

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

林诚, 李清华*, 王飞, 何春梅, 钟少杰, 李昱, 林新坚

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350003)

摘要: 为探讨施磷对冷浸田水稻(*Oryza sativa*)生长的作用, 研究不同施磷水平对水稻植株的磷含量、光合特性及产量的影响。结果表明, 与对照相比, 分蘖期增施磷肥使根、茎叶的磷含量和叶片净光合速率增加 10.53%~36.84%、18.52%~37.03%和 15.17%~29.88%; 抽穗期使根、茎叶和稻穗的磷含量增加 11.76%~23.53%、24.13%~41.38%和 9.68%~22.58%, 叶片净光合速率和可溶性糖含量提高 13.41%~27.10%和 6.03%~22.38%, 而淀粉含量则降低 12.05%~41.77%; 成熟期的稻穗磷含量和产量增加 0.71%~28.57%和 4.65%~10.32%。施磷量(X)与稻谷产量(Y)满足方程: $Y = -0.0835X^2 + 14.224X + 6530.9$ ($r = 0.94^*$), 抽穗期茎叶磷含量、叶片净光合速率与稻谷产量的相关系数分别为 0.57* 和 0.77*。因此, 冷浸田增施磷肥可提高水稻植株的磷含量、叶片净光合速率和可溶性糖含量, 并降低叶片淀粉累积, 从而提高稻谷产量。抽穗期是磷肥影响冷浸田水稻产量的关键时期, 0.38%的茎叶磷含量可作为磷素养分丰缺的诊断指标, 冷浸田水稻磷肥(P_2O_5)的推荐用量为 85.17 kg hm^{-2} 。

关键词: 施磷; 冷浸田; 水稻; 光合特性; 产量

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.011

Effects of Phosphorus Fertilizer on Phosphorus Content, Photosynthesis Characters and Yield of Rice in Cold Waterlogged Paddy Field

LIN Cheng, LI Qing-hua*, WANG Fei, HE Chun-mei, ZHONG Shao-jie, LI Yu, LIN Xin-jian

(Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to understand the effect of phosphorus fertilizer on rice (*Oryza sativa*) grown in cold waterlogged paddy field, the phosphorus content, photosynthesis characters and yield were studied under four levels of phosphorus fertilizer. The results showed that the phosphorus contents in roots, stems and leaves, net photosynthetic rate of leaves treated with phosphorus fertilizer at tillering stage were higher than those of control by 10.53%–36.84%, 18.52%–37.03% and 15.17%–29.88%, respectively. At heading stage, the phosphorus contents in roots, stems and leaves, and panicles, net photosynthetic rate and soluble sugar content of leaves increased by 11.76%–23.53%, 24.13%–41.38%, 9.68%–22.58%, 13.41%–27.10% and 6.03%–22.38%, respectively, but the starch content reduced by 12.05%–41.77%. At mature stage, the phosphorus content of panicles and yield increased for 0.71%–28.57% and 4.65%–10.32%. There was regression equation between phosphorus fertilizer dosage (X) and rice yield (Y): $Y = -0.0835X^2 + 14.224X + 6530.9$ ($r = 0.94^*$). The coefficients between rice yield and net photosynthetic of leaf, phosphorus content of stems and leaves at heading stage were 0.57* and 0.77*, respectively. Therefore, phosphorus fertilizer could improve phosphorus content of rice, net photosynthetic and soluble sugar content in leaves, reduce starch accumulation in leaves, thus improve rice yield.

收稿日期: 2016-01-11 接受日期: 2016-04-07

基金项目: 公益性(农业)行业专项(201003059-08)资助

This work was supported by Special fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (Grant No. 201003059-08).

作者简介: 林诚(1981~), 男, 助理研究员, 主要从事植物营养与土壤磷素循环研究。E-mail: 694712367@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 13003898776@163.com

Heading stage was an important period for rice yield. It could be used as diagnostic reference index that the phosphorus content in stems and leaves was about 0.38%. The optimal dosage of phosphorus fertilizer is 85.17 kg hm⁻² for cold-waterlogged paddy field.

Key words: Phosphorus fertilizer; Cold-waterlogged paddy field; Rice; Photosynthetic characteristics; Yield

我国冷浸田面积有 3.46×10^6 hm², 占全国稻田面积的 15.07%, 占低产稻田面积的 44.20%^[1]。由于长期渍水, 土壤有效磷偏低已成为冷浸田重要的障碍因子^[2-3]。磷是水稻生长发育的重要营养元素之一, 参与水稻的光合磷酸化, 同时在碳水化合物合成代谢过程中也起到关键的促进作用。有研究表明^[4-5], 缺磷使水稻生育期延迟, 同时影响光合初产物的正常运转和光合产物的分配; 而增施磷肥不仅有利于提高叶片中 CO₂ 同化率和蔗糖含量, 而且还会降低叶片淀粉含量。此外, 供磷水平与植株磷素累积及稻谷产量密切相关, 在低磷胁迫下, 稻谷产量与水稻生育前期、中期地上部磷积累都会呈显著正相关^[6]; 而增施磷肥能够提高植株磷素含量, 同时连年施用还可保证冷浸田水稻的稳步增产^[2]。

当前有关水稻磷素研究主要是磷肥用量对水稻生长生理及产量的影响, 主要针对盆栽或早稻试验。由于目前南方丘陵区冷浸田水稻种植已从传统的双季稻转变为单季稻模式, 而且磷素有效性又与种植方式、环境气候等密切相关, 因此先前有关水稻磷素的营养诊断指标、施磷影响水稻敏感期等都值得进一步探究。本文通过研究冷浸田水稻不同时期植株磷素含量, 分析光合速率和光合产物的变化, 探讨其与产量构成的相关性, 阐明“施磷水平-植株磷素含量-光合特性-稻谷产量”之间的相互关系, 为揭示冷浸田单季稻增磷增产机制及有效施磷技术等提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验地位于福州市闽侯县白沙镇溪头村, 东经 119°04'11", 北纬 26°13'32", 海拔 15.0 m。试验区年均温度 19.2℃, 年降雨量 1346.9 mm, 年日照时数 1810.0 h, 无霜期 307 d, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温 6438℃。成土母质为低丘红壤坡积物, 地表常年渍水, 烂泥层厚度 ≥ 0.3 m, 土体剖面结构为 A-G, 按照冷浸田类型划分与改良利用技术规范(DB35/T 1376-2013)标准, 土壤类型为深脚烂泥田。供试土壤基本化学

性状: 有机质 32.72 g kg⁻¹、全氮 2.16 g kg⁻¹、全磷 0.32 g kg⁻¹、全钾 13.10 g kg⁻¹、碱解氮 173.40 mg kg⁻¹、有效磷 4.75 mg kg⁻¹、速效钾 49.50 mg kg⁻¹、活性还原性物质 2.77 cmol kg⁻¹、Fe²⁺ 151.98 mg kg⁻¹。供试水稻(*Oryza sativa*)品种为‘中浙优 1 号’。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计, 根据田间调查提出的最佳施用量, 设置 4 个水平磷肥(P₂O₅)施用量: 0 kg hm⁻² (P₀, 对照)、42.0 kg hm⁻² (P₁)、84.0 kg hm⁻² (P₂)和 126.0 kg hm⁻² (P₃)。除了磷肥用量不同, 其余施肥方式都一致, 氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 钾肥用氯化钾, 氮肥(N) 120.0 kg hm⁻²、钾肥(K₂O) 144.0 kg hm⁻², 其中 50%氮肥和钾肥在插秧前做基肥施用, 剩余 50%氮肥和钾肥在分蘖期做追肥施用, 100%磷肥全部做基肥施用。试验设 3 次重复, 小区面积 15 m²。本试验从 2012 年 7 月至 2013 年 11 月, 共种植 2 茬单季稻, 于每年 7 月上旬插秧, 10 月中旬采收。

1.3 方法

土壤化学性质和植株磷素含量 采用土壤农业化学分析方法^[7]测定。水稻植株按根、茎叶和穗分开, 通过杀青、烘干、粉碎等, 进行不同植株部位磷素测定。水稻收获时, 每小区取 5 株进行考种, 同时开展水稻植株磷含量测定。

叶片光合速率 在分蘖期、抽穗期测定水稻叶片光合速率, 每小区测 10 丛。对所观测植株进行取样, 根系带土整个挖出, 并用水清洗, 尽量减少根系断裂损失。采用英国 ADC 公司 LCPRO-SD 型便携式光合作用测定仪, 选在水稻分蘖期和抽穗期, 测定部位在水稻第 3 片剑叶的中部, 测定时间在晴天 10:00-12:00, 每处理小区测 10 片叶。仪器设置条件如下: 叶室温度为(25±1.3)℃, CO₂浓度为 400 μL L⁻¹, 采用外加 LED 光源, 光强为 1500 mol m⁻²s⁻¹, 测定叶片在叶室中适应 3 min 等数据稳定后开始记录^[8-9]。

叶片淀粉和可溶性糖 叶片可溶性糖直接用鲜样检测, 而淀粉含量用烘干样检测。淀粉含量

采用糖化酶-酸水解法,可溶性糖采用盐酸水解-铜还原直接滴定法^[7]。

1.4 统计分析

所有数值都是 2 年试验加和平均,应用 Excel 2003 软件进行数据统计,数据以平均值±标准差表示。采用 DPS 7.05 软件进行方差分析。

2 结果和分析

2.1 施磷对植株磷素含量的影响

从表 1 可知,施磷会影响水稻植株的磷素含量。与对照(P₀)相比,分蘖期水稻的根、茎叶磷含量分别增加 10.53%~36.84%、18.52%~37.04%;抽穗期的根、茎叶及穗磷含量分别增加 11.76%~23.53%、24.13%~41.38%和 9.68%~22.58%;而成熟期穗磷含量增加了 10.71%~28.57%。在分蘖期和抽穗期,植株磷含量均以 P₃ 处理最高,与对照均达显著差异

(*P*<0.05)。在成熟期,不同处理的根与茎叶磷含量差异均不显著,表明水稻生育后期根和茎叶中磷素均向穗部发生转移,这与郭朝晖等^[10]的研究结果相似。

2.2 施磷对水稻光合特性的影响

对光合速率的影响 从表 2 可见,增施磷肥能够增强水稻光合速率,与对照(P₀)相比,水稻净光合速率、蒸腾速率和气孔导度在分蘖期分别增加 15.17%~29.88%、4.81%~18.22%和 16.67%~23.33%;在抽穗期分别增加 13.41%~27.10%、7.54%~17.82%、12.50%~37.50%。随着施磷水平提高,净光合速率、蒸腾速率及气孔导度等均呈现明显上升趋势,且均以 P₃ 处理最高,与对照(P₀)的差异均达显著水平(*P*<0.05)。分蘖期水稻净光合速率与蒸腾速率、气孔导度的相关系数分别为 0.89^{**}和 0.67^{**},而抽穗期则为 0.84^{**}和 0.45^{*},表明冷浸田水稻增施磷肥提高了气孔导度和蒸腾速率,进而提高净光合速率。

表 1 施磷对冷浸田水稻植株磷含量(%)的影响

Table 1 Effect of phosphorus fertilizer on rice phosphorus content in cold-waterlogged paddy field

	分蘖期 Tillering stage		抽穗期 Heading stage			成熟期 Mature stage		
	根 Root	茎叶 Stem and leaf	根 Root	茎叶 Stem and leaf	穗 Panicle	根 Root	茎叶 Stem and leaf	穗 Panicle
P ₀	0.19±0.02bA	0.27±0.02cB	0.17±0.02bA	0.29±0.02cB	0.31±0.02bB	0.11±0.01aA	0.23±0.02aA	0.28±0.01cB
P ₁	0.21±0.02bA	0.32±0.03bAB	0.19±0.02abA	0.36±0.03bA	0.34±0.02abAB	0.11±0.02aA	0.25±0.03aA	0.31±0.02bAB
P ₂	0.24±0.03abA	0.35±0.02abA	0.20±0.01abA	0.38±0.02abA	0.37±0.03aA	0.13±0.02aA	0.25±0.02aA	0.35±0.02aA
P ₃	0.26±0.03aA	0.37±0.01aA	0.21±0.02aA	0.41±0.02aA	0.38±0.03aA	0.12±0.01aA	0.24±0.03aA	0.36±0.03aA

同列数据后不同大写和小写字母分别表示差异极显著(*P*<0.01)和显著(*P*<0.05)。下表同。

Data followed different capital and small letters within column indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same is following Tables.

表 2 施磷对冷浸田水稻光合速率的影响

Table 2 Effect of phosphorus fertilizer on rice photosynthetic rate in cold-waterlogged paddy field

	分蘖期 Tillering stage			抽穗期 Heading stage		
	净光合速率 Net photosynthetic rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate (mmol mol ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance (mol m ⁻² s ⁻¹)	净光合速率 Net photosynthetic Rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate (mmol mol ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductance (mol m ⁻² s ⁻¹)
P ₀	19.31±0.39cC	6.86±0.19cC	0.30±0.03bA	18.49±1.15cC	6.23±0.36cC	0.24±0.04bB
P ₁	22.24±1.01bB	7.19±0.13bB	0.35±0.05abA	20.97±0.83bB	6.70±0.23bB	0.27±0.05abAB
P ₂	24.76±0.30aA	7.92±0.15aA	0.36±0.03aA	22.69±1.41aAB	7.14±0.09aA	0.29±0.05abAB
P ₃	25.08±0.24aA	8.11±0.12aA	0.37±0.04aA	23.50±1.33aA	7.34±0.16aA	0.33±0.03aA

对叶片光合产物的影响 淀粉和可溶性糖是水稻光合作用的主要产物。从表 3 可见,施磷对光合产物影响主要是在分蘖期和抽穗期,而成熟期不同处理间的差异不显著。在分蘖期和抽穗期,随

着施磷量增加,水稻叶片可溶性糖呈上升趋势,而淀粉呈下降趋势,与对照(P₀)相比,可溶性糖含量分别增加 7.26%~12.13%和 6.03%~22.38%,而淀粉含量则分别下降 3.50%~8.50%和 12.05%~41.77%;

除分蘖期淀粉含量外, P_2 和 P_3 处理的差异达极显著水平($P<0.01$)。分蘖期和抽穗期叶片可溶性糖含量和淀粉含量的相关系数分别为 -0.63^* 和 -0.88^{**} 。

2.3 施磷对水稻产量的影响

从表 4 可知, 施磷有利于促进稻谷产量提高, 稻谷产量依次为 $P_2>P_3>P_1>P_0$, 比对照(P_0)增加了 4.65%~10.32%, 其中 P_2 处理与其他处理间达到极显著差异($P<0.01$)。水稻施磷量(X)与稻谷产量(Y)符合方程: $Y=-0.0835X^2+14.224X+6530.9$ ($r=0.94^*$)。施磷还会影响水稻产量构成, 与对照(P_0)相比, 每穗实粒数和千粒重分别增加 2.39%~7.56%和 1.55%~5.52%,

而结实率则提高 1.43~3.27 个百分点, 此外稻谷产量与每穗实粒数、千粒重的相关系数分别为 0.89^{**} 、 0.93^{**} 。

2.4 植株 P 含量、光合特性与产量构成的相关性分析

从表 5 可见, 抽穗期茎叶、成熟期稻穗的磷含量与稻谷产量呈显著正相关($P<0.05$), 除成熟期根和茎叶外, 水稻植株磷含量与结实、千粒重及每穗实粒数均呈显著或极显著正相关。从表 6 可见, 在分蘖期和抽穗期中, 叶片净光合速率、蒸腾速率与稻谷产量均呈极显著的正相关($P<0.01$)。分蘖期茎叶可溶性糖含量提高有利于促进稻谷产量增加, 而抽穗期茎叶淀粉含量过高反而会抑制稻谷产量。

表 3 施磷对冷浸田水稻叶片光合产物含量(%)的影响

Table 3 Effect of phosphorus fertilizer on photosynthetic production in rice leaves in cold-waterlogged paddy field

	分蘖期 Tillering stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Mature stage	
	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugar	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugar	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugar
P_0	2.00±0.06aA	7.58±0.40bB	2.24±0.07aA	6.30±0.17cC	1.31±0.06aA	4.21±0.20aA
P_1	1.93±0.12aA	8.13±0.57aAB	1.97±0.05bB	6.68±0.32bcBC	1.27±0.10aA	4.36±0.36aA
P_2	1.91±0.09aA	8.28±0.39aA	1.75±0.05cC	6.96±0.21bB	1.20±0.09aA	4.58±0.59aA
P_3	1.83±0.09aA	8.50±0.55aA	1.58±0.07dD	7.71±0.20aA	1.20±0.02aA	4.56±0.47aA

表 4 施磷水平对冷浸田水稻产量构成的影响

Table 4 Effects of phosphorus fertilizer application levels to rice yield components in cold waterlogged paddy field

	产量 Yield (kg hm ⁻²)	有效穗数 Number of panicle (×10 ⁴ hm ⁻²)	每穗实粒数 Number of filled grains per panicle	千粒重 1000-Grain weight (g)	结实率 Setting (%)
P_0	6567.0±169.2cB	203.26±16.04aA	156.07±3.67bA	25.73±0.31bA	87.32±1.88bA
P_1	6872.6±240.6bcAB	211.54±18.37aA	159.80±1.32abA	26.13±0.59aA	88.75±1.67abA
P_2	7244.8±203.7aA	215.73±12.32aA	167.87±6.74aA	27.15±0.45aA	89.60±1.33 abA
P_3	6961.5±139.8abAB	209.60±8.67aA	164.13±3.94abA	26.43±0.51abA	90.59±1.05aA

表 5 水稻植株磷素含量与产量构成的相关性

Table 5 Relationship between phosphorus contents and to yield components in cold-waterlogged paddy field

时期 Stage	部位 Part	产量 Yield	结实率 Setting	千粒重 1000-Grain weight	每穗实粒数 Number of filled grain per panicle	有效穗 Number of panicle
分蘖期 Tillering	根 Root	0.22	0.86 ^{**}	0.81 ^{**}	0.64 [*]	0.64 [*]
	茎叶 Stem and leaf	0.55	0.87 ^{**}	0.75 ^{**}	0.71 ^{**}	0.49
抽穗期 Heading	根 Root	0.34	0.71 ^{**}	0.83 ^{**}	0.68 [*]	0.70 ^{**}
	茎叶 Stem and leaf	0.57 [*]	0.70 ^{**}	0.58 [*]	0.65 [*]	0.29
	穗 Panicle	0.48	0.83 ^{**}	0.86 ^{**}	0.86 ^{**}	0.60 [*]
成熟期 Mature	根 Root	0.38	0.55	0.64 [*]	0.40	0.52
	茎叶 Stem and leaf	0.08	0.52	0.55	0.36	0.64 [*]
	穗 Panicle	0.58 [*]	0.75 ^{**}	0.80 ^{**}	0.79 ^{**}	0.51

3 讨论和结论

磷是水稻体内核酸、核蛋白、磷脂的组成成分, 缺磷会影响 DNA 复制和 RNA 合成, 进而影响水稻分

蘖, 因此目前普遍认为分蘖期是水稻需磷的敏感时期^[11], 并将分蘖期水稻茎叶磷含量 0.10%~0.15%作为临界指标^[12-13]。本试验中水稻分蘖期茎叶磷含量 0.27%~0.37%远超上述临界指标, 而水稻根、茎叶

表 6 水稻光合特性与产量构成的相关性

Table 6 Relationship between photosynthetic characters and yield components of rice in cold-waterlogged paddy field

时期 Stage	光合特性 Photosynthetic character	产量 Yield	结实率 Setting	千粒重 1000-Grain weight	每穗实粒数 Number of filled grains per panicle	有效穗 Number of panicle
分蘖期 Tillering	净光合速率 Net photosynthetic rate	0.85**	0.62*	0.74**	0.70**	0.44
	蒸腾速率 Transpiration rate	0.71**	0.65*	0.77**	0.73**	0.42
	气孔导度 Stomatal conductance	0.12	0.40	0.58*	0.41	0.52
	淀粉 Starch	-0.45	0.06	0.22	-0.02	0.56*
	可溶性糖 Soluble sugar	0.57*	0.56*	0.45	0.51	0.18
抽穗期 Heading	净光合速率 Net photosynthetic rate	0.77**	0.49	0.51	0.45	0.10
	蒸腾速率 Transpiration rate	0.78**	0.43	0.63*	0.64*	0.18
	气孔导度 Stomatal conductance	0.57*	0.27	0.60*	0.62*	0.24
	淀粉 Starch	-0.72**	-0.59*	-0.45	-0.55	-0.13
	可溶性糖 Soluble sugar	0.38	0.67*	0.48	0.44	0.25

磷素含量与稻谷产量也无显著相关性。此外按第二次土壤普查养分分级标准,本试验土壤有效磷含量 4.75 mg kg^{-1} ,属于缺乏水平($3.0\sim5.0\text{ mg kg}^{-1}$)。本试验结果表明,冷浸田土壤有效磷虽然较缺乏,但在分蘖期并不存在缺磷情况,且分蘖期植株磷含量并不会影响稻谷产量,这可能一是试验种植水稻为单季稻且处于中亚热带地区,试验期间稻田水分充足且气温逐渐升高,而土壤磷的有效性与环境条件密切相关,因此土壤供磷能力会进一步提升^[14];二是水稻分蘖期本身吸收磷量较少,一般仅占全生育期的 10.84% ^[10],因此在本试验条件下,冷浸田在水稻分蘖期仍能满足植株对磷素的需求。

分蘖期至抽穗期是水稻吸收磷量高峰期,而抽穗期至成熟期光合生产能力则会影响水稻产量,稻谷中 $60\%\sim80\%$ 粒重来自抽穗期的光合产物^[15]。本试验水稻抽穗期茎叶磷含量、叶片净光合速率与稻谷产量均呈显著正相关,这进一步证明了增施磷肥可提升水稻抽穗期茎叶磷素含量和叶片净光合速率,从而增加稻谷产量。因此,抽穗期茎叶磷含量是影响稻谷产量的重要因子,这与目前以分蘖期茎叶磷含量作为水稻磷素营养诊断指标存在较大差异,可能一是分蘖至抽穗期需磷量较大,约占全生育期的 77.69% ^[10];二是冷浸田土壤有效磷含量较低,且只有加大磷肥投入才能促进土壤磷素活性的提高^[16];三是抽穗期茎叶磷含量为 $0.29\%\sim0.41\%$,且均高于分蘖期的磷含量,因此增施磷肥对水稻产量影响主要是在抽穗期,若以产量为评价标准,抽穗期茎叶磷含量达 0.38% 可作为冷浸田水稻磷素营养诊断指标。

增施磷肥有利于提高抽穗期茎叶磷素含量,而水稻体内磷素是通过叶绿体膜上磷酸转换器控制光合初产物-磷酸丙糖的运输,供磷不足则会影响

光合初产物的正常运转,从而引起叶片淀粉积累和蔗糖减少^[17-18]。本研究中,适量施磷(P_1 、 P_2)使冷浸田水稻植株磷素累积、光合速率增加,进而促进产量提高;而过量施磷(P_3)反而会降低稻谷产量,可能是在抽穗期水稻体内磷含量过高,降低叶片中蔗糖磷酸合成酶活性^[19],而蔗糖磷酸合成酶又是蔗糖合成的关键性调节酶^[20],从而影响光合产物的运输,进而影响灌浆及稻谷产量形成。根据水稻施磷量(X)与稻谷产量(Y)的关系,以取得最高水稻产量为目标,适宜施磷量(P_2O_5)为 85.17 kg hm^{-2} ,这略低于目前鄂东南冷浸田推荐的 $90\sim108\text{ kg hm}^{-2}$ 磷肥用量^[2]。

参考文献

[1] CHAI J J, LIAO M, XU P Z, et al. Feature analysis on nutrient's restrictive factors of major low productive waterlogged paddy soil in China [J]. J Soil Water Conserv, 2012, 26(2): 284-288.
柴娟娟, 廖敏, 徐培智, 等. 我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 284-288.

[2] XU X Y, ZHANG M M, LIU Y, et al. Effects of regulating phosphorus and potassium supply on rice yield and nutrient absorption [J]. Plant Nutr Fert Sci, 2014, 20(5): 1076-1083. doi: 10.11674/zwzf.2014.0503.
徐祥玉, 张敏敏, 刘晔, 等. 磷钾调控对冷浸田水稻产量和养分吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1076-1083. doi: 10.11674/zwzf.2014.0503.

[3] LI Q H, WANG G F, HE C M, et al. Formation, difficulties and utilization of cold water paddy fields in Fujian [J]. Fujian J Agri Sci, 2011, 26(4): 681-685. doi: 10.3969/j.issn.1008-0384.2011.04.037.
李清华, 王飞, 何春梅, 等. 福建省冷浸田形成、障碍特性及治理利用技术研究进展 [J]. 福建农业学报, 2011, 26(4): 681-685. doi: 10.3969/j.issn.1008-0384.2011.04.037.

[4] LIU Y W. Effect of phosphorus on growth and physiological effect of

- hybrid rice [J]. *Acta Pedol Sin*, 1996, 33(3): 308–316.
- 刘运武. 磷对杂交水稻生长发育及其生理效应影响的研究 [J]. *土壤学报*, 1996, 33(3): 308–316.
- [5] WANG H L, SUN X. Effects of phosphorus on the growth and physiological metabolisms in rice plant [J]. *Acta Agri Univ Zhejiang*, 1988, 14(1): 9–15.
- 王海龙, 孙羲. 磷对水稻生长发育的影响及其生理效应 [J]. *浙江农业大学学报*, 1988, 14(1): 9–15.
- [6] LI Y F, LUO A C, WANG W M, et al. Genotypic variation of rice in yield phosphorus uptake and utilization at different phosphorus supply [J]. *Chin J Soil Sci*, 2005, 36(3): 365–370. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2005.03.019.
- 李永夫, 罗安程, 王为木, 等. 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.
- [7] LU R K. *Soil Agricultural Chemical Analysis Methods* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science-Technology Press, 2000.
- 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [8] ZHENG Y F, NI Y L, MAI B R, et al. Effects of reduced solar radiation on winter wheat flag leaf net photosynthetic rate [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22(6): 1457–1464.
- 郑有飞, 倪艳利, 麦博儒, 等. 太阳辐射减弱对冬小麦旗叶光合速率的影响 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1457–1464.
- [9] LI Q H, WANG F, LIN C, et al. Effects of potassium fertilizer increasement on rice physiology and iron accumulation in cold-waterlogged paddy field [J]. *Fujian J Agri Sci*, 2015, 30(3): 243–248. doi: 10.3969/j.issn.1008-0384.2015.03.007.
- 李清华, 王飞, 林诚, 等. 增施钾肥对冷浸田水稻生理及植株铁吸收累积的影响 [J]. *福建农业学报*, 2015, 30(3): 243–248. doi: 10.3969/j.issn.1008-0384.2015.03.007.
- [10] GUO Z H, LI H S, ZHANG Y Z, et al. Effects of phosphorus levels on hybrid rice growth and characteristics of phosphorus transportation [J]. *Chin J Rice Sci*, 2002, 16(2): 151–156. doi: 10.3321/j.issn:1001-7216.2002.02.011.
- 郭朝晖, 李合松, 张杨珠, 等. 磷素水平对杂交水稻生长发育和磷素运移的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2002, 16(2): 151–156. doi: 10.3321/j.issn:1001-7216.2002.02.011.
- [11] WU Z H, HE L Y, ZUO X D, et al. Influence of low-P stress on the biological characteristics of different rice genotypes at different stages [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2008, 14(2): 227–234. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2008.02.005.
- 吴照辉, 贺立源, 左雪冬, 等. 低磷胁迫对不同基因型水稻阶段生物学特征的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 227–234. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2008.02.005.
- [12] LU R K. *Theory and Fertilization of Soil-plant Nutrition* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 393–395.
- 鲁如坤. *土壤-植物营养学原理和施肥* [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 393–395.
- [13] SHI W Y. *Plant Nutrition Diagnosis and Fertilization* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 26–28.
- 石伟勇. *植物营养诊断与施肥* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 26–28.
- [14] WANG Y Z, CHEN X, SHI Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(1): 260–268.
- 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260–268.
- [15] CAO S Q, ZHAI H Q, YANG T N, et al. Studies on photosynthetic rate and function duration of rice germplasm resources [J]. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15(1): 29–34. doi: 10.3321/j.issn:1001-7216.2001.01.006.
- 曹树青, 翟虎渠, 杨图南, 等. 水稻种质资源光合速率及光合功能期的研究 [J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(1): 29–34. doi: 10.3321/j.issn:1001-7216.2001.01.006.
- [16] LI Q H, WANG F, LIN C, et al. Effects of paddy-upland rotation on the nutrient activation of soil carbon, nitrogen and phosphorus in cold waterlogged paddy field [J]. *J Soil Water Conserv*, 2015, 29(6): 113–117. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.06.021.
- 李清华, 王飞, 林诚, 等. 水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分活化的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 113–117. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.06.021.
- [17] HAMMOND J P, WHITE P J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation [J]. *J Exp Bot*, 2008, 59(1): 93–109. doi: 10.1093/jxb/erm221.
- [18] NILSSON L, MUELLER R, NILSSON T H. Increased expression of the MYB-related transcription factor, *PHR1*, leads to enhanced phosphate uptake in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant Cell Environ*, 2007, 30(12): 1499–1512. doi: 10.1111/j.1365-3040.2007.01734.x.
- [19] TANG X R, YU T Q. Effects of P and K fertilizers on yield and protein content in fodder rice and their mechanisms [J]. *Sci Agri Sin*, 2002, 35(4): 372–377. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2002.04.005.
- 唐湘如, 余铁桥. 磷钾肥对饲用稻产量和蛋白质含量的影响及其机理研究 [J]. *中国农业科学*, 2002, 35(4): 372–377. doi: 10.3321/j.issn:0578-1752.2002.04.005.
- [20] WEINER H, McMICHAEL R W, HUBER S C. Identification of factors regulating the phosphorylation status of sucrose-phosphate synthase *in vivo* [J]. *Plant Physiol*, 1992, 99(4): 1435–1442. doi: 10.1104/pp.99.4.1435.