

贾明云,李密密,周冬琴,等. 南京 5 种园林植物对大气污染物的综合净化能力[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):158-163.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.038

南京 5 种园林植物对大气污染物的综合净化能力

贾明云¹, 李密密¹, 周冬琴¹, 蒋逍逍², 于金平¹

(1. 江苏省中国科学院植物研究所, 江苏南京 210014; 2. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095)

摘要:采用人工烟雾箱模拟熏气法实时监测 5 种园林植物雪松、女贞、广玉兰、石楠和桂花作用下大气污染物的浓度变化。结果表明,5 种植物叶片单位面积对 SO_2 、氮氧化物(NO_x)和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的综合去除能力表现为广玉兰>雪松>女贞>桂花>石楠。动力学模型拟合结果表明,植物对大气中 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除主要由叶表面吸附过程控制;而对 NO_x 的去除则受植物叶片内的吸收转化过程影响。对叶片微形态结构的环境扫描电镜观察发现,表皮沟状组织、叶面密被绒毛有利于植物吸附 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$,而气孔大小和密度影响 NO_x 的吸收和转化。

关键词:大气污染;园林植物;人工烟雾箱;动力学;叶片微形态;净化能力

中图分类号: X51;X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0158-06

随着社会经济的快速发展,工业化、城镇化的推进,能源资源消耗的持续增加,我国大气污染现状严峻,以可吸入颗粒物(PM_{10})、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出^[1-2]。我国大气污染以煤烟型污染为主,表现为总悬浮颗粒物(TSP)、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标;二氧化硫(SO_2)污染长期保持在较高的水平;机动车尾气污染物排放总量增加,致使大气氮氧化物(NO_x)污染不断加重。大气污染直接影响生态环境,危害人体健康。前者主要体现在加重酸雨的形成、臭氧层破坏、影响气候等方面;后者主要是人体肺部吸入污染物,引起心血管、呼吸系统、肺部等疾病^[3-6]。为改善大气质量,国务院发布了《大气污染防治行动计划》^[1],近 5 年来城市大气污染问题得到了一定的改善,但大气污染与修复工程仍是国家和民众关注的焦点问题^[7]。

植物作为现代化城市环境建设的主体,在美化城市景观、调节区域小气候等方面发挥着重要作用^[8-10]。植物不仅对一定浓度范围内的环境污染有抵抗力,而且可以通过吸附、吸收、累积和转化等途径有效地持留和去除大气污染物,净化大气^[11-14]。近年来,利用植物修复技术来治理大气污染成为新的研究热点和科技前沿。目前国内外关于城市园林植物净化大气污染物的研究主要集中于野外清洁区和污染区植物在一定时间段内叶片滞留颗粒物的质量、叶片内硫(S)和氮(N)元素含量来反映植物对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 的吸收净化效果^[11-15]。但是,这种方法受其生长自然环境条件如颗粒物浓度、大气运动、气候状况、风力等,以及车辆、人类活动的影响较大,很难客观评价绿化植物对各种污染物的综合修复能力^[16]。人工熏气烟雾箱能够模拟自然界气候条件,对植物生长环境进行恒定控制,能够对不同植物的综合修复能力进行客观评价。然而,目前国内外采用人工烟雾箱开展不同植物净化大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 的研究^[17]甚少。因此,本研究拟采用人工熏气箱对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 进行实时监测,通过经典动力学方程探讨不同植物对大气污染物的累积动力学特征,结合植物叶片微形态特征,阐明不同植物叶片对大气污染物的净化机制,以期城市绿化植物选择和生态景观城市建设提供科学依据。

收稿日期:2019-06-04

基金项目:江苏省住房和城乡建设厅项目(编号:SJC2016010002);南京市园林局项目(编号:20140401);南京市绿化园林局项目(编号:YLKJ201705JH)。

作者简介:贾明云(1985—),女,河南南阳人,博士,助理研究员,主要研究方向为环境污染与控制技术。E-mail:jmy27@163.com。
通信作者:于金平,硕士,高级实验师,主要研究方向为大气污染与植物修复。E-mail:yujinping@cnbg.net。

[10]陈根云,陈娟,许大全. 关于净光合速率和胞间 CO_2 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯,2010,46(1):64-66.

[11]尹智宇,肖关丽. 干旱胁迫对冬马铃薯苗期生理指标及光合特性的影响[J]. 云南农业大学学报:(自然科学版),2017,32(6):1-6.

[12]徐俊增,彭世彰,魏征,等. 节水灌溉水稻叶片胞间 CO_2 浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报,2010,26(7):76-80.

[13]刘崑艳,周以飞,李清,等. 三叶青的蒸腾作用与气孔结构研究[J]. 中草药,2015,46(17):2610-2617.

[14]韩梅,林春新,杨利民,等. 水因子对东北铁线莲光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):213-217.

[15]谭勇,梁宗锁,董娟娥,等. 水分胁迫对菘蓝生长发育和有效成分积累的影响[J]. 中国中药杂志,2008,33(1):19-22.

[16]高冠龙,冯起,张小由,等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J]. 干旱区研究,2018,35(4):929-937.

[17]韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对于干旱胁迫的光合生理响应[J]. 生态学报,2007,27(12):5229-5237.

[18]韩磊,孙兆军,展秀丽,等. 宁夏河东沙区柠条植株叶片蒸腾对于干旱胁迫的响应[J]. 生态环境学报,2015,24(5):756-761.

[19]陈平,孟平,张劲松,等. 2 种药用植物生长和水分利用效率对于干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2014,25(5):1300-1306.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选择 5 种常用城市绿化植物作为试验材料,分别为雪松(*Cedrus deodara*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、广玉兰

(*Magnolia grandiflora*)、石楠(*Photinia serrulata*)、桂花(*Osmanthus fragrans*),其生长习性、叶片表观特征等基本性质见表 1。取生长状况良好的新鲜叶片,采用环境扫描电子显微镜(FEI Quanta 200,荷兰 FEI 公司)对其叶片微形态特征进行分析。

表 1 5 种植物基本生理性状

植物种类	拉丁名	所属科	生活型	叶片质地	叶片形状
雪松	<i>Cedrus deodara</i>	松科	常绿乔木	革质	针形
女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	木樨科	常绿灌木	革质	卵形
广玉兰	<i>Magnolia grandiflora</i>	木兰科	常绿乔木	革质	椭圆形
石楠	<i>Photinia serrulata</i>	蔷薇科	常绿灌木	革质	长椭圆形
桂花	<i>Osmanthus fragrans</i>	木樨科	常绿灌木	革质	椭圆形

1.2 试验方法

1.2.1 烟雾箱装置 本研究通过南京信息工程大学实验室自制的烟雾箱装置,模拟自然状态下植物对大气污染物的消减过程。烟雾箱的框架是用高为 2 m,直径为 60 cm 的圆柱形不锈钢制成。整个烟雾箱由特氟龙膜(对污染物无吸附)包裹,四周密封,每次试验时用密封棒将顶部密封。在烟雾箱的中部有 2 个直径为 1 cm 的圆孔,分别用于进样和连接监测仪器。分别采用美国 Thermo Scientific 公司的 SO₂ 分析仪(Model 43i)和 NO_x 分析仪(Model 42i)对烟雾箱中 SO₂ 和 NO_x 的浓度进行实时检测。利用美国 TSI 公司的扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪(SMPS)实时测量烟雾箱中大气颗粒物的粒径分布和浓度。为了使通入烟雾箱内的污染气体快速扩散均匀,在烟雾箱中置入 1 台小型风扇。试验在 25 ℃ 恒温光照室中进行。室内配有温湿度计,用于烟雾箱内温度和湿度实时监测。

1.2.2 植物对大气污染物的消减能力测定 每个树种选择树龄、树木高度基本相同的植株,进行大气污染物(SO₂、NO_x和 PM_{2.5})消减动力学试验。试验前将植物叶片擦洗干净,置入烟雾箱密封后,通入污染气体(SO₂、NO_x、PM_{2.5})。其中 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 的初始浓度分别为 55 ~ 75 μg/L、90 ~ 95 μg/L 和 10⁴ ~ 10⁵ 个/cm³。打开风扇工作 5 min,待烟雾箱中污染气体扩散均匀后(读数稳定),开始记录数据。每隔 1 min 记录 1 次污染气体的浓度。根据前期预试验结果,连续记录 2 h,用于计算烟雾箱中污染气体的净化百分率变化情况。通过纸样称量法测定植物的叶面积^[18],用于计算单位叶面积植物对污染气体吸附量的动态变化情况。

为了防止花盆以及土壤吸附污染气体影响试验,用装有相同土壤但无植物栽培的花盆作为空白对照。每种植物选取 3 盆作为 1 个平行,每盆重复测定 3 次,由于数据量过大,本试验取其算术平均值用于计算和作图。

1.3 数据处理

植物对污染气体的净化百分率通过公式(1)进行计算:

$$\text{净化百分率} = \frac{C_0 - (C_t - C_{\text{空白}})}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为烟雾箱中某一污染气体的初始浓度; C_t 为 t 时刻烟雾箱中该气体的浓度, t 为处理时间; $C_{\text{空白}}$ 为没有植物的对照处理中污染物的浓度。

单位叶面积植物对污染气体的吸附量通过公式(2)进行计算:

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t - C_{\text{空白}})V}{S_{\text{总}}} \quad (2)$$

式中: Q_t 为 t 时刻植物对污染物的吸附量; V 为烟雾箱总体积; $S_{\text{总}}$ 为单株植物的总叶面积。

污染气体在植物叶片上的吸附动力学分别采用假一级动力学方程和假二级动力学方程进行拟合。假一级动力学模型用于描述主要通过边界扩散完成的单层吸附,其数学表达式^[19-21]为:

$$Q_t = Q_e [1 - \exp(-k_1 t)]; \quad (3)$$

假二级动力学模型被广泛用于描述污染物的化学吸附机制,即通过在吸附质和吸附剂之间共用电子的方式形成共价键或离子交换作用^[19-21],其表达式如下:

$$Q_t = \frac{k_2 Q_e^2 t}{1 + k_2 Q_e t} \quad (4)$$

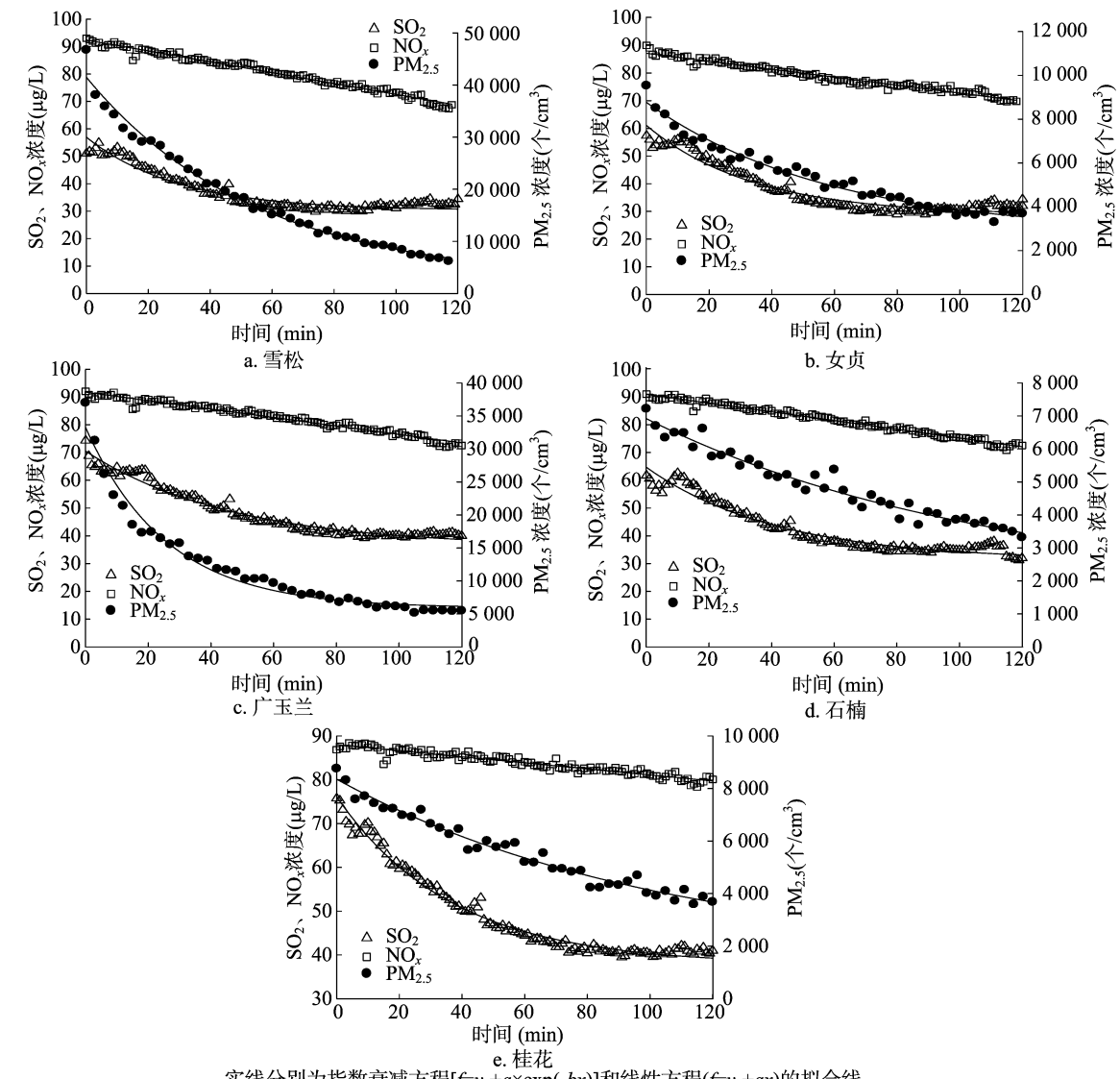
式中: Q_e 和 Q_t 分别表示吸附达平衡时、 t 时植物对污染气体的吸附量; k_1 和 k_2 分别为假一级、假二级吸附速率常数。

2 结果与讨论

2.1 大气污染物的消减

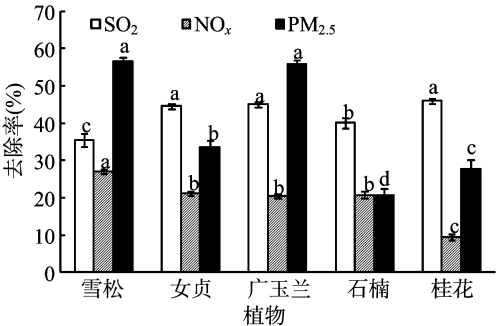
如图 1 所示,3 种大气污染物的浓度均随植物处理时间的延长呈逐渐下降的趋势,说明植物对这 3 种大气污染物均具有一定的净化作用。所不同的是,烟雾箱内不同污染物浓度随着时间的变化规律表现出明显的差异。从图 1 可以看出,SO₂ 和 PM_{2.5} 的消减规律大体相似,而与 NO_x 明显不同。具体为 SO₂ 和 PM_{2.5} 在烟雾箱中的浓度随着时间的延长先快速下降,在 100 min 左右逐渐趋向于稳定,呈显著指数衰减规律($r^2 = 0.933 \sim 0.988$)。然而,这 5 种植物对 NO_x 的消减速率基本保持不变,烟雾箱中 NO_x 的浓度随着时间的延长下降缓慢($r^2 = 0.911 \sim 0.980$)。说明植物对 NO_x 的吸收未达到饱和,可能与植物对大气中 NO_x 吸收、转化有关^[13]。

为评估单株植物对 3 种大气污染物的净化量,利用公式(1)计算植物对 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 的去除率(图 2)。5 种植物对大气中 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 均具有一定的净化作用,但是不同植物对污染物的去除率之间存在显著差异($P < 0.05$)。从图 2 可以看出,桂花对 SO₂ 的去除效果最好,2 h 的去除率可达 46%;其次是广玉兰和女贞,并且这 3 种植物对 SO₂ 的去除率无显著差异。石楠对 SO₂ 的去除效果居中,最差的是雪松,对 SO₂ 的去除率仅为 35%。5 种植物对 PM_{2.5} 的去除率表现为



实线分别为指数衰减方程 $[f=y_0+a\times\exp(-bx)]$ 和线性方程 $(f=y_0+ax)$ 的拟合线

图1 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 的浓度随时间的变化



不同小写字母表示在不同树种对同一污染物的去除率差异显著(P<0.05)

图2 5 种园林植物对 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 的去除率

雪松>广玉兰>女贞>桂花>石楠。雪松与广玉兰对 PM_{2.5} 的去除率之间无显著性差异,二者 2 h 对内可使烟雾箱中 PM_{2.5} 的浓度下降 56% 左右。石楠对 PM_{2.5} 的去除效果最差,2 h 的去除率仅为 20.8%。值得注意的是,本试验所选择的 5 种植物对 NO_x 的去除效果均较差,尤其是桂花,其对 NO_x 的净化率仅为 9.4%。即使是对 NO_x 去除效果最好的雪松,2 h

NO_x 的去除率仅为 27%。5 种植物对 NO_x 的净化效果远低于对 SO₂ 和 PM_{2.5} 的净化效果,表明植物对 NO_x 的去除途径与 SO₂ 和 PM_{2.5} 可能有所不同。

2.2 植物叶片对 SO₂、PM_{2.5} 和 NO_x 的吸附动力学特征

根据烟雾箱人工熏气模拟试验中大气污染物的浓度和植物总叶面积,通过公式(2)计算单位叶面积 SO₂、PM_{2.5}、NO_x 的吸附量,并运用经典反应动力学模型——假一级动力学模型和假二级动力学模型[公式(3)和公式(4)],探讨不同植物对 3 种大气污染物的吸附动力学特征,以揭示植物吸收/吸附 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 的规律,并根据模型拟合结果评价不同植物对大气污染物的去除能力。

由图 3 可以看出,2 h 内 5 种植物对 SO₂ 和 PM_{2.5} 的累积量均已达到饱和状态。由表 2 可知,假一级动力学和假二级动力学方程均能很好地拟合 SO₂ 和 PM_{2.5} 累积量随时间的变化,说明这 5 种植物对大气中 SO₂ 和 PM_{2.5} 的去除符合吸附反应动力学规律。从 R² 值来看,假一级动力学能更好地拟合植物对 SO₂ 的累积过程,表明这 5 种植物对大气中 SO₂ 的去除能力主要受大气中 SO₂ 浓度的影响,并且边界扩散过程是决

定其反应快慢的主要因素^[21]。与 SO₂ 不同的是,假二级动力学方程对 PM_{2.5} 累积动力学的拟合结果更佳,表明这 5 种植物叶片对 PM_{2.5} 的净化速率可能受化学反应过程限制^[21]。通过假一级动力学和假二级动力学模型的拟合结果可以看出,单位叶面积植物对大气 SO₂ 的累积量表现为广玉兰>雪松>女贞>桂花>石楠。这一排序结果与单株植物的去除率的排序结果(图 2)不同,但是与潘文等的研究结果^[13] 较为一致。表

明利用动力学吸附方程拟合单位叶面积 SO₂ 累积量的结果是可靠的。单位叶面积植物对大气 PM_{2.5} 的平衡吸附量表现为雪松>广玉兰>女贞>桂花>石楠。这一排序结果总体上与单株植物对 PM_{2.5} 去除率的排序结果一致,而又略有不同。从表 2 可以看出,单位叶面积雪松对 PM_{2.5} 的饱和累积量远高于广玉兰;而从整株植物的去除率来看,雪松和广玉兰对 PM_{2.5} 的去除率均较高,但二者之间无显著性差异(图 2)。

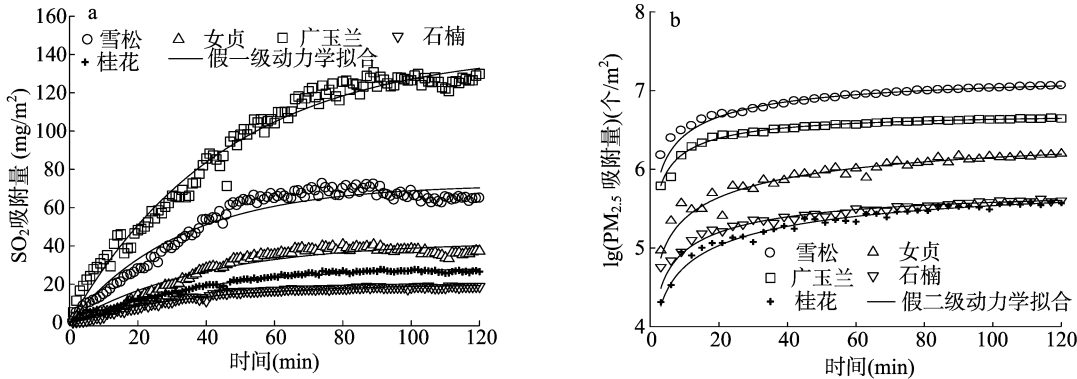


图3 单位面积植物叶片对 SO₂ (a)和 PM_{2.5} (b) 的吸附量随时间的变化

表 2 植物累积污染物的假一级和假二级动力学方程拟合参数

污染物	植物	假一级动力学			假二级动力学		
		Q_e (mg/m ²)	k_1 (min)	r^2	Q_e (mg/m ²)	k_2 [m ² /(mg·min)]	r^2
SO ₂	雪松	72.16 ± 1.02	0.031 ± 0.001	0.950	94.67 ± 5.14	0.29 ± 0.024	0.924
	女贞	42.17 ± 0.87	0.025 ± 0.001	0.938	58.41 ± 3.38	0.35 ± 0.033	0.918
	广玉兰	143.1 ± 1.88	0.022 ± 0.001	0.979	198.58 ± 5.95	0.091 ± 0.005	0.973
	石楠	19.94 ± 0.20	0.028 ± 0.001	0.980	26.59 ± 0.95	0.93 ± 0.053	0.966
	桂花	29.07 ± 0.27	0.027 ± 0.001	0.982	38.81 ± 1.18	0.61 ± 0.028	0.973
污染物	植物	一级动力学			假二级动力学		
		Q_e (× 10 ⁶ 个/m ²)	k_1 (min)	r^2	Q_e (× 10 ⁶ 个/m ²)	k_2 [× 10 ⁻⁹ m ² /(N·min)]	r^2
PM _{2.5}	雪松	11.78 ± 0.26	0.026 ± 0.002	0.960	16.27 ± 0.49	1.23 ± 0.06	0.975
	女贞	1.95 ± 0.13	0.013 ± 0.002	0.945	3.18 ± 0.21	2.51 ± 0.41	0.957
	广玉兰	4.27 ± 0.05	0.048 ± 0.003	0.943	5.27 ± 0.14	8.43 ± 0.30	0.992
	石楠	0.42 ± 0.01	0.025 ± 0.002	0.945	0.58 ± 0.03	31.5 ± 2.56	0.975
	桂花	0.47 ± 0.03	0.014 ± 0.001	0.959	0.77 ± 0.04	10.5 ± 1.43	0.970

由图 4 可以看出,试验结束时(2 h)植物对 NO_x 的吸收尚未达到最大值,其吸附量随着时间的延长仍处于快速上升阶段,尤其是雪松和广玉兰。此外,假一级动力学方程和假二级动力学方程均不能对试验数据进行拟合,说明植物对 NO_x 的去除途径可能与 SO₂ 和 PM_{2.5} 不同。植物对 SO₂ 和 PM_{2.5} 的去除可能主要以叶表面吸附为主,其净化速率受污染物浓度、边界扩散、化学键形成等物理化学过程的控制^[21],即使部分 SO₂ 通过气孔进入叶肉细胞后,其随后发生转化的过程(溶解于水后被氧化成 SO₄²⁻)亦为化学反应^[13]。因此,不管是吸附还是吸收过程,植物对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的净化反应速度均较快,因此在烟雾箱中的浓度迅速下降(图 1)。图 4 结果表明,5 种植物对 NO_x 的去除可能主要以吸收为主。大气中 NO_x 通过呼吸作用从气孔和细胞质进入植物体内,受体内转化、累积等生化代谢过程控制(与细胞膜及胞内还原性物质结合,形成有机氮,有机氮在 S-亚硝基谷胱甘肽还原酶作用下直接转化成铵根离子或降解成硝酸盐后,进入氨基酸代谢)^[22-23],该过程复杂,反应速度慢,导致其在烟雾箱中的浓

度一直处于缓慢下降状态(图 1)。

尽管 5 种植物对 NO_x 的吸附量尚未达到饱和,但是从吸附趋势仍然可以看出,其对 NO_x 的净化能力表现为广玉兰>雪松>女贞>石楠>桂花。将 5 种植物对 3 种大气污染物的净化能力分别赋予相同的权重,通过加权分析可以得出,5 种植物对 SO₂、PM_{2.5} 和 NO_x 的综合净化能力表现为广玉兰>雪

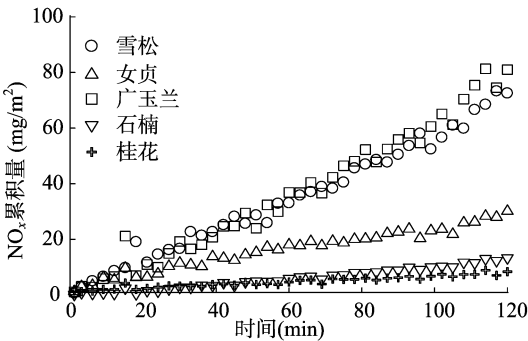


图4 单位面积植物叶片对 NO_x 的累积量随时间的变化

松 > 女贞 > 桂花 > 石楠。2 种高大乔木广玉兰和雪松对大气单一污染物(SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_x)的净化能力(图 3、图 4)和对 3 种污染物的综合净化能力优于其他 3 种灌木。以往的研究认为,乔木(整株)是大气污染物去除的主体,其滞尘量占城市绿地系统中总去除量的 87%,灌木次之,仅占 11.3%^[24];而不同树种单位叶面积大气污染物去除量表现为灌木 > 乔木^[16]。本试验结果与短期室外敞开环境中以单位叶面积去除率为指标评价不同树种净化能力的研究结果相反,可能是由于室外敞开环境中受人类活动影响,粉尘主要集中在近地面约 60 cm 空间内^[24],而大多数乔木较高,因此,从短期效果来看,单位叶面积灌木的去污效率高于乔木。本研究结果与植物的长期净化能力结果一致,进一步说明本试验的研究结果更能客观反映植物的净化能力。

2.3 植物叶片形态特征与净化机制

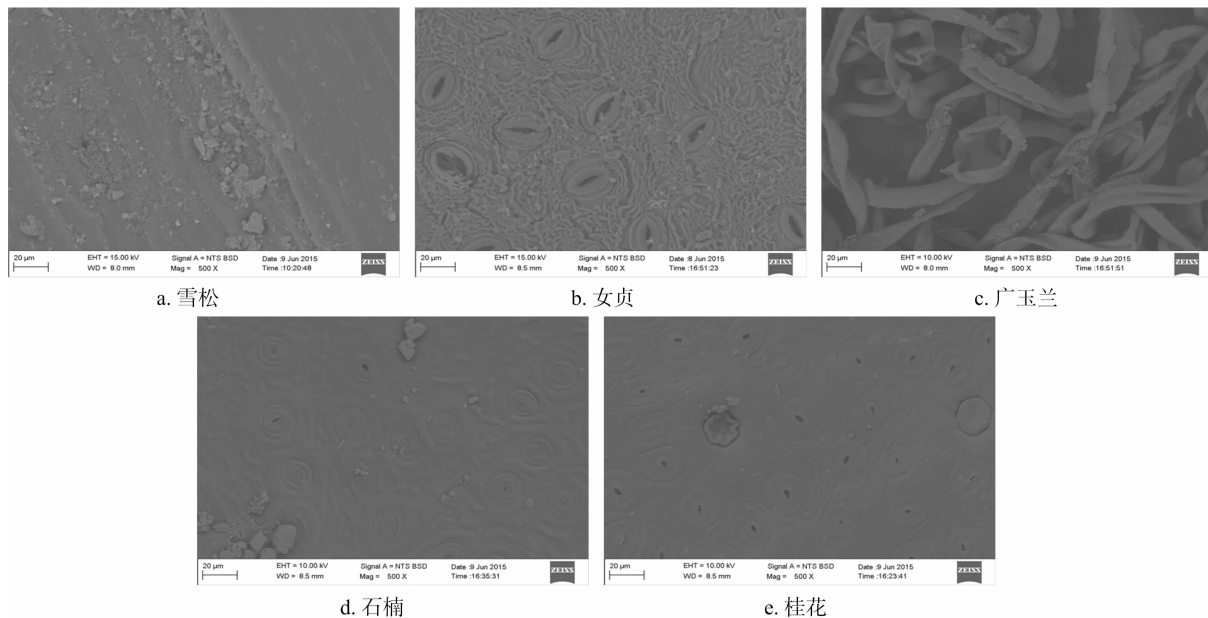


图5 5种植物叶片表面微形态的典型环境扫描电镜图像(500×)

植物叶片微形态结构和生物学特征对其大气污染物净化能力起着至关重要的作用^[13]。已有研究表明,叶片粗糙程度、叶表被毛情况、气孔密度等叶表形态结构影响着不同植物个体对大气污染物的吸附(滞留)^[25]。由图 3 和表 2 可以看出,5 种植物中 2 种乔木(雪松和广玉兰)对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除能力远高于 3 种灌木。与 3 种灌木相比,雪松和广玉兰的叶表均无气孔分布(图 5),但是具有深浅不一的沟状组织(雪松)和密被绒毛(广玉兰),表明沟(槽)状组织是植物滞留大气颗粒物,尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 的最重要微形态结构,其次是被毛情况,气孔大小和密度可能对植物吸附(滞留) $\text{PM}_{2.5}$ 的影响较小。这一结果与王蕾等对北京市 11 种园林植物的滞尘和微形态结构分析结果^[26]一致。3 种灌木中女贞对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留能力远高于石楠和桂花,可能与女贞叶表面褶皱和被有少量绒毛有关。此外,与石楠和桂花相比,尽管女贞的气孔密度较低,但是其气孔孔径大约是石楠和桂花的 2.8 倍,可能也是女贞对 $\text{PM}_{2.5}$ 去除能力较高的一个原因^[27]。桂花和石楠除气孔大小相近外,二者的另一共同特征是叶表皮均具有凸起组织。已有研究表明,凸起的表皮细胞不利于叶片滞纳颗

试验所用 5 种植物叶片的典型环境扫描电镜图像见图 5,从叶面的粗糙程度来看,雪松叶片的表面极其粗糙,具有深浅不一的沟状组织;广玉兰叶片的表面较光滑;女贞叶片的表面有明显的褶皱;石楠叶片的表面分布有大量凸起;而桂花的叶片表面则是褶皱与凸起并存。从叶表被毛情况来看,雪松和石楠的叶片正面和背面均无毛;广玉兰叶片正面无毛,背面密被绒毛;女贞叶片正面无毛,背面有稀疏的绒毛;桂花叶片正面和背面均有稀疏绒毛。从图 5 可以看出,2 种乔木(雪松和广玉兰)表面均无气孔结构;女贞、石楠和桂花的叶表面均有气孔分布,与雪松和广玉兰明显不同。3 种灌木叶表气孔孔径表现为女贞 $[(21.46 \pm 2.79) \mu\text{m}] >$ 桂花 $[(7.71 \pm 1.46) \mu\text{m}] \geq$ 石楠 $[(7.50 \pm 2.50) \mu\text{m}]$;气孔密度表现为桂花 $[(658.4 \pm 91.9) \text{个}/\text{mm}^2] >$ 石楠 $[(410.3 \pm 35.0) \text{个}/\text{mm}^2] >$ 女贞 $[(228.3 \pm 8.2) \text{个}/\text{mm}^2]$ 。

粒物^[27]。因此,石楠与桂花净化大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的能力均较弱应归因于其叶表面凸起组织。此外,桂花的叶片表面具有一定的褶皱组织,两面均有稀疏的绒毛,气孔密度大,可能是其对 $\text{PM}_{2.5}$ 的净化能力略高于石楠的原因。

目前,关于叶片微形态结构对植物净化大气中 SO_2 和 NO_x 的研究较少,大多研究关注的是大气中 SO_2 暴露对植物叶片形态和生理生化特征的影响^[28]。宋彬等通过石蜡切片法和指甲油印法对 13 种园林植物叶片解剖结构的观察结果表明,叶片紧实度、表皮角质层厚度、气孔长度、密度等影响着植物对大气中 SO_2 的吸收^[29]。潘文等研究发现,叶片有蜡质、革质或叶面密生绒毛的植物使污染气体不能畅通地进入叶内,影响植物的吸收净化效果^[13]。广玉兰和雪松的叶片均为革质,并且广玉兰叶面密被绒毛,但是对 SO_2 和 NO_x 的净化效果最好,这与潘文等的研究结果^[13]相反。在本试验中,植物对大气污染物的累积动力学规律表明,广玉兰和雪松对大气中 SO_2 的去除可能主要是通过表面吸附作用。广玉兰对 SO_2 和 NO_x 的净化能力略高于雪松,可能与雪松的叶片是披针形,表皮角质层厚有关^[26];也可能与植物利用 SO_2 和 NO_x ,

使之参与代谢有关^[29]。植物能够通过呼吸作用对大气中的 SO_2 和 NO_x 进行吸收和转化,植物叶片表面气孔的大小和数目影响植物对大气中 SO_2 和 NO_x 的净化能力。王勋陵等研究发现,单位面积内气孔数目少而且气孔器较小能够使通过呼吸作用进入叶片的 SO_2 避免二次排出^[30]。在本研究中,气孔孔径表现为石楠 < 桂花 < 女贞,与植物净化 SO_2 的能力大小顺序相反,表明通过呼吸作用吸收转化过程不是植物净化大气中 SO_2 主要途径。而石楠对大气中 NO_x 的净化效率略高于桂花(图 4),而石楠的气孔孔径略小于桂花(图 5),表明植物对大气中 NO_x 的去除可能是通过呼吸作用进行体内转化吸收^[17]。

3 结论

雪松、女贞、广玉兰、石楠、桂花等 5 种园林植物对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 的整株净化能力与单位叶面积能力明显不同。假一级动力学和假二级动力学模型能够很好地拟合植物对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 累积动力学,但是不适合拟合 NO_x 的累积动力学过程。表明 5 种植物对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的去除机制相似,且以表面吸附过程为主;而对 NO_x 去除较慢,可能由叶片吸收与转化过程控制。总体来看,5 种植物对 3 种大气污染物的综合净化能力表现为广玉兰 > 雪松 > 女贞 > 桂花 > 石楠。叶片表具有深浅不一的沟状组织,或者密生绒毛,有利于植物吸附净化 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 ;而表面凸起结构不利于对污染物的吸附;气孔大小和密度对 NO_x 的吸收和转化影响较大。研究结果可以为城市功能型园林植物选择和生态城市建设提供科学依据。

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知: 国发[2013]37 号[EB/OL]. (2013-09-10)[2019-01-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm.
- [2] Xu P, Chen Y, Ye X. Haze, air pollution, and health in China[J]. *The Lancet*, 2013, 382(9910): 2067.
- [3] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 及其危害[J]. *前沿科学*, 2012, 6(21): 22-31.
- [4] Burnett R T, Pope C A, Ezzati M, et al. An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(4): 397-403.
- [5] 陈伟光, 黄芳芳, 温小莹, 等. 大气 SO_2 和 NO_2 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.
- [6] Yin P, He G, Fan M, et al. Particulate air pollution and mortality in 38 of China's largest cities: time series analysis[J]. *BMJ*, 2017, 356: j667.
- [7] Yang J, Zhang B. Air pollution and healthcare expenditure: implication for the benefit of air pollution control in China[J]. *Environmental International*, 2018, 120: 443-455.
- [8] 夏冰, 马晓. 郑州市绿化植物滞尘效应及其生理特征响应[J]. *江苏农业科学*. 2017, 45(6): 127-131.
- [9] Jin S J, Guo J K, Wheeler S, et al. Evaluation of impacts of trees on $\text{PM}_{2.5}$ dispersion in urban streets[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 277-287.

- [10] Hu Y T, Zhao P, Niu J F, et al. Canopy stomatal uptake of NO_x , SO_2 and O_3 by mature urban plantations based on sap flow measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 125: 165-177.
- [11] 贺勇, 李磊, 李俊毅, 等. 北方 30 种景观树种净化空气效益分析[J]. *东北林业大学*, 2010, 38(5): 37-39.
- [12] Jim C Y, Chen W Y. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 665-676.
- [13] 潘文, 张伟强, 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.
- [14] Rai P K P, Panda L L S. Dust capturing potential and air pollution tolerance index (APTI) of some road side tree vegetation in Aizawl, Mizoram, India: an Indo-Burma hot spot region[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2014, 7(1): 93-101.
- [15] 张鹏鹭, 注明误, 刘艳菊, 等. 北京路边 9 种植物叶片表面微结构及其滞尘潜力研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(12): 2126-2133.
- [16] 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1465-1470.
- [17] 李德生, 孙旭红, 李荣花, 等. 经济树种苗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.
- [18] 宋岗, 谢明杰. 三种观叶植物吸收甲醛效果的研究[J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(1): 65-67.
- [19] Foo K Y, Hameed B H. Utilization of oil palm biodiesel solid residue as renewable sources for preparation of granular activated carbon by microwave induced KOH activation[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130: 696-702.
- [20] Jia M Y, Wang F, Bian Y R, et al. Sorption of sulfamethazine to biochars as affected by dissolved organic matters of different origin[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 36-43.
- [21] Ho Y S. Review of second-order models for adsorption systems[J]. *Journal of Hazardous Materials* 2006, 136(3): 681-689.
- [22] Morikawa H, Takahashi M, Sakamoto A, et al. Novel metabolism of nitrogen in plants[J]. *Z Naturforsch C J Biosci*, 2005, 60(3/4): 265-271.
- [23] Lea P J, Leecood R C. *Plant Biochemistry and molecular biology* [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1993.
- [24] 王江, 杜茜, 李慧溪. 城市绿化植物滞尘效应研究综述[J]. *现代园艺*, 2016, 12: 134-136.
- [25] 骆永明, 查宏光, 宋静, 等. 大气污染的植物修复[J]. *土壤*, 2002, 3: 113-119.
- [26] 王蕾, 高尚玉, 刘连友, 等. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 597-601.
- [27] 房瑶瑶. 森林调控空气颗粒物功能及其与叶片微观结构关系的研究——以陕西省关中地区森林为例[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [28] Heber A, Hüve K. Action of SO_2 on plants and metabolic detoxification of SO_2 [J]. *International Review of Cytology*, 1997, 177: 255-286.
- [29] 宋彬, 王得祥, 张义, 等. 13 种园林树种叶片解剖结构与其二氧化硫吸收能力的关系[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(6): 1206-1214.
- [30] 王勋陵, 王静. 植物形态结构与环境[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1989: 105-138.