

水稻品种的耐低磷性及其农艺生理性状

李银银 许更文 李俊峰 郭佳蓉 王志琴 杨建昌*

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; *通讯联系人, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn)

Tolerance to Low Phosphorus and Its Agronomic and Physiological Characteristics of Rice Cultivars

LI Yinyin, XU Gengwen, LI Junfeng, GUO Jiarong, WANG Zhiqin, YANG Jianchang*

(Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; * Corresponding author, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】The purpose was to elucidate the evaluation index of tolerance to low phosphorus (LP) and agronomic and physiological characteristics of rice cultivars with strong resistance to LP. 【Method】Eleven typical *japonica* rice cultivars applied in Jiangsu Province during the last 70 years were used and two levels of phosphorus concentrations, low phosphorus level (1/20 of the phosphorus concentration in the standard nutrient solution formulation, LP) and the normal phosphorus concentration (International Rice Research Institute standard nutrient solution formulation, control), were designed. 【Result】LP tolerance index (grain yield of LP treatment \times LP tolerance coefficient/average grain yield of LP treatment for all tested cultivars) and dry matter index (dry matter of LP treatment/dry matter of control) were significantly or extremely significantly and positively correlated with the LP tolerance coefficient (grain yield of LP treatment/ grain yield of control) and grain yield under the LP treatment. Therefore, the LP tolerance index and dry matter index were chosen as indexes to evaluate the tolerance to LP for rice cultivars. The tested cultivars were classified into three categories based on the two indexes: strong tolerance to LP (both LP tolerance index and dry matter index >1), medium resistance to LP (both LP tolerance index and dry matter index >0.6 and either LP tolerance index or dry matter index <1) and weak tolerance to LP (both LP tolerance index and dry matter index ≤ 0.6). Compared with those with weak tolerance to LP, the cultivars with strong tolerance to LP exhibited higher root dry weight, stronger root activity, more tiller number at the early tillering stage, larger total leaf area index (LAI), high-efficiency LAI, effective LAI and sink capacity, more accumulation of sugars in the stem and sheath at heading time and greater dry matter production capacity from heading to maturity. The LP treatment increased internal phosphorus use efficiency (grain yield/phosphorus uptake of plants) and the phosphorus harvest index (phosphorus in the grain/the total absorbed phosphorus in plants) in comparison with the control. Moreover, the cultivars with strong tolerance to LP showed much higher internal phosphorus use efficiency. 【Conclusion】The LP tolerance index and dry matter index can be used as indexes to evaluate the tolerance to LP for a rice cultivar. Under the LP treatment, higher root dry weight, more tiller number at the early tillering stage, larger sink capacity and greater dry matter production capacity during grain-filling period are the main agronomic and physiological characteristics of rice cultivars with strong tolerance to LP and high phosphorus use efficiency.

Key words: grain yield; tolerance to low phosphorus; evaluation index; agronomic and physiological trait

摘 要: 【目的】本研究旨在探明水稻耐低磷性的评价指标和耐低磷品种的农艺生理特征。【方法】以 11 个江苏省近 70 年来的代表性粳稻品种作为材料, 进行水培种植, 设置低磷(标准营养液中磷浓度的 1/20)处理, 以正常磷浓度(国际水稻研究所标准营养液配方)为对照。【结果】耐低磷指数(低磷产量 \times 耐低磷系数/所有供试品种低磷处理的平均产量)、干物质指数(低磷干物质质量/对照干物质质量)与耐低磷系数(低磷产量/对照产量)及低磷处理下的产量呈显著或极显著正相关。将耐低磷指数和干物质指数作为评价水稻品种耐低磷性的指标。根据两指标值的大小将供试品种分成 3 类: 强耐低磷品种, 耐低磷指数和干物质指数均 ≥ 1 ; 中耐低磷品种, 耐低磷指数和干物质指数均 >0.6 , 耐低磷指数或干物质指数 <1 ; 弱耐低磷品种或低磷敏感型品种, 耐低磷指数或干物质指数 ≤ 0.6 。与弱耐低磷品种相比, 强耐低磷品种在低磷处理下具有根量大、根系活力强, 分蘖早期分蘖数多, 总叶面积指数(LAI)和高效 LAI 大、有效 LAI 比例高, 库容量大, 抽穗期茎鞘中糖积累量多, 抽穗至成熟期物质生产能力强等特征。

收稿日期: 2017-04-25; 修改稿收到日期: 2017-05-26

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2014AA10A605); 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300206-4); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

与对照相比,低磷处理增加了磷素产谷利用率(稻谷产量/磷吸收量)和磷收获指数(籽粒中磷/成熟期植株中总吸收的磷)。在低磷下的磷素产谷利用率,强耐低磷品种高于弱耐低磷品种。【结论】耐低磷指数和干物质指数可以作为耐低磷品种的筛选指标;在低磷处理下,根量大、分蘖早期分蘖数多、库容量大、抽穗至成熟期物质生产能力是耐低磷性强和磷利用效率高水稻品种的重要农艺生理特征。

关键词: 水稻;产量;耐低磷性;评价指标;农艺生理性状

中图分类号: S143.2; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2018)01-0051-16

水稻既是世界三大禾谷类作物之一,也是我国最重要的粮食作物,其种植面积占中国谷物播种面积的 32.04%,稻谷总产占粮食总产的 37.05%^[1]。全国约有 65%的人口以稻米为主食^[2]。化肥对于粮食增产发挥了举足轻重的作用。但是,近 30 年来,我国粮食过度依赖水肥资源的投入,使得我国化肥使用量持续高速增长,我国粮食安全与资源消耗、环境保护之间的矛盾日益尖锐^[3]。磷是作物生长发育所必需三大关键营养元素之一,具有多种重要的生理生化作用^[4]。据统计,缺磷的耕地约占全世界 43%^[5],我国有近 2/3 的耕地缺磷,需要施用磷肥来解决土壤缺磷问题以维持和提高作物产量^[6-7]。然而,磷是一种非可再生资源,过多地施用磷肥不仅会造成磷源的枯竭,还会造成环境污染和成本的增加。因此,选用耐低磷作物品种,对于减少磷肥的使用、保护环境和提高经济效益具有十分重要的意义。

有研究表明,在水稻磷的吸收和利用方面,不同基因型间差异很大^[8-11]。这就为水稻磷高效的基础研究、磷高效种质资源的筛选以及磷高效品种的选育提供了可能。一些研究者指出,水稻在低磷胁迫下植株的形态,尤其是根系形态会发生变化^[12];不同基因型水稻在低磷胁迫下分泌的有机酸、质子或酶类的数量也有差异^[13-15]。但以往有关水稻品种响应低磷的研究,大多集中在苗期,难以反映水稻耐低磷性与产量的直接关系;目前有关评价磷高效水稻品种的指标不明确;磷高效品种或耐低磷品种的形态生理特征不清楚。针对这些问题,本研究以江苏省近 70 年来在生产上应用的 11 个代表性水稻品种为试验材料,研究其在低磷浓度处理下的耐低磷性以及农艺生理特性,以期建立和完善水稻耐低磷筛选系统,探明耐低磷水稻品种的形态生理特征,为耐低磷品种的遗传改良、品种培育和筛选、高产与磷高效利用的栽培调控提供理论和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与栽培概况

试验于 2016 年在扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室水培池进行。参试材料共 11 个,其

中 10 个为江苏省近 70 年来各阶段在生产上广泛应用的具有代表性的中粳稻品种(含超级稻),依据种植推广年代结合株型和基因型将其分为 20 世纪 50 年代、60 年代、70 年代、80 年代、90 年代和 2000 年以后 6 个类型,还有一个品种为杂交粳稻甬优 2640(表 1)。各材料均能在江苏扬州正常抽穗结实。各材料于 5 月 11—12 日播种,6 月 2 日移栽,株行距 10 cm × 17 cm,双本栽插。全生育期按国际水稻研究所的营养液(表 2)进行水培,严格控制病虫害。

1.2 试验设计

试验于 12 个水培池中进行,水培池溶液用抽水泵进行流动循环。全生育期设置低磷和正常磷 2 个处理,每个品种(各小区)种植 98~112 穴,重复 2 次。以正常磷浓度作为对照,按照国际水稻研究所的营养液配方进行各个时期的营养液配制。为了方便进行低磷处理,用 KCl 和 H₃PO₄ 代替 KH₂PO₄ 来供给磷、钾两种元素。低磷处理从移栽后开始直至收获磷浓度为标准营养液中磷浓度(对照磷浓度)的 1/20。其他营养液药品的配制与对照完全相同(表 2)。每天用 H₂SO₄ 调节 pH,保证营养液的 pH 值维持在 5.0~5.5;用抽水泵对营养液进行不断流动循环,以保证水培池营养液的通气性和稻株对营养吸收的均匀一致性,每隔 10 d 更换营养液。当遇到下雨天,则在第二天对营养液进行更换。因营养液保持酸性,且不断流动氧气含量高,故在水培池中并未发现藻类。

1.3 取样与测定

1.3.1 茎蘖动态

移栽后每 7d 定点调查每个品种不同处理的 10 穴茎蘖数,直至茎蘖数稳定。

1.3.2 干物质质量和叶面积

分别于分蘖中期(移栽后 20 d)、穗分化始期(叶龄余数 3.5)、抽穗期和成熟期,各品种不同磷浓度处理取 5 穴(按群体平均茎蘖数取样),采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-COR3050 型叶面积仪测定绿叶面积,并分器官在 105℃ 下杀青 30 min,75℃ 下烘干至恒重后测定地上部分和根部干物质质量。保留部分烘干样品,用于磷测定。抽穗期测定总叶面积、有效叶面积(有效分蘖的叶面积)和高效叶面积(有效分蘖顶部 3 张叶片的叶面积)。

表 1 本研究供试品种

Table 1. Tested cultivars in the study.

应用年份 Year of application	品种 Cultivar	主栽年份 Planting year
20 世纪 50 年代 1950s	桂花球 Guihuaqiu	1950—1960
20 世纪 60 年代 1960s	金南风、桂花黄 Jinnanfeng, Guihuahuang	1960—1970
20 世纪 70 年代 1970s	徐稻 2 号、黎明 Xudao 2, Liming	1970—1980
20 世纪 80 年代 1980s	泗稻 8 号、盐粳 2 号 Sidao 8, Yanjing 2	1980—1990
20 世纪 90 年代 1990s	镇稻 88、淮稻 5 号 Zhendao 88, Huaidao 5	1990—2000
2000 年以后 2000—	连粳 7 号（超级稻）、甬优 2640（杂交稻） Lianjing 7(super rice), Yongyou 2640(Hybrid rice)	2000—

表 2 水培池营养液配方（国际水稻研究所）

Table 2. Hydroponics nutrient solution (International Rice Research Institute).

药品种类 Type of drug	药品名称 Drug name	移栽后 10 d Ten days after transplanting		抽穗后 After heading	配置 Configuration
		全液 Full liquid/g	1/2 全液 1/2 full liquid/g	1/4 全液 1/4 full liquid/g	
大量元素 Macronutrients	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	736.92	368.46	184.23	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O 单独称，
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	2070	1035	517.5	不能和 MgSO ₄ ·7H ₂ O 混合，
	(NH ₄) ₂ SO ₄	405.72	202.86	101.43	其余几种称在一起
	KCl	154.24	77.12	38.56	用 KCl 和 H ₃ PO ₄ 代替 KH ₂ PO ₄
微量元素 Micronutrients	H ₃ PO ₄ (ml)	127.35	63.68	31.84	
	H ₃ BO ₃	23.68	11.84	5.92	用一瓶浓 H ₂ SO ₄ 分成两份溶解
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	1.82	0.91	0.46	分装于两个 1L 烧杯内
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	14.99	7.49	3.75	加入除 MnCl ₂ 以外的微量元素
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.66	0.33	0.17	于通风橱中加 MnCl ₂
	H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	0.17	0.08	0.04	放热一会后加入一定量的冰水
	柠檬酸	16.56	8.28	4.14	冷却后装入大瓶中稍微稀释
	EDTA Na	67			8 个小池子的量，用开水将 Na 盐
	FeSO ₄ ·7H ₂ O	62.5			溶解后加入 FeSO ₄ ·7H ₂ O 装入大桶稀释

全液中磷浓度为 8.02 mg/L。

The concentration of phosphorus in the whole solution was 8.02 mg /L.

1.3.3 根系氧化力、根系总吸收表面积和活跃吸收表面积

分别于分蘖中期、穗分化始期、抽穗期和成熟期各品种不同磷浓度处理取 3 穴代表性植株根部(每穴以稻株基部为中心用剪刀剪取)，冲洗干净后称取根鲜质量，取部分根按章骏德方法^[16]测定根系氧化力，采用甲烯蓝蘸根法测定根系总吸收表面积和活跃吸收表面积^[17]。

1.3.4 照片拍摄

移栽后随时观察水稻地上、地下部生长情况，进行不同处理、不同品种间的对比，每个时期在取样的同时拍摄地上、地下部和整体的照片，进行编号，便于比较。

1.3.5 茎鞘非结构性碳水化合物(NSC)

依据 Yoshida 等^[18]方法提取测定茎鞘非结构性

碳水化合物(NSC)并作改进：样品放入烘箱中烘干并且磨成细粉，称取 100 mg 过 100 目筛的样品，倒入 15 mL 离心管中，加入 10 mL 80%的乙醇，80℃水浴 30 min，冷却后在 2000 r/min 下离心 15 min，该提取重复 3 次，合并上清液并用蒸馏水定容至 50 mL，用于蔗糖和可溶性总糖的测定。蔗糖提取依照 Somogyi^[19]的方法，吸取 0.9 mL 提取液加入 0.1 mL 2 mol/L 的 NaOH，沸水浴 10 min，冷却后加入 1 mL 0.1%间苯二酚和 3 mL 10 mol/L 的 HCl，80℃水浴 60 min 冷却后在 OD₅₀₀ 下比色；可溶性总糖的分析依据 Pucher 等^[20]的方法，吸取上述提取液 1.0 mL 加入 1.0 mL 水再加入 4 mL 0.2%蒽酮试剂(用浓硫酸配制)，沸水浴 15 min 冷却后在 OD₆₂₀ 下比色。离心管中剩余的残渣放入 80℃烘箱中烘干用于淀粉的提取。在烘干残渣的离心管加入 2 mL 蒸馏水，

沸水浴 20 min, 并且不断搅动。离心管冷却后加入 2 mL 9.2 mol/L HClO_4 , 连续振荡 10 min, 加蒸馏水 6 mL, 离心管在 2000 r/min 下离心 20 min。倒出上清液, 在残渣中加入 2 mL 4.6 mol/L HClO_4 , 重复以上提取, 合并上清液, 用蒸馏水定容至 50 mL, 分析方法同可溶性总糖。

1.3.6 植株磷含量

取部分烘干的样品粉碎过筛后准确称取样品, 用优级纯 HNO_3 进行微波消解, 采用美国 Thermo Scientific 公司生产的全谱直读等离子体发射光谱仪 (Inductively Coupled Plasma-atomic Emission Spectrometry, iCAP6300 Duo) 测定植株中磷含量。

1.3.7 考种与计产

于收割前, 各品种不同处理取 3 个重复, 每个重复取 10 穴, 脱粒考种, 测定每穗粒数、千粒重, 计算结实率和产量。结实率为饱粒($\geq 1.06 \text{ g/cm}^3$)数占总粒数的百分率。

1.4 数据分析

参考抗旱品种评价指标^[21]分析耐低磷指标, 按下式计算:

耐低磷系数=低磷浓度的产量/对照(标准配方磷浓度)的产量;

耐低磷指数=低磷产量 \times 耐低磷系数/所有供试品种低磷处理的平均产量;

干物质指数=低磷干物质质量/对照干物质质量;

株高指数=低磷株高/对照株高;

磷胁迫敏感指数=(1-耐低磷系数)/(1-所有供试品种低磷处理的平均产量/所有供试品种对照的平均产量);

综合耐低磷指标=相对株高 \times 相对单株产量/相对出穗日数 $\times 100$ (相对值=低磷处理性状/对照性状);

茎蘖成穗率=成熟期穗数/分蘖高峰期茎蘖数;

NSC 对籽粒的贡献率(%)=(抽穗期茎鞘 NSC 量-成熟期茎鞘 NSC 量)/籽粒质量 $\times 100$;

茎鞘 NSC 运转率(%)=(抽穗期茎鞘 NSC 量-成熟期茎鞘 NSC 量)/抽穗期茎鞘 NSC $\times 100$;

库源比(kg/m^2)=库容量(单位面积颖花数 \times 千粒重)/叶面积;

根冠比=根系干质量/地上部干质量;

元素茎叶运转率=单位面积植株抽穗后某元素的茎叶表观输出量(抽穗期茎叶元素总量与成熟期茎叶该元素总量之差)/抽穗期茎叶元素积累总量;

元素产谷利用率 $\text{INE}(\text{kg/kg})$ =稻谷产量(kg/m^2)/总吸收元素量(kg/m^2);

元素收获指数 HI =籽粒元素/成熟期该元素总吸收量 $\times 100$;

本研究数据用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 软件进行处理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同磷处理下各品种的产量及其构成因素

表 3 为不同磷处理下各品种的产量及其构成因素(每平方米穗数、每穗粒数、千粒重、结实率)。由表 3 可见, 在低磷(磷浓度为对照处理磷浓度的 1/20)处理下, 除盐粳 2 号外, 其余品种产量均低于对照处理。说明降低营养液中磷浓度对不同品种的产量有不利影响。

从产量构成因素分析, 与对照相比, 在低磷条件下几乎所有品种的穗数和每穗粒数降低, 但所有品种的千粒重在低磷处理下均增加, 大部分品种的结实率也增加, 说明减少磷的施用会减少每平方米穗数和每穗粒数, 增加千粒重和结实率。但穗数和每穗粒数的减少超过了千粒重和结实率的增加, 造成减产(表 3)。

2.2 水稻品种的耐低磷性

2.2.1 各品种的耐低磷性

由表 4 可知, 各品种耐低磷指数大小依次为甬优 2640>桂花球>盐粳 2 号>金南风>桂花黄>泗稻 8 号>淮稻 5 号>徐稻 2 号>黎明>连粳 7 号>镇稻 88; 干物质指数、耐低磷系数和综合耐低磷指数与耐低磷指数的变化趋势大致相同; 磷胁迫敏感指数则与耐低磷指数呈现相反的趋势, 株高指数没有明显变化规律(表 4)。

2.2.2 品种耐低磷性与年代间关系

表 5 是各个耐低磷指标与年代间及品种间的方差分析。结果表明, 水稻品种的耐低磷性在品种育成或应用的年代间无显著差异。表明随着年代的推进, 水稻品种耐低磷性没有明显提高, 但各个耐低磷指标在品种间的差异达到极显著(表 5)。

2.2.3 耐低磷指标与产量的相关性分析

表 6 为耐低磷系数、耐低磷指数、干物质指数、株高指数、胁迫敏感指数、综合耐低磷指数和在低磷处理下水稻产量的相关分析。由表 6 可知, 耐低磷指数、干物质指数与低磷处理下的产量均呈极显著正相关($r = 0.78^{**} \sim 0.94^{**}$)。因此, 用耐低磷指数和干物质指数作为筛选耐低磷性的主要筛选指标是可靠的。

其他指标与低磷胁迫下的产量相关性均不显

表 3 不同磷处理下各水稻品种产量及其构成因素

Table 3. Yield and its components of rice cultivars under different phosphorus treatments.

处 理	品 种	单株穗数	每穗粒数	千粒重	结实率	单株产量
Treatment	Cultivar	Number of panicles per plant	Number of grains per panicle	1000-grain weight/g	Seed setting rate/%	Yield per plant/g
低 P	甬优 2640 Yongyou 2640	4.4 i	247.27 a	23.47 e	82.50 c	21.06 a
LP	桂花球 Guihuaqiu	6.1 e	119.42 b	28.48 a	79.19 d	16.29 b
	盐粳 2 号 Yanjing 2	8.2 c	79.71 f	24.48 d	89.62 a	14.34 cd
	金南风 Jinnanfeng	8.9 b	70.09 g	25.97 c	86.31 b	13.99 d
	桂花黄 Guihuahuang	6.9 d	110.16 c	26.92 b	70.59 ef	14.45 ef
	泗稻 8 号 Sidao 8	5.7 f	102.54 cd	24.85 d	87.47 b	12.71 e
	淮稻 5 号 Huaidao 5	4.8 h	95.53 de	26.45 bc	91.07 a	11.04 g
	徐稻 2 号 Xudao 2	6.0 e	104.25 c	26.06 c	72.84 e	11.87 f
	黎明 Liming	13.5 a	35.47 h	24.61 d	55.97 g	6.63 i
	连粳 7 号 Lianjing 7	5.4 g	122.07 b	26.92 b	48.31 h	8.57 h
	镇稻 88 Zhendao 88	4.9 h	92.14 e	28.30 a	68.82 f	8.71 h
对照	甬优 2640 Yongyou 2640	4.9 j	267.25 a	22.21 f	82.17 a	23.85 a
Control	桂花球 Guihuaqiu	7.3 e	144.58 c	25.25 b	63.53 e	16.93 b
	盐粳 2 号 Yanjing 2	6.5 f	116.51 e	22.35 f	78.86 b	13.46 e
	金南风 Jinnanfeng	9.7 b	80.19 g	23.04 e	74.66 c	13.39 e
	桂花黄 Guihuahuang	7.3 e	114.02 ef	23.87 cd	75.1 c	14.92 d
	泗稻 8 号 Sidao 8	7.6 d	113.28 ef	23.85 cd	75.53 c	15.5 c
	淮稻 5 号 Huaidao 5	5.1 i	146.72 c	23.92 cd	69.72 d	12.49 f
	徐稻 2 号 Xudao 2	7.8 c	123.06 d	24.14 c	71.72 d	16.63 b
	黎明 Liming	11.9 a	58.23 h	23.73 d	48.91 f	8.04 h
	连粳 7 号 Lianjing 7	5.6 h	158.52 b	25.44 a	48.8 f	11.12 g
	镇稻 88 Zhendao 88	6.3 g	111.91 f	25.41 ab	75.48 c	13.61 e

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 4 各水稻品种耐低磷性

Table 4. Low phosphorus(LP) tolerance of rice cultivars.

品 种	耐低磷指数	干物质指数	耐低磷系数	株高指数	磷胁迫敏感指数	综合耐低磷指数
Cultivar	LP tolerance index	Dry matter index	LP tolerance coefficient	Plant height index	Stress sensitivity index	Comprehensive tolerance index to LP
甬优 2640 Yongyou 2640	1.454 a	1.000 b	0.881 c	0.935 a	0.972 e	82.377 b
桂花球 Guihuaqiu	1.228 b	1.039 a	0.962 b	0.998 a	0.308 g	96.054 a
盐粳 2 号 Yanjing 2	1.197 b	1.010 ab	1.066 a	0.937 a	-0.539 i	99.876 a
金南风 Jinnanfeng	1.144 bc	0.748 d	1.045 a	0.958 a	-0.365 h	100.108 a
桂花黄 Guihuahuang	1.094 c	0.812 e	0.967 b	0.871 b	0.267 g	84.256 b
泗稻 8 号 Sidao 8	0.815 d	0.631 e	0.819cd	1.009 a	1.481 d	82.627 b
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.766 d	0.582 e	0.885 c	0.940 a	0.941 e	83.236 b
徐稻 2 号 Xudao 2	0.664 e	0.602 e	0.714 de	0.999 a	2.338 b	71.370 c
黎明 Liming	0.541 f	0.478 f	0.824 cd	1.026 a	0.602 f	95.067 a
连粳 7 号 Lianjing 7	0.517 f	0.510 f	0.771 d	1.000 a	1.878 c	77.071 c
镇稻 88 Zhendao 88	0.435 g	0.789 cd	0.639 e	0.975 a	2.960 a	62.280 c

同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

著(表 6), 并且耐低磷指数对低磷处理下产量影响最直接。因此, 本研究以耐低磷指数和干物质指数为筛选指标, 对试验所用的 11 个品种进行耐低磷性的评价: 确定耐低磷指数和干物质指数均 ≥ 1 的为强耐低磷品种; 耐低磷指数和干物质指数均 >0.6 、耐低磷指数或干物质指数 <1 的为中耐低磷品种; 耐

表 5 年代与各耐低磷指标之间的方差分析

Table 5. Analysis of variance between age and resistance to low phosphorus(LP) stress.

变异来源 Source of variation	自由度 df	耐低磷系数 LP tolerance coefficient	耐低磷指数 LP tolerance index	干物质指数 Dry matter index	株高指数 Plant height index	胁迫敏感指数 Stress sensitivity index	综合耐低磷指数 Comprehensive tolerance index to LP
年代间 Between periods	5	NS	NS	NS	NS	NS	NS
品种间 Between varieties	10	15196**	35655**	10380**	2679**	1963594**	2530686**

NS, 0.05 水平下不显著; **, 0.01 水平下显著。
NS, Insignificant at 0.05 level; **, significant at 0.01 level.

表 6 各耐低磷指标与产量及各指标之间的相关性

Table 6. Correlation between the resistance indexes to low phosphorus(LP) and grain yield.

耐低磷筛选指标 Indexes for evaluating LP tolerance	低磷产量 LP yield	耐低磷系数 LP tolerance coefficient	耐低磷指数 LP tolerance index	干物质指数 Dry matter index	株高指数 Plant height index	胁迫敏感指数 Stress sensitivity index	综合耐低磷指数 Comprehensive resistance to LP index
低磷产量 LPY	1	0.432	0.944**	0.778**	-0.478	-0.425	0.307
耐低磷系数 LPTC	0.432	1	0.699*	0.419	-0.393	-1.000**	0.947**
耐低磷指数 LPTI	0.944**	0.699*	1	0.796**	-0.533	-0.633	0.576
干物质指数 DMI	0.778**	0.419	0.796**	1	-0.533	-0.418	0.3
株高指数 PHI	-0.478	-0.393	-0.533	-0.451	1	0.33	-0.077
胁迫敏感指数 SSI	-0.425	-1.000**	-0.633	-0.418	0.33	1	-0.914**
综合耐低磷指数 CRTLI	0.307	0.947**	0.576	0.3	-0.077	-0.914**	1

*,0.05水平下显著; **, 0.01水平下显著。
LPY, Yield under low phosphorus ; LPTC, Low phosphorus tolerance coefficient; LPTI, Low phosphorus tolerance index; DMI, Dry matter index; PHI, Plant height index; SSI, Stress sensitivity index; CRTLI, Comprehensive resistance index to low phosphorus. *, significant at 0.05 level; **, significant at 0.01 level.

表 7 各品种的耐低磷性分类

Table 7. Classification of various cultivars of low phosphorus(LP) tolerance.

类型 Type	品种名称 Cultivar name
强耐低磷品种 Varieties with strong resistance to low phosphorus	甬优 2640、桂花球、盐粳 2 号 Yongyou 2640, Guihuaqiu, Yanjing 2
中耐低磷品种 Varieties with medium resistance to low phosphorus	金南风、桂花黄、泗稻 8 号、淮稻 5 号、徐稻 2 号 Jinnanfeng, Guihuahuang, Sidao 8, Huaidao 5, Xudao 2
弱耐低磷品种 Varieties with weak resistance to low phosphorus	黎明、连粳 7 号、镇稻 88 Liming, Lianjing 7, Zhendao 88

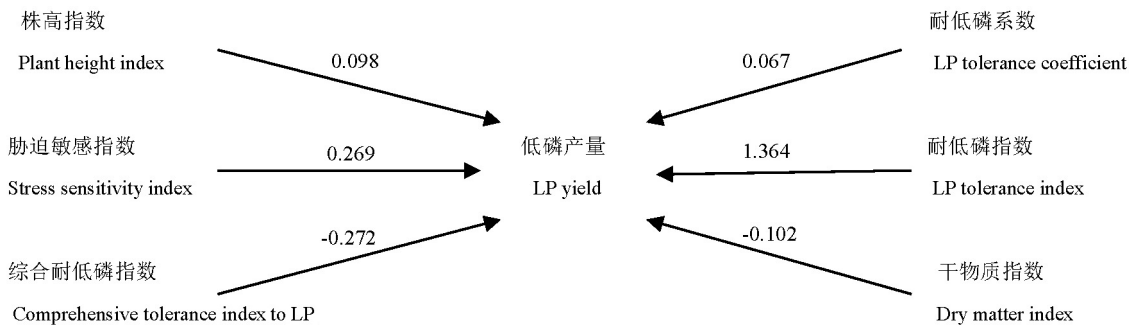


图 1 各耐低磷指标与低磷产量的通径分析

Fig. 1. Path analysis of low phosphorus(LP) tolerance and low phosphorus yield.

低磷指数或干物质指数 ≤ 0.6 的为弱耐低磷品种或低磷敏感性品种。按照上述指标,甬优 2640、桂花球、盐粳 2 号为强耐低磷品种;黎明、连粳 7 号、镇稻 88 为弱耐低磷品种;金南风、桂花黄、泗稻 8 号、淮稻 5 号、徐稻 2 号为中耐低磷品种(表 7)。下文将根据以上筛选结果为依据进行论述,将试验所

用 11 个品种分为三种类型进行分析。

2.3 不同磷处理下根系形态生理

2.3.1 根系形态

图 1 为抽穗期水稻植株整体照片,图 2 则是在生育后期 3 个品种根系形态图片。从图 1 中可以看出,在正常磷浓度(对照,左侧)条件下,分蘖数较

低磷处理(右侧)多,但根系长度较低磷处理短(图 1)。说明在低磷处理下水稻通过促进根系伸长来增加植株对磷元素的吸收。从图 2 中可以看出,在低磷处理下,水稻的每株根系相互之间有横向交织生长现象。推测水稻在低磷处理下根系可能会通过横向生长来扩大与培养液的接触面积,从而增加对磷的吸收。其他生育期的根系形态与抽穗期和成熟期的形态基本一致(图略)。

在生育后期对 10 个品种进行根系表面积等测定,结果表明,与对照相比,低磷处理的总根长和根表面积有增有减,强耐低磷品种(表 8)。

2.3.2 根系氧化力、根系活跃吸收表面积与总吸收表面积

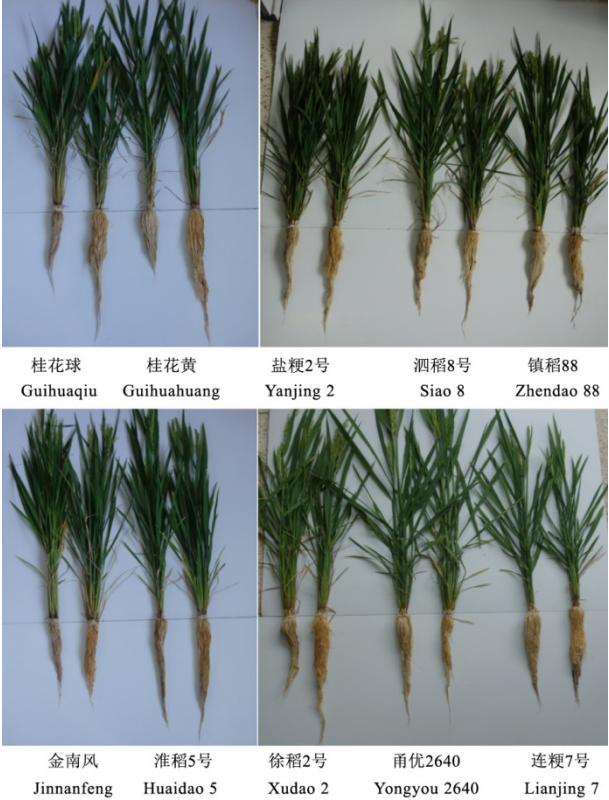
在表 9 和表 10 分别列出了 4 个品种的根系氧化力和根系吸收表面积。随着生育进程的推进,根系氧化力逐渐降低,低磷处理使强耐低磷品种的根系氧化力增强(表 9)。根系总吸收表面积和活跃吸收表面积随生育进程的推进而增大,在低磷处理下强耐低磷品种增幅大于弱耐低磷品种(表 10)。

2.3.3 不同磷处理下根干质量

表 11 中列出了不同生育期不同磷处理下各品种的根干质量。低磷处理增加了部分品种的根干质量,尤其是在生育后期,在低磷处理下几乎所有品种的根干重均要大于对照(表 11)。

2.3.4 不同磷处理下根冠比

与对照相比,低磷处理的根冠比增加(表 12)。说明在低磷处理下,水稻植株会将生产的养分运输



低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20; 对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度。

LP, 1/20 of phosphorus concentration the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

图 2 抽穗期不同磷处理下各品种的形态(左侧:对照;右侧:低 P)

Fig. 2. Morphology of each cultivar under different phosphorus treatments at heading stage (left: control; right: LP).



低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20; 对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度。

LP, 1/20 of phosphorus concentration the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

图 3 水稻生育后期不同磷处理根系形态

Fig. 3. Rice root morphology under different phosphorus treatments at late growth stage.

表 8 生育后期不同磷处理下的根长和根表面积

Table 8. Root length and root surface area under different phosphorus treatments at late growth stage.

品种 Cultivar	总根长		根表面积		根直径		根体积	
	Total root length/(m·hill ⁻¹)		Root surface area/(m ² ·hill ⁻¹)		Root diameter/mm		Root volume/(cm ³ ·hill ⁻¹)	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	786.70 a	416.39 f	0.561 a	0.523 a	0.228 e	0.332 a	31.89 c	52.76 a
桂花球 Guihuaqiu	403.52 d	394.31 g	0.336 c	0.305 de	0.250 d	0.239 d	14.70 i	18.78 g
盐粳 2 号 Yanjing 2	421.31 c	420.10 f	0.440 b	0.340 cd	0.333 a	0.302 b	36.58 a	21.95 e
金南风 Jinnanfeng	246.86 g	435.76 e	0.263 e	0.331 cd	0.340 a	0.293 b	22.38 g	20.02 f
桂花黄 Guihuahuang	345.80 f	619.69 a	0.347 c	0.467 b	0.324 a	0.259 cd	27.91 d	28.40 c
泗稻 8 号 Sidaao 8	450.49 b	319.95 h	0.451 b	0.264 e	0.319 b	0.298 b	36.02 b	17.55 h
淮稻 5 号 Huaidao 5	417.80 c	204.52 i	0.283 de	0.210 f	0.216 f	0.260 c	15.23 h	17.16 h
徐稻 2 号 Xudao 2	373.33 e	488.59 c	0.333 c	0.470 b	0.285 c	0.284 b	23.68 f	36.04 b
连粳 7 号 Lianjing 7	419.00 c	455.97 d	0.296 d	0.377 c	0.208 f	0.260 c	15.34 h	27.07 d
镇稻 88 Zhendao 88	401.34 d	501.89 b	0.292 d	0.334 cd	0.249 d	0.249 cd	24.34 e	22.23 e

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 9 不同生育期不同磷处理下 4 个品种根系氧化力

Table 9. Root oxidation of four cultivars under different phosphorus treatments at different growth stages.

μg·g⁻¹ h⁻¹

品 种 Cultivar	处 理 Treatment	分蘖中期 Tillering midterm	穗分化始期 Spike differentiation	抽穗期 Heading date	成熟期 Mature period
甬优 2640 Yongyou 2640	低 P LP	2266.05 c	833.79 f	796.11 a	613.03 b
	对照 Control	1264.70 f	705.57 g	688.83 b	561.94 c
盐粳 2 号 Yanjing 2	低 P LP	2192.18 d	1049.75 d	635.77 c	588.57 c
	对照 Control	1742.95 e	963.30 e	466.68 e	382.39 e
金南风 Jinnanfeng	低 P LP	1284.27 f	1151.60 c	633.15 c	618.19 b
	对照 Control	1250.88 f	1002.35 de	629.40 c	613.03 b
连粳 7 号 Lianjing 7	低 P LP	2329.05 b	1501.80 b	557.88 d	518.98 d
	对照 Control	2768.85 a	1789.91 a	787.18 a	766.28 a

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 10 不同生育期不同磷处理下 4 个品种根系吸收表面积

Table 10. Root absorption area of four cultivars under different phosphorus treatments at different growth stages.

品 种 Cultivar	处 理 Treatment	分蘖中期		穗分化始期		抽穗期	
		Tillering midterm/(m ² ·hill ⁻¹)		Panicle differentiation/(m ² ·hill ⁻¹)		Heading date/(m ² ·hill ⁻¹)	
		总面积 Total area	活跃面积 Active area	总面积 Total area	活跃面积 Active area	总面积 Total area	活跃面积 Active area
甬优 2640 Yongyou 2640	低 P LP	3.473 e	0.671 d	7.615 d	1.698 f	28.827 a	3.960 c
	对照 Control	2.945 h	0.529 f	6.506 f	1.305 g	26.586 c	2.041 g
盐粳 2 号 Yanjing 2	低 P LP	3.758 c	0.725 c	9.586 a	3.475 a	21.715 d	5.928 b
	对照 Control	3.622 d	0.570 e	6.730 e	2.702 d	17.831 h	3.905 d
金南风 Jinnanfeng	低 P LP	5.124 a	1.128 a	8.338 c	3.180 b	27.171 b	6.116 a
	对照 Control	4.198 b	0.820 b	9.154 b	3.111 c	20.560 f	3.552 e
连粳 7 号 Lianjing 7	低 P LP	3.456 f	0.570 e	5.142 g	1.236 h	20.208 g	1.834 h
	对照 Control	3.052 g	0.511 g	6.772 e	2.369 e	21.375 e	3.067 f

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 11 不同生育期不同磷处理下各品种根干质量

Table 11. Root dry weight of different cultivars under different phosphorus treatments.

品 种 Cultivar	分蘖中期		穗分化始期		抽穗期		成熟期	
	Mid-tillering/(kg·m ⁻²)		Panicle differentiation/(kg·m ⁻²)		Heading date/(kg·m ⁻²)		Maturity stage/(kg·m ⁻²)	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	0.029 b	0.038 a	0.100 d	0.070 f	0.318 b	0.305 a	0.438 a	0.265 a
桂花球 Guihuaqiu	0.027 c	0.030 b	0.096 d	0.121 c	0.370 a	0.261 b	0.166 g	0.115 e
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.029 b	0.024 e	0.146 b	0.135 b	0.198 e	0.216 d	0.383 b	0.158 d
金南风 Jinnanfeng	0.022 ef	0.026 cd	0.099 d	0.099 d	0.220 d	0.182 e	0.195 e	0.100 f
桂花黄 Guihuahuang	0.035 a	0.025 de	0.174 a	0.142 b	0.338 ab	0.262 b	0.189 f	0.173 c
泗稻 8 号 Sidao 8	0.034 a	0.027 c	0.059 f	0.071 f	0.178 f	0.170 f	0.200 e	0.182 b
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.027 c	0.029 b	0.139 c	0.190 a	0.310 b	0.246 c	0.143 h	0.111 e
徐稻 2 号 Xudao 2	0.025 d	0.025 de	0.065 e	0.044 h	0.269 c	0.140 g	0.204 e	0.181 b
黎明 Liming	0.023 e	0.019 f	0.043 g	0.033 i	0.114 g	0.095 h	0.191 f	0.200 a
连粳 7 号 Lianjing 7	0.021 f	0.020 f	0.056 f	0.084 e	0.204 e	0.212 d	0.250 d	0.161 d
镇稻 88 Zhendao 88	0.026 cd	0.026 cd	0.058 f	0.051 g	0.206 e	0.182 e	0.354 c	0.181 b

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 12 不同生育期不同磷处理下各品种根冠比

Table 12. Root and shoot ratio of different cultivars under different phosphorus treatments.

品 种 Cultivar	分蘖中期		穗分化始期		抽穗期		成熟期	
	Mid-tillering		Panicle differentiation		Heading stage		Maturity stage	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	0.091 d	0.074 b	0.228 d	0.188 c	0.212 bc	0.152 ab	0.151 b	0.089 a
桂花球 Guihuaqiu	0.123 bc	0.064 d	0.212 d	0.127 e	0.243 a	0.127 cde	0.051 f	0.037 h
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.142 ab	0.080 a	0.25 bc	0.186 c	0.167 ef	0.127 cde	0.129 c	0.053 f
金南风 Jinnanfeng	0.144 a	0.068 cd	0.227 d	0.180 cd	0.124 h	0.105 f	0.102 d	0.065 d
桂花黄 Guihuahuang	0.107 cd	0.075 a	0.266 b	0.258 a	0.196 cd	0.154 a	0.080 e	0.059 e
泗稻 8 号 Sidao 8	0.145 a	0.068 cd	0.270 b	0.165 d	0.146 g	0.133 bcd	0.110 c	0.063 de
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.107 cd	0.075 a	0.239 cd	0.226 b	0.161 fg	0.148 ab	0.101 d	0.046 g
徐稻 2 号 Xudao 2	0.137 ab	0.077 a	0.265 b	0.135 e	0.222 b	0.114 e	0.116 cd	0.061 de
黎明 Liming	0.108 cd	0.070 bc	0.320 a	0.177 c	0.176 def	0.121 def	0.120 cd	0.086 a
连粳 7 号 Lianjing 7	0.101 d	0.076 a	0.233 cd	0.226 b	0.182 de	0.160 a	0.163 a	0.072 c
镇稻 88 Zhendao 88	0.154 a	0.071 bc	0.192 d	0.187 c	0.219 b	0.144 abc	0.126 c	0.079 b

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

到根部，优先保证根系生长。

2.4 不同磷处理下茎蘖动态与成穗率

不同生育时期不同磷处理下各品种的茎蘖数和茎蘖成穗率列于表 13。由表中数据可以看出，分蘖中期所有品种在低磷处理下的茎蘖数均小于对照，只有少数品种(如盐粳 2 号、黎明)到生育后期时茎蘖数多于对照(表 13)。在低磷处理下，强耐低磷品种在分蘖中期茎蘖数要多于弱低磷品种。耐低

磷指数与分蘖中期的茎蘖数呈显著正相关($r = 0.62^*$)，而耐低磷指数与对照处理下的茎蘖数相关性不显著($r = -0.09$)。说明在低磷处理下茎蘖数的多寡可作为水稻品种耐低磷性强弱的一个早期诊断指标。

2.5 不同磷处理下叶面积动态

在低磷处理下，各生育期几乎所有品种的叶面积指数较对照均有所降低(表 14)。在耐低磷性不同

表 13 不同生育期不同磷处理下各品种茎蘖数及茎蘖成穗率
Table 13. Number of tillers and the percentage of stem and tiller under different phosphorus treatments at different growth stages.

品种 Cultivar	茎蘖数 Number of stems and tillers per m ²								茎蘖成穗率	
	分蘖中期		穗分化始期		抽穗期		成熟期		Percentage of productive	
	Mid-tillering		Panicle differentiation		Heading stage		Maturity stage		tillers and main stems/%	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	251.11 b	312.20 e	266.89 j	338.39 i	261.44 i	304.67 g	258.28 i	287.63 g	96.77 a	85.00 e
桂花球 Guihuaqiu	240.67 c	358.07 bc	431.73 e	532.58 c	384.16 e	459.87 c	355.14 e	428.51 d	82.26 d	80.46 f
盐粳 2 号 Yanjing 2	205.45 e	352.20 c	553.87 c	447.69 f	503.47 c	403.21 e	481.34 c	384.49 e	86.90 c	85.88 e
金南风 Jinnanfeng	281.76 a	387.42 a	646.16 b	594.42 b	570.21 b	578.44 b	522.43 b	569.39 b	80.85 d	95.79 ab
桂花黄 Guihuahuang	234.80 cd	316.98 e	451.99 d	474.65 e	416.65 d	441.22 d	405.03 d	428.72 d	89.61 bc	90.32 cd
泗稻 8 号 Sidao 8	228.93 d	387.42 a	366.97 g	486.07 d	348.54 f	459.98 c	334.59 f	446.12 c	91.18 b	91.78 c
淮稻 5 号 Huaidao 5	234.80 cd	292.85 f	297.75 i	319.67 j	285.47 h	306.86 g	281.76 h	299.37 g	94.63 a	93.65 bc
徐稻 2 号 Xudao 2	193.71 f	334.59 d	411.89 f	469.33 e	374.1 e	458.88 c	352.20 e	457.86 c	85.51 c	97.56 a
黎明 Liming	135.01 g	369.81 b	976.55 a	824.49 a	921.31 a	735.56 a	795.18 a	698.53 a	91.67 b	84.72 e
连粳 7 号 Lianjing 7	223.06 d	322.85 e	359.65 g	374.65 h	327.69 g	346.54 f	316.98 g	331.66 f	88.14 bc	88.52 d
镇稻 88 Zhendao 88	199.58 ef	363.94 b	329.35 h	425.99 g	298.65 h	391.23 e	284.70 h	372.75 e	86.44 c	87.50 d

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 14 不同生育期不同磷处理下各品种叶面积指数(LAI)的变化
Table 14. Changes of Leaf Area Index (LAI) at different growth stages under different phosphorus treatments.

品种 Cultivar	分蘖中期		穗分化始期		抽穗期		成熟期	
	Mid-tillering		Panicle differentiation		Heading stage		Maturity stage	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	0.667 d	1.868 a	4.129 a	4.762 e	7.250 e	10.504 d	3.322 h	6.211 a
桂花球 Guihuaqiu	0.680 d	1.635 b	2.978 d	8.392 a	8.208 c	11.797 b	4.143 c	3.903 g
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.689 d	1.227 f	3.086 c	6.146 c	5.970 f	12.438 a	2.775 j	6.192 a
金南风 Jinnanfeng	0.533 f	1.530 c	3.693 b	4.803 e	8.520 b	10.864 c	4.203 b	3.696 h
桂花黄 Guihuahuang	0.977 a	1.383 e	4.138 a	6.919 b	9.304 a	10.449 e	3.653 f	3.491 j
泗稻 8 号 Sidao 8	0.834 b	1.465 d	2.022 g	4.625 f	5.001 h	8.143 g	3.484 g	4.431 e
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.771 c	1.338 e	3.054 c	5.573 d	7.362 d	9.091 f	3.794 e	5.389 b
徐稻 2 号 Xudao 2	0.592 e	1.493 cd	2.341 e	4.078 g	5.227 g	7.130 h	2.967 i	4.084 f
黎明 Liming	0.681 d	1.184 f	1.345 i	1.216 j	3.257 j	5.111 k	2.680 k	3.553 i
连粳 7 号 Lianjing 7	0.614 e	1.039 g	1.968 h	3.519 h	4.329 i	6.940 i	3.997 d	4.903 d
镇稻 88 Zhendao 88	0.478 g	1.211 f	2.174 f	2.920 i	5.255 g	6.759 j	5.074 a	5.148 c

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

的品种间，叶面积指数则没有明显的变化规律。在抽穗期，虽然低磷处理的高效叶、有效叶、总叶面积均要小于对照，但其高效叶面积率和有效叶面积率在低磷处理下比对照降低的却很少，甚至有些品种有所增加(表 15)。在低磷处理下，强耐低磷品种在抽穗期的总叶面积指数、高效叶面积指数、有效叶面积指数、高效叶面积率和有效叶面积率几乎均

比弱耐低磷品种高(表 15)。这可能是生育后期强耐低磷品种在低磷处理下有较强物质生产能力的重要原因。

2.6 不同磷处理下产量库源特征

2 种磷浓度处理下的 11 个供试品种的库容量、最大叶面积以及库源比列于表 16。由表 16 可知，低磷处理下的库容量、最大叶面积较对照均有所降

表 15 抽穗期不同磷处理下各品种叶面积指数(LAI)的变化

Table 15. Changes of Leaf Area Index (LAI) of different cultivars under different phosphorus treatments at heading stage.

品种 Cultivar	低 P (LAI)			高效率	有效率	对照 (LAI)			高效率	有效率
	LP(LAI)					Control(LAI)				
	高效叶	有效叶	总叶			高效叶	有效叶	总叶		
	High efficient leaves	Effective leaf	Total leaves			High efficient leaves	Effective leaf	Total leaves		
甬优 2640 Yongyou 2640	4.805 b	7.250 c	7.250 e	0.662 a	1.000 a	6.399 b	10.192 d	10.504 d	0.609 a	0.970 b
桂花球 Guihuaqiu	3.782 d	7.893 b	8.208 c	0.460 cd	0.961 b	6.142 c	11.797 b	11.797 b	0.520 d	1.000 a
盐粳 2 号 Yanjing 2	3.570 e	5.937 e	5.970 f	0.597 b	0.994 a	6.879 a	12.438 a	12.438 a	0.553 c	1.000 a
金南风 Jinnanfeng	4.977 a	8.419 a	8.520 b	0.584 b	0.988 a	6.093 c	10.864 c	10.864 c	0.560 bc	1.000 a
桂花黄 Guihuahuang	4.308 c	8.438 a	9.304 a	0.463 cd	0.906 c	4.694 d	10.031 e	10.449 e	0.449 f	0.960 b
泗稻 8 号 Sidao 8	2.546 i	4.901 g	5.001 h	0.509 c	0.979 b	4.551 e	7.913 f	8.143 g	0.558 bc	0.971 b
淮稻 5 号 Huaidao 5	3.227 f	7.080 d	7.362 d	0.438 d	0.961 b	3.582 h	7.739 g	9.091 f	0.394 g	0.851 d
徐稻 2 号 Xudao 2	3.038 g	5.140 f	5.227 g	0.581 b	0.983 a	4.054 f	7.130 h	7.130 h	0.568 bc	1.000 a
黎明 Liming	1.889 k	2.866 j	3.257 j	0.579 b	0.879 d	3.220 j	4.945 k	5.111 k	0.629 a	0.967 b
连粳 7 号 Lianjing 7	2.406 j	4.232 i	4.329 i	0.555 b	0.977 b	4.002 g	6.409 j	6.940 i	0.576 b	0.923 c
镇稻 88 Zhendao 88	2.614 h	4.466 h	5.255 g	0.497 c	0.849 e	3.332 i	6.511 i	6.759 j	0.492 e	0.963 b

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 16 不同磷处理对各品种库、源及库源比的影响

Table 16. Effects of different phosphorus treatments on sink、source and source/sink ratio of cultivars.

品种 Cultivar	库容量		最大叶面积		库源比	
	Sink capacity/(kg·m ⁻²)		Maximum leaf area/(m ² ·m ⁻²)		Sink/Source/(kg·m ⁻²)	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	1.498 a	1.707 a	7.250 e	10.504 d	0.206 b	0.162 b
桂花球 Guihuaqiu	1.207 b	1.564 b	8.208 c	13.797 a	0.147 fg	0.113 d
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.939 d	1.001 f	5.970 f	12.439 b	0.157 ef	0.080 f
金南风 Jinnanfeng	0.950 d	1.052 e	8.520 b	10.864 c	0.111 i	0.096 e
桂花黄 Guihuahuang	1.200 b	1.166 d	9.304 a	10.449 e	0.129 h	0.111 d
泗稻 8 号 Sidao 8	0.852 e	1.205 d	5.001 h	8.143 g	0.170 d	0.148 c
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.712 h	1.050 e	7.362 d	9.091 f	0.096 j	0.115 d
徐稻 2 号 Xudao 2	0.957 d	1.360 c	5.227 g	7.130 h	0.183 c	0.190 a
黎明 Liming	0.781 f	0.965 f	3.257 j	5.111 k	0.239 a	0.188 a
连梗 7 号 Lianjing 7	1.041 c	1.337 c	4.329 i	6.940 i	0.240 a	0.192 a
镇稻 88 Zhendao 88	0.742 g	1.059 e	5.255 g	6.759 j	0.141 g	0.156 bc

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

低，而大多数品种的库源比在低磷处理下增加(表 16)。说明低磷处理下源下降的幅度比库大，且强耐低磷品种库源比增加的幅度较弱耐低磷品种更为明显。

2.7 不同磷处理下茎鞘非结构性碳水化合物(NSC)的转运

从表 17 中看出，低磷处理增加了大部分品种的 NSC 对籽粒的贡献率和 NSC 转运率。说明低磷

处理促使茎鞘中非结构性碳水化合物向籽粒的运转。从表 18 中还可以看出，低磷处理降低了几乎所有品种抽穗期和成熟期茎鞘总糖的积累量。综合分析表明，当低磷处理减少茎鞘中总糖的积累量的同时，也促进了茎鞘中合成的糖向籽粒的运输。

2.8 不同磷处理下干物质积累

表 19 和表 20 为不同生育期、不同磷处理下各品种地上部干物质质量和各个时期干物质指数及抽

表 17 不同磷处理下各品种茎鞘非结构性碳水化合物(NSC)的运转
Table 17. Transportation of non-structural carbohydrate(NSC) in stem and sheath of different cultivars under different phosphorus treatments.

品种 Cultivar	NSC 对籽粒的贡献率 Contribution of NSC to Grain/%		NSC 转运率 NSC transshipment rate/%	
	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	14.851 e	14.309 c	53.213 g	55.266 b
桂花球 Guihuaqiu	9.927 g	9.529 d	59.508 e	54.439 c
盐粳 2 号 Yanjing 2	18.417 c	15.07 b	55.357 f	40.893 e
金南风 Jinnanfeng	21.527 b	7.032 f	85.046 c	45.144 d
桂花黄 Guihuahuang	1.621 k	1.805 i	12.133 k	17.354 k
泗稻 8 号 Sidao 8	4.902 j	7.157 e	27.270 j	32.409 h
淮稻 5 号 Huaidao 5	23.002 a	20.926 a	88.314 a	74.042 a
徐稻 2 号 Xudao 2	11.801 f	4.202 h	69.559 d	35.042 g
黎明 Liming	7.226 h	5.851 g	38.432 h	27.967 i
连粳 7 号 Lianjing 7	14.956 d	14.298 c	87.715 b	35.851 f
镇稻 88 Zhendao 88	5.216 i	4.120 h	29.641 i	27.016 j

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 18 不同磷处理下各品种抽穗期和成熟期茎鞘总糖的积累
Table 18. Accumulation of stem and sheath sugar in heading and maturity of different cultivars under different phosphorus treatments.

品种 Cultivar	抽穗期 Heading date/(kg·m ⁻²)		成熟期 Mature period/(kg·m ⁻²)	
	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	0.345 a	0.363 a	0.161 a	0.162 a
桂花球 Guihuaqiu	0.159 de	0.173 c	0.064 d	0.079 c
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.280 b	0.291 b	0.125 b	0.172 a
金南风 Jinnanfeng	0.207 cd	0.122 d	0.031 ef	0.067 de
桂花黄 Guihuahuang	0.113 efg	0.091 d	0.099 c	0.075 cd
泗稻 8 号 Sidao 8	0.134 ef	0.201 c	0.097 c	0.135 b
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.242 bc	0.207 c	0.028 f	0.053 e
徐稻 2 号 Xudao 2	0.118 efg	0.117 d	0.036 ef	0.076 cd
黎明 Liming	0.082 g	0.098 d	0.050 de	0.071 cde
连粳 7 号 Lianjing 7	0.154 e	0.260 e	0.018 f	0.167 a
镇稻 88 Zhendao 88	0.089 fg	0.122 d	0.063 d	0.089 c

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。
LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

穗期至成熟期干物质积累得变化情况。由表中数据可以看出，低磷处理下几乎所有品种在整个生育期干物重均低于对照处理，但成熟期强耐低磷品种的干物质积累量要高于其他类型的品种(表 19)。强耐低磷品种抽穗期至成熟期的干物质积累量，表现为低磷处理要高于对照(表 20)。表明低磷处理下强耐

低磷品种在生育后期有较强的物质生产能力。

2.9 不同磷处理下磷元素吸收量与运转

表 21 为 2 种磷浓度处理下 11 个供试水稻品种磷素的转运率、磷素产谷利用率和磷收获指数。与对照相比，在低磷处理下几乎所有品种磷素的转运率、磷素产谷利用率和磷收获指数都增加了(表 21)。

表 19 不同生育期不同磷处理下各品种地上部干质量

Table 19. Dry weight of shoots of different cultivars under different growth stages.

品种 Cultivar	分蘖中期		穗分化始期		抽穗期		成熟期	
	Mid-tillering/(kg·m ⁻²)		Panicle differentiation/(kg·m ⁻²)		Heading stage/(kg·m ⁻²)		Maturity stage/(kg·m ⁻²)	
	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照	低 P	对照
	LP	Control	LP	Control	LP	Control	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	0.311 a	0.514 a	0.440 c	0.569 d	1.502 c	2.001 a	2.892 b	2.962 b
桂花球 Guihuaqiu	0.217 d	0.463 b	0.451 c	0.954 a	1.517 c	2.038 a	3.219 a	3.097 a
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.202 e	0.295 g	0.584 b	0.724 c	1.181 e	1.697 b	2.952 b	2.921 bc
金南风 Jinnanfeng	0.155 h	0.389 cd	0.436 c	0.550 d	1.768 a	1.719 b	1.894 d	2.530 e
桂花黄 Guihuahuang	0.324 a	0.330 f	0.656 a	0.550 d	1.718 b	1.704 b	2.344 c	2.885 cd
泗稻 8 号 Sidao 8	0.236 c	0.397 c	0.319 d	0.430 e	1.216 d	1.269 c	1.808 e	2.863 d
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.250 b	0.377 d	0.578 b	0.840 b	0.916 h	1.658 b	1.406 g	2.413 f
徐稻 2 号 Xudao 2	0.184 f	0.325 f	0.244 e	0.346 g	1.211 d	1.220 c	1.761 e	2.925 bc
黎明 Liming	0.108 i	0.271 h	0.133 f	0.284 h	0.647 i	0.779 d	1.588 f	2.316 g
连粳 7 号 Lianjing 7	0.212 d	0.257 h	0.241e	0.371 f	1.116 f	1.317 c	1.538 f	2.243 h
镇稻 88 Zhendao 88	0.168 g	0.358 e	0.302 d	0.374 f	0.942 g	1.259 c	1.799 e	2.279 h

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

表 20 不同生育期干物质指数及不同磷处理下抽穗至成熟干物质积累

Table 20. Dry matter index at different growth stages and dry matter accumulation from heading to mature under different phosphorus treatments.

品种 Cultivar	不同时期干物质指数				抽穗至成熟干物质积累	
	Dry matter index at different times				Heading to mature dry matter accumulation/(kg·m ⁻²)	
	分蘖中期	穗分化始期	抽穗期	成熟期	低 P	对照
	Mid-tillering	Panicle differentiation	Heading stage	Maturity stage	LP	Control
甬优 2640 Yongyou 2640	0.605 d	0.773 bc	0.750 d	0.976 b	1.390 c	0.961 g
桂花球 Guihuaqiu	0.468 f	0.472 g	0.744 de	1.039 a	1.702 b	1.059 f
盐粳 2 号 Yanjing 2	0.684 c	0.806 b	0.695 e	1.010 ab	1.771 a	1.224 d
金南风 Jinnanfeng	0.398 g	0.792 b	1.028 a	0.748 d	0.126 j	0.811 h
桂花黄 Guihuahuang	0.981 a	1.192 a	1.008 ab	0.812 e	0.626 f	1.181 e
泗稻 8 号 Sidao 8	0.594 e	0.741 cd	0.958 b	0.631 e	0.592 g	1.594 b
淮稻 5 号 Huaidao 5	0.663 c	0.688 ef	0.552 f	0.582 e	0.490 h	0.755 i
徐稻 2 号 Xudao 2	0.566 d	0.705 de	0.992 ab	0.602 e	0.550 g	1.705 a
黎明 Liming	0.398 g	0.468 g	0.830 c	0.478 f	0.941 d	1.537 c
连粳 7 号 Lianjing 7	0.824 b	0.649 f	0.847 c	0.510 f	0.422 i	0.926 g
镇稻 88 Zhendao 88	0.469 f	0.807 b	0.748 d	0.789 cd	0.857 e	1.020 f

低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20；对照—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度；同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

LP, 1/20 of phosphorus concentration of the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 level.

说明在低磷处理下，植株吸收到的磷会更加有效地向籽粒运转。比较表 4 和表 21 可以看出，就平均值而言，在低磷处理下，强耐低磷品种的磷产谷利用率高于弱耐低磷品种。说明耐低磷性强的品种也具有较高的磷吸收利用率。

3 讨论

3.1 关于耐低磷性品种的评价指标

目前已有一些评价耐低磷品种的指标，如相对

表 21 不同磷处理下磷素运转率、磷产谷利用率和磷收获指数

Table 21. Phosphorus operating rate, phosphorus yield utilization and phosphorus harvest index under different phosphorus treatments.

品种 Cultivar	PTE/%		IPE/(kg kg ⁻¹)		PHI/%	
	低 P LP	对照 Control	低 P LP	对照 Control	低 P LP	对照 Control
甬优 2640 Yongyou 2640	41.25 j	34.75 h	283.79 b	109.53 c	67.50 f	49.39 d
桂花球 Guihuaqiu	64.40 e	49.65 e	302.78 a	91.55 d	76.82 b	46.70 e
盐粳 2 号 Yanjing 2	55.90 f	45.80 f	149.67 i	70.73 g	68.25 f	46.04 e
金南风 Jinnanfeng	71.86 d	81.88 a	246.11 e	191.32 a	70.58 e	53.16 b
桂花黄 Guihuahuang	55.25 g	57.09 d	260.95 d	67.69 gh	52.28 h	17.20 i
泗稻 8 号 Sidao 8	88.32 a	65.60 b	280.42 c	115.25 b	60.30 g	75.65 a
淮稻 5 号 Huaidao 5	74.21 c	41.17 g	265.76 d	65.66 hi	70.00 e	42.93 f
徐稻 2 号 Xudao 2	42.09 i	25.56 j	204.37 g	87.13 e	71.72 d	50.91 c
黎明 Liming	19.60 k	60.95 c	189.16 h	62.79 ij	60.78 g	47.01 e
连粳 7 号 Lianjing 7	82.17 b	23.21 k	218.26 f	61.75 j	83.88 a	24.39 h
镇稻 88 Zhendao 88	46.90 h	32.17 i	104.82 j	79.15 f	75.68 c	40.99 g

PTE—运转率; IPE—产谷利用率; PHI—收获指数; 低 P—国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度的 1/20; 对照: 国际水稻研究所标准营养液配方磷浓度; 同一栏内标以不同字母的值在 0.05 水平下差异显著。

PTE, Phosphorus operating rate; IPE, Phosphorus yield utilization; PHI, Phosphorus harvest index; LP, 1/20 of phosphorus concentration the International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Control, International Rice Research Institute standard nutrient solution formula; Values followed by different letters within the same column are significantly different at 0.05 probability level.

单株干质量(低磷胁迫单株干重/正常供磷单株干重)^[15,22]、水稻苗期体内磷利用效率^[15]、相对叶龄^[23]、早期相对分蘖^[24]等。以上这些研究,大多为苗期的试验结果,仅能反映生育前期水稻对低磷的响应特点,不能反映最重要的籽粒产量指标。因此,上述这些指标不能为育种家和农学家提供重要的信息——在低磷胁迫下产量的高低。

本研究则进行水稻全生育期耐低磷性试验,将产量作为重要的评价指标。参考前人有关抗旱性指标的研究^[25,26],比较分析了耐低磷系数[低磷产量/正常磷(对照)产量]、耐低磷指数(低磷产量×耐低磷系数/所有供试品种低磷处理的平均产量)、干物质指数(低磷干物重/对照干物重)、株高指数(低磷株高/对照株高)、胁迫敏感指数[(1-耐低磷系数)/(1-所有供试品种低磷处理的平均产量/所有供试品种对照的平均产量)]、综合耐低磷指数[相对株高×相对单株产量/相对出穗日数×100(相对值=低磷处理性状/对照同一性状)]等作为评价水稻耐低磷性指标的可行性。我们发现,上述 6 个指标中耐低磷指数与耐低磷系数、干物质指数呈极显著正相关($r = 0.70^{**} \sim 0.78^{**}$);耐低磷系数与综合耐低磷指数呈极显著正相关($r = 0.95^{**}$);耐低磷系数与胁迫敏感指数的相关系数 $r = -1$,因此可以认为,磷胁迫敏感指数即为耐低磷系数的不同表达形式。表明除株高指数外,上述指标都可以在一定程度上反映水稻品

种对低磷胁迫的忍受能力或敏感程度。本研究结果还表明,耐低磷指数、干物质指数与低磷处理下产量呈极显著正相关($r = 0.78^{**} \sim 0.94^{**}$);其他 4 个指标与低磷胁迫下的产量相关性均不显著($r = -0.478 \sim -0.432$)。说明耐低磷指数和干物质指数能很大程度上反映低磷胁迫下产量情况和耐低磷性的强弱,可作为水稻耐低磷性的评价指标,即耐低磷指数和干物质指数高,品种的耐低磷性就强,反之,耐低磷性就弱。从育种和栽培的实际工作出发,用耐低磷指数作为品种耐低磷性的评价指标可能更为简易、准确。根据本研究结果,甬优 2640、桂花球、盐粳 2 号为强耐低磷品种,可作为耐低磷品种培育的育种材料或栽培上高产与磷高效利用的品种。

本研究还发现,在低磷处理下,强耐低磷品种的磷产谷利用率高于弱耐低磷品种。说明品种耐低磷性的强弱与其磷吸收利用的高低有密切关系,强耐低磷品种磷的吸收利用率也高。强耐低磷品种也是磷高效品种。

3.2 关于耐低磷性品种的农艺生理特征

研究表明,在低磷处理下,水稻的一些农艺生理性状在耐低磷性不同的品种间差异较大。与弱耐磷品种相比,强耐磷品种在低磷处理下具有以下几个显著特点:1) 根量大、根系活力强。强耐低磷品种的总根长和根表面积增加,而弱耐低磷品种减

少; 在低磷胁迫下根系氧化力和吸收表面积降低, 但强耐低磷品种较弱耐低磷品种降低少。植物根系既是水分和养分吸收的主要器官, 又是多种激素、有机酸和氨基酸合成的重要场所, 其形态和生理特性与地上部的生长发育有密切联系^[27]。在低磷下根量大、根系活力强, 有利于植物对磷的吸收利用, 有利于植株的生长发育和产量形成。2) 早期分蘖数多。在有效分蘖期特别是移栽后分蘖早期分蘖数多, 有利于形成有效穗和大穗, 提高分蘖成穗率, 进而提高产量。3) 总 LAI 和高效 LAI 大, 有效 LAI 比例高。在低磷下保持较高的叶面积, 有利于增加光合作用, 而高效 LAI 大、有效 LAI 比例高, 有利于改善群体质量, 提高物质生产能力^[28,29]。4) 库容量(单位面积总颖花数×千粒重)大。库容量不仅是产量的重要组成部分, 而且对源的光合生产有重要调节作用^[30], 库容量大, 可以促进源(叶片)光合生产, 促进光合同化物向籽粒转运, 提高产量。5) 抽穗期茎鞘中糖积累量多。抽穗期茎鞘中糖积累量多有利于提高灌浆初期籽粒库活性, 促进胚乳细胞分裂, 进而促进籽粒灌浆、提高结实率和粒重^[31,32]。6) 抽穗至成熟期物质生产能力强。水稻抽穗至成熟期的干物质生产约占籽粒重量(产量)的 90%, 提高抽穗至成熟期的物质积累是提高产量的重要途径, 也是作物群体质量的核心指标^[33]。强耐低磷品种抽穗至成熟期物质生产能力强, 这是其在低磷下高产与磷高效利用的另一个重要特征。

4 结论

耐低磷指数和干物质指数能反映一个水稻品种在低磷处理下的产量情况和耐低磷性的强弱, 可作为水稻耐低磷性的评价指标。甬优 2640、桂花球、盐粳 2 号的耐低磷指数和干物质指数均 ≥ 1 , 可视为强耐低磷品种。强耐低磷品种的磷素产谷利用率也高。与弱耐低磷品种相比, 强耐低磷品种在低磷处理下具有根量大、根系活力强, 早期分蘖数多, 总 LAI 和高效 LAI 大, 有效 LAI 比例高, 库容量大, 抽穗期茎鞘中糖积累量多, 抽穗至成熟期物质生产能力强等特征。这些特征可作为耐低磷品种的重要农艺与生理性状。

参考文献:

[1] 中华人民共和国. 中国统计年鉴 2015. 北京: 中国统计出版社, 2015: 264-270.

- The people ' s Republic of China. China Statistical Yearbook 2015 Beijing: China Stat Press. 2015: 264-270.
- [2] 薛亚光, 杨建昌. 水稻超高产生理特性与栽培技术. 作物杂志, 2009(6): 8-12.
- Xue Y G, Yang J C. Physiological characteristics and Cultivation Techniques of super high yield rice. *Crops*, 2009(6): 8-12.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Current situation of fertilizer utilization efficiency of main grain crops in China and its improvement. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 王汝慈, 程式华, 曹立勇. 水稻耐低磷胁迫研究进展. 中国农学通报, 2009, 25(6): 77-83.
- Wang R C, Cheng S H, Cao L Y. Advance of tolerance to low-phosphorus stress of rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, 25(6): 77-83.
- [5] 田莉. 植物的磷素营养和土壤磷的生物有效性研究. 农业与技术, 2015, 35(20): 22-22.
- Tian L. Study on phosphorus nutrition of plants and bioavailability of phosphorus in soil. *Agric & Technol*, 2015, 35(20): 22-22.
- [6] 胡训霞, 史春阳, 丁艳, 张萍, 葛永胜, 刘玉金, 王泽港, 葛才林. 水稻根系中磷高效吸收和利用相关基因表达对低磷胁迫的应答. 中国水稻科学, 2016, 30(6): 567-576.
- Hu X X, Shi C Y, Ding Y, Zhang P, Ge Y S, Liu Y J, Wang Z G, Ge C L. Response of gene expression related to efficient phosphorus absorption and utilization to low-P stress in rice roots. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(6): 567-576.
- [7] Hinsinger P. Bioavailability of inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant Soil. Plant & Soil*, 2001, 237(2): 173-195.
- [8] Kai W, Cui K, Liu G, Xie W B, Yu H H, Pan J F, Huang J L, Nie L X, Shah F, Peng S B. Identification of quantitative trait loci for phosphorus use efficiency traits in rice using a high density SNP map. *BMC Genet*, 2014, 15(1): 155.
- [9] Nestler J, Wissuwa M. Superior Root Hair Formation Confers Root Efficiency in Some, But Not All, Rice Genotypes upon P Deficiency. *Front Plant Sci*, 2016, 7(e75997).
- [10] Wissuwa M, Ae N. Genotypic variation for tolerance to phosphorus deficiency in rice and the potential for its exploitation in rice improvement. *Plant Breeding*, 2001, 120(1): 43-48.
- [11] Akinrinde E A, Gaizer T. Differences in the performance and phosphorus-use efficiency of some tropical rice (*Oryza sativa* L.) varieties. *Pakis J Nutr*, 2006, 5(3): 206-211.
- [12] 郭再华, 贺立源, 徐才国. 水稻耐低磷特性研究. 应用与环境生物学报, 2004, 10(6): 681-685.
- Guo Z H, He L Y, Xu C G. Tolerance to low phosphorus of rice. *Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(6): 681-685.
- [13] 李锋, 李木英, 潘晓华, 朱安繁. 不同水稻品种幼苗适应低磷胁迫的根系生理生化特性. 中国水稻科学, 2004, 18(1): 48-52.

- Li F, Li M Y, Pan X H, Zhu A F. Biochemical and physiological characteristics in seedlings roots of different rice cultivars under low-phosphorus stress. *Chin J Rice Sci*, 2004, 18(1): 48-52.
- [14] 潘晓华, 刘水英, 李锋, 李木英. 低磷胁迫对不同水稻品种幼苗光合作用的影响. *作物学报*, 2003, 29(5): 770-774.
Pan X H, Liu S Y, Li F, Li M Y. Photosynthetic effect on seedlings of different rice cultivars under low phosphorus stress. *Acta Agron Sin*, 2003, 29(5): 770-774.
- [15] 李永夫, 罗安程, 王为木, 杨长登, 杨肖娥. 耐低磷水稻基因型筛选指标的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 119-124.
Li Y F, Luo A C, Wang W M, Yang C D, Yang X E. An approach to the screening index for low phosphorous tolerant rice genotype. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(1): 119-124.
- [16] 章骏德. 植物生理实验法. 南昌: 江西人民出版社, 1982, pp: 52-57.
Zhang J D. Plant physiology experiment. Nanchang: Jiangxi People's Publishing House, 1982: 52-57.
- [17] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术. 北京: 中国农业出版社, 2005, pp: 61-62.
Xiao L T, Wang S G. Experimental techniques of Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 61-62.
- [18] Yoshida S, Forno D, Cock J, Gomez K. Determination of sugar and starch in plant tissue. //Yoshida S. Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice. Philippines: The International Rice Research Institute, 1976: 46-49.
- [19] Somogyi M. A new reagent for the determination of sugars. *J Histochem & Cytochem*, 1945, 63(5): 350-366.
- [20] Pucher G W, Leavenworth C S, Vickery H B. Determination of Starch in Plant Tissues. *Plant Physiol*, 1948, 7(3): 541.
- [21] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 水稻品种的抗旱性及其生理特性的研究. *中国农业科学*, 1995, 28(5): 65-72.
Yang J C, Wang Z Q, Zhu Q S. Research on drought resistance and physiological characteristics of different rice varieties. *Sci Agric Sin*, 1995, 28(5): 65-72.
- [22] 郭玉春, 林文雄, 石秋梅, 梁义元, 陈芳育, 何华勤, 梁康逵. 水稻苗期磷高效基因型筛选研究. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1587-1591.
Guo Y C, Lin W X, Shi Q M, Liang Y Y, Chen F Y, He H Q, Liang K J. Study on the screening of high phosphorus efficiency genotypes at rice seedling stage. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(12): 1587-1591.
- [23] 曹黎明, 潘晓华. 水稻不同耐低磷基因型的评价指标分析. *上海农业学报*, 2000, 16(4): 31-34.
Cao L M, Pan X H. Analysis on the evaluation index of rice genotypes with different tolerance to low phosphorus. *Acta Agri Shanghai*, 2000, 16(4): 31-34.
- [24] Ni J J, Wu P, Lou A C, Tao Q N. Rice seedling tolerance to phosphorus stress in solution culture and soil. *Nutr Cycl Agroecos*, 1998, 51(2): 95-99.
- [25] 刘永巍, 田红刚, 李春光, 程芳艳, 孙逸轩. 水稻抗旱研究进展. *北方水稻*, 2015, 45(2): 76-80.
Liu Y W, Tian H G, Li C G, Cheng F Y, Sun Y X. Research Progress on Drought Resistance of rice. *North Rice*, 2015, 45(2): 76-80.
- [26] 敬礼恒, 刘利成, 梅坤, 陈光辉. 水稻抗旱性能鉴定方法及评价指标研究进展. *中国农学通报*, 2013(12): 1-5.
Heng J L, Liu L C, Mei K, Chen G H. Research progress on identification methods and evaluation indexes of drought resistance in rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2013(12): 1-5.
- [27] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 36-46.
Yang J C. Relationship between root morphology and yield, quality and nutrient absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(1): 36-46.
- [28] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2005, pp: 77-84.
Ling Q H. Crop Population Quality. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2005: 77-84.
- [29] 李梦婷. 氮肥运筹对籼粳亚种间杂交中稻甬优4949产量形成及氮肥吸收利用的影响研究. 武汉: 华中农业大学, 2015: 1-51.
Li M T. Effects of different nitrogen management on yield formation and nitrogen absorption and utilization of the subspecific hybrid medium rice yongyou 4949. Wuhan: Central China Agricultural University, 2015: 1-51.
- [30] 缪子梅, 俞双恩, 卢斌, 丁继辉, 于智恒. 基于结构方程模型的控水稻“需水量-光合量-产量”关系研究. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 91-98.
Miao Z M, Yu S E, Lu B, Ding J F, Yu Z H. Study on the relationship between water demand, Photosynthesis and rice yield of water controlled rice based on structural equation modeling. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, 29(6): 91-98.
- [31] 潘圣刚, 吴颖仪, 肖瑶, 陈燕红, 田华, 肖立中, 唐湘如. 抑制无效分蘖对水稻产量和非结构性碳水化合物含量的影响. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2015, 41(3): 229-233.
Pan S G, Wu Y Y, Xiao Y, Chen Y H, Tian H, Xiao L Z, Tang X R. Effects of inhibiting ineffective tiller on Rice Yield and non-structural carbohydrates. *Hunan Agric Univ: Nat Sci*, 2015, 41(3): 229-233.
- [32] 潘俊峰, 李国辉, 崔克辉. 水稻茎鞘非结构性碳水化合物再分配及其在稳产和抗逆的作用. *中国水稻科学*, 2014, 28(4): 335-342.
Pan J F, Li G H, Cui K H. Re-partitioning of non-structural carbohydrates in rice stem and their roles in yield stability and stress tolerance. *Chin J Rice Sci* 2014, 28(4): 335-342.
- [33] 凌启鸿. 水稻精确定量栽培理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2007: 2-45.
Ling Q H. Theory and technology of rice precise and quantitative cultivation. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 2-45.