净化臭氧和颗粒物复合大气污染的城市绿化树种筛选*

薛文凯[1,2] 黄诗雨[1] 李 品[1]

1 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室 森林培育与保护教育部重点实验室
干旱半干旱地区森林培育及生态系统研究国家林草局重点实验室 北京 100083
2 上海交通大学农业与生物学院 科技部上海长三角区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站 上海城市森林生态系统国家定位观测研究站 上海 200240

摘要：随着城市化和工业化进程不断加快，春夏季臭氧（O_3）污染和秋冬季颗粒物（PMs）污染等复合大气污染问题成为困扰我国各大城市的环境难题，严重威胁城市森林的碳汇潜力和净化空气等生态系统服务功能。筛选既具有较强吸收 O_3 和 PMs 能力且具有较低植源性挥发性有机化合物（BVOCs）释放量的抗性树种，是当今维持城市森林生态功能和人类福祉的重要保障。文章通过整合已发表的文献数据，运用权重赋值法和综合因子分析，解析我国常见 386 种绿化树种的 O_3 吸收能力、PMs 吸附能力、BVOCs 释放速率以及复合效应。结果表明：侧柏、圆柏和毛白杨表现出较强的 O_3 和 PMs 吸收、吸附能力和较低的 BVOCs 释放量，可作为综合抗性能力较强的城市绿化树种进行推广；悬铃木、鹅掌楸和枫香表现出较弱的 O_3 抗性和 PMs 吸附能力且 BVOCs 释放速率较高，不适宜作为城市绿化树种栽植。因此，在适地适树的基础上，城市绿化需要综合考虑树种景观布局和下垫面大气污染的组分和严重程度，选择适宜的绿化树种进行绿化布局，最大限度地发挥绿化树种在城市建设中的生态效益。

关键词：BVOCs；O_3；PMs；复合污染；城市森林；树种筛选
DOI：10.12169/zgcsly.2022.08.03.0002

Screening Greening Tree Speciesfor Reducing the Combined Air Pollution by Ozone and Particulate Matters

Xue Wenkai[1,2] Huang Shiyu[1] Li Pin[1]

(1. State Key Laboratory of Beijing Forestry University for Efficient Production of Forest Resources/Key Laboratory of Ministry of Education for Silviculture and Conservation/Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Silviculture and Forest Ecosystem, Beijing 100083, China; 2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University/ Observation and Research Station of Ministry of Science and Technology for Shanghai Yangtze River Delta Eco-Environmental Change and Management/ Research Station of National Forestry and Grassland Administration for Shanghai Urban Forest Ecosystem, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the accelerating process of industrialization and urbanization, the combined air pollution, such as volatile organic compounds (VOCs), ozone (O3) and particulate matter (PMs), has become the main environmental problem haunting major cities in China, which seriously threatens the services and functions of urban forest ecosystem including carbon sink and air purification. Screening the species with a

收稿日期：2022-08-03
* 基金项目：国家自然科学基金（32271673）；北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目（BLRC2023B06）；北京市大学生创新创业训练项目（S202110022017）
第一作者：薛文凯（2001-），男，博士生，研究方向为城市生态与长期观测。E-mail：chegov. k@ sjtu. edu. cn
通信作者：李品（1987-），女，博士，副教授，硕士生导师，研究方向为城市林业与环境互作。E-mail：lipin@ bjfu. edu. cn

strong absorption of O_3 and PMs and a low release of BVOCs will be the guarantee for maintaining urban forest ecosystem function and human well-being. Based on the published literature, this paper comprehensively analyzes the absorption capacity of O_3 and PMs, the release rate of BVOCs and combined effects of 386 common greening tree species using weight assignment and comprehensive factor analysis. The results show that the tree species of *Platycladus orientalis*, *Sabina chinensis* and *Populus tomentosa* have a strong absorption capacity of O_3 and PMs and low release rate of BVOCs, which could be promoted in urban greening with strongest tolerance; *Juglans regia*, *Ginkgo biloba* and *Paulownia fortunei* are the tree species with medium absorption capacity of O_3 and PMs and high release rate of BVOCs, which are not suitable for use in urban greening. In consideration of the principle of suitable trees for suitable places, more attention would be paid to the landscape layout with urban tree species and the composition and severity of air pollution at the underlying surface in urban greening. Thus, suitable greening species should be selected to maximize the ecological benefits of these species in urban construction.

Keywords: BVOCs; O_3; PMs; combined pollution; urban forest; tree species screening

随着国内城市化进程不断加快，大气污染物排放源和排放量剧增，导致空气质量明显恶化。经“十二五”减排治理、“大气污染防治行动计划”和“打赢蓝天保卫战当年行动计划”等一系列大气污染防治措施，我国氮氧化物（NO_x）和二氧化硫（SO_2）的排放量得到了实质性控制，大气细颗粒物（$PM_{2.5}$）浓度明显下降。然而，继 $PM_{2.5}$ 后 O_3 成为困扰我国城市空气质量改善和达标的首要污染物。O_3 主要是由 NO_x、挥发性有机化合物（VOCs）等一次污染物经太阳辐射发生光化学反应而形成的具有强氧化毒性的二次污染物[1]。目前，中国地表 O_3 浓度正以每年 2.2～2.4 nmol·mol^{-1} 的速度增加[2]，在人口密集的城市和地区，如京津冀城市群、长三角和珠三角城市群等，夏季一小时平均 O_3 浓度极值已达到300 μg·m^{-3} 以上（远超我国空气质量二级标准 200 μg·m^{-3}），也远超许多城市绿化树种的受害临界阈值[3]，造成了树木光合代谢受损、生长抑制、早衰等一系列连锁负效应[4]。然而，作为 O_3 最重要的前体物质，植物源挥发性有机物（biogenic volatile organic compounds，BVOCs）同样也是所有陆生植物都会释放的一种生物信号分子和抗氧化产物。据研究，BVOCs 比人为源 VOCs 具有更高的反应活性、释放总量和 O_3 生成潜力[5]。从全球尺度来看，BVOCs 占 VOCs 总量的 90%以上[6]。并且，BVOCs 还是其他二次污染的重要前体物质，如大气有机气溶胶（SOA）及悬浮 PMs 等[7]。目前，我国城市大气污染现状呈新型复合型（秋冬季 $PM_{2.5}$ 和春夏季 O_3），具有快速蔓延性、污染综合性和影响区域性等特征。因此，亟需筛选出能高效吸收吸附 O_3 和 $PM_{2.5}$ 且 BVOC 释放量低的树种。

现有园林绿化部门过去在筛选绿化树种时，除了景观效果外，主要关注植物对 SO_2、NO_x、氯气（Cl_2）等传统大气污染物的抗性[8-11]，常常忽略绿色植被的 BVOCs 释放量，及其带来的地表 O_3 合成风险[12]。同时，为更好解决“雾霾”问题，一些研究者开始集中探索对 $PM_{2.5}$ 等颗粒物有较强吸附能力的绿化植物[13-14]。Gao 等[15]对城市 6 种绿地类型的 PMs 滞尘效果发现，3 种城市森林绿地类型（针叶林、阔叶林、针阔混交林）由于其较大的叶面积，可以滞留大量的大气颗粒物，滞尘效果明显好于其他绿地类型。此外，大气“隐形杀手”——O_3 在近几年也逐渐引起了人们的关注。研究表明，近地面 O_3 的强氧化性对城市绿化植被具有毒害效应[16-17]。其氧化毒性效应远超其他大气污染物[18]。面对当下新型大气复合污染问题，根据树木对每一种大气污染物的表现，筛选对多种污染物都具有优秀表现的树种来绿化城市环境，成为主要突破口。李品等[19]通过研究 6 种大气污染物（O_3、PMs、HF、Cl_2、NO_2 和 SO_2）复合污染下城市树种的抗性表现，筛选出桑树、侧柏、臭椿等 10 种综合抗性强的植物。由于 BVOCs 的活性远高于人为源 VOCs，会导致地表 O_3 的更快形成，Ghurkina 等[12]认为通过采取筛选城市绿化树种等必要措施限制城市 BVOCs 排放是可行且必要的。

本文通过集成多种植物对 PMs、O_3 和 BVOCs 的吸附、吸收和释放能力研究，计算每种植物对大气复合污染的综合表现，科学选择综合表现优秀的树种进行城市绿化，以期为城市森林的生态服务功能提升和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据集成

研究大量搜集已公开发表的关于 PMs、O_3 和 BVOCs 3 种大气污染物影响城市绿化树种的文献数据。中英文文献搜集渠道分别为中国知网（CNKI）和 Web of Science（WOS），检索关键词为“大气污染(air pollution)”“绿化植物(greening plant)”“城市森林(urban forest)”“颗粒物(particulate matter, PMs, $PM_{2.5}$, PM_{10})”“臭氧(O_3)”“滞尘（adsorbing haze/dust)”和“植物源挥发性有机物（BVOCs）”。以从 46 篇符合标准的文献中获取的 734 个数据为基础，建立数据库，总计树种包括 69 科、161 属和 383 种，有乔木 257 种和灌木 126 种。数据库内容包含：种名、实验地点、O_3 损伤毒害程度、叶片滞尘量、BVOCs 释放量以及文献给出的抗性等级等信息[19]。

1.2 数据分析

数据分析评价指标包括：单位面积叶片单位时间内滞尘量，叶片受损面积及受损程度，气孔导度、叶片净光合速率和蒸腾速率等生理指标的下降率，单位质量叶片单位时间内释放挥发性有机物量。树种对 PMs、O_3 和 BVOCs 的表现优劣分别以滞尘量、耐受程度和释放速率进行评判，其中，滞尘量以多为优、耐受程度以强为优、释放速率以小为优。采取 1~10 的数值对 386 种植物的吸附颗粒物能力、抗 O_3 污染能力及释放 BVOCs 速率进行赋值，每个污染物各划分出 5 个表现评价等级：很好（9 和 10）、好（7 和 8）、中等（5 和 6）、差（3 和 4）以及很差（1 和 2）。由于各个文献评判植物表现优劣的评价指标不同，且不同实验设计的污染物浓度也有所差异，所以相同树种的表现在不同的报道中会有所不同。因此，本文的抗性评价等级是基于各文献中各树种的主要生理指标，并同其他文献进行多方面比较后，最终统一划分[19]。

基于赋值数据，利用 SPSS 软件分别对不同大气污染物组合的矩阵进行因子分析[19]。

2 结果与分析

由表 1 可知：按生物学类型划分，含科最多的是 BVOCs 相关研究，其次是 O_3 和 PMs；而含种最多的则是 PMs，其次是 O_3 和 BVOCs。按植物功能类型划分，乔木占所研究种类的 67.1%，灌木占 32.9%。

表 1 城市树种针对 3 种大气污染物表现的研究数量统计

分类	项目	空气污染物类别		
		PMs	O_3	BVOCs
生物学类型	科	38	45	49
	属	87	81	93
	种	140	130	123
功能类型	乔木	76	92	96
	灌木	64	38	27

2.1 树种对单一污染物的表现分类

对于 PMs 而言(表 2)，吸附能力较优的树种为金叶女贞、锦带花、天竺桂、西府海棠和侧柏等。在具有很强表现(得分为 7~10)的树种中，柏科(8.5%)、豆科(8.5%)、木樨科(8.5%)、蔷薇科(17.0%)、杨柳科(10.6%)和忍冬科(10.6%)占比较大。

对于 O_3 而言（表 2），62 种树种对 O_3 的吸收能力较差（得分为 1~2）；44 种树种对 O_3 的吸收能力较好（得分为 7~8），其中以香樟为代表的樟科（11.3%）和以旱柳、垂柳为代表的杨柳科（13.6%）树种占比较大，但樟科植物对 O_3 的吸收能力属间差别较大，楠属、润楠属、山胡椒属和木姜子属对 O_3 的吸收能力很差。此外，研究发现所有试验树种在超高 O_3 浓度水平下均出现受害特征，未见绝对抗性树种，但现实环境中 O_3 浓度一般达不到实验中的超高浓度水平。据研究，全国地表 O_3 浓度每日 8 h 滑动平均最大值（MDA8）的年均值在 41×10^{-12}，华北平原、京津冀、长三角和珠三角等区域 MDA8 在 $(60\sim70)\times10^{-12}$[20]。因此我们仍可以从 O_3 抗性表现较好的树种中筛选出理想的抗 O_3 城市树种。

对于 BVOCs 而言（表 2），以桉树、青冈栎、意大利杨等为代表的 12 个树种的 BVOCs 释放表现较差（得分小于 5）；以桦树、红松、落叶松、银杏、圆柏、栾树为代表的 82 个树种的释放表现好（得分为 9~10）。在 BVOCs 释放表现好及较好（得分为 7~10）的科中，以蔷薇科（13.7%）、松科（12.8%）、柏科（5.0%）、桑科（5.0%）和木犀科（5.0%）占比较大。

表 2　树种对单一污染物的表现等级划分名录

污染物	表现等级	树种及其科属
PMs	很好	**木犀科**女贞属 金叶女贞 *Ligustrum vicaryi*；**忍冬科**锦带花属 锦带花 *Weigela florida*；**蔷薇科** 枇杷属枇杷 *Eriobotrya japonica*；苹果属西府海棠 *Malus micromalus*；蔷薇属 黄刺玫 *Rosa xanthina*、七姊妹 *Rosa multiflora*；委陵菜属 金老梅 *Potentilla fruticosa*、银老梅 *Potentilla glabra*；**樟科** 樟属天竺桂 *Cinnamomum pedunculatum*；**柏科** 侧柏属侧柏 *Platycladus orientalis*；**豆科** 锦鸡儿属紫花锦鸡儿 *Caragana rosea*
	好	**苦木科** 臭椿属臭椿 *Ailanthus altissima*；**杨柳科** 杨属毛白杨 *Populus tomentosa*、加拿大杨 *Populus canadensis*、北京杨 *Populus×beijingensis*；柳属旱柳 *Salix matsudana*、垂柳 *Salix babylonica*；**玄参科** 泡桐属泡桐 *Paulownia fortunei*；**小檗科** 小檗属大叶小檗 *Berberis amurensis*；**松科** 云杉属红皮云杉 *Picea koraiensis*；**山茱萸科** 梾木属红瑞木 *Swida alba*；**桑科** 桑属桑树 *Morus alba*；构属构树 *Broussonetia papyrifera*；**忍冬科** 荚蒾属鸡树条 *Viburnum opulus* ；忍冬属早花忍冬 *Lonicera praeflorens*、金银木 *Lonicera maackii*、藏花忍冬 *Lonicera tatarinowii*；**蔷薇科** 苹果属钻石海棠 *Malus* ‘Sparkler’；棣棠花属棣棠 *Kerria japonica*；**槭树科** 槭属东北槭 *Acer mandshuricum*、茶条槭 *Acer ginnala*；**木犀科** 梣属白蜡树 *Fraxinus chinensis*；素馨属迎春花 *Jasminum nudiflorum*；女贞属大叶女贞 *Ligustrum compactum*；**木兰科** 玉兰属玉兰 *Magnolia denudata*；鹅掌楸属杂交马褂木 *Liriodendron chinense* × *tulipifera*；**壳斗科** 栗属板栗 *Castanea mollissima*；**锦葵科** 木槿属木槿 *Hibiscus syriacus*；**金缕梅科** 檵木属红花檵木 *Loropetalum chinense*；**黄杨科** 黄杨属小叶黄杨 *Buxus sinica*；**豆科** 锦鸡儿属松东锦鸡儿 *Caragana ussuriensis*；槐属国槐 *Sophora japonica*；刺槐属刺槐 *Robinia pseudoacacia*；**柏科** 圆柏属圆柏 *Sabina chinensis*、龙柏 *Sabina chinensis*；刺柏属杜松 *Juniperus rigida*；**杜鹃花科** 杜鹃花属春鹃 *Rhododendron simsii*
	中等	**黄杨科** 黄杨属黄杨 *Buxus sinica*；**棕榈科** 棕榈属棕榈 *Trachycarpus fortunei*；**榆科** 榆属榉树 *Zelkova serrata*；**悬铃木科** 悬铃木属悬铃木 *Platanus acerifolia*；**五加科** 五加属短梗五加 *Eleutherococcus sessiliflorus*；**松科** 松属红松 *Pinus koraiensis*；**杉科** 落羽杉属落羽杉 *Taxodium distichum*；**山茶科** 山茶属山茶花 *Camellia japonica*；**忍冬科** 荚蒾属法国冬青 *Viburnum odoratissimum*、珊瑚树 *Viburnum odoratissimum*；**茄科** 枸杞属枸杞 *Lycium chinense*；**蔷薇科** 蔷薇属玫瑰 *Rosa rugosa*；李属紫叶李 *Prunus cerasifera*；木瓜属木瓜树 *Chaenomeles sinensis*；桃属山桃 *Prunus davidiana*；**千屈菜科** 紫薇属紫薇 *Lagerstroemia indica*；**槭树科** 槭属拧筋槭 *Acer triflorum*；栾树属栾树 *Koelreuteria paniculata*；槭树属五角枫 *Acer pictum*；**木犀科** 丁香属紫丁香 *Syringa oblata*、小叶丁香 *Syringa pubescens*；连翘属连翘 *Forsythia suspensa*；木犀属桂花 *Osmanthus fragrans*；**黄杨科** 黄杨属大叶黄杨 *Euonymus japonicus*；**虎耳草科** 绣球属圆锥八仙花 *Hydrangea paniculata*；**胡桃科** 胡桃属核桃 *Juglans regia*；**海桐科** 海桐花属海桐 *Pittosporum tobira*；**杜鹃花科** 杜鹃花属兴安杜鹃 *Rhododendron dauricum*；**豆科** 合欢属山槐 *Albizia kalkora*；槐属龙爪槐 *Styphnolobium japonicum*；**柏科** 圆柏属塔柏 *Juniperus chinensis*
	差	**樟科** 樟属大叶樟 *Cinnamomum burmannii* 、香樟 *Cinnamomum septentrionale*；**榆科** 朴属滇朴 *Celtis kunmingensis*；**银杏科** 银杏属银杏 *Ginkgo biloba*；**小檗科** 十大功劳属十大功劳 *Mahonia fortunei*；**五加科** 五加属刺五加 *Eleutherococcus senticosus*；**卫矛科** 卫矛属卫矛 *Euonymus alatus*；**松科** 雪松属雪松 *Cedrus deodara*；松属油松 *Pinus tabuliformis*；云杉属云杉 *Picea asperata*；柳杉属柳杉 *Cryptomeria japonica*；**山茱萸科** 桃叶珊瑚属花叶青木 *Aucuba japonica*；**桑科** 榕属对叶榕 *Ficus hispida*；**蔷薇科** 珍珠梅属珍珠梅 *Sorbaria sorbifolia*；花楸属花楸 *Sorbus alnifolia*；石楠属椤木石楠 *Photinia bodinieri*；樱属毛樱桃 *Prunus tomentosa*；**千屈菜科** 石榴属石榴 *Punica granatum*；**槭树科** 槭属元宝枫 *Acer truncatum*；**木犀科** 女贞属小叶女贞 *Ligustrum quihoui*、水蜡 *Ligustrum obtusifolium*；**木兰科** 木兰属广玉兰 *Magnolia grandiflora*；**金缕梅科** 枫香树属枫香 *Liquidambar formosana*；**桦木科** 桦木属白桦 *Betula platyphylla*；**胡桃科** 胡桃属胡桃楸 *Juglans mandshurica*；**杜英科** 杜英属杜英 *Elaeocarpus decipiens*
	很差	**芸香科** 黄檗属 黄檗 *Phellodendron amurense*；**榆科** 榆属榆树 *Ulmus pumila*；**杨柳科** 柳属绦柳 *Salix matsudana*；杨属意大利杨 *Populus euramericana*；**小檗科** 小檗属紫叶小檗 *Berberis thunbergii*；**卫矛科** 南蛇藤属南蛇藤 *Celastrus orbiculatus*；**松科** 松属白皮松 *Pinus bungeana*；**鼠李科** 鼠李属兴安鼠李 *Rhamnus parvifolia*；**杉科** 水杉属水杉 *Metasequoia glyptostroboides*；**桑科** 榕属柳叶榕 *Ficus celebensis*、大叶榕 *Ficus virens*、黄葛榕 *Ficus virens*、榕树 *Ficus microcarpa*；**忍冬科** 忍冬属秦岭忍冬 *Lonicera ferdinandi*、长白忍冬 *Lonicera ruprechtiana*；**蔷薇科** 绣线菊属三裂叶绣线菊 *Spiraea trilobata*、华北绣线菊 *Spiraea fritschiana*；苹果属苹果 *Malus pumila*、海棠 *Malus spectabilis*；悬钩子属山楂叶悬钩子 *Rubus crataegifolius*；花楸属水榆花楸 *Sorbus alnifolia*；蔷薇属 月季 *Rosa chinensis*；桃属京桃 *Prunus persica*、榆叶梅 *Prunus triloba*；稠李属山桃稠李 *Padus maackii*；**五加科** 八角金盘属八角金盘 *Fatsia japonica*；**木犀科** 丁香属洋丁香 *Syringa vulgaris*、暴马丁香 *Syringa reticulata*；梣属水曲柳 *Fraxinus mandshurica*；**木兰科** 鹅掌楸属鹅掌楸 *Liriodendron chinensis*；**夹竹桃科** 夹竹桃属夹竹桃 *Nerium oleander*；**虎耳草科** 山梅花属东北山梅花 *Philadelphus schrenkii*；**胡桃科** 枫杨属枫杨 *Pterocarya stenoptera*；山核桃属美国山核桃 *Carya illinoinensis*；**豆科** 紫荆属紫荆 *Cercis chinensis*；**柏科** 刺柏属刺柏 *Juniperus formosana*
O_3	很好	—
	好	**樟科** 桢楠属浙江楠 *Phoebe chekiangensis*；木姜子属黄丹木姜子 *Litsea elongata*；樟属天竺桂 *Cinnamomum pedunculatum*、香樟 *Cinnamomum septentrionale*；新木姜子属浙江新木姜子 *Neolitsea aurata*；**榆科** 榆属 榆树 *Ulmus pumila*；**杨柳科**柳属 垂柳 *Salix babylonica*、馒头柳 *Salix matsudana*、旱柳 *Salix matsudana*；杨属 加拿大杨 *Populus canadensis*、毛白杨 *Populus tomentosa*、大叶杨 *Populus lasiocarpa*；**悬铃木科**悬铃木属 悬铃木 *Platanus acerifolia*；**玄参科**泡桐属 泡桐 *Paulownia fortunei*；**无患子科**文冠果属 文冠果 *Xanthoceras sorbifolium*；**松科**松属 白皮松 *Pinus bungeana*、油松 *Pinus tabuliformis*；**桑科**桑属 桑树 *Morus alba*；构属 构树 *Broussonetia papyrifera*；**忍冬科**锦带花属 锦带花 *Weigela florida*；荚蒾属 欧洲荚蒾 *Viburnum opulus*；**蔷薇科**珍珠梅属 线叶绣线菊 *Spiraea thunbergii*；苹果属 苹果 *Malus pumila*；桃属 山桃 *Prunus davidiana*；樱属 樱桃 *Prunus pseudocerasus*；**槭树科** 槭树属 五角枫 *Acer pictum*；槭属 复叶槭 *Acer negundo*；栾树属 栾树 *Koelreuteria paniculata*；**木犀科**女贞属 金叶女贞 *Ligustrum vicaryi*；**木兰科**木兰属 厚朴 *Houpoea officinalis*；**楝科**香椿属 红椿 *Toona ciliata*；**连香树科**连香树属 连香树 *Cercidiphyllum japonicum*；**壳斗科**栗属 板栗 *Castanea mollissima*；**夹竹桃科**夹竹桃属 黄花夹竹桃 *Thevetia peruviana*；**胡桃科**胡桃属 核桃 *Juglans regia*；**豆科**刺槐属 刺槐 *Robinia pseudoacacia*；紫穗槐属 紫穗槐 *Amorpha fruticosa*；槐属 国槐 *Sophora japonica*；**蝶形花科**黄檀属 黄檀 *Dalbergia hupeana*；**柏科**侧柏属 侧柏 *Platycladus orientalis*；圆柏属 圆柏 *Sabina chinensis*；**八角枫科**八角枫属 八角枫 *Alangium chinense*

表 2(续)

污染物	表现等级	树种及其科属
	中等	**樟科** 楠属闽楠 *Phoebe bournei*;**杨柳科** 杨属北京杨 *Populus × beijingensis*;**银杏科** 银杏属银杏 *Ginkgo biloba*;**山茶科** 木荷属木荷 *Schima superba*;**忍冬科** 忍冬属金银木 *Lonicera maackii*;**蔷薇科** 苹果属西府海棠 *Malus micromalus*;樱属河津樱 *Prunus kanzakura*;石楠属红叶石楠 *Photinia×fraseri*;**漆树科** 盐肤木属火炬树 *Rhus typhina*;杧果属芒果 *Mangifera indica*;**木犀科** 女贞属水蜡树 *Ligustrum obtusifolium*;梣属白蜡树 *Fraxinus chinensis*;**苦木科** 臭椿属臭椿 *Ailanthus altissima*;**壳斗科** 青冈属青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca*;**金缕梅科** 枫香树属枫香 *Liquidambar formosana*;**杜仲科** 杜仲属杜仲 *Eucommia ulmoides*;**豆科** 合欢属合欢 *Albizia julibrissin*
	差	**忍冬科** 荚蒾属荚蒾 *Viburnum dilatatum*;**壳斗科** 锥属苦槠 *Castanopsis sclerophylla*;**木棉科** 木棉属木棉 *Bombax ceiba*;**冬青科** 冬青属冬青 *Ilex chinensis*、全缘冬青 *Ilex integra*;**榆科** 榆属大叶榉树 *Zelkova schneideriana*;**樟科** 润楠科红楠 *Machilus thunbergii*;**木犀科** 连翘属连翘 *Forsythia suspensa*;**大戟科** 秋枫属秋枫 *Bischofia javanica*
	很差	**樟科** 木姜子属山鸡椒 *Litsea cubeba*、天目木姜子 *Litsea auriculata*、毛叶木姜子 *Litsea mollis*;润楠属宜昌润楠 *Machilus ichangensis*、绒毛润楠 *Machilus velutina*、刨花楠 *Machilus pauhoi*;楠属紫楠 *Phoebe sheareri*、宜昌楠 *Phoebe zhennan*‘Yichan’、湘楠 *Phoebe hunanensis*、桢楠 *Phoebe zhennan*;新木姜子属舟山新木姜子 *Neolitsea sericea*;山胡椒属乌药 *Lindera aggregata*、山橿 *Lindera reflexa*;**杨梅科** 杨梅属杨梅 *Myrica rubra*;**梧桐科** 梭罗树属梭罗树 *Reevesia pubescens*;**藤黄科** 金丝桃属金丝桃 *Hypericum monogynum*;**松科** 松属马尾松 *Pinus massoniana*、湿地松 *Pinus elliottii*;**鼠李科** 鼠李属长叶冻绿 *Rhamnus crenata*;**忍冬科** 荚蒾属聚花荚蒾 *Viburnum glomeratum*、合轴荚蒾 *Viburnum sympodiale*、粉团 *Viburnum plicatum*、鸡树条 *Viburnum opulus*;**清风藤科** 泡花树属柔毛泡花树 *Meliosma myriantha*;**蔷薇科** 樱属日本晚樱 *Prunus serrulata*、东京樱花 *Prunus yedoensis*、寒樱 *Prunus kanzakura*;悬钩子属山莓 *Rubus corchorifolius*;**七叶树科** 七叶树属七叶树 *Aesculus chinensis*、长柄七叶树 *Aesculus assamica*;**漆树科** 盐肤木属盐肤木 *Rhus chinensis*;**木犀科** 女贞属小叶女贞 *Ligustrum quihoui*、大叶女贞 *Ligustrum compactum*;**木兰科** 木兰属紫玉兰 *Yulania liliiflora*、山玉兰 *Lirianthe delavayi*、凹叶厚朴 *Magnolia officinalis*;鹅掌楸属鹅掌楸 *Liriodendron chinensis*;含笑属灰毛含笑 *Michelia foveolata*、金叶含笑 *Michelia foveolata*‘Xin’、新含笑 *Michelia*、黄兰 *Cephalantheropsis obcordata*;玉兰属玉兰 *Yulania denudata*;**马鞭草科** 杜荆属牡荆 *Vitex negundo*;紫珠属枇杷叶紫珠 *Callicarpa kochiana*;**楝科** 香椿属香椿 *Toona sinensis*;**壳斗科** 锥属钩锥 *Castanopsis tibetana*、米槠 *Castanopsis carlesii*;石栎属石栎 *Lithocarpus glaber*;栎属麻栎 *Quercus acutissima*;**锦葵科** 木槿属海滨木槿 *Hibiscus hamabo*、木槿 *Hibiscus syriacus*;**黄杨科** 黄杨属大叶黄杨 *Buxus megistophylla*;**虎耳草科** 山梅花属山梅花 *Philadelphus incanus*;**海桐科** 海桐花属海桐 *Pittosporum tobira*;**椴树科** 椴树属椴树 *Tilia tuan*;**豆科** 红豆属花榈木 *Ormosia henryi*;**大戟科** 算盘子属算盘子 *Glochidion puberum*;油桐属千年桐 *Vernicia montana*;**唇形科** 大青属海州常山 *Clerodendrum trichotomum*;**八角枫科** 八角枫属 毛八角枫 *Alangium kurzii*;**安息香科** 白辛树属小叶白辛树 *Pterostyrax corymbosus*;秤锤树属长果秤锤树 *Sinojackia dolichocarpa*
BVOCs	很好	**紫葳科** 火烧花属火烧花 *Mayodendron igneum*;**樟科** 樟属香樟 *Cinnamomum septentrionale*;**芸香科** 柑橘属柚子 *Citrus×junos*;**榆科** 榆属榆树 *Ulmus pumila*;**银杏科** 银杏属银杏 *Ginkgo biloba*;**杨柳科** 杨属毛白杨 *Populus tomentosa*;**小檗科** 小檗属紫叶小檗 *Berberis thunbergii*;**五加科** 八角金盘属八角金盘 *Fatsia japonica*;常春藤属常春藤 *Hedera nepalensis*;**桃金娘科** 桉属尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*;**苏铁科** 苏铁属苏铁 *Cycas revoluta*;**松科** 松属油松 *Pinus tabuliformis*、马尾松 *Pinus massoniana*、矮松 *Pinus virginiana*、白皮松 *Pinus bungeana*、樟子松 *Pinus sylvestris*、华山松 *Pinus armandii*、红松 *Pinus koraiensis*、黑松 *Pinus thunbergii*;落叶松属落叶松 *Larix gmelinii*;雪松属雪松 *Cedrus deodara*;油杉属油杉 *Keteleeria fortunei*;**鼠李科** 枣属枣树 *Ziziphus jujuba*;**柿科** 柿属柿树 *Diospyros kaki*;**杉科** 落羽杉属池杉 *Taxodium distichum*;柳杉属柳杉 *Cryptomeria japonica*;杉木属杉木 *Cunninghamia lanceolata*;水杉属水杉 *Metasequoia glyptostroboides*;**山茶科** 山茶属茶树 *Camellia sinensis*;木荷属木荷 *Schima superba*;**桑科** 榕属垂叶榕 *Ficus benjamina*;**肉豆蔻科** 风吹楠属琴叶风吹楠 *Horsfieldia prainii*;**忍冬科** 忍冬属金银木 *Lonicera maackii*;荚蒾属欧洲荚蒾 *Viburnum opulus*;猬实属蝟实 *Kolkwitzia amabilis*;**蔷薇科** 棣棠花属棣棠 *Kerria japonica*;苹果属苹果 *Malus pumila*、海棠 *Malus spectabilis*;蔷薇属月季 *Rosa chinensis*、黄刺玫 *Rosa xanthina*;桃属桃树 *Prunus persica*、榆叶梅 *Prunus triloba*;李属李树 *Prunus salicina*;梨属梨树 *Pyrus calleryana*;枇杷属枇杷 *Eriobotrya japonica*;杏属杏树 *Prunus armeniaca*;**槭树科** 槭树属欧亚槭 *Acer pseudoplatanus*;栾树属栾树 *Koelreuteria paniculata*;番龙眼属绒毛番龙眼 *Pometia pinnata*;**木犀科** 丁香属紫丁香 *Syringa oblata*、白丁香 *Syringa oblata*、暴马丁香 *Syringa reticulata*、毛紫丁香 *Syringa oblata*;**木麻黄科** 木麻黄属木麻黄 *Casuarina equisetifolia*;**木兰科** 鹅掌楸属鹅掌楸 *Liriodendron chinensis*;合果木属假含笑 *Michelia lacei*;**楝科** 麻楝属毛麻楝 *Chukrasia tabularis*;**壳斗科** 栗属板栗 *Castanea mollissima*;栎属柞树 *Quercus mongolica*;**使君子科** 诃子属千果榄仁 *Terminalia myriocarpa*;**夹竹桃科** 夹竹桃属夹竹桃 *Nerium oleander*;**黄杨科** 黄杨属大叶黄杨 *Buxus megistophylla*;**虎耳草科** 山梅花属太平花 *Philadelphus pekinensis*;溲疏属小花溲疏 *Deutzia parviflora*;**胡桃科** 胡桃属核桃 *Juglans regia*、胡桃楸 *Juglans mandshurica*;**红豆杉科** 红豆杉属红豆杉 *Taxus wallichiana*;**海桑科** 八宝树属八宝树 *Duabanga grandiflora*;**番荔枝科** 番荔枝属刺果番荔枝 *Annona muricata*;**椴树科** 椴树属紫椴 *Tilia amurensis*、椴树 *Tilia tuan*;**杜英科** 杜英属杜英 *Elaeocarpus decipiens*;**豆科** 金合欢属大叶相思 *Acacia auriculiformis*;合欢属南洋楹 *Falcataria moluccana*;紫荆属紫荆 *Cercis chinensis*;**冬青科** 冬青属冬青 *Ilex chinensis*;**柽柳科** 柽柳属柽柳 *Tamarix chinensis*;**柏科** 柏木属柏木 *Cupressus funebris*、墨西哥柏 *Cupressus lusitanica*;侧柏属侧柏 *Platycladus orientalis*;圆柏属圆柏 *Sabina chinensis*
	好	**棕榈科** 丝葵属丝葵 *Washingtonia filifera*;棕榈属棕榈 *Trachycarpus fortunei*;刺葵属江边刺葵 *Phoenix roebelenii*;**樟科** 月桂属月桂 *Laurus nobilis*;**杨柳科** 杨属山杨 *Populus davidiana*;**玄参科** 泡桐属泡桐 *Paulownia fortunei*;**桃金娘科** 白千层属白千层 *Melaleuca cajuputi*;**松科** 云杉属云杉 *Picea asperata*;松属湿地松 *Pinus elliottii*;**桑科** 榕属对叶榕 *Ficus hispida*、菩提树 *Ficus religiosa*、榕树 *Ficus microcarpa*、无花果 *Ficus carica*;**蔷薇科** 木瓜属木瓜树 *Chaenomeles sinensis*;樱属樱桃 *Prunus pseudocerasus*;石楠属石楠 *Photinia×fraseri*;**槭树科** 槭属 元宝枫 *Acer truncatum*;**木犀科** 梣属白蜡树 *Fraxinus chinensis*;**杜仲科** 杜仲属杜仲 *Eucommia ulmoides*;**大戟科** 橡胶树属 橡胶树 *Hevea brasiliensis*;**柏科** 圆柏属叉子圆柏 *Juniperus sabina*
	中等	**杨柳科** 柳属垂柳 *Salix babylonica*;杨属小叶杨 *Populus simonii*;**悬铃木科** 悬铃木属悬铃木 *Platanus acerifolia*;**桑科** 构属构树 *Broussonetia papyrifera*;**槭树科** 鸦蜜莓属鸦蜜莓 *Cupaniopsis anacardioides*;**壳斗科** 栎属栓皮栎 *Quercus variabilis*;**豆科** 槐属国槐 *Sophora japonica*、龙爪槐 *Styphnolobium japonicum*;刺槐属 刺槐 *Robinia pseudoacacia*
	差	**金缕梅科** 枫香树属枫香 *Liquidambar formosana*;**木兰科** 木兰属广玉兰 *Magnolia grandiflora*;**漆树科** 盐肤木属火炬树 *Rhus typhina*;**马鞭草科** 马缨丹属马缨丹 *Lantana camara*;**壳斗科** 栎属夏栎 *Quercus robur*、橡木 *Quercus spinosa*;**珙桐科** 蓝果树属多花蓝果树 *Nyssa sylvatica*
	很差	**杨柳科** 杨属意大利杨 *Populus euramericana*、速生杨‘107’*Populus*‘107’、杂交杨‘546’*Populus*‘546’;**壳斗科** 青冈属青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca*;**桃金娘科** 桉属桉树 *Eucalyptus robusta*

2.2　树种对 2 种组合污染物的综合表现

同一树种对 2 种大气污染物的综合表现研究共 3 种组合，结果如图 1 所示：

共有 49 个树种参与了 PMs+BVOCs 的综合表现研究，其中对两者的共同污染具有正向表现（综合得分 S 值大于 0）的树种有 20 种，以侧柏、黄刺玫、枇杷和板栗的综合表现最优；另有 29 种植物在两者的共同污染下不具有正向表现（综合得分 S 值小于等于 0），其中枫香、广玉兰和意大利杨的综合表现最差。

共有 41 个树种参与了 PMs+O_3 的综合表现研究，其中 23 个树种对两者的共同污染具有正向表现，以侧柏、锦带花、天竺桂、金叶女贞的综合表现最优；另有 18 种植物对两者的共同污染不具有正向表现，其中海桐、小叶女贞、香椿和鹅掌楸的综合表现最差。

共有 33 个树种参与了 O_3+BVOCs 的综合表现研究，其中 17 个树种对两者的共同污染具有正向表现，以侧柏、银杏、圆柏、榆树和白皮松的综合表现最优；另外 16 种植物对两者的共同污染不具有正向表现，其中火炬树、枫香、湿地松和青冈栎的综合表现最差。

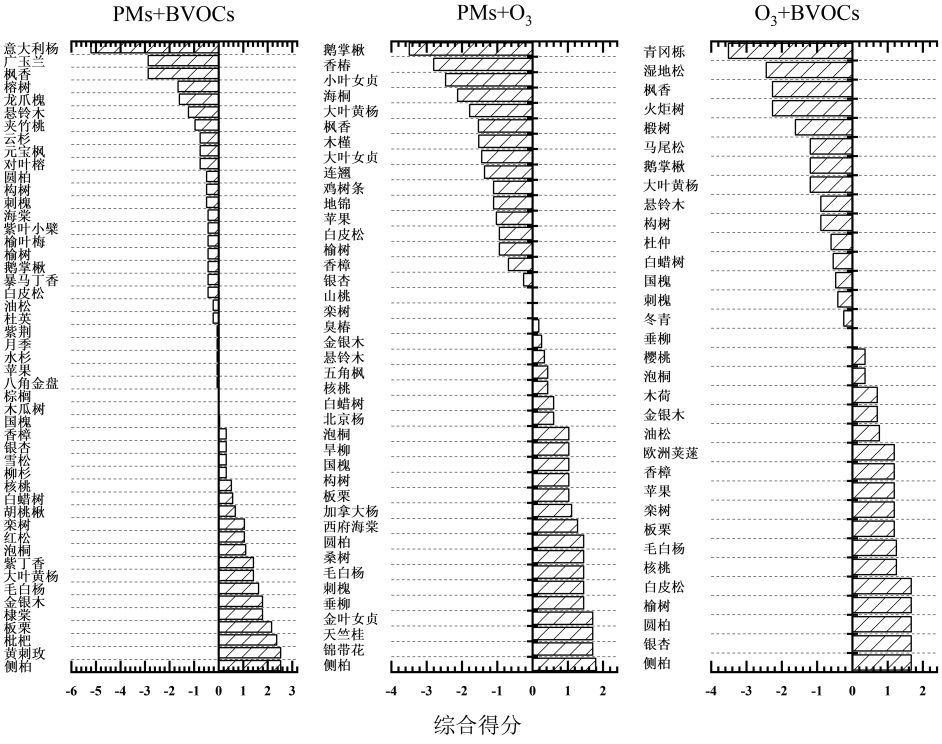


图 1　城市树种对 2 种污染物组合的综合表现排序

2.3　树种对 3 种组合污染物的综合表现

共有 19 个树种参与了 PMs+O_3+BVOCs 的综合表现研究（图 2），其中具有正向表现（S 值为正值）的树种排序依次为侧柏、圆柏、毛白杨、金银木、核桃、银杏、泡桐、香椿、白皮松、香樟和苹果，以侧柏、圆柏和毛白杨综合表现最优；不具有正向表现（S 值小于等于 0）的树种排序依次为白蜡树、国槐、刺槐、大叶黄杨、构树、悬铃木、鹅掌楸和枫香以鹅掌楸和枫香综合表现最差。

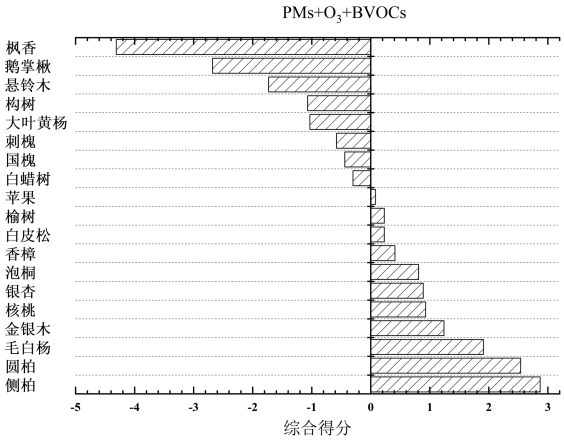


图 2　城市树种对 3 种污染物组合的综合表现排序

3 讨论

为响应建设“森林城市”和构建“宜居城市”的号召，急需筛选出一批应对新型大气复合污染表现优秀的城市树种，更好地发挥城市森林在净化城市大气环境等方面的生态效益和服务功能。

对于 PMs 而言，本研究结果表明，柏科、豆科、木犀科、蔷薇科、杨柳科和忍冬科植物在滞尘能力上表现优秀。结合前人的研究结果判断，可能的原因有：1）柏科、豆科和杨柳科密集的叶片数量和特殊的叶片形态有助于叶片滞尘。赵松婷等[21]研究表明植物叶片滞留大气颗粒物能力由高到低的微形态结构依次为蜡质结构、绒毛、沟槽、条状突起。这些微形态的结构越密集、深浅差越大，越有利于滞留 PMs。此外，研究表明树皮的褶皱和凹陷等生理特性也具有一定的滞尘作用，其去除悬浮颗粒物的机制是先将其沉降，吸附到树皮表面，再通过气象因素恢复树皮表面吸附颗粒物的能力[22]。但是，树皮表面吸附空气颗粒物的相关研究还比较少。2）树高和枝下高（林木自地面至第一个树枝的树干高度）对单株滞尘效果也有一定的影响。一般灌木相较于乔木更贴近地面，对机动车尾气和路面的扬尘具有更好的吸附作用，例如本研究中对 PMs 表现好的木樨科灌木占比 75%，蔷薇科占比 62.5%，忍冬科占比 100%。同样这一点，在前人研究中也有体现，例如李艳梅等[23]的研究数据表明，相同实验条件下，2~3 m 处的叶片滞尘量明显大于 4~6 m 处的叶片滞尘量。因此，在相同滞尘能力下，应优先选择树高、枝下高更接近 2~3 m 的树种。此外，在选择滞尘树种时还需要考虑到树形、枝叶密度等整体问题，但是研究单位面积上的滞尘量大的并不一定单株整体的滞尘量就大，例如黄慧娟[24]的研究中悬铃木叶片的平均滞尘量为 7.03 $g \cdot m^{-2}$/周，小于国槐的 7.97 $g \cdot m^{-2}$/周，但是悬铃木单株平均滞尘量达到 1016.97 g/周，却大于国槐的 664.79 g/周。同时，考虑到冬季落叶的生理特征，常绿树种比落叶树种在滞尘方面具有更优的生态效益，并且相比阔叶树，针叶树更小的叶子和更复杂的枝茎结构，能更有效地去除大气颗粒物[25]。

对于 O_3 而言，榆树、侧柏、垂柳、刺槐、加杨、毛白杨、桑树、圆柏和白皮松等树种抗性表现好，可能原因有：1）该类树种具有较大的气孔密度、较小的气孔大小和开度。O_3 侵害树木的主要途径是通过损伤气孔和通过气孔进入叶片内部，对内部的组织结构、叶绿素含量及组成成分等进行破坏。较大的气孔密度可以保证在低 O_3 浓度和短时间暴露的条件下，单位叶片面积有足够的气孔供植物进行气体交换；而较小的气孔大小和开度可以减少进入树木叶片内部的 O_3 量，从而减少 O_3 对植物叶片内部组织结构及叶绿素的破坏。例如陈波[26]在其研究中对比了银杏和白皮松的气孔密度、大小和开度，发现白皮松的气孔密度大于银杏，且白皮松的气孔大小和气孔开度均比银杏要小，导致白皮松的 O_3 吸收率明显小于银杏，且光合生理特性、气孔特征降低率也小于银杏，说明白皮松抗 O_3 污染能力强于银杏。2）该类树种具有较大的比叶重（leaf mass per unit area）和较高的基于叶片面积的抗氧化剂水平（area-based antioxidant levels）。大部分树种在受到 O_3 胁迫时，叶片均会出现褪绿现象；同时也存在一些树种在受到 O_3 胁迫时，虽然叶片外观没有表现出受害症状，但对其进行解剖后，发现其内部栅栏组织和海绵组织结构已经受到破坏[27]。Li 等[17]通过观察 29 种北方典型绿化树种，首次发现 O_3 受害症状时的累积 O_3 浓度，同时也发现树种 O_3 敏感性的决定因素是比叶重和基于叶片面积的抗氧化能力。因此可以推断，不同树种的 O_3 敏感性与其叶片内部组织结构及抗氧化水平有密切的关系。

BVOCs 是植物在抵御外界环境热胁迫、氧化胁迫[28]和生物侵害[29]时释放的次生代谢产物，起到在植物体内外传递生物信息的作用，用于警示其他植物、抵御环境胁迫、预防病虫害等[30]。BVOCs 主要是由异戊二烯（C_5H_8，isoprene）、单萜烯（$C_{10}H_{16}$，monoterpenes）、倍半萜烯（$C_{15}H_{24}$，sesquiterpenes）、醇、醛和酯类等物质组成[31]，且几乎所有陆地生态系统中的植物都会释放 BVOCs，化合物种类也是成千上万[1]。据估算，中国 BVOCs 的总排放量中 C_5H_8 占 58%，是最主

要组成部分，$C_{10}H_{16}$烯占 17%，其他 VOCs 占 25%[32]。本研究发现，以桦树、红松、落叶松等为代表的 82 个树种具有较低的 BVOCs 释放速率。影响树种间 BVOCs 排放差异的因素主要包括外部及内部因子，其中导致树种 BVOCs 排放差异的主因多为自身基因型、功能类型和自身生理活性的差异。因此，树种具有较低的 BVOCs 释放速率的原因可能有：1）关键酶的基因控制与转录因子引入。研究表明，关键酶基因通过影响代谢通量，可以在很大程度上控制植物 BVOCs 的代谢释放，而相关转录因子的引入则在很大程度上决定了关键酶基因的时空表达和诱导表达的特异性和效率[33]。因此，可以推断上述 BVOCs 释放速率较低的树种受关键酶基因控制和相关转录因子影响，相较其他树种具有低 BVOCs 释放量的优势。2）代谢速率和蒸腾速率（T_r）小。落叶树种总 BVOCs 和C_5H_8的排放速率与气孔导度（g_s）和T_r均呈显著正相关（$P<0.05$）[34]；多数常绿树种如松树、柏树、云杉等主要释放的是$C_{10}H_{16}$，其排放速率也与T_r呈极显著正相关（$r=0.49$，$P<0.01$）[35]；同时 BVOCs 存在明显季节性变化，夏季高（占全年的 51.5%）、冬季低（占全年的 3.40%）的特点与生理代谢规律一致[36]。3）树种花果期 BVOCs 释放特征。研究表明，植物所处的生理状态和发育阶段对 BVOCs 的释放具有十分重要的影响[37]。一般情况下，当植物处于芽期和花期时，其 BVOCs 的释放速率会明显高于其叶生长期。因此，BVOCs 平均释放速率低的树种很有可能具有花果期 BVOCs 释放速率较低的特点。此外，花果形态特性和花期长短对树种的 BVOCs 释放速率和释放总量也有影响。以 BVOCs 释放速率低的枣树为例，相较广玉兰等花形态较大的树种，枣树花小且花期短暂，枣树花期的 BVOCs 释放速率较低且释放的 BVOCs 总量较小。因此，在将景观效果视为第一需求（选择花形态美观的树种）的同时，也不能忽视花期所带来的生态效应。

就复合污染而言，目前大部分树种筛选研究仍停留在对SO_2、NO_x、Cl_2和氟化物等传统大气污染物的复合污染研究，关于对O_3、PMs 和 BVOCs 等新型大气污染物的复合污染研究尚少。同时，大气复合污染中的不同污染物成分间存在复杂的拮抗和协同作用。例如，O_3和 SOA 的复合污染中，O_3和 SOA 的浓度之间存在显著正相关关系，在O_3浓度上升抑制叶片光合作用的同时，SOA 浓度的上升会对植物光合作用产生促进效果，从而一定程度上补偿了O_3浓度上升对叶片光合作用的抑制效应[38]。据研究，VOCs 中甲苯、C_5H_8、乙苯和间/对二甲苯是对O_3与 SOA 生成贡献大的物种，VOCs 伴随着高温低湿和强烈辐射等一系列环境因素会导致高O_3浓度事件发生，严重威胁人体和城市绿化树种[39]。总的来说，面对目前新型大气污染物的复合污染，各地城市森林建设应在过去“适地适树”的基础上，综合考虑城市树种景观布局和大气环境中的污染物组分及严重程度，积极应对新型大气复合污染，选择适宜的树种进行绿化布局。

4　结论

本研究初步认定综合表现较好的最主要树种为侧柏、圆柏、毛白杨、金银木、核桃、银杏、泡桐。各地可以参考气象部门的大气污染物浓度数据，综合考虑城市景观布局，立足适地适树原则，选择具有较好综合表现的树种进行绿化栽培，以促进净化和减少城市中的大气污染物含量，提高城市居住适宜度，助力森林城市建设。

参考文献

[1] LORETO F, FARES S. Biogenic volatile organic compounds and their impacts on biosphere-atmosphere interactions[J]. Developments in Environmental Science, 2013, 13: 57-75.

[2] LI K, JACOB D J, LIAO H, et al. Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(2): 422-427.

[3] LI P, DE MARCO A, FENG Z Z, et al. Nationwide ground-level ozone measurements in China suggest serious risks to forests[J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 803-813.

[4] LI P, FENG Z Z, CATALAYUD V, et al. A meta-analysis on growth, physiological, and biochemical responses of woody species to ground-level ozone highlights the role of plant functional types[J]. Plant, Cell & Environment, 2017, 40(10): 2369-2380.

[5] LORETO F, SCHNITZLER J P. Abiotic stresses and induced BVOCs[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(3): 154-166.

[6] THEIS N, LERDAU M. The evolution of function in plant secondary metabolites[J]. International Journal of Plant Sciences, 2003, 164

(S3):93-102.
[7]CLAEYS M,GRAHAM B,VAS G,et al.Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene[J].Science,2004,303(5661):1173-1176.
[8]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.
[9]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.
[10]鲁敏,王仁卿,齐鑫山.绿化树种对大气氯污染的反应[J].山东大学学报(理学版),2004,39(2):98-101.
[11]徐丽珊.大气氟化物对植物影响的研究进展[J].浙江师范大学学报(自然科学版),2004,27(1):70-75.
[12]CHURKINA G,GROTE R,BUTLER T M,et al.Natural selection? Picking the right trees for urban greening[J].Environmental Science & Policy,2015,47:12-17.
[13]徐晓丹,马志影,张杰,等.植物叶表毛状体对空气PM净沉降的影响[J].中国城市林业,2021,19(6):35-40.
[14]李晓璐,叶锦东,章剑,等.乔木滞留大气颗粒物能力及其与叶表面微结构关系[J].中国城市林业,2022,20(3):22-28,120.
[15]GAO G J,SUN F B,THAO N T T,et al.Different concentrations of TSP,PM_{10},$PM_{2.5}$,and PM_1 of several urban forest types in different seasons[J].Polish Journal of Environmental Studies,2015,24(6):2387-2395.
[16]FENG Z Z,SUN J S,WAN W X,et al.Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing,China[J].Environmental Pollution,2014,193:296-301.
[17]LI P,CALATAYUD V,GAO F,et al.Differences in ozone sensitivity among woody species are related to leaf morphology and antioxidant levels[J].Tree Physiology,2016,36(9):1105-1116.
[18]KRUPA S,MCGRATH M T,ANDERSEN C P,et al.Ambient ozone and plant health[J].Plant Disease,2001,85(1):4-12.
[19]李品,卫妍妍,冯兆忠.抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选[J].环境科学,2020,41(10):4495-4503.
[20]ZENG Y Y,CAO Y F,QIAO X,et al.Air pollution reduction in China:recent success but great challenge for the future[J].Science of the Total Environment,2019,663:329-337.
[21]赵松婷,李新宇,李延明.园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J].生态环境学报,2014,23(2):271-276.
[22]CATINON M,AYRAULT S,BOUDOUMA O,et al.Atmospheric element deposit on tree barks:the opposite effects of rain and transpiration[J].Ecological Indicators,2012,14(1):170-177.
[23]李艳梅,陈奇伯,李艳芹,等.昆明10个绿化树种对不同污染区的滞尘及吸净效应[J].西南林业大学学报,2016,36(3):105-110.
[24]黄慧娟.保定常见绿化植物滞尘效应及尘污染对其光合特征的影响[D].保定:河北农业大学,2008.
[25]王蕾,哈斯,刘连友,等.北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征[J].应用生态学报,2007,18(3):487-492.
[26]陈波.臭氧胁迫对4种树木生长状况和生理特性的影响[D].北京:北京林业大学,2018.
[27]吴丹.地面臭氧污染对树木叶片组织结构的影响[D].北京:北京林业大学,2016.
[28]王永峰,李庆军.陆地生态系统植物挥发性有机化合物的排放及其生态学功能研究进展[J].植物生态学报,2005,29(3):387-396.
[29]AMEYE M,ALLMANN S,VERWAEREN J,et al.Green leaf volatile production by plants:a meta-analysis[J].New Phytologist,2018,220(3):666-683.
[30]HOE Y C,GIBERNAU M,MAIA A C D,et al.Flowering mechanisms,pollination strategies and floral scent analyses of syntopically co-flowering Homalomena spp.(Araceae) on Borneo[J].Plant Biology,2016,18(4):563-576.
[31]李双江,袁相洋,李琦,等.12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征[J].环境科学,2019,40(5):2078-2085.
[32]池彦琪,谢绍东.基于蓄积量和产量的中国天然源VOC排放清单及时空分布[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(3):475-482.
[33]张甜甜,郑炳松,袁虎威,等.植物挥发性有机物合成与代谢途径及其释放与感知调控机制的研究进展[J].天然产物研究与开发,2023,35(6):1068-1080.
[34]许燕.典型城市绿化树种BVOCs排放特征及其区域总量评估[D].南京:南京信息工程大学,2021.
[35]LORETO F,FINESCHI S.Reconciling functions and evolution of isoprene emission in higher plants[J].New Phytologist,2015,206(2):578-582.
[36]高超,张学磊,修艾军,等.中国生物源挥发性有机物(BVOCs)时空排放特征研究[J].环境科学学报,2019,39(12):4140-4151.
[37]郭霞.云南省典型乔木植物挥发性有机物释放规律研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.
[38]李景,王欣,王振华,等.臭氧和气溶胶复合污染对杨树叶片光合作用的影响[J].植物生态学报,2020,44(8):854-863.
[39]邹宇,邓雪娇,李菲,等.广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O_3与SOA的生成潜势[J].环境科学,2017,38(6):2246-2255.