

硅磷配施对水稻土中速效养分和水稻产量的影响

孙 颖, 王旭东, 王 莺, 泮吴洁, 陆荣杰, 阮忠强, 屠雯雯

(浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 为探讨硅肥添加对磷肥利用率的提高效应, 采用盆栽试验的方法, 分别设立硅肥和磷肥 3 个不同水平[二氧化硅施用量分别为 0(低), 0.25(中), 0.50(高) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 五氧化二磷施用量分别为 0(低), 0.2(中), 0.4(高) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$], 共 9 个处理, 研究不同硅磷配施比例对水稻 *Oryza sativa* 土中速效养分和水稻产量的影响。结果表明: 硅磷配施提高了土壤 pH 值、碱解氮、有效磷和速效钾的质量分数。在低磷和中磷条件下, 有效硅质量分数随着硅磷配施水平的提高而提高; 但高磷条件下, 趋势不明显。硅磷配施也提高了水稻收获期的植株干物质积累总量和糙米产量。在低硅和中硅(或低磷和中磷)水平下, 随着磷肥(或硅肥)的施用, 干物质质量随之增加, 但在高硅(或高磷)水平下有减少趋势。在低硅和中硅水平下, 水稻产量随着磷肥水平的提高而增加, 在中硅高磷配施处理下达到最高。因此, 本试验土壤有效磷为 $37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效硅为 $157 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 硅磷配施能够显著提高水稻土中有效磷及其他有效养分的质量分数、水稻干物质总质量和糙米产量。表 4 参 13

关键词: 土壤学; 硅磷配施; 水稻土; 速效养分; 产量

中图分类号: S157.4+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2014)04-0551-06

Soil available nutrients and rice yield with silicon and phosphorus fertilization

SUN Ying, WANG Xudong, WANG Ying, PAN Wujie, LU Rongjie, RUAN Zhongqiang, TU Wenwen

(Zhejiang Provincial Key of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: It had been confirmed that silicon(Si) could enhance P efficiency in paddy soil, but the interactional effect of different ratio of Si and P fertilization was rarely documented. Therefore, the study aims to understand the effects of fertilization with different ratios of Si and P on soil fertility and rice yield. Three levels of Si and P fertilizers treatments were carried out through a pot experiment (0, m and h mean light, moderate and high treatments respectively), nine different treatments included Si_0P_0 , Si_0P_m , Si_0P_h , Si_mP_0 , Si_mP_m , Si_mP_h , Si_hP_0 , Si_hP_m , Si_hP_h . Sodium silicate and calcium dihydrogen phosphate were used as Si and P fertilizers respectively. Each treatment had five replications and random arranged. After rice harvest, soil samples (about 1 kg fresh weight) were collected from each pot, air dried and sieved through a 2 mm stainless steel screen, then stored for pH, available nitrogen (N), phosphorus, potassium (K) and silicon analysis. Rice yield components were also determined. The data was analyzed in Microsoft 2003, SPSS 18.0 (ANOVA). Means were tested using the least significant difference (LSD) with a significance of $P < 0.05$. The soil pH value was significantly increased with the amount of P fertilization when compared with Si_0P_0 treatment under light and moderate Si level, but showed

收稿日期: 2014-10-14; 修回日期: 2014-11-27

基金项目: 浙江农林大学人才启动基金资助项目(2008FR003); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划资助项目(2014R412006); 浙江农林大学大学生创新创业训练计划资助项目(201303002)

作者简介: 孙颖, 从事土壤与植物营养研究。E-mail: 408271770@qq.com。通信作者: 王旭东, 副教授, 博士, 从事土壤与植物营养研究。E-mail: wangxd@zafu.edu.cn

no difference under high Si level. Under the same P level, the soil pH value was significantly increased with the application amount of Si. Under moderate Si level, the content of available N was significantly increased with the application amount of P, whereas, the amount of Si fertilization showed no significant effect on available N under the same P level. The available P was significantly increased with the application amount of Si under the same P level. The highest available P content occurred with treatment Si_hP_h . Under moderate Si level, the available K was significantly increased with the application amount of P, but showed no difference under light and high Si level. Available Si was significantly increased with light and moderate P application. Under light and moderate Si or P level, the rice dry matter weight increased significantly with the application amount of Si or P. Rice grain yield increased significantly with the P application amount under light and moderate Si application. The highest grain yield for the nine treatments occurred with Si_mP_h which increased by 74.78% compared with Si_0P_0 . In this pot experiment, application of moderate Si with P fertilization could enhance the soil pH, available N, P, K and Si, rice dry matter weight and grain yield in paddy soil. There had significant interaction between different amount of Si and P applying. [Ch, 4 tab. 13 ref.]

Key words: soil science; silicon and phosphorus fertilization; paddy soil; available nutrients; grain yield

水稻 *Oryza sativa* 是重要的粮食作物, 就栽培面积和总产量而言, 在世界粮食作物生产中排名第 2 位。在中国, 水稻生产尤为重要, 稻谷产量占全国粮食总产量的 40.43%^[1]。中国的水稻土存在养分缺乏问题, 其中磷的缺乏情况尤为严重^[2]。磷作为植物生长发育所必需的营养元素之一, 不仅是植物体内许多重要化合物的组分, 而且在作物的产量和品质形成等方面都有着重要的作用^[2]。但是磷肥进入土壤中易被固定, 当季利用率只有 10%~25%, 因此, 大量施用磷肥是解决土壤缺磷、维持和提高产量的传统途径。但磷肥是以磷矿为原料生产的化肥, 而磷矿属不可再生资源, 过量施磷会造成磷源浪费枯竭、环境污染以及农业生产成本增加等一系列问题^[3]。因而如何提高磷肥利用率是当前亟需解决的重要课题和热点问题^[4]。1926 年, 美国 Sommer 率先提出硅是水稻良好生长所必需的元素之后, 人们对硅元素的研究逐渐受到重视^[5]。研究发现, 水稻施硅能改善植株体内的营养条件, 增加生育后期植株功能叶的叶绿素含量和水稻根系活力^[6]; 提高稻米香味和整精米率, 改善加工品质, 提高稻米蒸煮品质^[7]。20 世纪 50 年代在应用含硅炉渣改良退化稻田成功后, 有关土壤和水稻中硅的研究文献日渐增多。70 年代后, 一些主要产稻国已将施用硅肥作为提高水稻产量的重要措施^[8-9]。近年研究发现, 硅可以加强水稻抗病性, 而磷则可以提高水稻的光合作用, 两者同时作用可提高产量^[8]; 在磷肥施用的基础上增施硅肥, 可以提高水稻植株对磷的吸收, 提高磷肥利用率^[8]。国内研究表明: 硅磷混合施用能够提高土壤酶活性^[10], 增强光能利用率和水分利用率, 减少叶面蒸腾, 有利于碳水化合物的合成与运转, 增强水稻土中磷元素的解吸, 提高水稻土磷活性^[11]。由此可见, 硅磷配施对于水稻的生长和产量形成均有积极作用。尽管对于硅和磷对水稻产量的影响有不少研究, 但不同比例硅磷肥配施的互作研究则鲜见报道。因此, 本研究采用盆栽试验, 研究不同比例硅磷配施对水稻土中速效养分和水稻生长的影响, 为水稻磷、硅肥的合理配施提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验于 2013 年 4 月至 2013 年 8 月在浙江农林大学东湖校区进行(29°56'~30°27'N, 118°51'~119°52'E)。该地属中纬度北亚热带季风气候, 四季分明, 气候温和, 雨水充沛, 气候在垂直方向上差异悬殊。多年平均气温为 15.8 ℃, 历年平均日照 1 939.0 h, 无霜期 234.0 d。供试土壤取自该校试验基地, 为典型红壤。供试土壤基本理化性质为: pH 5.34, 有机质 25.80 g·kg⁻¹, 全氮 1.69 g·kg⁻¹, 碱解氮 100.70 mg·kg⁻¹, 有效磷 37.15 mg·kg⁻¹, 速效钾 62.29 mg·kg⁻¹, 有效硅 157.28 mg·kg⁻¹。试验中施用的硅肥为硅酸钠(含二氧化硅 25%), 磷肥为磷酸二氢钙(含五氧化二磷 50%), 氮肥为尿素(含纯氮 46%), 钾肥为氯化钾(含氧化钾 60%)。所用水稻品种为‘嘉育 253’。

1.2 试验设计

试验设 3 个硅肥水平, 3 个磷肥水平, 共 9 个处理(表 1)。5 盆·处理⁻¹。土壤按 8.5 kg·盆⁻¹ 装入塑料盆中。试验前取土后粉碎均匀, 风干后按不同的处理与肥料混匀后装盆, 加水沉实后待用。硅、磷、钾肥均作为基肥一次性施入, 其中钾肥施用量为氧化钾(K₂O) 0.25 g·kg⁻¹(风干土), 氮肥基肥施入量为纯氮(N) 0.20 g·kg⁻¹(风干土), 分蘖期追施同样质量分数氮肥。移苗后水稻定植 4 株·盆⁻¹, 栽培管理方式参照大田。

表 1 不同施肥处理及施肥方案

Table 1 Different treatments of fertilization application and designing scheme

处理	SiO ₂ 施用量/(g·kg ⁻¹)	硅肥水平	P ₂ O ₅ 施用量/(g·kg ⁻¹)	磷肥水平
Si ₀ P ₀	0	低	0	低
Si ₀ P _m	0	低	0.2	中
Si ₀ P _h	0	低	0.4	高
Si _m P ₀	0.25	中	0	低
Si _m P _m	0.25	中	0.2	中
Si _m P _h	0.25	中	0.4	高
Si _h P ₀	0.50	高	0	低
Si _h P _m	0.50	高	0.2	中
Si _h P _h	0.50	高	0.4	高

说明:h 表示高,m 表示中,0 表示低。

1.3 样品采集及分析方法

1.3.1 样品采集 水稻于 2013 年 8 月 10 日成熟收获, 5 盆重复中随机抽取 3 盆考种记产、采集土样及水稻样品供实验室分析。土壤样品采集: 均匀收集盆栽中的水稻土, 风干后粉碎过筛, 分别保留过 2 mm 孔径粗土及过 1 mm 孔径细土。植物样品采集: 将成熟的水稻收割, 并根据不同的器官分为: 剑叶、其余叶、茎、鞘、穗轴、壳及糙米, 烘干粉碎后, 装入塑封袋中备用。

1.3.2 实验分析方法 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用氟化铵-氯化氢(NH₄F-HCl)浸提, 钼锑抗比色法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定; 有效硅采用醋酸钠-乙酸(NaOAc-HOAc)缓冲液提取有效态硅, 分光光度计法测定其中的硅质量分数。

1.4 统计方法

试验数据采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 硅磷配施对水稻土 pH 值和速效养分的影响

2.1.1 硅磷配施对土壤 pH 值的影响 跟试验前比较, 所有处理土壤 pH 值都有所提高, 原因是淹水后造成。在低硅和中硅水平下, 随施磷量的增加, pH 值有增加趋势, 但高硅水平下无明显规律。在相同磷水平下, 随施硅量增加, pH 值呈上升趋势, 且各处理之间差异达显著水平(表 2)。

2.1.2 硅磷配施对土壤碱解氮的影响 除高硅低磷(Si_hP₀)和高硅中磷(Si_hP_m)外, 在相同硅水平下, 随着施磷量的增加, 土壤碱解氮质量分数逐渐增加, 尤其在中硅水平下, 处理之间差异达显著水平。在相同的低磷和中磷水平下施硅量的多少并不影响土壤碱解氮的质量分数(表 2), 但在高磷水平下, 随着施硅量的增加, 土壤碱解氮的质量分数出现先增加后降低趋势, 其中在中硅高磷水平下质量分数为最高, 与对照相比, 差异显著。

2.1.3 硅磷配施对土壤有效磷的影响 在同一磷肥水平下, 随着施硅量的增加, 土壤中有效磷的质量分数明显增加, 各处理之间差异显著(表 2)。在相同硅肥水平下, 随着施磷量的增加, 土壤中有效磷质量分数显著增加, 但高磷高硅水平下, 则有下降趋势。其中, 高硅高磷(Si_hP_h)下土壤有效磷质量分数最高, 硅磷配施效应显著。

2.1.4 硅磷配施对土壤速效钾的影响 低硅水平下, 随着施磷量的增加, 土壤速效钾有减少趋势, 但差

表 2 不同硅磷配施条件下水稻土 pH 值和速效养分质量分数

Table 2 Soil pH value and available nutrients contents under different levels of Si and P application

处理	pH 值	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	有效硅/(mg·kg ⁻¹)
Si ₀ P ₀	5.47 d	103.37 c	10.25 d	53.67 c	102.45 cd
Si ₀ P _m	5.50 d	104.19 bc	14.58 c	50.33 c	112.23 c
Si ₀ P _h	5.59 cd	107.40 b	17.84 b	45.33 cd	110.25 c
Si _m P ₀	5.67 c	98.81 c	14.23 c	53.67 c	123.48 bc
Si _m P _m	5.71 c	111.87 b	17.22 b	63.00 bc	132.79 b
Si _m P _h	5.77 c	127.72 a	19.27 a	69.00 b	133.28 b
Si _h P ₀	6.49 a	98.17 c	14.29 c	78.33 a	142.14 ab
Si _h P _m	6.22 b	98.75 c	18.06 ab	76.67 a	153.83 a
Si _h P _h	6.38 ab	111.13 b	20.33 a	79.67 a	155.22 a

说明：a, b, c 等不同字母表示处理间达到 5% 显著性差异。h 表示高，m 表示中，0 表示低。

异不显著；中硅水平下，随施磷量的增加，土壤速效钾质量分数增加显著；而高硅水平下，不同供磷水平对土壤速效钾的影响较小(表 2)。相同的低磷(不施磷肥)水平下，低硅和中硅处理之间的土壤速效钾质量分数无变化，而高硅处理则显著提高，在中磷和高磷水平下，随着施硅量的增加，速效钾质量分数显著提高，硅磷配施效果明显。

2.1.5 硅磷配施对土壤有效硅的影响 在同一硅肥水平下，增施磷肥提高了土壤中有有效硅的质量分数，但中磷和高磷之间无显著差异。同一磷肥水平下，随着施硅量的增加，土壤有效硅质量分数显著增加，其中高硅高磷水平下的土壤有效硅质量分数为最高(表 2)，说明硅肥施用可显著提高土壤中有有效硅的质量分数。

2.2 硅磷配施对水稻各部位干物质积累的影响

硅磷配施对剑叶、其余叶影干物质质量无明显影响，但显著地提高了穗部和水稻的总干物质质量。在低硅水平下，随施磷量的提高，水稻的穗部及干物质总质量增加明显，但在相同的中硅和高硅水平下，随着施磷量的增加，干物质总质量呈现先增高再下降趋势(表 3)。在同一磷肥水平下，随硅肥水平的提高，水稻干物质总质量变化趋势相似，即在中硅中磷水平下最高。

水稻的穗部质量变化表现出与干物质总质量相似的规律，即在同一磷肥水平情况下，施硅量的增加会显著提高穗量，但在同一硅肥水平下，过高的磷素供应则有降低趋势。

表 3 硅磷配施对水稻各部位干物质积累的影响

Table 3 Effect of mixing fertilization of Si and P on dry matter weight in different rice organs

处理	干物质质量/(g·盆 ⁻¹)				
	剑叶	其余叶	茎鞘	穗部	总干物质
Si ₀ P ₀	5.65 bc	12.40 c	55.62 b	102.20 c	175.88 b
Si ₀ P _m	6.20 ab	15.46 a	53.64 b	117.05 bc	192.35 a
Si ₀ P _h	5.53 b	15.76 a	51.53 b	130.39 a	203.21 a
Si _m P ₀	4.81 c	9.98 d	42.80 c	110.55 c	168.14 bc
Si _m P _m	5.53 bc	15.22 a	55.81 b	136.42 a	212.98 a
Si _m P _h	5.60 bc	14.34 b	49.36 bc	141.69 a	210.99 a
Si _h P ₀	4.72 c	12.39 c	47.91 bc	117.60 bc	182.61 ab
Si _h P _m	7.08 a	15.59 a	59.55 ab	129.51 ab	211.73 a
Si _h P _h	5.50 bc	15.15 a	62.28 a	114.23 bc	197.15 a

说明：a, b, c 等不同字母表示处理间达到 5% 显著性差异。h 表示高，m 表示中，0 表示低。

2.3 硅磷配施对水稻产量性状的影响

低硅水平下，随着施磷量的增加，糙米和株高都呈现上升的趋势，特别是糙米的产量显著提高(表 4)。在中硅水平下，趋势相似。而在高硅水平下，随磷肥施用的增加，效果不明显(表 4)。在低磷和中磷水平下，糙米的产量随着硅肥使用量的增加有明显提高，特别是低磷水平下，施硅各处理之间差异显

表 4 硅磷配施对水稻产量性状的影响

Table 4 Effects of mixing fertilization of Si and P on rice grain yield properties

处理	株高/cm	每盆总分蘖数	糙米产量/(g·盆 ⁻¹)
Si ₀ P ₀	79.0 c	48 a	60.19 d
Si ₀ P _m	80.3 bc	52 a	87.20 bc
Si ₀ P _h	84.3 ab	48 a	96.37 ab
Si _m P ₀	83.3 abc	42 b	83.10 c
Si _m P _m	83.3 abc	51 a	91.57 b
Si _m P _h	82.3 abc	47 a	105.20 a
Si _h P ₀	85.7 a	46 a	92.15 b
Si _h P _m	86.7 a	48 a	95.62 ab
Si _h P _h	85.3 abc	51 a	83.78 c

说明：a, b, c 等不同字母表示处理间达到 5%显著性差异。h 表示高，m 表示中，0 表示低。

著，但高磷条件下，随着施硅量的增加，产量有降低趋势(表 4)。其中，中硅高磷(Si_mP_h)处理下，糙米产量达到最高。

3 讨论与结论

已有研究表明：硅、磷元素由于化学性质相似，存在着相互促进肥效的关系^[10-12]。在本试验中，硅磷配施后水稻土中的碱解氮、有效磷和速效钾质量分数均有不同程度的提高，为水稻生长发育提供了养分基础。但需要注意的是，过高的硅肥施加则可能产生负作用，如在本试验中，土壤碱解氮质量分数在高硅添加下有降低趋势。此外，硅磷互作还能提高水稻土壤的 pH 值，这可能由于本试验中所用硅肥为碱性，也是硅肥在酸性水稻土上肥效显著的原因之一。另外，从本实验中可以看出：水稻施用硅肥后，土壤有效磷质量分数增加明显，并且在高硅高磷处理中，有效磷质量分数达到最高(20.33 mg·kg⁻¹)，相比于低硅高磷，其处理效果明显。这主要是因为硅磷相似的化学性质，施用硅肥后土壤固定和吸附部分硅，从而减少了土壤对磷的吸附和固定，使得土壤中释放较多的有效磷，从而提高了土壤磷酸盐的有效性，这与前人的研究结果一致^[11]。

硅能使水稻体内磷酸的移动顺利进行，在磷酸盐供应量少时，可促进稻体内磷酸利用率的提高^[12]，但是一旦硅的供给不足则会引起生育不良，诸如稻叶似柳条一样下垂，分蘖以及每穗上的小穗数减少，结实率降低，产量下降等现象^[13]。水稻施用硅肥增产效果与土壤有效硅含量的相关性，国内外有一定的报道，但由于地区和土壤质地的不同，其试验结果也有差别。黑龙江农科院通过试验得出：土壤有效硅为 200.00~300.00 mg·kg⁻¹ 以下时，施用硅肥有效；吉林、辽宁、山东等地的试验结果表明：土壤有效硅为 200.00 mg·kg⁻¹ 以下时，施用硅肥有效；河南省硅肥工程技术研究中心在华北平原上的试验结果表明：土壤有效硅达 300.00 mg·kg⁻¹ 时，施用硅肥仍有效。南方地区的研究结果与北方有所差异，如浙江嵊县农科所试验表明，在当地土壤有效硅大于 100.00 mg·kg⁻¹ 时，施用硅肥增产效果不明显^[5,8-9]。

长期栽种水稻的土壤，由于每年均有大量的有效硅被吸收，另有一部分有效硅淋洗损失，很可能导致水稻土缺硅。本试验中，土壤有效磷为 37.15 mg·kg⁻¹，有效硅为 157.28 mg·kg⁻¹ 条件下，施用硅肥和磷肥后，显著提高了水稻干物质总质量和糙米产量，说明硅肥施加仍有效果。本试验结果还表明：硅磷配施效果比单施用磷肥，或者单施硅肥效果好。硅磷配施能够显著提高水稻土中有效磷及其他有效养分的质量分数，其中在中硅高磷的处理下，水稻获得最高产量。由此说明：硅肥和磷肥配施效果明显，但硅磷互作的效应在中硅高磷下最为显著，过高的硅肥供应则有使产量下降趋势。因此，在实际大田应用中，要结合当地土壤地力条件下，注意硅磷配施的合理比例和用量。

4 参考文献

[1] 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.
LI Yongfu, LUO Ancheng, WANG Weimu, *et al.* Genotypic variation of rice in yield, phosphorus uptake and utiliza-

- tion at different phosphorus supply [J]. *Chin J Soil Sci*, 2005, **36**(3): 365 – 370.
- [2] 李跃娜, 侯立刚, 齐春艳, 等. 不同磷素营养水平对水稻剑叶光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(32): 35 – 37.
LI Yuena, HOU Ligang, QI Chunyan, *et al.* Effects of different levels of phosphorus nutrient on the photosynthesis characteristic of rice flag [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2010, **38**(32): 35 – 37.
- [3] 张浩, 张凤文, 和忠, 等. 水稻耐低磷研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2009, **24**(5): 754 – 758.
ZHANG Hao, ZHANG Fengwen, HE Zhong, *et al.* Progress in research of tolerance to low-phosphorus in rice [J]. *J Yunnan Agric Univ*, 2009, **24**(5): 754 – 758.
- [4] USMAN K. Effect of phosphorus and irrigation levels on yield, water productivity, phosphorus use efficiency and income of lowland rice in Northwest Pakistan [J]. *Rice Sci*, 2013, **20**(1): 61 – 72.
- [5] 高玉凤, 焦峰, 沈巧梅. 水稻硅营养与硅肥应用效果研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(16): 156 – 160.
GAO Yufeng, JIAO Feng, SHEN Qiaomei. The research development of silicon nutrition and fertilizer application in rice [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, **25**(16): 156 – 160.
- [6] 邓接楼, 王艾平, 何长水, 等. 硅肥对水稻生长发育及产量品质的影响[J]. 广东农业科学, 2011(12): 58 – 61.
DENG Jielou, WANG Aiping, HE Changshui, *et al.* The effect of silicon fertilizer on growth and development yield and quality of rice [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2011(12): 58 – 61.
- [7] 卢维盛, 李华兴, 刘远金. 施硅对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2002, **23**(1): 92.
LU Weisheng, LI Huaxing, LIU Yuanjin. Effect of Si fertilization on yield and quality of paddy rice [J]. *J South China Agric Univ*, 2002, **23**(1): 92.
- [8] 解占军, 王秀娟, 郭万章. 硅磷复合对水稻的肥料效应影响研究[J]. 辽宁农业科学, 2006(2): 38 – 39.
XIE Zhanjun, WANG Xiujuan, GUO Wanzhang. Effect of silicon-phosphorus compound fertilizer on rice [J]. *Liaoning Agric Sci*, 2006(2): 38 – 39.
- [9] 刘鸣达, 张玉龙. 水稻土硅素肥力的研究现状与展望[J]. 土壤通报, 2001, **32**(4): 187 – 192.
LIU Mingda, ZHANG Yulong. Advance in the study of silicon fertility in paddy field [J]. *Chin J Soil Sci*, 2001, **32**(4): 187 – 192.
- [10] 王东, 王晓岑, 李淑芹, 等. 硅磷交互作用对土壤酶活力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, **41**(3): 70 – 74.
WANG Dong, WANG Xiaocen, LI Shuqin, *et al.* Effects of silicon-phosphorus interactions on soil enzyme activities [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2010, **41**(3): 70 – 74.
- [11] 李仁英, 邱译宣, 刘春艳, 等. 硅对水稻土磷吸附-解吸行为的影响[J]. 土壤通报, 2013, **44**(5): 1134 – 1139.
LI Renying, QIU Zexuan, LIU Chunyan, *et al.* Adsorption-desorption behaviors of phosphorus under different silicon concentrations in paddy soils [J]. *Chin J Soil Sci*, 2013, **44**(5): 1134 – 1139.
- [12] 李仁英, 沈孝辉, 谢晓金, 等. 施硅对土壤-水稻系统中磷迁移的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 423 – 428.
LI Renying, SHEN Xiaohui, XIE Xiaojin, *et al.* Effect of silicon on translocation of phosphorus in soil-rice system [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(2): 423 – 428.
- [13] ALI A M, LEE C H, LEE C H, *et al.* Silicate fertilization in no-tillage rice farming for mitigation of methane emission and increasing rice productivity [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2009, **132**(1): 16 – 22.