

DOI: 10.11766/trxb201807090296

硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸度的改良作用*

冀建华^{1, 2} 李絮花^{1†} 刘秀梅² 侯红乾² 刘益仁² 王子君² 吕真真²
蓝贤瑾² 陈剑秋³ 黄祥光⁴

(1 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018)

(2 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

(3 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东临沂 276700)

(4 江西省泰和县农业技术推广中心, 江西泰和 343700)

摘要 为明确硅钙钾镁肥阻控土壤酸化的效果和作用, 采用连续 4 a 的硅钙钾镁肥田间定位试验, 以农民习惯施肥处理为对照 (CK), 分析在农民习惯施肥基础上增施 750、1 125、1 500 和 1 875 kg·hm⁻² 硅钙钾镁肥对稻田土壤剖面 pH、电导率 (EC)、交换性酸、交换性盐基离子、酸碱缓冲容量和碱产生量的影响。结果表明: 农民习惯施肥降低了 0~30 cm 土壤 pH, 导致土壤酸化, 酸化率为 2.88 kmol·hm⁻²·a⁻¹; 与之相反, 硅钙钾镁肥能显著提高土壤 pH, 较 CK 处理在 0~15 cm 和 15~30 cm 分别提高了 1.22~1.58 和 0.35~0.64 个 pH 单位, 并产生大量碱, 在 0~30 cm 达到了 9.93~13.82 kmol·hm⁻²·a⁻¹, 其中 0~15 cm 占 80%。与 CK 处理相比, 硅钙钾镁肥能显著增加 0~30 cm 土壤 EC、交换性 Ca²⁺、交换性 Mg²⁺、盐基饱和度及 0~15 cm 交换性 K⁺, 减少 0~30 cm 交换性酸, 特别是交换性 Al³⁺。土壤交换性酸消耗量中硅钙钾镁肥释放的交换性盐基和相应碱贡献了 104.3%, 是交换性酸减少的主要途径。总之, 多次大量施用硅钙钾镁肥在显著提高 0~30 cm 交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 0~15 cm 交换性 K⁺ 含量的同时, 有效改良了表层 (0~15 cm) 和亚表层 (15~30 cm) 稻田土壤酸性, 用量越大, 效果越明显, 释放的 Ca²⁺、Mg²⁺ 盐基离子和碱是土壤酸化阻控的主要作用机制。

关键词 硅钙钾镁肥; 水稻; 土壤改良; 土壤 pH; 土壤交换性盐基

中图分类号 S156.2 文献标识码 A

近年来, 由于过量施用氮肥、农作物永久性移除和酸沉降, 我国稻田土壤在高强度、集约化种植下开始大面积酸化^[1], 而且这种趋势在进一步加速。土壤酸化导致了土壤养分流失加速, 铝、锰和重金属元素活性增加, 进而发生营养元素缺乏和元

素毒害, 影响植物的正常生长, 使稻田生态系统退化, 生物多样性降低, 产量及品质逐渐下降^[2]。

施用石灰是农业生产中最为常见的调节土壤 pH 的措施。研究表明, 施用石灰除了能有效降低土壤酸度之外, 还可显著减轻铝毒和其他重金属的

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200402-4)、江西省重点研发计划项目 (20161BBF60125) 和江西现代农业科研协同创新专项 (JXXTCX2015002-04) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0200402-4), the Key Research and Development Program of Jiangxi Province in China (No. 20161BBF60125) and the Collaborative Innovation of Modern Agriculture Research Program of Jiangxi Province in China (No. JXXTCX2015002-04)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lixh64@163.com

作者简介: 冀建华 (1982—), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事植物营养与施肥、土壤改良技术研究。E-mail: jron_jijianhua@126.com

收稿日期: 2018-07-09; 收到修改稿日期: 2018-11-20; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-12-03

毒害作用, 补充营养元素(如Ca、Mg等), 改良土壤物理结构, 提高团聚体稳定性和导水率, 增加土壤全碳和全氮含量^[3-5], 改善作物生长环境, 提高作物产量和品质^[6]。然而, 长期或大量施用石灰容易引发土壤养分失衡的问题, 甚至对环境造成一些不良影响。Brennan等^[7]研究表明, 施用石灰容易引起土壤缺锌, 导致作物减产。Nilsson等^[8]报道森林生态系统施用石灰会改变土壤有机质的质量, 使碳氮比和碳硫比显著下降; 同时土壤硝化作用增强, NO₃淋失量明显增加。此外, 施用石灰还会大大增加土壤CO₂的排放^[9]。连续多次施用石灰调节土壤酸度, 效果明显降低^[6]。因此, 寻找更加经济、环保、营养元素全面且有效的石灰替代品, 成为当前酸性土壤改良研究的重要课题。

硅钙钾镁肥是磷石膏、钾长石在高温下煅烧而形成的碱性肥料, 含有水稻所需要的硅、钙、镁、磷、钾大中量营养元素, 可有效克服石灰养分单一的不足。研究表明, 硅钙钾镁肥可有效提高水稻产量和稻田耕层土壤pH, 增加耕层土壤盐基离子含量, 降低土壤交换性铝含量^[10-11]。硅钙钾镁肥不仅对稻田土壤有明显的改良效果, 而且对旱地土壤也有同样的效果。粟方亮等^[12]研究表明, 硅钙钾镁肥可提高蜜柚产量, 改善蜜柚品质, 明显提高土壤pH以及有效磷、速效钾、交换性钙和交换性镁含量。王建康等^[13]报道, 硅钙钾镁肥不仅可提高

甘蔗产量、改善品质, 而且还可提高蔗田耕层土壤pH 0.09~0.80个单位。综上可见, 硅钙钾镁肥改良稻田和旱地耕层土壤均表现出明显的效果, 但是对稻田土壤耕层以下酸性特性与分布的影响如何, 仍不明确, 改良南方稻田土壤酸性的机制尚需进一步探索。

鉴于此, 本研究选用硅钙钾镁肥为研究对象, 采用田间定位试验研究方法, 通过分析硅钙钾镁肥不同用量对土壤pH、交换性酸、交换性盐基离子、交换性离子产生/消耗量、酸碱缓冲容量和碱产生量的影响, 明确改良、培肥效果, 探讨作用机制, 以期为南方稻田土壤长期合理施用硅钙钾镁肥、提升土壤质量和促进农业可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验基地位于江西省泰和县禾市镇丰堃村(26° 51' 58.08" N, 114° 43' 25.07" E)。田块面积约为970 m² (68.3 m × 14.2 m), 土壤类型为典型水稻土, 基本理化性质见表1。该地区年平均日照时间1 756 h, 年平均气温18.6 °C, 年平均降水量1 726 mm, 无霜期281 d, 四季分明, 热量丰富, 雨量充沛, 属典型的亚热带湿润季风气候。

表1 试验前供试土壤基本性质(0~20 cm)

Table 1 Basic chemical properties of the test soil before the experiment

pH	EC /($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	TOC /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TN /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效养分		交换性离子								
				Available nutrients		Exchangeable ions								
				/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		/($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)								
				P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	EB	CEC	H ⁺	Al ³⁺	EA
4.70	60.35	23.39	2.33	51.52	57.00	2.13	0.37	0.20	0.09	2.79	5.44	1.17	1.57	2.74

注: EC、TOC、TN、EB、EA、CEC分别为电导率、总有机碳、全氮、交换性盐基总量、交换性酸和阳离子交换量, 下同
Notes: EC, TOC, TN, EB, EA and CEC stands for electrical conductivity, total organic carbon, total nitrogen, exchangeable base cation, exchangeable acid and cation exchange capacity, respectively, and the same below

1.2 试验设计

供试作物: 早稻品种为欣荣优5号; 晚稻品种为五优华占, 基本苗均为2万蔸。供试肥料: 复合肥(N~P₂O₅~K₂O 15%~15%~15%)、尿素(N 46%)、氯化钾(K₂O 60%)和硅钙钾镁肥

(养分含量分别为CaO 27.4%, MgO 9.37%, SiO₂ 26.85%, K₂O 5.74%, P₂O₅ 8.58%, 酸中和量2.2 mol·kg⁻¹, pH 8.7)。

硅钙钾镁肥料定位试验开始于2013年。种植模式: 早稻—晚稻—休闲。试验以农民习惯施肥为

对照 (CK), 在农民习惯施肥基础上每季增施 750 (标记为 CK+T50)、1 125 (标记为 CK+T75)、1 500 (标记为 CK+T100) 和 1 875 (标记为 CK+T125) $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硅钙钾镁肥四个用量水平。每个处理重复 3 次, 随机区组排列, 小区面积 30 m^2 ($10\text{ m}\times 3\text{ m}$), 小区间以 0.45 m 深和 0.5 m 宽的田埂隔开, 田埂用塑料薄膜包裹, 独立排灌。各小区田间管理与农民习惯施肥处理一致。

农民习惯施肥在早稻和晚稻上均施氮 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷 (P_2O_5) $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾 (K_2O) $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中, 移栽前施复合肥 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 分蘖期施复合肥 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 尿素 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 幼穗分化期施复合肥 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。硅钙钾镁肥 4 个用量水平施氮均为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 施磷 (P_2O_5) 分别为 154.4 、 186.5 、 218.7 、 $250.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 施钾 (K_2O) 分别为 133.1 、 154.6 、 176.1 、 $197.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中, 尿素和复合肥的施肥量和施肥时期同农民习惯施肥。硅钙钾镁肥全作基肥, 所有肥料均表面撒施。

1.3 样品采集与分析

采用“S”型取样法采集试验开始前的基础土样和 2016 年晚稻收获后 $0\sim 15$ 、 $15\sim 30$ 、 $30\sim 50$ 和 $50\sim 70\text{ cm}$ 土层土壤样品, 分析土壤阳离子交换量 (CEC)、pH、电导率以及有机质、全氮、有效磷、速效钾、交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 、交换性 K^+ 、交换性 Na^+ 、交换性酸总量、交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 。

土壤阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法测定^[14]; pH 采用 2.5:1 水浸提, 酸度计 (Seven Compact pH 计 S220, Mettler Toledo, 上海) 测定; 电导率采用 5:1 水浸提, 电导率仪 (Orion Star A212, Thermo Scientific, 美国) 测定^[14]; 交换性酸总量 (交换性 H^+ , 交换性 Al^{3+}) 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 交换, 中和滴定法测定^[14]; 交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 、交换性 K^+ 和交换性 Na^+ 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提, 原子吸收分光光度法 (PinAAcle 900, PerkinElmer, 美国) 测定^[14]; 有机质、全氮、有效磷、速效钾采用常规分析方法^[14]。

硅钙钾镁肥的酸中和量采用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ H}_2\text{SO}_4$ 滴定已配制好的硅钙钾镁肥悬液 (固液比=1:5) 至 pH5.0, 然后根据 H_2SO_4 消耗量计算出硅钙钾镁肥的酸中和量^[15]。

土壤酸碱缓冲容量分析方法^[16]: 称取过 2 mm 筛的风干土样 2.5 g 于塑料离心管中, 每个管中准确加入 25 mL 浓度分别为 0 、 0.002 、 0.004 、 0.008 、 0.016 、 0.032 mol L^{-1} 系列 HNO_3 溶液和相同浓度的系列 NaOH 溶液, 然后在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下震荡 24 h , 培养 6 d , 测量前再震荡 30 min 后测定悬液的 pH, 土壤酸碱缓冲容量 (pH buffer capacity, pHBC) 的计算参照 Nelson 和 Sun^[17] 描述的方法。

1.4 数据处理

碱产生量 (Net alkalinity production, NAP)^[18] = $(\text{pH}_T - \text{pH}_{\text{CK}}) \times \text{pHBC}$ (1)

式中, pH_T 和 pH_{CK} 分别代表添加硅钙钾镁肥处理和农民习惯施肥处理的 pH。

酸化率 (Acidification rate, AR)^[19] = $(\Delta\text{pH} \times \text{pHBC} \times \text{BD} \times V) / T$ (2)

式中, ΔpH 为试验开始前与结束后的土壤 pH 变化量; pHBC 为试验结束后的土壤酸碱缓冲容量, $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{pH}^{-1}$; BD 为试验结束后的土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; V 为单位面积下某一深度的土壤体积, $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$; T 为试验时间, a。

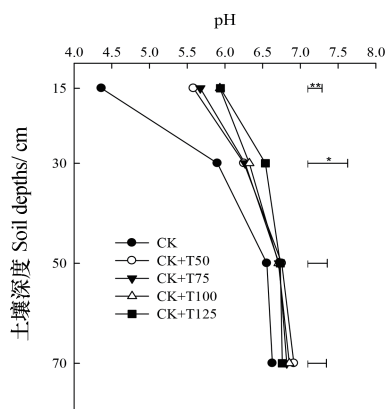
文中所有图表和数据采用 SigmaPlot10 和 Excel 2010 进行绘图和数据整理, 采用 SPSS16.0 进行统计分析。不同处理间土壤属性显著性差异采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和最小显著差异法 ($\text{LSD}_{0.05}$) 多重比较进行检验。

2 结果

2.1 硅钙钾镁肥对土壤 pH 的影响

由图 1 可见, 与 CK 处理相比, CK+T50、CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理对 $0\sim 30\text{ cm}$ 土壤 pH 有明显影响, 对 30 cm 以下影响不明显。其中, $0\sim 15\text{ cm}$ 分别提高了 1.22 、 1.31 、 1.57 和 1.58 个 pH 单位; $15\sim 30\text{ cm}$ 分别提高了 0.35 、 0.37 、 0.42 和 0.64 个 pH 单位。由此可见, 土壤 pH 的提高幅度在 $0\sim 15\text{ cm}$ 明显高于 $15\sim 30\text{ cm}$, 其中, $0\sim 15\text{ cm}$ 达到了施 $1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硅钙钾镁肥提高 0.1 个 pH 单位 ($y=0.10x+4.62$, $R^2=0.85$); $15\sim 30\text{ cm}$ 仅为施 $1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硅钙钾镁肥提高 0.04 个 pH 单位 ($y=0.04x+5.93$, $R^2=0.93$), 并且在 $0\sim 15\text{ cm}$ 和 $15\sim 30\text{ cm}$ 均表现出随硅钙钾镁肥用量增加而显著

增大的趋势。



注: CK表示农民习惯施肥处理, CK+T50、CK+T75、CK+T100和CK+T125分别表示在农民习惯施肥基础上增施750、1 125、1 500和1 875 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 硅钙钾镁肥。图中水平线表示最小显著差异(LSD) ($P < 0.05$), 下同Note: CK stands for traditional fertilization practice of the local farmers and CK+T50, CK+T75, CK+T100 and CK+T125, respectively, for treatment of application of 750, 1 125, 1 500 and 1 875 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ silicon-calcium-potassium-magnesium (SCPM) fertilizer in addition to what the local farmers traditionally apply. Horizontal lines indicate the Least Significant Difference ($P < 0.05$), and the same below

图1 硅钙钾镁肥处理下的土壤剖面pH (土水比为1:2.5)

Fig. 1 Soil pH (ratio of soil to water is 1:2.5) in the soil profile relative to treatment

2.2 硅钙钾镁肥对土壤交换性酸的影响

经过4 a 8季连续定位施肥试验, 各施肥处理的土壤交换性酸发生了明显变化。由图2可见, 与

CK处理相比, CK+T50、CK+T75、CK+T100和CK+T125处理的土壤交换性酸总量在0~30 cm显著降低, 30 cm以下无明显变化, 其中0~15 cm分别降低了75.02%、78.95%、80.57%和84.02%; 15~30 cm分别降低了32.31%、47.69%、49.74%和51.28%。可见, 硅钙钾镁肥用量越高, 土壤交换性酸总量的降低幅度相对越大, 并且降低量在0~15 cm明显高于15~30 cm。

土壤交换性酸总量是由交换性 H^+ 和交换性 Al^{3+} 组成。由图2可见, 施肥处理对0~30 cm土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 有明显影响, 其中, CK处理的土壤交换性酸(H^+ 和 Al^{3+})最高, 土壤交换性 Al^{3+} 占交换性酸总量的比例也相应最高, 在0~15 cm和15~30 cm分别达到了77.51%和44.62%; CK+T50和CK+T75其次, 土壤交换性 Al^{3+} 占交换性酸总量的比例在0~15 cm分别为57.57%和54.55%, 在15~30 cm分别为23.49%和0%; CK+T100和CK+T125处理的土壤交换性酸相对最低, 土壤交换性 Al^{3+} 占交换性酸总量的比例也相应最小, 在0~15 cm分别为48.77%和48.5%, 在15~30 cm几乎为零。由此说明, 硅钙钾镁肥处理较农民习惯施肥处理不仅显著降低了土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} , 而且也降低了土壤交换性 Al^{3+} 占交换性酸的比例, 用量越高, 降低的幅度相对越大。研究表明, 土壤交换性 H^+ 和 Al^{3+} 对交换性酸的贡献大小与土壤酸化程度有关, 酸化程度越严重, 交换性 Al^{3+} 所占比例越高^[20]。这与本研究结果基本一致。

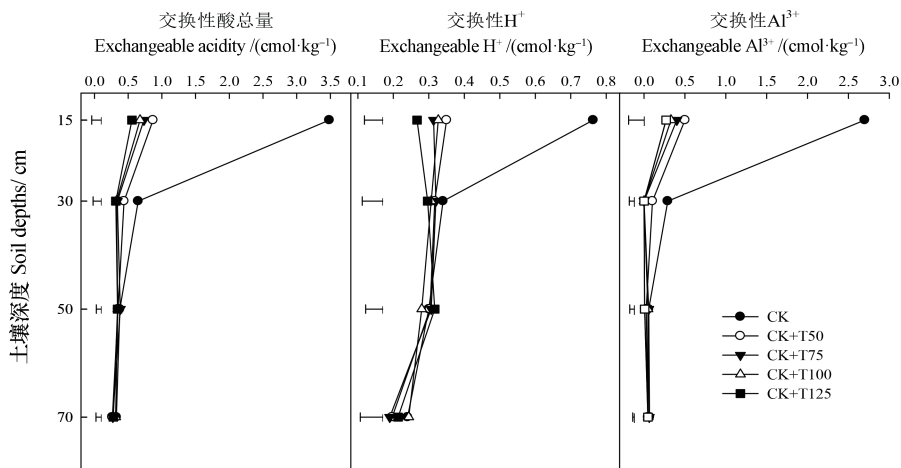


图2 硅钙钾镁肥处理下的土壤剖面交换性酸

Fig. 2 Exchangeable acid in the soil profile relative to treatment

2.3 硅钙钾镁肥对土壤电导率的影响

土壤浸出液的电导率 (EC) 能反映土壤可溶性盐含量, 可指示土壤水溶性离子浓度^[14]。于晚稻收获后测定 0~70 cm 土壤电导率, 结果如图 3, 硅钙钾镁肥处理的 EC 较 CK 处理在 0~30 cm 均有所提高, 其中, CK+T100 和 CK+T125 处理的提高幅度最大, 均达到了显著性差异水平; CK+T75 处理次之, CK+T50 处理的提高幅度相对最小, 差异不显著。由此可见, 连续 4 a 8 季施用硅钙钾镁肥, 每季用量在 1 500 kg·hm⁻² 以上可有效提高 0~30 cm 土壤溶液中离子浓度。土壤水溶性离子浓度的增加可能会补充土壤交换性盐基离子, 增加土壤交换性盐基总量。

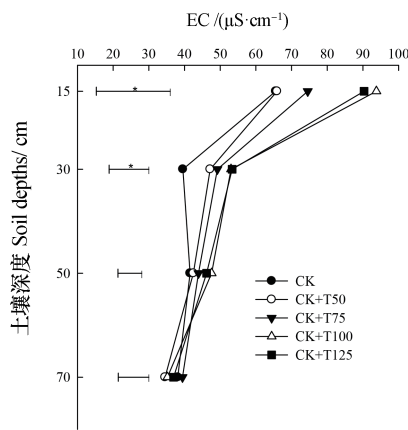


图3 硅钙钾镁肥处理下的土壤剖面电导率 (土水比为 1 : 5)

Fig. 3 Electrical conductivity (ratio of soil to water is 1 : 5) in the soil profile relative to treatment

2.4 硅钙钾镁肥对土壤交换性盐基离子的影响

与土壤电导率提高相对应, CK+T50、CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理的土壤交换性盐基总量较 CK 处理在 0~30 cm 均有所增加 (表 2)。其中, 增幅在 0~15 cm 分别为 110.6%、119.8%、133.6% 和 136.8%, 各处理均达到了显著性差异水平; 在 15~30 cm 分别为 5.39%、10.73%、11.68% 和 12.98%, 仅 CK+T125 处理差异显著。可见, 土壤交换性盐基总量的增加主要集中在 0~15 cm 土层, 并且随硅钙钾镁肥用量的增加而明显增大。由于土壤交换性盐基总量的增加, CK+T50、CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理的盐基饱和度较 CK 处理在 0~30 cm 也相应显著增大, 增幅大小顺序为:

CK+T125>CK+T100>CK+T75>CK+T50, 0~15 cm 明显高于 15~30 cm。可见, 硅钙钾镁肥对土壤盐基饱和度的影响与交换性盐基总量相似, 硅钙钾镁肥用量越大, 土壤盐基饱和度相对越高, 且对 0~15 cm 影响最大, 15~30 cm 其次, 30 cm 以下影响最小。

土壤交换性盐基总量是由交换性 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 和 K⁺ 四种离子构成。由表 2 可知, 与 CK 处理相比, CK+T50、CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理的土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 在 0~15 cm 均有所增加, 其中, 土壤交换性 Ca²⁺ 的增加量相对最大, 分别为 1.78、1.96、2.20、2.20 cmol·kg⁻¹; 土壤交换性 Mg²⁺ 次之, 分别为 0.87、0.92、1.00、1.07 cmol·kg⁻¹, 各处理差异均显著; 土壤交换性 K⁺ 的增加量相对最小, 分别为 0.02、0.03、0.04 和 0.06 cmol·kg⁻¹, 仅 CK+T100 和 CK+T125 处理达到了显著性差异水平。CK+T50、CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理的土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 较 CK 处理在 15~30 cm 同样表现出增加趋势, 其中 CK+T125 处理达到了显著性差异水平; 土壤交换性 K⁺ 较 CK 处理在 15~30 cm 差异不显著。由此说明, 土壤交换性 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 K⁺ 含量的增加量主要集中在 0~15 cm, 并且随硅钙钾镁肥施用量的增加而显著增大, 多次大量施硅钙钾镁肥有利于 Ca²⁺、Mg²⁺ 向 15 cm 以下土层移动, 对 K⁺ 几乎无明显影响。

2.5 硅钙钾镁肥对土壤阳离子交换量和土壤酸碱缓冲容量的影响

CK+T50、CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理的土壤阳离子交换量 (CEC) 在 0~50 cm 土层略高于 CK 处理 (表 2), 但差异均不显著。研究表明, 长期施石灰可以提高土壤 CEC^[20-22], 归因于土壤有机质含量增加和石灰用量大。Houle 等^[21] 及 Moore 等^[22] 研究发现石灰用量在 5 t·hm⁻² 才有明显效果。本研究中土壤 CEC 表现出增加趋势, 但不显著, 可能与施用量较少和施用时间较短有关。

土壤 pH 是评价土壤酸化的强度指标, 土壤酸碱缓冲容量 (pHBC) 是土壤 pH 改变一个单位情况下所添加酸或碱的当量, 是容量指标^[17,19]。由表 3 可知, 与 CK 处理相比, CK+T75、CK+T100 和 CK+T125 处理的 pHBC 在 0~15 cm 均有所增加, 其中, CK+T100 和 CK+T125 处理达到了显著性差异

表2 硅钙钾镁肥处理下土壤剖面交换性盐基离子

Table 2 Exchangeable base cation, CEC and base saturation in the soil profile relative to treatment

土层 Soil layers	处理 Treatments	交换性Ca ²⁺ Exchangeable Ca ²⁺ (cmol·kg ⁻¹)	交换性Mg ²⁺ Exchangeable Mg ²⁺ (cmol·kg ⁻¹)	交换性K ⁺ Exchangeable K ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	交换性Na ⁺ Exchangeable Na ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	交换性盐基总量 Exchangeable base cations (cmol·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC (cmol·kg ⁻¹)	盐基饱和度Base saturation/%
0 ~ 15 cm	CK	1.92 ± 0.31b	0.27 ± 0.08c	0.11 ± 0.00c	0.11 ± 0.01a	2.41 ± 0.39b	5.90 ± 0.30a	40.77 ± 4.68c
	CK+T50	3.70 ± 0.43a	1.14 ± 0.06b	0.13 ± 0.02bc	0.11 ± 0.02a	5.08 ± 0.49a	5.95 ± 0.43a	85.29 ± 2.09b
	CK+T75	3.89 ± 0.44a	1.19 ± 0.11ab	0.14 ± 0.01abc	0.09 ± 0.03a	5.31 ± 0.55a	6.04 ± 0.54a	87.79 ± 1.80ab
	CK+T100	4.13 ± 0.46a	1.26 ± 0.03ab	0.15 ± 0.02ab	0.10 ± 0.02a	5.64 ± 0.46a	6.32 ± 0.41a	89.22 ± 1.77ab
	CK+T125	4.12 ± 0.26a	1.34 ± 0.14a	0.17 ± 0.01a	0.09 ± 0.03a	5.72 ± 0.42a	6.27 ± 0.38a	91.08 ± 1.13a
15 ~ 30 cm	CK	4.27 ± 0.23b	0.83 ± 0.06b	0.06 ± 0.01a	0.13 ± 0.01a	5.30 ± 0.28b	5.95 ± 0.31a	89.06 ± 0.75c
	CK+T50	4.48 ± 0.32ab	0.95 ± 0.11ab	0.06 ± 0.01a	0.09 ± 0.02a	5.58 ± 0.41ab	6.02 ± 0.30a	92.63 ± 2.20b
	CK+T75	4.69 ± 0.30ab	1.02 ± 0.10ab	0.06 ± 0.01a	0.10 ± 0.02a	5.87 ± 0.22ab	6.21 ± 0.26a	94.54 ± 0.90ab
	CK+T100	4.73 ± 0.23ab	1.03 ± 0.14ab	0.07 ± 0.00a	0.08 ± 0.02a	5.92 ± 0.33ab	6.24 ± 0.32a	94.76 ± 0.59ab
	CK+T125	4.75 ± 0.05a	1.07 ± 0.09a	0.07 ± 0.01a	0.10 ± 0.02a	5.98 ± 0.11a	6.30 ± 0.11a	94.97 ± 0.44a
30 ~ 50 cm	CK	5.88 ± 0.47a	1.30 ± 0.06a	0.07 ± 0.00a	0.06 ± 0.02a	7.31 ± 0.42a	7.69 ± 0.44a	95.10 ± 0.02a
	CK+T50	6.03 ± 0.45a	1.24 ± 0.11a	0.08 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	7.41 ± 0.37a	7.76 ± 0.35a	95.47 ± 0.55a
	CK+T75	6.10 ± 0.25a	1.28 ± 0.06a	0.07 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	7.52 ± 0.31a	7.90 ± 0.31a	95.14 ± 0.40a
	CK+T100	6.15 ± 0.41a	1.28 ± 0.05a	0.08 ± 0.01a	0.06 ± 0.00a	7.57 ± 0.45a	7.91 ± 0.50a	95.63 ± 0.55a
	CK+T125	6.23 ± 0.19a	1.37 ± 0.05a	0.08 ± 0.00a	0.07 ± 0.01a	7.75 ± 0.23a	8.09 ± 0.27a	95.76 ± 0.37a
50 ~ 70 cm	CK	6.81 ± 0.28a	1.54 ± 0.06a	0.08 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	8.49 ± 0.33a	8.82 ± 0.36a	96.30 ± 0.44a
	CK+T50	7.07 ± 0.51a	1.48 ± 0.09a	0.09 ± 0.01a	0.06 ± 0.00a	8.70 ± 0.56a	8.97 ± 0.54a	97.01 ± 0.47a
	CK+T75	6.98 ± 0.59a	1.54 ± 0.10a	0.08 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	8.65 ± 0.67a	8.93 ± 0.63a	96.91 ± 0.69a
	CK+T100	6.90 ± 0.60a	1.50 ± 0.06a	0.07 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	8.53 ± 0.65a	8.84 ± 0.66a	96.45 ± 0.14a
	CK+T125	6.84 ± 0.20a	1.61 ± 0.03a	0.07 ± 0.00a	0.06 ± 0.00a	8.59 ± 0.22a	8.87 ± 0.23a	96.84 ± 0.20a

注：表中数据为平均值 ± 标准差，同列不同字母表示差异显著 (P<0.05)。下同 Note: the data in the table are of mean ± standard deviation. The different letters in the same column mean significant difference (P<0.05). The same below

水平, 增幅分别为34.85%和48.51%。15~30 cm 同样表现出增加趋势, 但差异不显著。由此说明, 硅钙钾镁肥在双季稻上每季用量为1 500和1 875 kg·hm⁻², 且连续施用8季, 可有效提高表层土壤酸碱缓冲容量。

对于酸性土壤且同一种土壤质地而言, 土壤pHBC的变化主要受土壤有机质和CEC的影响^[17]。相关研究表明, 土壤CEC与pHBC之间呈显著正相关, 土壤CEC越高, 土壤酸碱缓冲性能越大^[17]。本研究采用线性回归方程对土壤CEC与pHBC之间关系进行分析后发现, 硅钙钾镁肥连续施用8季后, 0~15 cm土壤CEC与pHBC呈显著线性正相关关系($y=0.037x+5.19$, $R^2=0.87$, $P=0.02$), 这与前人研究结果基本一致。说明硅钙钾镁肥导致的土壤酸碱缓冲容量变化主要归因于土

壤阳离子交换量的增加。

2.6 硅钙钾镁肥对土壤碱产生量的影响

酸化率(AR)和碱产生量是土壤pH变化量与土壤酸碱缓冲容量的函数。由表3可见, 在双季稻上经过4 a 8季连续施肥后, CK处理的土壤pH由试验前的4.7降低到了4.36, 下降了约0.34个单位, 导致0~30 cm土壤明显酸化, 土壤酸化率即每年质子产生量达到了2.86 kmol·hm⁻²·a⁻¹。与之相反, 在农民习惯施肥基础上增施一定量硅钙钾镁肥能有效阻止该酸化进程, 显著增加0~30 cm土壤碱量。CK+T50、CK+T75、CK+T100和CK+T125处理的碱产生量在0~30 cm分别达到了9.69、10.53、16.2和18.44 kmol·hm⁻²·a⁻¹, 其中, 0~15 cm土层所占比例达80%以上。可见, 土壤碱产生量随硅钙钾镁肥用量的增加而明显增大, 并且主要集中在0~15 cm土层。

表3 土壤酸碱缓冲容量与碱产生量

Table 3 pH buffer capacity(pHBC) and net alkalinity production

土层 Soil layers	处理 Treatments	土壤pH Soil pH	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	土壤酸碱缓冲容量 pHBC /(mmol·kg ⁻¹ ·pH ⁻¹)	酸化率 Acidification rate / (kmol·hm ⁻² ·a ⁻¹)	碱产生量Net alkalinity production /(kmol·hm ⁻² ·a ⁻¹)
0~15 cm	CK	4.36c	0.89a	21.11b	2.42c	—
	CK+T50	5.58b	0.86a	20.98b	-6.00b	8.29b
	CK+T75	5.67b	0.84a	21.80b	-6.73b	9.01b
	CK+T100	5.93a	0.86a	28.47a	-11.42a	14.50a
	CK+T125	5.94a	0.85a	31.35a	-12.40a	15.75a
15~30 cm	CK	5.90b	1.09a	10.10a	0.44c	—
	CK+T50	6.25ab	1.09a	10.14a	-1.00a	1.40b
	CK+T75	6.27ab	1.06a	10.33a	-1.12a	1.52b
	CK+T100	6.32ab	1.09a	10.34a	-1.29a	1.70b
	CK+T125	6.54a	1.07a	10.42a	-2.26a	2.69a

2.7 交换性盐基离子释放与交换性酸消耗之间的关系

硅钙钾镁肥处理的交换性盐基离子释放量为CK+T50、CK+T75、CK+T100和CK+T125处理的交换性盐基离子含量与CK处理相减而得; 同理, 硅钙钾镁肥处理的土壤交换性酸消耗量是CK处理的土壤交换性酸含量与CK+T50、CK+T75、CK+T100和CK+T125处理间的差值。由图4可见, 硅钙钾镁肥在土壤中释放的交换性盐基离子总量与土壤交换性酸消耗量有良好的线性关系, 线性回归方程为 $y=1.043x+0.145$ 。由此说明, 土壤交换性酸

消耗量中硅钙钾镁肥释放在土壤中的交换性盐基离子和相应碱贡献了104.3%, 换言之, 土壤交换性酸的减少主要由硅钙钾镁肥释放的盐基离子和相应碱所消耗。

3 讨论

3.1 硅钙钾镁肥对稻田土壤酸度的影响

本研究结果表明, 农民习惯施肥处理在每季水稻施氮量为360 kg·hm⁻², 连续施用8季后土壤pH由试验前的4.7降低到了4.36, 下降了约0.34个

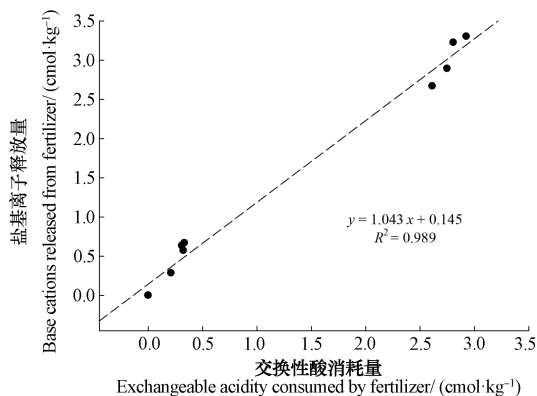


图4 土壤交换性酸消耗量与盐基离子释放量之间的关系
Fig. 4 Relationship between exchangeable acid consumption and release of base cations from SCPM in the soil

单位, 导致0~30 cm土壤明显酸化, 酸化率即质子产生量达到了 $2.86 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。Cai等^[19]报道南方红壤旱地施氮量为 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时, 产生 $3.2\sim 3.9 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 质子。Noble等^[23]研究表明, 在甘巴草(Gamba grass)上每年施铵态氮肥 $287 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产生 $16.6 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 质子, 施同样量的硝态氮肥仅产生 $5.6 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 质子。与这些研究相比, 本研究结果相对较低, 这是因为稻田淹水厌氧条件下硝化作用相对较弱, 硝酸盐向耕层以下淋洗量相对较少, 质子产生量主要以水稻永久性移除为主。相反, 在旱地好氧条件下将有大量硝酸盐产生并随土壤溶液向下淋溶, 从而产生大量的质子。在农民习惯施肥基础上增施一定量硅钙钾镁肥可以有效阻止土壤酸化进程, CK+T50、CK+T75、CK+T100和CK+T125处理的碱产生量分别达到了 9.69 、 10.53 、 16.2 和 $18.44 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。Lesturgez等^[24]报道石灰施用量为 $1.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 豇豆—玉米轮作和裸地休闲两种种植模式下碱产生量分别为 5.95 和 $7.25 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。与之相比, 本研究的碱产生量相对较高。究其原因, (1) 稻田生态系统中质子产生量较早地相对较少, 中和质子后残留的碱相对较多; (2) 硅钙钾镁肥碱度较石灰相对较低, 但盐基离子含量相对较高。硅钙钾镁肥的碱度为 $2.2 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 每年施入稻田土壤的碱量分别为 3.30 、 4.95 、 6.60 、 $8.25 \text{ kmol}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而实际硅钙钾镁肥在稻田土壤产生的碱量远高于施入的碱量, 这是因为硅钙钾镁肥主要由38%的硅酸钙

镁、20%氟磷灰石、20%钾石膏和17%白云石等矿物组成, 所测定的酸中和量仅为酸可以中和的那一部分碱性物质, 对于硅钙钾镁肥而言, 仅有17%白云石和部分硅酸钙镁可被酸有效中和, 所以酸中和量仅能反映硅钙钾镁肥中一部分碱度, 对钾石膏和氟磷灰石的碱度基本无法反映。而实际上, 钾石膏和氟磷灰石进入稻田土壤后同样产生大量碱, 并且起主要作用。

盐基养分对维持水稻健康生长至关重要。相关研究^[10-13]表明, 硅钙钾镁肥在提高土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 和有效硅含量等方面表现出良好的效果, 但是作为土壤改良剂, 用量多少才可有效改良耕层以下土壤酸性, 仍未明确。Goulding^[6]研究表明, 对于初始pH为5.0~6.2的土壤, 石灰推荐量在不同质地上为 $3\sim 14 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。Long等^[25]发现一次施用石灰岩 $22.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 土壤pH、交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的增加能到达 $35\sim 45 \text{ cm}$ 。石灰施用后对耕层以下土壤的改良效果与用量和施用次数有关^[26]。本研究结果显示, 在南方双季稻地区, 硅钙钾镁肥用量每季在 $1\ 500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 且连续施用8季可显著改良亚表层(15~30 cm)土壤酸性, 同时有效补充耕层和亚表层土壤盐基养分。

3.2 硅钙钾镁肥对稻田土壤酸度改良作用机制探讨

目前常用的酸化土壤改良材料主要有石灰、硅酸盐、碳酸盐、白云石粉或白云石灰岩、碱渣和石膏等物质。研究表明, 石灰施入土壤后水解产生 OH^{-} 和 HCO_3^{-} , 能有效中和土壤 H^{+} , 显著提高土壤pH^[27]。当大量或长期多次施石灰于表层土壤后, HCO_3^{-} 伴随着 Ca^{2+} 将由表层土壤移动至亚表层土壤, 从而提高亚表层土壤盐基离子含量和pH^[25]。石膏或碱渣中含有大量的 SO_4^{2-} , 由于这些 SO_4^{2-} 带负电荷, 容易向表层土壤以下淋溶, 在此过程中 SO_4^{2-} 与土壤表面的 OH^{-} 发生配位交换反应, 生成大量 OH^{-} 而提高表层和亚表层土壤的pH, 同时, SO_4^{2-} 携带的盐基离子可与表层和亚表层土壤的交换性酸进行交换反应, 降低土壤交换性酸含量^[27]。硅酸盐具有较高的可溶性, 进入土壤后由于 SiO_3^{2-} 水解产生 OH^{-} , 同样可提高土壤pH。此外, 硅酸盐具有较强的可移动性, 在多次大量施用下同样可携带盐基离子由表层移动至亚表层, 提高亚表层盐基离子含量和土壤pH^[28]。与石灰

相比, 硅酸盐在提高pH、交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和作物产量以及减少交换性 Al^{3+} 方面的效果相对更好^[29], 并且随硅酸盐用量的增加, 土壤pH、交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 及盐基饱和度显著增加, 交换性酸和交换性 Al^{3+} 显著降低^[30]。另外一类改良材料是白云石粉或白云石灰岩, 主要成分是 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 。白云石灰岩一次性施入土壤后交换性 Al^{3+} 逐年降低, 交换性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 逐年升高^[25], 并且随白云石粉用量的增加, 土壤pH、交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和盐基饱和度呈线性或二次方增加, 交换性酸呈二次方降低^[21-22], 在白云石粉基础上配施石膏, 效果相对更显著^[31]。

本研究结果表明, 农民习惯施肥导致土壤pH、交换性盐基和盐基饱和度显著降低, 土壤交换性酸和交换性 Al^{3+} 大幅增加, 这是因为在无盐基补充的情况下, 每年永久性生物量移除和氮肥用量过多导致的结果^[1]。硅钙钾镁肥由于含有硅、钙、镁、磷、钾等营养元素, 可有效补充损失的部分。本研究结果显示, 在双季稻区连续4 a 8季施硅钙钾镁肥, 稻田0~30 cm土壤pH、交换性盐基和盐基饱和度随用量的增加而显著提高, 土壤交换性酸, 特别是土壤交换性 Al^{3+} 随用量的增加而显著降低。本研究结果与上述前人的结论基本一致。本研究中选用的硅钙钾镁肥, 主要由氟磷灰石($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$)、钾石膏($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)和硅酸钙镁($\text{Ca}_2\text{Mg}_3\text{H}_2(\text{SiO}_3)_8$)等矿物组成。这些成分携带盐基离子与土壤交换性酸进行交换反应, 增加土壤交换性盐基总量, 降低土壤交换性酸, 其中, 钾石膏含有 SO_4^{2-} 和硅酸钙镁含有的 SiO_3^{2-} 作为稳定的阴离子在多次大量施用条件下, 可携带盐基离子向下淋溶至15~30 cm, 甚至30~50 cm, 从而提高亚表层土壤盐基离子总量和盐基饱和度, 降低亚表层土壤交换性酸, 有效改良亚表层土壤酸性。这些阴离子在表层或亚表层同样可发生水解或专性吸附, 有效中和土壤中的 H^+ 和 Al^{3+} , 提高土壤pH, 此外, 硅钙钾镁肥中硅酸盐具有很强的移动性, 可与表层和亚表层土壤 Al^{3+} 发生反应, 生成羟基铝硅酸盐沉淀, 降低 Al^{3+} 活性^[29]。

Shi等^[32]通过室内酸化模拟试验研究表明:

生物质炭的盐基离子释放占质子消耗的67%, 是土壤酸碱缓冲容量增加的主要作用机制, 可溶性硅与质子发生反应占质子消耗的20%。本研究发现, 土壤交换性酸消耗量中硅钙钾镁肥释放于土壤中的交换性盐基离子和相应碱贡献了104.3%, 是土壤交换性酸减少的主要作用机制, 其他物质如可溶性硅等未直接参与交换性酸的消耗。这与前人研究结果有所差异, 究其原因本研究是在田间试验条件下进行的, 考察了土壤交换性 Al^{3+} 和 H^+ 与盐基离子的交换作用, 更符合实际情况; 而前人是在室内模拟条件下进行的, 仅仅分析了溶液中质子的中和反应及交换作用, 与实际情况相差甚远, 因此与田间试验结果有所差异。

综上所述, 当硅钙钾镁肥连续多次施入稻田土壤表面后, 一方面, 释放大量的盐基离子与表层土壤交换性酸进行交换反应; 另一方面, SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 SiO_3^{2-} 等阴离子携带 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 向下移动, 与表层以下土壤交换性酸进行交换反应, 同时 SO_4^{2-} 的专性吸附和 CO_3^{2-} 、 SiO_3^{2-} 水解生产的 OH^- 有效中和了交换下来的 H^+ 和 Al^{3+} 。最终保证了硅钙钾镁肥碱度的有效释放, 土壤pH大幅提高。

4 结 论

硅钙钾镁肥的合理施用对改善农田养分管理、提高尾矿治理水平和促进农业可持续发展具有积极意义。连续4 a不同用量硅钙钾镁肥田间定位试验结果表明: (1) 农民习惯施肥降低了土壤pH、交换性盐基离子含量, 增加了土壤交换性酸, 导致土壤酸化, 酸化率达到了 $2.88 \text{ kmol} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; (2) 硅钙钾镁肥显著增加了表层(0~15 cm)土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和盐基饱和度, 用量越高, 增加量越大, 并且 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐基离子向下移动的量相对越多, 用量在 $1875 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时显著提高了亚表层(15~30 cm)土壤交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ; 同时减少了表层和亚表层土壤交换性酸, 特别是土壤交换性 Al^{3+} 。硅钙钾镁肥释放的盐基离子和碱是交换性酸减少的主要途径; (3) 硅钙钾镁肥能提高南方稻田表层和亚表层土壤pH和酸碱缓冲容量, 有效改良土壤酸性, 并产生大量碱, 在0~30 cm达到了 $9.93 \sim 13.82 \text{ kmol} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 在本研究范围内用量越大, 效果越明显。

参 考 文 献

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y J, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327 (19) : 1008—1010
- [2] 何园球, 孙波, 蔡崇法, 等. 红壤质量演变与调控. 北京: 科学出版社, 2008: 132—140
He Y Q, Sun B, Cai C F, et al. Evolvement and regulation of red soil quality (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 132—140
- [3] 易琼, 杨少海, 黄巧义, 等. 改良剂对反酸田土壤性质与水稻产量的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (1) : 176—183
Yi Q, Yang S H, Huang Q Y, et al. Effect of soil ameliorants on soil properties and rice yield of acid sulfate paddy field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1) : 176—183
- [4] Kirkham J M, Rowe B A, Doyle R B. Persistent improvements in the structure and hydraulic conductivity of a Ferrosol due to liming. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45 (3) : 218—223
- [5] Bennett J M, Greene R S B, Murphy B W, et al. Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of a red Sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales. *Soil Research*, 2014, 52 (2) : 120—128
- [6] Goulding K W T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. *Soil Use and Management*, 2016, 32: 390—399
- [7] Brennan R F, Bolland M D A, Bell R W. Increased risk of zinc deficiency in wheat on soils limed to correct soil acidity. *Australian Journal of Soil Research*, 2005, 43 (5) : 647—657
- [8] Nilsson S I, Andersson S, Valeur I, et al. Influence of dolomite lime on leaching and storage of C, N and S in a Spodosol under Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management*, 2001, 146 (1) : 55—73
- [9] West T O, Mcbride A C. The contribution of agricultural lime to carbon dioxide emissions in the United States: Dissolution, transport, and net emissions. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 108 (2) : 145—154
- [10] 李敏, 叶舒娅, 刘枫, 等. 硅钙镁磷钾肥不同用量对超级稻产量及磷钾吸收利用的影响. *中国农学通报*, 2014, 30 (30) : 122—126
Li M, Ye S Y, Liu F, et al. The effects of silicon, calcium, magnesium, phosphorus and potassium fertilization level on yield and phosphorus and potassium absorption of super rice (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30 (30) : 122—126
- [11] 韩科峰, 陈余平, 胡铁军, 等. 硅钙钾镁肥对浙江省酸性水稻土壤的改良效果. *浙江农业学报*, 2018, 30 (1) : 117—122
Han K F, Chen Y P, Hu T J, et al. Effects of silicon, calcium, potassium and magnesium fertilizer on acid paddy soil improvement in Zhejiang Province (In Chinese). *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30 (1) : 117—122
- [12] 栗方亮, 张青, 王焯平, 等. 土壤调理剂对蜜柚产量、品质及土壤性状的影响. *中国农学通报*, 2018, 34 (6) : 39—44
Li F L, Zhang Q, Wang H P, et al. Effects of soil amendments on yield, quality of honey pomelo and soil properties (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34 (6) : 39—44
- [13] 王建康, 李小玲, 陈海宁, 等. 硅钙钾镁肥对甘蔗产量品质及经济效益的影响. *甘蔗糖业*, 2016 (4) : 42—45
Wang J K, Li X L, Chen H N, et al. Effects of silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer on yield, quality and economic benefit of chewing cane (In Chinese). *Sugarcane and Canesugar*, 2016 (4) : 42—45
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56—271
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 56—271
- [15] Wong M T F, Nortcliff S, Swift R S. Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29 (19/20) : 2927—2937
- [16] Luo W T, Nelson P N, Li M H, et al. Contrasting pH buffering patterns in neutral-alkaline soils along a 3600 km transect in northern China. *Biogeosciences*, 2015, 12 (16) : 7047—7056
- [17] Nelson P N, Su N. Soil pH buffering capacity: A descriptive function and its application to some acidic tropical soils. *Soil Research*, 2010, 48 (3) : 201—207
- [18] Butterly C R, Baldock J A, Tang C. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. *Plant and Soil*, 2013, 366 (1/2) : 185—198

- [19] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 (2) : 260—270
- [20] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (1) : 203—212
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, et al. Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (1) : 203—212
- [21] Houle D, Duchesne L, Moore J D, et al. Soil and tree-ring chemistry response to liming in a sugar maple stand. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31 (6) : 1993—2000
- [22] Moore J D, Duchesne L, Ouimet R. Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (8/9) : 3460—3468
- [23] Noble A D, Suzuki S, Soda W, et al. Soil acidification and carbon storage in fertilized pastures of Northeast Thailand. *Geoderma*, 2008, 144 (1/2) : 248—255
- [24] Lesturgez G, Poss R, Noble A, et al. Soil acidification without pH drop under intensive cropping systems in Northeast Thailand. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 114: 239—248
- [25] Long R P, Bailey S W, Horsley S B, et al. Long-term effects of forest liming on soil, soil leachate, and foliage chemistry in Northern Pennsylvania. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79 (4) : 1223—1236
- [26] Rheinheimer D S, Tiecher T, Gonzatto R, et al. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. *Geoderma*, 2018, 313: 7—16
- [27] Li J Y, Masud M M, Li Zh Y, et al. Amelioration of an Ultisol profile acidity using crop straws combined with alkaline slag. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22 (13) : 1—11
- [28] Crusciol C A C, Foltran R, Rossato O B, et al. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 2014, 38 (5) : 1843—1854
- [29] Castro G S A, Crusciol C A C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma*, 2013, 195 (1) : 234—242
- [30] Sarto M V M, Lana M D C, Rampim L, et al. Effects of silicate application on soil fertility and wheat yield. *Semina Ciencias Agrarias*, 2015, 36 (6) : 4071—4082
- [31] Soratto R P, Crusciol C A C. Dolomite and phosphogypsum surface application effects on annual crops nutrition and yield. *Agronomy Journal*, 2008, 100 (2) : 261—270
- [32] Shi R Y, Hong Z N, Li J Y, et al. Mechanisms for increasing the pH buffering capacity of an acidic Ultisol by crop residue-derived biochars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65 (37) : 8111—8119

Effect of Si-Ca-K-Mg Fertilizer Remediating Acid Paddy Soil in South China

JI Jianhua^{1,2} LI Xuhua^{1†} LIU Xiumei² HOU Hongqian² LIU Yiren² WANG Zijun² LÜ Zhenzhen²
LAN Xianjin² CHEN Jianqiu³ HUANG Xiangguang⁴

(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources; College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

(2 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement; Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

(3 State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization; Kingenta Ecological Engineering Group Co. Ltd., Linyi, Shandong 276700, China)

(4 Extension Centre of Agricultural Techniques of Taihe County in Jiangxi Province, Taihe, Jiangxi 343700, China)

Abstract 【 Objective 】 In recent years, due to aggravating acid deposition and highly intensive

agricultural production, involving steadily growing chemical fertilizer application rate, permanent nutrient removal with harvested crops, etc., soil acidification of farmlands is speeding up. Soil acidification of large areas of paddy fields in South China has become an important problem in rice production. Therefore how to ameliorate or remedy the acidifying paddy soil and to exposit its mechanism has become a subject of important theoretical and practical significance to rebuilding healthy soils and guaranteeing food security of the nation. Although lime has already been extensively used as soil amendment to remedy acidified soils, Long-term application of a large amount of lime would not only cause the soil to harden, but also disturb the balance between calcium, potassium and magnesium in the soil. Silicon-calcium-potassium-magnesium (SCPM) fertilizer may be used as an alternative due to its lower solubility and comprehensive nutrient supply. The purpose of this study is to make clear functions of SCPM and its effects on soil acidification in paddy fields. 【 Method 】 A four-year stationary field experiment was conducted to investigate effects of SCPM on soil pH, electrical conductivity (EC), exchangeable acidity, exchangeable base cation, pH buffer capacity (pHBC) and net base production in the paddy soil. The experiment was designed to have five treatments, i.e. CK (Traditional fertilization practice of the local farmers): Treatment I (CK plus 750 kg·hm⁻² SCPM); Treatment II (CK plus 1 125 kg·hm⁻² SCPM); Treatment III (CK plus 1 500 kg·hm⁻² SCPM); and Treatment IV (CK plus 1 875 kg·hm⁻² SCPM), for comparison. 【 Result 】 Results show that CK lowered soil pH in the soil layers (0 ~ 30 cm), causing soil acidification at a rate of 2.88 kmol·hm⁻²·a⁻¹, while the SCPM treatments raised soil pH by 1.22 ~ 1.58 and 0.35 ~ 0.64 units in the topsoil (0 ~ 15 cm) and the subsoil (15 ~ 30 cm), respectively, and produced alkali in the two soil layers, as much as 9.93 ~ 13.82 kmol·hm⁻²·a⁻¹, of which 80% was in the topsoil. Compared to CK, SCPM treatments significantly increased soil EC, exchangeable Ca²⁺, exchangeable Mg²⁺ and base saturation in the two soil layers, and soil exchangeable K⁺ in the topsoil layer, and decreased soil exchangeable acid in the two soil layers, particularly soil exchangeable Al³⁺. In the SCPM treatments, the effects became more significant with rising SCPM, especially in the topsoil layer. The exchangeable base cations and alkali released by SCPM contributed 104.3% to the total reduction of soil exchangeable acid, which suggests that it is the main path to reduction of soil exchangeable acid. In Treatments III and IV, pHBC was significantly increased or by 34.85% and 48.51%, respectively, as compared with CK, which was mainly attributed to the increase in soil cation exchange capacity. 【 Conclusion 】 In a word, SCPM can not only effectively lower soil acidity in the top- and sub-soil layers of paddy fields, but also greatly increase soil exchangeable Ca²⁺ and exchangeable Mg²⁺ in the two layers, and soil exchangeable K⁺ in the topsoil layer. The higher the SCPM application rate, the more significant the effects. SCPM releases Ca²⁺, Mg²⁺ and alkali, which is believed to be the main mechanism of dulling soil acidification in paddy fields.

Key words Fertilizer of silicon-calcium-potassium-magnesium (SCPM); Paddy; Soil improvement; Soil pH; Exchangeable base cations

(责任编辑: 陈荣府)