

镉胁迫对龙葵镉的吸收积累及生理响应的影响

李志贤^{1,2}, 冯涛¹, 陈章¹, 陈国梁¹, 陈远其¹, 向言词³, 刘庆龙⁴, 刘顺⁴

(1. 湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201;

2. 湖南景翌湘台环保高新技术开发有限公司, 湖南湘潭 411201; 3. 湖南科技大学建筑与艺术设计学院, 湖南湘潭 411201; 4. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 为揭示镉(Cd)富集植物龙葵的Cd吸收、积累与光合生理特性间的相关性, 采用室内盆栽试验, 在不同Cd添加水平下(0, 2, 5, 10, 20 mg/kg, 分别记为Cd0、Cd2、Cd5、Cd10、Cd20), 研究了龙葵对重金属Cd的吸收、积累特性及生理响应。结果表明: 龙葵对Cd有极强的耐性, 在Cd浓度为20.0 mg/kg的污染土壤中仍能正常生长; Cd $\leq$ 10.0 mg/kg的污染土壤中龙葵对Cd的富集、转运系数均大于1; 但Cd20处理龙葵对Cd的富集和转运能力显著下降。Cd在龙葵中的分布为地上部 $>$ 地下部, 并且各处理(Cd0、Cd2、Cd5、Cd10、Cd20)龙葵地上部Cd的积累量也显著高达地下部Cd积累量的10~15倍。同时, 随土壤Cd浓度增加不仅引起龙葵对重金属Cd的吸收、转运的变化, 也会引起龙葵光合生理指标的相应变化, 当土壤Cd含量增加到10 mg/kg时, 龙葵地上部旗叶光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)和气孔导度(G_s)最强, 显著高于Cd0、Cd2、Cd5处理($p<0.05$)23.71%~79.80%, 当土壤Cd含量持续增加, 龙葵的光合强度呈显著下降的趋势。龙葵吸收Cd主要受植物外部因素土壤Cd浓度(SCCD)的影响, 与 P_n 、 Tr 和 G_s 等内部因素并无显著相关性。因此, 试图通过对龙葵的光合生理调控实现提高龙葵对Cd的吸收、积累并不能达到理想的效果, 对揭示龙葵富集Cd的机理及调控机制还需进一步的研究。

关键词: 镉污染; 龙葵; 富集系数; 转运系数; 生理响应

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0328-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.051

Effects of Different Levels Cd Stress on Cd Uptake and Physiological Response of *Solanum nigrum* L.

LI Zhixian^{1,2}, FENG Tao¹, CHEN Zhang¹, CHEN Guoliang¹, CHEN Yuanqi¹,

XIANG Yanci³, LIU Qinglong⁴, LIU Shun⁴

(1. Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201; 2. Hunan Jingyi Xiangtai Environmental Protection High-tech Development Limited Company, Xiangtan, Hunan 411201; 3. School of Architecture and Art Design, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201; 4. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201)

Abstract: In order to reveal the correlation between Cd uptake and photosynthetic physiological characteristics of *Solanum nigrum* L., pot experiments in greenhouse were conducted to investigate the Cd uptake and physiological response of *Solanum nigrum*, during its mature growth stage under five levels of Cd (0, 2, 5, 10 and 20 mg/kg, denoted as Cd0, Cd2, Cd5, Cd10 and Cd20 respectively). The results showed that *Solanum nigrum* had a strong resistance to Cd, which could grow normally in 20 mg/kg Cd contaminated soil, and the Cd accumulation coefficient and translocation factor of *Solanum nigrum* in the Cd contaminated soil with ≤ 10 mg/kg were both larger than 1, however, when the soil was heavily polluted (20 mg/kg), the Cd uptake and transfer ability of *Solanum nigrum* decreased significantly ($p<0.05$). In general, the Cd content in the overground of *Solanum nigrum* was larger than that in the underground of *Solanum nigrum*, and the Cd accumulation in overground parts of *Solanum nigrum* in five Cd levels were all significantly ($p<0.05$) larger than that in underground parts, which was about 10~15 times more. At the same time, the increase of

收稿日期: 2017-04-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(31400374, 31671635, 31671628, 51408214, 41501343); 湖南省教育厅项目(15C0534, 14B066)

第一作者: 李志贤(1979—), 女, 讲师, 主要从事农田重金属植物修复研究。E-mail: zhixianlimao@163.com

通信作者: 冯涛(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂煤层开采、岩石动力学和煤矿安全研究。E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

soil Cd concentration could cause not only the changes of Cd uptake and transfer of *Solanum nigrum*, but also cause the changes of its photosynthetic physiological characteristic. The photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr) and stomatal conductance (G_s) of the flag leaf in Cd10 treatment were significantly higher (23.71%~79.80%) than those in Cd0, Cd2, Cd5 treatments ($p < 0.05$), while the photosynthetic intensity of *Solanum nigrum* was significant lg decreased as Cd content of soil reaches 20 mg/kg. The results of correlation analysis showed that the Cd uptake by *Solanum nigrum* was mainly affected by soil Cd concentration (SCCD), and had no significant correlation with the internal factors, such as Tr and G_s . Therefore, it is not a good choice to improve the uptake and accumulation of Cd in *Solanum nigrum* by the physiological regulation of *Solanum nigrum*; further researches need to be done to reveal the mechanism and regulation of Cd uptake in *Solanum nigrum*.

Keywords: cadmium pollution; *Solanum nigrum* L.; accumulation coefficient; translocation factor; physiological response

土壤镉(Cd)污染是一个非常严重的环境问题,我国Cd污染农田面积达1.3万 hm^2 ,涉及11省市的25个地区^[1-3]。Cd是生物毒性极强的重金属元素,其迁移性很强,且极易被植物吸收积累^[4],目前国内外已有大量研究报道,土壤中Cd超标会导致植物生长缓慢、植株矮小、褪绿等中毒症状,其细胞的膜透性、光合代谢、呼吸代谢、酶代谢、遗传效应也发生改变,使生物量下降^[5-8],同时也会危及食品安全和人类的健康与生存^[9-10]。因此,对修复Cd污染的土壤研究一直是生态和环境保护的难点和研究的热点^[11]。

龙葵(*Solanum nigrum* L.)为茄科茄属一年生或多年生草本植物,孙正国等^[12-13]研究发现龙葵具有Cd超积累的特性,在Cd投加质量浓度为25 mg/kg时,根部的Cd含量仅为59.9 mg/kg,而茎和叶中Cd含量都超过了100 mg/kg。由于其生长周期短、生物量较大,使龙葵成为Cd污染土壤植物修复机理研究和应用的良好材料。龙葵修复污染土壤主要是通过获取其地上部带走Cd,达到从土壤中大量吸收和去除Cd的目的。在实际修复中,龙葵对Cd的去除效率主要取决于地上部的Cd积累总量,即地上部的生物量与含Cd浓度的乘积。因此,地上部的生物量与含Cd浓度是2项关键的指标^[14-16]。目前已有的研究主要集中在探讨龙葵对重金属的吸收特性^[17-19]及抗性机理^[20-21],但对其光合生理特性的研究还较少见,本文以龙葵为试验材料,研究不同水平Cd胁迫下龙葵对重金属Cd的吸收、积累特性及生理响应,揭示龙葵的Cd吸收、积累与光合生理特性间的相关性,为深入研究龙葵的耐Cd机制、调控措施以及Cd污染土壤的植物修复、Cd尾矿废弃地的植被重建等提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自湖南科技大学周边菜园0—20 cm土

层的土壤,土壤采回后风干、磨碎过5 mm孔径筛备用。土壤的基本理化性质为pH6.82,有机质68.11 g/kg,全氮1.03 g/kg,全磷1.09 g/kg,全钾2.18 g/kg,碱解氮224.28 mg/kg,速效磷47.2 mg/kg,速效钾118.76 mg/kg,总Cd 2.02 mg/kg,有效Cd 0.7 mg/kg。供试材料是茄科植物龙葵,购买于湘潭石码头种子公司。

1.2 试验设计

试验在湖南科技大学建筑学院网室进行。采用完全随机区组试验设计,共设置5个处理,Cd添加浓度分别为:(1)Cd0(CK对照),不添加Cd;(2)Cd2,添加2.0 mg/kg Cd;(3)Cd5,添加5.0 mg/kg Cd;(4)Cd10,添加10.0 mg/kg Cd;(5)Cd20,添加20.0 mg/kg Cd,每个处理3次重复。试验采用白色塑料盆(内径25 cm,高20 cm),并按设定浓度将重金属Cd以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 的形式拌入土壤后老化平衡2周,将土样装盆,每盆8.0 kg。将龙葵种子在育苗盘中育苗15 d后,选择长势整齐一致的小苗移栽到盆中,每盆定苗4株。试验期间根据作物生长情况补充土壤水分及肥料供给,为防止污染物、淋溶物渗漏损失,在盆下放置塑料托盘并将渗漏液倒回盆中。植物生长期从2015年4月10日—2015年7月5日,6月20日(生长期为成熟期)测定龙葵光合特性指标,7月5日生长期满地上、地下部收获龙葵并取样测定相关生长特征参数指标。

1.3 测定方法

生长成熟期选择长势良好的成熟旗叶作为测定对象。气体交换参数用美国LI-COR公司的LI-6400型便携式光合作用测定系统进行测定。测定时的叶温、光强及 CO_2 浓度等均用该仪器自控系统控制。选取龙葵5株,及其长势均一的旗叶片,于晴朗天气的上午10:00—12:00测定龙葵的光合生理参数,每株重复3次,由测定仪自动输出数据,分别取所测5株共15次数据的平均值。收获时,将龙葵分为地上

(叶、茎及果实)、地下(根)2个部分取样。植物样品用自来水充分冲洗以去除粘附于植物样品上的泥土和污物。然后再用去离子水清洗2~3次,沥去水分,在105℃杀青30min,70℃下烘干至恒重,分别测定干物质质量,并将植物样品粉碎备用。轻轻抖动植株根系,抖下根际土壤后混匀,风干,过0.15mm筛孔,备测土壤重金属含量。土壤样品分析采用常规土壤分析方法^[22]。土壤pH用电位测定法测定,水土质量比2.5:1;用 $\text{HNO}_3 \cdot \text{HClO}_4$ 法消化(二者体积比为3:1),SOLAAR M6型原子吸收光谱仪(美国热电)测定土壤及植物样品中的Cd含量^[23]。龙葵不同器官Cd含量用龙葵器官干重中的Cd含量表示(mg/kg)。

重金属富集系数(BCF)=植物中重金属含量/土壤中重金属含量。

重金属转运系数(TF)=地上部重金属含量/地下部重金属含量。

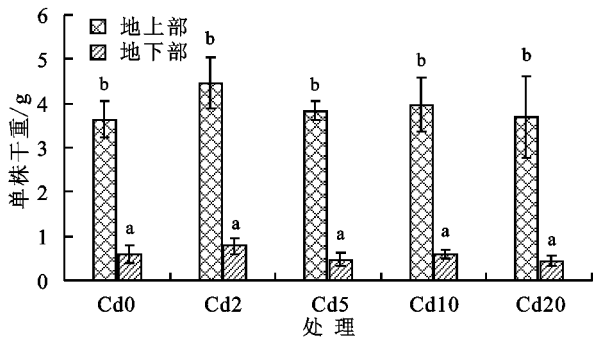
1.4 数据处理

采用Microsoft Excel进行数据处理并绘图,通过SPSS 13.0统计软件进行方差分析,Tukey检验进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 Cd对龙葵生物量的影响

由图1可知,各处理(Cd_0 、 Cd_2 、 Cd_5 、 Cd_{10} 、 Cd_{20})龙葵地上部生物量均显著($p < 0.05$)高于地下部生物量4.75~7.36倍,但不同处理间(Cd_0 、 Cd_2 、 Cd_5 、 Cd_{10} 、 Cd_{20}),龙葵地上、地下部生物量无显著差异,因此龙葵对Cd有极强的耐性,在Cd浓度为20.0 mg/kg的重度污染土壤中,龙葵仍能正常生长。



注:小写字母表示0.05显著水平。下同。

图1 Cd对龙葵生物量的影响

2.2 Cd在龙葵体内的积累分布规律

2.2.1 土壤Cd含量对龙葵不同器官Cd含量的影响 由图2可知,随着土壤Cd污染程度的加剧,龙葵地下部根系Cd含量为逐步增加的趋势,但不同Cd污染处理间(Cd_0 、 Cd_2 、 Cd_5 、 Cd_{10} 、 Cd_{20})龙葵根系Cd含量无显著差异;随着土壤Cd污染水平的增加,龙葵地上部Cd含量显著增加,其中中度、重度污染处理(Cd_5 、 Cd_{10})龙

葵地上部Cd含量显著高于轻度污染处理(Cd_0 、 Cd_2)41.33%~51.49%;土壤Cd污染浓度持续增加至20.0 mg/kg(Cd_{20})时,龙葵地上部Cd含量较 Cd_{10} 显著降低38.63%,由此说明土壤中Cd含量增加对龙葵根系Cd含量无显著影响,但可以显著促进地下部的Cd向地上部转移,使龙葵地上部Cd含量显著增加,当土壤中的Cd含量达到20.0 mg/kg时则抑制龙葵地下部的Cd向地上部的转移。

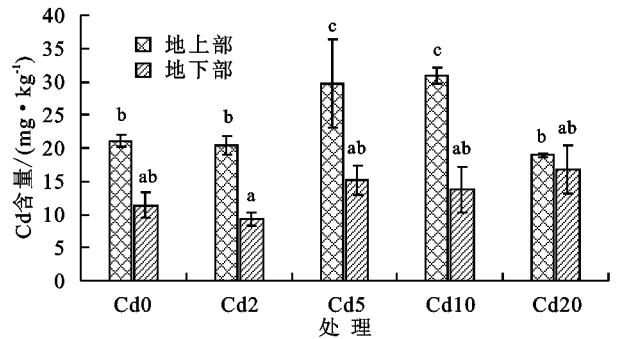


图2 龙葵的Cd含量

2.2.2 土壤Cd含量对龙葵不同器官Cd积累总量的影响 由图3可知,龙葵吸收土壤的重金属Cd主要累积于地上部,各处理(Cd_0 、 Cd_2 、 Cd_5 、 Cd_{10} 、 Cd_{20})龙葵地上部Cd积累量均显著高达龙葵地下部Cd积累量的10~15倍;龙葵地上部及整株Cd积累量随着土壤Cd含量的增加为逐步增加的趋势,当土壤中的Cd含量达到20.0 mg/kg时龙葵地上部及整株Cd积累量又减少到最低,但各处理间(Cd_0 、 Cd_2 、 Cd_5 、 Cd_{10} 、 Cd_{20})龙葵地上、地下部及整株Cd的积累总量差异均没达到显著水平。

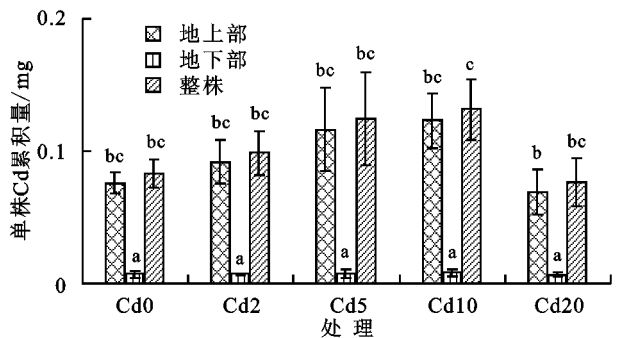


图3 龙葵的Cd吸收总量

2.3 土壤Cd含量对龙葵富集、转运系数的影响

为反映龙葵对重金属Cd的吸收转移能力,进一步计算了不同水平Cd污染土壤中龙葵对重金属Cd的富集系数(BCF)和转运系数(TF)(表1)。由表1可知,不同程度的Cd污染土壤中(Cd_2 、 Cd_5 、 Cd_{10}),龙葵对Cd都有较强的吸收、富集能力,其中 Cd_2 水平下龙葵富集系数达到10.20,为最高值,当土壤中的Cd含量达到20.0 mg/kg时,龙葵的Cd富集系数为0.95,说明在过度Cd污染土壤中,龙葵对Cd的富集能力显著降低。同时,龙

葵对 Cd 有很强的地上部转运能力,不同处理(Cd0、Cd2、Cd5、Cd10、Cd20)的龙葵 Cd 转运系数均大于 1,但过度 Cd 污染土壤中,龙葵向地上部转移 Cd 的能力也会下降,Cd20 处理龙葵的 Cd 转运系数显著低于其他各处理 35.78%~51.16%。

表 1 土壤 Cd 含量对龙葵 Cd 吸附特性的影响

Cd 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	龙葵	
	BCF	TF
0	—	1.95
2	10.2	2.23
5	5.95	1.91
10	3.09	2.52
20	0.95	1.23

2.4 土壤 Cd 含量对龙葵生理特性的影响

随土壤 Cd 浓度增加,不仅引起龙葵对重金属 Cd

的吸收、转运能力的变化,也会引起龙葵自身光合生理指标的相应变化。由表 2 可知,除 Cd5 处理的 *G_s* 显著小于 Cd0 外,Cd0、Cd2、Cd5 处理的 *P_n*、*T_r*、*G_s* 均无显著差异,因此在 0~5 mg/kg Cd 污染范围之内,土壤的 Cd 浓度变化对龙葵的光合生理特性无显著影响。土壤的 Cd 含量增加到 10 mg/kg 时,龙葵的光合强度达到最大,其地上部旗叶在 10:00—12:00 时间段的 *P_n*、*T_r*、*G_s* 显著高于 Cd0、Cd2、Cd5 处理 23.71%~79.80%;而当土壤 Cd 含量持续增加时,龙葵的光合强度呈显著下降的趋势,其中,Cd20 的 *T_r* 和 *G_s* 显著(*p*<0.05)低于 Cd10 处理 26.02%,37.93%。各处理中,Cd20 处理的 WUE 最高为 0.96 μmol CO₂/mmol · H₂O,显著(*p*<0.05)高于 Cd0、Cd2、Cd10 处理 44.13%,40.03%,18.36%。

表 2 土壤 Cd 含量对龙葵光合特性的影响

Cd 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	净光合速率(<i>P_n</i>)/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	蒸腾速率(<i>T_r</i>)/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	气孔导度(<i>G_s</i>)/ (mol · m ⁻² · s ⁻¹)	水分利用效率(WUE)/ (μmol · CO ₂ · mmol ⁻¹ · H ₂ O)
0	4.67±0.32a	7.06±0.61a	0.24±0.01bc	0.62±0.09a
2	4.67±0.34a	6.85±0.44a	0.22±0.02ab	0.74±0.04ab
5	4.93±0.95a	5.67±0.66a	0.16±0.03a	0.87±0.01abc
10	7.09±0.16b	8.80±0.32b	0.29±0.02c	0.81±0.07ab
20	6.21±0.12ab	6.51±0.25a	0.18±0.01ab	0.96±0.02c

2.5 相关性分析

由表 3 可知,土壤 Cd 污染浓度(SCCD)与龙葵的 Cd 富集系数(BCF)呈极显著的负相关(*r*=-0.593**,*p*<0.01),同时 SCCD 对龙葵的净光合速率(*P_n*)也有显著影

响(*r*=0.485*,*p*<0.05),但龙葵对 Cd 的吸收富集指标(PCCD、PACD、TF、BCF)与龙葵自身内部生理指标(*P_n*、*T_r*、*G_s*)间均无显著相关性,因此龙葵吸收富集 Cd 主要受植物外部因素的影响,受植物内部因素的影响不显著。

表 3 土壤 Cd 含量与龙葵 Cd 吸收特性的相关性分析

指标	SCCD	PCCD	PACD	<i>B</i>	<i>P_N</i>	<i>T_R</i>	<i>G_S</i>	WUE	TF	BCF
SCCD	1	-0.074	-0.107	-0.110	0.485*	0.039	-0.117	0.599**	-0.394	-0.593**
PCCD		1	0.838**	0.101	-0.016	0.107	0.106	-0.195	0.308	-0.217
PACD			1	0.613**	-0.243	-0.007	-0.028	-0.354	0.325	-0.192
<i>B</i>				1	-0.401	-0.094	-0.131	-0.426	0.220	-0.040
<i>P_N</i>					1	0.646**	0.559*	0.675**	-0.026	-0.394
<i>T_R</i>						1	0.980**	-0.112	0.129	0.054
<i>G_S</i>							1	-0.201	0.147	0.170
WUE								1	-0.277	-0.518*
TF									1	0.014
BCF										1

注:SCCD 表示土壤 Cd 污染浓度;PCCD 表示植株 Cd 含量;PACD 表示单株 Cd 吸收总量;*B* 表示单株生物量;*P_n* 表示光合速率;*T_r* 表示蒸腾速率;*G_s* 表示气孔导度;WUE 表示植物水分利用效率;TF 表示重金属 Cd 的转运系数;BCF 表示重金属 Cd 的富集系数;* 表示显著性相关(*p*<0.05);** 表示极显著性相关(*p*<0.01)。

3 讨论

3.1 镉对龙葵生长及生理特性的影响

Cd 是一种对植物具有毒害作用的重金属,土壤中的 Cd 含量过高会破坏植物体内的叶绿素结构,致使植物叶茎出现黄化甚至脱落的现象,还会减少根系对水分和营养物质的吸收,阻碍根系的生长,造成植物的生物量降低^[24]。龙葵作为一种新型 Cd 超富集

植物具有抗逆境能力强,生长迅速,繁殖能力强的特点,而且在 Cd 污染土壤中能正常生长,是一种优良的 Cd 超富集植物。本研究表明,在 20.0 mg/kg 的 Cd 重度污染土壤中,龙葵仍能正常生长,其生物量与无污染对照处理间无显著差异,而且不同程度的 Cd 污染土壤中(Cd2、Cd5、Cd10、Cd20),龙葵对 Cd 都有较强的吸收、富集能力,其中 Cd2 水平下龙葵富集系

数为 10.20, 达到最高值。

3.2 镉在龙葵体内的分布特性

Cd 是植物的非必需元素, 植物对 Cd 的过量吸收将对植物自身造成严重伤害。超富集植物能够吸收大量 Cd 贮藏于体内, 而不会对植物本身造成毒害作用, 龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 是一种新发现的 Cd 超富集植物, Cd 含量在龙葵体内的分布呈现叶片 > 茎 > 根 > 籽实的特征^[12], 孙正国等^[12]认为 Cd 主要富集在龙葵叶片, 并且在 Cd 投加浓度为 25 mg/kg 土壤条件下, 龙葵茎和叶中 Cd 含量分别为 103.8, 124.6 mg/kg。本试验结果也表明 Cd 在龙葵中的分布为地上部 > 地下部, 并且各处理 (Cd0、Cd2、Cd5、Cd10、Cd20) 龙葵地上部 Cd 的积累量也显著高达地下部 Cd 积累量的 10~15 倍进一步确认龙葵为重金属 Cd 理想的超富集植物。

3.3 镉在龙葵体内的吸收和运转

大量研究报道植物地上部元素分布规律, 认为元素地上部组织器官分布特征取决于植物自身的蒸腾速率、器官年龄、元素移动性及其他因子。例如由于较低的移动性, 导致植物老叶中钙 (Ca) 离子浓度较高, 其分布特点与硅 (Si) 和铝 (Al) 等元素的分布模式相类似^[25-26]。蒸腾作用是决定元素由根系通过木质部向地上部转运的主要因子之一^[25, 27], 叶片越大, 蒸腾越剧烈, 从而通过木质部转运更多的离子^[27]。但本试验的相关分析结果表明 (表 3) Cd 在龙葵地上部植株中的分布与累积与光合强度、蒸腾速率和气孔导度并无显著的相关性, 由此说明土壤中的 Cd 在转移进入龙葵体内各组织器官的途径可能主要依靠共质体和体外体 2 种运输途径, 一方面 Cd^{2+} 通过共质体途径从龙葵根毛细胞膜上的通道进入, 再利用细胞与细胞间的胞间连丝, 经由皮层、内皮层及周鞘进入根内导管细胞, 另一方面土壤中的 Cd^{2+} 则通过质外体途径经由龙葵根吸收之后不进入细胞内, 而是沿着细胞壁中的空隙从表皮、皮层到内皮层, 进入木质部和韧皮部^[28]。Cd 通过以上 2 种运输途径抵达维管束并向枝叶转运, 随着龙葵的生长和新陈代谢, 逐渐被稀释, 进而减少对龙葵的危害。所以, 龙葵吸收、积累 Cd 受植物内部光合生理因素的影响不显著, 若试图通过对龙葵的光合生理调控实现提高龙葵对 Cd 的吸收、积累并不能达到理想的效果。相反, 本文研究表明龙葵吸收富集 Cd 主要受植物外部因素的影响, 龙葵地上部分的 Cd 含量会随着土壤中 Cd 浓度的增加而增加, 但达到一定程度后就不再升高, 当土壤 Cd 污染浓度为 10 mg/kg 时, 龙葵地上部的 Cd 含量达

到最大为 30.92 mg/kg, 土壤 Cd 污染浓度继续增加至 20 mg/kg 时, 龙葵地上部的 Cd 含量反而下降, 而且过度 Cd 污染土壤中, 龙葵对土壤 Cd 的富集能力和向地上部的转移能力也会显著下降, 因此, 针对提高龙葵吸收、累积 Cd 的调控途径还应从改变土壤环境及理化性状等外部环境因素考虑, 对揭示龙葵富集 Cd 的机理及调控机制也还需进一步的研究。

4 结论

(1) 龙葵是一种对重金属 Cd 耐性很强的富集植物, Cd 浓度为 20.0 mg/kg 的污染土壤中, 龙葵仍能正常生长; Cd 在龙葵中的分布为地上部显著高于地下部, 各处理 (Cd0、Cd2、Cd5、Cd10、Cd20) 龙葵地上部 Cd 的积累量地下部 Cd 积累量的 10~15 倍。

(2) 随土壤 Cd 浓度增加, 不仅会引起龙葵对重金属 Cd 的吸收、转运的变化, 也会引起龙葵光合生理指标的变化。在 $Cd \leq 10.0$ mg/kg 的污染土壤中龙葵对 Cd 的富集、转运系数均大于 1, 同时龙葵地上部旗叶光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s) 也达最强, 当土壤 Cd 含量持续增加, Cd20 处理龙葵对 Cd 的富集转运能力及光合强度显著下降。但通过相关分析结果表明, 龙葵吸收 Cd 主要受植物外部因素土壤 Cd 浓度 (SCCD) 的影响, 与 P_n 、 T_r 和 G_s 等内部生理因素并无显著相关性。因此, 通过对龙葵的生理调控实现提高龙葵对 Cd 的吸收、积累或许并不能达到理想的效果, 针对提高龙葵吸收、累积 Cd 的调控途径还应从改变土壤环境及理化性状等外部环境因素考虑作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 师荣光, 赵玉杰, 彭胜巍, 等. 不同土地利用类型下土壤—作物镉含量积累及其健康风险分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1904-1909.
- [2] Essien O E, Douglass E E. Heavy metal transfer to vegetables from contaminated farmland adjoining sub urban animal park/market, Uyo[J]. African Journal of Agricultural Research, 2012, 7(8): 1268-1275.
- [3] 王家乐. 土壤镉污染及治理技术综述[J]. 中国西部科技, 2010, 9(7): 7-9.
- [4] Zhou Y H, Xue M, Yang Z Y, et al. High cadmium pollution risk on vegetable amaranth and a selection for pollution safe cultivars to lower the risk[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2013, 7(2): 219-230.
- [5] Anwarzeb K, Sardar K, Muhammad A K, et al. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk; A review [J]. Environmental Science and

- Pollution Research, 2015, 22(18): 13772-13799.
- [6] Kwang K L, Han S C, Yong C M, et al. Cadmium and lead uptake capacity of energy crops and distribution of metals within the plant structures[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(1): 44-50.
- [7] 秦丽, 祖艳群, 李元. Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 48-52.
- [8] 刘俊祥, 孙振元, 勾萍, 等. 镉胁迫下多年生黑麦草的光合生理响应[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 191-197.
- [9] Cvjetko P, Zovko M, Balen B. Proteomics of heavy metal toxicity in plants[J]. Archives of Industrial Hygiene and Toxicology, 2014, 65(1): 1-18.
- [10] Naser H M, Sultana S, Gomes R, et al. Heavy metal pollution of soil and vegetable grown near roadside at Gazipur[J]. Bangladesh Journal of Agricultural Research, 2012, 37(1): 9-17.
- [11] 邢艳帅, 乔冬梅, 朱桂芬, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(17): 208-214.
- [12] 孙正国. 龙葵对镉污染土壤的响应及其修复效应研究[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 397-401.
- [13] Sun Y, Zhou Q, Diao C. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(5): 1103-1110.
- [14] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028-1033.
- [15] Wu Q H, Jonathan Y S L, Huang X X, et al. Evaluation of the ability of black nightshade *Solanum nigrum* L. for phytoremediation of thallium-contaminated soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(15): 11478-11487.
- [16] Seregin I V, Kozhevnikova A D, Zhukovskaya N V, et al. Cadmium tolerance and accumulation in Excluder *Thlaspi arvense* and various accessions of hyperaccumulator *Noccaea caerulea* [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2015, 62(6): 837-846.
- [17] Xiao X, Luo S, Zeng G et al. Biosorption of cadmium by endophytic fungus (EF) microsphaeropsis sp. LSE10 isolated from cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 1668-1674.
- [18] Wei S, Li Y, Zhou Q, et al. Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1/3): 269-273.
- [19] Gao Y, Miao C, Mao L, et al. Improvement of phytoextraction and antioxidative defense in *Solanum nigrum* L. under cadmium stress by application of cadmium-resistant strain and citric acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1/3): 771-777.
- [20] Bao T, Sun T, Sun L. Effect of cadmium hyperaccumulation on antioxidative defense and proline accumulation of *Solanum nigrum* L. [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(37): 7198-7206.
- [21] Sun R L, Zhou Q X, Sun F H, et al. Antioxidative defense and proline/phytochelatin accumulation in a newly discovered Cd-hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60(3): 468-476.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-114.
- [23] 魏向利, 雷用东, 马小宁, 等. 微波消解-AAS 法测定土壤中铅铬镉元素的研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(11): 3243-3244, 3247.
- [24] Shi G R, Cai Q S, Liu C F, et al. Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes [J]. Plant Growth Regulation, 2010, 61(1): 45-52.
- [25] Thomas E, Heiner E G. Transpiration rate affects the mobility of foliar-applied boron in *Ricinus communis* L. cv. Impala[J]. Plant and Soil, 2010, 328(1): 165-174.
- [26] Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants [M]. Third edition. America: Academic Press, 2012.
- [27] Effi T, Alon BG, Uri S. Consequence of salinity and excess boron on growth, evapotranspiration and ion uptake in date palm (*Phoenix dactylifera* L., cv. Medjool)[J]. Plant and Soil, 2007, 297(1/2): 147-155.
- [28] Seregin I V, Kozhevnikova A D. Roles of root and shoot tissues in transport and accumulation of cadmium, lead, nickel and strontium[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2008, 55(1): 1-22.