

# 生物炭钝化修复镉、铅、铜和砷污染土壤的研究进展

邢英<sup>1,2</sup>, 张永航<sup>1,2</sup>, 韦万丽<sup>1,2</sup>, 李心清<sup>3</sup>, 陈卓<sup>1,2</sup>

(1. 贵州师范大学 化学与材料科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省功能材料化学重点实验室, 贵州 贵阳 550001; 3. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

[摘要] 生物炭在改良土壤、增加土壤碳汇等方面具有很大的应用潜力,且可以钝化土壤重金属,降低重金属污染的环境风险。为给西南地区开展生物炭钝化修复重金属污染土壤提供参考,对国内外利用生物炭钝化修复镉、铅、铜和砷污染土壤的研究现状进行综述,提出目前存在的挑战以及未来研究的侧重点。

[关键词] 生物炭; 钝化; 重金属; 污染治理; 土壤

[中图分类号] S39

[文献标识码] A

## Research Progress of Using Biochar to Stabilize Cadmium, Lead, Copper and Arsenic Contaminated Soil

XING Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Yonghang<sup>1,2</sup>, WEI Wanli<sup>1,2</sup>, LI Xinqing<sup>3</sup>, CHEN Zhuo<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001; 2. Guizhou Key Laboratory of Chemical Functional Materials, Guiyang, Guizhou 550001; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

**Abstract:** Biochar not only can be used to improve the quality of soil, increase the sinks of soil carbon, but also can be applied to stabilize the heavy metal in soil and reduce the environmental risk of heavy metals. The present paper reviews the publications both at home and abroad in using biochar to stabilize cadmium, lead, copper and arsenic in contaminated soil, discusses the current challenges of using biochar to stabilize heavy metals, gives the emphases of future study. The present paper can offer some references for the researchers who will use biochar to stabilize heavy metal contaminated soil in southwest China.

**Key words:** biochar; stabilization; heavy metals; pollution abatement; soil

在我国《重金属污染综合防治“十二五”规划》中,铅、镉、铬和类金属砷等被列为重点防控的重金属元素,由于特殊的地质背景,我国西南地区已发育有多个矿种(Hg, Sb, As, Pb-Zn)。矿山开采及矿石冶炼使有毒有害重金属随大气、水、固体废物迁移到周边的土壤造成污染并引起粮食安全问题,给区域经济发展和社会稳定造成一定影响。目前,全国的138个重金属污染防控区中西西南地区就有28个,占总数的1/4<sup>[1]</sup>,污染形势严峻,选用适用、有效、成本可控和操作性强的修复技术开展重金属污染土壤修复迫在眉睫,且对保障我国西南地区土壤质量安全具有重要意义。

重金属污染土壤修复技术主要包括客土法、稀释法、稳定/固定化技术、玻璃化、原位钝化、热脱附(挥发重金属)、电动修复、化学淋洗、植物修复和微生物修复等。其中,客土法、稀释法、稳定/固定化技术、原位钝化和植物修复可原位修复土壤,适宜大面积农田污染修复。然而,客土法和稀释法虽然容易工程化操作,但是修复成本高,很难大面积推广应用;固定化技术修复土壤后,土壤被固化,很难种植

作物,植物修复技术一般修复年限时间长,且受气候和土壤条件影响较大;原位钝化修复技术是修复大面积污染土壤的一种相对较理想的技术。目前,用于重金属钝化的材料(钝化剂)有天然粘土矿物、磷酸盐、硅酸盐、碳酸盐、有机堆肥和微生物材料等<sup>[2-3]</sup>。

近几年,很多学者研究利用生物炭钝化修复土壤重金属。生物炭是植物残体在缺氧或低氧环境下,经高温热解形成的产物,具有原材料来源广、成本低、生态安全、可大面积推广等技术优势<sup>[4]</sup>。生物炭自身化学性质稳定,添加到土壤后可作为碳库长期储存,生物质碳化技术是公认的解决气候变化问题的可行技术措施之一<sup>[5]</sup>。因此,利用生物炭修复重金属污染土壤具有多方面的积极环境效应。生物炭具有孔隙多、比表面积大、丰富的含氧官能团(羧基、羟基和酚基)和阳离子交换能力强等物理化学性质,添加到土壤后能增加土壤孔隙度、降低土壤容重、增强土壤持水力、降低土壤酸度、增加土壤有机质及养分含量等<sup>[6-8]</sup>。生物炭在影响土壤理化性质的同时也显著影响土壤重金属形态转化,从而降低

[收稿日期] 2014-11-22; 2015-06-08 修回

[基金项目] 中国科学院战略性科技先导专项(碳专项)“生物炭技术增汇作用及其生态、经济效益试验示范研究”(XDA05070400);贵州省科学技术基金项目“生物炭对贵州黄壤中磷的有效性影响及释放机理研究”[黔科合J字(2013)2218];贵州省科技计划项目“贵州省功能材料化学重点实验室”[黔科合计Z字(2013)4001];贵州师范大学博士基金资助项目“生物炭对黄壤中磷的有效性及其释放机理研究”

[作者简介] 邢英(1985-),女,讲师,博士,从事生物质炭环境化学行为研究。E-mail: xy31034@163.com

土壤重金属的环境风险。

为给西南地区开展生物炭钝化修复重金属污染土壤提供参考,笔者对国内外利用生物炭钝化修复镉、铅、铜和砷污染土壤的研究现状进行综述,并提出了目前存在的挑战以及未来研究的侧重点。

## 1 西南地区土壤镉、铅、铜和砷的污染现状

我国西南地区矿区土壤重金属污染形势严峻,采矿和冶炼不仅使得矿区和周边土壤重金属污染严重(表),而且重金属随地表径流扩散到更远区域。刘应忠等<sup>[9]</sup>以大宗农作物的绿色食品卫生标准和国

家食品卫生标准作为评判标准( $>0.5 \text{ mg/kg}$ ),利用区域化探技术对贵州黔西南水系沉积物和土壤的镉含量进行全面采样(4 208 个样品)分析发现,黔西南土壤镉含量达三级的有 56 691.84  $\text{km}^2$ ,占黔西南土壤总面积的 33%。何亚琳<sup>[10]</sup>在贵州省采集分析 220 个土壤剖面,约 660 个分层土壤样品发现,贵州土壤砷含量在 1~102  $\text{mg/kg}$ ,平均为 21  $\text{mg/kg}$ ,黔西南部分地区土壤砷含量普遍高于 25  $\text{mg/kg}$ 。可见,我国西南地区矿石开采已造成区域土壤重金属污染,对该地区重金属污染土壤进行修复迫在眉睫。

表 我国西南地区矿山区土壤中镉、铅、铜和砷的分布状况

位置 Location	镉 Cd	铅 Pb	铜 Cu	砷 As	文献序号 Reference No.
贵州水城铅锌矿区 Lead-zinc mining area in Shuicheng, Guizhou	5~10	170~918	58~73	25~26	[11]
贵州都匀铅锌矿区 Lead-zinc mining area in Duyun, Guizhou	10~55	283~2 808	37~86	22~43	[11]
四川大邑铅锌矿区 Lead-zinc mining area in Dayi, Sichuan	5~60	750~7 168	—	—	[12]
贵州都匀牛角塘矿床 Niujiatong mineral deposit in Duyun, Guizhou	2~210	—	—	—	[13]
四川汉源富泉铅锌矿山 Fuquan lead-zinc mining area in Hanyuan, Sichuan	3~59	96~4 871	—	—	[14]
四川甘洛铅锌矿区 Lead-zinc mining area in Ganluo, Sichuan	3~67	926~22 724	33~193	—	[15]
四川拉拉铜矿 Lala copper mine	—	—	260	—	[16]
四川龙门山铜尾矿库 Copper tailing yard in Longmenshan, Sichuan	3~4	1 417~2 155	3 267~4 008	—	[17]
贵州遵义松林 Ni-Mo 矿区 Ni-Mo mine area in Zunyi Songlin, Guizhou	1~5	—	—	45~129	[18]
云南省楚雄州某砷矿区 A as mine area in Chuxiong, Yunnan	—	—	—	465	[19]
云南新平铜尾矿库 Copper tailing yard in Xinping, Yunnan	—	23~39	14~39	4~10	[20]
云南普朗铜矿 Pulang copper mine in Yunnan	—	24~55	—	2~14	[21]
云南会泽废弃铅锌矿 Discarded lead-zinc mine in Huize, Yunnan	35±3	5 673±1 017	—	—	[22]
云南兰坪铅锌 Lead-zinc mine in Lanping, Yunnan	40~142	3 195~5 242	32~88	—	[23]
国家土壤质量标准 State soil quality standard	1	500	400	30~40	[24]

## 2 生物炭钝化修复重金属污染土壤

### 2.1 镉污染土壤

应用生物炭钝化土壤镉的效果相对较理想,国内外在此方面的研究报道相对较多。利用化学浸提法分析发现,添加生物炭能显著降低土壤有效态镉的含量。Jiang 等<sup>[25]</sup>研究发现,添加水稻秸秆生物炭后土壤酸溶态镉含量降低约 5.6%~14.1%。Houben 等<sup>[7]</sup>报道,在镉污染土壤添加 10% 生物炭后,土壤生物有效态镉含量降低约 71%。Fellet 等<sup>[26]</sup>研究发现,添加 3% 的果树枝条生物炭能使矿山尾渣的 DTPA 提取态和水提取态镉含量分别降低 71% 和 85%。Houben 等<sup>[27]</sup>研究发现,添加生物炭能降低土壤有效态镉的含量,而且土壤有效态镉

含量与 pH 呈负相关关系。Zhang 等<sup>[28]</sup>研究发现,镉污染(50  $\text{mg/kg}$ )土壤添加桉树和小麦壳制成的生物炭后,土壤有效态镉含量从 11  $\text{mg/kg}$  降至 0.5  $\text{mg/kg}$ 。Park 等<sup>[29]</sup>研究发现,镉污染土壤(5  $\text{mg/kg}$ )添加 5% 的鸡粪生物炭后,土壤可提取态镉含量降低约 94%。Beesley 等<sup>[30]</sup>通过土柱淋滤试验发现,添加生物炭土壤镉浓度较对照降低约 300 倍。Beesley 等<sup>[31]</sup>报道,添加生物炭能显著降低土壤孔隙水中镉的浓度。

我国有大面积农田受到不同程度的镉污染,使得粮食作物镉含量超标,造成食品安全危机<sup>[32]</sup>。利用原位钝化修复技术修复重金属污染土壤不仅可以降低土壤重金属迁移活性,更关键的是可以降低作物中重金属的含量,使得粮食得以安全生产。添加

生物炭后,土壤镉的有效性和移动性大大降低,而且植物的镉含量也显著降低。Lu等<sup>[33]</sup>研究发现,添加5%的竹子生物炭后镉污染土壤的 TCLP 镉含量降低约50%,种植的伴矿景天地上部分镉含量降低约49%。

不同温度所制生物炭对土壤镉钝化效果不同,高温下制的生物炭对土壤镉的钝化效果相对较好。唐行灿等<sup>[34]</sup>研究发现,镉污染土壤(镉1 mg/kg)添加2种不同温度(400℃,700℃)下生产的生物炭(添加比例为5%)均能降低土壤交换态镉以及小白菜可食部分镉的含量;添加700℃所制生物炭土壤的交换态镉含量较400℃所制生物炭土壤的降低约10%,小白菜可食部分的镉含量降低约14%。丁文川等<sup>[35]</sup>研究发现,在镉污染土壤添加松木条所制生物炭后能降低土壤酸提取态、Fe-Mn 氧化结合态和有机结合态镉的含量,提高残渣态镉含量。

添加生物炭导致土壤有效态镉含量降低的原因可能是:1) pH 升高使得镉形成氢氧化物或碳酸盐沉淀<sup>[36-37]</sup>;2) 生物炭提高土壤有机质的含量,使得土壤吸附镉的能力增强,从而降低土壤镉的有效性<sup>[38]</sup>;3) 制炭温度高,生物炭中含氧官能团相对较丰富,对镉的钝化效果相对较好。

## 2.2 铜污染土壤

生物炭对铜污染土壤的修复研究较少,生物炭对铜的修复效果与炭的性质与制炭材料密切相关。佟雪娇<sup>[39]</sup>研究发现,随生物炭(花生秸秆、大豆秸秆、油菜秸秆和稻草秸秆所制生物炭)添加量的增加,红壤对铜的吸附能力随之增加。其中,在土壤 pH 4 和生物炭添加量为2%时,添加油菜秸秆炭、花生秸秆炭、大豆秸秆炭和稻草炭使江西红壤对 Cu 的吸附量分别较对照增加97%、79%、51%和54%。但是,Beesley等<sup>[31]</sup>认为,添加生物炭使得土壤孔隙水中铜浓度增加。其原因可能是生物炭本身铜含量较高,或 DOC(溶解性有机碳)浓度增加引起铜含量升高所致。于志红等<sup>[40]</sup>研究发现,随铁锰氧化物改性生物炭添加量的增加,红壤对铜的吸附量随之增加。改性生物炭对土壤 pH 影响不大,但是红壤表面-OH、Mg-O、Si-O 等活性官能团数量明显增加。改性生物炭促进红壤对铜的吸附可能是由于红壤表面 Mg-O、Si-O 等官能团与铜形成 Mg-O-Cu、Si-O-Cu 等络合物,从而提高了红壤对铜的吸附能力。

Yuan J H 等<sup>[41]</sup>认为,生物炭添加引起土壤 pH 升高,使得重金属阳离子水解,形成重金属氧化物沉淀,而且土壤对重金属氧化物吸附能力要强于游离重金属离子。Uchimiya 等<sup>[42]</sup>认为,生物炭对 Cu<sup>2+</sup> 钝化与生物炭强的阳离子交换能力以及生物炭表面含氧官能团羧基、羟基和酚基有关。羧基、羟基和酚基能与 Cu<sup>2+</sup> 配合使得铜有效性降低。Ippolito 等<sup>[43]</sup>利用 XAFS 技术研究铜在生物炭(KOH-蒸汽活化核桃壳生物炭)表面吸附特征发现,铜在生物炭表面主要以有机配合物形态存在并与 Cu-HA 形态类似,或以碳酸盐态形态存在并与蓝铜矿

[Cu<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>]类似,或以铜氧化物形态存在并与黑铜矿(CuO)类似。

## 2.3 铅污染土壤

生物炭对修复铅污染土壤的案例较多,研究发现生物炭能降低有效态铅的含量。丁文川等<sup>[35]</sup>研究发现,铅污染土壤添加松木条生物炭后,土壤酸可提取态、Fe-Mn 氧化结合态和有机结合态铅含量较对照分别下降22.8%~53.8%、3.9%~29.1%和2.1%~17.5%,残渣态含量则较对照上升15.96%~40.10%;且制炭温度较高,生物炭对铅的钝化效果就越好。王鹤<sup>[44]</sup>研究发现,铅污染土壤(300 mg/kg)添加秸秆生物炭后,土壤有效态铅的含量显著降低,残渣态铅的含量有所提高,氧化锰结合态铅的含量也呈下降趋势。梁媛等<sup>[45]</sup>研究发现,铅污染土壤分别添加牛粪生物炭和水稻秸秆生物炭后,TCLP 铅含量分别较对照降低56%和36%。Fellet 等<sup>[26]</sup>在矿山尾渣中添加10%果树枝条生物炭后,其 DTPA 可提取态铅含量由39.2 mg/kg降至24.2 mg/kg, TCLP 铅浓度由60 mg/L 降至40 mg/L。

土壤添加生物炭后,能有效抑制植物对土壤铅的富集。唐行灿等<sup>[34]</sup>研究发现,添加玉米秸秆生物炭后,土壤水溶态、交换态铅的含量减少,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态铅的含量增加。小白菜根系和可食部分铅的含量分别降低35%~56%和17%~40%。Houben 等<sup>[27]</sup>通过淋滤试验发现,铅污染土壤(3110 mg/kg)添加1%、5%和10%生物炭后,土壤淋滤液中铅的含量分别降低19%、52%和77%。与对照相比,种植在5%和10%生物炭土壤的黑麦草地上部分铅的含量分别降低30%和50%。Cao 等<sup>[46]</sup>研究发现,土壤添加5%牛粪生物炭后,经过210 d 培养,土壤的有效态铅含量降低57%,TCLP 淋滤铅浓度降低70%~89%,蚯蚓体内的铅含量降低79%。

有学者在大田环境下开展了污染土壤的钝化修复试验。崔立强等<sup>[47]</sup>通过田间试验发现,土壤添加小麦秸秆生物炭后,土壤酸溶态铅、还原态铅和氧化态铅的含量降低,残渣态铅的含量增加。Karami 等<sup>[47]</sup>报道,铅污染土壤添加20%(V/V)生物炭后,土壤孔隙水中铅浓度由64 mg/L 降至约4 mg/L,黑麦草中铅的含量降低约80%。生物炭和30%(V/V)垃圾堆肥混合施用后,孔隙水中铅浓度与单施生物炭相比有所降低。

Karami 等<sup>[48]</sup>认为,土壤 DOC 对铅活性影响不大。生物炭对土壤铅的钝化机理包括:1) 生物炭中所含磷与铅形成 Pb<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH) 沉淀<sup>[46]</sup>;2) 添加生物炭引起土壤 pH 升高,使得铅形成沉淀<sup>[27,48]</sup>;3) 铅能与生物炭表面官能团配位结合使得铅活性降低<sup>[49]</sup>。

## 2.4 砷污染土壤

目前关于生物炭修复砷污染土壤的报道还不多,但研究发现,生物炭对砷的活性有影响。关连珠等<sup>[50]</sup>研究发现,砷污染土壤添加3种不同生物炭

(凋落松针、玉米秸秆、牛粪)后,其对砷的吸附容量和吸附强度较对照明显降低,使得土壤砷的有效性增强。Hartley 等<sup>[51]</sup>研究发现,砷污染土壤添加生物炭后,能在一定程度上增加土壤 pH 并进而增加砷的活性。Carbonell-Barrchina 等<sup>[52]</sup>认为,当土壤中砷造成毒害时,番茄根系能将砷固定在根系中,阻碍其向地上部分运输,以此保护自身。

添加生物炭引起土壤砷活性增加的原因可能是:土壤 pH 升高引起土壤砷的活性增加。有研究<sup>[53]</sup>认为,pH 升高时(碱性条件下),吸附在土壤铁氧化物表面的砷发生解吸附,使得土壤砷活性增加;也有研究<sup>[30,51]</sup>认为,生物炭能提高土壤孔隙水磷的浓度,磷能通过置换使得结合在土壤颗粒的砷被释放,引起土壤孔隙水砷浓度增加。Beesley 等<sup>[54]</sup>研究发现,添加生物炭使得土壤孔隙水 pH 增加和溶解态磷的浓度升高,并进而增加土壤砷活性。生物炭添加能提高土壤砷的活性,使得砷的环境风险增加。从植物修复角度考虑,砷活性增加能提高植物对砷的提取效率,缩短植物修复年限。Gregory 等<sup>[55]</sup>研究发现,砷污染土壤添加生物炭后能显著提高黑麦草地上部分对土壤砷的富集效率。

## 2.5 复合重金属污染土壤

唐行灿等<sup>[34]</sup>研究发现,在铜、铅、镉复合污染土壤中加入玉米秸秆生物炭后,水溶态、交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态铜含量减少,有机结合态和残渣态铜含量增加;水溶态、交换态铅含量减少,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态铅含量增加;交换态镉含量减少,铁锰氧化物结合态和残渣态镉含量增加。小白菜可食部分铜的含量降低 13%~35%,铅的含量降低 17%~40%,镉的含量降低 28%~63%。说明,生物炭仍能有效地钝化复合污染土壤中铜、镉和铅并抑制作物对该重金属的富集。Jiang 等<sup>[25]</sup>研究发现,在铜(50 mm/kg)、铅(50 mm/kg)和镉(50 mm/kg)复合污染土壤中添加 3%和 5%的水稻秸秆生物炭后,土壤酸提取态铜、铅和镉浓度分别降低 19.7%~100%、18.8%~77%和 5.6%~14%。Lu 等<sup>[33]</sup>研究发现,Cd、Cu、Pb 和 Zn 复合污染土壤分别添加竹子生物炭(<0.25 mm)和水稻秸秆生物炭(<0.25 mm)后,均能在一定程度上降低土壤 TCLP 提取态 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量。但是,水稻秸秆生物炭只能有效地降低伴矿景天地上部分铜和铅的含量,而竹子生物炭只能有效降低伴矿景天地上部分镉的含量。甘文君等<sup>[56]</sup>研究发现,随着秸秆生物炭添加量的增加多种重金属污染土壤残渣态铬的含量随之增加;该生物炭对铜和镍的钝化效果受其添加量影响明显,当生物炭添加量分别高于 7%和 3%时,对铜和镍有一定钝化效果;生物炭对该污染土壤的锌无明显钝化作用。在复合污染土壤中,生物炭与其他添加剂混施能显著地改善土壤重金属的钝化效果。

## 3 挑战和展望

应用生物炭钝化修复重金属污染土壤,面临以

下挑战:生物炭添加到土壤后引起的负面效益需要全面了解;现有大部分重金属钝化研究都基于短期室内试验,缺乏长期观测研究;生物炭种类、施用量和污染土壤性质及重金属污染水平均直接影响生物炭对重金属的钝化效果,需要开展更多此类研究;生物炭所钝化重金属的稳定性尚不清楚;生物炭对复合重金属污染土壤中不同重金属的钝化效果尚需深入研究。

大量的室内培养试验以及部分田间试验均表明,生物炭能有效地降低土壤生物有效态镉的含量,并抑制植物对土壤镉的富集。利用生物炭钝化修复镉污染土壤具有很大的应用前景,开展生物炭修复镉污染土壤工作,根据镉污染场地特征及镉污染水平筛选生物炭种类及施用量十分重要。

从现有文献看,生物炭对土壤铜具有一定的钝化效果,但是钝化效果受到生物炭种类和土壤类型影响,如生物炭在酸性环境下对铜的钝化效果较好而在碱性条件下相对较差。需要更多的研究探究不同原材料所制生物炭和土壤类型对铜的钝化效果影响。

生物炭能有效地降低土壤中有效态铅含量,并能在一定程度上降低植物对土壤铅的富集。但是需要开展更多的田间试验研究生物炭对重金属的钝化效果。

添加生物炭能增加土壤砷的活性,利用生物炭钝化修复砷污染土壤,需要对生物炭进行改性,使其 pH 保持中性或酸性,进而研究生物炭对砷的钝化效果。

## [参 考 文 献]

- [1] 黄智龙,胡瑞忠,苏文超,等.西南大面积低温成矿域:研究意义、历史及新进展[J].矿物学报,2011,31(3):309-314.
- [2] 梁媛,王晓春,曹心德.基于磷酸盐、碳酸盐和硅酸盐材料化学钝化修复重金属污染土壤的研究进展[J].环境化学,2012,31(1):16-25.
- [3] 王立群,罗磊,马义兵,等.重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J].应用生态学报,2009,20(5):1214-1222.
- [4] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management science and technology[M]. London: Earthscan,2009.
- [5] 陈温福,张伟明,孟军,等.生物炭应用技术研究[J].中国工程科学,2011,13(2):83-89.
- [6] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review[J]. Biol. Fert. Soils,2002,35(4):219-230.
- [7] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Biomass Bioenergy,2013,57:196-204.
- [8] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(1):68-79.

- [9] 刘应忠,胡从亮,袁义生,等. 黔西南地区土壤中镉的地球化学分级和污染修复建议[J]. 贵州地质, 2007, 23(3):219-222.
- [10] 何亚琳. 贵州土壤中的砷(As)及其地理分布[J]. 贵州环保科技, 1996, 18(1):23-26.
- [11] 孟忠常,吴迪,邓琴,等. 贵州典型铅锌矿区土壤重金属污染特征与生态危害风险评价[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(8):218-221.
- [12] 鲁荔,杨金燕,田丽燕,等. 大邑铅锌矿区土壤和蔬菜重金属污染现状及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3):374-380.
- [13] 谷团,李朝阳,李社红,等. 贵州牛角塘矿区镉对环境的潜在影响[J]. 地球与环境, 2006, 34(1):7-12.
- [14] 毛竹,张世熔,李婷,等. 铅锌矿区土壤重金属空间变异及其污染风险评价——以四川汉源富泉铅锌矿山为例[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):617-621.
- [15] 刘月莉,伍钧,唐亚,等. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J]. 生态学报, 2009, 29(4):2020-2026.
- [16] 朱志敏,熊述清,陈家彪,等. 拉拉铜矿区土壤重金属含量及其污染特征[J]. 地球与环境, 2007, 35(3):261-266.
- [17] 宗浩,苏光麒,张翔,等. 四川龙门山铜尾矿库植被调查及植被恢复的物种选择探讨[J]. 四川师范大学学报:自然科学版, 2009, 42(6):796-802.
- [18] 金昭贵,周明忠. 遵义松林 Ni-Mo 矿区耕地土壤的镉砷污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12):2367-2373.
- [19] 李彬,赵婵娟,李佩瑶,等. 砷矿区受污染土壤中 As 赋存形态分析[J]. 云南民族大学学报:自然科学版, 2013, 22(5):330-333.
- [20] 施择,孙鑫,宁平,等. 云南新平铜尾矿库周边土壤重金属污染评价[J]. 矿冶, 2014, 23(4):92-96.
- [21] 马林转,崔琼芳,郭俊明,等. 普朗铜矿土壤中 7 种重金属检测和污染评价[J]. 云南民族大学学报:自然科学版, 2012, 21(5):334-338.
- [22] 房辉,曹敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7):1277-1283.
- [23] 缪福俊,孙浩,陈玲,等. 兰坪铅锌尾矿区土壤与自然发生的 5 种植物的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1):189-194.
- [24] 环境保护部. 土壤环境质量标准 (GB15618-1995) [M]. 北京:中国标准出版社, 1995.
- [25] Jiang J, Xu R K, Jiang T Y, et al. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol [J]. J. Hazard. Mater., 2012, 229:145-150.
- [26] Fellet G, Marmiroli M, Marchiol L. Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar[J]. Sci. Total. Environ., 2014, 468:598-608.
- [27] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar [J]. Chemosphere, 2013b, 92(11):1450-1457.
- [28] Zhang Z Y, Meng J, Dang S, et al. Effect of Biochar on Relieving Cadmium Stress and Reducing Accumulation in Super japonica Rice[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3):547-553.
- [29] Park J H, Choppala G, Lee S J, et al. Comparative Sorption of Pb and Cd by Biochars and Its Implication for Metal Immobilization in Soils[J]. Water, Air, Soil Pollut, 2013, 224:1-12.
- [30] Beesley L, Marmiroli M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar[J]. Environ. Pollut., 2011, 159(2):474-480.
- [31] Beesley L, Moreno-Jimenez E, Gomez-Eyles J L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil [J]. Environ. Pollut., 2010, 158(6):2282-2287.
- [32] 张标金,罗林广,魏益华,等. 从国家自然科学基金资助项目分析应对土壤镉污染的研究发展方向[J]. 热带农业科学, 2014, 34(1):98-102.
- [33] Lu H P, Li Z, Fu S L, et al. Can Biochar and Phytoextractors Be Jointly Used for Cadmium Remediation? [J] Plos One, 2014, 9(4):1-7.
- [34] 唐行灿,陈金林,张民. 生物炭对铜、铅、镉复合污染土壤的修复效果[J]. 广东农业科学, 2014(12):67-71.
- [35] 丁文川,朱庆祥,曾晓岚,等. 不同热解温度生物炭改良铅和镉污染土壤的研究[J]. 科技导报, 2011, 29(14):22-25.
- [36] Bian R, Chen D, Liu X, et al. Biochar soil amendment as a solution to prevent Cd-tainted rice from China: Results from a cross-site field experiment[J]. Ecol. Eng., 2013, 58:378-383.
- [37] 高译丹,梁成华,裴中健,等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):258-261.
- [38] 易卿,胡学玉,柯跃进,等. 不同生物质黑碳对土壤中外源镉(Cd)有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):88-94.
- [39] 佟雪娇. 生物炭对水体/红壤中 Cu(II) 的去除和固定作用[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [40] 于志红,谢丽坤,刘爽,等. 生物炭-锰氧化物复合材料对红壤吸附铜特性的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):897-903.
- [41] Yuan J H, Xu R K, Qian W, et al. Comparison of the ameliorating effects on an acidic ultisol between four crop straws and their biochars[J]. J. Soils. Sediment., 2011, 11(5):741-750.
- [42] Uchimiyama M, Chang S, Klasson K T. Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups[J]. J. Hazard. Mater., 2011, 190(1):432-441.
- [43] Ippolito J A, Strawn D G, Scheckel K G, et al. Macroscopic and Molecular Investigations of Copper Sorption by a Steam-Activated Biochar[J]. J. Environ. Qual., 2012, 41(4):1150-1156.
- [44] 王鹤. 施用硅酸盐和生物炭对土壤铅形态与含量的影响[J]. 农业科技与装备, 2013(4):10-12.
- [45] 梁媛,李飞跃,杨帆,等. 含磷材料及生物炭对复合重金属污染土壤修复效果与修复机理[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2377-2383.

(下转第 201 页)

草地类型不仅有利于土壤质量改善,更有助于该地区草地畜牧业长期可持续发展。

[参 考 文 献]

[1] 中国科学院西南资源开发考察队. 中国西南部石灰岩山区资源开发研究[M]. 北京:科学出版社,1986.  
 [2] 陈全功. 西南岩溶山区的农牧业生产力[J]. 资源科学,1999,21(5):76-80.  
 [3] 王世杰,李阳兵,李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究,2003,23(11):657-666.  
 [4] 王建锋,谢世友. 西南喀斯特地区石漠化问题研究综述[J]. 环境科学与管理,2008,33(11):147-152.  
 [5] 蓝安军,熊康宁,安裕伦. 喀斯特石漠化的驱动因子分析——以贵州省为例[J]. 水土保持通报,2001,21(6):19-23.  
 [6] 庞冬辉,李先琨,何成新,等. 桂西峰丛岩溶区的环境特点及农业生态系统优化设计[J]. 广西植物,2003,23(5):408-413,398.  
 [7] 周游游,蒋忠诚,韦珍莲. 广西中部喀斯特干旱农业区的干旱程度及干旱成因分析[J]. 中国岩溶,2003,22(2):144-149.  
 [8] 孔祥斌,张风荣,齐伟,等. 集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响——以河北省曲周县为例[J]. 地理学报,2003,58(3):333-342.  
 [9] 傅伯杰,郭旭东,陈利顶,等. 土地利用变化与土壤养分的变化[J]. 生态学报,2001,21(6):927-931.  
 [10] 傅伯杰,陈利顶,马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响[J]. 地理学报,1999,54(3):24-246.  
 [11] Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. The relationship between land use and soil conditions in the hilly area of Loess Plateau in northern Shanxi, China[J]. Catena,

2000,39:69-78.  
 [12] 贵州省兴仁县编史修志委员会. 兴仁县志[M]. 贵州:贵州人民出版社,1991.  
 [13] 刘洪来,杨丰,黄顶,等. 农牧交错带草地开垦对土壤有效态微量元素的影响及评价[J]. 农业工程学报,2012,28(7):155-160.  
 [14] 杨学东,刘洪来,姚红艳,等. 贵州不同土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 广东农业科学,2013(6):70-76.  
 [15] Russell A E, Laird D A, Mallarino A P. Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil quality in Midwestern Mollisols[J]. Soil Science Society of America Journal,2006,70(1):249-255.  
 [16] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报,2006,26(3):901-913.  
 [17] 董国政,刘德辉,姜月华,等. 湖州市土壤微量元素含量与有效性评价[J]. 土壤通报,2004,35(4):474-478.  
 [18] 宁国赞. 中国首葆根瘤菌大面积应用研究现状及展望[R]. 北京:中国农业微生物菌种保藏管理中心,2001.  
 [19] 王秋菊,崔战利,王贵森,等. 土壤锰的研究现状及展望[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2005,17(3):39-42.  
 [20] Warkentin B P. The changing concept of soil quality [J]. Soil Water Cons,1995,50:226-228.  
 [21] Patrick J C, Thomas W, Kohley J, et al. Assessing land-use impacts on biodiversity using an expert systems tool[J]. Landscape Ecology,2000,15:47-62.  
 [22] 董莉丽,郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤质量的影响[J]. 干旱区研究,2011,28(4):616-621.

(责任编辑:刘 海)

(上接第 197 页)

[46] Cao X D, Ma L N, Liang Y, et al. Simultaneous Immobilization of Lead and Atrazine in Contaminated Soils Using Dairy-Manure Biochar[J]. Environ. Sci. Technol.,2011,45(11):4884-4889.  
 [47] 崔立强,杨亚鸽,严金龙,等. 生物质炭修复后污染土壤铅赋存形态的转化及其季节特征[J]. 中国农学通报,2014,30(2):233-239.  
 [48] Karami N, Clemente R, Moreno-Jimenez E, et al. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass[J]. J. Hazard. Mater.,2011,191(1-3):41-48.  
 [49] Pichtel J, Bradway D J. Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site[J]. Bioresource. Technol.,2008,99(5):1242-1251.  
 [50] 关连珠,周景景,张 昀,等. 不同来源生物炭对砷在土壤中吸附与解吸的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(10):2941-2946.  
 [51] Hartley W, Dickinson N M, Riby P, et al. Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with Miscanthus[J]. Environ Pollut,2009,157(10):2654-2662.

[52] Carbonell-Barrachina A A, Burlo F, Burgos-Hernandez A, et al. The influence of arsenite concentration on arsenic accumulation in tomato and bean plants [J]. Sci. Hortic.,1997,71(3-4):167-176.  
 [53] Jain A, Raven K. P, Loeppert R H. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: Surface charge reduction and net OH- release stoichiometry[J]. Environ. Sci. Technol.,1999,33(8):1179-1184.  
 [54] Beesley L, Inneh O S, Norton G J, et al. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil [J]. Environ. Pollut.,2014,186:195-202.  
 [55] Gregory S J, Anderson C W N, Arbestain M C, et al. Response of plant and soil microbes to biochar amendment of an arsenic-contaminated soil [J]. Agr. Ecosyst. Environ,2014,191:133-141.  
 [56] 甘文君,何 跃,张孝飞,等. 秸秆生物炭修复电镀厂污染土壤的效果和作用机理初探[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(3):305-309.

(责任编辑:王 海)