

毛竹林挥发性有机化合物释放特征及其与环境因子的关系

陶士杰¹, 宋艳冬², 吴沁娇¹, 王 丽¹, 周如意¹, 吴 电³, 周宇峰¹, 周国模¹

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 丽水市农林科学研究院, 浙江 丽水 323000; 3. 浙江省生态环境科学设计研究院, 浙江 杭州 310007)

摘要: 【目的】了解毛竹 *Phyllostachys edulis* 林内挥发性有机化合物 (VOCs) 的季节动态变化以及日变化规律, 并分析各环境因子对其 VOCs 摩尔分数变化的影响。【方法】采用吸附管富集采样与气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 测定浙江省绍兴市诸暨五泄景区中毛竹林内 VOCs 成分, 分析其变化规律, 并结合环境气象监测站数据, 分析 VOCs 摩尔分数与各环境因子的相关性。【结果】①在毛竹林检测出多种物质, 主要为烷类、萜烯类、芳香烃类、酯类、醇类和酮类共 6 类, 萜烯类摩尔分数最大, 为 7.249 nmol·mol⁻¹, 其中又以组分异戊二烯为主, 约占萜烯类的 80%。②从季节变化来看, 总 VOCs 摩尔分数在夏季最大, 为 10.600 nmol·mol⁻¹; 其次为春季和秋季, 分别为 8.068 和 7.254 nmol·mol⁻¹; 冬季最小, 仅为 4.432 nmol·mol⁻¹, 且各类主要 VOCs 的季节变化趋势与总 VOCs 相同。③从日变化来看, 在春季总 VOCs 摩尔分数在上午最大, 为 9.074 nmol·mol⁻¹, 其次为中午, 为 8.621 nmol·mol⁻¹, 下午时段最小, 为 6.509 nmol·mol⁻¹; 在夏季、秋季和冬季, 总 VOCs 摩尔分数均在中午最大, 分别为 11.710、8.038 和 5.298 nmol·mol⁻¹, 下午最小, 分别为 8.455、5.702 和 3.418 nmol·mol⁻¹。各类主要 VOCs 的日变化趋势与总 VOCs 相同, 均为上午和中午时段摩尔分数较大。④VOCs 与各环境因子都存在相关性, 其中萜烯类、烷类、酯类和总 VOCs 与气温呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与细颗粒物 (PM_{2.5})、可吸入颗粒物 (PM₁₀) 和臭氧呈显著负相关 ($P < 0.05$)。【结论】在不同季节和时段, 毛竹林 VOCs 种类和摩尔分数不同, 其中异戊二烯是决定毛竹林 VOCs 动态变化的主要物质。图 3 表 2 参 42

关键词: 毛竹林; 挥发性有机化合物; 季节动态; 日动态; 环境因子

中图分类号: S718; Q946 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2023)05-0940-11

Characteristics of volatile organic compounds release in *Phyllostachys edulis* forests and their relationship with environmental factors

TAO Shijie¹, SONG Yandong², WU Qinjiao¹, WANG Li¹, ZHOU Ruyi¹,
WU Dian³, ZHOU Yufeng¹, ZHOU Guomo¹

(1. Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Lishui Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Lishui 323000, Zhejiang, China; 3. Eco-Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The aim is to understand the seasonal dynamics and daily variation patterns of volatile organic compounds (VOCs) in *Phyllostachys edulis* forest, and analyze the influence of environmental factors on their concentration changes. [Method] The VOCs in *Ph. edulis* forest in Zhuji Wuxie scenic area, Shaoxing City of Zhejiang Province were determined by sorbent tube enrichment sampling and gas chromatography-mass

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-07-19

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2021C02005); 浙江省生态环境科研和成果推广项目 (2021HT0057)

作者简介: 陶士杰 (ORCID: 0009-0006-0806-5898), 从事森林康养研究。E-mail: 845418963@qq.com。通信作者: 宋艳冬 (ORCID: 000-0001-9158-9591), 助理研究员, 从事森林康养研究。E-mail: 1251707621@qq.com。周国模 (ORCID: 0000-0003-4204-1129), 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林康养、全球气候变化与森林碳汇等研究。E-mail: zhougm@zafu.edu.cn

spectrometry (GC-MS). Its variation pattern was analyzed and the correlation between VOCs concentration and various environmental factors was also analyzed based on the data from environmental meteorological monitoring stations. [Result] (1) A variety of substances were detected in *Ph. edulis* forest, mainly including alkanes, terpenes, aromatic hydrocarbons, esters, alcohols and ketones. The largest concentration of terpenes was released, with a maximum of $7.249 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, of which the dominant component was isoprene, accounting for about 80% of terpene. (2) From the perspective of seasonal variation, the concentration of total VOCs was the largest in summer ($10.600 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$), followed by spring and autumn (8.068 and $7.254 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, respectively). The smallest was in winter, only $4.432 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, and the seasonal variation trend of various major VOCs was the same as that of total VOCs. (3) From the perspective of daily variation, the total VOCs concentration was maximum in the morning in spring ($9.074 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$), followed by $8.621 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ at noon and a minimum of $6.509 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ in the afternoon. In summer, autumn and winter, the maximum VOCs concentration at noon was 11.710 , 8.038 and $5.298 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, and the lowest values in the afternoon were 8.455 , 5.702 and $3.418 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$. The daily variation trend of various major VOCs were the same as that of total VOCs, with higher concentrations in the morning and at noon. (4) VOCs were correlated with various environmental factors, among which terpenes, alkanes, esters and total VOCs were significantly positively correlated with temperature, and significantly negatively correlated with $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and ozone ($P < 0.05$). [Conclusion] The types and contents of VOCs in *Ph. edulis* forest are different in different seasons and time periods, and isoprene is the main substance that determines the dynamics of VOCs. [Ch, 3 fig. 2 tab. 42 ref.]

Key words: *Phyllostachys edulis* forests; volatile organic compounds (VOCs); seasonal dynamics; daily dynamics; environmental factors

植物挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 是一类经植物次生代谢合成并排放到空气中的小分子化合物, 其年排放量占全球挥发性有机化合物年排放总量的 90% 以上^[1]。VOCs 的成分有 3 万多种^[2], 全球的 VOCs 释放以异戊二烯为主, 约占总释放量的 50%^[3]。一定浓度的 VOCs 对促进植物生长与繁殖^[4], 调节气候变化^[5], 改善人体健康并且预防一些慢性疾病^[6] 等发挥着重要作用。竹子是一种重要的森林资源, 中国第 9 次森林资源清查结果显示: 中国竹资源丰富, 竹林面积为 641.16 万 hm^2 , 其中毛竹 *Phyllostachys edulis* 林为 467.78 万 hm^2 , 占 72.96%^[7]。作为异戊二烯释放量较大的笋材两用竹种^[8-9], 毛竹具有再生能力强、生长期快、造林周期短、产量高等特点, 具有较高的生态经济价值^[10]。目前, 对毛竹 VOCs 的研究大多集中在叶片或单株尺度^[11-13]。张莉等^[11] 研究指出: 毛竹是异戊二烯释放量较大的一种植物, 其释放与气温和光照度的变化有着密切的关系; SONG 等^[12] 量化了茎龄对毛竹叶片异戊二烯释放量的影响; CHANG 等^[13] 也证实了除了光照度和气温等外界环境, 毛竹的异戊二烯释放量还受到毛竹单位面积叶质量的影响。而基于毛竹林分尺度的 VOCs 释放特点及其与环境因子的关系研究较少^[14], 需要进一步研究探索。浙江省绍兴市诸暨五泄景区森林覆盖率达 90% 以上, 天然植被茂密, 种类繁多, 其中毛竹林面积大, 树种均匀度和自然度高, 人为干扰小, 可作为野外实验的重要场所^[15]。本研究选取景区内代表性毛竹林分为研究对象, 采集了 4 个不同季节以及同一季节同一天上午、中午和下午 3 个时间段的毛竹林内 VOCs, 分析鉴定其日变化和季节变化规律及其与环境因子的关系, 以期为毛竹的进一步开发利用提供理论依据, 同时为进一步构建森林 VOCs 释放特征模型提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 样地设置

样地设置在浙江省绍兴市诸暨五泄景区 ($27^{\circ}03'\sim 31^{\circ}11'N$, $118^{\circ}02'\sim 123^{\circ}08'E$)。该地地处浙东低山丘

陵地带,属亚热带季风气候区,气候温和,四季分明,雨量较多,光照充足。年平均气温为16.2℃,年平均降水量为1346.7 mm,年平均降雨日为158.7 d。选取景区内代表性毛竹林分为研究对象:海拔为223.9 m,中坡为140°,平均胸径为11.54 cm,林分密度为3500株·hm⁻²,林分面积约为0.87 hm²。该毛竹林2021年为小年,2022年为大年。在林分中心根据5点采样法^[16]随机设置5个VOCs采样点(离地面高度1.5 m),每个采样点之间相隔约20 m。

1.2 试验方法

选择晴朗天气,于2021年10月28—30日(秋季),2022年1月11—13日(冬季),2022年5月3—5日(春季),2022年7月20—22日(夏季)的9:00—11:00(上午),11:30—13:30(中午),14:00—16:00(下午)3个时段,在5个采样点用不锈钢吸附管(通用型5266, MARKES)对VOCs进行连续采样;便携式采样仪(北京市劳动保护科学研究所)设置采样流速为150 mL·min⁻¹,每个样品富集18 L空气,每个季度45根样品,共获得180根样品。采样后使用便携式气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, EXPEC 3500, 杭州谱育科技发展有限公司)吸附管模块对样品进行分析,以获得各季节毛竹林VOCs在3 d内上午、中午和下午3个时段的成分和摩尔分数,计算各季节3 d中各时段的平均值,得出各季节VOCs日变化规律;计算各季节林分VOCs日均摩尔分数,取3 d的平均值,作为各季节VOCs的释放水平,得出VOCs季节摩尔分数变化规律;统计各季节3 d中出现过的所有VOCs种类数量,作为各季节VOCs的释放水平。使用浙江农林大学自主研发的环境气象监测站测定林分内环境因子,气象监测站距离地面高度为2 m,布设于样地中心。测量指标包括气温、相对湿度、光照度、细颗粒物(PM_{2.5})、可吸入颗粒物(PM₁₀)、风速、二氧化碳(CO₂)。测量时间间隔为1 min,测量数据实时上传到网络平台。

1.3 分析测试方法

使用质谱仪数据分析软件结合保留时间、峰面积、标准质谱图和美国国家标准与技术研究所(NIST)的标准参考数据库判断组分种类,使用面积归一化外标法计算摩尔分数。外部标准曲线使用物质标准品和色谱级甲醇溶液配置各摩尔分数梯度标准溶液(5、10、20、50 nmol·mol⁻¹)后以便携式气相色谱-质谱联用仪进行定量。根据实测结果和文献研究^[17-18],确定目标物质并分析其摩尔分数变化,萜烯类物质标样有:叶醇、萜烯醇、3-萜烯、2-萜烯、埃烯,其他物质使用臭氧前体混合物(PAMS)气体标样定量。标样之外的单萜摩尔分数使用2-萜烯的标准曲线公式计算,烷摩尔分数使用3-甲基庚烷标准曲线公式计算,芳香烃摩尔分数使用甲苯的标准曲线公式计算,醇类和其他物质摩尔分数使用叶醇的标准曲线公式计算。每个目标化合物的绝对摩尔分数根据标准曲线计算,目标化合物的峰面积和已知标准摩尔分数间的拟合函数拟合优度均高于0.99。

1.4 数据处理

采用Excel 2016和Origin 2022对数据进行统计并作图,用SPSS 22统计分析软件对所有试验数据进行单因素方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 毛竹林VOCs组成成分的季节性变化

通过吸附管采集的毛竹林内VOCs经GC-MS分析测定,共鉴定出51种化合物(表1),包含烷类18种、萜烯类11种(包括单萜类10种和异戊二烯1种。因毛竹林内异戊二烯摩尔分数较大,本研究将萜烯类分为异戊二烯和单萜类分别进行分析)、芳香烃类7种、酯类5种、醇类5种以及酮类5种,共6类化合物。其中春季化合物数量最多,共鉴定出44种;夏季、秋季次之,均为40种;冬季最少,仅检测到27种化合物。

受植物自身生理情况及外界环境因素的影响,毛竹林不同季节各类VOCs成分有所差别,主要成分也不相同。烷类化合物春季主要成分为3-甲基庚烷(0.278 nmol·mol⁻¹)和十二烷(0.264 nmol·mol⁻¹),夏季主要成分为正戊烷(0.331 nmol·mol⁻¹)和正辛烷(0.313 nmol·mol⁻¹),秋季主要成分为三甲基庚烷(0.351 nmol·mol⁻¹),冬季主要成分为1,2-二氯乙烷(0.250 nmol·mol⁻¹)和1,2-二氯丙烷(0.238 nmol·mol⁻¹);萜烯类化合物在春、夏、秋、冬四季主要成分均为异戊二烯,分别为2.952、4.370、2.399、1.242 nmol·mol⁻¹;芳香烃类化合物在春、夏两季主要成分均为甲苯,分别为0.250和0.169 nmol·mol⁻¹,秋季

表 1 毛竹林 VOCs 组分及摩尔分数

Table 1 VOCs fraction and concentration in a *Ph. edulis* forest

化合物种类	化合物	分子式	摩尔分数/(nmol·mol ⁻¹)				
			春季	夏季	秋季	冬季	
烷类	2-甲基戊烷	C ₆ H ₁₄	0.086±0.023	0.124±0.051	0.094±0.049	0.081±0.071	
	1,2-二氯乙烷	C ₂ H ₄ Cl ₂	0.059±0.025	0.113±0.153	0.134±0.063	0.250±0.084	
	2-甲基己烷	C ₇ H ₁₆	0.040±0.010	0.110±0.048	0.083±0.027	—	
	3-甲基己烷	C ₇ H ₁₆	0.050±0.015	0.137±0.121	0.090±0.036	0.117±0.036	
	1,2-二氯丙烷	C ₃ H ₆ Cl ₂	0.070±0.066	0.230±0.049	0.236±0.106	0.238±0.082	
	正戊烷	C ₅ H ₁₂	0.078±0.041	0.331±0.070	0.120±0.058	0.187±0.060	
	甲基环己烷	C ₇ H ₁₄	0.045±0.012	0.162±0.043	0.061±0.016	0.094±0.022	
	2-甲基庚烷	C ₈ H ₁₈	0.033±0.009	—	0.025±0.000	—	
	3-甲基庚烷	C ₈ H ₁₈	0.278±0.151	0.183±0.064	0.351±0.219	—	
	正辛烷	C ₈ H ₁₈	0.073±0.029	0.313±0.074	0.212±0.094	0.196±0.124	
	正壬烷	C ₉ H ₂₀	0.036±0.016	—	0.062±0.021	0.050±0.009	
	正癸烷	C ₁₀ H ₂₂	0.178±0.077	0.256±0.142	0.213±0.071	—	
	十一烷	C ₁₁ H ₂₄	0.197±0.073	—	—	—	
	2-甲基癸烷	C ₁₁ H ₂₄	0.204±0.109	0.152±0.080	—	—	
	十二烷	C ₁₂ H ₂₆	0.264±0.091	0.198±0.070	—	—	
	4-甲基癸烷	C ₁₁ H ₂₄	0.128±0.046	—	—	—	
	十三烷	C ₁₃ H ₂₈	0.192±0.019	0.162±0.091	—	—	
	十四烷	C ₁₄ H ₃₀	0.149±0.035	—	—	—	
	萜烯类	异戊二烯	C ₅ H ₈	2.952±0.709	4.370±1.173	2.399±0.611	1.242±0.336
		α -蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	0.173±0.046	0.325±0.086	0.288±0.124	0.238±0.079
柠檬烯		C ₁₀ H ₁₆	—	0.070±0.012	0.116±0.083	0.109±0.069	
桉叶油醇		C ₁₀ H ₁₈ O	0.049±0.017	0.204±0.114	—	—	
3-蒎烯		C ₁₀ H ₁₆	0.046±0.018	0.231±0.116	0.262±0.238	—	
月桂烯		C ₁₀ H ₁₆	—	—	0.013±0.000	—	
左旋-beta-蒎烯		C ₁₀ H ₁₆	0.159±0.075	0.171±0.103	—	0.081±0.028	
蒎品油烯		C ₁₀ H ₁₆	—	0.156±0.092	0.097±0.032	—	
β -pinene		C ₁₀ H ₁₆	0.119±0.041	0.197±0.095	0.250±0.169	0.184±0.078	
蒎烯		C ₁₀ H ₁₆	0.174±0.098	0.153±0.071	0.194±0.107	0.092±0.050	
薄荷脑		C ₁₀ H ₂₀ O	0.323±0.128	0.113±0.052	—	—	
芳香烃类	苯	C ₆ H ₆	0.180±0.042	0.144±0.079	0.302±0.092	0.136±0.045	
	甲苯	C ₇ H ₈	0.250±0.093	0.169±0.030	0.194±0.067	0.190±0.051	
	乙苯	C ₈ H ₁₀	0.075±0.031	0.121±0.059	0.233±0.055	0.209±0.046	
	1,2-二甲苯	C ₈ H ₁₀	0.067±0.038	0.114±0.073	0.140±0.057	0.178±0.050	
	苯乙炔	C ₈ H ₈	0.109±0.059	—	0.062±0.033	—	
	1,3-二甲苯	C ₈ H ₁₀	0.110±0.072	0.104±0.039	0.174±0.071	0.236±0.065	
	叔丁基苯	C ₁₀ H ₁₄	—	—	0.064±0.000	—	
酯类	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	0.362±0.138	0.147±0.084	—	—	
	乙酸丙酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	0.155±0.025	0.213±0.082	0.262±0.098	—	
	乙酸正丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.046±0.006	0.184±0.032	0.128±0.039	0.154±0.041	
	乙酸异丁酯	C ₆ H ₁₂ O ₂	0.053±0.003	0.284±0.076	0.235±0.068	0.224±0.088	
	乙酸戊酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	0.195±0.107	0.169±0.060	—	—	
醇类	1-庚醇	C ₇ H ₁₆ O	—	0.107±0.034	0.072±0.031	0.132±0.037	
	异丙醇	C ₃ H ₈ O	0.182±0.146	—	0.140±0.073	—	
	2-乙基己醇	C ₈ H ₁₈ O	0.109±0.043	0.077±0.023	0.127±0.138	0.070±0.027	
	1-十一醇	C ₁₁ H ₂₄ O	0.144±0.057	0.414±0.086	0.182±0.076	—	
	1-癸醇	C ₁₀ H ₂₂ O	0.102±0.028	0.376±0.349	0.192±0.111	—	

表1 (续)

Table 1 Continued

化合物种类	化合物	分子式	摩尔分数/(nmol·mol ⁻¹)			
			春季	夏季	秋季	冬季
酮类	2-丁酮	C ₄ H ₈ O	0.180±0.059	0.188±0.053	0.155±0.071	0.132±0.097
	2-甲基环己酮	C ₇ H ₁₂ O	0.073±0.036	0.097±0.033	0.093±0.093	0.067±0.014
	环己酮	C ₆ H ₁₀ O	—	—	0.060±0.021	0.068±0.000
	二异丁基酮	C ₉ H ₁₈ O	—	—	0.193±0.094	0.109±0.069
	2-十一酮	C ₁₁ H ₂₂ O	0.128±0.000	0.181±0.000	0.132±0.141	—

说明：—表示未检出该物质。

主要成分为苯 (0.302 nmol·mol⁻¹), 冬季主要成分为 1,3-二甲苯 (0.236 nmol·mol⁻¹); 酯类化合物春季主要成分为乙酸乙酯 (0.362 nmol·mol⁻¹), 秋季主要成分为乙酸丙酯 (0.262 nmol·mol⁻¹), 夏季和冬季主要成分均为乙酸异丁酯, 分别为 0.284 和 0.224 nmol·mol⁻¹; 醇类化合物春季主要成分为异丙醇 (0.182 nmol·mol⁻¹), 夏季主要成分为 1-十一醇 (0.414 nmol·mol⁻¹) 和 1-癸醇 (0.376 nmol·mol⁻¹), 秋季主要成分为 1-癸醇 (0.192 nmol·mol⁻¹) 和 1-十一醇 (0.182 nmol·mol⁻¹), 冬季主要成分为 1-庚醇 (0.132 nmol·mol⁻¹); 酮类化合物春、夏、冬三季主要成分均为 2-丁酮, 分别为 0.180、0.188、0.132 nmol·mol⁻¹, 秋季主要成分为二异丁基酮 (0.193 nmol·mol⁻¹)。

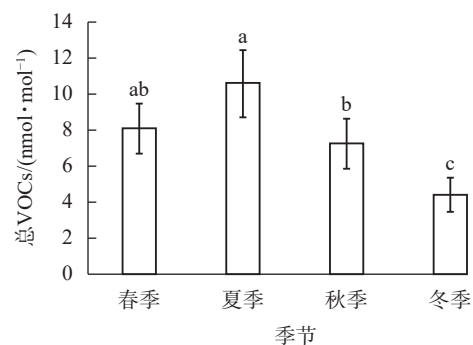
2.2 毛竹林 VOCs 摩尔分数的季节性变化

2.2.1 毛竹林总 VOCs 摩尔分数的季节性变化 如图 1 所示: 从季节来看, 毛竹林总 VOCs 摩尔分数从高到低依次为夏季、春季、秋季、冬季。夏季检测到的总 VOCs 摩尔分数最高, 为 10.600 nmol·mol⁻¹, 春季、秋季、冬季分别为 8.068、7.254、4.432 nmol·mol⁻¹。夏季总 VOCs 摩尔分数显著 ($P < 0.05$) 高于秋季, 秋季显著 ($P < 0.05$) 高于冬季, 春季显著高 ($P < 0.05$) 于冬季; 春季与夏季、春季与秋季之间差异不显著。由此可见, 不同季节的毛竹林内总 VOCs 摩尔分数差别较大。

2.2.2 毛竹林 VOCs 各组成成分的季节性变化 如图 2 所示: 毛竹林内各类 VOCs 中, 萜烯类中的异戊二烯组分在 4 个季节的占比均最高, 占总 VOCs 比例为 26%~40%, 其次为烷类, 占比为 21%~27%, 醇类和酮类占比较低, 仅为 2%~7%。从各类 VOCs 在 4 个季节所占比例来看, 异戊二烯在夏季所占比例最高, 为 40.28%, 比在春季、秋季和冬季所占的 36.93%、33.61% 和 26.60% 分别高 3.35%、6.67% 和 13.68%, 夏季所占比例显著 ($P < 0.05$) 高于冬季, 其他季节之间差异不显著; 烷类在春季所占比例最高, 为 26.66%, 比冬季、夏季和春季所占的 23.20%、21.57% 和 21.11% 分别高 3.46%、5.09% 和 5.55%, 但四季间差异不显著; 单萜类在夏季所占比例最高, 为 15.55%, 比在冬季、秋季和春季所占的 12.93%、12.84% 和 11.97% 分别高 2.62%、2.71% 和 3.58%, 且四季之间差异也不显著; 芳香烃类在冬季所占比例最高, 为 19.29%, 比在秋季、春季和夏季所占的 14.65%、8.33% 和 6.23% 分别高 4.64%、10.96% 和 13.06%, 冬季占比显著 ($P < 0.05$) 高于秋季, 而秋季又显著 ($P < 0.05$) 高于春季和夏季, 春季和夏季之间差异不显著。酯类、醇类和酮类占比较低 (低于 10.00%), 在 4 个季节相差不大, 且差异均不显著。由此可见: 各类 VOCs 占总 VOCs 比例均受季节变化影响, 且异戊二烯和芳香烃 2 类物质受影响较大, 不同季节间存在显著差异。毛竹是强异戊二烯释放树种, 异戊二烯释放量高于其他各类物质。

2.3 毛竹林总 VOCs 以及各组成成分摩尔分数的日变化

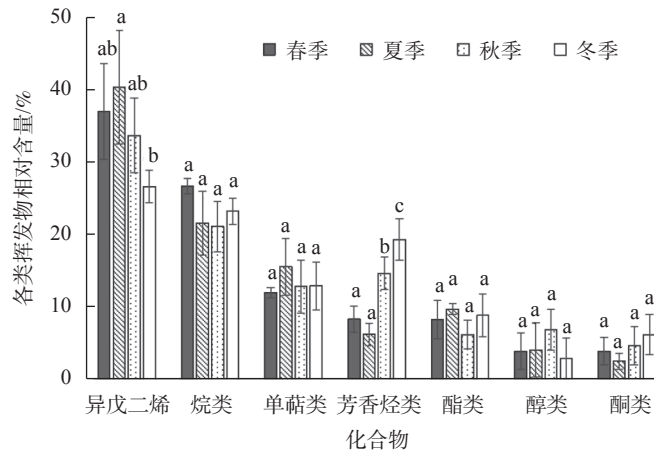
如表 2 所示: 春季, 总 VOCs 摩尔分数在上午达到最高, 为 9.074 nmol·mol⁻¹, 中午次之, 为 8.621



不同小写字母表示总 VOCs 摩尔分数在不同季节间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同季节毛竹林总 VOCs 摩尔分数

Figure 1 Total concentration of VOCs in a *Ph. edulis* forest in different seasons



不同小写字母表示同一类挥发物不同季节间显著差异($P < 0.05$)。

图 2 不同季节毛竹林各类 VOCs 组分所占比例

Figure 2 Relative content of concentration of various VOCs components in a *Ph. edulis* forests in different seasons

$\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 $6.509 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。毛竹林内各类 VOCs 摩尔分数全天各时刻以异戊二烯最高，烷类、醇类和酮类较低。在中午，异戊二烯摩尔分数最高可达 $3.806 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，占总 VOCs 的 44.00%，上午次之，为 $2.838 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 $2.301 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；烷类和单萜类摩尔分数日变化波动较小，且都为上午和中午时段较高，下午较低；芳香烃类摩尔分数日变化趋势与总 VOCs 日变化相近，从高到低依次为上午、中午、下午；酯类和醇类摩尔分数日变化波动较大，从高到低依次均为上午、下午、中午，且醇类摩尔分数上午约是中午的 4 倍；酮类摩尔分数从高到低依次表现为下午、中午、上午。

表 2 毛竹林各季节各时段 VOCs 摩尔分数

Table 2 Concentration of VOCs in a *Ph. edulis* forest by season and time

季节	时段	各VOCs组分及总VOCs摩尔分数/($\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$)							总VOCs
		异戊二烯	烷类	单萜类	芳香烃类	酯类	醇类	酮类	
春季	上午	2.838±0.396	2.438±0.739	1.043±0.324	0.937±0.335	0.991±0.281	0.604±0.179	0.223±0.071	9.074±2.325
	中午	3.806±0.351	2.198±0.444	1.102±0.385	0.600±0.134	0.483±0.156	0.156±0.057	0.276±0.107	8.621±1.633
	下午	2.301±0.337	1.798±0.540	0.757±0.181	0.502±0.099	0.544±0.204	0.214±0.078	0.394±0.102	6.509±1.541
夏季	上午	3.841±0.670	3.084±0.658	1.546±0.374	0.592±0.188	1.158±0.212	0.972±0.471	0.441±0.091	11.634±2.663
	中午	5.690±0.589	2.366±0.618	1.559±0.562	0.661±0.307	1.037±0.340	0.186±0.049	0.210±0.067	11.710±2.533
	下午	3.316±0.303	1.521±0.492	1.696±0.803	0.674±0.138	0.876±0.256	0.199±0.059	0.174±0.027	8.455±2.077
秋季	上午	2.354±0.051	1.409±0.660	1.264±0.815	1.114±0.380	0.659±0.198	0.786±0.339	0.439±0.204	8.024±2.646
	中午	3.161±0.103	1.709±0.857	0.702±0.385	1.036±0.222	0.341±0.112	0.541±0.384	0.549±0.345	8.038±2.410
	下午	1.834±0.469	1.397±0.525	0.800±0.462	0.980±0.297	0.351±0.105	0.239±0.056	0.101±0.024	5.702±1.938
冬季	上午	1.194±0.130	1.118±0.441	0.651±0.251	1.032±0.169	0.331±0.182	0.054±0.014	0.201±0.057	4.580±1.243
	中午	1.540±0.218	1.274±0.463	0.815±0.262	0.962±0.091	0.378±0.038	0.074±0.017	0.254±0.129	5.298±1.219
	下午	0.843±0.268	0.723±0.209	0.314±0.057	0.587±0.056	0.418±0.115	0.211±0.075	0.322±0.174	3.418±0.955

夏季，总 VOCs 摩尔分数在中午和上午较高，分别为 11.710 和 $11.634 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 $8.455 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。毛竹林内各类 VOCs 摩尔分数全天各时刻以异戊二烯最高，其次为烷类，酮类较低。在中午，异戊二烯摩尔分数最高可达 $5.690 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，约占总 VOCs 的 50.00%，上午次之，为 $3.841 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 $3.316 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；烷类、酯类和酮类摩尔分数日变化趋势相同，从高到低依次均为上午、中午、下午；单萜类和芳香烃类摩尔分数日变化波动较小，且均为下午和中午较高，上午较低；醇类摩尔分数日变化波动最大，从高到低依次为上午、下午、中午，且上午的摩尔分数是中午的

5倍以上。

秋季，总 VOCs 摩尔分数也体现为在中午和上午较高，分别为 8.038 和 8.024 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 5.702 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。毛竹林内各类 VOCs 摩尔分数全天各时刻以异戊二烯最高，其次为烷类，酯类、醇类和酮类较低。中午时，异戊二烯摩尔分数最高可达 3.161 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，占总 VOCs 的 40.00%，上午次之，为 2.354 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 1.834 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；烷类和酮类摩尔分数日变化趋势与异戊二烯相同，从高到低依次均为中午、上午、下午；单萜类和酯类摩尔分数日变化趋势相同，从高到低依次均为上午、下午、中午；芳香烃类和醇类摩尔分数日变化趋势相同，从高到低依次为上午、中午、下午。从摩尔分数日变化波动来看，芳香烃类日变化波动最小，酮类最大。

冬季，总 VOCs 摩尔分数在中午达到最高，为 5.298 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，上午次之，为 4.580 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 3.418 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。毛竹林内各类 VOCs 摩尔分数全天各时刻以异戊二烯最高，其次为烷类，醇类最低。在中午，异戊二烯摩尔分数最高可达 1.540 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，占总 VOCs 的 30.00%，上午次之，为 1.194 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，下午最低，为 0.843 $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ；烷类和单萜类摩尔分数日变化趋势与异戊二烯相同，从高到低依次均为中午、上午、下午；芳香烃类摩尔分数从高到低依次为上午、中午、下午；酯类、醇类和酮类摩尔分数日变化趋势相同，从高到低依次均为下午、中午、上午，且酯类日变化波动最小，醇类最大。

综合毛竹林内的 VOCs 摩尔分数在春季、夏季、秋季、冬季各时段的变化规律，可以发现：异戊二烯在 4 个季节的各时段均高于其他各类物质，且在 4 个季节均呈现出中午最高，上午次之，下午最低的规律。除春季外，其他各季节的总 VOCs 摩尔分数均呈现出中午最高，上午次之，下午最低的规律，其他各类物质摩尔分数所呈现的日变化规律在各季节有所不同，但总体趋势保持为上午和中午较高，下午较低。各类 VOCs 摩尔分数的日变化波动范围也较为不同，综合 4 个季节来看，醇类日变化波动最大，单萜烯和芳香烃日变化波动较小。

2.4 毛竹林 VOCs 各组成成分与环境因子的相关性

如图 3 所示：从四季整体来看，毛竹林内 VOCs 摩尔分数与各环境因子都有一定的相关性，其中，异戊二烯、总 VOCs 摩尔分数与环境因子的相关性表现出相似特征，均与气温存在极显著正相关 ($P < 0.001$)，与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 极显著负相关 ($P < 0.01$)，与臭氧呈显著负相关 ($P < 0.05$)，与其他环境因子相关不显著。烷类摩尔分数与气温存在极显著正相关 ($P < 0.01$)，与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 极显著负相关 ($P < 0.01$)，与其他环境因子相关不显著。单萜类摩尔分数与气温存在极显著正相关 ($P < 0.01$)，与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 显著负相关 ($P < 0.05$)，与臭氧呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与其他环境因子相关性不显著。芳香烃类摩尔分数与 CO_2 和相对湿度呈显著正相关 ($P < 0.05$)，和其他环境因子相关性不显著。酯类摩尔分数与气温存在极正显著相关 ($P < 0.01$)，与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和臭氧呈显著负相关 ($P < 0.05$)，与其他环境因子相关不显著。醇类和酮类摩尔分数在四季均较低，与各环境因子都不存在显著相关。另外，各类 VOCs 摩尔分数与风速都呈负相关；除芳香烃类和酮类外，其他 VOCs 摩尔分数都与气温呈正相关，与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和臭氧呈负相关。

3 讨论

VOCs 在自然界中发挥着重要作用，植物释放 VOCs 不仅与植物本身及所处的生理状态与发育阶段有关，还受外界气温、光照度等环境因素的影响^[19-21]。由于各类 VOCs 摩尔分数的日变化和季节变化规律较为不同，毛竹主要释放异戊二烯，且占比较大，因此本研究主要针对异戊二烯和总 VOCs 摩尔分数

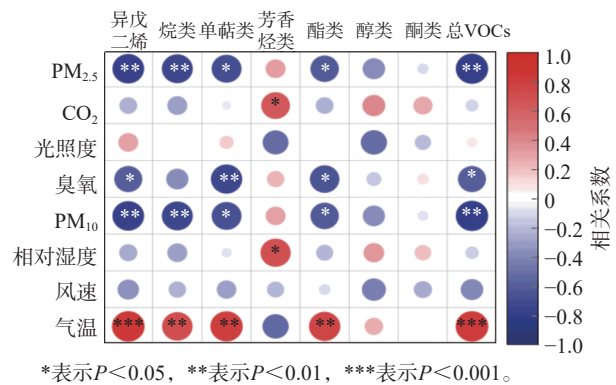


图 3 毛竹林 VOCs 与各环境因子相关性
Figure 3 Correlation between VOCs and various environmental factors in a *Ph. edulis* forest

日变化和季节变化进行讨论，以此作为毛竹林 VOCs 释放特征。

本研究发现：在毛竹林中检测到多种 VOCs，主要包括异戊二烯、烷类、单萜类、芳香烃类、酯类、醇类和酮类。这与王茜^[22]和李娟等^[23]的研究结果相似，但在具体的种类以及量值上存在一定的差异，可能与毛竹林所在的位置等因素有关。不同的位置外源环境也不尽相同，从而导致毛竹林内小气候的差异，一定程度上影响 VOCs 的合成与释放，使 VOCs 种类和量值上产生差别^[24]。在春季检测到的 VOCs 数量最多，夏季次之，冬季最少，可能是因为春夏两季为毛竹的快速生长期，毛竹的生理活性强，因此产生的次生代谢产物也更丰富^[25]。

本研究还发现：各季节各时段异戊二烯摩尔分数及占总 VOCs 比例均高于其他各类 VOCs，夏季中午最高，为 $5.690 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，约占总 VOCs 的 50.00%，也说明毛竹是强异戊二烯释放树种。这也与已有研究结果相符^[26-27]。从季节变化来看，毛竹林中异戊二烯和总 VOCs 以及其他各类主要 VOCs，如烷类和单萜类化合物摩尔分数在夏季最高，春季次之，冬季最低，在 BAI 等^[26]和井潇溪^[28]的研究中也得出类似的结论。夏季气温升高，毛竹叶片内部异戊二烯合成酶的活性增强，增加了异戊二烯释放量^[29]，同时，毛竹会生成更多的 VOCs 来保护自身免受因高温引起的氧化应激，以维持细胞膜的完整性和流动性^[30]。从日变化来看，除春季总 VOCs 摩尔分数外，其余各季节异戊二烯和总 VOCs 摩尔分数均呈现为从上午开始逐渐升高，在中午出现高峰，随后逐渐降低的规律，这也与王志辉等^[31]和郭希娟等^[32]的研究结果基本吻合，可能是因为 VOCs 摩尔分数受气温和光照影响较大，上午随气温升高和光照增强，VOCs 摩尔分数升高；11:00—13:00，气温和光照达到一天中最大值，VOCs 释放的峰值也出现在中午前后，下午开始下降^[33]。其他各类 VOCs 摩尔分数在不同季节的日变化规律较不一致，这可能与不同化合物的分子结构以及受环境因子影响程度不同有关^[34]。

复杂的环境因子对 VOCs 的合成和释放影响巨大^[35]，如气温、光照度、相对湿度、二氧化碳和臭氧等都是影响 VOCs 产生和释放的重要因素^[36]。本研究发现：毛竹林内 VOCs 与各环境因子都有一定的相关性，其中，异戊二烯、烷类、单萜类、酯类和总 VOCs 摩尔分数与气温呈显著正相关，与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和臭氧呈显著负相关。郭霞^[37]和任琴等^[38]也得出了异戊二烯等的释放对气温变化有着高依赖性的结论。VOCs 的释放速率随气温的升高而加快，可能主要是气温对酶影响的结果^[38]。与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 以及臭氧呈显著负相关可能是因为萜烯类等易发生光化学反应，形成二次有机气溶胶 (secondary organic aerosols, SOA)，该物质是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的重要组成部分，从而对 VOCs 摩尔分数产生影响^[39-40]。而张福珠等^[41]和林威等^[42]研究指出：植物的异戊二烯释放速率和光照度关系密切，光照是影响异戊二烯释放速率最强的环境因子。但在本研究中并未发现光照度对异戊二烯摩尔分数变化的显著影响，原因可能是环境监测站主要监测林下小气候，监测到的光照度容易受到样地内毛竹的遮挡，无法准确计量，因此，大气环境中的光照度对异戊二烯释放速率的影响还需进一步深入研究。

4 结论

在毛竹林中检测到的 VOCs 以烷类、萜烯类、芳香烃类、酯类、醇类和酮类共 6 类 51 种化合物为主，其中以萜烯类的异戊二烯释放量最大。各类 VOCs 摩尔分数在季节动态变化上与总 VOCs 比较一致，为夏季最大，春季次之，冬季最小。各类 VOCs 摩尔分数在各季节的日变化趋势不尽相同，但总体上呈现为上午和中午较高，下午较低的规律。毛竹林内 VOCs 摩尔分数与各环境因子均有一定的相关性，其中主要的几类 VOCs 与气温呈显著正相关，与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和臭氧呈显著负相关。

5 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*, 1995, **100**(D5): 8873 – 8892.
- [2] DUDAREVA N, KLEMPIEN A, MUHLEMANN J K, *et al.* Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds [J]. *New Phytologist*, 2013, **198**(1): 16 – 32.
- [3] OKUMURA M, KOSUGI Y, TANI A. Biogenic volatile organic compound emissions from bamboo species in Japan [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2018, **74**(1): 40 – 44.

- [4] LUN Xiaoxiu, LIN Ying, CHAI Fahe, *et al.* Reviews of emission of biogenic volatile organic compounds(BVOCs) in Asia [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**(9): 266 – 277.
- [5] YUAN Yali, SUN Zhihong, KANNASTE A, *et al.* Isoprenoid and aromatic compound emissions in relation to leaf structure, plant growth form and species ecology in 45 East-Asian urban subtropical woody species [J/OL]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, **53**: 126705 [2023-03-11]. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126705.
- [6] ANTONELLI M, DONELLI D, BARBIERI G, *et al.* Forest volatile organic compounds and their effects on human health: a state-of-the-art review [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(18): 6506 – 6541.
- [7] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
National Forestry and Grassland Administration. *Forest Resources Report of China* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.
- [8] 吴建国, 徐天莹, 崔克强, 等. 未来气候变化对武夷山自然保护区毛竹异戊二烯排放速率的影响[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1653 – 1664.
WU Jianguo, XU Tianying, CUI Keqiang, *et al.* Effects of climate change on isoprene emission rate from leaves of *Phyllostachys pubescens* distributed in Wuyi Nature Reserve [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1653 – 1664.
- [9] CHANG Tingwei, KUME T, OKUMURA M, *et al.* Characteristics of isoprene emission from moso bamboo leaves in a forest in central Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **211**(1): 288 – 295.
- [10] GUO Ming, HU Zhengqing, STRONG P J, *et al.* Evaluating the environmental health effect of bamboo-derived volatile organic compounds through analysis the metabolic indices of the disorder animal model [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2015, **28**(8): 595 – 605.
- [11] 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 Li, BAI Yanying, WANG Xiaoke, *et al.* Isoprene emission of bamboo and its implication to ozone level in region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1339 – 1344.
- [12] SONG Yandong, PENG Chunju, WU Qinjiao, *et al.* Age effects of moso bamboo on leaf isoprene emission characteristics [J]. *Front Plant Science*, 2023, **14**: 1 – 13.
- [13] CHANG T W, KOSUGI Y, KUME T, *et al.* Dependence of isoprene emission flux on leaf mass per area of *Phyllostachys pubescens* (moso bamboo) [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2022, **78**(1): 1 – 7.
- [14] 吴沁娇, 宋艳冬, 陶士杰, 等. 丽水白云国家森林公园5种典型林分挥发性有机化合物释放特征及其与环境因子的关系 [J/OL]. 浙江农林大学学报, 2023, **40** [2023-07-18]. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20220676.
WU Qinjiao, SONG Yandong, TAO Shijie, *et al.* VOCs release characteristics of 5 typical stands in Baiyun National Forest Park and their relationship with environmental factors [J/OL]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40** [2023-07-18]. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20220676.
- [15] 易夏. 浙江省五泄风景名胜典型植物群落评价[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2009.
YI Xia. *Typical Plant Community Evaluation of Wuxie Science Spot in Zhejiang* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2009.
- [16] 吕嘉欣, 王翔, 项亨旺, 等. 毛竹释放挥发物对空气负离子及微生物的影响[J]. 竹子学报, 2020, **39**(3): 49 – 57.
LÜ Jiaxin, WANG Xiang, XIANG Hengwang, *et al.* Effects of volatile components of *Phyllostachys edulis* on air negative ion and microorganisms [J]. *Journal of Bamboo Research*, 2020, **39**(3): 49 – 57.
- [17] 林静, 简毅, 骆宗诗, 等. 5种康养植物芬多精成分及含量研究[J]. 四川林业科技, 2018, **39**(6): 13 – 19.
LIN Jing, JIAN Yi, LUO Zongshi, *et al.* A study of chemical components and contents in the phytoncideres from 5 species of forest health plants [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2018, **39**(6): 13 – 19.
- [18] 吴敏. 5种杉科植物不同部位的精气成分[J]. 中南林学院学报, 2006, **26**(3): 82 – 86.
WU Min. A study of chemical components in the volatile gas from 5 taxodiaceae species [J]. *Journal of Central South Forestry College*, 2006, **26**(3): 82 – 86.
- [19] 蒋冬月, 李永红. 植物挥发性有机物的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2011(11): 143 – 149.
JIANG Dongyue, LI Yonghong. Research advances in volatile organic compounds of plant [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2011(11): 143 – 149.

- [20] CHEN Jungang, TANG Jing, YU Xinxiao. Environmental and physiological controls on diurnal and seasonal patterns of biogenic volatile organic compound emissions from five dominant woody species under field conditions [J/OL]. *Environmental Pollution*, 2020, **259**: 113955 [2023-03-11]. doi: 10.1016/j.envpol.2020.113955.
- [21] BARREIRA L M F, DUPORTÉ G, RNKK T, *et al.* Field measurements of biogenic volatile organic compounds in the atmosphere using solid-phase microextraction arrow [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(2): 881 – 893.
- [22] 王茜. 福州旗山森林公园毛竹游憩林生态保健功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
WANG Qian. *Study on Ecological Health Functions of Phyllostachys pubescens Forest in Qishan Mountain of Fuzhou* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [23] 李娟, 王成, 彭镇华. 侧柏挥发物变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(3): 52 – 56.
LI Juan, WANG Cheng, PENG Zhenhua. A study on the volatile matter changes of *Platycladus orientalis* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, **38**(3): 52 – 56.
- [24] 吕嘉欣. 毛竹挥发物对空气负离子及空气微生物的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
LÜ Jiixin. *Effect of Phyllostachys edulis on Negative Air Anion and Microorganism* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2021.
- [25] 徐超, 王海湘, 温国胜, 等. 从生理生态角度解析毛竹爆发式生长的原因[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, **38**(2): 64 – 69, 82.
XU Chao, WANG Haixiang, WEN Guosheng, *et al.* Analysis on the reason of *Phyllostachys edulis* explosive growth by physiological and ecological [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, **38**(2): 64 – 69, 82.
- [26] BAI Jianhui, GUENTHER A B, TURNIPSEED A, *et al.* Seasonal variations in whole-ecosystem BVOC emissions from a subtropical bamboo plantation in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 12 – 21.
- [27] 张莉, 王效科, 欧阳志云, 等. 中国森林生态系统的异戊二烯排放研究[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 8 – 15.
ZHANG Li, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, *et al.* Estimation of isoprene emission from forest ecosystems in China [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(1): 8 – 15.
- [28] 井潇溪. 北京市森林植物挥发性有机物排放研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
JING Xiaoxi. *Study on Biogenic Volatile Organic Compounds Emission from Forest Plants in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [29] 王新雨, 张宜升, 刘子杨, 等. 全球变暖对植被源异戊二烯排放影响的研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2020, **41**(4): 55 – 63.
WANG Xinyu, ZHANG Yisheng, LIU Ziyang, *et al.* A review of effects of global warming on biogenic isoprene emission [J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2020, **41**(4): 55 – 63.
- [30] LI Tao, BAGGESEN N, SECO R, *et al.* Seasonal and diel patterns of biogenic volatile organic compound fluxes in a subarctic tundra [J/OL]. *Atmospheric Environment*, 2023, **292**(1): 119430 [2023-03-11]. doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119430.
- [31] 王志辉, 张树宇, 陆思华, 等. 北京地区植物VOCs排放速率的测定[J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 7 – 12.
WANG Zhihui, ZHANG Shuyu, LU Sihua, *et al.* Screenings of 23 plant species in Beijing for volatile organic compound emissions [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(2): 7 – 12.
- [32] 郭希娟, 田媛. 一品红挥发性有机物释放日变化规律研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(10): 107 – 111.
GUO Xijuan, TIAN Yuan. Diurnal variations of volatile organic compounds released from *Poinsettia* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(10): 107 – 111.
- [33] 路通, 田旭平. 圆柏叶挥发性成分夏初的日变化规律[J]. 广西林业科学, 2022, **51**(3): 363 – 369.
LU Tong, TIAN Xuping. Diurnal change rules on volatile organic compounds of *Sabina chinensis* leaves in early summer [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2022, **51**(3): 363 – 369.
- [34] 李海东, 高岩, 金幼菊. 珍珠梅花挥发性物质日动态变化的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2004, **25**(2): 54 – 59.
LI Haidong, GAO Yan, JIN Youjü. The daily dynamic variances of the VOCs releasing from flower of *Sieria kirilowii* (Regel) maxim [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2004, **25**(2): 54 – 59.
- [35] 龚旭昇. 典型沉水植物的主要挥发性有机物组成及环境条件对其产生的影响[D]. 武汉: 湖北大学, 2019.

- GONG Xusheng. *Major Biogenic Volatile Organic Compounds of Typical Submerged Macrophytes and the Effects of Environmental Factors on These BVOCs Production* [D]. Wuhan: Hubei University, 2019.
- [36] 李洪远, 王芳, 熊善高, 等. 植物挥发性有机物的作用与释放影响因素研究进展[J]. 安全与环境学报, 2015, **15**(2): 292 – 296.
- LI Hongyuan, WANG Fang, XIONG Shangao, *et al.* Research review on the role and the influential factors of the biogenic volatile organic compounds [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(2): 292 – 296.
- [37] 郭霞. 云南省典型乔木植物挥发性有机物释放规律研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- GUO Xia. *The Research on Release Regularities of Biogenic Volatile Organic Compounds from the Typical Plants in Yunnan* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [38] 任琴, 谢明惠, 张青文, 等. 不同温度、光照对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(11): 3080 – 3086.
- REN Qin, XIE Minghui, ZHANG Qingwen, *et al.* Effect on volatile compounds from damaged *Eupatorium adenophorum* by different temperature and light [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(11): 3080 – 3086.
- [39] MOCHIZUKI T, TAKANASHI S, WADA R, *et al.* Canopy fluxes of monoterpene, isoprene and isoprene oxidation products in a pine-oak forest [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2020, **76**(1): 36 – 43.
- [40] 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[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3588 – 3592.
- LI Yingying, LI Xiang, CHEN Jianmin. Study on transformation mechanism of SOA from biogenic VOC under UV-B condition [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3588 – 3592.
- [41] 张福珠, 苗鸿, 鲁纯. 落叶阔叶林释放异戊二烯的研究[J]. 环境科学, 1994, **15**(1): 1 – 5, 92.
- ZHANG Fuzhu, MIAO Hong, LU Chun. Study on emissions of isoprene from deciduous and broadleaf trees [J]. *Environmental Science*, 1994, **15**(1): 1 – 5, 92.
- [42] 林威, 赵振, 赖金美, 等. 温度和光照对红花檵木和南天竹异戊二烯和单萜烯释放的影响[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(9): 3126 – 3133.
- LIN Wei, ZHAO Zhen, LAI Jinmei, *et al.* Effects of temperature and light on isoprene and monoterpene emission from *Loropetalum chinense* and *Nandina domestica* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(9): 3126 – 3133.