

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.020

引用格式:高顺心,田斌,王树林,等.滇西北高寒草甸生态系统生物源挥发性有机化合物(BVOC)排放的季节特征[J].草地学报,2026,34(7):2568—2578

GAO Shun-xin, TIAN Bin, WANG Shu-lin, et al. Seasonal Variations of Biogenic Volatile Organic Compound Emissions from An Alpine Meadow Ecosystem in Northwestern Yunnan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2568—2578

滇西北高寒草甸生态系统生物源挥发性有机化合物(BVOC)排放的季节特征

高顺心^{1,2}, 田斌^{1,2}, 王树林^{1,2}, 王莲^{1,2}, 李涛^{3*}

(1. 西南林业大学云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 云南昆明 650224; 2. 香格里拉普达措国家公园碧塔海高原湿地生态系统云南省野外科学观测研究站, 云南昆明 650233; 3. 四川大学教育部生物资源与生态环境重点实验室, 成都市植物园-四川大学山地植物迁地保护与资源利用实验室, 四川大学西南特色生物资源研究与利用四川省重点实验室, 四川成都 611130)

摘要:植物产生和排放的生物源挥发性有机化合物(Biogenic volatile organic compounds, BVOC)在大气中具有高化学反应活性,对大气化学和气候变化有着重要影响,是重要的大气痕量气体。为揭示高寒草甸BVOC排放的季节变化规律及其驱动因素,本研究以滇西北高寒草甸为研究对象,于2024年7—10月采用动态顶空采集系统结合GC/MS技术进行原位监测,并同步记录植被结构与环境因子。结果表明,共检出130余种BVOC,分属异戊二烯、单萜烯等11类。BVOC总排放速率具有显著季节差异,7月最高[(2485.51±847.08) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$],10月最低[(206.27±166.11) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$]。7—8月排放以异戊二烯为主(近100%),9—10月排放结构趋于多样化,绿叶气体、倍半萜烯和醛类显著增加。随机森林分析表明,异戊二烯是区分不同月份排放特征的关键化合物。BVOC排放受温度、光照及植被结构的共同影响,高温强光促进异戊二烯排放,低温与植株衰老增强非光依赖型BVOC释放。木里薹草(*Carex muliensis*)盖度与异戊二烯排放呈显著正相关,伴生种异质性和花期变化提高了BVOC排放多样性。本研究为揭示滇西北高寒草甸与大气交互作用及气候反馈提供了科学依据。

关键词:生物源挥发性有机化合物;高寒草甸生态系统;物候;季节变化

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2568-11

Seasonal Variations of Biogenic Volatile Organic Compound Emissions from An Alpine Meadow Ecosystem in Northwestern Yunnan

GAO Shun-xin^{1,2}, TIAN Bin^{1,2}, WANG Shu-lin^{1,2}, WANG Lian^{1,2}, LI Tao^{3*}

(1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province 650224, China; 2. Shangri-La Potatso National Park Bita Lake Plateau Wetland Ecosystem Observation and Research Station of Yunnan Province, Kunming, Yunnan Province 650233, China; 3. Key Laboratory of Bio-Resource and Eco-Environment of Ministry of Education, Chengdu Botanical Garden-Sichuan University Joint Laboratory for Ex Situ Conservation and Resource Utilization of Mountain Plants, Southwest Bio-resources R&D Key Laboratory of Sichuan Province, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu, Sichuan Province 611130, China)

Abstract: Biogenic volatile organic compound (BVOC) produced and emitted by plants exhibit high chemical reactivity in the atmosphere, exerting significant influence on atmospheric chemistry and climate change. They constitute important atmospheric trace gases. To elucidate the seasonal variation patterns and driving factors of BVOC emissions in alpine meadows, this study employed a dynamic headspace sampling system coupled with

收稿日期:2025-11-11;修回日期:2025-12-31

基金项目:青藏高原高寒草甸挥发性有机物排放对放牧强度的响应项目(32271692);基于光合-挥发物耦合机制的川西高寒草地高碳汇草种资源筛选(2026NSFSC0129)资助

作者简介:高顺心(1998-),男,汉族,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事草地生态与全球变化生态学研究, E-mail:2305247402@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:tao.li@scu.edu.cn

GC/MS technology for in situ monitoring in alpine meadows of northwestern Yunnan from July to October 2024, concurrently recording vegetation composition and environmental factors. we detected over 130 BVOCs belonging to 11 classes, including isoprene and monoterpenes. Total BVOC emission rates exhibited pronounced seasonal variation, peaking in July [$(2485.51 \pm 847.08) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$] and reaching a minimum in October [$(206.27 \pm 166.11) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$]. Emissions from July to August were dominated by isoprene (nearly 100%), while emissions from September to October exhibited greater diversity, with notable increases in green leaf volatiles, sesquiterpenes, and aldehydes. Random forest analysis indicated isoprene as the key compound distinguishing monthly emission patterns. BVOC emissions were jointly influenced by temperature, light intensity, and vegetation structure: high temperatures and strong light promoted isoprene release, whereas low temperatures and plant senescence enhanced non-light-dependent BVOC emissions. Coverage of *Carex muliensis* was significantly positively correlated with isoprene emissions, while co-occurring species heterogeneity and flowering period variations enhanced BVOC emission diversity. These findings would aid in our understanding of BVOC-driven atmospheric processes and climatic feedbacks within the alpine meadows of northwestern Yunnan.

Key words: Biogenic volatile organic compounds; Alpine meadow ecosystems; Plant phenology; Seasonal variation

生物源挥发性有机化合物(Biology volatile organic compound, BVOC)是生物体向大气中释放的一类低沸点、低分子量的活性有机气体,主要包括异戊二烯、单萜烯、倍半萜烯等化合物^[1]。陆地植被是大气BVOC的主要贡献者,其年总排放量达到1~1.5 Pg^[2],其中异戊二烯和单萜烯分别占全球BVOC的53%和15%^[3]。BVOC通过参与近地面大气对流层臭氧的光化学反应过程,显著影响对流层臭氧浓度及大气氧化水平^[4];同时,BVOC对大气氧化剂(尤其是OH自由基)的消耗可延长甲烷等温室气体在大气中的大气寿命,从而影响区域和全球气候变化^[5],并且BVOC作为化感作用化学物质对植物生长发育存在直接或间接影响^[6]。20世纪80年代以来,国外学者已经开始对BVOC展开广泛研究,特别是欧美、日本等发达国家对森林排放的BVOC进行了大量的研究,现已基本建立了森林BVOC排放量的数据库,并利用BVOC模型评估BVOC排放对区域乃至全球大气环境的影响^[6-8]。然而,相较于森林生态系统,高寒草甸生态系统的BVOC排放特征研究仍较为匮乏。

BVOC排放受诸多环境因子复杂调控^[7],其中非生物因子主要包括温度^[8]、光照^[9-10]等气候条件,它们直接调控BVOC合成的生化途径(如异戊二烯的合成强烈依赖于光照和温度^[11-12])。生物因子主要包括植物群落结构^[13]、物候^[14]、病虫害^[15]等,通过影响植物生理活动间接调控BVOC的排放速率和化学组成,这些生物和非生物因子均具有明显的季节变化规律,并驱动植物生理过程发生相应的季节变化^[16]。因此,植物BVOC排放也表现出明显的季节和日变化^[17]特征。目前,关于草地生态系统BVOC季节变

化特征的研究非常稀少,且多聚焦于旱季和湿润季节^[18],对生长季至枯黄季这一关键物候转换期的研究仍显不足,难以系统揭示植被生理衰退过程中BVOC排放的变化特征及其潜在生态效应。

高寒草甸作为青藏高原重要的生态系统类型^[19],其植物季节变化对区域碳循环、气候调节及生物地球化学过程具有显著影响。滇西北高寒草甸作为当地重要的放牧场所,放牧强度对优势种群与植物群落地上现存量^[20]和生物量^[21],以及牧民刈割对牧草光合作用产物分配均具有显著影响^[22]。近年来,在气候变化与人类活动双重压力下^[23],滇西北高寒草甸生态系统植被群落结构与物种组成正发生变化,而这种变化对高寒草甸生态系统与大气环境间BVOC交换的影响及其机制尚不明晰。目前,国内外学者对于植物BVOC排放的季节变化规律的研究主要集中于单一木本植物或人为种植多种木本植物实验^[24],对自然生态系统中草本植物季节变化对BVOC排放速率及组分的影响相关数据较为稀缺。此外,现有研究也主要集中在低海拔平原^[25]、北极苔原地区^[26],对于中、低纬度高海拔地区植物BVOC排放的时空格局研究亟待开展。因此,研究青藏高原高寒草甸BVOC排放的季节变化特征,对深入理解高原生物地球化学循环及准确评估其未来对区域大气环境与空气质量的潜在影响,均具有重要意义。

为深入揭示滇西北高寒草甸生态系统BVOC的排放规律及其关键驱动机制,本研究以云南省纳帕海省级自然保护区作为研究区域。于2024年7月至10月植被生长期至枯黄期转变的关键时期,采用动态顶空采集系统结合气相色谱—质谱联用技

术(GC/MS),对草甸植物BVOC的排放组分与通量开展系统性的原位监测。同步开展植被群落结构调查及多项环境因子的连续观测,旨在全面解析BVOC排放的季节动态变化特征,并深入揭示其背后的生物与非生物驱动因素。研究结果可为高寒生态系统物质循环及区域大气环境效应的评估提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

实验地点位于云南省西北部迪庆藏族自治州香格里拉市纳帕海省级自然保护区内(27.8404°N, 99.6543°E,海拔3269 m),该区域受西南季风影响、干湿季分明,夏秋多雨、冬春少雨^[27],年均降水量约619.5 mm,年均温约6.9℃,试验区土壤pH值约8.1,土壤孔隙度约41.2%。2024年8月对区域植物进行调查,该区域植被主要由菊科鼠曲草(*Pseudognaphalium affine*)、莎草科木里薹草(*Carex muliensis*)、华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)、蔷薇科西南委陵菜(*Argentina lineata*)、鹅绒委陵菜(*Argentina anserina*)等组成。在70 m×100 m的样地中,随机设置12个2 m×2 m样方,每个样方中间埋0.3 m×0.3 m不锈钢基座,用于监测生态系统

BVOC排放。然而,受天气条件影响,7月采集到8个样方;9月采集到11个样方;8,10月各采集12个样方。

1.2 BVOC与植物特征收集

2024年7—10月,每月选取晴朗天气,使用动态顶空BVOC采集系统(dynamic headspace sampling system)收集BVOC一次,动态顶空BVOC采集系统测量室长0.33 m,宽0.33 m,高0.5 m。上室用光合有效辐射(photosynthetic active radiation, PAR)穿透率高(>95%)的聚碳酸酯透明板(厚度2 mm)制成;上室顶部设置温度、湿度记录仪,内侧设置两个风扇混合室内气体,上室侧面有进气和出气孔(图1)。每次采样前,将腔室倒扣于不锈钢基座的密封槽中,用水密封,并以15 L·min⁻¹流速冲洗腔室5 min,气体经活性炭和O₃过滤器过滤,冲洗结束后,在出气口接上填有Tenax TA-Carbopack B-Carbopack X吸附剂的不锈钢采样管(广州莱创应用科技有限公司,广州,中国),以0.2 L·min⁻¹流速采集气体20 min,气体被吸附在填有吸附剂的吸附管中。采样结束后立即用内置特氟龙密封圈的黄铜盖封紧吸附管,低温保存(4℃)。BVOC采集结束后调查样方内植物物种、花朵数量,估算物种盖度。采样期间采样腔室内空气温度、湿度以及光合有效辐射,如表1。

表 1 7—10月采样期间相对湿度、温度、光和有效辐射

Table 1 Relative humidity, temperature, and photosynthetically active radiation during the sampling period from July to October

日期 Date	相对湿度 Relative humidity/%	温度 Temperature/℃	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
7月27日—7月28日	77.49±1.10	32.98±0.83	1413.590
8月20日—8月22日	69.25±2.42	34.43±1.25	1338.435
9月20日—9月21日	70.11±1.45	35.87±0.59	1605.946
10月17日—10月19日	71.89±1.60	28.55±1.10	1253.224

注:相对湿度和温度由腔室内置温度、湿度记录仪获取;光合有效辐射由Onset HOBO记录器获取

Note: Relative humidity and temperature were obtained from the chamber's built-in temperature and humidity sensors; photosynthetically active radiation was obtained from the Onset's HOBO data logger

1.3 BVOC组分分析

使用全自动热脱附仪(UNITY2, Markes International,英国)对样品热脱附,之后经气相色谱质谱联用仪(Gas Chromatography/Mass Spectrometry, GC/MS, Agilent 8890C-5977B GC/MSD,美国)对BVOC组分进行分离和检测。热脱附设置在250℃脱附10 min,He作为载气,使用HP-5超惰性毛细柱(30 m×0.25 mm; film thickness, 0.25 μm)。色谱柱的控温程序为:40℃保持0~5 min,之后以5℃·min⁻¹的速度升至210℃,再以20℃·min⁻¹的速度升至

250℃。获得的图谱用专业软件Paradise^[28]进行批量解谱,并基于标准样品和NIST20图谱库对BVOC的组分进行鉴定和定量。

1.4 BVOC排放速率计算

生态系统BVOC排放速率(μg·m⁻²·h⁻¹)的计算:生态系统BVOC的浓度减去同一天收集的空白浓度(排除采集系统的BVOC排放),按下公式计算:

$$E = \frac{(C_{out} - C_{in}) \times Q}{A}$$

其中 E 为基于单位面积计算挥发物的排放速率($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), C_{out} 是出气口的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$), C_{in} 是入

气口的浓度(将被视为0,因为采集过程中进气口气体被过滤), Q 是进气口流速($\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$), A 是地表面积(m^2)。

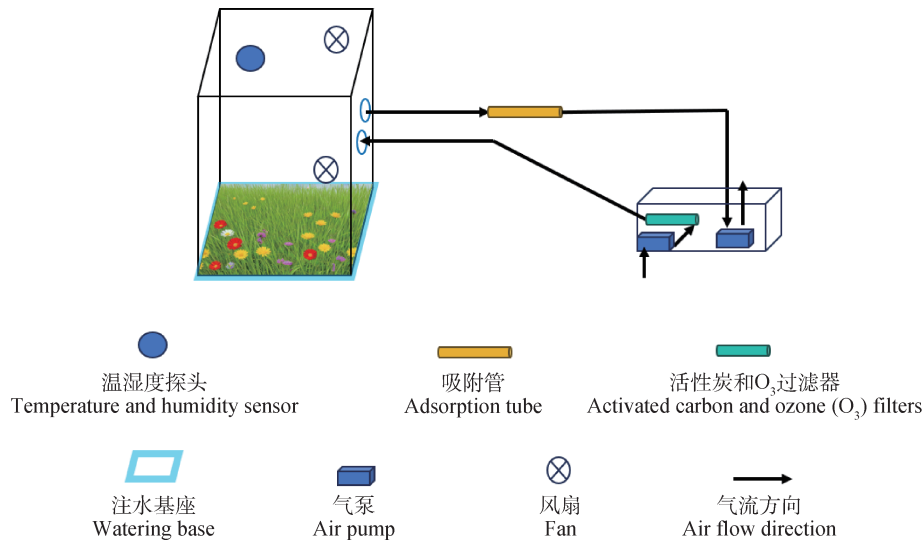


图1 动态顶空采集系统示意图

Fig. 1 Schematic representation of the dynamic headspace sampling system

注:腔室由两部分组成:上室和底座,气泵使用移动电源供电

Note: The chamber consists of two parts: the upper transparent chamber and the metal frame. The air pump is powered by a portable power bank

1.5 统计分析

使用 R4.2.2 (<http://www.r-project.org/>) 软件进行数据分析和作图,研究各挥发物组分的季节变化,掌握植物 BVOC 排放的季节变化规律。具体而言,运用主成分分析(PCA)评估不同样方间群落物种组成差异;采用随机森林分析(Random Forest Analysis, RF)分析月份之间 BVOC 组成变化以及识别驱动 BVOC 组分月度变化的关键化合物;利用相关性分析探究光照强度、湿度、温度等环境因子对样方 BVOC 排放速率的影响。

2 结果与分析

2.1 植被特征

所研究的高寒草甸群落中,植被组成涵盖莎草科、菊科、蓼科、豆科、玄参科、禾本科等多个主要类群,呈现典型的滇西北高原草本群落特征。莎草科的木里藁草作为全域核心优势种,在所有样方中均稳定存在,其相对占比介于 25%~45%,反映出该物种在群落结构中的主导地位,如图 2(a,b)。伴生种组成及其盖度分布表现出显著的空间异质性,部

分物种在特定样方中形成局部优势。例如,阿拉伯婆婆纳(*Veronica persica*)在样方 P2 中占比达 25%,成为该样方的关键伴生种;鼠曲草在 P5(25%)和 P11(20%)中优势显著;早熟禾(*Poa annua*)在 P7(23%)和 P10(25%)中也作为重要伴生种出现;而百脉根(*Lotus corniculatus*)在 P5 中占比 20%,为该样方的典型伴生种。此外,鹅绒委陵菜、华扁穗草等植物也在多个样方中频繁出现,进一步丰富了群落的物种组成与结构层次。上述分布格局表明,尽管木里藁草作为建群种统一了群落基底,不同微生境下的物种优势度仍存在明显分异。

鼠曲草是样方中主要开花植物,花期持续整个采样期。由图 2(c)可看出,群落样方植物花数呈现明显的季节性动态变化,7—8 月花数呈上升趋势,8 月达到花数峰值;9—10 月持续下降,10 月花数降至最低。同一月份内,不同样方的花数存在显著空间分异特征,8 月为植物生长鼎盛时期,花数达到峰值,样方 P11 花数远高于其他样方(>60 朵);7 月,8 月,10 月份样方 P1, P2 中花朵数为 0,而 9 月份样方 P1, P2 中出现花朵,其数量分别为 18, 3 朵;10 月样方花朵数整体减少,但 P11, P9 仍保持相对较高水平(>20 朵),多数样方花数集中在 10~20 区间。

存在显著分离。异戊二烯是导致月份间BVOC差异的主要化合物,而绿叶气体的贡献相对最小。具体而言,10月样本在MDS多维标度分析图中单独聚类,与7—9月样本显著分离;后者虽分布相对集中,但仍可区分,表明月份是影响BVOC组分的重要因素。

2.3 BVOC排放速率的季节变化特征

BVOC排放速率表现出显著的季节动态,不同化合物类别的变化趋势存在明显差异。如图4(l)总排放速率在7月达到峰值 $[2485.51 \pm 847.08] \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,随后逐月递减,至10月降至最低 $[206.27 \pm 166.11] \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。就BVOC种类而言,如图4(a)异戊二烯的排放速率在7月最高 $[2322.67 \pm 783.97] \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,之后显著下降,10月降幅最为显著,仅为7月排放速率的1.98%;与之相反,如图4(b,c,h)单萜烯、倍半萜烯和醛类的排放速率整体呈上升趋势,其中倍半萜烯和醛类的排放速率在10月显著增长,较7月增加约2倍和76倍;如图4(i,j,k)酯类、烷烃和烯烃则在8月出现排放高峰。在化合物层面,单萜烯以蒎烯和柠檬烯为主,倍半萜烯以石竹烯和法尼烯为主,其排放速率均在7—8月较低,随后上升,并于10月达到最大值。

2.4 影响BVOC组成多样性与排放速率的主要因素

2.4.1 生物因素 异戊二烯在7月呈现最高排放水平,成为夏季BVOC排放的主导组分,而不同BVOC的生物合成途径差异进一步增加了组成的复杂性(图3)。图5(a)相关性分析热图表明,植被盖度和植被类型与特定BVOC组分的排放速率存在显著相关性。具体而言,白车轴草(*T. repens*)与单萜烯、百脉根与酮类、木里藁草与异戊二烯排放速率之间呈显著正相关。花数与化合物排放速率相关性分析图5(b)进一步证实,开花物候对BVOC排放具有重要调控作用,表现为7月花数与多数BVOC组分呈负相关($-0.50 \sim -0.25$),而9—10月相关关系发生逆转并增强至0.25,这种物候依赖性的变化模式反映了植物生长策略对次生代谢产物合成的深刻影响。这些生物因素共同构成了一个复杂的调控网络,其中物候阶段特征决定了BVOC排放的时间动态;植被特征(包括物种组成和植被盖度)影响了排放的空间格局,而开花物候则通过调节资源分配进一步细化了BVOC的组成特征。

2.4.2 非生物因素 总体而言,所测环境因子与大多数BVOC排放速率之间的线性相关性较弱,但是异戊二烯的排放速率与光合有效辐射($r=0.47$, $P<0.01$)呈中等程度的正相关,而异戊二烯的排放速率与腔室内温度($r=0.52$, $P<0.001$)呈现出显著的正相关,表明其排放对光照和温度变化较为敏感。与之相比,其他大多数BVOC类别(如单萜烯、倍半萜烯、绿叶气体等)的排放速率与所测环境因子(腔室温、湿度及光合有效辐射)的线性相关性普遍较弱($|r|<0.3$),未表现出明显一致的依赖性。值得注意的是,单萜烯、苯环类、烯烃类的排放速率与光合有效辐射呈现出较弱的正相关趋势($r=0.37$, $r=0.31$, $r=0.35$, $P<0.05$)。而湿度与所有检测到的BVOC并无显著关系。在本研究中,除异戊二烯外,所关注的环境因子并非是直接驱动大多数BVOC排放的主要因素,植物生理状态或物候变化可能扮演着更为关键的角色。

3 讨论

3.1 BVOC排放的季节动态及其驱动机制

本研究中,7月至10月BVOC总排放速率呈递减趋势,该结果与高超等^[29]关于全国BVOC时空排放特征的研究结论一致,其核心驱动机制在于气候因子与植物生理过程的季节耦合。昼夜循环和季节变化造成的温度波动,会直接影响植物体内酶活性,进而迅速调控BVOC的合成和释放^[30]。7—8月期间,研究区光照强度大,莎草科等优势植物处于生长鼎盛期,光合作用强。异戊二烯主要通过甲基赤藓糖醇磷酸盐(MEP)途径在植物的叶绿体中合成^[31],并与植物的光合作用密切正相关^[32],因此,在高温与强光照的双重促进下,异戊二烯成为该阶段最主要的BVOC组分,相对占比近100%。尽管9月光照强度依然保持较高水平,但异戊二烯占比较7月下降至44.88%,推测可能与植物开始进入衰老阶段有关^[33]。10月,随着气温快速下降与光照减弱,植被群落进入枯黄期^[34],植物光合速率显著下降,导致异戊二烯合成底物供应不足^[35-36],其排放速率与占比均大幅下降,仅为7月排放速率的2.96%。

与之相反,单萜烯、倍半萜烯和醛类等BVOC的排放速率从7月至10逐渐增加,并在10月达到峰值,其中倍半萜烯和醛类的排放速率分别是7月的3倍和70倍以上,而绿叶气体也维持较高排放,这一

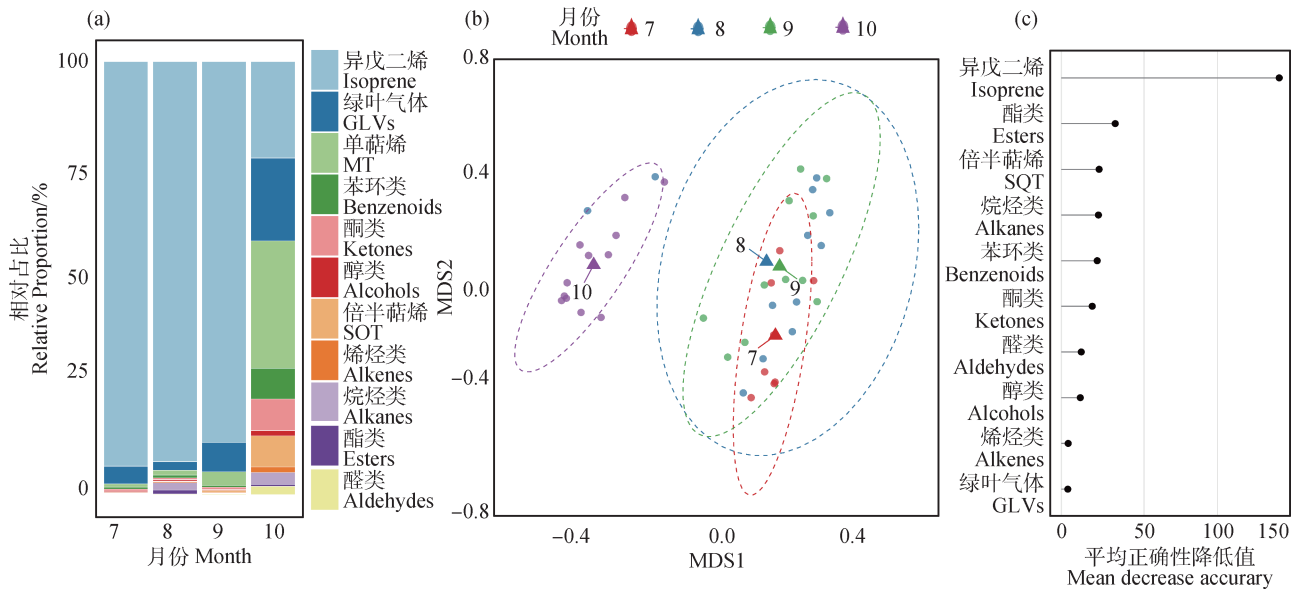


图3 BVOC组分特征分析

Fig. 3 Characteristic Analysis of BVOC Components

注: (a) 7—10月样方中各BVOC种类占总挥发物的比例; (b) 不同月份间BVOC组成差异的随机森林(RF)分类分析; (c) 关键BVOC组分的重要性排序(依据RF分析中的平均精度下降值, MDA)

Note: (a) Proportion of each BVOC species in the total volatiles within the quadrats from July to October; (b) Discrimination of BVOC profiles among months based on Random Forest (RF) classification analysis; (c) Ranking of volatile compounds that are most influential in distinguishing BVOC profiles among months, as measured by the mean decrease in accuracy (MDA) from RF analysis

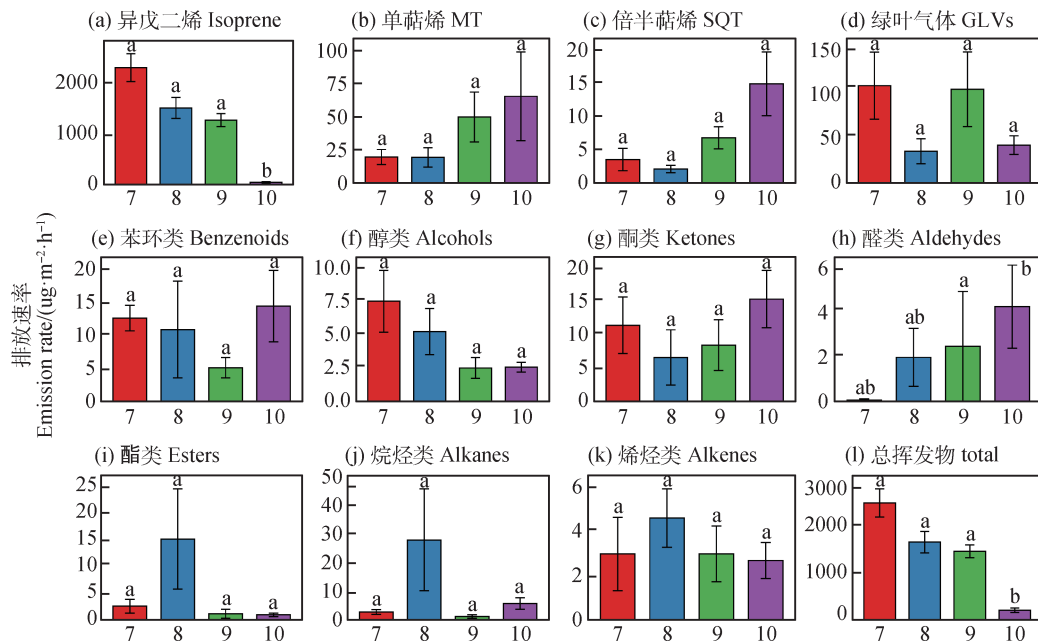


图4 7—10月11类BVOC及总BVOC月平均排放速率

Fig. 4 Monthly average emission rates of 11 BVOC categories and total BVOCs from July to October

注: 图中小写字母表示各月份间的差异显著性

Note: Different lowercase letters in the Fig. indicate the statistical significance of differences among months

现象很可能源于植物生理过程与细胞结构在物候转换期的显著变化。具体而言, 叶片快速衰老以及低温引起的细胞膜破裂和膜脂降解, 触发了绿叶气体快速释放^[37], 这与本研究观测结果一致。此外,

某些植物具备BVOC储存结构(如松科植物的树脂道排放BVOC、菊科植物的腺毛^[38]), 其中富含单萜烯和倍半萜烯非光依赖型BVOC^[39]。这些化合物受光照变化影响较小, 但在低温与衰老引起的储存

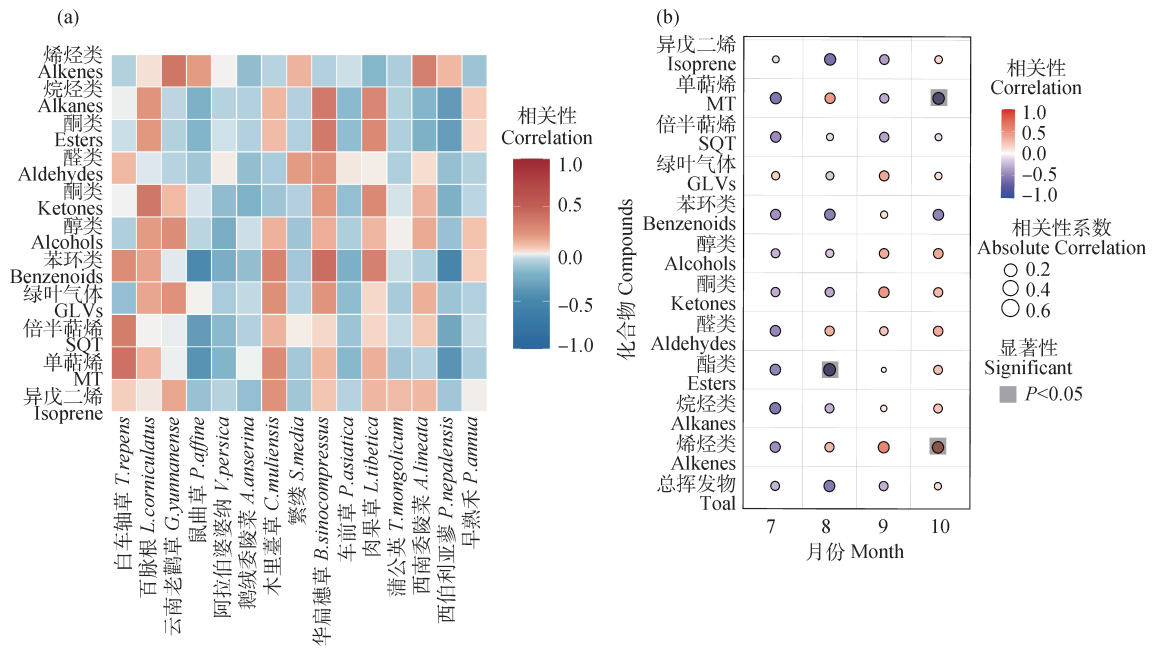


图 5 植物与 BVOC 排放速率相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between plant species and BVOC emission rates

注:(a)不同植物与BVOC排放速率之间的相关性热图;(b)每月样方内花朵总数与BVOC排放速率相关性矩阵。红色代表正相关,蓝色代表负相关,圆圈大小代表相关性指数的大小,黑色矩形表示具有较强显著性 $P < 0.05$

Note: (a) Heatmap showing correlations between BVOC emission rates and different plant species; (b) Correlation between total flower count and BVOC emission rates. Red and blue colors indicate positive and negative correlations, respectively, circle size represents the magnitude of the correlation coefficient, and black rectangles highlight significant correlations ($P < 0.05$)

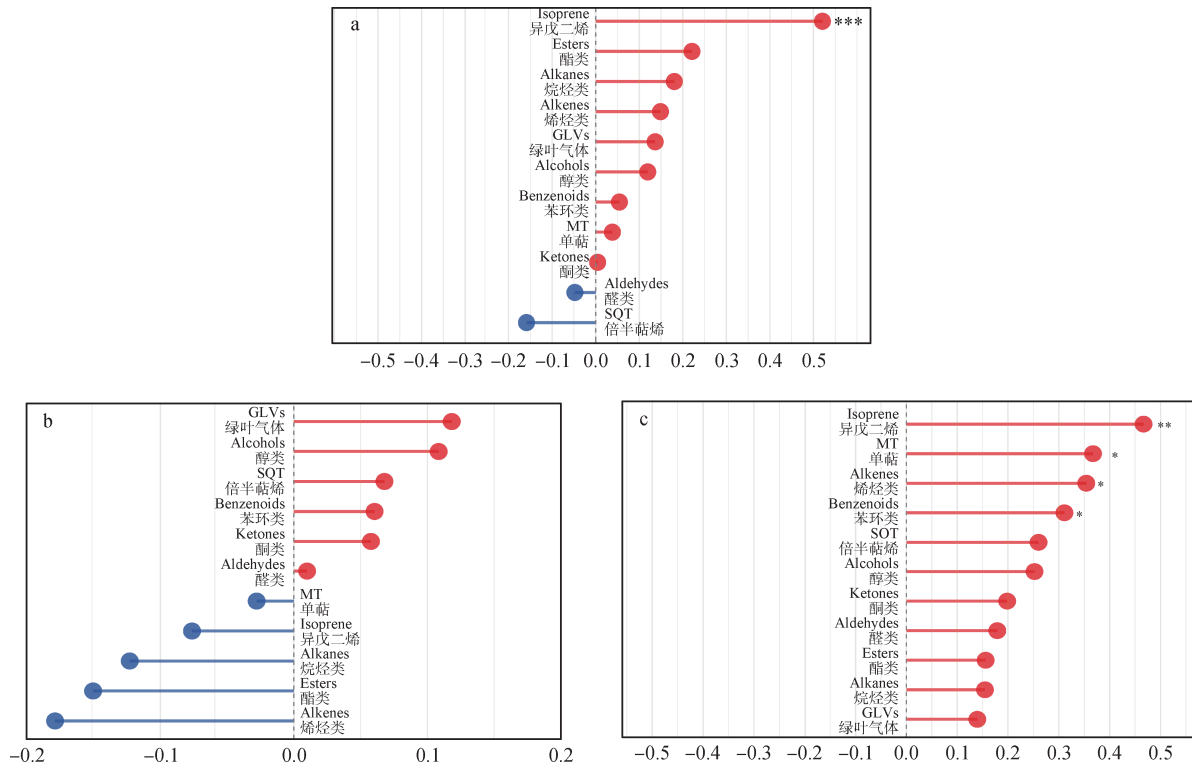


图 6 BVOC 排放速率与环境因子之间的相关性分析

Fig. 6 Correlations between BVOC emission rates and environmental factors

注:(a)腔室内温度($^{\circ}\text{C}$);(b)腔室内相对湿度($\%$);(c)光合有效辐射($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$);红色表示正相关,蓝色表示负相关;*表示 $P < 0.05$,**表示 $P < 0.01$,***表示 $P < 0.001$

Note: (a) Temperature ($^{\circ}\text{C}$) inside the chamber; (b) relative humidity ($\%$) inside the chamber; (c) photosynthetically active radiation ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Red and blue colors indicate positive and negative correlations, respectively. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

结构破损时会迅速释放。因此,10月观测到的高单萜烯与倍半萜烯排放,可能与菊科等植物在低温和衰老过程中储存器官的损伤有关。另一方面,低温胁迫也可能诱导植物增强单萜烯、倍半萜烯等次生代谢产物排放^[40],进而帮助植物应对低温环境导致的温度胁迫并提升抗冻能力^[41]。同时,生长季后期叶片衰老、凋落物分解及土壤微生物活动增强^[42],促使醛类等BVOC在生态系统中的排放贡献上升,进一步丰富了10月BVOC组分多样性。

特别值得注意的是,本研究发现,8月份酯类和烯烃的排放数量与花朵数呈正相关,10月单萜烯排放速率与花朵数呈显著正相关,表明开花物候的动态变化能显著改变生态系统BVOC的排放时间格局。一项在北极苔原生态系统的研究也发现,开花期与种子扩散期会导致生态系统水平的BVOC排放发生显著变化^[43],支持了本研究结果。花期较高的BVOC排放可能有助于吸引传粉昆虫^[44]。花朵释放的挥发物在植物自我保护^[45]以及植物与传粉昆虫的互惠作用中扮演关键角色^[46-48],对植物繁殖成功具有重要生态意义。

3.2 植物群落结构对BVOC排放的影响

除季节变化外,植物群落结构在空间上对BVOC排放亦具有重要影响。尽管大尺度上植被类型与气候差异可导致BVOC排放特征显著不同^[49],本研究发现,即使在小尺度范围内,不同样方间BVOC组成与排放速率仍存在显著差异,主要原因是该空间分异主要源于物种组成、盖度及微环境因子的共同作用。例如,莎草科木里藁草作为滇西北高寒草甸的核心优势种,其盖度在所研究样方中占比25%~45%,且与异戊二烯排放速率呈显著正相关,表明莎草科可能是滇西北高寒草甸异戊二烯排放的主要贡献者。尽管本研究未在物种水平解析物种间BVOC组成和排放速率的差异,但研究表明植物物种差异是影响BVOC的化合物组成及各组分的排放速率主要的决定因素^[50-51]。近期在青海省高寒草甸的研究表明,以莎草科为主的高寒草甸以排放异戊二烯为主^[16]。此外,在北极苔原生态系统的水平和物种水平开展的研究也表明,莎草科是高异戊二烯排放物种^[26]。

然而,群落的优势种并不一定是其BVOC排放的唯一或主要贡献者。例如,尽管禾本科植物在诸多群落中可能占据优势地位,但其BVOC排放的种类和速率通常较低;此时,菊科等伴生种虽盖度不

高,却可能通过释放单萜烯等化合物,成为影响群落BVOC组成的关键功能群。本研究也观察到,不同样方中伴生植物组成的差异造成了BVOC组成的细微变化,反映出自然群落中物种功能性状多样性与BVOC组成多样性之间的复杂关系。这一发现拓展了以往基于单一树种或人工群落的研究认知,强调了在评估生态系统BVOC排放时,需同时关注优势种与关键伴生种的贡献。

但需要指出的是,本研究的观测尺度局限于单一站点,尚难全面反映滇西北高寒草甸BVOC排放的空间异质性;同时,所纳入的环境因子以气象变量为主,尚未系统考虑土壤理化性质、植物生理代谢过程及微生物群落等潜在关键调控因素,这在一定程度上限制了对BVOC综合驱动机制的深入解析。未来研究可在更大空间尺度上构建多点位观测网络,覆盖不同植被类型和地形条件的高寒草甸,通过多季节同步观测提升研究结论的区域代表性;同时,加强对土壤理化性质、植物生理指标及微生物功能特征等多维度因子的综合监测,并结合模型模拟和遥感技术,系统解析高寒草甸BVOC排放格局及其调控机制。

4 结论

滇西北高寒草甸BVOC排放特征受气候因子、植被组成以及植被生理过程的协同调控,其季节变化体现为不同功能类型BVOC在物候变化过程中的阶段性主导与功能转换。生长旺盛期,在高温和强辐射条件下,优势种莎草科植物通过光依赖代谢途径主导异戊二烯排放,决定生态系统BVOC排放强度;而在生长季后期及低温条件下,随着植物衰老和组织结构变化,非光依赖型BVOC逐渐占据主导地位,显著提高了BVOC组成的多样性。

参考文献

- [1] GAN Z Y, ZHOU Q A, ZHENG C Y, et al. Challenges and applications of volatile organic compounds monitoring technology in plant disease diagnosis[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2023, 237: 115540
- [2] SHALAMZARI M S, KAHNT A, VERMEYLEN R, et al. Characterization of polar organosulfates in secondary organic aerosol from the green leaf volatile 3-Z-hexenal[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12671-12678
- [3] GUENTHER A B, JIANG X, HEALD C L, et al. The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions[J]. Geoscientific Model Development,

- 2012, 5(6):1471-1492
- [4] MCKEEN S A, HSIE E Y, LIU S C. A study of the dependence of rural ozone on ozone precursors in the eastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96(D8):15377-15394
- [5] CHENG Y, HE H J, YANG C P, et al. Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(6):1091-1102
- [6] 陈梦词, 盛庭岩, 索郎大吉, 等. 化感物质 α -蒎烯对垂穗披碱草-土壤反馈作用的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(11):3722-3731
- CHEN M C, SHENG T Y, SUO L, et al. Effects of allelopathic α -pinene on feedback interactions of *Elymus nutans* and soil [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(11):3722-3731
- [7] LI S J, YUAN X Y, LI S L, et al. Extreme heat event alters BVOC responses to elevated ozone: from physiology to emission patterns [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(24):12132-12144
- [8] WANG H L, WU K, LIU Y M, et al. Role of heat wave-induced biogenic VOC enhancements in persistent ozone episodes formation in Pearl River Delta [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(12): e2020JD034317
- [9] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428(6985):821-827
- [10] LIANG X Y, ZHANG T, LU X K, et al. Global response patterns of plant photosynthesis to nitrogen addition: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6):3585-3600
- [11] GOMES ALVES E, TAYLOR T, ROBIN M, et al. Seasonal shifts in isoprenoid emission composition from three hyperdominant tree species in central Amazonia [J]. *Plant Biology*, 2022, 24(5):721-733
- [12] SHARKEY T D, WIBERLEY A E, DONOHUE A R. Isoprene emission from plants: why and how [J]. *Annals of Botany*, 2008, 101(1):5-18
- [13] SCHULDT A, EBELING A, KUNZ M, et al. Multiple plant diversity components drive consumer communities across ecosystems [J]. *Nature Communications*, 2019, 10:1460
- [14] SATAKE A, HAGIWARA T, NAGANO A J, et al. Plant molecular phenology and climate feedbacks mediated by BVOCs [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2024, 75(1):605-627
- [15] MOREIRA X, ABDALA-ROBERTS L, GOLS R, et al. Insect herbivory but not plant pathogen infection drive floral volatile-mediated indirect effects on pollinators and plant fitness in *Brassica rapa* [J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112(2):402-415
- [16] ZHU N, ZHOU Y M, YANG M J, et al. Investigating the regulatory role of seasonal changes in soil and microbial communities on *Codonopsis pilosula* physiology [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2025, 69: 103765
- [17] BAGGESEN N, LI T, SECO R, et al. Phenological stage of tundra vegetation controls bidirectional exchange of BVOCs in a climate change experiment on a subarctic heath [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(12):2928-2944
- [18] CHEN X, GONG D C, LIN Y J, et al. Emission characteristics of biogenic volatile organic compounds in a subtropical pristine forest of Southern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 148:665-682
- [19] PAN S C, LUO C Y, CHEN X, et al. Winter grazing, not fencing or unicast, promotes stability of microbial community and function in the Qilian Mountains of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(18):5771-5785
- [20] 王梓晗, 吕世杰, 王忠武, 等. 放牧强度对优势种群与植物群落地上现存量的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(5):1440-1447
- WANG Z H, LYU S J, WANG Z W, et al. The influence of grazing intensity on the relationship between the standing crops of dominant populations and plant community [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5):1440-1447
- [21] 段俊光, 房凯, 裴淦, 等. 高寒草甸不同放牧强度下植物地上-地下生物量权衡的变化[J]. *草地学报*, 2025, 33(8):2575-2584
- DUAN J G, FANG K, PEI L, et al. Changes of trade-offs between aboveground and belowground plant biomass across different grazing intensities of Alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(8):2575-2584
- [22] 余国杰, 王青, 韩瑞鑫, 等. 刈割强度对狗牙根光合产物分配的动态影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(8):2521-2530
- YU G J, WANG Q, HAN R X, et al. Dynamic effect of mowing intensity on the allocation of photosynthetic products in *Cynodon dactylon* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(8):2521-2530
- [23] LIANG D F, DOSSA G G O, MA Z, et al. Leaf litter decomposition in mixture depends on its own abundance and neighbor richness in an Alpine meadow [J]. *Plant and Soil*, 2025, 513(2):2163-2175
- [24] SANAIE A, HERRMANN H, ALSHAABI L, et al. Changes in biodiversity impact atmospheric chemistry and climate through plant volatiles and particles [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4:445
- [25] MACHADO L A T, UNFER G R, BRILL S, et al. Frequent rainfall-induced new particle formation within the canopy in the Amazon rainforest [J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(12):1225-1232
- [26] WANG H, WELCH A M, NAGALINGAM S, et al. High temperature sensitivity of Arctic isoprene emissions explained by sedges [J]. *Nature Communications*, 2024, 15:6144
- [27] 张晓宁, 刘振亚, 李丽萍, 等. 大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物凋落物质量衰减的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(23):7811-7820
- ZHANG X N, LIU Z Y, LI L P, et al. Effect of experimental warming on the decomposition of litter from dominant lakeside plants in a typical wetland of Northwestern Yunnan Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23):7811-7820
- [28] ROALD M, SCHENKER C, CALHOUN V D, et al. An AO-ADMM approach to constraining PARAFAC2 on all modes [J]. *SIAM Journal on Mathematics of Data Science*, 2022, 4(3):1191-1222
- [29] 高超, 张学磊, 修艾军, 等. 中国生物源挥发性有机物(BVOCs)时空排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12):4140-4151
- GAO C, ZHANG X L, XIU A J, et al. Spatiotemporal distribution

- of biogenic volatile organic compounds emissions in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12):4140-4151
- [30] YANG Y, SUN F B, HU C, et al. Emissions of biogenic volatile organic compounds from plants: impacts of air pollutants and environmental variables [J]. *Current Pollution Reports*, 2025, 11(1):10
- [31] LAURIA G, LO PICCOLO E, DAVINI A, et al. Modulation of VOC fingerprint and alteration of physiological responses after supplemental LED light in green-and red-leafed sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 315:111970
- [32] PEI D Y, WANG A Z, SHEN L D, et al. Research on the emission of biogenic volatile organic compounds from terrestrial vegetation [J]. *Atmosphere*, 2025, 16(7):885
- [33] DANI K G S, POLLASTRI S, PINOSIO S, et al. Isoprene enhances leaf cytokinin metabolism and induces early senescence [J]. *The New Phytologist*, 2022, 234(3):961-974
- [34] 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 等. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态 [J]. *植物生态学报*, 2020, 44(11):1138-1153
- XIONG X S, CAI H Y, LI Y Q, et al. Seasonal dynamics of leaf C, N and P stoichiometry in plants of typical steppe in Nei Mongol, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(11):1138-1153
- [35] RASULOV B, TALTS E, BICHELE I, et al. Evidence that isoprene emission is not limited by cytosolic metabolites. exogenous malate does not invert the reverse sensitivity of isoprene emission to high CO₂ [J]. *Plant Physiology*, 2018, 176(2):1573-1586
- [36] RASULOV B, HÜVE K, BICHELE I, et al. Temperature response of isoprene emission in vivo reflects a combined effect of substrate limitations and isoprene synthase activity: a kinetic analysis [J]. *Plant Physiology*, 2010, 154(3):1558-1570
- [37] XU L, PAN R, ZHANG W Y. Membrane lipids are involved in plant response to oxygen deprivation [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2020, 15(7):1771938
- [38] FISCHBACH R J, STAUDT M, ZIMMER I, et al. Seasonal pattern of monoterpene synthase activities in leaves of the evergreen tree *Quercus ilex* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 114(3):354-360
- [39] ZENG J Q, ZHANG Y L, PANG W H, et al. Contrasting emission seasonality between light-dependent and light-independent biogenic VOCs from subtropical *Eucalyptus* trees [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2025, 130(17):e2025JD043387
- [40] XU C Y, MA Y D, TIAN Z F, et al. Monoterpene emissions and their protection effects on adult *Cinnamomum camphora* against high temperature [J]. *Trees*, 2022, 36(2):711-721
- [41] RAFIEE H, MEHRA FARIN A, OMIDI H, et al. Evaluation of phytochemical and biochemical patterns of lemon *Verbena* (*Lippia citriodora* H. B. K.) at different temperatures [J]. *Research Journal of Pharmacognosy*, 2019, 6:9-24
- [42] LI T, BAGGESEN N, SECO R, et al. Seasonal and diel patterns of biogenic volatile organic compound fluxes in a subarctic tundra [J]. *Atmospheric Environment*, 2023, 292:119430
- [43] GILLESPIE M A K, BAGGESEN N, COOPER E J. High Arctic flowering phenology and plant - pollinator interactions in response to delayed snow melt and simulated warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(11):115006
- [44] FARRÉ -ARMENGOL G, FILELLA I, LLUSIA J, et al. Floral volatile organic compounds: between attraction and deterrence of visitors under global change [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2013, 15(1):56-67
- [45] SRIKANTA DANI K G, FINESCHI S, MICHELOZZI M, et al. Diversification of petal monoterpene profiles during floral development and senescence in wild roses: relationships among geraniol content, petal colour, and floral lifespan [J]. *Oecologia*, 2021, 197(4):957-969
- [46] LO M M, BENFODDA Z, MOLINIÉ R, et al. Volatile organic compounds emitted by flowers: ecological roles, production by plants, extraction, and identification [J]. *Plants*, 2024, 13(3):417
- [47] KESSLER D, BING J L, HAVERKAMP A, et al. The defensive function of a pollinator-attracting floral volatile [J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(7):1223-1232
- [48] BURKLE L A, RUNYON J B. Floral volatiles structure plant-pollinator interactions in a diverse community across the growing season [J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(11):2116-2129
- [49] LI L Y, BAI G K, HAN H J, et al. Localized biogenic volatile organic compound emission inventory in China: A comprehensive review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353:120121
- [50] MÄNNISTÖ E, YLÄNNE H, LOSOI M, et al. Emissions of biogenic volatile organic compounds from adjacent boreal Fen and bog as impacted by vegetation composition [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858(Pt 2):159809
- [51] CHEN W B, WANG L X, WU J, et al. Emission pattern of biogenic volatile organic compounds from wetland vegetation [J]. *Atmosphere*, 2024, 15(6):651

(责任编辑 彭露茜)