

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

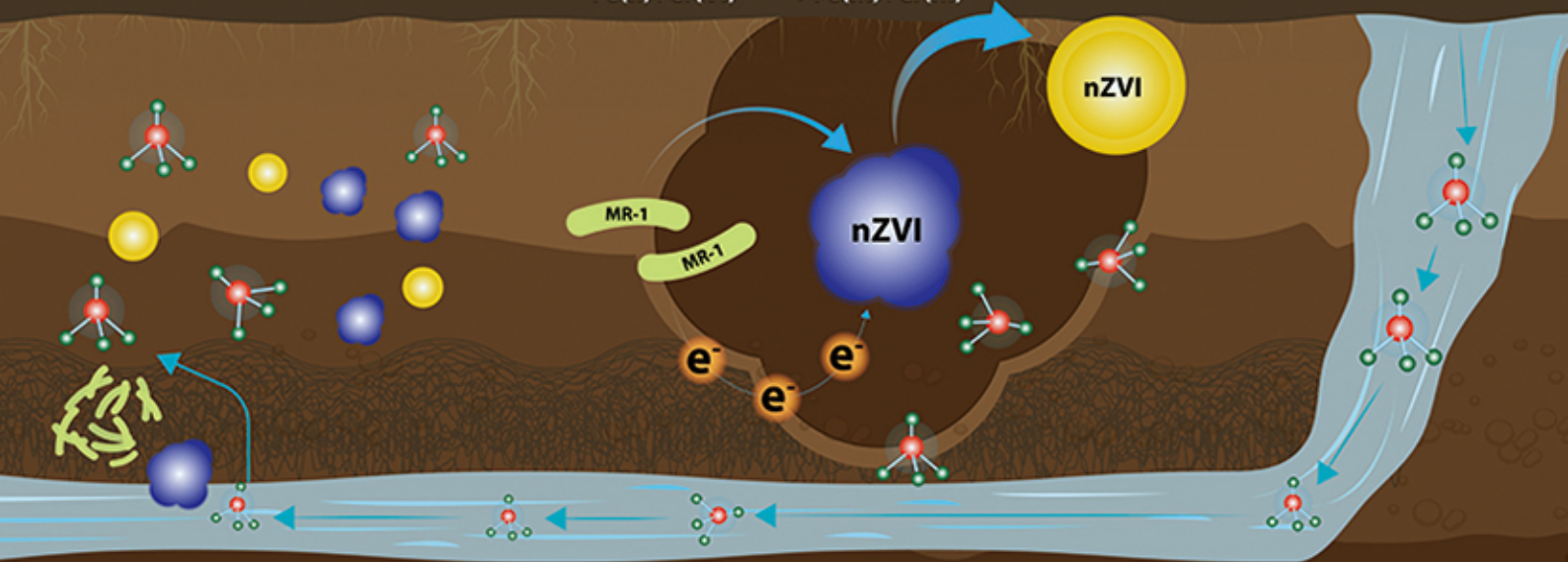
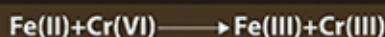
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿康伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)	

4 种典型沉水植物对去除镉污染底泥的应用效果

陶理^{1,2}, 王沛芳^{1,2*}, 袁秋生^{1,2}, 王洵^{1,2}, 胡斌^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 本研究选取 4 种典型沉水植物黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻 (*Elodea canadensis*)、菹草 (*Potamogeton crispus*) 和金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*), 通过对植物叶绿素含量及抗氧化酶活性的检测来分析植物对镉的耐受效应, 并借助生物/底泥富集因子 (BSAF) 和植物转运因子 (TF) 来了解植物的富集能力, 最后通过植物组织化学方法来揭示镉在沉水植物体内的分布情况, 以期为沉水植物的实际应用提供理论支持。结果表明, 除金鱼藻以外的 3 种植物对底泥镉污染有不同耐受能力, 其中黑藻和伊乐藻的耐受能力最强。在底泥镉含量不超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 菹草的富集能力最强 (BSAF 为 2.32)。金鱼藻在本实验中 BSAF 均小于 1.0, 说明根在镉污染底泥的植物修复中起着重要作用。比较不同植物的 TF 可以发现, 黑藻根部对镉的地上转运能力最强, 而菹草主要将镉富集于植物根部, 同时与其他植物不同, 在镉含量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 镉已均匀分布在菹草茎部细胞器中。综合植物对镉污染的耐受和富集机制, 并结合实际情况, 最终将黑藻和菹草选为修复含镉底泥的理想植物, 同时结合植物不同的转运能力, 建议可仅去除黑藻的地上部分, 而及时定期连根拔除菹草。

关键词: 沉水植物; 底泥; 镉污染; 耐受能力; 富集能力

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4311-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012300

Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment

TAO Li^{1,2}, WANG Pei-fang^{1,2*}, YUAN Qiu-sheng^{1,2}, WANG Xun^{1,2}, HU Bin^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, four typical submerged macrophytes, namely *Hydrilla verticillata*, *Elodea canadensis*, *Potamogeton crispus*, and *Ceratophyllum demersum*, were tested for their chlorophyll content and antioxidant enzyme activity, to analyze their cadmium tolerance. The biota-sediment accumulation factor (BSAF) and plant transport factor (TF) were utilized to understand the accumulation capacity of the plants. Finally, the distribution of cadmium in submerged macrophytes was revealed through phytohistochemical methods, to provide theoretical support for the practical application of submerged macrophytes. The results showed that three of the plants, excluding *C. demersum*, exhibited varying tolerances to cadmium pollution in sediments, among which the tolerance of *H. verticillata* and *E. canadensis* were the strongest. *P. crispus* had the strongest accumulation capacity (BSAF was 2.32) at relatively low pollution levels ($\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). In this study, because of its weak root system, the BSAF of *C. demersum* was less than 1.0, indicating that macrophyte roots play an important role in phytoremediation of Cd-contaminated sediments. Comparing the TF of different plants, it can be found that the roots of *H. verticillata* had the strongest above-ground cadmium transport capacity, while *P. crispus* mainly accumulated cadmium in its roots. At the same time, when the cadmium concentration was $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, cadmium was found to be evenly distributed in the stem organelles of *P. crispus*, in contrast to the other plants. Based on the cadmium tolerance and accumulation mechanism of the plants, and in consideration of real-world factors, *H. verticillata* and *P. crispus* were selected as ideal plants for repairing cadmium-containing sediments. Meanwhile, based on the different transport capabilities of plants, it is recommended that only the above-ground part of *H. verticillata* should be removed, while *P. crispus* should be uprooted regularly.

Key words: submerged macrophytes; sediment; cadmium; tolerance; accumulation

近年来,水体重金属污染事件频繁发生,严重威胁着河湖环境生态质量^[1]。这些重金属进入河流、湖泊等水环境中,通过吸附和络合等过程最终会沉积富集在底泥中,使得底泥成为重金属污染的“蓄积库”^[2,3]。一旦水环境条件发生变化,底泥中的重金属就会被释放到上覆水中,通过食物链逐级向上富集,最终进入人体,对人类以及水生生物的健康产生严重威胁^[4,5]。针对这一问题,目前国内外研发出多种河湖底泥重金属污染的修复技术,可分为原位修复和异位修复两大类。异位修复包括淋洗和电化学等,通常来说这些方法所需要的工作量较大且

成本较高,同时存在破坏原地生态结构的危险^[6,7]。原位修复与异位修复相比具有成本低和影响小等特点,这其中针对浅水湖泊和湿地污染的植物修复技术由于具有较好的修复效果和应用潜力而逐渐受到人们的青睐^[1,2,8]。

沉水植物作为水生环境的重要组成部分,具有

收稿日期: 2020-12-30; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502203); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(92047201); 中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项

作者简介: 陶理(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为水资源生态修复, E-mail: taoli_324@163.com

* 通信作者, E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

修复效率高、单位成本低、生物量大和取材广泛等优点. 同时相较于其他类别的水生植物, 沉水植物全株生长在水中, 与污染源的接触面积大, 因此可以同时去除底泥和水体中的污染物, 是水环境中重要的污染净化体^[9,10]. Xing 等^[11]在长江中下游 24 个重金属污染湖泊中发现大茨藻(*Najas marina*)是 As 和 Cd 的超累积植物, 最大富集量分别达到 1 117.65 mg·kg⁻¹ 和 463.48 mg·kg⁻¹, 同时也发现金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)是 Co、Cr 和 Fe 的超累积植物. 张饮江等^[12]研究了金鱼藻、苦草和伊乐藻这 3 种沉水植物的去镉效果, 结果表明伊乐藻对水体镉的去除能力最强(去除率 92%), 金鱼藻次之(去除率 90%), 苦草最少(去除率 66%). 由此可以发现, 沉水植物对重金属有良好的富集能力, 且自身能够缓解重金属的毒害作用. 然而, 目前对沉水植物的研究多集中在水体环境中^[12,13], 鲜见将底泥镉污染的耐受和富集机制结合研究, 同时缺乏对植物修复具体应用的建议^[14~16].

目前很多关于植物重金属的研究多以定量检测的方法为主, 但是重金属在不同植物细胞中的分布并不相同, 仅依靠单位干/湿重下重金属的含量来表征植物对重金属的富集能力, 所得的研究结论并不全面^[17]. 组织化学分析法可以为定量分析的结果提供补充, 有助于理解植物内重金属的分布和转移机制, 同时也可以更直观地了解植物细胞受毒害程度, 以便植物修复的实际应用^[18,19]. 基于此, 本文将以 4 种典型沉水植物黑藻(*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻(*Elodea canadensis*)、菹草(*Potamogeton crispus*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)为研究对象, 通过对植物各生长指标以及抗氧化酶活性的检测来分析植物对镉的耐受效应, 并借助生物/底泥富集因子和植物转运因子分析来了解植物的富集能力, 最后通过植物组织化学的方法来揭示镉在沉水植物体内的分布情况, 以期为沉水植物的实际应用提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 实验材料及实验设计

本研究所用水生植物为黑藻、伊乐藻、金鱼藻和菹草, 采自江苏省无锡市生态湿地园区, 挑选生长良好的幼苗, 在水生植物培育池中用 1/4 Hoagland 营养液预培养一周. 实验所用底泥为市购池塘泥, 风干后去除其中的粗杂质, 并过 100 目筛后均质化. 用 CdCl₂·2H₂O(分析纯)配制 5 g·L⁻¹的镉储存液, 稀释不同的倍数倒入底泥中, 均匀混合并风干, 最终制成 0、10、20 和 50 mg·kg⁻¹这 4 个含量梯度的镉污染实验底泥(Cd-0、Cd-10、Cd-20 和 Cd-50)备

用^[16]. 实验采用高约 20 cm 的塑料花盆来模拟静态条件下的水体环境. 每个花盆中称取 80 g 的实验底泥, 随后加入 3 L Hoagland 营养液. 选取长势相同的植物幼苗以每盆 5 株的密度植入, 于室内培养 42 d, 培养温度为 (18 ± 3)℃, 每天用 2 000 μmol·(m²·s)⁻¹的光照 12 h/黑暗 12 h, 每隔 3 d 用 1/4 Hoagland 营养液补充蒸发的水分, 实验设置 3 个平行.

1.2 植物、底泥及水体中镉含量测定

本实验结束后取出植物样本, 用去离子水冲洗 2~3 遍, 擦干植物表面水分后置于烘箱中, 在 60℃ 烘干至恒重, 磨碎后称取 0.05 g(精确到 0.000 1 g)进行微波消解. 底泥样本在去除烂根及碎屑后, 冷冻干燥并研磨过 100 目筛, 随后称取 0.12 g(精确至 0.000 1 g)进行消解. 样本消解后, 用 ICP-OES(5100 型, 美国安捷伦科技有限公司)测定镉含量^[20]. 此外, 取培养结束后的上覆水样 10 mL, 用 0.45 μm 滤膜过滤后, 同样测定其中的镉含量.

1.3 植物各指标的测定

本研究采用直接浸提法测量叶绿素含量^[21]. 取不包括叶脉的叶片 0.25 g 于比色管, 加入适量丙酮和乙醇, 避光静置后用紫外分光光度计进行测量, 进而计算出叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)和总叶绿素(Chla + b)的含量(mg·g⁻¹).

另取 0.4 g 植物鲜样, 加入缓冲液研磨后定容至 10 mL, 离心后取上清液作为粗酶液待测. 参考陈国梁^[22]的实验方法, 分别用氮蓝四唑光化还原法、愈创木酚法和紫外吸光度法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性.

1.4 植物组织内镉分布双硫腠显色法

双硫腠可以与镉反应生成红褐色沉淀, 利用这一性质可以定性分析镉在植物各部分的富集量^[23]. 分别取 0.5 g 植物根、茎和叶的鲜样, 用去离子水清洗 3 遍后, 放入染色剂中染色 15 min, 染色剂由 3 mg 双硫腠、6 mL 丙酮、2 mL 蒸馏水与 1~2 滴冰醋酸制成. 染色结束后用蒸馏水漂洗, 用徕卡光学显微镜观察并拍摄红褐色的镉双硫腠沉淀.

1.5 数据处理

实验数据处理所需公式如下:

$$\text{植物含水率} = \frac{\text{植物鲜重} - \text{植物干重}}{\text{植物鲜重}} \times 100\% \quad (1)$$

生物/底泥富集因子(biota-sediment accumulation factor, BSAF)是衡量植物对底泥中重金属的富集累积情况, 可以反映植物对该重金属的

去除能力. 富集因子越大, 植物对重金属的去除效果就越强^[24], 其公式为^[25]:

$$BSAF = \frac{\text{植物体内重金属含量}}{\text{沉积物中重金属含量}} \quad (2)$$

转运系数(translocation factor, TF)可以表征植物根部向地上部分转移重金属的能力, 其公式为^[26]:

$$TF = \frac{\text{植物地上部分重金属含量}}{\text{植物地下部分重金属含量}} \quad (3)$$

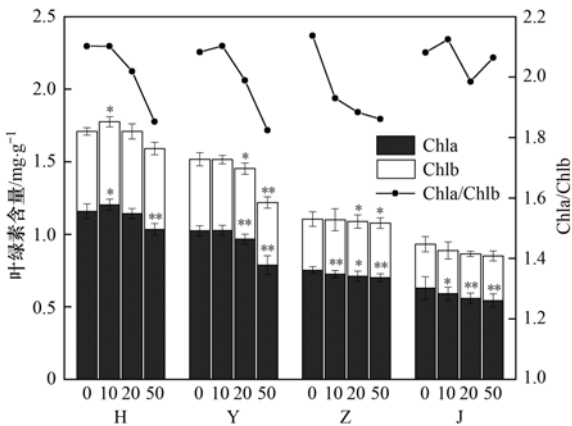
用 Excel 2013、Origin 8.0 和 SPSS18.0 统计分析软件进行数据处理. 图由 Origin 8.0 绘制, 表由 Excel 2013 生成, 利用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 沉水植物生长情况及叶绿素含量变化情况

暴露在不同浓度的底泥镉环境中 42 d 后, 金鱼藻在各浓度梯度中的生长状态均为最佳, 而菹草在各加标实验组中表现出了叶片失绿、枯萎和茎杆易断的现象.

由图 1 可知黑藻和金鱼藻在 Cd-10 中的 Chla 和 Chla + b 含量均大于对照组 ($P < 0.05$), 随后呈下降趋势, 而菹草的 Chla 和 Chla + b 含量则随浓度升高而逐渐降低. 黑藻和伊乐藻的 Chlb 含量随镉浓度的升高而降低, 但菹草表现为一直上升, 从对照组的 $0.352 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 到 Cd-50 中的 $0.376 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 黑藻和伊乐藻的 Chla/Chlb 比值呈现先上升后下降的趋势而菹草则表现为随浓度升高而下降的特点, 其中在 Cd-10 中 Chla/Chlb 比值有明显下降, 随后随底泥镉浓度升高而缓慢下降. 金鱼藻的 Chla/Chlb 比



H 为黑藻, Y 为伊乐藻, Z 为菹草, J 为金鱼藻; 0、10、20 和 50 代表含有不同含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的底泥镉; ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), * 表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 4 种典型沉水植物在不同底泥镉浓度中的叶绿素含量
Fig. 1 Chlorophyll content of four typical submerged macrophytes in sediments with different cadmium concentrations

值无明显变化趋势.

2.2 底泥镉胁迫下植物抗氧化酶活性的变化

黑藻和伊乐藻在 Cd-10 中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性与对照组相比均有上升 [图 2(a)], ($P < 0.05$), 而菹草和金鱼藻并没有明显变化. 在 Cd-50 中, 除金鱼藻以外的 3 种植物的 SOD 活性相较对照组都有显著下降 ($P < 0.01$). 在本实验验中, 金鱼藻的 SOD 活性变化并不明显.

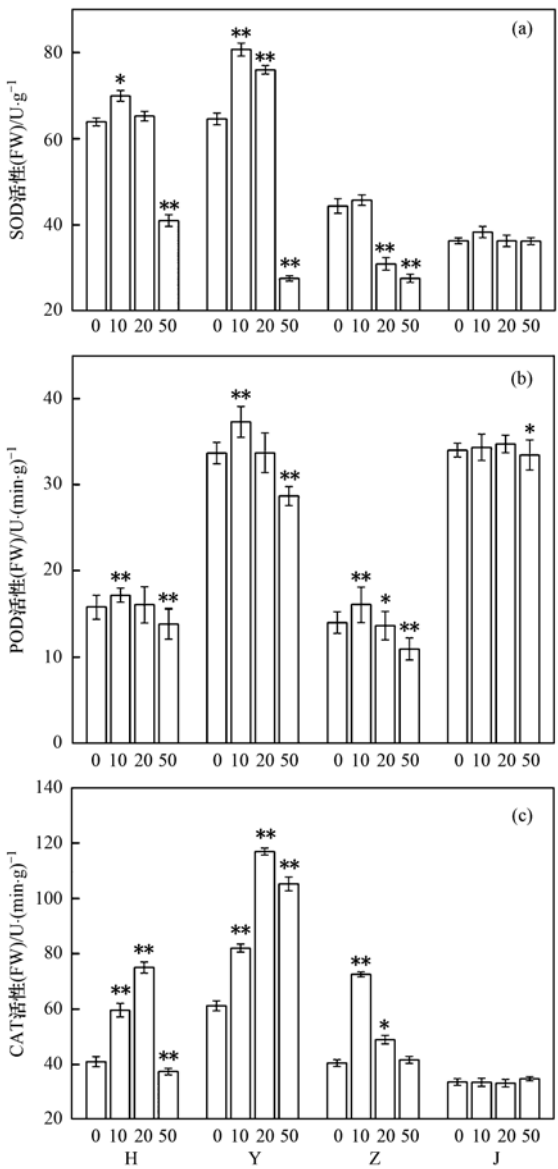


图 2 4 种典型沉水植物在不同底泥镉浓度中的抗氧化酶活性
Fig. 2 Antioxidant enzyme activities of four typical submerged macrophytes in sediments with different cadmium concentrations

黑藻、伊乐藻和菹草的过氧化物酶 (POD) 活性在 Cd-10 中均高于无污染的对照组 [图 2(b)], 而在 Cd-20 中, 黑藻和伊乐藻的酶活性为 $16.03 \text{ U} \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $33.73 \text{ U} \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1}$, 分别略高于对照组的 $15.77 \text{ U} \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $33.67 \text{ U} \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1}$. 在 Cd-50 中, 黑藻、伊乐藻和菹草的 POD 活性有明

显下降. 从整体来看, 金鱼藻的 POD 活性在 Cd-10 和 Cd-20 中随浓度增加有小幅上升, 而在 Cd-50 中略有下降.

黑藻和伊乐藻的过氧化氢酶 (CAT) 活性在 Cd-10 和 Cd-20 都有所提高[图 2(c)]. 在 Cd-50 中, 两者的酶活性均下降, 其中伊乐藻的酶活性却仍高于对照组. 菹草的 CAT 酶活性表现为先上升后下降的趋势, 在 Cd-10 中达到最大值. 金鱼藻 CAT 的活性并没有表现出明显的变化. 总的来说, 黑藻、伊乐藻和菹草的 SOD、POD 和 CAT 的活性都表现出先升高后下降的趋势, 而金鱼藻变化趋

势较不明显.

2.3 沉水植物对底泥中镉的富集量

如表 1 所示, Cd-10 和 Cd-20 的 4 种植物 BSAF 的大小均为: 菹草 > 黑藻 > 伊乐藻 > 金鱼藻, 其中菹草在 Cd-10 下的 BSAF 达到 2.58. 在 Cd-50 中, 黑藻的富集能力最大, 伊乐藻其次, 菹草的 BSAF 为 1.16, 富集能力有显著下降 ($P < 0.05$). 金鱼藻的 BSAF 一直呈下降趋势, 显著低于同等条件下的其它植物 ($P < 0.05$), 且在 3 个浓度下的 BSAF 均未超过 1. 总体来说, 除金鱼藻外的 3 种沉水植物均表现出一定的底泥镉污染富集能力.

表 1 4 种典型沉水植物体和底泥中的镉含量及生物/底泥富集因子 (BSAF)

Table 1 Cadmium content and biological/sediment enrichment factor (BSAF) in four typical submerged macrophytes and sediments

项目	类型	Cd-10	Cd-20	Cd-50
底泥中镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	对照组	9.83 $\pm$ 0.13	19.21 $\pm$ 0.41	49.63 $\pm$ 0.23
	黑藻	7.70 $\pm$ 0.63 **	16.66 $\pm$ 0.93 **	44.85 $\pm$ 1.28 **
	伊乐藻	8.14 $\pm$ 0.15 **	17.03 $\pm$ 0.84 **	45.34 $\pm$ 0.85 **
	菹草	7.45 $\pm$ 0.93 **	15.89 $\pm$ 0.67 **	46.73 $\pm$ 0.73 **
	金鱼藻	9.62 $\pm$ 0.23	19.34 $\pm$ 0.64	48.88 $\pm$ 0.66
植物中镉含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	黑藻	16.50 $\pm$ 0.14	38.61 $\pm$ 0.87	92.35 $\pm$ 1.43
	伊乐藻	10.61 $\pm$ 0.94	27.44 $\pm$ 0.64	57.20 $\pm$ 1.57
	菹草	19.22 $\pm$ 1.42	36.91 $\pm$ 0.22	54.15 $\pm$ 0.96
	金鱼藻	8.28 $\pm$ 1.22	11.31 $\pm$ 0.75	8.58 $\pm$ 0.47
生物/底泥富集因子 (BSAF)	黑藻	2.14 $\pm$ 0.11	2.31 $\pm$ 0.21	2.06 $\pm$ 0.17
	伊乐藻	1.30 $\pm$ 0.05	1.61 $\pm$ 0.15	1.26 $\pm$ 0.12
	菹草	2.58 $\pm$ 0.11	2.32 $\pm$ 0.33	1.16 $\pm$ 0.09
	金鱼藻	0.86 $\pm$ 0.19	0.58 $\pm$ 0.14	0.48 $\pm$ 0.13

1) ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), * 表示差异显著 ($P < 0.05$)

本研究同时还分析了在 Cd-50 中生长的水生植物的地上部分和地下部分的镉含量, 结果如表 2 所示. 由于金鱼藻没有明显根系, 因此将其视为整株. 从结果可以发现, 3 种植物的地下部分镉含量都要大于地上部分, 转运系数 (TF) 均小于 1, 同时其大小关系为: 黑藻 > 伊乐藻 > 菹草, 说明这 3 种植物依靠植物根滤的机制来富集镉. 值得注意的是: 黑藻的 TF 最高, 为 0.77; 菹草最低, 仅为 0.28.

表 2 高镉污染环境中黑藻、伊乐藻和菹草地上和地下部分的镉含量

Table 2 Cadmium content of *H. verticillata*, *E. canadensis*, and *P. crispus* in high cadmium polluted environment

项目	地上部分 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	地下部分 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	转运系数 (TF)
黑藻	82.97 $\pm$ 0.88	107.75 $\pm$ 1.24	0.77
伊乐藻	36.64 $\pm$ 0.53	65.42 $\pm$ 1.31	0.56
菹草	17.30 $\pm$ 1.14	61.79 $\pm$ 0.67	0.28

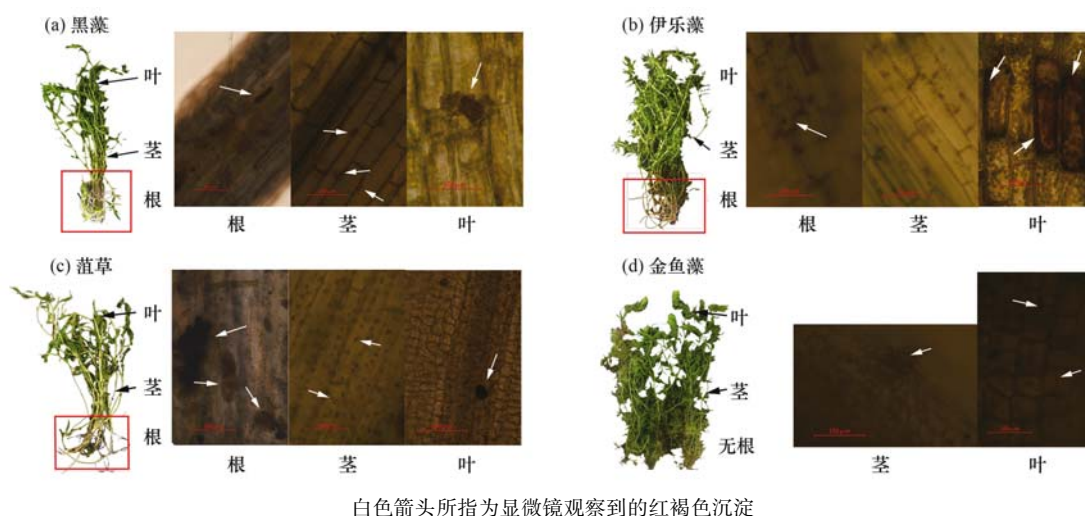
为了更好地了解实验期间, 底泥中的镉向上覆水释放情况, 同时也对水样中的镉含量进行了测定. 结果发现水样中基本没有检出镉污染物质, 仅在底泥镉污染浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的黑藻和菹草实验组

发现有少量镉存在, 检出浓度均为 $0.02 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 与底泥相比污染物含量很低, 因此本研究不考虑水体中的镉污染.

2.4 镉在沉水植物各部分的分布

为了进一步探究重金属镉进入植物体内后的转运机制, 以及各植物对镉的富集机制, 本研究以 Cd-50 中的植物作为研究对象, 通过双硫腠显色法来观察镉在沉水植物根茎叶的分布情况, 同时又通过分析镉在沉水植物叶片中的亚细胞含量来揭示植物的富集机制. 双硫腠试剂可与镉反应, 生成可以在光学显微镜下观察到的不溶性红棕色沉淀. 根据这个原理, 将 4 种植物洗净并分成根、茎和叶这 3 部分, 分别进行双硫腠染色后, 用光学显微镜观察并拍照.

由于金鱼藻没有明显的根系, 因此只对 3 种植物的根部进行了染色实验. 结果表明, 3 种植物根部均呈现不同程度的红褐色沉淀, 其中菹草白根的红褐色沉淀最为明显, 且形成沉淀较大[图 3(c)], 说明其根系表现出了良好的阻隔镉向地上运输的作用. 从茎细胞发现黑藻、伊乐藻和菹草中均能明显看到红褐色沉淀, 同时黑藻的细胞壁上附着有红褐色



白色箭头所指为显微镜观察到的红褐色沉淀
图 3 4 种典型沉水植物各部分双硫腙-镉沉淀光学显微镜照片

Fig. 3 Optical micrographs of dithizone-cadmium precipitation in various parts of four typical submerged macrophytes

沉淀[图 3(a)]. 在菹草中, 植株茎细胞中的叶绿体密集均匀地分布有红褐色沉淀[图 3(c)], 说明此时镉已经对植株的叶绿体产生影响, 开始影响植株正常的生理活动. 金鱼藻由于没有吸收过多重金属镉, 因此在茎部并没有看到明显的红褐色沉淀. 在 4 种植物叶片中均能看到明显的红棕色沉淀. 伊乐藻叶片的某些细胞均被染色, 其中细胞壁的颜色最深, 同时还可以发现, 叶片中的某些细胞中叶绿体和液泡均有不同程度的显色[图 3(b)]. 在菹草叶片的叶脉中出现一个明显的深色沉淀[图 3(c)], 而在金鱼藻叶片中, 形成的沉淀较小且多聚集在细胞壁边[图 3(d)].

3 讨论

3.1 沉水植物对底泥镉污染的耐受效应

本研究从叶绿素含量以及抗氧化酶活性方面来分析 4 种沉水植物对底泥镉污染的耐受能力. 叶绿素主要分布在叶绿体中, 是帮助植物吸收太阳光并进行光合作用的核心物质, 其含量的变化直接影响了植物的生长与发育. 在本研究中, 除了菹草一直受到抑制以外, 其它 3 种植物各叶绿素含量均呈现先上升后下降的趋势, 这符合植物在镉环境中“低促高抑”的特点^[27]. 该现象是由于镉对植物细胞分裂产生的干扰所致, 即在低浓度的镉环境中, 植物细胞的分裂速度会加快, 进而提高植物代谢能力^[28]. 虽然低浓度的镉可以促进植物生长, 但是镉作为植物生长发育的非必需元素, 具有很强的生物毒性^[29]. 当底泥镉浓度较高时 ($\text{Cd} \geq 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 4 种植物的叶绿素含量已经受到不同程度的抑制, 直观表现为叶片失绿、茎秆萎蔫, 这种现象在 Cd-50 的菹草中尤为明显. 抗氧化酶系统是植物的解毒机制之一, 主

要包括过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 等^[30]. 在本研究中, 黑藻和伊乐藻在较低的污染环境里 (Cd-10 和 Cd-20) 各氧化酶活性都有不同程度的升高, 说明植物自身解毒机制已经被激活. 值得注意的是, 菹草在 Cd-10 环境下 3 种酶活性都有不同程度升高, 但是其生长增量却低于对照组, 这可能是由于镉对菹草的毒害作用已经超过了抗氧化系统自身调节能力, 使得植株的生长受到抑制^[31, 32].

综合以上分析, 从底泥含镉浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 开始, 菹草的生长就已经受到抑制, 耐受能力在 4 种植物中最低, 同时金鱼藻的生长情况与底泥污染浓度并没有明显关系, 因此在本实验中, 植物的耐受能力为: 黑藻 > 伊乐藻 > 菹草.

由于本研究是静态实验, 各样本的水体中均未检测出镉含量 (部分 Cd-50 样本中检出有少量镉的存在, 但含量较少), 因此底泥是唯一镉污染源, 而在实际应用中, 当水体环境发生变化时, 底泥中的重金属镉会被释放, 此时植物地上部分也与污染物直接接触. 关于沉水植物对水体镉的耐受能力, 王晓美等^[15]的实验结果表明, 菹草叶片在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液中开始出现腐烂发黑的现象, 而黑藻表现出来的抑制浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在林海等^[33]的实验中, 黑藻在 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的镉溶液中依然有 50% 的去除效果. 同时又通过查阅相关研究, 总结了近年我国东南部河流湖泊不同介质的镉污染情况, 结果如下: ①淮河流域的水体最高镉浓度为 $1.57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 $0.288 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[34]; ②太湖流域典型水系的底泥中镉浓度为 $0.479 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[35]; ③太湖梅梁湾的底泥镉浓度为 $2.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水体中镉浓度为 $0.065 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[36]; ④杭州市某河道底泥最高镉浓度为

14.04 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 3.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[37]; ⑤山东省泰安市东平湖底泥最高镉浓度为 0.348 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 0.285 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[38]. 通过对比可以发现, 实际情况下的水体与底泥的镉污染浓度要远低于室内实验中沉水植物表现出来的抑制浓度. 因此笔者推测, 本实验所选沉水植物都可以在大部分镉污染流域中生长.

3.2 沉水植物对底泥镉污染的富集转运作用

从植物的生物/底泥富集因子 (BSAF) 可以看出, 在底泥含镉浓度小于 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 菹草的富集能力要略高于黑藻, 而在 Cd-50 中, 黑藻表现出来的富集能力要优于菹草. 由于在实际情况中, 底泥的含镉浓度很难达到 20 ~ 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 因此从富集能力来说, 黑藻和菹草都是比较理想的底泥修复植物. 本研究中的金鱼藻并没有得到与前人在镉污染水体中进行的研究相类似的现象^[27], 结果表明其 BSAF 的值小于 1, 可能是由于金鱼藻退化的根系导致其并不能很好地与底泥中的镉有良好的接触^[15,16], 这也说明了根系对于修复底泥污染物的重要性.

从转运能力来说, 黑藻的 TF 为 0.77, 接近 Cd 超富集植物的临界迁移系数标准 (TF = 1.00), 相比之下菹草更容易将镉富集在根部 (TF = 0.28). 在实际应用中, 向地上部分转运能力强的黑藻, 可直接收获地上部分来收集重金属镉. 而根部富集能力强的菹草, 需要连根拔除来收集污染物, 另外由于种植时间越长, 根系越发达, 在选用菹草修复底泥镉的时候需要及时收割和清理.

3.3 沉水植物体内镉污染的组织化学分布

在本研究中, 通过双硫腠染色发现, 镉在不同植物、不同组织部位的分布都表现出了不均一性 (如金鱼藻和伊乐藻叶片), 这也说明仅依靠 BSAF 和 TF 分析来了解植物的富集转运机制具有一定局限性. 转运能力最低的菹草根部在经双硫腠染色之后出现边界明显且体积较大的红棕色沉淀, 这也与定量分析的结果一致. 这种结果的出现可能是由于菹草的根部相对于其它水生植物可以产生更多的根际分泌物来固定重金属^[39]. 从根部进入植物体内的镉, 会被茎输送至地上部分, 而茎作为物质传输的部分, 对镉的富集能力较差^[15]. 值得注意的是, 在 Cd-50 中镉已经较均匀地分布在菹草茎部细胞的叶绿体中, 而在同样培养条件下的黑藻茎部仅可见一些清晰的沉淀附在细胞壁上, 且分布较不均匀. 结合菹草的耐受性低于黑藻, 可以推断在一定重金属浓度中, 植物会将重金属固定在某个区域; 而当重金属的浓度超过植物可以承受的范围时, 重金属会对植物全身产生毒害作用. 同时也建议在实际应用中, 为

避免重金属镉对菹草正常生理活动产生影响, 应及时对菹草进行连根去除.

4 结 论

根系作用是沉水植物吸收和富集底泥镉污染的关键途径, 而根系严重退化的金鱼藻未能表现出明显的镉污染富集能力. 其它 3 种植物在较低含镉污染底泥 ($\text{Cd} \leq 20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的镉富集能力大小为: 菹草 $\approx$ 黑藻 > 伊乐藻, 镉耐受能力大小为: 黑藻 > 伊乐藻 > 菹草. 菹草将多数富集的镉积累在植物根部, 而黑藻和伊乐藻却将多数镉转运至地上部分. 进入地上部分的镉通过茎部被运输至叶片, 当毒性超出植物自身解毒能力的时候, 叶片中的镉便会进入细胞器中, 产生毒害作用. 综合植物对镉污染的耐受和富集能力, 并结合实际情况, 最终将黑藻和菹草选为修复含镉底泥的理想植物. 参考植物的转运能力, 建议在收获黑藻时可仅去除地上部分, 而菹草则需要定期连根去除.

参考文献:

- [1] 李晶, 栾亚宁, 孙向阳, 等. 水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 世界林业研究, 2015, 28(2): 31-35.
Li J, Luan Y N, Sun X Y, et al. Research advances in remediation of heavy metal contaminated water bodies by aquatic plants[J]. World Forestry Research, 2015, 28(2): 31-35.
- [2] Giripunjie M D, Fulke A B, Meshram P U. Remediation techniques for heavy-metals contamination in lakes: a mini-review[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2015, 43(9): 1350-1354.
- [3] 张海锋, 胥焘, 黄应平, 等. 水生植物修复沉积物中重金属污染的机制及影响因素研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2015, 27(1): 37-41.
- [4] Akcil A, Erust C, Ozdemiroglu S, et al. A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 86: 24-36.
- [5] Jaiswal A, Verma A, Jaiswal P. Detrimental effects of heavy metals in soil, plants, and aquatic ecosystems and in humans[J]. Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology, 2018, 37(3): 183-197.
- [6] 梁欣. 旧厂房改造土壤重金属污染的原位与异位修复技术进展[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(5): 85-87.
Liang X. Advances in in-situ and ectopic repair techniques for heavy metal pollution in soil of old factory buildings[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(5): 85-87.
- [7] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2038-2045.
Yang S X, Tian Q J, Liang S C, et al. Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 2038-2045.
- [8] Peng J F, Song Y H, Yuan P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3): 633-640.
- [9] 张萌, 刘足根, 李雄清, 等. 长江中下游浅水湖泊水生植被生态修复种的筛选与应用研究[J]. 生态科学, 2014, 33

- (2): 344-352.
- Zhang M, Liu Z G, Li X Q, *et al.* Studies of the selection and application of suitable hydrophyte species on lake restoration in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(2): 344-352.
- [10] 高海荣, 陈秀丽, 赵爱娟, 等. 5 种沉水植物对重金属富集能力的对比研究[J]. *环境保护科学*, 2016, **42**(4): 101-105.
- Gao H R, Chen X L, Zhao A J, *et al.* Comparison of heavy metal accumulation by five submerged macrophytes [J]. *Environmental Protection Science*, 2016, **42**(4): 101-105.
- [11] Xing W, Wu H P, Hao B B, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals by submerged macrophytes: looking for hyperaccumulators in eutrophic lakes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(9): 4695-4703.
- [12] 张饮江, 易冕, 王聪, 等. 3 种沉水植物对水体重金属镉去除效果的实验研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, **21**(5): 784-793.
- Zhang Y J, Yi M, Wang C, *et al.* Research on phytoremediation of cadmium contaminated water by three submerged macrophytes [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, **21**(5): 784-793.
- [13] 贺艳. 植物材料对重金属污染水体的修复和轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata* L.) 对镉积累特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- He Y. Phytoremediation of contaminated water with plant materials and characterization of Cd accumulation in the aquatic plant *Hydrilla verticillata* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [14] 谢佩君, 李铭红, 晏丽蓉, 等. 三种沉水植物对 Cu、Pb 复合污染底泥的修复效果[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(4): 757-763.
- Xie P J, Li M H, Yan L R, *et al.* Remediation of Cu and Pb co-polluted sediments by three submerged plants [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 757-763.
- [15] 王晓美, 高培培, 孙旭昊, 等. 修复白洋淀镉污染水体的沉水植物筛选试验[J]. *广西植物*, 2018, **38**(10): 1382-1390.
- Wang X M, Gao P P, Sun X H, *et al.* Screening of submerged macrophytes for phytoremediation of cadmium-contaminated water in Baiyangdian Lake[J]. *Guihaia*, 2018, **38**(10): 1382-1390.
- [16] 乔云蕾, 李铭红, 谢佩君, 等. 沉水植物对受重金属镉、锌污染的水体底泥的修复效果[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2016, **43**(5): 601-609.
- Qiao Y L, Li M H, Xie P J, *et al.* A study on the absorption of cadmium and zinc in the water sediments with submerged plants [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2016, **43**(5): 601-609.
- [17] Seregin I V, Kozhevnikova A D. Distribution of cadmium, lead, nickel, and strontium in imbibing maize caryopses[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2005, **52**(4): 565-569.
- [18] Seregin I V, Kozhevnikova A D. Histochemical methods for detection of heavy metals and strontium in the tissues of higher plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011, **58**(4): 721-727.
- [19] 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 等. 铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 3054-3060.
- Zhu G X, Xiao H Y, Guo Q J, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of heavy metals in three types of compositae plants from lead-zinc tailings area[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 3054-3060.
- [20] 陈秀梅. 酸溶-微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定土壤及沉积物中的钼[J]. *环境科学导刊*, 2020, **39**(1): 85-90.
- Chen X M. Determination of Ta in soil and sediment samples in mixed acid using microwave digestion method by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Environmental Science Survey*, 2020, **39**(1): 85-90.
- [21] 兰心宇, 王军军, 阎蕴运, 等. 水生植物有翅星蕨 (*Microsorium pteropus*) 对镉的超富集能力及抗性生理研究[J]. *中国科学: 生命科学*, 2017, **47**(10): 1113-1123.
- Lan X Y, Wang J J, Yan Y Y, *et al.* Hyperaccumulation capacity and resistance physiology of *Microsorium pteropus*, an aquatic fern to cadmium[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2017, **47**(10): 1113-1123.
- [22] 陈国梁. 沉水植物对砷的富集特征及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Chen G L. The characteristics and mechanism of arsenic accumulation by submerged plants [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [23] Clabeaux B L, Navarro D A G, Aga D S, *et al.* Cd tolerance and accumulation in the aquatic macrophyte, *Chara australis*: Potential use for charophytes in phytoremediation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(12): 5332-5338.
- [24] Lafabrie C, Major K M, Major C S, *et al.* Trace metal contamination of the aquatic plant *Hydrilla verticillata* and associated sediment in a coastal Alabama creek (Gulf of Mexico-USA) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **68**(1-2): 147-151.
- [25] Huang P C, Tien C J, Sun Y M, *et al.* Occurrence of phthalates in sediment and biota: relationship to aquatic factors and the biota-sediment accumulation factor[J]. *Chemosphere*, 2008, **73**(4): 539-544.
- [26] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- He D, Qiu B, Peng J H, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a lead-zinc tailings in xiashuiwan of Hunan province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3595-3600.
- [27] 陈虹, 张颖, 方元平, 等. 镉对金鱼藻植株生长和抗氧化酶活性的影响[J]. *湖北农业科学*, 2012, **51**(5): 977-980.
- Chen H, Zhang Y, Fang Y P, *et al.* Cadmium-induced changes in development and oxidative metabolism in *Ceratophyllum demersum* plant [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, **51**(5): 977-980.
- [28] 丁继军, 潘远智, 刘柿良, 等. 土壤重金属镉胁迫对石竹幼苗生长的影响及其机理[J]. *草业学报*, 2013, **22**(6): 77-85.
- Ding J J, Pan Y Z, Liu P L, *et al.* Effect and mechanisms of soil cadmium stress on *Dianthus chinensis* seedling growth [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, **22**(6): 77-85.
- [29] 杨红霞, 陈俊良, 刘威. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(2): 1-8.
- [30] 贾茜茹, 刘奋武, 樊文华. 硅对 Cd 胁迫下黄瓜苗期光合及抗氧化酶系统的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(4): 321-326.
- Jia Q R, Liu F W, Fan W H. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidant enzymes of cucumber seedling under cadmium stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(4): 321-326.
- [31] 赵会君, 梁昕昕, 魏玉清. 不同浓度的 Cu、Mn、Zn 胁迫对商陆叶片光合系统参数及抗氧化酶系统的影响[J]. *北方园*

- 艺, 2020, (3): 120-127.
- Zhao H J, Liang X X, Wei Y Q. Effect of different concentrations of Cu, Zn and Mn on the photosynthetic and antioxidative system of *pH ytolacca americana* [J]. Northern Horticulture, 2020, (3): 120-127.
- [32] 万子栋, 高天鹏, 周玉霞, 等. 重金属复合胁迫下碱蓬萌发生长及富集特征[J]. 生物工程学报, 2020, **36**(3): 493-507.
- Wan Z D, Gao T P, Zhou Y X, *et al.* Seed germination, bud growth and heavy-metal accumulation of *Suaeda salsa* [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2020, **36**(3): 493-507.
- [33] 林海, 陈思, 董颖博, 等. 黑藻、狐尾藻对重金属铅、镉、铬、钒污染水体的修复[J]. 中国有色金属学报, 2017, **27**(1): 178-186.
- Lin H, Chen S, Dong Y B, *et al.* Phytoremediation on heavy metal-polluted water of Pb, Cd, Cr and V by *Hydrilla verticillata* and *Myriophyllum verticillatum* [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, **27**(1): 178-186.
- [34] 陈雅琼. 淮河淮南段重金属含量变化规律研究[J]. 广东化工, 2020, **47**(5): 89-90.
- Chen Y Q. Study on the variation of heavy metal content in Huainan section of Huaihe river [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, **47**(5): 89-90.
- [35] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from lake Taihu basin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [36] Ni L X, Li D D, Su L L, *et al.* Effects of algae growth on cadmium remobilization and ecological risk in sediments of Taihu Lake [J]. Chemosphere, 2016, **151**: 37-44.
- [37] 丁涛, 田英杰, 刘进宝, 等. 杭州市河道底泥重金属污染评价与环保疏浚深度研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 911-917.
- Ding T, Tian Y J, Liu J B, *et al.* Assessment of heavy metal status in sediments and environmental dredging depth in Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, **35**(3): 911-917.
- [38] Wang Y Q, Yang L Y, Kong L H, *et al.* Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China [J]. CATENA, 2015, **125**: 200-205.
- [39] Ma Y, Oliveira R S, Freitas H, *et al.* Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: relevance for phytoremediation [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, **7**, doi: 10.3389/fpls.2016.00918.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)