

几种利用方式下酸性硫酸盐土的环境风险及其连锁效应

刘振乾^{1,3}, 王建武¹, 骆世明¹, 翟金良², 王世岩², 段舜山³

(1. 华南农业大学, 广东 广州 510642; 2. 中国科学院长春地理研究所, 吉林 长春 130021; 3. 暨南大学, 广东 广州 510632)

摘 要: 研究并比较了不同利用方式下酸性硫酸盐土酸形态和铝形态的结构特征, 分析了硫形态与酸形态、酸形态与铝形态之间的相关性。研究发现, 酸性硫酸盐土的不同利用类型中, 土壤酸度由大到小依次为: 鱼塘塘基、荒稻田> 稻田> 荒旱地> 改良稻田> 蔗田> 红树林迹地; 活性铝含量由高到低依次为: 荒旱地> 鱼塘塘基、荒稻田> 稻田> 改良稻田> 蔗田> 红树林迹地。土壤酸度和铝形态含量的层间差异较为显著, 多数随深度增加呈逐渐上升的趋势。酸性硫酸盐土中的硫形态—酸—铝形态之间有明显的连锁关系。
关键词: 利用方式; 酸性硫酸盐土; 环境风险; 连锁效应
中图分类号: X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2002)03 – 0211 – 04

Environmental Risks and Linking Effects of Acidic Sulfate Soils under Several Land Utilization
LIU Zhen-qian^{1,3}, WANG Jian-wu¹, LUO Shi-ming¹, ZHAI Jin-liang², WANG Shi-yan², DUAN Sun-shan³
(1. South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, P. R. China; 2. Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Geography, Changchun 130021, P. R. China; 3. Jinan University, Guangzhou, 510632, P. R. China)

Abstract: In order to understand the relations between land use types and environmental risks of acid sulfate soils (ASS), followed to provide scientific basis for a wise use and effective management of the ASS, the situation of acid hazard and Al toxicity in the ASS were studied through acid and Al forms test and synthesis. The results showed that: (1) in the ASS of some use types, the soil acidity orders were in: pond – bank & fallow – paddy field > paddy field > fallow dry farmland> reformed paddy field> sugarcane field> Mangrove field; (2) contents of active Al forms in the soils were: fallow dry farmland> Pond – bank & fallow paddy field > paddy field > reformed paddy field> sugarcane field> Mangrove field; (3) significant vertical difference of soil acidity and contents of Al forms existed in the ASS and most of them were increased along with the increasing of depth; (4) the correlation chain of S forms – acidity – Al forms was significant.
Keywords: land use; acid sulfate soils; environmental risks; chain effect

酸性硫酸盐土 (Acid Sulfate Soils, 以下简称“ASS”) 是一种自然资源, 但人类的不合理开发利用与干扰又是导致 ASS 发生酸害和铝毒等环境风险的重要原因之一^[1-5]。ASS 中酸的形成、残留和铝的活化, 对农作物 (特别是其根系) 的生长造成障碍; 而酸和铝的溶出并随水体运动向环境的释放, 很容易引起酸害和铝毒的爆发, 导致鱼类、贝类的大量死亡^[1]。此外, 酸的释放还会影响硫的生物地球化学循环, 加剧酸雨等环境问题的威胁^[1-4], 还会强烈腐蚀工程建

筑, 给生产和环境造成巨大损失。因此, 研究 ASS 开发利用方式与其土壤化学性质之间的相互作用规律, 明确 ASS 中硫、酸、铝三者的形态变化及其相互制约关系, 是进行土壤改良和建立合理利用模式的前提, 具有重要意义。
酸性硫酸盐土的环境危害已成为全球性的滨海环境问题, 国际上已先后召开了 4 次有关酸性硫酸盐土研究的国际会议, 交流研究进展和探讨管理对策。我国酸性硫酸盐土的面积约 $11.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 主要分布在广东、广西、海南、福建等地区^[3], 开发利用方式多种多样, 为开展相关内容的研究提供了便利条件, 但目前的研究还很薄弱。

收稿日期: 2001 – 10 – 23
基金项目: 广东省自然科学基金(980161); 中科院知识创新项目 (KXCX2—302)
作者简介: 刘振乾 (1965—), 男, 博士后, 主要从事农业环境与生态研究。

1 区域与方法

1.1 实验区

研究区位于广东省台山市南部广海湾至镇海湾一带的沿海围田区。该区年平均气温 22.2℃, 年雨量可达 2 270—2 460 mm, 年蒸发量只有 1 546 mm, 无霜期长达 363 d。ASS 约有 6 020.27 hm², 是珠江三角洲 ASS 连片分布面积最大的地区^[3]。

1.2 方法

1.2.1 样品采集与处理

采用 5 点随机采样法布设采样点, 分别于 2000 年 11 月、2001 年 3 月和 2001 年 6 月对实验区不同利用类型的 ASS(冲蒌八家鱼塘塘基、冲蒌八家荒稻田、冲蒌八家稻田、斗山镇改良稻田、海侨东堤红树林迹地、海宴新寨围荒旱地、海侨护亨蔗田)按深度分 5 层采样, 每层深度 20 cm。土样用双层塑料袋密封防止氧化, 带回实验室后, 85℃烘干, 研磨、过筛后备用。

1.2.2 分析测试方法

土壤 pH 用电位法测定, 硫的分级测定根据文献[2]的方法进行, 硫的形态分为水溶性 S、交换性 S、黄铁矿 S、黄钾铁矾 S、有机硫和元素 S、全 S。SO₄²⁻ 用硫酸钡比浊法测定。交换性酸总量、交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺ 按文献[8]的常规方法测定。

根据文献[5]中改进的连续分级提取方法, 区分酸性硫酸盐土中的交换态 Al、吸附态无机羟基 Al、有机配合态 Al、氧化铁结合态 Al、层间 Al、非晶体态铝硅酸盐及三水铝石 Al、全 Al, 用等离子发射光谱法测定 Al 含量。

采用酸度和硫酸盐结合的双氧水方法(Peroxide Oxidation Combined Acidity and Sulfate Method, 简称“POCAS”)^[7]测定土壤总实际酸度、总潜在酸度、双氧水消解的硫(S_P)和 1 mol·L⁻¹KCl 提取的硫(S_{KCl}), 并通过差减来确定总硫化物性酸度(TSA)和未氧化双氧水可氧化硫(S_{POS}): TSA = TPA - TAA; S_{POS} = S_P - S_{KCl}。这是目前 ASS 潜在酸性定量评价中最常用的方法之一^[7]。

2 结果与分析

2.1 ASS 利用方式与酸性特征

2.1.1 交换性酸度和 pH 特征

将 3 次定点采样测试的 pH 值、交换性酸度数据的平均值进行统计, 得到各种类型土壤剖面 pH 和交换性酸形态含量的平均值(见表 1)。从表 1 可以发现, 不同利用方式之下, ASS 的 pH 和交换性酸含量存

在显著差异, pH 从小到大依次排列为: 鱼塘塘基、荒稻田 < 稻田 < 荒旱地 < 改良稻田 < 蔗田 < 红树林迹地, 而交换性酸含量排列次序基本相反。其中, 红树林迹地 ASS 的 pH 大于 7, 交换性酸度为 0, 土壤不显酸性。但土壤中硫的含量较高, 属于潜在 ASS。其它剖面土壤 pH 介于 3—5.54 之间, 土壤呈酸性, 为实际 ASS。

表 1 几种土壤剖面的 pH 和交换态酸含量(cmol·kg⁻¹)
Table 1 pH and contents of exchangeable acidity forms in some profiles

剖面类型	pH	交换性酸总量	交换性 H ⁺	交换性 Al ³⁺
鱼塘堤	3.05	20.00	4.67	15.33
荒稻田	3.06	20.34	4.57	15.78
八家稻田	3.16	19.93	3.13	16.79
斗山稻田	3.89	4.36	0.71	3.63
红树林迹地	7.82	0.00	0.00	0.00
荒旱地	3.49			
蔗田	5.54			

蔗田土壤的 pH 比稻田高得多, 荒旱地的 pH 也比荒稻田高, 交换性酸度不到荒稻田的 1/2, 表明甘蔗类旱地作物对酸性土壤的耐性不如水稻, 因此, 酸性硫酸盐土集中分布区的稻田面积远远大于旱地面积。斗山镇的改良稻田采用石灰中和酸、地下暗管排水排酸等措施, 显著削弱了土壤酸性程度, 水稻亩产量接近当地平均水平, 但土壤仍呈显著酸性。由于水产养殖业的经济效益高于水稻种植业, 近年来有大量的 ASS 由稻田改为鱼塘, 形成 ASS 开发利用的新趋势, 主要鱼种由原来的四大家鱼改为以鳊鱼为主, 鱼塘的治酸措施主要是在塘底和塘基撒施石灰。研究证明, 塘基和塘底土壤的酸度依然很高, 鱼类大量的减产、绝收事故经常发生, 酸害发生依然是养殖生产的重大隐患。

2.1.2 土壤酸性的垂直分布

表 1 显示, 交换性铝在交换性酸总量中平均约占 3/4, 而交换性氢仅占约 1/4。从表 1 和图 1 可以发现, 各种开发利用方式的土壤剖面中, pH 值和交换性酸总量的层间差异比较明显, 有一定的分布规律。除塘基以外, 其它剖面共同的趋势是随深度增加, 土壤酸性增强。其原因可能与灌溉和排水过程使土壤表层酸大量淋失有关。鱼塘塘基交换性酸总量的分布趋势与其它剖面较一致, 但其表层土壤 pH 相对较低, 交换性氢离子含量相对较高, 主要原因是其地形相对凸出, 表层土壤滞水能力差, 透气性好, 黄铁矿氧化较强烈。塘基底层交换性铝含量相对较高。

2.1.3 潜在酸性和实际酸性构成特征

ASS 的潜在酸性分析对预测其潜在风险具有重要的意义。在“POCAS”测定指标中,总实际酸度和 KCl 可提取 S 都用来反映土壤实际酸度,总硫化物性酸度和双氧水消解的 S 反映残留酸度,总潜在酸度和未氧化双氧水可氧化 S 反映总潜在酸度。据有效数据统计(见表 2)显示,除了荒稻田剖面总实际酸度均值略高于鱼塘塘基外,其它的各项酸度指标排列情况基本为:鱼塘塘基> 荒稻田> 稻田> 荒旱地> 改良稻田> 蔗田> 红树林迹地。

2.2 不同利用方式下 ASS 的铝形态特征

在所提取的各种铝形态中,交换态 Al、吸附态无

图 1 酸性硫酸盐土 pH 和交换性酸总量的垂直分布
Figure 1 Vertical distribution of pH and total exchangeable acidity in the soil profiles

表 2 各剖面主要酸度形态和 S 形态的平均含量 Table 2 Average contents of the main acidity forms and S forms in the profiles						
剖面类型	总实际酸度 /cmol · kg ⁻¹	总潜在酸度 /cmol · kg ⁻¹	总硫化物性酸度 /cmol · kg ⁻¹	未氧化双氧水可氧 化 S/%	KCl 可提取 S /%	双氧水消解的 S /%
鱼塘堤	15.68	67.19	51.51	0.96	0.35	0.61
荒稻田	15.80	40.55	24.75	0.69	0.25	0.44
八家稻田	15.43	38.22	22.78	0.60	0.20	0.39
斗山稻田	3.53	9.48	5.96	0.16	0.06	0.11
红树林迹地	0	0	0	0.08	0.06	0.03
荒旱地	0.743	1.264	0.521	—	—	—

机羟基 Al 和有机配合态 Al 是活性较强的部分,也是 ASS 中“铝毒”的主要来源,在生态环境和铝的形态转化上具有重要意义^[4-5]。氧化铁结合态 Al、层间 Al、非晶体态铝硅酸盐及三水铝石 Al 的活性较差,它们的形成往往使活性铝老化,土壤交换性酸度下降。但它们又是活性铝形成的后备资源。从表 3 可以看出,5 种不同利用类型下,ASS 交换态 Al、吸附态无机羟基 Al 和有机配合态 Al 含量差异显著。其含量的大小排列次序与实际酸度排列基本一致。从图 2 可以看出,除去荒稻田的吸附态无机羟基 Al 的土壤含量明显随深度增加而减小外,其它利用类型交换态 Al、吸附态无机羟基 Al 和有机配合态 Al 的土壤含量都随深度增加而增大或变化不显著。这一点与交换性酸的垂直分布规律一致。不同利用类型之间,土壤全 Al 含量的垂直升降趋势不一致。

2.3 连锁效应

2.3.1 土壤酸度与硫形态含量的相关性

从表 4 可以发现,土壤 pH 值与其各种形态硫的含量之间呈现负相关关系,其它的土壤酸性指标含量与硫形态含量之间均为正相关关系。在所有统计的相关项中,土壤 pH 值与所有硫形态指标含量均呈负相关,相关系数介于 -0.30—-0.54;其它土壤酸度指标与所有硫形态指标之间均呈正相关,且相关系数小于 0.50 的仅 1 项,其余均为极显著相关。各种硫形态与各酸性指标相关系数的绝对值的平均值由大到小排列为:水溶性 S> 交换性 S> 全 S、黄钾铁矾 S> 有机 S + 元素 S> 黄铁矿 S,该次序表明了相关程度由强到弱的分布。

2.3.2 铝形态与酸形态指标之间的相关性

对比表 1、表 2 和表 3 的数据可以发现,除荒旱地外,其它 5 种利用类型中,3 种活性较强的铝形态(交换态 Al、吸附态无机羟基 Al、有机配合态 Al)的土壤含量由大到小的排列次序基本与土壤酸度(交换性酸和实际酸度)由强到弱的排列次序一致,而活性较弱

表 3 各剖面 ASS 中铝形态平均含量(g · kg ⁻¹) Table 3 Average contents of Al forms in the profiles							
剖面类型	交换态 Al	吸附态无机羟基 Al	有机配合态 Al	氧化铁结合态 Al	层间 Al	非晶态硅酸盐及三水铝石 Al	全 Al
鱼塘堤	1.23	0.49	3.98	0.55	0.90	9.30	93.37
荒稻田	1.17	0.47	3.06	0.98	1.38	14.11	102.58
八家稻田	1.08	0.46	3.43	0.94	1.06	14.16	117.93
改良稻田	0.41	0.33	1.83	0.65	1.36	11.37	69.93
红树林迹地	0.02	0.15	0.61	2.06	2.26	11.96	127.34

图 2 ASS 中铝形态的垂直分布

Figure 2 Vertical distribution of Al forms in the soil profile

表 4 酸指标与硫形态指标之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients(r) between acid index and S forms

硫形态	pH	交换性酸总量	交换性 H ⁺	交换性 Al ³⁺	总实际酸度	总潜在酸度	绝对值平均
水溶性 S	- 0. 50	0. 85	0. 92	0. 77	0. 89	0. 88	0. 80
交换性 S	- 0. 54	0. 75	0. 72	0. 71	0. 78	0. 86	0. 73
黄钾铁矾 S	- 0. 48	0. 70	0. 72	0. 65	0. 78	0. 76	0. 68
黄铁矿 S	- 0. 30	0. 54	0. 45	0. 54	0. 57	0. 61	0. 50
有机 S + 元素 S	- 0. 34	0. 64	0. 68	0. 59	0. 67	0. 78	0. 62
全 S	- 0. 43	0. 71	0. 67	0. 68	0. 76	0. 80	0. 68

注: $n = 30$, $\alpha_{0.01} = 0.463$, $\alpha_{0.05} = 0.361$ 。

的氧化铁结合态 Al、层间 Al 的土壤含量由大到小与土壤酸度由强到弱的排列次序基本相反。这种分布显示,不同利用类型间 ASS 的酸性强度和铝毒强度具有一致性的分布特点。相关分析表明(见表 5),交换态 Al 和有机配合态 Al 与 pH 之间呈显著负相关,与交换性酸总量、交换性 H⁺、交换性 Al³⁺ 之间呈显著正

相关。吸附态无机羟基 Al 和有机配合态 Al 与总实际酸度、总潜在酸度之间,呈显著正相关。再一次表明 ASS 中铝的活性与其酸性强弱显著相关。此外,交换态 Al 含量与有机质含量、吸附态无机羟基 Al 含量与 CEC、层间 Al 含量与 CEC 之间的相关系数也都大于 0.70,表明土壤有机质含量和 CEC 条件对铝形态转

表 5 铝形态与酸形态指标之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients(r) between Al forms and acid indexes

铝指标	pH	交换性酸总量	交换性 H ⁺	交换性 Al ³⁺	总实际酸度	总潜在酸度	总硫化物性酸度	有机质	CEC
交换态 Al	- 0. 65	0. 52	0. 44	0. 52	0. 22	0. 24	0. 23	0. 74	—
吸附态无机羟基 Al	0. 32	- 0. 41	- 0. 42	- 0. 38	- 0. 66	- 0. 52	- 0. 44	—	0. 70
有机配合态 Al	- 0. 72	0. 69	0. 62	0. 67	0. 52	0. 58	0. 56	—	- 0. 45
氧化铁结合态 Al	0. 24	- 0. 38	- 0. 42	- 0. 34	- 0. 63	- 0. 59	- 0. 54	- 0. 53	—
层间 Al	0. 14	- 0. 35	- 0. 32	- 0. 33	- 0. 62	- 0. 52	- 0. 46	—	0. 75
非晶体态铝硅酸盐及三水铝石 Al	- 0. 14	- 0. 06	- 0. 09	- 0. 04	- 0. 29	- 0. 36	- 0. 36	0. 59	0. 68

注: $n = 25$, $\alpha_{0.01} = 0.505$, $\alpha_{0.05} = 0.396$ 。

化也具有显著的影响。

3 结论

(1)相同利用方式下,土壤的酸度、活性铝形态的含量和垂直分布有较大差异,而且不同的作物或产品对酸害和铝毒的敏感性和忍耐性亦有差异。从生产的安全性来看,水田比旱田安全,鱼塘养殖风险较大。改良稻田的总实际酸度和交换性酸含量明显小于未改良稻田,水稻产量达到或接近非 ASS 稻田的平均水平,效果显著,但其 pH 值上升幅度不十分显

著,说明 ASS 的改良是一项艰巨的任务。同时探讨合理、高效的开发利用模式也是一项十分紧迫的任务。

(2)土壤酸形态含量与硫形态含量之间、土壤铝形态(特别是活性形态)含量与酸度之间均有显著的正相关关系,表明硫形态—酸度—铝形态之间具有明显的连锁制约关系。这种连锁关系还有待于进一步深入研究。

(3)土壤酸害和铝毒的强度具有协同性的特点,控制黄铁矿的氧化、加石灰中和形成的酸、洗酸排酸等是目前主要的管理手段。(下转第 227 页)