

DOI: 10.5846/stxb202101310333

马慧燕, 伍乾辉, 付彦, 杨宗德, 何禾. 几种海南岛热带雨林优势种植物挥发性有机物排放对模拟氮沉降的短期响应. 生态学报, 2023, 43(3): 1073-1089.

Ma H Y, Wu Q H, Fu Y, Yang Z D, He H. Short-term response of BVOCs emissions from several dominant tropical rainforest tree species in Hainan Island to simulated nitrogen deposition. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1073-1089.

几种海南岛热带雨林优势种植物挥发性有机物排放对模拟氮沉降的短期响应

马慧燕^{1,3,4}, 伍乾辉^{2,3,4}, 付彦^{2,3,4}, 杨宗德⁵, 何禾^{1,3,4,*}

1 海南大学林学院, 海口 570228

2 海南大学生态与环境学院, 海口 570228

3 海南大学热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室, 海口 570228

4 海南大学环南海陆域生物多样性研究中心, 海口 570228

5 海南省霸王岭林业局, 昌江 572722

摘要: BVOCs (Biogenic Volatile Organic Compounds) 是植物向大气释放的一类重要气态化合物, 能参与大气化学过程和陆地生态系统碳素循环。分析环境因子对 BVOCs 排放的影响, 对科学认识未来气候变化具有重要意义。氮素作为植物生长、发育所需的大量营养元素之一, 其沉降增加是当前全球气候变化的主要驱动因素之一, 但学者对 BVOCs 如何应对氮沉降增加知之甚少。因此以海南岛热带雨林树种: 木荷 (*Schima superba*)、厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*) 和线枝蒲桃 (*Syzygium araiocladum*) 为研究对象, 通过温室盆栽实验模拟氮沉降对 3 个树种 BVOCs 释放的短期效应。主要结论如下: (1) 自然状态下, 从木荷、厚壳桂和线枝蒲桃的枝叶中鉴定出 14、34 和 24 种挥发性有机化合物, 包括异戊二烯、单萜烯、倍半萜烯和其他挥发性有机化合物 (烷烃、羰基、醛、醇、酯、醚和酸), 此外三个阔叶树种释放 BVOCs 的速率呈厚壳桂>木荷>线枝蒲桃; (2) 外源施氮均促进了三种植物幼苗 VOCs 释放, 其中总 VOCs 释放速率和成分数量均随施氮浓度的升高而增加, 且叶面施氮的影响效果显著高于土壤施氮。 (3) 三种植物幼苗对氮沉降的敏感性大小表现为木荷>厚壳桂>线枝蒲桃。 (4) 外源施氮对植物的生理参数和土壤肥力均产生了影响, 且叶面施氮的影响效果更为突出。生理参数中, 净光合速率与幼苗释放 BVOCs 关系最为密切, 其次是气孔导度。施氮主要对土壤 pH、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 有显著影响, 其次是有效磷 (Available phosphorus, AP) 和总磷 (Total phosphorus, TP)。

关键词: 氮沉降; 植物挥发性有机物 (BVOCs); 热带雨林树种

Short-term response of BVOCs emissions from several dominant tropical rainforest tree species in Hainan Island to simulated nitrogen deposition

MA Huiyan^{1,3,4}, WU Qianhui^{2,3,4}, FU Yan^{2,3,4}, YANG Zongde⁵, HE He^{1,3,4,*}

1 College of Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China

2 College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China

3 Ministry of Education Key Laboratory for Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Hainan University, Haikou 570228, China

4 Center for Terrestrial Biodiversity of the South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China

5 Bawangling Forestry Bureau of Hainan Province, Changjiang 572722, China

Abstract: Biogenic volatile organic compounds (BVOCs) are low-boiling, small-molecule secondary metabolites released

基金项目: 海南省自然科学基金青年项目 (419QN174); 海南省自然科学基金面上项目 (420MS118, 322MS028); 国家自然科学基金地区项目 (31660145)

收稿日期: 2021-01-31; **采用日期:** 2022-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: graminese@126.com

by plants, and play an important role in the biosphere, such as herbivore deterrence, fungal toxicity, and pollinator attraction. Besides, BVOCs are also important gaseous compounds in the atmosphere, which can react with active free radicals in the atmosphere to form secondary organic aerosols (SOA) and prolongs the life of greenhouse gases such as CH₄ in the atmosphere. Analyzing the impact of environmental factors on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) emissions is of great significance for accurately understanding future climate change. As we all know, nitrogen is one of large numbers of nutrients for plant growth, however, it's increasing in deposition is the main driver of current global climate change. Besides, the emission of BVOCs in response to the elevated N deposition is poorly understood. In this study, *Schima superba*, *Cryptocarya chinensis*, and *Syzygium araiocladum* were chosen as the research objects, which are the tropical rain forest tree species in Hainan Island, the short-term effect of nitrogen deposition on the release of BVOCs of three tree species were also simulated through a greenhouse test. A dynamic headspace method was used to collect BVOCs released by the three broad-leaved tree species. The main conclusions are as follows: (1) Under natural conditions, 14, 34 and 24 kinds of volatile organic compounds were isolated and identified from the branches and leaves of *S. superba*, *C. chinensis*, and *S. araiocladum*, including isoprene, monoterpene, sesquiterpene and other VOCs (alkanes, carbonyls, aldehydes, alcohols, esters, ethers and acids), and the rates of BVOCs released by three broad-leaved tree species showed *C. chinensis*>*S. superba*>*S. araiocladum*. (2) Nitrogen application promoted the release of BVOCs from the three plant seedlings, and the effect of foliar nitrogen application was significantly higher than that of soil nitrogen, and the emission rate of Total Volatile Organic Compounds (TVOCs) and the number of components increased with the increase of nitrogen concentration. (2) The sensitivity of the three plant seedlings to nitrogen deposition was expressed as *Schima superba*>*Cryptocarya chinensis*>*Syzygium araiocladum*. (3) Nitrogen application had an impact on plant physiological parameters and soil fertility, and the effect of foliar nitrogen application was more prominent. Among the physiological parameters, the net photosynthetic rate had the closest relationship with the BVOCs released by the seedlings, followed by the stomatal conductance. Nitrogen application mainly had a significant effect on soil pH, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N, followed by Available phosphorous (AP) and Total phosphorus (TP).

Key Words: nitrogen deposition; Biogenic volatile organic compounds (BVOCs); tropical rain forest tree species

BVOCs (Biogenic Volatile Organic Compounds, 植物源挥发性有机物) 是大气中一类重要的气态化合物, 是碳素循环的重要一环, 能参与大气光化学反应, 促使臭氧 (O₃) 和光化学烟雾的形成^[1-2]。研究表明, 植物释放 BVOCs 过程与植物的生理活动、大气环境和土壤养分息息相关^[3]。随着全球气候变化, 温度、光照、降水和土壤性质等环境要素都随之改变^[4], 使植物释放 BVOCs 速率发生改变, 这都对大气环境产生一定的影响。气候变化也引起了生态系统的碳、氮循环的改变, 尤其是氮沉降全球化, 已威胁到生态系统的健康和安, 且热带增加的速率较温带高^[5]。

氮素作为植物生长和发育所需的大量营养元素之一, 它的沉降可通过影响植物的生长发育完成自身循环, 而且会影响植物对 C 的固定, 间接对植物释放 BVOCs 这一过程产生重要的影响, 进而影响 C 素循环^[6]。氮沉降增加了植物氮素的来源, 有利于植物的生长发育, 但如果氮素过量, 即超过了植物对氮素的最高需求, 氮沉降就成了限制植物生长的不利因子^[7]。20 世纪八九十年代, 学者从氮素养分角度开展了一系列有关氮素可利用性对 BVOCs 影响的研究。Loreto 和 Sharkey^[8] 研究发现, 植物释放异戊二烯的速率与土壤肥力呈正相关关系, 这与俞飞^[9] 的研究一致, 随着氮沉降浓度升高, 美洲黑杨 (*Populus deltoides*) 的雌株幼苗异戊二烯释放浓度和排放速率均升高。而 Kim^[10] 研究发现可利用氮素水平降低会促进腋生菊 (*Heterotheca subaxillaris*) 和灰白银胶菊 (*Parthenium argentatum*) 叶片倍半萜烯和异戊二烯的合成和积累。对于单萜烯而言, 对植物追施氮肥可造成单萜烯物质的产量降低, 其机理是氮肥含量增多使植物的光合产能更多用来植物生长, 致使植物体内的碳源向单萜类物质的分配模式发生变化, 从而影响 BVOCs 的前体物-蔗糖、葡萄糖、果

糖和淀粉等非结构碳水化合物的合成和释放,但其作用原理还需深入研究^[11-12]。因此探究 BVOCs 究竟如何应对氮沉降加剧,释放速率升高、降低或无变化?是否还会影响到植物对环境的适应能力和生态系统的功能?都是亟须回答的问题。综上,开展热带雨林地区 BVOCs 的相关研究,探讨氮素可利用性对 BVOCs 释放的影响及影响机理,对全球气候变化具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南大学的海甸校区(19°32′—20°05′N, 110°10′—110°41′E),地处海南岛北部,位于低纬度热带北缘,属于热带海洋性季风气候,温暖多雨、光照充足,其中年平均日照时数 2000 h 以上。年平均气温 24.2℃,年平均降水量 1664 mm,其中平均相对湿度 85%,常年风向以东南风和东北风为主,实验样地土壤理化性质见表 1。

表 1 三种乔木土壤(0—20 cm)理化性质

Table 1 General soil properties (0—20 cm) of three tree species

种名 Species	土壤 pH Soil pH	硝态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	氨态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	总氮 TN/ (g/kg)	有效氮 AN/ (mg/kg)	总磷 TP/ (g/kg)	有效磷 AP/ (g/kg)
木荷 <i>Schima superba</i>	3.83±0.05	12.85±1.33	36.39±0.38	1.60±0.15	761.65±31.44	0.16±0.02	0.07±0.00
厚壳桂 <i>Cryptocarya chinensis</i>	3.87±0.23	12.64±0.44	34.76±0.33	1.53±0.22	763.06±45.23	0.16±0.01	0.07±0.00
线枝蒲桃 <i>Syzygium araiocladum</i>	3.86±0.22	12.55±0.32	33.84±1.20	1.70±0.16	736.16±13.59	0.17±0.02	0.07±0.00

TN:总氮 Total nitrogen; AN:有效氮 Available nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus; AP:有效磷 Available phosphorus

1.2 外源施氮

木荷(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)和线枝蒲桃(*Syzygium araiocladum*)是海南霸王岭国家森林公园的典型的常绿阔叶树种。2018年8月,将1年龄的木荷、厚壳桂和线枝蒲桃健康幼苗各36株,移栽至21 cm×23 cm的花盆中,每盆装有从海南省霸王岭国家森林公园(19°5′N, 109°10′E)取回的土壤5 kg,每盆1株,在种植基地内常规管理。缓苗2个月后,分别选取株高和地径基本一致的苗木,随机分成4组,每组9株,进行外源加氮实验。本实验设置4个不同梯度的氮浓度,即对照(6 kg hm⁻² a⁻¹)、低氮(10 kg hm⁻² a⁻¹)、中氮(15 kg hm⁻² a⁻¹)、高氮(30 kg hm⁻² a⁻¹)^[13]。采用两种喷洒方式进行加氮,即叶面施氮(FN)和土壤施氮(SN)。共8个实验处理,每个处理设置3个重复。自2018年10月15日起,每周一对各处理组的植株喷淋不同浓度的NH₄NO₃溶液。具体2种喷洒方法为:①从幼苗顶端用花洒喷洒时用塑料薄膜围在幼苗周围,防止溶液喷洒到盆外,并尽量保证全部均匀喷洒在植株上;②从土壤表层喷洒则直接用花洒将溶液均匀洒在土壤表层。处理时间为2018年10月—2019年10月, BVOCs 采集于2019年11月晴天11:00—14:00进行,每月连续采样,月初、月中和月末均采集1次。

1.3 BVOCs 样品的采集

BVOCs 的收集采用动态顶空采集法^[14],由 Tenax TA 吸附管(Tenax TA+a Graphitised Carbon Black, Markes, UK)富集,详见图1。具体过程如下:将生长状况良好的植物枝叶用透明的5 L Teflon 采样袋套上,然后在采样袋的上方开一小口,插入 Tenax TA 吸附管;采样袋下端左右两边各开一口,左边开口接入一根聚四氟乙烯管和气泵作为抽气端,另一开口连接聚四氟乙烯管、活性炭过滤管、硅胶干燥管和另一气泵作为进气端,组装完成后用封口膜将开口密封,使之密闭。

抽气:打开与抽气端相连的电源抽气10 min,采集时空气以500 mL/min的流速通过吸附管。

充气:抽气完成后,打开进气端连接的电源,使经活性炭净化后的空气通过出气口泵入采样袋内,采集时空气以1000 mL/min的流速通过吸附管。

循环:装置开始充气后,推出 Tenax TA 吸附管以吸附气体。此时植物与采样装置形成一个闭合的回路,

循环采样 30 min。

空白对照:不接入枝叶,然后将采样袋中的空气抽尽,充入过滤后的空气。待袋中空气达 2/3 体积时接入 Tenax TA 吸附管装置,开始循环采气。

采样流速为 600 mL/min,采样体积为 18 L。采样结束后,立即将 Tenax TA 吸附管取下,贴好标签放入采样盒保存。

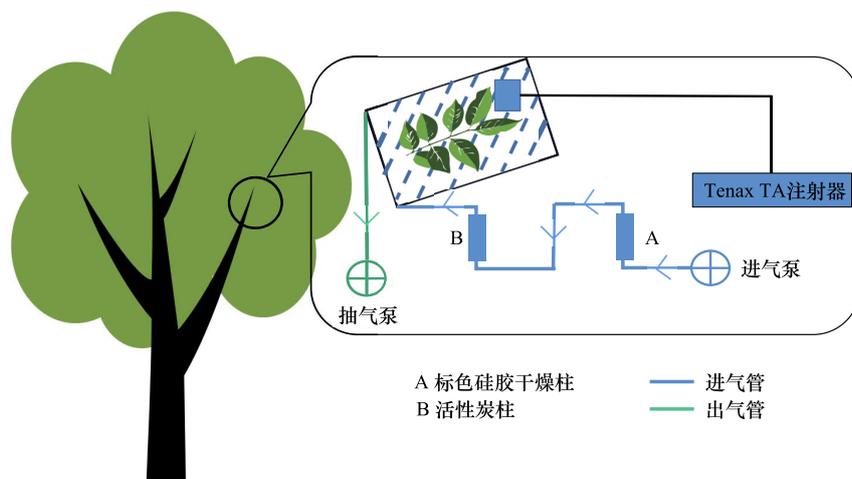


图 1 动态顶空采集流程图

Fig.1 Flow diagram of a dynamic enclosure sampling system

1.4 BVOCs 样品的分离与鉴定

1.4.1 BVOCs 定性分析方法

采用美国 Agilent 公司的 GC-MS(7890A-5975C, USA)对释放的 BVOCs 进行分离鉴定。首先将热脱附管置于热脱附仪;热脱附仪操作条件:冷阱温度 -10°C ,脱附温度 250°C 。色谱条件:弹性石英毛细管柱 HP-5MS ($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$);升温程序:初始温度 50°C ,以 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 100°C 保持 5 min,以 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 120°C 保持 5 min,然后以 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 130°C ,再以 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 160°C ,最后以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 180°C ;进样口温度为 250°C ;不分流进样方式,载气为氦气,流量 $1\text{ mL}/\text{min}$;质谱条件:离子源为 EI;离子源温度 230°C ;电子能量 $1.12\times 10^{-17}\text{ J}$;质量扫描范围 $1.992\times 10^{-23}\text{—}9.13\times 10^{-22}\text{ g}$;MS Quad 温度 150°C ;以相同条件进行空白对照组样品分析。在 MS 化学工作站中对总离子流图自动积分,采用仪器自带的 NIST 2013 标准谱库对检出的物质进行初步定性。此外,应用科瓦茨保留指数(Kovats' Retention Index)辅助定性。在前两种方法基础上,购买标准品,用丙酮稀释至 $53.33\text{ mg}/\text{L}$,在相同的 GC-MS 条件下进样,并结合此前物质的保留时间对物质进行准确定性。萃取后对萃取头进行高温处理,去除残留^[15-16]。

1.4.2 BVOCs 定量分析方法

针对不同的待测物质,分别采用外标法及内标法进行定量。以丙酮为溶剂,分别配置异戊二烯、 α -蒎烯、桉树脑和石竹烯标准溶液,然后通过微量进样器在 $50\text{ mL}/\text{min}$ 的流速下进样 $1\times 10^{-6}\text{ L}$,时间 1 min。在统一的 GC-MS 进样条件下,可以得到呈现峰面积与浓度关系的工作曲线,可根据此工作曲线计算出混合物中这 4 种物质的浓度。余下的单萜类、倍半萜类以及含氧萜类物质的浓度分别以 α -蒎烯、桉树脑和石竹烯作为内标定量,从而计算出相应浓度。

1.5 植物生理指标测定

利用便携式智能光合仪(LCPro-SD, England)测定环境因子,包括植物叶片温度、相对湿度、光合有效辐射、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等生理特征参数。

土壤元素的测定采用传统实验方法^[17]。在上述提及的试验地点中,去除土壤表层凋落物,自上而下

20 cm处取混合土壤样品,标记好后带回实验室。首先剔除土壤中的植物根系和其他杂质,经自然风干后过筛(100目),然后收集、混匀装样置于玻璃瓶中密封保存。采用电位法测定土壤 pH。土壤有机质含量的测定用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)容量法。全氮和有效磷含量的测定均参考连续流动分析仪的 SmartChem 方法。全氮消解后加入硝酸钠形成红色络合物在 660 nm 波长处有吸收。全 P 在酸性条件下与钼酸铵反应生成淡黄色的磷钼酸铵复合物,再用还原剂抗坏血酸还原生成深蓝色的钼蓝,于 880 nm 波长处测定吸光度。采用 NH_4OAc 浸提和火焰光度法测定土壤速效钾的含量。

1.6 数据处理

所有数据均使用 Excel 2010 进行预处理。采用 SPSS 20.0 统计软件对 3 种乔木 BVOCs 释放的成分和释放速率进行统计分析,不同施氮方式和施氮浓度的差异性通过 LSD、Tamhane's 检验和单因素方差分析(One-way ANOVA)进行成对比较。采用 Pearson 相关指数法研究乔木释放 BVOCs 与环境因子和生理特征参数的关系。此外,利用 IBM SPSS 20.0 对土壤因素和不同 BVOCs 成分间的影响进行主成分分析(PCA)。所有图形均采用 Sigmaplot 10.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 施氮浓度对 BVOCs 释放的影响

对所采集的木荷、厚壳桂和线枝蒲桃 BVOCs 样品进行分析,发现低、中和高浓度的氮肥均显著促进了树种释放 BVOCs ($P < 0.05$),且高氮影响效果最明显(表 2、3、4)。其中,高氮组木荷释放的 BVOCs 共鉴定出 1 种挥发性有机物,包含异戊二烯、单萜烯 6 种,倍半萜烯 5 种,和其他 VOCs 2 种;线枝蒲桃共释放出 24 种挥发性有机物,分别是异戊二烯、单萜烯 3 种,倍半萜烯 13 种,和其他 VOCs 7 种;土壤施氮和叶面施氮下高氮组的厚壳桂分别鉴定出 34 和 32 种挥发性有机物,包括异戊二烯,17 种倍半萜烯,其他 VOCs 8 种,单萜烯分别为 8 种和 6 种。就 BVOCs 释放速率而言,三个阔叶树种释放各挥发物成分的速率均随施氮浓度的升高而增加,且总 VOCs 的释放速率也随施氮浓度显著增加 ($P < 0.01$ 或 0.05) (图 2)。此外,在对照处理组中,厚壳桂的总 VOCs 的释放速率显著高于其他两种植物 ($P < 0.05$)。

2.2 施氮方式对 BVOCs 释放的影响

同一施氮浓度下,经土壤施氮的木荷、厚壳桂和线枝蒲桃释放出各挥发物成分、数量、速率及总 VOCs 释放速率总显著低于叶面施氮 ($P < 0.05$) (表 2、3、4,图 2)。其中,木荷总 VOCs 释放速率在土壤和叶面施氮下的范围分别为 $8.935\text{—}46.238 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 和 $30.431\text{—}56.649 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。此外,在两种施氮方式下,倍半萜烯均对 TVOCs (Total Volatile Organic Compounds, 总挥发性有机物) 贡献最大,其相对含量范围为 47.55%—65.35%;其次是单萜烯,相对含量范围在 23.03%—40.59%之间,木荷释放其他 VOCs 占 TVOCs 的比重最少(图 3);土壤和叶面施氮也导致木荷释放单萜烯和其他 VOCs 的比重增加,但较土壤施氮,叶面施氮下各 BVOCs 组分比重变化幅度小。表 3 中,土壤施氮下厚壳桂 BVOCs 释放速率最高为 $(35.44 \pm 2.81) \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$,而叶面施氮下 BVOCs 释放速率最高为 $(54.08 \pm 3.66) \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。此时两种施氮方式对厚壳桂的各 VOCs 释放速率占比影响不大,其中单萜烯和倍半萜烯的占比最高。线枝蒲桃的总 BVOCs 释放速率范围在 $5.780\text{—}36.023 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 之间(图 2),且倍半萜烯相对占比最多,异戊二烯相对占比最少。其中,土壤施氮下倍半萜烯的释放速率范围为 $2.361\text{—}18.194 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$,相对含量范围为 41%—56%;叶面施氮下线枝蒲桃释放倍半萜烯的释放速率为 $11.631\text{—}36.023 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$,相对含量范围为 49%—53%(图 3)。

2.3 植物生理指标与 BVOCs 释放的关联

外源施氮下三种植物 BVOCs 释放速率与环境因子(叶温、气孔导度和净光合速率)间的相关性亦被分析(表 5)。结果表明,土壤施氮下木荷释放的各 BVOCs 大体上与叶温、气孔导度和净光合速率均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著负相关 ($P < 0.01$)。而叶面施氮下,木荷各 BVOCs 种类释放速率与气孔导度和净光合速率呈显著正相关。就厚壳桂而言,各 BVOCs 种类仅在叶面施氮下与气孔导度和净光合速率呈极显著正相关关系

表 2 外源施氮下木荷 (*Schinus molle*) 释放 BVOCs 组成及释放速率 (平均值 ± 标准误差)

Table 2 Effects of nitrogen levels and nitrogen methods on the emission rates and composition of BVOCs from *Schinus molle* (Mean ± SD)

序号 No.	化学成分 Compounds	分子式 Molecular formula	保留时间 Retention time	BVOCs 各成分平均释放速率. Average emission rate of BVOCs ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)							
				对照 (CK-SN)	低氮 (Low-SN)	中氮 (Medium-SN)	高氮 (High-SN)	对照 (CK-FN)	低氮 (Low-FN)	中氮 (Medium-FN)	高氮 (High-FN)
1	异戊二烯 Isoprene	C_5H_8	507	0.77±0.1Bd	1.26±0.1Bc	1.77±0.2Bb	2.73±0.4Ba	0.87±0.1Ad	1.81±0.2Ac	2.74±0.4Ab	3.21±0.3Aa
2	3-己烯-1-醇 3-hexen-1-ol	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	852	0.26±0.1Bd	0.62±0.1Ac	0.98±0.3Bb	1.83±0.1Ba	0.29±0.0Ad	0.59±0.0Bc	1.42±0.1Ab	2.14±0.2Aa
3	α -蒎烯 α -Thujene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	920	-Ab	-Bb	-Bb	0.07±0.0Ba	-Ad	0.47±0.1Ac	0.75±0.1Ab	1.36±0.2Aa
4	α -蒎烯 α -Pinene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	939	0.50±0.0Bd	0.79±0.0Bc	1.18±0.2Bb	1.74±0.2Ba	0.56±0.1Ad	1.08±0.2Ac	2.18±0.4Ab	2.92±0.6Aa
5	双环[3.1.0]己烷, 4-亚甲基-1-(1-甲基乙基)- Bicyclo [3, 1, 0] hexane, 4- methylene-1-(1-methylethyl)-	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	969	-Ab	-Ab	-Bb	0.63±0.1Ba	-Ac	-Ac	0.30±0.1Ab	0.85±0.1Aa
6	β -蒎烯 β -Pinene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	979	0.84±0.1Ad	1.03±0.1Ac	1.43±0.1Ab	1.62±0.1Aa	0.09±0.0Bd	0.13±0.0Bc	0.20±0.1Bb	0.29±0.1Ba
7	β -月桂烯 β -Myrcene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	988	-Bd	5.50±0.7Bc	8.15±0.6Bb	10.99±0.8Ba	6.94±0.4Ad	8.02±0.5Ac	11.51±0.9Ab	13.83±1.0Aa
8	柠檬烯 Limonene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1028	0.71±0.1Bd	1.10±0.1Bc	1.22±0.4Bb	1.83±0.1Ba	0.71±0.1Ad	1.27±0.1Ac	1.68±0.1Ab	2.15±0.2Aa
9	壬醛 Nonanal	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	1044	-Ad	1.43±0.3Bc	2.09±0.3Bb	2.48±0.4Ba	-Ad	0.76±0.1Ac	1.94±0.3Ab	2.93±0.2Aa
10	反式- α -香柠檬烯 Trans- α -bergimonene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1433	-Ad	-Bc	0.47±0.2Bb	0.71±0.1Ba	-Ad	0.32±0.0Ac	0.72±0.1Ab	1.58±0.4Aa
11	石竹烯 Caryophyllene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1437	-Bd	5.93±0.5Bc	8.29±0.6Bb	9.88±0.5Ba	5.83±0.4Ad	8.31±0.6Ac	11.22±0.8Ab	12.98±0.7Aa
12	α -法尼烯 α -Farnesene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1446	5.58±0.9Ad	7.56±0.8Ac	9.32±0.6Ab	11.23±0.9Aa	5.20±0.8Ad	7.36±0.6Ac	9.08±1.6Ab	11.20±2.0Aa
13	β -萜二烯 β -Acoradiene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1472	0.28±0.1Ba	-Bc	-Bc	0.24±0.0Bb	-Ad	0.32±0.1Ac	0.60±0.1Ab	0.84±0.1Aa
14	β -甜没药烯 β -Bisabolene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1509	-Ac	-Ac	0.18±0.0Bb	0.27±0.0Ba	-Ab	-Ab	-Ab	0.36±1.1Aa

BVOCs: 植物挥发性有机物 Biogenic volatile organic compounds; SN: 土壤施氮 Soil nitrogen application; FN: 叶面施氮 Soil nitrogen application; -表示该物质含量低于检出限; 不同大写字母表示施氮方式差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示氮水平间差异显著 ($P < 0.05$)

表 3 外源施氮下厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*) 释放 BVOCs 组成及释放速率 (平均值±标准误差)

Table 3 Effects of nitrogen levels and nitrogen methods on the emission rates and composition of BVOCs from *Cryptocarya chinensis* (Mean±SD)

序号 No.	化学成分 Compounds	分子式 Molecular formula	保留时间 Retention time	BVOCs 各成分平均释放速率 Average emission rate of each component of BVOCs / ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)							
				对照 (CK-SN)	低氮 (Low-SN)	中氮 (Medium-SN)	高氮 (High-SN)	对照 (CK-FN)	低氮 (Low-FN)	中氮 (Medium-FN)	高氮 (High-FN)
1	异戊二烯 Isoprene	C_5H_8	507	3.80±1.2Ad	5.70±1.4Ac	7.98±1.1Ab	10.43±1.9Aa	1.90±0.4Bd	3.65±0.5Bc	6.32±1.7Bb	8.73±1.9Ba
2	2-己酮 2-Hexanone	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	788	-Bc	-Bc	0.20±0.0Ba	0.14±0.03Bb	0.11±0.0Ad	0.18±0.0Ac	0.23±0.0Ab	0.26±0.0Aa
3	1-己醇 1-Hexanol	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	845	1.24±0.3Bd	1.43±0.4Bc	1.53±0.4Bb	2.04±0.6Ba	1.43±0.1Ad	2.63±0.5BAc	3.85±0.6Ab	4.30±0.7Aa
4	顺式-3-己烯醇 Cis-3-hexenol	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	852	2.10±0.8Bd	2.09±0.4Bc	2.56±0.4Bb	5.41±1.4Ba	3.37±0.56Ad	5.3±1.0Ac	7.57±0.6Ab	9.55±1.50Aa
5	甲氧基苯酚 Methoxybenzoxime	$\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2$	925	0.01±0.0Bd	0.01±0.0Bc	0.02±0.0Bb	0.02±0.0Ba	0.01±0.0Ad	0.02±0.0Ac	0.03±0.0Ab	0.04±0.01Aa
6	α -蒎烯 α -Pinene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	939	0.21±0.1Ad	0.29±0.01Ac	0.36±0.1Ab	0.49±0.2Aa	-Ba	-Ba	-Ba	-Ba
7	莰烯 Camphene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	953	0.04±0.0Bd	0.07±0.0Bc	0.14±0.0Bb	0.17±0.1Ba	0.09±0.0Ad	0.13±0.0Ac	0.20±0.1Ab	0.29±0.1Aa
8	双环[3.1.0]己烷, 4-亚甲基-1(1-甲基基)- Bicyclo[3.1.0]hexane, 4-methylene-1-(1-methylethyl)-	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	969	0.20±0.1Ad	0.28±0.0Ac	0.38±0.0Bb	0.46±0.1Ba	0.12±0.1Bd	0.17±0.0Bc	0.41±0.1Ab	0.55±0.2Aa
9	β -蒎烯 β -Pinene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	979	0.13±0.0Bd	0.21±0.0Bc	0.24±0.1Bb	0.34±0.08Ba	0.27±0.1Ad	0.47±0.0Ac	0.67±0.1Ab	0.83±0.2Aa
10	1-辛醇 1-octanol	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	1022	-Bb	-Bb	-Bb	0.03±0.01Ba	0.03±0.0Ad	0.05±0.0Ac	0.07±0.0Ab	0.08±0.0Aa
11	柠檬烯 Limonene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1028	2.11±0.9Ad	3.36±0.4Ac	4.10±0.9Ab	4.86±1.2Aa	-Ba	-Ba	-Ba	-Ba
12	桉油精 Eucalyptus	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	1030	2.16±0.6Ac	2.19±0.6Ab	2.20±0.6Aa	1.08±0.6Bd	0.82±0.2Bd	1.58±0.7Bc	2.17±0.5Bb	2.92±0.9Aa
13	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯 (Z)-3,7-Dimethyl-1,3,6-octadecatriene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1035	0.08±0.0Ad	0.16±0.1Ac	0.17±0.0Bb	0.24±0.0Ba	0.08±0.0Ad	0.13±0.0Bc	0.24±0.0Ab	0.26±0.1Aa
14	罗勒烯 Ocimene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1044	2.69±0.9Bd	2.77±0.9Bc	4.22±1.0Bb	5.16±1.6Ba	5.42±0.7Ad	7.00±0.7Ac	8.72±1.6Ab	11.03±2.0Aa
15	γ -松油烯 γ -Terpinene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1056	0.12±0.0Ad	0.16±0.0Ab	0.17±0.0Aa	0.13±0.1Bc	0.10±0.0Bd	0.22±0.1Ac	0.26±0.1Ab	0.28±0.1Aa
16	4-乙基苯甲醚 4-ethyl anisole	$\text{C}_9\text{H}_{12}\text{O}$	1125	-Bd	0.01±0.00Bc	0.02±0.0Bb	0.02±0.0Ba	0.01±0.0Ad	0.02±0.0Ac	0.04±0.0Ab	0.05±0.0Aa
17	乙酸己酯 Hexyl acetate	$\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$	1277	0.08±0.1Ad	0.11±0.1Bc	0.16±0.1Bb	0.20±0.1Ba	0.09±0.01Ad	0.14±0.01Ac	0.1±0.1Ab	0.25±0.1Aa
18	(-)- α -萜荜油烯 (-) α -Citrolene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1347	0.01±0.0Ad	0.01±0.0Ac	0.02±0.0Aa	0.02±0.0Ab	0.01±0.0Bd	0.01±0.0Bc	0.02±0.0Ab	0.03±0.0Aa
19	α -法呢烯 α -Farnesene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1361	0.00±0.0Ad	0.00±0.0Ac	0.01±0.02Ba	0.01±0.0Bb	-Bc	-Bc	0.01±0.0Ab	0.01±0.0Aa
20	(-)- α -蒎烯 (-)- α -Pinene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1380	0.02±0.01Ad	0.04±0.0Bc	0.07±0.0Bb	0.09±0.0Ba	-Ad	0.10±0.0Aa	0.09±0.0Ab	0.10±0.0Aa
21	β -榄香烯 β -Elemene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1396	0.02±0.0Bd	0.03±0.0Bc	0.04±0.0Bb	0.05±0.0Ba	0.02±0.0Ad	0.03±0.0Ac	0.05±0.0Ab	0.06±0.0Aa
22	β -长叶蒎烯 β -Pinene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1412	0.34±0.1Bd	0.49±0.1Bc	0.67±0.0Bb	0.69±0.1Ba	0.78±0.1Ad	0.93±0.2Ac	1.35±0.2Aa	1.450.3Aa
23	β -衣兰烯 β -Mylinene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1416	0.95±0.1Bd	0.99±0.1Bc	1.01±0.1Bb	1.82±0.1Ba	1.95±0.2Ad	2.87±0.4Ac	3.80±0.5Ab	3.89±0.8Aa
24	β -古巴烯 β -Cubinenene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1427	0.31±0.1Bd	0.35±0.1Bc	0.47±0.1Bb	0.76±0.1Ba	0.54±0.1Ad	0.78±0.1Ac	1.06±0.1Ab	1.26±0.2Aa
25	石竹烯 Caryophyllene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1437	1.91±0.5Bd	2.403±0.7Bc	3.49±0.5Bb	5.12±0.5Ba	3.86±0.5Ad	3.50±0.5Ac	6.07±1.0Ab	7.41±0.8Aa

续表

序号 No.	化学成分 Compounds	分子式 Molecular formula	保留时间 Retention time	BYOCs 各成分平均释放速率 Average emission rate of each component of BYOCs ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)							
				对照 (CK-SN)	低氮 (Low-SN)	中氮 (Medium-SN)	高氮 (High-SN)	对照 (CK-FN)	低氮 (Low-FN)	中氮 (Medium-FN)	高氮 (High-FN)
26	香橙烯 Orangene ul, 1, 2, 3, 3a, 4, 5, 6, 7-八氢-1, 4-二甲基-7-(1-甲基乙烯基)-, [1R-(1 α , 3 $\alpha\beta$, 4 α , 7 β)]-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1439	1.02±0.3Bd	1.44±0.3Bc	1.91±0.1Bb	2.13±0.3Aa	1.13±0.2Ad	1.66±0.5 Ac	2.08±0.2Ab	2.21±0.3Aa
27	ul, 1, 2, 3, 3a, 4, 5, 6, 7-octahydro-1, 4-dimethyl- 7-(1-methylvinyl)-, [1R-(1 α , 3 $\alpha\beta$, 4 α , 7 β)]-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1468	-Ad	0.01±0.0Bc	0.01±0.0Bb	0.02±0.0Ba	-Ad	0.02±0.0Ac	0.03±0.0Ab	0.03±1.0 Aa
28	γ -依兰油烯 γ -Ylangolene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1472	1.44±0.4Bd	1.91±0.4Bc	1.94±0.4Bb	2.37±0.7Ba	2.15±0.3Ac	2.13±0.3Ac	3.63±0.7Ab	5.39±1.0Aa
29	十四烷 Tetradecane	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$	1475	0.02±0.0Bd	0.02±0.0Ac	0.03±0.0Bb	0.02±0.0Aa	0.01±0.0Ac	0.02±0.0Ab	0.03±0.0Aa	0.03±0.0Aa
30	右旋大根香叶 Dextromethanone (1S, 2E, 6E, 10R)-3, 7, 11, 11-四甲基 双环[8.1.0]十一烷基-2, 6-二烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1490	0.14±0.1Bd	0.19±0.06Bc	0.23±0.0Bb	0.27±0.1Ba	0.23±0.0Ad	0.37±0.0Ac	0.44±0.1Ab	0.61±0.1Aa
31	(1S, 2E, 6E, 10R)-3, 7, 11, 11-四甲基 tetramethylbicyclo[8.1.0]undecyl-2, 6-diene	$\text{C}_{15}\text{H}_{25}$	1495	-Ac	-Ac	0.04±0.0Bb	0.08±0.0Ba	-Ac	-Ac	0.08±0.0Ab	0.13±0.0Aa
32	γ -榄香烯 γ -elemene 1H-环戊[1, 3]环丙烷[1, 2]苯, 八氢- 7-甲基-3-亚甲基-4-(1-甲基乙基)-, [3aS-(3 $\alpha\alpha$, 3 $\beta\beta$, 4 β , 7 α , 7 αS *)]-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1498	-Ac	-Ac	0.04±0.0Bb	0.05±0.0Ba	-Ac	-Ac	0.05±0.02Ab	0.08±0.0Aa
33	1H-Cyclopenta[1, 3]cyclopropane [1, 2] benzene, octahydro- 7-methyl- 3- methylene- 4-(1-methylethyl)-, [3aS- (3 $\alpha\alpha$, 3 $\beta\beta$, 4 β , 7 α , 7 αS *)]-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1577	-Ab	-Ab	-Ab	0.39±0.1Ba	-Ac	-Ac	0.39±0.1Ab	0.66±0.1Aa
34	1H-环丙[e]az烯, 1 α , 2, 3, 4, 4a, 5, 6, 7b-八氢-1, 1, 4, 7-四甲基-, [1aR- (1 $\alpha\alpha$, 4 α , 4 $\alpha\beta$, 7 $\beta\alpha$)] azene, 1 α , 2, 3, 4, 4a, 5, 6, 7b-octahydro- 1, 1, 4, 7- tetramethyl-, [1aR-(1 $\alpha\alpha$, 4 α , 4 $\alpha\beta$, 7 $\beta\alpha$)]-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1583	-Ab	-Ab	-Ab	0.03±0.0Ba	-Ac	-Ac	0.02±0.0Ab	0.05±0.0Aa

-表示该物质含量低于检出限, 不同大写字母表示施氮方式差异显著 ($P < 0.05$), 小写字母表示氮水平间差异显著性 ($P < 0.05$)

表 4 外源施氮下线枝蒲桃 (*Syzygium araiocladum*) 释放 BVOCs 组成及释放速率 (平均值±标准误差)

Table 4 Effects of nitrogen levels and nitrogen methods on the emission rates and composition of BVOCs from *Syzygium araiocladum* (Mean±SD)

序号 No.	化学成分 Compounds	分子式 Molecular formula	保留时间 Retention time	BVOCs 各成分平均释放速率 Average emission rate of each component of BVOCs / ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)							
				对照 (CK-SN)	低氮 (Low-SN)	中氮 (Medium-SN)	高氮 (High-SN)	对照 (CK-FN)	低氮 (Low-FN)	中氮 (Medium-FN)	高氮 (High-FN)
1	异戊二烯 Isoprene	C_5H_8	507	0.07±0.0Bd	0.10±0.0Bc	0.17±0.0Bb	0.42±0.1Ba	0.13±0.0Ad	0.22±0.0Ac	0.39±0.1Ab	0.78±0.1Aa
2	1-己醇 1-hexanol	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	845	0.08±0.0Bd	0.16±0.0Bc	0.17±0.0Bb	0.22±0.0Ba	0.16±0.0Ad	0.20±0.1Ac	0.21±0.0Ab	0.29±0.0Aa
3	顺式-3-己烯醇 Cis-3-hexenol	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	852	1.08±0.2Bd	2.00±0.1Bc	2.31±0.3Ab	2.85±0.3Ba	1.42±0.3Ad	2.64±0.2Ac	2.31±0.3Ab	4.80±0.7Aa
4	(1S)-2,6,6-三甲基双环[3.1.1]庚-2-烯 (1S)-2,6,6-trimethylbicyclo[3.1.1]hept-2-ene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	952	0.06±0.0Bd	0.11±0.0Bc	0.14±0.0Bb	0.26±0.1Ba	0.14±0.1Ad	0.23±0.0Ac	0.33±0.0Ab	0.45±0.0Aa
5	邻-异丙基苯 O-Cumene	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}$	1022	-Ac	-Bc	0.91±0.1Bb	1.62±0.1Ba	-Ad	1.14±0.1Ac	1.67±0.3Ab	2.92±0.2Aa
6	柠檬烯 Limonene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1028	-Ac	-Bc	0.07±0.0Bb	0.08±0.0Ba	-Ad	0.04±0.0Ac	0.06±0.0Ab	0.10±0.0Aa
7	桉油精 Eucalyptus	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	1030	-Bc	-Bc	0.11±0.0Bb	0.29±0.0Ba	0.10±0.0Ad	0.13±0.0Ac	0.21±0.0Ab	0.35±0.1Aa
8	罗勒烯 Ocimene	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}$	1044	1.99±0.0Bd	2.76±0.1Bc	3.19±0.4Bb	4.02±0.3Ba	3.19±0.4Ad	3.87±0.9Ac	5.14±0.5Ab	7.09±0.5Aa
9	壬醛 Nonanal	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	1105	0.14±0.0Bd	0.21±0.0Bc	0.22±0.0Bb	0.38±0.0Ba	0.20±0.0Ad	0.33±0.0Ac	0.47±0.1Ab	0.75±0.1Aa
10	2,6-二甲基-1,3,5,7-辛烯, E, E- 2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octene, E, E-	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}$	1150	-Ab	-Bb	-Bb	0.18±0.1Ba	-Ad	0.25±0.1Ac	0.37±0.1Ab	0.35±0.1Aa
11	环己烷, 1-乙基-1-甲基-2,4-双(1- 甲基乙炔基)-, [1S-(1 α ,2 β ,4 β)]- Cyclohexane, 1-vinyl-1-methyl-2,4-bis (1-methylvinyl)-, [1S-(1 α , 2 β , 4 β)]-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1345	0.07±0.0Bd	0.14±0.0Bc	0.16±0.04Bb	0.21±0.1Ba	0.32±0.1Ad	0.35±0.1Ac	0.54±0.1Ab	0.75±0.1Aa
12	(-)- α -萜橙蒎烯 (-)- α -Citrolene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1347	0.16±0.0Bd	0.34±0.1Bc	0.35±0.0Bb	0.43±0.4Ba	1.30±0.1Ab	0.50±0.1Ad	0.63±0.1Ac	1.09±0.1Aa
13	(-)- α -蒎烯 (-)- α -Pinene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1380	0.30±0.0Bd	0.46±0.1Bc	0.79±0.1Bb	1.01±0.1Ba	0.31±0.1Ad	1.89±0.2Ac	2.20±0.2Ab	3.00±0.1Aa
14	β -榄香烯 β -elemene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1396	1.15±0.1Ad	2.04±0.1Ab	2.01±0.1Ac	2.958±0.3Aa	0.88±0.3Ba	0.43±0.1Bd	0.61±0.04Bc	0.86±0.1Bb
15	石竹烯 Caryophyllene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1437	0.16±0.0Ad	0.27±0.0Bc	0.33±0.0Bb	0.52±0.1Ba	0.03±0.0Bd	1.16±0.1Ac	1.50±0.1Ab	1.99±0.3Aa
16	香橙烯 Orangeene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1439	0.52±0.1Ad	0.94±0.1Ac	1.23±0.1Ab	1.68±0.1Aa	0.94±0.3Bb	0.06±0.0Bd	0.08±0.0Bc	0.10±0.0Ba
17	α -法尼烯 α -Farnesene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1446	-Bc	-Bc	1.13±0.4Bb	1.54±0.1Ba	0.02±0.0Ad	1.60±0.1Ac	2.05±0.1Ab	3.59±0.5Aa
18	α -律草烯 α -Humulene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1455	-Bd	0.02±0.0Bc	0.04±0.01Bb	0.08±0.0Ba	2.25±0.3Aa	0.03±0.0Ad	0.08±0.0Ac	0.10±0.0Ab
19	1H-环丙[e]az烯, 十氢-1,1,7-三甲 基-4-亚甲基- 1H-Cycloprop[e]azene, decahydro-1, 1,7-trimethyl-4-methylene-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1461	-Ac	-Ac	-Bb	0.04±0.0Ba	-Ac	-Ac	0.05±0.0Ab	0.07±0.0Aa

续表

序号 No.	化学成分 Compounds	分子式 Molecular formula	保留时间 Retention time	BYOCs 各成分平均释放速率 Average emission rate of each component of BYOCs ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)							
				对照 (CK-SN)	低氮 (Low-SN)	中氮 (Medium-SN)	高氮 (High-SN)	对照 (CK-FN)	低氮 (Low-FN)	中氮 (Medium-FN)	高氮 (High-FN)
20	γ -依兰油烯 γ -Ylangolene	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1472	-Bd	2.34±0.1Bc	2.62±0.2Bb	4.29±0.7Ba	0.09±0.0Ad	3.13±0.5Ac	4.67±0.5Ab	5.88±0.4Aa
21	右旋大根香叶烯 Dextrorhethanone	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1490	-Bd	0.12±0.0Bc	0.15±0.02Bb	0.28±0.0Ba	0.16±0.0Ac	0.13±0.0Ad	0.20±0.0Ab	0.28±0.0Aa
22	(1S, 2E, 6E, 10R)-3, 7, 11, 11-四甲基 双环[8.1.0]十一烷基-2, 6-二烯	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1495	-Ad	-Bc	0.07±0.0Bb	0.12±0.0Ba	-Ad	0.06±0.0Ac	0.09±0.0Ab	0.20±0.0Aa
23	萘 1, 2, 3, 5, 6, 8a-六氢-4, 7-二甲基-1- (1-甲基乙基)-, (1S-顺式)- Naphthalene 1, 2, 3, 5, 6, 8a-hexahydro- 4, 7-dimethyl-1-(1-methylethyl)-, (1S- cis)-	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}$	1611	-Ac	0.12±0.0Bb	-Ac	0.17±0.1Ba	-Ab	0.24±0.1Aa	-Ab	-Ab
24	正十八烷 N-octadecane	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	1800	-Bc	0.17±0.0Bb	0.17±0.04Bb	0.24±0.0Ba	-Ad	0.20±0.0Ac	0.21±0.0Ab	0.28±0.0Aa

-表示该物质含量低于检出限;不同大写字母表示施氮方式差异显著($P<0.05$),小写字母表示氮水平间差异显著($P<0.05$)

表 5 外源氮处理下木荷 (*Schima superba*)、厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*) 和线枝蒲桃 (*Syzygium araiocladum*) BVOCs 释放速率与环境因子的相关性 ($n=10$)
 Table 5 Correlation coefficients between BVOCs emission rates and environmental factors, in *Schima superba*, *Cryptocarya chinensis* and *Syzygium araiocladum* under nitrogen treatments ($n=10$)

种名 Species	BVOCs 分类 BVOCs classification	土壤施氮 Soil nitrogen application				叶面施氮 Foliar nitrogen application			
		叶温 Temperature	气孔导度 Stomatal conductance (g_s)	净光合速率 Photosynthetic rate (p_n)	净光合速率 Photosynthetic rate (p_n)	叶温 Temperature	气孔导度 Stomatal conductance (g_s)	净光合速率 Photosynthetic rate (p_n)	净光合速率 Photosynthetic rate (p_n)
木荷	异戊二烯	-0.287	-0.808**	-0.922**	-0.225	0.882**	0.962**	0.962**	
<i>Schima superba</i>	单萜烯	-0.360*	-0.937**	-0.974**	-0.256	0.947**	0.971**	0.971**	
	倍半萜烯	-0.343*	-0.958**	-0.970**	-0.233	0.930**	0.963**	0.963**	
	其他 VOCs	-0.363*	-0.921**	-0.950**	-0.296	0.986**	0.947**	0.947**	
	总 VOCs	-0.353*	-0.948**	-0.977**	-0.254	0.957**	0.981**	0.981**	
厚壳桂	异戊二烯	-0.176	-0.274	-0.033	-0.076	0.884**	0.874**	0.874**	
<i>Cryptocarya chinensis</i>	单萜烯	-0.107	-0.309	-0.075	-0.215	0.871**	0.894**	0.894**	
	倍半萜烯	-0.157	-0.240	0.036	-0.247	0.953**	0.923**	0.923**	
	其他 VOCs	-0.259	-0.049	0.151	-0.270	0.928**	0.932**	0.932**	
	总 VOCs	-0.263	-0.161	0.076	-0.260	0.971**	0.965**	0.965**	
线枝蒲桃	异戊二烯	-0.220	0.068	0.900**	-0.270	0.951**	0.962**	0.962**	
<i>Syzygium araiocladum</i>	单萜烯	-0.293	-0.087	0.910**	-0.225	0.925**	0.974**	0.974**	
	倍半萜烯	-0.256	-0.258	0.937**	-0.192	0.935**	0.984**	0.984**	
	其他 VOCs	-0.319*	-0.220	0.927**	-0.170	0.919**	0.924**	0.924**	
	总 VOCs	-0.277	-0.208	0.941**	-0.205	0.951**	0.991**	0.991**	

数据为皮尔逊相关指数; VOCs: 挥发性有机物 Volatile organic compounds; * 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)

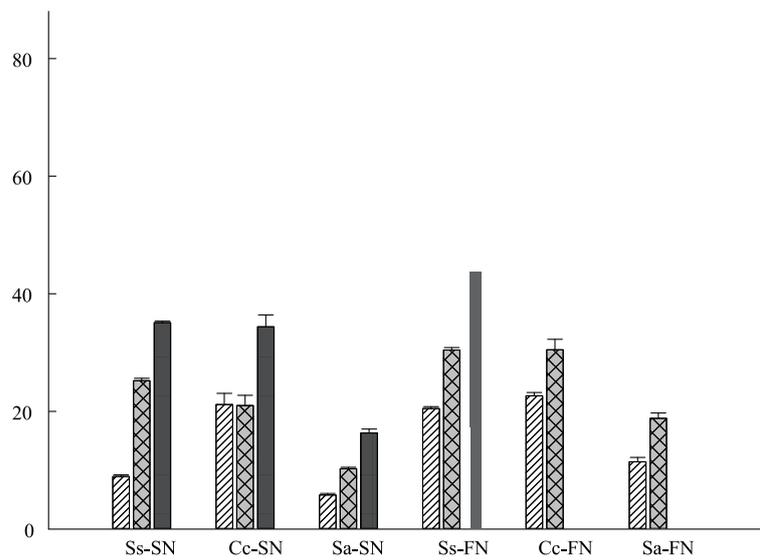


图2 外源施氮对木荷(*Schima superba*, Ss)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*, Cc)和线枝蒲桃(*Syzygium araiocladum*, Sa) TVOCs 释放速率的影响

Fig.2 Impacts of Soil Nitrogen application (SN) and Foliar nitrogen application (FN) on TVOCs emissions from *Schima superba* (Ss), *Cryptocarya chinensis* (Cc) and *Syzygium araiocladum* (Sa)

SN: 土壤施氮 Soil nitrogen application; FN: 叶面施氮 Soil nitrogen application; Ss-SN: 木荷土加氮; Ss-FN: 木荷叶加氮; Cc-SN: 厚壳桂土加氮; Cc-FN: 厚壳桂叶加氮; Sa-SN: 线枝蒲桃土加氮; Sa-FN: 线枝蒲桃叶加氮; 不同大写字母表示树种间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示氮水平间差异显著 ($P < 0.05$); * 表示施氮方式间差异显著 ($P < 0.05$)

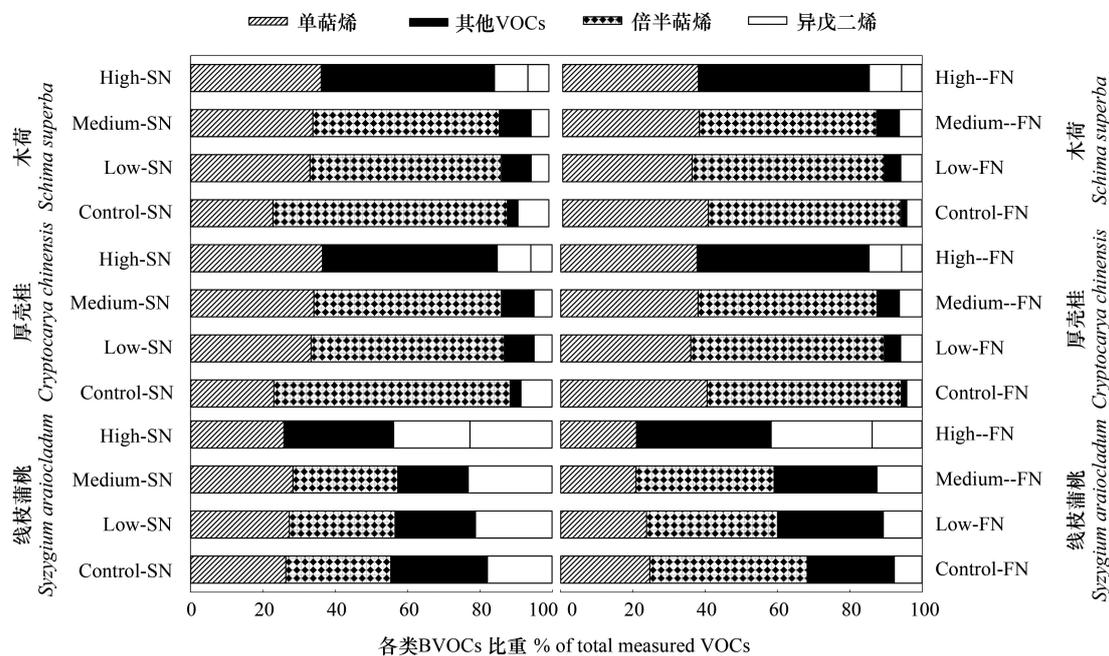


图3 外源施氮对木荷(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)和线枝蒲桃(*Syzygium araiocladum*)释放各类 BVOCs 所占比重的影响

Fig.3 Impacts of nitrogen treatments on the relative proportions of different types of BVOCs emitted from *Schima superba*, *Cryptocarya chinensis* and *Syzygium araiocladum*

High-SN 表示高浓度的土壤施氮; Medium-SN 表示中浓度的土壤施氮; Low-SN 表示低浓度的土壤施氮; Control-SN 表示对照组的土壤施氮; High-FN 表示高浓度的叶面施氮; Medium-FN 表示中浓度的叶面施氮; Low-FN 表示低浓度的叶面施氮; Control-FN 表示对照组的叶面施氮

($P < 0.01$)。总体说来,线枝蒲桃在两种施氮方式下各 BVOCs 种类的释放速率均随净光合速率的升高而显著增加($P < 0.01$),叶面施氮下 BVOCs 的释放速率还随气孔导度的增加而增大。

对外源施氮下三种植物释放的各 BVOCs 种类与土壤理化性质进行主成分分析,得到了 3 个主成分因子(图 4)。其中,土壤施氮下,木荷、厚壳桂和线枝蒲桃 3 个因子的累积贡献率分别达到了 88.23%、79.86%和

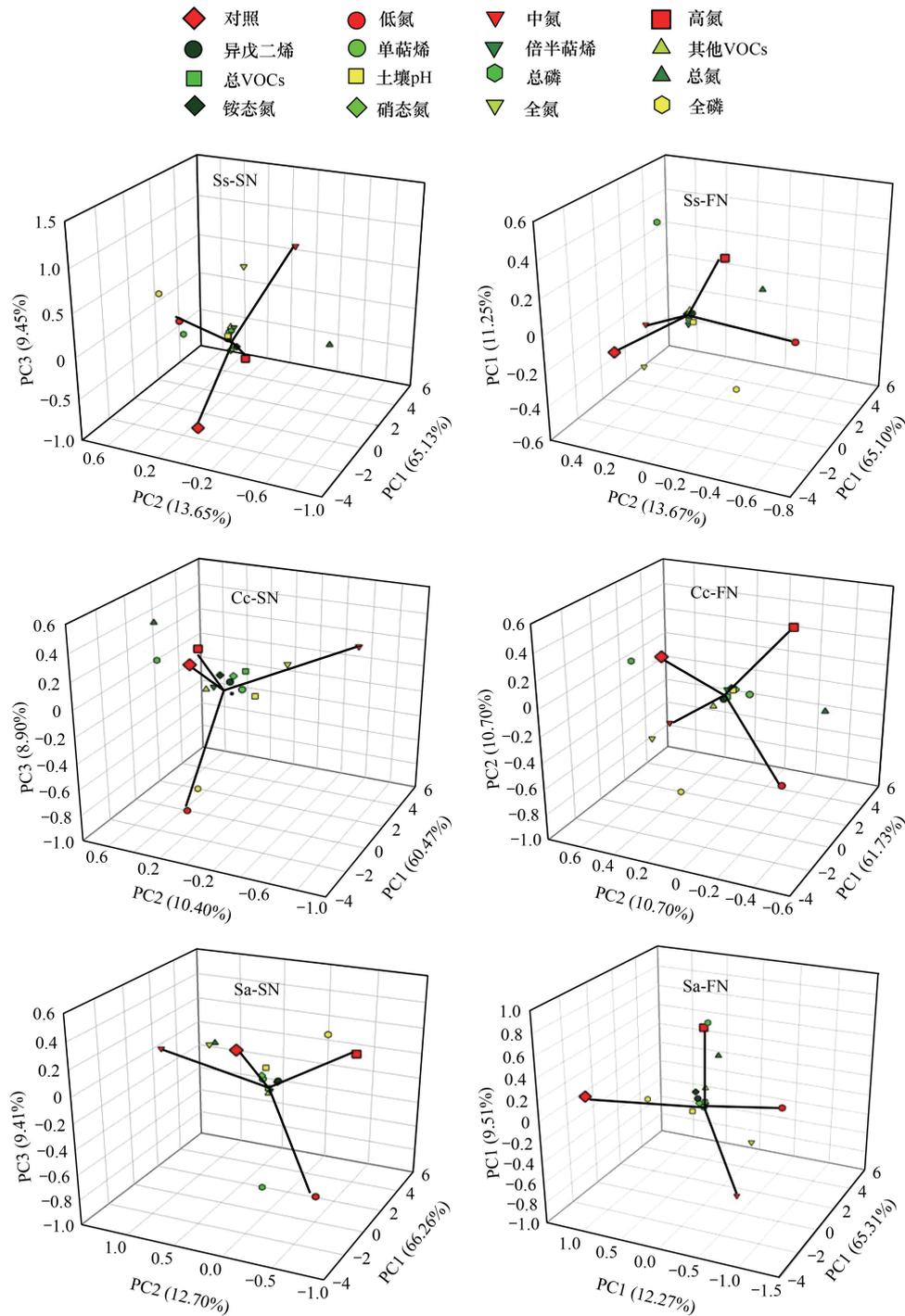


图 4 外源施氮处理下木荷(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)和线枝蒲桃(*Syzygium araiocladum*) BVOCs 释放与土壤理化性质间的主成分分析

Fig.4 The Principal Component Analysis (PCA) analysis of BVOCs emission rates and soil physicochemical properties of *Schima superba*, *Cryptocarya chinensis* and *Syzygium araiocladum* under different nitrogen treatments

88.37%,此时叶面施氮下各植物 3 个因子的累积贡献率分别为 90.01%、90.41%和 87.08%。图 4 中,外源施氮下木荷主成分 1 所对应的特征形状中,单萜烯、倍半萜烯、其他 VOCs、TVOCs、pH 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有较高权重,其所对应的载荷量绝对值均大于 0.96,其次是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和异戊二烯的相对载荷量较高;主成分 2 中,TN 的载荷量最大,其在土壤施氮和叶面施氮下的载荷量绝对值分别为 0.95 和 0.83;主成分 3 中,载荷量最大的分别是全氮和 TP。此外,叶面施氮下,高氮处理组与各土壤理化性质具有强的相关性,而土壤施氮下,中氮与各土壤理化性质的相关性最强。

两种外源施氮方式下厚壳桂主成分 1 的贡献率分别为 60.47%和 61.73%,与木荷不同,其载荷量位于前五的分别是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NNO}_3^-\text{-N}$ 、倍半萜烯、pH 和 TVOCs,其载荷量均高于 0.91,其次是异戊二烯、其他 VOCs 和 TN,AP 的权重最低。此外,相较于对照、中氮和高氮处理组,低氮浓度与各理化性质的相关性最低。

对线枝蒲桃各类指标进行主成分分析后发现,土壤施氮和叶面施氮下主成分 1 中载荷量最高的依次是 TVOCs、倍半萜烯、其他 VOCs、单萜烯、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和异戊二烯,其载荷量均高于 0.92;主成分 2 中载荷量 AP 的权重最高,其载荷量分别为 -0.71 和 0.88。叶面施氮下,低氮组和对照组与各土壤理化性质相关性强于中氮和高氮组,而在土壤施氮下,对照组与各土壤理化性质的相关性最强。

2.4 外源施氮对土壤理化性质的影响

外源施氮下,对采集的盆栽土壤样品共分析检测了 7 种指标。表 6 中,施氮对土壤的 pH、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AN 和 TP 均产生了不同程度的影响,且叶面施氮比土壤施氮的影响效果更明显。其中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随氮浓度的升高明显增大($P<0.05$);pH 则随施氮浓度的增加而显著降低($P<0.05$)。在叶面施氮条件下,木荷土壤有效氮的增加幅度明显高于厚壳桂和线枝蒲桃($P<0.05$),而在土壤施氮下,厚壳桂 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量显著高于木荷和线枝蒲桃($P<0.05$)。

3 讨论

植物释放 BVOCs 是一个复杂多变的过程,主要受植物本身的遗传特性(基因型)决定,植物科属亲缘关系不同,其释放的 BVOCs 种类就会有较大变化,如有些是异戊二烯的强排放种类,有些则是单萜烯的强排放种类^[18]。本实验分别从木荷、厚壳桂和线枝蒲桃枝叶中分离鉴定出 14 种、34 种和 24 种挥发性有机物,包括异戊二烯、单萜烯、倍半萜烯和其他 VOCs(烷烃、羰基、醛类、醇类、酯类、醚类、酸类)四类。徐文等^[19]对木荷挥发物数量进行分析,共鉴定出 12 种化合物,和本研究结果类似。BVOCs 释放还受研究采用的采集、分析和鉴定方法影响,不同的方法也会导致所得到的结果存在差异。

一般认为,阔叶树种释放的 VOCs 类型多样、成分复杂,以释放异戊二烯为主,针叶树种则以释放单萜烯为主^[20]。本文中三种阔叶树枝叶释放的 VOCs 组分差异明显,但都以释放单萜烯和倍半萜烯为主。这可能是因为三者均属于热带常绿植物,具有相似的生理生态习性。受外源施氮的影响,植物释放各 VOCs 的速率占比发生变化,其中土壤施氮下木荷和线枝蒲桃 TVOCs 组成变化较明显,引起单萜烯和其他 VOCs 占比增加,而异戊二烯和倍半萜烯的比重降低。其他 VOCs 被认为可能影响大气化学并具有抵抗非生物和生物胁迫的能力^[21-22],如 C_6 和 C_9 的醛和醇,其通过脂氧合酶途径合成的,在植物抗逆性中起着关键作用^[23]。

BVOCs 是植物抵御环境影响的重要物质,也被认为是植物适应全球气候变化的一种适应策略^[24-25]。模拟自然氮沉降背景下,施氮浓度和施氮方式均会影响植物幼苗释放 BVOCs 的情况。植物吸收氮素的主要途径有土壤施氮和叶面施氮,土壤施氮是由植物根毛区对氮素进行稀释,而叶面施氮是通过植物叶片的气孔吸收。与土壤施氮相比,叶面施氮针对性强,养分吸收快,更符合大气氮沉降对幼苗的影响。大气中的氮沉降首先通过植物叶片的吸收或保留而间接到达土壤,这些过程引起了土壤氮量的变化^[26-28],从而导致了两种施氮方式对 BVOC 排放的不同响应。本研究的结果也表明,叶面施氮比土壤施氮对三种幼苗 TVOCs 的释放促进效果更为显著。Wortman^[29]和 Houle 等^[30]也发现在 Novaggio 森林和加拿大北方针叶林中,分别有 15%—20% 和 52%—59% 的氮沉降被树叶拦截。由此可见,采取叶面施氮的方式更有利于植物对氮素的吸收。

表 6 不同氮处理下木荷 (*Schima superba*)、厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*) 和线蒲桃 (*Syzygium araiocladum*) 盆栽土壤理化性质 (平均值±标准误, $n=10$)

Table 6 Soil physical-chemical properties of *Schima superba*, *Cryptocarya chinensis* and *Syzygium araiocladum* under different nitrogen treatments (Mean±SD, $n=10$)

氮水平 Level of nitrogen application	土壤 pH Soil pH	总氮 TN/(g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N / (mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N / (mg/kg)	有效氮 AN/ (g/kg)	总磷 TP/ (g/kg)	有效磷 AP/ (g/kg)
木荷土加氮 Soil nitrogen applied to <i>Schima superba</i>							
对照 Control group	4.00±0.0Ba	1.70±0.0Aa	6.73±0.1Ad	10.94±0.1Bd	833.43±13.8Bb	0.22±0.0Aa	0.06±0.0Ba
低氮 Low nitrogen	3.91±0.0Ab	1.69±0.0Aa	8.04±0.1Ac	15.59±0.2Bc	859.25±16.4Aab	0.19±0.0Ab	0.07±0.0Aa
中氮 Medium nitrogen	3.54±0.0Cc	1.76±0.0Aa	23.37±0.5Ab	28.878±0.5Cb	928.84±6.8Aa	0.19±0.0Ab	0.07±0.0Aa *
高氮 High nitrogen	3.18±0.0Cd	1.68±0.0ABa	37.60±0.4Aa	57.844±0.3Ba	833.36±7.9Bab	0.18±0.0ABb	0.07±0.0Aa
木荷叶加氮 Foliar nitrogen applied to <i>Schima superba</i>							
对照 Control group	4.84±0.1Aa *	1.73±0.0Aa	11.27±0.2Ad *	22.70±0.3Ad *	869.79±15.40Aa	0.19±0.0Aa	0.07±0.0Bb
低氮 Low nitrogen	4.30±0.0Cb *	1.76±0.0Aa	16.43±0.3 Ac *	33.85±0.4Ac *	814.37±22.2Bab	0.19±0.0Aa	0.07±0.0Aab
中氮 Medium nitrogen	4.03±0.0Cc *	1.74±0.0Aa	32.78±0.2Ab *	56.18±0.6Ab *	860.49±20.9ABab	0.19±0.0Aa	0.06±0.0Ab
高氮 High nitrogen	3.52±0.0Cd *	1.74±0.0Aa	55.26±0.5Aa *	117.47±0.9Aa	803.92±22.9Bb	0.20±0.0Aa	0.07±0.0Aa
厚壳桂土加氮 Soil nitrogen applied to <i>Cryptocarya chinensis</i>							
对照 Control group	4.15±0.0Aa	1.78±0.1Aa	5.10±0.2Bd	16.76±0.0Ad	919.33±33.3Aa	0.22±0.0Aa	0.06±0.0Aa
低氮 Low nitrogen	3.83±0.0Bb	1.72±0.0Aa	8.24±0.1Ac *	25.71±0.6Ac	712.15±103.5Aa	0.20±0.0Aab *	0.07±0.0Aa
中氮 Medium nitrogen	3.66±0.0Bc	1.68±0.0Aa	17.01±0.4Bb	55.04±1.6Ab *	905.00±27.1Aa	0.17±0.0Ab *	0.06±0.0Ba
高氮 High nitrogen	3.32±0.0Bd	1.68±0.0Ba	29.53±0.7Ba	73.42±0.5Aa	942.77±21.5Aa	0.19±0.0Ab *	0.07±0.0Aa
厚壳桂叶加氮 Foliar nitrogen applied to <i>Cryptocarya chinensis</i>							
对照 Control group	4.76±0.0Ba *	1.72±0.0Aa	5.23±0.1Bd	17.18±0.5Cd	881.31±34.7Aa	0.20±0.0Aa	0.07±0.0Aa
低氮 Low nitrogen	4.46±0.0Bb *	1.76±0.0Aa	6.30±0.1Bc	23.79±0.6Cc	887.658±29.0Aa	0.14±0.0Bb	0.07±0.0Aa
中氮 Medium nitrogen	4.10±0.0Bc *	1.67±0.0Ba	20.94±0.5Bb *	47.54±2.1Bb	904.57±24.5Aa	0.13±0.0Cb	0.07±0.0Aa
高氮 High nitrogen	3.84±0.0Bd *	1.73±0.0Aa	43.96±0.8Ba *	95.45±6.2Ba *	882.10±14.1Aa	0.16±0.0Ba	0.07±0.0Aa
线枝蒲桃土加氮 Soil nitrogen applied to <i>Syzygium araiocladum</i>							
对照 Control group	4.14±0.0Aa	1.68±0.0Aa	4.19±0.2Bd	9.94±0.1Cd	898.49±14.6Ab *	0.18±0.0Ba	0.07±0.00Aab
低氮 Low nitrogen	3.86±0.0Bb	1.63±0.1Aa	7.05±0.0Bc	14.38±0.2Cc	823.76±9.3Aa	0.19±0.0Aa	0.07±0.0Aab
中氮 Medium nitrogen	3.75±0.0Ac	1.79±0.0Aa *	11.60±0.3Cb	40.22±0.3Bb	900.86±13.6Ab	0.17±0.0Aa	0.07±0.0ABb
高氮 High nitrogen	3.64±0.0Ad	1.76±0.0Aa	25.54±0.4Ca	53.82±0.4Ca	764.88±18.4Cac	0.16±0.0Bca	0.08±0.0Aa
线枝蒲桃叶加氮 Foliar nitrogen applied to <i>Syzygium araiocladum</i>							
对照 Control group	4.77±0.0ABa *	1.67±0.0Ab	8.23±0.3Cd *	19.78±0.9Bd *	750.94±13.9Ba	0.18±0.0Aa	0.08±0.0Aa
低氮 Low nitrogen	4.53±0.0Ab *	1.76±0.0Aa	15.13±0.4Cc *	31.42±0.3Bc *	864.17±17.0ABb	0.17±0.0Aab	0.07±0.0Ab
中氮 Medium nitrogen	4.39±0.0Ac *	1.67±0.0Bbc	30.46±0.2Cb *	49.69±0.7Bb *	843.82±13.1Bb *	0.16±0.0Bb	0.07±0.0Ab
高氮 High nitrogen	4.16±0.0Ad *	1.72±0.0Aabc	51.91±0.3Ca *	117.35±3.0Aa *	839.53±11.2ABb *	0.17±0.0Bab	0.08±0.0Aa

不同大写字母表示树种间差异显著 ($P<0.05$); 小写字母表示氮水平间差异显著 ($P<0.05$); * 表示施氮方式间差异显著性 ($P<0.05$)

就施氮浓度而言,本实验的低、中和高氮浓度均促进了木荷、厚壳桂和线枝蒲桃幼苗 BVOCs 的释放,且促进效果随施氮浓度升高而增加。Huang 等^[31] 研究表明在中浓度 ($15.6 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和高浓度 ($20.6 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 叶面施氮下,马尾松和木荷 TVOCs 释放均被显著抑制,与本研究结果相反。推测是因为植物生长的土壤理化性质不同导致的,通过对比发现,本实验盆栽土壤中的总氮、硝态氮、铵态氮的含量是 Huang 等人实验土壤的 2—3 倍。当系统氮素水平处于适合植物生长范围,土壤中 N 可利用性升高会促进更多的碳分配到植物生长(叶片厚度、腺大小和体积),对 BVOCs 释放影响不显著;而当系统中氮素过量时,氮沉降则会促进植物地上部分的生长,致使地上部分积累过多的碳水化合物而产生和释放大量的 BVOCs^[1232-33]。根据这一说法提出以下假说:三种植物幼苗随着环境中氮浓度的增加,其 BVOCs 的释放量增大。

相关性分析结果表明,外源施氮下植物净光合速率和气孔导度是影响其释放 VOCs 的重要因素。有趣的

是,两者在两种施氮方式下呈相反的变化趋势。叶面施氮下,幼苗净光合速率和气孔导度在对照处理下最小,随施氮浓度的增加而上升,此时三种植物幼苗 BVOCs 释放与净光合速率显著正有关。土壤施氮下,植物幼苗净光合速率和气孔导度在对照组最大,在氮处理下反而下降,这很有可能是因为氮素过量导致的,此时木荷各 VOCs 种类释放与净光合速率呈显著负相关,这与俞飞的研究结果一致^[9];而线枝蒲桃 BVOCs 释放速率与净光合速率呈显著正相关。李德军等^[34]通过模拟氮沉降对 3 种亚热带优势树种木荷、厚壳桂和锥栗 (*Castanea henryi*) 生长和光合作用的响应,结果发现三种树苗净光合速率均随氮水平增加呈先上升后下降的趋势,即一定范围内的施氮会促进植物的光合作用,氮浓度过高时反而会使光合作用抑制。因此上述提及的假说是错误的,推测事实是:叶面施氮下,低、中和高浓度的施氮水平均未达到植物系统的氮饱和水平,此时光合速率和气孔导度与施氮浓度呈正相关关系,而同等施氮水平下的土壤施氮使系统氮素过饱和或富营养化,此时植物通过降低自身的光合速率和关闭气孔导度为抵御氮素胁迫。本研究结果还表明叶温与外源施氮下植物幼苗 BVOCs 释放无关,说明氮沉降对植物叶片温度几乎无影响。此外,本研究也间接证明了郑丽丽等^[35]的研究,温度过高会抑制相关合成酶的生成,本实验采样期间,所测温度大多高于 30 °C (28—34 °C 之间)^[36]。

其次,前文已经提及,植物 BVOCs 的释放受植物自身条件及生理状态影响。木荷、厚壳桂和线枝蒲桃均为被子植物,其水分通过导管运输,但因为线枝蒲桃的叶片面积较木荷和厚壳桂小,限制了叶片光合及蒸腾作用^[36]。推测在同一环境中,线枝蒲桃的光合和蒸腾速率维持在一个相对较低的平稳水平,其光合作用受养分和水分的限制较小。此外,研究表明木荷本身富氮及大而薄的叶片结构等生理特征已满足自身代谢要求,施氮反而加速了水分流失,导致其光合速率下降的水平高于厚壳桂,最终导致 BVOCs 与净光合速率和气孔导度呈显著负相关^[37]。因此土壤施氮下三种植物对氮沉降的敏感性大小关系为:木荷>厚壳桂>线枝蒲桃。

4 结论

外源施氮对植物叶片 VOCs 释放速率的影响与施氮水平、施氮方式和树种本身有关。总体来说,外源施氮均促进了三种植物幼苗 VOCs 释放,且叶面施氮的促进效果显著高于土壤施氮,也使植物 TVOCs 的组成发生改变;此外,TVOCs 释放速率和成分数量均随施氮浓度的升高而增加。叶面施氮下,其氮沉降氮水平未达到植物的氮饱和系统,此时光合速率和气孔导度与施氮浓度呈正相关关系,植物通过释放 VOCs 以调配自身碳素平衡;而土壤施氮下,植物生长系统氮素过饱和或富营养化,此时植物通过降低自身的光合速率和关闭气孔导度为抵御氮素胁迫。此外,就同一施氮方式和施氮浓度而言,三种植物幼苗对氮沉降的敏感性大小表现为木荷>厚壳桂>线枝蒲桃。

模拟自然氮沉降背景下,外源施氮对植物的生理参数和土壤肥力均产生了影响,影响效果随树种而异。生理参数中,净光合速率与幼苗释放 BVOCs 关系最为密切,其次是气孔导度。施氮主要对土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有显著影响,其次是 AP 和 TP,且叶面施氮的影响效果更为突出。其中不同氮浓度均导致土壤 pH 降低,尤其是高氮处理。土壤有效氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量随着氮水平的升高明显增大。

参考文献 (References):

- [1] Peñuelas J, Staudt M. BVOCs and global change. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(3): 133-144.
- [2] 熊振华, 钱枫, 苏荣荣. 大气中 VOCs 分布特征和来源的研究进展. *环境科学与技术*, 2013, 36(S2): 222-228.
- [3] 李洪远, 王芳, 熊善高, 孟伟庆, 吕铃钥. 植物挥发性有机物的作用与释放影响因素研究进展. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 292-296.
- [4] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 2011.
- [5] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöösmary C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [6] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.

- [7] 毛晋花, 邢亚娟, 马宏宇, 王庆贵. 氮沉降对植物生长的影响研究进展. 中国农学通报, 2017, 33(29): 42-48.
- [8] Loreto F, Sharkey T D. On the relationship between isoprene emission and photosynthetic metabolites under different environmental conditions. *Planta*, 1993, 189(3): 420-424.
- [9] 俞飞. 模拟氮沉降对雌雄美洲黑杨光合特性和异戊二烯释放的影响. 林业科技通讯, 2018(5): 3-6.
- [10] Kim J C. Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(19): 3279-3292.
- [11] Bryant J P, Chapin F S, Klein D R. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos*, 1983, 40(3): 357.
- [12] 黄娟, 莫江明, 孔国辉, 鲁显楷, 张炜. 植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望. 生态学报, 2011, 31(21): 6616-6623.
- [13] Wang A, Fang Y T, Chen D X, Koba K, Makabe A, Li Y D, Luo T S, Yoh M. Variations in nitrogen-15 natural abundance of plant and soil systems in four remote tropical rainforests, Southern China. *Oecologia*, 2014, 174(2): 567-580.
- [14] 林富平. 桂花挥发性有机物释放动态及其对空气微生物的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [15] Strickler H, Kovats E. Influence of experimental condition on peak resolution in gas chromatography. *Journal of Chromatography*, 1962, 8: 289-302.
- [16] Smith R J, Haken J K, Wainwright M S. Estimation of dead time and calculation of Kovats indices. *Journal of Chromatography A*, 1985, 334: 95-127.
- [17] 杜森, 高祥照, 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范(第二版). 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [18] Kesselmeier J, Staudt M. Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1999, 33(1): 23-88.
- [19] 徐文, 周光雄, 戴毅, 姚新生. 木荷茎的化学成分研究. 中草药, 2010, 41(6): 863-866.
- [20] 张倩, 李洪远, 贺梦璇, 吕铃钥, 杨佳楠. 天津市常用绿化树种挥发性有机物排放潜力估算. 环境科学研究, 2018, 31(2): 245-253.
- [21] Helmig D, Daly R W, Milford J, Guenther A. Seasonal trends of biogenic terpene emissions. *Chemosphere*, 2013, 93(1): 35-46.
- [22] Holopainen J K. Can forest trees compensate for stress-generated growth losses by induced production of volatile compounds? *Tree Physiology*, 2011, 31(12): 1356-1377.
- [23] Dudareva N, Klempien A, Muhlemann J K, Kaplan I. Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist*, 2013, 198(1): 16-32.
- [24] Vickers C E, Gershenzon J, Lerdau M T, Loreto F. A unified mechanism of action for volatile isoprenoids in plant abiotic stress? *Nature Chemical Biology*, 2009, 5(5): 283-291.
- [25] Wiberley A E, Linskey A R, Falbel T G, Sharkey T D. Development of the capacity for isoprene emission in kudzu. *Plant, Cell & Environment*, 2005, 28(7): 898-905.
- [26] Gaige E, Dail D B, Hollinger D Y, Davidson E A, Fernandez I J, Sievering H, White A, Halteman W. Changes in canopy processes following whole-forest canopy nitrogen fertilization of a mature spruce-hemlock forest. *Ecosystems*, 2007, 10(7): 1133-1147.
- [27] Huang X R, Liu Y F, Li Y Y, Guo P P, Fang X, Yi Z G. Foliage application of nitrogen has less influence on soil microbial biomass and community composition than soil application of nitrogen. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 221-231.
- [28] Zhang W, Shen W, Zhu S, Wan S, Luo Y, Yan J, Wang K, Liu L, Dai H, Li P, Dai K, Zhang W, Liu Z, Wang F, Kuang Y, Li Z, Lin Y, Rao X, Li J, Zou B, Cai X, Mo J, Zhao P, Ye Q, Huang J, Fu S. CAN canopy addition of nitrogen better illustrate the effect of atmospheric nitrogen deposition on forest ecosystem?. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11245.
- [29] Wortman E, Tomaszewski T, Waldner P, Schleppl P, Thimonier A, Eugster W, Buchmann N, Sievering H. Atmospheric nitrogen deposition and canopy retention influences on photosynthetic performance at two high nitrogen deposition Swiss forests. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2012, 64(1): 17216.
- [30] Houle D, Marty C, Duchesne L. Response of canopy nitrogen uptake to a rapid decrease in bulk nitrate deposition in two eastern Canadian boreal forests. *Oecologia*, 2015, 177(1): 29-37.
- [31] Huang X R, Lai J M, Liu Y F, Zheng L L, Fang X, Song W, Yi Z G. Biogenic volatile organic compound emissions from *Pinus massoniana* and *Schima superba* seedlings: their responses to foliar and soil application of nitrogen. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135761.
- [32] Blanch J S, Peñuelas J, Llusià J. Sensitivity of terpene emissions to drought and fertilization in terpene-storing *Pinus halepensis* and non-storing *Quercus ilex*. *Physiologia Plantarum*, 2007, 131(2): 211-225.
- [33] Velikova V, Tsonev T, Barta C, Centritto M, Koleva D, Stefanova M, Busheva M, Loreto F. BVOC emissions, photosynthetic characteristics and changes in chloroplast ultrastructure of *Platanus orientalis* L. exposed to elevated CO₂ and high temperature. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2629-2637.
- [34] 李德军, 莫江明, 方运霆, 蔡锡安, 薛璟花, 徐国良. 模拟氮沉降对三种南亚热带树苗生长和光合作用的影响. 生态学报, 2004, 24(5): 876-882.
- [35] 郑丽丽. 南亚热带森林地表和植物挥发性有机物通量对模拟氮沉降的响应[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [36] 孙双峰, 黄建辉, 林光辉, 韩兴国. 三峡库区岸边共存松树树种水分利用策略比较. 植物生态学报, 2006, 30(1): 57-63.
- [37] 黄儒珠, 李机密, 郑怀舟, 王健, 周延锋. 福建长汀重建植被马尾松与木荷光合特性比较. 生态学报, 2009, 29(11): 6120-6130.