

3 种阴生地被植物对 SO₂ 胁迫的 生理响应及净化能力

杨 丹¹, 杨晓晓, 钟霞飞, 魏可心, 孙凌霞*

(四川农业大学 风景园林学院, 成都, 611130)

摘 要: 该研究以 3 种阴生地被植物麦冬、虎耳草和紫萼玉簪为研究材料, 采用人工模拟熏气方法, 测定不同浓度 (5.71, 11.43, 17.14, 22.86 mg · m⁻³) SO₂ 胁迫下参试植物的外观受害症状, 以及膜质过氧化、保护酶活性、渗透调节物质等生理指标, 以叶片吸硫量比较 3 种植物的净化能力, 并采用模糊数学隶属函数与主成分分析法对其抗 SO₂ 能力进行综合评价。结果显示: (1) 随着 SO₂ 熏气浓度的升高, 3 种植物的叶片都有不同程度的受害症状, 叶片叶绿素含量、汁液 pH 值和相对含水量下降, 丙二醛含量、叶片相对电导率、可溶性糖、游离脯氨酸含量上升, 且其 SOD 和 CAT 活性显著增强。 (2) 隶属函数法和主成分分析法综合评定结果显示, 3 种地被植物对 SO₂ 抗性能力表现为: 麦冬 > 紫萼玉簪 > 虎耳草, 与叶片受伤害症状和叶液 pH 值下降的顺序相反, 说明这 2 个指标可作为简单可行的评价 SO₂ 抗性的重要鉴定指标。 (3) 3 种植物均有一定的 SO₂ 净化能力, 其强弱顺序为虎耳草 > 麦冬 > 紫萼玉簪。研究表明, 3 种阴生地被植物都能够在 SO₂ 胁迫下提高其保护酶活性和渗透调节物质含量, 增强其抗硫胁迫和 SO₂ 吸收能力, 并以麦冬对 SO₂ 抗性最强, 虎耳草对 SO₂ 的吸收能力最强; 该试验中最低参试 SO₂ 浓度远远高于城市大气中的实际 SO₂ 浓度, 在试验环境下 3 种阴生植物再都未呈现伤害症状, 说明吸收硫能力强的虎耳草和麦冬可以在 SO₂ 污染严重的林下区域大面积应用推广。

关键词: 阴生地被植物; SO₂; 抗性生理; 净化能力

中图分类号: Q945.7; Q948.116

文献标志码: A

Resistant Physiological Response and Purifying Ability of Three Shady Perennial Plants to SO₂ Stress

YANG Dan, YANG Xiaoxiao, ZHONG Xiafei, WEI Kexin, SUN Lingxia*

(College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, 611130, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of shady perennial plants to sulfur dioxide (SO₂) resistance and phytoremediation of air pollution, we selected and screened three shady plant species including *Ophiopogon japonicus*, *Saxifraga stolonifera*, and *Hosta ventricosa* growing under the greenhouse condition for tolerance to SO₂ injury and purification of SO₂ in this study. SO₂ treatment was achieved through an artificial simulated fumigation method, and SO₂ was set as the following four concentrations: 5.71, 11.43, 17.43 and 22.86 mg · m⁻³. The differential responses to SO₂ stress among the three plant species were manifested through the phenotypic injuries and the various physiological indexes, and the methods of subordination function and principal component analysis was used to evaluate the SO₂ resistance. Our results

收稿日期: 2016-07-26; 修改稿收到日期: 2016-12-29

基金项目: 留学回国科研启动基金和四川农业大学双支计划资助

作者简介: 杨 丹 (1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事园林植物抗性生理研究。E-mail: yangdan0413@126.com

* 通信作者: 孙凌霞, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事园林植物培育与应用研究。E-mail: sunlingxiasicau@foxmail.com

showed that: (1) there was the phenotypic injury with the different extents among three plant species under SO_2 stress. The chlorophyll and leaf pH declined gradually with the rise of SO_2 concentrations among three species, while the content of MDA and the relative electrolyte leakage rose. Meanwhile the soluble sugar and the proline were accumulated substantially. Furthermore, the superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) were activated dramatically. (2) Through the subordination function and principal component analysis, we concluded that the resistance to SO_2 among these three species is ordered in sequence from high to low as *O. japonicus* > *H. ventricosa* > *S. stolonifera*, which is opposite as the order of phenotypic injury and leaf pH value. (3) The purification ability to SO_2 is ranked in order from high to low as *S. stolonifera* > *O. japonicus* > *H. ventricosa*. The results showed that all the three shade-tolerant ground-cover plants could increase their protective enzyme activities and osmotic adjustment substance contents under SO_2 stress, enhance their resistance to sulfur stress and SO_2 uptake capacity, and *O. japonicus* had the strongest resistance to SO_2 , *S. stolonifera* had the strongest absorption capacity on SO_2 ; the lowest concentration of SO_2 in this experiment is much higher than the actual concentration of SO_2 in the urban atmosphere, in which the three shade plants are not present in the injury symptoms, so healthy and strong absorption of sulfur of *S. stolonifera* and *O. japonicus* can be used in SO_2 heavily polluted areas.

Key words: shady perennial plants; sulfur dioxide; resistance physiology; purification ability

二氧化硫(SO_2)是主要的大气污染物之一,主要来自于含硫金属矿的冶炼工业源以及含硫煤和石油的燃烧居民生活源、采暖源、电厂源^[1]。国内外流行病学研究表明 SO_2 与心血管疾病、呼吸系统疾病有明显的相关性^[2]。大气中的 SO_2 通过植物开放的气孔进入叶片,在植物细胞中反应先形成亚硫酸根离子,再氧化成硫酸盐,被植物生长所利用^[3]。只要大气中 SO_2 的浓度不超过一定限度,产生的亚硫酸根离子不过量,那么植物叶片就能不断吸收大气中的 SO_2 并转化为对自身有益的营养物质^[4]。随着叶片的衰老凋落,所吸收的硫元素也一同落到地上,被土壤所吸收,因而在植物生命周期变化中,就可不断地将空气中的硫转移到土壤中,使空气不断地得以净化。在目前 SO_2 污染源未能完全治理的情况下,利用绿色植物对 S 的吸收将是净化大气中的 SO_2 污染物的有效途径之一^[5]。

当前国内外学者关于 SO_2 的植物抗性机理研究主要集中在对植物的形态伤害和生理响应^[6-10],对 SO_2 抗性和净化能力强的植物物种筛选上^[11-15],以及参与 SO_2 同化和转化过程中的基因鉴定和功能研究^[16-19]等方面。植物对 SO_2 抗性和净化能力受遗传、叶片质地、气孔数量和形态结构以及体内的转化途径等因素的综合影响,所以对 SO_2 的敏感性不同而导致植物抗性和吸收能力有差异^[5]。目前对 SO_2 抗性和吸收能力的植物种类的筛选主要集中在乔灌木树种^[10,12-14]和少量喜阳地被植物^[7,20]上,但还没有涉及到阴生地被植物。随着城市绿地率要求越来越高,不论是高架桥或立交下,还是树林下都需要绿化,而这些区域的绿化材料只能是耐阴性地被

植物。基于此背景,本研究选取了多年生常绿喜阴草本植物麦冬(*Ophiopogon japonicus*)和虎耳草(*Saxifraga stolonifera*),以及阴生花卉之王紫萼玉簪(*Hosta ventricosa*)作为研究对象,采用人工熏气的方法,研究不同浓度 SO_2 胁迫下 3 种阴生地被植物的生理响应,并通过综合分析评价其对 SO_2 的抗性和净化能力,从而为今后大气污染的植物修复提供科学的参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料选用天开园林公司彭州基地提供的虎耳草、麦冬和紫萼玉簪。选取株高一致、长势相近的健康植株栽植于花盆中,花盆半径规格为 22×15 cm,盆栽基质为泥炭土和腐殖土混合而成(体积比为 1:1)。将盆栽植物置于基地大棚内正常养护管理。

1.2 试验方法

采用温室盆栽试验,在四川农业大学成都校区科研基地进行,盆栽植物在大棚内养护管理 1 个月,用塑料膜封好盆口,露出植物(以避免土壤吸收 SO_2)后放入自制熏气室内适应环境 1 周后进行熏气处理。自制熏气设备为长、宽、高各为 68 cm 的玻璃箱子,四周用玻璃胶封死。试验设 4 个 SO_2 熏气浓度梯度(5.71、11.43、17.14 和 $22.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),以相同培养环境下不熏气的 1 组作为对照(CK),每个熏气箱内放 4 盆植株。根据 $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 (\text{浓}) \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \uparrow$ 的原理,定量产生 SO_2 气体,入口处放置 6 V 的小风扇搅匀气体。采

用 APH 型 SO₂ 监测仪监测箱内东、南、西、北 4 个方位的 SO₂ 浓度,当箱内 SO₂ 浓度达到预设浓度时开始计时,根据预实验中植物的外部反应症状决定熏气浓度和所加试剂的量。每个熏气箱为一个浓度处理,每天 9:00 开始熏气,17:00 将植物从箱内拿出,结束熏气,即熏气时间为 8 h/d。在熏气处理 7 d 后立即进行取样,每盆取东、西、南、北 4 个方位顶芽向下第 3~4 枚功能叶片组成混合叶样进行关键酶和抗性相关指标的测定,每个指标取 3 个重复的平均值作为计算结果。

1.3 指标测定

熏气 7 d 后,剪取离土 2 cm 以上叶片部分标记装袋,进行各项生理生化指标测定。用 EOS 760 相机记录下不同植物在不同二氧化硫熏气处理下表现,利用 AutoCAD 软件测算叶面积。叶绿素含量的测定用丙酮乙醇等量混合法^[21]。叶片相对电导率的测定采用电导法^[22]。相对含水量采用烘干法^[23]。丙二醛和可溶性糖含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[24]。游离脯氨酸的测定采用茚三酮比色法^[25]。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[26],过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外分光光度法^[27]。叶片汁液 pH 值测定采用杨玉珍等方法^[28]。叶片硫含量测定取 2 g 植物鲜样用马弗炉灰化后采用硫酸钡比浊法^[29]。植物净化 SO₂ 能力的计算参照张德强等方法^[30],将硫的净化率(SO₂ 处理下植物叶片含硫量高出对照的百分率)在 40%以上的划为净化能力强的种类,20%~40%之间的划为净化能力中等的种类,在 20%以下的为净化能力差的种类。

1.4 数据分析

用 SPSS19.0 对试验数据进行显著性分析,并用 Excel2007 对数据进行作图,利用模糊数学隶属函数和主成份分析法对植物抗性进行综合评定。

1.4.1 模糊数学隶属函数 按照公式计算每个植物的具体隶属函数值:

$$U(X_i) = (X_{ij} - x_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}), \Delta = \sum U(X_i) / n$$

若某个指标与抗性为负相关,则用反隶属函数计算其隶属函数值:

$$U(X_i) = 1 - (X_{ij} - x_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}), \Delta = \sum U(X_i) / n$$

式中, X_{ij} 为第 i 个植物 j 指标; $U(X_i) \in [0, 1]$; Δ 为每个植物各项指标测定的综合评定结果; n 为测

定的指标总数; $X_{j\max}$ 与 $X_{j\min}$ 分别为全部植物第 j 项指标的最大值与最小值;最后将每种植物的各个指标隶属值代入对应的主成份公式,得到最终的抗性对比。

1.4.2 主成份分析法 利用主成份分析法将具有重叠作用的 9 个指标化为 2 个综合指标。

设 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)'$ 为一个 P 维随机向量,考虑如下线性组合:

$$\begin{cases} Y_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \\ Y_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \end{cases} \text{ 并且满足 } a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{ip}^2 = 1 \quad (i=1, 2, \dots, p);$$

其中, Y_1 与 Y_2 不相关,分别为第一主成份,第二主成份; Y_1 是 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ 的一切线性组合中方差最大的; Y_2 其次; $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}, i=1, 2, 3, \dots, p$ 是系数,是观测向量相关矩阵的单位特征向量; p 为指标总数; $X_1, X_2, \dots, X_p$ 为某种植物某指标的变化率。

2 结果与分析

2.1 SO₂ 熏气处理对 3 种地被植物的形态伤害

SO₂ 熏气处理对植物的伤害主要表现在叶片上,3 种植物叶片在不同浓度的 SO₂ 熏气处理下,均受到不同程度地伤害,并且伤害症状在浓度上表现出差异(表 1)。在 SO₂ 浓度为 11.43 mg · m⁻³ 下,少量虎耳草叶片边缘卷曲、变黄并呈现不规则的水渍状斑块,随着 SO₂ 浓度的升高,受伤害的症状越来越明显,叶片边缘出现坏死褐色斑块;在 SO₂ 浓度为 22.86 mg · m⁻³ 下,叶脉间呈现圆形坏死斑块。而玉簪在 SO₂ 浓度为 17.14 mg · m⁻³ 下,叶片边缘呈现不规则水渍状斑块,随着 SO₂ 胁迫浓度的增加,在 SO₂ 浓度为 22.86 mg · m⁻³ 下,少量叶片的边缘出现不规则坏死斑块,而叶脉间呈现圆形坏死斑块。麦冬在最高 SO₂ 胁迫浓度 22.86 mg · m⁻³ 下,仅少量叶片边缘变黄。这表明麦冬对 SO₂ 胁迫最不敏感,伤害最轻,其次是玉簪和虎耳草。

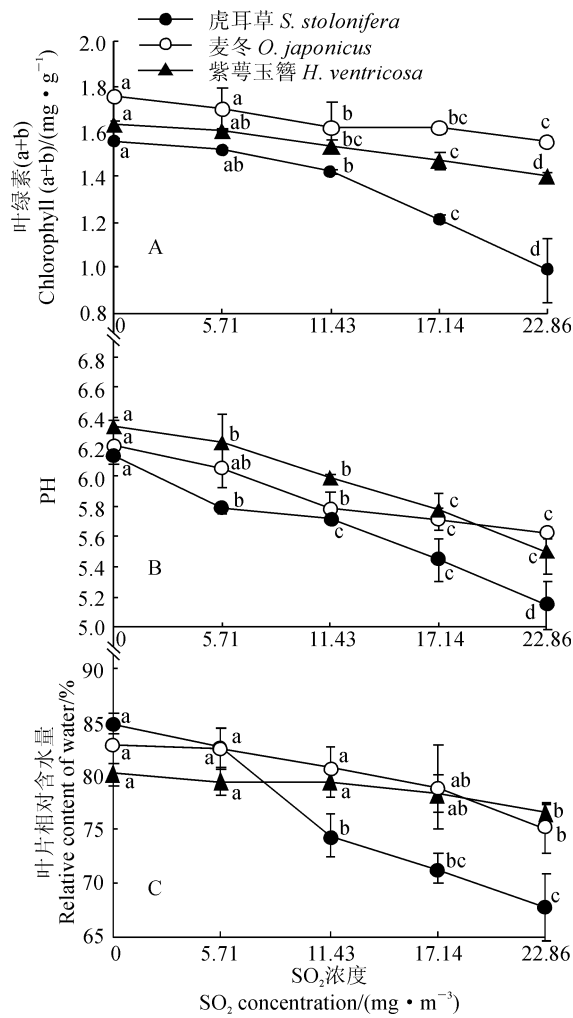
2.2 SO₂ 熏气处理对植物叶片相对含水量、叶绿素含量和叶液 pH 的影响

SO₂ 熏气胁迫导致 3 种植物叶片的叶绿素(a+b)含量、汁液 pH 值和叶片相对含水量不同程度地降低,但每种植物下降的幅度不同(图 1)。随着 SO₂ 熏气浓度的增加,虎耳草叶片叶绿素(a+b)含量下降幅度最快,在 SO₂ 浓度 22.86 mg · m⁻³ 处理下降至最低,同对照相比显著下降了 36.9% ($P < 0.05$);而麦冬和紫萼玉簪的叶片叶绿素(a+b)含量

表 1 3 种地被植物在不同浓度 SO₂ 熏气处理下叶片的伤害症状和伤害率

Table 1 Phenotypic injury symptom of leaves among three plant species under various SO₂ treatments during the whole experimental period

植物种类 Species	SO ₂ 浓度 SO ₂ concentration/(mg · m ⁻³)			
	5.71	11.43	17.14	22.86
虎耳草 <i>S. stolonifera</i>	不明显 Not significant	叶片边缘卷曲变黄,呈现水渍状斑块(<5%) The edge of the leaf was curled yellow and presented with watery patches	叶片边缘呈现坏死斑块(5%) Leaf edge showed necrotic plaque	叶缘和叶脉间呈现褐色坏死斑(10%) Leaf margin and interveinal leaf vein showed brown necrotic spots
麦冬 <i>O. japonicus</i>	不明显 Not significant	不明显 Not significant	不明显 Not significant	叶片边缘变黄(<5%) Blade edge yellowing
玉簪 <i>H. ventricosa</i>	不明显 Not significant	不明显 Not significant	叶边缘呈现水渍状斑块(<5%) The leaf edge presented with watery patches	叶边缘和叶脉间呈现褐色坏死斑(5%) Leaf margin and interveinal leaf vein showed brown necrotic spots



不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),
而竖条表示标准差($n=15$);下同

图 1 SO₂ 处理对 3 种植物的叶绿素(a+b)含量(A),
叶液 pH(B)和叶片相对含水量(C)的影响

Bars indicate standard deviation ($n=15$). Different letters above the columns indicate the significant differences among the SO₂ treatments ($P<0.05$). The same as below

Fig. 1 Effect of various SO₂ treatments on the content of chlorophyll (a+b) (A), the pH value of leaf extract fluid (B), and the relative water content(C) among three plant species

随着 SO₂ 浓度的升高也在逐渐下降,但下降幅度同虎耳草相比缓慢很多(图 1,A)。3 种植物的叶片汁液 pH 值随着 SO₂ 熏气浓度的升高也都呈现下降趋势,在最大熏气浓度 22.86 mg · m⁻³ 处理下达到最低值,虎耳草、麦冬和紫萼玉簪分别比对照显著下降了 16.3%、9.4%与 13.2%(图 1,B)。在 SO₂ 熏气处理下,3 种植物对水分的利用效率(表现在叶片相对含水量上)也不同,随着 SO₂ 熏气浓度的增加,麦冬和紫萼玉簪对水分的利用效率受到的影响不明显,而虎耳草对水分的利用效率却迅速地降低,其在 SO₂ 熏气浓度 22.86 mg · m⁻³ 处理下与对照相比显著下降了 20.2%(图 1,C)。

2.3 SO₂ 熏气处理对植物叶片膜质过氧化影响

3 种植物叶片的 MDA 含量和叶片相对电导率均随着 SO₂ 熏气胁迫浓度的升高而逐渐增加(图 2)。其中,3 种植物叶片中 MDA 含量都在 SO₂ 熏气浓度 22.86 mg · m⁻³ 下达到最大值,此时虎耳草、麦冬和紫萼玉簪分别比对照显著增加 76.3%、62.1%和 78.6% ($P<0.05$)(图 2,A);3 种植物叶片相对电导率也随着 SO₂ 熏气浓度的升高而大幅度增加,在 SO₂ 熏气浓度 22.86 mg · m⁻³ 下达到峰值,此时虎耳草、麦冬和紫萼玉簪分别比对照极显著增加 358.8%、312.6%和 385.7% ($P<0.01$)(图 2,B)。

2.4 SO₂ 熏气处理对植物叶片渗透调节物质含量的影响

SO₂ 熏气处理致使 3 种植物叶片中可溶性糖和脯氨酸含量不同程度升高,但各植物上升幅度存在差异(图 3)。其中,随着 SO₂ 熏气浓度的升高,3 种植物的叶片可溶性糖含量都逐步升高,麦冬与虎耳草在 SO₂ 浓度超过 11.43 mg · m⁻³ 后上升幅度降低,而紫萼玉簪叶片中可溶性糖含量大幅度上升;三者均在 SO₂ 浓度 22.86 mg · m⁻³ 下达到峰值,分别

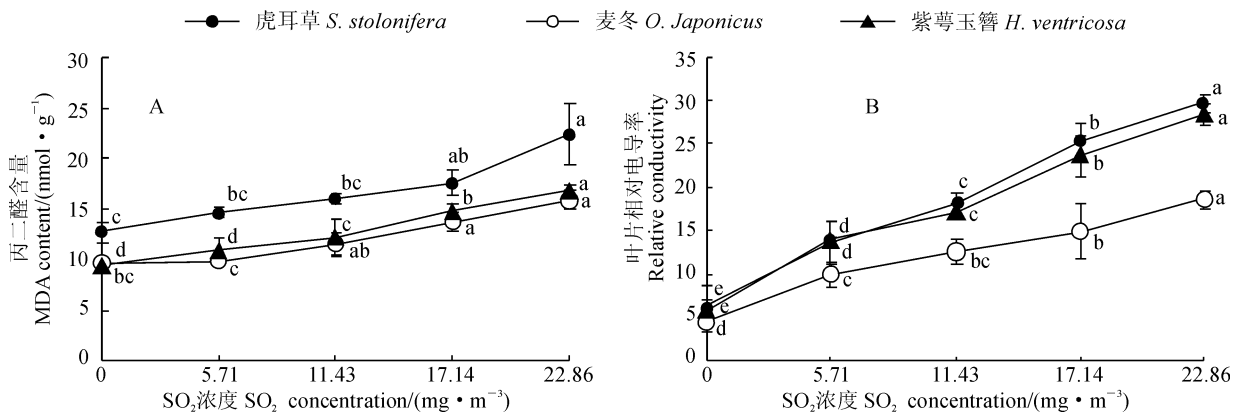


图 2 SO₂ 处理对 3 种植物叶片丙二醛含量(A)和叶片相对电导率(B)的影响
Fig. 2 Effect of various SO₂ treatments on the MDA content (A) and leaf relative conductivity (B) among the three plant species

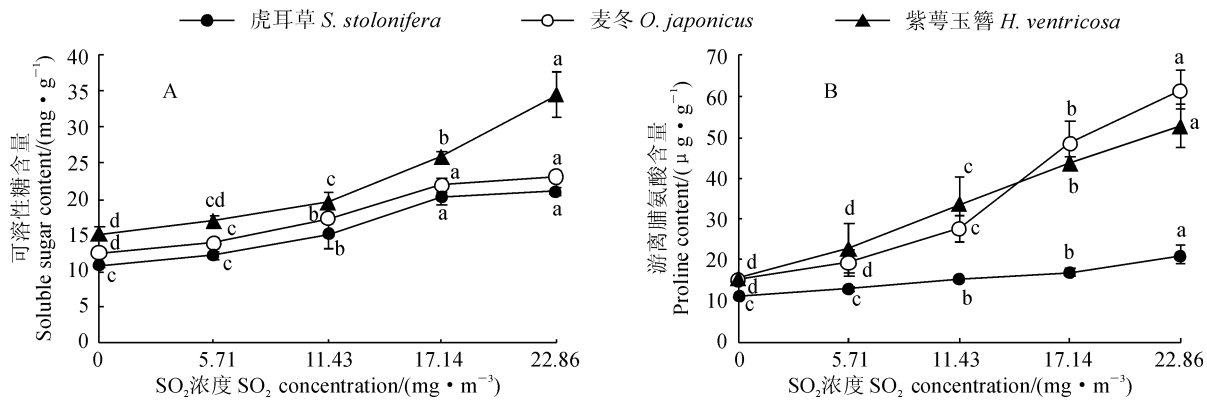


图 3 SO₂ 处理对 3 种植物叶片的可溶性糖(A)和游离脯氨酸(B)含量的影响
Fig. 3 Effect of various SO₂ treatments on soluble sugar (A) and proline (B) contents among three plant species

比对照显著增加了 84.9%、94.4% 和 127.0%($P < 0.05$)(图 3,A)。同时,随着 SO₂ 熏气浓度的升高,虎耳草叶片的脯氨酸始终缓慢增加,而麦冬与紫萼玉簪脯氨酸含量则大幅度上升,它们均在 SO₂ 浓度 22.86 mg · m⁻³下达到峰值,分别比对照显著增加了 89.8%、299.9%和 241.8%(图 3,B)。

2.5 SO₂ 熏气处理对植物叶片抗氧化酶活性的影响

在 SO₂ 熏气胁迫下,3 种植物叶片的 SOD 和 CAT 活性被激活(图 4)。其中,随着 SO₂ 熏气浓度的升高,虎耳草,麦冬和紫萼玉簪的 SOD 活性均逐渐急剧上升,并在 SO₂ 浓度为 22.86 mg · m⁻³时达到峰值,分别比对照显著增加了 541.4%、600.5%和 670.6%(图 4,A)。同时,随着 SO₂ 熏气浓度的升高,虎耳草叶片中 CAT 活性平稳上升,而麦冬和紫萼玉簪叶片 CAT 活性则在 SO₂ 浓度从 17.14 mg · m⁻³到 22.86 mg · m⁻³间骤升,三者 在 22.86 mg · m⁻³ 处理下分别比对照显著增加 245.5%、

494.8%和 238.4%(图 4,B)。由此看出麦冬与紫萼玉簪叶片的抗氧化酶活性在 SO₂ 熏气胁迫下强于虎耳草。

2.6 3 种喜阴地被植物对 SO₂ 净化能力比较

3 种植物叶片中硫含量随着 SO₂ 浓度的升高而持续增加,在 SO₂ 浓度为 22.86 mg · m⁻³时达到峰值,它们叶片吸硫量表现为虎耳草>紫萼玉簪>麦冬(图 5)。这个结果表明这些植物即使在高浓度 SO₂ 处理下,仍然有气体交换能力,这也同这 3 种植物的 SO₂ 胁迫受害症状不明显的观察结果相一致。

本试验中,植物对 S 的净化能力的计算参照张德强等^[30]的方法,将叶片含硫量比对照提高 40%以上的植物划分为净化能力强,介于 20%~40%的为净化能力中等,低于 20%的为净化能力弱。结果(表 2)表明,3 种植物叶片对 SO₂ 的净化率明显不同,虎耳草、麦冬和紫萼玉簪的平均净化率分别为 76.36%、42.68%和 35.82%,即虎耳草与麦冬的 S 净化能力均为强,紫萼玉簪为中等。3 种植物净化

SO₂ 能力顺序从高到低依次为虎耳草、麦冬和紫萼玉簪。

2.7 3 种地被植物对 SO₂ 抗性能力的综合评价

植物在受到逆境胁迫时其生理变化是错综复杂的,用某一个生理指标很难评定其抗性能力。为综合评价 3 种植物对 SO₂ 的抗性,对多个生理指标进行模糊数学隶属函数公式计算,除了叶片丙二醛含量与相对电导率用反隶属函数计算,其余指标均用隶属函数计算^[13],同时避免各指标贡献的重复性,本研究采用主成份分析法将 9 个评定指标化为作用不重叠的 2 个综合指标,对其进行抗性分析。X 为各个指标的平均隶属函数值,Y 为综合指标。

$$Y_1 = 0.949X_1 + 0.867X_2 + 0.765X_3 + 0.999X_4 - 0.147X_5 - 0.988X_6 - 0.165X_7 - 0.822X_8 + 0.939X_9$$
$$Y_2 = -0.317X_1 + 0.499X_2 - 0.644X_3 + 0.032X_4 + 0.989X_5 + 0.157X_6 - 0.986X_7 - 0.570X_8 + 0.344X_9$$

其中,X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆、X₇、X₈ 和 X₉ 分别为叶绿素(a+b)、相对电导率、相对含水量、丙二醛、可溶性糖、游离脯氨酸、SOD、CAT 和叶液 pH 值平

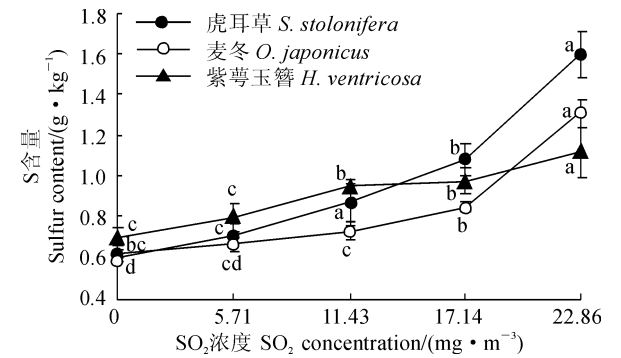


图 5 SO₂ 处理对 3 种植物叶片硫含量的影响
Fig. 5 Effect of SO₂ on the changes of sulfur content among three plant species

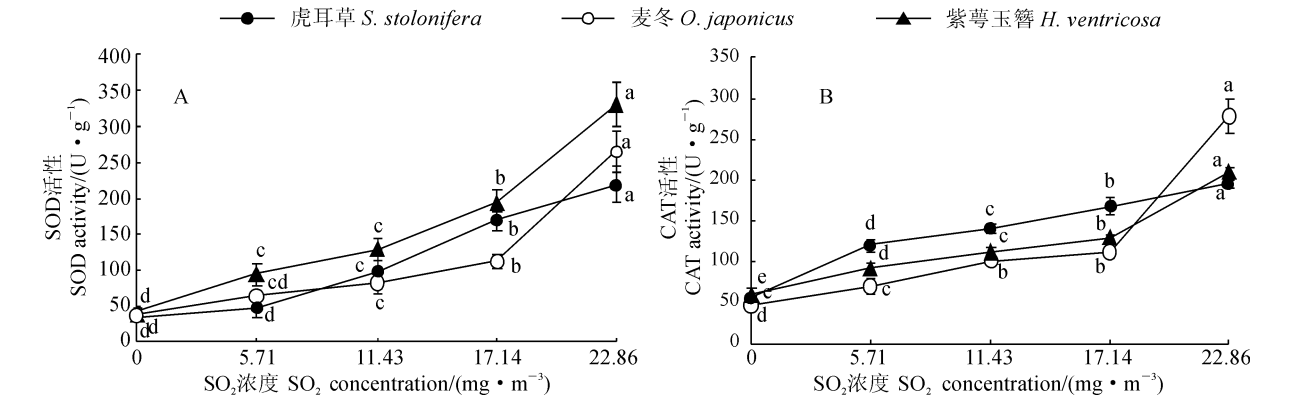


图 4 SO₂ 处理对 3 种植物的 SOD(A)和 CAT(B)活性的影响
Fig. 4 Effect of SO₂ on the activities of SOD(A) and CAT(B) among three plant species

植物种类 Species	净化率 Purification rate/%				平均 Mean/%	净化能力 Purification ability
	5. 71 mg · m ⁻³	11. 43 mg · m ⁻³	17. 14 mg · m ⁻³	22. 86 mg · m ⁻³		
虎耳草 <i>S. sarmentosa</i>	18. 27	43. 93	78. 42	164. 60	76. 36	强 High
麦冬 <i>O. japonicus</i>	6. 80	17. 07	36. 33	110. 54	42. 68	强 High
紫萼玉簪 <i>H. ventricosa</i>	12. 47	34. 75	38. 20	57. 89	35. 82	中等 Medium

表 3 3 种地被植物对 SO ₂ 抗性的综合评定				
项目 Item	贡献率 Contribution rate/%	隶属函数值 Valve of subordinate function		
		虎耳草 <i>S. stolonifera</i>	麦冬 <i>O. japonicus</i>	紫萼玉簪 <i>H. ventricosa</i>
Y ₁	64. 36	0. 343	1. 185	0. 813
Y ₂	35. 37	0. 184	0. 170	0. 277
综合评定 Comprehensive conclusion	100	0. 526	1. 355	1. 091
SO ₂ 抗性排序 Resistant order to SO ₂		3	1	2

均隶属函数值, Y_1 为综合指标 1, Y_2 为综合指标 2。如表 3 所示, 将综合指标 Y_1 与 Y_2 分别乘以其贡献率再求其平均值, 得出相应的综合评定结果, 即 3 种植物对 SO₂ 的抗性能力表现为麦冬 > 紫萼玉簪 > 虎耳草, 与它们叶片受害症状和受害率的观察结果一致。

3 讨 论

利用人工模拟熏气的方法通过测定植物生长、细胞膜脂质过氧化、渗透调节相关及叶片含硫量等指标, 是比较不同植物物种对 SO₂ 抗性和净化能力的一种可信便捷的方法^[9,31]。早期研究表明在 SO₂ 熏气胁迫下致使叶绿素漂白或分解而导致叶绿素含量的降低^[32], 本试验中虎耳草的叶绿素含量下降幅度较紫萼玉簪和麦冬大。虽然硫是植物必需的大量元素, 与蛋氨酸及叶绿素的合成直接相关, 但是短时间内高浓度的 SO₂ 熏气可能导致植物体内代谢紊乱, 从而导致了叶绿素含量的下降, 这一结论与其他学者的研究结果相一致^[33]。

长期开放的叶表面气孔会通过蒸腾作用导致水分大量流失。本试验中随着 SO₂ 熏气浓度的上升虎耳草叶片含水量下降很快, 表明高浓度的 SO₂ 胁迫可能使其叶片的气孔失去调节功能, 气孔可能开放时间过长, 因过强的蒸腾作用而导致叶片相对含水量下降, 而麦冬和紫萼玉簪叶片相对含水量受 SO₂ 胁迫的影响非常小。这一结果表明 SO₂ 胁迫下不同的植物有不同的水分利用效率, 这一结论得到潘文的研究结果支持^[13]。

植物叶片通过气孔吸收 SO₂ 后通过水合作用生成酸性 HSO₃⁻ 或 SO₃²⁻, 从而使叶片细胞酸化^[5], 影响植物正常的生理代谢活动。本研究结果表明, 在供试的 3 种阴生地被植物中, 随着 SO₂ 胁迫浓度的升高, 叶片汁液 pH 下降幅度最小的是麦冬。从这一结果可以推测在 SO₂ 胁迫下麦冬的叶片具有很强的缓冲能力, 其细胞能维持相对稳定的 pH 环境, 有利于新陈代谢的正常进行, 这也可能是其抗性强的一个原因。前人的研究结果也表明 SO₂ 胁迫下叶片 pH 值降幅越小, 细胞调节与缓冲能力越强, 植物伤害越轻^[34]。从这些结果我们可以推断

汁液 pH 值也可以作为评价 SO₂ 抗性能力强弱的一个便捷可行的指标。

SO₂ 胁迫下产生大量 O₂⁻、OH⁻ 自由基从而使植物细胞膜受到伤害^[35], MDA 是植物膜脂过氧化物的重要产物, 其含量与代表质膜透性的叶片相对电导率呈正相关, 与植株受伤害程度呈负相关。本研究表明, 随着 SO₂ 处理浓度的升高, 3 种植物的 MDA 含量和叶片相对电导率都有不同程度升高, 但是麦冬上升幅度最为缓慢, 这也同本试验 3 种参试植物中麦冬的抗性最强相一致。SOD、CAT 是细胞抵御活性氧伤害的主要保护酶类, 在逆境状态下被激活。随着 SO₂ 浓度的升高, 3 种植物的 SOD 和 CAT 活性都有不同程度地升高, 这 2 种酶上升幅度最快的就是麦冬, 表明其本身清除活性氧的能力最强。

脯氨酸的积累能在一定程度内调节胞内膨压使植物适应逆境, 而可溶性糖是合成有机物质的碳架和能量来源, 能稳定细胞膜和原生质胶体^[6]。本试验结果显示, 随着 SO₂ 浓度的升高, 3 种植物游离脯氨酸和可溶性糖含量均呈现不同幅度上升, 其中虎耳草中的这些渗透调节物质增加的幅度低于麦冬和紫萼玉簪, 这一结果说明后 2 种植物的细胞在 SO₂ 下有更强的抗胁迫能力。

进一步对上述指标进行综合评定的结果表明, 3 种植物对 SO₂ 的抗性能力从高到低的顺序依次为麦冬 > 紫萼玉簪 > 虎耳草, 这也同 3 种植物的受伤程度相一致, 抗性强的麦冬受伤害程度最轻, 抗性弱一些的虎耳草最严重, 但是虎耳草在 5.71 mg · m⁻³ SO₂ 胁迫浓度下并未有形态伤害。根据 3 种植物中叶片含硫量不同推测它们对硫的净化能力存在差异, 3 种植物对 SO₂ 的净化能力从高到低依次为虎耳草 > 麦冬 > 紫萼玉簪。本试验中 SO₂ 的最低参试浓度远远高于城市大气中的实际 SO₂ 浓度 (0.069~0.15 mg · m⁻³)^[36-37], 而这个浓度下 3 种植物均未呈现伤害症状, 因此, 作为城市大气中 SO₂ 污染区植物的选择标准, 应在保证植物不受伤害的前提下首要考虑其 SO₂ 的净化能力, 才有可能对大气污染进行植物修复, 使地被植物在表现景观效果的同时, 发挥更好的生态效果。

参考文献:

[1] 朱红霞, 赵淑莉, 阚海东. 2013 年我国典型城市大气污染物浓度分布特征[J]. 环境科学与技术, 2015, (6): 227-233.
ZHU H X, ZHAO S L, KAN H D. Distribution characteristics of main atmospheric pollutant concentration in Chinese typical cities in 2013 [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, (6): 227-233.

[2] 宋桂香, 江莉莉, 陈国海, 等. 上海市大气气态污染物与居民每日死亡关系的时间序列研究[J]. 环境与健康杂志, 2006, **23** (5): 390-393.
SONG G X, JIANG L L, CHEN G H, *et al.* A time-series study on the relationship between gaseous air pollutants and daily mortality in Shanghai [J]. *Journal of Environmental and Health*, 2006, **23**(5): 390-393.

[3] DARRALL N M. The effect of air pollutants on physiological processes in plants[J]. *Plant Cell & Environment*, 1989, **12** (12): 1-30.

[4] OMASA K, SAJI H, YOUSSEFIAN S, *et al.* Air Pollution and Plant Biotechnology: Prospects for Phytomonitoring and Phytoremediation[M]. Springer, 2002.

[5] SINGH L P, GILL S S, GILL R, *et al.* Mechanism of sulfur dioxide toxicity and tolerance in crop plants[J]. *Improving Crop Resistance to Abiotic Stress*, 2012: 133-163.

[6] AGRAWAL M, SINGHA M, RAIPUTA M, *et al.* Effect of air pollution on peri-urban agriculture: a case study[J]. *Environment Pollution*, 2003, **126**: 323-329.

[7] 杨晓晓, 杨 丹, 方欢欢, 等. 3 种地被植物对二氧化硫胁迫的生理响应[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(2): 361-369.
YANG X X, YANG D, FANG H H, *et al.* Physiological response of 3 ground cover plants to sulfur dioxide stress [J]. *Acta Botan. Boreal. -Ocliden. Sinica*, 2016, **36**(2): 361-369.

[8] 孙 华. 二氧化硫胁迫对园林植物生长和叶片含硫量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, (2): 168-172.
SUN H. The effect of SO₂ stress on growth of plants in garden and sulfur content of leaves[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2015, (2): 168-172.

[9] 孙凌霞, 孙 萍, 蔡仕珍, 等. 四种冷季型草坪草对二氧化硫胁迫的生理响应研究[J]. 草业学报, 2014, **23**(4): 237-244.
SUN L X, SUN P, CAI S Z, *et al.* Physiological responses of four cold-season turfgrasses to oxidative stress of SO₂[J]. *Acta Prqtaculturqe Sinica*, 2014, **23**(4): 237-244.

[10] 种培芳, 苏世平. 4 种金色叶树木对 SO₂ 胁迫的生理响应[J]. 生态学报, 2013, **33**(15): 4 639-4 648.
CHONG P F, SUN S P. Physiological response of four golden-leaf trees to SO₂ stress[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2013, **33**(15): 4 639-4 648.

[11] 张卫强, 甘先华, 殷祚云, 等. 二氧化硫胁迫对园林植物幼苗生理生态特征的影响[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(6): 247-253.
ZHANG W Q, GAN X H, YIN Z Y, *et al.* Effects of sulfur dioxide stress on the physiological and ecological characteristics of landscape plants [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2012, **19**(6): 247-253.

[12] 韦阳连, 王 瑛, 余金昌, 等. 城市绿地乡土树种对大气污染的适应性响应[J]. 亚热带植物科学, 2013, (1): 15-22.
WEI Y L, WANG Y, YU J C, *et al.* Response of native tree species adapted to air pollution in urban green land. [J]. *Subtropical Plant Science*, 2013, (1): 15-22.

[13] 潘 文, 张卫强, 张方秋, 等. 广州市园林绿化植物苗木对二氧化硫和二氧化氮吸收能力分析[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(4): 606-612.
PAN W, ZHANG W Q, ZHANG F Q, *et al.* Decontamination ability of sulfur dioxide and nitrogen dioxide for 38 young landscaping plants in Guangzhou City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(4): 606-612.

[14] 陈卓梅, 李庆荣, 杜国坚. 浙江省 42 种园林绿化植物对 SO₂ 气体的抗性及其吸收能力研究[J]. 浙江林业科技, 2007, (6): 29-32, 52.
CHEN Z M, LI Q R, DU G J. Resistance and absorbency to gaseous SO₂ of 42 landscaping plants in Zhejiang[J]. *Jour of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2007, (6): 29-32, 52.

[15] 温达志, 陆耀东, 旷远文, 等. 39 种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, **11** (4): 341-347.
WEN D Z, LU Y D, KUAN Y W, *et al.* Ecophysiological response and sensitivity of 39 woody species exposed to air pollution [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, **11**(4): 341-347.

[16] KOPRIVOVA A, KOPRIVA S. Molecular mechanisms of regulation of sulfate assimilation: first steps on a long road [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, **5**(5): 589.

[17] YARMOLINSKY D, BRYCHKOVA G, FLUHR R, *et al.* Sulfite reductase protects plants against sulfite toxicity[J]. *Plant Physiology*, 2013, **161**(2): 725-743.

[18] BRYCHKOVA G, SAGI M. An essential role for tomato sulfite oxidase and enzymes of the sulfite network in maintaining leaf sulfite homeostasis[J]. *Plant Physiology*, 2013, **161**(1): 148-164.

[19] YI H, JING L, KE Z. Effect of sulfur dioxide hydrates on cell cycle, sister chromatid exchange, and micronuclei in barley[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2005, **62** (3): 421-426.

[20] 王丽华,李 西,刘 尉,等. 四种暖季型草坪草对 SO₂ 的抗性 & 净化能力的比较[J]. 草业学报, 2013, **22**(1):225-233.
WANG L H, LI X, LIU W, *et al.* Comparison resistance and purification ability of four warm-season turfgrasses to SO₂[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2013, **22**(1): 225-233.

[21] 孙守家. 玫瑰花蕾采后衰老机理研究[D]. 山东: 山东农业大学, 2013.

[22] 宋凤鸣,葛秀春. 活性氧及膜脂过氧化与棉花对枯萎病抗性的关系[J]. 植物病理学报, 2001, **31**(2):110-116.
SONG F M, GE X C. The roles of active oxygen species and lipid peroxidation in the resistance of cotton seedlings to fusarium wilt[J]. *Plant Pathology Journal*, 2001, **31**(2): 110-116.

[23] 郝建军,康宗利. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:79-81.

[24] 郝再彬. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.

[25] 杨明明. SO₂ 和 Cl₂ 及复合胁迫对茶条槭非酶类保护剂生理代谢的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.

[26] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000:164-165.

[27] 郑炳松. 现代植物生理生化研究技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006:269-271.

[28] 杨玉珍. 不同绿化树种抗氟性机理研究[J]. 河南农业大学学报, 1999, **33**(1):83-86.
YANG Y Z. Fluoride resistance mechanism of different trees [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 1999, **33**(1):83-86.

[29] 吴名剑,孙贤军,雷启福,等. 硫酸钡溶胶比浊法测定烟草中的硫[J]. 烟草科技, 2005, (1):24-26.
WU M J, SUN X J, LEI Q F, *et al.* Determination of sulfur in tobacco by barium sulfate sol turbidity method [J]. *Tobacco Science and Technology*, 2005, (1): 24-26.

[30] 张德强,孔国辉,温达志,等. 园林绿化植物的抗性及其对 SO₂ 和 Pb 净化能力分析[J]. 广州环境科学, 2003, (18) : 22-25.
ZHANG D Q, KONG G H, WEN D Z, *et al.* A study on resistance and purifing ability of SO₂ and Pb on landscape plants [J]. *Guangzhou Environmental Science*, 2003, (18): 22-25.

[31] SUN L X, ZHANG J M, CAI S Z, *et al.* Physiological responses of *Taxus chinensis* var. *mairei* to SO₂ stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(7):1 811-1 817.

[32] PRASAD B J, RAO D N. Relative sensitivity of a leguminous and a cereal crop to sulphur dioxide pollution[J]. *Environmental Pollution*, 1982, **29**(1):57-70.

[33] 李 西,王丽华,刘 尉,等. 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较[J]. 生态学报, 2014, **34**(5):1 189-1 197.
LI X, WANG L H, LIU W, *et al.* Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(5): 1 189-1 197.

[34] SUROWKA, KAROLEWSKI P, NIEWIADOMSKA E, *et al.* Antioxidative response of *Mesembryanthemum crystallinum*, plants to exogenous SO₂ application[J]. *Plant Science*, 2007, **172**(1):76-84.

[35] LI LIHONG, YI HUILAN. Effect of sulfur dioxide on ROS production, gene expression and antioxidant enzyme activity in *Arabidopsis* plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry* 58:46-53.

[36] 杨义彬. 成都市大气污染及气象条件影响分析[J]. 四川气象, 2004, **24**(3):40-43.
YANG Y B. Analysis on the influence of atmospheric pollution and meteorological conditions in Chengdu[J]. *Journal of Sichuan Meteorology*, 2004, **24**(3):40-43.

[37] 谢雨竹,潘月鹏,倪长健,等. 成都市区夏季大气污染物浓度时空变化特征分析[J]. 环境科学学报, 2015, 4:975-983.
XIE Y Z, PAN Y P, NI C J, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of atmospheric pollutant concentration in summer in Chengdu[J]. *Journal of Environmental Science*, 2015, 4:975-983.

(编辑:裴阿卫)