

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

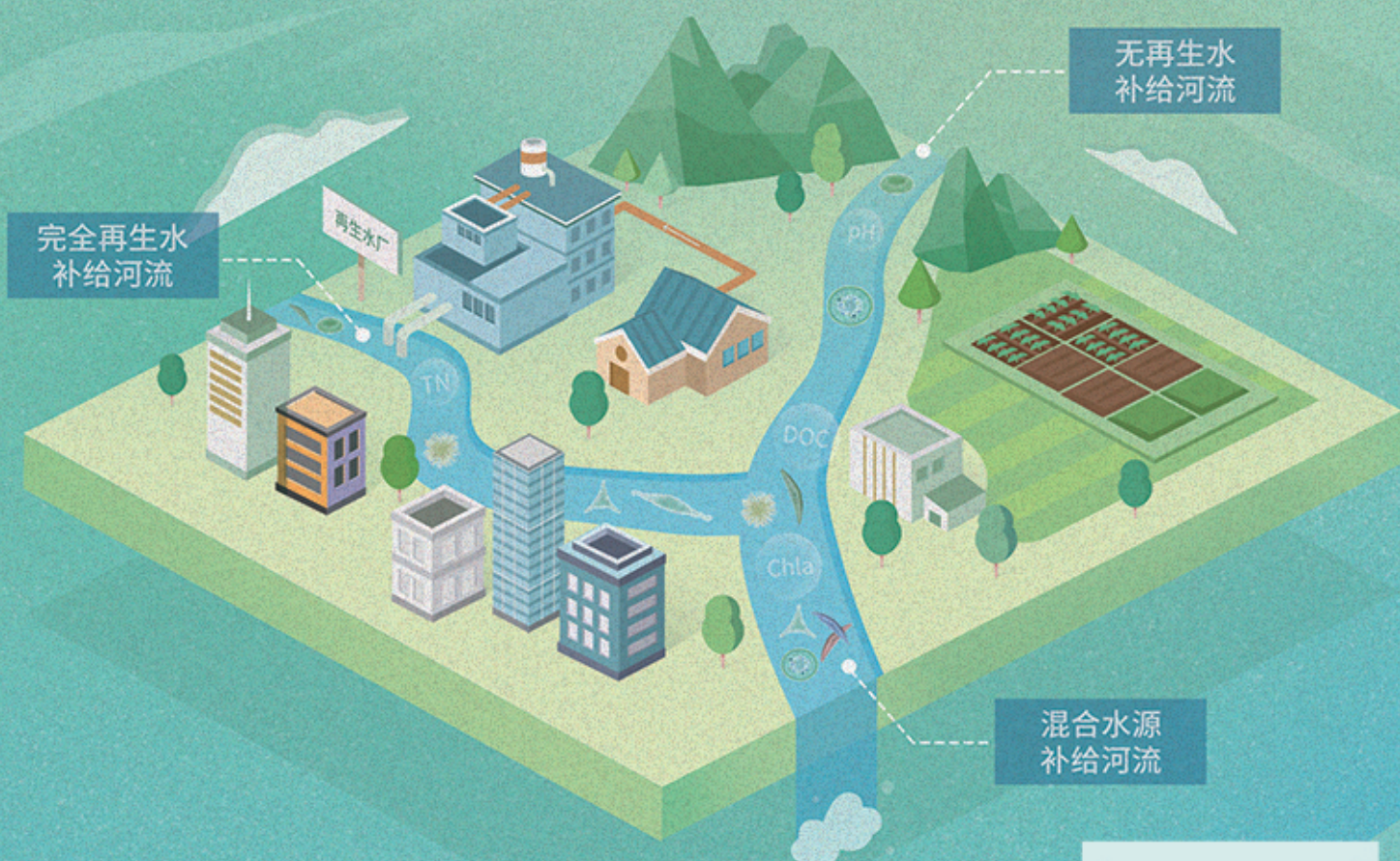
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜豪, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累

杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆*, 赵鹏*

(河南农业大学资源与环境学院, 河南省土壤污染防治与修复重点实验室, 郑州 450000)

摘要: 为探究烟秆生物炭(TSB)和磷酸氢二铵(DHP)对微碱性土壤镉(Cd)迁移转化机制, 通过盆栽试验调查了其施用对土壤pH、有效态Cd、Cd赋存形态和小麦Cd积累的影响。结果表明: ① TSB和DHP显著降低了土壤有效态Cd含量, 10.12 t·hm⁻²TSB可降低微碱性土壤(pH 7.8)有效态Cd含量的44%。② TSB和DHP显著改变了土壤Cd的赋存形态, 6.75 t·hm⁻²和10.12 t·hm⁻²TSB分别降低可交换态Cd含量的48%和42%, 分别增加铁锰氧化物结合态Cd和有机结合态Cd含量的47%~67%和22%~38%。所有处理均增加了残渣态Cd含量, 以TSB和DHP配施增幅最大, 为115%~217%。③ TSB和DHP显著降低小麦根系、叶片、叶鞘、茎秆、颖壳和籽粒Cd含量。10.12 t·hm⁻²TSB小麦籽粒Cd含量降低56%, 产量不受影响。10.12 t·hm⁻²TSB和DHP配施小麦可增产32%, 籽粒Cd含量降低53%。结果说明在微碱性土壤上施用TSB和DHP可促进土壤Cd的形态转化, 降低土壤Cd的生物有效性, 降低小麦籽粒Cd积累。

关键词: 镉(Cd); 小麦; 改良剂; 弱碱性土壤; 烟秆生物炭(TSB); 磷酸氢二铵(DHP)

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5769-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202202074

Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils

YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, FU Hai-chao, QIN Shi-yu, WANG Long, LIU Hai-yang, LIU Hong-en, SUI Fu-qing*, ZHAO Peng*

(Key Laboratory of Soil Pollution Control and Remediation of Henan Province, College of Resource and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Soil cadmium (Cd) contamination has become a worldwide concern, and the remediation of contaminated soil is now an urgent task. Usually, the remediation of acid-contaminated soil is relatively easier than that of alkaline soils, and the remediation technologies used for acid-contaminated soil is also more developed. However, remediation technologies suitable for alkaline Cd-contaminated soil are still underdeveloped in northern China, which is also the main wheat producing area. In the present study, a pot experiment was set up to investigate the mechanism of Cd migration and transformation in alkaline soil (pH 7.8), as affected by tobacco stem biochar (TSB) and diammonium hydrogen phosphate (DHP). TSB (6.75 t·hm⁻², 10.12 t·hm⁻², calculated as 2250 t soil hm⁻²), DHP (2.88 t·hm⁻²), and their combination together with the control treatment were implemented in an artificial Cd-contaminated soil (5.0 mg·kg⁻¹), and their effects on soil pH, available Cd, Cd speciation, and Cd accumulation in wheat were investigated. The results showed that: ① the application of TSB and DHP significantly reduced soil available Cd content, and the 10.12 t·hm⁻² TSB application reduced the available Cd content by 44%. ② TSB and DHP changed Cd speciation markedly; 6.75 t·hm⁻²/10.12 t·hm⁻² TSB application decreased exchangeable Cd content by 48%-42% and increased iron manganese oxide-binding Cd content by 47%-67% and organic binding-Cd by 22%-38%, respectively. All treatments increased residual form Cd content, among which, the TSB and DHP combination treatment showed the highest increase (115%-217%). ③ All treatments significantly reduced Cd content in wheat roots, leaves, leaf sheaths, stems, glume, and grains. The 10.12 t·hm⁻² TSB treatment decreased wheat grain Cd content by 56% without yield penalty. Further, combined with DHP, wheat grain Cd content was decreased by 53% with a 32% grain yield increase. Taken together, all these results showed that the application of TSB and DHP in alkaline soils promotes Cd transformation and decreases its bioavailability and Cd accumulation in wheat grain.

Key words: Cd; wheat; amendments; alkaline soils; tobacco stem biochar (TSB); diammonium hydrogen phosphate (DHP)

根据2014年调查公报显示, 全国土壤总的污染点位超标率为16.1%, 其中镉(Cd)以7.0%的点位超标率排在无机污染物的首位, 土壤污染问题不容乐观^[1,2]。情况更糟糕的是, 调查表明土壤 ω (Cd)仍以每年0.004 mg·kg⁻¹的速度递增^[3], 如果这个趋势保持不变, 仅需50 a就可使土壤平均Cd含量翻倍^[1]。Cd通过植物进入食物链引起健康风险^[4-6]。Chaney^[7]于1980年提出了有毒元素进入食物链的“土壤-植物屏障”, 即元素本身的溶解性、向地上部分转运特性和植物毒性。与其他元素相比, 土壤中Cd有较高的溶解性和可移动性, 在植物中

向地上部转运活性较高和较低的植物毒性, 使得Cd非常容易穿越“土壤-植物屏障”积累在作物可食部分, 造成健康风险^[5,8,9]。

由于Cd不是植物的必需营养元素, 植物并没有进化出专门吸收Cd的机制, Cd以搭“顺风车”的方法进入植物体内^[4,5,10,11]。近年来引起广泛关注的

收稿日期: 2022-02-12; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 河南省自然科学基金项目(30602173); 河南省科技攻关项目(202102110213)

作者简介: 杨艳征(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: 2687232766@qq.com

* 通信作者, E-mail: fuqing.sui@henau.edu.cn; zhpddy@163.com

“Cd 大米”和“Cd 小麦”就是 Cd 超标导致的. 与水稻籽粒 Cd 超标问题同样值得关注的是^[12,13], 小麦向地上部分转运 Cd 的能力比水稻更高, 造成籽粒 Cd 容易超标^[14]. 小麦对北方人群 Cd 暴露贡献较高, 达到 11.8% 以上^[15]. 对于非吸烟人群来说, 超过 90% 的 Cd 都是通过食物链进入人体^[4], 因此降低作物可食部分的 Cd 含量对保障人体健康意义重大.

通过污染土壤修复安全利用是保障我国粮食和卫生安全的重要手段^[16]. 钝化剂修复具有较高的可操作性在 Cd 污染土壤修复中应用较好^[17~21]. 常用的修复剂主要有生物炭、含磷修复剂和黏土矿物等材料^[22,23]. 生物炭可以改善土壤结构, 增加土壤养分和微生物多样性, 还可以吸附固定重金属, 是一种最有潜力的改良剂^[24,25]. 磷酸盐可以促进 Cd 从活性较高的弱酸提取态向活性低的残渣态转变, 增加 Cd 的固定, 减少植物吸收^[26~28]. 生物炭和磷酸盐修复土壤重金属污染已有报道, 然而, 生物炭和磷酸盐对中国北方微碱性 Cd 污染土壤修复研究较少, 仍需加大研究力度. 本文在已有研究的基础上通过盆栽试验, 选用较为经济的烟秆生物炭 (tobacco stem biochar, TSB) 和磷酸氢二铵 (diammonium hydrogen phosphate, DHP) 为钝化剂, 分析不同钝化剂对土壤 pH, 土壤有效态 Cd 含量, 小麦生物量及 Cd 含量的影响, 通过筛选出治理效果较好的改良剂, 以期为我国北方 Cd 污染土壤安全利用提供技术依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自河南农业大学原阳县科教实践基地农田表层土壤(0~20 cm), 风干, 粉碎, 过 2 mm 筛. 供试土壤的基本理化性质为: pH 7.56, ω (有机质) 14.54 g·kg⁻¹, ω (碱解氮) 56.18 mg·kg⁻¹, ω (有效磷) 41.00 mg·kg⁻¹, ω (速效钾) 169.00 mg·kg⁻¹, 总 Cd 未检出. 试验位于郑州市河南农业

大学科教园区基地日光温室中 (113.60°E, 34.87°N). 暖温带亚湿润季风气候. 年平均气温 14.4℃, 7 月最热, 平均 27℃, 1 月最冷, 平均 0.1℃, 年平均降雨量 632 mm, 无霜期 220 d, 全年日照时间约 2 400 h.

1.2 试验处理

本文采用盆栽试验, 容器选择聚乙烯塑料花盆, 高为 25 cm, 直径 30 cm, 每盆装土 8 kg, 共 6 个处理(表 1), 3 个重复. 其中 TSB 24 g·盆⁻¹ 和 36 g·盆⁻¹ 的用量分别相当于大田 6.75 t·hm⁻² 和 10.12 t·hm⁻², DHP 的用量相当于大田 2.88 t·hm⁻². (以 20 cm 耕层土壤 2 250 t·hm⁻² 计).

为更好地评估改良剂的修复效果, 参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) pH>7.5 时土壤的风险管控值 ω (Cd) 为 4 mg·kg⁻¹, 本文采用人为污染土壤 ω (Cd) 为 5.0 mg·kg⁻¹. 以分析纯试剂 3CdSO₄·8H₂O (CAS 号: 7790-84-3) 为 Cd 源并以溶液形式加入土壤, 混匀, 稳定熟化 30 d 之后加入改良剂. 改良剂选用 DHP (分析纯, CAS 号: 7783-28-0, 购于国药集团) 和 TSB (限氧裂解法制备, 热解温度 400℃, 炭化 2 h). TSB 的基础理化性质见表 2. 改良剂加入之后稳定 14 d 施入基础肥料(尿素、磷酸二氢钾和氯化钾, 均为分析纯), 用量为每 kg 土壤 0.1 g N、0.15 g P₂O₅ 和 0.15 g K₂O. 磷和钾一次性施入, 氮一半基施, 一半在拔节期追施. 稳定 3 d 后于 2019 年 10 月 4 日播种小麦, 每盆 20 粒, 3 叶期定苗 6 株. 小麦品种为百农 207, 由河南科技学院提供.

表 1 不同处理试验设计

Table 1 Experimental treatment designing		
处理	TSB/g·盆 ⁻¹	(NH ₄) ₂ HPO ₄ /g·盆 ⁻¹
T1	0	0
T2	0	10.24
T3	24	0
T4	36	0
T5	24	10.24
T6	36	10.24

表 2 TSB 理化性质

Table 2 Physicochemical properties of biochar									
材料	pH	电导率 /mS·cm ⁻¹	ω (C) /%	ω (N) /%	ω (P) /mg·g ⁻¹	ω (K) /mg·g ⁻¹	ω (Ca) /mg·g ⁻¹	ω (Mg) /mg·g ⁻¹	比表面积 /m ² ·g ⁻¹
TSB	9.6	35.81	23.97	2.22	9.346	113.25	97.18	9.87	6.072

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品的处理测定

将土壤样品放在洁净牛皮纸上, 清除根系等杂物, 阴凉处风干. 研磨, 分别过 10 目和 100 目尼龙筛. 土壤基本理化性质参照土壤农化分析方法测定^[29]: 土壤 pH 测定水土质量比 2.5:1, 用 FE28 型

号 pH 计(梅特勒-托利多仪器公司)测定; 土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 土壤速效磷用 c(NaHCO₃) 0.5 mol·L⁻¹ 浸提-比色法测定; 速效钾用 c(NH₄OAc) 1 mol·L⁻¹ 浸提-火焰光度计法测定; 碱解氮用 c(NaOH) 1 mol·L⁻¹ 碱解扩散法测定.

土壤 Cd 形态分级采用 Tessier 连续提取法测

定^[30]; 土壤有效态 Cd 含量用 $c(\text{DTPA}) 0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} + c(\text{CaCl}_2) 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} + c(\text{TEA}) 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 混合溶液 (pH, 7.30) 浸提, 用原子吸收分光光度计 (ZEEnit700, 德国耶拿) 测定。

1.3.2 植株样品的处理与测定

小麦成熟后采集根、茎、叶、叶鞘、颖壳和籽粒样品, 70℃ 烘干 3 d, 称重, 粉碎, 过 2 mm 筛。称取 0.25 g 左右样品放入石墨消解管, 加入混酸 ($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$, 87:13, 体积比) 5 mL 置于石墨电热消解炉 (ED54, Lab TEC) 上, 按以下程序消解: 升温至 60℃, 保持 1 h; 升温至 120℃, 保持 1 h; 升温至 150℃, 保持 1 h; 升温至 190℃, 保持 1~2 h 赶酸, 定容。用原子吸收分光光度计测定 Cd 浓度 (ZEEnit700, 德国耶拿)。

1.3.3 标准品的加入与质量控制

所有样品测试过程中, 分别添加土壤成分分析标准物质 (GBW07427) 和小麦粉成分分析标准物质 [GBW(E)100496] 进行质量控制。总体加标回收率为 95%~105%, 表明测试结果准确可靠。

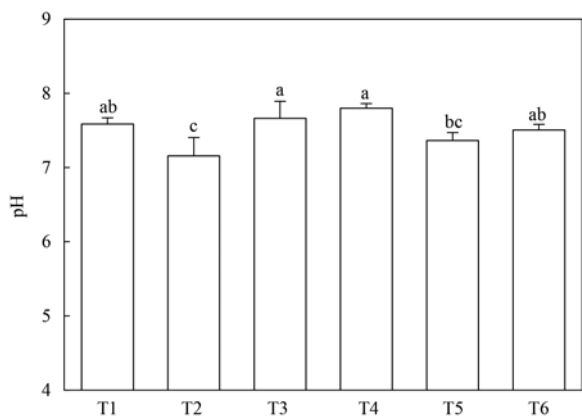
1.4 数据分析

采用 Microsoft office 2010 整理数据, Sigma plot 14 绘图, 利用 R 进行相关性分析绘图, 利用 Canoco5 进行主成分分析 (principal component analysis, PCA)。图中数据展示的是平均值 $\pm$ SD。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对土壤 pH 的影响

土壤 pH 可显著影响重金属的形态和有效性^[1,24~26]。不同改良剂对土壤 pH 的影响如图 1 所示。T2 处理土壤 pH 显著降低, 与 T1 相比降低了 0.43 个单位; TSB T3 和 T4 处理分别使土壤 pH 增加了 0.08 和 0.23 个单位, 土壤 pH 随着 TSB 用量



不同小写字母表示统计学显著性差异,

Tukey's test, $P < 0.05$, $n = 3$

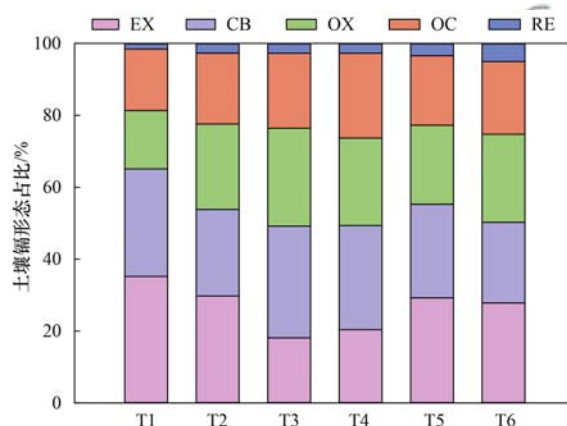
图 1 不同改良剂处理对土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil pH

的增加而增加, 处理间无显著性差异。T5 和 T6 使土壤 pH 减少 0.08~0.22 个单位, 说明 DHP 对土壤 pH 值影响较大, DHP 降低了土壤 pH, 配合施用 TSB 可缓解土壤 pH 的下降。

2.2 不同改良剂对土壤 Cd 形态的影响

所有处理均能降低土壤 EX-Cd 和 CB-Cd 含量, 其中 T6 降低幅度较大 (图 2)。T1 (对照处理) 中 EX-Cd 和 CB-Cd 所占比例较高, 其和为 65%。施加改良剂之后 EX-Cd 含量下降, OX-Cd、OC-Cd 和 RE-Cd 含量上升。与 T1 相比, T3 和 T4 降低了 48% 和 42% 的 EX-Cd, 同时分别比 T1 增加 47%~67% 和 22%~38% 的 OX-Cd 和 OC-Cd。与 T1 相比所有处理都使 RE-Cd 增加, T2 残渣态增加 68%, T3 和 T4 均增加 72%, T5 和 T6 增加 115%~217%。



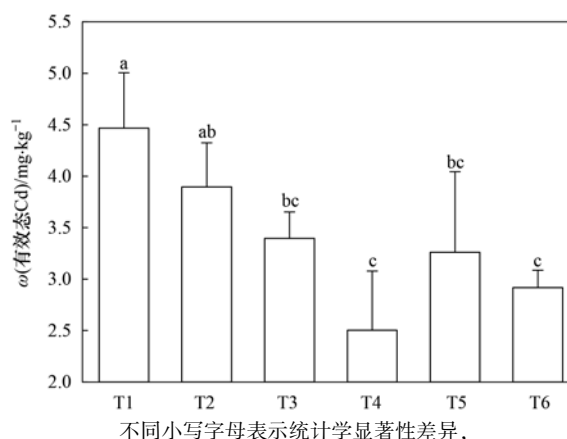
EX 表示可交换态, CB 表示碳酸盐结合态, OX 表示铁锰氧化物结合态, OC 表示有机结合态, RE 表示残渣态

图 2 不同改良剂对土壤 Cd 形态分级的影响

Fig. 2 Effects of different amendmens on soil Cd fraction

2.3 不同改良剂对土壤有效态 Cd 含量的影响

不同改良剂均可降低土壤有效态 Cd 含量 (图 3)。T2 与 T1 相比土壤有效态 Cd 含量降低



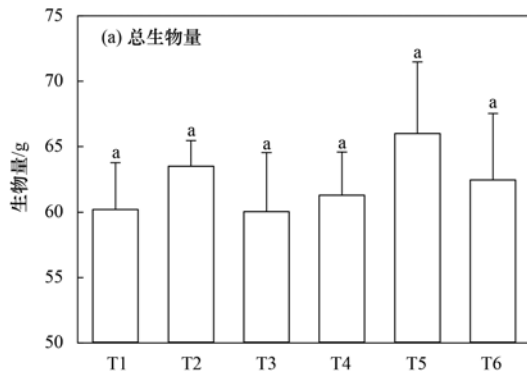
不同小写字母表示统计学显著性差异,

Tukey's test, $P < 0.05$, $n = 3$

图 3 不同改良剂处理对土壤有效 Cd 含量的影响

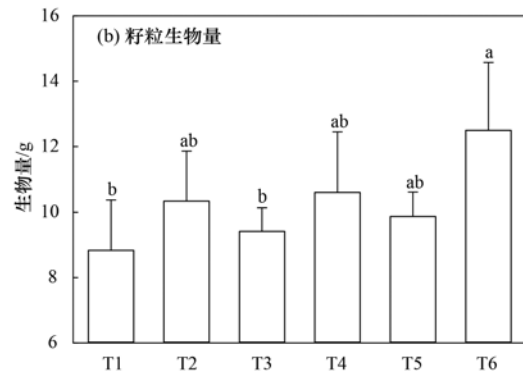
Fig. 3 Effects of different amendment treatments on soil available Cd content

13%; TSB 处理 T3 和 T4 均显著降低了土壤有效态 Cd 含量, 降低幅度分别为 24% 和 44%, 其中 T4 处理对土壤有效态 Cd 含量降低幅度较大. 混施 T5 和 T6 处理显著降低了 27% 和 35% 有效态 Cd 含量, 所有处理中 T4 和 T6 效果最好, T3 和 T5 次之.



2.4 不同改良剂对小麦生物量的影响

小麦总生物量是包括根系、地上部分和籽粒的总体生物量. 由图 4 可知不同改良剂对小麦总生物量影响未达显著水平. 然而 T6 与 T1 相比小麦籽粒增产 32%, 说明 TSB 和 DHP 的添加改良了土壤, 增加了土壤肥力, 从而提高小麦产量.



不同小写字母表示统计学显著性差异, Tukey's test, $P < 0.05$, $n = 3$

图 4 不同改良剂对小麦生物量的影响

Fig. 4 Effects of different amendments on wheat biomass

2.5 不同改良剂对小麦不同部位 Cd 含量的影响

由图 5 可知, 所有处理除 T2 外均可显著降低小麦各部位的 Cd 含量. 不同部位 Cd 含量为: 根 > 茎 > 叶 > 叶鞘 > 颖壳. T3、T4 和 T6 处理显著降低小麦根系 Cd 含量, T3 和 T4 处理效果较好, 小麦根系 Cd 含量降低 37%~41% [图 5(a)]. T3 和 T4 处理小麦茎 Cd 含量分别降低 29% 和 39%, T5 和 T6 处理小麦茎 Cd 含量降低 21% 和 43%, T6 处理降低幅度最大 [图 5(b)]. T3 和 T4 处理小麦叶片 Cd 含量分别降低 28% 和 32%, T4 幅度较大. T5 和 T6 分别显著降低 13%~39% 的小麦叶片 Cd 含量 [图 5(c)]. T3 和 T4 小麦叶鞘的 Cd 含量分别降低 38% 和 65%, 且 T4 降幅较大. 混施处理 T5 和 T6 小麦叶鞘 Cd 含量显著降低 18%~66% [图 5(d)]. TSB T3 和 T4 处理小麦颖壳 Cd 含量降低 26% 和 41%; 混施处理 T5 和 T6 小麦颖壳 Cd 含量降低明显, 降幅为 12%~35% [图 5(e)].

2.6 不同改良剂对籽粒 Cd 含量的影响

所有处理除 T2 外均显著降低小麦籽粒 Cd 含量 (图 6). TSB T3 和 T4 处理降低小麦籽粒 Cd 含量的 42% 和 56%. T5 和 T6 处理降低了小麦籽粒 Cd 含量的 22% 和 53%. 所有处理中 T4 处理对小麦籽粒 Cd 含量降幅最大.

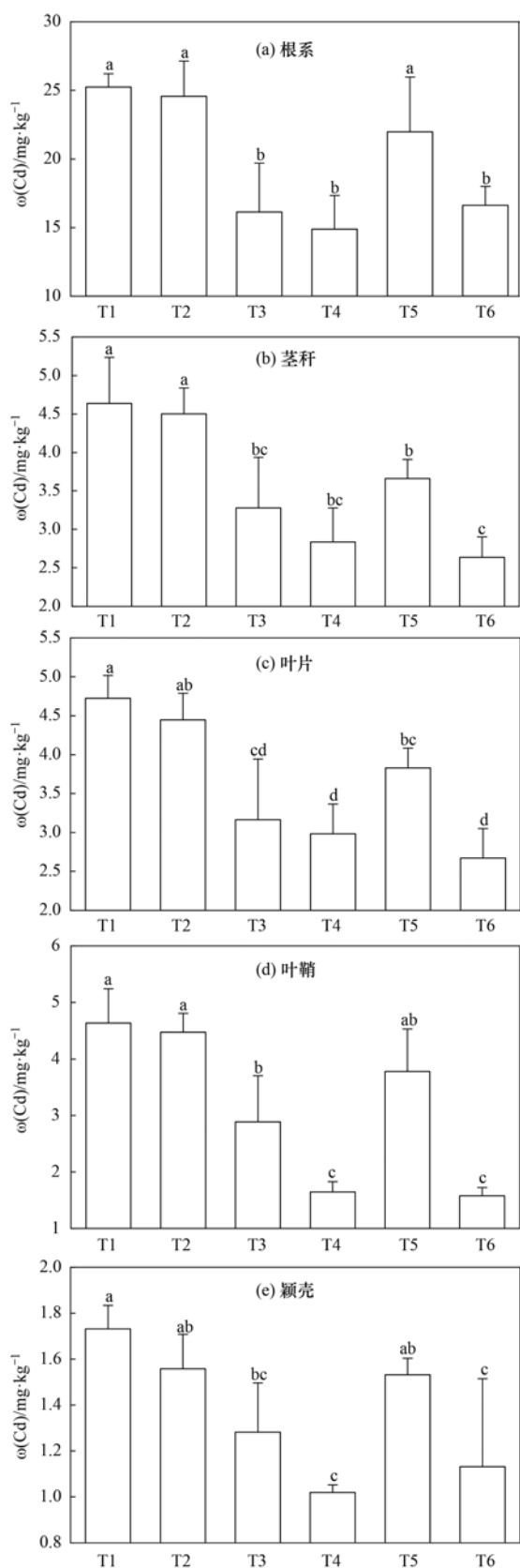
2.7 籽粒 Cd 含量影响因素分析

为了更好地理解影响小麦籽粒 Cd 积累的因素, 本文分析了小麦各部位和土壤不同 Cd 形态以及 pH 和有效态 Cd 含量之间的皮尔逊相关性. 结果表明小麦籽粒 Cd 含量与小麦颖壳、根系、茎秆、

叶片和叶鞘等植物部位 Cd 含量存在极显著相关性, 与土壤中 EX-Cd 和有效态 Cd 含量有极显著相关关系. 颖壳 Cd 含量与根系、茎秆、叶片、叶鞘和土壤有效态 Cd 含量呈极显著相关关系, 与土壤 pH 值呈显著负相关. 茎秆 Cd 含量与叶片和叶鞘 Cd 含量以及土壤有效态 Cd 含量呈极显著相关关系. 叶片 Cd 含量与叶鞘 Cd 含量极显著正相关, 同时与土壤中 EX-Cd、CB-Cd 和土壤有效态 Cd 含量呈极显著正相关, 与土壤中 OX-Cd 和 OC-Cd 呈显著正相关. 土壤中 CB-Cd、OX-Cd 和 OC-Cd 含量之间呈现极显著相关关系 (图 7).

2.8 土壤环境因子与小麦生理指标的主成分分析

本文进一步将土壤环境因子对小麦 Cd 含量的影响进行了主成分分析 (图 8). 第一和第二主成分分别解释了 88.24% 和 8.42% 变量变化, 两个主成分解释了 96.66% 的总方差. PC1 与籽粒和颖壳 Cd 含量、CB-Cd 和 OX-Cd 呈高度正相关, 与改良剂含量和土壤 pH 呈高度负相关. PC2 与产量和总生物量呈高度正相关. 因此, 这两个主成分可以反映处理对土壤 Cd 形态和小麦 Cd 吸收的综合作用. 不同处理间差异较大. T1 和 T2 主要分布在第一和第四象限, 小麦对 Cd 的吸收较多, T4、T5 和 T6 主要分布在第二和第三象限, 小麦对 Cd 的吸收较少. 土壤 pH 与有效态 Cd 含量和根系 Cd 含量呈显著负相关. 施加改良剂会增加土壤 pH, 降低土壤有效 Cd 含量, 进而减少小麦根系对 Cd 的吸收. 小麦籽粒、颖壳和叶片 Cd 含量与土壤有效 Cd 和水溶态 Cd 的相关性较好. 小麦根系 Cd 含量与土壤 CB-Cd 和

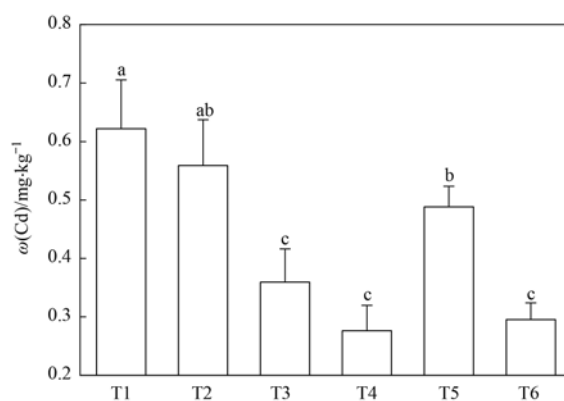


不同小写字母表示统计学显著性差异, Tukey's test, $P < 0.05$, $n = 3$

图5 不同改良剂对小麦植株 Cd 吸收转运的影响

Fig. 5 Effects of different amendments on Cd uptake and translocation in wheat

OX-Cd 的相关性较好. 表明不同改良剂通过改变土壤 Cd 而影响小麦对 Cd 的吸收, 这与本文前面的结



不同小写字母表示统计学显著性差异,

Tukey's test, $P < 0.05$, $n = 3$

图6 不同改良剂处理对小麦籽粒 Cd 含量的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on wheat grain Cd content

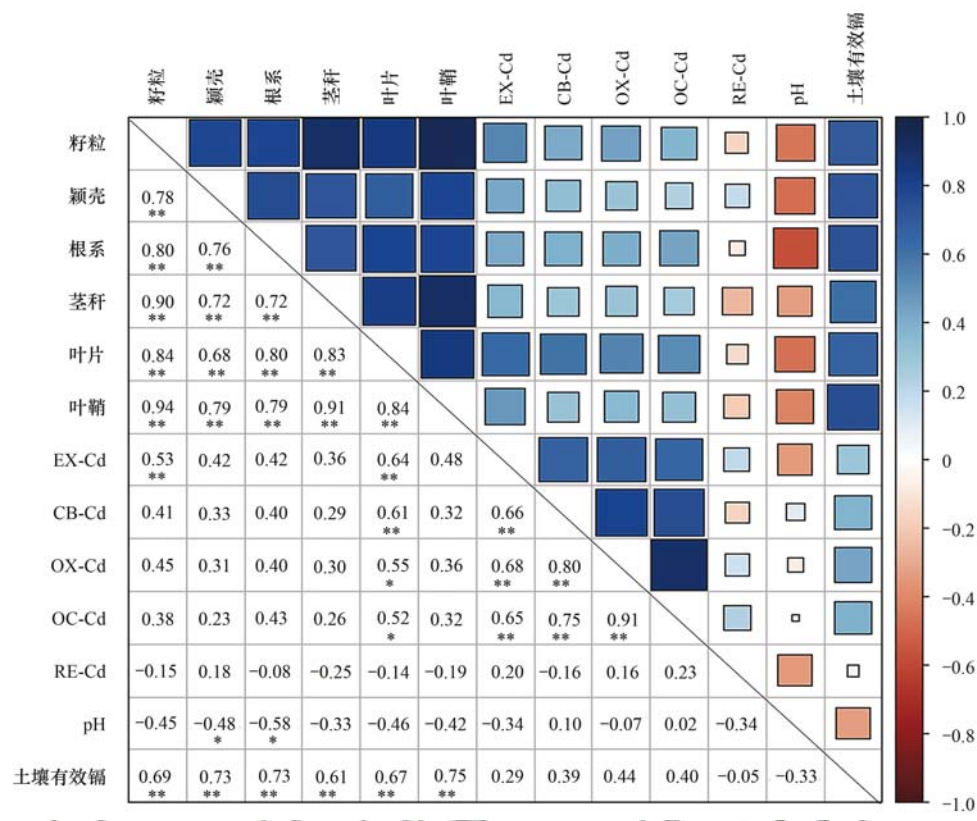
果一致.

3 讨论

3.1 不同改良剂对土壤 pH 和土壤 Cd 的植物有效性的影响

pH 值可以极大地影响土壤 Cd 的生物有效性^[1,31]. 有研究表明土壤 pH 值每下降一个单位, 土壤溶液中的 Cd 可增加 4.5 倍^[32]. 因此很多研究通过提高土壤 pH 的方法来降低土壤 Cd 的有效性而降低作物可食部分的 Cd 积累^[33~37]. 在南方酸性土壤上施用碳酸钙等碱性物料提高土壤 pH 值可显著降低水稻籽粒 Cd 含量^[37], 效果可持续两年以上^[33]. 我国北方受污染耕地土壤基本都是碱性或微碱性, 一般来讲土壤 Cd 的有效性并不高, 然而在我国北方受污染农田中小麦 Cd 超标问题仍然比较严重.

目前, 虽然针对北方碱性或微碱性 Cd 污染土壤修复已有一定研究^[36,38,39], 总体上仍有效果不稳定和机制不明确等问题, 需加大研究力度. 本文探索了 TSB 和 DHP 在北方微碱性 Cd 污染土壤的修复效果. TSB 增加了土壤的 pH 值, 这是因为生物炭本身呈碱性. 生物炭的 pH 值与碳化温度有关, 一般温度越高生物炭的 pH 值越高, 但大都呈碱性可增加土壤 pH 值^[40]. DHP 降低了土壤 pH 则是因为 DHP 中 NH_4^+ 的硝化作用所致. pH 值的改变可以显著影响土壤 Cd 的赋存形态而改变土壤 Cd 的植物有效性. 刘阿梅等^[41]的研究发现生物炭明显提高了土壤 pH 值, 随添加量的增加而增大, pH 值提高会增加金属离子的吸附, 减少植物的吸收. 赵晶等^[42]的研究发现增施磷肥能降低土壤 pH 值. 周志云^[43]向石灰性土壤施用磷酸改性生物炭有利于土壤 Cd 的固定.



蓝色表示显著正相关, 红色表示显著负相关; 不同正方形的面积表示相关性的 大小, 显著性: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

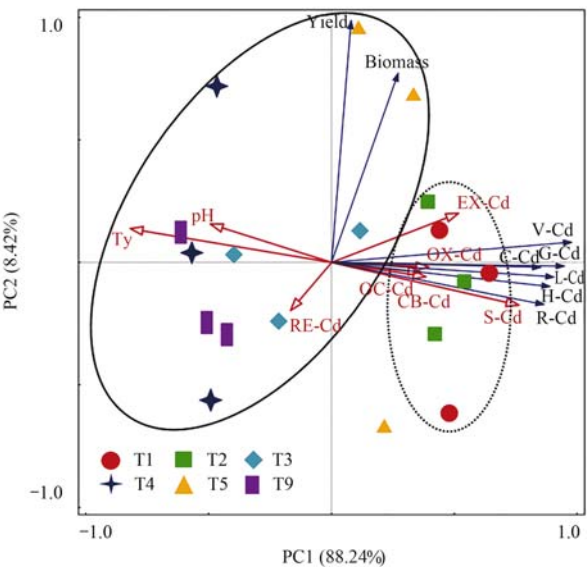
图 7 成熟期小麦各部位 Cd 含量及土壤 Cd 含量的皮尔逊相关性分析

Fig. 7 Pearson correlation analysis of Cd concentration in different parts of wheat and soil at mature period

3.2 不同改良剂对土壤 Cd 的赋存形态和植物有效性的影响

生物炭具有较大的比表面积和丰富的官能团, 可改变 Cd 的赋存形态而影响植物对 Cd 的吸收^[44~48]. 通过对 2009 ~ 2020 年之间发表的 65 篇论文的分析可知, 生物炭增加土壤 pH 值和电导率, 平均降低 42.1% 的土壤可提取态 Cd 含量^[49]. 花生壳生物炭改性后稳定性提升, 更可通过物理阻控、沉淀、共沉淀、内表面络合和离子交换等机制提高对 Cd 的钝化能力^[50]. 亚铁酸钾改性制得的分层次多孔磁性小麦秸秆生物炭无论在水中还是在土壤中对 Cd 均有较好的固定效果, $\omega(\text{C})$ 为 1% 的添加培养 60 d 可增加土壤 pH 值, 降低土壤 47.97% ~ 61.38% 可提取态 Cd^[44].

磷酸盐可通过对 Cd 的吸附沉淀影响 Cd 的有效性. 水环境中磷酸盐在 pH 4 ~ 9 的范围内均可显著降低溶液中的 Cd^{2+} 浓度, pH < 5 的情况下形成 $\text{Cd}_3(\text{H}_2\text{PO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 在 pH = 7 左右形成 $\text{Cd}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{Cd}_5\text{H}_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, pH ≥ 8.5 则形成无定形磷酸 Cd 沉淀^[51]. 有研究表明磷酸盐通过促进螯合作用显著改善多年生黑麦草 Cd 毒害并降低黑麦草对 Cd 的吸收^[52]. 磷酸盐减轻植物受 Cd 的胁迫, 降低植物对 Cd 的吸收, 降低



R-Cd 表示小麦根系 Cd 含量, C-Cd 表示颖壳 Cd 含量, G-Cd 表示籽粒 Cd 含量, H-Cd 表示茎秆 Cd 含量, L-Cd 表示叶 Cd 含量, V-Cd 表示叶鞘 Cd 含量, S-Cd 表示土壤有效态 Cd 含量, EX-Cd 表示可交换态 Cd, CB-Cd 表示碳酸盐结合态 Cd, OX-Cd 表示铁锰氧化物结合态 Cd, OC-Cd 表示有机结合态 Cd, RE-Cd 表示残渣态 Cd, Ty 表示改良剂含量, Yield 表示小麦产量, Biomass 表示小麦总生物量

图 8 土壤中环境因子与成熟期小麦生理指标的主成分分析

Fig. 8 PCA analysis between soil environment factors and physiological indexes of wheat

Cd 向地上部分转移比例^[53]。有研究表明磷酸盐与生物炭联合施用可降低玉米对 Cd 的吸收, 降低玉米籽粒 Cd 含量^[54]。Cui 等^[55]采用 3 种不同粒径磷灰石修复重金属污染土壤, 结果表明磷灰石可降低土壤中 27.4% 的有效态 Cd。施用磷酸盐可使土壤 Cd 由交换态向残渣态转化, 可降低水稻精米 Cd 积累的 35.8%^[56]。

有研究发现施用改良剂后土壤 Cd 的可交换态和碳酸盐结合态减少, 残渣态增加^[57]。在北方微碱性土壤上施用生物炭可显著提高残渣态 Cd 含量, 降低土壤有效态 Cd 含量, 降低小麦对 Cd 的吸收^[36]。本文 TSB 显著降低水溶态 Cd 和碳酸盐结合态 Cd 含量, 增加氧化物结合态和有机结合态(图 2), 且土壤有效 Cd 降低 24%~44% (图 3)。TSB 和 DHP 配施显著增加了氧化物结合态和有机结合态 Cd 含量, 降低 27%~34% 土壤有效态 Cd 含量(图 2 和图 3), 高剂量的 TSB 和 DHP 混施, 能进一步降低土壤态 Cd。这些结果与前人研究一致^[36,57], 表明 TSB 和 DHP 可促进北方碱性土壤上 Cd 的形态转化, 降低其植物有效性。

3.3 不同改良剂对小麦 Cd 吸收的影响

小麦作为三大主粮作物之一, 在居民日常生活中消费量很大, 保障小麦粮食卫生安全意义重大。与水稻和玉米相比, 小麦由于 Cd 向地上部分转移效率较高而造成籽粒容易超标^[14]。本文选取的改良剂均可降低小麦根、茎、叶和颖壳 Cd 含量, 且随施用量的增加而降幅增大(图 5)。DHP 未能显著降低小麦籽粒 Cd 含量(图 6), 而两者配施显著降低了小麦籽粒 Cd 含量(图 6), 这并不是说 DHP 没有发挥作用, DHP 显著增加了小麦籽粒产量[图 4 (b)], 说明 TSB 和 DHP 配施能够在保证产量的前提下降低小麦籽粒对 Cd 的积累。张静静等^[36]的研究也发现生物炭在北方微碱性土壤施用可降低小麦籽粒 Cd 的积累。尾矿区受污染耕地中添加磷酸盐可显著降低对 Cd 的吸收^[58]。此外, 在玉米^[54]、多年生黑麦草^[52]、高羊茅草^[53]和菠菜^[35]等植物上研究也发现磷酸盐能显著降低植物对 Cd 的吸收, 这与本试验的结果一致。

4 结论

(1) TSB 和 DHP 对微碱性土壤 pH 影响不大, 但是可降低土壤交换态和碳酸盐结合态 Cd 含量, 提高氧化物结合态和有机结合态 Cd 含量, 降低土壤 Cd 的生物有效性。

(2) TSB 和 DHP 均可降低小麦籽粒 Cd 含量, 两者配施可保证小麦产量不受影响。

参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 750-759.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1689-1692. Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the report on the national general survey of soil contamination [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [3] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [4] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, *et al.* Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning [J]. *Trends in Plant Science*, 2013, **18**(2): 92-99.
- [5] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, **67**: 489-512.
- [6] Ma W Y, Sun T, Xu Y M, *et al.* In-situ immobilization remediation, soil aggregate distribution, and microbial community composition in weakly alkaline Cd-contaminated soils: A field study [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118327.
- [7] Chaney R L. Health risks associated with toxic metals in municipal sludge [A]. In: Bitton G (Ed.). *Sludge: Health Risks of Land Application* [M]. Michigan: Ann Arbor Science Publications, 1980.
- [8] Zhao F J, Wang P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies [J]. *Plant and Soil*, 2020, **446**(1-2): 1-21.
- [9] Qu J H, Yuan Y H, Zhang X M, *et al.* Stabilization of lead and cadmium in soil by sulfur-iron functionalized biochar: performance, mechanisms and microbial community evolution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **425**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127876.
- [10] Zhao F J, Tang Z, Song J J, *et al.* Toxic metals and metalloids: uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food [J]. *Molecular Plant*, 2022, **15**(1): 27-44.
- [11] Huang S, Wang P T, Yamaji N, *et al.* Plant nutrition for human nutrition: hints from rice research and future perspectives [J]. *Molecular Plant*, 2020, **13**(6): 825-835.
- [12] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 346-351.
- [13] Chen H P, Tang Z, Wang P, *et al.* Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 482-490.
- [14] Sui F Q, Chang J D, Tang Z, *et al.* Nramp5 expression and functionality likely explain higher cadmium uptake in rice than in wheat and maize [J]. *Plant and Soil*, 2018, **433**(1-2): 377-389.
- [15] Song Y, Wang Y B N, Mao W F, *et al.* Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0177978.
- [16] Tang L, Hamid Y, Zehra A, *et al.* Endophytic inoculation coupled with soil amendment and foliar inhibitor ensure phytoremediation and Argo-production in cadmium contaminated soil under oilseed rape-rice rotation system [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **748**, doi: 10.1016/j.scitotenv.

2020. 142481.
- [17] Rehman M Z U, Khalid H, Akmal F, *et al.* Effect of limestone, lignite and biochar applied alone and combined on cadmium uptake in wheat and rice under rotation in an effluent irrigated field[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **277**: 560-568.
- [18] Cui H B, Bao B L, Cao Y, *et al.* Combined application of ferrihydrite and hydroxyapatite to immobilize soil copper, cadmium, and phosphate under flooding-drainage alternations [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118323.
- [19] Jiang Y, Zhou H, Gu J F, *et al.* Combined amendment improves soil health and brown rice quality in paddy soils moderately and highly Co-contaminated with Cd and As [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **295**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118590.
- [20] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, *et al.* Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review [J]. *Environment International*, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105046.
- [21] Liang X F, Li N, He L Z, *et al.* Inhibition of Cd accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in alkaline soil using mercapto-modified attapulgite [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 818-826.
- [22] Lahori A H, Guo Z Y, Zhang Z Q, *et al.* Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: prospects and challenges[J]. *Pedosphere*, 2017, **27**(6): 991-1014.
- [23] Gong Y Y, Zhao D Y, Wang Q L. An overview of field-scale studies on remediation of soil contaminated with heavy metals and metalloids: technical progress over the last decade[J]. *Water Research*, 2018, **147**: 440-460.
- [24] Chen D, Guo H, Li R Y, *et al.* Low uptake affinity cultivars with biochar to tackle Cd-tainted rice-A field study over four rice seasons in Hunan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 1489-1498.
- [25] Lan J R, Zhang S S, Dong Y Q, *et al.* Stabilization and passivation of multiple heavy metals in soil facilitating by pinecone-based biochar: mechanisms and microbial community evolution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126588.
- [26] 王璨, 张煜行, 何明靖, 等. 不同土壤调理剂对土壤镉和邻苯二甲酸酯迁移转化影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 4024-4036.
- Wang C, Zhang Y H, He M J, *et al.* Influence of different soil conditioner on the transfer and transformation of cadmium and phthalate esters in soil[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 4024-4036.
- [27] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 389-398.
- Zhao Q Y, Li X M, Yang Q, *et al.* Passivation of simulated Pb- and Cd-contaminated soil by applying combined treatment of phosphate, humic acid, and fly ash[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 389-398.
- [28] 霍洋, 仇银燕, 周航, 等. 外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4719-4725.
- Huo Y, Qiu Y Y, Zhou H, *et al.* Effects of exogenous phosphorus on rice growth and cadmium accumulation and transportation under cadmium stress[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4719-4725.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [31] Wang A S, Angle J S, Chaney R L, *et al.* Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant and Soil*, 2006, **281**(1-2): 325-337.
- [32] Wang J, Wang P M, Gu Y, *et al.* Iron-manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2500-2508.
- [33] Chen H P, Zhang W W, Yang X P, *et al.* Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain [J]. *Chemosphere*, 2018, **207**: 699-707.
- [34] Bolan N S, Adriano D C, Mani P A, *et al.* Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, **251**(2): 187-198.
- [35] Tan W N, Li Z A, Qiu J, *et al.* Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in South China[J]. *Pedosphere*, 2011, **21**(2): 223-229.
- [36] 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.
- [37] Liao P, Huang S, Zeng Y J, *et al.* Liming increases yield and reduces grain cadmium concentration in rice paddies: a meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2021, **465**(1-2): 157-169.
- [38] 朱利楠, 化党领, 杨金康, 等. 不同改良剂对微碱性土壤镉形态及小麦吸收的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(8): 3559-3566.
- Zhu L N, Hua D L, Yang J K, *et al.* Effects of different amendments on chemical speciation and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by Cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3559-3566.
- [39] 杨金康, 朱利楠, 杨秋云, 等. 硅钙镁肥和改性腐殖酸对土壤镉形态和小麦镉积累的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, **37**(6): 808-816.
- Yang J K, Zhu L N, Yang Q Y, *et al.* Effects of silicon-calcium-magnesium fertilizer and modified humic acid on soil cadmium chemical fractions and accumulation in wheat [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(6): 808-816.
- [40] Fu Q, Zhao H, Li H, *et al.* Effects of biochar application during different periods on soil structures and water retention in seasonally frozen soil areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133732.
- [41] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(5): 193-198, 204.
- Liu A M, Xiang Y C, Tian D K, *et al.* Effects of biochar on plant growth and uptake of heavy metal cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(5): 193-198, 204.
- [42] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(5): 953-961.
- Zhao J, Feng W Q, Qin Y S, *et al.* Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**

- (5): 953-961.
- [43] 周志云. 磷酸改性生物炭和氯化物混施对小麦吸收铅镉的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
Zhou Z Y. Effects of phosphoric-acid modified biochar combined with chlorine on lead and cadmium adsorption in wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018.
- [44] Fu H C, Ma S L, Xu S J, *et al.* Hierarchically porous magnetic biochar as an efficient amendment for cadmium in water and soil: performance and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2021, **281**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130990.
- [45] O'Connor D, Peng T Y, Zhang J L, *et al.* Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 815-826.
- [46] 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.
- [47] Hussain B, Umer M J, Li J M, *et al.* Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125557.
- [48] Li H B, Dong X L, Da Silva E B, *et al.* Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications [J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 466-478.
- [49] Albert H A, Li X, Jeyakumar P, *et al.* Influence of biochar and soil properties on soil and plant tissue concentrations of Cd and Pb: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **755**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142582.
- [50] Qiu Z, Chen J H, Tang J W, *et al.* A study of cadmium remediation and mechanisms: Improvements in the stability of walnut shell-derived biochar [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 80-84.
- [51] Matusik J, Bajda T, Manecki M. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 1332-1339.
- [52] Jia H, Hou D Y, O'Connor D, *et al.* Exogenous phosphorus treatment facilitates chelation-mediated cadmium detoxification in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **389**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121849.
- [53] Li Y P, Sun M J, He W, *et al.* Effect of phosphorus supplementation on growth, nutrient uptake, physiological responses, and cadmium absorption by tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) exposed to cadmium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **213**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112021.
- [54] Li J F, Zhang S R, Ding X D. Biochar combined with phosphate fertilizer application reduces soil cadmium availability and cadmium uptake of maize in Cd-contaminated soils [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(17): 25925-25938.
- [55] Cui H B, Shi Y, Zhou J, *et al.* Effect of different grain sizes of hydroxyapatite on soil heavy metal bioavailability and microbial community composition [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **267**: 165-173.
- [56] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(2): 314-320.
Wang L, Xu Y M, Sun G H, *et al.* Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, **21**(2): 314-320.
- [57] 黄黎粤, 丁竹红, 胡忻, 等. 生物炭施用对小麦和玉米幼苗根际和非根际土壤中 Pb、As 和 Cd 生物有效性的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(2): 348-355.
Huang L Y, Ding Z H, Hu X, *et al.* Effects of biochars on bioavailability of Pb, As, and Cd in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of corn and wheat seedlings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(2): 348-355.
- [58] Wang B L, Xie Z M, Chen J J, *et al.* Effects of field application of phosphate fertilizers on the availability and uptake of lead, zinc and cadmium by cabbage (*Brassica chinensis* L.) in a mining tailing contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(9): 1109-1117.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)