

硅钙钾镁肥及引入柠檬酸对红壤和潮土 pH 值及养分含量的影响

李小燕^{1, 2*}, 张舒予¹, 赵秉强², 俞为民¹, 袁亮²

(1. 天津水泥工业设计研究院有限公司, 天津 300400; 2. 农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 通过土壤培养试验研究了硅钙钾镁肥 (SCPM) 及引入柠檬酸的复混肥 (CA-SCPM) 在酸性红壤和石灰性潮土上的养分供给和酸碱度调节能力。硅钙钾镁肥添加量设置为 6 g/kg, 硅钙钾镁肥与柠檬酸 (CA) 的比例为 88%:12%。与对照处理相比, 培养至 150 d 时, SCPM 肥及 CA-SCPM 肥提高红壤 pH 值约 1.16 个单位, 提高潮土 pH 值约 0.19 个单位。SCPM、CA-SCPM 两个处理均能显著提高红壤速效钾、交换性钙镁、水溶性钙镁硅及有效硅含量; SCPM、CA-SCPM 两个处理提高了潮土速效钾、有效硅及水溶性硅含量, 却降低了潮土交换性钙镁、水溶性钙镁含量。CA 对两种土壤养分有效性无明显影响。SCPM 肥在红壤上的改良效果, 体现在其提高 pH 值、盐基离子以及有效硅含量; 在潮土上的积极效果主要表现在速效钾和有效硅含量的提高, 将 CA 引入 SCPM 肥后综合效果更好。

关键词: 硅钙钾镁肥; 柠檬酸; 土壤培养; 养分含量; 土壤 pH 值

我国酸化土壤和盐渍化土壤面积分别占国土总面积的 22.7% 和 4.88%^[1-2], 所以调节土壤酸碱度、降低盐碱危害显得尤为重要。2015 年全国测土配方施肥数据表明, 中微量元素在缺素临界值以下的土壤面积不断增大。以柑橘为例, 钙镁缺乏问题比较普遍, 微量元素锌硼缺乏比例较大; 对于苹果、桃、葡萄等北方主栽果树, 钙镁等元素不能及时补充导致树体营养失衡已经成为产量及品质提高的重要限制因子^[3-4]。

以钙、镁、硅、钾为主要成分, 呈碱性的硅钙钾镁肥, 具有中微量元素肥料和土壤调理剂两方面的功能。目前此类产品是以土壤调理剂来开展产品登记的, 国标 GB/T 36207-2018《硅钙钾镁肥》于 2018 年 5 月发布^[5]。工业上以钾长石和钙质助剂 (如石灰石、白云石、石灰或磷石膏) 为原料生产硅钙钾镁肥有两种途径, 即高温煅烧法和水热化学反应法^[6]。科技工作者不仅关注其所含硅、钙、钾、镁等元素的营养功能^[7], 还关注其在调节土

壤物理化学性质方面的作用^[8-10], 包括土壤 pH、交换性酸、交换性铝、交换性盐基离子和有效硅的动态变化等, 同时研究其提高作物抗性的功能。

硅钙钾镁肥属于枸溶性肥料, 存在水溶性养分含量低、养分释放偏慢等问题; 其 pH 在 9.5 ~ 11.5 之间, 在北方土壤上积极的使用效果尚未得到科学解释。考虑到在植物生长过程中, 低分子有机酸可通过酸化与螯合作用提高土壤多种养分的有效性^[11], 外源柠檬酸^[12-15]能提高土壤磷、铁等元素的有效含量, 改变土壤微生物环境, 增强根系对养分的吸收能力; 同时考虑到钙镁磷肥、硅钙钾镁肥等枸溶性肥料历史上曾采用 2% 的柠檬酸溶液作为有效成分的浸提液, 因此拟将柠檬酸作为活化剂, 以期促进硅钙钾镁肥的养分释放, 并探讨降低 pH 后产品的使用效果。采用土壤培养试验, 研究两种肥料 (硅钙钾镁肥、柠檬酸复混硅钙钾镁肥) 对土壤 pH 值、速效钾、交换性钙镁、有效硅含量及水溶性养分含量的影响, 以期开发适用于不同土壤类型的系列产品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

供试土壤分两种: (1) 广东红壤, 取自博罗县

收稿日期: 2019-11-22; 录用日期: 2020-02-29

基金项目: 十三五国家重点研发计划 (2017YFB0310801)。

作者简介: 李小燕 (1982-), 女, 山西运城人, 高级工程师, 博士, 主要从事中微量元素肥料和土壤调理剂的研究。E-mail: lixiaoyan@sinoma-tianjin.cn。同时为通讯作者。

横河镇白马村赤红壤柑桔园; (2) 山东潮土, 取自中国农业科学院德州实验站禹城试验基地的匀地试

验场; 取 0 ~ 20 cm 耕层土壤进行试验。土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤	pH 值	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	交换性钙 (mg/kg)	交换性镁 (mg/kg)	有效硅 (mg/kg)
广东红壤	5.24	1.16	50.25	146.46	28.1	332.16	13.31	40.04
山东潮土	8.11	0.57	2.31	125.91	6.51	4097.18	336.81	51.63

1.2 土壤培养试验

1.2.1 供试肥料

采用经高温煅烧工艺生产的硅钙钾镁肥 (编号 SCPM, 缩写为 SC)。柠檬酸 (编号 CA), 分子式 $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$, 含量 $\geq 99.5\%$, pH 2.1 左右。按照硅钙钾镁肥与柠檬酸比例为 88%:12% 称取原料后, 经球磨机粉磨后得到柠檬酸复混硅钙钾镁肥 (编号 CA-SCPM, 缩写为 CA-SC)。两种供试肥料的技术指标见表 2。

表 2 供试肥料的技术指标

肥料	编号	有效营养成分含量 (%)				pH
		SiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	
硅钙钾镁肥	SC	34.14	29.55	5.82	3.72	10.70
柠檬酸复混硅钙钾镁肥	CA-SC	30.30	26.28	5.13	3.36	7.09

1.2.2 试验设计

共设 4 个处理: (1) 不施肥处理 (CK), (2) 单施硅钙钾镁肥处理 (SC), (3) 柠檬酸复混硅钙钾镁肥处理 (CA-SC), (4) 单施柠檬酸处理 (CA)。按等肥料投入的原则设计试验, 肥料添加量设置为 6 g/kg, 每个处理重复 3 次, 随机区组排列。

将供试肥料与过 2 mm 筛的 600 g 风干土壤混

合均匀, 装入塑料培养杯中, 用重量法调节土壤含水量为田间持水量的 60%, 置于 25°C 人工气候箱保持湿度培养 150 d, 培养过程中保持土壤湿度不变。

1.2.3 土壤样品采集与分析测定

分别于培养后第 5、15、30、60、90、150 d 随机破坏性采集样品, 测定土壤 pH 值, 速效钾、交换性钙镁、有效硅以及水溶性钙、镁、硅含量, 参照《土壤农化分析》中的有关方法进行^[16]。土壤 pH 值按水土比 2.5:1, 采用 pH 计检测; 土壤有效硅含量采用硅钼蓝比色法^[17]。土壤交换性钙、镁含量采用乙酸铵浸提-原子吸收光谱法。

1.2.4 数据处理

数据测定均重复 3 次, 采用 Excel 2010 进行处理, SPSS 20.0 软件进行统计分析, Duncan 新复极差法对处理间差异进行多重比较 ($P < 0.05$)。绘图由 Origin 8.0 完成。

2 结果与分析

2.1 对不同土壤酸碱度的调控效果

不同处理对两种土壤 pH 值的影响如图 1 所示。CK 处理, 红壤 pH 值随着培养时间的增加呈降低的趋势。在整个培养过程中, 含硅钙钾镁肥的两

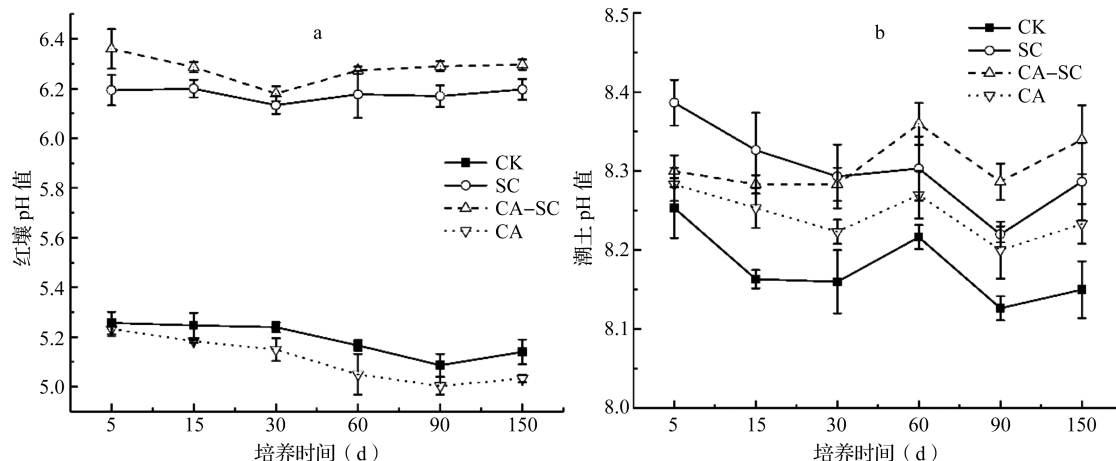


图 1 不同处理对土壤 pH 值的影响

个处理 (SC 和 CA-SC) 均能显著提高红壤 (图 1a) pH 值 ($P<0.05$), 红壤 pH 值大小呈现 $CA-SC>SC>CK>CA$ 的规律。其中, CA-SC 处理后, 红壤 pH 值提高了 0.94 ~ 1.2 个单位, 其中以 90 d 时增幅最大, 增幅为 23.58%。SC 处理对红壤 pH 值的提高量在 0.89 ~ 1.08 个单位。CA 处理降低了红壤 pH 值, 且在培养 30 d 后达到显著。

不同处理对潮土 pH 值的影响见图 1b。各处理均提高了潮土 pH 值, 培养 5 ~ 30 d 呈现 $SC>CA-SC>CA>CK$ 的规律, 而 60 ~ 150 d 呈现 $CA-SC>SC>CA>CK$ 的规律。SC 处理对潮土 pH 值的提高量在 0.08 ~ 0.17 个单位, 且差异达到显著。随着培养时间增加, SC 处理对潮土 pH 值的影响有减弱趋势, 与最初 pH 值差值稳定在 0.1 个单位左右,

这表明 SC 处理对石灰性潮土 pH 值影响较小。

2.2 对土壤速效钾含量的影响

不同处理对土壤速效钾含量的影响如图 2 所示。SC 和 CA-SC 两个处理对两种土壤速效钾含量影响规律基本一致, 即随着培养时间的增加土壤速效钾含量逐渐增加, 150 d 培养后各处理速效钾含量按大小排序依次为 $SC>CA-SC>CA>CK$, 但 SC 处理与 CA-SC 处理两者之间差异不显著。含硅钙钾镁肥处理的速效钾含量均在培养 150 d 后达到最大值, 其中, SC 和 CA-SC 处理的红壤 (图 2a) 速效钾含量平均提高了 245.38 mg/kg; 潮土 (图 2b) 速效钾含量平均提高 71.28 mg/kg。此外, CA 处理对两种土壤速效钾含量影响较小, 培养后期小幅提高了两种土壤速效钾含量, 但差异不显著。

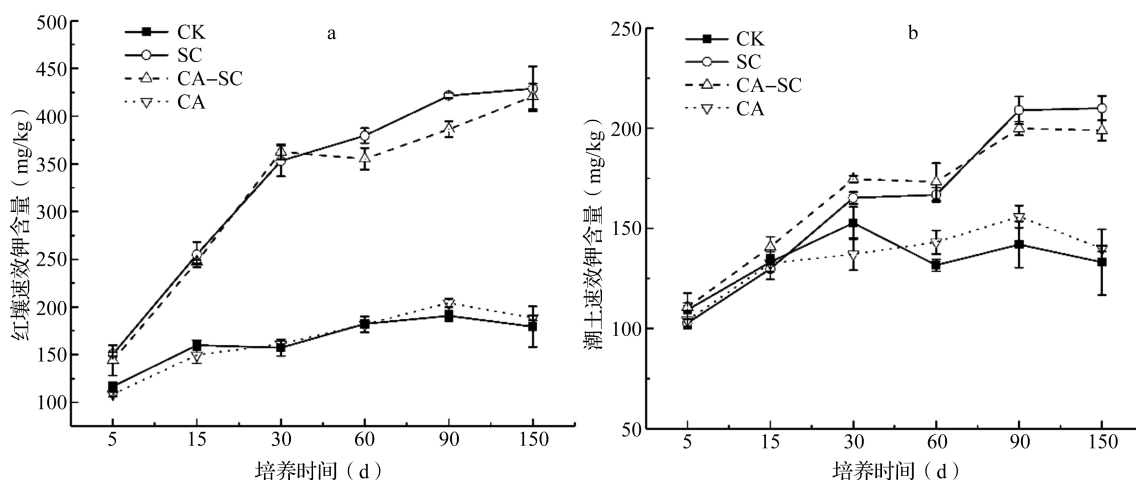


图 2 不同处理对土壤速效钾含量的影响

2.3 对土壤交换性钙镁含量的影响

不同处理对两种土壤交换性钙镁含量的影响见图 3。在红壤中, SC 和 CA-SC 处理均能显著提高交换性钙镁含量 (图 3a、c) ($P<0.05$), 而 CA 处理对红壤交换性钙镁含量无显著影响。培养前 30 d, 含硅钙钾镁肥处理的红壤交换性钙含量快速提高, 红壤交换性镁含量则随着培养时间的增加逐渐增加。各处理红壤交换性钙镁含量总体呈现出 $SC>CA-SC>CK>CA$ 的规律。

在潮土中, 各处理均不同程度地降低了交换性钙镁含量 (图 3b、d), 降幅大小整体表现为: $SC>CA>CA-SC>CK$ 。培养 150 d 后, CA-SC、SC 和 CA 处理的潮土交换性钙含量降幅最大, 分别为 3.84%、5.05% 和 5.21%。潮土交换性镁含量在培养前 30 d 降幅最大, 但随着培养时间的增加, 各处理降幅呈

逐渐减少的趋势。

2.4 对土壤有效硅含量的影响

不同处理对土壤有效硅含量影响见图 4。在整个培养期内, SC 和 CA-SC 处理均能显著提高两种土壤有效硅含量 ($P<0.05$), 且表现为 SC 处理的效果优于 CA-SC 处理; CA 处理对两种土壤有效硅含量影响不显著。在红壤 (图 4a) 中, 培养 5 d 时有效硅含量提升最大, SC 与 CA-SC 处理分别较 CK 处理提高了 258.52 和 220.47 mg/kg, 直至 150 d, 两个处理的有效硅含量有所降低并趋于同一水平。在潮土 (图 4b) 中, SC 与 CA-SC 处理的有效硅含量同样在培养 5 d 时达到最大值, 分别较 CK 处理提高了 85.44 和 81.97 mg/kg。整体来看, SC 和 CA-SC 两个处理对土壤有效硅含量提升效果在红壤中表现优于潮土。

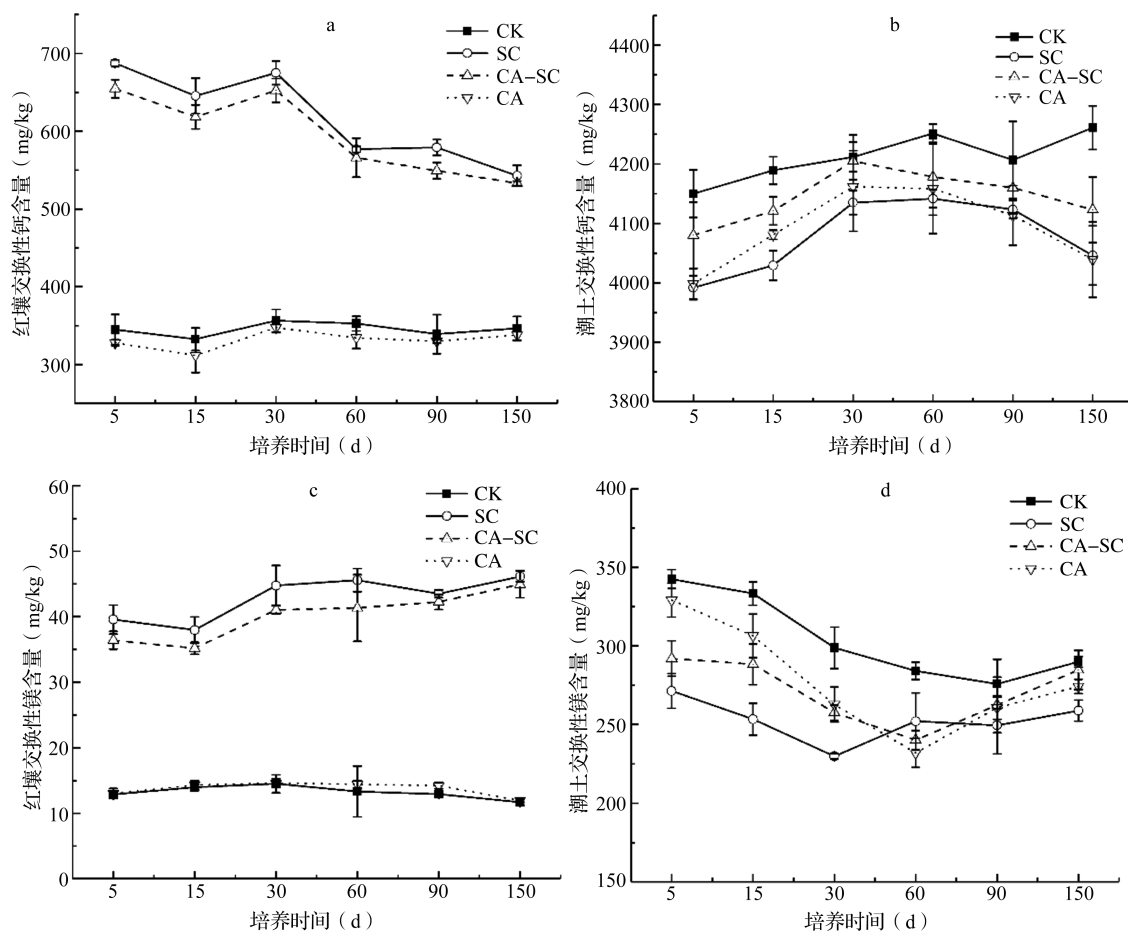


图3 不同处理对土壤交换性钙镁含量的影响

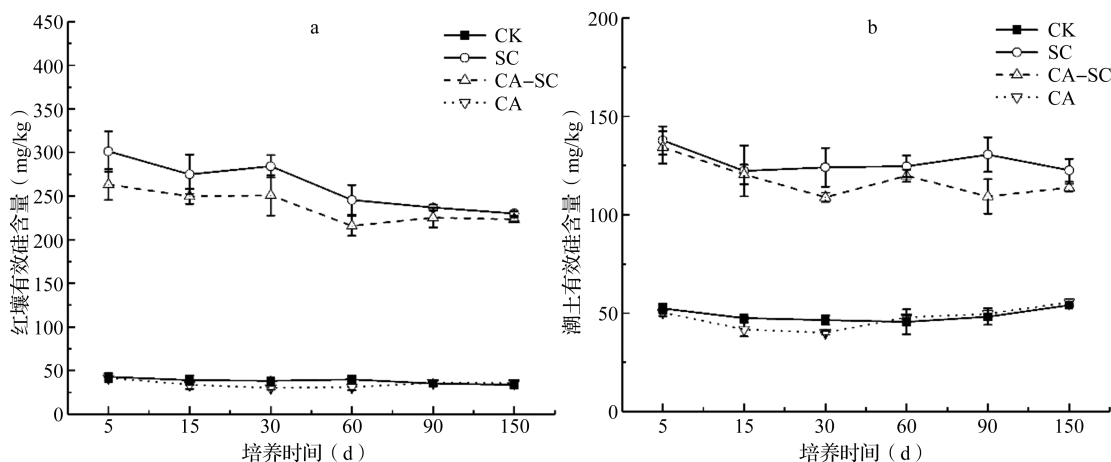


图4 不同处理对土壤有效硅含量的影响

2.5 对土壤水溶性钙镁含量的影响

两种土壤水溶性钙镁含量变化规律如图5所示,水溶性钙镁含量在红壤和潮土中表现规律与交换性钙镁含量变化规律一致。红壤(图5a、c)中,SC和CA-SC处理的水溶性钙镁含量在前15d内增幅最快,且在15d时达到最大值,随后逐渐趋于稳定。

潮土(图5b、d)中,各处理均降低了潮土水溶性钙镁含量,其中水溶性钙含量表现为CA处理最低,培养5d时潮土水溶性钙含量降低了12.86 mg/kg,降幅为10.27%。水溶性镁含量则表现为SC处理最低,培养15d时潮土水溶性镁含量降低了14.41 mg/kg,降幅为28.55%。

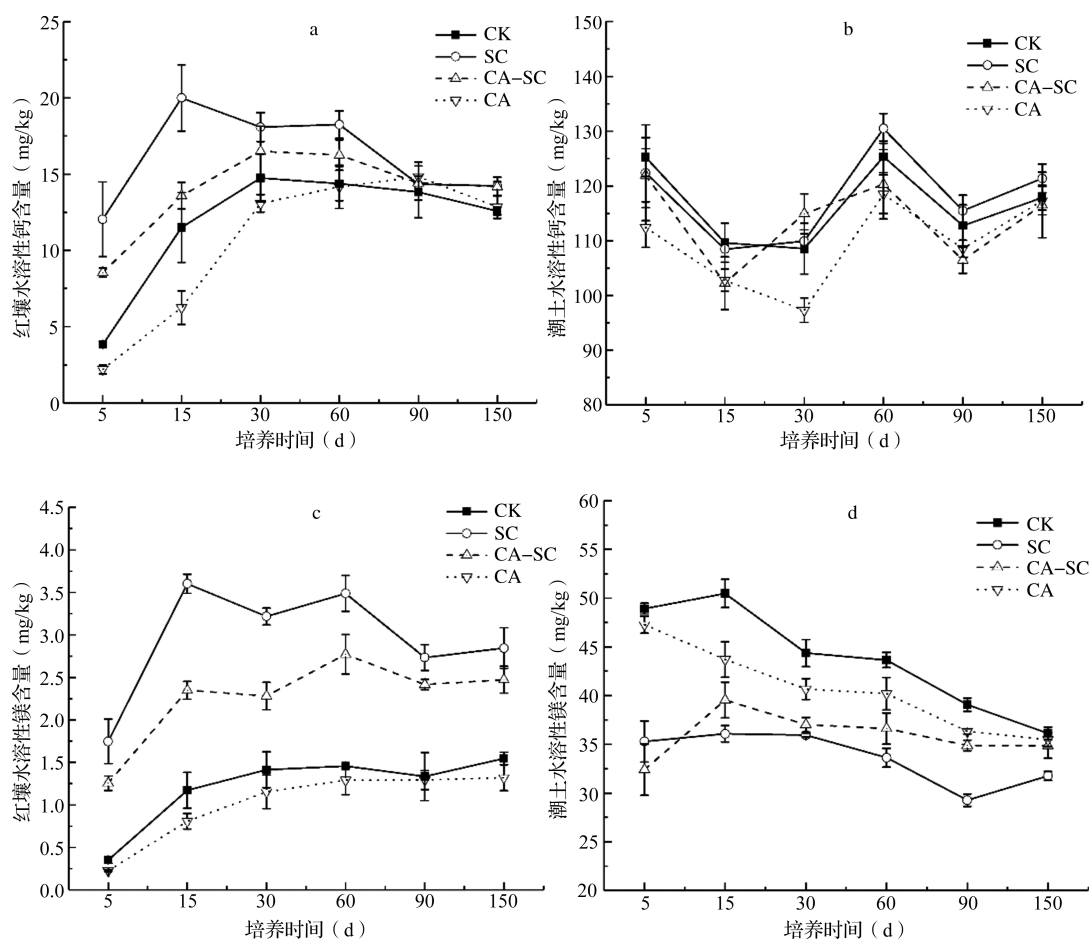


图5 不同处理对土壤水溶性钙镁含量的影响

2.6 对土壤水溶性硅含量的影响

不同处理对土壤水溶性硅含量的影响如图6所示。SC和CA-SC处理均能显著提高两种土壤水溶性硅含量 ($P<0.05$), CA处理对两种土壤水溶性硅含量无明显影响。在红壤(图6a)中, SC处理对水溶性硅含量的提升效果优于CA-SC处理, 且在培养

5 d时差异显著, SC处理较CA-SC处理提高了2.62 mg/kg。随着培养时间的增加, 两者对水溶性硅的提升效果逐渐降低并趋近于同一水平。在潮土(图6b)中, CA-SC处理对水溶性硅含量的提升效果则优于SC处理, 且在培养15 d时最为显著, 此时CA-SC处理较SC处理水溶性硅含量提高了8.64 mg/kg。

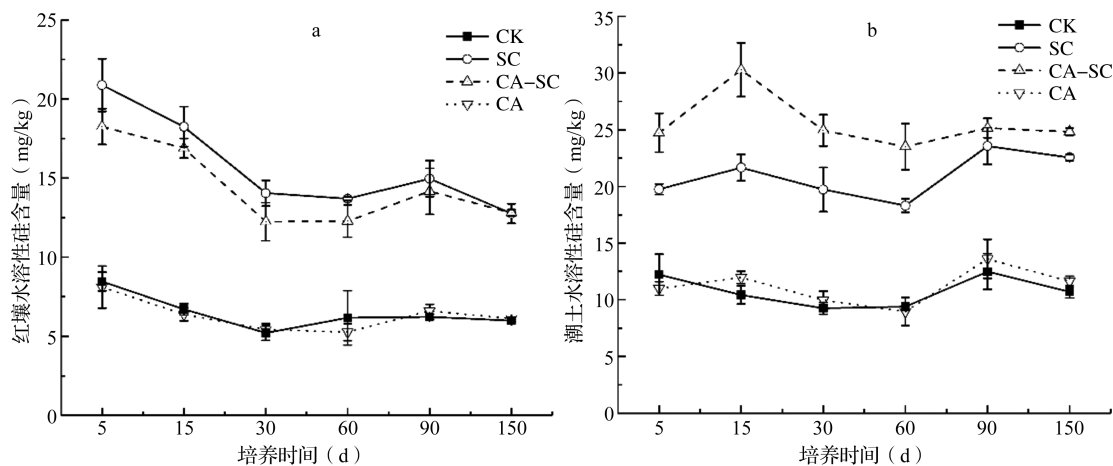


图6 不同处理对土壤水溶性硅含量的影响

3 讨论

3.1 对不同土壤酸碱度的影响

连续培养 150 d 后, CK 处理红壤 pH 值下降了 0.12 个单位; 潮土 pH 值下降了 0.1 个单位, 说明耕层土壤有着酸化的趋势。连续培养 150 d 后, 含硅钙钾镁肥处理 (SC、CA-SC) 的红壤 pH 值较 CK 平均提高了 1.11 个单位, 潮土 pH 值较 CK 平均提高了 0.12 个单位。

本研究硅钙钾镁肥 pH 值为 10.79, 主要由假硅灰石 ($\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$)、镁黄长石 ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$)、钾霞石 (KAlSiO_4) 和钙铝黄长石 ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) 等矿物组成^[18-19]。一方面, 硅钙钾镁肥释放的交换性盐基离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+) 替代土壤胶体上吸附的交换性氢离子 (H^+) 和铝离子 (Al^{3+}), 提高土壤的盐基饱和度; 另一方面硅酸根离子 (SiO_3^{2-}) 发生水解产生碱性物质 OH^- , 会有效中和土壤中的 H^+ 和 Al^{3+} ^[20], 从而降低了红壤酸度。柠檬酸与硅钙钾镁肥复混后, 红壤 pH 值较单施硅钙钾镁肥有小幅度的提高, 这主要是因为柠檬酸包含的有机酸根离子与矿物表面的 Al 和 Si 形成配合物, 生成的配合物通过键极化作用破坏 Al—O 键和 Si—O 键的稳定性, 降低了 SiO_3^{2-} 水解反应的表面活化能, 增强了 SiO_3^{2-} 的水解速率^[21], 从而进一步降低了红壤酸度。

在潮土中, 即使肥料添加量为 6 g/kg, SC 和 CA-SC 两个处理对 pH 值提升幅度并不大。石灰性潮土属于碳酸钙缓冲体系, 土壤酸碱缓冲容量与碳酸钙及活性碳酸钙含量呈显著正相关, 与阳离子交换量的相关性不显著^[22]。本研究中石灰性潮土的交换性钙 (4097.18 mg/kg) 和交换性镁 (336.81 mg/kg) 都比较丰富, 盐基离子交换量较大; 硅钙钾镁肥引入后, 交换性钙、镁含量有一定程度的降低, 但速效钾含量有一定的升高, 盐基离子饱和度变化不大, 从而对潮土 pH 值产生较小影响。和单施硅钙钾镁肥相比, 柠檬酸与硅钙钾镁肥复混后, 能够减缓潮土 pH 值的增加, 其降碱作用在 30 d 之后逐渐消失。

3.2 对土壤养分有效性的影响

诸多研究^[7-8]表明, 硅钙钾镁肥可以提高酸性土壤速效钾、交换性钙镁及有效硅含量。硅钙钾镁肥释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进入土壤溶液后, 一部分被土壤胶体吸附成交换性钙和交换性镁, 土壤酸度

的降低与交换性钙镁的增加基本同步。硅钙钾镁肥具有缓释性, 在植物生长过程中提供的钾可成为速效钾的有效补充。硅钙钾镁肥主要是由硅酸盐矿物组成, 其中含有丰富的 $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$ 和 $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ^[18], 在土壤中释放出 H_4SiO_4 供作物吸收。柠檬酸与硅钙钾镁肥配伍后, 强化了硅钙钾镁肥调节酸性土壤 pH 的能力, 却延缓了其在酸性土壤中的养分释放。这与柠檬酸在土壤中的酸效应和羧基络合作用相关, 也与柠檬酸对硅钙钾镁肥矿物溶解的影响等有关, 是一个复杂的过程。

肥料加入量为 6 g/kg 的条件下, 通过硅钙钾镁肥引入的有效钙、镁离子分别为 1266 和 121 mg/kg, 提高了土壤中钙和镁的潜在水平, 然而 SC、CA-SC 两个处理却降低了潮土交换性钙、镁含量。究其原因, 反映土壤供钙能力的指标是交换性钙, 对于 pH 偏高的潮土而言, 交换性钙与土壤 pH 值之间呈现显著的负相关关系^[23-24], 即各处理 pH 值升高后, 碳酸钙溶解减缓, 降低了潮土交换性钙含量。另外, 影响土体中钙吸附和解吸过程的离子 (如 K^+) 也会影响交换性钙离子含量, 硅钙钾镁肥引入后土壤中速效钾含量提升, 一定程度上抑制了钙的解吸。交换性镁含量与 pH 值、Ca/Mg、K/Mg 等因素有关^[25]。

低分子量有机酸可解离成 H^+ 和酸根离子, H^+ 可促进土壤中碳酸钙/镁的分解, 而酸根离子则可以和钙、镁结合成活性不同的化合物^[26], H^+ — Ca^{2+} 的交换作用以及酸根离子与钙、镁之间的结合是一个竞争过程。柠檬酸与硅钙钾镁肥混合后肥料的 pH 值降到中性, 有机配体柠檬酸根离子可以与金属离子 (主要是 Al^{3+}) 发生配合反应形成表面配合物^[27], 提高矿物溶解速率, 促进硅钙钾镁肥矿质元素的释放, 从而一定程度上抑制了硅钙钾镁肥施入潮土对交换性钙、镁含量的降低。

3.3 硅钙钾镁肥及引入柠檬酸后对土壤水溶性养分含量的影响

在红壤上, SC 和 CA-SC 两个处理在 15 d 前能迅速提高水溶性钙、镁、硅含量。这是由于在酸性条件下, 钙、镁等养分能够与酸性基团发生反应被活化, 从而水溶性含量增加。Crusciol 等^[28]报道, pH 增加后土壤胶体对 SiO_3^{2-} 的吸附减少, 单体 H_4SiO_4 聚合形成无定形沉淀 SiO_2 的量降低, 导致硅可溶性提高。这与本文结果一致。

在潮土上, SC 和 CA-SC 两个处理会造成土壤

中水溶性钙、镁含量有所降低,柠檬酸的加入则能缓解水溶性含量下降的趋势。这是由于土壤 pH 值升高抑制了潮土中碳酸钙、碳酸镁的溶解,降低了土壤活性钙、镁的供给。史红平等^[29]研究指出,苹果园石灰性土壤 pH 值与土壤水溶性钙含量之间呈现显著负相关关系,这与本文结果相吻合。

综上所述,红壤和潮土中硅钙钾镁肥施用后土壤 pH 值、钾、钙、镁、硅含量具有不同变化趋势,柠檬酸对硅酸盐矿物与养分释放的影响还需深入研究。硅钙钾镁肥施用在红壤上,其释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 的替代作用以及硅酸盐水解生成碱的中和作用能够有效减轻土壤酸化,显著提高土壤钾素含量,同时补充红壤形成过程中淋失的硅和盐基离子,是改良酸性红壤比较理想的一种肥料。因潮土酸碱缓冲能力较强,施入硅钙钾镁肥后其 pH 变化较小,硅钙钾镁肥在潮土上的积极效果可能取决于其提高了速效钾和有效硅含量;柠檬酸引入后会减轻硅钙钾镁肥对潮土交换性钙镁含量的影响,是一种可供选择的方案。

4 结论

硅钙钾镁肥添加量为 6 g/kg 的土壤培养试验中,硅钙钾镁肥及柠檬酸复混硅钙钾镁肥处理能够显著提高红壤 pH 值,对潮土 pH 值的提升幅度较小。

硅钙钾镁肥及柠檬酸与硅钙钾镁肥复混处理后,红壤速效钾、交换性钙镁、水溶性钙镁硅及有效硅含量显著提高;硅钙钾镁肥效果优于柠檬酸复混硅钙钾镁肥处理。

硅钙钾镁肥及柠檬酸复混硅钙钾镁肥处理后,潮土速效钾、有效硅及水溶性硅含量提高,但交换性钙镁、水溶性钙镁含量有所降低;柠檬酸复混硅钙钾镁肥后的效果优于硅钙钾镁肥处理。

参考文献:

- [1] 沈仁芳,赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学报, 2019, 9(3): 16-20.
- [2] 李建国,濮励杰,朱明,等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [3] 鲁剑巍,陈防,王富华,等. 湖北省柑橘园土壤养分分级研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 390-394.
- [4] 陈士更,张民,丁方军,等. 腐植酸土壤调理剂对酸化果园土壤理化性状及苹果产量和品质的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1): 83-89.
- [5] GB/T 36207-2018, 硅钙钾镁肥[S].
- [6] 孙蓓蓓,王旭,侯晓娜,等. 我国钾长石土壤调理剂的发展现状与问题分析[J]. 中国土壤与肥料, 2018(4): 1-7.
- [7] 郭碧花. 水稻对硅、钾、钙、镁的吸收动力学研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 396-401.
- [8] 冀建华,李絮花,刘秀梅,等. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸性和盐基离子动态变化的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 583-592.
- [9] 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[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(1): 117-122.
- [10] 蒙园园,石林. 矿物质调理剂中铝的稳定性及其对酸性土壤的改良作用[J]. 土壤, 2017, 49(2): 345-349.
- [11] 肖艳,张怀文,王克武,等. 柠檬酸对土壤养分的活化及对作物吸收 Fe、P 的影响[J]. 2004, 13(4): 638-640.
- [12] 房福力,姚志鹏,林伟,等. 柠檬酸对温室土壤磷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1166-1173.
- [13] 张广才,王佼,张隰,等. 柠檬酸存在下施硅对土壤磷吸附和解吸特性影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 49-52, 134.
- [14] Wang Y Z, Chen X, Whalen J K, et al. Kinetics of inorganic and organic phosphorus release influenced by low molecular weight organic acid in calcareous, neutral and acidic soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178: 555-566.
- [15] 孔涛,刘民,淑敏. 低分子量有机酸对土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(2): 348-354.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [17] 段文静,石林. 硅钼蓝分光光度法测定硅肥中有效硅[J]. 分析科学学报, 2015, 31(3): 389-392.
- [18] 李小燕,万夫伟,彭学平,等. 煅烧钾长石生产硅钙钾肥的矿物组成研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12): 3648-3651.
- [19] Li X Y, Yu W M, Zhao B Q. Effect of sintering temperature of potassium feldspar-limestone/dolomite on composition and microstructure of silicate fertilizers[J]. International Journal of Ceramic Engineering and Science, 2019(1): 185-193.
- [20] Castro G S A, Crusciol C A C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation[J]. Geoderma, 2013, 195/196: 234-242.
- [21] Bennett P C, Casey W. Chemistry and mechanisms of low temperature dissolution of silicates by organic acids[M]//Organic acids in geological processes. Springer Berlin Heidelberg, 1994. 162-200.
- [22] 汪吉东,戚冰洁,张永春,等. 长期施肥对沙壤质石灰性潮土土壤酸碱缓冲体系的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1031-1036.
- [23] 李鹏. 渭北苹果园土壤钙素演化趋势及其对苹果品质的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

- [24] 张大庚, 祝艳青, 李天来, 等. 长期定位施肥对保护地土壤钙素形态分布的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (2): 198–202.
- [25] 丁玉川, 焦晓燕, 聂督, 等. 山西农田土壤交换性镁含量、分布特征及其与土壤化学性质的关系 [J]. 自然资源学报, 2012, 27 (2): 311–321.
- [26] 张大庚, 栗杰, 刘慧. 外源低分子量有机酸对土壤中钙素迁移特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29 (5): 152–155.
- [27] Liu J Y, Xu R K, Ji G L. Dissolution of aluminum in variably charged soil as affected by low-molecular-weight organic acid [J]. Pedosphere, 2005, 15 (4): 484–490.
- [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 [J]. Revista Brasileira de Ciencia do solo, 2014, 38: 1843–1854.
- [29] 史红平, 王益权, 石宗琳, 等. 农田土壤钙素含量及空间分布规律研究——以武功县大庄乡为例 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (5): 1008–1016.

Effects of silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer and the introduction of citric acid on soil pH and nutrient contents for red soil and fluvo-aquic soil

LI Xiao-yan^{1, 2*}, ZHANG Shu-yu¹, ZHAO Bing-qiang², YU Wei-min¹, YUAN Liang² (1. Tianjin Cement Industry Design and Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300400; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The soil incubation test was carried out to study the nutrient supply and acidity regulation ability of silicon-calcium-potassium-magnesium (SCPM) fertilizer and citric acid compound silicon-calcium-potassium-magnesium (CA-SCPM) fertilizer on the acid red soil and calcareous fluvo-aquic soil. The addition amount of SCPM fertilizer was 6 g/kg and the ratio of SCPM fertilizer and citric acid (CA) was 88%:12%. Compared with control treatment, the pH value of red soil was increased by 1.16 units and the pH value of fluvo-aquic soil was increased by 0.19 units with the treatment of SCPM fertilizer and CA-SCPM fertilizer after 150 days of culture. For the red soil, SCPM and CA-SCPM treatments significantly increased the contents of available potassium, exchangeable calcium, exchangeable magnesium, soluble calcium, soluble magnesium, soluble silicon and available silicon. For the fluvo-aquic soil, SCPM and CA-SCPM treatments improved the contents of available potassium, available silicon and water-soluble silicon, but reduced the contents of exchangeable calcium, exchangeable magnesium, soluble calcium and soluble magnesium. CA had no significantly influence on the nutrient availability of two soils. The improvement effect of SCPM fertilizer on the red soil lies in an increase of soil pH, base cation content and available silicon content; while the positive effect on the fluvo-aquic soil mainly results from raised available potassium and silicon content, and the comprehensive effect is better when CA is introduced into SCPM fertilizer.

Key words: silicon-calcium-potassium-magnesium fertilizer; citric acid; soil incubation; nutrient content; soil pH