

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征

王港¹, 余海英^{1*}, 黄化刚¹, 张路¹, 左洪菊²

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 德阳杰化农业科学技术研究有限公司, 德阳 618400)

摘要: 为明晰镉(Cd)在不同类型土壤中的稳定化特征和有效性差异,以四川省6种主要的农耕土壤酸性紫色土、中性紫色土、石灰性紫色土、灰潮土、典型黄壤和漂洗黄壤为研究对象,通过土壤培养试验,对外源Cd进入土壤后的稳定化时间、化学形态和有效Cd含量进行了对比分析,进一步结合盆栽试验下各土壤中小白菜生物量和Cd含量,探讨了外源Cd在6种土壤中的化学行为和污染效应。结果表明:①6种土壤的有效Cd含量在外源Cd添加后的15 d内迅速降低,后趋于平稳。稳定后,漂洗黄壤和酸性紫色土的有效Cd含量显著高于其他4种土壤,石灰性紫色土最低($1.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);②6种土壤中的Cd均以可交换态的占比最高(42.51%~56.07%),其次,漂洗黄壤和典型黄壤中的铁锰氧化物结合态Cd,石灰性紫色土中的碳酸盐结合态和灰潮土中的有机络合态Cd的占比相对较高;③低含量Cd处理下($0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),6种土壤中小白菜的生长均无明显抑制,生物量与对照无显著差异,但可食部位Cd含量却有不同程度地富集,表现为典型黄壤和漂洗黄壤显著高于其他4种土壤;高含量Cd处理下($2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),6种土壤中小白菜的生长均受到明显抑制,小白菜Cd含量和土壤有效Cd含量均以石灰性紫色土最低,酸性土壤尤其是漂洗黄壤最高。

关键词: 镉(Cd); 土壤类型; 土壤性质; 稳定化; 有效性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0387-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202203150

Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil

WANG Gang¹, YU Hai-ying^{1*}, HUANG Hua-gang¹, ZHANG Lu¹, ZUO Hong-ju²

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Deyang Jiehua Agricultural Science and Technology Research Co., Ltd., Deyang 618400, China)

Abstract: To clarify the characteristics of stabilization and availability of exogenous cadmium (Cd) in different types of soils, six main agricultural soils in Sichuan province, including acidic purple soil, neutral purple soil, calcareous purple soil, gray fluvo-aquic soil, typical yellow soil, and rinsed yellow soil, were used in this study. A soil culture experiment was conducted to explore the differences in stabilization time, chemical form, and effective Cd content between the six types of soils. Additionally, the effects of exogenous Cd on the growth and Cd accumulation of cabbage growing in different soils was discussed. The results showed the following: ① with exogenous Cd treatment, the available Cd content of the six soils decreased sharply within 15 d after Cd addition and then tended to be flat. After 30 d, there was no significant difference. The available Cd contents of rinsed yellow soil and acidic purple soil were significantly higher than that of the other four soils, and the content of calcareous purple soil was significantly lower ($1.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). ② After stabilization, exchangeable Cd was the main Cd form in the six soils, up to 42.51%-56.07%. The relative proportions of other Cd forms differed greatly between different soils. The proportion of iron and manganese oxides in the rinsed yellow soil and typical yellow soil was higher, whereas organic complex Cd, residual Cd, and carbonate-bound Cd were higher in the gray fluvo-aquic soil, neutral purple soil, and calcareous purple soil, respectively. ③ The characteristics of availability and bioavailability of Cd among different soils were significantly different with different exogenous Cd doses. With the lowest Cd dose ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), compared with that in the control, there was no significant decrease in Cd content in the edible parts of the cabbage, but Cd accumulation in the edible parts differed. The Cd contents of edible parts of the cabbage growing in typical yellow soil and rinsed yellow soil were significantly higher than that of the other soils. With the highest Cd dose ($2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), the growths of cabbage growing in all six soils were significantly inhibited. The available Cd contents of rinsed yellow soil and acidic purple soil were significantly higher than that of the other four soils, which is consistent with the Cd content in the edible parts of the cabbage. The available Cd contents and the Cd content in the edible parts of the cabbage in calcareous purple soil were the lowest, and acidic soils, especially in rinsed yellow soil, had the highest.

Key words: cadmium(Cd); soil type; soil properties; stabilization; availability

近年来,农田Cd污染导致的粮食安全问题广受关注。据文献[1]显示,在重金属污染物中,Cd的点位超标率最高,达7.0%,Cd具有高毒性和易移动等特点,土壤中的Cd会引起土壤质量恶化并危害作物产量和品质,进而影响人类健康^[2,3]。已有研究表明,Cd进入土壤后,可经过一系列的溶解-沉淀、吸附-解吸和络合-解离等综合反应,形成不同的化学形态,其有效性和毒性也随之改变^[4~6]。该过程和土壤性质密切相关,已有研究发现不同类型土壤因成土环境(温度、季节性淹水和耕作方式等)和理化性质(pH、有机质、阳离子交换量和氧化还原电位

等)迥异,Cd在土壤中的稳定化过程和化学形态等也存在明显差异^[7,8],但由该差异所导致的污染生态效应,尤其是农业生产条件下作物对Cd的富集效应却尚不明确,而这对于针对性地开展污染土壤的修复治理尤为必要^[9]。

文献[10]指出,四川省土壤环境状况总体不容乐观,部分区域土壤污染严重,Cd是四川省土壤

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802605); 德阳市重点研发科技计划项目(2020SZ037)

作者简介: 王港(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤化学与土壤污染防治, E-mail: wanggang6180@163.com

* 通信作者, E-mail: 308998818@qq.com

污染的主要特征污染物. 潮土、紫色土和黄壤是四川省 3 种主要的农业土壤, 在土壤分类上分别属于半水成土纲、初育土纲和铁铝土纲. 为明确三大类土壤对 Cd 有效性的影响, 本研究以其代表性的 6 种亚类土壤灰潮土、酸性紫色土、中性紫色土、石灰性紫色土、典型黄壤和漂洗黄壤为研究对象, 通过土壤培养试验和盆栽试验, 探讨外源 Cd 进入不同类型土壤后的化学形态和有效性的变化, 明晰不同类型土壤对 Cd 的固定差异, 以期为针对性地解决不同类型 Cd 污染土壤的修复利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤: 供试土壤 6 种, 其中, 酸性紫色土、中性紫色土和石灰性紫色土属于初育土纲中的紫色土类, 采自雅安市雨城区, 由紫色砂岩发育而成; 典型黄壤和漂洗黄壤属于铁铝土纲中的黄壤类, 采自

雅安市名山区, 由第四系更新统沉积物发育而成; 灰潮土属于半水成土纲中的潮土类, 采自都江堰市蒲阳镇, 由灰色冲积物发育而成. 基本性质见表 1.

供试植物: 小白菜 (*Brassica chinensis* L.), 品种为精纯 5 号.

供试肥料: 尿素 (N 46%), 磷酸二氢钾 (P_2O_5 52%, K_2O 34%) 和硫酸钾 (K_2O 54%) 均为分析纯.

1.2 试验设计与处理

1.2.1 不同类型土壤中外源 Cd 形态的动态变化特征

以 6 种土壤为研究对象, 设土壤 Cd 污染含量为 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯) 以溶液形式加入供试土壤中, 将 Cd 溶液和土壤充分混匀后装入 250 mL 塑料瓶, 每瓶装土 100 g. 保持土壤水分为田间持水量的 70%, 于培养箱中分别培养 1、5、10、15 和 30 d 后采集土壤样品, 自然风干, 磨碎过筛后用于有效 Cd 含量和土壤 Cd 形态测定. 共计 30 个处理, 各处理重复 3 次.

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soils

土壤类型	pH	CEC / $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	ω (有机质) / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	各粒级组分质量分数/%			ω (有效 Cd) / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	ω (全 Cd) / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
				砂粒	粉粒	黏粒		
酸性紫色土	5.21	9.89	6.39	59.42	23.47	17.11	0.048	0.119
中性紫色土	6.73	24.66	7.13	45.72	24.81	29.47	0.047	0.147
石灰性紫色土	8.04	26.52	9.74	44.35	26.22	29.43	0.043	0.158
灰潮土	6.68	12.04	11.19	36.17	47.63	16.20	0.056	0.150
典型黄壤	4.69	15.32	9.65	48.82	26.61	24.57	0.033	0.087
漂洗黄壤	5.51	7.02	3.39	24.63	38.21	37.16	0.022	0.049

1.2.2 不同含量外源 Cd 处理下土壤有效 Cd 的变化特征

以 6 种土壤为研究对象, 设土壤 Cd 污染含量为 0.5、1 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 不添加 Cd 为对照, 共计 24 个处理, 各处理重复 3 次. $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯) 以溶液形式加入供试土壤中, 将 Cd 溶液和土壤充分混匀后装入 250 mL 塑料瓶, 每瓶装土 100 g. 保持土壤水分为田间持水量的 70%, 于培养箱中培养 30 d 后采集土壤样品, 自然风干, 磨碎过筛后用于土壤有效 Cd 含量测定.

1.2.3 不同含量外源 Cd 处理对 6 种土壤小白菜生物量和 Cd 含量的影响

采用盆栽试验, 以 6 种土壤为研究对象, 试验设 0.5、1 和 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 3 个 Cd 含量, 不添加 Cd 为对照. $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯) 以溶液形式加入供试土壤中, 将 Cd 溶液和土壤充分混匀后装入塑料盆 (容积 2 L), 每盆装土 1.5 kg. 陈化 30 d. 随后, 按 N $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 P_2O_5 $0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 K_2O $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施入底肥. 平衡 15 d 后将小白菜种子直播于盆中, 待小白菜

长至两片真叶时间苗, 每盆定苗 4 株. 生长过程中不定期浇水, 使土壤含水量保持在田间持水量的 70% 左右. 于小白菜生长 40 d 后采样, 采集小白菜地上部样品, 经自来水冲洗和去离子水润洗后用吸水纸擦干, 称小白菜鲜重, 然后在 105°C 下杀青 30 min, 75°C 下烘干至恒重, 称干重, 样品粉碎后用于小白菜 Cd 含量的测定. 共计 24 个处理, 各处理重复 3 次.

1.3 测定项目与方法

土壤 Cd 全量: 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ (5:1:1, 体积比) 消化, 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 进行测定 (GB/T17141-1997); 土壤有效 Cd 含量: 采用 DTPA 溶液浸提, 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 进行测定 (GB/T 23739-2009); 土壤 Cd 形态: 采用 Tessier 五级连续提取法对 Cd 进行形态分级^[11]; 小白菜 Cd 含量: HNO_3 微波消解-电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 进行测定 (GB 5009.268-2016); 小白菜生物量: 采用称重法测定.

1.4 数据处理与分析

小白菜 Cd 富集系数 (BCF):

$$BCF = C_{\text{plant}}/C_{\text{soil}}$$
式中, C_{plant} 为小白菜 Cd 含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{soil} 为土壤总镉含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

数据采用 SPSS 22.0 进行统计分析, LSD 进行多重比较, 图表制作采用 Excel 2013 和 Origin 8.5.

2 结果与分析

2.1 外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征

2.1.1 土壤有效 Cd 含量随时间的动态变化

外源 Cd 进入不同类型土壤后, 其有效 Cd 含量随时间的动态变化如图 1 所示. 添加后 1 d, 6 种土壤中有有效 Cd 含量较高且差异明显, 表现为: 漂洗黄壤 > 石灰性紫色土和灰潮土 > 中性紫色土、典型黄壤和酸性紫色土, 其中漂洗黄壤 $\omega(\text{有效 Cd}) = 1.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于其他 5 种土壤. 随着培养时间的推移, 6 种土壤有效态 Cd 含量均迅速降低, 15 d 后趋于平缓, 与添加后 30 d 无显著差异; 稳定后, 不同土壤间有效 Cd 的含量大小较添加 1 d 后有明显不同, 漂洗黄壤 ($1.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和酸性紫色土 ($1.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于其他 4 种土壤, 其次为典型黄壤 ($1.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 显著高于中性紫色土、灰潮土和石灰性紫色土, 表明中性紫色土、灰潮土和石灰性紫色土对 Cd 的固定能力更强.

2.1.2 土壤 Cd 形态随时间的动态变化

由图 2 可知, 外源 Cd 进入 6 种土壤后, 除有效

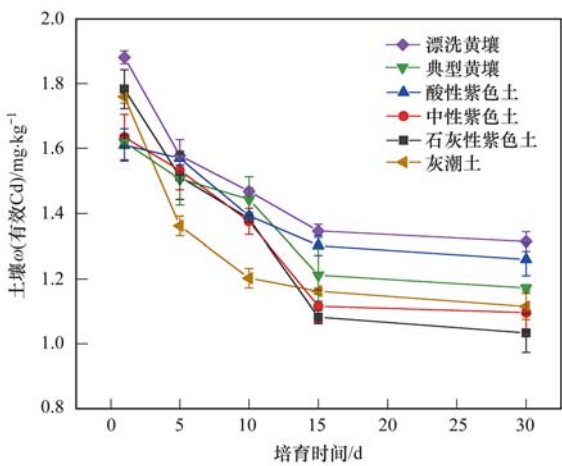
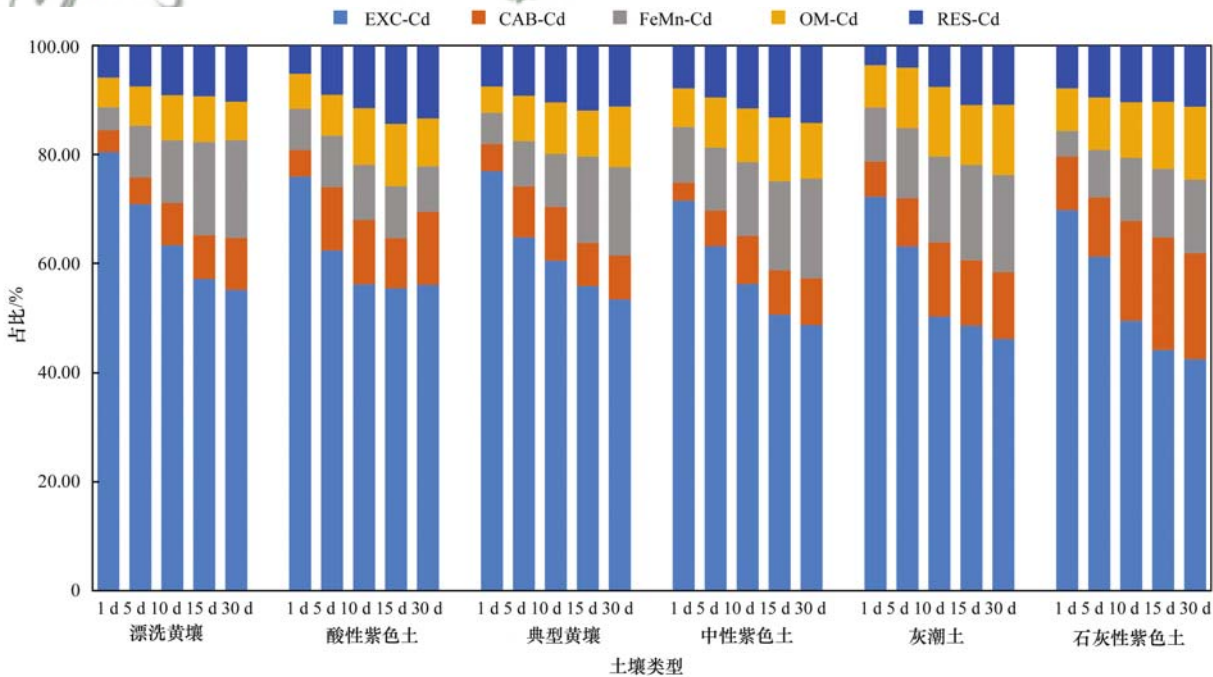


图 1 不同类型土壤中有效 Cd 含量的动态变化特征
Fig. 1 Change in available Cd content in different types of soils

性最高的可交换态 Cd 随时间的推移呈降低趋势外, 其余 4 种形态均呈增加趋势. 具体表现为: 可交换态 Cd 占比在添加后 15 d 内明显降低, 在 30 d 时趋于稳定, 该形态是 6 种土壤中 Cd 的主要存在形态, 且在酸性紫色土和漂洗黄壤中的占比最高, 达 56.07% 和 55.10%, 其次为典型黄壤和中性紫色土, 而在灰潮土和石灰性紫色土中的占比最低, 分别为 46.12% 和 42.51%; 相应地, 有效性最低的残渣态 Cd 的占比则表现为: 中性紫色土 (14.22%) > 酸性紫色土 (13.40%) > 石灰性紫色土 (11.23%) > 典型黄壤 (11.21%) > 灰潮土 (10.91%) > 漂洗黄壤 (10.32%); 碳酸盐结合态 Cd 在石灰性紫色土中的



EXC-Cd 表示可交换态 Cd, CAB-Cd 表示碳酸盐结合态 Cd, FeMn-Cd 表示铁锰氧化物结合态 Cd, OM-Cd 表示有机络合态 Cd, RES-Cd 表示残渣态 Cd

图 2 不同类型土壤中 Cd 形态的动态变化特征
Fig. 2 Change in Cd species distribution in different types of soils

占比最高且增幅最大;铁锰氧化物结合态 Cd 在漂洗黄壤和典型黄壤中的占比较高且增幅较大,分别增加了 13.71% 和 10.53%;而有机络合态 Cd 在 6 种土壤中虽均有提升,但增幅不大.由此可知:有效 Cd 含量最低的石灰性紫色土,其土壤 Cd 形态主要为可交换态 Cd 和碳酸盐结合态 Cd;而有效 Cd 含量最高的漂洗黄壤,其 Cd 形态则以交换态 Cd 和铁锰氧化物结合态 Cd 为主,两者共占 73.03%.

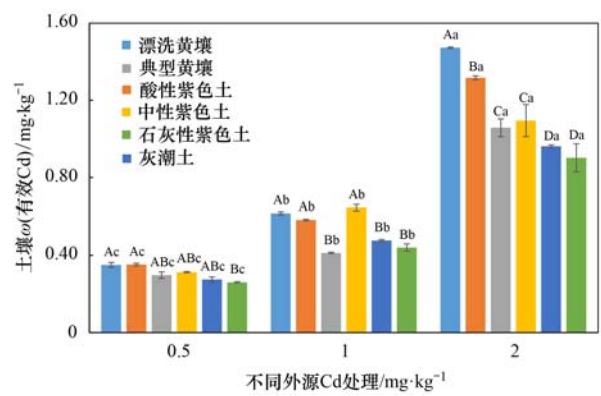
2.1.3 土壤有效 Cd 随外源 Cd 处理含量的变化特征

由图 3 分析可知,不同外源 Cd 处理下(0.5、1 和 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),6 种土壤中的有效 Cd 含量均随 Cd 处理含量的增加而显著增加,在酸性土壤(漂洗黄壤、典型黄壤和酸性紫色土)中有效 Cd 的增幅远高于其余 3 种土壤,并且 Cd 处理含量越大,土壤间有效 Cd 含量的差异就越明显.低含量 Cd 处理下(0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), ω (有效 Cd)在漂洗黄壤、酸性紫色土、典型黄壤、中性紫色土和灰潮土中无显著差异(0.29 ~ 0.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但均高于石灰性紫色土;Cd 处理量增至 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,6 种土壤中有有效 Cd 的含量增幅为 38.76% ~ 105.85%,土壤间的差异进一步增大,漂洗黄壤、酸性紫色土和中性紫色土的 ω (有效 Cd)为 0.58 ~ 0.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于典型黄壤、灰潮土和石灰性紫色土(0.41 ~ 0.48 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);高含量 Cd 处理(2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)条件下,有效 Cd 的含量增幅以漂洗黄壤和酸性紫色土最大,其 ω (有效 Cd)分别为 1.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他 4 种土壤,具体为:漂洗黄壤和酸性紫色土 > 典型黄壤和中性紫色土 > 灰潮土和石灰性紫色土.总体而言,6 种土壤中,石灰性紫色土和灰潮土对 Cd 的固定能力相对最强,有效 Cd 含量最低,其次为中性紫色土和典型黄壤,漂洗黄壤和酸性紫色土对 Cd 的固定最弱,有效 Cd 含量最高.

2.2 外源 Cd 在不同类型土壤中生物有效性的变化特征

2.2.1 外源 Cd 对不同类型土壤中小白菜生长的影响

由表 2 可知,低含量外源 Cd 处理下(0.5



不同大写字母表示土壤间差异达 0.05 显著水平,不同小写字母表示处理间达 0.05 显著水平

图 3 不同外源 Cd 处理下 6 种土壤中有有效 Cd 含量的差异特征
Fig. 3 Differential characteristics of available Cd content in six soils under different exogenous Cd concentrations

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),6 种土壤中小白菜的生长无明显抑制,生物量 and 对照均无显著差异;1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源 Cd 处理下,仅典型黄壤和灰潮土中小白菜的生长受到明显抑制,生物量分别较对照降低了 14.46% 和 18.32%;但在 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源 Cd 处理下,6 种土壤中小白菜的生长均受到明显抑制,小白菜生物量均显著低于对照,降幅为 10.26% ~ 32.89%,其中以典型黄壤的降幅最大,为 32.89%,漂洗黄壤次之,为 27.48%,石灰性紫色土的降幅最小,为 10.26%.由此可见,等量外源 Cd 进入土壤后,其对小白菜的毒害效应因污染程度和土壤类型的不同而有明显不同,低含量处理(< 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)对本试验中的酸性紫色土、中性紫色土、灰潮土和石灰性紫色土这 4 种土壤均未表现出明显的生物胁迫,而在高含量 Cd 处理下(2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),6 种土壤中小白菜生长均受到明显的生物胁迫,小白菜生物量显著降低.

2.2.2 外源 Cd 对不同类型土壤中小白菜可食部位 Cd 含量的影响

由表 3 可知,不同外源 Cd 处理下(0.5、1 和 2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),6 种土壤中的小白菜 Cd 含量均随 Cd 处理含量的增加显著增加,Cd 处理含量越大,土壤间的差异越大.低含量外源 Cd 处理下(0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),小白菜的生长无明显抑制,生物量均和

表 2 外源 Cd 对不同类型土壤中小白菜生物量的影响¹⁾/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

Table 2 Change in Chinese cabbage biomass in different types of soil with Cd concentration/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

土壤类型	CK	不同外源 Cd 处理/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
		0.5	1	2
漂洗黄壤	39.06 ± 0.69Da	37.94 ± 1.51Da	35.76 ± 3.40Ca	27.80 ± 2.93Cb
酸性紫色土	38.56 ± 0.64Da	34.79 ± 0.28Dab	33.24 ± 0.79Cab	29.57 ± 2.02Cb
典型黄壤	42.92 ± 0.81CDa	38.61 ± 0.95cDab	36.59 ± 2.23Cb	28.71 ± 1.58Cc
中性紫色土	45.57 ± 0.56Ca	44.08 ± 1.33Ca	43.01 ± 0.75Bab	37.73 ± 1.40Bb
灰潮土	61.83 ± 0.50Aa	58.69 ± 1.43Aa	50.93 ± 1.79Ab	47.65 ± 1.09Ab
石灰性紫色土	53.75 ± 0.77Ba	50.13 ± 0.77Bab	50.11 ± 2.18Aab	48.03 ± 2.35Ab

1) 不同大写字母表示土壤间差异达 0.05 显著水平,不同小写字母表示处理间达 0.05 显著水平,下同

对照无显著差异,但 Cd 含量却均有显著增加,增幅为对照的 1.59 ~ 8.50 倍,其中典型黄壤 (1.406 mg·kg⁻¹) 和漂洗黄壤 (1.251 mg·kg⁻¹) 中小白菜 $\omega(\text{Cd})$ 显著高于其他 4 种土壤 (0.169 ~ 0.891 mg·kg⁻¹),以石灰性紫色土最低,为 0.169 mg·kg⁻¹,差异最大可达 8.32 倍;在 1 mg·kg⁻¹ Cd 处理时,6 种土壤中小白菜 Cd 含量进一步增加,典型黄壤的小白菜 $\omega(\text{Cd}) = 2.637 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其余 5 种土壤 (0.235 ~ 2.081 mg·kg⁻¹),其中石灰性紫色土的小白菜 Cd 含量仍最低,为 0.235 mg·kg⁻¹,差异最大可达 11.22 倍;2 mg·kg⁻¹ Cd 处理时,典型黄壤、漂洗黄壤和酸性紫色土中小白菜 $\omega(\text{Cd})$ 为 2.824 ~ 3.067 mg·kg⁻¹,显著高于其他 3 种土壤,石灰性紫色土中小白菜 $\omega(\text{Cd})$ 显著最低,为 0.473 mg·kg⁻¹.

从小白菜 Cd 富集系数来看,不同外源 Cd 处理下 (0.5、1 和 2 mg·kg⁻¹),3 种酸性土壤 (漂洗黄壤、酸性紫色土和典型黄壤) 均显著高于中性土壤 (中性紫色土和灰潮土) 和石灰性紫色土,表明 Cd 在酸性土壤中更易被小白菜吸收和富集.此外,同为酸性的 3 种土壤中,黄壤类 (典型黄壤和漂洗黄壤) 明显高于紫色土类 (酸性紫色土);同为紫色土类的酸性紫色土又明显高于中性紫色土和石灰性紫色土,是石灰性紫色土的 5.63 ~ 6.75 倍.由此可知,等量外源 Cd 进入不同土类和同一土类不同亚类土壤后的生物有效性存在明显差异,漂洗黄壤和典型黄壤中小白菜 Cd 含量均显著高于其他 4 种土壤,Cd 的生物有效性最高,小白菜 Cd 的富集量也相对最高;而石灰性紫色土中小白菜 Cd 含量在各含量处理下均显著低于其他 5 种土壤,Cd 的生物有效性最低.

表 3 外源 Cd 对不同类型土壤中小白菜 Cd 含量和富集系数的影响¹⁾

土壤类型	CK	Cd 0.5 mg·kg ⁻¹		Cd 1 mg·kg ⁻¹		Cd 2 mg·kg ⁻¹	
	Cd 含量	Cd 含量	BCF _{小白菜}	Cd 含量	BCF _{小白菜}	Cd 含量	BCF _{小白菜}
漂洗黄壤	0.251 ± 0.021Ad	1.251 ± 0.102Ac	2.278	2.081 ± 0.077Bb	1.984	3.067 ± 0.026Aa	1.497
酸性紫色土	0.109 ± 0.003Bd	0.891 ± 0.012Be	1.440	1.534 ± 0.017Cb	1.371	2.824 ± 0.310Aa	1.333
典型黄壤	0.267 ± 0.004Ad	1.406 ± 0.125Ac	2.396	2.637 ± 0.043Ab	2.426	3.074 ± 0.071Aa	1.473
中性紫色土	0.046 ± 0.004Cc	0.438 ± 0.031Cb	0.677	0.608 ± 0.057Db	0.530	1.187 ± 0.091Ba	0.553
灰潮土	0.045 ± 0.001Cd	0.352 ± 0.020Cc	0.541	0.626 ± 0.018Db	0.544	0.824 ± 0.015Ca	0.383
石灰性紫色土	0.065 ± 0.001Cd	0.169 ± 0.005De	0.256	0.235 ± 0.008Eb	0.203	0.473 ± 0.049Da	0.219

1) Cd 含量单位为 mg·kg⁻¹,以鲜重计

3 讨论

3.1 外源 Cd 在土壤中的稳定化过程

从图 1 可知,外源 Cd 进入 6 种土壤后,其有效 Cd 含量均在 15 d 内迅速降低,后趋于平缓,与施入后 30 d 无显著差异.有研究表明^[12,13],外源 Cd 进入土壤后,存在明显的两个阶段:快速稳定阶段和慢速稳定阶段.快速稳定阶段是 Cd 进入土壤以后,受到土壤矿物颗粒、腐殖物质和各种离子等的作用,发生吸附、离子交换和螯合等各种物理-化学反应,使得进入土壤中的外源 Cd 有效性迅速降低;而慢速稳定阶段是 Cd 进一步向土壤微孔隙渗透和扩散,反应速率逐渐减慢,直到 Cd 的形态分配达到平衡.

土壤中的 Cd 形态可分为:可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机络合态和残渣态^[11].其中,可交换态是最易溶解和迁移并被植物吸收的形态;碳酸盐结合态、铁锰氧化物和有机络合态的有效性均较低,较难被利用;残渣态存在于矿物晶格和部分稳定性有机化合物中,最为稳定,对环境的危害度最小^[14,15].图 2 表明,外源 Cd 稳定后,6 种土壤中的 Cd 均以可交换态 Cd 的占比最高

(42.51% ~ 56.07%),但其他形态 Cd 的相对占比则在土壤间的差异较大.黄壤类土壤中,交换态 Cd 的占比相对最大,同时由于该类土壤富含大量的铁锰氧化物,能够提供更多的铁锰水化合物和 Cd 发生作用^[16,17],因此,漂洗黄壤和典型黄壤的铁锰氧化物结合态 Cd 的占比也高于其他土壤;灰潮土中有机质含量较高,易于和 Cd 发生络合和螯合反应,故土壤中有有机络合态 Cd 的占比较高,有效 Cd 含量较低^[18,19];而石灰性紫色土呈碱性且碳酸盐含量高,可与 Cd 生成共沉淀,其碳酸盐结合态 Cd 的占比达 19.34%,故有效 Cd 含量相对最低^[20,21].尽管 6 种土壤中外源 Cd 随时间的稳定化过程具有一定的相似性,但不同土壤因理化性质的不同对 Cd 的固定能力和固定机制存在明显差异.

3.2 不同类型土壤 Cd 有效性的差异

在不同外源 Cd 处理下 (0.5、1 和 2 mg·kg⁻¹),6 种土壤中有效 Cd 含量 (图 3) 和小白菜 Cd 含量 (表 3) 总体表现为:酸性土壤 (漂洗黄壤、典型黄壤和酸性紫色土) > 中性土壤 (灰潮土和中性紫色土) > 碱性土壤 (石灰性紫色土).有研究表明,土壤 pH 值控制着 Cd 水合氧化物、碳酸盐和硫酸盐的溶解

度,影响着土壤中 Cd 的水解和离子对的形成、有机物的溶解性、铁铝氧化物和有机物的表面电荷等,是影响重金属吸附特性的主要因素^[22,23]. 酸性土壤 pH 值较低,土壤中的负电荷较少,土壤对 Cd^{2+} 的吸附能力弱^[24],同时酸性土壤中 H^+ 和 Al^{3+} 的含量和活性更高,可与 Cd^{2+} 竞争吸附点位,从而进一步导致土壤对 Cd^{2+} 的吸附减少,有效 Cd 含量增加^[25,26]. 随着土壤 pH 的升高,土壤表面的负电荷增加,对 Cd^{2+} 的吸附力加强^[27,28],同时 Cd^{2+} 在氧化物表面的专性吸附和土壤有机质-金属络合物的稳定性随 pH 升高而增强^[29,30]. 随着 pH 的升高,土壤溶液中 H^+ 、 Fe^{2+} 和 Al^{3+} 浓度减小,与 Cd^{2+} 竞争吸附减少,更有利于土壤吸附 Cd^{2+} ^[31,32],同时,高 pH 还有利于 CdOH^+ 生成, CdOH^+ 在土壤吸附点位上的亲和力明显高于 Cd^{2+} ,从而促进了 Cd^{2+} 的吸附^[33]. 此外,当土壤呈碱性时, Cd^{2+} 会形成 CdCO_3 和 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 的结合形态,使有效 Cd 含量和植物对 Cd 的吸收能力均明显降低^[34,35]. 因此, pH 值较低的漂洗黄壤、典型黄壤和酸性紫色土中有效 Cd 含量较高. 结合表 1 中不同土壤的理化性质,发现漂洗黄壤、典型黄壤和酸性紫色土中 CEC 和有机质含量也相对较低. 而土壤中有有效 Cd 含量也和 CEC 和土壤有机质密切相关^[36~38]. 其中土壤 CEC 反映了土壤胶体的负电荷量,其值越高,表示土壤中负电荷量越高,从而能够提供更多吸附点位来固定 Cd^[39~41], CEC 显著较低的酸性紫色土和漂洗黄壤对 Cd 的固定能力较弱,因此有效 Cd 含量较高. 而土壤有机质中富含羧基、酚羟基和醇羟基等含氧功能团,容易和 Cd 发生络合或螯合反应,是土壤中重要的 Cd 络合剂^[42,43]; 同时,土壤中的有机质以有机颗粒或有机膜被覆的形式和土壤中的黏土矿物和氧化物等无机颗粒相结合,形成有机胶体或有机-无机复合胶体,由此增加了土壤的表面积和表面活性,也使得土壤中 Cd 的生物有效性随有机质的增加而降低^[44]; 土壤有机质也可通过影响植物对其他金属离子的吸收来提高其对 Cd 的耐性^[45]. 综上,土壤 pH、CEC 和有机质含量均显著较低的酸性紫色土、典型黄壤和漂洗黄壤,其土壤有效 Cd 含量高于灰潮土、中性紫色土和石灰性紫色土.

4 结论

(1)外源 Cd 进入 6 种土壤后的有效 Cd 含量和 Cd 的形态分布均在 Cd 处理 15 d 后趋于稳定,稳定后,漂洗黄壤($1.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和酸性紫色土($1.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的有效 Cd 含量显著高于其他 4 种土壤,石灰性紫色土最低. 6 种土壤中 Cd 的形态均以可

交换态 Cd 的占比最高(42.51%~56.07%),此外,漂洗黄壤和典型黄壤中的铁锰氧化物结合态 Cd,石灰性紫色土中的碳酸盐结合态和灰潮土中的有机络合态 Cd 的占比相对较高,和土壤间 pH、CEC 和有机质等性质的分异密切相关.

(2)外源 Cd 的化学有效性和生物有效性在 6 种土壤间的差异特征因 Cd 处理含量的不同而有明显不同. 低含量 Cd 处理($0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对 6 种土壤小白菜生长无明显抑制,但其可食部位中的 Cd 则有不同程度地富集,其富集系数表现为典型黄壤和漂洗黄壤显著高于其他 4 种土壤,差异达 9.4 倍;高含量 Cd 处理下($2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),6 种土壤中小白菜的生长均受到明显抑制,生物量均显著低于对照,土壤间有效 Cd 含量和小白菜 Cd 含量差异显著,表现为:酸性土壤(漂洗黄壤、典型黄壤和酸性紫色土) > 中性土壤(灰潮土和中性紫色土) > 碱性土壤(石灰性紫色土),两指标均以酸性土壤尤其是漂洗黄壤最高,石灰性紫色土最低.

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京:环境保护部,2014.
- [2] 王玉军,刘存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报,2014, 33(8): 1465-1473.
Wang Y J, Liu C, Zhou D M, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [3] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: a critical review[J]. Environment International, 2016, 92-93: 515-532.
- [4] Sayen S, Guillon E. Aging effect on Zn retention on a calcareous soil: column experiments and synchrotron X-ray micro-spectroscopic investigation[J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 545-556.
- [5] Naidu R, Bolan N S. Chapter 2 contaminant chemistry in soils: key concepts and bioavailability[J]. Developments in Soil Science, 2008, 32: 9-37.
- [6] 林蕾,陈世宝,刘继芳,等. 不同老化时间对土壤中外源 Zn 的形态转化及生态毒性阈值(EC_x)的影响[J]. 应用生态学报,2013, 24(7): 2025-2032.
Lin L, Chen S B, Liu J F, et al. Effects of aging time on the form transformation and eco-toxicity threshold (EC_x) of added Zn in typical China soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 2025-2032.
- [7] Lock K, Janssen C R. Influence of aging on metal availability in soils[A]. In: Ware G W (Ed.). Reviews of Environmental Contamination and Toxicology[C]. New York: Springer, 2003.
- [8] 李传飞,李廷轩,张锡洲,等. 外源镉在几种典型农耕土壤中的稳定化特征[J]. 农业环境科学学报,2017, 36(1): 85-92.
Li C F, Li T X, Zhang X Z, et al. Stabilization characteristics of cadmium in some typical agricultural soils[J]. Journal of Agro-

- Environment Science, 2017, **36**(1): 85-92.
- [9] Tang X J, Li X, Liu X M, *et al.* Effects of inorganic and organic amendments on the uptake of lead and trace elements by brassica chinensis grown in an acidic red soil[J]. Chemosphere, 2015, **119**: 177-183.
- [10] 四川省国土资源厅. 四川省土壤污染状况调查公报[EB/OL]. <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/10727/10866/2014/12/1/10319883.shtml>, 2014-12-01.
- [11] 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.
- [12] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 4030-4043.
- Qin Y L, Xiong S J, Xu W H, *et al.* Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in soil and uptake by chinese cabbage at different soil pH and cadmium levels [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 4030-4043.
- [13] 蔡楠, 肖青青, 许振成, 等. 基于土壤-农作物迁移途径重金属镉化学形态研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 13-18.
- Cai N, Xiao Q Q, Xu Z C, *et al.* The chemical forms of cadmium through soil-crop transport [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 13-18.
- [14] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 143-153.
- [15] 熊仕娟, 徐卫红, 谢文文, 等. 纳米沸石对土壤 Cd 形态及大白菜 Cd 吸收的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- Xiong S J, Xu W H, Xie W W, *et al.* Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in soil and its uptake by cabbage[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- [16] 肖瑶, 彭渤, 杨梓璇, 等. 湘江下游重污染段河床沉积物重金属赋存特征[J]. 环境化学, 2017, **36**(9): 1977-1986.
- Xiao Y, Peng B, Yang Z X, *et al.* Speciation of heavy metals in riverbed sediments of heavy pollution section of the lowermost of the Xiangjiang River [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(9): 1977-1986.
- [17] Suda A, Makino T. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: a review[J]. Geoderma, 2016, **270**: 68-75.
- [18] 吴清清, 马军伟, 姜丽娜, 等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(7): 1302-1309.
- Wu Q Q, Ma J W, Jiang L N, *et al.* Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(7): 1302-1309.
- [19] Yuan C L, Li Q, Sun Z Y, *et al.* Effects of natural organic matter on cadmium mobility in paddy soil: a review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **104**: 204-215.
- [20] 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.
- [21] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 等. 岩溶区石灰性土壤对 Cd²⁺ 吸附的解吸特性及滞后效应[J]. 环境化学, 2016, **35**(7): 1407-1414.
- Zhu D N, Zou S Z, Zhou C S, *et al.* Desorption characteristics and hysteresis of adsorbed cadmium in calcareous soils on karst area [J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(7): 1407-1414.
- [22] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [23] Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, *et al.* Cadmium sorption and desorption in soils: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, **42**(5): 489-533.
- [24] Neina D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2019, **2019**, doi: 10.1155/2019/5794869.
- [25] Kubier A, Wilkin R T, Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: a review[J]. Applied Geochemistry, 2019, **108**, doi: 10.1016/j.apgeochem.2019.104388.
- [26] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, *et al.* Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety [J]. Environmental Pollution, 2019, **249**: 1038-1048.
- [27] 吴继阳, 郑凯琪, 杨婷婷, 等. 污泥生物炭对土壤中 Pb 和 Cd 的生物有效性的影响[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(10): 5757-5763.
- Wu J Y, Zheng K Q, Yang T T, *et al.* Remediation of Pb and Cd contaminated soil by sludge biochar [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(10): 5757-5763.
- [28] 刘雅, 辜娇峰, 周航, 等. 谷壳灰对稻田土壤镉、砷生物有效性及糙米镉、砷累积的影响[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(7): 2581-2588.
- Liu Y, Gu J F, Zhou H, *et al.* Effects of rice husk ash on Cd and As bioavailability in paddy soil and their accumulation in brown rice [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(7): 2581-2588.
- [29] 和君强, 刘代欢, 邓林, 等. 农田土壤镉生物有效性及暴露评估研究进展[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(6): 69-82.
- He J Q, Liu D H, Deng L, *et al.* Bioavailability and exposure assessment of cadmium in farmland soil: a review [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(6): 69-82.
- [30] Ye X X, Li H Y, Ma Y B, *et al.* The bioaccumulation of Cd in rice grains in paddy soils as affected and predicted by soil properties [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(8): 1407-1416.
- [31] 詹杉, 袁红, 杜田甜, 等. 不同降镉处理对水稻土酸碱缓冲能力和有效镉含量的影响[J]. 热带作物学报, 2020, **41**(2): 225-229.
- Zhan S, Yuan H, Du T T, *et al.* Effects of buffering ability to acid and alkali and available cadmium content in different cadmium reduction treatments in paddy soil [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, **41**(2): 225-229.
- [32] 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 等. 棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1871-1879.
- Liu S D, Zhu X P, Han Y G, *et al.* Control of cadmium migration and transformation in alkaline paddy soil-rice using cotton stalk biochar [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4):

- 1871-1879.
- [33] 迟菽琳, 徐卫红, 熊仕娟, 等. 不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1654-1666.
- Chi S L, Xu W H, Xiong S J, *et al.* Effect of nano zeolites on pH, CEC in soil and Cd fractions in plant and soil at different cadmium levels [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1654-1666.
- [34] Lim J E, Ahmad M, Usman A R A, *et al.* Effects of natural and calcined poultry waste on Cd, Pb and As mobility in contaminated soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(1): 11-20.
- [35] 王芳婷, 陈植华, 包科, 等. pH 值对海陆交互土壤镉纵向迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 335-341.
- Wang F T, Chen Z H, Bao K, *et al.* Effects of pH on vertical migration of cadmium in the sea land interaction zone[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 335-341.
- [36] 王逸群, 许端平, 薛杨, 等. Pb 和 Cd 赋存形态与土壤理化性质相关性研究[J]. 地球与环境, 2018, **46**(5): 451-455.
- Wang Y Q, Xu D P, Xue Y, *et al.* Correlation between fractionation content of Pb, Cd and physico-chemical properties of contaminated soils[J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(5): 451-455.
- [37] 卢维宏, 刘娟, 张乃明, 等. 设施菜地土壤重金属累积及影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(6): 2744-2753.
- Lu W H, Liu J, Zhang N M, *et al.* Study on the accumulation of heavy metals and influencing factors in the soil of facility vegetable fields[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2744-2753.
- [38] Grütter R, Costerousse B, Mayer J, *et al.* Long-term organic matter application reduces cadmium but not zinc concentrations in wheat[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **669**: 608-620.
- [39] 郭毅轩, 赵秀兰. 颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5180-5188.
- Guo Y X, Zhao X L. Effect of particulate organic matter on cadmium uptake and transport in rice [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5180-5188.
- [40] 安梦洁, 王开勇, 王海江, 等. 改良剂对滴灌棉田镉分布及迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(4): 291-296.
- An M J, Wang K Y, Wang H J, *et al.* Effect of conditioners on the distribution and migration of cadmium in drip irrigation cotton field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(4): 291-296.
- [41] Kelebemang R, Dinake P, Schube N, *et al.* Speciation and mobility of lead in shooting range soils[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2017, **29**(1): 143-152.
- [42] 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 等. 广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1514-1522.
- Ma H H, Peng M, Guo F, *et al.* Factors affecting the translocation and accumulation of cadmium in a soil-crop system in a typical karst area of Guangxi Province, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1514-1522.
- [43] Chen W, Peng L, Hu K R, *et al.* Spectroscopic response of soil organic matter in mining area to Pb/Cd heavy metal interaction: a mirror of coherent structural variation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **393**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122425.
- [44] 宋波, 曾伟铨. 土壤有机质对镉污染土壤修复的影响[J]. 土壤通报, 2015, **46**(4): 1018-1024.
- Song B, Zeng W Q. Effects of organic matter on the remediation of cadmium-contaminated soil-a review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(4): 1018-1024.
- [45] Zhang X Q, Li Y, Ye J, *et al.* The spectral characteristics and cadmium complexation of soil dissolved organic matter in a wide range of forest lands[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **299**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118834.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)