

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征

郭俊梅^{1,2}, 杨俊兴^{1,2*}, 杨军^{1,2}, 万小铭^{1,2}, 孟晓飞^{1,2}, 陈同斌^{1,2}, 何孟轲^{1,2,3}, 周小勇⁴, 徐铁兵⁵

(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. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100083; 4. 北京瑞美德环境修复有限公司, 北京 100015; 5. 河北省环境科学研究院, 石家庄 050051)

摘要: 采用 Cd 含量为 $2.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的潮褐土开展盆栽试验, 通过外源添加 NaCl 研究不同生态型八宝景天对 Cd 和盐分复合胁迫的生长响应以及 Cd 吸收积累的差异. 结果表明, 在 Cd 单一或与盐分复合胁迫下, 八宝景天各生态型间地上部生物量和 Cd 含量均表现出显著差异, 盐分胁迫进一步加剧了八宝景天的生长抑制, 高盐胁迫下八宝景天各生态型地上部 Cd 含量总体呈下降趋势, 这与盐分引起土壤 pH 显著升高导致 Cd 生物有效性降低有关. 此外, 不同生态型对盐分胁迫表现出的生长和 Cd 吸收响应有显著差异, LN 生态型地上部生物量在各处理下均显著高于其他生态型, 且在 1% NaCl 处理下生物量仍没有显著下降, 耐性指数可达 0.91. 同时, 其地上部 Cd 含量在不同处理下均显著高于其他生态型, 其原因为 LN 生态型在 Cd 富集和解毒的生理机制方面更具优势, 而这些同样是其耐盐性的重要生理机制. 综上可知, 尽管盐分胁迫减少了八宝景天地上部 Cd 富集量, 但其不同生态型间差异显著, LN 生态型在 2% NaCl 处理下地上部 Cd 富集量仍可达 $84.4 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$, 且较其他生态型显著提高 48.4%~89.3%, 因此, LN 生态型八宝景天具有应用于修复盐渍化土壤 Cd 污染的潜力.

关键词: 盐分胁迫; 八宝景天; 生态型; 镉积累; 耐盐性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1177-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202010128

Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of *Hylotelephium spectabile* Under Salt Stress

GUO Jun-mei^{1,2}, YANG Jun-xing^{1,2*}, YANG Jun^{1,2}, WAN Xiao-ming^{1,2}, MENG Xiao-fei^{1,2}, CHEN Tong-bin^{1,2}, HE Meng-ke^{1,2,3}, ZHOU Xiao-yong⁴, XU Tie-bing⁵

(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 Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. Beijing Remediation Environmental Restoration Co., Ltd., Beijing 100015, China; 5. Hebei Provincial Academy of Environmental Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the growth response and Cd accumulation characteristics among different populations of *Hylotelephium spectabile* in Cd-contaminated cinnamon soil ($2.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) with the addition of different concentrations of NaCl. Results showed that the biomasses and Cd concentrations of *H. spectabile* showed significant differences among different populations under Cd alone or Cd-salt combined stress. Moreover, salt stress aggravated the growth inhibition of *H. spectabile* and the Cd concentrations in different *H. spectabile* populations showed a declining trend, which may be related to the salt-derived pH increase leading to a decrease in Cd bioavailability. In addition, the growth and Cd absorption responses of *H. spectabile* under salt stress were significantly different in the different populations. The shoot biomasses of the LN population were significantly higher than in other populations under different treatment, and showed no significant decrease with the addition of 1% NaCl when compared with the control treatment and the tolerance index remained 0.91. At the same time, the shoot Cd concentration of the LN population was significantly higher than in other populations under different treatments. The result may be attributed to the Cd accumulation and detoxification mechanisms in LN are prior than other populations that may also have important physiological mechanisms for tolerance of salt stress. In summary, although Cd uptake in *H. spectabile* decreased with salt stress, there were significant differences among different populations. LN populations accumulated $84.4 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ Cd in shoots with 2% NaCl addition, which was 48.4%~89.3% higher than in other populations. Therefore, *H. spectabile*, especially LN populations, is a good candidate for phytoremediation of Cd-contaminated saline soil.

Key words: salt stress; *Hylotelephium spectabile*; populations; Cd accumulation; salt tolerance

土壤重金属污染是全球面临的重要环境问题之一, 矿山开采、金属冶炼和电镀等工业活动排放的大量废水、废物以及不合理的灌溉和农业活动等人为因素都会导致大量重金属污染进入土壤^[1]. 而这些因素往往同时导致土壤中重金属的积累, 许多土壤

收稿日期: 2020-10-20; 修订日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907125, 41771509); 中国博士后科学基金项目(2019M650827); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802604, 2018YFD0800600)

作者简介: 郭俊梅(1990~), 男, 博士后, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: gjm19900321@163.com

* 通信作者, E-mail: yangjx@igsnrr.ac.cn

在受到重金属污染的同时还受到了土壤盐渍化的危害^[2]. 据统计,全球约有 $8.31 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 土壤受到盐渍化的影响,约占世界总土地面积的 7%^[3,4]. 随着我国经济的快速发展和人口迅速增加,土地资源越来越紧缺,剧烈的农业生产活动和耕地开发,导致土壤盐渍化和重金属污染日益加剧^[5]. 仅黄海平原地区同时受重金属和盐渍化危害的土壤面积就高达 114 万 hm^2 ^[6,7]. Li 等^[8]对珠江口围垦农田盐渍化土壤的调查发现,土壤中 Cd、Cu、Ni、Zn 和 Pb 等重金属均存在超标现象,其中 Cd 超标率最高,达 95.2%. 农田土壤的盐渍化和重金属污染严重威胁农产品安全,对盐渍化土壤中重金属污染问题的研究有助于提高盐渍化土壤的农业可持续利用潜力.

土壤中盐分过高会引起土壤理化性质发生改变,pH 升高, Na^+ 过量引起植物微量元素的缺乏. 同时盐分和重金属的双重胁迫还直接影响植物对水分的利用,抑制植物的生长^[9~11]. 此外,土壤中 Na^+ 等盐离子可通过置换作用将土壤表面吸附的重金属离子置换出来,或通过 Cl^- 等伴随阴离子与重金属的络合作用,从而提高土壤重金属的迁移性和生物有效性,从而促进作物对重金属的吸收和积累,使得盐渍化土壤中生长的作物较非盐渍化土壤存在更大的重金属超标风险^[12,13].

植物修复技术是修复重金属污染农田土壤的有效措施^[14]. 然而目前所发现的超富集植物,如天蓝遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*)、东南景天 (*Sedum alfredii*) 和龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 等^[15~17],大多难以适应盐渍化的土壤环境. 因此,寻求具有一定耐盐性的镉富集植物对盐渍化土壤的重金属污染修复具有重要意义.

八宝景天 (*Hylotelephium spectabile*) 是景天科常见的景观花卉植物,对土壤镉胁迫具有较强的耐性和富集能力,在北方 Cd 含量为 $2.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的农田土壤上,其地上部 Cd 含量可达 $17 \sim 36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,具有修复镉污染土壤的潜力,而不同生态型间 Cd 富集能力具有较大差异^[18]. 同时八宝景天还具有耐旱、耐寒和耐盐碱等特性, Li 等^[4]的研究发现八宝景天可有效应用于滨海盐渍土的植被重建. 苏彦宾等^[19]的研究结果也表明,八宝景天具有较强的抗盐胁迫能力. 因此,八宝景天具有应用于盐渍化土壤重金属污染修复的潜力.

本文以不同 Cd 富集能力的八宝景天生态型作为研究对象,分析不同盐胁迫下八宝景天耐盐性的生态型差异及其对 Cd 吸收积累的影响,筛选出具有较强耐盐性和 Cd 富集能力的八宝景天生态型,以为盐渍土环境下利用八宝景天修复 Cd 污染土

壤提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究供试植物为 6 种不同 Cd 富集能力的八宝景天生态型,分别为 HB1、HB2、JX、LN、SD 和 TJ,获取自河南省某市重金属污染修复试验基地,由中国科学院地理科学与资源研究所提供. 供试土壤采自河南省某铅锌冶炼企业周边污染农田表层 0 ~ 20 cm 土壤,土壤基本理化性质如下:pH 为 7.7,土壤全 N、P 和 K 含量分别为 1.18、0.86 和 $26.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $83.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $23.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $140.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $19.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量为 $20.1 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤含盐量为 0.05%. 土壤中 Cd 含量为 $2.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)的风险筛选值 ($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH > 7.5),土壤中有有效态 Cd 含量达 $0.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占总 Cd 的 32.0%.

1.2 试验设计

本试验采用双因素试验设计. 因素 1,设置 0、0.5%、1% 和 2% 这 4 个盐分(质量分数)添加,即每千克土壤中分别添加 0、5、10 和 20 g NaCl. 因素 2,6 种不同 Cd 富集能力的八宝景天生态型. 共设置 24 个处理,每个处理设 3 个重复.

盆栽试验于 2017 年 7 月开展,将供试土壤风干以及研磨混匀后分别装入 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 塑料盆中,每盆装 2 kg 土壤,然后将 NaCl 按照不同添加比例施入土壤中,待土壤与盐分稳定平衡一周,将土壤供试的 6 种八宝景天生态型选取长势一致的幼苗移栽入盆中,每盆移栽 3 株. 整个试验周期为 60 d,期间昼夜温度为 $20 \sim 35^\circ\text{C}$,添加去离子水保持土壤水分含量为 60% 田间持水量.

1.3 样品采集与分析

培养试验结束后,收获八宝景天地上部,用去离子水洗净后放入烘箱, 105°C 杀青 30 min,后于 65°C 烘干至恒重,测定生物量. 然后将地上部样品磨碎,过 0.25 mm 筛,准确称取 0.5 g 植物样品到 50 mL 容量瓶中,采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (5:1, 体积比) 法进行消解,溶液澄清后定容至 50 mL,消解液中 Cd 含量采用电感耦合等离子体光谱仪 (ICP-OES, 5300DV, Perkin Elmer, 美国) 测定,同时设置空白对照和国家标准物质 (GBW-07603) 进行化学分析质量控制 ($95\% \pm 5\%$).

同时采取植物根际土壤样品,自然风干后,研磨并分别过 2 mm 和 0.15 mm 筛. 土壤 Cd 全量测定依

据美国环保署 US EPA 3050B 方法,称取过 0.15 mm 筛后的土壤样品 0.2 g 到 50 mL 三角瓶中,采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法进行消解,定容至 50 mL 容量瓶中,消解液中 Cd 含量采用电感耦合等离子体光谱仪 (ICP-OES, 5300DV, Perkin Elmer, 美国) 测定,同时设置空白对照和国家标准物质 (GBW-07603) 进行化学分析质量控制 ($95\% \pm 5\%$). 土壤 pH 值采用电位法 (HJ 962-2018) 进行测定,土壤电导率采用电极法 (HJ 802-2016) 进行测定.

1.4 数据处理

使用 Excel 软件进行数据相关计算,试验结果采用 IBM SPSS statistics 26 软件进行数据统计分析,不同处理间采用最小显著差数法 (LSD 法) 进行差异显著性检验 ($P < 0.05$),采用 OriginPro 2019 软件进行作图.

2 结果与分析

2.1 盐分胁迫对八宝景天生长的影响

无盐分胁迫条件下各生态型八宝景天地上部生物量在 $3.41 \sim 5.77 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 之间,其中 HB1、HB2 和 LN 生态型显著高于 JS、SD 和 TJ 生态型 (表 1). 双因素方差分析结果表明,八宝景天地上部生物量受不同生态型和盐分胁迫浓度的显著影响. 各生态型地上部生物量均随盐分胁迫的增加而降低,在盐分胁迫浓度为 0.5% 时,各生态型八宝景天地上部生物量同对照处理均无显著差异,耐性指数均在 0.7 以上. 当胁迫浓度达到 1% 时,除 LN 和 JS 生态型外,其余各生态型八宝景天地上部生物量较对照处理均显著下降 ($P < 0.05$). LN 生态型在不同胁迫浓度下地上部生物量均显著高于其他生态型 ($P < 0.05$).

2.2 盐分胁迫对八宝景天 Cd 吸收的影响

不同盐分胁迫下八宝景天地上部 Cd 含量如图 1 所示,八宝景天地上部 Cd 浓度受不同生态型和盐分胁迫浓度的显著影响. 八宝景天各生态型地上部 Cd 含量在 $5.76 \sim 28.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,然而随盐分胁迫的增加并未表现出一致的变化趋势,HB1 和 TJ 生态型 Cd 含量没有显著变化,HB2、LN 和 SD 生态型 Cd 含量先下降后增加,JS 生态型 Cd 含量随盐分胁迫的增加而显著降低. LN 生态型在不同盐分胁迫下地上部 Cd 含量较其他生态型显著提高 $24.8\% \sim 322.3\%$ ($P < 0.05$).

2.3 盐分胁迫对土壤 pH 和电导率的影响

不同盐分胁迫条件下种植八宝景天后根际土壤 pH 和电导率如图 2 和图 3 所示. 八宝景天根际土壤 pH 在 $7.92 \sim 9.08$ 之间,均随盐分胁迫浓度的增加

表 1 不同盐分胁迫下八宝景天地上部生物量及耐性指数¹⁾

Table 1 Shoot biomass and tolerance index of *Hylotelephium*

spectabile under different salinity stress			
生态型	处理	地上部生物量 / $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$	耐性指数 (TI)
HB1	CK	5.5 ± 0.79 Aa	
	0.5%	4.14 ± 0.96 ABab	0.75
	1%	3.04 ± 0.73 Cb	0.55
	2%	2.83 ± 0.49 ABb	0.51
HB2	CK	5.77 ± 0.37 Aa	
	0.5%	4.06 ± 0.93 ABb	0.70
	1%	4.42 ± 0.43 ABb	0.77
	2%	1.56 ± 0.68 Cc	0.27
JS	CK	4.11 ± 0.77 Ba	
	0.5%	3.59 ± 1.23 Bab	0.87
	1%	2.71 ± 0.5 Cab	0.66
	2%	1.99 ± 1.14 BCb	0.48
LN	CK	5.72 ± 1.09 Aa	
	0.5%	5.71 ± 1.03 Aa	1.00
	1%	5.21 ± 0.89 Aa	0.91
	2%	3.28 ± 0.06 Ab	0.57
SD	CK	3.41 ± 0.61 Ba	
	0.5%	2.86 ± 0.33 Bab	0.84
	1%	2.58 ± 0.23 CDb	0.76
	2%	0.91 ± 0.09 Dc	0.27
TJ	CK	3.89 ± 0.16 Ba	
	0.5%	3.77 ± 0.71 Ba	0.97
	1%	1.85 ± 0.81 Db	0.48
	2%	1.56 ± 0.31 Cb	0.40
ANOVA			
生态型		20.162 ***	
盐分浓度		46.473 ***	
生态型 $\times$ 盐分浓度		1.681	

1) 表中八宝景天地上部生物量均以干重计; 数据为平均值 $\pm$ 标准差, 不同大写字母代表相同处理不同生态型间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母代表同一生态型不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 双因素方差分析中, *** 表示 $P < 0.001$

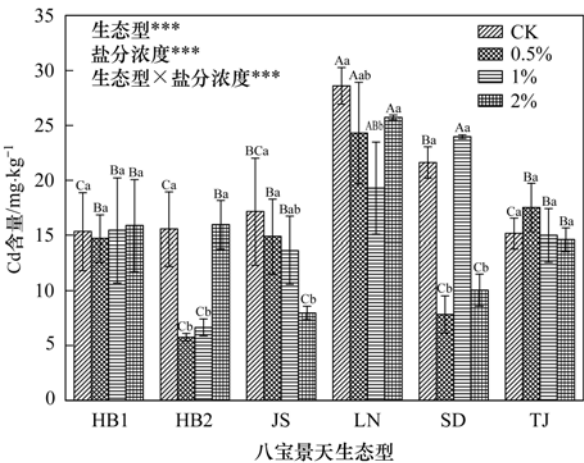
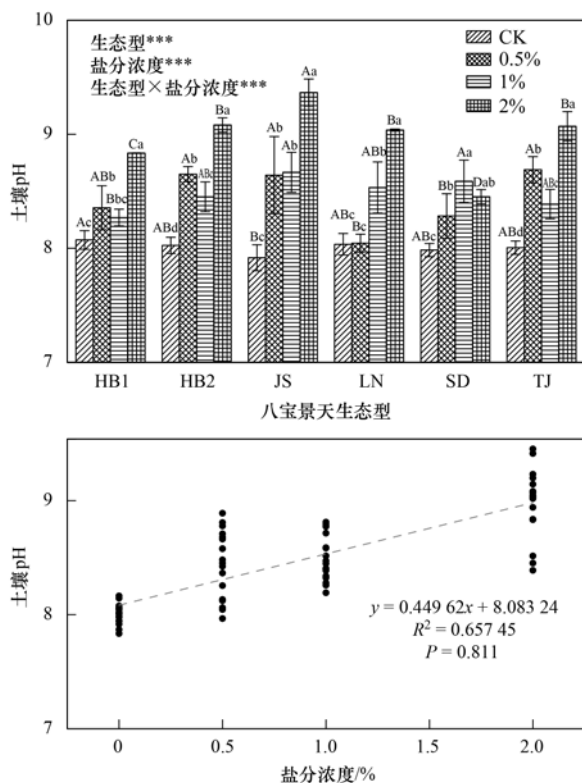


图 1 不同盐分胁迫下八宝景天地上部 Cd 含量

Fig. 1 Shoot Cd concentration of *Hylotelephium spectabile* under different salinity stress

而显著升高,对不同盐分胁迫浓度和土壤 pH 进行线性回归分析可获得回归方程 $y = 0.449\ 62x + 8.083\ 24$, ($P = 0.811$, $n = 24$),可知二者存在显著的线性相关.此外,盐分胁迫的增加对 JS 生态型根际土壤 pH 的提高效应高于其他生态型,且在 2% 浓度胁迫下,其 pH 显著高于其他生态型.

不同盐分胁迫下八宝景天根际土壤电导率在 $132.3 \sim 638.0\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,同土壤 pH 一致,均随盐分胁迫浓度的增加而显著提高,对不同盐分胁迫浓度和土壤电导率进行线性回归分析可获得回归方程 $y = 168.41x + 197.88$, ($P = 0.745\ 1$, $n = 24$),二者存在显著的线性相关.



误差线上不同大写字母代表相同处理不同生态型间差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母代表同一生态型不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 双因素方差分析中, *** 表示 $P < 0.001$

图 2 不同盐分胁迫对土壤 pH 的影响

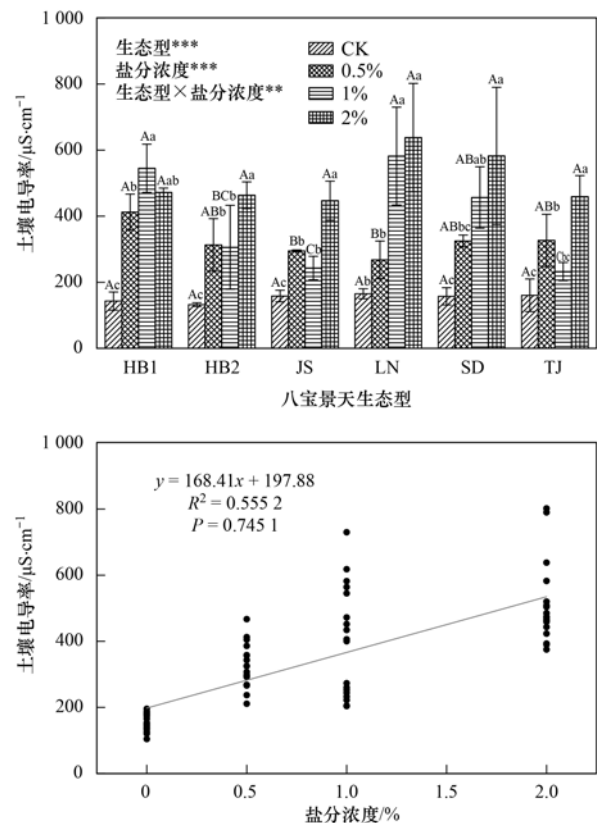
Fig. 2 Soil pH value under different salinity stress

2.4 盐分胁迫对八宝景天 Cd 富集量的影响

八宝景天 Cd 积累量受不同生态型和盐分胁迫浓度的极显著影响(图 4),八宝景天各生态型地上部 Cd 积累量均随盐分胁迫的增加而显著降低, LN 生态型地上部 Cd 积累量在 $84.41 \sim 164.12\ \mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ 之间,在不同盐分胁迫下均显著高于其他生态型 ($P < 0.05$).

2.5 盐分胁迫对八宝景天 Cd 富集能力影响的主成分分析

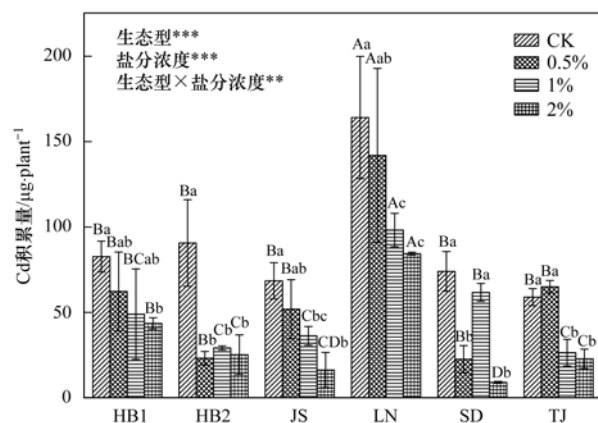
为进一步分析盐分胁迫对八宝景天 Cd 富集能



误差线上不同大写字母代表相同处理不同生态型间差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母代表同一生态型不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 双因素方差分析中, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 3 不同盐分胁迫对土壤电导率的影响

Fig. 3 Soil electronic conductivity under different salinity stress



误差线上不同大写字母代表相同处理不同生态型间差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母代表同一生态型不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 双因素方差分析中, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 4 不同盐分胁迫下八宝景天地上部 Cd 积累量

Fig. 4 Cd uptake in shoot of *Hyalotelephium spectabile* under different salinity stress

力的影响,对土壤 pH、电导率、八宝景天生态型、地上部生物量、Cd 含量和 Cd 富集量等指标进行主成分分析(图 5),提取特征根大于 1 的两个主成分,两个主成分的累积方差贡献率达到 85.55%,说明两个

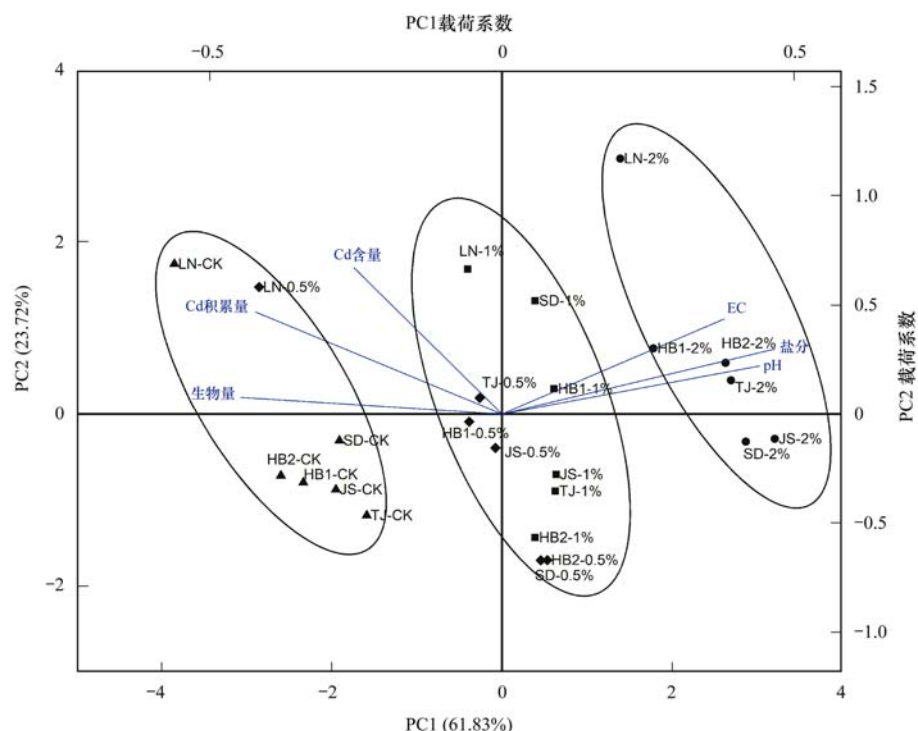


图5 盐分胁迫对不同生态型八宝景天 Cd 富集能力影响的主成分分析

Fig. 5 Principle component analysis of the effect of salinity stress on Cd accumulation capacity of different populations of *Hylotelephium spectabile*

主成分包含了上述 7 个指标的大部分信息. 图 5 中横坐标为第一主成分,解释了 61.83% 的变量,主要解释了土壤 pH、电导率、八宝景天地上部生物量等指标,可知第一主成分主要反映八宝景天对盐分胁迫的响应,各盐分胁迫处理下 LN 生态型在第一主成分上得分均最低,可知之其受盐分胁迫影响最小,HB1 次之,JS 和 LN 生态型得分均较高,可知其受盐分胁迫影响较大;纵坐标为第二主成分,解释了 23.71% 的变量,主要解释八宝景天地上部 Cd 含量等指标,主要反映八宝景天生态型之间的差异, LN 生态型在不同盐分胁迫下在第二主成分上得分均最高,可知 LN 生态型较其他生态型具有更强的 Cd 富集能力. 综上可知, LN 生态型较其他生态型具有更强的耐盐性和盐分胁迫下吸收富集 Cd 的能力.

3 讨论

利用重金属富集能力强且具有较强耐盐性的植物修复盐渍化的重金属污染土壤是一个非常有潜力的研究方向^[20],其首先要求植物在盐分和重金属复合胁迫下仍能保持正常的生长和新陈代谢. 本研究中,在 Cd 单一胁迫下,八宝景天地上部生物量不同生态型之间具有显著差异, LN、HB1 和 HB2 生态型显著高于 JS、SD 和 TJ. 添加盐分处理加剧了对八宝景天生长的胁迫作用,这与前人研究结果一致, Rehman 等^[21]的研究发现与 Cd 单一胁迫相比, Cd

和盐分复合胁迫对 *Conocarpus erectus* L. 地上部和根系生物量影响更大. 盐分和 Cd 复合胁迫下 *Acacia nilotica* L. 叶片含水率和叶绿素含量较 Cd 单一胁迫显著降低^[20,22]. 随着土壤中 Na⁺ 和 Cl⁻ 的增加,通过影响八宝景天对水分的吸收,限制其对维持细胞内离子稳态的 K⁺ 等营养元素的吸收,从而造成植物养分、水分的缺乏,同时植物吸收过量 Na⁺ 和 Cl⁻ 破坏细胞内渗透平衡,造成过氧化胁迫^[20],因此导致八宝景天各生态型地上部生物量均呈下降趋势.

然而,不同生态型对盐分胁迫的生长响应表现出显著差异,在 0.5% NaCl 处理下,各生态型八宝景天地上部生物量与对照处理均无显著差异,且耐性指数均保持在 0.7 以上,可知八宝景天各生态型对轻度盐分胁迫均有一定的耐受性. 荆瑞^[23]对多种景天科植物耐盐性综合评价将八宝景天归为耐盐性较强的一类, Li 等^[4]也曾开展了采用八宝景天进行海滨盐渍土植被恢复的研究. 当 NaCl 添加量达到 1% 时,仅 LN 生态型地上部生物量仍没有显著降低,耐性指数保持在 0.91,且在不同盐分胁迫处理下其地上部生物量均显著高于其他生态型,其原因可能是八宝景天对重金属和盐分胁迫具有相似的生理和生化机制^[24]. 前期研究中发现 Cd 胁迫下, LN 生态型相比其他生态型更倾向于将 Cd 区隔在细胞壁以及液泡等毒性较低的组分或者通过金属硫蛋白螯合以降低其毒性,且其过氧化物酶 (POD) 活性较其他生

态型高 0.75 ~ 20 倍,具有更高的抗氧化潜力和耐 Cd 胁迫的能力^[25]. 因此 LN 生态型具有较强的耐盐性,在 Cd 和盐分复合胁迫下受到的生长抑制小于其他生态型.

盐分影响植物吸收重金属的机制主要集中在盐分对土壤重金属形态和植物有效性方面的影响,一方面土壤中 Na^+ 可与 Cd 竞争土壤胶体表面的吸附点位,促进 Cd^{2+} 解离,同时 Cl^- 可通过复杂的化学反应与 Cd^{2+} 形成稳定络合物,从而提高土壤中 Cd 的迁移性和生物有效性^[13,26,27]. 而另一方面, Na^+ 等盐分离子可与 Cd^{2+} 通过竞争植物根系表面吸收结合位点从而降低植物对 Cd 的吸收^[28]. 许多研究表明土壤盐分含量增加促进了植物对 Cd 的吸收^[20,21],然而也有研究得出不同结论,盐分对植物 Cd 吸收的影响还受植物对盐分的敏感程度和盐分浓度影响,盐分胁迫对敏感型苋菜 Cd 吸收转运的影响大于耐盐性苋菜^[29,30]. 本研究中,八宝景天在高盐分胁迫下地上部 Cd 含量总体呈降低趋势,这与 Shabir 等^[20]的研究结果一致,其发现高盐分胁迫下 *A. nilotica* 的 Cd 吸收量显著降低. Mei 等^[30]的研究发现食用苋菜 (*Amaranthus mangostamus* L.) 主要通过 Ca 离子通道吸收 Cd,而高盐分胁迫下 Na^+ 可通过与 Cd^{2+} 竞争 Ca 离子通道从而抑制 Cd 的吸收.

此外,不同生态型八宝景天对盐分胁迫的 Cd 吸收响应并不一致,随着盐分胁迫的增加,HB1 和 TJ 生态型 Cd 含量没有显著变化,HB2、LN 和 SD 生态型 Cd 含量则呈 U 型变化趋势先降低后增加,JS 生态型则逐渐下降,其原因可能与不同生态型八宝景天在盐分胁迫下的生长状况有关. 一般研究认为,当土壤中盐分使植物生物量下降 50% 时,该盐分浓度为植物的耐盐阈值^[31]. HB1 和 TJ 生态型在 1% 胁迫下其耐性指数即下降到 0.5 左右,表明其达到耐盐阈值,在这一阶段其复合胁迫对生长的抑制作用与其对 Cd 吸收的降低作用相当,而进一步增加盐分胁迫(2%)也并未使其地上部生物量进一步显著降低,其原因可能是增加盐分胁迫可能会触发继耐盐阈值后的第二次“代谢开关”,从而帮助植物进一步适应胁迫环境^[31],因此 HB1 和 TJ 生态型在各处理下 Cd 含量未有显著变化. 而 HB2、LN 和 SD 生态型随盐分胁迫的增加地上部生物量呈逐渐下降的趋势,在 2% 盐分胁迫下较上一级盐分胁迫处理其生物量有一个较大幅度的骤降,尤其是 HB2 和 SD 生态型其耐性指数仅为 0.27,在这一阶段其复合胁迫对生长的抑制大于对减少 Cd 吸收的影响,因此使其在高盐分胁迫下地上部 Cd 含量呈现回升现象,其中 HB2 和 SD 生态型对盐分胁迫的敏感程度高于

LN 生态型,因此其 Cd 吸收转运受盐分胁迫的影响更为明显. 在八宝景天各生态型中,LN 生态型在不同盐分胁迫下地上部 Cd 含量均显著高于其他生态型,这与其具有较强的 Cd 富集能力和耐盐性有关,前期研究发现 LN 生态型在亚细胞区隔化和抗氧化酶活性等 Cd 富集和解毒机制方面较其他生态型更具优势^[25],而这同样是植物耐盐性的重要生理机制^[24,32,33],因此其在 Cd 和盐分复合胁迫下仍能保持较强的耐受性和 Cd 吸收能力.

土壤 pH 是影响土壤中重金属形态的主要因素,土壤 pH 每降低 0.5 个单位,Cd 的有效性可提高 1 倍^[34]. 土壤电导率是反映土壤中盐离子含量的重要参数. 本研究中,土壤中盐分含量同土壤 pH 和电导率均呈显著线性正相关,这进一步解释了八宝景天随盐分胁迫增加地上部 Cd 含量呈下降趋势. 同时,八宝景天不同生态型根际土壤 pH 和电导率对盐分胁迫的响应有显著差异,Cd 富集能力较强的 LN 生态型在盐分胁迫下根际土壤 pH 升高幅度低于 Cd 富集能力较弱的生态型,这可能与其根际分泌有机酸等物质来减轻盐分和重金属胁迫有关^[35]. 相反地,LN 生态型在盐分胁迫下根际土壤电导率升高幅度大于其他生态型,其原因可能为耐盐性较弱的八宝景天生态型缺乏应对盐分胁迫的生理机制,将大量 Na^+ 等盐分吸收到体内,而 LN 生态型则存在离子选择性吸收等耐盐机制从而减少 Na^+ 吸收^[36],还需进一步深入研究以明晰其响应机制.

本研究中,尽管各生态型八宝景天地上部 Cd 富集量均随盐分胁迫增加而降低,但不同生态型间表现出极显著差异,LN 生态型在 2% NaCl 胁迫处理下地上部 Cd 富集量仍可达到 $84.4 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$,较其他生态型显著提高 48.4% ~ 89.3%. 郭世鸿等^[5]对盐分胁迫下不同 Cd 富集能力苋菜 Cd 积累量研究结果可知,在 Cd 含量为 $1.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 6.38 的污染土壤上添加 0.3% NaCl 胁迫下,两种苋菜 Cd 积累量分别为 $24.8 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 和 $63.9 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$. Manousaki 等^[37]对盐生植物——盐滨藜 (*Atriplex halimus* L.) Cd 富集效率的研究中, $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤上添加 0.5% 和 3% 的盐分后,其 Cd 富集量分别为 $60 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 和 $20 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$. 对比前人研究结果可知,八宝景天具有较强的 Cd 富集能力和一定的耐盐性,但还需考虑不同生态型间的差异,LN 生态型是应用于修复盐渍化土壤 Cd 污染的理想材料.

4 结论

本研究中,随着盐分胁迫的增加,八宝景天不同

生态型地上部生物量均显著降低,同时,不同生态型间对盐分胁迫的生长响应差异显著,LN 生态型对盐分胁迫相比于其他生态型表现出较高的耐受性,其地上部生物量在各处理下均显著高于其他生态型。此外,盐分胁迫对八宝景天不同生态型 Cd 吸收的影响有显著差异,LN 生态型较其他生态型在亚细胞区隔化和抗氧化酶活性等 Cd 富集和解毒机制方面更有优势,这些机制同样赋予其更强的耐盐性,使其在盐分胁迫下地上部 Cd 含量显著高于其他生态型。综合可知,尽管盐分胁迫下八宝景天各生态型地上部 Cd 富集量均有所降低,但其生态型间存在显著差异,LN 生态型在高盐分胁迫下仍表现出较强的 Cd 富集能力,具有修复盐渍化 Cd 污染土壤的应用潜力。

参考文献:

- [1] Hsu S H, Wang S L, Huang J H, *et al.* Effects of rice straw ash amendment on Cd solubility and distribution in a contaminated paddy soil under submergence [J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, **13**(1): 135-143.
- [2] Lutts S, Qin P, Han R M. Salinity influences biosorption of heavy metals by the roots of the halophyte plant species *Kosteletzkya pentacarpos* [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 682-689.
- [3] FAO. The State of Food and Agriculture 2015. Social protection and agriculture: breaking the cycle of rural poverty [R]. Rome: FAO, 2015.
- [4] Li X B, Kang Y H, Wan S Q, *et al.* A vegetation reconstruction method to plant *Sedum spectabile* Boreau using drip-irrigation with saline water on a coastal saline soil in region around Bohai Gulf [J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, **14**(4): 491-498.
- [5] 郭世鸿. 盐分胁迫对苋菜 (*Amaranthus mangostanus* L.) 活化和吸收土壤重金属 Cd 的影响机制 [D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- Guo S H. Effect of salt stress on soil Cd mobility and Cd uptake by edible amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) cultivar [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [6] 白由路, 李保国, 石元春. 基于 GIS 的黄淮海平原土壤盐分分布与管理研究 [J]. *资源科学*, 1999, **21**(4): 66-70.
- Bai Y L, Li B G, Shi Y C. Research of the soil salt content distribution and management in Huang-Huai-Hai Plain based on GIS [J]. *Resources Science*, 1999, **21**(4): 66-70.
- [7] 谭科艳, 刘晓端, 汤奇峰, 等. 华北平原土壤环境重金属元素分布规律及其意义 [J]. *地球学报*, 2011, **32**(6): 732-738.
- Tan K Y, Liu X D, Tang Q F, *et al.* Distribution regularity of heavy metals in north China plain and its significance [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2011, **32**(6): 732-738.
- [8] Li Q S, Chen Y, Fu H B, *et al.* Health risk of heavy metals in food crops grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **227**: 148-154.
- [9] 罗璇, 陈小娇, 李取生, 等. 盐分胁迫下番茄盐分离子和重金属的分布特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(4): 654-660.
- Luo X, Chen X J, Li Q S, *et al.* Distribution characteristics of salt ions and heavy metals in tomato under salinity stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(4): 654-660.
- [10] Mustafa G, Akhtar M S, Abdullah R. Global concern for salinity on various agro-ecosystems [A]. In: Akhtar M S (Ed.). *Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Causes and Solution* [M]. Singapore: Springer, 2019. 1-9.
- [11] Zhang F Q, Wang Y S, Lou Z P, *et al.* Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*) [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(1): 44-50.
- [12] Usman A R A, Kuzyakov Y, Stahr K. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2005, **14**(4): 329-344.
- [13] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K, *et al.* Salinity increases mobility of heavy metals in soils [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(8): 1318-1324.
- [14] Begum Z A, Rahman I M M, Tate Y, *et al.* Formation and stability of binary complexes of divalent ecotoxic ions (Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) with biodegradable aminopolycarboxylate chelants (DL-2-(2-carboxymethyl) nitrilotriacetic acid, GLDA, and 3-hydroxy-2, 2'-iminodisuccinic acid, HIDS) in aqueous solutions [J]. *Journal of Solution Chemistry*, 2012, **41**(10): 1713-1728.
- [15] 魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 167-171.
- Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(3): 167-171.
- [16] Nedelkoska T V, Doran P M. Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens* [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, **67**(5): 607-615.
- [17] Tao Q, Hou D D, Yang X E, *et al.* Oxalate secretion from the root apex of *Sedum alfredii* contributes to hyperaccumulation of Cd [J]. *Plant and Soil*, 2016, **398**(1-2): 139-152.
- [18] 郭俊梅. 八宝景天修复镉污染土壤及其强化措施研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- Guo J M. Phytoextraction of cadmium-contaminated soils by *Hylotelephium spectabile* under different enhancing strategies [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [19] 苏彦宾, 刘鲁江, 亓德明, 等. 海水胁迫对 2 种景天种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *中国农学通报*, 2017, **33**(3): 88-93.
- Su Y B, Liu L J, Qi D M, *et al.* Effect of seawater stress on seed germination and seedling growth of two red-spotted stonecrops [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(3): 88-93.
- [20] Shabir R, Abbas G, Saqib M, *et al.* Cadmium tolerance and phytoremediation potential of acacia (*Acacia nilotica* L.) under salinity stress [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, **20**(7): 739-746.
- [21] Rehman S, Abbas G, Shahid M, *et al.* Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in conocarpus exposed to cadmium stress: implications for phytoremediation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 146-153.
- [22] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, **59**: 651-681.
- [23] 荆瑞. 部分景天属植物园林应用评价及耐盐性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.

- Jing R. Study of the landscape application evaluation and salt tolerance of *Sedum* spp. [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [24] Van Oosten M J, Maggio A. Functional biology of halophytes in the phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, **111**: 135-146.
- [25] Guo J M, Yang J, Yang J X, *et al.* Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of four *Hylotelephium spectabile* populations exhibit differences in phytoextraction potential [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, **21**(3): 209-216.
- [26] Laing G D, De Vos R, Vandecasteele B, *et al.* Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **77**(4): 589-602.
- [27] 徐明岗, 曾希柏, 周世伟, 等. 施肥与土壤重金属污染修复 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [28] 柴民伟. 外来种互花米草和黄顶菊对重金属和盐碱胁迫的生态响应 [D]. 天津: 南开大学, 2013.
Chai M W. Ecological response of exotic species *Spartina alterniflora* and *Flaveria bidentis* to heavy metal and saline-alkali stresses [D]. Tianjin: Nankai University, 2013.
- [29] 周丽珍, 罗璇, 何宝燕, 等. NaCl 胁迫下苋菜中镉的亚细胞分布及转运研究 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(1): 139-145.
Zhou L Z, Luo X, He B Y, *et al.* Subcellular distribution and translocation of Cd in amaranth under salinity stress [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(1): 139-145.
- [30] Mei X Q, Li S S, Li Q S, *et al.* Sodium chloride salinity reduces Cd uptake by edible amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) via competition for Ca channels [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **105**: 59-64.
- [31] Maggio A, Raimondi G, Martino A, *et al.* Salt stress response in tomato beyond the salinity tolerance threshold [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **59**(3): 276-282.
- [32] Flowers T J, Colmer T D. Salinity tolerance in halophytes [J]. *The New Phytologist*, 2008, **179**(4): 945-963.
- [33] Manousaki E, Kalogerakis N. Halophytes—an emerging trend in phytoremediation [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, **13**(10): 959-969.
- [34] 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.
- [35] Boominathan R, Doran P M. Organic acid complexation, heavy metal distribution and the effect of ATPase inhibition in hairy roots of hyperaccumulator plant species [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **101**(2): 131-146.
- [36] Wang X P, Geng S J, Ri Y J, *et al.* Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, **130**(1): 248-255.
- [37] Manousaki E, Kalogerakis N. Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, **16**(7): 844-854.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)