

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM_{2.5} 各组分污染特征及来源分析 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)

基于时空混合效应模型的京津冀 PM_{2.5} 浓度变化模拟 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)

2000~2018年京津冀城市群 PM_{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)

海-陆大气交汇作用下青岛冬季天气 PM_{2.5} 污染特征与来源解析 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)

硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)

省会城市不同功能区大气 PM_{2.5} 化学组分季节变化及来源分析 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)

太原市冬季不同污染程度下 PM_{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)

郑州市冬季大气 PM_{2.5} 金属元素来源及健康风险评估 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)

淄博市冬季 PM_{2.5} 载体金属元素污染特征、生态风险评估及来源分析 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)

承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)

珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡亮, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)

基于模式过程分析技术天津地区 PM_{2.5} 污染气象成因分析 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)

基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)

基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)

基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)

基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 石耀鹏, 胡京南, 褚晰晰, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)

重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 曾景海, 王灿 (2436)

黄河流域水污染风险分区 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)

黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)

黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)

APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)

河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)

太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)

富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)

基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)

暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)

鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评估 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)

太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李元乾, 郑娜 (2586)

面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)

微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)

白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)

人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)

鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)

负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO₂-Sb-Ni 电极催化氧化双酚 A 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)

磁性 Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄@SiO₂ 催化 H₂O₂ 降解亚甲基蓝效能及机制 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)

两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)

AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)

三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 卢英源, 董小琦, 彭星然, 贾晓珊 (2685)

污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)

基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)

铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 陈航, 王颖, 王澍 (2719)

典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)

两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)

基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)

紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)

不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)

木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)

生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)

戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)

模拟增温和降雨增加对撂荒地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)

中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

两种油菜配施水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤

孟晓飞^{1,2}, 郑国砥^{1,2}, 陈同斌^{1,2}, 杨俊兴^{1,2*}, 郭俊梅³, 刘杰⁴

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 太原理工大学环境科学与工程学院, 晋中 030600; 4. 北京农学院生物与资源环境学院, 北京 102206)

摘要: 为了探讨不同品种的油菜 (*Brassica napus* L.) 配施螯合剂对铅 (Pb) 污染土壤的修复效果, 采用盆栽试验的方式, 研究了甘蓝型油菜品种秦油 1 号 (QY-1) 和白菜型油菜品种三月黄 (SYH) 在 0%、2% 和 4% 的水溶性壳聚糖 (WSC) 处理下对中国北方河南和南方广西两种典型 Pb 污染农田土壤中 Pb 吸收和转运的影响, 并进一步在河南某 Pb 污染农田通过田间小区试验比较了两个油菜品种在 WSC 条件下的修复效率和经济效益. 结果表明, 盆栽条件下, 与对照处理相比, QY-1 和 SYH 的生物量受 WSC 含量和土壤类型影响显著, 随着 WSC 含量增加 QY-1 的生物量在两种土壤条件下呈下降趋势, 而低含量 WSC 处理下 SYH 生物量显著提高, 在高含量 WSC 处理下生物量下降. 如广西 Pb 污染土壤上 2% WSC 处理下 SYH 生物量上升最明显, 与对照处理相比, 生物量提高了 80.96%. 两个油菜品种不同部位 Pb 含量也受 WSC 含量和土壤类型的影响, QY-1 地上部分和根部分在河南 Pb 污染土壤上随 WSC 含量的升高而增加, 在广西 Pb 污染土壤上随 WSC 含量的升高而降低. Pb 提取量是评价植物修复效率的关键. 盆栽和田间试验结果表明, SYH 配施 WSC 处理的 Pb 吸收量明显高于 QY-1, 地上部 Pb 提取量更高, 更适合用于土壤 Pb 污染修复. 此外, 田间试验结果发现本研究两种油菜籽所制取的成品油中 Pb 含量均远低于食品安全国家标准 (GB 2762-2017) 中油脂 ω (Pb) 的限值 ($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 因此, 种植冬油菜联合 WSC 的“边修复, 边利用”的模式在治理我国典型 Pb 污染农田土壤具有较大的应用潜力.

关键词: 铅 (Pb); 农田; 油菜; 植物修复; 水溶性壳聚糖

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2741-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202106076

Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of *Brassica napus* L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils

MENG Xiao-fei^{1,2}, ZHENG Guo-di^{1,2}, CHEN Tong-bin^{1,2}, YANG Jun-xing^{1,2*}, GUO Jun-mei³, LIU Jie⁴

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 4. College of Bioscience and Resources Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: A pot trial was used to explore the absorption and transportation of the Pb of QY-1 and SYH (*Brassica napus* L.) under 0%, 2%, and 4% water-soluble chitosan (WSC) treatments in two typical Pb-contaminated farmland soils in China (north: Henan province and south: Guangxi province). Based on the results of the pot trial, a field experiment was conducted to compare the remediation efficiency of the QY-1 and SYH under WSC treatment in northern farmland soil, and the environmental risk and economic value under field conditions were analyzed. The results of the pot trial showed that the biomasses of QY-1 and SYH were significantly affected by WSC addition and soil type compared with that of the control. The biomass of QY-1 was reduced with the application of WSC, and the shoot and root biomass of SYH were significantly increased under the treatment of low concentrations of WSC; conversely, these were decreased under the treatment of high concentrations of WSC. The shoot biomass of SYH increased notably under the 2% WSC treatment in Guangxi soil, which increased by 80.96% compared with that of the control treatment. Lead concentrations in different parts of *B. napus* were also affected by WSC addition and soil type. Pb in the shoots and roots of QY-1 increased with increasing WSC addition in Henan soil, whereas it decreased with the increase in WSC addition in Guangxi soil. The extraction amount of Pb was the key to evaluating the efficiency of phytoremediation. Lead uptake of QY-1 showed an increasing trend in Henan soil but a decreasing trend in Guangxi soil. In Guangxi soil, although the total Pb uptake of the QY-1 and SYH-combined application of 2% WSC was not significantly different, the biomass and Pb absorption amount of the SYH-combined application of 2% WSC were significantly higher than that of QY-1, and the shoot Pb extraction amount was higher. The results of the field experiment also confirmed that the phytoremediation efficiency of SYH combined with WSC was higher than that of QY-1. Additionally, concentrations of Pb in the rapeseed oils of QY-1 and SYH were lower than the limit of the maximum level of ω (Pb) in market rapeseed oils (GB 2762-2017, $\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Therefore, the mode of *B. napus* combined with WSC had great application potential in the rational utilization and remediation of mildly and moderately Pb-contaminated farmland soil in China.

Key words: lead (Pb); farmland; *Brassica napus* L.; phytoremediation; water-soluble chitosan

铅 (lead, Pb) 是环境中污染较为严重的有毒物质之一^[1,2], 具有不可降解的特点且易在土壤中积累, 对土壤理化性质、作物产量和作物品质产生负面影响^[3,4]. 此外, Pb 能够通过食物链进入人体, 威胁人体健康^[5]. 大量研究表明, 植物吸收 Pb 的含量主要与土壤 Pb 形态和 Pb 的转运能力有关^[6,7]. Pb

收稿日期: 2021-06-09; 修订日期: 2021-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771509, 41907125); 国家重点研究发展计划项目 (2018YFC1802604, 2018YFD0800600); 中国博士后科学基金项目 (2019M650827); 人才培养质量建设-高水平人才交叉培养计划-实培计划项目 (PXM2020_014207_000009)

作者简介: 孟晓飞 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: xfmengcumth@163.com

* 通信作者, E-mail: yangajx@126.com

在土壤中以水溶态、弱酸提取态、可氧化态、可还原态和残渣态的形式存在,其中水溶态和弱酸提取态 Pb 可被植物吸收,其余形态的 Pb 很难被植物吸收^[8].

植物修复技术因具有低成本、无二次污染等特点而被认为是一种极具潜力的重金属污染土壤修复技术^[9],但在实际应用过程中往往存在环境适应性差、修复效率和生物量低等问题^[10]. 有研究表明,施用螯合剂能够提高土壤中重金属的生物活性^[11,12],进而提高植物修复效率. 按照螯合剂来源可将其分为两类,合成螯合剂和天然螯合剂^[8,13,14]. 合成螯合剂主要包括乙二胺四乙酸(EDTA)和二乙三胺五乙酸(DTPA)等,由于其能够和重金属形成高溶解性和持久性的重金属螯合物而被广泛应用于土壤重金属修复领域^[15]. 然而,合成螯合剂能在环境中较长时间地存在,给环境带来一定的风险^[15]. 天然螯合剂多为苹果酸和柠檬酸等低分子量有机酸,有相关研究称其对植物修复重金属污染土壤的作用有限,难以实际应用^[16]. 基于以上限制因素,一种天然无毒的氨基多糖——壳聚糖被大量研究,证实其可与金属发生螯合作用,应用于重金属污染土壤的修复^[17,18].

壳聚糖是一种以虾、蟹壳为原料,通过酸降解或复合酶降解或微生物发酵制备而成的水溶性螯合剂(water soluble chitosan, WSC),其主要化学成分为(1-4)-2-氨基-2-脱氧- β -D-葡聚糖^[8,18,19]. 有研究表明,水溶性壳聚糖不仅具有多种生物活性,能够抵抗真菌、细菌和病毒,还能够促进植物的生长^[20-22]. Guo 等^[8]的研究结果显示水溶性壳聚糖能够显著提高镉富集植物(八宝景天, *Hylotelephium spectabile*)中 Cd 的提取量,且对其生长无明显抑制作用. Yang

等^[23]的研究也得到了类似的结果. 目前,这方面研究主要集中在水培条件或盆栽条件下,添加壳聚糖对植物在重金属胁迫条件下的生长等影响^[18,24,25],但在大田条件下,添加外源壳聚糖对典型 Pb 污染农田土壤上主要经济作物的重金属吸收、产量和风险的影响还鲜有报道,此外,实际条件下,施加壳聚糖在田间产生的经济成本尚不明确.

油菜(*Brassica napus* L.)是我国主要油料作物之一,在南方和北方广泛种植,对 Pb 具有较强的耐受程度和一定的富集能力^[26]. 本研究选取两个不同 Pb 富集能力的油菜品种为试验对象,通过盆栽和田间试验,分析油菜-水溶性壳聚糖在典型 Pb 污染农田土壤中的修复能力,并根据田间试验结果,进一步对土壤修复效果和经济效益进行综合评价,以期为我国 Pb 污染农田土壤“边修复,边生产”提供技术支持.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究分为盆栽试验和大田试验两部分,盆栽试验土样分别采集自北方河南某市(35°08'31"N, 112°32'24"E)和南方广西某市(24°55'13"N, 110°31'29"E)的 Pb 冶炼厂附近的污染农田 0~20 cm 的土壤,其基本理化性质如表 1 所示. 供试土壤中 $\omega(\text{Pb})$ 均超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)(170 mg·kg⁻¹, pH > 7.5; 120 mg·kg⁻¹ 7.5 > pH > 6.5). 大田试验点设置于北方河南某市 Pb 冶炼厂附近土壤重金属治理修复基地试验田,该地属温带大陆性季风气候,年平均气温 14.6℃、降水量 860 mm 和日照时长 1 727.6 h. 其基本理化性质同盆栽试验所用土壤.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Pb concentrations and physicochemical properties of tested soils

土壤	pH	阳离子可交换量 /mmol·kg ⁻¹	$\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{有机质})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{总氮})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{总磷})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{总钾})$ /g·kg ⁻¹
河南潮褐土	7.7	20.1	230.1	19.4	1.18	0.86	26.6
广西棕色石灰土	7.07	8.37	659.4	14.78	1.58	1.47	16.01

1.2 试验设计

本研究设计了盆栽与大田两部分试验.

盆栽试验设计三因素:设置两个不同品种的油菜:甘蓝型油菜秦油 1 号(QY-1)和白菜型油菜三月黄(SYH),在两个不同程度实际 Pb 污染农田土壤上:北方河南典型 Pb 污染土壤和南方广西典型 Pb 污染土壤中,配合施加 3 种不同质量分数的水溶性壳聚糖 WSC(C0: 0%, C1: 2%, C2: 4%),试验共设置 12 个处理,每个处理 3 次重复. 于 2019 年 7 月 24

日~2019 年 9 月 24 日进行盆栽试验,首先取 5 kg 干土置于 18 cm(高)×20 cm(直径)的塑料盆中,每盆 3 株植物,在气温 20~31℃条件下栽培 60 d,在第 45 d 添加 WSC. 收获前分别采集两个油菜品种地上部、根部和对应的根际土壤样品.

田间试验:在北方河南某市典型 Pb 污染农田土壤上种植供试植物 QY-1 和 SYH,并根据 Guo 等^[8]的研究结果,大田小区试验设计施加不同含量的 WSC(0 g·m⁻²和 10 g·m⁻²),试验共设置 4 个处理,每

个处理 5 次重复, 每个小区面积为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$. 本试验于 2019 年 10 月开展, 田间管理按当地常规种植模式进行, WSC 在油菜成熟前 1 个月前(2020 年 4 月)加入, 2020 年 5 月收获前分别采集两个油菜品种地上部、根部和土壤样品.

1.3 样品的采集与测定

油菜成熟后将其地上部和根部单独收获, 先将样品用自来水冲洗 3 遍, 后用超纯水清洗 3 遍, 于 105°C 条件下杀青 30 min, 再于 65°C 条件下烘干至恒重, 记录其干重. 油菜各部位采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (5:1, 体积比) 法消解, 同时设置空白对照和标准品 GBW07603 (GSV-2) 进行质控分析 [$90 \pm 10\%$], 使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Elan DRC-E, Perkin Elmer, USA) 测定 Pb 含量.

为收集原位根际土壤, 用干净的一次性手套将油菜和其根际土壤一起拔起, 用手剧烈摇晃 3 分钟, 直到未粘附植物根的土壤被完全清除, 取轻摇后附着在植物根毛上的剩余土壤作为根际土壤. 混合均匀, 风干过 0.85 mm 和 0.15 mm 的尼龙筛用于后续试验. 土壤 pH 的测定方法参考 ISO 10390:2005, 取 2.5 g 过 0.85 mm 的土壤样品于离心管中, 加入 12.5 mL 的去离子水 (1:5, 质量比), 用 pH 计测定其 pH 值. 土壤全量的测定方法参考 USEPA 3050 (1996), 取 0.25 g 过 0.15 mm 尼龙筛的土壤样品于锥形瓶中, 加入 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 进行消解, 同时设置空白和标准品 GBW07401a (GSS-1a). 土壤 Pb 形态的测定根据 BCR (bureau community of reference) 连续提取法^[8,27], 将土壤 Pb 形态分为: 水溶态 Pb (WSO-Pb)、弱酸提取态 Pb (AEX-Pb)、可还原态 Pb (RED-Pb)、可氧化态 Pb (OX-Pb) 和残渣态 Pb (RES-Pb). 取 0.5 g 60 目待测土壤样品于 50 mL 离心管中, 按固液 1:40 比例加蒸馏水, 振荡 2 h, 3000 g 离心 20 min, 将上清液转移到聚乙烯瓶中, 测定水溶态 Pb 含量; 添加 20 mL $0.11 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HAc 提取液于固体残渣中, 重复振荡、离心和转移步骤, 测定弱酸提取态 Pb 含量; 清洗固体残渣后, 将 20 mL $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 加入固体残渣中, 重复振荡、离心和转移步骤, 测定可还原态 Pb 含量; 再次清洗, 添加 5 mL H_2O_2 , 室温消化 1 h, (85 ± 2) $^\circ\text{C}$ 水浴消化 1 h, 加热使溶液减少至 2 mL, 再次添加 10 mL H_2O_2 , 继续加热使溶液减少至 1 mL, 加入 25 mL NH_4OAc , 重复振荡、离心和转移步骤, 测定可氧化态 Pb 含量; 再次清洗后按照常规消解, 测定残渣态 Pb 含量. 土壤 Pb 含量和不同形态的 Pb 含量均使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Elan DRC-E, Perkin Elmer, USA) 测定.

1.4 数据统计分析

采用 SPSS Statistics 19 进行方差分析 (ANOVA), 采用最小显著差法 (least significant difference, LSD) 进行显著性检验 ($P < 0.05$), 并使用 Origin 2017 绘制图表.

采用生物富集系数 (BCF) 评价油菜对 Pb 的富集能力, 公式如下:

$$\text{BCF} = C_{\text{shoot/root}}/C_{\text{soil}}$$

采用转运因子 (TF) 评价油菜根部向地上部转运 Pb 的能力, 公式如下:

$$\text{TF} = C_{\text{shoot}}/C_{\text{root}}$$

采用因子迁移率 (MF) 评价 Pb 元素的迁移能力, 公式如下:

$$\text{MF} = \frac{C_{\text{WSO}} + C_{\text{AEX}}}{C_{\text{WSO}} + C_{\text{AEX}} + C_{\text{RED}} + C_{\text{OX}} + C_{\text{RES}}} \times 100\%$$

式中, C_{shoot} 和 C_{root} 分别表示油菜地上部和根部 Pb 含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), C_{WSO} 、 C_{AEX} 、 C_{RED} 、 C_{OX} 和 C_{RES} 分别代表水溶态、弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态 Pb 含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

$$R_{\text{盆栽}} = \frac{\text{Pb}_{\text{uptake}}}{C_{\text{Pbsoil}} \times W} \times 100\%$$

式中, $R_{\text{盆栽}}$ 为土壤 Pb 的修复率, $\text{Pb}_{\text{uptake}}$ 为每盆油菜地上部 Pb 的提取量, 以每盆 3 株油菜计; C_{Pbsoil} 为土壤 Pb 含量; W 土壤质量, 以 5 kg 计.

$$R_{\text{大田}} = \frac{\text{Pb}_{\text{uptake}}}{C_{\text{Pbsoil}} \times W_g \times V} \times 100\%$$

式中, $R_{\text{大田}}$ 为土壤 Pb 的修复率, $\text{Pb}_{\text{uptake}}$ 为每公顷油菜地上部 Pb 的提取量, 以每 300 000 株 $\cdot\text{hm}^2$ 计; C_{Pbsoil} 为土壤 Pb 含量; W_g 为土壤容重 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; V 为每公顷 0~20 cm 深度范围内土壤的体积.

2 结果与分析

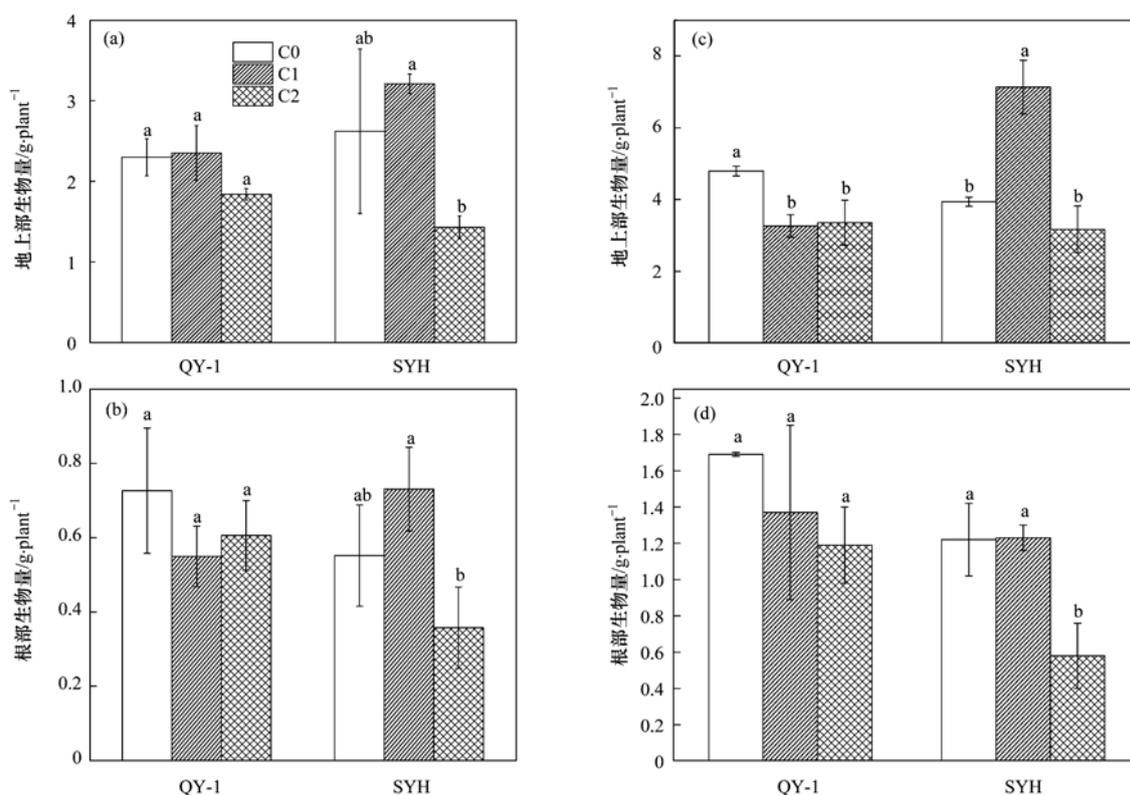
2.1 盆栽试验

2.1.1 WSC 对油菜生物量的影响

图 1 结果表明, 广西土壤上两个油菜品种的地上部生物量和根部生物量均高于河南土壤. WSC 含量对两种供试油菜在两种土壤的生物量影响有不同效果. QY-1 地上部和根部的生物量随着 WSC 含量的增加主要呈现下降趋势. 而 SYH 地上部和根部的生物量与添加 WSC 的含量有关, 在 C1 处理下, 生物量上升, C2 处理下, 生物量显著下降 ($P < 0.05$). 与 C0 相比, 在 C1 处理条件下, SYH 在河南和广西土壤上的地上部生物量分别提高了 22.65% 和 80.96%.

2.1.2 WSC 对油菜 Pb 含量的影响

WSC 含量对两种供试油菜在两种土壤上积累的 Pb 含量有不同效果 (图 2). QY-1 在河南土壤地



(a)和(b)河南,(c)和(d)广西;河南土壤的 $\omega(\text{Pb})$ 为 $230.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,广西土壤的 $\omega(\text{Pb})$ 为 $659.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;数据为平均值 \pm 标准误, $n=3$,不同小写字母表示不同含量的WSC处理油菜生物量的显著性差别($P < 0.05$),下同

图1 盆栽条件下0% (C0)、2% (C1)和4% (C2)WSC处理对河南和广西Pb污染土壤上两个油菜品种地上部和根部生物量的影响

Fig. 1. Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on shoot and root biomass of two *B. napus* cultivars in Henan province and Guangxi province Pb-contaminated soils under pot conditions

上部Pb含量随着WSC含量的升高显著增加,而在广西土壤上则表现为随WSC含量增加显著下降($P < 0.05$).SYH在河南土壤上地上部和根部积累的Pb含量随WSC含量的增加呈现先上升后下降的趋势,如与C0相比,C1处理下SYH地上部Pb含量提高了76.52%,C2处理下SYH地上部Pb含量则没有显著提高($P > 0.05$).

由表2可知,WSC含量对两种土壤上生长的两种供试油菜的TF没有显著影响($P > 0.05$).两种供试油菜的地上部和根部BCF受WSC含量和土壤类型影响较大.如SYH在河南土壤上的地上部BCF随着WSC含量的增加呈现先增加后降低的趋势,而在广西土壤上地上部BCF随着WSC含量的增加显著增加($P < 0.05$).

表2 盆栽条件下0% (C0)、2% (C1)和4% (C2)WSC处理对两个油菜品种Pb富集和转运能力的影响¹⁾

Table 2 Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on bio-concentration factors and transfer factors of Pb in shoots and roots of two *B. napus* cultivars in Pb-contaminated soil under pot conditions

品种	项目	河南			广西		
		C0	C1	C2	C0	C1	C2
QY-1	BCF _{shoot}	0.026 ± 0.003b	0.035 ± 0.004ab	0.046 ± 0.008a	0.029 ± 0.003a	0.022 ± 0.003ab	0.016 ± 0.001b
	BCF _{root}	0.083 ± 0.009a	0.091 ± 0.014a	0.109 ± 0.007a	0.166 ± 0.005a	0.123 ± 0.029ab	0.095 ± 0.018b
	TF	0.326 ± 0.052a	0.385 ± 0.038a	0.423 ± 0.085a	0.177 ± 0.018a	0.202 ± 0.072a	0.186 ± 0.053a
SYH	BCF _{shoot}	0.065 ± 0.014b	0.115 ± 0.018a	0.077 ± 0.004ab	0.028 ± 0.003b	0.035 ± 0.005b	0.053 ± 0.005a
	BCF _{root}	0.204 ± 0.053a	0.349 ± 0.064a	0.200 ± 0.029a	0.056 ± 0.009c	0.096 ± 0.019b	0.199 ± 0.006a
	TF	0.360 ± 0.130a	0.359 ± 0.123a	0.394 ± 0.050a	0.504 ± 0.061a	0.397 ± 0.144a	0.269 ± 0.032a

1)数据为平均值 \pm 标准误, $n=3$;C0表示0%WSC,C1表示2%WSC,C2表示4%WSC,BCF_{shoot}表示地上部生物浓度因子,植物地上部Pb含量与土壤中Pb含量的比值;BCF_{root}表示根部生物浓度因子,植物根部Pb含量与土壤中Pb含量的比值;TF表示转运因子,即植物地上部Pb含量与根部Pb含量的比值;不同小写字母表示同一品种油菜在不同含量壳聚糖处理下的显著差异($P < 0.05$)

2.1.3 WSC对油菜Pb提取量的影响

图3结果表明,广西土壤上两个油菜品种的地上部、根部Pb提取量均高于河南土壤.两种供试油

菜Pb的提取量受不同的土壤类型和WSC含量影响显著,如在河南土壤上,QY-1地上部和根部Pb提取量表现为随WSC含量增加而增加,而在广西土壤上

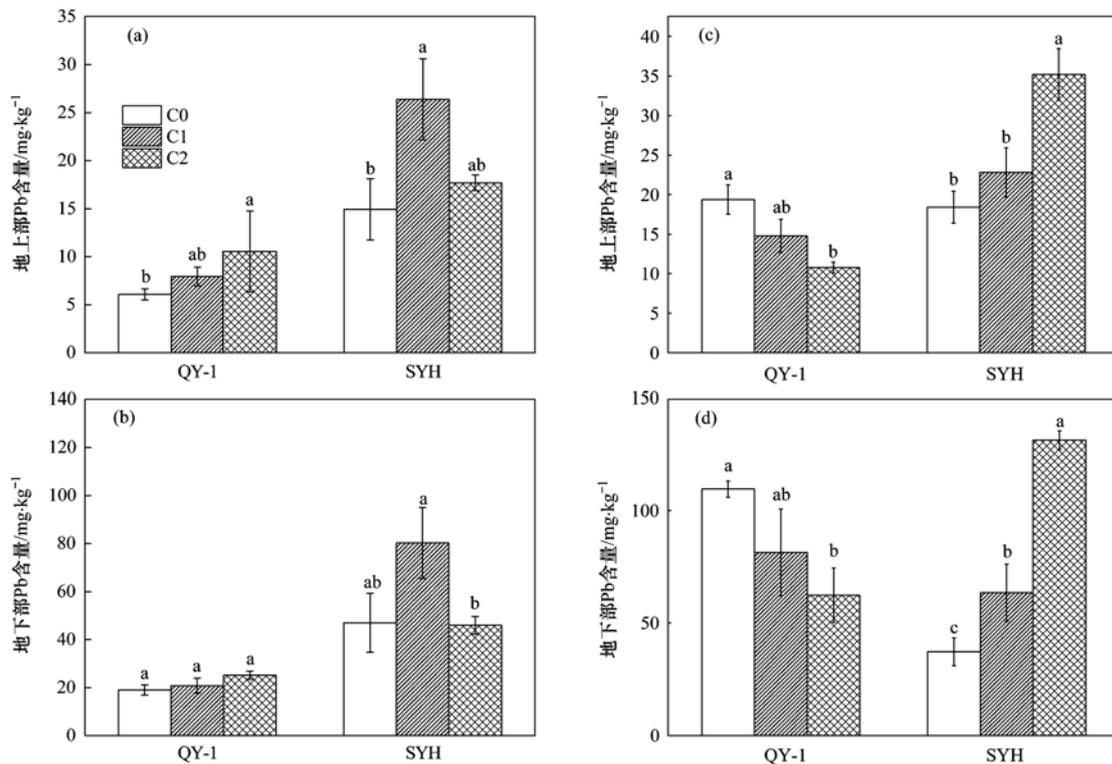


图2 盆栽条件下0% (C0)、2% (C1)和4% (C2) WSC处理对河南和广西Pb污染土壤上两个油菜品种地上部和根部Pb含量的影响

Fig. 2 Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on the concentration of Pb in shoots and roots of two *B. napus* cultivars in Henan province and Guangxi province Pb-contaminated soil under pot conditions

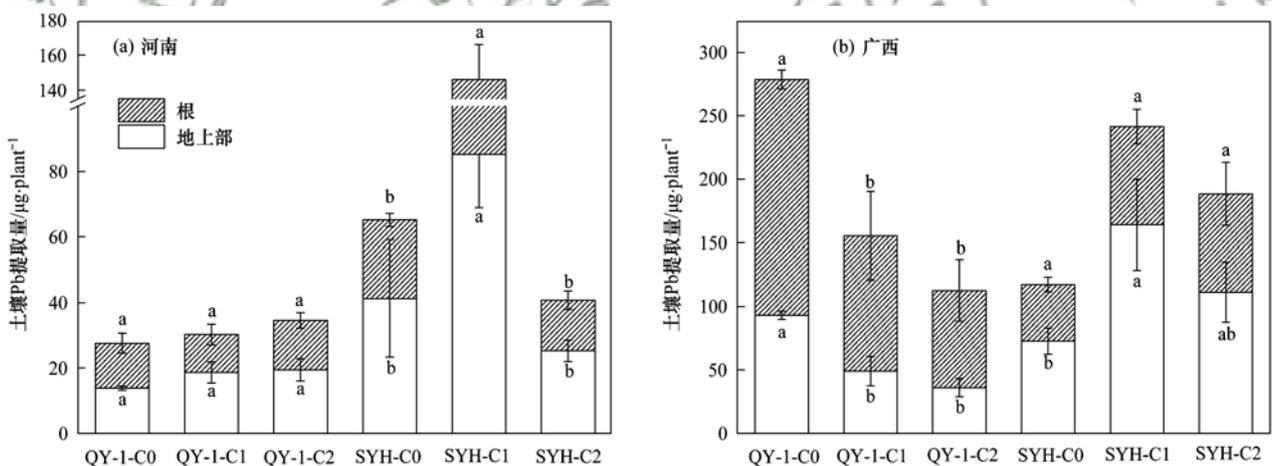


图3 盆栽条件下0% (C0)、2% (C1)和4% (C2) WSC处理对河南和广西Pb污染土壤上两个油菜品种Pb提取量的影响

Fig. 3 Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on Pb uptake of two *B. napus* cultivars in Henan province and Guangxi province Pb-contaminated soil under pot conditions

则表现为随WSC含量增加显著下降($P < 0.05$)。SYH在两种供试土壤上地上部和根部的Pb提取量与WSC含量有关,低含量WSC处理下SYH的Pb提取量显著上升($P < 0.05$),高含量WSC处理SYH的Pb提取量显著下降($P < 0.05$)。

2.1.4 WSC对土壤Pb形态分布的影响

由表3可知,随着WSC含量的增加,两种供试土壤的pH显著降低($P < 0.05$),河南土壤pH变化范围为7.55~7.99,广西土壤的pH变化范围为7.00~7.36。不同土壤Pb形态含量受土壤类型和

WSC含量影响,在河南种植QY-1和SYH土壤水溶态Pb含量随WSC含量的增加显著下降,如与对照相比,高含量WSC处理下,QY-1和SYH水溶态Pb含量分别下降了56.25%和65.22%。在广西土壤上水溶态Pb含量则没有显著变化。土壤Pb弱酸提取态与油菜的品种有关,广西土壤上,QY-1随着WSC含量的增加显著上升,SYH随WSC含量的增加显著下降,如与C0相比,QY-1在C2处理下,弱酸提取态Pb含量显著提高了29.72%。

由图4可知,广西土壤种植两种油菜品种土壤

Pb 的因子迁移率均高于河南土壤. 土壤 Pb 因子迁移率受油菜品种和土壤类型的影响显著, 在河南土壤上 QY-1 和 SYH 的因子迁移率均没有显著变化

($P > 0.05$), 而在广西土壤上, QY-1 表现为随 WSC 含量的增加因子迁移率显著上升, SYH 表现为随 WSC 含量的增加因子迁移率显著下降.

表 3 盆栽条件下 0% (C0)、2% (C1) 和 4% (C2) WSC 处理对两种土壤 pH 和 Pb 形态的影响¹⁾

Table 3 Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on pH and Pb fractions in two Pb-contaminated soils under pot conditions

土壤	品种	处理	pH	不同形态 $\omega(\text{Pb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				
				水溶态	弱酸提取态	可还原态	可氧化态	残渣态
河南	QY-1	C0	7.97a	0.16 ± 0.004a	11.64 ± 0.225a	131.39 ± 3.833a	66.21 ± 3.620a	7.07 ± 0.280c
		C1	7.84a	0.10 ± 0.007b	12.11 ± 0.742a	121.14 ± 3.427a	61.47 ± 17.097a	8.00 ± 0.020a
		C2	7.59b	0.07 ± 0.014bc	12.69 ± 0.847a	122.24 ± 8.549a	71.81 ± 4.810a	7.18 ± 0.270bc
	SYH	C0	7.99a	0.23 ± 0.015a	13.19 ± 1.061a	147.48 ± 2.006a	51.50 ± 16.379a	7.49 ± 1.310ab
		C1	7.72b	0.16 ± 0.042a	12.03 ± 0.389a	128.10 ± 14.772ab	58.06 ± 7.854a	6.32 ± 0.620b
		C2	7.55c	0.08 ± 0.017b	12.59 ± 0.726a	112.41 ± 8.205b	73.93 ± 2.453a	8.80 ± 0.050a
广西	QY-1	C0	7.32a	1.25 ± 0.190a	43.61 ± 0.557b	566.12 ± 55.245a	64.90 ± 1.429a	28.01 ± 1.100a
		C1	7.24a	1.09 ± 0.354a	44.39 ± 0.945b	534.57 ± 14.436a	66.19 ± 4.401a	28.31 ± 1.590a
		C2	7.05b	1.24 ± 0.094a	56.57 ± 3.705a	560.04 ± 14.539a	60.29 ± 3.816a	26.51 ± 1.660a
	SYH	C0	7.36a	1.36 ± 0.011a	53.73 ± 2.789a	521.75 ± 36.73a	65.36 ± 1.979b	27.91 ± 0.920a
		C1	7.07b	1.48 ± 0.118a	41.58 ± 1.426c	509.49 ± 21.297a	76.61 ± 3.293a	29.09 ± 1.750a
		C2	7.00b	1.24 ± 0.466a	45.20 ± 2.847bc	567.62 ± 19.514a	66.96 ± 4.208b	29.99 ± 0.660a

1) 数据为平均值 ± 标准误, $n = 3$; 河南土壤的 $\omega(\text{Pb})$ 为 $230.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 广西土壤的 $\omega(\text{Pb})$ 为 $659.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 不同小写字母表示同一品种油菜在不同含量壳聚糖处理下的显著差异 ($P < 0.05$)

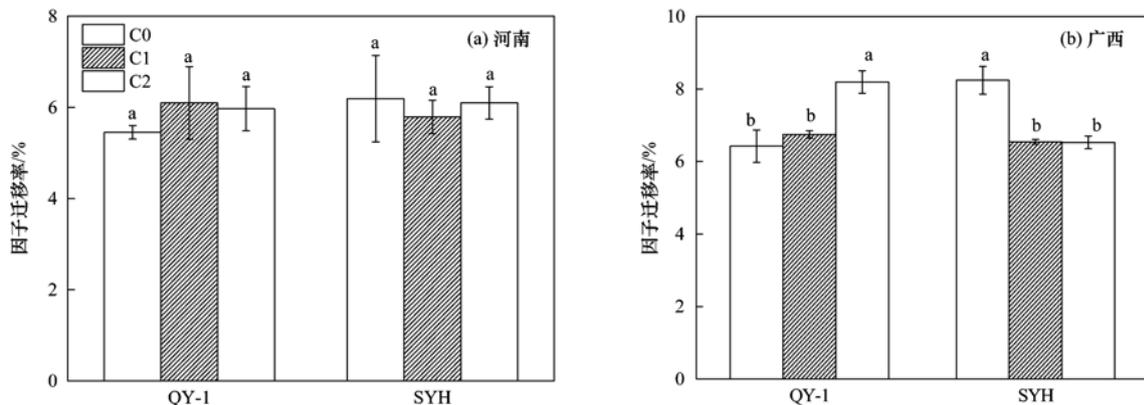


图 4 盆栽条件下 0% (C0)、2% (C1) 和 4% (C2) WSC 处理对河南和广西 Pb 污染土壤上 Pb 因子迁移率的影响

Fig. 4 Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on mobility factors of Pb in Henan and Guangxi Pb-contaminated soils under pot conditions

2.1.5 盆栽条件下 WSC 对土壤 Pb 修复效率的影响

对盆栽试验 Pb 污染土壤的修复效率进行评估 (表 4). 不同处理对 Pb 污染土壤的修复效率受 WSC 添加含量和油菜品种影响, 其中 SYH 配施 2% WSC 的修复效率最高, 如与 QY-1 配施 2% WSC 的修复效率相比, SYH 配施 2% WSC 对河南和广西 Pb 污染土壤的修复效率分别是其 4.4 倍和 3.3 倍.

2.2 田间试验

大田条件下, WSC 处理显著 ($P < 0.05$) 提高了两个油菜品种对 Pb 的富集和对 Pb 污染土壤的修复效率, 且收获的油菜籽制备的菜籽油中 Pb 含量均远低于食品安全国家标准 (GB 2762-2017) 中油脂 $\omega(\text{Pb})$ 的限值 ($\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表 5). 大田试验修复效率以表层土壤 (0 ~ 20 cm), 容重 $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 每公顷 300 000 株计. 计算可知, 与其它处理相比,

表 4 盆栽条件下 0% (C0)、2% (C1) 和 4% (C2) WSC 处理对河南和广西 Pb 污染土壤的修复效率¹⁾

Table 4 Effects of 0% (C0), 2% (C1), and 4% (C2) WSC treatments on the efficiency of the remediation Henan and Guangxi Pb-contaminated soils under pot conditions

土壤	品种	处理	地上部 Pb 提取量 $/\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$	修复效率 /%
河南	QY-1	C0	13.29	0.004
		C1	18.62	0.005
		C2	19.40	0.005
	SYH	C0	41.23	0.011
		C1	85.25	0.022
		C2	25.28	0.007
广西	QY-1	C0	93.08	0.024
		C1	49.03	0.013
		C2	36.13	0.009
	SYH	C0	72.87	0.019
		C1	164.15	0.043
		C2	111.37	0.029

1) 盆栽试验每盆 3 株

表 5 田间试验条件下 WSC 对油菜 Pb 含量、富集系数、转运系数、提取量和修复效率的影响¹⁾Table 5 Effects of WSC treatments on the growth, Pb concentrations, translocation factors, Pb uptake, and remediation efficiency of two *B. napus* cultivars grown in field trials

品种	处理	$\omega(\text{Pb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		BCF		TF/%	地上部 Pb 提取量 /g·hm ⁻²	菜籽油中 $\omega(\text{Pb})$ /mg·kg ⁻¹	Pb 修复效率 /%
		地上部	根部	地上部	根部				
QY-1	对照	81.56 ± 4.23 b	7.50 ± 1.15 b	0.35b	0.03b	1.087	389.55	0.022	0.065
	WSC	103.63 ± 4.93 a	13.43 ± 1.07 a	0.45a	0.06a	771.6	681.60	0.026	0.114
SYH	对照	110.23 ± 3.89 b	17.50 ± 1.29 b	0.48b	0.08b	629.9	478.20	0.023	0.080
	WSC	126.74 ± 5.96 a	54.29 ± 8.91 a	0.55a	0.24a	233.4	688.20	0.024	0.115

1) 不同小写字母表示对照和 WSC 处理下, 油菜 Pb 含量的显著差异 ($P < 0.05$)

SYH 和 WSC 联合处理对 Pb 污染土壤的修复效率最高, 为 0.115%。大田条件下, WSC 的添加降低了两个油菜品种的转运能力, 与对照的 TF 相比, 2% WSC 处理下, QY-1 和 SYH 的 TF 分别降低了 29.02% 和 62.95%。

3 讨论

3.1 施加 WSC 对油菜生长和 Pb 吸收的影响

生物量是反映植物受到重金属胁迫的直接指标^[28], 较为理想的整合剂应对植物生长没有显著抑制作用^[8]。本研究中, 盆栽条件下, 2 种油菜生长受 WSC 添加含量的影响显著, 低含量 WSC (2%) 提高了 SYH 地上部和根部的生物量, 而高含量 WSC 处理则使其地上部和根部的生物量显著下降, 这可能是因为适量的 WSC 加入土壤后, 能够提高土壤养分的含量, 增强土壤酶的活性, 将土壤中有物质水解成易被植物吸收的小分子有机物, 从而促进油菜的生长^[29,30], 而当 WSC 施用超过一定范围, 可能会导致土壤中的微生物与油菜争夺养分而引起油菜生物量下降^[29]。此外, 油菜的生物量与种植的油菜品种有关, 大量研究表明, 不同品种的油菜应对重金属胁迫的响应机制不同^[26]。广西土壤上, QY-1 生物量随 WSC 增加显著下降, 而 SYH 随 WSC 的增加先上升后下降, 这可能与油菜富集和转运 Pb 的能力有关。QY-1 在广西土壤上拥有较高的 Pb 富集能力, 但其吸收的 Pb 多积累在根部, 受转运能力的限制, 大量的 Pb 积累在 QY-1 的根部而无法向地上部转运, 抑制其生长和 Pb 的进一步积累。而 SYH 拥有较高的向地上部转运 Pb 的能力, 根部积累的 Pb 能够高效转运到地上部, 与细胞中的金属富集颗粒、热稳定蛋白等生物解毒组分相结合, 减少进入细胞器中 Pb²⁺ 的含量, 从而减轻 Pb 的毒害作用^[26], 进一步促进 SYH 对 Pb 的积累, 但当植物体内的 Pb 积累超过一定范围, 就会抑制植物的生长, 引起生物量的下降。油菜对 Pb 的积累还与土壤 Pb 污染程度有关, QY-1 在河南和广西土壤上对 Pb 的积累趋势相反, 这可能是因为广西土壤 Pb 污染程度高于河南, 约为

河南土壤 Pb 含量的 3 倍。广西土壤上 QY-1-C0 根部积累的 Pb 远高于河南土壤, 超过了 QY-1 的富集能力, 抑制其进一步积累 Pb, 因此呈现随 WSC 含量增加而下降的趋势。在河南土壤中, SYH Pb 提取量显著高于 QY-1; 而在广西土壤中, QY-1-C0 和 SYH-C1 地上部和根部 Pb 提取量之和相差不大, 但 SYH-C1 地上部 Pb 的提取量要远高于 QY-1-C0, 能够通过收割的方式带走更多的重金属, 更适合土壤重金属修复。

大田试验结果表明, 在典型 Pb 污染土壤中, SYH 地上部和根部吸收的 Pb 含量显著高于 QY-1, 且 WSC 可进一步提高油菜对 Pb 的富集能力。盆栽和大田条件下, 对比两个油菜品种对 Pb 污染土壤的修复效率发现, 盆栽条件下的修复效率远低于大田, 这可能是因为大田试验种植的油菜是一个完整的生命周期, 收获的油菜生物量要明显高于盆栽。综合分析盆栽试验和大田试验结果, 本研究认为, SYH 配合施加低含量 WSC 更适合修复河南 Pb 污染土壤。此外, 将本研究两个油菜品种配施整合剂后地上部 Pb 提取量和修复效率与已报道的同类研究进行比较(表 6), 发现将 SYH 配施 WSC 应用于 Pb 污染土壤修复有较高的修复效率和应用前景。

3.2 WSC 处理对油菜根际土壤的 pH、Pb 形态和迁移率的影响

土壤 pH 与 Pb 生物有效性存在极显著的负相关关系^[32,33]。本研究中, WSC 的添加显著降低了土壤 pH, 同时增加了土壤中碱解氮、速效磷、速效钾和有机质等营养元素的含量。相关研究表明, 土壤 pH 降低, 能够促进土壤重金属活性的增加^[32]。采用优化的 BCR 法对土壤 Pb 形态进行分析, 将土壤 Pb 划分为 5 个形态, 其中水溶态 Pb 和弱酸提取态 Pb 的移动性最强, 比可氧化态和可还原态 Pb 更容易被植物吸收^[34]。自然条件下, 由于老化效应, 大多数水溶性和弱酸提取态重金属会向更稳定的形式转化。WSC 的主要作用是使土壤其它形态 Pb 转化为弱酸提取态和水溶态 Pb, 从而促进植物对 Pb 的吸收^[8,35]。在广西土壤中 QY-1 和 SYH 土壤弱酸提取

表 6 田间条件下富集植物/富集植物配施螯合剂对 Pb 污染土壤的修复效果比较

Table 6 Comparison of phytoremediation effects of accumulators or accumulators with chelating agent treatment in Pb-contaminated soils under field conditions

富集植物	pH	土壤 $\omega(\text{Pb})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部 Pb 提取量 / $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	修复效率/%	文献
蜈蚣草	7.73	281	102.00	0.014	[23]
蜈蚣草-壳聚糖	7.73	281	274.09	0.038	[23]
巨菌草	4.7	118	139.55	0.053	[31]
巨菌草-纳米重金属富集剂	4.7	118	154.40	0.058	[31]
秦油 1 号	7.7	230.1	389.55	0.065	本研究
秦油 1 号-壳聚糖	7.7	230.1	681.60	0.114	本研究
三月黄	7.7	230.1	478.20	0.080	本研究
三月黄-壳聚糖	7.7	230.1	688.20	0.115	本研究

态 Pb 含量呈现不同的变化趋势,随着 WSC 施加含量的增加,QY-1 表现为显著上升,SYH 则表现为显著下降,这可能是因为 WSC 促进了 SYH 根系的生长和对土壤 Pb 的吸收,使得 SYH 根际吸收的可交换态 Pb 含量高于由其它形态转化成的可交换态 Pb 含量,致使 SYH 根际弱酸提取态 Pb 含量显著下降,这与油菜根部 Pb 含量变化的结果相呼应.通过比较强移动性组分(水溶态和弱酸提取态)与总 Pb 含量的比值,可以计算出 Pb 的因子迁移率^[36].WSC 的添加导致在 SYH 土壤中 Pb 因子迁移率下降,说明了 WSC 促进油菜 Pb 积累的机制,除了活化土壤中 Pb 形态以外,还可能存在其它如刺激油菜根系生长和 Pb 吸收转运的能力,大量吸收根际有效态的 Pb,从而导致根际 Pb 因子迁移率下降.

3.3 SYH 与 WSC 结合种植目标农田的环境和经济意义

田间条件下,对每公顷 SYH 修复 Pb 污染土壤的经济成本进行评估(表 7).与对照相比,SYH 配施 WSC 提高了河南 Pb 污染土壤的修复效率,具有一定的环境效益.另外,SYH 在施用 WSC 处理后,收获的油菜籽制备的菜籽油中 $\omega(\text{Pb}) = 0.024 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远低于食品安全国家标准(GB 2762-

2017)中油脂 $\omega(\text{Pb})$ 的限值($\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).因此,SYH 油菜品种配合施用水溶性壳聚糖在轻中度 Pb 污染土壤修复上具有较强的应用潜力.

收获物安全处置技术也是目前植物修复过程中面临的重要难题.收获后的油菜秸秆是一种含有较高含量重金属的生物质,油菜秸秆中的重金属可能会被重新释放到环境中,引起二次污染^[37].目前处置的方法主要有堆肥法、液相萃取法、焚烧法、热解法、压缩填埋法和植物冶金法等^[38].堆肥法虽然具有减容减量 and 占地面积小等优点,但由于其设备昂贵,处置过程时间长等^[39]缺点并不适用于大规模的产后修复.液相萃取法和植物冶金法由于成本昂贵和回收率较低等^[38]原因限制了其应用于农田作物产后处置.压缩填埋法的处置时间更短,成本更低,但未实现循环利用且其重金属含量是否满足填埋标准是另一问题^[38].相比较于其它技术,焚烧法是一种高效的减量化处置技术,其减量化可达到 99%,且焚烧产生的热能可回收利用,如结合当地生物质发电厂,实现资源化.焚烧过程产生的飞灰经处理达到标准后进行填埋,最大程度地降低油菜修复 Pb 污染土壤的经济成本,实现资源化利用.

表 7 田间条件下油菜(三月黄)单季(2019~2020 年)成本投入与经济产出

Table 7 Single-season (2019-2020) cost input and economic output of *B. napus* (SYH) growing under field conditions

项目	类型	单价	对照数量	小计/元	WSC 数量	小计/元
基础支出成本	油菜种子	7 元 $\cdot(100 \text{ g})^{-1}$	4.5 kg	315	4.5 kg	315
	肥料	120 元 $\cdot(40 \text{ kg})^{-1}$	600 kg	1 800	150 kg	1 800
	除草剂	20 元 $\cdot(800 \text{ g})^{-1}$	12 kg	300	12 kg	300
	WSC	100 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$	0	0	100 kg	10 000
	防虫农药	20 元 $\cdot(200 \text{ mL})^{-1}$	3 L	300	3 L	300
	防病多菌灵	4 元 $\cdot(100 \text{ g})^{-1}$	1.5 kg	60	1.5 kg	60
	油菜脱粒	1 500 元 $\cdot\text{hm}^{-2}$	1 hm^2	1 500	1 hm^2	1 500
	电费	1 050 元 $\cdot\text{a}^{-1}$	1 a	1 050	1 a	1 050
合计支出				5 325		15 325
收入	油菜籽	6.4 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$	3 675 kg	23 520	4 125 kg	26 400
	政府补贴	150 元 $\cdot\text{hm}^{-2}$	1 hm^2	150	1 hm^2	150
合计收入				23 670		26 550
净利润				18 345		11 225

4 结论

在盆栽条件下, 两种油菜(QY-1 和 SYH) 生长受 WSC 添加量影响, 表现出不同的变化趋势. 在河南和广西两种 Pb 污染土壤上, QY-1 的生物量均随 WSC 含量的增加而呈下降趋势, 而 SYH 的生物量则随 WSC 添加呈先升高后降低的趋势. 此外, WSC 对两种油菜 Pb 吸收的影响也随土壤类型有显著区别, 在河南土壤上, QY-1 地上部和根部 Pb 含量均随 WSC 含量的升高而增加, 而在广西土壤上, 则随 WSC 含量的升高而降低. 盆栽和大田试验的结果均表明, SYH 配施低含量 WSC 处理下 Pb 含量明显高于对照处理, 同时与同样处理下的 QY-1 相比, 地上部 Pb 的提取量更高, 更适合用于 Pb 污染土壤修复, 能够产生更高的环境效益. 此外, 田间试验表明, 本研究两种油菜籽所制取的成品油中 Pb 含量符合食品安全国家标准(GB 2762-2017) 中油脂 Pb 含量的限值. 因此, 种植冬油菜 SYH 配合低含量 WSC 模式在我国典型 Pb 污染农田土壤的原位植物修复中具有较大的应用潜力.

参考文献:

- [1] Sidhu G P S, Bali A S, Pal Singh H, *et al.* Phytoremediation of lead by a wild, non-edible Pb accumulator *Coronopus didymus* (L.) Brassicaceae [J]. International Journal of Phytoremediation, 2018, **20**(5): 483-489.
- [2] Khan I, Iqbal M, Shafiq F. Phytomanagement of lead-contaminated soils: critical review of new trends and future prospects[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, **16**(10): 6473-6488.
- [3] Ayangbenro A S, Babalola O O. A new strategy for heavy metal polluted environments; a review of microbial biosorbents [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(1), doi: 10.3390/ijerph14010094.
- [4] Rahman M F, Ghosal A, Alam M F, *et al.* Remediation of cadmium toxicity in field peas (*Pisum sativum* L.) through exogenous silicon[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **135**: 165-172.
- [5] Bassegio C, Campagnolo M A, Schwantes D, *et al.* Growth and accumulation of Pb by roots and shoots of *Brassica juncea* L. [J]. International Journal of Phytoremediation, 2020, **22**(2): 134-139.
- [6] 杨建伟, 杜瑞卿, 夏敏, 等. 3 种螯合剂对铅胁迫下香樟幼苗生长及铅富集的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, **48**(1): 1-8.
Yang J W, Du R Q, Xia M, *et al.* Effect of three chelating agents on plant growth and lead accumulation of camphor seedlings under lead stress [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, **48**(1): 1-8.
- [7] 刘良栋, 舒俊林, 杨智宽. 壳聚糖和 EDTA 对污染土壤中 Pb 的解吸作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(2): 345-348.
Liu L D, Shu J L, Yang Z K. Effects of chitosan and EDTA on lead desorption in Pb contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, **25**(2): 345-348.
- [8] Guo J M, Yang J, Yang J X, *et al.* Water-soluble chitosan enhances phytoremediation efficiency of cadmium by *Hylotelephium spectabile* in contaminated soils[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116559.
- [9] Chauhan P, Mathur J. Phytoremediation efficiency of *Helianthus annuus* L. for reclamation of heavy metals-contaminated industrial soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(24): 29954-29966.
- [10] Gong Y Y, Zhao D Y, Wang Q L. An overview of field-scale studies on remediation of soil contaminated with heavy metals and metalloids; technical progress over the last decade[J]. Water Research, 2018, **147**: 440-460.
- [11] Li Z, Wu L H, Luo Y M, *et al.* Changes in metal mobility assessed by EDTA kinetic extraction in three polluted soils after repeated phytoremediation using a cadmium/zinc hyperaccumulator[J]. Chemosphere, 2018, **194**: 432-440.
- [12] 马叶, 赵国梁, 王晓凤, 等. 添加螯合剂诱导-栽培红叶芥菜 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 修复铅和镉污染土壤效果的研究 [J]. 土壤通报, 2021, **52**(2): 416-424.
Ma Y, Zhao G L, Wang X F, *et al.* Remediation of lead and cadmium contaminated soil with chelate-induced-*Beta Vulgaris* Var. *Cicla* L. [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(2): 416-424.
- [13] Evangelou M W H, Ebel M, Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents[J]. Chemosphere, 2007, **68**(6): 989-1003.
- [14] Wang S L, Mulligan C N. Effects of three low-molecular-weight organic acids (LMWOAs) and pH on the mobilization of arsenic and heavy metals (Cu, Pb, and Zn) from mine tailings[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2013, **35**(1): 111-118.
- [15] Souza L A, Piotto F A, Nogueiro R C, *et al.* Use of non-hyperaccumulator plant species for the phytoextraction of heavy metals using chelating agents[J]. Scientia Agricola, 2013, **70**(4): 290-295.
- [16] Turgut C, Pepe M K, Cutright T J. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus* [J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(1): 147-154.
- [17] Kamari A, Pulford I D, Hargreaves J S J. Metal accumulation in *Lolium perenne* and *Brassica napus* as affected by application of chitosans[J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, **14**(9): 894-907.
- [18] El Hadrami A, Adam L R, El Hadrami I, *et al.* Chitosan in plant protection[J]. Marine Drugs, 2010, **8**(4): 968-987.
- [19] Zong H Y, Li K C, Liu S, *et al.* Improvement in cadmium tolerance of edible rape (*Brassica rapa* L.) with exogenous application of chitooligosaccharide [J]. Chemosphere, 2017, **181**: 92-100.
- [20] Ma Z X, Yang L Y, Yan H X, *et al.* Chitosan and oligochitosan enhance the resistance of peach fruit to brown rot [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, **94**(1): 272-277.
- [21] Li K C, Liu S, Xing R E, *et al.* Preparation, characterization and antioxidant activity of two partially N-acetylated chitotrioses [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, **92**(2): 1730-1736.
- [22] Davydova V N, Nagorskaya V P, Gorbach V I, *et al.* Chitosan antiviral activity: dependence on structure and depolymerization method[J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2011, **47**(1): 103-108.
- [23] Yang J X, Yang J, Huang J. Role of co-planting and chitosan in

- phytoextraction of As and heavy metals by *Pteris vittata* and castor bean—a field case[J]. *Ecological Engineering*, 2017, **109**: 35-40.
- [24] 艾林芳, 吴振宇, 熊萍萍, 等. 改性壳聚糖联合植物修复铅污染土壤试验研究[J]. *湿法冶金*, 2020, **39**(6): 546-549.
- Ai L F, Wu Z Y, Xiong P P, *et al.* Remediation of lead-contaminated soil by modified chitosan and vegetation [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2020, **39**(6): 546-549.
- [25] 杜萌, 李丹丹, 杨军, 等. 不同氮肥类型及配施壳聚糖对八宝景天修复镉污染土壤的强化效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(9): 1714-1723.
- Du M, Li D D, Yang J, *et al.* Study on different nitrogen forms and combined application of chitosan for enhancing phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Hylotelephium spectabile*[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2020, **26**(9): 1714-1723.
- [26] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 两种油菜不同铅富集能力差异机理[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4479-4487.
- Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Mechanism of the two cultivars of rapes with different Pb enrichment ability[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4479-4487.
- [27] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进 BCR 法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1881-1884.
- Zhang C Y, Peng P A, Song J Z, *et al.* Utilization of modified BCR procedure for the chemical speciation of heavy metals in Chinese soil reference material[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(11): 1881-1884.
- [28] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, *et al.* Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 583-594.
- [29] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(2): 445-454.
- Ye X F, Yang C, Li Z, *et al.* Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, **19**(2): 445-454.
- [30] 曹琪, 孟姝婷, 桑金盛, 等. 壳聚糖对苹果幼树根区土壤养分活化及其养分吸收的影响[J]. *山东农业科学*, 2021, **53**(4): 78-83.
- Cao Q, Meng S T, Sang J S, *et al.* Effects of chitosan on soil nutrient activation in root area and nutrient uptake of young apple trees[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, **53**(4): 78-83.
- [31] 龚建华, 薛合伦, 康敏, 等. 巨菌草的重金属富集特性及对土壤的修复效果[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2019, **45**(2): 154-161.
- Gong J H, Xue H L, Kang M, *et al.* Heavy metal enrichment characteristics and soil remediation effects of *Pennisetum giganteum* [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019, **45**(2): 154-161.
- [32] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **108**(1): 27-38.
- [33] 王剑, 杨婷婷, 朱有为, 等. 田间条件下施用石灰石及调理剂降低土壤镉可提取性的效应[J]. *水土保持学报*, 2021, **35**(4): 334-340, 368.
- Wang J, Yang T T, Zhu Y W, *et al.* Effects of limestone and conditioner on reducing soil Cd extractability under field conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(4): 334-340, 368.
- [34] Wang K, Liu Y H, Song Z G, *et al.* Chelator complexes enhanced *Amaranthus hypochondriacus* L. phytoremediation efficiency in Cd-contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124480.
- [35] Jalali M, Khanlari Z V. Effect of aging process on the fractionation of heavy metals in some calcareous soils of Iran[J]. *Geoderma*, 2008, **143**(1-2): 26-40.
- [36] Yuan T Y, Gu J F, Zhou H, *et al.* Translocation and accumulation of cadmium and lead in the tissues of 39 rape cultivars grown in a polluted farmland [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(13): 15888-15900.
- [37] 雷龙, 崔晓茨, 庄萍, 等. 重金属污染农田修复植物龙葵与伴矿景天的生物质处置技术[J]. *环境工程学报*, 2021, **15**(7): 2356-2367.
- Lei L, Cui X Y, Zhuang P, *et al.* Safe disposal technologies of post-harvest Cd-rich hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and *Sedum plumbizincicola* in heavy metal contaminated farmland[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, **15**(7): 2356-2367.
- [38] 钟道旭. 土壤污染修复植物热处置及其重金属迁移转化规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2017. 4-7.
- Zhong D X. Partitioning and speciation of heavy metals during the thermal disposal of phytoremediation plant [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. 4-7.
- [39] Chen X M, Zhao Y, Zeng C C, *et al.* Assessment contributions of physicochemical properties and bacterial community to mitigate the bioavailability of heavy metals during composting based on structural equation models[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **289**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121657.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)