高温胁迫对园林树木植物源挥发性有机化合物影响机制的研究进展*

张德顺 敬南仪

同济大学建筑与城市规划学院，高密度城市人居环境生态与节能教育部重点实验室 上海 200092

摘要：气候变暖、城市热岛和下垫面性质的改变导致了臭氧（O_3）浓度持续攀升，使其成为我国多数地区的首要空气污染物，尤其夏季高温加剧了臭氧的生成和积累。植物源挥发性有机化合物（BVOCs）是植物释放的低沸点、高挥发性的非甲烷碳氢化合物，也是臭氧形成的重要前体，并受温度显著影响。为揭示高温对 BVOCs 生成与释放的影响规律，有效评估 BVOCs 排放对当前及未来高温胁迫情景的响应，寻求应对气候变化下臭氧污染对城市绿化树种“适地适树”规划与选择对策，文章在综述高温胁迫影响不同种类、不同植被类型 BVOCs 排放的基础上，拆解分析了酶活性、光合作用、分子扩散运动、植物耐热性对 BVOCs 的作用，总结归纳高温胁迫对园林树木 BVOCs 的各项影响及其内在机理的研究进展；最后，探讨了未来需深入研究的方向，即需加强研究 BVOCs 排放对温度的敏感性、加强对不同树种 BVOCs 排放的温度阈值的测定、加强系统性研究高温对 BVOCs 合成与排放的内在作用机制及影响途。

关键词：高温；臭氧；BVOCs；园林树木；影响机制

DOI：10.12169/zgcsly.2025.03.21.0001

Research Progressin Influencing Mechanism of High Temperature Stress on BVOCs from Garden Trees

Zhang Deshun Jing Nanyi

(College of Architecture and Urban Planning, Tongji University/Key Laboratory of Ministry of Education for Ecology and Energy-Saving of Dense Habitats, Shanghai 200092, China)

Abstract: Climate warming and changes in urban heat islands and underlying surface properties lead to rising ozone concentrations, making it the primary air pollutant in most parts of China, especially in summer, when high temperatures cause ozone production and accumulation. Biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from plants are low-boiling and highly volatile non-methane hydrocarbons released by plants, which are important precursors of O_3 formation and are significantly affected by temperature. To reveal the effect patterns of high temperature on generation and release of BVOCs, effectively evaluate the response of BVOCs emissions to current and future high temperature stress, and seek the countermeasures for planning and selection of suitable urban greening tree species for suitable land in response to ozone pollution under climate change, the paper reviews the effects of high temperature stress on BVOCs emissions of different species and of different vegetation types, and separately analyzes the effects of enzyme activity, photosynthesis, molecular diffusion movement and plant “heat resistance” on BVOCs to summarize the research progress in the various effects of high temperature on BVOCs from garden trees and its internal mechanism. At the end, the paper discusses the directions that need to be further studied,

收稿日期：2025-03-21

* 基金项目：国家自然科学基金项目（32071824）；2024 年同济大学研究生教材建设项目（2024JC07）

第一作者：张德顺（1964-），男，博士，教授，研究方向为园林植物与生态与景观规划设计。E-mail：zds@ tongji. edu. cn

通信作者：敬南仪（2001-），女，硕士生，研究方向为应对气候变化的园林树种选择。E-mail：813395987@ qq. com

which are to strengthen the study of sensitivity of BVOC emission to temperature, improve the measurement of temperature thresholds for BVOC emission of different tree species, and boost the systematic study of internal acting mechanism and influencing pathways to the generation and emission of BVOCs.

Keywords: high temperature; ozone; biogenic volatile organic compound; garden tree; influencing mechanism

植物的不同组织和器官，如叶片、花朵、果实及根系，通过次生代谢途径合成的一系列低沸点、挥发性高的非甲烷碳氢化合物被称为植物源挥发性有机化合物（Biogenic Volatile Organic Compounds，BVOCs）[1]。BVOCs 主要包括烯类（异戊二烯和单萜烯）、烷烃、烯烃、羰基、醇、酯、醚和酸等 3 万余种化合物。Guenther 等[2]将全球树木排放的 BVOCs 划分为 4 类，包括异戊二烯（44%）、单萜（11%）、其他活性 BVOCs（22.5%）以及非活性 BVOCs（22.5%），其中异戊二烯和单萜是树木释放的 BVOCs 主要种类。

在全球气候变暖的背景下，高温热浪等极端气候事件的出现频率显著增加。温度是影响植物 BVOCs 合成与释放的关键环境因子之一[3]。同时，O_3已成为我国众多人口密集和工业发达地区的首要空气污染物[4]。BVOCs 是臭氧生成的关键前体物之一，不仅直接影响臭氧生成，还会与大气中的氮氧化物、羟基自由基等组分反应生成一系列二次污染物。

迄今为止，高温胁迫对树木 BVOCs 释放的影响已有众多研究，研究方法包括野外监测、实验室测定及模型模拟与排放量估算等。然而，当前研究主要集中在对 BVOCs 释放速率及其组成变化的测量与分析上，对于高温对 BVOCs 合成与排放内在机制及途径影响的探讨尚显不足，目前仍缺乏系统的理论框架和实证研究。因此，本研究进一步透彻探究 BVOCs 的排放机制、影响因素及其对大气环境的综合效应，为制定城市环境可持续治理策略提供科学依据。

1　高温胁迫对 BVOCs 排放的影响

1.1　不同类别 BVOCs 对高温胁迫的响应

目前对于不同种类的 BVOCs 的定性与定量研究，主要集中在异戊二烯、单萜烯及其他 BVOCs3 大类别上。自 20 世纪 90 年代以来，众多研究揭示了异戊二烯排放速率与温度之间存在显著相关性。由于植物体内异戊二烯储存库相对较小，异戊二烯排放对温度的响应存在一定阈值，即若温度上升幅度太小或过大将对其释放产生抑制。同时，异戊二烯的排放表现出明显的光依赖性，这是单萜烯及其他 BVOCs 所不具备的特性。20 世纪 80 年代，单萜烯释放主要依赖温度，且不直接受光照影响。温度可以影响单萜的挥发性及排放阻力。与异戊二烯相比，单萜烯对温度响应更为强烈和显著[5]。此外，越来越多的研究表明，针叶树种释放单萜烯类物质很可能是储存和即时合成化合物排放的组合[6]，两种释放模式对单萜烯释放均有显著贡献，大量长期的实地观测研究对于特定地区植物或某一物种的 BVOCs 释放速率研究仍十分必要。由于含量少、化学性质繁杂，目前研究很少深入聚焦其他 BVOCs 的生成、排放等过程，对于其他 BVOCs 仍缺乏更为精准的计算与评估测定。

综上所述，在其他变量相同且适宜的条件下，大多数 BVOCs 在适宜的温度区间均呈指数增长。在认识不同类别 BVOCs 对温度响应的共性及差异性的基础上，国际上建立了一系列区域及全球 BVOCs 排放估算法和模型，如 BEIS、G95、GloBEIS、MEGAN 及 BEM 等[7]，对植物在不同环境下的 BVOCs 排放进行科学模拟与预测。

目前，国内对 BVOCs 排放速率及排放量的估算主要以 Guenther 模型为基础，分为异戊二烯、单萜烯和其他 BVOCs3 类计算，通过对环境排放因子作部分修正量化 BVOCs 的标准排放速率及排放量。MEGAN 模型针对温度的影响将标准化公式分为两类，分别用于估算异戊二烯排放和单萜类及其他 BVOCs 的排放[8]。具体公式如下：

$$\gamma_T = \frac{E_{opt} C_{T2} \exp(C_{T1} x)}{C_{T2} - C_{T1}[1 - \exp(C_{T2} x)]}$$

$$x = \frac{\frac{1}{T_{opt}} - \frac{1}{T}}{R} \qquad (1)$$

式（1）中：γ_T代表异戊二烯的温度修正系数，x 为简化公式的中间变量。E_{opt}代表最大标准化排放潜力，为 1.9；T_{opt}代表达到 E_{opt}时的温度，为 312.5 K；T 代表当前叶温（K）；R 代表理想气体常数，为 8.314 J/（k · mol）；C_{T1}（95 000 J · mol^{-1}）和 C_{T2}（230 000 J · mol^{-1}）是经验系数，分别代表活跃、不活跃状态下的能力。

$$\gamma_T = \exp[\beta(T - T_S)] \quad (2)$$

式（2）中：γ_T代表单萜类及其他 BVOCs 的温度修正系数。$\beta = 0.09$，为经验系数；T 代表叶片温度（K）；T_S为 303K（标准状况）。

由公式（1）~（2）可知，异戊二烯、单萜类及其他 BVOCs 排放随叶片温度呈指数式增长，经验系数β取值通常为 0.09K^{-1}。公式适用于对一定升温区间的排放量估算，但不能真实反映超过温度阈值后 BVOCs 排放下降的情况。此外，估算通常使用经验值如 C_{T1}、C_{T2}，这难免存在一定误差，需进一步优化与精确测定。

现有研究对不同种类 BVOCs 对高温的响应进行了大量定性描述与定量分析，主要集中在高温下 BVOCs 排放的变化趋势、组分变化、模型建立与估算等方面，达成了高温胁迫对 BVOCs 排放差异性影响与排放预测的初步认识。然而，城市中各类 BVOCs 对高温响应的精准量化与特异性的排放模式还需进一步优化，同时建议观测时也应关注其他 BVOCs 的排放特征以及在大气中的化学物理性质。

1.2 植物单体及群落对高温胁迫的响应

BVOCs 排放对温度响应的研究尺度包括植物单体及群落两大类。针对植物单体，现有研究通常选取乔木作为研究对象，对其叶片、枝条或冠层部分进行 BVOCs 排放监测[3-4]；对于群落尺度，主要包括区域内的植被生态系统及更广泛的全球生态系统的 BVOCs 排放估算[9]。

当前研究关于高温胁迫对植物 BVOCs 排放影响主要采用 3 类研究方法。第 1 类是实验测定[10-11]，适用于植物单体 BVOCs 排放监测，通常选取一种或多种乔木的盆栽幼苗、枝叶样本等，通过控制变量研究不同温度梯度下植物 BVOCs 的排放特征及变化趋势。第 2 类是野外监测[5]，通常选取一天中不同气温的时刻或不同月份、季节，对自然环境中生长的植物进行 BVOCs 采样与组分分析，研究不同气温环境下植物 BVOCs 排放变化及特征，此方法适用于植物单体及群落。第 3 类是模型模拟，主要应用于区域或全球植被群落尺度的 BVOCs 排放估算，预测高温胁迫下的排放变化与趋势。20 世纪 90 年代，Guenther 等[12]开发了自然排放气体和气溶胶模型（MEGAN），可估算异戊二烯、单萜烯等 100 余种 BVOCs 的排放。不同植被功能类型 BVOCs 排放对温度的响应与单体植物不同，除温度外，还与植被叶面积指数、物种组成、生态系统类型紧密相关。目前，BVOCs 排放模型所使用的气象、土地利用及植被分布等数据大多基于相对粗糙的空间分辨率土地覆盖数据集，估算结果存在较大的不准确性。近年来，有研究针对树种植被类型的 BVOCs 排放估算进行更精准的计算方式的探索，如建立能显著提高城市树木 BVOCs 排放的估算量及准确性的高空间分辨率的树种分类数据集[13]。此外，也有研究综合运用多种方法对 BVOCs 的高温响应进行更全面的研究与对比[9]。针对 MEGAN 估算所使用数据集精度较低的问题，建议耦合模型如 I-Tree。I-Tree 是由 Nowak 和 Greenfield[14]开发的一套城市森林评估模型，用于量化树木结构、功能及其生态系统服务价值。基于实地调研数据，I-Tree 可通过外推估算整个研究区域的树种分布；也可基于遥感影像快速估算树冠覆盖率和粗略树种分类。MEGAN 则进行 BVOCs 排放估算和环境影响模拟，两者结合可更精确地量化城市绿化的 BVOCs 排放及其空气质量影响。I-Tree 模型基于北美地区数据开发，若用于我国则需本地化校准与进一步调试。

在未来研究中，应将卫星遥感技术、动态植被模型以及高精度气象模式应用于 BVOCs 排放模型中，针对城市区域的绿地类型与植物群落特征，因地制宜地提出区别于绿化生态系统的估算模式。

1.3 高温胁迫程度影响 BVOCs 的响应

植物 BVOCs 的释放具有一个温度阈值，当超过阈值时其释放速率随温度升高而减少[4,15]。由表 1 可知，尽管不同研究中测定出的温度阈值不尽相同，但大多数植物 BVOCs 排量在 40℃左右达到峰值。一方面，这是由于高温抑制植物的光合

作用，使 BVOCs 合成底物 DMAPP 供应减少所造成的。早在 1991 年，Guenther 等[12]便发现当温度超过 40 ℃，植物异戊二烯排放速率会下降，他们认为这是因光合作用受到抑制，使碳元素供应不足造成的。另一方面，这与温度过高导致相关酶蛋白失活有关[16-18]。此外，当植物长期处于高温胁迫状态时，其细胞及叶片等生理构造也可能会遭受高温损害[19]，从而降低萜烯类化合物释放。由于不同植物自身生理特性及外界环境影响，这一阈值仍需大量实地监测与实验来精准识别。

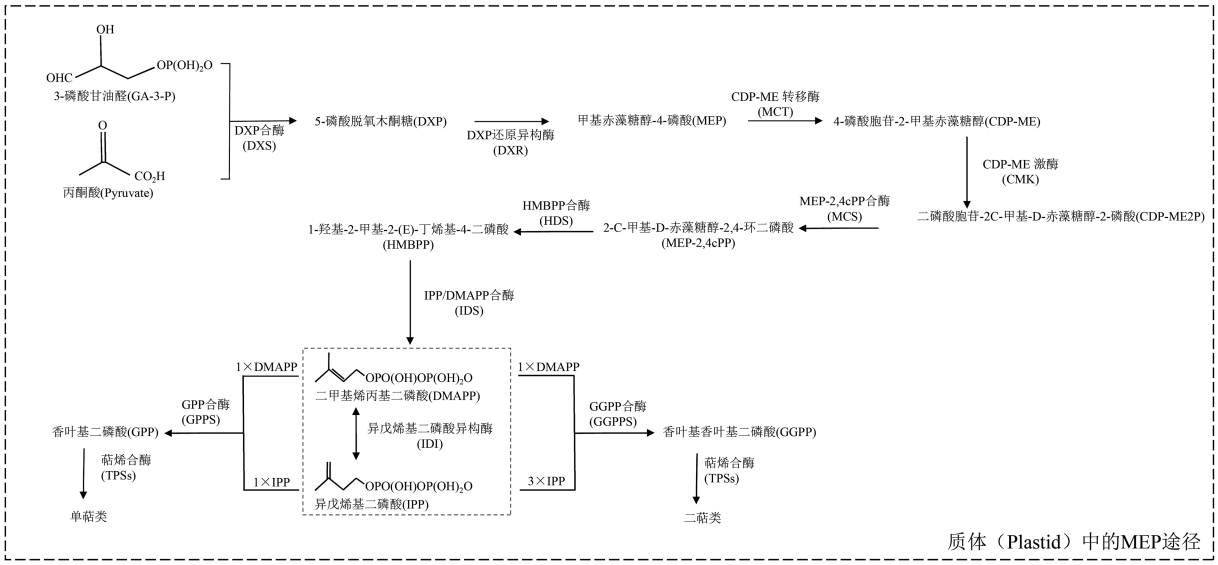
表 1　不同研究中植物 BVOCs 排放随升温先增后减的温度阈值

研究对象	温度阈值/℃	原因分析
赤桉(*Eucalyptus camaldulensis*)	45	细胞损伤[4]
油松(*Pinus tabuliformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等	40	光合作用受抑制,碳供应不足[9]
紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)	30	叶片受到破坏、酶失活[10]
葛(*Pueraria montana* var. *lobata*)	35	光合作用受抑制,DMAPP 供应减少[11]
刺槐(*Robinia pseudoacacia*)	42.4	酶活性降低,底物 DMAPP 供应减少[15]
大红栎(*Quercus coccifera*)	40	光合作用受抑制[20]
美洲黑杨(*Populus deltoides*)等	40	光合作用受抑制,DMAPP 供应减少[16]
红槲栎(*Quercus rubra*)	40	光合作用受抑制,碳供应不足[17]
芦苇(*Phragmites australis*)	45	光合作用受抑制,DMAPP 供应减少[18]
银白杨(*Populus alba*)	25	ISPS 基因表达降低[21]
蓝桉(*Eucalyptus globulus*)	40	光合作用受抑制,碳供应不足[22]
冬青栎(*Quercus ilex*)、欧洲云杉(*Picea abies*)	40	酶活性降低[23]
大红栎、冬青栎	40	光合速率下降,酶活性降低,叶片特性[24]
冬青栎	30	酶活性降低[25]

2　高温胁迫对 BVOCs 排放的影响机制

2.1　影响 BVOCs 合成酶的活性

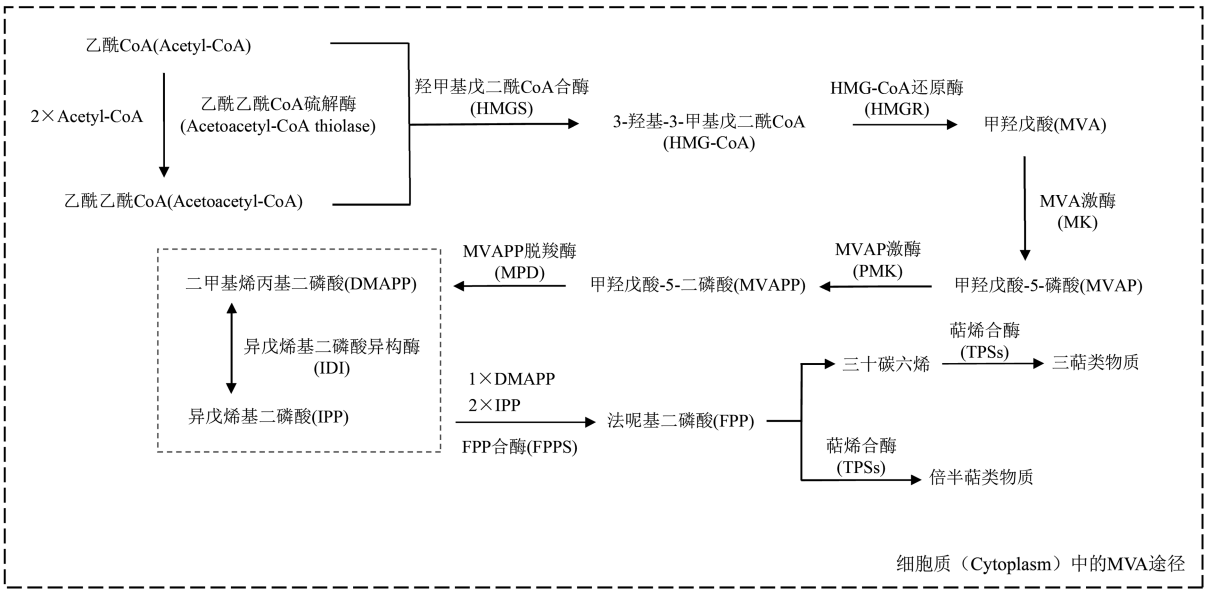
BVOCs 的生物合成途径主要包括 3 类：1）类异戊二烯途径：为异戊二烯、单萜烯等 BVOCs 的生物合成主要路径，包括 MEP（图 1）、MVA（图 2）两种合成机制。2）脂肪酸及其衍生物：合成脂肪酸衍生物包括小分子的醇醛类。3）莽草酸途径：主要合成酚类及其他芳香族化合物。



注：图片根据吴鞠[26]、Rodríguez-concepción[27]、Zhou 和 Pichersky[28]的文章改绘。

图 1　类异戊二烯合成中的甲基赤藻糖醇-4-磷酸（Methylerythritol 4-phosphate，MEP）合成机制

由图 1~2 可知，在 BVOCs 的生物合成过程中存在大量酶促反应的参与。在适宜温度区间，合成酶活性随温度升高而增强。对于非贮存释放的 BVOCs，其释放速率随温度变化的响应曲线与酶催化反应的温度依赖性曲线极为相似[29]。植物 BVOCs 合成中的最后一步均是在相关合成酶的催化作用下由二甲基烯丙基二磷酸（DMAPP）转化而成[22]。植物体内的可溶性酶的最适温度通常在



注：图片根据吴鞠[26]、Rodríguez-concepción[27]、Zhou 和 Pichersky[28]的文章改绘。

图 2 类异戊二烯合成中的甲羟戊酸（Mevalonate，MVA）合成机制

50 ℃左右，但异戊二烯合成酶的最适温度通常在 45~50 ℃；萜烯合成酶的最佳温度比异戊二烯更低，如欧洲云杉释放单萜类 BVOCs 的最适温度为 40.40 ℃，冬青栎为 40.6 ℃，这可能与反应介质的 pH 值、离子强度和渗透压有关[23-24]。

2.2 影响光合作用

光合作用能反映植物的生理性能与生长状况，是植物与自然界进行物质运输与气体交换的重要过程。部分学者对环境因素与植物生理生态参数与 BVOCs 释放之间的相关性进行研究发现，植物异戊二烯排放率与 PAR、Tair、SLW、Pn、Tr、Gs、Ci 普遍存在显著相关性，单萜烯排放率则与 P、Tair、RH、SLW、Tr 与 Vpd 显著相关[30-44]（图 3）。

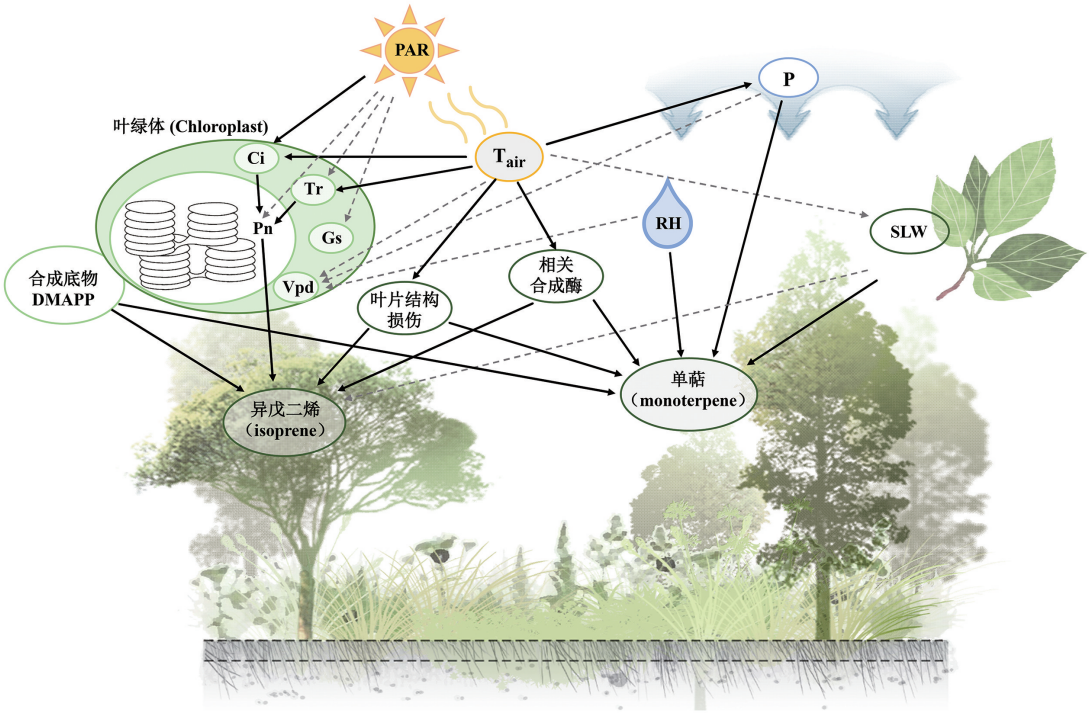
由表 2 可知，植物 BVOCs 的释放与植物光合作用密切相关[30]，植物 BVOCs 合成可利用光合作用固定的碳作为碳源[31-32]，光合碳同化效率与植物净光合速率（Pn）和气孔导度（Gs）存在显著相关性。由于异戊二烯最终是在相关合成酶的作用下由 DMAPP 转化而成，因此推断温度升高会影响光合作用中 DMAPP 合成过程，从而间接影响异戊二烯的生成和释放[40]。然而，高温亦可能引发光合作用中的光抑制现象而间接影响 BVOCs 排放。光合作用和呼吸作用要在不同温度下达到碳平衡的转化，两者为丙酸盐而竞争，进而限制异戊二烯的在高温下的排放。此外，Ci 与 BVOCs 排放速率成显著负相关[42-44]，根据异戊二烯的生成途径推测，这可能是由叶绿体中 BVOCs 生成过程与线粒体呼吸过程之间存在前体物磷酸烯醇丙酮酸（PEP）的代谢竞争造成。

虽然很多研究证实了植物 BVOCs 排放与光合作用之间具有显著相关性，但也有研究发现部分树种 BVOCs 排放与叶片光合速率并无相关性，尤其是在多种温带或热带植物中[37]。

植物内部的各项生理活动之间息息相关，彼此影响与制约，外界环境因子如温度、光照对内部生理功能影响的外在表现是综合性的结果。未来研究需扩大研究树种范围，加深温度因子对植物内部光合作用的影响，以及 BVOCs 的直接效应与其他环境变量或植物生理生态因子所间接导致的间接效应的辨识。

2.3 影响分子扩散运动

分子的运动速率和扩散力随温度升高而增强，也将促进 BVOCs 的合成与释放。温度对储存于树脂导管、树脂泡等特定储存结构中的单萜和倍半萜类化合物的影响尤为显著[45-46]。部分学者提出，萜类化合物的释放速率主要受存储结构中蒸汽压的调控。高温环境能够提升单萜的挥发性或加速其生物合成过程。温度上升，存储萜类化合物的结构内部蒸汽压增大，调节单萜释放速率。



注：实线表示直接影响，虚线表示间接影响；PAR 为光合有效辐射；T_{air}为气温；P 为大气压强；RH 为相对空气湿度；SLW 为比叶重；Pn 为光合速率；Tr 为蒸腾速率；Gs 为气孔导度；Ci 为胞间 CO_2浓度；Vpd 为叶温蒸汽压亏损[30-44]。

图 3　环境因素、光合等生理参数与植物异戊二烯、单萜排放的相互影响

表 2　植物 BVOCs 排放与光合参数的相关性研究

研究对象	显著正相关	显著负相关
欧洲赤松（*Pinus sylvestris*）[5]	Pn	—
油松、侧柏等[9]	Pn、Gs、Tr	Ci
木荷（*Schima superba*）、闽楠（*Phoebe bournei*）[30]	Pn	—
猴欢（*Apeiba tibourbou*）、孪叶豆（*Hymenaea coubaril*）、剑鞘桑（*Sorocea guilleminiana*）[33]	Gs	—
欧洲赤松[34]	Pn	—
沼桦（*Betula nana*）、四棱岩须（*Cassiope tetragona*）、高山杜鹃（*Rhododendron lapponicum*）等[35]	Pn、Gs、SLW	—
油松、侧柏等[38]	Pn、Gs、Tr	—
红花檵木（*Loropetalum chinense* var. *rubrum*）、南天竹（*Nandina domestica*）[39]	Pn、Gs、Tr	—
加杨（*Populus×canadensis*）[40]	Gs、Gm	—
毛果杨（*Populus trichocarpa*）、美洲黑杨等[42]	—	Ci
青杨（*Populus cathayana*）[43]	—	Ci
美洲黑杨[44]	—	Ci

2.4　影响植物“耐热性”

早有研究提出假设，植物体内产生的 BVOCs 会随着温度升高而迅速蒸发，避免对叶绿体内的类囊体膜造成损伤[47]。1995 年，Sharkey 和 Singsaas[48]在《Nature》首次提出了植物的“抗热胁迫”假说，即植物在遭受热胁迫时会释放异戊二烯。该研究揭示了植物应对高温环境压力的一种潜在机制，并为植物生理学领域提供了新的研究方向。植物叶片在高温下会合成并释放大量异戊二烯和单萜烯并以此替代光呼吸过程，防止氧化损伤[49]。迄今为止，异戊二烯增强植物对热胁迫的抵抗力的具体机制尚待进一步研究。

3　展望

1）加强 BVOCs 排放对温度的敏感性的研究。现有研究常聚焦于对不同树种在高温胁迫下的 BVOCs 排放量变化的定性分析，对于不同树种在升温条件下 BVOCs 排放量增长的幅度大小缺乏定量化的研究与对比。未来研究应充分考虑不同树种的生态习性和生物学特性，加大对不同树种 BVOCs 随温度上升的变幅，即 BVOCs 排放对温度的敏感性的探讨。

2）加强对不同树种 BVOCs 排放的温度阈值的测定。虽然普遍认为存在适用于所有乔木 BVOCs 排放的温度阈值，但鲜有研究针对各个树种的温度阈值进行精确测定与研究。未来研究应当加强对不同树种 BVOCs 排放的温度阈值的测定。基于树种的生理状态与生活习性，因地制宜地选择最适合当地气候且 BVOCs 排放量相对更低的树种，减缓臭氧污染。

3）加强高温对 BVOCs 合成与排放内在作用机制及影响途径的系统性研究。尽管众多研究揭示了 BVOCs 释放速率与环境温度之间的相关性，但关于高温如何调控 BVOCs 的生物合成过程及其排放途径的改变，目前仍缺乏系统的理论框架和实证测析，应深化高温、植物生理生态与 BVOCs 排放的内在影响探究，为气候变暖背景下的树木 BVOCs 排放模式奠定理论基础，以指导城市树种规划策略与实践。

参考文献

[1] LORETO F, SCHNITZLER J P. Abiotic stresses and induced BVOCs[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(3): 154-166.

[2] GUENTHER A, HEWITT C N, ERICKSON D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(5): 8873-8892.

[3] LI T, HOLST T, MICHELSEN A, et al. Amplification of plant volatiledefence against insect herbivory in a warming Arctic tundra[J]. Nature Plants, 2019, 5(6): 568-574.

[4] GUIDOLOTTI G, PALLOZZI E, GAVRICHKOVA O, et al. Emission of constitutive isoprene, induced monoterpenes, and other volatiles under high temperatures in Eucalyptus camaldulensis: a^{13} C labelling study [J]. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(6): 1929-1938.

[5] KIVIMÄENPÄÄ M, GHIMIRE R P, SUTINEN S, et al. Increases in volatile organic compound emissions of Scots pine in response to elevated ozone and warming are modified by herbivory and soil nitrogen availability[J]. European Journal of Forest Research, 2016, 135(2): 343-360.

[6] 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: 1471-1492.

[7] 吕铃钥，李洪远，杨佳楠. 中国植物挥发性有机化合物排放估算研究进展[J]. 环境污染与防治，2015，37(11)：83-89.

[8] GUENTHER A, KARL T, HARLEY P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols fromNature)[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(11): 3181-3210.

[9] 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.

[10] 任琴，谢明惠，张青文，等. 不同温度、光照对虫害紫茎泽兰挥发物释放的影响[J]. 生态学报，2010，30(11)：3080-3086.

[11] SHARKEY T D, LORETO F. Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves[J]. Oecologia, 1993, 95(3): 328-333.

[12] GUENTHER A B, ZIMMERMAN P R, HARLEY P C, et al. Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(7): 12609-12617.

[13] BAO X X, ZHOU W Q, WANG W M, et al. Tree species classification improves the estimation of BVOCs from urban greenspace[J]. Science of The Total Environment, 2024, 914: 169762.

[14] NOWAK D J, GREENFIELD E J. Declining urban and community tree cover in the United States[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 32: 32-55.

[15] BAMBERGER I, RUEHR N K, SCHMITT M, et al. Isoprene emission and photosynthesis during heatwaves and drought in black locust[J]. Biogeosciences, 2017, 14(15): 3649-3667.

[16] LI Z R, RATLIFF E A, SHARKEY T D. Effect of temperature on postillumination isoprene emission in oak and poplar[J]. Plant Physiology, 2011, 155(2): 1037-1046.

[17] SINGSAAS E L, SHARKEY T D. The effects of high temperature on isoprene synthesis in oak leaves [J]. Plant, Cell & Environment, 2000, 23(7): 751-757.

[18] LORETO F, BARTA C, BRILLI F, et al. On the induction of volatile organic compound emissions by plants as consequence of wounding or fluctuations of light and temperature[J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(9): 1820-1828.

[19] 鲍歆歆，周伟奇，郑重，等. 城市植物挥发性有机化合物排放与臭氧相互作用及其机制[J]. 生态学报，2023，43(5)：1749-1762.

[20] STAUDT M, LHOUTELLIER L. Monoterpene and sesquiterpene emissions from Quercuscoccifera exhibit interacting responses to light and temperature[J]. Biogeosciences, 2011, 8(9): 2757-2771.

[21] NOGUES I, MEDORI M, FORTUNATI A, et al. Leaf gas exchange and isoprene emission in poplar in response to long-term experimental night-time warming and summer drought in a forest-steppe ecosystem[J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 152: 60-67.

[22] GUENTHER A B, MONSON R K, FALL R. Isoprene and monoterpene emission rate variability: observations with eucalyptus and

emission rate algorithm development[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,1991,96(D6):10799-10808.

[23]FISCHBACH R J,ZIMMER I,STEINBRECHER R,et al. Monoterpene synthase activities in leaves of *Picea abies* (L.) Karst. and *Quercus ilex* L.[J].Phytochemistry,2000,54(3):257-265.

[24]NIINEMETS Ü,SEUFERT G,STEINBRECHER R,et al.A model coupling foliar monoterpene emissions to leaf photosynthetic characteristics in Mediterranean evergreen *Quercus* species[J]. New Phytologist,2002,153(2):257-275.

[25]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.

[26]吴鞠.北京油松游憩林内挥发性有机物变化规律及其影响因素的研究[D].北京:北京林业大学,2021.

[27]RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN M.Plant isoprenoids:methods and protocols[M].New York:Humana Press,2014.

[28]ZHOU F,PICHERSKY E.More is better:the diversity of terpene metabolism in plants[J]. Current Opinion in Plant Biology,2020,55:1-10.

[29]STAUDT M,BOURGEOIS I,AL HALABI R,et al.New insights into the parametrization of temperature and light responses of mono-and sesquiterpene emissions from Aleppo pine and rosemary[J].Atmospheric Environment,2017,152:212-221.

[30]黄幸然.亚热带主要乔木异戊二烯和单萜烯释放对多环境因子的响应[D].福州:福建农林大学,2020.

[31]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.

[32]JARDINE K J,JARDINE A B,HOLM J A,et al.Monoterpene 'thermometer' of tropical forest-atmosphere response to climate warming[J].Plant,Cell & Environment,2017,40(3):441-452.

[33]SIMON E,KUHN U,ROTTENBERGER S,et al.Coupling isoprene and monoterpene emissions from Amazonian tree species with physiological and environmental parameters using a neural network approach[J].Plant,Cell & Environment,2005,28(3):287-301.

[34]TIIVA P,HÄIKIÖ E,KASURINEN A.Impact of warming,moderate nitrogen addition and bark herbivory on BVOC emissions and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings[J].Tree Physiology,2018,38(10):1461-1475.

[35]SIMIN T,TANG J,HOLST T,et al.Volatile organic compound emission in tundra shrubs-Dependence on species characteristics and the near-surface environment[J]. Environmental and Experimental Botany,2021,184:104387.

[36]PIKKARAINEN L,NISSINEN K,GHIMIRE R P,et al.Responses in growth and emissions of biogenic volatile organiccompounds in Scots pine,Norway spruce and silver birch seedlings to different warming treatments in a controlled field experiment[J].Science of The Total Environment,2022,821:153277.

[37]许燕,李双江,袁相洋,等.北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性[J].环境科学,2020,41(8):3518-3526.

[38]花圣卓,陈俊刚,余新晓,等.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[J].林业科学,2016,52(11):19-28.

[39]林威,赵振,赖金美,等.温度和光照对红花檵木和南天竹异戊二烯和单萜烯释放的影响[J].环境科学学报,2019,39(9):3126-3133.

[40]FARES S,MAHMOOD T,LIU S R,et al.Influence of growth temperature and measuring temperature on isoprene emission,diffusive limitations of photosynthesis and respiration in hybrid poplars[J].Atmospheric Environment,2011,45(1):155-161.

[41]DUAN C S,WU Z F,LIAO H,et al.Interaction processes of environment and plant ecophysiology with BVOC emissions from dominant greening trees[J].Forests,2023,14(3):523.

[42]GUIDOLOTTI G,CALFAPIETRA C,LORETO F.The relationship between isoprene emission,CO_2 assimilation and water use efficiency across a range of poplar genotypes[J]. Physiologia Plantarum,2011,142(3):297-304.

[43]YUAN X Y,SHANG B,XU Y S,et al.No significant interactions between nitrogen stimulation and ozone inhibition of isoprene emission in *Cathay poplar* [J]. Science of The Total Environment,2017,601:222-229.

[44]YUAN X Y,CALATAYUD V,GAO F,et al.Interaction of drought and ozone exposure on isoprene emission from extensively cultivated poplar[J].Plant,Cell & Environment,2016,39(10):2276-2287.

[45]STAUDT M,BERTIN N.Light and temperature dependence of the emission of cyclic and acyclic monoterpenes from holm oak (*Quercus ilex* L.) leaves[J].Plant,Cell & Environment,1998,21(4):385-395.

[46]NIINEMETS U,REICHSTEIN M,STAUDT M,et al.Stomatal constraints may affect emission of oxygenated monoterpenoids from the foliage of *Pinus pinea*[J].Plant Physiology,2002,130(3):1371-1385.

[47]PENUELAS J,LLUSIA J.BVOCs:plant defense against climate warning? [J].Trends in Plant Science.2003,8(3):105-109.

[48]SHARKEY T D,SINGSAAS E L.Why plants emit isoprene[J]. Nature,1995,374(6525):769.

[49]TAYLOR T C,SMITH M N,SLOT M,et al.The capacity to emit isoprene differentiates the photosynthetic temperature responses of tropical plant species[J].Plant,Cell & Environment,2019,42(8):2448-2457.