

枫香树林挥发物和空气负离子季节变化及对微生物数量的影响

马玲, 张静, 赵亚红, 王彬, 韦赛君, 吕嘉欣, 高岩

(浙江农林大学, 亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 为揭示枫香树 *Liquidambar formosana* 释放挥发性有机化合物 (VOCs) 的种类、VOCs 的抑菌效果及净化空气作用, 本研究采用热脱附-气相色谱-质谱 (TDS-GC-MS) 联用技术, 分析鉴定了枫香树单株和枫香树林的 VOCs 组分及含量, 同时测定了枫香树林在春季、夏季和秋季的空气负离子浓度和空气微生物 (细菌、真菌、放线菌) 分布状况。结果表明, 单株枫香树释放的 VOCs 共鉴定出 3 类 26 种化合物, 主要成分有柠檬烯、月桂烯、 β -蒎烯等, 其中萜烯类占 VOCs 总量的 96.6%。春、夏、秋季枫香树林空气中的 VOCs 共有 7 类 28 种化合物, 主要以萜烯类、苯类物质为主, 其中, 春季共有 5 类 21 种化合物, 主要有柠檬烯、 β -蒎烯、甲苯等; 夏季共有 5 类 21 种化合物, 主要有柠檬烯、 β -蒎烯、甲苯等; 秋季共有 4 类 6 种化合物, 主要有甲苯、邻二甲苯、十六烷酸等, 不同季节 VOCs 的种类与含量存在差异, 夏季总释放量分别是春、秋季的 1.2、69.5 倍, 春季和夏季主要成分有柠檬烯、 β -蒎烯、月桂烯等, 其中萜烯类分别占 VOCs 总量的 28.4%、40.5%。春季、夏和秋季空气负离子浓度与对照 (空地) 比分别增加了 61.8%、68.7%、29.5%。春季、夏季和秋季枫香林内细菌含量与对照比分别降低了 27.9%、49.5%、18.9%; 春季和夏季真菌含量与对照比分别降低了 21.4%、38.3%。利用 VOCs 单体抑菌试验表明, β -蒎烯、柠檬烯、月桂烯、 γ -萜品烯对细菌抑制效果显著, 后 3 种也对真菌抑制作用显著。综上所述, 枫香树林释放的 VOCs 具有抑制空气微生物生长、净化空气的作用。

关键词: 枫香树; VOCs; 空气负离子; 微生物

中图分类号: S718.51 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776 (2021) 02-0008-09

Seasonal Variation of Volatile Organic Compounds and Negative Air Ions in *Liquidambar formosana* Stand and Their Effect on Microbial Populations

MA Ling, ZHANG Jing, ZHAO Ya-hong, WANG Bin, WEI Sai-jun, LU Jia-xin, GAO Yan

(State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: To reveal the species of volatile organic compounds (VOCs) released by *Liquidambar formosana*, the bacteriostatic effect of VOCs and the purifying effect of air, the composition and content of single *Liquidambar formosana* and *Liquidambar formosana* forest were analyzed and identified by thermal desorption gas chromatography-mass spectrometry (TDS-GC-MS). The results showed that there were 26 kinds of 3 types compounds from VOCs of single tree, mainly limonene, myrcene, β -pinene, etc., terpenes accounted for 96.0% of the total VOCs. There were 28 kinds of 7 types compounds from VOCs in the stand, including terpenes and benzene, among them, there were 21 kinds of 5 types of VOCs in spring and summer, 6 kinds of 4 types in autumn. Kinds and content of VOCs differed with seasons, total release in summer was 1.2 and 69.5 time of that in spring and autumn. The negative air ion concentration in stand in spring, summer and autumn increased by 61.8%, 68.7% and 29.5% compared with that in the control (open space). Compared with the control, in spring, summer and autumn, the bacterial content decreased by 27.9%, 49.5% and

收稿日期 2020-11-23; 修回日期: 2021-02-15

基金项目: 浙江省省院合作项目 (2018SY07); 国家自然科学基金项目 (31470704)

作者简介: 马玲, 硕士研究生, 从事园林植物与观赏园艺研究; E-mail: 1130405387@qq.com。通信作者: 王彬, 硕士, 高级实验师, 从事植物生理生态研究; E-mail: wangbin@zafu.edu.cn。

18.9%, while in spring and summer, the fungal content decreased by 21.4% and 38.3% respectively.

Key words: *Liquidambar formosana*; VOCs; negative air ion; microorganisms

植物挥发性有机物 (Plant volatile organic compounds, PVOCs) 是通过植物体内次生代谢途径合成的低沸点、易挥发的小分子化合物, 主要分为萜烯类、苯基/苯丙烷类和脂肪酸衍生物^[1-2], 具有抑菌、杀菌、净化空气、消除疲劳等功效^[3-4]。林富平等发现木犀 *Osmanthus fragrans* 叶片释放的 VOCs (挥发性有机物) 能降低空气中微生物的数量^[5]。Gomez-Rodriguez 等发现万寿菊 *Tagetes erecta* 释放的挥发物可降低番茄枯萎病病菌 *Fusarium oxysporum* sp. 的孢子萌发率^[6]。南美蟛蜞菊 *Wedelia trilobata* 释放 VOCs 对水稻稻瘟病病菌 *Magnaporthe grisea*、水稻纹枯病病菌 *Rhizoctonia solani* 和玉米纹枯病病菌的抑菌效果显著^[7]。Fadil 等发现百里香 *Thymus mongolicus*、迷迭香 *Rosmarinus officinalis* 和香桃木 *Myrtus communis* 精油对鼠伤寒沙门氏菌 *Salmonella typhimurium* 具有协同抑菌作用^[8]。柠檬 *Citrus limon* 精油和欧洲银冷杉 *Abies alba* 精油混合后能净化室内空气质量^[9]。

空气负离子是由植物的尖端放电和光电效应产生, 具有杀菌、降尘、改善情绪的作用^[10]。研究发现气象因子、植被类型对空气负离子浓度影响较大。潘辉等发现不同林分中空气负、正离子浓度与空气温度、光照强度之间呈负相关, 与空气湿度呈正相关^[11]。对四种植被类型的空气负离子浓度调查发现自然林 > 经济林 > 绿地 > 农田^[12]。空气负离子浓度在生态环境和空气质量评价体系中是不可或缺的重要指标之一。

枫香树 *Liquidambar formosana* 属金缕梅科 Hamamelidaceae 枫香树属 *Liquidambar* 落叶乔木。目前, 对枫香树的研究主要集中在繁育^[13]、生理生化^[14]、光合^[15]等方面, 但对枫香树 VOCs 抑菌作用的研究较少。因此, 本文以枫香树为对象, 研究了枫香树单株释放的 VOCs 和枫香树林空气 VOCs 成分, 测定了林内空气负离子浓度和微生物数量, 分析了不同季节枫香树林的抑菌特性和空气负离子效应, 以期为森林康养建设中的树种选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验样地

试验样地设在浙江省杭州市临安区浙江农林大学东湖校区枫香树林教学实习基地, 地理坐标为 119°43'39" E, 30°15'25"N, 海拔约 39 m, 林下有人工栽植的菲白竹 *Pleioblastus fortunei* 和自然生长的马兰 *Aster indicus*、爵床 *Justicia procumbens* 等草本植物, 平均高度在 30 ~ 50 cm, 地被植物总盖度约 30%, 周边无其他树木、机动车及其他污染源影响。属中亚热带季风气候区, 温暖湿润, 四季分明, 雨热同期, 有梅雨季节, 空气湿润。全年平均气温为 16.4℃, 年日照时数为 1 939.0 h, 1 月温度最低, 日平均气温为 5℃, 极端最低温度为 -12℃; 7 月温度最高, 日平均气温为 30℃, 极端最高温度为 41℃, 全年降水量为 1 628.6 mm, 年平均相对湿度在 70% 以上。

1.2 试验材料和试验林

枫香树树龄均在 20 a 左右, 平均高约为 15 m, 平均胸径约为 25 cm, 植株长势良好, 无病虫害和机械损伤。枫香树林为人工纯林, 土壤为红壤, 造林面积约 900 m², 种植密度约为 1 650 株·hm⁻², 郁闭度 0.8 左右, 平均枝下高约 2 m, 并以距林缘 15 m 处的无林地作对照。

1.3 VOCs 采集与分析

枫香树单株 VOCs 测定: 于 2019 年 5 月多次选择雨后晴朗无风天气的 9:00–11:00, 采用 QC-2 型大气采样仪 (北京市劳动保护科学研究所), 采用动态顶空气体循环采集法^[16]采集活体枫香树单株的 VOCs, 根据树木平均高度采用五点采样法选择 5 株枫香树单株, 每株作为 1 个独立实验, 共 5 次重复, 采样位置位于树冠向阳背风中中部健康无病虫害枝叶, 采集 VOCs 后采摘叶片称量。气体循环流量为 100 mL·min⁻¹, 采气时间为 1 h。

枫香树林分 VOCs 测定: 于 2019 年春季 (5 月)、夏季 (8 月) 和秋季 (11 月) 多次选择雨后晴朗无风天气的 9:00–11:00, 采用开放式采样法采集枫香树林空气 VOCs。在距地面 1.5 m 处对枫香树林空气 VOCs 进行采集, 均匀的选择 5 个点, 每个点作为 1 次独立实验, 共 5 次重复。气体循环流量为 100 mL·min⁻¹, 采气时间为 1 h。

采用热脱附-气相色谱-质谱 (TDS-GC-MS) 联用技术分析 VOCs, 仪器及参数设置条件参照高群英等的方法^[16]。采用 NIST2008 谱库检索, 并根据已报道的植物 VOCs 保留时间对 VOCs 各组分进行定性, 然后选取特征离子进行进一步定量分析。枫香树单株 VOCs 定量方法采用单位采样时间内每克植物叶片释放出的 VOCs 特征离子峰峰面积进行定量。

$$\text{单株挥发物峰面积} (\times 10^6 \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{\text{该物质峰面积}}{\text{叶片质量}}$$

1.4 空气负离子的测定

采用 YZQ-308A 森林康养检测系统 (翼鬃麒科技有限公司) 于春季、夏季和秋季于枫香树 VOCs 测定同时检测枫香树林和对照空气负离子浓度, 采样高度为 1.5 m, 时间 25 min, 每 5 min 记录一次数据, 共 5 次重复 (五点取样法选 5 个点)。

1.5 培养基的配制

参照周德庆^[17]的方法配置细菌培养基 (牛肉蛋白胨培养基)、真菌培养基 (马丁氏培养基)、放线菌培养基 (高氏 1 号培养基)。植物挥发性有机物单体培养基参照 GAO Y 等^[18]的方法, 无菌条件下, 分别在柠檬烯、月桂烯、 β -蒎烯、 γ -蒎品烯 (Sigma 公司生产) 中加入两滴吐温, 用无菌水将原液稀释为 100、200、1 000 倍, 分别取稀释液 1 mL 加入培养皿中, 再加入 9 mL 培养基, 充分摇匀凝固后待用。

1.6 空气微生物的采集

2019 年春季 (5 月)、夏季 (8 月) 和秋季 (11 月), 多次选择雨后晴朗无风天气的 10:00, 采用自然沉降法采集空气微生物 (细菌、真菌和放线菌), 分别在枫香树林与对照地随机各设 5 个采样点, 每次 5 个重复, 将带有不同培养基的培养皿分别放在距树冠水平距离 0.3 m 左右, 高约 1.5 m 的平板支架上, 打开培养皿盖, 采集空气中微生物, 将培养基在空气中暴露 10 min 后, 盖上培养皿盖并用封口膜封好, 置于 30℃ 恒温培养箱中培养 48~96 h, 细菌培养 48 h, 真菌培养 72 h, 放线菌培养 96 h 后, 检查菌落。

1.7 数据处理

按照 1991 年颁布的公共场所每立方米空气微生物的计算公式, 计算出各处理的微生物浓度^[19]。

$$\text{微生物浓度} (\text{个} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{50\,000 \times N}{A \times T}$$

式中, N 为培养皿中菌落的平均数 (个); A 为培养皿的面积 (cm^2); T 为培养皿盖打开的时间 (min)。

$$\text{抑菌率} (\%) = \frac{\text{对照菌数} - \text{处理菌数}}{\text{处理菌数}} \times 100$$

式中, 所有数据均为 5 次重复的平均值 \pm 标准误差。

利用 Origin 9.0 软件 (OriginLab 公司, 美国) 进行统计分析和作图。采用 One-Way ANOVA 对枫香树林和对照分别进行检验, 并进行 Tukey 多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 枫香树挥发物成分分析

枫香树单株 VOCs 共鉴定出 3 类 26 种化合物 (见图 1, 表 1)。由图 1 和表 1 可知, VOCs 以蒎烯类物质为主要成分, 共 23 种, 主要有柠檬烯 (22.4%)、月桂烯 (12.3%)、 β -蒎烯 (13.7%)、 γ -蒎品烯 (5.7%)、石竹烯 (1.2%)、

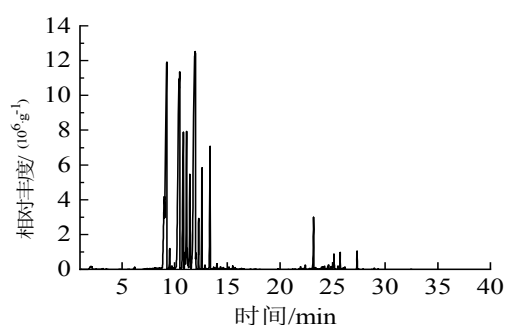


图 1 单株枫香树 VOCs 总离子流图

Figure 1 Total ion flow diagram of VOCs from single *L. formosana*

花柏烯 (2.0%) 等, 占 VOCs 总量的 96.6%; 烃类物质仅 1 种为对伞花烃, 占 VOCs 总量的 1.4%; 酯类物质有 2 种, 分别为顺-3-己烯乙酸酯 (1.4%) 和酞酸二乙酯 (0.6%), 占 VOCs 总量的 2.0%。

表 1 枫香树叶片释放 VOCs 的主要成分
Table1 Main component of VOCs from single *L. formosana*

序号	保留时间/min	化合物	分子式	峰面积 (×10 ⁶ ·g ⁻¹)	占比/%
1	9.023	α-蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	12.32±0.14	6.0
2	9.234	β-蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	28.35±6.29	13.7
3	9.533	蒾烯	C ₁₀ H ₁₆	1.65±0.12	0.8
4	9.747	月桂烯	C ₁₀ H ₁₆	25.46±2.20	12.3
5	10.466	水芹烯	C ₁₀ H ₁₆	20.37±3.82	9.9
6	10.818	3-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	5.20±1.04	2.5
7	11.133	3-崖柏烯	C ₁₀ H ₁₆	9.42±0.72	4.6
8	11.145	顺-3-己烯乙酸酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	2.86±0.35	1.4
9	11.445	α-蒎品烯	C ₁₀ H ₁₆	12.68±2.79	6.1
10	11.594	对伞花烃	C ₁₀ H ₁₄	2.88±0.30	1.4
11	11.953	柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	46.19±1.03	22.4
12	12.285	罗勒烯	C ₁₀ H ₁₆	1.14±0.88	0.6
13	12.579	γ-蒎品烯	C ₁₀ H ₁₆	11.77±0.14	5.7
14	12.872	蒎品油烯	C ₁₀ H ₁₆	1.53±0.31	0.7
15	13.351	对-薄荷-1,4-二烯	C ₁₀ H ₁₆	7.43±0.52	3.6
16	14.009	紫苏烯	C ₁₀ H ₁₄ O	0.16±0.12	0.1
17	20.744	榄香烯	C ₁₅ H ₂₄	0.46±0.25	0.2
18	22.409	愈创木烯	C ₁₅ H ₂₄	0.26±0.10	0.1
19	23.194	石竹烯	C ₁₅ H ₂₄	2.55±0.17	1.2
20	24.234	朱桉倍半萜	C ₁₅ H ₂₄	1.86±0.44	0.9
21	24.613	衣兰油烯	C ₁₅ H ₂₄	1.80±0.65	0.9
22	24.866	芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	1.51±0.52	0.7
23	25.079	花柏烯	C ₁₅ H ₂₄	4.20±0.80	2.0
24	25.138	杜松烯(葑澄茄烯)	C ₁₅ H ₂₄	1.97±0.95	1.0
25	25.721	去氢白菖烯	C ₁₅ H ₂₂	0.88±0.18	0.4
26	27.286	酞酸二乙酯	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	1.25±0.08	0.6
总计				206.16	100

2.2 不同季节枫香树林空气 VOCs 成分分析

由图 2 和表 2 知, 春、夏、秋季枫香树林空气 VOCs 共有 7 类 28 种化合物, 主要以萜烯类、苯类物质为主, 不同季节 VOCs 的种类与含量存在差异, 夏季总释放量分别是春、秋季的 1.2 倍、69.5 倍。

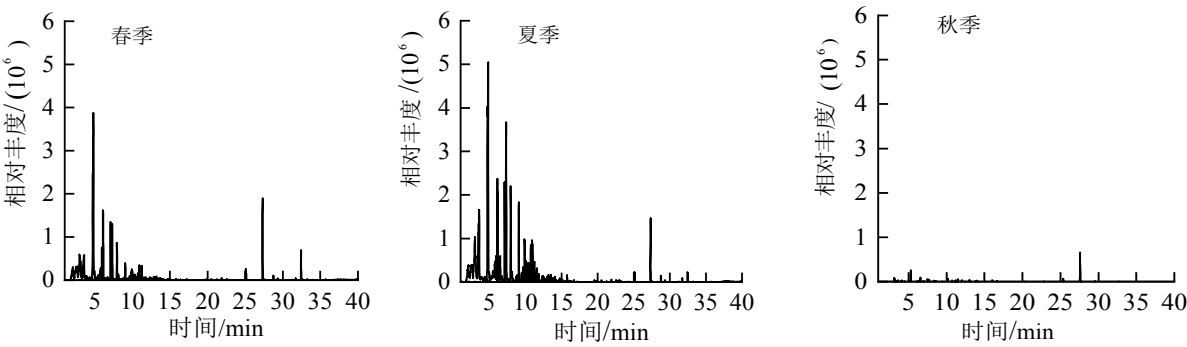


图 2 不同季节枫香树林空气 VOCs 总离子流图

Figure 2 Total ion flow diagram of VOCs from *L. formosana* stand at different seasons

春季, 共检测出 5 类 21 种化合物, 其中, 萜烯类物质有 5 种, 主要为柠檬烯 (13.3%)、β-蒎烯 (9.7%)

等, 占 VOCs 总量的 28.4%; 苯类物质有 8 种, 主要为甲苯(16.5%)、乙苯(12.4%)等, 占 VOCs 总量的 44.1%; 烃类物质有 5 种, 主要为 1,3,5-环庚三烯(10.1%)、庚烷(5.7%)、1,2-二氯乙烷(3.0%)等, 占 VOCs 总量的 20.1%; 酯类物质有 2 种, 分别为乙酸丁酯(1.0%)和邻苯二甲酸二异丁酯(0.2%), 占 VOCs 总量的 1.2%; 醇类物质有 1 种, 为异植物醇, 占 VOCs 总量的 6.1%。

表 2 不同季节枫香树林空气 VOCs 成分
Table 2 Components of VOCs from *L. formosana* stand at different seasons

序号	保留时间/min	化合物	分子式	峰面积/($\times 10^6 \cdot \text{g}^{-1}$)			
				春季	夏季	秋季	对照
1	2.988	1,2-二氯乙烷	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	4.43±0.26	2.04±0.88	—	
2	3.111	苯	C_6H_6	1.31±0.86	1.20±0.70	—	4.23±1.42
3	3.572	庚烷	C_7H_{16}	8.38±0.85	4.77±0.94	—	
4	4.728	甲苯	C_7H_8	6.01±1.50	24.89±6.01	0.35±0.09	4.19±0.83
5	4.819	1,3,5-环庚三烯	C_7H_8	14.80±1.05	—	—	
6	5.465	辛烷	C_8H_{18}				0.20±0.05
7	5.779	四氯乙烯	C_2Cl_4	1.56±0.20	0.77±0.08	—	
8	5.957	乙酸丁酯	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	1.48±2.09	2.96±0.04	—	1.13±0.31
9	7.099	乙苯	C_8H_{10}	5.05±7.14	5.05±1.21	0.08±0.12	1.77±1.05
10	7.312	对二甲苯	C_8H_{10}	7.58±0.72	4.90±0.88	—	2.65±0.54
11	7.941	1,4-二甲苯	C_8H_{10}	4.18±0.90	2.55±0.51	0.23±0.03	1.57±0.63
12	9.067	α -蒎烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	2.50±0.54	1.38±0.55	0.21±0.04	
13	9.234	β -蒎烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	6.00±0.48	11.60±0.39	—	
14	9.533	苾烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	—	2.96±0.34	—	
15	9.747	月桂烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	—	5.10±2.89	—	
16	9.866	间乙基甲苯	C_9H_{12}	2.75±0.89	0.19±0.27	—	0.56±0.06
17	10.255	水芹烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	0.43±0.61	—	—	
18	10.734	1,2,4-三甲苯	C_9H_{12}	1.10±0.55	—	—	0.30±0.12
19	11.238	对二氯苯	$\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2$	0.82±0.16	0.61±0.87	—	0.57±0.35
20	11.445	α -蒎品烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	2.34±0.73		—	
21	11.58	邻伞花烃	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}$	0.37±0.52		—	
22	11.953	柠檬烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	7.92±0.05	18.19±2.12	—	
23	12.579	γ -蒎品烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	—	3.30±0.90	—	
24	12.872	蒎品油烯	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	—	1.45±0.23	—	
25	23.194	石竹烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	—	0.51±0.11	—	
26	25.069	十五烷	$\text{C}_{15}\text{H}_{32}$				0.63±0.27
27	27.319	异植物醇	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}\text{O}$	3.63±0.02	5.61±1.31	—	
28	32.447	邻苯二甲酸二异丁酯	$\text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_4$	0.36±0.51	9.81±1.05	—	0.31±0.05
29	33.217	2-十二烷酮	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}$	—	—	0.10±0.15	
30	34.146	十六烷酸	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	—	—	0.60±0.50	
总和				92.23	109.84	1.58	18.12

注: “—”表示未检测到物质。

夏季, 同样检测到 5 类 21 种化合物, 其中, 蒎烯类物质有 8 种, 主要成分为柠檬烯(16.6%)、 β -蒎烯(10.6%)、月桂烯(4.6%)等, 占总量的 40.5%; 苯类物质有 7 种, 以甲苯(22.6%)、乙苯(4.6%)为主要成分, 占 VOCs 总量的 35.7%; 酯类有 2 种, 分别为乙酸丁酯(2.7%)和邻苯二甲酸二异丁酯(9.1%), 占 VOCs 总量的 11.8%; 烃类物质有 3 种, 主要为庚烷(4.3%), 占 VOCs 总量的 6.8%; 醇类物质仅 1 种, 为异植物醇, 占 VOCs 总量的 5.1%。

秋季, 共检测到 4 类 6 种化合物, 其中, 苯类物质有 3 种, 主要成分为甲苯(23.6%)、乙苯(6.3%)、邻二甲苯(15.4%)等, 占 VOCs 总量的 45.2%; 酸类物质有 1 种, 为十六烷酸, 占 VOCs 总量的 35.4%; 蒎烯类物质有 1 种, 为 α -蒎烯, 占 VOCs 总量的 13.8%; 酮类物质有 1 种, 为 2-十二烷酮, 占 VOCs 总量的 5.6%。

夏季, 在对照空气中共检测到 3 类 12 种化合物, 其中苯类物质有 8 种, 占 VOCs 总量的 87.4%; 烃类物质有 2 种, 占 VOCs 总量的 4.6%; 酯类物质有 2 种, 占 VOCs 总量的 8.0%。不同季节枫香树林释放的 VOCs 与对照对比, 春、夏季枫香树林内的 VOCs 总释放量分别是对照的 5.1 和 6.1 倍, 秋季枫香林内的 VOCs 总释放量低

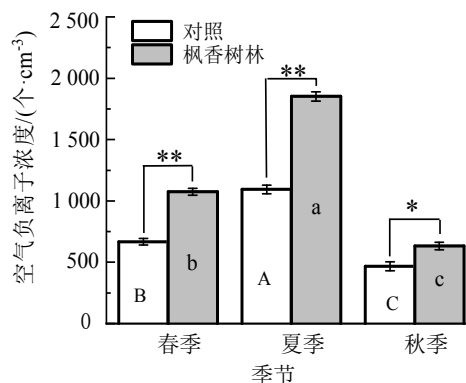
于对照。

2.3 不同季节枫香树林空气负离子浓度变化

由图 3 知,不同季节枫香树林与对照空气负离子浓度变化趋势均为夏季最高,春季次之,秋季最低。夏季对照的空气负离子浓度分别比春季和秋季增加了 39.3% 和 55.6%, 3 个季节之间均差异显著 ($P<0.05$); 夏季枫香树林空气负离子浓度分别比春季和秋季增加了 41.9% 和 65.9%, 与对照间均差异显著 ($P<0.05$); 春、夏、秋季枫香树林空气负离子浓度分别比对照增加了 61.8%、68.7%和 29.5%, 与对照间均差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 不同季节枫香树林空气微生物含量变化

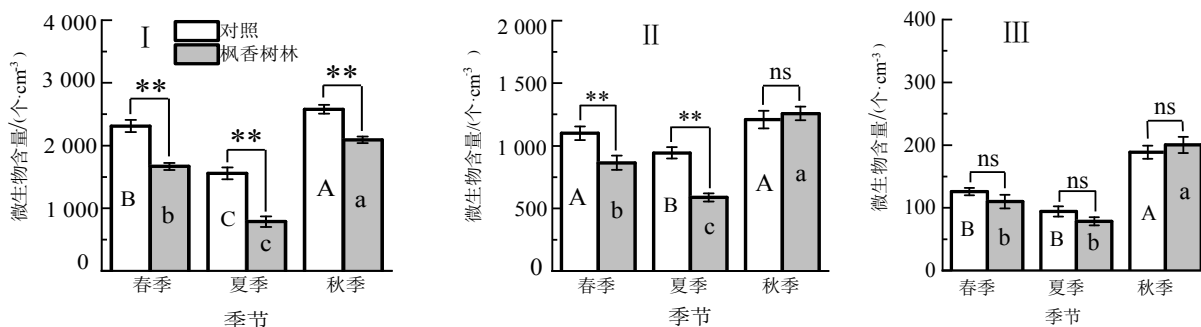
由图 4 知,枫香树林内微生物数量在不同季节有一定的动态变化。夏季枫香树林内的细菌含量比春季和秋季分别降低了 112.0%和 166.0%, 与这二个季节之间均差异显著 ($P<0.05$); 春、夏、秋季林内细菌含量与对照相比分别降低了 27.9%、49.5%和 18.9%, 与对照之间均差异显著 ($P<0.05$)。



注: 每个数值为平均值±标准误 (n=5)。不同大写字母表示不同季节对照间的差异显著,不同小写字母表示不同季节枫香树林间的差异显著。*表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$); ns 表示差异不显著。下同。

图 3 不同季节枫香树林空气负离子浓度变化

Figure 3 Variation of negative ion concentration in *L. formosana* stand at different seasons.



I - 细菌, II - 真菌, III - 放线菌。

图 4 不同季节枫香林空气微生物含量

Figure 4 Air microbe content in *L. formosana* stand at different seasons

夏季枫香树林内的真菌含量比春季和秋季分别降低了 48.6%和 132.4%, 与这二个季节之间均差异显著 ($P<0.05$); 春、夏季与对照相比分别降低了 21.4%和 38.3%, 与对照之间均差异显著 ($P<0.05$)。放线菌数量变化趋势与真菌一致, 春、夏季与对照相比分别降低了 12.6%和 16.7%, 与对照间均差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 VOCs 单体对空气微生物的抑制

由图 5 知,随着单体浓度的升高, β -蒎烯、柠檬烯、月桂烯和 γ -蒎品烯与对照相比对细菌的抑制作用增强, 0.1%浓度 β -蒎烯和柠檬烯处理与对照相比对细菌的抑制率分别为 30.0%和 34.6% ($P<0.05$), 1%浓度月桂烯和 γ -蒎品烯处理与对照相比对细菌的抑制率分别为 31.4%和 21.2% ($P<0.05$); 1%浓度月桂烯、柠檬烯、 γ -蒎品烯处理与对照相比对真菌抑制率分别为 28.7%、35.3%和 32.1% ($P<0.05$), 随着浓度的升高三种蒎烯类处理与对照相比对真菌的抑制作用加强; 0.1%浓度柠檬烯、 β -蒎烯、月桂烯、 γ -蒎品烯处理与对照相比对放线菌的生长影响不大, 1%浓度时柠檬烯处理与对照相比对放线菌抑制率为 27.8% ($P<0.05$)。

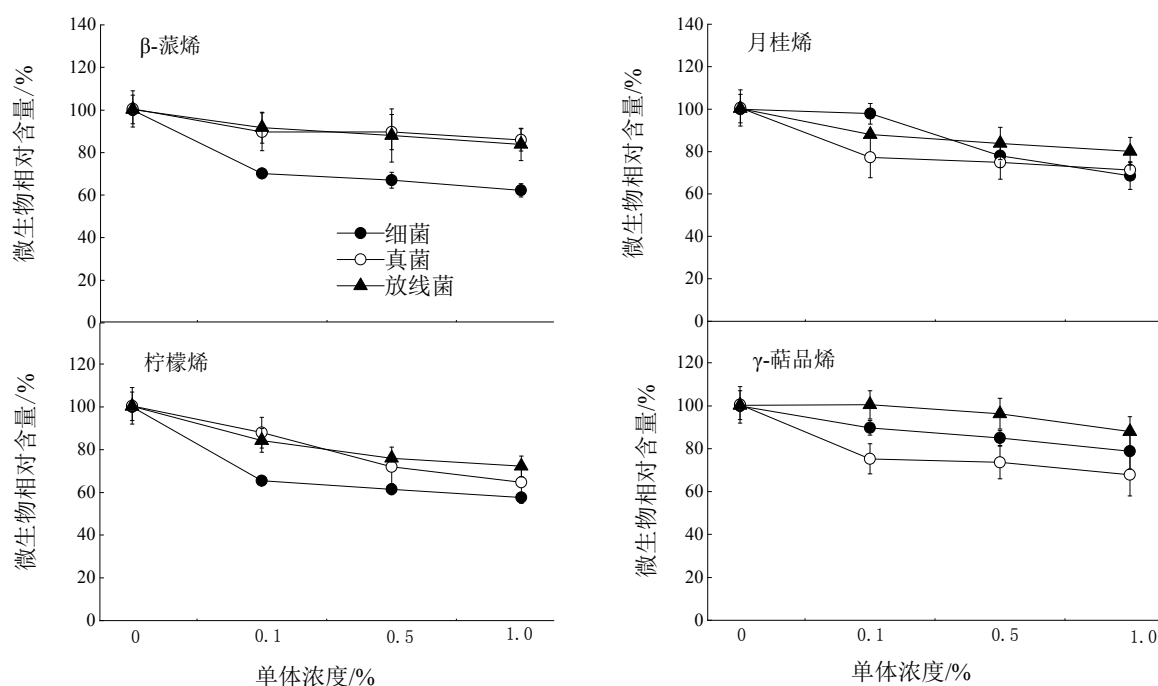


图5 单体对空气微生物的抑制

Figure 5 Inhibition of monomers on air microorganisms

3 讨论

植物释放 VOCs 的种类及含量与植物生长发育阶段、体内合成相关酶的活性和环境因子密切相关。辣薄荷 *Mentha piperita* 幼叶期释放的 VOCs 以柠檬烯为主, 随着叶片的生长发育, 释放的 VOCs 以薄荷酮为主^[20]。光照使黄花蒿 *Artemisia annua* β -蒎烯合酶的表达水平增高^[21]。木犀在盛花期释放的萜烯类种类和含量高于衰败期^[22]。高温能促进桉 *Eucalyptus camaldulensis* 和香蕉 *Musa nana* 叶片的单萜释放^[23-24]。迷迭香在干旱处理后其萜烯类的释放量增加^[25]。本研究中, 枫香树林空气中的萜烯类含量主要由枫香树的叶片释放, 春季、夏季和秋季随着叶片生长发育阶段的不同, 萜烯类的种类和含量也不同, 夏季成熟叶片释放的萜烯类含量最高, 秋季叶片衰老, VOCs 大量减少。其原因一方面可能是受环境因素 (光照、温度、湿度) 的影响, 夏季光照时间变长, 温度逐渐升高, 植物进入生长旺盛期, 体内有机物合成、代谢加快, 释放 VOCs 的种类和含量增多^[26-27]; 同时, 植物旺盛的光合作用为萜烯类合成提供充足的碳源和还原力, 促进萜烯类合成^[28]。秋季气温降低、叶片衰老, 叶绿素降解, 花青素含量增多, 叶片变红, 花青素吸收的光不能用于光合作用, 合成萜烯类的碳源和能量大量减少。另一方面可能是受相关生物合成酶的影响所致^[29], 异戊烯二磷酸为底物, 在萜类合酶的催化下合成单萜、倍半萜和二萜等, 萜类合酶的活性和数量决定了萜类化合物种类和结构的多样性^[30]。这可能导致 VOCs 种类和释放量多样化。

空气负离子浓度是衡量空气清洁度与生态环境的重要指标之一, 由植物尖端放电和光电效应产生, 具有降尘、杀菌、净化空气的作用, 其浓度受气象因素、植被自身特性的影响^[11-12]。冯燕珠等研究发现福州闽江公园空气负离子浓度在秋季最高^[31]。吴际友对空气负离子浓度研究发现夏、秋季大于春、冬季^[32]。这可能与环境因子、林分及观测地区春、秋季的差异性有关。本研究中, 春、夏、秋季枫香树林内的空气负离子浓度随着 VOCs 的变化呈同步变化, 以夏季林内空气负离子浓度最高。这一方面可能是植物 VOCs 对空气负离子的促进作用, 植物 VOCs 中萜烯类是可以挥发中性气体分子, 当受到碰撞 (喷嘴效应)、电场力 (路德格效应)、辐射 (光电效应) 等外力作用影响时能产生较多的空气负离子^[33]; 另一方面可能是夏季降水增多、植物生长旺盛、光合作用强, 太阳紫外线强烈等因素产生了较多的空气负离子, 秋季温度降低, 叶片衰老, 光合作用较弱, 植物逐

渐进入休眠状态,林内的空气负离子浓度减少。

植物释放的 VOCs 具有抵抗病原微生物入侵、生长和繁衍,减少或杀死空气微生物的作用^[6,34]。Wang Y 等研究发现肉桂醛可以显著减少中华猕猴桃 *Actinidia Chinensis* 在贮藏期间微生物的数量^[35]。本研究中,夏季枫香树林释放的 VOCs 以萜烯类为主,林内细菌、真菌、放线菌含量低于春季和秋季,不同季节枫香树林内的细菌、真菌含量均显著低于对照。魏琦等研究发现乙酸乙酯能抑制细菌生长^[36]。高群英等研究发现壬醛、柠檬烯、 β -蒎烯能抑制微生物生长^[16]。植物释放的 VOCs 对空气中的微生物生长有抑制作用^[6-7]。为了进一步探索枫香树释放的 VOCs 中具体抑菌物质,选择萜烯类中含量较高的柠檬烯、 β -蒎烯、月桂烯、 γ -蒎品烯进行单体抑菌试验,结果表明 4 种萜烯类均对细菌生长抑制作用显著,柠檬烯、月桂烯、 γ -蒎品烯对真菌生长抑制作用显著。柠檬烯、 β -蒎烯、月桂烯、 γ -蒎品烯可能是主要的微生物抑制剂。

4 结论

上述研究结果表明,单株枫香树释放的 VOCs 共鉴定出 3 类 26 种化合物,以萜烯类为主,春、夏、秋季枫香树林中的空气 VOCs 共有 7 类 28 种化合物,主要以萜烯类、苯类物质为主,其中,春季共有 5 类 21 种化合物,主要有柠檬烯、 β -蒎烯、甲苯等;夏季共有 5 类 21 种化合物,主要有柠檬烯、 β -蒎烯、甲苯等;秋季共有 4 类 6 种化合物,主要有甲苯、邻二甲苯、十六烷酸等。不同季节 VOCs 的种类与含量存在差异,夏季总释放量是春、秋季的 1.2 倍、69.5 倍,夏季枫香树林内萜烯类含量高于春季和秋季;不同季节枫香树林中空气负离子浓度变化趋势为夏季最高,春季次之,秋季最低;枫香树林内微生物数量在不同季节有一定的动态变化,夏季枫香树林内萜烯类含量最高,细菌和真菌含量显著降低,柠檬烯、 β -蒎烯、月桂烯、 γ -蒎品烯可能是微生物主要抑制物质。

基于目前植物 VOCs 排放的物种变化和不同植物 VOCs 对空气负离子及微生物抑制作用的差异来看,建议在为城市环境选择树种时,除了考虑树木的适应性、抗污染性和观赏价值标准外,还应考虑植物的 VOCs 和空气负离子浓度。

参考文献:

- [1] DUDAREVA N, NEGRE F. Practical applications of research into the regulation of plant volatile emission[J]. Curr Opin Plant Biol, 2005, 8 (1): 113–118.
- [2] 邓晓军,陈晓亚,杜家纬. 植物挥发性物质及其代谢工程[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30 (1): 11–18.
- [3] 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.
- [4] 王小婧,贾黎明. 森林保健资源研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26 (12): 73–80.
- [5] 林富平,周帅,马楠,等. 4 个桂花品种叶片挥发物成分及其对空气微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30 (01): 15–21.
- [6] GÓMEZ-RODRÍGUEZ O, ZAVALA-MEJÍA E, GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, et al. Allelopathy and microclimatic modification of intercropping with marigold on tomato early blight disease development[J]. Field Crop Res, 2003, 83 (1): 27–34.
- [7] 江贵波,陈实,曾任森. 入侵物种三裂叶蟛蜞菊挥发物质的鉴定及其抗菌活性[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16 (4): 905–908.
- [8] FADIL M, FIKRI-BENBRAHIM K, RACHIQ S, et al. Combined treatment of *Thymus vulgaris* L., *Rosmarinus officinalis* L. and *Myrtus communis* L. essential oils against *Salmonella typhimurium*: optimization of antibacterial activity by mixture design methodology[J]. Eu J Pharmac Biopharmac, 2018, 126: 211–220.
- [9] LANZERSTORFER A, ACKL M, CHLÖMER M, et al. The influence of air-dispersed essential oils from lemon (*Citrus limon*) and silver fir (*Abies alba*) on airborne bacteria and fungi in hospital rooms[J]. J Environ Sci Health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering, 2019, 54 (3): 256–260.
- [10] BOWERS B, FLORY R, AMETEPE J, et al. Controlled trial evaluation of exposure duration to negative air ions for the treatment of seasonal affective disorder[J]. Psychiat Res, 2018, 259: 7–14.
- [11] 潘辉,李永莉,黄石德,等. 棕榈科植物群落空气负离子密度影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38 (03): 69–70, 81.
- [12] YAN X J, WANG H R, HOU Z Y, et al. Spatial analysis of the ecological effects of negative air ions in urban vegetated areas: a case study in Maiji, China[J]. Urban For Urban Green, 2015, 14 (3): 636–645.

- [13] 王泽伟, 张炎, 齐帅征, 等. 杂种枫香组织培养再生研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40 (08) : 46 – 53.
- [14] HU W J, WU Q, LIU X, et al. Comparative proteomic analysis reveals the effects of exogenous calcium against acid rain stress in *Liquidambar formosana* Hance leaves[J]. J Proteome Research. 2016, 15 (1) : 216 – 228.
- [15] LUO Z, GUAN H, ZHANG X, et al. Photosynthetic capacity of senescent leaves for a subtropical broadleaf deciduous tree species *Liquidambar formosana* Hance[J]. Sci Rep, 2017, 7 (1) : 6323 – 6323.
- [16] 高群英, 高岩, 张汝民, 等. 3 种菊科植物香气成分的热脱附气质联用分析[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28 (2) : 326 – 332.
- [17] 周德庆. 微生物学实验教程: 第 2 版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 372 – 374.
- [18] GAO Y, JIN Y J, LI H D, et al. Volatile organic compounds and their roles in bacteriostasis in five conifer species[J]. J Integ Plant Biol, 2005, 47 (4) : 499 – 507.
- [19] 黄健屏, 吴楚才. 与城区比较的森林区微生物类群在空气中的分布状况[J]. 林业科学, 2002 (02) : 173 – 176.
- [20] GERSHENZON J, MCCONKEY M E, CROTEAU R B. Regulation of monoterpene accumulation in leaves of peppermint[J]. Plant Physiol, 2000, 122 (1) : 205 – 214.
- [21] LU S, XU R, JIA J W, et al. Cloning and functional characterization of a beta-pinene synthase from *Artemisia annua* that shows a circadian pattern of expression[J]. Plant Physiol, 2002, 130 (1) : 477 – 486.
- [22] 蔡宙霖, 陈雅奇, 许馨露, 等. 4 个桂花品种开花进程释放 VOCs 动态变化分析[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34 (04) : 608 – 619.
- [23] GUIDOLOTTI G, PALLOZZI E, GAVRICHKOVA O, et al. Emission of constitutive isoprene, induced monoterpenes, and other volatiles under high temperatures in *Eucalyptus camaldulensis*: A ¹³C labelling study[J]. Plant Cell Environ, 2019, 42 (6) : 1929 – 1938.
- [24] JARDINE K J, JARDINE A B, HOLM J A, et al. Monoterpene 'thermometer' of tropical forest-atmosphere response to climate warming[J]. Plant Cell Environ, 2017, 40 (3) : 441 – 452.
- [25] 刘芳, 左照江, 许改平, 等. 迷迭香对于干旱胁迫的生理响应及其诱导挥发性有机化合物的释放[J]. 植物生态学报, 2013, 37 (05) : 454 – 463.
- [26] 赵美萍, 邵敏, 白郁华, 等. 我国几种典型树种非甲烷烃类的排放特征[J]. 环境化学, 1996 (01) : 69 – 75.
- [27] SHARKEY T D, LORETO F. Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves[J]. Oecologia, 1993, 95 (3) : 328 – 333.
- [28] STAUDT M, LHOUTELLIER L. Monoterpene and sesquiterpene emissions from *Quercus coccifera* exhibit interacting responses to light and temperature[J]. Biogeosciences, 2011, 8 (9) : 2757 – 2771.
- [29] BUCHANAN B, GRUISSEM W, JONES R. Biochemistry & Molecular Biology of Plants[M]. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000.
- [30] DEGENHARDT J, KÖLLNER T G, GERSHENZON J. Monoterpene and sesquiterpene synthases and the origin of terpene skeletal diversity in plants[J]. Phytochemistry, 2009, 70 (15 – 16) : 1621 – 1637.
- [31] 冯燕珠, 陈旭, 高欢欢, 等. 公园不同植物配置群落空气负离子变化特征[J]. 福建农业学报, 2019, 34 (01) : 95 – 103.
- [32] 吴际友, 程政红, 龙应忠, 等. 园林树种林分中空气负离子水平的变化[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2003, 27 (4) : 78 – 80.
- [33] 柏智勇, 吴楚材. 空气负离子与植物精气相互作用的初步研究[J]. 中国城市林业, 2008 (01) : 56 – 58.
- [34] KALEMBA D, KUNICKA A. Antibacterial and antifungal properties of essential oils[J]. Curr Medicin Chem, 2003, 10 (10) : 813 – 829.
- [35] WANG Y, SHAN T, YUAN Y, et al. Overall quality properties of Kiwifruit treated by cinnamaldehyde and citral: Microbial, Antioxidant capacity During Cold Storage[J]. J Food Sci, 2016, 81 (12) : 3043 – 3051.
- [36] 魏琦, 姚曦, 孙赓, 等. 苦竹叶化学成分对细菌及 3 种肿瘤细胞的抑制活性[J]. 林业科学, 2015, 51 (05) : 87 – 94.