

张璐, 蔡泽江, 文石林, 等. 两种钢渣源调理剂对水稻生长及氮磷钾吸收量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 439-448.

ZHANG Lu, CAI Ze-jiang, WEN Shi-lin, et al. Effects of Two Soil Amendments from Steel Slag on Rice Growth and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Uptake[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 439-448.

两种钢渣源调理剂对水稻生长及氮磷钾吸收量的影响

张璐^{1,2}, 蔡泽江^{1,2}, 文石林^{1,2}, 上官方钦³, 秦松³, 张会民^{1,2*}

(1.耕地培育技术国家工程实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2.祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182; 3.钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 钢渣富含硅、钙等养分, 是优良的土壤调理剂原料, 但其肥效和合理施用量在很大程度上取决于钢渣的养分含量和组分, 本研究选取白色钢渣调理剂(W)和黄色钢渣调理剂(Y)2种性质不同的钢渣调理剂, 通过盆栽试验研究其不同施用量(W 调理剂 0.74、1.47、2.94、5.88 g·kg⁻¹ 和 11.76 g·kg⁻¹; Y 调理剂 1.47、2.94、5.88、11.76 g·kg⁻¹ 和 23.52 g·kg⁻¹) 对水稻生长的影响。研究结果表明, 与单施 NPK 相比, 添加 W 调理剂对水稻生长无显著促进作用, 而 Y 调理剂施用量为 11.76 g·kg⁻¹ 和 23.52 g·kg⁻¹ 时可提高晚稻籽粒产量 20%, 且当 Y 调理剂施用量为 5.88~23.52 g·kg⁻¹ 时显著提高晚稻秸秆产量 24.02%~35.23%。施用 Y 调理剂促进了晚稻对氮、磷、钾素的吸收, 提高幅度分别为 12.61%~21.55%、7.63%~38.31%、11.89%~54.13%。综合结果表明, 在弱酸性水稻土(pH 6.51)上, 添加 W 钢渣源调理剂未促进水稻生长, 而施用 Y 调理剂对晚稻生长和氮磷钾养分吸收具有一定的促进作用。

关键词: 钢渣; 调理剂; 水稻生长; 产量; 氮磷钾吸收量

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)05-0439-10

doi: 10.13254/j.jare.2017.0118

Effects of Two Soil Amendments from Steel Slag on Rice Growth and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Uptake

ZHANG Lu^{1,2}, CAI Ze-jiang^{1,2}, WEN Shi-lin^{1,2}, SHANGGUAN Fang-qin³, QIN Song³, ZHANG Hui-min^{1,2*}

(1.National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2.Agro-ecosystem of National Field Experimental Station, Qiyang 426182, China; 3.Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of two soil amendments (W and Y) derived from steel slag and their application rates (0.74, 1.47, 2.94, 5.88 g·kg⁻¹ and 11.76 g·kg⁻¹ for W; 1.47, 2.94, 5.88, 11.76 g·kg⁻¹ and 23.52 g·kg⁻¹ for Y) on rice growth. The results showed that no significant change in rice yield was found following W amendments; conversely, a 20% increase in rice yield was observed following Y amendments at rates of 11.76 g·kg⁻¹ and 23.52 g·kg⁻¹ as compared with NPK treatments. Y amendment at rates of 5.88~23.52 g·kg⁻¹ increased straw mass by 24.02%~35.23% when compared with NPK treatments. Combined application of Y amendments and NPK fertilizers increased subsequent N, P and K uptake by rice by 12.61%~21.55%, 7.63%~38.31% and 11.89%~54.13%, respectively. The results indicated Y amendments could effectively accelerate subsequent rice growth at high application rates by increasing nutrient uptake in the soil studied (pH 6.51); Conversely, we observed no significant effects with W amendments.

Keywords: steel slag; soil amendment; rice growth; yield; nitrogen, phosphorus and potassium uptake

收稿日期: 2017-05-07

基金项目: “十二五”科研基础性工作专项(2013BAB03B03); 中央级公益性科研院所专项资金资助项目(IARRP-2015-4)

作者简介: 张璐(1984—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态与培肥方面研究。E-mail: zhanglu01@caas.cn

* 通信作者: 张会民 E-mail: zhanghuimin@caas.cn

我国钢渣产量大,每年超过 2 亿 t,但综合利用率低,仅为 50%~60%;大量无处理的钢渣任意堆放,不仅造成环境污染,更是一种资源浪费。钢渣中含有大量植物生长所需要的营养元素,如 Ca(29%~36%)、Si(4%~12%)、Fe(6%~27%)、Mg(1.8%~10.2%)及少量的 P、Mn、Cu、Zn 等元素^[1-2],且在冶炼过程中经高温煅烧,其溶解度大大改善,各种成分易溶解量达全量的 1/3~1/2,有的甚至更高,容易被植物吸收^[3];同时钢渣具有较大的比表面积和孔隙度,是优良的土壤调理剂原料^[4-5]。如在日本、美国以及欧洲等国家的研究表明,施用钢渣及其加工产品(土壤调理剂)均不同程度地促进了水稻生长和改善了水稻土的理化性质^[6-9]。目前,我国有关施用钢渣改良低产稻田的研究已取得了一定的研究成果^[10-13]。李军等^[10]通过田间试验证明,施用钢渣可改善水稻的生长状况,提高水稻产量 8.3%~20.9%。余长国等^[11]也通过田间试验证明,施用钢渣粉有利于提高早稻产量和促进水稻对硅素养分的吸收,但对晚稻产量无显著影响。宁东峰等^[12]则通过盆栽试验证明,施用钢渣后能有效提高土壤 pH 值和有效硅含量,且显著促进水稻生长。可见,前人的研究多集中在施用钢渣对土壤硅素肥力的影响^[13-14]。钢渣源土壤调理剂是在钢渣原有养分含量的基础上,进一步采取活化工序,使其养分有效性大大增加,并通过物理粉碎而获得的便于施用的土壤改良产品,其对作物生长的影响在很大程度上取决于活化后的养分含量和有效性,以及其他理化性质;然而目前有关钢渣源土壤调理剂对水稻生长的影响,及合理施用量的研究较少。为探明两种钢渣源调理剂(W 和 Y)的肥料效应,本研究通过盆栽试验,在湖南祁阳红壤性水稻土上连续种植两季(早、晚稻),分析添加两种不同成品钢渣源调理剂在不同施用量下水稻生长的变化特征,以期作为钢渣源调理剂的科学开发和合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自湖南省祁阳县官山坪村(26°45'

38.85"N,111°52'25.14"E),系丘岗地红壤性水稻土。土壤自然风干后,挑出杂质,磨碎过 1 cm 筛备用。土壤基础理化性质为:pH 值 6.51,有效 SiO₂ 176 mg·kg⁻¹,速效钾 109.5 mg·kg⁻¹,全钾 10.6 g·kg⁻¹,速效磷 13.0 mg·kg⁻¹,全磷 0.55 g·kg⁻¹,速效氮 148.0 mg·kg⁻¹,全氮 2.04 g·kg⁻¹,有机质 35.07 g·kg⁻¹。供试钢渣源土壤调理剂均由钢铁研究总院提供,分别标记为 W 和 Y,其理化性质如表 1 所示。其中,2 种钢渣源调理剂的重金属(As、Hg、Pb、Cd、Cr)含量符合农用粉煤灰中污染物控制标准(GB 8173—1987)。

1.2 试验设计

盆栽试验于中国农业科学院衡阳红壤实验站网室内进行,连续种植 2 季水稻。试验于 2015 年 4 月 27 日开始,2015 年 10 月 23 日结束。本研究共设置 12 个处理,以不施肥(CK)或单施氮磷钾肥料(NPK)处理为对照,每个处理 3 次重复,随机排列并经常调换位置。每种土壤调理剂(W 和 Y)各设置 5 个施用梯度,分别标记为 W1、W2、W3、W4、W5 和 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5。所有肥料和调理剂均作为基肥一次性施用,具体施肥量和施肥品种如表 2 所示,其中氮、磷、钾肥料分别为尿素、磷酸二氢钾、硫酸钾。

试验开始前称取相当于 10 kg 烘干土的风干土,将所有肥料和调理剂与土壤充分混匀后装入塑料桶中,灌水至淹没土壤 5 cm,放置 1 d 后插秧。选择长势均匀的秧苗,每桶 3 兜,早稻每兜 2 株,晚稻每兜 1 株。早稻品种为陵两优 268,于 2015 年 4 月 29 日插秧,2015 年 7 月 20 日收获。晚稻品种为岳优 518,于 2015 年 7 月 22 日插秧,2015 年 10 月 23 日收获。两季肥料和调理剂施用量相同。每个生育期定量浇水,按常规管理。

1.3 测定项目与方法

水稻插秧后,早稻于第 12 d、晚稻于第 10 d 开始测定分蘖数和株高,每隔 7 d 测定 1 次,至水稻抽穗期测定结束;水稻收获后,自然风干、考种,其中籽粒和秸秆重量于 75 °C 烘干后称取;籽粒和秸秆分别机械粉碎,用于其养分含量测定。籽粒和秸秆样品均采用

表 1 2 种钢渣源调理剂的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the two soil amendments from steel slag

土壤调理剂 Soil amendment	pH 值	硅含量 Si content/ %	钙含量 Ca content/ %	镁含量 Mg content/ %	氮含量 N content/ %	五氧化二磷 含量 P ₂ O ₅ content/%	氧化钾含 量 K ₂ O content/%	砷含量 As content/ mg·kg ⁻¹	汞含量 Hg content/ mg·kg ⁻¹	铅含量 Pb content/ mg·kg ⁻¹	镉含量 Cd content/ mg·kg ⁻¹	铬含量 Cr content/ mg·kg ⁻¹
W	10.45	14.62	27.88	6.28	0.03	1.43	0.42	<0.012	0	50	3.8	207.2
Y	7.94	2.34	5.07	3.37	0.94	0.38	0.36	0.4	0	15.8	2.2	<2.0

表2 试验处理与肥料和调理剂施用量

Table 2 Treatments and application rates of fertilizers and soil amendments

处理 Treatments	施肥量 Application rates of fertilizers/ mg·kg ⁻¹			调理剂施用量 Application rates of soil amendments/g·kg ⁻¹	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	W	Y
CK	0	0	0	0	0
NPK	200	100	150	0	0
NPK+W1	200	100	150	0.74	0
NPK+W2	200	100	150	1.47	0
NPK+W3	200	100	150	2.94	0
NPK+W4	200	100	150	5.88	0
NPK+W5	200	100	150	11.76	0
NPK+Y1	200	100	150	0	1.47
NPK+Y2	200	100	150	0	2.94
NPK+Y3	200	100	150	0	5.88
NPK+Y4	200	100	150	0	11.76
NPK+Y5	200	100	150	0	23.52

H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮,其中氮、磷、钾含量分别采用半微量凯氏法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定^[15]。

1.4 数据分析

文中所有图和数据分析分别采用 Microsoft Excel

2003 和 SPSS 16.0 软件进行,采用 Duncan 多重比较不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 水稻分蘖数和株高

添加土壤调理剂对水稻分蘖的影响如图 1 所示。早稻插秧后至第 33 d(2015 年 6 月 1 日),各施肥处理间差异不显著,此后差异增大,至 2015 年 6 月 22 日即插秧后的第 54 d,以 NPK 处理分蘖数最多(21),其次为施用土壤调理剂处理,分蘖数为 15~19,而不施肥处理(CK)分蘖数仅为 11。晚稻插秧后至第 23 d(2015 年 8 月 14 日),各处理分蘖数显著增加,其中以添加 Y 土壤调理剂的处理分蘖数最多(14~16),显著高于 W 调理剂处理(11~13)和单施 NPK 肥处理(11),且二者间无显著差异,此后各处理分蘖数基本保持不变或略有降低。添加 W 和 Y 调理剂后,早稻和晚稻株高呈现出缓慢增加的趋势,但各施肥处理间株高差异不显著(图 2)。

2.2 水稻产量

2 种调理剂及其用量对水稻产量的影响如图 3 所示。随 W 或 Y 施用量的增加,早稻籽粒产量呈现出

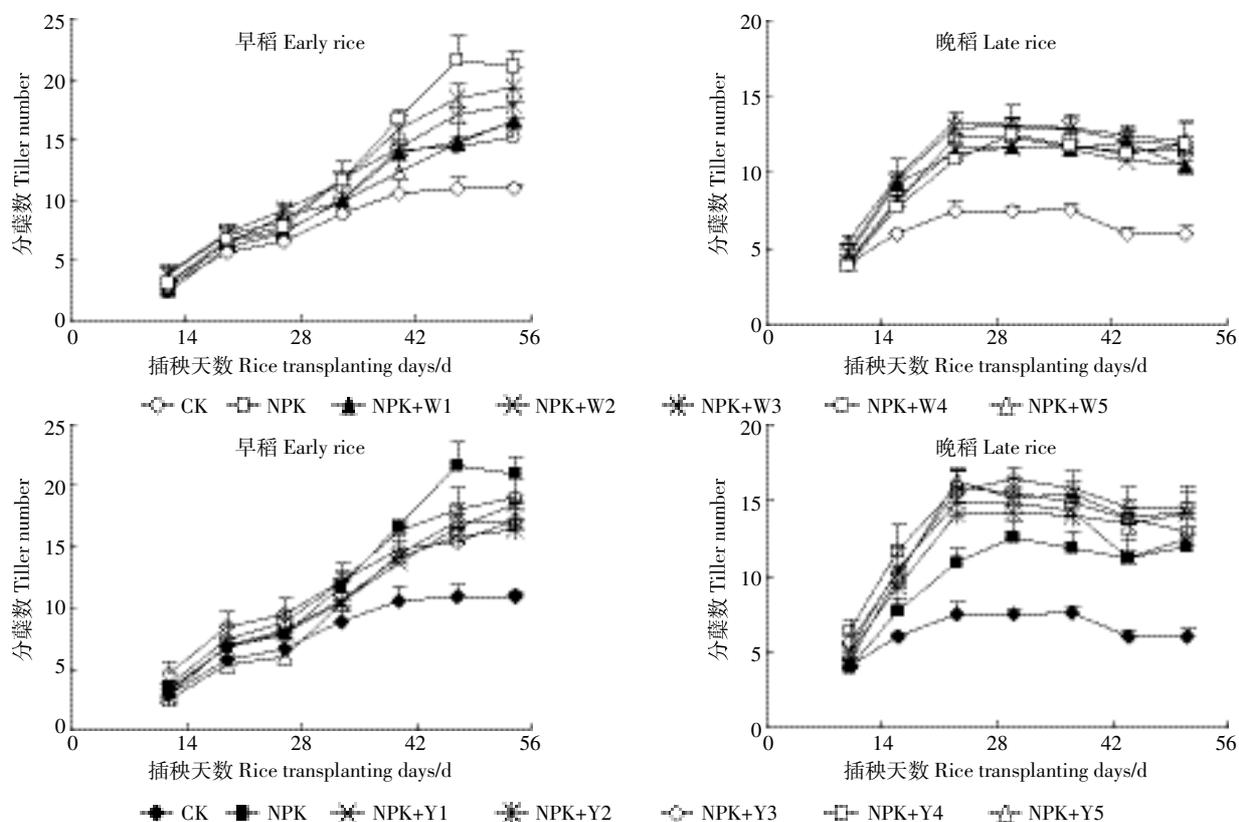


图1 施用土壤调理剂后水稻分蘖变化

Figure 1 The changes in tiller number of rice following soil amendment application

先增加后降低的变化趋势。与 NPK 处理相比,NPK+W2 和 NPK+W3 处理早稻籽粒产量无显著变化, NPK+W1、NPK+W4 和 NPK+W5 分别降低 19.72%、25.59%和 26.68%。与 NPK 处理相比,NPK+Y4 处理早稻籽粒产量提高 4.57%, 而 NPK+Y1、NPK+Y2 和 NPK+Y5 处理分别降低 15.79%、16.24%和 16.82%, NPK+Y3 处理则无显著变化。与单施 NPK 相比,施用 W 或 Y 调理剂对早稻秸秆产量无显著影响。与 NPK 处理相比, 早稻地上部生物量除 NPK+W2、NPK+W3 和 NPK+Y4 处理无显著变化外, 其他添加调理剂处理均降低, 降低幅度 W 调理剂处理为 17.09%~24.32%, Y 调理剂处理为 9.42%~12.17%。

随 W 或 Y 调理剂施用量的增加, 晚稻籽粒产量呈现先增加后稳定的趋势。与 NPK 处理相比,NPK+W1 处理晚稻籽粒产量降低 11.04%, 而 NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理分别提高 20.26%和 20.27%, 差异不显著,其他施肥处理无显著变化。与 NPK 处理晚稻秸秆产量相比,NPK+W5 提高 14.43%,NPK+W1 处理降低 10.51%, 其他 W 调理剂施用量下对晚稻秸秆产量无影响; 施用 Y 调理剂 5 个处理晚稻秸秆具有增加趋

势,其中 NPK+Y3、NPK+Y4 和 NPK+Y5 达显著水平, 增加幅度为 24.02%~35.23%($P<0.05$)。与 NPK 处理相比,NPK+W4 和 NPK+W5 处理晚稻地上部生物量分别提高 4.67%和 5.59%, 而 NPK+W1 处理降低 10.79%; 施 Y 调理剂的 5 个处理晚稻地上部生物量均有所提高,提高幅度为 5.11%~23.93%,其中 NPK+Y3、NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理达显著水平。

从水稻籽粒产量构成因素可以看出(表 3),与 NPK 处理相比,NPK+W1、NPK+W4 和 NPK+W5 处理早稻有效穗数分别显著降低 25.15%、22.16%和 29.35%($P<0.05$), 除 NPK+W5 处理千粒重较单施 NPK 处理显著增加外,其他添加 W 调理剂处理对早稻每穗粒数、千粒重和结实率无显著影响。与 NPK 处理相比,NPK+Y1 和 NPK+Y2 处理早稻有效穗数分别显著降低 27.55%和 23.36%($P<0.05$),添加 Y 调理剂处理对早稻每穗粒数、千粒重和结实率影响不显著。

与单施 NPK 相比,施用 W 调理剂对晚稻籽粒产量构成因素各指标影响不显著。而 NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理晚稻有效穗数较 NPK 处理分别提高 21.74%和 27.17%,因此其晚稻籽粒产量相对较高。

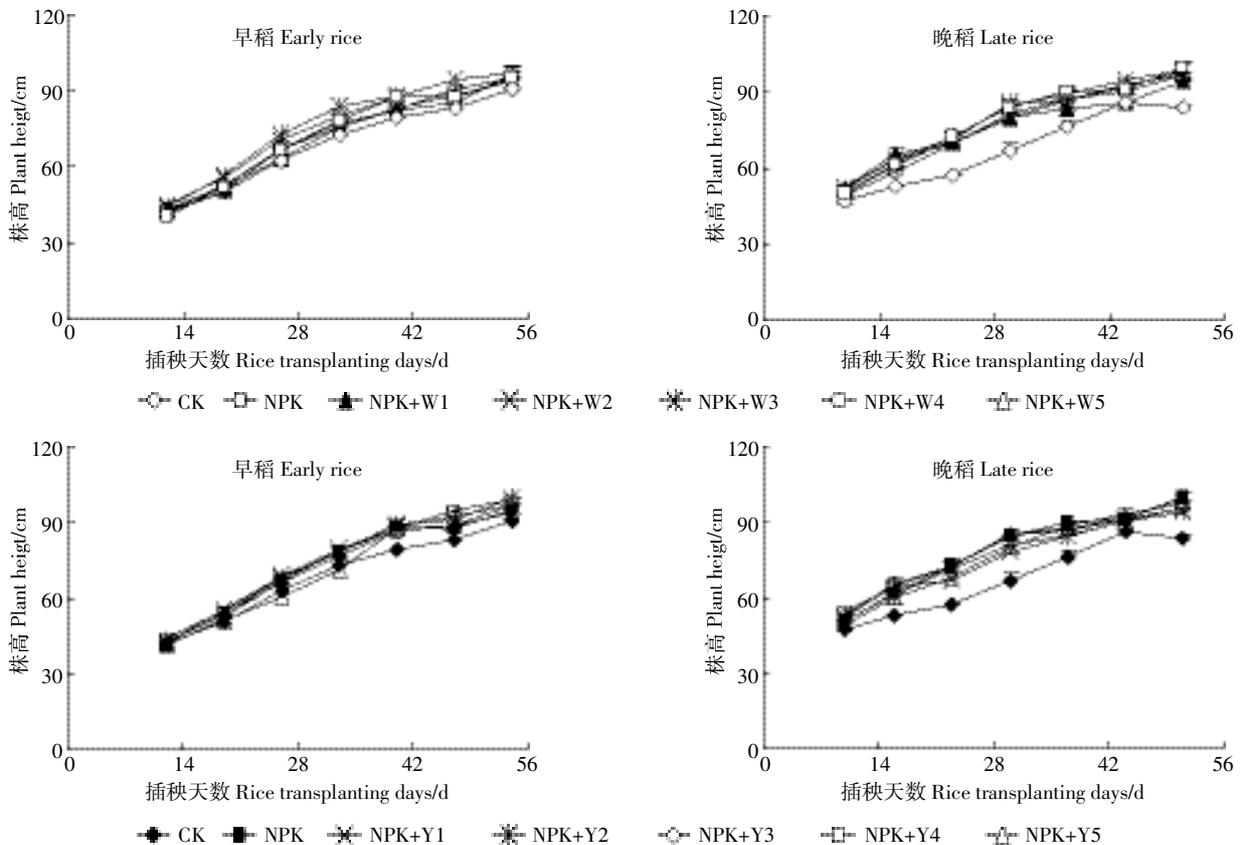
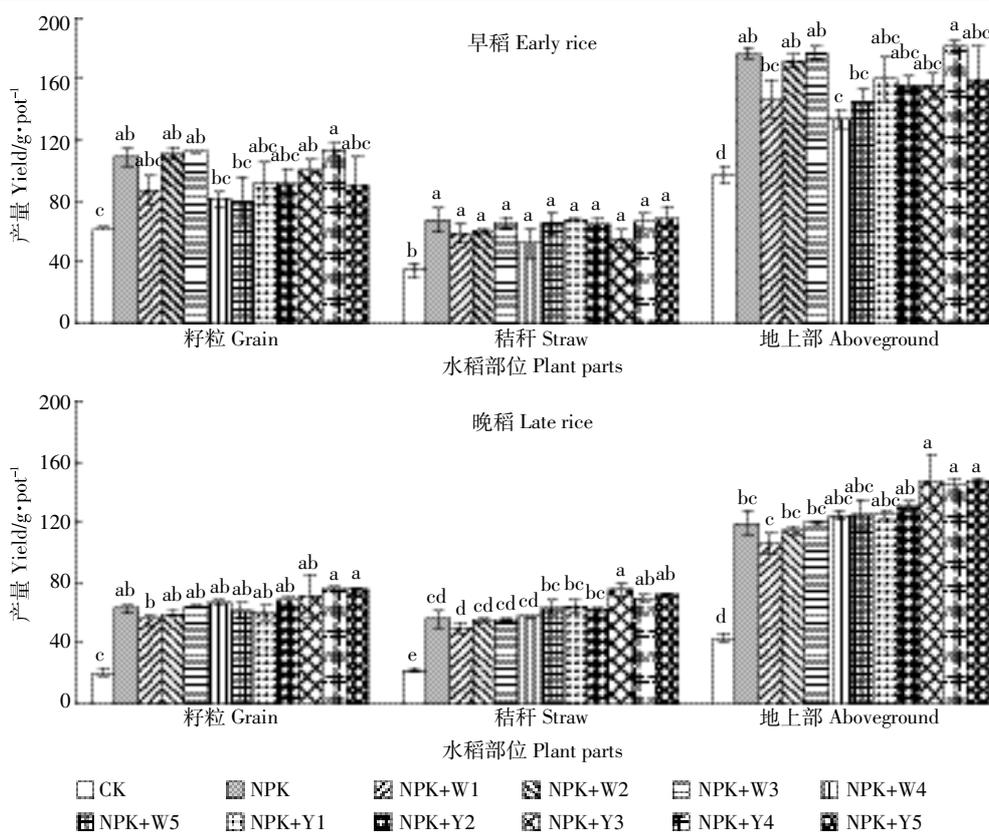


图 2 施用土壤调理剂后水稻株高变化

Figure 2 The changes in height of rice following soil amendment application



图中不同小写字母表示处理间在同一水稻部位差异显著($P < 0.05$)。下同

Different small letters for each plant part indicate the significant differences ($P < 0.05$) among treatments. The same below

图3 不同土壤调理剂和施用量下水稻产量

Figure 3 The effects of soil amendments on rice yield

2.3 水稻养分吸收量

2.3.1 水稻钾素吸收量

从图4可以看出,早稻籽粒吸钾量随W或Y调理剂施用量的增加,呈现出先升高后降低的变化趋势。与NPK处理相比,NPK+W1、NPK+W4和NPK+Y2处理早稻籽粒吸钾量分别降低17.48%、24.57%和17.96% ($P < 0.05$),其他添加W或Y调理剂处理与NPK处理相比变化不显著。与单施NPK相比,施用W调理剂的5个处理早稻秸秆吸钾量无显著变化(NPK+W4降低9.29%);除NPK+Y3处理外,施用Y调理剂的处理较单施NPK处理早稻秸秆吸钾量均显著提高,升高幅度为15.95%~40.21% ($P < 0.05$)。与NPK处理相比,NPK+W1、NPK+W4和NPK+W5处理早稻地上部总吸钾量降低5.23%~12.73%,而施用Y调理剂的5个处理均有所提高,提高幅度为11.08%~28.27%,其中NPK+Y2、NPK+Y4和NPK+Y5处理达显著水平。

与单施NPK处理相比,施用W调理剂对晚稻籽粒吸钾量影响不显著;而施用Y调理剂则提高晚稻

籽粒吸钾量,提高幅度为6.63%~35.98%,其中NPK+Y3、NPK+Y4和NPK+Y5处理达显著水平。随W或Y调理剂施用量的增加,晚稻秸秆吸钾量均呈现出升高的趋势,其中NPK+W4和NPK+W5处理提高幅度分别为23.18%和40.52%;NPK+Y2、NPK+Y3、NPK+Y4和NPK+Y5处理晚稻秸秆吸钾量均显著高于NPK处理,增幅为10.21%~57.94% ($P < 0.05$)。晚稻地上部总吸钾量与秸秆吸钾量变化趋势相同,与NPK处理相比,NPK+W4和NPK+W5处理分别升高20.57%和33.54%;NPK+Y2、NPK+Y3、NPK+Y4和NPK+Y5处理提高幅度为11.89%~54.13%,且达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.3.2 水稻氮素吸收量

两种调理剂对早稻籽粒吸氮量的影响如图5所示。与NPK处理相比,NPK+W1和NPK+W4处理早稻籽粒吸氮量分别显著降低18.96%和17.26% ($P < 0.05$);而施用Y调理剂对早稻籽粒吸氮量影响不显著。与NPK处理相比,NPK+Y1和NPK+Y2显著提高了早稻秸秆吸氮量,提高幅度分别为41.36%和

表 3 水稻籽粒产量构成因素
Table 3 Effects of soil amendments on rice grain yield components

作物 Crops	处理 Treatments	每盆有效穗数 No. of effective panicles per pot	每穗粒数 Grain number per panicle	千粒重 1 000-grain weight/g	结实率 Seed setting rate/%	
早稻 Early rice	CK	28±3c	96±10a	23.79±0.10ab	89.13±1.97a	
	NPK	56±1a	87±5a	22.54±0.24b	81.03±1.29ab	
	NPK+W1	42±4b	89±5a	23.67±0.36ab	80.83±2.03ab	
	NPK+W2	45±2ab	104±3a	23.84±0.75ab	84.08±0.71ab	
	NPK+W3	49±4ab	99±8a	23.23±0.23ab	82.36±2.45ab	
	NPK+W4	43±3b	79±5a	23.70±0.26ab	75.38±2.64b	
	NPK+W5	39±3b	87±22a	24.14±0.89a	79.17±8.04ab	
	NPK+Y1	40±3b	96±6a	23.34±0.31ab	75.55±5.46b	
	NPK+Y2	43±3b	91±3a	23.46±0.28ab	77.99±3.12ab	
	NPK+Y3	46±27ab	91±2a	23.96±0.30ab	84.70±1.71ab	
	NPK+Y4	49±3ab	99±6a	23.83±0.30ab	81.58±1.37ab	
	NPK+Y5	45±8ab	85±7a	23.15±0.62ab	75.41±4.50b	
	晚稻 Late rice	CK	15±1e	57±11b	24.71±0.28c	67.30±1.85c
		NPK	31±4cd	80±5a	25.99±0.37ab	82.75±1.83ab
		NPK+W1	29±2d	73±3ab	26.63±0.07ab	82.56±2.13ab
NPK+W2		31±1cd	76±4a	25.71±0.16abc	80.36±1.07ab	
NPK+W3		31±1cd	78±2a	26.70±0.55a	83.50±0.70ab	
NPK+W4		32±2bcd	79±3a	26.56±0.49ab	82.10±1.41ab	
NPK+W5		35±2abcd	68±4ab	25.85±0.26ab	74.32±2.59bc	
NPK+Y1		33±3bcd	70±2ab	26.53±0.47ab	77.61±0.46ab	
NPK+Y2		36±1abc	72±6ab	26.09±0.30ab	83.47±2.68ab	
NPK+Y3		41±3a	67±10ab	25.47±0.33bc	76.00±8.76abc	
NPK+Y4		37±3abc	77±4a	26.56±0.38ab	83.98±1.32ab	
NPK+Y5		39±0ab	73±2ab	26.44±0.26ab	84.73±1.06a	

注:表中数据为平均值±标准差,同列数据中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The data in the table are means of three replicates ± standard error. Values in the same column followed by different small letters indicate the significant differences ($P<0.05$) among treatments.

56.94% ($P<0.05$)。与 NPK 处理相比,施用 2 种调理剂对早稻地上部总吸氮量影响不显著。

与 NPK 处理相比,NPK+Y3、NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理晚稻籽粒吸氮量显著提高,提高幅度分别为 21.80%、18.73%和 20.76% ($P<0.05$),而其他施用调理剂处理变化不显著;且 NPK+Y3 和 NPK+Y4 也均显著提高了晚稻秸秆吸氮量,提高幅度分别为 35.77%和 29.01% ($P<0.05$)。与 NPK 处理晚稻地上部总吸氮量相比,NPK+Y3、NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理提高了 12.61%~21.55%,其中 NPK+Y3 和 NPK+Y4 处理达显著水平,而其他处理影响不显著。

2.3.3 水稻磷素吸收量

从图 6 可以看出,与 NPK 处理相比,添加 W 调理剂对早稻籽粒吸磷量影响不显著,对 NPK+Y4 和 NPK+Y5 有显著影响,NPK+Y4 显著提高 17.63% ($P<0.05$),

NPK+Y5 显著降低 16.61% ($P<0.05$)。与 NPK 处理早稻秸秆吸磷量相比,施不同用量 W 调理剂的 5 个处理无显著变化,而 NPK+Y2 较 NPK 处理显著增加,增加幅度为 51.82% ($P<0.05$)。与 NPK 处理地上部总吸磷量相比,NPK+W4 显著降低 13.23% ($P<0.05$),其余添加 W 或 Y 调理剂影响不显著。

与 NPK 处理晚稻籽粒吸磷量相比,除 NPK+W3 处理显著升高外,其他施用 W 调理剂处理变化不显著;施用 Y 调理剂处理中,NPK+Y3 和 NPK+Y5 处理晚稻籽粒吸磷量显著升高,升高幅度分别为 23.25%和 26.73% ($P<0.05$)。与 NPK 处理晚稻秸秆吸磷量相比,NPK+W1、NPK+W2 和 NPK+W3 无显著变化,NPK+W4 和 NPK+W5 分别降低 23.89%和 9.56%;施不同用量 Y 调理剂的 5 个处理均有所提高,提高幅度为 7.63%~38.31%,NPK+Y3 达显著水平。施用 W 调理

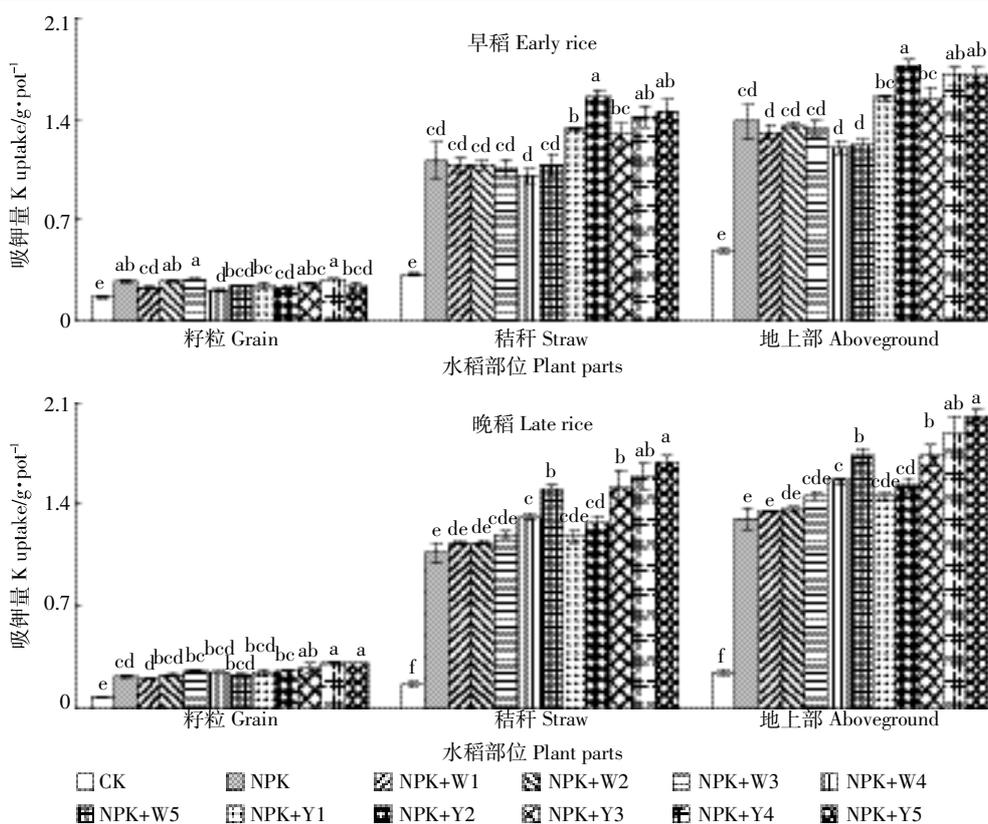


图4 不同土壤调理剂和施用量下水稻吸钾量

Figure 4 The effects of soil amendments at different application rates on potassium uptake of rice

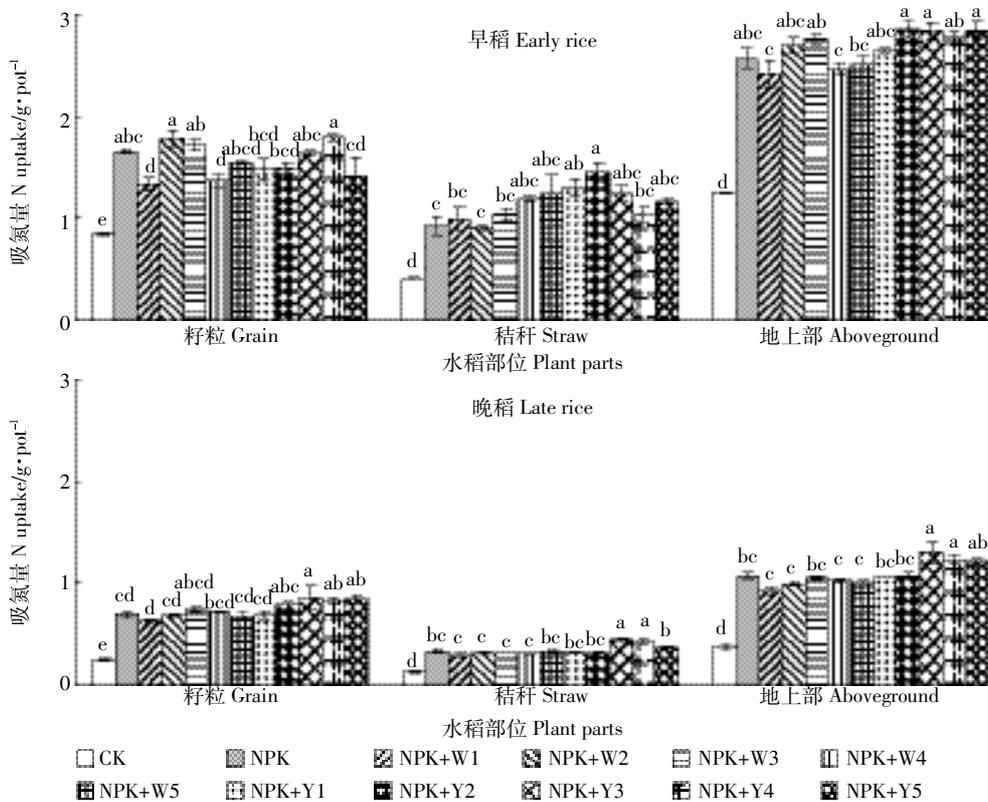


图5 不同土壤调理剂和施用量下水稻吸氮量

Figure 5 The effects of soil amendments at different application rates on nitrogen uptake of rice

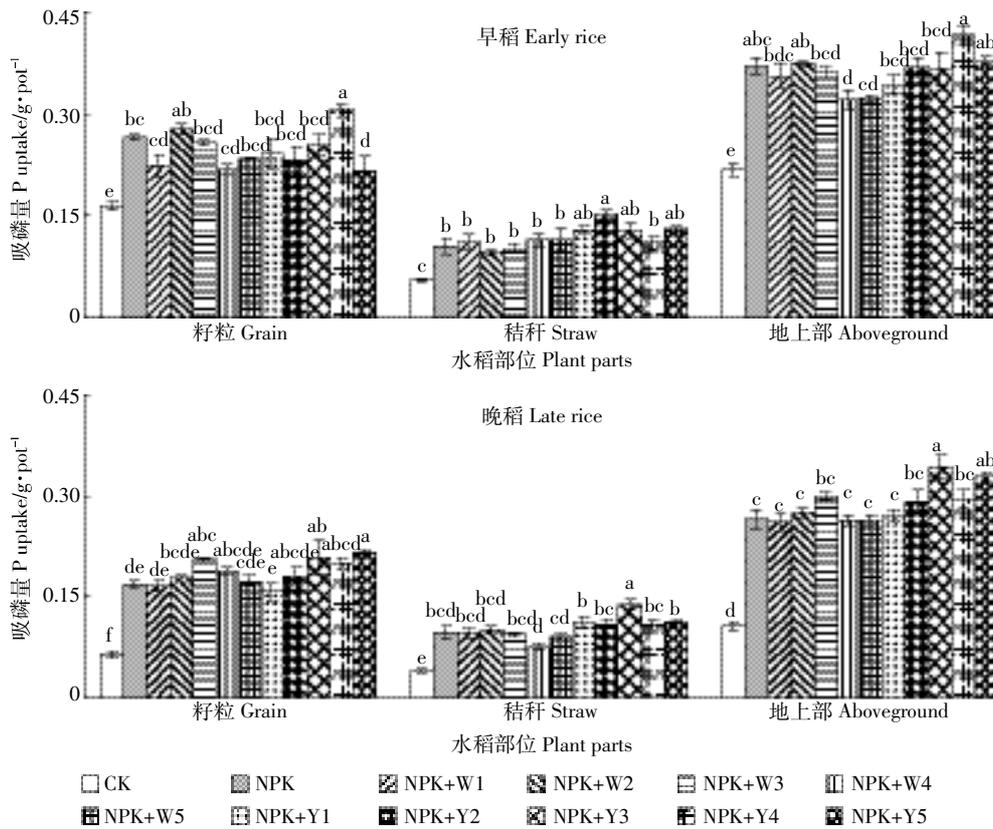


图 6 不同土壤调理剂和施用量下水稻吸磷量

Figure 6 The effects of soil amendments at different application rates on phosphorus uptake of rice

剂对晚稻地上部总吸磷量影响不显著,而NPK+Y3 和 NPK+Y5 处理则显著高于 NPK 处理,增加幅度分别为 31.78%和 26.42%($P<0.05$)。

3 讨论

本研究结果显示,水稻产量的变化与钢渣调理剂品种有关,NPK+Y3、NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理显著增加了晚稻秸秆产量和地上部总产量,养分吸收数据表明(图 4~图 6),当钢渣源调理剂 Y 施用量高于 5.88 $g \cdot kg^{-1}$ (Y3)时,促进了晚稻对氮、磷、钾的养分吸收,这可能是晚稻产量提高的主要因素之一。而施用 W 调理剂对水稻生长无明显促进作用,甚至出现减产现象(图 3),这可能与 W 调理剂的钙、镁含量有关(分别为 27.88%和 6.28%)。前人研究表明,过高的钙、镁施用量会降低土壤磷的有效性,以及作物对磷素的吸收利用^[16-17]。本研究 W 调理剂的用量为 0.74、1.47、2.94、5.88 $g \cdot kg^{-1}$ 和 11.76 $g \cdot kg^{-1}$, 带入的钙量相当于 206、410、820、1 639 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 3 279 $mg \cdot kg^{-1}$, 镁量相当于 46、92、185、369 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 739 $mg \cdot kg^{-1}$, 而磷肥添加量约为 48~117 $mg P \cdot kg^{-1}$ 。由此可见,添加的钙、镁量

远高于磷肥用量,在一定程度上降低了磷肥的有效性,从而限制了早稻对磷素的吸收利用(图 6);另一方面,W 调理剂 pH 值为 10.45,属于碱性肥料,对土壤 pH 值具有一定的提升作用,本研究所选土壤 pH 值为 6.51,属于弱酸性水稻土,盆栽试验结束后 NPK+W1、NPK+W2、NPK+W3、NPK+W4 和 NPK+W5 处理土壤 pH 值增加至 7.14~7.84,且随调理剂施用量的增加而显著增大,而土壤磷的有效性在 pH 值 6.0~6.5 之间时最高^[17],pH 值过高会降低磷的有效性。此外,研究表明土壤养分有效性与土壤酸碱性呈显著相关关系,土壤过碱会导致磷、铁、锰、锌等元素有效性降低^[18]。可见,过量施用 W 调理剂导致土壤 pH 值升高可能是水稻生长受到限制的主要因素之一。

与 W 调理剂相比,Y 调理剂钙、镁含量较低,分别为 5.07%和 3.37%,带入的钙量相当于 75、149、298、596 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 1 192 $mg \cdot kg^{-1}$, 镁量相当于 50、99、198、396 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 793 $mg \cdot kg^{-1}$, 显著低于 W 调理剂处理。此外,Y 调理剂 pH 值为 7.94,盆栽试验结束后 NPK+Y1、NPK+Y2、NPK+Y3、NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理土壤 pH 值为 6.92~7.36,显著低于施用 W 调

理剂的处理,也在一定程度上减轻了对养分有效性的影响。本研究表明,与单施 NPK 相比,施用 Y 调理剂 5 个处理的晚稻籽粒、秸秆、地上部总产量均有所提高(NPK+Y1 处理晚稻籽粒产量略低除外),其中 NPK+Y3、NPK+Y4、NPK+Y5 处理的秸秆产量、地上部总产量与 NPK 处理差异达显著水平,图 1 看出这 3 个处理晚稻分蘖数也相对较高,具体原因有待于进一步研究。

本研究 W 调理剂施用量低于 $2.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (W3) 时,籽粒吸钾量随 W 调理剂施用量的增加而增加,高于 $2.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (W3) 时,籽粒吸钾量下降。一方面过高的钙、镁添加量可能对水稻钾素吸收有抑制作用;另一方面,W 调理剂中的硅含量相对较高(14.62%),可能会使细胞壁硅化加速,凯式带的硅质化会阻止 K^+ 进入细胞内^[9]。Y 调理剂略有不同,当施用量低于 $11.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Y4) 时,籽粒吸钾量随 Y 调理剂施用量的增加而增加,当施用量高于 $11.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Y4) 时,籽粒吸钾量呈稳定或下降趋势,这可能与 Y 调理剂钙含量相对较低有关。NPK+Y4 和 NPK+Y5 处理在两季水稻中地上部吸钾量均相对较高,图 4 显示 NPK+Y4 和 NPK+Y5 两个处理在两季水稻中秸秆吸钾量也相对较高,本研究中秸秆吸钾量约是籽粒的 4 倍。

前人研究表明添加钢渣对土壤 pH 值和硅有效性的影响,是其影响水稻生长的主要因素之一^[12,20]。宁东峰等^[12]在酸性低硅土壤(pH 值 5.16 和有效 SiO_2 量 $89.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上通过盆栽试验研究表明添加钢渣源肥料后早、晚稻土 pH 值分别升高至 6.0~6.7 和 5.9~6.5,且当土中施用钢渣有效 SiO_2 用量高于 $1600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,显著提高土壤有效硅含量和水稻干物质质量。刘鸣达等^[20]也在酸性水稻土(pH 值 5.50) 上研究表明添加钢渣能显著提高水稻土 pH 值、水溶态硅含量,进而提高水稻产量。而本研究所选土壤为弱酸性水稻土(pH 值 6.51) 且有效硅含量较高($176 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本身不存在 pH 值对水稻生长的不利影响;而 W 钢渣源土壤调理剂具有高 pH 值(10.45)、富含硅、以及钙、镁等碱性金属化合物等特点,添加到土壤后,钙、镁等碱性化合物水解,释放出氢氧根离子,从而进一步提高了土壤 pH 值(7.14~7.84),过高的土壤 pH 值和钙、镁含量对磷等其他养分有效性具有一定抑制作用,从而限制了水稻生长。同时本研究也表明,W 钢渣源调理剂在酸性或强酸性水稻土上的应用潜力及前景,但其对酸性或强酸性水稻土肥力和水稻生长的影响还有待进一步研究。

4 结论

(1) 本研究表明在弱酸性水稻土(pH 6.51) 上,添加 W 钢渣源调理剂未促进水稻生长,且当施用量较高时($5.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 抑制了水稻对氮、磷、钾养分的吸收,进而抑制了水稻生长;施用 Y 调理剂对水稻生长具有一定的促进作用,当施用量 $\geq 11.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时提高晚稻产量 20%。

(2) 2 种调理剂对水稻生长的影响与其钙、镁含量、pH 值,以及施用量有关,调理剂钙、镁含量和 pH 值过高限制了土壤养分有效性及水稻对养分的吸收利用可能是其影响水稻生长的主要因素之一。

参考文献:

- [1] 吴志宏,邹宗树,王承智. 转炉钢渣在农业生产中的再利用[J]. 矿产综合利用, 2005(6):25-28.
WU Zhi-hong, ZOU Zong-shu, WANG Cheng-zhi. Application of converter slags in agriculture[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2005(6):25-28. (in Chinese)
- [2] Tsakiridis P E, Papadimitriou G D, Tsvivilis S, et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152:805-811.
- [3] 许刚. 转炉钢渣对海洋生态环境影响及碳的生物利用探索研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院, 2007.
XU Gang. The impact of steelmaking slag on the marine ecology environment and exploration research of carbon by biology[D]. Qingdao: Chinese Academy of Sciences Graduate School, 2007. (in Chinese)
- [4] Datnoff L E, Snyder G H, Raid R N, et al. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yields of rice[J]. *Plant Disease*, 1991, 75:729-732.
- [5] Liang Y C, Ma T S, Li F J, et al. Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25:2285-2297.
- [6] 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 Ming-da, ZHANG Yu-long. Advance in the study of silicon fertility in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(4):187-192. (in Chinese)
- [7] Ma J F, Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan [M]. Amsterdam:Elsevier, 2002:107-119.
- [8] Datnoff L E, Deren C W, Snyder G H. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida[J]. *Crop Protection*, 1997, 16:525-531.
- [9] Seebold K W, Kucharek T A, Datnoff L E, et al. The influence of silicon on components of resistance to blast in susceptible, partially resistant, and resistant cultivars of rice[J]. *Phytopathology*, 2001, 91:63-69.
- [10] 李军,张玉龙,刘鸣达,等. 钢渣对辽宁省水稻的增产作用 [J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(1):45-48.
LI Jun, ZHANG Yu-long, LIU Ming-da, et al. Effect of slag on rice in Liaoning Province[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*,

- 2005, 36(1):45-48. (in Chinese)
- [11] 余长国, 张添华, 吴建富, 等. 施用不同用量钢渣粉对水稻产量和土壤养分的影响[J]. 江西冶金, 2015, 35(3):39-42.
YU Chang-guo, ZHANG Tian-hua, WU Jian-fu, et al. Application of different dosage of steel slag powder effect on rice yield and soil nutrient[J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2015, 35(3):39-42. (in Chinese)
- [12] 宁东峰, 刘战东, 肖俊夫, 等. 水稻土施用钢渣硅钙肥对土壤硅素形态和水稻生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8):42-46.
NING Dong-feng, LIU Zhan-dong, XIAO Jun-fu, et al. Effects of application of steel slag-based silicon fertilizer on chemical forms of soil silicon and rice growth[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8):42-46. (in Chinese)
- [13] 杨丹, 刘鸣达, 姜峰, 等. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 I. 对土壤 pH、Eh 及硅动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4):757-763.
YANG Dan, LIU Ming-da, JIANG Feng, et al. Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils I. Effect on dynamic changes of Ph, Eh and Si in soil solution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):757-763. (in Chinese)
- [14] 刘鸣达, 张玉龙, 李军, 等. 施用钢渣对水稻土硅素肥力的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3):220-223.
LIU Ming-da, ZHANG Yu-long, LI Jun, et al. Effect of slag application on silicon fertility in paddy soil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(3):220-223. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-271.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis(Third edition)[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000:264-271. (in Chinese)
- [16] 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.
WANG Yong-zhuang, CHEN Xin, SHI Yi. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1):260-268. (in Chinese)
- [17] 张效扑, 郑根宝. 连续施石灰对作物生长及其养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 1987, 24(4):343-351.
ZHANG Xiao-pu, ZHENG Gen-bao. Effect of continuous liming on crop growth and their absorption of nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1987, 24(4):343-351. (in Chinese)
- [18] 陆景陵. 植物营养学(第 2 版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003:151-154.
LU Jing-ling. Plant nutrition(second edition)[M]. Beijing: Chinese Agricultural University Press, 2003:151-154. (in Chinese)
- [19] 魏朝富, 谢德体, 杨剑红, 等. 氮钾硅肥配施对水稻产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 1997, 28(3):121-123.
WEI Chao-fu, XIE De-ti, YANG Jian-hong, et al. Combined application of nitrogen, potassium and silicon fertilizers affecting on yields and nutrients uptake of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1997, 28(3):121-123. (in Chinese)
- [20] 刘鸣达, 张玉龙, 王耀晶, 等. 施用钢渣对水稻土 pH、水溶态硅动态及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(1):47-50.
LIU Ming-da, ZHANG Yu-long, WANG Yao-jing, et al. Effects of slag application on dynamic changes of pH, water-soluble silicon concentrations in paddy soil and rice yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1):47-50. (in Chinese)