

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240307

广州城市公园常见园林植物 BVOCs 组分和释放节律

龚玲玲^{1,2} 高丙涛¹ 郝泽周¹ 李乐¹ 王淳¹ 李嘉睿¹ 裴男才¹

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; 2. 南京林业大学, 江苏南京 210037)

摘要:【目的】研究华南地区城市公园中常见园林植物挥发性有机物质(BVOCs)组分差异及时间动态规律, 为城市公园植物选择和搭配提供参考。【方法】以广州天河公园 9 种园林植物为研究对象, 通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法(HS-SPME-GC-MS)对样品在不同物候期下的 BVOCs 成分进行鉴定, 并利用峰面积归一化法确定各组分的相对含量。【结果】不同植物释放的 BVOCs 组成及相对含量存在一定差异, 植物花朵释放的 BVOCs 成分在不同物候期下较植物叶片差异明显。9 种园林植物共检测到萜烯类、醇类、醛类、酯类等 11 类挥发物。不同植物释放的 BVOCs 组成类别及释放特性同样存在差异, 但优势化合物类别基本稳定。其中白兰以醇类、酯类、萜烯类为主; 四季桂、女贞、阴香花以醇类、醛类、酯类和萜烯类为主; 杧果、羊蹄甲、樟、枫香、落羽杉以萜烯类为主; 柠檬桉以醇类、酯类和萜烯类为主; 阴香叶片以醇类、醛类、萜烯类为主。植物释放有益 BVOCs 相对含量与物候变化有一定关联。白兰、杧果、阴香的花在初花期释放的有益 BVOCs 相对含量最高(84.7%、97.6%、70.1%); 四季桂、女贞、羊蹄甲、樟的花则在末花期释放的有益 BVOCs 相对含量最高(78.8%、79.1%、94.1%)。枫香和柠檬桉的叶片释放的有益 BVOCs 在秋冬季相对含量达到峰值(98.2%、67.0%), 而落羽杉和阴香的叶片则在夏季达到峰值(99.7%、88.1%)。【结论】BVOCs 成分和相对含量与植物种类和物候存在相关性, 在营造城市公园时应考虑植物配置, 以达到“四时花香”的嗅觉景观, 助推实现人与自然和谐共生的健康与福祉等可持续发展目标。

关键词: 嗅觉景观; 城市绿地; 植物挥发物; 生态功能

中图分类号: S68 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2025)02-0095-10

引文格式: 龚玲玲, 高丙涛, 郝泽周, 等. 广州城市公园常见园林植物 BVOCs 组分和释放节律 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(2): 95-104. Gong Lingling, Gao Bingtao, Hao Zezhou, et al. Composition and release rhythm of BVOCs in common ornamental plants in Guangzhou urban parks of southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(2): 95-104.

Composition and release rhythm of BVOCs in common ornamental plants in Guangzhou urban parks of southern China

Gong Lingling^{1,2} Gao Bingtao¹ Hao Zezhou¹ Li Le¹ Wang Chun¹ Li Jiarui¹ Pei Nancai¹

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;

2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] This paper investigates the component differences and temporal dynamics of volatile organic matter (BVOCs) released by common ornamental plants in urban parks of southern China, so as to provide references for plant selection and collocation in urban regions. [Method] Nine ornamental plant species from Tianhe urban park in Guangzhou City were identified by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and the relative contents of each component were determined by peak area normalization method. [Result] The composition and

收稿日期: 2024-09-13 修回日期: 2024-10-28

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2024A1515011484), 中国林科院基本科研业务费专项(CAFYBB2023MB017, CAFYBB2021SY003-1)。

第一作者: 龚玲玲。主要研究方向: 城市林业与人居环境。Email: quan_39894@163.com 地址: 510520 广东省广州市天河区广汕一路 682 号。

责任作者: 高丙涛, 助理研究员。主要研究方向: 城市林业。Email: gaobingtao@126.com 地址: 同上。裴男才, 研究员。主要研究方向: 森林生态、城市林业与人居环境。Email: nancai.pei@gmail.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

relative content of BVOCs released by different ornamental plants were different to some extent, and the composition of BVOCs released by plant flowers was significantly different from that of plant leaves at different phenological stages. A total of 11 volatiles (e.g. terpenes, alcohols, aldehydes and esters) were detected in nine ornamental plant species. The composition and release characteristics of BVOCs released by different plants varied, but the types of dominant compounds generally remained stable. The components of BVOCs in different plant species were different and the release characteristics were different under varied phenological periods, but the dominant compounds were relatively stable. *Michelia × alba* was mainly composed of alcohols, esters and terpenes. *Osmanthus fragrans*, *Ligustrum lucidum* and *Cinnamomum burmanni* flowers were mainly composed of alcohols, aldehydes, esters and terpenes. *Mangifera indica*, *Bauhinia purpurea*, *Cinnamomum camphora*, *Liquidambar formosana* and *Taxodium distichum* were mainly composed of terpenes. *Eucalyptus citriodora* leaves were mainly composed of alcohols, esters and terpenes. Leaves of *Cinnamomum burmanni* were mainly composed of alcohols, aldehydes and terpenes. The relative content of beneficial BVOCs released by plants was related to phenological changes. The contents of beneficial BVOCs in *Michelia × alba*, *Mangifera indica* and *Cinnamomum burmanni* were the highest (84.7%, 97.6%, 70.1%) in the early opening stage. In addition, the contents of beneficial BVOCs were the highest (78.8%, 79.1%, 94.1%) in the last opening stage. The relative content of beneficial BVOCs released by the leaves of *Liquidambar formosana* and *Eucalyptus citriodora* reached the peak value (98.2%, 67.0%) in autumn and winter, while the content of beneficial BVOCs released by *Liquidambar formosana* and *Cinnamomum burmanni* reached the peak value (99.7%, 88.1%) in summer. [Conclusion] The composition and relative content of BVOCs are correlated with plant species and phenology. Plant configuration should be considered in the construction of urban parks to achieve the smellscape of diverse seasons, and help realize the sustainable development goal of good health and well-being of harmonious coexistence between human beings and the nature.

Key words: smellscape; urban green space; plant volatiles; ecological function

“良好健康与福祉 (good health and well-being)”是联合国提出的 17 个可持续发展目标之一。在快速城市化和后疫情时代,人们对自然互动场所的需求显著增加^[1]。城市绿化和减排降污在提升空气质量、改善城市人居环境与公众健康方面发挥着至关重要的作用^[2-3]。科学、有序地发展城市林业是解决城市化快速进展带来的问题的重要措施之一^[4]。作为城市森林生态与人居环境研究的重要组成部分,城市公园为大部分居民和社区提供着至关重要的生态服务保障,一直是最重要的城市自然互动场所之一,具有提高人类健康和福祉的作用^[5-7]。以往的城市公园景观配置通常是以视觉体验为设计导向,即以视觉感知为主。近年来,越来越多人认为景观感知元素不应该由视觉体验单一组成,进而增加对其他维度景观的关注^[8-9]。与视觉印象一样,气味也是人们对环境的重要感知^[10]。研究^[11]显示,相比其他感官体验,时间对气味记忆的淡化作用更小,通过气味获取的记忆和情感体验通常更为持久和深刻。1985 年加拿大地理学家 Porteous^[12]提出“嗅觉景观(smellscape)”的概念,与视觉景观侧重体验者的视觉认知和思考不同,嗅觉景观则侧重通过气味来激发体验者的情绪和情感体验^[10],强调气味与空间、地点的关联性。

自嗅觉景观的提出到疗愈花园、感官花园的应用,嗅觉景观开始发展并逐渐进入城市规划师的实践。

植物挥发性有机物 (biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 是通过植物体内的次生代谢合成的沸点低、挥发性强的小分子化合物,具有更高的反应活性,约占全球挥发性有机物总量的 90%^[13-14]。以萜烯类化合物为主的 BVOCs 形成的植物嗅觉景观,通过刺激人的嗅觉感受而产生对自然界的反馈^[15-16],具有调节环境小气候、改善空气质量、减轻民众身心压力等正面生态功效^[17-20]。国内外学者对 BVOCs 与人体健康的关系展开的相关研究表明,大部分 BVOCs 对人的生理和心理有一定的改善作用^[21-22]。通过闻香实验发现,嗅闻康复景观中的九里香、假连翘等释放的 BVOCs 在一定程度上可以缓解人体疲劳、提高注意力等^[23]。当然,有些植物释放的有毒物质也会对人体健康产生负面影响,比如嗅闻珍珠梅后人体情绪倾向焦虑紧张^[24]。

基于不同 BVOCs 对人体健康影响的差异化,探索不同植物 BVOCs 释放特性与动态变化,进而更有效地利用 BVOCs。本研究通过顶空固相微萃取提取广州城市公园常见的 9 种园林植物释放的 BVOCs,并使用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 测量不同

物候期下的 BVOCs 成分及其相对含量,定量分析 BVOCs 成分及相对含量在时间上的差异,为城市嗅觉景观的植物选择与配置提供理论依据,进而推动实现基于常见城市景观植物良好健康与福祉的可持续发展目标。

1 材料与方法

1.1 研究地点与样本采集

广州市天河公园(113°21'~113°22'E, 23°07'~23°08'N)位于亚热带季风气候区,年均温度 21.9℃,其中公园总面积为 70.7 hm²。基于选取区域内常见、气味明显、数量丰富以及空间分布均匀的原则,遴选该公园内 9 种园林植物(白兰 *Michelia × alba*、四季桂 *Osmanthus fragrans*、女贞 *Ligustrum lucidum*、芒果 *Mangifera indica*、羊蹄甲 *Bauhinia purpurea*、樟 *Cinnamomum camphora*、阴香 *Cinnamomum burmannii*、柠檬桉 *Eucalyptus citriodora* 和落羽杉 *Taxodium distichum*)为研究对象,测定不同植物不同物候期下释放 BVOCs 的特性(表 1)。植物的芳香物质释放来源不同,对于选取花朵为芳香来源的植物,根据其开放程度分为 3 个花期。(1)初花期:花蕾饱满,只有 1~2 层花瓣展开;(2)盛花期:花瓣全部展开,花蕊显露;(3)末花期:花瓣开始萎蔫,花瓣一触即落。

1.2 试验方法

1.2.1 植物挥发物样品萃取

根据预试验确定的测定时期,在对应的时间内选择晴朗无风的一天进行采样(08:00 左右采集大花蕾;10:00 左右采集成熟叶片)。选择生长环境相对

一致且生长状态良好的植株作为采样标准株,采集健康无病害且生理状态良好的花朵或叶片作为测试样品。分别称取 2.00 g 样品置于 20 mL 固相微萃取瓶中,加入内标 1 μg(2,4,6-三甲基吡啶, 20 μg/mL 50 μL),密封顶空瓶。40℃ 水浴中,平衡 10 min 后,插入萃取针(57 348-U supelco)萃取 30 min。萃取针使用前,在气质进样口活化 20 min(250℃)。萃取完成后将萃取针插入气相色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A-5975C GC-M; 气相色谱柱:HP-INNOWax)。

1.2.2 GC-MS 工作条件

气相色谱条件:进样口温度 250℃,气质接口温度 250℃,载气流速 1.2 mL/min;升温程序:初始 40℃,保持 5 min,以 5℃/min 升温到 240℃ 保持 0 min;10℃/min 升温到 260℃ 保持 5 min。

质谱条件电子轰击源(EI):电子能量 70 eV,离子源温度 250℃,四级杆温度 150℃,扫描质量范围 29~450 m/z。通过气相色谱-质谱联用分析得到植物挥发物成分质谱数据,利用 Nist17 谱库检索以及人工解谱分析挥发物质的化学成分,并利用峰面积归一化法确定各组分相对含量。

1.3 BVOCs 分类

BVOCs 具有一定的生物学功能^[25-26],通过查阅文献对 BVOCs 中对人体有益的组分进行总结归类^[27],按其化学结构可以分为醇类、酮类、酯类、酚类和萜烯类,这类 BVOCs 具有提高免疫机能,促进身心健康等功效。本文所列主要化合物类别是指两个或以上的化合物类别累计达 80% 以上,或对单个化合物类别达 70% 以上。

表 1 研究区域内主要园林植物

Tab. 1 Main ornamental plants in the research area

物种	科	芳香来源	花期	测定时期
白兰 <i>Michelia × alba</i>	木兰科 Magnoliaceae	花	夏	初花期、盛花期、末花期
四季桂 <i>Osmanthus fragrans</i>	木犀科 Oleaceae	花	春、夏、秋冬	初花期、盛花期、末花期
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	木犀科 Oleaceae	花	春、夏	初花期、盛花期、末花期
芒果 <i>Mangifera indica</i>	漆树科 Anacardiaceae	花	秋冬、春	初花期、盛花期、末花期
羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i>	豆科 Fabaceae	花	春、夏	初花期、盛花期、末花期
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科 Lauraceae	花	春	初花期、盛花期、末花期
阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>	樟科 Lauraceae	花	秋冬	初花期、盛花期、末花期
阴香 <i>Cinnamomum burmannii</i>	樟科 Lauraceae	叶		春季、夏季、秋冬季
柠檬桉 <i>Eucalyptus citriodora</i>	桃金娘科 Myrtaceae	叶		春季、夏季、秋冬季
落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	柏科 Cupressaceae	叶		春季、夏季、秋冬季

注:依据国家气候季节划分标准(GB/T 42074—2022),近40年气候统计显示广州的秋冬季节界限模糊,入冬时间主要集中在1月至2月,秋冬季节在气候特征上有所重叠。

2 结果与分析

2.1 9种园林植物释放 BVOCs 成分分析

不同树种不同花期的主要挥发物成分和相对含量见表2。白兰花挥发物以芳樟醇和2-甲基丁酸甲酯为主,不同物候期下相对含量差异较小,浮动在5%内。四季桂挥发物成分以乙醇、青叶醛、对甲氧基苯乙醇为主,从初花期到末花期乙醇、青叶醛含量逐渐减少,对甲氧基苯乙醇含量逐渐增加。女贞花挥发物以苯乙醇、苯甲醇为主,各成分含量在不同花期差异明显。杧果花主要挥发物为异松油烯、对-甲位-二甲基苏合香烯、3-萜烯,各成分释放含量在不同花期较稳定。不同花期下羊蹄甲花挥发物成分差异较大,初花期和末花期主要成分为瑟琳-3,7-二烯、去氢白菖烯、 γ -榄香烯,盛花期主要成分为月桂烯和罗勒烯。樟的花主要挥发物为橙花叔醇、反式石竹烯、 α -瑟林烯、罗勒烯,不同花期含量变化较小,芳香气味稳定。阴香的花气味类型与樟的花较相似,主要成分为氧化芳樟醇、 α -律草烯、苯甲醛,挥发物成分在不同花期有明显变化。研究显示园林植物花朵释放的BVOCs成分和动态变化差异较明显,白兰、桂花、杧果、樟在不同花期释放的BVOCs成分和含量较稳定,而女贞、羊蹄甲、阴香则存在明显的动态变化。

不同树种间叶片的挥发物成分差异较小,但其相对含量存在较明显的季节差异(表3)。枫香和落羽杉的叶片主要挥发物为 α -蒎烯、柠檬烯、反式石竹烯,阴香的叶片挥发物以龙胆、乙酸龙脑酯为主,3种植物的叶片挥发物相对含量存在明显的季节性波动。柠檬桉叶片挥发成分以香茅醛、反式石竹烯、乙酸香茅酯为主,不同季节间的挥发物相对含量变化较小,呈现较稳定的芳香气味。枫香、落羽杉、柠檬桉、阴香作为我国南方常见的园林绿化树种,叶片挥发物具有独特的香味,其香气成分与植物花朵的挥发性物质有显著差异,在一定程度上可以增加园林的视觉与嗅觉美感。

2.2 不同园林植物释放 BVOCs 类别差异

不同植物释放的BVOCs成分存在一定差异,同时被测的9种园林植物在不同物候期释放的BVOCs所含类别和相对含量上也存在差异。通过GC-MS共检测出11类BVOCs,分别为醇类、醛类、酮类、酯类、酸类、酚类、醚类、萜烯类、烷烃、芳香烃、酰胺;其中萜烯类化合物相对含量最高,酰胺类仅在春季的落羽杉中检测到。由于植物自身生理状态及环境的波动,不同BVOCs类别相对含量具有明显的动态变化,但在不同物候期下优势化合物类别

基本不变。

不同花期同种植物花朵的主要挥发物化合物类别较稳定,但不同树种间花释放的主要BVOCs类别及相对含量差异明显(图1)。白兰花的挥发成分以醇类、酯类和萜烯类为主,醇类化合物含量逐渐增加,在末花期达到峰值(37.29%),酯类和萜烯类变化趋势相同,在初花期达到峰值(36.75%、16.38%)。四季桂、女贞、阴香的花以醇类、醛类、酯类和萜烯类化合物为主。四季桂和女贞的醇类挥发物含量较高,不同花期含量在40%左右。阴香花挥发的醇类及萜烯类含量在盛花期达到低谷(20.42%、17.48%),相应的醛类在盛花期达到峰值(32.97%)。杧果、羊蹄甲、樟释放的萜烯类挥发物含量远高于其他树种,不同花期含量均在60%以上。羊蹄甲的酯类释放量在盛花期(17.72%)相较于初花期(0.87%)和末花期(0.89%)显著增加。樟的酯类化合物在不同花期含量相对稳定,均在20%左右。白兰的酯类含量较其他物种含量较高且变动不大,在不同物候期含量在30%左右。

在不同季节,同种植物叶片的优势挥发物化合物类别保持不变,不同树种间叶片释放的主要BVOCs类别及相对含量相较于植物花朵成分类别差异较小(图2)。枫香和落羽杉叶片挥发物以萜烯类为主,不同季节含量在75%以上,均在夏季达到峰值(90.71%、95.05%)。柠檬桉叶片挥发物以醇类、醛类、萜烯类为主,醇类和萜烯类在秋冬季达到峰值(31.35%、21.94%),醛类化合物在夏季达到峰值(52.88%),同时不同季节其醛类化合物相对含量均高于被测的另外3种植物,有微量刺激性气味。阴香的叶片挥发物以醇类、酯类、萜烯类为主,醇类和醛类化合物在春季达到峰值(28.71%、19.56%),萜烯类化合物在夏季达到峰值(51.76%)。

3 讨论

与自然互动可为人类带来心理健康、认知、生理等方面的一系列益处^[28]。自然气味对人体健康和记忆的影响有着不同于其他感官的有益关联^[29]。公园绿地作为城市绿地系统的重要组成部分,是研究城市绿地环境属性的最佳样本之一。近年来,随着人们对景观多元化的追求,越来越多的学者开始关注园林植物BVOCs成分及其动态变化,但多以单种或少数几种植物进行研究,缺乏对同一公园内多种植物的综合分析。陈伟玉等^[30]和姚祖凤等^[31]分别对广东白兰花挥发油和女贞挥发油化学组成成分进行研究,相关结果得到本文支持。周帅等^[32]对樟的花挥发物成分分析显示以芳樟醇(37.0%)、环氧芳樟醇

表2 区域内7种园林植物不同花期花朵的挥发物成分及相对含量

Tab. 2 Composition and relative content of flower volatiles in seven ornamental plants at different blooming periods

物种	化合物名称	相对含量/%		
		初花期	盛花期	末花期
白兰 <i>Michelia × alba</i>	芳樟醇	22.513 6	24.313 9	27.512 2
	2-甲基丁酸甲酯	21.017 2	17.814 3	17.474 6
	2-甲基丁酸	6.806 7	3.171 8	2.624 2
	苯乙醇	5.266 0	6.667 8	5.569 0
	2-甲基丁酸乙酯	4.474 6	—	—
	丙酸苯乙酯	—	4.869 7	—
	异丁香酚甲醚	—	—	4.085 2
四季桂 <i>Osmanthus fragrans</i>	乙醇	25.539 0	24.906 9	21.657 1
	反-2-己烯醛	16.277 1	7.257 8	5.767 2
	对甲氧基苯乙醇	6.111 3	6.541 4	12.902 9
	壬醛	4.290 4	—	—
	丙位癸内酯	2.798 0	—	—
	乙醛	—	13.373 5	6.727 0
	壬醇	—	—	—
	壬醛	—	4.332 1	—
	α -法呢烯	—	—	9.954 8
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	己醇	8.897 1	7.988 3	—
	反-2-己烯醛/青叶醛	8.636 7	—	—
	异松油烯	6.879 8	—	—
	叶醇	5.292 1	—	—
	苯甲醇	5.272 6	9.074 8	7.397 8
	反-2-己烯醇	—	—	6.322 2
	苯乙醇	—	16.404 6	22.116 9
	水杨酸甲酯	—	—	4.539 5
	罗勒烯	—	7.070 4	—
	芳樟醇	—	6.859 0	—
杧果 <i>Mangifera indica</i>	苯乙酸甲酯	—	—	7.305 1
	异松油烯	53.286 4	54.527 3	46.443 5
	4-异丙烯基甲苯	6.994 9	7.250 0	9.036 9
	丁位-3-萜烯	7.109 7	7.180 3	8.063 2
	α -松油烯	4.990 4	4.092 1	—
	乙位石竹烯	3.219 5	—	—
	α -蒎烯	—	—	3.468 9
	柠檬烯	—	2.955 8	—
	苯乙醇	—	—	3.832 4
羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i>	瑟琳-3,7-二烯	17.699 0	—	15.037 1
	去氢白菖烯	10.273 9	—	14.417 6
	γ -榄香烯	14.720 4	4.563 9	16.773 1
	巴伦西亚桔烯	5.697 0	—	—
	杜松二烯	5.028 3	—	4.204 7
	月桂烯	—	12.171 9	—
	β -榄香烯	—	—	5.653 2
	罗勒烯	—	28.302 8	—
	橙花醇	—	5.054 5	—
	桉叶-3,7(11)-双烯	—	4.472 4	—
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	橙花叔醇	7.356 9	6.712 9	9.664 5
	乙位石竹烯	10.797 8	4.898 2	4.438 1
	α -瑟林烯	5.791 5	7.008 4	5.357 6
	罗勒烯	4.995 6	4.930 7	4.451 1
	α -律草烯	4.197 5	—	—
	α -法呢烯	5.672 9	—	7.915 1
阴香 <i>Cinnamomum burmanni</i>	α -律草烯	10.391 9	—	8.232 1
	氧化芳樟醇	8.346 5	7.108 4	4.223 0
	苯甲醛	6.489 4	5.022 0	—
	苯乙醇	5.804 2	—	7.570 5
	柠檬烯	3.800 3	—	4.796 4
	苯甲酸甲酯	—	7.434 5	—
	苯乙醛	—	3.935 6	—
	龙脑	—	—	8.177 3
	肉豆蔻醛	—	11.958 2	—

表3 区域内4种园林植物不同季节叶片的挥发物成分及相对含量

Tab. 3 Volatile components and relative contents of leaves of four ornamental plants in the region in different seasons

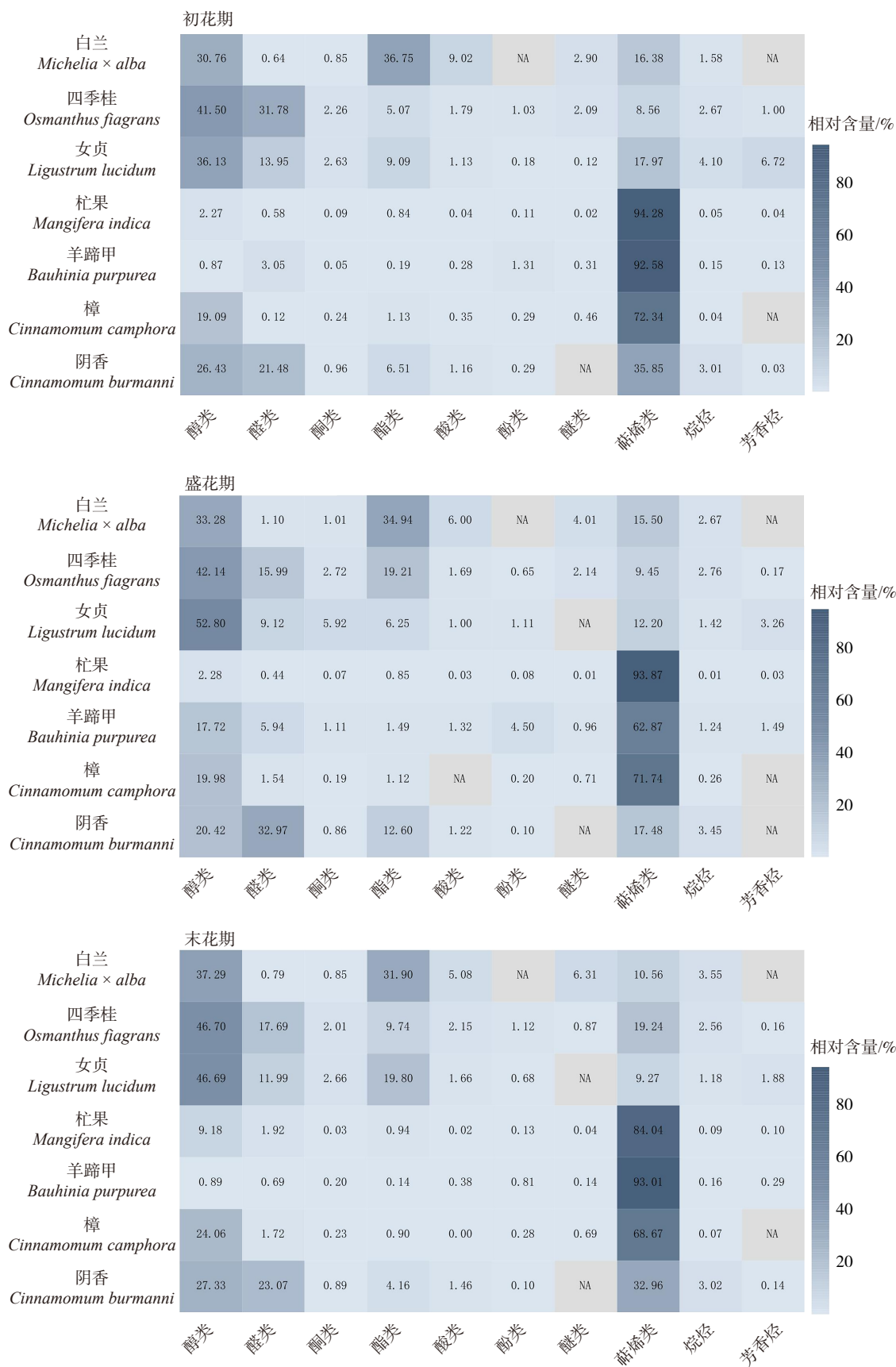
物种	化合物名称	相对含量/%		
		春	夏	秋冬
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	乙位蒎烯	13.196 9	15.183 1	26.514 2
	α -蒎烯	20.279 1	—	23.708 2
	柠檬烯	35.286 2	37.143 1	13.573 2
	乙位石竹烯	4.693 0	—	4.657 0
	侧柏烯	2.438 9	—	4.428 2
	月桂烯	6.164 8	4.327 3	3.072 1
	甲位水芹烯	—	24.773 8	—
	乙位水芹烯	—	3.652 1	—
落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	α -蒎烯	26.752 2	—	56.790 3
	柠檬烯	41.037 4	39.389 8	7.713 1
	氧化石竹烯	—	—	5.100 6
	异海松二烯	—	—	2.325 9
	乙酸松油酯	—	—	2.127 7
	月桂烯	4.964 2	5.327 0	—
	乙位石竹烯	11.217 3	3.397 8	—
	芮木泪柏烯	1.439 8	—	—
	甲位水芹烯	—	35.252 8	—
	苯乙烯	—	2.251 6	—
柠檬桉 <i>Eucalyptus citriodora</i>	香茅醛(+)-CITRONELLAL(RT=19.38)	44.631 2	49.342 4	29.429 2 2
	香茅醇	6.369 6	6.125 3	16.996 2 8
	乙位石竹烯	10.281 6	8.806 7	14.845 3 3
	乙酸香茅酯	10.076 9	9.920 3	11.625 8 6
	异薄荷醇	11.103 6	8.381 5	11.521 7
阴香 <i>Cinnamomum burmanni</i>	龙胆	18.836 6	15.822 1	11.568 6
	乙位石竹烯	—	6.253 1	9.812 4
	乙酸龙脑酯	13.769 4	8.997 2	7.577 1
	α -法呢烯	—	—	6.012 0
	柠檬烯	6.169 3	7.738 3	5.168 4
	月桂烯	6.446 6	—	—
	芮木泪柏烯	4.773 9	—	—
桉烯	—	7.768 9	—	

(12.7%)、罗勒烯(7.5%)为主,组成成分与本文结果存在一定差异,但均以萜烯类为主。植物挥发物的产生与植物所处的生境以及实验检测方式密切相关^[33],尽管不同研究中植物释放的BVOCs具体组成成分和相对含量存在差异,但主要挥发物类别均具有相似性。

本文对广州城市公园的9种园林植物挥发物检测显示不同树种释放BVOCs类别和相对含量存在明显差异,且与物候期有较强的相关性,即不同树种释放的有益BVOCs相对含量变化模式差异显著,这与李少宁等^[34]对北京市山楂和枣叶释放BVOCs季动态结果相似。本研究显示白兰、芒果、阴香释放的有益BVOCs在初花期相对含量最高(84.7%、97.6%、70.1%);四季桂、女贞、羊蹄甲、樟释放的有益BVOCs在末花期达到峰值(78.8%、79.1%、94.1%)。不同树种间有益BVOCs物候变化趋势截然不同,相同的是植物花朵释放的有益BVOCs相对含量不会在盛花

期达到峰值。枫香和柠檬桉叶片释放有益BVOCs在秋冬季相对含量达到峰值(98.2%、67.0%),在夏季达到最低值(94.6%、45.0%),这与李少宁等^[35]对北京市侧柏总有益挥发物在季节间的表现相同。落羽杉和阴香则在夏季达到峰值(99.7%、88.1%),秋冬季达到最低值(96.1%、80.3%),这与胡立香^[36]对北京白皮松林总挥发物变化趋势相同。除对人体健康有益的化合物种类外,研究显示被测的9种园林植物中,还释放了较多的醛类化合物,主要包括苯甲醛、苯乙醛、香茅醛、青叶醛、乙醛。醛类释放物质具有微量的刺激性气味,且对呼吸道、皮肤和眼部会产生一定的刺激作用,在植物搭配时避免在人流量密集处种植醛类挥发物含量较多植物,或游客出游时避免醛类挥发物含量较高的时节。芳香烃、酰胺、烷烃以及酸类化合物的含量则保持在较低水平,对人体健康和环境气味的的影响相对较小。

城市绿地作为城市空间的生态主体,大量研究



NA 表示未检出。下同。

图 1 研究区内 7 种园林植物不同花期花朵的挥发物类别相对含量

Fig. 1 Relative contents of flower volatiles in seven ornamental plants at different blooming periods in the region

表明 BVOCs 与人体健康存在明显关联, 其有益 BVOCs 释放特性更是作为开展城市嗅觉景观研究

的重要因素。可通过不同植物释放有益 BVOCs 成分及动态变化规律进行植物搭配以构建更具吸引力

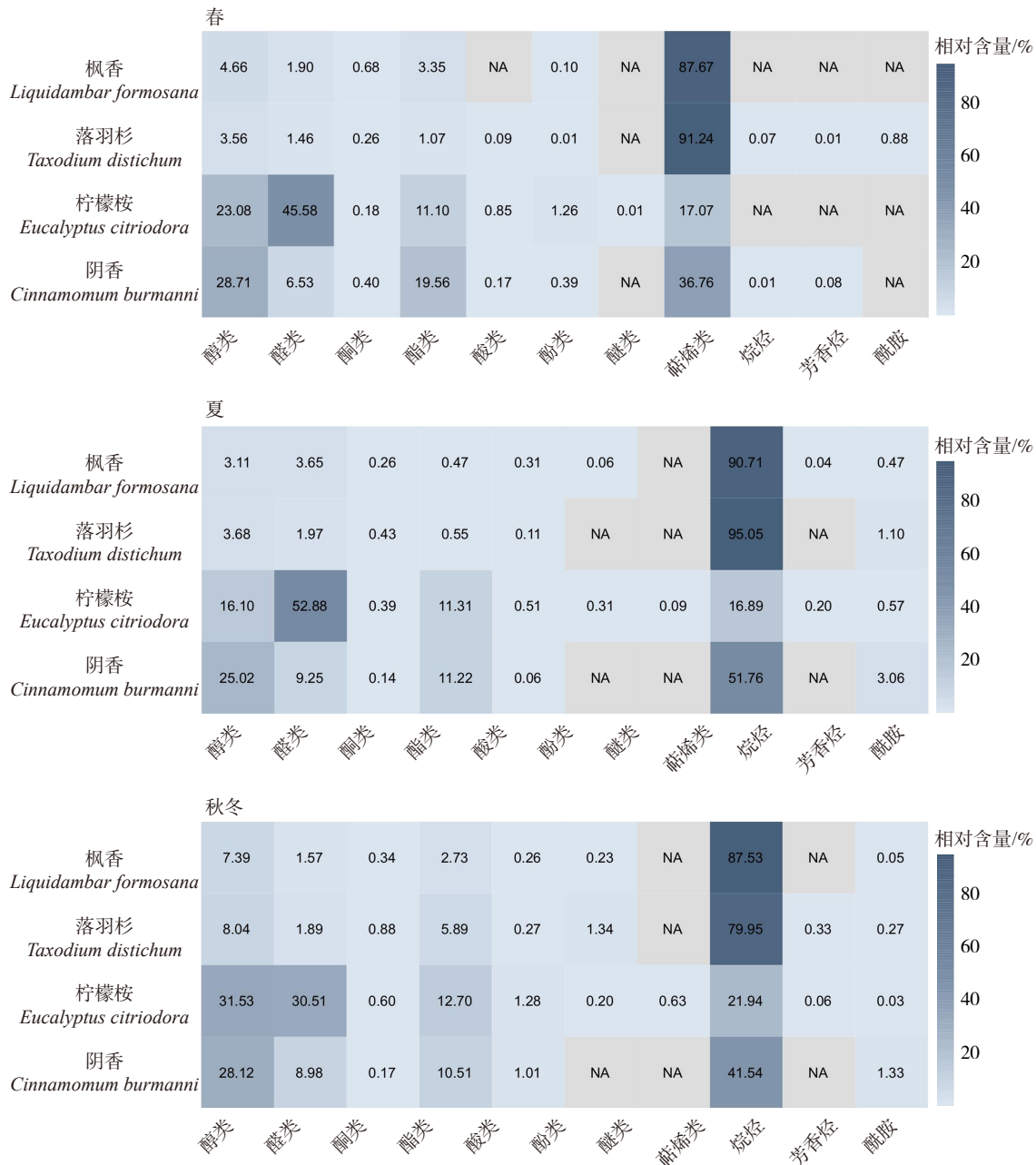


图2 研究区内4种园林植物不同季节叶片的挥发物类别相对含量

Fig. 2 Relative contents of leaf volatiles in four ornamental plants in different seasons in the region

和宜居的城市环境。目前嗅觉景观领域对 BVOCs 的研究主要是采用感官漫步法探讨气味感知与环境之间的关系。Pálsdóttir^[37]研究表明,花园嗅觉景观对压力相关的精神障碍患者具有治疗作用; Song 等^[38]采用嗅觉漫步法结合 GC-MS 技术分析北京市 5 种常见的芳香植物挥发物与人体感知的关系,发现受试者对牡丹的香气表现出不愉快的情感,而对玉兰、木兰、牡丹和丁香的主观评价则偏向正面,表明芳香成分对人类情感的影响因香气成分而异。可基于植物气味在城市环境中的作用、影响因素等制定更为合理的植物搭配方案,让城市公园在不同季节都能给人带来令人愉悦的气味体验。夏季开花的白兰可与枫香或柠檬桉搭配种植,为公园带来丰富的嗅觉

层次。四季桂与秋冬至春季开花的杧果和阴香进行搭配种植,充分利用不同植物释放 BVOCs 的差异以营造不同季节下有益 BVOCs 含量相对均衡的嗅觉景观。此外,可通过研究适用于城市自然互动场所的嗅觉景观模型^[39],系统分析不同植物 BVOCs 释放规律及其对人体健康影响的差异化,更科学地评估嗅觉景观质量,为营造具有城市特色的嗅觉景观植物配置提供理论支撑。

4 结 论

本研究通过顶空固相微萃取对广州天河公园的 9 种园林植物释放的 BVOCs 成分和相对含量进行检测并分析其释放动态,结合有益 BVOCs 释放规律

和植物物候, 可为景观规划师进行城市绿化植物搭配提供数据支撑, 进而充分发挥植物在高密度城市区域的生态康养价值。

(1) 不同植物释放的 BVOCs 成分及相对含量存在一定差异, 植物花朵释放的 BVOCs 成分变化在不同物候期下差异较明显, 植物叶片释放的 BVOCs 成分变化相较于花朵差异较小。

(2) 9 种园林植物共检测出 11 类 BVOCs, 且不同植物释放 BVOCs 类别较相似, 主要包括萜烯类、醇类、醛类、酯类。不同物候期下释放 BVOCs 类别存在差异, 但优势化合物类别基本稳定, 其中白兰以醇类、酯类、萜烯类为主; 四季桂、女贞、阴香花以醇类、醛类、酯类和萜烯类为主; 杧果、羊蹄甲、樟、枫香、落羽杉以萜烯类为主; 柠檬桉以醇类、酯类和萜烯类为主; 阴香叶以醇类、醛类、萜烯类为主。白兰、桂花、杧果、樟、柠檬桉在不同物候期下释放的 BVOCs 成分较稳定, 而女贞、羊蹄甲、阴香、枫香、落羽杉则存在明显的物候差异, 挥发物成分在不同时期存在较大的变化。

(3) 不同植物释放的有益 BVOCs 相对含量及其动态变化差异明显。白兰、杧果、阴香在初花期的有益 BVOCs 相对含量达到峰值; 四季桂、女贞花、羊蹄甲、樟则在末花期达到峰值。枫香和柠檬桉在秋冬季节释放的有益 BVOCs 相对含量达到峰值, 而落羽杉和阴香则在夏季达到峰值。

致谢 李少宁、李绣宏等人在芳香 BVOCs 分析进行了有益的讨论; 何继红、谢亚婷等人在样品采集和数据分析部分提供了支撑。

参 考 文 献

- [1] 李博. 后疫情背景下城市公园游憩行为偏好变化及景观空间优化研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2023.
- Li B. Study on the change of recreational behavior preference and landscape spatial optimization in urban parks under the background of the post-epidemic era [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.
- [2] Li H, Zhu X, Kong W, et al. Physiological response of urban greening shrubs to atmospheric particulate matter pollution: an integral view of ecosystem service and plant function [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 213: 105439.
- [3] Venter Z S, Hassani A, Stange E, et al. Reassessing the role of urban green space in air pollution control [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(6): 2306200121.
- [4] 丛日春, 李吉跃. 试论城市林业在我国城市发展中的地位 [J]. *北京林业大学学报*, 1997, 19(2): 1-10.
- Cong R C, Li J Y. On the position of urban forestry in urban development in China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, 19(2): 1-10.
- [5] Daniel T C, Muhar A, Amberger A, et al. Contributions of cultural services to the ecosystem services agenda [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(23): 8812-8819.
- [6] Fu B, Liu Y, Meadows M E. Ecological restoration for sustainable development in China [J]. *National Science Review*, 2023, 10(7): 33.
- [7] Tang L, Shao G, Groffman P M. Urban trees: how to maximize their benefits for humans and the environment [J]. *Nature*, 2024, 626(7998): 261.
- [8] 张煜子. 多感官体验式互动景观的研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2015.
- Zhang Y Z. Research on multi-sensory design experience of interactive landscape architecture [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015.
- [9] 叶茂乐. 五感在景观设计中的运用 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- Ye M L. Five senses applied in landscape design [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [10] Xiao J, Tait M, Kang J. Understanding smellscape: Sense-making of smell-triggered emotions in place [J]. *Emotion, Space and Society*, 2020, 37: 100710.
- [11] Herz R S, Engen T. Odor memory: review and analysis [J]. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1996, 3: 300-313.
- [12] Porteous J D. Smellscape [J]. *Progress in Physical Geography*, 1985, 9(3): 356-378.
- [13] Theis N, Lerda M. The evolution of function in plant secondary metabolites [J]. *International Journal of Plant Sciences*, 2003, 164(S3): S93-S102.
- [14] Cai Y, Xu H, Xu C, et al. Adjusting function of camphor on primary metabolism in *Cinnamomum camphora* stressed by high temperature [J]. *Plant Science*, 2024, 339: 111956.
- [15] Zhao J, Liu X, Dong R, et al. Landsenses ecology and ecological planning toward sustainable development [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 293-297.
- [16] 董仁才, 吕晨璨, 翁辰, 等. 景感生态学原理及应用 [J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4236-4244.
- Dong R C, Lü C C, Weng C, et al. The principles and methods of landsenses ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4236-4244.
- [17] Bratman G N, Anderson C B, Berman M G, et al. Nature and mental health: an ecosystem service perspective [J]. *Science Advances*, 2019, 5(7): 903.
- [18] 黄娜, 石铁矛, 石羽, 等. 绿色基础设施的生态及社会功能研究进展 [J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 7946-7954.
- Huang N, Shi T M, Shi Y, et al. Research progress on ecological and social function of green infrastructure [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 7946-7954.
- [19] Browning M H E M, Rigolon A, McAnirlin O. Where greenspace matters most: a systematic review of urbanicity, greenspace, and physical health [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 217: 104233.
- [20] Huynh L T M, Gasparatos A, Su J, et al. Linking the nonmaterial dimensions of human-nature relations and human well-being through cultural ecosystem services [J]. *Science Advances*, 2022,

- 8(31): 8042.
- [21] 奚露, 邱尔发, 张致义, 等. 国内外五感景观研究现状及趋势分析[J]. 世界林业研究, 2020, 33(4): 31–36.
- Xi L, Qiu E F, Zhang Z Y, et al. Current situation and trend analysis of international and national five sense landscapes research[J]. World Forestry Research, 2020, 33(4): 31–36.
- [22] 金紫霖, 张启翔, 潘会堂, 等. 芳香植物的特性及对人体健康的作用[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(5): 1245–1247.
- Jin Z L, Zhang Q X, Pan H T, et al. The aromatic characteristics and healthy effects of the aromatic plants[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(5): 1245–1247.
- [23] 贾梅. 康复景观中几种芳香植物挥发物及其对人体健康影响的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- Jia M. Study on volatile compounds of several aromatic plants used in rehabilitation landscape and their impacts of human health[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018.
- [24] 郑华, 金幼菊, 周金星, 等. 活体珍珠梅挥发物释放的季节性及其对人体脑波影响的初探[J]. 林业科学研究, 2003, 16(3): 328–334.
- Zheng H, Jin Y J, Zhou J X, et al. A preliminary study on human brain waves influenced by volatiles released from living *Sorbaria kirilowii* (Regel) Maxim. in different seasons[J]. Forest Research, 2003, 16(3): 328–334.
- [25] Negre-Zakharov F, Long M C, Dudareva N. Floral scents and fruit aromas inspired by nature[M]//Osborn A E, Lanzotti V. Plant-derived natural products: synthesis, function, and application. Berlin: Springer, 2009: 405–431.
- [26] 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.
- Wang Y F, Li Q J. BVOCs emitted from plants of terrestrial ecosystems and their ecological functions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(3): 387–396.
- [27] 谢祝宇, 胡希军, 马晶晶. 精气植物分类及其园林应用研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(16): 42–44.
- Xie Z Y, Hu X J, Ma J J. Division and application of essence plants in green space[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(16): 42–44.
- [28] Keniger L E, Gaston K J, Irvine K N, et al. What are the benefits of interacting with nature?[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, 10(3): 913–935.
- [29] Bentley P R, Fisher J C, Dallimer M, et al. Nature, smells, and human wellbeing[J]. Ambio, 2023, 52(1): 1–14.
- [30] 陈伟玉, 刘俊, 蔡开朗, 等. 不同种源白兰叶和花挥发油的化学成分研究[J]. 热带林业, 2024, 52(1): 51–55.
- Chen W Y, Liu J, Cai K L, et al. Studies on chemical constituents of volatile oil from leaves and flowers of *Michelia alba* from different provenances[J]. Tropical Forestry, 2024, 52(1): 51–55.
- [31] 姚祖凤, 刘家欣, 唐丽娜, 等. 女贞花挥发油化学成分的研究[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 1999, 20(2): 43–45.
- Yao Z F, Liu J X, Tang L N, et al. Study on the chemical constituents of essential oil from ligustrum flower[J]. Journal of Jishou University (Natural Sciences Edition), 1999, 20(2): 43–45.
- [32] 周帅, 马楠, 林富平, 等. 樟树花挥发有机化合物日动态变化分析[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6): 986–991.
- Zhou S, Ma N, Lin F P, et al. Diurnal variation of volatile organic compounds emitted from *Cinnamomum camphora* flowers[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2011, 28(6): 986–991.
- [33] 杨莉. 不同顶空分析法对植物挥发物测定的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- Yang L. Effect of different headspace methods on determination of plant volatiles[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [34] 李少宁, 李绣宏, 柳学强, 等. 山楂和枣释放 BVOCs 组分生长季动态变化特征研究[J]. 经济林研究, 2024, 42(1): 87–98.
- Li S N, Li X H, Liu X Q, et al. Study on the dynamic characteristics of BVOCs released from hawthorn and jujube during the growing season[J]. Non-wood Forest Research, 2024, 42(1): 87–98.
- [35] 李少宁, 陶雪莹, 李慧敏, 等. 侧柏和垂柳释放有益 BVOCs 组分生长季动态变化特征研究[J]. 生态环境学报, 2024, 42(1): 87–98.
- Li S N, Tao X Y, Li H M, et al. Study on dynamic characteristics of BVOCs released from *Platycladus orientalis* and *Salix babylonica* in growing season[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 42(1): 87–98.
- [36] 胡立香. 白皮松林挥发物及其时空动态变化[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- Hu L X. BVOCs emission and their spatial-temporal variation in a *Pinus bungeana* Zucc. stand[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007.
- [37] Pálsdóttir A M, Spendrup S, Mårtensson L, et al. Garden smellscape-experiences of plant scents in a nature-based intervention[J]. Frontiers in Psychology, 2021, 12: 667957.
- [38] Song X, Wu Q. Study on smellscape perception and landscape application of fragrant plants[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 67: 127429.
- [39] Xiao J, Tait M, Kang J. A perceptual model of smellscape pleasantness[J]. Cities, 2018, 76: 105–115.

(责任编辑 范娟
责任编辑 李雄)