

DOI: 10.5846/stxb202107191943

李少宁, 陶雪莹, 李慧敏, 赵娜, 徐晓天, 鲁绍伟. 北京地区侧柏和垂柳释放有益挥发性有机物组分日动态变化特征. 生态学报, 2023, 43(15): 6418-6432.

Li S N, Tao X Y, Li H M, Zhao N, Xu X T, Lu S W. Characteristics of diurnal dynamic changes of beneficial BVOCs components released by *Platycladus orientalis* and *Salix babylonica* in Beijing area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6418-6432.

北京地区侧柏和垂柳释放有益挥发性有机物组分日动态变化特征

李少宁^{1,2}, 陶雪莹^{1,2}, 李慧敏^{1,2}, 赵娜¹, 徐晓天¹, 鲁绍伟^{1,2,*}

1 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京燕山森林生态系统长期定位观测研究站, 北京 100093

2 沈阳农业大学, 沈阳 110866

摘要:以侧柏(*Platycladus orientalis*)和垂柳(*Salix babylonica*)为研究对象,采用动态顶空袋采集法和自动热脱附-气相色谱/质谱联用技术来分析这些植物释放的挥发性有机物(VOCs)的组成和释放模式。选择不同的时间和天气条件下的样本进行采集,并记录相关信息。通过对原始数据的分析,确定有益挥发性有机物(BVOCs)的成分和相对百分含量。研究结果显示,侧柏和垂柳在不同季节释放的BVOCs成分主要包括醇类、醛类、烯烃类等其他类化合物,这些有益BVOCs在植物的生理和生态功能中扮演着重要的角色,对于深入了解植物与环境之间的相互作用具有重要意义。侧柏和垂柳释放BVOCs成分在不同季节会有所变化。其次,研究分析了侧柏和垂柳在不同季节中有益BVOCs成分的含量和变动趋势。侧柏在不同季节的释放模式呈现出明显的差异。春季的释放模式呈现出“单峰单谷”曲线,夏季的释放模式呈现出“单峰”曲线,而秋季的释放模式呈现出“双峰单谷”曲线。这表明侧柏在不同季节中的挥发物释放存在明显的季节性变化。相比之下,垂柳的释放模式在不同季节中相对稳定,呈现出一致的“单峰型”曲线。这说明垂柳的挥发物释放模式在不同季节中相对持续且稳定,不像侧柏那样受季节变化的影响较大。此外,研究还发现侧柏和垂柳释放有益BVOCs的相对含量在正午前后达到高峰期,而低谷期则出现在高峰期前后。这表明植物的挥发物释放受到日光照射和其他环境因素的影响,存在明显的日变化规律。综上所述,该研究采用了先进的分析技术,对北京市顺义区高丽营试验基地的侧柏和垂柳进行了挥发物采集和分析。结果显示侧柏和垂柳在不同季节中释放的有益BVOCs成分存在明显差异,并具有季节性变化。此外,它们的挥发物释放还受到日变化的影响。

关键词:侧柏;垂柳;有益挥发性有机物(BVOCs);日变化;动态变化

Characteristics of diurnal dynamic changes of beneficial BVOCs components released by *Platycladus orientalis* and *Salix babylonica* in Beijing area

LI Shaoning^{1,2}, TAO Xueying^{1,2}, LI Huimin^{1,2}, ZHAO Na¹, XU Xiaotian¹, LU Shaowei^{1,2,*}

1 Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing, Yanshan Forest Ecosystem Research Station of Beijing, Beijing 100093, China

2 Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: This study was conducted for *Platycladus orientalis* and weeping willow in Gaoliying Experimental Base, Shunyi District, Beijing. The composition and release patterns of volatile organic compounds (VOCs) released by these plants were analyzed using dynamic headspace bag collection method and automatic thermal desorption gas chromatography/mass spectrometry technology. In order to obtain more comprehensive information, samples were collected at different times and weather conditions, and relevant information was recorded. Through the analysis of the original data, the composition and

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设资助项目(KJ CX20230306, KJ CX20230209, KJ CX20230602)

收稿日期:2021-07-19; **采用日期:**2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hblsw8@163.com

relative percentage of beneficial volatile organic compounds (BVOCs) were determined. The research results show that the BVOCs released by *Platycladus orientalis* and weeping willow in different seasons mainly include alcohols, aldehydes, olefins, and other compounds. These beneficial BVOCs play important roles in the physiological and ecological functions of plants, and are of great significance for a deeper understanding of the interactions between plants and the environment. Research has found that the composition of BVOCs released by *Platycladus orientalis* and weeping willow varies in different seasons. Secondly, the study analyzed the content and variation trend of beneficial BVOCs components in *Platycladus orientalis* and weeping willow in different seasons. The release patterns of *Platycladus orientalis* show significant differences in different seasons. The release pattern in spring presents a “single peak and single valley” curve, while the release pattern in summer presents a “single peak” curve, while the release pattern in autumn presents a “double peak and single valley” curve. This indicates that there are significant seasonal changes in the release of volatile matter from *Platycladus orientalis* in different seasons. In contrast, the release pattern of weeping willows is relatively stable in different seasons, presenting a consistent “unimodal” curve. This indicates that the volatile matter release pattern of weeping willows is relatively continuous and stable in different seasons, unlike *Platycladus orientalis*, which is greatly affected by seasonal changes. In addition, the study also found that the relative content of beneficial BVOCs released by *Platycladus orientalis* and weeping willow reached its peak around noon, while the trough period appeared before and after the peak period. This indicates that the release of volatile matter from plants is influenced by sunlight and other environmental factors, and there is a clear diurnal variation pattern. To sum up, the study used advanced analytical techniques to collect and analyze the volatiles of *Platycladus orientalis* and weeping willow in Gaoliying Experimental Base, Shunyi District, Beijing. The results showed that there were significant differences in the beneficial BVOCs released by *Platycladus orientalis* and weeping willow in different seasons, with seasonal variations. In addition, their volatile matter release is also affected by daily changes.

Key Words: *Platycladus orientalis*; *Salix babylonica*; beneficial biogenic volatile organic compounds; daily change; dynamic change

植物挥发性有机物 (Biogenic Volatile Organic Compounds, BVOCs)^[1] 的化学结构和组成非常多样, 主要包括烯烃类、酯类、醛类、酮类、醇类、有机酸和其他类化合物^[2-3]。BVOCs 是植物体内合成的化合物, 其特点是具有较低的沸点和相对较小的分子量^[4]。这些挥发性有机物在植物体内产生并通过气孔释放到周围环境中。研究表明, 植物通过释放 BVOCs 对自身和人体健康具有积极的作用。首先, BVOCs 能够帮助植物抵御病虫害侵害, 通过释放具有杀菌和驱虫作用的化合物, 保护自身免受病害和虫害的侵害^[5-7]。其次, BVOCs 还能够提神醒脑, 具有振奋精神和改善心境的效果^[8]。此外, 这些有机物还对人体的健康具有正面影响, 包括增强免疫力、促进新陈代谢、调节血压和心率等方面的作用^[9-10]。另外, 植物释放的 BVOCs 还能够净化大气环境, 吸附空气中的有害物质, 如挥发性有机化合物和氮氧化物等, 从而改善空气质量, 并减少空气污染对人类健康的影响^[11-12]。

研究发现, 不同植物的挥发性有机物 (BVOCs) 释放时间具有特异性。例如, 毛竹 (*Phyllostachys heterocycla*)、侧柏和垂柳等植物在不同的时间点达到特定成分的峰值释放^[13-14]。这意味着不同植物对环境的适应性和调节机制存在差异, 它们通过在特定时间释放特定成分来响应和适应外界环境^[15]。此外, 研究还发现不同植物和林分类型的季节性变动差异较大。植物的 BVOCs 成分在不同的季节中会有显著的变化。这表明季节对于植物挥发性有机物的合成和释放具有重要影响^[16]。植物可能在不同季节中调整其 BVOCs 的组成, 以适应季节性变化和环境的不同需求^[17]。总结而言, 不同植物的 BVOCs 释放时间具有特异性, 这反映了它们对环境的适应性和调节机制的差异。不同植物和林分类型的季节性变动存在明显的差异, 有益成分的季节变化也是显著的。这些发现更深入地理解植物的生理和生态过程提供了重要线索, 并揭示了植物与周围环境的相互作用的复杂性。季节对植物释放的挥发性有机物 (BVOCs) 的组成和含量具有显著影响, 不同季节下植物释放的有益成分会有所变化。为了探索这些植物释放的有益 BVOCs 对人体和环境的影响机制, 本

研究以北京市的侧柏和垂柳为研究对象,通过采样、分析和鉴定它们释放的有益 BVOCs 成分和相对含量,比较分析了它们的日动态变化特征^[18-19]。总结而言,植物通过释放 BVOCs 对自身和人体健康产生积极影响。不同植物和季节下的 BVOCs 释放具有特异性,对人体和环境具有重要意义。本研究以北京市的侧柏和垂柳为研究对象,通过分析它们的 BVOCs 成分和相对含量,揭示了其日动态变化特征,这些研究结果对于促进城市生态健康发展和提高居民生活质量具有重要意义。

1 研究材料与研究方法

1.1 试验材料

研究地点位于顺义区高丽营试验基地(40°11'08"N, 116°29'41"E),该基地紧邻京承高速公路,属于暖温带半湿润大陆季风气候,平均气温为 11.5℃,年均降雨量为 625 mm,无霜期为 195d。研究选择了北京市常见的绿化树木,侧柏和垂柳作为研究对象,侧柏的平均树高为 3.2 m,平均胸径为 9.1 cm,平均树龄约为 8 年左右,而垂柳的平均树高为 5.8 m,平均胸径为 14.5 cm,平均树龄也约为 8 年左右^[20]。为后续的研究提供基础数据和参考,使研究结果更具代表性和可比性。

1.2 实验方法

1.2.1 植物挥发物样品采集

在 2019 年 4 月、6 月、9 月,分别在每月上、中、下旬各选晴朗无风或微风天气 1d 共 9d,选取树龄相同、长势一致 3 个单株树种作为平行样,于 8:00—18:00 对供试树种释放 BVOCs 进行采集,利用动态顶空套袋技术完成活体植物 BVOCs 气体样品采集:

(1)抽气:选择一健康、长势良好枝条套上采样袋,袋口系紧,上下两端各开一小口连接硅橡胶管,借助 QC-1S 型大气采样仪与干燥塔完成抽气工作。

(2)充气:将干燥塔上端与大气采样仪和 QC-1S 型大气采样仪相连,完成充气工作。

(3)循环采样:需要进行多次的抽气和充气步骤,通常是三次循环采样。然后在最后一次充气操作完成后,将大气采样仪进行复位,即将其恢复到初始状态。同时,让采样仪静置 10 min。

(4)采集样品:使用事先活化好的吸附管、干燥塔和大气采样仪来与供试植物的枝条形成闭合回路。

采样完成后,需要将吸附管进行包裹,并记录以下信息:采样时间、采样地点、树种和吸附管编号、环境温湿度、瞬时风速等相关信息。这些记录信息将有助于后续在实验室进行分析鉴定。将采集到的样品带回实验室后,可以进行进一步的分析和鉴定工作。

1.2.2 植物挥发物样品分析鉴定

实验仪器:采用自动热脱附-气相色谱/质谱联用仪(TCT/GC/MS)。

TCT 部分,冷阱首先被冷却至-25℃,随后升温至 300℃,进行脱附吸附管的挥发物。脱附完成后,挥发物通过传输线进入与质谱相连的气相色谱系统。GC 部分,氦气被用作载气,并以 1.0 mL/min 的流速进行实验。色谱柱按照预设的升温程序进行操作。在 MS 部分,使用电子轰击离子源对样品进行电离。离子化的化合物将在质谱中进行分析,并在质量范围为 29—350 m/z 之间进行检测。接口温度被设定为 250℃。

1.3 数据处理

通过分析得原始数据,图中各峰代表的化学信息经 Nist 2008 标准谱库进行确认和筛选^[21]。查阅文献资料甄别有益成分,各有益成分在样品中的相对百分含量采用面积归一化法,计算公式为:

$$\text{相对含量} = (\text{该物质峰面积} / \text{样品所有气体峰面积之和}) \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 侧柏释放有益 BVOCs 组分的日变化特征

2.1.1 侧柏释放有益 BVOCs 组分相对含量和种类数量日变化

侧柏植物在一天中的 BVOCs 释放呈现出特定的日变化趋势(图 1)。具体而言,有益 BVOCs 的相对含量

在侧柏中呈现出“N”型的日变化趋势。该趋势表明,侧柏在下午和傍晚释放的有益 BVOCs 含量最高,而早晨的含量最低。有益 BVOCs 在侧柏中的主要成分包括桉烯、 β -蒎烯、(1R)-(+)- α -蒎烯、右旋萜二烯等。这些化合物在侧柏的 BVOCs 中起到重要的作用。在一天中的特定时间点,有益 BVOCs 的相对含量呈现出两个峰值,分别在 14:00 和 18:00。这意味着在这些时间点,侧柏释放的有益 BVOCs 含量最高。此外,侧柏在中午时段释放的有益 BVOCs 成分种类最多。这表明侧柏在不同时间段释放的 BVOCs 成分具有差异性,中午时段的种类最为丰富。另外,侧柏在春季释放的有益 BVOCs 表现出明显的变化,并且具有显著的日变化趋势。总结而言,侧柏植物在不同时间段释放有益 BVOCs 含量和种类数量存在差异,下午和傍晚时段释放的含量最高,中午时段释放的种类最多。这些研究结果有助于更好地了解侧柏植物的生物活性和对环境的影响。

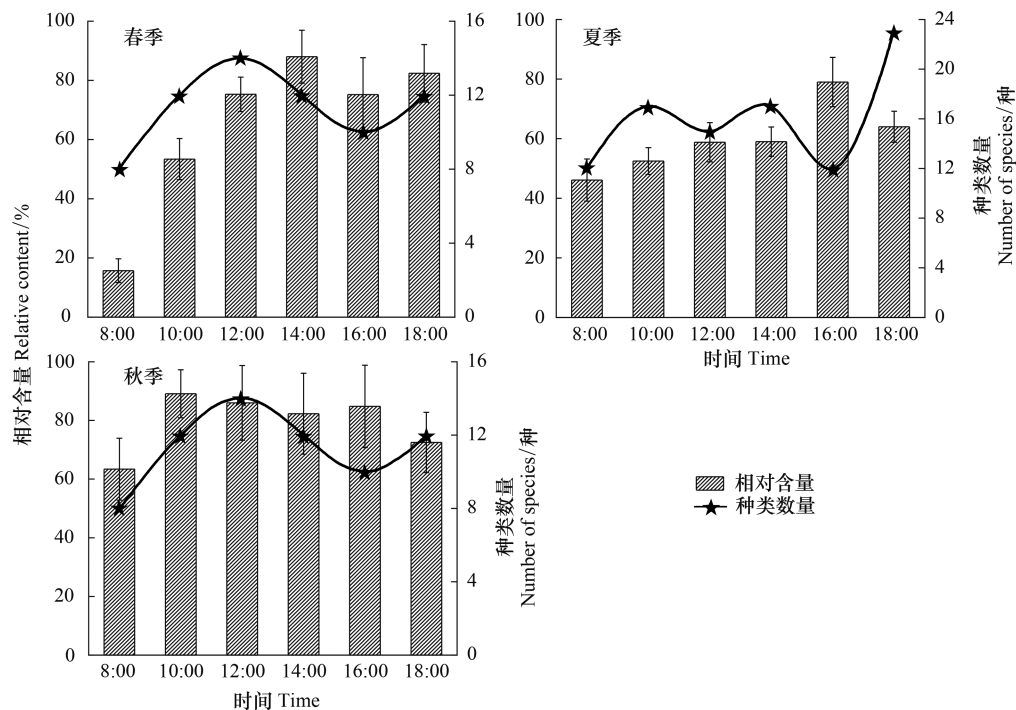


图 1 侧柏生长季释放有益 BVOCs 成分总相对含量和种类数量变化

Fig.1 Changes in total relative content and species quantity of BVOCs released during the growth season of *Platycladus orientalis*

如图 1,夏季有益 BVOCs 的相对含量呈现出倒“V”型的日变化趋势,与春季不同,夏季侧柏在下午和傍晚释放的有益 BVOCs 含量最高,而早晨的含量较低。夏季有益 BVOCs 的主要成分包括 3-蒎烯、松油烯和右旋萜二烯等。这些化合物是夏季侧柏挥发过程中的关键组分,具有对环境和人类健康有益的特性。在一天中的特定时间点,有益 BVOCs 的相对含量达到峰值的时间为 16:00,含量最高达到 79.0%。相比之下,18:00 和 08:00 的含量较低,分别为 64.0%和 46.1%。这意味着夏季侧柏在下午释放的有益 BVOCs 含量最高。一天中不同时间点,侧柏释放的有益 BVOCs 成分种类的总数量大小排序为 18:00>10:00=14:00>12:00>08:00=16:00。其中,18:00 的种类最多,共有 23 种不同的有益 BVOCs 成分,而 16:00 仅有 12 种。这意味着夏季侧柏在傍晚释放的有益 BVOCs 成分种类最为丰富。夏季有益 BVOCs 的含量呈现出“倒 V”型的日变化趋势,下午和傍晚释放的含量最高,而早晨较低。3-蒎烯、 β -蒎烯、右旋萜二烯等化合物是夏季有益 BVOCs 的主要成分。夏季侧柏在傍晚释放的有益 BVOCs 含量最高且种类最多,这些研究结果有助于更深入地了解夏季侧柏植物的生物活性和对环境的影响。

如图 1,秋季有益 BVOCs 的相对含量呈现出“M”型的日变化趋势,与春季和夏季相比,秋季侧柏在上午释放的有益 BVOCs 含量较高,而傍晚和早晨的含量较低。秋季有益 BVOCs 的主要成分包括 3-蒎烯、 α -蒎烯和 β -蒎烯等。这些化合物是秋季侧柏挥发过程中的关键组分,具有对环境和人类健康有益的特性。在一天中的

特定时间点,有益 BVOCs 的相对含量达到峰值的时间为 10:00 和 16:00,分别达到 89.1%和 84.8%。相比之下,08:00 以及 14:00 和 18:00 的含量较低,其中 08:00 的相对含量最低,仅为 63.4%。这表明秋季侧柏在上午释放的有益 BVOCs 含量最高。一天中不同时间点,侧柏释放的有益 BVOCs 成分种类的总数量大小排序为 08:00=16:00>10:00>18:00>14:00>12:00。其中,16:00 释放的种类数量最多,共有 16 种不同的有益 BVOCs 成分,而 12:00 和 14:00 的种类数量相同,均为最小值 11 种。这意味着秋季侧柏在傍晚释放的有益 BVOCs 成分种类最为丰富。综上所述,秋季侧柏释放的有益 BVOCs 成分的相对含量和种类数量呈现出与春季和夏季截然不同的日变化趋势。上午是有益 BVOCs 含量较高的时段,而傍晚和早晨的含量较低。3-萜烯、 β -蒎烯、右旋萜二烯等化合物是秋季有益 BVOCs 的主要成分。在上午的峰值时间点,有益 BVOCs 的含量最高,而傍晚和早晨的含量较低。此外,傍晚释放的有益 BVOCs 成分种类最为丰富。这些研究结果有助于进一步了解秋季侧柏植物的生物活性和对环境的影响。

综上所述,侧柏释放的有益 BVOCs 成分的相对含量和种类数量在不同季节和时间点呈现出差异。季节对侧柏 BVOCs 的释放具有显著影响,并且可能存在其他因素影响其释放和组成。这些研究结果对于进一步理解植物 BVOCs 的释放机制和生态功能具有重要意义。

2.1.2 侧柏释放有益 BVOCs 各组分含量日变化

在侧柏春季的一天中的不同时段,烯烴类化合物是主要的有益成分,共有 13 种(图 2,图 3)。其中,(1R)-(+)- α -蒎烯是平均含量最高的成分,达到 23.84%。其他重要的烯烴类化合物包括右旋萜二烯(7.90%)、 β -蒎烯(8.41%)、桉烯(7.04%)、 α -蒎烯(2.30%)、萜品油烯(2.60%)和柠檬烯(2.58%)等。这些烯烴类化合物在侧柏春季释放的有益 BVOCs 中起到重要作用,其相对含量较高,种类数量也较多。醛类化合物共有 3 种,相对含量较低。具体成分和含量未提供,因此无法对其详细特征进行描述。酯类和醇类化合物各有 2 种,相对含量也较低。具体成分和含量未提供,因此对它们的具体特征无法提供更多信息。酮类和其他类化合物各有 1 种,相对含量较低。具体成分和含量未提供,因此对它们的详细特征也无法提供更多信息。这些结果有助于进一步了解侧柏在春季释放的有益挥发物的特征。然而,为了更全面地了解侧柏春季释放的有益 BVOCs,要获得其他类化合物的具体成分和含量,以及它们在整体释放中的作用。

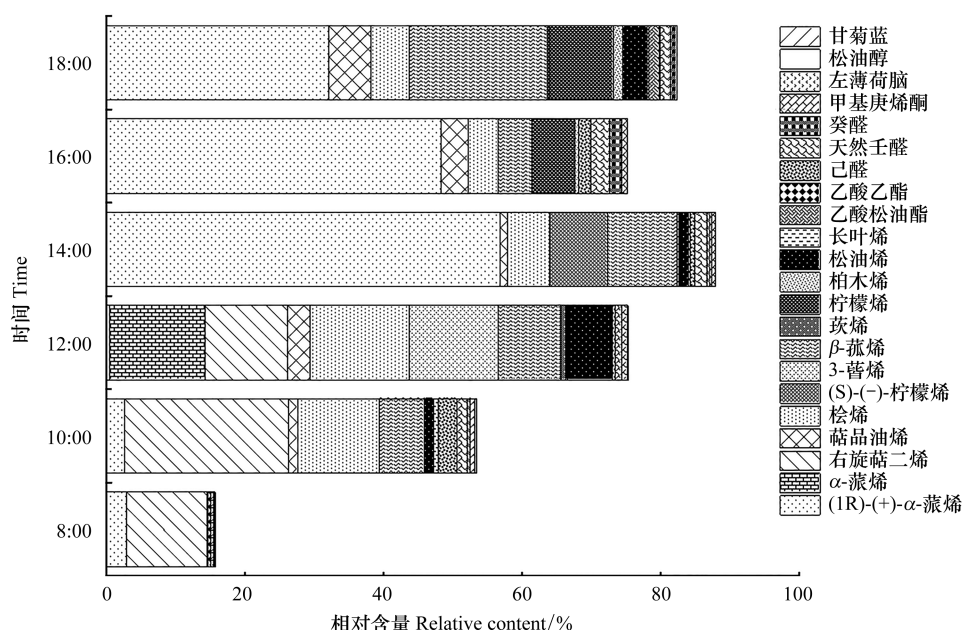


图2 侧柏春季释放有益 BVOCs 组分含量

Fig.2 Content of beneficial BVOCs components released by *Platycladus orientalis* in spring

研究结果显示,在侧柏夏季的六个时段中,烯烃类化合物是主要的有益成分,其释放量和种类数量最多(图4,图5)。这意味着侧柏在夏季主要通过释放烯烃类化合物来发挥其有益作用。烯烃类化合物的相对含量变化趋势与总有益 BVOCs 成分的相对含量变化趋势一致,呈现出“N”型曲线。在夏季的 14:00 时段,烯烃类化合物的相对含量达到最高峰值,占总有益 BVOCs 的 84.27%。其中,(1R)-(+)- α -蒎烯是六个时段中平均相对含量最高的化合物,达到 23.84%。另外,尽管醛类化合物的含量较少,但除了烯烃类化合物之外,它是在全天都能检测到的另一类化合物。醛类化合物的相对含量变化呈现“M”型曲线。在夏季,只检测到了天然壬醛(1.43%)、己醛(0.96%)和癸醛(0.70%)这三种醛类化合物。此外,其他四类化合物的相对含量较低,甚至只在特定时刻检测到一种化合物。例如,酯类化合物仅在 8:00 和 18:00 各检测到一种化合物,分别是乙酸乙酯(0.07%)和乙酸松油酯(0.25%);酮类化合物仅在 10:00 至 16:00 期间检测到甲基庚烯酮(平均含量 0.48%);醇类化合物仅在 8:00 至 14:00 期间检测到左薄荷脑(0.05%)和松油醇(0.01%);此外,在 8:00 时刻检测到了甘菊蓝(0.01%)。总体来说,(1R)-(+)- α -蒎烯、蒎品油烯和天然壬醛是夏季全天各时段均能检测到的有益 BVOCs 成分。这些结果有助于进一步了解侧柏在夏季释放的有益挥发物的特征,提供了对其化学组成和释放模式的详细了解。对于深入研究侧柏植物的生态行为、环境适应性以及其对生态系统的影响,这些成分的释放具有重要意义。

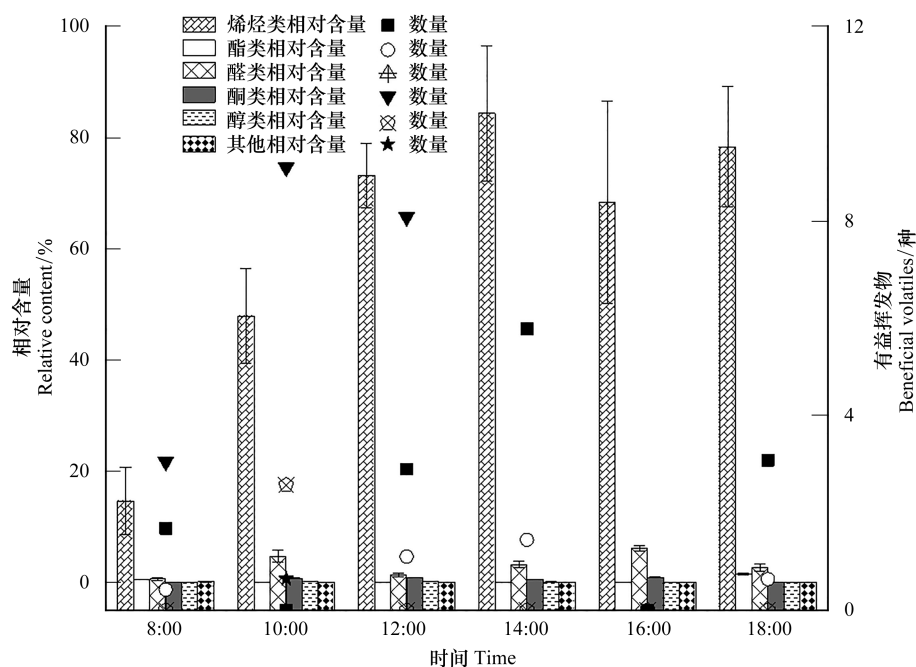


图3 侧柏春季释放有益 BVOCs 相对组分含量

Fig.3 Relative Component Content of Beneficial BVOCs Released by *Platycladus orientalis* in Spring

在整个夏季的时间段中,除了 16:00 时段外,烯烃类化合物在相对含量和种类数量上都表现出最高的水平。主要的烯烃类化合物包括 α -蒎烯(平均含量为 9.82%)、(S)-(-)-柠檬烯(6.98%)、罗勒烯(6.09%)、乙酸叶醇酯(5.15%)、月桂烯(4.79%)等多种物质。这些成分的释放对于进一步了解侧柏在夏季释放的有益挥发物具有重要意义,为深入了解侧柏植物的生态行为和环境适应性提供了有价值的信息。

不同类别的化合物在不同时段表现出不同的变化趋势,其中烯烃类、醛类、酮类和酯类化合物是持续存在的主要成分。侧柏在秋季一天中释放的有益 BVOCs 可以分为醛类、酮类、酯类和烯烃类等化合物。烯烃类化合物在 12:00 达到最高峰值,相对含量达到 50.95%。主要成分包括 α -蒎烯、月桂烯和(S)-(-)-柠檬烯罗勒烯等。主要的醛类化合物包括己醛、天然壬醛和癸醛;酮类化合物只检测到甲基庚烯酮。有机酸类和其他类

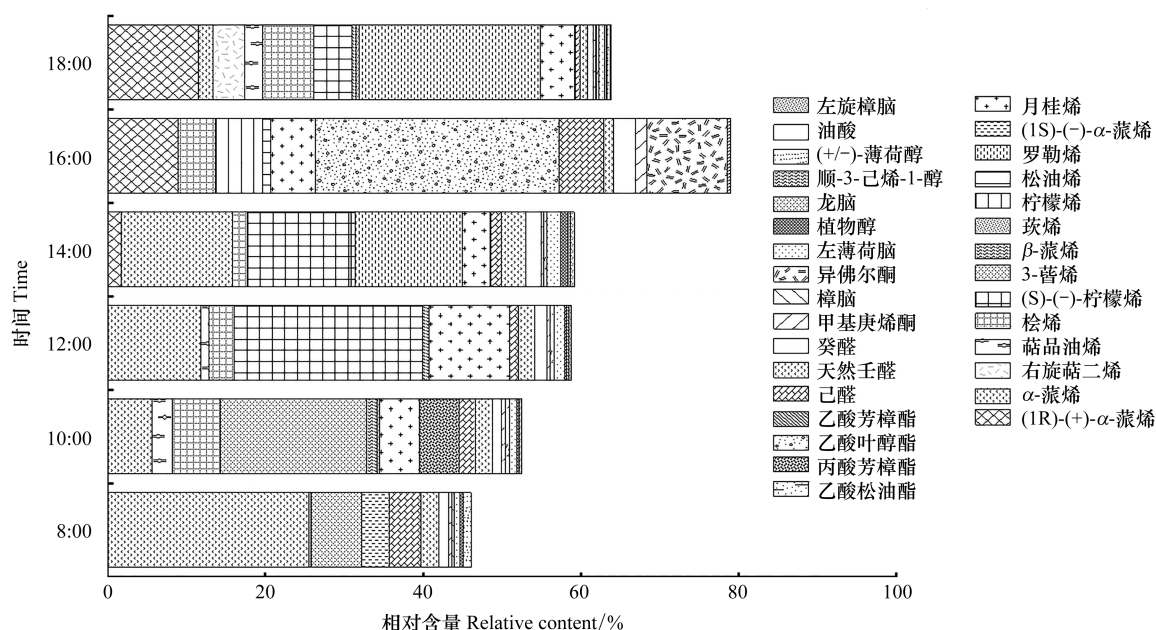


图4 侧柏夏季释放有益 BVOCs 组分含量

Fig.4 Content of beneficial BVOCs components released by *Platycladus orientalis* in summer

化合物仅有一种物质,且含量较低。在 16:00 检测到油酸(0.11%),而左旋樟脑在 10:00 到 14:00 期间可检测到,日均含量为 0.18%。这些研究结果提供了侧柏植物在秋季释放的有益 BVOCs 的详细成分和日变化趋势。进一步的研究可以进一步探索这些化合物的生理作用和对环境的影响,从而更深入地了解侧柏植物在秋季释放有益 BVOCs 的特征。这些结果对于理解植物的生长和适应策略,并为环境保护和生态管理提供科学依据具有重要意义。

如图 6—图 7,侧柏在秋季一天中的不同时段释放的有益 BVOCs 成分,成烯炔类化合物在种类数量和相对含量上占据主导地位。这些烯炔类化合物包括 3-萜烯(平均含量为 44.71%)、 β -蒎烯(12.21%)、右旋萜二烯(9.70%)、 α -蒎烯(5.35%)、松油烯(1.41%)、石竹烯(1.32%)和茨烯(1.10%)等物质。这些烯炔类化合物在秋季侧柏释放的有益 BVOCs 中起到重要作用。它们的相对含量最高,且种类数量最多。这些结果对于进一步了解侧柏在秋季释放的有益挥发物具有重要意义,有助于深入研究侧柏植物在不同季节的挥发性有机化合物的释放规律及其环境效应。

垂柳的有益 BVOCs 中不同类别的化合物在一天中的释放呈现不同的日变化趋势。首先,除了烯炔类化合物外,其他五类化合物的相对含量都很低。烯炔类、醛类和醇类化合物在各个时段都有释放。烯炔类化合物的日动态变化趋势呈倒“V”型。其中,在 10:00 时达到最高峰值,相对含量为 86.22%。主要的烯炔类化合物包括 3-萜烯、松油烯、 β -蒎烯和右旋萜二烯等物质。醛类和醇类化合物的变化规律相似。它们在 08:00 至 12:00 时呈下降趋势,12:00 后逐渐上升,在 14:00 至 18:00 又呈下降趋势。两者在 14:00 时达到相对含量的最高峰值,醛类为 2.14%,醇类为 0.65%。主要的醛类成分包括癸醛和天然壬醛,而醇类成分包括薄荷醇和植物醇。酯类化合物在 08:00 至 12:00 时呈下降趋势,在 14:00 未释放,而在 16:00 至 18:00 时呈大幅度下降趋势。主要的有益酯类成分包括乙酸冰片酯和乙酸松油酯。酮类和其他类化合物只检测到一种物质。樟脑只在 10:00 和 14:00 至 16:00 时释放,而甘菊蓝仅在 08:00 时释放。综上所述,垂柳的有益 BVOCs 中不同类别的化合物在一天中的释放呈现不同的日变化趋势。烯炔类化合物在 10:00 时达到高峰,醛类和醇类在 14:00 时达到高峰,酯类在 14:00 未释放,而酮类和其他类化合物的释放相对较少且时间点有限。这些研究结果对于深入了解垂柳植物在春季释放的有益挥发性有机化合物的动态变化有重要的参考价值。

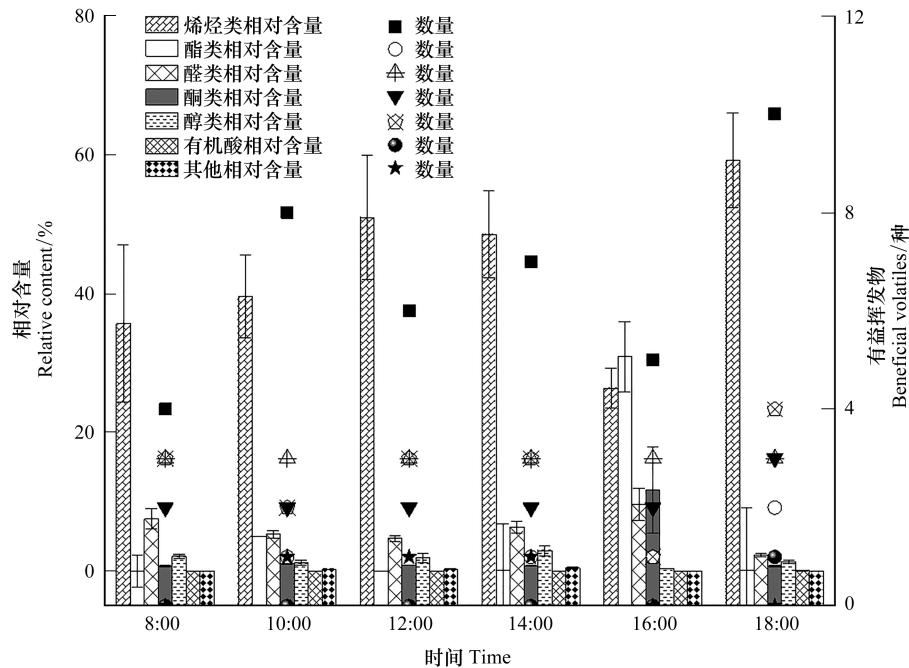


图5 侧柏夏季释放有益 BVOCs 相对含量

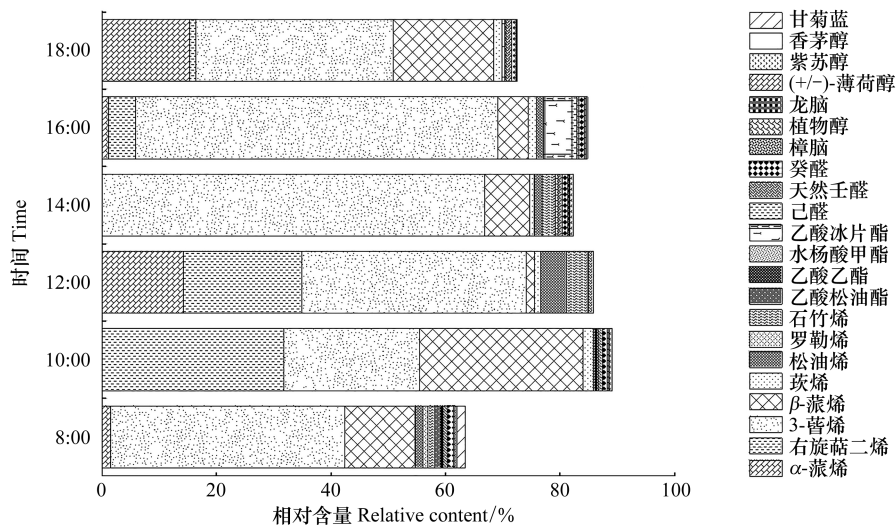
Fig.5 Relative content of beneficial BVOCs released by *Platycladus orientalis* in summer

图6 侧柏秋季释放有益 BVOCs 组分含量

Fig.6 Content of beneficial BVOCs components released by *Platycladus orientalis* in autumn

2.2 垂柳释放有益 BVOCs 组分的日变化特征

2.2.1 垂柳释放有益 BVOCs 相对含量和种类数量日变化

根据图8的数据显示,垂柳在春季释放的有益挥发性有机化合物(BVOCs)成分的相对含量和种类数量在一天中呈现较大的差别。具体而言,垂柳春季释放的有益 BVOCs 的相对含量在一天中的日变化趋势呈现倒“V”型。主要的有益成分包括(1R)-(+)- α -蒎烯、柠檬烯、乙酸叶醇酯、天然壬醛、癸醛、乙酸乙酯和顺-3-己烯-1-醇等物质。此外,垂柳春季释放的有益 BVOCs 的种类数量在一天中也有所变化。具体而言,12:00 时种类数量最多,共有 15 种有益 BVOCs 释放,而 16:00 时种类数量最少,仅有 11 种释放。因此,可以得出结论,

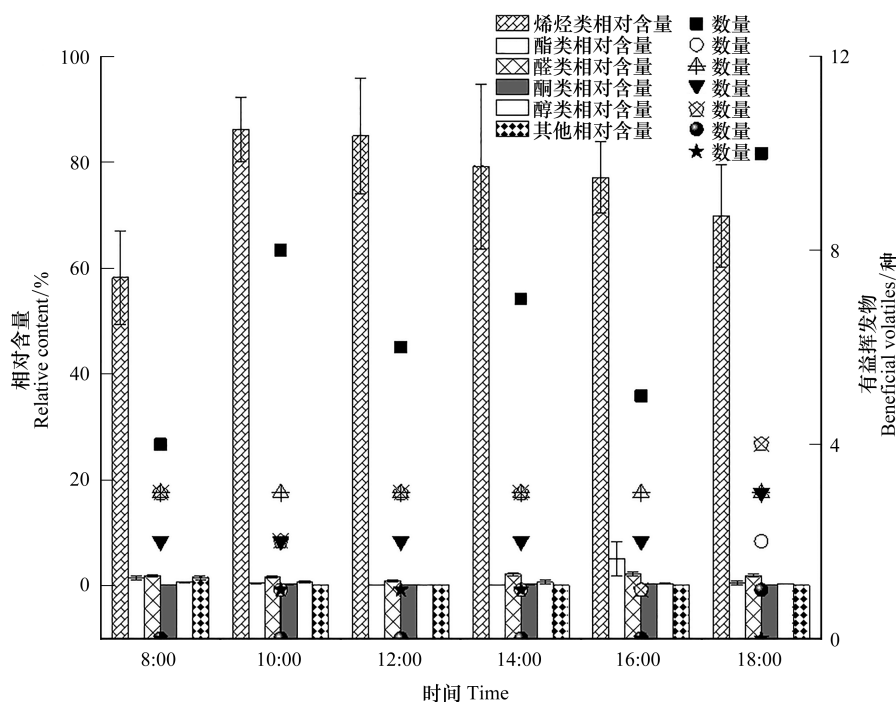


图7 侧柏秋季释放各类有益 BVOCs 相对含量

Fig.7 Relative content of beneficial BVOCs released by *Platycladus orientalis* in autumn

垂柳春季释放的有益 BVOCs 在一天中的相对含量和种类数量存在明显的日变化趋势。其中,14:00 是高峰期,而 08:00 和 18:00 是低谷期。同时,不同时间段也会影响有益 BVOCs 的种类数量。这些研究结果对于深入了解垂柳植物在春季释放的有益挥发性有机化合物的动态变化具有重要意义。进一步研究可以探索这些变化背后的生理和环境因素,以及其对大气化学和生态系统的影响机制。

如图 8,夏季垂柳释放有益 BVOCs 成分相对含量和种类数量日变化趋势基本一致,大体为倒“V”型。有益成分主要有乙酸叶醇酯、顺-3-己烯-1-醇、癸醛、异佛尔酮、天然壬醛、己醛和左薄荷脑。一天中的高峰值出现在 12:00,含量为 34.14%;低谷值出现在 08:00 和 18:00,以 08:00 相对含量最低(8.47%)。垂柳夏季释放有益 BVOCs 的种类在一天中不同时间点总数量大小排序为 14:00>12:00>10:00>16:00>08:00=18:00。14:00 种类最多,为 16 种;08:00 和 18:00 种类最少,均只释放 8 种。如图 8,秋季垂柳释放有益 BVOCs 成分相对含量和种类数量日变化趋势有较大差别。垂柳在秋季释放的有益成分相对含量日变化趋势近似“N”型,有益成分主要有顺-3-己烯-1-醇、乙酸叶醇酯、癸醛、天然壬醛、己醛、3-萜烯和乙酸乙酯。高峰值出现在 12:00,含量为 63.90%;低谷值出现在 16:00,相对含量为 33.76%。垂柳秋季释放有益 BVOCs 种类在一天中不同时间点总数量大小排序为 10:00>12:00>08:00>18:00>16:00>14:00。以 10:00 种类最多,释放出 13 种;14:00 种类最少,仅 7 种。

垂柳在春夏秋三个季节中释放的有益挥发性有机化合物(BVOCs)在 12:00 至 14:00 之间达到高峰期,而在上午或下午则出现低谷期。不同季节的有益 BVOCs 相对含量和种类数量的日变化趋势各不相同,并且它们之间的相关关系并不明显。垂柳在不同季节的有益 BVOCs 释放表现出昼夜变化的规律,但各季节之间的变化趋势和相关关系存在差异。这些研究结果对于深入了解垂柳植物在不同季节释放的有益挥发性有机化合物的动态变化具有重要意义。进一步的研究可以探索这些变化背后的生理和环境因素,以及其对大气化学和生态系统的影响机制。这些研究结果有助于更好地理解植物的生长和适应性策略,并为环境保护和生态管理提供科学依据。通过了解垂柳植物在不同季节释放的有益 BVOCs 的动态变化,我们可以更好地评估其对大气质量和生态系统健康的影响,并制定相应的管理和保护措施。

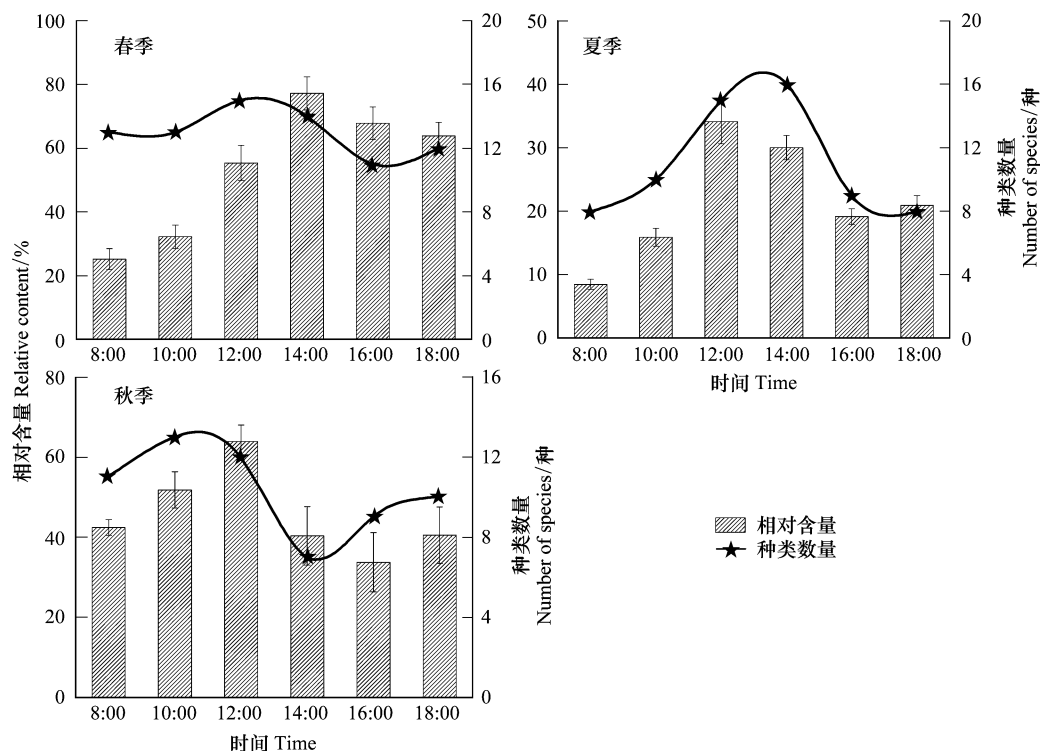


图8 垂柳生长季释放有益 BVOCs 成分总相对含量和种类数量变化

Fig.8 Changes in the total relative content and species quantity of beneficial BVOCs released during the growth season of *Salix babylonica*

2.2.2 垂柳释放有益 BVOCs 各组分含量日变化

春季 1 天中垂柳释放有益 BVOCs 包括烯烃类 10 种、酯类 5 种、醛类和醇类各 3 种、酮类和其他类各 1 种 (图 9, 图 10)。总体看来,各时段垂柳释放有益 BVOCs 均以烯烃类化合物为主,酯类和醛类次之。主要成分为(1R)-(+)- α -蒎烯(平均含量 14.92%)、柠檬烯(6.99%)、乙酸叶醇酯(5.52%)、天然壬醛(5.00%)、癸醛(2.41%)、乙酸乙酯(2.33%)和顺-3-己烯-1-醇(2.24%)等物质。

除其他类化合物,其余 5 类化合物在 1 天中 6 个时段均有释放,各类化合物变化趋势不同。垂柳释放烯烃类化合物在全天各时段相对含量均最高,动态变化呈倒“N”型曲线,12:00 出现最高值,为 43.44%,主要成分为(1R)-(+)- α -蒎烯、柠檬烯、 β -蒎烯(2.17%)、柏木烯(1.45%)、右旋萜二烯(1.39%)和(S)-(-)-柠檬烯(1.38%)。酯类和酮类变化规律较一致,08:00—16:00 呈上升趋势,16:00 之后逐渐下降,二者相对含量均在 16:00 出现高峰值,酯类化合物为 19.45%,酮类化合物为 2.04%。主要酯类成分有乙酸叶醇酯、乙酸乙酯和乙酸松油酯(1.41%),醇类化合物 08:00—14:00 呈上升趋势,14:00 相对含量最高,值为 8.70%,14:00—16:00 逐渐下降,之后缓慢上升,顺-3-己烯-1-醇为主要有益醇类物质。垂柳仅在 18:00 释放甘菊蓝(1.37%)一种其他类化合物,含量较低。

垂柳在夏季 1 天中各时段释放有益 BVOCs 共鉴定出 23 种,6 类化合物,其中醇类 7 种,烯烃类和酯类各 4 种,醛类和酮类各 3 种,其他类 2 种(图 11, 图 12)。总体看来,垂柳在各时段释放有益 BVOCs 中醛类化合物相对含量较高(图 13, 图 14),主要成分为乙酸叶醇酯(平均含量 4.73%)、顺-3-己烯-1-醇(2.82%)、癸醛(2.79%)、异佛尔酮(2.76%)、天然壬醛(2.41%)、己醛(1.63%)和左薄荷脑(1.07%)等物质。

1 天中 6 个时段,6 类有益化合物变化趋势不很一致,醇类、酯类、醛类和酮类化合物在各时段均能检测到。醛类和酮类化合物相对含量日变化趋势均呈“N”型曲线。醛类在 10:00 出现最高值,为 9.07%,主要成分有癸醛、天然壬醛和己醛;酮类化合物最高值出现在 14:00,为 5.89%,释放主要成分有异佛尔酮和甲基庚烯

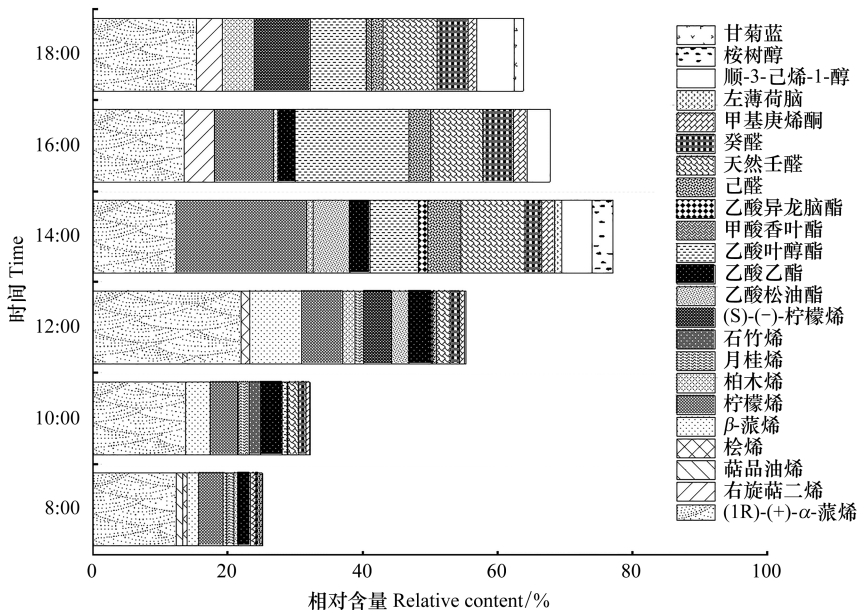


图 9 垂柳春季释放有益 BVOCs 组分含量

Fig.9 Content of beneficial BVOCs components released by *Salix babylonica* in spring

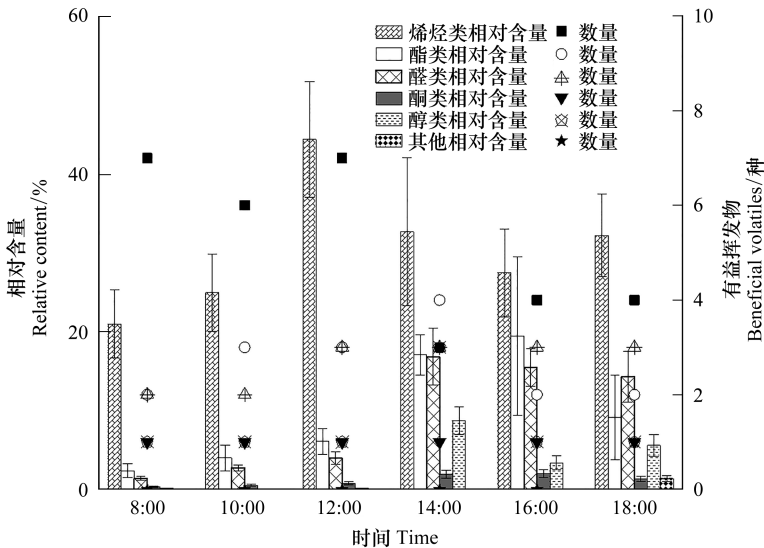


图 10 垂柳春季释放各类有益 BVOCs 相对含量

Fig.10 Relative content of beneficial BVOCs released by *Salix babylonica* in spring

酮(0.90%)。醇类在 08:00—14:00 逐渐上升,14:00 出现最高值,为 7.71%,之后开始下降,主要成分有顺-3-己烯-1-醇和左薄荷脑。酯类化合物动态变化与总有益 BVOCs 成分相对含量变化趋势一致,均在 12:00 相对含量最高,值为 13.92%,成分主要为乙酸叶醇酯。烯烃类和其他类化合物相对含量较低。烯烃类仅在 08:00—14:00 释放,08:00—10:00 缓慢下降,之后逐步上升至 14:00,最高值为 2.54%,主要成分为长叶烯和 (1R)-(+)-α-蒎烯;其他类仅在 08:00—16:00 释放,主要成分为左旋樟脑和甘菊蓝。

垂柳在秋季一天中释放了 19 种有益挥发性有机化合物 (BVOCs),这些化合物涵盖了 6 类不同的化合物。秋季垂柳释放的有益 BVOCs 主要以醇类化合物的相对含量较高。其中,顺-3-己烯-1-醇是主要成分之一,平

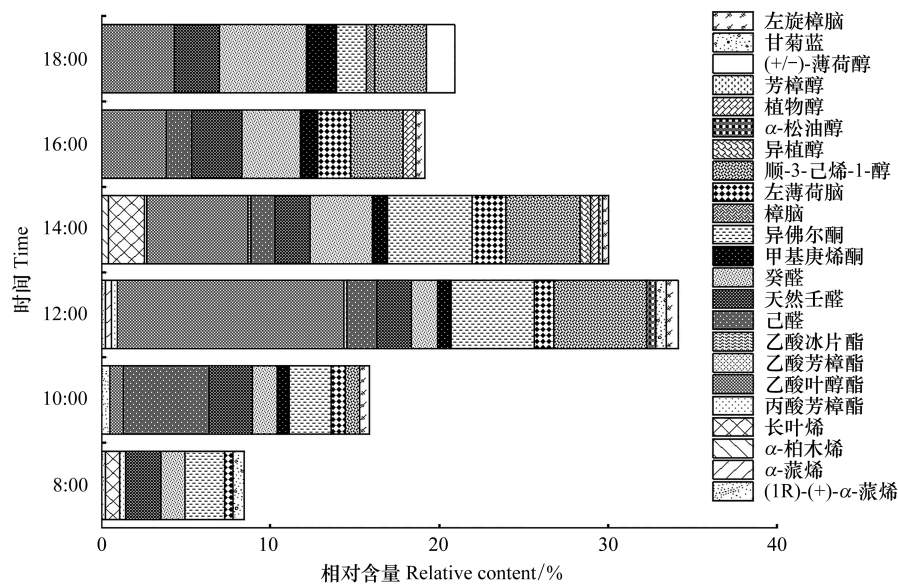


图 11 垂柳夏季释放有益 BVOCs 组分含量

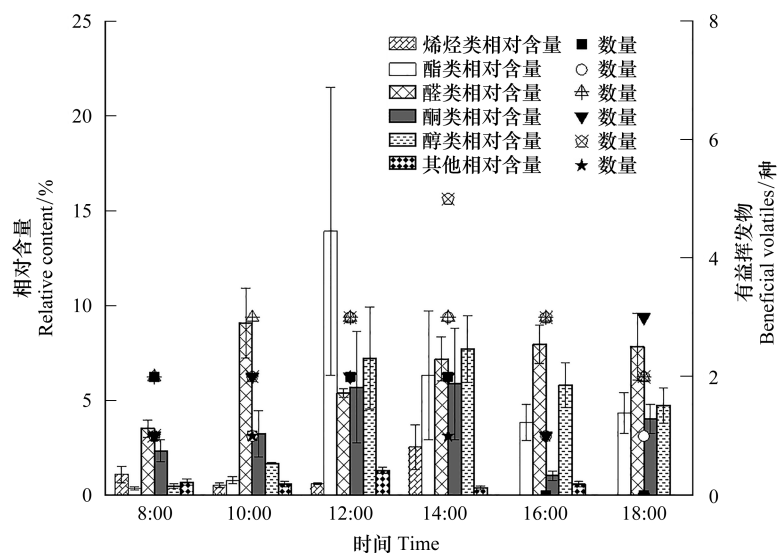
Fig.11 Content of beneficial BVOCs components released by *Salix babylonica* in summer

图 12 垂柳夏季释放各类有益 BVOCs 相对含量

Fig.12 The relative content of various beneficial BVOCs released by *Salix babylonica* in summer

均含量达到 17.78%。其他重要成分包括乙酸叶醇酯 (5.04%)、癸醛 (2.98%)、天然壬醛 (2.98%)、己醛 (2.95%)、3-萜烯 (2.45%) 和乙酸乙酯 (2.17%) 等。根据这些结果, 可以得出结论: 垂柳在秋季释放的有益 BVOCs 主要以醇类化合物为主, 其中顺-3-己烯-1-醇是主要成分之一。这些化合物可能对环境 and 人体健康产生积极的影响。然而, 为了更全面地了解这些化合物的具体功效和影响, 还需要进一步深入研究。这将有助于更好地理解垂柳秋季释放的有益 BVOCs 对环境 and 人体健康的潜在作用, 并为相关领域的进一步应用提供科学依据。

1 天中 6 个时段, 6 类有益化合物相对含量日变动趋势各不相同, 其中醇类、醛类和烯烃类化合物在各时段均有释放。醛类化合物日动态呈“W”曲线, 谷值出现在 12:00 和 16:00, 最高值 (12.99%) 出现在 08:00, 主

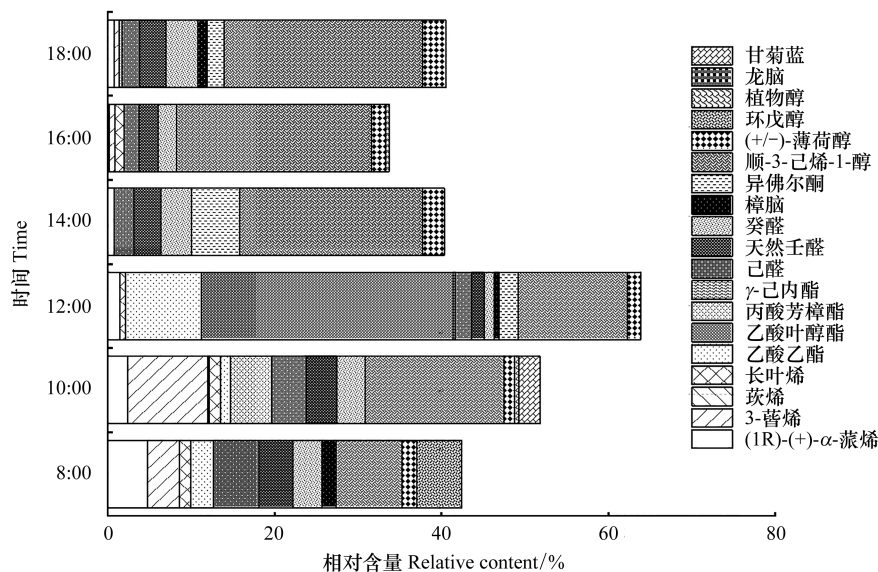


图 13 垂柳秋季释放有益 BVOCs 组分含量

Fig.13 Content of beneficial BVOCs components released by *Salix babylonica* in autumn

要成分为癸醛、天然壬醛和己醛。烯烃类化合物在各时段波动较大,10:00 出现相对含量最高值(13.50%),主要有益成分为 3-萜烯和(1R)-(+)- α -蒎烯(1.73%)。酯类化合物仅在 08:00—12:00 和 18:00 出现,在 08:00—12:00 呈上升趋势,12:00 相对含量最高,值为 39.51%,主要成分有乙酸叶醇酯和乙酸乙酯。酮类化合物在 10:00 和 16:00 未释放,最高值出现在 14:00,相对含量为 5.77%,主要成分有异佛尔酮(1.66%)和樟脑(0.57%)。垂柳仅在 10:00 释放甘菊蓝一种其他类化合物,日均含量(0.43%)较低。

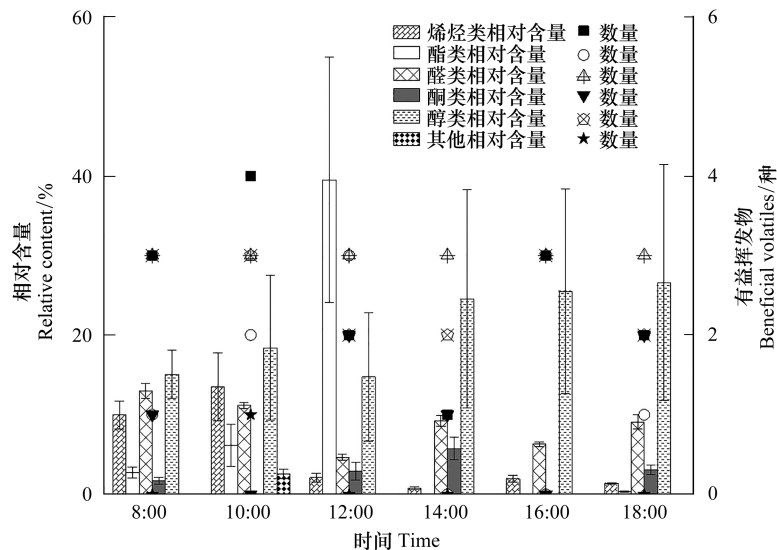


图 14 垂柳秋季释放各类有益 BVOCs 相对含量

Fig.14 Relative content of beneficial BVOCs released by *Salix babylonica* in autumn

3 讨论

一天中,植物 BVOCs 合成和释放与自身生长调节机制及光照、温度、空气相对湿度等周围环境因子变化

关系密切,且不同树种枝叶间挥发物存储、输送、合成机理不同,有益 BVOCs 作为其重要组分亦受上述因子综合作用^[22]。本研究侧柏和垂柳枝叶有益 BVOCs 相对含量和种类数量表现一定日变化节律。

研究表明,侧柏在春、夏、秋三个季节一天中释放的有益挥发物类别的日变化趋势不同,主要以烯烃类化合物为主^[23]。具体而言,烯烃类化合物的相对含量在不同时间段有所差异,但总体上呈现出春季呈“N”型,夏季呈倒“V”型,秋季呈“M”型的变化趋势。结论显示,侧柏在一天中不同时间段释放的有益挥发物类别和含量呈现出规律性的变化,受到光照和温度等因素的影响^[24-25]。挥发物的释放与气孔导度和挥发性组分的储存量密切相关,同时也受到枝叶生长损伤程度和环境条件的影响^[26]。然而,在实际操作过程中,气候特殊性、天气条件、人为误差以及植物生理差异等因素可能对实验结果产生影响^[27]。此外,非主要组分也可能对总有益挥发物的日变动产生综合作用。这些研究结果对于深入了解侧柏植物的生长特性以及挥发物释放机制具有重要意义。进一步的研究可以帮助更好地了解植物对环境变化的响应,并为植物生长管理和环境保护提供科学依据。

研究发现,垂柳和侧柏在不同季节的生长过程中,释放的有益挥发物的相对含量差异并不大。然而,垂柳在春、夏、秋三个季节的相对含量呈现出有规律的单峰曲线。具体来说,在 12:00 和 14:00 之间,垂柳释放的有益挥发物达到高峰期。值得注意的是,不同季节的高峰期主要组分有所不同,但整体而言,酯类是其中的主要组分之一^[28]。综合上述观察结果,可以得出结论:垂柳的有益挥发物释放受到光照和温度的影响,并呈现出昼夜变化的特点。此外,挥发物的释放和当日光合速率变化趋势之间存在正向相关关系。以上研究结果对于了解垂柳植物的生长特性以及其与环境因素之间的相互作用具有重要意义^[29-31]。这些发现有助于深入研究植物的挥发物释放机制,并为环境保护和植物生长调控提供一定的参考依据。

本研究选择与王君怡^[15]采样时期比较接近的春季和夏季比较分析两实验中侧柏与垂柳挥发物日释放动态。一天中侧柏释放挥发物与有益 BVOCs 均以烯烃类化合物相对含量最高,烯烃类日变化趋势自 08:00 逐渐上升至 18:00,但各组分变化与此存在差异(在全天各时段均可能出现释放高峰期)。研究发现春季一天中垂柳释放烯烃类、酯类、醛类和醇类有益类别含量较高,主要有益组分包括(1R)-(+) - α -蒎烯、乙酸叶醇酯、天然壬醛等,各有益类别日变化趋势大体相同,均在午后。挥发物与有益挥发物之间各类别和组分日变动存在一定相似和差异性,这与挥发物间交互作用、植物自身及外界环境因子影响机制密不可分。

侧柏和垂柳是两种树种,它们在不同季节释放有益挥发性有机化合物(BVOCs),这些化合物对人体健康功能可能产生影响,但目前仍存在不确定性^[32-34]。侧柏和垂柳树种在三个季节的 BVOCs 释放动态表现有一定共通性,但具体含量和趋势在不同季节有所变化。在春夏两季,BVOCs 的含量在下午较高,而在秋季则相反,在下午较低。研究显示,侧柏和垂柳在春季和夏季的相对 BVOCs 含量较低,特别是在早上 8 点时较为明显。然而,目前的研究主要关注相对 BVOCs 的含量,并且这些含量相对较低,因此无法确定其对人体健康功能的影响程度较小。此外,目前还没有文献支持有益 BVOCs 的含量越高,其保健效果就越强的结论。因此,未来的研究需要深入探究有益 BVOCs 的理化性质和组成含量,以进一步了解它们对人体健康的影响。这将有助于更好地理解侧柏和垂柳树种释放的 BVOCs 对人体健康的潜在作用,并为相关保健效果提供更多科学依据。

4 结论

(1) 在春季、夏季和秋季的生长季,侧柏和垂柳在一天中释放的有益 BVOCs 成分主要包括烯烃类、酯类、醛类、酮类、醇类和其他类共 6 类化合物。夏季的侧柏 BVOCs 释放中还存在微量的有机酸成分,与其他季节有所不同。总体而言,侧柏在一天中释放的有益 BVOCs 的相对含量高于垂柳。

(2) 侧柏和垂柳在生长季中释放的总有益挥发物种数和相对含量表现出一定的共性,并呈现出明显的日变化规律。首天中的总有益挥发物释放呈现出高峰期和低谷期。高峰期多出现在正午前后,而低谷期则在高峰期前后出现。在春夏季节,侧柏和垂柳的总有益挥发物相对含量下午高于上午。在秋季,侧柏和垂柳的总

有益挥发物相对含量在下午低于上午。

(3) 生长季,侧柏和垂柳释放总有益挥发物日变化存在变动差异性。侧柏有益 BVOCs 春季日变化波动较大,呈“N”型,秋季侧柏和垂柳日变化波动较小,呈“M”型,相对含量在 10:00—16:00 较高。垂柳在三季一天中相对含量均呈有规律单峰曲线。

参考文献 (References):

- [1] 陈晓亚,王凌健,毛颖波,杨长青. 植物萜类生物合成与抗虫反应. 生命科学, 2015, 27(7): 813-818.
- [2] Dudareva N, Klemptner A, Muhlemann J K, Kaplan I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. The New Phytologist, 2013, 198(1): 16-32.
- [3] Mercke P, Kappers I F, Verstappen F W A, Vorst O, Dicke M, Bouwmeester H J. Combined transcript and metabolite analysis reveals genes involved in spider mite induced volatile formation in cucumber plants. Plant Physiology, 2004, 135(4): 2012-2024.
- [4] 陈俊刚. 森林植物排放挥发性有机物及对二次污染物生成的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [5] 刘荣家. 杭州半山国家森林公园典型常绿阔叶树种及其混交林挥发性有机物释放研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [6] 黄麟. 造林气候调节效应及其影响机理研究进展. 生态学报, 2021, 41(2): 469-478.
- [7] 邓小勇. 深圳市常见芳香植物挥发性有机物释放特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [8] Park B J, Tsunetsugu Y, Kasetani T, Morikawa T, Kagawa T, Miyazaki Y. Physiological effects of forest recreation in a young conifer forest in Hinokage Town, Japan. Silva Fennica, 2015, 43(2): 291-301.
- [9] 王凌健, 方欣, 杨长青, 李建戌, 陈晓亚. 植物萜类次生代谢及其调控. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(12): 1030-1046.
- [10] Vakilian K, Atarha M, Bekhradi R, Chaman R. Healing advantages of lavender essential oil during episiotomy recovery: a clinical trial. Complementary Therapies in Clinical Practice, 2011, 17(1): 50-53.
- [11] Horiuchi M, Endo J, Takayama N, Murase K, Nishiyama N, Saito H, Fujiwara A. Impact of viewing vs. not viewing a real forest on physiological and psychological responses in the same setting. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(10): 10883-10901.
- [12] 李敏. 杉木、马尾松精油抑菌效能及园林应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [13] 冯青, 高群英, 张汝民, 高岩, 侯平. 3 种百合科植物挥发物成分分析. 浙江农林大学学报, 2011, 28(3): 513-518.
- [14] 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.
- [15] 王君怡. 北京地区 8 种典型景观树种释放挥发性有机物 (BVOCs) 动态变化特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [16] 谢小洋. 西安市主要绿化树种 VOCs 组成及释放规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [17] 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.
- [18] Aaltonen H, Pumpanen J, Pihlatie M, Hakola H, Hellén H, Kulmala L, Vesala T, Bäck J. Boreal pine forest floor biogenic volatile organic compound emissions peak in early summer and autumn. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(6): 682-691.
- [19] Son Y S, Kim K J, Jung I H, Lee S J, Kim J C. Seasonal variations and emission fluxes of monoterpene emitted from coniferous trees in East Asia: focused on *Pinus rigida* and *Pinus koraiensis*. Journal of Atmospheric Chemistry, 2015, 72(1): 27-41.
- [20] 高媛. 5 种园林绿化树种 BVOCs 排放动态及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [21] 贾晓轩. 北京地区银杏、红松纯林挥发性有机物释放研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [22] 李新岗, 刘惠霞, 刘拉平, 马养民. 影响松果梢斑螟寄主选择的植物挥发物成分研究. 林业科学, 2006, 42(6): 71-78.
- [23] 李娟, 王成, 彭镇华, 徐程扬, 鄢光发. 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, 2011, 24(1): 82-90.
- [24] 花圣卓, 陈俊刚, 余新晓, 毕华兴, 付妍琳, 陈静, 孙丰宴. 温带典型森林树种的萜烯类化合物排放及其与环境要素的相关性. 林业科学, 2016, 52(11): 19-28.
- [25] 杨伟伟, 王成, 鄢光发, 郭二果. 北京西山春季侧柏游憩林内挥发物成分及其日变化规律. 林业科学研究, 2010, 23(3): 462-466.
- [26] 运方华, 王连喜, 安兴琴, 程艳丽. 结合气象模式与 GloBEIS 模式研究气象条件对 BVOCs 排放的影响. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2013, 5(3): 236-243.
- [27] 孙延军, 张伟, 王一钦, 廖文波, 王蕾, 苏薇薇. 深圳地区 8 种常见生态公益林树种 VOCs 测定及其保健作用. 林业与环境科学, 2019, 35(2): 67-74.
- [28] 田卫环, 张蓓. 4 种不同产地青、红花椒挥发油成分及香气特征研究. 香料香精化妆品, 2017(2): 7-11.
- [29] 王琦. 22 种园林植物挥发性有机物成分分析及其层次分析法评价[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [30] 王茜, 任彬彬, 张中霞. 园林植物挥发物释放的影响机理. 农村实用技术, 2019(8): 87-88.
- [31] 李海梅, 何兴元, 王奎玲, 陈玮. 沈阳城区五种乔木树种的光合特性. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1709-1714.
- [32] 夏琪涵. 植物 VOCs 有益成分的分子康养作用机理研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [33] Aydin Y M, Yaman B, Koca H, Dasdemir O, Kara M, Altioek H, Dumanoglu Y, Bayram A, Tolunay D, Odabasi M, Elbir T. Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: determination of specific emission rates for thirty-one tree species. Science of the Total Environment, 2014, 490: 239-253.
- [34] Calfapietra C, Fares S, Manes F, Morani A, Sgrigna G, Loreto F. Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: a review. Environmental Pollution, 2013, 183: 71-80.