

磷水平对不同香稻品种苗期形态生理的影响

陈健晓^{1,3},王小娟²,屠乃美¹,王效宁³,符策强³,唐清杰³,刘爱玉¹

(1. 湖南农业大学 农学院,湖南 长沙 410128; 2. 海南省农业科学院 蔬菜研究所,海南 海口 571100;
3. 海南省农业科学院 粮食作物研究所,海南省农作物遗传育种重点实验室,海南 海口 571100)

摘要:为了分析低磷胁迫下对不同香稻品种苗期形态生理的影响,筛选出耐低磷性较好的香稻品种。在自然条件下,通过不同磷浓度(0,0.25,0.50,2.00,8.00,31.00 mg/L)营养液水培试验,在不同时间(7,14,21,28,31 d)测定不同磷浓度下绿金香、华香、美香占2号和海香占4个香稻品种苗期各项形态生理指标,研究了不同香稻品种在苗期不同磷水平下形态生理的差异。结果表明:在35 d无磷(磷浓度为0 mg/L)条件下,绿金香在SPAD值(34.58)、磷的积累量(1.45 mg/瓶)、根系活力(529.84 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$)、根冠比(0.63)、总根长(443.06 cm)、总根系表面积(152.02 cm^2)、总根体积(14.15 cm^3)、总根尖数(2452.02)和直径0~0.5 mm总根长(378.43 cm)均比其他香稻品种高,华香在超氧化物歧化酶(SOD)活性(240.39 U/g)和过氧化氢酶(CAT)活性(28.03 U/($\text{g}\cdot\text{min}$))上高于其他香稻品种,美香占2号在钠钾离子ATP酶($\text{Na}^+\text{K}^+\text{-ATPase}$)活性(68.97 $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$)上高于其他香稻品种。综合而言,低磷胁迫下,4个香稻品种耐低磷能力从强到弱依次为绿金香、华香、美香占2号、海香占,即绿金香为本试验条件下耐低磷胁迫能力最强的香稻品种。

关键词: 香稻;磷;形态生理;幼苗

中图分类号:S143.2 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)02-0117-09

doi:10.7668/hbxb.20190403



Effects of Different Concentration of Phosphorus Nutrient on Morphophysiology of Different Scented Rice Varieties at the Seedling Stage

CHEN Jianxiao^{1,3}, WANG Xiaojuan², TU Naimei¹, WANG Xiaoning³,
FU Ceqiang³, TANG Qingjie³, LIU Aiyu¹

(1. Agronomy College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2. Vegetable Research Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China;
3. Cereal Crop Research Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Hainan Key Laboratory of Crop Genetics Breeding, Haikou 571100, China)

Abstract: In order to study the effects of low phosphorus stress on morphophysiology of different scented rice varieties at the seedling stage which were selected preferable scented rice varieties resistant to low phosphorus. A hydroponic experiment was conducted by different P concentration nutrient solution (0, 0.25, 0.50, 2.00, 8.00, 31.00 mg/L) in natural conditions, different morphophysiological indexes of four scented rice varieties (Lüjinxiang, Huaxiang, Meixiangzhan 2, Haixiangzhan) under different P concentration nutrient solution in different stage (7, 14, 21, 28, 31 d) were determined, to reveal morphophysiological differences of different scented rice varieties under different concentration of phosphorus nutrient at the seedling stage. The results showed that under the condition of without P (P concentration was 0 mg/L) at 35 d, Lüjinxiang were higher than other scented varieties in SPAD value (34.58), P accumulation (1.45 mg/bottle), root activity (529.84 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$), shoot-root ratio (0.63), total root length (443.06 cm), total root surface area (152.02 cm^2), total root volume (14.15 cm^3), total number of root tip and total root length of 0-0.5 mm in diameter (378.43 cm), Huaxiang were higher than other scented varieties in

收稿日期:2019-10-31

基金项目:海南省自然科学基金项目(318QN295);海南农业科技示范推广项目(琼财农[2018]1024号);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-89)

作者简介:陈健晓(1983-),男,海南乐东人,副研究员,在读博士,主要从事作物高产栽培与增产机理研究。

通讯作者:刘爱玉(1965-),女,湖南长沙人,教授,博士,博士生导师,主要从事作物高产栽培与生理生化研究。

SOD activity (240.39 U/g) and CAT activity (28.03 U/(g·min)), and Meixiangzhan 2 was better than other scented varieties in $\text{Na}^+ \text{K}^+$ -ATPase activity (68.97 $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$). In conclusion, under low phosphorus stress, the low P resistance of the four varieties from strong to weak was Lujinxiang > Huaxiang > Meixiangzhan 2 > Haixiangzhan, that was Lujinxiang, a scented rice, was the strongest resistance ability to low phosphorus stress in the experiment.

Key words: Scented rice; Phosphorus; Morphophysiology; Seedling

磷是细胞质和细胞核的主要成分之一,直接参与水稻体内糖、蛋白质和脂肪的代谢。供磷不足会影响到水稻植株体内的能量代谢过程,抑制水稻的正常生长^[1]。我国每年有75%化肥用于粮食生产,其中磷肥占20%左右,磷肥施入土壤后大部分容易被土壤固定,移动性差导致水稻磷肥的利用率只有15%~25%,并且农田土壤速效磷含量一直呈上升趋势,土壤速效磷含量在10~40 mg/kg的农田面积增加最多^[2-3]。有研究表明,当土壤速效磷含量超过磷素环境警戒值(速效磷的含量在25~30 mg/kg)时,磷素将向水体释放,造成水体污染^[4-6]。在海南有22.22%土壤磷素超过环境警戒值,且部分农户还在增施磷肥,造成磷肥利用率降低,阻碍农业高效健康发展^[4]。利用作物耐低磷和高效吸收利用磷的基因资源,是提高作物磷吸收效率的有效手段^[7],也是合理利用磷素资源、减少环境污染的重要途径。

作物耐低磷和磷高效有2种情况,一种是低磷条件下,能够吸收较多磷,即吸磷能力强;另一种是吸收相同磷素,能够生产更多的干物质。磷高效品种比磷低效品种具有较强的干物质积累和磷素吸收能力^[8-9]。有研究认为低磷条件下,整株磷累积量是评价水稻苗期磷效应高低的重要指标之一^[10]。

前人有关磷对水稻的研究主要关注不同生育期、磷肥施用方式及不同磷肥施用量下,水稻适应性及磷吸收利用的特征,并且研究对象多为普通水稻^[11-19],对于香稻耐低磷性的相关研究报道较少。为此,本研究采用营养液培养方法,研究不同供磷水平下不同香稻品种在苗期叶绿素含量、磷素累积、根系抗氧化酶活性等生理指标影响,旨在对不同香稻品种苗期耐低磷性能进行初步的鉴定和形态生理基础指标分析评价,筛选出耐低磷性较强(磷高效)香稻品种并为香稻苗期的耐低磷性机理研究提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点与供试品种

试验于2018年11-12月在海南省农业科学院粮食作物研究所农作物遗传育种重点实验室(N20°

0'45.79", E110°21'39.75")开展。供试水稻品种为绿金香、华香、美香占2号和海香占,其中美香占2号由广东省农业科学院水稻研究所提供,绿金香、华香和海香占由海南省农业科学院粮食作物研究所提供。

1.2 试验设计

选择饱满一致水稻种子,用多菌灵消毒液浸泡24 h,用自来水清洗后转移到培养皿中,放入智能人工气候箱(型号:RPX-3500C,宁波海曙赛实验仪器厂)进行黑暗30℃催芽,种子露白后,光照16 h/黑暗8 h,温度28℃,湿度85%,培养期间保证培养皿中一定量水分,确保水稻正常生长。待秧苗长至三叶期后,挑选生长一致的幼苗移入有营养液的培养瓶(高12 cm,下底直径7 cm,中部直径10 cm,口径8 cm,瓶口里处挂有深3 cm筛子)中,每瓶12株,每个品种138瓶,瓶子用黑色塑料纸包裹,避免根系见光以及培养液中滋生绿藻,然后将培养瓶放置在实验室阳台上,盖上有透明塑料薄膜的小拱棚(宽90 cm,高80 cm,长200 cm),当温度低于15℃或者下雨时,将小拱棚两边薄膜盖上,起保温和防雨作用。在自然条件下培养5 d,秧苗适应水培条件后去除种子残留物,并用清水淋洗根部,转移到不同磷浓度培养液中培养,不同磷浓度培养液是以水稻完全营养液为基础^[18],将磷的浓度设计为6个水平分别为31.00(P31),8.00(P8),2.00(P2),0.50(P0.5),0.25(P0.25),0(P0) mg/L,水稻品种4水平分别为绿金香、华香、美香占2号和海香占,二因素试验,共24个处理,每个处理23瓶。培养期间每2 d每瓶加入1 mL 3% H_2O_2 ,预防绿藻滋生,每4 d更换1次营养液,pH值控制在5.5~5.8,从转入不同磷浓度开始计天数,共培养35 d。

1.3 测定项目与方法

叶绿素含量动态的测定:从秧苗放入不同磷水平培养液开始,每7 d每个处理取3瓶,用叶绿素测定仪(型号:SPAD-502plus,浙江托普云农科技股份有限公司)在秧苗顶1全展叶片中部测定,连续测定10株后取平均值。

磷积累动态的测定:测定时间同上,每个处理

取 3 瓶, 每瓶秧苗用剪刀切断秧苗地上部和地下部(根系), 分开装袋, 80 °C 烘至恒质量后称质量(干物质质量), 粉碎过筛, 用钼锑钒比色法测定植株含磷量, 磷含量 × 干质量为磷积累量^[18]。

根冠比的测定: 在秧苗培养 35 d 时, 用烘干后秧苗地下部(根系)/地上部为根冠比。

根系不同酶活性和根系活力的测定: 秧苗培养到 28, 35 d, 每个处理取 4 瓶, 选取秧苗根系, 采用氯化硝基四氮蓝唑(NBT)光化还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[18]、过氧化氢法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[18]、ATP 酶试剂盒(南京建成科技有限公司)测定钠钾离子 ATP 酶($\text{Na}^+ \text{K}^+ \text{-ATPase}$)的活性、氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力^[18]。

根系形态指标的测定: 秧苗培养到 35 d, 每个处理取 3 瓶, 每瓶秧苗用剪刀切断水稻秧苗地上部和地下部(根系), 将完整根系冲洗干净, 在根系扫描仪(Epson V700, China)上进行扫描, 采用 WinRHIZO PRO 2012(Regent Instruments, Quebec, Canada)软件

进行分析, 获得总根长、总根系表面积、总根系体积、根系平均直径、总根尖数和直径 0 ~ 0.5 mm 总根长。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 进行数据整理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫对香稻苗期 SPAD 值的影响

由表 1 可知, 各处理的 SPAD 值随着生育进程的推进而升高, 至 35 d 时处理间差异均不显著, 但在其他时间(7, 14, 21, 28 d), 不同品种在各 P 浓度下 SPAD 值变化也有所不同。其中, 绿金香在 21 d 时, P0 的 SPAD 值显著低于 P2、P8 和 P31, 其中与 P31 SPAD 值差值最大(2.87), 28 d 时 P8 SPAD 值最高, 显著高于除 P31 外的其他 P 浓度处理; 华香在 21 d 时, P0 和 P0.25 SPAD 值显著高于 P31, 与其他处理差异不显著; 美香占 2 号在 7 d 时, P0.5 SPAD 值显著高于 P2、P8 和 P31, 14 d 时, P0.25 SPAD 值显著高于

表 1 低磷胁迫对香稻苗期 SPAD 值的影响

Tab. 1 Effects of low phosphorus stress on SPAD value of scented rice in seedlings

处理 Treatment		SPAD 值 SPAD value				
品种 Variety	P 浓度 P concentration	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
绿金香 Lüjinxiang	P0	22.83 ± 1.53a	25.84 ± 1.32a	28.75 ± 0.82b	31.51 ± 0.58d	34.58 ± 1.62a
	P0.25	21.72 ± 1.67a	24.81 ± 2.12a	29.66 ± 1.12ab	31.86 ± 0.93cd	34.24 ± 1.37a
	P0.5	22.36 ± 2.01a	26.60 ± 1.89a	29.62 ± 1.43ab	33.42 ± 1.03bcd	34.65 ± 1.04a
	P2	22.43 ± 1.75a	26.33 ± 1.67a	30.83 ± 1.67a	32.75 ± 1.74bcd	34.64 ± 1.11a
	P8	23.75 ± 1.27a	26.72 ± 2.01a	31.37 ± 1.52a	35.85 ± 1.37a	36.23 ± 1.12a
华香 Huaxiang	P31	24.28 ± 1.70a	26.80 ± 2.22a	31.62 ± 1.32a	34.43 ± 1.52ab	36.67 ± 1.28a
	P0	21.13 ± 1.47a	27.03 ± 2.31a	30.92 ± 1.28a	33.34 ± 2.23a	34.41 ± 1.30a
	P0.25	23.22 ± 1.21a	27.11 ± 2.11a	31.43 ± 1.83a	34.22 ± 2.03a	34.63 ± 1.57a
	P0.5	22.74 ± 1.60a	26.26 ± 1.21a	30.61 ± 1.23ab	33.95 ± 1.45a	34.07 ± 2.25a
	P2	21.46 ± 1.05a	26.85 ± 0.95a	30.26 ± 1.08ab	33.28 ± 1.63a	36.52 ± 1.80a
美香占 2 号 Meixiangzhan 2	P8	22.67 ± 1.53a	27.63 ± 1.57a	29.62 ± 0.83ab	35.17 ± 1.25a	36.33 ± 2.21a
	P31	23.68 ± 1.77a	27.51 ± 1.50a	28.73 ± 0.72b	34.82 ± 0.85a	35.99 ± 2.13a
	P0	24.31 ± 1.68ab	26.32 ± 0.85ab	28.85 ± 2.23a	30.38 ± 1.03b	33.60 ± 1.34a
	P0.25	23.93 ± 1.34abc	27.46 ± 1.27a	28.14 ± 2.03a	30.35 ± 0.97b	34.22 ± 1.78a
	P0.5	25.12 ± 0.75a	26.17 ± 2.03ab	27.40 ± 1.39a	33.07 ± 1.67a	34.64 ± 2.43a
海香占 Haixiangzhan	P2	22.24 ± 0.66cd	24.48 ± 0.98b	26.95 ± 1.57a	33.36 ± 1.43a	33.87 ± 2.18a
	P8	20.68 ± 2.24d	22.36 ± 0.65c	27.72 ± 2.12a	32.12 ± 0.55a	33.79 ± 1.09a
	P31	22.63 ± 1.38bc	25.92 ± 1.52ab	28.44 ± 1.28a	32.93 ± 1.53a	35.22 ± 2.23a
	P0	21.83 ± 1.32abc	25.93 ± 0.78a	26.63 ± 0.82ab	28.88 ± 2.26a	31.12 ± 1.73a
	P0.25	21.28 ± 0.93bc	24.81 ± 1.23a	27.12 ± 1.02ab	29.43 ± 1.32a	31.31 ± 1.25a
P0.5	22.66 ± 1.63ab	24.60 ± 1.02a	28.35 ± 1.32a	28.93 ± 1.53a	31.82 ± 1.02a	
	P2	20.11 ± 0.83c	22.45 ± 0.78b	26.53 ± 0.31b	30.52 ± 2.21a	32.12 ± 2.10a
	P8	20.72 ± 0.32c	22.78 ± 0.63b	25.92 ± 0.88b	29.18 ± 1.73a	31.81 ± 1.13a
	P31	23.43 ± 1.56a	25.23 ± 0.98a	25.47 ± 1.26b	30.01 ± 2.34a	32.23 ± 2.38a

注: 同列同品种不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。表 2-5 同。

Note: Different lowercase letters in the same column and variety indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same as Tab. 2-5.

P2 和 P8, 28 d 时, P0 与 P0.25 SPAD 值显著低于 P0.5、P2、P8 和 P31; 海香占在 7 d 时, P31 SPAD 值显著高于 P0.25、P2 和 P8, 14 d 时, P0、P0.25、P0.5 和 P31 SPAD 值显著高于 P2 和 P8, 21 d 时, P0.5 SPAD 值与 P0 和 P0.25 差异不显著, 但显著高于 P2、P8 和 P31。

2.2 低磷胁迫对香稻苗期根系不同酶的活性和根系活力的影响

如表 2 所示, 低磷胁迫总体上能够显著降低水稻苗期的根系活力, 但提高了钠钾离子 ATP 酶活性, 同一香稻品种和磷浓度下, 各处理随生育进程的推进, 根系活力和钠钾离子 ATP 酶活性均有所提高, 其中在 35 d 时, P0 下绿金香的根系活力最高 (529.84 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$), 美香占 2 号钠钾离子 ATP 酶活性最高 (68.97 $\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h})$)。

不同时间内 (28, 35 d), 绿金香各 P 浓度处理间根系活力和钠钾离子 ATP 酶活性的差异表现基本一致, 根系活力在 P0.25 与 P0.5 处理差异不显著, 但其他处理间差异均显著, 钠钾离子 ATP 酶活性在 P0、P0.25 和 P0.5 处理显著高于 P2、P8 和 P31。华

香在 28 d 时, 根系活力在 P0、P0.25 和 P0.5 差异不显著, 但与其他 P 浓度处理间差异均显著, 钠钾离子 ATP 酶活性在 P0 显著高于 P0.5 和 P2, 三者及 P0.25 均显著高于 P8 和 P31; 美香占 2 号在 28 d 时, 根系活力在 P0 与 P0.25 差异不显著, 但均与其他 P 浓度处理差异显著, 钠钾离子 ATP 酶活性在 P0 显著高于其他 P 浓度处理, 且 P0.25 亦显著高于 P2、P8 和 P31。在 35 d 时, 绿金香、华香、美香占 2 号及海香占的根系活力随着 P 浓度的降低均呈下降趋势, 且整体上各 P 浓度处理间差异均显著; 华香钠钾离子 ATP 酶活性随着 P 浓度降低表现为先升高后降低再升高的趋势, 呈“N”型, P31 显著低于 P0.5 和 P2, 三者均显著低于其他 3 个 P 浓度处理, 美香占 2 号钠钾离子 ATP 酶活性处理间差异与 28 d 一致, 海香占钠钾离子 ATP 酶活性在 P0 与 P0.25、P0.5 与 P2 及 P8 与 P31 处理间差异不显著。

表 2 低磷胁迫对香稻苗期根系活力和钠钾离子 ATP 酶活性影响

Tab. 2 Effects of low phosphorus stress on root activity and $\text{Na}^+ \text{K}^+ \text{-ATPase}$ activity of scented rice in seedlings

处理 Treatment		根系活力/ $(\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h}))$ Root activity		钠钾离子 ATP 酶活性/ $(\mu\text{mol}/(\text{mg}\cdot\text{h}))$ $\text{Na}^+ \text{K}^+ \text{-ATPase}$ activity	
品种 Variety	P 浓度 P concentration	28 d	35 d	28 d	35 d
绿金香 Lüjinxiang	P0	100.80 ± 15.23e	529.84 ± 10.67e	50.96 ± 8.85a	54.21 ± 5.63a
	P0.25	141.63 ± 18.38d	550.66 ± 10.28d	48.55 ± 7.23a	49.11 ± 6.12a
	P0.5	159.14 ± 10.08d	565.67 ± 20.34d	46.02 ± 5.23a	48.32 ± 4.32a
	P2	183.78 ± 13.56c	865.34 ± 46.72c	19.64 ± 3.21b	27.92 ± 4.57b
	P8	359.90 ± 13.38b	1 049.31 ± 58.62b	17.98 ± 2.52b	32.48 ± 3.23b
华香 Huaxiang	P31	402.83 ± 27.68a	1 468.72 ± 80.38a	14.82 ± 3.38b	29.25 ± 4.68b
	P0	120.29 ± 10.68d	379.61 ± 23.56f	30.59 ± 3.22a	46.91 ± 4.78a
	P0.25	122.92 ± 20.37d	462.05 ± 13.67e	26.12 ± 1.63ab	43.49 ± 2.17a
	P0.5	126.31 ± 15.63d	514.89 ± 22.38d	24.59 ± 2.13b	36.71 ± 4.25b
	P2	230.71 ± 28.34c	793.33 ± 15.38c	21.93 ± 2.83b	33.95 ± 2.12b
美香占 2 号 Meixiangzhan 2	P8	348.18 ± 20.38b	836.50 ± 20.63b	16.33 ± 2.02c	44.30 ± 3.63a
	P31	453.82 ± 35.68a	1 269.22 ± 78.32a	14.01 ± 2.12c	26.81 ± 3.78c
	P0	131.76 ± 20.32e	199.95 ± 34.57f	51.31 ± 4.67a	68.97 ± 8.23a
	P0.25	147.38 ± 15.62e	418.37 ± 15.68e	40.14 ± 4.12b	54.69 ± 4.52b
	P0.5	213.21 ± 32.67d	473.77 ± 28.53d	40.80 ± 3.22b	50.68 ± 3.62b
海香占 Haixiangzhan	P2	270.75 ± 22.67c	639.30 ± 42.68c	39.24 ± 3.83b	49.16 ± 4.34b
	P8	313.16 ± 18.34b	843.45 ± 38.66b	37.49 ± 2.88b	46.49 ± 5.63b
	P31	381.96 ± 28.67a	932.00 ± 42.38a	36.76 ± 4.31b	48.43 ± 2.86b
	P0	109.85 ± 18.67d	190.30 ± 21.63f	56.83 ± 8.23a	58.84 ± 3.78a
	P0.25	157.52 ± 28.63c	237.27 ± 15.38e	38.31 ± 6.38b	56.25 ± 4.43a
	P0.5	146.06 ± 20.37c	319.74 ± 32.68d	34.60 ± 5.25bc	45.18 ± 3.07b
	P2	268.18 ± 32.78b	530.83 ± 20.12c	27.91 ± 3.28c	44.98 ± 1.56b
	P8	286.35 ± 31.38b	562.21 ± 10.57b	26.49 ± 2.57c	32.44 ± 2.03c
	P31	386.93 ± 41.23a	804.57 ± 63.28a	25.43 ± 4.42c	31.75 ± 2.89c

从表 3 可以看出,随磷浓度的降低,不同香稻品种根系 SOD 活性表现为先降低后升高再降低的趋势,呈倒“N”型,CAT 活性在华香品种表现为先升高后降低的趋势,呈倒“V”型,其他香稻品种均表现为降低的趋势;在相同磷浓度下,SOD 和 CAT 活性随水稻生育进程的推进而升高。

在相同时间(28 d 或 35 d)内,绿金香、华香和海香占 SOD 活性均在 P8 浓度时最低,而美香占 2 号在

P0 时最低,但与 P8 差异不显著。在相同时间内 CAT 活性除了华香在 P2 时最高外,其他香稻品种均在 P31 浓度下最高,但 4 个香稻品种的 CAT 活性最低均在 P0,说明低磷胁迫会降低根系 CAT 活性。在 35 d, P0 时,华香根系 SOD 活性最高(240.39 U/g),美香占 2 号根系 SOD 活性最低(172.45 U/g),同时华香根系 CAT 活性最高(28.03 U/(g·min)),绿金香根系 CAT 活性最低(14.71 U/(g·min))。

表 3 低磷胁迫对水稻根系抗氧化酶活性的影响

Tab. 3 Effects of low phosphorus stress on root antioxidant enzyme activities of scented rice in seedlings

处理 Treatment		SOD 活性/(U/g) Superoxide dismutase activity		CAT 活性/(U/(g·min)) Catalase activity	
品种 Variety	P 浓度 P concentration	28 d	35 d	28 d	35 d
绿金香 Lüjinxiang	P0	119.21 ± 5.25bc	196.37 ± 3.48c	10.43 ± 1.87d	14.71 ± 3.12c
	P0.25	125.25 ± 4.27b	228.46 ± 6.78b	10.57 ± 1.72d	16.75 ± 1.23c
	P0.5	149.27 ± 7.23a	264.28 ± 14.23a	16.10 ± 3.25c	20.33 ± 3.65c
	P2	127.56 ± 5.72b	223.28 ± 5.26b	28.15 ± 2.03b	36.13 ± 4.23b
	P8	84.48 ± 5.63d	161.79 ± 18.63d	30.82 ± 1.78b	40.84 ± 2.02b
华香 Huaxiang	P31	106.47 ± 8.57c	177.54 ± 5.42d	36.47 ± 2.47a	54.57 ± 3.25a
	P0	123.43 ± 7.28c	240.39 ± 5.26cd	18.54 ± 1.62c	28.03 ± 3.85c
	P0.25	124.93 ± 6.10c	250.67 ± 12.23bc	22.82 ± 3.52bc	32.85 ± 1.17bc
	P0.5	190.14 ± 20.32a	346.25 ± 53.21a	26.88 ± 2.45b	34.93 ± 2.12b
	P2	146.66 ± 12.53b	265.60 ± 18.72b	36.39 ± 3.27a	44.87 ± 3.37a
美香占 2 号 Meixiangzhan 2	P8	96.83 ± 11.23d	198.82 ± 5.79e	20.33 ± 2.32c	40.16 ± 2.01a
	P31	131.66 ± 8.72bc	225.14 ± 11.25d	18.57 ± 1.37c	32.61 ± 1.11bc
	P0	117.56 ± 10.21d	172.45 ± 15.78cd	18.88 ± 1.53c	26.12 ± 1.29d
	P0.25	136.67 ± 5.23bc	192.83 ± 10.02c	22.31 ± 1.78c	30.08 ± 1.83c
	P0.5	155.03 ± 10.67a	235.22 ± 12.27a	22.98 ± 2.03c	34.23 ± 2.72c
海香占 Haixiangzhan	P2	146.84 ± 8.24ab	213.31 ± 7.56b	26.76 ± 0.78b	40.48 ± 1.28b
	P8	126.81 ± 6.25cd	182.60 ± 10.88cd	30.60 ± 1.02a	44.62 ± 3.02b
	P31	137.00 ± 4.23bc	191.19 ± 5.27c	32.36 ± 2.15a	50.92 ± 2.13a
	P0	149.28 ± 10.23bcd	216.85 ± 8.45d	8.27 ± 1.71e	16.39 ± 2.22e
	P0.25	157.05 ± 12.61bc	238.45 ± 11.23c	10.75 ± 1.02e	20.83 ± 2.51e
海香占	P0.5	166.15 ± 9.25b	276.12 ± 20.57b	14.00 ± 1.44d	28.64 ± 0.73d
	P2	198.07 ± 18.23a	379.75 ± 62.32a	22.66 ± 2.32c	36.07 ± 1.18c
	P8	134.29 ± 6.27d	187.38 ± 13.63e	30.48 ± 1.26b	46.48 ± 3.12b
	P31	146.88 ± 7.25cd	197.48 ± 7.22e	36.58 ± 1.72a	52.69 ± 2.23a

2.3 低磷胁迫对香稻苗期磷的积累量的影响

相同时间内,香稻秧苗磷的积累量均随着 P 浓度的降低而降低,并且随着秧苗生育进程的推进,P0、P0.25 和 P0.5 秧苗磷的积累量也随之降低,但 P2、P8 和 P31 秧苗磷的积累量增加,说明 P2 是本试验秧苗 P 积累的临界浓度,低于 P2,秧苗随生育进程的推进 P 的积累量会降低,而高于或等于 P2,P 的积累量反而提高(表 4)。

35 d 时,绿金香和海香占磷的积累量在各 P 浓度处理间差异均显著;华香磷积累量在 P0.25 与 P0.5 差异不显著,其他 P 浓度处理差异均显著;美

香占 2 号磷积累量在 P0 与 P0.25 差异不显著,均与其他 P 浓度处理差异显著。总之,在 35 d,P0 及 P31 处理,均以海香占磷积累量最低(0.88, 13.16 mg/瓶),而绿金香磷积累量最高(1.45, 19.77 mg/瓶),说明绿金香可能是耐低磷或磷高效品种,而海香占可能是磷低效品种。

2.4 低磷胁迫对香稻根系形态指标的影响

表 5 所示,香稻总根长、总根系表面积、总根体积、总根尖数和直径 0~0.5 mm 总根长均随着 P 浓度的降低而降低;根冠比及根系平均直径的变化与品种有关。

表 4 低磷胁迫对香稻磷的积累量的影响

Tab. 4 Effects of low phosphorus stress on P accumulation of scented rice in seedlings

mg/瓶

处理 Treatment		P 积累量 P accumulation				
品种 Variety	P 浓度 P concentration	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
绿金香 Lüjinxiang	P0	1.99 ± 0.08d	1.89 ± 0.05f	1.71 ± 0.12f	1.60 ± 0.09e	1.45 ± 0.13f
	P0.25	2.32 ± 0.04c	2.20 ± 0.02e	1.92 ± 0.10e	1.84 ± 0.11e	1.71 ± 0.07e
	P0.5	2.36 ± 0.07c	2.27 ± 0.03d	2.20 ± 0.13d	2.15 ± 0.19d	1.90 ± 0.08d
	P2	2.38 ± 0.08bc	2.62 ± 0.27c	3.25 ± 0.25c	5.33 ± 0.77c	7.83 ± 2.01c
	P8	2.55 ± 0.06b	3.35 ± 0.28b	5.14 ± 0.38b	7.38 ± 0.56b	11.85 ± 1.23b
华香 Huaxiang	P31	2.75 ± 0.11a	5.87 ± 0.23a	9.29 ± 0.76a	13.50 ± 1.83a	19.77 ± 2.75a
	P0	1.60 ± 0.05e	1.51 ± 0.03e	1.45 ± 0.06e	1.30 ± 0.08e	1.23 ± 0.06e
	P0.25	1.80 ± 0.09d	1.77 ± 0.07d	1.68 ± 0.15d	1.56 ± 0.17d	1.48 ± 0.11d
	P0.5	1.85 ± 0.06d	1.80 ± 0.05d	1.78 ± 0.13d	1.66 ± 0.21d	1.58 ± 0.13d
	P2	2.03 ± 0.10c	2.22 ± 0.21c	2.91 ± 0.52c	4.65 ± 0.73c	6.59 ± 0.98c
美香占 2 号 Meixiangzhan 2	P8	2.34 ± 0.12b	3.01 ± 0.37b	4.65 ± 0.83b	6.54 ± 1.07b	9.08 ± 1.23b
	P31	2.63 ± 0.13a	4.36 ± 0.41a	8.73 ± 1.26a	11.85 ± 1.76a	16.97 ± 2.25a
	P0	1.48 ± 0.03e	1.30 ± 0.03e	1.22 ± 0.05e	1.17 ± 0.12d	1.02 ± 0.13e
	P0.25	1.64 ± 0.05d	1.42 ± 0.11e	1.32 ± 0.07de	1.21 ± 0.08d	1.18 ± 0.06e
	P0.5	1.92 ± 0.04c	1.73 ± 0.08d	1.50 ± 0.12d	1.37 ± 0.21d	1.30 ± 0.08d
海香占 Haixiangzhan	P2	2.00 ± 0.05bc	2.10 ± 0.12c	2.91 ± 0.53c	4.32 ± 0.32c	6.22 ± 0.84c
	P8	2.14 ± 0.16b	2.68 ± 0.32b	3.62 ± 0.72b	5.89 ± 1.07b	8.54 ± 1.22b
	P31	2.58 ± 0.23a	4.05 ± 0.73a	6.87 ± 1.32a	9.86 ± 1.76a	14.35 ± 1.53a
	P0	1.41 ± 0.10d	1.32 ± 0.08e	1.17 ± 0.13e	1.01 ± 0.05f	0.88 ± 0.03f
	P0.25	1.61 ± 0.09c	1.53 ± 0.04d	1.45 ± 0.14d	1.22 ± 0.05e	1.02 ± 0.09e
	P0.5	1.74 ± 0.13c	1.63 ± 0.17d	1.56 ± 0.27d	1.40 ± 0.07d	1.28 ± 0.12d
	P2	1.76 ± 0.11c	1.99 ± 0.05c	2.36 ± 0.22c	2.82 ± 0.31c	4.80 ± 1.01c
	P8	2.07 ± 0.17b	2.36 ± 0.21b	3.06 ± 0.42b	4.63 ± 0.67b	7.19 ± 0.58b
	P31	2.49 ± 0.23a	3.55 ± 0.51a	5.44 ± 0.63a	8.22 ± 1.25a	13.16 ± 1.72a

表 5 低磷胁迫对香稻根系形态指标的影响

Tab. 5 Effects of low phosphorus stress on root morphology of scented rice in seedlings

处理 Treatment		根冠比	总根长/cm	总根系表面积/cm ²	总根体积/cm ³	根系平均直径/mm	总根尖数	直径 0~0.5 mm 总根长/cm
品种 Variety	P 浓度 P concentration	Shoot-root ratio	Total root length	Total root surface area	Total root volume	Average root diameter	Total number of root tip	Total root length of 0-0.5 mm in diameter
绿金香 Lüjinxiang	P0	0.63 ± 0.06a	443.06 ± 20.61f	152.02 ± 12.88d	14.15 ± 0.73e	0.51 ± 0.02b	2 452.02 ± 313.67f	378.43 ± 20.55f
	P0.25	0.60 ± 0.05a	482.61 ± 10.01e	192.37 ± 18.25c	16.69 ± 1.32d	0.45 ± 0.01d	3 020.23 ± 207.34e	433.74 ± 10.78e
	P0.5	0.57 ± 0.03ab	503.06 ± 10.27d	204.44 ± 10.13c	18.21 ± 0.43d	0.48 ± 0.02c	3 448.18 ± 124.46d	475.10 ± 18.65d
	P2	0.52 ± 0.02b	576.37 ± 48.38c	214.54 ± 15.38c	22.95 ± 0.52c	0.41 ± 0.02e	3 944.56 ± 232.63c	511.08 ± 14.52c
	P8	0.43 ± 0.04c	684.68 ± 22.78b	311.92 ± 20.07b	25.65 ± 0.78b	0.51 ± 0.01b	4 494.38 ± 216.38b	587.66 ± 23.67b
华香 Huaxiang	P31	0.36 ± 0.02d	739.78 ± 28.37a	352.64 ± 17.62a	28.04 ± 1.23a	0.56 ± 0.02a	5 062.03 ± 324.56a	654.42 ± 30.67a
	P0	0.58 ± 0.04a	372.03 ± 15.66f	145.34 ± 8.03e	10.83 ± 1.82e	0.62 ± 0.08a	2 131.78 ± 225.65f	308.58 ± 23.65f
	P0.25	0.56 ± 0.02a	413.75 ± 21.02e	163.72 ± 11.93d	14.20 ± 0.92d	0.45 ± 0.01c	2 745.23 ± 218.92e	358.82 ± 12.83e
	P0.5	0.56 ± 0.03a	452.31 ± 13.73d	178.30 ± 7.71d	14.32 ± 1.09cd	0.50 ± 0.03b	3 168.62 ± 158.67d	384.65 ± 10.66d
	P2	0.49 ± 0.02b	489.29 ± 16.38c	202.32 ± 15.63c	16.26 ± 1.57c	0.43 ± 0.02cd	3 508.02 ± 117.68c	419.94 ± 15.58c
美香占 2 号 Meixiangzhan 2	P8	0.37 ± 0.05c	582.08 ± 18.67b	265.01 ± 23.53b	20.21 ± 1.24b	0.40 ± 0.01d	3 907.08 ± 207.28b	502.06 ± 34.52b
	P31	0.35 ± 0.08c	655.17 ± 43.24a	301.72 ± 10.32a	24.69 ± 2.13a	0.42 ± 0.02cd	4 540.42 ± 214.34a	587.85 ± 22.37a
	P0	0.50 ± 0.03ab	229.58 ± 26.38f	114.67 ± 18.84e	8.09 ± 0.78d	0.55 ± 0.02bed	1 688.83 ± 123.44e	187.50 ± 16.33f
	P0.25	0.47 ± 0.01b	345.40 ± 18.77e	148.95 ± 7.55d	10.82 ± 1.12c	0.58 ± 0.04ab	1 966.33 ± 108.84e	267.82 ± 8.69e
	P0.5	0.55 ± 0.05a	388.32 ± 16.52d	165.14 ± 9.73c	11.38 ± 0.53c	0.61 ± 0.04a	2 314.34 ± 208.33d	292.23 ± 10.25d
海香占 Haixiangzhan	P2	0.54 ± 0.02a	448.25 ± 25.67c	176.90 ± 22.33c	11.50 ± 0.84c	0.54 ± 0.02cd	2 782.76 ± 192.87c	373.78 ± 42.74c
	P8	0.45 ± 0.03b	539.89 ± 45.67b	221.96 ± 15.62b	14.94 ± 1.22b	0.50 ± 0.02e	3 296.23 ± 278.65b	463.45 ± 12.33b
	P31	0.47 ± 0.02b	618.35 ± 30.26a	250.28 ± 13.63a	21.00 ± 1.73a	0.53 ± 0.01de	4 195.73 ± 428.37a	542.59 ± 32.61a
	P0	0.56 ± 0.03a	192.06 ± 28.27f	109.04 ± 5.66f	6.97 ± 0.88e	0.54 ± 0.02ab	1 706.38 ± 98.32f	165.31 ± 19.75f
	P0.25	0.49 ± 0.02b	270.69 ± 34.65e	128.21 ± 11.37e	8.36 ± 0.65d	0.51 ± 0.01b	2 030.67 ± 178.25e	225.36 ± 27.31e
	P0.5	0.43 ± 0.01bed	342.84 ± 20.61d	195.23 ± 20.62d	10.57 ± 1.03c	0.56 ± 0.03a	2 331.43 ± 102.33d	308.26 ± 9.89d
	P2	0.36 ± 0.06d	415.22 ± 30.18c	236.98 ± 8.56c	11.21 ± 0.92c	0.42 ± 0.01cd	2 713.56 ± 156.77c	335.03 ± 13.82c
	P8	0.40 ± 0.04cd	465.06 ± 18.63b	258.63 ± 13.65b	14.35 ± 1.56b	0.40 ± 0.02d	3 111.07 ± 178.91b	364.10 ± 10.67b
	P31	0.44 ± 0.03bc	551.14 ± 38.33a	289.03 ± 10.78a	20.96 ± 2.28a	0.46 ± 0.03c	3 957.58 ± 327.66a	481.16 ± 21.70a

在总根长、总根尖数和直径 0~0.5 mm 总根长中,不同香稻品种,在不同磷浓度处理间整体上差异均显著,并且在 P0 浓度下,绿金香在根冠比、总根长、总根系表面积、总根体积、总根尖数和直径 0~0.5 mm 总根长均比其他香稻品种高。绿金香根冠比随着 P 浓度的降低而升高,在 P0、P0.25 与 P0.5 及 P0.5 与 P2 处理间差异不显著,其他 P 浓度处理间差异均显著;总根系表面积在 P0.25、P0.5 和 P2 差异不显著,均与其他 P 浓度处理间差异均显著;总根体积除 P0.25 与 P0.5 差异不显著外其他 P 浓度处理间差异均显著;根系平均直径随磷浓度降低表现为先降低后升高再降低再升高的趋势,呈“W”型,P31 最高(0.56 mm),显著高于其他 P 浓度处理。华香根冠比随着 P 浓度的降低而升高,在 P0、P0.25 与 P0.5 及 P8 与 P31 处理间差异不显著,与其他 P 浓度处理差异均显著;总根系表面积除 P0.25 与 P0.5 差异不显著外其他 P 浓度处理间差异均显著;总根体积在 P0.5 与 P0.25 和 P2 差异不显著,而其他 P 浓度处理差异均显著;P0 根系平均直径高(0.62 mm),与其他处理差异显著。美香占 2 号根冠比随磷浓度的降低表现为先降低后升高再降低再升高的趋势,呈“W”型,P0.5 和 P2 显著高于除 P0 外的其他 P 浓度处理;总根系表面积和总根系体积在 P0 最低,与其他 P 浓度处理差异显著;根系平均直径在 P0.5 最大(0.61 mm),显著高于除 P0.25 外的其他 P 浓度处理。海香占根冠比随磷浓度的降低先降低后升高,呈“V”型,P0 时最大(0.56),与其他处理差异显著;总根系表面积在不同磷浓度处理间差异均显著;总根系体积除 P0.5 与 P2 差异不显著外其他磷浓度处理间差异均显著;根系平均直径在 P0.5 时最大(0.56 mm),显著高于除 P0 外的其他 P 浓度处理。

3 讨论与结论

低磷胁迫能够影响水稻光合作用,主要是降低了净光合速率、蒸腾速率和气孔导度^[11]。叶绿素是光合作用主要的组成部分,SPAD 值与叶绿素含量呈显著正相关关系^[19]。本研究结果显示,35 d 时 P31 SPAD 值整体上高于其他 P 浓度的 SPAD 值,但处理间差异不显著,说明降低磷水平能够使水稻叶片中叶绿素含量降低,这与韩胜芳^[19]的研究结果相符,但影响的效果较小。4 个香稻品种中,35 d 时 P0 浓度下绿金香 SPAD 值最高(34.58),海香占 SPAD 值最低(31.12),且 SPAD 值与磷积累量呈显著正相关关系($r=0.48, P<0.05$)。

SOD 和 CAT 均属于抗氧化酶,在逆境环境下 SOD 活性和 CAT 活性均降低,并且非耐冷水稻品种中,在一定磷素营养水平内,SOD 活性和 CAT 活性随磷素营养水平的降低而降低^[20]。本研究表明,SOD 活性表现为随磷浓度的降低先降低后升高再降低的趋势,并且 4 个香稻品种均在 P8 时 SOD 活性最低,说明 P8 是敏感浓度,其对不同香稻品种 SOD 活性的作用机理有待进一步研究;CAT 活性除华香外的其他品种均随磷浓度的降低而降低,但过高的磷浓度会降低华香品种的 CAT 活性,故华香品种在磷浓度高于 P2 时,CAT 活性降低,而其他水稻品种均在 P31 时 CAT 活性最大,这可能是由于品种间复杂性和差异性导致 P 对 CAT 活性作用机制不一致。低磷胁迫能够显著降低根系活力^[21],与本试验结果基本相符。钠钾离子 ATP 酶是进行钠离子和钾离子之间交换专一酶,保持膜内高钾,膜外高钠的不均匀离子分布^[22]。本试验中,低磷胁迫下香稻根系钠钾离子 ATP 酶活性反而提高,导致钠钾离子交换速率提高,而钾离子的积累能够增强水稻抗逆性,避免因根系氧化能力降低导致抗逆性下降。

根系是磷素吸收的唯一途径,根系的大小和分布决定磷积累量,同时也是造成水稻磷素吸收利用效率不同的主要原因^[23-25],并且水稻生育前期的磷积累量与水稻产量及磷利用效率密切相关,特别是水稻分蘖期磷的积累量是提高水稻产量关键^[10],同时低磷能显著增大水稻根冠比,改变根基的向地性,并且根表面积、根系总长与磷吸收量呈正相关^[12,26-27]。本研究结果表明,低磷胁迫能影响香稻根冠比,但影响的效果与品种有关:低磷胁迫总体上能提高绿金香和华香的根冠比,提高根系总量,增大对磷元素的吸收,维持作物正常生长,与前人研究结果一致,但对美香占 2 号根冠比的影响,根冠比呈“W”型变化的趋势,而对海香占根冠比的影响,根冠比呈“V”型变化的趋势,说明低磷胁迫对香稻根冠比的影响存在品种的差异性;同时低磷胁迫能显著降低总根长、总根表面积、总根体积、总根尖数和直径 0~0.5 mm 总根长,从而造成磷的积累量显著降低,与前人研究结果一致。陈晨等^[10]认为低磷条件下,整株磷积累量是评价水稻苗期磷高效重要指标之一。本试验中发现,在 35 d 时低磷浓度下,绿金香磷的积累量均高于其他品种,华香磷积累量高于美香占 2 号,海香占磷积累量低于其他品种,说明绿金香是耐低磷胁迫能力较强(磷高效)品种、海香占为耐低磷胁迫能力较差(磷低效)品种。

综上所述,绿金香的耐低磷胁迫能力较强,华

香次之,接下来是美香占2号,海香占较低。

参考文献:

- [1] Mori A, Fukuda T, Vejchasarn P, Nestler J, Pariasca-Tanaka J, Wissuwa M. The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(4): 1179 - 1189. doi: 10.1093/jxb/erv557.
- [2] 杜春丽, 黄曼, 洪诗佳. 我国磷矿资源开发利用研究综述[J]. *中国国土资源经济*, 2019, 32(4): 32 - 38. doi: 10.19676/j.cnki.1672-6995.0000208.
Du C L, Huan M, Hong S J. Research review on development and utilization of phosphate resources in China[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2019, 32(4): 32 - 38.
- [3] 朱兆良, 金续运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259 - 273. doi: 10.11674/zwyf.2013.0201.
Zhu Z L, Jin X Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259 - 273.
- [4] 于费, 陈柳燕, 张黎明, 李福燕, 唐树梅. 海南省农用地土壤磷素现状的调查研究[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(2): 423 - 425. doi: 10.3969/j.issn.1001-4829.2009.02.042.
Yu F, Chen L Y, Zhang L M, Li F Y, Tang S M. Study on phosphorus content soil in Hainan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(2): 423 - 425.
- [5] 张东明, 吴鹏飞, 郝丽虹, 张永发, 漆智平, 张永安. 海南文昌市土壤有效磷时空变异特征及环境风险分析[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 728 - 732. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2010.03.043.
Zhang D M, Wu P F, Hao L H, Zhang Y F, Qi Z P, Zhang Y A. Spatio-temporal variability of soil available phosphorus and environment risk analyze of Wenchang[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 728 - 732.
- [6] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 胡正义, 董元华, 尹睿. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能-I. 稻田土壤磷素径流迁移流失的特征[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 799 - 804. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929.2005.05.013.
Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, Hu Z Y, Dong Y H, Yi R. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment I. characteristics of soil P losses from paddy fields to waterbodies with runoff[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 799 - 804.
- [7] 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.
- [8] 李莉, 张锡洲, 李廷轩, 余海英, 戢林. 不同产量类型水稻基因型干物质积累与磷素吸收利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 588 - 597. doi: 10.11674/zwyf.2014.0309.
Li L, Zhang X Z, Lin T X, Yu H Y, Qi L. Genotype differences in dry matter accumulation and phosphorus absorption and use efficiency in rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 588 - 597.
- [9] 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 刘双利, 吕艳杰, 刘春光, 王永军, 王立春. 我国北方40个高产春玉米品种的磷素利用特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 580 - 589. doi: 10.11674/zwyf.2015.0304.
Wang X H, Cao Y J, Wei W W, Liu S L, Lü Y J, Liu C G, Wang Y J, Wang L C. Phosphorus utilization characteristics of forty spring maize hybrids with high-yield potential in North of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 580 - 589.
- [10] 陈晨, 龚海青, 金梦灿, 郜红建. NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 供应条件下水稻磷高效品种初选[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(9): 32 - 42. doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.09.04.
Chen C, Gong H Q, Jin M C, Gao H J. Primary screening of high phosphorus use efficiency of rice varieties under NH_4^+ -N and NO_3^- -N conditions[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(9): 32 - 42.
- [11] 李清华, 王飞, 林诚, 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.
Li Q H, Wang F, Li C, 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.
- [12] 郑丽, 樊剑波, 何园球, 郑学博, 许小伟. 不同供磷水平对旱作条件下水稻生长、根系形态和养分吸收的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(4): 664 - 669. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2015.04.007.
Zheng L, Fan J B, He Y Q, Zheng X B, Xu X W. Effects of phosphorus on growth, root morphology, phosphorus uptake and utilization efficiency of rice seedlings[J]. *Soils*, 2015, 47(4): 664 - 669.
- [13] 李前, 侯云鹏, 高军, 楚振全, 孔丽丽, 徐新朋, 王洪君, 谢佳贵. 不同供磷水平对水稻干物质积累、磷素吸收分配及产量的影响[J]. *吉林农业科学*, 2015, 40(3): 37 - 41. doi: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2015.03.010.
Li Q, Hou Y P, Gao J, Chu Z Q, Kong L L, Xu X M, Wang H J, Xie J G. Effects of different phosphorus application on dry matter accumulation, phosphorus uptake and distribution and yield of rice[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2015, 40(3): 37 - 41.
- [14] 李华慧, 辜琼瑶, 黄平, 涂建, 刘晓利, 张洪亮, 李自超, 陈忆昆, 张云, 卢义宣, 奎丽梅. 低磷胁迫对水稻不同基因型苗期氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(1): 160 - 165. doi: 10.3969/j.issn.1001-4829.2014.01.031.
Li H H, Gu Q Y, Huang P, Tu J, Liu X L, Zhang H L, Li Z C, Chen Y K, Zhang Y, Lu Y X, Kui L M. Absorption effects of nitrogen, phosphorus and potassium of different rice varieties based on low-phosphorus stress at seedling stage[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(1): 160 - 165.
- [15] 龚海青, 张敬智, 陈晨, 郜红建, 常江, 章力干, 丁玉宁. 磷肥后移与减量对水稻磷素利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(5): 144 - 152. doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2017.05.17.

- Gong H Q, Zhang J Z, Chen C, Gao H J, Chang J, Zhang L G, Ding Y N. Effects of phosphorus fertilizer postpone and reduction on phosphorus utilization efficiency of rice [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22 (5): 144 - 152.
- [16] 王汝慈, 程式华, 曹立勇. 水稻耐低磷胁迫研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2009, 25 (6): 77 - 83. doi: 10.3969/j. issn. 1006-8082. 2012. 03. 002.
- Wang R C, Cheng S H, Cao L Y. Advancements in phosphorus deficiency tolerance study in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25 (6): 77 - 83.
- [17] 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, 36 (3): 365 - 370. doi: 10.3321/j. issn: 0564-3945. 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 utilization at different phosphorus supply [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36 (3): 365 - 370.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 65 - 68.
- Li H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 65 - 68.
- [19] 韩胜芳. 水稻磷素吸收的生理和分子基础研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2009: 18 - 19. doi: 10.7666/d. y1647930.
- Han S F. The physiological mechanism and molecular biology of phosphorus acquisition in *Oryza sativa* L. [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2009: 18 - 19.
- [20] 江浩林, 王孟, 唐湘如, 段美洋, 潘圣刚, 田华, 王树林, 莫钊文. 不同香稻品种苗期耐高温的形态生理响应 [J]. *中国水稻科学*, 2019, 33 (1): 68 - 74. doi: 10.16819/j. 1001-7216. 2019. 8022.
- Jiang H L, Wang M, Tang X R, Duan M Y, Pan S G, Tian H, Wang S L, Mo Z W. Morphophysiological responses of different scented rice varieties to high temperature at seedling stage [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33 (1): 68 - 74.
- [21] 苏军, 张武君, 杜琳, 宋亚娜, 付艳萍. 磷胁迫下蔗糖对水稻苗期根适应性和磷酸转运蛋白基因表达的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (11): 1334 - 1340. doi: 10.13930/j. cnki. cjea. 131137.
- Su J, Zhang W J, Du L, Song Y N, Fu Y P. Effects of sucrose on rice root adaptability and phosphate transporter gene expression under phosphorus stress [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22 (11): 1334 - 1340.
- [22] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 73 - 81.
- Xiao L T, Wang S G. Plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 73 - 81.
- [23] Jing J, Zhang F, Rengel Z, Shen J. Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake [J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 176 - 185. doi: 10.1016/j. fcr. 2012. 04. 009.
- [24] 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 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44 (1): 36 - 46. doi: 10.3864/j. issn. 0578-1752. 2011. 01. 005.
- Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (1): 36 - 46.
- [25] 黄荣, 孙虎威, 刘尚俊, 宋文静, 刘言勋, 余超, 毛颖, 张亚丽, 徐国华. 低磷胁迫下水稻根系的发生及生长素的响应 [J]. *中国水稻科学*, 2012, 26 (5): 563 - 568. doi: 10.3969/j. issn. 1001-7216. 2012. 05. 008.
- Huang R, Sun H W, Lu S J, Song W J, Liu Y X, Yu C, Mao Y, Zhang Y L, Xu G H. Rice root growth and auxin concentration in response to phosphate deficiency [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26 (5): 563 - 568.
- [26] 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 [J]. *中国水稻科学*, 2016, 30 (6): 567 - 576. doi: 10.16819/j. 1001-7216. 2016. 6017.
- 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 roots [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30 (6): 567 - 576.
- [27] 邢承华, 黄文方, 蒋红英. 缺磷对水稻根表铁膜形成的影响 [J]. *江西农业学报*, 2017, 29 (9): 66 - 68. doi: 10.19386/j. cnki. jxnyxb. 2017. 09. 15.
- Xing C H, Huang W F, Jiang H Y. Effect of phosphorus deficiency on formation of iron plaque on rice root surface [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29 (9): 66 - 68.