

常见花卉植物释放挥发性有机化合物的研究进展

胡春芳^{1,2} 袁相洋^{2,3} 田媛¹ 冯兆忠^{2,3*}

(¹北京工商大学食品学院,北京 100048; ²中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085; ³中国科学院大学资源环境学院,北京 101408)

摘要 花卉植物释放的挥发性有机化合物对大气环境质量、全球气候变化和人体健康都有着直接或间接的影响。本文综述了植物源挥发性有机化合物(BVOCs)的基本概念与作用,常见花卉植物释放VOCs种类和速率,释放VOCs组分和效应,以及影响花卉植物释放VOCs的内部因素(发育阶段和不同器官)及外部因素(温度、光周期和水分)等方面的研究进展。针对我国在花卉植物释放VOCs的负面效应和长期监测等方面研究较少的现状,我们对花卉植物释放VOCs今后的研究方向进行了展望,建议关注多重因素影响下花卉植物释放VOCs的组分和速率,并进行长期观测,深入探讨其对环境及人类的负面影响,以期对人类健康生活和大气质量改善提供科学依据。

关键词 花卉植物; 植物源挥发性有机物; 释放速率; 影响因素

A review on biogenic volatile organic compounds emitted from common flower plants. HU Chun-fang^{1,2}, YUAN Xiang-yang^{2,3}, TIAN Yuan¹, FENG Zhao-zhong^{2,3*} (¹College of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; ²State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ³College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China).

Abstract: The biogenic volatile organic compounds (BVOCs) released by flower plants have effects on atmosphere quality, global climate change and human health. Here, we reviewed the progress on the basic concept and function of BVOCs, the types and emission rates of VOCs emitted from common flower plants, components and effects of VOCs, and the internal factors such as developmental stage and organs and the external factors such as temperature, photoperiod and water condition that driving variation of VOCs emission. In addition, due to few studies on the negative effects and long-term measurement of VOCs emitted from flower plants, such research is needed in the future. More attention should be paid on the components and rate of VOCs emitted from flower plants under multiple environmental factors, and long-term and dynamic processes of VOCs emission. The negative impacts of VOCs emitted from flower plants on the environment quality and human health are also warranted.

Key words: flower plant; biogenic volatile organic compound; emission rate; impact factor.

植物源挥发性有机化合物(biogenic volatile organic compounds,简称BVOCs)是植物体内通过次生代谢途径合成的沸点低、挥发性强的小分子化合物。与人为源挥发性有机化合物(anthropogenic volatile organic compounds,AVOC)相比,BVOCs具有更高的

反应活性,且从全球来看BVOCs占VOCs总量的90%以上(Theis *et al.*, 2003)。池彦琪等(2012)估算中国2003年BVOCs总排放量为12.83 Tg,其中异戊二烯为7.45 Tg(占58%),是最主要组成部分,单萜烯为2.23 Tg(仅占17%),其他VOCs是3.14 Tg(占25%)。BVOCs是影响大气物理性质和化学性质的关键因子,在生物圈与大气化学交互进程中扮演着重要角色:(1)BVOCs具有极其重要的生态功

国家重点研发计划项目(2017YFC0210106)和中国科学院百人计划项目资助。

收稿日期:2017-07-06 接受日期:2017-12-06

* 通讯作者 E-mail: fzz@rcees.ac.cn

能。BVOCs 作为生物信号物质,可在植物体的组织-器官、植物-植物及植物-动物之间传递信号或信息,以警示邻近的其他生物,抵御环境胁迫,预防病虫害等(Hoe *et al.*, 2016); (2) BVOCs 影响陆地生态系统碳(C)素循环。BVOCs 中的 C 素来源于植物光合作用,绝大多数释放到大气, BVOCs 最终都会通过各种形式转化成为 CO₂, 再次进入陆地生态系统,并且 BVOCs 在氧化过程中会消耗羟基自由基,降低大气的氧化性以延长 CH₄ 和 CO 等温室气体的寿命,增强温室效应(张学珍等, 2015)。(3) BVOCs 影响大气光化学进程。BVOCs 是近地层臭氧(O₃)的重要前体物,且有些 BVOCs 的氧化产物是全球单体大气有机气溶胶(SOA)的重要来源,对大气光化学进程及城市空气质量等区域性或全球性环境问题有重要影响(Loreto *et al.*, 2013)。

花卉植物作为城市生态系统的重要组成部分,在 20 世纪 80 年代以前,其规模化及市场化的区域主要集中在发达国家。伴随人们生活水平的提高及政府对城市绿化的重视,20 世纪末世界花卉消费总额达到 2.00×10¹¹ 美元,欧盟、美国和日本形成了世界花卉消费的三大中心地区(王隆清等, 2005)。中国花卉市场在改革开放之前还很萧条,但随着经济的快速发展,花卉植物被广泛应用于室内装饰、礼仪庆典及园林绿化中,我国花卉市场也迅速发展并日渐成熟。2014 年我国花卉生产面积已达 1.27×10⁶ hm², 成为世界花卉种植面积最大的国家(白晓琦等, 2015)。花卉植物种植面积的急剧增加及广泛应用美化了城市环境,增进人民身心健康,但学者也发现许多花卉的花、叶、芽、茎秆和根等器官在其新陈代谢时能不断释放一些具有芳香气味的 VOCs (魏德保, 1981)。花卉植物释放的 VOCs 物质依据所含成分的不同对人类健康和环境有着积极或消极的影响:一方面,某些花卉散发的 VOCs 具有解除疲劳、调节精神和净化空气的功效,传统医护人员据此提出了“芳香疗法”、“园艺疗法”及“森林浴”等概念,通过吸入花卉植物释放的 VOCs 达到祛病保健的目的(马世峰, 2010);另一方面,花卉植物大量聚集的地区, BVOCs 释放总量不容忽视。过量的 BVOCs 可以增加近地层 O₃ 浓度,促进次生有机气溶胶(SOA)的形成。有些花卉释放的 VOCs 还含有对人体有害物质,可使人的情绪趋向紧张和焦躁,甚至一些毒性较强的 BVOCs 可导致过敏性皮炎甚至慢性肺功能损伤等。因此,深入探讨不同花卉植物释

放的 VOCs 种类及含量,研究花卉植物释放 VOCs 的影响因素,不仅可以为城市绿化中花卉植物的合理配置提供选择依据,也可为大气环境质量预报和全球气候变化预测提供科学依据。

1 常见花卉植物释放 VOCs 的研究现状

1.1 国外常见花卉植物释放 VOCs

20 世纪 70—80 年代,欧美等发达国家就认识到 BVOCs 对大气环境的重要影响,至今已取得不少成果。与其他木本植物和草本植物相比,花卉植物在 BVOCs 的采样技术、分析方法及模型建立等方面受到的关注并不多,但经过 20 多年的发展也取得了一些成果。

总体来看,不同种花卉植物 VOCs 的释放速率有所差异,且花卉不同生长阶段的释放速率也不尽相同。Rapparini 等(2001)关于樱(*Prunus avium*)花和苹果(*Malus pumila*)花的研究发现,在开花时期,樱花单萜类物质释放速率(1213 ng·g⁻¹ DW·h⁻¹)是苹果花(366 ng·g⁻¹ DW·h⁻¹)的 3 倍多。随着季节的变化,二者 BVOCs 释放量的范围均有大幅度变化,在结实和果实成熟阶段, BVOCs 排放速率均显著降低,收获季节达到最低值 3~9 ng·g⁻¹ DW·h⁻¹。皂荚树(*Gleditsia sinensis*)在开花阶段的单萜释放速率是 5.3 μg C·g⁻¹·h⁻¹,显著高于花朵凋谢阶段(1.2 μg C·g⁻¹·h⁻¹)(Baghi *et al.*, 2012),说明花卉植物在开花期,由花释放的 VOCs 物质对花卉植物 VOCs 释放总量的贡献很大。

表 1 汇总了国外已有文献中不同花卉植物释放的 BVOCs 种类。从表 1 可以看出,花卉释放的 VOCs 组成成分存在明显差异,主要有萜烯类、苯类、脂肪族、烃类、醇类、醛类、酯类化合物,其次是酸类、酮类和其他类化合物。此外,欧洲油菜花的研究中还检测到含硫化合物及 C₄ 取代化合物;一般情况下,花卉 BVOCs 中,香气的主要成分是萜烯类和醇类组分,如 β-罗勒烯、芳樟醇和月桂烯等。然而,对于个别品种,香气主要构成也有差异,如水仙还释放乙酸苜酯(Chen *et al.*, 2013)。目前,已有的研究多是针对单一花卉品种,而制定花卉排放清单并探索其释放规律,对筛选有益或有害于环境和人体的成分有重要意义。

此外,花卉植物花释放的香气成分具有多样性。Knudsen 等(2006)发现,所有花卉植物都释放单萜类化合物,除单萜类以外,脂肪族化合物居多(表 2)。

表 1 常见花卉植物释放 VOCs 类别

Table 1 Categories of VOCs emitted from common flower plants

花卉植物名称	释放的 BVOCs 种类	参考文献
欧洲油菜花 <i>Brassica napus</i>	主要成分是有有机硫化物、C ₄ 取代化合物、脂肪族和芳香醛、单萜烃, 其余成分为短链醇类、酮类和酸类	Robertson <i>et al.</i> , 1993
依兰 <i>Cananga odorata</i>	51 种 BVOCs, 主要是烃类, 其次是酯类、酸类、醛类和醇类	Qin <i>et al.</i> , 2014
仙客来 <i>Cyclamen persicum</i>	倍半萜烯、醇类、醛类、单萜酯和芳香酯	Ishizaka <i>et al.</i> , 2002
玉簪 <i>Hosta plantaginea</i>	70 多种 BVOCs, 其中 48 种为香气成分, 萜类化合物是主要成分, 包括月桂烯、柠檬烯、 β -罗勒烯和芳樟醇	Liu <i>et al.</i> , 2014
滇丁香 <i>Luculia pinceana</i>	32 种 BVOCs, 主要是苯型烃类和倍半萜, 其次是单萜类和脂肪族	Li <i>et al.</i> , 2016
白兰 <i>Michelia alba</i>	78 种 BVOCs, 其中 33 种属于类异戊二烯化合物, 其余是脂肪酸衍生物、苯、苯丙素和其他碳氢化合物	Sanimah <i>et al.</i> , 2008
水仙 <i>Narcissus tazetta</i> var. <i>chinensis</i>	35 种 BVOCs, 包括单萜、萜烯醇、萜烯氧化物、芳香醇、芳香酯和烃类等, 主要香气成分是 β -罗勒烯和乙酸苧酯	Chen <i>et al.</i> , 2013
牡丹 <i>Paeonia suffruticosa</i>	146 种 BVOCs, 其中 81 种为香气成分, 主要是萜类化合物、醇类、芳香烃和烷烃, 还有少量酯类、醛类等成分	Li <i>et al.</i> , 2012
万代兰 <i>Vanda</i>	主要成分是萜类、苯类和苯丙烷类化合物, 萜类化合物包括罗勒烯、芳樟醇氧化物、芳樟醇和橙花叔醇; 而苯类和苯丙烷类化合物包括苯甲酸甲酯、乙酸苧酯、苯乙醇和乙酸苧乙酯	Mohd-Hairul <i>et al.</i> , 2010

从表 2 可以看出, 相对而言, 大多类别的花卉植物释放脂肪族化合物、苯环型、苯丙素类化合物和倍半萜类化合物, 其次是不规则萜烯类、C₅ 支链和含氮化合物, 有 15 种花卉植物释放含硫化合物, 而二萜类化合物只有唇形目、茄目和金粟兰目植物释放, 可见其挥发性很低。

1.2 国内常见花卉植物释放 VOCs

虽然中国在植物挥发性有机物领域的研究起步比较晚, 但是目前已在 BVOCs 排放清单的建立、排放速率的测定、排放量的估算(王焕顺等, 2008)、排放模型的建立和影响因子等方面取得了一定的研究成果, 但研究主要关注于森林植被 BVOCs 释放, 较少涉及花卉植物。

目前, 已有的关于花卉植物释放 VOCs 的研究, 多是对用于园林绿化或室内盆栽植物释放 VOCs 的组成成分。如邓晓军(2005)分析了天竺葵(*Pelargonium hortorum*)释放的 BVOCs 组成, 鉴定到 17 种萜类化合物, 其中以 6 种单萜(α -蒎烯、香叶烯、 β -蒎烯、苜蓿烯、芳樟醇、柠檬烯)和 1 种倍半萜(石竹烯)为主要组分。马世峰等(2010)对桂花(*Osmanthus fragrans*)枝叶 BVOCs 成分进行动态分析, 发现其释放的化合物主要是酯类、萜类和醛类化合物, 主要化学成分是二氢香茅醇、Z-罗勒烯、癸醛和壬醛等。郭希娟等(2012)研究了一品红(*Euphorbia pulcherrima*) BVOCs 的组成及含量的日变化规律, 检测到 8 类共 49 种挥发性有机物, 包括烷烃、酮类、醇类、醛类、烯烃、酯类、芳香烃类和其他物质等, 并且发现各种物质的释放具有显著的日变化规律, 不同种类物质释放的日变化规律也不同。丁倩倩等

(2013)探究木兰科的二乔玉兰(*Magnolia soulangeana*)、紫玉兰(*Magnolia liliflora*)、飞黄玉兰(*Magnolia denudata* 'Feihuang')和深山含笑(*Michelia maudiae*)鲜花 BVOCs 成分, 建立了相应的排放清单。此外, 国内学者还对梅花(*Armeniaca mume*) (金荷仙等, 2005)、山茶花(*Camellia*) (范正琪等, 2006)及菊科(Compositae)植物(高群英等, 2011)香气成分进行了研究。和国外学者的研究结果一致, 不同的花卉植物, 其香气成分也有所差异。总体来说, 针对个别花卉植物或者科属 BVOCs 的释放速率和种类已经进行研究, 但离排放清单建立、总量评估和明确排放规律及机理尚远。

此外, 我国一些学者还聚焦花卉植物释放 VOCs 对环境和人体的影响。郑华(2002)研究珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)释放挥发性成分时, 发现含氮有毒化合物, 如三甲胺等。因此, 若选择珍珠梅做园林绿化树种, 应合理配置。李海东等(2004)研究了珍珠梅 VOCs 组成及日动态变化规律, 发现在珍珠梅释放的 VOCs 中, 检测到高含量的含氮化合物、苯甲醛和异戊醇等刺激性较强的有毒物质。马楠等(2012)对瓜子黄杨(*Buxus sinica*)、红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)、金叶女贞(*Ligustrum vicaryi*)、无刺枸骨(*Ilex cornuta*)和龟甲冬青(*Ilex crenata* cv. *Convexa* Makino)等 5 种花卉释放 VOCs 的种类和相对含量进行了研究, 发现无刺枸骨中 β -蒎烯和 3-萜烯含量很高, β -蒎烯对皮肤和呼吸道具具有刺激作用, 3-萜烯会刺激皮肤和鼻黏膜, 长期接触可能导致过敏性皮炎甚至慢性肺功能损伤, 因此其作为绿篱植物, 应远离人群密集的区域, 可适当应用

表 2 花的香气化合物主要类别分布
Table 2 Distribution of major classes of floral scent compounds

花卉类别	C5 支链化合物	含氮化合物	含硫化合物	脂肪族化合物	苯环型和苯丙素类	倍半萜类	二萜类	不规则萜烯类
泽泻目 Alismatales	√	√	√	√	√	√	-	√
伞形目 Apiales	√	√	-	√	√	√	-	√
棕榈目 Arecales	√	√	√	√	√	√	-	√
天门冬目 Asparagales	√	√	√	√	√	√	-	√
菊目 Asterales	√	√	-	√	√	√	-	√
十字花目 Brassicales	√	√	√	√	√	√	-	√
白桂皮目 Canellales	√	-	-	√	√	√	-	√
石竹目 Caryophyllales	√	√	√	√	√	√	-	√
金粟兰目 Chloranthales	-	-	-	√	-	√	√	-
鸭跖草目 Commelinales	-	√	-	-	-	√	-	√
山茱萸目 Cornales	-	√	√	-	√	-	-	√
葫芦目 Cucurbitales	√	-	-	√	√	√	-	-
苏铁目 Cycadales	√	-	-	√	√	√	-	√
川续断目 Dipsacales	√	√	-	√	√	√	-	√
杜鹃花目 Ericales	√	√	√	√	√	√	-	√
豆目 Fabales	√	√	√	√	√	√	-	√
龙胆目 Gentianales	√	√	-	√	√	√	-	√
牻牛儿苗目 Geraniales	-	-	-	√	-	√	-	-
唇形目 Lamiales	√	√	√	√	√	√	√	√
樟目 Laurales	√	-	-	√	√	√	-	√
百合目 Liliales	-	-	-	√	√	√	-	√
木兰目 Magnoliales	√	√	-	√	√	√	-	√
金虎尾目 Malpighiales	-	√	-	√	√	√	-	√
锦葵目 Malvales	√	√	√	√	√	√	-	√
桃金娘目 Myrtales	√	-	√	√	√	√	-	√
睡莲目 Nymphaeales	√	-	-	√	√	√	-	√
露兜树目 Pandanales	√	-	-	√	√	-	-	√
松目 Pinales	-	-	-	√	√	-	-	-
胡椒目 Piperales	-	-	√	√	√	-	-	√
禾本目 Poales	-	-	√	√	√	√	-	-
山龙眼目 Proteales	-	-	-	√	√	√	-	-
毛茛目 Ranunculales	√	√	-	√	√	√	-	√
蔷薇目 Rosales	√	√	√	√	√	√	-	√
无患子目 Sapindales	√	√	-	√	√	√	-	√
虎耳草目 Saxifragales	-	-	-	-	-	-	-	-
茄目 Solanales	√	√	√	√	√	√	√	√
葡萄目 Vitales	-	-	-	√	√	√	-	√
姜目 Zingiberales	√	√	-	√	√	√	-	√

√: 检测到的花卉香气成分; -: 未检测到的花卉香气成分。

于道路绿化。而瓜子黄杨释放的芳樟醇,红花檵木释放的伞花烃等对环境中的微生物有抑制作用,可以改善道路环境,将其作为绿化植物可广泛种植。武利玉等(2014)以夹竹桃(*Nerium indicum*)、变叶木(*Codiaeum variegatum*)和广东万年青(*Aglaonema modestum*)3种典型花卉为材料,测定出的代表性有毒有害物质是邻苯二甲酸二丁酯、乙苯和苯乙烯,从而得出结论广东万年青是最不适宜室内养殖的,其次为变叶木,而夹竹桃对人体及环境的危害最小。这些研究为当下及未来筛选可改善园林环境、利于

人体健康的花卉植物及控制由花卉 BVOCs 造成的污染提供理论参考。

2 花卉植物释放 VOCs 的影响因素

2.1 影响花卉植物释放 VOCs 的内部因素

不同种花卉植物的 VOCs 释放速率不同。表 3 按照 BVOCs 排放强度,总结了部分花卉植物释放的异戊二烯和单萜烯的速率。可以看出,每种花卉释放的 VOCs 速率各有差异,同是菊科桔梗目的线叶菊和紫花野菊,紫花野菊异戊二烯释放速率高于线

表 3 不同花卉植物释放 VOCs 的速率
Table 3 Emission rate of VOCs from different flower plants

花卉植物名称	异戊二烯释放速率 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	单萜烯释放速率 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	参考文献
美丽波温铁 <i>Bowenia spectabilis</i>	4.27	3.67	黄爱葵等 2011
苏铁蕨 <i>Brainea insignis</i>	2.81	4.79	黄爱葵等 2011
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	0.88	0.68	何念鹏 2005
紫花野菊 <i>Dendranthema zawadskii</i>	3.24	3.02	何念鹏 2005
线叶菊 <i>Filifolium sibiricum</i>	0.63	3.17	何念鹏 2005
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	7.20	2.29	何念鹏 2005
山柳菊 <i>Hieracium umbellatum</i>	3.24	3.02	何念鹏 2005
八宝景天 <i>Hylotelephium erythrostictum</i>	4.79	0.53	何念鹏 2005
欧亚旋覆花 <i>Inula britannica</i>	2.78	0.92	何念鹏 2005
囊花鸢尾 <i>Iris ventricosa</i>	2.15	0.47	何念鹏 2005
细叶百合 <i>Lilium pumilum</i>	2.75	3.69	何念鹏 2005
火烧花 <i>Mayodendron igneum</i>	1.9±0.3	3.9±1.4	赵静等 2004
芍药 <i>Paeonia lactiflora</i>	5.39	2.67	何念鹏 2005
太阳花 <i>Rudbeckia laciniata</i>	3.15	7.73	何念鹏 2005
草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>	2.99	2.11	何念鹏 2005
华北蓝盆花 <i>Scabiosa tschiliensis</i>	2.68	1.59	何念鹏 2005
鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	7.50	7.74	黄爱葵等 2011
土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i>	5.33	6.58	何念鹏 2005
丁香 <i>Syzygium aromaticum</i>	0.2±0.1	1.8±0.2	王志辉等 2003
东北蒲公英 <i>Taraxacum ohwianum</i>	3.32	0.42	何念鹏 2005

叶菊,而单萜烯释放速率却低于线叶菊。未来应加强研究花卉植物 VOCs 排放速率,在园林绿化及人类生活中合理配置花卉植物。

花卉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。一般地,芽期和花期的 VOCs 释放速率要明显高于叶生长期,并且组分也有明显区别(郭霞 2012)。菊花在初花期和盛花期释放的 BVOCs 种类多于花蕾期和终花期,并且随着花朵的开放和凋谢,酮类、萜烯类和醇类化合物的含量呈先上升后下降趋势,在盛花期含量最高,而酯类、醛类和杂环类化合物则呈现持续下降的趋势(徐瑾等 2012)。黄兰(*Michelia champaca*)在

花蕾期时,释放的 BVOCs 主要成分是萜烯类化合物;显色期以萜烯类和酮类化合物含量最高;初花期、盛花期、盛花末期和凋谢期,则以萜烯类、酯类和醇类化合物为主(蒋冬月等 2012a)。李祖光等(2008)对金桂、银桂和丹桂 3 种桂花在不同开花期释放的 VOCs 结果表明,半开期和盛花期,3 种桂花 BVOCs 释放量较多,花蕾期和衰败期 BVOCs 释放量较少,因此建议在开花初期采摘桂花来加工制作产品。

花卉植物的不同器官如叶片、花瓣和花粉等释放 BVOCs 也具有差异性。有研究表明,植物的花主要释放萜类、醇类、酯类和烃类等化合物,如罗勒烯、乙酸叶醇酯和 3,7-二甲基-1-辛醇等;而枝叶主要释放萜类、醛类和醇类等化合物,如 α -蒎烯、癸醛(王琦 2014)。花朵的不同部位释放的 BVOCs 种类也有差别。梅花花瓣雄蕊主要释放芳香族化合物,雌蕊、花萼和花盘释放大量单萜类化合物(赵印泉等, 2010)。蒋冬月等(2012b)在黄兰叶片中检测出 10 种 BVOCs,都是萜烯类物质,而黄兰花瓣共鉴定出 27 种 BVOCs,以萜烯类物质为主,其次是芳樟醇等醇类物质,还含有少量的酯类、酮类、烷类及其他物质。可见,花卉植物群落 BVOCs 源清单的建立和排放规律的研究有相当的难度,还有待进一步探索。

2.2 影响花卉植物释放 VOCs 的外部因素

2.2.1 温度

温度是影响花卉释放 VOCs 的最主要因素之一。在适宜的温度条件范围内,植物的生长速度与温度呈正相关,随着温度的升高,体内合成代谢加快,植物 VOCs 的合成与释放速度也随之加快(Tsai *et al.*, 2003)。但是当温度高于一定程度时, BVOCs 释放速率也会下降。Sharkey 和 Loreto (1993)发现,葛藤(*Argyrea seguinii*)在低温条件下(低于 19 °C)异戊二烯的释放量为 0,当温度升高时(如 26 °C),完全展开的叶片才能被诱导产生异戊二烯,并且温度每升高 10 °C,异戊二烯的释放量可以增加 8 倍。徐洁华等(2012)通过研究温度胁迫下薰衣草(*Lavandula angustifolia*)花释放 17 种 VOCs 的 3 类关键酶的活性,发现温度影响酶活性的变化,从而影响苯丙烷类化合物、脂肪酸衍生物和单萜类化合物的合成。

2.2.2 光周期

花卉植物释放 VOCs 与光周期有关(高岩 2005)。光周期是昼夜周期中光照期和暗期长短的交替变化。日本小檗科(Berberidaceae)植物花序自然释放 BVOCs 是有昼夜节律变化的。光

周期试验表明,光周期是提高大多数挥发物释放水平的促进因素,BVOCs 释放量最高一般发生在光周期中(Picone *et al.*,2002)。烟草(*Nicotiana tabacum*)花 VOCs 中的苯丙酮白天释放量很少,而夜间明显增加(Baldwin *et al.*,1997)。黑醋栗(*Ribes nigrum*)花 VOCs 最大释放量在光周期中间,并且随着光照时间延长,BVOCs 的释放量逐渐下降。当光照条件恒定时,BVOCs 释放的节律性几乎停止了(Hansted *et al.*,1994)。

2.2.3 水分 不同程度的干旱可以诱导形成不同种类的芳香物质,并且随着干旱胁迫程度的加深,芳香物质种类也随之增加(Li *et al.*,2014)。刘芳等(2014)采用称量控水法对迷迭香(*Rosmarinus officinalis*)进行干旱胁迫试验,发现干旱导致迷迭香 BVOCs 释放总量减少,但种类增加,尤其萜烯类物质的释放比例呈增加的趋势。Delfine 等(2005)的研究也表明,随着干旱胁迫水平提高,薄荷(*Mentha haplocalyx*)和迷迭香的生物量逐步减少,然而,单萜类化合物释放量增加,这可能是因为当胁迫发生时,花卉植物会通过增加萜烯类化合物的释放来缓解胁迫压力,提高花卉植物抗旱性。Ebel 等(1995)发现,在严重干旱时,苹果树释放大量的己醛、己醇、乙酸己酯和(E)-2-己烯醛等,其释放速率是中度干旱的5~310倍。Sharkey 等(1993)发现,葛藤受到水分胁迫后,因气孔关闭使光合速率降为零,但异戊二烯释放速率受影响较小,葛藤复水处理后异戊二烯释放率是胁迫前的5倍。干旱胁迫对花卉植物释放 VOCs 的研究结果较少,且受到技术水平或实验条件的限制,研究结果不一致。

根据以上分析,本文总结了不同因素对不同花卉植物的影响效果(表4)。一般来说,植物异戊二烯的释放受温度和光照的影响,而单萜烯的释放主

要受温度的影响。研究表明,光照越强,在一定范围内(40℃以下)温度越高,异戊二烯释放速率越大,单萜烯的排放速率也越大(王志辉等,2003)。目前对花卉植物受环境因子影响的研究较少,未来仍需深入研究。

3 问题与建议

3.1 常见花卉植物释放 VOCs 的负面效应

随着人们对环境质量要求的不断提高,花卉植物已成为城市生态建设的一个重要组成部分,在改善人类生存环境、缓解城市环境问题等方面发挥着不可替代的作用。花卉植物可以净化空气、美化环境;涵养水源、固土护坡;使人放松心情、减轻压力。但不可忽视的是,常见花卉植物释放的 VOCs 对环境也有一些负面影响,尤其在花卉盛花期,伴随花朵的绽放,BVOCs 的释放也增多,而且开花期大多在春季和夏季,不合理的花卉配置很可能进一步加重春季城市雾霾和夏季城市上空 O₃ 污染。目前园林绿化部门在筛选绿化良种时,比较侧重于花卉植物在城市绿化中所能营造的景观美学效果,在花卉对环境负面效应方面的评估较为欠缺。未来要对花卉合理选择与配置,除了满足生态、景观这些外在的要求,更要考虑花卉本身对环境和人类身心健康所具有的各种潜在影响。因此,未来的研究应深入探讨常见花卉植物释放的 BVOCs 对环境及人类的负面影响。

3.2 环境因子对常见花卉植物释放 VOCs 的影响

BVOCs 释放受到花卉植物内部与外部因素的多重控制。当前对常见花卉植物 VOCs 释放成分和排放量的相关研究多基于单一环境条件和单一物种水平的比较,植物 VOCs 的释放主要受温度、光周期和水分的影响,与其他环境因子(O₃、CO₂和氮素等)的响应情况仍存在较大争议,研究结果并不一致,并且研究多是针对森林树种的,对花卉植物的影响还未见报道。今后更应关注多物种要素和多环境压力下常见花卉植物 VOCs 释放速率和组分,通过人工控制温度、光照和湿度等条件,探究花卉植物 VOCs 释放的规律及机理,尽可能利用花卉释放的 BVOCs 造福于人类。

3.3 常见花卉植物释放 VOCs 的长期监测

由于大气化学过程的全球性和复杂性,常见花卉植物释放 VOCs 对区域乃至全球气候环境的影响方面,研究尚不深入。今后应进行长期观测研究,将

表4 不同外部因素对不同物种 BVOCs 释放的影响
Table 4 Effects of different external factors on BVOCs emission from different species

影响 BVOCs 释放的外部因素	花卉植物种类	对花卉植物释放 VOCs 的影响效果	参考文献
温度	葛藤	增加	Sharkey <i>et al.</i> ,1993
光周期	小檗科植物	增加	Picone <i>et al.</i> ,2002
光周期	黑醋栗	先增加后降低	Hansted <i>et al.</i> ,1994
干旱胁迫	迷迭香	增加	刘芳等,2014
干旱胁迫	薄荷	增加	Delfine <i>et al.</i> ,2005
干旱胁迫	苹果树	增加	Ebel <i>et al.</i> ,1995

常见花卉植物释放 VOCs 对气候变化的影响及城市空气质量的贡献做出预测,了解 BVOCs 应对环境胁迫的变化规律,使之对环境造成的负面影响最小化。

参考文献

- 白晓琦,苏庆,单会霖. 2015. 我国花卉业现状与发展趋势. 现代农业科技, (19): 164.
- 池彦琪,谢绍东. 2012. 基于蓄积量和产量的中国天然源 VOC 排放清单及时空分布. 北京大学学报: 自然科学版, 48(3): 475-482.
- 邓晓军. 2005. 植物气味生物工程研究(II): 植物挥发性萜类代谢分析及其调控(博士学位论文). 上海: 中国科学院研究生院(上海生命科学研究院).
- 丁倩倩,吴兴波,刘芳,等. 2013. 木兰科4种植物鲜花挥发物成分分析. 浙江农林大学学报, 30(4): 477-483.
- 范正琪,李纪元,田敏,等. 2006. 三个山茶花种(品种)香气成分初探. 园艺学报, 33(3): 592-596.
- 高岩. 2005. 北京市绿化树木挥发性有机物释放动态及其对人体健康的影响(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.
- 高群英,高岩,张汝民,等. 2011. 3种菊科植物香气成分的热脱附气质联用分析. 浙江农林大学学报, 28(2): 326-332.
- 郭霞. 2012. 云南省典型乔木植物挥发性有机物释放规律研究(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.
- 郭希娟,田媛. 2012. 一品红挥发性有机物释放日变化规律研究. 环境科学与技术, 35(10): 107-111.
- 何念鹏. 2005. 锡林河流域温带草地植物 VOC 释放及其对草地生态系统碳循环的贡献(博士学位论文). 北京: 中国科学院植物研究所.
- 黄爱葵,李楠, Alex Guenther, 等. 2011. 深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析. 环境科学, 32(12): 3555-3559.
- 蒋冬月,李永红,何昉,等. 2012a. 黄兰开花过程中挥发性有机成分及变化规律. 中国农业科学, 45(6): 1215-1225.
- 蒋冬月,李永红,夏兵,等. 2012b. 黄兰叶片和花瓣挥发性成分及其抑菌效果. 东北林业大学学报, 40(5): 71-74.
- 金荷仙,陈俊愉,金幼菊. 2005. 南京不同类型梅花品种香气成分的比较研究. 园艺学报, 32(6): 1139.
- 李海东,高岩,金幼菊. 2004. 珍珠梅花挥发性物质日动态变化的研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 25(2): 54-59.
- 李祖光,曹慧,朱国华,等. 2008. 三种桂花在不同开花期头香成分的研究. 林产化学与工业, 28(3): 75-80.
- 刘芳,许改平,吴兴波,等. 2014. 干旱-复水处理对迷迭香挥发性有机化合物释放规律的影响. 浙江农林大学学报, 31(2): 264-271.
- 马楠,周帅,林富平,等. 2012. 5种绿篱植物挥发性有机化合物成分分析. 浙江农林大学学报, 29(1): 137-142.
- 马世峰,冯青,张汝民,等. 2010. 桂花枝叶挥发性有机物成分动态分析. 安徽农业科学, 38(18): 9485-9488.
- 马世峰. 2010. 4种园林植物挥发性有机物成分动态分析(硕士学位论文). 浙江: 浙江农林大学.
- 王琦. 2014. 22种园林植物挥发性有机物成分分析及其层次分析法评价(硕士学位论文). 杭州: 浙江农林大学.
- 王焕顺,林长清,万显烈. 2008. 大连地区生态植被所排放 VOC 的估算研究. 环境保护科学, 34(3): 79-81.
- 王隆清,杨小玲. 2005. 国内外花卉产业发展现状与思考. 安徽农业科学, 33(10): 1996-1997.
- 王志辉,张树宇,陆思华,等. 2003. 北京地区植物 VOCs 排放速率的测定. 环境科学, 24(2): 7-12.
- 魏德保. 1981. 森林与人类健康. 北京: 科学出版社.
- 武利玉,孙迎雪,田媛,等. 2014. 北京市典型绿地花卉植物 BVOCs 释放成分谱研究. 环境科学与技术, (10): 154-158.
- 徐瑾,李莹莹,郑成淑,等. 2012. 菊花不同花期及花序不同部位香气成分和挥发研究. 西北植物学报, 32(4): 722-730.
- 徐洁华,文首文. 2012. 温度胁迫薰衣草花精气挥发的机理分析. 中南林业科技大学学报自然科学版, 32(4): 194-199.
- 张学珍,于志博,郑景云,等. 2015. 植物挥发性有机物的气候与环境效应研究进展. 地球科学进展, 30(11): 1198-1209.
- 赵静,白郁华,王志辉,等. 2004. 我国植物 VOCs 排放速率的研究. 中国环境科学, 24(6): 654-657.
- 赵印泉,潘会堂,张启翔,等. 2010. 梅花花朵香气成分时空动态变化的研究. 北京林业大学学报, 32(4): 201-206.
- 郑华. 2002. 北京市绿色嗅觉环境质量评价研究(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.
- Baghi R, Helmig D, Guenther A, et al. 2012. Contribution of flowering trees to urban atmospheric biogenic volatile organic compound emissions. *Biogeosciences*, 9: 3777-3785.
- Baldwin IT, Preston C, Euler M, et al. 1997. Patterns and consequences of benzyl acetone floral emissions from *Nicotiana attenuata* plants. *Journal of Chemical Ecology*, 23: 2327-2343.
- Chen HC, Chi HS, Lin LY. 2013. Headspace solid-phase microextraction analysis of volatile components in *Narcissus tazetta* var. *chinensis* Roem. *Molecules*, 18: 13723-13734.
- Delfine S, Loreto F, Pinelli P, et al. 2005. Isoprenoids content and photosynthetic limitations in rosemary and spearmint plants under water stress. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106: 243-252.
- Ebel RC, Mattheis JP, Buchanan DA. 1995. Drought stress of apple trees alters leaf emissions of volatile compounds. *Physiologia Plantarum*, 93: 709-712.
- Hansted L, Jakobsen HB, Olsen CE. 1994. Influence of temperature on the rhythmic emission of volatiles from *Ribes nigrum* flowers in situ. *Plant, Cell and Environment*, 17: 1069-1072.

- Hoe YC , Gibernau M , Maia AC , *et al.* 2016. Flowering mechanisms , pollination strategies and floral scent analyses of syntopically co-flowering *Homalomena* spp. (Araceae) on Borneo. *Plant Biology* , **18**: 563–576.
- Ishizaka H , Yamada H , Sasaki K. 2002. Volatile compounds in the flowers of *Cyclamen persicum* , *C. purpurascens* , and their hybrids. *Scientia Horticulturae* , **94**: 125–135.
- Knudsen JT , Eriksson R , Gershenzon J , *et al.* 2006. Diversity and distribution of floral scent. *Botanical Review* , **72**: 1–120.
- Li DW , Shi Y , He XY , *et al.* 2014. Effects of elevated CO₂ and O₃ concentrations on isoprenoid emissions from *Pinus tabulaeformis*. *Applied Mechanics and Materials* , **522–524**: 264–271.
- Li S , Chen L , Xu Y , *et al.* 2012. Identification of floral fragrances in tree peony cultivars by gas chromatography–mass spectrometry. *Scientia Horticulturae* , **142**: 158–165.
- Li Y , Ma H , Wan Y , *et al.* 2016. Volatile organic compounds emissions from *Luculia pinceana* flower and its changes at different stages of flower development. *Molecules* , **21**: 531–541.
- Liu Q , Sun G , Wang S , *et al.* 2014. Analysis of the variation in scent components of *Hosta* flowers by HS-SPME and GC-MS. *Scientia Horticulturae* , **175**: 57–67.
- Loreto F , Fares S. 2013. Biogenic volatile organic compounds and their impacts on biosphere–atmosphere interactions. *Developments in Environmental Science* , **13**: 57–75.
- Mohd-Hairul AR , Namasivayam P , Lian GEC , *et al.* 2010. Terpenoid , benzenoid , and phenylpropanoid compounds in the floral scent of *Vanda Mimi* Palmer. *Journal of Plant Biology* , **53**: 358–366.
- Picone JM , Mactavish HS , Clery RA. 2002. Emission of floral volatiles from *Mahonia japonica* (Berberidaceae) . *Phytochemistry* , **60**: 611–617.
- Qin XW , Hao CY , He SZ , *et al.* 2014. Volatile organic compound emissions from different stages of *Cananga odorata* flower development. *Molecules* , **19**: 8965–8980.
- Rapparini F , Baraldi R , Facini O. 2001. Seasonal variation of monoterpene emission from *Malus domestica* and *Prunus avium*. *Phytochemistry* , **57**: 681–687.
- Robertson GW , Griffiths DW , Smith MF , *et al.* 1993. The application of thermal desorption–gas chromatography–mass spectrometry to the analyses of flower volatiles from five varieties of oilseed rape (*Brassica napus* spp. *oleiferd*) . *Phytochemical Analysis* , **4**: 152–157.
- Sanimah S , Suri R , Azizun RN , *et al.* 2008. Volatile compounds of essential oil from different stages of *Michelia alba* (cempaka putih) flower development. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science* , **36**: 109–119.
- Sharkey TD , Loreto F. 1993. Water stress , temperature , and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of Kudzu leaves. *Oecologia* , **95**: 328–333.
- Theis N , Lerdau M. 2003. The evolution of function in plant secondary metabolites. *International Journal of Plant Sciences* , **164**: 93–102.
- Tsai JH , Chiang HL , Hsu YC , *et al.* 2003. The speciation of volatile organic compounds (VOCs) from motorcycle engine exhaust at different driving modes. *Atmospheric Environment* , **37**: 2485–2496.

作者简介 胡春芳,女,1992年生,硕士研究生,主要研究方向为环境生态。E-mail: 13001087600@163.com
责任编辑 李凤芹
