

# 水稻根长动态模拟和生长特性研究

李娟, 章明清, 林琼, 陈子聪, 颜明娟, 孔庆波

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013)

**摘要:** 利用水培和土培试验, 并基于空心菜和莴苣的根长增长模型, 对整个生长周期的水稻根系生长特性进行动态模拟, 结果表明: 7个供试水稻品种的根长增长模型拟合精度均达到统计显著水平, 由根长增长模型可得到根长增长常数、根系最大增长速率和最大根长及其出现的时间等根系生长特性的量化指标。不同晚稻品种间平均的根系生长特性差异不大, 但特优3101品种与其他品种相比有较大的差异。最大根系增长速率在不同品种间的变异系数为7.6%, 时间在播种后2个月左右。土培试验表明, 与不施肥相比, 氮磷钾平衡施肥使根系增长常数提高57.2%, 最大根系增长速率和最大根长则分别提高61.0%和65.4%, 明显促进根系生长和增加根长。

**关键词:** 水稻; 根系生长; 根长增长模型; 动态模拟

中图分类号: S 572

文献标识码: A

## Dynamic models simulating root length and growth characteristics of rice

LI Juan, ZHANG Ming-qing, LIN Qiong, CHEN Zi-cong, YAN Ming-juan, KONG Qing-bo

(Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China)

**Abstract:** Based on the water and soil cultivation experiments on rice and the root growth model of water spinach and lettuce, a model to describe the cycle and characteristics of the root growth of rice was established. Statistical significance of the model for 7 rice varieties was obtained. For instance, the model could predict the root length growth constant, the maximum root growth rate and length, as well as the time for their appearances. The water and soil cultivation experiments showed that all varieties retained a large root system at later stage of growth; no significant difference on root growth characteristics among the late rice varieties, except Teyou 3101; the variation coefficient of the maximum root growth rate among different species was 7.6%; and the time for the maximum root growth was about two months after sowing, suggesting an advantage of topdressing at this time for fertilization efficiency. The soil cultivation experiment showed that the root growth constant could be increased 57.2% by application of a balanced fertilization of nitrogen, phosphorus and potassium, as compared with no fertilization. The maximum root growth rate and root length were increased 61.0% and 65.4%, respectively, showing the apparent effect of the timed fertilization in promoting growth and increasing length of the roots for rice.

**Key words:** rice; root growth; root length growth model; dynamic simulation.

根系性状对水稻生长发育、养分吸收以及产量形成等方面有着极其重要的影响。Weaver<sup>[1]</sup>指出, 要科学地理解作物生产, 就必须全面地认识作物根系发育、根群分布、不同生育时期根系吸收水分和养分的能力, 以及不同环境下根系特性的变化。但长期以来, 由于根系生长环境的不可视性以及测量技术的局限性, 根系研究落后于地上部分的研究。自20世纪80年代以来, 作物根系模拟研究取得一定进展<sup>[2~5]</sup>, 已经可以采用数学模型对根系生长过

程进行定量描述和模拟<sup>[6]</sup>。当前在土—根系统养分运移研究领域, 为使机理模型表达式得以简化和易于求解, 使用的根长增长模型仍然采用最简单的线性或指数模型<sup>[7]</sup>。众所周知, 水稻一生中经历了几个不同的生育期, 各时期的生长特点有显著的差别。由于忽略了不同生育期的影响, 使当前根长模型只能适用于描述短期植物根长动态, 而用于描述一个种植周期则会产生很大误差, 这可能是当前土—根系统养分运移机理模型只能进行短期生物试验

收稿日期: 2009-03-03 初稿; 2009-04-20 修改稿

作者简介: 李娟(1977-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 植物营养与肥料学(E-mail: lj95@163.com)

通讯作者: 章明清(1963-), 男, 研究员(E-mail: zhangmq2001@163.com)

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2007J0253)

验证的重要原因之一。

Mengel<sup>[8]</sup>、冯广龙<sup>[9]</sup>、王绍中<sup>[10]</sup>等人对根长动态变化的研究结果表明, 植物根系生长过程类似“S”型曲线。显然, 线性模型和指数模型不适合描述一个种植周期的作物根系生长实际状况。因此, 为使建立土—根系统养分运移机理模型得以简化和易于求解, 研究和建立可描述一个种植周期的简洁根长增长模型, 对于深入开展相关问题的研究具有重要的理论和实际意义。本文应用水培和土培试验, 研究水稻根系生长特性, 建立基于一个生长周期的水稻根系生长模拟模型, 以期为水稻根长增长特性的定量分析和营养调控技术提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 作物根长增长模型

章明清等人根据作物根系生长的“S”型特征, 建立了空心菜和莴苣根长增长模型<sup>[11]</sup>:

$$\frac{dL}{dt}(t) = l_0 t \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

其中,  $L(t)$  是指在时间  $t$  时的根长 ( $\text{cm} \cdot \text{株}^{-1}$ ),  $dL(t)/dt$  是根长的增长速率 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ ),  $t$  是指植物生长时间 (d), 从播种时开始计算。 $T$  是供试植物最大根长出现时的时间 (d),  $l_0$  是根长的内在增长率 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ ), 简称根长增长常数。

对 (1) 式积分, 得下式:

$$L(t) = \frac{1}{2} l_0 t^2 \left(1 - \frac{2t}{3T}\right) \quad (2)$$

(2) 式即为根长增长模型。从模型可以看出, 从苗期开始的短期试验, 由于起始  $t$  很小,  $1 - 2t/3T$  约等于 1, 这时根长增长就以指数模式显现; 若从较大的  $t$  开始进行短期试验, 这时根长以近似直线方式增长。因此, (2) 式的根长增长模式耦合了当前土—根系统养分运移研究的线性模型和指数模型。

### 1.2 试验设计

1.2.1 试验 1 2006 年选用Ⅱ优 683、宜香优 185、天优航 1 号 3 个晚稻品种, 在福建省农科院土肥所玻璃网室进行水培试验, 营养液采用国际水稻研究所常规营养液配方<sup>[12]</sup>, 每周更换营养液 1 次。水培试验所用塑料桶规格是  $30 \text{ cm} \times 22 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ , 装培养液 10 L, 液面覆盖塑料板, 板上钻 2 洞植稻, 每盆 4 株。每个品种种植 21 盆。

1.2.2 试验 2 2007 年选用连优 6118、闽优 6118、特优 3101 的 3 个晚稻品种进行水培试验,

方法与试验 1 相同。

1.2.3 试验 3 2008 年选用早稻品种闽优 6117 进行土培盆栽试验。在试验前 2 个月, 取 0~20 cm 的耕层灰泥土, 在自然状态下风干。盆栽前破碎土壤, 去除小石头等杂物, 过 3 mm 筛。选择  $25 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的塑料盆, 每盆装土 4.5 kg。试验设 2 个处理, 即: (1) 不施肥 (CK) 和 (2) 施氮磷钾 (NPK) 肥, 施 N 量为  $0.71 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ , 三要素比例为 1:0.67:1; 肥料分别选用化学纯硝酸铵 (N 35%)、磷酸二氢钾 (N 14%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44%) 和氯化钾 (K<sub>2</sub>O 60%)。肥料配成溶液后均匀喷施于每盆土壤中, 然后浇水保持 2~3 cm 的水层。每个处理 21 盆。

### 1.3 取样及测定

移栽前取 200 株秧苗样品, 计算每株秧苗及其根系的平均重量。在水稻的生育期中每隔 15 d 取 1 次样品, 每次 3 盆, 共取样 7 次。吸干水分, 分别称取植株和根系鲜重, 烘干后称其干量。最后一次取样时, 同时测定各处理的籽粒产量。

### 1.4 根长计算及模型建立

水稻根长计算方法为:  $L = W/\pi r^2 d$  ( $L$  为根长,  $W$  为根系鲜重,  $d$  为根系比重,  $r$  为根半径 (取根系平均半径 0.011 cm<sup>[13]</sup>)。根据根长数据, 建立根系增长模型, 用 OriginPro7.0 软件进行参数估计和绘制模拟结果图。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型参数估计及根长生长模拟

根据 2006 年和 2007 年 6 个水稻品种水培试验不同生长时期 ( $t$ ) 的根系鲜重实测结果换算成根长  $L(t)$ , 并建立 (2) 式根长增长模型, 用 OriginPro7.0 软件进行参数估计, 结果见表 1。根长实测值及其模拟结果见图 1 所示。回归分析结果表明, 6 个水稻品种根长的拟合模型中, 复相关系数均达显著水平以上, 说明 (2) 式模型能很好地反映水培条件下水稻全生育期的根长生长动态。

为了验证 (2) 式根长增长模型在土培条件下的可行性, 2008 年进行了同一个水稻品种的 2 个处理的土培盆栽试验。同样根据供试水稻不同生长时期的根系鲜重实测值换算成根长以及对应的生长时间, 用 (2) 式模型进行回归分析, 结果见表 1。2008 年的 2 个回归模型的复相关系数亦达到显著水平, 说明 (2) 式根长增长模型同样能反映土培条件下水稻不同生长阶段的根长动态变化。但从 R<sup>2</sup> 的数据看, 水培试验的拟合精度高于土培试验

结果, 这主要是由于水培试验的水稻根系能够精确测定, 而土培试验中在对根系取样时对根系极易造

成损伤, 精度较差。

表1 (2)式水稻根长增长模型的参数估计结果  
Table 1 Parameter estimations of Model 2 for root growth and length of rice

栽培方式	年度	品种或处理	$l_0$ (cm · d <sup>-1</sup> · 株 <sup>-1</sup> )	T (d)	$R^2$
水培	2006	II优683	26.65	120	0.9365**
		宜香优185	24.88	113	0.9349**
		天优航1号	30.10	116	0.9208**
		连优6118	25.56	122	0.9412**
	2007	闽优6118	23.79	121	0.9786**
		特优3101	26.87	140	0.9604**
土培	2008	CK	17.61	126	0.7302*
		NPK	27.69	129	0.7566*

注:“\*”表示0.05显著水平,“\*\*”表示0.01显著水平。

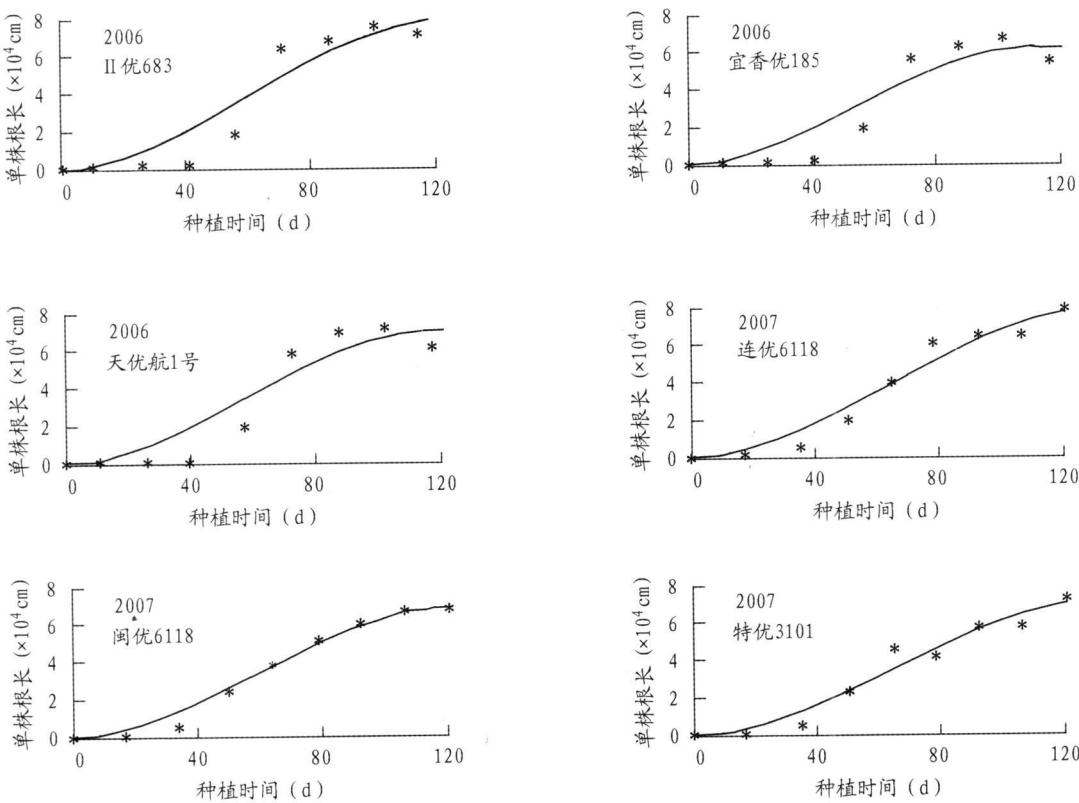


图1 用(2)式模型对6个水稻品种根长增长的模拟  
Fig 1 Simulating root length and growth of 6 rice varieties using Model 2

供试水稻品种的模拟结果表明(图1), 在水稻播种后40 d左右的生长阶段, 根长以类似于指数的形式增长。而在播种后40~90 d的生长阶段则以线性形式增长, 这与当前土壤-根系统养分运移研究采用的线性或指数模型所描述的根长增长模式

相同。但到水稻生长后期, 根系增长会逐渐变缓, 甚至会因作物衰老死亡而降低, 此时, 线性或指数模型将不再适用, 而(2)式模型则能描述水稻生长后期的根长变化动态。

## 2.2 水稻根系生长特性的定量分析

2.2.1 不同水稻品种的根系生长特性 根据(1)式根长增长速率模型, 当  $t = T/2$  时, 根长最大增长速率为  $V_{\max} = l_0 T/4$ 。由(2)式根长增长模型可知, 当  $t = T$  时, 根长达到最大值, 且  $L_{\max} =$

$l_0 T^2/6$ 。由此, 根据表 1 的数据, 可计算供试水稻品种根系最大增长速率、最大根长及其出现时间, 以及根长增长常数  $l_0$  等根系生长特性参数, 计算结果见表 2。

表 2 不同水稻品种的根系生长特性参数

Table 2 Parameters of root growth characteristics of various rice varieties

年度	品种	$l_0$ ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ )	最大根长增长速率 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ )	最大根长增长速率时间 (d)	最大根长 ( $\text{cm} \cdot \text{株}^{-1}$ )	最大根长出现时间 (d)
2006	Ⅱ优 683	26.65	799.5	60	$6.396 \times 10^4$	120
	宜香优 185	24.88	702.9	57	$5.295 \times 10^4$	113
	天优航 1 号	30.10	872.9	58	$6.750 \times 10^4$	116
2007	连优 6118	25.56	777.2	61	$6.301 \times 10^4$	122
	闽优 6118	23.79	722.1	61	$5.845 \times 10^4$	121
	特优 3101	26.87	940.5	70	$8.778 \times 10^4$	140

$l_0$  表示根系增长常数, 反映了不同品种在相同试验条件下的根系增长潜力。表 2 显示, 6 个水稻品种的  $l_0$  为  $26.31 \pm 2.18 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ , 变异系数为 8.3%。最大根长增长速率为  $802.5 \pm 90.6 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ , 出现时间在播种后的第  $61.2 \pm 4.6 \text{ d}$ , 变异系数分别为 11.3% 和 7.6%。最大根长为  $6.561 \times 10^4 \pm 1.197 \times 10^4 \text{ cm}$ , 出现时间在播种后的第  $122.0 \pm 9.4 \text{ d}$ , 变异系数分别为 18.2% 和 7.7%。表明同为晚稻的不同品种间的根系生长特性参数差异不大。但个别品种与其他品种相比有较大的差异, 例如天优航 1 号的  $l_0$  达到  $30.10 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ , 表明该品种根系增长潜力最大; 而特优 3101 有较大的  $l_0$  值, 同时最大根长增长速率和最大根长均明显大于其他供试品种, 表明该品种的根系增长潜力较强, 可为水稻有关育种的选材提供科学依据。

统计结果还表明, 晚稻最大根长增长速率的出现时间为播种后的第  $61.2 \pm 4.6 \text{ d}$ , 变异系数仅为 7.6%。表明供试晚稻在播种后 2 个月左右, 根系生长速率达到最大, 此时根系对养分吸收能力较

强, 养分利用率较高。表 2 还表明, 2006 年 3 个供试品种生长期为 116 d, 最大根长出现时间在播种后的第  $116.3 \pm 3.5 \text{ d}$ , 变异系数 3.0%; 2007 年 3 个供试品种的生育期为 121 d, 最大根长出现时间为  $127.7 \pm 10.7 \text{ d}$ , 变异系数 8.4%。说明这些新选育的高产品种在生长后期仍然保留较大的根系, 对养分仍有较强的吸收能力, 这与林文等<sup>[3]</sup>的研究结果一致。

2.2.2 施肥对根系生长的影响 对 2008 年早稻土培试验结果, 用同样的方法计算最大根系增长速率、最大根长及其出现时间等根系生长特性参数, 结果见表 3。与不施肥相比, 氮磷钾平衡施肥使根系增长常数  $l_0$  提高 57.2%, 最大根长增长速率和最大根长则分别提高 61.0% 和 65.4%。表明氮磷钾平衡施肥能明显促进根系生长和增加根长, 有利于扩大根系吸收水分和养分的总表面积。在 132 d 的生长期中, 最大根长增长速率的出现时间在播种后 63~65 d, 最大根长出现在播种后 126~129 d, 表明早稻生长后期亦有较大的根系用于吸收养分, 与水培试验结果一致。

表 3 施肥对水稻根系生长的影响

Table 3 Effect of fertilization on root growth of rice

处理	$l_0$ ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ )	最大根系增长速率 ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ )	最大根系增长速率 出现时间(d)	最大根长 ( $\text{cm} \cdot \text{株}^{-1}$ )	最大根长出现时间 (d)
CK	17.61	554.7	63	$4.667 \times 10^4$	126
NPK	27.69	893.0	65	$7.721 \times 10^4$	129

注: 供试水稻品种为闽优 6117。

### 3 结论与讨论

水培和土培试验表明, 基于空心菜根系生长所建立的根长增长模型适用于描述全生育期的水稻根系生长特性, 供试水稻品种的根长增长模型模拟结果与实测值的拟合精度均达到统计显著水平。虽然模型较好地模拟了水培和土培水稻根长增长的动力学变化, 但在田间条件下是否可行还有待于进一步验证。在生产或科学的研究中, 由于每个品种的生育期是已知的, 它相当于模型中的T值, 因而只要输入很少的试验数据, 就可获得根系生长量化的特征参数, 为水稻养分吸收机理模型提供参考。这是此模型的最大优点之一。

水培试验结果表明, 供试晚稻最大根长增长速率在不同品种间的变异系数为7.6%, 出现时间在播种后2个月左右, 表明此时追肥有利于养分吸收, 提高了养分利用率。土培试验表明, 氮磷钾平衡施肥能明显促进根系生长和增加根长, 有利于扩大根系吸收水分和养分的总表面积, 与不施肥相比, 根系增长常数 $k_0$ 提高57.2%, 最大根系增长速率和最大根长则分别提高61.0%和65.4%。

根据(2)式根长增长模型可得到根长增长常数、根长最大增长速率和最大根长及其出现的时间等根系生长特性特征参数。6个品种的水培试验表明, 同为晚稻的不同品种间平均根系生长特性参数值差异不大, 但个别品种与其他品种相比却有较大的差异。水培和土培试验结果都表明, 新选育的高产水稻品种在生长后期仍然保留较大的根系, 对养分仍有较强的吸收能力, 而且水稻拔节期的追肥很重要。因此, 研究结果对水稻不同生育期肥料的合理分配有指导意义。

### 参考文献:

- [1] WEAVER J E. Root Development of Field Crops [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1926.
- [2] DIGGLE A J, ROOTMAE. A model in three dimensional coordinates of the growth and structure of fibrous root systems [J]. Plant and Soil, 1988, 105: 169–178.
- [3] PAGES L, JORDAN M O, PICARD D. A simulation model of the three dimensional architecture of the maize root system [J]. Plant and Soil, 1989, 1 (19): 147–154.
- [4] 金明现, 王天铎. 玉米根系生长及向水性的模拟 [J]. 植物学报, 1996, 38: 384–390.
- [5] 马新明, 杨娟, 熊淑萍, 等. 烟草根系形态发育模拟模型 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (12): 2421–2427.
- [6] BHAT K, NYE K S. Diffusion of phosphate to plant roots in soil I. Quantitative autoradiography of the depletion zone [J]. Plant and Soil, 1973, 38: 161–175.
- [7] SMEDLLL P J, Comerford N B. Simulation nutrient uptake by single or competing contrasting root system [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 1361–1367.
- [8] MENGELE D B, BARBER S A. Development and distribution of the corn root system under field conditions [J]. Agronomy Journal, 1974, 66: 341–344.
- [9] 冯广龙, 罗培远. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究 [J]. 生态学报, 1999, 19 (1): 96–103.
- [10] 王绍中, 茹天祥. 丘陵红粘土旱地冬小麦根系生长规律的研究 [J]. 植物生态学报, 1997, 21 (2): 175–190.
- [11] 章明清. 土壤—植物系统养分运移模型与叶菜生态经济施肥量研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
- [12] 吉田昌一. 水稻生理学试验手册 [M]. 北京: 科学出版社, 1957: 57–83.
- [13] 林文, 李义珍, 郑景生, 等. 杂交水稻根系形态与机能对养分的反应 [J]. 福建农业学报, 2000, 15 (1): 1–6.

(责任编辑: 刘新永)