

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



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

生物质炭对磷镉富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响

黄洋, 郭晓, 胡学玉*

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要:以磷镉富集土壤(总 Cd $0.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和低镉积累基因型红菜薹金秋红三号为供试材料,采用盆栽试验的方法,设置了绝对对照 CK0(仅施 NK 无机肥)、相对对照 CKp(施 NPK 无机肥)、生物质炭 BC(BC + NK 无机肥)和 BC-CKp(BC + NPK)这 4 个处理,考察了土壤磷素和重金属 Cd 的生物有效性、植株可食部位生物量及其 Cd 累积特征和土壤基本性状等指标。结果表明,至作物收获时,添加生物质炭的 BC 和 BC-CKp 处理与未添加生物质炭的 CK0 和 CKp 处理相比,土壤有效 Cd 含量分别降低了 8.23% 和 5.68%;同时土壤有效磷含量提高了 11.60 ~ 16.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施加外源磷肥的 CKp 和 BC-CKp 处理土壤有效 Cd 含量与未施加磷肥的 CK0 和 BC 处理相比分别降低了 31.43% 和 33.29%。除 CK0 处理外,其它 3 个处理(CKp、BC 及 BC-CKp)的红菜薹作物可食部位 Cd 含量均未超出我国食品安全国家标准(GB 2762-2017)中 Cd 的限定值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。结果表明,将生物质炭输入到磷素富集的中、轻度 Cd 污染土壤中,能够同时实现土壤中重金属 Cd 钝化和磷素活化的双重功能;且在不额外使用磷素化肥的条件下,种植弱吸收低积累 Cd 的蔬菜作物基因型,既可以保证可食部位生物量增加,也可以使其可食部位重金属 Cd 含量满足食品安全国家标准。

关键词:生物质炭(BC); 土壤-作物系统; 磷镉富集土壤; 镉钝化; 土壤磷素活化

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2861-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911278

Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops

HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu*

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Using phosphorus and cadmium enriched soil (total Cd is $0.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, total phosphorus is $0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and low cadmium accumulation genotype JinqiuHong 3 as experimental materials, we set up four treatments: absolute control (only NK inorganic fertilizer), relative control (CKp, NPK inorganic fertilizer), biochar (only NK inorganic fertilizer), and biochar + phosphate fertilizer (BC-CKp). The availability of phosphorus and heavy metal Cd in soil, the biomass, Cd accumulation characteristics of edible parts of plants, and the basic characteristics of soil were investigated. The results showed that the content of available Cd in soil decreased by 8.23% and 5.68% by BC and BC-CKp treatment with biochar compared with CK0 and CKp treatment without biochar, respectively. At the same time, the content of available phosphorus in soil significantly increased 11.60-16.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of biochar. The content of available Cd in CKp and BC-CKp treated with exogenous phosphate fertilizer was significantly lower than that in CK0 and BC treatments without phosphate fertilizer by 31.43% and 33.29%, respectively. In addition to CK0 treatment, the Cd content of edible parts of *Brassica campestris* bolting crops in the other three treatment groups (CKp, BC, and BC-CKp) did not exceed the limit value of Cd of the China Food Safety National Standard (GB 2762-2017) of $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The results showed that the dual functions of heavy metal Cd passivation and phosphorus activation could be realized by injecting biochar into moderate and mild Cd contaminated soil with phosphorus enrichment at the same time. Under the condition of no additional use of phosphorus fertilizer, planting vegetable crop genotypes with weak absorption and low accumulation of Cd can not only ensure an increase in biomass of edible parts but can also ensure that the heavy metal Cd content in edible parts meets the national standard of food safety.

Key words: biochar (BC); soil-crop system; phosphorus and cadmium enrichment soil; cadmium passivation; soil phosphorus activation

磷(P)是植物生长必须的三大营养元素之一且具有不可替代性。基于磷矿开采的化学磷肥在粮食需求增加的背景下成为农业生态系统磷的主要来源。由于土壤组分对 P 的吸附固定以及追求高产,磷肥实际用量往往大于作物需求量或推荐施用量,由此导致土壤中 P 素的积累现象在包括中国在内的全球不同区域的土壤中普遍发生^[1-3]。据 2016 年全国耕地质量监测报告,全国土壤全磷平均含量 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,部分省份耕地土壤中全磷已超过 1.5

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全国土壤有效磷平均含量达 $27.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 2004 年比,该值上升 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,年均增加 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这些数据一方面体现了我国耕地的土壤的供磷能力,另一方面也反映出耕地磷素养分富

收稿日期: 2019-11-30; 修订日期: 2019-12-22

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2019ABA118); 国家自然科学基金项目(41371485); 中央高校基本科研业务费专项(CUG170103)

作者简介: 黄洋(1995 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: 1779892448@qq.com

* 通信作者, E-mail: huxueyu@cug.edu.cn

集已成为我国一个重大的共性问题. 这一重大共性问题不仅涉及不可更新磷矿资源的利用效率、化学磷肥的农学效益,还关乎土壤磷素盈余可能产生的环境影响. 环境影响之一是增加了磷素向水体环境释放的风险,其二,由于重金属镉(Cd)在磷矿石中的伴生性,随着磷矿的开采以及矿质磷肥的连年施用,大量的重金属元素 Cd 或藉大气沉降或随磷肥一起进入农业土壤而引起耕层土壤 Cd 的超标积累^[4-6]. 与此同时,土壤中 Cd 的超标不仅影响农产品安全,也同样存在迁移至水体环境而致的生态风险^[7-10].

农业土壤磷镉富集共存现象已成为不争的事实,而且在未来一段时间随着土地集约化程度提高和粮食需求进一步增加,磷镉富集土壤会更加普遍. 土壤中磷、镉交互作用十分复杂. 现有研究表明,于作物吸收积累重金属元素 Cd 而言,磷的存在可能会产生几种不同的作用方向,或提高土壤 Cd 活性促进植株对镉的吸收、或降低土壤 DTPA-Cd 含量减少植株镉积累^[5, 11]. 磷、镉共存条件下所产生效应的差异与土壤类型、土壤条件、磷的存在形态与水平以及重金属 Cd 在相应条件下的反应性变化等因素有关.

近年来,生物质炭(biochar, BC)作为一种土壤改良剂和重金属钝化剂被广泛关注. 有关生物质炭对土壤磷素的活化作用^[12-15]及重金属 Cd 的钝化效应^[16-20]这两方面的研究已有报道,且更多集中于

生物质炭对重金属 Cd 的影响及其效应. 在耕地土壤磷镉富集共存现象渐趋普遍的现状下,生物质炭在磷镉富集土壤-作物体系中对两种元素迁移转化的协同影响及其生物可利用度的研究还为数不多,仅有的研究结果也不尽一致^[21-24]. 而阐明生物质炭-磷-镉共存条件下的相互作用及其植物吸收累积镉的特征,可为生物质炭在高镉富磷土壤环境中同时实现其镉钝化和磷活化的双重功能提供理论依据和技术途径. 这对于推动农业废弃物和磷矿资源的高效利用,客观评价生物质炭作为土壤调理剂和重金属钝化剂的功能效应,以及重金属 Cd 超标耕地土壤的安全利用均有重要意义.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤与生物质炭的基本理化性质见表 1. 本试验用土采自湖北省大冶市某水稻田,采样深度为 0~20 cm. 土壤经自然风干、去除植物残体,过 2 mm 筛后装盆备用. 400℃玉米秸秆生物质炭由中科院南京土壤研究所提供.

供试红菜薹品种为本课题组前期关于茎菜类蔬菜对重金属镉的累积特征的研究筛选出的低镉积累红菜薹品种金秋红 3 号^[25],该品种种子生产商为四川种都高科种业有限公司,为中晚熟品种.

供试磷肥选用国药集团生产的优级纯磷酸二氢钾(KH₂PO₄),P₂O₅含量为 12%.

表 1 供试材料理化性质¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of the tested materials

供试材料	测试指标					
	pH 值	有机质 /g·kg ⁻¹	总镉 /mg·kg ⁻¹	有效镉 /mg·kg ⁻¹	全磷(P) /g·kg ⁻¹	有效磷(P) /mg·kg ⁻¹
供试土壤	6.78	49.25	0.94	0.29	0.86	17.82
供试生物质炭	8.03	—	N. D	—	2.10	—

1) “—”表示未做检测,“N. D”表示未检出

1.2 试验设计

采用室外盆栽试验,每盆(直径约 32 cm,高 20 cm)装土 4 kg. 本试验设置:①绝对对照 CK0(仅施 NK 无机肥);②相对对照 CKp(施 NPK 无机肥);③生物质炭 BC(BC + NK 无机肥)和④BC-CKp(BC + NPK)这 4 个处理. 每个处理设 3 次重复. 试验期间氮磷钾的施用量(以土计,下同)为:ω(N) = 280 mg·kg⁻¹,ω(P₂O₅) = 180 mg·kg⁻¹和 ω(K₂O) = 560 mg·kg⁻¹,分别以尿素、磷酸二氢钾和氯化钾形式添加. 其中,N 肥中 35% N 作为基肥、20% N 和 45% N 肥分别为第一次和第二次追肥;P 肥全都作为基肥;K 肥中 90% 作为基肥、10% 作为追肥. 生物质炭

使用量为 30 g·kg⁻¹,与基施肥料在作物移栽前一并施入土壤并混匀.

种植过程中保持每盆植株的株数一致(4 株·盆⁻¹),试验期间保持盆中土壤含水量为田间持水量的 60%~70%左右. 盆钵随机摆放,其位置更换频率为一周一次. 雨天采用覆有透明薄膜的遮雨棚处理.

1.3 样品采集、制备与分析测定

土壤样品分别在移栽前(0 d)、定植 15 d 和收获后(移栽后 99 d)采集土壤样品 180 g·盆⁻¹,自然风干过 2 mm 筛和 0.149 mm 筛后置于密封袋中保存,用于土壤样品各指标的测定. 土壤 pH 值采用电

极法;土壤中交换性钙、镁含量用乙酸铵-EDTA 络合滴定法;土壤有效磷用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定;土壤总镉用 $\text{HF-HClO}_4\text{-HNO}_3$ 消解,原子吸收分光光度法测定;土壤有效态镉采用 DTPA 浸提法。

植物样品采集选择在红菜薹成熟期进行. 收获各盆中所有红菜薹植株,将植株地下部分和地上部分分开,立即测量植株的生物学性状指标,包括每盆植株数、薹高、薹粗和菜薹鲜重. 先后用自来水、超纯水冲洗植株,并用吸水纸吸干植株上附着的水分. 将样品放入烘箱,先在 105°C 下杀青 30 min,然后在 60°C 下烘干至恒重. 研磨后过 0.149 mm 的尼龙网筛,密封存放于自封袋,用于植物样品各指标的测定. 植物总镉含量采用湿式消解法-石墨炉原子吸收光谱法测定,植物总磷含量采用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 与 Origin8.5 完成数据处理及相关图表绘制,并用 SPSS 21.0 对数据进行分析,多重比较采用最小显著差异法 (LSD),显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对土壤有效磷水平的影响

生物质炭对土壤有效磷含量的影响如图 1 所示. 作物移栽前,CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 处理的土壤有效磷含量分别为 25.28、18.95、34.62 和 39.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,添加生物质炭的 BC 和 BC-CKp 处理土壤有效磷含量显著高于未添加生物质炭的 CK0 和 CKp 处理 ($P < 0.05$),增量分别为 9.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 20.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

定植 15 d 后,CK0、BC 和 BC-CKp 处理的土壤有效磷相比于作物移栽前均呈现出显著下降,只有 CKp 处理的有效磷水平与移栽前相当,这可能与外源磷肥的补充延时效应有关。

至收获期时,CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 处理的土壤有效磷含量分别为 20.28、12.82、31.87 和 29.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均显著低于移栽前各处理土壤有效磷水平. 从此期处理间的差异来看,添加生物质炭的 BC-CKp 和 BC 处理的土壤有效磷含量分别在 CKp 和 CK0 处理基础上增加了 16.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 11.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P < 0.05$). 但是,施加外源磷肥的 BC-CKp 处理与无外源磷肥的 BC 处理间差异性不显著,甚至前者的有效磷含量比后者还低了 2.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这可能与 BC-CKp 处理土壤条件下对作物生长的促进作用有关,高的生物量带走了更多的土壤有效磷

素. 在不施用外源磷肥的两个处理中,BC 处理有效磷含量比 CK0 增加了 11.60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这表明添加 BC 能够显著增加土壤有效磷含量。

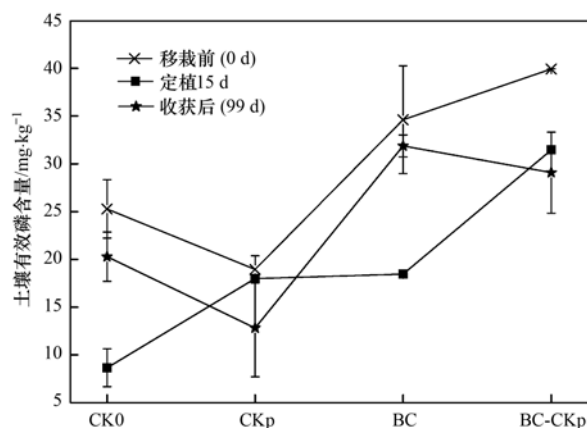


图 1 生物质炭对土壤有效磷含量的影响

Fig. 1 Effect of biochar on the content of available phosphorus in soil

2.2 施磷与不施磷条件下生物质炭对土壤有效态镉 (Cd) 的影响

生物质炭对土壤有效 Cd 含量的影响如图 2 所示. 在作物移栽前,CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 处理的土壤有效 Cd 含量分别为 0.324、0.289、0.299 和 0.246 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 与 CK0 处理相比,CKp、BC 和 BC-CKp 处理土壤有效 Cd 含量分别显著降低了 7.72%、24.16% 和 10.79% ($P < 0.05$). 施加外源磷肥的 CKp 和 BC-CKp 处理的土壤有效 Cd 含量与未施加磷肥的 CK0 和 BC 处理相比,分别显著降低了 10.79% 和 17.85%. 并且在同样施加了外源磷肥的条件下,添加生物质炭的 BC 和 BC-CKp 处理比未添加生物质炭的 CK0 和 CKp 处理的土壤有效 Cd 含量分别降低了 7.72% 和 14.99% ($P < 0.05$).

定植 15d 后,CK0 和 CKp 处理的土壤有效 Cd 含量与作物移栽前相比无明显变化,BC 处理的有效 Cd 水平比移栽前降低 9.76%,但 BC-CKp 处理有效 Cd 含量却比移栽前提高了 11.89%。

作物收获后,CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 处理的土壤有效 Cd 含量分别为 0.602、0.402、0.552 和 0.379 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相较于移栽前分别显著提高了 85.68%、38.88%、84.65% 和 54.13% ($P < 0.05$),这可能是由于土壤 pH 降低,负电荷减少导致其吸附 Cd 的能力减弱,土壤 Cd 的有效性增强^[26]. 就本期处理间的差异而言,添加生物质炭的 BC、BC-CKp 处理与未添加生物质炭的 CK0 和 CKp 处理相比,土壤有效 Cd 含量分别降低了 8.23% 和 5.68%. 而且,施加外源磷肥的 CKp 和 BC-CKp 处理土壤有效 Cd 含量与未施加磷肥的 CK0 和 BC 处理相比分别显著降低了 31.43% 和 33.29%. 说明添加生物质炭和外

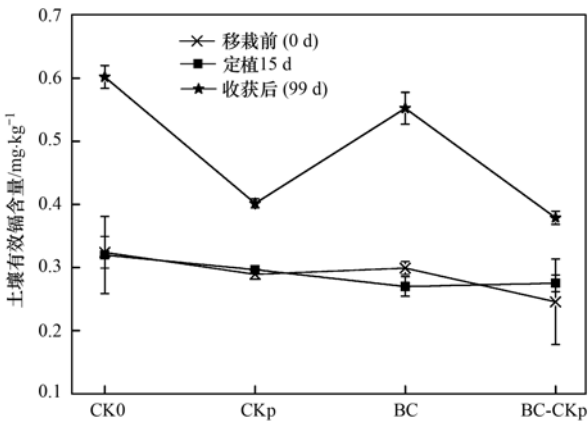


图2 生物炭对土壤有效 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effect of biochar on the content of available cadmium in soil

源磷肥均能显著降低土壤中有有效 Cd 含量,而且当两者复合添加时对土壤有效镉的效果更为显著.

2.3 生物质炭对 Cd 胁迫下红菜薹不同部位 Cd 累积及其生长的影响

在 Cd 胁迫下,红菜薹不同部位的 Cd 累积特征如图 3 所示. 在本研究中,CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 这 4 个处理的红菜薹地上可食部位的 Cd 含量分别为 0.112、0.085、0.100 和 0.089 mg·kg⁻¹, 其中 CKp、BC 以及 BC-CKp 处理均未超出我国食品安全国家标准(GB 2762-2017)的限定值 0.1 mg·kg⁻¹, 并且以加磷的两个处理 CKp 和 BC-CKp 的 Cd 含量为最低,与 CK 处理间形成显著差异($P < 0.05$). 施磷处理 BC-CKp 和 CKp 与未施磷处理 BC 和 CK0 两两比较,红菜薹的地上可食部位 Cd 含量分别降低了 11.31% 和 26.21%;地下部分 Cd 含量提高了 74.73% 和 72.24%.

4 个处理地下部分 Cd 含量与其地上部分 Cd 含量有着几近相反的趋势,CKp 和 BC-CKp 这两个加

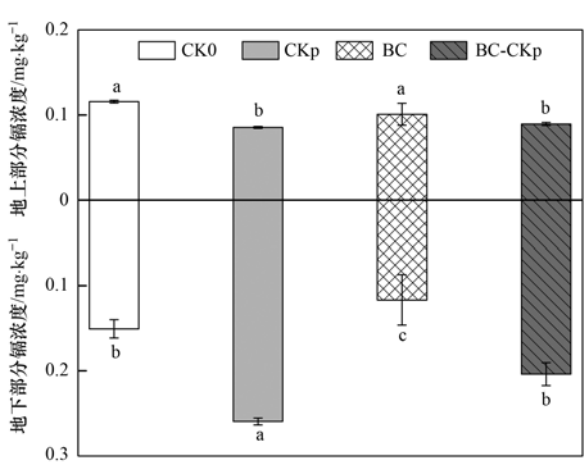


图3 红菜薹不同部位 Cd 累积特征

Fig. 3 Cadmium accumulation characteristics in different parts of Brassica campestris

磷处理的 Cd 含量最高,且二者间差异显著($P < 0.05$). 可见磷元素可以抑制红菜薹根部吸收的 Cd 元素向其地上部分转移,存在根部 Cd 的囤积效应,磷与生物质炭协同处理时也显示出这一效应.

此外,磷素、生物质炭可以减少 Cd 对红菜薹生长的胁迫. 表 2 显示,CKp、BC 与 BC-CKp 处理的红菜薹植株可食部位生物量比 CK0 处理分别显著提高了 108.09%、74.05% 和 157.45% ($P < 0.05$). 可见,磷素的添加更能促进作物生长. 在相同的磷水平下,BC-CKp 处理的生物量显著高于 CKp 处理($P < 0.05$),增量为 38.67 g·盆⁻¹,总量达到了 201.67 g·盆⁻¹,是 CKp 处理的 1.2 倍,这说明生物质炭与磷素在促进作物生长方面协同作用显著. 另一方面,CKp、BC 与 BC-CKp 处理红菜薹植株可食部位生物量的增加可能对其中 Cd 的含量存在一定的稀释效应.

表 2 生物质炭对红菜薹生物量及生长状况的影响¹⁾

Table 2 Effect of biochar on biomass and growth status of Brassica campestris

处理	作物鲜重/g·盆 ⁻¹	薹高/cm·盆 ⁻¹	薹粗/cm·盆 ⁻¹
CK0	78.33 ± 7.07a	17.68 ± 1.11b	5.80 ± 0.18a
CKp	163.00 ± 9.90b	24.15 ± 0.97a	7.91 ± 0.80a
BC	136.33 ± 29.70b	18.53 ± 2.97ab	7.15 ± 0.52a
BC-CKp	201.67 ± 9.19c	28.25 ± 0.46a	7.61 ± 0.40a

1) 数据为 3 个重复的平均值 ± 标准误差,同一列中不同字母表示差异显著,显著水平为 $P < 0.05$

2.4 生物质炭与磷素影响下土壤基本性状与镉迁移的关系

2.4.1 生物质炭与磷素影响下土壤 pH 值的变化

生物质炭能使红菜薹生长过程中的土壤理化性质发生改变,土壤 pH 值变化如图 4 所示. 在红菜薹从移栽前到收获后的整个生长培育过程中,CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 这 4 种处理的土壤 pH 值呈现先大幅度降低后部分回升的趋势,且收获后的土壤

pH 值均低于移栽前. 这可能是由于作物根系分泌了大量的低分子量有机酸,致使土壤 pH 值降低.

至收获后,添加生物质炭的 BC-CKp 和 BC 处理的 pH 值分别明显高于未添加生物质炭的 CKp 和 CK0 处理($P < 0.05$),增幅为 0.53 和 0.29 个单位,且 BC-CKp 处理的 pH 值最高,可见外源磷与生物质炭对土壤 pH 值的影响也有一定的协同效应. 综合作物收获后土壤中有有效镉(图 2)和有效磷(图 1)含

量及红菜薹地上可食部位的 Cd 浓度(图 3), 本研究发现土壤中有效态 Cd 含量及红菜薹地上可食部位 Cd 含量随着土壤 pH 值的减小而增大, 呈负相关关系; 但同时土壤 pH 值与收获时土壤中的有效磷含量呈正相关关系, 土壤有效磷含量随 pH 值增大而升高。

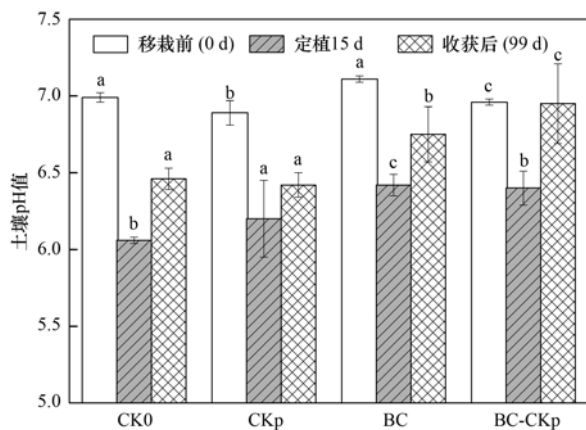
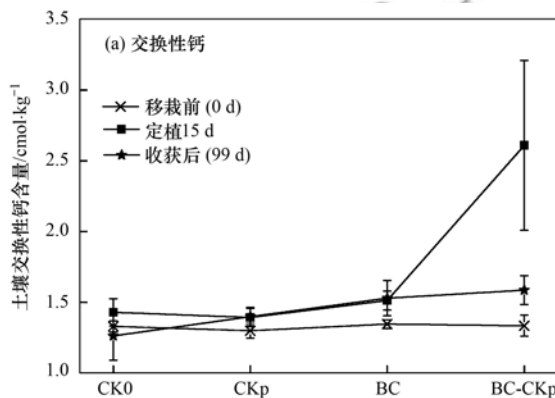


图 4 生物质炭对土壤 pH 值的影响

Fig. 4 Effect of biochar on soil pH value



2.4.2 生物质炭与磷素影响下土壤交换性钙、镁含量的变化

土壤交换性钙、镁含量在生物质炭与磷素影响下的变化如图 5 所示。作物移栽前, CK0、CKp、BC 和 BC-CKp 处理土壤中的交换性钙含量分别达到 1.330、1.300、1.346 和 1.335 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$; 交换性镁含量分别为 1.467、2.400、1.933 和 2.433 $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。添加生物质炭的 BC 和 BC-CKp 处理与未添加生物质炭的 CK0 和 CKp 处理相比, 土壤中交换性 Ca、Mg 含量有微量增加但不显著; 施加磷肥的 CKp 和 BC-CKp 处理与未施加磷肥的 CK0 和 BC 处理相比, 土壤中交换性 Ca、Mg 的含量略微降低, 但也不显著。

定植 15 d 后, 除 BC-CKp 处理的土壤交换性 Ca 含量显著提高外, 其它 3 个处理与移栽前无明显变化; BC 处理的土壤交换性 Mg 含量与移栽前相当, 但 CK0、CKp 和 BC-CKp 处理的交换性镁含量均显著降低。

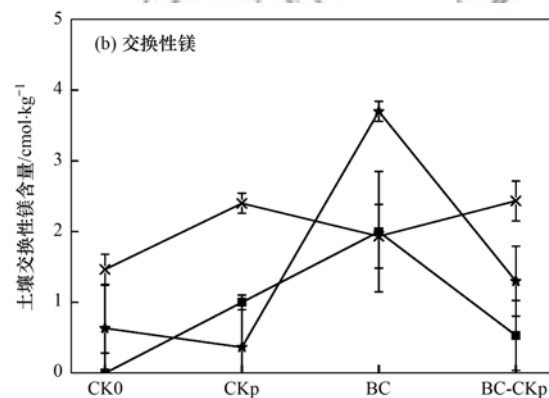


图 5 生物质炭对土壤交换性钙、镁的影响

Fig. 5 Effect of biochar on soil exchangeable calcium and magnesium content

至作物收获期, 添加生物质炭的 BC-CKp 和 BC 处理中交换性 Ca 与交换性 Mg 含量显著 ($P < 0.05$) 高于未添加生物质炭的 CKp 和 CK0 处理, 增幅分别为 13.39% ~ 21.14%、254.55% ~ 484.49%。施加外源磷肥的 BC-CKp 和 CKp 处理与未施加外源磷肥的 BC 和 CK0 处理相比, 土壤中交换性 Ca 含量分别提高了 3.73% 和 10.83%; 交换性 Mg 含量分别降低了 42.09% 和 64.88% ($P < 0.05$)。

本研究结果表明, 土壤中交换性 Ca 和交换性 Mg 的含量与土壤有效磷含量间存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.745 和 0.835。初步推断, 这可能与生物质炭携带 Ca 和 Mg 等盐基物质进入土壤致其 Ca、Mg 含量增加有关。而交换性 Ca 和交换性 Mg 可与土壤中带负电荷的磷基团 (H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 等) 结合, 且附着于生物质炭或土壤基质的表面, 抑制土壤磷素从土壤中淋失, 并且

在一定土壤条件下可从土壤固相表面转移至液相, 表现为土壤有效磷含量的增加。

3 讨论

3.1 生物质炭与外源磷对土壤磷镉有效性的影响

生物质炭作为改善土壤环境的外源输入材料, 能够直接或间接参与土壤生态系统中的磷素循环, 其自身携带的磷可提高土壤中有效磷含量^[27]。本研究中, 作物收获后, CKp、BC 和 BC-CKp 处理与 CK0 处理相比, 土壤有效磷含量均表现为增加; BC 和 BC-CKp 处理相比于 CK0 和 CKp 处理, 土壤有效磷含量显著提高, 增幅达 11.60 ~ 16.26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。有研究将改性牦牛粪生物质炭添加到土柱中进行淋溶试验, 发现可以有效控制农田土壤中磷的流失, 且在前期淋溶过程中能够保水保磷, 在后期逐渐释放从土壤中吸附的磷^[28]。除自身携带磷素外, 生物质炭还

可以通过影响与磷相互作用的阳离子活性、改变微生物的土壤环境以及改变含铁氧化物与磷的吸附结合等方式,来改变土壤磷的生物有效性^[29~31]. 本研究中添加生物质炭的 BC 和 BC-CKp 处理中交换性钙、镁含量显著高于未添加生物质炭的 CK0 和 CKp 处理,生物质炭所含一定量的灰分元素(Ca 和 Mg 等)使得土壤中的盐基饱和度提高、交换性 H^+ 水平降低,导致土壤 pH 一定程度升高^[32],使土壤中可溶性磷含量增大^[33],易被作物根系吸收,刺激根系分泌有机酸,与 Zn 和 Fe 等发生络合作用,促进难溶性的磷化合物溶解,进而提高土壤有效磷含量^[34]. 生物质炭不仅自身可向土壤供磷,且能活化土壤中的固定态磷,从而提高土壤磷素的生物有效性.

植株体内 Cd 的累积特征受土壤中 Cd 生物有效性影响较大,许多研究表明植物吸收重金属 Cd 的含量与土壤有效 Cd 含量呈正相关^[35~39]. 在本研究中,红菜薹地上可食部位 Cd 累积特征与收获后土壤中的有效 Cd 含量也与这些结果一致. 施加生物质炭的土壤有效 Cd 含量显著低于未施加的处理. 土壤 pH 值变化是土壤 Cd 活性增加或降低的关键因素. 生物质炭表面存在能与 H^+ 结合的有机酸根—COO—、—O—以及其含有一定量的灰分物质,使土壤溶液中·OH 浓度增大, Cd^{2+} 可与·OH 或 CO_3^{2-} 等结合生成难溶的 $Cd(OH)_2$ 和 $CdCO_3$ 沉淀. 同时,土壤 pH 值升高会增强土壤胶体及土壤黏粒对重金属离子的吸附能力^[40],改变土壤 Cd 的存在形态^[41],抑制重金属 Cd 的流动性. Uchimiya 等^[42] 的研究发现,BC 可引起土壤 pH 值从 4.56 上升到 7.80,可交换态 Cd 的占比由 8.9% 下降到 5.0%,络合态 Cd 由 8.8% 增至 30.2%,残渣态 Cd 由 3.1% 增至 65.1%. 这进一步说明生物质炭通过改变土壤 pH 值,使得土壤镉的有效性降低. 有关生物质炭钝化土壤 Cd 的机制还待进一步深入研究证实.

磷(P)是植物生长发育的必需元素之一,对保障作物生长有着不可替代的作用. 但磷矿中的伴生元素 Cd 又是制约磷肥安全利用的重要因素. 进入土壤中的磷镉元素间的交互作用及其生态效益十分复杂,研究结果也趋于多样化. 有研究表明,施用磷肥可直接导致土壤及作物中的 Cd 含量增加,引发环境风险^[43]. 澳大利亚研究者利用长期施用高 Cd 含量的过磷酸钙土壤种植生产谷类作物发现,谷类中 Cd 含量极低^[44];也有研究结果表明^[45],在 $\omega(P) < 160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤磷浓度增大可促进重金属 Cd 的解吸. 本研究结果显示,土壤有效态 Cd 含量与土壤有效磷含量呈极显著负相关关系($P < 0.01$),这可能是由于土壤有效态磷素与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 生成

的难溶性磷酸盐,可直接吸附土壤中的 Cd^{2+} ,降低土壤 Cd 的移动性. 这一作用也与生物质炭对土壤有效磷、土壤交换性钙镁的作用效应有关.

3.2 生物质炭对作物生长及不同部位镉吸收积累的影响

本研究表明,CKp、BC 和 BC-CKp 这 3 个处理与 CK0 处理相比,其作物地上部分生物量以及作物的薹高和薹粗均显著提高,生物质炭有促进植物生长的作用^[46~48]. 同时,BC-CKp 和 CKp 处理的红菜薹地上可食部位 Cd 含量分别显著低于 CKp 和 CK0 处理,且其地下部分 Cd 含量与此结果几近相反. 这表明生物质炭和磷素对红菜薹体内重金属 Cd 的毒害均具有明显的缓解作用,并存在根部囤积效应. 他人研究也发现小白菜地上部以及根部 Cd 含量随外加 Cd 浓度水平的增加而增加,但植物体内的 Cd 较难向地上部迁移而是在植物根部大量累积,^[36]. 本研究中,收获期各处理的土壤有效态 Cd 含量显著高于移栽前,这可能是由于随着作物的生长,作物根系分泌的低分子量有机酸活化了部分重金属 Cd,但 BC 的加入有效抑制了这部分活化的 Cd 向植株可食部位的迁移. 有研究发现在 pH 8.07 的土壤上进行的小麦定位大田试验,施用生物质炭(pH = 10.4)显著降低了小麦籽粒中的镉含量^[8].

在本研究中,除 CK0 处理外,CKp、BC 和 BC-CKp 处理的红菜薹可食部位镉含量均未超出我国食品安全国家标准(GB 2762-2017)中的限定值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 这可能与生物质炭和磷素养分加入土壤环境中所产生的酸碱效应、离子效应以及生物质炭-磷-镉三者间的交互作用有关. 其间的机制还待进一步的揭示与验证.

4 结论

(1)在土壤-作物系统中,施用生物质炭能够活化土壤磷素,同时钝化重金属 Cd. 作物收获时,添加生物质炭的 BC-CKp 和 BC 处理的土壤有效磷含量分别在 CKp 和 CK0 处理基础上显著增加了 $16.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态 Cd 含量降低了 8.23% 和 5.68%.

(2)在不额外使用磷素肥料的条件下,通过在磷素富集的中、轻度 Cd 污染土壤上施用生物质炭,种植弱吸收低积累 Cd 的蔬菜作物,既可保证作物生物量增加,又能使其可食部位的重金属 Cd 含量满足国家食品安全标准. 除 CK0 处理外,CKp、BC 和 BC-CKp 处理的红菜薹可食部位 Cd 含量均未超出我国食品安全国家标准(GB 2762-2017)的限定值 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与此同时,CKp、BC 和 BC-CKp 这 3 个

处理的作物可食部位生物量以及茎高、茎粗都显著高于 CK0 处理。

参考文献:

- [1] Hu X Y. Application of visible/near-infrared spectra in modeling of soil total phosphorus[J]. *Pedosphere*, 2013, **23**(4): 417-421.
- [2] 马进川. 我国农田磷素平衡的时空变化与高效利用途径[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
Ma J C. Temporal and spatial variation of phosphorus balance and solutions to improve phosphorus use efficiency in Chinese arable land[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [3] Wironen M B, Bennett E M, Erickson J D. Phosphorus flows and legacy accumulation in an animal-dominated agricultural region from 1925 to 2012[J]. *Global Environmental Change*, 2018, **50**: 88-99.
- [4] Alloway B J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability[M]. Dordrecht: Springer, 2013. 283-311.
- [5] 胡红青, 黄益宗, 黄巧云, 等. 农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(6): 1676-1685.
Hu H Q, Huang Y Z, Huang Q Y, *et al.* Research progress of heavy metals chemical immobilization in farm land[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(6): 1676-1685.
- [6] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [7] 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 等. 渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4637-4646.
Li N, He H Z, Feng A X, *et al.* Safe Utilization of paddy soils lightly polluted with cadmium in western Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4637-4646.
- [8] Sui F F, Zuo J, Chen D, *et al.* Biochar effects on uptake of cadmium and lead by wheat in relation to annual precipitation: a 3-year field study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(4): 3368-3377.
- [9] 匡荃芬, 胡春华, 孙丽丽, 等. 鄱阳湖鱼类重金属积累特征及其健康风险评价[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2018, **42**(6): 578-583.
Kuang H F, Hu C H, Sun L L, *et al.* Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in fish species from Poyang lake[J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2018, **42**(6): 578-583.
- [10] Gu J F, Zhou H, Tang H L, *et al.* Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under *in situ* remediation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 451-459.
- [11] 王雪晴. 水稻植株内外磷素供应状况及磷饥饿信号影响镉积累的分子生理机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
Wang X Q. The molecular physiological mechanism study of cadmium accumulation affected by internal or external phosphate status and phosphate starvation signaling in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [12] Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: science, technology and implementation[M]. London: Routledge, Taylor & Francis Group, 2015. 138-164.
- [13] Chathurika J A S, Kumaragamage D, Zvomuya F, *et al.* Woodchip biochar with or without synthetic fertilizers affects soil properties and available phosphorus in two alkaline, chernozemic soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, **96**(4): 472-484.
- [14] Liu S N, Meng J, Jiang L L, *et al.* Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, **116**: 12-22.
- [15] Yao Q, Liu J J, Yu Z H, *et al.* Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **110**: 56-67.
- [16] Li H Y, Ye X X, Geng Z G, *et al.* The influence of biochar type on long-term stabilization for Cd and Cu in contaminated paddy soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **304**: 40-48.
- [17] 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 M, 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.
- [18] 于春晓, 张丽莉, 杨立杰, 等. 镉钝化剂与尿素配施对土壤镉钝化效果的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(7): 1941-1948.
Yu C X, Zhang L L, Yang L J, *et al.* Effects of passivators and urea on soil Cd availability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(7): 1941-1948.
- [19] Lu K P, Yang X, Gielen G, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **186**: 285-292.
- [20] Hamid Y, Tang L, Sohail M I, *et al.* An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 80-96.
- [21] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
Zhang W M. Physical and chemical properties of biochar and its application in crop production[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012.
- [22] 张沙沙, 刘扬, 曹坤坤, 等. 生物质炭对富磷镉土壤中磷镉形态转化的影响[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(7): 16-22.
Zhang S S, Liu Y, Cao K K, *et al.* Effect of biochar on the morphological transformation of phosphorus and cadmium in phosphorus-cadmium enriched soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(7): 16-22.
- [23] Yang X, Liu J J, McGrouther K, *et al.* Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 974-984.
- [24] Peng H B, Gao P, Chu G, *et al.* Enhanced adsorption of Cu(II) and Cd(II) by phosphoric acid-modified biochars[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 846-853.
- [25] 张迪, 胡学玉, 殷俊, 等. 城郊农业生态系统中茎菜类蔬菜对重金属镉的累积特征及品质表现[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, **21**(2): 188-194.
Zhang D, Hu X Y, Yin J, *et al.* Cadmium accumulation and vegetable quality of edible parts of stem vegetables growing in suburban farmlands[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, **21**(2): 188-194.
- [26] 陈青云, 胡承孝, 谭启玲, 等. 不同磷源对土壤镉有效性的

- 影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(10): 2254-2259.
- Chen Q Y, Hu C X, Tan Q L, *et al.* Effect of different phosphate sources on availability of cadmium in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(10): 2254-2259.
- [27] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(6): 1690-1695.
- Liu Y X, Tang X, Yang S M, *et al.* Review on the effect of biochar on soil phosphorus transformation and mechanisms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, **22**(6): 1690-1695.
- [28] 侯杰发. 镁改性牛粪生物炭对农田土壤磷吸附性能及其机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- Hou J F. Study on the performance and mechanism of phosphorus adsorption by cow dung biochar modified with magnesium on farmland soil[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [29] 才吉卓玛. 生物炭对不同类型土壤中磷有效性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- Cai J Z M. Impact of biochar on availability of phosphorus in different soil types [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [30] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. *Plant and Soil*, 2010, **337**(1-2): 1-18.
- [31] Gui H J, Wang M K, Fu M L, *et al.* Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(7): 1135-1141.
- [32] Masulili A, Utomo W, Syechfani M S. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, **2**(1): 39-47.
- [33] 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.
- [34] 马祥庆, 梁霞. 植物高效利用磷机制的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(4): 712-716.
- Ma X Q, Liang X. Research advances in mechanism of high phosphorus use efficiency of plants [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(4): 712-716.
- [35] Scotti I A, Silva S, Baffi C. Effects of fly ash pH on the uptake of heavy metals by chicory[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **109**(1-4): 397-406.
- [36] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(3): 654-658.
- Guo L M, Ai S Y, Tang M D, *et al.* Effect of amendment on Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(3): 654-658.
- [37] 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.
- [38] Munir M A M, Liu G J, Yousaf B, *et al.* Synergistic effects of biochar and processed fly ash on bioavailability, transformation and accumulation of heavy metals by maize (*Zea mays* L.) in coal-mining contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2020, **240**: 124845.
- [39] Zhu L, Tong L H, Zhao N, *et al.* Key factors and microscopic mechanisms controlling adsorption of cadmium by surface oxidized and aminated biochars [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **382**: 121002.
- [40] 王凤, 王梦露, 许堃, 等. 生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(5): 907-914.
- Wang F, Wang M L, Xu K, *et al.* Effects of biochar application on cadmium transformation in brown soil and uptake by baby bokchoi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(5): 907-914.
- [41] 王丹丹, 林静雯, 丁海涛, 等. 牛粪生物炭对重金属镉污染土壤的钝化修复研究[J]. 环境工程, 2016, **34**(12): 183-187.
- Wang D D, Lin J W, Ding H T, *et al.* Immobilization of cadmium in soils by dairy dung biochar [J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(12): 183-187.
- [42] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, *et al.* Immobilization of heavy metal ions (Cu^{II} , Cd^{II} , Ni^{II} , and Pb^{II}) by broiler litter-derived biochars in water and soil [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, **58**(9): 5538-5544.
- [43] Huang B, Kuo S, Bembek R. Availability of cadmium in some phosphorus fertilizers to field-grown lettuce[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **158**(1): 37-51.
- [44] Williams C H, David D J. The effect of superphosphate on the cadmium content of soils and plants[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1973, **11**(1): 43-56.
- [45] 张水勤, 王峰源, 姜慧敏, 等. 设施菜地土壤中速效磷是镉生物有效性的关键调控因子[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(9): 1721-1727.
- Zhang S Q, Wang F Y, Jiang H M, *et al.* Available phosphorus is a key regulator of cadmium phytoavailability in greenhouse soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(9): 1721-1727.
- [46] 睦锋, 廖萍, 黄山, 等. 施用生物炭对双季水稻产量和氮素吸收的影响[J]. 核农学报, 2018, **32**(10): 2062-2068.
- Sui F, Liao P, Huang S, *et al.* Effects of biochar amendment on yield and nitrogen uptake in a double rice-cropping system [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, **32**(10): 2062-2068.
- [47] 王起凡, 郭伟, 常青, 等. 不同浓度镧处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 480-487.
- Wang Q F, Guo W, Chang Q, *et al.* Effects of different concentrations of lanthanum on the growth and uptake of Pb by maize grown under moderate lead stress [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 480-487.
- [48] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. Cd、Zn 交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 470-479.
- Guo J M, Yang J X, Yang J, *et al.* Interaction of Cd and Zn affecting the root morphology and accumulation of heavy metals in *Sedum aizoon* [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 470-479.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)