

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 ..... 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 与惰性 SiO<sub>2</sub> 的生物毒性比较 ..... 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)

APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 ..... 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)

2000 ~ 2014 年北京市 SO<sub>2</sub> 时空分布及一次污染过程分析 ..... 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)

利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 ..... 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)

长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 ..... 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)

珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 ..... 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)

春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 ..... 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)

洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 ..... 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)

大辽河主要污染源营养盐输入特征 ..... 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)

三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 ..... 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)

不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 ..... 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)

周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 ..... 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)

华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 赵焱, 袁瑞强 (4051)

某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)

乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 ..... 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)

青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 ..... 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)

多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配 ..... 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)

降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 ..... 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)

重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 ..... 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)

三峡水库消落带植物汞的分布特征 ..... 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)

物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 ..... 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)

超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 ..... 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)

载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 ..... 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)

TiO<sub>2</sub> 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 ..... 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)

单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 ..... 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)

间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 ..... 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)

单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 ..... 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)

水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 ..... 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)

氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 ..... 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)

厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 ..... 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)

同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 ..... 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 ..... 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 ..... 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)

活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 ..... 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)

温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 ..... 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙酉, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)

污染场地修复技术筛选方法及应用 ..... 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)

基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 ..... 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)

大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 ..... 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)

缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 ..... 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)

不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 ..... 兰木岭, 高明 (4252)

生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 ..... 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)

不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 ..... 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)

组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 ..... 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文毅, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)

水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)

大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 ..... 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)

覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 ..... 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)

阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能 ..... 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)

应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的萘和苯并芘 ..... 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)

《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)

# 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响

姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱\*

(浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 临安 311300)

**摘要:** 通过盆栽试验, 研究清洁有机物料(沼渣、菌渣、笋壳)对镉、锌超积累植物东南景天修复重金属污染程度不同的土壤(分别采自温州和富阳, 称温州土和富阳土)的影响。结果表明, 有机物料对土壤重金属有效性的影响因有机物料种类和添加量而异, 不同重金属元素的反应也不同。在温州土中, 以5%沼渣对Cu、Zn的活化效果最好; 而在富阳土中则以1%笋壳对Cu、Zn、Pb和Cd的活化效果最好。有机物料的添加促进了东南景天的生长, 其生物量随着有机物料添加量的提高而增加, 增幅达23.7%~93.0%。在温州土中, 仅以1%笋壳的处理对东南景天地上部吸收积累Cd的效果最佳, 超过对照的22.6%, 而其余各处理皆不及对照; 对于Zn, 菌渣处理不及对照, 而其它处理均优于对照, 以5%沼渣、1%笋壳和5%笋壳为佳, 分别超过对照的39.6%、32.6%和23.8%。而在富阳土中, 对于Cd而言, 以5%笋壳、1%沼渣和5%沼渣的处理效果为佳, 地上部Cd积累量超过对照的12.9%、12.8%和6.2%, 而其余处理皆不及对照; 对于Zn, 添加有机物料的各处理都促进了东南景天地上部Zn的积累, 最佳处理分别为: 5%笋壳、5%沼渣和5%菌渣, 分别超过对照的38.4%、25.7%和22.4%。

**关键词:** 有机物料; 东南景天; 重金属; 土壤; 植物修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4268-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.043

## Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by *Sedum alfredii* Hance

YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, MA Jia-wei, LIU Dan, YE Zheng-qian\*

(Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, School of Environmental and Resources Science, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China)

**Abstract:** In this study, a pot experiment was conducted to investigate the effect of clean organic materials i. e., biogas residue (BR), mushroom residue (MR), and bamboo shell (BS) on phytoextraction remediation of two heavy metal contaminated soils (collected from Wenzhou and Fuyang, which referred to "Wenzhou soil" and "Fuyang soil", respectively.) using a cadmium (Cd) and zinc (Zn) hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance. The results indicated that the effects of organic materials on availabilities of soil heavy metals were different due to different kinds of heavy metals, organic materials, and the application rates of the organic materials. Addition with 5% BR showed the greatest activation to copper (Cu), Zn in Wenzhou soil, and in Fuyang soil 1% BS had the highest activation for Cu, Zn, lead (Pb) and Cd. Growth of shoot biomass of *Sedum alfredii* Hance increased with the addition rate of organic materials, and the plant dry weights were increased by 23.7%-93.0%. In Wenzhou soil, only 1% BS treatment had the best effect on Cd uptake and accumulation in shoots of *Sedum alfredii* Hance, increased by 22.6%, while other treatments were inferior to the control. For Zn, MR treatments were inferior to the control, while other treatments were superior to the control, of which 5% BR, 1% BS and 5% BS exceeded the control by 39.6%, 32.6% and 23.8%, respectively. In Fuyang soil, for Cd, the treatment effects of 5% BS, 1% BR and 5% BR were the greatest, of which Cd accumulation in shoots exceeded the control by 12.9%, 12.8% and 6.2%, respectively, while Cd accumulations in shoots in all other treatments were less than that of control. For Zn, the treatments of adding organic materials promoted Zn accumulation in shoots of *Sedum alfredii* Hance, and the best treatments were as follows: 5% BS, 5% BR and 5% MR, exceeded the control by 38.4%, 25.7% and 22.4%, respectively.

**Key words:** organic material; *Sedum alfredii* Hance; heavy metal; soil; phytoremediation

土壤重金属污染问题日益严峻, 亟待治理。近年来, 学术界已提出了诸如物理修复、化学修复、生物修复以及多措施联合修复等多种方法来治理重金属污染土壤。与传统的理化治理方法相比, 生物修复技术因其治理过程的原位性、治理成本的低廉性、管理与操作的简易性及环境美学的兼容性而日益受到人们的重视<sup>[1-3]</sup>。其中利用超积累植物<sup>[4-6]</sup>有效吸取土

壤重金属, 实现重金属污染土壤的修复, 已成为污染土壤修复研究的热点之一。东南景天是在中国东南部古老矿山上所发现的一种生长速率相对较快、生

收稿日期: 2015-01-29; 修订日期: 2015-06-06

基金项目: 浙江省科技厅公益项目(2013C33016); 种养废弃物循环利用与污染防治技术创新团队项目(2013TD12)

作者简介: 姚桂华(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境修复, E-mail: steamedbread@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: yezhq@zafu.edu.cn

物量较大的 Zn、Cd 超积累植物,是目前发现的较为理想的 Zn、Cd 污染土壤修复植物之一<sup>[7,8]</sup>。然而,由于受到环境等因素的影响,单纯使用植物修复技术效率往往很低<sup>[9]</sup>,因此需要采取强化措施如施用有机肥、金属螯合剂等来提高植物修复的效率<sup>[10~14]</sup>。

农业生产过程中产生的大量废弃物,包括沼渣、菌渣、笋壳等有机物料<sup>[13]</sup>,如能对其加以利用,既可以变废为宝,减少其对环境的污染,还可节省化肥的使用,降低农业成本;而且施加廉价易得的清洁有机物料对土壤进行修复,还被认为是一种切实可行的方法<sup>[10]</sup>。沼渣中所含大量的有机质和植物生长所需的营养元素(如氮、磷、钾等),是优质的有机肥料<sup>[15]</sup>。菌渣含有丰富的纤维素、维生素、抗生素、矿质元素和其他生物活性物质,可在农业生产上作为有机肥料或土壤改良剂应用<sup>[16,17]</sup>。而笋壳是竹笋加工废弃物,同样富含大量的氨基酸、蛋白质和粗纤维等成分,利用笋壳生产有机肥能够获得优质的堆肥<sup>[18,19]</sup>。有机肥/有机物料施入土壤后,不仅可以改良土壤、提高土壤肥力,而且在矿化分解过程中产生小分子有机酸等可溶性有机物(DOM)可以活化土壤重金属,从而提高它们的植物有效性<sup>[20]</sup>,促进植物吸收,潘逸等<sup>[21]</sup>研究发现施用有机肥后,耕层土壤中交换性 Cu、Cd 含量明显增加,促进了小麦对 Cu、Cd 的吸收和积累。此外,Wei 等<sup>[22]</sup>在研究超富集植物球果蕻菜修复 Cd 污染土壤时,施用鸡粪显著提高了球果蕻菜对 Cd 的提取能力。将有机物料用于辅助植物修复重金属污染土壤已成为新的趋势,但有机物料的添加对植物修复重金属

的效率往往呈现出不同的结果,或提高<sup>[23,24]</sup>或降低<sup>[25,26]</sup>。因此,利用有机物料辅助修复重金属污染土壤有待进一步研究,并且根据当地现有的农业废弃物来提高东南景天修复重金属污染土壤的研究鲜见报道。本研究通过盆栽试验,探讨上述 3 种有机物料对东南景天修复重金属污染土壤的效果,以期为田间实际修复提供借鉴和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试植物:取自浙江省衢州市一古老铅锌矿的重金属超积累植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance),该植物能够无性繁殖,经扦插进行人工繁殖培育后,选用长约 5 cm、大小均匀、去顶芽和带叶片的植株作为供试材料。

供试有机物料:沼渣,采自余杭某有机养殖场猪场粪沼气池,风干;菌渣,采自嘉兴某农场黑木耳栽培后的废菌棒,菌棒原材料主要为桑枝屑(约占 80%),辅料为麦麸、棉籽壳、石膏、石灰等;笋壳,采自临安某竹笋加工厂。菌渣和笋壳经发酵腐熟后,风干。风干有机物料经粉碎后过 2 mm 筛备用,基本性质见表 1。

供试土壤:一种采自温州市农业科学院试验基地,为 Cd 污染的农田土壤(温州土),另一种采自杭州富阳市环山乡某一小高炉周边,为多金属复合污染的土壤(富阳土),基本性质见表 1。所取土壤皆为 0~20 cm 的表层土壤,置于阴凉处风干,过 5 mm 筛备用。

表 1 供试材料的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of materials used in the experiment

供试材料	温州土	富阳土	沼渣	菌渣	笋壳
pH	5.32	5.64	6.50	7.80	6.80
有机质/%	4.05	2.86	52.72	75.11	56.22
CEC/cm <sup>ol</sup> ·kg <sup>-1</sup>	20.60	9.19	—	—	—
全氮/%	—	—	1.72	1.14	2.24
全磷/%	—	—	0.20	0.10	0.44
全钾/%	—	—	0.91	0.60	1.35
碱解氮/mg·kg <sup>-1</sup>	246.96	197.72	—	—	—
有效磷/mg·kg <sup>-1</sup>	74.86	9.19	—	—	—
速效钾/mg·kg <sup>-1</sup>	365.50	88.50	—	—	—
全 Cu/mg·kg <sup>-1</sup>	84.64	1 183.48	25.50	10.00	8.43
全 Zn/mg·kg <sup>-1</sup>	228.15	2 403.15	256.25	85.40	7.59
全 Pb/mg·kg <sup>-1</sup>	77.35	817.75	1.75	3.30	0.23
全 Cd/mg·kg <sup>-1</sup>	2.65	13.15	0.25	nd <sup>1)</sup>	nd
有效 Cu/mg·kg <sup>-1</sup>	8.14	768.73	—	—	—
有效 Zn/mg·kg <sup>-1</sup>	54.20	1 140.36	—	—	—
有效 Pb/mg·kg <sup>-1</sup>	11.71	515.01	—	—	—
有效 Cd/mg·kg <sup>-1</sup>	0.49	2.61	—	—	—

1) nd 表示未检出

## 1.2 试验方法

选用3种有机物料:沼渣、菌渣、笋壳作为试验材料,每种有机物料分别按土重比为1%、5%与供试土壤混匀后装入塑料盆中,同时设对照处理(不添加有机物料),每个处理重复3次.塑料盆尺寸为305 mm×210 mm×110 mm,每盆装5 kg土壤.将培育好的生长一致的东南景天苗株移栽入盆中(植株间距5 cm).在植物生长过程中,定期浇水保证每盆土壤的含水率维持在田间持水量的60%左右.待其中某一处理的植株封行(植物生长皆处于营养生长阶段)后,收获所有处理的植物和进行土壤样品的采集.

植物样品采集后,用去离子水洗净,吸水纸吸干表面水,测定鲜重.然后置于70℃下烘干至恒重,测定其干物质量.再用玛瑙研钵磨碎,过20目筛供分析测定.采集的土样经风干后,磨细,过筛.用于土壤速效成分和pH测定的样品过10目筛,其它指标过100目筛.

土壤pH、有机质、CEC以及速效养分均采用常规分析方法测定<sup>[27]</sup>.

土壤重金属有效态采用0.1 mol·L<sup>-1</sup> HCl浸提,土壤重金属全量采用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消煮,植物样品采用HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,最后所得浸提液和消

煮液均用电感耦合等离子发射光谱仪ICP-OES(Optima 7000 DV,美国PE公司)进行测定.

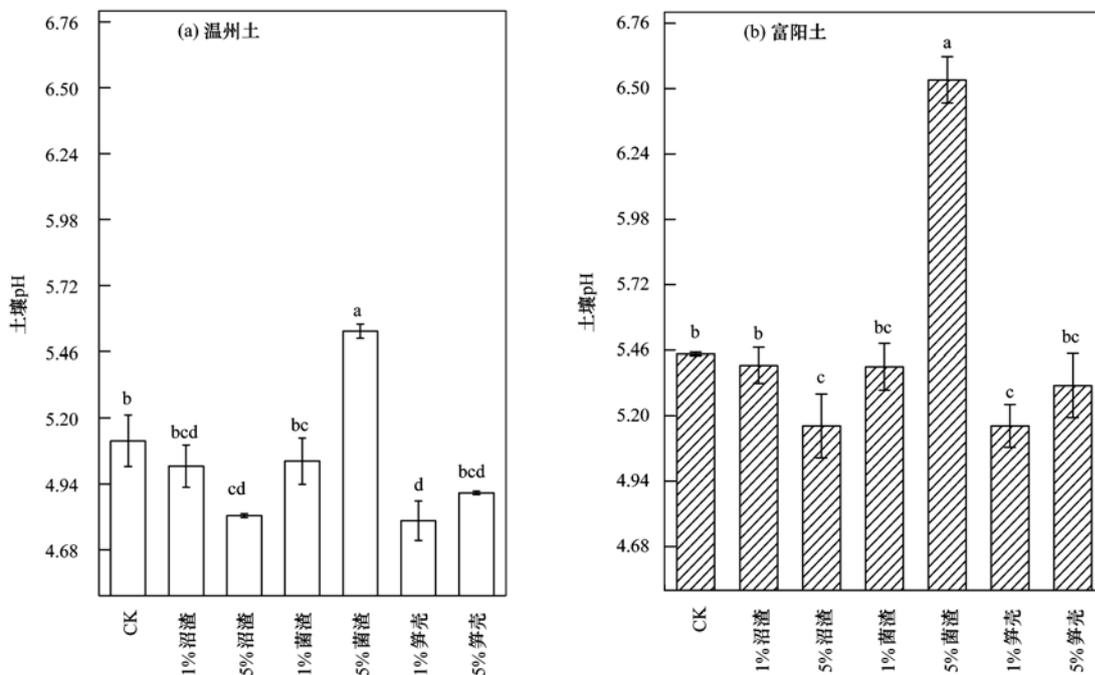
## 1.3 数据分析

采用Excel 2007和Origin 8.0进行数据处理和作图,SPSS 18.0进行差异显著性检验( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 有机物料对土壤pH的影响

由图1可知,3种有机物料在两种土壤上对土壤pH的影响表现趋势基本一致.与对照(CK)相比,除了施入5%菌渣显著提高pH外,其他处理pH值都有不同程度的下降.尤其是施加了5%沼渣和1%笋壳的处理,pH值降低了0.3个单位,达到显著性差异( $P < 0.05$ ).出现这一现象的原因,可能是由于不同的有机物料具有不同的酸碱性和组成成分,使得施入土壤后分解产生的可溶性离子或者小分子有机酸的含量不同,导致了对土壤酸碱度产生不同程度的影响<sup>[28]</sup>.另外,还可能会受东南景天根系代谢活动如根系分泌物、土壤微生物等的影响.东南景天的根系分泌物往往是一些有机酸化合物,内含有羟基、羧基、氨基等大量的官能团对土壤pH会产生很大变化,降低土壤pH<sup>[29]</sup>.



图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

图1 不同处理对两种土壤pH值的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on pH in two soils

## 2.2 有机物料对土壤有机质的影响

由图 2 可知,与对照相比,添加 1% 有机物料的处理,对土壤有机质含量没有显著影响. 但当添加 5% 有机物料时土壤有机质含量显著提高,这与前人的研究结果一致<sup>[30]</sup>.

施加 5% 沼渣、5% 菌渣和 5% 笋壳后,在温州土中,有机质含量分别比对照增加了 9.5%、10.3% 和 12.8%,但只有 5% 笋壳达到了显著水平( $P < 0.05$ ). 而富阳土中,有机质含量分别比对照增加了 23.3%、40.0% 和 26.3%,均达到了显

著性差异. 由此可知,有机物料的添加效果富阳土要明显好于温州土. 这可能是由于富阳土本身的有机质含量要低于温州土的有机质含量,当施入等量的有机物料时,有机物料对温州土所产生的效果低于富阳土的效果;也可能由于富阳土壤重金属污染比较严重,抑制了土壤微生物对有机物质的矿化分解;还可能受有机物料本身性质的影响,在温州土的处理中,施加 5% 笋壳效果最好,增幅达 12.8%,而富阳土的处理中,以添加 5% 菌渣效果最好,增幅达 40.0%.

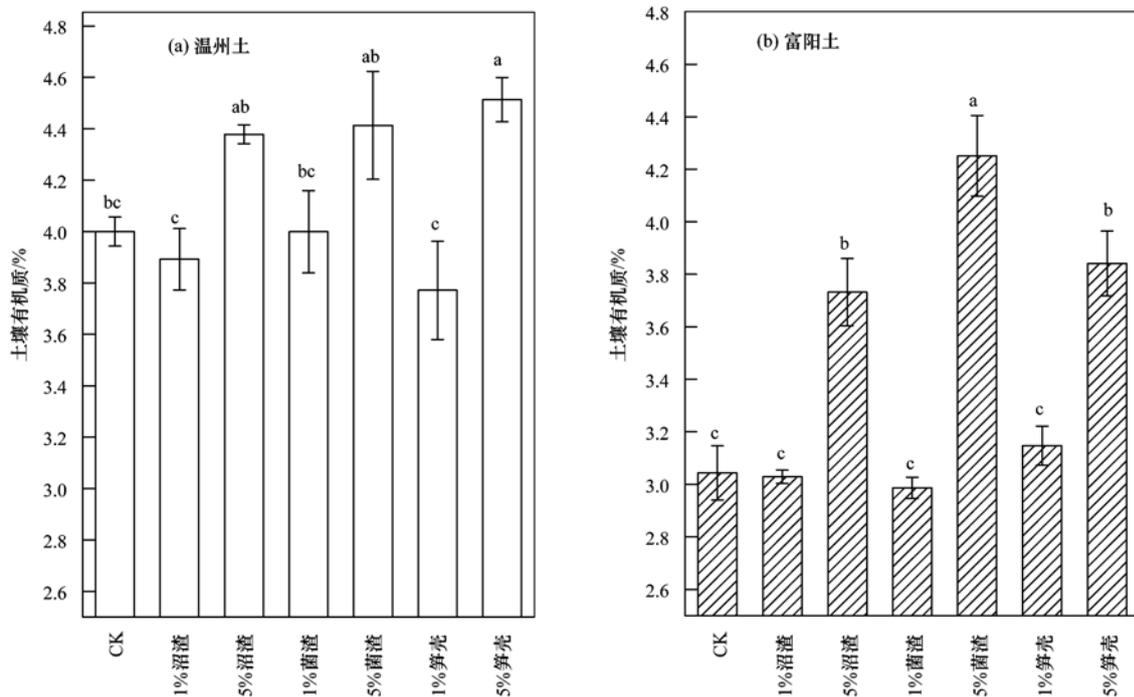


图 2 不同处理对两种土壤有机质含量的影响

Fig. 2 Soil organic matter content affected by different treatments

## 2.3 有机物料对土壤重金属有效态的影响

由于有机物料对土壤重金属形态转化的作用,3种有机物料的添加对两种土壤中重金属有效态含量产生了不同程度的影响(表 2). 总体而言,与对照相比,温州土中,除 5% 沼渣的处理土壤 Cu、Zn 有效态含量显著增加外,其它各处理对土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 有效性都有降低或显著降低的作用;富阳土中,土壤重金属有效性的变化因有机物料种类和添加量而异. 比较同一有机物料用量之间的效果可以发现,低用量(1%)条件下土壤重金属有效态含量都比高用量(5%)的高. 与对照相比,施加 5% 有机物料的处理降低或显著降低了土壤有效 Cu 的含量,其中以 5% 沼渣的处理降幅最大,达 13.5%,而施用低量有机物料(1%)却有提高或显著提高土

壤有效 Cu 的作用,以 1% 笋壳的作用最大,达 7.9%. 在对土壤 Zn 有效性的作用方面,除 5% 沼渣处理显著降低了土壤有效 Zn(降幅达 12.2%)外,其它各处理土壤有效 Zn 都比对照高,也以 1% 笋壳的作用显著,提高了 12.5%.

对于重金属元素 Pb,与对照相比,在温州土中添加不同有机物料的各处理土壤 Pb 的有效态含量都有不同程度的下降. 但在富阳土中却表现出不同的结果,低用量(1%)条件下起显著的活化作用,以 1% 笋壳的作用最大,提高了 15.2%;高用量条件下活化作用减弱(5% 笋壳)、甚至降低了土壤有效 Pb 的含量,以 5% 沼渣的降低作用最为显著,降低达 15.8%. 这与黄霁霞等<sup>[31]</sup>、黎秋君等<sup>[32]</sup>的研究结果一致. 对于 Cd 元素,在温州土中,所有有机物料

处理的土壤有效 Cd 都比对照显著降低;但在富阳土中,除了沼渣处理降低了土壤有效 Cd 含量外,菌渣的作用微小,而笋壳的处理却增加了土壤有效 Cd

的含量,低量(1%)笋壳的作用更大,增幅达 27.2%。综合各处理,富阳土中以 1% 笋壳对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的活化效果最大。

表 2 不同处理对土壤重金属有效态含量的影响<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 2 Soil available heavy metal contents affected by different treatments/mg·kg<sup>-1</sup>

处理	温州土				富阳土			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
对照(CK)	7.59 b	46.96 b	11.05 a	0.47 a	800.62 bc	988.87 c	486.86 d	1.80 b
1% 沼渣	7.04 b	44.22 b	9.35 bcd	0.35 d	835.49 ab	1 005.49 bc	530.17 ab	1.75 bc
5% 沼渣	8.36 a	68.51 a	10.93 a	0.37 cd	692.74 d	867.99 d	414.67 e	1.54 c
1% 菌渣	7.05 b	45.26 b	9.70 bc	0.41 b	811.99 b	1 029.74 bc	522.17 bc	1.86 b
5% 菌渣	5.34 c	44.23 b	8.05 d	0.39 bc	767.32 c	1 008.16 bc	472.47 d	1.74 bc
1% 笋壳	6.94 b	40.38 b	8.85 cd	0.31 e	863.16 a	1 112.66 a	560.84 a	2.29 a
5% 笋壳	7.21 b	43.63 b	10.62 ab	0.40 bc	759.87 c	1 027.87 bc	490.78 cd	1.90 b

1) 表中同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

#### 2.4 有机物料对东南景天生长的影响

有机肥能够促进植物生长,由图 3 可知,在温州土中,与对照相比,5% 菌渣、1% 笋壳和 5% 笋壳显著增加了东南景天地上部的生物量,增幅分别为 35.6%、23.7% 和 24.4%;在富阳土中,各处理的地上部生物量均有所增加,其中 5% 沼渣、1% 菌渣、5% 菌渣和 5% 笋壳处理的地上部生物量得到显著提高,分别提高了 54.4%、43.9%、93.0% 和 81.6%。以上结果可知,无论是对于温州土,还是富阳土,添加 5% 菌渣的处理效果最好。可以看出,有机物料的添加可以促进超积累植物东南景天的生

长,提高地上部生物量,并且随着有机物料添加量的增加而增加<sup>[33,34]</sup>。

#### 2.5 有机物料对东南景天地上部重金属含量的影响

虽然有机物料促进了东南景天的生长,但是与对照相比,在两种土壤上,施用有机物料后东南景天地上部重金属含量大多呈下降的趋势(表 3),可能与“稀释作用”有关。但在温州土壤上,东南景天地上部 Zn 的含量因有机物料种类和使用量而产生相反的结果,与对照相比,1% 沼渣、5% 沼渣和 1% 笋壳的处理显著提高了东南景天地上部 Zn 的含量,而 1% 菌渣、5% 菌渣和 5% 笋壳的处理则作用效果相

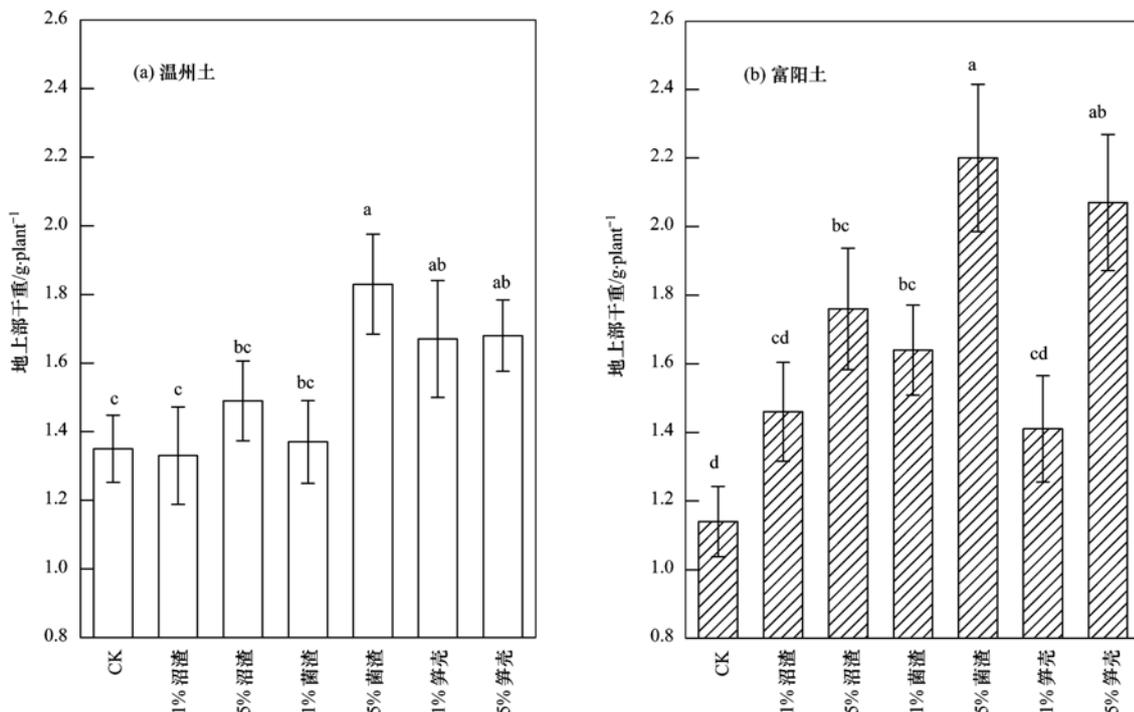


图 3 不同处理对东南景天地上部生物量的影响

Fig. 3 Biomass of *Sedum alfredii* Hance shoot dry weights affected by different treatments

反. 沼渣用量对植物 Zn 含量影响较大, 为各处理中最高(4.4 ~ 4.8 g·kg<sup>-1</sup>), 而植物体内 Zn 的浓度随着菌渣和笋壳用量的提高而显著下降, 尤以 5% 菌渣的作用明显, 只有对照的 67.5%. 有机物料降低了东南景天地上部 Cd 的含量, 并随有机物料用量的增加而下降, 以 5% 菌渣的降低作用最大, 仅为对照的 57.6%.

在富阳土中, 与对照相比, 施用 3 种有机物料后东南景天地上部重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量均

有不同程度的降低, 其降低程度依次为: 菌渣 > 笋壳 > 沼渣, 且 4 种重金属表现出一致的规律性. 有机物料对东南景天地上部重金属含量的作用随着施入量的增加, 其降低的越显著, 在 5% 菌渣处理下, 东南景天地上部 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量分别只有对照的 31.2%、70.8%、25.3% 和 42.9%. 由以上结果可知, 两种土壤中, 菌渣对提高东南景天地上部重金属含量的效果最小, 沼渣和笋壳的作用效果不明显, 甚至显著降低(尤其是元素 Pb 和 Cd).

表 3 不同处理对东南景天地上部重金属含量的影响/mg·kg<sup>-1</sup>

Table 3 Effects of different treatments on heavy metal concentrations in shoots of *Sedum alfredii* Hance/mg·kg<sup>-1</sup>

处理	温州土				富阳土			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
对照(CK)	4.61 bc	4 035.49 c	1.00 a	35.95 a	34.53 a	16 822.10 a	185.11 a	473.19 a
1% 沼渣	4.31 c	4 448.40 ab	0.42 d	31.29 b	30.24 ab	15 859.99 b	135.51 b	410.34 ab
5% 沼渣	4.97 ab	4 796.74 a	0.41 d	29.02 b	24.17 c	14 074.59 c	99.10 c	311.40 cd
1% 菌渣	3.50 d	3 328.38 d	0.50 d	23.75 c	23.93 c	12 704.53 d	107.39 c	321.50 cd
5% 菌渣	3.01 d	2 724.06 e	0.43 d	20.69 c	10.78 d	11 917.40 d	46.89 d	203.04 e
1% 笋壳	4.76 abc	4 397.72 b	0.75 b	36.01 a	25.24 bc	14 742.89 c	134.08 b	357.78 c
5% 笋壳	5.25 a	3 657.45 d	0.52 cd	24.24 c	19.99 c	11 827.01 d	94.43 c	269.66 d

### 3 讨论

#### 3.1 有机物料对土壤重金属有效态的影响

从上述的结果可知, 不同有机物料及用量的处理对土壤 4 种重金属有效态的影响不同. 这显然与有机物料在土壤体系中的反应过程比较复杂有关, 对重金属生物有效性的效果取决于有机物料本身的性质、内在的氧化还原作用、土壤类型以及重金属离子的性质等因素的影响. 有机物料施入土壤后发生转化、分解产生小分子有机酸或者大分子的腐殖酸, 小分子酸可以活化被土壤表面或胶体吸附的重金属, 从而增加了土壤溶液中重金属离子的含量, 而大分子腐殖酸可以络合土壤胶体或者土壤溶液中的重金属, 形成稳定的络合物, 从而降低土壤溶液中重金属离子的浓度. 卢丽兰等<sup>[35]</sup>、García-Mina 等<sup>[36]</sup>研究表明, 腐殖酸在不同条件下对重金属有不同的作用, 既可以活化也可以钝化. 本研究中, 3 种有机物料的性质很不相同, 沼渣原材料为动物的排泄物经过沼气池厌氧发酵而来; 笋壳为食用竹笋去除可食部分的剩余物经堆置好氧发酵而得; 而菌渣则主要由桑枝菌棒经黑木耳栽培后的剩余物经堆置发酵而得. 因此, 从有机物料组成来看, 除了含有结构复杂、不易降解的木质素和腐殖酸外, 所用笋壳比沼渣和菌渣具有更多的相对结构简单、易于矿化分解的有机成分(纤维素、半纤维素)及结构更简单的有

机物<sup>[15,17,19,37]</sup>, 因而能够使土壤重金属有效态含量较高, 而菌渣由于具有高 pH, 从而使土壤 pH 提高、重金属有效性显著降低<sup>[38]</sup>, 并随用量的提高其作用更明显(图 1、表 3), 影响植物的吸收, 导致东南景天地上部重金属的吸收积累低于其它有机物料的处理, 也低于对照.

在本研究中, 对于重金属 Cu、Zn, 在温州土中 1% 的沼渣降低了有效态 Cu、Zn 含量, 而 5% 的沼渣却增加了 Cu、Zn 有效态含量, 这说明沼渣进入土壤后分解产生的大分子酸比例要大于小分子酸, 使得施入 1% 沼渣后抑制了土壤中重金属的活性, 而随着沼渣施入量的增加, 大分子酸逐渐分解矿化成小分子酸, 当施入 5% 沼渣时小分子酸的比例高于大分子酸, 活化的 Cu、Zn 量也就多于络合的 Cu、Zn 量, 从而造成重金属有效态含量的增加. 可是沼渣施入富阳土后对重金属有效态含量表现出了相反的情况. 从表 1 可以看出, 温州土无论从养分含量还是阳离子交换量(约为富阳土的两倍)都高于富阳土, 而其重金属污染程度远小于富阳土, 这也就使得微生物在温州土中的活性或者新陈代谢的速率要比在富阳土中大得多.

对于重金属 Cd, 本研究中两种土壤中几乎所有处理对有效态 Cd 都产生了一定的抑制作用, 唯独笋壳施入富阳土后对 Cd 有一定的活化作用, 其中 1% 笋壳的处理达到了显著水平( $P < 0.05$ ). 这可

能是由于笋壳中纤维素含量比较高,富阳土的有机质含量不高,Cd 在氧化条件下不易形成稳定的络合(或者螯合)物。同时,东南景天根系的分泌物、根际的微生物(如丛枝菌根、内生菌根)等都会对重金属产生或活化或抑制的作用<sup>[39,40]</sup>。因此重金属有效态在不同的土壤体系中得到活化还是钝化,受到有机物料种类和用量、根系分泌物、土壤微生物、土壤有机质等一系列因素的影响<sup>[10,41,42]</sup>。它们之间含量的多少、相互间作用的强弱决定了重金属有效态含量的变化。此外,东南景天对土壤重金属的吸收,消耗了土壤有效态重金属。因此,在东南景天生长修复过程中有机物料对土壤重金属有效态的影响过程复杂。

### 3.2 有机物料对东南景天地上部重金属吸收积累的影响

在评价东南景天修复重金属污染土壤的效率时,不仅要考虑对土壤结构、肥力、迁移风险<sup>[43]</sup>等指标的改良程度去考量,更要从单位时间内从土壤中带走的重金属总量去考量。东南景天带走的重金属总量的多少涉及以下两个因素:地上部植株生物量和植株重金属含量,两者的乘积(重金属积累量)真正反映了有机物料对东南景天修复土壤重金属效率的作用。在本试验中,3种有机物料的施入都不同程度的增加了东南景天地上部的生物量,且温州土和富阳土表现出一致的规律,尤以菌渣的处理效果最好,表明菌渣施用更有利于改善东南景天的营养条件,其原因可能是经黑木耳栽培后的菌棒中有更多有利于东南景天生长的葡萄糖、氨基酸、有益微生物等<sup>[44]</sup>。但是,与生物量反应不同的是,施用3

种有机物料对东南景天地上部重金属的吸收积累作用表现不一,有促进、有抑制,其作用还受土壤性质、重金属元素的影响,这与 van Herwijnen 等<sup>[45]</sup>的研究结果一致。其中菌渣处理在温州土中对东南景天地上部重金属的积累都表现出抑制作用,而在富阳土中,除对 Zn 有一定的促进作用外,对 Cu、Pb 和 Cd 也都起抑制作用(表 4)。沼渣和笋壳在两种土壤上对 Cu、Zn 则主要起促进作用,对 Pb 起抑制作用;而对 Cd 的作用,在温州土中只有 1% 笋壳处理显著促进了在东南景天地上部的积累,在富阳土中,1% 沼渣、5% 笋壳起显著促进作用,5% 沼渣和 1% 笋壳则作用不显著。这些有机物料对东南景天地上部重金属的吸收积累作用,其抑制作用一方面可能与施用后土壤 pH 升高、腐熟有机物料中腐殖物质等大分子复杂有机物对土壤重金属的络合、固定,使土壤中重金属活性下降,抑制了植物根系对它们的吸收有关<sup>[22]</sup>。而有机物料对东南景天地上部重金属积累的促进作用,则与它们对东南景天生长的促进作用、在土壤中的矿化分解产生小分子有机物对土壤重金属的活化等有关<sup>[29,35,42]</sup>,从而有利于植物对重金属的吸收积累。由此可知,同一有机物料处理虽然提高了东南景天地上部生物量,却可能会降低了地上部某种重金属的积累。

因此,不仅有机物料的性质影响土壤重金属有效性,有机物料的用量对重金属有效性的影响也很明显,在考虑有机物料对东南景天吸收重金属的促进效果时,要兼顾有机物料对土壤重金属有效性和东南景天生长的影响,才能有效地考量有机物料对提高东南景天修复重金属污染土壤效率的作用。

表 4 不同处理对东南景天地上部重金属积累量的影响/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$

Table 4 Effects of different treatments on heavy metal accumulation in *Sedum alfredii* Hance shoots/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$

处理	温州土				富阳土			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
对照(CK)	6.52 b	5 507.93 cd	1.40 a	48.96 bc	39.47 ab	19 627.26 cd	223.92 a	531.50 bc
1% 沼渣	6.58 b	5 989.76 c	0.51 e	41.03 c	44.33 a	22 855.79 bc	206.60 ab	599.76 a
5% 沼渣	8.74 a	7 689.52 a	0.75 d	43.48 c	45.44 a	24 676.21 ab	156.45 c	564.21 ab
1% 菌渣	4.51 c	4 280.78 e	0.82 cd	32.32 d	35.96 b	20 029.54 cd	178.31 bc	463.92 de
5% 菌渣	5.95 b	5 134.86 d	1.13 b	37.80 d	21.59 d	24 023.87 ab	91.92 d	404.82 e
1% 笋壳	8.40 a	7 301.20 ab	1.24 ab	60.02 a	35.39 b	19 956.11 cd	175.15 c	487.92 cd
5% 笋壳	9.31 a	6 817.13 b	0.96 c	47.30 c	42.16 a	27 171.42 a	223.81 a	599.85 a

综上所述可以发现,有机物料对东南景天修复土壤重金属的作用不仅因有机物料种类而异,而且还与有机物料的施用量相关,需要综合考虑土壤 pH、有机质、东南景天生物量等多种因素。在所用

3种有机物料中,笋壳和沼渣是较好的有机物料,适当的用量条件下,能够促进东南景天对重金属 Zn、Cd 污染土壤的修复,而菌渣的施入却抑制了东南景天对 4 种重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的提取,显著降低

了东南景天地上部重金属的吸收量。

#### 4 结论

(1) 3 种有机物料(沼渣、菌渣、笋壳)对两种土壤(温州土和富阳土) pH 的影响趋势一致,与对照相比,除了施入 5% 菌渣显著提高 pH 外,其他处理下土壤 pH 值都有不同程度的下降。添加 5% 有机物料的土壤有机质含量显著高于添加 1% 有机物料的处理,在温州土中,5% 笋壳的处理效果最好,增幅达 12.8%,富阳土中,5% 菌渣的处理效果最好,增幅达 40.0%。

(2) 对于土壤重金属有效性,温州土中,5% 沼渣对重金属 Cu、Zn 的活化效果最好,而富阳土中 1% 笋壳对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的活化效果最好。

(3) 综合东南景天地上部生物量和重金属含量可知,在温州土中,以 1% 笋壳的处理对东南景天地上部吸收积累 Cd 的效果最佳。而在富阳土中,对于重金属 Zn 而言,处理效果依次为: 5% 笋壳 > 5% 沼渣 > 5% 菌渣; 对于重金属 Cd, 1% 沼渣、5% 沼渣和 5% 笋壳的处理效果相近,都显著好于对照。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Krumins J A, Goodey N M, Gallagher F. Plant-soil interactions in metal contaminated soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **80**: 224-231.
- [ 2 ] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2014, **30**(17): 208-214.
- [ 3 ] 黄铮, 徐力刚, 徐南军, 等. 土壤作物系统中重金属污染的植物修复技术研究现状与前景[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(增刊): 58-62.
- [ 4 ] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? [J]. *Plant Science*, 2011, **180**(2): 169-181.
- [ 5 ] Yang X E, Feng Y, He Z L, *et al.* Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, **18**(4): 339-353.
- [ 6 ] Knight B, Zhao F J, McGrath S P, *et al.* Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution[J]. *Plant and Soil*, 1997, **197**(1): 71-78.
- [ 7 ] 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(5): 513-518.
- [ 8 ] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天(*Sedum alfredii* H.) ——一种新的锌超积累植物[J]. *科学通报*, 2002, **47**(13): 1003-1006.
- [ 9 ] Pulford I D, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-

- contaminated land by trees—a review [J]. *Environment International*, 2003, **29**(4): 529-540.
- [ 10 ] 王意锬, 张焕朝, 郝秀珍, 等. 有机物料在重金属污染农田土壤修复中的应用研究[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(5): 1275-1280.
- [ 11 ] Wei S H, da Silva J A T, Zhou Q X. Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **150**(3): 662-668.
- [ 12 ] Leštan D, Luo C L, Li X D. The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **153**(1): 3-13.
- [ 13 ] 王林, 周启星. 农艺措施强化重金属污染土壤的植物修复[J]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(3): 772-777.
- [ 14 ] 孙约兵, 周启星, 郭观林. 植物修复重金属污染土壤的强化措施[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(3): 103-110.
- [ 15 ] 郭强, 牛冬杰, 程海静, 等. 沼渣的综合利用[J]. *中国资源综合利用*, 2005, (12): 11-15.
- [ 16 ] 温广蝉, 叶正钱, 王旭东, 等. 菌渣还田对稻田土壤养分动态变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(3): 82-86.
- [ 17 ] 胡清秀, 卫智涛, 王洪媛. 双孢蘑菇菌渣堆肥及其肥效的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(9): 1902-1909.
- [ 18 ] 张有珍, 马嘉伟, 姚芳, 等. 笋壳微生物腐熟肥料利用的研究[J]. *世界竹藤通讯*, 2012, **10**(1): 16-19.
- [ 19 ] 周兆祥, 田荆祥, 赖椿根. 竹笋壳的化学成分[J]. *浙江林学院学报*, 1991, **8**(1): 54-59.
- [ 20 ] 王良梅, 周立祥, 占新华, 等. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 858-864.
- [ 21 ] 潘逸, 周立祥. 施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响: 田间微区试验[J]. *南京农业大学学报*, 2007, **30**(2): 142-146.
- [ 22 ] Wei S H, Zhu J G, Zhou Q X, *et al.* Fertilizer amendment for improving the phytoextraction of cadmium by a hyperaccumulator *Rorippa globosa* (Turcz.) Thell [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(6): 915-922.
- [ 23 ] 刘景, 吕家珑, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对红壤 Cu 和 Cd 含量及活化率的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 914-919.
- [ 24 ] 徐明岗, 张青, 曾希柏. 改良剂对黄泥土镉锌复合污染修复效应与机理研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1361-1366.
- [ 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 ] 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. *土壤学报*, 2001, **38**(2): 212-218.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] 詹绍军, 喻华, 冯文强, 等. 有机物料与石灰对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. *西南农业学报*, 2011, **24**(3): 999-1003.
- [ 29 ] Li T Q, Di Z Z, Yang X E, *et al.* Effects of dissolved organic matter from the rhizosphere of the hyperaccumulator *Sedum*

- alfredii* on sorption of zinc and cadmium by different soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**(3): 1616-1622.
- [30] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(5): 1057-1064.
- [31] 黄嵩霞, 许超, 吴启堂, 等. 赤泥对重金属污染红壤修复效果及其评价[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(1): 267-272.
- [32] 黎秋君, 黎大荣, 王英辉, 等. 3种有机物料对土壤理化性质和重金属有效态的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(6): 182-185.
- [33] 孟桂元, 周静, 邬腊梅, 等. 改良剂对苕麻修复镉、铅污染土壤的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, **28**(2): 273-277.
- [34] Zupanc V, Kastelec D, Lestan D, *et al.* Soil physical characteristics after EDTA washing and amendment with inorganic and organic additives[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **186**: 56-62.
- [35] 卢丽兰, 王旭东, 王虎, 等. 鸡粪腐解过程中不同溶性腐殖质结合铜的变化[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(5): 980-987.
- [36] García-Mina J M, Antolín M C, Sanchez-Diaz M. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soil types[J]. *Plant and Soil*, 2004, **258**(1): 57-68.
- [37] 贾燕芳, 石伟勇. 几种笋壳的化学成分及其纤维素特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, **37**(3): 338-342.
- [38] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of Pb-and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145**(1): 365-373.
- [39] Khan A G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, **18**(4): 355-364.
- [40] Zhuang X L, Chen J, Shim H, *et al.* New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation [J]. *Environment International*, 2007, **33**(3): 406-413.
- [41] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(2): 503-512.
- [42] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 根系分泌物与重金属的化学行为研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, **9**(4): 425-431.
- [43] van Herwijnen R, Laverge T, Poole J, *et al.* The effect of organic materials on the mobility and toxicity of metals in contaminated soils[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(11): 2422-2434.
- [44] 孙建华, 袁玲, 张翼. 利用食用菌菌渣生产有机肥料的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2008, (1): 52-55.
- [45] van Herwijnen R, Hutchings T R, Al-Tabbaa A, *et al.* Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **150**(3): 347-354.

## CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing .....	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM <sub>2.5</sub> from Beijing and Inert Particle SiO <sub>2</sub> .....	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC .....	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO <sub>2</sub> and An Ambient SO <sub>2</sub> Pollution Process in Beijing During 2000-2014 .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....	ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta .....	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta .....	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring .....	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin .....	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River .....	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China .....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms .....	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County .....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City .....	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay .....	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River .....	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River .....	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events .....	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing .....	REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance .....	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System .....	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon .....	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO <sub>2</sub> .....	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater .....	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater .....	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O <sub>3</sub> -BAC and Double O <sub>3</sub> -BAC .....	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier .....	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule .....	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage .....	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics .....	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitrification-ANAMMOX Process .....	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitrification Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor .....	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning .....	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community .....	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application .....	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study .....	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment .....	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming .....	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage .....	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance .....	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System .....	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes .....	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover .....	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells .....	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection .....	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人