

外源 Cd 对川芎芩种萌发及幼苗生长的影响

张德林¹, 陈云子¹, 陈蓉²,
喻文¹, 袁文洪³, 苟琰⁴, 刘薇¹, 李敏^{1*}

¹成都中医药大学西南特色中药资源国家重点实验室, 成都 611137; ²眉山药科职业学院, 眉山 620000;
³资阳市食品药品检验检测中心, 资阳 641300; ⁴四川省药品检验研究院, 成都 611731

摘要:本研究旨在探究不同浓度镉(Cd)对川芎芩种萌发和幼苗生长的影响。采用以石英砂为基质的水培试验, 施加不同浓度 CdCl₂ · 2.5 H₂O (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 mmol/L) 溶液处理川芎芩种, 研究 Cd 胁迫对川芎芩种萌发、幼苗生长、生理代谢及 Cd 含量的影响。结果显示, 随着 Cd 浓度的增加, 株高抑制率、根长抑制率上升; 根、叶及节盘 Cd 含量显著升高; 株高、根长、叶鲜重、根鲜重下降; 抗氧化酶(过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶)活性、非酶系统物质(可溶性蛋白、谷胱甘肽、脯氨酸)含量以及丙二醛含量先升高后降低。研究表明, 0.1~2.0 mmol/L Cd 对川芎芩种萌发和早期幼苗生长均有明显的毒害作用, 随着 Cd 胁迫浓度的升高毒害作用增强, 其中川芎芩幼苗根对 Cd 胁迫最敏感。Cd 胁迫下川芎芩幼苗生理生化指标整体上呈现低促高抑的 Hormesis 效应。川芎芩幼苗通过提高抗氧化酶活性和非酶系统物质积累, 减少膜系统损伤、活性氧蓄积, 缓解 Cd 毒害作用, 提高耐受性。

关键词:川芎芩种; Cd; 胁迫; 种子萌发; 生长发育

中图分类号: R282.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-6880(2024)5-0838-09

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2024.5.013

Effects of exogenous cadmium application on *Ligusticum chuanxiong* Lingzong germination and seedling growth

ZHANG De-lin¹, CHEN Yun-zi¹, CHEN Rong²,
YU Wen¹, YUAN Wen-hong³, GOU Yan⁴, LIU Wei¹, LI Min^{1*}

¹State Key Laboratory of Southwestern Chinese Medicine Resources, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China;

²Meishan pharmaceutical college, Meishan 620000, China;

³Ziyang Inspection and Testing Center for Food and Drug Control, Ziyang 641300, China;

⁴Sichuan Institute for Drug Control, Chengdu 611731, China

Abstract: This study aimed to investigate the effects of various cadmium (Cd) concentrations on *Ligusticum chuanxiong* Lingzong germination and seedling growth. The effect of Cd stress on the germination, seedling growth, physiological metabolism, and Cd content of *L. chuanxiong* Lingzong was investigated by applying different concentrations of CdCl₂ · 2.5H₂O (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 mmol/L) solution in a hydroponic experiment applying quartz sand as the substrate. According to the findings, plant height and root length were inhibited at higher Cd concentrations. The Cd content of the root, leaf, and stem node significantly increased with increasing Cd concentrations, but plant height, root length, and fresh weight of leaf and root reduced. Besides, antioxidant enzyme activities (catalase, peroxidase, peroxidase), non-enzymatic substance content (soluble protein, glutathione, proline), and malonaldehyde content increased first before decreasing. The study found that Cd concentrations ranging from 0.1 to 2.0 mmol/L had a substantial harmful effect on *L. chuanxiong* Lingzong germination and early seedling growth and that the toxic effect increased with increasing Cd stress concentration. The root of *L. chuanxiong* seedlings was

收稿日期: 2023-06-20 接受日期: 2023-09-28

基金项目: 国家科技部中药现代化重点专项(2022YFC3501500); 四川省科技厅科技计划(2020YFS0303); 四川省中医药发展服务中心中医药产业发展重大项目(510201202109711); 成都中医药大学“杏林学者”提升计划(CXTD2018016)

* 通信作者 Tel: 86-28-61800237; E-mail: 028limin@163.com

the most sensitive organ to Cd stress. Under Cd stress, the physiological and biochemical indices of *L. chuanxiong* seedlings exhibited a low-promoting and high-suppressing hormesis. The results revealed that *L. chuanxiong* seedlings were able to decrease membrane damage, and reactive oxygen species formation, mitigate the toxic effects and improve tolerance of Cd by boosting antioxidant enzyme activity and non-enzymatic material accumulation.

Key words: *Ligusticum chuanxiong* Lingzong; cadmium; stress; germination; growth and development

近年来,随着工业化和城市化进程的深入,土壤重金属污染问题愈发严重。环境保护部和国土资源部于 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示^[1],我国 19.4% 的耕地受到污染,以无机污染为主,其中重金属镉、铜、铅的点位超标率分别是 7.0%、2.1%、1.5%,每年仅因重金属污染而造成的经济损失至少 200 亿元^[2]。镉(cadmium, Cd)是一种生物非必须有毒元素,具有迁移性强、生物蓄积性强和毒性持久等特点,易被植物吸收和积累,不仅会影响植物的生长发育,还会通过食物链严重危害人类健康和生命安全^[3]。

种子发芽率和幼苗的完整、成型、结实,是作物产量和品质的基础。过量的 Cd 会抑制植物的种子萌发、幼苗生长、生长发育,破坏膜系统、抗氧化酶系统,降低光合效率等^[4]。已有研究表明,随着 Cd 胁迫浓度的增加,小麦^[5]、沙棘^[6]种子的发芽率和发芽势呈低促高抑的变化趋势,幼苗生长受到抑制,且根长受抑制最强。水稻^[7]、白三叶^[8]种子的发芽势、发芽指数和活力指数随着 Cd 处理浓度的增加而显著降低,抑制作用逐渐加强,受到品种差异和剂量效应的影响。Sun 等^[9]研究发现,Cd 胁迫对芝麻种子胚根生长影响大而对萌发影响小,芝麻幼苗芽长、根长和鲜重随 Cd 浓度的增加而减少,当 Cd 浓度为 20 mg/L 时,芝麻种子萌发后胚根基本不生长,难以形成种苗。随着 Cd 浓度的升高,青箱^[10]的超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性以及谷胱甘肽含量呈先上升后下降的趋势,可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛含量则逐渐升高;青箱能通过提高抗氧化酶活性和抗氧化物质含量来缓解 Cd 的毒害作用,提高耐镉能力。Cd 胁迫对种子萌发和幼苗的生长的影响主要受到胁迫浓度和品种的影响,整体规律表现为低浓度促进或影响较小,而高浓度抑制^[11]。

川芎(*Ligusticum chuanxiong* Hort.)是伞形科藁本属的一年生草本植物^[12],具有耐受性强、生物量大、易于栽种和管理等特点,不仅被广泛地用于药品、食品、日化产品等^[13],也可用于污染土壤的控制

与治理^[14]。既往研究证实,川芎具有 Cd 富集特性,在中度 Cd 污染^[14]或清洁^[15]土壤均可产出重度 Cd 污染川芎,川芎 Cd 富集系数大于 0.5^[14,16],甚至普遍大于 1^[17]。此外,不同川芎种质富集和转运 Cd 的能力也存在明显差异^[14],其中高积累种质可作为修复植物用于土壤重金属污染治理,而低积累种质可用于生产优质绿色药材加以推广。因此,研究川芎对重金属的耐性、吸收积累特性等对保障药品和食品安全、挖掘川芎用于污染土壤修复的潜力具有重要意义。

目前关于川芎对 Cd 吸收、转运、分布、积累及降 Cd 措施的研究较多,但川芎种萌发和幼苗生长对 Cd 胁迫响应机制方面的研究尚未见报道。本试验以川芎种为试验材料,深入探究不同浓度 Cd 胁迫对川芎种萌发、幼苗生长及幼苗毒害作用的影响,丰富川芎对 Cd 胁迫的响应机制,为将川芎应用于修复重金属 Cd 污染土壤提供理论基础与试验支撑。

1 材料与方法

1.1 仪器

350 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 PE 公司);DW-HL1010 超低温冷冻储存箱(中科美菱低温科技股份有限公司);QUINTIX224-1CN 电子天平(赛多利斯科学仪器北京有限公司);MARS 型微波消解仪(美国 CEM 公司);Millipore Milli-Q 超纯水器(美国 Millipore 公司);酶标仪(Molecular Devices Spectra Max ID3);UV-1100 型 TECHCOMP 紫外分光光度计(上海天美科学仪器有限公司);PHS-3E 型 PH 剂(雷磁-上海仪电科学仪器股份有限公司)。

1.2 试剂与试药

丙二醛(malonaldehyde, MDA)(批号:20180717)、过氧化氢酶(catalase, CAT)(批号:20180718)、过氧化物酶(peroxidase, POD)(批号:20180724)、超氧化物歧化酶(superoxidase, SOD)(批号:20180702)、脯氨酸(proline, PRO)(批号:20180807)、谷胱甘肽(glutathione, GSH)(批号:20180808)、可溶性蛋白(soluble protein, SP)(批号:

20180714) 试剂盒(南京建成生物科技有限公司); MOS 级硝酸(德国 CNW 公司, 65%, 编号: 4. 110040. 2501); Cd 元素标准液(1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 中国计量科学研究院, 编号: GBW08612); 钢元素标准溶液(1 000 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 国家有色金属及电子材料分析测试中心, 编号: GSB04-1731-2004); Li、Be、Mg、Fe、In、Ce、Pb、U 混合标准溶液(1 $\mu\text{g}/\text{L}$, 美国 PE 公司, 编号: N9307807); 过氧化氢(优级纯, 成都市科隆化学品有限公司, 30%, 批号: 2018030801); 石英砂(80 目); EDTA- Na_2 (AR, 成都市科隆化学品有限公司, 纯度: $\geq 99\%$, 批号: 2018080802); $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$ (AR, 成都市科隆化学品有限公司, 纯度: 99%, 批号: 20180501101)。

1.3 试验材料

试验材料为课题组 2018 年 8 月在四川省汶川县水磨镇灯草坪村(E103° 24' 52. 76", N30° 54' 7. 60")收集的优良川芎种质自繁子二代苓种, 所有苓种均经成都中医药大学中药鉴定教研室李敏教授鉴定为川芎 *Ligusticum chuanxiong* Hort. 的新鲜茎节^[12]。

1.4 试验设计

试验于室内进行, 选取大小均一、健壮的川芎苓种, 用 10% H_2O_2 消毒 30 min^[18], 用去离子水冲洗 3 次, 置装有石英砂的塑料发芽盒(每盒 600 g 石英砂 + 50 mL Cd 溶液)中, 每盒均匀摆放苓种 30 粒, 芽口朝上, 仅露 1/2 于表面, 盖上盖子, 称重记录, 将所有发芽盒转移至智能生化培养箱, 每天更新处理液, 并保持溶液的 pH 值在 5.5 ~ 7.0 范围之间。培养箱设置昼夜调节为 16 h/8 h, 温度为 $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 70%。试验共设置 6 个处理, 分别为对照组(0 mmol/L)和 5 个 Cd 胁迫组(0.10、0.25、0.50、1.00、2.00 mmol/L), 分别命名为 Cd_0 、 $\text{Cd}_{0.1}$ 、 $\text{Cd}_{0.25}$ 、 $\text{Cd}_{0.5}$ 、 Cd_1 、 Cd_2 , 各处理设置 3 次重复, 发芽 7 d 后结束试验采样。

1.5 发芽参数

当川芎苓种芽延伸至少 2 mm 时, 苓种被认为已经发芽。为了研究 Cd 胁迫对幼苗初始生长的影响, 每 24 h 记录一次发芽数据, 并根据获得的数据计算发芽参数。发芽率(germination rate, GR)、发芽势(germination potential, GP)、发芽指数(germination index, GI)、活力指数(vigour index, VI)、平均发芽时间(mean germination time, MGT)分别用公式(1) ~ (5)计算。

$$\text{GR} = n/N \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{GP} = n_3/N \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{GI} = \sum(G_n/D_n) \quad (3)$$

$$\text{VI} = \text{GI} \times \text{SL} \quad (4)$$

$$\text{MGT} =$$

$$(G_1D_1 + G_2D_2 + \dots + G_nD_n)/(G_1 + G_2 + \dots + G_n) \quad (5)$$

式中: n -最终发芽粒数; N -供试种子数; n_3 -第 3 d 发芽粒数; G_n -相应各日的发芽粒数, D_n -置床日数; SL -平均苗长。

1.6 农艺性状

随机选取各处理 30 株川芎幼苗, 用干净的剪刀将川芎幼苗的叶、节盘、根分离, 去离子水冲洗 3 次后吸水纸擦干表面水分, 测得株高、叶片数、根长(以最大根长计)、叶鲜重和根鲜重。抑制率(inhibition rate, IR)、耐受指数(tolerance index, TI)分别用公式(6)、(7)计算。

$$\text{IR} = (1-B/A) \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{TI} = \text{RL}_n/\text{RL} \times 100\% \quad (7)$$

式中: B -Cd 胁迫组指标值(株高、根长); A -对照组指标值(株高、根长); RL_n -胁迫组平均根长; RL -对照组平均根长。

1.7 Cd 含量

随机选取各处理 3 株川芎幼苗, 将幼苗地下部分于 20 mmol/L 的 EDTA- Na_2 溶液中浸泡 15 min, 去离子水冲洗 3 次后吸水纸擦干表面水分, 分离根、节盘和叶, 置 105 $^\circ\text{C}$ 杀青 30 min 后, 60 $^\circ\text{C}$ 烘干至恒重, 玛瑙研钵研成细粉备用。参照课题组前期建立的方法^[14], 采用微波消解-电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定 Cd 含量, 川芎幼苗各组织 Cd 含量用公式(8)计算。

$$\text{Cd 含量}(\text{mg}/\text{kg DW}) = \text{检出浓度} \times 50/\text{取样量} \quad (8)$$

式中: DW 为干重(dry weight)。

1.8 生理生化指标

随机选取各处理 3 株川芎幼苗, 剪碎混合后, 称取 0.2 g FW(鲜重), 重复 3 次, 称重后立即转移至冻存管中保存在 -80 $^\circ\text{C}$ 冰箱中待测。采用试剂盒测定川芎幼苗 CAT、POD、SOD 活性及 MDA、PRO、GSH、SP 含量, 具体方法按南京建成生物工程研究所提供的试剂盒说明书进行。

1.9 统计分析

利用 Microsoft Excel 365 进行试验数据整理和计算; 采用 R(4.1.2) 软件对数据进行指标间的相

关性分析、聚类分析;采用单因素方差分析检验各组间差异的显著性($P < 0.05$)并作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Cd 处理对川芎种萌发的影响

Cd 对川芎种活力指数具有明显的抑制作用(见图 1),且抑制作用随 Cd 胁迫浓度的升高而进一步增强。发芽第 2 d, $Cd_{0.25}$ 处理川芎种发芽率显著低于其他处理($P < 0.05$),而其他处理间差异不

显著;发芽第 4 d 除 $Cd_{0.25}$ 处理发芽率为 98.89%,其他各组均达到 100%,之后各处理川芎种发芽率不再变化(见图 2)。各处理间川芎种的发芽率、发芽势、平均发芽时间无显著差异。 $Cd_{0.25}$ 处理川芎种的发芽指数较 Cd_0 降低了 4.62% ($P < 0.05$)。活力指数随着 Cd 胁迫浓度的升高持续下降,相对于 Cd_0 降低了 10.98% ~ 41.48%,除 $Cd_{0.1}$ 以外的其他处理与 Cd_0 均有显著性差异($P < 0.05$)。

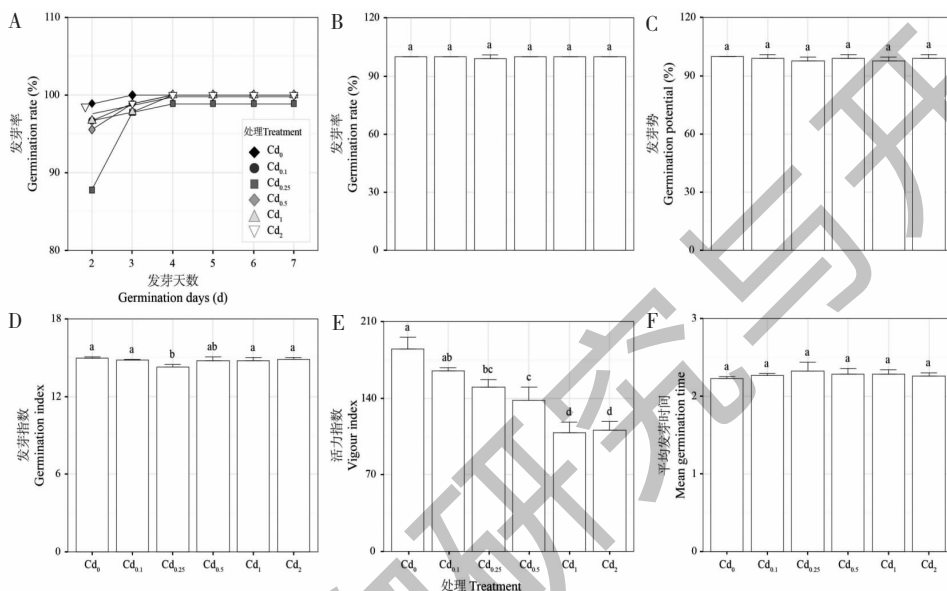


图 1 不同浓度 Cd 处理对川芎种发芽指标的影响 ($n = 90$)

Fig. 1 Effects of different concentrations of Cd treatment on germination index of *L. chuanxiong* Lingzong ($n = 90$)

注:不同小写字母代表不同处理差异显著 ($P < 0.05$),下同。Note: Different lowercase letters represented significant difference among different treatments ($P < 0.05$), the same below.

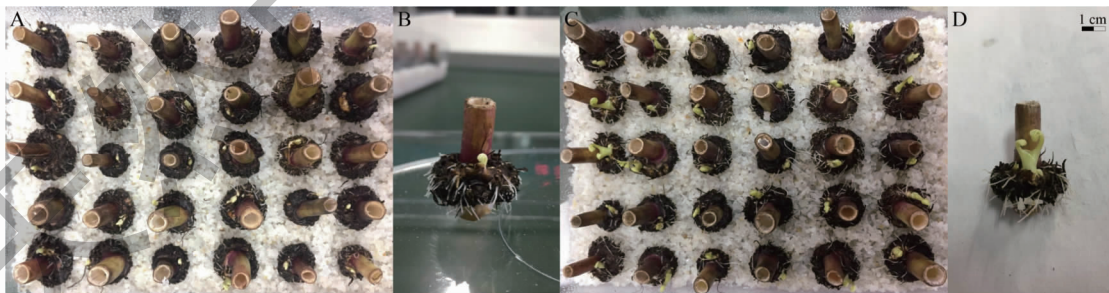


图 2 川芎种发芽第 3 d (A、B) 和第 4 d 情况 (C、D)

Fig. 2 The germination of *Ligusticum chuanxiong* Lingzong on the third day (A, B) and the fourth day (C, D)

2.2 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗生长的影响

Cd 对川芎幼苗早期生长具有明显的抑制作用(见图 3),且随着 Cd 胁迫浓度的升高而进一步增强,高浓度的 Cd 处理导致川芎根系发育异常,生长发育受阻,植株矮小。株高、根长、叶鲜重、根鲜重随

Cd 胁迫浓度的升高持续下降。与 Cd_0 相比(见图 4),川芎幼苗的根长和根鲜重分别显著减少 32.06% ~ 87.88%、29.39% ~ 76.43% ($P < 0.05$);株高、叶片数和叶鲜重分别下降 1.47% ~ 24.95%、8.69% ~ 26.10% 及 3.61% ~ 24.58%。



图3 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗表型的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of Cd treatment on the phenotype of *L. chuanxiong* seedlings

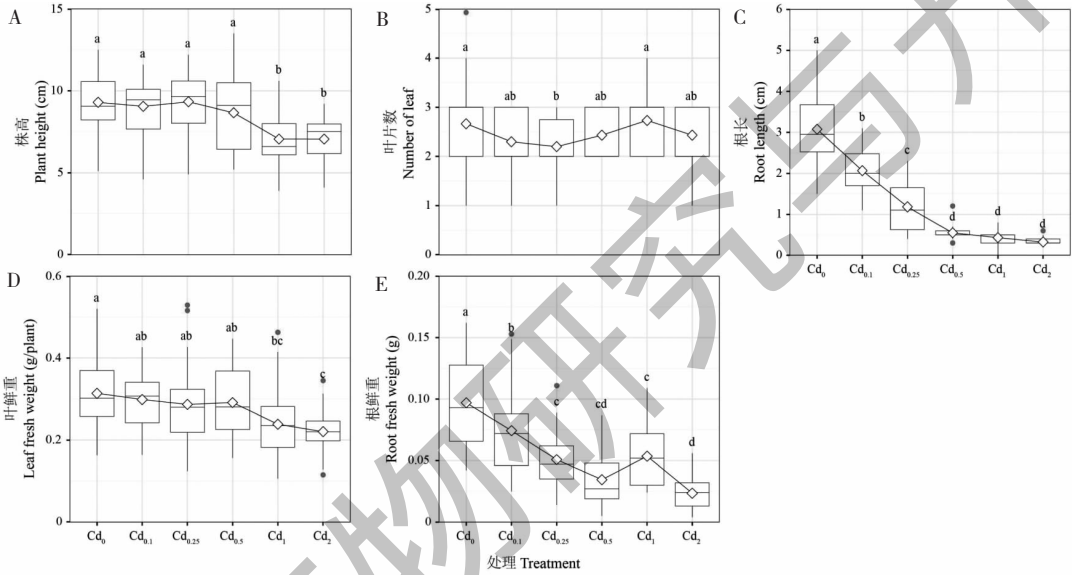


图4 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗生长的影响 ($n = 30$)

Fig. 4 Effects of different concentrations of Cd treatment on the growth of *L. chuanxiong* seedlings ($n = 30$)

2.3 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗株高、根抑制率及耐受指数的影响

川芎幼苗株高和根长的抑制率随 Cd 胁迫浓度对数的变化趋势符合线性关系(见图 5), 拟合曲线

的 R^2 分别为 0.743 ($P = 0.060$) 和 0.905 ($P = 0.013$)。耐受指数随 Cd 浓度的升高持续下降, 耐受指数与浓度指数呈显著负相关($R^2 = 0.905, P = 0.013$)。

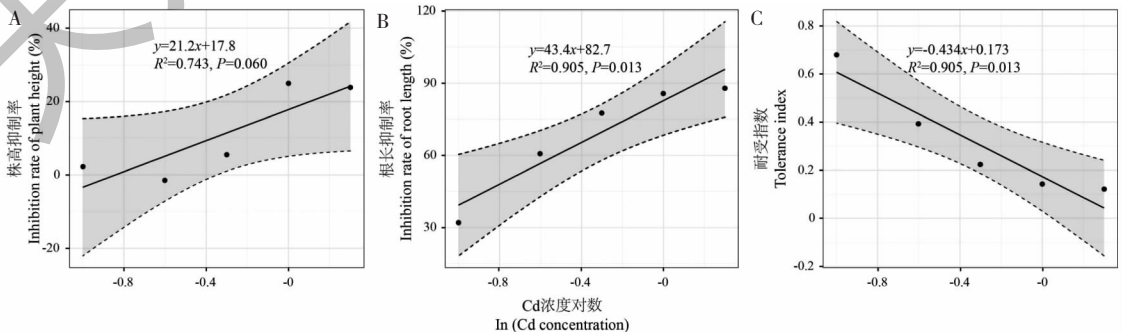


图5 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗株高、根长抑制率及耐受指数的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of Cd treatment on the growth of *L. chuanxiong* seedlings

2.4 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗抗氧化酶活性的影响

川芎幼苗 CAT 和 SOD 活性在低浓度 Cd 处理下呈上升趋势,然后随 Cd 胁迫浓度的增加而降低(见图 6)。当 Cd 浓度为 0.25 mmol/L 时, CAT 和 SOD 活性达到最大值,相较于其他处理分别高出 15.0% ~ 74.1%、6.2% ~ 52.5%。与 Cd₀ 相比,

Cd_{0.25}、Cd₁、Cd₂ 处理 CAT 活性降低显著 ($P < 0.05$),除 Cd₂ 处理外,其他 Cd 胁迫处理 SOD 活性较 Cd₀ 增加显著 ($P < 0.05$)。随着 Cd 处理浓度的增加,川芎幼苗 POD 活性呈先降低后升高再降低的趋势,在 1 mmol/L 时达到最大值,相较于其他处理高出 12.2% ~ 23.1%。

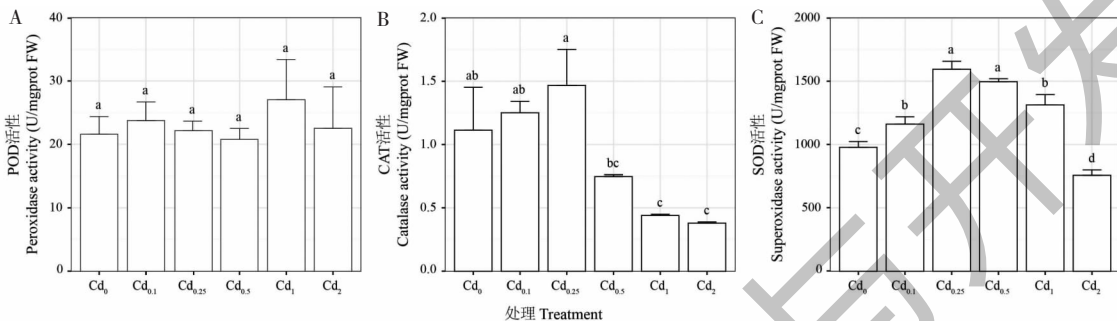


图 6 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗抗氧化酶活性的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 9$)

Fig. 6 Effects of different concentrations of Cd on antioxidant enzyme activities of *L. chuanxiong* seedlings ($\bar{x} \pm s, n = 9$)

2.5 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗非酶系统物质含量的影响

川芎幼苗中 SP、PRO、MDA 和 GSH 含量随 Cd 浓度的增加整体上呈现抛物线变化趋势(见图 7)。SP 和 PRO 含量在低浓度 Cd 处理下呈上升趋势,分别在 0.25、1 mmol/L 时达到最大值,相较于其他处理分别高出 4.2% ~ 32.2%、51.5% ~ 58.9%。与 Cd₀ 相比, Cd_{0.25}、Cd_{0.5} 处理 SP 含量升高显著 ($P <$

0.05), Cd₁ 处理 PRO 含量显著高于对照 ($P < 0.05$)。Cd 胁迫处理显著增加 MDA 含量 ($P < 0.05$), MDA 含量随 Cd 浓度的升高而降低,在 0.1 mmol/L 时达到最大值,较其他处理升高 4.4% ~ 62.2%。不同浓度 Cd 处理 GSH 含量较对照升高 1.4% ~ 9.9%,在 0.25 mmol/L 时达到最大值,相较于其他处理高出 0.6% ~ 9.0%。

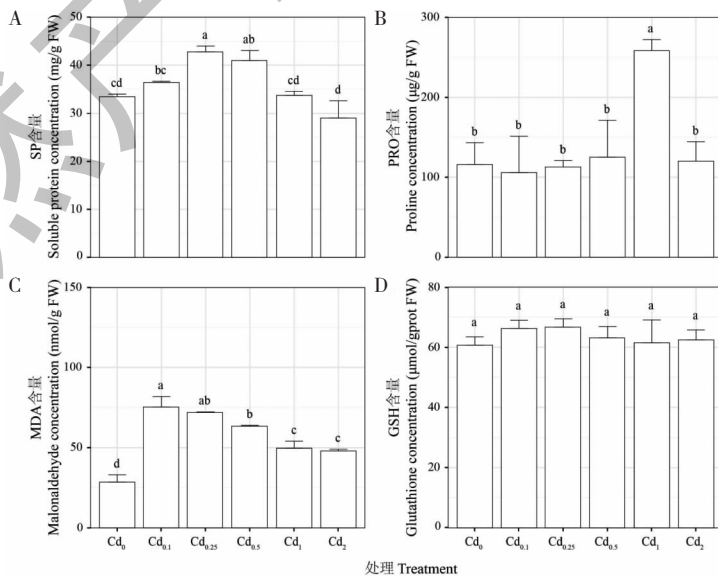


图 7 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗非酶系统物质含量的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 9$)

Fig. 7 Effects of different concentrations of Cd on the content of non-enzyme system substances of *L. chuanxiong* seedlings ($\bar{x} \pm s, n = 9$)

2.6 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗各部位 Cd 含量的影响

川芎幼苗叶、节盘和根的 Cd 含量随 Cd 胁迫浓度的升高而显著增加,其中根 > 节盘 > 叶 ($P <$

0.05)。与 Cd₀ 相比,Cd_{0.25}、Cd_{0.5}、Cd₁ 和 Cd₂ 处理川芎幼苗叶、节盘的 Cd 含量显著高于对照组 ($P <$ 0.05),不同浓度 Cd 处理川芎幼苗根的 Cd 含量差异显著 ($P <$ 0.05) (见图 8)。

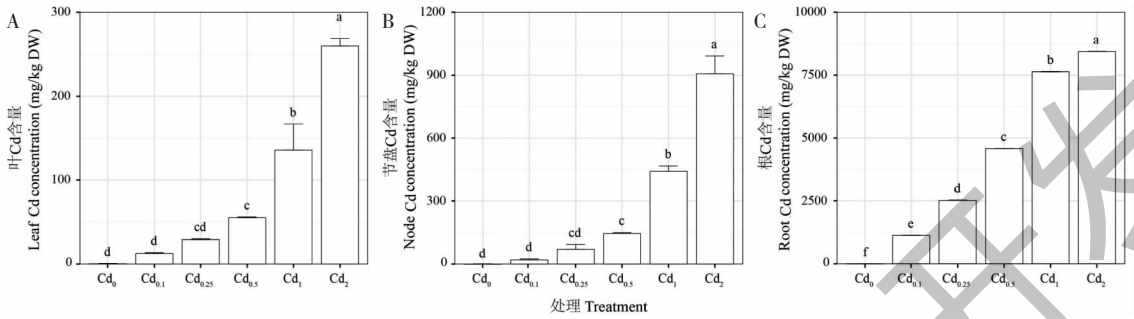


图 8 不同浓度 Cd 处理对川芎幼苗叶 (A)、节盘 (B) 及根 (C) 中 Cd 含量的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 9$)
Fig. 8 Effects of different concentrations of Cd treatment on Cd content in leaf (A), node (B), and root (C) of *L. chuanxiong* seedlings ($\bar{x} \pm s, n = 9$)

2.7 不同浓度 Cd 处理下川芎各指标之间的主成分分析、热图分析、相关矩阵以及随机森林

聚类分析结果表明,在指标方面分为 2 类,根长抑制率、根 Cd 含量、株高抑制率、叶 Cd 含量、节盘 Cd 含量、GR、GP、GI、叶片数、PRO 和 POD 聚类一类,其余指标聚为一类。在 Cd 处理方面也分为 2 类,Cd₁ 和 Cd₂ 聚为一类,其他处理聚为一类 (见图 9A)。

川芎种萌发和早期幼苗生长指标的影响,其中 PC1 和 PC2 在整体的变异中分别占了 43.8% 和 22.0% (见图 9B)。Dim1 显著分离了 Cd₀、Cd_{0.1}、Cd_{0.25} 和 Cd₁ (或 Cd₂), Dim2 显著分离了 Cd₀ 和 Cd_{0.25}, Cd₀ 和低浓度 Cd 处理 (Cd_{0.1}、Cd_{0.25}、Cd_{0.5}) 与高浓度 Cd 处理 (Cd₁、Cd₂) 显著分离; Dim1 显著影响了 Cd 含量 (根、叶、节盘)、抑制率 (株高、根长)、株高、根鲜重、叶鲜重、VI、根长和耐受指数, Dim2 显著影响了 GI、GP、MGT、SP 含量和叶片数。

采用主成分分析的方法研究了不同浓度 Cd 对

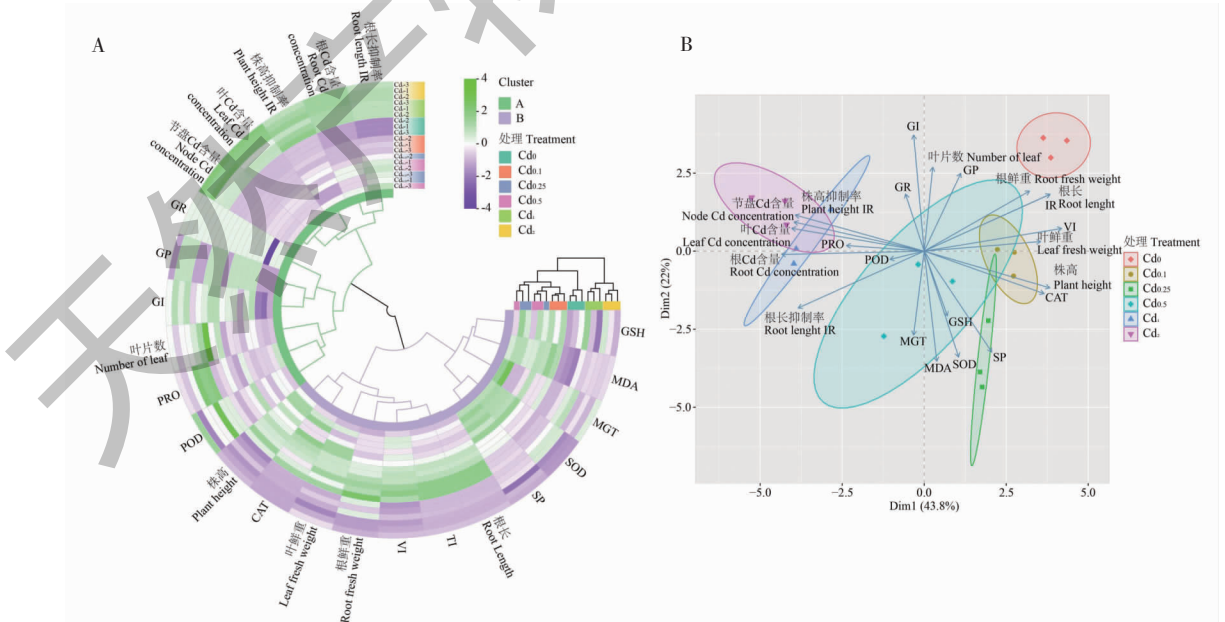


图 9 不同 Cd 胁迫浓度川芎种发芽率及幼苗各指标变化的聚类热图 (A) 和主成分分析聚类热图 (B)
Fig. 9 Principal component analysis (A) and cluster heatmap (B) of germination rate and seedling indexes of *L. chuanxiong* under different concentrations of Cd

相关性分析结果表明(见图 10A),Cd 胁迫浓度与 VI(-0.82)、耐受指数(-0.74)、株高(-0.79)、根长(-0.74)、叶鲜重(-0.71)、根鲜重(-0.70)显著负相关($P < 0.05$),而与株高抑制率(0.81)、根长抑制率(0.74)、叶 Cd 含量(0.99)、根 Cd 含量(0.92)和节盘 Cd 含量(0.99)显著正相关($P < 0.001$)。叶 Cd 含量与根 Cd 含量(0.91)、节盘 Cd 含量(0.99)显著正相关($P < 0.001$),与 SP 含量(0.63)、CAT(0.78)和 SOD(0.50)活性显著负相关($P < 0.05$)。根 Cd 含量与节盘 Cd 含量(0.89)和 PRO 含量(0.51)显著正相关($P < 0.05$),与 CAT(0.82)活性

显著负相关($P < 0.001$)。节盘 Cd 含量与 SP 含量(0.67)、CAT(0.77)和 SOD(0.55)活性显著负相关($P < 0.05$)。

随机森林图(见图 10B)表明,在生长指标方面,Cd 胁迫依次对根长抑制率、耐受指数、根长、根鲜重、株高和叶片数具有显著性影响($P < 0.05$);在 Cd 含量方面,Cd 胁迫依次对根 Cd 含量、叶 Cd 含量和节盘 Cd 含量具有显著性差异($P < 0.01$);在川芎芩种萌发方面,Cd 胁迫对 VI 有显著影响($P < 0.01$);在生理生化方面,Cd 胁迫依次对 SOD、SP、MDA 和 CAT 具有显著性影响($P < 0.05$)。

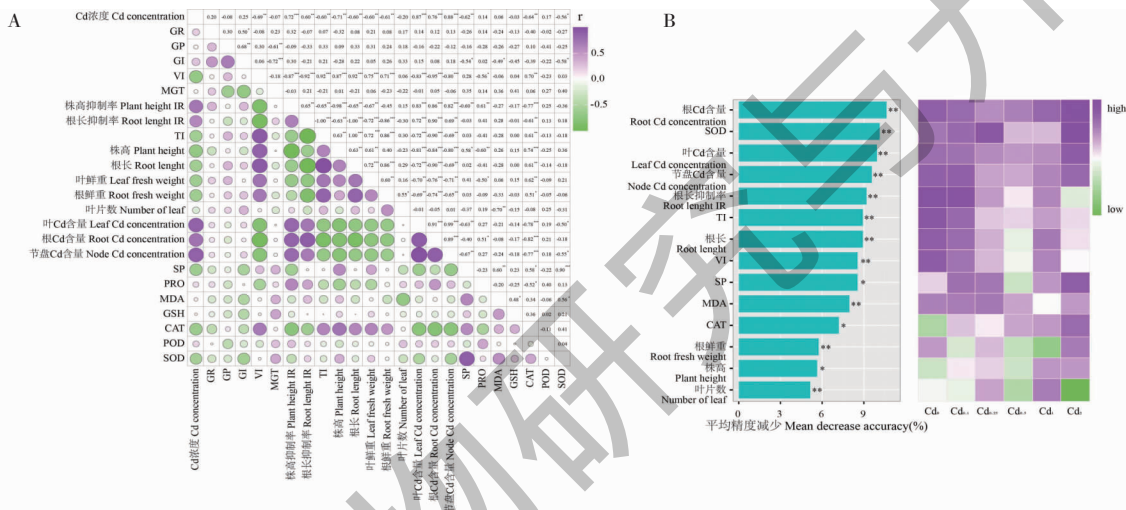


图 10 不同 Cd 胁迫浓度川芎芩种发芽率及幼苗各指标变化的相关性分析(A)和随机森林分析(B)

Fig. 10 Correlation analysis (A) and random forest analysis (B) of germination rate and seedling indexes of *L. chuanxiong* treated with different Cd concentrations

3 结论和讨论

Cd 胁迫主要通过抑制川芎芩种活力指数干扰正常幼苗的形成。Cd 是一种非必须有毒重金属元素,当土壤中 Cd 达到一定浓度时,会对作物产生多方面的毒害作用。这些作用包括干扰种子萌发、抑制根系生长、阻碍矿质元素和水的吸收运输,以及扰乱植物体内正常的生理代谢,最终导致作物生长发育异常^[19]。本试验结果显示,0.1 ~ 2.0 mmol/L 的 Cd 胁迫对川芎芩种发芽率、发芽势、发芽指数和平均发芽时间基本无影响,这与 Cd 胁迫对沙棘^[6]种子萌发的影响一致。推测植物种子在发芽早期主要从基质中吸收水分以助胚芽冲破种皮,而对重金属元素的需求非常有限,因此,重金属元素对其发芽的影响较小。此外,本研究还发现,川芎芩种活力指数随 Cd 胁迫浓度的增加而不断降低。这可能是因

为在萌发过程中,基质中的 Cd^{2+} 随着水分被川芎芩吸收,当大量的 Cd^{2+} 积累在川芎芩种体内时,扰乱了发芽所需的淀粉、蛋白质等物质的代谢过程,从而影响种子萌发必须物质和能力的供给^[6,20]。

Cd 胁迫对川芎芩幼苗根的抑制作用强于芽。造成这一结果的原因可能是芩种萌发前节盘从基质中吸收水分,胚根先于胚芽长出,胚根长出后不断深入基质,持续吸收水分和 Cd^{2+} ,而大部分的 Cd^{2+} 滞留在胚根中,导致根受到 Cd 毒害的时间和程度均大于芽。因此,观察到根抑制程度大于株高,这与沙棘^[6]、菠菜和油菜^[21]在 Cd 胁迫下早期幼苗生长规律相似。Cd 胁迫下川芎芩幼苗生理生化指标整体上呈现低促高抑的 Hormesis 效应。其中,MDA 含量在 0.1 mmol/L 时最大,之后随着 Cd 浓度的升高显著降低,推测 0.1 mmol/L 是川芎芩幼苗对 Cd 毒害的最

大耐受阈值。另外,SP、CAT、SOD、GSH 调节川芎幼苗 Cd 毒害的阈值可能是 0.25 mmol/L,而 PRO、POD 调节川芎幼苗 Cd 毒害的阈值可能是 1.00 mmol/L。这说明当川芎幼苗中 Cd 浓度超过耐受阈值后其抗氧化酶系统和非酶系统被破坏而功能大幅降低。进一步说明川芎幼苗在受到 Cd 胁迫时会通过提高抗氧化酶 CAT、SOD、POD 活性及非酶系统物质 SP、GSH 和 PRO 含量来缓解 Cd 的毒害作用。

本研究仅针对一个品种川芎种开展了不同浓度 Cd 胁迫对其发芽和幼苗生长的影响。然而,低 Cd 高抗川芎新品种的筛选是解决当前川芎 Cd 污染严峻形势切实可行的方法^[22],下一步将结合品种和药材产量、品质评价做进一步的研究和论证。

参考文献

- Chen NC, Zheng YJ, He XF, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. J Agro-Environ Sci(农业环境科学学报), 2017, 36:1689-1692.
- Chen WP, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedol Sin(土壤学报), 2018, 55:261-272.
- Du LN, Yu RZ, Wang HY, et al. Pollution and toxicity of cadmium: a review of recent studies[J]. J Environ Health(环境与健康杂志), 2013, 30:167-174.
- El Rasafi T, Oukarroum A, Haddioui A, et al. Cadmium stress in plants: a critical review of the effects, mechanisms, and tolerance strategies[J]. Crit Rev Env Sci Tec, 2022, 52:675-726.
- Zhang K, Gao N, Zhang LJ, et al. Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different wheat varieties[J]. J Light Ind(轻工学报), 2022, 37:118-126.
- Wang ZY, Li LS, Di L, et al. Effect of cadmium stress on seed germination and seedling growth of sea buckthorn[J]. Shaanxi Forest Sci Technol(陕西林业科技), 2022, 50:21-25.
- Sun YL, Liu HM, Xu QG. Effects of cadmium stress on rice seed germination characteristics[J]. Chin J Rice Sci(中国水稻科学), 2017, 31:425-431.
- Gao Q, Wu FF, Liu F, et al. Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different varieties of white clover(*Trifolium repens* L.)[J]. Acta Agrest Sin(草地学报), 2023, 31:1772-1779.
- Sun J, Zhou HY, Yue MW, et al. Effects of heavy metal ions stress on seed germination of *Sesamum indicum* and its seedling growth[J]. SubTrop Plant Sci(亚热带植物科学), 2016, 45:21-26.
- Hu JY, Wang WM, Kuang XS, et al. Seed germination and seedling physiological characteristics of *Celosia argentea* un-

der cadmium stress[J]. Pratacult Sci(草业科学), 2022, 39:1391-1398.

- Zhang M. The influence of Cu and Cd stress on the growth of *Brassica campestris* L. and the biological effectiveness[D]. Hohhot: Inner Mongolia University(内蒙古大学), 2014.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Vol I(中华人民共和国药典:第一部)[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 42.
- Yu W, Zhang DL, Gou Y, et al. Determination of 65 pesticide residues in Chuanxiong Rhizoma by GC-MS/MS[J]. Chin J Pharm Anal(药物分析杂志), 2021, 41:1009-1018.
- Zhang DL, Chen R, Yu W, et al. Study on the enrichment characteristics of four heavy metals based on different germplasm resources of *Ligusticum chuanxiong*[J]. J Chin Med Mater(中药材), 2019, 42:279-284.
- Yi GH, Peng PH. Absorption and accumulation characteristics of the rhizoma of genuine Chinese medicinal *Ligusticum chuanxiong* Hort. produced in Sichuan province to heavy metals in soil[J]. J Anhui Agric Sci(安徽农业科学), 2007, 35:10744-10745.
- Zhang DL, Zhang SD, Yang HY, et al. Effect of yield and quality of *Ligusticum chuanxiong* Hort. based on soil cadmium pollution[J]. J Chin Med Mater(中药材), 2019, 42:1228-1230.
- Zhou XT, Lu H, Li G, et al. Enrichment ability and health risk assessment of heavy metals in *Ligusticum chuanxiong* Hort. originated from Sichuan Province in China[J]. Environ Chem(环境化学), 2014, 33:562-567.
- Yu Y, Fu PN, Huang QQ, et al. Accumulation, subcellular distribution, and oxidative stress of cadmium in *Brassica chinensis* supplied with selenite and selenate at different growth stages[J]. Chemosphere, 2019, 216:331-340.
- Huang H, Li M, Rizwan M, et al. Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants[J]. J Hazard Mater, 2021, 401:123393.
- Ge CJ, Chen QB, Yu MH, et al. Effect of Cd on germination and inhibition of root elongation of tropical forage plants[J]. Chin J Trop Crop(热带作物学报), 2008, 29:567-571.
- He JY, Ren YF, Zhu C, et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth, and amylase activities in rice[J]. Chinese J Rice Sci(中国水稻科学), 2008, 22:399-404.
- Zhang DL, Yu W, Wang M, et al. Improvement effects for the content of five heavy metals, the yield, and quality of Chuanxiong Rhizoma via quicklime treatments[J]. Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发), 2021, 33:1925-1935.