

水稻根系空间分布特性的数学模拟及应用

张 玉, 秦华东, 黄 敏, 李 忠, 杨彩玲, 汪妮娜, 姬秋梅, 张 婧,
伍龙梅, 农文寿, 董心普, 江立庚

(广西大学 农学院, 作物栽培学与耕作学重点实验室, 广西 南宁 530005)

摘要:为了明确水稻根系在土壤中的空间分布特性,通过根箱试验,获取水稻根系坐标数据,采用方程 $Y=a(1-b^X)$ (Y 为根系累积长度, X 为横向分布距离或纵向分布深度)建立根系纵向和根系横向分布模型,并利用模型分析田间水分管理对水稻根系生长及分布的影响.结果表明,水稻分蘖期和成熟期,约88%的根系分布在10 cm深度土层内,60%~70%根系分布在10 cm的横向范围内,其纵向和横向累积长度的变化均可用方程 $Y=a(1-b^X)$ 模拟.水分管理影响水稻根系生长数量和纵向分布,但不影响根系横向分布.间隙灌溉水稻根系分别比湿润灌溉和水层灌溉水稻根系分布深0.6和3.5 cm,根系长度分别比湿润灌溉、水层灌溉水稻多19.8%与26.4%,根系数量分别比湿润灌溉、水层灌溉水稻多28.3%及21.0%.平均角度的变化具有同样的趋势.

关键词:水稻; 根构型; 分布模型; 水分管理
中图分类号:S511;S11 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2013)03-0304-05

Mathematical Simulation of Rice Root Spatial Distribution and Its Application

ZHANG Yu, QIN Huadong, HUANG Min, LI Zhong, YANG Cailing, WANG Nina, JI Qiumei,
ZHANG Jing, WU Longmei, NONG Wenshou, DONG Xinpu, JIANG Ligeng
(Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Agricultural College of Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: To clarify the root spatial distribution characteristics of rice, root box experiments were conducted to collect root distribution data. The equation $Y=a(1-b^X)$, where Y is the total root length, and X is the distance of root horizontal distribution or the depth of root vertical distribution, was used to establish root distribution model. Moreover, influences of water management on root growth and distribution were analyzed using the model. The results showed that about 88% of roots were distributed in the top 10 cm soil layer, and 60% – 70% of the roots were distributed in horizontal range of 10 cm from the plant at tillering and ripening stages. The change in total root length with the distance of root horizontal distribution or the depth of root vertical distribution could be simulated by the equation $Y=a(1-b^X)$. Water management had impact on rice root vertical distribution and root number without affecting the root horizontal distribution. The rice roots were 0.6 and 3.5 cm deeper, 19.8% and 26.4% longer, and 28.3% and 21.0% greater in number under intermittently flooded irrigation compared with wet irrigation and continuously flooded irrigation, respectively. The variation of average angle of roots showed similar tendency.

Key words: rice; root distribution; distribution model; water management

根构型是指根系在生长介质中的空间造型和分布大小,也与作物吸收利用养分的能力密切相关.土壤
布^[1].作物根构型不仅决定了作物固定植株能力的中养分有效性的高低或分布状况对植物根构型也有

一定调控作用。因此,根构型研究越来越受到重视^[2]。廖红等^[3]和赵静等^[4]对大豆和菜豆低磷胁迫下根构型变化进行了较深入系统研究。樊小林等^[5]和唐劲驰等^[6]研究了若干水稻根构型参数对供氮量和供氮方式的适应性,但这方面的定量研究还较少。蔡昆争等^[7-8]研究了若干群体水稻根系在土壤中的分布情况,发现根系体积与质量均随土层深度增加而下降,并确定了水稻品种群体根系特征与地上部及产量的相关关系。Yoshida^[9]也发现根系分布较深的品种与地上部生长具有显著的关系。为了进一步精确定量水稻根构型,本文采用空间坐标模拟模型的方法表达水稻根系空间分布,并通过模型分析水分管理对水稻根系生长和分布的影响,以期阐明水稻根系生长特性及其调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验品种为三系粳型杂交水稻“金优253”。

1.2 根箱试验和田间试验

2009年在广西大学农学院农场进行根箱试验。根箱大小为30 cm×30 cm×30 cm,用不锈钢丝网制作。根箱中每10 cm土层插入水稻根系能自由通过的不锈钢网(50 μm),其作用是固定水稻根系和分层。根箱外围套尼龙纤维网,可自由通过水、肥,但可阻止根系的自由穿入与穿出,保证根系的完整性。根箱中土壤从免耕水稻田取得,方法是先在稻田中分层切取土壤方块,然后小心搬入根箱中。

装好土壤的根箱在水稻移栽前1~2 d原位放入大田中,每个根箱在中心小心种植2棵生长基本一致秧苗,然后按根箱所在田间试验小区方法进行田间管理。田间试验设置3种水分条件:1)湿润灌溉(移栽后长期进行湿润灌溉,在分蘖末期进行适当的晒田);2)水层灌溉(移栽后长期1~3 cm浅水层灌溉,不晒田);3)间隙灌溉(每次灌水后自然落干并保持2~3 d)。小区面积12.4 m²,随机区组排列,3次重复,共9小区。小区四周作高30 cm、宽20 cm田埂,田埂盖塑料膜并入土30 cm以防肥水渗透。小区在作好田埂后喷除草剂“农民乐747”,5 d后灌水沅田,沅田5 d后抛秧。均按氮(N)195 kg/hm²、过磷酸钙(P₂O₅)450 kg/hm²、氯化钾(K)225 kg/hm²施肥。磷肥全部作基肥一次施用,氮肥按基肥50%、分蘖肥30%、穗肥20%施用,钾肥按基肥60%、分蘖肥20%、穗肥20%施用。其他管理与生产大田相同。

在分蘖盛期及成熟期将根箱取回,放置在100 g/L NaCl溶液中浸泡3 h,然后用自来水小心冲洗以

获得完整根系。逐层清洗根部土壤,当露出表面部分完整单根时,逐条记录每条单根位置、伸展方向,方法是先记录根段的绝对位置,再以根段为中心原点坐标($x=0, y=0, z=0$),记录每条单根的末端点与原点的相对位置,逐根逐点记录。

1.3 模型的建立与检验方法

1.3.1 根系纵向分布模型 首先根据根系坐标数据绘制根系空间分布图,方法是利用VC++6.0与OpenGL结合,调用GLUT图形库,编制能够自动绘制三维根系模型的应用程序。利用该程序打开原始根系三维坐标数据文件,利用OpenGL的图形绘制功能,完整绘制出1株水稻根系的自然形态图。然后根据原始坐标数据,进行空间数据计算,得到根系纵向分布数据。再利用VC++6.0编写程序绘制根系纵向累积分布散点图形。最后根据根系纵向累积分布散点图形变化趋势,通过数学方程筛选,最终确定用方程 $Y=a(1-b^X)$ 进行拟合,式中 X 表示土层深度(cm), Y 表示根系累积长度(cm)。1)当 $X \rightarrow \infty, Y \rightarrow a$,参数 a 表征了根系最大生长潜力;2)求一阶导数 dY/dX ,可得根系累积长度与深度的函数关系(即根系群体向下伸长速率): $dY/dX = -a \ln b b^X$, b 值越大, dY/dX 越大,当根系总长度一定时,根系入土深度越深。因此,参数 b 实际上表征了根系纵向分布深度, b 越大,根系入土越深。

用建立的数学模拟方程分别计算水分管理试验各小区根系在10、20和30 cm处累积根长度,与10、20和30 cm处实测根长度进行比较,通过分析实测值与模型值相关性的显著程度检验数学模拟的可靠性。

根系角度计算方法:以根轴为原点,根系末点坐标与原点坐标之间的连线与地平面之间的角度作为根系分布角度。

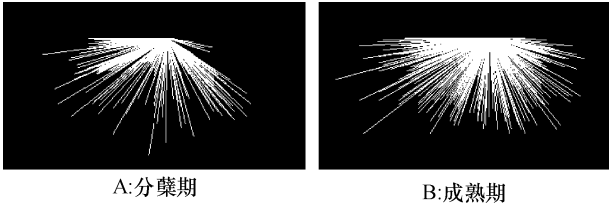
1.3.2 根系横向分布模型 方法同“1.3.1”。根系横向累积分布散点图形变化趋势与根系纵向累积分布散点图形变化趋势完全相同,因此,仍采用方程 $Y=a(1-b^X)$ 进行拟合,式中 X 表示根系横向分布距离(cm), Y 表示根系累积长度(cm)。

数据分析均使用SPSS 11.5进行处理。

2 结果与分析

2.1 水稻根系的纵向分布与数学模拟结果

从图1可以看出,在水稻分蘖期和成熟期,靠近地表的根系几乎水平生长,禾薹中心根系竖直向下生长,平面上形成“扇形”分布。不同根系的长度差异较大,一般以竖直向下或斜向下方向生长的根系较长。

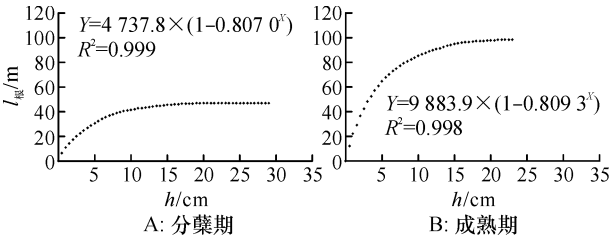


A:分蘖期

B:成熟期

图 1 分蘖期和成熟期水稻根系在土壤中的纵向分布
Fig. 1 Rice root longitudinal distribution in soil at tillering and ripening stages

从根系总长度随土壤深度的变化(图 2)可以看出,分蘖期水稻根系总长度与成熟期水稻根系总长度差异很大,成熟期根系总长度大约是分蘖期根系总长度的 2 倍.但是,分蘖期根系入土深度比成熟期根系入土深度更大.分蘖期水稻根系入土深度接近 30 cm,成熟期水稻根系入土深度不到 25 cm,表明前期生长根系入土相对较深,后期生长根系入土相对较浅.在 0 ~ 10 cm 土层内,分蘖期和成熟期水稻根系总长度随入土深度的增加几乎呈直线增加;在 10 ~ 30 cm 土层内,水稻根系总长度随入土深度的增加而增加,但增加的速度明显下降.



A: 分蘖期

B: 成熟期

图 2 分蘖期和成熟期水稻根系总长度随土壤深度的变化
Fig. 2 Total rice root length variations with soil depth at tillering and ripening stages

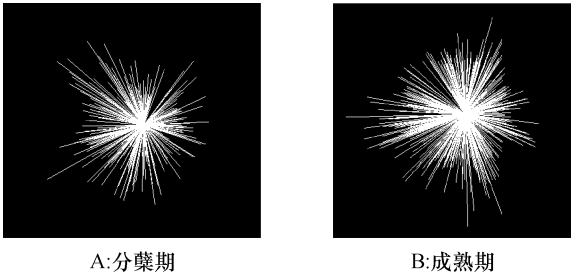
根系总长度(Y)随土壤深度(X)变化的拟合方程:分蘖期为 $Y=4\,737.8 \times (1-0.807\,0^X)$;成熟期为 $Y=9\,883.9 \times (1-0.809\,3^X)$.

根据拟合方程可以计算出,分蘖期 88.7% 根系分布在 10 cm 土层内,成熟期 88.2% 根分布在 10 cm 土层内;分蘖期与成熟期的 90% 根系均分布在 20 cm 土层内.分蘖期水稻根系总长较小,但分布相对较深;成熟期根系总长较大,但分布相对较浅.

为了检验数学模拟的可靠性,用建立的数学模拟方程计算根系在 10、20、30 cm 处累计根长,与 10、20、30 cm 处实测根长进行比较.结果表明,实测值与数学模拟值之间的相关系数均达极显著水平.以成熟期为例,10 cm 处根系总长度数学模拟值与实测值的相关性达到 0.721 **, 20 和 30 cm 处分别达到 0.810 ** 和 0.815 **.表明用数学方程 $Y=a(1-b^X)$ 模拟根系在土壤中的纵向分布是可靠的.

2.2 水稻根系的横向分布与数学模拟结果

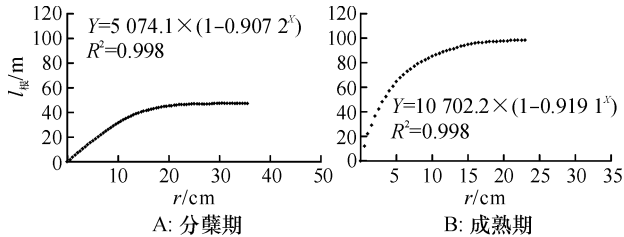
从图 3 可以看出,在水稻分蘖期和成熟期,根系在土壤中几乎均匀向四周生长,但由于根系长度不同,不同根系的横向分布范围差异很大.由图 4 可以看出,在离禾茬中心 15 cm 的土层内,水稻根系总长度随距离的增加几乎呈直线增加;15 ~ 25 cm 土层内,根系总长度增加的速度明显下降;超过 25 cm 后,水稻根系总长度基本不再增加.



A:分蘖期

B:成熟期

图 3 分蘖期和成熟期水稻根系在土壤中横向分布
Fig. 3 Rice root transverse distribution in soil at tillering and ripening stages



A: 分蘖期

B: 成熟期

图 4 水稻根系总长度随离禾茬中心距离的变化
Fig. 4 Total rice root length variations with distance from root stubble center

水稻根系总长度(Y)随离禾茬中心距离(X)变化的拟合方程:分蘖期为 $Y=5\,074.1 \times (1-0.907\,2^X)$,成熟期为 $Y=10\,707.2 \times (1-0.919\,1^X)$.

根据拟合方程可以计算出,分蘖期 66.96% 根系分布在离禾茬中心 10 cm 土层内,成熟期 61.94% 根系分布在离禾茬中心 10 cm 土层内;分蘖期 90% 根系分布在离禾茬中心 19 cm 土层内,成熟期 90% 根系分布在离禾茬中心 21 cm 土层内.分蘖期水稻根系的横向分布范围较成熟期小.

2.3 水分管理对水稻根系生长和分布的影响

从表 1 可以看出,水分管理对分蘖期和成熟期水稻根系生长产生了一定的影响,间隙灌溉水稻的根系数量较多、总长度较大,水层灌溉水稻次之,湿润灌溉水稻的根系较少.水分管理对根系的横向分布影响不大,各处理 90% 根系分布在 21.0 ~ 22.5 cm 范围内.但是,水分管理对根系的纵向分布影响较大,水层灌溉比湿润灌溉和间隙灌溉水稻根系在分蘖期和成熟期的纵向分布浅 2.5 ~ 3.0 cm.

表2表明,分蘖期间隙灌溉水稻根系纵向和横向分布方程参数 a 均比其他2个处理要高,但与水层灌溉的参数差异不显著.说明间隙灌溉在纵向与横向分布的根系未来生长潜力上要高于湿润灌溉.

从表3可以看出,在角度分布上,间隙灌溉比水层灌溉的根系分布要深,在分蘖期和成熟期间隙灌

溉比水层灌溉的平均角度分别大 5.63 和 5.29° .在分布的比例上,间隙灌溉比水层灌溉在大于 45° 的角度分布高,表明间隙灌溉水稻根系生长具有优势.水层灌溉在 $0\sim 20^{\circ}$ 的角度分布均比其他2个处理要高,表明水层灌溉处理对根系更多分布于土壤表面,对土壤深层养分的吸收水平要低于其他2个处理.

表1 水分管理对水稻分蘖期和成熟期根系生长与分布的影响¹⁾

Tab.1 Influence of water management on rice root growth and distribution at tillering and ripening stages							
生长期	水分管理	根系数量/ (条·株 ⁻¹)	根系总长度/ (cm·株 ⁻¹)	纵向		横向	
				10 cm 以内根系 比例/%	$h_{90\%}$ 根系/ cm	10 cm 以内根系 比例/%	$r_{90\%}$ 根系/ cm
分蘖期	湿润灌溉	338.0b	6 775.3b	77.4a	14.9a	64.1a	19.5a
	间隙灌溉	447.5a	9 169.9a	80.0a	14.1a	63.9a	19.9a
	水层灌溉	352.7b	7 387.0b	85.3a	12.2a	60.8a	21.3a
成熟期	湿润灌溉	435.0b	9 846.1b	76.7ab	15.4a	65.5a	19.7a
	间隙灌溉	558.0a	11 794.3a	75.4a	16.0a	65.2a	19.6a
	水层灌溉	461.5b	9 330.8b	83.7b	12.5a	63.2a	19.9a

1) 相同生长期同列数字后凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P>0.05$ Duncan's 法, $n=3$).

表2 水分管理对水稻根系模型参数的影响¹⁾

Tab.2 Influence of water management on parameters of rice root model at tillering and ripening stages									
生长期	水分管理	纵向分布				横向分布			
		参数 a	参数 b	F	相关系数	参数 a	参数 b	F	相关系数
分蘖期	湿润灌溉	6 938.1b	0.87a	9 409.6	0.995**	7 473.1b	0.92a	4 923.2	0.993**
	间隙灌溉	9 286.1a	0.86a	11 008.2	0.997**	9 971.6a	0.92a	3 477.9	0.989**
	水层灌溉	7 299.7ab	0.81a	3 285.5	0.987**	8 163.6ab	0.92a	4 352.8	0.991**
成熟期	湿润灌溉	10 008.2a	0.87a	8 163.1	0.997**	10 476.0a	0.91a	4 170.6	0.990**
	间隙灌溉	11 972.7a	0.87a	11 544.6	0.997**	12 619.1a	0.91a	3 876.0	0.989**
	水层灌溉	9 433.9a	0.84a	8 287.4	0.994**	10 317.4a	0.92a	3 391.6	0.990**

1) 相同生长期同列数字后凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著($P>0.05$ Duncan's 法, $n=3$).

表3 水分管理对水稻根系角度分布的影响¹⁾

Tab.3 Influence of water management on rice root angle distribution at tillering and ripening stages											
生长期	水分 管理	$\theta_{\text{根系}}/(^{\circ})$	不同角度分布的根系比例/%								
			0~10°	10~20°	20~30°	30~40°	40~50°	50~60°	60~70°	70~80°	80~90°
分蘖期	湿润灌溉	32.64a	13.33b	14.43b	19.00a	20.80a	13.73A	9.57a	6.03a	2.23a	0.87a
	间隙灌溉	30.43ab	11.90b	18.90ab	21.65a	20.00a	13.20A	8.35a	3.65b	1.90a	0.40b
	水层灌溉	24.80b	28.20a	20.90a	16.37a	14.33b	7.53B	6.17b	4.57b	1.47a	0.53b
成熟期	湿润灌溉	32.42Aa	14.30b	17.00a	16.35b	18.55a	13.70a	10.80a	5.20a	2.85a	1.15A
	间隙灌溉	28.92ABb	16.75ab	16.45a	23.85a	16.95ab	12.30a	8.15ab	4.00a	1.45a	0.10B
	水层灌溉	23.63Bc	28.40a	17.05a	21.40ab	15.95b	8.70b	5.90b	1.60b	0.90b	0.10B

1) 相同生长期同列数字后凡是有一个相同大、小写字母者,分别表示在0.01、0.05水平差异不显著(Duncan's 法, $n=3$).

3 讨论与结论

根系生长和分布的模拟是当今根系研究的热点之一,用数学方法对根系的分布进行拟合,通过方程来反映根系在垂直或水平方向上的变化规律是常用的研究方法之一.朱德峰等^[10]和苗果园等^[11]研究谷

类作物根轴根质量垂直分布与行间根质量垂直分布均符合以 e 为底的指数模型 $y=Ae^{-bx}$,生育后期阶段,根长在不同土层分布用三次多项式 $y=ax^3+bx^2+cx+d$ 拟合.马新明等^[12]研究烟草一二级侧根累积根长符合直线方程,顾东祥等^[13]和刘永霞等^[14]研究认为根系长度等与根干质量间的动态关系符合幂函数

$$Y = aX^b.$$

本文采用指数模型模拟水稻根系在土壤中的横向和纵向分布,并分析了水分管理对数学方程参数的影响.研究表明,水稻分蘖期和成熟期,约88%的根系分布在10 cm深度土层内,60%~70%根系分布在10 cm的横向范围内.这与前人的研究结果^[10,15-18]吻合.水稻纵向和横向根系累积长度的变化均可用方程 $Y = a(1 - b^x)$ 进行数学模拟.

水分管理是影响水稻根系生长和分布的重要措施.研究表明,水分管理主要影响根系的数量和纵向分布,对横向分布并不产生影响.水层灌溉比湿润灌溉和间隙灌溉水稻在分蘖期和成熟期的90%根系纵向分布浅2.5~3.0 cm,间隙灌溉根系数量分别比湿润灌溉、水层灌溉多28.3%及21.0%.间隙灌溉水稻根系纵向生长潜力(参数 a)比湿润灌溉、水层灌溉分别大33.8%及37.2%.水分管理对根系生长和分布的影响在其他作物根系也具有类似报道^[19].有研究表明,深层根对水稻地上部的生长具有直接的作用,根据深层根系生长可以筛选适宜的水肥管理措施,对提高水稻产量具有积极的意义^[20-21].

综上所述,本文通过根系坐标的测定和根系分布特性的分析,建立了水稻根系的纵向和横向分布模型,并应用建立的模型探讨了水分管理对水稻根系生长影响.模型的建立为定量描述水稻根系的空间分布特性和定量表达栽培措施与根系生长间的关系提供了技术途径和依据,因而具有重要的理论意义.但是,根系坐标的获取相对困难,影响了模型的实际应用.因此,如何准确快速获取作物根系的坐标需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 严小龙,廖红,年海.根系生育学原理与应用[M].北京:科学出版社,2008:72-73.
- [2] 严小龙,廖红.植物根构型特性与磷吸收效率[J].植物学通报,2000,17(6):511-519.
- [3] 廖红,严小龙.低磷胁迫下菜豆根构型性状的QTL定位[J].农业生物技术学报,2000,8(1):67-70.
- [4] 赵静,严小龙,廖红.一种更有效的根构型研究纸培系统[J].华南农业大学学报,2012,33(2):125-129.
- [5] 樊小林,史正军,吴平.水肥(氮)对水稻根构型参数的影响及其基因型差异[J].西北农林科技大学学报:自

然科学版,2002,30(2):1-5.

- [6] 唐劲驰, MBOREHA I A, 余丽娜, 等. 大豆根构型在玉米/大豆间作系统中的营养作用[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1196-1203.
- [7] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的分布及其与产量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2003, 24(3): 1-4.
- [8] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(2): 1-4.
- [9] YOSHIDA S. Relationship between rice plant type and root growth[J]. Soil Sci Plant Nutr, 1982, 28(4): 473-482.
- [10] 朱德峰, 林贤青, 曹卫星. 超高产水稻品种的根系分布特点[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 5-8.
- [11] 苗果园, 杨珍平. 四种谷类作物次生节根群空间分布特点[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 137-142.
- [12] 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.
- [13] 顾东祥, 汤亮, 徐其军, 等. 水氮处理下不同品种水稻根系生长分布特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 558-566.
- [14] 刘永霞, 岳延滨, 刘岩, 等. 基于生物量的水稻根系生长动态模型[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(4): 704-709.
- [15] 代贵金, 岩石真嗣, 三木孝昭, 等. 不同耕作与施肥方法对水稻根系生长分布和活性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(3): 274-278.
- [16] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 等. 不同灌溉方式对水稻根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007(1): 102-104.
- [17] 吴伟明, 宋祥甫. 不同类型水稻的根系分布特征比较[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 276-280.
- [18] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 等. 田间条件下水稻根系分布及其与土壤容重的关系[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(2): 141-144.
- [19] 高鹭, 胡春胜, 陈素英. 喷灌条件下冬小麦根系分布与土壤水分条件的关系[J]. 华南农业大学学报, 2006, 27(1): 5-8.
- [20] YAMAZAKI K. The root system formation and its possible bearings on grain yield in rice plants[J]. Japanese Agricultural Research Quarterly, 1982, 15(3): 153-160.
- [21] 森田茂纪, 管微也, 山崎耕字. 水稻的根长密度与产量[J]. 日本作物学会纪事, 1988, 57(3): 438-443.

【责任编辑 周志红】