

大麦茎秆生长动态模拟模型

李红岭¹,高晓阳^{1,2},张明艳¹,杨占峰¹,毛红玉¹,杨倩¹

(1.甘肃农业大学工学院;2.甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃兰州730070)

摘要:通过系统分析甘肃地区不同株型大麦品种茎秆生长的变化动态,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,并以不同品种不同播期的大麦对模型进行了检验。结果表明:模型对大麦不同品种不同播期节间长度实测值和模拟值的RMSE范围在0.37~1.62 cm之间,节间粗度的RMSE范围在0.011~0.034 cm之间,模型具有较好的预测性。

关键词:大麦;Richards方程;节间;形态

中图分类号: S512.301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)04-0129-04

20世纪60年代荷兰的de Wit C T研制出第一个计算机模型ELCROS^[1-2],标志着作物模拟模型的问世,随着计算机技术的进步以及信息和系统科学的推动,作物模拟技术研究得到了快速发展。陈国庆、谭子辉等^[3-4]利用生长度日(GDD)来代表时间步长,用Logistic方程描述了小麦叶片、麦穗、叶鞘和节间生长的动态变化,结合了小麦叶片和节间的同伸规律,具有较好的实用性。常丽英通过连续观测不同氮素和水分水平下不同类型品种水稻地上部器官的形态特征,以积温为主线,构建了水稻植株各器官形态建成的模拟模型^[5]。另外,徐寿军等以生理发育时间为尺度,通过对江苏地区不同大麦品种不同播期的试验分析,对大麦穗和茎秆生长进行了动态模拟^[6]。刘铁梅等以生理生态过程为基础,通过系统分析扬州和武汉地区不同大麦品种高产群体叶面积指数变化动态,构建了大麦叶面积指数变化动态的模拟模型^[7]。大麦在我国分布地区广,但与南方地区相比,我国北方地区,尤其西北部大麦的器官形态模拟研究相对较少。甘肃省是我国啤酒大麦的种植大省,由甘肃省农科院和农垦农业研究院研制的甘啤系列和垦啤系列大麦新品种在甘、新、蒙、青、宁等五省区已得到良好的推广应用。本研究通过对我国西部地区甘肃省不同株型大麦品种的实验观测与分析,构建了大麦茎秆生长的动态模拟模型,包括节间伸长和节间增粗的变化动态,为进一步系统构建甘肃大麦形态发育模型等提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2010—2011年在甘肃农业大学进行,供试土壤质地为砂土,土壤有机质含量约为0.94 g/kg、速效N 42.30 mg/kg、速效P 15.61 mg/kg、速效K 74.8 mg/kg,土壤为碱性,pH值约为7~8.3。供试品种为甘啤4号、甘啤5号和垦啤6号,设3个播期(4月1日、4月10日和4月15日),播深3~4 cm。每品种每播期种10盆,木质花盆,规格为43.5 cm×19 cm×14 cm,盛土9 504 cm³。折算播量为176.5~200.5 kg/hm²,施纯氮120~180 kg/hm²,五氧化二磷120~240 kg/hm²,氮磷比1.0:1.0~1.3,作为底肥一次性施足。

甘肃农业大学位于黄河上游,北纬36°03',东经103°49',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。

1.2 测定项目

每品种每播期选长势相同的大麦10株挂牌标记。从出苗期到灌浆期定点定株观测,每2 d测量1次主茎的节间长度和粗度,在节间伸长速度较快的时期,如拔节期,每1 d测量1次主茎的节间长度和节间粗度。节间长度测量用皮尺测量,节间粗度用游

收稿日期:2011-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61164001);甘肃省干旱生境作物学重点实验室开放基金课题(1102-11)和甘肃省教育厅高等学校科研计划项目(1102-07)资助

作者简介:李红岭(1986—),女,河北邢台人,硕士生,主要研究方向是工程检测与智能控制技术。E-mail:lihongling1986815@163.com。

通讯作者:高晓阳(1962—),男,甘肃兰州人,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。

标卡尺测量,测量部位为节间最粗处,即每节间中部。

1.3 建模方法

依据分析试验数据,探明生理发育时间(PDT)与大麦茎秆生长的关系,建立大麦茎秆生长动态模型所需的量化关系。资料研究^[5]表明与生物生长的Logistic方程相比,Richards方程更具有可塑性,被认为是现今最能适应动植物生长分析的方程。本试验以生理发育日为步长,运用Richards方程构建大麦茎秆生长的动态模型,并采用国际常用方法根均方差RMSE来对模型进行检验,分析模拟值与观测值之间的符合情况。Richards表达式^[8]和RMSE表达式^[9]分别如下:

$$Y = \frac{A}{(1 + Be^{-kt})^m} \quad (1)$$

式中, A 是累积生长的饱和值或称之为生物学上限; B 是生长初始值参数; k 是生长速率参数; m 是异速生长参数。

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

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 模型的假设与描述

2.1.1 节间伸长模型的描述 依据试验数据和参考文献^[10-13],所选大麦品种地上茎节为5节,节间伸长开始于内外颖分化期(生理拔节期),结束于灌浆期,经历的时间约为12个生长日。各节间生长具有一定顺序性和重叠性,先是基部第一节开始伸长,其余各节自下而上依次伸长。基部节间长度较短,穗下节长。各节间伸长的动态模型如下:

$$INL(PDT)_n = \frac{INL_{maxn}}{(1 + b_n e^{-k_n(PDT - (6.1 + 2(n-1)))})^m} \quad (3)$$

$n = 1, 2, 3, 4, 5$

式中, $INL(PDT)_n$ 为大麦在某一生理发育时刻第 n 节的节间长度; PDT 为生理发育时间^[14],取值范围在 $6.1 + 2(n-1) \sim 18.1 + 2(n-1)$ 之间,其中6.1为大麦生长发育到内外颖分化期时的生理发育时间, INL_{maxn} 为大麦第 n 节间长度的最大值,如表1所示,可视为遗传参数。 b_n, k_n, m 均是模型参数,根据所测试验数据和文献资料^[15-16],用EXCEL拟合方程来对其进行确定,其中 m 在本方程中可视为常量0.4190, b_n, k_n 如表2所示。

表1 3个大麦品种节间长度和粗度的最大值(cm)

Table 1 Maximal value of internode length and thickness in 3 barley genotypes

节间 Internode	节间长度 Internode length			节间粗度 Internode thickness		
	甘啤4号 Ganpi 4	甘啤5号 Ganpi 5	垦啤6号 Kenpi 6	甘啤4号 Ganpi 4	甘啤5号 Ganpi 5	垦啤6号 Kenpi 6
第1 1st	5.60	5.81	6.21	0.352	0.381	0.420
第2 2nd	8.98	9.20	9.34	0.441	0.452	0.483
第3 3rd	10.51	10.83	11.90	0.485	0.510	0.523
第4 4th	12.06	12.51	13.41	0.348	0.381	0.395
第5 5th	24.10	24.81	25.40	0.251	0.253	0.261

表2 3个大麦品种节间伸长的模型参数值

Table 2 Model parameter values of internode growth in 3 barley genotypes

节间 Internode	甘啤4号 Ganpi 4		甘啤5号 Ganpi 5		垦啤6号 Kenpi 6	
	$b_n(10^7)$	k_n	$b_n(10^7)$	k_n	$b_n(10^7)$	k_n
第1 1st	1.5	2.2	1.7	2.3	2.0	2.3
第2 2nd	2.2	2.3	2.3	2.3	2.6	2.3
第3 3rd	2.6	2.3	2.9	2.3	3.0	2.3
第4 4th	1.4	2.2	1.7	2.3	1.8	2.3
第5 5th	7.9	2.1	8.0	2.1	8.5	2.2

节间长度不同,各节间粗度先增加,再减少,最大值在第三节间。各节间增粗的动态模型如下:

$$INT(PDT)_n = \frac{INT_{maxn}}{(1 + b_n e^{-k_n(PDT - (6.1 + 2(n-1)))})^m} \quad (4)$$

$n = 1, 2, 3, 4, 5$

式中, $INT(PDT)_n$ 是大麦在某一生理发育时刻第 n 节的节间粗度; PDT 为生理发育时间,取值范围在 $6.1 + 2(n-1) \sim 18.1 + 2(n-1)$ 之间,其中6.1为大麦生长发育到内外颖分化期时的生理发育时间; INT_{maxn} 是大麦第 n 节间粗度的最大值,如表1所示,可视为遗传参数。 b_n, k_n, m 均是模型参数,根据所测试验数据和文献资料^[15-16],用EXCEL拟合方程来对其进行确定,其中 m 在本方程中可视为常量

0.4507, b_n, k_n 如表 3 所示。

表 3 3 个品种大麦节间增粗的模型参数值
Table 3 Model parameter values of internode thickness in 3 barley genotypes

节间 Internode	甘啤 4 号 Ganpi 4		甘啤 5 号 Ganpi 5		星啤 6 号 Kenpi 6	
	$b_n(10^7)$	k_n	$b_n(10^7)$	k_n	$b_n(10^7)$	k_n
第 1 1st	5.2	3.7	5.2	3.8	5.3	3.9
第 2 2nd	5.7	4.5	5.7	4.5	5.8	4.6
第 3 3rd	5.9	4.7	5.9	4.8	6.0	5.0
第 4 4th	6.0	5.0	6.1	5.0	6.2	5.2
第 5 5th	6.8	6.1	6.8	6.2	6.9	6.2

表 4 模型检验 RMSE 值(cm)
Table 4 The root mean square errors of the validated model

播期(M-d) Sowing date	节间长度 Internode length			节间粗度 Internode thickness		
	甘啤 4 号 Ganpi 4	甘啤 5 号 Ganpi 5	星啤 6 号 Kenpi 6	甘啤 4 号 Ganpi 4	甘啤 5 号 Ganpi 5	星啤 6 号 Kenpi 6
04-01	0.81	1.04	1.14	0.030	0.031	0.034
04-10	0.37	0.98	1.62	0.026	0.011	0.023
04-15	0.72	1.27	1.17	0.026	0.030	0.022

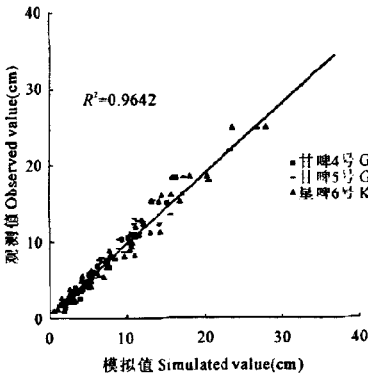


图 1 不同品种不同播期节间长
模拟值与观测值的比较

Fig.1 Comparison of simulated with observed value for internode length of various sowing dates and genotypes

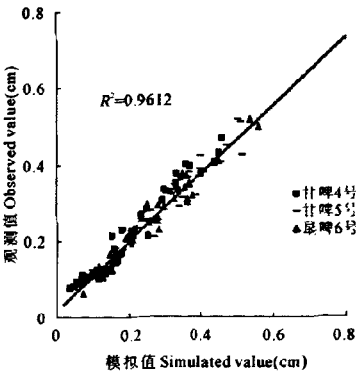


图 2 不同品种不同播期节间粗度
模拟值与观测值的比较

Fig.2 Comparison of simulated with observed value for internode thickness of various sowing dates and genotypes

3 讨论

20 世纪 80 年代起,随着生物学家 Lindelunay-er^[17]提出 L 系统的应用使得作物形态变化动态的模拟模型成为虚拟作物研究中的关键技术,随着计算机信息技术和数字农业的发展,作物形态结构模拟与可视化研究也将变得更加迫切和便利。在实际大麦生长模拟模型研究基础上,构建基于形态模型的

2.1.3 模型的检验 大麦各节间生长可分为渐增阶段、快增阶段和缓增阶段,因此分别选取不同品种不同播期具有代表 3 个生长阶段的 3 个观测日数据对模型进行检验。根据试验数据采用均方根差(RMSE)分别对大麦节间伸长模型和节间增粗模型进行检验,如表 4,其模拟值与观测值分别做 1:1 关系图,如图 1 和图 2 所示。结果表明,模型对大麦的不同品种不同播期节间长度模拟值的 RMSE 范围在 0.37 ~ 1.62 cm 之间,节间粗度的 RMSE 范围在 0.011 ~ 0.034 cm 之间。因此,本模型对大麦不同品种不同播期节间长度和节间粗度有很好的预测性。

RMSE 范围在 0.37 ~ 1.62 cm 之间, 节间粗度的 RMSE 范围在 0.011 ~ 0.034 cm 之间。说明本模型对大麦的不同品种不同播期节间长度和节间粗度有很好的预测性, 能够较好地拟合茎秆生长动态, 符合茎秆生长的生物学规律, 具有一定的生物学意义。由于本试验为盆栽实验, 其生长环境较大田试验有一定差距, 因此模型的预测性和适用性还有待于在更大范围内进一步研究和检验。

4 结 论

通过对甘肃大麦的实际观测与检验, 以生理发育日为时间步长, 表明 Richards 方程可较好模拟试验栽培条件下甘肃大麦茎秆生长及增粗的动态变化过程。该模型对大麦茎秆长度和粗度模拟精度高, 预测性较好。

参 考 文 献:

- [1] De Wit C T. Photosynthesis of leaf canopies [C]//Agricultural Research Report. Wageningen: Pudoc, 1965.
- [2] Duncan W G, Loomis R S, Williams W A. et al. A model for simulating photosynthesis in plant communities [J]. *Hilgardia*, 1967, 38: 181-205.
- [3] 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.
- [4] 谭子辉. 小麦植株形态建成的模拟模型研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [5] 常丽英. 水稻植株形态建成的模拟模型研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 邢黎峰, 孙明高, 王元军. 生物生长的 Richards 模型 [J]. *生物数学学报*, 1998, 13(3): 348-353.
- [9] Kazuhiko Kobayashi, Moin Us Salam. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components [J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 345-352.
- [10] 马得泉. 甘肃大麦研究与实践 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2003: 7-10.
- [11] 王效宗, 潘永东, 王小平, 等. 啤酒大麦新品种甘啤 4 号特征特性及栽培技术要点 [J]. *大麦科学*, 2004, (3): 34-35.
- [12] 包奇军, 潘永东, 张华瑞, 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.
- [13] 张想平, 何庆祥, 张 京, 等. 优质高产啤酒大麦新品种—墨啤 6 号 [J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(5): 990.
- [14] 徐寿军, 顾小莉, 庄恒扬, 等. 大麦顶端发育和物候期的模拟 [J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(3): 123-127.
- [15] 贺晓鹏, 贺希华, 宋昌兰. 用 Excel 拟合 Richards 方程 [J]. *计算机与农业*, 1998, (3): 16-19.
- [16] 胡 亮. 非线性拟合的初值问题 [J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2003, (1): 37-39.
- [17] Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interactions in development [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 18: 280-315.
- [18] 黄金堂. 二棱大麦茎秆性状与抗倒性关系的研究 [J]. *麦类作物学报*, 2004, 24(3): 49-52.
- [19] 张卫星, 朱德峰, 林贤青, 等. 干旱胁迫对不同穗型超级稻品种产量及穗部性状的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 255-260.
- [20] 卢良恕. 中国大麦学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 295-347.
- [21] 胡利平, 裴古斌, 姚延辉, 等. 天水苹果发育模拟模型研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 237-242.

Simulation models of internode dynamic growth in barley

LI Hong-ling¹, GAO Xiao-yang^{1,2}, ZHANG Ming-yan¹, YANG Zhan-feng¹, MAO Hong-yu¹, YANG Qian¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on the analysis of different barley varieties in Gansu, using the Richard equation, this article presents a dynamic simulation of internode elongation and thickening process at physiological development time (PDT). The dynamic models were validated in various sowing dates and different genotypes of barley in Gansu. Experimental results showed that the ranges of the root mean square errors (RMSE) of internode length in various sowing dates and different genotypes of barley were 0.37 ~ 1.62 cm, and that of internode thickness were 0.011 ~ 0.034 cm. The two simulating models showed separately good correlation and predictability.

Keywords: barley; Richards equation; internode; morphogenesis