

二氧化硫胁迫对园林植物幼苗生理生态特征的影响

张卫强, 甘先华, 殷祚云, 王明怀, 周平, 李召青, 温小莹, 李明帅

(广东省林业科学研究院, 广州 510520)

摘要:为探讨 28 种广州市常用园林植物抗 SO_2 污染能力, 以 2~3 a 生实生苗为材料, 通过人工气候室的盆栽实验, 测定了 $5.329 \text{ mg/m}^3 \text{SO}_2$ 浓度胁迫处理下其叶片气体交换参数、相对叶绿素含量和相对含水量生理生态指标, 并利用隶属函数法及系统聚类分析法对其抗 SO_2 污染能力进行了综合评价。结果表明: 与相对清洁区相比, SO_2 污染胁迫下大多数植物叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、相对叶绿素含量和相对含水量均出现不同程度的下降, 下降幅度因植物种类的不同而有较大的差异。综合隶属函数和聚类分析表明, 桂花、夹竹桃、小叶榄仁、罗汉松、樟树、乐昌含笑、石栗、糖胶树、竹柏和铁冬青抗 SO_2 污染能力强, 黄金榕、海南红豆、红千层、澳洲鸭脚木、幌伞枫抗 SO_2 污染能力较强, 洋紫荆、菩提榕、长芒杜英、非洲桃花心和大花五桠果抗 SO_2 污染能力中等, 红花银桦、海南蒲桃、木棉、大花紫薇和人面子抗 SO_2 污染能力较弱, 而白千层、麻楝和复羽叶栎树抗 SO_2 污染能力弱。研究结果可为火电厂、陶瓷厂、钢铁厂、石化厂等重度酸污染地区植物选择提供参考。

关键词:园林植物幼苗; 人工气候室; SO_2 胁迫; 生理生态特征; 抗污染能力分析

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)06-0247-07

Effects of SO_2 Stress on Eco-physiological Characteristics of Garden Plant Seedlings

ZHANG Wei-qiang, GAN Xian-hua, YIN Zuo-yun,

WANG Ming-huai, ZHOU Ping, LI Zhao-qing, WEN Xiao-ying, LI Ming-shuai

(Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: In order to explore the resistance of 28 common garden plant species to sulfur dioxide (SO_2) pollution in Guangzhou City, 2 to 3 year-old seedlings of these species were selected and treated in artificial climate chamber. Leaf gas exchange parameters, relative chlorophyll content and relative water content of these seedlings were determined under $5.329 \text{ mg/m}^3 \text{SO}_2$ stress, and their resistance to SO_2 pollution was comprehensively evaluated by using fuzzy subordinate function and system cluster analysis. The results indicated that the leaf net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, relative chlorophyll content and relative water content decreased to the different extent with regard to varieties of plants. Results from the fuzzy subordinate function and system cluster analysis showed that for the resistance of test plants to SO_2 pollution; the strongest were *Osmanthus fragrans*, *Nerium indicum*, *Terminalia mantaly*, *Podocarpus macrophyllus*, *Cinnamomum camphora*, *Michelia chapensis*, *Aleurites moluccana*, *Alstonia scholaris*, *Podocarpus nagi*, and *Ilex rotunda*; the second strongest ones were *Ficus microcarpa*, *Ormosia pinnata*, *Calistemon rigidus*, *Brassia actinopfnylla*, and *Heteropanax fragrans*; the moderate ones were *Bauhinia variegata*, *Ficus religiosa*, *Elaeocarpus apiculatus*, *Khaya senegalensis*, and *Dillenia turbinata*; the second weakest ones were *Grevillea banksii*, *Syzygium cumini*, *Bombax malabaricum*, *Lagerstroemia speciosa*, and *Dracontomelon duperreranum*; the weakest ones were *Melaleuca leucadendron*, *Chukrasia tabularis*, and *Koelreuteria bipinnata*. The study could provide a reference for the species selection in severely acid-contaminated areas such as thermal power plants, ceramic plants, steel mills, and petrochemical plants.

Key words: garden plant seedlings; artificial climate chamber; SO_2 stress; eco-physiological characteristics; anti-pollution capacity analysis

收稿日期: 2012-04-20

修回日期: 2012-05-28

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项 (200904015); 广州市南沙区公共服务研究项目“广州市抗大气污染树种筛选与配置研究”; 广东省林业科技创新专项 (2008KJ CX008-02)

作者简介: 张卫强 (1976—), 男, 山西清徐人, 博士, 高级工程师, 主要从事森林水文与植物生理生态。E-mail: happyzwq@sina.com

通信作者: 甘先华 (1969—), 男, 四川邻水人, 硕士, 高级工程师, 主要从事森林生态研究。E-mail: 1161753550@qq.com

随着城市化的迅猛发展,环境污染尤其是大气污染日益成为严重的城市环境问题^[1]。SO₂ 是大气中主要的污染物之一,素有“大气污染元凶”之称^[2]。除对人健康产生严重影响外^[3],对森林生态系统也会造成很大影响^[4]。SO₂ 对植物影响的研究主要集中在植物生长^[5-6]、敏感性和伤害性^[7-8]、抗污染能力^[9]上。SO₂ 胁迫对植物生理生态的影响主要聚焦于野外植物叶绿素荧光^[10]和光合生理生态^[8,11]特性的研究,而采用人工模拟熏气实验,开展 SO₂ 污染胁迫对园林植物光合生理生态影响的研究很少。本研究以广州市常用的 28 种园林植物幼苗为研究对象,开展人工模拟熏气试验,比较相对清洁区(对照)和 SO₂ 污染胁迫(处理)后叶片气体交换参数、相对叶绿素含量和相对含水量的差异,分析这 28 种植物对 SO₂ 胁迫的抗性,研究结果可为火电厂、陶瓷厂、钢铁厂、石化厂等重度酸污染地区树种选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设

2011 年 6 月,选择 28 种广州市常用的园林植物(表 1),将生长健壮、生长状况基本相同的 2~3 a 生的实生苗放置在人工气候室中,每种植物设 3 株,设计温度为 25~35℃和湿度 35%~55%,光照强度为 600 μmol/(m²·s),CO₂ 浓度 380~400 μmol/mol,SO₂ 浓度为 5.329 mg/m³,人工模拟熏气 72 h。人工气候室为封闭式自动监测熏气装置,能模拟自然界气候条件,温度、湿度、光照、CO₂、NO₂、SO₂ 参数的控

制可按程序设定进行,可恒定控制和渐变控制。气候室内采用红外线 CO₂ 传感器、SO₂、NO₂ 传感器测量室内的 CO₂、SO₂、NO₂ 气体浓度值,由计算机将采集到的气候室内的 CO₂、SO₂、NO₂ 浓度值与设定的 CO₂、SO₂、NO₂ 浓度值进行比较,通过 PID 及模糊控制算法控制电子流量调节阀,调节进入气候室的 CO₂、SO₂、NO₂ 流量,实现精确控制。由于 CO₂、SO₂、NO₂ 气体分子量均大于空气平均分子量,因此采用送回风模式,气室底侧栅板送风,上侧栅板回风,实现气室内气体循环,同时也能提高混合气体的均匀性。气候室内尺寸为 2.0 m×1.2 m×1.8 m。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 植物叶片光合作用 试验前后选取典型晴朗天气,利用美国 LI—COR 公司生产的 Li—6400 光合作用测定系统,对相对清洁区和 SO₂ 胁迫处理的园林植物光合作用进行了测定,每种植物(表 1)选择 3 个有代表性的植株,每株测定 3 片树冠中上部外围健康向阳叶,测定时间为上午 9:00—11:00,连续测定 3 d。为保证不同植物种类之间观测数据的可比性,在具体测定时采用不同植株、不同叶片重复之间的交替测定法。测定指标包括:净光合速率[μmol/(m²·s)],气孔导度[mmol/(m²·s)],蒸腾速率[mmol/(m²·s)]等,其他重要参数因子叶片水分利用效率(μmol/mmol)由以下公式计算:WUE=P_n/T_r。在观测时段内,气温(T_a)介于 37.0~39.6℃,空气相对湿度为 41.4%~48.6%,空气 CO₂ 浓度介于 376~385 μmol/mol,光合有效辐射为 384~1 250 μmol/(m²·s)。

表 1 试验植物

试验植物	拉丁名	试验植物	拉丁名
罗汉松	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	白千层	<i>Melaleuca leucadendron</i>
竹柏	<i>Podocarpus nagi</i>	铁冬青	<i>Ilex rotunda</i>
乐昌含笑	<i>Michelia chapensis</i>	麻楝	<i>Chukrasia tabularis</i>
樟树	<i>Cinnamomum camphora</i>	非洲桃花心	<i>Khaya senegalensis</i>
洋紫荆	<i>Bauhinia variegata</i>	复羽叶栎树	<i>Koelreuteria bipinnata</i>
菩提榕	<i>Ficus religiosa</i>	人面子	<i>Dracontomelon duperreranum</i>
黄金榕	<i>Ficus microcarpa</i>	大花紫薇	<i>Lagerstroemia speciosa</i>
红花银桦	<i>Grevillea banksii</i>	海南红豆	<i>Ormosia pinnata</i>
大花五桠果	<i>Dillenia turbinata</i>	糖胶树	<i>Alstonia scholaris</i>
长芒杜英	<i>Elaeocarpus apiculatus</i>	夹竹桃	<i>Nerium indicum</i>
木棉	<i>Bombax malabaricum</i>	幌伞枫	<i>Heteropanax fragrans</i>
石栗	<i>Aleurites moluccana</i>	澳洲鸭脚木	<i>Brassaia actinophylla</i>
海南蒲桃	<i>Syzygium cumini</i>	桂花	<i>Osmanthus fragrans</i>
红千层	<i>Callistemon rigidus</i>	小叶榄仁	<i>Terminalia mantaly</i>

1.2.2 植物叶片相对叶绿素和相对含水量 采用美国 CCM—200 的手持式叶绿素计,对相对清洁和 SO_2 胁迫处理植物苗木叶片叶绿素相对含量(CCI 值)进行了测定,每株测定 6 片叶,连续测定 3 d。叶片相对含水量采用烘干称重法。

1.3 数据处理

数据分析采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0。

2 结果与分析

2.1 植物叶片净光合速率与气孔导度

表 2 表明,在相对清洁区,木棉、红千层、非洲桃花心、小叶榄仁、白千层和夹竹桃的净光合速率较高,变化范围为 $7.08 \sim 10.92 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对应的气孔导度 G_s 为 $0.128 \sim 0.221 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;其次为罗汉松、樟树、菩提榕、红花银桦、长芒杜英、石栗、海南蒲桃、铁冬青和糖胶树,其净光合速率变化范围为 $5.10 \sim 6.67 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对应气孔导度为 $0.057 \sim 0.169 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而竹柏、大花五桠果、海南红豆、幌伞枫、澳洲鸭脚木和桂花净光合速率相对较小,其值介于 $3.38 \sim 3.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间。在 SO_2 胁迫处理下,28 种园林植物的净光合速率与相对清

洁区相比均有不同程度的下降,下降幅度在 80% 以上的植物有白千层、麻楝、复羽叶栎树和人面子,其气孔导度降幅也在 80% 以上,表明 SO_2 胁迫对以上 5 种植物净光合速率和气孔导度影响大;净光合速率下降幅度在 51%~80% 的园林植物有洋紫荆、菩提榕、黄金榕、红花银桦、大花五桠果、长芒杜英、木棉、海南蒲桃、非洲桃花心、大花紫薇和海南红豆,除黄金榕和海南红豆外,其气孔导度下降幅度也在 51%~80%;净光合速率下降幅度在 31%~50% 的园林植物有罗汉松、竹柏、乐昌含笑、石栗、红千层、铁冬青、夹竹桃、糖胶树、幌伞枫和小叶榄仁,而下降幅度在 0%~30% 之间的园林植物有樟树、澳洲鸭脚木和桂花,除澳洲鸭脚木外,樟树和桂花气孔导度下降幅度在 30% 以内, SO_2 胁迫对其净光合速率和气孔导度影响不大。

通过分析相对清洁区和 SO_2 胁迫处理下 28 种植物的净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)之间的相关关系(图 1),发现 P_n 与 G_s 之间存在显著线性相关关系,表明多数植物能够感应污染胁迫并调节气孔开度,是植物对胁迫环境的一种适应策略,但污染胁迫使数据点离散程度增加,线性关系的显著程度被削弱^[11]。

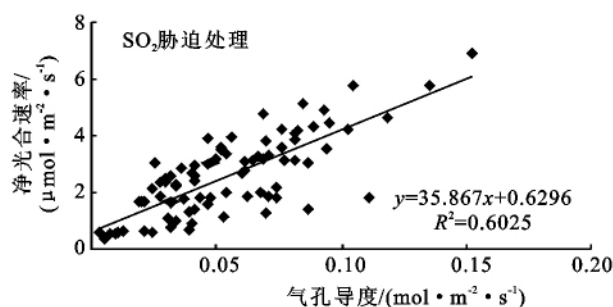
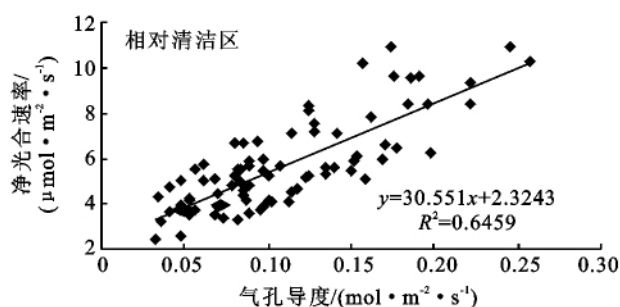


图 1 对照及 SO_2 处理的园林植物净光合速率与气孔导度之间的相关关系

2.2 植物叶片蒸腾速率与水分利用效率

从表 3 可知,在相对清洁区,红千层、白千层、非洲桃花心、夹竹桃和小叶榄仁具有较高的蒸腾速率,变化范围为 $4.03 \sim 5.12 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;其次为菩提榕、木棉、海南蒲桃、铁冬青、麻楝和糖胶树,其值介于 $3.01 \sim 3.88 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而罗汉松、竹柏、乐昌含笑、洋紫荆、海南红豆、幌伞枫、澳洲鸭脚木和桂花蒸腾速率低于 $2.00 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。与对照相比, SO_2 胁迫处理下蒸腾速率下降幅度在 80% 以上的园林植物有白千层、麻楝、复羽叶栎树和人面子,其下降幅度与对应的净光合速率下降幅度一致;蒸腾速率降幅在 51%~80% 的园林植物有菩提榕、红花银桦、大花五桠果、长芒杜英、木棉、海南蒲桃、非洲桃花心、大花紫薇和澳洲鸭脚木;蒸腾速率下降幅度在 31%~50% 的园林植物洋紫荆、黄金榕、石栗、红千层、铁冬青、海

南红豆、夹竹桃、幌伞枫和小叶榄仁;下降幅度在 30% 以下的园林植物有罗汉松、竹柏、乐昌含笑、樟树、糖胶树和桂花。在 SO_2 胁迫处理下,菩提榕、大花五桠果、长芒杜英、红千层、麻楝、人面子、澳洲鸭脚木和桂花水分利用效率与对照相比均有不同程度的上升,上升幅度在 4%~86% 之间,这主要由于 P_n 受到的抑制程度小而 T_r 受抑制的程度较大,使水分利用效率升高;水分利用效率降幅在 50% 以上的为黄金榕;水分利用效率下降幅度在 31%~50% 有洋紫荆、白千层和大花紫薇;水分利用效率下降幅度在 11%~30% 的为罗汉松、竹柏、乐昌含笑、樟树、红花银桦、石栗、海南蒲桃、非洲桃花心、海南红豆、夹竹桃和糖胶树;而下降幅度在 0~10% 之间的有木棉、复羽叶栎树、幌伞枫和小叶榄仁,其水分利用效率相对稳定。

表 2 对照及 SO₂ 处理的园林植物光合特性净光合速率与气孔导度

植物名称	净光合速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			气孔导度/($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	清洁对照(对照)	污染处理(处理)	处理/对照	清洁对照(对照)	污染处理(处理)	处理/对照
罗汉松	5.56±0.31	3.58±0.27	0.64	0.084±0.004	0.076±0.005	0.91
竹柏	3.95±0.27	2.37±0.23	0.60	0.047±0.006	0.028±0.004	0.60
乐昌含笑	4.69±0.60	2.96±0.61	0.63	0.118±0.016	0.041±0.011	0.35
樟树	5.51±1.18	3.91±0.86	0.71	0.057±0.023	0.047±0.022	0.83
洋紫荆	4.98±0.49	2.28±0.58	0.46	0.084±0.014	0.034±0.002	0.41
菩提榕	6.12±0.49	2.76±0.37	0.45	0.153±0.018	0.061±0.020	0.40
黄金榕	4.83±0.85	1.80±0.03	0.37	0.089±0.018	0.074±0.037	0.83
红花银桦	5.10±0.35	2.02±0.14	0.40	0.158±0.117	0.068±0.006	0.43
大花五桠果	3.85±0.50	1.39±0.41	0.36	0.070±0.017	0.041±0.007	0.59
长芒杜英	5.68±1.11	1.68±0.01	0.30	0.089±0.004	0.020±0.001	0.23
木棉	7.08±1.35	3.49±0.46	0.49	0.142±0.080	0.052±0.004	0.37
石栗	5.93±0.34	3.12±0.43	0.53	0.169±0.029	0.077±0.017	0.46
海南蒲桃	5.86±0.64	1.27±0.14	0.22	0.151±0.027	0.070±0.017	0.46
红千层	7.80±0.59	4.32±0.15	0.55	0.162±0.034	0.089±0.006	0.55
白千层	9.34±0.92	0.77±0.16	0.08	0.221±0.037	0.032±0.008	0.15
铁冬青	6.67±1.65	4.21±0.93	0.63	0.086±0.038	0.076±0.009	0.88
麻楝	4.36±0.87	0.59±0.05	0.14	0.085±0.016	0.011±0.002	0.13
非洲桃花心	9.53±1.40	3.15±0.05	0.33	0.185±0.061	0.065±0.004	0.35
复羽叶栎树	4.16±0.95	0.45±0.09	0.11	0.052±0.017	0.006±0.001	0.12
人面子	4.53±0.82	0.65±0.05	0.14	0.115±0.019	0.021±0.018	0.18
大花紫薇	4.65±0.52	1.32±0.25	0.28	0.118±0.005	0.039±0.008	0.33
海南红豆	3.76±1.29	1.80±0.18	0.48	0.047±0.014	0.043±0.011	0.92
糖胶树	5.97±1.17	3.04±1.18	0.51	0.097±0.018	0.087±0.016	0.90
夹竹桃	10.92±0.71	5.77±1.13	0.53	0.174±0.017	0.135±0.017	0.78
幌伞枫	3.38±0.76	2.23±0.36	0.66	0.074±0.026	0.034±0.007	0.46
澳洲鸭脚木	3.61±0.28	3.01±0.35	0.83	0.089±0.008	0.047±0.007	0.53
桂花	3.70±0.02	3.17±0.65	0.86	0.053±0.003	0.050±0.020	0.94
小叶榄仁	7.57±2.03	4.93±0.83	0.65	0.128±0.047	0.093±0.012	0.73

表 3 对照及 SO₂ 处理的园林植物蒸腾速率与水分利用效率

植物名称	蒸腾速率/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)			水分利用效率/($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)		
	相对清洁区(对照)	污染胁迫(处理)	处理/对照	相对清洁区(对照)	污染胁迫(处理)	处理/对照
罗汉松	1.76±0.06	1.26±0.29	0.72	3.83±0.14	2.84±0.38	0.74
竹柏	1.71±0.13	1.23±0.13	0.72	2.39±0.09	1.93±0.03	0.81
乐昌含笑	1.70±0.41	1.52±0.64	0.89	2.93±0.25	2.07±0.46	0.71
樟树	2.22±0.75	1.71±0.24	0.77	2.62±0.56	2.31±0.43	0.88
洋紫荆	1.80±0.38	1.16±0.45	0.64	2.91±0.20	1.57±0.30	0.54
菩提榕	3.88±0.36	1.69±0.64	0.44	1.62±0.22	2.17±0.90	1.34
黄金榕	2.13±0.33	1.33±0.09	0.62	2.92±0.55	1.35±0.05	0.46
红花银桦	2.56±0.18	0.98±0.11	0.38	2.42±0.15	2.06±0.26	0.85
大花五桠果	2.50±0.59	0.87±0.37	0.35	1.62±0.24	1.73±0.81	1.07
长芒杜英	2.52±0.72	0.60±0.10	0.24	2.30±0.26	2.84±0.48	1.23
木棉	3.07±1.52	1.38±0.06	0.45	2.72±0.65	2.53±0.62	0.93
石栗	2.77±0.19	1.88±0.47	0.68	2.12±0.25	1.81±0.20	0.85
海南蒲桃	3.18±0.64	0.75±0.18	0.24	1.92±0.11	1.69±0.48	0.88
红千层	4.05±0.67	2.08±0.12	0.51	1.99±0.22	2.08±0.34	1.04
白千层	4.45±0.49	0.55±0.15	0.12	2.09±0.29	1.42±0.10	0.68
铁冬青	3.19±1.24	1.78±0.25	0.56	2.26±0.34	2.45±0.19	1.08
麻楝	3.01±0.49	0.42±0.09	0.14	1.44±0.12	1.51±0.33	1.05
非洲桃花心	4.03±0.80	1.49±0.13	0.37	2.39±0.13	2.11±0.05	0.88
复羽叶栎树	2.09±0.55	0.25±0.02	0.12	1.97±0.17	1.82±0.46	0.92
人面子	2.91±0.38	0.39±0.06	0.13	1.61±0.15	1.67±0.24	1.04
大花紫薇	2.23±0.74	0.98±0.11	0.44	2.19±0.56	1.35±0.11	0.62
海南红豆	1.64±0.41	0.98±0.27	0.60	2.24±0.21	1.90±0.56	0.85
糖胶树	3.13±0.57	2.21±0.14	0.71	2.01±0.09	1.45±0.47	0.72
夹竹桃	5.12±0.48	2.92±0.33	0.57	2.59±0.24	1.96±0.21	0.76
幌伞枫	1.72±0.55	1.19±0.29	0.69	2.10±0.63	1.94±0.59	0.92
澳洲鸭脚木	1.96±0.37	0.72±0.11	0.37	2.25±0.26	4.18±1.02	1.86
桂花	1.98±0.80	1.88±0.11	0.95	1.68±0.32	1.97±0.11	1.17
小叶榄仁	4.26±1.42	2.72±0.38	0.64	1.82±0.18	1.63±0.11	0.90

2.3 植物叶片相对叶绿素含量和相对含水量

由表 4 可见,与对照相比,SO₂ 胁迫下 28 种园林植物的相对叶绿素含量均有不同程度的下降。其中,下降幅度 50% 以上的园林植物有红花银桦、海南蒲桃、白千层、麻楝、复羽叶栎树,其中白千层叶片相对叶绿素含量下降幅度达到 72%;下降幅度在 31%~50% 之间的有宫粉羊蹄甲、菩提榕、黄金榕、大花五桠果、木棉、大花紫薇、海南红豆、糖胶树、幌伞枫和澳洲鸭脚木;下降幅度在 11%~30% 之间的有罗汉松、竹柏、乐昌含笑、樟树、长芒杜英、铁冬青和非洲桃花心;下降幅度在 0%~10% 之间的有石栗、红千层、人面子、夹竹桃、桂花和小叶榄仁,说明 SO₂ 浓度胁迫对以上 5 种植物相对叶绿素含量影响小。与对照相比,在

SO₂ 浓度为 5.329 mg/m³ 胁迫下,园林绿化树种叶片组织抗脱水能力均有不同程度的下降。其中,下降幅度在 50% 以上的有木棉、白千层、麻楝、复羽叶栎树和人面子,以上植物在污染环境叶片组织抗脱水能力差;下降幅度在 31%~50% 之间的植物为红花银桦、红千层和幌伞枫;下降幅度在 11%~30% 之间的植物有罗汉松、竹柏、樟树、宫粉羊蹄甲、大花五桠果、海南蒲桃、铁冬青、非洲桃花心、大花紫薇、海南红豆和小叶榄仁;而下降幅度在 0%~10% 之间的有乐昌含笑、菩提榕、黄金榕、长芒杜英、石栗、糖胶树、夹竹桃、澳洲鸭脚木和桂花,表明以上植物在 SO₂ 胁迫下叶片组织抗脱水能力强。

表 4 对照及 SO₂ 处理的园林植物叶片相对叶绿素含量和相对含水量

植物名称	叶片相对叶绿素含量/%			叶片相对含水量/%		
	相对清洁区(对照)	污染胁迫(处理)	处理/对照	相对清洁区(对照)	污染胁迫(处理)	处理/对照
罗汉松	41.5±3.3	32.3±0.6	0.78	86.88	76.72	0.88
竹柏	19.6±2.0	15.3±1.6	0.78	88.81	70.47	0.79
乐昌含笑	11.2±1.0	8.5±0.5	0.76	90.95	84.17	0.93
樟树	11.6±0.5	10.3±0.5	0.89	88.90	74.03	0.83
洋紫荆	6.4±0.8	4.2±0.4	0.66	88.87	71.41	0.80
菩提榕	13.4±2.6	8.3±0.6	0.62	86.84	82.13	0.95
黄金榕	24.9±1.5	14.4±0.8	0.58	90.43	86.87	0.96
红花银桦	5.9±0.3	2.6±0.2	0.44	67.07	38.22	0.57
大花五桠果	8.2±1.3	5.6±0.8	0.68	73.36	55.75	0.76
长芒杜英	11.1±1.2	8.3±1.4	0.75	83.24	77.15	0.93
木棉	11.3±0.6	7.7±0.3	0.68	88.50	34.21	0.39
石栗	12.2±0.4	11.6±0.7	0.95	85.26	78.46	0.92
海南蒲桃	8.9±0.3	3.7±0.2	0.42	85.44	72.58	0.85
红千层	15.1±0.6	14.9±1.3	0.99	82.96	46.79	0.56
白千层	19.8±2.7	5.6±0.3	0.28	95.44	45.65	0.48
铁冬青	12.9±2.4	10.8±0.7	0.84	88.98	78.84	0.89
麻楝	8.3±1.0	3.5±0.7	0.42	86.03	24.62	0.29
非洲桃花心	17.1±3.2	12.2±2.8	0.71	84.41	69.06	0.82
复羽叶栎树	11.8±3.0	4.3±0.2	0.36	85.06	28.32	0.33
人面子	3.2±0.6	3.0±0.3	0.94	80.39	26.32	0.33
大花紫薇	8.5±0.4	4.4±0.1	0.52	85.00	71.48	0.84
海南红豆	12.9±1.8	7.1±1.4	0.55	93.55	76.36	0.82
糖胶树	13.7±2.3	8.3±1.4	0.61	84.13	80.17	0.95
夹竹桃	17.2±2.3	16.8±1.9	0.98	81.43	78.49	0.96
幌伞枫	5.1±1.4	3.2±0.2	0.63	78.01	53.65	0.69
澳洲鸭脚木	13.7±2.1	7.2±0.3	0.53	84.13	75.93	0.90
桂花	14.5±1.1	13.5±0.5	0.93	76.69	71.70	0.94
小叶榄仁	12.7±0.8	12.4±1.0	0.98	90.35	76.87	0.85

2.4 园林植物叶片各指标的隶属函数值

采用数学分析隶属函数法^[12-13]和系统聚类法对园林植物抗 SO₂ 污染能力进行综合评价(表 5、图 2)。其中,各指标隶属函数计算公式为:

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin})$$

式中:U(X_{ij})——测定指标的抗 SO₂ 污染隶属函数值;X_{ij}——各材料的指标测定值;X_{imin}——各材料中

测定指标的最小值;X_{imax}——各材料中测定指标的最大值。将各指标的抗 SO₂ 污染隶属函数值进行累加,求平均值,平均值越大,抗污染能力越强。

从图 2 和表 5 可以看出,桂花、夹竹桃、小叶榄仁、罗汉松、樟树、乐昌含笑、石栗、糖胶树、竹柏和铁冬青隶属函数值最高,为 0.69~0.98,抗 SO₂ 污染能

力强;黄金榕、海南红豆、红千层、澳洲鸭脚木、幌伞枫隶属函数值介于 0.59~0.65 之间,抗 SO₂ 污染能力较强;洋紫荆、菩提榕、长芒杜英、非洲桃花心和大花五桠果隶属函数值介于 0.44~0.55 之间,抗 SO₂ 污染能力中等;红花银桦、海南蒲桃、木棉、大花紫薇和人面子隶属函数值介于 0.23~0.41 之间,抗 SO₂ 污染能力较弱;而白千层、麻楝和复羽叶栎树隶属函数值介于 0.04~0.06 之间,抗 SO₂ 污染能力弱。

表 5 园林绿化植物叶片各指标的隶属函数值 $U(X)$

序号	植物名称	净光合速率	气孔导度	蒸腾速率	相对叶绿素含量	相对含水量	平均值
1	罗汉松	0.72	0.96	0.72	0.70	0.88	0.80
2	竹柏	0.67	0.59	0.72	0.70	0.75	0.69
3	乐昌含笑	0.71	0.28	0.93	0.68	0.96	0.71
4	樟树	0.81	0.87	0.78	0.86	0.81	0.82
5	洋紫荆	0.49	0.35	0.63	0.54	0.76	0.55
6	菩提榕	0.47	0.34	0.39	0.48	0.99	0.53
7	黄金榕	0.37	0.87	0.60	0.42	1.00	0.65
8	红花银桦	0.41	0.38	0.31	0.23	0.42	0.35
9	大花五桠果	0.36	0.57	0.28	0.56	0.70	0.49
10	长芒杜英	0.28	0.13	0.14	0.66	0.96	0.44
11	木棉	0.53	0.30	0.40	0.56	0.15	0.39
12	石栗	0.58	0.41	0.67	0.94	0.94	0.71
13	海南蒲桃	0.18	0.41	0.14	0.20	0.84	0.35
14	红千层	0.60	0.52	0.47	1.00	0.40	0.60
15	白千层	0.00	0.04	0.00	0.00	0.28	0.06
16	铁冬青	0.71	0.93	0.53	0.79	0.90	0.77
17	麻楝	0.08	0.01	0.02	0.20	0.00	0.06
18	非洲桃花心	0.32	0.28	0.30	0.61	0.79	0.46
19	复羽叶栎树	0.04	0.00	0.00	0.11	0.06	0.04
20	人面子	0.08	0.07	0.01	0.93	0.06	0.23
21	大花紫薇	0.26	0.26	0.39	0.34	0.82	0.41
22	海南红豆	0.51	0.98	0.58	0.38	0.79	0.65
23	糖胶树	0.55	0.95	0.71	0.46	0.99	0.73
24	夹竹桃	0.58	0.80	0.54	0.99	1.00	0.78
25	幌伞枫	0.74	0.41	0.69	0.49	0.60	0.59
26	澳洲鸭脚木	0.96	0.50	0.30	0.35	0.91	0.61
27	桂花	1.00	1.00	1.00	0.92	0.97	0.98
28	小叶榄仁	0.73	0.74	0.63	0.99	0.84	0.78

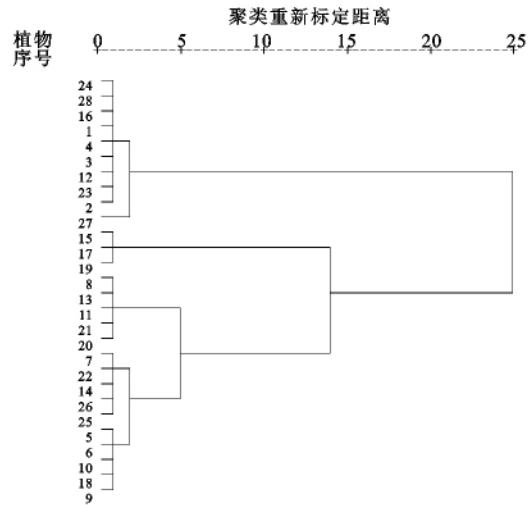


图 2 广州市 28 种园林植物抗 SO₂ 污染能力等级划分系统聚类

3 讨论与结论

(1) SO₂ 胁迫对叶片气体交换参数的影响。在相对清洁区和 SO₂ 胁迫处理下的净光合速率与气孔导度存在显著相关性,但 SO₂ 胁迫处理后净光合速率与气孔导度的相关系数的下降,表明污染胁迫使数据点离散程度增加,线性关系的显著程度被削弱,这与温达志等^[11]的研究结果相似。植物不间断地感应环境和调节气孔至适当的开度,以减少吸入污染物,同时维持 CO₂ 的吸收和固定,以适应胁迫生境,叶片气孔开张度越大,SO₂ 等污染气体越容易进入到植物体,对植物造成更大的危害^[11],但并不意味着叶片气孔导度越大的植物受 SO₂ 污染损害的程度越大,如罗汉松、石栗、铁冬青、糖胶树、夹竹桃、小叶榄仁、桂花、黄金榕和红千层有较高的气孔导度,但仍表现出强或较强的抗性。海南红豆、澳洲鸭脚木和幌伞枫调节气

孔至适当的开度,减少吸入 SO_2 污染物,维持较高的净光合速率,以适应 SO_2 胁迫环境。白千层、麻楝和复羽叶栎树在 SO_2 胁迫处理后维持低的净光合速率和气孔导度,这有可能由于气孔导度降低引起的 CO_2 供应不足,及 SO_2 胁迫可能导致白千层、麻楝和复羽叶栎树叶肉细胞光合活性降低引起同化力不足而限制了光合碳同化。

(2) SO_2 胁迫对叶片相对叶绿素含量和相对含水量的影响。叶绿素相对含量也称叶色值,通过此值的大小来定量描述叶片的绿色度^[14]。叶色值与叶绿素含量具有显著的相关性,能较好地反映叶绿素含量的变化^[15]。28种园林植物在 SO_2 胁迫处理下叶片相对叶绿素含量均有不同程度的降低,与对照相比,白千层、麻楝和复羽叶栎树叶片相对叶绿素含量下降幅度达 58%~72%,这与其净光合速率下降幅度一致。叶片相对含水量是标志植物水分状况的重要指标,在大气污染胁迫下,其含量的变化可反映组织的抗脱水能力^[16]。在 SO_2 胁迫处理下,28种园林植物叶片相对含水量与相对清洁区相比均有下降,其中,白千层、麻楝、复羽叶栎树失水比较严重,叶片失绿、泛黄、凋萎,出现大量的落叶。

(3) 园林植物抗 SO_2 污染能力分析。由于单一指标难以全面准确地反映植物抗污染性的强弱。本研究采用叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、相对叶绿素含量和相对含水量观测指标,运用隶属函数及聚类分析法对园林植物的抗污染能力进行了综合评判,将 28 种园林植物划分为 5 个抗性等级,其中,桂花、夹竹桃、小叶榄仁、罗汉松、樟树、乐昌含笑、石栗、糖胶树、竹柏和铁冬青抗 SO_2 污染能力强;黄金榕、海南红豆、红千层、澳洲鸭脚木、幌伞枫抗 SO_2 污染能力较强;洋紫荆、菩提榕、长芒杜英、非洲桃花心和大花五桠果抗 SO_2 污染能力中等;红花银桦、海南蒲桃、木棉、大花紫薇和人面子抗 SO_2 污染能力较弱;而白千层、麻楝和复羽叶栎树抗 SO_2 污染能力弱。本研究没有开展叶片 pH 值、细胞质膜相对透性、丙二醛、过氧化物酶活性、超氧化歧化酶活性、可溶性蛋白含量等方面的生理生化指标的研究,在今后的研究中将补充完善,准确反映植物抗 SO_2 污染的能力。

参考文献:

- [1] 吴耀兴,康文星,郭清和,等. 广州市城市森林对大气污染物吸收净化的功能价值[J]. 林业科学,2009,45(5): 42-47.
- [2] 徐玉梅,王建明,高俊明,等. 42 种园林植物对 SO_2 伤害的敏感性研究[J]. 山西农业大学学报,2006,26(1):32-35.
- [3] Syed Z I, Khattak A I, Nasir S M, et al. Air pollution assessment in urban areas and its impact on human health in the city of Quetta Pakistan[J]. Clean Techn Environ Policy,2010,12(3):291-299.
- [4] 黄益宗,李志先,黎向东,等. 酸沉降和大气污染对华南典型森林生态系统生物量的影响[J]. 生态环境,2007,16(1):60-65.
- [5] 郑飞翔,余春珠,温达志,等. 五种亚热带树苗的生长与干物质分配格局对大气污染胁迫的响应[J]. 生态环境,2006,15(3):519-524.
- [6] 刘世忠,薛克娜,孔国辉,等. 大气污染对 35 种园林植物生长的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2003,11(4):329-335.
- [7] 孔国辉,陆耀东,刘世忠,等. 大气污染对 38 种木本植物的伤害特征[J]. 热带亚热带植物学报,2003,11(4):319-328.
- [8] 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.
- [9] 李德生,孙旭红,李荣花,等. 经济树种苗木对二氧化硫和二氧化氮的抗性分析[J]. 天津理工大学学报,2007,23(1):44-51.
- [10] 苏行,胡迪琴,林植芳,等. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物生态学报,2002,26(5):599-604.
- [11] 温达志,孔国辉,张德强,等. 30 种园林植物对短期大气污染的生理生态反应[J]. 植物生态学报,2003,27(3): 311-317.
- [12] 王改萍,岑显超,彭方仁,等. 不同楸树品种的抗旱性鉴定[J]. 浙江林学院学报,2009,26(6):815-821.
- [13] 鲁守平,孙群,洪露,等. 不同种源地乌拉尔甘草发芽期抗旱性鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2007,8(2):189-194.
- [14] 刘昊,余树全,江洪,等. 模拟酸雨对山核桃叶绿素荧光参数、叶绿素和生长的影响[J]. 浙江林学院学报,2009,26(1):32-37.
- [15] 兰春剑,江洪,黄梅玲,等. UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响[J]. 生态学报,2011,31(24): 7516-7525.
- [16] 葛亿达,隋方功,张金政,等. 玉米根、叶质膜透性和叶片水分对土壤干旱胁迫的反应[J]. 西北植物学报,2005,25(3):507-512.