

目次

- 中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
- 交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
- 基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)
- 基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
- 高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
- 北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
- 碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)
- 中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
- 2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
- 疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
- 苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
- 湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
- 邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
- 聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
- 高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
- 北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
- 高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
- 水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
- 黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)
- 藏东多曲河流域锑富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
- 西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
- 基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)
- 丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
- 金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
- 德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
- 典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
- 抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
- 过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
- 矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
- 生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
- 微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
- 紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
- 土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
- 鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
- 典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
- 污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
- 宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
- 大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
- 基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
- 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
- 长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
- 土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
- 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
- 基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
- 防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
- 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
- 冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
- 辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
- 高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
- 生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
- 太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
- 基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
- 基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
- 西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
- 重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
- 金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
- 赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
- 施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果

刘龙宇^{1,2}, 杨世利¹, 赵黄诗雨^{1,2}, 常凯威^{1,3}, 余江^{1,2,3*}

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

摘要:为实现重金属复合污染(Pb、Zn、Cu和Cd)土壤同步修复, 构建土壤-小白菜体系, 探究赤泥(RM)、纳米赤泥(RMn)以及纳米赤泥负载纳米零价铁(RMn-nZVI)这3种不同赤泥基钝化剂对Pb、Zn、Cu和Cd复合污染土壤的修复效果与机制, 并考察土壤中Pb、Zn、Cu和Cd形态分布对小白菜积累Pb、Zn、Cu和Cd的控制作用. 结果显示, 3种钝化剂施用可显著提高土壤pH, 降低土壤酸可提取态(F1)Pb、Zn、Cu和Cd含量, 增加残渣态(F4)含量, 最终钝化效果表现为: RMn-nZVI>RMn>RM. 此外, 3种钝化剂显著降低了小白菜可食用部分Pb、Zn、Cu和Cd的积累, 其中RMn-nZVI处理下降程度最高, Pb、Zn、Cu和Cd含量分别下降35.11%、45.05%、69.52%和59.63%. 结果表明, 纳米赤泥负载纳米零价铁新型钝化材料在重金属复合污染土壤修复领域具有一定的应用潜力.

关键词: 赤泥; 纳米零价铁; 钝化; 重金属; 污染土壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2473-06 DOI: 10.13227/j.hjks.202305043

Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil

LIU Long-yu^{1,2}, YANG Shi-li¹, ZHAO Huang-shi-yu^{1,2}, CHANG Kai-wei^{1,3}, YU Jiang^{1,2,3*}

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

Abstract: In order to realize the simultaneous remediation of heavy metal composite-contaminated (Pb, Zn, Cu, and Cd) soils, a soil-pakchoi system was established to study the effect and mechanism of three passivators, red mud (RM), nano red mud (RMn), and nano red mud loaded with nano zero-valent iron (RMn-nZVI), on the remediation of Pb, Zn, Cu, and Cd composite-contaminated soils and to explore the effect of soil Pb, Zn, Cu, and Cd morphological distribution on the control of Pb, Zn, Cu, and Cd accumulation. The results showed that the application of the three passivators significantly increased the soil pH, reduced the content of Pb, Zn, Cu, and Cd in the acid-extractable state (F1), and increased the content of the residue state (F4). The final passivation effect showed that RMn-nZVI>RMn>RM. In addition, the three passivators significantly reduced the accumulation of Pb, Zn, Cu, and Cd in the edible fraction of pakchoi; the RMn-nZVI treatment showed the highest reduction, with Pb, Zn, Cu, and Cd decreasing by 35.11%, 45.05%, 69.52%, and 59.63%, respectively. This study showed that the new passivation material of nano red mud loaded with nano zero-valent iron has certain potential for application in the field of remediation of heavy metal composite-contaminated soils.

Key words: red mud; nano zero-valent iron; passivation; heavy metal; polluted soil

随着城市化和工业化的快速发展, 土壤重金属污染问题日益突出, 重金属污染治理已成为城市可持续发展与生态保护的“瓶颈”^[1,2]. 在已有的众多土壤重金属污染修复技术中, 土壤原位钝化技术因操作简单、效果较好、成本低, 被认为是适合工程化施工的方法之一^[3].

赤泥是精选冶炼铝土矿过程中排出的呈碱性的工业废弃物^[4]. 以往研究表明单独施用赤泥或将赤泥与其它材料配合施用后可以钝化土壤中重金属、降低重金属有效态含量, 且可提高农作物产量^[5~7]. 此外, 纳米零价铁(nZVI)具有比表面积大、良好的反应活性以及强还原性等优点, 是一种很有前途的环境修复材料, 但因在环境中易氧化或团聚, 一定程度限制了其广泛应用, 大量研究发现将纳米零价铁负载于其它材料可提高性能^[8,9]. 但目前学者们集中于研究探讨生物炭等材料负载纳米零价铁修复污

染土壤效果^[9,10], 尚没有通过赤泥钝化材料负载nZVI的相关研究报道, 因此赤泥与纳米零价铁的结合使用对重金属复合污染土壤的修复效果尚不明确. 为此, 本研究以赤泥(RM)为基础材料, 通过液相还原制备得到纳米赤泥负载纳米零价铁(RMn-nZVI)新型复合材料, 通过探究该新型复合材料施用对复合重金属污染(Pb、Zn、Cu和Cd)土壤修复效果及内在机制, 同时探讨了土壤Pb、Zn、Cu和Cd形态分布对小白菜积累4种重金属的控制作用, 以为治理土壤重金属复合污染问题提供科学的参考.

收稿日期: 2023-05-06; 修订日期: 2023-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802605); 四川省区域创新项目(2022YFQ0081); 成都市科技局重点研发支撑计划项目(2022-YF05-00357-SN)

作者简介: 刘龙宇(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染治理, E-mail: 1433862865@qq.com

* 通信作者, E-mail: yuj@scu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自川南某矿区周边农田，采集表层土壤并去除杂质后，经晾干、研磨过 2 mm 尼龙筛保存备用. 供试土壤基本性质见表 1.

赤泥(RM)：本试验使用的赤泥采自华中地区某铝冶炼企业的赤泥库.

纳米赤泥(RMn)：采用 PM2L 行星式球磨机，研磨球与赤泥的质量比为 2:1，采用单向运行不定 时停机模式对赤泥进行球磨，转速为 400 r·min⁻¹，球磨 2 h 得到纳米赤泥备用.

纳米赤泥负载纳米零价铁(RMn-nZVI)：采用液相还原法制备 RMn-nZVI 材料^[11]. 简要步骤如下：称取 FeSO₄·7H₂O(4.96 g)，溶于 30% 乙醇溶液(50 mL)，随后加入一定质量的 RMn(RMn 与 nZVI 的质量比为 1:1)，在恒温恒速条件下搅拌 20 min. 然后，在 N₂ 氛围下，将 0.8 mol·L⁻¹ NaBH₄ 溶液(100 mL)滴加到上述混合溶液中(1~2 滴·s⁻¹)，反应结束后继续搅拌至无气泡产生. 最后对混合溶液真空过滤，并在无氧条件下用无水乙醇洗涤多次，并于真空干燥箱中烘干，以此制得纳米赤泥负载纳米零价铁材料(RMn-nZVI).

供试植物为小白菜，品种为上海青，种子购买于寿光金鹏种业有限公司.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

项目	pH	ω(总 Pb) /mg·kg ⁻¹	ω(有效态 Pb) /mg·kg ⁻¹	ω(总 Zn) /mg·kg ⁻¹	ω(有效态 Zn) /mg·kg ⁻¹	ω(有机质) /g·kg ⁻¹	ω(总 Cu) /mg·kg ⁻¹	ω(有效态 Cu) /mg·kg ⁻¹	ω(总 Cd) /mg·kg ⁻¹	ω(有效态 Cd) /mg·kg ⁻¹
参数	5.71	1 012.98	220.22	485.91	115.17	28.73	150.72	18.22	4.59	1.86

1.2 试验方法

本试验共设置 4 组处理，其中空白组处理直接将供试土壤装入约 15 cm×20 cm 的花盆中；其余 3 组处理按土重的 1.5% 为添加量分别添加 RM、RMn 和 RMn-nZVI 这 3 种钝化剂，并将土壤与钝化剂混合均匀后装入花盆中，每盆装土壤 1 kg，每组试验设置 3 个平行样. 土壤和钝化剂装入盆中养护一周，期间以称重法加去离子水维持 60% 左右的土壤含水量. 养护一周后，每盆播种小白菜种子 10 颗左右，定苗 3 株，待植物生长成熟时收获，进行指标分析测试. 采集小白菜可食用部分，洗干净后于 105℃ 烘箱内杀青 1 h，之后于 60℃ 条件下烘干，称重粉碎后保存待测；采集小白菜根际土壤样品，去除杂质后自然风干、研磨后分别过 10 目和 100 目筛保存备用.

1.3 样品分析测定方法

土壤理化性质测定参照文献[12]，土壤中重金属的形态采用 BCR 提取法^[13]测定. 土壤样品采用四酸消解法消解，植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 湿法消解，土壤和植物中重金属含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS，美国布鲁克公司)测定，测定过程中采用国家标准物质 GSS-1 和 GSS-5 完成质量控制，各重金属含量的测定误差均小于±10%.

富集系数^[14](BCF) = 植物体内重金属含量/土壤重金属含量.

1.4 数据处理与分析

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

2 结果与分析

2.1 赤泥基钝化剂对土壤重金属的钝化效果

2.1.1 赤泥基钝化剂对土壤理化性质的影响

由表 2 可知，与 CK 处理相比，施用 RM、RMn 以及 RMn-nZVI 显著提高了土壤的 pH 值($P<0.05$)，以 RMn-nZVI 处理下土壤 pH 最高. 与 CK 处理相比，施用 RM、RMn 和 RMn-nZVI，土壤 pH 分别提升了 0.25、0.43 和 0.47 个单位，上升幅度为 4.38%、7.53% 和 8.23%. 但 3 种赤泥基钝化剂的施用对土壤有机质没有显著影响.

表 2 不同钝化剂对小白菜种植土壤基本理化性质的影响¹⁾

Table 2 Effects of red mud-based passivators on basic physical and chemical properties of pakchoi planting soil

不同处理	pH	ω(OM)/g·kg ⁻¹
CK	5.71±0.01c	28.73±1.59a
RM	5.96±0.01b	31.77±0.82a
RMn	6.14±0.02a	31.48±1.23a
RMn-nZVI	6.18±0.02a	32.34±1.63a

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$), 下同

2.1.2 赤泥基钝化剂对土壤重金属形态赋存的影响

由图 1 可知，与 CK 对照组相比，RM、RMn 和 RMn-nZVI 这 3 种钝化剂添加后明显改变 Pb、Zn、Cu 和 Cd 的酸可提取态(F1)和残渣态(F4)含量，将酸可提取态部分转化为生物有效性较低的残渣态，具有明显的钝化效果，影响强弱表现为：RMn-nZVI > RMn > RM. 其中，施用 RM、RMn 和 RMn-nZVI 后，土壤中重金属 Pb 的酸可提取态(F1)含量显著降低($P<0.05$)，其占比从 CK 处理下的 13.65% 分别降低到

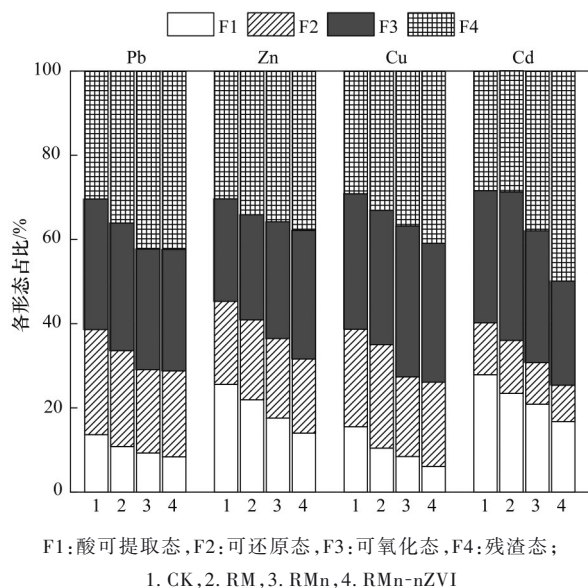


图1 不同赤泥基钝化剂对土壤重金属形态的影响
Fig. 1 Effect of different red mud-based passivators on soil heavy metal morphology

10.82%、9.29%和8.39%；可还原态(F2)含量显著降低($P<0.05$)，其占比从CK处理的24.94%分别降低到22.78%、19.80%和20.40%；而可氧化态(F3)占比从CK处理的31.03%分别降低到30.31%、28.65%和28.84%；残渣态(F4)含量显著升高($P<0.05$)，从CK处理下的30.37%分别升高到36.09%、42.25%和42.36%。未添加钝化剂前，土壤中Cd的F1~F4这4种形态分别占27.88%、12.33%、31.39%和28.40%。添加3种钝化剂后，相比CK对照组，土壤中重金属Cd的F1含量显著降低($P<0.05$)，所占比例从27.88%降低到23.43%、20.89%和16.73%；F2占比从12.33%变化为12.60%、9.87%和8.66%；同时F3占比从31.39%变化为35.25%、31.31%和24.74%；F4含量升高，其形态比例从28.40%上升到了28.71%、37.92%和49.87%，仅RMn以及RMn-nZVI处理下与CK处理存在显著差异($P<0.05$)。对于土壤Zn而言，在未添加钝化剂的情况下，F1~F4这4种形态含量占比分别为25.60%、19.71%、24.33%和30.36%；与CK处理相比，施用3种钝化剂之后，土壤中重金属Zn的酸可提取态(F1)含量显著降低($P<0.05$)，从25.60%分别降低到21.90%、17.57%和13.99%，可还原态(F2)比例有所降低，而可氧化态(F3)及残渣态(F4)含量则显著提高($P<0.05$)，其中残渣态占比从CK处理的30.36%升高到34.11%、35.78%和37.83%。此外，对于土壤Cu而言，与CK处理相比，3种钝化剂施用后F1含量显著降低($P<0.05$)，其占比从15.50%分别降低到10.46%、8.44%和6.07%；F2占比从23.18%变化为24.57%、18.93%

和20.04%；F3占比从32.17%变化为31.89%、35.81%和32.97%；而F4含量显著升高($P<0.05$)，其比例从29.15%分别升高到33.08%、36.82%和40.93%。总体而言，钝化剂RM对Pb、Zn和Cu的钝化效果优于Cd，而钝化剂RMn和RMn-nZVI对Cd、Pb和Cu的钝化效果则优于Zn。

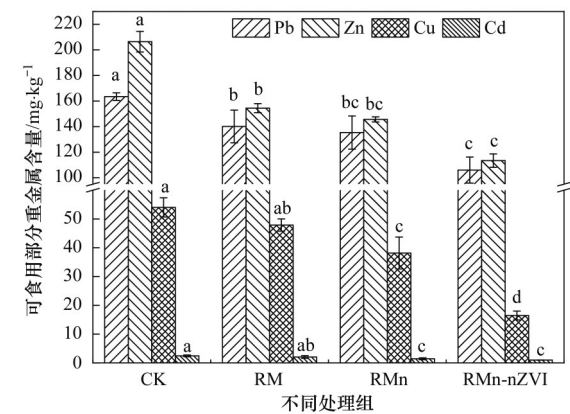
2.2 赤泥基钝化剂对小白菜累积重金属的影响

2.2.1 赤泥基钝化剂对小白菜富集土壤重金属能力的影响

添加钝化剂后，小白菜可食用部分Pb、Zn、Cu和Cd这4种重金属的含量变化如图2所示，从中可以看出，与CK处理相比，施用3种赤泥基钝化剂显著降低了小白菜中Pb和Zn的含量($P<0.05$)，其中施用RMn和RMn-nZVI还显著降低了Cu和Cd的含量($P<0.05$)。当不添加任何钝化剂时，小白菜可食用部分积累 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别为163.42、206.40、54.03和2.44 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，当添加赤泥RM后，小白菜可食用部分积累 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别为140.12、154.42、47.90和2.04 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与CK相比分别降低了14.25%、25.19%、11.35%和16.32%；RMn钝化剂施用后，小白菜可食用部分积累 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别为135.35、145.63、38.17和1.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，较CK分别降低了17.17%、29.44%、29.36%和41.59%；而当添加RMn-nZVI后，小白菜可食用部分积累 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 分别为106.03、113.41、16.47和0.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，较CK相比分别降低了35.11%、45.05%、69.52%和59.63%，但 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 均超过了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中规定的限值 [$\omega(\text{Pb})$ 为0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\omega(\text{Cd})$ 为0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]。同时可看出3种钝化剂对降低小白菜累积重金属量存在差异，钝化剂RM降低小白菜Zn含量效果最好，RMn降低Cd含量效果最好，RMn-nZVI降低Cu、Cd的效果较好。此外，RMn-nZVI在降低小白菜富集重金属含量方面效果最好，RMn次之，RM最差，由此进一步说明纳米赤泥负载纳米零价铁之后对于重金属的钝化效果更佳。

2.2.2 赤泥基钝化剂对小白菜重金属富集系数的影响

添加钝化剂后，小白菜重金属富集系数的变化如表3所示。从中可以看出，赤泥基钝化剂施用后，小白菜可食用部分对Pb、Zn、Cu和Cd这4种重金属的富集系数呈现出不同程度的降低。与CK处理相比，添加RM钝化剂对重金属Pb、Zn、Cu和Cd的富集系数分别降低了13.32%、25.96%、9.46%和



不同小写字母表示处理间的显著性差异($P<0.05$)
图2 不同赤泥基钝化剂对小白菜重金属含量的影响
Fig. 2 Effect of different red mud-based passivators on heavy metal concentrations in pakchoi

17.32%；RMn和RMn-nZVI的施用显著降低了4种重金属的富集系数($P<0.05$)，其中添加RMn钝化剂对重金属Pb、Zn、Cu和Cd的富集系数依次降低了16.65%、28.07%、28.77%和42.43%，添加RMn-nZVI钝化剂对重金属Pb、Zn、Cu和Cd的富集系数分别降低了34.35%、45.03%、68.26%和59.57%，比钝化剂RM和RMn的降低量均有提升。由此可知，施用赤泥基钝化剂可以有效降低植物对土壤中重金属的富集系数，并且RMn-nZVI的降低效果最为明显。

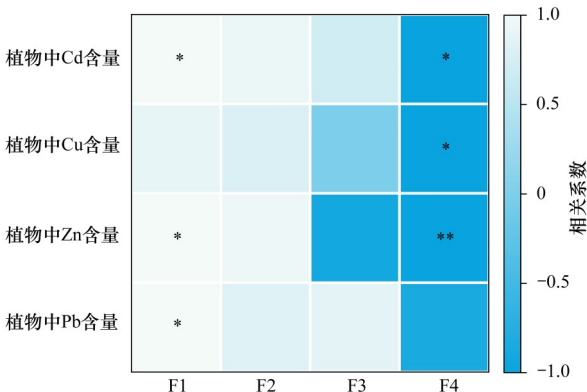
表3 小白菜可食用部分对重金属的富集系数
Table 3 Enrichment coefficient of heavy metals in pakchoi

富集系数	Pb	Zn	Cu	Cd
CK	0.32±0.00a	0.41±0.01a	0.35±0.02a	0.46±0.05a
RM	0.27±0.02b	0.30±0.01b	0.32±0.01a	0.38±0.07a
RMn	0.26±0.02b	0.29±0.00b	0.25±0.03b	0.26±0.05b
RMn-nZVI	0.21±0.02c	0.22±0.01c	0.11±0.01c	0.18±0.00b

2.2.3 小白菜重金属含量与土壤重金属形态的相关性分析

从图3可知，小白菜可食用部分积累的重金属与土壤中重金属的形态息息相关，其中与酸可提取态(F1)以及残渣态(F4)表现出了较好的相关性。小白菜可食用部分中重金属Pb、Zn和Cd的含量与土壤重金属的酸可提取态(F1)呈现出了显著的正相关性($P<0.05$)；小白菜可食用部分重金属Zn的含量与土壤重金属的残渣态(F4)含量呈现出了极显著的负相关性($P<0.01$)，Cu和Cd则呈现出了显著的负相关性($P<0.05$)，可见小白菜对Pb、Zn、Cu和Cd的积累受控于土壤酸可提取态Pb、Zn、Cu和Cd的含量而不是总量。赤泥基钝化剂均能显著降低土壤中重金属Pb、Zn、Cu和Cd的酸可提取态含量，并将其成功转化为活性较低的可氧化态和残渣态，对小

白菜吸收重金属起到阻控作用，有效地保护了作物安全。



*表示在 $P<0.05$ 级别(双尾),相关性显著;
**表示在 $P<0.01$ 级别(双尾),相关性显著
图3 土壤中重金属各形态与小白菜可食用部分重金属含量的相关性
Fig. 3 Correlation between heavy metal forms in soil and heavy metal content in the edible part of pakchoi

3 讨论

赤泥具有较多孔隙和较大的比表面积，同时含碱性物质和易与重金属结合而降低重金属活性的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO和 SiO_2 等物质，已有大量研究证明其在钝化土壤重金属方面具有巨大优势^[15]；同时nZVI特有的铁核和氧化铁壳两种纳米成分在吸附重金属方面也展现出巨大潜力^[16]，为此，本研究利用赤泥作为载体，负载nZVI后成功制备得到赤泥基nZVI材料用于Pb、Zn、Cu和Cd复合污染土壤修复。本研究结果表明，赤泥基钝化剂RM、RMn和RMn-nZVI具有改良酸化土壤以及钝化土壤重金属Pb、Zn、Cu和Cd的联合作用，且效果为：RMn-nZVI>RMn>RM。土壤pH是决定土壤重金属有效性和风险的关键因素^[17]，由表2可知，3种赤泥基钝化剂均能够显著提高土壤pH，原因之一在于赤泥中含碱性物质，外源施入土壤后会与土壤的酸性物质发生反应，进而提高土壤pH^[15]。RMn-nZVI和RMn两种材料由于纳米化，颗粒变小、比表面积增大以及反应活性增强^[18]，其活性组分与土壤之间的相互作用增强，同时RMn-nZVI中零价铁的氧化也会伴随着OH⁻的生成^[19]，故最终提升pH能力表现为：RMn-nZVI>RMn>RM。但3种钝化剂的施用对土壤有机质含量无显著影响，这是由于赤泥、纳米零价铁主要成分都是无机物，有机成分含量少，因此施入赤泥基钝化剂后对土壤有机质的含量影响不大^[20]。

由图1可知，添加赤泥基钝化剂前，土壤中4种重金属主要以可氧化态(F3)和残渣态(F4)存在，添加赤泥基钝化剂后，土壤中酸可提取态(F1)的含

量明显降低,而可氧化态(F3)和残渣态(F4)的含量升高,可见赤泥基钝化剂对土壤Pb、Zn、Cu和Cd存在明显的钝化效果.作用机制主要在于:①赤泥基钝化剂施入土壤后,升高了土壤pH,使得材料和土壤胶体表面的可变负电荷增多,这导致两者对 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 这4种重金属阳离子的静电吸附作用增强^[6,21].②pH的升高导致 OH^- 溶出, OH^- 再与土壤中的铁锰离子结合生成铁锰氢氧化物,这为4种重金属阳离子提供了更多吸附位点^[22],同时溶出的 OH^- 也可直接与 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 结合生成氢氧化物沉淀^[6,23].③赤泥基材料表面丰富的孔隙结构对Pb、Zn、Cu和Cd进行表面吸附^[24],同时重金属还可通过与材料表面的阳离子进行离子交换而吸附在赤泥基材料表面^[25].④赤泥基钝化剂表面存在大量的羟基及羧基等含氧基团,能够与重金属离子发生络合反应,以沉淀的形式将其吸附在材料表面^[26].⑤RMn-nZVI中nZVI的存在可将吸附的 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 还原成更稳定的 Pb^0 和 Cu^0 ^[25],同时nZVI可形成铁羟基化合物通过表面络合作用而吸附重金属^[27].故最终RMn-nZVI对土壤重金属的钝化效果要明显优于RMn和RM,可见赤泥及nZVI两种材料对重金属的钝化存在协同作用.

富集系数可以表征植物从土壤中吸收富集重金属的能力^[14],本试验发现赤泥基钝化剂的施用降低了小白菜对4种重金属的富集系数,从而抑制了小白菜对重金属的吸收,减少了重金属的积累.此外,重金属的生物有效性也是影响植物吸收积累重金属的重要因素^[28],酸可提取态作为生物有效性高的形态^[29],较容易被植物吸收利用,而赤泥基钝化剂的施用可降低酸可提取态含量并将其向生物有效性低的形态转化,从而实现减少小白菜对重金属积累,减轻小白菜受重金属污染的危险.所用赤泥基钝化剂中, RMn-nZVI材料的效果明显优于其余两种材料,由此说明纳米赤泥(RMn)负载纳米零价铁(nZVI)得到的新复合材料(RMn-nZVI),对多种重金属均具有良好的钝化效果,是一种极具潜力的钝化剂.

4 结论

(1)赤泥基钝化剂的施用显著提高了土壤pH,且RMn-nZVI处理下的效果最好,pH上升幅度达到了8.23%,可见RMn-nZVI材料具有一定改良酸性土壤的效果.

(2)赤泥基钝化剂的施用降低了重金属Pb、Zn、Cu和Cd酸可提取态含量,使其向可氧化态以及残渣态转化,其中钝化剂RMn-nZVI降低4种重金属酸

可提取态含量以及提高残渣态含量效果最优.

(3)赤泥基钝化剂的施用减少了小白菜可食用部分对重金属Pb、Zn、Cu和Cd的富集,使小白菜受重金属污染的威胁降低,同样钝化剂RMn-nZVI的效果优于RMn以及RM, RMn-nZVI处理下小白菜对4种重金属富集量的降低比例达35.11%、45.05%、69.52%和59.63%.

参考文献:

- [1] 刘孝严,樊亚男,刘鹏,等.基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征[J].环境科学,2022,43(11):5169-5179.
- [2] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833.
- [3] Song P P, Xu D, Yue J Y, et al. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: A critical review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156417.
- [4] 董梦阳,董远鹏,徐子文,等.赤泥改良过程中微生物群落及酶活性恢复研究[J].中国环境科学,2021,41(2):913-922.
- [5] Li H, Liu L M, Luo L, et al. Resilience of soil microbiome and enzyme activity with soil amelioration of Bayer process red mud[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 913-922.
- [6] Xu Z M, Lu Z Y, Zhang L S, et al. Red mud based passivator reduced Cd accumulation in edible amaranth by influencing root organic matter metabolism and soil aggregate distribution [J]. Environmental Pollution, 2021, 275, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116543.
- [7] Zhao Y Q, Wang J, Yang B R, et al. Performance of red mud/biochar composite material (RMBC) as heavy metal passivator in Pb-contaminated soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2022, 109(1): 30-43.
- [8] 胡佩伟,高润琴,戴妍妮,等.纳米零价铁耦合黏土修复污染土壤的研究进展[J].中国环境科学,2022,42(10):4731-4740.
- [9] Liang W Y, Wang G H, Peng C, et al. Recent advances of carbon-based nano zero valent iron for heavy metals remediation in soil and water: A critical review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 426, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127993.
- [10] 田利强,龙康,陈秀清.绿色合成膨脹石墨负载纳米零价铁去除水中Cd(II)[J].环境化学,2021,40(12):3909-3918.
- [11] Tian L Q, Long K, Chen X Q. Research on removal of cadmium (II) by green synthesized nanoscale zero-valent iron supported on

- expanded graphite[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(12): 3909-3918.
- [11] 黄雪征, 张永祥, 田振军, 等. 纳米零价铁的制备、改性及场地应用研究进展[J]. *水处理技术*, 2021, **47**(1): 12-18, 26.
- Huang X Z, Zhang Y X, Tian Z J, *et al.* Research progress in synthesis, modification and field application of nano zero-valent iron [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, **47**(1): 12-18, 26.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Quevauviller P, Rauret G, López-Sánchez J F, *et al.* Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **205**(2-3): 223-234.
- [14] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in Crops[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [15] 史力争, 陈惠康, 吴川, 等. 赤泥及其复合钝化剂对土壤铅、镉和砷的稳定效应[J]. *中国科学院大学学报*, 2018, **35**(5): 617-626.
- Shi L Z, Chen H K, Wu C, *et al.* Effects of red mud and the combinations on lead, cadmium, and arsenic availability in contaminated soil[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **35**(5): 617-626.
- [16] Li S L, Wang W, Liang F P, *et al.* Heavy metal removal using nanoscale zero-valent iron (nZVI): Theory and application[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **322**: 163-171.
- [17] 陈莹, 刘汉斌, 刘娜, 等. 农地土壤重金属Pb和Cd有效性测定方法的筛选与评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3494-3506.
- Chen Y, Liu H Y, Liu N, *et al.* Screening and evaluation of methods for determining available lead (Pb) and cadmium (Cd) in farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3494-3506.
- [18] 崔岩山, 王鹏飞, 琚宜文. 纳米材料在土壤重金属污染修复中的应用[J]. *地球科学*, 2018, **43**(5): 1737-1745.
- Cui Y S, Wang P F, Ju Y W. Progress of applications of nanomaterials in soil heavy metal remediation [J]. *Earth Science*, 2018, **43**(5): 1737-1745.
- [19] 霍佳佳, 罗盛旭, 王燕诗, 等. 富里酸-纳米零价铁复合物对土壤中铅的钝化[J]. *环境工程*, 2022, **40**(4): 112-120.
- Huo J J, Luo S X, Wang Y S, *et al.* Passivation of lead in soil by fulvic acid-nano-zero-valent iron complex [J]. *Environmental Engineering*, 2022, **40**(4): 112-120.
- [20] 李阳, 尹英杰, 朱司航, 等. 不同混施钝化剂对水稻吸收累积Cd的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(2): 247-255.
- Li Y, Yin Y J, Zhu S H, *et al.* Effects of different combined amendments on Cd uptake and accumulation by rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(2): 247-255.
- [21] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(5): 890-897.
- Luo Y H, Gu X Y, Wu Y G, *et al.* In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(5): 890-897.
- [22] 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 等. 复合改良剂FZB对砷镉污染土壤的修复效果[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 917-924.
- Ding P, He Y L, He H, *et al.* Remediation effect of compound modifier FZB on arsenic and cadmium contaminated Soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 917-924.
- [23] 张剑, 孔繁艺, 卢升高. 无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4679-4686.
- Zhang J, Kong F Y, Lu S G. Remediation effect and mechanism of inorganic passivators on cadmium contaminated acidic paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4679-4686.
- [24] 李杰, 赵转军, 马翔邦, 等. 优化水铁矿-腐殖酸复合材料对镉、铅污染土壤的稳定化[J]. *环境化学*, 2022, **41**(8): 2693-2702.
- Li J, Zhao Z J, Ma X B, *et al.* Study on stabilization of soil contaminated with cadmium and lead by optimization of carbon and iron composites [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(8): 2693-2702.
- [25] 马文静. 生物炭负载纳米零价铁对重金属污染土壤修复机理的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- Ma W J. Remediation mechanism of heavy metal contaminated soil by biochar-supported nanoscale zero-valent iron [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [26] 刘钦, 周新涛, 黄静, 等. 赤泥吸附重金属离子性能及其机理研究进展[J]. *化工进展*, 2021, **40**(6): 3455-3465.
- Liu Q, Zhou X T, Huang J, *et al.* Research status on adsorption properties and mechanism of heavy metal ions using red mud [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, **40**(6): 3455-3465.
- [27] Li P R, Yu J, Huangfu Z X, *et al.* Applying modified biochar with nZVI/nFe₃O₄ to immobilize Pb in contaminated soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(19): 24495-24506.
- [28] Xu W J, Shafi M, Penttinen P, *et al.* Bioavailability of heavy metals in contaminated soil as affected by different mass ratios of biochars [J]. *Environmental Technology*, 2020, **41**(25): 3329-3337.
- [29] 王哲, 程俊丽, 卞园, 等. 老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中Cd²⁺的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5205-5213.
- Wang Z, Cheng J L, Bian Y, *et al.* Effect of aging on stabilization of Cd²⁺ through biochar use in alkaline soil of Bayan Obo mining area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5205-5213.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiong, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)