

## 锌、镉及其复合胁迫下白花泡桐幼苗的生理及富集特征

朱秀红, 程红梅, 季柳洋, 茹广欣, 赵珠琳, 蔡曜琦, 温道远

河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002

朱秀红, 程红梅, 季柳洋, 等. 锌、镉及其复合胁迫下白花泡桐幼苗的生理及富集特征. 生物工程学报, 2021, 37(7): 2463-2473.

Zhu XH, Cheng HM, Ji LY, et al. Physiological and enrichment characteristics of *Paulownia fortunei* seedlings under zinc, cadmium and their combined stress. Chin J Biotech, 2021, 37(7): 2463-2473.

**摘 要:** 采用水培培养的试验方法, 研究白花泡桐幼苗在锌 (Zn)、镉 (Cd) 单一及复合胁迫下的生理生化响应及对重金属的富集、转移特征变化。结果表明, 单一及复合重金属胁迫下, 白花泡桐的生物量、株高及过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性均随处理浓度的增加而降低。在复合污染下, Zn、Cd 在植株的株高及生物量上表现出拮抗作用。与对照比, 单一胁迫下, 随着 Zn 浓度的增加, 白花泡桐叶绿素含量和过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性先增加后减小, 超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 活性升高, 地上部丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量先减小后增加; 随着 Cd 浓度的增加, 叶绿素含量和过氧化氢酶 (CAT) 活性升高, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性及地上部丙二醛 (MDA) 含量先增加后减小, 复合胁迫下, 则表现出更加复杂的生理响应。白花泡桐幼苗对 Cd 的富集部位集中在根部; 对 Zn 的富集部位集中在地上部, 且转移系数大于 1.00; Zn 的加入会促进重金属向地上部分的转移; 白花泡桐具有对复合重金属污染地进行有效的生态恢复的潜力。

**关键词:** 白花泡桐幼苗, 重金属, 镉, 锌, 土壤修复

## Physiological and enrichment characteristics of *Paulownia fortunei* seedlings under zinc, cadmium and their combined stress

Xiuhong Zhu, Hongmei Cheng, Liuyang Ji, Guangxin Ru, Zhulin Zhao, Yaoqi Cai, and Daoyuan Wen

College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China

**Abstract:** The hydroponic culture test method was used to study the physiological and biochemical responses of *Paulownia fortunei* seedlings under Zn stress, Cd stress, and combined Zn and Cd stress as well as changes in the enrichment and transfer characteristics of heavy metals. Under single and combined heavy metal stress, the biomass, plant height, and peroxidase (POD) activity of *P. fortunei* decreased as the treatment concentration increased. Combined Zn and Cd affected adversely plant

**Received:** July 26, 2020; **Accepted:** October 28, 2020

**Supported by:** Biosafety and Genetic Resources Project of National Forestry and Grass Administration of China (No. KJZXSA2019042), Forest Germplasm Resources Construction Project of Henan Province, China (No. 30601998).

**Corresponding author:** Guangxin Ru. Tel: +86-371-63558813; E-mail: ruguangxin@163.com

国家林草局生物安全与遗传资源项目 (No. KJZXSA2019042), 河南省林木种质资源建设项目 (No. 30601998) 资助。

网络出版时间: 2020-11-18

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1998.Q.20201118.1038.001.html>

height and biomass. As the concentration of Zn increased when applied alone, the chlorophyll content and catalase (CAT) activity of *P. fortunei* first increased and then decreased, the superoxide dismutase (SOD) activity increased, and the aboveground malondialdehyde (MDA) content first decreased and then increased. As the concentration of Cd increased when applied alone, chlorophyll content and CAT activity increased, and SOD activity and aboveground MDA content first increased and then decreased. Under both Cd and Zn, the physiological response was more complex. Cd in the seedlings of *P. fortunei* was concentrated in the root. In contrast, Zn was concentrated in the upper part of the ground, and its transfer coefficient was greater than 1.00. Thus, the addition of Zn promotes the transfer of heavy metals to the above-ground portions of plants. Generally, *P. fortunei* can effectively promote ecological restoration under complex forms of heavy metal pollution.

**Keywords:** *Paulownia fortunei* seedlings, heavy metal, Cd, Zn, soil remediation

随着工业化的快速发展,重金属污染已经成为全球性环境污染问题,据2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示<sup>[1]</sup>,全国土壤总的超标率为16.1%,无机污染物超标点位占全部超标点位的82.8%,其中重金属镉(Cd)居无机污染物点位超标第一位,高达7%,而锌(Zn)的点位超标率为0.9%,位于第七。传统的重金属污染土壤治理方法主要以物理和化学方法为主<sup>[2]</sup>,而近年来,植物修复作为一种相对新兴的土壤污染治理技术,因其成本低、对环境友好以及可大规模原位修复等优点,在实际中得到了越来越广泛的应用<sup>[3]</sup>。

白花泡桐 *Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl. 是玄参科泡桐属植物,是我国常见的速生树种,分布广泛,品质优良,可作为用材树种、园林绿化树种等。目前,大多数学者关于白花泡桐的研究主要集中在泡桐花和叶的化学成分分析、木质素结构与木材材性研究以及如何解决泡桐丛枝病<sup>[4-6]</sup>等方面,而关于重金属对泡桐的影响以及泡桐对重金属富集能力的研究较少。朱连秋等<sup>[7]</sup>的研究表明,木本植物泡桐具有较高的重金属综合富集能力,因此,研究重金属胁迫下白花泡桐的生长及富集特征具有重要的现实意义。

为了研究泡桐在重金属胁迫下的耐性机理及对重金属的富集能力,本试验通过对Ca、Zn单一及复合胁迫处理下白花泡桐的抗氧化防御系统响应、叶绿素含量变化以及其对重金属Cd、Zn的吸收富集等特征进行探讨,以了解白花泡桐在重金属胁迫下的响应机制,揭示其对重金属胁迫

的抗性机理,同时对Cd、Zn重金属的富集能力进行量化和科学评价,为利用该树种进行矿区土壤复合污染和城市土壤污染治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

在2018年3-6月,选取种源为江西省赣江市的白花泡桐幼嫩茎段为外植体材料,进行组培。待幼苗长出4-6对叶时,选择性状一致、生长健壮的白花泡桐组培苗炼苗一周,用蒸馏水将根部的培养基冲洗干净后,移栽至含有1/2 Hong land营养液的塑料水培盒(24 cm×15 cm×7.5 cm)中,用定植板固定,部分根系在营养液面和定植板之间的空隙气生,每盆定植6株,2-3 d后更换Hong land全营养液继续培养,此时即可进行Cd、Zn单一及其复合重金属的胁迫处理,营养液每隔2-3 d更换一次。试验设置9个处理梯度(表1),分别为:空白Cd 0 mmol/L+Zn 0 mmol/L(CK)、Cd 0.05 mmol/L(C1)、Cd 0.10 mmol/L(C2)、Zn 8 mmol/L(Z1)、Zn 16 mmol/L(Z2)、Zn 8 mmol/L+Cd 0.05 mmol/L(Z1C1)、Zn 16 mmol/L+Cd 0.05 mmol/L(Z2C1)、Zn 8 mmol/L+Cd 0.10 mmol/L(Z1C2)、Zn 16 mmol/L+Cd 0.10 mmol/L(Z2C2),每个梯度6个平行。培养15 d后,毁灭性采收幼苗全株用于生物量的测定。

整个试验过程中,温度为(25±2)℃,光强为1 600-1 800 lx,光照时间为12 h/d,湿度控制在80%以上。采样地点为河南农业大学科技园区泡桐种质资源圃(N34°86', E113°5')。供试的重金

属以  $\text{ZnSO}_4$ 、 $\text{CdN}_2\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  等重金属盐用去离子水溶解后,以溶液的形态处理,所用试剂均为分析纯 (AR) 级。

表 1 试验处理

Table 1 Test treatment

Zn concentration (mmol/L)	Cd concentration (mmol/L)		
	0	0.05	0.10
0	CK	C1	C2
8	Z1	Z1C1	Z1C2
16	Z2	Z2C1	Z2C2

## 1.2 生理生化指标测定

植株生物量的测定:在处理 15 d 后取样,用蒸馏水冲洗根部 3~5 遍,用滤纸将表面的水分吸干后,用皮尺测量株高。将收获好的样品称完鲜重后,将植株分为根、茎、叶 3 部分,放置在 105 °C 烘箱中杀青 2 h,在 60 °C 下烘干至恒重,称其干质量。

生理指标的测定:混合取样植株新鲜叶片 0.1 g,测定各项生理指标。叶绿素含量的测定采用乙醇提取比色法<sup>[8]</sup>;丙二醛 (MDA) 含量的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[9]</sup>;超氧化物歧化酶 (SOD) 的测定采用氮蓝四唑法<sup>[10]</sup>;过氧化物酶 (POD) 的测定采用愈创木酚法<sup>[11]</sup>;过氧化氢酶 (CAT) 的测定采用双氧水法<sup>[12]</sup>。

## 1.3 白花泡桐幼苗对重金属富集和转运能力的测定

将各处理泡桐幼苗根、茎和叶用去离子水冲洗干净后分开,准确称取 0.1 g 用于测定。植物样品用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  (4:1) 湿法消化<sup>[13]</sup>,金属元素采用 FAAS-M6 火焰原子吸收分光光度计测定。

金属离子富集系数 (Bioconcentration factors, BCF) 的计算:

$\text{BCF} = \text{收获的植物中重金属含量} / \text{溶液中重金属含量}$ 。

金属离子转运系数 (Translocation factor, TF) 的计算:

$\text{TF} = \text{植物地上部分重金属含量} / \text{地下部分重金}$

属含量。

## 1.4 数据处理

重金属处理选择 3 个生物学重复,每个生物学重复设置 3 个操作重复。运用 EXCEL、SPSS 25.0、ORIGIN 2018 软件对数据进行相关分析,数据的差异显著性检验采用 LSD 检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd、Zn 单一及复合胁迫对白花泡桐幼苗生理指标的影响

#### 2.1.1 对生物量和苗高的影响

单一 Cd 处理下,生物量和株高显著高于其他处理,且随着 Cd 浓度的增加,生物量和株高均呈下降趋势。单一 Zn 胁迫下,生物量和株高均显著低于其他处理,在 Zn 浓度为 16 mmol/L 时达到最低,株高为对照组的 89.4%,根生物量是对照组的 76.4%,叶生物量是对照组的 65.5%,表明 Zn 对植物的毒害作用更强。复合胁迫下,随着 Cd 的加入,白花泡桐幼苗的株高及生物量,与同水平单一 Zn 胁迫相比,都有所提高,且均高于对照组,说明低浓度的 Cd 促进泡桐幼苗的生长 (表 2)。

#### 2.1.2 对叶绿素含量的影响

叶绿素在植物的光合作用中发挥着重要的作用,叶绿素含量的多少显示出光合作用的强弱,因此以叶绿素的含量来衡量植物的抗逆性<sup>[13]</sup>。与对照组相比,重金属 Cd 单一胁迫下,白花泡桐叶片叶绿素 a 含量分别高出对照组 20.6%、11.8%,叶绿素 b 含量分别增加了 37.5%、35.7%,说明单一 Cd 处理有利于白花泡桐叶片中叶绿素的合成,而叶绿素 a/b 先增加后减少,表明随着 Cd 浓度的增加,叶片衰老加速。重金属 Zn 单一胁迫下,与 CK 相比,叶绿素 (a+b) 含量呈现先增加后减小的趋势,叶绿素 a/b 值小于对照组,其中叶绿素 a 含量变化不明显,叶绿素 b 含量分别增加了 37.5%、0.07%。复合胁迫下,随着处理浓度的增加,叶绿素 a、b 含量均呈现下降趋势,且均小于对照组,

在 Cd 浓度 0.10 mmol/L、Zn 浓度为 16 mmol/L 时含量最小，与对照组相比下降 20%，而在 Z1C2、Z2C2 处理下，叶绿素 a/b 显著高于对照组，表明

在高浓度的 Zn、Cd 复合胁迫下，植物受到较为严重的外界胁迫，叶绿体结构被破坏，叶绿素含量减少，光合能力减弱（图 1）。

表 2 不同重金属处理对白花泡桐幼苗生物量和苗高的影响

Table 2 Effects of different heavy metal treatments on the biomass and seedling height of *P. fortunei* seedlings

Treatment	Height (g)	Biomass of root (g)	Biomass of leaves (g)
CK	9.03±0.26g	0.381±0.0 035c	1.006±0.0 025c
C1	10.93±0.66a	0.451±0.0 010a	1.120±0.0 026a
C2	10.26±0.53b	0.404±0.0 087b	1.082±0.0 010b
Z1	8.23±0.53h	0.313±0.0 046e	0.805±0.0 051f
Z2	8.07±0.17i	0.291±0.0 053f	0.659±0.0 026h
Z1C1	9.66±0.62d	0.384±0.0 036c	0.897±0.0 072e
Z2C1	9.34±0.87e	0.346±0.0 036d	0.789±0.0 046g
Z1C2	9.91±0.66c	0.406±0.0 017b	0.914±0.0 072d
Z2C2	9.06±0.26f	0.267±0.0 050g	0.582±0.0 046i

Note: The data in the table is the  $\bar{x} \pm s$  deviation,  $n=3$ , and different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index ( $P<0.05$ ).

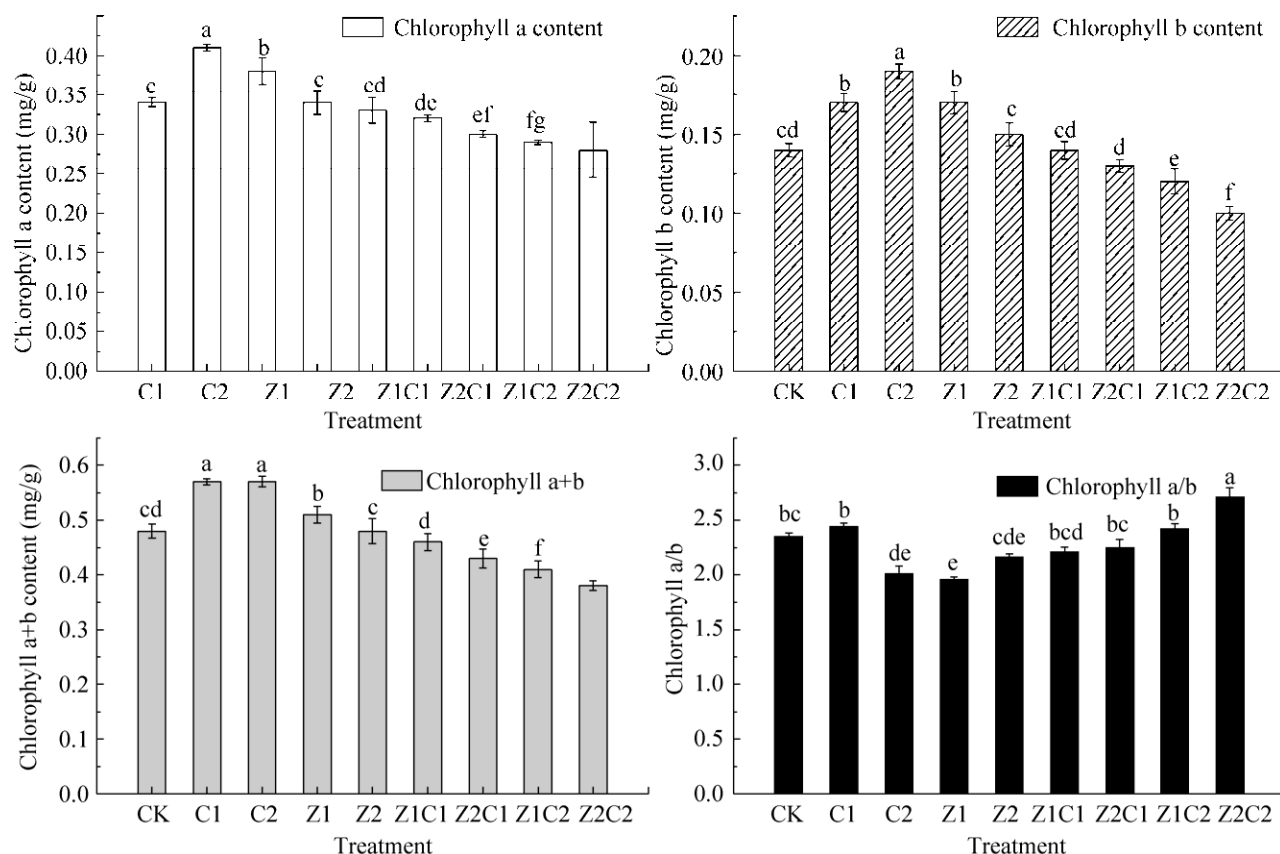


图 1 重金属处理对幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of heavy metal treatment on in seedlings. From left to right, from top to bottom, chlorophyll a content, chlorophyll b content, chlorophyll a+b content, chlorophyll a/b, and different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P<0.05$ .

### 2.1.3 对丙二醛 MDA 含量的影响

MDA 是生物体内自由基作用于脂质发生过氧化反应的最终产物, 它的含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度, 是衡量植物逆境生长的重要指标<sup>[14]</sup>。单一 Cd 胁迫下, 白花泡桐体内 MDA 含量均高于对照组, 其中根部 MDA 含量随着处理浓度的增加呈上升趋势, 叶片 MDA 含量随着处理浓度的增加而下降; 单一 Zn 胁迫下则相反, 叶片 MDA 含量最高值出现在 Cd 浓度为 0.05 mmol/L, 比对照组增加了 15%, 根部 MDA 含量最高值出现在 Cd 浓度为 0.10 mmol/L 时, 比对照组增加了 7%, 说明单一重金属胁迫下, Cd 对白花泡桐脂质过氧化损害较大。复合胁迫下, 叶片中 MDA 含量在相同水平 Cd 处理下, 随着 Zn 浓度的增加而减少; 根部 MDA 含量随着处理浓度的增加呈上升趋势, 分别是对照组的 1.16 倍、1.30 倍、1.44 倍、1.50 倍, 说明复合胁迫浓度越高对白花泡桐根部脂质过氧化损害越大 (图 2)。

### 2.1.4 对 SOD 酶活性的影响

与对照组相比, 在单一 Zn 胁迫条件下, 白花泡桐体内 SOD 酶活性随着浓度的增加而增加; 单一 Cd 胁迫下, 白花泡桐 SOD 酶活性随着浓度的增加先升高后降低, 仅在单一 Cd 浓度为 0.10 mmol/L 时, 白花泡桐幼苗根部 SOD 酶活性最低, 是对照组的 83.5%, 其他处理下的 SOD 酶活性均高于对照组。在单一 Zn 浓度为 16 mmol/L 时, 根部 SOD 酶活性达到最高值 454 U/g, 比对照组增加了 83.06%。复合胁迫下, 白花泡桐体内 SOD 酶活性显著大于 CK 及同水平单一 Cd 胁迫下的 SOD 酶活性, 其中叶片的 SOD 值随着 Zn 浓度的增加而显著增加, 根中则相反, 说明 Zn 的加入促进了白花泡桐体内 SOD 酶的活性 (图 3)。

### 2.1.5 对 POD 酶活性的影响

单一胁迫下 POD 活性均随处理浓度的升高而降低, 根部 Cd、Zn 单一胁迫浓度最高时, POD 活性分别比对照降低了 39.08%、28.57%, 地上部 Cd、Zn 单一胁迫浓度最高时, POD 活性分别比

对照降低了 48.68%、42.11%。复合胁迫时, 根和叶 POD 含量随处理浓度的增加呈下降趋势。重金属处理下, 白花泡桐地下部和地上部的 POD 活性与对照相比均有显著降低, Zn 对白花泡桐 POD 活性的影响最小 (图 4)。

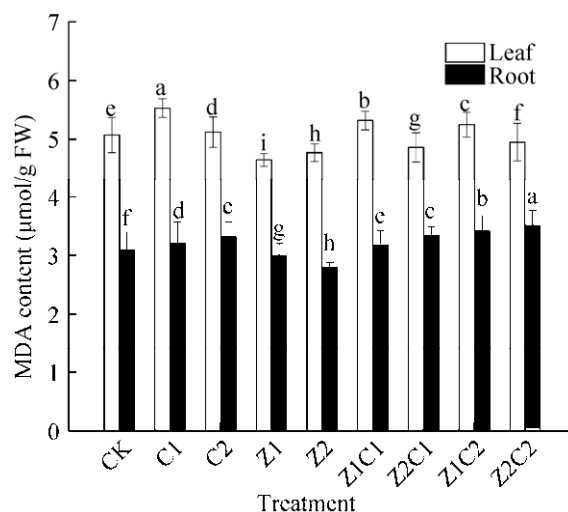


图 2 重金属处理对幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effect of heavy metal treatment on MDA content of seedlings. Different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P < 0.05$ .

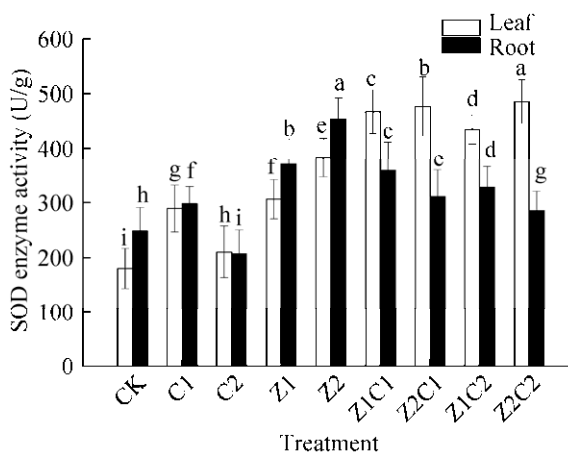


图 3 重金属处理对幼苗 SOD 酶活性的影响

Fig. 3 Effect of heavy metal treatment on SOD enzyme activity of seedlings. Different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P < 0.05$ .

### 2.1.6 对过氧化氢酶 (CAT) 活性的影响

在 Cd 浓度为 0.10 mmol/L 时, 地下部和地上部 CAT 含量均显著高于其他处理。与对照组相比, Cd、Zn 单一胁迫均能使白花泡桐 CAT 活性增强。Cd 单一胁迫下, 白花泡桐 CAT 含量随着浓度的升高而增加, 浓度最高时, 地下部 CAT 含量最高达到 15.17 U/g, 地上部达到 32.83 U/g, 与对照组比分别升高了 21.65%、41.27%。Zn 单一胁迫下, 与 CK 相比, CAT 含量随着处理浓度的增加呈先上升后下降趋势, 在 Zn 浓度为 8 mmol/L 时达到最大值, 此时叶中 CAT 活性为 14.60 U/g、根中为 25.43 U/g, 分别是对照组的 1.17 倍和 1.09 倍。复合胁迫下, 白花泡桐 CAT 含量在 C1 水平下随着 Zn 浓度的增加而增加, 在 C2 水平下随着 Zn 浓度的增加而减小 (图 5)。

## 2.2 白花泡桐幼苗富集和转移重金属能力

### 2.2.1 白花泡桐幼苗各部位对 Cd 的富集能力

单一 Cd 胁迫下, 白花泡桐幼苗体内 Cd 的含量随着处理浓度的增加而增大, 在单一 Cd 浓度为 0.10 mmol/L 时, 根、茎、叶中的富集量达到最大, 分别是低浓度 Cd 处理的 150.3%、114.6%、

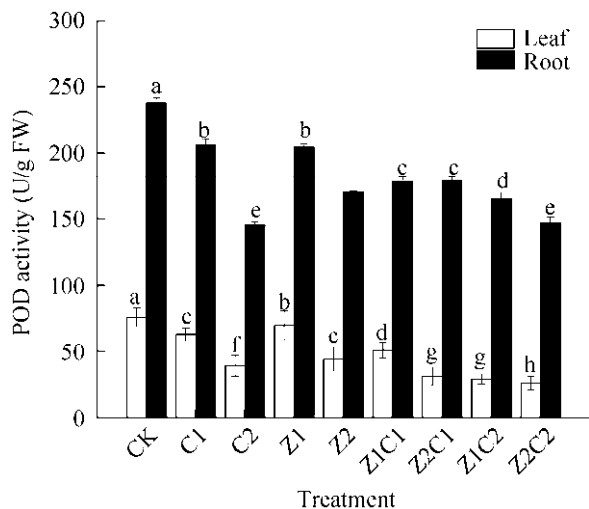


图 4 重金属处理对幼苗 POD 活性的影响

Fig. 4 Effect of heavy metal treatment on POD activity of seedlings. Different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P < 0.05$ .

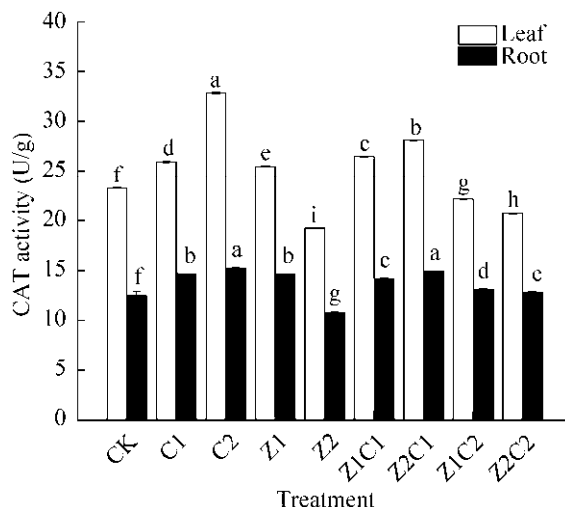


图 5 重金属处理对幼苗 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effect of heavy metal treatment on CAT activity of seedlings. Different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P < 0.05$ .

120.9%。Cd 的累积量均表现为根 > 叶 > 茎, 说明地下部分比地上部分具有更强的 Cd 富集能力。复合胁迫下, 根、茎、叶的富集量均显著低于单一 Cd 处理, 在 Zn 浓度为 8 mmol/L、Cd 浓度为 0.10 mmol/L 时, 根、茎、叶的 Cd 含量明显低于其他处理, 仅是浓度单一 Cd 处理下的 49.2%、59.6%、65.4%, 说明 Zn 的加入, 不利于 Cd 在白花泡桐体内的富集, 二者为拮抗作用。在高浓度的 Zn、Cd 复合处理时, Cd 的富集量显著高于其他复合胁迫, 表明高浓度 Zn 对根、茎、叶 Cd 的富集的拮抗作用减弱 (图 6)。

### 2.2.2 白花泡桐幼苗各部位对 Zn 的富集能力

单一 Zn 胁迫下, 白花泡桐体内 Zn 的富集量显著高于其他处理, 随着 Zn 浓度的增加而增加, 在 Zn 浓度为 18 mmol/L 时达到最大, 根、茎、叶中的 Zn 含量分别高出对照组 66.9%、149.0%、284.4%, 表明白花泡桐幼苗对 Zn 的富集量受外界 Zn 浓度的限制, 对 Zn 的富集主要集中在地上部分。单一 Cd 处理下, 白花泡桐幼苗体内 Zn 的富集量随 Cd 处理浓度的增加而减小, 在单一 Cd 浓度为

0.10 mmol/L 时,根、茎中对 Zn 的富集量仅是对照的 68%、84%。复合处理下,随着 Cd 的加入,根、茎、叶中 Zn 的富集量明显低于单因素 Zn 处理,随着 Cd 浓度的升高,白花泡桐幼苗体内 Zn 的富集量升高,说明重金属 Cd 对 Zn 在白花泡桐体内的富集主要起拮抗作用,随着 Cd 浓度的增加,拮抗作用减弱(图 7)。

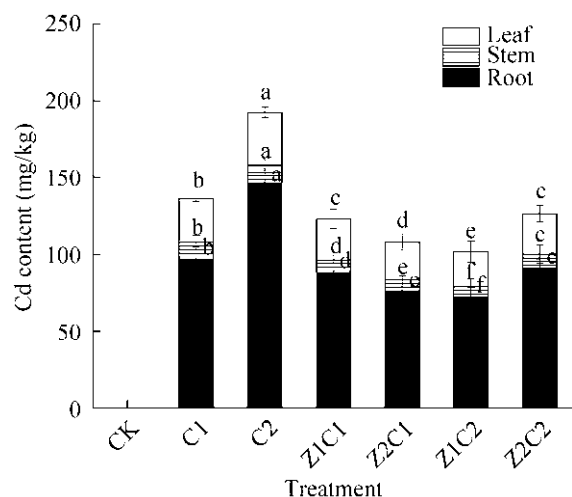


图 6 幼苗各部位中重金属 Cd 的累积量

Fig. 6 The accumulation of heavy metal Cd in each part of seedlings. Different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P < 0.05$ .

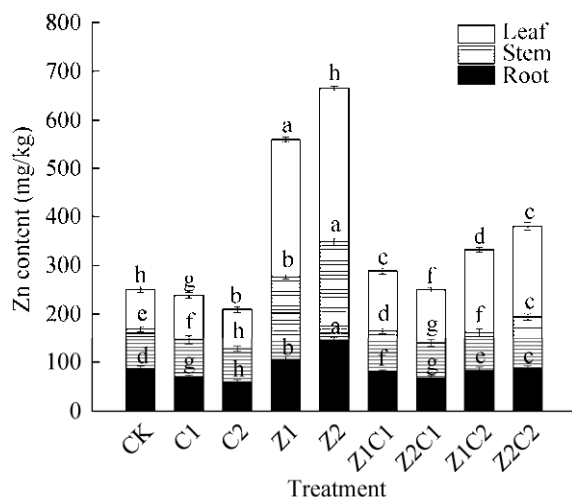


图 7 幼苗各部位中重金属 Zn 的累积量

Fig. 7 The accumulation of heavy metal Zn in each part of seedlings. Different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index,  $P < 0.05$ .

### 2.2.3 单一及复合胁迫处理下 Cd 的富集系数与转运系数

富集系数反映植物从土壤中提取重金属的能力。转移系数反映重金属在植物体内的迁移与累积情况,转移系数越大,越有利于重金属在植物地上部分累积。单一 Cd 胁迫下,根、茎、叶中 Cd 的转运和富集系数均随处理浓度的增加而减小,在 Cd 浓度为 0.10 mmol/L 时,富集系数达到最小,分别是低浓度单一 Cd 处理的 81.3%、57.7%、61.4%,说明随着 Cd 浓度的增加,白花泡桐幼苗对 Cd 的转运及富集能力减弱。复合胁迫中,转运系数均高于单一 Cd 胁迫,说明随着 Zn 离子的加入,有利于增强 Cd 从白花泡桐根部向上迁移到茎叶的能力;在同水平 Cd 处理下,随着 Zn 的加入,白花泡桐幼苗对 Cd 的富集系数均小于单一处理,说明 Zn 抑制了 Cd 在白花泡桐体内的富集(表 3)。

### 2.2.4 单一及复合胁迫处理下 Zn 的富集系数与转运系数

单一 Cd 胁迫下,根、茎、叶中 Zn 的富集系数随着 Cd 处理浓度的增加而减小,随着 Zn 处理浓度的增加而增大。复合胁迫下,白花泡桐幼苗体内 Zn 的富集系数及转运系数均小于同水平单一 Zn 胁迫,但随着 Cd 浓度的增加,富集系数及转运系数呈上升趋势,说明重金属 Cd 抑制 Zn 在植物体内的富集,表现为拮抗作用,但随着 Cd 浓度的增加,Zn 在植物根、茎、叶中的富集量增加,拮抗作用减弱。单一胁迫下,转运系数随着 Cd 浓度的增加而增加,随着 Zn 浓度的增加而减小,在 Zn 浓度为 8 mmol/L 时,达到最大值,高出对照 130.53%,此时幼苗对 Zn 的富集主要集中在地上部分。复合胁迫下,转运系数数值均低于单一 Zn 胁迫,随着 Zn 浓度的增加,转运系数也增加,说明随着 Zn 的加入,促进了其从根部向上迁移到茎叶的能力(表 4)。

表 3 重金属处理下 Cd 在白花泡桐体内的转运和富集

Table 3 Cd transport and enrichment in *Paulownia fortune* under heavy metal treatment

Treatment	Translocation factor	Bioconcentration factors		
		Root	Stem	Leaf
C1	0.41±0.006b	2.30±0.040a	0.26±0.002a	0.70±0.006a
C2	0.32±0.006c	1.87±0.021c	0.15±0.001c	0.43±0.006d
Z1C1	0.41±0.006b	2.03±0.032b	0.18±0.002b	0.64±0.010b
Z2C1	0.45±0.006a	1.64±0.035d	0.17±0.002b	0.58±0.015c
Z1C2	0.45±0.006a	0.77±0.015f	0.08±0.001e	0.26±0.006f
Z2C2	0.40±0.006b	1.05±0.015e	0.11±0.002d	0.31±0.006e

Note: the data in the table is the  $\bar{x} \pm s$  deviation,  $n=3$ , and different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index ( $P<0.05$ ).

表 4 重金属处理下 Zn 在白花泡桐体内的转运和富集

Table 4 Zn transport and enrichment in *P. fortunei* under heavy metal treatment

Treatment	Translocation factor	Bioconcentration factors		
		Root	Stem	Leaf
CK	1.90±0.031g	4.31±0.075a	4.08±0.076a	4.12±0.046b
C1	2.44±0.035f	3.47±0.056b	3.83±0.047b	4.62±0.061a
C2	2.61±0.070e	2.88±0.053c	3.42±0.066c	4.05±0.819b
Z1	4.38±0.020a	0.20±0.000de	0.33±0.001d	0.54±0.000c
Z2	3.52±0.031b	0.22±0.001d	0.35±0.001d	0.42±0.058d
Z1C1	2.66±0.040e	0.15±0.001e	0.16±0.001e	0.24±0.001f
Z2C1	2.67±0.075e	0.07±0.006f	0.07±0.001e	0.11±0.058g
Z1C2	3.02±0.045d	0.16±0.001de	0.15±0.001ef	0.32±0.058e
Z2C2	3.31±0.085c	0.08±0.006f	0.10±0.002f	0.18±0.000f

Note: the data in the table is the  $\bar{x} \pm s$  deviation,  $n=3$ , and different lowercase letters to indicate that there are significant differences between different treatments under the same index ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 Cd、Zn 单一及复合胁迫处理对白花泡桐幼苗抗性生理的影响

重金属对植物的毒害作用通常表现为抑制植物幼苗的生长和促使植物坏死<sup>[15]</sup>。本研究表明,单一胁迫下,Cd胁迫对白花泡桐幼苗的生物量和株高起促进作用,Zn胁迫则抑制了幼苗的株高及生物量;复合胁迫下,加入Cd则会缓解单一Zn对株高及生物量的抑制,Zn、Cd表现为拮抗作用,与多数学者认为低剂量下可刺激植物生长,低浓度范围内植物体内活性氧自由基含量升高,可激活蛋白酶,调节合成以及诱导基因表达,进而促进细胞分裂和增殖,宏观表现为刺激生长的

结论相同<sup>[16-20]</sup>。

单一Cd胁迫促进白花泡桐叶绿素的合成,促进其光合作用,产生相应的解毒物质缓解重金属的毒害,与王泽港等<sup>[21]</sup>对重金属对水稻光合作用的影响的结果类似;高浓度和复合胁迫下,抑制叶绿素的合成,与孙晓灿等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。复合胁迫下,Zn的加入抑制了Cd对叶绿素合成的促进作用,Zn、Cd表现为拮抗。

单一Cd胁迫下,白花泡桐MDA含量均高于CK,单一Zn胁迫下,白花泡桐幼苗的MDA含量均小于CK,表明白花泡桐幼苗对重金属Cd的抗性较弱,对重金属Zn有较强的抗性。复合胁迫下,叶片中MDA含量随Zn浓度的增加而降低,表明Zn的加入会缓解Cd造成的膜质过氧化伤



害,与叶片中的 Cd 起拮抗作用;根部的 MDA 含量随着处理浓度的升高而升高,表明 Zn、Cd 在根部的毒害表现为协同作用。

SOD、POD、CAT 这 3 种抗氧化酶在植物抗氧化系统中清除植物在重金属胁迫下产生的氧自由基,这 3 种酶活性的高低决定植物对重金属的耐受程度<sup>[23]</sup>。白花泡桐幼苗 SOD 酶活性在单一 Cd 胁迫下随着浓度升高而降低,在单一 Zn 胁迫及复合胁迫下则相反,表现出更高水平的活性氧自由基清除能力,表明 Zn 的加入促进了 SOD 酶活性。在重金属处理下,白花泡桐 POD 酶活性均呈下降趋势,这与万子栋等<sup>[24]</sup>研究的单一胁迫下碱蓬芽期 POD 活性呈上升趋势结果不同,可能是重金属胁迫下,重金属离子通过与白花泡桐体内核酸结合,影响 POD 转录和翻译过程。单一 Cd 处理下,CAT 活性呈上升趋势,且在高浓度 Cd 处理下 CAT 活性达到最高;单一 Zn 处理下则相反;复合胁迫下,白花泡桐 CAT 含量随着浓度的增加呈先上升后下降的趋势,表现为低促高抑。

### 3.2 Cd、Zn 单一及复合胁迫处理下幼苗对重金属的转移和富集能力

试验结果显示,单一胁迫下,Zn、Cd 的富集量受外界环境的限制,复合胁迫下则表现为拮抗作用。重金属处理下对 Zn 的转运系数大于 1.00,表明白花泡桐幼苗主要累积 Zn 的部位为地上部,这与朱连秋等<sup>[7]</sup>的研究结果一致。白花泡桐幼苗对 Cd 的富集能力为根>叶>茎,对 Zn 的富集能力为叶>茎>根,表明白花泡桐对 Cd 的富集部位主要集中在根部,对 Zn 的富集部位主要集中在地上部,这与冯莲莲等<sup>[25]</sup>和姜腾雪等<sup>[26]</sup>发现 Cd 的富集部位主要在根部的研究结论相同。由试验结果可知,Zn 的加入可以促进 Cd 向地上部分转移,因此在利用泡桐进行污染土地修复时,可适量加入 Zn 肥,便于最终回收处理重金属。

综上所述,白花泡桐幼苗在低浓度的 Cd 下表现为促进生长,高浓度下抑制生长;单一胁迫下,对 Zn、Cd 的富集量受外界环境的限制,且

对 Zn 的转移系数大于 1.00;在 Cd 胁迫下加入 Zn,能促进 Cd 向地上部分的转移,便于回收处理重金属,因其生物量较一般的草本超富集植物巨大,具有速生、轮伐期短、生物量大、生长速度快等特点,因此,也不失为植物修复的良好选择。利用白花泡桐这种高生物量经济植物修复重金属污染的土壤,能够兼顾生态和经济效益,具有很大的应用前景。

## REFERENCES

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.  
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of national soil pollution investigation. China Environ Prot Ind, 2014(5): 10-11 (in Chinese).
- [2] 贾伟涛,吕素莲,林康祺,等. 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展. 生物工程学报, 2020, 36(3): 416-425.  
Jia WT, Lü SL, Lin KQ, et al. Research progress in phytoremediation of heavy-metal contaminated soils with high-biomass economic plants. Chin J Biotech, 2020, 36(3): 416-425 (in Chinese).
- [3] 王海慧,郇恒福,罗瑛,等. 土壤重金属污染及植物修复技术. 中国农学通报, 2009, 25(11): 210-214.  
Wang HH, Huan HF, Luo Y, et al. Soil contaminated by heavy metals and its phytoremediation technology. Chin Agric Sci Bull, 2009, 25(11): 210-214 (in Chinese).
- [4] 赵振利,张靖曼,郑秋莉,等. 白花泡桐丛枝病发生过程中全基因组 DNA 甲基化差异分析. 河南农业大学学报, 2020, 54(3): 400-407.  
Zhao ZL, Zhang JM, Zheng QL, et al. Difference analysis of DNA methylation in the whole genome of *Paulownia fortunei* during the occurrence of PaWB. J Henan Agric Univ, 2020, 54(3): 400-407 (in Chinese).
- [5] 冯卫生,吕锦锦,张靖柯,等. 泡桐花中糖苷类成分及其抗氧化活性. 中成药, 2020, 42(2): 369-374.  
Feng WS, Lü JJ, Zhang JK, et al. Glycosides from the flowers of *Paulownia fortunei* and their antioxidant

- activities. Chin Tradit Pat Med, 2020, 42(2): 369-374 (in Chinese).
- [6] 温道远, 韩晓雪, 杨金橘, 等. 泡桐纤维变化及其制浆造纸研究. 林产工业, 2020, 57(2): 41-45.  
Wen DY, Han XX, Yang JJ, et al. Study on fiber changes of *Paulownia* and its pulping and papermaking. Chin For Pro Ind, 2020, 57(2): 41-45 (in Chinese).
- [7] 朱连秋, 祖晓明, 汪恩锋. 白花泡桐对土壤重金属的积累与转运研究. 安徽农业科学, 2009, 37(25): 12063-12065, 12069.  
Zhu LQ, Zu XM, Wang EF. Study on the role of *Paulownia fortunei* in accumulation and transformation of heavy metal in soil. J Anhui Agric Sci, 2009, 37(25): 12063-12065, 12069 (in Chinese).
- [8] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000: 163-169.  
Zou Q. Experimental Guidance of Plant Physiology. Beijing: China Agric Press, 2000: 163-169 (in Chinese).
- [9] Xu QZ, Huang BR. Antioxidant metabolism associated with summer leaf senescence and turf quality decline for creeping bentgrass. Crop Sci, 2004, 44(2): 553-560.
- [10] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-263.  
Li HS. Principles and techniques of Plant Physiology and Biochemistry experiments. Beijing: Higher Edu Press, 2000: 134-263 (in Chinese).
- [11] 张志良, 瞿伟青. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2002: 71-78.  
Zhang ZL, Qu WQ. Plant Physiology experiment guide. Beijing: Higher Edu Press, 2002: 71-78 (in Chinese).
- [12] 赵亚华. 生物化学试验技术教程. 广州: 中南大学技术出版社, 2000, 151-154.  
Zhao YH. Biochemical Experimental Technology course. Guangzhou: Central South Univ Tech Press, 2000, 151-154 (in Chinese).
- [13] 李岚涛, 申凤敏, 马文连, 等. 镉胁迫下菊苣叶片原位高光谱响应特征与定量监测研究. 农业机械学报, 2020, 51(3): 146-155.  
Li LT, Shen FM, Ma WL, et al. Response characteristics and quantitative monitoring models analyzed using *in situ* leaf hyperspectral under different Cd stress conditions. Trans Chin Soc Agric Mach, 2020, 51(3): 146-155 (in Chinese).
- [14] 翁锦周, 林江波, 林加耕, 等. 盐胁迫对桉树幼苗的生长及叶绿素含量的影响. 热带作物学报, 2007(4): 15-20.  
Weng JZ, Lin JB, Lin JG, et al. Effect of salt stress on the growth and the content of chlorophyll in seedling leaves of *Eucalyptus*. Chin J Trop Crops, 2007(4): 15-20 (in Chinese).
- [15] Ibrahim E A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. J Plant Physiol, 2016, 192: 38-46.
- [16] Khalid S, Shahid M, Niazi NK, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils//Whitacre D, ed. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. New York: Springer, 2012, 182: 247-268.
- [17] 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. 环境科学, 2019, 40(1): 470-479.  
Guo JM, Yang JX, Yang J, et al. Interaction of Cd and Zn affecting the root morphology and accumulation of heavy metals in *Sedum aizoon*. Chin J Envir Sci, 2019, 40(1): 470-479 (in Chinese).
- [18] 齐世静, 于星宇, 温友伟, 等. 重金属  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  胁迫对小白菜生理及其 *BcMT2a* 基因表达的影响. 水土保持学报, 2018, 32(2): 335-342.  
Qi SJ, Yu XY, Wen YW, et al. Effects of heavy metal  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  stress on physiology and the expression of *BcMT2a* gene in *Brassica campestris* L.. J Soil Water Conserv, 2018, 32(2): 335-342 (in Chinese).
- [19] 姜志艳, 王建英, 杨雪梅. 铜、铅、锌对黄芪生长及其 DNA 损伤的影响. 南方农业学报, 2013, 17(2): 205-209.  
Jang ZY, Wang JY, Yang XM. Effect of copper, lead and zinc on growth of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. Varmongholicus (Bge.) Hsiao and its DNA damage. J Southern Agric, 2013, 17(2): 205-209 (in Chinese).
- [20] 谭万能, 李志安, 邹碧. 植物对重金属耐性的分子

- 生态机理. 植物生态学报, 2006, 19(4): 703-712.
- Tan WN, Li ZA, Zou B. Molecular mechanism of plant tolerance to heavy metals. Chin J Plant Ecol, 2006, 19(4): 703-712 (in Chinese).
- [21] 王泽港, 骆剑峰, 刘冲, 等. 单一重金属污染对水稻叶片光合特性的影响. 上海环境科学, 2004(6): 240-243.
- Wang ZG, Luo JF, Liu C, et al. Effect of individual heavy metals on photosynthetic characteristics in rice leaves. Shanghai Environ Sci, 2004(6): 240-243 (in Chinese).
- [22] 孙晓灿, 魏虹, 谢小红, 等. 水培条件下秋华柳对重金属 Cd 的富集特性及光合响应. 环境科学研究, 2012, 25(2): 220-225.
- Sun XC, Wei H, Xie XH, et al. Bioaccumulation and photosynthesis response of *Salix variegata* to cadmium under hydroponic culture. Res Environ Sci, 2012, 25(2): 220-225 (in Chinese).
- [23] 郭晖, 郭孝茹, 柴光东, 等. 重金属短期胁迫下 5 种观赏植物积累特性与生理抗性研究. 西南林业大学学报, 2017, 37(4): 29-33.
- Guo H, Guo XR, Chai GD, et al. Soil heavy metals stress on the accumulation characteristics and physiological resistance of 5 ornamental plants in the short-term condilions. J Southwest For Univ: Nat Sci, 2017, 37(4): 29-33 (in Chinese).
- [24] 万子栋, 高天鹏, 周玉霞, 等. 重金属复合胁迫下碱蓬萌发生长及富集特征. 生物工程学报, 2020, 36(03): 493-507.
- Wan ZD, Gao TP, Zhou YX, et al. Seed germination, bud growth and heavy-metal accumulation of *Suaeda salsa*. Chin J Biotech, 2020, 36(3): 493-507 (in Chinese).
- [25] 冯莲莲, 郭京霞, 黄梓璨, 等. 水稻土中 7 个水稻品种对土壤 Cd、Pb 的富集与转运:田间研究. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2146-2153.
- Feng LL, Guo JX, Huang ZC, et al. A field study on the accumulation and translocation of cadmium and lead from a contaminated paddy rice field by seven rice cultivars. Ecol Environ Sci, 2017, 26(12): 2146-2153 (in Chinese).
- [26] 娄腾雪, 吕素莲, 李银心. 盐角草在 Cd、Pb、Li 污染盐土修复中的应用潜力. 生物工程学报, 2020, 36(3): 481-492.
- Lou TX, Lü SL, Li YX. Application potential of *Salicornia europaea* in remediation of Cd, Pb and Li contaminated saline soil. Chin J Biotech, 2020, 36(3): 481-492 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)