

文 炯, 李祖胜, 许望龙, 等. 生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2496–2502.

WEN Jiong, LI Zu-sheng, XU Wang-long, et al. Effects of quicklime and calcium magnesium phosphate application on late-season rice growth and grain cadmium uptake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2496–2502.

## 生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响

文 炯<sup>1</sup>, 李祖胜<sup>1</sup>, 许望龙<sup>1</sup>, 陈 鹤<sup>1</sup>, 白玲玉<sup>2</sup>, 曾希柏<sup>1,2\*</sup>, 吴家梅<sup>3</sup>

(1. 农业部岳阳农业环境科学观测实验站/岳阳市农业科学研究院, 湖南 岳阳 414000; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 3. 湖南省农业环境生态研究所, 长沙 410000)

**摘 要:**为研究不同培肥措施对镉污染稻田的修复效果, 采用小区试验的方法, 研究了生石灰和钙镁磷肥及与化肥、有机肥配施对土壤镉有效性、水稻生长和稻米镉含量的影响。结果表明: 施用生石灰、钙镁磷肥可以显著提高土壤pH值, 其增幅为10.5%~16.1%, 其中耦合石灰、钙镁磷肥和化肥(NPKML)处理增幅最大, 达到16.1%。施用生石灰次之、钙镁磷肥增幅最小。有机肥与生石灰、有机肥与化肥和生石灰配施可使土壤有效镉含量降低7.9%~23.5%、使糙米的镉含量降低35.1%~47.5%, 其中NPKML对两者的降低效果最佳。施用生石灰、钙镁磷肥等对水稻生长和稻谷品质没有显著影响。研究表明, 有机肥、化肥、钙镁磷肥和石灰合理配施, 对镉污染稻田修复具有较好的效果。

**关键词:**生石灰; 钙镁磷肥; 水稻; 镉

中图分类号: S156.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)11-2496-07 doi:10.11654/jaes.2019-0419

### Effects of quicklime and calcium magnesium phosphate application on late-season rice growth and grain cadmium uptake

WEN Jiong<sup>1</sup>, LI Zu-sheng<sup>1</sup>, XU Wang-long<sup>1</sup>, CHEN Ge<sup>1</sup>, BAI Ling-yu<sup>2</sup>, ZENG Xi-bai<sup>1,2\*</sup>, WU Jia-mei<sup>3</sup>

(1. Scientific Observation and Experiment Station of Yueyang, Ministry of Agriculture/Yueyang Agricultural Research Academy, Yueyang 414000, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Hunan Institute of Agro-Environment and Ecology, Changsha 410000, China)

**Abstract:** The aim of the present study is to evaluate the remediation effect of different fertilization measures on cadmium (Cd)-contaminated paddy fields. The effects of quicklime, calcium magnesium phosphate fertilizer, or their combined application with chemical and organic fertilizers on soil Cd availability, rice growth, and grain Cd content were determined in a field plot experiment. The addition of quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer significantly increased the soil pH by 10.5%~16.1%. In comparison, the combined application of quicklime, calcium magnesium phosphate fertilizer, and chemical fertilizer (NPKML) resulted in a maximum increase of 16.1% in soil pH, followed by quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer. The combined application of organic fertilizer and quicklime along with NPKML significantly decreased the contents of soil available Cd by 7.9%~23.5% and the grain Cd content by 35.1%~47.5%. NPKML showed optimal efficiency in decreasing the soil available Cd and grain Cd content. No significant effect on rice growth and quality was observed after application with quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer. In conclusion, the combined application of organic fertilizer, chemical fertilizer, calcium magnesium phosphate fertilizer, and quicklime is a better immobilizer of Cd in paddy soils.

**Keywords:** quicklime; calcium magnesium phosphate fertilizer; rice; cadmium

收稿日期: 2019-04-17 录用日期: 2019-08-12

作者简介: 文 炯(1983—), 男, 湖南株洲人, 农艺师, 主要从事农业环境研究与技术示范。E-mail: 942890820@qq.com

\*通信作者: 曾希柏 E-mail: zengxibai@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801504); 湖南省重点研发计划项目(2017NK2142)

**Project supported:** The National Key R&D Program of China (2017YFD0801504); The Provincial Key Research and Development Program of Hunan (2017NK2142)

近年来,受污染物排放量增加、部分地区超标排放等因素的影响,我国农田污染呈加剧的趋势,局部治理、整体下降的态势较严重,其中重金属污染尤为严峻<sup>[1-2]</sup>。据2014年发布的“全国土壤污染状况调查公报”显示,我国有16.1%的土壤存在不同程度污染,其中轻微、轻度、中度和重度污染分别占11.2%、2.3%、1.5%和1.1%<sup>[3-4]</sup>,受镉污染的土壤即达到7.0%。重金属污染是土壤无机污染最主要的形式,而湖南又是受镉污染较严重、报道较多的省份,且其中又以水稻所受的影响最大,因此,镉污染稻田安全利用也受到了更多关注<sup>[5]</sup>。据报道,近年来亚洲地区稻田重金属、尤其是镉污染面积不断扩大<sup>[6]</sup>,已成为制约水稻可持续发展的重要因素。有研究认为,土壤pH和有机质含量决定了镉的活性和生物有效性<sup>[7]</sup>,土壤中微量元素的含量也直接或间接影响镉的活性和生物有效性<sup>[8]</sup>。因此,常用碱性物质(如石灰、钙镁磷肥等)或有机物(如腐植酸等)作为钝化剂来降低土壤中镉的活性和生物有效性。石灰作为最常用的化学改良剂,它能提高土壤pH,促进重金属形成碳酸盐、氢氧化物沉淀等,从而降低土壤中镉的有效性、减少植物对镉的吸收<sup>[9]</sup>。钙镁磷肥中的磷可通过溶解、沉淀等过程与污染土壤中的镉相互作用,降低土壤镉的生物有效性<sup>[10]</sup>,并改变土壤中镉的形态分布,促使镉从交换态向碳酸盐结合态和氧化锰结合态转化<sup>[11]</sup>。有机质对重金属离子的吸附和络合作用,可在一定程度上促进重金属由高活性态向低活性态转化<sup>[12]</sup>。目前,在上述物质单独利用及其效果研究方面已进行过相关研究,并得出了有价值的结论,本研究在已有研究的基础上,针对镉污染稻田晚稻调控难度大等问题,应用大田试验的方法,研究了上述物质配合施用对土壤镉有效性及晚稻吸收镉的影响,为镉污染稻田安全利用和水稻(特别是晚稻)安全生产提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试水稻品种为盛泰优018,它是一种广泛种植于我国南方的杂交稻品种,购自中化集团洞庭高科股份有限公司;有机肥为菜饼有机肥,购自湖南金叶肥料有限公司;生石灰、钙镁磷肥等改良剂均为购自市场的成品,其中钙镁磷肥主要成分为 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{MgSiO}_3$ 。试验用化学肥料还包括尿素( $\text{N} \geq 46.0\%$ )和氯化钾( $\text{K}_2\text{O} \geq 60.0\%$ )。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 研究区概况

试验地点位于地处长江中游亚热带地区的湖南省湘阴县原种场,年平均气温 $17\text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均降雨量 $1393\text{ mm}$ ,全年日照时数 $1399\sim 2050\text{ h}$ 。供试土壤为河湖沉积物发育的水稻土,土壤有机质 $28.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,总镉和有效镉分别为 $0.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷、速效钾和总氮分别为 $4.35$ 、 $92.57\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH 5.5。

#### 1.2.2 试验设计

试验共设6个处理,分别为CK(不施肥料)、NPK(施用尿素、钙镁磷肥和氯化钾)、NPKL(NPK+生石灰)、M(施用有机肥)、ML(有机肥+生石灰)、NPKML(NPK+有机肥+生石灰),每个处理3次重复,小区随机区组排列(图1)。试验小区长 $6\text{ m}$ 、宽 $5\text{ m}$ ,面积 $30\text{ m}^2$ ,为防止肥水等的串联,小区间田埂用塑料薄膜覆盖,高度 $30\text{ cm}$ ,各小区分别排灌。

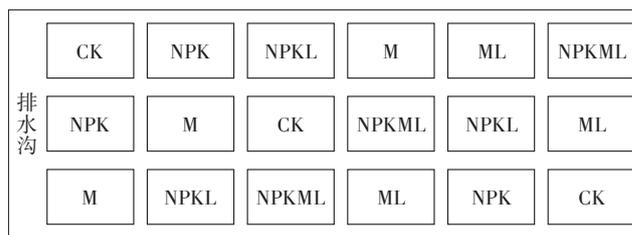


图1 小区试验分布图

Figure 1 The layout of field plot experiment

水稻于2016年6月中旬播种,7月中旬移栽,各处理晚稻季施用肥料总量见表1。石灰于水稻移栽前4 d旋耕时撒施,基肥于水稻移栽前2 d撒施,基追肥比列为氮肥5:5、磷肥1:0、钾肥5:5,7月下旬追施尿素,8月上旬追施钾肥。为了验证不同处理年际效应,2017年连续种植,各处理设置与2016年相同。

#### 1.3 测定内容与方法

水稻收割后(田块落干)利用土钻(赛亚斯,SYK-CY1)采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤样品,经风干后取适量土壤磨细过 $1\text{ mm}$ 和 $0.25\text{ mm}$ 筛,留存备用。晚稻生长期间按相关方法记录生长数据,收割后采集植株样用超纯水清洗, $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 $30\text{ min}$ , $70\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒质量;同时采集稻谷样,经风干后脱壳研磨过 $1\text{ mm}$ 筛,留存备用。

土壤pH用pH计测定(水土比5:1),有机质用重铬酸钾氧化还原滴定法测定<sup>[13]</sup>,全镉采用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消煮、有效镉用DTPA浸提,消煮液和浸提

表1 试验各处理肥料施用量(kg·hm<sup>-2</sup>)Table 1 Fertilizers application quantity in different treatments(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatments	有机肥 Organic fertilizer	石灰 Lime CaO	化肥 Chemical fertilizer		
			尿素 N	钙镁磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	氯化钾 K <sub>2</sub> O
CK	不施肥	0	0	0	0
NPK	施用化肥	0	300	600	180
NPKL	化肥+生石灰	1800	300	600	180
M	施用有机肥	0	0	0	0
ML	有机肥+生石灰	1800	0	0	0
NPKML	NPK+有机肥+生石灰	1800	150	300	90

注:有机肥养分含量:N≥2.3%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥1.2%,K<sub>2</sub>O≥1.8%。

Note: Nutrient content of the organic fertilizer: N≥2.3%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥1.2%, K<sub>2</sub>O≥1.8%.

液中的镉用原子吸收分光光度法测定<sup>[13]</sup>。稻米和植株总镉含量用微波消解-原子吸收分光光度法测定<sup>[9]</sup>。为了保证消煮和测定过程的准确性,加入土壤标准物质 GBW07404(GSS-4)进行质量控制,植株则加入已知浓度的硝酸镉并设置样品重复,回收率在 93.7%~99.12% 之间。

#### 1.4 数据分析

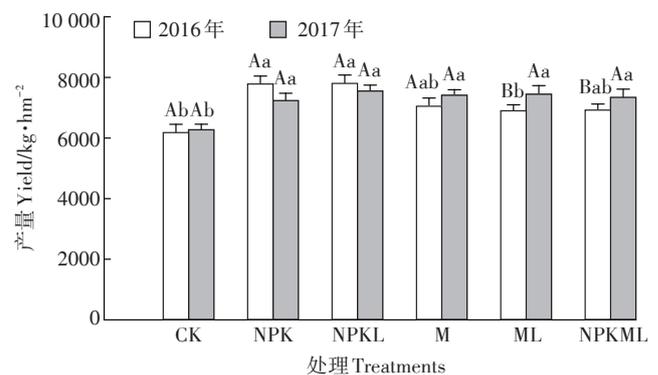
所得数据用 Excel 2010 进行试验数据整理,采用 SPSS 19.0 进行方差分析(ANOVA)和 Pearson 相关性分析,用 Sigma Plot 12.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对水稻产量及稻谷品质的影响

不同处理之间由于生石灰、有机肥等施用的差异,导致水稻生长具有相应的差别,并对水稻产量构成了相应的影响(图2),其中ML和NPKML处理2017年水稻产量相比于2016年均显著提高,分别增加了9.2%和6.3%,而其他处理2017年产量接近或低于2016年。

不同处理对稻谷主要品质指标亦具有一定影响(表2)。与CK相比,其他处理稻谷的出糙率和精米率均有所增加,其比例分别为1.0%~1.7%和0.7%~1.9%,但仅M处理下稻谷的出糙率与CK之间差异显著( $P<0.05$ )。不同处理对稻米透明度无影响,但显著影响稻米的整精米率、垩白粒率、垩白度,其中整精米率以M最高,达68.4%;垩白粒率以NPKL最高,达18%,NPKML最小,仅8%,这两种处理与CK均具有显著差异( $P<0.05$ ),而其他处理与CK差异均不显著;各处理米粒的垩白度均显著低于CK( $P<0.05$ ),NPKML最低,M和NPK次之。除NPK处理外,其他处理稻米直链淀粉含量均较CK显著增加( $P<0.05$ )。



不同大写字母代表相同处理不同年份间的差异显著( $P<0.05$ ),不同小写字母代表相同年份不同处理间的差异显著( $P<0.05$ ), $n=3$

Values are means ( $n=3$ ) with standard error. Different capital letters indicate significant differences between two years of the same treatment at  $P<0.05$  and different lowercase letters indicate significant differences between different treatments of the same year at  $P<0.05$

图2 不同处理的水稻产量

Figure 2 Yield of late-rice of different treatments

不同处理下稻米胶稠度的变化不一,M和NPKML处理增加,其他处理则均显著降低( $P<0.05$ )。可以看出,由于不同处理物质投入等的差别,导致稻米相关品质特性也出现了相应变化。

### 2.2 不同处理对土壤理化性质的影响

土壤pH是土壤重要的理化性质,由表3可知,不同处理下土壤pH年际变化存在差异性,2016年各处理之间的pH无显著差异,经过两年的连续种植、施肥和调理剂的耦合作用,2017年不加生石灰的CK、NPK和M处理的pH年际和处理间均显著降低,其余处理的pH无显著变化。2016年有机质含量除M与NPK-ML之间有显著差异外,其余各处理间并没有显著性的差异,2017年各处理间同样没有显著性的差异,但是较2016年NPKL、M和ML处理有机质含量有显著提高。土壤总氮与速效磷的含量变化与有机质的变

表2 不同处理对稻谷主要品质的影响

Table 2 Effects of different treatments on the quality of rice

处理 Treatments	出糙率 Brown rice/%	精米率 Milled rice/%	整精米率 Head milled rice/%	垩白粒率 Chalky grain rate/%	垩白度 Chalkiness/%	透明度 Transparency (Level)	胶稠度 Gel consistency/ mm	直链淀粉 Amylose content/%
CK	77.6±1.1b	71.3±2.4a	67.2±3.1a	14±1b	4.2±0.6a	2.3±0.6a	65.1±1.6b	15.2±0.3b
NPK	78.9±0.9ab	72.7±2.7a	67.5±3.8a	14±1b	2.8±0.5c	2.3±0.6a	63.1±1.2c	15.3±0.4b
NPKL	79.1±1.3ab	73.2±1.9a	67.2±4.4a	18±2a	3.4±0.7b	2.0±0.0a	60.1±0.6d	15.5±0.2a
M	79.3±1.2a	72.4±2.1a	68.4±2.9a	15±3b	2.6±0.4d	2.0±0.0a	68.0±0.8a	15.6±0.3a
ML	78.8±1.7ab	72.8±3.0a	67.0±3.4a	15±2b	3.3±1.0b	2.3±0.6a	60.1±1.9d	15.5±0.5a
NPKML	78.6±2.1ab	72.0±2.4a	67.1±3.6a	8±2c	1.5±0.8e	2.3±0.6a	65.2±2.1b	15.5±0.3a

注:不同字母表示不同处理间的差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters indicate significant differences at 0.05 level among treatments.

表3 2年中不同处理对土壤理化性质的影响

Table 3 Effect of different treatments on the chemical properties of the soil after two years

年份 Years	处理 Treatments	pH	有机质含量 Organic matter content/ $g \cdot kg^{-1}$	总氮含量 Total N content/ $g \cdot kg^{-1}$	速效磷含量 Available P content/ $mg \cdot kg^{-1}$	速效钾含量 Available K content/ $mg \cdot kg^{-1}$
2016	CK	5.93±0.03Aa	13.9±0.6Aab	0.81±0.06Aab	5.35±0.32Ab	82.6±9.3Ab
	NPK	5.89±0.10Aa	14.1±1.3Aab	0.83±0.04Bab	5.33±0.24Bb	107.2±16.5Aa
	NPKL	5.84±0.06Aa	14.7±0.6Bab	0.84±0.03Bab	5.31±0.28Bb	101.0±15.5Aab
	M	5.88±0.03Aa	13.1±0.9Bb	0.77±0.04Bb	5.56±0.27Bb	90.3±11.2Aab
	ML	5.84±0.10Aa	14.7±1.7Bab	0.84±0.04Bab	5.73±0.41Bb	87.8±2.5Aab
	NPKML	5.83±0.08Aa	15.7±1.1Aa	0.87±0.07Ba	6.81±1.28Aa	91.9±2.3Aab
2017	CK	5.25±0.18Bb	15.7±0.1Aa	0.91±0.05Ab	6.31±0.32Ab	75.1±5.6Aab
	NPK	5.20±0.14Bb	16.0±1.2Aa	1.09±0.02Aa	8.13±1.56Aab	94.0±11.3Aab
	NPKL	5.97±0.31Aa	16.9±0.4Aa	1.10±0.02Aa	7.64±1.76Aab	105.7±16.2Aa
	M	5.18±0.17Bb	16.9±1.1Aa	1.08±0.02Aa	7.52±1.51Aab	101.9±5.9Aab
	ML	5.80±0.40Aa	16.7±0.5Aa	1.04±0.02Aa	8.24±0.46Aa	66.8±4.8Bb
	NPKML	6.10±0.26Aa	16.8±1.4Aa	1.09±0.08Aa	7.37±0.52Aab	97.8±4.8Aab

注:不同大写字母代表相同处理不同年份间的显著性差异( $P<0.05$ ),不同小写字母代表相同年份不同处理间的显著性差异( $P<0.05$ ), $n=3$ 。下同。

Note: Values are means( $n=3$ ) with standard error. Different capital letters indicate significant differences between two years in the same treatment at  $P<0.05$  and different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same year at  $P<0.05$ . The same below.

化相类似,2017年较2016年都有增加的趋势,2017年所有处理的总氮含量较CK处理都有增加;土壤速效磷各处理较CK均有所增加,但只有ML处理最为显著。土壤速效钾含量的变化规律与上述营养元素并不一致,其中有机肥加石灰即ML处理较2016年显著降低,其他处理年际间没有显著差异。

### 2.3 不同处理对土壤有效镉和稻米镉含量的影响

如表4所示,2017年施用石灰的NPKL、ML和NPKML处理中土壤有效镉含量较上一年分别下降了19%、18%和17%,差异显著( $P<0.05$ )。对于稻米籽粒中镉含量,2017年施用石灰的NPKL、ML和NPKML处理与2016年相比分别下降了42%、35%和48%,差异显著( $P<0.05$ ),其中NPKML处理2017年稻米籽粒镉

含量接近国家限定稻米镉含量 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 标准,但其他处理均高于或显著高于该标准。

由表5可知,稻米镉含量变化与土壤有效镉显著正相关( $r=0.787^{**}$ ),与土壤pH呈显著负相关( $r=-0.446^{**}$ )。表明稻米镉含量受土壤中镉的活性及其生物有效性的影响,而根据2017年对土壤有效镉含量与pH的分析结果并求其相互关系,发现两者间呈极显著负相关, $Y=-0.39X+2.67$ ( $R^2=0.57$ , $P<0.01$ )。

## 3 讨论

### 3.1 土壤有机质、pH和钙对土壤镉有效性的影响

土壤pH的升高会改变土壤胶体颗粒表面可变电荷性质,增加土壤胶体表面吸附点位,有利于重金属的

表4 不同处理对土壤有效镉和稻米镉含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )Table 4 Effect of different treatments on soil available cadmium content and rice cadmium content during two years( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

处理 Treatments	土壤有效镉含量 Soil available cadmium content		稻米镉含量 Rice cadmium content	
	2016	2017	2016	2017
CK	0.39±0.02Aa	0.39±0.01Aa	0.67±0.18Aab	0.68±0.10Aa
NPK	0.38±0.01Aa	0.39±0.03Aa	0.58±0.11Aabc	0.51±0.14Ab
NPKL	0.40±0.03Aa	0.32±0.02Ba	0.49±0.02Abc	0.29±0.04Bc
M	0.37±0.02Aa	0.38±0.01Aa	0.74±0.03Aa	0.82±0.05Aa
ML	0.38±0.01Aa	0.31±0.02Ba	0.53±0.12Abc	0.35±0.07Bc
NPKML	0.40±0.02Aa	0.33±0.03Ba	0.40±0.08Ac	0.21±0.03Bc

表5 稻米镉含量与土壤理化性质的 Pearson 相关性系数

Table 5 Pearson's correlation coefficients of rice cadmium content and the chemical properties of soil

	总镉 Total cadmium	有效镉 Available cadmium	pH	有机质 Organic matter	速效磷 Available P	速效钾 Available K	总氮 Total N
稻米镉含量 Cadmium concentration of rice	0.137	0.787**	-0.446**	-0.324	-0.240	-0.056	-0.343*

注:\*\*表示差异达1%显著水平,\*表示差异达5%显著水平。

Note:\*\* is significantly related at the level of 0.01,\* is at the level of 0.05.

吸附<sup>[14]</sup>;同时,有利于土壤中重金属离子与 $\text{OH}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等阴离子形成氢氧化物或碳酸盐沉淀,从而进一步降低重金属的生物有效性<sup>[15-16]</sup>。Lombi等<sup>[17]</sup>研究石灰对重金属形态的影响发现,向土壤中添加石灰会显著降低可交换态镉、锌含量,碳酸盐结合态含量分别升高2.8倍和2.1倍,显著降低了土壤中镉、锌的生物有效性。本研究结果显示,添加钙镁磷肥、生石灰与有机肥处理的土壤pH均有不同程度升高,其中添加生石灰的处理pH上升明显,钙镁磷肥与有机肥次之。有研究指出,土壤中添加碱性物质能够增加土壤pH,从而降低重金属的活性及生物有效性<sup>[15]</sup>。本研究表明,经过两年培肥后添加石灰处理的有效镉含量有所下降,且均低于其他处理,说明土壤pH高低可以间接作为判断重金属有效性的基本指标,可以通过提高土壤pH阻隔重金属的生物有效性。这与前人研究结果一致。

土壤有机质是土壤固体的重要组成部分,是作为土壤肥力的重要指标,增加土壤有机质有利于提高土壤的缓冲能力和自净能力,为植物生长提供养分并降低污染物的生物毒性<sup>[18]</sup>。Pardo等<sup>[19]</sup>研究表明,猪粪堆肥与熟石灰联合施用能够显著降低表土层与土壤孔隙中镉的含量,且适度降低了5~12 cm之间土层的镉含量。本研究结果表明,添加有机肥能够显著提高土壤有机质含量,且有机质含量与有机肥添加量变化一致;单施有机肥、有机肥与生石灰或有机肥与化肥、生石灰配施均不同程度降低了土壤中有效镉的含量,

但是差异并不显著,说明有机肥添加对土壤有效镉含量影响不大,这可能与有机肥添加量或有机肥本身的性质有关。

钙离子是作物生长的必需元素之一,是多种酶的组分和激活剂,可以参与细胞的黏度、弹性和渗透性以及细胞壁的构建,维持细胞的正常生理活动,Andersson等<sup>[20]</sup>认为钙可以与镉竞争植物根系上吸收位点,汪洪等<sup>[21]</sup>研究表明钙离子可以在一定程度上缓解玉米受镉的毒害。本试验中,连续施用两年的石灰和钙镁磷肥,均在不同程度上减少了水稻籽粒中镉的含量。同时,钙离子作为土壤的盐基离子之一,可以与镉离子竞争土壤中黏土矿物、氧化物以及有机质上的阳离子交换吸附位点<sup>[22]</sup>。宋正国等<sup>[23]</sup>认为钙与镉具有相似的化学性质,是土壤中镉吸附位点的主要竞争者,当吸附体系中钙、镉共存时,钙可明显降低土壤矿物对镉的吸附。Naidu等<sup>[24]</sup>用钠离子作为阳离子来研究镉的吸附,与钙相比,钠离子对镉的吸附是钙离子的2倍。本文中施用的生石灰会向稻田中带入大量的钙,一方面降低植物吸收镉的能力,另一方面减少镉在土壤中的有效性。

土壤-植物系统中镉的转运过程、植物体内镉的再分配过程,以及稻米中镉的累积过程都是控制镉迁移转化的可能机理<sup>[25]</sup>。水稻籽粒中镉含量对不同处理条件下的变化响应不一致,本研究结果表明,单施有机肥增加了稻米中镉含量,添加石灰的处理均显著

降低了稻米中镉的含量。这可能是由于单施有机肥提高了土壤中有效镉的含量,增加了水稻对镉的吸收,从而增加了稻米中镉的累积。由相关性分析可知(表5),稻米中镉累积量与土壤有效镉含量之间呈显著正相关,说明提高土壤有效镉含量对稻米中镉的累积有促进作用。

### 3.2 不同施肥处理对土壤养分含量及水稻生长状况的影响

化肥与有机肥施用对土壤养分平衡和作物生长均具有显著影响,但不同性质肥料的养分输入量对土壤养分状况和作物产量及品质的影响效果不同<sup>[26]</sup>。张国荣等<sup>[27]</sup>研究有机肥与化肥氮磷钾配合施用对水稻产量的影响,发现长期施用化肥、以及与有机肥配施均有利于提高土壤速效氮、磷、钾以及有机质的含量,但施用化肥对土壤有机质的累积并没有很明显的促进作用。同样,本文单施化学肥料(NPK和NPKL)虽可提高土壤中速效养分含量,但是有机质含量并没有显著提高。刘晓卡等<sup>[28]</sup>研究表明黄腐酸有机肥能够促进植株生长和分蘖发生,提高每穗总粒数和结实率,但对千粒重基本无影响,对产量贡献不大。本研究结果显示,施用化肥、有机肥和化肥与有机肥配施均增加了水稻产量,其中施用化肥对水稻增产效果最佳。这可能是由于化肥施用迅速提高了土壤中速效养分含量,从而增加水稻对养分的吸收;而有机肥中速效养分相对低,促进作用不显著<sup>[29]</sup>。

有机肥处理(M、ML和NPKML)可以有效改善稻米的品质(表2),这可能是由于施用有机肥提高了土壤供肥性能、中微量元素含量等,从而促进水稻生长和养分均衡等。王鹏等<sup>[30]</sup>研究表明,施用生物菌肥能够提高稻米籽粒的长宽比,显著降低垩白粒率和垩白度,增加稻米的胶稠度、粗脂肪含量和直链淀粉含量,提高了稻米的食味值,改善了稻米的食用品质。但是有机肥料中的生石灰与钙镁磷肥等不同改良剂施用对水稻生长和稻谷品质的影响不大。

## 4 结论

(1)单施有机肥提高了土壤有效镉和稻米中镉含量;有机肥配施生石灰、钙镁磷肥及单施生石灰与钙镁磷肥均降低了土壤有效镉与稻米中镉含量,且钙镁磷肥、生石灰、有机肥三者配施效果最佳。

(2)施用化肥、有机肥和化肥有机肥配施均增加了水稻产量,其中施用化肥对水稻增产效果最佳;生石灰与钙镁磷肥等不同改良剂施用对水稻生长和稻

谷品质的影响不大。

### 参考文献:

- [1] 周启星. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004: 67-70.  
ZHOU Qi-xing. Principles and methods for repairing contaminated soil [M]. Beijing: Science Press, 2004: 67-70.
- [2] Sun Y B, Zhou Q X, An J, et al. Chelator-enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil irrigated by industrial wastewater with the hyperaccumulator plant (*Sedum alfredii* Hance)[J]. *Geoderma*, 2009, 150(1): 106-112.
- [3] 中华人民共和国环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查报告[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部和国土资源部, 2014. Ministry of Environmental Protection and Ministry of Land and Resources of PRC. National soil pollution status survey report[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection and Ministry of Land and Resources of PRC, 2014.
- [4] 王 刚, 孙育强, 杜立宇, 等. 石灰与生物炭配施对不同浓度镉污染土壤修复[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 379-383.  
WANG Gang, SUN Yu-qiang, DU Li-yu, et al. Study on remediation of Cd-contaminated soils with different concentrations of lime and biochar [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 379-383.
- [5] Uruguchi S, Mori S, Kuramata M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9): 2677-2688.
- [6] Li B, Wang X, Qi X, et al. Identification of rice cultivars with low brown rice mixed cadmium and lead contents and their interactions with the micronutrients iron, zinc, nickel and manganese[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(10): 1790-1798.
- [7] Jin H P, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2/3): 549-574.
- [8] Sarwar N, Saifullah, Malhi S S, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 90(6): 925-937.
- [9] 王美娥, 彭 驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4283-4290.  
WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping. Effect of rice varieties and typical soil improvement measures on rice absorbing cadmium[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4283-4290.
- [10] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态学报, 2006, 27(7): 3043-3050.  
ZHOU Shi-wei, XU Ming-gang. The progress in phosphate remediation of heavy metal-contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 27(7): 3043-3050.
- [11] 曹仁林, 霍文瑞. 钙镁磷肥对土壤中镉形态转化与水稻吸镉的影响[J]. 重庆环境科学, 1993(6): 6-9.  
CAO Ren-lin, HUO Wen-rui. Influence of calcium magnesium phosphate on the fraction transform of cadmium in contaminated soil

- and rice uptaking cadmium[J]. *Chongqing Environmental Science*, 1993(6):6-9.
- [12] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):258-261.  
GAO Yi-dan, LIANG Cheng-hua, PEI Zhong-jian, et al. Effects of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):258-261.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:30-35.  
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing:China Agricultural Press, 1999:30-35.
- [14] Malandrino M, Abollino O, Buoso S, et al. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(2):169-178.
- [15] 周相玉, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镁、锰、活性炭和石灰对土壤pH及镉有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):199-203.  
ZHOU Xiang-yu, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime on soil pH and the availability of cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):199-203.
- [16] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, et al. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(4):419-429.
- [17] Lombi E, Hamon R E, McGrath S P, et al. Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime, beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(5):979-984.
- [18] Khan M A, Khan S, Khan A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, s601/602:1591-1605.
- [19] Pardo T, Bernal M P, Clemente R. Efficiency of soil organic and inorganic amendments on the remediation of a contaminated mine soil: I Effects on trace elements and nutrients solubility and leaching risk[J]. *Chemosphere*, 2014, 107:121-128.
- [20] Andersson A, Nilsson K O. Influence of lime and soil pH on Cd availability to plants[J]. *Ambio*, 1974, 3(5):198-200.
- [21] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1):78-87.  
WANG Hong, ZHOU Wei, LIN Bao. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of maize under Cd stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1):78-87.
- [22] 周卫, 汪洪, 李春花, 等. 添加碳酸钙对土壤中镉形态转化与玉米叶片镉组分的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(2):219-225.  
ZHOU Wei, WANG Hong, LI Chun-hua, et al. Effects of calcium carbonate addition on transformation of cadmium species in soil and cadmium forms in leaves of maize[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2):219-225.
- [23] 宋正国, 徐明岗, 丁永祯, 等. 共存阳离子(Ca、Zn、K)对土壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):485-489.  
SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, DING Yong-zhen, et al. Effect of coexistence cations (Ca, Zn, K) on cadmium bioavailability in lateritic red soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):485-489.
- [24] Naidu R, Bolan N S, et al. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 45(4):419-429.
- [25] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):1867-1872.  
ZHANG Zhen-xing, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):1867-1872.
- [26] 关静. 长期定位施肥对水稻生长生理特性、产量及品质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2008.  
GUAN Jing. Effects of long-term located fertilization on characteristics of growth and physiology, grain yield and grain quality[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2008.
- [27] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2):543-551.  
ZHANG Guo-rong, LI Ju-mei, XU Ming-gang, et al. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2):543-551.
- [28] 刘晓卡, 李农, 邵宏清, 等. 嘉有黄腐酸对水稻产量和品质的影响[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(5):103-104.  
LIU Xiao-ka, LI Nong, SHAO Hong-qing, et al. Effect of fulvic acid on yield and quality of rice[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(5):103-104.
- [29] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.  
LI Yan-qing. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer [D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [30] 王鹏, 吴云艳. 生物菌肥对丹东地区水稻产量性状和品质的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(2):90-92.  
WANG Peng, WU Yun-yan. Effects of biomass fertilizer on yield and quality of rice in Dandong area[J]. *China Rice*, 2019, 25(2):90-92.