余海峰,邬湘成,成 琳,等.中国亚热带森林区(贵州黔西南-浙江绍兴)异戊二烯空间格局的走航观测研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4145-4151.
Yu H F, Wu X C, Cheng L, et al. Mobile observations of isoprene spatial distribution in the subtropical forests of China (Guizhou Qianxinan-Zhejiang Shaoxing) [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4145-4151.

中国亚热带森林区(贵州黔西南-浙江绍兴)异戊二烯空间格局的走航观测研究

余海峰[1],邬湘成[2],成 琳[1],常运华[1*] (1.南京信息工程大学生态与应用气象学院,江苏 南京 210044；2.南京林业大学生态与环境学院,江苏 南京 210037)

摘要：通过搭载高分辨率质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-TOF-MS)的移动实验室,对中国亚热带森林区由东西向横断面(2000km)开展了区域尺度大气异戊二烯的移动观测,旨在揭示该区域大气异戊二烯的空间分布格局.结果表明,异戊二烯浓度存在显著的空间异质性,平均浓度为(0.635 ± 0.204) μg/m^3.其中,江南森林以广泛分布的竹子和主要的亚热带常绿阔叶树种为特征,异戊二烯浓度为(0.629 ± 0.116) μg/m^3,约比贵州森林中(主要为针叶林)的(0.474 ± 0.155)μg/m^3 高出 32.8%,这表明植被组成显著影响森林异戊二烯空间分布和排放强度.而在工业生产活动密集的浙江区域,异戊二烯浓度达到了(0.881 ± 0.155)μg/m^3,分别比贵州和江南森林分别高出 86.2%和 40.1%.除了该区域丰富的植被种类植物物种多样性外,工业活动、交通等人为因素也可能对该地区异戊二烯浓度偏高产生一定影响.

关键词：亚热带森林；生物源挥发性有机化合物；异戊二烯；移动测量；排放
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4145-07

Mobile observations of isoprene spatial distribution in the subtropical forests of China (Guizhou Qianxinan-Zhejiang Shaoxing). YU Hai-feng[1], WU Xiang-cheng[2], CHENG Lin[1], CHANG Yun-hua[1*] (1.College of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China；2.College of Ecology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4145~4151

Abstract：Regional-scale mobile observations of atmospheric isoprene were conducted along a 2000km east-west transect in China's subtropical forest region using a mobile laboratory equipped with a high-resolution proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-TOF-MS). The objective of this study was to elucidate the spatial distribution patterns of isoprene in this area. The results revealed significant spatial heterogeneity in isoprene concentrations, with an average value of (0.635 ± 0.204) μg/m^3. The isoprene concentration in the Jiangnan forests, characterized by widespread bamboo and predominantly subtropical evergreen broadleaf species, was (0.629 ± 0.116) μg/m^3, which was approximately 32.8% higher than the (0.474 ± 0.155) μg/m^{3}observed in the Guizhou forests, primarily composed of conifers. These findings indicate that the spatial distribution and emission intensity of isoprene in forested areas are significantly influenced by vegetation composition. Moreover, in the industrially dense Zhejiang region, the isoprene concentration reached (0.881 ± 0.155) μg/m^3, representing increases of 86.2% and 40.1% compared to the Guizhou and Jiangnan forests, respectively. These results suggest that in addition to the rich diversity of plant species, anthropogenic factors such as industrial and traffic activities also likely contribute to the elevated isoprene concentrations observed in this region.

Key words：subtropical forests；biogenic volatile organic compounds (BVOCs)；isoprene；mobile measurement；emissions

生物源挥发性有机物(BVOCs)的化学结构和组成多样,主要包括单萜、倍半萜、醛类、酮类、醇类和芳香烃等[1].BVOCs 的很多成分具有高度的化学活性,极易与大气中的氮氧化物、氧化剂及·OH 等发生复杂的光化学反应[2-3],成为臭氧(O_3)和二次有机气溶胶(SOA)形成的重要前体物,进而对区域和全球气候变化产生间接影响[4-6].

BVOCs 在气候调节和生态平衡中扮演着重要角色,影响着植物生长、生态系统功能及生物多样性[7-9].植被是 BVOCs 的主要来源,全球约 90%的 BVOC 来源于植被排放[1,10].其中,异戊二烯(C_5H_8)是 BVOCs 的重要组成部分,全球年排放量约为 400~600TgC[7,11],约占 BVOC 排放总量的 44%[1].由于碳-碳双键的存在,异戊二烯具有高反应性,能够增强

收稿日期：2025-01-07
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3706202);国家自然科学基金项目(41975166 和 42175135)
* 责任作者, 教授, changy13@nuist.edu.cn

对流层 O_3 的形成[12-13],进而影响区域乃至全球的气候变化[14-15].大气异戊二烯绝大部分源于植被排放,但在机动车尾气[16-17]、人体呼出的气体[18-19]、生物质燃烧[20]和合成橡胶生产过程中[21]都检测到了异戊二烯.

亚热带森林是中国分布面积最大的森林类型,占全国森林面积的约一半[22].这些森林不仅是重要的碳汇,也是异戊二烯的重要排放源[23]中国亚热带森林区地形多样,涵盖了喀斯特地貌显著的云贵高原以及山峦起伏的江南丘陵区,且平原地区交错分布.得益于东亚季风环流,亚热带区域拥有良好的水热条件,为植被生长提供了有利环境.该地区植被类型丰富,以亚热带常绿阔叶林为主,贵州的森林植被以常绿阔叶林和次生林为主,低山和丘陵地区则广泛分布着马尾松林、杉木林和毛竹林.独特的气候和复杂的地形、土壤等因素使得该区域的植被类型呈现出显著的丰富性和空间异质性.为研究异戊二烯的排放特征,本文利用移动实验室在中国植被最为密集的亚热带森林区域进行异戊二烯的移动观测.该移动实验室配备了具有高时间分辨率和高灵敏度的 Vocus 质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-TOF-MS),能够在线实时监测环境中的异戊二烯及其他物质,快速响应环境变化.此外,该方法能够覆盖更广泛的研究区域,从而有效描绘异戊二烯的空间分布格局,为进一步理解其在大气化学过程中的作用及其对生态环境的影响提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于中国南部亚热带森林区(23°N~30°N,104°E~121°E),属于典型的亚热带季风气候,温暖湿润,年平均气温在 16~20°C 之间,年降水量一般在 1200~2000mm 之间,雨量充沛且集中在夏季,冬季较为温和,很少出现严寒天气.植被以亚热带常绿阔叶林为主,在一些高海拔或特定地理条件下,还存在亚热带混交林和针叶林.

本次观测于 2019 年 11 月 29 日至 12 月 1 日(晚秋/初冬)在中国南部亚热带森林区进行,是 2019 年中国进出口博览会空气质量保障要求的一部分,旨在同步获取多种大气组分的时空分布信息[24-25].此外,选择此相对非生长季时段,有助于在较弱的光化学反应和通常较低的混合层条件下,更好地识别和对比不同区域源排放的空间特征.观测路线(见图 1)从贵州黔西南州首府兴义出发,穿越高海拔的云贵高原,向东到达地势起伏的江南丘陵地区,再到地势相对平坦的长江流域,最终抵达浙江绍兴,行程近2000km,几乎横穿整个中国南部地区.根据植被类型和地理条件的不同,我们将测量区域划分为三个主要路段:贵州高原阔叶混交林带、江南亚热带常绿阔叶林带,以及浙江的城市、工厂与森林混合带.其中,贵州高原段主要由亚热带混交林和针叶林组成,优势树种包括马尾松、云南松等.随着地势由高原逐步过渡到丘陵山地,区域内主要以亚热带常绿落叶阔叶混交林为主,主要树种包括栎属、木荷和青冈等.同时,山地地区还广泛分布有杉木林和毛竹林.浙江段则后为典型的亚热带常绿阔叶林区,以楠木、樟树、栲树等常绿阔叶树种为主,同时毛竹林也分布广泛.浙江段是典型的亚热带常绿阔叶林区,但作为中国经济最发达的省份之一,浙江的工业化和城市化程度较高,交通网络发达,因此该路段包含了更多的城市和工业元素,形成了独特的城市、工厂与森林混合带.

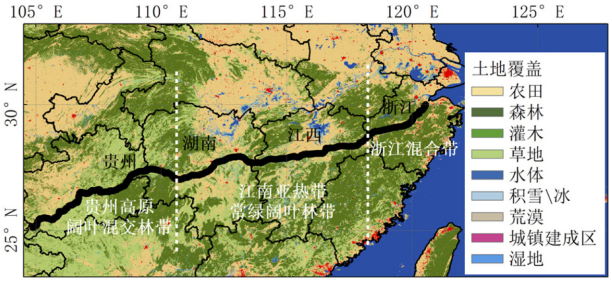


图 1 中国亚热带森林区异戊二烯观测路线

Fig.1 Observation Route in the Subtropical Forest Region of China

2019 年中国土地覆盖数据(30 米分辨率)来源于 https://zenodo.org/record/4417810;最后访问日期:2025 年 4 月 16 日

审图号:GS(2024)0650 号

1.2 研究方法

本研究采用高灵敏度的 Vocus PTR-TOF-MS (TOFWERK AG, Switzerland)进行实时测量.该仪器使用水合氢离子(H_3O^+)作为试剂离子,异戊二烯被确认为 $C_5H_8H^+$ (*m/z* 69.070).仪器通过长度仅为 3 米的全氟烷氧基管,以 2L/min 的流速吸入环境空气进行分析.该仪器的检测限极低,能够检测到极低浓度

的 VOCs[26-27].采样频率设置为 1 秒,使得仪器能够快速响应环境变化,高频率采样和高灵敏度的结合,提高了数据的时效性.

为了保证本研究数据的准确性,在正式测量前,我们在相对湿度为 55%的条件下使用标准气体对仪器进行了校正;将 VOCs 混合标准气体分别稀释成 5 个不同浓度梯度的标准气体,每个梯度浓度测试时间为 10 分钟,根据分析结果建立标准曲线,如图 2 所示.此外,该仪器还同时测量了苯($C_6H_6H^+$, *m/z* 79.11),并提供了苯的校准结果图(图 2).

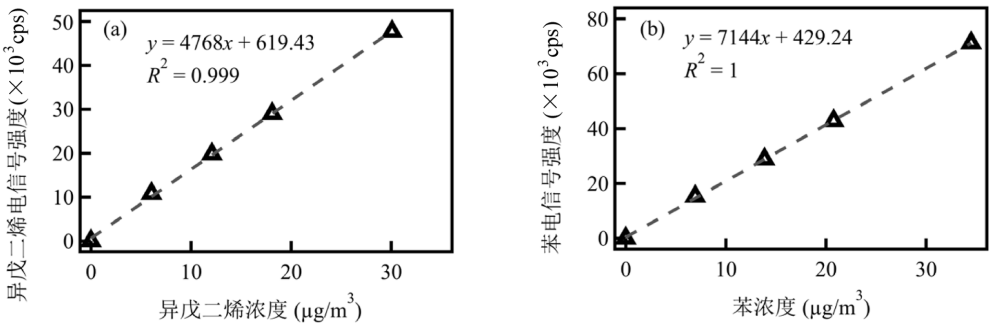


图 2　异戊二烯(a)和苯(b)的校准曲线

Fig.2　Calibration curves for isoprene (a) and benzene (b)

1.3　数据处理与分析

考虑到移动测量的复杂性,我们对收集到的原始数据进行了严格的过滤和分类.测量路线不仅经过了目标森林区域,还途经了一些人为排放较强的地区,例如城市和工业园区.在实验过程中,我们进行了多次停车加油,并偶尔穿过隧道,因此需要剔除这些期间采集的数据,以确保保留的数据更加准确和具有代表性.此外,为了减少瞬时波动的影响,提高数据的稳定性和可靠性,我们将秒级数据平均为分钟数据进行处理.

所有的数据处理均基于 Igor Pro 的 Tofware 软件包 v3.2.0(瑞士 Tofwerk 公司)进行浏览、质量校准、基线计算、高分辨率峰拟合以及数据输出等.使用 Excel 进行数据处理,并使用 Igor Pro 7.08 进行画图及相关分析.

2　结果与分析

2.1　异戊二烯的浓度水平及特征

本研究通过搭载高分辨率质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-TOF-MS)的移动实验室,对中国亚热带森林区进行了大区域的异戊二烯走航观测.结果表明(表 1),观测期间异戊二烯平均浓度为(0.635 ± 0.204) μg/m^3,不但空间异质性显著:贵州段的异戊二烯浓度最低,仅为(0.474 ± 0.155) μg/m^3;江南段的浓度处于中等水平,为(0.629 ± 0.116) μg/m^3;而浙江段的异戊二烯浓度最高,达到了(0.881 ± 0.155)μg/m^3.需要指出,本结果反映的是晚秋/初冬时段的浓度水平.由于异戊二烯排放强烈依赖于温度和光照,具有显著的季节性[1],本研究的平均浓度显著低于文献报道中亚热带森林夏季的浓度水平(如鼎湖山夏季 2.037μg/m^3,表 2),这与温度驱动的排放季节性衰减规律一致.此外,与部分在非生长季或全年平均的观测结果(如贡嘎山 0.578μg/m^3,表 2)相比,本研究的浓度处于相似或略高水平.此外,与同位于亚热带的城市年均值相比(如广州 3.405μg/m^3 表 2),本研究的结果显著偏低.除了受季节因素的影响外,可能还因为城市环境中异戊二烯来源更为广泛.已有研究表明,在城市区域内,异戊二烯不仅来源于植被的自然排放,还包括化石燃料燃烧、生物质燃烧以及机动车排放等人为源[28-30].

表 1　移动测量过程中不同路段的异戊二烯浓度水平

Table 1　Variation in isoprene concentrations across segments during mobile observation

监测点	植物功能类型	优势树种	平均浓度(μg/m^3)
贵州高原阔叶混交林带	亚热带混交森林 针叶林	马尾松,云南松	0.474 ± 0.155
江南亚热带常绿阔叶林带	常绿阔叶林 落叶阔叶林 竹林	毛竹,杉木,樟树,木荷,青冈,石楠	0.629 ± 0.116
浙江混合带	常绿阔叶林 落叶阔叶林	樟树,木荷,青冈,乌桕,毛竹	0.881 ± 0.155

表 2 不同地区异戊二烯的大气浓度水平

Table 2 Concentration of isoprene in different regions

监测点	生态类型	方法	观测季节/时段	平均浓度(μg/m^3)
中国亚热带森林区	亚热带森林	PTR-TOF-MS(移动观测)	晚秋/初冬(11 月底至 12 月初)	0.635 ± 0.204
Amazon [30]	热带雨林	PTR-MS (原位观测)	湿季(9 月) 干季(2、3 月)	16.265 2.615
天井山南岭站 [31]	亚热带高山森林	GC-MS (原位观测)	夏、秋季 (7~11 月)	0.526
鼎湖山[32]	亚热带森林	GC-MS (原位观测)	夏季(6~8 月)	2.037
贡嘎山[33]	温带高原	GC-MS (原位观测)	全年	0.578
Hyytiala [34]	温带针叶林	GC-SIM (原位观测)	夏季(7 月)	0.298
Castelporziano [35]	温暖温带常绿灌丛	PTR-MS (原位观测)	春~夏季(5~6 月)	0.374
广州 [28]	亚热带城市	GC-MS (原位观测)	全年	3.405
台北 [29]	亚热带城市	GC-MS (原位观测)	夏季(7~8、10 月)	2.189
Houston [30]	亚热带城市	GC-FID (原位观测)	夏季(6~7 月)	1.915

2.1 异戊二烯浓度的空间分布特征

图 3 展示了从贵州到浙江行驶路径上异戊二烯浓度变化的时间序列.如图,沿途异戊二烯浓度波动显著,不同时间段和地区之间存在明显差异.贵州段观测到的异戊二烯浓度为(0.474±0.155) μg/m^3,在 3 个区域中最低.其根本原因在于植被组成的差异:该区域主要为以马尾松和云南松为主的针叶林,这些树种的异戊二烯排放率通常远低于阔叶树种和竹子[22,36-37].其次,云贵高原的高海拔特征(平均 1500m)导致其整体气温偏低,尤其在观测进行的晚秋/初冬时节.根据已知的异戊二烯排放对温度的敏感性[7],较低的环境温度会进一步抑制植物的生物合成和排放过程,这也是造成该区域观测浓度偏低的一个重要辅助因素.因此,海拔主要通过影响局地气温和适宜植被类型来间接调控区域异戊二烯水平.

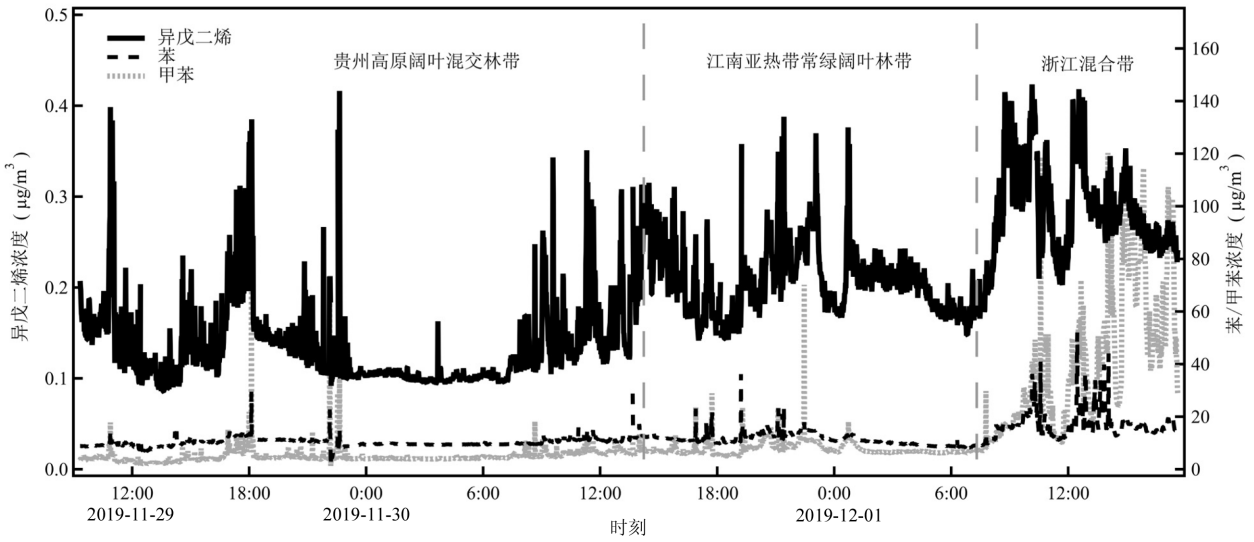


图 3 沿观测路线异戊二烯、苯和甲苯的浓度时间序列

Fig.3 Time series of isoprene, benzene, and toluene concentrations along the observation route

浙江段异戊二烯浓度(0.881±0.155μg/m^3)高于江南区域(约 40.1%),并且远高于贵州森林(约 86.2%).该区域植被茂密,包含樟树、毛竹等高排放物种[37-38,41],使其具有较高的自然排放背景.观测期间,苯浓度与异戊二烯呈现正相关(r = 0.504,图 4),而苯作为典型人为源标志物,其来源涵盖交通排放(机动车尾气)与工业过程(如化工生产)[39],这表明浙江异戊二烯浓度的升高可能受到多种人为活动的综合影响.此外,苯、甲苯与异戊二烯在浙江段的同步升高(图 3)进一步表明,交通和工业等人为源可能通过

直接释放(如机动车尾气中的异戊二烯)或前体物的光化学转化共同驱动异戊二烯生成[16-17,21].此外,观测时段(晚秋/初冬)恰逢生物质燃烧高发期(如秸秆焚烧或取暖燃烧),此类活动可释放异戊二烯或其前体物[20],可能对城乡结合区域的浓度产生增量.我们先前研究已确认该区域存在显著的人为胺类排放源[24-25],结合浙江省工业活动(如纺织印染、化工生产)密集的特征,工业源可能通过直接排放或释放前体物间接促进异戊二烯生成.尽管自然源(如常绿阔叶林)贡献不可忽视,但多维度证据表明人为活动的协同效应是导致浓度异常升高的关键诱因.然而,当前数据缺乏 NO_x、CO 等标志物,限制了工业、交通、生物质燃烧源等的精确区分.同时,当前移动观测数据尚不足以精确量化各类源的相对贡献,后续需进行详细的源排放测试.

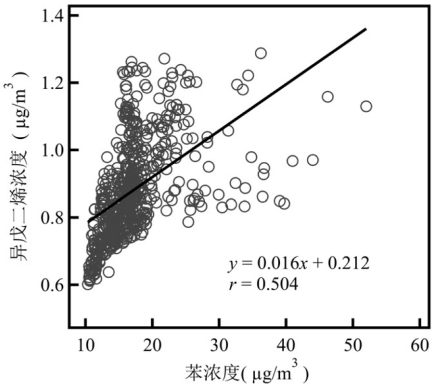


图 4　浙江区域异戊二烯与苯浓度的相关性

Fig.4　Isoprene and benzene concentration correlation in Zhejiang region

3　讨论

通过大范围移动观测揭示了晚秋/初冬时段异戊二烯浓度的空间分异特征,但其时空代表性仍受限于观测设计的约束.由于本次移动观测未能同步获取连续、高精度的沿途气象参数(如环境温度、光合有效辐射).因此,本研究无法定量分析实时气象波动对异戊二烯浓度的精细影响.相关的讨论主要基于观测时段、地理区域的一般气候特征以及已知的异戊二烯排放对环境因子的响应规律.

本研究在晚秋/初冬开展,观测到的异戊二烯绝对浓度水平受限于当时较低的气温和光照条件.与表 2 中其他研究对比(特别是夏季观测,如鼎湖山[32]),本研究的绝对浓度值偏低是符合预期的,主要反映了异戊二烯排放强烈的季节性[40].然而,研究的核心在于揭示不同区域间的相对差异.我们认为,观测到的贵州<江南<浙江的空间格局,主要由区域代表性植被类型的固有排放潜力差异驱动.具体而言,江南森林以毛竹、樟树等亚热带常绿树种为主,而贵州森林以以松树、杉树等针叶林占优.之前的研究表明,毛竹和樟树等植物的叶片在强光照和高温条件下能够大量释放异戊二烯,而松树和杉树等的异戊二烯排放潜力较低[35,37,41].本研究的结果与先前的研究一致,进一步表明植被组成差异直接决定了区域本底排放的空间格局.尽管绝对浓度会随季节波动,但植被固有排放特性使得该相对差异具有跨季节普适性.除了植被差异,区域间的气候背景也存在不同.贵州高原通常气温低于江南丘陵和浙江沿海,尤其在观测时段,这种温度差异会进一步加剧异戊二烯排放的区域差异.

浙江段浓度的异常高值,除了与当地丰富的植被多样性(如竹林、常绿阔叶树种密集分布)有关,可能还受到该区域工业活动和机动车排放等人为活动的影响.通过结合苯、和甲苯数据分析表明,表明交通排放(机动车尾气含芳香烃类前体物)、工业活动及生物质燃烧等人为源可能贡献额外增量.具体而言,机动车尾气中的甲苯、二甲苯等化合物可在大气中通过光化学反应生成异戊二烯[16-17] ,而石化加工等工业过程也可能直接释放异戊二烯或其前体物[21].这种自然与人为排放的叠加效应,使得浙江成为冬季异戊二烯浓度的异常高值区.然而,受限于详细的源解析数据,目前尚无法精确量化交通、工业等具体人为源的贡献比例,这需要通过同位素示踪或 PMF 受体模型等方法进一步验证.

为将本研究观测结果置于更广阔的模拟背景下,我们参考了已发表的基于 MEGAN 模型的异戊二烯排放模拟研究.基于 MEGAN 的模拟显示,作为长三角 BVOCs 排放核心区,浙江省 2014 年异戊二烯年排放量达 3.3×10^5 ton/yr,呈现显著的季节特征:夏季排放最高,仅 7 月贡献率高达约 40%;而冬季的排放最低,仅占约 3%[42].Lou 等[43]的研究进一步表明,浙江夏季异戊二烯最大日均浓度可达 3.5×10^{-9} 以上,远高于本研究中晚秋/初冬时段的观测值 (0.881μg/m^3,约为 0.3×10^{-9}),这与异戊二烯排放的温度依赖性

特征高度一致.此外,于模型对季节排放贡献率的估算(夏季占 60%~70%,冬季约 3%)[44-45],得到冬季模拟浓度结果低于 0.2×10^{-9},略低于本研究实测值.这一差异可能与模型对局地高排放植被(如城市常绿树种、竹林)的空间分布刻画不足以及冬季人为排放源(如生物质燃烧)与自然源的耦合效应未被充分量化密切相关.本研究通过大范围移动观测获取的冬季异戊二烯浓度数据,不仅揭示了现有排放清单在低温季节的潜在偏差,更为优化模型参数体系(包括植被分类精细化、排放因子动态修正)以及发展自然-人为协同排放表征方法提供了关键实证支撑.

尽管移动测量方法能够有效捕捉大规模的空间变化,但为了更全面地理解异戊二烯的空间分布模式及其环境效应,在高排放区域和关键时间节点进行长期原位观测至关重要.此外,纳入更广泛的气象参数(如温度、太阳辐射等)将有助于提升对异戊二烯排放和传输机制的认识.未来的研究应深入探讨植被类型、海拔高度及地理特征等因素之间的相互关系,评估人为活动对异戊二烯浓度的具体影响,并探索如何通过管理措施来减轻这些影响.

4 结论

4.1 晚秋/初冬时段中国亚热带森林区的异戊二烯平均浓度为(0.635±0.204)μg/m^3,呈现出显著的空间异质性.其中,浙江森林区的异戊二烯浓度最高,江南森林区次之,而贵州森林区的浓度最低.

4.2 亚热带森林区异戊二烯空间分布格局与区域代表性植被类型直接相关.以低排放潜力针叶林为主的贵州高原段,其浓度显著低于以高排放潜力阔叶树种和竹林为主的江南及浙江区域.

4.3 人为活动对工业化与城市化区域的异戊二烯浓度存在较为显著的叠加贡献.浙江段的异戊二烯浓度不仅显著高于其他自然植被主导的区域(较贵州和江南分别高 86.2%和 40.1%),其浓度变化与人为源示踪物苯(r=0.504)和甲苯呈现出较为显著的正相关性.

4.4 晚秋/初冬时段的实测异戊二烯浓度与基于 MEGAN 模型的模拟结果存在差异.本研究的观测平均值高于部分模型对该季节排放贡献率的估算结果,尤其是在人为活动与局地高排放植被耦合的区域.

参考文献:

[1] 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.

[2] 何念鹏,韩兴国,潘庆民.植物源 VOCs 及其对陆地生态系统碳循环的贡献 [J]. 生态学报, 2005,25(8):2041-2048.
He N P, Han X G, Pan Q M. Volatile organic compounds emitted from vegetation and their contribution to the terrestrial carbon cycle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(8):2041-2048.

[3] 张 蔷,李令军,赵文慧,等.北京森林 BVOCs 排放现状及动态变化特征分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(9):3991-4000.
Zhang Q, Li L J, Zhao W H, et al. The current status and characteristics of variations in forest BVOCs emissions in Beijing [J]. China Environmental Science, 2022,42(9):3991-4000.

[4] 王成辉,陈军辉,韩 丽,等.成都市城区大气 VOCs 季节污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2020,41(9):3951-3960.
Wang C H, Chen J H, Han L, et al. Seasonal pollution characteristics and analysis of the sources of atmospheric VOCs in Chengdu urban area [J]. Environmental Science, 2020,41(9):3951-3960.

[5] 杨滨锴,姜萌微,王 超,等.不同秆龄毛竹生长季叶片挥发性有机物组成和异戊二烯排放日变化研究 [J]. 环境科学学报, 2024,44(7):377-387.
Yang B K, Jiang M W, Wang C, et al. Daily variation in moso bamboo leaf volatile organic compositions and isoprene emissions during the growing season of with different culm ages [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(7):377-387.

[6] Millet D B, Baasandorj M, Hu L, et al. Nighttime chemistry and morning isoprene can drive urban ozone downwind of a major deciduous forest [J]. Environmental Science & Technology, 2016,50(8):4335-4342.

[7] 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.

[8] Li J J, Wang G H, Cao J J, et al. Observation of biogenic secondary organic aerosols in the atmosphere of a mountain site in central China: temperature and relative humidity effects [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(22):11535-11549.

[9] 李少宁,陶雪莹,李慧敏,等.北京地区侧柏和垂柳释放有益挥发性有机物组分日动态变化特征 [J]. 生态学报, 2023,43(15):6418-6432.
Li S N, Tao X Y, Li H M, et al. Characteristics of diurnal dynamic changes of beneficial BVOCs components released by *Platycladus orientalis* and *Salix babylonica* in Beijing area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(15):6418-6432.

[10] Guenther A. The contribution of reactive carbon emissions from vegetation to the carbon balance of terrestrial ecosystems [J]. Chemosphere, 2002,49(8):837-844.

[11] Arneth A, Monson R K, Schurgers G, et al. Why are estimates of global terrestrial isoprene emissions so similar (and why is this not so for monoterpenes)? [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008,8(16):4605-4620.

[12] Claeys M, Graham B, Vas G, et al. Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene [J]. Science, 2004,303(5661):1173-1176.

[13] Pacifico F, Harrison S P, Jones C D, et al. Isoprene emissions and climate [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(39):6121-6135.

[14] Mellouki A, Wallington T J, Chen J. Atmospheric chemistry of oxygenated volatile organic compounds: impacts on air quality and climate [J]. Chemical Reviews, 2015,115(10):3984-4014.

[15] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air

pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. Nature, 2015,525(7569):367-371.

[16] Wagner P, Kuttler W. Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere--a case study in Essen, Germany [J]. Science of the Total Environment, 2014,475:104-115.

[17] Borbon A, Fontaine H, Veillerot M, et al. An investigation into the traffic-related fraction of isoprene at an urban location [J]. Atmospheric Environment, 2001,35(22):3749-3760.

[18] King J, Koc H, Unterkofler K, et al. Physiological modeling of isoprene dynamics in exhaled breath [J]. Journal of Theoretical Biology, 2010,267(4):626-637.

[19] Kinoyama M, Nitta H, Watanabe A, et al. Acetone and isoprene concentrations in exhaled breath in healthy subjects [J]. Journal of Health Science, 2008,54(4):471-477.

[20] Ciccioli P, Centritto M, Loreto F. Biogenic volatile organic compound emissions from vegetation fires [J]. Plant, Cell & Environment, 2014,37(8):1810-1825.

[21] Whited G M, Feher F J, Benko D A, et al. TECHNOLOGY UPDATE: Development of a gas-phase bioprocess for isoprene-monomer production using metabolic pathway engineering [J]. Industrial Biotechnology, 2010,6(3):152-163.

[22] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室,自然资源部,国家统计局.第三次全国国土调查主要数据公报 [EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-08/26/content_5633490.htm, 2021-08-26.
The Leading Group Office of the State Council for the Third National Land Survey, Ministry of Natural Resources, National Bureau of Statistics. Main data bulletin of the third national land survey [EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-08/26/content_5633490.htm, 2021-08-26.

[23] Klinger L F, Li Q J, Guenther A B, et al. Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002,107(D21):4603.

[24] Chang Y, Ling Q Y, Ge X L, et al. Nonagricultural emissions enhance dimethylamine and modulate urban atmospheric nucleation [J]. Science Bulletin, 2023,68(13):1447-1455.

[25] Chang Y, Feng Y N, Cheng L, et al. Trimethylamine from subtropical forests rival total farmland emissions in China [J]. Environmental Science & Technology, 2024,58(12):5453-5460.

[26] Wang Y, Yang G, Lu Y, et al. Detection of gaseous dimethylamine using vocus proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometry [J]. Atmospheric Environment, 2020,243:117875.

[27] Chang Y, Wang H, Gao Y, et al. Nonagricultural emissions dominate urban atmospheric amines as revealed by mobile measurements [J]. Geophysical Research Letters, 2022,49(10).

[28] 邹　宇,邓雪娇,李　菲,等.广州大气中异戊二烯浓度变化特征、化学活性和来源分析 [J]. 环境科学学报, 2015,35(3):647-655.
Zou Y, Deng X J, Li F, et al. Variation characteristics, chemical reactivity and source apportionment of isoprene in the atmosphere of Guangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(3):647-655.

[29] Wang J L, Chew C, Chang C Y, et al. Biogenic isoprene in subtropical urban settings and implications for air quality [J]. Atmospheric Environment, 2013,79:369-379.

[30] Park C, Schade G W, Boedeker I. Characteristics of the flux of isoprene and its oxidation products in an urban area [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116(D21):D21303.

[31] Yáñez-Serrano A M, Nölscher A C, Williams J, et al. Diel and seasonal changes of biogenic volatile organic compounds within and above an Amazonian rainforest [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(6):3359-3378.

[32] 张诗炀,龚道程,王　好,等.南岭国家大气背景站异戊二烯的在线观测研究 [J]. 中国环境科学, 2017,37(7):2504-2512.
Zhang S Y, Gong D C, Wang H, et al. Online measurement of isoprene at a national air background monitoring station in the Nanling Mountains, South China [J]. China Environmental Science, 2017,37(7):2504-2512.

[33] 白建辉,王明星,John Graham,等.亚热带森林非甲烷碳氢化合物的研究——Ⅱ.日变化 [J]. 气候与环境研究, 2001,6(4):456-466.
Bai J H, Wang M X, Graham J, et al. A study of the nonmethane hydrocarbons at subtropical forest part II: Diurnal variation [J]. Climatic and Environmental Research, 2001,6(4):456-466.

[34] 张军科,王跃思,吴方堃,等.贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 [J]. 环境科学, 2012,33(12):4159-4166.
Zhang J K, Wang Y S, Wu F K, et al. Study on atmospheric VOCs in Gongga Mountain base station [J]. Environmental Science, 2012,33(12):4159-4166.

[35] Hakola H, Tarvainen V, Laurila T, et al. Seasonal variation of VOC concentrations above a boreal coniferous forest [J]. Atmospheric Environment, 2003,37(12):1623-1634.

[36] Davison B, Taipale R, Langford B, et al. Concentrations and fluxes of biogenic volatile organic compounds above a Mediterranean macchia ecosystem in western Italy [J]. Biogeosciences, 2009,6(8):1655-1670.

[37] 张　莉,白艳莹,王效科,等.浙江省毛竹异戊二烯排放规律及其影响 [J]. 生态学报, 2002,22(8):1339-1344.
Zhang L, Bai Y Y, Wang X K, et al. Isoprene emission of bamboo and its implication to ozone level in region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(8):1339-1344.

[38] 刘云凤,龚道程,林尤静,等.南岭箭竹生物源挥发性有机物排放特征 [J]. 中国环境科学, 2022,42(2):568-574.
Liu Y F, Gong D C, Lin Y J, et al. Emissions of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from *fargesia nanlingensi* in Nanling mountains, southern China [J]. China Environmental Science, 2022,42(2):568-574.

[39] Durana N, Navazo M, Gómez M C, et al. Long term hourly measurement of 62 non-methane hydrocarbons in an urban area: Main results and contribution of non-traffic sources [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(16):2860-2872.

[40] 朱少峰,黄晓锋,何凌燕,等.深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性 [J]. 中国环境科学, 2012,32(12):2140-2148.
Zhu S F, Huang X F, He L Y, et al. Variation characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2012,32(12):2140-2148.

[41] 王效科,牟玉静,欧阳志云,等.太湖流域主要植物异戊二烯排放研究 [J]. 植物学通报, 2002,19(2):224-230.
Wang X K, Mou Y J, Ouyang Z Y, et al. Study on emission of isoprene from major plants living in Taihu Basin [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2002,19(2):224-230.

[42] Liu Y, Li L, An J Y, et al. Estimation of biogenic VOC emissions and its impact on ozone formation over the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2018,186:113-128.

[43] Lou C X, Jiang F, Tian X D, et al. Modeling the biogenic isoprene emission and its impact on ozone pollution in Zhejiang province, China [J]. Science of the Total Environment, 2023,865:161212.

[44] 刘　岩,李　莉,安静宇,等.长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布 [J]. 环境科学, 2018,39(2):608-617.
Liu Y, Li L, An J Y, et al. Emissions, chemical composition, and spatial and temporal allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta region in 2014 [J]. Environmental Science, 2018,39(2):608-617.

[45] 宋媛媛,张艳燕,王勤耕,等.基于遥感资料的中国东部地区植被 VOCs 排放强度研究 [J]. 环境科学学报, 2012,32(9):2216-2227.
Song Y Y, Zhang Y Y, Wang Q G, et al. Estimation of biogenic VOCs emissions in Eastern China based on remote sensing data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(9):2216-2227.

作者简介：余海峰(2000-),女,云南怒江人,南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为大气化学.202312080025@nuist.edu.cn.