

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.017

基于因子分析的不同楸树无性系耐镉综合评价

刘振华^{1,2}, 王军辉¹, 童方平², 孙良³, 李贵²,
陈瑞², 吴敏², 刘作群⁴, 麻文俊^{1*}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 楸树国家创新联盟, 北京 100091; 2. 湖南省林业科学院, 湖南长沙 410004; 3. 浏阳市浏阳湖国有林场, 湖南浏阳 410300; 4. 宁乡市园林绿化维护中心, 湖南宁乡 410600)

摘要: [目的] 为了评价 10 个不同无性系楸树的耐镉能力, 为镉污染土壤的修复提供植物材料。[方法] 在不同镉胁迫浓度下, 通过对生长量、生物量、叶片叶绿素含量、根茎叶中镉元素含量、叶片解剖结构、叶片中过氧化氢含量 (H_2O_2)、超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 含量、谷胱甘肽 (GSH)、过氧化氢酶 (CAT) 活性、过氧化物酶 (POD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性的测定, 并利用因子分析法对 10 个不同无性系楸树耐镉能力进行综合评价。[结果] 不同浓度镉胁迫下, 除 8402 无性系根生物量差异不显著外, 其余无性系地上和根生物量在不同镉浓度间存在差异; 随镉胁迫浓度的升高, 大部分无性系株高和地径增长量均表现为先升高后降低的趋势; 除 8402 和 72 无性系在 2 000 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉胁迫下根生物量比对照高外, 其它无性系在较低浓度镉胁迫下促进了生物量增加, 到了一定浓度随着镉浓度的增加, 生物量逐渐减少。楸树对镉的富集主要在根部, 600 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉胁迫下, 63 无性系根、叶中镉含量最高, 8402 无性系茎中镉含量最高; 1 200 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉胁迫下, 5-2 无性系根中镉含量最高, 1-1 无性系茎和叶中镉含量最高; 2 000 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉胁迫下, 5-8 无性系根中镉含量最高, 8402 无性系茎中镉含量最高, 72 无性系叶中镉含量最高。在一定胁迫压力内, 抗氧化酶活性和植物体内的活性氧物质的浓度呈正相关性。[结论] 对各指标进行综合分析表明, 在 0~2 000 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉胁迫下, 10 个楸树无性系耐镉能力大小排序为 5-8>0>20-01>2-8>5-2>63>8402>1>72>1-1。研究结果为镉污染土壤修复提供了植物材料, 在土壤镉污染 2 000 $mg \cdot kg^{-1}$ 以下, 能够利用镉耐受能力强的楸树无性系进行修复。

关键词: 因子分析; 无性系; 楸树; 镉

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)06-0151-10

近年来, 随着工业废弃物的排放和化肥等使用的不断增多, 重金属污染已经成为一个严重的环境问题, 影响人类健康和农业生产^[1]。McCallum^[2]研究表明, 镉 (Sb) 和镉的化合物是一类具有潜在毒性的重金属物质, 具有致癌作用。我国镉资源丰富, 储量和产量均为世界第一位, 主要分布在湖南、广西和贵州等南方省区^[3-5]。由于长年的开采和冶炼造成当地土壤严重的镉污染, 何孟常等^[6]研

究表明, 位于湖南省的锡矿山镉矿区土壤中镉含量的最高浓度达 5 045 $mg \cdot kg^{-1}$ 。因此, 镉污染土壤的治理成为迫切需要解决的问题。植物修复具有绿色、成本低和适合大面积修复的特点, 被广泛应用。目前, 报道的镉矿区具有修复潜力的草本植物主要有芒 (*Miscanthus sinensis* Anderss.)^[7]、狗牙根 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)、蜈蚣草 (*Eremochloa ciliaris* L.)、长叶车前草

收稿日期: 2021-04-28 修回日期: 2021-10-21

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费项目 (CAFYBB2020SZ003); 长沙市杰出青年培养计划 (kq2009087)

* 通讯作者: 麻文俊, 博士, 副研究员。主要研究方向: 楸树遗传育种研究。Email: mwjlx@sina.com

(*Plantago depressa* L.)、大叶井口边草 (*Pteris cretica* var. *nervosa*)^[8]；木本植物有臭椿 (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle)、构树 (*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L'Hér. ex Vent.)、大叶黄杨 (*Buxus megistophylla* Levl.) 和紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.)^[9]，其中，高大乔木尤其是珍贵树种较少，因此，寻求一种既具有修复作用，且经济价值高的树种显得尤为重要。楸树 (*Catalpa bungei* C. A. Mey.) 为中国特有的珍贵树种，木材可用作高档家具、地板、特种设备的材料^[10-11]。楸树也具有较强的耐污染能力，已有研究表明，楸树对镉具有较好的吸收和转运能力^[12]。作为一个生长快且经济价值高的乔木树种，其产品不会进入食物链，对人类健康没有风险，因此，利用楸树来修复镉污染土壤具有广阔的前景。有报道证实，不同无性系植物对重金属的累积和吸收具有差异^[13-14]，如柳树 (*Salix* spp.)^[15]、栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.)^[16]。本研究旨在运用因子分析法对不同无性系楸树耐镉能力进行综合评价，以期选择出较强耐镉能力的无性系，为镉污染土壤提供具有修复潜力的植物材料。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试材料为中国林业科学研究院选育的 10 个楸树优良无性系，分别为 8402、20-01、5-8、63、5-2、0、1、2-8、1-1 和 72。

1.2 试验设计

试验地点位于湖南省林业科学院龙伏科研基地 (28°24'0" N, 113°29'35" E)，属于亚热带季风湿润气候，年平均气温 17.5 °C，年平均降水量 1 467 mm，土壤为第四纪红壤。参试无性系均为组培苗，移植成活后 1 个月选取长势基本一致的幼苗进行镉胁迫试验，培养基质为当地无污染的红壤，土壤 pH 值为 4.8，土壤的化学元素背景值：镉 1.94 mg·kg⁻¹、全氮 0.74 g·kg⁻¹、全磷 0.15 g·kg⁻¹、全钾 11.3 g·kg⁻¹、有机质 10.5 g·kg⁻¹、有效磷 0.51 mg·kg⁻¹、速效钾 39.2 mg·kg⁻¹、水解性氮 63.7 mg·kg⁻¹。2020 年 6 月 15 日进行镉胁迫处理，采用土培盆栽的方法，塑料盆规格为 30 cm × 18 cm (直径 × 高，盆底带有 5 个约 1 cm² 的透水孔)，土壤过 2 mm 塑料筛，每盆装土 5 kg。根据 Li 等^[17]对湖南省娄底市冷水江镉矿区土壤重金

属镉检测的含量 (185.6~2 081.3 mg·kg⁻¹)，设置 4 个处理浓度 (以镉计)：0、600、1 200、2 000 mg·kg⁻¹，采用浇灌的方式进行土壤胁迫处理。用酒石酸镉钾 (KSbC₄H₄O₇·1/2H₂O，分析纯，国药集团化学试剂有限公司) 配置相应的水溶液 3 L，在 6 月 15 日、6 月 18 日、6 月 21 日分 3 批次进行浇灌，每批次浇灌 1 L，每次以溶液不渗透出盆底为准。试验采取随机区组设计，每个盆中栽植 4 株幼苗，3 次重复，每个处理 3 盆，共 12 株。为保持与外界气候条件一致性，盆栽植物置于仅具有遮雨功能的透光通风遮阴棚中，6 月 21 日以后每隔 3 d 浇 1 次水，以保持土壤湿润即可。

1.3 样品采集与测定

培养 90 d 后，每个处理每盆中随机选取 1 株，共 3 株，用去离子水冲洗 3 次，将根系等部位的泥土冲洗干净，测定株高和地径后按根、茎和叶三部分收获，每个处理选取 5 g 鲜叶置于液氮中用于测定抗逆相关酶与非酶物质；另选取 5 g 鲜叶置于干冰上用于测定叶绿素及石蜡切片；其余 105 °C 烘箱中杀青 30 min，然后 80 °C 下烘干至恒质量，分别测定各处理根、茎和叶生物量。各处理的根、茎、叶分别用粉碎机粉碎，过 100 目筛备用。

1.3.1 镉含量测定 称取 0.5 g 各部位烘干样品置于微波消解仪 (CEM Mars6) 中加入 10 mL 浓硝酸进行硝化，硝化完定容至 50 mL，采用 ICP-MS (Thermo ICAP7000) 测定各部分镉含量。

1.3.2 叶绿素含量测定 采用丙酮乙醇浸提法^[18]测定叶片中叶绿素含量。

1.3.3 生理生化指标测定 过氧化氢 (H₂O₂) 含量、超氧阴离子 (O₂^{·-}) 含量、过氧化氢酶 (CAT) 活性、还原型谷胱甘肽 (GSH) 活性、过氧化物酶 (POD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性选用 Solarbio 公司试剂盒测定。

1.3.4 栅栏组织/海绵组织 采用石蜡切片法，用 FAA 固定 48 h-脱水-透明-包埋-切片-番红、固绿染色-中性树胶封片。在光学显微镜下观察拍照测量。

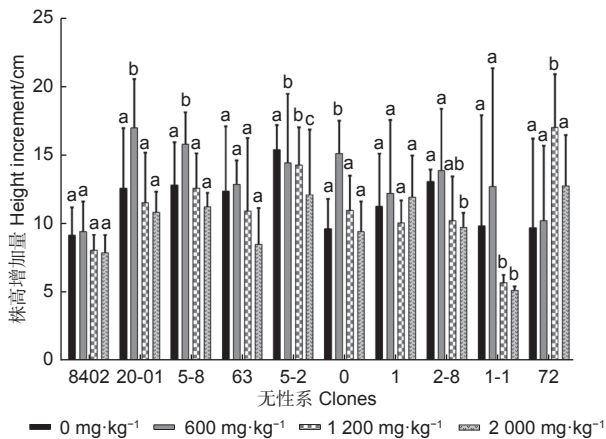
1.4 统计分析方法

所有试验结果都以 3 个重复的均值 ± 标准误表示，每个重复有 3 株。数据分析采用 Spss 17.0 统计软件进行单因素方差分析 (ANOVA)，因子分析参照张连金等^[19]方法。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对不同无性系楸树生长的影响

图1、2表明: 随镉浓度的增加, 大部分无性系株高、地径增长量均表现为先升高后降低的趋势。方差分析表明: 不同浓度镉胁迫下, 8402、63、1无性系的株高增长量差异不显著, 5-8、5-2、0、2-8、72无性系的地径增长量差异不显著, 其他均存在差异。0 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 株高和地径增长最大的分别为5-2和0无性系, 最小的分别为8402和20-01; 600 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 株高和地径增长最大的均为20-01, 最小的分别为8402



注: 不同小写字母表示同一家系在不同镉浓度下差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

Notes: Different letters indicate significant differences among the treatments at $p < 0.05$ ($n = 3$). The same below.

图1 镉胁迫下不同无性系株高增长量

Fig. 1 Effects of Sb concentration on height increment of *Catalpa bungei*.

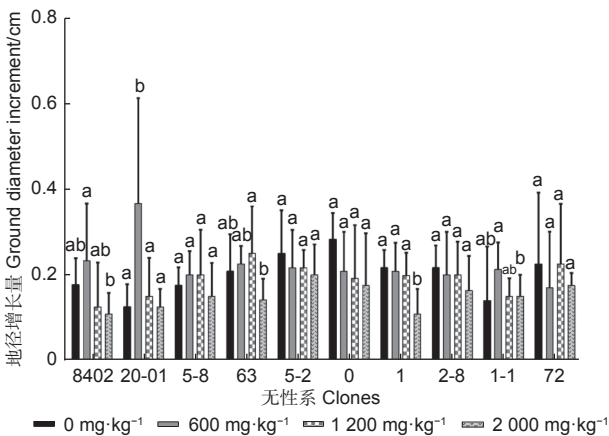


图2 镉胁迫下不同无性系地径增长量

Fig. 2 Effects of Sb concentration on ground diameter increment of *Catalpa bungei*.

和72; 1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 株高和地径增长最大的分别为72和63无性系, 最小的分别为1-1和8402; 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 株高和地径增长最大的分别为72和5-2无性系, 最小的分别为1-1和8402无性系。

2.2 镉对不同无性系楸树生物量的影响

由表1可知: 不同胁迫处理下, 除8402无性系根生物量差异不显著外, 其余无性系地上部分和根生物量在不同镉浓度间存在差异; 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 除8402和72无性系, 根生物量比对照高外, 其余无性系根生物量均小于对照。5-2和63无性系地上生物量随胁迫浓度升高逐渐降低, 2-8无性系地上生物量随胁迫浓度升高先降低再升高后降低, 其它无性系在镉胁迫未超过600 mg·kg⁻¹ 促进了地上生物量的增加, 超过1 200 mg·kg⁻¹ 生物量逐渐减少。600 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 根和地上生物量最大的均为5-8, 最小的分别为20-01和72; 1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 根和地上生物量最大的分别为5-8和2-8, 最小的均为1-1; 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 根和地上生物量最大的分别为8402和5-8, 最小的均为1-1。

2.3 镉胁迫下不同无性系楸树各器官镉含量

由表2可知: 镉主要积累在楸树的根部, 600 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 63无性系根、叶中的镉含量最高, 8402无性系茎中的镉含量最高; 1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 5-2无性系根中的镉含量最高, 1-1无性系茎和叶中的镉含量均最高; 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 5-8无性系根中的镉含量最高, 8402无性系茎中的镉含量最高, 72无性系叶中的镉含量最高。

2.4 镉对不同无性系楸树叶绿素含量的影响

由图3可知: 随镉胁迫浓度的增加, 8402、2-8、1-1和72无性系的叶绿素含量呈下降趋势, 20-01和63无性系叶绿素含量呈下降-上升-再下降趋势, 5-8、5-2和0无性系叶绿素含量呈先上升后下降的趋势, 1无性系叶绿素含量呈先上升后下降再上升趋势。在镉胁迫下, 5-2和1无性系叶片的叶绿素含量均大于对照, 5-8无性系在600、1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 叶绿素含量均大于对照, 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 叶绿素含量小于对照, 20-01在镉胁迫浓度2 000 mg·kg⁻¹ 时, 叶绿素含量与对照相当。

表 1 镉胁迫下不同无性系楸树生物量

Table 1 The biomass of different clones of *Catalpa bungei* under Antimony stress

不同部位 Different parts	胁迫浓度 Stress concentration/ (mg·kg ⁻¹)	无性系生物量 Biomass of different clones/g				
		8402	20-01	5-8	63	5-2
根 Root	0	8.62 ± 0.64 a	4.16 ± 0.14 b	9.01 ± 0.50 c	5.86 ± 0.54 b	7.99 ± 0.22 a
	600	9.24 ± 0.38 a	4.74 ± 0.22 a	11.22 ± 0.35 a	7.38 ± 0.17 a	7.28 ± 0.13 b
	1 200	8.62 ± 0.80 a	3.70 ± 0.24 c	10.03 ± 0.45 b	6.33 ± 0.21 b	6.62 ± 0.15 c
	2 000	9.24 ± 1.32 a	3.32 ± 0.15 d	7.12 ± 0.22 d	5.09 ± 0.34 c	5.44 ± 0.12 d
地上部分 Aboveground	0	16.08 ± 1.72 a	18.21 ± 1.09 a	23.69 ± 1.76 b	18.99 ± 2.12 a	22.46 ± 2.78 a
	600	18.15 ± 0.61 a	19.48 ± 1.62 a	34.21 ± 1.37 a	16.26 ± 0.72 b	19.76 ± 1.90 ab
	1 200	15.82 ± 1.95 ab	18.18 ± 1.29 a	18.31 ± 1.72 c	15.59 ± 0.72 bc	18.61 ± 1.76 b
	2 000	12.86 ± 1.97 b	15.20 ± 1.24 b	15.51 ± 1.84 c	13.48 ± 0.91 c	13.37 ± 1.39 c

不同部位 Different parts	胁迫浓度 Stress concentration/ (mg·kg ⁻¹)	无性系生物量 Biomass of different clones/g				
		0	1	2-8	1-1	72
根 Root	0	7.02 ± 0.15 b	8.88 ± 0.95 a	5.65 ± 0.23 b	2.20 ± 0.06 b	4.27 ± 0.26 b
	600	8.45 ± 0.56 a	9.10 ± 0.53 a	7.95 ± 0.27 a	5.49 ± 0.17 a	5.87 ± 0.05 a
	1 200	7.35 ± 0.51 ab	8.94 ± 0.38 a	6.13 ± 0.37 b	1.89 ± 0.21 c	5.84 ± 0.22 a
	2 000	6.54 ± 0.53 c	6.98 ± 0.42 b	4.70 ± 0.13 c	1.72 ± 0.14 c	4.82 ± 0.17 b
地上部分 Aboveground	0	11.75 ± 1.17 b	18.89 ± 1.00 a	18.56 ± 1.99 a	9.83 ± 0.12 b	11.52 ± 1.02 b
	600	14.28 ± 0.86 a	20.61 ± 1.96 a	15.48 ± 0.69 b	14.10 ± 0.68 a	13.65 ± 0.96 a
	1 200	14.17 ± 0.30 a	14.01 ± 0.47 b	19.23 ± 1.39 a	4.25 ± 0.24 c	10.61 ± 1.40 bc
	2 000	9.56 ± 0.97 c	10.18 ± 0.77 c	12.58 ± 2.05 b	3.86 ± 0.10 c	9.28 ± 1.04 c

注：同列不同小写字母代表同一无性系不同胁迫浓度间差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different stress concentrations of the same clone in the same column at 0.05 level ($n = 3$).

2.5 镉胁迫下不同无性系楸树叶中氧化物质含量和抗氧化酶活性

表 3 表明：随镉胁迫浓度的增加，各无性系体内的 O_2^- 产生速率逐渐增大；600 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，20-01 无性系的 O_2^- 产生速率最大，8402 无性系的最小；1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，72 无性系的 O_2^- 产生速率最大，8402 无性系的最小；2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，2-8 无性系的 O_2^- 产生速率最大，5-8 无性系的最小。各无性系体内的 H_2O_2 含量，600 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，5-8 无性系的最大，20-01 无性系的最小；1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，20-01 无性系的最高，0 无性系的最小；2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，20-01 无性系的最高，5-8 无性系的最小。

在镉胁迫浓度小于 2 000 mg·kg⁻¹ 时，各无性系体内的谷胱甘肽 (GSH) 活性随镉胁迫浓度的升高而升高，在镉胁迫浓度 2 000 mg·kg⁻¹ 时，除

63 和 2-8 无性系外，其它无性系叶片中的 GSH 活性均降低，这可能是镉浓度过高，GSH 的合成受到了影响。 H_2O_2 等活性氧物质的产生诱导了过氧化物酶 (POD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性的增加，而增加的酶活性用以清除大量产生的活性氧物质。在镉胁迫浓度小于 2 000 mg·kg⁻¹ 时，各无性系体内的 APX 活性随镉胁迫浓度的增加而升高；在 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫浓度时，APX 活性比 1 200 mg·kg⁻¹ 胁迫时低。POD 活性和 APX 活性具有相似的变化趋势，CAT 活性随镉胁迫浓度的增加而升高。

2.6 镉对不同无性系楸树叶解剖结构的影响

图 4 表明：10 个无性系楸树栅海比均随镉胁迫浓度的增加呈先升后降的趋势。600 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，所有无性系的栅海比均比对照的高；1 200 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下，除 0 和 72 无性系的栅海比均比对照低外，其余无性系的栅海比均比对照

表 2 镉胁迫下不同无性系楸树各器官中镉含量

Table 2 Antimony content in organs of different clones of *Catalpa bungei* under Antimony stress

mg·kg⁻¹

器官 Organs	胁迫浓度 Stress concentration/(mg·kg ⁻¹)	无性系 Clones				
		8402	20-01	5-8	63	5-2
根 Root	0	0.33 ± 0.02 d	0.56 ± 0.02 a	0.18 ± 0.01 f	0.24 ± 0.01 e	0.37 ± 0.01 c
	600	983.00 ± 13.22 h	1 764.00 ± 12.00 c	1 547.00 ± 13.89 d	2 701.00 ± 9.50 a	1 833.00 ± 17.00 b
	1 200	2 335.00 ± 15.52 f	2 014.00 ± 3.00 h	3 176.00 ± 15.00 b	3 066.00 ± 3.61 c	3 648.00 ± 22.71 a
	2 000	3 508.00 ± 13.00 c	2 405.00 ± 29.00 g	5 799.00 ± 33.18 a	3 278.00 ± 9.40 e	3 346.00 ± 14.11 d
茎 Stem	0	0.43 ± 0.01 e	0.54 ± 0.03 d	0.15 ± 0.00 g	0.28 ± 0.01 f	0.75 ± 0.02 c
	600	183.00 ± 7.55 a	29.10 ± 1.50 g	93.70 ± 2.20 c	112.00 ± 3.30 b	74.60 ± 1.30 d
	1 200	142.00 ± 3.64 c	29.90 ± 1.18 h	109.00 ± 1.44 d	146.87 ± 5.50 b	86.70 ± 1.65 e
	2 000	164.00 ± 0.90 a	68.90 ± 2.00 h	156.00 ± 2.20 b	150.00 ± 3.20 c	82.70 ± 1.30 f
叶 Leaf	0	0.40 ± 0.02 d	1.33 ± 0.04 a	0.44 ± 0.03 c	0.22 ± 0.01 g	0.43 ± 0.01 cd
	600	61.10 ± 2.46 g	9.46 ± 0.21 i	71.60 ± 2.70 f	117.00 ± 1.60 a	62.20 ± 1.50 g
	1 200	96.20 ± 0.30 d	67.60 ± 2.43 g	89.60 ± 2.81 e	136.00 ± 2.35 b	81.10 ± 2.01 f
	2 000	121.00 ± 2.17 c	82.20 ± 2.09 f	108.00 ± 4.30 d	142.00 ± 5.60 b	116.00 ± 2.90 c

器官 Organs	胁迫浓度 Stress concentration/(mg·kg ⁻¹)	无性系 Clones				
		0	1	2-8	1-1	72
根 Root	0	0.51 ± 0.04 b	0.35 ± 0.01 cd	0.26 ± 0.01 e	0.13 ± 0.01 g	0.17 ± 0.01 f
	600	1 208.00 ± 11.14 e	2 690.00 ± 11.50 a	1 055.00 ± 6.56 g	1 204.00 ± 8.51 e	1 145.00 ± 7.40 f
	1 200	1 782.00 ± 15.39 i	2 792.00 ± 9.15 d	2 622.00 ± 4.36 e	2 175.00 ± 8.30 g	1 504.00 ± 6.40 j
	2 000	2 018.00 ± 18.52 h	5 249.00 ± 14.40 b	2 651.00 ± 36.37 f	3 460.00 ± 89.09 c	1 539.00 ± 9.30 i
茎 Stem	0	0.14 ± 0.02 g	1.73 ± 0.09 a	0.25 ± 0.01 f	1.46 ± 0.15 b	0.43 ± 0.02 e
	600	72.40 ± 3.32 d	71.60 ± 1.10 d	23.00 ± 1.15 h	38.10 ± 2.20 f	46.20 ± 1.25 e
	1 200	85.00 ± 3.91 e	67.10 ± 2.25 f	69.10 ± 1.51 f	386.00 ± 5.30 a	41.70 ± 1.20 g
	2 000	109.00 ± 3.89 d	102.00 ± 2.50 e	66.80 ± 4.25 g	99.60 ± 2.38 e	103.00 ± 1.67 e
叶 Leaf	0	0.54 ± 0.03 b	0.12 ± 0.00 h	0.33 ± 0.02 f	0.34 ± 0.01 e	0.39 ± 0.01 d
	600	78.10 ± 2.83 e	99.40 ± 2.00 b	52.10 ± 0.70 h	90.00 ± 1.45 c	82.10 ± 1.60 d
	1 200	83.30 ± 4.80 f	101.00 ± 1.65 c	88.80 ± 3.01 e	163.87 ± 2.70 a	100.00 ± 2.42 c
	2 000	94.60 ± 2.90 e	111.00 ± 3.20 cd	51.50 ± 1.81 g	89.37 ± 2.90 e	165.00 ± 2.30 a

注: 同行不同小写字母代表同一胁迫浓度下不同无性系差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same line indicatesignificant differences among different clones under the same stress concentrationat 0.05 level ($n = 3$).

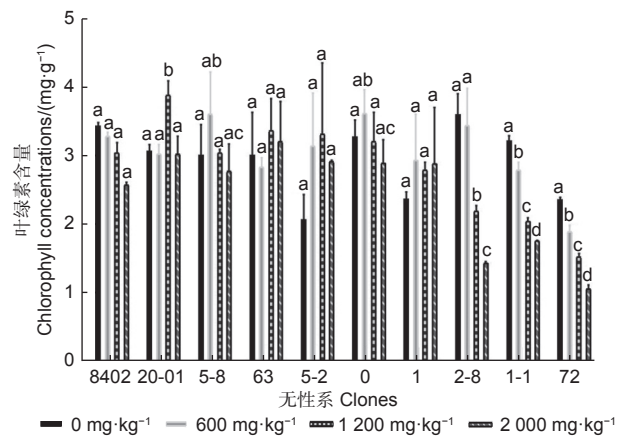


图 3 镉胁迫下不同无性系楸树叶绿素含量

Fig. 3 Chlorophyll content of different clones of *Catalpa bungei* under Antimony stress

的高; 2 000 mg·kg⁻¹ 镉胁迫下, 除 5-2 无性系的栅海比比对照高外, 其余无性系的均比对照的低。

2.7 基于因子分析的楸树不同无性系耐镉综合评价

对 15 个因素作 KMO 和 Bartlett, 判断是否适合做因子分析。当 KMO 统计量 > 0.5, 说明可利用因子分析方法进行分析。本研究的效度分析中, KMO 值为 0.649 > 0.5, P 值为 0.000, 远小于显著性水平。因此, 所选用的变量适合做因子分析。通过因子分析共提取了 4 个特征值大于 1 的因子, 其特征值分别为 4.981、2.341、1.920、1.127, 其方差累积贡献率为 69.132%。因此, 这 4 个因子包含了指标体系中的绝大部分信息, 说明将这

表 3 锑胁迫下不同无性系楸树叶中氧化物质含量和抗氧化酶活性

Table 3 Contents of oxidants substances and activity of antioxidant enzymes in leaves of different clones of *Catalpa bungei* under Antimony stress

无性系 Clones	胁迫浓度 Stress concentration/ (mg·kg ⁻¹)	超氧阴离子 O ₂ ^{-·} / (μmol·g ⁻¹)	抗坏血酸过氧化物酶 APX/(U·mg ⁻¹)	谷胱甘肽 GSH/ (μg·g ⁻¹)	过氧化氢 H ₂ O ₂ / (μmol·g ⁻¹)	过氧化氢酶 CAT/(U·mg ⁻¹)	过氧化物酶 POD/(U·mg ⁻¹)
8402	0	0.000 050 ± 0.000 004	0.004 7 ± 0.001 5	1.37 ± 0.37	0.59 ± 0.10	0.45 ± 0.05	0.45 ± 0.03
	600	0.000 068 ± 0.000 002	0.078 8 ± 0.009 2	4.42 ± 0.16	5.99 ± 0.38	2.23 ± 0.18	3.96 ± 0.04
	1200	0.000 097 ± 0.000 029	0.093 4 ± 0.003 6	6.24 ± 0.82	7.45 ± 0.49	5.38 ± 0.18	5.27 ± 0.19
	2000	0.000 211 ± 0.000 004	0.071 7 ± 0.004 6	5.70 ± 0.33	9.25 ± 0.16	8.54 ± 0.41	4.92 ± 0.07
20-01	0	0.000 065 ± 0.000 009	0.006 4 ± 0.001 7	1.48 ± 0.21	0.53 ± 0.14	0.59 ± 0.42	0.56 ± 0.13
	600	0.000 140 ± 0.000 042	0.060 2 ± 0.003 3	4.63 ± 0.25	3.56 ± 0.20	3.12 ± 0.13	4.73 ± 0.10
	1200	0.000 221 ± 0.000 006	0.100 4 ± 0.005 5	6.12 ± 0.09	8.18 ± 0.46	6.65 ± 0.28	5.57 ± 0.32
	2000	0.000 254 ± 0.000 008	0.076 5 ± 0.001 9	3.96 ± 0.32	10.74 ± 0.25	7.50 ± 0.32	4.28 ± 0.15
5-8	0	0.000 038 ± 0.000 005	0.007 6 ± 0.001 3	1.50 ± 0.17	0.64 ± 0.18	0.74 ± 0.10	0.31 ± 0.02
	600	0.000 114 ± 0.000 003	0.102 0 ± 0.005 4	6.27 ± 0.26	8.31 ± 0.50	6.30 ± 0.19	5.46 ± 0.35
	1200	0.000 148 ± 0.000 007	0.174 2 ± 0.009 3	8.45 ± 0.15	5.30 ± 0.08	8.30 ± 0.32	8.66 ± 0.21
	2000	0.000 183 ± 0.000 009	0.099 1 ± 0.005 5	4.59 ± 0.29	5.38 ± 0.21	9.37 ± 0.67	5.41 ± 0.13
63	0	0.000 060 ± 0.000 006	0.006 7 ± 0.002 8	1.34 ± 0.14	0.72 ± 0.15	0.43 ± 0.08	0.40 ± 0.01
	600	0.000 135 ± 0.000 008	0.060 3 ± 0.006 7	5.38 ± 0.15	5.47 ± 0.24	3.31 ± 0.30	4.57 ± 0.19
	1200	0.000 173 ± 0.000 007	0.146 3 ± 0.006	6.54 ± 0.74	6.48 ± 0.45	6.09 ± 0.53	5.31 ± 0.18
	2000	0.000 257 ± 0.000 01	0.061 8 ± 0.005 2	10.19 ± 0.64	7.10 ± 0.24	6.96 ± 0.72	3.81 ± 0.14
5-2	0	0.000 040 ± 0.000 007	0.009 2 ± 0.002 7	1.28 ± 0.26	0.55 ± 0.11	0.87 ± 0.06	0.63 ± 0.08
	600	0.000 132 ± 0.000 004	0.040 2 ± 0.002 9	5.25 ± 0.27	6.33 ± 0.16	3.40 ± 0.37	3.64 ± 0.26
	1200	0.000 177 ± 0.000 003	0.110 7 ± 0.005 7	7.42 ± 0.33	6.95 ± 0.57	6.25 ± 0.26	5.79 ± 0.17
	2000	0.000 237 ± 0.000 015	0.058 2 ± 0.007 8	7.34 ± 0.60	7.15 ± 0.09	8.10 ± 0.36	3.35 ± 0.24
0	0	0.000 037 ± 0.000 014	0.005 9 ± 0.001 1	1.50 ± 0.30	0.66 ± 0.11	0.39 ± 0.08	0.66 ± 0.05
	600	0.000 082 ± 0.000 005	0.061 4 ± 0.004 4	5.89 ± 0.25	4.62 ± 0.15	4.87 ± 0.30	4.66 ± 0.22
	1200	0.000 112 ± 0.000 006	0.149 6 ± 0.004	6.35 ± 0.20	5.08 ± 0.13	6.68 ± 0.23	5.44 ± 0.31
	2000	0.000 184 ± 0.000 011	0.085 2 ± 0.004 4	6.02 ± 0.08	5.99 ± 0.26	8.89 ± 0.28	3.57 ± 0.35
1	0	0.000 039 ± 0.000 014	0.006 6 ± 0.000 7	1.91 ± 0.06	0.74 ± 0.13	0.42 ± 0.07	0.56 ± 0.04
	600	0.000 129 ± 0.000 006	0.041 6 ± 0.006 5	4.57 ± 0.44	3.79 ± 0.21	3.66 ± 0.22	4.55 ± 0.35
	1200	0.000 182 ± 0.000 002	0.126 5 ± 0.008	5.32 ± 0.09	5.65 ± 0.26	5.55 ± 0.27	5.84 ± 0.19
	2000	0.000 229 ± 0.000 013	0.051 6 ± 0.003 1	4.79 ± 0.42	8.02 ± 0.57	7.13 ± 0.62	2.75 ± 0.15
2-8	0	0.000 035 ± 0.000 003	0.003 2 ± 0.001 2	1.11 ± 0.16	0.53 ± 0.15	0.53 ± 0.15	0.63 ± 0.09
	600	0.000 120 ± 0.000 006	0.069 7 ± 0.007 2	4.75 ± 0.34	4.49 ± 0.33	4.49 ± 0.33	3.44 ± 0.25
	1200	0.000 144 ± 0.000 009	0.122 7 ± 0.003	6.66 ± 0.25	5.19 ± 0.20	5.19 ± 0.20	5.81 ± 0.83
	2000	0.000 280 ± 0.000 011	0.089 8 ± 0.006 3	7.10 ± 0.61	5.98 ± 0.36	5.98 ± 0.36	3.01 ± 0.14
1-1	0	0.000 027 ± 0.000 008	0.009 4 ± 0.000 9	1.57 ± 0.28	0.41 ± 0.07	0.53 ± 0.07	0.62 ± 0.03
	600	0.000 109 ± 0.000 007	0.053 8 ± 0.005	5.43 ± 0.41	5.11 ± 0.10	4.34 ± 0.11	4.71 ± 0.07
	1200	0.000 184 ± 0.000 008	0.125 8 ± 0.006	5.93 ± 0.30	5.68 ± 0.56	5.79 ± 0.43	6.14 ± 0.07
	2000	0.000 250 ± 0.000 013	0.048 3 ± 0.003 8	4.44 ± 0.43	6.28 ± 0.10	7.26 ± 0.56	5.43 ± 0.42
72	0	0.000 025 ± 0.000 012	0.004 3 ± 0.002 4	1.01 ± 0.14	0.63 ± 0.04	0.71 ± 0.10	0.69 ± 0.11
	600	0.000 074 ± 0.000 008	0.063 7 ± 0.002	4.57 ± 0.17	5.17 ± 0.20	2.50 ± 0.27	5.18 ± 0.57
	1200	0.000 236 ± 0.000 01	0.120 1 ± 0.005 5	5.11 ± 0.09	6.71 ± 0.14	4.23 ± 0.11	6.77 ± 0.29
	2000	0.000 273 ± 0.000 012	0.071 3 ± 0.007 6	3.41 ± 0.28	9.20 ± 0.39	7.62 ± 0.15	3.61 ± 0.37

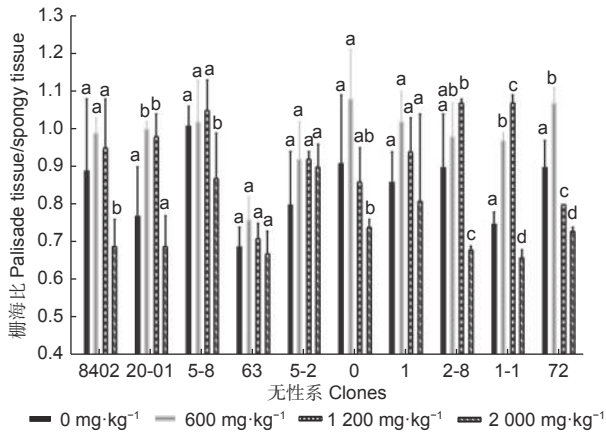


图4 镉胁迫下不同无性系楸树栅海比

Fig. 4 Palisade tissue/spongy tissue of different clones of *Catalpa bungei* under antimony stress

4个因子作为综合变量来评价不同无性系楸树耐镉能力是可行的。以各公因子方差贡献率占累计方差贡献率的权重作为系数,分别乘以因子的得分数(C),从而获得一个楸树不同无性系耐镉综合评价得分模型:

$$S=23.926/69.132 \times C1 + 18.479/69.132 \times C2 + 13.488/69.132 \times C3 + 13.239/69.132 \times C4$$

通过因子分析可知:10个楸树无性系在镉胁迫下的平均得分情况见表4。在0~2000 mg·kg⁻¹镉胁迫下,10个楸树无性系耐镉能力综合评价为5-8>0>20-01>2-8>5-2>63>8402>1>72>1-1。

3 讨论

重金属通过植物根系吸收后转运至地上部分对植物产生毒害作用^[20],地上生物量大可以降低植物单位面积中重金属的含量,从而降低重金属对植物的毒害作用。本研究中,除8402无性系根生物量差异不显著外,其余无性系地上和根生物量在不同镉浓度间存在差异,这说明不同无性系对重金属的响应有差异,这与施翔等^[16]和Yang等^[21]的研究结果相似。所有处理的地上生物量均大于根生物量,地上部分分散了镉的积累,这可能是楸树耐镉的一个原因。植物叶片中叶绿素含量是衡量植物耐重金属的重要生理指标,植物遭受重金属毒害会导致叶片中叶绿素含量降低,进而抑制光合作用导致生物量降低。有研究表明,镉破坏了植物光合系统(叶绿体、酶系统等)^[22]。芥菜(*Brassica juncea* (Linnaeus) Czernajew)和玉米(*Zea mays* L.)进行高浓度镉处理,芥菜的叶片变黄,玉米的叶绿

素合成受阻^[4]。本研究结果表明,10个无性系楸树叶绿素含量在镉胁迫下影响不大,有的处理甚至出现叶绿素含量有所提高,说明在镉浓度2000 mg·kg⁻¹以下镉胁迫对楸树无性系的叶绿素合成影响较小,这与上述研究结果不一致,镉胁迫尚未破坏叶绿体膜结构,没有造成叶绿体不可逆损伤^[23],更高浓度的镉胁迫对楸树叶绿素合成的影响还需要进一步研究。

本研究中,不同无性系楸树体内镉含量主要集中在根部,向地上部分转运少,这一结果与水稻(*Oryza sativa* L.)^[24]、构树(*Broussonetia papyrifera* (Linnaeus) L'Heritier ex Ventenat)、臭椿、大叶黄杨和紫穗槐^[9]等镉胁迫下的研究结果相似。已有研究表明,重金属可以通过抑制养分吸收和细胞分裂等来抑制根系的生长,耐性强的植物或者无性系表现出根的生物量大^[25]。参试楸树无性系根中富集镉最多的为5-8无性系,在2000 mg·kg⁻¹镉胁迫下,镉含量为5799 mg·kg⁻¹;茎中镉含量最高的为无性系1-1,在1200 mg·kg⁻¹镉胁迫下,镉含量为386 mg·kg⁻¹;叶片中镉含量最高的为无性系72,在2000 mg·kg⁻¹镉胁迫下,镉含量为165 mg·kg⁻¹。有研究表明,大叶黄杨地上部分最高镉含量为35.37 mg·kg⁻¹,根中含量最高为85.6 mg·kg⁻¹;构树地上部分镉含量最高为108.33 mg·kg⁻¹,根中含量最高为196.53 mg·kg⁻¹;紫穗槐地上部分镉含量最高为55.97 mg·kg⁻¹,根中含量最高为418.27 mg·kg⁻¹^[9];而狗牙根根中镉含量为2209.3 mg·kg⁻¹,芒根中镉含量为177.29 mg·kg⁻¹,地上部分镉含量最高为75.81 mg·kg⁻¹,苕麻(*Boehmeria nivea* (L.) Gaudich.)地上部分镉含量为748.7 mg·kg⁻¹^[4]。本研究中,楸树根内镉含量远高于目前已经报道植物根镉的含量,茎与叶片中镉的含量也高于大部分已报道植物地上部分镉的含量,楸树具有生长快、生物量大的特点,即使没有达到超富集植物的标准,但是地上部分较大的生物量也能够吸收较多的镉。楸树萌芽能力强,也可以通过收获地上部分生物量,让其萌发新的地上部分,再转运根系中吸收的镉,通过多次采集地上部分,减少因为根系的分解,镉重新回到土壤的风险。楸树生物量大、生长快、观赏价值高、耐镉能力强和具有较高的经济价值,利用转运系数较高的楸树无性系对镉污染土壤修复具有重要的现实意义。

表 4 楸树不同无性系耐锑综合评价得分表

Table 4 Comprehensive Evaluation score table of Antimony tolerance of different clones of *Catalpa bungei*

无性系 Clones	锑处理浓度 Stress concentration/(mg·kg ⁻¹)	因子 Factor				总分 Total score	平均得分 Average score
		C1	C2	C3	C4		
8402	600	2.37	-1.13	0.32	-0.93	0.40	-0.14
	1 200	0.81	-1.33	0.29	0.00	-0.02	
	2 000	-1.03	-1.30	-0.06	-0.43	-0.80	
20-01	600	0.54	2.88	-0.25	0.09	0.93	0.19
	1 200	-0.25	0.45	0.61	0.27	0.21	
	2 000	-1.12	0.03	-0.01	-0.97	-0.57	
5-8	600	0.60	0.26	1.16	0.23	0.55	0.34
	1 200	-0.22	0.40	0.78	3.18	0.79	
	2 000	-1.06	-0.34	0.30	0.49	-0.30	
63	600	0.19	0.08	0.22	-0.68	0.00	-0.03
	1 200	-0.65	-0.31	1.71	0.63	0.14	
	2 000	-1.00	-0.75	2.38	-0.77	-0.23	
5-2	600	0.64	0.37	-0.01	-1.30	0.07	0.03
	1 200	-0.21	0.44	0.48	0.81	0.29	
	2 000	-0.70	-0.11	0.64	-0.70	-0.28	
0	600	1.49	0.42	1.13	-0.49	0.75	0.31
	1200	0.14	0.31	0.73	0.93	0.45	
	2000	-0.74	-0.06	0.64	-0.65	-0.27	
1	600	0.88	0.39	-0.72	-0.44	0.18	-0.18
	1 200	-0.16	0.24	-0.73	1.07	0.07	
	2 000	-0.86	-0.61	-0.28	-1.48	-0.80	
2-8	600	0.67	1.06	0.24	-0.88	0.39	0.05
	1 200	-0.05	0.37	0.00	1.29	0.33	
	2 000	-1.31	0.68	-1.07	-0.42	-0.56	
1-1	600	1.28	0.55	-1.34	-0.45	0.24	-0.33
	1 200	1.40	-3.21	-1.14	1.44	-0.32	
	2 000	-1.33	-0.31	-1.60	-0.29	-0.91	
72	600	1.55	0.67	-0.97	-0.12	0.50	-0.25
	1 200	-0.71	0.50	-1.85	1.29	-0.23	
	2 000	-1.14	-0.64	-1.59	-0.72	-1.02	

植物在正常生活条件下,体内的自由基等氧化物质的产生和消除处于平衡,并且含量很低,不会对植物生长造成影响。一旦植物处于逆境条件下,细胞内的自由基等氧化物质的产生和消除打破平衡,氧化物质积累过多就会影响植物生长发育。本研究结果表明,在逆境条件下,植物体内产生大量的超氧阴离子和 H_2O_2 ,随着胁迫浓度的增加,各

个无性系体内的 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率逐渐增大,在一定胁迫压力内抗氧化酶(CAT、POD、APX)活性和植物体内的非酶抗氧化物质(GSH)的浓度呈正相关性,这与李聪等^[26]的研究结果相似。这说明抗氧化酶活性增强和非酶抗氧化物质 GSH 含量的增加是楸树耐锑的一个重要原因。

4 结论

在不同镉浓度胁迫下,大部分无性系随着镉胁迫浓度的升高,株高增长量和地径增长量均表现为先升高后降低的趋势;除 8402 和 72 无性系,在 $2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下根生物量比对照高外,其它无性系在较低浓度镉胁迫下促进了生物量增加,到了一定浓度随着镉浓度的增加,生物量逐渐减少。

镉主要积累在楸树的根部,在不同浓度镉胁迫下,各无性系各器官中镉浓度和耐镉能力具有差异。因子分析结果表明:在 $0\sim 2\ 000\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫下,10 个楸树无性系耐镉能力综合评价为 $5\text{-}8\text{-}0\text{-}20\text{-}01\text{-}2\text{-}8\text{-}5\text{-}2\text{-}63\text{-}8402\text{-}1\text{-}72\text{-}1\text{-}1$ 。但受条件和材料的限制,笔者仅对苗期的不同无性系楸树进行了分析评价,还需要后期的试验进行验证和筛选,以获得适应性较强的耐镉楸树品种,提高镉污染土壤的修复效果。植物修复是一种具有绿色、成本低和相对安全的重金属污染土壤修复技术,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵策,邱尔发,马俊丽,等.行道树国槐不同形态重金属富集效能研究[J].林业科学研究,2019,32(3):142-151.
- [2] McCallum R I. Occupational exposure to antimony compounds[J]. Environ Monit, 2005, 7(12): 1245-1250.
- [3] 张强,刘飞,纪磊,等.镉胁迫对玉米生物量、光合特性及镉积累的影响[J].核农学报,2017,31(8):1633-1639.
- [4] 蓝唯源,宋书巧,吴浩东,等.土壤三价镉污染对甜芥菜生长及品质的影响研究[J].环境科学与技术,2009,32(2):20-23.
- [5] He M, Wang X, Wu F, et al. Antimony pollution in China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 421/422(3): 41-50.
- [6] 何孟常,季海冰,赵承易,等.镉矿区土壤和植物中重金属污染初探[J].北京师范大学学报(自然科学版),2002,38(3):417-420.
- [7] 薛亮.镉矿区植物重金属积累特征及其耐镉机理研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
- [8] 周林,梁亚楠,武艳芳,等.重金属富集植物研究进展及其园林应用分析[J].长江大学学报(自科版),2017,14(2):52-58.
- [9] 薛亮,高暝,史胜青,等.四种抗污染木本植物对镉的生理响应及积累特征研究[J].生态环境学报,2014,23(8):1344-1350.
- [10] Wang P, Ma L, Li Y, et al. Transcriptome profiling of indole-3-butyric acid-induced adventitious root formation in softwood

cuttings of the *Catalpa bungei* variety 'YU-1' at different developmental stages[J]. Genes & Genomics, 2015, 38(2): 145-162.

- [11] Zheng H, Zhang X, Ma W, et al. Morphological and physiological responses to cyclic drought in two contrasting clones of *Catalpa bungei*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 138: 77-87.
- [12] 童琪,王陈,黄凤燕,等.冷水江镉矿废弃地乡土树种重金属富集能力研究[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):78-82.
- [13] Tang L, Luo W, Tian S, et al. Genotypic differences in cadmium and nitrate co-accumulation among the Chinese cabbage clones under field conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 92-100.
- [14] Liu J, Mei C, Cai H, et al. Relationships Between Subcellular Distribution and Translocation and Grain Accumulation of Pb in Different Rice Cultivars[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(4): 1-9.
- [15] 张莹,张玲,刘泓,等.柳树6个无性系在铜尾矿砂中的生长及耐受性差异[J].林业科学研究,2017,30(6):936-945.
- [16] 施翔,王树凤,陈益泰,等.不同栓皮栎家系对重金属的耐性和富集特性[J].林业科学研究,2021,34(1):121-127.
- [17] Li H B, Yang Z H, Yuan P F, et al. Characteristics of antimony pollution in soils at mining areas in central hunan province[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(1): 70-74.
- [18] 柴立元,王勇,杨志辉,等.镉胁迫下地枇杷的生理变化特性[J].中国有色金属学报(英文版),2017,27(4):939-945.
- [19] 张连金,赖光辉,孙颖,等.基于因子分析法的北京九龙山土壤质量评价[J].西北林学院学报,2016,31(3):7-14.
- [20] 王晓娟,王文斌,杨龙,等.重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J].生态学报,2015,35(23):7921-7929.
- [21] Yang W D, Wang Y Y, Zhao F L, et al. Variation in copper and zinc tolerance and accumulation in 12 willow clones: implications for phytoextraction[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2014, 15(9): 788-800.
- [22] Ren J H, Ma L Q, Sun H J, et al. Antimony uptake, translocation and speciation in rice plants exposed to antimonite and antimonate[J]. Science of the Total Environment, 2014, 475: 83-89.
- [23] Durand T C, Hausman J F, Carpin S, et al. Zinc and cadmium effects on growth and ion distribution in *Populus tremula* × *Populus alba*[J]. Biologia Plantarum, 2010, 54(1): 191-194.
- [24] Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants[J]. Environmental & Experimental Botany, 1999, 41(2): 105-130.
- [25] Tan Y F, Corke H. Factor analysis of physicochemical properties of 63 rice varieties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2002, 82(7): 745-752.
- [26] 李聪,杨爱江,陈蔚洁,等.镉胁迫对鱼腥草抗氧化能力及渗透调节物质的影响[J].江苏农业科学,2019,47(13):175-179.

Comprehensive Evaluation of Antimony Tolerance of Different *Catalpa bungei* Clones based on Factor Analysis

LIU Zhen-hua^{1,2}, WANG Jun-hui¹, TONG Fang-ping², SUN liang³, LI Gui²,
CHEN Ru², WU Min², LIU Zuo-qun⁴, MA Wen-jun¹

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, National Innovation Alliance of *Catalpa bungei*, Beijing 100091, China; 2. Hu'nan Forestry Academy, Changsha 410004, Hu'nan, China; 3. Liuyanghu state forest farm, Liuyang 410300, Hu'nan, China; 4. Landscaping maintenance Center of Ningxiang, 410600, Ningxiang, Hu'nan)

Abstract: [Objective] To evaluate the antimony tolerance of 10 different clones of *Catalpa bungei* for providing plant materials for the remediation of antimony contaminated soil. [Method] Under different antimony stress, the growth, biomass, leaf chlorophyll content, antimony content, leaf anatomical structure, hydrogen peroxide content, superoxide anion content, glutathione, and antioxidant enzyme activities (CAT, POD, APX) of different clones were determined. The antimony tolerance of 10 different clones was evaluated by factor analysis. [Result] The results showed that under different concentrations of antimony stress, there were significant differences in aboveground and root biomass except 8402. The plant height and ground diameter of most clones increased firstly and then decreased with the increase of sb concentration. The root biomass of clone 8402 and 72, was higher than that of the control. Under the sb concentration 2 000 mg·kg⁻¹, the other clones promoted the increase of the root biomass under low antimony concentration, and gradually decreased with the increase of antimony concentration to a certain concentration. Antimony was mainly accumulated in root. Under concentration 600 mg·kg⁻¹, clone 63 had the highest antimony content in roots and leaves, and 8402 had the highest antimony content in stems. Under 1 200 mg·kg⁻¹, clone 5-2 had the highest antimony content in roots, 1-1 had the highest antimony content in the stem and leaf. Under 2 000 mg·kg⁻¹, the highest antimony content in roots, stems and leaves was clone 5-8, 8402 and 72, respectively. There was a positive correlation between the activity of antioxidant enzymes and the concentration of reactive oxygen species in plants under certain antimony stress. [Conclusion] The comprehensive evaluation of antimony tolerance of 10 *Catalpa bungei* clones under 0-2 000 mg·kg⁻¹ antimony stress is clone 5-8 > 0 > 20-01 > 2-8 > 5-2 > 63 > 8402 > 1 > 72 > 1-1. The results provide plant materials for the remediation on antimony contaminated soil, and can improve the remediation effect of antimony contaminated soil. Under 2 000 mg·kg⁻¹ antimony concentration in soil, *Catalpa bungei* clones with strong antimony tolerance can be used for remediation.

Keywords: Factor analysis; Clones; *Catalpa bungei*; Antimony

(责任编辑: 徐玉秀)