

镉、铅、锌复合胁迫对滇杨幼苗富集及转运镉的影响

王艳霞, 郑武扬, 侯磊, 何承忠, 郎爽, 岩肖明, 李思泽

引用本文:

王艳霞, 郑武扬, 侯磊, 何承忠, 郎爽, 岩肖明, 李思泽. 镉、铅、锌复合胁迫对滇杨幼苗富集及转运镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 310-318.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0695>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雪里蕻对于Cd、Zn的耐性及富集特性研究

郭堤, 管伟豆, 张洋, 刘翔宇, 李一曼, 张增强

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2151-2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1028>

小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究

彭维新, 庄玉婷, 梁智淇, 俞政男, 吴道铭, 张学平, 曾曙才

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1707-1717 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0241>

硫铁矿区污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选

鲍广灵, 陶荣浩, 张慧敏, 叶文玲, 胡兆云, 周彩玲, 马友华

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2693-2703 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0449>

不同玉米(Zeamays)品种对镉锌积累与转运的差异研究

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 胡万里, 付斌, 陈安强, 毛妍婷, 木霖, 王红华, 严婷婷, 段宗颜, 雷梅

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 16-23 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0872>

聚乙烯微塑料对花生幼苗镉吸收及生理特征的影响

宗海英, 刘君, 郭晓红, 李萌, 黄小丽, 王芳丽, 宋宁宁

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1400-1407 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1446>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王艳霞, 郑武扬, 侯磊, 等. 镉、铅、锌复合胁迫对滇杨幼苗富集及转运镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 310–318.
WANG Y X, ZHENG W Y, HOU L, et al. Effects of Cd, Pb, and Zn combined stress on Cd accumulation and translocation in *Populus yunnanensis* seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2): 310–318.



开放科学 OSID

镉、铅、锌复合胁迫对滇杨幼苗富集及转运镉的影响

王艳霞^{1,2}, 郑武扬¹, 侯磊¹, 何承忠^{3*}, 郎爽¹, 岩肖明¹, 李思泽¹

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2. 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 昆明 650224; 3. 西南林业大学生命科学学院, 昆明 650224)

摘要:为探究 Cd-Pb、Cd-Zn 和 Cd-Pb-Zn 复合污染的交互效应,以滇杨幼苗为研究对象,通过土培盆栽试验对 Cd(50 mg·kg⁻¹)、Pb(500 mg·kg⁻¹)、Zn(500 mg·kg⁻¹) 单一及复合胁迫下滇杨富集、转运 Cd 的特征进行深入分析,旨在为滇杨的矿区修复利用提供依据。结果表明:单一及复合胁迫可降低滇杨幼苗株高增长率,提高其地径增长率,其中 Cd-Pb-Zn 复合胁迫株高增长率降幅最大(24.45%),Cd-Zn 复合胁迫地径增长率增幅最高(317.04%),而滇杨生物量仅在 Cd-Pb-Zn 复合胁迫时显著下降,降幅为 30.28%。与单一 Cd 胁迫相比,Cd-Pb 复合胁迫显著增加滇杨茎中 Cd 含量,Cd-Zn 和 Cd-Pb-Zn 复合胁迫显著降低滇杨各器官 Cd 含量;单一 Cd 胁迫下滇杨 Cd 积累量为 0.32 mg·pot⁻¹,Cd-Pb 胁迫未显著改变 Cd 积累量(0.34 mg·pot⁻¹),而 Cd-Zn(0.14 mg·pot⁻¹)和 Cd-Pb-Zn 胁迫(0.13 mg·pot⁻¹)显著降低 Cd 积累量。不同胁迫条件下滇杨 Cd 富集与转运系数变化规律结果显示,复合胁迫中 Pb 和 Cd 的交互作用(Pb×Cd)促进 Cd 由土壤向滇杨富集,并增强 Cd 向地上部转运,Pb×Cd 表现出协同效应;Zn×Cd 抑制滇杨 Cd 富集,但能提高 Cd 转运,对 Cd 富集和转运分别表现出拮抗和协同效应;Pb×Zn×Cd 抑制滇杨对 Cd 的富集和转运,三者复合时表现出拮抗效应。研究表明,滇杨幼苗对 Cd-Pb、Cd-Zn 复合胁迫具有耐受性,复合胁迫下交互作用类型及作用的植物器官决定了对 Cd 富集与转运的影响程度。

关键词:滇杨;重金属复合污染;重金属交互效应;镉;富集;转运

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)02-0310-09 doi:10.11654/jaes.2022-0695

Effects of Cd, Pb, and Zn combined stress on Cd accumulation and translocation in *Populus yunnanensis* seedlings

WANG Yanxia^{1,2}, ZHENG Wuyang¹, HOU Lei¹, HE Chengzhong^{3*}, LANG Shuang¹, YAN Xiaoming¹, LI Sizhe¹

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous and Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China; 3. College of Life Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to explore the interactions of metals in the combined pollutants Cd-Pb, Cd-Zn, and Cd-Pb-Zn, seedlings of *Populus yunnanensis* were selected, and the characteristics of Cd enrichment and transport under the single and combined stress of Cd (50 mg·kg⁻¹), Pb (500 mg·kg⁻¹) and Zn (500 mg·kg⁻¹) were analyzed by soil pot experiments, to provide a reference for the restoration and utilization of mining areas where *P. yunnanensis* occurs. The results showed that: both single and combined stresses significantly reduced

收稿日期: 2022-07-07 录用日期: 2022-10-12

作者简介: 王艳霞(1979—),女,河南商丘人,硕士,副教授,主要从事土壤生态相关研究。E-mail: wang197912@163.com

*通信作者: 何承忠 E-mail: hcz70@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860219); 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室开放课题(2020YB002)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31860219); The Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous and Rural Areas of Yunnan Province, China(2020YB002)

the height growth rate of *P. yunnanensis* seedlings and increased the growth rate of the ground diameter. The height growth rate decreased the most under the Cd-Pb-Zn combined stress (24.45%), and the increase rate of the ground diameter was the highest under the Cd-Zn stress (317.04%). The biomass decreased significantly only under the Cd-Pb-Zn combined stress, with a decrease of 30.28%. Compared with the single Cd stress, the Cd-Pb stress significantly increased the content of Cd in the stem of *P. yunnanensis*, whereas the Cd-Zn and Cd-Pb-Zn combined stresses significantly reduced the content of Cd in the roots, stems, and leaves. The accumulation of Cd was 0.32 mg·pot⁻¹ under the single Cd stress. The Cd-Pb stress did not significantly change the accumulation of Cd (0.34 mg·pot⁻¹), while the Cd-Zn (0.14 mg·pot⁻¹) and Cd-Pb-Zn (0.13 mg·pot⁻¹) combined stresses significantly reduced the accumulation. The results of bioaccumulation and translocation factors of Cd in *P. yunnanensis* under different stress conditions showed that the interaction between Pb and Cd (Pb×Cd) promoted Cd accumulation from the soil and enhanced Cd translocation, showing a synergistic effect. The interaction between Zn and Cd inhibited the accumulation of Cd, but increased the translocation of the absorbed Cd to the shoot, showing an antagonistic and synergistic effect on Cd accumulation and translocation, respectively. The interactions among Pb, Zn, and Cd inhibited both the accumulation and translocation of Cd, showing an antagonistic effect. This study shows that *P. yunnanensis* seedlings exhibit tolerance to the combined stress of Cd-Pb and Cd-Zn, and that the effects of heavy metal combined stress on Cd accumulation and translocation depend on the type of metal interaction and the specific plant organ.

Keywords: *Populus yunnanensis*; heavy metal combined stress; heavy metal interaction; Cd; accumulation; translocation

土壤重金属污染常以多种重金属共存的复合污染形式存在^[1]。研究显示,铅锌矿等矿产资源的开采、冶炼以及尾矿的堆积常导致周边土壤重金属元素Cd、Pb、Zn含量较高,而西南地区作为我国有色金属主要产区,其周边土壤的Cd-Pb-Zn复合污染问题尤为突出^[2-4]。利用生长速度快、生物量大、根系发达、进入食物链风险小的短轮伐树种进行矿区土壤污染修复,不仅能缓解土壤污染,而且可兼顾用材和生物质能源需求,以及净化空气、美化环境、保持水土等生态功能。目前,在西南矿山复垦及植被恢复过程中,重金属复合污染是其最重要的限制因素^[5]。为此,筛选适于西南矿区的、耐受性强的、能富集多种重金属的乔木树种,明确其重金属胁迫下的生理生态效应十分必要。

重金属复合污染的植物生理生态效应不是单个元素的简单相加,其联合作用方式包括拮抗效应、协同效应以及加和效应^[6],而重金属复合类型及同种复合类型不同浓度组合所产生的交互效应因树木种类和作用器官的不同而存在差异^[7-8]。研究发现,低浓度的Pb(200 mg·kg⁻¹)抑制樟树(*Cinnamomum camphora*)根对Cd的吸收而促进茎叶Cd吸收,Pb和Cd的交互作用(Pb×Cd)在根部表现为拮抗效应,在茎叶部表现为协同效应,而高浓度的Pb(>600 mg·kg⁻¹)能促进樟树根、茎、叶对Cd的吸收,Pb×Cd表现为协同效应^[9]。Zn能抑制Cd在白花泡桐(*Paulownia fortunei*)体内的富集,并增强Cd从根部向地上部迁移的能力,Zn和Cd的交互作用(Zn×Cd)在Cd富集时表现为拮抗效应,在Cd转运时表现为协同效应^[10]。彭玲^[11]有关

Cd-Pb-Zn复合污染的研究表明,Pb×Cd、Zn×Cd均会对日本楸木(*Aralia elata* var. *inermis*)根中Cd富集产生拮抗效应,而三种重金属复合胁迫时,Pb×Zn×Cd对Cd富集产生了协同促进效应。由此可知,Cd与Pb、Zn共存时,重金属间的交互作用对植物Cd富集的影响十分复杂,而目前针对不同植物类型和作用器官的交互效应规律与机制仍不清楚。

滇杨(*Populus yunnanensis*)作为西南乡土杨树,具有速生、成材早、抗逆性强、易于无性繁殖及对Cd、Pb等重金属有一定富集能力等优点,是重金属复合污染土壤修复的重要候选树种^[12-15],但已有研究多集中于单一或两种重金属胁迫环境,针对Cd-Pb-Zn复合胁迫下的滇杨Cd富集特征鲜见报道。因此,本研究以滇杨幼苗为研究对象,通过盆栽试验研究其在Cd、Cd-Pb、Cd-Zn以及Cd-Pb-Zn复合胁迫下的Cd富集与转运特征,旨在明确不同复合污染下重金属交互效应对滇杨吸收、富集和转运Cd的具体影响,研究结果可为滇杨的矿区土壤修复利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物:选择粗细均匀的一年生滇杨枝条制成长20 cm的插穗,在黑色塑料桶中水培60 d后,选择根、叶发育良好且生长基本一致的滇杨幼苗用于胁迫试验。供试基质:按红壤和有机基质体积比4:1配制,所配供试基质基本性质为pH值5.21,有机质含量24.16 g·kg⁻¹,有效氮含量174.48 mg·kg⁻¹,有效磷含量4.00 mg·kg⁻¹,速效钾含量317.85 mg·kg⁻¹,全Cd含量

0.15 mg·kg⁻¹, Pb未检测出,全Zn含量63.14 mg·kg⁻¹。供试药剂: Cd(NO₃)₂·4H₂O、Pb(NO₃)₂、ZnSO₄·7H₂O、CO(NH₂)₂和KH₂PO₄均为分析纯。

1.2 试验方案

本试验采用盆栽的方式进行,共设5个处理,即Cd、Cd-Pb、Cd-Zn、Cd-Pb-Zn以及未加重金属的对照(CK),每个处理均设3个重复。Cd、Pb、Zn添加浓度依据西南典型有色金属矿区周边土壤重金属含量^[6],并结合文献和预试验中滇杨对重金属的耐受浓度^[17-18],依次设置为Cd 50 mg·kg⁻¹、Pb 500 mg·kg⁻¹、Zn 500 mg·kg⁻¹。每盆装入过3 mm筛的供试基质3.5 kg,并按0.15 g·kg⁻¹ N和0.15 g·kg⁻¹ P₂O₅拌入CO(NH₂)₂和KH₂PO₄作为基肥,充分混匀并浇水稳定3 d后,选择长势相近的滇杨幼苗进行移栽,每盆移栽1棵。待滇杨幼苗恢复正常生长后(恢复期3周),使用文献报道的浇灌法加入重金属^[17,19],具体方法:将各处理重金属分别溶于500 mL蒸馏水中,一次性浇灌至土壤中,并在盆底部垫上托盘,若盘内渗出水分需倒回盆中,以免重金属流失。胁迫试验在西南林业大学温室内进行,室内温度为15~28℃,空气相对湿度为23%~67%,大气CO₂质量浓度为400~410 mg·L⁻¹,光照充足。胁迫试验共持续75 d,期间保持田间持水量的60%~80%。

1.3 样品测定与分析

重金属胁迫期间,利用游标卡尺与卷尺每15 d测定株高和地径一次;胁迫结束后,采用烘干法测定植物干质量(文中生物量及植物含量均以干质量计),并根据公式(1)计算耐性指数^[20];采用HNO₃-HClO₄消解植物,HNO₃-HCl-HClO₄消解土壤,0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂提取土壤交换态重金属,并利用ICP-OES(Agilent

720,美国)测定植物与土壤中的重金属含量,同时根据公式(2)和(3)分别计算富集系数与转运系数^[21];采用电位法测定土壤pH值;采用K₂Cr₂O₇外加热法测定土壤有机质;采用碱解扩散法测定土壤有效氮;采用NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法测定土壤有效磷;采用CH₃COONH₄浸提,火焰光度法测定土壤速效钾^[22]。

耐性指数(T_i)=处理组植物的总生物量(g)/对照组植物的总生物量(g) (1)

富集系数(BCF)=植株镉含量(mg·kg⁻¹)/土壤镉含量(mg·kg⁻¹) (2)

转运系数(TF)=植株地上部镉含量(mg·kg⁻¹)/植株地下部镉含量(mg·kg⁻¹) (3)

1.4 数据处理及统计分析

采用SPSS 21.0进行数据统计分析,采用单因素方差分析和Duncan法进行差异显著性检验和多重比较,采用Canoco 5进行冗余分析,采用Origin 9.1制图。

2 结果与分析

2.1 重金属胁迫对滇杨幼苗生长的影响

重金属单一和复合胁迫对滇杨幼苗株高和地径的影响如图1所示。与CK相比,重金属胁迫抑制滇杨幼苗株高的增长,两种重金属复合胁迫的抑制作用小于单一Cd胁迫,三种重金属复合胁迫的抑制作用最强,株高增长率降幅最大,与CK相比降低24.45%。重金属胁迫促进幼苗地径增粗,复合胁迫促进作用强于单一胁迫,其中Cd-Zn促进作用最强,其地径增长率较CK增加317.04%。重金属胁迫可抑制滇杨幼苗向上生长,但能促进茎的横向加粗。

单一和复合胁迫对滇杨幼苗生物量和耐性指数的影响如表1所示。与CK相比,Cd-Pb-Zn复合胁迫

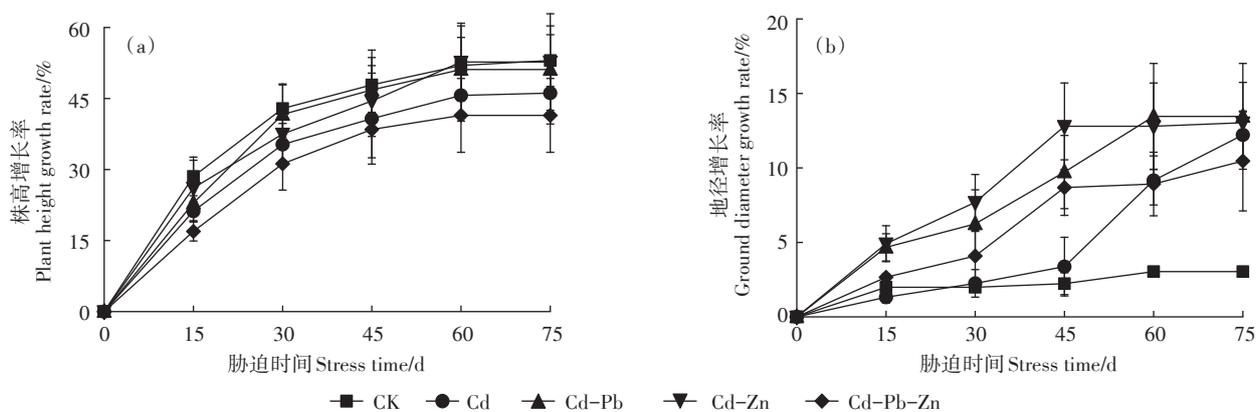


图1 滇杨幼苗株高(a)与地径(b)的变化

Figure 1 Variation of plant height(a) and ground diameter(b) of *Populus yunnanensis*

可显著降低滇杨幼苗总生物量($P<0.05$),降幅为30.28%,其余处理影响不显著($P>0.05$);根和叶的生物量不受重金属胁迫的影响,各处理间差异不显著($P>0.05$),茎生物量在Cd-Pb-Zn复合胁迫时较Cd处理显著降低($P<0.05$),降幅为40.73%。重金属复合胁迫可降低植物的耐性指数,三种重金属复合胁迫时滇杨耐性指数降低最多,降幅为30%,且Cd-Pb-Zn处理的耐性指数显著低于其他各处理($P<0.05$),而Cd、Cd-Pb、Cd-Zn处理的耐性指标与CK无显著差异($P>0.05$),说明滇杨幼苗对Cd-Pb-Zn复合胁迫的耐受性最差,对单一Cd胁迫及Cd-Pb、Cd-Zn胁迫具有一定适应性和耐受性。

2.2 重金属胁迫对滇杨幼苗Cd含量和Cd积累量的影响

滇杨幼苗各器官Cd含量和积累量如图2所示。在重金属胁迫下,滇杨根中Cd含量最高,平均为 $36.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶和茎中Cd含量次之,平均值分别为 $18.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $12.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各器官Cd含量大体表现为根>叶>茎。各器官Cd积累量以茎积累为最多,

平均值为 $0.15\text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$,根和叶中Cd积累量相近,平均值分别为 $0.04\text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$ 和 $0.05\text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$,各器官Cd积累量大体表现为茎>叶>根。综合滇杨各器官生物量数据可知(表1),生物量大小是决定滇杨幼苗Cd积累量的关键。

与单一Cd胁迫相比,Cd-Pb复合胁迫显著增加茎中Cd含量($P<0.05$),增幅为38.06%,对其他器官Cd含量影响不显著($P>0.05$);Cd-Zn复合胁迫显著降低根、茎、叶中Cd含量($P<0.05$),降幅分别为78.19%、34.64%和75.68%;Cd-Pb-Zn复合胁迫亦能显著降低各器官Cd含量,但降幅小于Cd-Zn胁迫。与单一Cd胁迫相比,Cd-Pb复合胁迫时滇杨各器官Cd积累量以及植株总积累量无显著变化,但Cd-Zn、Cd-Pb-Zn复合胁迫时滇杨茎、叶Cd积累量以及总积累量均显著降低($P<0.05$),Cd、Cd-Pb、Cd-Zn、Cd-Pb-Zn处理的Cd总积累量分别为 0.32 、 0.34 、 0.14 、 $0.13\text{ mg}\cdot\text{pot}^{-1}$ 。

2.3 重金属胁迫对滇杨幼苗Cd富集与转运的影响

滇杨幼苗Cd富集与转运系数如表2所示。与

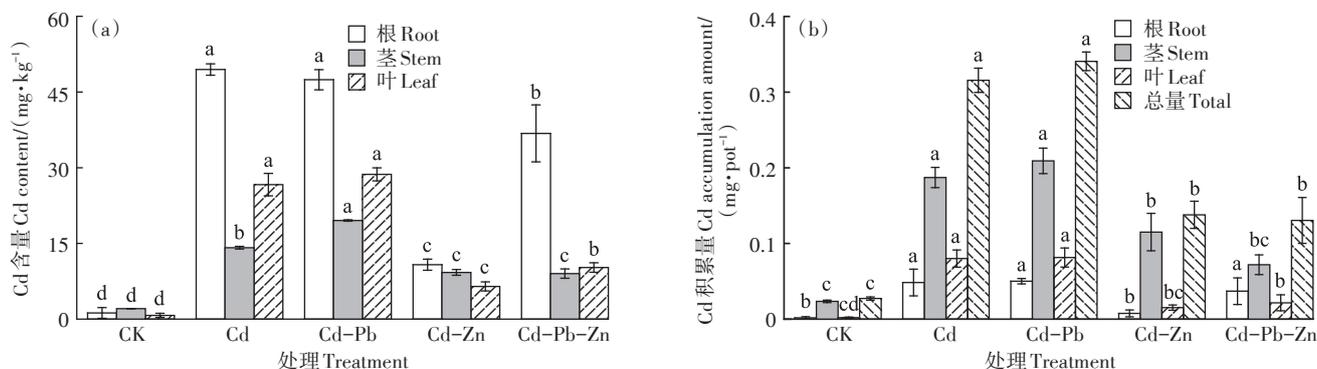
表1 滇杨生物量与耐性指数

Table 1 Biomass and tolerance index of *Populus yunnanensis*

处理 Treatment	根生物量 Root biomass/g	茎生物量 Stem biomass/g	叶生物量 Leaf biomass/g	总生物量 Total biomass/g	耐性指数 Tolerance index
CK	1.30±0.28a	11.30±1.33ab	2.99±0.85a	15.59±2.03a	1.00±0.13a
Cd	0.98±0.34a	13.21±1.43a	3.01±0.36a	17.19±0.77a	1.10±0.05a
Cd-Pb	1.06±0.04a	10.69±1.55ab	2.83±0.32a	14.57±1.30a	0.93±0.08a
Cd-Zn	0.73±0.50a	12.26±4.20ab	2.39±0.72a	15.39±3.04a	0.99±0.19a
Cd-Pb-Zn	0.97±0.31a	7.83±1.24b	2.07±0.95a	10.87±2.14b	0.70±0.14b

注:同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.



不同字母表示同一器官或总量在不同处理间差异显著($P<0.05$)

Different letters indicate significant difference among treatments of the same organ and total ($P<0.05$)

图2 滇杨各器官Cd含量(a)与Cd积累量(b)

Figure 2 Cd content(a) and accumulation amount(b) in each organ of *Populus yunnanensis*

单一 Cd 胁迫相比, Cd-Pb 复合胁迫显著提高 Cd 总富集系数和地上部富集系数 ($P < 0.05$), Cd-Zn、Cd-Pb-Zn 复合胁迫则显著降低 Cd 富集系数 ($P < 0.05$), 且 Cd-Zn 复合胁迫时降幅最大, 说明复合胁迫时 Pb 的存在促进 Cd 由土壤向植物富集, 而 Zn 的存在抑制 Cd 富集。

与单一 Cd 胁迫相比, Cd-Zn 复合胁迫显著提高 Cd 转运系数 (叶除外, $P < 0.05$), Cd-Pb 复合胁迫亦使 Cd 转运系数有所提高, 但作用不显著 ($P > 0.05$), 而 Cd-Pb-Zn 复合胁迫降低了 Cd 转运系数, 作用亦不显著 ($P > 0.05$)。综上可知, Cd-Pb 和 Cd-Zn 复合胁迫时 Pb、Zn 的存在均可促使 Cd 从根部向地上部转运, 但 Cd-Pb-Zn 复合胁迫时, Pb、Zn 的共存抑制了 Cd 转运。

2.4 滇杨幼苗 Cd 富集转运特征与土壤理化性质的关系

不同重金属胁迫处理的土壤理化指标如表 3 所示。在滇杨-土壤互作下, 土壤交换态 Cd 含量以 Cd-Zn 胁迫时最高, 其次为 Cd-Pb-Zn 复合胁迫, Cd-Pb 胁迫与单一 Cd 胁迫无显著差异 ($P > 0.05$), 但均显著低于 Cd-Zn 和 Cd-Pb-Zn 胁迫 ($P < 0.05$); 交换态 Pb 和交换态 Zn 均是在 Cd-Pb-Zn 三者复合胁迫时显著高于二者复合胁迫 (Cd-Pb、Cd-Zn)。与 CK 相比, 土壤 pH 值在 Cd-Pb、Cd-Pb-Zn 胁迫下显著下降, 在 Cd-Zn 胁迫下显著升高; 有机质含量在 Cd 胁迫下较 CK 显著下降; 有效氮在 Cd-Pb、Cd-Pb-Zn 胁迫下较 CK 显著

升高, 在 Cd 胁迫下较 CK 显著下降; 有效磷在 Cd-Pb-Zn 胁迫下较 CK 显著升高; 速效钾在 Cd-Zn 胁迫下较 CK 显著下降。

将滇杨 Cd 富集转运相关的 5 个指标作为植物响应变量, 8 个土壤理化指标作为环境变量进行冗余分析可知, 土壤 pH 值、交换态重金属含量等理化因子可以解释植物响应变量总特征值的 96.9%, 能够反映滇杨 Cd 富集转运特征与土壤理化性质关系的绝大部分信息。结果 (图 3) 显示, 滇杨 Cd 含量、Cd 积累量、Cd 富集系数与土壤交换态 Cd、交换态 Zn 呈负相关关系 (夹角 $> 90^\circ$), 与土壤交换态 Pb 呈正相关关系 (夹角 $< 90^\circ$), 说明滇杨吸收、富集 Cd 的过程, 能降低土壤中交换态 Cd、Zn 的含量, 而易被植物吸收利用的交换态 Pb 含量则因 Cd 吸收而有所增加。

滇杨 Cd 富集与转运过程除影响土壤交换态重金属含量外, 还会对土壤酸碱性、有机质含量、速效养分等指标产生影响, 其中, 对土壤 pH、有机质 (OM)、有效磷 (AP) 的影响达显著水平 ($P < 0.05$), 其解释贡献率分别为 13.9%、29.3% 和 12.8%。由图 3 可知, 土壤 pH 值、有机质含量与滇杨 Cd 富集指标呈负相关关系, 与 Cd 转运系数呈正相关关系, 而有效磷含量与 Cd 富集、转运指标均呈负相关关系。此外, 土壤 pH 值、土壤有机质还与土壤交换态重金属含量 (ECd、EPb、EZn) 呈负相关关系。

表 2 滇杨各器官 Cd 富集系数与转运系数

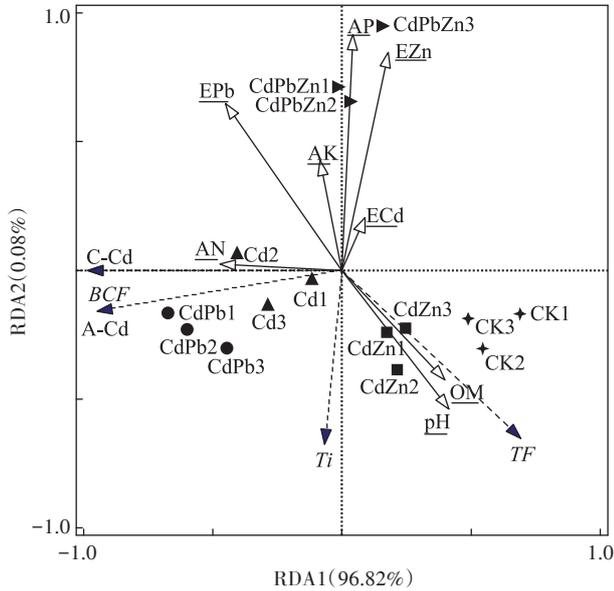
Table 2 Bioaccumulation factor and translocation factor of each *Populus yunnanensis* organ towards Cd

处理 Treatment	富集系数 BCF				总富集系数 Total BCF	转运系数 TF		总转运系数 Total TF
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	地上部 Aerial part		茎 Stem	叶 Leaf	
Cd	0.99±0.022a	0.28±0.004b	0.53±0.044a	0.33±0.012b	0.37±0.025b	0.29±0.008bc	0.54±0.034a	0.33±0.005bc
Cd-Pb	0.95±0.040a	0.39±0.006a	0.57±0.026a	0.43±0.008a	0.47±0.009a	0.41±0.016b	0.61±0.030a	0.45±0.019b
Cd-Zn	0.22±0.022c	0.19±0.02c	0.13±0.018c	0.17±0.023c	0.18±0.021d	0.87±0.139a	0.60±0.035a	0.82±0.127a
Cd-Pb-Zn	0.74±0.113b	0.18±0.036c	0.20±0.019b	0.19±0.032c	0.24±0.027c	0.25±0.061c	0.28±0.038b	0.26±0.054c

表 3 各处理土壤理化指标

Table 3 Physical and chemical indexes of soil in each treatment

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	有效氮 Available nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	交换态 Cd Exchangeable Cd/ (mg·kg ⁻¹)	交换态 Pb Exchangeable Pb/ (mg·kg ⁻¹)	交换态 Zn Exchangeable Zn/ (mg·kg ⁻¹)
CK	4.68±0.04b	26.7±0.79ab	89.18±5.55c	2.66±0.41b	250.20±12.26a	0.46±0.01d	0.74±0.05c	5.88±0.86c
Cd	4.73±0.04ab	19.55±2.15c	78.48±4.29d	2.75±1.17b	237.28±5.86ab	8.71±1.43c	0.78±0.02c	3.90±0.36c
Cd-Pb	4.42±0.03c	26.00±2.34ab	121.48±5.48a	2.57±0.41b	253.31±11.02a	10.78±0.19c	111.55±0.65b	3.43±0.07c
Cd-Zn	4.75±0.01a	28.47±2.10a	90.05±6.45c	2.21±0.71b	218.24±12.21b	46.42±2.97a	0.70±0.13c	111.26±3.87b
Cd-Pb-Zn	4.40±0.02c	23.38±1.03b	100.31±4.10b	6.62±1.25a	253.85±22.08a	30.31±5.86b	138.58±7.28a	292.73±5.48a



C-Cd: Cd 含量, A-Cd: Cd 积累量, BCF: 富集系数, TF: 转运系数, Ti: 耐受系数, ECd: 交换态镉, EPb: 交换态铅, EZn: 交换态锌, pH: 酸碱度, OM: 有机质, AN: 有效氮, AP: 有效磷, AK: 速效钾
C-Cd: Cd content, A-Cd: Cd accumulation, BCF: Bioaccumulation factor, TF: Translocation factor, Ti: Tolerance index, ECd: Exchangeable cadmium, EPb: Exchangeable lead, EZn: Exchangeable zinc, pH: pH, OM: Organic matter, AN: Available nitrogen, AP: Available phosphorus, AK: Available potassium

图3 滇杨 Cd 富集转运指标与土壤理化性质的冗余分析

Figure 3 Redundancy analysis between Cd accumulation and translocation indicators of *Populus yunnanensis* and soil physicochemical properties

3 讨论

3.1 Cd-Pb-Zn 复合胁迫对滇杨生长特性的影响

生长状况和生物量大小是植物响应重金属胁迫的最直观反映,杨树对重金属具有一定耐受性和富集性,但耐受程度和富集特征受浓度效应的影响^[23-24]。不同重金属对植物生长影响的阈值不同,当环境中重金属含量超过阈值时,可能导致植物的生长发育受到抑制^[25]。例如银杏(*Ginkgo bioba*)幼苗在 Cd 小于 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 Pb 小于 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的单一或复合胁迫时,幼苗生长受到促进,但当胁迫浓度超过此阈值时则表现为抑制作用^[26];秋枫(*Bischofia javanica*)的生长则在超过 Cd 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 Pb 1 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时明显受到抑制^[27];假苹婆(*Sterculia lanceolata*)的生物量、株高和地径则在 Zn 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 Pb 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时受到抑制^[28]。

在本研究中, Cd 胁迫浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,滇杨幼苗的株高增长率有所降低,地径增长率有所提高,但总生物量无显著变化,且 Cd 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 Pb 500

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn 500 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 二者之一共同胁迫时,生物量亦无显著变化,说明此胁迫浓度仍在滇杨耐受阈值以下,但当滇杨幼苗受三者共同胁迫时生物量显著下降,说明滇杨虽然对 Cd、Pb、Zn 胁迫具有一定耐受性,但 Cd-Pb-Zn 共同胁迫已超过其耐受阈值,故表现出生长抑制和生物量下降。为适应重金属胁迫环境,滇杨还可通过调整自身生长与形态特征来增强耐受性,在本研究中表现为抑制茎的向上生长促进其横向加粗,变矮增粗可能是滇杨响应重金属胁迫的生长策略之一,其原因可能是重金属胁迫诱导了植物体内酚类次生代谢合成途径的加强,而木质素生物合成的加强可导致植物细胞壁加厚以抵御和固定重金属,同时细胞木质化速度加快,细胞伸长受抑制,从而造成了植物的变矮增粗^[29]。

此外,滇杨在单一 Cd 胁迫下的株高增长率低于 Cd-Pb、Cd-Zn 复合胁迫,而复合胁迫的地径增长率高于单一 Cd 胁迫,原因可能是复合胁迫下,重金属间产生了拮抗作用,从而在一定程度上抵消了对滇杨幼苗生长发育的影响。在拮抗作用中,竞争位点在某种程度上可视为复合污染拮抗作用的直接形成原因,此竞争既包括土壤胶体上吸附位点的竞争,又包括植物特定组织器官上结合位点的竞争^[6]。

3.2 Cd-Pb-Zn 复合胁迫对滇杨 Cd 富集转运的交互作用

重金属复合胁迫对滇杨 Cd 富集与转运的影响效应因重金属复合类型的不同而存在差异。本研究观察到 Cd-Pb 复合胁迫时 Pb 可显著增加滇杨茎中 Cd 含量以及 Cd 富集系数,而 Cd-Zn 复合胁迫时 Zn 则可显著降低滇杨根、茎、叶中 Cd 含量和 Cd 富集系数,说明在滇杨 Cd 富集时, Pb×Cd 呈现协同效应, Zn×Cd 呈现拮抗效应,当 Cd-Pb-Zn 三者共同胁迫时, Pb×Zn×Cd 仍呈现拮抗效应,原因可能是 Zn 对 Cd 的拮抗效应大于 Pb×Cd 的协同效应。在土壤生态系统中, Cd、Pb、Zn 会同时竞争土壤无机胶体与有机胶体上的阳离子交换吸附位点,当三者共存时, Pb²⁺ 与吸附位结合的牢固程度较单一污染时增强,而 Cd²⁺ 和 Zn²⁺ 较单一污染时减弱,解吸率大小为 Zn>Cd>Pb^[30],表明 Pb 会优先占据土壤吸附位点并促使 Cd 解吸到土壤溶液中从而更易于植物吸收,故 Pb×Cd 在 Cd 富集时表现出协同促进,与之相反, Zn 的存在则降低了 Cd 的生物有效性,进而抑制植物对 Cd 的吸收, Zn×Cd 在 Cd 富集时表现为拮抗抑制。另外, Zn 是植物生长所必需的营养元素,而 Cd、Pb 作为植物非必需的有毒元

素,主要通过必需或有益元素的转运体被吸收,Cd的吸收往往需要借助Zn、Mn、Fe(II)等二价阳离子的转运体完成^[31],如OsZIP5、OsZIP9锌转运蛋白^[32]。当土壤中Zn浓度增加时,其竞争根细胞上转运子结合位点的能力相应增加,Cd与转运子结合能力则相应降低,Cd吸收量亦相应减少,故Zn×Cd在滇杨Cd富集时呈现拮抗效应。

彭玲^[11]有关日本榉木的研究表明,Pb不利于Cd在日本榉木根中的富集,但能促进茎、叶中Cd的吸收,Pb×Cd在根中表现为拮抗,在茎叶中表现为协同,Zn×Cd对Cd富集则表现为拮抗效应,与本研究结果一致,但在Cd-Pb-Zn复合胁迫时,Pb和Zn的加入对Cd在日本榉木体内的吸收富集起促进作用,Cd×Pb×Zn表现为协同效应的结果与本研究不同,说明Cd-Pb-Zn复合胁迫的交互作用较为复杂,其交互效应可能因植物种类和作用器官的不同而存在差异,而重金属胁迫浓度的化学计量比可能是产生不同交互效应的重要原因^[33-34],具体作用机制有待进一步研究。

此外,相同的复合污染对不同的指标也可能产生不同的效应^[35]。在本研究中,Cd由土壤向滇杨体内富集时,Zn×Cd表现为拮抗抑制,而Cd在滇杨体内转运时,Zn×Cd表现为协同促进,原因是Cd与Zn具有相同的价态和近似相同的离子半径,二者在植物体内运输时可能共用细胞质上的同一个转运子,Zn竞争转运子结合位点时可导致Cd的移动性增强,从而促使Cd从根部向地上部转移^[36]。周启星等^[37]有关水稻的研究表明,Zn×Cd在Cd富集(根部)、Cd转运(叶部)时均表现为加和效应,说明Cd-Zn复合污染对重金属积累的影响不是单一的加和、协同或拮抗效应,它与植物的类型以及作用部位有关^[38-39],同时还受土壤重金属复合方式以及土壤理化性质的影响^[40]。通常,土壤pH值越低,重金属生物有效性则越高,植物越容易吸收、积累重金属^[41],而土壤有机质含量越高,与重金属的络合作用越强,土壤中易被植物吸收的交换态重金属含量则越低,越不利于重金属的吸收与积累^[42]。冗余分析的结果亦表明土壤pH值、土壤有机质与土壤交换态重金属含量呈负相关关系。此外,磷酸盐含量亦会对重金属富集、转运过程产生影响,原因是磷酸盐极易与土壤以及植物体内重金属形成沉淀从而降低重金属的移动性和有效性,进而影响植物对重金属的富集与转运。

在滇杨-土壤互作体系中,植物应答重金属胁迫时亦会对土壤性质产生影响。冗余分析的结果表明,

土壤pH值、有机质、有效磷与滇杨Cd富集指标呈显著负相关关系,说明滇杨Cd富集量的增多会伴有土壤pH值的降低以及有机质、有效磷含量的减少。富集重金属能力强的植物,往往可以通过释放特异的根系分泌物来降低土壤pH值以促进植物对重金属的活化和吸收^[43]。土壤有效磷的减少,一方面是有有效磷与土壤重金属形成难溶态磷所致,另一方面可能是植物增强了对磷酸盐的吸收以降低重金属对其自身的伤害,但具体机制有待进一步验证。

4 结论

(1)滇杨幼苗在单一Cd和Cd-Pb、Cd-Zn复合胁迫时表现出较强耐受性,在Cd-Pb-Zn复合胁迫时耐受性最低且生物量显著下降;滇杨更适宜修复Cd、Pb、Zn含量分别低于50、500、500 mg·kg⁻¹的单一Cd污染或Cd-Pb、Cd-Zn复合污染的土壤。

(2)与单一Cd胁迫相比,Cd-Pb胁迫下,滇杨茎中Cd含量显著提高,根、叶中无显著变化,Pb与Cd仅在茎中产生协同效应;Cd-Zn胁迫下,滇杨根、茎、叶中Cd含量以及Cd积累量较单一Cd胁迫显著降低,Zn与Cd产生拮抗效应;Cd-Pb-Zn复合胁迫时,根、茎、叶中Cd含量以及茎、叶中Cd积累量和总积累量均显著降低,Pb×Zn复合对Cd产生拮抗效应。

(3)从富集系数看,茎、地上部富集系数以及总富集系数均表现出Pb×Cd的协同效应,而Zn×Cd均表现出拮抗效应,当Cd-Pb-Zn共同胁迫时,Pb×Zn对Cd富集亦产生拮抗效应。从转运系数看,两种重金属胁迫时,Pb×Cd、Zn×Cd均表现出协同效应,而Cd-Pb-Zn共同胁迫时,Pb×Zn对Cd转运产生拮抗效应。

参考文献:

- [1] 李梓萌,李肖乾,张文慧,等. 重金属复合污染对生物影响的研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(11):3331-3343. LI Z M, LI X Q, ZHANG W H, et al. Research progress on the effects of heavy metal compound pollution on organisms[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(11): 3331-3343.
- [2] 林晓燕,唐彪,熊云武,等. 铅锌矿区土壤重金属含量及木本植物吸收特征[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(18):4656-4659. LIN X Y, TANG B, XIONG Y W, et al. Heavy metal concentrations in soils and woody plants absorption characteristics around lead/zinc mineland[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(18):4656-4659.
- [3] 张昭昱,文一,刘伟江,等. 四川省某铅锌矿尾矿库周边环境重金属污染特征[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(6):105-110. ZHANG Z Y, WEN Y, LIU W J, et al. Polluted characteristics of heavy metals in surrounding environment near a Pb-Zn mine tailing in Sichuan Prov-

- ince[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(6):105-110.
- [4] 张德刚,袁寒,刘艳红. 云南锡矿尾矿库土壤肥力特征与重金属污染分析[J]. 西南农业学报, 2017, 30(5):1158-1161. ZHANG D G, YUAN H, LIU Y H. Analysis of soil heavy metal pollution and fertility properties in tin tailings storehouse of Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(5):1158-1161.
- [5] 蒋旭升,刘杰,李海翔,等. 复垦铅锌矿尾矿库的植被恢复和基质演变[J]. 环境工程, 2021, 39(12):220-226. JIANG X S, LIU J, LI H X, et al. Vegetation restoration and substrate amendment of a reclaimed lead-zinc mine tailings pond[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(12):220-226.
- [6] 刘孝敏,赵运林,鹿瑞锐. 重金属复合污染植物修复的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(10):214-218. LIU X M, ZHAO Y L, TUO R R. Research progress in phytoremediation of soil polluted by heavy metals[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(10):214-218.
- [7] LIU X L, ZHANG S Z, SHAN X Q, et al. Combined toxicity of cadmium and arsenate to wheat seedlings and plant uptake and antioxidant enzyme responses to cadmium and arsenate co-contamination[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68(2):305-313.
- [8] CAI Y M, XU W B, WANG M E, et al. Mechanisms and uncertainties of Zn supply on regulating rice Cd uptake[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253:959-965.
- [9] 于静波. Cd、Pb及其复合胁迫对樟树生理特性的影响[D]. 福州:福建农林大学, 2012:51-52. YU J B. Effects of Cd/Pb and their compound stress on physiological characteristics of *Camphor*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012:51-52.
- [10] 朱秀红,程红梅,季柳洋,等. 镉、铅及其复合胁迫下白花泡桐幼苗的生理及富集特征[J]. 生物工程学报, 2021, 37(7):2463-2473. ZHU X H, CHENG H M, JI L Y, et al. Physiological and enrichment characteristics of *Paulownia fortune* seedlings under zinc, cadmium and their combined stress[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2021, 37(7):2463-2473.
- [11] 彭玲. 镉铅锌复合污染下日本榉木的耐性特征及重金属富集研究[D]. 天津:天津理工大学, 2016:29, 33. PENG L. Tolerance characteristics and heavy metal accumulation in *Aralia elata* var. *inermis* under Cd, Pb and Zn combined pollution[D]. Tianjin:Tianjin University of Technology, 2016:29, 33.
- [12] 何承忠,车鹏燕,周修涛,等. 滇杨基因资源及其研究概况[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(1):83-88, 94. HE C Z, CHE P Y, ZHOU X T, et al. A survey of research progress on gene resources of *Populus yunnanensis*[J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2010, 30(1):83-88, 94.
- [13] JIANG H, KORPELAINEN H, LI C Y. *Populus yunnanensis* males adopt more efficient protective strategies than females to cope with excess zinc and acid rain[J]. *Chemosphere*, 2013(91):1213-1220.
- [14] PENG S, WU L, SEYLER B C, et al. The combined effects of Cu and Pb on the sex-specific growth and physiology of the dioecious *Populus yunnanensis*[J]. *Environmental Research*, 2020, 184:109276.
- [15] 郑武扬,王艳霞,郑雁方,等. 镉、铅胁迫对滇杨(*Populus yunnanensis*)幼苗生长及其光合生理的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(10):1331-1340. ZHENG W Y, WANG Y X, ZHENG Y F, et al. Effects of cadmium and lead stress on growth and photosynthetic physiology of *Populus yunnanensis* seedlings[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(10):1331-1340.
- [16] 张健琳,瞿明凯,陈剑,等. 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[J]. 环境科学, 2021, 42(9):4414-4421. ZHANG J L, QU M K, CHEN J, et al. Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in southwest China [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9):4414-4421.
- [17] PENG S M, WU L R, SEYLER B C, et al. The combined effects of Cu and Pb on the sex-specific growth and physiology of the dioecious *Populus yunnanensis*[J]. *Environmental Research*, 2020, 184:109276.
- [18] LIU D, ZHENG K Y, WANG Y, et al. Harnessing an arbuscular mycorrhizal fungus to improve the adaptability of a facultative metallophytic poplar(*Populus yunnanensis*) to cadmium stress: Physiological and molecular responses[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424:127430.
- [19] 易嘉欣,马晓雨,孙国语,等. 铅锌复合胁迫对小黑杨、黑青杨生长及生理的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(4):15-20. YI J X, MA X Y, SUN G Y, et al. Characteristics of lead-zinc composite stress on the growth and physiological response of *Populus simonii*×*P. nigra* and *P. euramericana* 'N3016'×*P. ussuriensis*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(4):15-20.
- [20] 彭维新,庄玉婷,梁智淇,等. 小叶榕对土壤铅镉污染的抗性和修复潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8):1707-1717. PENG W X, ZHUANG Y T, LIANG Z Q, et al. Resistance and remediation potential of *Ficus microcarpa* to Pb and Cd pollution in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8):1707-1717.
- [21] 张杏锋,吴萍,冯健飞,等. 超富集植物与能源植物间作对Cd、Pb、Zn累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7):1481-1491. ZHANG X F, WU P, FENG J F, et al. Effects of intercropping on Cd, Pb, and Zn accumulation using hyperaccumulators and energy plants [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7):1481-1491.
- [22] 胡慧蓉,田昆. 土壤学实验指导教程[M]. 北京:中国林业出版社, 2012:48-87. HU H R, TIAN K. Experiment tutorial of soil science [M]. Beijing:China Forestry Press, 2012:48-87.
- [23] 刘艳丽,吴凤霞,徐莹,等. 杨树修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 林业科学, 2012, 48(9):139-144. LIU Y L, WU F X, XU Y, et al. Research progress in the remediation of heavy metal contaminated soil with populus[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(9):139-144.
- [24] 李晓宇. 杨树修复土壤重金属污染研究进展[J]. 辽宁林业科技, 2021(4):59-61. LI X Y. Research progress in the remediation of soil heavy metal pollution through poplar plantations[J]. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 2021(4):59-61.
- [25] 温瑀,穆立蕾. 土壤铅、镉胁迫对4种绿化植物生长、生理及积累特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):234-239. WEN Y, MU L Q. Effects of soil Pb, Cd stress on the growth, physiological and accumulating characteristics of four ornamental trees[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5):234-239.
- [26] 李高钰. Cd、Pb单一及复合污染对银杏幼苗生长及银杏黄酮含量的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2019:15-25. LI G Y. Effects of single and combined pollution of Cd, Pb on the growth of *Ginkgo bi-*

- loba seedlings and the content of flavonoids in *Ginkgo biloba* L.[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019: 15-25.
- [27] 周强英, 黄泽梅, 陈瑶, 等. 秋枫对 Pb 和 Cd 复合胁迫的耐受及累积特性[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(7): 42-46. ZHOU Q Y, HUANG Z M, CHEN Y, et al. Tolerance and accumulative characteristics of *Bischofia javanica* under combined stresses of Pb and Cd[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 45(7): 42-46.
- [28] 陈筱圆. 铅锌胁迫对假苹婆苗木生长和生理特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2021: 12-18. CHEN X Y. Research on the response of *Sterculia lanceolata* seedlings to Pb and Zn[D]. Nanning: Guangxi University, 2021: 12-18.
- [29] 赵胡, 李裕红. 植物对重金属耐性机理的研究进展[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2008(3): 35-40. ZHAO H, LI Y H. Research advances on the mechanisms of heavy metal tolerance in plants [J]. *Journal of Fuyang Teachers College (Natural Science)*, 2008(3): 35-40.
- [30] 宋菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 土壤中重金属镉锌铅复合污染的研究[J]. 环境科学学报, 1996(4): 431-436. SONG F, GUO Y W, LIU X Y, et al. Study on the combined pollution of cadmium, zinc and lead in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996(4): 431-436.
- [31] ZHAO F J, TANG Z, SONG J J, et al. Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation and crop improvement for safer food[J]. *Molecular Plant*, 2022, 15(1): 27-44.
- [32] TAN L T, QU M M, ZHU Y X, et al. Zinc transporter5 and zinc transporter9 function synergistically in zinc / cadmium uptake[J]. *Plant Physiology*, 2020, 183: 1235-1249.
- [33] 宗良纲, 丁园. 土壤重金属(Cu Zn Cd)复合污染的研究现状[J]. 农业环境保护, 2001(2): 126-129. ZONG L G, DING Y. Present investigation on synergism of heavy metals copper, zinc and cadmium in soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001(2): 126-129.
- [34] 赵晓祥, 冯璐, 王宇晖. 锌、镉单一及复合胁迫下番茄幼苗生理响应及联合毒性的研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 1176-1184. ZHAO X X, FENG L, WANG Y H. Physiological responses and joint toxicity of tomato seedlings under single and combined stress of zinc and cadmium[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(3): 1176-1184.
- [35] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. Cd、Zn 交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 470-479. GUO J M, YANG J X, YANG J, et al. Interaction of Cd and Zn affecting the root morphology and accumulation of heavy metals in *Sedum aizoon*[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(1): 470-479.
- [36] 王吉秀, 祖艳群, 李元. 镉锌交互作用及生态学效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊1): 256-260. WANG J X, ZU Y Q, LI Y. The interaction of cadmium and zinc and its ecological effects[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl1): 256-260.
- [37] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复合污染和生态效应[J]. 应用生态学报, 1994(4): 438-441. ZHOU Q X, WU Y Y, XIONG X Z. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994(4): 438-441.
- [38] 李忠海, 王海燕, 梁文彬, 等. 土壤镉、锌、铅复合污染对芹菜的影响[J]. 中南林学院学报, 2002(1): 36-39. LI Z H, WANG H Y, LIANG W B, et al. Effects of the compound pollution of soil Cd, Zn and Pb on celery in red soil[J]. *Journal of Central South Forestry College*, 2002(1): 36-39.
- [39] RAU S, MIERSCH J, NEUMANN D, et al. Biochemical responses of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* to Cd, Cu, Pb and Zn determined by chlorophyll fluorescence and protein levels[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2007, 59(3): 299-306.
- [40] NING Y Z, ZHANG X M, LI B Z, et al. Distribution of Cd and Cu fractions in Chinese soils and their relationships with soil pH: A meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2019, 11(2): 337.
- [41] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH 对土壤及其组分吸附和解吸镉的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 320-324. ZHANG H M, XU M G, LÜ J L, et al. A review of studies on effects of pH on cadmium sorption and desorption in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(suppl): 320-324.
- [42] 刘霞, 刘树庆. 土壤重金属形态分布特征与生物效应的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006(增刊): 407-410. LIU X, LIU S Q. Progress in research on relationship between heavy metal speciation and bioavailability in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006(Suppl): 407-410.
- [43] 闫研, 李建平, 赵志国, 等. 超富集植物对重金属耐受和富集机制的研究进展[J]. 广西植物, 2008(4): 505-510. YAN Y, LI J P, ZHAO Z G, et al. Advances in the mechanisms of heavy metal tolerance and accumulation in hyperaccumulators[J]. *Guihaia*, 2008(4): 505-510.

(责任编辑:叶飞)