

李发桥, 戴晓萧, 王伦伟, 夏小舟, 韦善清, 梁和, 江立庚. 广西主要水稻品种耐低肥能力评价与分类 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(3): 1-10.

广西主要水稻品种耐低肥能力评价与分类

李发桥¹, 戴晓萧¹, 王伦伟¹, 夏小舟¹, 韦善清¹, 梁和¹, 江立庚^{1,2}

(1. 广西大学农学院, 广西 南宁 530004; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 湖南 长沙 410128)

摘要: 【目的】评价广西主要水稻品种的耐低肥能力, 筛选养分高效水稻品种供生产应用。【方法】选用广西 48 个主要水稻品种进行大田试验, 设置 1/3 正常施氮量、不施磷肥、不施钾肥、正常施肥 4 个处理。根据相对产量 (低肥条件下水稻产量 / 正常施肥条件下的产量) 评价水稻品种的耐低肥能力。【结果】1/3 正常施氮量、不施磷肥、不施钾肥处理水稻的相对产量分别为 0.89、0.88 和 0.93, 且品种间差异均达显著水平。根据品种相对产量进行聚类分析, 48 个参试水稻品种按耐低氮能力、耐低磷能力、耐低钾能力分别可以聚类成 3 类。其中, 广两优 1598、桂两优 2 号、特优 5 号、特优 582、桂丰 2 号、特优 3813、T 优 6135、科两优 889、中广香 1 号、亚航金占等 10 个品种同时具备较强的耐低氮、低磷、低钾能力。【结论】广西不同水稻品种耐低氮、低磷、低钾能力的差异显著, 参试 48 个品种中 10 个品种同时具备较强的低氮、低磷、低钾能力。

关键词: 水稻; 耐低肥能力; 低氮; 低磷; 低钾; 品种筛选; 聚类分析

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2019) 03-0001-10

Evaluation and Classification of Low Fertility Tolerance of Main Rice Varieties in Guangxi

LI Faqiao¹, DAI Xiaoxiao¹, WANG Lunwei¹, XIA Xiaozhou¹, WEI Shanqing¹, LIANG He¹, JIANG Ligeng^{1,2}

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China)

Abstract: 【Objective】The present study was to evaluate the ability of low fertilizer tolerance of major rice varieties in Guangxi and to screen nutrient-efficient rice varieties for production and application. 【Method】48 major rice varieties were selected for field experiment and four treatments were set, i.e. 1/3 standard nitrogen fertilization, no phosphorus fertilization, no potash fertilization and standard fertilization. The ability of low fertilizer tolerance of rice varieties was evaluated based on relative yield (ratio of rice yield under low fertilizer conditions to that under standard fertilizer conditions). 【Result】The relative yields of the three treatments (1/3 N application, no P application and K application) were 0.89, 0.88 and 0.93, respectively, and there were significant differences among varieties. Based on the clustering analysis of relative yield of varieties, 48 rice varieties could be grouped into three categories according to their tolerance to low nitrogen, phosphorus and potassium, respectively. Among all varieties, Guangliangyou 1598, Guiliangyou 2, Teyou 5, Teyou 582, Guifeng 2, Teyou 3813, Teyou 6135, Keliangyou 889, Zhongguangxiang 1, Yahangjinzhan had strong tolerance to low nitrogen, phosphorus and potassium simultaneously. 【Conclusion】There were significant differences in the tolerance to low nitrogen, phosphorus and potassium among different rice varieties in Guangxi. 10 of 48 varieties had strong tolerance ability to low nitrogen, phosphorus and potassium.

Key words: rice; low fertilizer tolerance; low nitrogen; low phosphorus; low potassium; variety selection; cluster analysis

收稿日期: 2019-01-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系广西创新团队 (水稻) (NYCYTXGXCXTD-01)

作者简介: 李发桥 (1992—), 男, 瑶族, 在读硕士生, 研究方向为水稻栽培生理, E-mail: 823485241@qq.com

通信作者: 江立庚 (1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水稻栽培生理, E-mail: jiang@gxu.edu.cn

【研究意义】水稻是广西重要的粮食作物。合理施肥是实现水稻高产和保障粮食安全的重要手段^[1]。然而,过量施肥所带来的问题也日益受到广泛的关注^[2]。“十三五”以来,中央提出农业生产上要实行“双减”政策,要求在2020年我国农业生产用药用肥实现零增长。因此,从现有栽培品种中筛选出耐低肥高效品种,对于降低水稻生产肥料用量和保障粮食安全具有十分重要的意义。挖掘生物自身潜能,筛选高效水稻品种,对于提高肥料利用率和减少肥料使用量具有重要意义。【前人研究进展】研究表明,现存的水稻品种中存在着对氮磷钾元素利用效率的差异,部分水稻品种可以在低肥条件下生长发育受影响较小,甚至表现在产量上的不下降^[3]。在氮元素方面利用效率,不同的水稻品种表现出不一致的氮效率,氮利用率高的水稻品种表现为更高的氮素吸收能力、氮素转移效率、氮素生产效率^[4]。从群体发育特征来看,氮高效水稻品种有更高的成穗率,抽穗期后表现为更强的物质转移能力和光合作用能力^[5]。水稻的产量与其生长发育时长相关,氮高效品种在低氮时能获得比敏感品种更长的发育时长^[6]。氮素经水稻根系吸收后,氮高效品种凭借更发达活力更高的根系系统、更强的转运能力、更活跃的生理生化能力将更多氮元素固定^[7]。在植株内的分配情况,氮高效品种凭借更强的转移能力,能将更多氮元素转移到籽粒中^[8]。应用于实际生产的大量品种中存在低氮条件下产量下降不明显的水稻品种^[9]。区别于氮元素从水稻移栽后的整个生长发育时期都起作用,特别氮高效品种表现为更强的后期生长发育能力,磷元素在水稻生长的前期作用更大^[10]。低磷时,水稻的生长发育受到限制,主要表现为水稻生长株高受限制,分蘖能力变差,无法形成高产表现的群体质量^[11]。低磷条件下磷高效品种比低效品种有更多的有效穗数和更高的千粒重,对比自身正常施肥,千粒重增加,结实率增加^[12]。磷高效品种具有更多的根、更大的根冠比、分蘖早发、茎蘖成穗率高,高效叶面积率大、光合能作用力强,库容量大、茎物质转运率更高,后期生长发育能力更强,有更高的抗倒伏能力^[13]。现存的水稻品种中同样存在大量磷高效品种^[14]。这些水稻品种在低磷条件下能保持产量下降不明显,具有更高的磷利用效率^[15]。钾元素不参与

重要有机物的组成,钾作为多种酶的激活剂参与植物体内的重要代谢,钾元素在水稻的一生中甚至会出现吸收进入植物体内的钾流失回到环境中去。水稻产量对钾肥的敏感性低于氮磷两种元素^[16]。当水稻受到钾胁迫时,水稻根系干重、地上部干重、有效穗数、籽粒生产效率等有明显差别,钾高效品种通常表现为根系更发达、根冠比更大、地上部相对产量更高,与抗逆性相关的酶更有利于植株正常发育^[17]。近年来有许多学者对一定数量水稻品种的钾利用效率进行研究,结果表明有些品种在一定钾胁迫条件下产量不下降^[18]。【本研究切入点】前人对单一养分高效品种的筛选及其生理机制进行了较多研究,但还没有同时对氮、磷、钾3种元素进行耐低肥能力评价的报道。【拟解决的关键问题】以广西现有水稻品种为试验材料,通过大田试验,对广西主要水稻品种的耐低氮、耐低磷和耐低钾能力进行评价,从中筛选出同时具备2种或3种养分高效的品种供生产应用。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点与材料

2017年在广西大学农科教学基地进行大田试验。根据何燕等^[19]的方法,广西水稻种植区域可划分为迟熟双季稻适宜气候区、早中熟双季稻适宜气候区、单季再生稻适宜气候区等。通过对玉林、河池、贺州、合浦、南宁等市(县)农业技术部门进行问卷调查,收集各气候区种植面积较大的10个水稻品种。同时,在南宁、河池、桂林、贺州等市购买销量大或者当地特色水稻品种。上述方法共收集72个水稻品种。播种后,根据秧苗的生长和试验田大小情况,最终进行小区试验的品种共48个(表1)。

1.2 试验设计

采用双因素(品种和施肥水平)裂区试验设计,以施肥水平为主区、品种为裂区,以常规施肥水平($N\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $P_2O_5\ 100\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $K_2O\ 200\ \text{kg}/\text{hm}^2$)作对照,设1/3常规施氮量($N\ 66.7\ \text{kg}/\text{hm}^2$,磷钾肥水平与对照相同)、不施磷肥(氮钾肥水平与对照相同)、不施钾肥(氮磷水平与对照相同)处理,3次重复,共576个小区。主区间以PVC板隔开,挡板连接与交角处用薄膜包裹防止串水串肥,主区内品种随机排列,品种间无

隔离；每裂区1.9 m²，插3行，每行19穴，每穴2苗，行株距为33 cm × 10 cm。氮肥分基肥、分蘖肥、穗肥3次施用，其比率为4 : 3 : 3；磷肥和钾肥作基肥一次性施用。3月10日播种，4月11日移栽。根据品种成熟期确定收获时期。

1.3 测定指标及方法

在水稻成熟期，调查每个小区有效穗数，计算平均有效穗数。每个小区取3穴代表性植株，然后按小区实收稻谷测产。

各试验处理相对产量 = 低肥处理产量 / 正常施肥处理产量

试验数据采用 Excel 2016 统计，使用 SPSS

21.0 进行聚类分析，选择系统聚类，使用组间联接以 Euclidean 距离为度量标准。

2 结果与分析

2.1 广西主要水稻品种不同施肥水平下的产量表现

各试验处理水稻产量结果见表1。由表1可知，低氮（1/3N）处理水稻平均产量比对照低11%，但有2个品种的产量比对照略高；不施磷处理水稻平均产量比对照低12%，但有4个品种的产量比对照略高；不施钾处理水稻平均产量比对照低7%，但有10个品种的产量比对照略高。

表1 不同施肥水平下广西主要水稻品种产量
Table 1 Grain yield of Guangxi main rice varieties under different fertilizer application

品种 Variety	对照产量 Yield of CK (t/hm ²)	1/3N 1/3 nitrogen application		不施 P No P application		不施 K No K application	
		产量 Grain yield (t/hm ²)	相对产量 Relative yield	产量 Grain yield (t/hm ²)	相对产量 Relative yield	产量 Grain yield (t/hm ²)	相对产量 Relative yield
群优 2 号 Qunyou 2	6.64 ± 0.32	5.33 ± 0.06	0.80	4.80 ± 0.64	0.72	6.40 ± 0.41	0.96
C 两优 4418 C liangyou 4418	7.08 ± 0.33	5.90 ± 0.37	0.83	6.36 ± 0.12	0.90	6.87 ± 0.17	0.97
H 两优 6839 H liangyou 6839	7.85 ± 0.06	6.94 ± 0.21	0.88	7.16 ± 0.59	0.91	6.54 ± 0.56	0.83
T 优 6135 T you 6135	7.23 ± 0.17	7.08 ± 0.37	0.98	6.91 ± 0.13	0.95	7.41 ± 0.52	1.02
Y 两优 087 Y liangyou 087	4.57 ± 0.35	4.12 ± 0.00	0.90	3.82 ± 1.04	0.83	4.67 ± 0.87	1.02
Y 两优 1 号 Y liangyou 1	6.50 ± 0.37	4.92 ± 0.43	0.75	5.1 ± 0.370	0.78	5.69 ± 0.20	0.88
Y 两优 2 号 Y liangyou 2	5.98 ± 0.00	5.22 ± 0.76	0.87	4.56 ± 0.90	0.76	5.49 ± 0.44	0.92
Y 两优 3218 Y liangyou 3218	5.94 ± 0.34	5.38 ± 1.12	0.91	4.97 ± 0.53	0.84	5.30 ± 0.73	0.89
Y 两优 9038 Y liangyou 9038	6.46 ± 0.00	6.19 ± 0.03	0.96	4.82 ± 0.24	0.75	6.20 ± 0.14	0.96
Y 两优 916 Y liangyou 916	6.27 ± 0.06	5.23 ± 0.24	0.83	3.33 ± 0.16	0.53	5.14 ± 0.14	0.82
Y 两优 9918 Y liangyou 9918	7.98 ± 0.56	6.69 ± 0.32	0.84	6.49 ± 0.13	0.81	6.83 ± 0.36	0.86
百香 139 Baixiang 139	5.38 ± 0.52	5.14 ± 0.15	0.95	5.21 ± 0.47	0.97	4.87 ± 0.33	0.90
丰两优 4 号 Fengliangyou 4	6.27 ± 0.15	5.96 ± 0.26	0.95	5.15 ± 0.06	0.82	5.27 ± 0.16	0.84
丰两优六号 Fengliangyou 4	5.83 ± 0.66	5.71 ± 0.33	0.98	4.66 ± 0.05	0.80	4.60 ± 0.10	0.79
广 8 优金占 Guang 8 youjingzhan	6.12 ± 0.10	5.16 ± 0.22	0.84	5.4 ± 0.080	0.88	5.26 ± 0.17	0.86
广两优 1598 Guangliangyou 1598	7.60 ± 0.54	7.04 ± 0.30	0.93	7.29 ± 0.31	0.96	7.07 ± 0.21	0.93
桂丰 2 号 Guifeng 2	5.55 ± 0.13	5.36 ± 0.11	0.97	5.47 ± 0.09	0.99	5.31 ± 0.22	0.96
桂禾丰 Guihefeng	5.60 ± 0.54	4.75 ± 0.72	0.86	5.61 ± 0.40	1.00	5.11 ± 0.30	0.91
桂两优 2 号 Guiliangyou 2	6.63 ± 0.76	6.16 ± 0.54	0.93	6.70 ± 0.38	1.01	6.92 ± 0.54	1.04
桂育 9 号 Guiyu 9	6.64 ± 0.15	5.49 ± 0.63	0.83	5.33 ± 0.51	0.80	5.58 ± 0.45	0.84
恒丰优华占 Hengfengyouhuazhan	8.12 ± 0.42	7.51 ± 0.45	0.93	7.41 ± 0.28	0.91	8.04 ± 0.73	0.99
华两优 338 Hualiangyou 338	5.34 ± 0.93	4.27 ± 0.27	0.80	4.73 ± 0.53	0.89	4.03 ± 0.75	0.75
金谷优 3301 Jingguyou 3301	7.04 ± 0.26	6.77 ± 0.57	0.96	6.49 ± 0.45	0.92	7.25 ± 0.16	1.02
金农垦苗 Jingnongsimiao	7.17 ± 0.67	5.29 ± 0.14	0.74	5.62 ± 0.55	0.78	5.86 ± 0.30	0.81
科两优 889 Keliangyou 889	5.21 ± 0.07	5.17 ± 0.08	0.99	5.04 ± 0.02	0.97	5.15 ± 0.39	0.99
科玉 03 Keyu 03	5.24 ± 0.06	3.43 ± 0.28	0.65	4.93 ± 0.07	0.94	4.94 ± 0.26	0.94
泸优 578 Luyou 587	6.21 ± 0.22	6.07 ± 0.53	0.98	5.59 ± 0.13	0.90	5.92 ± 0.11	0.95
农乐 1 号 Nongle 1	5.89 ± 0.66	5.74 ± 0.47	0.97	5.10 ± 0.26	0.87	4.99 ± 0.26	0.85
深优 9516 Shenyong 9516	7.04 ± 0.16	6.31 ± 0.17	0.90	6.42 ± 0.37	0.91	7.41 ± 0.74	1.05
深优 9583 Shenyong 9583	9.67 ± 0.22	7.77 ± 0.03	0.80	5.25 ± 0.19	0.54	8.32 ± 0.10	0.86
泰优 99 Taiyou 99	6.59 ± 0.07	4.94 ± 0.61	0.75	5.68 ± 0.04	0.86	5.51 ± 0.65	0.84
特优 165 Teyou 165	7.29 ± 0.46	6.71 ± 0.26	0.92	6.59 ± 0.41	0.90	6.52 ± 0.45	0.89
特优 3550 Teyou 3350	7.27 ± 0.11	6.31 ± 0.03	0.87	7.32 ± 0.14	1.00	7.13 ± 0.07	0.98

(续表 1)

品种 Variety	对照产量 Yield of CK (t/hm ²)	1/3N 1/3 nitrogen application		不施 P No P application		不施 K No K application	
		产量 Grain yield (t/hm ²)	相对产量 Relative yield	产量 Grain yield (t/hm ²)	相对产量 Relative yield	产量 Grain yield (t/hm ²)	相对产量 Relative yield
特优 3813 Teyou 3813	7.32 ± 0.42	7.14 ± 0.27	0.97	7.29 ± 0.27	0.99	7.14 ± 0.15	0.97
特优 524 Teyou 524	7.54 ± 0.10	6.74 ± 0.67	0.89	6.08 ± 0.24	0.81	7.20 ± 0.56	0.95
特优 582 Teyou 582	6.93 ± 0.40	6.67 ± 0.09	0.96	6.78 ± 0.19	0.98	6.99 ± 0.55	1.01
特优 5 号 Teyou 5	6.55 ± 0.41	6.24 ± 0.22	0.95	6.29 ± 0.54	0.96	7.02 ± 0.15	1.07
特优 918 Teyou 918	7.08 ± 0.06	6.17 ± 0.10	0.87	6.63 ± 0.03	0.94	5.91 ± 0.74	0.83
五山丝苗 Wushansimiao	7.70 ± 0.66	6.68 ± 0.71	0.87	7.03 ± 0.01	0.91	6.98 ± 0.23	0.91
亚航金占 Yahangjingzhan	5.40 ± 0.66	5.48 ± 0.50	1.01	5.41 ± 0.43	1.00	5.74 ± 0.52	1.06
野香优 2998 Yexiangyou 2998	7.04 ± 0.24	6.14 ± 0.00	0.87	6.13 ± 0.65	0.87	5.90 ± 0.14	0.84
野香优 863 Yexiangyou 863	6.09 ± 0.50	5.45 ± 0.50	0.89	6.03 ± 0.66	0.99	6.57 ± 0.99	1.07
宜香 2292 Yixiang 2292	6.91 ± 0.48	6.07 ± 0.16	0.88	6.45 ± 0.64	0.93	6.11 ± 0.20	0.88
宜香 9683 Yixiang 9683	6.12 ± 0.75	5.26 ± 0.01	0.86	5.46 ± 0.25	0.89	6.07 ± 0.44	0.99
宜香 99E-4 Yixiang 99E-4	6.01 ± 0.17	5.11 ± 0.04	0.85	5.49 ± 0.66	0.91	5.97 ± 0.30	0.99
中广香 1 号 Zhongguangxiang 1	4.21 ± 0.54	4.25 ± 0.52	1.01	4.17 ± 0.39	0.99	4.17 ± 0.58	0.99
中研优 519 Zhongyanyou 519	6.28 ± 0.25	5.90 ± 0.39	0.94	5.3 ± 0.65	0.84	5.66 ± 0.10	0.90
中浙优 1 Zhongzheyou 1	4.63 ± 0.02	4.17 ± 0.21	0.90	3.98 ± 0.88	0.86	5.07 ± 0.87	1.09
平均 Average	6.50	5.78	0.89	5.70	0.88	6.04	0.93
F 值 F value	18.42**	16.37**	2.25*	15.45**	4.13*	14.40**	3.66*

2.2 广西主要水稻品种耐低氮能力评价及分类

从表 1 可以看出, 低氮处理水稻品种间相对产量的差异达显著水平。因此, 以 Euclidean 距离为度量标准对参试水稻品种的相对产量值进行系统聚类, 结果 (图 1) 表明, 参试水稻品种的耐低氮能力可分为 3 类, 其中耐低氮品种 20 个, 中耐低氮品种 24 个, 氮敏感品种 4 个。方差分析结果

表明, 类间差异极显著。耐低氮品种还可以进一步划分 3 个等级: 第一级为耐低氮能力较强品种, 包括亚航金占和中广香 1 号两个品种, 在低氮条件下相对产量值大于 1; 第二级耐低氮品种, 如丰两优四号等 13 个品种, 相对产量在 0.9494~0.9921; 第三级耐低氮品种, 如特优 165 等 5 个品种, 相对产量为 0.9204~0.9406 (表 2)。

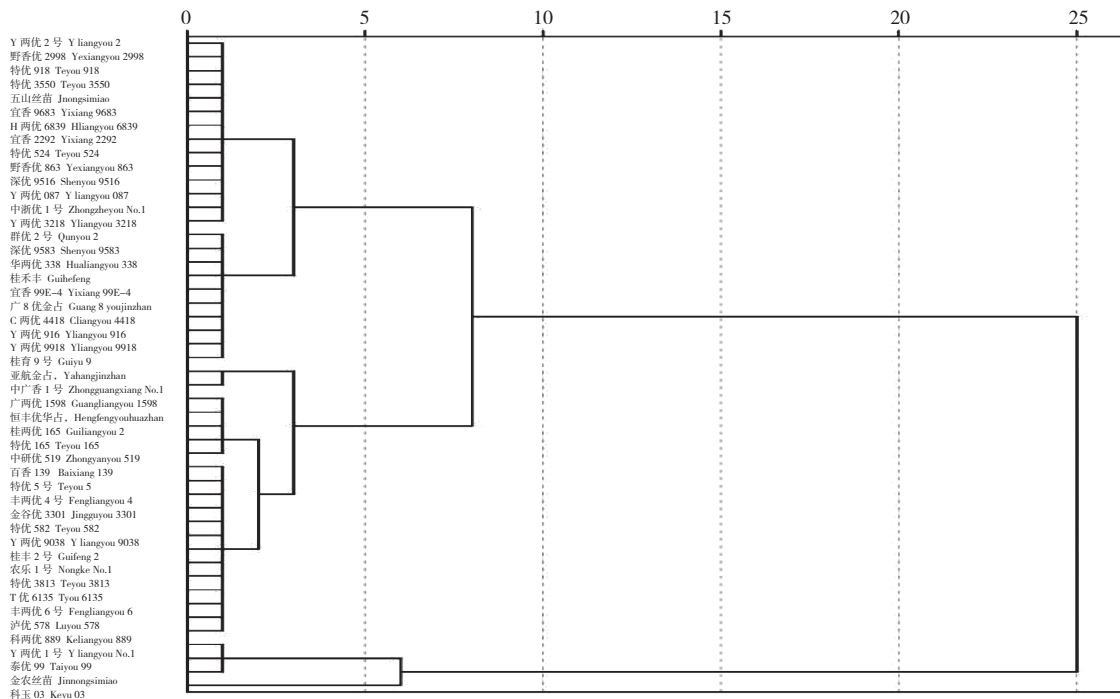


图 1 广西主要水稻品种低氮条件下相对产量聚类分析结果

Fig. 1 Cluster analysis chart of relative yield of Guangxi main rice varieties under low nitrogen condition

表 2 参试水稻品种耐低氮能力分类
Table 2 Classification of low nitrogen tolerance of the tested rice varieties

耐低氮能力 Low nitrogen tolerance ability	水稻品种 Rice variety
耐低氮 Low nitrogen tolerance	一级 First level 亚航金占、中广香 1 号
	二级 Second level 丰两优四号、特优 5 号、百香 139、Y 两优 9038、金谷优 3301、特优 582、特优 3813、桂丰 2 号、农乐 1 号、泸优 578、丰两优六号、T 优 6135、科两优 889
	三级 Third level 特优 165、恒丰优华占、广两优 1598、桂两优 2 号、中研优 519
中耐低氮 Medium nitrogen tolerance	华两优 338、群优 2 号、深优 9583、桂育 9 号、C 两优 4418、Y 两优 916、Y 两优 9918、广 8 优金占、桂禾丰、宜香 99E-4、宜香 9683、五山丝苗、特优 3550、特优 918、野香优 2998、Y 两优 2 号、宜香 2292、H 两优 6839、野香优 863、特优 524、深优 9516、Y 两优 087、中浙优 1、Y 两优 3218、特优 165、恒丰优华占、广两优 1598、桂两优 2 号
氮敏感 Sensitive to nitrogen	科玉 03、金农丝苗、泰优 99、Y 两优 1 号

2.3 广西主要水稻品种耐低磷能力评价及分类

从表 1 可以看出，不施磷肥条件下，水稻品种间相对产量差异达显著水平。根据不施磷处理相对产量的系统聚类结果（图 2），参试水稻品

种的耐低磷能力可分为 3 类，其中耐低磷品种 17 个，中耐低磷品种 19 个，不耐低磷品种 12 个（表 3）。方差分析结果表明，类间差异极显著。

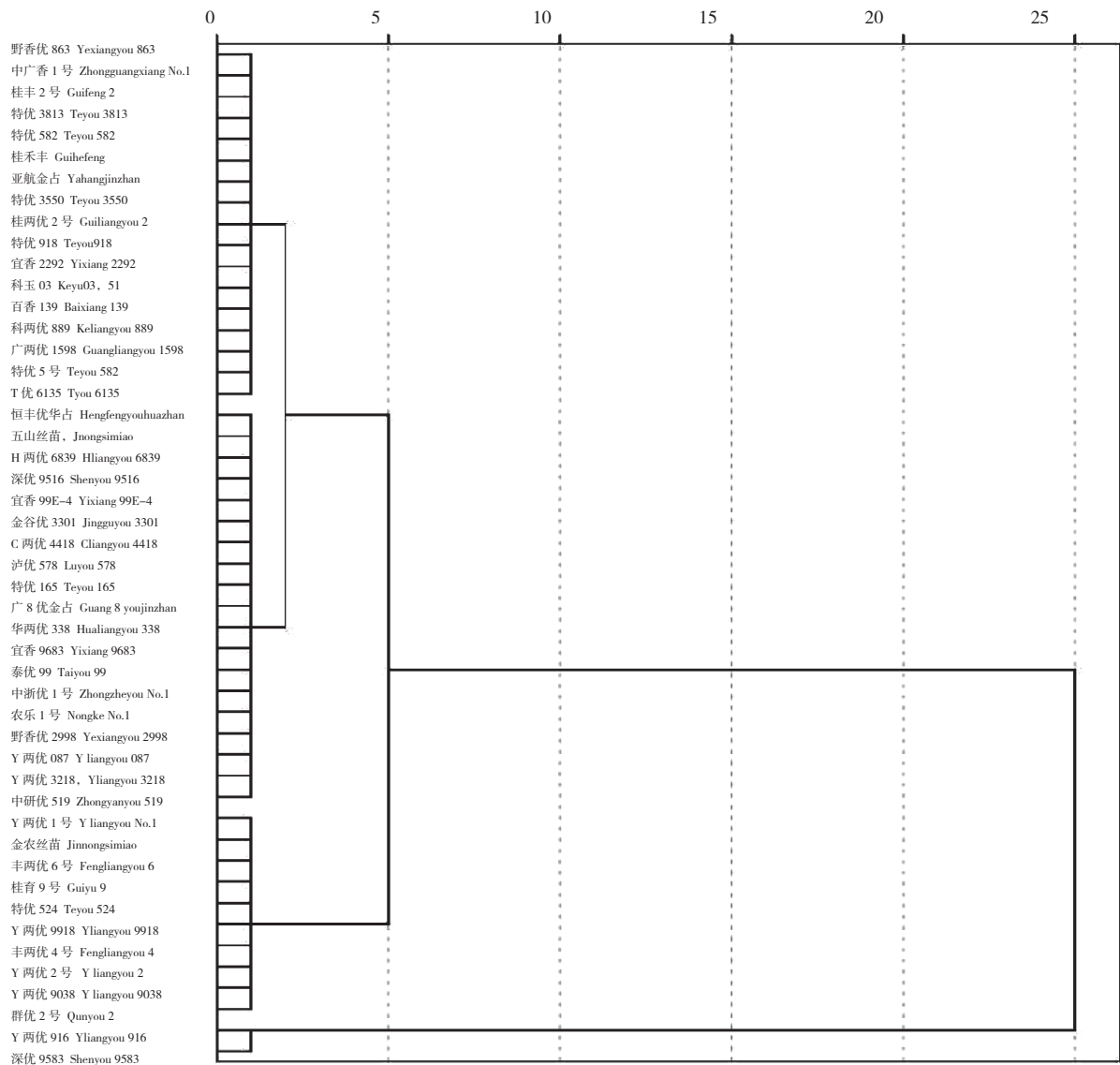


图 2 广西主要水稻品种低磷条件下相对产量聚类分析结果

Fig. 2 Cluster analysis chart of relative yield of Guangxi main rice varieties under low phosphorus condition

表3 广西主要水稻品种耐低磷能力分类

Table 3 Classification of low phosphorus tolerance of Guangxi main rice varieties

耐低磷能力 Low phosphorus tolerance ability	水稻品种 Rice variety
耐低磷 Low phosphorus tolerance	宜香 2292、特优 3550、亚航金占、桂禾丰、特优 3813、中广香 1 号、野香优 863、桂丰 2 号、特优 582、百香 139、科两优 889、特优 5 号、广两优 1598、T 优 6135、科玉 03、特优 918、桂两优 2 号
中耐低磷 Medium phosphorus tolerance	Y 两优 087、Y 两优 3218、中研优 519、中浙优 1、泰优 99、农乐 1 号、野香优 2998、广 8 优金占、华两优 338、宜香 9683、C 两优 4418、泸优 578、特优 165、深优 9516、H 两优 6839、五山丝苗、恒丰优华占、宜香 99E-4、金谷优 3301
磷敏感 Sensitive to phosphorus	群优 2 号、Y 两优 9038、Y 两优 2 号、金农丝苗、Y 两优 1 号、丰两优六号、桂育 9 号、特优 524、Y 两优 9918、丰两优 4 号、Y 两优 916、深优 9583

2.4 广西主要水稻品种耐低钾能力评价及分类

从表 1 可以看出，不施钾肥条件下，各水稻品种间的相对产量差异达显著水平。根据其相对产量值进行系统聚类，结果（图 3）表明，参试

水稻品种的耐低钾能力可分为 3 类，其中耐低钾品种 25 个，中耐低钾品种 21 个，钾敏感品种 2 个。方差分析表明，类间差异极显著。参试品种耐低钾能力分类见表 4。

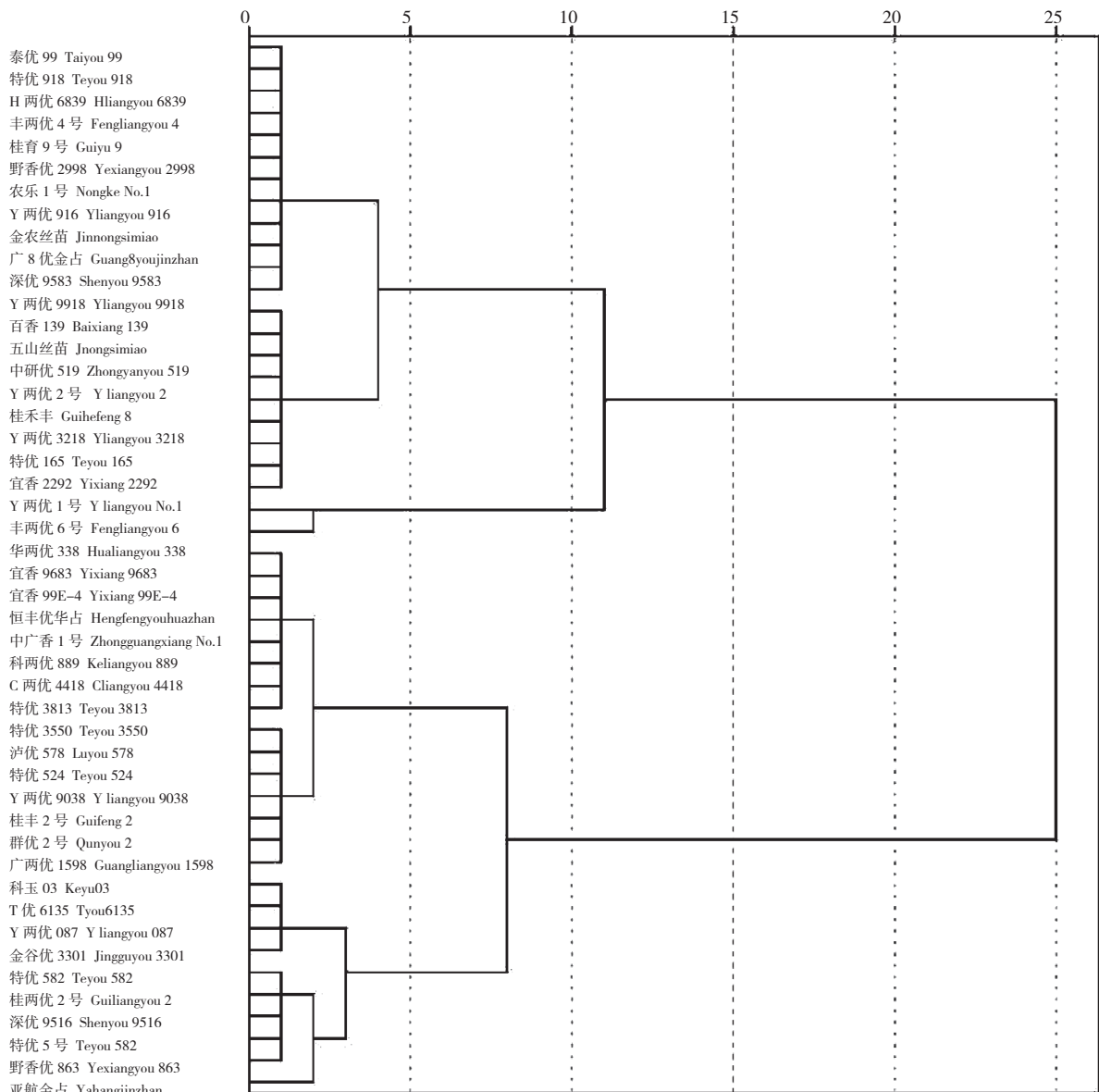


图3 广西主要水稻品种低钾条件下相对产量聚类分析结果

Fig. 3 Cluster analysis chart of relative yield of Guangxi main rice varieties under low potassium condition

表 4 广西主要水稻品种耐低钾能力分类
Table 4 Classification of low potassium tolerance of Guangxi main rice varieties

耐低钾能力 Low potassium tolerance ability	水稻品种 Rice variety
耐低钾 Low potassium tolerance	深优 9516、桂两优 2 号、亚航金占、特优 5 号、野香优 863、中浙优 1 号、特优 582、T 优 6135、Y 两优 087、金谷优 3301、C 两优 4418、特优 3813、特优 3550、科两优 889、恒丰优华占、中广香 1 号、宜香 9683、宜香 99E-4、科玉 03、泸优 578、广两优 1598、特优 524、桂丰 2 号、Y 两优 9038、群优 2 号
中耐低钾 Medium potassium tolerance	金农丝苗、Y 两优 916、H 两优 6839、特优 918、泰优 99、野香优 2998、丰两优 4 号、桂育 9 号、农乐 1 号、Y 两优 9918、广 8 优金占、深优 9583、Y 两优 1 号、宜香 2292、Y 两优 3218、特优 165、中研优 519、百香 139、五山丝苗、桂禾丰、Y 两优 2 号
钾敏感 Sensitive to potassium	华两优 338、丰两优六号

2.5 广西主要水稻品种综合耐低肥能力评价

参试 48 个水稻品种的耐低肥能力如图 4 所示。由图 4 可知，参试 48 个广西主要水稻品种中，有能耐低氮的水稻品种 20 个，耐低磷水稻品种 17 个，耐低钾水稻品种 25 个；同时表现出耐低

氮、耐低磷和耐低钾的品种有 10 个，分别为广两优 1598、桂两优 2 号、特优 5 号、特优 582、桂丰 2 号、特优 3813、T 优 6135、科两优 889、中广香 1 号、亚航金占。

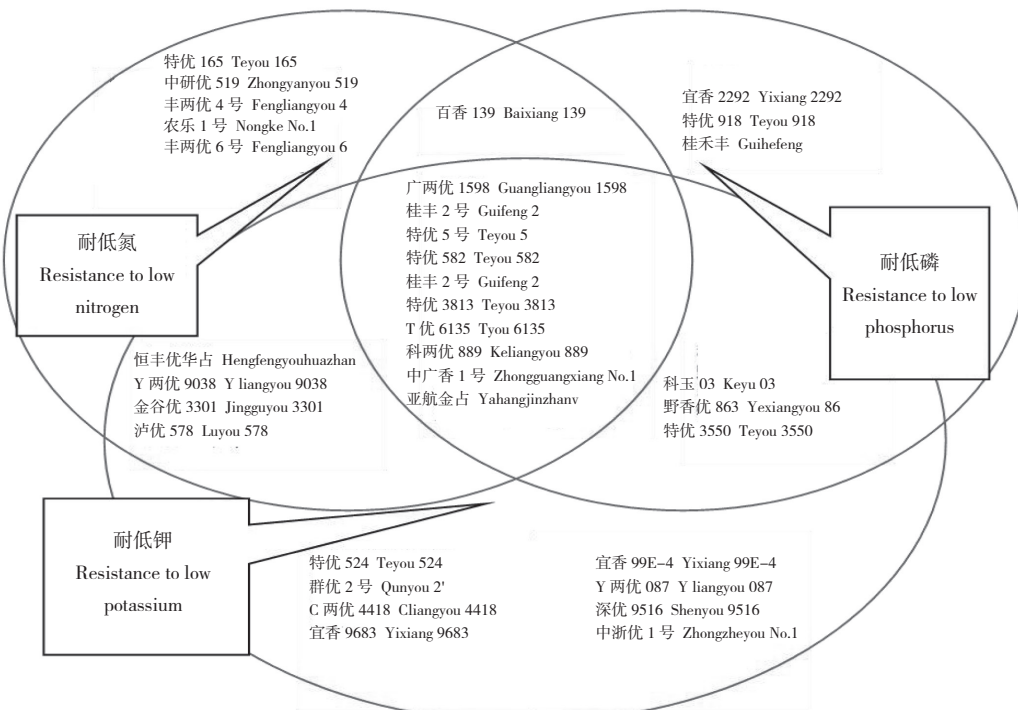


图 4 耐低肥的广西主要水稻品种
Fig. 4 Main rice varieties in Guangxi with low fertilizer tolerance

3 讨论

当前水稻生产过程中的化肥利用效率普遍较低，通常氮肥利用率在 35% 左右^[20]，磷肥利用率为 13%^[21]，钾肥为 25.6%^[22]。肥料利用率由作物遗传因素决定，同时还受到环境的影响^[23]。肥料利用率因不同的土壤条件^[24]、气候条件^[25]、种质资源条件^[26]、施肥习惯^[27]、水分管理情况^[28]而变化。

利用高效水稻品种是降低肥料用量、提高肥料利用率的最经济手段，因此，研究者十分重视高效品种的评价与筛选。在氮素方面，江立庚等^[4]研究表明，不同水稻品种在氮素吸收能力、氮素生产效率、氮素农学效率方面均存在显著的差异。在相对产量方面，有研究表明在 1/3 正常施肥水平条件下水稻相对产量为 0.55~1.11^[6]。对氮素高效水稻品种生理特征的研究表明，氮高效品种

从长势来看, 主要在后期拥有更强的后劲, 即氮低效品种与氮高效品种的区别在于水稻生长的后期^[29]。另外, 有些氮高效品种在苗期也有多数指标与氮低效品种有着显著差异^[30]。这些优势从苗期一直贯穿水稻整个生育期, 氮高效品种在低氮条件时能拥有更发达的根系, 创造的根系环境更适宜水稻吸收各种营养元素^[31]。在磷元素方面, 水稻对磷元素的吸收与利用存在着广泛的差异性。磷高效品种区别氮高效品种的地方在于, 磷高效品种的优势在水稻生长早期表现出来^[10]。水稻磷元素的积累主要在生育前期和中期, 生育后期磷的积累量较少, 生物后期水稻吸收积累磷的多少对产量并不会造成太大影响, 磷高效品种在苗期表现更为发达的根系吸收系统、更高的磷积累速率、更快的物质积累速度^[32]。磷高效品种在低磷条件下、拥有更多的有效穗数、更多的每穗粒数, 在群体质量上都有更好的表现^[33], 且磷高效品种拥有更为发达的根系^[34]。在钾元素方面, 水稻产量对钾元素的响应相对于氮元素是欠敏感的。钾元素通常以离子形式存在, 不直接参与有机物构成。研究表明钾高效品种具有更高的生物量、收获指数和结实率, 但基本农艺性状及产量构成因子没有显著差异^[35]。钾高效水稻品种在低钾条件下, POD 活性变化较大, 而 CAT 活性变化较小, 各品种之间差异不一^[36]。钾高效品种的叶片叶绿素含量较其他品种高; 钾高效品种在低钾条件下, 其可溶性糖和可溶性蛋白含量均高于其他品种, 但氨酸含量则是钾高效品种含量低于其他品种, 钾元素影响脯氨酸含量的变化; 抗氧化酶的活性与钾效率的关系密切; 不同化感作用强度的水稻品种对钾元素吸收不一致, 化感作用强的水稻品种对钾的吸收能力更强^[37]。与氮、磷元素一致的是, 钾高效品种同样拥有更好的根系^[38]。

4 结论

以往研究主要是在单一养分模式下筛选养分高效品种。对比氮、磷、钾 3 种元素的高效品种, 现存水稻品种中, 总能筛选到某种元素的高效品种, 且氮磷钾高效品种在根系方面具有共同点, 都拥有更为发达的根系系统。本研究在氮、磷、钾 3 种养分模式下评价和筛选养分高效品种, 结果表明, 在低养分供应下水稻产量均下降, 但下

降幅度差异明显。其中, 1/3 正常氮水平、不施磷、不施钾处理下水稻产量分别下降 12%、11% 和 7%。表明正常的养分供应是水稻高产的基础, 同时三大营养元素中, 氮的正常供应对保障水稻产量最重要。本研究结果还表明, 不同品种的耐低养分能力不同, 其耐低氮、低磷和低钾能力的差异均可达显著水平, 这为高效水稻品种的筛选应用提供了重要的理论依据。在参试的 48 个水稻品种中耐低氮品种 20 个, 耐低磷品种 17 个, 耐低钾品种 25 个, 这些耐低养分能力较强品种可直接供水稻生产应用。

本研究对参试水稻品种的耐低氮、低磷和低钾能力进行了评价, 因此可以筛选出同时对两种或三种养分高效的水稻品种。试验中同时表现出耐低氮、耐低磷和耐低钾的品种有 10 个, 分别为广两优 1598、桂两优 2 号、特优 5 号、特优 582、桂丰 2 号、特优 3813、T 优 6135、科两优 889、中广香 1 号、亚航金占。

参考文献 (References) :

- [1] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 陈林涛, 李宏伟, 袁志成. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 8-27. doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001.
LI Z H, MA X, LI X H, CHEN L T, LI H W, YUAN Z C. Research progress of rice transplanting mechanization [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):8-27. doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001.
- [2] CHEN J, LYU S Y, ZHANG Z, ZHAO X X, LI X M, NING P, LIU M Z. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2017(613-614): 829-839. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.186.
- [3] 江立庚, 戴廷波, 韦善清, 甘秀芹, 徐建云, 曹卫星. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 466-471. doi:10.17521/cjpe.2003.0067.
JIANG L G, DAI T B, WEI S Q, GAN X Q, XU J Y, CAO W X. Genotypes differences and evaluation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4):466-471. doi:10.17521/cjpe.2003.0067.
- [4] 宋玉林. 水稻氮素吸收利用与累积特征的分析[J]. 科学技术创新, 2013(35): 249. doi:10.3969/j.issn.1673-1328.2013.35.259.
SONG Y L. Characteristics of nitrogen uptake, utilization and accumulation in rice [J]. *Science and Technology Innovation*, 2013(35):249. doi:10.3969/j.issn.1673-1328.2013.35.259.
- [5] 张亚丽. 水稻氮效率基因型差异评价与氮高效机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
ZHANG Y L. Genotypic difference in grain yields and nitrogen use efficiency in rice cultivars [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural

- University,2006.
- [6] 马汉云. 水稻氮素利用基因型鉴定筛选及其响应研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- MA H Y. Study on response and identification screening of nitrogen utilization in rice genotype [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [7] 姜元华. 甬优系列籼粳杂交稻生产力优势与相关生理生态特征研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- JIANG Y H. Studies on productivity and ecological-physiological characteristics of indica-aponica hybrid rice of Yongyou [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.
- [8] 陈波. 江西双季晚稻不同类型品种综合生产力及其形成特征 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- CHEN B. Studies on comprehensive productivity of different types of double-cropping late rice and characteristics analysis [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [9] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 周卫, 徐芳森, 蔡红梅. 我国南方主推水稻品种氮效率筛选及评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014 (5): 1051-1062. doi:10.11674/zwyf.2014.0501.
- FENG Y, CHEN H F, HU X M, ZHOU W, XU F S, CAI H M. Nitrogen efficiency screening of rice cultivars popularized in South China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014(5):1051-1062. doi:10.11674/zwyf.2014.0501.
- [10] 仲军. 磷高效高产型水稻产量形成的基本特点 [D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- ZHONG J. The characteristics of yield formation of rice with high P uptake efficiency and gain yield [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [11] 李永夫, 罗安程, 王为木, 蔡炳祥, 胡晓跃, 杨肖娥. 不同供磷水平下水稻磷素吸收利用和产量的基因型差异 [J]. 土壤通报, 2005(3): 365-370. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2005.03.019.
- LI Y F, LUO A C, WANG W M, CAI B X, HU X Y, YANG X E. Genotypic variation of rice in yield, phosphorus uptake and utilization at different phosphorus supply [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005(3):365-370. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2005.03.019.
- [12] 林诚, 李清华, 王飞, 何春梅, 钟少杰, 李昱, 林新坚. 不同施磷水平对冷浸田水稻磷含量、光合特性及产量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24 (5): 553-558. doi:10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.011.
- LIN C, LI H Q, WANG F, HE C M, ZHONG S J, LI Y, LIN X J. Effects of phosphorus fertilizer on phosphorus content, photosynthesis characters and yield of rice in cold waterlogged paddy field [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2016, 24(5): 553-558. doi:10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.011.
- [13] 吴照辉, 贺立源, 左雪冬, 严昶, 杨建峰, 门玉英. 低磷胁迫下不同基因型水稻阶段性磷营养特征 [J]. 中国水稻科学, 2008, 22 (1): 71-76. doi:10.16819/j.1001-7216.2008.01.012.
- WU Z H, HE L Y, ZUO X D, YAN C, YANG J F, MEN Y Y. Characteristics of phosphorus nutrition of different rice genotypes under low-P stress at different growth stages [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(1):71-76. doi:10.16819/j.1001-7216.2008.01.012.
- [14] 张俊国, 张三元, 杨春刚, 孙强, 郭桂珍. 水稻磷高效品种资源筛选的初步研究 [J]. 吉林农业科学, 2010, 35 (6): 25-29. doi:10.16423/j.cnki.1003-8701.2010.06.013.
- ZHANG J G, ZHANG S Y, YANG C G, SUN Q, GUO G Z. Preliminary studies on selection of high-phosphorus-utilization rice variety resources [J]. *Jilin Agricultural Science*, 2010, 35(6):25-29. doi:10.16423/j.cnki.1003-8701.2010.06.013.
- [15] 何丹, 张锡洲, 李廷轩, 戢林, 黄平. 稻种资源的磷利用效率差异及其分类评价 [J]. 中国土壤与肥料, 2012 (3): 70-76. doi:10.3969/j.issn.1673-6257.2012.03.015.
- HE D, ZHANG X Z, LI T X, JI L, HUANG P. Classification and evaluation of phosphorus utilization efficiency for different rice germplasms [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(3):70-76. doi:10.3969/j.issn.1673-6257.2012.03.015.
- [16] 刘枫, 何传龙, 王道中, 王本豹. 江淮丘陵区水稻钾、氮吸收特性与施钾效应研究 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (2): 314-317. doi:10.3321/j.issn:0564-3945.2006.02.023.
- LIU F, HE C L, WANG D Z, WANG B B. Absorption characteristic of potassium and nitrogen by rice and response to potassium application in Jianghuai filly region [J] *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 314-317. doi:10.3321/j.issn:0564-3945.2006.02.023.
- [17] 王为木. 水稻适应土壤低钾营养胁迫的机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- WANG W M. Mechanisms of rice plant adaptation to low potassium in soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [18] 苏是泮. 钾高效水稻品种筛选及其机理研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
- SU S H. Study on screening for K-efficiency rice varieties and its mechanism [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [19] 何燕, 王斌, 江立庚, 孟翠丽, 欧钊荣, 徐世宏. 基于 GIS 的广西水稻种植布局精细化气候区划 [J]. 中国水稻科学, 2013, 27 (6): 658-664. doi:10.3969/j.issn.1001-7216.2013.06.014.
- HE Y, WANG B, JIANG L G, MENG C L, OU Z R, XU S H. Refined climatic division of rice planting distribution using GIS in Guangxi [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(6):658-664. doi:10.3969/j.issn.1001-7216.2013.06.014.
- [20] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 李应洪, 严奉君, 徐徽, 王海月, 马均. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (24): 4745-4756. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.24.007.
- SUN Y J, SUN Y Y, JIANG M J, LI Y H, YAN F J, XU H, WANG H Y, MA J. Effects of fertilizer levels on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies [J]. *Scientia Agricultura sinica*, 2016, 49(24):4745-4756. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.24.007.
- [21] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 李小坤, 李云春, 李慧. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (5): 545-553. doi:10.11674/zwyf.2011.0240.
- WANG W N, LU J W, LU M X, LI X K, LI Y C, LI H. Effect of nitrogen fertilizer application and nitrogen use efficiency of early, middle and late rice in Hubei province [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer*

- Science*, 2011, 17(4):795–802. doi:10.11674/zwyf.2011.0240.
- [22] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017(6): 1067–1077. doi:10.13758/j.cnki.tr.2017.06.001. YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China [J]. *Soils*, 2017(6):1067–1077. doi:10.13758/j.cnki.tr.2017.06.001.
- [23] 吴照辉, 贺立源, 张丽梅, 严昶, 杨建峰, 门玉英. 作物磷高效种质资源筛选研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2008, 27(1): 61–68. doi:10.3969/j.issn.1008–0457.2008.01.013. WU Z H, HE L Y, ZHANG L M, YAN C, YANG J F, MEN Y Y. Research progress in screening germplasm resources of crops with high phosphorus efficiency [J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2008, 27(1):61–68. doi:10.3969/j.issn.1008–0457.2008.01.013.
- [24] 薛欣欣. 水稻钾素营养特性及钾肥高效施用技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. XUE X X. Study on the characteristics of potassium nutrition and high-efficient application technologies of potassium fertilizer in rice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [25] LIU Z L, TAO L Y, LIU T T, ZHANG X H, WANG W, SONG J M, YU C L, PENG X L. Nitrogen application after low-temperature exposure alleviates tiller decrease in rice [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 11(1):205–214. doi:10.1016/j.envexpbot.2018.11.001.
- [26] 赵婧玮. 耐低钾水稻的筛选及基因型鉴定[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014. ZHAO J W. Screening and genotypes identification of low potassium tolerant rice [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2014.
- [27] WANG Y, ZHAO X, GUO Z, JIA Z, WANG S, DING K. Response of soil microbes to a reduction in phosphorus fertilizer in rice-wheat rotation paddy soils with varying soil P levels [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181:127–135. doi:10.1016/j.still.2018.04.005.
- [28] ZIA Z, BAKHAT H. F, SAQIB Z A, SHAH G M, FAHAD S, ASHRAF M R. Effect of water management and silicon on germination, growth, phosphorus and arsenic uptake in rice [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 144:11. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.06.004.
- [29] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 韦善清, 徐建云, 董登峰, 陈念平, 陆福勇, 秦华东. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490–496. doi:10.3321/j.issn:0578–1752.2004.04.005. JIANG L G, CAO W X, GAN X Q, WEI S Q, XU J Y, DONG D F, CHEN N P, LU F Y, QIN H D. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4):490–496. doi:10.3321/j.issn:0578–1752.2004.04.005.
- [30] 孙虎威, 王文亮, 刘尚俊, 李应洪, 严奉君, 徐徽, 王海月, 马均. 低氮胁迫下水稻根系的发生及生长素的响应[J]. 土壤学报, 2014(5): 1096–1102. doi:10.11766/trxb201401290057. SUN H W, WANG W L, LIU S J, LI Y H, YAN F J, XU H, WANG H Y, MA J. Formation of rice root regulated by nitrogen deficiency [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014(5):1096–1102. doi:10.11766/trxb201401290057.
- [31] 冯蕾. 施肥对水稻植株碳氮分配与积累的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. FENG L. The effect of fertilization on the absorption, partition and accumulation of carbon and nitrogen in rice plants [D]. Xi'an: Xi'an Jiaozhu University, 2011.
- [32] 李莉梅. 不同基因型水稻磷素营养差异机理的研究[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 155–160. doi:10.3969/j.issn.1000–7091.2013.02.028. LI L M. The mechanism of P nutrition differences in the different rice genotypes [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(2):155–160. doi:10.3969/j.issn.1000–7091.2013.02.028.
- [33] 向镜, 徐早增, 陈惠哲, 张玉屏, 张义凯, 朱德峰. 磷肥用量对超级早稻生长、产量及磷吸收利用的影响[J]. 中国稻米, 2016(1): 35–38. doi:10.3969/j.issn.1006–8082.2016.01.008. XIANG J, XU H Z, CHEN H Z, ZHANG Y P, ZHANG Y K, ZHU D F. Effects of phosphorus levels on growth, grain yield and phosphorus use efficiency of super rice in early season [J]. *China Rice*, 2016(1):35–38. doi:10.3969/j.issn.1006–8082.2016.01.008.
- [34] 林文雄, 石秋梅, 郭玉春, 梁义元, 何华勤, 陈芳育. 水稻磷效率差异的生理生化特性[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(6): 578–583. doi:10.3321/j.issn:1006–687X.2003.06.004. LIN W X, SHI Q M, GUO Y C, LIANG Y Y, HE H Q, CHEN F Y. Physio-biochemical characters of P-efficient differences in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(6):578–583. doi:10.3321/j.issn:1006–687X.2003.06.004.
- [35] 项虹艳, 丁洪, 郑金贵, 李卫华, 林勇. 耐低钾水稻品种的筛选[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(3): 338–344. doi:10.3969/j.issn.1000–2286.2004.03.005. XIANG H Y, DING H, ZHEN J G, LI W H, LIN Y. Screening of low K-tolerant rice varieties [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(3):338–344. doi:10.3969/j.issn.1000–2286.2004.03.005.
- [36] 刘建祥, 杨肖娥, 杨玉爱, 吴良欢. 低钾胁迫下水稻钾高效基因型若干生长特性和营养特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 190–195. doi:10.3321/j.issn:1008–505X.2003.02.011. LIU J X, YANG X E, YANG Y A, WU L H. Some agronomic and nutritional characteristics for potassium efficient rice genotypes under low potassium stress [J]. *Plant Nutrition & Fertilizing Science*, 2003, 9(2):190–195. doi:10.3321/j.issn:1008–505X.2003.02.011.
- [37] 张宁. 氮钾双高效水稻品种筛选及其生理机制研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015. ZHANG N. Study on screening for N and K efficiency rice genotype and its physiological mechanisms [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015.
- [38] 王海斌, 郭徐魁, 周阳, 徐志兵, 何海斌, 林文雄. 不同化感潜力水稻钾离子吸收动力学差异分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 645–649. doi:10.1671/1671-3990(2011)03-0645-05. WANG H B, GUO X K, ZHOU Y, XU Z B, HE H B, LIN W X. Kinetic analysis of potassium absorption in rice accessions with different allelopathic potentials [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3):645–649. doi:10.1671/1671-3990(2011)03-0645-05.