

铅污染及酸化的农田改良与利用研究

梅娟^{1,2}, 谢华^{3*}, 阎秀兰¹, 李华², 廖晓勇^{1*}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.山西大学, 太原 030006; 3.广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022)

摘要:研究石灰-氢氧化钠单施或与有机肥、蚕沙配施对铅污染及土壤酸化的农田改良效果及植物生长的影响。结果表明, 各种改良处理可在一定程度上提高土壤的 pH 和有机质, 促进植物生长。改良处理后种植甘蔗, 其植株地上部 Pb 含量均有所下降, 但甘蔗汁、蔗糖 Pb 含量均超过相关标准, 具有较大的健康风险。与对照处理相比, 各类改良处理可降低皇竹草地上部 Pb 含量的 39%~88%, 且均在《GB 13078—2001 饲料卫生标准》限值内。由此可见, 改良污染农田后, 种植皇竹草具有较低的重金属健康风险, 还可将其用作饲料以产生经济效益, 因而是一种经济、安全且生态的治理模式。

关键词:铅; 土壤酸化; 改良; 皇竹草; 甘蔗

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)01-0075-06 doi:10.11654/jaes.2014.01.009

Amelioration and Reutilization of Lead Contaminated and Acidified Farmland

MEI Juan^{1,2}, XIE Hua^{3*}, YAN Xiu-lan¹, LI Hua², LIAO Xiao-yong^{1*}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China; 2. Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 3. Scientific Research Academy of Guangxi's Environmental Protection, Nanning 530022, China)

Abstract: Exploring measures for ameliorating and reutilizing heavy metal contaminated soils attracts wide-ranging interest. A field experiment was conducted on farmland with lead contamination and soil acidification. Four treatments including lime-sodium hydroxide (LS), lime-sodium hydroxide and organic fertilizer (LSO), lime-sodium hydroxide and silkworm excrement (LSS) and control (CK) were used. To some extent, all amelioration treatments improved soil pH and organic matter, promoting plant growth. Amendments slightly decreased lead accumulation in the shoots of sugarcane. However, lead concentrations in the juice and sucrose exceeded the food health standards, posing a great healthy risk. Compared with the control, amelioration treatments reduced lead contents of hybrid giant napier (*Pennisetum hybridum*) by 39 to 88%, and plant lead concentrations were within the "feed hygiene standards" (GB 13078—2001). These results suggest that heavy metal contaminated soils could be used to grow hybrid giant napier for feeds with lower health risks after being ameliorated.

Keywords: lead; soil acidification; amelioration; hybrid giant napier; sugarcane

铅是对神经系统有毒害的重金属元素, 尤其是对儿童的智力发育和神经行为有很大影响^[1]。近年我国铅污染事件频发, 2009 年发生了 6 起较大血铅事件, 2010 年发生 9 起较大血铅事件^[2]。因人类活动造成的农田铅污染日趋严重, 上海、广州、天津、沈阳、西安等城郊的农田土壤均受到不同程度的 Pb 污染^[3], 这不仅影响作物的产量和质量, 而且 Pb 可通过作物系统进

入食物链, 威胁到人类健康。土壤改良法是农田重金属污染综合治理的常用手段之一, 一方面通过增加吸附位点或促进重金属离子共沉淀等过程来降低重金属生物有效性, 另一方面通过改变土壤 pH 值、增加土壤肥力、提高通透性等达到改善土壤环境以促进作物生长的目的。石灰等碱性化学制剂是最常用的土壤改良剂之一, 李瑞美等^[4]使用石灰改良受 Cd、Pb 污染的农田, 提高了土壤 pH 值, 使土壤中有效 Pb 含量降低了 23.7%~57.7%, 显著地抑制了水稻、花生对 Pb 的吸收。有机物料对土壤重金属的生物有效性也有一定抑制效果, 同时还具有改善土壤结构、调节土壤养分的功能。吴清清等^[5]在红壤中施入不同比例的鸡粪或垃圾有机肥, 结果表明土壤有机质、有效磷、速效钾含量

收稿日期: 2013-05-10

基金项目: 中央环境保护专项资金项目; 国家 863 计划项目 (2012AA06 A201)

作者简介: 梅娟 (1987—), 女, 山东临沂人, 在读硕士生, 主要从事土壤污染修复研究。E-mail: meijuan23@163.com

* 通信作者: 廖晓勇 E-mail: liaoxiao@igsnr.ac.cn

谢华 E-mail: xiehuagx@139.com

均增加, 苋菜植株中 Pb 含量比不施肥降低 4.1%~71.3%。采用有机物料与无机改良剂相结合的方法, 既能发挥无机改良剂较强的抑制效果, 又能发挥有机物料对土壤肥力质量较强的调节功能, 对重金属 Pb 污染的酸性土壤具有较好的修复改良效果, 有利于污染土壤的可持续利用。

2001 年, 特大洪灾导致广西环江县大环江流域铅锌硫铁矿约 1 万 m³ 的尾砂和硫铁粉冲入沿江的农田, 致使 613 hm² 良田遭受酸化和重金属污染^[6], 其中约 30% 的农田土壤酸化且受中轻度铅污染。该地区污染农田面积大, 土地利用率极低, 农作物产量低、品质差且重金属超标, 严重威胁当地的农业生产安全及民众健康。本文选择大环江流域有代表性的铅污染且酸化农田为研究对象, 通过前期的探索性试验确定化学改良剂为石灰与氢氧化钠, 配合施用当地常见的有机肥; 另外, 选定根系发达、生物量大且生理耐受能力强的优质牧草(皇竹草)及当地一种主要经济作物(甘蔗)为供试植物, 研究碱性化学制剂-有机肥对土壤酸化与铅污染农田的改良效果, 并分析种植牧草与甘蔗的健康风险, 旨在探索适宜这类铅污染且酸化农田的安全利用模式。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于环江毛南族自治县北部大环江沿岸(东经 107°51'~108°43', 北纬 24°44'~25°33'), 气候类型为亚热带季风气候, 年平均气温 19.9 °C, 年日照数为 1392 h, 年降雨量 1389~1750 mm, 年平均白霜日为 6.5 d。红壤是当地的主要土壤类型。

前期调查发现耕层(0~20 cm)土壤呈酸性, 平均 pH 值为 4.99(4.01~6.32); 耕层 Pb 含量为 256~309

mg·kg⁻¹, 平均值为 279.06 mg·kg⁻¹(*n*=36), 超出我国土壤环境质量二级标准(土壤全 Pb<250 mg·kg⁻¹, pH<6.5), 是广西土壤 Pb 背景值(23.16 mg·kg⁻¹)的 12.04 倍。试验区农田土壤出现酸化, 且遭受一定程度的铅污染。试验区土壤主要理化性质和其他重金属元素含量见表 1。

1.2 试验方案与样品采集

1.2.1 土壤改良材料选择

石灰: 采自环江县水源镇温平石灰厂, pH 值 13, 全 Pb 15.5 mg·kg⁻¹。

氢氧化钠: 新疆中泰化学股份有限公司, 全 Pb 25.5 mg·kg⁻¹。

有机肥: 采自环江县大才乡新坡村木连屯, 经风干, pH 值 6.5, 全 Pb 7.46 mg·kg⁻¹。

蚕沙: 采自环江县思恩镇文化村下兰屯, 经风干, pH 值 9, 全 Pb 1.93 mg·kg⁻¹。

1.2.2 供试植物

皇竹草(*Pennisetum hybridum*): 新型皇竹草, 种苗由当地牧场提供。

甘蔗(*Saccharum officinarum*): 台优 25 号。

1.2.3 试验处理

本研究采用大田试验方法, 设置 4 组处理进行污染土壤改良, 处理分为对照、石灰-氢氧化钠单施及石灰-氢氧化钠与有机肥或蚕沙配施四种, 具体施用方案见表 2。每组处理 3 个片区, 每个片区约 667 m², 按随机区组排列。

施加改良剂后第 3 d, 每个片区分为 3 个小区, 小区之间起低垄, 翻耕, 分别为皇竹草种植区、甘蔗种植区及无作物种植区, 皇竹草、甘蔗的种植密度(行距×株距)分别为 80 cm×50 cm、90 cm×15 cm。试验周期为 2011 年 3 月至 2012 年 1 月, 植物全生育期不进行灌

表 1 试验土壤主要理化性质及重金属含量

Table 1 Physical and chemical properties of the experimental soil

有机质/ g·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	碱解氮/ mg·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	容重/ g·cm ⁻³	孔隙度/ %	固相体积/ %	铜/ mg·kg ⁻¹	锰/ mg·kg ⁻¹	锌/ mg·kg ⁻¹	总砷/ mg·kg ⁻¹	总镉/ mg·kg ⁻¹
17.95	48.05	64.08	16.43	1.20	54.53	45.47	20.36	62.20	152.49	19.95	0.58

表 2 改良剂的施用情况

Table 2 Applications of soil amendments

时间	改良剂	CK 对照	LS 石灰+氢氧化钠	LSO 石灰+氢氧化钠+有机肥	LSS 石灰+氢氧化钠+蚕沙
第 1 d	石灰/t·hm ⁻²	0	15	15	15
	氢氧化钠/t·hm ⁻²	0	7.5	7.5	7.5
第 15 d	有机肥/t·hm ⁻²	0	0	30	0
	蚕沙/t·hm ⁻²	0	0	0	30

溉和施肥,采用人工除草方式防治田间杂草。

1.2.4 土壤、植物样品采集与前处理

土壤翻耕后,每个小区分别采用五点法布置 5 个样点,取 0~20 cm 土壤组成混合样品,在室内风干,除去土壤中的石块、植物根系和凋落物等,粉碎,过 2 mm 筛,测定土壤 pH 值及有机质含量。

试验于 2011 年 6 月至 10 月连续定期采集 5 次植物样品,每隔 30 d 采集一次,每个小区采用五点法布置 5 个样点,采集各样点 1 m² 内的植物地上部,组成混合样品,用自来水清洗表面粘附的土壤之后,再用去离子水淋洗 3 遍,晾干,105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘至衡重,粉碎,用于重金属含量测定。2012 年 12 月采集成熟期甘蔗茎,榨汁,分别收集汁液和蔗渣,取部分甘蔗汁烘干至衡重测蔗糖含量,蔗渣 105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘至衡重,粉碎,用于重金属含量测定。皇竹草、甘蔗于 2012 年 12 月测地上部生物量。

1.3 样品分析与测定

土壤理化性质按土壤理化常规分析法测定^[7-8],重铬酸钾容量法测有机质^[8],土壤 pH 采用土:水=1:2.5 测定^[9]。植物及甘蔗汁、蔗渣用 HNO₃-HClO₄ 联合消煮(GB 5009.12—2010)^[10],用 ICP-OES 法测定全铅^[11],分析过程加入国家标准植物样品(GSV-3)进行分析质量控制。测定结果均在允许误差范围内。

1.4 数据分析

所有试验数据均采用 SPSS 17.0 和 Excel 2003 进行统计分析,方差分析应用 SPSS 的 One-Way ANOVE 处理,显著性水平均为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同改良处理对土壤 pH 和有机质的影响

石灰-氢氧化钠单施或与有机肥、蚕沙配施均显著提高了土壤的 pH 值(表 3),不同的改良处理之间无显著性差异。与对照组相比,只施加石灰和氢氧化

表 3 改良处理对土壤 pH 值和有机质的影响
Table 3 Soil pH and organic matter after treatments with different amendments

处理	pH	有机质/g·kg ⁻¹
CK	4.99±0.80b	17.09±1.95b
LS	7.79±0.17a	17.30±2.54b
LSO	7.63±0.34a	21.16±1.98a
LSS	7.36±0.67a	20.69±2.23a

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

钠,土壤 pH 值提高了 2.8,碱性物质的添加消耗了污染农田土壤溶液中大量活性酸;石灰-氢氧化钠与有机肥或蚕沙配施土壤 pH 值低于石灰-氢氧化钠单施,这是由于有机肥或蚕沙等大量有机质的加入,缓解了因碱性制剂添加导致的土壤 pH 值升高。有机肥或蚕沙的施用显著提高了土壤有机质含量,其中 LSO 处理效果最明显,有机质含量比 CK 处理提高了 24% 左右;LSS 处理效果较 LSO 处理稍差,有机质含量比 CK 处理提高了 21% 左右。

2.2 不同改良处理对植物地上部生长的影响

皇竹草与甘蔗在试验期间的生长发育均未出现明显胁迫现象,两种植物在一年种植周期内均可正常生长,各生长阶段无受抑制表现。但改良处理对供试植物的生物量产生了影响,石灰-氢氧化钠单施或与有机肥、蚕沙配施均可不同程度地提高皇竹草、甘蔗地上部生物量,其中 LSO、LSS 处理均显著提高了两种植物地上部生物量,LS 处理皇竹草地上部干物量最高,LSS 处理对甘蔗地上部增产效果最佳(表 4)。LS 处理可显著提高皇竹草地上部生物量,比 CK 处理高约 33.9%;LSO、LSS 处理皇竹草地上部生物量比 CK 处理分别高出约 24.6%、28.6%。甘蔗地上部生物量依次为 LSS>LSO>LS>CK,LSS 处理甘蔗地上部生物量比 CK 处理高 59.8% 左右。

表 4 改良处理对植物地上部生物量的影响(t·hm⁻²)
Table 4 Effects of soil amendments on plant aboveground biomass

处理	皇竹草	甘蔗
CK	71.13±4.39c	21.22±2.52c
LS	95.24±7.20a	22.29±4.02c
LSO	88.65±2.14b	27.98±5.03b
LSS	91.48±1.03ab	33.91±1.34a

2.3 不同改良处理对植物 Pb 含量的影响

各改良处理的皇竹草、甘蔗地上部 Pb 含量均低于对照处理(图 1)。三种改良措施皇竹草地上部 Pb 含量比对照处理低 39%~88%,Pb 含量大小顺序大致为 LS<LSO<LSS<CK;施加改良剂后皇竹草地上部 Pb 含量介于 1.34~12.56 mg·kg⁻¹ 之间,除 LSO 处理在 6 月份的样品(12.56 mg·kg⁻¹)外,其他所有样品 Pb 含量均在《饲料卫生标准》(GB 13078—2001)规定的奶牛、肉牛精料补充料的 Pb 最高允许含量(≤ 8 mg·kg⁻¹)范围内;而对照处理的样品超标率为 80%,其 Pb 含量平均值为 14.73 mg·kg⁻¹,最高浓度为 24.04 mg·kg⁻¹。LS、LSO、LSS 三种处理甘蔗地上部 Pb 含量比 CK 低 9%~53%,其中 LSO 处理甘蔗地上部 Pb 含量最低。皇

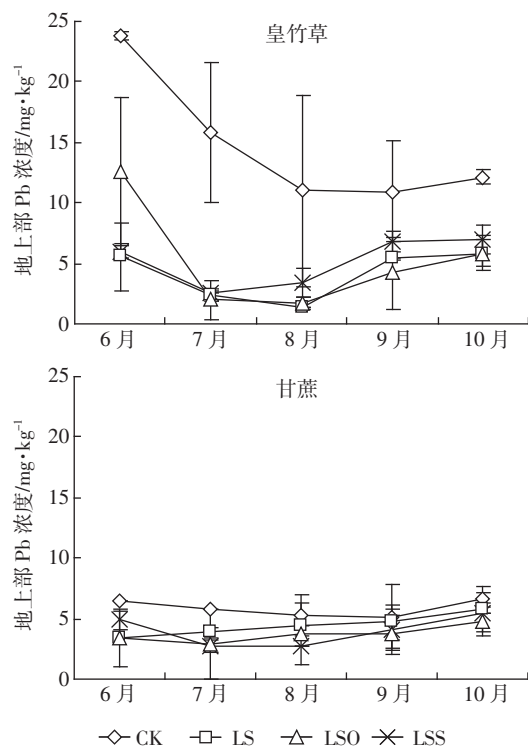


图1 植物地上部铅含量的动态变化

Figure 1 Dynamics of Pb concentrations in plant aboveground part

竹草地上部 Pb 含量随植株生长总体下降,但呈现出先降低后略有升高的趋势;甘蔗地上部 Pb 含量则基本保持平稳而微有波动。

与对照相比,石灰-氢氧化钠与有机肥配施可显著降低甘蔗汁、蔗糖中 Pb 的含量,石灰-氢氧化钠与蚕沙配施可显著降低蔗渣中 Pb 的含量,石灰-氢氧化钠单施对甘蔗汁、蔗糖及蔗渣中 Pb 含量的影响均不显著(表5)。LSO、LSS 处理蔗汁及蔗糖中 Pb 含量比 CK 分别低 35%、26%左右,蔗渣中 Pb 含量分别低 18%、25%左右。所有样品蔗汁中 Pb 含量均介于 0.16~0.24 mg·kg⁻¹ 之间,大部分 Pb 残留于蔗渣中,蔗渣中 Pb 含量介于 2.26~4.89 mg·kg⁻¹ 之间。甘蔗汁中 Pb 含量均超过国家标准《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2005)规定的水果中铅的限量值(≤0.1 mg·kg⁻¹),平均超标 1.47 倍。蔗糖中 Pb 含量介于 1.67~3.45

表5 改良处理对甘蔗汁、蔗糖及蔗渣中铅含量的影响(mg·kg⁻¹)
Table 5 Lead concentrations in the juice, cane sugar and bagasse of sugarcane in different amendments

处理	甘蔗汁	蔗糖	蔗渣
CK	0.24±0.05a	2.87±0.63a	3.87±0.16a
LS	0.24±0.08a	2.81±0.89a	3.87±1.45a
LSO	0.16±0.03b	1.87±0.29b	3.16±0.53a
LSS	0.18±0.02ab	2.14±0.20ab	2.92±0.93b

mg·kg⁻¹ 之间,均超出我国《食糖卫生标准》(GB 13104—2005)规定的原糖中 Pb 含量的最高限量值(Pb≤0.50 mg·g⁻¹),超标率为 100%,平均超标 3.85 倍。

2.4 不同改良处理对植物累积铅的影响

皇竹草地上部对土壤中 Pb 的累积量大于甘蔗,平均最高总 Pb 累积量为甘蔗的 4.70 倍(图2)。对照处理皇竹草总 Pb 累积量最高,为 863.20 g·hm⁻²,施加改良剂后,皇竹草地上部总 Pb 累积量均有显著下降,但各处理间差异不显著,LS、LSO、LSS 处理皇竹草地上部总 Pb 累积量分别为 CK 的 0.64、0.60、0.74 倍,这可能是由于改良剂对皇竹草地上部生物量的提高程度小于对 Pb 吸收的抑制程度。相比其他处理,LSS 处理甘蔗地上部总 Pb 累积量最高,且显著高于 LS、LSO 处理,分别是 CK、LS、LSO 处理的 1.23、1.41、1.36 倍。

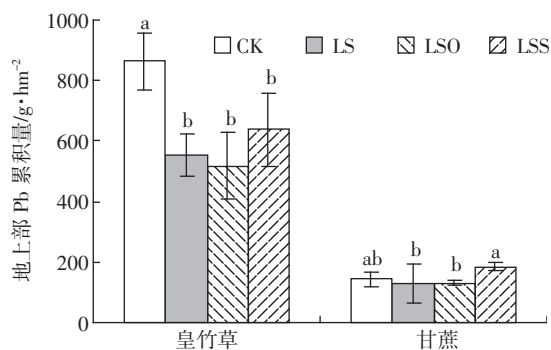


图2 改良处理对植物地上部铅累积量的影响

Figure 2 Effects of soil amendments on Pb accumulations in plant aboveground part

3 讨论

3.1 改良处理对植物 Pb 含量及 Pb 累积量的影响

土壤改良法是治理农田污染行之有效的措施之一,本研究证实在土壤酸化且铅污染农田的修复过程中,无论是碱性添加剂单施还是配施有机肥料均能不同程度地降低种植植物的 Pb 含量。陈宏等^[12]研究表明石灰能降低或显著降低土壤 Pb 的植物可利用性,明显地抑制 Pb 从土壤向植物体内迁移,随着石灰用量的增加,莴笋 Pb 含量逐渐减少;Castaldi 等^[13]盆栽试验表明石灰能显著降低酸性土壤(pH=4.2)中 Pb、Cd 和 Zn 的生物有效性,显著提高豌豆和小麦的产量,抑制 Pb 向植物地上部转移;杜彩艳等^[14]研究表明随着石灰用量的增加大白菜中 Pb 的含量逐渐降低,石灰配施低量猪粪改良土壤可抑制大白菜对 Pb 的吸收效果。本研究与以上结果一致:石灰-氢氧化钠单施皇竹草地上部 Pb 含量最低,石灰-氢氧化钠与有机肥配施收获时甘蔗地上部 Pb 含量最低。石灰等改良剂

的施入能降低土壤中水溶态、可交换态 Pb,而增加碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态的 Pb^[14],从而降低植物对铅的吸收富集。施入石灰后, Ca²⁺与土壤中 Pb²⁺之间存在离子拮抗作用,降低了土壤中碳酸盐结合态 Pb 含量^[15];施入石灰、氢氧化钠提高了土壤的 pH 值,一方面增加了土壤表面可变负电荷、削弱了 H⁺对交换位点的竞争而增加对 Pb²⁺的吸附,另一方面使铅离子的羟基复合物增加,降低了离子的平均电荷,使吸附反应的障碍减小;同时 pH 值升高使土壤中 Fe²⁺、Mn²⁺水解为 Fe(OH)₂、Mn(OH)₂^[16],增加了铁-锰氧化物,从而增加 Fe-Mn 氧化物结合态 Pb 含量^[17];有机肥或蚕粪的施入,不仅影响了土壤的理化性质,为 Pb²⁺提供了直接的吸附位点,腐植酸中的胡敏酸和胡敏素等还与 Pb²⁺形成难溶性的络合(螯合)物,增加了土壤中有有机物结合态 Pb 的含量^[18],抑制了植物对 Pb 的吸收。

植物地上部重金属含量的变化对其安全利用具有一定的指导作用。试验区皇竹草、甘蔗生长中期(8月到9月)地上部 Pb 含量基本低于植物生长前、后期,这与翁高艺等^[19]研究的铜锌铅复合污染土壤上香薷植物叶片对铅的吸收动态变化规律一致。重金属在植物体内的变化是很复杂的^[20-21],方其仙等^[22]研究了铅锌矿区圆叶无心菜对 Pb 的累积特征后发现,随着生长时期的延长圆叶无心菜 Pb 含量不断增加。植物生长期 Pb 浓度的下降可能是由于当地气温及降水等气候条件适宜导致的“相对稀释效应”所致,即元素的累积速度低于植物的生长速度,致使元素含量下降。同时 Pb 不是植物体所需要的营养元素,并且一旦进入植物体内之后就很难转移^[23],若植物生长速度放缓则在植物生长后期元素可能呈现出一定的累积效应。

种植植物可提取土壤中的重金属到植物地上部,对污染农田具有一定的修复作用。皇竹草、甘蔗对 Pb 的耐性都较强,均可在铅污染及酸化土壤上生存并在一年种植周期中正常生长,而施加改良剂后,皇竹草地上部的 Pb 累积量虽均低于对照处理,但仍能累积较高的 Pb,甘蔗地上部的 Pb 累积量与对照处理相比变化不显著。因此,这两种植物在铅污染且酸化的农田上种植,可在产生一定经济效益的同时又能起到修复 Pb 污染土壤的效果,其中种植皇竹草的修复效果较好。

3.2 污染农田改良后再利用的环境健康风险与经济效益分析

皇竹草是由象草与美洲狼尾草杂交育成的高产

优质禾本科牧草,能适应我国多数地区的气候条件和土质栽培,每年可生产粗蛋白 15~22.5 t·hm⁻²,是牛、马、羊、鱼、鸵鸟等草食动物的优质饲料^[24],具有较好的经济效益。改良土壤后,皇竹草干草产量在供试期内可达 95.24 t·hm⁻²,比象草等其他牧草要高。同时皇竹草地上部 Pb 含量最低且均未超出饲料卫生标准,直接喂养肉牛或作青贮牧草的健康风险均较小,故改良土壤后种植皇竹草养殖肉牛或其他动物安全可行且经济效益较好。

甘蔗生产为广西的支柱产业,但在污染试验区(土壤改良或未改良)种植的甘蔗,无论是直接食用还是作为蔗糖原料均具有较高的健康风险,甘蔗汁、蔗糖 Pb 含量均高出相关限量标准。夏会龙等^[25]研究表明当土壤中 Pb 含量大于 100 mg·kg⁻¹时,甘蔗汁中的 Pb 含量均超过 0.1 mg·kg⁻¹,本研究结果与其一致。施加改良剂后,试验区蔗糖的最低平均铅含量分别为 1.87 mg·kg⁻¹,若按现代营养学的健康吃糖标准(每公斤体重每天 0.5 g 糖)计算,体重 70 kg 的成年人每日消耗蔗糖 35 g,则仅食糖一项人体最低摄入的铅元素为 0.065 mg·d⁻¹,为 WHO(1993)设定的成年人每天允许摄入 Pb 的限量值(0.25 mg·d⁻¹)^[26]的 26%,具有较大健康风险。

4 结论

针对铅污染且酸化农田,无论通过单施石灰-氢氧化钠还是配施有机肥与蚕沙改良,都可提高土壤 pH 和有机质,并有效降低植物地上部 Pb 含量。改良农田再种植甘蔗,可提高甘蔗产量,但其甘蔗汁或蔗糖的 Pb 含量仍然超过相应的标准,说明种植甘蔗具有一定的重金属健康风险。改良农田种植皇竹草,产量提升效果明显,且地上部 Pb 含量大幅度下降,符合饲料卫生标准。因此,改良酸化农田,种植皇竹草,并采用该植物养牛或作青贮饲料等用途具有较低的健康风险和较高的经济效益,这是一种生态、经济、安全的污染农田再利用模式。

参考文献:

- [1] Koller K, Brown T, Spurgeon A, et al. Recent developments in low-level lead exposure and intellectual impairment in children[J]. *Environmental health perspectives*, 2004, 112(9):987-994.
- [2] 张华英,宋立新. 对铅污染及其防治对策的几点思考[J]. *北方环境*, 2012, 25(3):87-88.
- [3] ZHANG Hua-ying, SONG Li-xin. Thinking on lead pollution status and prevention measure[J]. *Northern Environment*, 2012, 25(3):87-88.
- [3] 周建利,陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与

- 展望[J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(5): 476-480.
- ZHOU Jian-li, CHEN Tong-bin. Situation and prospect of research on heavy metal pollution in vegetables and soils for vegetable cultivation in urban areas of China[J]. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2002, 22(5): 476-480.
- [4] 李瑞美, 王果, 方玲. 石灰与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 293-296.
- LI Rui-mei, WANG Guo, FANG Ling. Effects of lime complexation organic manure on uptake of Cd, Pb by crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 293-296.
- [5] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1302-1309.
- WU Qing-qing, MA Jun-wei, JIANG Li-na, et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1302-1309.
- [6] 翟丽梅, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1206-1211.
- ZHAI Li-mei, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, et al. Pollution of agricultural soils resulting from a tailing spill at a Pb-Zn mine: A case study in Huanjiang, Guangxi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(6): 1206-1211.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978: 132-142, 146-153, 514-518.
- Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 132-142, 146-153, 514-518.
- [8] 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, 1999: 27-28, 266-269.
- LU Ru-kun. Agricultural chemical analysis method of soil[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 27-28, 266-269.
- [9] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 1146-1151.
- LEI Mei, YUE Qing-Ling, CHEN Tong-Bin, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1146-1151.
- [10] 中华人民共和国国家标准. GB 5009. 12—2010. 食品安全国家标准: 食品中铅的测定[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2010.
- Chinese Standards. GB 5009. 12—2010 National food safety standard: Determination of lead in foods[S]. Beijing: Ministry of Health of the People's Republic of China, 2010.
- [11] Duz M Z, Celik K S, Aydin I, et al. Microwave digestion followed by ICP-OES for the determination of Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Sn in Maize[J]. *Atomic Spectroscopy*, 2012, 33(3): 78-82.
- [12] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 549-552.
- CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, YANG Xue-chun. Regulation of phytoavailability of Hg, Cd, Pb in soil by limestone[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 549-552.
- [13] Castaldi P, Melis P, Silveti M, et al. Influence of pea and wheat growth on Pb, Cd, and Zn mobility and soil biological status in a polluted amended soil[J]. *Geoderma*, 2009, 151(3-4): 241-248.
- [14] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. 施用石灰对 Pb、Cd、Zn 在土壤中的形态及大白菜中累积的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1710-1713.
- DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effect of liming and pig manure application on fractions of Cd, Pb and Zn in soil and their accumulation in Chinese cabbage[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1710-1713.
- [15] 杨亚卓, 张福锁. 土壤-植物体系中的铅[J]. 土壤学进展, 1993(5): 1-10.
- YANG Ya-zhuo, ZHANG Fu-suo. Soil-plant system of Pb[J]. *Progress in Soil Science*, 1993(5): 1-10.
- [16] 袁可能. 土壤化学[M]. 北京: 农业出版社, 1990: 88-90.
- YUAN Ke-neng. Soil chemistry[M]. Beijing: Agriculture Press, 1990: 88-90.
- [17] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1): 81-86.
- LIAO Min, HUANG Chang-yong, XIE Zheng-miao. Effect of pH on transport and transformation of cadmium in soil water system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(1): 81-86.
- [18] Cabrera D, Young S D, Rowell D L. The toxicity of cadmium to barley plant as affected by complex formations with humic acid[J]. *Plant and Soil*, 1988, 105: 195-204.
- [19] 翁高艺, 孙小峰, 吴龙华, 等. 铜铅锌复合污染土壤上香薷植物的生长和重金属吸收动态[J]. 土壤, 2006, 38(5): 602-608.
- WENG Gao-yi, SUN Xiao-feng, WU Long-hua, et al. Growth and metal uptake dynamics of two *Elsholtzia* plants on Cu, Pb and Zn mixed-contaminated soils[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 602-608.
- [20] 蒋高明. 承德市油松针叶硫及重金属含量动态及其与大气 SO₂ 之间的关系[J]. 生态学报, 1995, 15(4): 407-412.
- JIANG Gao-ming. The dynamics of sulphur and heavy metal content in the needles of *Pinus Tabulaeformis* carr and the relation between needlesulphur and air SO₂[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(4): 407-412.
- [21] 王文卿, 郑文教, 林鹏. 九龙江口红树植物叶片重金属元素含量及动态[J]. 台湾海峡, 1997, 16(2): 233-238.
- WANG Wen-qing, ZHEN Wen-jiao, LIN Peng. Content and dynamics of five heavy metals elements in the leaves of five mangrove species in Jiulong Estuary[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1997, 16(2): 233-238.
- [22] 方其仙, 李元, 祖艳群, 等. 圆叶无心菜对 Pb 的吸收累积特征研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(5): 121-126.
- FANG Qi-xian, LI Yuan, ZU Yan-qun, et al. Accumulation characteristics of *Arenaria rotundifolia* Bieberstein to Pb[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(5): 121-126.
- [23] 万欣, 关庆伟, 邱靖, 等. 3 种垂直绿化植物叶片对 Zn、Cu、Pb 的富集能力[J]. 城市环境与城市生态, 2010, 23(2): 33-35.
- WAN Xin, GUAN Qing-wei, QIU Jing, et al. Accumulation ability of three vertical plants' leaves to Zn, Cu, Pb[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2010, 23(2): 33-35.
- [24] 骆信志, 刘玖伶. 皇竹草利用及栽培技术[J]. 中国种业, 2001(6): 32.
- LUO Xin-zhi, LIU Mei-ling. The utilization and cultivation techniques of *Pennisetum hybridum*[J]. *China Seed Industry*, 2001(6): 32.
- [25] Xia H L, Chi X Y, Cheng W W. Uptake and growth response of *Saccharum officinarum* to lead pollution in soil[R]. Beijing: The 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2009: 1-4.
- [26] Santos E E, Lauria D C, Silveira P C L. Assessment of daily intake of trace elements due to consumption of foodstuffs by adult inhabitants of Rio de Janeiro City[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 327(1-3): 69-79.