

臭氧与干旱胁迫对盆架子和海南蒲桃幼苗荧光生理的影响*

叶龙华¹ 易立飒² 黄威龙³ 赖敏婷¹ 莫云豹¹ 张春花¹

(1. 广东省林业科技推广总站, 广东广州 510173; 2. 广州市儿童公园, 广东广州 510403;

3. 广州懒猫木阳台装饰工程有限公司, 广东广州 510419)

摘要 以臭氧和干旱交叉胁迫下盆架子 *Alstonia scholaris* 和海南蒲桃 *Syzygium hainanense* 为研究对象, 测定其荧光参数变化, 为华南地区选择抗逆树种提供参考。对 2 种幼苗进行人工臭氧熏气和干旱处理后, 用荧光仪测定其叶绿素荧光参数的动态。随着胁迫时间的延长, 盆架子幼苗的最小初始荧光 F_0 无显著变化, 海南蒲桃幼苗则呈上升趋势。盆架子幼苗的 F_v/F_m 呈下降趋势, 海南蒲桃幼苗先升后降或波动。E150 处理的两种幼苗的 PS II 实际光量子效率先降后升, 其余处理的呈下降趋势。E20、E40+D 和 E150 处理的盆架子幼苗的 NPQ 显著上升后降, 其余处理的盆架子幼苗和所有处理的海南蒲桃幼苗呈下降趋势。研究表明, 盆架子幼苗的抗臭氧或干旱能力强于海南蒲桃幼苗, 适宜作为抗臭氧或干旱的树种。

关键词 臭氧胁迫; 干旱胁迫; 盆架子; 海南蒲桃; 幼苗; 荧光生理

中图分类号: Q945.11 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 04-0060-05

Effects of Ozone and Drought on Fluorescence Physiology of *Alstonia scholaris* and *Syzygium hainanense* Seedlings

YE Longhua¹ YI Lisa² HUANG Weilong³ LAI Minting¹
MO Yunbao¹ ZHANG Chunhua¹

(1. Guangdong Provincial Extension Station of Forestry Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510173, China;

2. Guangzhou Children's Park, Guangzhou, Guangdong 510403, China; 3. Guangzhou LazyCat Co, Ltd, Guangzhou, Guangdong 510419, China)

Abstract This study was conducted to understand the fluorescent physiology under cross stress of ozone and drought in *Alstonia scholaris* and *Syzygium hainanense* seedlings in order to provide reference for choosing stress-resistant tree species in South China. *A. scholaris* and *S. hainanense* seedlings were treated with ozone fumigation and drought treatment, and then their chlorophyll fluorescence parameters were determined using fluorimeter. The results showed that with increasing treatment time, there was no significant change in minimal initial fluorescence (F_0) for *A. scholaris* seedlings, whereas that of *S. hainanense* seedlings tended to increase. PSII maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) of *A. scholaris* seedlings tended to decrease, whereas that of *S. hainanense* increased followed by a decrease. Active quantum efficiency of PSII [$Y(II)$] of the seedlings of two species treated with E150 decreased followed by an increase, whereas those treated with other methods tended to decrease. Non-photochemical quenching (NPQ) of *A. scholaris* seedlings treated with E20、E40+D and E150 increased followed by a decrease, whereas that treated with other methods and *S. hainanense* seedlings

* 基金项目: 广东省林业科技计划项目 (2019-07); 广东省林业局资助项目 (F09054)。

第一作者: 叶龙华 (1988—), 男, 工程师, 从事森林培育、森林生态、林业科技管理工作, E-mail: yelonghuayongshi@163.com;

通信作者: 张春花 (1979—), 女, 高级工程师, 主要从事林业标准化、技术推广工作, E-mail: 987797620@qq.com。

treated with all methods tended to decrease. We concluded that the ability to resist ozone or drought of *A. scholaris* seedlings was stronger than *S. hainanense* seedlings.

Key words stress of ozone; stress of drought; *Alstonia scholaris*; *Syzygium hainanense*; seedlings; fluorescence physiology

近年来, 由于经济的高速发展以及工业发展引起近地层的臭氧浓度逐渐变高, 本世纪末大气中的臭氧浓度逐渐升高^[1]。臭氧胁迫严重影响植物的生理活动^[2], 导致叶绿体受损, 破坏光合色素^[3], 降低光合速率, 抑制气孔开放, 降低光合电子传递效率^[4-5]。在荧光反应中, 高浓度的臭氧抑制光合系统 (PSII) 反应中心的活性, 降低光化学效率^[6]。干旱主要是对植物的光合作用有着胁迫以及抑制的作用, 损伤光合器官, 减少植物叶片的叶绿素含量, 引起叶绿素荧光参数的变化, 植物体内酶活性发生改变等一系列变化^[7-10]。

由于自然界干旱和臭氧逆境往往同时存在, 二者对植物有着的交互作用。此种交互作用可能是拮抗的 (通过引起气孔关闭), 或是协同的 (通过刺激活性氧的过量生产)^[11]。植物对臭氧和干旱胁迫的响应过程不仅取决于两种胁迫作用的先后次序和持续时间, 而且受到植物本身生理代谢差异的影响^[12]。Temple 等^[13]研究表明, 臭氧和干旱可以导致植物进一步减少干旱情况下植物光合产物转移幅度; 李秋静等^[14]发现尖叶杜英 (*Elaeocarpus apiculatus*)、米老排 (*Mytilaria laosensis*) 和藜蒻 (*Castanopsis fissa*) 在臭氧以及干旱胁迫下, 3 种幼苗气体交换参数发生变化, 以适应胁迫; 陶汉成等^[15]研究了臭氧浓度升高和干旱对紫丁香光合生理特性的影响, 并指出适度干旱减缓了臭氧对紫丁香光合作用的不利影响。探讨臭氧与干旱对植物交互作用的机理, 可以揭示植物适应胁迫的生理生化机制, 从而找出逆境状态下生物进化的若干规律。盆架子 (*Alstonia scholaris*) 和海南蒲桃 (*Syzygium hainane*) 是我国华南地区重要的园林绿化树种。尽管前人对这两个树种在

低温胁迫下的生理特性^[16-17]、臭氧与干旱交叉胁迫下的光合特性进行过研究^[18], 但是尚未见到臭氧和干旱交叉胁迫下这两个树种叶绿素荧光特性的报道。研究臭氧与干旱胁迫下两种幼苗荧光生理的变化, 可以为抗臭氧与干旱胁迫树种的选择提供依据, 对于改善生态环境具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于华南农业大学跃进北苗圃。将 1 年生海南蒲桃和盆架子实生苗栽植于直径和高分别为 12 和 10 cm 的营养袋中, 置于直径 3.0 m 和高 2.4 m 的熏气设备采用开顶式熏气室。臭氧来源于 CFY5 制氧机及 COM-AD-01 臭氧发生器, 使用 GT901-03 便携式臭氧检测仪监测臭氧浓度。试验最初时的幼苗基本生长情况见表 1。

1.2 试验方法

熏气室内设 3 个臭氧处理, 分别是: E20 (安装碳过滤装置, 经过滤后熏气室的臭氧浓度为周围环境的二分之一, 约为 20 nL/L); E40 (仅通风不通臭氧, 熏气室的臭氧浓度和大气中自然的臭氧浓度相同, 约为 40 nL/L); E150 (臭氧浓度约为 150 nL/L)。每个臭氧处理设 2 个水分梯度, 即 ①对照: 土壤相对含水量为 75% -80%; ②干旱处理: 土壤相对含水量为 40% -45%。臭氧和干旱胁迫共组合成 6 种处理, 分别是: E20 (过滤)、E40 (对照)、E150 (臭氧胁迫)、E20+D (过滤+干旱)、E40+D (不通臭氧+干旱, 即干旱胁迫)、E150+D (150 nL/L 臭氧+干旱, 即臭氧与干旱交叉胁迫)。每天通臭氧时间为 9:00-17:00 时。每天 18:00 时称量整个营养袋, 计算土壤相对含水量,

表 1 2 种幼苗生长基本情况

Table 1 Growth status of seedlings of two species

| 树种 Species | 平均地径 /mm Average ground diameter | 平均苗高 /cm Average height | 平均冠幅 /cm Average corwn width |
|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 海南蒲桃 <i>Syzygium hainanense</i> | 4.50 ± 0.18 | 32.97 ± 0.89 | 14.77 ± 0.64 |
| 盆架子 <i>Alstonia scholaris</i> | 3.15 ± 0.18 | 32.97 ± 0.95 | 12.67 ± 0.48 |

注: 表中数值为平均值 ± 标准误
Note: the date are mean ± SE

用称重补水法控制土壤相对含水量在设定范围内。在0、15和30 d时,测定各项荧光指标。

1.3 指标测定方法

选取生长状况一致的3株幼苗,在每株幼苗的第3位至第8位功能叶间选取3枚叶片挂牌标记。于早晨9:00-11:00采用脉冲调制荧光仪OS-1P将测定测试叶片在暗适应20 min后,在非化学淬灭(NPQ)模式下设定每次测量时间为1 min,每次测量3次重复,分别测定光下初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、任意时间实际荧光(F')、光适应下最大荧光(F_m')。计算变动荧光值($F_v = F_m - F_0$)、PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、非光化学淬灭($NPQ = F_m'/F_m - 1$)、PSII实际光化学效率 $Y(II) = (F_m' - F')/F_m'$ 。

1.4 数据分析

数据统计分析和作图由Microsoft Excel 2010和SAS 9.0软件进行Duncan's多重比较。

2 结果与分析

2.1 臭氧胁迫和干旱胁迫下幼苗的最小初始荧光变化

随着时间的延长,E20处理的盆架子幼苗的最小初始荧光 F_0 先下降后上升(图1)。荧光 F_0 在E20+D、E40、E40+D和E150的处理条件下没有显著差异。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d上升2.94%、6.85%、7.22%和13.48%。随着时间延长,E20处理的海南蒲桃幼苗的最小初始荧光 F_0 下降后显著上升($P < 0.05$),而E40和E40+D的处理下最小初始荧光 F_0 显著上升后下降($P < 0.05$)。在E20+D、E150和E150+D的处理当中幼苗 F_0 持续上升。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d上升25.04%、26.32%、23.88%和22.20%。

2.2 臭氧胁迫和干旱胁迫下幼苗的最大光化学效率变化

随着时间的延长,E20、E40和E40+D处理的盆架子幼苗的 F_v/F_m 小幅波动后显著下降($P < 0.05$)(图2)。E20+D、E150和E150+D处理的幼苗的 F_v/F_m 持续下降。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d下降15.50%、25.99%、15.69%和14.99%。随着时间延长,E20处理的海南蒲桃幼苗的 F_v/F_m 小幅上升后显著下降($P < 0.05$)。E20+D、E40、E40+D和E150处理的

幼苗的 F_v/F_m 持续下降。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d下降7.90%、27.31%、7.63%和0.04%。

2.3 臭氧胁迫和干旱胁迫下幼苗的PSII实际光量子效率变化

随着时间的延长,E20和E20+D处理的盆架子幼苗的PSII实际光量子效率显著下降($P < 0.05$)(图1)。E40和E40+D处理的幼苗的PSII实际光量子效率小幅上升后显著下降($P < 0.05$)。E150处理的幼苗先显著下降后小幅上升($P < 0.05$),而E150+D处理的先显著上升后下降($P < 0.05$)。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d下降47.98%、51.66%、29.22%和3.57%。随着时间的延长,E20和E150+D处理的海南蒲桃幼苗的PSII实际光量子效率小幅上升后显著下降($P < 0.05$)。E20+D、E40和E40+D处理的幼苗显著下降($P < 0.05$)。E150处理的幼苗显著下降后上升($P < 0.05$)。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d下降54.59%、30.87%、9.79%和42.83%。

2.4 臭氧胁迫和干旱胁迫下种幼苗的非光化学淬灭变化

随着时间的延长,E20、E40+D和E150处理的盆架子幼苗的NPQ先显著上升后显著下降($P < 0.05$)(图1)。E20+D和E40处理的幼苗持续下降。E150+D处理的幼苗的NPQ小幅下降。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d下降28.39%、31.82%、18.72%和6.62%。随着时间延长,E20、E20+D、E40和E40+D处理的海南蒲桃幼苗的NPQ显著下降($P < 0.05$)。E150和E150+D处理的幼苗的NPQ小幅下降小幅下降后上升。E20+D、E40+D、E150和E150+D处理的30 d时分别比0 d下降27.76%、33.45%、4.37%和11.43%。

3 结论与讨论

F_0 作为叶绿素PSII反应中心全部开放时的最小初始荧光水平,受到PSII天线色素、PSII反应的结构状态和叶绿素状态有关^[19]。通常, F_0 的升高表示PSII反应受到胁迫,甚至失活^[20]。在本次研究当中,随着胁迫时间的延长,盆架子幼苗的 F_0 保持稳定,海南蒲桃幼苗的 F_0 多有不同程度的升高,说明前者启动了光保护作用的调节机制,

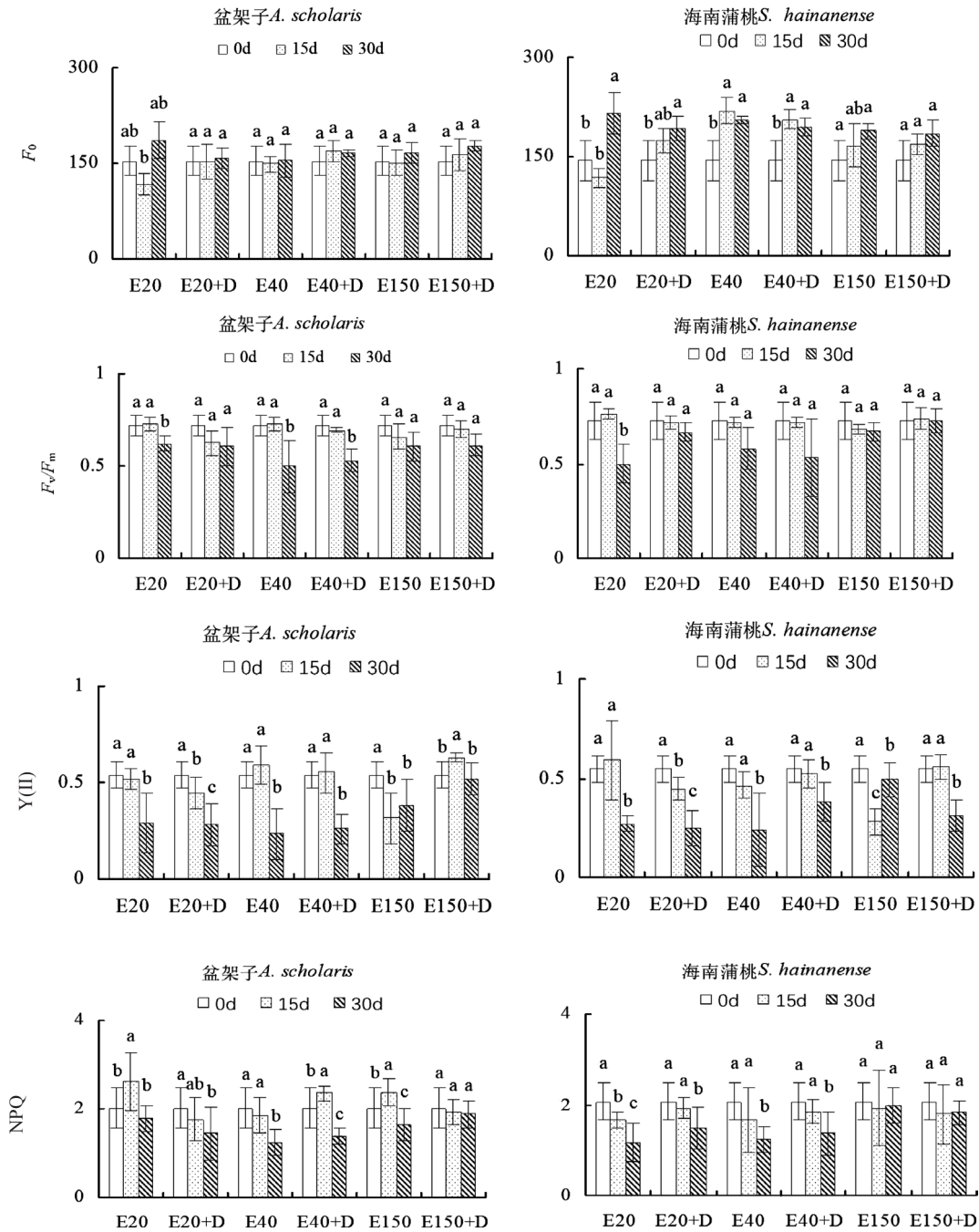


图 1 臭氧胁迫和干旱胁迫下盆架子和海南蒲桃荧光参数的变化

Fig. 1 The change of fluorescence physiology under O_3 stress and drought stress of *A. scholaris* and *S. hainanense*

注：图中横坐标分别表示臭氧和干旱胁迫共组合成的 6 种处理，即：E20(过滤)、E40(对照)、E150(臭氧胁迫)、E20+D(过滤+干旱)、E40+D(不通臭氧+干旱，即干旱胁迫)、E150+D(臭氧+干旱，即臭氧与干旱交叉胁迫)。a,b,c 为多重比较结果，不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Note: There are 6 treatments including E20 filtration, E40 (Control), E150 (Under O_3 stress), E20+D (filtration+drought stress), E40+D (drought stress), E150+D (under O_3 stress and drought stress). a, b, c mean significant differences ($P < 0.05$)

免遭强光的破坏^[21]。

F_v/F_m 是暗适应下 PSII 的最大光化学效率，反映了 PSII 反应中心捕获激发能的效率与利用能力，其值降低是发生光抑制的重要表征^[22]。在本次研

究当中，随着时间延长，两种幼苗的 F_v/F_m 均有所下降，可能在胁迫的作用下，降低了叶片 PSII 反应中心的转化率^[23]，表明植物利用自身的保护机制使过剩的激发能通过非光化学途径耗散，从而

阻止了由于激发能积累引起的 PSII 的损害^[24]。

盆架子和海南蒲桃随着臭氧和干旱处理时间的延长,在 30 d 时,两个树种的 Y(II) 均比初始状态显著下降。说明在胁迫环境中,使得光合电子传递过程受阻,抑制了电子传递,使 PSII 吸收的光能转变成化学能的比例降低,影响了植物对碳的固定和同化^[25]。

盆架子幼苗在 E20、E40+D 和 E150 处理当中,非光化学猝灭系数(NPQ)随着时间的延长显示出先上升后下降的趋势,使过剩的激发能通过非光化学途径耗散,可以主动缓解激发能积累引起的 PSII 的损伤^[26],但是由于通过增加光的耗散而降低光抑制程度,以保持植物较高的光合效率来表现出相对较强的环境适应性,当达到一定适应程度消耗减少导致 NPQ 下降。海南蒲桃的 NPQ 在各组处理中呈现持续下降的趋势,表明 PSII 天线热耗散的保护能力被显著削弱。

从 4 种荧光指标综合判断,盆架子幼苗的抗臭氧或干旱的能力强于海南蒲桃,前者适宜选做抗臭氧或干旱种类。

参考文献

- [1] IPCC. CLIMATECHANGE 2001 - The Scientific Basis[M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2002.
- [2] 列淦文, 薛立. 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 294-306.
- [3] Calatayud A, Iglesias D J, TALÓN M, et al. Effects of 2-month ozone exposure in spinach leaves on photosynthesis, antioxidant systems and lipid peroxidation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2003, 41(9): 839-845.
- [4] Ryang S Z, Woo S Y, Kwon S Y, et al. Changes of net photosynthesis, antioxidant enzyme activities, and antioxidant contents of *Liriodendron tulipifera* under elevated ozone[J]. Photosynthetica, 2009, 47(1): 19-25.
- [5] Witing V E, Ainsworth E A, Naidu S N, et al. Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2009, 15: 396-424.
- [6] 罗克菊, 朱建国, 刘钢, 等. 臭氧胁迫对水稻的光合损伤与施氮的缓解作用[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 294-306.
- [7] 冯慧芳, 薛立, 任向荣, 等. 4 种阔叶苗木对 PEG 模拟干旱的生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 371-382.
- [8] Ekmekci Y, Bohms A, Thomson J A, et al. Photochemical and antioxidant responses in the leaves of *Xerophyta viscosa* Baker and *Digitaria sanguinalis* L, under water deficit[J]. Z Naturforsch, 2005, 60(5/6): 435-443.
- [9] 刘伟新, 郑会全, 胡德活, 等. PEG6000 模拟水分胁迫对杉木家系苗木生理生化指标的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(2): 19-24.
- [10] 叶龙华, 黄香兰, 薛立. 干旱对树木叶片性状及抗旱生理的影响[J]. 世界林业研究, 2014, 27 (1): 29-34.
- [11] 列淦文, 薛立. 臭氧与其他环境因子对植物的交互作用[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1678-1687.
- [12] 高峰, 李品, 冯兆忠. 臭氧与干旱对植物复合影响的研究进展[J]. 植物生态学报, 2017, 41 (2): 252-268.
- [13] Temple P J, Riechers G H, Miller P R. Foliar injury responses of ponderosa pine seedlings to ozone, wet and dry acidic deposition, and drought[J]. Environmental and Experimental Botany, 1992, 32: 101-113.
- [14] 李秋静, 卢广超, 薛立, 等. 臭氧与干旱交叉胁迫对 3 树种幼苗光合生理的影响[J]. 广东林业科技, 2014, 30(2): 45-51.
- [15] 陶汉成, 徐胜, 付伟, 等. 臭氧浓度升高和干旱对紫丁香光合生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(11): 186-190.
- [16] 何跃君, 薛立, 任向荣, 等. 低温胁迫对六种苗木生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 524-531.
- [17] 王相娥, 薛立, 谢腾芳, 等. 低温处理对 6 种园林绿化树种幼苗生理生化特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(3): 139-142.
- [18] 郝云亭, 林敏, 薛立, 等. 臭氧与干旱胁迫对海南蒲桃和盆架子幼苗光合生理的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(2): 193-197.
- [19] 种培芳, 李毅, 苏世平, 等. 荒漠植物红砂叶绿素荧光参数日变化及其与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 539-545.
- [20] 卢从明, 张其德, 匡廷云. 水分胁迫对小麦光系统 II 的影响[J]. 植物学报, 1994, 36(2): 93-98.
- [21] 徐德聪, 吕芳德, 刘小阳, 等. 不同品种美国山核桃叶绿素荧光参数日变化的研究[J]. 激光生物学报, 2007, 16(3): 259-265.
- [22] 王亮, 曾青, 冯兆忠, 等. 开放式臭氧浓度升高对 2 个冬小麦品种光合损伤的研究[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 527-534.
- [23] 夏建国, 兰海霞, 吴德勇. 铅胁迫对茶树生长及叶片生理指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 43-48.
- [24] 卢广超, 许建新, 薛立, 等. 干旱胁迫下 4 种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7872-7888.
- [25] 梁芳, 郑成淑, 孙宪芝, 等. 低温弱光胁迫及恢复对切花菊花光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 29-35.
- [26] 卢广超, 许建新, 薛立, 等. 低温胁迫对 4 种幼苗的叶绿素荧光特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(2): 44-49.