

镉胁迫对茅苍术生理生化特征的影响

孙永娣, 巢建国*, 谷巍, 王马勃

南京中医药大学药学院中药资源学实验室, 南京210023

摘要: 采用盆栽试验, 研究不同镉离子浓度(0、1、5、10和50 mg·kg⁻¹)胁迫对茅苍术抗氧化酶活性、光合作用、叶绿素含量和叶绿素荧光等参数的影响。结果表明: 经过镉胁迫后, 茅苍术的过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)均呈先升高再降低的趋势。随镉离子浓度增加, 光合作用中净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)等参数均在胁迫初期(第7天)时呈先上升再下降的趋势, 至胁迫14 d后各处理均低于对照。镉胁迫显著降低叶绿素含量, 且最大光化学量子产量(F_v/F_m)、有效光化学量子产量(F_v'/F_m')、光化学淬灭(q_p)和表观光合电子传递速率(ETR)均出现下降趋势, 胁迫时间越长, 下降趋势越明显, 而非光化学淬灭(q_N)则是呈先上升再下降的趋势。表明茅苍术对低浓度(1和5 mg·kg⁻¹)镉离子有一定的耐性, 而高浓度(50 mg·kg⁻¹)镉离子对植株造成伤害, 影响其生长发育。

关键词: 镉离子; 抗氧化酶; 光合作用; 叶绿素含量; 叶绿素荧光

茅苍术(*Atractylodes lancea*)为菊科植物, 其干燥根茎为中药茅苍术, 具有燥湿健脾、祛风散寒之功效(国家药典委员会2015)。江苏茅山的苍术药材因质量好、药效显著被誉为道地药材, 然而在栽培过程中出现土壤酸化等一系列不利于苍术根茎生长的现象, 且茅山苍术在生长发育过程中土壤养分状况不理想, 并受到严重的缺钾胁迫(郭兰萍2005)。目前在中药材栽培中, 土壤环境通过影响着植物的生长决定着药材的质量, 因此对于野生资源日益枯竭然而药用需求量逐年增大的苍术来说, 土壤环境的好坏至关重要。在土壤环境中, 重金属由于其不可降解性影响最为突出, 20世纪以来由于工业制造的发展、大气沉降物的积聚以及废水的灌溉导致土壤中的重金属累积量增加, 致使土壤环境质量下降、农作物生产力下降(Gao等2013; 陈晶等2016)。镉(Cd)是一种毒性强且易富集迁移的重金属, 通常会抑制种子萌发(Rascio等1993)、植物生长(Stiborová等1987)、营养分布(Moral等1994)和光合作用等(Baszynski等1980; Clijsters和Van 1985; Krupa等2010), 土壤中累积过量的镉离子会改变土壤的生态结构, 影响植物生长、使叶片卷曲萎黄致使产量降低等现象。经研究发现, 当植物经过镉胁迫后, 易出现营养吸收受阻和叶片水分含量降低等现象, 且在细胞层面上会出现酶活性降低、膜脂过氧化等问题(Douchiche等2012; Merian等1991; Lin等2007)。当三七中累积过量的镉离子时, 不仅导致三七生长缓慢, 使其根

尖细胞DNA损伤和三七中的皂苷含量降低, 还导致服用人群有非致癌风险(朱美霖等2014a, 2014b; 李子唯等2015)。吴坤等(2011)研究表明, 镉胁迫能够破坏叶绿体的结构和造成类囊体减少, 造成烟草叶片叶绿素含量降低, 从而致使烟草叶片的 P_n 降低。此外, 徐红霞等(2005)研究结果发现, 当水稻受到重金属Cd的迫害时会诱导抗氧化酶活性的升高来清除自由基, 同时通过耗散能量来保护光合机构; 当镉离子浓度过高时, PSII的活性降低(Baszynski等1980), q_p 和 q_N 则呈上升趋势。经研究证明, 当中药材或农作物遭受重金属镉胁迫时, 都易导致植物生理生化指标出现一定的变化规律(刘劲松等2011; 吕朝晖和王焕校1998; 贾中民等2014; Prasad 2004; 邓培雁等2007)。

目前, 已有学者研究了茅苍术在缺钾和干旱胁迫下形成的逆境效应, 结果表明干旱胁迫和低钾胁迫是苍术道地性形成的重要逆境因子之一(周洁2005)。另外, 茅苍术在酸雨、高温、养分和淹水等逆境胁迫下的生理生化变化也有报道(张文明等2016; 李孟洋等2015; 陆奇杰等2017), 然而重金属胁迫对茅苍术植株的生理生化特性的影响还没

收稿 2018-05-15 修定 2018-12-05

资助 国家自然科学基金(81573520)、国家基本药物所需中药材种子种苗繁育基地建设项目(2014-茅苍术)、2017年中医药公共卫生服务补助专项“全国中药资源普查项目”(财社[2017]66号)和江苏省基础研究计划(自然科学基金)-面上项目(BK20171312)。

* 通讯作者(jgchao1016@163com)。

有报道。本试验采用盆栽法研究不同质量浓度的镉胁迫对茅苍术生理生化指标的影响,为镉污染对茅苍术的生理机制的研究提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及设计

供试材料为江苏省句容市的茅苍术。经南京中医药大学中药资源与鉴定系巢建国教授鉴定为菊科植物茅苍术[*Atractylodes lancea* (Thunb.) DC.]。试剂是 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5 \text{H}_2\text{O}$ 分析纯。

2016年12月从茅山购买二年生的茅苍术种苗,挑选健康有芽头及须根的茅苍术,在12月底前种植于南京中医药大学药用植物园内,种植前需将茅苍术的不必要须根剪掉,将根茎浸泡于多菌灵中0.5 h,之后于空地晾晒避免根茎腐烂,根茎较大的茅苍术需要进行切块。于2017年6月从药用植物园内选取3年内未种植过中药材的土壤,碎土风干后过5 mm筛,测定土壤中铵态氮、速效钾和速效磷含量分别为10.82、43.57和6.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤Cd设置5个浓度,分别为0 (CK)、1、5、10和50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (每千克干重土壤含镉离子量计)。

于6月上旬选取大小体积一致、健康且丰茂的植株移栽至花盆中,每盆3株,每个处理5盆,共为20盆,每盆装土8 kg,移栽1周内细心培养。待植物生长稳定后将 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 配成相应浓度,均匀浇灌于土中,避免喷洒到茅苍术的叶片,于胁迫0、7、14、21、28和35 d时选取健康生长的功能叶测定叶绿素含量、荧光参数、光合参数及抗氧化酶活性等相关指标。由于茅苍术耐旱怕水,试验开始后每周浇一次适宜浓度的多菌灵以防病害及高温。

1.2 指标测定

1.2.1 抗氧化酶活性和叶绿素含量

称取茅苍术叶片0.25g,加入5 mL pH 7.0的PBS磷酸缓冲液,冰浴研磨,9 982×g离心15 min,取部分上清液经适当稀释用于酶活性测定,采用南京建成生物工程公司的试剂盒测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(catalase, CAT);过氧化物酶(Peroxidase peroxidase, POD)采取愈创木酚法测定;叶绿素采用Arnon法(Arnon 1949)。

1.2.2 光合及叶绿素荧光参数

利用美国基因公司生产的LI-6400型便携式光

合测定仪,选择有阳光的天气,温度在20~30°C左右,于9:00~12:00将植株从大棚中搬至阳光无风下照射0.5 h,打开仪器预热20 min后对仪器进行标定,选取功能叶5片,测定时避开叶脉,测其光合参数以及荧光参数净光合速率(P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、细胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、有效光化学量子产量最大光化学量子产量(F_v'/F_m')、光化学淬灭系数(q_p)、非光化学淬灭系数(q_n)、表观光合电子传递速率(ETR)等数据;于日落后将植株搬至室内,暗适应20 min后,与上述测定过程一致,测最大光化学量子产量 F_v/F_m 以及其他等数据,结束后从仪器中导出相关的光合及叶绿素荧光参数。

1.3 数据处理

采用Excel 2010绘制图表,以SPSS 16.0的LSD检验与Dunnnett检验进行数据的多重比较分析。

2 实验结果

2.1 镉胁迫对茅苍术中抗氧化酶活性的影响

由图1-A可知,茅苍术的CAT活性随镉处理浓度的增大呈先上升后下降的趋势,随处理时间延长,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉处理的CAT活性增加,在处理35 d达到峰值,显著高于其他处理;5~50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉处理的都先上升后下降,其中50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉处理的CAT活性显著低于其他处理。POD活性与CAT的趋势类似,在胁迫第35天时,各梯度的POD活性均达到显著性差异($P < 0.05$) (图1-B)。

由图1-C可知,茅苍术的SOD活性随镉处理浓度的增大呈先上升后下降的趋势,与前两者不同的是,胁迫期间不同梯度的SOD活性(除CK外)均呈上升趋势,于第35天达到最大值,分别是对照组的108.76%、112.17%、108.52%和100.82%。

2.2 镉胁迫对茅苍术中光合特性的影响

由图2-A和B可知,在胁迫初期(第7天), C_i 和 T_r 随镉处理浓度的增大呈先上升后下降的趋势;随着胁迫时间的延长, C_i 和 T_r 随镉处理浓度的增大呈现下降的趋势,时间越长下降幅度越明显,于胁迫第35天降到最低值; C_i 在胁迫第14、28和35天时各梯度间均达到显著性差异, T_r 在胁迫第21和35天不同梯度间也达到显著性差异。

镉胁迫初期(第7天), P_n 和 G_s 随镉处理浓度的

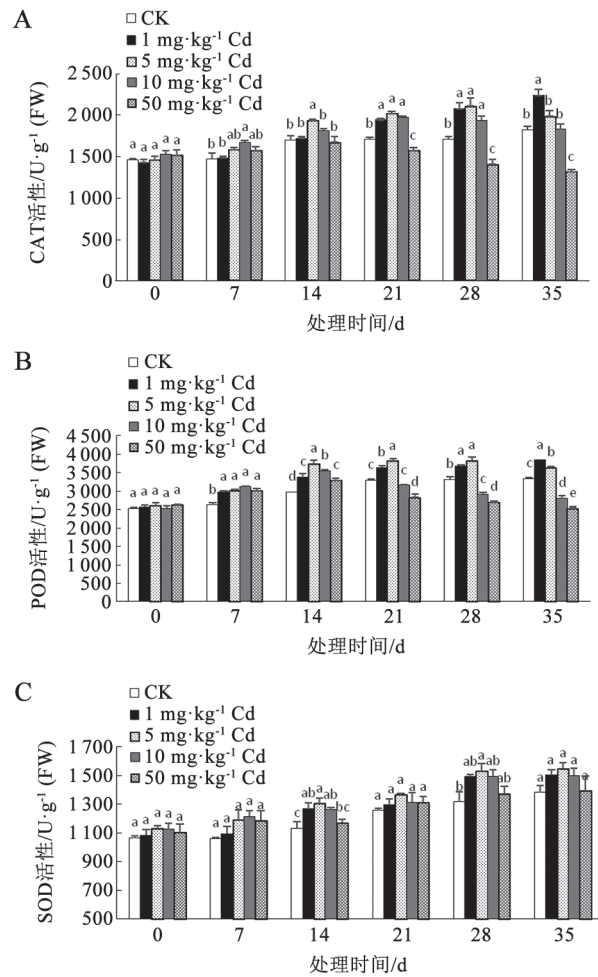


图1 镉胁迫对茅苍术抗氧化酶活性的影响
Fig.1 Effects of Cd stress on antioxidant enzyme activities of *A. lancea*

不同小写字母表示茅苍术经不同时间胁迫处理差异显著($P < 0.05$), 下同此。

增大呈先上升后下降的趋势; 随之由于胁迫时间的延长, P_n 和 G_s 迅速下降, 下降幅度也随之增大, 于胁迫末期(第35天)降到最低值; P_n 在胁迫21 d后均显著低于CK, 但各梯度之间差异并不显著; 而 G_s 在胁迫第21和35天时各梯度达到差异性显著。

2.3 镉胁迫对茅苍术中叶绿素含量和叶绿素荧光特征的影响

由图3-A可知, 镉胁迫能显著影响茅苍术叶片的叶绿素含量, 经过镉胁迫后叶绿素含量总体呈下降趋势, 叶绿素合成被抑制, 在低浓度(1和5 $mg \cdot kg^{-1}$)的镉处理下降幅度较小; 高浓度胁迫(50 $mg \cdot kg^{-1}$)对茅苍术叶片有较强的毒性, 于胁迫14 d出现叶片萎黄现象。不同浓度镉胁迫35 d后叶绿素含量降到

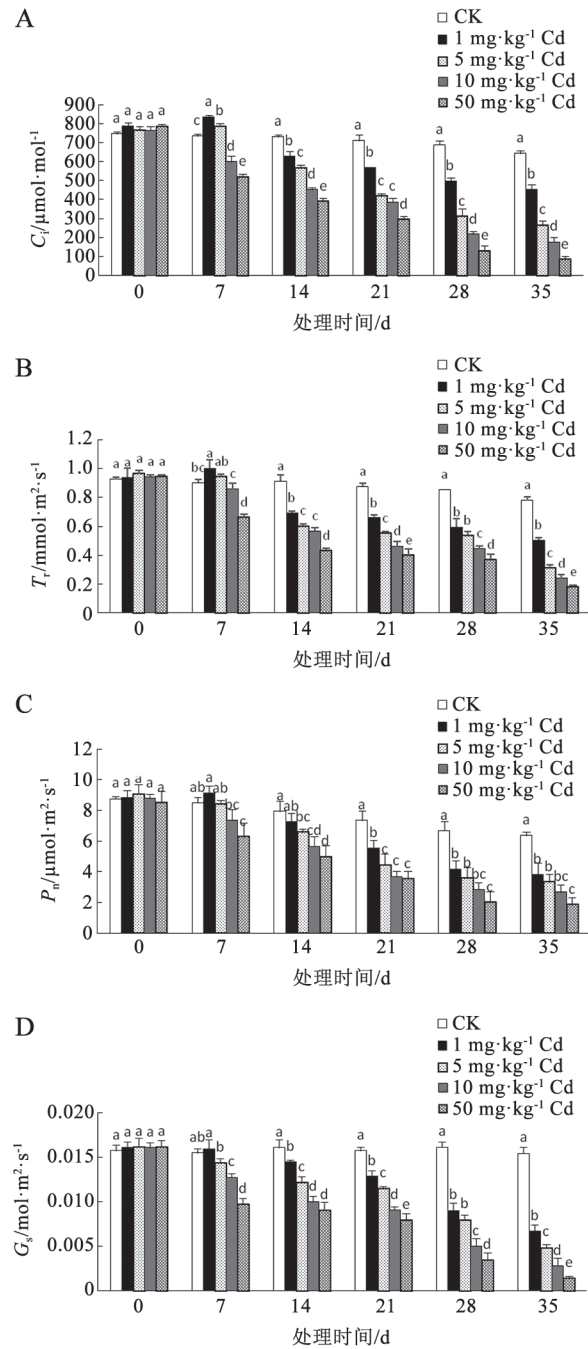


图2 镉胁迫对茅苍术光合作用指标的影响
Fig.2 Effects of Cd stress on photosynthesis indexes of *A. lancea*

最低值, 且达到显著性差异, 分别是CK的89.56%、81.70%、71.78%和63.83%。

由图3-B可知, q_n 随镉处理浓度的增大呈现出先升后降的变化趋势。在胁迫初期(第7天), 1和5 $mg \cdot kg^{-1}$ 浓度的处理高于CK, 10和50 $mg \cdot kg^{-1}$ 的处理低于CK; 随胁迫时间的延长, 各梯度处理的 q_n 随之降低, 至胁迫35 d时, 不同梯度处理的 q_n 降到最低

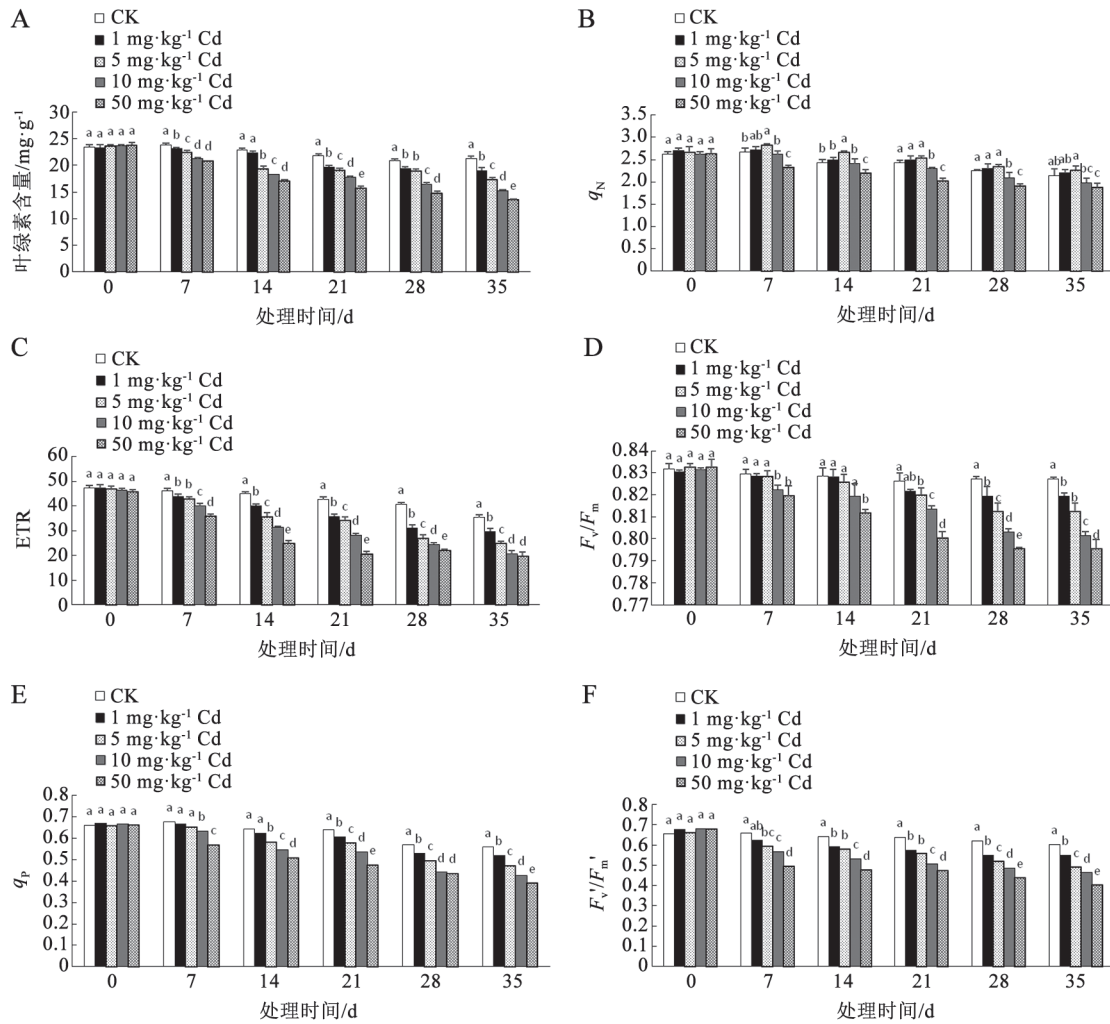


图3 镉胁迫对茅苍术叶绿素含量及叶绿素荧光特性的影响

Fig.3 Effects of Cd stress on chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence parameters of *A. lancea*

值, 分别是CK的102.37%、105.73%、92.36%和87.66%。

由图3-C和D可知, F_v/F_m 和ETR随镉离子浓度的升高呈下降的趋势, 低浓度(1和5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的镉处理下降幅度比中高浓度(10和50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的缓慢, 浓度越高时间越长, 下降幅度越大, 其变化规律总体与叶绿素含量相似, 两者都在第28天达到显著性差异, 在第35天下降到最低值, F_v/F_m 在第35天时各处理梯度分别是CK组的99.04%、98.19%、96.89%和96.13%, 而ETR在第35天时各处理梯度分别是CK组的84.21%、71.01%、58.23%和56.02%。

由图3-E和F可知, F_v'/F_m' 和 q_p 随镉处理浓度的增大呈下降趋势。与ETR不同的是, 随胁迫时间的延长, F_v'/F_m' 和 q_p 下降的幅度相对缓慢, 胁迫初期

(第7天)不同浓度的镉处理组均低于CK, 随时间延长, 各处理组下降幅度更加明显, 都在第35天达到显著性差异。 F_v'/F_m' 在第35天时不同浓度的镉处理分别是CK的91.36%、81.32%、76.87%和66.39%, q_p 在第35天时不同浓度的镉离子处理分别是CK的93.26%、84.68%、76.12%和70.11%。

3 讨论

植物受到重金属胁迫时, 会通过抗氧化系统、植物体内细胞的作用和根部截留等抗性机理来减少重金属的毒害, 而抗氧化系统在植物抵抗逆境时至关重要(徐金波2014)。研究证明, 当镉离子浓度超过细胞的解毒能力时, 由于氧化还原系统出现不平衡, H_2O_2 在细胞中累积过多, 继而可能导致

木质化的发生(Schützendübel等2001)。本试验中, 镉胁迫后的抗氧化酶系统酶活性(SOD、POD和CAT)均呈现出先上升后下降的变化规律, 在镉离子浓度较低(1和5 mg·kg⁻¹)时, 茅苍术没有受到明显的伤害, 说明植物自身生长和生理指标可以出现“代偿性增强”, 即用于抵御环境胁迫, 祛除镉胁迫带来的诸如活性氧(ROS)等物质对茅苍术叶片的损害, 说明茅苍术对镉离子有一定的耐受性, 这与尹大川等(2017)研究结果类似。当土壤中存在较高浓度(50 mg·kg⁻¹)的镉离子时, 3个酶活性出现显著的下降趋势, 表明此时土壤中的镉离子高于茅苍术的承受阈值, 已经对植物造成了不可避免的损害, 说明当镉离子浓度超过了茅苍术的抗氧化酶系统(SOD、POD和CAT)的抗性调节程度时, 植株将无法正常的生长发育。

光合作用是一个高度自我调节的过程, 逆境过程可能会导致植株超微结构的改变和功能的破坏, 由此光合速率被抑制(Vassilev等2004)。根据本试验中镉胁迫对茅苍术叶片的光合参数的变化规律来看, 胁迫时间的延长和镉离子浓度的升高易导致茅苍术叶片光合机构结构的紊乱, 经镉胁迫7 d后, 茅苍术叶片的 G_s 和 T_r 呈现下降的变化趋势, 且浓度越高下降幅度越大, 且由图2-B和D可知, 气孔阻力的上升和水分含量的降低显示相似的趋势, 均在第35天下降至最低值, 并达到显著性差异, 分别是对照组的9.00%和23.33%, 这说明可能是镉离子诱导了茅苍术叶片气孔的关闭、扰乱了叶片的水分状况, 且高浓度时 G_s 的下降导致CO₂供应减少, 由此影响着碳水化合物的积累。胁迫后 C_i 值的减小致使茅苍术叶片的光呼吸强度的降低, 同时气孔导度也会随之降低, 说明在大多数情况下 G_s 和 C_i 在光合作用中是相辅相成的作用。由此可见镉离子对茅苍术组织有毒性作用, 可使叶片水分利用率下降、胞间CO₂浓度降低, 而植物所遭受的毒性大小决定着气孔阻力增加的程度(Yordanov 1997)。在胁迫初期, 低浓度(1和5 mg·kg⁻¹)镉对茅苍术叶片的 P_n 有一定的诱导作用, 胁迫第7天后浓度高于5 mg·kg⁻¹镉离子起抑制作用, 此时茅苍术叶片的 P_n 则呈下降趋势, 这是过量镉离子破坏了茅苍术叶片的光合酶, 降低了茅苍术叶片对光的吸收能力, 同时也说明植物的光合活性的减弱以及对逆境环境的抗御能力的降低(唐慧2012)。

近些年来, 叶绿素荧光参数由于其能够直接表达逆境胁迫对植株光合特性的影响而被广泛运用(杨再强等2013)。PSII在光合作用占据着举足轻重的地位, 也是容易遭受逆境胁迫伤害的关键地方, 重金属胁迫能够导致最大光化学效率和光合电子传递效率降低(Prasad等1991)。当植物叶片中叶绿素含量较高时, 植物的生长发育情况呈现良好的状态, 叶片合成光合色素能力也较强, 本试验结果表明, 镉胁迫能够导致茅苍术叶片中的叶绿素含量大幅度减少, 说明重金属离子破坏了叶绿体的结构, 抑制了叶片的光合色素的合成, 这与杜晓和申晓辉(2010)的研究结果相似。ETR的数值在茅苍术经过胁迫后一直呈下降趋势, 表明PSII的电子受体减少, 说明镉胁迫导致茅苍术叶片的电子传递过程受到抑制, 影响了光能的传递过程。镉离子处理后的 F_v/F_m 和 F_v'/F_m' 出现明显的下降趋势, 和ETR呈现一致的变化趋势, 均在胁迫后第35天达到最低值, 说明镉离子能导致苍术叶片碳循环活性的下降, 光能转换效率和有机物积累降低, 从而使得受到光抑制, 这与前文镉胁迫导致CO₂供应减少, 影响着碳水化合物的积累的结论一致。Jannssen等(1992)研究认为 q_N 升高意味着重金属限制了植株的电子传递, 本试验结果中 q_N 呈先上升再下降的趋势, 证实镉胁迫确实能影响植物的光合电子传递效率, 与其所述结果一致。 q_p 反映了PSII原初电子受体Q_A的还原状态, 因此 q_p 越大, PSII的反应活性也就越大, q_p 的降低代表茅苍术无法通过增加热耗散来保护植物, 影响了光能的耗散过程从而使光合机构受到伤害。

综上所述, 镉胁迫通过影响茅苍术叶片的抗氧化酶活性、叶绿体的结构以及对光能的光化学转换、电子传递等光合作用过程来影响茅苍术的生理机制, 且茅苍术对镉离子有一定程度的耐镉作用, 为了深入研究重金属Cd对茅苍术的影响, 能够更客观准确的提供科学理论依据, 后续会继续测定生长指标、生物量、药效成分含量等实验以及进行相关分析。

参考文献(References)

- Arnon DI (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol*, 24 (1): 1-15
- Baszynski T, Wajda L, Krol M, et al (1980). Photosynthetic

- activities of cadmium treated tomato plants. *Physiol Plant*, 48: 365–370
- Chen J, Pang SQ, Zhao XL (2016). Effects of exogenous auxins on growth and antioxidation system in maize seedlings under cadmium stress. *Plant Physiol J*, (8): 1191–1198 (in Chinese with English abstract) [陈晶, 庞思琪, 赵秀兰 (2016). 外源生长素对镉胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化系统的影响. *植物生理学报*, (8): 1191–1198]
- Chinese Pharmacopoeia Committee (2015). *Chinese Pharmacopoeia (Vol.1)*. Beijing: Chinese Medical and Science and Technology Press, 204 (in Chinese) [国家药典委员会(2015). 《中国药典》(一部). 北京: 中国医药科技出版社]
- Clijsters H, Van AF (1985). Inhibition of photosynthesis by heavy metals. *Photosyn Res*, 7 (1): 31–40
- Deng PY, Liu W, Han BP (2007). Photosynthesis of *Viola baoshanensis* under Cd stress. *Acta Ecologica Sin*, 27 (5): 1858–1862 (in Chinese with English abstract) [邓培雁, 刘威, 韩博平(2007). 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)镉胁迫下的光合作用. *生态学报*, 27 (5): 1858–1862]
- Douchiche O, Chaïbi W, Morvan C (2012). Cadmium tolerance and accumulation characteristics of mature flax, cv. Hermes: contribution of the basal stem compared to the root. *J Hazard Mater*, 235–236 (235–236): 101–107
- Du X, Shen XH (2010). Effects of cadmium stress on physiological and biochemical indices of *Viburnum odoratissimum* and *V. tinus* seedlings. *Chin J Ecol*, 29 (5): 899–904 (in Chinese with English abstract) [杜晓, 申晓辉(2010). 镉胁迫对珊瑚树和地中海荚蒾生理生化指标的影响. *生态学杂志*, 29 (5): 899–904]
- Guo LP (2005). Study on ecological factors affecting the quality of cangzhu (dissertation). Beijing: China Academy of Traditional Chinese Medicine; China Academy of Medical Sciences (in Chinese with English abstract) [郭兰萍 (2005). 影响苍术质量的生态因子研究(学位论文). 北京: 中国中医研究院; 中国中医科学院]
- Ja ZM, Fen HR, Wei H (2014). Effects of cadmium on growth and photosynthetic characteristics of *Pterocarya stanoptera*. *J Southwest Univ (Nat Sci Edi)*, 36 (8): 27–35 (in Chinese with English abstract) [贾中民, 冯汉茹, 魏虹 (2014). 镉对枫杨幼苗生长和光合特性的影响. *西南大学学报(自然科学版)*, 36 (8): 27–35]
- Krupa Z, Öquist G, Npa H (2010). The effects of cadmium on photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* – a fluorescence analysis. *Physiol Plant*, 88 (4): 626–630
- Li MY, Chao JG, Gu W, Hou HR, et al (2015). Effects of high temperature stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Atractylodes lancea* from different habitats. *Plant Physiol J*, (11): 1861–1866 (in Chinese with English abstract) [李孟洋, 巢建国, 谷巍等(2015). 高温胁迫对不同产地茅苍术开花前叶片叶绿素荧光特征的影响. *植物生理学报*, (11): 1861–1866]
- Li ZW, Yang Y, Cui XM, et al (2015). Physiological response and bioaccumulation of *Panax notoginseng* to cadmium under hydroponic. *China J Chin Mat Med*, 40 (15): 2903–2908 (in Chinese with English abstract) [李子唯, 杨野, 崔秀明等(2015). 三七对镉胁迫的生理响应及富集特性研究. *中国中药杂志*, 40 (15): 2903–2908]
- Lin AJ, Zhang XH, Chen MM, et al (2007). Oxidative stress and DNA damages induced by cadmium accumulation. *J Environ Sci*, 19 (5): 596–602
- Liu JS, Shi H, Li YY (2011). Effects of Cd²⁺ stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of cucumber seedlings. *Res Soil Water Conserv*, 18 (5): 187–190 (in Chinese with English abstract) [刘劲松, 石辉, 李秧秧(2011). 镉胁迫对黄瓜幼苗光合和叶绿素荧光特性的影响. *水土保持研究*, 18 (5): 187–190]
- Lu QJ, Chao JG, Gu W, et al (2017). Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics and physiological indexes of *Atractylodes lancea*. *Plant Physiol J*, (9): 1673–1679 (in Chinese with English abstract) [陆奇杰, 巢建国, 谷巍等(2017). 不同氮素水平对茅苍术光合特性及生理指标的影响. *植物生理学报*, (9): 1673–1679]
- Lv CH, Wang HX (1998). A preliminary study on the effect of lead and cadmium on gene expression of wheat alcohol dehydrogenase (ADH). *J Acta Sci*, 18 (5): 500–503 (in Chinese with English abstract) [吕朝晖, 王焕校(1998). 镉铅对小麦醇脱氢酶(ADH)基因表达影响的初步研究. *环境科学学报*, 18 (5): 500–503]
- Merian E, Anke M, Ichnat M, et al (1991). *Elements and Their Compounds in the Environment: Occurrence, Analysis and Biological Relevance*. Wiley-VCH, 235–254
- Moral R, Gomez I, Navarropedreno J, et al (1994). Effects of cadmium on nutrient distribution, yield, and growth of tomato grown in soilless culture. *J Plant Nutr*, 17 (6): 953–962
- Prasad MNV (2004). *Heavy Metal Stress In Plants: From Biomolecules To Ecosystems*. Berlin: Springer
- Prasad SM, Singh JB, Rai LC, et al (1991). Metal-induced inhibition of photosynthetic electron transport chain of the cyanobacterium *Nostoc muscorum*. *Fems Microbiol Lett*, 82 (1): 95–100
- Rascio N, Vecchia FD, Ferretti M, et al (1993). Some effects of cadmium on maize plants. *Archives Environ Contam Toxicol*, 25 (2): 244–249
- Schützendübel A, Schwanz P, Teichmann T, et al (2001). Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots. *Plant Physiol*, 127 (3): 887–898
- Stiborová M, Ditrichová M, Březinová A (1987). Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley and maize seedlings. *Biol Plant*, 29 (6): 453–467

- Tang H (2012). Physiological responses of *Sasa argenteostriatus* E. G. Camus to cadmium and the regulation of silicon (dissertation). Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese with English abstract) [唐慧(2012). 铺地竹对镉的生理响应以及硅的调节作用(学位论文). 南京: 南京林业大学]
- Vassilev A, Lidon F, Scotti P, et al (2004). Cadmium-induced changes in chloroplast lipids and photosystem activities in barley plants. *Biol Plant*, 48 (1): 153–156
- Wu K, Wu ZH, Tai FJ, et al (2011). Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves. *Acta Ecol Sin*, 31 (16): 4517–4524 (in Chinese with English abstract) [吴坤, 吴中红, 邰付菊等(2011). 镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响. *生态学报*, 31 (16): 4517–4524]
- Xu HX, Weng XY, Mao WH, et al (2005). Effects of cadmium stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in leaves of rice. *Chin J Rice Sci*, 19 (4): 338–342 (in Chinese with English abstract) [徐红霞, 翁晓燕, 毛伟华等(2005). 镉胁迫对水稻光合、叶绿素荧光特性和能量分配的影响. *中国水稻科学*, 19 (4): 338–342]
- Xu JB (2014). Study on seed germination characteristics and physiological responses of *Typha angustifolia* under heavy metal stress (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural College (in Chinese with English abstract) [徐金波(2014). 重金属胁迫下狭叶香蒲种子萌发特性及幼苗的生理反应(学位论文). 南京: 南京农业大学]
- Yang ZQ, Zhu K, Peng XD, et al (2013). Effects of day and night temperature difference on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of greenhouse tomato. *Chin J Ecol*, 32 (12): 3190–3196 (in Chinese with English abstract) [杨再强, 朱凯, 彭晓丹等(2013). 昼夜温差对设施番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响. *生态学杂志*, 32 (12): 3190–3196]
- Yin DC, Deng X, Song XS, et al (2017). Effects of ectomycorrhizal fungi on physiological indexes of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings and soil enzyme activities under cadmium stress. *Chin J Ecol*, 36 (11): 3072–3078 (in Chinese with English abstract) [尹大川, 邓勋, 宋小双等(2017). Cd胁迫下外生菌根菌对樟子松生理指标和根际土壤酶的影响. *生态学杂志*, 36 (11): 3072–3078]
- Zhou J (2008). Effects of adversity stress on metabolism and volatile oil of *Atractylodes* L. plants (dissertation). Jinan: Shandong University of Traditional Chinese Medicine. (in Chinese with English abstract) [周洁(2008). 逆境胁迫对茅苍术植株代谢和挥发油的影响(学位论文). 济南: 山东中医药大学]
- Zhu ML, Chen ZJ, Jang Y, et al (2014a). Cadmium stress of soil on cadmium enrichment in different tissues and its main active compositions of *Panax notoginseng*. *Chin Tra Patent Med*, 36 (2): 342 (in Chinese with English abstract) [朱美霖, 陈中坚, 姜阳等(2014a). 外源土壤 Cd胁迫对三七富集及其药效成分的影响. *中成药*, 36 (2): 342]
- Zhu ML, Wei FG, Cui B, et al (2014b). Effect of soil Cd stress on growth, root system DNA damage and antioxidant enzyme activity of *Panax notoginseng*. *J Plant Resour Environ*, 23 (1): 58 (in Chinese with English abstract) [朱美霖, 魏富刚, 崔斌等(2014b). 土壤Cd胁迫对三七生长和根系DNA损伤及抗氧化酶活性的影响. *植物资源与环境学报*, 23 (1): 58]
- Zhang WM, Chao JG, Gu W, et al (2017). Photosynthesis and physiological responses of *Atractylodes lancea* under acid rain stress. *J Southern Agric*, 48 (7): 1167–1172 (in Chinese with English abstract) [张文明, 巢建国, 谷巍等(2017). 酸雨胁迫下茅苍术的光合及生理响应. *南方农业学报*, 48 (7): 1167–1172]

Effect of cadmium stress on physiological and biochemical characteristics of *Atractylodes lancea*

SUN Yong-Di, CHAO Jian-Guo*, GU Wei, WANG Ma-Bo

Laboratory of Traditional Chinese Medicine Resources, School of Pharmacy, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the effects of different cadmium (Cd) concentrations (0, 1, 5, 10, 50 mg·kg⁻¹) on antioxidant enzyme activities, photosynthesis, chlorophyll content and chlorophyll fluorescence of *Atractylodes lancea*. The results showed that under cadmium stress, the activities of POD, SOD and CAT of *A. lancea* increased firstly and then decreased. With the increase of cadmium ion concentration, the parameters of P_n , G_s , C_i and T_r in photosynthesis increased first and then decreased at the initial stage of stress (7 d), and were lower than those of the control after 14 days of stress. The cadmium stress reduced the chlorophyll content. The maximum photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m), actual photochemical efficiency of PSII (F_v'/F_m'), photochemical quenching coefficient (q_p), electron transport rate (ETR) showed a downward trend, and the longer the stress time, the more obvious the downward trend was. While the non-photochemical quenching (q_N) was increased firstly and then decreased. It indicated that *A. lancea* has a certain tolerance to low concentrations (1 and 5 mg·kg⁻¹) of cadmium stress, while high concentration (50 mg·kg⁻¹) of cadmium stress caused damage to plants and affected their growth and development.

Key words: Cd; antioxidant enzyme; photosynthesis; chlorophyll content; chlorophyll fluorescence

Received 2018-05-15 Accepted 2018-12-05

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (81573520), National Essential Medicine Seeds and Seeds Breeding Base Construction Project (2014-Atractylodes lancea), 2017 Chinese Medicine Public Health Service Subsidy Special "National Chinese Medicine Resources Census Project" (Caishe [2017] No. 66) and Jiangsu Basic Research Project (Natural Science Fund) - Project (BK20171312).

*Corresponding author (jgchao1016@163com).