

元宝枫叶片挥发物成分及其季节差异

宋秀华¹, 李传荣^{2,3,*}, 许景伟⁴, 王超¹

(¹ 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018; ² 泰山森林生态站, 山东泰安 271018; ³ 山东农业大学农业生态与环境重点实验室, 山东泰安 271018; ⁴ 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

摘 要: 采用固相微萃取结合气质联用仪 (SPME - GC - MS) 检测了元宝枫 (*Acer truncatum* Bunge.) 叶片春、夏、秋季挥发物的释放, 同时利用 CIRAS-II 型光合仪测定了其主光合参数, 分析了元宝枫挥发物的主要成分、季节变化规律及其影响因素。结果表明, 元宝枫挥发物的主要成分是酯类, 其次是醇和醛类及萜烯类物质, 主要物质有 3 - 己烯醛、3 - 己烯醇、乙酸叶醇酯、乙酸己酯和 β - 石竹烯。挥发物总峰面积为春季 > 夏季 > 秋季, 主要物质的释放规律不同, 挥发物总峰面积与气孔导度呈显著正相关, 与温度、净光合速率及蒸腾速率的变化趋势一致, 与光合有效辐射的变化不一致。

关键词: 元宝枫; 挥发物; 季节变化; 固相微萃取; 气相色谱—质谱联用

中图分类号: S 68

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2014) 05-0915-10

The Analysis of Volatile Compounds and Seasonal Differences Emitted from Leaves of *Acer truncatum*

SONG Xiu-hua¹, LI Chuan-rong^{2,3,*}, XU Jing-wei⁴, and WANG Chao¹

(¹ College of Horticulture and Science Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; ² Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China; ³ Key Laboratory of Agricultural Ecology and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; ⁴ Shandong Research Institute of Forestry, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Volatile compounds emitted by *Acer truncatum* were collected and analyzed by SPME - GC - MS in spring, summer and autumn, and the photosynthetic characteristics of the species were measured by CIRAS-II photosynthetic apparatus. The main components, seasonal change and influencing factors of volatile compounds were analyzed. The results showed, the main volatile compounds included esters, followed by alcohols, aldehydes and terpenes, and the main components were 3-hexenal, 3-hexen-1-ol, 3-hexen-1-ol, acetate, acetic acid hexyl ester and β -caryophyllene. The total volatile compounds concentration varied with seasons, presenting a tendency of spring > summer > autumn, and the main components showed different releasing patterns. The correlation analysis indicated that there was a positive correlation between the total volatile compound and the stomatal conductance at the significant level. And the total volatile compound was accord with temperature, photosynthetic rate and transpiration rate, but not accord with the PAR.

Key words: *Acer truncatum*; volatile compound; seasonal change; solid-phase microextraction

收稿日期: 2013 - 11 - 18; 修回日期: 2014 - 03 - 31

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201404301); 国家自然科学基金项目 (31170662); 山东农业大学博士后基金项目 (76362)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: chrli@sdau.edu.cn)

(SPME); gas chromatography – mass spectrometry (GC – MS)

绿色植物在吸收 CO₂ 释放 O₂ 的同时, 也释放次生代谢的产物, 即挥发性有机化合物 (Volatile organic compounds, VOCs), 也称为挥发物 (Volatiles)。植物挥发物在调节植物的生长发育和繁衍 (韩芬 等, 2008)、抵御环境胁迫 (Šimpraga et al., 2011; Kivimäenpää et al., 2013) 以及预防动物和昆虫危害 (赵艳群 等, 2012; Delia et al., 2013) 等方面具有重要作用, 还可抑制空气微生物生长 (孟雪 等, 2010), 以及对人 (郑华 等, 2003; Jo et al., 2010; Lee et al., 2011) 及其他动物 (王艳英 等, 2013) 的生理及心理产生重要影响。此外最新研究表明, 挥发物特别是绿叶挥发物 (Green leaf volatiles, GLVs) 可能是信号候选分子, 在植物抵抗环境胁迫中可诱导防御基因的表达 (Loreto, 2006; Stefania et al., 2012)。因此, 城市植被建设不应只考虑到景观功能, 更要考虑到其生态功能, 良好的城市植被能为人们提供健康舒适的生产和生活环境 (刘娇妹 等, 2007), 特别是能引起人体生理心理变化的植物挥发物的释放情况, 通过树种的合理配置, 创造一个更有利于人类健康的绿地环境, 这已成为科研和生产领域亟待解决的理论和技术问题。

元宝枫 (*Acer truncatum* Bunge.) 为落叶乔木, 树冠优美, 是华北地区常见的绿化树种, 也常作为荒山绿化或风景林的伴生树种。国内外关于该树种的研究重点一直集中于黄酮和绿原酸等药用生物成分的测定与提取 (苏建荣 等, 2004; Tao et al., 2010), 另外在提取生物制品、保健品、饮料等方面也有应用 (Atsushi et al., 2010; 庞晓莉 等, 2010), 而对其挥发物的相关研究方面报道较少。同属植物复叶槭 (*Acer negundo* L.) 和五角枫 (*Acer mono* Maxim.) 的研究多集中于挥发物与植食性昆虫间的关系及杀菌方面 (张凤娟 等, 2006, 2007), 对于城市绿地植物挥发物的研究多集中于侧柏、油松等常绿树种 (李金龙 等, 1994; 李娟 等, 2011), 阔叶树种尚未有系统研究。

本试验中采用离体采样固相微萃取 (SPME) 结合 GC – MS 方法分析元宝枫叶片挥发物的季节性变化规律, 并探讨光合参数及环境因子对元宝枫叶片挥发物释放的影响, 目的是为营建生态保健型城市绿地提供理论和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与取样方法

在山东农业大学校园绿地 (沙质壤土) 内选择生长健康的元宝枫 5 株, 树高约 5.6 m, 胸径约 15.4 cm。于 2012 年 5、7 和 9 月中旬选择晴朗无风或微风天气选取树冠中部向阳叶片取样测定, 挥发物在 8: 00、11: 00、14: 00 和 17: 00 共 4 个时间点采集分析, 每次采样 3 次重复, 每重复叶片约 20 片; 光合作用日变化从 8: 00—18: 00 每隔 1 h 测定 1 次, 每次测定 15 个叶片的光合参数, 每叶片连续测定 3 次。

1.2 测定方法

1.2.1 挥发物采集与分析方法 (SPME – GC – MS)

称取新鲜功能叶 10 g, 剪成 0.5 cm × 0.5 cm 碎片放入 100 mL 萃取瓶中, 铝箔纸封口, 平衡 10 min, 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头 (美国 Supelco 公司制造) 插入萃取瓶中, 40 °C 顶空萃取 30 min, 吸附完成后萃取头插入 GC – MS 进样口, 于 250 °C 解吸 3 min。GC – MS 分析方法: 仪器采用日本岛津公司 GC – MS – QP 2010 plus 气—质联用仪, RTX-5MS 毛细管柱 (30 m × 0.32 mm, 0.25 μm), 柱子 300 °C 老化 30 min。色谱条件: 柱初温 35 °C, 保持 2 min, 以 6 °C · min⁻¹ 上升至 100 °C, 再以

8 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 上升至 140 $^{\circ}\text{C}$ ，随后以 12 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 上升至 250 $^{\circ}\text{C}$ ，保留 3 min。质谱条件：载气 He 气，流量 1.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ，EI 电离源，电子能量 70 eV，离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$ ，接口温度 230 $^{\circ}\text{C}$ ，全扫描模式，扫描范围 45 ~ 450 $\text{m} \cdot \text{z}^{-1}$ 。进样方式：不分流。化合物定性与定量分析：经 NIST08 和 NIST08S 数据库检索，按 SI 相似度 > 80% 的原则对挥发物成分进行定性分析；用峰面积归一化法计算化合物的相对含量。

1.2.2 叶片光合作用的测定

采用 CIRAS-II 型光合仪测定树冠中上部向阳叶片的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度，同时测定环境的温度和光合有效辐射。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 软件对数据进行整理、分析和制图，采用 SPSS 软件对数据进行差异显著性检验、相关分析和逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 元宝枫叶片挥发物成分分析

通过对元宝枫叶片挥发物离子流图（图 1）分析，检索出的物质在春、夏、秋 3 季有所不同，主要是酯、醇、醛和萜烯类化合物。

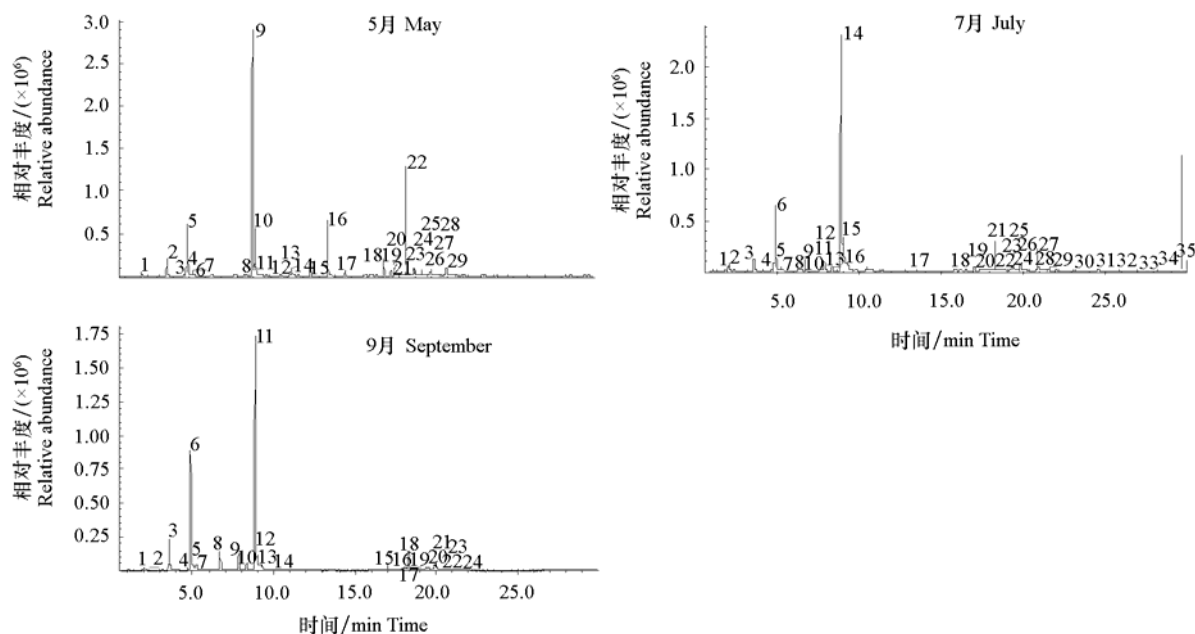


图 1 元宝枫叶片挥发物总离子流图

Fig. 1 TIC (Total ion current chromatogram) of volatiles from leaves of *Acer truncatum*

本试验中化合物相对含量（表 1）取日变化的平均值，有些物质只检测到 1 次且含量较低，在表中未列出（如丁酸-2-戊烯酯、丁酸己酯、 β -罗勒烯、 α -法尼烯、 δ -葑澄茄烯等相对含量低于 0.1%）。表 1 中所列化合物共 24 种，占所测化合物相对含量的 90% 以上。其中酯类物质有 7 种，占挥发物总种类的 29.2%，相对含量最高，在 55% ~ 63% 之间；醇、醛类物质共 5 种，占总种类的 20.8%，相对含量约 10% ~ 34%；萜烯类物质共 11 种，4 种单萜和 7 种倍半萜，占总种类的 45.8%，

相对含量约 8%~17%。这些物质主要是相对分子质量中等或偏低的碳原子数在 15 以下的碳氧化合物,还检测到 1 种含氮化合物柠檬腈($C_{10}H_{15}N$)。由表 1 可知,在 5、7、9 月均检测到的相对含量在 1.0%以上的物质主要有 5 种,分别是乙酸叶醇酯、3-己烯醇、 β -石竹烯、乙酸己酯和 3-己烯醛,这 5 种物质占总含量的 80%~90%,可认为是元宝枫挥发物的主要组成成分。其中,3-己烯醛、3-己烯醇和乙酸叶醇酯,具有青叶香味,可作为食用香精;乙酸己酯具有水果香味,也可作为食用香精; β -石竹烯,具有介于丁香和松节油之间的香味,可作为食用香精,同时可镇咳平喘,用于医药生产。这 5 种主要成分使元宝枫叶片呈现青叶香气。

表 1 元宝枫叶片春、夏、秋季挥发物组分和相对含量(平均值 \pm 标准误差)

Table 1 Components and relative contents of volatiles from leaves of *Acer truncatum* in spring, summer and autumn (mean \pm SE)

序号 No.	保留时间/min Retention time	化合物 Compounds	相对含量/% Relative content		
			5 月 May	7 月 July	9 月 September
1	2.02	2,2-二甲基-丙醛 2,2-dimethyl-propanal	0.41 \pm 0.091	0.75 \pm 0.190	0.69 \pm 0.111
2	3.57	3-己烯醛 3-hexenal	2.50 \pm 0.678	1.75 \pm 0.224	4.95 \pm 0.638
3	4.80	2-己烯醛 2-hexenal	0.85 \pm 0.238	0.78 \pm 0.109	1.01 \pm 0.339
4	4.88	3-己烯醇 3-hexen-1-ol	6.60 \pm 1.391	11.26 \pm 0.691	25.95 \pm 1.071
5	5.26	1-己醇 1-hexanol	0.23 \pm 0.134	0.71 \pm 0.218	0.88 \pm 0.063
6	6.72	α -蒎烯 α -pinene	-	0.64 \pm 0.229	0.84 \pm 0.643
7	7.69	2-己烯-4-内酯 2-hexen-4-olide	-	0.40 \pm 0.178	-
8	7.86	β -蒎烯 β -pinene	-	0.70 \pm 0.273	0.70 \pm 0.546
9	8.36	β -月桂烯 β -myrcene	0.50 \pm 0.107	2.14 \pm 0.857	0.80 \pm 0.274
10	8.91	乙酸叶醇酯 3-hexen-1-ol,acetate	55.56 \pm 1.476	53.27 \pm 2.171	54.06 \pm 2.270
11	9.04	乙酸己酯 Acetic acid hexyl ester	4.24 \pm 0.549	7.13 \pm 1.588	0.83 \pm 0.074
12	9.12	2-己烯-1-醇-乙酸酯 2-hexen-1-ol,acetate	1.40 \pm 0.253	1.16 \pm 0.387	0.02 \pm 0.010
13	9.33	柠檬烯 Limonene	0.47 \pm 0.091	1.75 \pm 0.294	0.33 \pm 0.264
14	11.33	丙酸-3-己烯酯 3-hexen-1-ol,propanoate	0.22 \pm 0.021	-	-
15	11.73	柠檬腈 Geranyl nitrile	0.26 \pm 0.140	-	-
16	13.54	丁酸-3-己烯酯 Butanoic acid 3-hexenyl ester	2.81 \pm 1.113	0.76 \pm 0.217	-
17	14.59	戊酸叶醇酯 n-valeric acid cis-3-hexenyl eater	0.50 \pm 0.289	-	-
18	17.03	α -长叶蒎烯 α -longipinene	0.76 \pm 0.479	0.84 \pm 0.271	0.56 \pm 0.107
19	17.43	环长叶烯 Logicyclene	0.18 \pm 0.021	0.17 \pm 0.088	0.08 \pm 0.032
20	18.24	2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)-二环[3.1.1]-庚-2-烯 Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene,2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-	0.54 \pm 0.155	0.19 \pm 0.053	0.29 \pm 0.139
21	18.34	β -石竹烯 β -caryophyllene	12.94 \pm 1.326	7.31 \pm 2.452	3.63 \pm 0.752
22	18.48	10,10-二甲基-2,6-二亚甲基-双环[7.2.0]十一烷 Bicyclo[7.2.0]undecane,10,10-dimethyl-2,6-bis(methylene)-	0.17 \pm 0.038	0.24 \pm 0.067	-
23	18.90	α -石竹烯 α -caryophyllene	0.84 \pm 0.106	0.51 \pm 0.172	0.19 \pm 0.070
24	19.30	吉马烯 D Germacrene D	0.74 \pm 0.253	0.49 \pm 0.195	0.79 \pm 0.214

注: - 未检出。

Note: - Undetected.

2.2 元宝枫叶片挥发物的季节变化

挥发物总浓度采用总峰面积值来反应,峰面积是指峰高与保留时间的积分值,可表示各化合物的含量。由图 1 经计算可知,不同季节之间挥发物总峰面积差异显著($P<0.01$),表现为 5 月(2.38×10^7) $>$ 7 月(1.87×10^7) $>$ 9 月(1.25×10^7)。

5 种主要挥发物峰面积变化也呈现出不同的日变化和季节性变化(图 2)。3-己烯醛,日均峰面积为 9 月 \approx 5 月 $>$ 7 月,日变化 5 月先增后降呈倒“V”型,7 月和 9 月则先降后增与 5 月变化趋势相反;3-己烯醇,峰面积为 9 月 $>$ 7 月 $>$ 5 月,日变化在 3 季表现不同,5 月呈增加趋势至 14:00 趋于稳定,7 月和 9 月先降后增且在 14:00 降至谷底;乙酸叶醇酯,峰面积为 5 月 $>$ 7 月 $>$ 9 月,日变化为先降后增,14:00 达次高峰,且峰面积日均值季节差异显著;乙酸己酯,峰面积为 7 月 $>$

5 月 > 9 月, 5 月和 7 月日变化由 8: 00 急剧下降至 11: 00, 随后缓慢下降, 9 月日变化不明显, 且峰面积日均值季节差异显著; β -石竹烯, 峰面积为 5 月 > 7 月 > 9 月, 日变化在 5 月先增后降再增, 7 月和 9 月则逐渐增加在 17: 00 达最高值。

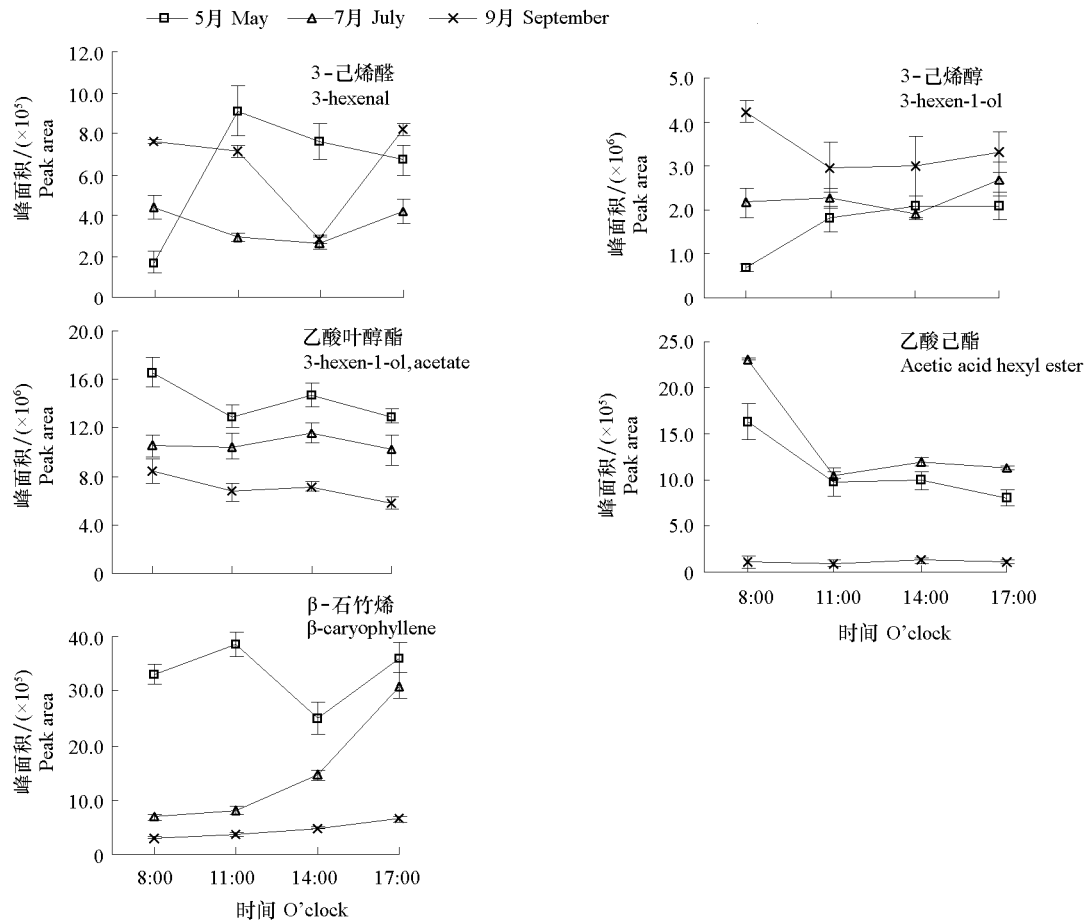


图 2 元宝枫叶片挥发物主要成分峰面积日变化和季节性变化
Fig. 2 Diurnal and seasonal variation of the main compounds peak area from leaves of *Acer truncatum*

对 5 种主要挥发物峰面积值进行 Pearson 相关分析 (表 2), 3-己烯醇与乙酸叶醇酯和乙酸己酯极显著负相关, 与 β -石竹烯显著负相关; 乙酸叶醇酯与乙酸己酯显著负相关, 与 β -石竹烯极显著相关; 此外 3-己烯醛与乙酸叶醇酯和乙酸己酯呈负向关系, 这与图 2 中的变化趋势一致。

表 2 元宝枫叶片 5 种主要成分的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of 5 compounds from leaves of *Acer truncatum*

化合物 Compounds	3-己烯醛 3-hexenal	3-己烯醇 3-hexen-1-ol	乙酸叶醇酯 3-hexen-1-ol,acetate	乙酸己酯 Acetic acid hexyl ester	β -石竹烯 β -caryophyllene
3-己烯醛 3-hexenal	1.000				
3-己烯醇 3-hexen-1-ol	0.416	1.000			
乙酸叶醇酯 3-hexen-1-ol,acetate	-0.207	-0.828**	1.000		
乙酸己酯 Acetic acid hexyl ester	-0.433	-0.712**	-0.643*	1.000	
β -石竹烯 β -caryophyllene	0.084	-0.655*	0.766**	0.369	1.000

** 表示 0.01 水平显著, * 表示 0.05 水平显著。
** Indicates significance at $P < 0.01$, * Indicates significance at $P < 0.05$, $n = 36$.

2.3 元宝枫叶片挥发物释放的影响因素分析

已有研究表明,在一定条件下光照增强、温度升高可促进叶片挥发物的释放(Owena et al., 2002; Hu et al., 2009)。本研究中,挥发物总峰面积(图 3, A)5 月在 8:00 最高,7 月在 11:00 略有下降,随后逐渐增加至 17:00 最高,9 月则呈下降趋势。而 3 个季节的光合有效辐射(图 3, B)和温度(图 3, C)均呈单峰曲线变化,在 12:00—14:00 达最高,而总挥发物的变化与此并不一致,这可能与植物生长的节律性有关。

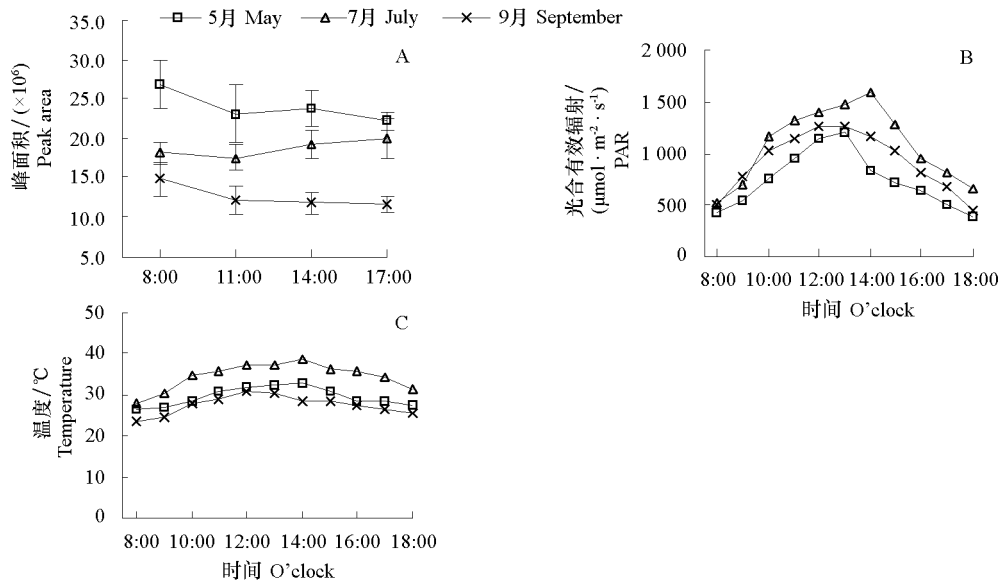


图 3 总挥发物峰面积、光合有效辐射和温度的日变化和季节性变化

Fig. 3 Diurnal and seasonal variation of the total volatile compound peak area, PAR and temperature

元宝枫存在明显的光合午休现象(马志波 等, 2004),净光合速率(图 4, A)在 10:00 和 16:00 左右达到高峰;蒸腾速率(图 4, B)呈单峰曲线变化,春季和秋季在 10:00—13:00 蒸腾速率较

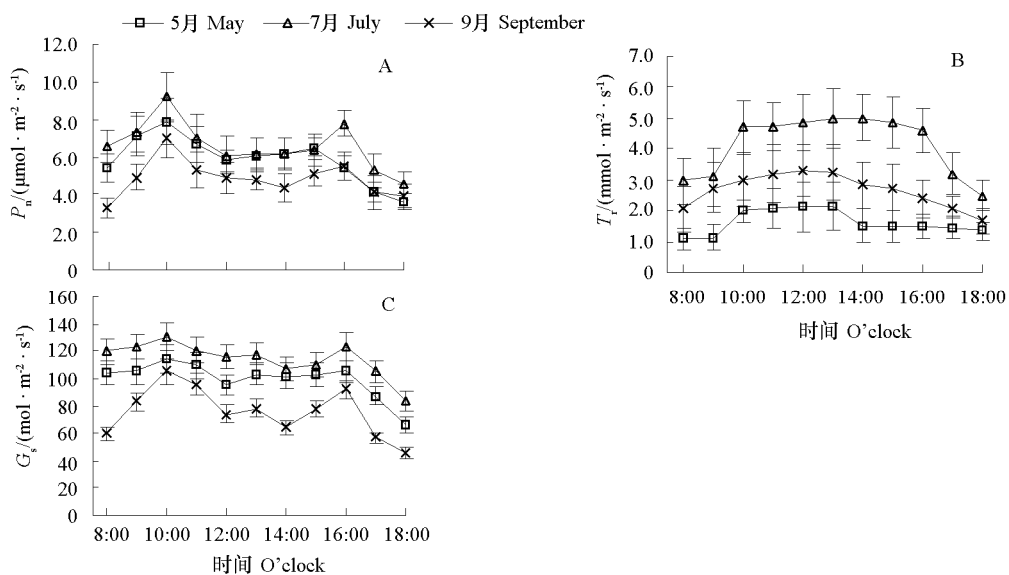


图 4 净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的日变化和季节性变化

Fig. 4 Diurnal and seasonal variation of the photosynthetic rates, transpiration rates and stomatal conductance

高, 夏季在 10: 00—16: 00 较高; 气孔导度 (图 4, C) 呈双峰曲线, 在 10: 00 和 16: 00 左右达到高峰, 与净光合速率变化一致。这 3 项光合参数变化规律与总挥发物的释放亦不一致。

采用 SPSS 软件对挥发物总峰面积和光合有效辐射、温度及光合参数进行 Pearson 相关分析 (表 3), 挥发物和气孔导度呈显著正相关, 与温度、净光合速率、蒸腾速率及光合有效辐射相关性不显著。采用逐步回归分析, 可建立挥发物 (Y_V) 与气孔导度 (G_s) 的模型: $Y_V = 5.666 + 0.136G_s$, 其 R 、 R^2 及调整的 R^2 值分别为 0.597、0.356 和 0.292, F 检验 $P < 0.05$, 与相关分析的结果一致。分析挥发物与其他参数不相关的原因可能是元宝枫存在光合午休现象, 在光合有效辐射最高时净光合速率及气孔导度非最高, 由于气孔限制导致净光合速率降低, 合成物质减少同时气孔导度下降使得挥发物的释放减少。

表 3 元宝枫叶片总挥发物与影响因素的相关性
Table 3 Correlations between total volatile compound and influence factors

影响因素 Influencing factor	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance
光合有效辐射 PAR	- 0.178	0.580
温度 $Temperature$	0.222	0.488
净光合速率 P_n	0.429	0.164
蒸腾速率 T_r	0.333	0.291
气孔导度 G_s	0.597*	0.041

* 表示 0.05 水平显著。

* Indicates significance at $P = 0.05$.

3 讨论

植物挥发物释放规律及影响因素的研究多集中于针叶树种, 特别是侧柏和油松 (李金龙 等, 1994; 孙月琴和骆有庆, 2007; 李娟 等, 2011), 在阔叶树方面报道较少。本研究中采用离体采样固相微萃取 SPME 方法收集挥发物, 结合气质联用仪 GC-MS, 测定了元宝枫在春、夏、秋 (5、7、9 月) 3 季挥发物的释放情况。结果表明, 元宝枫挥发物的主要成分是酯类, 其次是醇和醛类及萜烯类物质; 挥发物总峰面积变化为春季 > 夏季 > 秋季, 主要物质的释放规律不同; 研究了光合有效辐射、温度、净光合速率、蒸腾速率及气孔导度对挥发物释放的影响, 各要素间相关性分析表明, 挥发物总峰面积与气孔导度呈显著正相关, 其他要素的影响不显著。

植物挥发物的采集方法现在主要有固相微萃取 SPME 方法和静态/动态顶空法结合 TCT-GC-MS 分析。SPME 是 20 世纪 80 年代末发展起来的一种新型样品前处理方法, 热解吸涂层上吸附的物质, 化合物在气相和萃取头固定相之间分配系数的不同也造成了两种分析结果的差异 (Heather & Janusz, 2000), 该方法简洁方便, 现已广泛应用于环境、食品 (Maria et al., 2013)、药品、生物等领域。张凤娟等 (2006) 采用静态顶空采集法结合 TCT-GC-MS 技术分析鉴定了复叶槭、五角枫、华北五角枫、挪威槭等植物挥发物的种类和相对含量, 均以酯类物质含量最高 (主要是乙酸叶醇酯, 相对含量在 54.81% ~ 65.30% 之间)。本研究中元宝枫挥发物的主要成分乙酸叶醇酯相对含量 53.27% ~ 55.56%, 与前人研究相近。对比分析来看, 本研究采用的试验方法可行。

有研究表明机械损伤 (践踏、修剪等) 会增加某些物质的含量, 如 2-己烯醛、3-己烯醛等 (左照江 等, 2010), 但不同树种增加的物质及量不同。周帅等 (2012) 采用动态顶空气体循环法和热脱附/气相色谱/质谱联用技术 (TDS-GC-MS), 对樟树幼苗叶片损伤后释放的 C6 ~ C10 醛类化合物进行采集与分析, 其中醛类物质的释放量大量增加, 新增了 2-己烯醛、2,4-己二烯醛、(E)-2-辛烯醛和 (E)-2-壬烯醛等物质, 分析原因是机械损伤使 PS II 供体侧受损、脂氧合酶 LOX 活性升高, 致使 C6 ~ C10 醛类化合物大量释放。本研究中采用摘取叶片剪碎方式处理样品, 可能会促使叶室内挥发物的释放; 同时本研究中 2-己烯醛含量在春、夏、秋季的含量均较低且重复性好,

没有明显变化,这与树体机械损伤造成的挥发物种类和释放量的变化有所不同。有研究表明,女贞修剪前后枝叶释放的挥发物主要成分相同,对人体有益的组分相对含量还会增加(董建华 等,2011)。对于本研究中摘叶和修剪对植株挥发物释放产生的影响还需要进一步做比较试验。

挥发物的季节和日变化情况,不同树种表现出不同的规律,一般认为在正午和午夜会有两个释放高峰(李金龙 等,1994;胡永建 等,2007)。李娟等(2011)研究侧柏春季挥发物释放规律呈“三峰两谷”型,5:00、13:00、19:00呈现高峰,23:00—1:00和17:00呈现低谷;Li等(2003)对复叶槭的研究表明,7月的释放高峰集中于14:00左右,而8月则在10:00左右,且挥发物的种类和相对含量有明显不同。本研究中元宝枫挥发物释放呈现的变化规律则不同,挥发物总峰面积为5月>7月>9月,这与元宝枫生长发育节律密切相关,3月气温回升,元宝枫生长活动开始,4—5月正值元宝枫开花期,观测日白天均温达到31℃,新陈代谢活动加强,光合、呼吸作用旺盛,合成释放的挥发物增多;7月观测日均温达36℃,元宝枫枝叶繁茂,光合、蒸腾作用明显增加,释放的总挥发物略低于5月;9月进入秋季,生长转入衰弱期,挥发物总浓度明显低于夏季和春季。5种主要挥发物的日变化和季节变化规律亦不同,相关分析表明,3-己烯醇与乙酸叶醇酯和乙酸己酯极显著负相关,与 β -石竹烯显著负相关;乙酸叶醇酯与乙酸己酯显著负相关,与 β -石竹烯极显著相关。Ben等(2010)研究发现,蚕豆的主要挥发物也呈现昼夜节律变化,特别是3-己烯醇与乙酸叶醇酯,甲基庚烯酮与乙酸叶醇酯呈显著相关。这可能与植物体内代谢酶有关,植物体内醛在醇脱氢酶ADH作用下生成醇,然后在酰基转移酶AAT作用下生成酯,这可能与ADH酶和AAT酶活性有关。

植物在生长过程中,挥发物的组分和释放与植物的生长发育状况,如年龄、发育状态和遗传特性等密切相关;同时,外界环境条件的变化,如光照、温度、水分、营养、CO₂浓度和空气湿度等及昆虫、机械损伤等也有明显的影响。一般在一定范围内随着光照增强、温度升高、湿度减小,挥发物的释放量会增加(李娟 等,2011;Ziru et al.,2011)。挥发物是植物次生代谢的产物,是通过光合、呼吸和蒸腾作用调节气孔开闭释放到大气中的,这些内在因素对植物挥发物的释放产生直接影响。而光照和温度作为外在因素,通过影响植株的生理变化来影响挥发物的释放,引起植株生理变化的因素还有风速、营养及所处的环境状况等,挥发物采集方法的不同也会影响到试验结果。此外,次生代谢酶也影响植株体内化合物的生成和转化,进而影响挥发物的种类和释放,对此还需要进一步研究。

References

- Atsushi H, Tomoyuki K, Kazunaga Y. 2010. Anti-hyperglycemic effects of sugar maple *Acer saccharum* and its constituent acertannin. *Food Chemistry*, 123: 390–394.
- Ben W, Salvador G, Toby B, Jim H, John P. 2010. Between plant and diurnal variation in quantities and ratios of volatile compounds emitted by *Vicia faba* plants. *Phytochemistry*, 71 (1): 81–89.
- Delia M P-Z, Heidi H, Hannele H, Saskyav N, Jarmo K H. 2013. Induced defenses of *Veronica spicata*: Variability in herbivore-induced volatile organic compounds. *Photochemistry Letters*, 6: 653–656.
- Dong Jian-hua, Wang Cheng, Zhang Jing, Ren Lu-jie. 2011. Changes of VOCs released by branch and leaf of *Ligustrum lucidum* Ait. after mechanical damage. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 9 (3): 40–43. (in Chinese)
- 董建华, 王 成, 张 晶, 任露洁. 2011. 女贞枝叶机械损伤前后挥发性物质的变化. *中国城市林业*, 9 (3): 40–43.
- Han Fen, Wang Hui, Bian Yin-xia, Li Yong-bing. 2008. Chemical components and their allelopathic effects of the volatiles from *Larix principis-rupprechtii* leaves and branches. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19 (11): 2327–2332. (in Chinese)
- 韩 芬, 王 辉, 边银霞, 李永兵. 2008. 华北落叶松枝叶挥发性物质的化学成分及其化感作用. *应用生态学报*, 19 (11): 2327–2332.
- Heather L, Janusz P. 2000. Evolution of solid-phase microextraction technology. *Journal of Chromatography A*, 885: 153–193.

- Hu Yong-jian, Ren Qin, Jin You-ju, Li Zhen-yu, Chen Hua-jun. 2007. Diurnal cycle of emission of volatile compounds from *Pinus massoniana* and *Pinus elliottii*. *Acta Ecologica Sinica*, 27 (2): 565 – 570. (in Chinese)
- 胡永建, 任 琴, 金幼菊, 李镇宇, 陈华君. 2007. 马尾松 (*Pinus massoniana*)、湿地松 (*Pinus elliottii*) 挥发性化学物质的昼夜节律释放. *生态学报*, 27 (2): 565 – 570.
- Hu Zeng-hui, Shen Ying-bai, Su Xiao-hua. 2009. Saturated aldehydes C6 – C10 emitted from ashleaf maple (*Acer negundo* L.) leaves at different levels of light intensity, O₂ and CO₂. *Journal of Plant Biology*, 52 (4): 289 – 297.
- Jo H-J, Fujii E, Cho T D. 2010. An experimental study of physiological and psychological effects of pine scent. *Journal of the Korea Institute of Landscape Architecture*, 38 (4): 1 – 10.
- Kivimäenpää M, Riikonen J, Ahonen V, Tervahauta A, Holopainen T. 2013. Sensitivity of Norway spruce physiology and terpenoid emission dynamics to elevated ozone and elevated temperature under open-field exposure. *Environmental and Experimental Botany*, 90: 32 – 42.
- Lee J, Park B-J, Tsuntesugu Y, Ohira T, Kagawa T, Miyazaki Y. 2011. Effect of forest bathing on physiological and psychological responses in young Japanese male subjects. *Public Health*, 125: 93 – 100.
- Li Jian-guang, Jin You-ju, Luo Yong-qing, Xu Zhi-chun, Chen Hua-jun. 2003. Leaf volatiles from host tree *Acer negundo*: Diurnal rhythm and behavior responses of *Anoplophora glabripennis* to volatiles in field. *Acta Botanica Sinica*, 45: 177 – 182.
- Li Jin-long, Bai Yu-hua, Hu Jian-xin, Shao Min, Zhang Bao-xiang, Xia Yu, Tang Xiao-yan. 1994. Diurnal variation in the concentration of terpenes and its emission rate measurements from oil pine. *China Environmental Science*, 14 (3): 165 – 169. (in Chinese)
- 李金龙, 白郁华, 胡建信, 邵 敏, 张宝祥, 夏 羽, 唐孝炎. 1994. 油松排放萜烯类化合物浓度的日变化及排放速率的研究. *中国环境科学*, 14 (3): 165 – 169.
- Li Juan, Wang Cheng, Peng Zhen-hua, Xu Cheng-yang, Qie Guang-fa. 2011. The diurnal variation and influence factors of VOC of *Platycladus orientalis* in spring. *Forest Research*, 24 (1): 82 – 90. (in Chinese)
- 李 娟, 王 成, 彭镇华, 徐程扬, 郗广发. 2011. 侧柏春季挥发物浓度日变化规律及其影响因子研究. *林业科学研究*, 24 (1): 82 – 90.
- Liu Jiao-mei, Li Shu-hua, Wu Fei, Liu Jian, Zhang Zhi-guo. 2007. The ecological effects between pure woodland and mixed of urban green space. *Acta Ecologica Sinica*, 27 (2): 674 – 684. (in Chinese)
- 刘娇妹, 李树华, 吴 菲, 刘 剑, 张志国. 2007. 纯林、混交林型园林绿地的生态效益. *生态学报*, 27 (2) : 674 – 684.
- Loreto F. 2006. On the induction of volatile organic compound emissions by plants as consequence of wounding or fluctuations of light and temperature. *Plant, Cell & Environment*, 29 (9): 1820 – 1828.
- Ma Zhi-bo, Ma Qin-yan, Han Hai-rong, Chen Xia-lin. 2004. Photosynthetic characteristics of six broad-leaved deciduous trees in Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 26 (3): 13 – 18. (in Chinese)
- 马志波, 马钦彦, 韩海荣, 陈遐林. 2004. 北京地区 6 种落叶阔叶树光合特性的研究, *北京林业大学学报*, 26 (3): 13 – 18.
- María P F, Mario J A R, Daniel A W. 2013. Markers of typical red wine varieties from the Valley of Tulum (San Juan-Argentina) based on VOCs profile and chemometrics. *Food Chemistry*, 141: 1055 – 1062.
- Meng Xue, Wang Zhi-ying, Lü Hui. 2010. The volatile constituents analysis of *Scindapsus aureum* and *Hedera nepalensis* var. *sinensis* and their inhibition against five fungi. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (6): 971 – 976. (in Chinese)
- 孟 雪, 王志英, 吕 慧. 2010. 绿萝和常春藤主要挥发性成分及其对 5 种真菌的抑制活性. *园艺学报*, 37 (6): 971 – 976.
- Owena S M, Harleyb P, Guenther A, Hewitt C N. 2002. Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species. *Atmospheric Environment*, 36: 3147 – 3159.
- Pang Xiao-li, Si Hui-qing, Wang Hai-yan. 2010. Season variation of main biochemistry component of *Acer truncatum* Bunge's leaves. *Science and Technology of Food Industry*, 31 (8): 147 – 148. (in Chinese)
- 庞晓莉, 司辉清, 王海燕. 2010. 元宝枫叶主要生化成分的季节变化. *食品工业科技*, 31 (8): 147 – 148.
- Šimpraga M, Demarcke M, Joó É, Pokorska O, Amelynck C, Schoon N. 2011. Clear link between drought stress, photosynthesis and biogenic volatile organic compounds in *Fagus sylvatica* L. *Atmosphere Environment*, 45: 5254 – 5259.
- Stefania D D, Stefania B, Ralf H, Victoria P, Marco T, Palmiro P, Muhammad I, Gunter K, Vidor F, Peter W, Angelo S. 2012. Transcriptomic analysis of oxylipin biosynthesis genes and chemical profiling reveal an early induction of jasmonates in chickpea roots under drought stress.

- Plant Physiology and Biochemistry, 61: 115 – 122.
- Su Jian-rong, Luo Xiang, Yang Wen-yun, Deng Jiang. 2004. A study on the seasonal variation of the contents of flavonoid and chlorogenic acid in the leaf of *Acer truncatum*. Forest Research, 17 (4): 496 – 499. (in Chinese)
- 苏建荣, 罗 香, 杨文云, 邓 疆. 2004. 元宝枫叶内黄酮、绿原酸含量动态变化研究, 林业科学研究, 17 (4): 496 – 499.
- Sun Yue-qin, Luo You-qing. 2007. Volatile compound components and the daily variation of emission rates from *Platycladus orientalis*. Journal of Beijing Forestry University, 29 (5): 84 – 87. (in Chinese)
- 孙月琴, 骆有庆. 2007. 侧柏挥发性物质组成及其释放速率的日变化, 北京林业大学学报, 29 (5): 84 – 87.
- Tao Y, Jaehwi L, Yong G L, Se E B, Min H K, Eun-Hwa S, Yong J L, Sun G L, Jae Y C. 2010. *In vitro* and *in vivo* anti-inflammatory effects of ethanol extract from *Acer tegmentosum*. Journal of Ethnopharmacology, 128: 139 – 147.
- Wang Yan-ying, Wang Cheng, Qie Guang-fa, Dong Jian-hua, Jiang Ji-hong. 2013. Comparative analysis on effects of VOCs from branches and leaves of four conifer species on locomotor activity of mice. Scientia Silvae Sinicae, 49 (5): 188 – 193. (in Chinese)
- 王艳英, 王 成, 郝光发, 董建华, 蒋继宏. 2013. 4 个针叶树种枝叶气味对小白鼠自发性行为影响的比较分析. 林业科学, 49 (5): 188 – 193.
- Zhang Feng-juan, Jin You-ju, Chen Hua-jun, Wu Xiao-ying. 2006. The selectivity mechanism of *Anoplophora glabripennis* on four different species of maples. Acta Ecologica Sinica, 26 (3): 870 – 877. (in Chinese)
- 张凤娟, 金幼菊, 陈华君, 吴晓颖. 2006. 光肩星天牛对 4 种不同槭树科寄主植物的选择机制. 生态学报, 26 (3): 870 – 877.
- Zhang Feng-juan, Li Ji-quan, Xu Xing-you, Meng Xian-dong, Chen Fa-ju. 2007. The volatiles of two greening tree species and the antimicrobial activity. Acta Horticulturae Sinica, 34 (4): 973 – 978. (in Chinese)
- 张凤娟, 李继泉, 徐兴友, 孟宪东, 陈发菊. 2007. 皂荚和五角枫挥发性物质组成及其对空气微生物的抑制作用. 园艺学报, 34 (4): 973 – 978.
- Zhao Yan-qun, Zhao Jin-rui, Mao Li-juan, Shi Zu-hua. 2012. Effects of the volatiles from different tomato varieties on host selection behavior of B-biotype *Bemisia tabaci*. Chinese Journal of Applied Ecology, 23 (9): 2509 – 2514. (in Chinese)
- 赵艳群, 赵金瑞, 毛黎娟, 施祖华. 2012. 不同番茄品种挥发物对 B 型烟粉虱寄主选择行为的影响. 应用生态学报, 23 (9): 2509 – 2514.
- Zheng Hua, Jin You-ju, Zhou Jin-xing, Li Wen-bin. 2003. A preliminary study on human brain waves influenced by volatiles released from living *Sorbaria kirilowii* (Regel) Maxim. in different seasons. Forest Research, 16 (3): 328 – 334. (in Chinese)
- 郑 华, 金幼菊, 周金星, 李文彬. 2003. 活体珍珠梅挥发物释放的季节性及其对人体脑波影响的初探. 林业科学研究, 16 (3): 328 – 334.
- Zhou Shuai, Lin Fu-ping, Wang Yu-kui, Shen Ying-bai, Zhang Ru-min, Gao Rong-fu, Gao Yan. 2012. Effects of mechanical damage of leaves on volatile organic compounds and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of *Cinnamomum camphora*. Chinese Journal of Plant Ecology, 36 (7): 671 – 680. (in Chinese)
- 周 帅, 林富平, 王玉魁, 沈应柏, 张汝民, 高荣孚, 高 岩. 2012. 樟树幼苗机械损伤叶片对挥发性有机化合物及叶绿素荧光参数的影响. 植物生态学报, 36 (7): 671 – 680.
- Ziru L, Ellen A R, Thomos D S. 2011. Effect of temperature on postillumination isoprene emission in oak and poplar. Plant Physiology, 155: 1037 – 1046.
- Zuo Zhao-jiang, Zhang Ru-min, Wang Yong, Hou Ping, Wen Guo-sheng, Gao Yan. 2010. Analysis of main volatile organic compounds and study of aboveground structures in *Artemisia frigid*. Chinese Journal of Plant Ecology, 34 (4): 462 – 468. (in Chinese)
- 左照江, 张汝民, 王 勇, 侯 平, 温国胜, 高 岩. 2010. 冷蒿挥发性有机化合物主要成分分析及其地上部分结构研究. 植物生态学报, 34 (4): 462 – 468.