

基于 WOFOST 模型的东北地区春小麦 水分平衡模拟与验证

张铁楠^{1,2}, 许为政³, 魏 滢¹, 顾万荣¹, 贺 丹¹, 芦玉双³, 钱 诚⁴, 陈 琦⁴, 李 晶¹

(1. 东北农业大学 农学院, 哈尔滨 150030; 2. 大庆市农业委员会, 黑龙江 大庆 163000;

3. 黑龙江省农业技术推广站, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省农业科学院绥化分院, 黑龙江 绥化 152000)

摘 要:对 WOFOST 模型进行了本地化参数校正,并对输入模型的参数进行了敏感性分析,选取出对结果影响较大的几个参数进行调整,建立相应的模型运行数据库,对东北春麦区具有代表性的哈尔滨、绥化、嫩江、呼玛和牙克石地区 2012 年、2013 年春小麦生育期内土壤水分含量情况进行了模拟及精度分析,最终评价 WOFOST 模型在东北地区春小麦生长过程中水分平衡模拟的适应性及准确性。结果表明:WOFOST 模型对 2012 年、2013 年各地春小麦生育期内土壤水分含量变化模拟值与实测值的绝对平均误差为 2.43%~8.75%,均方根误差 RMSE 为 6.75%~13.75%,模拟性能指数 EF 为 -0.844~0.245,残差聚集指数 CRM 为 -0.272~0.084,一致性系数 IoA 为 0.457~0.789,在可信区间内。从整体看,该模型对土壤水分含量的模拟具备一定的参考价值;同时利用校正后的模型对 2012 年、2013 年各地春小麦作物蒸腾、土壤蒸发与作物需水量进行了模拟,实现了利用较少参数达到作物蒸腾与土壤蒸发分离的目的。

关键词:WOFOST 模型;东北地区;春小麦;参数调试;土壤含水量;模拟验证

中图分类号:S512.1⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0045-07

Simulation and Verification of Spring Wheat Water Balance in Northeast Region Based on WOFOST Model

ZHANG Tienan^{1,2}, XU Weizheng³, WEI Shi¹, GU Wanrong¹, HE Dan¹,

LU Yushuang³, QIAN Cheng⁴, CHEN Qi⁴, LI Jing¹

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Commission of Agriculture of Daqing City, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 3. Heilongjiang

Province Station for Popularizing Agricultural Techniques, Harbin 150030, China; 4. Branch of

Suihua Academy of Agricultural Sciences of Heilongjiang Province, Suihua, Heilongjiang 152000, China)

Abstract: This research has carried on the localization parameter calibration in WOFOST model, and carried the sensitivity analysis of the input relevant parameters. Then several parameters were picked out which had significant influence on result and made different adjustment scheme. A corresponding model was setted up to run database to simulate spring wheat growth and soil moisture content conditions in Harbin, Suihua, Nenjiang, Huma and Yakeshi area in 2012, 2013. Then the measured values were compared with the simulation values. Finally, the WOFOST model's adaptability and accuracy of spring wheat in the process of water balance growth in northeast area was evaluated. The results showed that for 2012 and 2013, absolute error of between the soil moisture content simulated by WOFOST model and the measured values ranged from 2.43% to 8.75% on average, RMSE was between 6.75% to 13.75%, EF was between -0.844 to 0.245, CRM was between -0.272 to 0.084, IoA was between 0.457 to 0.789 that was in the confidence interval. On the whole, the model simulation of soil water content had a certain reference value. The calibrated model was used to simulate the spring wheat soil evaporation and crop transpiration and crop water requirement in 2012, 2013. It can be achieved the purpose of using the fewer parameters for soil evaporation and crop transpiration separation.

Keywords: WOFOST model; northeast area; spring wheat; parameter adjustment; soil moisture content; simulation and verification

收稿日期:2014-08-21

修回日期:2014-10-10

资助项目:公益性行业(农业)科研专项(200903010);黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z10253);东北农业大学博士科研资助项目(2010RCB20)

第一作者:张铁楠(1989—),男,黑龙江省大庆市人,硕士,从事作物高产栽培研究。E-mail:15846000034@163.com

通信作者:李晶(1977—),女,黑龙江省哈尔滨市人,博士,副教授,从事作物高产栽培研究。E-mail:jingli1027@163.com

东北地区是中国纬度位置最北的区域,包括黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东部。该地区雨热同季,属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,地势平坦、土壤肥沃,以典型黑土、黑钙土著称,是中国重要的粮食生产地区。2012 年东北三省(黑龙江、吉林和辽宁)粮食总产量达到 11 175 万 t,占全国粮食产量的 18.95%^[1]。该区为传统雨养农业,气候变化是影响春麦生产及产量的重要因子。长期以来,该区农业生产仍处于开放式经营模式,导致生产潜力尚未发挥其应有水平,缺少数字模拟技术对生产预测预警的应用研究。

WOFOST 模型是在世界粮农组织 FAO 的资助下,由荷兰的瓦赫宁根大学 de Wit 教授在作物模型理论上不断完善开发而成的,是模拟特定的土壤和气候条件下一年生作物生长的动态解释性模型^[2]。WOFOST 模型的首次在 3 个非洲国家被应用^[3]。秘鲁的安第斯山脉地区应用该模型对灌溉和水分的保持进行了评价^[4],欧洲把它用于主要大田作物的潜在产量评估^[5-6]。布基纳法索的 AGRISK 工程中用其进行产量风险研究。在 MARS 工程^[7-8]中,欧洲联合研究中心把 WOFOST 作为产量预测的模型。开发应用后的 30 年间,我国多地区应用 WOFOST 模型进行模拟验证试验^[9-10],寒地作物生长模拟涉及水稻、小麦、玉米、大豆、甜菜、马铃薯等^[11-13]。王光火,

谢文霞^[14]等人根据中国浙江具体情况对 WOFOST 模型的部分参数进行了修改,对该地区的部分一年生作物进行了产量评估。于强等^[15]运用 WOFOST 模型进行了小麦的水分处理试验,用来评价该模型在华北平原的适用性。杜春英等^[16]运用 WOFOST 模型对黑龙江省水稻产量动态预报进行研究,实现了 WOFOST 模型在水稻产量动态预报业务中的应用。

本研究对 WOFOST 模型进行了本地化参数校正,并对输入模型的参数进行了敏感性分析,选取出对结果影响较大的几个参数进行调整,建立相应的模型运行数据库,对东北春麦区具有代表性的哈尔滨、绥化、嫩江、呼玛和牙克石地区 2012 年、2013 年春小麦生育期内土壤水分含量情况进行了模拟及精度分析,最终评价 WOFOST 模型在东北地区春小麦生长过程中水分平衡模拟的适应性及准确性,以其能为政府决策部门进行农业生产宏观调控提供理论依据,进而保障东北地区粮食生产的安全与稳定。

1 试验设计与方法

1.1 试验区自然概况

试验选择东北春麦区 5 个具有代表性的监测地点(表 1),获取 2010—2013 年春小麦生育期间田间自然状态下作物数据及气象数据。

表 1 试验监测点概况

监测点	纬度	经度	年均 气温/℃	无霜期/ d	年降 水量/mm	年均 日照/h	有效 积温/℃
呼玛	51°43'N	126°37'E	-2.0	80~100	450	2564	1800~2100
牙克石	49°24'N	121°08'E	-2.2	90~105	372~474	2589	1750~2000
嫩江县	49°10'N	125°17'E	3.0	85~120	450~550	2472	1850~2200
绥化市	46°36'N	126°53'E	3.3	120~140	483	2600	2400~2700
哈尔滨	46°25'N	126°18'E	3.6	145	537	2632	2700~3000

1.2 试验材料与设计

试验品种采用龙麦 26,采用戊唑醇种衣剂拌种,基本保苗数 600 万株/hm²,播深 3~5 cm,播后镇压;应用除草剂封闭除草;施肥同普通大田水平,其他均为常规大田管理。

1.3 数据观测与方法

作物资料:2012 年、2013 年作物资料来自东北农业大学小麦栽培研究室及黑龙江其他各站点多年研究记录数据。

气象资料:2012 年、2013 年春小麦生育期内逐日气象数据由中国农科院联合清华大学、北京农业信息技术研究中心等机构联合开发的“农业环境无线远程实时监控系统”采集记录。系统配有 HAYASHI DENKO 公司的 Pt100 空气温度传感器和土壤温度传感器,Automata 公司的 AQUA-TEL-TDR 空气湿度传感器和土壤湿度传感器,还配有太阳辐射测定装置及

风向风速测定装置,每 10 min 自动测定试验地气候状况和土壤温度、湿度变化情况及空气温度、湿度变化及太阳辐射情况等上传至服务器。数据缺失部分由中国气象科学数据共享服务网上的数据进行补充。试验站的经度、纬度、海拔高度数据通过 GPS 测量。

土壤资料:本研究所用土壤参数除部分实测外,其余主要取自《中国土种志》^[17]和《黑龙江土壤》^[18];土壤含水量采用“农业环境无线远程实时监控”土壤湿度传感器进行测定,每 10 min 测一次,计算每天土壤湿度平均值。

1.4 WOFOST 数据库的建立与参数调试

气象数据库的建立:常规观测数据包括 2012 年、2013 年东北地区各检测站点设备自动采集,人工整理的逐日最高温度、最低温度、日照时数、降水、平均风速和水汽压等要素数据,建立模型可识别的气象数据库。

表 2 各试验地土壤理化性质

地点	土层 厚度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	永久 萎蔫点/%	田间 持水量/%	饱和 含水量/%	饱和导水率/ (mm·d ⁻¹)
哈尔滨	0—25	1.36	18.6	32.4	35.4	490
	25—60	1.38	18.4	29.6	40.2	377
	60—90	1.49	17.2	28.0	35.5	297
	90—120	1.50	18.3	27.1	32.7	215
绥化	0—25	1.19	20.3	31.4	38.5	520
	25—50	1.22	19.4	35.2	35.6	346
	50—90	1.30	18.8	33.7	38.5	277
	90—120	1.44	18.9	29.8	33.4	226
嫩江	0—30	1.2	18.3	32.2	43.8	519
	30—55	1.28	18.8	33.2	42.4	322
	55—90	1.3	17.7	31.1	35.2	264
	90—120	1.39	18.0	28.4	32.4	238
呼玛	0—20	1.18	17.4	31.1	43.4	588
	20—40	1.23	21.0	28.9	33.3	375
	40—90	1.45	18.8	32.3	38.1	257
	90—120	1.45	17.5	24.9	35.5	242
牙克石	0—30	1.22	18.9	39.5	45.2	587
	30—60	1.24	19.1	35.7	42.9	524
	60—90	1.35	18.0	32.4	42.1	354
	90—120	1.47	17.7	28.8	37.4	235

作物数据库的建立:WOFOST 模型作物模块共
计 18 个参数,其中 7 个默认参数:TSUMEN,
TSUM1, TSUM2, TDWI, SLATB, SPAN,
AMAXTB,11 个需调参 CLV,CVS,CVO、CVR,
RGR Lai(最大叶面积增长量)、KDIFTB(散射光消
光系数)、EFFTB(单叶光利用效率)、RML,RMO,
RMR,RMS,将参数输入模型,建立作物数据库。

土壤数据库的建立:11 个参数,8 个需调参:
SMTAB(土壤含水量)、SMW(凋萎系数)、SMFCF
(田间持水量)、SMO(土壤饱和含水量)、CON TAB
(土壤导水率)、KO(饱和土壤导水率)、RDI(初始扎
根深度)、RDM(最大扎根深度),3 个默认参数:
CRAIRC(土壤通气临界空气含量)、SOPE(根层最大
入渗速率)、KSUB(根层以下土壤最大入渗速率),参
数输入模型,建立土壤数据库。

准确的参数是模拟结果准确和稳定的前提,需
根据历史资料,需要根据实际情况对作物参数进
行调整。

1.5 检验模型有效性的方法和指标

为评价各项模拟值与实测值之间的差距和模拟
效果,选择以下参数进行评价:线性回归方程 R²,平
均相对误差(AE)、相对平均误差(MAE)、均方根误
差(RMSE)、模拟性能指数(EF)、残差聚集系数
(CRM)、一致性系数(IoA)。计算公式如下:^[19-21]

$$AE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(p_i-o_i)$$
$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|p_i-o_i|$$
$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(p_i-o_i)^2}$$
$$EF=\frac{\sum_{i=1}^n(o_i-o)^2-\sum_{i=1}^n(p_i-o_i)^2}{\sum_{i=1}^n(o_i-o)^2}$$
$$CRM=\frac{\sum_{i=1}^np_i-\sum_{i=1}^no_i}{\sum_{i=1}^no_i}$$
$$IoA=-\frac{\sum_{i=1}^n(p_i-o_i)^2}{\sum_{i=1}^n[|p'_i|+|o'_i|]^2}$$

式中:n——样本容量;o——试验实测平均值;p_i 和
o_i——模型模拟值与实测值;p'_i=p_i-o,o'_i=o_i-o。

R² 越接近 1,说明模拟值与实测值的相关性越
好。AE,MAE 越小,说明模型的模拟性越好。
RMSE 取值范围≥0,越靠近 0 说明模拟效果越好。
EF 取值范围≤1,取值越接近 1 表明模拟效果越好。
CRM 可为正值或负值,正值表示相对实测值偏高,负
值表示相对实测值偏低。IoA 越大,表示误差越小,
模型的预测性越好。

2 结果与分析

运用调试后的 WOFOST 模型对哈尔滨、绥化、

嫩江、呼玛、牙克石等地 2012 年,2013 年的春小麦生育期内土壤水分含量变化进行模拟,结合当时实测的试验数据,对比分析模型对水分平衡模拟结果的有效性,同时对小麦生育期内作物需水量、作物蒸腾量、土壤蒸发量进行模拟,最终评价 WOFOST 模型对东北地区春小麦水分平衡模拟的适用性。

2.1 土壤含水量模拟结果及精度分析

运用 WOFOST 模型对 2012 年、2013 年哈尔滨、

绥化、嫩江、呼玛、牙克石等地的春小麦生育期内土壤水分含量进行模拟,与小麦苗情检测系统的土壤湿度的实测值进行对比分析,如图 1 所示。

从图 1 中对土壤水分含量的模拟值与实测值的对比可以看出,WOFOST 模型基本能反映出小麦生育期内土壤含水量整体变化趋势,模拟值与实测值之间的误差在允许范围之内,土壤湿度的模拟值整体低于实测值。

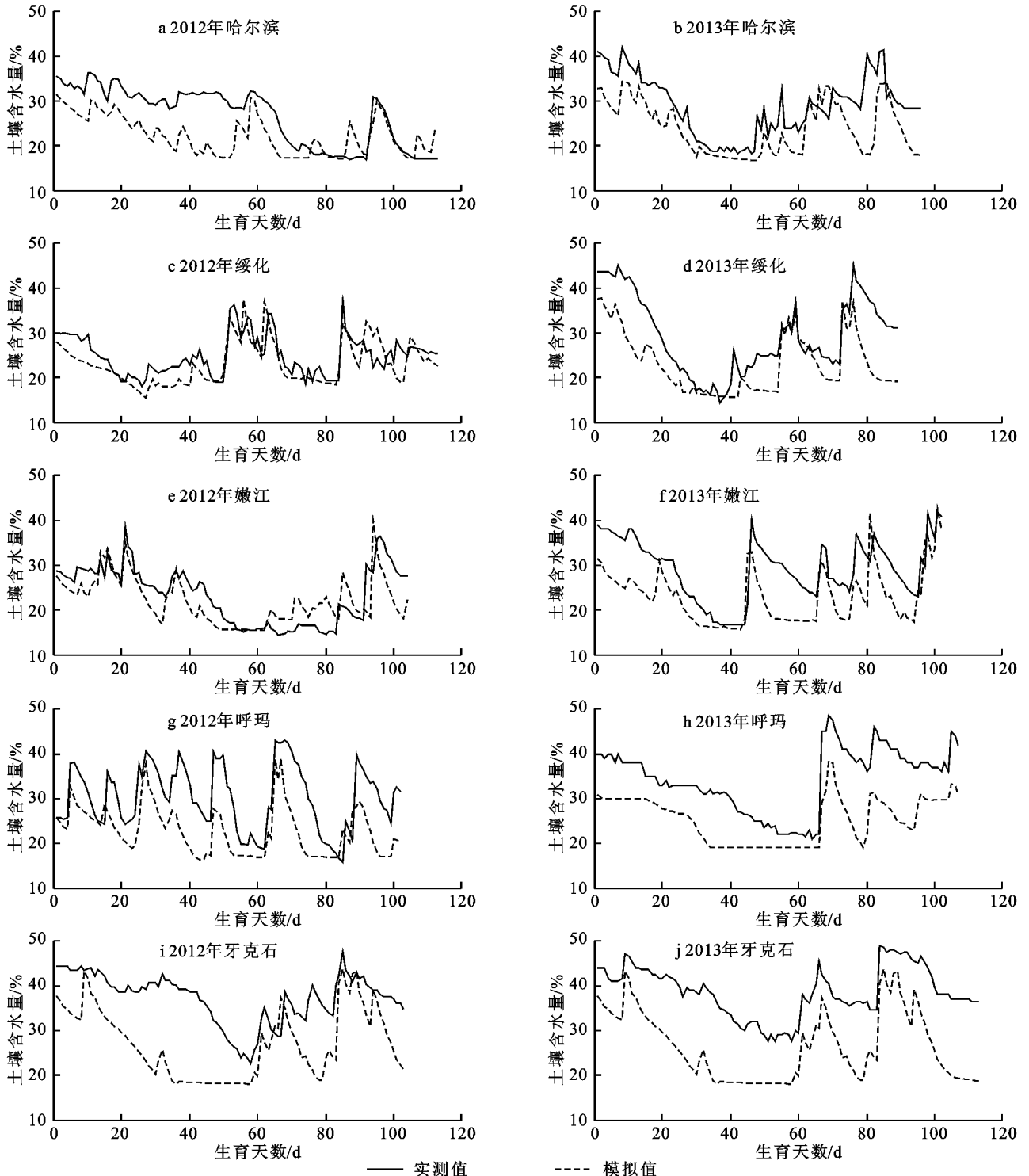


图 1 2012—2013 年各地春麦生育期内土壤体积含水量实测值与模拟值

表 3 WOFOST 模型对土壤水分含水量模拟结果精度分析

地点	年份	均方根误差	残差聚集系数	绝对平均误差	模拟性能指数	一致性系数
哈尔滨	2012	6.75	-0.097	5.33	-0.624	0.572
	2013	7.82	-0.214	2.43	-0.475	0.724
绥化	2012	11.85	-0.143	2.48	-0.844	0.778
	2013	7.57	0.084	4.71	0.245	0.789
嫩江	2012	10.37	0.061	2.81	0.237	0.747
	2013	13.47	-0.089	3.34	-0.453	0.772
呼玛	2012	13.31	-0.154	2.57	-0.725	0.557
	2013	6.76	-0.272	3.15	-0.375	0.457
牙克石	2012	13.75	-0.164	7.37	-0.157	0.741
	2013	9.86	-0.227	8.75	-0.574	0.734

从表 3 中可以看出,WOFOST 模型对 2012 年,2013 年各地春小麦生育期内土壤水分含量变化模拟值与实测值的绝对平均误差在 2.43%~8.75%,RMSE 在 6.75%~13.75%,EF 在-0.844~0.245,CRM 在-0.272~0.084,IoA 在 0.457~0.789,在可信区间内。从整体看,该模型对土壤水分含量的模拟具备一定的参考价值。

2.2 生育期内作物需水量、作物蒸腾量、土壤蒸发量的模拟

运用 WOFOST 模型对各地春小麦生育期内作物需水量、作物蒸腾量、土壤蒸发量进行模拟,作物蒸散及区分作物蒸腾与土壤蒸发量的准确模拟,是预测生物量的关键。在生物量模拟达到一定准确度的前提下,作物蒸腾与土壤蒸发的模拟结果具有一定的可信度。2012 年和 2013 年黑龙江各监测站点的生育期内土壤蒸发、作物蒸腾、作物需水量模拟结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出在作物生长发育前期,土壤中的水分消耗主要以土壤水分蒸发为主,原因是由于生长发育前期植株刚出苗,对地面的覆盖度较小,土壤直接接受太阳直照及风力侵蚀,土壤水分蒸发较快,哈尔滨、绥化、嫩江、呼玛、牙克石各站点日平均土壤蒸发量分别为为 1.8,1.81,1.99,1.96,2.62 mm/d,出苗后,随着植株逐渐长大,对地面的覆盖率逐渐增大,减少太阳直接照射和阻挡风力,植株对地面起到冠层覆盖作用,使土壤水分蒸发强度逐渐下降,出苗到成熟期日平均土壤蒸发量分别为 0.98,0.73,0.94,0.88,0.69 mm/d。

作物蒸腾量在整个生育期的变化曲线均呈脉冲状,主要是不同天气和气象条件影响的结果。每次降雨后的晴天,日蒸腾量和蒸腾速率有明显的上升趋势,而后依次减少。从出苗到成熟的生长季节中,小麦的蒸腾量随时间的推移发生明显的变化。一般趋势是苗期较低,拔节后逐渐上升,明显高于苗期,抽穗

到灌浆期蒸腾量继续上升,达到高峰阶段,日平均蒸腾量为 4.32 mm/d,灌浆以后逐渐下降。经过模拟所得,各个站点生育期内日平均作物蒸腾量分别为 2.75,3.24,3.2,3.08,2.72 mm/d。

因降雨、温度等因素的综合影响,作物需水量曲线在生育期内波动幅度较为频繁,生育期内作物日平均需水量的模拟结果分别为 3.74,3.98,4.16,3.96,3.41 mm/d。

从总体来看,在春小麦整个生育期内,随着春小麦冠层覆盖度的日益增大,土壤蒸发量下降幅度增大,在此后一段时间内,土壤蒸发量变化波动较小,但遇到强降雨之后的土壤蒸发量依然变化强烈,生育末期由于植株叶片衰老,地面覆盖度减小,土壤水分蒸发较为活跃。受叶片衰老与温度的影响,作物需水量、作物蒸腾和土壤蒸发三者在成熟期末整体均呈下降趋势。通过模型的模拟,哈尔滨、绥化、嫩江、呼玛、牙克石各站点生育期内每日的土壤蒸发量变化区间为 0.85~2.95,0.15~3.9,0.15~3.8,0.1~4.1,0.15~3.15 mm/d;每日的作物蒸腾量变化区间为 0.25~5.7,0.5~6.05,0.15~6.95,0.25~5.9,0.15~6.15 mm/d;每日的作物需水量变化区间为 0.95~6.85,1.15~6.85,0.95~7.1,1.1~6.7,0.55~6.4 mm/d。

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究采用模型模拟和田间试验相结合的方法,利用整理好的各地气象数据、土壤数据和生育期内各种作物观测资料,对 WOFOST 模型进行参数校准,利用本地化调参后的 WOFOST 模型对黑龙江哈尔滨、绥化、嫩江、呼玛和内蒙古牙克石地区五个地点春小麦生育期内土壤含水量变化过程进行模拟,研究结果表明,模拟结果与实测结果较为接近,各参数指标误差均在可信区间,说明 WOFOST 模型可用于区域范

围内土壤含水量变化的研究,对农业水分利用和预测方面具有一定的参考价值;同时通过对各地春小麦作

物蒸腾、土壤蒸发与作物需水量进行了模拟,实现了利用较少参数达到作物蒸腾与土壤蒸发分离的目的。

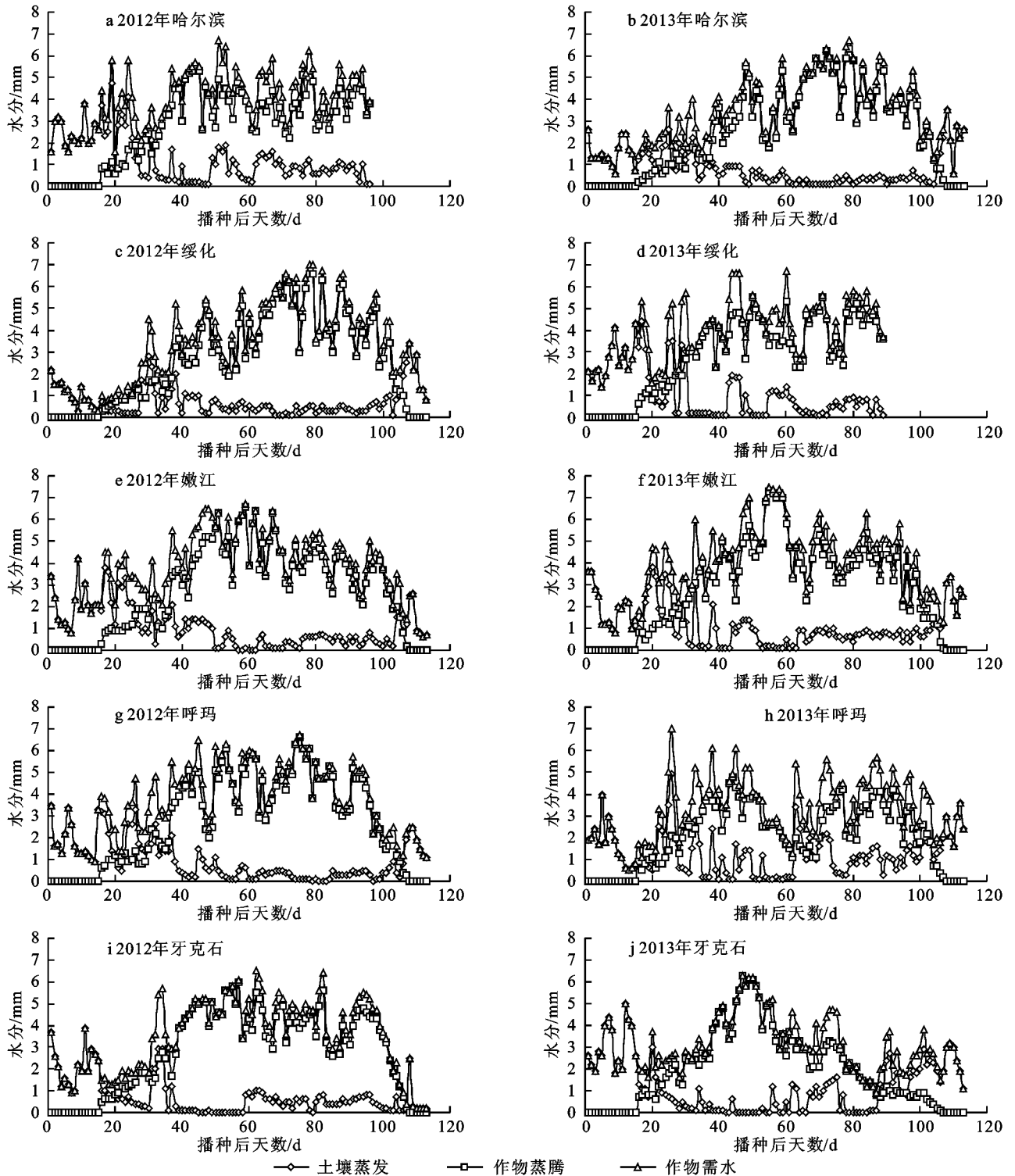


图2 2012年、2013年各地春麦生育期内土壤蒸发、作物蒸腾、作物需水量模拟

3.2 讨论

WOFOST模型中,与作物生长发育相关的参数有数十个,加之模型参数之间的相关性,对全部的参数一一进行校正,其工作量巨大,且是不现实的^[22]。因此,需要针对其中较为重要的一部分参数进行调整。首先需要根据研究目的,对各主要参数进行敏感

性分析,选取出对结果影响较大的几个参数,经检验WOFOST模型最终的模拟结果以及过程最大值对AMAXTB2, CVO, CVS, KDIFTB, Q10, SPAN, TSUM1和TSUM2这几个参数的敏感性都较强,均超过了1%,最高的SPAN甚至达到了223.35%,因此需要根据资料,对这些参数进行调整。杜春英

等^[19]运用 WOFOST 模型在黑龙江对水稻产量预报进行研究,结果表明水稻单产的拟合准确率最大值为 100%,最小值为 84%,平均值为 94.3%,产量预测的精度与本研究运用 WOFOST 模拟春小麦产量的精度基本一致,模拟结果较为可靠,但还有提升的空间,需要对此模型进行进一步的参数调整及验证工作,增强模型在本地模拟的稳定性及准确性。

总体来说,经过校正的 WOFOST 模型在东北地区春小麦的生产中水分平衡的模拟具有较强的准确性及适应性,可以用于指导东北地区春小麦的生产,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 中国统计年鉴. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2013/indexch.htm>. 2013.
- [2] Boogaard H L, Diepen C A V, Rotter R P, et al. WOFOST 7.1: user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1. 5[M]. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 1998.
- [3] 谢文霞,王光火,张奇春. WOFOST 模型的发展及应用[J]. 土壤通报,2006,37(1):154-158.
- [4] Berkhout J A A, Huygen J, Azzali S, et al. MARS definition study: results of the preparatory phase [R]. Wageningen, 1988.
- [5] Van Lanen H A J, Van Diepen C A, Reinds G J, et al. Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European Communities [J]. Agricultural Systems, 1992, 39(3):307-328.
- [6] De Koning G H J, Janssen H, Van Keulen H. Input and output coefficients of various cropping and livestock systems in the European Communities [M]. The Hague: Netherlands Scientific Council for Government Policy, 1992.
- [7] Diepen C A, Van Der Wal T. Crop growth monitoring and yield forecasting at regional and national scale[M]. Publication EUR, 1994.
- [8] Vossen P, Rijks D, Hough M N. Early crop yield assessment of the EU countries: the system implemented by the Joint Research Centre [M]. Office for Official Publications of the European Communities, 1995.
- [9] 张雪芬,余卫东,王春乙,等. WOFOST 模型在冬小麦晚霜冻害评估中的应用[J]. 自然灾害学报,2006,15(6):337-341.
- [10] 马玉平,王石立,张黎,等. 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.
- [11] 高永刚,那济海,顾红,等. 黑龙江省马铃薯气候生产力特征及区划[J]. 中国农业气象,2007,28(3):275-280.
- [12] 李秀芬,王育光,季生太,等. 作物长势监测系统(CGMS)在黑龙江省的应用[J]. 中国农业气象,2005,26(3):155-157.
- [13] 高永刚,南瑞,顾红,等. 黑龙江省甜菜气候生产力模拟和种植气候区划[J]. 生态学杂志,2009,28(1):27-31.
- [14] 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.
- [15] 于强,罗毅,邬定荣,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,2004,27(5):594-602.
- [16] 杜春英,李秀芬,王晨轶等. 基于 WOFOST 模型的黑龙江省水稻产量动态预报研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):15093-15095.
- [17] 全国土壤普查办公室. 中国土种志[M]. 北京:中国农业出版社,1991.
- [18] 黑龙江省土地管理局,黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京:农业出版社,1992.
- [19] 张忠学,于贵瑞. 不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2003,22(2):1-4.
- [20] 商磊,赵军,祁广云,等. 黑土农田大豆产量形成过程的模拟验证[J]. 中国生态农业学报,2008,16(4):869-873.
- [21] 王宗明,张柏,宋开山,等. CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J]. 农业工程学报,2005,21(5):47-50.
- [22] 姜志伟,陈仲新,周清波,等. CERES-Wheat 作物模型参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报,2011,27(1):236-242.