

梁娟,周华芳,任建国,等.黔产艾纳香对镉胁迫的生理响应及其体内镉分布特征[J].江苏农业科学,2016,44(5):271-274.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.078

# 黔产艾纳香对镉胁迫的生理响应及其体内镉分布特征

梁娟<sup>1</sup>,周华芳<sup>1</sup>,任建国<sup>2</sup>,王俊丽<sup>1</sup>

(1. 贵州医科大学公共卫生学院,贵州贵阳 550025;2. 贵州医科大学生物与工程学院,贵州贵阳 550025)

**摘要:**为探明黔产艾纳香对镉(Cd)胁迫的生理响应及其体内 Cd 分布特征,采用沙培试验研究不同浓度 Cd(0、10、30、60、120 mg/L)处理下艾纳香生理生化指标的变化规律及 Cd 在其体内器官和亚细胞分布特征。结果表明:随着 Cd 胁迫浓度的增加,叶绿素含量整体上逐渐降低,丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白含量均有不同程度的升高,超氧化物歧化酶(SOD)活性呈先升高后降低的变化;艾纳香各器官 Cd 含量随处理浓度的增加而增加,并表现为根>茎>叶;根、茎和叶细胞中 Cd 主要分布在可溶组分、细胞壁中,根、茎、叶可溶组分中 Cd 的分配比例分别为 51.9%~69.7%、45.4%~69.7%、52.5%~57.9%,根、茎、叶细胞壁中 Cd 的分配比例分别为 26.0%~37.8%、24.4%~45.6%、36.8%~41.4%;随着 Cd 处理浓度的增加,细胞壁中 Cd 含量所占比例呈上升趋势,而可溶组分所占比例呈下降趋势。总的看出,黔产艾纳香对 Cd 胁迫具有一定的生理适应性,细胞壁对 Cd 的滞留和可溶组分对 Cd 的区室化可能是其主要的解毒机制。

**关键词:**艾纳香;镉(Cd);器官分布;亚细胞分布;生理响应

**中图分类号:** S567.23+9.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)05-0271-04

镉(Cd)是环境中继汞(Hg)、铅(Pb)之后对环境、人类健康危害最大的第 3 种重金属元素<sup>[1]</sup>,具有移动性强、毒性大、易吸收积累等特征<sup>[2]</sup>。Cd 是植物生长发育的非必需元素,但是与其他重金属相比,却更容易被植物吸收<sup>[3]</sup>。大量研究表明,Cd 在植物体内累积到一定程度后会引发生理代谢紊乱,并抑制生长发育,严重时可导致死亡<sup>[4-5]</sup>;同时,蓄积在植物可食部分的 Cd 还可以进入食物链威胁人类健康。

艾纳香[*Blumea balsamifera* (L.) DC.]是制取冰片的药用植物<sup>[6]</sup>,其叶、嫩枝、根均可入药,具有温中活血、祛风除湿、杀虫等功效。作为贵州省十大苗药之一,艾纳香是贵州省许多名牌中成药产品的原料药<sup>[7]</sup>,如金骨莲胶囊、心胃止痛胶囊、咽立爽等<sup>[8]</sup>。有调查显示,贵州省农业土壤中存在 Cd 的重污染<sup>[9]</sup>,而且黔产艾纳香对 Cd 也表现出较强的富集作用<sup>[10-11]</sup>,因此了解 Cd 胁迫对艾纳香生理生态的影响具有重要的现实意义,但是目前相关的基础研究比较缺乏。本研究通过沙培试验,探讨不同浓度 Cd 对黔产艾纳香几个典型生理指标的影响以及艾纳香体内 Cd 的分布特征,以期为艾纳香的安全性用药和无公害种植提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

选取贵州省罗甸县同一艾纳香生产质量管理规范

(GAP)种植示范基地内生长良好、长势基本一致的艾纳香根生春苗作为供试植物。盆栽河沙均用去离子水洗净、风干备用。

### 1.2 试验方法

试验于 2014 年 6 月在贵州医科大学(北京路校区)内进行。用自来水将供试幼苗根部的泥沙冲洗干净,并用蒸馏水冲洗数次,然后移栽至盛有等量河沙的聚丙烯塑料花盆中,每盆定植 1 株,采用改良 Hoagland 营养液(pH 值 5.5~6.5)进行浇灌培养。缓苗 7 d 后,将存活艾纳香苗随机分成 5 组,进行 Cd 胁迫处理。将分析纯 CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 加入到营养液中,设置 5 个 Cd 处理水平:0(CK)、10、30、60、120 mg/L(以纯 Cd<sup>2+</sup>计),每个处理 10 株苗。人工避雨,自然光照条件,视河沙湿度不定期浇入等体积含相应浓度 Cd 的营养液。处理 10 d 后,随机从各组选取 5 株测定生理生化指标:叶绿素含量、可溶性蛋白的鲜质量含量、脯氨酸(Pro)的鲜质量含量、丙二醛(MDA)的鲜质量含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性(鲜质量)。30 d 后收获剩余植株,用自来水、蒸馏水冲洗根部、地上部,再用 20 mmol/L EDTA-2Na 浸泡根部 20 min,以去除根表面吸附的 Cd<sup>2+</sup>;最后再用去离子水冲洗 2~3 次,吸干植物表面的水分,按根、茎、叶分别取样,将一部分鲜样置于-80℃冰箱待分析 Cd 的亚细胞分布,其余样品于 105℃杀青 30 min,75℃烘干至恒质量,研细后过 1 mm 筛,用于各器官 Cd 含量的测定。大部分试验用水为超纯水。

**1.2.1 生理生化指标测定**<sup>[12]</sup> 取植株相同部位叶片(植株顶端第 4~6 张叶)用于测定叶绿素、可溶性蛋白、Pro、MDA 含量,SOD 活性用根进行测定。叶绿素含量的测定采用 95%乙醇浸提法,MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法,SOD 活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)比色法,Pro 含量的测定采用酸性茚三酮比色法,可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法。

收稿日期:2015-09-04

基金项目:贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2013]2041 号);贵州省三地联合项目[编号:施中药科合专项(2012)6 号];贵阳医学院科学基金(编号:2012003)。

作者简介:梁娟(1990—),女,四川资阳人,硕士研究生,主要从事环境科学研究。E-mail:1094012198@qq.com。

通信作者:王俊丽,博士,副教授,主要从事环境科学研究。E-mail:wjlrgj@126.com。

1.2.2 各器官 Cd 含量测定 分别称取一定量研磨后的根、茎、叶干样,按体积比加入 5 : 2 的 HNO<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 混合酸,用 Milestone ETH 型微波消解仪进行消解,然后用原子吸收光谱仪(contrAA® 700,德国)测定 Cd 含量。

1.2.3 亚细胞组分 Cd 含量测定 亚细胞组分分离参照 Wang 等的方法<sup>[13]</sup>并略作改动,取冷冻的新鲜根、茎、叶样本,按料液比 1 g : 10 mL 加入预冷的提取缓冲液充分研磨成匀浆液。提取缓冲液组成:250 mmol/L 蔗糖、pH 值 7.5 的 50 mmol/L Tris - HCl、1 mmol/L 二硫代苏糖醇。匀浆液过 300 目尼龙网,过滤后的残渣为含细胞壁的残渣部分,滤液在 15 000 r/min 下离心 30 min,沉淀为细胞器组分,上清液为可溶物质组分(含细胞质、液泡内高分子和大分子有机物质、无机离子)。试验操作均在 4 ℃ 条件进行。细胞壁、细胞器组分参照“1.2.2”节进行消解和 Cd 含量的测定;可溶物质组分用超纯水定容后再用原子吸收光谱仪测定 Cd 含量。

表 1 Cd 胁迫对艾纳香叶绿素含量的影响

Cd 含量 (mg/L)	叶绿素含量(mg/g)			叶绿素 a/叶绿素 b
	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素	
0 (CK)	0.721 ± 0.034a	0.257 ± 0.035a	0.978 ± 0.037a	2.850 ± 0.442a
10	0.667 ± 0.031b	0.234 ± 0.111ab	0.901 ± 0.022b	2.854 ± 0.255a
30	0.673 ± 0.007b	0.221 ± 0.008abc	0.895 ± 0.010b	3.046 ± 0.112a
60	0.606 ± 0.025c	0.193 ± 0.023bc	0.809 ± 0.042c	3.177 ± 0.418a
120	0.574 ± 0.010c	0.177 ± 0.038c	0.753 ± 0.057c	3.373 ± 0.871a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

2.1.2 Cd 胁迫对 Pro、可溶性蛋白含量的影响 由图 1 - A、图 1 - B 看出,随着 Cd 处理浓度增加,艾纳香叶片内的可溶性蛋白、Pro 含量总体上呈升高趋势,表明 Cd 胁迫能促进可溶性蛋白、Pro 的合成。在 30 mg/L 及以下的 Cd 处理浓度下,可溶性蛋白、Pro 含量与 CK 相比差异不显著;Cd 浓度增加至 60 mg/L 时,可溶性蛋白含量达最大值,与 CK 相比增加了 48.2%;在 60、120 mg/L Cd 处理浓度下,与其他各处理间 Pro 含量差异均显著( $P < 0.05$ )。

1.3 数据分析

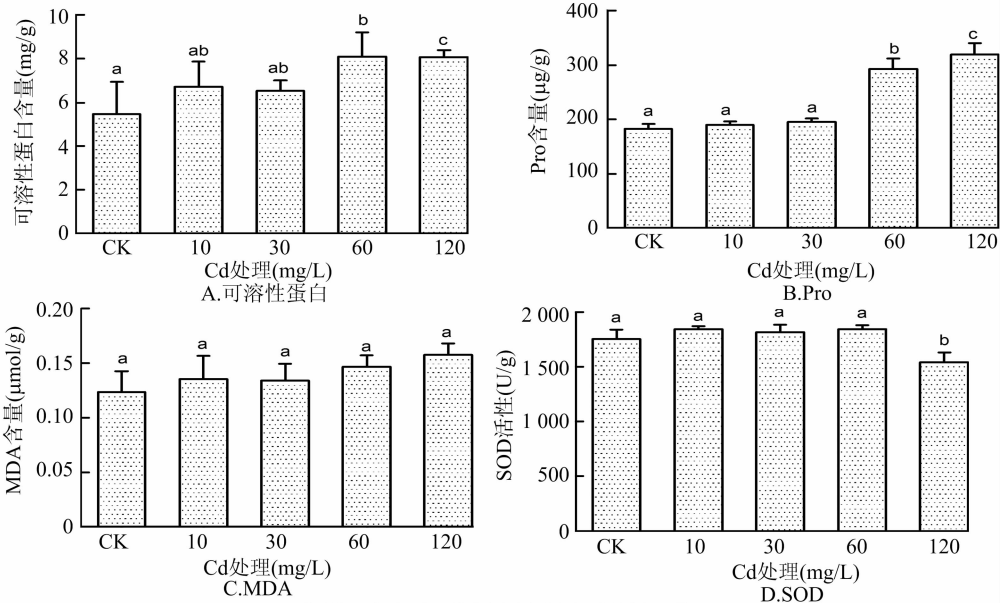
采用 SPSS 16.0 软件进行数据录入和统计分析。试验数据以“均值 ± 标准差( $\bar{x} \pm s$ )”表示,多样本均数的比较采用单因素方差分析,组间比较用  $LSD - t$  法, $\alpha = 0.05$ 。采用 Graph-Pad Prism 5 软件完成作图。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对艾纳香生理生化特性的影响

2.1.1 Cd 胁迫对叶绿素含量的影响 从表 1 可以看出,艾纳香叶片内叶绿素 a、b 及总叶绿素含量随着 Cd 处理浓度的增加总体上逐渐降低。当 Cd 浓度  $\geq 10$  mg/L 时,叶绿素 a、总叶绿素含量与 CK 相比差异显著( $P < 0.05$ );但叶绿素 b 含量在 Cd 浓度增加到 30 mg/L 以上后,与 CK 比较差异才显著( $P < 0.05$ );叶绿素组成(叶绿素 a/叶绿素 b)随 Cd 浓度增加而逐渐增大,但各组间差异不显著。

2.1.3 Cd 胁迫对 MDA 含量、SOD 活性的影响 由图 1 - C 可知,Cd 处理组的艾纳香叶片内的 MDA 含量均较 CK 组有所增加,但各组间差异不显著。当 Cd 处理浓度  $\leq 60$  mg/L 时,艾纳香根部的 SOD 活性均较 CK 有所增加,但差异不显著;在 Cd 处理浓度增加至 120 mg/L 时,SOD 活性表现出明显的降低,与其他处理之间差异均显著( $P < 0.05$ )(图 1 - D)。表明低浓度的 Cd 使 SOD 活性增强,高浓度 Cd 抑制 SOD 活性。



不同处理间标有不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )  
图1 Cd胁迫对艾纳香可溶性蛋白含量、Pro含量、MDA含量和SOD活性的影响

2.2 Cd 在艾纳香体内的器官分布

由表 2 可知,除了对照组的叶中 Cd 含量未检出外,其他处理组的根、茎、叶中的 Cd 含量均随着 Cd 处理浓度的增加而增加,且各器官各处理组的 Cd 含量差异都显著 ( $P < 0.05$ )。艾纳香各器官 Cd 含量的分布大小为:根 > 茎 > 叶。

2.3 Cd 在艾纳香体内的亚细胞分布

由表 3 可知,Cd 在艾纳香根、茎、叶亚细胞组分中的分布均表现为:可溶组分(F3) > 细胞壁(F1) > 细胞器(F2),根、茎、叶中 F3、F1 2 个部分总的 Cd 含量分别占总量的 88.1% ~ 95.7%、91.0% ~ 94.2%、90.6% ~ 94.7%。可见 Cd 主要积累在细胞壁和可溶部分,细胞器中含量相对较少。随着 Cd 处理浓度的增加,各组分中的 Cd 含量均逐渐增加;

表 2 艾纳香中 Cd 的器官分布

Cd 处理 (mg/L)	Cd 含量(μg/g)		
	根	茎	叶
CK	0.067 ± 0.059a	0.035 ± 0.061a	ND
10	44.667 ± 7.699b	11.768 ± 1.082b	4.590 ± 1.583a
30	82.323 ± 16.358c	22.257 ± 4.357c	15.743 ± 1.905b
60	128.201 ± 12.767d	33.303 ± 4.508d	24.590 ± 3.663c
120	185.663 ± 13.759e	46.887 ± 5.032e	33.441 ± 3.840d

注:ND 表示未检出。下表同。

根、茎、叶可溶组分中 Cd 的分配比例随着 Cd 处理浓度的增加总体上呈下降趋势,细胞壁中 Cd 的分配比例却随着 Cd 处理浓度的增加总体上呈上升趋势。

表 3 艾纳香中 Cd 的亚细胞分布

部位	Cd 处理 (mg/L)	Cd 含量(μg/g FW)			分配比例(%)		
		细胞壁	细胞器	可溶物质	细胞壁	细胞器	可溶物质
叶	CK	ND	ND	ND	—	—	—
	10	0.28 ± 0.19a	0.04 ± 0.02a	0.44 ± 0.12a	36.8	5.3	57.9
	30	0.63 ± 0.09a	0.16 ± 0.10a	0.90 ± 0.12a	37.3	9.5	53.3
	60	1.26 ± 0.14b	0.29 ± 0.06b	1.80 ± 0.57b	37.6	8.7	53.7
	120	2.01 ± 0.44c	0.30 ± 0.06b	2.55 ± 0.50b	41.4	6.2	52.5
茎	CK	ND	ND	ND	—	—	—
	10	0.57 ± 0.25a	0.10 ± 0.05a	1.06 ± 0.27a	32.9	5.8	61.3
	30	1.20 ± 0.40 ab	0.29 ± 0.08 ab	3.47 ± 0.80b	24.4	5.9	69.7
	60	2.10 ± 0.39b	0.43 ± 0.15b	3.33 ± 1.40b	35.8	7.3	56.9
	120	4.41 ± 0.85c	0.87 ± 0.17c	4.39 ± 1.40b	45.6	9.0	45.4
根	CK	ND	ND	ND	—	—	—
	10	1.04 ± 0.38a	0.17 ± 0.05a	2.79 ± 0.84a	26.0	4.3	69.7
	30	2.07 ± 0.38a	0.82 ± 0.05b	4.01 ± 0.47b	30.1	11.9	58.0
	60	4.91 ± 1.11b	1.67 ± 0.13c	7.72 ± 0.97c	34.3	11.7	54.0
	120	8.20 ± 1.53c	2.24 ± 0.29d	11.26 ± 1.58d	37.8	10.3	51.9

3 讨论与结论

植物在逆境胁迫下,当其质膜受损后,细胞会启动一系列的响应机制,具体表现为电解质、某些小分子有机物的渗漏、酶活性的改变、渗透调节物质含量的增加(如脯氨酸、可溶性糖)以及叶绿素含量降低等<sup>[14]</sup>。

叶绿素含量是衡量植物叶片生理功能的重要生理指标,其变化既可以反映植物叶片光合作用的强弱,也可用以表征植物组织、器官的衰老状况<sup>[15]</sup>。本研究结果显示,随着 Cd 处理浓度的提高,艾纳香叶绿素含量总体上呈现下降趋势,这与以往相关研究结果一致<sup>[14,16]</sup>。Cd 胁迫导致叶绿素含量降低与其间接抑制叶绿素的合成以及直接破坏叶绿体结构和功能有关<sup>[17-18]</sup>。各处理组间的叶绿素组成(叶绿素 a/叶绿素 b)差异无统计学意义,可能是因为 Cd 对艾纳香叶片捕光系统中色素的影响速率相似<sup>[19]</sup>。

可溶性蛋白大多是参与植物体内各种代谢的酶类,其含量增多有助于维持植物细胞的正常代谢,从而提高植物的抗逆性<sup>[20]</sup>。Pro 作为重要的渗透调节物质,其积累有着对逆境适应的意义,被认为是测定各种逆境胁迫的理想指标<sup>[21]</sup>。在本研究中,随着 Cd 处理浓度的增加,艾纳香叶片内可溶性蛋白、Pro 含量呈上升趋势,有助于维持细胞的正常代谢,从而缓解 Cd 的伤害。李清飞等在研究麻疯树、大豆幼苗等其他

植物时也得到了相似的结果<sup>[16,22]</sup>。但张琼等却发现,随着 Cd 处理浓度的增加,Pro 含量呈现先升后降的变化<sup>[23]</sup>,其原因可能是植物抗逆性能力的有限性,低浓度的 Cd 能通过促进体内 Pro 的积累来维持正常代谢,高浓度的 Cd 会使细胞机能丧失,导致 Pro 含量的下降。

在重金属胁迫下,植物体内产生的活性氧类物质(ROS)攻击膜脂上的多不饱和脂肪酸,引发过氧化反应<sup>[24]</sup>。MDA 是细胞膜脂质过氧化的重要产物,可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成不溶性化合物(脂褐素)沉积,干扰细胞的正常生命活动<sup>[25]</sup>,通常作为衡量脂质过氧化损伤的指标。同时,植物体内也将通过抗氧化酶[SOD、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等]和非酶物质[谷胱甘肽(GSH)、巯基(SH)等]消除 ROS。在抗氧化酶中,SOD 是一种重要的活性氧防御酶,在消除 ROS 过程中起重要作用。本研究中,Cd 处理组的艾纳香叶片内 MDA 含量均较对照组有所增加,但是各组间差异不显著,表明叶片细胞膜还没有受到明显的伤害,其完整性、功能性尚好;随着 Cd 处理浓度增加,根的 SOD 活性先升高后降低,表明低浓度 Cd 能使 SOD 活性增强,高浓度 Cd 可能破坏了清除 ROS 酶系统的平衡。

Cd 被植物吸收后,大部分富集在根部,迁移到地上部的一般较少<sup>[26]</sup>。大量研究显示,根部是植物富集 Cd 的主要部位,它作为植物对 Cd 胁迫的一种有效应对机制,能限制 Cd

向植物地上部迁移,从而减轻对地上部分的毒害作用<sup>[27-28]</sup>。在本研究中,艾纳香各器官 Cd 含量大小为:根 > 茎 > 叶,说明根也是艾纳香积累 Cd 的主要器官,这可能是艾纳香抵御 Cd 毒害的机制之一。

细胞壁被认为是保护原生质体免受重金属毒害的第一道屏障,细胞壁的多糖分子、蛋白质分子含有大量的羧基、羟基、氨基酸残基和醛基等亲金属离子的配位基团,可与进入植物体内的金属离子配位而贮存部分金属离子,从而减少金属离子进入原生质体,以维持细胞的正常生理代谢功能<sup>[29]</sup>。植物可溶组分包括细胞质、液泡 2 个部分,液泡是植物细胞代谢副产品和囤积废物的场所,它含有多种能与重金属离子结合而使金属离子在细胞内被区隔化的物质(蛋白质和有机酸等)。因此,细胞壁对重金属的滞留、可溶组分对重金属的区室化被认为是植物解毒的 2 个重要途径<sup>[30]</sup>。在本研究中,艾纳香根、茎、叶亚细胞组分中 Cd 的分布表现为:可溶组分 > 细胞壁 > 细胞器,表明可溶组分的液泡区室化可能是艾纳香解毒的原因之一。随着 Cd 处理浓度的增加,艾纳香根、茎、叶的细胞壁中 Cd 所占比例呈上升趋势,而可溶组分中 Cd 所占比例呈下降趋势,表明细胞壁对 Cd 的固持作用增强,减少了进入可溶组分中的 Cd,也限制了 Cd 向活性较强的细胞器中转运,这种方式可能也起到了重要的解毒作用。

综上所述,在本试验条件下,Cd 胁迫能降低黔产艾纳香叶绿素含量,提高可溶性蛋白、Pro、MDA 的积累,使 SOD 活性发生改变。根是积累 Cd 的主要器官,细胞中的 Cd 则主要分布在细胞壁、可溶组分中。说明黔产艾纳香对镉胁迫具有一定的生理适应性,细胞壁对 Cd 的滞留和可溶组分对 Cd 的区室化可能是其主要解毒机制。

#### 参考文献:

- [1] 柳 絮,范仲学,张 斌,等. 我国土壤镉污染及其修复研究[J]. 山东农业科学,2007(6):94-97.
- [2] 张 鑫,李昆伟,陈康健,等. 镉胁迫对丹参生长及有效成分积累的影响研究[J]. 植物科学学报,2013,31(6):583-589.
- [3] 陈圣安. 镉污染对水稻生理生化的影响[J]. 农技服务,2011,28(7):1033-1035.
- [4] Dalcorso G, Farinati S, Maistri S, et al. How plants cope with cadmium: staking all on metabolism and gene expression[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(10):1268-1280.
- [5] Yoshihara T, Hodoshima H, Miyano Y, et al. Cadmium inducible Fe deficiency responses observed from macro and molecular views in tobacco plants[J]. Plant Cell Reports, 2006, 25(4):365-373.
- [6] 江兴龙,潘俊锋,司 健. 艾纳香人工栽培技术[J]. 林业科技开发, 2005, 19(2):68-70.
- [7] 夏稷子,赵 智,安 军,等. 不同产地艾纳香药材的 GC 指纹图谱研究[J]. 中国药事,2011,25(12):1191-1194.
- [8] 师琴丽,覃军章,王用平,等. 贵州优势苗族药物艾纳香及其产品[J]. 中药材,2003,26(增刊1):87-88.
- [9] 宋春然,何锦林,谭 红,等. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价[J]. 贵州农业科学,2005,33(2):13-16.
- [10] 刘 峰,黄先飞,秦樊鑫,等. 贵州省艾纳香种植基地土壤重金属污染现状评价[J]. 安徽农业科学,2009,37(9):4249-4253.
- [11] 刘 峰,胡继伟,秦樊鑫,等. 黔产艾纳香对土壤中重金属的吸收富集特征研究[J]. 时珍国医国药,2009,20(3):629-631.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [13] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckermia nivea* (L.) Gaud[J]. Environmental & Experimental Botany, 2008, 62(3):389-395.
- [14] 孙宇晓,宋桂龙. 紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特性[J]. 草业科学,2015,32(4):581-585.
- [15] Huff A. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogen peroxide[J]. Phytochemistry, 1982, 21(2):261-265.
- [16] 李清飞,仇荣亮. 麻疯树对镉胁迫的生理耐性及富集特征研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):42-47.
- [17] Prasad D D K, Prasad A R K. Effect of lead and mercury on chlorophyll synthesis in mung bean seedlings[J]. Phytochemistry, 1987, 26(26):881-883.
- [18] Stobart A K, Griffiths W T, Ameen - Bukhari I, et al. The effect of Cd<sup>2+</sup> on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley[J]. Physiologia Plantarum, 1985, 63(3):293-298.
- [19] Liu N, Peng C L, Lin Z F, et al. Changes in photosystem II activity and leaf reflectance features of several subtropical woody plants under simulated SO<sub>2</sub> treatment[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, 48(11):1274-1286.
- [20] 常云霞,王红星,陈 龙. 水杨酸对锌胁迫下小麦幼苗生长抑制的缓解效应[J]. 西北植物学报,2011,31(10):2052-2056.
- [21] 张金彪,黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报,2000,20(3):514-523.
- [22] 陈 璨,常云霞,古红梅,等. 重金属及有机物复合污染对大豆生理特性和 DNA 损伤效应的影响[J]. 大豆科学,2012,31(6):915-919.
- [23] 张 琼,陈晓燕,陈 梅,等. 镉对绿豆幼苗生长影响的研究[J]. 漳州师范学院学报:自然科学版,2006,19(4):106-111.
- [24] Kaufman S, Pecker J C. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. Plant Science, 2001, 161(1):1135-1144.
- [25] 徐勤松,施国新,杜开和. 镉胁迫对水车前叶片抗氧化酶系统和亚显微结构的影响[J]. 农村生态环境,2001,17(2):30-34.
- [26] Kelly J M, Parker G R, McFee W W. Heavy metal accumulation and growth of seedlings of five forest species as influenced by soil cadmium level[J]. Journal of Environmental Quality, 1979, 8(3):361-364.
- [27] 方继宇,贾永霞,张春梅,等. 马缨丹对镉的生长响应及其富集、转运和亚细胞分布特点研究[J]. 生态环境学报,2014(10):1677-1682.
- [28] 邹金华,张忠贵,魏爱琪. 毛葱的镉吸收积累及亚细胞分布特征[J]. 天津师范大学学报:自然科学版,2014,34(1):72-77.
- [29] Zhong H T, Pan W B, Zhang T P, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Euphorbia thymifolia* L. [J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(3):50-54.
- [30] Brune A, Urbach W, Dietz K J. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanisms involved in zinc tolerance[J]. Plant Cell & Environment, 1994, 17(17):153-162.