

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期

Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

4 种草本植物对镉的富集特征

陈迪^{1,2}, 李伯群¹, 杨永平¹, 和兆荣², 李雄^{1*}

(1. 中国科学院昆明植物研究所西南野生生物种质资源库, 昆明 650201; 2. 云南大学生命科学学院, 昆明 650091)

摘要: 以4种草本入侵植物粗毛牛膝菊、洋野黍、莠狗尾草和欧黑麦草作为研究材料, 利用盆栽实验研究了这4种植物在土壤镉(Cd)含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为0(T0)、5(T5)、25(T25)和50(T50)处理下的耐受和富集特征, 以期筛选出对Cd污染土壤具有修复潜力的植物。结果表明, 粗毛牛膝菊在T5~T50处理下, 地上部分和根部生物量与对照(T0)相比均没有显著变化, 而其他3种禾本科植物的地上部分和根部生物量在T25或T50处理下与对照相比显著降低, 表明粗毛牛膝菊比其他3种植物具有更强的Cd耐受性。在不同土壤Cd含量处理下, 4种植物地上部分和根中的Cd含量均随土壤Cd含量增加而显著升高, 但4种植物地上部分富集系数随土壤Cd含量升高有显著降低的趋势。在不同土壤Cd含量处理下, 粗毛牛膝菊和洋野黍的地上部分富集系数都大于1, 莠狗尾草和欧黑麦草地上部分富集系数小于1。在T5、T25和T50处理下, 粗毛牛膝菊的转移系数分别为0.93、0.73和1.04, 分别显著高于同一Cd含量处理下的其他3种植物。此外, 在相同的Cd处理下, 粗毛牛膝菊积累的Cd总量和地上部分Cd含量均显著高于其它3种植物, 并且粗毛牛膝菊能将90%以上的Cd转移到地上部分, 显著高于其他3种植物。综合考虑对Cd的耐受和富集能力, 本研究认为粗毛牛膝菊是一种潜在的Cd高富集植物, 具有一定的植物修复潜力。

关键词: 环境污染; 镉; 植物修复; 粗毛牛膝菊; 富集特征

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0960-07 DOI: 10.13227/j.hjks.202007034

Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs

CHEN Di^{1,2}, LI Bo-qun¹, YANG Yong-ping¹, HE Zhao-rong², LI Xiong^{1*}

(1. Germplasm Bank of Wild Species, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201, China; 2. School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: A pot-based experiment was conducted to study the Cd tolerance and accumulation characteristics of four invasive herbs (*Galinsoga quadriradiata*, *Panicum dichotomiflorum*, *Setaria geniculata*, and *Lolium persicum*) under exposures of 0 (T0), 5 (T5), 25 (T25), and 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (T50) soil Cd concentrations to screen for potential Cd accumulators for phytoremediation. The results showed that the biomasses of both shoots and roots of *G. quadriradiata* had no significant changes compared to the control (T0) samples under all Cd treatments, whereas the biomass of the other three Poaceae species significantly decreased under the T25 or T50 treatment. The results indicate that *G. quadriradiata* had stronger Cd tolerance than the other three species. The Cd concentrations in the shoots and roots of the four herbs significantly increased with an increase in soil Cd concentrations, but the shoot bioconcentration factors (SBCF) of the four plant species significantly decreased under T5, T25, and T50 treatment. The SBCF of *G. quadriradiata* and *P. dichotomiflorum* were greater than 1 whereas those of *S. geniculata* and *L. persicum* were lower than 1. The translocation factors (TF) of *G. quadriradiata* were 0.93, 0.73, and 1.04 under T5, T25, and T50 treatment, respectively, which were significantly higher than those of the other three plants under the same soil Cd concentration. In addition, both the total Cd and shoot Cd contents of *G. quadriradiata* were notably higher than in the other three species under the same Cd treatment. Moreover, 90% of the Cd in *G. quadriradiata* could be transferred aboveground, which was significantly higher than for the other three plants. Based on our comprehensive comparison of Cd tolerance and accumulation capacity, we suggest that *G. quadriradiata* is a high-Cd accumulator with considerable phytoremediation potential.

Key words: environmental pollution; cadmium; phytoremediation; *Galinsoga quadriradiata*; accumulation characteristic

土壤重金属污染是全球性的环境问题, 严重危害人体健康和生态系统^[1]。文献[2]指出我国土壤中重金属的点位超标率达到16.1%。其中, Cd由于毒性大、迁移性强和污染面积广等特点, 成为最突出的土壤重金属污染物^[3]。植物吸收和富集过量重金属会影响植物正常的生理功能, 而且重金属还会通过食物链进入动物和人体, 严重危害人类健康^[4]。随着近年来以Cd为代表的重金属污染事件的频发, 国内外对污染土壤的治理也日益重视。

在诸多重金属污染土壤的修复技术中, 植物萃取技术(phytoextraction)因为具有简单、环保、经济

和高效等特点, 被认为是最有前景的修复方法^[5,6]。植物萃取技术是指利用植物体将土壤中的重金属吸收和富集, 之后收割植物体地上部分来去除土壤中污染物的方法^[7]。植物萃取效率与植物生物量积累速度和植物对重金属的富集能力密切相关。因此, 用于植物萃取的植物需要具备以下3个特点: ①生物量大, 生长速度快; ②对重金属有较强的耐受性

收稿日期: 2020-07-03; 修订日期: 2020-08-14

基金项目: 中国科学院青年创新促进会会员支持项目(2020387)

作者简介: 陈迪(1994~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境修复植物学。E-mail: 15761636827@163.com

* 通信作者, E-mail: lixiong@mail.kib.ac.cn

和富集性; ③ 能将吸收的重金属离子转移到地上部分. 植物萃取技术的有力“武器”是重金属超富集植物(hyperaccumulator), 指的是在自然生境中叶片或地上部分(干重)的污染物含量能达到某一临界值以上, 并且地上部分污染物富集系数和转运系数大于 1 的植物^[8].

尽管植物修复技术得到了理论和实践的验证^[9], 但它仍面临一些问题. 比如① 大多数超富集植物生长缓慢, 生物量小, 对环境适应性差^[10]; ② Cd超富集植物等类群的数量还很少^[7]. 因此, 继续筛选生物量大、生长快和富集能力强的植物资源仍是植物萃取技术迫切需要解决的问题.

当前, 入侵植物是生态学领域关注的焦点之一, 尽管入侵植物对生态系统的破坏很大, 但是除了彻底将其清除外, 开发其潜在的应用价值也非常有必要^[11]. 许多入侵植物不仅生长速度快, 环境适应性强, 而且对许多污染物具有很强的富集能力, 在植物修复方面表现出优良的特性^[12]. 实际上, 科学家已经开始将入侵植物应用于植物修复中. 例如, 世界上著名的入侵物种风眼莲(*Eichhornia crassipes*), 已经被成功地用于其分布区内水体重金属的修复中^[13]. 空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)也被应用于修复污泥中的重金属^[14]. 这些实例都表明, 利用入侵植物进行植物修复可以是一种“变废为宝”的策略^[15].

现有研究发现重金属超富集植物主要分布在十字花科、菊科、茄科和禾本科等植物类群^[7, 15, 16]. 本研究选取了菊科和禾本科的 4 种草本入侵植物粗毛牛膝菊(*Galinsoga quadriradiata*)、洋野黍(*Panicum dichotomiflorum*)、莠狗尾草(*Setaria geniculata*)和欧黑麦草(*Lolium persicum*)为研究对象, 通过室内盆栽实验来研究它们在 Cd 胁迫下的富集特征. 这 4 种草本植物都是广泛分布的杂草, 均被收录于文献^[17]中.

粗毛牛膝菊原产于墨西哥, 现广泛分布于我国贵州、云南和安徽等地, 入侵等级为 2^[17]. 先前的研究表明, 粗毛牛膝菊生长速度快^[18], 并且其同属植物牛膝菊(*G. parviflora*)对土壤中的 Cd 有很强的富集能力^[19]. 洋野黍原产于北美洲, 分布于我国云南、广西和台湾等地, 入侵等级为 4^[17]. 有研究表明, 黍属植物能吸收土壤中的 Ni、Zn 和 Cd 等元素^[20]. 莠狗尾草原产于美洲, 分布于贵州、云南和陕西等地, 入侵等级为有待观察类^[17]. 莠狗尾草的同属植物狗尾草(*S. viridis*)对 Cd 具有较好的富集性^[21]. 欧黑麦草原产于欧洲至西亚, 分布于四川、陕西和青海等地, 入侵等级为有待观察类^[17]. 欧黑

麦草的同属植物黑麦草(*L. perenne*)对 Cd 和 Zn 等具有修复潜力^[22].

本实验通过研究这 4 种植物对 Cd 的富集特性, 有望筛选得到生长较快, 生物量较大, 且 Cd 富集能力强的植物资源, 以期为解决土壤 Cd 污染问题提供新的种质资源.

1 材料与方法

1.1 实验材料和供试土壤

本实验中 4 种植物的种子从中国西南野生生物种质资源库申请得到. 本实验中所用的土壤是从云南省昆明市斗南花卉市场购买的有机质营养土, 土壤的基本理化性质如下所示: pH 为 5.55, 有机质为 313 g·kg⁻¹, 全磷为 1.24 g·kg⁻¹, 全氮为 9.6 g·kg⁻¹, 有效磷为 38.2 mg·kg⁻¹, 水解氮为 1.19 g·kg⁻¹, 在原土壤中未检出 Cd.

1.2 材料种植和处理

参照先前的报道^[15], 本实验一共设置 3 个土壤 Cd 含量(mg·kg⁻¹), 分别为 5(T5)、25(T25)和 50(T50)这 3 个 Cd 处理, 用不加 Cd 的土壤作为对照(T0). 虽然我国农用地土壤的 Cd 风险筛选值较低, 但在许多矿区的土壤中也观察到高含量的 Cd. 因此本文设置了相对较高的土壤 Cd 含量来研究植物对 Cd 的富集特征. 本实验所用土壤都经过风干和过筛, 按上述含量向土壤中添加 CdCl₂·2.5H₂O, 混匀并存放 30 d 后备用, 放置期间经常翻动土壤, 使土壤充分混匀.

本实验在中国科学院昆明植物研究所的温室(昼夜温度: 25℃/20℃; 光照周期: 12 h 光照/12 h 黑暗; 相对湿度: 50%~60%)中开展. 取适量的 4 种植物种子播种在未受重金属污染的土壤中, 2 周后, 挑选展开 2 片真叶的幼苗分别单株移入装有等量上述处理土壤的花盆中($d = 18.5 \text{ cm}$, $h = 17.5 \text{ cm}$). 4 种植物每个处理种植 3 盆, 共计 48 盆苗. 种植好的植物材料随机摆放于温室中培养. 整个实验持续 90 d, 在实验期间, 每天用自来水(不含 Cd²⁺ 或肥料)补偿水分损失.

1.3 植株样品采集与分析

植物种植 3 个月, 从土壤中将植物收集, 在自来水下将根部泥土冲洗干净, 再用去离子水反复清洗. 每个样品分别取根和地上部分, 放入 70℃ 的恒温箱中烘干至样品恒重. 植物的生物量使用分析天平称重获得.

植物 Cd 含量的测定参照《食品安全国家标准食品中多元素的测定》(GB 5009.268-2016), 采用的是电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS). 称取 1.0

g 的干燥植物样品放入聚四氟乙烯消解罐中, 然后加入 5 mL 硝酸溶液于消解罐, 充分混匀. 待反应结束后, 加盖密封消解罐, 并将其放入微波消解仪中. 之后自然冷却到 50℃ 以下, 取出消解罐, 放置于通风橱中. 一段时间后打开消解罐, 将液体全部转移到 50 mL 的容量瓶中, 并用超纯水润洗 3~4 次消解罐, 洗涤液也要放入容量瓶中, 最后用超纯水定容, 作为待测液, 空白对照的制备方法相同. 使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-MS, USA, Thermo-Fisher Scientific) 检测样品溶液, 然后再根据标准曲线计算 Cd 含量. 标准曲线制备如下: 将 1 mg·mL⁻¹ Cd 标准溶液用 5% 硝酸稀释至 10 mg·L⁻¹ 作为贮备液, 然后将贮备液制备成 0、0.1、0.2、0.4 和 1 mg·L⁻¹ 的标准溶液, 摇匀后待用. 利用 ICP-MS 测定每个标准溶液中 Cd 的含量, 根据实验数据绘制标准曲线.

1.4 数据处理

本实验中所有数据用 Microsoft Excel 2010 进行处理, 用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行统计分析, 用 SigmaPlot 10.0 作图. 本实验中所有数据的差异显著性都使用单因素方差分析 (ANOVA), 差异显著水平设定为 $P < 0.05$.

植物对 Cd 的提取效率主要取决于生物富集系数 (bioconcentration factor, BCF) 和转移系数 (translocation factor, TF). 生物富集系数反映的是植物从土壤中积累重金属的效率, 转移系数反映的是植物将积累的重金属从土壤向地上部分转移的效率. 它们的计算方法为^[7]:

$$\text{富集系数 (BCF)} = \frac{\text{植物 Cd 含量}}{\text{土壤 Cd 含量}}$$

$$\text{转移系数 (TF)} = \frac{\text{地上部分 Cd 含量}}{\text{根部 Cd 含量}}$$

2 结果与分析

2.1 4 种植物的生物量

为了分析植物对 Cd 的耐受情况, 本实验测定了生长 90 d 后 4 种植物各组织的干重 (表 1). 结果显示, 在 T5 ~ T50 处理下, 粗毛牛膝菊的地上部分 (shoot) 和根部 (root) 生物量与对照相比均没有发生显著变化. 不同的是, 在 Cd 处理下, 洋野黍地上部分生物量在 T5 处理下没有发生显著变化, 但是在 T25 处理下开始显著降低 ($P < 0.05$), 在 T50 处理下最低, 与对照相比生物量降低了 80.86%. 而洋野黍根部的生物量在 T5 处理下显著升高 ($P < 0.05$), 达到最大值. 但是在 T25 处理时, 根部生物量显著降低 ($P < 0.05$), 在 T50 处理下, 根部生物量达到最低, 与对照相比, 根部生物量降低了 66.67%. 莠狗尾草地上部分生物量在 T25 处理下显著降低 ($P < 0.05$), 在 T50 处理时最低, 与对照相比地上部分生物量降低了 55.5%. 而根部生物量在 T50 处理下显著降低 ($P < 0.05$), 与对照相比降低了 30.2%. 欧黑麦草的地上部分生物量在 T50 处理下显著降低 ($P < 0.05$), 与对照相比降低了 40.1%, 而根部的生物量随土壤 Cd 含量的增加没有发生显著变化. 另外, 本研究还发现, 在相同的时间内, 粗毛牛膝菊积累的总生物量显著高于其他 3 种植物 (表 1).

表 1 不同 Cd 含量处理下 4 种植物的生物量¹⁾/g

Table 1 Biomass of the four examined plant species under different Cd content treatments/g

物种	部位	处理			
		T0	T5	T25	T50
粗毛牛膝菊 (<i>G. quadriradiata</i>)	地上部分	4.95 ± 0.76a	5.18 ± 0.83a	5.75 ± 0.18a	5.16 ± 0.30a
	根部	0.31 ± 0.03a	0.30 ± 0.03a	0.30 ± 0.02a	0.34 ± 0.05a
洋野黍 (<i>P. dichotomiflorum</i>)	地上部分	1.88 ± 0.11b	2.12 ± 0.41b	0.67 ± 0.08a	0.36 ± 0.07a
	根部	0.15 ± 0.03c	0.24 ± 0.01d	0.10 ± 0.01b	0.05 ± 0.01a
莠狗尾草 (<i>S. geniculata</i>)	地上部分	1.55 ± 0.23b	1.49 ± 0.10b	0.88 ± 0.11a	0.69 ± 0.17a
	根部	0.31 ± 0.03b	0.32 ± 0.02b	0.27 ± 0.02ab	0.26 ± 0.01a
欧黑麦草 (<i>L. persicum</i>)	地上部分	1.77 ± 0.51b	1.97 ± 0.04b	1.83 ± 0.10b	1.06 ± 0.06a
	根部	0.29 ± 0.02a	0.21 ± 0.06a	0.28 ± 0.07a	0.19 ± 0.02a

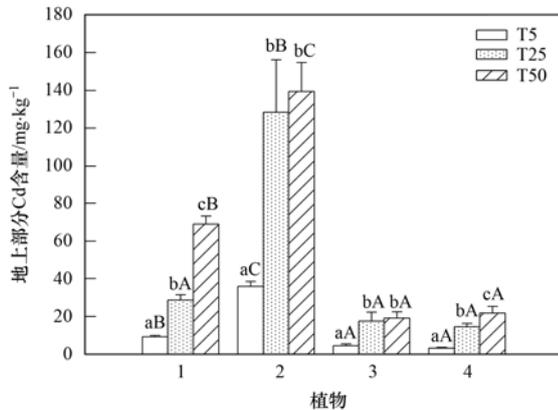
1) 表中的数据表示为平均值 ± 标准差 ($n = 3$), 同一行多个处理间的不同小写字母表示差异在 0.05 水平达到显著

2.2 4 种植物的 Cd 含量

为了研究 Cd 处理下 4 种植物各组织对土壤中 Cd 的富集情况, 测量了不同土壤 Cd 含量下 4 种植物干燥组织中的 Cd 含量 (图 1 和图 2). 从图 1 中可以看出, 这 4 种植物地上部分的 Cd 含量随土壤 Cd 含量的增加显著增加 ($P < 0.05$). 在 T5 ~ T50 处

理下, 粗毛牛膝菊地上部分 Cd 含量分别为 9.32、28.77 和 69.00 mg·kg⁻¹; 洋野黍的地上部分 Cd 含量分别为 35.93、128.33 和 139.33 mg·kg⁻¹; 莠狗尾草的地上部分 Cd 含量分别为 4.56、17.60 和 19.23 mg·kg⁻¹; 欧黑麦草的地上部分 Cd 含量分别为 3.26、14.60 和 21.80 mg·kg⁻¹. 此外还发现, 在

相同 Cd 含量处理下, 4 种植物地上部分的 Cd 含量从高到低依次为洋野黍 > 粗毛牛膝菊 > 莠狗尾草 > 欧黑麦草(图 1)。



1: *G. quadriradiata*; 2: *P. dichotomiflorum*; 3: *S. geniculata*; 4: *L. persicum*; 图中同一物种多个处理间的不同小写字母表示差异在 0.05 水平达到显著; 相同处理不同物种间的不同大写字母表示差异在 0.05 水平达到显著, 下同

图 1 不同 Cd 处理下 4 种植物地上部分 Cd 含量

Fig. 1 Shoot Cd concentrations of the four species under different soil Cd levels

这 4 种植物根部 Cd 含量也随土壤 Cd 含量的增加显著增加($P < 0.05$), 在 T5 ~ T50 处理下, 粗毛牛膝菊根部 Cd 含量分别为 10.50、39.40 和 80.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 洋野黍根部 Cd 含量分别为 77.97、315.33 和 383.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 莠狗尾草根部 Cd 含量分别为 104.33、378.33 和 604.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 欧黑麦草根部 Cd 含量分别为 35.37、166.33 和 315.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 在相同 Cd 含量处理下, 4 种植物根部 Cd 含量排序为莠狗尾草 > 洋野黍 > 欧黑麦草 > 粗毛牛膝菊(图 2)。

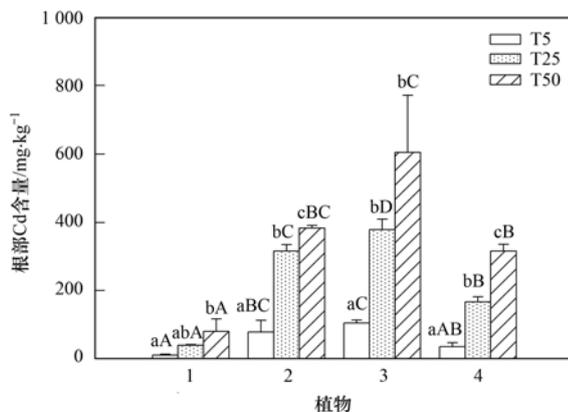


图 2 不同 Cd 处理下 4 种植物根部 Cd 含量

Fig. 2 Root Cd concentrations of the four species under different soil Cd levels

2.3 4 种植物的富集系数与转移系数

根据植物的 Cd 含量计算了 Cd 处理下植物的地上部分富集系数 (shoot bioconcentration factor,

SBCF) 和转移系数(图 3 和图 4)。从图 3 中可以看出, 这 4 种植物的地上部分富集系数随 Cd 含量的增加而显著降低($P < 0.05$)。在 T5 ~ T50 处理下粗毛牛膝菊的地上部分富集系数分别为 1.86、1.15 和 1.38; 洋野黍的地上部分富集系数分别为 7.19、5.13 和 2.79; 莠狗尾草的地上部分富集系数分别为 0.91、0.77 和 0.35; 欧黑麦草的地上部分富集系数分别为 0.65、0.58 和 0.44。明显地, 这 4 种植物的地上富集系数都是在 T5 处理下最高。此外, 本研究还发现, 在相同 Cd 含量处理下, 洋野黍的地上部分富集系数都是最大的, 其次为粗毛牛膝菊、莠狗尾草和欧黑麦草(图 3)。

这 4 种植物的转移系数随土壤 Cd 含量的增加有降低趋势, 但是差异水平不显著。具体表现为在 T5 ~ T50 处理下, 粗毛牛膝菊的转移系数分别为 0.93、0.73 和 1.04; 洋野黍的分别为 0.55、0.41 和 0.36; 莠狗尾草的分别为 0.04、0.05 和 0.03; 欧黑麦草的分别为 0.10、0.09 和 0.07。这 4 种植物在相同 Cd 含量处理下, 粗毛牛膝菊的转移系数都最高, 其次为洋野黍、欧黑麦草和莠狗尾草。其中, 粗毛牛膝菊在 T5 ~ T50 处理下的转移系数都接近于 1(图 4)。

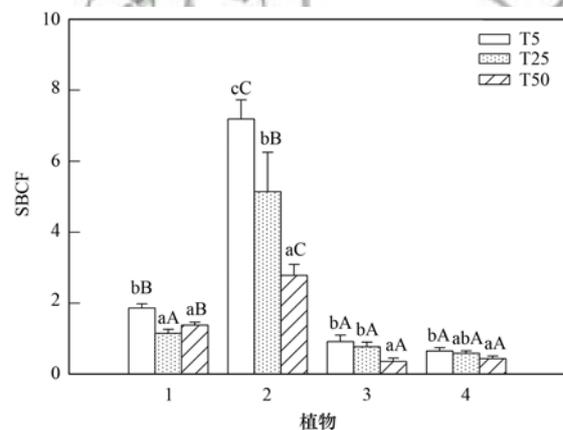


图 3 不同 Cd 处理下 4 种植物的富集系数

Fig. 3 Shoot bioconcentration factors for the four species under different soil Cd levels

2.4 植物中的 Cd 积累量

植物的 Cd 积累量主要由植物的生物量和 Cd 含量共同决定。根据植物的生物量和 Cd 含量, 计算了植物的 Cd 积累量。在 Cd 处理下, 粗毛牛膝菊单株地上部分 Cd 积累量随土壤 Cd 含量的增加显著升高($P < 0.05$), 在 T50 处理时最高, 为 355.99 μg 。而洋野黍、莠狗尾草和欧黑麦草都是在 T25 处理下积累量达到最大值, 分别为 85.79、16.69 和 26.75 μg 。除此之外, 本研究还比较了相同 Cd 含量处理下 4 种植物地上部分积累量的情况。结果显示, 在 T5

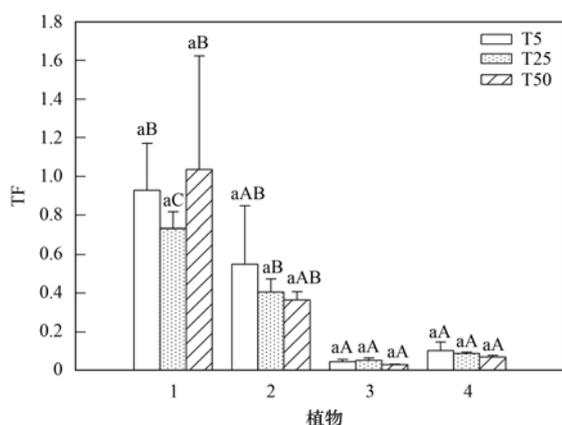


图4 不同 Cd 处理下 4 种植物的转移系数

Fig. 4 Transfer factors for the four species under different soil Cd levels

处理下,洋野黍的单株地上部分 Cd 积累量最高.而在 T25 和 T50 处理下,粗毛牛膝菊的单株地上部分 Cd 积累量最高(图 5).

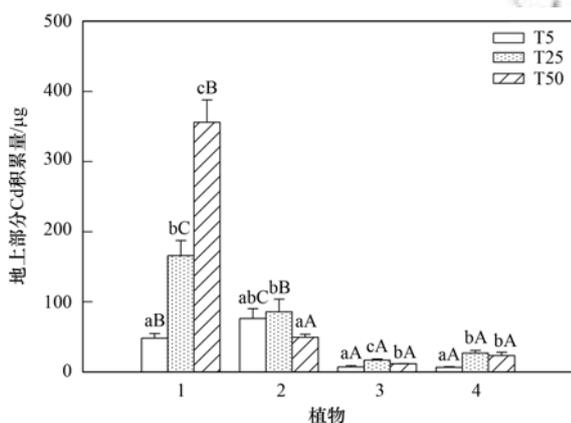


图5 不同 Cd 含量处理下 4 种植物地上部分积累量

Fig. 5 Shoot Cd contents of the four species under different soil Cd levels

本研究还分析了 Cd 在植物体内的分配比例(图 6).结果显示,随着土壤 Cd 含量的增加,除了欧黑麦草地上部分 Cd 积累量占总积累量比例显著

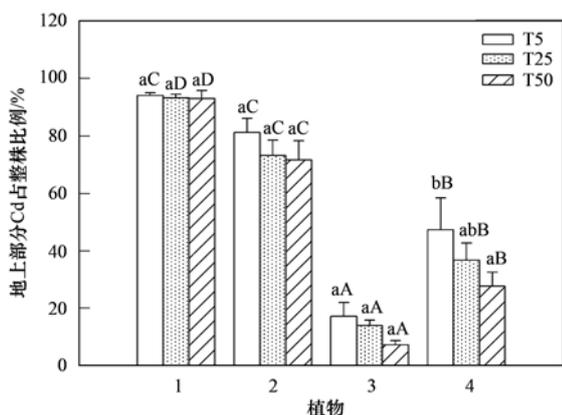


图6 不同 Cd 含量处理下 4 种植物体内 Cd 的分配比例

Fig. 6 Distribution ratios of Cd in the four plant species under different soil Cd levels

降低外($P < 0.05$),其余 3 个物种没有发生显著变化.在不同 Cd 含量处理下,粗毛牛膝菊都能将 90% 以上的 Cd 转移到地上部分,洋野黍能将 75% ~ 80% 的 Cd 转移到地上部分,欧黑麦草和莠狗尾草分别只能将低于 50% 和 20% 的 Cd 转移到地上部分.在相同 Cd 处理下,4 种植物的单株地上部分 Cd 积累量占整株植物积累量的比例都表现为粗毛牛膝菊 > 洋野黍 > 欧黑麦草 > 莠狗尾草(图 6).

3 讨论

筛选生物量大且对污染物富集性强的植物对于植物萃取至关重要^[23].本研究发现粗毛牛膝菊的耐受性比较强.因为在 T5 ~ T50 处理下,粗毛牛膝菊的生物量都没有发生显著变化,而其他 3 种禾本科植物在 T25 或 T50 处理下生物量都发生了显著的降低($P < 0.05$,表 1).与同属植物牛膝菊相比,牛膝菊的生物量在 Cd 含量为 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时开始显著降低^[24],这从侧面说明粗毛牛膝菊的耐受性可能比牛膝菊强.另外,在相同时间内,粗毛牛膝菊积累的生物量显著高于其他 3 种植物,表明粗毛牛膝菊生长比其他 3 种植物快.

本研究发现 4 种植物的地上部分和根部 Cd 含量都随土壤 Cd 含量的增加显著增加($P < 0.05$,图 1 和图 2).并且在相同土壤 Cd 含量处理下,洋野黍地上部分 Cd 含量最高,其次为粗毛牛膝菊、莠狗尾草和欧黑麦草.但是在根中,Cd 含量最高的为莠狗尾草,其次为洋野黍、欧黑麦草和粗毛牛膝菊(图 1 和图 2).之前的研究表明,Cd 富集植物对 Cd 的富集水平虽然比不上 Cd 超富集植物,但也能积累接近 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 到地上部分,如 Cd 富集植物小蓬草 (*Conyza canadensis*) 和蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*) 中的 Cd 含量^[25,26].在本实验中,洋野黍地上部分 Cd 含量大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;粗毛牛膝菊的地上部分 Cd 含量接近 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;莠狗尾草和欧黑麦草地上部分 Cd 含量远小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这表明粗毛牛膝菊和洋野黍具有相对较强的 Cd 富集能力.先前的研究表明,牛膝菊体内 Cd 含量变化趋势与粗毛牛膝菊相似,并且牛膝菊在土壤 Cd 含量为 $75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部分 Cd 含量才大于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24].因此,在后续研究中可以提高土壤 Cd 含量,来验证粗毛牛膝菊能否达到 Cd 超富集植物的标准.植物的地上部分富集系数和转移系数能进一步反映植物的富集和转运能力^[23].本研究表明这 4 种植物的地上部分富集系数随土壤 Cd 含量的增加显著降低($P < 0.05$,图 3).先前的研究也表明在低含量的重金属污染土壤中植物的富集系数高于

严重污染土壤^[27], 这可能是因为高含量下, 植物的生命活动受到抑制, 造成植物富集能力降低. 在所有 Cd 处理下, 粗毛牛膝菊和洋野黍的富集系数都是大于 1, 而莠狗尾草和欧黑麦草的富集系数小于 1 (图 3). 这表明粗毛牛膝菊和洋野黍的地上部分富集能力比莠狗尾草和欧黑麦草强.

植物地上部分 Cd 含量和富集系数在一定程度上反映了植物对 Cd 的转运能力. Cd 富集植物通常能将根中大量的 Cd 转移到地上部分, 因而有较高的转移系数^[7,28]. 在本研究中发现这 4 种植物在相同土壤 Cd 含量处理下, 粗毛牛膝菊的转移系数最高 (图 4), 可以初步看出粗毛牛膝菊转移 Cd 的能力比其他 3 种植物强. 在实际应用中, 植物对 Cd 的积累总量决定对土壤中 Cd 的去除效果, 而植物 Cd 积累总量由植物的生物量和 Cd 含量共同决定. 尽管在同一土壤 Cd 含量处理下, 洋野黍的地上部分 Cd 含量高于粗毛牛膝菊, 但由于其生物量较小, 因此除了在 T5 处理下, 洋野黍单株地上部分 Cd 积累量都明显比粗毛牛膝菊低. 而且由于洋野黍生物量受 Cd 胁迫下降显著, 其单株地上部分 Cd 积累量也随着土壤 Cd 含量的增加显著降低 ($P < 0.05$). 相反, 由于粗毛牛膝菊的生物量不受 Cd 胁迫影响, 其单株地上部分 Cd 积累量随着土壤 Cd 含量的增加显著增加 ($P < 0.05$). 这进一步说明粗毛牛膝菊在植物萃取 Cd 方面的优势明显.

由于植物萃取主要收获和去除植物地上部分富集的污染物, 因此污染物在植物体内的分配情况也十分重要^[23]. 植物转移到地上部分的污染物比重越高, 越适宜用于植物萃取. 因为如果大量的污染物蓄积在根部, 不仅面临再次进入环境的风险, 而且植物的富集作用改变了土壤中污染物的分布, 增加了局部区域污染物毒害的程度. 通常, Cd 超富集植物如牛膝菊^[19]和遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*)^[29] 都能最大限度地 Cd 转移到地上部分. 在本研究中, 在所有处理下, 粗毛牛膝菊都能将 90% 以上的 Cd 积累到地上部分 (图 6), 而洋野黍只能将 75% ~ 80% 的 Cd 转移到地上部分, 欧黑麦草和莠狗尾草分别只能将低于 50% 和 20% 的 Cd 转移到地上部分. 这说明粗毛牛膝菊具有较高的 Cd 萃取能力, 具有更好的应用潜力.

因此, 综合植物在 Cd 处理下的生物量和富集特性, 推荐粗毛牛膝菊为治理土壤 Cd 污染的潜在高富集植物. 由于本实验选用的是室内盆栽实验, 植物面临的生长环境和野外环境差异较大, 因此植物的生长状态和对 Cd 的耐受和富集能力也可能和自然条件下明显不同, 因此在后期需要进行野外实

验来进一步探究粗毛牛膝菊富集性和修复能力. 同时, 粗毛牛膝菊耐受和富集 Cd 的分子机制值得进一步研究. 粗毛牛膝菊是否能吸收土壤中其他重金属也不清楚, 需要进一步的研究. 此外, 粗毛牛膝菊作为一种入侵植物, 如何在利用的过程中消除其对生态环境的潜在危害也是重中之重. 根据粗毛牛膝菊的生长特性, 我们建议可以在植物开花之前将植株收获, 这样可以避免植物的扩散.

4 结论

在盆栽实验下, 本研究发现不同 Cd 含量处理下粗毛牛膝菊, 洋野黍, 莠狗尾草和欧黑麦草的耐受性及富集性不同. 在 T5 ~ T50 处理下, 粗毛牛膝菊的生物量没有发生显著变化, 而其他 3 种植物生物量在 T25 或 T50 处理下显著降低. 因此, 粗毛牛膝菊的 Cd 耐受性较强. 通过分析植物对 Cd 的富集特征发现, 在不同 Cd 含量处理下, 4 种植物地上部分和根中的 Cd 含量均随土壤 Cd 含量增加而显著升高. 植物的地上部分富集系数和转移系数结果表明, 粗毛牛膝菊和洋野黍的富集系数都大于 1, 粗毛牛膝菊的转移系数显著高于其他 3 种植物. 此外, 粗毛牛膝菊转移到地上部分的 Cd 也显著高于其他 3 种植物. 这说明粗毛牛膝菊具有很强的 Cd 富集性和转运能力. 综上所述, 结合 4 种植物的耐受性和富集性, 本研究推荐将粗毛牛膝菊作为一种 Cd 高富集植物.

参考文献:

- [1] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 690-700.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 中国环保产业, 2014, (5): 10-11.
- [3] 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 等. 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 [J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5531-5539.
- [4] Chen S L, Xu C Y, Geng Z C, et al. Remediation effects of different composite materials on cadmium-contaminated farmland soil [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5531-5539.
- [5] Zhao H X, Wang L S, Zhao F J, et al. SpHMA1 is a chloroplast cadmium exporter protecting photochemical reactions in the Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(4): 1112-1124.
- [6] Yan A, Wang Y M, Tan S N, et al. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11, doi: 10.3389/fpls.2020.00359.
- [7] Ashraf S, Ali Q, Zahir Z A, et al. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 174: 714-727.
- [8] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals-

- concepts and applications [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(7): 869-881.
- [8] Zhong L S, Lin L J, Liao M A, *et al.* Phytoremediation potential of *Pterocypselia laciniata* as a cadmium hyperaccumulator [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(13): 13311-13319.
- [9] Gerhardt K E, Gerwing P D, Greenberg B M. Opinion: taking phytoremediation from proven technology to accepted practice [J]. *Plant Science*, 2017, **256**: 170-185.
- [10] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
Zhang Y X, Song B, Bin J, *et al.* Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- [11] Simberloff D, Martin J L, Genovesi P, *et al.* Impacts of biological invasions: what's what and the way forward [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, **28**(1): 58-66.
- [12] Colautti R I, Barrett S C H. Rapid adaptation to climate facilitates range expansion of an invasive plant [J]. *Science*, 2013, **342**(6156): 364-366.
- [13] Rezaei S, Ponraj M, Talaiekhosani A, *et al.* Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **163**: 125-133.
- [14] 林茂兹, 邱雪芬, 林能文, 等. 空心莲子草对污泥重金属的响应与吸附效应 [J]. *草业科学*, 2012, **29**(5): 681-686.
Lin M Z, Qiu X F, Lin N W, *et al.* Response of *Alternanthera philoxeroides* to heavy metals and its sorption effectiveness for heavy metals [J]. *Pratacultural Science*, 2012, **29**(5): 681-686.
- [15] Wei H, Huang M Y, Quan G M, *et al.* Turn bane into a boon: application of invasive plant species to remedy soil cadmium contamination [J]. *Chemosphere*, 2018, **210**: 1013-1020.
- [16] 张军, 魏璐, 任雪盈, 等. Cd²⁺胁迫对3种超富集植物种子萌发特征的影响 [J]. *上海农业学报*, 2018, **34**(3): 32-36.
Zhang J, Wei L, Ren X Y, *et al.* Effects of cadmium ion stress on seed germination characteristics of three hyperaccumulating plants [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2018, **34**(3): 32-36.
- [17] 马金双, 李惠茹. 中国外来入侵植物名录 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
Ma J S, Li H R. The checklist of the alien invasive plants in China [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [18] 陶波, 董玉梅, 汤东生. 入侵杂草牛膝菊和粗毛牛膝菊种子成熟与萌发研究 [J]. *湖北农业科学*, 2013, **52**(2): 331-333.
Tao B, Dong Y M, Tang D S. Study on seed maturation and germination of invasive weed *Galinsoga parviflora* and *G. ciliata* [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, **52**(2): 331-333.
- [19] Lin L J, Jin Q, Liu Y J, *et al.* Screening of a new cadmium hyperaccumulator, *Galinsoga parviflora*, from winter farmland weeds using the artificially high soil cadmium concentration method [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, **33**(11): 2422-2428.
- [20] Olowoyo J O, Mugivhisa L L, Busa N G. Trace metals in soil and plants around a cement factory in Pretoria, South Africa [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, **24**(5): 2087-2093.
- [21] 张前进, 陈永春, 安士凯. 淮南矿区土壤重金属污染的植物修复技术及植物优选 [J]. *贵州农业科学*, 2013, **41**(4): 164-167.
Zhang Q J, Chen Y C, An S K. Phytoremediation technology of heavy metal contaminated soil in huainan mining area and plant optimization [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, **41**(4): 164-167.
- [22] Wang K, Huang H G, Zhu Z Q, *et al.* Phytoextraction of metals and rhizoremediation of PAHs in co-contaminated soil by co-planting of *Sedum alfredii* with ryegrass (*Lolium perenne*) or castor (*Ricinus communis*) [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2013, **15**(3): 283-298.
- [23] Liu S L, Ali S, Yang R J, *et al.* A newly discovered Cd-hyperaccumulator *Lantana camara* L. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **371**: 233-242.
- [24] 金倩. 镉超富集植物牛膝菊 (*Galinsoga parviflora*) 的抗氧化酶活性变化与光合特性研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
Jin Q. Study on antioxidant enzyme activity and photosynthetic characteristics of Cd-hyperaccumulator *Galinsoga parviflora* [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2014.
- [25] We S H, Zhou Q X, Saha U K, *et al.* Identification of a Cd accumulator *Conyza canadensis* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**(1): 32-35.
- [26] Wei S H, Zhou Q X, Mathews S. A newly found cadmium accumulator-*Taraxacum mongolicum* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **159**(2-3): 544-547.
- [27] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(5): 1103-1110.
- [28] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **41**(2): 168-214.
- [29] Küpper H, Parameswaran A, Leitenmaier B, *et al.* Cadmium-induced inhibition of photosynthesis and long-term acclimation to cadmium stress in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *New Phytologist*, 2007, **175**(4): 655-674.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshui Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshui	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)