

碱性材料对修复与改良酸性硫酸盐土壤障碍因子的研究^①

易琼, 唐拴虎*, 黄旭, 李苹, 张发宝, 杨少海

(广东省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部南方植物营养与肥料重点实验室/广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640)

摘要: 采用盆栽试验研究了不同碱性材料(石灰、自研改良剂、钙镁磷肥)对酸性硫酸盐土壤主要障碍因子的修复及其对水稻生长的影响。结果表明, 不同碱性材料对土壤理化特性、土壤养分有效性和水稻生长的影响存在明显差异。与常规施肥(NPK)处理相比, 自研改良剂(SAM)和钙镁磷肥(CMP1)处理土壤 pH 增加了 1.25 和 0.92 个单位, 土壤速效磷含量分别增加了 3.1 倍和 2.6 倍, 土壤有效铁、有效锰、交换性 H^+ 、 Al^{3+} 含量均大幅下降。SAM 与 CMP1 处理通过提供足够的有效磷并补充钙、镁等元素, 有效改善了根系生长环境, 从而有效控制铁、锰、铝等元素向地上部转运, 进而对作物的生长起到促进作用。SAM 和 CMP1 处理较 NPK 处理有效促进了关键生育期水稻根系活力并显著增加了水稻籽粒产量, 增幅分别达 121.1% 和 105.1%。石灰效果次之。综上, 初步认为碱性材料改良酸性硫酸盐土壤的关键在于保证了充足有效磷的同时, 提高了土壤 pH, 降低了土壤金属的毒害。本试验条件下, 钙镁磷肥对修复和改良酸性硫酸盐土壤障碍因子效果非常明显, 但其成本是自研改良剂的 3 倍, 因此, 基于改良剂的成本与长期适用性考虑, 自研改良剂可能是该类土壤改良的最佳选择。

关键词: 酸性硫酸盐土; 碱性材料; 障碍因子; 修复; 改良

中图分类号: S156.2

酸性硫酸盐土是一种富含黄铁矿的土壤, 在有氧条件下黄铁矿发生氧化反应形成硫酸, 土壤耕作层以下的酸可通过毛细管作用上升至耕作层, 加剧土壤酸化^[1]。此类土壤主要分布在我国东部沿海地区, 华南地区将酸性硫酸盐土壤发育的水稻土形象地称为“反酸田”^[2]。广东省酸性硫酸盐土壤分布面积约有 1.04 万 hm^2 , 占全省土壤面积的 8.07%^[3]。酸性硫酸盐土壤除酸性强外, 有效磷含量极低且富含大量的铁、铝、锰毒害元素等, 导致土壤生产力水平低下, 并且严重危害环境^[4]。因此, 探索酸性硫酸盐土壤低产低效机制并开发切实可行的改良措施或改良产品以消除毒害离子的胁迫, 是现阶段酸性硫酸盐土壤研究的当务之急^[5]。以往试验研究表明^[6], 富含有效钙或磷的无机偏碱性矿物质在酸性土壤改良方面效果显著。为此, 本文以不同碱性物质为材料, 探讨酸性硫酸盐土壤障碍因子修复及水稻植株对不同碱性材料的响应机制, 为更好地实现酸性硫酸盐土土壤培肥和农业可持续发展奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2013 年在广东省农科院网室内 (23.15°N, 113.36°E) 开展, 试验共设 6 个处理(表 1), 各处理设 16 个重复(部分用于生长期内进行破坏性取样分析), 耕层水稻土混匀装盆, 每盆装土 2 kg。供试土壤属于砖红壤, 是典型酸性硫酸盐土壤, 采自台山冲蒺镇(22.15°N, 112.48°E)农民稻田, 基本理化性质为: pH 4.21, 有机质 21.7 g/kg, 碱解氮 240.0 mg/kg, 有效磷 8.95 mg/kg, 速效钾 113.0 mg/kg。供试品种为当地主栽水稻品种合丰占, 每盆移栽 1 穴(2 株)水稻秧苗。处理 LIME 为添加石灰处理, 处理 SAM 为添加自研改良剂处理(主要成分为石灰、白云石等复合材料), 处理 CMP1 为添加钙镁磷肥处理, 石灰、自研改良剂和钙镁磷肥这 3 种碱性材料作为酸性硫酸盐土壤改良物质(表 1), 用量均为 10 g/盆。供试肥料分别为尿素、磷酸二铵和氯化钾, 各处理氮、磷、钾养分用

基金项目: 广东省科技计划项目(2012A020100004)和公益性行业科研专项(201003016)资助。

* 通讯作者(tfstshu@aliyun.com)

作者简介: 易琼(1985—), 女, 湖南株洲人, 博士研究生, 主要从事养分资源利用方面的研究。E-mail: yiq100@126.com

量保持一致,分别按 N 0.25 g/盆、P₂O₅ 0.075 g/盆, K₂O 0.2 g/盆施入(其中处理 CMP1 由于钙镁磷肥作为改良剂含磷量较高,因此不施磷),其中氮肥按基追比 3:2 施用,磷肥全部作基施,钾肥基追各半施入,碱性材料与基肥在水稻移栽前与土壤充分混匀施入,追肥以撒施的形式施入。所有管理措施包括病虫害治理、水分管理尽量与大田保持一致。水稻于 2013 年 4 月 16 日移栽,7 月 25 日收获,生长期为 100 天。

表 1 试验处理设计
Table 1 Design of experimental treatments

处理代号	处理具体内容
CK	不施肥处理
NPK	常规施肥处理
LIME	石灰 (pH = 12.0) + NPK
SAM	自研改良剂(pH = 9.6)+ NPK
CMP1	钙镁磷肥 (作改良剂, pH = 8.9) + NK
CMP2	钙镁磷肥作磷肥处理(与常规施肥处理磷用量相等) + NK

1.2 测定项目与方法

水稻成熟期各处理分别取 3 个重复计产,并采集土样进行分析测定。分别于水稻关键生育期采集水稻植株样,记录水稻植株根系分布特征及其活力。土壤与地上部氮、磷、钾等指标均按照常规方法测定^[7],土壤 pH 采用电位法(水土比 2.5:1)测定;土壤交换性酸、Al³⁺ 含量采用 1 mol/L KCl 交换-中和滴定法测定;土壤有效铁含量采用 DTPA 溶液浸提-原子吸收光谱法测定,土壤有效硫含量采用磷酸盐浸提-硫酸钡比浊法测定,土壤有效锰含量采用稀盐酸浸提-原子吸收光谱法测定;根系全铁、全钙及全镁采用硝酸高氯酸消煮-原子吸收光谱法测定,根系体积与根系活力分别采用水位取代法和甲烯蓝吸附法进行测定^[8]。

试验数据均采用 Excel 2007 和 SAS 9.0 统计软件进行分析。采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤酸度

土壤酸度是酸性硫酸盐土最重要、最关键的理化性质之一,其强度的高低通常用 pH 表示,pH 与土壤生产力水平和生产潜力密切相关。由表 2 可知,不同碱性材料处理较常规施肥处理(NPK)土壤 pH 显著增加,其中以石灰(LIME)和自研改良剂(SAM)处理效果最明显,分别较 NPK 处理增加了 1.33 和 1.25 个单位。钙镁磷肥处理(CMP1)效果次之,较 NPK 处理土壤 pH 增加了 0.92 个单位。此外,当钙镁磷肥作为磷

源处理(CMP2),其土壤 pH 较 NPK 处理差异不显著,表明等磷量的钙镁磷肥的添加对土壤 pH 的改善效果不佳,钙镁磷肥对酸性硫酸盐土的改良效果只有达到一定用量水平才能突显。

表 2 不同碱性材料对酸性硫酸盐土壤 pH、交换性 H⁺ 和 Al³⁺ 含量的影响
Table 2 Effects of different basic materials on pH, exchangeable H⁺, Al³⁺ contents in acid sulfate soil

处理	pH	交换性 H ⁺ (cmol/kg)	交换性 Al ³⁺ (cmol/kg)
CK	4.26 ± 0.05 d	6.12 ± 0.54 a	5.65 ± 0.53 a
NPK	4.32 ± 0.03 cd	5.41 ± 0.27 b	4.87 ± 0.25 b
LIME	5.65 ± 0.11 a	0.13 ± 0.04 c	0.03 ± 0.01 c
SAM	5.57 ± 0.06 a	0.25 ± 0.06 c	0.14 ± 0.05 c
CMP1	5.24 ± 0.04 b	0.53 ± 0.11 c	0.39 ± 0.10 c
CMP2	4.37 ± 0.05 c	5.02 ± 0.43 b	4.62 ± 0.41 b

注:同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 P<0.05 显著水平,下表同。

土壤酸度也可通过数量指标交换性酸表示,通常是指土壤胶体上吸附的 H⁺、Al³⁺ 所反映的潜性酸量,土壤交换性酸量对调节和估算外源改良剂添加量具有重要的参考价值。与 NPK 处理比较,LIME、SAM 和 CMP1 处理均极显著降低了土壤溶液中交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺ 的含量,降幅分别为 97.6%、95.4%、90.2% 和 99.4%、97.1%、92.0%(表 2),从而有效降低了土壤酸害和铝毒风险。

2.2 土壤与根系关键元素分布特征

碱性材料对酸性硫酸盐土壤和水稻根系中关键元素含量影响见表 3,与不施肥(CK)处理相比,NPK 处理土壤速效磷,有效锰、铁、硫含量均未得到有效改善,并且根系中铁、钙、镁的含量也未明显增加。SAM 与 CMP1 处理土壤有效磷含量较 NPK 处理分别增加了 3.1 倍和 2.6 倍,而 LIME 处理并未改善土壤中磷的有效性,土壤中磷的缺乏会影响水稻根系及地上部磷的吸收。各碱性材料(石灰除外)作为土壤改良剂显著降低了土壤中有效锰和有效铁的含量,SAM 与 CMP1 处理土壤有效铁和有效锰含量较 NPK 处理分别降低了 60.8% 和 90.5%、28.1% 和 31.8%,但对土壤中有效硫含量的影响不明显。与 NPK 处理相比,SAM 处理水稻根系钙含量增加最多,LIME 与 CMP1 处理次之。SAM、CMP1 及 LIME 处理还促进了根系对镁离子的吸收,对土壤中铝的吸收具有明显的抑制作用,从而有效降低铁毒的风险。综上,SAM 处理在改善土壤有效磷含量,增加水稻根系钙、镁含量,降低土壤有效铁、锰及根系全铁含量方面效果明显。

表 3 不同碱性材料对土壤与根系关键元素含量的影响
Table 3 Effects of different basic materials on key elements of soil and rice root

处理	土壤				根系		
	速效磷 (mg/kg)	有效锰 (mg/kg)	有效铁 (mg/kg)	有效硫 (mg/kg)	全铁 (g/kg)	全钙 (g/kg)	全镁 (g/kg)
CK	2.97 d	16.03 a	925.83 b	466.47 ab	50.65 a	1.87 cd	0.66 c
NPK	4.89 cd	14.78 a	923.06 b	463.61 ab	52.59 a	1.87 cd	0.63 c
LIME	5.11 cd	12.39 ab	1 150.75 a	549.35 a	28.74 c	2.51 b	0.94 b
SAM	20.09 a	5.80 b	663.31 c	483.62 ab	37.93 b	3.17 a	1.02 ab
CMP1	17.39 b	1.35 b	629.50 c	446.46 b	33.64 bc	2.15 c	1.08 a
CMP2	5.86 c	15.44 a	640.88 c	422.17 b	50.79 a	1.50 e	0.70 c

2.3 水稻根系特征

根系的生长发育好坏和活力强弱直接关系着养分吸收利用效率的高低和地上部植株能否正常生长发育。不同碱性物质对水稻根系的生长发育的影响不一致(表 4)。移栽后 46 天(分蘖盛期),CMP1 处理根系体

积和根干重均显著高于其他各处理,且其最大根长也处于较高水平。与 NPK 处理相比,LIME 与 SAM 处理根干重显著增加,但其对水稻根系最大根长与根体积的影响不大。至移栽后 78 天(抽穗期),SAM 与 CMP1 处理显著促进了根系生物量的增加和根系体积的增长。

表 4 不同碱性材料对水稻不同生育期根系生长的影响
Table 4 Effects of different basic materials on root development during different rice growth stages

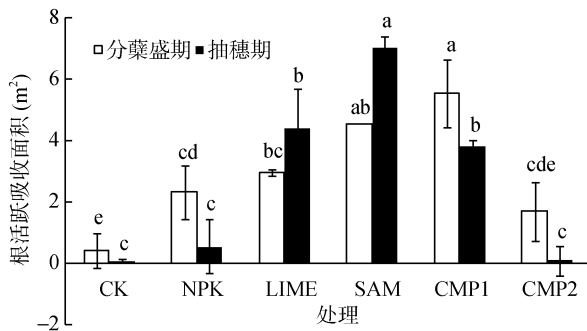
处理	移栽后 46 天			移栽后 78 天		
	最大根长 (cm)	根体积 (ml/株)	根干重 (g/株)	最大根长 (cm)	根体积 (ml/株)	根干重 (g/株)
CK	24.5 ab	12.8 b	1.0 c	29.2 ab	15.0 b	1.7 bc
NPK	24.6 ab	12.0 b	1.2 c	33.5 a	19.0 b	1.7 bc
LIME	24.3 ab	18.3 b	2.3 b	35.3 a	19.7 b	2.3 b
SAM	23.7 b	28.3 b	2.4 b	37.0 a	36.0 a	3.7 a
CMP1	29.2 a	45.0 a	3.8 a	34.5 a	37.7 a	4.3 a
CMP2	25.8 ab	20.3 b	1.6 bc	21.2 b	9.3 b	1.2 c

水稻根系活力的大小与根系最大根长、根体积及根生物量密切相关。水稻生育期内根系活力对不同碱性材料的响应不同(图 1) 水稻分蘖盛期表现为 CMP1 处理与 SAM 处理水稻根系活力高于 LIME 处理,且显著高于 NPK 处理。与 NPK 处理相比,CMP2 处理

对提高水稻根系活力效果并不明显。同样地,抽穗期 SAM、LIME 与 CMP1 处理水稻根系活力均显著高于其他各处理,SAM 处理根系活跃吸收面积达到 7 m²,极显著高于 LIME 处理与 CMP1 处理,该结果与水稻根系特征趋势表现一致。

2.4 籽粒产量

由图 2 所示,常规施肥处理籽粒产量较不施肥处理差异不显著,表明在酸性硫酸盐土壤条件下,单施化肥对提高水稻籽粒产量效果不明显。各添加碱性材料处理籽粒产量均显著高于常规施肥处理,其中 SAM 处理籽粒产量增幅最大,较 NPK 处理增产达 121.1%。CMP1 处理较 NPK 处理增产效果显著,增幅达 105.1%。LIME 处理增产效果远不及 SAM 和 CMP1 处理。等磷条件下,以钙镁磷肥为磷源(CMP2)处理较以磷酸二铵为磷源(NPK)处理籽粒产量明显增加,该结果可能是由于钙镁磷肥作为磷源的同时向土壤中补充了钙与镁离子,进而促进了产量的提升。



(图中小写字母不同表示同一生育期各处理间差异达到 P<0.05 显著水平,下同)

图 1 不同碱性材料对水稻不同生育期根系活力的影响
Fig. 1 Effects of different basic materials on active absorption areas of root during different rice growth stages

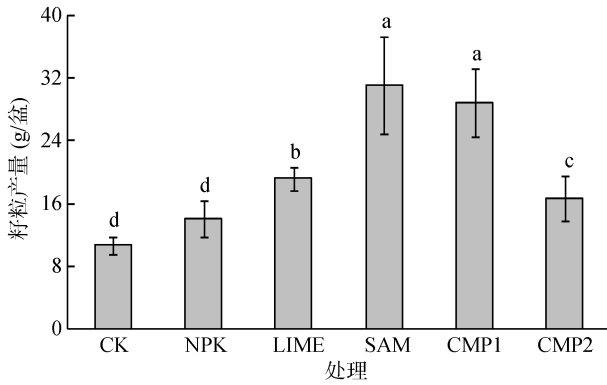


图 2 不同碱性材料对酸性硫酸盐土水稻籽粒产量的影响
Fig. 2 Effects of different basic materials on rice grain yields in acid sulfate soil

2.5 产量与土壤理化性质相关性

综合分析水稻籽粒产量、收获后土壤理化性质之间的相关性可知,水稻籽粒产量与土壤有效磷含量呈极显著正相关,而与土壤交换性 H^+ 、 Al^{3+} 呈显著负相关,与土壤有效锰含量呈极显著负相关(表 5)。此外,土壤有效磷含量与土壤有效锰含量呈极显著负相关。然而,土壤中有效铁、硫含量与籽粒产量及其他理化性质并未呈现显著相关性,即土壤交换性酸、铝含量及土壤有效磷、有效锰含量作为酸性硫酸盐土壤障碍因子,是限制该土壤生产力的关键因素。

3 讨论与结论

酸性硫酸盐土壤存在诸多障碍因子,不同地区、

不同土壤母质条件下酸性硫酸盐土壤障碍因子并非完全一致。酸性硫酸盐土壤毒害现象并非仅受某一个因素的制约,而是由多种因素综合作用的结果^[9]。人们对酸性硫酸盐土壤的主要限制因子观点并不一致,李金培^[4]研究认为土壤酸度低是酸性硫酸盐土壤生产力水平低的关键因素之一,缺磷是酸性硫酸盐土壤中最重要限制因子,施用磷肥和石灰是改良酸性硫酸盐土壤的有效措施^[10]。同时也有人认为干湿交替、土壤还原物质如 H_2S 对根系功能的降低等也是造成酸性硫酸盐土壤毒害机理之一^[11-12],然而本试验结果表明,几种碱性物质处理土壤有效硫含量并未得到明显改善,但其土壤磷元素含量显著升高,土壤生产力及水稻根系生长均得到有效提高,因此认为有效硫含量可能不是该类土壤主要限制因子。本文对酸性硫酸盐土壤毒害机制主要从土壤养分元素有效性和水稻植株根系活力及其养分吸收两方面考虑,二者相互制约、相互影响。土壤养分元素的影响主要涉及土壤中氮、磷、钾养分有效性低或严重缺乏,或者金属元素、硫含量过高富集均会对水稻植物根系的生长发育和地上部养分的吸收利用产生抑制作用,甚至是毒害作用。研究结果表明土壤酸害、贫磷、铝毒、锰毒、铁毒是本试验条件下土壤的主要障碍因子,是限制该土壤生产力的关键因素,该结果与黄巧义等^[13]研究结论一致。因此,针对酸性硫酸盐土进行改良必须综合调控每一个限制因子及其相互效应^[14]。

表 5 不同碱性材料处理土壤理化性质及籽粒产量的相关关系

Table 5 Correlations among rice grain yield and soil physical and chemical properties under different basic materials treatments ($n = 18$)

	产量	pH	交换性 H^+	交换性 Al^{3+}	有效磷	有效铁	有效锰	有效硫
产量	1							
pH	0.7810	1						
交换性 H^+	-0.8487*	-0.9839**	1					
交换性 Al^{3+}	-0.8490*	-0.9832**	0.9999**	1				
有效磷	0.9670**	0.6323	-0.7069	-0.7076	1			
有效铁	-0.5417	0.0668	0.0548	0.0521	-0.6577	1		
有效锰	-0.9264**	-0.6823	0.7828	0.7843	-0.9195**	0.5076	1	
有效硫	-0.0592	0.6476	-0.5283	-0.5293	-0.1019	0.7891	0.0098	1

注: * 表示相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平, ** 表示相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平。

国内外针对酸性硫酸盐土壤的改良与修复已开展了大量的研究工作^[15-18],粉煤灰、碱渣、磷石膏等工业副产品作为酸性土壤改良剂的趋势逐渐明显^[19-21]。此外,不同原材料制成的生物炭因其具有较高的石灰位,能够明显增加土壤 pH、交换性碱基离子和盐基饱和度,并能降低土壤中交换性酸,也备受农业科技研究者的青睐^[6, 22]。本试验主要以石灰、自研改良剂

与钙镁磷肥为研究材料,着重从土壤养分元素有效性与水稻产量及根系养分吸收特征角度来分析解释酸性硫酸盐土壤障碍因子的改良效果。研究结果表明,与常规施肥(NPK)处理相比,自研改良剂(SAM)和钙镁磷肥(CMP1)处理土壤 pH 大幅增加、交换性酸铝含量急剧降低,根系土壤养分有效性明显升高,水稻根系土壤环境得到改善,水稻根系吸收活力加强,并

提高了作物对土壤有效营养元素的吸收利用,从而使水稻籽粒产量增幅极显著高于其他各处理。酸性硫酸盐土壤障碍因子对土壤与作物的影响机制并非完全抑制。前人研究指出,土壤中活性铝的大量存在会降低磷的有效性,无机离子态铝可与土壤中水溶性磷酸根离子结合生产磷酸铝,从而抑制根对磷元素的吸收;与此同时,活性铝水解还导致土壤溶液 pH 下降,硫、钙、镁等营养元素的有效性降低^[23]。Ma 等^[24]研究认为铝毒害的原初反应是抑制植物根系的生长,在铝胁迫下作物根伸长受阻,根尖抗氧化酶活性显著降低。据报道,在酸性土壤条件下,锰在土壤中的有效性随土壤 pH 的升高而降低,因此,通过改良土壤酸度,如添加石灰类物质能间接抑制锰毒的发生^[25-26]。本试验条件下,LIME 处理水稻产量较 NPK 处理显著增加,但其增产效果远不及 SAM 处理,这不仅是由土壤中磷的有效性以及有效锰含量并未得到明显改善所致,而且还与水稻生长后期石灰处理水稻根系体积、根吸收面积显著低于 SAM 处理有关。澳大利亚政府采取一种叫做石灰辅助性潮汐交换策略以修复 ASS 存在的问题,该措施有效改善了水的质量,使土壤 pH 从 3.5 增加到 6~8,并使土壤中铝和铁还原率降至安全值^[27]。传统认为,石灰既能中和土壤中的酸,又能补充盐基离子,对改良酸性硫酸盐土壤效果明显,但长期施用石灰会导致土壤负面效应,如土壤板结,这是生产中存在的现实问题^[28]。等磷用量条件下,CMP2 处理较 NPK 处理在一定程度上提高了水稻籽粒产量,改善了土壤理化性质,该结果可能与铝、钙呈拮抗有关,钙含量的增加将会引起铝浓度的减少^[29-30]。

综上所述,初步认为本试验条件下缓解植物根际土壤障碍因子的关键在于保证充足有效磷的同时,提高土壤 pH,降低土壤关键毒害金属元素含量,从而改善根系生长环境,促进根系生长发育和根系吸收活力,提高植物营养元素的正常吸收和利用,抑制铁、铝等元素向地上部吸收运输。钙镁磷肥对修复和改良酸性硫酸盐土壤障碍因子效果明显,但作为土壤改良剂其成本投入是自研改良剂的 3 倍,因此,基于以上研究结果并综合考虑改良剂的长期适用性及成本投入,自研改良剂是本试验条件下酸性硫酸盐土壤改良的最佳选择。而自研改良剂是否适用于该区域酸性硫酸盐土壤的改良及大面积推广还有待进一步的研究与验证。

参考文献:

- [1] Lin C. Could acid sulfate soils be a potential environmental threat to estuarine ecosystems on the south China Coast[J]? *Pedosphere*, 1999, 9(1): 53-59
- [2] 黄继茂. 广东滨海强酸性盐渍水稻土(反酸田)化学特性的研究[J]. *土壤学报*, 1958, 6(2): 114-122
- [3] 广东省土壤普查办公室编著. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 282-288
- [4] 李金培. 有机、无机改良剂对酸性硫酸盐土化学动力学与水稻生长的影响[J]. *华南农业大学学报*, 1993, 14(1): 16-23
- [5] 林郑和, 陈荣冰. 植物铝毒及其耐铝机制研究进展[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(13): 94-98
- [6] 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[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 176-183
- [7] 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: 39-114
- [8] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 38-39
- [9] Satawatanamont S, Jr Patrick H W, Jr Moore P A. Effect of controlled redox conditions on metal solubility in acid sulfate Soils[J]. *Plant and Soil*, 1991, 133: 281-290
- [10] 臧小平, 孙光明, 张承林, 等. 酸性硫酸盐土壤上几种磷矿粉对水稻生长的影响[J]. *土壤通报*, 2001, 32(5): 217-219
- [11] Jugsujinda A, Krairapanond A, Jr Patrick H W. Influence of extractable iron, aluminium, and manganese on P-sorption in flooded acid sulfate soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 20: 118-124
- [12] 黄巧义, 唐拴虎, 卢瑛, 等. 酸性硫酸盐土的形成、特性及其生态环境效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1 534-1 544
- [13] 黄巧义, 唐拴虎, 黄旭, 等. 广东省酸性硫酸盐水稻土(反酸田)作物产量主要限制因子分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 180-191
- [14] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivities in Guangdong province, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 177-186
- [15] Ai C, Liang G Q, Sun J W, et al. The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51: 465-477
- [16] Álvarez E, Fernández-Sanjurjo M J, Seco N, et al. Use of mussel shells as a soil amendment effects on bulk and rhizosphere soil and pasture production[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 152-164
- [17] Muhrizal S, Shamshuddin J, Fauziah I, et al. Changes in iron-poor acid sulfate soil upon submergence[J]. *Geoderma*, 2006, 131: 110-122
- [18] Wang L, Yang X L, Rachel K, et al. Combined use of alkaline slag and rapeseed cake to ameliorate soil acidity in an Acid Tea garden soil[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(2): 177-184
- [19] 王秀斌, 唐拴虎, 荣勤雷, 等. 不同改良措施改良反酸田及水稻产量效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 404-412

- [20] Li J Y, Wang N, XU R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 645–654
- [21] Yuan J H, Xu R K, Wang N, et al. Amendment of acid soil with crop residues and biochars[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 302–308
- [22] 李九玉, 赵安珍, 袁金华, 等. 农业废弃物制备的生物质炭对红壤酸度和油菜产量的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 334–339
- [23] 肖厚军, 王正银. 酸性土壤铝毒与植物营养研究进展[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(6): 1 180–1 188
- [24] Ma J F, Sasaki M, Matsumoto H. Al-induced inhibition of root elongation in corn, *Zea mays* L. is overcome by Si addition. *Plant and Soil*, 1997, 188(2): 171–176
- [25] 郇恒福. 不同土壤改良剂对酸性土壤化学性质影响的研究[D]. 海南儋州: 华南热带农业大学, 2004
- [26] 许丹丹, 李金城, 阙广龙, 等. 酸性土壤锰毒及其防治方法[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12F): 472–475
- [27] Šimek M, Virtanen S, Křišťůfek V, et al. Evidence of rich microbial communities in the subsoil of a boreal acid sulphate soil conducive to greenhouse gas emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1–2): 113–122
- [28] Krairapanond A, Jugsujinda A, Patrick Jr W H. Phosphorus sorption characteristics in acid sulfate soils of Thailand: Effect of uncontrolled and controlled soil redox potential (Eh) and pH[J]. *Plant and Soil*, 1993, 157: 227–237
- [29] 田仁生, 刘厚田. 酸化土壤中铝及其植物毒性[J]. *环境科学*, 1990, 11(6): 41–46
- [30] Alva K A, Sumner E M. Amelioration of acid soil infertility by phosphogypsum[J]. *Plant and Soil*, 1990, 128: 127–134

Study on Restoration and Amelioration of Limiting Factors in Acid Sulfate Soils by Basic Materials

YI Qiong, TANG Shuanhu^{*}, HUANG Xu, LI Ping, ZHANG Fabao, YANG Shaohai

(*Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture / Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: Pot experiment was conducted to study the effects of different basic materials (lime, self-development ameliorant and calcium magnesium phosphorus treatment) on the restoration of the main limiting factors and rice growth in acid sulfate soils (ASS). The results showed that the effects of different basic materials were significantly different on soil physical and chemical characteristics, availability of soil nutrient and rice growth. Compared with NPK, SAM and CMP1 treatments effectively increase pH values by 1.25 and 0.92 units respectively, increased available P content by 3.1 times and 2.6 times respectively, while reduced greatly the contents of available Fe and Mn, exchangeable H⁺ and Al³⁺. SAM and CMP1 treatments extremely improved root surroundings thereby effectively control the transport of Fe, Mn and Al elements to the ground through ensuring of enough available P content in combination with the supplement of elements such as Ca, Mg and so on. SAM and CMP1 treatments promoted the growth and development of root, significantly increased the root activity at peak tillering and heading stages, and significantly increased rice grain yield by 121.1% and 105.1% in comparison to NPK, respectively. The effect of LIME treatment was next to SAM and CMP1 treatments. In conclusion, it was preliminarily consider that the key points of the alleviation mechanism of basic materials on limiting factors in ASS lies in improving the available contents of nutrient elements and pH, reducing the contents of some toxic metal elements. In the conditions of this study, CMP1 plays an extremely important role in restoring the limiting factors of ASS, but its cost was 3 times higher than SAM. Thus, taking the applicability for a long time and cost of soil ameliorant into consideration, self-development ameliorant should be a more appropriate soil conditioner for ASS.

Key words: Acid sulfate soils; Basic materials; Limiting factors; Restoration; Amelioration