



WOFOST 模型对于云南烤烟的适用性研究

摘要

为研究 WOFOST 模型对于云南烤烟的适用性,使用 2010—2011 年在云南烟区玉溪、昭通的烤烟田间实验数据,应用 WOFOST 模型对云南烤烟潜在生长进行了模拟和验证.用昭通 2010 年的实验数据作参数校正,得到云南本地化的参数,再用其余实验数据验证.结果显示:WOFOST 模型可以较好模拟云南烤烟的潜在生长过程,目前烤烟的产量水平仅相当于其生产潜力的 88%左右,仍有提升的空间.

关键词

WOFOST 模型;烤烟;模拟;修订

中图分类号 Q945.3;S572

文献标志码 A

收稿日期 2015-01-15

资助项目 中国气象局气候变化专项(CCSF201426)

作者简介

胡雪琼,女,硕士,高级工程师,研究方向为农业气象.hxqnky@163.com

朱勇(通信作者),男,研究员,研究方向为农业气象及气候.zhu Yong78@hotmail.com

1 云南省气候中心,昆明,650034

2 江苏省气候中心,南京,210008

0 引言

目前,基于作物生理生态机理,考虑作物生长与大气、土壤、生物乃至人文等环境因素相互作用的作物生长动态模拟模型已成为农业研究最有力的工具之一^[1].WOFOST 模型由荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心共同开发研制,近年来在国内外得到了广泛的应用,被用于产量预测、发育期、作物生产潜力、适宜度、灌溉及施肥对作物的影响、灾害监测评估等方向的研究^[2-6].WOFOST 对于国内多种作物如冬小麦、水稻等的适用性也得到了广泛的验证^[7-9],但尚少见对 WOFOST 或其他作物模型模拟烤烟的研究.

云南烤烟种植面积、产量、质量均居全国首位,烤烟作为云南的主要经济作物,在地方经济、农民增收等方面发挥着重要的作用.烤烟评估预测产品质量受到烤烟生产管理部门的重视,烤烟生育期及产量预测更是一项涉及烤烟生产、收购、贮运等一系列产销过程的时间及规模的重要服务内容,但是长期以来,烤烟相关评估预测基本为定性的,烤烟生育期、单产的预测缺乏有力的定量工具,而 WOFOST 模型能精确地模拟作物的生长过程,可定量预测作物生育期、叶面积、单产等重要指标.引入先进的 WOFOST 模型,开展烤烟生育期、产量预测,对于烤烟相关生产管理部门生产、收购计划等决策制定,开展未来气候变化对烤烟种植影响等科学研究均具有重要的现实意义.

本文运用 WOFOST 模型的原理和技术,对云南省烤烟主栽品种 K326 生长进行模拟验证,校正 WOFOST 模型模拟烤烟的相关参数,以期为进一步更高水平开展烤烟相关科学研究、业务服务奠定基础.

1 材料与方 法

1.1 实验点概况

实验点选择传统烟区滇中的玉溪、滇东北的昭通 2 个市进行,为云南主要的传统烤烟种植区域.玉溪属于亚热带季风气候区,年平均气温 16.3℃,年降水 909 mm,四季如春,干湿季分明,冬春干旱严重,夏季光照和煦、气温宜人.昭通属于亚热带、暖温带共存的高原季风立体气候,年平均气温 11.8℃,年降水 675 mm,干湿分明,四季明显,冬天气温 3.6℃,夏天平均气温 19.0℃、雨热同季、光照充足.玉溪实验点位于玉溪赵桅烤烟种植科技示范园区(102°36'E,24°18'N),海拔 1 637 m,为有灌溉条件的半山地,管理规范,各项措施基本能保障

烤烟的肥料、灌溉等生长需求。昭通试验点位于 103°42'E, 27°18'N, 海拔 1 950 m, 为山地种植, 有水窖保证灌溉。

1.2 模型主要输入参数

WOFOST 模型包含气候、作物、土壤 3 个模块^[7], 可以模拟潜在生长、水分限制、养分限制 3 种条件下的作物生长过程, 潜在生长模拟作物水肥充分供应条件下的生长状况^[10]。模型的参数主要包括描述作物生态特性的作物参数及描述土壤特性的土壤参数, 其中, 作物参数包括各发育期积温、干物质分配系数、比叶面积、叶片光能利用率等, 土壤参数包括枯萎系数、田间持水量等^[7]。

1.3 实验设计及数据收集

1.3.1 实验设计

烤烟田间试验品种选择主栽品种 K326。K326 在云南得到了大面积种植, 该品种整齐度好、抗逆性强、耐肥性强, 适宜在肥水条件较好的田地种植, 苗龄 60—70 d, 4 月下旬—5 月中旬移栽, 9 月采收完毕。试验在昭通、玉溪均进行 2 a (2010—2011 年)。每个试点的播种及移栽时间与当地种植习惯保持一致, 田间管理措施也尽量符合当地常规, 并保证各试点大致一致, 采取当地烤烟种植的常规措施施肥。由于烟草种植的规范性, 可认为各实验点土壤在施肥管理后肥力一致并能满足烤烟的生长需求。烟田大垄单行种植, 种植密度 1 100 株/亩左右, 1.2 m (行距) × 0.5 m (株距)。每个试验点设 3 个重复, 每个试验小区面积 100 m²。

1.3.2 作物数据测定

各试点均对烤烟生育期、生长量、产量进行逐年观测。烤烟各个生育期按照农业气象观测规范^[11]观测记录烤烟播种、出苗、二真叶、四真叶、七真叶、移栽、成活、团棵、现蕾、工艺成熟。生长量测定自移栽时开始直至烤烟工艺成熟期结束, 每 15 天一次, 用面积系数法测定叶面积, 之后按茎、叶等分器官烘干称重。产量测定于烟草进入工艺成熟期后在 3 个小区共固定 30 株, 按烤烟成熟的先后, 分批采收烘烤。

1.3.3 气象数据收集

模型需要的部分气象要素如日最高气温、日最低气温、降雨量来自于烤烟实验点所在县气象台站观测资料。对于部分台站不观测的要素或需要转化计算的要素如太阳总辐射、湿度、风速进行了推算, 推算出 2 个实验站点 2 a 逐日气象要素。

1.3.4 土壤数据收集

土壤数据采用气象台站土壤水分常数测定数据, 包括凋萎湿度、田间持水量等。

1.4 参数调试方法

实验数据分为 2 组: 昭通 2010 年实验数据用于参数调试; 昭通 2011 年实验数据、玉溪 2010—2011 年实验数据用于模型检验。参数调试采用“试错法”, 利用 2010 年昭通的实验数据, 计算作物参数, 把作物参数及气象数据、土壤参数输入模型, 可输出 2010 年昭通潜在生长条件下的烤烟生育期、干物质、叶面积等模拟值, 根据模拟值与实测值的差距, 反复调整作物参数, 直至模拟值与实测值的差距最小^[2, 12-13]。其余参数参考 WOFOST 模型文件自带的参数值及相关文献资料^[14]。根据实验点的环境条件, 灌溉、施肥条件均较好, 管理规范, 基本可以保证烤烟的水肥需要, 可以认为实验点烤烟是在潜在生长条件下的生长过程, 模型模拟值选择潜在生长条件。

1.5 模型检验方法

通过散点图、评价指标等方法评判模型模拟效果, 采用目前较通用的评价指标: 决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、归一化均方根误差 (NRMSE)。决定系数 (R^2) 可反映模拟值与实测值之间的一致性, 越接近 1 说明模拟效果愈好; 均方根误差 (RMSE) 表示模拟值与实测值之间的绝对误差, 归一化均方根误差 (NRMSE) 则表示模拟值与实测值之间的相对误差, RMSE 值及 NRMSE 值愈小, 模拟误差愈小^[15]。一般认为, NRMSE 值小于 10%, 则模拟效果非常好, 10%~20% 较好, 20%~30% 为一般^[16]。

2 结果与分析

2.1 作物参数调试结果

采用昭通 2010 年实验数据, 用“试错法”修正了部分烤烟参数: 出苗到开花的积温为 910 °C, 开花到成熟的积温为 220 °C, 初始发育阶段为 0.29 (移栽), 总干质量为 65.0 kg/ha。

2.2 土壤参数取值

土壤参数采用气象台站土壤水分常数测定数据, 各参数取云南烟区内各土壤观测站的平均值: 凋萎湿度为 0.2 cm³/cm³, 田间持水量为 0.4 cm³/cm³。

2.3 模型验证

对昭通 2011 年烤烟实验和玉溪 2010、2011 年实验进行验证, 输入气候资料, 对输出的潜在生长条

件下的作物各生长特征模拟值与观测值进行对比分析,检验模型效果。

2.3.1 生育期的检验

对比潜在生长条件下的生育期模拟值与观测值,发现模型对烤烟 K326 的生育期模拟效果较好,误差基本不超过 5 d,尤其是成熟期不超过 2 d(表 1)。图 1 与表 1 显示:烤烟关键生育期现蕾及成熟的

模拟值与观测值较一致,散点图基本落在 1:1 线附近,尤其是成熟期模拟值与观测值非常一致,散点多落在 1:1 线上,生育期观测值与模拟值的决定系数 R^2 为 0.94。均方根误差(RMSE)为 3.6 d、归一化均方根误差(NRMSE)为 2%(表 2),表明生育期模拟效果非常好,WOFOST 模型能准确模拟云南烟区烤烟生育期进程。

表 1 烤烟 K326 生育期的观测与模拟值日序对比

Table 1 Observed and simulated values of developmental stages of tobacco K326

台站	年份	现蕾			成熟		
		观测值	模拟值	差值	观测值	模拟值	差值
昭通	2011	198	193	-5	214	214	0
玉溪	2010	173	168	-5	188	186	-2
	2011	171	176	5	194	194	0

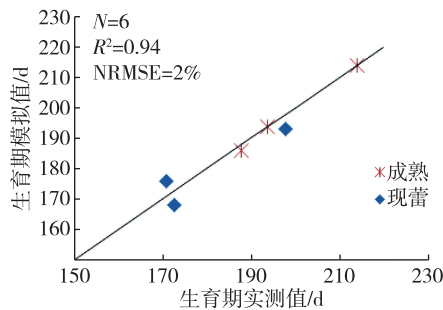


图 1 烤烟 K326 生育期模拟值与实测值关系

Fig. 1 Relationship between simulated and observed values of developmental stages of tobacco K326

2.3.2 生长量的检验

从烤烟总干质量(图 2)的模拟数据来看,各站点各年份总干质量模拟值与实测值趋势较为一致,在第 150~170 d 左右,即大概 6 月上旬一下旬,接近烤烟旺长阶段,总干质量进入一个快速增长阶段,对 2 个实验站点的观测数据与模拟数据进行分析,决定系数 R^2 达到 0.98,归一化均方根误差(NRMSE)为 22%,说明 WOFOST 模型基本能模拟烤烟总干质量的变化情况。2010 年玉溪模拟效果稍差,这可能与 2010 年云南大旱,玉溪旱情较重,人为灌溉等措施不力对烤烟生长产生的不确定性影响有关。

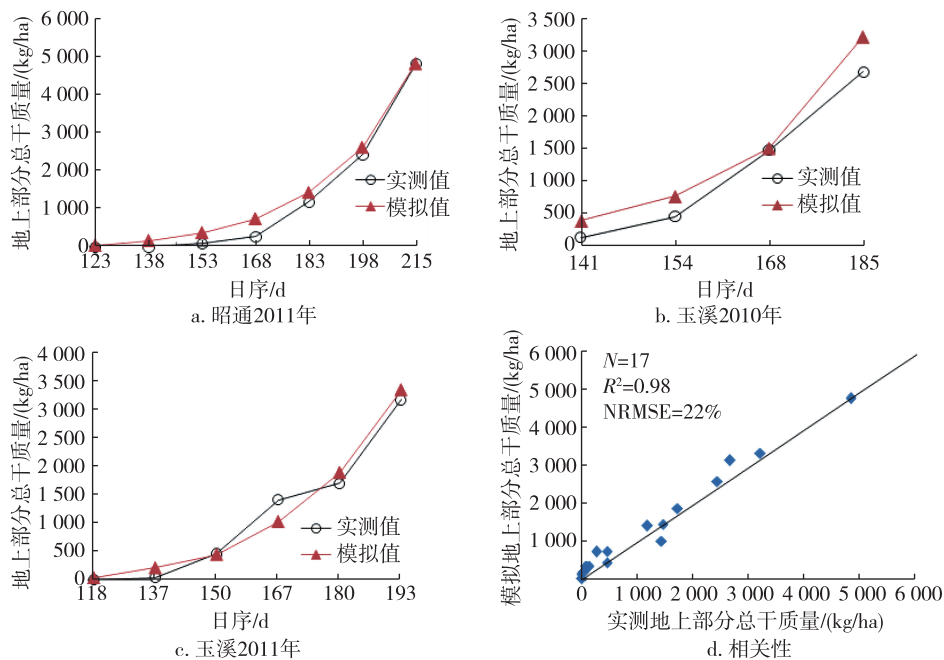


图 2 烤烟 K326 品种地上部分总干质量模拟值与观测值的关系

Fig. 2 Relationship between simulated and observed values of total dry matter above ground of tobacco K326

茎干质量、叶片干质量、叶面积指数的模拟(图3—5)也与总干质量的模拟具有相似的规律.茎干质量模拟值与实测值决定系数 R^2 达到 0.92,归一化均方根误差(NRMSE)为 28%;叶干质量模拟值与实测值决定系数 R^2 达到 0.96,归一化均方根误差(NRMSE)为 22%;叶面积指数模拟值与实测值决定

系数 R^2 达到 0.88,归一化均方根误差(NRMSE)为 29%,模型较好地模拟了烤烟各器官干物质、叶面积的变化过程,基本能模拟烤烟生长形态的动态变化.从各试验站点各年份的模拟情况来看,玉溪 2010 年茎干质量、总干质量模拟效果较差,与 2010 年玉溪烤烟生长季内旱情有关.部分站点部分年份在模拟值

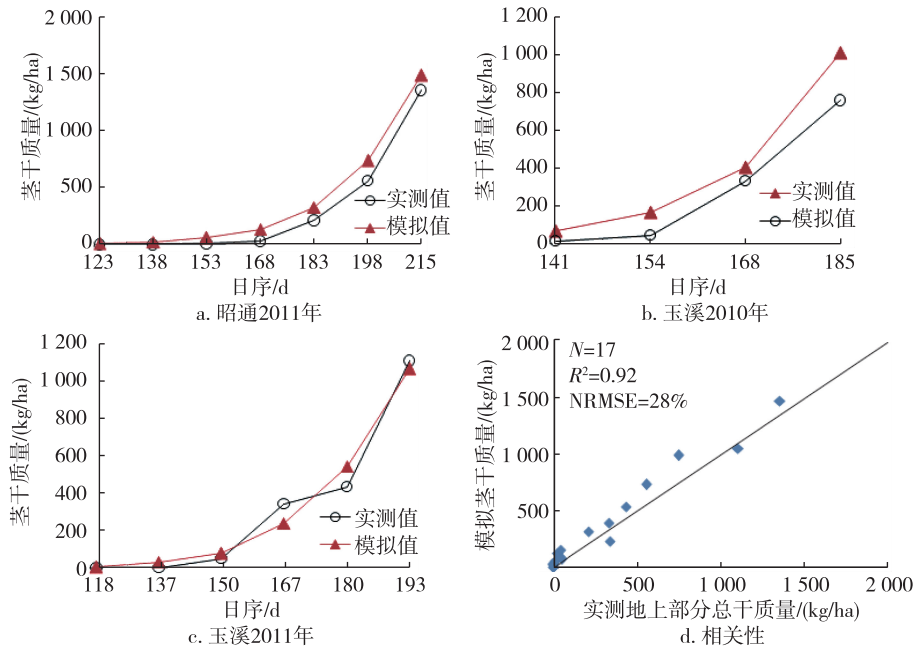


图3 烤烟 K326 品种茎干质量模拟值与观测值的关系

Fig. 3 Relationship between simulated and observed values of stem weight of tobacco K326

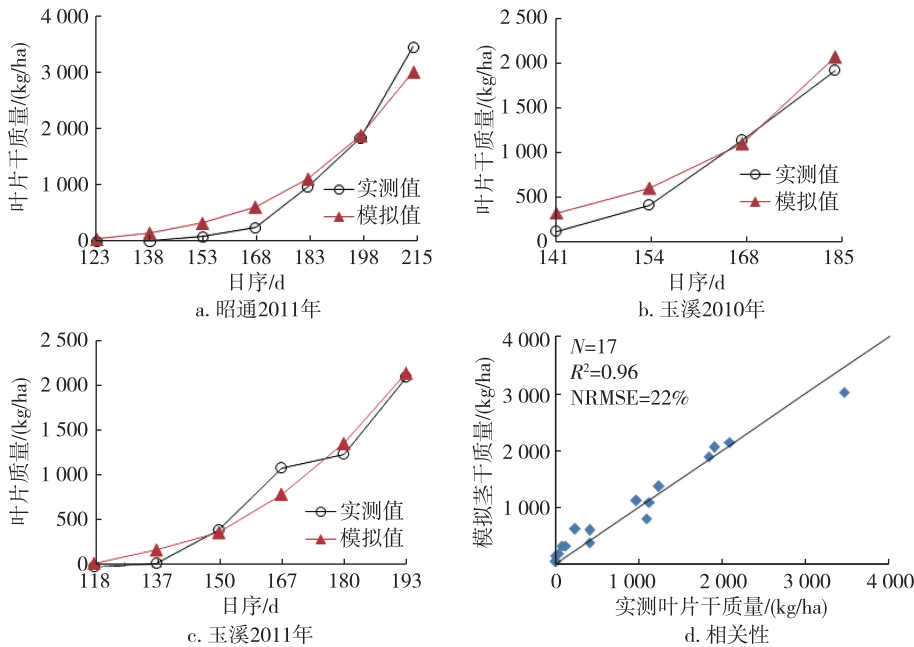


图4 烤烟 K326 品种叶干质量模拟值与观测值的关系

Fig. 4 Relationship between simulated and observed values of leaves weight of tobacco K326

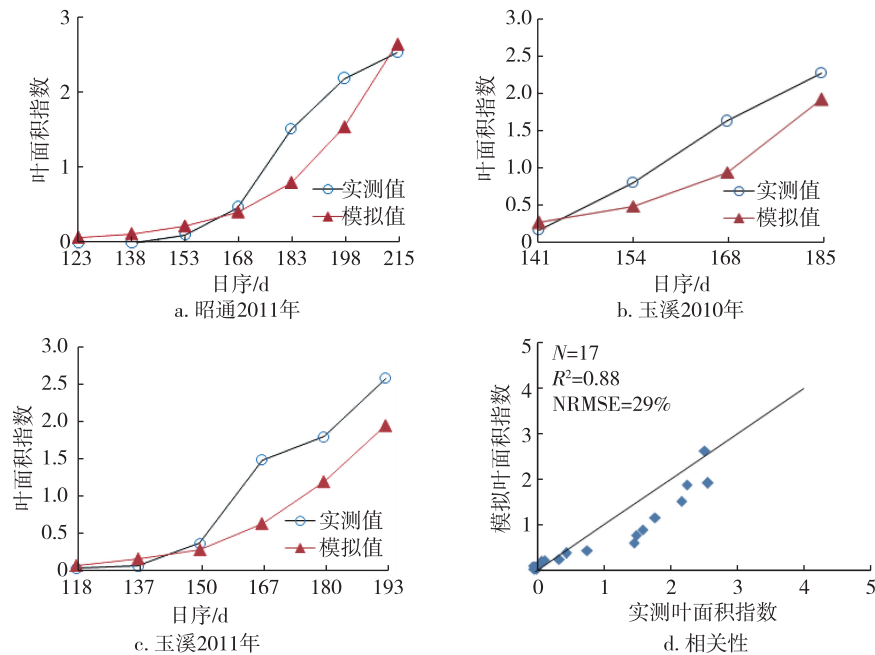


图 5 烤烟 K326 品种叶面积指数模拟值与观测值的关系

Fig. 5 Relationship between simulated and observed values of LAI of tobacco K326

表 2 烤烟 LAI、生物量、叶面积指数模拟值与实测值的统计指标

Table 2 Statistical indicators of simulated and measured LAI, biomass and yield for tobacco

烤烟变量	N	$X_{obs}(SD)$	$X_{sim}(SD)$	R^2	RMSE	NRMSE/%
生育期	6	189.7(16.2)	188.5(16.0)	0.94	3.6	2
总干质量	17	1 195(1 388)	1 359(1 390)	0.98	260	22
叶质量	17	882(978)	946(871)	0.96	198	22
茎质量	17	307(415)	375(444)	0.92	87	28
叶面积指数	17	1.06(0.98)	0.81(0.78)	0.88	0.31	29

注: N 为样本数; X_{obs} 表示观测值的平均值; X_{sim} 表示模拟值的平均值;SD表示标准差。

达到较大值时,模拟值与观测值差异较大,可能与烤烟生长随着时间的推移,经历了较多的自然灾害、病虫害等有关,而模型并没有考虑这些因素。

总干质量、叶干质量、茎干质量的模拟值与实测值的散点图中散点大多落在 1:1 线上,说明烤烟实际生长量小于潜在生长条件下的生长量,从 2010—2011 年昭通、玉溪实验点潜在生长模拟的叶片最大干质量平均值来看,烤烟潜在生产水平约 2 423 kg/ha,对比 2 个实验点实际测产值的平均值 2 125 kg/ha,现在烤烟生产的产量水平仅相当于潜在生产水平的 88%左右。

3 讨论

WOFOST 模型能模拟云南烤烟的潜在生长过程,对于生育期、干物质量、叶面积指数均呈现较好

的模拟效果,基本适用于云南烤烟的生长模拟分析。

现在烤烟生产的产量水平仅相当于潜在生产水平的 88%左右,若改善水肥管理措施、调节烟田小气候条件,烤烟单产可以提高。

对烤烟 K326 的模拟显示,干物质的模拟效果要好于叶面积指数的模拟效果,这可能与不同气候条件下,叶片厚薄受干旱或阴雨寡照等天气影响而变化有关。

本研究模型模拟值为潜在生长条件下的输出结果,但实际的气候条件下,烤烟水分的供给与烤烟的最适水分需求可能存在一定差距,有可能会过多或过少,肥料的供给状态也可能不是最佳的,另外病虫害等也可能影响烤烟的生长,这些因素均会导致理想状态下的模拟结果与实际有差异。

由于条件限制,实验观测时间间隔较长、观测项

目有限,对模型参数的修正存在一定局限性,这也是今后继续研究的一个方向.本研究对 WOFOST 模拟烤烟生长作了一些探索性尝试,在烤烟定量评估预测方面引入了作物模型,有利于烤烟定量模拟评估水平的提高.

参考文献

References

- [1] 林忠辉,莫兴国,项月琴.作物生长模型研究综述[J].作物学报,2003,29(5):750-758
LIN Zhonghui, MO Xingguo, XIANG Yueqin. Research advances on crop growth models [J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 750-758
- [2] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.不同气候情景下中国东北与华北作物产量变化趋势模拟[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):262-266
ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al. Simulation of change trend of crop yields under different climate change scenarios in Northeast and North China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 262-266
- [3] 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
WANG Tao, LÜ Changhe, YU Bohua. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Natural Resources. 2010, 25(3): 475-487
- [4] 李秀芬,马树庆,宫丽娟,等.基于 WOFOST 的东北地区玉米生育期气象条件适宜度评价[J].中国农业气象,2013,34(1):43-49
LI Xiufen, MA Shuqing, GONG Lijuan, et al. Evaluation of meteorological suitability degree during maize growth period based on WOFOST in Northeast China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(1): 43-49
- [5] 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
ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al. Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4132-4138
- [6] 邢开瑜.基于作物生长模型的华北夏玉米水分利用效率研究[D].南京:南京信息工程大学应用气象学院,2011:48-60
XING Kaiyu. Study on water use efficiency of summer maize based on crop growth simulation model in North China [D]. Nanjing: School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, 2011: 48-60
- [7] 邬定荣,欧阳竹,赵小敏,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
WU Dingrong, OUYANG Zhu, ZHAO Xiaomin, et al. The applicability research of WOFOST model in North China plain [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(5): 594-602
- [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
XIE Wenxia, YAN Lijiao, WANG Guanghuo. Simulation and validation of rice potential growth process in Zhejiang by utilizing WOFOST model [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(3): 319-323
- [9] 马玉平,王石立,张黎.针对华北小麦越冬的 WOFOST 模型改进[J].中国农业气象,2005,26(3):145-149
MA Yuping, WANG Shili, ZHANG Li. Study on improvement of WOFOST against overwinter of wheat in North China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(3): 145-149
- [10] Boogaard LH, van Diepen CA, Rotter R P, et al. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth in simulation model and WOFOST control center 1.5 [M]. Wageningen DLO Inand Staring Centre, 1998
- [11] 国家气象局.农业气象观测规范[M].北京:气象出版社,1993:4-52
China Meteorological Administration. Agrometeorological observation specification [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 4-52
- [12] 张倩.长江中下游地区高温热害对水稻的影响评估[D].北京:中国气象科学研究院,2010:39-41
ZHANG Qian. Study on the impact assessment of high temperature damage for rice in the lower and middle reaches of YANGTZE River. [D]. Beijing: The Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2010: 39-41
- [13] 田展.气候变化对中国小麦生产影响模拟研究[D].太原:山西农业大学资源环境学院,2003:23-33
TIAN Zhan. Simulation study on impacts of climate change on the potential yield of wheat [D]. Taiyuan: College of Resouce and Environment, Shanxi Agricultural University, 2003: 23-33
- [14] 钟楚,张明达,胡雪琼.温度变化对烟草光合作用光响应特征的影响[J].生态学杂志,2012,31(2):337-341
ZHONG Chu, ZHANG Mingda, HU Xueqiong, et al. Effects of temperature variation on the light-response characteristics of tobacco leaf photosynthesis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 337-341
- [15] 刘志娟,杨晓光,王静,等. APSIM 玉米模型在东北地区的适应性[J].作物学报,2012,38(4):740-746
LIU Zhijuan, YANG Xiaoguang, WANG Jing, et al. Adaptability of APSIM maize model in Northeast China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(4): 740-746
- [16] 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]. China Agriculture Science, 2013, 46(11): 2220-2231

The applicability of WOFOST model for tobacco development in Yunnan province

HU Xueqiong¹ XU Mengying¹ MAI Miao² ZHU Yong¹

1 Yunnan Provincial Climate Center, Kunming 650034

2 Jiangsu Provincial Climate Center, Nanjing 210008

Abstract The tobacco field experiment data of Yuxi and Zhaotong during 2010-2011 were used to simulate the potential growth processes of tobacco in Yunnan province, thus calibrate and validate the WOFOST model for tobacco development. The tobacco field experiment data of Zhaotong in 2010 were applied to the WOFOST model to get the localized WOFOST model parameters for Yunnan province, which were then validated by the rest of the experimental data. The results show that the WOFOST model can simulate the tobacco potential growth process, and the current tobacco yield is only about 88% of its potential yield, thus there's still room for increasing tobacco yield in Yunnan province.

Key words WOFOST model; tobacco; simulation; calibration