

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

复合改良剂 FZB 对砷镉污染土壤的修复效果

丁萍^{1,2}, 贺玉龙^{1,2}, 何欢^{1,2}, 余江^{1,2,3*}

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川大学新能源与低碳技术研究院, 成都 610065; 3. 四川大学宜宾产业技术研究院, 宜宾 644000)

摘要: 通过小白菜盆栽种植试验,研究了复合改良剂 FZB(硫酸铁+沸石+改性生物炭)在不同施加量条件下对土壤基本理化性质、As 和 Cd 的生物有效性和赋存形态,以及小白菜累积转运 As 和 Cd 的影响。结果表明,在砷镉复合污染农田土壤中,施用复合改良剂 FZB 后,小白菜根际土壤 pH、有机质含量和阳离子交换量均呈现上升趋势;土壤中有效态 As 和有效态 Cd 含量随 FZB 施用量的增加而逐渐降低,最大降幅分别为 65.99% 和 30.68%; FZB 的施用使土壤中重金属赋存形态发生明显改变,其中交换态 As 和交换态 Cd 含量降低,铝结合态 As、铁结合态 As、有机结合态 Cd 和残渣态 Cd 含量却有所增加;同时,施用 FZB 还可有效降低小白菜根部和地上部中 As 和 Cd 的含量,在 8 g·kg⁻¹ 施用量水平,与对照组相比,小白菜地上部分 As、Cd 含量均降低到最小值,下降幅度分别为 42.09% 和 31.34%; FZB 的施用减少了小白菜根部和地上部分对 As 和 Cd 的富集,并且降低了小白菜植株将 As 从根部转运到地上部的能力。本研究表明,在降低农田土壤 As、Cd 生物有效性方面,复合改良剂 FZB 具有良好的应用前景。

关键词: 砷; 镉; FZB 复合改良剂; 小白菜; 生物有效性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0917-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007240

Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil

DING Ping^{1,2}, HE Yu-long^{1,2}, HE Huan^{1,2}, YU Jiang^{1,2,3*}

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Institute of New Energy and Low Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Yibin Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, China)

Abstract: A pot-based planting experiment of *Chinese brassica* was carried out to study the influence of the compound modifier FZB (iron sulfate + zeolite + modified biochar) on the physical and chemical properties of soil, As and Cd bioavailability and morphology, and the ability of *Chinese brassica* to accumulate As and Cd at different dosages. The results showed that, after application of FZB, the pH, OM, and CEC contents of the rhizosphere soil tended to increase in As and Cd compound contaminated farmland soils. The concentrations of available As and available Cd in the soil gradually reduced with an increase in FZB application, with maximum reductions of 65.99% and 30.68%, respectively. The application of FZB significantly changed the morphology of heavy metals in the soil, which consequently decreased the exchangeable concentrations of As and Cd, while the concentrations of aluminum-bound As, iron-bound As, organic bound Cd, and residual Cd increased. At the same time, the application of FZB effectively reduced the concentrations of As and Cd in the roots and aerial parts of *Chinese brassica*. When 8 g·kg⁻¹ of FZB was applied, compared with the control group, the concentrations of As and Cd in the aerial parts of *Chinese brassica* were reduced by 42.09% and 31.34%, respectively. FZB application decreased the As and Cd bioaccumulation capacity of the roots and aerial parts, and decreased the capacity of the plant to translocate As from the roots to the aerial parts. The study shows that the composite modifier FZB has good application prospects for reducing the bioavailability of As and Cd in farmland soils.

Key words: arsenic; cadmium; compound modifier FZB; *Chinese brassica*; bioavailability

随着工业化和城市化的快速发展,我国土壤重金属污染日益加重,成为当前亟需解决的环境问题^[1]。原位钝化技术以其效果迅速、操作简单和价格低廉等优势逐渐成为重金属污染土壤修复的研究热点之一^[2,3]。通过原位施用一定量的钝化修复材料,能有效改善土壤的理化性质,改变重金属的赋存形态并降低其生物有效性,减少植物对重金属元素的吸收富集^[4,5]。砷(As)和镉(Cd)均为典型的有毒重金属(类金属)元素,由于它们在土壤中赋存形态不同,性质存在差异以及二者之间存在拮抗效应,导致 Cd 污染土壤的修复材料和方法普遍不适用于 As

污染土壤^[6,7],因此 As、Cd 复合污染土壤的联合修复是目前的研究难点^[8,9]。

有研究表明,铁基材料对 As 具有极强的选择性配位作用,能通过表面吸附、共沉淀作用实现对土壤重金属的钝化稳定^[10];沸石能够显著降低 Cd 的交换态含量,并减少小白菜 Cd 累积量,促进生物量的提

收稿日期: 2020-07-26; 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802605); 四川省科技重点攻关项目(2017GZ0383, 2017SZ0181)

作者简介: 丁萍(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染治理与修复技术, E-mail: 646744802@qq.com

* 通信作者, E-mail: yuj@scu.edu.cn

高^[11];生物炭具有疏松多孔、比表面积大、表面官能团丰富等特点,使其在土壤肥力改良和环境治理修复方面有着广泛应用^[12].然而土壤环境污染复杂多变,受多重因素影响,传统的单一钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效果不佳,因此,研究与开发新型复合改良剂显得尤为重要.本研究以硫酸铁、沸石和改性生物炭为主要试验材料组配得到复合改良剂 FZB,通过小白菜盆栽试验探究 FZB 对农田土壤理化性质、As 和 Cd 的赋存形态与生物有效性,以及小白菜累积转运 As 和 Cd 的影响,以期 As 和 Cd 复合污染农田土壤的治理与修复提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自四川某矿区 (103°59.223'E, 30°33.512'N)附近农田,采集 0~20 cm 耕作层土壤,自然风干后,剔除异物,过 10 目筛.分别按 150 mg·kg⁻¹ As 和 5 mg·kg⁻¹ Cd 对土壤进行染毒,老化 14 d 后,装袋备用.其中 As 源为 NaAsO₂,Cd 源为 CdCl₂.

前期的研究成果发现,硫酸铁及改性生物炭对 As 均具有较好的吸附能力,但单施过多硫酸铁可能造成土壤板结、孔隙率降低以及影响植物对 Ca、Mg 等元素的吸收等,从而导致农作物减产;沸石、改性生物炭对 Cd 均具有良好的吸附能力,但单施沸石容易造成土壤 pH 升高,不利于 As 的生物有效性的降低;改性生物炭对 As 和 Cd 均表现出良好的吸附能力,但配合其他改良剂对土壤重金属的稳定效果更佳.通过土壤熟化试验权衡硫酸铁、沸石和改性生物炭按不同质量比混合的复合改良剂对土壤基本理化性质、As 和 Cd 的生物有效性的影响,最后筛选出硫酸铁(F)、沸石(Z)和改性生物炭(B)按照质量比 2:2:1 均匀混合而成的土壤复合改良剂 FZB 进行小白菜盆栽试验.改性生物炭制备过程为生物炭粉碎过 100 目筛后,加入 FeCl₃ 溶液(超声波使其充分溶解)中,调节 pH 值至 6,搅拌后浸泡 24 h,烘干后绝氧焙烧 2 h,最后用去离子水清洗至出水清澈,烘干制得.小白菜品种选用早生华京,是我国大面积种植的小白菜品种之一,由中国广东省良品引进服务公司提供.供试改良剂及土壤基本性质见表 1.

表 1 供试材料基本性质
Table 1 Physical and chemical properties of the tested materials

材料	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	总 As /mg·kg ⁻¹	总 Cd /mg·kg ⁻¹
硫酸铁	1.23	0	36.85	1.95	0.001
沸石	11.10	0	83.26	0.53	0.005
改性生物炭	8.85	53.26	17.35	0.98	0.125
复合改良剂 FZB	5.05	18.62	48.95	0.89	0.025
土壤	5.20	14.56	7.32	167.23	5.68

1.2 试验方法

将供试土壤风干,按照 0、0.5、1、2、4、8 和 32 g·kg⁻¹ 的施用水平分别加入复合改良剂 FZB,充分混合均匀,装入无盖圆柱形塑料盆(底铺一层膜,防止土壤中重金属流失),每盆装土 1.0 kg.同时施入尿素(N 100 mg·kg⁻¹)和磷酸二氢钾(P 80 mg·kg⁻¹、K 100 mg·kg⁻¹)作为基肥,陈化一周,期间加水维持 20% 的土壤含水量.将经过消毒处理的小白菜种子按 7~10 粒/盆播种于盆中,待种子发芽一周后,根据小白菜幼苗的大小和长势情况,每盆定苗 3 株,每个处理 3 次重复.期间以称重法保持田间持水量 60% 左右,植株在温室内 18~30℃ 自然光照条件下生长.45 d 后,收获小白菜植株样品,采集小白菜根系 0~5 cm 内根际土壤样品.将小白菜植株分为地上部分和根系,洗净后 105℃ 杀青 30 min,70℃ 烘干,恒重后称取干重,粉碎干燥保存备用.土壤自然风干,研磨后分别过 10 目和 100 目筛,干燥保存备用.

1.3 样品分析测定方法

参照文献[13]测定土壤基本理化性质.采用王水消解法测定土壤总 As 含量,HNO₃-HF-HClO₄ 消解法测定土壤总 Cd 含量,HNO₃-HClO₄ 法消化(体积比为 4:1)测定植物重金属 As、Cd 全量.有效态 As、有效态 Cd 分别通过 NaHCO₃、DTPA-TEA-CaCl₂ 浸提.采用武斌等^[14]和 Chang 等^[15]的方法测定 As 的分级形态,分为残渣态(F1)、钙结合态(F2)、铁结合态(F3)、铝结合态(F4)和交换态(F5);采用修正 BCR 法^[16]测定 Cd 的分级形态,分为残渣态(G1)、有机结合态(G2)、铁锰结合态(G3)和交换态(G4).用原子荧光光度计(AFS-8220,北京吉天仪器有限公司)测定土壤和小白菜样品中 As 含量,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国布鲁克公司)测定土壤和小白菜样品中 Cd 含量.以国家标准物质四川盆地土壤 GBW07428(GSS-14)进行质量控制,同时做空白试验,As 和 Cd 的回收率分别为 95.4%~103.2% 和 90.1%~105.3%.

小白菜的抗性系数、富集系数和转运系数计算公式如下:

抗性系数 = 处理组总生物量/对照组总生物量

富集系数(BCF) = $\frac{\text{植物体内重金属含量}}{\text{土壤重金属含量}}$

转移系数(TF) = $\frac{\text{植物地上部分重金属含量}}{\text{根部重金属含量}}$

1.4 数据统计与分析

运用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 统计软件进行数据统计分析,OriginPro 9.1 制图.

2 结果与分析

2.1 FZB 对土壤中砷镉的钝化效果

2.1.1 FZB 对土壤理化性质的影响

由表 2 可知,少量复合改良剂 FZB (0.5 g·kg⁻¹) 的施加能略微降低土壤 pH 值,随着施用量的增加(1~16 g·kg⁻¹),土壤 pH 逐渐升高,当继续增至 32 g·kg⁻¹ 时,土壤 pH 值降至 6.42. 总体而言,FZB 各处理组在一定程度上影响了土壤 pH,但各处理间差异并不显著($P>0.05$). FZB 的施用能有效增加土壤有机质(OM)含量,与对照组 CK 比较,增加了 8.46%~38.21%,其中较少的施用量(0.5~1 g·kg⁻¹)即可显著增加 OM 含量. 土壤阳离子交换量(CEC)随着 FZB 施用量的增加呈先降后升的趋势,变化范围在 5.65~7.95 cmol·kg⁻¹ 之间,且在 32 g·kg⁻¹ 的处理下达到最大值,与对照组 CK 相比,增加了 10.72%.

表 2 复合改良剂 FZB 对小白菜种植土壤基本理化性质的影响¹⁾

Table 2 Effects of the compound modifier FZB on basic physical and chemical properties of Chinese brassica planting soil

施用量/g·kg ⁻¹	pH	OM/g·kg ⁻¹	CEC/cmol·kg ⁻¹
CK	6.88 ± 0.04ab	16.07 ± 0.26e	7.18 ± 0.34a
0.5	6.82 ± 0.07b	22.21 ± 0.35a	5.81 ± 0.38b
1	6.91 ± 0.07ab	22.07 ± 1.02a	7.79 ± 0.29a
2	6.93 ± 0.02ab	17.43 ± 0.22de	5.65 ± 0.52b
4	6.96 ± 0.04a	21.13 ± 0.68a	6.76 ± 0.43ab
8	6.89 ± 0.04ab	17.53 ± 0.28de	7.25 ± 0.57a
16	6.91 ± 0.04ab	21.20 ± 0.67a	7.87 ± 0.67a
32	6.42 ± 0.06d	21.47 ± 0.72a	7.95 ± 0.66a

1) 根据 Duncan 检验($P=0.05$),同列具有不同字母表示数据间差异显著,下同

2.1.2 FZB 对土壤中砷镉有效态含量的影响

由图 1 可知,与对照组 CK 相比,FZB 施用量在低水平时(0.5~4 g·kg⁻¹),各处理虽有显著下降趋势,但各处理组之间差异并不显著($P>0.05$),继续增加施用量,小白菜根际土壤有效态 As 含量显著下降,下降幅度为 39.46%~65.99%; FZB 处理对土壤中 Cd 有效态含量具有显著影响,随着施用量的

增大,土壤中 Cd 有效态含量呈递减的趋势,当 FZB 施用量为 0.5~16 g·kg⁻¹,有效态 Cd 含量显著下降,下降幅度为 11.36%~20.45%,但各处理组之间差异仍不显著($P>0.05$),当继续增至 32 g·kg⁻¹ 时,土壤有效态 Cd 含量显著降低,降幅达到最大值 30.68%. 综上可看出,土壤改良剂 FZB 对 As 的钝化效果比对 Cd 的钝化效果好.

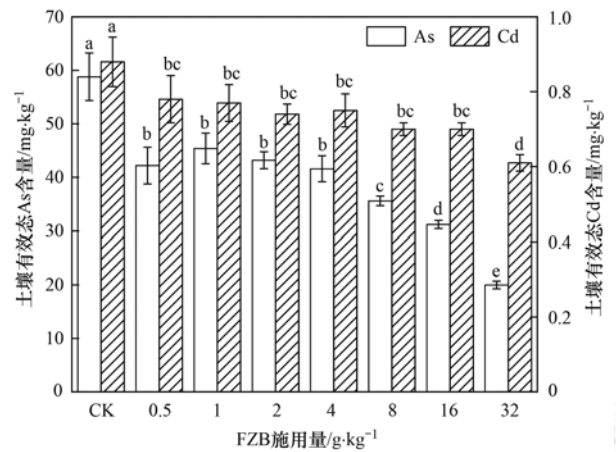
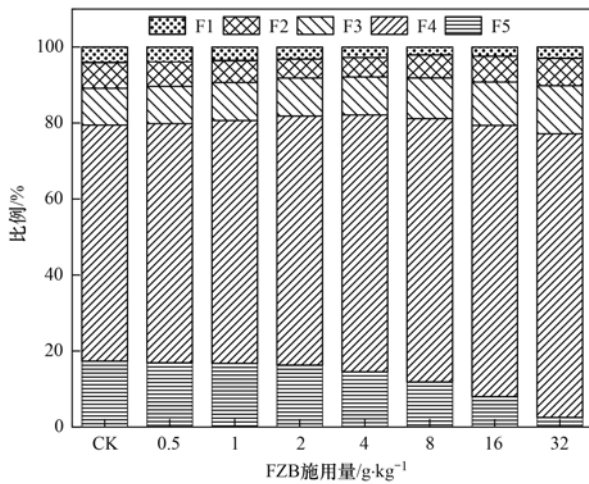


图 1 复合改良剂 FZB 对根际土壤有效 As 和有效态 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effect of the compound modifier FZB on available As and available Cd concentrations in the rhizosphere soil

2.1.3 FZB 对土壤砷镉赋存形态的影响

由图 2 可知,在未施用 FZB 的污染土壤中,As 主要以铝结合态存在,占 62.09%,其他形态依次为交换态(17.36%)、铁结合态(9.67%)、钙结合态(6.76%)和残渣态(4.12%). 施用 FZB 后,土壤中 As 交换态比例下降到 2.56%~16.91%,而 As 铝结合态和铁结合态比例分别上升至 62.94%~74.62% 和 9.8%~12.65%. As 钙结合态和残渣态比例随 FZB 施用量的增加呈现先降后升的趋势,变化范围分别在 4.95%~7.18% 和 2.09%~3.87% 之间,与对照组 CK 相比,FZB 高施用量(16~32 g·kg⁻¹)增加了钙结合态 As 含量,而减少了残渣态 As 含量. 由图 3 可知,未施加 FZB 时,土壤中的 Cd 各赋存形态含量关系为:交换态>铁锰结合态>残渣态>有机结合态. 随改良剂 FZB 施用量的增加,土壤中 Cd 交换态含量呈下降趋势,而有机结合态和残渣态含量呈上升趋势,当 FZB 施用量为 32 g·kg⁻¹,交换态 Cd 比例下降到最低值,降幅为 15.66%,此时有机结合态 Cd 和残渣态 Cd 所占比例均达到最大,分别上升了 1.47% 和 6.48%. 与对照组 CK 相比,FZB 低施用量(0.5~2 g·kg⁻¹)会降低铁锰结合态 Cd 的比例,但随着施用量的增加,铁锰结合态 Cd 所占比例逐渐上升,增幅为 0.52%~7.71%.



F1:残渣态; F2:钙结合态; F3:铁结合态;
F4:铝结合态; F5:交换态

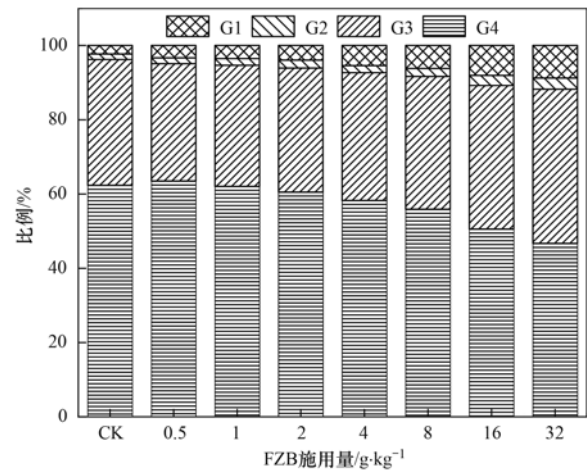
图2 复合改良剂 FZB 对根际土壤中 As 形态含量的影响

Fig. 2 Effect of the compound modifier FZB on As morphological concentrations in the rhizosphere soil

2.2 FZB 对小白菜累积砷镉的影响

2.2.1 FZB 对小白菜植株各部位砷镉含量的影响

由图4(a)可知,随着改良剂 FZB 施用量的增大,小白菜根部 As 含量呈现先上升后下降趋势,Cd 含量总体呈逐渐下降的趋势.与对照组 CK 相比,FZB 施用量在较高水平时(4~32 g·kg⁻¹),小白菜根部 As、Cd 含量分别降低 9.57%~34.60%和 16.81%~51.08%.由图4(b)可知,FZB 的施用也可有效降低小白菜地上部 As 和 Cd 含量,降低幅度分别为 11.94%~42.09%和 2.99%~31.34%,随着 FZB 施用量的增加,As、Cd 含量总体上均呈现先降后升的趋势,当 FZB 施用量为 8 g·kg⁻¹时,小白菜地上部分 As 含量从 49.68 mg·kg⁻¹ 逐渐下降到最低值 28.77 mg·kg⁻¹,同时,地上部分 Cd 含量也从 33.50



G1:残渣态; G2:有机结合态; G3:铁锰结合态; G4:交换态

图3 复合改良剂 FZB 对根际土壤中 Cd 形态含量的影响

Fig. 3 Effect of the compound modifier FZB on Cd morphological concentrations in the rhizosphere soil

mg·kg⁻¹降低到最低值 23.00 mg·kg⁻¹,这表明施用 8 g·kg⁻¹改良剂 FZB 能使小白菜可食用部分的重金属超标风险降到较低水平.

2.2.2 FZB 对小白菜农艺性状及生物量的影响

由表3可知,施用 FZB 可显著增加小白菜的株高和根长,与对照组 CK 相比,FZB 施用量为 0.5~32 g·kg⁻¹,小白菜株高增加 28.6%~78.46%,根长增加 27.54%~78.7%.小白菜各部位干重随 FZB 施用量的增加而增大,与对照相比,地上部和根部干重分别增加了 1.44~4.06 倍和 1.38~3.81 倍.生物量是反映植物生长状况能力的一个重要指标. FZB 的施用促进了根系的生长,进而促进了小白菜各部位干重的增大,对小白菜生物量提高有显著促进作用,在 FZB 施用量为 32 g·kg⁻¹,小白菜总干重从 0.20 g 逐渐上升到 0.99 g,生物量达到最大值.施用 FZB 后,抗性系数增大

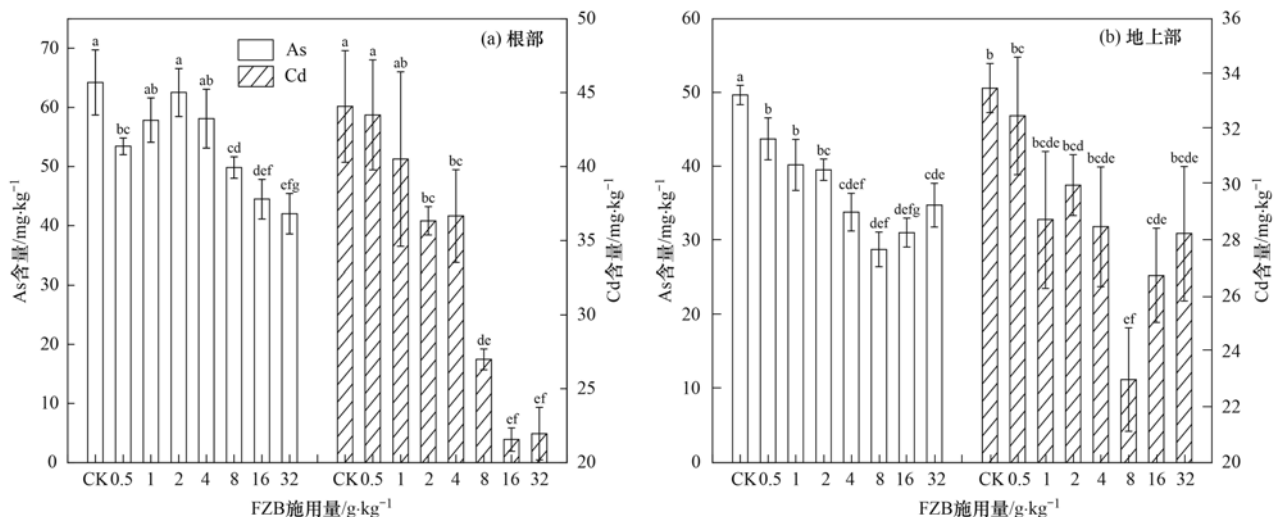


图4 复合改良剂 FZB 对小白菜各部位 As、Cd 含量的影响

Fig. 4 Effect of the compound modifier FZB on As and Cd concentrations in various Chinese brassica organs

表 3 复合改良剂 FZB 对小白菜生长的影响

Table 3 Effect of the compound modifier FZB on the growth of *Chinese brassica*

施用量 /g·kg ⁻¹	株高 /cm	根长 /cm	干物质量			抗性系数
			根部/g	地上部分/g	总干重/g	
CK	10.63 ± 0.80d	6.90 ± 0.18f	0.016 ± 0.001g	0.18 ± 0.014i	0.20 ± 0.01i	1.00h
0.5	15.80 ± 1.28bc	9.37 ± 0.61de	0.038 ± 0.002f	0.44 ± 0.036h	0.48 ± 0.04h	2.41f
1	16.03 ± 1.01bc	8.80 ± 1.28de	0.047 ± 0.002de	0.54 ± 0.034fg	0.59 ± 0.05fgh	2.96cd
2	13.67 ± 0.50c	8.97 ± 0.33de	0.042 ± 0.001ef	0.53 ± 0.019fg	0.57 ± 0.05gh	2.85de
4	14.23 ± 1.07c	10.13 ± 0.59de	0.048 ± 0.003ef	0.59 ± 0.034f	0.63 ± 0.02fg	3.19b
8	15.10 ± 1.23c	10.87 ± 0.88cd	0.052 ± 0.001d	0.49 ± 0.012gh	0.54 ± 0.07gh	2.70e
16	13.87 ± 0.88c	9.73 ± 0.62de	0.054 ± 0.004d	0.57 ± 0.014f	0.62 ± 0.05fg	3.13bc
32	18.97 ± 1.63ab	12.33 ± 1.06bc	0.077 ± 0.006c	0.91 ± 0.032b	0.99 ± 0.03b	4.95a

了 1.41 ~ 3.95 倍,表明改良剂 FZB 能增强小白菜对重金属的耐受能力。

2.2.3 FZB 对小白菜砷镉富集转运系数的影响

由表 4 可知,小白菜根部和地上部分对 Cd 的富集系数均远远大于对 As 的富集系数,表明小白菜植株对 Cd 的富集能力远大于 As。施用 FZB 可降低小白菜根部对 As 和 Cd 的富集系数,与对照组 CK 相比,FZB 施用量为 0.5 ~ 32 g·kg⁻¹,根部对 As 的富集系数降低 17.5% ~ 32.5%,对 Cd 的富集系数降低 4.62% ~ 49.88%; FZB 的施用也可降低小白菜地上部对 As 和 Cd 的富集系数,与对照相比,FZB 施用

量为 8 g·kg⁻¹时,小白菜地上部对 As 和 Cd 的富集系数均达到最小值,降幅分别为 41.94% 和 30.22%。与对照组 CK 相比,FZB 的施用可降低小白菜对 As 的转运系数,在施用量为 8 g·kg⁻¹时,其转运系数达到最小值 0.58,降幅为 24.68%。而大量 FZB 的施用(16 ~ 32 g·kg⁻¹)却使小白菜对 Cd 的转运系数不降反增,在施用量为 32 g·kg⁻¹时,其转运系数达到最大值 1.29,此时根部吸收的 Cd 大量转运至可食用部分。因此寻求 FZB 最佳施用量对于抑制 As、Cd 累积转移水平有很重要的意义。本试验结果显示 FZB 的最佳施用量为 8 g·kg⁻¹。

表 4 复合改良剂 FZB 对小白菜中 As、Cd 富集系数及转运系数的影响

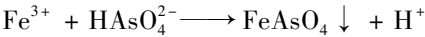
Table 4 Effect of the compound modifier FZB on As and Cd enrichment coefficients and transfer coefficients

施用量 /g·kg ⁻¹	As			Cd		
	转运系数	根部富集系数	地上部分富集系数	转运系数	根部富集系数	地上部分富集系数
CK	0.77 ± 0.03cd	0.40 ± 0.030a	0.31 ± 0.023a	0.76 ± 0.05e	8.44 ± 0.53a	6.42 ± 0.41b
0.5	0.82 ± 0.05bc	0.33 ± 0.027cd	0.27 ± 0.022b	0.75 ± 0.04e	8.53 ± 0.31a	6.37 ± 0.23b
1	0.70 ± 0.02de	0.36 ± 0.023bc	0.25 ± 0.016bc	0.71 ± 0.05e	8.05 ± 0.61a	5.72 ± 0.43bc
2	0.63 ± 0.04ef	0.39 ± 0.027cd	0.24 ± 0.009c	0.83 ± 0.07de	7.10 ± 0.58b	5.86 ± 0.48bc
4	0.59 ± 0.03f	0.36 ± 0.023bc	0.21 ± 0.012de	0.78 ± 0.05de	7.08 ± 0.45b	5.50 ± 0.35bcd
8	0.58 ± 0.04f	0.31 ± 0.008de	0.18 ± 0.004fg	0.85 ± 0.06de	5.26 ± 0.45d	4.48 ± 0.38de
16	0.70 ± 0.06de	0.27 ± 0.007f	0.19 ± 0.005ef	1.24 ± 0.10abc	4.23 ± 0.32e	5.26 ± 0.40bcd
32	0.83 ± 0.05bc	0.26 ± 0.009f	0.21 ± 0.008de	1.29 ± 0.08ab	4.36 ± 0.35e	5.62 ± 0.46bcd

3 讨论

3.1 FZB 对土壤砷镉的作用机制

由图 2 可知,随着复合改良剂 FZB 施用量的增加,土壤中交换态 As 含量逐渐降低,而 As 铝结合态、铁结合态及钙结合态含量均呈现不同程度增加。这可能是由于复合改良剂中 3 种组分的综合作用,其作用机制在于:①硫酸铁以及改性生物炭释放出的游离态铁离子能与砷酸根离子反应生成难溶的铁砷化合物,其反应式为:



土壤中游离态铁含量越高,土壤中交换态 As 稳定化效果越好^[17,18];其次,硫酸铁水解后生成的铁(氢)氧化物和改性生物炭负载的铁氧化物也能吸

附土壤中的 As,被吸附的 As 随之取代其表面的 OH⁻ 和 OH₂ 等基团生成非晶态的砷酸铁沉淀或难溶的次生矿物^[19,20]。②沸石和改性生物炭具有较大的比表面积和很多的微小孔隙,对 As 的物理吸附作用较强,可以将土壤溶液中游离的 As 固定在孔隙中^[8]。③黏土矿物沸石和改性生物炭含有丰富的铝物质和钙物质,能促进交换态 As 向难溶的铝结合态 As 和钙结合态 As 转化^[21]。

由图 3 可看出,FZB 的施用显著降低了土壤中交换态 Cd 的含量,而 Cd 铁锰结合态、有机结合态和残渣态呈现上升趋势,且残渣态的增幅较大。其原因在于:①施用 FZB 后,土壤 pH 值略微升高,使土壤胶体表面负电荷量增加,对 Cd²⁺ 的吸附增强^[22,23],同时形成金属阳离子羟基态,为 Cd²⁺ 提供

了更多的吸附位点^[21]。②改性生物炭表面含有大量含氧官能团(羧基、酚羟基和羰基等),能与 Cd^{2+} 发生络合或螯合作用形成难溶的络合物^[12,24],增加残渣态 Cd 的含量;施加改性生物炭后,还能增加土壤有机质含量,促使交换态 Cd 向有机结合态转化^[25]。③沸石和改性生物炭具有较大的比表面积,能吸附游离的 Cd^{2+} ^[11]。

在砷镉复合污染土壤中,As 和 Cd 之间存在着比较复杂的交互作用,包含竞争吸附和竞争活化^[26]。有研究表明,单施生物炭可有效固定土壤中游离的 Cd^{2+} ,但由于生物炭呈碱性,会显著提高土壤 pH,导致可交换态 As 含量增加,残渣态 As 被活化,砷污染反而加剧^[27]。本研究将生物炭用 FeCl_3 溶液进行改性,使其表面负载上铁氧化物,不仅减弱生物炭提高土壤 pH 的能力,铁基材料的引入也增强了生物炭同时钝化 As 和 Cd 的能力。复合改良剂 FZB 是将硫酸铁、沸石和改性生物炭按一定质量比例混合制成的,施入土壤后,改性生物炭对硫酸铁和沸石大幅度改变土壤 pH 的能力具有缓冲作用,使得土壤 pH 略微升高,在 As 没有被活化的情况下,能够最大程度地发挥复合改良剂 3 种组分对 As 和 Cd 的钝化效果。

3.2 FZB 对小白菜生长及累积砷镉的影响机制

由表 3 可知,复合改良剂 FZB 的施用显著促进了小白菜株高、根长和干重的增加,其主要原因有两点,一是 FZB 的施用降低了土壤中交换态 As 和交换态 Cd 的含量(图 2 和图 3),减轻了重金属对小白菜的毒害作用。二是 FZB 中含有的改性生物炭不仅能够改善土壤理化性质,提高土壤有机质和氮、磷养分的含量,促进作物的吸收和利用,而且其巨大的孔隙结构和比表面积,能吸附土壤中未被利用的水分和养分,延缓养分释放,为作物的生长源源不断提供营养物质^[28,29]。

小白菜的根系吸收并富集土壤重金属,通过小白菜木质部运输进入到小白菜茎叶等部位,整个过程是重金属由地下部分转运至地上部分的关键。植物从土壤中吸收累积重金属的能力通常用生物富集系数(BCF)进行评估,生物富集系数越大,对重金属的富集能力越强^[30]。由表 4 可知,施用改良剂 FZB 后,小白菜对 As 和 Cd 的富集系数逐渐降低,表明 FZB 降低了小白菜对 As 和 Cd 的富集能力,能够减少小白菜体内 As 和 Cd 的含量。植物将土壤中的重金属转运累积到地上部位的能力通常用转运系数(TF)进行评估^[31],转运系数越大,植物将根部重金属转运到地上部的能力越强,地上部分累积的重金属含量越大。从表 4 可以看出,对照组 CK 中小白菜

对 As、Cd 的转运系数相近,施加 FZB 改良剂后,As 的转运系数降低,而 Cd 的转运系数升高,说明 FZB 抑制了小白菜对 As 的累积转运能力,增强了对 Cd 的累积转运能力,FZB 的施用使得更少的 As 转运累积到小白菜地上部位,但有增大小白菜地上部 Cd 累积量的风险。

4 结论

(1)施用 FZB 复合改良剂后,土壤 pH 值、有机质含量和阳离子交换量均呈上升趋势。而土壤中有有效态 As 和有效态 Cd 含量显著降低,最大降幅分别为 65.99% 和 30.68%。

(2)随着 FZB 施用量的增大,交换态 As 含量逐渐下降,铝结合态和铁结合态 As 含量逐渐上升,钙结合态和残渣态 As 含量则先下降后上升;随着 FZB 施用量的增大,交换态 Cd 含量逐渐下降,有机结合态和残渣态 Cd 含量逐渐上升,而铁锰结合态 Cd 含量先降后升。

(3)复合改良剂 FZB 的施用,减少了小白菜根部和地上部分对 As 和 Cd 的富集,同时抑制了小白菜将 As 从根部转运到地上部分的能力,促进其生物量的提高。FZB 最佳施用量为 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时小白菜地上部分 As 和 Cd 的含量均降低到最小值,重金属超标风险较小。

参考文献:

- [1] 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.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 409-417.
- [2] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 460-468.
Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 460-468.
- [3] Zhang L W, Shang Z B, Guo K X, *et al.* Speciation analysis and speciation transformation of heavy metal ions in passivation process with thiol-functionalized nano-silica [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **369**: 979-987.
- [4] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, *et al.* Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils-To mobilize or to immobilize? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **266**: 141-166.
- [5] 田桃,雷鸣,周航,等. 两种钝化剂对土壤 Pb、Cd、As 复合污染的菜地修复效果[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2553-2560.
Tian T, Lei M, Zhou H, *et al.* Effects of two amendments on remedying garden soil complexly contaminated with Pb, Cd and As[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2553-2560.
- [6] 卢美献,李方圆,张超兰,等. 不同固定剂对土壤中镉砷钝化修复效果研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016,

- 41(5): 1667-1675.
- Lu M X, Li F Y, Zhang C L, *et al.* Effects of different soil amendments on the immobilization and remediation of cadmium and arsenic in soil[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, **41**(5): 1667-1675.
- [7] 单天宇, 刘秋辛, 阎秀兰, 等. 镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(10): 1938-1945.
- Shan T Y, Liu Q X, Yan X L, *et al.* Cd and As absorption and transport characteristics of rice in a paddy field co-contaminated by Cd and As[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(10): 1938-1945.
- [8] 辜娇峰, 周航, 贾润语, 等. 三元土壤调理剂对田间水稻镉砷累积转运的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- Gu J F, Zhou H, Jia R Y, *et al.* Effects of a tribasic amendment on cadmium and arsenic accumulation and translocation in rice in a field experiment[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1910-1917.
- [9] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, *et al.* Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(8): 4178-4185.
- [10] 吴萍萍, 李录久, 李敏. 生物炭负载铁前后对复合污染土壤中 Cd、Cu、As 淋失和形态转化的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(10): 3959-3967.
- Wu P P, Li L J, Li M. Effects of biochar and Fe-loaded biochar on the leaching and fraction transformation of Cd, Cu and As in multi-contaminated soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3959-3967.
- [11] 熊仕娟, 徐卫红, 谢文文, 等. 纳米沸石对土壤 Cd 形态及大白菜 Cd 吸收的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- Xiong S J, Xu W H, Xie W W, *et al.* Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in Soil and its uptake by cabbage[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- [12] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L, *et al.* A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(12): 3269-3282.
- [13] 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.
- [14] 武斌, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 石灰性土壤中砷形态分级方法的比较及其最佳方案[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(9): 1467-1473.
- Wu B, Liao X Y, Chen T B, *et al.* Comparison of five methods for fractionation of calcareous soil contaminated with arsenic[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(9): 1467-1473.
- [15] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Science*, 1957, **84**(2): 133-144.
- [16] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57-61.
- [17] 胡立琼, 曾敏, 雷鸣, 等. 含铁材料对污染水稻土中砷的稳定化效果[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(4): 1599-1604.
- Hu L Q, Zeng M, Lei M, *et al.* Stabilization effects of iron-containing materials on arsenic in contaminated paddy soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(4): 1599-1604.
- [18] 王英杰, 邹佳玲, 杨文毅, 等. 组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 4004-4010.
- Wang Y J, Zou J L, Yang W T, *et al.* Synergetic control of bioavailability of Pb, Cd and As in the rice paddy system by combined amendments [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 4004-4010.
- [19] Wu J Z, Huang D, Liu X M, *et al.* Remediation of As(Ⅲ) and Cd(Ⅱ) co-contamination and its mechanism in aqueous systems by a novel calcium-based magnetic biochar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **348**: 10-19.
- [20] Suda A, Makino T. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: a review[J]. *Geoderma*, 2016, **270**: 68-75.
- [21] 辜娇峰, 周航, 杨文毅, 等. 复合改良剂对镉砷化学形态及在水稻中累积转运的调控[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(6): 1576-1585.
- Gu J F, Zhou H, Yang W T, *et al.* Effect of combined soil amendment regulating chemical forms of cadmium and arsenic in paddy soil and their bioaccumulation and translocation in rice [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(6): 1576-1585.
- [22] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 4030-4043.
- Qin Y L, Xiong S J, Xu W H, *et al.* Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in soil and uptake by Chinese cabbage at different soil pH and Cadmium levels [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 4030-4043.
- [23] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(5): 890-897.
- Luo Y H, Gu X Y, Wu Y G, *et al.* In-situ remediation of Cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(5): 890-897.
- [24] 李丹, 李俊华, 何婷, 等. 不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(9): 1679-1685.
- Li D, Li J H, He T, *et al.* Effects of different amendments on soil Cd forms and Cd uptake by Chinese cabbage in Cd-contaminated calcareous soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(9): 1679-1685.
- [25] Nawab J, Khan S, Aamir M, *et al.* Organic amendments impact the availability of heavy metal(loid)s in mine-impacted soil and their phytoremediation by *Penisetum americanum* and *Sorghum bicolor* [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(3): 2381-2390.
- [26] 张燕, 铁柏清, 刘孝利, 等. 玉米秸秆生物炭对稻田土壤砷、镉形态的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 715-721.
- Zhang Y, Tie B Q, Liu X L, *et al.* Effects of waterlogging and application of bio-carbon from corn stalks on the physico-chemical properties and the forms of arsenic and cadmium in arsenic and cadmium-contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 715-721.
- [27] Zheng R L, Cai C, Liang J H, *et al.* The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(7): 856-862.
- [28] 侯艳伟, 池海峰, 毕丽君. 生物炭施用对矿区污染农田土壤

- 上油菜生长和重金属富集的影响[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 1057-1063.
- Hou Y W, Chi H F, Bi L J. Effects of biochar application on growth and typical metal accumulation of rape in mining contaminated soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(6): 1057-1063.
- [29] 李冬, 陈蕾, 夏阳, 等. 生物炭改良剂对小白菜生长及低质土壤氮磷利用的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2384-2391.
- Li D, Chen L, Xia Y, *et al.* The effects of biochar on growth and uptake of nitrogen and phosphorus for Chinese cabbage in poor quality soil in Ningxia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(9): 2384-2391.
- [30] Liu J G, Ma X M, Wang M X, *et al.* Genotypic differences among rice cultivars in lead accumulation and translocation and the relation with grain Pb levels [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **90**: 35-40.
- [31] 欧阳林男, 吴晓芙, 李芸, 等. 锰矿修复区泡桐与栾树生长与重金属积累特性[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 908-916.
- Ouyang L N, Wu X F, Li Y, *et al.* Growth and heavy metal accumulation of *Paulownia fortunei* and *Koelreuteria bipinnata* in an ecological restoration site of the manganese-ore tailing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(3): 908-916.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2019年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2019年度总被引频次12 057,影响因子2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll <i>a</i> in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)