

氮肥与硅肥配施对杂交稻冈优 725 干物质和镉积累的影响

代邹^{1,2}, 李娜^{1,2}, 严奉君^{1,2}, 杨志远^{1,2}, 徐徽^{1,2}, 孙永健^{1,2}, 马均^{1,2*}

(四川农业大学水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130)

摘要:以杂交籼稻冈优 725 为材料, 设置不同施氮量(0、90、180 kg/hm²)和施硅量(0、150、300 kg/hm²), 研究氮硅配施对冈优 725 干物质积累和镉吸收的影响。结果表明: 各施氮水平下, 施硅均能够显著促进水稻根系干物质的积累和地上部氮的积累, 施氮量为 0、90 kg/hm²时, 施硅均能够显著促进地上部干物质的积累; 施氮量相同的条件下, 与不施硅相比, 施硅量为 150 kg/hm²处理可显著增加有效穗数, 显著降低水稻千粒质量; 施氮为 0 时, 与不施硅相比, 施硅可显著增加每穗粒数; 各施氮水平下, 水稻产量均随施硅量的增加而提高, 但在施氮量为 180 kg/hm²时, 施硅的增产效果不明显; 各施氮水平下, 施硅能显著降低根、茎、穗、精米中镉的含量及地上部镉的积累量, 但叶片中镉含量升高, 施氮量为 180 kg/hm²时, 施硅量为 150 kg/hm²和 300 kg/hm²处理精米中镉的含量差异不明显。综合本研究结果, 施氮量 180 kg/hm²+施硅量 150 kg/hm²对冈优 725 的增产降镉的效果较好。

关键词:水稻; 冈优 725; 施氮量; 施硅量; 干物质质量; 镉含量

中图分类号: S511.2⁺1; S506.2 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2017)03-0229-05

Effects of combined application of nitrogen and silicon on dry matter and cadmium accumulation in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) Gangyou725

DAI Zou^{1,2}, LI Na^{1,2}, YAN Fengjun^{1,2}, YANG Zhiyuan^{1,2}, XU Hui^{1,2}, SUN Yongjian^{1,2}, MA Jun^{1,2*}

(Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest China, Ministry of Agriculture, Wenjiang, Sichuan 611130, China)

Abstract: A field experiment was conducted in cadmium contaminated paddy rice field to investigate the effects of combined application of nitrogen and silicon on growth and cadmium accumulation in hybrid rice cultivar Gangyou725. In the present study, three nitrogen (0, 90, 180 kg/hm²) and/or silicon (0, 150, 300 kg/hm²) levels were applied, dry matter weight, nitrogen accumulation in rice shoot, rice yield and its component factors, cadmium content and accumulation amount in rice root and shoot and cadmium content in polished rice were investigated. The results showed that under 3 nitrogen application levels, silicon could improve the root dry matter weight significantly. But it only improved the shoot dry matter weight at 0 and 90 kg/hm² nitrogen treatments. Under the three nitrogen treatments, the nitrogen accumulation in shoot of the rice was increasing with the silicon levels applying in the field. The yield component factors were significantly affected by combined application of nitrogen and silicon. Treatment with 150 kg/hm² silicon could increase the effective panicle numbers under the same nitrogen levels, but decrease the 1000-grain weight compared to the treatments with 0 kg/hm² silicon treatment. Under 0 kg/hm² nitrogen treatment, applying 150 and 300 kg/hm² silicon improved the spikelets per panicle significantly compared to the 0 kg/hm² silicon treatment. Under each nitrogen level, rice yield was higher in 150 and 300 kg/hm² silicon treatments compared with 0 kg/hm² silicon treatment, but the effect was not significant under 180 kg/hm² nitrogen treatment. The cadmium contents in root, stem, panicle and the cadmium accumulation amount were lower in treatment with 150 and 300 kg/hm² silicon treatments than those in 0 kg/hm² silicon treatment under each nitrogen level, but the cadmium content in 150 and 300 kg/hm² silicon treatments was higher than in 0 kg/hm² silicon treatment. The cadmium contents in polished rice were decreased significantly by the silicon under the three nitrogen levels, there was no difference between the two silicon treatments under 180 kg/hm² nitrogen treatment.

收稿日期: 2016-09-01

修回日期: 2017-03-25

基金项目: “十二·五”国家科技支撑计划项目(2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13); 四川省科技支撑计划项目(2014NZ0040, 2014NZ0041, 2014NZ0047); 四川省育种攻关专项(2011NZ0098-15)

作者简介: 代邹(1989—), 男, 重庆江津人, 博士研究生, 主要从事水稻重金属吸收转运研究, daizou1989@163.com; *通信作者, 马均, 博士, 教授, 主要从事作物栽培生理研究, majunp2002@163.com

Based on the rice yield and cadmium content in panicle, combined application of 180 kg/hm² with 150 kg/hm² silicon could both improve rice yield and decrease cadmium in polished rice.

Keywords: rice; Gangyou725; nitrogen application rate; silicon application rate; dry matter; cadmium content

2014年,由中国国土资源部和环境保护部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》指出,中国耕地土壤污染超标率为19.4%,耕地土壤环境质量堪忧,污染物以无机污染物为主,无机污染物超标点位占全部超标点位的82.8%,其中,镉以7%的超标率成为首要无机污染物^[1]。镉污染主要来源于工业废气排放、矿渣的不合理利用、磷肥施用以及污水灌溉等^[2-3]。土壤中的镉因易溶和高迁移性被植物根系吸收进入植物体内并向地上部运输,最终对植物造成生理毒害^[4]。20世纪60年代发生在日本的“痛痛病”就是因为当地居民长期食用被镉污染的大米而导致的,因此,降低稻米中镉的积累,保证粮食质量安全是农业科技工作者的重要目标之一。氮肥的施用在一定范围内与水稻生物量及产量密切相关^[5]。有关氮肥对植物镉吸收积累的研究表明,植物对镉的吸收与氮肥用量^[6]、氮肥种类^[7]、植物种类^[8]等有关。前人研究表明,增加施氮量能够促进水稻对镉的吸收,最终导致籽粒中镉含量增加^[6],因此,产量与品质安全的矛盾是水稻生产中需要迫切解决的问题之一。硅有钝化重金属、与重金属元素形成难溶的螯合物或共沉淀、促进细胞壁形成、减少重金属元素进入等作用^[9-12],因此,硅既能促进植物生长,又可减少植物对镉、锰、铝、锌和铜等重金属的吸收,缓解重金属胁迫对植物的伤害。关于氮硅配施对水稻生长及产量的影响研究较多,但二者配施对水稻镉吸收的研究鲜见报道。本研究中,以杂交籼稻冈优725为材料,研究氮硅配施对其干物质及镉积累的影响效果,现将结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为杂交籼稻冈优725,是四川水稻生产上大面积推广应用的品种。土壤全氮含量为1.65 g/kg,速效磷含量为27.8 mg/kg,速效钾含量为110 mg/kg,碱解氮含量为101.3 mg/kg,有机质含量为25.4 g/kg,土壤全镉含量为0.75 mg/kg,pH值为5.83,土壤有效硅含量为178.4 mg/kg。按《土

壤环境质量标准(GB 15618—1995)》分类,属三级土壤、中轻度镉污染田块。

1.2 方法

试验于2014年在四川农业大学水稻研究所(温江区)试验基地进行。采用裂区设计,施氮(尿素)量为主区,设0(N0)、90(N1)、180 kg/hm² (N2)3个水平;施硅(Na₂SiO₃·9H₂O)量为副区,设0(S0)、150(S1)、300 kg/hm² (S2)3个水平,共9个处理。每个处理重复3次。小区面积15.4 m²。于4月7日播种,早育壮秧,5月9日移栽。移栽行株距为33.3 cm×16.7 cm。氮肥按基肥、分蘖肥、穗肥3次施用,施用质量比为3 3 4;硅肥全部用作基肥;磷肥用量75 kg/hm²,钾肥用量150 kg/hm²,全部用作基肥。田间管理按常规高产栽培管理进行。

1.3 测定项目与方法

1) 植株干物质质量测定。成熟期,每小区以稻株为中心,按30 cm×15 cm、深30 cm的规格,挖取具有代表性的稻株3株,分别置于孔径为0.4 mm的尼龙网袋中,用自来水冲洗干净,分开根、茎、叶和穗,于105℃烘箱中杀青30 min,调温至75℃烘干至恒重。测定植株各部位的干物质质量。

2) 产量及其构成因素调查。成熟期,每个小区计数30穴水稻的有效穗数,取平均值作为小区单株有效穗。在成熟期各小区取5株,晾干后室内考种,调查穗粒数、实粒数、千粒质量等指标,并计算结实率,各小区实打实收计产。

3) 植株及精米中镉含量的测定。测干物质质量的样品经粉碎,过孔径为0.25 mm的筛,用于测定植株各部位镉的含量。根据各部位镉的含量换算成单位面积镉的积累量。取一部分收获的籽粒烘干,用精米机制得精米,将精米粉碎,用于测定精米中镉的含量。镉含量采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES,美国热电公司)测定。

4) 植株含氮量的测定。准确称取粉碎样品0.200 0 g,用浓H₂SO₄和定氮催化剂消煮,采用FOSS-8400全自动凯氏定氮仪(Kjeltec 8400,丹麦)测定,再换算成单位面积氮积累量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 进行数据整理和作图；采用 DPS 7.05 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 氮硅配施对水稻根系及地上部干物质质量的影响

从表 1 可以看出，氮以及氮硅的互作效应对根系和地上部的干物质质量有极显著的影响，施硅量仅对根系干物质质量有极显著影响。施氮量为 0 时，施硅量为 150、300 kg/hm² 处理的根系干物质质量分别比不施硅的高 26.5%、17.2%；施氮量为 90

kg/hm² 时，施硅量为 150、300 kg/hm² 处理的根系干物质质量分别比不施硅的高 22.3%、17.6%；施氮量为 180 kg/hm² 时，施硅量为 150、300 kg/hm² 处理的根系干物质质量分别比不施硅处理高 1.9%、37.3%。在不施氮条件下，施硅量为 300 kg/hm² 处理能显著提高冈优 725 地上部的干物质质量；在施氮量为 90 kg/hm² 时，施硅量为 150、300 kg/hm² 处理分别比不施硅处理的干物质质量高 3.5% 和 2.9%；在施氮量为 180 kg/hm² 时，不施硅处理地上部的干物质质量最高，而施硅量为 150 kg/hm² 处理的干物质质量比不施硅处理的低 3.7%，两者差异显著。

2.2 氮硅配施对水稻产量及其构成因子的影响

从表 2 中可以看出，氮和硅对有效穗数、每穗粒数、千粒质量、产量及结实率有显著或极显著的影响，氮硅互作效应对水稻的有效穗数、每穗粒数、结实率有极显著影响。各施氮水平下，均以施硅量为 150 kg/hm² 的有效穗数最高。相同施氮水平下，施硅量为 150 kg/hm² 的千粒质量与不施硅的差异显著。在施氮量为 90 kg/hm² 时，施硅量为 150 kg/hm² 处理的每穗粒数比不施硅处理的高 12.8%。施氮量为 0 时，施硅量为 150、300 kg/hm² 处理的结实率比不施硅处理的低 5.9%、4.4%；施氮量为 90 kg/hm² 时，与不施硅处理相比，施硅量为 150 kg/hm² 的结实率显著下降，而施硅量为 300 kg/hm² 处理的结实率显著升高。施氮为 0 时，施硅能显著提高水稻的产量；施氮量为 90 kg/hm² 时，施硅量为 300 kg/hm² 处理的产量比不施硅处理的高 4.2%，且差异达显著水平。

表 1 氮硅配施下供试水稻的干物质质量及其方差分析结果

Table 1 Effects of combined application of nitrogen and silicon on the dry matter weight of root and shoot in rice and the analysis of variance

施氮量/ (kg·hm ⁻²)	施硅量/ (kg·hm ⁻²)	干物质质量/(t·hm ⁻²)	
		根系	地上部
0	0	0.36 c	12.13 b
	150	0.45 b	12.10 b
	300	0.51 a	13.07 a
90	0	0.41 c	16.97 b
	150	0.49 b	17.60 a
	300	0.57 a	17.47 a
180	0	0.47 b	18.97 a
	150	0.49 b	18.30 b
	300	0.64 a	18.53 ab
施氮量		37.89**	215.17**
施硅量		427.84**	3.64ns
氮硅互作		16.20**	6.24**

不同字母表示相同施氮量下不同施硅量之间差异显著(P < 0.05)；“**”表示在 0.01 水平上影响显著；“ns”表示影响不显著。

表 2 氮硅配施供试水稻的产量及其构成因子及方差分析结果

Table 2 Yield and yield components on rice and the analysis of variance under combined application of nitrogen and silicon

施氮量/(kg·hm ⁻²)	施硅量/(kg·hm ⁻²)	有效穗/(×10 ⁶ ·hm ⁻²)	千粒质量/g	每穗粒数	结实率/%	产量/(t·hm ⁻²)
0	0	1.34 b	28.00 a	210 b	86.11 a	6.75 b
	150	1.51 a	26.87 b	243 a	81.01 c	7.23 a
	300	1.47 a	26.85 b	249 a	82.28 b	7.47 a
90	0	1.76 b	27.09 a	250 b	83.81 b	9.62 b
	150	1.82 a	25.48 c	282 a	79.56 c	9.70 ab
	300	1.80 ab	26.23 b	257 b	86.52 a	10.04a
180	0	1.84 ab	26.96 a	266	83.30 b	10.29
	150	1.87 a	26.21 b	263	84.87 ab	10.39
	300	1.82 b	26.40 ab	257	85.76 a	10.68
施氮量		435.17**	47.25**	35.54**	10.36*	132.31**
施硅量		16.99**	31.38**	36.26**	30.22**	10.56**
氮硅互作		8.95**	2.13ns	22.74**	24.04**	0.79ns

不同字母表示相同施氮量下不同施硅量之间差异显著(P < 0.05)；“*”表示在 0.05 水平上影响显著；“**”表示在 0.01 水平上影响显著；“ns”表示影响不显著。

2.3 氮硅配施对水稻地上部氮积累量的影响

从图 1 可以看出,随着施氮量的增加,冈优 725 地上部的氮积累量显著升高。施氮量为 0 kg/hm²时,施硅量 300 kg/hm²处理的氮素积累量显著高于其他 2 个处理;施氮量为 90 kg/hm²时,施硅量为 150、300 kg/hm²处理的氮素积累量分别比不施硅处理的高 7.7%、14.2%;在施氮量为 180 kg/hm²时,施硅 300 kg/hm²的氮素积累量比不施硅处理的高 6.1%,差异显著。

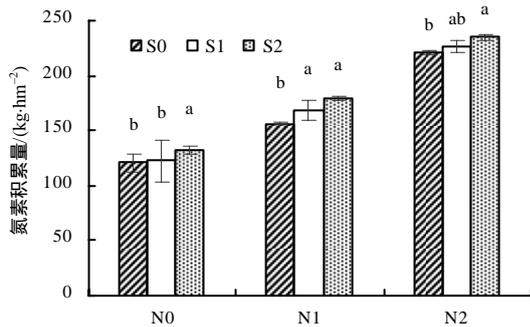


图 1 氮硅配施下供试水稻地上部的氮积累量

Fig.1 Nitrogen accumulation in the shoot of rice under application of nitrogen and silicon

2.4 氮硅配施对水稻各器官镉含量和积累量的影响

从表 3 可以看出,氮、硅及二者的互作效应均极显著影响水稻根、茎、叶和穗中的镉含量以及根

系和地上部的镉积累量。在 3 种施氮水平下,与不施硅相比,150、300 kg/hm²处理水稻根和茎中的镉含量显著降低,以施硅量为 300 kg/hm²处理的降幅最大。施氮量为 0、90 kg/hm²时,施硅量为 300 kg/hm²处理叶片中的镉含量较高,比不施硅处理的分别升高了 11.7%和 26.0%;施氮量 180 kg/hm²时,施硅量为 150 kg/hm²处理叶片的镉含量最高,比不施硅处理高 67.3%。施氮量为 0 和 90 kg/hm²时,施硅量为 300 kg/hm²处理降低穗部镉含量的效果较优;施氮量为 180 kg/hm²时,施硅量为 150、300 kg/hm²处理在降低穗部镉含量的效果上差异不明显。

在施氮量为 0 时,施硅量为 150 kg/hm²处理根系的镉积累量比不施硅处理的高 12.8%,施硅量为 300 kg/hm²处理根系的镉积累量比不施硅处理的低 6.8%;施氮量为 90 kg/hm²时,施硅量为 150 和 300 kg/hm²处理根系的镉积累量则显著升高,分别比不施硅处理的高 12.2%、14.5%;施氮量为 180 kg/hm²时,施硅量为 150 kg/hm²处理根系的镉积累量显著低于不施硅处理的,施硅 300 kg/hm²处理的根系镉积累量显著高于不施硅处理。在施氮量相同条件下,施硅量为 150 和 300 kg/hm²都能降低水稻地上部的镉积累量,且以施硅量为 300 kg/hm²的效果较好。

表 3 氮硅配施下供试水稻的镉含量和镉积累量及其方差分析结果

Table 3 Cadmium content and accumulation amount in different parts of rice under combined application of nitrogen and silicon and analysis of variance

施氮量/(kg·hm ⁻²)	施硅量/(kg·hm ⁻²)	镉含量/(mg·kg ⁻¹)				镉积累量/(g·hm ⁻²)	
		根系	茎	叶	穗	根系	地上部
0	0	31.00 a	12.12 a	2.65 b	1.15 a	11.22 b	44.33 a
	150	27.87 b	9.45 b	2.70 b	1.08 b	12.65 a	38.96 b
	300	20.41 c	6.68 c	2.96 a	0.91 c	10.46 c	36.01 c
90	0	32.88 a	13.59 a	2.65 c	1.53 a	13.44 b	79.15 a
	150	30.89 b	11.89 b	3.21 b	1.39 b	15.08 a	75.75 a
	300	26.81 c	8.25 c	3.34 a	1.24 c	15.39 a	66.21 b
180	0	44.61 a	17.15 a	2.94 c	1.29 a	21.19 b	122.59 a
	150	43.17 b	14.26 b	4.92 a	0.90 b	20.10 c	90.00 b
	300	36.36 c	9.91 c	3.22 b	0.94 b	22.87 a	79.28 c
施氮量		439.36**	902.95**	995.31**	412.34**	243.23**	568.96**
施硅量		507.82**	2 872.76**	782.31**	253.25**	12.82**	165.50**
氮硅互作		12.88**	32.55**	572.66**	26.65**	31.44**	49.87**

不同字母表示相同施氮量下不同施硅量之间差异显著(P < 0.05);**表示在 0.05 水平上影响显著;***表示在 0.01 水平上影响显著;“ns”表示影响不显著。

2.5 氮硅配施对水稻精米镉含量的影响

由图 2 可以看出,在施氮量相同的条件下,与不施硅相比,施硅处理均能显著降低水稻精米中的镉含量。不施氮时,施硅量为 150 和 300 kg/hm²处

理精米中的镉含量比不施硅处理的低了 33.3%和 40.0%;施氮量为 90 kg/hm²时,施硅量为 150 和 300 kg/hm²处理精米中的镉含量比不施硅处理的低 9.6%和 25.3%;施氮量为 180 kg/hm²时,施硅量为

150 和 300 kg/hm² 处理精米中的镉含量比不施硅处理的低 45.7% 和 50.0%。

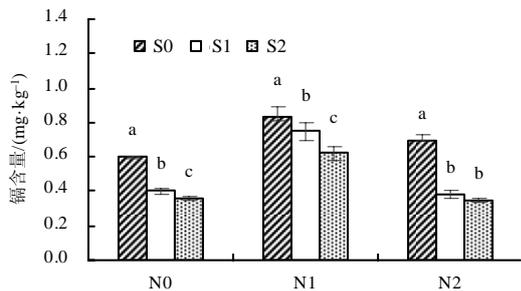


图 2 氮硅配施下供试水稻精米中镉的含量

Fig.2 Cd content in polished rice under nitrogen and silicon

3 结论与讨论

本研究结果表明,施氮提高了冈优 725 的有效穗、每穗粒数和结实率,但降低了千粒质量,可能是氮肥导致了水稻的“库”增大而“源”相对不足。随着施氮量的增加,冈优 725 的根、茎和叶中的镉含量呈上升趋势,可能与施氮导致土壤 pH 下降,土壤中的有效态镉含量增加有关^[13]。3 种施氮量下,施硅处理的千粒质量均比不施硅处理的低,这与吴建富等^[14]的研究结果不同,可能是硅导致了水稻籽粒中 Q 酶活性迅速下降,从而影响水稻的灌浆过程^[15]。在 3 种施氮量下,施硅量为 150 和 300 kg/hm² 处理水稻叶片中的镉含量比不施硅处理的高,可能是因为叶片中的硅与镉形成惰性的硅镉复合物积累在了叶片细胞壁中^[16],从而导致叶片中镉浓度增加。在 3 种施氮量下,随着施硅量的增加,水稻穗部镉含量均较不施硅时显著下降,可能是硅促进了水稻穗部生物量增加而造成的“稀释效应”所致。本研究结果表明,不同施氮条件下,硅对冈优 725 根系镉积累量的影响不一致,可能是不同用量的氮与硅肥作用导致土壤 pH、氧化还原电位、土壤团粒结构等不一致,从而影响了土壤中镉的有效性,进而影响水稻根系镉的积累。不施氮时,水稻穗粒数随施硅量的增加而增加,施氮量为 180 kg/hm² 时,施硅对穗粒数没有影响,说明适宜的氮硅配比才有助于水稻穗粒数的增加。本研究在不施氮和施氮量为 90 kg/hm² 时,施硅量为 150 kg/hm² 的结实率显著低于另外 2 个处理,可能是水稻光合生产不足,导致灌浆能力不足。在同一施氮水平下,施硅能促进冈优 725 地上部氮的积累,可能是硅使水稻体内硝酸还原酶活性增强^[17-18]所致。

综合本试验结果,在施氮 180 kg/hm²+施硅 150 kg/hm² 条件下冈优 725 的增产降镉的效果较好。

参考文献:

- [1] 国家环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17). <http://www.gov.cn/foot/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>.
- [2] LI L, ZHOU W, DAI H, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235/236(2): 343-351.
- [3] 范芙蓉, 罗琳, 廖育林, 等. 不同改良剂对镉污染土壤的改良效果和对水稻光合特性的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 38(4): 430-434.
- [4] 唐杰, 徐浩洋, 王昌全, 等. 镉胁迫对 3 个水稻品种(系)根系生长及有机酸和氨基酸分泌的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(2): 118-124.
- [5] FENG J, SHI Q, WANG X, et al. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 123(4): 521-530.
- [6] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 氮肥品种和用量对水稻产量和镉吸收的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 281-285.
- [7] 易蔓, 韦慧琴, 胡梦坤, 等. 氮素形态对烟草根际镉的有效性及镉吸收的影响[J]. *环境工程学报*, 2016(2): 941-947.
- [8] 李继光, 朱恩, 李廷强, 等. 氮对镉胁迫下东南景天根系形态及镉积累的影响[J]. *环境污染与防治*, 2007(4): 271-275.
- [9] WU J W, SHI Y, ZHU Y X, et al. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 815-825.
- [10] 张国良, 戴其根, 张洪程, 等. 水稻硅素营养研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2003(3): 8-12.
- [11] 高尔明, 赵全志. 水稻施用硅肥增产的生理效应研究[J]. *耕作与栽培*, 1998(5): 20-22.
- [12] 丁亨虎, 刘章军, 杨利, 等. 施硅对水稻生长发育及产量结构的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015(14): 3356-3360.
- [13] 刘安辉, 赵鲁, 李旭军, 等. 氮肥对镉污染土壤上小油菜生长及镉吸收特征的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(2): 77-81.
- [14] 吴建富, 姚仲生, 谢凡, 等. 不同硅肥用量对双季水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2015(6): 955-959.
- [15] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 水稻氮素吸收、利用与硅素营养的关系[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(5): 648-655.
- [16] WANG L J, WANG Y H, CHEN Q, et al. Silicon induced cadmium tolerance of rice seedlings[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(10): 1397-1406.
- [17] 许佳莹. 氮硅配施对不同品种水稻产量及生理特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [18] 陈健晓. 硅氮互作对超级早稻部分生理效应的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.

责任编辑: 尹小红

英文编辑: 梁和