

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响

林海^{1,2}, 靳晓娜¹, 董颖博^{1,2*}, 罗明科¹, 赵一鸣¹

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 工业典型污染物资源化处理北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过盆栽试验, 研究了膨润土对3种类型农田土壤中土壤理化性质、Cd、As、V和Cr的形态、小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 生长、重金属吸收及根际微生物群落的影响。结果表明, 添加膨润土降低了3种土壤中可交换态Cd比例, 降幅依次为黄壤(Gy, 19.44%) > 黄褐土(Sy, 13.85%) > 潮土(Bf, 5.03%), 小白菜地上部Cd对应降幅为Gy(34.81%) > Bf(23.91%) > Sy(11.11%); 与各自对照相比, Bf和Sy中可交换态As比例降低, 降幅分别为4.53%和25.16%, Gy中可交换态As比例升高了0.57%; 可交换态Cr比例均升高, 增幅依次为Sy(31.30%) > Gy(2.91%) > Bf(0.58%); As、V和Cr残渣态均升高(Sy中Cr除外), 小白菜对其吸收也不同程度地降低。膨润土有助于3种土壤中小白菜的生长, Bf中小白菜生物量、根表面积、根尖数分别增大了147.55%、80.71%和124.31%。此外, 膨润土降低了3种类型土壤中速效氮、速效磷和有机质的含量, 增大了速效钾含量和根际微生物群落多样性。因此, 认为膨润土均适用于这3种土壤的修复改良。

关键词: 土壤类型; 重金属; 稳定化; 膨润土; 生物有效性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0945-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201807139

Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils

LIN Hai^{1,2}, JIN Xiao-na¹, DONG Ying-bo^{1,2*}, LUO Ming-ke¹, ZHAO Yi-ming¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Resource-Oriented Treatment of Industrial Pollutants, Beijing 100083, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to evaluate the effects of bentonite on the physicochemical properties of soil; chemical forms of Cd, As, V, and Cr; pakchoi (*Brassica chinensis* L.) growth; metal uptake; and rhizosphere microbial community in three different types of farmland soils. The results showed that bentonite decreased the exchangeable Cd in the sequence of Yellow earths (Gy, 19.44%) > Yellow-cinnamon soils (Sy, 13.85%) > Fluvo-aquic soils (Bf, 5.03%), and the content of Cd in shoots of pakchoi declined in the sequence of Gy (34.81%) > Bf (23.91%) > Sy (11.11%), compared with the controls. Compared with the controls, the exchangeable As in Bf and Sy decreased by 4.53% and 25.16%, respectively, while the exchangeable As in Gy increased by 0.57%. The exchangeable Cr was increased in the sequence of Sy (31.30%) > Gy (2.91%) > Bf (0.58%). The residual As, V, and Cr increased (except for Cr in Sy), and their uptake was also reduced in different degrees. The addition of bentonite significantly promoted the growth of pakchoi in the three soil types, especially in Bf. pakchoi biomass, root surface area, and number of root tips increased by 147.55%, 80.71%, and 124.31%, respectively, in Bf, compared with the control. In addition, bentonite reduced the content of available nitrogen, phosphorus, and organic matter; increased the content of available potassium; and increased the diversity of rhizosphere microbial community in all three soils. Therefore, bentonite could be highly recommended as a safe stabilizer in these three types of soil.

Key words: soil type; heavy metals; stabilization; bentonite; bioavailability

近年来, 随着工农业的发展, 尤其是工业废水的排放和污水灌溉的兴起、农药肥料等在农田中的大量施用, 农田土壤重金属污染日益严重^[1]. 全国约有16.1%的土地受到污染, 耕地土壤点位超标率为19.4%, 主要污染物为镉、镍、铜、砷等^[2]. 农田土壤重金属污染不仅导致农作物减产, 重金属超标的农作物也带来了一系列食品安全问题, 农田土壤重金属污染治理迫在眉睫。

农田土壤重金属污染修复技术主要包括物理技术(深耕法、客土法等)、化学技术(原位钝化技术等)、生物技术(植物修复技术、植物阻隔技术等)和农艺措施(种植结构调整等)^[3]. 原位钝化技术

因经济有效、适于大面积推广和对环境扰动小等优点成为当今研究的热点。目前常用的土壤改良剂主要包括硅钙物质、含磷材料、黏土矿物及生物炭等^[4], 其中膨润土以比表面积大、离子交换吸附能力强、效果稳定且储量丰富等优势被广泛应用^[5]. 目前关于膨润土修复重金属污染土壤的研究较多, 对象多为重金属阳离子(如Cd²⁺、Pb²⁺、Cu²⁺

收稿日期: 2018-07-17; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07205003)

作者简介: 林海(1966~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为土壤重金属污染修复技术及材料开发, E-mail: linhai@ces.ustb.edu.cn

* 通信作者, E-mail: ybdong@ustb.edu.cn

等)^[6],而对重金属阴阳离子复合污染的研究较少,且缺乏不同地区、不同性质的农田土壤修复效果的综合研究.因此,本试验选取我国3种不同类型的复合污染农田土壤为修复对象,以小白菜为供试农作物,膨润土为改良剂,采用盆栽试验研究了膨润土对不同类型土壤的重金属形态和理化性质、小白菜的生长、重金属吸收以及根际微生物的影响,以期为不同地区重金属复合污染农田土壤的修复提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取我国3个省区具有代表性的农田土壤,分

别为北京潮土(fluvo-aquic soils, Bf)、山西黄褐土(yellow-cinnamon soils, Sy)、贵州黄壤(yellow earths, Gy).采集表层(0~20 cm)土壤,去除杂物混合均匀后置于阴冷通风处自然风干,捣碎过2 mm筛.供试膨润土产地为内蒙古呼和浩特市,过200目筛后备用.供试土壤及膨润土的基本理化性质见表1.根据国家二级标准GB 15618-1995中规定,3种土壤Cd分别超标1.09、1.57和5.20倍(pH大于7.5时是 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH小于7.5时是 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).除Gy中As超过标准值(旱地是 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)外,其他土壤As未超标.V和Cr均低于标准值.供试小白菜种子购于北京东升种业有限公司.

表1 供试土壤及膨润土的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils and bentonite

性质	单位	Bf	Sy	Gy	膨润土
pH	—	7.82	7.72	6.87	8.63
土壤质地	—	壤土	砂土	黏壤土	—
速效氮	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	23.08	21.68	23.91	—
速效磷	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	39.61	21.33	26.67	—
速效钾	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	141.51	85.28	362.53	—
有机质	%	1.49	1.74	2.47	—
比表面积	$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	—	—	—	25.10
SiO ₂	%	—	—	—	41.07
Al ₂ O ₃	%	—	—	—	4.14
CaO	%	—	—	—	29.17
MgO	%	—	—	—	22.19
Fe ₂ O ₃	%	—	—	—	1.11
K ₂ O	%	—	—	—	1.24
总Cd	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.09	1.57	3.12	0.19
总As	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.45	13.48	51.61	2.56
总V	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	70.25	67.15	162	0.48
总Cr	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	66.75	60.33	282.16	1.05
可交换态Cd	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.24	0.14	1.03	—
可交换态As	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.94	1.84	1.21	—
可交换态V	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.12	0.11	0.36	—
可交换态Cr	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.08	0.07	0.05	—

1.2 试验设计与处理

用塑料盆装土1.0 kg,膨润土按质量比4%均匀地加入3种土壤中,对照组不加膨润土,分别记为北京对照组(BN)、北京加矿组(BY)、山西对照组(SN)、山西加矿组(SY)、贵州对照组(GN)、贵州加矿组(GY),共6组处理,每组重复3次.充分混匀后喷施去离子水至田间持水率的70%.稳定1个月后,撒入小白菜种子.肥料在装盆前以基肥的形式加入,用量为: $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} = 0.2 + 0.3 + 0.2 (\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$,以尿素和磷酸二氢钾(化学纯)的形式添加.各处理随机置于人工气候箱中,在适宜条件下培养,种子发芽后间苗至每盆3株.2个月后收获小白菜样品及根际土,五点采样法取盆中土壤

进行土壤理化性质和重金属形态的测定.

1.3 测定项目及方法

小白菜样品用自来水清洗后,用去离子水淋洗.取第3片叶去除叶脉,用95%乙醇提取,紫外可见分光光度计测定叶绿素含量.利用STD1600Epson数字化扫描仪进行图像扫描,WinRHIZO软件对扫描图像进行分析,获得根部数据.在105℃下杀青30 min,65℃烘干至恒重,地上和地下部分别经研钵磨细后装袋保存,留测重金属含量.

将五点法采集的土壤样品置于通风处自然风干,分别取20目和100目筛下物测试土壤理化性质和重金属含量.土壤pH、有机质、速效氮、速效

磷、速效钾的测定参照文献^[7].

土壤和小白菜样品采用微波消解法测定重金属含量, 膨润土参照土壤样品消解. 土壤重金属形态采用改进的 BCR 法^[8]. 土壤消解液及浸出液、膨润土及小白菜样品消解液中 Cd、As、V 和 Cr 含量采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent Technologies, U. S. A) 测定. 分析过程中加入国家标准参比物质土壤样品 (GBW(E)070009) 和植物样品 (GBW08513) 进行质量控制, Cd、As、V 和 Cr 的回收率分别为 95.3% ~ 102.6%, 95.3% ~ 99.4%, 98.6% ~ 101.7% 和 99.4% ~ 104.1%. 蔬菜样品中重金属含量以干重计.

1.4 数据处理

富集系数 (biological concentration factor):

$$BCF = \frac{\text{植物地下部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{土壤中重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})} \times 100\%$$

转运系数 (translocation factor):

$$TF = \frac{\text{植物地上部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{植物地下部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})} \times 100\%$$

表 2 不同处理下土壤 pH 及速效养分的含量¹⁾

Table 2 Soil pH and the contents of available nutrients under different treatments

处理	pH	速效氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	有机质/%
BN	7.84a	26.32c	112.17a	122.98d	1.29d
BY	7.93a	25.28d	68.59b	159.97c	0.86e
SN	7.36c	26.65c	67.77b	92.56e	1.70c
SY	7.59b	24.29e	40.19c	98.17e	1.33d
GN	6.57e	92.78a	28.59d	178.18b	2.42a
GY	6.84d	37.67b	23.35e	215.99a	1.91b

1) 同一列中相同字母表示各处理无显著性差异, 不同字母表示数据间有显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

2.2 膨润土对土壤中重金属形态的影响

由图 1 可知, 与各自对照相比, 膨润土施加后, 3 种土壤中可交换态、可氧化态 Cd 比例均下降, 降幅分别为: 19.45% (Gy) > 13.86% (Sy) > 5.00% (Bf) 和 13.69% (Bf) > 8.09% (Sy) > 6.55% (Gy); 残渣态比例均升高, 增幅依次为: 19.47% (Gy) > 3.32% (Bf) > 2.85% (Sy). BY 与 BN 相比, 土壤可交换态、可还原态和可氧化态 As 比例均下降, 降幅分别为 4.53%、8.62% 和 19.71%; Sy 与 Bf 规律一致, 对应降幅分别为 25.16%、7.59% 和 23.59%; 而 Gy 中, 膨润土的加入使可交换态、可氧化态 As 比例较对照分别升高了 0.57% 和 37.82%, 可还原态 As 比例降低了 9.56%; 3 种土壤中残渣态 As 比例均升高, 最大增幅为 8.54%. 在 3 种土壤中 V 主要以残渣态存在 (约占 90%), 膨润土几乎对可交换态、残渣态 V 比例没有影响; 而明显降低了 Sy 中可氧化态 V (降幅 42.67%)、升

平均颜色变化率 (average well color development, AWCD) 表征土壤微生物群落利用单一碳源的能力. Shannon 指数用来评估物种的丰富度, McIntosh 指数用于评估群落物种均匀度. 计算公式参考文献^[9].

数据采用统计软件 SPSS 18.0 进行显著性检验 (Duncan 法).

2 结果与分析

2.1 膨润土对土壤理化性质的影响

由表 2 可知, 与不添加膨润土的 3 种对照土壤相比, 膨润土的加入均提高了土壤的 pH 值, 增幅依次为 0.27 (Gy)、0.23 (Sy) 和 0.09 (Bf) 个单位, 其中对 Sy 和 Gy 作用显著, 对 Bf 作用不显著. 膨润土显著降低了 3 种土壤速效氮、速效磷及有机质的含量, 最大降幅分别为 59.40% (Gy)、40.70% (Sy) 和 33.33% (Bf). 不同的是, 3 种土壤中速效钾含量均因膨润土的加入而增加, 对 Sy 作用不显著, 其他两者显著.

高了 Gy 中可还原态 V (增幅 301.29%). Cr 主要也是以残渣态存在于土壤中 (占总量的 85% 以上), SY 与 SN 比较, 可交换态、可还原态和可氧化态 Cr 比例均升高, 增幅分别为 31.3%、21.16% 和 54.00%, 残渣态比例降低了 4.99%; Bf 和 Gy 中可交换态、残渣态 Cr 比例均升高, 可氧化态比例降低.

2.3 膨润土对小白菜生长的影响

从图 2 可以看出, 膨润土均显著提高了 3 种土壤中小白菜的生物量, 3 种土壤间差异显著, 对于 Bf 效果最佳, BY 为 BN 的 2.48 倍. 在 3 种土壤中, 各试验组小白菜叶绿素 a 和 b 的含量均增加, 但是与对照相比均不显著.

由表 3 可知, 3 种土壤中, 膨润土施加均能显著增大根干重, 增幅依次为 266.67% (Sy) > 66.67% (Gy) > 21.43% (Bf). 小白菜根表面积显著增大, 增幅依次为 80.71% (Bf) > 37.95% (Sy)

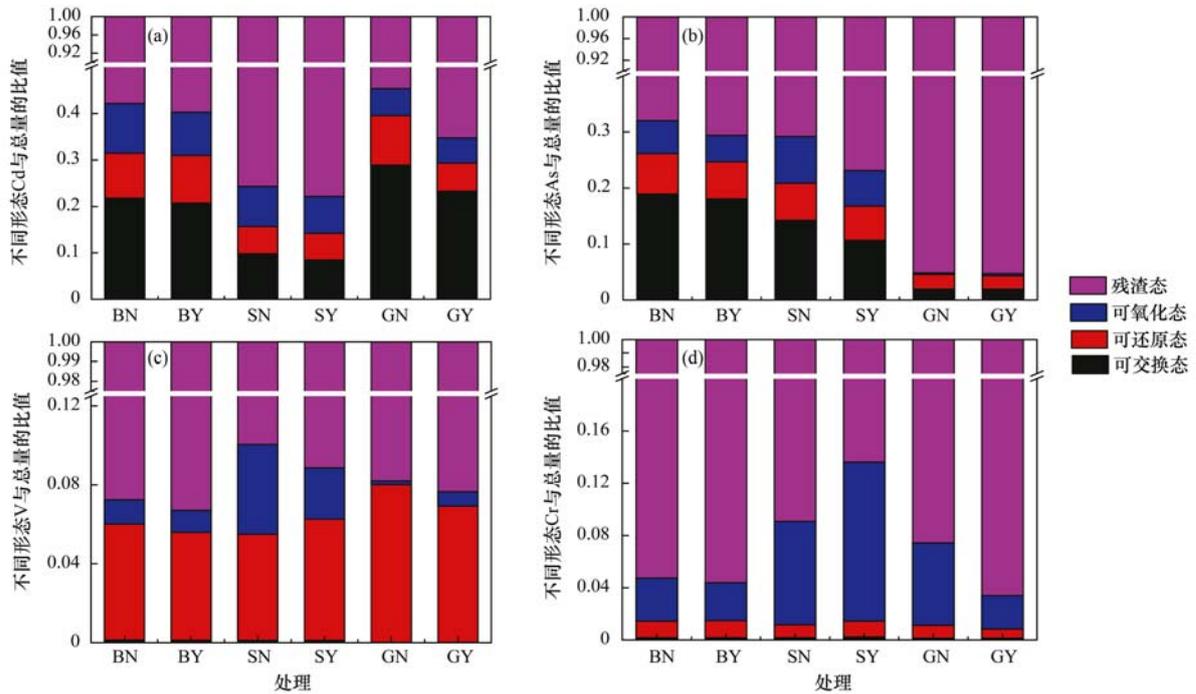


图 1 不同处理土壤中 Cd、As、V 和 Cr 的形态分布

Fig. 1. Chemical forms of Cd, As, V, and Cr in different treated soils

>34.22% (Gy). 对于 Bf 和 Gy 而言, 试验组小白菜总根长与对照组相比增加, 增幅分别为 84.80% 和 28.61%; 而 SY 总根长较 SN 有所降低, 降幅为 11.55%. 此外, 对于 Bf 和 Gy 而言, 试验组小白菜根平均直径均与对照差异不显著, 而 Sy 中显著增大. 说明膨润土施加到 Bf 和 Gy 中对小白菜的主要作用是使根增长, 而 Sy 中是使根增粗. 3 种土壤中, 膨润土均能提高植物总根尖数, 增幅分别为 124.31% (Bf) > 21.55% (Sy) > 2.9% (Gy).

降幅分别为 6.93%、4.92% 和 6.79%、36.30%. 地下部各重金属含量趋势与地上部大致相同, 但是降低幅度均低于同类型土壤中同种重金属. 对比 3 种土壤可知, 在小白菜中, Bf 组 V 含量最高, Sy 组 As 含量最高, Gy 组 Cd 和 Cr 含量最高.

由表 4 可知, 试验组小白菜对 Cd、As、V 和 Cr 的地下部富集系数 BCF 低于对照组 (Sy 中 V 和 Cr 除外), 最大降幅分别对应为 14.10% (Sy)、14.29% (Sy)、40% (Gy) 和 8.6% (Bf). 就转运系数 TF 而言, Bf 中小白菜对 4 种重金属转运能力均有所下降; Sy 中小白菜对 Cr 的转运能力增强, 对其他重金属转运能力下降, 但是幅度不大; Gy 中小白菜对 V 的转运能力增强, 对其他重金属转运能力下降.

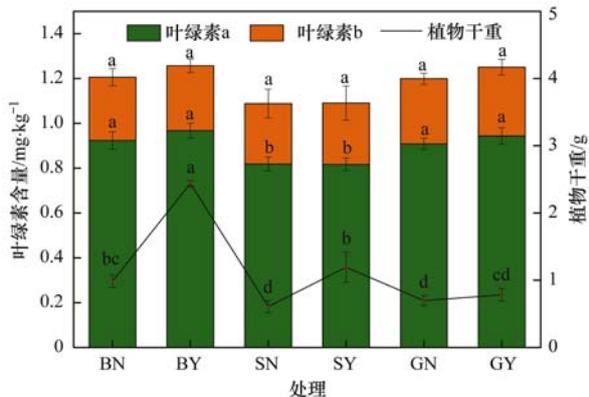


图 2 膨润土对不同处理土壤中小白菜叶绿素含量和干重的影响

Fig. 2 Effects of bentonite on chlorophyll content and dry weight of pakchoi in different types of soil

2.4 膨润土对小白菜吸收重金属的影响

由图 3 可以看出, 膨润土的加入均降低了小白菜地上部 Cd 和 As 的含量, 最大降幅分别为 34.81% (Gy)、32.38% (Sy); 除 Sy 中小白菜地上部 V 和 Cr 含量略有升高外, Bf 和 Gy 中小白菜地上部 V 和 Cr

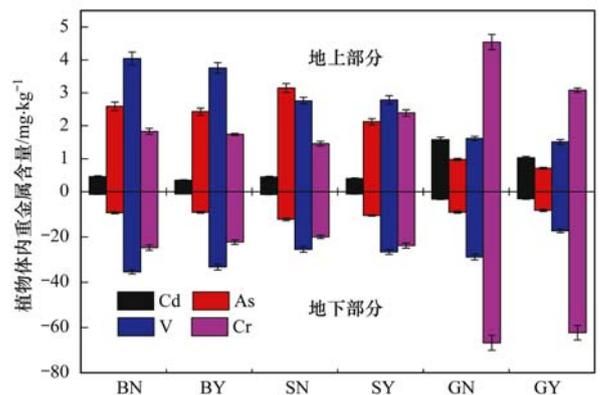


图 3 不同处理中小白菜地上部和地下部分重金属含量

Fig. 3 Contents of Cd, As, V, and Cr in the shoots and roots of pakchoi in different treatments

表 3 膨润土对不同类型土壤中小白菜根部微形态的影响

Table 3 Effects of bentonite on root micromorphology of pakchoi in different types of soil

处理	根干重/g	总根长/cm	根表面积/cm ²	根平均直径/mm	总根尖数/个	0.00 ~ 0.50 cm 根长占比/%
BN	0.14b	165.72b	35.25b	0.68b	1 127b	84.31b
BY	0.17a	306.25a	63.70a	0.66b	2 528a	84.91b
SN	0.03e	106.57c	15.60d	0.47d	645d	80.67c
SY	0.11c	94.26d	21.52c	0.73a	784c	89.21a
GN	0.03e	54.91f	8.65f	0.50c	350e	78.17c
GY	0.05d	70.62e	11.61e	0.52c	360e	80.48c

表 4 不同处理中小白菜的富集系数和转运系数

Table 4 BCF and TF of pakchoi in different treatments

处理	BCF				TF			
	Cd	As	V	Cr	Cd	As	V	Cr
BN	1.03	0.89	0.53	0.35	0.41	0.28	0.11	0.07
BY	0.90	0.87	0.50	0.32	0.36	0.27	0.11	0.08
SN	0.78	0.91	0.42	0.30	0.38	0.26	0.11	0.12
SY	0.67	0.78	0.44	0.35	0.38	0.20	0.10	0.19
GN	1.05	0.17	0.10	0.41	0.48	0.11	0.06	0.07
GY	0.99	0.16	0.06	0.38	0.33	0.09	0.09	0.05

2.5 膨润土对根际微生物群落的影响

由图 4 可知, 在 Bf 中, 膨润土添加使根际微生物 AWCD 值略有升高, 但是变化不大, 培养的后期两者 AWCD 值接近相等. Sy 中, 膨润土的加入显著提高了根际微生物 AWCD 值, 且随着培养时间的增加, SY 与 SN 差值逐渐增大. Gy 中, 膨润土添加增大了根际微生物 AWCD 值, 但是培养后期与对照差值逐渐减小, 结合 3 种土壤的污染程度来说 (表 1), 污染程度越轻, AWCD 值越大.

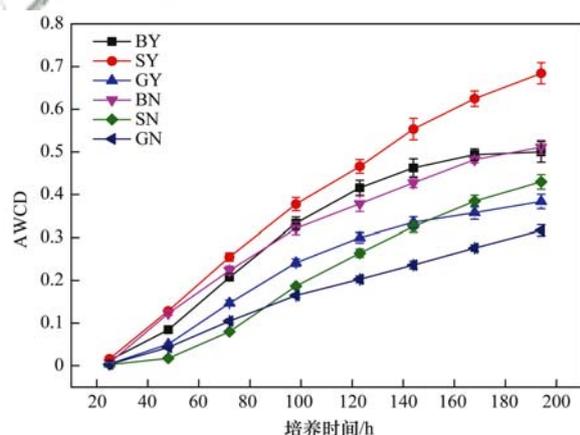


图 4 不同处理下根际微生物 AWCD 值随培养时间的变化

Fig. 4 AWCD of rhizosphere microbes under different treatments

分析培养 72 h 的多样性指数, 得到表 5. 各处理 AWCD 值差异显著, 3 种土壤中, 膨润土显著增加了 Sy 和 Gy 的 AWCD 值, 而显著降低了 Bf 的 AWCD 值. Shannon 指数和 McIntosh 指数变化趋势与 AWCD 值一致, 对于 Bf 而言, 虽然两者均在膨润土添加后有所降低, 但是均不显著. Gy 试验组的 McIntosh 指数显著增高, 说明膨润土有效提高了其

表 5 不同处理中根际微生物多样性指数 (72 h)

Table 5 Rhizosphere microbial diversity index for different treatments (72 h)

处理	AWCD 值	Shannon 指数	McIntosh 指数
BN	0.223b	2.719b	1.993ab
BY	0.207c	2.664bc	1.911b
SN	0.080f	2.460c	0.847d
SY	0.255a	2.871a	2.042a
GN	0.105e	2.196e	0.577e
GY	0.147d	2.308d	1.698c

物种均匀度.

3 讨论

一般认为, 施加土壤改良剂是降低土壤重金属生物有效性和植物吸收量的有效途径之一, 施入土壤改良剂后, 土壤理化性质如 pH、CEC、有机质含量等发生变化从而影响重金属形态, 进一步影响其生物有效性^[10, 11]. 其中, 土壤 pH 不仅影响土壤溶液的离子组成及土壤中的各种化学反应, 而且也对重金属形态以及植物吸收重金属的影响显著, 是影响重金属污染土壤修复效果的重要因素^[12]. 本试验中, 膨润土加入均提高了土壤 pH 值, 增幅从大到小依次为 Gy、Sy 和 Bf, 与土壤中 Cd 有效态含量降幅顺序一致, 小白菜对 Cd 的吸收和转运能力也均下降, 说明膨润土有效降低了土壤 Cd 生物有效性. 高瑞丽等^[13]的研究也指出改良剂升高了土壤 pH, Cd 的生物有效性随之降低. 此外, 土壤有机质作为可吸附态 Cd 的吸附位点和螯合剂, 可有效降低 Cd 的生物有效性^[14]. 膨润土中含有的 Ca²⁺ 对 Cd 有拮抗作用, 参与竞争植物根系上的吸收位点,

抑制植物对 Cd 的吸收^[15]。综合来说,对于降低 Cd 生物有效性方面,膨润土对 pH 值较低、有机质含量较高的黄壤作用较其他两种土壤明显。这与代允超等^[16]的研究结果类似。

一般情况下, pH 升高会导致在土壤中主要以阴离子形式存在的 As、V 和 Cr 向活性高的形态转变^[17-19]。而本试验中,与对照相比,除有效态 Cr 比例有所增高外,可交换态 As 比例均降低,可交换态 V 比例几乎无变化(图 1)。除 SY 中植物体内 V 和 Cr 较 SN 略有升高外,其他组均低于对照。其原因可能是复合污染情况下,重金属间相互影响^[20],加入膨润土后的土壤胶体吸附能力增强,其中包含的 Ca、Mg 和 Fe 等均能与砷酸根形成共沉淀^[21],从而使砷向更稳定的形态转变。另外,添加膨润土显著增大了小白菜生物量,由此产生的稀释作用也有助于降低小白菜体内重金属含量^[16]。已有研究指出,砂土中重金属生物有效性较壤土、黏土高,生物富集系数对应升高^[22]。Sy 为砂质土,相同环境下,重金属间相互作用较弱,且 Sy 中小白菜生物量最小,稀释效应最弱,难以抵消 pH 值升高带来的有效性的增加,最终导致 V 和 Cr 在植物体内含量比对照组略高。

改良剂膨润土的加入也有助于提高农田土壤的农用功能。大量文献表明,影响土壤中速效养分的因素很多:矿物的添加会增强土壤对碱解氮、速效磷和速效钾的吸附作用^[23];铵态氮、速效磷含量与土壤 pH 值呈显著负相关^[24, 25]。本文所用膨润土为比表面积较大的多孔材料,吸附性较强,加入后提高了土壤 pH 值,最终导致土壤速效氮、速效磷和有机质含量的降低。这有效地控制了土壤中速效养分的释放,防止其随灌溉淋失和挥发,延长养分在土壤中的有效供给时间,提高土壤保肥供肥能力,从而提高农作物的产量^[26]。需要注意的是,改良剂的用量需控制在一定范围,过量施用可能会导致作物营养不良。有研究表明,随着土壤 pH 值的升高,土壤阳离子交换性增加,从而增加 H⁺ 或 NH₄⁺ 的含量,促进土壤缓效钾转化成速效钾^[27]。本试验中,虽然膨润土增强了土壤对于速效钾的吸附作用,但是由膨润土加入带来钾的作用和土壤 pH 值的升高作用更大,导致速效钾含量又出现不同程度地升高(表 2)。

土壤微生物直接参与土壤中营养元素的循环和能量流动,其数量和群落受土壤重金属的污染程度而变化,在土壤污染治理方面具有重要的指示作用^[28]。有研究表明,根系微生物及其分泌物能与根相互作用,影响根分泌物的种类和数量,对降低重

金属的生物有效性发挥重要作用^[29]。崔红标等^[30]通过向铜镉污染土壤中添加磷灰石、石灰、木炭等发现铜镉由活性态向非活性态和潜在活性态转化,AWCD 值、Shannon 和 McIntosh 指数均较对照有所提高,认为改良剂提高了微生物功能多样性。本试验中膨润土的加入提高了根际微生物的 AWCD 值,说明微生物对多种碳源的利用能力增强,微生物活性提高,增加了土壤中能利用有关单一碳源的微生物数量,侧面反映出重金属毒性减弱,有利于微生物群落结构多样性的恢复。且 3 种类型土壤中, Sy 修复后微生物活性提高最明显,这与其土壤污染程度最低有关。Shannon 指数和 McIntosh 指数分析结果表明,各处理根际微生物群落得以丰富,微生物系统功能多样性提高。

4 结论

(1) 添加膨润土提高了 3 种类型土壤 pH 值,降低了土壤有效态 Cd 含量和小白菜对 Cd 的吸收及转运,其中对 Gy 作用最明显,小白菜地上部 Cd 含量较对照下降了 34.81%。小白菜对 As、V 和 Cr 吸收也出现不同程度地降低。

(2) 膨润土降低了 3 种类型土壤中速效氮、速效磷及有机质的含量,最大降幅分别为 59.40% (Gy)、41.18% (Sy) 和 33.33% (Bf),而速效钾含量均升高,有助于提高土壤的保肥能力。

(3) 膨润土增大了 3 种土壤中小白菜的生物量、根表面积、根尖数以及根际微生物活性。与对照相比, Bf 中小白菜生物量、根表面积、根尖数分别增大了 147.55%、80.71% 和 124.31%; Sy 中根际微生物 AWCD 值显著增大。

参考文献:

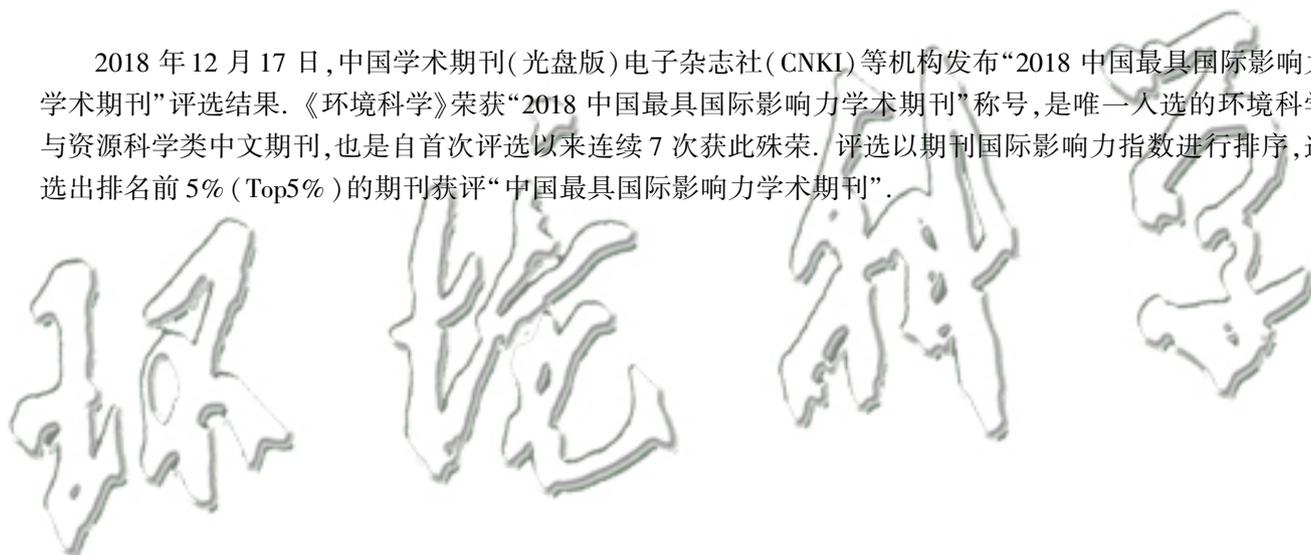
- [1] 朱旭彬,蔡滨莲,林伟杰,等. 我国市郊农田重金属污染研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 36(S1): 137-142.
Zhu X B, Cai B L, Lin W J, et al. Research progress of farmland heavy metal pollution in the suburbs of China [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 36(S1): 137-142.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
- [3] 杨辰. 我国农田土壤重金属污染修复及安全利用综述[J]. 现代农业科技, 2017, (3): 164-167.
Yang C. Review on remediation and safety utilization of heavy metal pollution of farmland soil in China [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017, (3): 164-167.
- [4] 宁东峰. 土壤重金属原位钝化修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(23): 72-80.
Ning D F. A review of in situ passivation repairing technology of heavy metals in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(23): 72-80.
- [5] 刘云,董元华,杭小帅,等. 环境矿物材料在土壤环境修复中的应用研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 629-638.
Liu Y, Dong Y H, Hang X S, et al. Advances in application of

- environmental mineral materials in soil environment remediation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(3): 629-638.
- [6] Xu Y, Liang X F, Xu Y M, *et al.* Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: a review [J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(2): 193-204.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [8] Ahmadipour F, Bahramifar N, Mahmood G S. Fractionation and mobility of cadmium and lead in soils of Amol area in Iran, using the modified BCR sequential extraction method [J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2014, **26**(1): 31-36.
- [9] Zhu L X, Xiao Q, Shen Y F, *et al.* Microbial functional diversity responses to 2 years since biochar application in silt-loam soils on the Loess Plateau [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **144**: 578-584.
- [10] 王秀丽, 梁成华, 马子惠, 等. 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1437-1444.
Wang X L, Liang C H, Ma Z H, *et al.* Effects of phosphate and zeolite on the transformation of Cd speciation in soil [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1437-1444.
- [11] 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.
- [12] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. *中国矿业*, 2017, **26**(6): 79-83.
Yang X M, Ren G M, Li L X, *et al.* Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. *China Mining Magazine*, 2017, **26**(6): 79-83.
- [13] 高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 等. 生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 361-367.
Gao R L, Tang T, Fu Q L, *et al.* Fractions transformation of heavy metals in compound contaminated soil treated with biochar, montmorillonite and mixed addition [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 361-367.
- [14] 陈建清, 郭栋, 陈德, 等. 生物质炭、有机肥和钙镁磷肥对三七 (*Panax notoginseng*) Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(10): 1909-1916.
Chen J Q, Guo D, Chen D, *et al.* Influences of biochar, calcium magnesium phosphate and manure on Cd accumulation in *Panax notoginseng* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(10): 1909-1916.
- [15] 李涛, 李光照, 梅馨月, 等. 镉-钙交互作用对植物的生态学效应[J]. *中国农学通报*, 2017, **33**(32): 77-80.
Li T, Li G Z, Mei X Y, *et al.* The interaction of cadmium and calcium and its ecological effects on plants [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(32): 77-80.
- [16] 代允超, 吕家琰, 刁展, 等. 改良剂对不同性质镉污染土壤中有有效镉和小白菜镉吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(1): 80-86.
Dai Y C, Lu J L, Diao Z, *et al.* Effects of soil amendments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassia chinensis* in different Cd-contaminated soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(1): 80-86.
- [17] 刘雪, 王兴润, 张增强. pH 和有机质对铬渣污染土壤中 Cr 赋存形态的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(6): 1436-1440.
Liu X, Wang X Y, Zhang Z Q. Potential influences of pH and organic matter on the occurrence forms of chromium in chromium-contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(6): 1436-1440.
- [18] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
Zhong S X, Yin G C, Chen Z L, *et al.* Influencing mechanism of Eh, pH and iron on the release of arsenic in paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
- [19] Xiao X Y, Yang M, Guo Z H, *et al.* Soil vanadium pollution and microbial response characteristics from stone coal smelting district [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, **25**(4): 1271-1278.
- [20] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1441-1453.
Cao X D, Wei X X, Dai G L, *et al.* Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: a review [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(7): 1441-1453.
- [21] 陈小凤, 周新涛, 罗中秋, 等. 化学沉淀法固化/稳定化除砷研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2015, **34**(12): 3510-3516.
Chen X F, Zhou X T, Luo Z Q, *et al.* Progress on arsenic immobilization/stabilization with chemical precipitation method [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, **34**(12): 3510-3516.
- [22] 王坤, 王小敏, 赵勇, 等. 土壤质地和碳氮比对龙葵富集重金属 Cd 的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(2): 199-203, 220.
Wang K, Wang X M, Zhao Y, *et al.* Influence of soil textures and carbon nitrogen ratio on enrichment heavy metal Cd of *Solanum nigrum* L. [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(2): 199-203, 220.
- [23] 李婧, 陈森, 周艳文, 等. 凹凸棒石施用对镉污染土壤理化性质及小白菜生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2017, **45**(29): 101-103, 173.
Li J, Chen S, Zhou Y W, *et al.* Effects of attapulgite application on Cd contaminated soil's physical and chemical properties and Chinese cabbage's growth [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, **45**(29): 101-103, 173.
- [24] 曹小闯, 钟楚, 马庆旭, 等. 不同典型地带性土壤氮素分布特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(3): 688-696.
Cao X C, Zhong C, Ma Q X, *et al.* Distribution characteristics of soil nitrogen and its influence factors in different typical zonal soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(3): 688-696.
- [25] Zhao J, Dong Y, Xie X B, *et al.* Effect of annual variation in soil pH on available soil nutrients in pear orchards [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(4): 212-216.
- [26] 韩君, 梁学峰, 徐应明, 等. 黏土矿物原位修复镉污染稻田及其对土壤氮磷和酶活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(11): 2853-2860.
Han J, Liang X F, Xu Y M, *et al.* In-situ remediation of Cd-polluted paddy soil by clay minerals and their effects on nitrogen, phosphorus and enzymatic activities [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(11): 2853-2860.
- [27] Mia S, Van Groenigen J W, Van De Voorde T F J, *et al.* Biochar application rate affects biological nitrogen fixation in red clover conditional on potassium availability [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 83-91.

- [28] Guo H H, Nasir M, Lv J L, *et al.* Understanding the variation of microbial community in heavy metals contaminated soil using high throughput sequencing [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **144**: 300-306.
- [29] 陈永勤, 江玲, 徐卫红, 等. 黑麦草、丛枝菌根对番茄 Cd 吸收、土壤 Cd 形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4642-4650.
- Chen Y Q, Jiang L, Xu W H, *et al.* Effect of ryegrass and arbuscular mycorrhizal on Cd absorption by varieties of tomatoes and cadmium forms in soil [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4642-4650.
- [30] 崔红标, 范玉超, 周静, 等. 改良剂对土壤铜镉有效性和微生物群落结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 197-205.
- Cui H B, Fan Y C, Zhou J, *et al.* Availability of soil Cu and Cd and microbial community structure as affected by applications of amendments [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 197-205.

《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)