

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.06.007

5 种观花园林树木对 NO₂ 的抗性评价

祝浩翔¹, 赖小红², 李留彬³, 王海洋¹

1. 西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715; 2. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400060;
3. 中国林业集团有限公司, 北京 100026

摘要: 为阐明 5 种观花园林树木耐 NO₂ 污染机制, 科学评价植物抗 NO₂ 污染能力以及指导园林绿化科学选择植物, 采用开顶式熏气的方法对日本晚樱(*Cerasus serrulata* var. *lannesiana* (Carr.) Makino)、紫荆(*Cercis chinensis* Bunge)、紫叶桃(*Amygdalus persica* L. 'Atropurpurea')、春鹃(*Rhododendron mucronatum* (Bl.) G. Don)和紫薇(*Lagerstroemia indica* L.) 5 种观花园林树木的 3 年生苗木进行不同浓度的 NO₂ 胁迫, 研究了被试植物在不同质量浓度的 NO₂ 胁迫条件下叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、相对叶绿素含量、细胞膜透性、MDA 含量、SOD 和 POD 酶活性等生理指标的变化, 并采用模糊数学隶属函数法和灰色关联度法对其抗 NO₂ 能力进行了综合评价。结果表明, 随着处理质量浓度的增加, 5 种观花园林树木的各项指标变化模式不同。植物叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、相对叶绿素含量、SOD 和 POD 酶活性随着 NO₂ 胁迫加剧, 其变化趋势基本相似, 均是先上升后下降; 细胞膜透性和 MDA 含量的变化趋势均总体上升。隶属函数值从大到小依次为: 紫叶桃、春鹃、紫薇、日本晚樱、紫荆。在所选的 8 个指标中, MDA 含量、细胞膜透性、SOD 酶活性、POD 酶活性等指标均可作为观花园林植物对 NO₂ 抗性的重要鉴定指标。

关键词: 观花园林树木; 二氧化氮; 生理指标; 抗性; 综合评价

中图分类号: Q948.116

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)06-0064-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assessment of NO₂ Resistance of Five Ornamental Garden Trees

ZHU Haoxiang¹, LAI Xiaohong², LI Liubin³, WANG Haiyang¹

1. School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400060, China;

3. China Forestry Group Corporation, Beijing 100026, China

Abstract: In order to elucidate the mechanism of NO₂ tolerance of five kinds of ornamental trees, scientifically evaluate the ability of the plants to resist to NO₂ pollution, and guide the scientific selection of plants for landscaping, an artificial simulation method was employed to treat three-year-old saplings of five ornamental garden plants species, *Cerasus serrulata* var. *lannesiana* (Carr.) Makino, *Cercis chinensis* Bunge,

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTC2019-lykjfpzx002); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2021F002).

作者简介: 祝浩翔, 硕士, 实验师, 主要从事园林植物及植物生理生态方面的研究.

通信作者: 王海洋, 教授.

Amygdalus persica L. ‘Atropurpurea’, *Rhododendron mucronatum* (Bl.) G. Don and *Lagerstroemia indica* L. with different concentrations of NO₂. The symptoms of acute injury were observed. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, relative chlorophyll content, cell membrane permeability, MDA content, SOD and POD activity were measured. The methods of subordination function and grey correlation analysis were used to comprehensively evaluate the resistance to NO₂. The results showed that with the increase of NO₂ concentration, the change patterns of each index of five garden trees were different. The change of the trends of net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, relative chlorophyll content, SOD and POD enzyme activities of leaves were basically similar with the increasing of NO₂ stress, which increased first and then decreased. The trends of cell membrane permeability and MDA content were generally increasing. The tolerance of tested tree species to NO₂ was in an order of *Amygdalus persica* L. ‘Atropurpurea’, *Rhododendron mucronatum* (Bl.) G. Don, *Lagerstroemia indica* L., *Cerasus serrulata* var. *lannesiana* (Carr.) Makino, *Cercis chinensis* Bunge. Among the eight selected indexes, MDA content, cell membrane permeability, SOD enzyme activity, and POD enzyme activity can be used as important indicators to identify the NO₂ resistance of ornamental forest plants.

Key words: ornamental garden forest plants; NO₂; physiological indicators; resistance; comprehensive evaluation

随着经济的发展和人口的增长,城市规模不断扩大,环境污染问题尤其是大气污染日益突出,严重威胁着城市居民的身体健康和城市生态环境的安全^[1-3]. NO₂ 是大气污染的主要来源之一,在目前 NO₂ 污染发生源治理尚待提升的情况下,依靠城市园林植物对 NO₂ 的吸收将是防控城市大气污染的有效途径之一^[4-5]. 有研究表明,园林植物对于一定浓度范围内的大气 NO₂ 污染物,不仅具有显著的抵抗力,而且具有一定程度的吸收能力^[6],甚至有些植物还可以利用 NO₂^[7]. 目前,国内外学者就 NO₂ 污染物对园林植物的影响已开展了相关研究,主要集中在植物功能性状变化^[8-10]、器官伤害症状^[11-12]、生理生化特征^[13-15]和光合作用响应^[16-19]等方面. 相关研究结果揭示了不同园林植物对 NO₂ 污染的适应与响应差异,对预测城市 NO₂ 污染可能带来的植物生态策略和筛选抗逆性强的园林植物具有重要意义.

植物种类和种植地域不同,对 NO₂ 污染的抗性也不同,如圣倩倩等^[20]对 7 种适生植物抗 NO₂ 能力进行研究发现,红花檵木和洒金桃叶珊瑚的抗性较强,南天竹的抗性中等,金边黄杨和金叶银杏的抗性较弱. 重庆作为内陆唯一的直辖市,根据《重庆市环境质量简报》(2015-2018)和《重庆市环境状况公报》(2015-2018)提供的数据,近 3 年重庆市主城区 NO₂ 年均浓度均超标,NO₂ 污染问题仍然存在. 在重庆市运用园林植物抗大气污染方面,已有部分学者开展了相应的研究,如张灵芝等^[21]对重庆主城区城市主干道路的绿带滞尘效应进行了综合评价,范修远等^[22]分析了重庆主城区 10 种主要绿色植物叶片的硫含量. 但到目前为止,有关重庆市这个重工业城市的抗 NO₂ 植物筛选的研究还很少,尤其是对一些在园林美化方面起重要作用的观花园林树木的研究更是鲜有报道. 鉴于此,本研究选择重庆市城市绿化常用的 5 种观花园林树木为试验材料,进行开顶式熏气实验,测定其在短期不同质量浓度 NO₂ 污染胁迫下生理生态指标,分析各指标的变化特征,以探讨植物体对 NO₂ 胁迫下的生理生态响应机制,并采用隶属函数法和灰色关联度法对其抗性进行综合评价,为重庆地区观花园林树木选择和应用提供科学的参考依据.

1 材料和方法

1.1 试验材料

因城市绿化的植物群落几乎全为人为配置,具有美化与生态价值的大多数植物为成年植株,因此,试

验材料选择重庆城市绿化中应用广泛的日本晚樱、紫荆、紫叶桃、春鹃和紫薇 5 种观花园林树木(表 1), 每种植物选择生长健壮、规格一致、长势基本相同的 3 年成株苗。采用植生袋栽培, 土壤与水肥管理条件一致。

表 1 5 种观花园林树木的基本情况

植物	拉丁名	生长型	开花期/月	平均株高/m
日本晚樱	<i>Cerasus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i> (Carr.) Makino	落叶乔木	4—5	2~3
紫荆	<i>Cercis chinensis</i> Bunge	落叶灌木	3—4	2~3
紫叶桃	<i>Amygdalus persica</i> L. 'Atropurpurea'	落叶乔木	3—4	2~3
春鹃	<i>Rhododendron mucronatum</i> (Bl.) G. Don	常绿灌木	4—5	1~2
紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i> L.	落叶灌木	6—9	2~3

1.2 NO₂ 质量浓度处理

结合《HJ633-2016 环境空气质量指数(AQI)技术规定》以及借鉴前人在其他园林植物上 NO₂ 的设定质量浓度^[23], 设计 4 个试验组, 质量浓度设置分别为: 0 mg/m³(CK), (0.25±0.03) mg/m³(T1), (0.50±0.05) mg/m³(T2), (0.75±0.05) mg/m³(T3)。

1.3 试验设计

1.3.1 装置设计

采用开顶式熏气装置对 NO₂ 质量浓度进行控制, 熏气装置的长、宽、高分别为 8, 3, 2 m, 顶部呈收口状敞开, 壁框架表面由透明性好、无毒耐用的聚氯乙烯塑料薄膜围成。NO₂ 气体进气系统主要由 NO₂ 瓶钢、减压阀和进气管道组成, 将流经减压装置的 NO₂ 气体由导管导入进气管道, 进气管道一头连接鼓风机出风口, 另一头连接熏气室, 进气质量浓度通过减压阀调节, 对照组仅通过鼓风机通入空气。气体检测仪采用 GT-1000H(深圳市科尔诺电子科技有限公司)。

1.3.2 植物处理

试验于 2019—2020 年在重庆市北碚区西南大学歇马十字花科基地进行, 苗木在露地进入旺盛生长期后, 将植物移入不同质量浓度的开顶式熏气装置, 待适应 2 周后开始进行熏气处理, 每种植物 5 株。持续熏气 20 d, 每天熏气 4 h(上午 7:00—11:00), 熏气室内温度与大气环境温度差小于±1℃, 湿度差小于±5%。熏气结束后进行相关叶性状指标测定。

1.4 测定指标及方法

采用便携式光合仪(Licor-6400)测定净光合速率(Pn, μmol/(m²·s))、气孔导度(Gs, mol/(m²·s))、蒸腾速率(Tr, mmol/(m²·s))等指标; 采用便携式叶绿素仪(SPAD-502)测定叶片相对叶绿素含量; 采用电导法测定细胞膜透性^[24]; 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)的含量^[25-26]; 采用的氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[24], 采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[24]。

1.5 抗 NO₂ 性综合评价方法

1.5.1 隶属函数法

为了消除单个指标带来的片面性, 用隶属函数法将各指标扩展到[0, 1]闭区间上, 分别计算各指标的隶属函数值, 进行抗性评价^[27]。

正相关:

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

负相关:

$$U(X_{ij}) = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

式中, $U(X_{ij})$ 表示 i 种类 j 指标的抗旱隶属函数值, X_{ij} 表示 i 种类 j 指标的测定值, $X_{j\min}$ 表示所有种类 j 指标的最小值, $X_{j\max}$ 表示所有种类 j 指标的最大值, i 表示某个品种; j 表示某项指标。

1.5.2 灰色关联度分析

按照灰色系统理论, 将所有测定指标视为一个灰色系统, 而每个测定指标是该系统中的一个因素. 设参考数列为 X_0 , 比较数列为 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$, 则参考数列 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$, 比较数列 $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$. 对各指标进行处理^[28], 用 $X'_i(k) = X_i(k) - X_i S_i$ 对原始数据进行无量纲化处理, 其中 $X_i(k)$ 是原始数据, X_i 和 S_i 是同一指标的平均值和标准差.

关联系数为:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min \min \Delta_i(k) + \rho \cdot \max \max \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \cdot \max \max \Delta_i(k)} \quad (3)$$

式中: $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$, 表示 X_0 数列与 X_i 数列在第 k 点的绝对值; $\min \min \Delta_i(k)$ 为二级最小差, $\max \max \Delta_i(k)$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数, 取值范围为 $0 \sim 1$, 本研究试验取值 0.5.

等权关联度为:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad i, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

权重计算公式为:

$$W(k) = \frac{R(k)}{\sum_{k=1}^n R(k)} \quad (5)$$

加权关联度为:

$$r'_i = \sum_{k=1}^n \omega_i(k) \cdot \varepsilon_i(k) \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 NO₂ 对 5 种观花园林树木光合生理的影响

如图 1a 所示, 低质量浓度 NO₂ 胁迫处理下(T1), 日本晚樱、紫叶桃和春鹃等 3 种植物的净光合速率与对照(CK)相比均有不同程度的上升, 说明低质量浓度 NO₂ 胁迫能促进植物苗木的光合作用. 当 NO₂ 质量浓度达到高质量浓度胁迫条件时(T3), 5 种观花园林树木净光合速率下降幅度明显高于 T1 和 T2. 在 T1 处理下, 除紫薇外, 其余 4 种植物的净光合速率与 T2 处理相比差异有统计学意义($p > 0.05$); 在 T3 处理下 5 种观花园林树木净光合速率与 CK 相比差异均有统计学意义($p < 0.05$).

从图 1b 可知, 在 T1 处理下, 除紫荆外, 其余 4 种观花园林树木的气孔导度与 CK 相比均有不同程度的上升, 从此处可以看出低质量浓度 NO₂ 胁迫会刺激叶片增大气孔开度. 在 T1 和 T2 处理下, 5 种观花园林树木的气孔导度与 CK 相比差异有统计学意义($p < 0.05$), 说明 NO₂ 胁迫对 5 种观花园林树木气孔导度影响较大. 日本晚樱、紫叶桃气孔导度在 T1 和 T2 处理间差异无统计学意义($p > 0.05$), 而紫荆、春鹃和紫薇气孔导度在 T1 和 T2 处理间差异有统计学意义($p < 0.05$). 在 T3 处理下, 紫叶桃气孔导度与对照相比差异无统计学意义($p > 0.05$), 其余园林植物差异均有统计学意义($p < 0.05$).

从图 1c 可知, 在 CK 组中, 5 种观花园林树木的叶片蒸腾速率大小范围在 $(1.283 \pm 0.316) \sim (7.604 \pm 0.226)$ mmol/(m² · s), 其中紫荆蒸腾速率最大. 在 T1 处理下, 除紫荆外, 其余 4 种园林植物蒸腾速率与 CK 相比均有上升, 这与 T1 处理下植物的气孔导度变化基本一致. 随着胁迫的增加, 在 T2 处理时, 除春鹃外, 其余 4 种植物与 T1 处理时相比都有不同程度的增加, 但 5 种观花园林树木的蒸腾速率在 T1 和 T2 胁迫处理下差异无统计学意义($p > 0.05$). 当胁迫浓度达到 T3 时, 5 种观花园林树木蒸腾速率(Tr)与 CK 相比均有下降, 其中紫荆蒸腾速率下降幅度最大, 达 60.5%, 除紫薇外, 其余 4 种园林植物蒸腾速率与 CK 相比差异均有统计学意义($p < 0.05$).

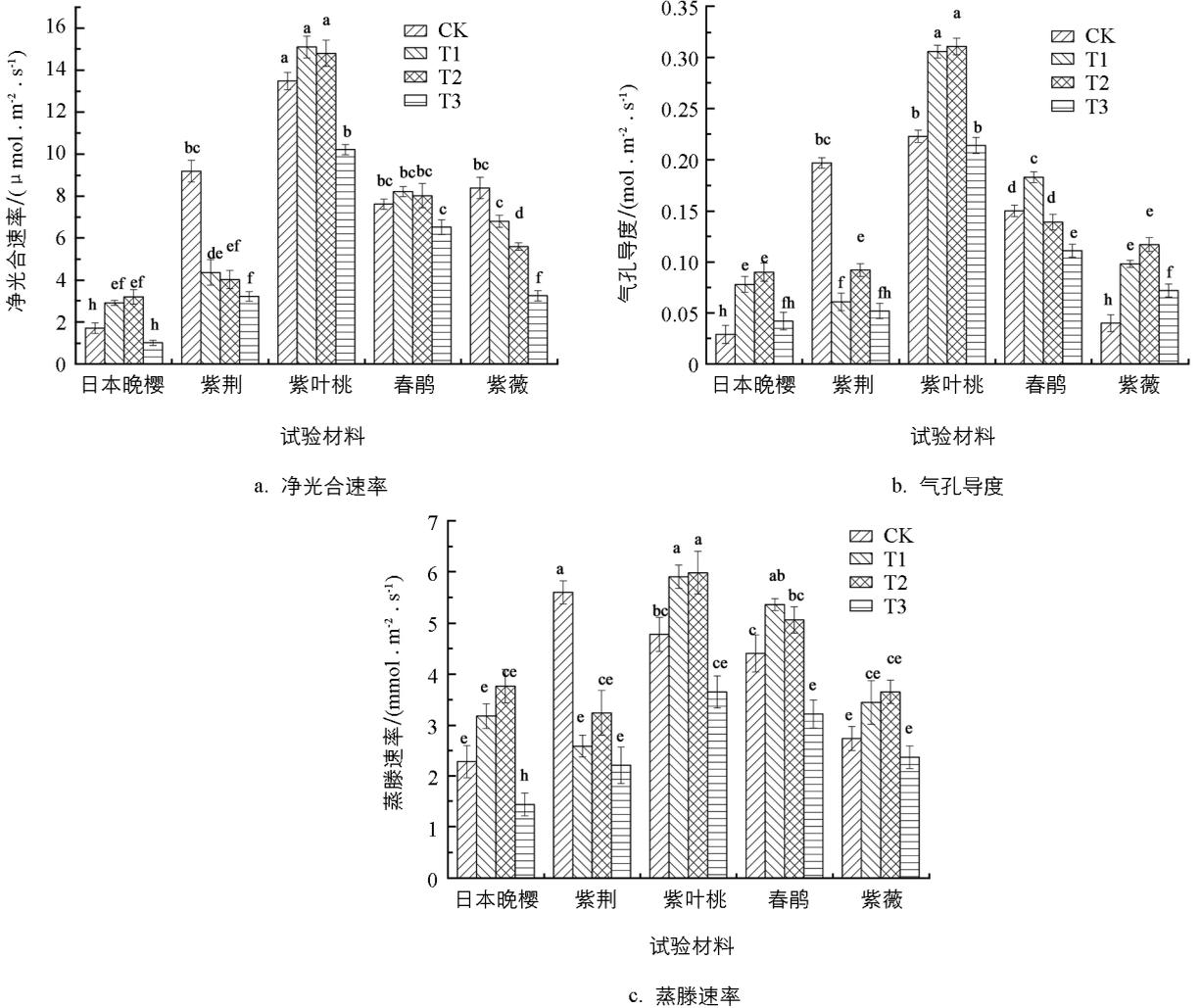


图 1 NO_2 对 5 种观花园林树木光合生理的影响

2.2 NO_2 对 5 种观花园林树木相对叶绿素含量的影响

从图 2 可知, 在 CK 和 T1, T2, T3 胁迫处理下, 日本晚樱、紫叶桃和春鹃的相对叶绿素含量间差异无统计学意义 ($p > 0.05$); 紫荆和紫薇的相对叶绿素含量在 CK 处理下和 T3 处理下的相对叶绿素含量差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 而 T1, T2 胁迫处理下紫荆和紫薇的相对叶绿素含量差异无统计学意义 ($p > 0.05$). 以上研究结果表明, NO_2 污染胁迫对日本晚樱、紫叶桃和春鹃的相对叶绿素含量影响小. 除 T2 处理下的紫荆和 T3 处理下的紫叶桃外, 其余在不同质量浓度胁迫下与 CK 相比均有不同程度的降低, 其中, 紫荆的相对叶绿素含量与 CK 相比下降幅度最大, 下降幅度达到 23.70%.

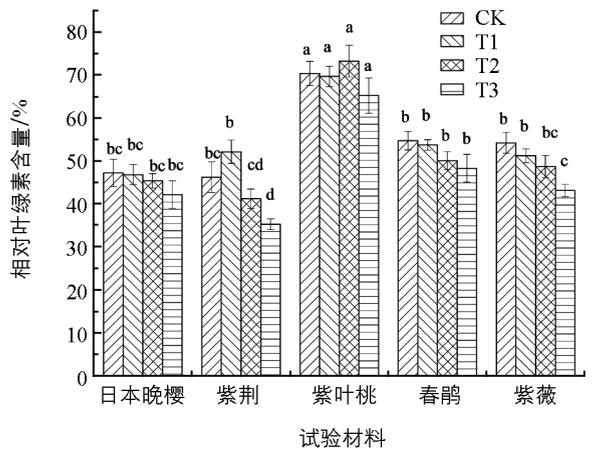


图 2 NO_2 对 5 种观花园林树木相对叶绿素含量的影响

2.3 NO₂ 对 5 种观花园林树木叶片膜脂过氧化的影响

由图 3 可以看出, 5 种观花园林树木叶片的 MDA 含量随 NO₂ 质量浓度的增加而迅速增加, 叶片 MDA 含量与 NO₂ 质量浓度呈正相关关系, 在 NO₂ 处理质量浓度为 T3 时候, 日本晚樱、紫荆、紫叶桃、春鹃、紫薇叶片 MDA 含量分别比 CK 增加了 42.93%, 156.54%, 178.43%, 116.90% 和 90.84%, 方差结果表明, 处理与 CK 差异均极有统计学意义 ($p < 0.01$). 随 NO₂ 质量浓度增加, 5 种观花园林树木叶片细胞膜透性迅速上升, 当 NO₂ 质量浓度达到 T2 之后, 日本晚樱和紫荆果叶片细胞膜透性呈缓慢增加趋势, 而紫叶桃、春鹃和紫薇叶片细胞膜透性呈直线增加趋势. 在 NO₂ 处理质量浓度为 T3 时, 5 种观花园林树木叶片细胞膜透性分别比 CK 增加了 61.75%, 114.78%, 152.98%, 90.97% 和 129.60%, 方差分析显示, 各处理与 CK 差异均极有统计学意义 ($p < 0.01$).

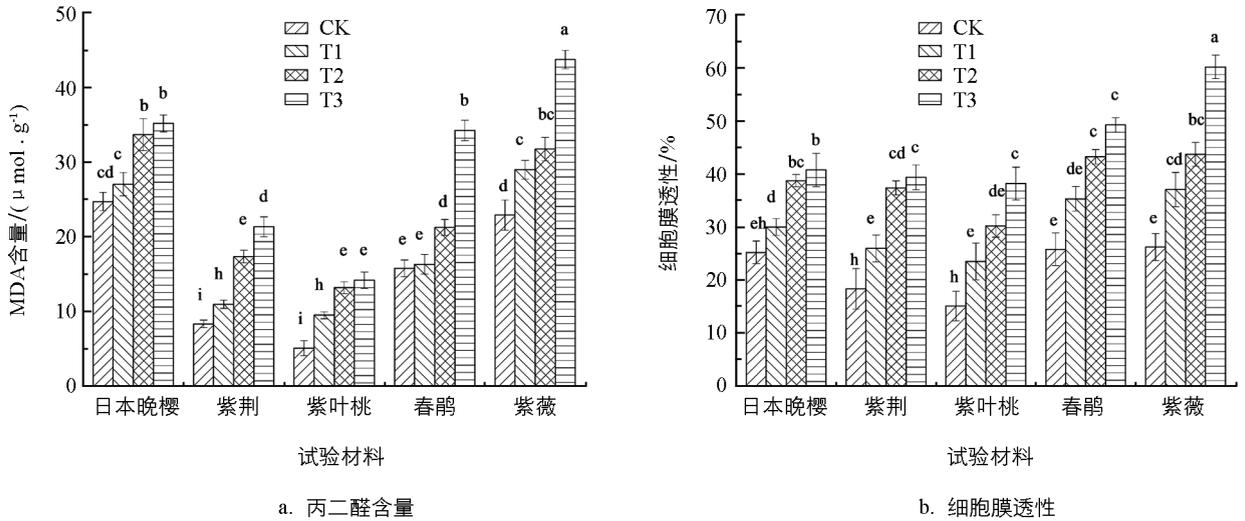


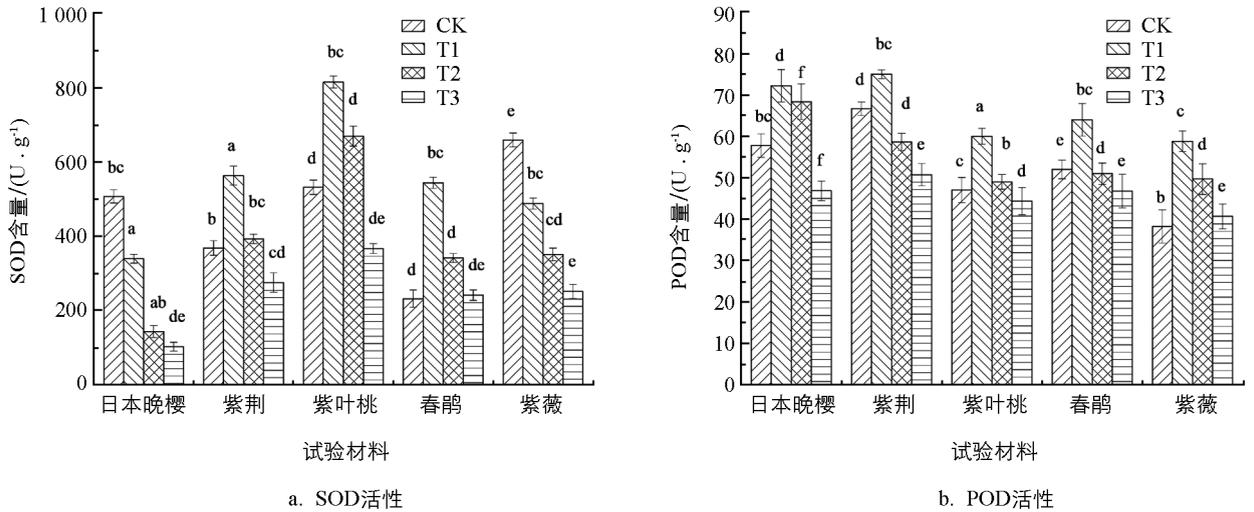
图 3 NO₂ 对 5 种观花园林树木叶片膜脂过氧化的影响

2.4 NO₂ 对 5 种观花园林树木抗氧化酶活性的影响

由图 4 可知, 与 CK 相比, 日本晚樱和紫薇叶片 SOD 活性随着胁迫质量浓度的增加呈下降的趋势; 而紫叶桃、紫荆、春鹃叶片 SOD 活性随着胁迫质量浓度的增加呈先升后降的趋势, 在 T1 质量浓度下, 3 种观花园林树木 SOD 活性均最强, 具体数值分别为 (563.37 ± 25.7) 、 (815.42 ± 56.21) 和 (543.88 ± 44.94) U/g, 说明在较低的质量浓度胁迫下, 被试园林植物叶片内的抗氧化酶系统启动, SOD 活性明显升高, 但随着胁迫质量浓度的增加, 抗氧化酶防御系统可能也遭到破坏, 导致 SOD 活性有所下降. NO₂ 胁迫后, 随处理质量浓度的增加, 5 种观花园林树木叶片 POD 活性呈先上升后下降趋势. 5 种观花园林树木在 0.5 mg/m^3 时 POD 活性均达到最大值, 具体数值分别为 (72.22 ± 3.9) 、 (75 ± 1.08) 、 (60.24 ± 1.92) 、 (64.31 ± 3.96) 和 (58.78 ± 2.5) U/g, 之后活性开始下降.

2.5 5 种观花园林树木抗 NO₂ 能力的综合评定

植物受到环境胁迫时其生理变化是十分复杂的, 用单一指标评价植物的抗污染能力很难真实地反映其抗性大小. 因此, 为了综合评价 5 种观花园林树木的抗污染能力的大小, 对叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、相对叶绿素含量、细胞膜透性、MDA 含量、SOD 和 POD 活性采用隶属函数计算, 用每个植物的各项指标隶属度的平均值作为综合评定标准进行评价, 综合评定结果见表 2. 5 种观花园林树木的抗污染能力从大到小依次排列为: 紫叶桃、春鹃、紫薇、日本晚樱、紫荆.

图 4 NO_2 对 5 种观花园林树木抗氧化酶活性的影响表 2 5 种观花园林树木对 NO_2 抗性的综合评定结果

指标	日本晚樱	紫荆	紫叶桃	春鹃	紫薇
净光合速率	0.55	0.33	0.97	0.63	0.54
气孔导度	0.50	0.33	0.51	0.48	0.54
蒸腾速率	0.41	0.56	0.66	0.60	0.42
相对叶绿素含量	0.53	0.35	0.61	0.60	0.53
MDA 含量	0.48	0.53	0.41	0.67	0.57
细胞膜质透性	0.45	0.43	0.50	0.46	0.54
SOD 含量	0.42	0.43	0.51	0.35	0.46
POD 含量	0.57	0.50	0.37	0.39	0.42
平均隶属函数值	0.49	0.43	0.57	0.52	0.50
抗 NO_2 排序	4	5	1	2	3

由于各指标对植物抗 NO_2 的重要程度不同,在评价不同指标的关联程度时还应根据其重要程度赋予不同的权重,并以加权关联度对各指标进行评价。故将各项指标与平均隶属值的关联系数、等权关联度、权重和加权关联度按照公式进行计算,结果见表 3,MDA 含量和细胞膜透性的关联度都在 0.7 以上,与 5 种观花园林树木的抗 NO_2 能力关联性最强;SOD 和 POD 活性的关联度在 0.6~0.7 之间,与植物的抗 NO_2 能力关联性也较为重要;而净光合速率、相对叶绿素含量、蒸腾速率和气孔导度的关联度在 0.6 以下,说明它们与 5 种观花园林树木的抗 NO_2 能力关系不紧密。

表 3 5 种观花园林树木各抗 NO_2 指标的关联度及权重

指标	净光合速率	气孔导度	蒸腾速率	相对叶绿素含量	MDA 含量	细胞膜质透性	SOD 活性	POD 活性
等权关联度	0.696 5	0.615 2	0.672 5	0.676 8	0.817 9	0.816 6	0.793 3	0.768 1
权重	0.118 9	0.105 0	0.114 8	0.115 5	0.139 6	0.139 4	0.135 4	0.131 1
加权关联度	0.538 3	0.420 0	0.501 9	0.508 3	0.742 4	0.740 1	0.698 4	0.654 8
排序	5	8	7	6	1	2	3	4

3 讨论

1) 植物通过气孔吸收同化 CO_2 的同时也不断向外扩散水分,在调节碳收获和水分散失过程中起中枢作用^[29],因此在理论上植物净光合速率、气孔导度与蒸腾速率之间存在密切关系,从图 1 中可以看出净光合速

率、气孔导度与蒸腾速率整体变化趋势较为一致,说明大多数植物都能够通过感应环境变化来调节气孔的开张,这是植物对胁迫环境的一种适应策略.但污染胁迫的加剧,使净光合速率、气孔导度与蒸腾速率变化趋势也发生改变,体现了不同种类植物对污染胁迫响应的复杂性以及适应策略的多样性.这3项指标的等权关联度排序都较靠后,说明在当前胁迫浓度下光合生理变化不是植物对NO₂抗性的主要鉴定指标.

2) 相对叶绿素含量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^[30].NO₂胁迫处理对5种观花园林树木相对叶绿素含量均有不同程度的影响,紫荆的相对叶绿素含量随NO₂胁迫质量浓度的增加呈先升后降的趋势,这可能是由于短时间和较低质量浓度NO₂胁迫对叶绿素的合成有一定的促进作用,但随着质量浓度升高,吸收、积累的NO₂超过植物叶片的需要量,就会造成代谢混乱和抑制叶绿素合成,使叶片叶绿素含量降低.

3) NO₂污染对植物影响的研究表明,当植物处于逆境胁迫时,细胞内产生大量的自由基,致使细胞内自由基产生和清除的平衡遭到破坏而出现自由基积累,并诱发或加剧细胞膜脂过氧化,进一步导致细胞膜破坏,严重时导致植物细胞死亡^[31].本试验研究结果证明,随NO₂处理质量浓度的增加,5种观花园林树木叶片细胞膜透性和MDA含量都逐渐增加,这与潘文等^[27]的研究结论一致.这2项指标的加权关联度在所有指标中排列较前,说明细胞膜透性和MDA含量是鉴定这5种观花园林树木对NO₂抗性强弱的重要指标.

4) SOD和POD是细胞抵御活性氧伤害的主要保护酶类,在清除氧自由基、过氧化物以及阻止或减少自由基形成方面起重要作用.本试验结果表明,在NO₂胁迫下,5种观花园林树木抗氧化酶活性发生了明显的变化,随NO₂质量浓度增加,SOD和POD活性先上升,当达到一定浓度后开始下降,说明植株体内保护酶系统的活力和平衡受到破坏,是活性氧积累,启动并加剧膜脂过氧化而造成整体膜的损伤^[32].这2项指标的等权关联度位于第3和第4,说明它们也是鉴定NO₂抗性的一个重要指标.

4 结论

综上所述,5种观花园林树木抗NO₂污染能力存在差异,且许多生理生化指标均与植物的抗NO₂能力有关,因此,在评价植物抗NO₂污染能力时必须将这些生理指标综合联系在一起才能作出正确的评价.灰色关联度法评价结果表明,在所选的8个指标中,MDA含量、细胞膜透性、SOD活性和POD活性等指标均可作为观花园林树木对NO₂抗性的重要鉴定指标,对后续筛选抗NO₂的园林树木具有重要的参考意义.通过综合隶属函数分析可知,5种观花园林树木中紫叶桃和春鹃抗NO₂能力相对较强,可用作交通繁忙地段和工业区的绿化美化树,紫荆和日本晚樱抗NO₂能力相对较弱,可在车流量小的园林景观路上应用.同时,在选择抗NO₂的园林植物进行城市绿化美化时,可结合植物生长型和开花的时节特性进行组合搭配,以达到更好的生态、经济和社会的效益.

参考文献:

- [1] 燕一波. 4种樟科幼树叶片对汽车尾气胁迫的生理响应[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(2): 234-240.
- [2] 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): 42-48.
- [3] 骆畅, 李相逸, 李淙钰. 基于生态系统服务价值评估的山地城市绿色空间规划策略——以重庆市主城区为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 195-204.
- [4] PLEIJEL H, KLINGBERG J, BÄCK E. Characteristics of NO₂ Pollution in the City of Gothenburg, South-West Sweden-Relation to NO_x and O₃ Levels, Photochemistry and Monitoring Location[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2009, 9(1/2): 15-25.
- [5] CRUTZEN P J, HEIDTL E, KRASNEC J P, et al. Biomass Burning as a Source of Atmospheric Gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl[J]. Nature, 1979, 282: 253-256.
- [6] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [7] ZHAI S, MCGARVEY S. Temporal Changes and Rural-Urban Differences in Cardiovascular Disease Risk Factors and

- Mortality in China[J]. *Hunan Biology*, 1992, 64(6): 807-819.
- [8] 赖小红, 王海洋, 钟雨航, 等. 人工控制条件下 9 种园林植物叶功能性状对短期 NO₂ 污染的反应 [J]. *生态学报*, 2019, 39(21): 8058-8067.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 圣倩倩, 祝遵凌. 南京市 7 种适生彩叶植物抗 NO₂ 能力及生态功能研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(8): 81-88.
- [12] 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, 405.
- [13] 陈伟光, 黄芳芳, 温小莹, 等. 大气 SO₂ 和 NO₂ 污染及植物的抗性和净化能力研究进展 [J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(4): 123-129.
- [14] 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.
- [15] 胡丁猛, 孙明高, 王大明, 等. SO₂ 对三种园林绿化苗木叶片膜脂过氧化和保护酶的影响 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 36(2): 175-180.
- [16] 潘文, 张卫强, 张方秋, 等. SO₂ 和 NO₂ 胁迫对红花荷等植物光合生理影响及抗性评价 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1075-1081.
- [17] 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.
- [18] 李成, 胡丁猛. 10 个园林绿化树苗对 SO₂ 的反应特性 [J]. *西北植物学报*, 2006, 26(2): 407-411.
- [19] 彭长连, 温达志, 孙梓健, 等. 城市绿化植物对大气污染的反应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(4): 321-327.
- [20] 圣倩倩, 祝遵凌, 王丽萍, 等. NO₂ 胁迫对园林植物生长影响的研究进展 [J]. *西部林业科学*, 2017, 46(5): 142-149.
- [21] 张灵芝, 秦华. 城市道路行道树绿带对 PM_{2.5} 的滞尘效应及其变化分析 [J]. *中国园林*, 2015, 31(5): 106-110.
- [22] 范修远, 陈玉成. 重庆主城区主要行道植物硫氮水平的初步研究 [J]. *资源与人居环境*, 2007(6): 74-75.
- [23] HU Y B, BELLALOUIN, TIGABU M, et al. Gaseous NO₂ Effects on Stomatal Behavior, Photosynthesis and Respiration of Hybrid Poplar Leaves [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(2): 1-8.
- [24] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [25] 黄菁, 魏丽萍, 周会平, 等. 遮荫对望天树生长和生理生化特性的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(2): 74-79.
- [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, 1900.
- [27] 潘文, 张卫强, 张方秋, 等. 红花荷等植物对 SO₂ 和 NO₂ 的抗性 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1851-1858.
- [28] 杨秀芳, 陈玲玲, 乌艳红, 等. 应用灰色关联度综合评价 26 个青贮玉米的生产性能 [J]. *草业科学*, 2012, 29(1): 105-111.
- [29] FARQUHAR G D, SCHULZE E D, KUPPERS M. Responses to Humidity by Stomata of *Nicotiana glauca* L. and *Corylus avellana* L. are Consistent with the Optimization of Carbon Dioxide Uptake with Respect to Water Loss [J]. *Functional Plant Biology*, 1980, 7(3): 315-327.
- [30] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1543-1548.
- [31] 李彦慧, 聂庆娟, 王君山, 等. 4 种针叶树抗汽车尾气污染能力之比较 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24(2): 409-413.
- [32] DING C K, WANG C Y, GROSS K C, et al. Jasmonate and Salicylate Induce the Expression of Pathogenesis-Related Protein Genes and Increase Resistance to Chilling Injury in Tomato Fruit [J]. *Planta*, 2002, 214(6): 895-901.