

WOFOST作物模型在拉林河流域的适用性研究

陈浩^{1,2}, 洪林¹, 罗德伟³

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650033; 3. 襄阳市环境保护监测站, 湖北 襄阳 441021)

摘要: 为了解 WOFOST 作物模型对拉林河流域春玉米的适用性, 以东北地区哈尔滨、双城、尚志、扶余等地春玉米为研究对象, 建立模型运行所需的气候、土壤、作物数据库, 模拟 2013 年春玉米发育期日序变化、2009 年土壤含水率的变化、2009 年哈尔滨站春玉米生物量累积过程以及 2009—2013 年春玉米产量, 并与实测值进行对比分析。结果表明, 生育期平均绝对误差 $MAE=1.57$ d, 标准差 $\sigma=1.54$ d, 均方根误差 $RMSE=1.85$ d; 土壤含水率 MAE 在 1.38%~1.75% 之间, $RMSE$ 在 1.87%~2.33% 之间, 模型效率指数 MEI 在 0.48~0.73 之间; 叶干质量、茎干质量、穗干质量的 MEI 在 0.82~0.94 之间, 产量 $RMSE$ 和 MEI 分别为 0.72 t/hm² 和 0.15。各适用性指标均在可信范围内, 表明经过参数校准后的 WOFOST 模型在拉林河流域具有一定的适用性。

关键词: 模型; 春玉米; 发育阶段; 土壤含水率; 生物量; 产量

中图分类号: S513

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.03.002

陈浩, 洪林, 罗德伟. WOFOST 作物模型在拉林河流域的适用性研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3): 7-13, 19.

0 引言

WOFOST(World Food Studies)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在 de Wit 的作物模型理论上不断完善开发得到的, 是以日为时间步长, 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。WOFOST 模型首次应用在肯尼亚、布基纳法索等几个非洲国家, 目的是研究施肥和灌溉对粮食作物产量的影响以及评估产量风险^[1]。21 世纪以来, WOFOST 作物模型在我国得到应用^[2-5]。WOFOST 模型定位于模拟所有一年生作物生长, 作物生育期只有出苗、开花和成熟 3 个阶段, 且灌溉只有充分和无灌 2 种。因此, 在模型本地化过程中如没考虑上述缺陷, 模拟土壤含水率时容易造成模拟值普遍小于实测值, 且误差往往较大^[5], 对生育期的模拟也仅限于一年生作物共有的出苗、开花和成熟^[6-7], 无法精确模拟计算作物的所有生育期。为此, 选取我国东北地区拉林河流域作为研究区域进行 WOFOST 模型在半干旱地区的适用性研究, 根据研究区试验站的灌溉制度, 将灌入田间的水量当作降雨输入到气候数据中的降雨一栏, 利用发育阶段对作物生育期进行细分, 进行哈尔滨、双城、尚志、扶余等 4 站的春玉米的生长过程模拟研究, 并与实测值进行对比分析, 检验该作物模型在东北春玉米主产区的适用性, 以期得出一套适用于该地区的模型参数, 为揭示该流域春玉米增产潜力、提出增产措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

所选研究区站点哈尔滨(45°45'N, 126°46'E)、双城(45°23'N, 126°18'E)、尚志(45°13'N, 127°58'E)、扶余(44°37'N, 125°35'E)均位于拉林河流域, 属中温带大陆性季风气候, 气候较为寒冷, 年平均气温在 3℃左右, 极端最低温为 -40.9℃, 极端最高温为 35.6℃。年积温为 2 500~2 700℃, 多年平均降雨量为 500 mm, 降雨多集中在 6—8 月, 占全年降水量的 70%以上。无霜期 110~140 d, 年日照时间 2 400~2 600 h, 年太阳

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501013); 国家自然科学基金重点项目(91547205)

作者简介: 陈浩(1990-), 男, 江西高安人。硕士研究生, 主要从事灌排工程方面的研究。E-mail: whuchenhao@126.com

通信作者: 洪林(1963-), 女, 安徽合肥人。教授, 博士, 主要从事农田水利水环境研究。E-mail: lhong@whu.edu.cn

辐射能量 4 200~4 600 MJ/m²。拉林河流域土壤类型主要有棕壤土、白浆土、黑土、草甸土、泛滥地土壤 5 类，土地肥沃，人口密集，为黑龙江省和吉林省乃至全国重要的玉米生产基地。

1.2 实测数据获取及处理

1) 春玉米生育期日序

2009 年和 2013 年哈尔滨站、双城站、尚志站、扶余站春玉米实际生育日期来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/user/toLogin.html>)中国农作物生长发育数据集，并换算成日序(Day of year, DOY)。

2) 土壤含水率

从中国气象数据网中的农气资料农田土壤湿度旬值数据集获取土壤剖面 10、20、50、70、100 cm 处的相对湿度，根据各生育期根长，加权平均得到根区土壤含水率。

3) 生物量与产量

哈尔滨站 2009 年春玉米地上生物量积累来源于站点试验记录数据。生育期内每隔 10~15 d 随机取 5 点共 1 m² 玉米植株，按叶片、茎鞘、穗分开，于烘烤箱内 105 ℃ 下杀青 30 min，80 ℃ 烘干后称质量，取平均值。其他站点 2009—2013 年玉米产量来源于中国气象数据网中国农作物产量资料数据集。

1.3 模型描述

WOFOST 模型是动态解释性模型，以模拟作物生长过程中各种生态生理指标为基础，主要模拟过程包括物候发育、光截获、CO₂ 同化、LAI 变化、干物质形成及分配、土壤水分平衡等^[8]。

1.3.1 生长发育

WOFOST 模型模拟作物生长发育是建立在积温理论上的，认为温度对作物生长发育起主导作用，后期考虑日长因素，以适应不同光敏作物的生育特点。模型将作物全生育期分为：播种到出苗、出苗到开花、开花到成熟 3 个大阶段，并通过状态变量 DVS (Development Stage, 发育阶段) 来描述，0 代表播种，1 代表开花，2 代表成熟。温度和日长对作物发育阶段的影响可用式(1)、式(2)计算：

$$DVS = F_{pr} \frac{\int T_e}{TSUM_j}, T_e = \max[(T - T_{base}), 0], \quad (1)$$

$$F_{pr} = \frac{P - P_c}{P_0 - P_c}, 0 \leq F_{pr} \leq 1, \quad (2)$$

式中： T_e 为有效积温，不能超过有效积温上限(℃)； $TSUM_j$ ($j=1, 2, 3$) 表示完成某一发育阶段所需的有效积温(℃)； T 为日均气温(℃)； T_{base} 为发育临界温度(℃)； F_{pr} 为日长降低因子； P 为实际日长； P_c 为临界日长； P_0 为最佳日长。模型模拟计算时，当有效积温达到完成某个发育阶段所需积温时，则该生育期结束，进入下一个生育期。

1.3.2 光合同化作用

WOFOST 模型通过考虑当地的大气透射系数、直射光和漫射光、冠层对光的反射和散射以及光的吸收等来详细描述冠层对光的截获。认为光截获是一个与辐射和叶面积指数有关的函数，自冠层顶部垂直向下，随着叶面积累加，各层叶片截获的辐射通量呈指数减少。冠层对光的截获计算式如下：

$$I_{aL} = \kappa(1 - \rho)I_0 e^{-\kappa \cdot LAI_L}, \quad (3)$$

式中： I_{aL} 为距冠层顶部 L 处截获的有效光合辐射(J/(m²·d))； κ 是消光系数； ρ 为反射系数； I_0 为冠层顶部有效光合辐射(J/(m²·d))； LAI_L 为冠层顶部至 L 处累计叶面积指数。

L 处冠层瞬时同化速率 A_L 由下式计算：

$$A_L = A_m(1 - e^{-\varepsilon \cdot I_{aL}/A_m}), \quad (4)$$

式中： A_m 为光饱和时光合作用速率(kg/(m²·d))； ε 为初始光能利用效率(kg/J)。

由于太阳仰角改变以及垂直方向上叶片遮盖原因，各冠层叶片在时间和空间上的 CO₂ 同化速率各异。在计算整个冠层每日总同化速率时，WOFOST 模型作了简化，在垂直方向上将冠层分成 3 个部分，每部分取 1 个与冠层高度有关的典型位置和 1 个与日长有关的代表时间点，通过 Gaussian 三点积分法加权作为整个冠层的平均同化速率，此处不作详细介绍。

1.3.3 干物质的分配

作物生产的同化物部分被用于呼吸消耗，剩下的则转化成结构干物质。干物质 ΔW 分 2 个步骤进行分

配,第1步是分配到地下组织(根)和地上组织(叶、茎、贮存器官)。根和地上组织干物质的分配计算式如下:

$$\Delta W_{rt} = pc_{rt} \Delta W, \quad (5)$$

$$\Delta W_{ag} = (1 - pc_{rt}) \Delta W, \quad (6)$$

式中: ΔW_{rt} 、 ΔW_{ag} 分别为根和地上组织干物质累积速度($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); PC_{rt} 为根的分配系数。

第2步 ΔW_{ag} 是在叶、茎和贮存器官之间的分配,分配方式如式(7):

$$\Delta W_i = pc_i \Delta W_{ag}, \quad (7)$$

式中: $\Delta W_i(i=1,2,3)$ 为叶、茎和贮存器官的干物质累积速度($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); $PC_i(i=1,2,3)$ 叶、茎和贮存器官的分配系数,三者之和为1。

上述分配过程是同时进行的,分配系数随发育阶段 DVS 的不同而不同。在作物营养生长阶段($DVS=0\sim1$),大部分同化物首先转化为根和叶组织,其次快速转化为茎组织;在生殖生长阶段($DVS=1\sim2$),生殖器官获得绝大多数同化物。

1.4 模型数据库的建立

1.4.1 逐日气象数据

模型气象数据库中的逐日气象数据包括阳光辐射、最低温度、最高温度、平均水汽压、平均风速(2 m高处)和降雨量。本研究气候数据来自中国气象科学数据网中的地面气象资料日值数据集,此数据集无太阳辐射数据,需要根据日照时间,利用埃斯屈朗(Angstrom)经验公式^[9]转换,见式(8):

$$R_s = R_{\max} \times [a_s + b_s \cdot (n/N)], \quad (8)$$

式中: R_s 是逐日太阳辐射量(kJ/m^2); $R_{\max}$ 为逐日晴天最大可能太阳辐射量(kJ/m^2),由站点纬度决定; a_s 、 b_s 是与大气质量状况有关的参数,研究区处于寒温气候带,采用FAO推荐的经验数据0.18和0.55^[10]; n 和 N 分别为逐日实际日照时间和可照时间(h)。

由于WOFOST模型没有提供单独输入灌溉水量的模块,本文将每次灌入田间的水量当作降雨,并输入到气候数据库中的相应位置。

1.4.2 土壤参数

研究所用土壤参数主要来源于《中国土种志》^[11]、《黑龙江土壤》^[12]以及相关参考文献[13],根据站点所在的春玉米种植区土壤各个土层的质地平均值设定参数,模型所需土壤参数如表1。

表1 WOFOST模型主要土壤参数

站点	土壤质地	凋萎系数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	出苗后根系生长 范围/cm
哈尔滨	砂土	0.065	0.255	0.42	35	10~100
双城	砂壤土	0.088	0.287	0.41	28	
尚志	砂壤土	0.090	0.290	0.39	27	
扶余	轻壤土	0.110	0.295	0.38	25	

1.4.3 作物参数

模型中的作物参数也称基本机理参数,是构成模型作物数据库的最主要部分,包括与作物种类相关和与作物品种相关2类。前者主要参照WOFOST模型中自带的春玉米参数进行设定,后者主要参考相关研究^[14-15]设定并利用模型Rerun模块进行调整。与作物生长发育相关的参数众多,加之参数之间的相关性,若对所有参数进行校正,工作量巨大。根据张铁楠等^[6]的研究, $TSUM1$ 、 $TSUM2$ 、 $SPAN$ 、 $AMAXTB$ 、 CVO 和 CVS 6个参数较为敏感,在调参过程中需要重点关注。本研究4个站点同处拉林河流域,位置和纬度接近,认为所种春玉米为同一品种并使用同一套作物参数(表2)。

1.5 模型的应用

WOFOST模型可以模拟潜在条件下和水分限制条件下作物产量,前者认为作物产量仅由光温决定,后者加上了水分限制因素,2种模拟方式均没有考虑灌溉、营养元素、病虫害、杂草、田间管理等因素^[8]。本研究模拟春玉米生育期用的是潜在方式,因为温度主导作物发育;模拟土壤含水率、生物量累积、产量用的是水分限制方式,并将灌溉水当作降雨加以考虑。

WOFOST模型模拟春玉米物候期时,仅能确定出苗、开花、成熟期,生育期划分过于简略。利用 DVS 进

行生育期的细化,具体做法是:利用2009年和2013年研究区试验资料进行生育阶段的率定和验证,分析各生育期DOY与模型模拟的DVS对应关系,率定期输出实际DOY下的DVS,观测开花期、成熟期DVS与固定值(1和2)的差值以及各细化生育期DVS的确定性,用于初步得出细化生育期的DVS和率定积温等参数;验证期输出率定期求出的所有生育期的DVS对应的DOY,并与实测DOY对比,从而验证细化生育期DVS和积温等参数的有效性。

表2 区域适应性调整后的WOFOST模型春玉米作物参数					
参数	含义	取值	参数	含义	取值
<i>TSUMEN</i> /℃	种子至出苗所需积温	135	<i>CVO</i> /(kg·kg ⁻¹)	同化物转化为种子效率	0.65
<i>TSUM1</i> /℃	出苗至开花所需积温	850	<i>CVR</i> /(kg·kg ⁻¹)	同化物转化为根效率	0.69
<i>TSUM2</i> /℃	开花至成熟所需积温	720	<i>RML</i> /(kg(CH ₂ O)/kg·d)	叶片最大维持呼吸消耗比重	0.03
<i>RGR LAI</i> /(hm ² ·hm ² ·d ⁻¹)	叶面积指数的最大日增量	0.029	<i>RMO</i> /(kg(CH ₂ O)/kg·d)	种子最大维持呼吸消耗比重	0.01
<i>TDWI</i> /(kg·hm ²)	初始干物质质量	25	<i>RMR</i> /(kg(CH ₂ O)/kg·d)	根最大维持呼吸消耗比重	0.01
<i>AMAXTB</i> /(kg(CO ₂)/hm ² ·d)	最大CO ₂ 同化速率	65	<i>RMS</i> /(kg(CH ₂ O)/kg·d)	茎最大维持呼吸消耗比重	0.015
<i>SPAN</i> /d	叶片在35℃下的寿命周期	35	<i>DVSI</i>	初始发育阶段	0
<i>CVL</i> /(kg·kg ⁻¹)	同化物转化为叶片效率	0.6	<i>Q10</i> /(kg·hm ²)	温度变化10℃呼吸变化速率	2
<i>CVS</i> /(kg·kg ⁻¹)	同化物转化为茎效率	0.57	<i>LAIEM</i> /(hm ² ·hm ²)	出苗时叶面积指数	0.026

1.6 模型适用性评价指标和方法

采用常规的模型有效性检验指标—均方根误差(*RMSE*)、模型效率指数(*MEI*),计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}} \quad , \tag{9}$$

$$MEI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n [S_i - \bar{S}] \cdot [M_i - \bar{M}]} \quad , \tag{10}$$

式中:*n*为样本容量;*M_i*和*S_i*分别为实测值和模型模拟值;*M̄*和*S̄*分别为实测平均值和模拟平均值。

*RMSE*的取值范围为≥0,越接近0表明模拟效果越好^[16];*MEI*的取值范围为[0,1],越接近1表明模拟值与观测值符合度越高,*MEI*可以反映模拟值的平均值和实测值的平均值之间的差异^[17]。

2 结果与分析

2.1 春玉米物候期的模拟及验证

为率定积温等发育参数以及得出细化生育期的DVS,将率定期各生育期实际DOY对应的DVS作为模型输出项,将开花期和成熟期的DVS模拟值与固定值(1和2)进行对比,并分析三叶期、七叶期、拔节期和乳熟期DVS的确定性,以此初步得出所有生育期DVS。将4个站点2009年春玉米生育期作为率定期,模型模拟开始时间为播种日期(表3)。

表3 率定期(2009年)春玉米生育期DOY及DVS									
站点	项目	播种期	出苗期	三叶期	七叶期	拔节期	开花期	乳熟期	成熟期
哈尔滨	实际DOY	126	137	146	166	193	206	238	267
	模拟DVS	0	0	0.07	0.31	0.74	0.95	1.64	2.01
双城	实际DOY	120	136	142	161	191	209	237	261
	模拟DVS	0	0	0.09	0.33	0.75	1.05	1.66	2.02
尚志	实际DOY	128	142	150	169	197	212	246	269
	模拟DVS	0	0	0.09	0.29	0.72	0.99	1.67	2.00
扶余	实际DOY	119	132	141	159	189	207	236	265
	模拟DVS	0	0	0.08	0.30	0.72	1.00	1.64	2.01

由表3可知,4个站点开花期平均模拟值 $DVS=0.998$, $\sigma=0.041$;成熟期的平均模拟值 $DVS=2.013$, $\sigma=0.082$,模拟值和固定值(1和2)很接近,且不确定性较小。为探讨利用 DVS 判定其余生育期是否有效,需比较其 DVS ,可知:4个站点三叶期平均模拟值 $DVS=0.08$, $\sigma=0.010$;七叶期平均模拟值 $DVS=0.31$, $\sigma=0.017$;拔节期平均模拟值 $DVS=0.73$, $\sigma=0.015$;乳熟期平均模拟值 $DVS=1.65$, $\sigma=0.015$ 。结果表明,细化的4个生育期 DVS 模拟值比较接近、不确定性小,加之开花期和成熟期 DVS 与固定值很接近,因此,初步将各细化生育期4个站点 DVS 模拟值的平均值作为本生育期的 DVS ,即:三叶期 $DVS=0.08$,七叶期 $DVS=0.31$,拔节期 $DVS=0.73$,乳熟期 $DVS=1.65$,成熟期 $DVS=2.00$ 。

为验证发育参数设置的合理性以及细化春玉米生育期 DVS 的有效性,将2013年春玉米生育期作为验证期,输出所有生育期 DVS 对应的 DOY ,并与实际观测值进行对比分析,见表4。

表4 验证期(2013年)春玉米生育期 DOY 模拟值与实测值对比

站点	项目	播种期	出苗期	三叶期	七叶期	拔节期	开花期	乳熟期	成熟期
哈尔滨	实际 DOY	133	147	155	167	185	207	230	269
	模拟 DOY	133	146	152	166	183	204	226	267
	差值	0	1	3	1	2	3	4	2
双城	实际 DOY	123	134	146	165	185	205	238	263
	模拟 DOY	123	134	145	163	185	202	237	260
	差值	0	0	1	2	0	3	1	3
尚志	实际 DOY	129	143	149	171	189	207	236	261
	模拟 DOY	129	144	151	170	188	205	237	260
	差值	0	-1	-2	1	1	2	-1	1
扶余	实际 DOY	126	141	142	155	179	202	231	257
	模拟 DOY	126	140	144	155	177	203	230	255
	差值	0	1	-2	0	2	-1	1	2

由表4可知,模拟结果与实测结果的误差较小, $MAE=1.57$ d, $\sigma=1.54$ d, $RMSE=1.85$ d。2013年各站生育期误差多在1~3 d内波动,出苗期模拟效果最好。最大误差为4 d,发生在哈尔滨站的乳熟期,原因可能是主观观测误差以及前期误差积累。4站春玉米成熟期实测 DOY 大于模拟值1~3 d,原因可能是实际生产中定义的成熟期为收获期,而非模型定义的成熟期。

通过生育期细化研究,能够精确模拟春玉米生育阶段、确定各生育期相关参数,弥补了 WOFOST 模型划分作物生育期过于宽泛、参数比较初略的缺陷。

2.2 土壤含水率的模拟

WOFOST 模型模拟土壤含水率是通过水量平衡模块计算得来,将一维方向上作物根区土层作为一个系统,考虑来水和失水,模型计算值为土壤平均含水率。运用模型对2009年哈尔滨站、双城站、尚志站、扶余站的春玉米生育期土壤含水率进行模拟,模型模拟开始时间为出苗日序,起始含水率与实测含水率保持一致,并将模拟结果与实测值进行对比分析(图1)。

WOFOST 模型模拟的春玉米生育期土壤含水率能够反映实际值的变化趋势(图1)。误差分析可知,模型对2009年各站春玉米生育期内土壤含水率变化模拟值与实测值的 MAE 在1.38%~1.75%之间, $RMSE$ 在1.87%~2.33%之间, MEI 在0.48~0.73之间。各指标均在可信区间内,因此,模型可以有效地模拟根区土壤含水率,为灌溉提供参考。

通过将灌溉水量作为降雨量输入模型,能够精确模拟春玉米土壤含水率的变化,弥补了 WOFOST 模型灌溉处理过于简单的缺陷。

2.3 生物量和产量的模拟

运用 WOFOST 模型模拟哈尔滨站2009年春玉米生物量的累积以及2009—2013年哈尔滨站、双城站、尚志站、扶余站玉米产量,并将模拟值与实测值进行对比(图2、图3),图中 WLV 为叶干质量, WST 为茎干质量, WSO 为穗干质量。

分析图2可知,模型模拟计算值与实测值比较接近,叶干质量、茎干质量、穗干质量的模型效率指数 MEI 分别为0.82、0.94、0.82。乳熟期以后,穗干质量误差开始加大,原因可能是:模型没有考虑病虫害、养分缺乏

等缩减因子,实际上这些不利因素影响了开花期至乳熟期之间灌浆速率和灌浆质量,从而导致穗干质量的模拟值大于实测值,这说明了模型有待进一步改善。

由图3得到,产量实测值与模拟值的线性相关性 $R^2=0.63$,相对误差在-13.0%~12.3%之间, $RMSE$ 为 0.72 t/hm^2 , MEI 为0.15。个别年份春玉米实际产量接近潜在产量,如2011年双城站的 11.7 t/hm^2 、尚志站的 10.3 t/hm^2 、扶余站的 10.2 t/hm^2 。

总体而言,生物量累积和产量的模拟值与实测值的差距基本在允许的范围,表现出良好的适应性。

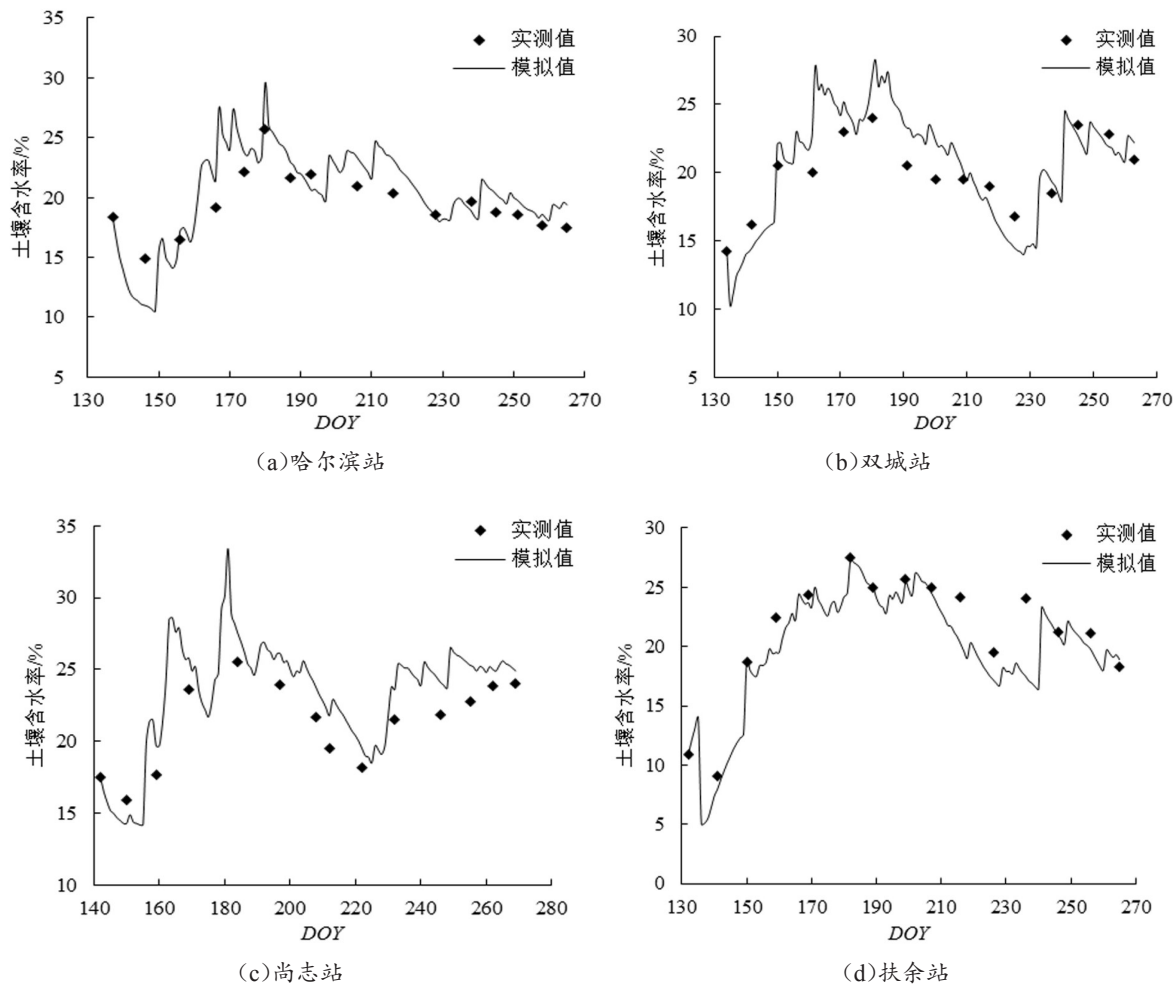


图1 2009年4站春玉米生育期土壤体积含水率实测值和模拟值

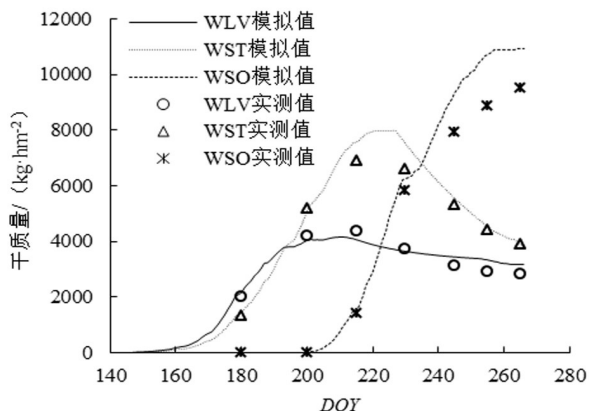


图2 2009年哈尔滨站春玉米生物量积累

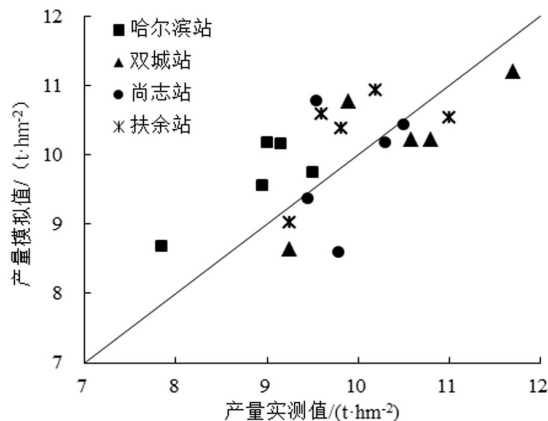


图3 2009—2013年春玉米产量实测值与模拟值

3 讨论

张建平等^[7]利用WOFOST模型对东北春玉米生育期日序和产量进行了模拟,开花期、成熟期 MAE 分别为2.8、3.3 d,本研究为2.3 d和2.0 d,而且本研究利用DVS细分了春玉米生育期,得出了细化生育期的DVS

值,使模型对物候期的模拟和验证不再局限于出苗期、开花期和成熟期,模拟效果更好;张建平^[7]模拟产量的相对误差范围为-5.23%~9.34%, $RMSE$ 为 0.48 t/hm^2 ,模拟结果稍好于本研究的-12.96%~12.30%和 0.72 t/hm^2 ,模拟结果较为可靠,作物参数的精准度还有提升的空间。利用WOFOST模型模拟玉米生育期土壤含水率还未见报道,Eitzinger等^[17]利用WOFOST模型模拟不同质地土壤下生长的春大麦和冬小麦土壤含水率, $RMSE$ 在3.10%~5.70%之间;张铁楠等^[5]利用WOFOST模型模拟了东北春小麦生育期土壤含水率, $RMSE$ 在6.75%~13.75%之间,且模拟值普遍小于实测值。本研究中4个站点土壤含水率 $RMSE$ 在1.87%~2.33%之间,模拟效果显著好于以上研究,表明将灌溉水量当作降雨量输入模型气象数据库可行,提高了模型对土壤水分平衡的模拟精度。WOFOST模型2种工况均假设营养元素、田间管理处在最佳状态,没有考虑病虫害、杂草等不利因素,事实上这些因素对作物生长会产生一定的影响。总体而言,通过对春玉米物候期、土壤含水率、生物量和产量的模拟,模型指标均在可信区间内,模型表现出良好的适应性。今后,利用本地化后的WOFOST模型模拟研究区春玉米潜在产量和水分限制下产量,并与实际产量对比,进行产量差分析,定量评价水分和上述不利因素对产量的影响,为提高拉林河流域春玉米产量提供理论依据。

4 结 论

1)将2009年春玉米生育期作为率定期,2013年作为验证期,模拟春玉米生育期 DVS 和 DOY 。率定期各生育期 DVS 值非常接近,标准差 σ 在0.010~0.082之间。验证期各站生育期误差多在1~3 d内波动, $MAE=1.57\text{ d}$, $\sigma=1.54\text{ d}$, $RMSE=1.85\text{ d}$ 。利用 DVS 细化生育期合理,细化的生育期 DVS 值是否适合其他作物的相同生育期有待进一步研究。

2)春玉米生育期土壤含水率模拟值能够正确反映实测土壤含水率的变化趋势, MAE 在1.38%~1.75%之间, $RMSE$ 在1.87%~2.33%之间, MEI 在0.48~0.73之间,模型评价指标均在可信区间内。

3)利用WOFOST模型模拟生物量积累和产量,叶干质量、茎干质量和穗干质量的 MEI 分别为0.82、0.94和0.82;产量的相对误差在-13.0%~12.3%之间, $RMSE$ 为 0.72 t/hm^2 , MEI 为0.15。后期穗干质量和产量差异比较大,模型不太适合比较细致的研究。

参考文献:

- [1] JANSSEN B H, GUIKING F C T, VANDEREIJKD, et al. A system for quantitative-evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS)[J]. Geoderma, 1990, 46(4): 299-318.
- [2] 郭定荣,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.
- [3] 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.
- [4] LIU F, LIU X N, ZHAO L T, et al. The dynamic assessment model for monitoring cadmium stress levels in rice based on the assimilation of remote sensing and the WOFOSTmodel[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2015,8(3):1 330-1 338.
- [5] 张铁楠,许为政,魏湜,等. 基于WOFOST模型的东北地区春小麦水分平衡模拟与验证[J]. 水土保持研究,2015,22(4):45-51.
- [6] 张铁楠,许为政,魏湜,等. WOFOST模型对东北春麦区春小麦生长和产量的模拟效果[J]. 麦类作物学报,2015,35(1):120-128.
- [7] 张建平,赵艳霞,王春乙,等. 气候变化情景下东北地区玉米产量变化模拟[J]. 中国生态农业学报,2008,16(6):1 448-1 452.
- [8] CURNEL Y, DE WIT, DUVEILLER G, et al. Potential performance of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on the OSS experiment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(12):1 843-1 855.
- [9] 戴明宏,陶洪斌,廖树华,等. 基于CERES-Maize模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报,2008,24(4):30-36.
- [10] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999:57-60.
- [11] 全国土壤普查办公室. 中国土种志[M]. 北京:中国农业出版社,1991:91-120.
- [12] 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,1992:7-21.
- [13] 曹志洪,周健民. 中国土壤质量[M]. 北京:科学出版社,2008:543-561.
- [14] 陈思宁,赵艳霞,申双和,等. 基于PyWOFOST作物模型的东北玉米估产及精度评估[J]. 中国农业科学,2013,46(14):2 880-2 893.
- [15] 李晶,张运福,班显秀. 辽宁玉米作物系数研究[J]. 辽宁气象,2000(1):18-20.
- [16] 刘琦,龚道枝,郝卫平,等. 利用AquaCrop模型模拟旱作覆膜春玉米耗水和产量[J]. 灌溉排水学报,2015,34(6):54-61.
- [17] EITZINGER J, TRNKA M, HOSCH J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions [J]. Ecological Modelling, 2004, 171(3): 223-246.

(下转第19页)