

王小虎,方云霞,张 栋,等. 水稻根基粗适宜取样量及其与抗倒伏性状的相关分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):85-89.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.023

水稻根基粗适宜取样量及其与抗倒伏性状的相关分析

王小虎^{1,2,3}, 方云霞⁴, 张 栋², 祝阳舟², 余海平², 胡 江², 钟卫国³,

潘斌清³, 俞 良³, 端木银熙³, 梁国华¹, 钱 前²

(1. 扬州大学农学院/江苏省遗传生理重点实验室/教育部植物功能基因组学重点实验室,江苏扬州 225009;

2. 中国水稻研究所/水稻生物学国家重点实验室,浙江杭州 310006;

3. 江苏省常熟市农业科学研究所/江苏省杂交晚粳工程技术研究中心/国家杂交水稻工程技术研究中心常熟分中心,江苏常熟 215500;

4. 江西省农业科学院水稻研究所,江西南昌 330200)

摘要:利用典型的籼粳交(窄叶青8号/京系17)的F₁代花培加倍单倍体(DH)分离群体为材料,通过水培法在齐穗期考查了与抗倒伏相关根基粗等性状。根基粗在DH群体中呈明显的连续性变异分布。根基粗总平均数与10、20、30、40、50、60、70、80、90、100个最粗根基粗平均数均存在极显著正相关,且根基粗总平均数(Y)与10~100个最粗根基粗平均数(X)两者关系符合直线回归方程 $Y=a+bX$ 。根基粗总平均数与30、40个最粗根基粗平均数的相关系数最大。根基粗与水稻抗倒伏相关的地下部根系性状以及地上部性状的相关分析表明,根基粗与总根数、最大根长、根干物质量、根冠比等根系性状之间存在着极显著正相关;除分蘖数外,根基粗与地上部株高、株周长、单蘖直径、地上部干物质量之间也存在着极显著正相关。根基粗与地上部性状的多元回归分析表明,根基粗只与单蘖直径、地上部干物质量成显著线性关系,这说明单蘖直径和地上部干物质量对根基粗的影响较大。本研究旨在寻求水稻根基粗的最适调查方法,为水稻根系育种提供理论参考。

关键词:水稻;根基粗;取样量;抗倒伏性状;相关分析

中图分类号: S511.03 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)05-0085-05

根系是水稻重要的地下组织器官,具有固定植株、吸收水分和养分、合成内源激素等众多功能^[1-2]。此外,水稻根系还

是地上与地下各部分物质及信息交换的系统之一^[3]。

根基粗是水稻根系统的重要性状之一,在水稻根系的遗传^[4-5]、抗旱^[6-8]、抗倒伏^[9-10]等诸多研究中是必不可少研究因子。其他的根系性状如总根数、根长、根干物质量、根冠比等数据调查相对简单,在实验室均可操作。而根基粗数据调查相对复杂,费时又费力^[7,11],同时随着测量群体的增大,出现误差的概率相应增加。目前,公认调查根基粗较为准确、快速和便捷的方法是利用WinRHIZOLA6400XL根系专用大幅面透视扫描仪对根系进行透视扫描,然后用根系专用WinRHIZOPRO软件分析扫描图片获取数据。这种方法虽可获得根系准确、完整的表观数据,但也有其缺点,应用此方法

收稿日期:2015-12-03

基金项目:国家自然科学基金(编号:31201194);江苏省科技计划后补助项目(编号:BE2015378);江苏省苏州市农业科技创新工程项目(编号:SNG201509)。

作者简介:王小虎(1979—),男,江西南昌人,博士研究生,高级农艺师,从事水稻遗传育种研究。E-mail:jcsnkswxh188@163.com。
通信作者:梁国华,研究员,主要从事水稻分子育种研究,E-mail:ricegh@yzu.edu.cn;钱 前,研究员,主要从事水稻分子生物技术及育种研究,E-mail:qianqian188@hotmail.com。

[3]高士杰,张龙步,陈温福. 直立穗型水稻群体小气候环境研究[J]. 中国农业气象,2000,21(3):23-26.

[4]王伯伦,王 术,黄元财,等. 水稻优化育种方法的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(4):298-303.

[5]李彪俊. 影响水稻产量因子的研究[J]. 西南农业大学学报:自然科学版,2005,27(5):579-583.

[6]刘 建. 环境因子对稻米品质影响研究进展[J]. 湖北农学院学报,2002,22(6):550-554.

[7]孟亚利,高如嵩,张嵩午. 影响稻米品质的主要气候生态因子研究[J]. 西北农业大学学报,1994,22(1):40-43.

[8]杨化龙,杨泽敏,卢碧林. 生态环境对稻米品质的影响[J]. 湖北农业科学,2001(6):14-16.

[9]杨联松,白一松,李少恒,等. 气候条件对稻米品质性状的影响[J]. 安徽农业科学,2003,31(3):341-342, 344.

[10]吕文彦,邵国军,曹 萍,等. 灌浆结实期日均温度对稻米品质

之影响[J]. 辽宁农业科学,1998(4):3, 5, 4, 7-8.

[11]李秀芬,贾 燕,黄元财. 沈阳地区气候因子对稻米品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2005,36(5):523-527.

[12]王伯伦. 水稻优化栽培[M]. 北京:农业出版社,1993:99-124.

[13]张文香,王成媛,王伯伦,等. 寒冷地区温度、光照对水稻产量及品质的影响[J]. 吉林农业科学,2006,31(1):16-20.

[14]矫 江,王伯伦. 我国东北地区稻米垩白发生规律研究[J]. 作物学报,2003,29(2):311-314.

[15]秦 阳,蒋文春,张 城,等. 不同水稻品种播期与品质的关系[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(4):328-331.

[16]李 林,沙国栋,陆淮淮. 灌浆结实期温光因子对稻米品质的影响[J]. 中国农业气象,1996,5(2):33-38.

[17]Kato T. Effect of the shading and rachis branch clipping on the grain filling process of rice cultivars differing in the grain[J]. Japan J Crop Sci, 1986, 55(2):252-260.

得到的数据不是直接测量的表型数据,而是通过处理扫描后的照片得出的数据,与性状的实际值之间还存在着一定误差^[12-13]。

本研究利用水培法获得 DH 群体各株系完整的根系系统^[14-15],利用激光测量仪(型号为 KEYENCE LS-7000,测量范围为 0~30 mm)测量根基粗,同时考查了根基粗与抗倒伏相关的总根数、最大根长、根干物质质量、根冠比等地下部性状以及与抗倒伏相关的分蘖数、株高、株周长、单蘖直径、地上部干物质质量等地上部性状之间的相关性,以获得根基粗研究时最适取样样本量,为水稻根系育种研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

利用典型的籼稻品种窄叶青 8 号(ZYQ8)与粳稻品种京系 17(JX17)杂种 F₁ 代花药培养,获得 127 个稳定株系组成的 DH 群体。

1.2 试验方法

1.2.1 材料种植 DH 群体及双亲种植于中国水稻研究所试验基地,6 叶期时移入聚苯乙烯泡沫板中,每板规格为 150 cm×100 cm×5 cm,共 35 穴,行株距为 20 cm×15 cm,种植孔径 4.5 cm,以海绵为固定基质。采用水稻固体混合肥料,含大量元素 N、P、K 和各种微量元素,折算纯氮 180 kg/hm²。根据历年调查资料,每块板按照 DH 群体的株高不同由低到高排列种植,每行为 1 株系,共 7 株。所有材料均种植于室外的大水池中。

1.2.3 性状考察 齐穗 7 d 后,每株系取 3 株,用激光测量仪(型号为 KEYENCE LS-7000,测量范围为 0~30 mm)测量离根基部 2 cm 处的根粗;用直尺量取最长根长度;记录根总数、根和地上部干物质质量、根冠比、分蘖数;测量计算株高、株周长及单蘖直径等数据,其中株周长为贴地稻基部的周长。采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析(相关和回归分析的样本量 *n* 均为 DH 株系数)。

2 结果与分析

2.1 根基粗及其他根系性状在双亲和 DH 群体中的表现

从图 1 可以看出,根基粗在 DH 群体中表现出连续性的正态分布,表明水稻根基粗是由数量性状基因控制的。整个群体全部根基粗也表现正态分布(图 2),其中,在整个群体中根基粗在 1.00~1.20 mm 区段分布较多,而在 0.10~0.60 mm 和 1.60~1.90 mm 区段分布最少,这表明整个 DH 群体根基粗的大小大部分集中在 1.00~1.20 mm 这个区段,

特别细或者特别粗的根系较少。从表 1 可以看出,亲本间除了根基粗、最大根长差异显著或极显著外,其他 3 个性状差异均不显著。在考查 DH 株系时,5 个性状均表现出超亲现象,除根干物质质量的偏度和峰度以及总根数的峰度大于 1 外,其余均小于 1。

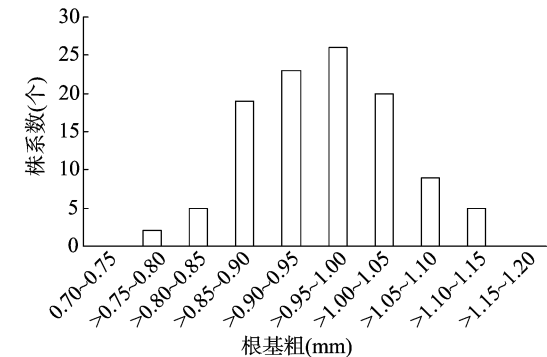


图1 根基粗在DH群体中的分布

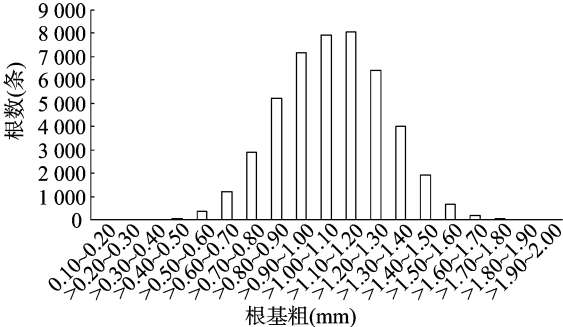


图2 整个DH群体全部根基粗分布频率

2.2 根基粗总平均值与 10~100 个最粗根基粗的平均值相关分析

相关分析表明,根基粗的总平均数与 10~100 个最粗根基粗的平均值均存在极显著的正相关,相关系数变异范围为 0.864 7~0.900 7。从图 3 可以看出,根基粗总平均值与 10~40 个最粗根基粗平均值的相关系数呈逐渐增大的趋势,与 50~70 个最粗根基粗平均值的相关系数呈下降的趋势,与 80~100 个最粗根基粗平均值的相关系数又呈逐渐增大的趋势。根基粗总平均值与 40 个最粗根基粗平均值的相关系数最大,与 10 个最粗根基粗平均值相关系数最小,相关系数大小排列顺序为 40 个平均>30 个平均>50 个平均>60 个平均>20 个平均>100 个平均>80 个平均>90 个平均>70 个平均>10 个平均。

表 1 亲本与 DH 群体根系性状表现与分布

性状	亲本			<i>t</i> 检验	DH 群体		
	窄叶青 8 号	京系 17	平均值		变异范围	偏度	峰度
根基粗 (mm)	1.01	0.94	0.96	3.07 *	0.77~1.13	-0.001 7	-0.34
总根数 (条)	276	291	243	0.11	112~546	0.82	1.82
最大根长 (cm)	39.90	24.60	29.25	4.93 **	19.00~49.00	0.87	0.48
根干物质质量 (g)	2.70	2.24	2.11	0.071	0.71~6.14	1.37	2.56
根冠比 (%)	8.27	7.11	7.07	0.98	3.44~11.56	0.32	-0.15

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下表同。

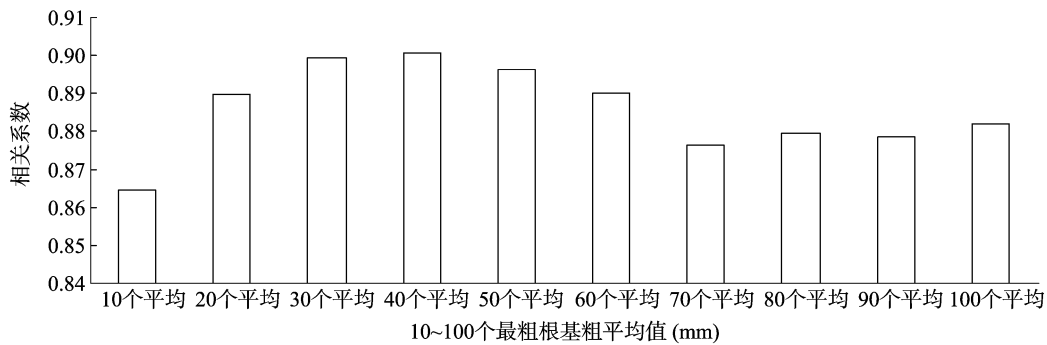


图3 根基粗总平均数与10~100个最粗根基粗平均值的相关系数分布

2.3 根基粗总平均值与 10 ~ 100 个最粗根基粗平均值的回归关系分析

从图 4 可以看出,根基粗总平均值与 10 ~ 100 个(只列出了 10 个、30 个、40 个、100 个)最粗根基粗平均值在散点图上呈明显的线性关系,其数量关系可用一个线性方程来表示^[16]。如表 2 所示,根基粗总平均值与 10 ~ 100 个最粗根基粗平均值线性回归方程的估计标准误(*s*)很小,而 *s* 是回归精

确度的度量,*s* 愈小,由回归方程估计 *y* 的精确性愈高。且 *F* 值远大于 *F*_{0.01} 值,故根基粗总平均值与 10 ~ 100 个最粗根基粗平均值呈直线回归关系。从表 2 中回归截距 *a* 置信区间来看,30、40 个最粗根基粗平均值在 0.118 5 ~ 0.261 4 mm、0.140 0 ~ 0.278 3 mm 之间时,这一推断的可靠度为 95%。表明可以通过测量 30 ~ 40 个最粗的根基粗平均值来推算根基粗的总平均值。

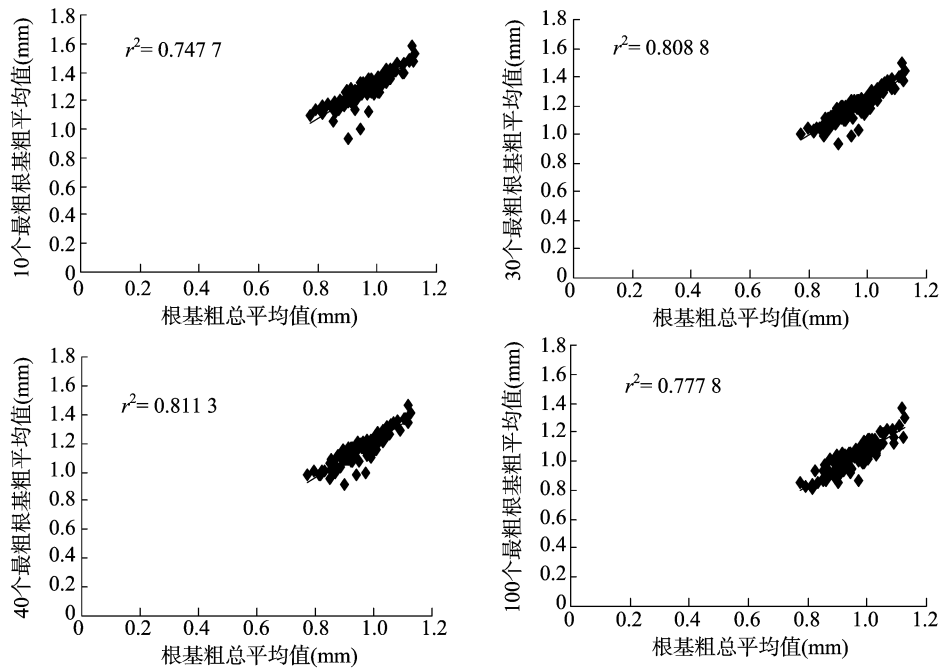


图4 根基粗总平均值与10、30、40、100个最粗根基粗平均值散点分布图

表 2 根基粗总平均值与 10 ~ 100 个最粗根基粗平均值的回归关系分析

最粗根基粗 平均值	直线回归方程	估计标准误 (<i>s</i>)	离回归平方和 (<i>Q</i>)	<i>F</i> 值	回归截距置信区间	
					下限 95%	上限 95%
10 个平均	$Y=0.194\ 1+0.598\ 9X$	0.038 3	0.160 1	322.99 **	0.109 1	0.278 9
20 个平均	$Y=0.184\ 3+0.631\ 3X$	0.034 8	0.132 1	414.34 **	0.108 3	0.260 2
30 个平均	$Y=0.189\ 9+0.645\ 5X$	0.033 4	0.121 3	461.00 **	0.118 5	0.261 4
40 个平均	$Y=0.2092+0.645\ 6X$	0.033 1	0.119 7	468.50 **	0.140 0	0.278 3
50 个平均	$Y=0.232\ 8+0.640\ 0X$	0.033 8	0.124 7	445.67 **	0.164 1	0.301 5
60 个平均	$Y=0.260\ 9+0.628\ 9X$	0.034 8	0.132 0	415.03 **	0.192 5	0.329 4
70 个平均	$Y=0.323\ 0+0.593\ 5X$	0.036 8	0.147 3	360.46 **	0.256 0	0.389 9
80 个平均	$Y=0.307\ 3+0.612\ 2X$	0.036 3	0.143 5	372.79 **	0.239 8	0.549 3
90 个平均	$Y=0.316\ 0+0.615\ 2X$	0.036 4	0.144 7	368.94 **	0.249 1	0.382 9
100 个平均	$Y=0.315\ 1+0.626\ 3X$	0.036 0	0.141 0	381.46 **	0.249 2	0.381 0

注:*Y* 表示根基粗的总平均值,*X* 表示 10 ~ 100 个最粗根基粗平均值。

从表 3 可以看出,根基粗与总根数、最大根长、根干物质质量、根冠比等根系性状分别呈极显著正相关,与株高、株周长、单蘖直径、地上部干物质质量等地上部性状分别呈极显著的正相关。这表明株系的根基部越粗时,根越长,株高相对越高,株周长、单蘖直径越粗。说明根基粗是水稻根系统中重要性

状之一。根系性状相互之间也都呈极显著正相关。除根冠比外,其他根系性状与株周长、单蘖直径、地上部干物质质量等地上部性状都呈极显著正相关。分蘖数除与总根数呈极显著正相关外,与其他根系性状相关都不显著;株高除与根基粗呈极显著相关外,与其他根系性状相关不显著。

表 3 根系性状与地上部之间的相关系数

性状	根基粗 (mm)	总根数 (条)	最大根长 (cm)	根干物质质量 (g)	根冠比	分蘖数 (个)	株高 (cm)	株周长 (cm)	单蘖直径 (cm)	地上部干 物质质量(g)
根基(mm)	1.000									
总根数(条)	0.326 **	1.000								
最大根长(cm)	0.501 **	0.410 **	1.000							
根干物质质量(g)	0.517 **	0.769 **	0.641 **	1.000						
根冠比	0.377 **	0.355 **	0.443 **	0.565 **	1.000					
分蘖数(个)	-0.069	0.277 **	-0.090	0.172	0.066	1.000				
株高(cm)	0.322 **	0.127	0.098	0.189	-0.248	-0.185 *	1.000			
株周长(cm)	0.360 **	0.685 **	0.389 **	0.688 **	0.205	0.369 **	0.171	1.000		
单蘖直径(cm)	0.419 **	0.351 **	0.418 **	0.444 **	0.160	-0.555 **	0.293 **	0.537 **	1.000	
地上部干物质质量(g)	0.387 **	0.685 **	0.473 **	0.806 **	-0.010	0.145	0.404 **	0.685 **	0.447 **	1.000

2.5 根基粗与地上部性状的多元回归分析

对水稻根基粗(Y_1)与水稻地上部抗倒伏相关分蘖数(X_1)、株高(X_2)、株周长(X_3)、单蘖直径(X_4)、地上部干物质质量(X_5)等 5 个农艺性状进行逐步多元回归分析。表 4 结果表明,根基粗只与单蘖直径、地上部干物质质量有显著的线性关系。回归方程 $Y_1 = 0.792 + 0.118X_4 + 0.00178X_5$ 表明单蘖直茎、地上部干物质质量分别每增加 1 个单位,根基粗将分别增加 0.118 个单位和 0.00178 个单位,两者分别解释了 6.81% 和 6.30% 的根基粗的变异。

本研究还对总根数(Y_2)、最大根长(Y_3)、根干物质质量(Y_4)、根冠比(Y_5)等 4 个地下部根系性状与地上部性状进行了多元回归分析。表 4 结果表明,除分蘖数对 4 个根系性状均没有显著线性效应外,株高、株周长、单蘖直径、地上部干物质质量对 4 个根系性状均存在显著线性效应。多元回归方程表明,株高每增加 1 个单位,总根数、根干物质质量分别减少

0.798、0.0114 个单位,而根冠比则增加 0.000404 个单位,分别解释了 4.24% 的总根数、5.66% 的根干物质质量和 9.42% 的根冠比变异。株周长只与总根数存在显著线性效应,株周长每增加 1 个单位,总根数则增加 14.385 个单位,解释了 13.54% 的总根数变异。单蘖直径每增加 1 个单位,最大根长和根冠比分别增加 9.528、0.00102 个单位,分别解释了 6.76% 的最大根长和 6.00% 的根冠比变异。地上部干物质质量每增加 1 个单位,总根数、最大根长和根干物质质量分别增加 3.544、0.204、0.0764 个单位,分别解释了 21.25% 的总根数、12.04% 的最大根长和 61.00% 的根干物质质量变异。

多元回归方程较好地反映了水稻抗倒伏相关的地下部根系性状和地上部农艺性状的关系,这与相关分析结果基本一致。但是总根数、根干物质质量、根冠比与株高无显著关系,通过多元回归分析却发现它们之间的关联。

表 4 根系性状与地上部性状多元回归关系

多元回归方程	自变量	F 值	标准误差	偏决定系数 r^2 (%)
$Y_1 = 0.792 + 0.118X_4 + 0.00178X_5$	X_4	7.00 **	0.448	6.81
	X_5	6.48 *	0.000699	6.30
	X_2	4.22 *	0.389	4.24
$Y_2 = 37.697 - 0.798X_2 + 14.385X_3 + 3.544X_5$	X_3	14.85 **	3.732	13.54
	X_5	25.62 **	0.700	21.25
	X_4	6.99 **	3.604	6.76
$Y_3 = 13.284 + 9.528X_4 + 0.204X_5$	X_5	13.16 **	0.0563	12.04
	X_2	5.54 *	0.00484	5.66
	X_5	143.78 **	0.00638	61.00
$Y_4 = 0.873 - 0.0114X_2 + 0.0764X_5$	X_2	9.47 **	0.000131	9.42
	X_4	5.82 *	0.0111	6.00

注: X_1 表示分蘖数、 X_2 表示株高、 X_3 表示株周长、 X_4 表示单蘖直径、 X_5 表示地上部干物质质量, Y_1 表示根基粗、 Y_2 表示总根数、 Y_3 表示最大根长、 Y_4 表示根干物质质量、 Y_5 表示根冠比。

3 结论与讨论

利用水培法对 DH 群体进行根系的相关研究,其优点是可以保证根系的完整性,并且生长条件容易控制,可很好地模

拟水稻在自然条件下的生长状态,取得与水田相仿甚至更高的产量^[17]。最重要的是,利用水培法获得的水稻根系性状与大田水稻根系性状能够表现较好的一致性^[15]。因此,水培法是研究水稻根系的一种简便易行而且较可靠的方法。

本研究对 DH 群体齐穗后 7 d 的根系性状进行取样分析,该时期的水稻根系能比较完整地反映水稻根形态特征^[4]。相关统计分析表明,DH 群体中的根基粗性状呈近似的正态分布,并且根基粗总平均值与 10~100 个最粗根基粗平均值分别存在着极显著正相关,且有明显的线性回归关系,回归截距和回归系数变化范围都很小。根基粗总平均值与 30 个、40 个最粗根基粗平均值相关系数最大,这表明在研究根基粗时,考查 30 个或者 40 个最粗的根系基粗就能反映出整个株系根基粗。

倒伏已成为水稻高产稳产的重要限制因素之一^[18]。根据倒伏发生的位置不同,水稻倒伏可分为茎秆倒伏和根倒伏 2 种。而在生产实践中发生的水稻倒伏,大部分兼有根倒伏和茎秆倒伏的综合性特征^[19]。根倒伏即发生在稻株根际的全株倒伏,主要是由于水稻根系入土较浅、下层根系发育差所致^[20]。茎秆倒伏由于较普遍且比较直观,所以研究报道较多^[21-24]。然而关于根倒伏的研究却鲜有报道^[20,25],主要原因是由于根系处于地下,挖起时容易损失其固有形态,损伤较大,研究相对困难。随着抛秧技术^[26]和直播稻技术^[27]的推广,根系倒伏的风险加大,人们对水稻抗倒伏性研究提出了新的要求,因而研究水稻根系与抗倒伏关系势在必行。本研究把水稻抗倒伏相关的地下部根系性状与抗倒伏相关的地上部性状结合起来分析,结果表明,地下部根系性状与地上部性状具有联动关系,除根冠比外,其他根系性状与株周长、单蘖直径、地上部干物质量等地上部性状都呈极显著正相关。其中,根基粗、最大根长、总根数与株周长、单蘖直径分别呈极显著的正相关。而茎秆越粗,植株的抗倒能力相对越强^[28]。因此,根基粗、最大根长、总根数可以作为水稻抗倒伏育种的选择目标,同时这三者也是抗旱育种的选择目标^[7]。研究还表明,地下部根系性状与地上部性状存在多元回归关系,回归方程较好地反映了地上部性状对地下部根系性状所起的作用。但是总根数、根干物质量、根冠比与株高无显著关系,通过多元回归分析却发现它们之间的关联,说明株高对地下部根系性状具有一定的影响。

本研究通过水培模拟自然条件下的植株生长状态,通过对抗倒伏相关根基粗等性状的研究,为水稻根系育种^[29-30]提供参考。

参考文献:

- [1] 黄英金,石庆华,李木英,等. 水稻根系性状的遗传研究[J]. 江西农业大学学报,1995,17(4):368-374.
- [2] 石庆华,黄英金,李木英,等. 水稻根系性状与地上部的相关及根系性状的遗传研究[J]. 中国农业科学,1997,30(4):62-68.
- [3] 廖荣伟,刘晶森. 作物根系形态观测方法研究进展讨论[J]. 气象科技,2008,36(4):429-435.
- [4] 吴伟明. 水稻根系性状的遗传及基因定位[D]. 北京:中国农业科学院,2006.
- [5] 梁永书. 超级稻协优 9308 衍生群体根系的遗传研究[D]. 北京:中国农业科学院,2011.
- [6] 穆平,李自超,李春平,等. 水、旱稻根系性状与抗旱性相关分析及其 QTL 定位[J]. 科学通报,2003,48(20):2162-2169.
- [7] 凌祖铭,李自超,余荣,等. 水、陆稻根部性状的研究[J]. 中国农业大学学报,2002,7(3):7-11.
- [8] Li J Z, Han Y C, Liu L, et al. qRT9, a quantitative trait locus controlling root thickness and root length in upland rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(9): 2723-2732.
- [9] Ekanayake I J, Garrity D P, Toole J O. Influence of deep root density on root pulling resistance in rice [J]. Crop Science, 1986, 26(6): 1181-1186.
- [10] Jong G W, Hirahara Y, Yoshida T, et al. Selection of rice lines using SPGP seedling method for direct seeding [J]. Plant Production Science, 1998, 1(4): 280-285.
- [11] 孙传清, 张文绪. 水稻根系性状和叶片水势的遗传及其相关研究[J]. 中国农业科学, 1995, 28(1): 42-48.
- [12] 王会民. 超级稻协优 9308 根系相关性状 QTLs 的精细定位 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [13] 梁永书, 占小登, 高志强, 等. 超级稻协优 9308 衍生群体根系与地上部重要农艺性状的相关性 [J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1711-1723.
- [14] 宋祥甫, 应火冬, 朱敏, 等. 自然水域无土栽培水稻的研究 [J]. 中国农业科学, 1991, 14(4): 8-13, 96.
- [15] 吴伟明, 宋祥甫, 邹国燕. 利用水上栽培方法研究水稻根系 [J]. 中国水稻科学, 2000, 14(3): 189-192.
- [16] 莫惠栋. 农业试验统计 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
- [17] 宋祥甫, 吴伟明, 应火冬, 等. 自然水域无土栽培水稻的生态适应性研究 [J]. 中国水稻科学, 1996, 10(4): 227-234.
- [18] 赵黎明, 顾春梅, 陈淑洁, 等. 水稻倒伏研究及其影响因素分析 [J]. 北方水稻, 2009, 39(4): 66-70.
- [19] 张喜娟, 李红娇, 李伟娟, 等. 北方直立穗型梗稻抗倒性的研究 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2305-2313.
- [20] Terashima K. Eco-physiological study of root lodging tolerance in direct-seeded rice (*Oryza sativa*) cultivars [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1997, 31(3): 155-162.
- [21] 胡江, 藤本宽, 郭龙彪, 等. 水稻抗倒力及相关抗倒伏性状的 QTL 分析 [J]. 中国水稻科学, 2008, 22(2): 211-214.
- [22] 郭保卫, 朱大伟, 许轲, 等. 有序摆秧栽培对超级稻植株抗倒伏能力的影响 [J]. 中国水稻科学, 2015, 29(1): 45-55.
- [23] 张忠旭, 陈温福, 杨振玉, 等. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 1999, 34(2): 81-85.
- [24] Kashiwagi T, Togawa E, Hirotsu N, et al. Improvement of lodging resistance with QTLs for stem diameter in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. TAG, 2008, 117(5): 749-757.
- [25] Terashima K, Akita S, Sakai N. Eco-physiological characteristics related with lodging tolerance of rice in direct sowing cultivation. III. Relationship between the characteristics of root distribution in the soil and lodging tolerance [J]. Crop Science Society of Japan, 1995, 64(2): 243-250.
- [26] 杨祥田, 罗三镛, 吴晓华. 水稻抛秧栽培对其抗倒伏能力的影响 [J]. 浙江农业学报, 1999, 11(3): 151.
- [27] 许轲, 唐磊, 郭保卫, 等. 不同水直播方式水稻植株抗倒特性研究 [J]. 华北农学报, 2014, 29(6): 226-232.
- [28] 饶玉春, 李跃, 董国军, 等. 水稻抗倒伏研究进展 [J]. 中国稻米, 2009(6): 15-19.
- [29] 吴伟明, 程式华. 水稻根系育种的意义与前景 [J]. 中国水稻科学, 2005, 19(2): 174-180.
- [30] 魏磊, 董华林, 武晓智, 等. 水稻根系育种研究进展 [J]. 农业科学与技术, 2015, 16(4): 675-678.