带半干旱大陆性气候,各季节降水差异明显;该区域平均海拔高度 2 159 m,年日照时数 2 562.5 h;年平均降水量 300~400 mm;土壤为典型黄绵土,呈微碱性(pH 为 8.0~8.5)。播前 0~30 cm 土层土壤有机质平均含量为 8.47 g/kg,全氮、磷、钾含量分别为 0.55 g/kg、0.61 g/kg、18.05 g/kg,速效磷、速效钾含量分别为 10.19 mg/kg、106.04 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验选用的胡麻品种为抗旱性较好的陇亚杂 1 号(LYZ1)、陇亚 11 号(LY11)。胡麻种子于 2013 年 4 月 1 日、2014 年 4 月 1 日采用条播方式进行播种,试验采用双因素随机区组法,双因素分别为干旱时期和干旱胁迫程度。播种量为 1 个小区 20 g,小区面积为 3.20 m<sup>2</sup>,行距 20.00 cm,行长 3.25 m,每个小区 3 行,3 次重复。试验设置 2 个干旱时期,分别为现蕾期和青果期,干旱胁迫程度由土壤含水量决定。试验设置对照组(CK)和 2 个干旱胁迫处理组(T1、T2),其土壤相对含水量分别为 70%~80%、50%~60%、30%~40%,于干旱胁迫第 3 d、6 d、9 d、12 d、15 d、18 d 取样测定蒸腾速率( $E$ )、气孔导度( $G_s$ )、叶面积指数(LAI)。每个处理重复 3 次。灌水量用水表严格计量控制,除干旱胁迫处理时期外,其他所有时期提供充分灌溉,农事操作与一般大田相同。

### 1.3 测定指标与测定方法

选择胡麻的现蕾期和青果期的晴日上午(9:00~10:00),当自然光的光照度为 1 000~1 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,使用 Li-6800 便携式光合仪测定蒸腾速率、气孔导度,使用 LAI-2000 冠层分析仪测定叶面积指数。成熟期采用室内考种的方法,按小区收获测定籽粒产量。

## 1.4 干旱胁迫效应算法

**1.4.1 APSIM 模型干旱胁迫效应算法** APSIM 模型是由农业生产系统研究部(APSRU)开发的一种农业系统模型,用于评估农业生产中的风险<sup>[12-13]</sup>。APSIM 模型的干旱胁迫效应算法采用 PERFECT 模型和 CERES 模型中的级联水平衡模型算法求得<sup>[14]</sup>,且使用逐日计算的方式模拟土壤水分,其基本原理是比较植物可吸收的土壤含水量与潜在根系吸水量、作物水分需求量与潜在蒸腾量。APSIM 模型通过土壤干旱胁迫因子来量化光合作用、叶片生长、固氮能力、物候期对干旱胁迫的敏感,从而模拟干旱胁迫对作物不同生育期的影响。

**1.4.2 WOFOST 模型干旱胁迫效应算法** WOFOST 模型是 1 年生作物解释性模型,模拟其在特定气候和土壤条件下的动态生长<sup>[15]</sup>。WOFOST 模型用蒸腾速率变化来响应土壤干旱程度,蒸腾速率直接影响作物的同化速率。WOFOST 模型的作物潜在蒸腾速率( $T_m$ )通过使用 Penman-Monteith (PM) 模型的 Penman 公式计算得到,再使用凋萎点水分含量、土壤体积含水量等参数计算实际蒸腾速率<sup>[16]</sup>,最后使用作物和土壤的蒸腾蒸发量来量化由土壤湿度变化导致的作物同化量的变化。表层土壤蒸发量和作物蒸腾量在计算时视为一个整体,PM 模型通过作物的 LAI 区分二者。

WOFOST 模型使用作物修正系数来校正不同作物的差异,多数作物、部分节水作物的修正系数分别为 1.0、0.8。 $T_a/T_p$  ( $T_a$  为实际蒸腾速率、 $T_p$  为潜在蒸腾速率)是衡量土壤含水量的指标,其值为 1.0 说明作物生长发育正常,土壤含水量处于土壤田间最大持水量和土壤临界含水量之间;当土壤含水量降低时,土壤含水量的下降将导致实际蒸腾速率下降,进而影响作物的正常生长发育。

**1.4.3 DSSAT 模型干旱胁迫效应算法** DSSAT 由国际农业技术转让基准点网络项目开发<sup>[17]</sup>,可以促进作物模型在农艺学研究系统方法中的应用,其整合作物、土壤、气候和管理等模块,以便更好地决定将生产技术从一个土壤、气候不同的地方转移到其他地方<sup>[18]</sup>。DSSAT 模型对干旱胁迫的响应是从作物蒸腾速率的角度来考虑,采用 2 个干旱胁迫因子模拟干旱胁迫对作物造成的影响,以日为步长,通过比较潜在根系吸水速率与潜在蒸腾速率,对作物生长是否受到影响做出判断,并量化影响的程度。

DSSAT 模型模拟土壤水分的理论依据是前人提出的一维“翻桶式”的土壤含水量平衡方法<sup>[19]</sup>,该方法对各层土壤的根系吸水和水分流动进行模拟。在土壤水分充足的环境下,植株根系的潜在吸水和潜在蒸腾比值大于 1,即植株根系吸收水分充足,作物生长发育正常,作物没有受到干旱胁迫影响;发生干旱胁迫时,植株根系的水分吸收量低于潜在蒸腾量,即二者的比值开始减小,并在某个时刻达到一个阈值,第一个干旱胁迫因子( $TURFAC$ )开始起作用,此因子会对作物叶片的生长过程造成影响,比如伸展等;第二个干旱胁迫因子( $SWFAC$ )在潜在根系吸水速率小于或等于潜在蒸腾速率时开始起作用,此时土壤含水量较低,作物的光合作用速率开始降低,从而影响作物的同化速率,即该因子会对作物生长和生物量形成造成影响<sup>[20]</sup>。

## 1.5 模型参数校正与检验

采用 2 个生长年份 2013 年、2014 年的田间试验观测数据,分别用于模型的校正、检验。前者用来调参,后者用来验证模型的模拟结果。3 种模型的参数校正结果如表 1 显示。

参照 He 等<sup>[21]</sup>的研究结果,对胡麻品种遗传参数的调整采取试错法,结合当地同期年份气象数据与胡麻观测数据,通过调试相关遗传参数使籽粒产量与各物候期叶面积指数的模拟结果尽可能接近实测数据,最终确定品种遗传参数,再利用其他年份的试验实测数据来验证模型和遗传参数的准确性。

为系统评估 3 个模型模拟结果的可靠性和准确性,使用目前国际学术界在检验、评价模型上广泛认可的 4 个评价指标:决定系数( $R^2$ )、均方根误差( $RMSE$ )、平均绝对误差( $MAE$ )、平均绝对百分比误差( $MAPE$ )。 $R^2$  的取值范围为 $[0, 1]$ ,其值越大,说明模型拟合效果越好,具体计算方法见公式 1。 $RMSE$  反映了模拟值与实测值的偏差大小,对数据异常值较为敏感,可以衡量模型模拟的准确程度,其值越小,模型越精确,具体计算方法见公式 2。 $MAE$  表示模拟值和实测值绝对误差的平均值, $MAE$  取值越小说明预测模型具有更高的精确度,具体计算方法见公式 3。 $MAPE$  是一种相对误差度量值,其使用绝对值来避免正误差、负误差相互抵消,一般认为  $MAPE$  小于 10 时,模型的模拟精确度较高,具体计算方法见公式 4。

表 1 APSIM、DSSAT、WOFOST 模型校正参数

Table 1 Calibration parameters of APSIM, DSSAT, and WOFOST models

模型	参数名称	单位	参数含义	数值
APSIM	<i>Transp_eff_cf</i>	—	蒸腾效率系数	0.005
	<i>Water_stress_factor</i>	—	光合作用干旱胁迫因子	0.600
	<i>Cover_green</i>	MJ/m <sup>2</sup>	辐射截获	19.500
	<i>RUE</i>	g/(MJ·m <sup>2</sup> )	辐射利用率	1.400
DSSAT	<i>PIV</i>	d	春化敏感系数	32.710
	<i>P1D</i>	%	光周期敏感系数	102.300
	<i>P5</i>	℃·d	灌浆期特性系数	544.600
	<i>G1</i>	No./g	籽粒数特性系数	16.790
	<i>G2</i>	mg	标准粒粒质量系数	48.810
	<i>G3</i>	g	成熟期单株茎穗质量系数	1.635
	<i>PHINT</i>	℃·d	出叶间隔特性参数	92.400
WOFOST	<i>RML</i>	—	叶片维持呼吸消耗系数	0.021
	<i>AMAX</i>	kg/hm <sup>2</sup>	最大 CO <sub>2</sub> 同化速率	32.000
	<i>SWFCF</i>	—	田间持水量	0.340
	<i>SMW</i>	—	凋萎点土壤含水量	0.150
	<i>CFET</i>	—	作物蒸散校正系数	1.000

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \tag{3}$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \tag{4}$$

其中  $y_i$  为实测值,  $\hat{y}_i$  为模拟值,  $n$  为样本数。

2 结果与分析

2.1 蒸腾速率对干旱胁迫响应的模拟

图 1 显示,从不同干旱胁迫水平下实测蒸腾速率的动态变化可以观察到,随着干旱时间的延长和干旱胁迫程度的加深,胡麻的蒸腾速率总体呈下降趋势,且相同处理条件下青果期胡麻蒸腾速率整体高于现蕾期。3 种作物生长模型均模拟出干旱胁迫下蒸腾速率下降的趋势。

不同模型模拟结果(表 2)表明,WOFOST 模

型的干旱胁迫效应算法在模拟胡麻蒸腾速率方面整体上表现最好,APSIM、DSSAT 模型的干旱胁迫效应算法表现相对较差。以陇亚杂 1 号为例,在轻度干旱胁迫条件下 WOFOST 模型模拟胡麻现蕾期蒸腾速率的 *RMSE* 为 0.06,青果期为 0.07;在中度干旱胁迫下现蕾期模拟值的 *RMSE* 为 0.05,青果期为 0.28,误差指标总体低于其他 2 个作物模型。

从不同干旱程度来看,干旱胁迫程度越高,蒸腾速率下降越快且所能达到的最低界限越小(图 1)。3 种作物模型都可以模拟蒸腾速率对不同干旱程度的响应,随着干旱程度的加深,对陇亚杂 1 号的模拟精度总体呈下降趋势,但对陇亚 11 号的模拟精度总体提高,例如在陇亚杂 1 号青果期的对照组中,3 种作物模型的平均 *RMSE* 为 0.05,但在中度干旱胁迫处理下的平均 *RMSE* 为 0.42;在陇亚 11 号青果期对照组中,3 种作物模型的平均 *RMSE* 为 0.07,但在中度干旱胁迫处理下的平均 *RMSE* 为 0.03。



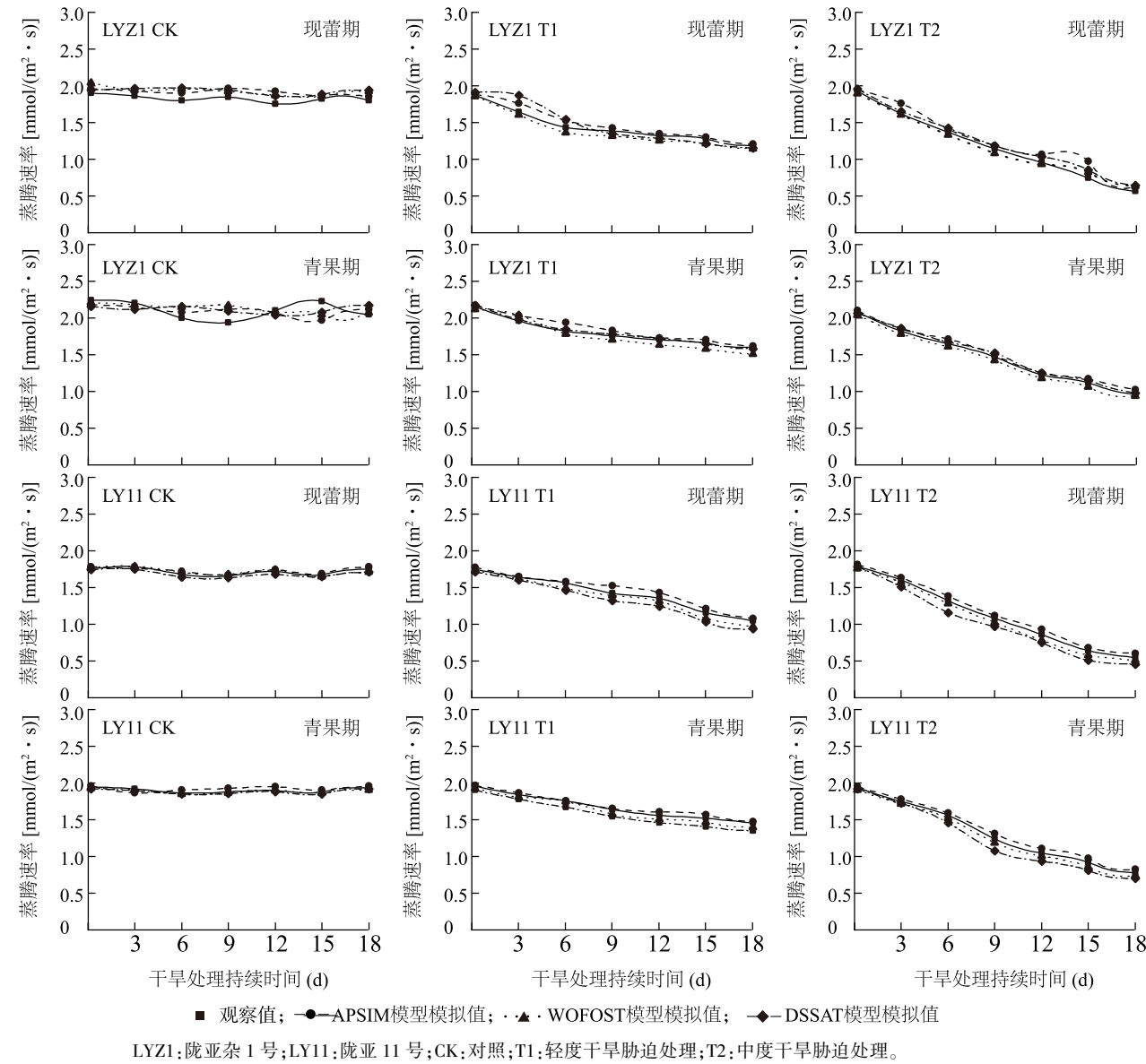


图1 3种干旱胁迫效应算法的蒸腾速率模拟值与实测值比较

Fig.1 Comparison of simulated and measured values of transpiration rate by three drought stress algorithms

表2 3种作物模型对现蕾期、青果期胡麻蒸腾速率预测准确性的统计检验

Table 2 Statistical tests of the prediction accuracy of transpiration rate of oil flax at budding stage and green fruit stage by three crop models

品种	生育期	指标	CK			T1			T2		
			APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型
LYZ1	现蕾期	$R^2$	0.90	0.90	0.91	0.89	0.90	0.91	0.93	0.94	0.93
		RMSE	0.11	0.05	0.07	0.06	0.06	0.10	0.09	0.05	0.20
		MAE	0.09	0.04	0.06	0.04	0.05	0.07	0.08	0.04	0.11
		MAPE	10.03	5.20	6.88	3.23	3.84	5.29	4.81	4.65	5.67
	青果期	$R^2$	0.84	0.94	0.94	0.80	0.86	0.77	0.85	0.85	0.86
		RMSE	0.07	0.05	0.03	0.06	0.07	0.02	0.67	0.28	0.32
		MAE	0.05	0.04	0.02	0.05	0.06	0.02	0.10	0.43	1.11
		MAPE	3.00	2.91	2.17	2.92	3.66	1.03	4.96	4.51	5.48

续表2 Continued2

品种	生育期	指标	CK			T1			T2		
			APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型
LY11	现蕾期	$R^2$	0.94	0.95	0.94	0.92	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94
		$RMSE$	0.06	0.05	0.11	0.06	0.05	0.09	0.04	0.03	0.04
		$MAE$	0.05	0.04	0.10	0.05	0.04	0.08	0.03	0.02	0.03
		$MAPE$	5.04	5.36	11.31	3.31	3.77	6.80	1.33	1.23	1.83
	青果期	$R^2$	0.77	0.84	0.81	0.84	0.89	0.82	0.81	0.87	0.85
		$RMSE$	0.05	0.05	0.10	0.03	0.05	0.10	0.04	0.02	0.03
		$MAE$	0.04	0.04	0.08	0.02	0.04	0.09	0.03	0.01	0.02
		$MAPE$	4.06	3.61	7.73	1.60	2.57	5.37	1.88	0.82	1.19

CK:对照;T1:轻度干旱胁迫处理;T2:中度干旱胁迫处理。 $R^2$ :决定系数; $RMSE$ :均方根误差; $MAE$ :平均绝对误差; $MAPE$ :平均绝对百分比误差。LYZ1:陇亚杂1号;LY11:陇亚11号。

2.2 气孔导度对干旱胁迫响应的模拟

表3、图2显示,干旱胁迫发生后,气孔导度受到抑制,且干旱程度越严重、干旱时间越长,气孔导

度越低。与陇亚11号相比,陇亚杂1号对干旱胁迫更加敏感;与现蕾期相比,青果期对干旱胁迫更加敏感。

表3 3种作物模型对现蕾期、青果期胡麻气孔导度预测准确性的统计检验

Table 3 Statistical tests of the prediction accuracy of stomatal conductance of oil flax at budding stage and green fruit stage by three crop models

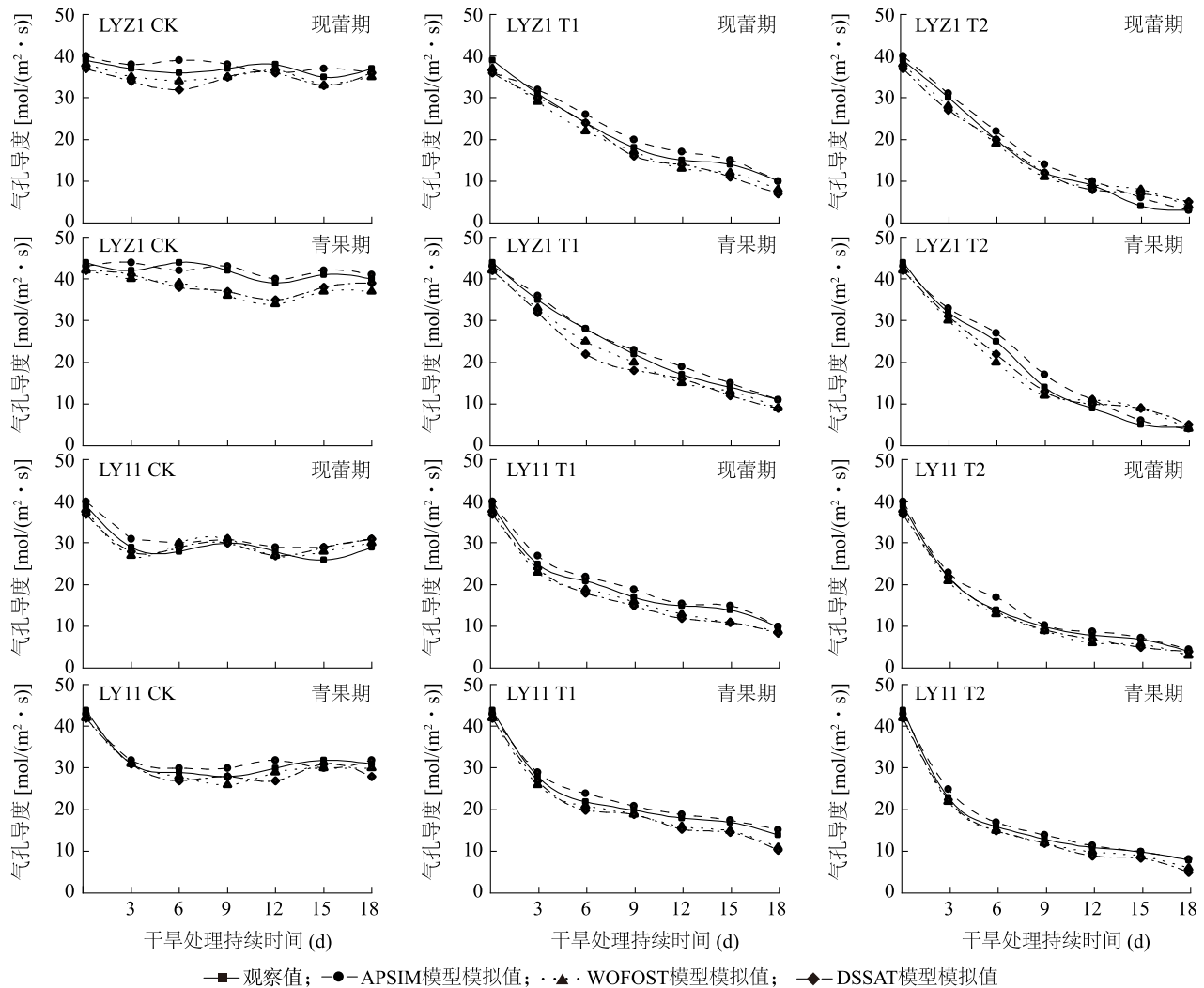
品种	生育期	指标	CK			T1			T2		
			APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型
LYZ1	现蕾期	$R^2$	0.94	0.98	0.86	0.92	0.94	0.91	0.87	0.84	0.85
		$RMSE$	1.73	1.77	2.44	1.60	1.77	2.00	1.46	1.96	2.13
		$MAE$	1.57	1.71	2.28	1.42	1.71	1.71	1.28	1.57	1.71
		$MAPE$	4.28	4.66	6.20	6.92	10.08	11.10	13.40	22.67	24.41
	青果期	$R^2$	0.93	0.91	0.94	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86	0.84
		$RMSE$	1.36	3.64	4.12	1.06	1.92	3.25	1.70	2.74	2.14
		$MAE$	1.28	3.14	3.85	0.85	1.71	2.85	1.50	2.35	1.78
		$MAPE$	3.07	6.29	7.51	4.09	8.94	13.02	12.60	18.44	22.31
LY11	现蕾期	$R^2$	0.95	0.92	0.94	0.93	0.92	0.90	0.91	0.89	0.88
		$RMSE$	1.85	1.64	1.55	1.26	1.85	2.33	0.91	1.31	1.61
		$MAE$	1.71	1.57	1.28	1.07	1.71	2.21	0.60	1.00	1.03
		$MAPE$	6.08	5.51	4.60	5.44	10.18	13.24	7.42	8.58	12.69
	青果期	$R^2$	0.97	0.95	0.96	0.94	0.92	0.91	0.91	0.88	0.85
		$RMSE$	1.31	1.46	1.96	1.19	1.85	2.39	1.02	1.19	1.58
		$MAE$	1.14	1.28	1.57	1.11	1.71	2.21	0.81	1.14	1.28
		$MAPE$	3.76	4.28	5.08	5.47	9.12	11.41	4.67	9.34	12.39

CK:对照;T1:轻度干旱胁迫处理;T2:中度干旱胁迫处理。 $R^2$ :决定系数; $RMSE$ :均方根误差; $MAE$ :平均绝对误差; $MAPE$ :平均绝对百分比误差。LYZ1:陇亚杂1号;LY11:陇亚11号。

比较3种作物模型对气孔导度的模拟结果,中度干旱胁迫处理下,APSIM模型对青果期胡麻气孔导度的动态模拟效果最好,例如陇亚11号模拟值和

观察值之间的  $RMSE$  相较 WOFOST 模型和 DSSAT 模型降低了 0.17、0.56,  $R^2$  提高了 0.03、0.06。

比较3种作物模型对2个物候期的模拟情况,3



LYZ1: 陇亚杂 1 号; LY11: 陇亚 11 号; CK: 对照; T1: 轻度干旱胁迫处理; T2: 中度干旱胁迫处理。

图 2 3 种干旱胁迫效应算法的气孔导度模拟值与实测值比较

Fig.2 Comparison of simulated and measured values of stomatal conductance by three drought stress algorithms

种作物模型对现蕾期干旱胁迫处理下气孔导度的模拟效果整体优于青果期。

### 2.3 叶面积指数对干旱胁迫响应的模拟

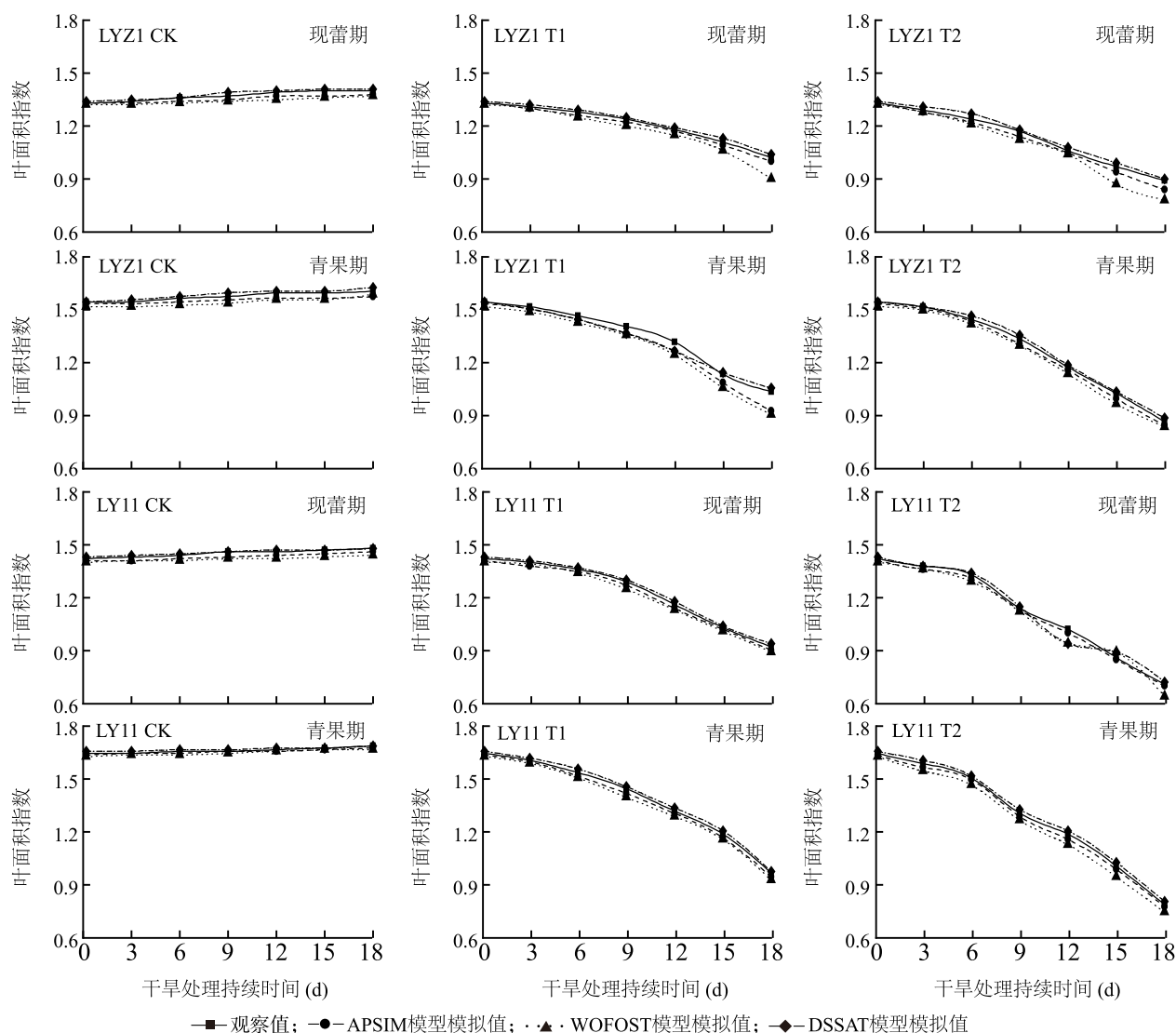
图 3 显示,干旱胁迫发生后,胡麻叶面积指数下降,且干旱胁迫越严重叶面积指数下降越快、越低。3 种作物生长模型都能反映出干旱胁迫下胡麻叶面积指数下降的趋势。一定程度上,3 种作物生长模型均可以反映出叶面积指数受干旱胁迫的限制,但表现各有差别。整体上看,3 种作物模型在轻度干旱胁迫处理下的模拟效果总体优于中度干旱胁迫处理下的模拟效果。3 种作物模型对青果期叶面积指数的模拟效果总体好于现蕾期;3 种作物模型对陇亚 11 号叶面积指数的预测精度总体优于陇亚杂 1

号。

表 4 显示,从不同模型对胡麻 2 个物候期叶面积指数的模拟结果来看,DSSAT 模型干旱胁迫效应算法整体表现最好,其  $RMSE$  平均值为 0.02。在中度干旱胁迫处理下,现蕾期模拟效果最好的是 APSIM 模型干旱胁迫效应算法,其模拟叶面积指数的平均  $RMSE$  为 0.03;青果期表现最好的是 DSSAT 模型干旱胁迫效应算法,其模拟叶面积指数的平均  $RMSE$  为 0.02。

### 2.4 籽粒产量对干旱胁迫响应的模拟

图 4 显示,3 种作物生长模型对产量变化的模拟趋势相同,但误差各有不同,其中 WOFOST 模型干旱胁迫效应算法的模拟结果要优于其他 2 种模



LYZ1: 陇亚杂 1 号; LY11: 陇亚 11 号; CK: 对照; T1: 轻度干旱胁迫处理; T2: 中度干旱胁迫处理。

图 3 3 种干旱胁迫效应算法的叶面积指数模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparison of simulated and measured values of leaf area index by three drought stress algorithms

型。WOFOST 模型对胡麻产量的模拟值与实测值分布趋近 1 : 1 线, 残差平方和 (RSS) 为 0.019~1.939, 能较好地模拟了干旱胁迫条件下的胡麻产量; APSIM 模型对胡麻产量的模拟值与实测值的 RSS 为 0.264~11.629; DSSAT 模型对胡麻产量的模拟值与实测值的 RSS 为 3.556~15.154。

### 3 讨论

极端干旱事件是全球气候变化背景下造成胡麻减产的重要原因之一。作物生长模型<sup>[22-24]</sup>是量化气候变化对胡麻生产力影响的重要工具。本研究利

用 3 种作物生长模型的干旱胁迫效应算法与田间试验资料, 重点模拟胡麻生理生化指标、产量等对不同程度干旱胁迫的响应, 系统评估了不同模型在干旱胁迫下的模拟结果, 研究结果可以为以后优化干旱胁迫效应算法提供理论依据。

本研究结果表明, 3 种干旱胁迫效应算法对于干旱胁迫的响应存在明显差异。刘竞择<sup>[25]</sup>认为, 干旱胁迫可能会导致叶片衰老。李正鹏<sup>[26]</sup>研究发现, DSSAT 模型对小麦籽粒产量、LAI 和蒸腾作用的模拟主要受田间土壤含水量的影响, 而 APSIM 模型对田间施氮量较敏感。本研究发现, DSSAT 模型对叶

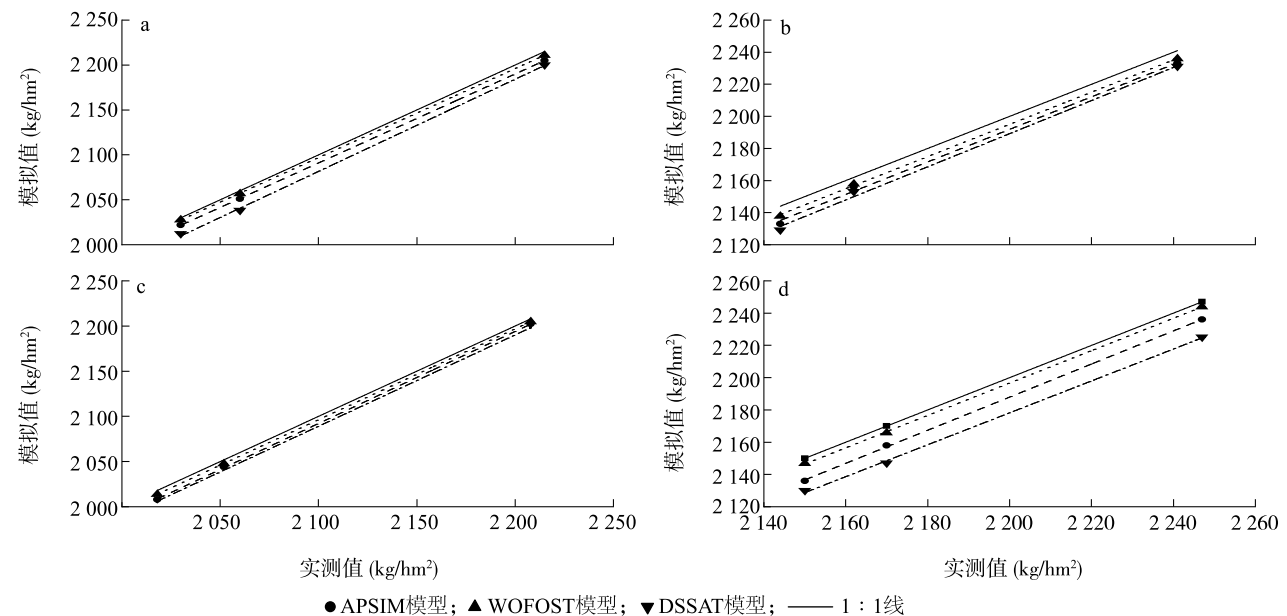


表 4 3 种作物模型对现蕾期、青果期胡麻叶面积指数预测准确性的统计检验

Table 4 Statistical tests of the prediction accuracy of leaf area index of oil flax at budding stage and green fruit stage by three crop models

品种	生育期	指标	CK			T1			T2		
			APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型	APSIM 模型	WOFOST 模型	DSSAT 模型
LYZ1	现蕾期	$R^2$	0.93	0.93	0.94	0.88	0.84	0.91	0.85	0.82	0.86
		RMSE	0.02	0.03	0.01	0.02	0.05	0.01	0.03	0.06	0.02
		MAE	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04	0.02
		MAPE	1.24	2.07	0.73	1.22	3.69	1.10	1.41	4.68	1.52
	青果期	$R^2$	0.95	0.95	0.96	0.89	0.86	0.92	0.90	0.84	0.91
		RMSE	0.02	0.04	0.01	0.05	0.07	0.03	0.02	0.04	0.01
		MAE	0.02	0.03	0.01	0.04	0.06	0.02	0.02	0.03	0.01
		MAPE	1.35	2.17	0.72	3.46	4.90	1.63	1.59	2.99	1.00
LY11	现蕾期	$R^2$	0.94	0.94	0.95	0.92	0.92	0.93	0.86	0.85	0.88
		RMSE	0.02	0.04	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.05	0.04
		MAE	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04
		MAPE	1.38	2.25	0.40	1.33	2.07	1.11	1.29	4.12	1.35
	青果期	$R^2$	0.94	0.95	0.97	0.93	0.93	0.94	0.90	0.89	0.90
		RMSE	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02
		MAE	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02
		MAPE	0.43	0.85	0.43	1.29	2.39	1.06	1.40	3.64	1.46

CK: 对照; T1: 轻度干旱胁迫处理; T2: 中度干旱胁迫处理。  $R^2$ : 决定系数; RMSE: 均方根误差; MAE: 平均绝对误差; MAPE: 平均绝对百分比误差。LYZ1: 陇亚杂 1 号; LY11: 陇亚 11 号。



a: 基于陇亚杂 1 号现蕾期数据的产量模拟值与实测值的比较; b: 基于陇亚 11 号现蕾期数据的产量模拟值与实测值的比较; c: 基于陇亚杂 1 号青果期数据的产量模拟值与实测值的比较; d: 基于陇亚 11 号青果期数据的产量模拟值与实测值的比较。

图 4 产量模拟值与实测值的比较  
Fig.4 Comparison of simulated and measured yield values

面积指数的模拟效果整体相对较好。DSSAT 模型中叶面积扩大受叶片质量和比叶面积 2 个参数影响,后者受温度、水分亏缺和光照的影响,在达到土

壤干燥度阈值后启动干旱胁迫因子来调节伸展性生长,如叶片的伸展。WOFOST 模型中叶片生长是由叶片生物量的增加驱动的,干旱胁迫不会直接影响

叶片生长,而是通过叶片生物量变化间接影响叶片生长。APSIM 模型使用叶片的外观、扩张和衰老等函数模拟叶面积的变化,而叶片衰老函数受叶龄、光照竞争、干旱和霜冻等因素共同影响。

未来可以将作物的生长参数调整纳入干旱胁迫效应算法,并为每个胁迫因子创建适当的权重函数,不仅可以改善干旱胁迫下的植物生长模拟情况,还可以改善多种胁迫下的植物生长模拟情况。

Prasad 等<sup>[27]</sup>认为模拟叶片干质量和叶面积积累的误差通过影响干物质生产模拟造成更大的效应,导致不能准确模拟干旱胁迫对整体生长和发育的影响。Hao 等<sup>[28]</sup>认为,与充分灌溉相比,亏缺灌溉将导致作物较低的叶面积指数、收获指数和产量。本研究中,WOFOST 模型的干旱胁迫效应算法在模拟蒸腾速率和籽粒产量方面的效果整体优于 APSIM 模型和 DSSAT 模型,主要原因是 APSIM 模型和 DSSAT 模型评估不同干旱程度、不同干旱处理时期对胡麻生理指标的影响时涉及过多参数,复杂的参数调整使模型预测能力降低。在 DSSAT 模型中,作物的胁迫效应算法是基于温度、水、氮和磷 4 种胁迫因子的最大值计算的,作物在多重胁迫下所受的影响比单个胁迫因素更强,而本研究只探讨了水分这一基本变量,减弱了并发胁迫源和相互作用对实际作物生长的影响。APSIM 模型中实际每日生物量累计是根据最低辐射量 and 水分限制速率来计算的,其中水分限制的日生物量受实际土壤供水、作物蒸腾系数、日间蒸气压亏缺影响,再根据发育阶段的分配功能将日生物量划分给叶、茎和籽粒。

Todorovic 等<sup>[29]</sup>认为作物生长模型无法充分模拟水分利用效率,尤其是在干旱胁迫条件下。Antle 等<sup>[30]</sup>认为在水分、养分和极端温度等胁迫环境下,作物生长模型中仍有许多过程没有得到满意的量化,导致了作物生长发育、产量模拟的不确定性。综上所述,作物生长模型的干旱胁迫效应算法在模拟干旱条件下现蕾期、青果期胡麻的生理生化响应仍有不足之处,有待进一步优化、完善。

## 4 结 论

干旱胁迫使胡麻的蒸腾速率、气孔导度、叶面积指数和籽粒产量明显降低。在干旱胁迫下,WOFOST 模型模拟蒸腾速率和籽粒产量表现较好,APSIM 模型模拟气孔导度表现较好,DSSAT 模型模拟叶面积指数

表现较好。本研究通过对比 3 种干旱胁迫效应算法分别对干旱条件下胡麻 2 个物候期的 3 个生理指标及产量的模拟效果来明确各模型的优缺点,为今后优化模型的干旱胁迫效应算法提供了参考依据。

## 参考文献:

- [1] 赵利,党占海,牛俊义,等.水分胁迫下不同抗旱类型胡麻苗期生理生化指标变化[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):206-211.
- [2] 何丽,杜彦斌,张金,等.干旱对胡麻现蕾期光合特性及产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(4):59-64.
- [3] 李玥,牛俊义,吴兵,等.基于 APSIM 的胡麻陇亚杂 1 号的生育时期模拟模型[J].核农学报,2015,29(5):972-979.
- [4] 肖骏波,刘蕾蕾,邱小雷,等.小麦生长模型对拔节期和孕穗期低温胁迫响应能力的比较[J].中国农业科学,2021,54(3):504-521.
- [5] 康佳,李玥,康亮河.胡麻生理生化代谢指标对干旱胁迫的响应及其模拟模型的研究[J].干旱区地理,2022,45(3):879-889.
- [6] 李玥,牛俊义,郭丽琢,等. AquaCrop 模型在西北胡麻生物量及产量模拟中的应用和验证[J].中国生态农业学报,2014,22(1):93-103.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘健,姚宁,齐海霞,等.冬小麦物候期对土壤水分胁迫的响应机制与模拟[J].农业工程学报,2016,32(21):115-124.
- [10] CHEN Y, MAREK G W, MAREK T H, et al. Assessing soil and water assessment tool plant stress algorithms using full and deficit irrigation treatments[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3):1266-1280.
- [11] SASEENDRAN S A, AHUJA L R, MA L, et al. Current water deficit stress simulations in selected agricultural system models[J]. Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes, 2008, 1: 1-38.
- [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):2342-2350.
- [13] HOLZWORTH D P, HUTH N I, DEVOIL P G, et al. APSIM-evolution towards a new generation of agricultural systems simulation[J]. Environmental Modelling and Software,2014,62:327-350.
- [14] 刘沉默.旱作条件下 APSIM 模型的适应性评价及应用——以山西省为例[D].太原:山西农业大学,2019.
- [15] 穆青云,李俊,何亮,等.青藏高原冬小麦生产潜力及其对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2021,35(7):92-99.

- [16] 王—明. 干旱条件下基于 WOFOST 模型与遥感数据同化的玉米产量模拟改进研究[D].北京:中国科学院大学, 2018.
- [17] 魏玉清,沈强云,郝正刚. 基于 DSSAT 模型和正交试验相结合的春小麦灌溉模式优化研究[J].节水灌溉,2019(1):6-11,17.
- [18] 高 言. 基于改进 DSSAT-CERES 模型的夏玉米地膜覆盖生长模拟[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] 付春晓,龚时宏,王建东,等. 改进 CERES-Maize 模型在玉米膜下滴灌模式下的适用性[J].排灌机械工程学报,2018,36(11):1076-1080.
- [20] HE J, CAI H, BAI J. Irrigation scheduling based on CERES-Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 19-31.
- [21] HE D, WANG E, 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: 163-175.
- [22] 张伟欣,吴 茜,孙传亮,等. 油菜株型模拟研究进展[J]. 江苏农业学报,2022,38(2):549-557.
- [23] 纪洪亭,赵韩伟,王 勇,等. 基于数学模型的向日葵穴盘苗生长动态特征分析[J]. 江苏农业学报,2022,38(1):135-142.
- [24] 陈永快,黄语燕,兰 婕,等. 基于辐热积的 NFT 栽培生菜生长模型[J]. 江苏农业科学,2021,49(19):201-204,215.
- [25] 刘竞择. 水分胁迫对赤霞珠葡萄不同叶龄叶片光合特性的影响[D].银川:宁夏大学,2020.
- [26] 李正鹏. 基于田间试验和 DSSAT 模型的关中冬小麦水氮管理优化[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [27] PRASAD P V V, PISIPATI S R, RISTIC Z, et al. Impact of nighttime temperature on physiology and growth of spring wheat [J]. Crop Science,2008,48(6):2372-2380.
- [28] HAO B, XUE Q, MAREK T H, et al. Soil water extraction, water use, and grain yield by drought-tolerant maize on the Texas High Plains[J]. Agricultural Water Management, 2015, 155: 11-21.
- [29] TODOROVIC M, ALBRIZIO R, ZIVOTIC L, et al. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 509-521.
- [30] ANTLE J M, BASSO B, CONANT R T, et al. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: design and improvement[J]. Agricultural Systems, 2017, 155: 255-268.

(责任编辑:王 妮)