

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.03.013

张强,陈雄伟,陈军文,等.两种入侵能力不同的莲子草光合系统稳定性的比较研究[J].广西植物,2014,34(3):348—354

Zhang Q, Chen XW, Chen JW, et al. Comparison of stability of photosystem II between two *Alternanthera* invasive species with different invasion ability [J]. *Guihaia*, 2014, 34(3):348—354

两种入侵能力不同的莲子草光合系统稳定性的比较研究

张 强¹, 陈雄伟², 陈军文³, 张兴旺¹, 邵 玲^{2*}

(1. 淮北师范大学 生命科学学院 资源植物生物学安徽省重点实验室, 安徽 淮北 235000; 2. 肇庆学院 生命科学学院, 广东 肇庆, 526061; 3. 云南农业大学 农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘 要: 为揭示恶性杂草空心莲子草入侵的部分机制,并为采取防控措施降低其危害提供理论依据,比较了空心莲子草与其同属的入侵能力相对较弱的刺花莲子草对光氧化胁迫(由 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲基紫精在光强 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下诱导产生)的生理响应。结果表明:在光氧化胁迫下,空心莲子草和刺花莲子草两者的叶绿素、类胡萝卜素、总酚和类黄酮含量均显著下降,叶片细胞死亡率相应升高,但空心莲子草对光氧化胁迫具有较高的忍耐性,这可能与总酚和类黄酮含量以及 DPPH·(1,1-二苯基苦基苯肼)自由基清除能力有关。这种特性可能是空心莲子草光合系统稳定性更高、入侵能力更强和危害性更大的重要因素之一。

关键词: 光氧化胁迫; 甲基紫精; 莲子草; 细胞死亡率; 叶绿素荧光

中图分类号: Q945.79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2014)03-0348-07

Comparison of stability of photosystem II between two *Alternanthera* invasive species with different invasion ability

ZHANG Qiang¹, CHEN Xiong-Wei², CHEN Jun-Wen³,
ZHANG Xing-Wang¹, SHAO Ling^{2*}

(1. School of Life Sciences, Anhui Key Laboratory of Plant Resources and Biology, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China; 2. College of Life Sciences, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China; 3. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To reveal the invasion mechanism of an alien noxious weed-*Alternanthera philoxeroides* and reduce or ultimately eliminate its damage, physiological responses of *A. philoxeroides* and *A. pungens* with a relatively weak invasion capacity to photooxidative stress (induced by $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen at light intensity of $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) were investigated and compared in the present study. Under photooxidative stress, the contents of chlorophyll, carotenoids, total phenolics and flavonoids in *A. philoxeroides* and *A. pungens* significantly decreased and leaf cell death rate correspondingly increased, but the former showed a higher tolerance to photooxidative stress, which might be related to total phenolic, flavonoid and DPPH· scavenging capacity in *A. philoxeroides*. This could be used to explain why *A. philoxeroides* had more stable photosystem, greater invasion capacity and higher damage.

Key words: photooxidative stress; methyl viologen; *Alternanthera* plant; cell death rate; chlorophyll fluorescence

收稿日期: 2014-02-02 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(31201142, 31000187, 31060094); 资源植物生物学安徽省重点实验室项目(ZYZWSW2014004)。

作者简介: 张强(1976-),男,河南信阳市人,博士,副教授,研究方向为光合与环境的关系,(E-mail)zhangq@foxmail.com。

*通讯作者: 邵玲,博士,教授,主要从事植物生理生态学研究,(E-mail)shaoling@zqu.edu.cn。

空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 属苋科 (Amaranthaceae) 莲子草属 (*Alternanthera*)，又称喜旱莲子草、水花生、革命草，属水生或湿生多年生宿根草本植物。原产于南美的巴西、阿根廷等地，现已遍布北美洲、大洋洲、东南亚，并已蔓延到意大利等欧洲国家，是世界公认的恶性杂草，入侵能力很强。20 世纪 30 年代末空心莲子草引种至中国，现已由国家环保总局列为首批外来入侵物种。由于其生命力强、适应性广 (水陆两栖生长) 及生长繁殖迅速，现已传播到我国华东、华中、华南和西南等地区，北至吉林，南至广东的 20 多个省、市、自治区都有空心莲子草的足迹 (林冠伦等, 1990; 沈国军等, 2005)。由于其大面积扩散蔓延，空心莲子草已对种植、水产、水利、航运、物种资源、环境等造成极为不利的影 响，成为亟待解决防除的重要外来恶性杂草 (沈国军等, 2005)。而刺花莲子草 (*Alternanthera pungens*) 则是同属的另一种一年生草本植物，又称地雷草，原产于南美洲。1957 年在四川芦山首次发现刺花莲子草，现主要分布于中国的四川西南部、云南、海南、香港、福建南部 (陈飞鹏等, 1993)，是一般性的杂草，入侵能力相对较弱，危害性远小于空心莲子草 (王坤等, 2010)。

空心莲子草之所以在我国能传播广泛，蔓延迅速，危害猖獗，与其自身特有的生态适应性密切相关 (闫淑君等, 2006; 淮虎银等, 2006)。成功的外来种对各环境因子的适应幅度较广，对各种环境具有较强的忍耐力 (Hertling *et al.*, 2000)。光是植物生长和繁殖的重要生态因子，而空心莲子草对光的适应范围较广，无论是日照强的开阔地还是荫蔽的地方都能生长 (Liu *et al.*, 2004)。强光照是空心莲子草成功入侵必须克服的一道障碍。当入侵植物叶片吸收的光能超过其利用能力时，它们会产生各种适应策略来有效地维持自身光合系统的正常运转。如王俊峰等 (2003, 2004) 的研究发现，对高光照环境适应能力较强是入侵植物的共性之一，也可能是其表现较强的入侵能力的原因之一。我们推测叶片光合机构的光破坏防御能力的大小可能影响着外来植物的入侵能力，研究并认识入侵植物空心莲子草的光破坏防御能力，将有助于深入了解其防御系统，并或许可找到一种相匹配的阻断剂来破坏其防御系统，从而达到有效控制空心莲子草的目的。叶绿素荧光特征能快速灵敏地反映植物生理状态及其与环境的关系。甲基紫精 (MV) 作为光系统 I (PSI) 电子传递

到 O_2 的有效人工次生电子受体，是细胞内产生氧化逆境的促进剂，常被用来研究 O_2^- 。介导的植物氧化伤害 (林植芳等, 1999)。本研究利用叶绿素荧光技术研究在光强 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下及 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MV 对两种入侵能力不同的莲子草光合系统稳定性的影响，试图探讨空心莲子草和刺花莲子草对光氧化胁迫的生理响应机制及其差异，并探索空心莲子草对生境的适应性机制及入侵特性，以期为我国南方这两种入侵植物的风险评估提供借鉴与参考。

1 材料与方 法

1.1 植物材料的培养和预处理

所用的两种莲子草植物空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 和刺花莲子草 (*A. pungens*) 均采自华南地区广东省广州市郊区的自然群体。剪取带芽茎段在培养箱内进行扦插繁殖，培养箱内的光照强度 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，培养温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}/28 \text{ }^\circ\text{C}$ ，光照周期为 16 h/8 h，相对湿度为 65%~70%。待生根后每周用 1/2 Hogland 营养液浇灌。取培养 30 d 后的苗的第三片成熟叶进行实验和测定。

光氧化处理参照 Shao *et al.* (2008) 的方法略加修改。取整片叶片放入 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MV 溶液，加入 0.01% Triton-100 渗透剂 (聚乙二醇辛基苯基醚)，抽真空 10 min。放置于温度为 $(28 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 、光强为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的人工气候箱内进行光氧化处理 360 min。通过预实验证实 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光强不会引起未经 MV 处理的莲子草叶片的任何光氧化胁迫。

1.2 色素分析

分别测定光氧化处理 0、360 min 时两种莲子草的色素含量。从空心莲子草和刺花莲子草上取两个 0.5 cm^2 大小的叶圆片用以色素含量的分析。叶绿素 a 和叶绿素 b 用 100% 丙酮提取，用紫外—可见分光光度计 (UV-2550, 日本岛津) 进行测定，按 Lichtenthaler *et al.* (1983) 的方法进行计算。类胡萝卜素含量的测定参照 Kornyushenko *et al.* (1970) 的方法。

1.3 总酚和类黄酮含量的测定

分别测定光氧化处理 0、360 min 时两种莲子草的总酚和类黄酮含量。取 1 cm^2 大小的叶圆片 (同时也进行称重)，加入盐酸-甲醇溶液 (盐酸 : 甲醇 =

1:99, v/v), 置于暗处 4 ℃ 下浸提 48 h, 将盐酸-甲醇提取液在分别 280 和 325 nm 下测定其吸光度值 (Fukumoto *et al.*, 2000)。

1.4 总抗氧化能力(DPPH·自由基清除能力)的测定

分别测定光氧化处理 0、180 和 360 min 时的两种莲子草的 DPPH·自由基清除能力。DPPH·自由基的清除能力按照彭长连等(2000)的方法进行测定。制备 50% 乙醇的叶片提取液和 DPPH·的 50% 乙醇溶液, 首先取两种莲子草的新鲜叶片各 0.1 g, 然后 $10\ 000\times g$ 离心 10 min。将上清液经过稀释后, 与紫红色的 DPPH·溶液进行反应, 利用 DPPH·溶液的特征紫红色团的吸收峰, 以分光光度法测定 525 nm 测定样品对 DPPH·紫红色液的褪色程度, 以 A_{525} 吸收值的下降表示其对有机自由基消除能力。

1.5 细胞成活率测定

分别测定光氧化处理 0、360 min 时两种莲子草的细胞成活率。按刘楠等(2011)的方法, 用伊文思蓝(Evans blue)染色对细胞坏死进行定量测定, 活细胞不会被染色, 死细胞会被染成蓝色。将光氧化处理 360 min 的莲子草叶片浸泡于 0.25% 的伊文思蓝水溶液 5 h, 用 75% (v/v) 的沸乙醇脱色。用 25 mL 1% SDS-50% 甲醇溶液把死细胞中的蓝色沉淀物溶解, 用紫外分光光度计(Lambda 650, Perkin-Elmer, CT, USA)测定其在 600 nm 下的吸光度值。未处理的对照叶片的乙醇提取物在 600 nm 下的吸光度定义为 1, 处理叶片的吸光度值与对照值的比值作为 MV 处理后的死细胞的值。

1.6 叶绿素荧光参数的测定

叶绿素荧光参数测定等用 PAM-2100 便携式荧光仪(德国 Walz 公司)。每个叶片每 30 min 测定 4~5 次, 直到叶片 PSII 最大光化学效率 F_v/F_m 接近 0 时停止测定。叶片暗适应 10 min 后, 用小于 $1\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的测量光测定 F_o 值(暗适应叶片最小荧光), 而后用饱和脉冲光 $2\ 700\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 照射 0.8 s, 测定 F_m 值(暗适应叶片最大荧光), 并计算出暗适应叶片 PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)。在光照光强度为 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下测定的荧光参数分别为 PSII 的实际光化学量子产量 ΦPSII , 光化学猝灭系数 qP , 表观光合电子传递速率 ETR 和非光化学猝灭 NPQ。

1.7 数据统计分析

所用数据均取 4~5 次重复测定的平均值。对

MV 处理的两种莲子草叶片之间的差异采用 *t*-检验。所有数据统计分析均用软件 SPSS 20.0 (SPSS, Chicago, IL), 作图用软件 SigmaPlot 12.5 (Systat Software, San Jose, CA, USA)。数值表示采用平均值 \pm 标准差, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 总酚、类黄酮和色素含量的变化

从图 1 看出, 两种入侵莲子草在 MV 处理 360 min 下叶片总叶绿素的含量和类胡萝卜素的含量均显著下降 ($P < 0.05$), 空心莲子草和刺花莲子草中的总叶绿素含量分别下降 18.3% 和 21.5%; 类胡萝卜素的含量分别下降 9.5% 和 14.6%。与空心莲子草相比, 刺花莲子草叶片中的总叶绿素含量下降幅度相对较大, 总叶绿素含量的下降主要是由叶绿素 a 的下降引起的(数据未列出)。刺花莲子草叶片中的叶绿素更容易被降解, 这意味着在光氧化胁迫下, 刺花莲子草对叶绿素保护的效果较弱。

由图 2:A、B 可知, 在光氧化胁迫处理前, 两种莲子草叶片中的总酚和类黄酮的含量无显著性差异 ($P > 0.05$)。MV 处理 360 min 后, 两种莲子草叶片中的总酚和类黄酮的含量均显著下降 ($P < 0.05$)。其中空心莲子草和刺花莲子草的类黄酮含量分别下降 16.4% 和 28.4%, 总酚的含量分别下降 8.0% 和 12.2%。与空心莲子草相比, 刺花莲子草叶片中的总酚和类黄酮含量下降幅度相对较大。

2.2 叶片总抗氧化能力(DPPH·自由基清除能力)和细胞死亡率的变化

由图 3 可知, 光氧化胁迫处理前, 两种莲子草的 DPPH·自由基清除能力之间无显著性差异。MV 处理 180 min 和 360 min 后, 两种入侵莲子草叶片的 DPPH·自由基清除能力均显著下降 ($P < 0.05$)。MV 处理 180 min 后, 空心莲子草和刺花莲子草叶片的 DPPH·自由基清除能力分别下降 15.8% 和 52.1%。随着 MV 处理时间延长至 360 min, 空心莲子草和刺花莲子草叶片的 DPPH·自由基清除能力分别下降 22.1% 和 67.7%。表明 MV 处理无论是 180 min 还是 360 min, 刺花莲子草均比空心莲子草在 DPPH·自由基清除能力方面表现出更大的下降幅度。

从图 4 看出, 光氧化胁迫处理 360 min 后, 空心莲子草和刺花莲子草的叶片细胞存活率分别为

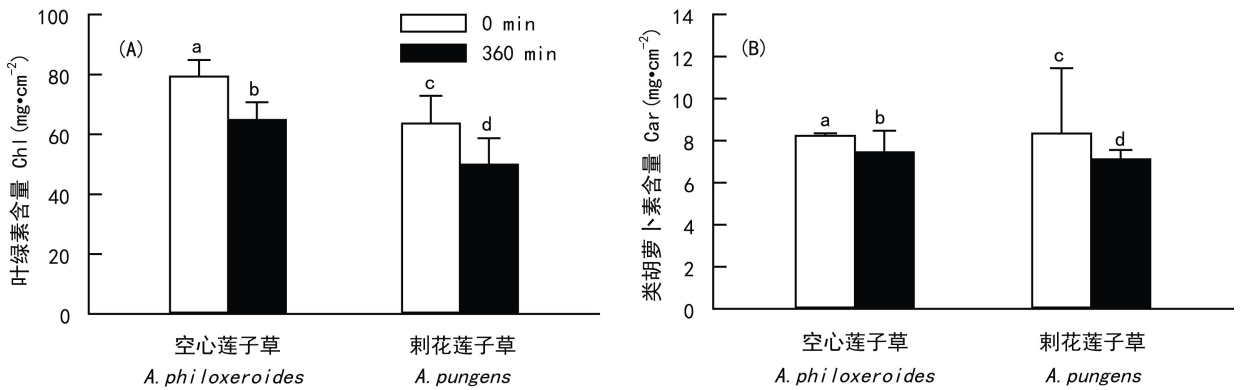


图 1 MV 介导的光氧化处理下两种入侵莲子草叶绿素(A)和类胡萝卜素(B)含量的变化 数据为平均值±标准误差, n=5。下同。

Fig. 1 Changes in the contents of total chlorophyll-Chl (A), and carotenoids-Car (B), in the leaves of *A. philoxeroides* and *A. pungens* exposed to a solution of $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen for 360 min at 28°C .

Data are mean±SE, n=5. The same below.

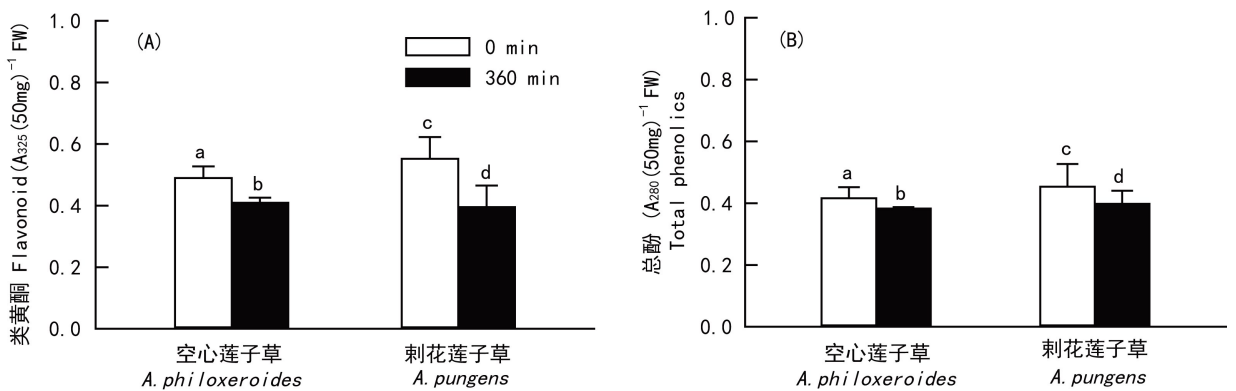


图 2 MV 介导的光氧化处理下两种入侵莲子草类黄酮(A)和总酚(B)含量的变化

Fig. 2 Changes in the content of total phenolics (A) and flavonoid (B) in the leaves of *A. philoxeroides* and *A. pungens* exposed to a solution of $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen for 360 min at 28°C .

84.8%和77.4%。与空心莲子草相比,刺花莲子草的细胞死亡率更高,表明光氧化胁迫处理诱发细胞损伤和死亡,刺花莲子草受到的伤害程度明显高于空心莲子草。

2.3 叶片叶绿素荧光参数的变化

两种莲子草叶片 F_v/F_m 的平均值为 0.76 左右, F_v/F_m 的平均值相对较低可能与暗适应的时间较短有关。在测定叶绿素荧光参数前,两种莲子草的叶片仅暗适应 10 min。若进行整晚暗适应,未经 MV 处理的叶片 F_v/F_m 值接近 0.8。光氧化处理条件下,两种莲子草叶片的 F_v/F_m 均表现出下降趋势。MV 处理 270 min 时,与 0 min 相比,空心莲子草和刺花莲子草叶片的 F_v/F_m 分别下降 73.7% 和 95.4%;刺花莲子草 PSII 光化学效率迅速下降,表现出更大的下降幅度(图 5),这表明刺花莲子草比空心莲子草对光氧化胁迫更敏感。另外,表观光合

电子传递速率 ETR、PSII 实际光能转化效率 ΦPSII 和光化学猝灭系数 q_P 均表现出相同趋势。ETR、 ΦPSII 和 q_P 这些叶绿素荧光参数的变化反映出刺花莲子草比空心莲子草对光氧化胁迫更加敏感。

非光化学猝灭系数 NPQ 可在强光下快速响应并将过量吸收的光能以热能形式耗散掉。 $Y(\text{NO})$ 是光损伤的重要指标,若 $Y(\text{NO})$ 较高,则表明光化学能量转换和保护性的调节机制(如热耗散)不足以将植物吸收的过量光能完全消耗掉。本实验中 $Y(\text{NO})$ 的增加是由于 PSII 过剩光能引起的损伤。光氧化处理 0~270 min,两种莲子草的 $Y(\text{NO})$ 表现出显著的增加趋势。与空心莲子草相比,刺花莲子草的 $Y(\text{NO})$ 表现更快速的增加趋势(图 6:A),表明刺花莲子草叶片受到更严重的光氧化损伤。光氧化处理(0~60 min)刚开始的时间内,两种莲子草的 NPQ 先表现出迅速增加随后才开始下降的趋势(图

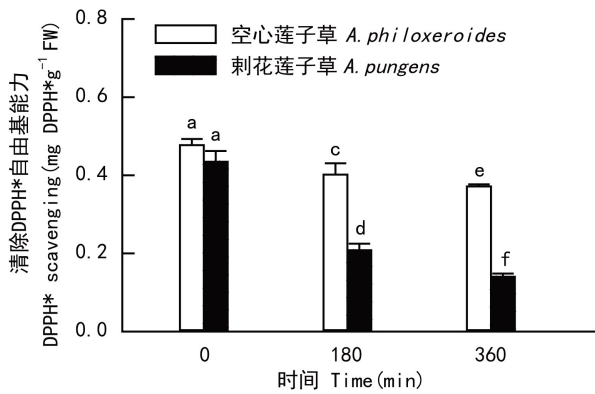


图3 MV介导的光氧化处理下两种入侵莲子草 DPPH·自由基清除能力的变化

Fig. 3 Changes in the total antioxidant capacity (DPPH· scavenging capacity) in the leaves of *A. philoxeroides* and *A. pungens* exposed to a solution of $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen at $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ for 180 min and 360 min.

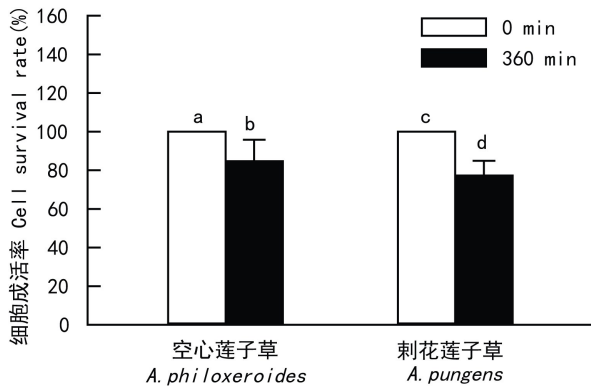


图4 MV介导的光氧化处理 360 min后两种入侵莲子草细胞成活率(%)的变化

Fig. 4 Changes in cell survival rate (%) in the leaves of *A. philoxeroides* and *A. pungens* exposed to a solution of $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen at $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ for 360 min.

6;B)。刺花莲子草和空心莲子草的 NPQ 分别在 MV 处理 60 min 和 90 min 时达到最高点,表明此时两种莲子草具备最强的热耗散能力。从图 6:B 看出,两种莲子草 NPQ 的走势并不同步,这可能与两种莲子草对光氧化胁迫的敏感性不同有关。空心莲子草在相对较长的时间内 NPQ 才能达到最高值,而刺花莲子草 NPQ 则很快就达到最高值,这意味着入侵能力较弱的刺花莲子草更依赖于热耗散这一途径应对光氧化胁迫。在最初的 60 min MV 处理下,这一现象与 F_v/F_m 、 qP 、ETR 和 ΦPSII 轻微的下降相一致,表明此时 PSII 的热耗散能力可维持光系统 II 的运转。前期(0~60 min)处理莲子草可

以通过自身的调控能力来缓解光氧化胁迫,但到了后期(60~270 min)则表现不可逆的损伤。在两种莲子草之间,刺花莲子草对 MV 诱导产生的光氧化胁迫更敏感。

3 讨论与结论

比较不同植物对光氧化胁迫的响应差异可按两个方面来进行。一是变化趋势是否存在差异?二是变化幅度是否存在差异?当变化趋势存在差异时,说明不同植物对光氧化胁迫反应存在不同的策略;在变化趋势相似情况下,需进一步判断其变化幅度是否相一致,如果变化幅度也相似,说明它们对光氧化胁迫的响应基本相同。当变化幅度存在较大差异时,说明它们尽管变化趋势相一致,但仍存在明显差异,而且这种差异可能具有一定的生理生态意义。基于此种思路,我们对空心莲子草和刺花莲子草叶片色素含量、总酚和类黄酮含量、总抗氧化能力和叶绿素荧光相关指标在光氧化胁迫处理过程中的反应进行了分析。研究发现两种莲子草在 MV 诱导的光氧化胁迫条件下,随着处理时间延长其叶绿素荧光参数的变化趋势基本一致(图 5,图 6),但刺花莲子草叶片的叶绿素荧光参数的变化幅度远高于空心莲子草。

叶绿素荧光特征能快速灵敏地反映植物生理状态及其与环境的关系,其参数具有各自的生理学意义。 F_v/F_m 表示植物叶片 PSII 最大的或潜在的量子效率,对于大多数正常生长的植物而言其值稳定在 0.8 左右,外界环境胁迫可导致其降低(周蕴薇等,2006;Zhang *et al.*,2012)。 ΦPSII 是 PSII 吸收的光能分配于光化学反应的比例,而 ETR 是根据 ΦPSII 计算得出,与光合速率存在很强的线性关系。本研究结果表明,随着光氧化胁迫处理时间的延长,两种莲子草叶片的各个荧光指标均表现为类似的变化趋势。当以 MV 处理 0 min 为对照处理,探讨光氧化胁迫影响各指标的变化幅度时,发现两种莲子草的变化幅度存在明显区别,各指标均表现为空心莲子草的变化幅度明显低于刺花莲子草。与色素含量变化相似(图 1),以叶绿素荧光指标为代表的两种莲子草叶片光合特征对光氧化胁迫的响应表现为刺花莲子草的叶片反应更敏感、变化幅度更大。其原因可能是在光氧化胁迫条件下,与空心莲子草相比,刺花莲子草的叶片获取光能用于光化学过程的

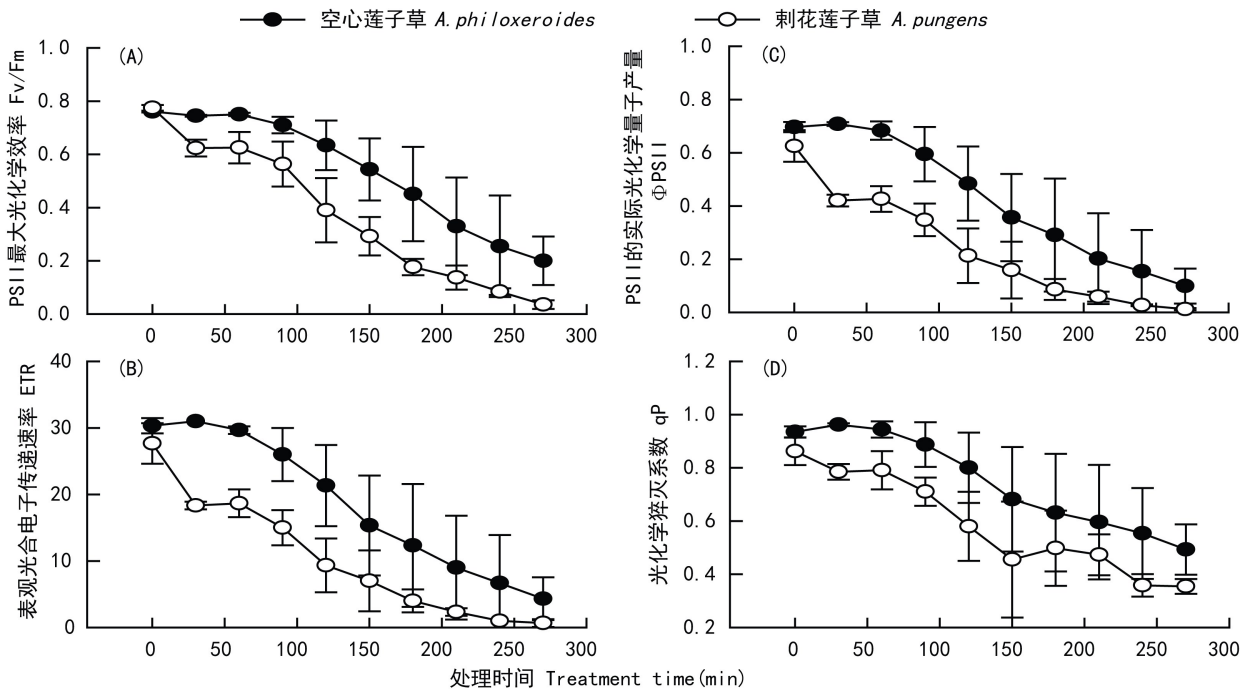


图5 MV介导的光氧化处理下两种入侵莲子草PSII最大光化学效率 F_v/F_m (A),表观光合电子传递速率ETR(B),PSII的实际光化学量子产量 Φ_{PSII} (C)和光化学猝灭系数 qP (D)的变化。整片叶子浸泡在 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的MV溶液中 28°C 下光氧化胁迫处理270 min。

Fig. 5 Effects of photooxidative treatment on the maximal PSII quantum yield- F_v/F_m (A), the electron transport rate-ETR (B), effective PSII quantum yield- Φ_{PSII} (C), and the coefficient of photochemical quenching- qP (D), in the leaves of *A. philoxeroides* and *A. pungens*. Photooxidative treatment was conducted with the whole leaves exposed to a solution of $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen at 28°C for 270 min.

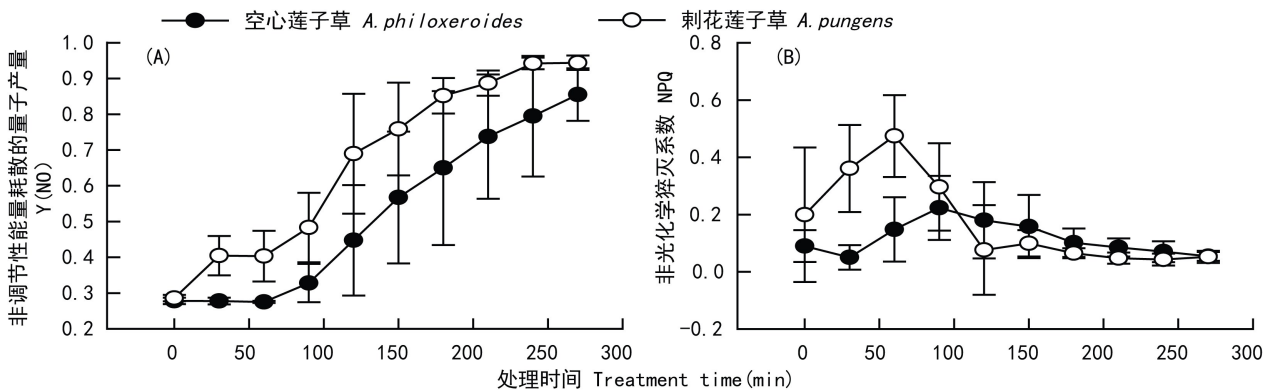


图6 MV介导的光氧化处理下两种入侵莲子草PSII非调节性能量耗散的量子产额 $Y(NO)$ (A)和非光化学猝灭系数NPQ(B)的变化。整片叶子浸泡在 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的MV溶液中 28°C 下光氧化胁迫处理270 min。

Fig. 6 Effects of photooxidative treatment on non-regulated heat dissipation (A)-a loss process due to PSII inactivity, $Y(NO)$, and non-photochemical quenching-NPQ (B), in the leaves of *A. philoxeroides* and *A. pungens*. Photooxidative treatment was conducted with the whole leaves exposed to a solution of $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ methyl viologen at 28°C for 270 min.

份额 qP 下降幅度较大,最大可达59%(空心莲子草则为47%);用于热耗散的份额NPQ则更大幅度地上升,最大可达74%(空心莲子草则为40%),这表明入侵能力较弱的刺花莲子草更依赖于热耗散这一

途径应对光氧化胁迫。综上所述,两种莲子草叶片色素含量及叶绿素荧光特征对MV诱导的光氧化胁迫反应特点可以概括为除了两种莲子草NPQ的走势并不同步,其它叶绿素荧光参数变化趋势基本

一致,但变化幅度刺花莲子草均高于空心莲子草。

关于空心莲子草防控的研究,目前面临的一个关键挑战就是找到一个行之有效的控制方法,或许我们可以找到一种匹配的抗氧化系统阻断剂来破坏空心莲子草的防御系统,从而达到有效控制空心莲子草的目的。刘华等(2003)研究表明,水生环境下空心莲子草营养器官的抗氧化物质含量高于陆生环境下空心莲子草相应营养器官的含量,这是植物体内一种生理生化的适应机制。许凯扬等(2004)的研究发现,空心莲子草在水分胁迫条件下,通过体内活性氧清除系统各酶之间的相互协调来维持活性氧代谢平衡,阻止或减弱膜脂过氧化伤害,维持空心莲子草的正常水分需求及叶绿素含量并保护细胞膜免受损伤。基于此,或许我们可以找到一种匹配的抗氧化系统阻断剂来破坏空心莲子草的防御系统

我国许多外来植物,尤其是最具入侵性的外来植物类群,即起源于美洲的一些多年生克隆植物,大多是有意引入,在爆发成灾前往往有一段潜伏期(Huang *et al.*, 2009)。在我们集中于解释植物成功入侵机制的同时,却忽视了对弱入侵性外来植物的研究(Pyšek *et al.*, 2008)。我们并不知道一些外来植物为何入侵性较弱,以及它们将来是否可能成为强入侵种,考虑到外来植物在爆发成灾后往往难以控制,加强对外来植物早期预警的研究就显得尤为重要(黄乔乔等, 2012)。总的来看,入侵能力强的空心莲子草与入侵能力相对较弱的刺花莲子草相比,其叶绿素、类胡萝卜素、总酚和类黄酮含量均表现相对较小的下降幅度,其细胞死亡率也相对较低,表现出对光氧化胁迫较高的忍耐能力,这可能与总酚和类黄酮含量以及 DPPH·自由基清除能力的高维持能力有关。因此,空心莲子草具有较高的总酚和类黄酮以及 DPPH·自由基清除能力的维持能力可能是其光合系统稳定性较高、入侵能力较强和危害性更大的重要原因之一。

参考文献:

Chen FP(陈飞鹏), Ji SY(暨淑仪), Xing FW(邢福武). 1993. A record of three plant species new to Hainan province(海南植物增补)[J]. *J South Chin Agric Univ*(华南农业大学学报), **14**(3): 99-101

Fukumoto LR, Mazza G. 2000. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds[J]. *J Agric Food Chem*, **48**: 3 597-3 604

Hertling UM, Lubke RA. 2000. Assessing the potential for biological invasion the case of *Ammophila arenaria* in South Africa[J].

S Afr J Sci, **96**(9-10): 520-527

Huai HY(淮虎银), Jin YG(金银根), Zhang B(张彪), *et al.* 2003. Habitat diversity of an alien plant *Alternanthera philoxeroides* and its characteristics(外来植物空心莲子草分布的生境多样性及其特征)[J]. *Weed Sci*(杂草科学), (1): 18-20

Huang QQ(黄乔乔), Shen YD(沈奕德), Li XX(李晓霞), *et al.* 2012. Research progress on the distribution and invasiveness of alien invasive plants in China(外来入侵植物在中国的分布及入侵能力研究进展)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报) **21**(5): 977-985

Huang QQ, Wu JM, Bai YY, *et al.* 2009. Identifying the most noxious invasive plants in China: role of geographical origin, life form and means of introduction[J]. *Biodiver Conserv*, **18**: 305-316

Kato M, Shimizu S. 1985. Chlorophyll metabolism in higher plants VI. Involvement of peroxidase in chlorophyll degradation[J]. *Plant Cell Physiol*, **26**: 1 291-1 301

Kornysushenko GA, Popova IA. 1970. Comparative characteristics of methods of paper and thin-layer chromatography of green leaf carotenoids[J]. *Fiziol Rast* (Moscow), **17**: 1 011-1 016

Lichtenthaler HK, Wellburn AR. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents[J]. *Biochem Soc Trans* **11**: 591-592

Lin GL(林冠伦), Yang YZ(杨益众), Hu JS(胡进生). 1990. Studies on biology and control of *Alternanthera philoxeroides* (空心莲子草生物学及防治研究)[J]. *J Jiangsu Agric Coll* (江苏农学院学报), **11**(2): 57-63

Lin ZF(林植芳), Peng CL(彭长连), Lin GZ(林桂珠). 1999. Membrane injury and PSII inactivation in some subtropical woody plants induced by photooxidation(光氧化作用引起几种亚热带木本植物膜损伤和 PSII 失活)[J]. *Acta Bot Sin*(植物学报), **41**(8): 871-876

Liu CH, Yu D. 2004. Invade mechanism and controls of *Alternanthera philoxeroides* [M]// Xu RM, Ye WH(Eds). The theories and practice of biological invasion. Beijing: Science Press, 219-235

Liu H(刘华), Wu GR(吴国荣), Lu CM(陆长梅), *et al.* 2003. Comparison of contents of anti oxidant compounds of *Alternanthera philoxeroides* in aquatic and terrestrial environments(不同生境下喜旱莲子草营养器官中抗氧化物质含量的比较)[J]. *Guihaia*(广西植物), **23**(3): 279-281

Liu N(刘楠), Lin ZF(林植芳). 2011. Use of Evans blue for testing cell viability of intact leaves of plant(用伊文思蓝染色法检测植物整体叶片的细胞活性)[J]. *Plant Physiol J*(植物生理学报), **47**(6): 570-574

Long SP, Humphries S, Falkowski PG. 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature[J]. *Annu Rev Plant Biol*, **45**: 633-662

Peng CL(彭长连), Chen SW(陈少薇), Lin ZF(林植芳), *et al.* 2000. Detection of antioxidative capacity in plants by scavenging organic free radical DPPH(用清除有机自由基 DPPH 法评价植物抗氧化能力)[J]. *Prog Biochem Biophys*(生物化学与生物物理进展), **27**: 658-661

Pyšek P, Richardson D M, Pergl J, *et al.* 2008. Geographical and taxonomic biases in invasion ecology[J]. *Trend Ecol Evol*, **23**: 237-244

(下转第 425 页 Continue on page 425)