

镉对金银花的毒物刺激效应*

贾莲^{1,2} 刘周莉¹ 陈玮¹ 何兴元^{1**} 齐丹³

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³沈阳市农业检测中心, 沈阳 110034)

摘要 采用水培方法, 研究不同浓度镉(Cd)(0、0.5、2.5、5、10 和 25 mg·L⁻¹)胁迫下金银花的生长特征, 分析低浓度 Cd 对金银花产生的毒物刺激效应。结果表明: 低浓度 Cd 处理(≤ 5 mg·L⁻¹)对金银花最大根长、植株干质量以及叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均产生显著刺激效应, 分别比对照增加 13.6%、11.7%、14.0%、10.8% 和 54.5%; 低浓度 Cd(≤ 5 mg·L⁻¹)对叶片含水量表现出一定程度的促进作用, 但影响不显著; 当 Cd 浓度 ≥ 10 mg·L⁻¹, 对金银花的生长表现出显著的抑制作用。当 Cd 浓度为 25 mg·L⁻¹ 时, 金银花地上部 Cd 含量达到 622.93 mg·kg⁻¹, 表明金银花对 Cd 具有较强的超富集能力。Cd 对金银花产生毒物刺激效应的剂量范围为 0.5~5 mg·L⁻¹。

关键词 金银花 镉 毒物刺激效应 超富集

文章编号 1001-9332(2013)04-0935-06 **中图分类号** X171.5 **文献标识码** A

Hormesis effect of cadmium on *Lonicera japonica*. JIA Lian^{1,2}, LIU Zhou-li¹, CHEN Wei¹, HE Xing-yuan¹, QI Dan³ (¹State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Shenyang Agriculture Testing Center, Shenyang 110034, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(4): 935–940.

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to study the growth characteristics of *Lonicera japonica* under the stress of different concentrations (0, 0.5, 2.5, 5, 10, and 25 mg·L⁻¹) cadmium (Cd), aimed to explore the hormesis effect of low concentrations Cd on *L. japonica*. At ≤ 5 mg·L⁻¹ of Cd, the maximum root length, plant dry biomass, and the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid of *L. japonica* increased significantly, with the increment being 13.6%, 11.7%, 14.0%, 10.8%, and 54.5%, respectively, as compared with the control. ≤ 5 mg·L⁻¹ of Cd also had a definite positive effect on the leaf water content. At ≥ 10 mg·L⁻¹ of Cd, the growth of *L. japonica* was inhibited significantly. When exposed to 25 mg·L⁻¹ of Cd, the shoot Cd concentration of *L. japonica* reached 622.93 mg·kg⁻¹, suggesting that *L. japonica* had a strong capacity of Cd-hyperaccumulation. The dose range of the hormesis effect of Cd on *L. japonica* was 0.5~5 mg·L⁻¹ of Cd.

Key words: *Lonicera japonica*; cadmium; hormesis; hyperaccumulation.

近年来, 随着采矿、冶金和其他工业的迅猛发展, 大量废水、废气、废渣被排放, 我国土壤中的重金属污染日益严重^[1-2]。镉(Cd)作为一种严重污染性重金属元素, 具有很强的毒性, 并且很难被生物降解, 其半衰期长达 10~30 年^[3]。Cd 对于生物和人体来说是非必需元素, 与其他重金属相比, 更易被植物

吸收, 并通过食物链对动物和人体健康造成威胁^[4]。目前, Cd 污染问题受到广泛关注。有研究表明, Cd 对植物的影响表现出显著的剂量效应关系, 在低浓度时表现出对植物生长的刺激作用, 在高浓度时则表现出对植物生长的抑制作用^[5]。这种有毒物质的双相剂量-效应关系被称为毒物刺激效应(hormesis)^[6-10]。100 多年以来有很多这种低剂量毒物刺激作用现象的研究报道, Calabrese 等^[10]从 1450 篇文献中统计了约 5600 个剂量效应关系, 建立了毒物刺激效应库。这种刺激效应在一系列化学

*“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC05B05)和国家水体污染防治与治理科技重大专项(2012ZX07202008)资助。

**通讯作者。E-mail: hexy@iae.ac.cn

2012-07-23 收稿, 2012-10-25 接受。

物质中都有发现,如重金属化合物、抗生素、有机物等;涉及到的物种也很广泛,包括动物、植物和微生物,其中较多的是动物和植物,分别占 46.2% 和 46.0%;测试的终点包括肿瘤、生殖、生长、生存、寿命和代谢效应,以生长促进为终点所占的比例最高,为 46.7%,其次为代谢效应、生殖、生存和寿命^[10]。因此,Calabrese 等^[10-11]认为,化学兴奋效应广泛存在于不同种属、不同结构的化学物质中以及各种生命终点。但是长久以来,在试验设计上人们只注重高剂量的反应,很少关注低剂量下的反应,当出现毒物刺激作用时,结果虽可以重复,但经常被忽视。同样在 Cd 对植物的影响研究中,大多集中于高浓度 Cd 对植物的毒害作用,而对低浓度 Cd 胁迫效应研究较少,但现实中存在的多是低浓度的污染,因此对低浓度 Cd 胁迫效应的研究具有重要的现实意义。

金银花(*Lonicera japonica*)是忍冬科忍冬属多年生半常绿藤本植物,具有生物量大、生长快、寿命长、根系发达、抗性强、适应性广、对土壤要求不严格等特点,可以弥补现有超富集植物生物量低、生长缓慢、修复时间较长等缺陷;另外,金银花具有很高的药用和经济价值,是广泛分布于热带和亚热带地区的优秀垂直绿化植物^[12-13]。本课题组前期针对金银花对 Cd 的超积累与生理响应进行了研究,结果表明,金银花对 Cd 具有超富集能力和对 Cd 污染土壤的潜在修复能力,而且低浓度 Cd 对金银花的生长、叶绿素含量均产生一定的刺激作用^[14-17],这种刺激作用符合 Hormesis 效应的描述。本文通过水培试验,研究低浓度 Cd 胁迫下金银花的生长特性,对低浓度 Cd 诱导金银花产生的 Hormesis 效应进行验证,旨在为金银花应用于城市污染环境修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011 年 6 月在中国科学院沈阳应用生态研究所沈北新区实验室进行。6 月初,从中国科学院沈阳应用生态研究所树木园内 2 年生金银花种苗上采集插穗,从枝条基部截取长度 25 cm、粗细一致、带有 3 个茎节的茎段作为插穗,自来水扦插培养 6 周,待长出 2~3 片营养叶、根长达到 5 cm 时,挑选长势一致的幼苗,在 1/2 Hoagland 营养液中培养 1 周,全营养液中培养 2 周后进行 Cd 胁迫处理。

添加 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 到营养液中,设置 6 个 Cd 浓度梯度: 0 (对照, CK)、0.5、2.5、5、10、25

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每处理 15 株苗,3 次重复。每天测定营养液的 pH 值,并用 0.1 mmol · L⁻¹ NaOH 或 0.1 mmol · L⁻¹ HCl 调节营养液 pH 值至(5.8±0.1),用增氧泵 24 h 连续通气,营养液 5 d 更换一次。处理 28 d 后收获并进行指标测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 Cd 含量测定 处理 28 d 后将幼苗从营养液中取出,用蒸馏水冲洗根系,在 20 mmol · L⁻¹ 乙二胺四乙酸二钠(EDTA-Na₂)溶液中交换 30 min,以去除根系表面粘附的金属离子,再用去离子水冲洗干净,用吸水纸吸干根系表面水分。每处理取整株 3 株,再取 3 株分为地上部(包括茎和叶)和地下部(根)两部分进行收获。105 ℃ 下杀青 30 min,70 ℃ 下烘干至恒量,测定植株干质量,地上部和地下部样品分别粉碎,采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消化(体积比为 3 : 1),ICP-AES 法测定 Cd 含量。

1.2.2 最大根长测定 每处理取 3 株幼苗,测量最大根长。

1.2.3 叶片相对含水量测定 采用烘干称量法测定叶片相对含水量^[18]。每处理取新鲜的功能叶 3 片,用吸水纸将叶片表面灰尘擦拭干净,称鲜质量后,浸入去离子水中,放置 8 h,待其充分吸水后,称其饱和质量,然后将叶片置于烘干箱中,70 ℃ 下烘干 48 h 至恒量,称干质量,计算叶片相对含水量。叶片相对含水量=(鲜质量-干质量)/(饱和质量-干质量)×100%。

1.2.4 光合色素含量测定 采用紫外分光光度计法测定叶片光合色素含量。Cd 胁迫 28 d 后,取各处理植株的成熟叶片,去主脉后剪碎,称取 0.2 g,加入 95% 乙醇,暗处浸提 48 h,直至叶片组织变白,过滤定容到 25 mL 试管中。以 95% 乙醇为对照,测定 663、645、470 nm 波长下的光密度 OD 值,再计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量^[19]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件进行数据统计分析,采用最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。图表中数据为平均数±标准差。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对金银花最大根长和植株干质量的影响

由图 1 可以看出,随着 Cd 浓度的升高,金银花幼苗最大根长和植株干质量均呈先上升后下降的趋势。Cd 浓度为 0.5 和 2.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,最大根长分别

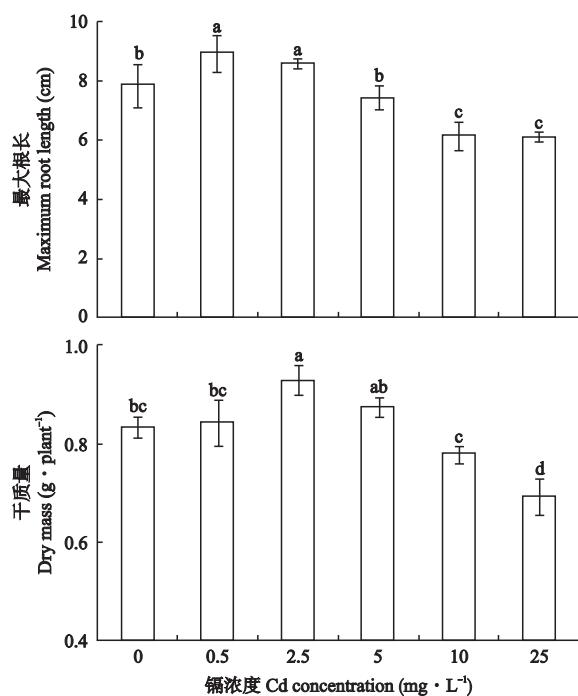


图1 不同浓度 Cd 处理下金银花幼苗最大根长和植株干质量

Fig. 1 Maximum root length and dry mass of *Lonicera japonica* seedlings under different Cd concentration treatments.

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

比对照增加了 13.6% 和 9.4%, 植株干质量在 Cd 浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时比对照增加了 11.7%, 均表现出显著的促进作用; 当 Cd 浓度 $>5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 金银花幼苗最大根长和植株干质量均呈下降趋势; 当 Cd 浓度为 10 和 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 最大根长显著减少 21.8% 和 22.2%, 植株干质量显著减少 6.7% 和 17.0%. 可见, 添加低浓度 Cd ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 促进了金银花幼苗的生长, 而添加高浓度 Cd ($\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 抑制了幼苗的生长, 具有典型的 Hormesis 效应特征。

2.2 Cd 胁迫对金银花叶片相对含水量的影响

由图 2 可以看出, Cd 胁迫 28 d 后, 金银花幼苗叶片相对含水量呈先升高后降低的趋势。低浓度 Cd 处理下 ($<5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 叶片相对含水量呈升高趋势, 但与对照相比差异不显著, 表明低浓度 Cd ($<5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 未造成叶片水分失调, 而且表现出一定程度的促进作用; 当 Cd 浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶片相对含水量显著降低, 为对照的 80.7%, 说明高浓度 Cd 胁迫对金银花体内的水分平衡有显著影响。

2.3 Cd 胁迫对金银花光合色素含量的影响

由表 1 可以看出, 随着 Cd 浓度的增加, 金银花

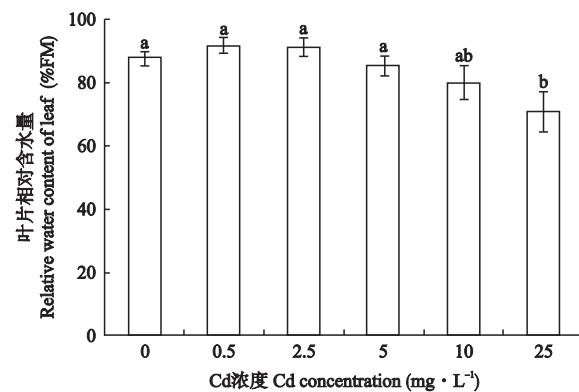


图2 不同浓度 Cd 处理下金银花幼苗叶片相对含水量

Fig. 2 Relative water content in leaves of *Lonicera japonica* seedlings under different Cd concentration treatments.

表1 不同浓度 Cd 处理下金银花幼苗叶片光合色素含量

Table 1 Photosynthetic pigment contents in leaves of *Lonicera japonica* seedlings under different Cd concentration treatments

Cd 浓度 Cd concentration ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	叶绿素 a Chlorophyll a ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$)	叶绿素 b Chlorophyll b ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$)	类胡萝卜素 Carotenoid ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FM}$)
0	$2.15 \pm 0.09 \text{ ab}$	$1.20 \pm 0.08 \text{ cd}$	$0.44 \pm 0.05 \text{ cd}$
0.5	$2.45 \pm 0.14 \text{ a}$	$1.25 \pm 0.08 \text{ bc}$	$0.68 \pm 0.05 \text{ a}$
2.5	$2.36 \pm 0.13 \text{ a}$	$1.33 \pm 0.05 \text{ a}$	$0.58 \pm 0.09 \text{ b}$
5	$2.36 \pm 0.17 \text{ a}$	$1.29 \pm 0.10 \text{ ab}$	$0.53 \pm 0.08 \text{ bc}$
10	$1.89 \pm 0.09 \text{ b}$	$1.16 \pm 0.11 \text{ d}$	$0.36 \pm 0.08 \text{ d}$
25	$1.04 \pm 0.27 \text{ c}$	$0.65 \pm 0.11 \text{ e}$	$0.36 \pm 0.04 \text{ d}$

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level.

幼苗叶片中叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均呈先上升后下降的趋势。其中, 当 Cd 浓度为 0.5、2.5 和 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 与对照相比, 叶绿素 a 含量分别增加了 14.0%、9.8% 和 9.8%; 叶绿素 b 含量分别增加了 4.2%、10.8% 和 7.5%; 类胡萝卜素含量分别增加了 54.5%、31.8% 和 20.5%, 表明低浓度 Cd ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对金银花叶片光合色素含量表现出不同程度的促进作用。当 Cd 浓度 $\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均显著降低, 当 Cd 浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量分别比对照显著减少 51.6%、45.8% 和 18.2%。可见, 重金属 Cd 对金银花表现出低剂量有益、高剂量有害的双相剂量-反应现象, 具有 Hormesis 效应特征。

2.4 Cd 胁迫对金银花 Cd 累积的影响

由图 3 可以看出, 随着 Cd 浓度的增加, 金银花幼苗根系和地上部的 Cd 含量均逐渐增加, 而且各处理间的差异均达显著水平。金银花 Cd 主要累积在根系中, 呈现出根系大于地上部的分布格局。当

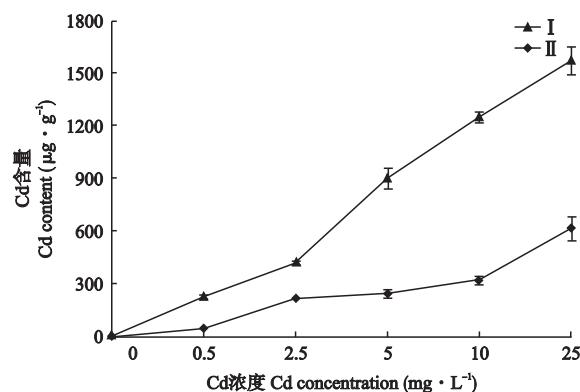


图 3 不同浓度 Cd 处理下金银花幼苗 Cd 含量

Fig. 3 Cd contents of *Lonicera japonica* seedlings under different Cd concentration treatments.

I : 根 Root; II : 地上部 Shoot.

Cd 浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 地上部 Cd 含量为 $(622.93 \pm 66.93) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 根系 Cd 含量为 $(1575.64 \pm 82.15) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于 Cd 超富集植物的临界含量标准, 即地上部富集 Cd $> 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20]. 可见, 在较高浓度 Cd 处理下, 金银花仍有很强的积累能力, 金银花是一种可用于修复 Cd 污染土壤的藤本植物.

3 讨 论

毒物刺激效应 (hormesis) 是指有毒物质或者化学物质对生物体产生的双相剂量-效应现象, 即高剂量对生物体表现为负面影响 (抑制生长、发育等), 在低剂量时则表现为一定程度的有益作用 (如刺激生长发育) 现象^[5, 21-22]. Cd 是环境中广泛存在的一种重金属污染物, 易于被植物吸收并在植物体内累积, 过量 Cd 会影响植物的正常生长发育^[23]. 有研究表明, 低浓度 Cd 可促进不同植物的生长, 如低剂量 Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理使苜蓿 (*Medicago sativa*) 的株高、主根长和生物量均有所提高^[24]; Cd ($< 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对烤烟叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 (a+b) 和类胡萝卜素含量均产生了促进作用^[25]; 低浓度 Cd ($\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 促进了续断菊 (*Sonchus asper*) 株高的生长^[26]. 本研究中, 营养液中 Cd 浓度不同, 对金银花幼苗生长的影响不同, 低浓度 Cd 处理 ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对金银花幼苗的根长、植株生物量和叶片光合色素含量均表现出显著的刺激作用, 而高浓度 Cd 处理下则表现出明显的抑制作用, 这与毒物刺激效应的特征相符. 低浓度 Cd ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理下, 金银花幼苗生物量增加, 其原因可能是低浓度 Cd 胁迫 ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 刺激了植株光

合色素含量的增加, 促进了干物质的合成, 从而增加了幼苗生物量, 这与 Seth 等^[27]的研究结果一致.

叶绿素含量的高低直接影响光合作用的强弱和物质合成速率的高低, 其含量受重金属胁迫的影响而下降, 导致植物正常的生长发育受阻^[28-29]. 本研究中, 叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均呈先上升后下降的趋势. 低浓度 Cd ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 刺激叶绿素合成, 其原因可能是少量 Cd 弥补了植物体内对质体蓝素的需求, 而质体蓝素是组成光合作用电子传递体的成分之一, 因此叶绿素含量增加^[15]. 高浓度 Cd ($\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 可导致叶绿体内膜系统被破坏, 叶绿素合成能力降低^[30], 使光合作用受阻, 导致叶片的光合、蒸腾作用减弱, 从而导致植株生长受阻^[28]. 类胡萝卜素是一种在植物体内普遍存在的色素, 具有抑制活性氧 (ROS) 的产生和清除活性氧的功能, 可保护植物体免受活性氧的伤害^[1], 并对保护光合器官免受有毒物质破坏起重要作用. 低浓度 Cd ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对类胡萝卜素的刺激效应比叶绿素更加显著, 与对照相比含量增加幅度大; 高浓度 Cd ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 导致类胡萝卜素含量降低, 但与对照相比没有显著差异, 说明重金属 Cd 并未对类胡萝卜素的合成造成较大伤害, 类胡萝卜素所具有的生物学功能仍在发挥着作用, 这也促使金银花对 Cd 产生较强的抗性.

Chaney 等^[31]研究认为, Cd 超积累植物的临界含量标准是 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并提出超积累植物的一个极其关键的特征是其对重金属有超强的耐性. 本研究中, Cd 处理 28 d 后, 当 Cd 处理浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 金银花幼苗的地上部和根系 Cd 含量分别为 $(323.43 \pm 20.74) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(1254.95 \pm 27.16) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于 Cd 超富集植物的临界含量标准, 而且金银花幼苗未表现出明显的毒害现象; 当 Cd 浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 地上部和根系富集 Cd 含量达到最大值, 表明在高浓度 Cd 胁迫下, 金银花仍有很强的积累能力, 而且植株仍能维持一定程度的生长, 表明金银花对 Cd 具有很强的耐性和超富集潜力. 而毒物刺激作用通常发生在低于未观察到毒性效应的剂量 (no observed adverse effect level, NOAEL), 最大刺激效应的剂量大部分在 NOAEL 值的 $1/5 \sim 1/10$ 范围内^[5]. 由于金银花对重金属 Cd 具有很强耐性, 促使其比其他植物的低剂量刺激作用所能观察到的剂量范围更广. 现实中存在的多为低浓度的 Cd 污染, 因此将金银花应用于城市 Cd 污染土壤的修复中具有重要的现实意义. 虽然以 Cala-

breste 等^[32-33]为代表的科学家做了大量的毒物刺激作用方面的研究,证实了毒物刺激作用是一种客观存在的剂量-反应现象,但是其作用机制仍然不是很清楚,也可能由多种机制共同调节,因此对毒物刺激效应还需进一步研究。金银花作为一种新的植物模型,对其毒物刺激效应的潜在机制需要进行深入探讨。

综上所述,低浓度 Cd 处理($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对金银花生长有一定的刺激作用,表现出明显的毒物刺激效应,金银花对 Cd 具有较强的超富集能力,促使 Cd 对金银花产生毒物刺激效应的剂量范围较广,本研究中 Cd 对金银花产生毒物刺激效应的剂量范围为 $0.5 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此可见,金银花在低浓度 Cd 胁迫下生长得到促进,对高浓度 Cd 胁迫具有较高的耐性,将其应用于城市 Cd 污染土壤的修复具有重要的现实意义。此外,金银花作为忍冬属药用植物,其根、茎和叶均可入药,本研究结果对作为传统中药的金银花栽培和用药安全提供了科学参考。

参考文献

- [1] Wang X-M (王兴明), Tu J-F (涂俊芳), Li J (李晶), et al. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(1): 102-106 (in Chinese)
- [2] Wen H (温华), Wei S-Q (魏世强). Research progress in phytoextraction technique of cadmium contaminated soil. *Sichuan Nonferrous Metals* (四川有色金属), 2005, **6**(2): 41-45 (in Chinese)
- [3] Zhao Q-G (赵其国), Zhou S-L (周生路), Wu S-H (吴绍华), et al. Cultivated land resources and strategies for its sustainable utilization and protection in China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(4): 662-672 (in Chinese)
- [4] Xiong Z-T (熊治廷). Pollution resistant evolution in plants and its gynecological costs. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 1997, **16**(1): 53-57 (in Chinese)
- [5] Guo X-Y (郭雪雁), Ma Y-B (马义兵), Li B (李波). Advances in the effects, mechanisms and modeling of hormesis in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(8): 4408-4419 (in Chinese)
- [6] de la Rosa G, Peralta-Videa JR, Montes M, et al. Cadmium uptake and translocation in tumbleweed (*Salsola kali*), a potential Cd-hyperaccumulator desert plant species: ICP/OES and XAS studies. *Chemosphere*, 2004, **55**: 1159-1168
- [7] Calabrese EJ. Hormesis: Why it is important to toxicology and toxicologists. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**: 1451-1474
- [8] Calabrese EJ, Baldwin LA. Hormesis: The dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 2003, **43**: 175-197
- [9] Calabrese EJ, Baldwin LA. The hormetic dose-response model is more common than the threshold model in toxicology. *Toxicological Sciences*, 2003, **71**: 246-250
- [10] Calabrese EJ, Blain R. The occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature, the hormetic database: An overview. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, **202**: 289-301
- [11] Calabrese EJ, Blain R. Hormesis and plant biology. *Environmental Pollution*, 2009, **157**: 42-48
- [12] Yang J-H (杨吉华), Wang H-T (王华田), Zhang G-C (张光灿), et al. Effects of the honeysuckle on soil and water conservation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 1997, **16**(3): 35-38 (in Chinese)
- [13] Larson BMH, Catling PM, Waldron GE. The biology of Canadian weeds. 135. *Lonicera japonica* Thunb. *Canadian Journal of Plant Science*, 2007, **87**: 423-438
- [14] Liu ZL, He XY, Chen W, et al. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a potential hyperaccumulator *Lonicera japonica* Thunb. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**: 170-175
- [15] Liu Z-L (刘周莉), He X-Y (何兴元), Chen W (陈玮). Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Lonicera japonica*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(1): 40-44 (in Chinese)
- [16] Liu Z-L (刘周莉), He X-Y (何兴元), Chen W (陈玮), et al. Growth responses and cadmium accumulation of *Lonicera japonica* under cadmium stress. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(8): 1579-1583 (in Chinese)
- [17] Jia L, Liu Z, Chen W, et al. Stimulative effect induced by low-concentration cadmium in *Lonicera japonica* Thunb. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, **6**: 826-833
- [18] Zou Q (邹琦). *Experiment Guide of Plant Physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [19] Li H-S (李合生). *Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry Experiment*. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [20] Baker AJM, Brooks RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1989, **1**: 811-826
- [21] Chapman PM. The implications of hormesis to ecotoxicology and ecological risk assessment. *Human and Ex-*

- perimental Toxicology, 2001, **20**: 499–505
- [22] Wang D-H (王东红), Peng A (彭安), Wang Z-J (王子健). Advances in study of hormesis. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2004, **4**(1): 18–21 (in Chinese)
- [23] Shao GS, Chen MX, Wang WX, et al. Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants. *Plant Growth Regulation*, 2007, **53**: 33–42
- [24] Xu S-L (徐苏凌), Xing C-H (邢承华), Fang Y (方勇). The effect of cadmium stress on growth and Cd content of alfalfa. *Guangdong Trace Elements Science* (广东微量元素科学), 2008, **15**(3): 23–26 (in Chinese)
- [25] Gao J-H (高家合), Wang S-H (王树会). Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco. *Tobacco Agricultural Science* (烟草农业科学), 2006, **2**(1): 62–66 (in Chinese)
- [26] Qin L (秦丽), Zhu Y-Q (祖艳群), Li Y (李元). Effects of Cd on the physiological characteristics and growth of the *Sonchus asper* L. Hill. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2010, **29** (suppl.): 48–52 (in Chinese)
- [27] Seth CS, Chaturvedi PK, Misra V. The role of phytochelatins and antioxidants in tolerance to Cd accumulation in *Brassica juncea* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **71**: 76–85
- [28] Zhang J-B (张金彪), Huang W-N (黄维南). Effects of cadmium stress on photosynthetic functions of strawberry. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1673–1676 (in Chinese)
- [29] Wang K-R (王凯荣), Zhou J-L (周建林), Gong H-Q (龚惠群), et al. Phytotoxic effect of soil cadmium pollution on ramie. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(5): 773–776 (in Chinese)
- [30] Yu K-L (宇克莉), Meng Q-M (孟庆敏), Zou J-H (邹金华). Effects of Cd²⁺ on seedling growth, chlorophyll contents and ultrastructures in maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2010, **25**(3): 118–123 (in Chinese)
- [31] Chaney RL, Malik M, Li YM. Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, **8**: 279–284
- [32] Calabrese EJ, Baldwin LA. The frequency of U-shaped dose-responses in the toxicological literature. *Toxicology Science*, 2001, **62**: 330–338
- [33] Calabrese EJ, Baldwin LA. Hormesis as a biological hypothesis. *Environmental Health Perspectives*, 1998, **106**: 357–362

作者简介 贾莲,女,1984年生,博士研究生。主要从事植物生态学和城市污染生态学研究。E-mail: jl_58@163.com

责任编辑 孙菊
