

◆植物生理◆

铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的影响*

许爱祝^{1,2},曾小颺^{3**},张翠娇³,唐健民¹,韦霄¹,蒙美清^{1,3},梁敏玲^{1,3}

(1.广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所,广西桂林 541006; 2.桂林理工大学旅游与风景园林学院,广西桂林 541006; 3.百色学院农业与食品工程学院,广西百色 533000)

摘要:为了研究铜(Cu)、镉(Cd)及其复合胁迫对麻疯树(*Jatropha curcas* Linn.)幼苗生理生化指标的影响,测定经Cu、Cd及其复合处理后麻疯树幼苗的丙二醛(MDA)含量、根系活力、叶绿素含量、细胞膜透性、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、过氧化物酶(POD)和脯氨酸含量等的变化情况。研究表明,Cu和Cd的浓度分别为50-400和10-200 mg/L时,对麻疯树幼苗有一定的负效应,且两者的复合处理存在一定的拮抗作用。负效应表现为丙二醛、可溶性蛋白质和脯氨酸含量增加,相对电导率增大,根系活力下降,叶绿素和可溶性糖含量以及过氧化物酶活性下降,表明一定浓度的Cu、Cd会影响或改变麻疯树幼苗部分生理生化特征,对麻疯树幼苗的生长造成一定的危害;当Cu+ Cd复合胁迫处理液浓度为(100+50) mg/L时,其对植物细胞中丙二醛产生最大的抑制作用,从而减轻植物细胞受损程度;当Cu+ Cd复合胁迫处理液浓度为(50+10) mg/L时,其对植物根系活力的积极影响相对于参照组变化最为明显。适量Cu、Cd重金属含量对植物的生长和保护具有积极影响。

关键词: Cu Cd 麻疯树 生理生化指标 复合胁迫 重金属

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2021)02-0152-08

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20210806.007

0 引言

现代社会重金属污染愈发严重,其来源主要有金属冶炼及化工企业生产、污灌、固体废弃物、农药及化学残留等。铜(Cu)是动植物生长的微量必需元素,

含量过高时会产生毒害作用,镉(Cd)是比较常见且污染严重的一种重金属,铜和镉是重金属污染中两个主要的环境污染物,其中Cd污染较普遍,其次是Cu、Pb、Zn等。国内许多地方从粮食、蔬菜中已检测出含量超标的重金属有砷、铅、镉、铜等^[1-3]。铜和镉等重

收稿日期:2021-03-04

* 广西科技重大专项(桂科AA19254007-4),河池市科技攻关项目(河科AB198807),广西植物功能物质研究与利用重点实验室主任基金项目(ZRJJ2018-9和ZRJJ2018-10)和广西植物研究所基本业务费项目(桂植业21002,21012,21013)资助。

【作者简介】

许爱祝(1996-),女,在读硕士研究生,主要从事风景园林规划设计与药用植物景观应用研究。

【**通信作者】

曾小颺(1971-),男,副教授,主要从事植物保育和抗性研究,E-mail:1499494130@qq.com。

【引用本文】

许爱祝,曾小颺,张翠娇,等.铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的影响[J].广西科学院学报,2021,37(2):152-159.

XU A Z,ZENG X B,ZHANG C J,et al. Effects of Copper,Cadmium and Their Combined Stress on the Physiological and Biochemical Characteristics of *Jatropha curcas* Linn. Seedlings [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2021,37(2):152-159.

金属的污染已经成为影响我国农业和生态环境可持续发展的重要因素。

过量的 Cd 容易被植物吸收并积累,影响农作物产量^[4,5]。Cd 不仅影响植物细胞生长,而且会抑制叶绿素的合成,对植物光合作用产生复杂的影响。目前关于 Cu 对植物毒害的相关研究大都集中在对高等植物细胞结构和光合作用的影响等方面^[6,7]。总的来说铜毒害作用和镉毒害机理相似,两者均对植物细胞生长发育、细胞膜结构、细胞器以及各种酶类产生广泛的毒害作用,影响光合作用并对植物生长起抑制作用^[8,9]。

目前,有关汞胁迫对玉米、小麦、水稻、辣椒等种子萌发和幼苗生长的影响研究较多,但有关于镉、铜及其复合胁迫条件下麻疯树 (*Jatropha curcas* Linn.) 幼苗生理生化特性的研究报道较少。麻疯树也被称为小桐子、木花生、老胖果、膏桐、黑皂树等,属大戟科 (Euphorbiaceae Juss) 麻疯树属 (*Jatropha*), 原产于巴西,适合生长在热带和亚热带地区,其中美洲和亚洲的热带地区占绝大多数。麻疯树是全球已发现并受到公认的林业生物柴油物种,是当今最有开发潜力和优势的树种之一,得到国际组织、政府和企业的高度重视。经广西检测中心测定,麻疯树种子含油率为 53.6%; 当年种植,次年开花结果,5 年进入盛产期,正常结果期长达 50 年;具有较强的抗旱能力,适宜种植在贫瘠干热地区,同时具有绿化作用和经济价值。

本研究以麻疯树种子为材料,研究受镉、铜及其复合胁迫后,麻疯树幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、丙二醛 (MDA)、可溶性蛋白质和可溶性糖含量,以及过氧化物酶 (POD) 活性、根系活力、细胞膜透性、脯氨酸积累等生理生化特性,以揭示铜和镉对麻疯树生理生化特性的影响和作用机制,为铜、镉对麻疯树伤害机理的研究提供科学依据,并为麻疯树及其他受铜、镉等重金属元素危害的植物的保护和利用提供有效的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

麻疯树种子为云南壮大科技有限公司提供,编号为 TB2。

仪器:电子天平、离心机、微量移液器、恒温水浴锅、可见光分光光度计、漩涡仪、DDS-307 型数显电导率仪、研钵、烧杯、容量瓶、量筒、移液管等。

试剂:标准脯氨酸溶液、酸性茚三酮、甲苯、脯氨酸、冰醋酸、磺基水杨酸、丙酮、乙酸乙酯、硫代硫酸钠、碳酸钙均为分析纯级;1 mol/L 硫酸、66 mmol/L 磷酸缓冲液、10% 三氯乙酸 (TCA)、磷酸缓冲液、pH 值为 6.0 的反应混合液、1% 氯化三苯四氮唑 (TTC) 等。

1.2 方法

1.2.1 种子催芽

用清水浸泡种子 12 h,随后用高锰酸钾消毒液按照 1:5000 的比例消毒 10 min,将湿润的棉花和两层滤纸在培养皿中垫上一层,将实验种子平铺在滤纸上,放入培养皿中恒温培养,温度为 25℃,并且按时喷洒蒸馏水,确保种子所需水分。

1.2.2 盆栽沙培处理

(1) 播种育苗

提前准备好塑料杯作为栽培器具,器皿直径为 8 cm。将培育所需基质定为珍珠岩,种子露白后,将种子进行播种。每日用 1/2 的霍格兰培养液保持实验基质的湿润。

(2) 胁迫处理

实验共设铜离子、镉离子、铜和镉复合离子 3 个因子,每个因子设 6 个处理,分别为 6 种不同的浓度,各处理浓度如表 1 所示,其中 T1 为对照组。每个处理包含 10 株长势匀称、体态一致的麻疯树幼苗,使用含有不同金属浓度的培养液分别用于浇洒栽培基质。实验进行 7 d 后检测各项生理指标。

表 1 不同试验因子及相关处理浓度

Table 1 Different test factors and related treatment concentrations

处理编号 Treatment number	处理浓度 Treatment concentration (mg/L)		
	铜离子 Copper ion	镉离子 Cadmium ion	铜和镉复合离子 Cu and Cd complex ion
T1	0	0	0+0
T2	25	5	25+5
T3	50	10	50+10
T4	100	50	100+50
T5	200	100	200+100
T6	400	200	400+200

1.2.3 测定方法

以王小菁等^[10]和张志良等^[11]的实验研究为依据,无水丙酮提取并采用可见光光度法测定叶绿素含量;采用硫代巴比妥酸加热显色法测定丙二醛含量;采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量;使用愈创

木酚法测定过氧化物酶的活性;使用 TTC 显色法测定根系活力;通过测定外渗液电导率来测定植物细胞质膜的透性;使用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量。

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 软件整理数据及绘制图表。

2 结果与分析

2.1 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗丙二醛含量的影响

丙二醛作为膜脂过氧化物的主要产物,能够和核酸、蛋白质、氨基酸等活性物质交换联结,沉积为脂褐素(不溶化合物),对细胞生命活动产生干扰,其膜脂过氧化程度通过内部含量呈现^[12,13]。丙二醛会抑制蛋白质的合成,植物在衰老和逆境伤害的情况下,会发生膜脂过氧化生成丙二醛,通过丙二醛含量可了解植物组织的破坏程度。由图 1 可知,Cd 胁迫下丙二醛含量随着 Cd^{2+} 浓度的升高先升高后下降,当浓度升高至 10 mg/L 时丙二醛含量降至最低,之后随着 Cd^{2+} 浓度的继续增加丙二醛含量又再次升高,当 Cd^{2+} 浓度为 100 mg/L 时达到峰值, Cd^{2+} 浓度超过 100 mg/L 后丙二醛含量再次下降。Cu 胁迫下,其浓度为 100 mg/L 时,麻疯树幼苗丙二醛含量最低,是对照组的 82.92%;当浓度增大至 200 mg/L 时,其 MDA 含量最高。在 Cd、Cu 复合胁迫下,当 Cu + Cd 复合离子浓度为 (25 + 5) mg/L 时 MDA 含量最高,浓度加大至 (100 + 50) mg/L 时 MDA 含量降至最低。丙二醛含量低时对麻疯树幼苗生长有促进作用;含量高时对麻疯树幼苗生长有毒害作用。

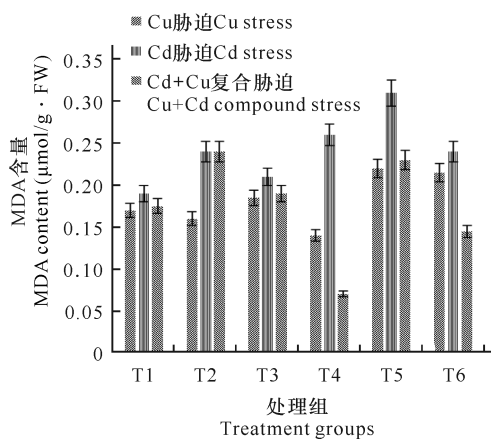


图 1 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗丙二醛含量的影响

Fig. 1 Effects of Cu, Cd and their combined stress on the content of malondialdehyde in *J. curcas* seedlings

2.2 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗根系活力的影响

根系为植物提供生长所需的营养物质,根系代谢强度与其活力有直接关系,活力高则代谢旺盛,对植株生长有好处。由图 2 可知,Cd 胁迫下麻疯树幼苗的根系活力先降低后升高,当 Cd^{2+} 浓度为 100 mg/L 时根系活力达到最高值,之后随着浓度的继续升高再次下降。但是可以看到,不管何种 Cd^{2+} 浓度下的胁迫,根系活力都处在较高的水平,说明 Cd^{2+} 胁迫对麻疯树根系活力影响不明显。在 Cu 胁迫下,麻疯树幼苗根系活力随着 Cu^{2+} 浓度的增加先逐渐升高再迅速下降至几乎接近零,表明根系基本死亡。Cu + Cd 复合胁迫下,根系活力也是升高再降低,当 Cu + Cd 复合浓度为 (50 + 10) mg/L 时,麻疯树幼苗根系活力最强,说明一定 Cu + Cd 复合离子浓度有利于幼苗的生长,而高浓度 Cu + Cd 复合离子则会毒害幼苗的生长。

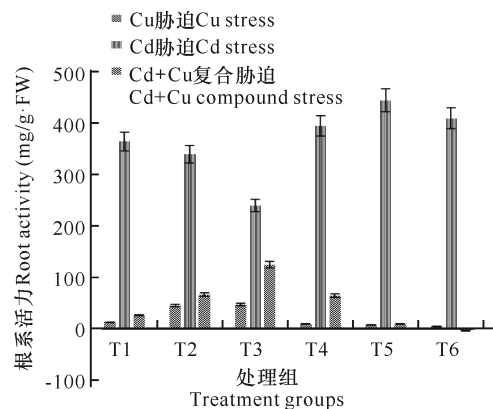


图 2 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗根系活力的影响

Fig. 2 Effects of Cu, Cd and their combined stress on root activity of *J. curcas* seedlings

2.3 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树叶绿素含量的影响

由图 3-5 可知,随着 Cu^{2+} 浓度增加,叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 含量总体呈现上升趋势, Cu^{2+} 胁迫组麻疯树幼苗的叶绿素含量均比对照组的叶绿素含量有所增加,说明 Cu^{2+} 浓度对麻疯树幼苗生长有促进作用。 Cu^{2+} 浓度为 25 mg/L 时,麻疯树幼苗叶绿素含量上升幅度较大,可能是麻疯树幼苗在 Cu^{2+} 浓度为 25 mg/L 时表现出应激作用,加快其光合作用(图 3)。 Cd^{2+} 处理后的叶绿素含量相对于对照组的叶绿素含量普遍稍低,当 Cd^{2+} 浓度为 5 mg/L 时,叶绿素的含量降到最低;在 50 mg/L 及以上的 Cd^{2+} 浓度时,叶绿素含量先降低后上升(图 4),表明

其浓度的增加不能说明对叶绿素积累有促进或者抑制作用。在 Cd、Cu 复合胁迫下, 其叶绿素总体呈小幅度起伏, 说明 Cd、Cu 复合胁迫对麻疯树幼苗光合作用的影响不大(图 5)。

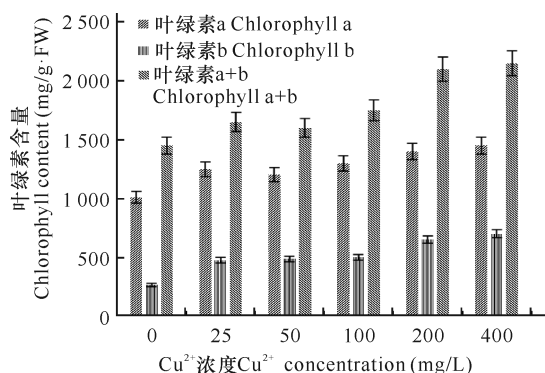


图 3 不同铜离子浓度胁迫对麻疯树幼苗叶绿素含量的影响
Fig. 3 Effects of different concentrations of copper ions on the chlorophyll content in *J. curcas* seedlings

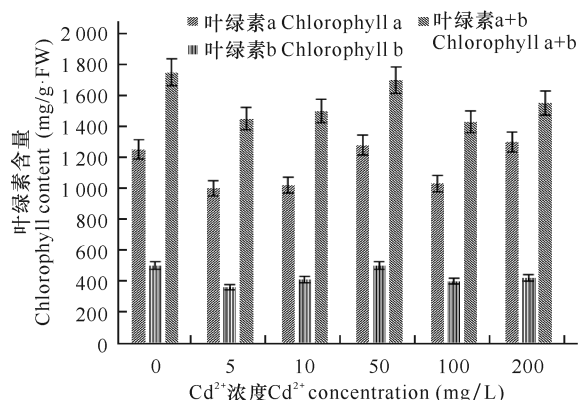


图 4 不同镉离子浓度胁迫对麻疯树幼苗叶绿素含量的影响
Fig. 4 Effects of different cadmium concentration stress on the chlorophyll content of *J. curcas* seedlings

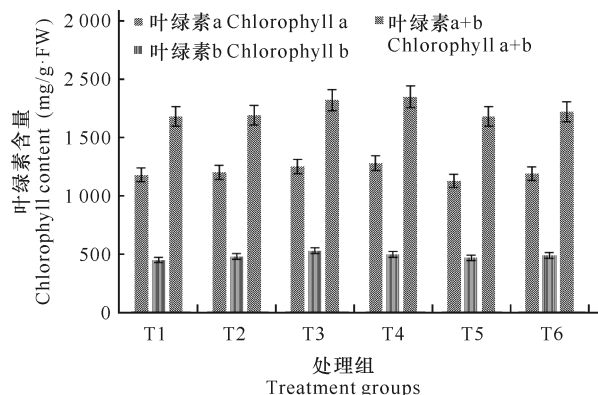


图 5 铜、镉复合胁迫对麻疯树幼苗叶绿素含量的影响
Fig. 5 Effects of Cu and Cd on the chlorophyll content in *J. curcas* seedlings

2.4 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗电导率的影响

Cu^{2+} 胁迫下, 麻风树幼苗外渗液电导率随 Cu^{2+}

浓度增加而增加, 呈显著正相关关系(图 6)。 Cd^{2+} 胁迫下, 相对电导率总体是先升高再下降后上升的变化趋势, 浓度为 10 mg/L 时, 其相对电导率为对照组的 78.24%。Cu + Cd 复合胁迫浓度逐渐上升到 (50 + 10) mg/L 时, 相对电导率缓慢下降。当 Cu + Cd 复合胁迫浓度为 (100 + 50) mg/L 时相对电导率急剧上升, 当复合浓度为 (400 + 200) mg/L 时相对电导率达到最高, 为对照组的 238.38%。

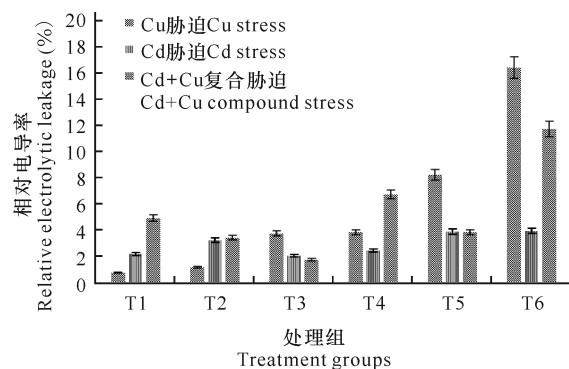


图 6 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗相对电导率的影响
Fig. 6 Effect of Cu, Cd and their combined stress on the electrical conductivity of *J. curcas* seedlings

2.5 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗可溶性蛋白质含量的影响

由图 7 可知, 麻疯树幼苗叶片中含有的可溶性蛋白质含量随 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 胁迫浓度升高而升高, Cd 浓度为 200 mg/L 或 Cu 浓度为 400 mg/L 时, 可溶性蛋白质含量达到顶峰, 分别为对照组的 352.87% 和 575.06%。Cd、Cu 复合胁迫时, 可溶性蛋白质含量也随着处理浓度的增加而增加, 但当 Cu + Cd 复合胁迫浓度分别为 (25 + 5)、(50 + 10) mg/L 时, 可溶性蛋白质含量与对照组差异不明显; 当 Cu + Cd 复合胁迫浓度分别达到 (200 + 100)、(400 + 200) mg/L 时, 可溶性蛋白质含量显著提高, 分别为对照组的 190.87% 和 193.94%。可溶性蛋白质作为重要的渗透调节物质和营养物质, 其增加可提高细胞的保水能力, 同时对细胞的生命物质、生物膜起保护作用。从图 7 中可以明显看出, Cd^{2+} 浓度为 200 mg/L 时可溶性蛋白质含量变化最明显, 含量最高。

2.6 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗可溶性糖含量的影响

如图 8 所示, 单一金属 Cd 处理下, 麻疯树幼苗的可溶性糖含量先降低然后升高达到最大值(浓度为 50 mg/L 时), 但与对照组间的差异不明显, 说明 Cd 胁迫对麻风树可溶性糖含量影响不显著。在 Cu 处

理下,随着其浓度增加,可溶性糖含量也随之增加,当 Cu^{2+} 浓度达到 400 mg/L 时,可溶性糖含量达到峰值,为对照组 151.58%。复合胁迫时,麻疯树幼苗中可溶性糖含量随胁迫浓度的升高而增加,当 Cu + Cd 复合胁迫浓度为 (200 + 100) mg/L 时,含量达到最高值,为对照组的 143.52%。可溶性糖含量的增加,能减少重金属胁迫对植物产生的伤害,增强植物的抗逆性。

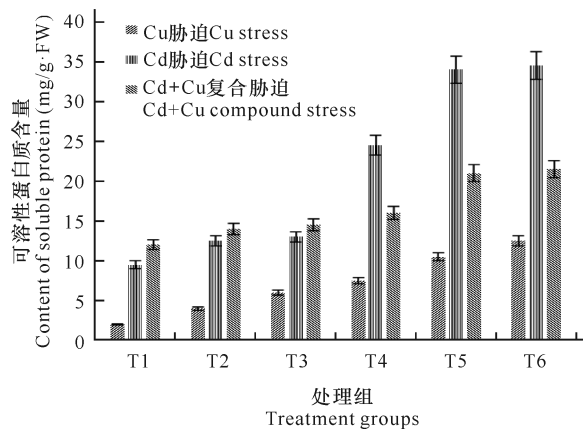


图7 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 7 Effects of Cu, Cd and their combined stress on the protein content of *J. curcas* seedlings

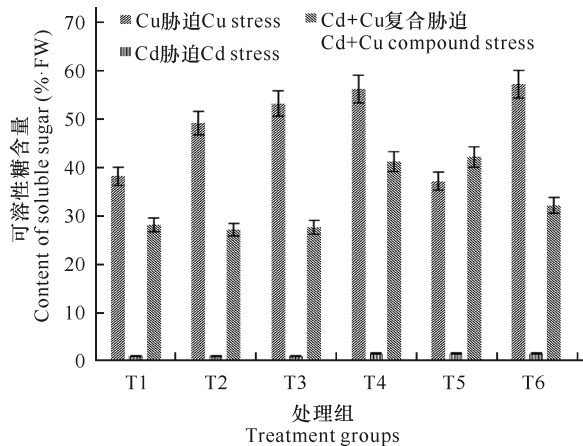


图8 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 8 Effects of Cu, Cd and their combined stress on the content of soluble sugar in *J. curcas* seedlings

2.7 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗过氧化物酶活性的影响

过氧化物酶是一种含铁的酶,能促进 H_2O_2 氧化酶类反应,进而促进植物的生长,在植物体的呼吸代谢中起着重要的作用。由图9可知,单一 Cu、Cd 胁迫下,POD 活性均随 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的浓度升高先缓慢上升后缓慢下降。当 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 浓度分别为 50, 10

mg/L 时,POD 活性达到最高值,分别为对照组的 116.14% 和 107.63%。当 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 浓度分别为 400, 200 mg/L 时,POD 活性达到最小值,分别为对照组的 96.38% 和 78.25%。表明 Cu^{2+} 或 Cd^{2+} 浓度较低时,能诱导过氧化物酶表达并消除胁迫下产生的活性氧。

Cu + Cd 复合胁迫对 POD 活性的影响不显著,当 Cu + Cd 复合胁迫处理浓度为 (400 + 200) mg/L 时,活性达到最大值,为对照组的 1.027 倍;当 Cu + Cd 复合胁迫浓度为 (100 + 50) mg/L 时,POD 活性达到最小值,为对照组的 0.956 倍。

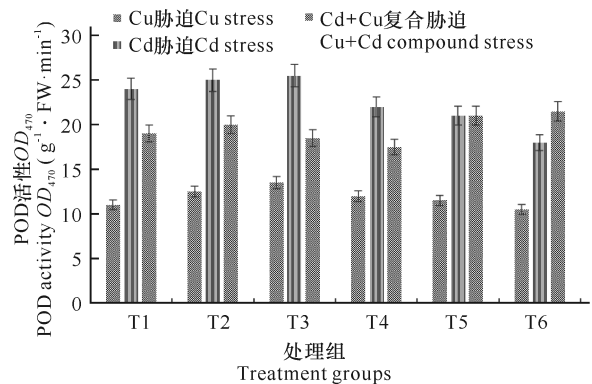


图9 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗过氧化物酶(POD)活性的影响

Fig. 9 Effects of Cu, Cd and their combined stress on the peroxidase (POD) activity of *J. curcas* seedlings

2.8 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗脯氨酸含量的影响

由图10可知,随着 Cu^{2+} 浓度增加,麻疯树幼苗脯氨酸含量呈增大趋势,低浓度(25, 50 mg/L)处理对脯氨酸含量影响不显著,高浓度(200, 400 mg/L)处理能够促进麻疯树游离脯氨酸含量的显著提高。同样单一 Cd 胁迫时,当浓度为 200 mg/L 时,脯氨酸

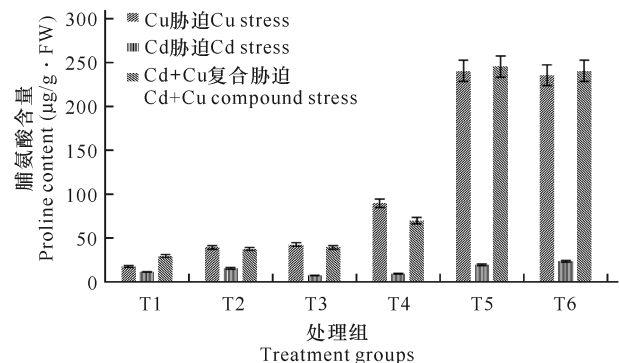


图10 铜、镉及其复合胁迫对麻疯树幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 10 Influence of Cu, Cd and their combined stress on the proline content of *J. curcas* seedlings

含量增大;当浓度为 10 mg/L 时,脯氨酸含量变少,为对照组的 68.32%,说明 10 mg/L 的 Cd^{2+} 阻碍了麻疯树幼苗体内脯氨酸的合成。当 Cu + Cd 复合胁迫浓度达到 (100 + 50)、(200 + 100)、(400 + 200) mg/L 时,脯氨酸含量加速上升,分别为对照组的 114.68%、165.66%、208.92%。复合胁迫时,麻疯树幼苗中脯氨酸含量随着处理浓度的升高呈上升趋势(图 10),当 Cu + Cd 复合胁迫浓度为 (25 + 5) mg/L 时,幼苗中的脯氨酸含量与对照组间差异不显著,当复合浓度大于等于 (100 + 50) mg/L 时,其含量与对照组间差距显著。且随复合胁迫浓度增加,脯氨酸含量高于单一金属胁迫,说明复合胁迫增加了脯氨酸积累,加剧对细胞膜的破坏。

3 讨论

3.1 镉胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的影响

重金属对植物生理生化特征的影响会因为外界环境的变化而变化,重金属污染严重会导致植物生长不良、产生病害,甚至早衰死亡。Cd 对所有植物都具有毒性, Cd^{2+} 在低浓度 (0.1 - 1.0 mg/kg) 时抑制植物的生长、发育和繁殖,高浓度时可导致植物死亡^[14]。本研究结果表明,Cd 胁迫下麻疯树幼苗的 MDA 含量均较对照组增加,说明 Cd^{2+} 在麻疯树幼苗体内的积累可以破坏活性氧代谢平衡,同时随着 Cd^{2+} 浓度的增高,可溶性蛋白质含量增加,且游离脯氨酸含量在 5, 100, 200 mg/L 时增加,使 Cd^{2+} 对麻疯树幼苗的毒害作用减弱,从而使 Cd^{2+} 对叶绿素的合成和根系活力的毒害作用降至最低,同时对植物细胞组织起到保护作用。当 Cd^{2+} 浓度 > 50 mg/L 时,实验显示 POD 活性有明显的下降趋势,而可溶性糖和电导率明显增高。以上结果表明,当 Cd^{2+} 浓度 > 50 mg/L 时,Cd 对麻疯树幼苗表现出毒害现象,这与徐玲玲等^[15]、彭昌琴等^[16] 的试验结果一致。

3.2 铜胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的影响

铜是植物生长的必需微量元素之一,也是叶绿素的重要组成部分,参与植物光合作用等,但 Cu 过量也会对植物产生毒害作用。本研究结果表明,在 Cu 胁迫下,浓度分别为 25, 100, 50, 400, 400, 400, 50, 200 mg/L 时,相对应的丙二醛、根系活力、叶绿素含量、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、POD 活性、脯氨酸含量等指标相对于参照组均处于对植物组织具有积极利好阶段。

由实验结果可以看出,当 Cu^{2+} 浓度为 100 mg/L

时其 MDA 含量最低,当浓度增大至 200 mg/L 时,其 MDA 含量最高。这是因为高浓度的 Cu^{2+} 会破坏麻疯树幼苗叶片膜结构和功能,导致细胞膜透性增大和大量的 MDA 积累。麻疯树幼苗根系活力和过氧化物酶(POD)活性随 Cu^{2+} 浓度的增大先缓慢上升后缓慢下降。这是因为低浓度的 Cu^{2+} 不仅能诱导过氧化物酶活性,还能对其胁迫下产生的活性氧有一定的消除作用,从而使过氧化物酶(POD)的活性升高,但其维持系统稳定的能力有限,当胁迫达到一定强度时,这种能力会渐渐丧失,随之酶的活性降低。酶活性的高低,在影响麻疯树幼苗根系的生长的同时对其根系活力也有影响。而当 Cu^{2+} 浓度到达 200 mg/L 时,麻疯树根系活力值已经很小,根系基本死亡。

麻疯树幼苗外渗液电导率、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量都随 Cu^{2+} 浓度增加而增加,其中高浓度 Cu (200, 400 mg/L) 能促进麻疯树游离脯氨酸含量的显著提高。当 Cu^{2+} 浓度到达一定程度后,可溶性糖和可溶性蛋白质的含量达到最大值, Cu^{2+} 浓度为 400 mg/L 时可溶性蛋白质和可溶性糖含量均最大。

综上所述,低浓度 Cu^{2+} 不仅对麻疯树幼苗的毒害作用表现不明显,还对相关生理指标表现出促进作用,符合低浓度 Cu^{2+} 会促进麻疯树幼苗生长这一科学理论,也表明当 Cu^{2+} 浓度达到一定程度时才会抑制、毒害麻疯树幼苗生长发育。

3.3 铜、镉复合胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的影响

叶绿体是光合作用的主要场所,其结构的完整性会影响植物光合作用。本研究结果显示,与对照组相比,随着 Cd + Cu 复合胁迫浓度的提高,麻疯树幼苗叶片叶绿素虽有变化但是变化幅度不大,也就是说 Cd + Cu 复合胁迫不影响麻疯树幼苗叶片叶绿素的合成;但麻疯树幼苗 POD 活性有不同程度影响,即 Cd + Cu 复合胁迫致使幼苗体内活性氧代谢失衡;麻疯树幼苗活性氧积累增多,导致膜脂过氧化,从而产生丙二醛等膜脂过氧化物。

本实验研究 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 复合胁迫时,当 Cd + Cu 复合胁迫浓度为 $\text{Cd}^{2+} < 50$ mg/L、 $\text{Cu}^{2+} < 100$ mg/L 时,麻疯树幼苗中的脯氨酸含量与对照组没有明显变化;当复合胁迫浓度中 Cd^{2+} 达到 100 mg/L 及以上、 Cu^{2+} 达到 200 mg/L 及以上时,其含量与对照组间差距显著。脯氨酸作为渗透调节物质,可在逆境条件下大量合成,这就说明在高浓度复合胁迫逆境下,植物

会为了保护自身的代谢功能而产生大量的脯氨酸。

参考文献

- [1] 赵纪新,尹鹏程,岳荣,等.我国农田土壤重金属污染现状·来源及修复技术研究综述[J].安徽农业科学,2018,46(4):19-21,26.
- [2] 袁林,赖星,杨刚,等.钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究[J].环境科学与技术,2019,42(3):90-97.
- [3] 黄燕华,张娜,刘丽,等.我国耕地土壤重金属污染现状及防治对策探析[J].化工设计通讯,2017,43(9):192-193.
- [4] CARGNELUTTI D, TABALDI L A, SPANEVELLO R M, et al. Mercury toxicity induces oxidative stress in growing cucumber seedlings [J]. Chemosphere, 2006, 65(6):999-1006.
- [5] 覃勇荣,汤丰瑜,严海杰,等.重金属胁迫对任豆种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J].种子,2017,36(10):31-36.
- [6] 王友保,刘登义. Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响[J].应用生态学报,2001,12(5):773-776.
- [7] 郝晓华,任美艳. Cu²⁺ 单独污染对藜麦种子萌发及部分生理指标的影响[J].安徽农学通报,2018,24(11):16-20.
- [8] 林义章,徐磊.铜污染对高等植物的生理毒害作用研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):201-204.
- [9] 公勤,康群,王玲,等.重金属铜对植物毒害机理的研究现状及展望[J].南方农业学报,2018,49(3):469-475.
- [10] 王小菁,李玲,张盛春,等.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2019.
- [11] 张志良,李小方.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2016.
- [12] OUZOUNIDOU G. Copper-induced changes on growth, methal content and photosynthetic function of *Alyssum montanum* plants [J]. Environ Experi Botan, 1994,34(2):165-172.
- [13] 董袁媛,孙竹,杨洋,等.镉胁迫对黄麻光合作用及镉积累的影响[J].核农学报,2017,31(8):1640-1646.
- [14] 尹国丽,师尚礼,寇江涛,等. Cd 胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生理生化特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(8):1638-1644.
- [15] 徐玲玲,李巧玉,张红莲,等.3种草本植物种子萌发及幼苗初期对镉胁迫的生理影响[J].种子,2016,35(3):37-41.
- [16] 彭昌琴,陈兴银,杨鹏,等.镉胁迫对尾穗苋种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].种子,2018,37(7):43-48.

Effects of Copper, Cadmium and Their Combined Stress on the Physiological and Biochemical Characteristics of *Jatropha curcas* Linn. Seedlings

XU Aizhu^{1,2}, ZENG Xiaobiao³, ZHANG Cuijiao³, TANG Jianmin¹, WEI Xiao¹, MENG Meiqing^{1,3}, LIANG Minling^{1,3}

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. College of Tourism and Landscape Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, 541006, China; 3. College of Agriculture and Food Engineering, Baise University, Baise, Guangxi, 533000, China)

Abstract: In order to study the effects of copper (Cu), cadmium (Cd) and their combined stress on the physiological and biochemical indexes of *Jatropha curcas* Linn. seedlings, changes in malondialdehyde content, root vitality, chlorophyll content, cell membrane permeability, soluble protein content, soluble sugar content, peroxidase (POD) and proline content after Cu, Cd and their combined treatments were determined. Studies showed that when the concentrations of Cu and Cd were 50 – 400 and 10 – 200 mg/L, respectively, there was a certain negative effect on *J. curcas* Linn. seedlings and the combined treatment of the two had a certain an-

tagonistic effect. Negative effects were manifested by the increase in the content of malondialdehyde, soluble protein and proline, the increase in relative conductivity, the decrease in root activity, the decrease in chlorophyll and soluble sugar content and peroxidase activity, indicating that a certain concentration of Cu, Cd would affect or change some physiological and biochemical characteristics of *J. curcas* Linn., causing certain harm to the growth of *J. curcas* Linn. seedling. When the concentration of Cu + Cd compound stress treatment solution was (100 + 50) mg/L, it had the greatest inhibitory effect on malondialdehyde in plant cells, thereby delaying the damage of plant cells. When Cu + Cd compound stress treatment solution was (50 + 10) mg/L, its positive effect on plant root vitality changed most significantly compared to the reference group. The appropriate amount of Cu and Cd heavy metal content has a positive effect on the growth and protection of plants.

Key words: Cu, Cd, *Jatropha curcas* Linn., physiological and biochemical indexes, composite processing, heavy metal

责任编辑: 陆雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxkx.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>