

大气SO₂和NO₂污染及植物的抗性和净化能力研究进展*

陈伟光¹ 黄芳芳² 温小莹² 张卫强² 黄钰辉² 甘先华²

(1. 佛山市林业科学研究所, 广东 佛山 528225;

2. 广东省林业科学研究院 / 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520)

摘要 SO₂和NO₂为我国大气污染主要污染物, 城市森林对SO₂和NO₂具有一定的抵抗能力和吸收净化能力, 利用城市森林对大气污染进行修复具有良好的应用前景。文章概述了我国SO₂和NO₂气体污染的状况, 总结了污染物进入植物体的过程及其损伤机理, 并从植物抗性和吸附净化能力两方面总结了城市景观树种与SO₂和NO₂气体污染的关系研究, 并基于研究结论提出今后研究可能发展方向, 如SO₂、NO₂与悬浮颗粒物等复合污染对城市树种生长的影响、树种抗性和吸附能力综合研究等。

关键词 SO₂; NO₂; 城市森林; 抗性; 净化

中图分类号: X511, S718.51 **文献标识码**: A **文章编号**: 2096-2053 (2017) 04-0123-07

Research Progress on the Atmospheric SO₂ and NO₂ Pollution and the Plant Resistance and Purification Capacity

CHEN Weiguang¹ HUANG Fangfang² WEN Xiaoying²
ZHANG Weiqiang² HUANG Yuhui² GAN Xianhua²

(1. Foshan Academy of Forestry, Foshan, Guangdong 528225, China; 2. Guangdong Academy of Forestry/Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract SO₂ and NO₂ are the major pollutants of the air pollution in China. Urban forest has the certain resistance and purification capacity to SO₂ and NO₂, and it has a good application prospect of the restoration of air pollution. This paper summarizes the status of SO₂ and NO₂ gas pollution in China, and the process of pollutant entering the plant body and its damage mechanism. The paper also summarized the relationship between urban landscape tree species and the SO₂ and NO₂ gas pollution from the aspects of the plant resistance and purification capacity. Based on the conclusions of the study, the possible research directions, such as the effects of SO₂, NO₂ and suspended particulate matter on the growth of urban tree species, comprehensive study of the tree species resistance and absorption capacity are put forward.

Key words SO₂; NO₂; urban forest; resistance; purification

随着工业化的迅猛发展, 环境污染尤其是大气污染成了严重的环境问题^[1]。SO₂和NO₂是主要大气污染物, 素有“大气污染元凶”之称^[2-3]。城市森林是城市生态系统中具有自净功能的重要组成部分, 在保护人体健康、调节生态平衡、改

善环境质量和美化城市景观方面起着重要作用。城市森林不同树种对于一定浓度范围内的大气污染物不仅有抵抗能力, 而且也有相当程度的吸收净化能力, 利用城市森林对大气污染进行修复受到越来越多的关注。

* 第一作者: 陈伟光 (1963—), 男, 高级工程师, 主要从事森林经营, E-mail: chwg123@126.com。

通信作者: 黄芳芳 (1987—), 女, 助理研究员, 主要从事森林生态学研究, E-mail: hff120876158@hotmail.com。

1 NO_2 和 SO_2 污染现状及危害

氮氧化物 (NO_x) 种类较多, 包括 NO 、 N_2O_5 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_4 等, 其中大气含量较多且具危害作用的主要为 NO_2 和 NO , 后者在空气中易氧化成 NO_2 。 NO_2 来源主要为汽车尾气排放、火力发电站、硝酸和氮肥生产过程中及其他工业燃料燃烧等。据国家环境统计公报显示^[4], 2015 年氮氧化物排放量达 1 851.9 万 t, 其中工业氮氧化物排放量为 1 180.9 万 t、城镇生活氮氧化物排放量为 65.1 万 t、机动车氮氧化物排放量为 585.9 万 t。

NO_2 对人体和环境造成危害主要体现在: 形成酸雨的主要物质, 酸雨会使水体和土壤酸化, 农作物、林业和渔业减产, 腐蚀建筑物及危害人体健康; 产生光化学烟雾, 刺激眼睛、鼻粘膜、呼吸道及肺等多处器官; 破坏臭氧层, 导致更多的紫外线到达地面, 对动植物健康造成危害; 加剧温室效应。

我国环境空气质量标准规定, NO_2 年平均浓度应不超过 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[5]。2015 年中国环境状况公报显示, NO_2 年均浓度范围为 $8\sim 63 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (达到国家二级标准); 全年超标 (空气质量指数 >100) 天数中以 NO_2 为首要污染物的天数占 0.5%; 全国 338 个地级以上城市 NO_2 年均值超过 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的城市比例为 18.4%, 其中 0.6% 更是超过 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[4]。

SO_2 主要来源于煤炭、石油等化石燃料的燃烧。据国家环境统计公报显示^[4], 2015 年全国废气中 SO_2 排放量达 1 859.1 万 t, 其中, 工业 SO_2 排放量为 1 556.7 万 t、城镇生活 SO_2 排放量为 296.9 万 t。工业排放占总量 88%, 为大气 SO_2 的主要源头。

SO_2 对人体健康构成严重的危害, 也是酸雨形成的主要成分之一。 SO_2 可通过人体呼吸道进入血液, 造成流泪、咳嗽等症状, 严重时影响肺功能和呼吸系统功能。 SO_2 污染还会对土壤、建筑物、森林甚至整个城市生态系统造成影响。目前的治理措施主要为源头控制, 如燃料脱硫、烟气脱硫和高烟囱扩散稀释等方法^[6], 但上述方法存在二次污染、处理成本高等缺点, 且不适用于已污染的大气^[7]。因此, 目前源头控制 SO_2 排放仍未得到切实解决。

我国环境空气质量标准规定, 一级标准 SO_2

年平均浓度应不超过 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 二级标准应不超过 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[5]。2015 年中国环境状况公报显示, SO_2 年均浓度范围为 $3\sim 87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均为 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (达到二级标准); 全年超标 (空气质量指数 >100) 天数中以 SO_2 为首要污染物的天数占 0.5%; 全国 338 个地级以上城市 SO_2 年均值未达到一级标准的占 53.9%, 其中 3.3% 的城市仍未达到二级标准^[8]。

2 SO_2 和 NO_2 进入植物体的过程及损伤机理

植物体吸收污染气体主要通过表面吸附和体内积累两种方式, 其中叶片是植物吸附的主要器官。N 和 S 都是植物体生长的必要元素, 在大气 SO_2 和 NO_2 浓度较低的情况下, 植物可通过气孔吸收污染气体并将其同化至自身体内, 通过代谢并最终以有机物形式储存在氨基酸和蛋白质中。如大气中 SO_2 进入叶肉细胞后, 溶于水生成毒性很强的 HSO_3^- 和 SO_3^{2-} , 二者随后被氧化成毒性很低的 SO_4^{2-} , 部分参与植物的生长代谢, 部分则以硫形态排出体外。由于 SO_2 进入植物体生成 SO_3^{2-} 的速度要比 SO_3^{2-} 氧化成 SO_4^{2-} 的速度快约 30 倍, 因此在植物受到严重 SO_2 污染时, 体内积累 HSO_3^- 和 SO_3^{2-} 数量超出自身的解毒机能, 造成急性伤害; 而在长期受污染的状态下, SO_4^{2-} 的积累大于其利用的效率, 则可能产生慢性伤害^[10]。污染气体对植物伤害取决于两个主要因素, 即胁迫浓度和持续时间。污染物浓度越高, 出现伤害症状的时间越早, 伤害程度也越重。有研究表明, SO_2 对植物长期性伤害阈值的范围在 $25\sim 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间^[11]。

污染气体对植物体的伤害主要是通过影响细胞生理生化过程的动态平衡。例如, 过量的 SO_2 进入细胞后溶解生成亚硫酸, 大量的 H^+ 降低细胞的 pH 值, 导致叶绿素分解; 其次, 亚硫酸与醛类反应生成 α -羟基磺酸, 阻碍光合作用中 ATP 的产生, 继而阻碍碳同化作用; 第三, HSO_3^- 和 SO_3^{2-} 作用于细胞膜的类脂膜蛋白, 导致细胞膜透性增大, 从而使 K^+ 、 Na^+ 等电解质大量外渗, 此外还对 PEP 和 RuDP 羧化酶等产生竞争性抑制, 影响光合作用; 最后, 亚硫酸盐水平的提高抑制了与抗氧化有关的巯基 ($-\text{SH}$) 的活性, 而亚硫酸氧化的连锁反应中产生的自由基、氧化活体物质可能导致脂膜过氧化^[12]。

设置污染区和清洁区对照以及采用人工熏气处理是研究抗性和吸附能力最常见的两种方法, 衡量吸附能力的指标通常为植物体尤其是叶片的污染物含量和植物体生长表现。设置污染区和清洁区对照能够充分反应树种在实际情况下的生长状况, 但由于大气中通常存在多种大气污染物, 因此无法排除目标气体以外的污染物对实验的影响; 人工熏气处理能够很好地反映不同污染物、不同污染浓度对植物的作用影响, 缺点是控制条件下的植物生长状况可能与野外状况有所差异。

3 植物对污染气体 SO₂ 和 NO₂ 的抗性研究

不同植物对 SO₂ 和 NO₂ 胁迫的抗性存在较大差异。植物抗性主要通过以下几个机制产生: (1) 屏蔽性, 即污染物不进入或少进入细胞组织, 这与叶片形态、气孔控制能力有关; (2) 忍耐性, 即植物体通过生理生化过程限制毒性或减少毒性, 这与细胞的缓冲能力, 酶的稳定性及代谢解毒机制有关; (3) 适应性, 即长期生长在污染地区的植物体, 在一定的大气污染浓度阈值下, 伤害不再继续增加, 进化出抗污染的适应机制^[13]。抗性不同的植物面对胁迫时在生长和生理生化水平上会产生程度不同的变化, 因此生理生化过程的差异可用于判断不同植物的抗性差异。

3.1 SO₂ 和 NO₂ 污染对植物表现生长的影响

气体污染物对植物表现损伤分为急性和慢性两种。急性损伤是指较短时间的高浓度污染物处理下, 植物体会出现色斑、褪绿、失水、干枯老化等明显症状, 慢性损伤则是指长时间低浓度污染物处理下, 植物体出现衰老加速、发育不良、矮化、光合速率和产量下降等表现。

叶片是植物体首先出现损伤症状的器官。例如, 李德生等^[14]应用人工熏气箱法研究了北方主要经济树种苗木对 SO₂ 和 NO₂ 胁迫的抗性, 发现 SO₂ 污染叶片的常见症状是在叶脉间出现烟斑, 阔叶植物典型的伤害症状是脉间的不规则形的坏死斑, 并且界限较为清晰, 针叶树的坏死则常从叶先端开始, 逐渐向下发展, 变为红棕色或褐色; NO₂ 对阔叶树的伤害症状也是从叶部开始, 首先在叶片的叶脉间出现不规则的水渍状伤斑, 之后逐渐坏死变成白色或黄白色斑块, 而后叶缘、叶柄也开始出现伤斑, 最后导致叶片死亡脱落, 对

针叶树的伤害症状主要是在针叶的中部或顶部出现伤斑, 逐渐变成黄白色或褐色, 最后导致针叶死亡, 变成黄白色或褐色, 但一般并不脱落。徐玉梅等^[2]通过研究 42 种园林植物对 SO₂ 污染的耐受差异, 根据叶片损伤症状分为褪绿黄斑类和坏死褐斑类, 两类病斑均呈不规则形, 和健康组织的界限比较明显。伤斑多呈点状、块状或条状, 伤害严重时扩展成片, 通过等级划分认为白皮松 (*Pinus bungeana*)、元宝槭 (*Acer truncatum*)、油松 (*P. tabuliformis*)、槐树 (*Sophora japonica*) 等 7 种植物具有高抗性。

SO₂ 和 NO₂ 胁迫也会对植物生长产生显著的影响。刘世忠等^[15]对生长在高浓度 SO₂ 污染下的 35 种植物的生长指标 (株高、基径、冠幅) 进行测量, 结果发现植物在清洁区的生长优于在污染区, 由于污染主要损害叶片和嫩枝, 因此 3 个生长指标中冠幅的变化受污染影响最为明显, 此外还发现桑科和山茶科对大气污染具有较强的抗性, 而木兰科植物抗性普遍较弱。DHIR 等^[16]研究了菊苣 (*Cichorium intybus*) 在 SO₂ 处理下叶片的变化, 发现受试植株叶片数量、叶面积和叶生物量要显著低于 ($P < 0.05$) 对照植株。CAPORN 等^[17]研究发现, 在低浓度 SO₂ 和 NO₂ 下的帚石楠 (*Calluna vulgaris*) 生物量增加, 但会减弱植物体对霜冻的抗逆性。

3.2 SO₂ 和 NO₂ 污染对细胞膜的影响

细胞膜是植物细胞的重要组成部分, 起着调节控制细胞内外物质交换的作用。研究表明^[18], 在植物接触高浓度污染气体后细胞膜首先受到损伤, 继而膜透性发生改变。在低浓度条件下, SO₂ 浓度增加对膜透性影响不显著, 但随着浓度增大到一定程度时 (通常为植物的伤害阈值), 膜透性随着 SO₂ 浓度增加而增大, 从而引起离子平衡的破坏。脂膜对污染物敏感性很高, 在植物出现损害症状前, 其膜透性很可能已经发生改变。SO₂ 对膜透性的影响与叶片细胞的成熟度有关, 一般而言幼叶抗性最强, 成叶最敏感, 而老叶介于二者之间^[19], 在一定浓度范围内, 细胞膜透性变化和叶片可见伤害成正比。此外, SO₂ 对膜透性的影响还与植物种类有关, 抗性弱的植物细胞膜对 SO₂ 比抗性强的植物反应强。因此, 细胞膜透性变化可作为衡量植物抗性强弱的重要指标^[20]。

除膜透性发生改变外, 当植物处于胁迫状态

下,植物细胞内自由基清除平衡系统遭到破坏而出现自由基积累,并由此诱发或加剧细胞膜脂质过氧化,进一步导致细胞膜破坏^[10]。丙二醛(MDA)是膜脂质过氧化作用的主要产物之一,细胞毒性很强,对膜和细胞内许多生物分子如蛋白质、核酸和酶均能产生破坏作用,并且参与破坏膜的结构和功能^[21],因此MDA含量可用于表征膜损伤程度。例如,胡丁猛等^[22]对3种盆栽园林绿化幼树进行SO₂熏气研究发现,随着SO₂胁迫增强,3个树种质膜透性和MDA含量增大,且二者成正相关性。张玲玲^[23]用不同浓度的SO₂对11个树种苗木进行静态熏气处理发现,楸树(*Catalpa bungei*)和栎树(*Koelreuteria paniculata*)的MDA含量和相对电导率均呈上升趋势,表明污染气体对质膜造成伤害,引起内容物外渗,电导率上升,且处理浓度越大变化幅度越大,恢复时间越长。

目前关于气体污染物对植物细胞膜和脂膜过氧化的影响研究多见于SO₂,NO₂相关研究很少。

3.3 SO₂和NO₂污染对抗氧化体系的影响

植物体在胁迫环境下会产生大量活性氧自由基,这些自由基主要由两大类物质来清除:一类是保护酶系统,包括超氧化歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等,其中SOD是植物体内重要的氧自由基清除剂,主要将O₂⁻转化为O₂和H₂O₂;POD是定位于叶绿素中的专一酶,其作用是将H₂O₂分解为H₂O;CAT则主要清除植物体内H₂O₂,将其转化为O₂和H₂O,从而起到保护植物的作用^[24];另一类是非酶系统,主要为小分子的抗氧化物质,包括抗坏血酸(AsA)、胡萝卜素等,其中AsA是非酶系统中清除自由基的最重要组分,参与植物体内抗坏血酸-谷胱甘肽循环(AGC)等生化过程,主要清除O₂⁻、H₂O₂两种自由基^[25]。

SO₂对植物体内抗氧化酶和其他具有生理生化作用的蛋白质分子的一个重要影响是切割二硫键,导致酶分子的空间构型发生改变,继而使酶失去活性和催化作用,酶对环境胁迫的反应非常敏感,即使在低浓度作用下,也有可能发生失活^[26]。

有研究表明,抗氧化酶在SO₂胁迫下通常出现活性增加,但不同植物的变化趋势不一。例如,杨晓晓等^[27]测定了3种地被植物蜂斗菜(*Petasites japonicus*)、峨眉附地菜(*Trigonotis omeiensis*)和绵毛水苏(*Stachys lanata*)在SO₂处

理下的生理生化变化,结果表明随着SO₂胁迫浓度的升高,3种植物的SOD、POD、CAT活性都有不同程度升高,上升幅度最快的是蜂斗菜,表明其本身清除活性氧的能力最强。李西等^[24]对3种常见暖季型草坪草结缕草(*Zoysia japonica*)、百喜草(*Paspalum notatum*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)进行SO₂胁迫处理,结果表明结缕草和狗牙根POD、CAT、SOD活性均呈现增加趋势,百喜草SOD和CAT活性先升后降,同时其POD活性在各胁迫处理下均低于空白对照。田保状^[28]以绒毛白蜡(*Fraxinus velutina*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、栎树、女贞(*Ligustrum lucidum*)、红叶臭椿(*Ailanthus altissima*)、海州常山(*Clerodendrum trichotomum*)等6个树种为研究对象,探讨不同浓度和低浓度不同时间的SO₂胁迫对酶活性的影响,结果表明,随SO₂胁迫浓度加大,各树种叶片内保护酶有不同程度的变化。红叶臭椿和绒毛白蜡的SOD、POD活性增强,CAT活性先升高后下降;栎树、女贞和海州常山的SOD、POD活性增强,CAT活性降低;鹅掌楸SOD、POD活性下降,CAT活性明显上升,由此认为3种保护酶在红叶臭椿抗SO₂氧化方面起着重要作用,而鹅掌楸和女贞可能是通过其它途径来清除活性氧从而抵御SO₂伤害。

3.4 SO₂和NO₂污染对光合作用的影响

SO₂对叶绿素的影响机理为:首先,SO₂在水中溶解成亚硫酸,降解叶绿素分子中的卟啉环,使镁离子流失,成为无光合活性的脱镁叶绿素;其次,SO₂进入叶组织内部,在H⁺和SO₃²⁻的作用下抑制核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶的活性,抑制CO₂的固定;第三,引起质膜上的光系统II(PSII)和非循环式光磷酸化受阻,影响ATP的产生,引起叶绿素分解^[25]。NO₂对光合作用的影响机理为:首先,大量的NO₂进入叶片后快速积累NO₂⁻,亚硝酸的转化及碳同化对NADPH产生竞争,最终对光合色素及膜完整性产生破坏,降低光合效率;其次,NO₂自身所具有的酸性特性可改变电子传递及光磷酸化;第三,NO₂⁻转化过程中形成Fe-NO自由基复合物,可能抑制部分蛋白质中酶的活性^[29]。

大气污染物往往会导致光合速率和气孔导度的下降。污染气体对光合作用的影响可分为两类:一类由气孔限制因素引发,在大气环境良好

的情况下, 植物趋向于最大程度地开放气孔, 通过光合作用尽可能固定 CO₂; 但在胁迫条件下, 气孔开放程度高会导致更多有害气体进入植物体内, 因此关闭部分气孔是植物体自我保护的方式, 但与此同时 CO₂ 的吸收也会随之减少, 并可能影响光合速率; 二是由非气孔限制因素引发, 这类影响往往出现在胁迫持续或程度加重的条件下, 污染气体很可能通过上述影响机理对叶绿素造成破坏, 损害其活性, 从而造成光合速率的降低。例如, 黎明等^[30] 在城市污染条件下测定云南拟单性木兰 (*Parakmeria yunnanensis*) 幼苗的光合速率, 光合速率呈现下降趋势, 其气孔导度下降最为明显, 并且随着胁迫时间的延长, 气孔导度回升的情况下光合速率仍持续下降, 表明大气污染胁迫可能已造成光系统的损伤。DHIR 等^[16] 研究发现 SO₂ 处理下菊苣的光合速率、气孔导度和气孔密度都显著 ($P<0.05$) 低于对照, 而叶片气孔开口的长度和宽度则显著 ($P<0.05$) 大于对照叶片。SHA 等^[31] 研究 16 种草本植物对 SO₂ 的抗性发现, 随着胁迫浓度的增加, 所有植物的最大量子产率和最大电子传递速率均出现不同程度的下降, 这表明植物体的光反应中心可能已经受到损害, 电子传递受到抑制。SU 和 SUN^[32] 研究发现行道树北美悬铃木 (*Platanus occidentalis*) 的光合速率随着污染程度的增加而显著降低 ($P<0.05$), 并且两种抗氧化酶 (抗坏血酸过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶) 的活性显著增加 ($P<0.05$)。CHUNG 等^[33] 测定了在 40-ppb SO₂ 熏气处理下 10 种木本植物的光合响应变化, 结果发现植物体虽无显著明显损伤症状, 但其固碳能力却有所降低。

大气污染物对叶绿素的影响主要表现在叶绿素含量和叶绿素组成比例的变化。在污染浓度较高时, 短时间内即可引起植物叶绿素含量显著 ($P<0.05$) 降低, 特别是植物出现可见伤害症状之后; 而在污染浓度较低时, 植物叶绿素含量变化则较为缓和。SHARMA 和 TRIPATHI^[34] 研究孟加拉榕 (*Ficus benghalensis*) 和印度黄檀 (*Dalbergia sisso*) 对大气污染的响应发现, 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素在高污染地区出现较大程度的降低。JOSHI 等^[35] 研究小麦 (*Triticum aestivum*) 等作物对 SO₂ 胁迫的响应也得出类似的结论。SO₂ 对叶绿素组成比例的影响存在较大的种间差异, 即不同植物的光合色素对 SO₂ 的敏感性不同, 此

外还与植物发育阶段和叶片受损伤程度相关。有研究认为, 主要起辅助保护作用的叶绿素 b 与对植物光合起主要作用的叶绿素 a 相比更容易分解, 以减少捕光色素蛋白复合体的含量, 降低光系统 II 对光能的捕获, 使得叶绿素 a/b 值升高, 而部分研究则得出相反结论^[25]。

3.5 SO₂ 和 NO₂ 污染对渗透调节物质的影响

植物体主要渗透调节物质包括可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白 (SP) 及游离脯氨酸 (Pro) 等。植物在胁迫条件下, 细胞内溶物质发生主动积累, 并引起细胞渗透势的下降使植株加强吸水, 维持一定的膨压^[24]。因此, 渗透调节物质的含量与植物抗性密切相关, 一般而言含量越高, 抗性也越强, 但不同植物之间存在一定差异。例如, 刘丹等^[36] 研究发现 SO₂ 胁迫显著增加了巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 和西蒙得木 (*Simmondsia chinensis*) 叶片 SS、SP 和 Pro 3 种渗透调节物质含量, 但对天竺桂 (*Cinnamomum pedunculatum*) 叶片 SP 和 SS 含量无显著影响, 且对 Pro 含量的促进作用也是在处理 30 天后才体现; 对茶树 (*Camellia sinensis*) 叶片 SP 含量无显著影响, 而使 SS 含量显著 ($P<0.05$) 降低, Pro 含量显著增加。

4 植物对污染气体的吸附净化能力研究

植物吸收污染气体的能力受其本身的生物学、生态学特性影响, 如生长阶段、树形、高度、叶面积等密切相关, 不同植物吸收污染气体的能力差异很大。此外, 吸附能力还与叶片年龄、生长季节、大气污染物浓度、接触污染时间及其他环境因素如温度、相对湿度有关。例如, 罗红艳等^[37] 研究了北京 32 种主要绿化树种对大气 SO₂ 的吸收、累积特点及净化作用, 发现吸收表现为落叶乔木 > 灌木 > 常绿针叶树, 其中绦柳 (*Salix matsudana*) 净化能力最强, 刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、国槐 (*Sophora japonica*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*) 等也是优良的净化污染树种。洪渊等^[38] 研究深圳市 116 种园林植物的叶片含硫量与大气 SO₂ 浓度的关系发现, 部分植物如大红花 (*Hibiscus rosa-sinensis*) 和簕杜鹃 (*Bougainvillea glabra*), 其叶片硫含量与大气 SO₂ 含量呈正相关, 而九里香 (*Murraya exotica*) 等植

物叶片硫含量与大气 SO_2 含量呈负相关, 其它植物相关不显著, 并认为正相关性高的植物除具有净化能力外, 还能用作 SO_2 指示植物, 此外叶片含硫量随季节变化而变化, 秋季叶片含硫量高于春季。

植物对污染气体的抗性不等同于吸收能力, 研究表明二者之间并不存在明显的相关性, 例如, 缪宇明等^[3]分析了浙江省38种绿化植物对 NO_2 的抗性及其吸收能力, 发现不同植物的抗性和吸收能力均存在较大差异, 火棘 (*Pyracantha fortuneana*) 的抗性最弱, 但吸收能力却最强。李伟^[10]分析了3种观赏果树秋子梨 (*Pyrus ussuriensis*)、中国李 (*Prunus salicina*) 和山杏 (*Armeniaca sibirica*) 在二氧化硫气体急性胁迫下的吸收特性及抗性能力, 发现吸硫量为李 > 梨 > 杏, 而综合14个指标的抗性能力评价为梨 > 李 > 杏。可见, 为提高树种配置的科学合理性, 有必要将植物的吸收能力和抵抗能力结合进行研究, 筛选出具有强吸收能力且高抗性的植物种。

5 研究展望

植物对污染气体 SO_2 和 NO_2 的抗性和吸附能力研究起步较早, SO_2 和 NO_2 对植物形态生长、生理生化水平的影响机理研究较为深入, 也已有部分研究对基因水平的影响作了探讨^[39-41]。从应用角度而言, 目前研究还可进一步完善: 基于我国目前大气污染主要为复合污染, 尤其是悬浮颗粒物污染严重的现状, 在不同地方及区域开展针对 SO_2 、 NO_2 与悬浮颗粒物污染的研究, 以加深对在实际污染条件下城市植物树种生长响应的了解; 植物抗性和吸附净化能力之间存在较大差异, 今后研究应注重结合抗性和吸附能力这两个方面进行综合评价, 为城市森林建设提供更为科学准确的树种搭配选择。

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): 42-48.
- [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(自然科学版),

2006, 26(1): 32-35.

- [3] 缪宇明, 陈卓梅, 陈亚飞, 等. 浙江省38种园林绿化植物苗木对二氧化氮气体的抗性及其吸收能力[J]. 浙江农林大学学报, 2008, 25(6): 765-771.
- [4] 中国环境保护部. 全国环境统计公报(2015年) [EB/OL]. (2017-02-23) [2017-05-10]. https://www.zhb.gov.cn/gzfw-13107/hjtj/qghjtjgb/201702/t20170223_397419.shtml.
- [5] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [6] 孙荣庆. 我国二氧化硫污染现状与控制对策[J]. 中国能源, 2003, 25(7): 25-28.
- [7] DONG R, LU H, YU Y, et al. A feasible process for simultaneous removal of CO_2 , SO_2 and NO_x in the cement industry by NH_3 scrubbing[J]. Applied Energy, 2012, 97(3): 185-191.
- [8] 中国环境保护部. 2015中国环境状况公报[EB/OL]. (2016-06-01)[2017-05-17]. <http://www.mep.gov.cn/hjzl/>.
- [9] 张德强, 褚国伟, 余清发, 等. 园林绿化植物对大气二氧化硫和氟化物污染的净化能力及修复功能[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 336-340.
- [10] 李伟. 三种观赏果树在二氧化硫气体急性胁迫下的吸收特性及抗性能力的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.
- [11] 王忠. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 邱靖. 三种垂直绿化植物净化大气中 SO_2 能力研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [13] 杨娟. 植物对 SO_2 伤害的反应及生理抗性研究[D]. 临安: 浙江林学院, 2007.
- [14] 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): 44-46.
- [15] 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.
- [16] DHIR B, SIDDIQI T O, IQBAL M. Stomatal and photosynthetic responses of *Cichorium intybus* leaves to sulfur dioxide treatment at different stages of plant development[J]. Journal of Plant Biology, 2001, 44(2): 97-102.
- [17] CAPORN S J M, ASHENDEN T W, LEE J A. The effect of exposure to NO_2 and SO_2 on frost hardiness in *Calluna vulgaris*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 43(2): 111-119.
- [18] 高吉喜. 二氧化硫对植物新陈代谢的影响(I)——对气孔、膜透性与物质代谢的影响[J]. 环境科学研究, 1997, 10(2): 36-39.
- [19] 刘荣坤, 李世承. 二氧化硫对蓖麻叶质膜透性、叶绿素含量和花粉生长的影响[J]. 辽宁大学学报(自然科学

- 版), 1980(2): 62-70.
- [20] PATRA J, PANDA B B. A comparison of biochemical responses to oxidative and metal stress in seedlings of barley, *Hordeum vulgare* L.[J]. Environmental Pollution, 1998, 101(1): 99-105.
- [21] 陈由强, 叶冰莹, 朱锦懋. 渗透胁迫对花生幼叶活性氧伤害和膜脂过氧化作用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(1): 53-56.
- [22] 胡丁猛, 孙明高, 王太明, 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.
- [23] 张玲玲. 11种园林树木对汽车尾气和SO₂的抗性生理研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
- [24] 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): 1189-1197.
- [25] 陈卓梅. 二氧化氮胁迫下樟树的生理生化响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [26] 曹洪法, 刘厚田, 舒俭民, 等. 植物对SO₂污染的反应[J]. 环境科学, 1985(6): 61-68.
- [27] 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.
- [28] 田保状. 6个园林绿化树种对SO₂抗性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [29] SABARATNAM S, GUPTA G. Effects of nitrogen dioxide on biochemical and physiological characteristics of soybean[J]. Environmental Pollution, 1988, 55(2): 149-158.
- [30] 黎明, 马焕成, 李复秀, 等. 城市大气污染对云南拟单性木兰苗期气体交换及叶绿素荧光的影响[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 46-50.
- [31] SHA C Y, WANG T H, LU J J. Relative sensitivity of wetland plants to SO₂ pollution[J]. Wetlands, 2010, 30(6): 1023-1030.
- [32] SU Y W, SUN M J. Photosynthetic rates and antioxidant enzyme activity of *Platanus occidentalis* growing under two levels of air pollution along the streets of Seoul[J]. Journal of Plant Biology, 2006, 49(4): 315-319.
- [33] CHUNG C Y, CHUNG P L, LIAO S W. Carbon fixation efficiency of plants influenced by sulfur dioxide[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173(1-4): 701-707.
- [34] SHARMA A P, TRIPATHI B D. Biochemical responses in tree foliage exposed to coal-fired power plant emission in seasonally dry tropical environment[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 158(1-4): 197-212.
- [35] JOSHI N, CHAUHAN A, JOSHI P C. Impact of industrial air pollutants on some biochemical parameters and yield in wheat and mustard plants[J]. The environmentalist, 2009, 29(4): 398-404.
- [36] 刘丹, 陈保军, 杨永贵, 等. 4种幼树对二氧化硫胁迫的抗性生理响应[J]. 西北植物学报, 2013, 33(12): 2441-2450.
- [37] 罗红艳, 李吉跃, 刘增. 绿化树种对大气SO₂的净化作用[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(1): 45-50.
- [38] 洪渊, 黄俊华, 张冬鹏. 深圳市园林植物叶片含硫量的特点[J]. 生态科学, 2007, 26(2): 122-125.
- [39] 李蕊, 仪慧兰. NR途径参与调节SO₂胁迫下拟南芥含硫抗氧化物水平[J]. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3864-3869.
- [40] 李利红, 仪慧兰, 王艺雯, 等. 二氧化硫胁迫诱导拟南芥NIT2基因DNA甲基化修饰[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 685-690.
- [41] 仪慧兰, 李利红, 仪民. 二氧化硫胁迫导致拟南芥防护基因表达改变[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1682-1687.