

# 撒施阻控材料快速去除上覆水 Cd 对的室内模拟研究

刘孝利<sup>1,2</sup>, 铁柏清<sup>1</sup>, 雷鸣<sup>1</sup>, 曾昭霞<sup>3,\*</sup>, 魏祥东<sup>1</sup>

1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

**摘要** 湘中矿区塘、水库等灌溉水体及其底泥重金属超标问题日益凸显, 研究选取石灰、水稻秸秆生物炭和人造沸石等3种环境友好型土壤重金属阻控材料, 通过室内玻璃柱模拟静止水体实验探讨水面缓慢撒施阻控材料对上覆水重金属 Cd 去除与底泥 Cd 有效性影响。为期 60 d 的实验结果显示, 1% (0~20 cm 表层底泥质量分数) 的单一石灰、生物炭、沸石与石灰+生物炭+人造沸石配方 (质量比 1:1:1) 4 种处理均可明显快速去除上覆水中水溶态 Cd 质量浓度, 其中石灰效果最佳, 沸石效果最差, 石灰与 3 种阻控剂组配处理均可使上覆水中水溶态 Cd 质量浓度由  $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  以上降至  $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 符合我国灌溉水 Cd 的限定标准。阻控材料自然沉积在底泥表面后对 5 cm 处底泥水溶液 Cd 质量浓度具有一定的消减效应, 沸石效果优于石灰、生物炭处理, 其中“石灰+生物炭+沸石”的不同粒径阻控材料组配方式效果最佳。石灰、生物炭、沸石及 3 种阻控剂组配处理 60 d 后底泥 pH 值依然略高于对照, 差异不显著, 但可交换态 Cd 含量明显低于对照。结果可为塘库型水体上覆水及底泥 Cd 等重金属污染的生态风险降低及控制措施研究提供科学参考与方法指导。

**关键词** 灌溉水; 底泥; Cd 超标; 上覆水; 阻控材料

中图分类号 X131 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)07-4097-06 DOI:10.12030/j.cjee.201604216

## Laboratory simulation study on Cd rapid removal from the overlying water through scattering resistance materials

LIU Xiaoli<sup>1,2</sup>, TIE Baiqing<sup>1</sup>, LEI Ming<sup>1</sup>, ZENG Zhaoxia<sup>3,\*</sup>, WEI Xiangdong<sup>1</sup>

1. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3. Key Laboratory of Agro-ecology Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

**Abstract** Heavy metal pollution of irrigation water and pond and reservoir sediment has been increasing. Lime, rice straw-derived biochar, and artificial zeolite are three kinds of soil heavy metal pollution resistance control materials, which were proven to be environmentally friendly, were selected to assess the rapid removal efficiency of Cd in overlying water and sediment Cd availability through water surface broadcasting under laboratory indoor glass column stationary water body simulation. Results of a 60 day period showed that all four treatments—lime, biochar, and zeolite treatments and a lime + biochar + zeolite (weight ratio 1:1:1) combination treatment—at a 1% mass ratio (0 to 20 cm sediment) application amount could quickly reduce the water soluble-Cd concentration from overlying water. Treatment with lime gave the best removal efficiency, followed by biochar and zeolite treatments. Lime treatment and the combination treatment obviously decreased the water soluble-Cd concentration from above  $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  to below  $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , which conforms to the irrigation water Cd limit standard in China. The three kinds of environmentally friendly resistance materials showed a consistent reduction effect on a 5 cm site with a sediment slurry solution containing Cd on the sediment surface from natural material deposits.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409101); 湖南农业大学杨仁斌教授环境科学基金项目(14YB07)

收稿日期: 2016-04-27; 录用日期: 2016-08-11

第一作者: 刘孝利(1979—), 男, 博士, 研究方向: 农业生态与水环境, 重金属面源污染及控制措施。E-mail: zzhxll@163.com

\* 通信作者, E-mail: elizeberth@163.com

A treatment combining the three materials showed the best reduction efficiency, and individually used zeolite showed better performance than that of lime and biochar. Results also revealed that the sediment pH in the four treatments was still slightly higher than that of the control experiment after 60 days. Though non-significant differences were observed, the exchangeable Cd was obviously decreased compared to that in the control experiment. The results provide some scientific references and guidance for reducing the ecological risks in ponds, overlying reservoir water, and sediments polluted by heavy metal Cd.

**Key words** irrigation water; sediment; Cd excess of the standards; overlying water; resistance control material

近年来伴随我国水资源紧缺形势的日益严峻,污灌在一定程度上缓解了农业用水的供需矛盾,然而因工业污水、畜禽养殖废水和矿区水塘水库等灌溉水源中含有较高浓度的重金属离子,经污灌、作物累积等生态过程引发的农产品重金属超标问题日益受到关注<sup>[1]</sup>。已有研究表明,作物 Cd 污染水平与灌溉水中 Cd 质量浓度呈显著正相关<sup>[2]</sup>,同时全国范围内农田生态系统中的重金属 Cd 超标率最高,沈阳张士灌区、上海沙川灌区、湖南衡阳水口山和株洲清水塘等地区,污灌导致稻田土壤中 Cd 的含量超标严重且已达到生产镉米(大米 Cd 含量  $\geq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的污染程度<sup>[3-6]</sup>。近年来,国内外均开展了一系列农田土壤重金属污染阻控、修复措施研究<sup>[7-10]</sup>,李洪良等<sup>[11]</sup>就污水灌溉的危害及控制措施进行了综述研究,结果显示当前灌溉水净化多集中在去除悬浮物和病原菌等有机污染物,较少关注灌溉水中重金属污染物的净化。

湖南是我国重要的稻米产区,土壤为酸性红壤,同属典型酸雨区,土壤与降雨双重酸性导致重金属活性较强,极易随降雨迁移进入食物链<sup>[12-13]</sup>。金属矿产的累年采冶,尾矿露天堆放,导致周围水塘、水库等农用灌水、人畜饮用等水体因重金属随降雨产汇流迁移过程受到不同程度的污染。如衡阳市水口山铅锌矿区建矿历程已有 110 多年,由于污排致使矿区周边大面积灌溉稻田遭受重金属污染,长株潭地区, Cd、Pb、As 和 Zn 等重金属以外源形式进入土壤的特征明显,其中 Cd 的污染指数最大<sup>[14]</sup>。通常进入水体的重金属离子大部分会以各种形态赋存于底泥中,但却会在微生物活动、自然扰动及人为干扰下不断释放到上覆水中,从而随灌溉过程进入食物链。李建凤等<sup>[15]</sup>分析了广东省 45 宗大中型水库底泥重金属含量发现,底泥中 Cd、Pb 和 Cu 等重金属元素含量均高于广东土壤背景值,黄河上游一些典型地区河段底泥中重金属 Cr 和 Cd 污染程度较为严重<sup>[16]</sup>。底泥作为水体污染的敏感指标,其重金属含量可反映上覆水体的污染程度,然而如何快速降低水溶态重金属质量浓度,同时有效控制底泥中重金属向水相释放是亟待解决的科学难题。当前针对水体沉积物的重金属污染特征与风险评价研究较多,但底泥重金属修复及其上覆水中重金属离子有效去除一直缺乏有效方法<sup>[17-19]</sup>。

水体底泥污染与其水生态风险已成为一个世界性的环境问题,目前污染底泥控制技术主要有原位和异位处理 2 类技术,其中异位处理主要通过底泥的疏浚、挖掘等手段将污染源移走,原位处理则主要采取阻止底泥污染物释放进入水体措施。疏浚和挖掘等方法虽然见效快但成本高,且疏浚挖掘过程会破坏底栖生态系统,后续处理困难。有研究指出将铁矿尾矿渣施加到污染底泥表层后覆盖水泥,通过搅拌混匀表层底泥形成固化覆盖层,可有效阻隔深层底泥污染物向上覆水体中迁移释放<sup>[20]</sup>。厚度为 0.9 m 的沙子覆盖工程可以有效控制河道底泥重金属及 PCBs 的污染风险,沈佳佳等<sup>[21]</sup>选取天然沸石、赤铁矿和高岭土等材料在原位掩蔽厚度达到 2~3 cm 时对底泥汞释放的抑制获得了良好效果,然而,固化覆盖及较厚的覆盖层均存在破坏底栖生物生态过程的风险。

研究选取石灰、生物炭和天然沸石等 3 种不同粒径且具有推广前景的土壤重金属阻控材料,采用室内塘库型水体模拟实验研究,通过水面缓慢撒施方法,探索不同阻控剂及其配方处理对上覆水中溶解态 Cd 离子的快速去除及其自然沉积在底泥表面后对底泥 Cd 释放阻控效果,旨在寻求一种经济可行、环境友好的 Cd 污染塘库型灌溉水体的原位控制措施,为降低因灌溉带来的农田生态系统重金属累积来源及其生态风险提供科学参考。

## 1 实验部分

### 1.1 模拟实验装置及底泥样品采集

模拟装置为高 1.5 m ×  $\phi$ 0.40 m 的不锈钢玻璃柱,下段设有阀门开关。供试底泥采自湖南某矿区受污染的灌溉水塘(N27°50'1.3", E113°02'8.4") ,利用 Van veen 不锈钢抓斗采集池塘表明 0 ~ 20 cm 范围内的表层底泥,装入自封纱布袋中,悬挂至水分不再渗出,运回实验室冷藏保存,使用前将底泥样品置于容器内混匀,拣除石块等杂物备用。水面撒施材料选用当前生态环境效益较好的熟石灰、水稻秸秆生物炭、人造沸石,供试底泥与选取材料的基本理化性质见表 1。由表 1 可知,该水塘底泥 Cd 污染最为严重,总 Cd 含量高达 26.52 mg · kg<sup>-1</sup>,其中 CaCl<sub>2</sub> 提取剂提取的可交换态 Cd 含量为 3.47 mg · kg<sup>-1</sup>。

表 1 供试底泥、阻控材料基本性状

Table 1 Basic properties of experimental sediment and selected remediation materials

项目	pH	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	总 Pb/ (g · kg <sup>-1</sup> )	总 Zn/ (g · kg <sup>-1</sup> )	总镉/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效 Cd/ (g · kg <sup>-1</sup> )
0 ~ 20 cm 底泥	6.27	21.8	527.3 ± 47.9	638.7 ± 73.6	26.52 ± 8.17	3.47 ± 0.49
底泥背景值	—	—	34	118	0.4	—
石灰	12.0	—	—	—	0.11 ± 0.05	—
稻秆生物炭	10.5	—	—	—	0.05 ± 0.00	—
人造沸石	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示未测定,底泥背景值采用地球化学背景值

### 1.2 实验设计与样品采集分析

先将玻璃柱注入 1 m 深的自来水,并取自来水样品进行重金属背景值分析,然后将底泥样品从水面轻放自然沉入柱底。玻璃柱内底泥厚度设计为 20 cm,静置一周,待底泥污染物释放达到平衡与上覆水浊度稳定后开始从水面缓慢撒施选取的土壤重金属污染修复材料。实验处理设置详情见表 2 所示,其中组配实验处理中熟石灰、稻秆生物炭与人造沸石的质量配比为 1:1:1,阻控剂添加量均按 0 ~ 20 cm 底泥质量(底泥容重取 1.0 g · cm<sup>-3</sup>) 的 1%。依据玻璃柱内径的水面面积确定添加量,因需观测材料添加后的持续效果,故实验期间玻璃柱内不进行换水等干扰操作。

底泥总 Cd 含量用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消煮,原子吸收分光光度计(TAS-990)测定。底泥可交换态 Cd 含量采用修改后的“五态法”以水土比 10:1 的 0.01 mol · L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提,用石墨炉分光光度计(GTA120 美国 Varrian)测定<sup>[22]</sup>。底泥 5 cm 处水溶液用土壤水分采样器采集,将接好延长管的多孔亲水滤膜取样头插入底泥 5 cm 深处,延长管另一头连接针筒式 0.45 μm 滤膜过滤器(注射器可重复使用),上覆水与底泥水溶液采集后立刻过 0.45 μm 滤膜,加 1:1 分析纯硝酸溶液酸化至 pH 为 1 ~ 2 并于冰柜中冷藏用石墨炉原子吸收分光光度计法测定水溶态 Cd 浓度。底泥重金属含量分析质量控制:每个底泥样品平行消解 3 份,同时设置空白消解对比,并均采用优级纯酸试剂,底泥、水样品均测试了标准溶液、空白和平行样。底泥 Cd 分析过程参照污染土壤重金属含量分析方法采用土壤成分标准物质 GBW07403,其分析结果与标准差范围为 4% ~ 7%,加标回收率 96% ~ 113%。底泥水溶液与上覆水水样中 Cd 的加标回收率

表 2 实验处理与阻控材料添加方式

Table 2 Experiment settlement and resistance controlling materials additive

处理	撒施量/(kg)	撒施方法
CK	—	—
L	0.25	从水面均匀、缓慢撒施
B	0.25	从水面均匀、缓慢撒施
F	0.25	从水面均匀、缓慢撒施
LBF(1:1:1)	0.25	从水面均匀、缓慢撒施

注:L 为熟石灰处理;B 为生物炭处理;F 为沸石处理;LBF 为熟石灰生物炭沸石(1:1:1)配方处理。下同。

为 91% ~ 122%。其中空白对照低于仪器检测限,平行样误差在 ±5.8%。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据的描述统计分析及制图,SPSS 12.0 统计软件进行方差及显著性分析,LSD 法进行多重比较。

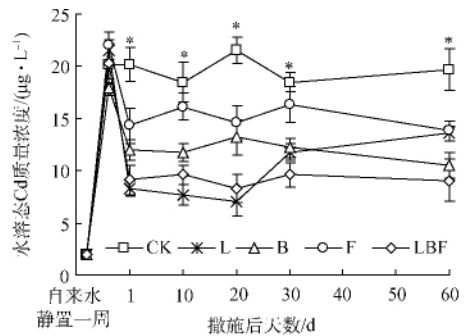
## 2 结果与分析

### 2.1 上覆水中水溶态 Cd 质量浓度变化特征

沸石和生物炭等环境材料具备较强的吸附性能,添加到土壤中可固定并降低重金属向水相解析,Cd 污染土壤通过添加石灰、生物炭和沸石等环境友好型阻控材料可通过提高土壤 pH 降低 Cd 生物毒性,但目前具有推广潜力的组控措施<sup>[22-24]</sup>,但污染灌溉水体表面撒施这些环境友好型阻控材料对于上覆水中的水溶态 Cd 去除效果如何却鲜有报道。研究通过室内玻璃柱静止水体模拟实验结果得出,通过上覆水表面缓慢均匀撒施石灰、生物炭和沸石等阻控材料处理相比对照可快速降低上覆水中水溶态 Cd 的质量浓度。其中撒施石灰和石灰 + 生物炭 + 沸石 2 种处理效果最好(见图 1),且撒施 60 d 后依然显示良好的持续效应。而添加沸石去除效果最差,可能因沸石颗粒大撒施后快速沉积到底泥表面,在上覆水中滞留时间短,吸附量小所致。石灰效果优于生物炭,其中石灰与石灰 + 生物炭 + 沸石(1:1:1)组配处理均可使上覆水中水溶态 Cd 质量浓度由 20 μg · L<sup>-1</sup>降到 10 μg · L<sup>-1</sup>以下,优于我国灌溉水 Cd 的限定标准(见图 1)。生物炭的吸附能力强于熟石灰,而熟石灰对上覆水的 pH 影响大于生物炭,因此,导致石灰处理的水溶态 Cd 减低效果优于生物炭(见图 1)。

### 2.2 底泥水溶液 Cd 质量浓度变化特征

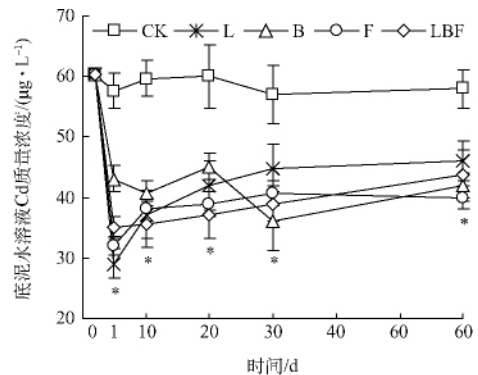
通过抽取 5 cm 深处底泥水溶液的 Cd 质量浓度分析结果显示,通过上覆水表面缓慢撒施阻控材料自然沉积在底泥表面对底泥水溶液 Cd 质量浓度具有一定的消减效应,撒施阻控剂与对照处理间差异显著,沸石效果优于石灰、生物炭处理,其中“石灰 + 生物炭 + 沸石”的不同粒径阻控材料组配方式效果最佳(见图 2)。已有包括煤渣、煤灰、城市垃圾、淤泥、铁铝矿的工业副产品、活性炭、石灰、生物炭和沸石等等诸多材料被用于重金属污染土壤的改良。其中石灰、生物炭、沸石等碱性材料添加到污染土壤后具有良好的生态环境效应,并可有效降低土壤中重金属的水溶态和生物有效性<sup>[25-27]</sup>,很好地支持了本研究底泥水溶液中 Cd 质量浓度分析结果。重金属作为沉积物主要污染物类型,因毒性大、易被富集、无法降解等特性,近年来有关底泥与水相中重金属污染对底栖生物及水生生物毒性研究日益受到关注<sup>[28-29]</sup>。本研究结果可为底泥重金属的生物毒性降低措施提供数据基础与一定的科学参考。



注: L为熟石灰处理; B为生物炭处理; F为沸石处理; LBF为熟石灰生物炭沸石(1:1:1)配方处理。下同。  
\*表示不同处理间差异达显著水平,  $p < 0.05$ 。

图 1 不同处理对上覆水中水溶态 Cd 降低效果

Fig. 1 Water soluble Cd reduction efficiency of overlying water under different treats



注: \*表示不同处理间差异达显著水平,  $p < 0.05$ 。

图 2 不同处理下 5 cm 处底泥水溶液中 Cd 质量浓度动态

Fig. 2 Dynamics of Cd concentration in sediment slurry solution under different treatments

### 2.3 不同处理对表层底泥 pH 及可交换态 Cd 含量影响

石灰、农田秸秆生物炭和沸石等生态材料以其友好的有毒金属元素固化与生态环境效应成为土壤污染修复及作物安全生产的关注热点,并展现了良好的大田推广潜力<sup>[25,28,30]</sup>,李扬等<sup>[31]</sup>通过室内模拟研究发现,生物炭覆盖对底泥磷和氨氮、COD 释放具有消减效果,在控制水体富营养化方面具有积极作用,但较少用于底泥重金属污染修复领域。底泥污染的原位处理的诸多理化、生物等技术中的原位覆盖方法备受关注,通过在底泥表明覆盖渗透性小的卵石和沙粒等材料,有效控制底泥中营养盐与污染物的释放,提高水体透明,促进沉水植物生长,但缺点是难以大面积使用,甚至会影响到水体固有的水与底栖生态环境<sup>[20,30]</sup>。本研究 1% (0~20 cm 表层底泥质量分数) 的石灰、生物炭、沸石添或 3 种阻控剂组配(1:1:1) 材料添加 60 d 后依然可在一定程度上提高底泥的 pH 值,但与对照处理差异不显著,其中石灰、3 种阻控材料组配处理效果略优于其他单一添加处理(见图 3)。已有研究指出,生物炭和石灰等碱性材料添加到污染土壤主要通过提高土壤 pH、阳离子交换容量来降低某些重金属离子的活性与迁移性<sup>[32]</sup>,石灰以前主要用于改良酸性土壤,提高土壤 pH 值,而石灰在提高土壤 pH 值的同时能够通过  $\text{Ca}^{2+}$  与金属离子间的拮抗作用降低污染土壤中的 Cd 和 Zn 等金属离子的生物活性和迁移性。CAO 等<sup>[33]</sup>研究指出,生物炭除了具备较强吸附性能外还可明显提高土壤 CEC、pH,且富含 P 元素,能促使 Cd 在碱性条件下形成的  $\text{Cd}(\text{OH})^+$  离子在土壤颗粒吸附点位的亲和力明显增强,从而降低其迁移性和生物有效性,很好地支持了本研究结果(见图 3)。通过室内模拟静置水面缓慢撒施环境友好型 Cd 阻控材料(1% 质量分数) 实验表明,水面撒施阻控材料不仅可快速去除上覆水中水溶态 Cd 质量浓度(见图 1),同时在 60 d 内可有效降低底泥可交换态 Cd 含量,其中石灰处理效果优于生物炭、沸石与 3 种材料配方(1:1:1) 处理,石灰+生物炭+沸石处理效果略好于生物炭、沸石处理,但差异不显著(见图 3)。相比以往采用沙子、水泥、矿渣和高岭土等覆盖材料原位覆盖方式控制底泥污染物迁移扩散措施<sup>[31,34]</sup>。本研究通过水面撒施表层底泥 1% 质量比环境友好型材料,具有较薄的覆盖层,不仅可快速去除上覆水中水溶态 Cd 质量浓度,对于降低底泥水溶液及底泥中可交换态 Cd 含量具有显著效果(见图 1~3)。

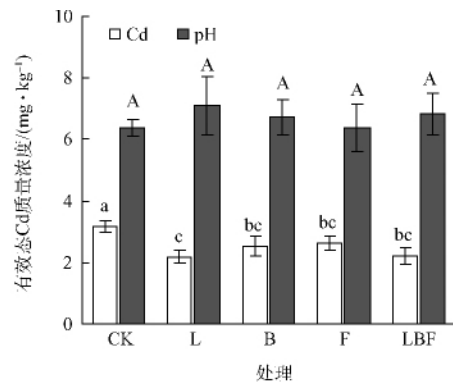
### 3 结论

1) 通过玻璃柱静止水体室内模拟研究得知,水面缓慢撒施(0~20 cm 表层底泥 1% 质量分数) 石灰、生物炭和沸石等环境友好型土壤重金属污染修复阻控材料可快速去除上覆水水溶态 Cd 质量浓度,同时材料自然沉积到底泥表面后可在一定程度上减低底泥水溶液中水溶态 Cd 质量浓度和底泥可交换态 Cd 的组分,且 60 d 的室内模拟实验结果显示,3 种阻控材料处理均呈现良好的持续效应,其中石灰与 3 种不同粒径的材料配方处理效果最佳。

2) 本研究仅模拟了 1 m 深上覆水的 Cd 去除实验,尚需选取典型污染静止塘库水体根据其底泥及上覆水中 Cd 污染程度与上覆水水深进行撒施量的原位小、中试实验研究来评价本研究结果的推广潜力及科学价值。

### 参考文献

- [1] 刘润堂,许建中.我国污水灌溉现状、问题及其对策[J].中国水利,2002,10:123-125  
 [2] 姜国辉,周雪梅,李玉清,等.不同浓度镉水灌溉对土壤及水稻品质的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):264-267



注:同系列不同大小写字母表示不同处理间的差异达显著水平,  $p < 0.05$ 。

图 3 不同阻控材料添加处理 60 d 后对底泥有效态 Cd 含量与 pH 值影响

Fig. 3 Effect of different resistance control materials addition treats on exchangeable Cd content and pH value

- [3] LIU K, LV J, HE W, et al. Major factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2015, 113: 207-213
- [4] HU P, OUYANG Y, WU L, et al. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27: 225-231
- [5] 刘发欣, 高怀友, 伍军. 镉的食物链迁移及其污染防治对策研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 805-809
- [6] 宋文恩, 陈世宝, 唐杰伟. 稻田生态系统中镉污染及环境风险管理 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1669-1678
- [7] 田伟莉, 柳丹, 吴家森, 等. 动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 188-192
- [8] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用 [J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 793-801
- [9] WANG D J, ZHANG W, HAO X Z, et al. Transport of Biochar Particles in Saturated Granular Media: Effects of Pyrolysis Temperature and Particle Size [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(2): 821-828
- [10] 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]. *Environmental Pollution*, 2014, 186: 195-202
- [11] 李洪良, 邵孝侯, 黄鑫, 等. 农田污水灌溉的危害研究进展与解决对策 [J]. *节水灌溉*, 2007, 2: 14-17, 21
- [12] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策 [J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7615-7622
- [13] 朱永官, 陈保冬, 林爱军, 等. 珠江三角洲地区土壤重金属污染控制与修复研究的若干思考 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12): 1575-1579
- [14] 龙永珍, 戴塔根, 邹海洋. 长沙、株洲、湘潭地区土壤重金属污染现状及评价 [J]. *地球与环境*, 2008, 36(3): 231-236
- [15] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价 [J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6059-6067
- [16] 王霞. 黄河上游典型地区底泥重金属调查与污染评价 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014
- [17] 王贵玲, 蔺文静. 污水灌溉对土壤的污染及其整治 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 163-166
- [18] LUCCHINI P, QUILLIAM R, DELUCA T H, et al. Does biochar application alter heavy metal dynamics in agricultural soil? [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 184: 149-157
- [19] AKCAY H, OGUZ A, KARAPIRE C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments [J]. *Water Research*, 2003, 37: 813-822
- [20] 宁寻安, 陈文松, 李萍, 等. 污染底泥修复治理技术研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(9): 100-103
- [21] 沈佳佳, 石艳洁, 吴丰昌, 等. 原位掩蔽对底泥汞释放的抑制效果及中试评估 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(8): 1281-1287
- [22] 王国莉, 陈孟君, 范红英, 等. 四种土壤重金属形态分析方法的对比研究 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(5): 906-910
- [23] 张晶, 苏德纯. 不同镉污染农田土壤上秸秆和炭化秸秆分解动态及其对土壤镉的吸附特征 [J]. *环境工程学报*, 2013, 7(10): 4097-4102
- [24] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 409-417
- [25] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 309-313
- [26] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 [J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3716-3721
- [27] KUMPIENE J, LAGERKVIST A, MAURICE C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—A review [J]. *Waste Management*, 2008, 28(1): 215-225
- [28] 沈洪艳, 张红燕, 刘丽, 等. 淡水沉积物中重金属对底栖生物毒性及其生物有效性研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(1): 272-280
- [29] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 [J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 325-334
- [30] 许炼烽, 邓绍龙, 陈继鑫, 等. 河流底泥污染及其控制与修复 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1708-1715
- [31] 李扬, 李锋民, 张修稳, 等. 生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响 [J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3071-3078
- [32] 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*, 2013, 92(11): 1450-1457
- [33] CAO X D, MA L N, LIANG Y, et al. Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-mannure biochar [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(11): 4884-4889
- [34] 喻阳华, 陈程, 吴永贵, 等. 红枫湖沉积物大容积高水位条件下薄层覆盖材料的污染原位控制效果 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(2): 689-696