

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.029

基于不同有效积温的玉米干物质累积量模拟

蔡甲冰^{1,2} 常宏芳^{1,2} 陈鹤^{1,2} 张宝忠^{1,2} 魏征^{1,2} 彭致功^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 为获得研究区适宜的玉米干物质累积量(DM)估算模型,通过2017—2019年在吉林省长春地区开展的3年农田试验,观测玉米生育期内作物根区20 cm地温、40 cm地温、农田气温、作物冠层温度以及玉米地上部干物质累积量等数据,建立基于不同有效积温的Logistic模型及其归一化模型,并用实测数据进行模型验证。结果表明,基于有效积温建立的Logistic模型可以模拟单株玉米干物质累积量生长,但不同地点、不同年份所建立的模型参数差异较大;Logistic归一化模型能够很好地模拟区域玉米干物质增长,在利用实测数据进行模型验证中,基于作物根区20 cm地温、40 cm地温、农田气温和作物冠层温度4种类型有效积温的Logistic归一化模型,其均方根误差、相对误差、决定系数和模型一致性系数都能达到较优值;以2019年数据建立的Logistic归一化模型对玉米干物质累积量模拟效果最优;基于有效冠层积温的Logistic归一化模型模拟效果较优。本研究结果可为灌区精量灌溉决策和管理提供技术支撑。

关键词: 玉米;有效冠层积温;干物质累积量;Logistic模型;归一化Logistic模型

中图分类号: S513; S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)05-0263-09

OSID:



Simulation of Maize Dry Matter Accumulation in Normalized Logistic Model with Different Effective Accumulated Temperatures in Field

CAI Jiabing^{1,2} CHANG Hongfang^{1,2} CHEN He^{1,2} ZHANG Baozhong^{1,2} WEI Zheng^{1,2} PENG Zhigong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China)

Abstract: Dry matter accumulation (DM) and yield assessment are the key issues of maize production management and market of silage and deep processing. A three-year experiment (2017—2019) was carried out in maize fields of Changchun, Jilin Province, monitoring soil temperature (20 cm and 40 cm) in root zone, air temperature, canopy temperature and dry matter accumulation in maize growth stages. The Logistic model and the normalized Logistic model were established based on different effective accumulated temperatures with the observation in each year, separately. Then the validations of each normalized Logistic model were implemented by the observations in the others two years. Results showed that the Logistic models were varied in parameters with the data in different locations and years, based on the four effective accumulated temperatures (soil temperature at 20 cm and 40 cm, air temperature and crop canopy temperature) to simulate dry matter of single maize. However, the normalized Logistic model made a good performance in simulating maize dry matter accumulation under the normalized method. The statistical parameters of root mean square error, relative error, the coefficient of determination, and the index of model agreement reached good values between the simulation and observation. Especially for the normalized Logistic model in 2019, it was run better in the validation of 2017 and 2018. At the same time, the simulations effect was better in effective accumulated canopy temperature of normalized Logistic model. Thus it can be seen that the crop canopy temperature would be more available in regional irrigation management with its scale extension. These research results could support the precision irrigation system and management in irrigation district.

Key words: maize; effective accumulated canopy temperature; dry matter accumulation; Logistic model; normalized Logistic model

收稿日期: 2019-12-30 修回日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979286, 51679254)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)

作者简介: 蔡甲冰(1976—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: caijb@iwhr.com

0 引言

玉米是重要的粮食作物,是畜牧业、养殖业、水产养殖业等重要饲料来源,也是食品、医疗卫生、轻工业、化工业等不可或缺的原料之一^[1]。我国玉米生产黄金带包括东北四省区大部分地区,其种植面积和产量在国内占有重要地位^[2]。玉米生育期的合理灌溉、干物质累积量和产量评估是其生产管理和青贮饲料及玉米深加工市场预测的关键问题。

在现代灌区和大农场的区域玉米灌溉管理决策和产量评估中,除了考虑和利用高时空分辨率的遥感图像,其评估效果往往取决于核心作物生长模型的适宜性和优劣性。Logistic 模型通过数据拟合和标定能够定量描述作物株高、叶面积指数以及干物质累积量等^[3-5],在育种等领域也能有效应用^[6]。在早期应用中,Logistic 模型是以时间 t (播种后时间或出苗后时间) 为自变量对作物生长过程进行模拟分析,如沟谷地春玉米干物质累积量随出苗后时间 t 呈 S 形曲线变化^[7]。不同地区的气候状况以及作物生长时间不同,单纯通过生长时间表示作物的生长阶段会产生较大的偏差^[8-9];作物完成某一生长阶段需要的热量是固定的,用有效积温代替时间因子在模拟作物生长和发育上更具有代表性^[8,10-11]。SHABANI 等^[9] 基于播种后时间和有效气积温分别建立了油菜的 Logistic 干物质增长方程,结果表明,基于有效气积温建立的 Logistic 模型在模拟油菜的干物质量和产量时精度更高。MAHBOD 等^[12] 基于有效气积温率定并验证了不同水氮影响下的冬小麦 Logistic 干物质增长方程。作物根系的生命活动、生理生化过程都与土壤温度有关^[4],因而可以将地积温作为 Logistic 模型中的自变量,对作物生长进行分析,如利用出苗后 5~20 cm 地积温建立河套地区覆膜与裸地玉米地上生物量 Logistic 生长动态模型^[13]。孙仕军等^[4] 应用 Logistic 方程拟合了不同颜色地膜覆盖下玉米干物质累积量随有效地积温的动态变化。

虽然 Logistic 模型在模拟作物生长过程时具有较高精度,但其只能描述一个生长过程,在不同的生态条件下,模型的参数值会有不同^[14-15],因而所建立的 Logistic 模型较难有普适性。为了弥补这一不足,许多研究者采用归一化方法应用 Logistic 模型^[16-18]。也有研究将影响作物生长的两个关键因子水、氮引入到 Logistic 模型中,建立了不同水氮管理条件下玉米、冬小麦以及油菜干物质的模拟模型,并进行验证^[9,12,19],取得了较好的结果。

以往在基于 Logistic 模型对作物生长过程进行

分析时,鲜见以作物冠层温度开展相关研究。植被冠层温度能够较好地反映作物水分状况,而玉米大面积种植区具有很高的植被覆盖度;随着遥感技术的快速发展和应用,灌区地表温度的获取更加容易,从而可快捷地得到玉米田块的冠层温度。此外,利用有效积温所建立的 Logistic 模型可能因积温类型不同而引起模型精度差异。因此,为了探究上述不同和差异,本文通过吉林省长春地区 2017—2019 年数据观测和试验结果,以玉米生育期根区 20 cm 有效地积温(t_{20})、40 cm 有效地积温(t_{40})、农田有效气积温(t_{air})和玉米有效冠层积温(t_{canopy})作为标尺,分别建立玉米生长发育过程的 Logistic 模型。为了获得普适性参数,建立各个有效积温下的 Logistic 归一化模型,利用 3 年试验数据进行参数率定并加以验证,以期获得当地适宜的玉米干物质累积量估算模型,为今后区域玉米籽粒产量、青贮饲料估产以及精度灌溉决策研究提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验观测于 2017—2019 年在玉米的主要生育期(5—9 月)进行。试验区位于吉林省长春市朝阳区吉林水科院灌溉试验站(125°19'7.77"E,43°38'39.92"N)附近(图 1)。地处东北松辽平原腹地,地势平坦开阔,属北温带大陆性季风气候,海拔 248 m,年均降水量 520~755 mm^[20],夏季降水量占全年降水量的 60% 以上。年内平均气温 4.8℃,最高温度 39.5℃,最低温度 -39.8℃,日照时间 2 700 h 左右。土壤类型以黑土、草甸土为主,土质以沙壤土为主。

研究区土地面积约为 733 hm²,种植的农作物以玉米为主,品种为先玉 335。种植时间为 5 月初,于 9 月底收获。研究区内自然降雨时段基本与玉米整个生育期吻合,当地农田基本不灌溉。2017—2019 年玉米整个生育期降雨量以及土壤含水率变化情况如图 2 所示,2018 年降雨稍少,2017 年和 2019 年降雨较多,玉米主要生长期内农田土壤比较湿润,供水充分。

1.2 地面数据监测与采集

1.2.1 连续自动监测数据

根据研究区春玉米分布情况,选取 5 个代表性地块,在每个地块中间布置 1 套 CTMS-On line 型作物冠层温度及环境因子测量系统(分别为 H1~H5,图 1),有关该系统的详细描述见文献[21]。该系统采集时间间隔均为 30 min,同步连续监测的农田信息包括:空气温/湿度、风速、太阳辐射、光合有效辐射、大气压强、作物冠层红外温度,以及土壤温/

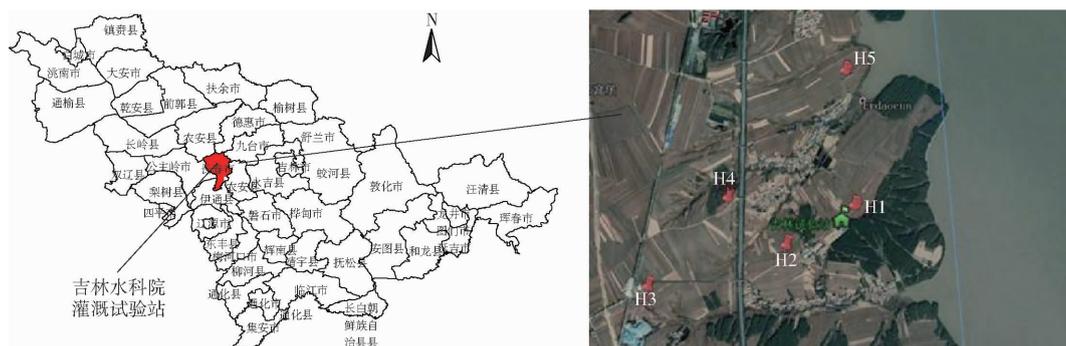


图1 研究区位置及试验仪器布置

Fig. 1 Location of research area and field monitoring systems in experimental site

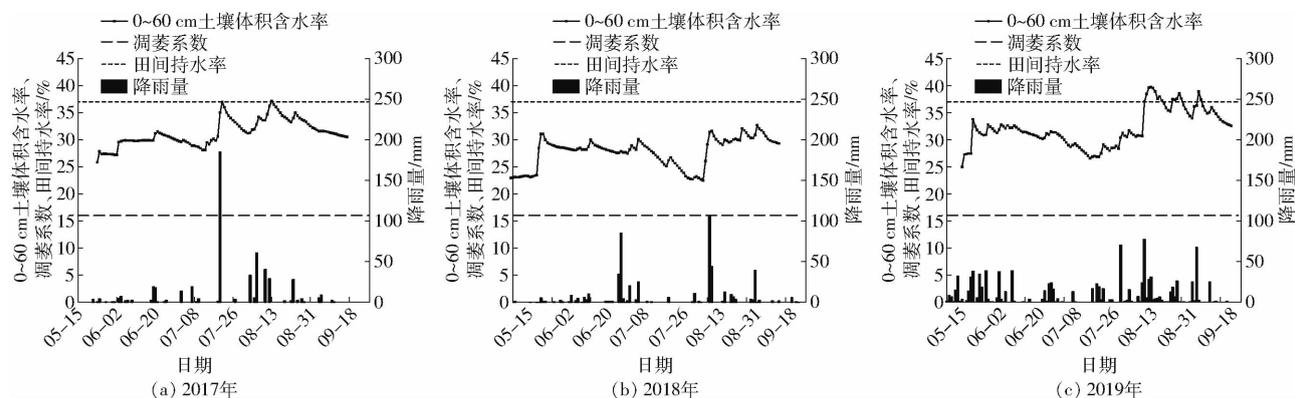


图2 试验区玉米生育期内降雨量及土壤含水率变化

Fig. 2 Precipitations and soil water contents during maize growth period in 2017–2019

湿度(作物根区 20 cm 和 40 cm)等。

1.2.2 作物生长指标观测

玉米干物质质量:在 5 个典型地块中分别选取代表性植株 3 株,测其鲜质量,然后立刻放入干燥箱中 105℃ 杀青 30 min,再 80℃ 干燥至质量恒定。生育期内每 10~15 d 测量 1 次。

玉米产量:生长季末分别测量各个地块的实际产量和干物质产量(1 m²),并记录种植密度。

1.3 Logistic 生长模型

1.3.1 Logistic 一般模型

Logistic 生长模型的一般通式为^[22-23]

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-kt)} \quad (1)$$

其中

$$t = \sum_{i=1}^n (t_i - 10)$$

式中 y ——任意时刻的干物质质量(记为 DM), g/m²

a ——一定环境条件下的最大干物质质量, g/m²

t ——生育期标尺,出苗后有效积温,以下简称有效积温,℃

t_i ——日均温度,℃

b, k ——待定系数

t_i 的最高和最低临界温度分别为 30℃ 和 10℃,当 t_i 超过 30℃ 时按照 30℃ 计算,当 t_i 低于 10℃ 时,按照 10℃ 计算^[24]。

1.3.2 Logistic 归一化模型

YU 等^[14]研究表明,尽管 Logistic 模型在描述作物生长过程中精确度高,但在不同的生态条件下所建立的 Logistic 模型参数值不同。不同地块模型参数值差异性表现为数据点的离散程度大,导致无法建立适用于研究区的统一 Logistic 方程。归一化方法原理是将原始数据经过数据标准化处理后,各指标处于同一数量级,适合进行综合对比评价^[25-26];因此可以通过将每个地块的干物质累积量和有效积温分别取相对值来建立模型,以降低不同地块间数据点的离散程度^[27],从而能够建立研究区统一 Logistic 方程。本文对 Logistic 生长曲线模型进行归一化处理。Logistic 归一化模型与 Logistic 生长模型形式相同,但参数所代表含义不同,模型表达式为

$$\begin{cases} Y = \frac{A}{1 + B \exp(-KT)} \\ Y = \frac{y}{y_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$T = t/t_m$$

式中 Y ——相对干物质质量(记为 RDM),是归一化后的玉米干物质质量,即为各次干物质质量 y 与最大干物质质量 y_{\max} 之比,本文 y_{\max} 取玉米收获时的干物质质量, g/m²

T ——相对有效积温,是归一化后的有效积

温,即为出苗后任意日的有效积温 t 与收获时有效积温 t_m 的比值

A ——相对干物质量的增长极限

$B、K$ ——待定系数

当 $T=0$ 时, Y 为出苗时的相对干物质量;随着玉米逐渐生长, T 逐渐变大,此时 $B\exp(-KT)$ 逐渐变小。理论上,当 T 达到最大值 1 时, $B\exp(-KT)$ 的值趋于 0,此时 $Y=A$,即相对干物质量达到最大值;但由于田间数据采集过程中存在人为误差,实际上 Y 值难以达到 A 值, A 值只是理想极限值。

1.4 数据处理

为了评价模型的精度,本文采用相对误差 (RE)、均方根误差 (RMSE)、一致性系数 (d) 以及决定系数 (R^2) 来检验模型精度。其中, d 越接近 1, 决定系数越高,均方根误差和相对误差越小,说明模型模拟的精度越高。采用 Origin Pro 9.1 制图,表格及统计参数分析在 Excel 2016 中进行。

2 结果与分析

2.1 基于 2017—2019 年数据的 Logistic 模型参数率定

根据式(1),利用 2017—2019 年 3 年的试验数据拟合了不同类型有效积温下玉米干物质量的

Logistic 模型,其模型参数见表 1。由表 1 可知,2017—2019 年基于不同有效积温建立的 Logistic 作物生长模型 R^2 达到 0.95 以上,模型拟合效果很好,表明基于有效积温建立的 Logistic 模型可以精确地模拟作物干物质增长过程。然而由于不同年份环境因子的差异以及不同地块田间小气候的差异,导致不同年份、不同地块所建立的 Logistic 模型参数均有较大的差异。在有效积温类型相同情况下,不同年份建立的 Logistic 模型参数中, a 差异较大,这是由于不同的年份、降雨量以及太阳辐射不同,均会影响玉米的生长,从而影响 Logistic 模型模拟的最大干物质量; b 变化差异明显,尤以 2018 年各个监测点中数值相对较大;2019 年 k 比 2018 年和 2017 年整体偏高。同一年份中,基于不同的有效积温得到的 Logistic 模型参数也不同, $a、b$ 差异明显,而且在每一个年份变化规律不同; k 变化差异不大。

图 3 是以 H1 和 H2 监测点有效冠层积温 t_{canopy} 为例,2017—2019 年玉米的干物质量 Logistic 模型拟合结果。可见以作物有效冠层积温为作物生育期长度的尺度时,整个生育期的干物质累积量随有效冠层积温呈 S 形曲线增长,Logistic 模型的决定系数 R^2 均在 0.98 以上,但不同年份模型率定参数数值有较大差异。

表 1 2017—2019 年不同类型有效积温下玉米干物质累积量 Logistic 模型参数

Tab. 1 Parameters in Logistic models of dry matter accumulation with different effective accumulated temperatures in maize growth season in 2017—2019

积温类型	编号	2017 年				2018 年				2019 年			
		$a/(g \cdot m^{-2})$	b	k	R^2	$a/(g \cdot m^{-2})$	b	k	R^2	$a/(g \cdot m^{-2})$	b	k	R^2
t_{20}	H1	3 279.418	47.419	0.005	0.995	3 043.555	72.464	0.004	0.997	2 541.829	136.093	0.006	0.996
	H2	5 261.186	51.774	0.004	0.979	3 243.737	133.595	0.005	0.987	2 224.858	43.608	0.006	0.993
	H3	3 304.970	31.466	0.004	0.961	3 748.071	88.096	0.004	0.983	2 331.559	60.308	0.007	0.960
	H4	2 412.646	28.165	0.006	0.965	6 105.314	127.457	0.004	0.989	2 441.913	75.931	0.008	0.978
	H5	2 964.567	32.737	0.004	0.982					2 109.469	75.389	0.006	0.989
t_{40}	H1	3 114.366	37.947	0.006	0.994	2 850.174	58.258	0.005	0.996	2 441.613	114.440	0.007	0.996
	H2	4 526.308	37.650	0.004	0.977	3 123.245	103.231	0.006	0.987	2 163.629	37.996	0.006	0.993
	H3	3 260.417	26.388	0.005	0.960	3 533.960	64.469	0.005	0.982	2 281.998	54.391	0.007	0.958
	H4	2 376.857	23.460	0.006	0.962	5 190.196	92.448	0.004	0.989	2 432.718	68.571	0.009	0.978
	H5	2 863.337	27.215	0.005	0.979					2 065.570	62.223	0.007	0.988
t_{air}	H1	3 357.830	46.683	0.004	0.994	3 148.125	72.954	0.004	0.996	2 577.535	123.888	0.005	0.996
	H2	5 050.946	51.142	0.003	0.976	3 310.662	138.279	0.004	0.987	2 316.683	43.855	0.004	0.992
	H3	3 220.443	28.227	0.004	0.958	3 772.884	75.674	0.003	0.982	2 343.200	59.781	0.005	0.959
	H4	2 432.571	27.637	0.005	0.965	6 435.222	137.458	0.003	0.989	2 478.967	74.588	0.006	0.978
	H5	2 981.899	30.609	0.004	0.981					2 147.479	71.002	0.005	0.990
t_{canopy}	H1	3 340.189	62.928	0.004	0.995	3 137.734	86.705	0.004	0.997	2 539.318	163.118	0.005	0.996
	H2	3 828.443	74.342	0.003	0.983	3 067.305	176.320	0.004	0.988	2 265.395	55.639	0.004	0.993
	H3	2 821.759	30.695	0.004	0.959	3 188.576	89.726	0.003	0.985	2 349.708	76.845	0.005	0.961
	H4	2 435.569	38.734	0.004	0.967	5 755.279	154.169	0.003	0.990	2 471.604	100.901	0.006	0.979
	H5	2 944.299	40.256	0.003	0.983					2 124.545	107.896	0.005	0.991

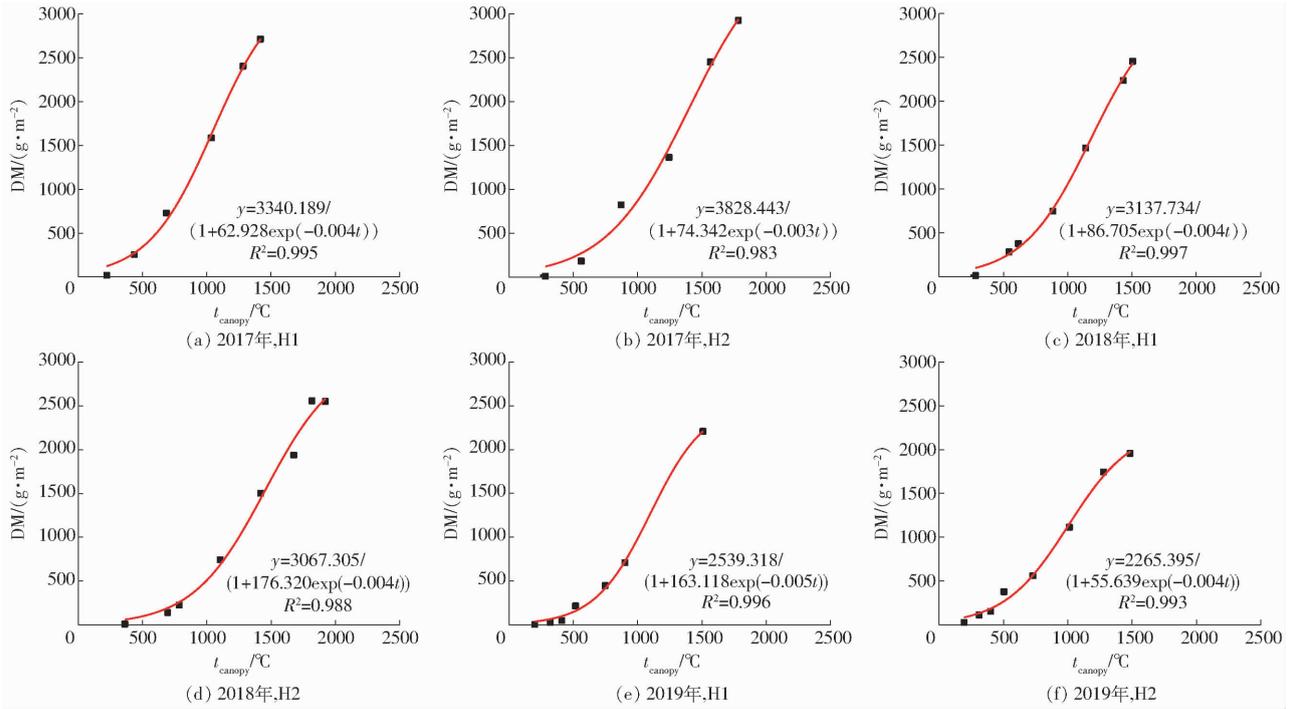


图 3 2017—2019 年玉米干物质 Logistic 模型率定曲线

Fig. 3 Calibration of Logistic model of dry matters in 2017—2019 with effective accumulated temperature in maize canopy

2.2 基于 2017—2019 年数据的 Logistic 归一化模型参数率定

从上述数据率定和分析可见,基于单一田块所建立的 Logistic 模型,其参数间有很大的差异,很难选取合适的模型参数来代表本地区作物生长情况。因此,利用式(2)建立玉米基于不同类型有效积温的干物质 Logistic 归一化模型,用 2017—2019 年

试验观测数据率定其模型参数。

图 4(图中 T_{20} 、 T_{40} 、 T_{air} 、 T_{canopy} 分别表示 20 cm 相对有效地积温、40 cm 相对有效地积温、相对有效气积温和相对有效冠层温度积温)是以 2017 年为例的基于不同有效积温的 Logistic 归一化模型率定结果,其变化趋势皆呈 S 形。将 5 个试验点的干物质累积量与有效积温进行归一化处理后,基于不同相对有

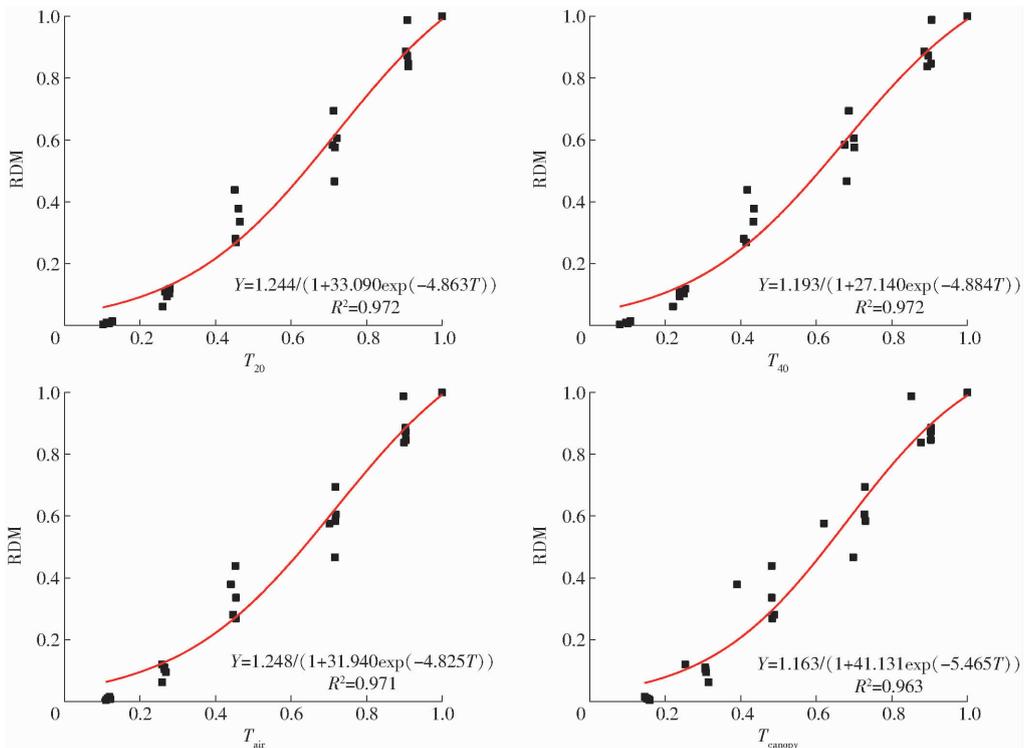


图 4 2017 年基于不同有效积温的 Logistic 归一化模型率定

Fig. 4 Normalized Logistic model with different effective accumulated temperatures in 2017

效积温建立的 Logistic 归一化模型决定系数 R^2 在 0.96 以上;其中地积温最高,空气积温次之,作物冠层积温稍小,但三者差别很小。可见利用有效冠层积温率定的 Logistic 归一化模型是可行的,具有类似的精度和效果。

表 2 统计了 2017—2019 年分别率定的 Logistic 归一化模型参数及 R^2 。从表中可见,同一年份下, Logistic 归一化模型参数 A 在 T_{air} 时最大, T_{40} 时最小;

表 2 2017—2019 基于不同有效积温率定 Logistic 归一化模型参数

Tab. 2 Calibration results of normalized Logistic model with different effective accumulated temperatures in 2017—2019

积温类型	2017 年				2018 年				2019 年			
	A	B	K	R^2	A	B	K	R^2	A	B	K	R^2
T_{20}	1.244	33.090	4.863	0.972	1.473	91.752	5.302	0.986	1.041	43.966	5.905	0.936
T_{40}	1.193	27.140	4.884	0.972	1.373	69.668	5.265	0.985	1.010	38.916	6.091	0.937
T_{air}	1.248	31.940	4.825	0.971	1.529	91.509	5.190	0.985	1.056	46.139	5.830	0.942
T_{canopy}	1.163	41.131	5.465	0.963	1.390	109.085	5.681	0.984	1.056	58.246	6.111	0.943

2.3 玉米干物质量 Logistic 归一化模型参数验证

2.2 节所率定的玉米干物质量 Logistic 归一化模型参数差异减小,但不同年度之间仍然存在一定差异。因而利用农田实测玉米干物质量,对上述归一化模型参数进行校核和验证,以获得本地区最佳参数。

表 3~5 是根据 1 年 Logistic 归一化模型参数分别对其余 2 年实测数据进行校核的统计参数。从表 3 可见,利用 2017 年率定模型分别对 2018 年和 2019 年数据模拟与实测值对比中, T_{20} 和 T_{40} 效果最好, T_{air} 次之, T_{canopy} 最差;但 RMSE、 d 、 R^2 和 RE 在不同类型有效积温之间差异很小。综合考虑 4 个统计参数,可见 2017 年率定模型对 2018 年数据模拟效果优于对 2019 年数据模拟。利用 2018 年率定模型分别对 2017 年和 2019 年数据模拟值与实测值对比,与 2017 年模型结果类似,但 RMSE 和 RE 明显减小、 d 和 R^2 增大,表明 2018 年模型精度提高,尤其是 2019 年 T_{canopy} 尺度的干物质量模拟效果,其统计参数在 4 个积温类型中达到最优(表 4)。利用 2019 年率定模型分别对 2017 年和 2018 年数据模拟值与实测值对比,与 2017 年和 2018 年模型结果相比, RMSE 和 RE 减小更多、 d 和 R^2 持续增大;2018 年 T_{canopy} 尺度的干物质量模拟效果在 4 个积温类型中达到最优,而 2017 年 T_{canopy} 尺度模拟值的统计参数要优于 2018 年的(表 5)。

综合对比 3 年的验证结果,采用 2019 年的率定模型对其他两年的模拟效果优于 2018 年以及 2017 年的率定模型;基于 T_{canopy} 尺度的 Logistic 归一化模型能够很好地模拟玉米生育期干物质量。

B 在 T_{canopy} 时最大, T_{40} 时最小;而 K 在 T_{canopy} 时最大,最小值时为 T_{air} 。同一有效积温类型下,模型参数年际变化有差异,其中 A 和 B 2018 年最大, K 2019 年最大;与 2.1 节 Logistic 模型变化情况一致,但数值间差异减小。同一年份中,不同有效积温所建立的 Logistic 归一化模型 R^2 差异不大;同一有效积温类型下,所有有效积温在不同年份建立的 Logistic 归一化方程的 R^2 由大到小依次为 2018 年、2017 年、2019 年。

表 3 2017 年不同有效积温类型 Logistic 归一化模型模拟值与实测值对比结果

Tab. 3 Validation results of normalized Logistic model of dry matters with four effective accumulated temperatures between simulated and observed values in 2017

积温类型	2018 年				2019 年			
	RMSE	d	R^2	RE/%	RMSE	d	R^2	RE/%
T_{20}	0.094	0.984	0.978	6.8	0.168	0.942	0.937	4.7
T_{40}	0.093	0.984	0.979	6.8	0.168	0.942	0.939	5.0
T_{air}	0.098	0.982	0.976	7.3	0.170	0.941	0.946	5.7
T_{canopy}	0.101	0.981	0.971	7.3	0.169	0.942	0.947	6.0

表 4 2018 年不同有效积温类型 Logistic 归一化模型模拟值与实测值对比结果

Tab. 4 Validation results of normalized Logistic model of dry matters with four effective accumulated temperatures between simulated and observed values in 2018

积温类型	2017 年				2019 年			
	RMSE	d	R^2	RE/%	RMSE	d	R^2	RE/%
T_{20}	0.099	0.983	0.951	-5.4	0.114	0.974	0.907	-3.7
T_{40}	0.098	0.983	0.952	-5.3	0.111	0.974	0.909	-3.4
T_{air}	0.104	0.981	0.948	-6.0	0.107	0.977	0.917	-3.1
T_{canopy}	0.112	0.978	0.938	-6.2	0.103	0.978	0.921	-2.8

表 5 2019 年不同有效积温类型 Logistic 归一化模型模拟值与实测值对比结果

Tab. 5 Validation results of normalized Logistic model of dry matters with four effective accumulated temperatures between simulated and observed values in 2019

积温类型	2017 年				2018 年			
	RMSE	d	R^2	RE/%	RMSE	d	R^2	RE/%
T_{20}	0.068	0.991	0.969	-1.3	0.096	0.994	0.963	4.8
T_{40}	0.069	0.991	0.968	-1.4	0.094	0.994	0.963	4.6
T_{air}	0.071	0.990	0.969	-2.3	0.090	0.995	0.965	4.2
T_{canopy}	0.079	0.988	0.963	-2.8	0.085	0.996	0.968	3.7

图5是以2019年率定模型对2017年和2018年模拟值与实测值拟合图。从表3~5结果也可见,不同年份模拟值与实测值对比中,RE有正有负。从图5可见,同一年份下,模拟值与实测值拟合度很高,而且不同有效积温率定的模型,所得结果拟合度无明显差异。同一有效积温

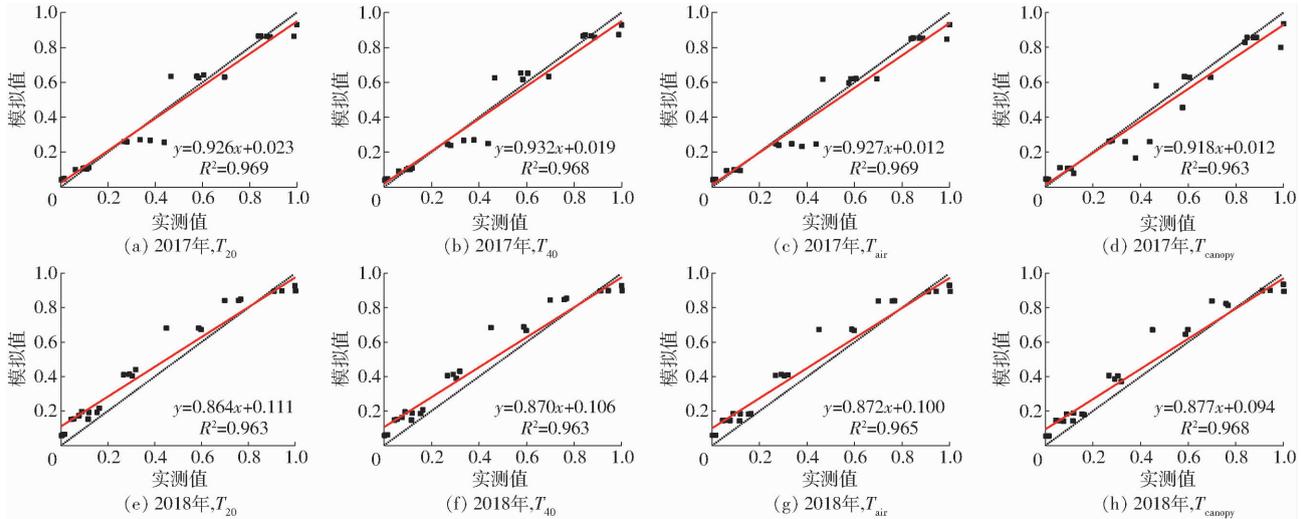


图5 2019年率定模型在2017—2018年模拟值和实测值回归对比

Fig. 5 Regression between simulated and observed values in 2017—2018 using normalized Logistic model calibrated in 2019

3 讨论

Logistic模型能够很好地模拟作物生育期的生理生态发育和生长过程,少见以有效冠层积温为尺度的相关研究和模型。从本文数据分析可知,利用4种类型有效积温的Logistic归一化模型进行模拟值与实测值对比中,其4个统计参数差别不大。其中以2019年模型参数对2018年和2017年实测值进行模型验证中,相比其他类型有效积温, T_{canopy} 的模拟效果最佳,RMSE和RE较小而 R^2 和 d 达到较高的值。因而推荐表2中2019年Logistic归一化模型参数,分别基于 T_{20} 、 T_{40} 、 T_{air} 和 T_{canopy} 的A、B、K值作为本地区玉米干物质模拟参数。

作物生长环境中,气温和地温通过影响植株和根系发育间接影响作物生长,而作物冠层温度能够比较直接地反映其水分状况。通过地区气象站或天气预报可以获取气温,也可以通过在地下安装传感器来获取作物根区不同深度的地温。随着遥感技术和相关解译方法的发展,在灌区农田植被覆盖度高的地方,可以比较快捷地获得大面积作物冠层温度和地表温度。运用有效冠层积温建立的Logistic归一化模型能够精确地模拟玉米干物质生长,在气温或者地温不易获取的地区,可以采用遥感获得的冠层温度对作物干物质质量进行模拟。作物冠层温度作为连接作物水分胁迫和作物干物质累积量的关键连

下,2017年数据的拟合度高于2018年。2017年模拟值与实测值拟合点基本分布于1:1线两侧,表明利用2019年归一化模型对2017年数据的模拟值基本接近实测值;2018年模拟值与实测值拟合点大部分位于1:1线上侧,表明模拟值要高于实测值。

接因子,通过建立玉米干物质Logistic归一化模型而得到本地区适宜的模型参数,可以为现代化农田灌溉管理提供更高效的管理方法。

所建立的玉米干物质Logistic归一化模型中,玉米达到最大干物质质量时的有效积温 t_m 是模型在实际应用时的关键数值。根据本文分析可知,利用研究区多年气象观测资料和遥感反演数据,获得玉米生育期 t_{air} 和 t_{canopy} ,在降雨排频后得到不同水文年型下相应的数值,从而可以得到当前应用中模型所需的有效积温 t_m 。利用Logistic模型或者其归一化模型进行玉米干物质发育过程模拟,在玉米整个生育期至少应该取一次干物质质量进行模型的自适应校核,获得Logistic归一化模型中 y_{max} 等数值,进而可应用该模型模拟得到玉米整个生育期的干物质增长曲线。在获得本地区作物生育期干物质质量与最终籽粒产量的相关关系后,进而可利用玉米生育期实际试验观测对其最终产量进行预评估。这也是下一步继续开展和完善的工作。

4 结论

(1)不同地块、不同年份建立的Logistic玉米干物质增长方程参数不同,且差异显著,表明某一地点建立的Logistic干物质增长方程不能代表区域的干物质增长过程。

(2)不同年份下率定的Logistic归一化模型参

数不同,模型验证表明,2019年率定的模型模拟效果最好,其基于4种温度积温 T_{20} 、 T_{40} 、 T_{air} 和 T_{canopy} 的Logistic归一化模型可以准确地模拟区域干物质增长过程。

(3)不同类型有效积温率定的模型模拟精度均

较高,在玉米整个生育期内,应至少取一次干物质质量用作模型自适应校核,选择当地易于获取的温度数据作为模型生育期长度,以建立Logistic归一化模型。因作物冠层温度尺度扩展性,可进一步加强和完善其区域应用研究。

参 考 文 献

- [1] KLOPFENSTEINA T J, ERICKSONA G E, BERGER L L. Maize is a critically important source of food, feed, energy and forage in the USA [J]. *Field Crops Research*, 2013, 153: 5 - 11.
- [2] 张曲薇. 东北地区玉米种植面积调整及影响因素研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
ZHANG Quwei. Research on the adjustment of maize planting area and the influencing factors in the area of Northeast China [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [3] 彭记永, 李军玲, 张志红. 夏玉米叶面积指数模型适用性及误差分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 70 - 76.
PENG Jiyong, LI Junling, ZHANG Zhihong. Applicability and error analysis of leaf area index model of summer maize [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 70 - 76. (in Chinese)
- [4] 孙仕军, 姜浩, 陈志军, 等. 不同颜色地膜覆盖下春玉米主要生长性状对耕层积温的响应 [J]. *草业学报*, 2019, 28(2): 61 - 72.
SUN Shijun, JIANG Hao, CHEN Zhijun, et al. Effects of surface-layer accumulated temperature on major growth traits of spring maize when un-mulched or under clear or black plastic film mulches [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(2): 61 - 72. (in Chinese)
- [5] BAKOGLU A, CELIK S, KOKTEN K, et al. Examination of plant length, dry stem and dry leaf weight of bitter vetch [*Vicia ervilia* (L.) Willd.] with some non-linear growth models [J]. *Legume Research*, 2016, 39(4): 533 - 542.
- [6] YIN Shuangyi, LI Pengcheng, XU Yang, et al. Logistic model-based genetic analysis for kernel filling in a maize RIL population [J]. *Euphytica*, 2018, 214(5): 86 - 101.
- [7] 阎翠萍, 张虎, 王建军, 等. 沟谷地春玉米干物质积累、分配与转移规律的研究 [J]. *玉米科学*, 2002, 10(1): 67 - 71.
YAN Cuiping, ZHANG Hu, WANG Jianjun, et al. Study on law of biomass accumulation, distribution and transference of spring corn in the gully region [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(1): 67 - 71. (in Chinese)
- [8] 王贺垒, 韩宪忠, 范凤翠, 等. 基于有效积温的设施茄子营养生长期蒸散量模拟系统 [J]. *节水灌溉*, 2019(2): 11 - 17.
WANG Helei, HAN Xianzhong, FAN Fengcui, et al. Dynamic simulation system of eggplant evapotranspiration at vegetative growth stage based on effective accumulated temperature [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(2): 11 - 17. (in Chinese)
- [9] SHABANI A, SEPASKHAH A R, KAMGAR-HAGHIGHI A A. Estimation of yield and dry matter of rapeseed using Logistic model under water, salinity and deficit irrigation [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(7): 951 - 969.
- [10] LECOEUR J, GUILIONI L. Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea [J]. *Field Crops Research*, 1998, 57(3): 319 - 328.
- [11] 王声锋, 段爱旺, 徐建新. 冬小麦株高和叶面积指数变化动态分析及模拟模型 [J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 97 - 100.
WANG Shengfeng, DUAN Aiwang, XU Jianxin. Dynamic changes and simulation model of plant height and leaf area index of winter wheat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(4): 97 - 100. (in Chinese)
- [12] MAHBOD M, SEPASKHAH A R, ZAND-PARSA S. Estimation of yield and dry matter of winter wheat using Logistic model under different irrigation water regimes and nitrogen application rates [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(12): 1 - 16.
- [13] 孔德胤, 智海, 张富强, 等. 河套地区覆膜与裸地玉米随地积温变化的生长动态模型 [J]. *中国农业气象*, 2008, 29(1): 67 - 70.
KONG Deyin, ZHI Hai, ZHANG Fuqiang, et al. Dynamic growth models joint with changes of accumulated soil temperature for corn mulched and unmulched with plastic film in Hetao areas of Inner Mongolian Autonomous Region [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(1): 67 - 70. (in Chinese)
- [14] YU Qiang, LIU Jiandong, ZHANG Yongqiang, et al. Simulation of rice biomass accumulation by an extended Logistic model including influence of meteorological factors [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2002, 46(4): 185 - 191.
- [15] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(5): 32 - 38.
QIAO Jia, ZHU Jincheng, ZHAO Jiao, et al. Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 32 - 38. (in Chinese)
- [16] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 69 - 72.
LIN Zhonghui, XIANG Yueqin, MO Xingguo, et al. Normalized leaf area index model for summer maize [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 69 - 72. (in Chinese)
- [17] 李忠辉, 郭春明, 袁福香. 吉林西部春玉米的叶面积与有效积温的相关性 [J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(1): 130 - 132.
LI Zhonghui, GUO Chunming, YUAN Fuxiang. Correlation between leaf area of spring maize and effective temperature in western Jilin Province [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2018, 46(1): 130 - 132. (in Chinese)
- [18] 王全九, 蔺树东, 苏李军. 马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析 [J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 306 - 316.
WANG Quanjiu, LIN Shudong, SU Lijun. Quantitative analysis of response of potato main growth index to growing degree days

- [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 306 – 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200335&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.035. (in Chinese)
- [19] SEPASKHAH A R, FAHANDEZH-SAAD I S, ZAND-PARSA S, et al. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management [J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 51 – 57.
- [20] 戚琳琳. 长吉经济圈供水安全研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
QI Linlin. Research on safety of water supply in Changji Economic Circle [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [21] 蔡甲冰, 许迪, 司南, 等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 133 – 139.
CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture for irrigation decision-making [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133 – 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151219&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.019. (in Chinese)
- [22] WEST G B, BROWN J H, ENQUIST B J. A general model for ontogenetic growth [J]. Nature, 2001, 413(6856): 628 – 631.
- [23] WU R, MA C, CHANG M, et al. A Logistic mixture model for characterizing genetic determinants causing differentiation in growth trajectories [J]. Genetical Research, 2002, 79(3): 235 – 245.
- [24] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 93 – 104.
LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 93 – 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151014&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.014. (in Chinese)
- [25] 付雪丽, 赵明, 周宝元, 等. 小麦、玉米粒重动态共性特征及其最佳模型的筛选与应用 [J]. 作物学报, 2009, 35(2): 309 – 316.
FU Xueli, ZHAO Ming, ZHOU Baoyuan, et al. Optimal model for dynamic characteristics of grain weight commonly used in wheat and maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(2): 309 – 316. (in Chinese)
- [26] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验 [J]. 作物学报, 2007, 33(4): 612 – 619.
ZHANG Bin, ZHAO Ming, DONG Zhiqiang, et al. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(4): 612 – 619. (in Chinese)
- [27] 张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 等. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 25 – 29.
ZHANG Xudong, CAI Huanjie, FU Yujuan, et al. Study on leaf area index of summer maize in loess areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2): 25 – 29. (in Chinese)

(上接第 262 页)

- [28] ZHAO G, BRYAN B A, SONG X D. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM – wheat model: interactions between cultivar, environmental, and management parameters [J]. Ecological Modelling, 2014, 279: 1 – 11.
- [29] JONES C A, KINIRY J R. CERES – N maize: a simulation model of maize growth and development [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1986, 41(3): 339.
- [30] LIANG H, QI Z M, DEJONGE K C, et al. Global sensitivity and uncertainty analysis of nitrate leaching and crop yield simulation under different water and nitrogen management practices [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 201 – 210.
- [31] 张忠学, 陈鹏, 聂堂哲, 等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 217 – 226.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, NIE Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation models on nitrogen distribution and availability in paddy soils [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 217 – 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181125&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025. (in Chinese)
- [32] ASSENG S, EWERT F, ROSENZWEIG C, et al. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change [J]. Nature Climate Change, 2013, 3: 827 – 832.