

甘肃几个大麦品种茎秆形态生长模型试验研究

杨占峰,高晓阳*,武季玲,李红岭,李小莹,毛红玉,杨倩,孔彦龙

(甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃兰州730070)

摘要:以甘肃培育和引种的三种不同品种大麦为供试材料,通过对不同播期三种试验大麦茎秆生长过程的两轮连续观测和定量分析,构建了甘肃大麦茎秆生长过程的动态模拟模型。本研究采用 Logistic 方程模型描述了不同节间长度和粗度以及节间伸长和增粗的动态过程,并采用根均方误(RMSE)方法对不同品种大麦进行检验,模型检验结果显示,不同品种的不同节间长和节间粗,其预测值的平均 RMSE 值范围分别在 0.2371~1.0613 cm 和 0.0142~0.0775 之间。试验表明本模型具有较好的预测性和可靠性。

关键词:大麦;茎秆;生长模型;Logistic 方程;参数

中图分类号: S314;S512.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0044-06

Experimental research on morphologic growing model of stalk for several barley varieties in Gansu

YANG Zhan-feng, GAO Xiao-yang*, WU Ji-ling, LI Hong-ling,

LI Xiao-ying, MAO Hong-yu, YANG Qian, KONG Yan-long

(Gansu Agricultural University, Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Habitats in Biology, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the three different varieties of barley for testing materials which has been cultivated and introduced in Gansu, through two continuous observation and quantitative analysis for the stem growing process of three varieties barley with different sowing time, has structured a dynamic simulation model for the barley stalk growing process in Gansu. In this research, the Logistic Equation Model has been used to describe the dynamic process of different internode length and diameter. The root mean square error (RMSE) method has been adopted to inspect the different varieties of barley. The model inspected results showed that: For the different internode length and diameter of different varieties of barely, the forecasting value of the average root mean square errors(RMSE) were between 0.2371~1.0613 cm and 0.0142~0.0775 cm, respectively. The test has indicated this models possessed good predictability and reliability.

Keywords: barley; stalk; growing model; logistic equation; parameters

近年来,随着信息技术和农业科学技术的发展,一个新兴的农业信息技术领域正在对传统农业科学和农业生产产生着深刻和广泛的影响,其中作物生长模拟模型是作物可视化技术的前提,是农业生产栽培信息技术的核心内容和重要基础。作物生长模拟模型利用系统分析方法和计算机模拟技术,对作物生长发育过程及其与环境 and 栽培技术的动态关系的定量描述和预测^[1-2]。大麦是我国古老而重要的栽培作物,具有生育期短、早熟高产、适应性强、耐盐碱、耐瘠省肥等特点,既是耕作改制的先锋作物,又是酿造啤酒的重要原料,在我国的播种面积和总产量仅次于水稻、小麦、玉米,在国民经济中占有重要地位^[3]。而且西北特别是甘肃河西地区啤酒大麦籽粒色泽光亮,皮薄色浅,发芽率高,是我国优质啤酒大麦生产的重要基地。然而,与小麦相比,大麦穗较短,穗粒数少,产量低,茎秆柔软纤细,容易倒伏,因而低产和倒伏始终困扰着优质大麦的生产。关于作物形态模型的研究,国内外都有所报道^[4-8],但由于禾谷类作物形态特征的可变性,以及形态数据的难获取性,一般都是采用静态模型^[9-12]。徐寿军等以生理发育时间(GDD)为尺度,以 Richards 方程对南方地区不同品种大麦的不同播期的试验结果进行了

收稿日期:2013-05-28
基金项目:国家自然科学基金项目(61164001);甘肃省教育厅高等学校科研计划项目(1102-07);甘肃省干旱生境作物学重点实验室开放基金课题(1102-11)资助
作者简介:杨占峰(1987—),男,河北省邢台市人,主要研究方向是工程检测与智能控制技术。E-mail: yangzhanfeng97@126.com。
* 通信作者:高晓阳(1962—),男,甘肃省临夏市人,教授,硕士生导师,主要从事农业工程检测与智能控制技术及系统研究。E-mail: gaoxiao1081@sina.com。

分析,建立了大麦穗和茎秆生长的动态模型^[13]。刘铁梅等在生理生态过程的基础上,系统地分析了武汉和扬州两个地区不同大麦品种高产群体叶面积指数变化动态,并对大麦的叶面积指数变化动态进行了模拟^[14]。陈国庆等采用 Logistic 方程首次对小麦叶鞘和节间生长的形态变化过程进行了定量化模拟,较好地体现了小麦叶鞘和节间形态建成的动态特征^[15]。李红岭等以生理发育时间(PDT)为步长,首次对甘肃不同形态类型大麦品种茎秆生长进行了定量化模拟,用 Richards 方程描述了大麦茎秆节间伸长和节间增粗的动态过程^[16]。与南方地区相比,我国西北地区特别是甘肃大麦的生长模拟研究相对较少。本研究通过对甘肃不同品种大麦的茎秆生长过程的连续观测和定量分析,构建了大麦茎秆生长的动态模型,这对于预防大麦倒伏、提高培育品质,指导栽培生产等都具有重要的理论和实践意义^[17]。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于在甘肃农业大学试验田进行,分别在 2011 年 4 月和 2012 年 4 月初,每年分三个播期,各播期相差 10 d。甘肃农业大学试验田位于黄河上游,东经 103°49',北纬 36°03',海拔 1 520 m。该区属于温带大陆性气候,年平均日照时数 2 446 h,年平均气温 10℃~11.2℃,极端最高气温 38℃~39℃,极端最低气温-19℃~-17℃,全年无霜天气为 180 d,年均蒸发量约为 1 134 mm,年平均降水量为 327 mm。

本试验小区共分为三个小区,每个小区面积为 15 m²。土壤质地为砂土,土壤有机质含量约为 0.93 g·kg⁻¹、速效 N 42.35 mg·kg⁻¹、速效 P 15.64 mg·kg⁻¹、速效 K 75.0 mg·kg⁻¹,土壤为碱性,pH 值约为 7.0~8.3。供试大麦品种为甘啤 5 号、甘啤 6 号和玛丽,分别播在三个小区里,播深 3~4 cm。播量为 176.5~200.5 kg·hm⁻²,施纯氮 120~180 kg·hm⁻²,P₂O₅ 120~240 kg·hm⁻²,N:P 为 1.0:1.0~1.3,并且作为底肥一次性施足。其它栽培管理措施同大田。

1.2 测定项目

从出苗期开始,每个小区的每个品种随机选取长势相同的大麦 30 株挂牌标记,定点定株观测。从拔节期开始,每 1 天测量 1 次主茎的节间长度和粗度,采用方差分析对测量数据进行处理。节间长度测量用直尺测量,节间直径用游标卡尺测量,每一节间分上、中、下三个点进行测量。

1.3 建模方法

以甘啤 6 号的实测数据为基础,比照甘啤 5 号和甘肃农业大学引种选育品种玛丽,构建大麦茎秆生长动态,以三个品种不同播期的实验实测数据对所建模型进行测试和检验。模型检验采用国际上常用的统计方法根均方误 RMSE(Root Mean Square Error)^[18],来对模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析。RMSE 取值范围在 0~+∞之间,当求得的 RMSE 值大于 0.3 时,说明模型的描述效果不好,在 0.2~0.3 之间则说明模型的描述效果一般,在 0.1~0.2 之间则比较好,而当 RMSE 值小于 0.1 时,则说明模型的描述性非常好。

RMSE 可用以下的方程计算:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}}$$

(1)

式中, OBS_i 为观测值, SIM_i 为模拟值, n 为样本容量。

2 结果与分析

2.1 甘肃大麦模型的建立

2.1.1 节间长度变化模型 从拔节期开始,大麦植株的生长就是节间长度不断伸长和增粗的结果,由于不同位置处的节间形态也不同,故建模时必须考虑各节间的差异性。已有研究表明,大麦的节间生长符合 S 生长曲线,即 Logistic 模型。因此依据试验数据和参考文献^[19-20],所选大麦品种地上茎节为 5 节,各节间长度模型描述如下:

$$L_n(d) = \frac{l_{\max n}}{1 + e^{a_1 - a_2 d}} \quad n = 1, 2, 3, 4, 5$$

(2)

式(2)中 L_n(d) 为节间 n 在生长天数 d 时的长度(cm), l_{maxn} 为节间 n 的最终长度(cm), a₁, a₂ 为拟合参数,它们随节间序号的不同而不同。根据实验观测数据计算出对应不同节间序号的不同节间形态参数 l_{maxn}、a₁、a₂ 的值见表 2。利用 Excel 软件采用线性拟合方法可得,不同品种大麦各节间长度生长模拟方程表如表 1、表 2 所示, l_{maxn}、a₁、a₂ 的值与节间序号之间的关系曲线^[21],如图 1~3 所示。

从图 1~3 可以看出,不同节间位置的形态参数 l_{maxn}、a₁、a₂ 各不相同,所以需要根据其所在节间位置选择相对应的参数值来构建节间形态。

2.1.2 节间增粗模型 拔节期时,在侧分生组织和居间分生组织的作用下,大麦节间直径随生长天数的累积不断增大,同节间长度生长规律一样,遵循“慢-快-慢”的生长变化趋势,试验表明其也符合 Logistic 模型,其生长模型可描述为:

$$R_n(d) = \frac{r_{\max n}}{1 + e^{b_1 - b_2 d}} \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (3)$$

式中, $r_{\max n}$ 为节间的最终直径, b_1 、 b_2 为拟合参数, 它们也随节间序号的变化而变化, $R_n(d)$ 为节间 n 在生长天数 d 时的节间直径。由试验结果可求出不

同的节间对应的不同参数 $r_{\max n}$ 、 b_1 、 b_2 的值, 最后利用 Excel 软件采用线性拟合方法进行处理, 可得大麦各节间直径生长模拟方程表如表 1、表 3 所示。3 种不同试验品种的拟合参数 $r_{\max n}$ 、 b_1 、 b_2 与节间序号的关系如图 4 ~ 6 所示。

表 1 三个品种大麦节间长度和粗度的最大值

Table 1 Maximal value of internode length and thickness of 3 barley varieties

节间 Internodes	节间长度 Internode length/cm			节间粗度 Internode thickness/cm		
	甘啤 6 号 Ganpi 6	甘啤 5 号 Ganpi 5	玛丽 Mali	甘啤 6 号 Ganpi 6	甘啤 5 号 Ganpi 5	玛丽 Mali
第 1 1st	1.97	2.32	1.74	0.276	0.261	0.255
第 2 2nd	4.95	5.62	4.82	0.433	0.413	0.413
第 3 3rd	7.52	7.94	7.25	0.495	0.478	0.421
第 4 4th	9.98	10.27	9.34	0.452	0.438	0.394
第 5 5th	12.45	13.15	11.63	0.371	0.367	0.342

表 2 三个品种大麦节间伸长的模型参数值

Table 2 Model parameter values of internode growth of 3 barley varieties

节间 Internodes	甘啤 6 号 Ganpi 6		甘啤 5 号 Ganpi 5		玛丽 Mali	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
第 1 1st	28.6816	0.8053	24.3224	0.5534	33.3818	0.9595
第 2 2nd	11.7369	0.2895	7.5206	0.1678	16.4225	0.3906
第 3 3rd	26.6443	0.4487	25.1129	0.4639	28.0937	0.5358
第 4 4th	26.1841	0.4767	25.4597	0.4225	27.5585	0.4818
第 5 5th	24.6979	0.4405	22.1828	0.3601	27.5933	0.5210

表 3 三个品种大麦节间增粗的模型参数值

Table 3 Model parameter values of internode thick of 3 barley varieties

节间 Internodes	甘啤 6 号 Ganpi6		甘啤 5 号 Ganpi5		玛丽 Mali	
	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2
第 1 1st	28.3037	0.4154	15.6237	0.3368	31.8053	0.5832
第 2 2nd	8.2428	0.2167	7.3557	0.1771	11.3410	0.2657
第 3 3rd	11.3751	0.2862	7.9785	0.2664	16.9763	0.3819
第 4 4th	9.8597	0.2177	5.4938	0.1664	13.5514	0.2993
第 5 5th	12.9268	0.2524	6.6157	0.2068	17.0476	0.3399

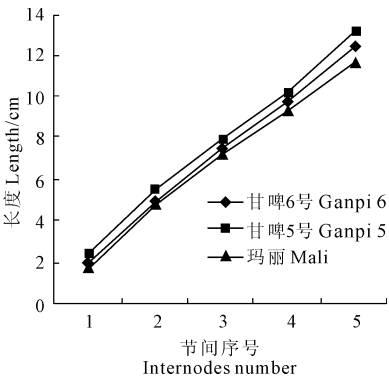


图 1 不同品种形态参数 $l_{\max n}$ 随节间变化折线图

Fig.1 Different varieties morphologic parameter $l_{\max n}$ with internode variation

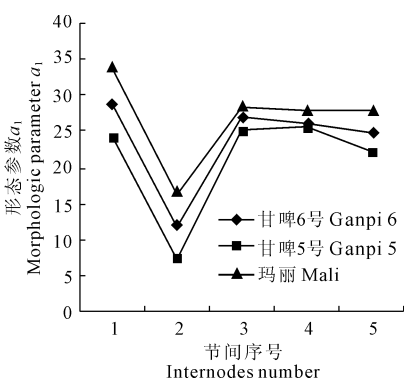


图 2 不同品种形态参数 a_1 随节间变化折线图

Fig.2 Different varieties morphologic parameter a_1 with internode variation

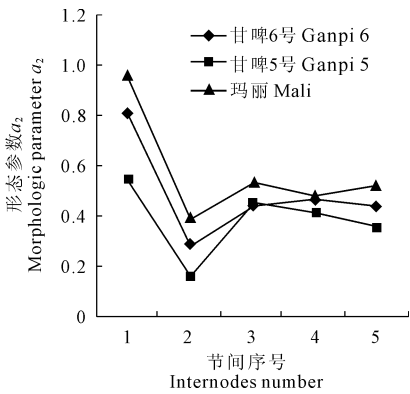


图 3 不同品种形态参数 a_2 随节间变化折线图

Fig.3 Different varieties morphologic parameter a_2 with internode variation

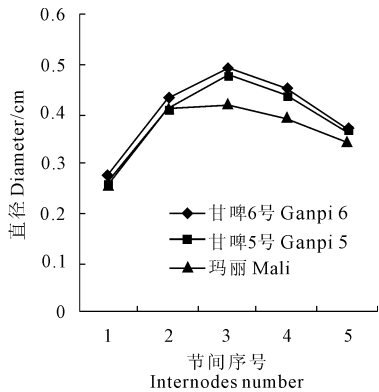


图 4 不同品种形态参数 $r_{\max/n}$ 随节间变化折线图

Fig.4 Different varieties morphologic parameter $r_{\max/n}$ with internode variation

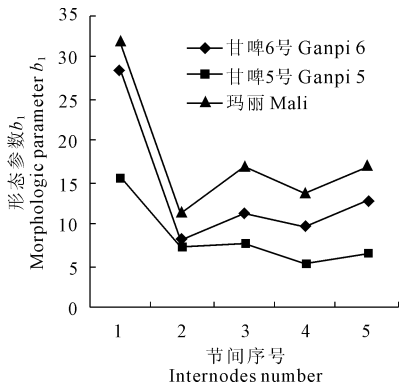


图 5 不同品种形态参数 b_1 随节间变化折线图

Fig.5 Different varieties morphologic parameter b_1 with internode variation

2.2 茎秆生长模型检验

利用上述所构建的大麦节间伸长模型和节间增粗模型,分别对甘啤 6 号不同播期不同节间位置的几何形态进行模拟,每个播期选取 8 株大麦节间生

长数据,并取平均值与模型模拟值进行比较,部分节间伸长和增粗试验观测值与模拟值的比较结果如图 7 和图 8 所示。根据试验结果,甘肃大麦随着节间位置的不同,其节间形态也在发生一定的变化,但是节间直径变化较为缓慢。从图 7 中可以看出,植株上部(如节间 5)的节间长度比植株下部的大 2 ~ 5 cm。此外,随着生长天数的变化,在拔节期时,节间快速伸长,数天后伸长逐渐变缓。从图 8 中可得出,且植株中部(如节间 3)的节间粗度比植株上下两部分的大。大麦各节间粗度在节间开始伸长的同时,也开始增加,与节间长度不同,各节间粗度缓慢增加,最大值为第 3 节间的约 0.5 cm。这些均表明模型模拟结果与大麦植株的形态结构及试验结果的变化规律具有较强的一致性^[22-24]。

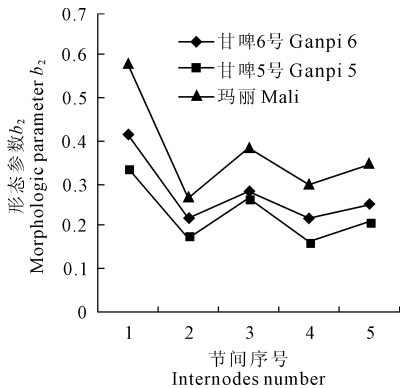


图 6 不同品种形态参数 b_2 随节间变化折线图

Fig.6 Different varieties morphologic parameter b_2 with internode variation

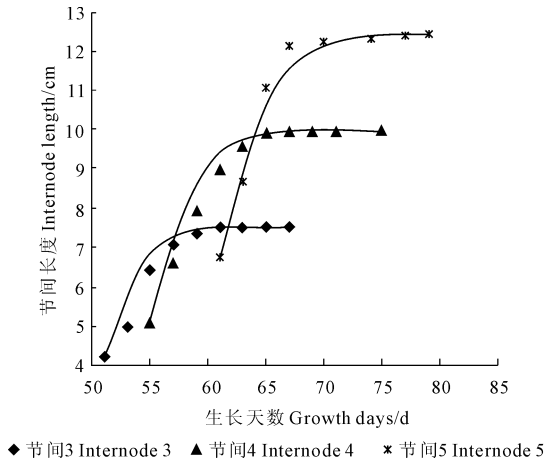


图 7 不同节间序号的节间长度生长观测值和模拟值

Fig.7 Simulated and observed internode length with different serial number

为了更进一步检验模型的正确性和适应性,采用根均方误 $RMSE$ (Root Mean Square Error) 分别选取

三个品种不同播期不同节间的各个生长日的观测值,将其与模型模拟值之间的符合度进行统计分析,其节间长度和节间粗度模型检验结果见表 4,不同节间长度和粗度模拟值与实测值的比较如图 9 和图 10 所示。结果表明,模型对大麦的不同播期、不同品种、不同节间长度模拟值的 $RMSE$ 范围在 0.2371 ~ 1.0613 cm 之间,节间粗度的 $RMSE$ 范围在 0.0142 ~ 0.0775 cm 之间。以随机取出的三个品种不同生理日的节间长、节间粗变化的模拟值和观测值作 1:1 关系图,显示了较为平行的变化趋势,能够较好地反映出模拟值与观测值之间较好的一致性。

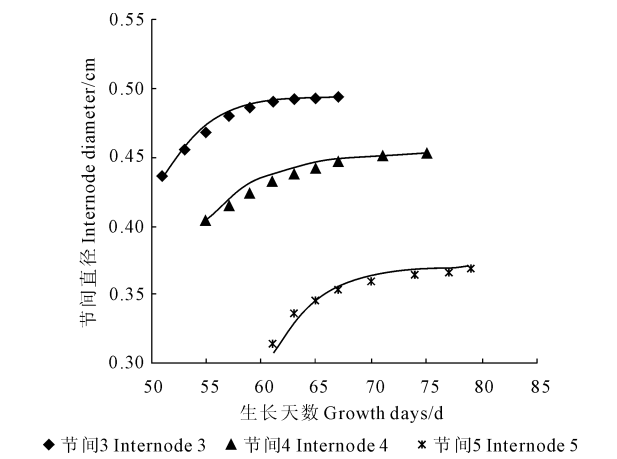


图 8 不同节间序号的节间直径生长观测值和模拟值
Fig.8 Simulated and observed internode thickness with different serial number

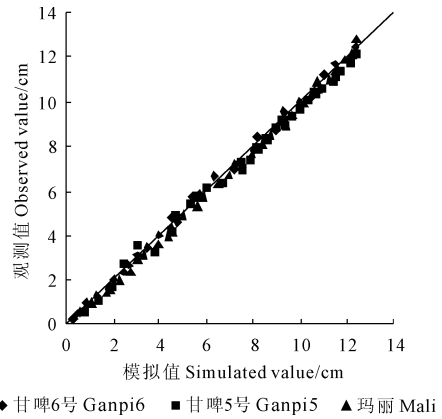


图 9 不同品种节间长模拟值与观测值的比较
Fig.9 Comparison of simulated with observed value for internode length with various varieties

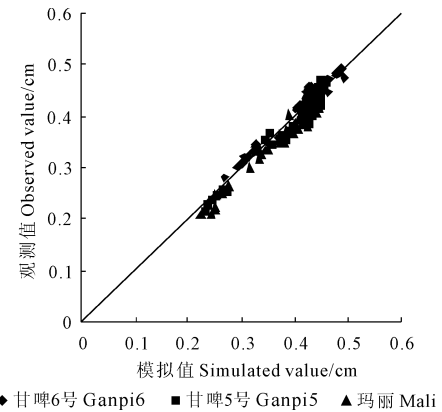


图 10 不同品种节间粗度模拟值与观测值的比较
Fig.10 Comparison of simulated and observed value for internode thickness of various varieties

节间 Internodes	节间长度 Internode Length/cm			节间粗度 Internode Thickness/cm		
	甘啤 6 号 Ganpi6	玛丽 Mali	甘啤 5 号 Ganpi5	甘啤 6 号 Ganpi6	玛丽 Mali	甘啤 5 号 Ganpi5
第 1 1st	0.2368	0.625	0.3896	0.0592	0.0695	0.0692
第 2 2nd	0.2212	0.3904	0.4628	0.0486	0.0613	0.0502
第 3 3rd	0.2635	0.3699	1.0613	0.0512	0.0593	0.0775
第 4 4th	0.3268	0.2371	0.6448	0.0256	0.0557	0.0164
第 5 5th	0.4843	0.9022	0.7360	0.0189	0.0142	0.0507

3 讨 论

植物生长是一个单向不可逆的变化过程,并经历一系列不同的生长阶段。植物形态结构的形成与生长发育有着密切联系,植物的形态建模是实现植物生长可视化的基础。为此,建立符合植物生长发育过程的模拟模型是虚拟植物技术的关键^[13,16,21,24]。徐寿军等以生理发育时间为基础,用

Richards 方程模拟了南方大麦穗伸长、节间伸长和增粗的动态过程^[13]。与本试验研究的西北 – 甘肃大麦品种相比,节间长度较小,节间直径较大,形态结构生长具有差异,该模型对西北大麦模拟具有局限性。李红岭等以生理发育时间(PDT)为步长,用Richards 方程模拟了甘肃大麦茎秆节间伸长和节间增粗的动态过程^[16]。但由于为盆栽试验,与本文生长环境和田间试验模型精度方面也存在有一定差

异。为此,本研究首次试验表达并客观反映了甘肃大麦的生长发育规律与模型模拟及检验。

另外大麦的茎秆生长还受肥、水因子的影响^[26-27],但本模型未考虑肥水因素对大麦茎秆生长的调控效应。为使模型在不同环境下具有广泛的适用性,也还需要对所建模型在更多的品种和更大地理范围内进行检验和进一步的实验研究。

4 结 论

1) 本文以甘肃三个大麦品种试验观测为基础,建立了可描述大麦节间生长动态的 Logistic 方程模拟模型,包括节间长度和节间粗度的动态模拟。图7和图8显示出生长模拟值和观测值数据高度拟合。本模拟模型研究表明,在节间长度上,甘啤6号从第1节到第5节的最终节间长度逐节递增,第5节生长速度最快,第3、4节次之,第2节较慢,第1节最慢。比较三个不同大麦品种可见,三个大麦品种的节间最终长度相近,但第1、第2节的生长速度相差较大。在节间直径增长方面,甘啤6号第3节最粗,第2、第4、第5、第1节依次减小。比较三个不同大麦品种,甘啤6号和甘啤5号节间增粗差距较小,但与玛丽的差距相对较大。

2) 不同播期实测数据的模型检验结果显示,3个播期之间因为温度积累的不同,模型也有差异,但是差异不明显,经过模型修订之后,可以较好地模拟不同播期的大麦生长。随着生长天数的增加,甘肃大麦节间伸长和增粗曲线呈“S”型。图7和图8显示出当前一节生长趋缓时,后一节就开始生长,表明模型模拟结果与大麦植株的实测形态结构变化规律相一致,模型具有较好的描述性。

3) 用三种不同播期的大麦品种的实测数据对所建模型进行重复测试和检验,结果显示,对于节间长度模型,大麦的不同品种不同节间长度模拟值的 *RMSE* 范围在 0.2371 ~ 1.0613 cm 之间;对于节间粗度的 *RMSE* 范围在 0.0142 ~ 0.0775 cm 之间,符合误差范围,说明本试验研究建立的模型对甘肃大麦节间生长动态具有较准确的描述性和预测性。

参 考 文 献:

- [1] 郭 浩,朱德海,戈振扬,等.植物立体可视化模拟系统原型 StereoPlants 的构建[J].农业工程学报,2012,28(15):113-117.
- [2] 唐天均,雷玉平.基于 GIS 的区域作物生长模拟模型[J].农业工程学报,2012,28(2):180-185.

- [3] 卢良恕.中国大麦学[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [4] 伍艳莲,汤 亮,刘小军,等.基于形态特征参数的稻穗几何建模及可视化研究[J].中国农业科学,2009,42(4):1190-1196.
- [5] 伍艳莲,曹卫星,汤 亮,等.基于 OpenGL 的小麦形态可视化技术[J].农业工程学报,2009,25(1):121-126.
- [6] 曹宏鑫,石春林,金之庆.植物形态结构模拟与可视化研究进展[J].中国农业科学,2008,41(3):669-677.
- [7] Guo Y, Li B G. New advances in virtual plant research[J]. Chinese Science Bulletin, 2001,46(11):888-894.
- [8] 陈国庆,张吉旺,董树亭.基于可视化的超级玉米生长模拟系统[J].中国农业科学,2009,42(9):3361-3367.
- [9] 展志岗,王一鸣,Philippe Reffye,等.冬小麦植株生长的形态构造模型研究[J].农业工程学报,2001,(5):6-11.
- [10] Prusinkiewicz P, Remphrey W R, Davidson C G, et al. Modeling the architecture of expanding *Fraxinus pennsylvanica* shoots using L-systems[J]. Can J Bot, 1994,72:701-714.
- [11] 甘阳英,夏 宁.虚拟植物的发展概况与应用[J].中国农学通报,2010,26(21):400-403.
- [12] 苏中滨,孟繁疆,康 丽,等.基于 Agent 技术虚拟植物模型的研究与探索[J].农业工程学报,2005,21(8):114-117.
- [13] 徐寿军,顾小莉,许如根,等.大麦穗和茎秆生长的动态模拟[J].麦类作物学报,2007,27(2):282-287.
- [14] 刘铁梅,王 燕,邹 薇,等.大麦叶面积指数模拟模型[J].应用生态学报,2010,21(1):121-128.
- [15] 陈国庆,朱 艳,曹卫星.小麦叶鞘和节间生长过程的模拟研究[J].麦类作物学报,2005,25(1):71-74.
- [16] 李红岭,高晓阳,等.大麦茎秆生长动态模拟模型[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):129-132.
- [17] 郭翠花,高志强,苗果园.不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J].农业工程学报,2010,26(3):151-155.
- [18] Kazuhiko Kobayashi, Moin Us Salam. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components[J]. Agronomy Journal, 2000,92:345-352.
- [19] 包奇军,潘永东,张华瑜,等.早熟、抗旱啤酒大麦新品种——甘啤5号[J].麦类作物学报,2008,28(3):542.
- [20] 包奇军,潘永东,张华瑜,等.优质高产啤酒大麦新品种——甘啤6号[J].麦类作物学报,2010,(9):39-40.
- [21] 张明艳,李红岭,高晓阳,等.紫花苜蓿株高和叶面积指数变化动态及模拟模型[J].干旱区资源与环境,2013,(4):187-192.
- [22] 刘 慧,汤 亮,张文宇,等.基于模型的可视化水稻生长系统的构建与实现[J].农业工程学报,2009,25(9):148-154.
- [23] 陈国庆,朱 艳,刘 惠,等.基于形态模型的小麦器官和单株虚拟生长系统研究[J].农业工程学报,2007,23(3):126-130.
- [24] 雷晓俊,汤 亮,张永会,等.小麦麦穗形态几何模型构建与可视化[J].农业工程学报,2011,27(3):179-184.
- [25] 曹宏鑫,赵锁劳,葛道阔,等.作物模型发展探讨[J].中国农业科学,2011,44(17):3520-3528.
- [26] 成 林,刘荣花,马志红.缺水 and 灌水对冬小麦产量影响评估[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):101-106.
- [27] Wu W, Fan L, Li M F, et al. Sensitivity analysis of crop growth models to multi-temporal scale solar radiation[J]. Transaction of the CSAE, 2012,28(3):123-128.