·专论与综述·

生物源挥发性有机物的大气环境效应及排放模型研究进展

孟德友[1,2,3],王宏[1,2,4*],邵生成[5],蔡河章[3],潘卫华[1,2,4]
(1. 中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室,福建　福州　350008;2. 福建省灾害天气重点实验室,福建　福州　350008;3. 福建省气象灾害防御技术中心,福建　福州　350008;4. 福建省气象科学研究所,福建　福州　350008;5. 金华市气象局,浙江　金华　322100)

摘　要:综述了生物源挥发性有机物(BVOCs)的大气环境效应,包括 BVOCs 促生臭氧(O_3)的原理和对二次有机气溶胶(SOA)生长变化的反馈机制,以及 BVOCs 在气候干预、影响全球碳排放等方面的研究现状。对比分析了 BEIS、G95、GloBEIS 与 MEGAN 等 BVOCs 排放模型的优缺点,提出了 BVOCs 液相化学反应及其生成物对环境的影响、BVOCs 排放模型与其他模型的耦合,以及 BVOCs 标准排放因子、相关模型参数和参数敏感性等后续研究方向。

关键词:生物源挥发性有机物;臭氧;二次有机气溶胶;碳排放;排放模型
中图分类号:X51　　　**文献标志码**:A　　　**文章编号**:1006-2009(2025)06-0012-06

A Review of Atmospheric Environmental Effects and Emission Models of Biogenic Volatile Organic Compounds

MENG Deyou[1,2,3], WANG Hong[1,2,4*], SHAO Shengcheng[5], CAI Hezhang[3], PAN Weihua[1,2,4]
(1. *Key Open Laboratory of Strait Disaster Weather*, *China Meteorological Administration*, *Fuzhou*, *Fujian* 350008, *China*; 2. *Fujian Provincial Key Laboratory of Disaster Weather*, *Fuzhou*, *Fujian* 350008, *China*; 3. *Fujian Meteorological Disaster Prevention Technology Center*, *Fuzhou*, *Fujian* 350008, *China*; 4. *Fujian Institute of Meteorological Science*, *Fuzhou*, *Fujian* 350008, *China*; 5. *Jinhua Meteorological Bureau*, *Jinhua*, *Zhejiang* 322100, *China*)

Abstract: The atmospheric environmental effects of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) were reviewed, including the principle of BVOCs promoting ozone (O_3) generation of and the feedback mechanism of BVOCs on the growth and change of secondary organic aerosol (SOA), as well as the current research status of BVOCs in climate intervention and their impact on global carbon emissions. The advantages and disadvantages of BVOCs emission models such as BEIS、G95、GloBEIS and MEGAN were compared and analyzed. Future research directions were proposed on liquid-phase BVOCs chemical reactions and the environmental impact of their products, the coupling of BVOCs emission models with other models, and standard emission factors, related model parameters and parameter sensitivity of BVOCs.

Key words: Biogenic volatile organic compounds; Ozone; Secondary organic aerosol; Carbon emission; Emission model

自 2013 年全面实施《大气污染防治行动计划》以来,虽然我国各地大气环境质量显著改善,但仍有约 36% 的城市空气质量尚未达标[1],主要受区域传输污染及大气复合污染的影响[2]。我国提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”,意味着我国环境污

收稿日期:2024-07-17;**修订日期**:2025-09-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U22A20578);福建省自然科学基金资助项目(No. 2021J01453, No. 2021J01463);福建省环保科技计划基金资助项目(No. 2023R004);中国气象局创新发展专项基金资助项目(CXFZ2023J046);珠江流域(华南区域)气象科研开放基金资助项目(ZJLY202427-FJ01)
作者简介:孟德友(1994—),男,江苏邳州人,工程师,硕士,研究方向为大气环境与气候变化。
***通信作者**:王宏,研究员 E-mail: wh1575@163.com

染防治工作面临减污降碳协同推进的新挑战。生物源挥发性有机物(BVOCs)是植物通过代谢途径次生合成的挥发性非甲烷碳氢化合物[3-4],在大气环境中广泛存在,是臭氧(O_3)和二次有机气溶胶(SOA)形成的重要前体物,其对大气环境和气候变化有着十分重要的影响[5]。2020 年我国 BVOCs 的排放总量约为 29.16 Tg,其主要成分为异戊二烯和单萜类化合物,占比分别为 27.5% 和 22.3%[6]。异戊二烯和单萜具有显著的大气光反应化学活性,对大气环境的氧化还原状况、对流层化学反应和全球碳循环具有重要影响[7]。因此,只有厘清 BVOCs 的大气环境效应、准确获取不同区域及全球尺度生态系统中的 BVOCs 排放情况,才能合理评价 BVOCs 对区域及全球的大气污染物和气候变化的影响[8]。今从 BVOCs 的大气环境效应和排放模型两个方面,对 BVOCs 的大气化学反应过程、碳循环影响、太阳辐射干预及排放模型发展状况进行系统综述,以期为我国 BVOCs 的进一步研究,以及大气污染物与温室气体的协同减排等工作提供参考。

1　BVOCs 的大气环境效应

1.1　BVOCs 与 O_3

影响大气对流层 O_3 浓度的前体物主要是 NO_x 和 VOCs,VOCs 可与羟基自由基(·OH)反应生成大量活性自由基(RO_2· 和 HO_2·),代替 O_3 的部分氧化作用,使得 O_3 在大气中积累。同时,在对流层顶附近,VOCs 氧化产物如甲醛(HCHO)等羰基化合物(RCHO)光解反应,产生更多的 HO_2·,通过 HO_2·和 NO 反应和后续 NO_2 光解反应均导致 O_3 浓度增加[9]。在该过程中,BVOCs 起着主导作用,其在自然环境 VOCs 总量中的占比约为 90%。通过区域化学传输模型观测 O_3 的浓度变化,结果表明 BVOCs 排放量的增加会导致 O_3 峰值时间提前且生成量大幅增加。在高温季节的区域传输过程中,由 BVOCs 生成的 O_3 对沿途区域 O_3 浓度的贡献占比可能超过 50%[5,10]。在全球变暖的背景下,BVOCs 对京津冀地区的 O_3 年贡献占比达 24%[11]。在植被覆盖率极高的福建,BVOCs 对 O_3 生成潜势的贡献超过 70%[12]。Liu 等[13]基于 CMAQ 和 WRF 模型的模拟数据及遥感影像数据,使用 MEGAN2 模型研究发现,到 21 世纪 50 年代我国 BVOCs 的排放量将增加约 24%,其增量生成的 O_3 约占 O_3 总量的 10%。受全球气候变化和局地极端天气,以及 BVOCs 组分复杂性、O_3 生成的复合作用等多重因素的共同影响,不同区域间 BVOCs 与 O_3 的相互作用特征具有显著差异,并且传统研究集中于森林系统,不能满足城市环境的观测及模拟需求。BVOCs 与 O_3 的复合作用,以及结合气象气候变化的区域本地化 BVOCs 与 O_3 的相关特征,需要进一步研究。

1.2　BVOCs 与 SOA

BVOCs 已经被确定是促进 SOA 形成和生长的最重要因素之一[5,14]。研究表明 BVOCs 的主要成分异戊二烯被吸收至含硫酸盐的潮湿颗粒中后,可被·OH 和 HO_2·氧化,形成中间体异戊二烯环氧二醇,进而有效产生 2-甲基四醇及硫酸酯,二者随后可形成 SOA 的主要成分二聚物和多聚物[15]。在大气氧化环境中,当 O_3 较·OH 占优势时,异戊二烯能促进 SOA 另一主要成分大气新粒子的形成[16]。研究显示异戊二烯对美国 SOA 的贡献约为 50%[7],我国东部地区 63% 的 SOA 来自 BVOCs[17]。此外,BVOCs 与·OH 反应生成 SOA 的速率明显高于 O_3 与 NO_x 反应生成 SOA 的速率[18-20]。萜烯与·OH、O_3 氧化会产生松醛、松酸和去甲酸等半挥发性有机化合物,这些物质可大量形成 SOA。同时,在大气 O_3 分解条件下,萜烯与硫酸盐颗粒物通过凝结作用也会形成 SOA[18-19],由萜烯生成的 SOA 约占美国东南部森林地区夏季 SOA 总量的 1/2[20]。在 BVOCs 与大气成分的响应及反馈过程中(见图 1,图中①—⑤代表不同的反应过程)[9,13,21],高温往往使植被的 BVOC 排放增加,并且在图 1 过程①中随着·OH 的消耗,BVOCs 的生命周期变长,其传输距离也进一步变长。Weber 等[9]研究发现,由于 SOA 前体物的生命周期及传输距离变长,导致大西洋中部 SOA 的生命周期增长 12%,使得大气环境中 SOA 的存量进一步增加。在高浓度 NO_x 背景下,BVOCs 及其初级氧化产物能够生成大气存续寿命更长的有机硝酸盐[3,22],并且在图 1 过程④中,由于 BVOCs 排放量增加,会产生更多 H_2O_2,促进 SO_2 的液相氧化反应,从而生成大量甲酸和乙酸类 SOA,进一步提高大气中 SOA 的负荷[23]。

1.3　BVOCs 的气候效应

大气环境中 BVOCs 通过形成 SOA 及云凝聚核作用影响太阳辐射[18]。随着局地 SOA 的累积,气溶胶光学厚度(AOD)增大,太阳辐射的散射量

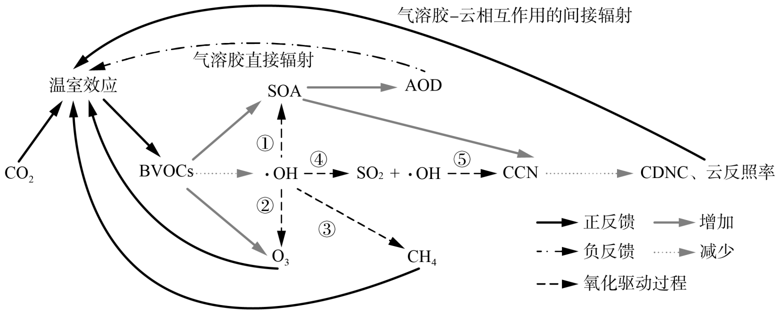

图 1　BVOCs 与大气成分的响应及反馈过程

Fig. 1　Response and feedback process of BVOCs to atmospheric components

相应增加,导致到达地表的太阳短波辐射减少,形成致冷效应[24]。同时, SOA 云凝形成凝结核(CCN),有利于云的生成,进而影响地表昼夜的太阳辐射情况。目前,大多数研究均表明 BVOCs 生成的 SOA 所产生的综合辐射效应表现为致冷[8,25]。Carslaw 等[26]研究认为,到 21 世纪末通过 BVOCs 产生的 SOA 将导致全球大气气溶胶量增加 25% ~ 150%,造成全球平均直接辐射出现 $-0.24\ W/m^2 \sim -0.04\ W/m^2$ 的扰动。然而,在图 1 过程④和⑤中,由于受 BVOCs 增量的影响,·OH 消耗量增加、存量减少,导致 SO_2 被·OH 氧化形成 H_2SO_4,进而形成新气溶胶粒子核(凝结核)的过程减弱,由此引发云滴数浓度(CDNC)及云反照率(albedo)下降,使得气溶胶–云相互作用的间接辐射效应增强。该过程产生的辐射强迫正反馈有可能超过 SOA 增加所引发的辐射强迫负反馈[27]。

在 BVOCs 增加所引发的系列反应中,·OH 减少量显著高于 HO_2·,导致 HO_2·的垂直迁移量增加,使其更易进入 O_3 辐射效率最高的区域并参与形成 O_3(图 1 过程②),进一步提高 O_3 的辐射效率,从而加剧 O_3 的温室效应。此外,由于·OH 的减少,CH_4 被·OH 氧化的通量大幅下降,相应导致 CH_4 浓度增加(图 1 过程③),进而使辐射强迫进一步增强[3,9]。

1.4　BVOCs 参与全球碳循环

在评估生态系统净碳平衡(NECB)和生态系统净交换(NEE)时,植被呼吸作用释放的 CO_2 通常被视为生态系统碳返回大气的主要途径。实际上,碳还会以植物释放的 BVOCs 为载体进入大气环境[3,28]。在全球范围内,植被每年通过 BVOCs 排放的碳量约超过 1 150 Tg[29]。研究表明,美国密苏里州的温带橡树林每年有 5% ~ 10% 的 NEE 以 BVOCs 的形式释放,我国亚热带针叶林 BVOCs 的排放对 NEE 的贡献为 3.5%[30]。由于 BVOCs 具有较强的化学活性,其在大气环境中的化学反应会使大气的还原性降低,从而延长 CH_4 等温室气体的半衰期,间接提升大气环境中的碳存量[3]。此外,在大气光化学反应条件下,BVOCs 可氧化生成 CO,CO 在大气环境中的寿命长达几个月,其将随大气环流进行长距离传输,最终 BVOCs 通过该方式全部转化为 CO,CO 又进一步氧化为 CO_2。总之,BVOCs 可通过一系列化学反应和全球传输过程对全球碳循环产生影响[8,30]。全球变暖导致的温度升高极大地促进了 BVOCs 的排放[29],到 21 世纪末,全球 BVOCs 排放量将在原有基础上增加 30% ~45%[31]。因此,亟须厘清 BVOCs 的排放通量及其对生态系统碳循环的影响。

2　BVOCs 排放模型

2.1　BEIS 模型

最早的 BEIS 模型由美国环境保护署(USEPA)建立,其考虑了土地利用类型、叶片生物量、排放因子和气象参数等要素,虽然可以模拟美国县域级别的 BVOCs 排放特征,但其分辨率仅为 16 km,并且受到土地利用类型、排放因子及叶片生物量等参数不确定性的限制[32]。后期,研究人员在 BEIS 模型的基础上,通过纳入新的土地利用类型数据库、更新排放因子、考虑冠层效应等拓展手段,相继开发了 BEIS2 和 BEIS3 等更新版本[33]。

2.2　G95 与 GloBEIS 模型

1995 年,Guenther 等[34]根据已有模型,针对排放源、排放速率和环境因子等方面进行改进,构建了新一代 G95 模型。该模型采用模块化设计,具有良好的灵活性,便于后续算法的升级和数据的更新。

20 世纪 90 年代中后期,研究人员在 G95 模型的基础上,通过更新土地利用数据、提高空间分辨率、细化植物分类、引入卫星数据和建立叶片能力平衡模型等多种手段开发了 GloBEIS 模型,极大地提高了 BVOCs 排放模型的可用范围及精细化程度[8]。

2.3　MEGAN 模型

2006 年,Guenther 等[35]基于 G95 和大量实验数据开发了自然气体和气溶胶排放模型(MEGAN),MEGAN 模型可以完全满足区域及全球的化学和传输建模要求,是目前使用最为广泛的 BVOCs 排放模型。在 MEGAN 中,BVOCs 排放是植被特定标准排放率和无量纲缩放函数的乘积,该函数取决于温度、阳光、叶面积指数、叶龄和土壤湿度[35-36]。MEGAN 模型对气象和土地覆盖情况具有高度敏感性,其模型效能的发挥,在很大程度上依赖于这些参数的准确性与空间分辨率[37]。

2.4　BVOCs 排放模型的不确定性及多模型对比

在 BVOCs 排放模型的计算过程中,涉及大量经验参数和校正因子,这些变量会随气温、物种特性、土地利用类型、叶生物量、太阳有效辐射等多种环境条件和物种特征的变化而变化。BVOCs 排放模型的敏感性分析表明,在各因子中,温度校正因子对 BVOCs 排放量影响最为显著,温度因子及其相关的季节调整系数的变动,可导致模拟结果产生超过 50%的差异[31]。此外,排放因子的差异导致北京地区异戊二烯排放量的前后差值达到 15%~70%,而土地利用数据库的不同则使 BVOCs 模拟排放量的差异达到约 40%[38]。因此,在具体研究中,需要参考对应区域及物种的 BVOCs 排放清单,以及各要素清单文献和数据库,选择合适的经验参数和校正因子。

不同 BVOCs 排放模型在应用场景及输入输出变量方面均存在较大差异[39-41],且随着版本的迭代更新,各版本模型逐渐形成了各自的特色(见表 1)。

表 1　BVOCs 主要排放模型的对比分析

Table 1　Comparative analysis of primary BVOCs emission models

模型	规模	输入变量	输出变量	优点	缺点	参考文献
BEIS	区域	叶片生物量、土地利用类型、排放因子、气象数据、区域代码等	异戊二烯,α-蒎烯及其他单萜类物质等	全球第 1 个生物源排放模型	空间分辨率低;应用范围小,仅限于北美地区;植被类型单一;不确定性大	[32]
G95	全球	生态系统类型、全球植被指数、气象数据等	异戊二烯、单萜类和其他 VOCs	引入了全球生态系统类型及植被指数;具有较高的全球排放清单分辨率;模块化结构便于升级和数据更新	研究主要集中于异戊二烯和单萜;所用参数多为月平均值,不确定性较大	[34]
BEIS2/3	区域	叶片生物量,土地利用类型,排放因子,小时冠层顶部气象条件(直接及散射光通量密度、温湿度、风速等)	异戊二烯、单萜类和其他 VOCs	具有较为精细的植物分类;增加了环境参数修正方法;引入了高空间分辨率的土地利用数据库;具备小时级时间分辨率	缺乏可靠的叶能量平衡模型和冠层模型,使用环境温度代替叶片温度,结果存在一定偏差;受土地利用类型数据库限制,仅适用于北美地区	[32-33]
GloBEIS	全球	叶面积指数、土地利用类型、气象数据等	异戊二烯、单萜类和其他 VOCs	具有网格化的高空间分辨率;考虑了叶片生长状态和消散效率对排放的影响;引入卫星(GOES)数据模拟太阳辐射数据;建立了可靠的叶片能量平衡模型	其全球排放数据基于区域化测量数据的模拟,且排放率和叶片生物量等受自然参数影响显著,其全球模拟结果准确性较低	[8]
MEGAN	区域/全球	土地利用类型、植被功能类型、气象数据等	异戊二烯、单萜类和其他 VOCs	分辨率高,可满足区域及全球尺度模拟需求;考虑了植被叶龄和土壤湿度对排放的影响;提出了耗散效率的计算方法	不确定的排放因子、经验算法、模型估算参数、温度、光照等物理变量与 CO_2、O_3 等化学物质对排放的影响,导致模拟结果存在一定误差	[7,35]
MEGAN2	区域/全球	土地利用类型、植被功能类型、叶面积指数、排放因子、气象数据等	异戊二烯、单萜类和其他 73 种特定类型化合物等共 146 种物质	基于 MEGAN 的改进模型,扩展了植被、化合物、排放类型及多种模式控制过程,模拟结果准确性提高	受排放因子、经验算法、模型估算参数和物理化学过程等不确定性因素的影响,存在误差	[4]
MEGAN3	区域/全球	土地利用数据、植被功能类型、叶面积指数、排放因子、气象数据等	异戊二烯、单萜类等共 201 种物质,新增轻烃和氧化产物等数个新的排放类别	更新了冠层环境模型;引入了排放因子预处理器;考虑了干旱、极端温度、高风速、空气污染及冠层空隙对排放的影响	对排放因子、模型估算参数和物理化学过程等不确定性因素的数据质量要求更高;对复杂化学物种的准确分析仍有进步空间	[36-37,42-43]

3　展望

本研究总结了 BVOCs 促生 O_3 和 SOA 的过程机理，以及对气候和碳循环的综合作用。由于 BVOCs 化学成分和理化性质复杂、气溶胶间接效应显著、区域间地理差异明显，其复杂组分与其他大气成分的相互作用机制仍存在诸多未知，且不同区域间 BVOCs 研究水平差异显著。同时，BVOCs 排放模型的准确性依赖于化学反应参数、排放观测数据，以及土地、生物量等相关变量。因此，BVOCs 的环境效应及排放模型研究仍存在很大的不确定性，未来还需要对以下方面进行研究。

（1）BVOCs 成分十分复杂，目前对其大气化学性质的研究主要集中于异戊二烯和单萜类化合物，而对于占比约 30% 的其他反应性 BVOCs 则关注较少，其他反应性 BVOCs 对 O_3 和 SOA 的生成影响及贡献亟待深入评估。同时，对 BVOCs 的大气成分反应性研究均集中于气相，未来还应关注大气中广泛存在的 BVOCs 液相化学反应过程及其生成物对大气环境和气候变化的影响。

（2）目前对 BVOCs 的大范围评估主要使用排放模型，大多模型基于离线数据的模拟，未来应深入与空气质量、天气模型和大气化学传输模型的耦合研究，使排放模型具有广泛适用性。我国实测的植被 BVOCs 排放因子及生物量数据相对较少，缺少覆盖范围广泛的土地利用类型数据库，极大地增加了排放模型的不确定性。未来应开展更普遍的 BVOCs 排放因子观测研究，对我国土地利用类型及植物分布情况进行系统分类与统计分析，进一步开展对 BVOCs 标准排放因子、相关模型参数及参数敏感性的研究。

［参考文献］

[1] 中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境状况公报[R/OL].（2023-05-29）[2024-07-10]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202305/P020230529570623593284.pdf.

[2] 张运江，雷若媛，崔世杰，等. 2015—2020 年我国主要城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染时空变化趋势和影响因素[J]. 科学通报，2022，67(18)：2029-2042.

[3] PEÑUELAS J，STAUDT M. BVOCs and global change[J]. Trends in Plant Science，2010，15(3)：133-144.

[4] 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.

[5] LI J F，WANG Y H，QU H. Dependence of summertime surface ozone on NO_x and VOC emissions over the United States：peak time and value[J]. Geophysical Research Letters，2019，46(6)：3540-3550.

[6] 白广坤，孔范龙，李志才，等. 中国天然源挥发性有机物排放特征及对大气二次污染物生成的影响[J/OL].（2025-02-12）[2025-08-15]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250212.1110.010.

[7] LIAO H，HENZE D K，SEINFELD J H，et al. Biogenic secondary organic aerosol over the United States：Comparison of climatological simulations with observations[J]. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，2007，112(D6)：D06201.

[8] LUN X X，LIN Y，CHAI F H，et al. Reviews of emission of biogenic volatile organic compounds（BVOCs）in Asia[J]. Journal of Environmental Sciences，2020，95(9)：266-277.

[9] WEBER J，ARCHER-NICHOLLS S，ABRAHAM N L，et al. Chemistry-driven changes strongly influence climate forcing from vegetation emissions[J]. Nature Communications，2022，13：7202.

[10] XU J W，ZHOU D R，GAO J，et al. Biogenic emissions-related ozone enhancement in two major city clusters during a typical typhoon process[J]. Applied Geochemistry，2023，152：105634.

[11] CAI B，CHENG H M，KANG T F. Establishing the emission inventory of biogenic volatile organic compounds and quantifying their contributions to O_3 and $PM_{2.5}$ in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Atmospheric Environment，2024，318：120206.

[12] 张银菊. 福建省挥发性有机物排放清单及臭氧生成潜势研究[D]. 厦门：厦门大学，2019.

[13] LIU Y F，SU H，WANG S W，et al. Strong particle production and condensational growth in the upper troposphere sustained by biogenic VOCs from the canopy of the Amazon Basin[J]. Atmospheric Chemistry and Physics，2023，23(1)：251-272.

[14] SAHU L K. Volatile organic compounds and their measurements in the troposphere[J]. Current Science，2012，102(12)：1645-1649.

[15] NGUYEN T B，COGGON M M，BATES K H，et al. Organic aerosol formation from the reactive uptake of isoprene epoxydiols（IEPOX）onto non-acidified inorganic seeds[J]. Atmospheric Chemistry and Physics，2014，14(7)：3497-3510.

[16] TISZENKEL L，LEE S H. Synergetic effects of isoprene and HO_x on biogenic new particle formation[J]. Geophysical Research Letters，2023，50(14)：103545.

[17] LIU S，XING J，ZHANG H L，et al. Climate-driven trends of biogenic volatile organic compound emissions and their impacts on summertime ozone and secondary organic aerosol in China in the 2050s[J]. Atmospheric Environment，2019，218：117020.

[18] LI X Y，REN Z Y，ZHANG X Y，et al. Differences in secondary organic aerosol formation from α-pinene photooxidation in a chamber with purified air and ambient air as matrices：preliminary results[J]. Atmosphere，2024，15(2)：204.

[19] EHN M，THORNTON J A，KLEIST E，et al. A large source of low-volatility secondary organic aerosol[J]. Nature，2014，506：476-479.

[20] ZHANG H, YEE L, LEE B H, et al. Monoterpenes are the largest source of summertime organic aerosol in the southeastern United States[J]. PNAS, 2018, 115(9): 2038-2043.

[21] MOZAFFAR A, SCHOON N, BACHY A, et al. Biogenic volatile organic compound emissions from senescent maize leaves and a comparison with other leaf developmental stages[J]. Atmospheric Environment, 2018, 176: 71-81.

[22] YANG Y C, LIU X G, ZHENG J, et al. Characteristics of one-year observation of VOCs, NO_x, and O_3 at an urban site in Wuhan, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 79(5): 297-310.

[23] BATES K H, JACOB D J, COPE J D, et al. Emerging investigator series: aqueous oxidation of isoprene-derived organic aerosol species as a source of atmospheric formic and acetic acids[J]. Environmental Science: Atmospheres, 2024, 4(2): 282.

[24] CLAEYS M, GRAHAM B, VAS G, et al. Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene[J]. Science, 2004, 303(5661): 1173-1176.

[25] 张学珍,于志博,郑景云,等.植物挥发性有机物的气候与环境效应研究进展[J].地球科学进展,2015,30(11):1198-1209.

[26] CARSLAW K S, BOUCHER O, SPRACKLEN D V, et al. A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the earth system[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(4): 1701-1737.

[27] SPORRE M K, BLICHNER S M, KARSET I H H, et al. BVOC-aerosol-climate feedbacks investigated using NorESM[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(7): 4763-4782.

[28] 周健,李晓源,邓一荣.碳中和实践进展、实现路径与展望[J].环境监测管理与技术,2023,35(2):8-11.

[29] CAI M F, AN C J, GUY C, et al. A scientometric analysis and review of biogenic volatile organic compound emissions: Research hotspots, new frontiers, and environmental implications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 149: 111317.

[30] QU Y, AN J L, LI J. Synergistic impacts of anthropogenic and biogenic emissions on summer surface O_3 in East Asia[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(3): 520-530.

[31] ZHANG M S, ZHAO C, YANG Y H, et al. Modeling sensitivities of BVOCs to different versions of MEGAN emission schemes in WRF-Chem(v3.6) and its impacts over eastern China[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(10): 6155-6175.

[32] PIERCE T E, BAUGUES K A. User's guide to the personal computer version of the biogenic emissions inventory system (PC-BEIS)[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1991, 41(7): 937-941.

[33] HANNA S R, RUSSELL A G, WILKINSON J G, et al. Monte Carlo estimation of uncertainties in BEIS3 emission outputs and their effects on uncertainties in chemical transport model predictions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110(D1): D01302.

[34] GUENTHER A, HEWITT C N, ERICKSON D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D5): 8873-8892.

[35] GUENTHER A, KARL T, HARLEY P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(11): 3181-3210.

[36] WANG Y J, TAN X J, HUANG L, et al. The impact of biogenic emissions on ozone formation in the Yangtze River Delta region based on MEGAN v3.1[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2021, 14: 763-774.

[37] DIMARIA C A, JONES D B A, WORDEN H, et al. Optimizing the isoprene emission model MEGAN with satellite and ground-based observational constraints[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(4): e2022JD037822.

[38] WANG H, WU Q Z, LIU H J, et al. Sensitivity of biogenic volatile organic compound emissions to leaf area index and land cover in Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(13): 9583-9596.

[39] XU X, XIAO Z H, NI Y Z, et al. Comprehensive analysis of BVOCs in Shanghai, China: Emission patterns, inventory, and association with ozone pollution[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 375: 110832.

[40] CHEN X, GONG D C, LIN Y J, et al. Emission characteristics of biogenic volatile organic compounds in a subtropical pristine forest of southern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 148: 665-682.

[41] 李奥哲,段文娇,亓浩雲,等.基于多模型和多源数据的京津冀地区 BVOCs 排放清单[J].中国环境科学,2023,43(10):5052-5061.

[42] 黄国锋,沈劲,陈多宏,等.广东省天然源 VOCs 排放特征及臭氧污染影响[J].环境科学学报,2025,45(4):322-330.

[43] CAI B, CHENG H M, KANG T F, et al. The input-optimized and supplemented MEGAN improves biogenic volatile organic compounds estimation accuracy in China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2025, 16(11): 102650.