

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20231229004

王慧, 李长爱, 李亚亮, 等. 高浓度镉(Cd)、铅(Pb)胁迫对铜钱草生长和生理生化参数的影响[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 440-450

WANG H, LI C A, LI Y L, et al. Effects of high concentrations of cadmium and lead stress on growth, physiological and biochemical parameters in *Hydrocotyle vulgaris* L. [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025, 20(1): 440-450

高浓度镉 (Cd)、铅 (Pb) 胁迫对铜钱草生长和生理生化参数的影响

王慧^{1,2}, 李长爱¹, 李亚亮¹, 宁丽丽¹, 刘玲^{1,2,*}, 黄荣¹

1. 淮南师范学院, 淮南 232038

2. 安徽省高等学校资源与环境生物技术重点实验室, 淮南 232038

收稿日期: 2023-12-29 录用日期: 2024-05-21

摘要: 为探究高浓度镉(Cd)、铅(Pb)胁迫下铜钱草生理生化指标变化及其对重金属污染水体的修复潜力, 采用水培法, 研究了不同浓度 Cd(5、20 mg·L⁻¹)、Pb(50、200 mg·L⁻¹)单一及其复合暴露对铜钱草的生物量、生理生化指标和镉铅累积的影响。结果表明, 各处理组铜钱草的生理生化指标基本随 Cd、Pb 浓度的升高而升高; 50 mg·L⁻¹ Pb 胁迫下铜钱草对 Pb 的抗逆性最高, 同时 5 mg·L⁻¹ Cd 暴露时铜钱草对水体 Cd 的净化率最高; 5 mg·L⁻¹ Cd 与 50 mg·L⁻¹ Pb 复合后, Pb 能够缓解 Cd 对铜钱草的氧化损伤; 5 mg·L⁻¹ Cd 与 200 mg·L⁻¹ Pb 复合后, 铜钱草对水体中 Pb 的去除率达到峰值。总体上, Cd 的植物毒性明显高于 Pb。铜钱草具有吸收累积水体铅镉的潜力, 可用于净化和修复铅镉污染水体。

关键词: 重金属污染; 铜钱草; 植物修复; 生理生化指标

文章编号: 1673-5897(2025)1-440-11 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Effects of High Concentrations of Cadmium and Lead Stress on Growth, Physiological and Biochemical Parameters in *Hydrocotyle vulgaris* L.

WANG Hui^{1,2}, LI Changai¹, LI Yaliang¹, NING Lili¹, LIU Ling^{1,2,*}, HUANG Rong¹

1. Huainan Normal University, Huainan 232038, China

2. Key Laboratory of Resources and Environmental Biotechnology of Anhui Province Higher Education Institutions, Huainan 232038, China

Received 29 December 2023 accepted 21 May 2024

Abstract: In order to investigate the changes of physiological and biochemical parameters and potential for remediating heavy metal-polluted water in *Hydrocotyle vulgaris* L. exposed to high concentrations of cadmium (Cd) and lead (Pb), a study was conducted to investigate the effects of Cd (5, 20 mg·L⁻¹), Pb (50, 200 mg·L⁻¹) and their combination on biomass, physiological and biochemical indices as well as Cd and Pb accumulation in *Hydrocotyle vulgaris* through hydroponic cultivation. Results showed that the physiological and biochemical indices generally increased with the increase of Cd and Pb in each treatment. The plants exhibited the highest tolerance to Pb under 50 mg·L⁻¹ Pb stress, while the highest purifying rate of Cd by the plant from the polluted water was shown when they were exposed to 5 mg·L⁻¹ Cd. Pb alleviated the oxidative damage due to Cd stress in the plant

基金项目: 淮南师范学院校级重点项目(2023XJZD020); 淮南师范学院校级一般项目(2023XJYB035)

第一作者: 王慧(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物逆境生理生态学, E-mail: 1515608834@qq.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: lliuu494@sina.com

under the combination of $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd and $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb. Moreover, the purifying rate of Pb reached a peak in the plants exposed to the combined contamination by $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd and $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb. In general, the phytotoxicity induced by Cd was obviously higher than that by Pb stress in *Hydrocotyle vulgaris*. *Hydrocotyle vulgaris* possesses the potential to absorb and enrich Pb and Cd from the polluted water, suggesting its competence for purification and remediation of Pb and Cd combined pollution of water.

Keywords: heavy metal pollution; *Hydrocotyle vulgaris* L.; phytoremediation; physiological and biochemical parameters

0 引言

随着人口增长和工业化进程加快,重金属、有机物以及营养元素等污染物通过生活污水、工业废水等形式进入河流、湖泊等地表水体,引起水质恶化、土壤污染,对动植物的生长发育造成严重不良影响。重金属水污染具有隐蔽性、不可逆性和长期性等特点,重金属在植物体内大量积累,可随食物链传递危害人类健康^[1-2]。其中,重金属一般是指镉(Cd)、铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu)等元素^[3],Pb和Cd都是常见的“五毒”重金属,在水环境中广泛分布^[4-5]。Cd污染是目前环境中最为严重的问题之一,在水体和土壤中的毒性很高,且很难被除去^[6-7]。与之相比,Pb的迁移性较高,对动植物有较强的潜在毒性。当Cd、Pb在植物体内积累到一定量时,会导致叶片的气孔关闭,进而影响植物的光合作用,抑制植物的正常生长发育,甚至导致植株死亡^[8-9]。另外,当Cd、Pb进入植物体内,会破坏植物体的器官和组织,扰乱细胞的正常功能,影响植物的生长代谢,干扰根系对养分的吸收和转运^[10]。

植物生态修复技术是一种利用水生植物和环境中的微生物共同作用对重金属进行净化的水体重金属污染治理技术,具有价格低廉、效果显著且具有可持续性的特点^[11]。研究表明,植物可通过吸附或吸收作用、协同微生物降解等方式直接或间接降低水体中的重金属浓度^[12]。不同植物对不同重金属的富集能力不同,陈洁宜等^[13]的研究对广东大宝山矿8种优势植物进行调查分析,发现芒草和乌毛蕨具有土壤重金属污染固定修复能力;WAN等^[14]的研究分析了湖南省矿山植物的重金属含量,发现柔毛堇菜对Cd、Pb和砷(As)具有超富集能力;而美人蕉对Pb和铬(Cr)有着较好的富集能力^[15]。Cd与Pb对水环境的影响很大,目前关于筛选何种植物净化水体中重金属Cd、Pb污染效果的研究相对缺乏。

铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris* L.)为伞形科多年生草本植物,叶片薄、圆肾形、耐水湿、根系发达且适

应性强,生长在河沟边及阴湿环境,分布广泛。研究发现铜钱草具有较好的净化作用,可有效去除城市污水中的氮磷等营养盐^[16];此外,铜钱草作为观赏性植物常被应用于生态沟渠^[17],提供一定的观赏价值。目前,对于铜钱草的研究主要集中在观赏价值以及氮磷营养盐的吸附等方面,但对于水体中重金属的净化效果的研究相对较少。

本研究以湿生植物铜钱草为研究对象,在高浓度Cd、Pb胁迫下,研究植株的生理特征及对重金属的吸收效果,探究其在Cd、Pb胁迫下的生理耐受机制,为净化水体中的重金属提供植物生态修复理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

铜钱草,购于福建新中闽园艺发展有限公司。

1.2 实验设计

本实验采用水培法,首先,挑选长势良好、大小一致的铜钱草植株洗净后,在装有清水的培养瓶中进行适应性培养,周期为7 d。然后选择株高18 cm、叶片直径3 cm的植株,移入200 mL的培养瓶中,每个培养瓶中移入20棵铜钱草,并将相应浓度的 CdCl_2 (中国上海阿拉丁生化科技股份有限公司,分析纯)、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (中国南京化学试剂股份有限公司,分析纯)与Hoagland营养液混合均匀后加入培养瓶中。将挑选处理的植株分别进行如下处理:CK(Hoagland营养液)、T1($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)、T2($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)、T3($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb)、T4($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb)、T5($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb)、T6($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb)、T7($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb)、T8($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb),每个处理重复5次。每天用注射器抽打培养瓶中溶液,使溶液充分混合,减少重金属离子的沉淀。处理7 d后,取出植株,将根系浸泡于 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA Na(中国上海碧云天生物技术股份有限公司,分析纯)溶液30 min,再用去离子水洗净以去除螯合附着在根系

表面的 Cd,随后对样品进行检测。

1.3 指标测定及方法

生物量的测定:去离子水洗净植株,滤纸吸干表面水分,用剪刀剪下植株的根、茎、叶,烘箱调至 105 ℃,杀青 20 min,后调至 80 ℃烘干至恒质量,用电子天平(AX224ZH/E,中国奥豪斯仪器(上海)有限公司)测定根、茎、叶各部位生物量^[18]。

生理指标的测定:氮蓝四唑法测超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,愈创木酚法测过氧化物酶(peroxidase, POD)活性,硫代巴比妥酸法测丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量^[19],乙醇浸提法^[20]测定叶绿素含量,蒽酮比色法测可溶性糖含量。分别称取植物材料 0.5 ~ 1.0 g(除可溶性糖含量指标测定所用材料为植物干质量,其余都是植物鲜质量),在研钵中加入相对应的试剂研磨成匀浆,转移到离心管中进行离心,取上清弃沉淀,按照不同实验要求,制得所需的溶液。利用分光光度计(UV-1600,上海美谱达仪器有限公司,中国)在不同吸光度下(超氧化物歧化酶活性:560 nm;过氧化物酶活性:470 nm;丙二醛:450 nm、532 nm;叶绿素:649 nm、665 nm;可溶性糖:485 nm)测定 OD 值,将测得的数值代入相对应的公式,计算各个生理指标的含 量^[21]。

植株中 Cd、Pb 质量浓度的测定:利用硝酸和高氯酸消化法进行消解,石墨炉原子吸收分光光度法测定幼苗各营养器官的 Cd、Pb 含量^[22]。将烘干后的植物样品粉碎,称 0.3000 g 粉末,加入 10 mL 浓硝酸和 5 mL 高氯酸,过夜后在电炉上高温消解,消解液滤膜过滤,用石墨炉原子吸收光谱仪(novAA

400P,德国 Analytikjena 公司)测定 Cd、Pb 含量,Cd、Pb 的检出限分别为 0.01 μg·L⁻¹和 0.2 μg·L⁻¹,加标回收率分别为 94.7%、96.2%(镉与铅的标准样均为 1 000 mg·L⁻¹,购于瀚时恒业原子吸收耗材有限公司,中国)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021、SPSS 23.0 进行数据处理和单因素方差分析,经 Duncan 法对各处理间的差异性进行多重比较,结果均以“平均值±标准差”表示。使用 Origin 2021 软件对统计结果作图。

2 结果

2.1 Cd、Pb 胁迫对铜钱草生物量的影响

植物的生物量可以一定程度上反映植物对逆境胁迫的适应性^[23]。由表 1 可知,在 Cd、Pb 胁迫下,铜钱草的生物量存在显著差异。随着 Cd 和 Pb 胁迫浓度的增加,植株各部位的干质量和整株总干质量整体呈先升高后降低的趋势。与对照相比,Cd 单一处理下,植物的生物量随浓度的增加表现为“低促高抑”的现象,且低浓度 Cd 处理下,铜钱草的生物量均高于对照组,而高浓度处理组则均低于对照组。Pb 单一处理下,随浓度的增加,生物量虽下降,但都高于对照组。Cd、Pb 复合处理下,与单一的 Cd、Pb 胁迫相比,同浓度的复合胁迫生物量呈下降趋势。T5 处理下,铜钱草的生物量基本高于 T1 处理组,说明低浓度的 Pb 能够部分缓解 Cd 对铜钱草的毒害作用。另外,低浓度的 Pb 单一处理下,铜钱草的生物量显著高于其他各处理组,高浓度 Cd、Pb 复合胁迫下,植株的生物量均明显低于其他处理组。

表 1 镉、铅胁迫对植株生物量的影响

Table 1 Effects of Cd and Pb stress on plant biomass

处理 Treatments	根干质量/g Root dry weight/g	茎干质量/g Stem dry weight/g	叶干质量/g Leaf dry weight/g	总干质量/g Total dry weight/g
CK	0.250±0.010 d	0.520±0.010 d	0.270±0.020 b	1.037±0.021 d
T1	0.280±0.010bc	0.580±0.010 b	0.273±0.012 b	1.113±0.006 b
T2	0.203±0.012 e	0.477±0.012 e	0.183±0.012 e	0.863±0.025 f
T3	0.343±0.015 a	0.630±0.010 a	0.297±0.012 a	1.267±0.021 a
T4	0.280±0.020bc	0.570±0.010bc	0.270±0.010 b	1.120±0.040 b
T5	0.296±0.012 b	0.587±0.006 b	0.243±0.015 c	1.126±0.012bc
T6	0.260±0.010 cd	0.557±0.012 c	0.217±0.012 d	1.034±0.015 cd
T7	0.213±0.015 e	0.520±0.010 d	0.223±0.012 cd	0.960±0.020 e
T8	0.180±0.010 f	0.487±0.015 e	0.113±0.006 f	0.773±0.015 g

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著性($P<0.05$);下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$); the same below.

当重金属污染浓度在一定范围内($\text{Pb} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Cd} \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,铜钱草长势良好,植物的生物量相对于 CK 会增加,且在 Pb 胁迫下其促进作用更为显著,而 Cd 胁迫下的促进作用较弱;当胁迫浓度超过一定范围($\text{Cd} > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,铜钱草的生物量会受到明显的抑制,植物表现出受害状态,叶片萎缩,根系变黑甚至枯死。在 Cd 和 Pb 复合胁迫下,低浓度的 Pb ($\text{Pb} \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)能够抑制 Cd 的毒害,当 Pb 的浓度超过一定范围($\text{Pb} > 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,会加重 Cd 对植物体的毒害。

2.2 Cd、Pb 胁迫对铜钱草丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛含量的高低可表明植物遭受毒害的强度以及对逆境条件下的反应能力。由图 1 可以看出,铜钱草叶片的丙二醛含量随着 Cd、Pb 胁迫浓度的增加呈现逐渐上升的趋势,Cd 处理组丙二醛含量均高于对照组。Cd 单一处理组丙二醛含量显著高于 Pb 单一处理组,说明该浓度下的 Cd 对铜钱草的毒害程度大于 Pb 胁迫处理组,单一 Pb 胁迫对铜钱草的危害较小,50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 处理下丙二醛含量为 22.503 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ (增幅为 11.77%)。低浓度 Cd、Pb 复合胁迫下,植物根系丙二醛含量显著低于 T1 处理组,高于 T3 处理组。与 CK 相比,T7、T8 处理下,丙二醛含量分别为 28.507 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 、31.763 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,增幅为 41.59%、57.77%。

2.3 Cd、Pb 胁迫对铜钱草超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

由图 2 可知,SOD 活性随着 Cd、Pb 胁迫浓度升高而呈上升趋势,除 T7 和 T8 处理组外呈下降趋势,且所有处理组 SOD 活性均高于 CK。与 CK 相比,T5、T6 处理下 SOD 活性达到峰值,增幅为 25.36% 和 34.52%。Pb 单一处理下 SOD 活性较 CK 接近,与单一的 Cd 胁迫相比,差异较为显著,其活性为单一 Cd 胁迫下降 12.50% 和 12.55%。在单一的 Cd、Pb 胁迫下,铜钱草的胁迫程度要明显低于复合胁迫。

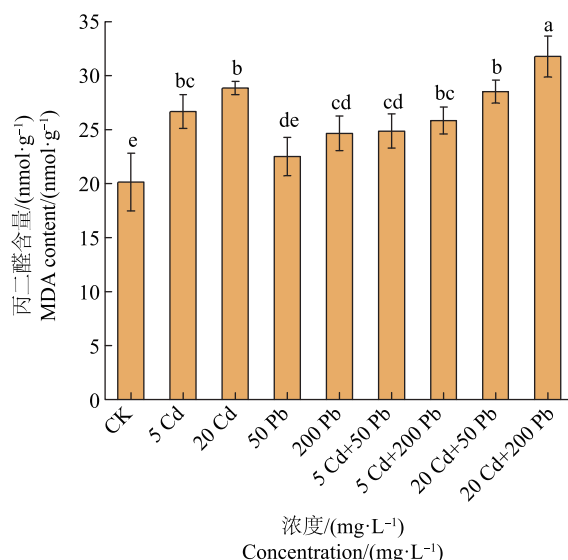
2.4 Cd、Pb 胁迫对铜钱草过氧化物酶(POD)活性的影响

由图 3 可知,Cd、Pb 单一与复合处理下,铜钱草植物 POD 活性与 SOD 活性变化趋势基本一致,都在 T5、T6 复合处理组达到峰值,POD 活性分别为 61.29 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ 、62.74 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,较 CK 组显著增加 41.19%、44.53%,但 POD 活性变化显著性较大。50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 处理时,与 CK 相比,铜钱草 POD 活性变

化显著性不大。可能是该浓度下的 Pb 对铜钱草 POD 活性影响较小,并没有造成很大程度的逆境胁迫。

2.5 Cd、Pb 胁迫对铜钱草光合色素含量的影响

植物叶片的叶绿素含量能反映植物光合作用能力的强弱^[24]。由图 4 可知,Cd、Pb 胁迫下叶绿素含



注:横坐标轴上的所有数字单位均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (如 5 Cd 表示镉的浓度为 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$);下同。

图 1 镉、铅胁迫下铜钱草丙二醛(MDA)含量

Fig. 1 The malondialdehyde (MDA) content of *Hydrocotyle vulgaris* L. under Cd and Pb stress

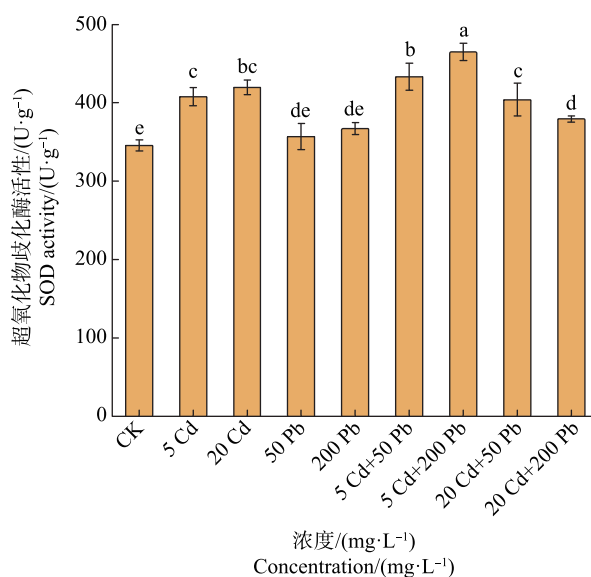


图 2 镉、铅胁迫下铜钱草超氧化物歧化酶(SOD)活性

Fig. 2 The superoxide dismutase (SOD) activity of *Hydrocotyle vulgaris* L. under Cd and Pb stress

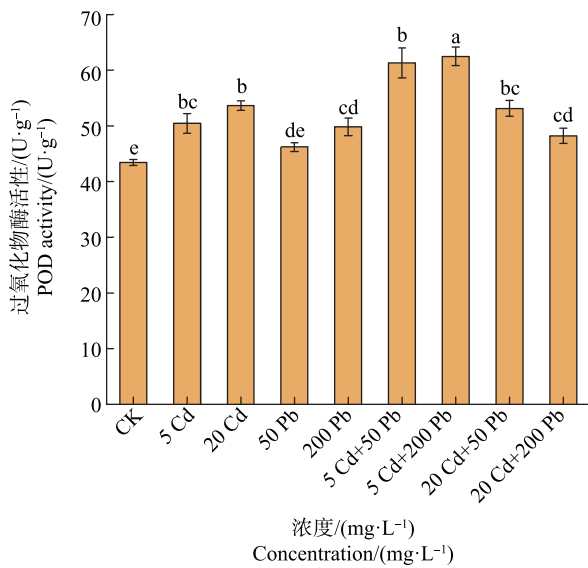


图3 镉、铅胁迫下铜钱草过氧化物酶 (POD) 活性

Fig. 3 The peroxidase (POD) activity of *Hydrocotyle vulgaris* L. under Cd and Pb stress

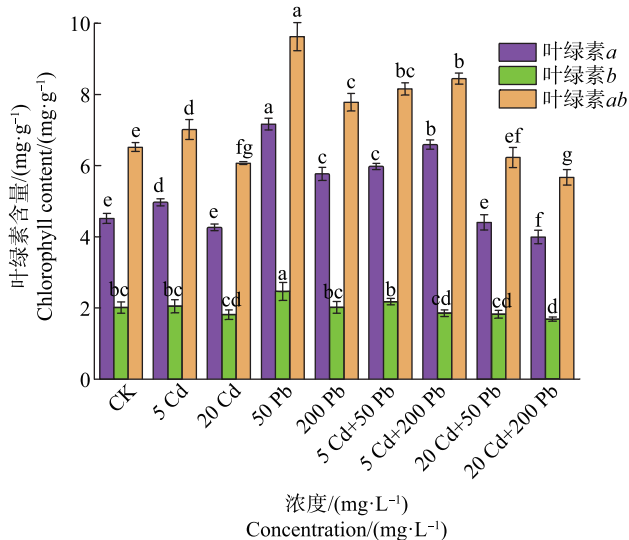


图4 镉、铅胁迫下铜钱草光合色素含量

Fig. 4 The photosynthetic pigment content of *Hydrocotyle vulgaris* L. under Cd and Pb stress

量呈先上升后下降的趋势。50 mg·L⁻¹ Pb 单一胁迫时,叶绿素 a、b 含量增长与 CK 相比变化最为显著,增幅分别为 58.72% 和 22.59%。在 T7、T8 处理时,叶绿素含量均显著低于 CK,叶绿素 a、b 含量分别为 4.403 mg·g⁻¹、1.823 mg·g⁻¹ 和 3.99 mg·g⁻¹、1.68 mg·g⁻¹,降幅分别为 2.44%、9.14% 和 11.59%、16.28%。其中,高浓度 Cd、Pb 复合胁迫时降幅程度最大,植物叶片有着一定的泛黄情况,植物生长受到胁迫。

2.6 Cd、Pb 胁迫对铜钱草可溶性糖含量的影响

植物在逆境条件下,通过提高植物体内的渗透调节物质来维持植物细胞正常的生命活动,可溶性糖是植物重要的营养成分之一,可用作能量的贮藏和传递介质,同时,也可作为判断植物抗逆性强弱的指标之一^[25]。植物在逆境条件下会通过增加可溶性糖含量来帮助自己维持水分平衡、提高细胞渗透压和保护细胞膜。由图 5 可以看出,本实验中,铜钱草可溶性糖含量随 Cd、Pb 胁迫浓度的增加而逐渐升高,且所有处理组含量均高于 CK;与 CK 相比,T8 处理下,铜钱草的可溶性糖达到峰值,为 13.893 mg·g⁻¹,增幅 67.93%。在 50 mg·L⁻¹ Pb 处理时,与 CK 相比铜钱草的可溶性糖含量为 9.753 mg·g⁻¹,增幅 17.89%,增幅量最低。

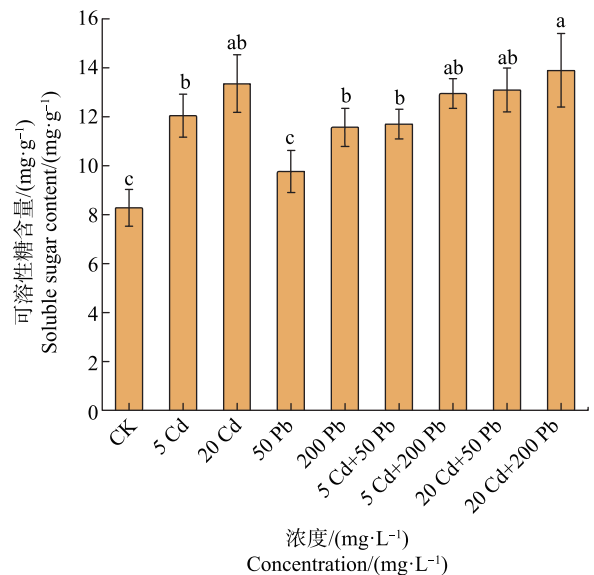


图5 镉、铅胁迫下铜钱草可溶性糖含量

Fig. 5 The soluble sugar content of *Hydrocotyle vulgaris* L. under Cd and Pb stress

2.7 铜钱草对水体中 Cd、Pb 的净化作用

铜钱草对 Cd、Pb 的吸收特性是对其对 Cd、Pb 污染水体修复潜力的重要体现^[26]。由表 2 可知,随着 Cd、Pb 胁迫浓度的升高,铜钱草体内的重金属含量也随之升高,Cd、Pb 复合胁迫对 Cd 的吸收量分别为 1.443 mg·L⁻¹(T5)、2.633 mg·L⁻¹(T6)、12.108 mg·L⁻¹(T7)和 12.330 mg·L⁻¹(T8),与 5 mg·L⁻¹ Cd 处理组相比,分别降低了 45.20%、0%、4.10% 和 2.92%。在 20 mg·L⁻¹ Cd 处理下,Cd 净化率最高(63.50%);低 Cd 低 Pb 复合胁迫处理组(T6),Cd 净化率显著小

于 5 mg·L⁻¹ Cd 单一处理组。Cd、Pb 复合胁迫时,低浓度 Cd 对 Pb 的吸收量较大,分别为 36.123 mg·L⁻¹和 178.533 mg·L⁻¹。5 mg·L⁻¹ Cd、200 mg·L⁻¹ Pb 复合胁迫处理下,Pb 净化率最高(89.00%),T7 处理组,Pb 净化率显著小于 T4 胁迫处理组。

3 讨论

关于 Cd、Pb 对植物生长和代谢的影响研究近年来已成为植物逆境生理学领域的研究热点之一^[27]。在环境中受到重金属污染胁迫,植物的生长表现会直接反映毒害程度^[28-29]。同时,这也间接反映了植物对于重金属污染环境的修复效果^[30]。本实验中,当铜钱草在 5 mg·L⁻¹ Cd、50 mg·L⁻¹ Pb 时,植株生物量与 CK 相比明显升高;随着 Cd、Pb 胁迫浓度的升高,铜钱草的生物量表现出下降的趋势。这可能是由于低浓度重金属胁迫激发了铜钱草自身防御系统,提高了新陈代谢水平,促进植物生长,所以在一定范围内铜钱草的生物量增加。这与 Pb、Cd 胁迫对枫香幼苗生长和生理特征的影响研究结果相似^[31],原因是植物应激反应造成的^[32],植物在遭受胁迫时会从外界吸收养分和能量来对抗胁迫。高浓度 Cd、Pb 胁迫打破了铜钱草自身承受能力,细胞结构和生理代谢功能被破坏,生物量显著下降,这与刘凤等^[33]对 Cd 胁迫西瓜幼苗生长的研究结果类似。研究表明,低浓度重金属胁迫有助于植物体生物量的增加,而高浓度重金属胁迫则抑制植物生长,严重时可能会造成植物死亡。

丙二醛是 1 种重要的代谢产物,在植物细胞内

具有重要的生理和生化功能。丙二醛含量的变化可以反映出植物细胞受到胁迫后的反应能力和毒害程度^[34]。在本研究中,铜钱草在 2 种重金属胁迫下,丙二醛含量总体上呈上升趋势。这一结果与王迪华等^[35]的研究结果一致。随着 Cd 浓度的升高,铜钱草所受到的毒害作用加强。可能原因是在 Cd、Pb 复合胁迫下,植株细胞内的活性氧增加,打破活性氧的代谢平衡,导致膜脂过氧化严重,膜结构遭到破坏^[36],而且高浓度 Cd、Pb 相互协作下,加速对细胞膜的破坏^[37]。这说明高浓度 Cd 胁迫会导致铜钱草细胞膜脂过氧化,增加植物受害程度。而低浓度 Pb 处理下,铜钱草叶片中丙二醛含量没有明显变化。这可能是由于此时叶片中积累的 Pb 含量较低,对细胞膜完整性的影响较小。

植物在受到不利条件时会产生大量活性氧自由基,导致植物细胞膜脂过氧化,从而对植物产生毒害^[38]。在本研究中,铜钱草在 Cd、Pb 胁迫下 SOD 和 POD 活性随胁迫浓度的升高呈上升趋势,但在高 Cd 复合处理下呈下降趋势,这与马凤仪等^[39]研究基本一致。Cd、Pb 胁迫会影响植物体内的氧化还原平衡,导致细胞膜质过氧化,引起细胞膜结构受损,细胞内的渗透调节能力下降^[40],植物自身具有一定的调节作用,通过增强抗氧化酶活性和活性氧代谢来增强自身的耐受性^[41],减少重金属对植物的损害。SOD 和 POD 能够使植物在一定程度上免受或少受活性氧的伤害,但植物自身的调控能力是有限的。因此,高浓度 Cd、Pb 胁迫下植物系统受到了明显破坏,SOD 和 POD 活性下降。

表 2 铜钱草镉、铅吸收状况变化
Table 2 Changes in Cd and Pb absorption by *Hydrocotyle vulgaris* L.

处理 Treatments	吸收的镉含量/(mg·L ⁻¹) Absorbed Cd concentration/(mg·L ⁻¹)	镉净化率/% Cd removal rate/%	吸收的铅含量/(mg·L ⁻¹) Absorbed Pb concentration/(mg·L ⁻¹)	铅净化率/% Pb removal rate/%
CK	—	—	—	—
T1	2.633±0.107 b	52.66	—	—
T2	12.700±0.197 a	63.50	—	—
T3	—	—	31.137±0.104 c	62.27
T4	—	—	148.937±0.584 b	74.47
T5	1.443±0.597 c	28.86	36.123±0.258 c	72.00
T6	2.633±0.107 b	52.66	178.533±0.777 a	89.00
T7	12.180±0.096 a	60.90	20.453±0.577 d	40.91
T8	12.330±0.451 a	61.65	137.697±0.734 b	68.69

注:“—”代表未检测出重金属含量。
Note: “—” represents no heavy metal content detected.

叶绿素含量是体现植物光合作用强弱的重要参数,间接体现植物对不良环境的适应能力。植物体内积累过量的重金属会降低叶绿素的合成效率,破坏叶绿体的微体结构,抑制光合系统活性,进而影响植物生长^[42]。本研究结果表明,铜钱草的叶绿素含量在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}$ 、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Pb}$ 时达到最大值,可能是由于铜钱草受 Pb 毒害后,需要消耗更多的能量,且有其他抗氧化酶进行协同抵抗,进而促进了光合作用,刺激了植株生长,这是铜钱草积极应对逆境胁迫的 1 种生理反应,与孙永娣等^[43]研究 Cd 胁迫下茅苍术的叶绿素含量呈先上升后下降的变化趋势的结果一致。但是,当 Cd、Pb 浓度超过植物的耐受水平时,植物生长会受到严重抑制^[44]。可能是由于高浓度 Cd、Pb 胁迫不仅导致合成叶绿素相关酶的结构改变,抑制叶绿素的合成,还改变叶绿素酶活性,加快叶绿素的分解^[45]。

植物在遭受 Cd、Pb 胁迫时体内生物膜、渗透调节物质、蛋白质等都会发生一系列的变化,影响着植株营养生长和生殖生长,甚至会导致植株死亡^[46]。可溶性糖作为渗透调节物质在植物面对胁迫时发挥着重要作用,它能够增加自身的含量以提高植物的抗逆性^[47]。在本研究中,重金属 Cd、Pb 胁迫下,铜钱草的可溶性糖呈上升趋势,这与朱红霞等^[48]研究结果不同。这种差异可能是因为铜钱草对 Pb 胁迫具有较大的抗性,能够产生大量的渗透调节物质,使其能够正常生长;另外,低浓度的 Pb 对铜钱草具有一定的促进作用,增强自身的抗逆性。与 Pb 相比,Cd 胁迫下的可溶性糖含量显著升高,这与周际海等^[49]对香樟幼苗相关的研究结果一致。因为植物在受到 Cd 胁迫时能够迅速反应,为应对不利环境,植物通过产生大量的可溶性糖为生理生化活动提供营养物质。同时,这也提高了植物细胞液的浓度,维持了植物体内水分调节,降低了细胞内的渗透势,从而保证了各种生命活动和生化反应的进行。

本研究中,低 Cd 复合 Pb 处理下,Cd 促进铜钱草对 Pb 吸收;而高 Cd 复合胁迫下,铜钱草对 Cd、Pb 的吸收都稍有下降。重金属污染对环境和生物的正常生命活动具有破坏作用^[50],而铜钱草对水体中的 Pb 和 Cd 具有较好的耐受和吸收能力。因为在重金属胁迫下,植物根系分泌的低分子量有机酸如柠檬酸、苹果酸可与重金属结合,降低重金属对植物的毒性,促进植物对重金属的吸收^[51]。但在不同的 Pb 和 Cd 浓度处理条件下,同一植物的生长情况

和重金属吸收效果是不同的,这与常宝亮等^[52]的研究结果一致。本研究在 Pb 单一胁迫下,铜钱草未受到明显的伤害,并且对水体中的 Pb 有较高的净化率。低浓度 Cd 复合 Pb 胁迫下,铜钱草对 Cd 的净化率较 Cd 单一胁迫下低,而对 Pb 的净化率较 Pb 单一处理下更高。可能是因为水体中 Cd 和 Pb 共存时由于对水体吸附位点的竞争,减少 Cd 进入植物根部的数量,产生交互作用^[53]。而 Cd 与 Pb 的浓度不同产生的交互作用也不同,胡莹等^[54]研究发现水稻根系和茎叶中的 Cd 浓度随着溶液中钒的浓度不断增加而呈现下降趋势,钒可抑制水稻对 Cd 的吸收,表现出一定的拮抗作用。

不同浓度 Cd、Pb 单一及复合胁迫下,铜钱草生理特性及生长指标均受到不同程度影响。Cd 单一胁迫下,浓度超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,铜钱草胁迫程度显著增加。Pb 单一胁迫下,铜钱草长势良好,能够通过调节自身的生长状况、渗透调节及酶活性的变化来应对一定范围内的胁迫。低浓度 Cd、Pb 复合胁迫下,能够部分缓解 Cd 对铜钱草的毒害作用。在高 Cd 复合 Pb 胁迫下,铜钱草对 Cd 的净化效果较好,但植物长势较差,这与 SARASWAT 和 RAI^[55]研究一致,当 Cd、Pb 在植物体内积累到一定量时,会导致植物生长缓慢、甚至死亡。在低 Cd 复合 Pb 作用下,铜钱草对 Pb 的净化率较高,但对 Cd 的净化率较低。因此,在利用铜钱草对重金属污染水体进行修复时,可依据水体中重金属浓度及种类等综合因素进行评估。由于本实验存在局限性,将其作为候选重金属修复水体的植物,还需在实际应用中进一步深入研究。

4 结束语

本文主要探究在高浓度 Cd、Pb 单一及复合胁迫下,铜钱草的生长生理指标变化以及对 Cd、Pb 的吸收情况,以期利用植物修复重金属污染的水体筛选出抗性好、高富集重金属的植物种类。结果表明,低浓度 Cd 与 Pb 处理下,铜钱草的长势良好,总干质量均高于对照;而高浓度 Cd 单一及复合 Pb 暴露下,铜钱草的生理生长指标基本低于对照,这说明 Cd 对铜钱草的胁迫程度高于 Pb,且二者均表现出“低浓度促进,高浓度抑制”的现象。从高浓度 Cd、Pb 单一及复合处理后铜钱草对其重金属的吸收率与净化率可知,Cd 与 Pb 复合胁迫下,铜钱草对 Cd 的净化率低于 Cd 单一处理组,而对 Pb 的净化率则表现出“低促高抑”的趋势,即低浓度 Cd 与 Pb 胁迫

处理,铜钱草对 Pb 的净化率大于 Pb 单一处理组,高度 Cd 复合处理的铜钱草对 Pb 净化率则低于 Pb 单一处理组。

通信作者简介:刘玲(1967—),女,博士,教授,主要研究方向为生态毒理学。

5 参考文献

- [1] 韩雨薇,张彦峰,陈萌,等. 沉积物中重金属 Pb 和 Cd 对河蚬的毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(4): 129-137.
HAN Y W, ZHANG Y F, CHEN M, et al. Toxicity of Pb/Cd-spiked freshwater sediments to *Corbicula fluminea*[J]. Asian journal of ecotoxicology, 2015, 10(4): 129-137.
- [2] 陈碧华,郭卫丽,孟凡茹,等. 镉胁迫对南瓜植株镉吸收积累及光合特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(12): 1-6.
CHEN B H, GUO W L, MENG F R, et al. Effects of cadmium stress on cadmium uptake accumulation and photosynthetic characteristics of pumpkin[J]. Journal of irrigation and drainage, 2020, 39(12): 1-6.
- [3] 邓灿辉,唐靖,戴志刚,等. 不同叶用黄麻种质对重金属吸附的差异及其机制分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 438-444.
DENG C H, TANG Q, DAI Z G, et al. Differential adsorption performance and mechanism of leaf-used jute germplasm for heavy metal removal[J]. Journal of agricultural resources and environment, 2020, 37(3): 438-444.
- [4] UZU G, SOBANSKA S, SARRET G, et al. Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts[J]. Environmental science & technology, 2010, 44(3): 1036-1042.
- [5] SCHRECK E, FOUCAULT Y, SARRET G, et al. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: mechanisms involved for lead[J]. Science of the total environment, 2012, 427: 253-262.
- [6] AZIMYCHETABI Z, SABOKDAST NODEHI M, KARAMI MOGHADAM T, et al. Cadmium stress alters the essential oil composition and the expression of genes involved in their synthesis in peppermint (*Mentha piperita* L.)[J]. Industrial crops and products, 2021, 168: 113602.
- [7] 宋玉婷,雷泞菲. 我国土壤镉污染的现状与修复措施[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 79-83.
SONG Y T, LEI N F. China's cadmium pollution land status and restoration measures[J]. Journal of Xichang University (natural science edition), 2018, 32(3): 79-83.
- [8] 陈旋,胡颖,孙明升,等. 外源调节物质对铅胁迫下格木幼苗生理特性的影响[J]. 林业科学, 2021, 57(2): 39-48.
CHEN X, HU Y, SUN M S, et al. Effects of exogenous regulating substances on physiological characteristics of *Erythrophleum fordii* seedlings under lead stress[J]. Scientia silvae sinicae, 2021, 57(2): 39-48.
- [9] 张博宇,滕维超. 铅胁迫对黄花风铃木幼苗生长和生理指标的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(7): 7-10, 16.
ZHANG B Y, TENG W C. Effects of lead stress on growth and physiology of *Tabebuia chrysantha* seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(7): 7-10, 16.
- [10] 薄伟,王松,康红梅,等. 铅胁迫对玉蝉花生长及生理生化的影响[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(4): 373-381.
BO W, WANG S, KANG H M, et al. Effects of lead stress on the growth and physio-biochemistry of *Iris ensata*[J]. Journal of forest and environment, 2021, 41(4): 373-381.
- [11] 迟明宏,刘敏,徐迎春,等. 水生观赏植物不同种植组合对富营养化水体的净化效果[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 636-647.
CHI M H, LIU M, XU Y C, et al. Purification effects of different combinations of ornamental aquatic plants on eutrophic water[J]. Journal of Zhejiang A & F university, 2023, 40(3): 636-647.
- [12] LU B, XU Z S, LI J G, et al. Removal of water nutrients by different aquatic plant species: an alternative way to remediate polluted rural rivers[J]. Ecological engineering, 2018, 110: 18-26.
- [13] 陈洁宜,刘广波,崔金立,等. 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5629-5639.
CHEN J Y, LIU G B, CUI J L, et al. Mobilization of heavy metals in a soil-plant system and risk assessment in the Dabaoshan Mine area, Guangdong Province, China[J]. Environmental science, 2019, 40(12): 5629-5639.
- [14] WAN X M, LEI M, YANG J X. Two potential multi-metal hyperaccumulators found in four mining sites in Hunan Province, China[J]. Catena, 2017, 148: 67-73.
- [15] 蒋伟,翁时超,易文涛,等. 不同湿地植物对重金属的富集规律研究[J]. 科技通报, 2020, 36(4): 125-129.
JIANG W, WENG S C, YI W T, et al. Study on the accumulation of heavy metals in different wetland plants[J]. Bulletin of science and technology, 2020, 36(4): 125-129.
- [16] 周遗品,刘雯,雷泽湘,等. 铜钱草对城市生活污水的

- 净化效果[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2011, 24(2): 9-12.
- ZHOU Y P, LIU W, LEI Z X, et al. Purifying effect of *Hydrocotyle vulgaris* L. on municipal domestic wastewater[J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2011, 24(2): 9-12.
- [17] 张树楠, 肖润林, 余红兵, 等. 水生植物刈割对生态沟渠中氮、磷拦截的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1066-1071.
- ZHANG S N, XIAO R L, YU H B, et al. Effects of cutting aquatic plants on nitrogen and phosphorus interception in ecological ditches[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2012, 20(8): 1066-1071.
- [18] 杨艺宁, 李琬婷, 黄晓霞, 等. 铅胁迫对洋常春藤生长及生理特性的影响[J]. 西部林业科学, 2020, 49(3): 126-131.
- YANG Y N, LI W T, HUANG X X, et al. Effects of lead stress on growth and physiological characteristics of *Hedera helix*[J]. Journal of West China forestry science, 2020, 49(3): 126-131.
- [19] 成广雷, 张海娇, 赵久然, 等. 临界胁迫贮藏条件下不同基因型玉米种子活力及生理变化[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 33-42.
- CHENG G L, ZHANG H J, ZHAO J R, et al. Vigor and physiological changes of different genotypes of maize seed (*Zea mays* L.) under critical stress storage conditions[J]. Scientia agricultura sinica, 2015, 48(1): 33-42.
- [20] 江晓, 周猛, 刘婷, 等. 乙醇浸提法提取南极磷虾多酚物质研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(12): 61-66.
- JIANG X, ZHOU M, LIU T, et al. Study on extraction of polyphenols in *Euphausia superba* by ethanol extraction method[J]. China food additives, 2019, 30(12): 61-66.
- [21] 胡佳瑶, 王悟敏, 匡雪韶, 等. 镉胁迫下青葙种子萌发及幼苗生理特性[J]. 草业科学, 2022, 39(7): 1391-1398.
- HU J Y, WANG W M, KUANG X S, et al. Seed germination and seedling physiological characteristics of *Celosia argentea* under cadmium stress[J]. Pratacultural science, 2022, 39(7): 1391-1398.
- [22] 王小平. 小麦中镉含量测定与分析: 石墨炉原子吸收光谱法[J]. 现代面粉工业, 2022, 36(3): 25-28.
- WANG X P. Determination and analysis of cadmium content in wheat: graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. Modern flour milling industry, 2022, 36(3): 25-28.
- [23] 石文广, 李靖, 张玉红, 等. 7种杨树铅抗性和积累能力的比较研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 61-70.
- SHI W G, LI J, ZHANG Y H, et al. A comparative study on lead tolerance and accumulation of seven poplar species[J]. Journal of Nanjing Forestry University (natural sciences edition), 2021, 45(3): 61-70.
- [24] 刘国华, 周兴元, 杨士虎. 盐胁迫对3种四照花属植物生理特性的影响[J]. 西部林业科学, 2018, 47(2): 59-64.
- LIU G H, ZHOU X Y, YANG S H. The effects of salt stress on physiology characteristics of *Dendrobenthamia* [J]. Journal of West China forestry science, 2018, 47(2): 59-64.
- [25] 师亚婷, 单立山, 解婷婷, 等. 干旱胁迫下红砂幼苗非结构性碳水化合物动态变化特征[J]. 西北植物学报, 2023, 43(1): 116-126.
- SHI Y T, SHAN L S, XIE T T, et al. Dynamic changes of non-structural carbohydrate in *Reaumuria soongorica* seedlings under drought stress[J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2023, 43(1): 116-126.
- [26] 袁泉, 吕巍巍, 刘娅琴, 等. 铜钱草对不同污染负荷模拟污水的净化效果初探[J]. 上海农业学报, 2019, 35(4): 88-93.
- YUAN Q, LYU W W, LIU Y Q, et al. Purification effect of different experimental wastewater by *Hydrocotyle vulgaris*[J]. Acta agriculture Shanghai, 2019, 35(4): 88-93.
- [27] 夏蔓蔓, 何冠谛, 符东顺, 等. 铜胁迫对不同马铃薯品种形态和生理特性的影响及评价[J]. 种子, 2020, 39(9): 41-46.
- XIA M M, HE G D, FU D S, et al. Effects of cadmium stress on morphology and physiology of different potato cultivars and cadmium-tolerant evaluation[J]. Seed, 2020, 39(9): 41-46.
- [28] 吴旻, 赵群芬. 3种沉水植物在不同污染水体中的生长及其对水质的影响[J]. 生物学杂志, 2015, 32(4): 43-47, 52.
- WU M, ZHAO Q F. The growth of three submerged plants in different polluted water and its impact on water quality[J]. Journal of biology, 2015, 32(4): 43-47, 52.
- [29] 余婷, 郑永红, 张治国, 等. 重金属Cd胁迫条件下水生植物生长和吸收特征分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(1): 63-70.
- YU T, ZHENG Y H, ZHANG Z G, et al. Study on the growth and adsorption characteristics of aquatic plants under the stress of heavy metal Cd[J]. Environmental science & technology, 2020, 43(1): 63-70.
- [30] 乔旭, 王沛芳, 郑莎莎, 等. 水生植物去除重金属机制及生理响应研究综述[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 15-20.
- QIAO X, WANG P F, ZHENG S S, et al. Review of stud-

- ies on the mechanism of removing heavy metals by aquatic plants and the physiological response of plants[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(5): 15-20.
- [31] 韦献东. Pb-Cd 胁迫对枫香幼苗生长和生理特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2020: 17-18.
- WEI X D. Effects of Pb-Cd stress on growth and physiological characteristics of *Liquidambar formosana* seedlings [D]. Nanning: Guangxi University, 2020: 17-18.
- [32] 张颖, 高景慧. 镉胁迫对红三叶种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(3): 57-59.
- ZHANG Y, Gao J H. Effects of Cd^{2+} stress on the seed germination and some physiological characteristics about seedlings of *Trifolium pratense*[J]. Acta criculurae boreali-occidentalis sinica, 2007, 16(3): 57-59.
- [33] 刘凤, 魏雨蒙, 刘霜平, 等. 镉胁迫对小麦生长和生理特性的影响[J]. 山东化工, 2017, 46(3): 24-26.
- LIU F, WEI Y M, LIU S P, et al. Effects of cadmium stress on the seedlings growth and physiological characteristics of wheat[J]. Shandong chemical industry, 2017, 46(3): 24-26.
- [34] 王涛, 黄语燕, 陈永快, 等. 镉胁迫对生菜生长、生理特性及镉富集转运特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 115-124.
- WANG T, HUANG Y Y, CHEN Y K, et al. Effects of cadmium stress on growth, physiological characteristics and cadmium enrichment and transport of lettuce[J]. Journal of Northwest A & F University (natural science edition), 2024, 52(7): 115-124.
- [35] 王迪华, 王改玲, 樊存虎. 镉胁迫对小白菜种子萌发、生理特性及其镉积累的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(9): 80-83.
- WANG D H, WANG G L, FAN C H. Effects of soil cadmium stress on seed germination, physiological characteristics and cadmium accumulation of pakchoi[J]. China cucurbits and vegetables, 2021, 34(9): 80-83.
- [36] 张涵洋, 李爱, 张卫华, 等. 镉胁迫对西瓜幼苗生长及其叶片解剖结构和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(3): 401-409.
- ZHANG H Y, LI A, ZHANG W H, et al. Effects of cadmium stress on the growth, leaf anatomical structure and physiological characteristics of *Citrullus lanatus* seedlings [J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2023, 43(3): 401-409.
- [37] MWAMBA T M, LI L, GILL R A, et al. Differential sub-cellular distribution and chemical forms of cadmium and copper in *Brassica napus*[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2016, 134P1: 239-249.
- [38] 邢艳帅, 朱桂芬. 重金属对水生生物的生态毒理效应及生物耐受机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(3): 13-26.
- XING Y S, ZHU G F. Advances on ecotoxicological effects of heavy metals to aquatic organisms and the tolerance mechanisms of aquatic organisms[J]. Asian journal of ecotoxicology, 2017, 12(3): 13-26.
- [39] 马凤仪, 赵宝平, 张茹, 等. 燕麦植株生长及叶片生理活性对土壤镉胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1347-1354.
- MA F Y, ZHAO B P, ZHANG R, et al. Response of oat plant growth and leaf physiological activity to soil cadmium stress [J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2022, 42(8): 1347-1354.
- [40] ZHANG H Y, WANG B Q, FENG X Y, et al. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of osmotic adjustment in sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] [J]. Acta agronomica sinica, 2020, 46(11): 1760-1770.
- [41] 穆海婷, 王英哲, 苗一凡, 等. 重金属铜和铅胁迫对东方山羊豆幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(11): 139-146.
- MU H T, WANG Y Z, MIAO Y F, et al. Effects of heavy metal Cu and Pb stress on the growth and physiological characteristics of *Galega orientalis* seedlings[J]. Acta prat-aculturae sinica, 2022, 31(11): 139-146.
- [42] 董名扬, 孙瑶, 冯晓晖, 等. 两种生态型香根草对镉的耐受和积累特性比较[J]. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1330-1338.
- DONG M Y, SUN Y, FENG X H, et al. Comparative tolerance and accumulation characteristics of cadmium in two vetiver grass ecotypes[J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2022, 42(8): 1330-1338.
- [43] 孙永娣, 巢建国, 谷巍, 等. 镉胁迫对茅苍术生理生化特征的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(12): 1857-1864.
- SUN Y D, CHAO J G, GU W, et al. Effect of cadmium stress on physiological and biochemical characteristics of *Atractylodes lancea*[J]. Plant physiology journal, 2018, 54(12): 1857-1864.
- [44] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3): 454-462.
- JIA Y, LIU C L, LAN X Y, et al. Effect of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Primula forbesii* seedlings [J]. Acta botanica boreali-occidentalia

- sinica, 2020, 40(3): 454-462.
- [45] 杨颖丽, 施树倩, 李嘉敏, 等. 铅胁迫对矮牵牛组培苗生长及光合特性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 47-54, 62.
- YANG Y L, SHI S Q, LI J M, et al. Effects of lead stress on the growth and photosynthetic characteristics of *Petunia* hybrid tissue culture plantlet[J]. Journal of Lanzhou University (natural sciences), 2023, 59(1): 47-54, 62.
- [46] 张涵洋, 李爱, 张卫华, 等. 镉胁迫对西瓜幼苗生长及其叶片解剖结构和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(3): 401-409.
- ZHANG H Y, LI A, ZHANG W H, et al. Effects of cadmium stress on the growth, leaf anatomical structure and physiological characteristics of *Citrullus lanatus* seedlings[J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2023, 43(3): 401-409.
- [47] MIYA S P, MODI A T, TESFAY S Z, et al. Maize grain soluble sugar and protein contents in response to simulated hail damage[J]. South African journal of plant and soil, 2018, 35(5): 377-383.
- [48] 朱红霞, 赵红艳, 陈丽丽, 等. 铅镉胁迫下马齿苋的种子萌发和幼苗生理响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(3): 76-81.
- ZHU H X, ZHAO H Y, CHEN L L, et al. Response of Pb and Cd on seed germination and seedling physiological of *Portulaca oleracea*[J]. Journal of Southwest Forestry University (natural sciences), 2020, 40(3): 76-81.
- [49] 周际海, 程坤, 邵茹茹, 等. 土壤镉污染对香樟幼苗光合和生理特性的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(6): 193-201.
- ZHOU J H, CHENG K, GAO R R, et al. Photosynthesis and other physiological characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings under cadmium stress[J]. Scientia silvae sinicae, 2020, 56(6): 193-201.
- [50] 尹泽润, 罗宝利, 罗锋, 等. 镉胁迫下水培杞柳生理特性及镉吸收转运[J]. 草业科学, 2021, 38(10): 1900-1909.
- YIN Z R, LUO B L, LUO F, et al. Physiological characteristics and Cd absorption and transportation in *Salix integra* under Cd stress[J]. Pratacultural science, 2021, 38(10): 1900-1909.
- [51] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
- WEI C Y, CHEN T B. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad [J]. Actaecologica sinica, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [52] 常宝亮, 吴春满, 陈剑鹰, 等. 铅、镉胁迫下4种沉水植物的生长和生理响应[J]. 人民长江, 2022, 53(12): 50-55.
- CHANG B L, WU C M, CHEN J Y, et al. Growth and physiological responses of four submerged plants under lead and cadmium stress[J]. Yangtze River, 2022, 53(12): 50-55.
- [53] 熊春晖, 许晓光, 卢永恩, 等. 铅镉复合胁迫下莲藕对铅镉的富集及其生理变化[J]. 园艺学报, 2012, 39(12): 2385-2394.
- XIONG C H, XU X G, LU Y E, et al. Effects of heavy metals Pb and Cd on the physiological response and accumulation in lotus root[J]. Acta horticulturae sinica, 2012, 39(12): 2385-2394.
- [54] 胡莹, 朱永官, 黄益宗, 等. 钒镉复合污染对水稻吸收积累镉、钒和磷的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2): 198-202.
- HU Y, ZHU Y G, HUANG Y Z, et al. Effects of combined contaminations of vanadium and cadmium on cadmium, vanadium and phosphorus uptake by rice in solution culture[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2005, 25(2): 198-202.
- [55] SARASWAT S, RAI J P N. Phytoextraction potential of six plant species grown in multimetal contaminated soil [J]. Chemistry and ecology, 2009, 25(1): 1-11. ◆