

Cd胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响

周蛟, 韩盼盼, 潘远智, 邬梦晞, 赵胤, 贾茵, 姜贝贝, 张璐, 徐倩, 刘思丽, 王凯璐, 曾勇

引用本文:

周蛟, 韩盼盼, 潘远智, 等. Cd胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 26–34.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0818>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土壤镉胁迫对龙葵(*Solanum nigrum* L.)幼苗生长及生理特性的影响

刘柿良, 杨容子, 马明东, 蒋潘, 赵燕

农业环境科学学报. 2015(2): 240–247 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.006>

不同形态氮素对龙葵镉毒害的缓解效应

蒋婷, 姜贝贝, 潘远智, 谭淼, 张梦琪, 杨亚男, 刘柿良

农业环境科学学报. 2015(6): 1060–1068 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.007>

镉胁迫对豇豆生长及光合作用相关参数的影响

徐小逊, 董袁媛, 邓玉兰, 霍庆霖, 张世熔, 蒲玉琳

农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1672–1679 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0573>

螯合剂对龙葵修复成都平原Cd污染土壤的影响

黎诗宏, 梁斌, 李忠惠

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1917–1922 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0371>

硫化氢对镉胁迫下大白菜幼苗光合生理的影响

车涛, 张丽萍, 金竹萍, 裴雁曦

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1008–1016 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1417>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周蛟, 韩盼盼, 潘远智, 等. Cd胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 26–34.

ZHOU Jiao, HAN Pan-pan, PAN Yuan-zhi, et al. Effects of cadmium stress on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence in *Solanum nigrum* and *Solanum americanum*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 26–34.



开放科学 OSID

Cd胁迫对两种龙葵光合生理及叶绿素荧光特性的影响

周蛟, 韩盼盼, 潘远智*, 邬梦晞, 赵胤, 贾茵, 姜贝贝, 张璐, 徐倩, 刘思丽,
王凯璐, 曾勇

(四川农业大学风景园林学院, 成都 611130)

摘要:为探究和比较两种不同龙葵对Cd胁迫的光合生理和叶绿素荧光特性响应的差异, 试验以Cd超富集植物龙葵(*Solanum nigrum*)和少花龙葵(*Solanum americanum*)为材料, 于2018年3月采用水培试验, 研究了不同浓度(0、20、80、320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)Cd胁迫对两种龙葵植株形态指标、气体交换参数、叶绿素及叶绿素荧光特性等的影响。结果表明: 不同浓度Cd胁迫显著影响两种龙葵生长, 两者的Cd耐受存在差异。少花龙葵在Cd浓度 $\geq 20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生长受到抑制($P<0.05$); 随Cd浓度增加, 少花龙葵的形态指标、生物量积累、叶绿素含量、叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_s)、PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和PS II潜在活性(F_v/F_0)均较CK显著降低($P<0.05$), 但初始荧光(F_0)、叶绿素a/b有上升趋势; 当Cd浓度 $\geq 80 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 少花龙葵PS II的受损程度加重。龙葵则在Cd浓度 $\geq 80 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时受到生长抑制, 随Cd浓度增加, 龙葵相应指标均呈下降趋势($P<0.05$), 但其形态指标、生物量积累及叶绿素荧光参数等指标的降低范围均小于少花龙葵。此外, Cd胁迫对两种龙葵传能效率的抑制比光能转化效率的抑制更为明显。20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫时, 两种龙葵光合作用主要受气孔因素限制; 80~320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫时, 其光合作用主要受非气孔因素限制。研究表明, Cd胁迫在少花龙葵的生长和光合方面表现出更显著的抑制作用; 受Cd浓度的影响, 两种龙葵光合作用的降低是气孔限制和非气孔限制综合作用的结果。研究进一步从光合生理和叶绿素荧光特性响应方面证明龙葵对Cd胁迫的耐受能力强于少花龙葵。

关键词: Cd胁迫; 龙葵; 少花龙葵; 叶绿素荧光; 光合生理

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)01-0026-09 doi:10.11654/jaes.2020-0818

Effects of cadmium stress on photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence in *Solanum nigrum* and *Solanum americanum*

ZHOU Jiao, HAN Pan-pan, PAN Yuan-zhi*, WU Meng-xi, ZHAO Yin, JIA Yin, JIANG Bei-bei, ZHANG Lu, XU Qian, LIU Si-li, WANG Kai-lu, ZENG Yong

(College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: To study and compare the effects of cadmium (Cd) stress on plant photosynthetic physiology and chlorophyll, Cd hyperaccumulators of *Solanum nigrum* and *Solanum americanum* were selected as materials. A water culture experiment was conducted to observe and analyze their growth and gas exchange parameters, as well as their chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence parameters under different Cd levels (0, 20, 80, and 320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). The results showed that *S. nigrum* and *S. americanum* possessed different Cd tolerance abilities. The growth of *S. americanum* was inhibited when Cd content $\geq 20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P<0.05$) as its morphological

收稿日期: 2020-07-16 录用日期: 2020-08-31

作者简介: 周蛟(1991—), 女, 四川什邡人, 博士研究生, 从事园林植物应用研究。E-mail: tracyzhou66@outlook.com

*通信作者: 潘远智 E-mail: scpyzls@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670622)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31670622)

indicators, biomass, chlorophyll content, net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Ts), the maximum photochemical efficiency (Fv/Fm), and PS II potential activity (Fv/Fo) were all significantly decreased under increasing Cd stress compared with those of the control. However, the Fo and Chla/Chlb values of *S. americanum* increased under Cd stress. Cadmium could destroy the chloroplast structure in *S. americanum* and increase PS II damage at $Cd \geq 80 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. *S. nigrum* growth was inhibited when Cd content was $>80 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, and all *S. nigrum* indices decreased with increasing Cd stress ($P < 0.05$) but with smaller reductions than those observed for *S. americanum* indices. Furthermore, Cd stress inhibited energy transfer efficiency to a greater extent than light energy conversion efficiency. In addition, photosynthesis was mainly influenced by stomatal factors when Cd stress was $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, whereas it was affected by non-stomatal factors when Cd stress was $80 \sim 320 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. In summary, Cd stress showed more obvious inhibitory effects on the growth and photosynthesis of *S. americanum* than on those of *S. nigrum*. The reductions in photosynthesis observed in the two species were the result of the combined effects of stomatal factors and non-stomatal factors. The present study further demonstrated that Cd tolerance was stronger in *S. nigrum* than in *S. americanum* in terms of photosynthetic physiology and chlorophyll fluorescence characteristics.

Keywords: Cd stress; *Solanum nigrum*; *Solanum americanum*; chlorophyll fluorescence; photosynthetic physiology

随着经济社会快速发展,人为释放到环境中的重金属量急剧增加,土壤重金属污染问题十分严峻^[1-3]。据2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》^[4]显示,Cd污染已成为我国土壤最重要和最典型的重金属污染。因Cd对生物的严重危害而使其受到广泛关注^[5]。植物修复技术被公认为是成本低且对环境无二次污染的友好型治理技术,其具有物理、化学修复技术不可比拟的优点:成本低、环保、经济,拥有广阔的市场前景^[6]。

经典的超富集植物理论定义:在Cd污染条件下正常生长,地上部分Cd含量达到 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW的临界值,富集系数(植物地上部金属元素含量/土壤金属元素含量)BCF >1 且转运系数TF >1 的植物为Cd的超富集植物^[7]。植物体内重金属含量会随土壤重金属含量升高而增加,当土壤重金属浓度达到一定浓度时非超富集植物体内重金属含量也可能达到临界值,故富集系数是超富集植物筛选的关键标准之一。龙葵和少花龙葵均为1~2年生草本,都具有生物量大、无性繁殖、适于刈割的特点,对Cd具有较强耐性,是实施土壤重金属修复及棕地改造的优良选择^[8-9]。

研究表明,Cd胁迫能够降低植物蒸腾速率,导致气孔关闭,抑制“钙信号”传递^[10],影响光合速率^[11],抑制植物叶片中叶绿素的生物合成,减少叶绿体数量,使基粒类囊体排列紊乱,影响植物的原初光化学反应和PS II^[11-13],从而引起植物体内一系列生理代谢过程紊乱^[14],最终影响植物生长发育的整个生命过程^[15-16];因此研究Cd对植物光合生理的影响十分重要。同时,由于植物种类、胁迫浓度和胁迫时间的差异,不同植物响应重金属胁迫的过程并不一致。此外,关于限制植物响应Cd胁迫的光合生理关键因素的原因尚不

甚清楚。目前,同时围绕同科属龙葵和少花龙葵的Cd响应研究较少。鉴于此,本试验以龙葵和少花龙葵为研究材料,在水培条件下研究其生长、叶绿素含量、气体交换参数及叶绿素荧光参数等指标对不同浓度Cd胁迫的响应,探讨和比较两种龙葵对Cd胁迫的光合生理及叶绿素荧光特性的差异,以期为Cd污染土壤的修复植物选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

研究发现龙葵(*S. nigrum*)在土壤Cd浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部分茎、叶Cd含量分别为 103 、 $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其生长不受Cd影响且对Cd具有超积累特性,是Cd的超富集植物^[8];少花龙葵(*S. americanum*)在土壤Cd浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上部分茎、叶Cd含量高达 215 、 $251 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但在高于此浓度时其气孔导度和蒸腾速率受到显著抑制,是潜在的Cd超富集植物^[9]。故本试验选用两者为供试材料,同时进行相同水平的胁迫处理,供试种子购于园艺公司。

1.2 试验设计

2018年3月用 $\omega=0.5\%$ NaClO溶液浸泡种子,消毒20 min后用蒸馏水冲洗干净,漂除瘪谷。消毒后的种子,每100粒均匀排列于垫有单层滤纸的直径为9 cm的培养皿中催芽,培养皿置于气候箱中,设置环境温度光照/黑暗为 $23^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$,光照/黑暗时间为14 h/10 h,相对湿度55%~65%,根据培养皿失水情况适当补充蒸馏水,使种子经常处于湿润状态。待植株长出两片子叶时点播至装有完全Hoagland营养液的水培箱内(塑料盆钵6个,每盆4~6株),置于四川农业大学温室大棚中预培养5周,待植株长出四片真叶时进

行间苗,每盆保留3株生长健壮一致、有足量白根的植株。预培养阶段,为保证植株每日营养,营养液每7 d更换1次,营养液连续通气防止烂根,每天用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl或者 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH调pH至6.2~6.3,经常补充塑料盆钵内由于蒸发和植物蒸腾造成的水分损失。

2018年5月在温室大棚内正式进行Cd胁迫试验。向水培箱中加入固体 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$,使营养液中Cd浓度分别为20、80、320 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (分别记为 T_1 、 T_2 、 T_3),以不加Cd为对照CK。试验期间,白天均温(25.0 ± 4.0) $^{\circ}\text{C}$,夜间(18.0 ± 2.0) $^{\circ}\text{C}$;相对湿度白天为(50.2 ± 10.3)%,夜间(55.1 ± 6.2)%。营养液每隔3 d更换一次,保证Cd浓度不变,其他日常管理同预培养阶段一致。

1.3 分析测定方法

1.3.1 生长指标的测定

Cd胁迫2周后,分别收取龙葵和少花龙葵在所有Cd浓度下的植物材料,每处理3次重复,混合取样。用游标卡尺测量主根长、株高并计算单株总叶片数。用蒸馏水将附着于收获植物表面的杂质洗净,然后将根浸入 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA溶液中交换20 min以去除根系表面吸附的Cd,再用去离子水冲洗3次,最后用吸水纸将其表面水分吸干。将植物分为根、茎、叶3部分,在 105°C 烘箱内杀青30 min,然后在 65°C 下烘干至恒质量,称量并计算单株生物量。

1.3.2 气体交换参数的测定

采用Li-6400型便携式光合作用测定仪(LI-COR, Inc, USA)于Cd胁迫2周后的晴天上午9:00—11:00测定植株顶端倒数第5片功能叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)。测定时设定 CO_2 浓度为 $350 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,光照强度为 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,温度 28°C 。为消除观测时间误差对光合测定造成的影响,熟练采取轮回交替的方式测定样本,对龙葵和少花龙葵的4个Cd处理组依次交替完成第一、第二和第三重复测定,每重复记录6个观测值,取其平均值作为测定值。

1.3.3 叶绿素含量的测定

采用分光光度法测定龙葵和少花龙葵叶片的叶绿素a和叶绿素b含量,并计算叶绿素总量及叶绿素a/b。称取两种龙葵鲜叶各 0.100 g ,每处理3次重复,混合取样。用95%的乙醇和丙酮混合液($V/V=1:2$)浸泡过夜(避光、密封),提取液参照Arnon的方法^[17]计算叶绿素含量,计算公式如下:

$$C_a = (12.7A_{663\text{nm}} - 2.69A_{645\text{nm}}) V / (1000W)$$

$$C_b = (22.9A_{645\text{nm}} - 4.68A_{663\text{nm}}) V / (1000W)$$

式中: C_a 、 C_b 分别表示叶绿素a、叶绿素b的含量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW; V 为提取液体积; W 为样品鲜质量。

1.3.4 叶绿素荧光参数的测定

用Li-6400型便携式光合作用测定仪(LI-COR, Inc, USA)荧光叶室测定各处理的叶绿素荧光参数。每个处理选择有代表性的植物幼苗6株,将功能叶充分暗适应30 min后测定初始荧光(F_0)、可变荧光(F_v)、最大荧光(F_m)、PS II最大光能转换效率(F_v/F_m)和PS II潜在活性(F_v/F_0)。

1.4 数据处理

采用SPSS 19.0软件对试验数据进行显著性及Pearson相关性分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)进行不同Cd胁迫差异分析,Duncan法进行多重比较,显著性检验 $\alpha=0.05$,Excel 2007制表做图。

2 结果与分析

2.1 Cd胁迫对两种龙葵生长的影响

研究发现在 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫时,龙葵叶片数目、株高及根长较CK略有增加,但差异不显著($P>0.05$);而少花龙葵各项生长指标均显著降低($P<0.05$)。随着Cd胁迫浓度增大,两种龙葵均出现叶片脱落、植株矮小、根长变短的情况,两种龙葵的各项生长指标均呈下降趋势。与CK相比,Cd胁迫下龙葵叶片数、株高、根长和生物量降低范围分别为10.38%~30.38%、13.59%~23.60%、9.94%~23.91%和45.22%~60.11%,而少花龙葵叶片数、株高、根长和生物量则分别降低22.43%~68.24%、17.55%~47.36%、16.46%~32.11%和56.90%~76.09%,龙葵各项生理指标降低范围显著小于少花龙葵($P<0.05$)。

2.2 Cd胁迫对两种龙葵气体交换参数的影响

与CK相比,随着Cd胁迫浓度的增加,龙葵和少花龙葵的 P_n 、 G_s 、 T_r 均呈下降趋势,且均显著低于各自CK($P<0.05$);与CK相比,龙葵 P_n 值在20、80、320 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的Cd浓度下分别减少了23.73%、32.96%、55.49%,少花龙葵则分别减少了39.39%、71.99%、84.58%,少花龙葵下降幅度明显高于龙葵。在 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd浓度下,龙葵的 G_s 和 T_r 值与CK相比分别降低了35.59%和27.98%,少花龙葵降低了52.20%、53.08%。Cd胁迫下,两种龙葵的 C_i 与其他3组气体交换参数的变化不同,呈现先降后升的趋势,少花龙葵在 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫时 C_i 降低,在中高浓度Cd处理时(80、320 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) C_i 升高,而龙葵仅在

表1 不同浓度Cd胁迫对龙葵和少花龙葵生长指标的影响

Table 1 Effects of different Cd content on growth indexes of *S. nigrum* and *S. americanum*

植物 Plant	处理 Treatments/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	叶片数 Leaf number/(pieces $\cdot\text{plant}^{-1}$)	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	总生物量 Total biomass/(g $\cdot\text{plant}^{-1}$)
龙葵 <i>S. nigrum</i>	0	45.00 $\pm$ 3.27ab	38.26 $\pm$ 2.01a	46.30 $\pm$ 4.22ab	4.60 $\pm$ 0.25a
	20	48.00 $\pm$ 2.94a	39.20 $\pm$ 2.20a	49.93 $\pm$ 1.33a	4.18 $\pm$ 0.31a
	80	40.33 $\pm$ 2.05b	33.06 $\pm$ 1.76b	41.70 $\pm$ 2.42bc	2.52 $\pm$ 0.28b
	320	31.33 $\pm$ 2.62c	29.23 $\pm$ 0.96b	35.23 $\pm$ 3.36c	1.84 $\pm$ 0.32c
少花龙葵 <i>S. americanum</i>	0	35.67 $\pm$ 2.87a	46.73 $\pm$ 1.52a	37.06 $\pm$ 1.67a	5.95 $\pm$ 0.34a
	20	27.67 $\pm$ 2.05b	38.53 $\pm$ 2.08b	30.96 $\pm$ 0.31b	3.43 $\pm$ 0.26b
	80	20.67 $\pm$ 2.49c	34.16 $\pm$ 1.10c	28.63 $\pm$ 0.45b	2.57 $\pm$ 0.21c
	320	11.33 $\pm$ 2.62d	24.60 $\pm$ 1.92d	25.16 $\pm$ 2.19c	1.42 $\pm$ 0.11d

注:表中数值为平均值 $\pm$ 标准差。同列不同小写字母表示同一种植物在不同处理间的差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data are means $\pm$ SD in the table. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments of the same plant ($P<0.05$). The same below.

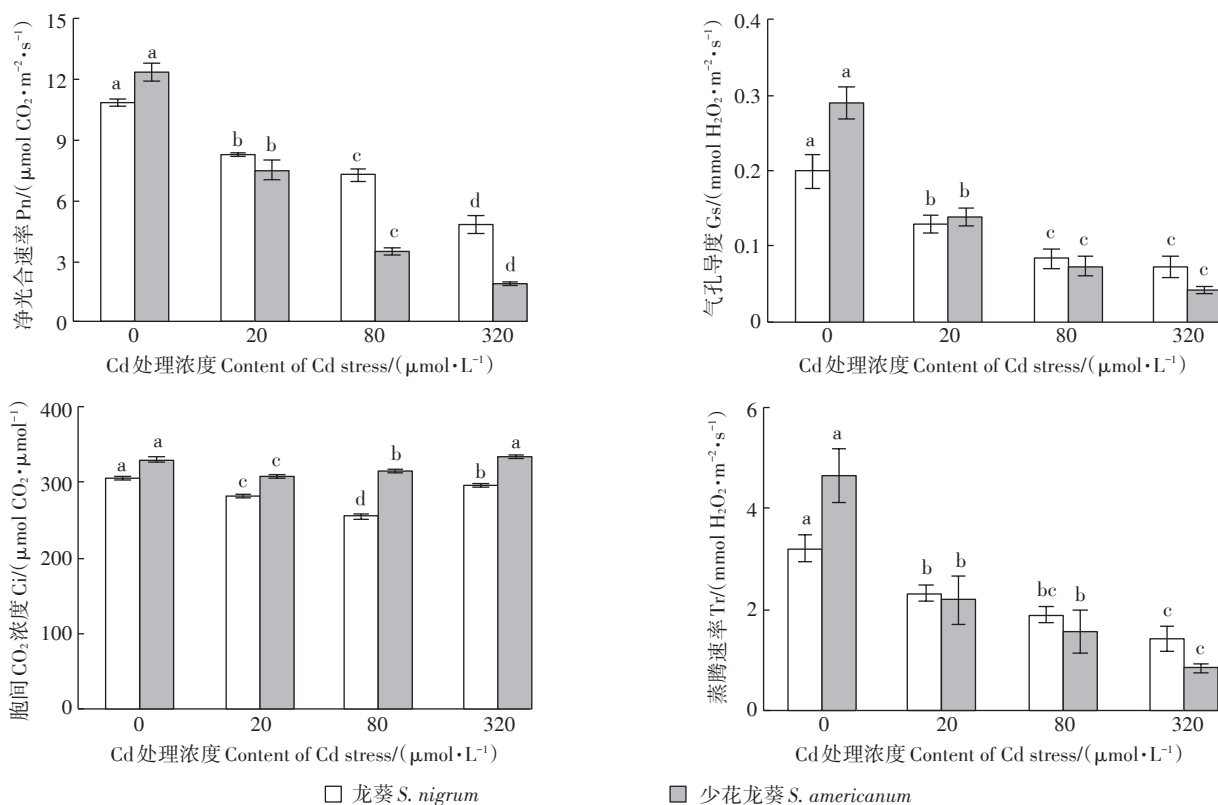


图1 不同浓度Cd胁迫对龙葵和少花龙葵气体交换参数的影响

Figure 1 Effects of different Cd stress on gas exchange parameters of *S. nigrum* and *S. americanum*

320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd处理时升高,且少花龙葵的 C_i 值始终高于龙葵;少花龙葵的 C_i 值对Cd胁迫较为敏感,Cd浓度为20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时少花龙葵有最低 C_i 值,龙葵则在80 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有最低 C_i 值(图1)。

2.3 Cd胁迫对两种龙葵叶绿素含量的影响

由表2可知,随Cd胁迫浓度的增加,龙葵和少花龙葵叶片中叶绿素含量变化呈显著下降的趋势($P<$

0.05),且均在320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理有最低值。但龙葵和少花龙葵的叶绿素a/b值变化趋势不同,仅在Cd $\geq$ 320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,少花龙葵的叶绿素a/b与CK相比有增加趋势($P<0.05$)。Pearson相关性分析表明,两种龙葵的叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量与Cd浓度均呈极显著负相关($P<0.01$,表3),两者的叶绿素合成均受到严重抑制。

表2 不同浓度Cd胁迫对龙葵和少花龙葵叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of different Cd stress on chlorophyll content of *S. nigrum* and *S. americanum*

植物 Plant	处理 Treatments/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	叶绿素a Chlorophyll a/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)	叶绿素b Chlorophyll b/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)	叶绿素总量 Chlorophyll(a+b)/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
龙葵 <i>S. nigrum</i>	0	1.73±0.10a	0.81±0.02a	2.54±0.11a	2.15±0.11a
	20	1.29±0.05b	0.62±0.02b	1.91±0.04b	2.09±0.13a
	80	0.77±0.04c	0.43±0.03c	1.19±0.06c	1.79±0.08b
	320	0.57±0.03d	0.36±0.01d	0.93±0.03d	1.60±0.11b
少花龙葵 <i>S. americanum</i>	0	1.42±0.01a	0.71±0.01a	2.13±0.01a	1.99±0.05b
	20	1.27±0.05b	0.67±0.01b	1.94±0.06b	1.90±0.03b
	80	1.06±0.04c	0.54±0.01c	1.60±0.05c	1.97±0.05b
	320	0.89±0.01d	0.36±0.02d	1.24±0.03d	2.47±0.12a

表3 龙葵和少花龙葵叶绿素含量与Cd浓度的

Pearson相关性分析

Table 3 Pearson correlation between pigment content and Cd content in *S. nigrum* and *S. americanum*

植物 Plant	叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	叶绿素总量 Chlorophyll(a+b)
龙葵 <i>S. nigrum</i>	-0.803**	-0.788**	-0.801**
少花龙葵 <i>S. americanum</i>	-0.891**	-0.963**	-0.941**

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关, **表示在0.01水平(双侧)上显著相关。下同。

Note: * indicates significant correlation at level 0.05 (bilateral), ** indicates significant correlation at level 0.01 (bilateral). The same below.

2.4 Cd胁迫对两种龙葵叶绿素荧光参数的影响

与CK相比,龙葵的 F_0 随Cd胁迫浓度的增加显著降低($P<0.05$),而少花龙葵的 F_0 在Cd胁迫下均高于CK(图2)。两种龙葵的 F_m 都随Cd浓度增加呈显著下降趋势($P<0.05$)(图2)。在Cd胁迫下, F_v/F_m 、 F_v/F_0 与 F_m 变化趋势一致,均呈随Cd胁迫浓度增大而下降的趋势,且在同一Cd浓度下,龙葵的 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 均高于少花龙葵(图2)。此外,两种龙葵 F_v/F_0 的降低幅度均大于 F_v/F_m 。相关性分析(表4)表明,龙葵的 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 及 F_v/F_0 之间都呈极显著正相关关系($P<0.01$),说明其在龙葵应对Cd胁迫中具有相同的适应性;而少花龙葵的 F_0 与 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 之间相关性不显著($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 Cd胁迫对龙葵和少花龙葵生长的影响

生物量是反映植物生长状况最直观的表现,Cd胁迫组与CK组生物量的比较可以一定程度反应植物

对Cd的耐受性,超富集植物能耐受一定程度高浓度重金属胁迫且不表现明显毒害现象^[7]。研究表明,不同浓度Cd胁迫(0、5、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对Cd超富集植物忍冬生物量的积累无显著影响^[18],但高浓度Cd($\text{Cd}\geq 150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)会抑制小报春的生物积累^[3]。本试验中龙葵和少花龙葵的总生物量在Cd胁迫下均显著下降($P<0.05$,表1),物种和试验条件是造成差异的主要原因。同一胁迫浓度下Cd对少花龙葵生物量的抑制作用较龙葵更强,说明在生物量积累方面龙葵更耐受Cd胁迫。这可能是受根系活性的影响^[19]:根系是植物最早接触土壤重金属污染的器官,重金属胁迫能影响植物的主根伸长和侧根发生,胁迫效果与重金属浓度和植物种类相关^[20-21],如研究表明Cd胁迫会抑制小麦根细胞的分裂及伸长^[22]。本研究中少花龙葵形态指标表明,在Cd浓度为20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时其生长已经受到抑制,而此时龙葵生长较CK有所增加;Cd浓度为80、320 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,两种龙葵均出现株高、根长降低的情况;Cd对龙葵和少花龙葵根系的毒害可能是主要原因。20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd对龙葵生长并未产生显著影响($P>0.05$),表明龙葵对Cd的耐性强于少花龙葵。植物根长的降低将直接导致养分吸收不足,间接影响植物地上部的生长(表1)。脱落酸(ABA)除促进叶片掉落外还能响应逆境胁迫,研究发现ABA的增加能够减轻Cd胁迫对胡杨的毒害^[23];本试验中Cd胁迫导致两种龙葵都出现叶片大量脱落的情况,少花龙葵的叶片数目比龙葵下降幅度大(表1),这可能是由于少花龙葵合成了更多的ABA以减轻Cd胁迫造成的伤害。在整个胁迫过程中,龙葵各形态指标受抑制情况均小于少花龙葵,说明在生长方面,龙葵对Cd胁迫的耐受强度高于少花龙葵。

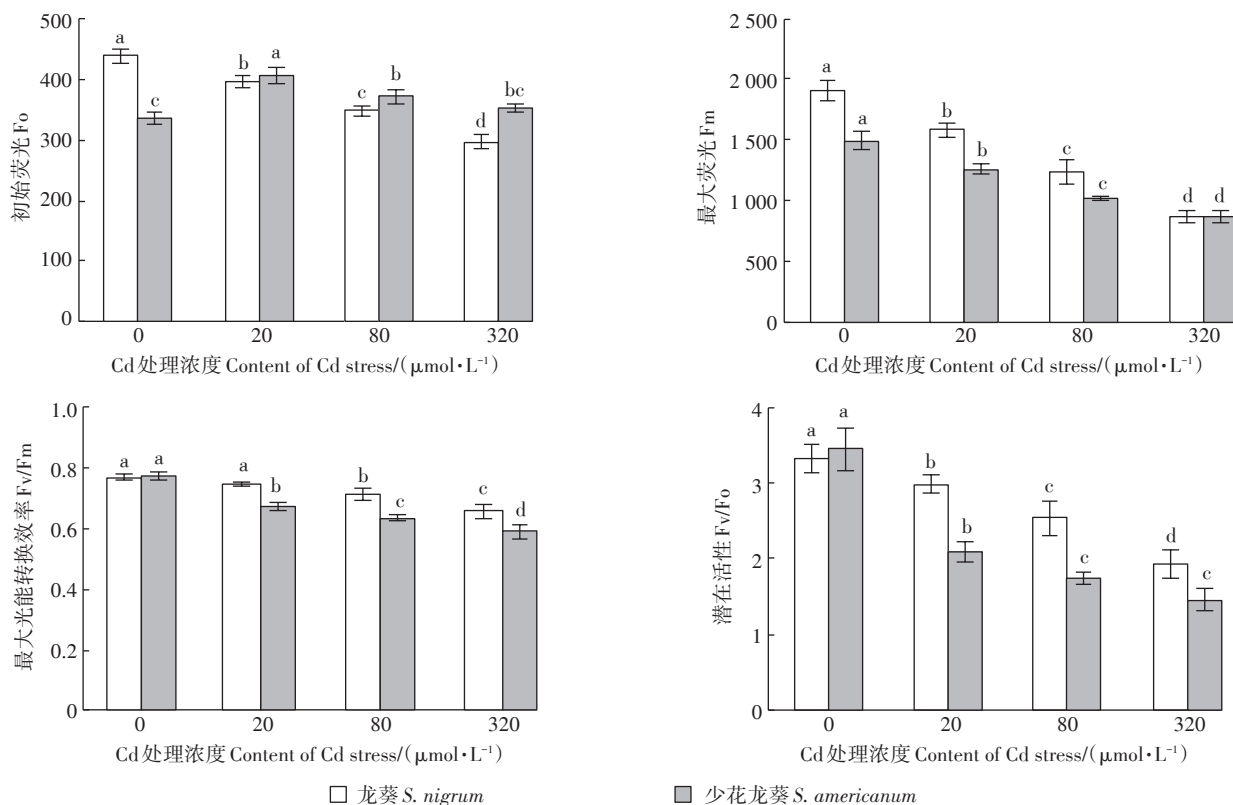


图2 不同浓度Cd胁迫对龙葵和少花龙葵叶绿素荧光参数的影响

Figure 2 Effects of different Cd content on chlorophyll fluorescence parameters of *S. nigrum* and *S. americanum*

表4 龙葵和少花龙葵叶绿素荧光参数间的相关性

Table 4 Correlation between chlorophyll fluorescence parameters of *S. nigrum* and *S. americanum*

植物 Plant	指标 Indexes	初始荧光 F_o	最大荧光 F_m	最大光能转换效率 F_v/F_m	潜在活性 F_v/F_o
龙葵 <i>S. nigrum</i>	F_o	1	0.961**	0.863**	0.857**
	F_m		1	0.954**	0.963**
	F_v/F_m			1	0.989**
	F_v/F_o				1
少花龙葵 <i>S. americanum</i>	F_o	1	0.188	-0.075	-0.196
	F_m		1	0.960**	0.924**
	F_v/F_m			1	0.988**
	F_v/F_o				1

3.2 Cd胁迫对龙葵和少花龙葵气体交换参数的影响

一般认为,导致光合作用降低的因子包括气孔限制和非气孔限制, C_i 的大小是评判气孔限制和非气孔限制的依据^[24]。当 P_n 、 G_s 和 C_i 值三者同时降低时,光合作用受气孔限制影响;当叶片 P_n 的降低伴随着 C_i 值的升高,则可认为光合作用受非气孔限制的影响^[3]。对不同植物的研究发现其限制因子并不一致:如Cd胁迫下富集植物小报春和黄麻的光合速率下降受非气孔限制^[25];超富集植物圆叶锦葵的光合速率则

受气孔和非气孔复合限制^[1,13]。本试验中,随Cd胁迫浓度的增加,龙葵和少花龙葵的 P_n 和 G_s 均呈降低趋势, C_i 值则呈先降后升的趋势(图1):说明20 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫下 G_s 的降低是引起两种龙葵光合作用减弱的主要原因;随Cd胁迫浓度增大, C_i 反而升高,这说明此时主要是非气孔因素(扩散限制或生化限制)阻碍光合^[26],其限制部位可能主要位于叶肉细胞^[24]。以上结果表明Cd胁迫对两种龙葵光合作用的限制因素与Cd胁迫浓度有关,是受气孔和非气孔复合限制;

但唐星林等^[27]认为Cd胁迫下非气孔限制是影响龙葵光合的主要因素,Cd浓度设置及胁迫时长可能是造成研究差异的主要原因。此外,Gs和Tr均与植物组织的水分状况有关,受气孔开闭的影响和制约。本试验中,不同浓度Cd胁迫后,两种龙葵的叶片Tr均减小,Gs、Pn与Tr表现出相同受抑制趋势,这说明水分可能是影响两种龙葵在Cd胁迫下叶Gs下降的主要原因,也可能是由于Cd引起叶片ABA水平增加而导致了气孔关闭^[23]。即使在较低浓度($20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)Cd胁迫下,少花龙葵的Gs和Tr的降幅也大于龙葵(图1),说明少花龙葵在气体交换参数方面对Cd胁迫的反应较龙葵更敏感。

3.3 Cd胁迫对植物叶绿素和叶绿素荧光特性的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础^[13]。研究表明Cd胁迫会影响植物叶片中叶绿素的合成,并降低其含量^[12]。研究表明多种超富集植物如东南景天^[28]、天蓝遏蓝菜^[29]等在Cd胁迫下均出现叶绿素合成受抑、叶绿素含量降低的情况。本试验中,两种龙葵的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量均与Cd胁迫浓度呈极显著负相关($P<0.01$)(表3),这与对超富集植物圆锥南芥^[30]和圆叶锦葵^[15]的研究结果一致。Cd胁迫下植物叶绿素含量明显减少可能有两个原因:其一,由于Cd与叶绿体中多种酶的巯基(—SH)结合,导致叶绿体的结构和功能受到破坏,加速叶绿体解体,致使叶绿素降解^[12]。其二,Cd胁迫抑制了第二信使 Ca^{2+} 的非生物逆境信号转导^[31];在外界环境胁迫刺激下, Ca^{2+} 积极响应胁迫信号,通过钙离子通道和钙载体蛋白的转运使胞质 Ca^{2+} 浓度增加,以与钙调蛋白(CAM)结合的方式等将外界刺激转化为植物感知信号,启动下游蛋白质磷酸化或去磷酸化的响应,调节包括光合作用、光形态建成和氧化应激等系列生理过程;当逆境信号传导过程完成后,通过跨膜运输系统(如 Ca^{2+} -ATPase和 $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^{+}$ 反向传递体等)将胞质内过量的 Ca^{2+} 排出或在贮 Ca^{2+} 体中存储,以维持胞质 Ca^{2+} 稳态^[10,32]。但由于 Cd^{2+} 和 Ca^{2+} 的相似性, Cd^{2+} 会与 Ca^{2+} 竞争离子通道和载体蛋白^[33],影响胞质 Ca^{2+} 的输入输出,而植物胞质 Ca^{2+} 浓度的改变是钙信使传导过程的中心环节,故Cd胁迫会阻碍 Ca^{2+} 信号传递,影响氧化应激和叶绿素合成,从而影响光合;此外由于过量的 Ca^{2+} 和 Cd^{2+} 积累于胞质,渗透调节作用使得叶绿体等结构肿胀破裂而失去生理功能^[34]。Woolhouse^[35]认为,随着叶片的衰老,叶绿素a会比叶绿素b下降得更快,叶绿素a/b可作为叶片衰老的指标。本试验中,Cd胁迫下龙葵

叶片中叶绿素a/b随Cd浓度增大逐渐降低,说明Cd胁迫加速了龙葵叶片的老化;少花龙葵在 $320\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd处理时其叶绿素a/b值较CK显著提高($P<0.05$),这可能是重金属破坏了少花龙葵叶绿体结构,说明少花龙葵叶片中叶绿素b对Cd胁迫更加敏感(表2)。

叶绿素荧光参数是评价植物生理变化和光能利用的一种较好检测方法^[10,36]。Fo可以反映PSⅡ的受损程度,Fm则可反映电子的传递情况,Fv/Fm可以反映PSⅡ光能转换效率,Fv/Fo值反映PSⅡ捕获激发能的传能效率。研究发现,Cd胁迫下银牙柳Fv/Fm下降的主要原因是热耗散的增加和最大光能转换效率的降低,热耗散又将导致Fo的降低^[37]。本试验中,龙葵的Fo随Cd浓度降低可能就是热耗散增加所致(图2)。但植物体内光能过剩会使PSⅡ反应中心受到破坏,Fo反而升高,这可能是试验中少花龙葵Fo高于CK的原因;此外,少花龙葵叶绿素荧光参数间的相关性不显著也进一步表明其PSⅡ反应中心可能受到了破坏失活(表4),这与Cd胁迫下苎麻^[25]的研究结果一致。本研究中,Cd胁迫下龙葵和少花龙葵的Fv/Fo与Fv/Fm都显著下降,且Fv/Fo的下降幅度更大,这说明两者叶片PSⅡ的最大光化学效率和从天线色素到PSⅡ反应中心的传能效率均明显受到Cd胁迫的影响,且Cd胁迫对其传能效率的抑制更明显,这与高桂青等^[38]对马来眼子菜的研究相似;Cd很有可能通过影响水裂解端的电子流而影响了PSⅡ的活性,从而导致光抑制现象。研究结果进一步说明,龙葵在应对Cd胁迫对光合作用伤害能力方面要优于少花龙葵。

4 结论

(1)龙葵和少花龙葵对Cd的耐受性存在差异。Cd胁迫显著抑制两种龙葵形态生长、光合生理和叶绿素荧光指标,但是龙葵受抑制程度均小于少花龙葵。说明龙葵在光合生理和叶绿素荧光特性方面对Cd胁迫有更强的耐受性。

(2)受不同Cd浓度影响,两种龙葵光合作用的降低是气孔限制和非气孔限制综合作用的结果。

参考文献:

- [1] Wu M, Luo Q, Liu S, et al. Screening ornamental plants to identify potential Cd hyperaccumulators for bioremediation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162:35-41.
- [2] 赵胤, 龙月, 潘远智, 等. 蜀葵-胶质芽孢杆菌联合修复土壤镉污染[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5):1026-1033. ZHAO Yin, LONG

- Yue, PAN Yuan-zhi, et al. Remediation of cadmium contamination in soil by *Althaea rosea*-*Bacillus mucilaginosus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5):1026-1033.
- [3] 贾茵, 刘才磊, 兰晓悦, 等. 镉胁迫对小报春幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(3):454-462. JIA Yin, LIU Cai-lei, LAN Xiao-yue, et al. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Primula forbesii* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(3):454-462.
- [4] 中华人民共和国环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部, 2014. Ministry of Environmental Protection of PRC, Ministry of Land and Resources of PRC. Bulletin of national survey on soil pollution[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of PRC, Ministry of Land and Resources of PRC, 2014.
- [5] Carvalho M, Castro P, Azevedo R, et al. Hormesis in plants under Cd exposure: From toxic to beneficial element? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384:121434.
- [6] Ali H, Khan E, Sajad M. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7):869-881.
- [7] Baker A, Brooks R, Pease A, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from zaïre[J]. *Plant and Soil*, 1983, 73(3):377-385.
- [8] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24):2568-2573. WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. A newly discovered cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24):2568-2573.
- [9] Zhang X, Xia H, Zhuang P, et al. Identification of a new potential Cd-hyperaccumulator *Solanum photeinocarpum* by soil seed bank-metal concentration gradient method[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 189(1/2):414-419.
- [10] Wilkins K, Matthus E, Swarbreck S, et al. Calcium-mediated abiotic stress signaling in roots[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(8):1296-1313.
- [11] 铁得祥, 胡红玲, 喻秀艳, 等. 桢楠幼树光合特性对镉胁迫的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(11):3738-3746. TIE De-xiang, HU Hong-ling, YU Xiu-yan, et al. Responses of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Phoebe zhennan* saplings to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11):3738-3746.
- [12] 张帆, 万雪琴, 翟晶. 镉处理下增施氮对杨树叶绿素合成和叶绿体超微结构的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(3):485-491. ZHANG Fan, WAN Xue-qin, ZHAI Jing. Effects of nitrogen supplement on chlorophyll synthesis and chloroplast ultrastructure of poplar plants under cadmium stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(3):485-491.
- [13] 罗巧, 邹梦晔, 龙月, 等. 圆叶锦葵对 Cd 处理的光合生理响应及 Cd 富集特征[J]. 核农学报, 2019, 33(7):1415-1422. LUO Qiao, WU Meng-xi, LONG Yue, et al. Changes in photosynthesis and Cd accumulation characteristic of *Malva pusilla* Smith under different concentrations of Cd[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(7):1415-1422.
- [14] Rui H, Chen C, Zhang X, et al. Cd-induced oxidative stress and lignification in the roots of two *Vicia sativa* L. varieties with different Cd tolerances[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301(1):304-313.
- [15] Wu M, Luo Q, Zhao Y, et al. Physiological and biochemical mechanisms preventing Cd toxicity in the new hyperaccumulator *Abelmoschus manihot*[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37(3):709-718.
- [16] 顾翠花, 王懿祥, 白尚斌, 等. 四种园林植物对土壤镉污染的耐受性[J]. 生态学报, 2015, 35(8):2536-2544. GU Cui-hua, WANG Yi-xiang, BAI Shang-bin, et al. Tolerance and accumulation of four ornamental species to contamination[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8):2536-2544.
- [17] Arnon D. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1):1-15.
- [18] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬——一种新发现的镉超富集植物[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4):666-670. LIU Zhou-li, HE Xing-yuan, CHEN Wei. *Lonicera japonica* Thunb.: A newly discovered Cd hyper-accumulator[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4):666-670.
- [19] 刘俊, 廖柏寒, 周航, 等. 镉胁迫下大豆生长发育的生理生态特征[J]. 生态学报, 2010, 30(2):333-340. LIU Jun, LIAO Bo-han, ZHOU Hang, et al. Main characteristics of physiological-ecological dynamics of soybean during the growth cycle under Cd stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):333-340.
- [20] 冯汉青, 杜变变, 王庆文, 等. 镉胁迫下活性炭对小麦幼根的保护作用[J]. 生态学报, 2016, 36(10):2962-2968. FENG Han-qing, DU Bian-bian, WANG Qing-wen, et al. The role of activated carbon in protecting the roots of wheat seedlings under cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10):2962-2968.
- [21] 刘媛, 马文超, 张雯, 等. 镉胁迫对秋华柳根系活力及其 Ca, Mg, Mn, Zn, Fe 积累的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4):1109-1115. LIU Yuan, MA Wen-chao, ZHANG Wen, et al. Effect of cadmium stress on root vigor and accumulation of elements Ca, Mg, Mn, Zn, Fe in *Salix variegata*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4):1109-1115.
- [22] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同耐性水稻幼苗根系对 Cd 胁迫的形态及生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2):522-528. HE Jun-yu, REN Yan-fang, WANG Yang-yang, et al. Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2):522-528.
- [23] Han Y, Wang S, Zhao N, et al. Exogenous abscisic acid alleviates cadmium toxicity by restricting Cd²⁺ influx in *Populus euphratica* cells[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2016, 35(3):827-837.
- [24] 高会玲, 刘金隆, 郑青松, 等. 外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应[J]. 生态学报, 2013, 33(6):1935-1943. GAO Hui-ling, LIU Jin-long, ZHENG Qing-song, et al. Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2013, 33(6):1935-1943.

- [25] 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. DONG Yuan-yuan, SUN Zhu, YANG Yang, et al. Effect of cadmium of photosynthesis and Cd accumulation of *Corchorus capsularis* L.[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8): 1640–1646.
- [26] 简敏菲, 杨叶萍, 余厚平, 等. 不同浓度 Cd^{2+} 胁迫对苧麻叶绿素及其光合荧光特性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1331–1338. JIAN Min-fei, YANG Ye-ping, YU Hou-ping, et al. Influences of different cadmium concentration stress on chlorophyll and its photosynthetic fluorescence characteristics of ramie (*Boehmeria nivea*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1331–1338.
- [27] 唐星林, 金洪平, 周晨, 等. 镉胁迫对龙葵叶绿素荧光和光合生化特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(9): 102–108. TANG Xing-lin, JIN Hong-ping, ZHOU Chen, et al. Effects of cadmium stress on chlorophyll fluorescence and photosynthetic biochemical characteristics in leaves of *Solanum nigrum* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(9), 102–108.
- [28] Li T Q, Qi T, Di Z Z, et al. Effect of elevated CO_2 concentration on photosynthetic characteristics of hyperaccumulator *Sedum alfredii* under cadmium stress[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2015, 57(7): 653–660.
- [29] Baycu G, Gevrek K, Moustaka J, et al. Cadmium-zinc accumulation and photosystem II responses of *Noccaea caerulea* to Cd and Zn exposure[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(3): 2840–2850.
- [30] 于方明, 汤叶涛, 仇荣亮, 等. Cd胁迫下超富集植物圆锥南芥抗氧化机理[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 409–414. YU Fang-ming, TANG Ye-tao, QIU Rong-liang, et al. Antioxidative responses to cadmium stress in the hyperaccumulator *Arabis paniculata* Franch[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 409–414.
- [31] Thor K. Calcium: Nutrient and messenger[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10(4): 440–447.
- [32] 贾如, 雷梦琦, 徐佳妮, 等. 植物细胞中钙通道的分布及其在植物抗逆机制中作用的研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(12): 1791–1800. JIA Ru, LEI Meng-qi, XU Jia-ni, et al. Research progress of Ca^{2+} channel and the effect of Ca^{2+} on plant resistance mechanism in plant cells[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(12): 1791–1800.
- [33] Sarwar N, Malhi S, Zia M, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(6): 925–937.
- [34] 李春辉, 丁国华, 刘保东. 重金属影响植物细胞超微结构和功能的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(18): 114–118. LI Chun-hua, DING Guo-hua, LIU Bao-dong. Research progress of heavy metal affecting plant cell ultrastructure and function[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(18): 114–118.
- [35] Woolhouse N. Longevity and senescence in plants[J]. *Science Progress*, 1974, 61(241): 123–147.
- [36] 崔倩, 夏江宝, 刘京涛, 等. 生物炭和EM菌对黄河三角洲盐碱地田菁生长和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3101–3110. CUI Qian, XIA Jiang-bao, LIU Jing-tao, et al. Effects of biochar and EM application on growth and photosynthetic characteristics of *Sesbania cannabina* in saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 3101–3110.
- [37] 钱永强, 周晓星, 韩蕾, 等. Cd^{2+} 胁迫对银芽柳PS II叶绿素荧光光响应曲线的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6134–6142. QIAN Yong-qiang, ZHOU Xiao-xing, HAN Lei, et al. Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Salix leucopurpurea* subjected to cadmium-ion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6134–6142.
- [38] 高桂青, 简敏菲, 卢龙, 等. Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫对马来眼子菜光合色素及光合荧光特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3): 517–523. GAO Gui-qing, JIAN Min-fei, LU Long, et al. Effects of Cu^{2+} or Cd^{2+} stress on photosynthetic pigment and photosynthetic fluorescence characteristics of *Potamogeton malaianus* [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(3): 517–523.