

铅胁迫对洋常春藤叶绿素荧光特性的影响

匡经舸, 李琬婷, 李响, 程小毛, 黄晓霞

(西南林业大学 园林园艺学院, 国家林业与草原局西南风景园林工程技术研究中心, 云南 昆明 650224)

摘要: 以洋常春藤 *Hedera helix* 扦插幼苗为材料, 采用不同浓度 (0, 50, 200, 400, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 溶液进行处理, 通过测定其叶片叶绿素含量、叶绿素荧光参数的变化, 探讨洋常春藤对重金属铅胁迫的抗逆性。结果表明, 与对照相比, 铅胁迫使洋常春藤叶片叶绿素含量显著下降 ($P < 0.05$), 叶绿素 a/b 比值增加; 与对照相比, Pb_2 和 Pb_3 (200 和 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 即中度铅胁迫下, 洋常春藤叶片初始荧光 (F_0) 和非光化学猝灭系数 (qN) 显著上升 ($P < 0.05$), 光系统 PSII 实际光合效率 ($Yield$)、光化学猝灭系数 (qP) 以及光合电子传递速率 (ETR) 显著下降 ($P < 0.05$), 而 PSII 最大光化学效率 (F_v/F_m) 无显著变化; 在重度铅胁迫 Pb_4 (800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 下, F_0 及 qN 显著上升 ($P < 0.05$), 其余指标均显著下降 ($P < 0.05$)。相关性研究表明, 铅胁迫使得洋常春藤叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 极显著正相关; 其 qP 与 ETR 极显著正相关, 且两者与 $Yield$ 均极显著正相关。研究发现, 轻度铅胁迫 Pb_1 (50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 虽使得洋常春藤叶绿素含量下降, 但对其 PSII 无明显影响, 中度铅胁迫对洋常春藤 PSII 有一定的影响, 而重度铅胁迫会导致其 PSII 明显的损伤。

关键词: 洋常春藤; 铅胁迫; 光合色素; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S687.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2020)05-0001-06

Stress of Different Concentration of Lead on Chlorophyll Fluorescence Properties of *Hedera helix*

KUANG Jing-ge, LI Wan-ting, LI Xiang, CHENG Xiao-mao, HUANG Xiao-xia

(College of Landscape Architecture and Horticulture, Southwest Landscape Architecture Engineering Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In April 2016, half lignification *Hedera helix* branches were harvested for cutting in Kunming, Yunnan province. In June of the current year, cuttings were treated by different concentrations of Pb^{2+} (0 as CK, 50, 200, 400, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). 60 days later, determinations were implemented on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameter of cuttings. The result showed that compared with the control, seedlings treated by different concentration of lead had significant low content of chlorophyll content, higher chlorophyll a/b. Under 200 and 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of lead stress, minimal fluorescence (F_0), non-photo chemical quenching coefficient (qN) of seedlings increased significantly, while yield, photo chemical quenching coefficient (qP), and apparent photosynthetic electron transport rate (ETR) decreased evidently, photochemical efficiency of PS II in the light (F_v/F_m) had no evident change. Less than 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of lead stress, F_0 and qN increased sharply, and the left index decreased evidently. Correlation analysis demonstrated that chlorophyll a had extreme significant relation with chlorophyll b, as well as qP with ETR , both qP and ETR with yield under any lead stress. The experiment concluded that 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of lead stress could decreased chlorophyll content, but had no evident effect on PSII, 200 and 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of lead stress had effect on PSII, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of lead stress had great effect.

Key words: *Hedera helix*; lead stress; photo synthetic pigment; chlorophyll fluorescence parameter

收稿日期: 2020-03-22; 修回日期: 2020-07-16

基金项目: 云南省应用基础上项目 (2010ZC264); 西南林业大学科技创新基金项目 (C16109)

作者简介: 匡经舸, 硕士研究生, 从事城市林业研究; E-mail: 471060224@qq.com。通信作者: 黄晓霞, 博士, 副教授, 从事园林植物生理生态研究; E-mail: huangxx@swfu.edu.cn。

在工业化、城市化的大背景下,铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)等重金属不仅污染环境,并严重威胁着动植物的生存。重金属的生物毒性可改变植物细胞质膜的通透性,破坏其功能和结构,导致重金属离子更容易进入细胞,导致质膜上的酶活性紊乱,膜系统通透性加大,各种代谢活动无法正常进行^[1]。为降低重金属胁迫伤害,植物启动自身抗氧化酶系统及渗透调节系统^[2],积极利用自身调节机制在细胞内外形成螯合肽、金属硫蛋白等来减少重金属的毒害作用^[3]。随着重金属离子浓度的增加,植物的光合作用电子传递受阻,叶绿体被破坏,植物叶绿素含量显著降低,进而导致叶片光合速率下降,同化物合成受阻,加速细胞衰老,严重时甚至会影响植物信息传导途径,导致蛋白功能降低,蛋白质合成趋于停顿,导致植株生长受阻^[4-5]。叶绿素含量与叶绿素荧光参数是反映植物生理状况的重要指标,叶绿素吸收光能后,能迅速地发生氧化还原反应变化,将光能直接转化为化学能,推动有机物的合成。

洋常春藤 *Hedera helix* 为五加科 Araliaceae 常春藤属 *Hedera* 多年生常绿缠绕类藤本植物,又名英国常春藤,既有观赏价值^[6-7],也具药用功能^[8],原产欧洲,目前国内种植十分广泛,在中国主要分布于福建省和湖北省等光照充足、温暖湿润地区。洋常春藤叶形优美,攀岩能力强,可应用于庭院垂直绿化^[9],阳台走廊绿化及地被应用^[10-11],其叶片上的气孔能吸收尼古丁、甲醛等有害物质,可盆栽于室内,达到净化空气,绿化空间的目的^[12-13]。此外,因含有皂苷类化合物,常春藤具有一定的药用价值。目前有关洋常春藤的研究主要集中于园林绿化、药用等^[14-15]方面,而关于洋常春藤抗性生理方面的研究还未见报道。研究洋常春藤的耐性生理,对改善环境以及提高洋常春藤的综合利用价值具有深远意义。本试验以洋常春藤幼苗为材料,设计不同浓度的铅胁迫处理,通过测定洋常春藤叶片叶绿素含量和叶绿素荧光参数,旨在阐明洋常春藤光系统 PSII 对不同铅胁迫的响应,以期了解洋常春藤对铅污染的适应能力,为重金属污染背景下的植物修复和保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验设计

于 2016 年 4 月中旬,在洋常春藤生长旺季进行试验。试验材料取自云南省昆明市西南林业大学老校区后山苗木基地(25°06' N, 102°76' E),年平均气温为 15℃,相对湿度为 74%,土壤类型为红壤,质地为黏土,从中选取长势良好,生长状况基本一致的洋常春藤,将半木质化枝条修剪成 10 cm 长的插穗进行扦插。扦插基质为红土:珍珠岩:腐殖土=1:1:2(体积比)。待扦插苗生长势稳定后,带回实验室。

于 6 月将长势一致,生长状况良好的扦插苗放入装有 MS 培养基的水培瓶中培养。本试验共设 5 个不同浓度的 Pb(CH₃COO)₂ 溶液处理组:对照(CK)浓度为 0 μmol·L⁻¹,轻度胁迫浓度为 50 μmol·L⁻¹(Pb₁),中度胁迫浓度为 200 μmol·L⁻¹(Pb₂)和 400 μmol·L⁻¹(Pb₃),重度胁迫浓度为 800 μmol·L⁻¹(Pb₄)。每个处理组 10 瓶,每瓶一株。所有幼苗放入人工气候箱中培养,每天光照 12 h(光强≥56.6 μmol·m⁻²·s⁻¹),温度(白天/晚上)为 25℃/20℃,湿度 80%。供试材料铅胁迫处理时间为 2016 年 6 月 15 日至 8 月 14 日,共 60 d。处理结束后,于 8 月 15 日将叶片完全展开的并处于同一高度的叶片作为叶绿素含量和叶绿素荧光参数测定材料。

1.2 试验方法

1.2.1 叶绿素含量的测定 叶绿素含量测定:参照 Inskeep and Bloom 的方法,称取 0.3 g 植物新鲜叶片,剪碎,用 4℃的二甲基甲酰胺在黑暗环境下浸提 72 h,采用分光光度法于 663.8 和 646.8 nm 波长下进行比色。计算单位叶片质量的叶绿素 a、叶绿素 b 的含量,并计算总叶绿素(叶绿素 a+b)以及叶绿素 a/b。

1.2.2 叶绿素荧光参数的测定 将待测试验苗暗处理 3 h 后,采用 Imaging-PAM 便携式调制叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光参数。利用叶夹夹住洋常春藤叶片,设置测量光强为 0.5 μmol·m⁻²·s⁻¹,饱和光脉冲为 2 700 μmol·m⁻²·s⁻¹,脉冲时间 0.8 s,作用光照强度为 76 μmol·m⁻²·s⁻¹。初始荧光(F₀),PSII 最大光化学效率(F_v/F_m),PSII 实际光合效率(Yield),非光化学猝灭系数(qN),光化学猝灭系数(qP)和 PS 域非循环光合电子传递速率(ETR)等叶绿素荧光参数均由仪器自动给出。试验植株测试之前应经充分暗适应(20~30 min),测量时应避免叶片的主脉位于叶室打光的中部,每个处理至少 5 个重复。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 和 SPSS 22.0 软件进行数据处理并做相关性分析, 采用 Duncan's 进行多重比较 ($\alpha=0.05$), 采用 Origin 9.1 软件作图。图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫对洋常春藤叶绿素含量的影响

由表 1 可知, 与 CK 相比, 洋常春藤叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量在铅胁迫下均显著下降趋势 ($P < 0.05$), 但不同浓度铅胁迫处理间的差异较小; 与 CK 相比, 在 Pb₄ 胁迫处理下叶绿素 b 含量下降了 43%, 比叶绿素 a 含量下降 (32%) 更为明显, 这使得叶绿素 a/b 在 Pb₄ 胁迫处理下显著高于 CK ($P < 0.05$), 而该指标在 Pb₁, Pb₂ 和 Pb₃ (50, 200 和 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫处理间并无显著差异。

表 1 铅胁迫对洋常春藤叶绿素含量的影响
Table 1 Effect of different concentration of lead stress on the content of chlorophyll in *H. helix*

处理	叶绿素 a/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	叶绿素 b/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	总叶绿素/ $(\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	叶绿素 a/b
CK	2 443.30 \pm 265.27c	879.92 \pm 95.72c	3 323.22 \pm 348.48c	2.78 \pm 0.19a
Pb ₁	1 840.44 \pm 111.62a	712.90 \pm 78.45b	2 553.35 \pm 143.02b	2.60 \pm 0.30a
Pb ₂	1 455.52 \pm 241.63a	515.85 \pm 76.90a	1 971.37 \pm 318.20a	2.82 \pm 0.06a
Pb ₃	1 479.19 \pm 262.81a	529.96 \pm 55.77a	2 009.15 \pm 317.75a	2.77 \pm 0.23a
Pb ₄	1 662.07 \pm 336.17a	501.31 \pm 95.03a	2 163.38 \pm 427.45ab	3.31 \pm 0.21b
P	0.000***	0.000***	0.000***	0.004**

注: P 值行中的**表示差异显著; ***表示差异极显著; 同一列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著; 下同。

2.2 铅胁迫对洋常春藤 F_0 和 F_v/F_m 的影响

由图 1A 可以看出, 洋常春藤幼苗受不同浓度铅胁迫后, 随着铅胁迫浓度的增加其 F_0 值整体上有所增加。与 CK 相比, F_0 值在 Pb₁ 胁迫下无显著变化 ($P > 0.05$), 在 Pb₂, Pb₃ 和 Pb₄ 胁迫下显著上升 ($P < 0.05$), 但 3 个处理组间无显著差异。此外, 由图 1B 可知, 洋常春藤叶片的 F_v/F_m 在 Pb₁, Pb₂, Pb₃ 胁迫下有所上升, 但与 CK 之间均无显著差异 ($P > 0.05$), 而在 Pb₄ 胁迫下其 F_v/F_m 显著下降 ($P < 0.05$), 其 F_v/F_m 由 CK 的 0.72 降至 0.66。

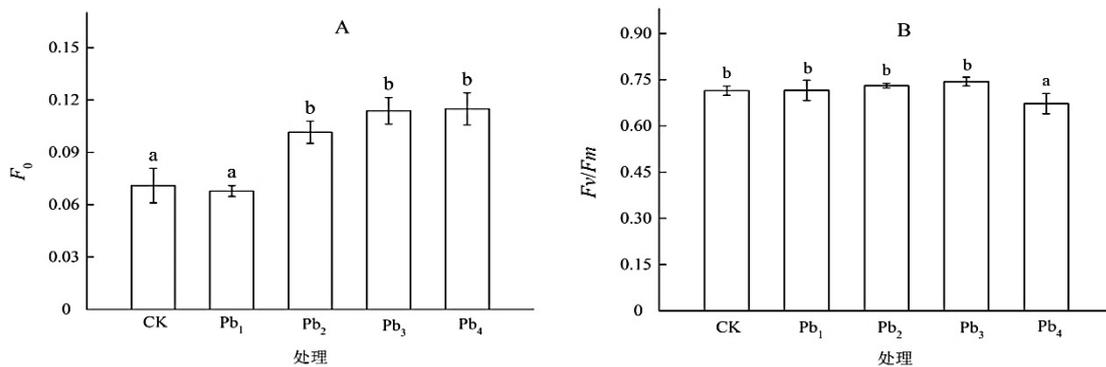


图 1 铅胁迫对洋常春藤叶片 F_0 和 F_v/F_m 的影响

Figure 1 Effect of different concentration of lead stress on initial fluorescence and the maximum photochemical efficiency of PSII in *H. helix*

2.3 铅胁迫对洋常春藤叶片 qN , qP 和 $Yield$ 和 ETR 的影响

由表 2 可看出, 与 CK 相比, 铅胁迫对洋常春藤叶片的 qN , qP , $Yield$ 以及 ETR 均有不同程度的影响。在轻度铅胁迫下, 植株的 qN , qP , $Yield$ 以及 ETR 与 CK 相比均无显著差异; 而在中度和重度铅胁迫下, 植株的 $Yield$, qP 和 ETR , 随着铅浓度的增加而呈下降趋势, qN 却呈上升的趋势, 在重度铅胁迫时高出 CK 15.7%。

表 2 铅胁迫对洋常春藤叶片 *Yield*, *qN*, *qP* 和 *ETR* 的影响
Table 2 Effect of different concentration of lead stress on *Yield*, *qN*, *qP* and *ETR* of *H. helix*

处理	<i>Yield</i>	<i>qN</i>	<i>qP</i>	<i>ETR</i>
CK	0.278 4±0.027 1b	0.741 0±0.026 6a	0.545 8±0.077 0a	12.86±1.27b
Pb ₁	0.279 6±0.023 1b	0.749 0±0.103 2a	0.535 5±0.014 5a	12.91±1.07b
Pb ₂	0.228 7±0.045 9ab	0.768 1±0.046 9ab	0.491 5±0.074 0ab	10.56±2.11ab
Pb ₃	0.202 4±0.022 4a	0.821 8±0.068 5ab	0.450 0±0.063 7b	9.35±1.02a
Pb ₄	0.194 3±0.038 5a	0.857 3±0.025 5b	0.441 8±0.071 4b	8.96±1.77a
<i>P</i>	0.004**	0.047*	0.138ns	0.004**

注: *P* 值行中的*表示差异较显著; **表示差异显著; ***表示差异极显著; “ns”表示差异不显著。

2.4 铅胁迫下洋常春藤叶绿素指标与叶绿素荧光参数相关性分析

由表 3 可知, 在铅胁迫下, 洋常春藤叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 极显著正相关 ($r = 0.949^*$), 总叶绿素与叶绿素 a 和叶绿素 b 均极显著正相关 ($r = 0.996^{**}$, $r = 0.974^{**}$); F_0 与 F_v/F_m , *Yield*, *qN*, *qP* 及 *ETR* 均无显著相关性。*Yield* 与 *qP* 和 *ETR* 均极显著正相关 ($r = 0.992^{**}$, $r = 1.000^{**}$); *qP* 与 *ETR* 极显著正相关 ($r = 0.992^{**}$)。

表 3 铅胁迫下洋常春藤叶绿素荧光参数与叶绿素指标的相关性分析
Table 3 Correlation between chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll parameters of *H. helix* treated by different concentration of lead

参数	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b	总叶绿素	F_0	F_v/F_m	<i>Yield</i>	<i>qN</i>	<i>qP</i>	<i>ETR</i>
叶绿素 a	1.000									
叶绿素 b	0.949*	1.000								
叶绿素 a/b	-0.189	-0.487	1.000							
总叶绿素	0.996**	0.974**	-0.279	1.000						
F_0	-0.375	-0.321	0.065	-0.363	1.000					
F_v/F_m	0.065	-0.010	0.210	0.044	-0.610	1.000				
<i>Yield</i>	0.308	0.360	-0.392	0.327	-0.871	0.200	1.000			
<i>qN</i>	-0.230	-0.345	0.550	-0.266	0.430	0.410	-0.808	1.000		
<i>qP</i>	0.340	0.386	-0.390	0.357	-0.824	0.086	0.992**	-0.866	1.000	
<i>ETR</i>	0.310	0.362	-0.394	0.328	-0.870	0.199	1.000**	-0.809	0.992**	1.000

注: *表示显著相关, **表示极显著相关。

3 结论与讨论

叶绿素存在于植物叶绿体片层膜系统中, 是植物进行光合作用的重要组成部分。叶绿素吸收光子后, 就进入不稳定的、高能状态的激发态, 由激发态能量推动光化学反应进行。重金属会使植物膜系统破坏, 导致位于膜上的酶活性紊乱, 同时影响叶绿素的合成, 导致植物的光能利用率降低^[16-18]。本研究中在铅胁迫下, 洋常春藤的叶绿素含量显著低于对照的 ($P < 0.05$), 这可能是铅胁迫造成的离子毒害导致叶绿体受损, 使合成叶绿素的相关性酶失活或变性, 叶绿素合成受阻, 降解加快, 最终导致洋常春藤叶片的叶绿素含量显著降低, 说明洋常春藤叶绿素对铅胁迫较为敏感。此外, 叶绿素 a/b 在 Pb₄ ($800 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫下显著上升 ($P < 0.05$), 说明洋常春藤叶片的叶绿素 b 比叶绿素 a 对铅胁迫更为敏感, 出现这一情况可能是由于高浓度铅胁迫下植物光合机能调节器官受损, 减缓了叶绿素的合成, 为维持其基本光合作用而进行一系列自我保护措施, 这一结果与李西^[19-20]等的研究结果相类似, 认为铅胁迫可显著降低植株叶片中的叶绿素含量。叶绿素荧光参数的变化反映了光系统对光能的吸收、传递与耗散, 反映植物受胁迫的状况^[21]。当叶绿体受到重金属胁迫时, 金属离子抑制了 Hill 反应, 引起正电荷在水氧化系统水平上的积累, 导致了围绕 PSII 的循环电子流动, 进而使 PSII 和光合电子传递活性受到抑制^[22]。

在本研究中, 洋常春藤叶片初始荧光 (F_0) 值在 Pb₂, Pb₃ 和 Pb₄ ($200, 400$ 和 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫下均呈显著上升 ($P < 0.05$), 且在重度铅胁迫下达到最大值, 与此同时, 植株叶片的 PSII 最大光化学效率 (F_v/F_m) 显著降低 ($P < 0.05$), 达到最小值。这说明洋常春藤叶片在 Pb₄ 时其 PSII 反应中心的破坏或者可逆失活引起 F_0

水平的增加, 导致 PSII 放氧复合体脱离, 反应中心失活, 原初反应的光能转换效率下降, 最终导致光合机构受到损伤。在 Pb_1 , Pb_2 , Pb_3 ($50, 200, 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 铅胁迫下, 其 PSII F_v/F_m 之间并没有显著差异, 说明该浓度铅胁迫对洋常春藤 PSII 的活性影响不大, 说明洋常春藤对轻、中度铅胁迫具有较好的耐受性。前人^[23-25]研究发现在铅胁迫初期不同植物可通过调节自身的应激性来增加 PSII 活性去抵御重金属毒害, 但由于 PSII 活性中心受损, 使得植株受到严重毒害, 反应中心失活使得被动保护机制逐渐失去作用。本研究与这些研究结果存在一些不同之处, 说明不同植物对重金属胁迫的荧光特性响应存在一定差异。光化学猝灭系数 (qP) 反映了原初反应中原初电子受体的还原情况和 PSII 开放的程度; 非光化学猝灭系数 (qN) 值反映 PSII 反应中心对天线色素吸收过量光能后的以热能散发掉的部分, 可反映光和机构的受损程度; 光合电子传递速率 (ETR) 反映了植物光合作用的表观电子传递; PSII 实际光合效率 ($Yield$) 是反映植物光合能力的重要指标之一, 代表 PSII 反应中心进行光化学反应的效率^[26]。本研究结果与刘涛等^[27]的研究结果相似, 洋常春藤叶片在 Pb_1 ($50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 铅胁迫下, qN 、 qP 、 $Yield$ 以及 ETR 与对照相比均无显著差异, 表明此胁迫浓度下植株的电子传递活性较高, 受抑制程度较轻; 随铅浓度的增加, 除 qN 显著上升外, $Yield$ 、 qP 和 ETR 均呈下降趋势, 则说明铅胁迫抑制洋常春藤叶片 PSII 反应中心的开放比例, 导致 PSII 光能转化效率下降, 光合电子传递效率下降, 光抑制加剧, 以热或者其他形式耗散的光能增加, 为避免光合机构损伤, 表现出洋常春藤的自我保护机制。在铅胁迫处理下洋常春藤叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 呈极显著正相关, 叶绿素 (a+b) 与叶绿素 a 和叶绿素 b 之间均呈极显著正相关; 洋常春藤叶片的 qP 、 ETR 与 $Yield$ 均呈极显著正相关, qP 与 ETR 呈极显著正相关。这表明在铅胁迫处理下洋常春藤叶片的 ETR 受 PSII 光能转换效率影响较大, 其转变过程及机理尚不清楚, 有待进一步试验研究。从本试验结果来看, 在 Pb_1 下, 洋常春藤叶片的 F_0 、 F_v/F_m 、 qN 、 qP 、 $Yield$ 以及 ETR 与对照相比均无显著差异, F_0 上升程度和 F_v/F_m 的下降程度均在 Pb_2 、 Pb_3 和 Pb_4 下逐渐增大, 其他荧光参数 $Yield$ 、 qP 和 ETR 下降程度亦是如此。

综上所述, Pb_1 ($50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 铅胁迫对洋常春藤幼苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数无显著影响, 而 Pb_2 和 Pb_3 ($200, 400 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 铅胁迫对其有一定的影响, 但光系统未受明显损伤, 说明该植物对铅胁迫具有较好的耐受性。建议今后可对洋常春藤的铅耐受性及铅吸附富集能力等进行更深一步的研究, 以期作为铅污染地区的生态修复地被物种进行推广应用。

参考文献:

- [1] 邓勇. 红麻耐镉生理响应相关机制的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [2] 姜永雷, 邓莉兰, 黄晓霞, 等. 镉胁迫对滇润楠幼苗生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35 (04): 769-774.
- [3] EMAMVERDIAN A, DING Y L, MOKHBERDORAN F, *et al.* Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response[J]. The Scientific World Journal, 2015:756120.
- [4] 徐勤松, 施国新, 郝怀庆. Cd、Cr (VI) 单一及复合污染对菹草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响[J]. 广西植物, 2001, 21 (1): 87-90.
- [5] 叶海波. 东南景天 (*Sedum alfredii* Hance) 对镉、铜、铅复合污染的反应与金属积累特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [6] 李英男, 杨秀珍, 任利超, 等. 北京奥林匹克森林公园地被植物的应用[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32 (S1): 189-193.
- [7] 徐恩凯, 田国行, 秦佩, 彩叶植物在郑州地区的种类及应用调查[J]. 西北林学院学报, 2010, 25 (01): 191-197.
- [8] 孙化鹏, 阮琴妹, 曹雄军, 等. 洋常春藤皂苷类化合物代谢累积规律研究[J]. 中草药, 2016, 47 (16): 2916-2920.
- [9] 庄艳. 八种藤本植物生理生态特性的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008.
- [10] 张玲慧, 夏宜平. 地被植物在园林中的应用及研究现状[J]. 中国园林, 2003 (9): 54-57.
- [11] 薛彦斌. 三种藤本地被植物抗旱性及在边坡绿化中的应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [12] 刘喜梅. 观赏植物对甲醛的去除效果及其耐受机理初探[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- [13] 张永福, 彭声静, 王定康, 等. 甲醛及弱光胁迫对常春藤生长和营养的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36 (02): 49-55.
- [14] 董丽, 黄亦工, 贾麦娥, 等. 北京园林主要常绿阔叶植物抗冻性及其测定方法[J]. 北京林业大学学报, 2002 (03): 70-73.
- [15] 孙化鹏, 阮琴妹, 曹雄军, 等. 洋常春藤皂苷类化合物代谢累积规律研究[J]. 中草药, 2016, 47 (16): 2916-2920.
- [16] 王娅玲, 李维峰, 杜华波, 等. 铅胁迫对咖啡幼苗叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. 贵州农业科学, 2014, 42 (02): 56-58.
- [17] 周丹丹, 刘德玺, 李存华, 等. 盐胁迫对朴树和速生白榆幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36 (05): 1004-1011.

