

李彤霄,刘佳,李聪,等. 基于大豆观测数据的 DSSAT 和 WOFOST 模型模拟比较研究[J]. 气象与环境科学,2021,44(2):9-15.

Li Tongxiao, Liu Jia, Li Cong, et al. Comparative Study of DSSAT and WOFOST Models Based on Soybean Observation Data[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021, 44(2): 9-15.

doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2021.02.002

基于大豆观测数据的 DSSAT 和 WOFOST 模型模拟比较研究

李彤霄^{1,2}, 刘佳³, 李聪³, 郑亚杰⁴, 郭戈⁴

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2. 河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 3. 郑州市气象局, 郑州 450000; 4. 黄泛区农场气象局, 河南 西华 466632)

摘 要: 选取2000—2017年黄泛区农场农业气象观测站大豆观测数据及同期气象数据,对 DSSAT 和 WOFOST 两种模型进行调参,并对模拟结果进行对比。结果显示:两种模型模拟的结果略有不同,DSSAT 模型较详细地模拟了大豆的生长过程,WFOST 模型的模拟则相对较简单。在有限数据的情况下,DSSAT 模型对生物量的模拟效果较好,WFOST 模型对生育期天数和产量的模拟效果较好。两种作物模型均不适合对长时间序列的大豆生长状况进行模拟,时间越长,预测产量的误差越大。

关键词: DSSAT; WOFOST; 大豆; 模拟

中图分类号: S565.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-7148(2021)02-0009-07

DSSAT 和 WOFOST 模型作为主流作物模型,在国内外被广泛应用^[1-4]。国内在作物模型的适应性及其在产量预报、生产潜力、水肥利用、灾害评估等方面的应用研究已有较多的成果^[5-23]。郭定荣^[6]、胡雪琼^[7]等分别验证了 WOFOST 模型对华北平原地区冬小麦、云南烤烟的适用性。谢文霞^[8]、张素青^[9]等利用 WOFOST 模型对浙江水稻、河南夏玉米进行了模拟、验证。杨勤^[10]、杜朝正^[11]等基于 DS-SAT 模型模拟了宁夏春小麦、中国水稻的产量变化。王涛^[12]、陈学文^[13]等分别用 WOFOST 模型和 DS-SAT 模型对京津冀地区冬小麦、黑土区玉米的生产潜力进行了模拟研究。邹龙等^[14]利用 DSSAT 模型研究了春玉米水肥效应。王文佳^[15]、邵光成^[16]、朱津辉^[17]等基于 DSSAT 模型研究了最优灌溉制度。薛昌颖^[18]、聂江文^[19]、栾庆祖^[20]、张建平^[21]等利用作物模型对旱稻干旱、水稻高低温灾害、玉米干旱、

玉米低温冷害等进行了影响评估。鲁向晖^[22]、姜志伟^[23]等利用 DSSAT 模型对冬小麦保护性耕作效应和资源高效种植模式进行了模拟研究。上述研究主要是利用单一模型对单一作物进行适用性研究。由于不同模型的原理和算法的差异,模拟的结果会产生一定的偏差。因此,分析不同模型之间模拟结果的差异,根据模拟效果合理选择作物模型就显得十分必要。

河南省处在亚热带向暖温带的过渡带上,具有四季分明、雨热同期、气候多样、灾害频发的特点,有着丰富的气候资源。利用河南省多变的气候资源,分析不同模型对不同气候资源的适应性,可以更好地了解不同模型的优势。因此,本文利用2000—2017年河南中部黄泛区农场农业气象观测站(简称泛区)大豆观测数据及同期气象数据,分析 DSSAT 和 WOFOST 两种模型模拟结果的差异,以期选取最

收稿日期: 2020-01-17; 修订日期: 2020-03-09

基金项目: 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室科学研究基金项目资助(AMF201704); 河南省气象局科研计划项目(KZ201816)资助

作者简介: 李彤霄(1981—),男,河南南阳人,高级工程师,硕士,从事应用气象研究。E-mail: ltx1981011@163.com

优的模型模拟结果,提升农业气象业务服务模型应用的参考价值。

1 资料与方法

1.1 样点选择

选取河南中部地区泛区为样点,利用泛区2000—2017年大豆观测数据和同期气象数据,分析两种模型在大豆模拟中的差异。

1.2 品种选择

大豆观测品种为中熟品种,以豫豆29号为主。

1.3 资料选择

(1) 大豆观测数据

2000—2017年大豆的发育期(播种期、出苗期、开花期、成熟收获期)、地上生物量、叶面积指数及产量等数据,来源于河南省气象探测数据中心。

(2) 气象数据

2000—2017年气象数据,包括日照时数、降水量、最高气温、最低气温、风速等,来源于河南省气象探测数据中心。

(3) 管理数据

2000—2017年大豆生产过程中的灌溉、施肥等措施的时间及数量,来源于河南省气象探测数据中心。

(4) 土壤数据

大豆观测地段的凋萎系数、田间持水量、土壤水分下渗速率、土壤饱和含水量、饱和土壤的水力传导率等参数,来源于中国科学院南京土壤研究所。

1.4 模型的选择和调试

DSSAT模型中的CROPGR-Soybean模型利用大豆观测、气象观测等资料和DSSAT自带的GLUE模

块进行调参。WOFOST模型首先使用“试错”法,进一步缩小敏感参数的分布范围。然后采取随机种子多次优化策略,通过多次随机调用SCE-UA算法进行参数优化。

对模型模拟的主要发育期、产量、叶面积指数(LAI)、地上生物量等进行验证,选择模拟值与观测值的均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)、决定系数(R^2)和标准差(SD)作为模型模拟效果的评判验证指标。

RMSE和NRMSE反映模拟值与实测值的绝对误差和相对误差。当RMSE接近标准误差时,表明模型模拟精度高。NRMSE<10%时,模型模拟结果很好;NRMSE为10%~20%,模拟结果好;NRMSE为20%~30%,模拟结果尚可,可以接受;NRMSE>30%,模拟结果较差,不能接受。决定系数 R^2 表示模拟值与实测值变化的一致性,越接近于1相关性越好。标准差(SD)反映数据结果的稳定性。

2 两个模型的模拟结果分析

由于样本个数有限,为有效利用数据资源,选取泛区2000—2008年共9年的数据进行调试,选取2009—2014年共6年的数据进行验证,选取2015—2017年共3年的数据进行预测、对比。

2.1 大豆的生育期模拟结果

由于作物模型模拟结果的主要发育期为播种、出苗、开花、成熟,因此选取这4个生育期进行模拟(图1)。利用大豆实测播种期为模拟初始日期,以泛区的逐日气象数据驱动DSSAT和WOFOST模型模拟大豆生长发育过程,并与实际观测数据进行对比分析,以检验模型的适应性。

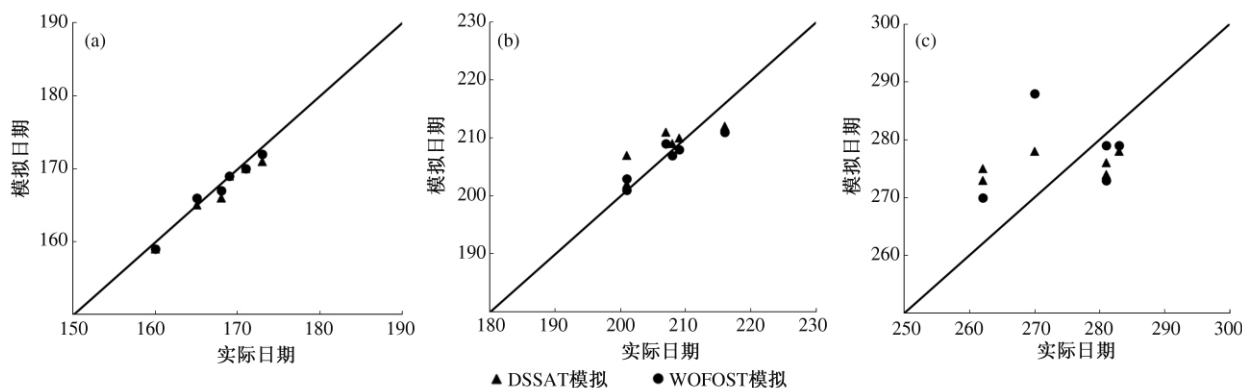


图1 大豆出苗期(a)、开花期(b)、成熟期(c)验证值模拟结果比较

2.1.1 大豆出苗期模拟结果

从大豆出苗期模拟结果的统计中可以看出(表1),两个模型模拟生育期与实测生育期间的 RMSE 值均较小。DSSAT 和 WOFOST 模型的 NRMSE 分别为 0.78% 和 0.82%,说明模拟结果与实测结果差异

较小。两个模型的 R^2 值均在 0.95 以上,说明两个模型的拟合程度都很好。DSSAT 和 WOFOST 模型的 SD 分别为 0.99 d 和 1.05 d,表明两个模型模拟结果稳定性差异不大。

表1 大豆生育期、产量调参值模拟结果的统计评价

评判指标	出苗期/d		开花期/d		成熟期/d		产量/(kg/hm ²)	
	DSSAT	WOFOST	DSSAT	WOFOST	DSSAT	WOFOST	DSSAT	WOFOST
RMSE	1.31	1.37	3.16	2.06	5.87	2.62	420.67	467.17
NRMSE	0.78	0.82	1.51	0.99	2.10	0.94	17.83	19.15
R^2	0.96	0.96	0.70	0.89	0.67	0.83	0.22	0.16
SD	0.99	1.05	3.11	1.80	4.16	1.98	351.76	395.66

从两个模型模拟大豆出苗期验证值与实测值的 1:1 图可以看出(图 1a),大豆的出苗期主要在儒略历第160—175天,WOFOST 模拟效果优于 DSSAT 的模拟效果。两个模型模拟的散点大部分落在 1:1 线周围,表明两个模型模拟效果均较好。

以上数据表明,DSSAT 和 WOFOST 模型对大豆出苗期的模拟效果较好。

2.1.2 大豆开花期模拟结果

大豆的开花期调参值模拟结果见表1。从中可以看出,DSSAT 和 WOFOST 模型的模拟生育期与实测生育期间的 RMSE 值分别为3.16 d和 2.06 d,相对较小。NRMSE 分别为1.51% 和 0.99%,说明模拟结果与实测结果差异较小。 R^2 值反映了两个模型的模拟结果较好。标准差 SD 在 3.11 d 和 1.80 d,说明稳定性较好。总体来说,WOFOST 模拟与实测结果拟合程度好于 DSSAT 模型的。

图 1(b) 是两个模型模拟大豆开花期验证值与实测值的 1:1 图。从中可以看出,大豆的开花期主要在第201—216天,两个模型的差异不大。模拟的散点大部分落在 1:1 线周围,表明模拟效果较好。

以上数据表明,DSSAT 和 WOFOST 模型对大豆开花期的模拟效果较好,WOFOST 模型略好于 DSSAT 模型。

2.1.3 大豆成熟期模拟结果

大豆的成熟期调参值模拟结果见表1。从中可以看出,DSSAT 和 WOFOST 模型模拟生育期与实测生育期间的 RMSE 值为 5.87 d 和 2.62 d。二者的 NRMSE 分别为 2.10% 和 0.94%,说明模拟结果与实测结果差异较小。 R^2 值显示 WOFOST 模拟与实测结果拟合程度较好,DSSAT 的略差。二者标准差 SD 分别为 4.16 d 和 1.98 d,显示 DSSAT 模型模拟结果略差于 WOFOST 模型的。

图 1(c) 是两个模型模拟大豆成熟期验证值与实测值的 1:1 图。从中可以看出,大豆的成熟期主要在第263—285天,两个模型模拟的差异不大,除 2001 年误差超过 20 天外,其他年份均在 5 天左右。模拟的散点大部分落在 1:1 线周围,表明模拟效果较好。2001 年模拟的成熟期偏晚的原因,主要是当年播种期偏晚,致使收获期偏晚。为不影响小麦适时播种,不等大豆完全成熟就及早收获,并记作成熟,再加上后期气温降低,又延长了成熟期的时间,因而导致模拟结果和实际值差别较大。

以上数据显示,两个模型可以较好地模拟大豆的成熟期。WOFOST 模型的模拟效果略好于 DSSAT 模型的。

2.2 大豆的产量模拟结果

大豆产量调参值模拟结果见表1。从中可以看出,各处理模拟生育期与实测生育期间的 RMSE 值相差不大。NRMSE 值显示,两个模型的模拟结果较好,但 WOFOST 的大于 DSSAT 的。 R^2 值显示 DSSAT 模拟与实测结果拟合程度较好,WOFOST 的略差。DSSAT 和 WOFOST 模型模拟结果的标准差 SD 分别为 351.76 kg/hm² 和 395.66 kg/hm²,相差不大。总的来说,DSSAT 的模拟效果好于 WOFOST 的。

图 2 是 CROPGRO-Soybean 模型模拟大豆产量验证值与实测值的 1:1 图。从图中可以看出,两个模型模拟的结果差异不大,模拟值普遍偏小。模拟的散点大部分落在 1:1 线的下方,模拟效果略差。究其原因,主要是品种变化导致的产量水平的提升。假设产量的提升值相对稳定,则 WOFOST 的模拟结果好于 DSSAT 的。

2.3 大豆的叶面积指数模拟结果

对比两个模型的叶面积指数的模拟曲线发现,

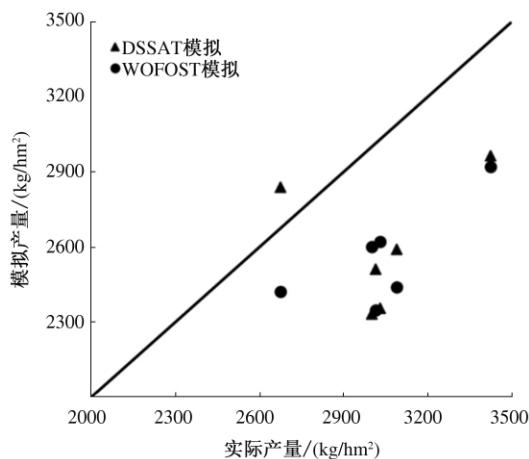


图 2 大豆产量验证值模拟结果比较

两个模型对叶面积指数的模拟有一定的差异。WOFOST模型模拟结果是抛物线形,叶面积指数达到最大值后,就迅速下降;DSSAT模型模拟结果是“几”

字形,叶面积指数达到最大值后缓慢下降,在末期再次迅速下降。本文选择利用2000—2008年数据调参,2009—2014年数据验证。由于叶面积指数模拟曲线的结果相似,为了有效展示模拟效果,文中用2000—2008年和2011—2014年数据展示。

调参结果(图 3a、图 4a)表明,DSSAT模型和WOFOST模型不同年份模拟的叶面积指数动态变化与实测值趋势一致,较能反映叶面积指数动态变化情况,DSSAT模型模拟的叶面积指数的最大值接近于测量值,WOFOST模型的模拟值明显偏大。

验证结果(图 3b、图 4b)表明,DSSAT模型和WOFOST模型不同年份模拟的叶面积指数动态变化与实测值趋势一致,但模拟效果比调参结果的略差。

总体来说,DSSAT模型模拟的结果较WOFOST模型模拟的结果好。

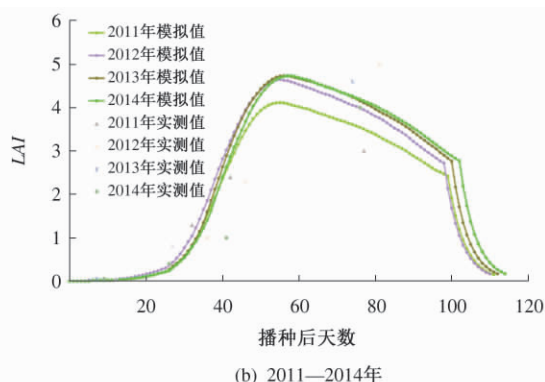
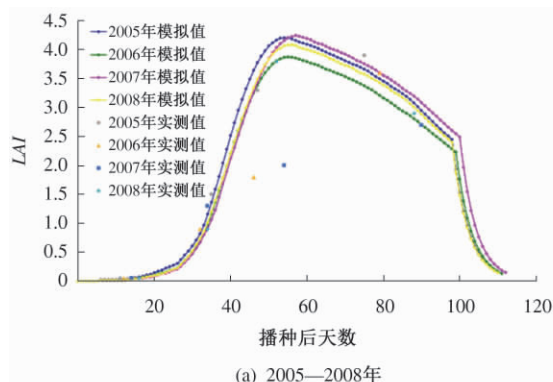


图 3 DSSAT 模型叶面积指数调参(a)和验证(b)图

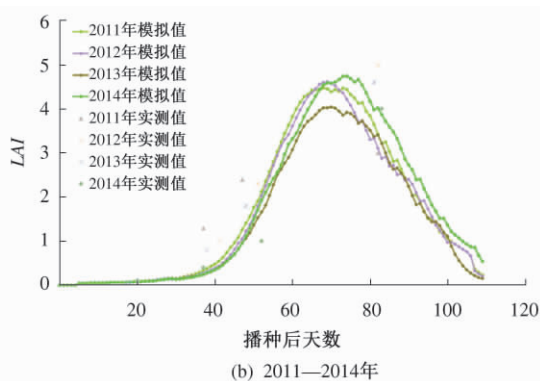
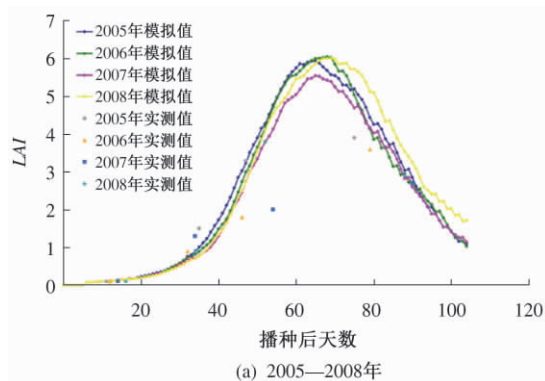


图 4 WOFOST 模型叶面积指数调参(a)和验证(b)图

2.4 大豆的地上生物量模拟结果

DSSAT模型和WOFOST模型对大豆地上生物量的模拟结果(图略)显示,模拟值与实测值在前中期均呈现良好的趋势一致性,但后期的模拟结果有很大不同。DSSAT模型能够反映地上生物量的情况,而WOFOST模型不能如实地反映后期的生物量

变化情况。

2.5 模拟结果分析小结

通过以上分析发现,DSSAT和WOFOST两个模型的生育期、最终产量、叶面积指数、地上生物量的模拟值与实测值一致性较好,模型能较为准确地模拟泛区大豆的生长过程和产量情况,但模拟效果略

有不同。DSSAT 模型在大豆生长过程的模拟效果略好于 WOFOST 模型的, WOFOST 模型在最终结果的模拟上略好于 DSSAT 模型的。总体上, DSSAT 模型和 WOFOST 模型均具有较好的模拟精度及较强的适应性, 能够用于河南省大豆生产。由于农业系统内在的复杂性和作物模型自身算法偏差, WOFOST 模型模拟的趋势过程没有 DSSAT 模型的精准。

3 两个模型的预测结果分析

利用以上得到的 DSSAT 模型与 WOFOST 模型参数对泛区 2015、2016、2017 年大豆生长状况进行预测, 并对比分析两个模型 3 年最终预测结果与实际生育期及产量的偏差, 进而得到两者大豆预测效果的差异。

3.1 大豆生育期和产量

通过两个模型得到的 2015、2016 和 2017 年 3 年大豆的生育期、产量的预测值和实际值对比(表 2)发现, 两个模型模拟的生育期都是以偏多为主,

但 DSSAT 模型模拟的大豆生育期误差明显大于 WOFOST 模型的。两个模型模拟的产量误差都以减小为主, 但 WOFOST 模型模拟的产量误差明显小于 DSSAT 模型的。总体来说, WOFOST 模型模拟的生育期延长, 客观上增加了产量积累的日数, 提升了产量, 减小了产量的误差。

表 2 2015—2017 年模拟结果和实际结果误差对比

年份	2015		2016		2017	
	DSSAT	WOFOST	DSSAT	WOFOST	DSSAT	WOFOST
出苗期/d	1	1	1	0	2	1
开花期/d	-1	1	1	0	2	-1
成熟期/d	7	9	13	-1	12	4
产量/%	-8.20	-11.42	-4.06	-19.29	6.00	-4.41

3.2 大豆叶面积指数

对比大豆叶面积指数预测值和实际值发现, 2015、2016 和 2017 年 3 年大豆的叶面积指数的预测值(图 5、6), 能够较好地反映大豆叶面积指数变化的趋势, 但与实际值均有一定的误差。由于模型算法的不同, WOFOST 预测的最大值, 明显高于 DSSAT 的, 略高于实际值。DSSAT 的预测效果较好。

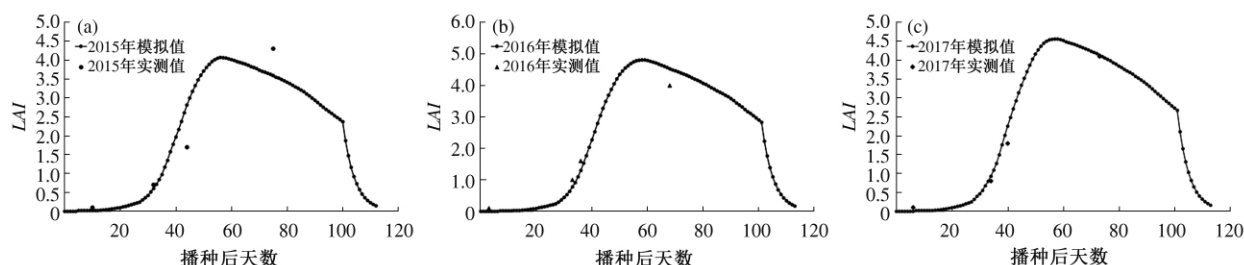


图 5 DSSAT 模型 2015 年(a)、2016 年(b)、2017 年(c) 叶面积指数预测及对比图

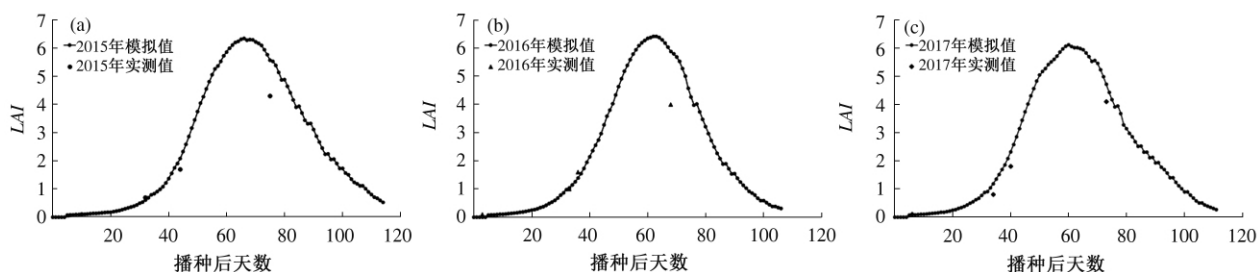


图 6 WOFOST 模型 2015 年(a)、2016 年(b)、2017 年(c) 叶面积指数预测及对比图

3.3 大豆地上物质量

对比大豆地上物质量预测值和实际值(图 7、8)发现, 2015、2016 和 2017 年 3 年大豆的地上物质量的预测值, 能够较好地反映大豆地上物质量变化的趋势, 但与实际值都有一定的误差。由于模型算法的不同, WOFOST 预测的最大值, 明显高于 DSSAT 的, 略高于实际值。DSSAT 的模拟效果较好。

3.4 预测结果分析小结

总的来说, 两个模型基本上能够预测大豆的生长情况, 但由于品种和管理方法的变化, 对大豆产量的预测存在较大的误差。在实际预测过程中, 两个模型各有所长, WOFOST 模型偏重于生育期预测, DSSAT 模型偏重于产量和过程预测。

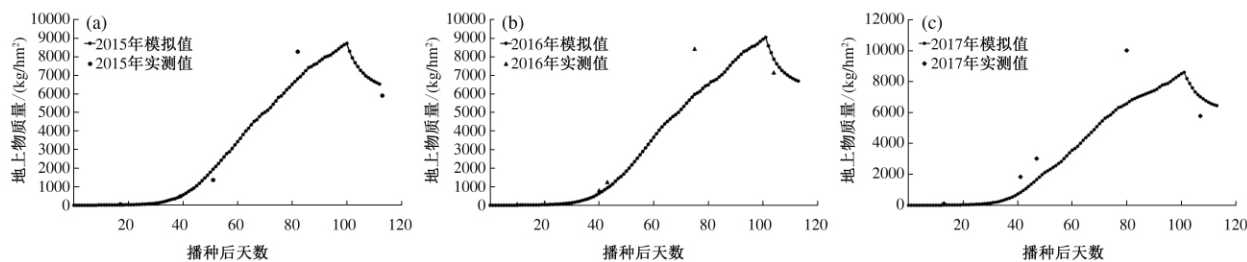


图7 DSSAT模型2015年(a)、2016年(b)、2017年(c)地上物质量预测及对比图

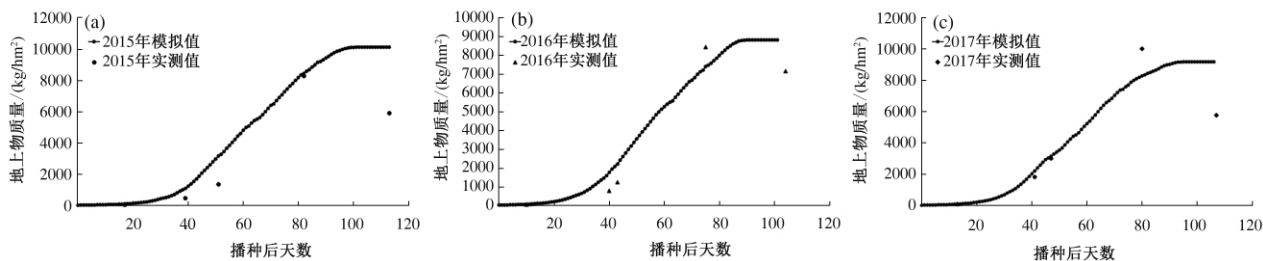


图8 WOFOST模型2015年(a)、2016年(b)、2017年(c)地上物质量预测及对比图

4 结论与讨论

(1) 由于模型机理的不同,不同模型对大豆生长发育过程的模拟结果也不同。DSSAT模型能够较为详细地模拟大豆的生长过程,WOFOST模型的模拟相对较粗,但由于减少了一些其他的影响要素,模拟的效果略好。

(2) 两个模型结果各有长处,在有限数据的情况下,DSSAT模型对生物量的模拟效果较好,WOFOST模型在生育期天数和产量方面模拟效果较好。考虑到模型自身的误差,建议在实际应用中,综合两种模型的长处,提取两种模型的共同规律,结合实测值去判定模型的定量化指标,提升预测的准确性。

(3) 两种作物模型均不适合模拟长时间序列的大豆生长状况,主要是品种和管理方法的改变,导致两种作物模型对长时间序列的模拟效果逐渐变差,特别是产量的模拟误差最大。DSSAT模型略好于WOFOST模型的。建议如果数据量充足的话,调参数据和模拟数据的日期差异尽可能在10年以内,以减少品种和管理变化带来的模拟误差。

参考文献

- [1] 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 22-23.
- [2] 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.
- [3] Lanen H A J, Diepen C A, et al. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects with in the EU-ROPE communities [J]. Agricultural Systems, 1992, 39: 307-328.
- [4] Salo T J, Palosuo T, Kersebaum K C, et al. Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization [J]. The Journal of Agricultural Science, 2016, 154(7): 1218-1240.
- [5] 余卫东, 张弘, 刘伟昌. 我国农业气象灾害评估研究现状和发展方向[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(3): 73-77.
- [6] 郭定荣, 欧阳竹, 赵晓敏, 等. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594-602.
- [7] 胡雪琼, 徐梦莹, 买苗, 等. WOFOST 模型对于云南烤烟的适用性研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015, 7(5): 451-457.
- [8] 谢文霞, 严力蛟, 王光火. 运用 WOFOST 模型对浙江水稻潜在生长过程的模拟与验证[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 319-323.
- [9] 张素青, 张建涛, 李继蕊, 等. WOFOST 模型在河南省夏玉米主产区的校准与验证[J]. 河南农业科学, 2014, 43(8): 152-156.
- [10] 杨勤, 许吟隆, 林而达, 等. 应用 DSSAT 模型预测宁夏春小麦产量演变趋势[J]. 干旱地区农业研究, 2009(2): 41-48.
- [11] 杜朝正. 基于 DSSAT 模型的中国水稻产量时空模拟研究[D]. 吉林: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2015(10): 211-213.
- [12] 王涛, 吕昌河, 于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 475-487.
- [13] 陈学文. 基于 DSSAT 模型的黑土区玉米生产力模拟研究[D]. 吉林: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2009.
- [14] 邹龙, 冯浩. 基于 DSSAT 模型的春玉米水肥效应—以黄土高原丘陵沟壑区为例[J]. 中国水土保持科学, 2014(6): 100-107.
- [15] 王文佳, 冯浩, 宋献方. 基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬小麦灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013(4): 1-10.
- [16] 邵光成, 王志宇, 王小军, 等. 基于 DSSAT 模型的冬小麦最优灌溉制度研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 289-297.
- [17] 朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 基于模型的河北省保定市冬小麦最佳

- 灌溉方案研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1398–1407.
- [18] 薛昌颖. 基于作物模型的河南省旱稻干旱风险评估[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 126–131.
- [19] 聂江文, 杨梅, 熊勤学, 等. 基于 DSSAT 模型模拟高低温灾害对荆州市中稻产量的影响及对策[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(2): 223–229.
- [20] 栾庆祖, 叶彩华, 莫志鸿, 等. 基于 WOFOST 模型的玉米干旱损失评估: 以北京为例[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 311–316.
- [21] 张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等. 基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4132–4138.
- [22] 鲁向晖, 穆兴民, Vinay Nangia, 等. DSSAT 模型对豫西冬小麦保护性耕作效应模拟效果验证[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 64–70.
- [23] 姜志伟. 基于 DSSAT 模型的资源高效种植模式模拟优化研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.

Comparative Study of DSSAT and WOFOST Models Based on Soybean Observation Data

Li Tongxiao^{1,2}, Liu Jia³, Li Cong³, Zheng Yajie⁴, Guo Ge⁴

(1. CMA • Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003, China;

2. Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China;

3. Zhengzhou Meteorological Office, Zhengzhou 450000, China;

4. Huanghe River Flooded Area Farm Meteorological Station, Xihua 466632, China)

Abstract: Based on the soybean observation data and meteorological data of the same period in 2000—2017 from the Huanghe River Flooded Area Farm Agrometeorological Observation Station, DSSAT and WOFOST models were used for adjusting the parameters and comparatively analyzing the simulation results. The results show that the simulation results of the two models are slightly different due to their different mechanisms. DSSAT model can simulate the growing process of soybean in detail, while WOFOST model can only do the simulation simply. However, in the case of limited data, DSSAT model has better simulation effect on biomass, and WOFOST model has better simulation effect on the days of growing period and crop yield. Neither of the two models are suitable for simulating soybean growth in long-time series, and the longer the lead time of prediction, the greater the error of yield simulation, which is due to the changes of varieties and management methods under the simulation of long time series. DSSAT model is slightly better than WOFOST model.

Key words: DSSAT; WOFOST; soybean; simulation