

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

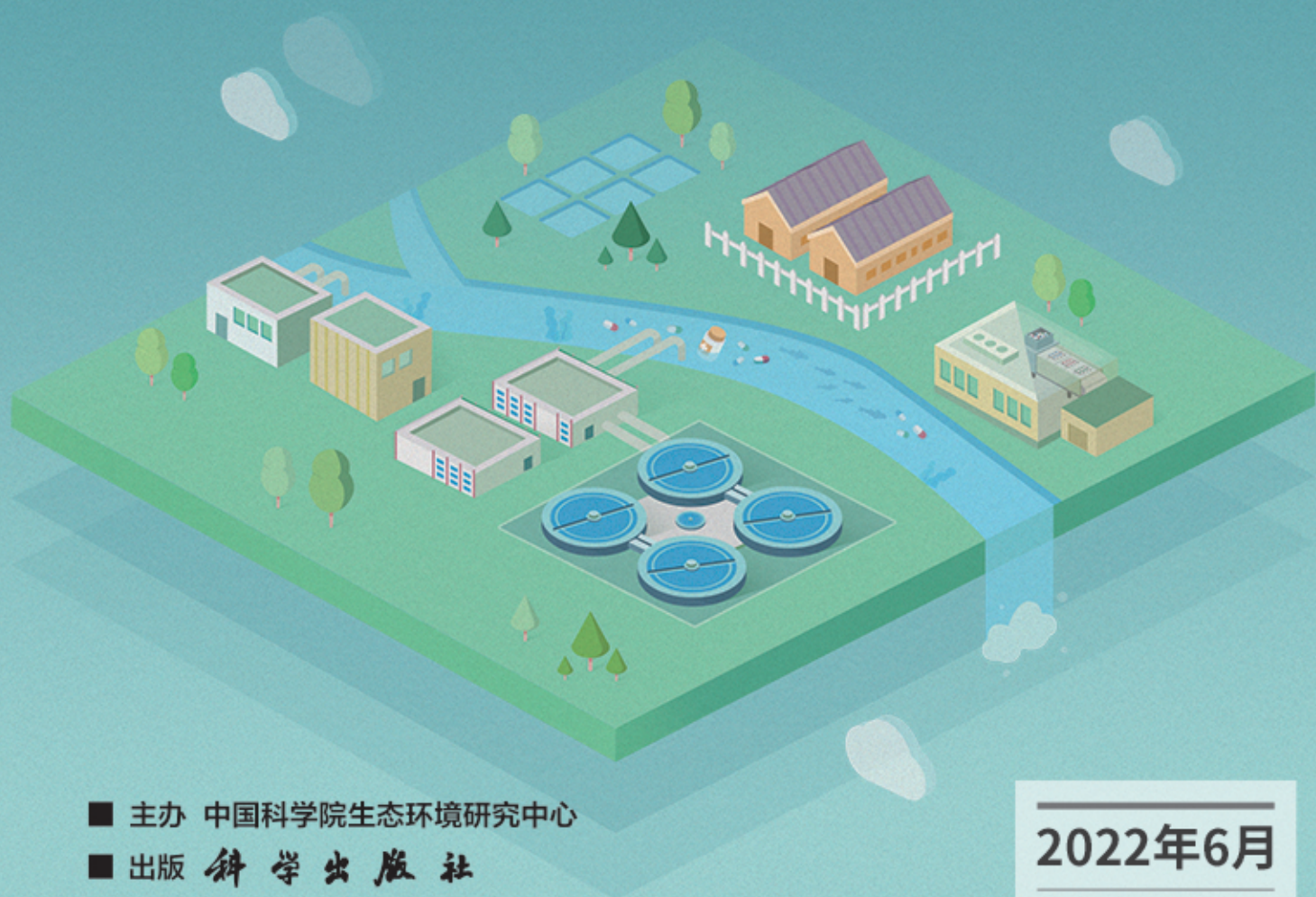
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐蘇士, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复

许璐¹, 周春海^{1, 2}, 刘梅³, 孔辉³, 李元¹, 黄志红^{3*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 山东天弘化学有限公司, 东营 257200; 3. 圣清环保股份有限公司, 昆明 650100)

摘要: 为安全利用并修复矿区重度镉污染农田, 使作物达到饲料安全标准, 以不同配比的石灰海泡石作为钝化剂, 钝化后试验两种轮作模式(玉米-紫花苜蓿和玉米-黑麦草), 综合分析比较, 筛选出最佳的钝化剂配比及配套的轮作模式。进行大田试验, 测定土壤理化性质、重金属 Cd 有效态含量及作物中 Cd 含量、生物量, 并采用 BCR 形态分级试验研究土壤钝化前后重金属形态的变化, 综合分析评价其修复效果。结果表明: ①通过石灰海泡石的施加, 能不同程度地提高土壤 pH 值、有机质和 CEC。②推荐施加量为 LS1 (石灰 $6.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 海泡石 $9.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 相比 CK 可显著降低玉米根、茎、叶和籽粒中重金属 Cd 的含量, 分别降低了 70.27%、61.54%、46.51% 和 44.23%。紫花苜蓿地上部 Cd 显著下降了 78.47%, 而黑麦草地上部 Cd 显著下降了 65.79%。玉米季、紫花苜蓿种植区和黑麦草种植区土壤有效态 Cd 钝化率分别为 51.37%、69.58% 和 77.83%, 土壤中重金属由活性高的弱酸提取态向活性低的残渣态进行转化。③推荐在施加量为 LS1 下, 配合玉米-紫花苜蓿的轮作模式, 相比 CK, 在略微提高玉米产量的同时可显著提高紫花苜蓿产量, 且可饲用部分均能达到饲料标准 [GB 13078-2017, $\omega(\text{Cd}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], 实现安全种植的同时修复成本最低。

关键词: 镉(Cd)污染; 石灰; 海泡石; 轮作; 钝化

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3299-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109161

Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation

XU Lu¹, ZHOU Chun-hai^{1, 2}, LIU Mei³, KONG Hui³, LI Yuan¹, HUANG Zhi-hong^{3*}

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Shandong Tianhong Chemical Co., Ltd., Dongying 257200, China; 3. Shengqing Environmental Protection Co., Ltd., Kunming 650100, China)

Abstract: In order to safely utilize and remediate the heavily cadmium-contaminated farmland in a mining area and ensure that the crops meet the feed safety standards, two rotation patterns (maize-alfalfa and maize-ryegrass) were tested after passivation with different ratios of lime and sepiolite as passivating agents, and the best ratio of passivating agent and matching crop rotation patterns were selected through comprehensive analysis and comparison. The field test was conducted to determine the physical and chemical properties of the soil, the content of the effective state of the heavy metal Cd, and the content and biomass of Cd in crops. We also studied the changes in heavy metal morphology before and after soil passivation using the BCR morphology classification test and comprehensively analyzed and evaluated its remediation effect. ① The results showed that the soil pH, organic matter, and CEC could be increased to different degrees by the application of lime and sepiolite. ② The recommended application amount of LS1 (lime $6.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ + sepiolite $9.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) significantly reduced the content of heavy metal Cd in maize roots, stems, leaves, and seeds by 70.27%, 61.54%, 46.51%, and 44.23%, respectively, compared with those of CK. The Cd above ground in alfalfa was significantly reduced by 78.47%, whereas the Cd above ground in ryegrass was significantly reduced by 65.79%. The effective state Cd passivation rate of the soil was 51.37%, 69.58%, and 77.83% in the corn season, alfalfa growing area, and ryegrass growing area, respectively. The heavy metals in the soil were converted from the weak acid extracted state with high activity to the residual state with low activity. ③ The recommended crop rotation pattern of supporting maize-alfalfa under the applied amount of LS1 can significantly increase alfalfa yield while slightly increasing maize yield compared with those of CK, and the forageable parts can meet the feed standard [GB 13078-2017, $\omega(\text{Cd}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], achieving safe cultivation with the lowest restoration cost.

Key words: cadmium(Cd)contamination; lime; sepiolite; crop rotation; passivation

云南省拥有非常丰富的矿产资源, 被称为“有色金属王国”, 但在发展工矿业的同时也带来了很多问题^[1]。金属矿石的开采、冶炼和加工等活动会导致重金属释放到空气、水和土壤中, 再经食物链进入人体, 威胁当地居民健康^[2]。根据 Hu 等^[3]的研究, 云南当前的土壤镉(Cd)含量与平均 Cd 背景值的比值为 16.92, 属于极高风险地区, 在如此严重的污染下, 如何安全利用并修复土壤值得研究。国内外修复重金属污染土壤的方法主要有化学法、物理法和生

物法^[4]。其中化学钝化法经济便宜, 适用于大面积土壤原位修复, 该技术是向污染土壤中投加钝化材料, 降低重金属在土壤中的迁移率和生物有效性等^[5]。钝化材料像石灰和海泡石等, 石灰可以提高土壤 pH

收稿日期: 2021-09-17; 修订日期: 2021-10-22

基金项目: 云南省重点研发项目(2018BB017); 云南省科技型中小企业技术创新资金项目(2017EH141)

作者简介: 许璐(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: 2845610845@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqhh2020@163.com

值^[6],促进重金属形成沉淀^[7],海泡石具有较大的孔容和比表面积^[8],通过吸附作用^[9]、离子交换^[10]和共沉淀^[11]等对重金属污染土壤具有良好的钝化效果^[12],并能降低作物对 Cd 的吸收.轮作可以使不同作物均衡利用土壤养分,减少病虫害和连作障碍的发生,利于提高作物产量及品质^[13,14],生物量高的经济作物轮作可以加快修复土壤 Cd 污染并获得经济效益^[15].玉米在轮作体系中是许多作物的良好前茬^[16],牧草也是轮作种植模式中优选的作物^[17].

目前农田原位钝化修复技术集中于单一种植模式下对土壤重金属的固化效果^[18],且农田污染程度相对较轻.对重度污染农田的利用和修复研究较少,对钝化后不同作物轮作情况的研究也较少,而将两者结合起来研究的暂未见报道.本试验选取矿区周边 Cd 重污染农田进行研究,在施加不同配比的石灰和海泡石后,采用玉米-紫花苜蓿和玉米-黑麦草这 2 种轮作模式,在满足饲料安全标准的前提下,筛选出作物产量提高最明显的轮作模式,及其相应钝化剂施加量配比,以期为 Cd 重度污染农田土壤如何安全利用与修复提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

本试验地点为云南省某矿区周边玉米农田,矿区全年露天开采,开采矿种主要为铅锌矿.经过前期试验发现,该区域所种玉米可食用部分 Cd 和 Pb 的确超过食品安全国家标准 [GB 2762-2017, $\omega(\text{Cd}) \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Pb}) \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$],但如果作为饲料,仅 Cd 超过饲料标准,而 Pb 不超标 [GB 13078-2017, $\omega(\text{Cd}) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Pb}) \leq 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$],故主要针对 Cd 进行研究.试验地土壤类型为砖红土,具体养分含量为: $\omega(\text{速效磷}) 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{速效钾}) 0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{碱解氮}) 0.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\omega(\text{有机质}) 38.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.所用石灰和海泡石购自湖南湘潭海泡石有限公司.供试土壤及钝化剂的 pH 和重金属含量见表 1.

表 1 供试土壤与钝化剂的 pH 值和重金属含量¹⁾

Table 1 pH value and heavy metal content of tested soil and passivation agent

项目	pH 值	$\omega(\text{全量 Cd})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{有效态 Cd})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
土壤	6.34	21.15	6.43
石灰	9.51	0.31	—
海泡石	12.34	0.18	—

1) “—”表示未检验

1.2 试验方法

本试验采用玉米 (*Zea mays*), 品种为“宣会 7

号”,作为青贮玉米;黑麦草 (*Lolium perenne*) 及紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 种子购买于当地种子店.

大田试验开展 6 个处理,除 CK 外其他不同处理的钝化剂配比及施加量基于前期盆栽试验结果确定,见表 2.考虑到有两种轮作模式,每个处理 6 个重复,共计 36 个小区.每个小区面积 15 m^2 ,小区间隔 1 m,中间设田埂,小区四周设排水沟便于雨季排水.钝化剂施用时用大型机械将其与土壤充分混匀,耕作深度 20 cm.钝化 10 d 后种植玉米,采用宽窄行种植,株距 30 cm,行距 60 cm,生长期根据情况进行杀虫、除草、排水和追肥.于玉米成熟期采取土样与植物样,此时每种处理下有 6 个玉米小区,将 2 个相邻小区视为 1 个大区,五点取样法,每个大区采取 5 株玉米,收集玉米根际土壤,土样风干后混匀,过 2 mm 尼龙筛,装袋保存、备用;每株玉米分为根、茎、叶和籽粒这 4 个部分,去离子水清洗, 105°C 烘箱内杀青 30 min,然后在 75°C 烘干至恒重,用不锈钢粉碎机粉碎,过 0.5 mm 尼龙筛,装袋保存、备用.

玉米收获完成后进行精细整地,分区种植黑麦草和紫花苜蓿.彻底清除杂草,深耕、耙平,采用条播,行距 20 cm,生长期管理同玉米种植.于牧草成熟期采取土样与植物样,五点取样法,每个小区采取 5 堆牧草,收集牧草根际土壤,土样风干后混匀,过 2 mm 尼龙筛,装袋保存、备用;每株牧草分解地上、地下两部分,用自来水和去离子水清洗干净,放入 105°C 烘箱内杀青 30 min,然后在 75°C 烘干至恒重,再用不锈钢粉碎机粉碎,过 0.5 mm 尼龙筛,装袋保存、备用.

表 2 钝化剂施用量

Table 2 Application amount of passivating agent

钝化剂	钝化剂用量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$					
	CK	LS1	LS2	LS3	LS4	LS5
石灰(L)	0	6.6	7.8	9	10.2	11.4
海泡石(S)	0	9.9	11.7	13.5	15.3	17.1

1.3 样品分析与数据统计

土壤基本理化性质按照土壤农化常规分析方法测定^[19].土壤重金属全量采用王水-高氯酸消解^[20],土壤有效态重金属采用 DTPA 提取剂提取^[21],形态分级试验则参照欧共体标准测量与检测局提出的 BCR 法进行^[22],植物重金属含量采用硝酸-过氧化氢,于压力消解罐中消解.土壤重金属含量和 DTPA 提取态含量利用火焰原子吸收分光光度计 (Thermo ICE 3000 SERIES) 进行测定,植物重金属含量及土壤中弱酸提取态重金属含量利用石墨炉原子吸收分光光度计 (Thermo ICE 3000 SERIES) 进行测定,采

用国家标准物质(土壤:GBW07407,植物:GBW10012)进行质量控制,土壤样品和植物样品回收率分别为95%~103%和92%~102%。重金属钝化效率按下式计算^[23]:

$$\text{钝化效率} = [1 - (C_e/C_i)] \times 100\%$$

式中, C_e 为污染土壤钝化后单一金属元素浸出含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_i 为未处理污染土壤单一金属元素浸出含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$$\text{富集系数} = \frac{\text{植物体内重金属含量}}{\text{土壤中重金属含量}}$$

本研究数据采用 Microsoft Excel 软件进行编辑和整理,采用 SPSS 23.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和差异显著性检验($P < 0.05$), Origin 软件绘图。图表中的数据用3个重复的均值 $\pm$ 标准差表示。

采用动态加权综合评估法^[24,25]对各处理结果进行综合评价,从土壤 pH 值、作物可饲用部分 Cd 含量、土壤有效态 Cd 含量、作物地上部产量和修复药剂成本这5个方面进行考量,按评估指标的特性进行一致化和标准化处理,根据指标和权重值的变化确定权函数为偏大型正态分布,即

$$W_i(x) = \begin{cases} 0, & x_i < \alpha_i \\ 1 - e^{-\frac{(x_i - \alpha_i)^2}{\sigma_i^2}}, & x_i \geq \alpha_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, $W_i(x)$ 为每个指标对应的权函数, x_i 为第 i 个评估指标的取值, α_i 取 x_i 的 I 类中间值; σ_i 由 $W_i(\alpha_3^i) = 0.9$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 确定, α_3^i 为第 i 个评估指标第3区间值 $[\alpha_3, b_3]$ 。再根据标准化的评估指标值 x_i 及相对应的动态权函数 $W_i(x)$ 建立综合评价模型,评价结果 X 为各指标的动态加权和,即:

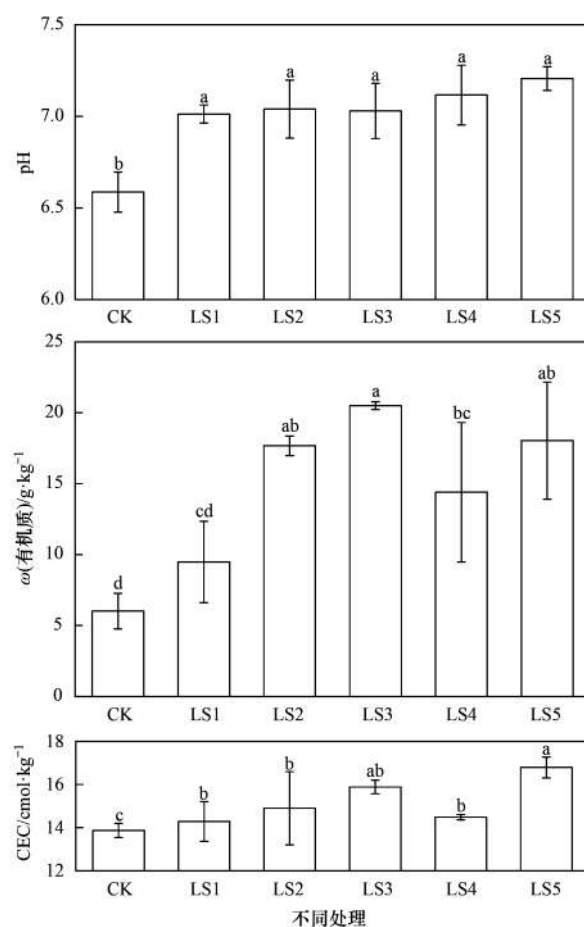
$$X = \sum_i W_i(x_i) x_i \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 施用石灰海泡石对不同作物土壤理化性质的影响

石灰和海泡石复配可显著提高土壤 pH 值^[26,27],由图1和图2可看出,在不同处理下玉米季土壤 pH 值相比 CK (6.58) 均显著提高 0.43 ~ 0.63 个 pH 值单位,牧草季紫花苜蓿区土壤 pH 相比 CK (6.80) 均显著提高 0.46 ~ 1.34 个 pH 值单位,黑麦草区土壤 pH 相比 CK (6.72) 均显著提高 0.53 ~ 1.57 个 pH 值单位。随着钝化剂施加量的增加 pH 值不断提高,均在 LS5 处理下提高至最大,但不同处理间无显著差异。土壤有机质、CEC (阳离子交换量) 是衡量土壤肥力的重要指标^[28,29],在玉米

季所有处理均能提升土壤有机质,相比 CK 提高了 57.57% ~ 241.10%,牧草季黑麦草区情况与之大致相同。而在牧草季紫花苜蓿区 LS5 处理下土壤有机质相比 CK 反倒有所下降,可能是在该施加量下更利于土壤微生物活动,加速含碳有机物转化,促进有机质分解^[30]。在各处理下,玉米季土壤 CEC 相比 CK 分别显著提升 3.03% ~ 21.14%,到了牧草季除黑麦草区的 LS3 外,其他处理土壤 CEC 仍有所提高,但相比 CK 已经没有了显著性,说明此时土壤 CEC 已趋于稳定。



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图1 玉米季不同处理下土壤 pH 值、有机质和 CEC 的变化情况

Fig. 1 Changes in soil pH, organic matter, and CEC under different treatments in the maize season

2.2 施用石灰海泡石对不同作物土壤 Cd 赋存形态及有效态含量的影响

由图3和图4可知,在施加复合钝化剂后,与 CK 相比,玉米季土壤有效态重金属 Cd 的含量均显著降低了 51.36% ~ 72.82%,随着钝化剂施加量的增加不断降低,在 LS5 时达到最低。牧草季紫花苜蓿区土壤有效态 Cd 含量相比 CK 均显著降低 65.64% ~ 95.06%,黑麦草区土壤有效态 Cd 含量相比 CK 均显著降低 61.73% ~ 93.01%,两个区域均在 LS5

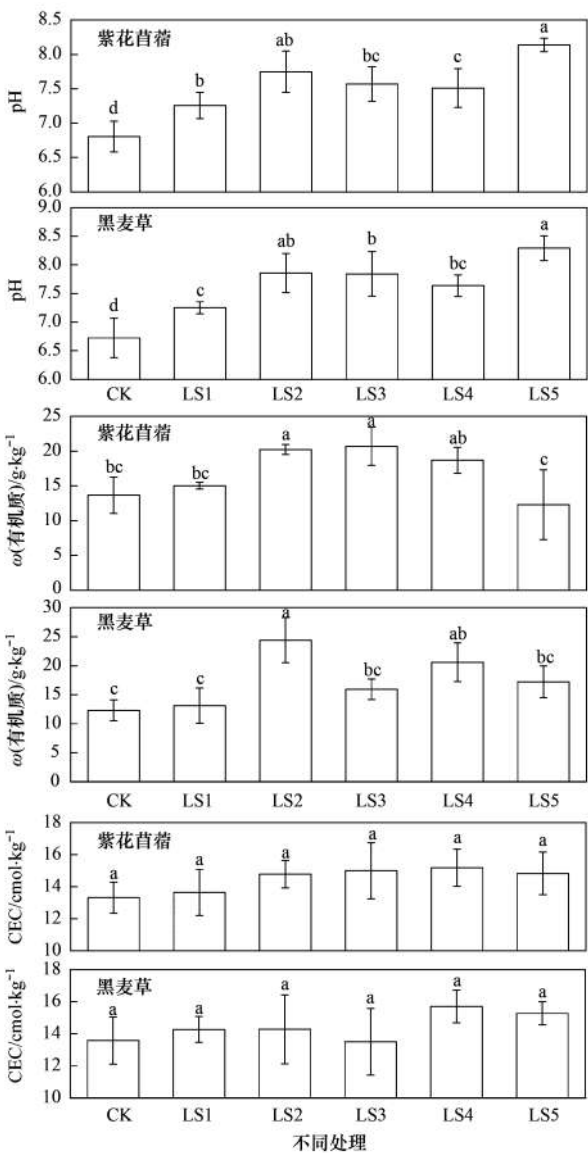


图2 牧草季不同处理下土壤 pH 值、有机质和 CEC 的变化情况
Fig. 2 Changes in soil pH, organic matter, and CEC under different treatments in the forage season

的处理下达到了最佳的钝化效果. 玉米季土壤经钝化处理后,不同形态的 Cd 含量发生了显著变化. 弱

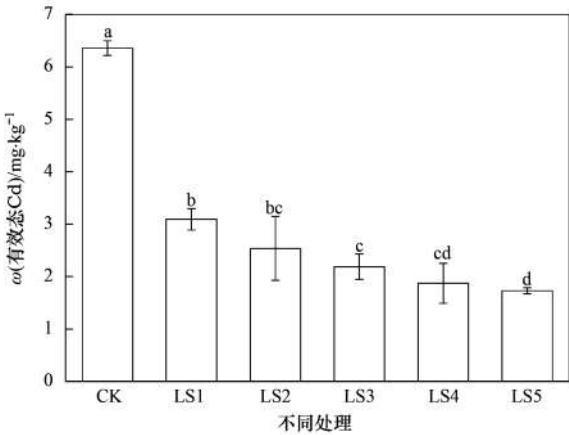


图3 玉米季不同处理对土壤 Cd 赋存形态及有效态含量的影响

酸提取态的 Cd 降低了 43.58%~89.51%,可还原态的 Cd 降低了 56.79%~88.20%,而残渣态的 Cd 含量上升了 112.46%~192.16%,可氧化态 Cd 无明显变化. LS5 处理修复效果最佳,其他处理效果排序为:LS1 > LS4 > LS2 > LS3. 牧草季两种牧草种植区通过复合钝化剂的修复,紫花苜蓿区土壤中弱酸提取态的 Cd 含量显著降低 70.22%~88.74%,而残渣态的 Cd 含量上升了 37.39%~51.37%,LS5 处理修复效果最佳,其他处理效果排序为:LS1 > LS2 > LS4 > LS3. 黑麦草区土壤弱酸提取态的 Cd 降低了 73.53%~84.66%,残渣态的 Cd 含量上升了 29.25%~43.49%,LS1 处理修复效果最佳,其他处理效果排序为:LS5 > LS2 > LS4 > LS3. 施加石灰后土壤 pH 值升高,增加了黏土矿物和有机质表面的负电荷,提高了土壤胶体对重金属离子的吸附能力,促进重金属离子与 CO₃²⁻ 或 OH⁻ 反应形成沉淀^[31],降低土壤中 Cd 的活性. 海泡石具有较大比表面积和特殊的孔结构,可对重金属进行稳定的内层吸附或非稳定的外层络合物物理吸附,并随着 pH 值的增加,海泡石表现出同晶置换和表面络合作用的并存,增强海泡石对重金属的吸附钝化^[32]. Zhou 等^[33] 的研究表明,石灰和海泡石复合钝化剂作用于土壤后,CEC 增加,高活性重金属可交换态含量显著降低,本研究的结果与前人的一致^[34].

2.3 施用石灰海泡石对作物地上部生物量及各部位 Cd 含量的影响

所种玉米作为青贮饲料,就是将包括果穗在内的地上部植株作为原料^[35,36]. 由图 5 和图 6 可知,相比 CK,复合钝化剂修复后的玉米植株地上部生物量虽有变化,但均未达到显著性,其中 LS1、LS2 和 LS3 处理下的玉米植株生物量有所升高,LS4 和 LS5 处理下玉米生物量开始减少,可能是在这种大用量下土壤团粒结构遭到破坏,土壤微生物活性受到影响,

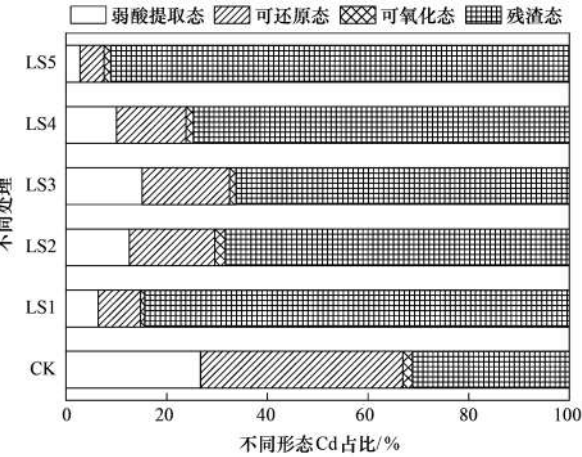


Fig. 3 Effects of different treatments in maize season on the occurrence form and available content of Cd in soil

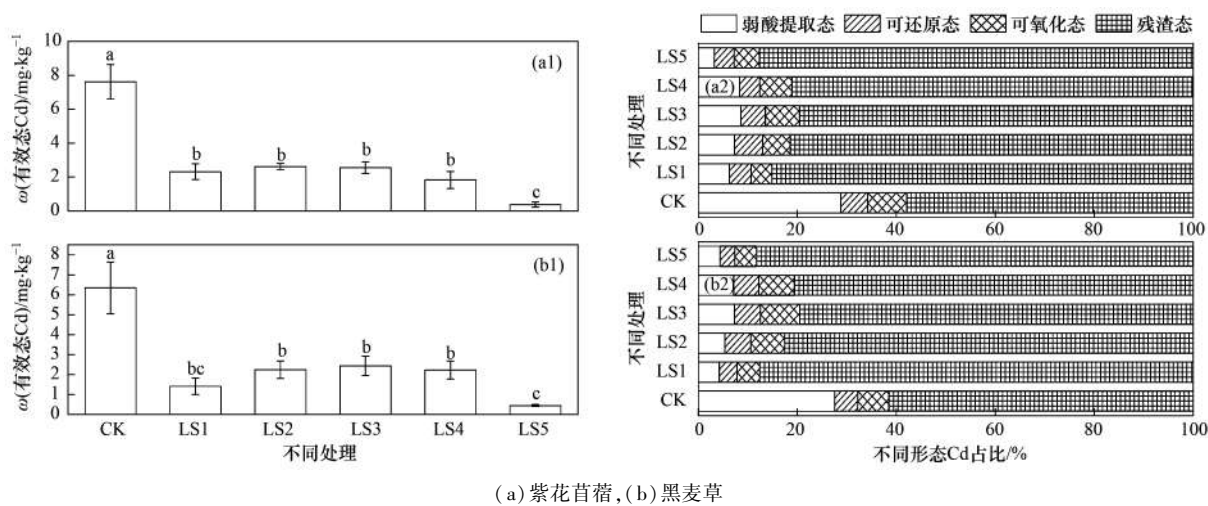


图 4 牧草季不同处理对土壤 Cd 赋存形态及有效态含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments in forage season on the occurrence form and available content of Cd in soil

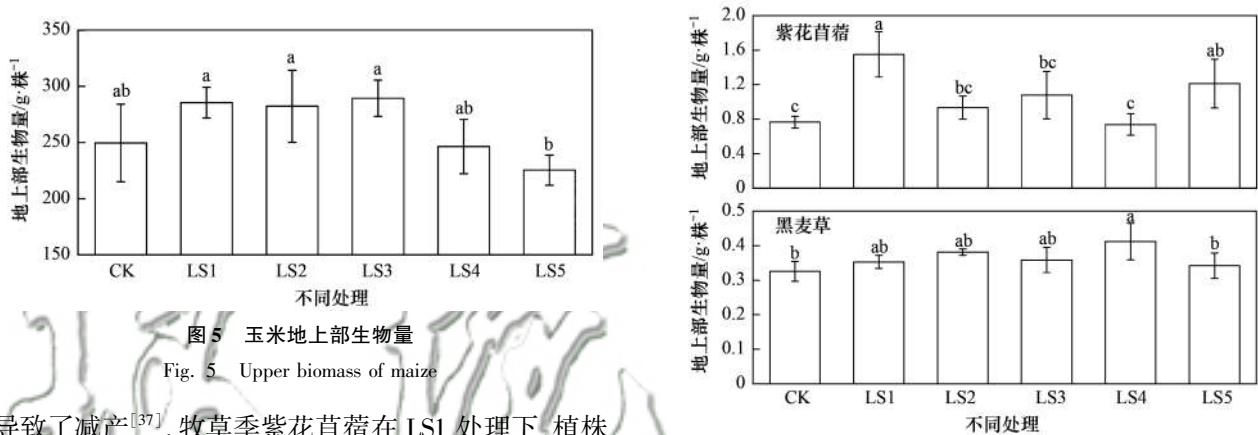


图 5 玉米地上部生物量

图 6 牧草地上部生物量

Fig. 5 Upper biomass of maize

Fig. 6 Upper biomass of forage

导致了减产^[37]. 牧草季紫花苜蓿在 LS1 处理下, 植株地上部生物量显著升高, 其次为 LS5 处理, 其余处理虽有变化但未达到显著性. 而黑麦草只在 LS4 处理下其地上部生物量显著升高. 本试验中, 玉米及牧草的生物量在 LS1、LS2 和 LS3 处理下均未降低甚至有显著增加, 一方面可能是因为在石灰海泡石用量下有利于土壤形成团粒结构, 使土壤疏松, 有吸水保肥作用, 利于植物生长^[38]. 一方面可能是作物轮作提高了用地与养地效率, 利于提高作物产量^[39].

由表 3 可看出, 通过复合钝化剂的施加, 不同处理下玉米植株的根、茎、叶和籽粒中 Cd 含量均降低, 根下降 47.49%~85.32%, 茎下降 47.55%~61.54%, 叶下降 13.95%~69.77%, 籽粒下降

21.15%~67.31%. 综合玉米地上部的茎、叶和籽粒来看, 经处理后其 Cd 含量均达到了我国饲料标准要求[GB 13078-2017, $\omega(\text{Cd}) \leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], 这或许是石灰海泡石中的 Ca^{2+} 对 Cd 离子存在一定的拮抗作用参与竞争植物根系上的吸收位点, 从而抑制植物对 Cd 的吸收^[40], 减小了对农作物的毒害作用, 提高了农作物的安全性^[41]. 由表 4 可看出, 牧草季紫花苜蓿地上部 Cd 含量在各处理下显著降低 21.52%~78.47%, 而黑麦草地上部 Cd 含量在各处理下降低 14.91%~65.79%, 对地上部 Cd 含量而言

表 3 不同处理对玉米不同部位 Cd 含量的影响¹⁾

处理	$\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				富集系数
	根	茎	叶	籽粒	
CK	2.59 ± 0.31a	1.43 ± 0.18a	0.43 ± 0.05a	0.52 ± 0.21a	0.231
LS1	0.77 ± 0.13c	0.55 ± 0.17b	0.23 ± 0.13bc	0.29 ± 0.13ab	0.086
LS2	1.30 ± 0.37b	0.67 ± 0.14b	0.35 ± 0.02b	0.37 ± 0.09ab	0.125
LS3	1.36 ± 0.13b	0.75 ± 0.08b	0.36 ± 0.03ab	0.41 ± 0.10ab	0.134
LS4	1.26 ± 0.41b	0.56 ± 0.15b	0.37 ± 0.08ab	0.32 ± 0.10ab	0.117
LS5	0.38 ± 0.09c	0.69 ± 0.20b	0.13 ± 0.06c	0.17 ± 0.05b	0.064

1) 数据为平均值 ± 标准差 (n=3); 不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05), 下同

表 4 不同处理对牧草不同部位 Cd 含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on Cd content in different parts of forage

处理	紫花苜蓿			黑麦草		
	地下部含量 /mg·kg ⁻¹	地上部含量 /mg·kg ⁻¹	富集系数	地下部含量 /mg·kg ⁻¹	地上部含量 /mg·kg ⁻¹	富集系数
CK	1.95 ± 0.08a	1.44 ± 0.23a	0.16	5.37 ± 1.03a	1.14 ± 0.26a	0.31
LS1	1.34 ± 0.24b	0.31 ± 0.07c	0.08	1.31 ± 0.16d	0.39 ± 0.08d	0.08
LS2	1.35 ± 0.25b	0.51 ± 0.20c	0.09	2.52 ± 0.72c	0.97 ± 0.16ab	0.17
LS3	1.11 ± 0.22b	1.13 ± 0.08b	0.11	4.22 ± 0.64b	0.82 ± 0.15ab	0.24
LS4	1.27 ± 0.16b	0.94 ± 0.09b	0.10	3.69 ± 0.49bc	0.73 ± 0.18b	0.21
LS5	0.61 ± 0.24c	0.49 ± 0.18c	0.05	2.66 ± 0.47c	0.63 ± 0.18c	0.16

两种牧草均在 LS1 处理下降幅最大. 在所有处理中, 仅 LS3 处理下的紫花苜蓿地上部 Cd 含量超标, 从富集系数来看, LS3 处理下玉米、紫花苜蓿及黑麦草的富集系数都是仅次于对照处理的, 可能是在该用量下作物更易富集 Cd.

2.4 综合分析

根据饲料卫生标准(GB 13078-2017), 参考相

关研究并结合本试验情况将各指标等级进行分类, 见表 5, 石灰价格按 400 元·t⁻¹ 计算, 海泡石价格按 800 元·t⁻¹ 计算, 产量按鲜重计算^[42], 紫花苜蓿适宜 pH 为 7 ~ 8^[43], 黑麦草适宜 pH 为 6 ~ 7^[44,45], 根据公式(1) 计算出相应的 α 和 σ 值. 结合公式(1) 和公式(2) 得表 6 的各函数计算值, 数值越小说明评价效果越好, X₁ 为玉米相关指标数

表 5 处理效果评估指标分级

Table 5 Treatment effect assessment index grading

项目		优秀	良好	一般	较差	α	σ
土壤 pH 值	玉米季	6.5 ~ 7.0	7.0 ~ 7.5	7.5 ~ 8.0	> 8.0	0.843 8	0.061 7
	紫花苜蓿区	7.0 ~ 8.0	8.0 ~ 8.5	8.5 ~ 9.0	> 9.0	0.832 6	0.073 7
	黑麦草区	6.0 ~ 7.0	7.0 ~ 8.0	8.0 ~ 9.0	> 9.0	0.722 5	0.109 7
作物可饲用部分 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	玉米 茎	0 ~ 0.33	0.33 ~ 0.66	0.66 ~ 0.99	> 0.99	0.166 7	0.329 5
	玉米 叶	0 ~ 0.33	0.33 ~ 0.66	0.66 ~ 0.99	> 0.99	0.166 7	0.329 5
	紫花苜蓿地上部	0 ~ 0.33	0.33 ~ 0.66	0.66 ~ 0.99	> 0.99	0.166 7	0.329 5
	黑麦草地上部	0 ~ 0.33	0.33 ~ 0.66	0.66 ~ 0.99	> 0.99	0.166 7	0.329 5
土壤有效态 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	玉米季	0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.0	3.0 ~ 4.5	> 4.5	0.166 7	0.329 5
	紫花苜蓿区	0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.0	3.0 ~ 4.5	> 4.5	0.166 7	0.329 5
	黑麦草区	0 ~ 1.5	1.5 ~ 3.0	3.0 ~ 4.5	> 4.5	0.166 7	0.329 5
作物地上部产量 /t·hm ⁻²	玉米	> 40	40 ~ 25	25 ~ 10	< 10	0.125	0.181 2
	紫花苜蓿	> 10	10 ~ 6	6 ~ 3	< 3	0.15	0.230 7
	黑麦草	> 15	15 ~ 10	10 ~ 5	< 5	0.166 7	0.329 5
修复药剂成本 × 15/元·hm ⁻²		0 ~ 1 000	1 000 ~ 2 000	2 000 ~ 3 000	> 3 000	0.166 7	0.329 5

表 6 综合评价指标函数计算值

Table 6 Calculated value of comprehensive evaluation index function

项目		LS1	LS2	LS3	LS4	LS5
土壤 pH 值	玉米季	0.211 7	0.256 3	0.241 2	0.382 0	0.522 5
	紫花苜蓿区	0.093 7	0.119 6	0.011 1	0.000 5	0.554 3
	黑麦草区	0.351 7	0.736 7	0.732 1	0.623 9	0.886 4
作物可饲用部分 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	玉米 茎	0.417 6	0.615 5	0.727 2	0.435 1	0.644 7
	玉米 叶	0.008 9	0.097 7	0.109 7	0.122 3	0.001 5
	玉米 籽粒	0.040 0	0.122 3	0.178 3	0.065 1	0.000 1
	紫花苜蓿地上部	0.056 1	0.346 9	1.141 2	0.946 2	0.311 4
	黑麦草地上部	0.149 1	0.977 5	0.813 6	0.700 7	0.552 9
土壤有效态 Cd 含量 /mg·kg ⁻¹	玉米季	0.630 4	0.448 3	0.293 3	0.180 6	0.136 0
	紫花苜蓿区	0.347 5	0.463 5	0.440 7	0.167 4	0.005 1
	黑麦草区	0.056 3	0.316 4	0.390 4	0.312 5	0.004 2
作物地上部产量 /t·hm ⁻²	玉米	0.148 0	0.153 2	0.140 8	0.230 9	0.286 8
	紫花苜蓿	0.256 2	0.648 0	0.536 4	0.817 2	0.450 3
	黑麦草	0.191 6	0.144 0	0.174 1	0.105 4	0.215 3
修复药剂成本 × 15/元·hm ⁻²		0.009 8	0.029 6	0.062 3	0.108 1	0.165 4
玉米-紫花苜蓿轮作模式计分(X ₁)		2.219 9	3.300 9	3.882 2	3.455 4	3.078 1
玉米-黑麦草轮作模式计分(X ₂)		2.215 1	3.897 5	3.863 0	3.266 6	3.415 8

与紫花苜蓿指标数相加, X_2 为玉米指标数与黑麦草指标数相加. 可以看出 LS1 处理下的两种轮作模式均优于其他处理, 在调节土壤 pH 值、降低修复成本、提高作物地上部生物量和降低作物可饲用部分 Cd 含量方面具有较大优势. 结合前面的试验结果, LS1 处理后可以显著提高紫花苜蓿地上部生物量至最大, 优于同期的黑麦草, 且种植苜蓿的收益会高于黑麦草^[46], 故推荐配合玉米-紫花苜蓿轮作模式.

3 结论

(1) 通过石灰海泡石的施加, 能不同程度地提高土壤 pH 值、有机质和 CEC, 降低土壤有效态 Cd, 使土壤中重金属由活性高的弱酸提取态向活性低的残渣态进行转化.

(2) 通过综合评价分析, 推荐大田施加量为 LS1 (石灰 $6.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ + 海泡石 $9.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$).

(3) 推荐在施加量为 LS1 下, 配合玉米-紫花苜蓿的轮作模式, 在略微提高玉米产量的同时能显著提高紫花苜蓿产量, 且可饲用部分均能达到饲料标准, 实现安全种植的同时修复成本最低.

参考文献:

- [1] Wang Y R, Wang R M, Fan L Y, *et al.* Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China[J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 613-627.
- [2] Cheng X F, Danek T, Drozdova J, *et al.* Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190** (4), doi: 10.1007/s10661-018-6574-x.
- [3] Hu B F, Shao S, Ni H, *et al.* Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in China at province level [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114961.
- [4] Liu L W, Li W, Song W P, *et al.* Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 206-219.
- [5] Li C F, Zhou K H, Qin W Q, *et al.* A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques [J]. *Soil and Sediment Contamination: an International Journal*, 2019, **28**(4): 380-394.
- [6] 李光辉, 成晴, 陈宏. 石灰配施有机物料修复酸性 Cd 污染稻田[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 925-931.
Li G H, Cheng Q, Chen H. Remediation of Cd contaminated acidic rice fields using the combined application of lime and organic matter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 925-931.
- [7] 田雪, 周文君, 张正蕊, 等. 不同时间下钝化剂对污染土壤中 Cd 和 Pb 的钝化效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(4): 522-528.
Tian X, Zhou W J, Zhang Z R, *et al.* Deactivation effects of deactivators on cadmium and plumbum polluted soil at different times[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35** (4): 522-528.
- [8] 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 等. 同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3527-3534.
Zhou S J, Liu Z Y, Xiong S L, *et al.* Screening of amendments for simultaneous Cd and As immobilization in soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3527-3534.
- [9] Xie S, Wang L, Xu Y M, *et al.* Performance and mechanisms of immobilization remediation for Cd contaminated water and soil by hydroxy ferric combined acid-base modified sepiolite (HyFe/ABsep)[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140009.
- [10] Song N, Hursthouse A, McLellan I, *et al.* Treatment of environmental contamination using sepiolite: current approaches and future potential [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(7): 2679-2697.
- [11] Bashir S, Ali U, Shaaban M, *et al.* Role of sepiolite for cadmium (Cd) polluted soil restoration and spinach growth in wastewater irrigated agricultural soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110020.
- [12] 王玉婷, 王紫玥, 刘田田, 等. 钝化剂对镉污染土壤修复效果及青菜生理效应影响[J]. *环境化学*, 2020, **39**(9): 2395-2403.
Wang Y T, Wang Z Y, Liu T T, *et al.* Effects of amendments on remediation of cadmium-contaminated soil and physiological characteristics of pakchoi[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(9): 2395-2403.
- [13] 陈华, 赵文军, 王正旭, 等. 不同轮作模式下氮素调控对烤烟产质量及氮肥利用的影响[J]. *河南农业科学*, 2021, **50** (9): 87-95.
Chen H, Zhao W J, Wang Z X, *et al.* Effects of nitrogen management on yield, quality and nitrogen utilization of flue-cured tobacco under different rotation patterns [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, **50**(9): 87-95.
- [14] 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 等. 不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征[J]. *环境科学*, 2020, **41** (10): 4682-4689.
Sun Q, Wu H L, Chen F, *et al.* Characteristics of soil nutrients and fungal community composition in crop rhizosphere under different rotation patterns[J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (10): 4682-4689.
- [15] 涂鹏飞, 谭可夫, 陈璘涵, 等. 红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤 Cd 的能力[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, **37** (4): 609-614.
Tu P F, Tan K F, Chen L H, *et al.* Ability of red leaf beet-peanut and oil sunflower-peanut rotation patterns to remediate soil Cd [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(4): 609-614.
- [16] 范琳娟, 刘奇志, 王合, 等. 玉米-苹果轮作体系对苹果根际土壤酶活性和 pH 值的影响[J]. *浙江农业学报*, 2017, **29** (12): 2084-2090.
Fan L J, Liu Q Z, Wang H, *et al.* Effects of corn-apple rotation on enzyme activity and pH value in rhizosphere soil of apple trees [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, **29** (12): 2084-2090.
- [17] 谭玉兰, 曾庆飞, 韦兴迪, 等. 不同牧草品种与烤烟轮作对植烟土壤养分及物理性状的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(19): 275-279.
Tan Y L, Zeng Q F, Wei X D, *et al.* Effects of different forage varieties and tobacco rotation on tobacco planting soil nutrients and physical properties [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, **47**(19): 275-279.

- [18] 徐浩然, 肖广全, 陈玉成, 等. 水旱轮作原位钝化削减技术修复土壤镉污染[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(3): 789-797.
Xu H R, Xiao G Q, Chen Y C, *et al.* Remediation of cadmium pollution in soil by in-situ passivation reduction technology of water and drought rotation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(3): 789-797.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 苏焕珍, 刘文胜, 郑丽, 等. 兰坪铅锌矿区不同污染梯度下优势植物的重金属累积特征[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(11): 5027-5034.
Su H Z, Liu W S, Zheng L, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in dominant plant species growing on Lanping lead/zinc mining wasteland with different pollution gradients[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(11): 5027-5034.
- [21] 周鸿斌, 角媛梅, 史正涛, 等. 云南泮江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1586-1591.
Zhou H B, Jiao Y M, Shi Z T, *et al.* Magnetic analysis and assessment on heavy metal contamination in the farmland soil along Bijiang River in Yunnan Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1586-1591.
- [22] Quevauviller P, Rauret G, Muntau H, *et al.* Evaluation of a sequential extraction procedure for the determination of extractable trace metal contents in sediments[J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1994, **349**(12): 808-814.
- [23] 袁兴超, 李博, 朱仁凤, 等. 不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 807-817.
Yuan X C, Li B, Zhu R F, *et al.* Immobilization of Cd and Pb using different amendments of cultivated soils around lead-zinc mines[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(4): 807-817.
- [24] 何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(8): 1734-1740.
He Y, Du P, Shi J, *et al.* Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation-field experiment study[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(8): 1734-1740.
- [25] 庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 等. 重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2502-2511.
Pang F H, Wu X J, Kong X F, *et al.* Functional stability and applicability of heavy metal passivators in reducing Cd uptake by lettuce[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2502-2511.
- [26] 汪毅, 王华静, 郑沈, 等. 3 种钝化剂及其组合对小白菜镉铅含量的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(12): 151-158.
Wang Y, Wang H J, Zheng S, *et al.* Effects of different soil amendments on the uptake and accumulation of cadmium and lead in pakchoi (*Brassica chinensis*) [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(12): 151-158.
- [27] 沈章军, 侯万青, 徐德聪, 等. 不同钝化剂对重金属在土壤-油菜中迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(12): 2779-2788.
Shen Z J, Hou W Q, Xu D C, *et al.* Effects of different immobilization materials on heavy metal migration in contaminated soil-rape[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(12): 2779-2788.
- [28] 白志强, 张世熔, 钟钦梅, 等. 四川盆地西缘土壤阳离子交换量的特征及影响因素[J]. 土壤, 2020, **52**(3): 581-587.
Bai Z Q, Zhang S R, Zhong Q M, *et al.* Characteristics and impact factors of soil cation exchange capacity (CEC) in western margin of Sichuan Basin[J]. Soils, 2020, **52**(3): 581-587.
- [29] 王仪明, 雷艳芳, 魏臻武, 等. 不同轮作模式对青贮玉米产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 核农学报, 2017, **31**(9): 1803-1810.
Wang Y M, Lei Y F, Wei Z W, *et al.* Effects of different rotation modes on yield, quality of silage Corn, and soil fertility [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, **31**(9): 1803-1810.
- [30] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1842-1849.
Yan J P, Ding X D, Cui L, *et al.* Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- [31] 蔡如梦, 石林. 矿物-有机质复合调理剂对 Pb 污染土壤的改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(12): 2438-2444.
Cai R M, Shi L. Amelioration effects of mineral-organic compound conditioner on Pb-contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(12): 2438-2444.
- [32] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(8): 1419-1424.
Chen Y Q, Zhang Y, Chen G L. Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(8): 1419-1424.
- [33] Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **101**: 226-232.
- [34] 周歆, 周航, 曾敏, 等. 石灰石和海泡石组配对水稻糙米重金属积累的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(3): 555-563.
Zhou X, Zhou H, Zeng M, *et al.* Effects of combined amendment (Limestone + Sepiolite) on heavy metal accumulation in brown rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(3): 555-563.
- [35] NY/T 2696-2015, 饲草青贮技术规程 玉米[S].
NY/T 2696-2015, Code of practice for ensiling forage-Corn (*Zea mays*) [S].
- [36] 唐德富, 陈志刚, 李飞, 等. 青贮玉米不同部位(组织)养分含量近红外预测模型的构建[J]. 草业科学, 2021, **38**(9): 1753-1761.
Tang D F, Chen Z G, Li F, *et al.* Construction of a near-infrared prediction model for nutrient content in different parts (tissues) of corn silage[J]. Pratacultural Science, 2021, **38**(9): 1753-1761.
- [37] 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1491-1497.
Yan D M, Guo Z H, Huang F L, *et al.* Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1491-1497.
- [38] 曾秀君, 程坤, 黄学平, 等. 石灰、腐植酸单施及复配对污染土壤铅镉生物有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(1): 121-128.
Zeng X J, Cheng K, Huang X P, *et al.* Effect of single and multiple application of lime and humic acid on the bioavailability of lead and cadmium in contaminated soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, **36**(1): 121-128.

- [39] 杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 等. 间套轮作超积累植物技术模式修复 Cd 污染土壤的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(10): 2122-2133.
- Yang J J, You S H, Wu J L, *et al.* Research progress of intercropping, interplanting, and crop rotation models on remediation of cadmium contaminated soil by hyperaccumulators [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(10): 2122-2133.
- [40] 李涛, 李光照, 梅馨月, 等. 镉-钙交互作用对植物的生态学效应[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(32): 77-80.
- Li T, Li G Z, Mei X Y, *et al.* The interaction of cadmium and calcium and its ecological effects on plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(32): 77-80.
- [41] Lahori A H, Zhang Z Q, Guo Z Y, *et al.* Potential use of lime combined with additives on (im) mobilization and phytoavailability of heavy metals from Pb/Zn smelter contaminated soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **145**: 313-323.
- [42] 魏志标, 柏兆海, 马林, 等. 中国苜蓿、黑麦草和燕麦草产量差及影响因素[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(3): 507-522.
- Wei Z B, Bai Z H, Ma L, *et al.* Yield gap of alfalfa, ryegrass and oat grass and their Influence factors in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(3): 507-522.
- [43] 徐丽君, 徐大伟, 逢焕成, 等. 中国苜蓿属植物适宜性区划[J]. 草业科学, 2017, **34**(11): 2347-2358.
- Xu L J, Xu D W, Pang H C, *et al.* Chinese alfalfa habitat suitability regionalization [J]. Pratacultural Science, 2017, **34**(11): 2347-2358.
- [44] 陈腾达, 赵晓登, 李玉帅, 等. 多花黑麦草营养品质及在动物饲养方面的研究进展[J]. 饲料研究, 2020, **43**(10): 146-149.
- Chen T D, Zhao X D, Li Y S, *et al.* Research progress of nutritional quality and animal feeding of *Lolium multiflorum* [J]. Feed Research, 2020, **43**(10): 146-149.
- [45] 陈娜红, 李国亮, 蔡雪娇, 等. 酸碱胁迫对黑麦草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, **60**(12): 2191-2193.
- Chen N H, Li G L, Cai X J, *et al.* Effects of acid-base stresses on seed germination and seedling growth of ryegrass [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, **60**(12): 2191-2193.
- [46] 石自忠, 王明利, 胡向东, 等. 我国牧草种植成本收益变化与比较[J]. 草业科学, 2017, **34**(4): 902-911.
- Shi Z Z, Wang M L, Hu X D, *et al.* Variation and comparison of forages' cost-benefits in China [J]. Pratacultural Science, 2017, **34**(4): 902-911.



CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)