

## 不同林龄橡胶树释放 BVOCs 的动态排放特征

王定程<sup>4</sup>, 王春燕<sup>1\*</sup>, 姬建波<sup>2</sup>, 杨宗德<sup>3</sup>, 郑文<sup>1\*\*</sup>

1. 海南省农垦科学院集团有限公司, 海南海口 570206; 2. 海南大学生态与环境学院, 海南海口 570228; 3. 海南热带雨林国家公园管理局霸王岭分局, 海南昌江 572722; 4. 海南省环境科学研究院, 海南海口 570100

**摘要:** 生物源挥发性有机物 (BVOCs) 是森林植物释放的重要次生代谢产物, 在植物生长发育和环境调节中发挥关键作用。本研究以海南岛广泛种植的橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 为研究对象, 采用动态顶空采样结合热脱附-气相色谱质谱联用技术 (GC-MS), 系统分析不同林龄 (5、15、20、25 a) 橡胶树 BVOCs 的释放特征及其环境影响因子。研究表明: BVOCs 日动态呈单峰曲线, 释放高峰集中在 10:30—13:00 时间段; BVOCs 释放速率基本呈现随林龄增长而显著递减的趋势, 即 5 a>15 a>20 a>25 a, 雨季的释放量显著高于旱季; 单萜烯类 (MTs)、其他萜烯类 (OTs) 和含氧化合物 (OVOCs) 的种类随林龄增加而减少, 而倍半萜烯类 (STs) 保持稳定; BVOCs 释放与净光合速率、蒸腾速率、光照强度呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 其中光照强度是主要影响因子; 空气温湿度对 BVOCs 释放的影响随林龄增长而增强。该研究结果揭示了橡胶林 BVOCs 释放的树龄效应和季节动态, 为评估热带人工林的生态环境效应提供科学依据。

**关键词:** 橡胶林; BVOCs; 释放速率

中图分类号: X173; S794.1 文献标志码: A

## Dynamic Emission Characteristics of BVOCs Released by *Hevea brasiliensis* of Different Ages

WANG Dingcheng<sup>4</sup>, WANG Chunyan<sup>1\*</sup>, JI Jianbo<sup>2</sup>, YANG Zongde<sup>3</sup>, ZHENG Wen<sup>1\*\*</sup>

1. Hainan State Farms Academy of Sciences Group Co., Ltd., Haikou, Hainan 570206, China; 2. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Bawangling Branch, Hainan Tropical Rainforest National Park Management Bureau, Changjiang, Hainan 572722, China; 4. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou, Hainan 570100, China

**Abstract:** Biogenic volatile organic compounds (BVOCs) are important secondary metabolites released by forest plants, playing a crucial role in plant growth, development and environmental regulation. This study focused on rubber trees (*Hevea brasiliensis*) widely cultivated in Hainan Island. Using dynamic headspace sampling coupled with thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), we systematically analyzed the emission characteristics of BVOCs and the environmental influencing factors across rubber trees of different stand ages (5, 15, 20 and 25 years). The diurnal variation of BVOCs exhibited a unimodal curve, with peak emissions concentrated between 10:30 and 13:00. BVOC emission rates decreased significantly with increasing stand age (5 years >15 years >20 years >25 years), and emissions during the rainy season were significantly higher than those during the dry season. The diversity of monoterpenes (MTs), other terpenes (OTs) and oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) decreased with stand age, while sesquiterpenes (STs) remained stable. BVOC emissions showed significant positive correlations with net photosynthetic rate, transpiration rate, and light intensity ( $P<0.05$ ), with light intensity being the primary influencing factor. The effects of air temperature and humidity on BVOC emissions increased with stand age. This study elucidated the age-related effects and seasonal dynamics of BVOC emissions in rubber plantations, providing a scientific basis for

收稿日期 2025-04-17; 接受日期 2025-07-15

基金项目 海南省自然科学基金面上项目 (No. 420MS118, No. 322MS028)。

作者简介 王定程 (1983—), 男, 学士, 工程师, 研究方向: 环境生态; \*同等贡献作者: 王春燕 (1983—), 女, 硕士, 高级农艺师, 研究方向: 环境生态。 \*\*通信作者 (Corresponding author): 郑文 (ZHENG Wen), E-mail: zhengwen81@163.com。

assessing the ecological and environmental impacts of tropical artificial forests.

**Keywords:** *Hevea brasiliensis*; BVOCs; release rate

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.11.022

生物源挥发性有机物 (biogenic volatile organic compounds, BVOCs) 是大气挥发性有机物的主要组成部分, 主要来源于植物、动物或微生物的代谢活动, 其中植物的释放量最大。BVOCs 是植物的次生代谢产物, 排放量远超人为源 (AVOCs), 且化学反应活性更强<sup>[1]</sup>。全球 VOCs 年排量约  $1.00\times 10^8$  t, 而 BVOCs 年排放量高达  $11.50\times 10^8$  t, 是人为源排放的 10 倍以上<sup>[2]</sup>。其中, 森林贡献最大, 年排放量约  $8.20\times 10^8$  t, 占全球 BVOCs 的 70% 以上<sup>[3]</sup>。BVOCs 主要包括异戊二烯 (44%)、单萜烯 (11%)、醚类、酯类等<sup>[4]</sup>。全球陆地植被 BVOCs 年释放量约 760 Tg C, 其中热带地区异戊二烯和单萜烯的释放量分别占陆地总释放量的 88% 和 83%<sup>[5-6]</sup>。BVOCs 可与大气成分生成二次有机气溶胶 (SOA), 增强温室效应<sup>[7-9]</sup>。另外, 部分 BVOCs 可杀死空气中的细菌, 但其氧化产物 (如臭氧、有机气溶胶、光化学烟雾) 可能威胁人类健康<sup>[10]</sup>。BVOCs 在大气化学、生态系统相互作用及气候调节中起关键作用。

随着全球气候变暖加剧, BVOCs 作为重要的碳排放源, 其对大气化学过程和碳循环的影响日益受到关注<sup>[11]</sup>。森林生态系统是 BVOCs 的主要释放源, 其中人工林 (特别是橡胶林) 因其特殊的生态功能和广泛分布, 在区域环境调节中扮演着重要角色。研究表明, 橡胶林具有显著的 BVOCs 释放潜力, 其排放特征受树种特性、林龄结构以及环境因子 (如光照、温湿度、CO<sub>2</sub> 浓度等) 协同调控。其中光照和温度通过影响 BVOCs 合成酶的活性, 进而影响植物 BVOCs 的释放速率<sup>[12-13]</sup>。橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 原产于亚马逊热带雨林, 自 19 世纪 50 年代正式引入中国后, 在海南岛、西双版纳等地区大面积推广种植。目

前, 我国橡胶林总种植面积达 110 万 hm<sup>2</sup>, 其中海南有 52.83 万 hm<sup>2</sup>, 约占全国橡胶种植面积的 48%<sup>[14]</sup>。然而, 当前关于橡胶林 BVOCs 排放的研究存在明显不足, 一方面, 现有研究多集中于区域或全球尺度, 缺乏对特定树种 (如橡胶树) 的系统研究; 另一方面, 关于 BVOCs 动态排放特征, 特别是林龄和季节变化的影响的认识仍十分有限。本研究通过系统分析橡胶树 BVOCs 的释放规律, 重点探讨林龄梯度和季节变化对其排放动态的影响机制。研究结果将有助于完善热带人工林 BVOCs 排放数据库, 为评估橡胶林生态系统的气候环境效益提供科学依据, 同时为制定合理的橡胶林管理策略提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于海南省儋州市 (19°11'~19°52'N, 108°56'~109°46'E), 属典型热带海岛季风气候, 湿度较大, 气温年较差小, 且夏季多发强对流雨, 7—11 月为热带风暴高发期。旱雨季分化明显, 5—10 月为雨季, 降水量占全年 75% 以上, 年均降水量约 1876 mm, 平均湿度为 79%~86%; 11 月至翌年 4 月为旱季。土壤为花岗岩类砖红壤, 多为弱酸性砂质黏壤土, 相对高度差较小, 属于海南宜胶地, 橡胶种植规模较大。

研究对象选用 5 a (未开割)、15 a (开割 5 a)、20 a (弃割)、25 a (弃割) 等不同林龄橡胶林固定样地各 1 个 (表 1), 且样地均无林下种植, 种植橡胶品系均为热研 7-33-97, 旱季 (11 月至翌年 3 月) 进行施肥、除草等胶园常规管理。橡胶林垂直结构单一且具有明显分层, 上层为橡胶林乔木层, 林冠高度为 8~20 m, 下层主要是一年生

表 1 试验区橡胶林概况  
Tab. 1 Situations of experimental plot of *H. brasiliensis*

| 林龄 Forest age/a | 定植年份 Planting year | 割龄 Tapping age/a | 位置 Location  | 经纬度 Latitude and longitude |
|-----------------|--------------------|------------------|--------------|----------------------------|
| 5               | 2017               | 0                | 海南儋州西庆农场     | 19°35'N, 109°28'E          |
| 15              | 2007               | 7                | 海南儋州西庆农场     | 19°35'N, 109°28'E          |
| 20              | 2002               | 12               | 海南大学儋州校区试验农场 | 19°30'N, 109°28'E          |
| 25              | 1998               | 17               | 海南儋州西联农场     | 19°38'N, 109°33'E          |

或多年生的草本和藤本植物, 高度在 1 m 以下。野外试验期间, 错开割胶周期, 避免割胶人为干扰橡胶树 BVOCs 释放。

## 1.2 方法

**1.2.1 样品采集** 分别于雨季(6、7月)和旱季(11月)采集 BVOCs 气体。选取晴朗、无风天气时采样, 确保采样时环境因子(光照、温湿度等)相近。利用动态顶空采样法, 随机选取 3 或 5 株健康橡胶树的成熟叶片, 每株选取 1.5~2.5 m 区间内的枝叶, 采样点分布在东、南、西、北 4 个不同方位各采样 1 次, 以排除风向、光照等影响。每次采样时, 同时采集空白样品, 并同步收集环境参数。从上午 8:00 开始采样, 每隔 2.5 h 采样 1 次, 直至 17:30, 每个时段采集 12 个或 20 个样品(25 a 橡胶树采集 12 个样品, 其他林龄样品数为 20 个)。采样过程如下: 在透明的 5 L Teflon 采样袋的上端开直径 1 cm 左右的小孔并插入 PTFE 管, 套于待测部位(植物枝叶或植物幼

苗)。下端接入 PTFE 管连接的空气过滤组(顺序为活性炭、变色硅胶、二氧化锰)以过滤采样袋内空气并做好密封。开始采样前先接入上端抽气泵, 密封下端进气口, 将采样袋内抽气至近似真空(采样袋因真空发出异响), 抽气过程约 2~3 min。抽气结束后断开抽气泵, 密封上端导气管, 下端空气过滤进气口接入气泵, 并向采样袋内输送已过滤的空气, 至采样袋膨胀, 送气过程约 2~3 min。送气结束后断开气泵, 上端依次接入吸附管(Tenax TA+a Graphitised Carbon Black, Markes)和大气采样仪(QC-2B, 中国), 采集流速为 1 L/min, 采样时间为 30 min(图 1)。采样结束后立即取下, 密封并做好标记, 于实验室内 4℃低温保存, 7 d 内进行气体样品的分离与鉴定。采集橡胶树枝叶 BVOCs 样品后取下采集部位的叶片, 置于自封袋内密封保存, 于实验室烘箱内 80℃连续烘干 72 h, 利用电子天平称取叶片干质量后, 用于计算 BVOCs 释放速率。

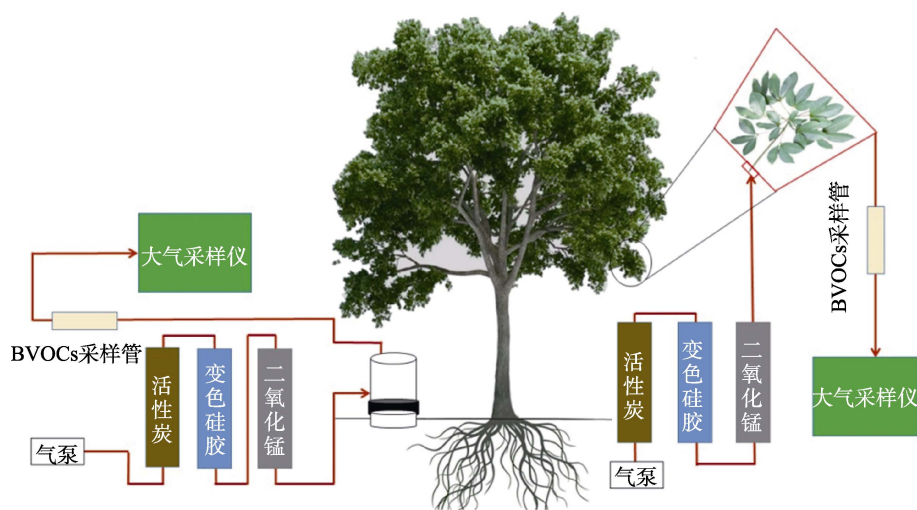


图 1 橡胶树 BVOCs 采样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BVOC sampling from rubber tree

**1.2.2 测定方法** (1) BVOCs 样品的分离与鉴定。采用美国 Agilent 热脱附-气相色谱质谱联用法(GC-MS, 7890A-5975C, USA)对采样管内的 BVOCs 样品进行分离鉴定。定性定量分析后参考 GUENTHER 等<sup>[2]</sup>提出的 G93 算法和 YU 等<sup>[15]</sup>的方法对单萜烯进一步分类, 将物质归类为 5 个组分: 异戊二烯(ISO)、含氧单萜(OTs)、单萜烯(MTs)、倍半萜烯(STs)和其他 BVOCs(OVOCs), BVOCs 表示总 BVOCs 释放。

(2) 相关因子测定。在采集 BVOCs 气体的

同时用 Li-6400 光合作用仪(Li-Cor Inc., USA)对叶片进行 6~9 次测量, 测定叶片光合作用指标: 净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、细胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )。利用便携式温湿度计(DT-321S, 中国)辅助测量环境空气温度( $T_{air}$ )、空气湿度( $H_{air}$ ), 利用光量子照度双辐射计(3415FQF, USA)辅助测定光照强度( $Par$ )。

## 1.3 数据处理

使用 Excel 软件整理试验数据, 用 SPSS 26

和 Origin 2021 软件进行数据处理。通过 LSD 和单因素方差分析（one-way ANOVA）比较不同林龄橡胶树 BVOCs 释放的差异，采用 Pearson 相关性指数法分析 BVOCs 释放与相关因子的相关性，并对标准化的数据进行主成分分析，采用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄橡胶树 BVOCs 释放速率的日变化

由图 2 可知，雨季（6、7 月）和旱季（11 月）不同林龄橡胶树 BVOCs 释放日变化明显，呈现较为一致的变化趋势。在 10：30—13：00 时段，

最大值均出现在 5 a 橡胶树，日变化分别为 29.54、19.44  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ，最小值出现在 25 a 橡胶树，日变化分别为 6.24、2.06  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ，雨季 BVOCs 释放速率约为旱季的 1.52~3.03 倍。在同一观测时段，橡胶树 BVOCs 释放速率均随林龄增长而显著降低的趋势，即 5 a>15 a>20 a>25 a。在不同观测时段，不同林龄橡胶树 BVOCs 释放速率呈先升后降的变化趋势，峰值均出现在 10：30—13：00 时段，最小值在 8：00—10：30 或 15：30—18：00。在相同林龄同一观测时间段，雨季的 BVOCs 释放速率显著高于旱季。由此推测，林龄、旱雨季对橡胶树 BVOCs 释放速率有较大影响。

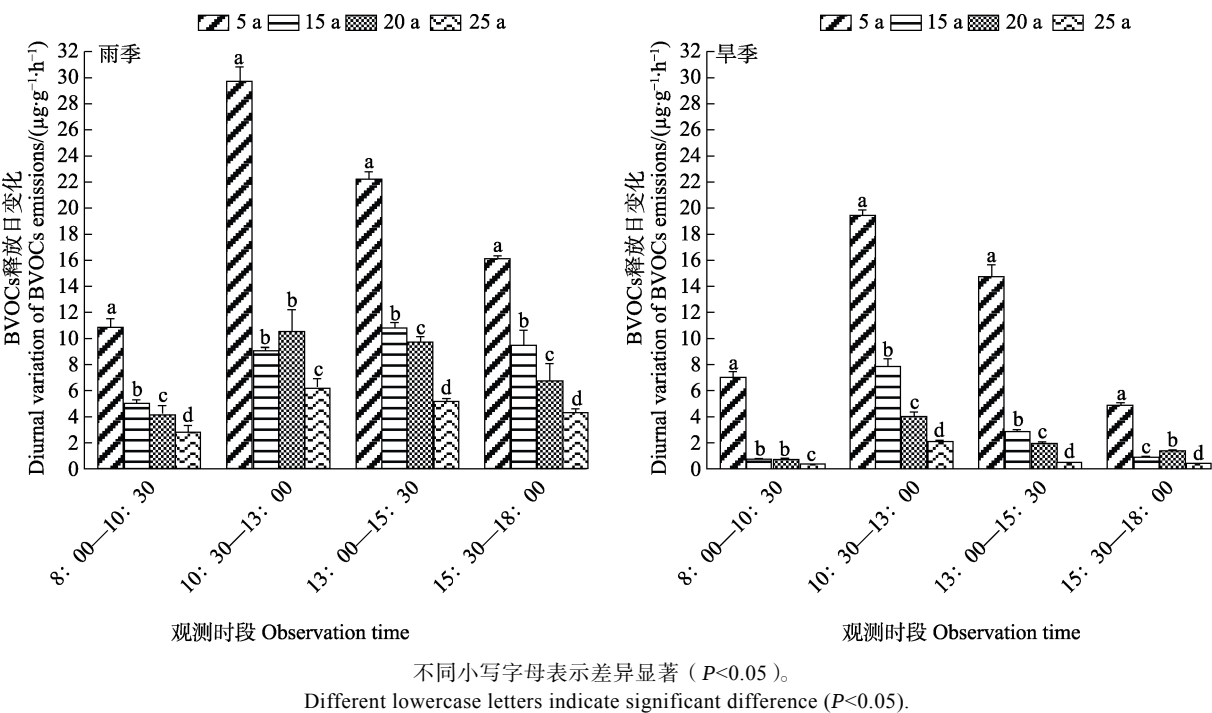


图 2 雨季、旱季不同林龄橡胶树 BVOCs 释放的日变化  
Fig. 2 Daily variation of BVOCs release in rubber tree of different ages during rainy and dry seasons

2.2 不同林龄橡胶树 BVOCs 各组分释放速率的日变化

由图 3 可知，不同林龄橡胶树 BVOCs 各组分释放速率在雨季和旱季的变化趋势相似，但是各组分的变化趋势有一定差异，其中 ISO、MTs、OTs 和 STs 均呈先升后降的单峰变化，峰值出现在 10：00—13：00 时间段，最小值出现在 15：30—18：00 时间段。OVOCs 在 5 a 和 15 a 橡胶树中的释放速率较小，并且在 20 a 和 25 a 林龄橡胶树中未检测到。

由图 4 可知，随着橡胶树林龄的增加，ISO

和 MTs 的释放量占总释放量的比例降低，而 OTs 和 STs 的释放量比例升高。即在雨季、旱季时，5 a 和 15 a 橡胶树的 ISO 和 MTs 的释放量占总释放量的 62%以上，而 20 a 和 25 a 橡胶树的 OTs 和 STs 释放量占总释放量的 50%以上，其中相同林龄橡胶树的 ISO 释放量旱季高于雨季，而 MTs 释放量则雨季高于旱季；OTs 释放量的占比为 25 a>20 a>15 a>5 a；STs 释放量占比为 20 a>25 a>15 a>5 a。

2.3 不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与相关因子的相关性

由表 2 可知，不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与

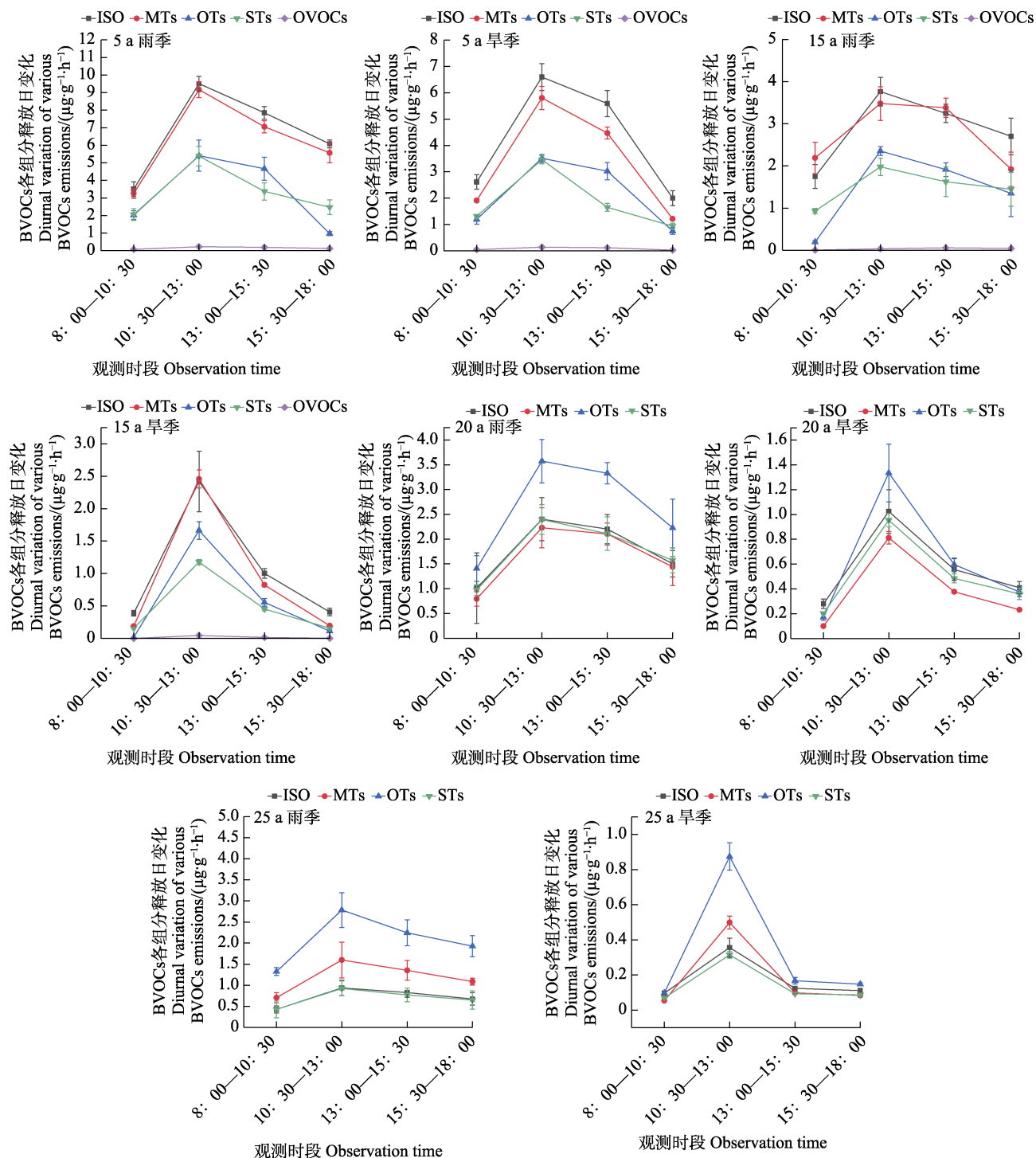


图 3 雨季、旱季不同林龄橡胶树 BVOCs 各组分释放的日变化

Fig. 3 Daily variation of BVOCs components release in rubber tree of different ages during rainy and dry seasons

叶片光合参数 ( $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ ) 和环境因子 ( $T_{\text{air}}$ 、 $H_{\text{air}}$ 、 $Par$ ) 具有一定相关性。其中, 不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与光合参数  $Par$ 、 $P_n$  和  $T_r$  均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。15 a 和 25 a 树龄 BVOCs 释放与  $T_{\text{air}}$  均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 而 25 a 树龄 BVOCs 释放与  $H_{\text{air}}$  呈显著负相关 ( $P <$

0.05), 表明温湿度对 BVOCs 释放的影响增强随林龄增长而占据主导。

由图 5 可知, 5、15、20、25 a 不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与相关因子的主成分累积贡献率分别为 82.6%、78.1%、84.1%、84.5%。其中 5 a 橡胶树 BVOCs 释放在雨季、旱季之间的差异较

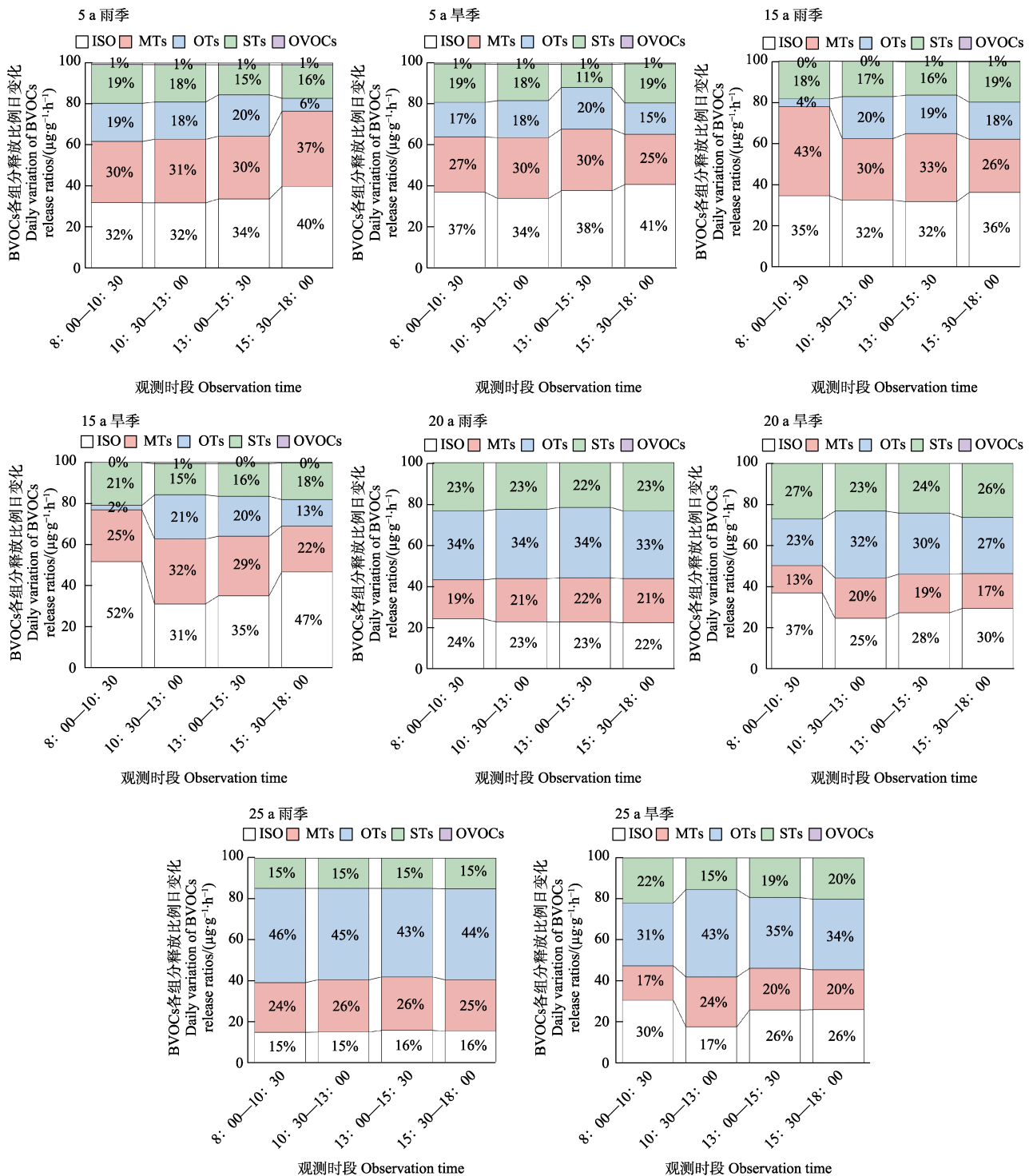


图 4 雨季、旱季不同林龄橡胶树 BVOCs 各组分释放比例日变化

Fig. 4 Daily variation of BVOCs components release ratios in rubber tree of different ages during rainy and dry seasons

小, 主成分 1 中载荷量较高的因子为 Par、 $P_n$ 、 $T_r$ ; 15 a 橡胶树 BVOCs 释放主成分 1 中载荷量较高的因子为 Par、 $P_n$ 、 $T_r$  和 T-air, 而 20 a 橡胶树 BVOCs 释放在雨季、旱季差异较大, 主成分 1 中载荷量较高的因子为 Par、 $P_n$ 、 $T_r$ 、 $C_i$ 、T-air、H-air, 与 BVOCs 各组分释放具有一定的正相关性。25 a 橡

胶树 BVOCs 释放同样在雨季表现出较大的离散程度, 主成分 1 中 Par、T-air、 $T_r$ 、 $P_n$  的载荷量均大于 0.78, H-air 载荷量为-0.76, 具有显著负相关性。由此可得, 各林龄的 BVOCs 释放均与 Par、 $P_n$  和  $T_r$  表现出紧密的正相关关系。随着林龄增加, T-air 与 BVOCs 释放的正相关性增强, 而 H-air

表 2 不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与相关因子的相关性  
Tab. 2 Correlation between BVOCs release from rubber tree and related factors during rainy and dry seasons

| 林龄 Forest age/a | 项目 Item | $P_n$   | $G_s$   | $C_i$  | $T_r$   | T-air   | H-air    | Par     |
|-----------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|---------|
| 5               | BVOCs   | 0.786** | 0.303*  | 0.157  | 0.654** | 0.287   | 0.023    | 0.936** |
|                 | ISO     | 0.785** | 0.286   | 0.142  | 0.659** | 0.337*  | 0.033    | 0.936** |
|                 | MTs     | 0.780** | 0.265   | 0.143  | 0.642** | 0.324*  | 0.063    | 0.937** |
|                 | OTs     | 0.705** | 0.440*  | 0.172  | 0.649** | 0.227   | -0.103   | 0.825** |
|                 | STs     | 0.663** | 0.156   | 0.148  | 0.483*  | 0.119   | 0.075    | 0.790** |
|                 | OVOCs   | 0.791** | 0.319*  | 0.144  | 0.673** | 0.291   | 0.046    | 0.919** |
| 15              | BVOCs   | 0.788** | 0.477*  | 0.017  | 0.551** | 0.637** | 0.034    | 0.950** |
|                 | ISO     | 0.847** | 0.323*  | 0.025  | 0.596** | 0.604** | 0.001    | 0.964** |
|                 | MTs     | 0.574** | 0.600** | 0.040  | 0.454*  | 0.473*  | 0.217    | 0.808** |
|                 | OTs     | 0.681** | 0.432*  | -0.100 | 0.363*  | 0.747** | -0.214   | 0.817** |
|                 | STs     | 0.875** | 0.375*  | 0.109  | 0.658** | 0.583** | 0.064    | 0.948** |
|                 | OVOCs   | 0.673** | 0.426*  | -0.131 | 0.349*  | 0.752** | -0.232   | 0.768** |
| 20              | BVOCs   | 0.972** | -0.003  | 0.439* | 0.669** | 0.328*  | -0.237   | 0.974** |
|                 | ISO     | 0.933** | -0.031  | 0.398* | 0.634** | 0.337*  | -0.247   | 0.907** |
|                 | MTs     | 0.945** | -0.011  | 0.425* | 0.665** | 0.334*  | -0.241   | 0.965** |
|                 | OTs     | 0.953** | 0.017   | 0.441* | 0.651** | 0.291   | -0.209   | 0.955** |
|                 | STs     | 0.950** | 0       | 0.437* | 0.656** | 0.333*  | -0.238   | 0.964** |
| 25              | BVOCs   | 0.859** | 0.427*  | -0.063 | 0.883** | 0.831** | -0.496*  | 0.959** |
|                 | ISO     | 0.860** | 0.372*  | -0.089 | 0.855** | 0.820** | -0.479*  | 0.921** |
|                 | MTs     | 0.856** | 0.435*  | -0.056 | 0.886** | 0.783** | -0.627** | 0.944** |
|                 | OTs     | 0.786** | 0.415*  | -0.044 | 0.837** | 0.829** | -0.385*  | 0.915** |
|                 | STs     | 0.846** | 0.379*  | -0.089 | 0.795** | 0.704** | -0.472*  | 0.891** |

注：\*表示显著相关 ( $P<0.05$ )；\*\*表示极显著相关 ( $P<0.01$ )。  
Note: \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).

在 25 a 时呈现出显著的负相关，表明环境温湿度的调控作用随树木老化而凸显。

3 讨论

3.1 橡胶树 BVOCs 释放日变化

本研究结果表明，不同林龄橡胶树 BVOCs 释放日变化明显，且变化趋势基本一致，呈现“早晚低，中午高”的单峰释放特征，释放速率的峰值出现在 10:30—13:00，而且雨季的 BVOCs 释放速率显著高于旱季。这与海南红豆 (*Ormosia pinnata*) [16] 的研究结论一致。YANG 等 [17] 指出，BVOCs 释放与树龄、叶龄和生长期有关。本研究还得出，不同林龄橡胶树 BVOCs 释放速率具有显著差异，随林龄增长而降低，即 5 a>15 a>20 a>25 a，且在 10:30—13:00 时间段，5 a 橡胶树的 BVOCs 释放速率是 25 a 橡胶树的 4.73 倍。幼龄橡胶树 (5 a) 的 BVOCs 释放速率显著高于老龄树 (25 a)，这与蓝桉 (*Eucalyptus globulus*)、

日本扁柏 (*Chamaecyparis obtusa*) 和榲桲 (*Quercus aliena*) 等树种 [18-19] 的研究结论一致。这是由于幼叶表皮角质层较薄，气孔密度高，促进挥发性有机物扩散，幼苗通过高 BVOCs 释放增强化感作用与抗逆性，老龄树次生代谢转向结构性防御 (如木质素沉积)，而幼树更依赖化学防御来提高自身存活率 [18, 20-23]。释放速率呈现 5 a>15 a>20 a>25 a 的非线性递减，这可能与橡胶树产胶周期有关；5 a 橡胶树处于生长旺盛期，25 a 橡胶树已进入产量衰退期，其生理活性的差异直接影响 BVOCs 合成酶 (如异戊二烯合成酶) 的活性。刘凤辰等 [24] 研究发现，油松 (*Pinus tabulaeformis*) 夏季 BVOCs 释放速率大于春秋两季；侧柏 (*Platycladus orientalis*) 总挥发性物质的季节变化规律为夏季>春季>秋季>冬季 [25]；蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 同样在夏季表现出异戊二烯的过量释放 [26]；北美黄松 (*Pinus ponderosa*) 春夏季 BVOCs 释放速率是秋季的 18 倍 [27]。王永峰等 [28] 提出，雨季初期

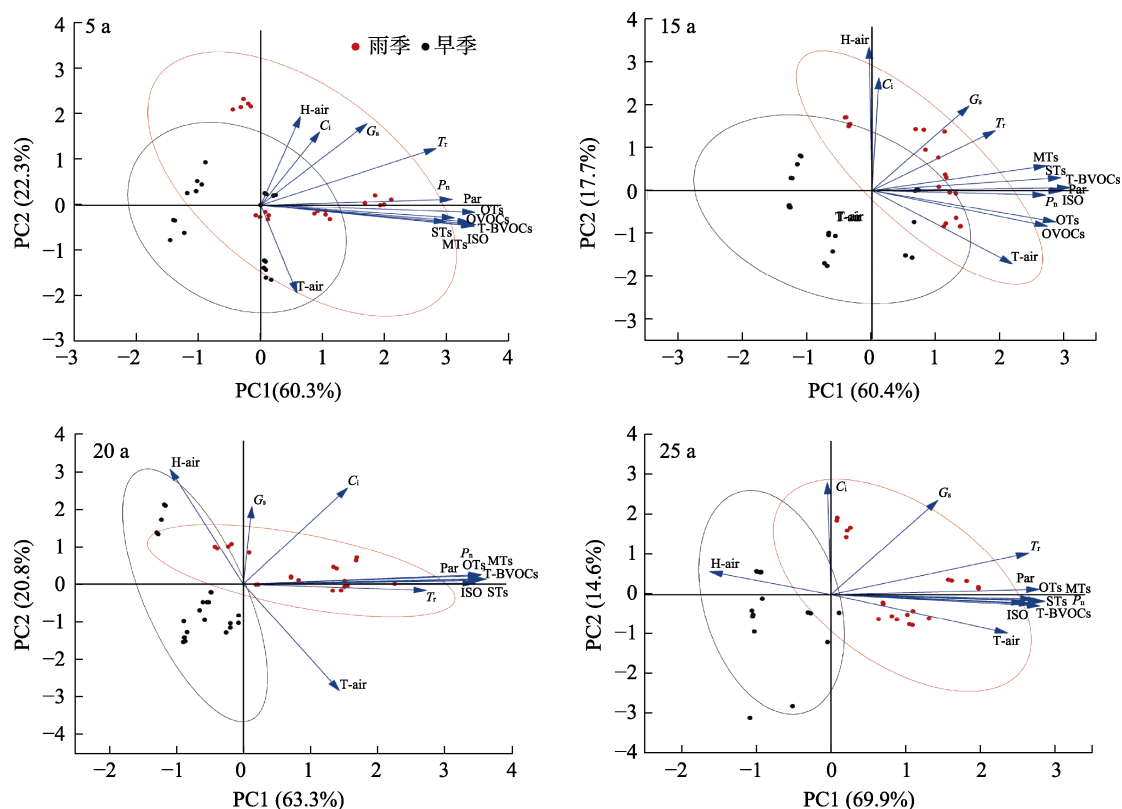


图 5 雨季、旱季不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与光合作用参数间的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of BVOCs release and photosynthetic parameters in rubber tree of different ages during rainy and dry seasons

橡胶树总 VOC 潜在释放强度是旱季的 2 个数量级。这是由于植物异戊二烯和单萜烯合成与释放受光照和温度的影响<sup>[29]</sup>, 雨季温度和光照水平均高于旱季, 雨季高温高湿条件下, 橡胶树 Rubisco 酶羧化效率降低, 导致过剩光能通过异戊二烯释放耗散, 同时雨季冠层光合有效辐射 (PAR) 增强, 为 BVOCs 合成提供更多底物<sup>[30]</sup>, 而从雨季过度至旱季, 橡胶树蒸散量和总初级生产力在旱季均出现显著下降, 降幅大于 45%<sup>[31]</sup>, 这是由于旱季橡胶树通过关闭气孔减少蒸腾作用, 同时限制了 BVOCs 扩散; 同时冠层光合有效辐射减少导致植被固定能量下降, 而总初级生产力降低共同作用的结果, 最终使旱季 BVOCs 释放量显著低于雨季。

### 3.2 不同林龄橡胶树 BVOCs 各组分释放速率的变化

不同植物在不同季节、不同发育阶段的 BVOCs 释放速率和组分存在一定差异, 这种差异既受环境因素的影响, 也与植物自身的遗传特性有关。研究发现, 不同品种柳树的异戊二烯、单萜烯、倍半萜的释放速率均存在明显差异<sup>[32]</sup>。美

国皂荚 (*Gleditsia triacanthos*)、海棠 (*Malus spectabilis*) 等植物在开花期的总单萜释放速率高于开花后<sup>[33]</sup>。本研究结果表明, 不同林龄橡胶树的 BVOCs 释放组分和释放速率也存在显著差异, 且 BVOCs 的释放种类随林龄增加而减少, 具体表现为: 单萜 (MTs)、其他萜类 (OTs) 和其他挥发性有机物 (OVOCs) 的化合物种类减少, 而倍半萜 (STs) 释放种类保持稳定。不同林龄橡胶树的 BVOCs 释放情况如下: 5 a 林龄释放 5 类 22 种化合物; 15 a 林龄释放 5 类 18 种化合物; 20 a 林龄释放 4 类 18 种化合物; 25 a 林龄释放 4 类 15 种化合物。这种变化趋势可能与橡胶树在不同生长阶段的生理特征和代谢调控有关。橡胶树在整个生命周期中固定在土壤中, 其幼苗期、成熟期、衰老期的生理状态不同, 导致萜类化合物的释放模式发生变化。尽管环境因子 (如温度、光照) 会影响 BVOCs 的释放速率, 但某些萜类化合物在整个生命周期内持续释放, 这可能与植物生长阶段及关键酶的季节性变化密切相关<sup>[34-35]</sup>。BVOCs 的释放动态受植物自身代谢途径和适应环境能力共同调控。研究发现, BVOCs 的组成主

要由植物遗传特性决定,而 BVOCs 的释放水平则受环境因子(如温度和光照)的影响<sup>[36-37]</sup>。因此,橡胶树 BVOCs 的释放差异不仅反映了不同林龄的代谢特征,也是植物长期适应环境的结果。这一发现有助于深入理解橡胶林生态系统的挥发性有机物排放规律及其环境调控机制。

### 3.3 不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与相关因子的关系

本研究结果表明,橡胶树 BVOCs 释放受光合与环境因子的共同调控,且存在显著的树龄效应。不同林龄橡胶树 BVOCs 释放与光合参数  $P_n$ 、 $P_{ar}$  和  $T_r$  均呈极显著正相关,环境温湿度( $T_{air}$ 、 $H_{air}$ )的调控作用随林龄增长而凸显,并随着林龄增长占据愈发重要位置。BVOCs 可作为叶片抗氧化剂,减少氧化胁迫对植物的伤害,而温度是影响萜烯类化合物释放的关键因素<sup>[38-39]</sup>。高温可能通过激活热休克蛋白(HSP)途径间接影响萜烯合成酶活性,萜类挥发性物质的释放可以散失植物体内大量的热量,有利于保持植物亚细胞结构的稳定;气孔阻力减小也有利于萜类挥发性物质的释放<sup>[40]</sup>。同时,强烈的蒸腾作用也为萜烯类化合物的扩散创造了有利条件<sup>[41]</sup>。光照和温度共同调控异戊二烯(ISO)的释放,其中光化学反应产生三磷酸腺苷(ATP)和二甲基烯丙基焦磷酸(DMAPP)为 ISO 合成提供碳源,而气孔导度和蒸腾速率则促进其释放<sup>[42-44]</sup>。相比之下,MTs 对光的依赖性较弱,其释放速率主要受温度调控<sup>[45]</sup>,温度通过影响合成酶活性而调节 MTs 的释放。研究表明,阔叶树种的 MTs 释放速率与温度、净光合速率、蒸腾速率呈显著正相关,植物叶片内合成和释放的 BVOCs 经过气孔排出,因此蒸腾速率、气孔导度等叶片生理指标均会促进植物 BVOCs 与大气间的气体交换<sup>[45]</sup>。KIVIMÄENPÄÄ 等<sup>[46]</sup>研究发现,温度升高导致欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)幼苗 MTs、OTs 和 STs 的释放速率增加 2 倍;LI 等<sup>[47]</sup>也发现经过长时间的模拟气候变暖导致北极苔原沼桦(*Betulanana*)的单萜烯释放增加 3 倍。值得注意的是,本研究发现净光合速率( $P_n$ )与 BVOCs 释放呈极显著正相关,揭示了二者在生理过程中的紧密耦合。从合成角度看, $P_n$  直接反映了碳固定效率,为 BVOCs(尤其是异戊二烯)的合成提供了必需的碳源(磷酸丙糖)和能量(ATP)。从释放过程看,高  $P_n$  往往与开放的气孔和活跃的蒸

腾作用同步,这为 BVOCs 的扩散逸出创造了有利条件。GUIDOLOTTI 等<sup>[48]</sup>研究发现,赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)在 30~45 °C 时光合作用降低,但异戊二烯的释放增加。温度升高可能提高叶绿素含量间接地影响光合作用,进而改变 BVOCs 释放模式。不同林龄橡胶树的 BVOCs 释放差异受环境因子(尤其是温度和光照)的显著影响,同时与植物自身的生理适应机制密切相关。高温和强光条件下,植物可能通过增加 BVOCs 释放来缓解氧化胁迫和高温伤害,而光合作用效率的变化进一步调节了这一过程。这些发现为了解橡胶林生态系统的 BVOCs 排放动态及其对气候变化的响应提供了重要依据。

橡胶树是典型的单萜化合物高释放物种,其释放的单萜化合物在种类和数量上的显著变化不仅影响区域大气化学过程,还可能对全球大气环境产生重要影响。这些生物源挥发性有机化合物(BVOCs)作为热带地区云雾和降水的核心凝结核,在大气化学过程中发挥着关键作用。同时,BVOCs 的强烈反应活性会消耗大气中的氢氧自由基( $\cdot OH$ ),而该自由基是甲烷氧化的主要媒介,因此橡胶树 BVOCs 释放可能通过影响甲烷存留时间进而调控区域气候变化。目前关于不同品系橡胶树 BVOCs 释放的种内差异尚不明确,环境因子间的交互效应机制也有待阐明。由于 BVOCs 合成与释放过程受生物和非生物因子的复杂调控,需要系统研究温度、湿度、光照、 $CO_2$ 、臭氧及氮素等多因子的协同作用。深入解析这些影响机制,将了解橡胶种植的生态环境效应提供重要科学依据。

### 参考文献

- [1] DUAN C S, ZUO S D, WU Z F, QIU Y, WANG J F, LEI Y H, LIAO H, REN Y. A review of research hotspots and trends in biogenic volatile organic compounds (BVOCs) emissions combining bibliometrics with evolution tree methods[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16: 013003.
- [2] GUENTHER A, HEWITT C, ERICKSON D, FALL R, GERON C, GRAEDEL T, HARLEY P, KLINGER L, LERDAU M, MCKAY W, PIERCE T, SCHOLLES B, STEINBRECHER R, TALLAMRAJU R, TAYLOR J, ZIMMERMAN P. A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. Journal of Geophysical Research,

- 1995, 100(D5): 8873-8892.
- [3] 邴光发, 王成, 彭镇华. 森林生物挥发性有机物释放速率研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1151-1155.  
QIE G F, WANG C, PENG Z H. Research advances on BVOCs emission from forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(6): 1151-1155. (in Chinese)
- [4] 蔡志全, 秦秀英. 植物释放挥发性有机物(VOCs)的研究进展[J]. 生态科学, 2002, 21(1): 86-90.  
CAI Z Q, QIN X Y. Advances in the studies on plant production and emission of volatile organic compounds[J]. Ecological Science, 2002, 21(1): 86-90. (in Chinese)
- [5] GUENTHER A B, JIANG X, HEALD C L, SAKULYANONTVITTAYA T, DUHL T, EMMONS L K, WANG X. The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions[J]. Geoscientific Model Development, 2012, 5(22): 1471-1492.
- [6] SINDELAROVA K, GRANIER C, BOUARAR I, GUENTHER A, TILMES S, STAVRAKOU T, MÜLLER J, KUHN U, STEFANI P, KNORR W. Global data set of biogenic VOC emissions calculated by the MEGAN model over the last 30 years[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(17): 9317-9341.
- [7] 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[J]. Atmospheric Environment, 2018, 186: 113-128.
- [8] YÁÑEZ-SERRANO A, BOURTSOUKIDIS E, ALVES E, BAUWENS M, STAVRAKOU T, LLUSIA J, FILELLA L, GUENTHER A, WILLIAMS J, ARTAXO P, SINDELAFOVA K, DOUBALOVÁ A, KESSELMEIER J, PEÑUELAS J. Amazonian biogenic volatile organic compounds under global change[J]. Global Change Biology, 2020, 26(9): 4722-4751.
- [9] ZHANG X D, DU J, ZHANG L M, HUANG T, GAO H, MAO X X, MA J M. Impact of afforestation on surface ozone in the North China Plain during the three-decade period[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287(15): 107979.
- [10] 吴玉明. 森林对人类生活环境的影响和作用[J]. 现代农业科学, 2008, 15(12): 66-67.  
WU Y M. Impac of forest to human life and the environment[J]. Modern Agricultural Science, 2008, 15(12): 66-67. (in Chinese)
- [11] RENNER E, MÜNZENBERG A. Impact of biogenic terpene emissions from *Brassica napus* on tropospheric ozone over Saxony (Germany): numerical investigation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2003, 10(3): 147-153.
- [12] NDAH F, VALOLAHTI H, SCHOLLERT M, MICHELSEN A, RINNAN R, KIVIMÄENPÄÄ M. Influence of increased nutrient availability on biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions and leaf anatomy of subarctic dwarf shrubs under climate warming and increased cloudiness[J]. Annals of Botany, 2022, 129(4): 443-455.
- [13] BAGGESEN N, LI T, SECO R, HOLST T, MICHELSEN A, RINNAN R. Phenological stage of tundra vegetation controls bidirectional exchange of BVOCs in a climate change experiment on a subarctic heath[J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2928-2944.
- [14] 甘业星, 佟金鹤, 田光辉. 海南岛橡胶种植区植被气候净初级生产力演变特征[J]. 生态科学, 2023, 42(2): 164-171.  
GAN Y X, TONG J H, TIAN G H. The evaluative characteristics of net primary productivity of vegetation in rubber planting area in Hainan Island[J]. Ecological Science, 2023, 42(2): 164-171. (in Chinese)
- [15] YU H, BLANDE J D. Diurnal variation in BVOC emission and CO<sub>2</sub> gas exchange from above- and belowground parts of two coniferous species and their responses to elevated O<sub>3</sub>[J]. Environmental Pollution, 2021, 278: 116830.
- [16] 黄娟, 鲁显楷, 莫江明, 张伟. 模拟 N 沉降对苗圃植物排放羧基化合物的影响[C]. 2014 中国环境科学学会学术年会, 中国四川成都, 2014: 7.  
HUANG J, LU X K, MO J M, ZHANG W. Effect of simulated N deposition on carbonyl compounds emitted by nursery plants[C]. 2014 Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences, Chengdu, Sichuan, China, 2014: 7. (in Chinese)
- [17] YANG W Z, CAO J, WU Y, KONG F L, LI L Y. Review on plant terpenoid emissions worldwide and in China[J]. Science of The Total Environment, 2021, 787: 147454.
- [18] KIM J C, KIM K J, KIM D S, HAN J S. Seasonal variations of monoterpene emissions from coniferous trees of different ages in Korea[J]. Chemosphere, 2005, 59(11): 1685-1696.
- [19] LIM Y J, ARMENDARIZ A, SON Y S, KIM J C. Seasonal variations of isoprene emissions from five oak tree species in East Asia[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 2202-2210.
- [20] ESTELL R E, JAMES D K, FREDRICKSON E L, ANDERSON D M. Within-plant distribution of volatile compounds on the leaf surface of *Flourensia cernua*[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2013, 48: 144-150.
- [21] HARIKAINEN K, KIVIMÄENPÄÄ M, NERG A, MÄENPÄÄ M, OKSANEN E, ROUSI M, HOLOPAINEN T. Elevated temperature and ozone modify structural characteristics of silver birch (*Betula pendula*) leaves[J]. Tree

- Physiology, 2020, 40(4): 467-483.
- [22] MEENINGEN Y V, WANG M, KARLSSON T, SEIFERT A, SCHURGERS G, RINNAN R, HOLST T. Isoprenoid emission variation of Norway spruce across a European latitudinal transect[J]. Atmospheric Environment, 2017, 170: 45-57.
- [23] MINNA K, JOHANNA R, HANNA V, ELINA H, HOLOPAINEN J K, TOINI H. Effects of elevated ozone and warming on terpenoid emissions and concentrations of Norway spruce depend on needle phenology and age[J]. Tree Physiology, 2022, 42(8): 1693.
- [24] 刘凤辰, 田娜, 程小琴. 油松植物挥发性有机物释放动态及其抑菌作用[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(9): 72-82.  
LIU F C, TIAN N, CHENG X Q. Dynamics of volatile organic compounds release from *Pinus tabulaeformis* plants and its antimicrobial effect[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(9): 72-82. (in Chinese)
- [25] 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 J, WANG C, PENG Z H. Changes in volatiles of *P. orientalis*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(3): 52-56. (in Chinese)
- [26] MATSUNAGA S, MULLER O, CHATANI S, NAKAMURA M, NAKAJI T, HIURA T. Seasonal variation of isoprene basal emission in mature *Quercus crispula* trees under experimental warming of roots and branches[J]. Geochemical Journal, 2012, 46(2): 163-167.
- [27] FLYCKT D. Seasonal Variation in the volatile hydrocarbon emissions from ponderosa pine and red oak[D]. Pullman: Washington State University, 1979.
- [28] 王永峰, SUE OWEN, 李庆军, JOSEP PE(N)UELAS. 橡胶树挥发性有机化合物释放特性及其对大气化学的影响[C]. 中国科学院“百人学者论坛”2007 年学术年会论文集, 2007: 28.  
WANG Y F, SUE O, LI Q J, JOSEP P. Release characteristics of volatile organic compounds from rubber trees and their effects on atmospheric chemistry[C]. Proceedings of the 2007 Annual Conference of the “100 Scholars Forum” of the Chinese Academy of Sciences, 2007: 28. (in Chinese)
- [29] SHARKEY T D, MONSON R K. The future of isoprene emission from leaves, canopies and landscapes[J]. Plant, Cell and Environment, 2014, 37(8): 1727-1740.
- [30] RASULOV B, HUVE K, BICHELE I, LAISK A, NIINEMETS U. Temperature response of isoprene emission *in vivo* reflects a combined effect of substrate limitations and isoprene synthase activity: a kinetic analysis[J]. Plant Physiology, 2010, 154(3): 1558-1570.
- [31] 郭沈沈, 吴志祥, 刘文杰, 赵豪, 李运帅, 王誉博, 王鹏. 热带北缘地区橡胶林水分利用效率的季节差异及归因分析[J]. 热带生物学报, 2023, 14(4): 424-443.  
GUO S S, WU Z X, LIU W J, ZHAO H, LI Y S, WANG Y B, WANG P. Seasonal differences and attribution analysis of water use efficiency of rubber plantations in the northern tropical margin[J]. Chinese Journal of Tropical Biology, 2023, 14(4): 424-43. (in Chinese)
- [32] KARLSSON T, RINNAN R, HOLST T. Variability of BVOC emissions from commercially used willow (*Salix* spp.) varieties[J]. Atmosphere, 2020, 11(4): 356.
- [33] BAGHI R, HELMIG D, GUENTHER A, DUHL T, DALY R. Contribution of flowering trees to urban atmospheric biogenic volatile organic compound missions[J]. Biogeosciences, 2012, 9(10): 3777-3785.
- [34] 付国需, 李为争, 刘珂, 王英慧, 安靖靖, 吴少英, 原国辉. 不同科芳香植物特征挥发物的生源及其对昆虫行为的影响[C]. 华中三省(湖北、湖南、河南)昆虫学会 2008 年学术年会, 咸宁, 2008: 14-27.  
FU G X, LI W Z, LIU K, WANG Y H, AN J J, WU S Y, YUAN G H. Origin of characteristic volatiles of aromatic plants of different families and their effects on insect behavior[C]. Entomological Society of Central China Province (Hubei, Hunan, Henan), 2008 Annual Meeting, Xianning, 2008: 14-27. (in Chinese)
- [35] 奚秋蕙. 基于健康环境营建的郊野公园规划设计[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.  
XI Q H. Planning and design of country parks based on healthy environment[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [36] 高岩. 北京市绿化树木挥发性有机物释放动态及其对人体健康的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.  
GAO Y. Dynamics of volatile organic compounds release from greening trees in Beijing and its impact on human health[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [37] 彭少麟, 南蓬, 钟扬. 高等植物中的萜类化合物及其在生态系统中的作用[J]. 生态学杂志, 2002, 21(3): 33-38.  
PENG S L, NAN P, ZHONG Y. Terpenoids in higher plants and their role in ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(3): 33-38. (in Chinese)
- [38] COPELAND N, CAPE J, NEMITZ E, HEAL M. Volatile organic compound speciation above and within a douglas fir forest[J]. Atmospheric Environment, 2014, 94: 86-95.
- [39] MEENINGEN Y, SCHURGERS G, RINNAN R, HOLST T. Isoprenoid emission response to changing light conditions of English oak, *European beech* and *Norway spruce*[J]. Biogeosciences, 2017, 14(18): 1-25.
- [40] NIINEMETS F, SEUFERT G, STEINBRECHER R, TENH-

- UMEN J. A model coupling foliar monoterpene emissions to leaf photosynthetic characteristics in Mediterranean evergreen *Quercus* species[J]. *New Phytologist*, 2002, 153: 257-275.
- [41] 李海东. 几种绿化植物挥发性物质动态释放特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.
- LI H D. Study on the dynamic release characteristics of volatile substances from several greening plants[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [42] PERSSON Y, SCHURGERS G, RINNAN R, HOLST T. BVOC emissions from English oak (*Quercus robur*) and European beech (*Fagus sylvatica*) along a latitudinal gradient[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(21): 6067.
- [43] YUAN X Y, CALATAYUD V, GAO F, FARES S, PAOLETTI E, TIAN Y, FENG Z Z. Interaction of drought and ozone exposure on isoprene emission from extensively cultivated poplar[J]. *Plant Cell Environ*, 2016, 39(10): 2276-2287.
- [44] YUAN X Y, LI S J, FENG Z Z, XU Y S, SHANG B, FARES S, PAOLETTI E. Response of isoprene emission from poplar saplings to ozone pollution and nitrogen deposition depends on leaf position along the vertical canopy profile[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114909.
- [45] BAI J H, DUHL T. A primary generalized empirical model of BVOC emissions for some typical forests in China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, 12(8): 101126.
- [46] KIVIMÄENPÄÄ M, GHIMIRE R, SUTINEN S, HAIKIÖ L, KASURINEN A, HOLOPAINEN T, HOLOPAINEN J. Increases in volatile organic compound emissions of Scots pine in response to elevated ozone and warming are modified by herbivory and soil nitrogen availability[J]. *European Journal of Forest Research*, 2016, 135(2): 343-360.
- [47] LI L Y, GUENTHER A B, GU D S, SECO R, NAGALINGAM S. Biogenic emission profile of volatile organic compounds from poplar, sweetgum, and pine trees[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(12): 4966-4973.
- [48] GUIDOLOTI G, PALLOZZI E, GAVRICHKOVA O, SCARTAZZA A, MATTIONI M, LORETO F, CALFAPIETRA C. Emission of constitutive isoprene, induced monoterpenes, and other volatiles under high temperatures in *Eucalyptus camaldulensis*: a  $^{13}\text{C}$  labelling study[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(6): 1929-1938.