

华南地区 8 种藤本植物叶绿素荧光特性 对模拟二氧化硫污染的响应

关岚岚^{1,2}, 刘楠¹, 韦强¹, 简曙光^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园广东省数字植物园重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:研究了模拟 SO₂ 处理对 8 种华南地区常见盆栽藤本植物离体叶片的叶绿素荧光参数、快速光响应曲线 (RLC)、叶片总抗氧化能力(清除有机自由基 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl 水平)和叶片色素含量的影响。结果表明, 经过 10 h 的 20 mmol/L NaHSO₃ 浸泡, 8 种藤本植物离体叶片的 Fv/Fm, Φ_{PSII} , rETR, rETR_{max} 和 RLC 初始斜率 α 与对照(纯净水浸泡)相比有明显下降。8 种供试植物的叶片总抗氧化能力和叶片色素含量的变化存在种间差异。8 种藤本植物中龙吐珠(*Clerodendron thomsonae*)、锦屏藤(*Cissus sicyoides*)和禾雀花(*Mucuna birdwoodiana*)是对模拟 SO₂ 抗性较强的绿化藤本植物, 抗性较差的是首冠藤(*Bauhinia corymbosa*)、红花西番莲(*Passiflora coccinea*)和宝巾(*Bougainvillea glabra*)。

关键词: 藤本植物; 叶绿素荧光; 大气污染; 抗污能力

中图分类号: Q945.78

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2008)02-0095-09

Responses of Chlorophyll Fluorescence to Simulated SO₂ Pollution in Eight Liana Species in South China

GUAN Lan-lan^{1,2}, LIU Nan¹, WEI Qiang¹, JIAN Shu-guang^{1*}

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangdong Key Laboratory of Digital Botanical Garden, Guangzhou 510650, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: We investigated the effects of simulated SO₂ treatment on chlorophyll fluorescence parameters, rapid light-response curves, anti-oxidant capacity (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical-scavenging capacity) and photosynthetic pigment contents in the excised leaves of eight liana species. After leaf sections were immersed in 20 mmol/L NaHSO₃ for 10 h, Fv/Fm, Φ_{PSII} , rETR, rETR_{max} and initial slope (α) of rapid light-response curves decreased compared with the controls (in purified water). Variation tendencies in anti-oxidant capacities and chloroplast pigment contents differed among species. It is deduced that *Clerodendron thomsonae*, *Cissus sicyoides* and *Mucuna birdwoodiana* had higher tolerance to simulated SO₂ treatment, whereas *Bauhinia corymbosa*, *Passiflora coccinea*, *Bougainvillea glabra* were sensitive to simulated SO₂ pollution.

Key words: Liana; Chlorophyll fluorescence; Air pollution; Pollutant-resistance

化石燃料燃烧产生大量 CO₂ 的同时, 也释放 SO₂ 等污染物, 其浓度随 CO₂ 的增高以一定的比例增加^[1]。中国作为世界上第一大煤炭消费国, 比其他发展中国家面临着更为严峻的 SO₂ 污染风险。

2006 年, 我国二氧化硫排放量为 2.589×10^7 t, 其中工业排放量为 2.235×10^7 t, 比上年有所增长, 珠江三角洲地区的酸雨污染也非常严重^[2]。

SO₂ 是一种广泛扩散的大气污染物, 是酸雨的

收稿日期: 2007-07-02 接受日期: 2007-09-27

基金项目: 广东省科技计划项目(2004B33301016, 2006B60101034); 广州市天河区科技计划项目(056G025); 佛山市高明区科技计划项目(2007N03)联合资助

* 通讯作者 Corresponding author

主要来源,其对环境的作用包括土地、湖泊与河流的酸化,以及对植物的伤害。 SO_2 污染严重地区的植物,体内含硫量明显增加,可累计的硫的限量是正常含量的 5~10 倍^[3]。 SO_2 进入细胞后与水作用形成有毒的 HSO_3^- ,在细胞间质内进一步转化成为 SO_3^{2-} ^[4],后者作为亲核类物质通过打开蛋白质的 S-S 键攻击许多酶反应底物,导致铁氧环蛋白失活、抗坏血酸氧化酶钝化、限制 mRNA 的表达等^[3,5]。 $\text{SO}_2/\text{HSO}_3^-$ 导致叶绿体等部位的还原,抑制卡尔文循环酶,影响电子传递速率^[6]。叶绿体是 SO_2 及其在水溶液中各种形式的主要攻击目标,对叶绿体的损伤造成了净 CO_2 同化的减少,电子传递速率的下降和光合作用暗反应的抑制^[7-8]。

为了改善珠江三角洲地区城市环境质量,提高城市绿化率及绿化质量是有效途径之一,也是建设生态城市的重要措施。藤本植物是一类不能直立、只能匍匐地面或依赖其它物体支持向上攀升的植物,在园林绿化中具有独特的优势。这类植物一般生长迅速、易于造型,且占地面积小,能够缓解绿化用地和建筑用地的矛盾。藤本植物还能够保持建筑物与周围环境协调一致,改善视觉卫生条件,从而增进人与自然的和谐^[9]。在筛选具有抗大气污染特性的城市绿化植物时,通常是将污染地区或污染气体密闭空间内栽种的植物与清洁环境中健康植物的生长状况进行对比^[10]。这种方法虽然简便直观,但缺乏对植物抗性机理的深入探讨和解释。此外, SO_2 熏蒸条件下,由于不同植物叶片表面的气孔数目,气孔开度的调节和表皮、角质层及蜡质厚度存在差异,因而进入叶肉细胞的 SO_3^{2-} 浓度往往不能保证统一,植物细胞受到的污染胁迫可能不一致。由于 SO_2 对植物体的伤害主要体现在 HSO_3^- 和 SO_3^{2-} 的毒性,已有研究利用 NaHSO_3 溶液浸泡处理植物叶片,以模拟 SO_2 污染,排除了气孔和叶片表面结构的限制^[11],并得到了与 SO_2 熏蒸相类似的植物体受害症状^[12]。本文利用 NaHSO_3 溶液浸泡植物叶圆片,对几种有较好开发利用前景的城市绿化藤本植物进行抗性的比较研究,以探讨植物在污染条件下的抗性机理,为筛选抗污染的绿化藤本植物提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 植物材料

试验材料为栽种于中国科学院华南植物园内

的 8 种绿化藤本植物:锦屏藤(*Cissus sicyoides* 葡萄科)、鸡蛋果(*Passiflora edulis* 西番莲科)、红花西番莲(*Passiflora coccinea* 西番莲科)、龙吐珠(*Clerodendron thomsonae* 马鞭草科)、炮仗花(*Pyrostegia venusta* 紫葳科)、首冠藤(*Bauhinia corymbosa* 苏木科)、禾雀花(*Mucuna birdwoodiana* 蝶形花科)和宝巾(*Bougainvillea glabra* 紫茉莉科)。锦屏藤、鸡蛋果和红花西番莲为草质藤本,其余 5 种均为木质藤本。所有植物均为人工栽种的盆栽苗,常规水肥管理,每种材料 4 盆。在 2007 年春季进行模拟 SO_2 污染处理并测定叶片的各项生理指标。

1.2 模拟 SO_2 处理

每种植物选取不同个体同一叶位的成熟叶片 ($n > 5$) 进行离体处理和各项分析测定。处理前,对每种植物叶片打孔,获得 7~8 个叶圆片(面积 2 cm^2)。相关研究表明浓度低于 8 mmol/L 的 NaHSO_3 溶液能抑制光呼吸过程,对光合作用具有一定的促进作用^[13];而浓度高于 50 mmol/L 的 NaHSO_3 溶液对一些木本植物离体叶片的光合机构伤害过快^[12],不易测定离体叶片在 NaHSO_3 短期处理过程中的生理变化。因此,在参照了广州地区降雨酸度^[14]后,我们选择 20 mmol/L NaHSO_3 溶液($\text{pH} 5.3$)浸泡这些离体叶圆片,作模拟 SO_2 处理,处理时间为 0、2、5 和 10 h,以纯净水($\text{pH} 6.0$)浸泡的植物叶圆片为对照。浸泡时,叶圆片正面向上,放置在 25°C 和 $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的光照条件下,实验结束时取出叶圆片用纯净水冲洗,以除去残留于叶表面的 NaHSO_3 溶液。

1.3 叶绿素荧光参数的测定

叶绿素荧光参数 F_v/F_m (光系统 II 最大光化学效率)和 Φ_{PSII} (通过光系统 II 线性电子传递的量子效率)^[15] 由便携式荧光测定仪(PAM-2100, Germany)测定和计算。测定前将植物离体叶片暗适应 30 min。其中, $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$, $\Phi_{PSII} = 1 - F_s/F_m$ ^[15]。这里, F_m 和 F_o 分别代表暗适应后的最大和初始荧光, F_m' 代表光适应后的最大荧光, F_s 是稳态荧光。

1.4 相对电子传递速率 (rETR) 快速光强响应曲线的测定

使用便携式荧光测定仪测量快速光强响应曲线。相对电子传递速率的计算公式为: $rETR = \Phi_{PSII} \times PAR \times 0.5 \times 0.84$ ^[16]。其中, PAR 代表不同的光化光强度 ($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。光化光强系列包括 99, 104,

170, 260, 395, 588, 809, 1181, 1821 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 在其照射 10 s 后分别测量叶片的 rETR 值并自动记录, 绘制成快速光响应曲线。

1.5 总抗氧化能力的测定

利用 DPPH· (1,1-二苯基-2-苦基苯肼, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) 溶液的特征紫红色团的吸收峰, 以紫外-可见分光光度计 (UV-3802, Unico) 测定 DPPH· 溶液在添加植物提取液前后于 525 nm 处的吸光度 (A_{525}), 以 A_{525} 的下降表示植物提取液对有机自由基的清除能力 (organic free radical scavenging capacity, ORSC)。DPPH· 溶液浓度 (溶于少量甲醇后, 以 50% 乙醇配制) 为 120 $\mu\text{mol/L}$ 。测定溶液为 2 ml, 反应时加植物提取液 (50% 乙醇) 0.1 ml 及 1.9 ml DPPH· 溶液, 室温下静置 20 min 后测定吸光度。在此条件下保留的 DPPH· % 即 $R = [(A - B)/A_0] \times 100\%$, 而清除率 ($ORSC\%$) = $(1 - R) \times 100\%$, A 为样品与 DPPH· 反应后的吸光度, B 为空白样品 (样品 0.1 ml + 1.9 ml 50% 乙醇) 的吸光度,

A_0 为未加样的 DPPH· (1.9 ml DPPH· 溶液 + 0.1 ml 50% 乙醇) 的吸光度。植物样品对 DPPH· 的清除能力 ($\text{mg DPPH} \cdot \text{cm}^{-2}$) = $[ORSC\% \times \text{反应加入的 DPPH} \cdot \text{的质量}(\text{mg})]/\text{样品叶面积}(\text{cm}^2)^{[17]}$ 。

1.6 色素含量的测定

以 80% 的丙酮浸提叶圆片, 用紫外分光光度计 (UV-3802, Unico) 于 663、645 和 440 nm 处测量总叶绿素含量、叶绿素 a 和 b 含量、类胡萝卜素总量, 并计算叶绿素 a/b、类胡萝卜素与叶绿素含量的比值^[18]。

1.7 数据分析

试验所得数据用 SPSS11.5 检验不同处理之间的差异显著性 ($P < 0.05$ 差异显著), 并用 Microsoft Office Excel 2003 作图。

2 结果和分析

2.1 叶绿素荧光参数

植物叶绿素荧光参数中, F_v/F_m 是 PSII 最大光化学效率, Φ_{PSII} 则表示通过 PSII 线性电子传递

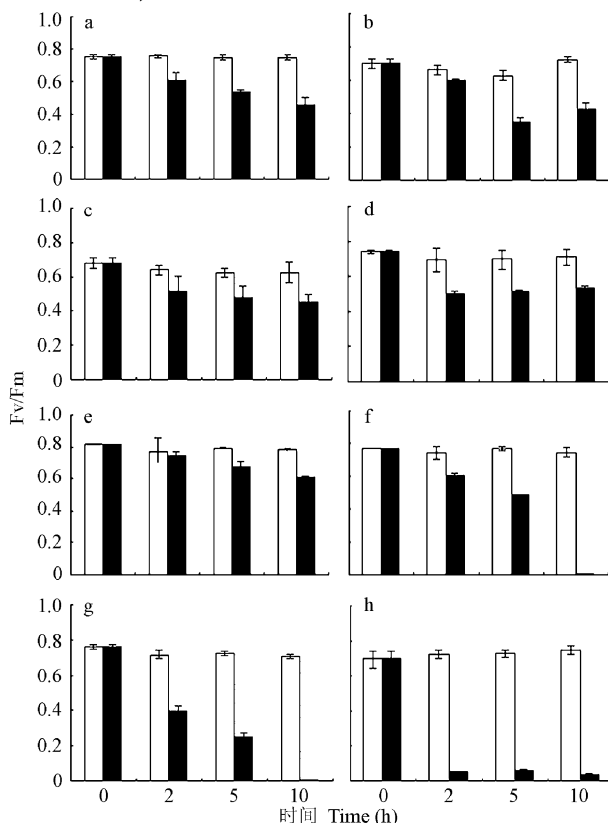


图 1 8 种藤本植物叶圆片 F_v/F_m 的变化

Fig. 1 Changes in F_v/F_m in leaf discs of eight liana species

□: 对照 Control; ■: 20 mmol/L NaHSO_3 ; a: 禾雀花 *Mucuna birdwoodiana*; b: 龙吐珠 *Clerodendron thomsonae*; c: 炮仗花

Pyrostegia venusta; d: 鸡蛋果 *Passiflora edulis*; e: 锦屏藤 *Cissus sicyoides*; f: 首冠藤 *Bauhinia corymbosa*; g: 红花西番莲 *Passiflora coccinea*; h: 宝巾 *Bougainvillea glabra*. 图 2 和 3 同。The same for figures 2 and 3.

的量子效率。图 1 的结果显示,纯净水浸泡处理的 8 种植物叶圆片的 F_v/F_m 值在处理期间(0 ~ 10 h)基本没有变化($P > 0.05$),保持在 0.7 ~ 0.8 之间。经 NaHSO_3 溶液处理 10 h 后,8 种藤本植物的 F_v/F_m 均明显下降,但下降幅度存在种间差异。锦屏藤、炮仗花和鸡蛋果的 F_v/F_m 降幅较小;禾雀花和龙吐珠的 F_v/F_m 分别降为 0.46 和 0.43,比起始时下降了 40% 左右;首冠藤、红花西番莲和宝巾的 F_v/F_m 则接近零,其中宝巾下降速率最快,处理 2 h 时其 PSII 最大光化学效率已近乎丧失。

NaHSO_3 处理显著降低($P < 0.05$)8 种藤本植物的 Φ_{PSII} ,但其变化趋势有所不同(图 2)。禾雀花、炮仗花、锦屏藤和龙吐珠的 Φ_{PSII} 随处理时间延长而持续降低,鸡蛋果、首冠藤、宝巾和红花西番莲的 Φ_{PSII} 在处理 2 h 时已急剧下降,随后变化甚微。 NaHSO_3 处理 10 h 后,炮仗花的 Φ_{PSII} 值与对照相比的降幅最小(降低了 32.78%),表明其光系统 II 对

模拟 SO_2 胁迫作用的忍耐能力最强。宝巾、首冠藤和红花西番莲的 Φ_{PSII} 受 NaHSO_3 处理的影响最明显,反映这 3 种植物的光系统 II 对 SO_3^{2-} 毒害的抵御能力较差。

2.2 相对电子传递速率(rETR)快速光强响应曲线

相对电子传递速率的快速光强响应曲线可以反映叶片对光照条件波动的耐受力,从而提供对光合活性的可靠评价^[9]。图 3 给出了被测 8 种藤本植物离体叶圆片受到 NaHSO_3 连续处理 2 h、5 h、10 h 后的快速光强响应曲线。不同植物的快速光强响应曲线大多随着光化光增强而逐渐升高至最大值,然后维持相对稳定或略有下降。8 种植物在处理前的 rETR 最大值均不超过 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,且大致出现在 $580 \sim 840 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光化光照射范围(曲线的第 5 或第 6 个点)。经过 NaHSO_3 处理后,rETR 明显降低($P < 0.05$,鸡蛋果除外),其中,首冠

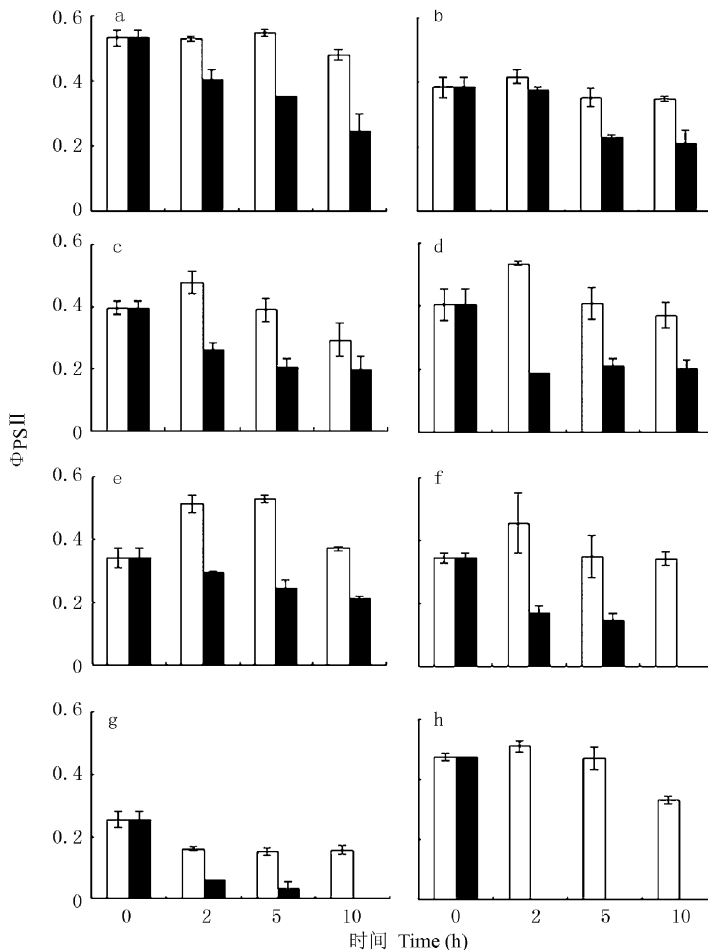


图 2 8 种藤本植物叶圆片 Φ_{PSII} 的变化

Fig. 2 Changes in Φ_{PSII} in leaf discs of eight liana species

□:对照 Control; ■:20 mmol/L NaHSO_3

藤、红花西番莲和宝巾在处理 2 h 后 rETR 值就已接近为 0,说明 NaHSO₃处理 2 h 已对这 3 种植物的光系统 II 造成了极大的伤害。禾雀花、炮仗花和锦屏藤经处理 5 h 和 10 h 的快速光强响应曲线几乎重合,处理 10 h 后的 rETR 最大值分别比对照下降了 83.54%、76.76% 和 47.14%,光系统受伤害程度比首冠藤、红花西番莲和宝巾小。而鸡蛋果比较特别,模拟 SO₂处理 10 h 的光强响应曲线位于处理 5 h 的光强响应曲线之上,rETR 值较处理 5 h 时有所提高。

快速光曲线的初始斜率用 α 表示,由曲线初始

部分前四个点线性回归计算得到^[20]。由表 1 可见,NaHSO₃处理使 8 种藤本植物的 α 值大幅度降低,表明较高浓度的 NaHSO₃(20 mmol/L)对这些植物叶片的光合相对电子传递速率具有明显的抑制作用。随着 NaHSO₃溶液浸泡时间的延长,不同植物的 α 值大多持续降低,处理 5 h 和 10 h 后的 α 值比较接近。模拟 SO₂处理仅 2 h,宝巾、首冠藤和红花西番莲的 α 值便降低为零或接近于 0。而锦屏藤、鸡蛋果和龙吐珠的 α 值则降幅较小,NaHSO₃处理 10 h 后的 α 值仍为起始时的 50% 左右。禾雀花和炮仗花的降幅介于前两类植物。

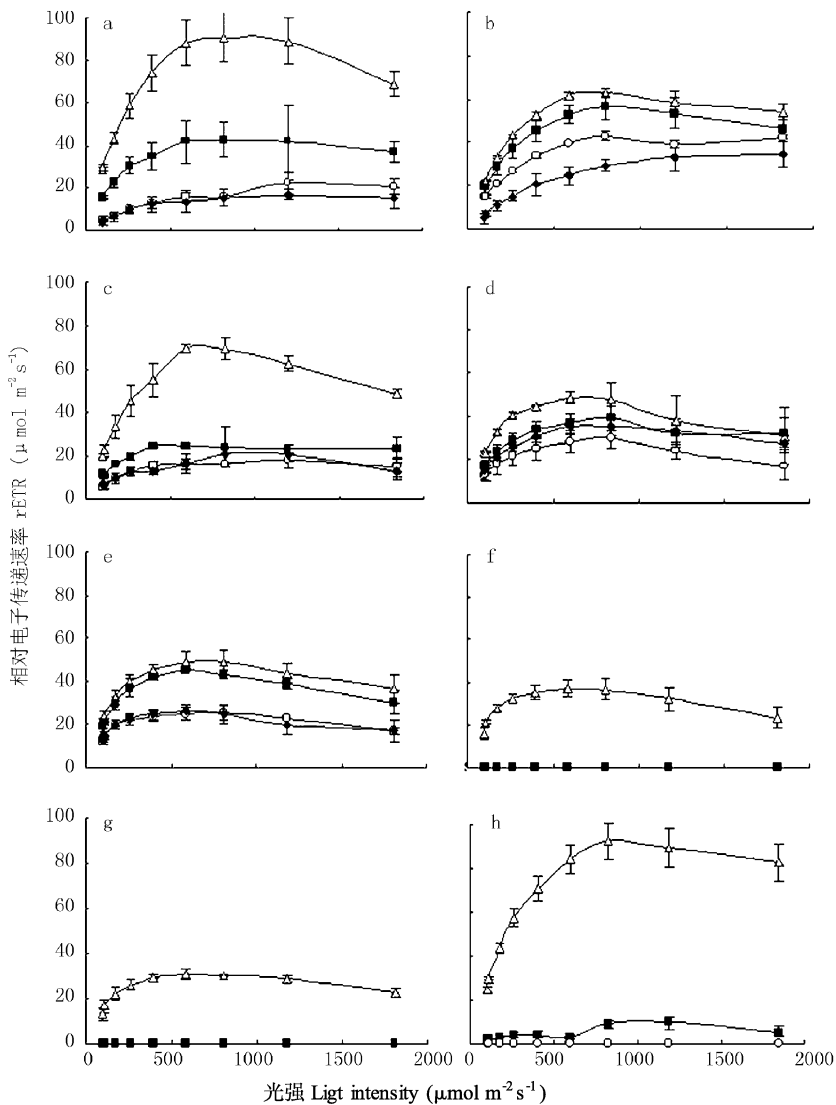


图 3 8 种藤本植物相对电子传递速率快速光强响应曲线

Fig. 3 Relative electron transport rate (rETR) to rapid light response curves in leaf discs of eight liana species treated with NaHSO₃ (20 mmol/L)

△:0 h; ■:2 h; ○:5 h; ◆:10 h

表 1 快速光强响应曲线初始斜率 α 的变化Table 1 Changes in initial slope (α) of rapid light-response curves in eight liana species treated with NaHSO_3 (20 mmol/L)

	时间 Time (h)			
	0	2	5	10
禾雀花 <i>Mucuna birdwoodiana</i>	0.187 ± 0.007	0.095 ± 0.004	0.032 ± 0.002	0.036 ± 0.002
龙吐珠 <i>Clerodendron thomsonae</i>	0.126 ± 0.013	0.114 ± 0.008	0.075 ± 0.004	0.057 ± 0.008
炮仗花 <i>Pyrostegia venusta</i>	0.151 ± 0.012	0.051 ± 0.009	0.041 ± 0.004	0.036 ± 0.001
鸡蛋果 <i>Passiflora edulis</i>	0.109 ± 0.01	0.076 ± 0.008	0.056 ± 0.006	0.063 ± 0.005
锦屏藤 <i>Cissus sicyoides</i>	0.12 ± 0.019	0.109 ± 0.013	0.059 ± 0.015	0.061 ± 0.014
首冠藤 <i>Bauhinia corymbosa</i>	0.089 ± 0.025	0	0	0
红花西番莲 <i>Passiflora coccinea</i>	0.072 ± 0.017	0	0	0
宝巾 <i>Bougainvillea glabra</i>	0.193 ± 0.022	0.013 ± 0.001	0	0

表 2 NaHSO_3 处理 10 h 后的色素含量和清除有机自由基 DPPH· 的能力Table 2 Pigment contents and DPPH· scavenging capacities in leaves of eight liana species treated with NaHSO_3 for 10 h

植物 Species		Chl(a + b) ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Chl a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	Chl a/b	Car ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	清除 DPPH· (mg cm^{-2}) Scavenging DPPH·
禾雀花	C	53.122 ± 3.660	41.644 ± 2.753	3.630	15.099 ± 1.032	1.021 ± 0.025
<i>Mucuna birdwoodiana</i>	T	50.672 ± 2.075	39.533 ± 1.671	3.549	14.156 ± 0.330	1.176 ± 0.003
龙吐珠	C	26.781 ± 0.151	20.597 ± 0.176	3.331	7.194 ± 0.003	0.463 ± 0.011
<i>Clerodendron thomsonae</i>	T	26.738 ± 0.205	20.296 ± 0.268	3.151	7.307 ± 0.062	0.257 ± 0.004
炮仗花	C	22.023 ± 0.547	17.048 ± 0.400	3.427	4.857 ± 0.137	0.322 ± 0.009
<i>Pyrostegia venusta</i>	T	21.567 ± 0.141	16.731 ± 0.078	3.445	5.3241 ± 0.116	0.274 ± 0.005
鸡蛋果	C	23.275 ± 0.194	18.231 ± 0.169	3.615	7.151 ± 0.085	0.295 ± 0.002
<i>Passiflora edulis</i>	T	23.332 ± 0.410	17.986 ± 0.536	3.366	6.977 ± 0.113	0.166 ± 0.004
锦屏藤	C	34.008 ± 1.574	24.0389 ± 1.385	2.410	9.478 ± 0.548	0.067 ± 0.001
<i>Cissus sicyoides</i>	T	42.279 ± 2.382	30.340 ± 2.759	2.546	12.232 ± 0.813	0.082 ± 0.002
首冠藤	C	28.638 ± 0.680	21.928 ± 0.592	3.268	8.489 ± 0.145	1.009 ± 0.093
<i>Bauhinia corymbosa</i>	T	23.997 ± 0.220	18.375 ± 0.132	3.268	7.288 ± 0.064	0.585 ± 0.191
红花西番莲	C	14.339 ± 0.458	10.571 ± 0.294	2.806	2.346 ± 0.040	0.925 ± 0.202
<i>Passiflora coccinea</i>	T	13.900 ± 0.382	9.766 ± 0.407	2.363	3.501 ± 0.147	0.915 ± 0.023
宝巾	C	24.461 ± 0.724	18.536 ± 0.585	3.128	5.107 ± 0.188	0.070 ± 0.000
<i>Bougainvillea glabra</i>	T	14.303 ± 0.317	7.997 ± 0.216	1.268	2.885 ± 0.052	0.061 ± 0.002

C: 对照 Control; T: 20 mmol/L NaHSO_3

2.3 叶片总抗氧化能力

清除有机自由基 DPPH· 试验是评价植物总抗氧化能力的快速、直接、可行的方法^[17]。根据表 2 的结果,与对照纯净水浸泡处理相比,经 NaHSO_3 处理 10 h 后,8 种藤本植物中除了禾雀花和锦屏藤对 DPPH· 清除能力分别有 15.18% 和 22.39% 的增加外,其余植物离体叶圆片的总抗氧化能力均有不同程度的降低。其中,首冠藤、龙吐珠和鸡蛋果的总抗氧化能力下降幅度较大,分别比对照下降了 42.02%、44.49% 和 43.73%。炮仗花和宝巾的下降幅度也在 13% ~ 15% 左右。红花西番莲的下降幅

度最小,仅为 1.08%。

2.4 叶片色素含量

叶绿体是光能的吸收、传递和转化的主要场所,叶绿素在这一过程中起着极为重要的作用^[21]。8 种供试植物中,只有锦屏藤经 NaHSO_3 处理 10 h 后,离体叶片中的叶绿素总量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量以及叶绿素 a/b 与对照相比均出现了不同程度的上升(表 2),显示出与其它被测植物不同的响应模拟 SO_2 胁迫的策略。其余 7 种藤本植物中,下降较为明显的是首冠藤和宝巾,分别下降了 16.21% 和 41.53%。叶绿素 a 含量的变化趋势与叶

绿素总量大致相同。在处理前后的叶绿素 a/b 比值的比较中,红花西番莲和宝巾分别下降了 15.79% 和 59.46%,其余各种则无明显变化。

类胡萝卜素作为辅助性的捕光色素,除了具有捕集光能的作用之外,还有防护强光和氧化胁迫伤害叶绿素和光合机构的功能^[22]。表 2 显示,8 种藤本植物中,有 4 种在 NaHSO₃ 浸泡后类胡萝卜素含量上升,其中锦屏藤和红花西番莲的增幅较大(29.06% 和 49.24%);其余 4 种则呈现下降,首冠藤和宝巾下降比较明显,分别降低了 14.15% 和 43.51%。

3 讨论

环境胁迫影响植物的光合作用过程,降低光合量子转化效率,从而增加荧光和热耗散^[23]。叶绿素荧光的测量快速、敏感且无破坏性,能够获得有关光合作用的定量和定性的信息,从而成为研究植物光合作用机制以及对不同环境胁迫响应的有效工具^[9]。常温条件下的叶绿素荧光几乎全部来源于 PSII 的 Chl a(包括天线 Chl a),叶绿素荧光提供的快速信息反映了 PSII 对激发能的利用和耗散情况。在常用的叶绿素荧光参数中,Fv/Fm 是常用的研究植物抗性响应的重要生理参数,反映光系统的最大光化学效率^[24]。 Φ_{PSII} 则反映植物在任一光照状态下的 PSII 实际光量子产量^[15]。本文中,8 种藤本植物的 2 个叶绿素荧光参数在 NaHSO₃ 处理后均出现了下降(图 1,图 2),随着时间的延长,PSII 活性受到的损伤逐渐加剧。炮仗花、鸡蛋果和锦屏藤受到的影响相对较小,荧光参数变幅不大。相反,首冠藤、红花西番莲和宝巾的荧光参数则大幅下降,甚至为 0,推测其光系统 II 出现了不可逆的严重损伤,抵御 SO₂ 污染的能力较差。

光合电子流传递速率(ETR)与通过放氧或 CO₂ 吸收测得的光合活性紧密相关^[25]。以相对电子传递速率(rETR)和对应的光化光强度(PAR)作图形成的快速光强响应曲线(RLC),与传统的放氧-光曲线(P-E curve)相似,但两者的意义不同^[26]。快速光强响应曲线(RLC)提供了相对电子传递速率特性的详细信息,以及植株的整体光合性能^[27]。我们的研究结果表明 8 种植物对模拟 SO₂ 处理具有不同响应特点(图 3)。龙吐珠的光合电子传递能力在 NaHSO₃ 处理下依然保持较高水平,说明其 P680 附近电子传递供体或受体可能没有受到太大影响,保

持了良好的接受光能并将电子向下传递以转移光能的功能。相反,首冠藤、红花西番莲和宝巾的光强响应曲线再次反映出其光系统 II 在模拟 SO₂ 条件下受到了严重伤害,失去了传递光能的功能。另外,曲线初始斜率 α 值能够评估光合作用的最大量子产额,从而反映植物的光合能力。rETR 最大值和 α 值的变化情况基本一致(表 1),与前面两个叶绿素荧光参数的变化规律不完全一致。根据快速光强响应曲线的分析结果,龙吐珠、锦屏藤和鸡蛋果在 SO₂ 污染条件下的生长可能会比较有优势。

细胞膜是生物体和细胞器与环境之间的界面结构,也是逆境胁迫中首当其冲的细胞结构。酸雨及 SO₂ 伤害植物的主要机理之一在于降低膜保护酶的活性,使活性氧代谢平衡失调,相对过剩的活性氧或氧自由基启动加剧了膜脂过氧化作用而使植物受害^[28]。生物试剂对 DPPH· 稳定自由基的清除能力可以用来表示其抗氧化性的强弱,可以大致反映植物体酶和非酶抗氧化系统对外源自由基损伤的抵抗作用^[17,29]。在细胞的非酶抗氧化系统中,类胡萝卜素中的叶黄素组分环氧玉米黄质 A 和玉米黄质 Z 之间的相互转化除了参与过量激发能的热耗散外,也可以抵御膜脂过氧化损伤^[30]。与对照相比,20 mmol/L NaHSO₃ 浸泡 10 h 后的禾雀花和锦屏藤叶圆片的抗氧化能力出现不同程度的上升(表 2),说明模拟 SO₂ 作用启动和强化了这两种植物细胞内保护性的抵御自由基损伤机制的运行,是对胁迫的正响应,表现出它们对自由基的清除能力较强。然而,首冠藤、龙吐珠和鸡蛋果的抗氧化系统可能受到较大破坏,清除 DPPH· 的能力降幅较大。从类胡萝卜素总量的变化结果来看,锦屏藤和红花西番莲的类胡萝卜素在处理后的提高幅度较大,与二者的清除 DPPH· 能力的提高或基本不变的结果大致对应,说明这两种植物的类胡萝卜素组分更多地参与到它们的抗氧化系统中。宝巾的类胡萝卜素含量和清除 DPPH· 能力的下降幅度都很大,说明模拟 SO₂ 破坏了其光合机构的同时也产生了较多自由基,对其膜系统造成了伤害。

叶绿素是植物光合作用的主要色素,其含量可以反映叶片的光合潜能以及光合初级产物水平^[31]。宝巾的叶绿素总量和叶绿素 a/b 比值对模拟 SO₂ 处理最为敏感,可能因为 SO₃²⁻ 破坏了叶绿素的结构,使其含量降低或产生了脱镁叶绿素,从而改变了叶

绿体类囊体膜上光系统反应中心色素和聚光色素的组成比例,影响了光能的吸收和转化,导致光合能力明显下降。结果中,锦屏藤的叶绿素总量在 NaHSO_3 处理后非但没有降低,反而提高了 24.32% (表 2)。我们推测,这可能是由于锦屏藤对模拟 SO_2 胁迫产生积极的响应,增加其叶绿素含量,以提高光合作用(如维持了较高的叶绿素荧光参数值),促进植物细胞进行 SO_3^{2-} 的解毒。温学等对高 SO_2 污染地区的园林植物进行叶绿素检测时也获得了类似的结果^[32]。8 种藤本植物的叶绿素 a 含量的变化较叶绿素 b 明显,即叶绿素 b 总量相对稳定(结果未显示),这说明光系统反应中心比其捕光天线系统更易于受 NaHSO_3 的影响。

自然界植物的多样性决定了它们在面临相同的胁迫时存在不同的忍耐能力,采取的防御措施也不尽相同。本研究选取的 8 种藤本植物的叶绿素荧光特性对模拟 SO_2 处理的响应存在种间差异。例如,锦屏藤可能是通过提高叶绿素总量和抗氧化能力(类胡萝卜素含量和清除 DPPH· 能力)进行自身调节来间接使 PSII 抵御 SO_3^{2-} 的毒害,其 Fv/Fm 和 rETR 值在 NaHSO_3 处理 10 h 后的降幅相对较少,保持较高的光合活性。模拟 SO_2 作用下,鸡蛋果的抗氧化能力减弱,但其 Fv/Fm 和 rETR 值仍相对较高,并且叶绿素总量未受影响,表明 PSII 的吸能和传能功能受损不明显,耐受性较强。首冠藤、红花西番莲和宝巾则对 NaHSO_3 处理甚为敏感,除 DPPH· 清除能力变幅较小外,其他的指标变幅很大,PSII 迅速丧失活性。8 种植物中龙吐珠、锦屏藤和禾雀花对模拟 SO_2 的抗性较强;首冠藤、红花西番莲和宝巾的抗性最弱;其余 2 种藤本植物在抵御 SO_2 伤害的能力介于上述两类植物之间。当然,要精确区分和筛选抗性强的种类,尚需进行较长期与多种浓度的处理,并引入更多相关的形态和生理指标测定,多角度和全方位考察它们对特定胁迫的忍耐及抵抗能力,为筛选抗性佳的城市绿化植物和完善相关生理机理提供全面的证据。

致谢 感谢中国科学院华南植物园植芳研究员在试验设计和论文写作方面的悉心指导。

参考文献

- [1] Martin A, Barber F R. Sulphur dioxide, oxides of nitrogen and ozone measured continuously for 2 years at a rural site [J]. Atmos Environ, 1981, 15: 567-578.
- [2] State Environmental Protection Administration of China(国家环保总局). Communique of Environmental Status of China in 2006 [EB/OL]. http://www.sepa.gov.cn.
- [3] Kong G H(孔国辉), Wang J X(汪嘉熙), Chen Q C(陈庆诚). Air Pollution and Plants [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1988: 28-67.(in Chinese)
- [4] Kurkdjian A, Guern J. Intracellular pH measurement and importance in cell activity [J]. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1989, 40: 271-303.
- [5] Würfel M, Häberlein I, Follmann H. Inactivation of thioredoxin by sulfite ions [J]. FEBS Lett, 1990, 268: 146-148.
- [6] Rennenberg H. The significance of higher plants in the emission of sulphur compounds from terrestrial ecosystems [C]// Sharkey T D, Holland E A, Mooney H A. Trace Gas Emissions by Plants. San Diego: Academic Press, 1991: 217-260.
- [7] Okpodu C M, Alscher R G, Grabau E A, et al. Physiological, biochemical and molecular effects of sulfur dioxide [J]. J Plant Physiol, 1996, 148: 309-316.
- [8] Veljovic-Jovanovic S, Bilger W, Heber U. Inhibition of photosynthesis, stimulation of zeaxanthin formation and acidification in leaves by SO_2 and reversal of these effects [J]. Planta, 1991, 191: 365-376.
- [9] Hu H Y(胡海燕), Lou G(娄钢). Three-dimensional greening by climbing plants [J]. Shaanxi For Sci Techn(陕西林业科技), 2005 (2): 32-34.(in Chinese)
- [10] Kong G H(孔国辉), Lu Y D(陆耀东), Liu S Z(刘世忠), et al. Injury symptoms of 38 woody species exposed to air pollutants [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2003, 11(4): 319-328.(in Chinese)
- [11] Taylor J S, Reid D M, Pharis R P. Mutual antagonism of sulphur dioxide and abscisic acid in the effect on stomatal aperture in broad bean (*Vicia faba* L.) epidermal strips [J]. Plant Physiol, 1981, 68: 1504-1507.
- [12] Liu N, Peng C L, Lin Z F, et al. Changes in photosystem II activity and leaf reflectance features of several subtropical woody plants under simulated SO_2 treatment [J]. J Integr Plant Biol, 2006, 48 (11): 1274-1286.
- [13] Chen P J(陈屏昭), Luo J G(罗家刚), Wang L(王磊), et al. Causation of sodium bisulfite affect photosynthesis in leaves of umbilical orange [J]. Acta Agri Boreal-Occid Sin(西北农业学报), 2004, 13 (1): 69-75.(in Chinese)
- [14] Huang J, Li F J, Jiang Y G, et al. Gradient distribution of acid rain in the scenic resort of the Baiyun Mountain in Guangzhou [J]. J Trop Meteor, 2004, 10(1): 95-105.
- [15] Zhang S R(张守仁). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. Chin Bull Bot(植物学通报), 1999, 16(4): 444-448.(in Chinese)
- [16] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of *in vivo* photosynthesis [C]// Schulze E D, Caldwell M M. Ecophysiology of Photosynthesis. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 49-70.
- [17] Peng C L(彭长连), Chen S W(陈少薇), Lin Z F(林植芳), et al.

- Detection of antioxidative capacity in plants by scavenging organic free radical DPPH· [J]. *Prog Biochem Biophys*(生物化学与生物物理学进展), 2000, 27: 658–661.(in Chinese)
- [18] Lin Z F(林植芳), Li S S(李双顺), Lin G Z(林桂珠), et al. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves [J]. *Acta Bot Sin*(植物学报), 1984, 26(6): 605–615.(in Chinese)
- [19] White A J, Christa C. Rapid light curves: A new fluorescence method to assess the state of the photosynthetic apparatus [J]. *Photosynth Res*, 1999, 59: 63–72.
- [20] Seródio J, Cruz S, Vieira S, et al. Rapid light-response curves of chlorophyll fluorescence in microalgae: relationship to steady-state light curves and non-photochemical quenching in benthic diatom-dominated assemblages [J]. *Photosynth Res*, 2006, 90: 29–43.
- [21] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine [J]. *Tree Physiol*, 1990, 7: 33–48.
- [22] Lin Z F(林植芳), Peng C L(彭长连), Lin G Z(林桂珠). Lutein and lutein epoxide-lutein cycle in plants [J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯), 2006, 42(3): 385–394.(in Chinese)
- [23] Calatayud A, Alvarado J W, Barreno E. Changes in chlorophyll a fluorescence, lipid peroxidation, and detoxificant system in potato plants grown under filtered and non-filtered air in open-top chambers [J]. *Photosynthetica*, 2001, 39(4): 507–513.
- [24] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer [J]. *Photosyn Res*, 1986, 10: 51–62.
- [25] Beer S, Vilenkin B, Weil A, et al. Measuring photosynthetic rates in seagrasses by pulse amplitude modulated (PAM) fluorometry [J]. *Marine Ecol-Progr Ser*, 1998, 174: 293–300.
- [26] Hawes I, Sutherland D, Hanelt D. The use of pulse amplitude modulated fluorometry to determine fine-scale temporal and spatial variation of *in situ* photosynthetic activity within an Isoetes dominated canopy [J]. *Aquat Bot*, 2003, 77: 1–15.
- [27] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. *Aquat Bot*, 2005, 82: 222–237.
- [28] Wang J H(王建华), Xu T(徐同). Effect of the simulated acid rain on the protecting enzymes and lipid preoxidation of membrane in cotton cotyledon disc [J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 1993, 13(3): 228–234.(in Chinese)
- [29] Larrauri J A, Sanchez-Moreno C, Saura-Calixto F. Effect of temperature on the free radical scavenging capacity of extracts from red and white grape pomace peels [J]. *J Agri Food Chem*, 1998, 46: 2694–2697.
- [30] Yamamoto H Y, Bugos R C, Hieber A D. Biochemistry and molecular biology of the xanthophyll cycle [M]// Frank H A, Young A J, Britton G, et al. *The Photochemistry of Carotenoids*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999: 293–303.
- [31] Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis [J]. *Crop Sci*, 1995, 35: 1400–1405.
- [32] Wen X(温学), Kong G H(孔国辉), Peng C L(彭长连). Air pollution monitoring by plants and plant resistance [J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), 2003, 11(4): 348–357.(in Chinese)