

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201411006

孙园园,徐玲玲,冯旭东,等. 藿香蓟的镉积累、生物量及叶绿素荧光参数对不同梯度镉胁迫的响应[J]. 广西植物,2015,35(5):679—684

Sun YY, Xu LL, Feng XD, et al. Biomass, cadmium accumulation and chlorophyll fluorescence parameters response of *Ageratum conyzoides* to different concentrations of cadmium stress[J]. *Guihaia*, 2015, 35(5):679—684

# 藿香蓟的镉积累、生物量及叶绿素荧光参数 对不同梯度镉胁迫的响应

孙园园, 徐玲玲, 冯旭东, 关萍\*

(贵州大学 生命科学学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 通过盆栽试验,研究藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)的地上部和地下部 Cd 含量、干重、转运系数、根冠比及叶片叶绿素荧光参数对不同梯度 Cd 胁迫的响应。结果表明:随 Cd 胁迫浓度增加,藿香蓟转运系数逐渐降低,地上部和地下部 Cd 含量随 Cd 胁迫浓度的增加而逐渐升高,在 Cd(300 mg · kg<sup>-1</sup>)胁迫下,植株地上部 Cd 含量为 125.50 mg · kg<sup>-1</sup>,这一结果已超过 Cd 超富集植物的临界值(100 mg · kg<sup>-1</sup>);植株地上部及地下部干重随 Cd 胁迫浓度的增加均逐渐降低,且中、高浓度 Cd 胁迫对植物的生长具有显著的抑制作用,各处理间的根冠比呈上升趋势并比对照高,可见高浓度 Cd 胁迫可阻碍根系的生长,从而影响植物地上部对营养和水分的吸收,最终抑制植株生长及生物产量的提高;PS II 的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、PS II 的潜在光化学效率( $F_v/F_o$ )随着 Cd 胁迫浓度的增加均逐渐升高,初始荧光( $F_o$ )和最大荧光( $F_m$ )均逐渐降低,光量子产量( $\Phi_{PS II}$ )、电子传递效率(ETR)、光化学猝灭系数( $qP$ )及非光化学猝灭系数( $q_N$ )均出现先升后降的趋势;Cd 胁迫扰乱叶片正常时期的光合特性及延缓植株衰老,但各处理间的叶绿素荧光动力学参数差异不显著,Cd 胁迫对叶片 PS II 反应中心的电子传递、光化学反应及散热能力影响较弱;高浓度 Cd 胁迫明显抑制植株的生长,但植株地上部及地下部的 Cd 积累能力较强,可作为植物修复重金属污染土壤的备选植物并用来治理 Cd 污染的土壤。

**关键词:** Cd; 藿香蓟; 生物量; 积累; 叶绿素荧光参数

**中图分类号:** Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)05-0679-06

## Biomass, cadmium accumulation and chlorophyll fluorescence parameters response of *Ageratum conyzoides* to different concentrations of cadmium stress

SUN Yuan-Yuan, XU Ling-Ling, FENG Xu-Dong, GUAN Ping\*

(College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The pot experiments was conducted to investigate the above ground Cd content, below ground Cd content, transfer factor, above ground dry weight, below ground dry weight, ratio of root to shoot and chlorophyll fluorescence parameters response of *Ageratum conyzoides* to different concentrations of Cd stress. The results showed that the transfer factor of *A. conyzoides* decreased gradually with Cd concentration increasing. However, the above ground Cd contents and below ground Cd contents increased gradually with Cd concentration increasing. It reached 125.50 mg · kg<sup>-1</sup> at the Cd concentrations stress which was 300 mg · kg<sup>-1</sup> and the text result had exceeded the critical value of Cd

收稿日期: 2014-11-06 修回日期: 2015-02-18

基金项目: 贵州省社会发展公关课题(201303137)

作者简介: 孙园园(1987-),女,黑龙江人,硕士研究生,植物生物技术与次生物质代谢专业,(E-mail)sun.786@163.com。

\*通讯作者: 关萍,博士,教授,从事植物学、分子生物学及植物生物技术研究,(E-mail)guanp@163.com。

hyperaccumulators which was  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The above ground dry weight and below ground dry weight in *A. conyzoides* plant decreased gradually with Cd concentration increasing. The above ground dry weight and below ground weight would be inhibited significantly at the moderate Cd concentration stress and high Cd concentration stress. The ratios of root to shoot among different treatments increased gradually with Cd concentration increasing which were higher than the control. It followed that root system growth of *A. conyzoides* would be inhibited obviously at the high Cd concentration stress. Meanwhile the high Cd concentration stress had a negative impact on nutrient absorption and water uptake of the plant shoot. Ultimately the high Cd concentration stress inhibited the growth and yield increase of plant. With Cd concentration increasing, the maximal photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) and potential photochemical efficiency of PS II ( $F_v/F_o$ ) increased gradually, while both the initial fluorescence ( $F_o$ ) and the maximum fluorescence ( $F_m$ ) decreased gradually, the quantum yield ( $\Phi_{\text{PS II}}$ ), electron transfer efficiency ( $ETR$ ), the photochemical quenching coefficient ( $qP$ ) and non photochemical quenching coefficient ( $qN$ ) increased firstly and then decreased. It was thus clear that, Cd stress disrupted photosynthetic characteristics of *A. conyzoides* leaves in normal times and delayed senescence in plants. But fluorescence induction kinetic parameters among different treatments had no significant differences. Cd stress had less impact on electron transport, photochemical reactions and heat dissipation ability in the leaves of *A. conyzoides*. In the research, the growth and dry weight would be inhibited obviously at the high Cd concentrations stress, however, the above ground Cd content and below ground Cd content in *A. conyzoides* plant has had strong Cd accumulation capacity. Consequently, *A. conyzoides* could be served as an alternative plant for the phytoremediation which could be used to help repairing Cd contaminated soil.

**Key words:** cadmium; *Ageratum conyzoides*; biomass; accumulation; chlorophyll fluorescence parameters

镉(Cd)是危害环境和人类健康最毒的微量元素之一,植物生长在镉污染的土壤中,可以吸收和富集镉,镉可以通过植物的可食部位进入人类的食物链(Ingwersen *et al.*, 2005)。随着工业和农业的发展,土壤镉污染日趋加重,严重威胁人体健康(冉烈等, 2011)。镉中毒会引起痛痛病,胃肠道不适,肾脏损伤,心血管功能障碍,严重可引发癌变(刘发欣等, 2006)。很多国家对土壤重金属污染非常重视,采取了多种修复方法,其中植物修复已成为世界各国争相研究的热点,不仅保持污染现场土壤的结构,也可减少修复费用(魏树和等, 2004)。植物修复的关键是选择对镉具有超富集能力及耐性较强的植物,目前据文献报道有关镉的超富集植物有印度芥菜、遏蓝菜、宝山堇菜、商陆、红慕菜、滇苦菜、萎蒿、籽粒苋、垂柳、鱼腥草等植物(李玉双等, 2007; 侯伶龙等, 2010; 胡鹏杰等, 2006)。

藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)是菊科藿香蓟属一年生草本植物,在中国南部有引种栽培用作观赏,被广泛用于城市绿化。有研究报道,藿香蓟在一定程度上适应 Pb 污染的土壤环境,可适应于轻度污染的园林绿化,但有关镉胁迫对藿香蓟的生物量、光合特性及富集镉特征尚无研究报道,仅有镉胁迫对其他植物富集及生理抗性的研究(刘碧英等, 2011; 陈英雯, 2011; 白雪等, 2014)。因此,通过盆栽试验,研究藿香蓟的镉富集特征、生物量及叶绿素荧光参

数( $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、 $\Phi_{\text{PS II}}$ 、 $ETR$ 、 $qP$ 、 $qN$ )对不同梯度镉胁迫的响应,以期为镉污染土壤的植物修复及城市建设中地被植物的筛选提供一定的参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

藿香蓟(*Ageratum conyzoides*)种子采自贵阳市惠水铁合金厂附近区域。土壤为购买的有机质营养土,土壤主要理化性状,容重  $0.2 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,孔隙度  $54\% \sim 75\%$ , Ec 值  $1 \sim 3.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,氮、磷、钾总含量  $2\%$ , pH  $5.5 \sim 7.5$ 。氯化镉( $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{ H}_2\text{O}$ )为分析纯。

### 1.2 盆栽试验

试验时间为 2014 年 3 月 15 日至 7 月 15 日。采用土壤盆栽法于温室内自然条件下培养,分别设置  $0, 50, 100, 200, 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 5 个不同含 Cd 量处理,每个处理 3 个重复,每盆 500 g 土壤,用喷淋器将氯化镉配成的溶液平均喷淋至盆装后的土壤中,每盆直接移栽 4 株大小长势一致的幼苗。盆栽容器为砖红色塑料花盆,其盆高 12.5 cm,上口径 14.5 cm,下口径 10.5 cm。实验期间采用自然光照,不施加任何肥料,并采用称重浇水的方法每天定时为植物补水,维持土壤的含水量为田间持水量的

80%。待藿香蓟盆栽 90 d 后, 植株生长旺盛时期开始进行试验。

### 1.3 Cd 含量的测定

分别采集植物样品的地下部(根)和地上部(茎、叶)两部分, 用自来水将粘附于植物样品上的泥土等污物冲洗干净, 再用去离子水冲洗数次, 将其水分沥去后, 于 65 °C 下的烘箱中烘干至恒重。将烘干后植物样品的地上部及地下部分别称重、磨碎、充分混匀, 每个样品称取 0.5 g, 采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  法消化, 原子吸收分光光度计测定样品中的 Cd 含量, 每个样品 3 次重复。

### 1.4 叶绿素荧光参数的测定

藿香蓟 Cd 处理 90 d 后用 LI-6400XT 配备荧光叶室 6400-40 测定叶绿素荧光参数。每个处理随机选 4 株, 每株选择植株中上端功能健壮的 1 片叶, 暗适应 30 min 后测定荧光指标包括初始荧光 ( $F_0$ )、最大荧光 ( $F_m$ )、PS II 的最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 和 PS II 的潜在光化学效率 ( $F_v/F_0$ )。打开活化光  $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$ , 持续光照射 20 min 后, 测定叶片荧光诱导动力学参数包括电子传递效率 ( $ETR$ )、光量子产量 ( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数 ( $qP$ ) 和非光化学猝灭系数 ( $qN$ )。

### 1.5 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 2007 软件进行整理, SPSS(19.0) 统计软件进行单因素方差分析, 差异显著性水平为 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd 胁迫对藿香蓟 Cd 积累特征的影响

由图 1、图 2 可知, 随 Cd 胁迫浓度的增加, 藿香蓟地上部和地下部的 Cd 含量均不断增加, 对照藿香蓟地上部和地下部的 Cd 含量最低, 分别为  $0.40$ 、 $0.42\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。结果表明, 在  $100\sim 300\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 胁迫下, 藿香蓟地上部和地下部的 Cd 含量与对照差异显著 ( $P<0.05$ ), 其中  $300\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 胁迫下地上部和地下部的 Cd 含量最大, 分别为  $121.50$ 、 $356.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 且地上部 Cd 含量已经超过了 Cd 超富集植物地上部 Cd 含量参考值 ( $100\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

另外, 转移系数可以反映植物由地下部向地上部转运重金属能力的大小, 更为严格地判断重金属超富集植物的标准。由图 3 可知, 随 Cd 胁迫浓度的增加, 藿香蓟转运系数逐渐降低, 在  $0.34\sim 1$ 。在

低浓度 Cd 胁迫下, 藿香蓟具有更高的转运系数, 同时  $50\sim 300\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 胁迫浓度下的转运系数均与对照差异不显著 ( $P>0.05$ )。可能是高浓度 Cd 处理时, 藿香蓟把更多的 Cd 固持在根部, 限制 Cd 向地上部转运, 进而减轻 Cd 胁迫对藿香蓟地上部特别是叶片的毒害作用。因此, 由藿香蓟地上部 Cd 含量和转运系数的分析结果表明, 藿香蓟是一种 Cd 超积累特征植物。

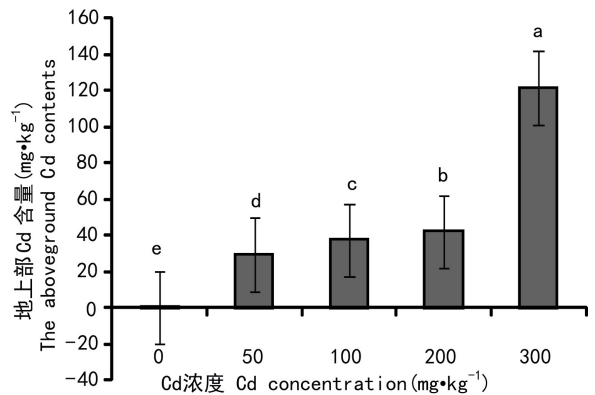


图 1 Cd 胁迫对藿香蓟地上部 Cd 量的影响

不同字母标记表示处理间显著差异  $P<0.05$ , 下同。

Fig. 1 Effects of Cd stress on the aboveground Cd contents in *A. conyzoides*. Different letters in each treatment indicate significantly differences  $P<0.05$ , the same as below.

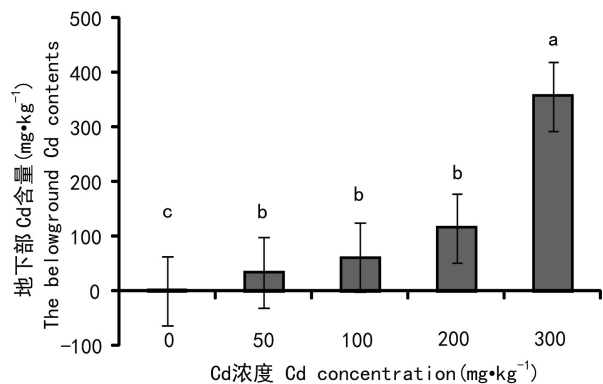


图 2 Cd 胁迫对藿香蓟地下部 Cd 量的影响

Fig. 2 Effects of Cd stress on the belowground Cd contents in *A. conyzoides*

### 2.2 Cd 胁迫对藿香蓟植株生物量的影响

由图 4、图 5 可知, 随 Cd 胁迫浓度的增加, 藿香蓟地上部和地下部的生物量均逐渐降低, 地上部的生物量在  $0.26\sim 0.47\ \text{g}$ , 地下部的生物量在  $0.031\sim 0.056\ \text{g}$ 。其中在  $100\sim 300\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 胁迫下, 地上生物量分别为对照的  $63.83\%$ 、 $57.45\%$ 、 $55.32\%$ ,

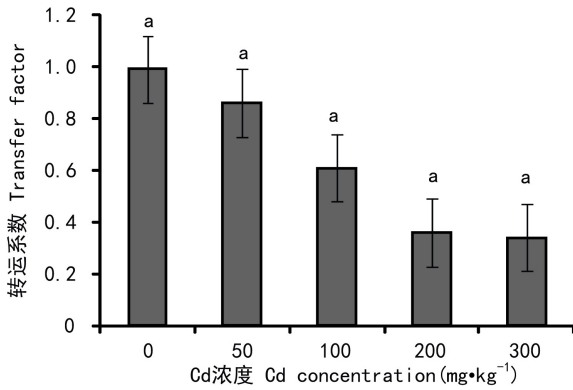


图3 Cd胁迫对藿香蓟转运系数的影响

Fig. 3 Effects of Cd stress on the transfer factors in *A. conyzoides*

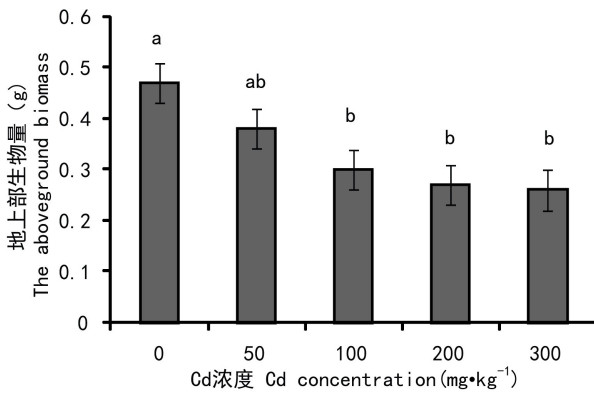


图4 Cd胁迫对藿香蓟地上生物量的影响

Fig. 4 Effects of Cd stress on the aboveground biomass in *A. conyzoides*

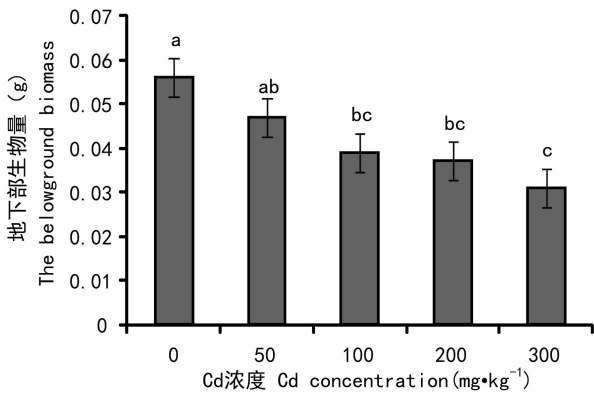


图5 Cd胁迫对藿香蓟地下生物量的影响

Fig. 5 Effects of Cd stress on the belowground biomass in *A. conyzoides*

地下生物量分别为对照的 69.64%、66.07%、55.36%，地上部和地下部的生物量均与对照差异显著 ( $P < 0.05$ )。由此可知，Cd胁迫显著抑制藿香蓟

植株地上部和地下部的生物量。由图6可知，随Cd胁迫浓度的增加，藿香蓟地上部与地下部的生物量比值呈上升趋势，可能原因是高浓度Cd胁迫抑制藿香蓟根系的生长，从而限制了植物地上部营养和水分的吸收，最终抑制植株生长及生命物质的代谢，在生长期表现出植株矮小、细弱、叶子发黄、生长缓慢，开花期延长。

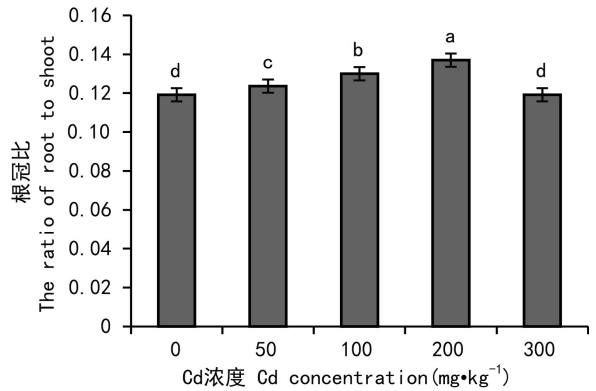


图6 Cd胁迫对藿香蓟根冠比的影响

Fig. 6 Effects of Cd stress on the ratio of root to shoot in *A. conyzoides*

## 2.3 Cd胁迫对藿香蓟荧光参数的影响

### 2.3.1 Cd胁迫对藿香蓟叶片叶绿素荧光参数的影响

随Cd胁迫浓度的增加，藿香蓟叶片的  $F_o$  逐渐降低，100~300  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd胁迫下的  $F_o$  与对照差异显著 ( $P < 0.05$ ) (表1)，可能原因是叶绿素荧光参数在植物长势3个月开始测定的，这时植株长势良好，已是生长的后期，叶片PSII反应中心的D1蛋白开始失活和降解。 $F_m$  随Cd胁迫浓度的增加呈下降趋势，与对照差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (表1)，说明Cd胁迫藿香蓟叶片PSII反应中心的电子传递能力影响较小。 $F_v/F_o$  是PSII的潜在光化学效率， $F_v/F_m$  是PSII的最大光化学效率。 $F_v/F_o$  和  $F_v/F_m$  均呈升高的趋势，Cd胁迫使藿香蓟叶片的潜在光化学活性和最大光化学效率均比对照高 (表1)，可能是Cd胁迫扰乱了藿香蓟叶片正常时期的光合特性。

### 2.3.2 Cd胁迫对藿香蓟叶片叶绿素荧光诱导动力学参数的影响

PSII实际的光化学量子产量 ( $\Phi_{\text{PSII}}$ ) 是判断植物光合能力的重要指标，它指被用于光化学途径中激发能占进入到PSII激发能的比例。随Cd胁迫浓度增加，藿香蓟的  $\Phi_{\text{PSII}}$  呈现先升高后降低的趋势，均比对照高，且差异不显著 ( $P > 0.05$ )

表 1 Cd 胁迫对藿香蓟叶片  $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  的影响Table 1 Effects of Cd stress on  $F_o$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$  and  $F_v/F_o$  in leaves of *A. conyzoides*

Cd 浓度 Cd concentration ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$F_o$	$F_m$	$F_v/F_m$	$F_v/F_o$
0	170.300± 10.27a	866.200± 19.61a	0.804± 0.01b	4.087± 0.24a
50	159.975± 9.56ab	865.150± 37.14a	0.815± 0.00ab	4.408± 0.11a
100	154.850± 5.37b	823.200± 14.67a	0.816± 0.00ab	4.334± 0.24a
200	152.275± 4.68b	819.275± 50.92a	0.817± 0.01ab	4.396± 0.25a
300	146.533± 4.29b	815.600± 8.80a	0.822± 0.04a	4.577± 0.11a

注: 同列数据不同字母表示处理间存在显著差异( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different letters in each column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 2 Cd 胁迫对藿香蓟叶片  $\Phi\text{PSII}$ 、 $\text{ETR}$ 、 $qP$  和  $qN$  的影响Table 2 Effects of Cd stress on  $\Phi\text{PSII}$ ,  $\text{ETR}$ ,  $qP$  and  $qN$  in leaves of *A. conyzoides*

Cd 浓度 Cd concentration ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\Phi\text{PSII}$	$\text{ETR}$	$qP$	$qN$
0	0.796± 0.01a	0.297± 0.01a	1.020± 0.01a	4.574± 0.16a
50	0.799± 0.01a	0.306± 0.03a	1.024± 0.01a	4.709± 0.30a
100	0.835± 0.03a	0.321± 0.02a	1.032± 0.00a	4.933± 0.03a
200	0.811± 0.01a	0.315± 0.02a	1.025± 0.01a	4.792± 0.11a
300	0.807± 0.02a	0.299± 0.02a	1.023± 0.00a	4.658± 0.41a

(表 2)。随 Cd 胁迫浓度增加, 藿香蓟的  $\text{ETR}$  也出现先升高后降低的趋势, 但均比对照值高, 且差异不显著( $P > 0.05$ ) (表 2)。光化学猝灭系数( $qP$ )可反映那部分可以被 PS II 天线色素吸收并用于光化学反应的光能, 它与 PS II 的光化学反应和 PS II 反应中心的开放程度有关。非光化学猝灭系数( $qN$ )反映那部分可以被 PS II 天线色素吸收但没有被用于光合电子传递而以热形式耗散掉的光能。 $qP$  及  $qN$  均随 Cd 胁迫浓度的增加出现先升后降的趋势, 均比对照值高, 且差异不显著( $P > 0.05$ ) (表 2), 可能是 Cd 胁迫能够延缓植物叶片的衰老, 但 Cd 胁迫对藿香蓟 PS II 的光学化学反应和散热能力影响较小。

### 3 讨论与结论

镉超积累植物应同时具备以下三个特征: 一是

植物地上部镉含量大于其根部镉含量即转运系数大于 1; 二是在同一生长条件下, 植物地上部(茎或叶)镉含量是普通植物的 100 倍, 其临界含量镉 ( $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 三是植物对镉具有较强的抗胁迫能力, 表现植株在生长过程中没有出现明显的毒害症状(魏树和等, 2004)。本研究表明, 在高浓度 Cd 胁迫下, 藿香蓟地上部的 Cd 含量已超过 Cd 超富集植物的临界标准 ( $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。同种植物不同器官对 Cd 的富集能力也有所不同(秦秦等, 2013)。本研究表明, 藿香蓟地上部和地下部对 Cd 的富集能力不同, 且植株体内 Cd 含量随 Cd 胁迫浓度的增加而逐渐积累, 这与(陈亚慧等, 2014)蓖麻植株内 Cd 含量随营养液 Cd 浓度的升高而增加的结果类似。

当重金属胁迫加重时, 毒害的外观症状表现为株高矮小、生长受抑、产量下降(李兰平等, 2012)。高家合等(2006)的研究表明, Cd 胁迫抑制烤烟的生长, 随 Cd 胁迫强度的增加, 烟株地上部干重和根干重逐渐降低, 且抑制效应与 Cd 胁迫强度呈正相关。本研究表明, 藿香蓟地上部和地下部的生物量随 Cd 胁迫浓度的增加而逐渐降低, 可见高浓度 Cd 胁迫对藿香蓟生物量的增长有比较显著的抑制效应。此外, 藿香蓟地下部与地上部生物量的比值随 Cd 胁迫浓度的增加呈现上升的趋势, 这与孙瑞莲(2006)的研究结果类似。

叶绿素荧光分析技术是研究和探测植物生理状况及植物与逆境胁迫关系的理想探针。 $F_o$  与 PS II 反应中心的 D1 蛋白有关的失活和降解有关(杨兴洪等, 2001)。 $F_m$  指已经过完全暗适应后所有 PS II 反应中心都关闭时的荧光强度, 这个时所有的非光化学过程均达到最小, 在一定程度上可反映植物叶片 PS II 反应中心的电子传递情况(秦红艳等, 2013)。本研究表明, 藿香蓟的  $F_m$ 、 $F_o$  随着 Cd 胁迫浓度的增加均逐渐降低, 但 Cd 胁迫使藿香蓟叶片 PS II 反应中心的电子传递能力降低较弱。不少研究指出,  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$  有很好的一致性, 是叶片发生光抑制的指标和光合系统受损伤的标志(张其德等, 2001; 李晓等, 2006)。本研究中, 藿香蓟的  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$  随 Cd 胁迫浓度的增加均逐渐升高, 但各处理间差异不显著, 说明 Cd 胁迫对藿香蓟叶片没有发生光抑制及明显的损伤光合系统。贾中民等(2014)研究表明, 枫杨 (*Pterocarya stenoptera*) 幼苗的  $\Phi\text{PSII}$ 、 $\text{ETR}$ 、 $qP$ 、 $qN$  随 Cd 浓度的增加逐渐降低。本研究结果表明, 藿香蓟的

$\Phi$ PSII、ETR、 $qP$  及  $qN$  随 Cd 胁迫浓度的增加均出现先升后降的趋势, Cd 胁迫抑制植株的生长发育及延缓叶片的衰老, 进而也扰乱了叶片正常时期的光合特性, 但 Cd 胁迫对藿香蓟叶片光合能力影响较小。

综上所述, 随 Cd 胁迫浓度的增加, 藿香蓟地上部及地下部生物量均逐渐降低, 但其地上部及地下部 Cd 富集量均逐渐提高, 且在高浓度 Cd 胁迫下, 地上部的 Cd 含量已超过 Cd 超富集植物的临界值, 由此可知, 藿香蓟对 Cd 具有较强的富集能力, 是一种 Cd 超富集特征植物, 若将其加以驯化及开发可作为 Cd 污染土壤植物修复的备选植物。

## 参考文献:

- Bai X(白雪), Chen Y H(陈亚慧), Geng K(耿凯), *et al.* 2014. Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Violatricolar* L.(镉在三色堇中的积累及亚细胞与化学形态分布)[J]. *Acta Sci Circum*(环境科学学报), **6**: 1 600—1 605
- Chen XY(陈亚慧), Liu XY(刘晓宇), Wang MX(王明新), *et al.* 2014. Cd tolerance, accumulation and relationship with Cd subcellular distribution in *ricinus* L.(蓖麻对镉的耐性、积累及与镉亚细胞分布的关系)[J]. *Acta Sci Circum*(环境科学学报), **34**(9): 2 440—2 446
- Chen YW(陈英雯). 2011. The Study of the infect of photosynthetic characteristics and absorption of related nutritents of rice material sand hybrids under cadmium stress(镉胁迫对水稻光合生理特征及相关营养元素吸收影响研究)[D]. *Sichuan Agric Univ*(四川农业大学)
- Gao JH(高家合), Wang SH(王树会). 2006. Effects of Cd stress on the growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco(镉胁迫对烤烟生长及生理特性的影响)[J]. *J Agr Environ Sci*(农业环境科学学报), **5**: 1 167—1 170
- Hou LL(侯伶龙), Huang R(黄荣), Zhou LR(周丽荣), *et al.* 2010. Promoting effect of *Houttuynia cordata* Thunb on Cd in soil enrichment and root microorganism(鱼腥草对土壤中镉的富集及根系微生物的促进作用)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), (4): 817—821
- Hu PJ(胡鹏杰), Zhou XY(周小勇), Qiu RL(仇荣亮), *et al.* 2007. Cd tolerance and accumulation features of Zn hyperaccumulator *Potentilla griffithii* var. *velutina*(Zn超富集植物长柔毛委陵菜对镉的耐性与富集特征)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **6**: 2 221—2 224
- Ingwersen J, Streck T. 2005. A regional-scale study on the crop-uptake of Cd from sandy soils: measurement and modeling[J]. *J Environ Qual*, **34**: 1 026—1 035
- Jia ZM(贾中民), Feng HR(冯汉茹), Wei H(魏虹). 2014. Effects of cadmium stress on growth and photosynthetic characteristics of *Pterocarya stenoptera* seedlings(镉对枫杨幼苗生长和光合特性的影响)[J]. *J Southwestern Univ; Nat Sci Ed*(西南大学学报·自然科学版), **8**: 27—35
- Li LP(李兰平). 2012. The study on tolerance, physiological me-

- tabolism in kenaf (*Hibiscus camarinus* L.) under the stress of Pb and Cd(红麻对 Pb、Cd 的耐受性及其生理生化基础研究)[D]. Nanning(南宁); Guangxi Univ(广西大学)
- Li X(李晓), Feng W(冯伟), Zeng XC(曾晓春), *et al.* 2011. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses(叶绿素荧光分析技术及应用进展)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*(西北植物学报), **10**: 2 186—2 196
- Li YS(李玉双), Sun LN(孙丽娜), Sun TX(孙铁珩), *et al.* 2007. Cd hyper accumulation *Beta vulgaris* var. *ciela* L. and its accumulation characteristics(超富集植物叶用红苜蓿及其对  $\text{Cd}^{2+}$  的富集特征)[J]. *J Agro-environ Sci*(农业环境科学学报), (4): 1 386—1 389
- Liu BY(刘碧英), Pang YZ(潘远智), Zhao YD(赵杨迪), *et al.* 2011. Physiological responses of *Ageratum conyzoides* to lead stress in soil(藿香蓟对土壤铅胁迫的生理响应)[J]. *Chin Appl Environ Biol*(应用与环境生物学报), **5**: 651—655
- Liu XF(刘发欣), Gao HY(高怀友). 2006. Transfer of cadmium in food chain and its prevention and control from pollution(Cd 的食物链迁移及其污染防治对策研究)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **25**: 805—809
- Qin YH(秦红艳), Ai J(艾军), Xu PL(许培磊), *et al.* 2013. Chlorophyll fluorescence parameters and ultrastructure in amar grape under salt stress(盐胁迫对山葡萄叶绿素荧光参数及超微结构的影响)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*(西北植物学报), **6**: 1 159—1 164
- Qin Q(秦秦), Li XM(李雪梅), Tai PD(台培东), *et al.* 2013. Cd accumulation in different eggplant cultivars and canmium effects of grafting on the accumulation characteristics(不同类型茄对镉的富集及嫁接对镉富集特性的影响)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **8**: 2 043—2 048
- Ran L(冉烈), Li HH(李会合). 2011. Progress and present condition of Cd pollution in soil(土壤镉污染现状及危害研究进展)[J]. *J Chongqing Univ Art Sci; Nat Sci Ed*(重庆文理学院学报·自然科学版), **4**: 69—73
- Sun RL(孙瑞莲). 2006. Ecological characteristics of cadmium-hyperaccumulators and their mechanism analysis of pollution endurance(镉超积累植物的生态特征及污染耐性机理分析)[D]. University of Chinese Academy of Sciences, Shenyang Institute of Applied Ecology(中国科学院研究生院, 沈阳应用生态研究所)
- Wei SH(魏树和). 2004. Identification of heavy metal hyperaccumulators and relevant processes of contaminated soil phytoremediation(超积累植物筛选及污染土壤植物修复过程研究)[D]. University of Chinese Academy of Sciences, Shenyang Institute of Applied Ecology(中国科学院研究生院, 沈阳应用生态研究所)
- Yang XH(杨兴洪), Zhou Q(邹琦), Wang W(王伟), *et al.* 2001. Photoinhibition in shaded cotton leaves after exposing to high and the time course of its restoration(遮荫棉花转入强光后光合作用的光抑制及其恢复)[J]. *Acta Bot Sin*(植物学报), **12**: 1 255—1 259
- Zhang QD(张其德), Jiang GM(蒋高明), Zhu XG(朱新广), *et al.* 2001. Photo synthetic capability of 12 gene types of *triticum aestivum*(12 个不同基因型冬小麦的光合能力)[J]. *Chin J Plant Ecology*(植物生态学报); 532—536