

镉对不同种源树番茄种子萌发及幼苗生长的影响

金友帆, 李世民, 李树萍, 张梅, 董琼

(西南地区生物多样性保育国家林业与草原局重点实验室·西南林业大学 昆明 650224)

摘要: 研究不同种源树番茄种子萌发及幼苗生长对镉添加的响应, 探讨不同种源树番茄对镉的耐受能力, 以期筛选耐镉性较强的优良种源。以 5 个树番茄种源 XS、PE、DH、BS、LC 种子为试材, 采用单因素完全随机试验设计, 设置 5 个镉浓度(土壤含镉量 w 计: 0、5、10、20、50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 水平, 观测不同种源树番茄种子萌发及幼苗生长情况。结果表明, XS 种源发芽率、发芽指数和活力指数在 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理时有促进作用, BS 种源发芽率、发芽指数和活力指数在 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理时有促进作用, LC 种源发芽率和活力指数均在 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理时有促进作用。随 Cd^{2+} 浓度的升高, XS、PE、BS 和 LC 种源幼苗的根长、苗高和鲜质量均受到抑制, 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉处理对各种源的叶长起促进作用, 10~50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著抑制 PE 和 DH 的根长、XS 和 BS 的苗高、PE 的叶长和鲜质量。5 个不同种源的树番茄对 Cd^{2+} 的耐受能力不同, 隶属函数结果为 LC 对 Cd^{2+} 的耐受性最强。

关键词: 镉; 树番茄; 种子萌发; 幼苗生长; 隶属函数

中图分类号: S641.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)05-125-06

Effect of cadmium on seed germination characteristics and seedling growth of *Cyphomandra betacea* from different seed sources

JIN Youfan, LI Shimin, LI Shupin, ZHANG Mei, DONG Qiong

(Key Laboratory of Biodiversity Resources Conservation in Southwest China, National Forestry and Grassland Administration/Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: We investigated the response of seed germination and seedling growth of *Cyphomandra betacea* from different seed sources to cadmium addition, and explored the cadmium tolerance of *C. betacea* from different seed sources, in order to screen out good seed sources with better cadmium tolerance. The seeds of five *C. betacea* seeds XS, PE, DH, BS, and LC were used as test materials, and five Cd concentrations (soil Cd content: 0, 5, 10, 20, and 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were set in a one-way completely randomized experimental design to observe the seed germination and seedling growth of different seeds of *C. betacea*. The results show that: Seed germination indexes were promoted at 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for XS seed source, germination potential, germination index and vigor index for BS seed source, and germination potential, germination index and vigor index for LC seed source, all at 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. With increasing Cd^{2+} concentration, root length, seedling height and fresh weight of seedlings of XS, PE, BS and LC species were inhibited. 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of Cd treatment promoted leaf length of various sources, and 10-50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ significantly inhibited root length of PR and DH, seedling height of XS and BS, and leaf length and fresh weight of PR. *C. beracea* from five different seed sources differed in their tolerance to Cd^{2+} , and the affiliation function resulted in the best tolerance of LC to Cd^{2+} .

Key words: Cadmium; *Cyphomandra betacea*; Seed germination; Seeding growth; Affiliation functions

镉(Cd)是一种非必需的重金属元素, 毒性强、水溶性高、迁移性大, 易被植物及其他生物吸收, 继而通过食物链在人畜体内累积, 对环境和人体生命健康构成严重威胁^[1]。近年来, 随着现代工农业生产的发展和人类活动的急剧增加, 大量重金属镉进入土壤环境, 镉污染日益严重。研究发现, 镉能抑

制植物生长发育, 其特点表现为植株矮小、叶片黄萎卷曲、根叶坏死导致植物死亡^[2]。目前, 已有镉对植物种子萌发及幼苗生长指标影响的研究报道, 如重金属 Cd 对小麦、玉米的发芽率、幼苗生长和根的伸长均有抑制作用^[3-5]。Moya 等^[6]、Verma 等^[7]研究认为, Cd 抑制植物生长是由于细胞内贮藏的物质不

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-08-22

基金项目: 云南特色木本蔬菜种植及营养调控关键技术研究(西南林业大学基金 2020YY013); 云南省“三区”科技人才支持计划(20200402)

作者简介: 金友帆, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为经济林栽培。E-mail: 704005508@qq.com

通信作者: 董琼, 男, 副教授, 现主要从事植被恢复与保持研究。E-mail: dqyeam@swfu.edu.cn

断积累影响细胞生长和伸长。因此,研究镉处理对种子萌发和幼苗生长的影响具有重要的现实意义^[8]。

树番茄(*Cyphomandra beracea*)为茄科(*Solanaceae*)树番茄属(*Cyphomandra*)多年生常绿小乔木或灌木,在我国西南等地均有栽培,果实风味独特,富含多种矿物质、果胶及维生素C,具有极高的观赏和食用价值^[9]。前人研究表明,我国镉污染现状突出,从镉分布来看,南方土壤的镉污染问题尤其突出,在一定程度上限制了南方果树的生产及发展^[10]。目前,树番茄的研究主要集中在引种栽培^[11]、组培^[12]以及混种富集植物嫁接后代对幼苗镉积累的影响^[13]等方面。土壤中镉对树番茄种子萌发及幼苗生长的影响尚不清楚。为此,笔者的研究选择不同镉浓度处理5个种源的树番茄种子,探讨镉对5个种源种子萌发及幼苗生长的影响,并进一步比较对镉的耐受能力,筛选出耐镉能力较强的种源。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省昆明市西南林业大学格林温室,地处昆明市东北,位于海拔约1891 m,年平均气温约15℃,年降雨量1031 mm,有明显的干、湿两季,5—10月为雨季,降水量占全年的85%左右,属于北亚热带气候类型。

1.2 材料

供试材料为5个不同种源树番茄果实(每份质量不少于2 kg)(表1),于2020年11月中旬分别从云南省普洱市思茅区、临沧市耿马县、德宏傣族景颇族自治州芒市市、保山市龙陵县、西双版纳傣族自治州景洪市等5个树番茄分布区采集树番茄果实,带回实验室后剥出种子进行初步净种,去除畸形、发霉、不饱满的种子,将种子摊放在阴凉通风处,风干后贮存备用。

供试土壤取自云南省昆明市西南林业大学树木园,地处云贵高原中部,土壤基本理化性质为:pH值5.45、总容质量1.26 g·cm⁻³、总氮含量(w,后同)1.44 g·kg⁻¹、总磷含量0.83 g·kg⁻¹、总钾含量8.82 g·kg⁻¹、总钙含量0.56 g·kg⁻¹、镁含量0.12 g·kg⁻¹、铁

表1 供试树番茄种源基本信息

种源编号	单果质量/g	来源	颜色	果形	果表粗糙程度	优势
XS	38.43	西双版纳傣族自治州景洪市	红色	椭圆形	光滑	维生素C含量、总酚含量和类黄酮含量较高
PE	35.97	普洱市思茅区	红色	近圆形	光滑	维生素C含量、总酚含量和类黄酮含量较高
DH	54.59	德宏傣族景颇族自治州芒市市	红色	椭圆形	光滑	单果质量、果实纵径和横径较大,可溶性固形物含量、可溶性糖含量、固酸比和糖酸比中等偏高
BS	48.49	保山市龙陵县	红色	椭圆形	光滑	单果质量、果实纵径和横径较大,可溶性固形物含量、可溶性糖含量、固酸比和糖酸比中等偏高
LC	40.45	临沧市耿马县	红色	近圆形	光滑	可滴定酸含量高

含量41.10 g·kg⁻¹,未检测出镉^[18]。

1.3 方法

试验于2021年4月16日在西南林业大学格林温室进行。以5个树番茄种源XS、PE、DH、BS、LC种子为试材,采用单因素完全随机试验设计,设置5个镉浓度(以土壤含镉量w记:即0、5、10、20、50 mg·kg⁻¹)水平。具体做法如下:用烘箱将基质烘干,精确称取450 g风干土装于8.5 cm×17.5 cm(高×直径)的塑料盆中。每个塑料盆加入150 mL(ρ 为0、15、30、60、150 mg·L⁻¹)溶液,搅拌基质将其混匀,使土壤的镉浓度分别为0、5、10、20、50 mg·kg⁻¹。将其在温室棚内放置30 d,不定期翻土混合,使土壤充分混合均匀^[19]。1个月后,将树番茄种子均匀播种在不同镉浓度的土壤里,每盆20粒种子,设3个重复,每处理60粒种子,共使用1500粒种子定期观测树番茄种子的生长发芽状况。每隔1~2 d浇

1次水,统计种子发芽数,计算发芽率、发芽势、发芽指数等,连续5 d种子没有萌发为发芽结束的标志,待实验结束时第43天对不同种源的树番茄种子进行破坏性取样,将各种镉浓度下生长的树番茄幼苗每次重复随机选取4株,用蒸馏水反复冲洗,对不同种源的树番茄幼苗进行晾干,带回实验室测量幼苗的生长指标。

1.4 项目测定

观察树番茄种子的发芽情况,详细记录树番茄种子每天的发芽个数,计算种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。

$$\text{发芽率}/\% = \frac{\text{正常发芽种子粒数}}{\text{供检种子总粒数}} \times 100; \quad (1)$$

$$\text{发芽势}/\% = \frac{\text{发芽达到顶峰时正常发芽种子粒数}}{\text{供检种子总粒数}} \times 100; \quad (2)$$

$$\text{发芽指数}(GI)=\sum\left(\frac{Gt}{Dt}\right)。(3)$$

式中:Gt为t天内的发芽数;Dt为对应的发芽时间(d)。

$$\text{活力指数}:VI=S\sum\left(\frac{Gt}{Dt}\right)。(4)$$

式中:VI为活力指数,S为幼苗根长(cm),Gt为t天内的萌发数,Dt为发芽时间(d)。

1.5 耐性综合评价

采用隶属函数法对不同种源的树番茄种子耐Cd²⁺进行综合评价。先利用公式 $U(X)=\frac{(X-X_{\min})}{(X_{\max}-X_{\min})}$ 分别计算发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、苗高、叶长和鲜质量在不同Cd²⁺浓度下的隶属函数值[U(X)]。式中,X为各指标统计或测得的数值,X_{max}和X_{min}分别为最大值和最小值,把每一指标在不同Cd²⁺浓度下的隶属值累加求平均值,最后把各项指标隶属函数值累加求平均值,平均值越大,耐性越强;平均值越小,耐性越弱。

1.6 数据分析

采用 Excel 2016 整理数据,采用 SPSS26.0 统

计分析软件对各指标进行单因素方差分析和 LSD 多重比较,结果以平均值±标准偏差(Mean±SD)的形式表示。

2 结果与分析

2.1 不同Cd²⁺浓度对不同种源树番茄种子发芽率、发芽势、发芽指数及活力指数的影响

由表2可知,不同Cd²⁺浓度处理的5个种源树番茄种子发芽率为28.17%~66.83%。与对照相比,镉处理抑制PE、DH、BS和LC种源的发芽率,DH和BS种源的发芽率在20、50mg·kg⁻¹的Cd²⁺处理下显著降低,LC种源的发芽率在50mg·kg⁻¹的Cd²⁺处理下显著降低。PE种源发芽率在不同Cd²⁺处理之间均无显著差异。而XS种源随着镉浓度的增加呈先增加后降低的趋势,在5mg·kg⁻¹达到最大值,其发芽率在50mg·kg⁻¹的Cd²⁺处理下显著降低,说明5mg·kg⁻¹的Cd²⁺能有效促进XS种子的萌发,表明低浓度镉处理提升了XS种子的发芽率,而高浓

表2 不同Cd²⁺浓度对不同种源树番茄种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数的影响

种源	w(Cd ²⁺)/(mg·kg ⁻¹)	发芽率/%	发芽势/%	发芽指数	活力指数
XS	0(CK)	55.00±1.29 a	28.17±3.25 a	0.44±0.01 a	1.28±0.12 a
	5	56.83±3.25 a	25.00±1.29 a	0.45±0.02 a	1.41±0.17 a
	10	55.00±1.29 a	23.17±2.69 a	0.46±0.01 a	1.22±0.19 a
	20	55.00±6.71 a	23.17±1.29 a	0.44±0.05 a	1.16±0.24 ab
	50	41.83±3.25 b	21.83±3.25 a	0.33±0.02 b	0.68±0.08 b
PE	0(CK)	66.83±0.75 a	28.17±0.75 a	0.59±0.01 a	2.95±0.31 a
	5	65.00±3.42 a	25.00±2.24 ab	0.55±0.04 ab	2.66±0.22 a
	10	61.83±2.69 a	25.00±2.58 ab	0.51±0.02 ab	1.95±0.11 b
	20	60.00±2.24 a	21.83±0.75 b	0.51±0.02 ab	1.70±0.12 b
	50	56.83±5.38 a	15.00±2.24 c	0.47±0.04 b	0.72±0.08 c
DH	0(CK)	48.17±0.75 a	23.17±1.49 a	0.40±0.01 a	1.75±0.16 a
	5	45.00±1.29 ab	16.83±1.97 b	0.38±0.01 a	1.26±0.14 b
	10	43.17±3.94 ab	15.00±1.29 b	0.37±0.03 a	1.03±0.13 b
	20	40.00±2.24 b	15.00±2.24 b	0.35±0.02 a	0.95±0.16 b
	50	28.17±1.97 c	13.17±1.49 b	0.24±0.02 b	0.56±0.08 c
BS	0(CK)	65.00±0.75 a	20.00±2.24 c	0.51±0.01 a	1.39±0.29 a
	5	61.83±0.75 a	23.17±1.49 bc	0.52±0.01 a	1.69±0.11 a
	10	60.00±1.29 a	31.83±0.75 ab	0.51±0.01 a	1.42±0.10 a
	20	51.83±2.69 b	35.00±5.92 a	0.41±0.02 b	0.88±0.09 b
	50	45.00±2.24 c	18.17±2.69 c	0.37±0.01 c	0.71±0.09 b
LC	0(CK)	50.00±1.29 a	26.83±0.75 ab	0.41±0.01 a	1.30±0.15 a
	5	46.83±4.15 a	30.00±4.65 a	0.39±0.04 ab	1.31±0.25 a
	10	46.83±0.75 a	25.00±4.65 ab	0.38±0.00 ab	1.07±0.14 ab
	20	43.17±1.49 ab	18.17±3.73 bc	0.37±0.01 ab	0.98±0.12 ab
	50	38.17±3.94 b	13.17±1.49 c	0.32±0.03 b	0.65±0.10 b

注:小写字母表示相同种源不同镉浓度间在0.05水平差异显著,下同。

度镉胁迫处理则抑制了树番茄种子发芽率。不同 Cd^{2+} 浓度处理的 5 个种源树番茄种子发芽势为 13.17%~35.00%。与对照相比,镉处理抑制 XS、PE 和 DH 种源的发芽势,且随镉浓度增加发芽势呈下降的趋势。PE 种源在 20、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理下显著降低;对于 DH 种源而言,不同 Cd^{2+} 浓度发芽势均显著降低;则 XS 种源发芽势在不同 Cd^{2+} 处理之间均无显著差异。而 BS 种源的发芽势随着 Cd^{2+} 浓度的增加呈先升后降的变化趋势,在 5、10、20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理下提升了 BS 种源的发芽势,并在 10、20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度下显著高于对照。对于 LC 种源而言,随镉浓度的增加呈先增后降的变化趋势,5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理对其发芽势有一定程度的促进作用,并在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理下显著降低。

由表 2 可知,5 个种源不同 Cd^{2+} 浓度处理的树番茄种子发芽指数为 0.24~0.59。与对照相比,镉处理抑制 PE、DH 和 LC 种源的发芽指数,且随镉浓度增加发芽指数均在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降;而 5、10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理可提高 XS 种源的发芽指数,在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降,且 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理

可提高 BS 种源的发芽指数,则 BS 种源在 20、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降。5 个种源不同 Cd^{2+} 浓度处理的树番茄种子活力指数为 0.56~2.95。与对照相比,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,PE 和 DH 种源的活力指数逐渐降低,DH 种源在所有 Cd^{2+} 处理下均显著降低,而 PE 种源在 10、20、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理下显著降低,且随镉浓度的增加抑制加重。对 XS、BS 和 LC 种源而言,树番茄活力指数随 Cd^{2+} 浓度的增加呈先升高后降低的变化趋势,XS 种源和 LC 种源在 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理时对其活力指数均有一定程度的促进作用,并在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著降低,而 BS 种源在 5、10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时均不同程度高于对照,则在 20、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降。

2.2 不同 Cd^{2+} 浓度对不同种源树番茄幼苗生长的影响

由表 3 可知,不同 Cd^{2+} 浓度处理的 5 个种源树番茄苗高为 2.77~4.42 cm。与对照相比, Cd^{2+} 处理抑制 XS 和 PE 种源的苗高,随着浓度的增加 XS 种源的苗高在 10、20、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降;PE 种源的苗高在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时显著下降;而 DH、BS 和

表 3 不同 Cd^{2+} 浓度对不同种源树番茄幼苗苗高、叶长、根长和鲜质量的影响

种源	$w(\text{Cd}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	苗高/cm	叶长/cm	根长/cm	鲜质量/g
XS	0(CK)	3.93±0.13 a	2.90±0.33 a	2.91±0.31 ab	0.15±0.01 a
	5	3.70±0.13 ab	3.07±0.31 a	3.20±0.40 a	0.14±0.02 a
	10	3.43±0.19 b	2.87±0.27 a	2.66±0.37 ab	0.13±0.01 a
	20	3.33±0.12 b	2.77±0.22 a	2.46±0.33 ab	0.12±0.01 a
	50	2.89±0.08 c	2.42±0.12 a	2.07±0.19 b	0.07±0.01 b
PE	0(CK)	4.42±0.17 a	3.89±0.21 ab	4.97±0.54 a	0.27±0.02 a
	5	4.37±0.19 a	4.24±0.20 a	4.84±0.35 a	0.26±0.06 a
	10	4.27±0.22 a	3.73±0.11 ab	3.84±0.19 b	0.15±0.01 b
	20	4.11±0.15 a	3.55±0.21 b	3.38±0.26 b	0.14±0.01 b
	50	3.48±0.12 b	2.77±0.22 c	1.54±0.14 c	0.13±0.01 b
DH	0(CK)	3.35±0.15 b	3.60±0.24 ab	4.40±0.40 a	0.11±0.02 bc
	5	3.84±0.20 a	3.96±0.21 a	3.13±0.34 b	0.13±0.01 ab
	10	3.29±0.18 b	3.53±0.19 ab	2.73±0.29 b	0.16±0.01 a
	20	3.27±0.16 b	3.28±0.20 ab	2.48±0.25 b	0.10±0.01 bc
	50	2.77±0.17 c	3.03±0.27 b	2.23±0.23 b	0.08±0.01 c
BS	0(CK)	3.78±0.14 ab	3.60±0.24 ab	2.66±0.55 ab	0.15±0.01 a
	5	3.93±0.13 a	4.08±0.19 a	3.26±0.23 a	0.14±0.01 a
	10	3.52±0.08 bc	3.21±0.14 bc	2.81±0.19 ab	0.13±0.01 a
	20	3.40±0.12 c	2.88±0.20 cd	2.18±0.24 b	0.12±0.01 a
	50	2.99±0.07 d	2.53±0.25 d	1.88±0.19 b	0.08±0.01 b
LC	0(CK)	3.70±0.17 a	3.29±0.26 a	3.18±0.43 a	0.17±0.01 a
	5	4.03±0.16 a	3.46±0.25 a	3.08±0.41 a	0.18±0.01 a
	10	3.89±0.26 a	3.03±0.25 a	2.83±0.38 ab	0.16±0.01 a
	20	3.85±0.17 a	2.81±0.17 a	2.68±0.33 ab	0.15±0.02 a
	50	2.87±0.22 a	1.97±0.18 b	1.93±0.20 b	0.09±0.01 b

LC 则呈先增高后降低的趋势,BS 种源的苗高在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 高于对照组,在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 达到最大值,均无显著差异,则在 $20, 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著下降。对于 DH 种源而言, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理对其苗高有促进作用,其中 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理显著提高了苗高,而 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理显著降低该种源的苗高。对 LC 种源而

言,在 $5, 10, 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 处理时均不同程度高于对照组,在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 达到最大值,则在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时低于对照组,但均无显著差异。

不同 Cd^{2+} 浓度处理的 5 个种源树番茄叶长分别为 $2.42 \sim 3.07 \text{ cm}$ 、 $2.77 \sim 4.24 \text{ cm}$ 、 $3.03 \sim 3.96 \text{ cm}$ 、 $2.53 \sim 4.08 \text{ cm}$ 、 $1.97 \sim 3.46 \text{ cm}$ 。低浓度的镉处理可促进叶

表 4 不同种源树番茄种子萌发期对 Cd^{2+} 耐性的隶属函数值及综合评价

种源	发芽率	发芽势	发芽指数	活力指数	根长	苗高	叶长	鲜质量	R1	排名
XS	0.727	0.384	0.741	0.642	0.522	0.543	0.593	0.632	0.598	2
PE	0.527	0.640	0.463	0.573	0.634	0.691	0.589	0.432	0.569	3
DH	0.637	0.346	0.680	0.461	0.353	0.499	0.485	0.442	0.488	5
BS	0.626	0.444	0.624	0.513	0.491	0.565	0.470	0.635	0.546	4
LC	0.577	0.562	0.595	0.624	0.651	0.691	0.633	0.695	0.629	1

注:R1 表示各组合平均隶属函数值。

长的生长,但高浓度则会抑制。与对照相比,随 Cd^{2+} 浓度的增加叶长呈先升后降的变化趋势,均在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时起到促进作用,PE 和 LC 种源在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著下降,而 BS 种源在 $20, 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著下降。XS 种源的叶长在不同 Cd^{2+} 处理之间均无显著差异。不同 Cd^{2+} 浓度处理的 5 个种源树番茄根长为 $1.54 \sim 4.97 \text{ cm}$ 。与对照相比,镉处理抑制 DH、PE 和 LC 的根长,DH 种源的根长随镉浓度增加均显著下降,而 PE 种源在 $10, 20, 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理下显著降低;而 LC 种源的根长在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著下降,XS 和 BS 种源随着镉浓度的增加呈先升高后下降的趋势,均在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 达到最大值;且 XS 种源根长在 $10, 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理时无显著差异,而 BS 种源根长在 $5, 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度时均不同程度高于对照,在 $20, 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均低于对照组。不同 Cd^{2+} 浓度处理对不同种源树番茄鲜质量有不同的影响。与对照相比,镉处理抑制 XS、PE 和 BS 种源的鲜质量,XS 和 BS 种源在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著下降,而 PE 种源在 $10, 20, 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著下降。LC 种源的鲜质量随 Cd^{2+} 浓度的增加先升后降, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd^{2+} 处理增加了 LC 的鲜质量,在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时显著下降。 $5, 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理增加了 DH 鲜质量,其中 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理中 DH 的鲜质量增加幅度显著高于对照。

2.3 不同种源树番茄耐 Cd^{2+} 性综合评价

由表 4 可知,采用隶属函数法,对供试 5 种不同种源树番茄的种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、苗高、叶长和鲜质量进行了隶属函数

值计算,然后对所有指标的隶属函数值求平均值,比较其大小,得出不同种源耐 Cd^{2+} 性为 $\text{LC} > \text{XS} > \text{PE} > \text{BS} > \text{DH}$ 。

3 讨论与结论

3.1 Cd 对不同种源树番茄种子萌发指标的影响

Cd 胁迫会对植物造成伤害,种子萌发是最感知及判断植物是否具有较强耐镉性的重要时期^[6]。笔者的研究表明,当镉浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,XS 种源的发芽率和 LC 种源的发芽势达到最高,而较低浓度的镉对 PE 和 DH 种子萌发无影响,随镉浓度的增加,抑制作用也逐渐增强,PE 和 DH 种源的发芽率与发芽势逐渐降低。 Cd^{2+} 浓度达到 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著提高了 BS 种源的发芽势,这表明种子具有耐性。发芽指数与活力指数是反映种子活力的综合指标,能反映种子发芽的质量。本研究结果表明,BS 和 XS 种源发芽指数在 $5, 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 最大,其中 LC 种子发芽指数降幅最小,说明其保有较好的发芽趋势。当镉浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 XS、BS 及 LC 的活力指数最大,而 PE 和 DH 种源的发芽指数和活力指数逐渐降低。造成低促高抑现象的原因,可能是低浓度 Cd^{2+} 提高胚的生理活性,促进萌发;而高浓度 Cd^{2+} 会对胚、芽等器官产生伤害,且高浓度 Cd^{2+} 会抑制淀粉酶、蛋白酶活性,进而抑制种子内贮藏蛋白质和淀粉分解,从而影响种子萌发所需要的物质和能力,使种子萌发受到抑制^[7]。

3.2 Cd 对不同种源树番茄幼苗生长指标的影响

重金属 Cd 是生物体非必需的元素,当 Cd^{2+} 浓度达到一定值时就会明显抑制植物的生长^[8]。笔者

研究显示,不同 Cd^{2+} 浓度处理对不同种源树番茄根长表现出不同的响应, XS 和 BS 种源随镉浓度的升高呈先升后降的趋势, 而 PE、DH 及 LC 种源随镉浓度的升高呈直线下降的趋势, 表现出“低促高抑”的现象, 可能是由于低浓度镉激活植物自身的保护系统发挥作用, 高浓度镉抑制其发挥作用。前人研究表明, 重金属物质进入植物体后, 与植物体内的生物大分子结合, 大部分积累在植物的根部, 仅少量向地上部分迁移^[9]。镉处理对 XS 和 PE 种源的苗高生长有抑制作用, 随着镉浓度的升高而被抑制越明显。而随镉浓度的增加呈先上升后下降的趋势, DH、BS 及 LC 种源在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 起到促进作用, 则 LC 种源在 10 、 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时均大于对照, 说明具有一定的耐受性。随着镉浓度的增加 XS、PE 和 BS 种源的鲜质量呈直线下降的趋势, 抑制作用明显, 而 LC 和 DH 种源随镉浓度的增加呈先升后降的趋势, LC 种源在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 起到促进作用, 则 DH 种源在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大值。笔者研究结果表明, 不同种源树番茄种子萌发和幼苗生长指标在高浓度 Cd^{2+} 会受到抑制而下降。出现这种情况的原因可能是高浓度的镉溶液对胚、芽等产生了伤害作用, 且高浓度镉溶液处理抑制了淀粉酶和蛋白酶的活性, 即抑制种子内贮藏的淀粉和蛋白质的分解, 从而影响了种子萌发所需要的营养物质, 导致种子萌发及幼苗在生长过程中细胞器受到致死性伤害和营养物质积累功能受损^[20-21]。

不同浓度 Cd^{2+} 对树番茄种子萌发及幼苗生长表现出“低促高抑”现象; 影响树番茄种子生长发育最明显的是镉浓度 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同种源树番茄对 Cd^{2+} 的耐受能力不同, BS 种源的活力指数、根长和 DH 种源的鲜质量对 Cd^{2+} 的耐性阈值为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, BS 种源的发芽势和 LC 种源的苗高对 Cd^{2+} 的耐性阈值为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。通过不同浓度的 Cd^{2+} 处理对不同种源的树番茄种子及幼苗的隶属函数值进行综合评价, 得出 LC 种源的耐镉性最强。

参考文献

- [1] 綦崢, 齐越, 杨红, 等. 土壤重金属镉污染现状、危害及治理措施[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7): 2286-2294.
- [2] HAIDER F U, CAI L Q, COULTER J A, et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 211: 111887.
- [3] 王树会, 黄成江. 烤烟对不同土壤类型中镉的吸收及其分配[J]. 内蒙古农业科技, 2008, 36(3): 40-42.
- [4] 杨刚, 伍钧, 唐亚, 等. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1507-1512.
- [5] SHAH K, DUBEY R S. Cadmium elevates level of protein, amino acids and alters activity of proteolytic enzymes in germinating rice seeds[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 1998, 20(2): 189-196.
- [6] MOYA J L, ROS R, PICAZO I, et al. Heavy metal-hormone interactions in rice plants: effects on, growth, net photosynthesis, and carbohydrate distribution[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1995, 14(2): 61-67.
- [7] VERMA S, DUBEY R S. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice[J]. Biologia Plantarum, 2001, 44(1): 117-123.
- [8] 王晓晶, 呼凤兰, 秦燕阳, 等. 重金属胁迫对不同花生种子萌发及生理的影响[J]. 种子, 2018, 37(10): 89-92.
- [9] 郭碧瑜, 周伟华, 叶青莲, 等. 树番茄的生物学特性及栽培技术[J]. 广东农业科学, 2007, (12): 102-103.
- [10] 庞荣丽, 王瑞萍, 谢汉忠, 等. 农业土壤中镉污染现状及污染途径分析[J]. 天津农业科学, 2016, 22(12): 87-91.
- [11] 张庆良, 张凤霞, 丰宗新, 等. 树番茄引种栽培试验初报[J]. 山东林业科技, 2005(3): 25-26.
- [12] 吴友特. 树番茄胚芽愈伤组织的诱导和植株再生[J]. 植物生理学通讯, 1984(4): 33-34.
- [13] 杨代宇. 混种两种生态型少花龙葵杂交 F_1 代对树番茄幼苗镉积累的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2016: 1-50.
- [14] 李世民, 郑鑫华, 段华超, 等. ABT-1 处理对树头菜扦插生根及生理生化特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(1): 116-125.
- [15] 黄科文, 李嘉宇, 李祉钰, 等. 喷施脱落酸对树番茄幼苗生理特性及镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 207-213.
- [16] 田丹, 任艳芳, 王艳玲, 等. 镉胁迫对生菜种子萌发及幼苗抗氧化酶系统的影响[J]. 北方园艺, 2018(2): 15-21.
- [17] 葛成军, 陈秋波, 俞花美, 等. Cd 胁迫对 2 种热带牧草种子发芽与根伸长的抑制效应[J]. 热带作物学报, 2008, 29(5): 567-571.
- [18] ZHU G X, XIAO H Y, GUO Q J, et al. Effects of cadmium stress on growth and amino acid metabolism in two Compositae plants[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 158(30): 300-308.
- [19] 覃勇荣, 覃艳花, 严军, 等. EDTA 对桑树和任豆幼苗吸收重金属 Pb 的影响[J]. 南方农业学报, 2011, 42(2): 168-172.
- [20] 张春荣, 夏立江, 杜相革, 等. 镉对紫花苜蓿种子萌发的影响[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5): 253-255.
- [21] 张义贤. 重金属对大麦 (*Hordeum vulgare*) 毒性的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 18(2): 199-201.