

DOI: 10.20103/j.stxb.202210192967

赵路佳, 李春林, 胡远满, 熊在平. 城市植物源挥发性有机化合物排放特征及其大气环境效应研究进展. 生态学报, 2023, 43(24): 10023-10031.

Zhao L J, Li C L, Hu Y M, Xiong Z P. Research progress on the emission characteristics of volatile organic compounds from urban plants and their atmospheric effects. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10023-10031.

城市植物源挥发性有机化合物排放特征及其大气环境效应研究进展

赵路佳^{1,2}, 李春林¹, 胡远满^{1,*}, 熊在平¹

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 在外界环境的刺激下, 植物会通过释放挥发性有机化合物来维护自身生长。城市是人类活动的主要集聚地, 剧烈的人为干扰导致城市环境特征呈现出复杂的变化趋势, 从而使城市植物排放挥发性有机化合物的过程与自然界出现较大差异。城市中的植物源挥发性有机化合物 (Biogenic Volatile Organic Compounds, BVOCs) 会直接与城市中的氧化物质接触, 生成二次污染物, 并在高温、强光照的条件下发生光化学反应, 严重破坏城市大气环境, 危害居民健康。总结了城市 BVOCs 的常见类型、作用机制及现有研究方法, 分析了不同时间、空间和人类活动背景下的城市 BVOCs 排放特征, 并进一步梳理了当前研究的不足, 提出未来重点研究方向, 旨在为大气环境治理、环境空间规划、居民健康保障等方面的城市管理工作提供指导。

关键词: 城市; 植物源挥发性有机化合物; 大气污染物; 空间分布; 公众健康

Research progress on the emission characteristics of volatile organic compounds from urban plants and their atmospheric effects

ZHAO Lujia^{1,2}, LI Chunlin¹, HU Yuanman^{1,*}, XIONG Zaiping¹

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Shenyang 110016, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Under the stimulation of the external environment, plants will maintain their own growth by releasing volatile organic compounds. Urban areas are the main places of human activities. Intensely anthropogenic disturbances lead to complex changes in urban environmental characteristics, which makes the emission of volatile organic compounds from urban plants greatly different from that of natural plants. The biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in urban area can directly contact with the oxidizing substances, generating secondary pollutants, and cause photochemical reactions under high temperature and strong light conditions. BVOCs could seriously deteriorate the urban atmospheric environment and harm the health of residents. This paper summarized the common types, action mechanisms, and existing research methods of urban BVOCs, analyzed the emission characteristics of urban BVOCs in different temporal, spatial, and human activity contexts. We further combed the limitations of current researches, and proposed the future research directions. The objective of this paper is to provide guidance for urban management in atmospheric environment management, environmental spatial planning, and residents' health protection.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目 (41730647); 国家自然科学基金项目 (41871192, 41671185)

收稿日期: 2022-10-19; **网络出版日期:** 2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huym@iae.ac.cn

Key Words: urban; biogenic volatile organic compounds; atmospheric pollutants; spatial distribution; public health

挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 指任何能参加大气光化学反应的有机化合物。VOCs 作为重要的大气污染物, 不仅直接影响人类的身体健康, 还会促使臭氧 (O_3)、二次有机气溶胶 (Secondary Organic Aerosol, SOA)、细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 等二次污染物的形成。在阳光照射下, VOCs 与大气中的氮氧化物、碳氢化合物、氧化剂等发生光化学反应, 能生成光化学烟雾, 严重刺激人眼和呼吸道, 诱发各种呼吸道疾病, 危害人体健康^[1-3]。一直以来, 大部分 VOCs 的研究集中于燃料燃烧、汽车尾气、工业废气、生产仓储等人类活动释放的人为挥发性有机物 (Anthropogenic Volatile Organic Compounds, AVOCs), 忽略了植物源挥发性有机化合物 (Biogenic Volatile Organic Compounds, BVOCs) 的重要影响^[4]。BVOCs 是植物生长过程中通过叶片气孔释放的重要新陈代谢物质, 在改变大气化学组成的同时影响环境中的其他生物, 对全球碳循环和对流层大气组成有着重要的影响。植物在高温、强光照条件下的 BVOCs 释放量最高, 可以达到全球 VOCs 排放总量的 90% 以上, 在极大程度上影响着全球大气组分^[5]。与此同时, 在全球变暖的过程中, 随着气温的升高, 植物将释放更多的 BVOCs 以抵抗热胁迫, 并在此基础上导致对流层 O_3 和 SOA 浓度的上升, 而这一过程又会间接推进全球气候变化的进程^[6]。因此, BVOCs 是大气环境研究中不可或缺的一部分, 对现在和未来的大气化学过程都有着深远的意义。

城市作为人类生活和各种经济活动的主要集聚地, 其生态环境质量直接影响到城市居民的健康问题。在快速城市化过程中, 剧烈的人类活动改变了自然生态环境, 导致城市热岛、大气污染、土壤退化、水体污染等问题日趋严重, 其中大气污染问题与居民健康关系最为密切。城市的复杂环境会诱发植被释放大量的 BVOCs, 并直接扩散到城市环境中, 发生光化学反应, 且城市中人口密集, BVOCs 作为重要的污染物前体, 会间接影响居民的呼吸系统, 同时, 部分 BVOCs 的过量释放还会造成人群过敏症状, 危害居民特别是老年人和儿童的身体健康。针对城市地区的 BVOCs 研究不仅有助于城市环境的规划与治理, 更是打好大气污染防治攻坚战中不可或缺的重要一环。

1 城市 BVOCs 研究的意义

虽然城市中 BVOCs 的浓度远低于 AVOCs, 但其反应活性更高, 对环境造成的潜在危害不亚于 AVOCs^[4]。近年来, 相关政策越来越注重城市 AVOCs 排放的管控, AVOCs 所造成的大气污染问题也逐步得到缓解, 在这种情况下, BVOCs 对城市环境的影响愈加重要^[7-8]。

1.1 对城市环境的影响

在城市环境的刺激下, 植物极易释放诱导性 BVOCs。城市景观具有不透水面占比高的特点, 加之人工热源、绿地减少等因素的作用, 会出现城市中的温度明显高于外围郊区温度的现象, 即城市热岛现象。在这样的环境中, 植物释放的诱导性 BVOCs 可以帮助城市内部的植物承受更高的温度, 抵抗热胁迫, 更好地适应复杂的城市环境^[9-10]。城市植物释放 BVOCs 的过程存在一种正反馈机制, 即 BVOCs 会与汽车尾气、工业生产等人类活动所排放的氮氧化物快速反应, 生成 O_3 , 导致地面 O_3 含量升高, 在这种情况下, 树木生长被抑制, 使得其释放出更多 BVOCs 以缓解氧化胁迫^[9-12]。因此, 研究城市中 BVOCs 的释放过程和分布格局, 能更加科学地进行针对 BVOCs 的城市环境治理工作。

1.2 对城市规划的影响

BVOCs 的排放不仅受温度、湿度、光合有效辐射等环境因素的影响, 还取决于植物的生物遗传因素, 具有物种特异性。BVOCs 对光化学反应的贡献在很大程度上受到地区植被类型的影响^[13]。针对城市的复杂环境, 一方面, 需要选择可以释放 BVOCs、能够应对城市胁迫的物种, 以适应复杂的城市环境; 另一方面, 还需要选择 BVOCs 排放量适宜的植物, 以防止高浓度的 BVOCs 加重大气污染问题。除此之外, 城市绿地的景观格局也会直接影响到城市中 BVOCs 及其二次污染物的分布和扩散特征, 进而影响城市大气质量^[14]。在城市规

划中,需要综合考虑不同植物的 BVOCs 释放特性、城市功能布局及景观特性等因素的影响。

1.3 对人类健康的影响

城市中的植被对维持城市生态系统服务功能和提高生活环境质量具有重要作用。城市中的公园、花园、绿化带以及城市森林等绿色空间释放的 BVOCs,可以通过消菌杀毒、清除 O₃ 和颗粒物、释放香气等过程调节城市居住环境,有着重要的医疗保健作用^[15-17]。但过量释放的 BVOCs 也存在造成人群过敏症状的风险,例如桃金娘科植物(桉树、白千层、莱菔子、红千层)、十字花科植物(油菜)和针叶树所释放的萜烯会造成呼吸道炎症,诱发季节性哮喘、过敏性鼻炎等;二氯甲烷、三氯甲烷、苯等 BVOCs 可能会引发肺部、神经系统疾病;部分芳香族化合物还有可能成为接触性过敏原,诱发皮肤敏感症状^[18-20]。目前为止,BVOCs 对居民健康的影响机理尚不明确,针对居民健康和潜在过敏源的城市 BVOCs 研究,既可以为园林绿化提供指导,也是保障城市居民身体健康的重要工作。

2 城市 BVOCs 排放特征

植物释放 BVOCs 的过程除了会受到植被功能类型、树龄、叶面积等自身因素的影响之外,还取决于温度、湿度、光合有效辐射等气象因素,和 O₃ 浓度、CO₂ 浓度、大气污染状况等外界环境因素,以及土地利用变化、植被修剪等人为因素^[21-25]。城市环境与自然环境不同,剧烈的人为干扰使得城市植物的 BVOCs 排放过程与自然界植物存在差异。

2.1 城市 BVOCs 主要类型

BVOCs 主要分为四类,分别是萜类、苯类、脂肪酸衍生物和氨基酸衍生物^[26]。萜类化合物是植物在生长过程中释放的重要挥发性有机化合物,有着保障植物生长发育、帮助植物抵抗外界刺激的重要作用。常见的萜类化合物包括异戊二烯、单萜烯、倍半萜烯等,其中异戊二烯的全球排放率可以达到 503TgC/a,排放量最高、反应活性较强、O₃ 形成潜力大,是城市 BVOCs 研究中的重点^[27-28]。

根据 BVOCs 的释放因素不同,还可以将 BVOCs 分为构成性的和诱导性的,其中常见的异戊二烯、单萜烯等属于构成性的 BVOCs;在高温、氧化应激条件、食草生物和病原体入侵等因素的刺激下,植物体所释放的类异戊二烯、倍半萜烯等属于诱导性的 BVOCs^[9,12,29-31]。构成性和诱导性 BVOCs 的释放过程和化学特性有着较大的区别,对环境的影响也不尽相同,均是城市 BVOCs 研究中的重要方向。

2.2 城市中 BVOCs 的时间排放特征

BVOCs 的排放受到温度和太阳辐射的影响,表现出明显的季节变化。一年之中,植物在春季的 BVOCs 排放量较小,随时间推移而增加,在夏季达到顶峰,又在冬季回落^[32-33]。在我国,BVOCs 在夏、冬两季排放量分别占全年排放量的 51.50% 和 3.40%^[34]。植被排放 BVOCs 的昼夜过程直接受到叶片光合作用的影响。在一天之中,随着光照和温度的变化,BVOCs 的排放从早上开始上升,在正午或午后达到高峰,后随着太阳辐射的减少而逐渐降低,在夜晚几乎归为零^[35]。随着每日温度的上升,BVOCs 的排放也会发生变化,呈现出日际变化规律,且 BVOCs 在高温时的排放量会超过当日的 AVOCs 排放量^[36]。值得注意的是,在众多城市 BVOCs 排放时间特征的研究中,受到不同研究区域特征、估算方法、数据集使用、取样条件等因素的影响,估算结果间存在略微差异,但整体规律相一致。

2.3 城市中 BVOCs 的空间排放特征

受土地利用类型、三维空间结构、人类活动等因素的影响,城市内部局地小气候空间差异明显^[37-38]。对于城市 BVOCs 而言,其空间分布特征主要受到植被分布的影响。城市中心区域是人类活动的主要场所,也是观赏性植被种植的重要地点。在高密度的植被分布和高强度的人类活动影响下,城市中心区域会呈现较高浓度的 BVOCs 分布^[39-41]。对于城市周边地区而言,森林覆盖较广、林地山地较多的区域会成为 BVOCs 排放的高值区^[41-43]。城市中不同生态功能的绿色空间,如城市公园、行道树等,所呈现的 BVOCs 排放特征也会有所差异^[44]。除森林景观外,其它土地利用类型的分布也会影响 BVOCs 的空间分布。农田是 BVOCs 的重要来

源之一,为了保证城市的粮食供给,城市周围往往会有部分森林或未利用地转变为农田,导致城市周围出现 BVOCs 的高浓度分布^[45-46]。季节、风向等因素也会影响城市的 BVOCs 分布特征。对于一些大城市或城市群而言,其下风口区域往往会成为 BVOCs 浓度的高值区域,而这种现象会随着不同季节盛行风的改变而发生变化^[47-48]。

城市的三维景观特征较为复杂,由此影响城市内部垂直方向上的空气流动特征^[49-50]。城市行道树会直接改变空气在垂直方向上的流动过程,从而改变近地面 BVOCs 的垂直分布。城市建筑物的高度、密度、几何形状和空间分布都会影响其混合层高度,进一步影响 BVOCs 在对流层的稀释过程,改变其垂直方向上的分布特征^[36]。

2.4 人类活动对城市 BVOCs 排放特征的影响

在城市的绿地规划中,植被种类的选取会直接影响到城市内部的 BVOCs 排放特征。不同树种间的 BVOCs 排放存在着较大的差异,受地域差异等因素的影响,有研究发现阔叶树的 BVOCs 释放种类少于针叶树、叶片排放速率也小于针叶树;也有研究认为,阔叶树对于 BVOCs 的贡献会高于针叶树^[17,51-52]。除植物种类之外,其年龄、叶片寿命等因素也会影响植物的 BVOCs 排放^[11]。有时为了保证城市的物种多样性,城市管理中会引入大量的观赏性植物,导致城市成为 BVOCs 排放的热点区域。因此在绿化过程中需要权衡生物多样性和 BVOCs 排放管控,选择适宜的植物种类和种植方式^[53]。在同一个城市中,本地物种和外来物种的 BVOCs 排放过程会存在明显差异,外来物种为了适应新的环境,会排放更多的 BVOCs,导致外来物种的 BVOCs 排放量普遍高于本地物种^[54]。

在城市管理中,针对城市绿化的人为修剪是必不可少的一环。不管是乔木的枝叶修剪,还是草坪的整体切割,都会对植物造成机械性损伤,导致植物释放出大量的 BVOCs,影响城市内部的 BVOCs 排放特征^[23,55-56]。因此,需要科学地进行城市绿化修剪工作,在保证城市美化和植被健康的同时,控制 BVOCs 排放量。

3 城市 BVOCs 的大气环境效应

3.1 城市 BVOCs 的大气环境效应评估

对于不同时间尺度和空间尺度的城市研究,其 BVOCs 的大气环境效应评估方法不尽相同。在具体的研究中,可以通过实地监测的方法直接观测小尺度、短时间内 BVOCs 的排放浓度,也可以通过模型模拟获取大尺度、长时间的 BVOCs 模拟数值。

在城市 BVOCs 研究中,往往需要针对城市绿地进行野外监测实验,获取叶片、个体尺度的 BVOCs 排放浓度,由此获得的 BVOCs 浓度数据既可分析不同物种的 BVOCs 排放特征,也可用于辅助模型模拟的数据验证。在小尺度的监测中,主要使用静态封闭采样、动态封闭采样等手段直接获取植物叶片、枝条的 BVOCs 排放浓度,计算其排放速率^[20,57]。在生态系统尺度的监测中,为了减少采集容器的影响,可以使用涡度协方差法、通量梯度法等微气候方法,获取城市森林冠层尺度的 BVOCs 通量^[58-60]。与此同时,随着遥感技术的发展,常常将遥感反演的的方法应用于城市、城市群等大尺度的大气研究中,分析大气气溶胶的理化性质,定量描述城市区域的大气污染状况。基于大气浓度反演 BVOCs 排放量,结合大气测量、气体传输模型等,获取长时间序列、大研究范围的 BVOCs 通量,由此推算其所造成的二次污染,实现区域大气环境的长期监测^[61-64]。在城市、城市群等研究中,模型模拟的方法可以获取较大空间范围的 BVOCs 排放数据。BVOCs 排放模型主要采用自下而上的建模方法,既可以基于过程构建细胞尺度的机理模型,也可以基于经验算法模拟植被的整体排放^[5,65-66]。在城市 BVOCs 模拟中,通常选用经验模型,以实测数据为基础,结合土地利用数据、植被类型数据、气象数据等,模拟研究区的 BVOCs 排放情况。上世纪 90 年代开始,Guenther 等人通过实验证实了桉树的异戊二烯排放速率与光照和温度相关,并以此试验数据为基础,经历多次优化,综合考虑气温、光辐射通量、风速、相对湿度等环境因子和植被特性对 BVOCs 排放速率的影响,开发了自然排放气体和气溶胶模型,也称

MEGAN 模型^[57,67]。MEGAN 模型主要由土地利用数据、高分辨率气象数据和大气化学组分构成,可估算异戊二烯、单萜烯、倍半萜烯等 100 余种 BVOCs 的排放^[27]。在实际应用中,MEGAN 模型常与其他大气模拟模型,如 CMAQ 模型、WRF 模型等结合使用,评估 BVOCs 对 O₃、SOA 等二次污染物的作用,量化 BVOCs 对大气组分和空气质量的影响^[14,68-70]。除此之外,为了满足城市研究的高时空分辨率需求,还可以将遥感、地理信息系统等技术融入到 BVOCs 模型的优化中,精确量化 BVOCs 对城市大气环境的影响^[71-73]。

3.2 城市 BVOCs 的大气环境效应

大气中的 BVOCs 会在高温、强光等作用下,发生一系列氧化反应,生成 O₃ 和 SOA 等二次污染物,严重影响对流层的大气环境质量。由于城市中的工业活动频繁、交通状况复杂,对植被造成了严重的氧化、高温胁迫,导致高反应活性的诱导性 BVOCs 排放量升高,由此引发了剧烈的二次反应,O₃ 和 SOA 浓度也随之急剧升高,直接影响城市人居环境,危害居民健康。通过对城市及城市群区域进行相关气体的监测与模拟工作,可以分析现在和未来气候情境下 BVOCs 与 O₃、SOA 的分布关系和浓度变化趋势,总结 BVOCs 在城市中的反应特性,并由此探究城市绿地格局及周边自然资源配置的优化方案^[12,52,74-75]。

3.2.1 BVOCs 与 O₃

城市中 BVOCs 生成 O₃ 的速率很大程度上取决于 BVOCs 与氮氧化物的比值(BVOCs/NO_x)。在不同的氮氧化物背景下,BVOCs 生成二次污染物的过程和效率也是不一样的。对于一些氮氧化物含量较低的地区而言,BVOCs 的释放一般不会对环境造成危害,但随着氮氧化物浓度的增加,城市中的 BVOCs 反应过程会发生改变,由此生成的 O₃ 浓度也会增加^[8,11,47]。城市周边地区是人工环境和自然环境的过渡地带,受到氮氧化物和 BVOCs 浓度的双重作用,是 O₃ 浓度升高的重点区域^[13]。

植物的 BVOCs 排放速率会直接影响到 O₃ 的生成速率。一天之中,BVOCs 对于 O₃ 的贡献率会随着光照和温度的上升而增加;一年之中,夏季 BVOCs 对于 O₃ 形成的贡献程度会显著高于其他季节,与 BVOCs 相比,BVOCs 在夏季对 O₃ 的贡献潜力高达 49.5%^[41]。BVOCs 对于 O₃ 浓度的贡献率受到下垫面因素的影响,存在着明显的空间分布特征。在区域研究中,不同城市区域,O₃ 浓度对 BVOCs 排放的响应存在差异,例如,在中国东部和西南部地区等植被覆盖广、经济发展快速的区域,BVOCs 排放水平高、氮氧化物浓度高,加之适宜的气象条件,导致 BVOCs 的 O₃ 贡献率较高^[75]。在城市研究中,与城市中心地区相比,周边乡村地区的 O₃ 形成受 BVOCs 的影响更大^[33]。同时,在 O₃ 浓度较高、污染水平高的地区,BVOCs 对 O₃ 形成的影响也会更强^[68]。在城市管理中,种植高 BVOCs 排放量的植物会导致地面 O₃ 生成显著增加,造成石灰石的衰退,影响城市建筑质量及建筑寿命^[76]。

3.2.2 BVOCs 与 SOA

BVOCs 的氧化产物会形成生物性二次有机气溶胶(Biogenic Secondary Organic Aerosol,BSOA),增加气溶胶颗粒的数量和大小^[77]。在夏季高温、强光照的影响下,BVOCs 排放量升高,光化学反应过程加强,BSOA 排放量也随之升高,最高可达到总体 SOA 的 90%^[78-79]。随着居民对城市环境要求的提高,城市绿化面积不断增加,BVOCs 的 BSOA 形成潜力不断增加^[12]。BVOCs 对 BSOA 的贡献会受到区域条件的影响。当城市周围的绿地覆盖率较高时,BVOCs 对 BSOA 的贡献率也会比较高,例如长江三角洲、成渝城市群、大兴安岭、秦岭等区域的 BSOA 浓度一般较高,南方城市的 BSOA 浓度会普遍高于北方城市^[75,79]。不同区域中构成性和诱导性 BVOCs 对 BSOA 的贡献程度会存在差异。在华东地区,夏季异戊二烯、单萜烯和倍半萜烯对 BSOA 的贡献浓度分别可达到 0.66 μg/m³、0.40 μg/m³ 和 0.15 μg/m³;在秦岭和长江流域南部,倍半萜烯对 BSOA 的贡献浓度则可以达到 0.50 μg/m³^[79]。对于城市研究而言,在复杂的环境胁迫下,诱导性 BVOCs 对 BSOA 的促进作用会在城市及周边乡村地区得到明显加强^[80]。不同种类的 BVOCs 对 BSOA 贡献率不尽相同。异戊二烯、单萜烯等构成性 BVOCs 的排放量较高,倍半萜烯等诱导性 BVOCs 的反应活性较高,均会在大气中发生二级反应,产生 BSOA。同时,环境胁迫程度的改变会直接影响构成性和诱导性 BVOCs 的排放过程,由此改变 BSOA 的形成过程和产量^[74]。

4 不足与展望

目前,城市 BVOCs 的研究主要集中于 BVOCs 观测技术、估算模型、排放特征等方面,并在此基础上分析 BVOCs 对大气环境造成的二次污染及其对居民健康的影响。现有研究已经对城市中的 BVOCs 分布特征及反应特性进行了大量的定量描述和回归分析,达成了对城市 BVOCs 排放和迁移机理的初步认识,但仍然需要推进城市中 BVOCs 的精准量化与预测工作。

随着对城市环境研究的深入,监测仪器、遥感反演和机理模型促进了城市 BVOCs 研究的深化,但相关的数据观测、模型优化等问题仍然需要通过技术手段进一步完善,大尺度研究的精度问题仍有待解决。BVOCs 的研究主要依托于实地观测和模型模拟,但城市环境较为复杂,传统 BVOCs 研究主要针对森林生态系统,不能完全满足城市环境,导致城市 BVOCs 研究在观测和估算过程中受到限制,难以做到精准分析和预测。一方面,城市 BVOCs 研究需要继续完善其观测仪器和技术,做到精确监测城市中的 BVOCs 排放。对于城市、城市群等大尺度研究而言,部分反应活性较强的 BVOCs 排放经常被忽略,导致现有研究缺少对这部分气体的化学反应分析,难以评估部分由此造成的二次污染问题。另一方面,为了准确估算城市 BVOCs 的排放与分布特征,需要对现有模型进一步完善,将城市三维景观特征纳入其中,完善城市 BVOCs 的跨尺度研究。常见的 BVOCs 估算模型主要基于植被、气象等自然数据,并未考虑城市本身的景观特征,导致三维景观、道路交通等城市特征对 BVOCs 扩散和反应过程被忽视,城市 BVOCs 的估算精度由此受到限制。

为了探究城市 BVOCs 的排放、分布和输移规律,需要将城市景观特征引入模型,针对 BVOCs 的扩散和反应过程,进行城市景观格局的优化,缓解城市大气环境问题,保障城市居民身体健康。除此之外,BVOCs 的遥感反演技术仍有待提升。遥感技术的发展在很大程度上推进了城市大气的相关研究,但与传统的气溶胶反演相比,BVOCs 在大气中的浓度更低、反应活性更高,对于传感器灵敏度和反演方法的要求也更高,遥感反演结果与地面调查的结合分析仍有待探讨。

参考文献 (References):

- [1] Haagen-Smit A J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, 44(6): 1342-1346.
- [2] Fehsenfeld F, Calvert J, Fall R, Goldan P, Guenther A B, Hewitt C N, Lamb B, Liu S, Trainer M, Westberg H, Zimmerman P. Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, 6(4): 389-430.
- [3] Claeys M, Graham B, Vas G, Wang W, Vermeylen R, Pashynska V, Cafmeyer J, Guyon P, Andreae M O, Artaxo P, Maenhaut W. Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene. *Science*, 2004, 303(5661): 1173-1176.
- [4] Chameides W L, Lindsay R W, Richardson J, Kiang C S. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. *Science*, 1988, 241(4872): 1473-1475.
- [5] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, McKay W A, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P. A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D5): 8873.
- [6] Arneth A, Harrison S P, Zaehle S, Tsigaridis K, Menon S, Bartlein P J, Feichter J, Korhola A, Kulmala M, O'Donnell D, Schurgers G, Sorvari S, Vesala T. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system. *Nature Geoscience*, 2010, 3(8): 525-532.
- [7] Owen S M, MacKenzie A R, Stewart H, Donovan R, Hewitt C N. Biogenic volatile organic compound (VOC) emission estimates from an urban tree canopy. *Ecological Applications*, 2003, 13(4): 927-938.
- [8] Gao Y, Ma M C, Yan F F, Su H, Wang S X, Liao H, Zhao B, Wang X M, Sun Y L, Hopkins J R, Chen Q, Fu P Q, Lewis A C, Qiu Q H, Yao X H, Gao H W. Impacts of biogenic emissions from urban landscapes on summer ozone and secondary organic aerosol formation in megacities. *Science of the Total Environment*, 2022, 814: 152654.
- [9] Loreto F, Schnitzler J P. Abiotic stresses and induced BVOCs. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(3): 154-166.
- [10] Fineschi S, Loreto F. Leaf volatile isoprenoids: an important defensive armament in forest tree species. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2012, 5(1): 13-17.
- [11] Churkina G, Grote R, Butler T M, Lawrence M. Natural selection? Picking the right trees for urban greening. *Environmental Science & Policy*, 2015, 47: 12-17.

- [12] Ghirardo A, Xie J, Zheng X, Wang Y, Grote R, Block K, Wildt J, Mentel T, Kiendler-Scharr A, Hallquist M, Butterbach-Bahl K, Schnitzler J P. Urban stress-induced biogenic VOC emissions and SOA-forming potentials in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(5): 2901-2920.
- [13] Calfapietra C, Fares S, Manes F, Morani A, Sgrigna G, Loreto F. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: a review. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 71-80.
- [14] Yu M, Zhou W Q, Zhao X J, Liang X D, Wang Y H, Tang G Q. Is urban greening an effective solution to enhance environmental comfort and improve air quality? *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(9): 5390-5397.
- [15] Niinemets Ü, Peñuelas J. Gardening and urban landscaping: significant players in global change. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(2): 60-65.
- [16] Bottalico F, Chirici G, Giannetti F, De Marco A, Nocentini S, Paoletti E, Salbitano F, Sanesi G, Serenelli C, Travaglini D. Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016, 8: 243-251.
- [17] Wu J, Long J Y, Liu H X, Sun G P, Li J, Xu L J, Xu C Y. Biogenic volatile organic compounds from 14 landscape woody species: tree species selection in the construction of urban greenspace with forest healthcare effects. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300: 113761.
- [18] Hagvall L, Sköld M, Bråred-Christensson J, Börje A, Karlberg A T. Lavender oil lacks natural protection against autoxidation, forming strong contact allergens on air exposure. *Contact Dermatitis*, 2008, 59(3): 143-150.
- [19] Gibbs J E. Essential oils, asthma, thunderstorms, and plant gases: a prospective study of respiratory response to ambient biogenic volatile organic compounds (BVOCs). *Journal of Asthma and Allergy*, 2019, 12: 169-182.
- [20] Lun X X, Lin Y, Chai F H, Fan C, Li H, Liu J F. Reviews of emission of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in Asia. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 95: 266-277.
- [21] Peñuelas J, Staudt M. BVOCs and global change. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(3): 133-144.
- [22] Possell M, Hewitt C N. Isoprene emissions from plants are mediated by atmospheric CO₂ concentrations. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1595-1610.
- [23] Brill F, Hörtnagl L, Bamberger I, Schnitzhofer R, Ruuskanen T M, Hansel A, Loreto F, Wohlfahrt G. Qualitative and quantitative characterization of volatile organic compound emissions from cut grass. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(7): 3859-3865.
- [24] Calfapietra C, Pallozzi E, Lusini I, Velikova V. Modification of BVOC emissions by changes in atmospheric [CO₂] and air pollution. *Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions*, 2013: 253-284.
- [25] Samson R, Grote R, Calfapietra C, Cariñanos P, Fares S, Paoletti E, Tiwary A. Urban trees and their relation to air pollution. *The urban forest: Cultivating green infrastructure for people and the environment*, 2017: 21-30.
- [26] Baldwin I T. Plant volatiles. *Current Biology*, 2010, 20(9): R392-R397.
- [27] Guenther A, Karl T, Harley P, Wiedinmyer C, Palmer P I, Geron C. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11): 3181-3210.
- [28] Sharkey T D, Wiberley A E, Donohue A R. Isoprene emission from plants: why and how. *Annals of Botany*, 2008, 101(1): 5-18.
- [29] Heiden A C, Hoffmann T, Kahl J, Kley D, Klockow D, Langebartels C, Mehlhorn H, Sandermann Jr H, Schraudner M, Schuh G, Wildt J. Emission of volatile organic compounds from ozone-exposed plants. *Ecological Applications*, 1999, 9(4): 1160-1167.
- [30] Niinemets Ü. Mild versus severe stress and BVOCs: thresholds, priming and consequences. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(3): 145-153.
- [31] Holopainen J K, Gershenzon J. Multiple stress factors and the emission of plant VOCs. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(3): 176-184.
- [32] 陈颖, 史奕, 何兴元. 沈阳市四种乔木树种 BVOCs 排放特征. *生态学杂志*, 2009, 28(12): 2410-2416.
- [33] Liu Y, Li L, An J Y, Huang L, Yan R S, Huang C, Wang H L, Wang Q, Wang M, Zhang W. Estimation of biogenic VOC emissions and its impact on ozone formation over the Yangtze River Delta region, China. *Atmospheric Environment*, 2018, 186: 113-128.
- [34] 高超, 张学磊, 修艾军, 黄凌, 赵红梅, 王堃, 童清清. 中国生物源挥发性有机物(BVOCs)时空排放特征研究. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4140-4151.
- [35] 袁相洋, 许燕, 杜英东, 冯兆忠. 南京和北京城市天然源挥发性有机物排放差异. *中国环境科学*, 2022, 42(04): 1489-1500.
- [36] Wagner P, Kuttler W. Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere—A case study in Essen, Germany. *Science of the Total Environment*, 2014, 475: 104-115.
- [37] Li C L, Liu M, Hu Y M, Zhou R, Huang N, Wu W, Liu C. Spatial distribution characteristics of gaseous pollutants and particulate matter inside a city in the heating season of Northeast China. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102302.
- [38] 李迪康, 刘淼, 李春林, 胡远满, 王聪, 刘冲. 我国城市大气环境与周边区域二维和三维景观格局关系. *应用生态学报*, 2021, 32(05): 1593-1602.
- [39] 郑君瑜, 郑卓云, 王兆礼, 钟流举, 吴兑. 珠江三角洲天然源 VOCs 排放量估算及时空分布特征. *中国环境科学*, 2009, 29(04): 345-350.
- [40] 常杰, 任远, 史琰, 朱轶梅, 焦荔, 洪盛茂, 傅承新, 葛滢. 亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单——以台州地区为例. *生态学报*, 2012,

- 32(02): 641-649.
- [41] Mo Z W, Shao M, Wang W J, Liu Y, Wang M, Lu S H. Evaluation of biogenic isoprene emissions and their contribution to ozone formation by ground-based measurements in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1485-1494.
- [42] 吴莉萍, 翟崇治, 周志恩, 史小春, 王同桂, 张灿, 居晓青. 重庆市主城区挥发性有机物天然源排放量估算及分布特征研究. *三峡环境与生态*, 2013, 35(04): 12-15.
- [43] 叶贤满, 徐昶, 洪盛茂, 焦荔, 沈建东, 张天, 何曦. 杭州市大气污染物排放清单及特征. *中国环境监测*, 2015, 31(02): 5-11.
- [44] Matsunaga S N, Shimada K, Masuda T, Hoshi J, Sato S, Nagashima H, Ueno H. Emission of biogenic volatile organic compounds from trees along streets and in urban parks in Tokyo, Japan. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2017, 11(1): 29-32.
- [45] Lamb B, Guenther A, Gay D, Westberg H. A national inventory of biogenic hydrocarbon emissions. *Atmospheric Environment(1967)*, 1987, 21(8): 1695-1705.
- [46] Squire O J, Archibald A T, Abraham N L, Beerling D J, Hewitt C N, Lathièrre J, Pike R C, Telford P J, Pyle J A. Influence of future climate and cropland expansion on isoprene emissions and tropospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(2): 1011-1024.
- [47] Wang Q G, Han Z W, Wang T J, Zhang R J. Impacts of biogenic emissions of VOC and NO_x on tropospheric ozone during summertime in Eastern China. *Science of the Total Environment*, 2008, 395(1): 41-49.
- [48] Situ S, Guenther A, Wang X, Jiang X, Turnipseed A, Wu Z, Bai J, Wang X. Impacts of seasonal and regional variability in biogenic VOC emissions on surface ozone in the Pearl River Delta region, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(23): 11803-11817.
- [49] 张楚宜, 胡远满, 刘森, 李春林. 景观生态学三维格局研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4353-4360.
- [50] Miao C P, Yu S, Hu Y M, Bu R C, Qi L, He X Y, Chen W. How the morphology of urban street canyons affects suspended particulate matter concentration at the pedestrian level: an in-situ investigation. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102042.
- [51] Kim H K, Woo J H, Park R S, Song C H, Kim J H, Ban S J, Park J H. Impacts of different plant functional types on ambient ozone predictions in the Seoul Metropolitan Areas (SMAs), Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(14): 7461-7484.
- [52] 刘岩. 长三角地区植物源 VOCs 排放特征及其对臭氧生成贡献的模拟研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2018.
- [53] Ren Y, Ge Y, Ma D P, Song X L, Shi Y, Pan K X, Qu Z L, Guo P P, Han W J, Chang J. Enhancing plant diversity and mitigating BVOC emissions of urban green spaces through the introduction of ornamental tree species. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 305-313.
- [54] Préndez M, Carvajal V, Corada K, Morales J, Alarcón F, Peralta H. Biogenic volatile organic compounds from the urban forest of the Metropolitan Region, Chile. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 143-150.
- [55] Karl T, Fall R, Jordan A, Lindinger W. On-line analysis of reactive VOCs from urban lawn mowing. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(14): 2926-2931.
- [56] Loreto F, Barta C, Brillì F, Noguez I. On the induction of volatile organic compound emissions by plants as consequence of wounding or fluctuations of light and temperature. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29(9): 1820-1828.
- [57] Guenther A B, Monson R K, Fall R. Isoprene and monoterpene emission rate variability: observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(D6): 10799.
- [58] Guenther A, Baugh W, Davis K, Hampton G, Harley P, Klinger L, Vierling L, Zimmerman P, Allwine E, Dilts S, Lamb B, Westberg H, Baldocchi D, Geron C, Pierce T. Isoprene fluxes measured by enclosure, relaxed eddy accumulation, surface layer gradient, mixed layer gradient, and mixed layer mass balance techniques. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D13): 18555-18567.
- [59] Guenther A B, Hills A J. Eddy covariance measurement of isoprene fluxes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D11): 13145-13152.
- [60] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(07): 903-917.
- [61] 王耀庭, 王桥, 王艳姣, 闫国年, 黄丙湖. 大气气溶胶性质及其卫星遥感反演. *环境科学研究*, 2005, 18(6): 27-33.
- [62] Palmer P I, Abbot D S, Fu T M, Jacob D J, Chance K, Kurosu T P, Guenther A, Wiedinmyer C, Stanton J C, Pilling M J, Pressley S N, Lamb B, Sumner A L. Quantifying the seasonal and interannual variability of North American isoprene emissions using satellite observations of the formaldehyde column. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D12): D12315.
- [63] Choi J, Henze D K, Cao H, Nowlan C R, González Abad G, Kwon H A, Lee H M, Oak Y J, Park R J, Bates K H, Maasakkers J D, Wisthaler A, Weinheimer A J. An inversion framework for optimizing non-methane VOC emissions using remote sensing and airborne observations in northeast Asia during the KORUS-AQ field campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(7): e2021JD035844.
- [64] Jung J, Choi Y, Mousavinezhad S, Kang D, Park J, Pouyaei A, Ghahremanloo M, Momeni M, Kim H. Changes in the ozone chemical regime over the contiguous United States inferred by the inversion of NO_x and VOC emissions using satellite observation. *Atmospheric Research*, 2022, 270: 106076.

- [65] Steinbrecher R, Smiatek G, Köble R, Seufert G, Theloke J, Hauff K, Ciccioli P, Vautard R, Curci G. Intra- and inter-annual variability of VOC emissions from natural and semi-natural vegetation in Europe and neighbouring countries. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(7): 1380-1391.
- [66] Keenan T, Niinemets, Sabate S, Gracia C, Peñuelas J. Process based inventory of isoprenoid emissions from European forests; model comparisons, current knowledge and uncertainties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(12): 4053-4076.
- [67] Guenther A B, Zimmerman P R, Harley P C, Monson R K, Fall R. Isoprene and monoterpene emission rate variability; model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D7): 12609.
- [68] Liu S, Xing J, Zhang H L, Ding D, Zhang F F, Zhao B, Sahu S K, Wang S X. Climate-driven trends of biogenic volatile organic compound emissions and their impacts on summertime ozone and secondary organic aerosol in China in the 2050s. *Atmospheric Environment*, 2019, 218: 117020.
- [69] Marais E A, Jacob D J, Guenther A, Chance K, Kurosu T P, Murphy J G, Reeves C E, Pye H O T. Improved model of isoprene emissions in Africa using Ozone Monitoring Instrument (OMI) satellite observations of formaldehyde: implications for oxidants and particulate matter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(15): 7693-7703.
- [70] Cifuentes F, González C M, Aristizábal B H. Dataset for evaluating WRF-Chem sensitivity to biogenic emission inventories in a tropical region. Global online model (MEGAN) vs local offline model (BIGA). *Data in Brief*, 2021, 38: 107438.
- [71] Wang Z H, Bai Y H, Zhang S Y. A biogenic volatile organic compounds emission inventory for Beijing. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(27): 3771-3782.
- [72] Wong M S, Sarker L R, Nichol J, Lee S, Chen H, Wan Y, Chan P W. Modeling BVOC isoprene emissions based on a GIS and remote sensing database. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 66-77.
- [73] Pacheco C K, Fares S, Ciccioli P. A highly spatially resolved GIS-based model to assess the isoprenoid emissions from key Italian ecosystems. *Atmospheric Environment*, 2014, 96: 50-60.
- [74] Mentel T F, Kleist E, Andres S, Dal Maso M, Hohaus T, Kiendler-Scharr A, Rudich Y, Springer M, Tillmann R, Uerlings R, Wahner A, Wildt J. Secondary aerosol formation from stress-induced biogenic emissions and possible climate feedbacks. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(17): 8755-8770.
- [75] Wu K, Yang X Y, Chen D, Gu S, Lu Y Q, Jiang Q, Wang K, Ou Y H, Qian Y, Shao P, Lu S H. Estimation of biogenic VOC emissions and their corresponding impact on ozone and secondary organic aerosol formation in China. *Atmospheric Research*, 2020, 231: 104656.
- [76] Tiwary A, Kumar P. Impact evaluation of green-grey infrastructure interaction on built-space integrity: an emerging perspective to urban ecosystem service. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 350-360.
- [77] 李莹莹, 李想, 陈建民. 植物释放挥发性有机物(BVOC)向二次有机气溶胶(SOA)转化机制研究. *环境科学*, 2011, 32(12): 3588-3592.
- [78] Szidat S, Jenk T M, Synal H A, Kalberer M, Wacker L, Hajdas I, Kasper-Giebl A, Baltensperger U. Contributions of fossil fuel, biomass-burning, and biogenic emissions to carbonaceous aerosols in Zurich as traced by ^{14}C . *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D7): D07206.
- [79] Li J, Han Z W, Wu J, Tao J, Li J W, Sun Y L, Liang L, Liang M J, Wang Q G. Secondary organic aerosol formation and source contributions over east China in summertime. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119383.
- [80] Bergström R, Hallquist M, Simpson D, Wildt J, Mentel T F. Biotic stress: a significant contributor to organic aerosol in Europe? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(24): 13643-13660.