

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.035

陕西关中冬油菜生长发育不同模型模拟精度研究

毛鑫^{1,2} 杨建利¹ 朱晓华^{2,3} 何川^{2,3} 冯浩^{3,4} 何建强^{2,3}

(1. 陕西省杂交油菜研究中心, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

4. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在陕西关中地区进行了连续6年(2009年9月—2015年5月)的冬油菜非充分灌溉试验,利用STICS、DSSAT和APSIM 3种不同模型对冬油菜物候期和产量等进行模拟,比较了3种不同模型的模拟精度。结果表明,3种模型中STICS模拟精度最高,平均 R_{ARE} 为3.24%,APSIM模型次之,平均 R_{ARE} 为8.79%,DSSAT模型最差,平均 R_{ARE} 为11.38%。其中STICS模型对物候期和产量的模拟精度均为最高,DSSAT模型对物候期的模拟精度高于APSIM模型,而APSIM模型对产量相关指标的模拟精度高于DSSAT模型。由于2012—2013年生育期内降水量较低,3种模型的模拟精度均较低,说明3个模型对于旱胁迫条件下的作物生长模拟均存在一定不足。综合比较,STICS模型的模拟精度高于DSSAT和APSIM模型,因此推荐STICS模型为关中地区冬油菜生长发育和产量形成模拟的适宜模型。

关键词: 冬油菜; 作物模型; 生长发育; STICS模型; DSSAT模型; APSIM模型

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0306-09

Simulation Accuracy of Growth and Development of Winter Rape (*Brassica napus* L.) in Guanzhong Plain with Different Crop Models

MAO Xin^{1,2} YANG Jianli¹ ZHU Xiaohua^{2,3} HE Chuan^{2,3} FENG Hao^{3,4} HE Jianqiang^{2,3}

(1. Hybrid Rapeseed Research Center of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Crop growth simulation models provided convenience for agricultural production research. However, there were many differences among the models in some of their structures and process descriptions. Thus, different models might have different simulation accuracies in different regions. An insufficient irrigation experiment of winter rape (*Brassica napus* L.) was conducted for six consecutive years (2009–09—2015–05) in Guanzhong Plain in Shaanxi Province. And the STICS, DSSAT and APSIM models were used to simulate the phenology dates and yields of winter rape based on the experimental data to evaluate their simulation accuracies. The results showed that the simulation accuracy of STICS was the highest among the three models with average value of absolute relative error (R_{ARE}) of 3.24%; APSIM model ranked the second with average R_{ARE} of 8.79%; DSSAT model was the worst with average R_{ARE} of 11.38%. In addition, the simulation accuracy of STICS model was the highest in both phenology dates and yields of winter rape. The simulation accuracy of DSSAT model in phenology date was higher than that of APSIM model, while in yield the simulation accuracy of APSIM was higher than that of DSSAT model. However, the simulation accuracies of the three models were all low in the season

收稿日期: 2018-12-01 修回日期: 2018-12-30

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-NY-007)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06)

作者简介: 毛鑫(1994—),男,博士生,主要从事农业生态系统模拟研究,E-mail: maoxin@nwfau.edu.cn

通信作者: 杨建利(1968—),男,副研究员,主要从事油菜绿色高产高效栽培技术研究,E-mail: syxexzjly@163.com

of 2012—2013 due to the low precipitation, which meant that the three models were inadequate in the simulation of drought stress conditions. In general, the accuracy of the STICS model was higher than those of DSSAT and APSIM models. The STICS model was recommended for the simulation of winter rape growth in the Guanzhong Plain.

Key words: winter rape; crop model; growth and development; STICS model; DSSAT model; APSIM model

0 引言

作物生长模型是基于计算机语言对作物生理生态过程机理性再呈现的技术^[1-2],在农业生产和管理决策方面扮演着重要角色^[3-4]。目前模型大多以气象要素为驱动,对土壤-植物-大气生态系统中包括水分运移、作物生长等过程进行模拟^[5]。虽然作物模型都能够模拟不同环境和管理下不同作物的生长发育,但是各个模型都有自己的优势和局限性^[6]。油菜作为我国重要的油料作物之一,种植面积已达 $7.30 \times 10^6 \text{ hm}^2$,位居世界第二^[7]。油菜种植面积虽然较大,但产量一直不高,通过优化种植管理方式提高产量是最直接的方法^[8-10]。传统大田试验耗时耗力且局限性多,将田间试验和作物模型结合的方法受到了广泛关注^[3-4]。

当前主要的油菜生长模型有 CROPGRO - Canola^[11]模型、APSIM - Canola^[12]模型、STICS - Rapeseed^[13]模型、AquaCrop - Canola^[14]模型等,利用模型模拟油菜生长发育的研究也取得了一定的成果^[15-19]。JING等^[20]用加拿大东部地区种植的不同施氮处理的春油菜进行试验,对 CSM - CROPGRO - Canola 进行调参评价,证实模型能够较好地模拟春油菜的生长发育和土壤水分变化情况。HE等^[21]利用 APSIM - Canola 模型对我国长江流域的冬油菜和内蒙古、甘肃两地的春油菜进行调参模拟,发现 APSIM 模型能够较好地模拟油菜的叶面积变化、生物量以及产量,并且模型在模拟油菜物候期方面有一定的优势。MOUSAVIZADEH等^[22]利用 AquaCrop 模型对半干旱地区不同灌溉处理的油菜生长进行模拟,发现模型能够较好模拟产量和生物量,但在一定胁迫的情况下模拟结果存在较大误差。以上研究均用某个模型对某一地区油菜生长和发育的情况作出评价,但是对于西北干旱且灌溉条件不良地区,作物生长模型能否较好地模拟冬油菜的生长发育,以及最适于模拟该地区油菜生长发育的模型尚未可知。

本研究选取包含油菜模块且较为主流的 STICS、DSSAT 和 APSIM 3 种作物模型,对连续 6 季(2009 年 9 月—2015 年 5 月)的冬油菜非充分灌溉试验进行模拟,旨在从油菜生长发育的物候期和产量等数据对 3 个模型模拟精度进行对比,从中优选

出最适宜模拟本地区冬油菜生长发育的作物模型,为作物模型在该地区农业生产上的应用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 田间试验

试验于 2009—2015 年在陕西省杂交油菜研究中心大荔试验站(34°54'N,109°54'E,海拔 369 m)进行。该区年平均气温 14.4℃,降水量 514 mm,无霜期 214 d,属暖温带半干旱大陆性季风气候区,降水明显呈现季节性。由于降水年内分布不均,容易形成季节性干旱。农田土壤类型为壤土,土壤 pH 值 7.6~8.0,有机质质量分数 1.11%。

选择甘蓝型油菜品种“秦优 7 号”,分别于 2009 年 9 月 18 日、2010 年 9 月 22 日、2011 年 9 月 26 日、2012 年 9 月 18 日、2013 年 9 月 20 日和 2014 年 9 月 24 日播种,播种方式为人工开沟直播,播种深度约为 3 cm,播种密度 2009 年为 1.5×10^4 株/hm²,2010—2012 年为 2.3×10^4 株/hm²,2013—2014 年为 3.8×10^4 株/hm²,分别于 2010 年 6 月 2 日、2011 年 5 月 28 日、2012 年 5 月 29 日、2013 年 5 月 21 日、2014 年 5 月 29 日和 2015 年 5 月 28 日收获。由于 2010—2013 年播种时土壤墒情不佳,为保证出苗和苗期生长,分别在 2010 年 9 月 21 日、2012 年 9 月 24 日和 2013 年 9 月 19 日进行灌水,灌水量为 30 mm。由于各年抽薹期会发生严重干旱,因此在该时期采用漫灌的方式进行灌水,灌水量为 110 mm。各年播前施入 N 110 kg/hm²和 P₂O₅ 60 kg/hm²作为基肥;随春灌再追肥 N 52 kg/hm²。试验小区长 8.34 m,宽 2.4 m,小区面积约 20 m²,试验小区设置 3 个重复,相邻年份在相邻地块进行,以消除由于收获时籽粒残留造成的影响。

1.2 模型简介

本研究选取的 STICS、DSSAT 和 APSIM 模型都是以日为步长,能够对包括植物生长发育、土壤水分溶质运移等进行机理性模拟,但模型内部过程量化存在一定差异。

STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard)模型是通过逐日气象数据驱动的土壤作物生态机理性模型,对多种作物均有较好模

拟^[13]。模型对于作物生长的模拟按照“确定性作物”和“不确定性作物”进行^[23]。STICS - Rapeseed 模拟油菜潜在腾发量与气候条件和作物生长相关。气候方面根据所拥有的气象数据类型选择不同的计算方法,目前模型提供有 Penman - Monteith^[24]、Shuttleworth - Wallace^[25]和 Priestley - Taylor^[26]3种计算方法;作物方面是与叶面积指数相关的函数。模型对土壤中水分变化情况的模拟按照土壤-根系系统的供给和土壤-叶片系统的需求平衡原理^[23],根据“翻桶式”(Tipping bucket)方法^[27]对每1 cm 土层进行模拟,之后再划分到各个土层设置的不同深度。

DSSAT (Decision support system for agrotechnology transfer)模型包括土壤、气象、管理以及作物品种等模块,目前能够模拟谷物类、豆科等20多种作物^[28]。CROPGR - Canola 模型模拟油菜生长通过辐射有效利用系数计算转换的干物质量,与叶面积指数、密度和行距相关。土壤水分根据 RITCHIE^[29]提出的水量平衡模拟,模型模拟逐日土壤水分平衡采用一维“翻桶式”方法^[27],可以模拟各个土层水分流动的根系吸水情况。水分胁迫的计算就是比较潜在根系吸水和潜在蒸腾的大小关系^[30],其中潜在蒸发蒸腾量根据 Priestley-Taylor^[26]和 FAO56 Penman - Monteith^[24]两种方法计算,潜在根系吸水是根系深度、根长密度、根系分布和当前土壤含水率的函数。

APSIM (Agricultural production system simulator)模型用于模拟旱作农业系统中各个组分的机理模型^[31]。APSIM 将各种不同的作物模型耦合到一个

平台,界面友好,目前能够模拟包括小麦、玉米、棉花、油菜、豆类作物以及杂草等多种作物^[32]。APSIM - Canola 模型以温度、光周期、太阳辐射、土壤水分和氮素供给为驱动,对油菜生长发育、产量形成以及氮素累积进行模拟^[12]。模型根据水量平衡能够模拟土壤水分下渗、运移、蒸发、径流等一系列过程^[33],模拟水分和溶质运移时提供两个方法:“翻桶式”方法^[27]和利用 Richard 方程的数值求解方法^[34]。在水分胁迫方面共有4个水分胁迫因子对作物的不同生长阶段造成影响,包括光合作用、物候、叶片伸展和氮素固定。

1.3 数据获取

模型输入的气象数据由陕西省大荔县气象站提供,包括逐日最高气温、逐日最低气温、太阳辐射、降雨量、风速等。其中,逐日太阳辐射量根据 Angstrom 经验公式计算^[35]

$$R_s = R_{\max} \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right)$$

式中 R_s ——太阳总辐射, MJ/m²

R_{\max} ——天文辐射, MJ/m²

a_s 、 b_s ——与大气状况相关的经验系数,取 0.25、0.50

n ——日照时长, h

N ——最大时长, h

土壤相关数据均为田间实测数据。选取的土壤剖面深度为100 cm,每20 cm 采样一次,采用高速离心法测定各层土壤凋萎含水率、田间持水率和饱和含水率等参数,利用 TopSizer 激光粒度分析仪测定土壤颗粒级配(表1)。

表 1 试验区土壤性质

Tab. 1 Soil properties of experimental plots

土层深度/ cm	黏粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	容重/ (g·cm ⁻³)	凋萎含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	田间持水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0~20	29.27	35.26	1.42	0.21	0.34	0.41
20~40	31.03	35.70	1.58	0.23	0.35	0.39
40~60	33.71	37.43	1.56	0.21	0.34	0.38
60~80	30.26	35.53	1.49	0.17	0.32	0.39
80~100	29.63	36.97	1.49	0.17	0.32	0.39

开花期和成熟期是指全区50%以上植株开花或成熟的日期。油菜黄熟期时,避开边行,每个小区选取连续正常生长且长势均匀的10株进行产量和千粒质量的测定,其中千粒质量的测定是在晒干(阳光下晾晒至含水率不高于10%)的纯净种子内,利用四分法取样3份,计数1000粒并分别称量,取3个样本的平均值,单位为g;产量测定是各个小区内所有植株产量晒干称量,单位折算为kg/hm²,取3

个小区的平均值。

1.4 模型的校正与验证

模拟精度评价指标采用模拟值与实测值之间的绝对相对误差 R_{ARE} (Absolute relative error, ARE),它能够度量模拟值与实测值之间的相对差异程度,同时因为属于无量纲统计量,因此可以在不同变量之间进行比较^[36-37]。 R_{ARE} 越小表明模型模拟精度越高。

本研究各个模型中田间管理方案设置一致,土

壤和气象相关数据根据不同模型需要进行输入,由于试验安排等原因对部分指标未进行测定而模型中需要输入的,根据相关文献或模型默认值设定。同时模型校正通常选择水肥条件较好的处理进行,因此本研究选取降水量较为充沛的 2009—2010 年度和 2013—2014 年度冬油菜物候期和产量数据进行模型校正,其余年份相关数据进行模型验证。为保证不同模型间验证精度的可靠性,模型校正精度 R_{ARE} 控制在 5% 之内(表 2)。由于 3 个模型之间参数较多且设定有所不同,因此仅呈现对模型默认值

改动的参数(表 3)。

表 2 STICS、DSSAT 和 APSIM 模型校正总体结果
Tab. 2 General results of calibration of STICS, DSSAT and APSIM models %

观测指标	2009—2010 年			2013—2014 年		
	STICS	DSSAT	APSIM	STICS	DSSAT	APSIM
花期	0.51	1.01	0	1.05	0	2.09
成熟期	0.78	0.78	0.39	0.40	0.80	2.00
产量	1.05	3.20	0.25	0.52	0.97	0.04
平均	0.78	1.66	0.21	0.66	0.59	1.38

表 3 STICS、DSSAT 和 APSIM 模型相关参数估计值

Tab. 3 Estimated values of relative parameters in STICS, DSSAT and APSIM models

模型	参数	默认值	估计值
STICS	出苗到苗期结束所需积温(stlevamf)/(°C·d)	40	332
	抽薹到初花所需积温(stamflax)/(°C·d)	840	510
	出苗到灌浆所需积温(stlevdrp)/(°C·d)	1 002	510
	最大单粒质量(pgrainmaxi)/g	0.006 15	0.005 15
	单位面积最大籽粒数(nbgrmax)/(个·m ⁻²)	200 000	190 000
	灌浆到成熟所需积温(stdrpmat)/(°C·d)	760	980
	用于计算有效籽粒的时间(nbjgrain)/d	45	40
	籽粒数量和发育速率之间的斜率(cgrain)/(g·d ⁻¹)	0.050	0.012
DSSAT	株间竞争开始的最小密度(bdens)/(株·m ⁻²)	7	15
	日长临界值(CSDL)/h	16	17
	出苗到初花的时间(EM - FL)/d	45.0	59.5
	初花到第 1 个籽粒的时间(FL - SD)/d	18.5	7.66
	第 1 个籽粒到生理成熟的时间(SD - PM)/d	33.5	36.47
	30°C、350 μmol/mol CO ₂ 下最大叶片光合速率(LFMAX)/(mg·m ⁻² ·s ⁻¹)	1	1.62
	比叶面积(SLA VR)/(cm ² ·g ⁻¹)	225.0	168.1
	最大单粒质量(WTPSD)/g	0.003	0.004
APSIM	灌浆时间(SFDUR)/d	20	15
	坐果所需时间(PODUR)/d	10.000	4.861
	出苗到苗期结束所需积温(tt_emergence)/(°C·d)	500 ~ 100	1 200 ~ 100
	抽薹到现蕾所需积温(tt_end_of_juvenile)/(°C·d)	900 ~ 430	400 ~ 30
	现蕾到初花所需积温(tt_floral_initiation)/(°C·d)	250	200
	初花到灌浆所需积温(tt_flowering)/(°C·d)	200	80
	灌浆到成熟所需积温(tt_start_grain_fill)/(°C·d)	1 000	980
	线性生长开始之前所需积温(shoot_lag)/(°C·d)	15.0	2.6
胚芽鞘生长速率(shoot_rate)/(°C·d·mm ⁻¹)	5.0	2.6	
最大潜在收获指数(hi_max_pot)	0.30	0.65	

2 结果与分析

2.1 不同模型物候期模拟比较

3 个模型对冬油菜物候期的模拟结果较为理想(图 1)。对于开花期,DSSAT 模型模拟值密集分布在 1:1 线两侧,模拟精度最高,平均 R_{ARE} 为 0.60%,STICS 模型模拟结果次之,平均 R_{ARE} 为 0.68%,而 APSIM 模型模拟点大多位于 1:1 线以下,即模拟值低于实测值,平均 R_{ARE} 为 1.23%。成熟期方面,

STICS 模型模拟结果优于其他两模型,平均 R_{ARE} 为 0.47%,DSSAT 模型模拟效果居中,平均 R_{ARE} 为 2.04%,其中在 2011—2012 年和 2012—2013 年模拟值低估 10 d 以上,这可能是由于两年生育期内降水处于较低水平,干旱胁迫缩短生育期,而模型内部对此过程存在高估造成的。APSIM 模型模拟值存在高估现象,平均 R_{ARE} 为 2.51%。总体而言,STICS 模型对物候期的模拟稳定性最高且模拟效果最优。

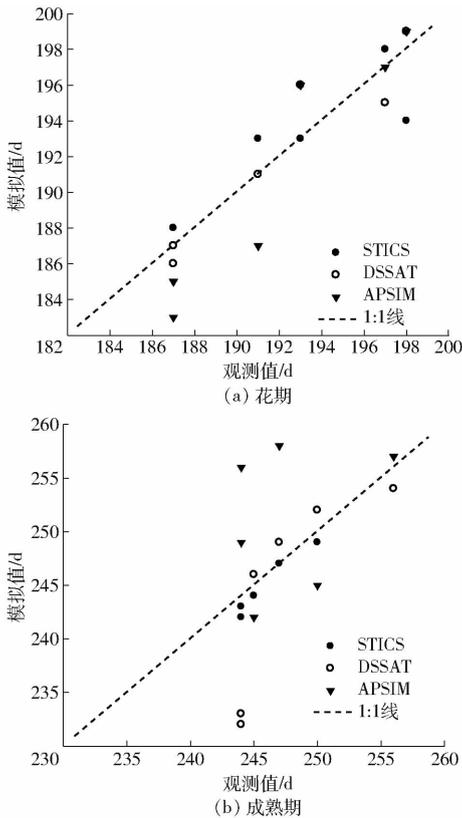


图1 不同模型对物候期的模拟

Fig. 1 Simulated phenology dates with different models

2.2 不同模型产量和千粒质量模拟比较

对千粒质量和产量进行分析对比(表4、5),结果表明,千粒质量方面,STICS模型模拟效果最优,平均 R_{ARE} 为7.53%,而DSSAT模型模拟结果相对较差,平均 R_{ARE} 为23.17%(APSIM-Canola模型中没有籽粒质量的输出项,因此未对其做考虑)。其中,在2011—2012、2012—2013年度,DSSAT模型对千粒质量的模拟严重低估,其 R_{ARE} 分别为62.96%和42.85%,而STICS模型模拟效果较好。产量方面,STICS模型模拟结果最优,平均 R_{ARE} 为4.24%,其次为APSIM模型,平均 R_{ARE} 为15.70%,DSSAT模型模拟效果较差,平均 R_{ARE} 为19.70%。其中,DSSAT模型在2011—2012、2012—2013年度的产量模拟相差较大,这可能是模型中关于干旱胁迫缩短物候期导致提前成熟的过程存在高估,模拟灌浆时间缩短造成的,APSIM模型存在相似的结果。在2012—2013年度,3个模型的模拟结果均较差,平均 R_{ARE} 分别为18.62%、40.64%和45.92%。由千粒质量和产量模拟结果看出,在2012—2013年度,STICS模型对产量的低估很有可能是由于低估籽粒数造成的,而DSSAT模型对产量的低估很大原因是由于籽

表4 不同模型对千粒质量的模拟

Tab. 4 Simulation result of 1000-kernel weight with different models

年份	降水量/mm	观测值/g	STICS		DSSAT	
			模拟值/g	$R_{ARE}/\%$	模拟值/g	$R_{ARE}/\%$
2009—2010	221.01	3.71	3.60	2.97	3.50	5.66
2010—2011	209.08	3.67	2.76	24.80	3.50	4.63
2011—2012	186.48	2.97	2.73	8.08	1.10	62.96
2012—2013	68.04	2.80	2.78	0.35	1.60	42.85
2013—2014	226.77	3.90	3.56	8.71	3.40	12.82
2014—2015	156.61	3.67	3.68	0.27	3.30	10.08
均值				7.53		23.17

表5 不同模型对产量的模拟

Tab. 5 Simulation result of yield with different models

年份	观测值/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	STICS		DSSAT		APSIM	
		模拟值/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$R_{ARE}/\%$	模拟值/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$R_{ARE}/\%$	模拟值/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$R_{ARE}/\%$
2009—2010	3 453	3 490	1.05	3 343	3.20	3 445	0.25
2010—2011	3 740	3 790	1.32	3 792	1.38	3 134	16.21
2011—2012	3 386	3 270	3.43	1 294	61.78	2 192	35.26
2012—2013	4 018	3 270	18.62	2 173	45.92	2 385	40.64
2013—2014	3 558	3 540	0.52	3 524	0.97	3 560	0.04
2014—2015	3 372	3 390	0.52	3 205	4.96	3 313	1.76
均值			4.24		19.70		15.70

粒灌浆受到影响,粒质量低估造成的。总体而言,STICS模型在产量和千粒质量方面的模拟效果最优。

2.3 不同模型模拟精度比较

总体来说,STICS模型在物候期和产量方面模

拟精度最高,平均 R_{ARE} 为3.24%,APSIM次之,平均 R_{ARE} 为8.79%,DSSAT最差,平均 R_{ARE} 为11.38%。DSSAT模型在物候期方面的模拟精度高于APSIM,两者 R_{ARE} 分别为1.32%和1.87%,但在

产量方面的模拟精度低于 APSIM, 两者 R_{ARE} 分别为 21.44% 和 15.70% (表 6)。

表 6 不同模型模拟精度比较

Tab.6 Comparison of simulation accuracies of

different models

%

观测指标	STICS	DSSAT	APSIM
物候期	0.58	1.32	1.87
产量相关指标	5.89	21.44	15.70
平均	3.24	11.38	8.79

注: 产量相关指标模拟精度为产量和千粒质量模拟精度的均值。

2.4 不同模型土壤含水率与腾发量模拟比较

油菜侧根发达, 且密集分布在 20 cm 左右土壤层, 基于以上结果, 对 3 个模型模拟 2012—2013 年度浅层 0~20 cm 土壤含水率和 20~100 cm 土壤含水率进行对比分析(图 2)。结果表明, 3 个模型都能够对降雨和灌溉对土壤水分的影响有较好的反映。抽薹期之前, 土壤含水率的变化由土壤蒸发主导, DSSAT 模型模拟含水率大多时段相对其他两个模型较低, 而在抽薹期之后, 土壤含水率的变化主要由作物蒸腾作用主导, APSIM 模型模拟含水率明显低于其他两个模型, STICS 模型模拟的土壤含水率大多时段都高于 DSSAT 和 APSIM 模型(图 2a)。表明 DSSAT 模型对土壤蒸发的模拟高于其他两模型, 而 APSIM 对植物蒸腾的模拟高于其他两模型。STICS 模型和 APSIM 模型对 20~100 cm 的土壤含水率模拟结果趋势相同, STICS 模型模拟值略高于 APSIM, DSSAT 模型模拟值在越冬期前高于 STICS 和 APSIM 模型模拟值, 但进入越冬期之后, 其模拟

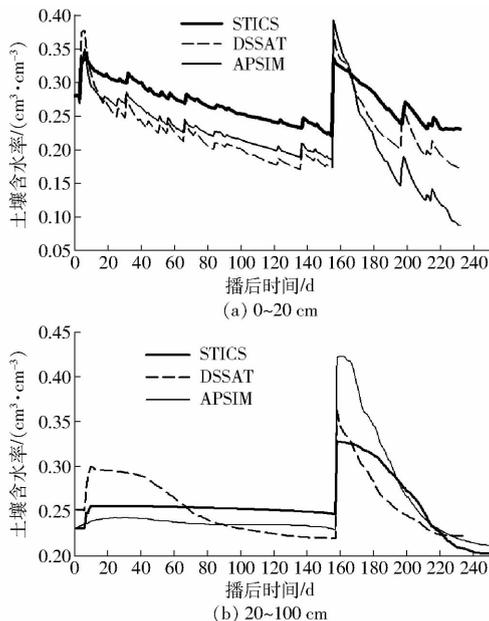


图 2 2012—2013 年土壤含水率动态变化模拟
Fig.2 Simulated dynamic changes of soil moisture content in 2012—2013 season

值低于两者(图 2b)。

同时对 DSSAT 模型模拟 2012—2013 年、2013—2014 年两年的 0~20 cm 和 20~100 cm 土层土壤含水率进行对比分析, 在生育期的绝大多数时段, 2013—2014 年对 0~20 cm 土壤含水率模拟值均高于 2012—2013 年(图 3a), 对于 20~100 cm 土层土壤含水率的模拟, 在花期之前 2012—2013 年的模拟值高于 2013—2014 年, 花期之后 2013—2014 年的模拟值高于 2012—2013 年(图 3b)。因此认为 2012—2013 年产量方面模拟值偏低可能是由于浅层土壤含水率偏低造成的。

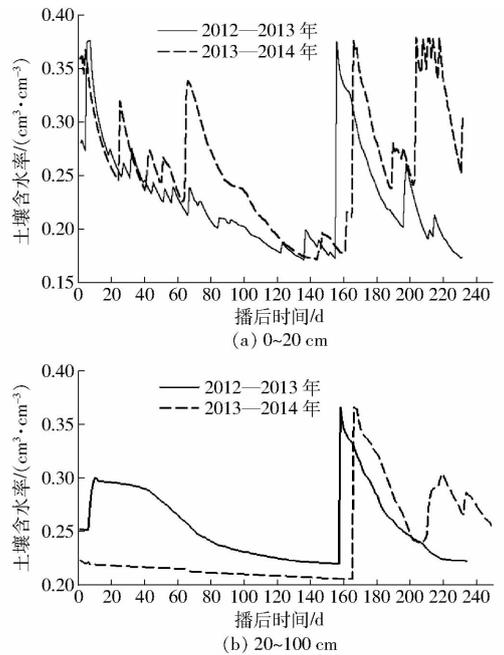


图 3 DSSAT 模型对 2012—2013 年、2013—2014 年土壤含水率变化模拟

Fig.3 Simulated dynamic changes of soil moisture content with DSSAT model in 2012—2013 and 2013—2014 seasons

对 3 个模型模拟油菜生育期内的腾发量进行对比分析(图 4)。播种后 20 d 内, 腾发量相对较高, 这是由于此阶段油菜刚出苗, 且温度较高, 腾发量主要由土壤蒸发造成, 本阶段 STICS 模型模拟值低于其他两个模型。而在播种后 20~160 d, 也就是油菜苗期阶段, 腾发量相对于其他阶段都比较低, 这是由于进入越冬期, 温度较低, 太阳辐射强度较弱, 因此土壤蒸发和作物蒸腾作用都相对较弱。本阶段 DSSAT 模型模拟腾发量高于其他两个模型, 这与 DSSAT 模型模拟当年 0~20 cm 土壤含水率较低相对应。抽薹期后, 腾发量迅速升高, 这是由于温度回升, 油菜迅速生长, 植株增高、叶面积变大, 此阶段的腾发量主要由作物蒸腾贡献。本阶段前期 APSIM 模型模拟值明显高于其他两个模型, 而 STICS 模拟的腾发量峰值晚于其他两个模型。

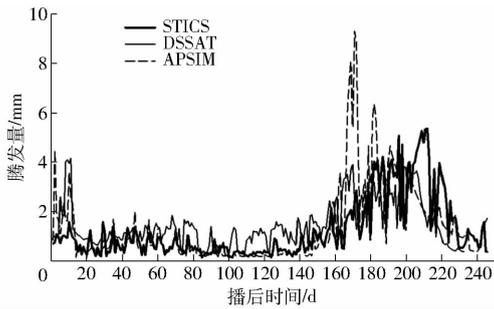


图4 2012—2013年腾发量动态变化模拟

Fig. 4 Simulated dynamic changes of evapotranspiration in 2012—2013 season

3 讨论

尽管 STICS、DSSAT、APSIM 模型内部过程和作物参数设置存在一定差异,但根据前人研究,模型对油菜物候期和产量都有很好的模拟效果^[38-40]。在本研究中,STICS、DSSAT 和 APSIM 对 6 年试验中油菜物候期和产量相关指标都有较好的模拟(平均 R_{ARE} 分别为 3.24%、11.38% 和 8.79%),其中 STICS 模型对物候期和产量相关指标的模拟均为最优, R_{ARE} 分别为 0.58% 和 5.89%,DSSAT 和 APSIM 模型模拟结果稍差,但对物候期和产量相关指标的 R_{ARE} 都分别小于 5% 和 25%。然而对于 2012—2013 年的模拟结果,3 个模型均存在低估 (R_{ARE} 分别为 18.62%、45.92% 和 40.64%)。2012—2013 年生育期内降水低于其余年份,千粒质量也低于其他年份,但当年产量观测值却高于其他年份。试验记录当年花期平均气温比历年同期偏高 0.4℃,日照时长比历年同期偏多 36.6 h,对油菜花蕾分化以及开花授粉十分有利,同时对油菜籽粒建成起到促进作用^[41],从而导致籽粒数多,千粒质量低,总产量高的情况,而模型可能对这一过程缺少描述或过程描述不完善。

在 2012—2013 年,DSSAT 模型对花期有很好的模拟,但模拟成熟期少了 11 d,即灌浆期比实际少 11 d,以致于当年产量和千粒质量模拟效果很差 (R_{ARE} 分别为 45.92% 和 42.85%)。从气象数据来

看,当年生育期内降水明显低于其他年份,且大多降雨小于 10 mm,从 3 个模型对 0~20 cm 层土壤含水率模拟情况来看,DSSAT 模型模拟值在花期之前都处于较低水平,因此当年可能存在水分胁迫现象。干旱能够加快作物生育期进程导致作物提前成熟^[42-43],姚宁等^[44]利用 DSSAT 模型对水分胁迫下的冬小麦进行研究,发现前期受旱处理的模拟误差大于后期受旱处理。因此推测 DSSAT 模型在模拟干旱加快生育进程的影响方面存在高估。APSIM 模型模拟当年作物腾发量时,在播后 166~172 d 突然变大,远远大于其他两模型,且该时段腾发量主要由作物蒸腾作用影响。这可能是由于该时期为抽薹期,气温回升,油菜生长迅速,叶面积急速增加,作物蒸腾作用加剧,而模型对此阶段的模拟存在高估所导致的。

本研究中不同模型校正时虽然保证校正精度 R_{ARE} 均在 5% 以内,以减少不同模型验证的对比误差,但是不同模型之间结构的不确定性和参数定义的不确定性导致的误差无法避免,因此关于不同模型之间的不确定性问题有待进一步研究和量化。

本研究利用 3 个模型对连续 6 年油菜生长实测数据模拟,从数据方面优选出最适宜本地区油菜生长模拟的模型,同时为作物生长模型在本地区的油菜生产应用提供了基础和方向,促进了模型在我国农业生产研究的应用。但对于某些年份模型模拟精度较低的原因以及对应的模型优化改进仍需要进一步研究。

4 结束语

利用 STICS、DSSAT 和 APSIM 3 个模型对我国西北灌溉条件不良地区连续 6 年的冬油菜生长发育情况进行模拟对比,结果表明,3 个模型模拟物候期的 R_{ARE} 分别为 0.58%、1.32% 和 1.87%,产量相关指标的 R_{ARE} 分别为 5.89%、21.44% 和 15.70%,综合所有指标,3 个模型的平均 R_{ARE} 分别为 3.24%、11.38% 和 8.79%。STICS 模型为物候期和产量模拟的最优模型,是 3 个模型中最适合该地区冬油菜生长模拟的作物模型。

参 考 文 献

- [1] BRIAN A K, PETER J T. Modelling crops and cropping systems—evolving purpose, practice and prospects[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 100: 163–176.
- [2] STAPLETON H N. Crop production system simulation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1970, 13(1): 110–113.
- [3] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520–3528.
CAO Hongxin, ZHAO Suolao, GE Daokuo, et al. Discussion on development of crop models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3520–3528. (in Chinese)
- [4] 王亚莉, 贺立源. 作物生长模拟模型研究和应用综述[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5): 529–535.

- WANG Yali, HE Liyuan. A review on the research and application of crop simulation model[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005, 24(5): 529 - 535. (in Chinese)
- [5] 谢云, JAMES R K. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报, 2002, 28(2): 190 - 195.
- XIE Yun, JAMES R K. A review on the development of crop modeling and its application[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(2): 190 - 195. (in Chinese)
- [6] CLEMENTE R S, ASADI M E, DIXIT P N. Assessment and comparison of three crop growth models under tropical climate conditions[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2005, 3(2): 254 - 261.
- [7] 刘成, 黄杰, 冷博峰, 等. 我国油菜产业现状、发展困境及建议[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 203 - 210.
- LIU Cheng, HUANG Jie, LENG Bofeng, et al. Current situation, development difficulties and suggestions of Chinese rape industry[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(12): 203 - 210. (in Chinese)
- [8] 王汉中. 入世后的中国油菜产业[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(2): 82 - 86.
- WANG Hanzhong. China's rape industry after entry into WTO[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2002, 24(2): 82 - 86. (in Chinese)
- [9] 谷晓博, 李援农, 银敏华, 等. 降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 184 - 193.
- GU Xiaobo, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of biodegradable film mulching on root distribution, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 184 - 193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151225&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.025. (in Chinese)
- [10] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1 - 16.
- LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170901&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [11] DELIGIOS P A, FARCI R, SULAS L, et al. Predicting growth and yield of winter rapeseed in a mediterranean environment: model adaptation at a field scale[J]. Field Crops Research, 2013, 144(6): 100 - 112.
- [12] ROBERTSON M J, LILLEY J M. Simulation of growth, development and yield of canola (*Brassica napus*) in APSIM[J]. Crop and Pasture Science, 2016, 67(4): 332 - 344.
- [13] BRISSON N, MARY B, RIPOCHE D, et al. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn[J]. Agronomie, 1998, 18(5-6): 311 - 346.
- [14] ZLELKE K T, LUCKETT D, COWLEY R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(6): 1610 - 1618.
- [15] GABRIELLE B, DENOROY P, GOSSE G, et al. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape [J]. Field Crops Research, 1998, 57(2): 95 - 111.
- [16] DIEPENBROCK W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review[J]. Field Crops Research, 2000, 67(1): 35 - 49.
- [17] PETERSEN C T, JORGENSEN U, SVENDSEN H, et al. Parameter assessment for simulation of biomass production and nitrogen uptake in winter rape[J]. European Journal of Agronomy, 1995, 4(1): 77 - 89.
- [18] KINIRY J R, WILLIAMS J R, MAJOR D J, et al. EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern Great Plains region[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(3): 679 - 688.
- [19] KOCH S, DUNKER S, KLEINHENZ B, et al. A crop loss-related forecasting model for sclerotinia stem rot in winter oilseed rape[J]. Phytopathology, 2007, 97(9): 1186 - 1194.
- [20] JING Q, SHANG J, QIAN B, et al. Evaluation of the CSM - CROPGRO - Canola model for simulating canola growth and yield at west Nipissing in Eastern Canada[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(2): 575 - 584.
- [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 & Forest Meteorology, 2017, 232: 163 - 175.
- [22] MOUSAVIZADEH S F, HONAR T, AHMADI S H. Assessment of the AquaCrop model for simulating canola under different irrigation managements in a semiarid area[J]. International Journal of Plant Production, 2016, 10(4): 425 - 446.
- [23] BRISSON N, GARY C, JUSTES E, et al. An overview of the crop model STICS[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4): 309 - 332.
- [24] ALLAN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [25] SHUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 111(469): 839 - 855.
- [26] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81 - 92.
- [27] RITCHIE J T. A user-orientated model of the soil water balance in wheat[M]//Wheat growth and modelling. MA, Boston;

- Springer, 1985: 293 – 305.
- [28] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 235 – 265.
- [29] RITCHIE J T. Soil water balance and plant water stress[M] // TSUJI G Y, HOOGENBOOM G, THORNTON P K. Understanding options for agricultural production. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1998: 41 – 54.
- [30] SASEENDRAN S A, AHUJA L R, MA L, et al. Current water deficit stress simulations in selected agricultural system models[M] // AHUJA L R, REDDY V R, SASEENDRAN S A, et al. Response of crops to limited water: understanding and modeling water stress effects on plant growth processes. Fort Collins: Colorado, 2008: 1 – 38.
- [31] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 50(3): 255 – 271.
- [32] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究进展[J]. *气象科技*, 2002, 30(4): 193 – 203.
LIU Buchun, WANG Shili, MA Yuping. Advances in regional application of crop models abroad[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2002, 30(4): 193 – 203. (in Chinese)
- [33] PROBERT M E, DIMES J P, KEATING B A, et al. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 56(1): 1 – 28.
- [34] VERBURG K, ROSS P J, BRISTOW K L. SWIMv2. 1 user manual[M]. Canberra, Australia: CSIRO Division of Soils, 1996.
- [35] ANGSTROM A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 50(210): 121 – 126.
- [36] XIONG W, HOLMAN I, CONWAY D, et al. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 213(3): 365 – 380.
- [37] HE J, JONES J W, GRAHAM W D, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method[J]. *Agricultural Systems*, 2010, 103(5): 256 – 264.
- [38] SASEENDRAN S A, NIELSEN D C, MA L, et al. Adapting CROPGRO for simulating spring canola growth with both RZWQM2 and DSSAT 4.0[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(6): 1606 – 1621.
- [39] WANG S, WANG E, WANG F, et al. Phenological development and grain yield of canola as affected by sowing date and climate variation in the Yangtze River Basin of China[J]. *Crop and Pasture Science*, 2012, 63(5): 478 – 488.
- [40] HABEKOTTE B. A model of the phenological development of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Field Crops Research*, 1997, 54(2 – 3): 127 – 136.
- [41] 官春云. 优质油菜生理生态和现代栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [42] DOMINIQUE D, PIERRE R. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars[J]. *Field Crops Research*, 1996, 46(1 – 3): 61 – 70.
- [43] 马玉平, 孙琳丽, 马晓群. 黄淮海地区夏玉米对于干旱和涝渍的生理生态反应[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 85 – 93.
MA Yuping, SUN Linli, MA Xiaoqun. Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang – Huai – Hai plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 85 – 93. (in Chinese)
- [44] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT – CERES – Wheat 模型的调参与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 138 – 150.
YAO Ning, ZHOU Yuangang, SONG Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT – CERES – Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 138 – 150. (in Chinese)