

吕小波, 严定春, 朱练峰, 等. 不同类型水稻植株形态的模拟[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 9-15.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.01.002

不同类型水稻植株形态的模拟

吕小波¹, 严定春¹, 朱练峰², 金千瑜²

(1. 中国农业科学院农业信息研究所/农业部农业信息服务技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国水稻研究所, 浙江 杭州 310006)

摘要: 在3个不同土壤水分含量下, 以中浙优1号、甬优9号、中旱221以及中旱3号4个不同类型的水稻品种为试验材料, 定量描述了水稻叶龄、叶长、叶宽、节间长度、节间粗和株高随生育进程和环境条件的变化规律, 构建了基于生长过程的水稻形态指标变化动态模拟模型, 并利用水稻田间试验资料对所建模型进行了测试和检验。结果显示, 水稻叶龄、前半段节位最大叶长、后半段节位最大叶长、最大叶宽、节间长度、节间粗和株高的均方根误差(RMSE)分别为0.553、5.694 cm、6.136 cm、0.301 cm、2.353 cm、0.328 mm、8.489 cm。表明所构建的模型对水稻植株形态指标具有较好的预测性。

关键词: 水稻; 形态指标; 土壤水分含量; 动态模拟模型

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)01-0009-07

Simulation of plant morphology of different rice cultivars

LÜ Xiao-bo¹, YAN Ding-chun¹, ZHU Lian-feng², JIN Qian-yu²

(1. Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agri-information Service Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: To develop the dynamic simulation models of morphological character based on growth process in rice, the field experiments with 3 soil water contents were carried out on 4 rice cultivars, Zhongzheyu 1, Yongyou 9, Zhonghan 221, and Zhonghan 3, and the growth and development of rice leaf age, leaf length, leaf width, internode length, internode width, and plant height were analyzed. The models were validated with independent field experiment data. The root mean square errors (RMSEs) of leaf age, max leaf length (node ≤ 11), leaf length (node ≥ 12), max leaf width, internode length, internode width and plant height were 0.553, 5.694 cm, 6.136 cm, 0.301 cm, 2.353 cm, 0.328 mm, 8.489 cm, indicating that these models had good performance in predicting the rice plant morphological character.

Key words: rice; morphological character; water content in soil; dynamic simulation model

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101084、31270035); 教育部留学回国人员启动基金项目[教外司留(2011)1139号]; 中国农业科学院科技创新工程基金项目(CAAS-ASTIP-2015-A11)

作者简介: 吕小波(1989-), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为农业信息技术。(Tel) 13301370884

通讯作者: 严定春, (Tel) 010-82109660; (E-mail) yandingchun@caas.cn

中国口粮消费量约占粮食消费量的55%, 口粮消费结构中稻谷约占60%^[1-2]。因此, 粮食安全的关键是口粮, 口粮的主体是水稻, 水稻是粮食安全的关键^[3]。中国稻作技术水平的不断提高取决于高产育种和栽培技术的发展^[4]。作物生长模拟模型是对作物生长发育过程及其与环境条件、栽

培管理技术的动态关系进行定量描述和预测^[5-7],基本可以实现“数字可视作物”和“数字生理作物”^[8-10]。许多学者分析了水稻的结构特征,但大多数研究针对特定的品种和适宜的栽培水平,而难以反映品种类型和环境条件的变化对水稻表型参数的动态影响。为此,本研究以不同类型的水稻品种为试验材料,通过连续观察并定量分析不同土壤水分含量下叶龄、叶长、叶宽、节间长度、节间宽度、株高等形态指标随生育进程和环境条件的变化规律,构建水稻形态指标生长特征的动态模拟模型,以期开展基于形态特征的水稻高产栽培株型调控、耐旱品种选育和根据形态特征进行水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2012 年和 2013 年试验在浙江省富阳市黄田畝中国水稻研究所试验基地(39°4'49"N, 119°56'11"E)进行。供试材料为中浙优 1 号、甬优 9 号、中旱 221 以及中旱 3 号。2012 年水稻播种期为 5 月 21 日,当日平均温度为 21.85℃;分蘖期为 6 月 15 日,当日平均温度为 27.95℃;抽穗期为 8 月 19 日,当日平均温度为 30.55℃;成熟期为 10 月 30 日,当日平均温度为 13.2℃。2013 年播种期为 5 月 17 日,当日平均温度为 20.90℃;拔节期为 7 月 10 日,当日平均温度为 32.05℃;抽穗期为 8 月 23 日,当日平均温度为 29.55℃;齐穗期为 9 月 2 日,当日平均温度为 23.60℃。试验田前作冬闲,土壤属青紫泥,肥力均匀,土壤有机质质量分数为 43.0 g/kg,全氮质量分数为 2.1 g/kg,速效氮质量分数为 45.0 mg/kg,速效磷质量分数为 14.6 mg/kg,速效钾质量分数为 109.9 mg/kg,pH 值为 5.3。试验设 3 种土壤水分处理,分别为浅水层(0 kPa)、轻度土壤水分胁迫(-20 kPa)和中度土壤水分胁迫(-40 kPa),水分处理自移栽后 8 d 开始至成熟期结束。采用真空表式负压计(中国科学院南京土壤研究所制造)监测土壤水分含量,负压计陶土头底部置于 15 cm 土层处,每天 6:00-7:00、11:00-12:00、16:00-17:00 记录负压计读数,当读数低于设计值时,适度浇水。网室上覆盖透明塑料膜挡雨。试验采用裂区设计,水分处理为主区,品种为副区,每处理 3 次重复,小区(副区)面积 2 m²。移栽后每丛插 1 株

苗,中浙优 1 号移栽规格 30 cm×20 cm,甬优 9 号移栽规格 30 cm×17 cm,中旱 211 和中旱 3 号移栽规格为 20 cm×17 cm。各处理施用 N 144 kg/hm²、P₂O₅ 60 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²。氮肥分 3 次施用,基肥(移栽前 1 d)、分蘖肥(移栽后 7 d)和穗肥(幼穗分化第 3 期)比例分别为 60%、30%和 10%;磷肥全部作基肥施用;钾肥均分为 2 份,分别作基肥和穗肥施用。具体施肥方法如下:基肥,移栽前 1 d 施复合肥(N、P、K 含量均为 15%)600 kg/hm²;分蘖肥,于移栽后第 7 d 施用尿素 135 kg/hm²;穗肥,在幼穗分化第 3 期施用尿素 58 kg/hm²、氯化钾(K 含量 60%)50 kg/hm²。病虫草害防治及其他田间管理同当地丰产田。

2009 年试验在美国德克萨斯州博蒙特市(30°5'N, 94°08'E)进行。供试材料为 Banks、IR68886B 以及 Banks × IR68886A,采用常规方法种植水稻。试验采用分区设计,每个基因型水稻设有 3 个区,每一区被隔成 9 个小区间,在每一个小区间里又有 10 小块。

1.2 水稻形态指标的测定

每个品种每个水分处理,定点选取 9 穴水稻植株进行连续性测定(每个重复 3 穴),测定主茎每张新生叶片及顶三叶(如有)长度,新生叶片是指叶尖露出叶鞘的叶片。分蘖期以前测定间隔时间为 2 d,幼穗分化始期至抽穗期测定间隔时间为 3 d,灌浆期至成熟期测定间隔时间为 4 d。

齐穗后 20 d 每小区选取生长一致的代表性植株 3 丛,用于测定叶片长度、叶片宽度、节间长度和节间粗度。成熟期在田间测定植株高度,每处理每个重复调查 5 丛。

1.3 数据分析

取 3 次重复测量的平均值,借助数理统计分析方法,建立描述水稻形态指标的生长过程变化规律及其与环境因子关系的数学表达式,同时采用最小二乘法和试错法等确定模型的基本参数。模型检验采用实测值与模拟值之间的均方根误差(Root mean square error, RMSE)^[11]进行,并绘制实测值与模拟值之间的 1:1 关系图,以直观地展示模型的拟合度和可靠性。RMSE 值越小,表明模拟值与实测值的一致性越好,模型的模拟结果越准确、可靠。RMSE 值的计算公式如下,式中 OBS_i 为实测值, SIM_i 为模拟值, n 为样本容量。

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

2 模型的建立

2.1 叶龄模型

由图 1 可以看出,叶龄随着累积生长度日(GDD)的变化呈对数函数的关系,因此叶龄的变化可以描述如下: $LA(GDD) = LAa \times \ln GDD - LAB$,上式中GDD为逐日累加生长度日,指在实际环境条件下,完成某一生育阶段所经历的累积有效积温值($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$),计算公式为 $GDD = \sum (DAAT - 10)$,DAAT为日平均温度,10为水稻生长的基点温度^[12];LA(GDD)为某积温时刻的水稻叶龄;LAa为水稻生长过程的GDD对叶龄的影响率;LAB为水稻生理特性和品种类型对叶龄的影响量。通过拟合可得 $LAa = 5.8919$, $LAB = 29.1350$ 。由决定系数 R^2 为0.9965可判断方程拟合程度较好。

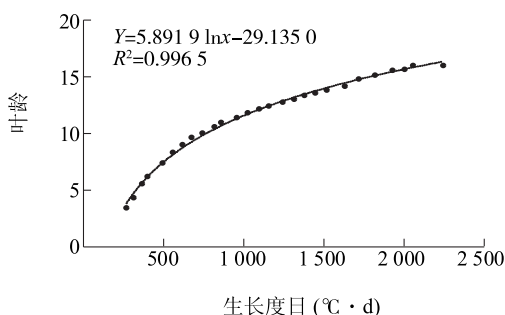


图1 水稻叶龄与累积生长度日(GDD)的动态图

Fig.1 Dynamic graph of leaf age and growing degree days (GDD) of rice

2.2 叶长模型

由图2、图3可以看出水稻平均最大叶长随着前半段节位的变化呈线性关系,因此可以描述如下: $LL(FNode) = LLa \times FNode + LLb$,式中, $LL(FNode)$ 表示水稻最大叶长(cm),FNode表示前半段节位,LLa为水稻节位对最大叶长的影响率,LLb为水稻生理特性和品种类型对最大叶长的影响量。通过计算可得LLa、LLb分别为5.7186和-5.3882,LLa为正数说明水稻叶长随前半段节位的变化呈现增大的趋势。决定系数 R^2 为0.9849,说明水稻平均最大叶长与节位之间有较强的线性关系。

由图4可以看出水稻平均最大叶长随着后半

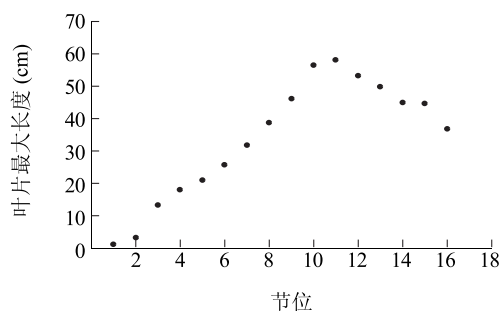


图2 水稻最大叶长随节位变化动态图

Fig.2 Dynamic graph of max leaf length and node of rice

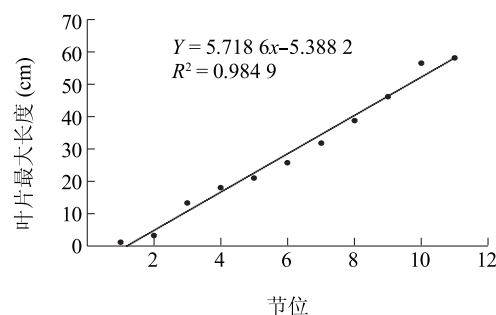


图3 水稻最大叶长与前半段节位的动态图

Fig.3 Dynamic graph of max leaf length and the upper half node of rice

段节位的变化呈线性关系,可以描述如下: $LL(LNode) = LLc \times LNode + LLd$,式中, $LL(LNode)$ 表示水稻最大叶长(cm),LNode表示后半段节位,LLc为水稻节位对最大叶长的影响率,LLd为水稻生理特性和品种类型对最大叶长的影响量。通过计算可得LLc、LLd分别为-3.7937和99.0410。LLc为负数,说明水稻叶长随后半段节位的变化呈现减小的趋势。决定系数 R^2 为0.9367,说明水稻最大叶长与后半段节位之间有较强的线性关系。

2.3 叶宽模型

由图5可以看出水稻最大叶宽随着节位的变化呈线性关系,可以描述如下: $LW = LWa \times Node + LWb$,式中,LW表示水稻最大叶宽(cm),Node表示节位,LWa为水稻节位对最大叶宽的影响率,LWb为水稻生理特性和品种类型对最大叶宽的影响量。通过计算可得,LWa、LWb分别为0.1838、-0.2293。LWa为正数,说明水稻叶宽随节位的变化呈现增大的趋势。决定系数 R^2 为0.9708,说明该方程拟合度较高。

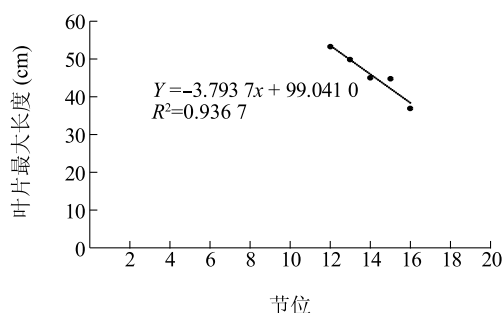


图4 水稻最大叶长与后半段节位的动态图

Fig.4 Dynamic graph of max leaf length and the lower half node of rice

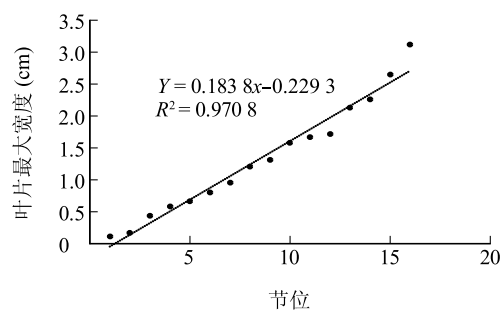


图5 水稻最大叶宽与节位的动态图

Fig.5 Dynamic graph of max leaf width and node of rice

2.4 节间长度和粗度模型

由图6可以看出,水稻节间长度随节间的位置变化呈幂指数的关系,可以描述如下: $IL(INode) = a \times INode^2 + b \times INode + c$, 式中, $IL(INode)$ 表示水稻节间长度(cm), $INode$ 表示节位, a 、 b 、 c 为方程的系数。通过计算可得, a 、 b 、 c 分别为 0.777 0、-1.583 2、2.327 2。 a 为正数, 表示水稻节间长度随节间的位置变化呈现增大的趋势; 由 b 、 c 值可知, 当节间在 1 处时, 水稻节间长度最小。此外由决定系数 R^2 为 0.985 1 可知该方程拟合度较高。

由图7可以看出,水稻节间粗度随节位的变化呈线性关系,可以描述如下: $INW(Node) = INWa \times Node + INWb$, 式中, $INW(Node)$ 表示水稻节间粗度(mm), $Node$ 表示节位, $INWa$ 表示水稻节间位置对节间粗度的影响率, $INWb$ 为水稻生理特性和品种类型对节间粗度的影响量。通过计算可得 $INWa$ 、 $INWb$ 分别为 -0.710 8、7.561 1。 $INWa$ 为负数表明水稻节间粗度随节位的变化呈现减小的趋势。决定系数 R^2 为 0.980 7, 说明该方程拟合度较高。

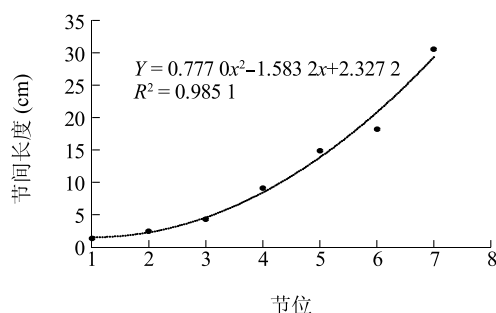


图6 水稻节间长度与节位的动态图

Fig.6 Dynamic graph of internode length and internode of rice

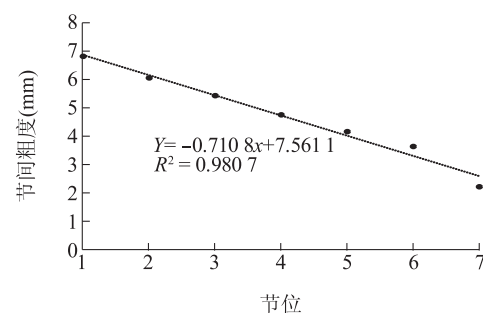


图7 水稻节间粗度与节位的动态图

Fig.7 Dynamic graph of internode width and node of rice

2.5 株高模型

由图8可以看出,水稻株高随 GDD 的变化呈对数函数的关系,可描述如下: $PH(GDD) = PHa \times \ln GDD + PHb$, 式中, $PH(GDD)$ 为特定 GDD 时刻的水稻株高(cm), PHa 表示水稻生长过程中 GDD 对株高的影响率, PHb 为水稻栽培环境对株高的影响量。通过计算可得 PHa 、 PHb 分别为 43.267、-213.500。决定系数 R^2 为 0.908 9, 说明该方程拟合度较高。

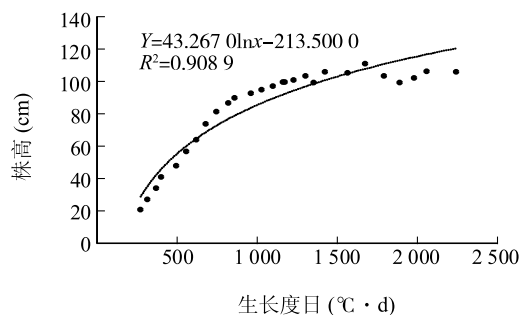


图8 水稻株高与累积生长度日(GDD)的动态图

Fig.8 Dynamic graph of plant height and GDD of rice

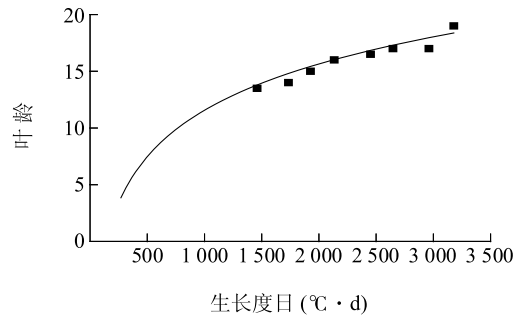
3 模型检验

利用 2009 年在美国德克萨斯州的试验数据,对上述模型进行测试和检验,并利用 Origin Lab 公司的 Origin Pro 7.5 软件绘制模拟值与观测值的 1:1 关系图。

图 9 散点图为水稻叶龄随 GDD 变化的动态图,图中的连线为模拟曲线, $n = 8$, $RSME = 0.553$,可以看出模拟值与实测值吻合得较好。图 9 显示随着水稻所需生长积温的不断积累,其叶龄由苗期开始不断增长,直至成熟期之后增长便趋于平缓。

图 10 散点图为水稻叶片长度随节位变化的动态图,图中的连线为模拟曲线,叶片长度随前、后半

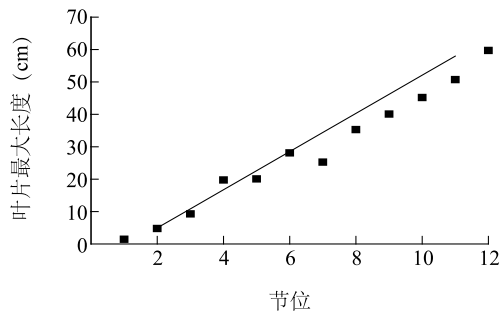
段节位变化的 $RMSE$ 值分别为 5.694 cm 和 6.136 cm,后半段节位的预测误差稍大。



■为 2009 年实测值,曲线为 2012 和 2013 年模拟值。

图 9 水稻叶龄实测值和模拟值的比较

Fig.9 Comparison between simulated and measured leaf age of rice



■为 2009 年水稻叶龄实测值,曲线为 2012 和 2013 年水稻叶龄模拟值。

图 10 水稻叶长随前半段节位和后半段节位变化的实测值和模拟值比较

Fig.10 Comparison between simulated and measured leaf length with the upper half and lower half nodes of rice

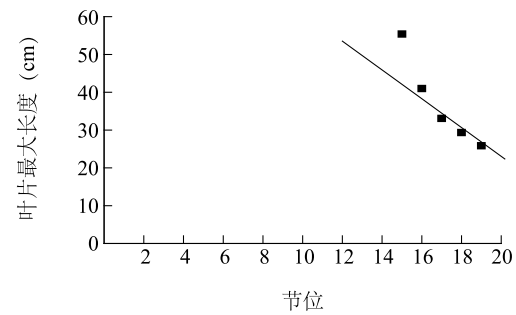
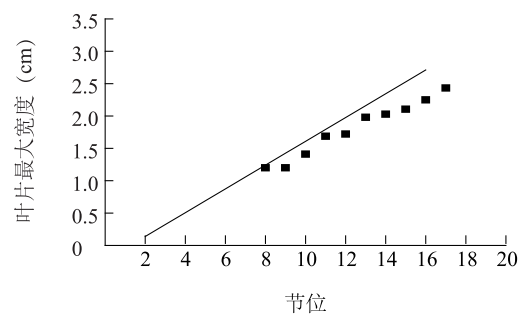


图 11 散点图为水稻叶片最大宽度动态图,图中连线为模拟曲线, $RSME$ 值为 0.301 cm。图 11 中水稻叶片最大宽度随着节位变化增长较多,可能因为拔节后长出的叶片特别是剑叶,其叶长显著变短,而叶宽仍在增加^[13]。

图 12、图 13 散点图为水稻节间的动态变化图,图中的连线为模拟曲线,节间长度和粗度随节位变化的 $RSME$ 值分别为 2.353 cm、0.328 mm,其中水稻节间长度预测误差稍大。黄艳玲等^[14]的研究结果表明,节间长度与水稻倒伏指数呈显著正相关,节间粗度则相反。由图 12、图 13 可知,随着节位升高,水稻节间长度逐渐增加而节间粗度则相反。

图 14 散点图为水稻株高动态图,图中的连线为模拟曲线, $n = 18$, $RMSE = 8.489$ cm,可以看出模拟值和实测值吻合较好。大量研究结果表明植株过高

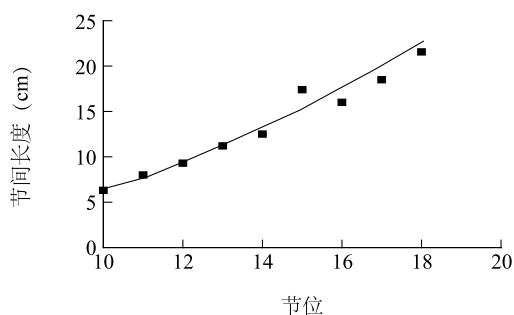


■为 2009 年实测值,曲线为 2012 和 2013 年模拟值。

图 11 水稻叶片最大宽度实测值和模拟值比较

Fig.11 Comparison between simulated and measured max leaf width of rice

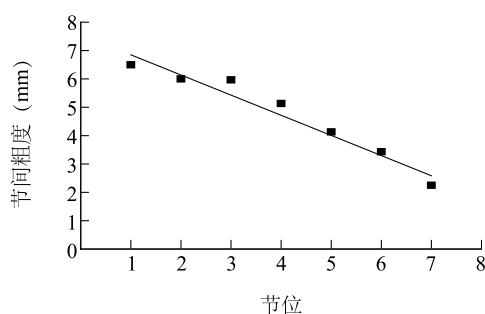
是引起倒伏的主要原因^[15-18],因此单从育种方面考虑,育种上应选择株高较矮的植株。但杨守仁等^[19]



■为 2009 年实测值,曲线为 2012 和 2013 年模拟值。

图 12 水稻节间长度实测值和模拟值比较

Fig.12 Comparison between simulated and measured internode length of rice



■为 2009 年实测值,曲线为 2012 和 2013 年模拟值。

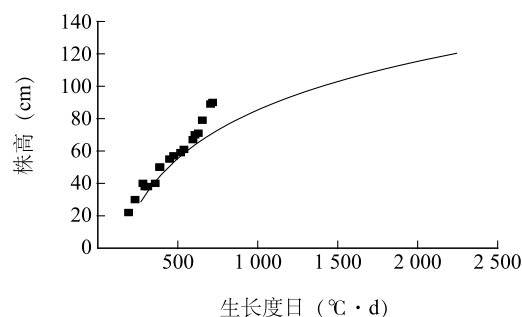
图 13 水稻节间宽度实测值和模拟值比较

Fig.13 Comparison between simulated and measured internode width of rice

的研究结果表明,从栽培角度看,植株过矮,会造成生长量不足,适当增加株高,可以降低叶面积密度(叶面积指数与株高的比值),有利于 CO_2 扩散和中下部叶片的受光,对生长量有利。图 14 中显示株高随着积温值的累积不断增高,但是在某一积温值后趋于平稳,说明适宜的株高有利于生长量的提高。

4 讨论

国内外对作物形态模型的研究较多。国外较为典型的有 Lindenmayer^[20] 开发的 L 系统,Chen 等^[21]、Watanabe 等^[22]、Takenaka^[23] 构建的杨树、水稻等植物形态模型。在国内,陈国庆^[24]、石春林等^[25]、郭新宇等^[26] 构建了小麦、玉米、水稻等作物叶片、叶鞘、节间及根系的形态模型。但由于禾谷类作物形态特征的复杂性、多变性以及形态指标动态数值的难获取性,已有研究一般都为静态模型,而预测形态建成过程的广适性动态模拟模型较少。本研



■为 2009 年实测值,曲线为 2012 和 2013 年模拟值。

图 14 水稻株高实测值和模拟值比较

Fig.14 Comparison between simulated and measured plant height of rice

究在上述学者研究的基础上,深入分析了水稻形态指标与品种类型以及生态环境的定量关系,建立了较为具有普适性的水稻形态指标适宜动态模型,并利用已有资料对所建模型进行了检验,结果表明,模型较好地体现了不同品种和不同水分条件下水稻形态指标的变化情况,因而模型具备较好的解释性和可靠性。

提高产量始终是水稻育种的主要目标,因为优质、多抗等性状只有在一定的产量基础上才具有实际意义^[27]。然而现有模型大多基于适宜栽培水平和特定生态环境下单一影响因子的研究。为此,本研究对不同品种水稻的形态指标进行了系统分析和定量模拟,较好地体现了不同品种和不同栽培条件下影响水稻产量因素的形态指标动态变化情况。当然本研究仅讨论了水稻产量因素的部分影响因子,而更完整意义上的水稻虚拟生长,还需结合水稻植株形态指标的相互联系以及各个指标的空间形态等内容,这些都有待于进一步的深入研究。此外本研究只是对不同土壤水分环境下不同水稻品种生长过程进行分析,而水稻生长过程还会受到其他环境条件的影响,如施肥量、病虫害以及气候等,因此今后将进一步拓展模型在不同条件下的适宜性。

参考文献:

- [1] 王明华.“十一五”时期我国粮食需求总量预测[J].调研世界,2006(4):16-18,42.
- [2] 李波,张俊彪,李海鹏.我国中长期粮食需求分析及预测[J].中国稻米,2008(3):23-25.
- [3] 方福平,程式华.论中国水稻生产能力[J].中国水稻科学,2009,23(6):559-566.

- [4] 鲁伟林,段仁周,余新春,等.不同施氮量对水稻株型特征和穗部性状的影响[J].河南农业科学,2012,41(1):40-44.
- [5] 陈昱利,张海军,葛道阔,等.小麦籽粒灌浆速率的模拟[J].江苏农业学报,2014,30(3):480-485.
- [6] 张文宇,张伟欣,葛道阔,等.基于生物量的油菜叶曲线模型[J].江苏农业学报,2014,30(6):1259-1266.
- [7] 董京铭,张耀鸿,田思颢,等.夜间模拟增温对大豆生长及产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(4):112-115.
- [8] 薛林,郑国清,戴廷波,等.作物生长模拟模型研究进展[J].河南农业科学,2011,40(3):19-24.
- [9] 赵春江,陆声链,郭新宇,等.数字植物及其技术体系探讨[J].中国农业科学,2010,43(10):2023-2030.
- [10] BINGHAM I J, WU L H. Simulation of wheat growth using the 3D root architecture model SPACSYS: validation and sensitivity analysis [J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34 (3): 181-189.
- [11] SNYDER R L, SPANO D, CESARACCIO C, et al. Determining degree-day thresholds from field observations [J]. International Journal of Biometeorology, 1999, 42(4):177-182.
- [12] 高亮之,李林.水稻气象生态[M].北京:农业出版社,1992.
- [13] 常丽英,顾东祥,张文宇,等.水稻叶片伸长过程的模拟模型[J].作物学报,2008,34(2):311-317.
- [14] 黄艳玲,石英尧,申广勤,等.水稻茎秆性状与抗倒伏及产量因子的关系[J].中国农学通报,2008,24(4):203-206.
- [15] AMANO T, ZHU Q S, WANG Y L. Case studies on high yields of paddy rice in Jiangsu Province, China II analysis of characters related to lodging [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1993, 62 (2):275-281.
- [16] 张晋贤,阮冠,梁社坚,等.水稻茎秆抗倒伏研究[J].安徽农业科学,2012,40(23):11664-11667,11728.
- [17] 杨惠杰,杨仁崔,李义珍,等.水稻茎秆性状与抗倒性的关系[J].福建农业学报,2000,15(2):1-7.
- [18] 李旭,毛艇,付立东,等.滨海稻区不同穗型梗稻分期收获抗倒伏性状比较[J].江苏农业科学,2014,42(1):66-68.
- [19] 杨守仁,张龙步,陈温福,等.水稻超高产育种的理论与方法[J].中国水稻科学,1996,10(2):115-120.
- [20] LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs [J]. Journal of Theoretical Biology, 1968, 18(3):280-299.
- [21] CHEN S G, IMPENS I, CEULEMANS R. Measurement of gap fraction of fractal generated canopies using digitalized image analysis [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1993, 65 (3): 245-259.
- [22] WATANABE T, ROOM P M, HANAN J S. Virtual rice: simulating the development of plant architecture [J]. International Rice Research Notes, 2012, 26 (2):60-62.
- [23] TAKENAKA A. A simulation model of tree architecture development based on growth response to local light environment [J]. Journal of Plant Research, 1994, 107(3):321-330.
- [24] 陈国庆.小麦形态建成模拟及可视化研究[D].济南:山东农业大学,2004.
- [25] 石春林,金之庆,曹卫星.水稻植株的虚拟生长[J].江苏农业学报,2006,22(2):105-108.
- [26] 郭新宇,赵春江,刘洋,等.基于生长模型的玉米三维可视化研究[J].农业工程学报,2007,23(3):121-125.
- [27] 高良艳,周鸿飞.水稻产量构成因素与产量的分析[J].辽宁农业科学,2007(1):26-28.

(责任编辑:张震林)