

太湖流域主要植物异戊二烯排放研究^①

1 王效科 1 牟玉静 1 欧阳志云 1 张晓山

2 倪士峰 2 傅承新

¹(中国科学院生态环境研究中心 北京 100085) ²(浙江大学生物学院 杭州 310029)

摘要 采用封闭式采样方法及光离子化气体分析仪(GC-PID)直接分析测定了太湖地区的94种植物的异戊二烯排放通量,结果表明在太湖地区,排放异戊二烯的植物有山茶、芭蕉、白栎、茶、垂柳、刺槐、短柄枹、法国梧桐、凤尾竹、枫香、钻天杨、合欢、河柳、胡枝子、槐树、黄檀、箭竹、苦楝、苦竹、莲、芦苇、罗汉松、毛白杨、毛竹、女贞、山鸡椒、十大功劳、柿子、算盘子、甜槠、香蒲、水稻、云实、樟树、梓桐、紫荆、紫穗槐、紫藤。毛竹作为太湖地区分布非常广泛的一种人工植被,大量释放异戊二烯,排放潜力达 $116.04 \pm 23.35 \text{ ug} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw} \cdot \text{h}^{-1}$,有可能会影响到该地区的大气臭氧浓度。

关键词 异戊二烯,排放潜力,太湖流域,竹,排放模型

Study on Emission of Isoprene from Major Plants Living in Taihu Basin

¹WANG Xiao-Ke ¹MU Yu-Jing ¹OUYANG Zhi-Yun ¹ZHANG Xiao-Shan

²NI Shi-Feng ²FU Cheng-Xin

¹(Research Center for Eco-Environmental Sciences, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

²(Biology college, Zhejiang University, Hangzhou 310029)

Abstract Due to the important role of volatile organic compounds (VOC) in affecting the short-term chemistry of the lower atmosphere, the measurement and estimation of VOC, especially isoprene from plants have been paid a great attention. In this paper, 94 plant species in the Tai lake basin were measured using an enclosure sampling method followed by GC-PID direct analysis. The results showed that the following species release isoprene: *Camellia japonica*, *Musa basjoo*, *Quercus fabri*, *Camellia sinensis*, *Salix babylonica*, *Robinia pseudoacacia*, *Quercus glandulifera*, *Platanus acerifolia*, *Bambusa multiplex*, *Liquidambar formosana*, *Broussonetia papyrifera*, *Albizia julibrissin*, *Salix chaenomeloides*, *Lespedeza bicolor*, *Sophora japonica*, *Dalbergia hupeana*, *Indocalamus latifolius*, *Melia azedarach*, *Pleiobcastus amarus*, *Nelumbo nucifera*, *Pragmites comman-*
is, *Podocarpus macrophyllus*, *Populus tomentosa*, *Phyllostachys pubescens*, *Ligustrum lucidum*, *Litsea cubeba*, *Mahonia fortunei*, *Diospyros glaucifolia*, *Glochidion puberum*, *Castanopris eyrei*, *Typha orient*, *Oryza sativa*, *Caesalpinia fruticosa*, *Cinnamomum camphora*, *Trachycarpus fortunei*, *Cercis chinensis*, *Amorpha fruticosa*, *Wisteria sinensis*, *Populus nigra*. Other remaining trees had no sign for isoprene emission. Bamboo which is widely distributed in Tai Lake basin emit large amount of isoprene (emission potential are $116.04 \pm 23.35 \text{ ug} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dw} \cdot \text{h}^{-1}$) which will strongly in-

① 国家自然科学基金重大基金(49899270)和中国科学知识创新项目(KZCX2-405, RCEES 9903)资助。

作者简介 王效科, 博士, 副研究员, 主要从事生物质燃烧、森林生态、碳循环和生物地球化学模型等方面研究。牟玉静, 博士, 副研究员, 主要从事痕量气体排放、大气臭氧形成机理等方面研究。

收稿日期 2001-04-30 接受日期 2001-08-22 责任编辑 姜联合

fluence the local ozone concentration in lower atmosphere.

Key words Isoprene, Emission potential, Tai Lake watershed, Bamboo, Emission model

植物中含有大量易挥发的有机碳化合物(VOC),其中包括异戊二烯、萜类、乙醇、甲醛和醚类等。这些化合物广泛分布在植物器官内,对抵制食草动物和昆虫侵袭具有重要作用(Farentinos *et al*, 1981)。在区域尺度或全球尺度,植物排放的有机碳化合物已远远超过其人为排放量。Guenther 等(1993; 1995)估算植物排放的有机碳化合物占全球总排放量的90%以上。

VOC 在对流层大气化学中起重要作用,并对全球变化具有重要影响,其影响概括如下:(1)通过耗损 OH 自由基增加具有辐射特性气体如甲烷等的寿命;(2)通过形成有机气溶胶及云凝聚核影响太阳辐射;(3)通过形成有机酸增加偏远地区酸沉降;(4)通过光化学反应增加对流层臭氧浓度;(5)影响全球碳循环。因此,为了定量评估 VOC 对区域及全球的影响,调查植物 VOC 的排放通量很有必要(Guenther *et al*, 1995)。

异戊二烯和单萜化合物是植物排放量最大的两种化合物,并且它们具有高反应活性,对对流层 OH 自由基的混合比具有重要作用。因此,国外对这两化合物已经开展了深入研究。而我国在该领域的研究尚处于初级阶段,还有待于进一步深入。

温度对异戊二烯和单萜化合物的排放具有重要影响,而光强仅对异戊二烯的排放具有明显影响。异戊二烯排放与光合作用有关,主要发生在白天。除了温度和光对 VOC 排放有影响外,植物年龄、水分及大气污染等也有一定影响。本文集中考虑环境因素(温度和光)对异戊二烯排放的影响,并利用实验测量的异戊二烯排放数据验证了 Guenther 等提出的异戊二烯排放算式。

1 材料和方法

1.1 采样地点

太湖流域是我国人口相当密集的地区之一,工业、农业和商业高度发达,城镇化水平很高。自然植被的范围很小,主要集中在杭州以西的山地和江苏的宜兴山地。人工栽培的农作物、经济林和竹林占有较大的面积。自然植被包括常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶常绿阔叶混交林、常绿阔叶林、灌丛、草丛和沼泽植被。根据这些植被的优势种植物,我们分别在杭州的浙江大学植物园、临安市的青山湖附近和杭州植物园等地,采集植物枝叶样品 14 种。采集样品后,立即插入盛水的塑料桶中,带回浙江大学进行测定。在宜兴市的阳茨林场采样后,就近进行通量测定,从树枝采样到排放测定一般小于 4 h。并且,在宜兴市的阳茨林场的毛竹林中,我们每隔 20 min 采集一样品,测定毛竹叶排放的日变化。

测定的植物包括 海桐(*Pittosporum tobira*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、杜鹃(*Rhododendron mariesii*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、大穗鹅耳枥(*Carpinus viminea*)、凤尾竹(*Bambusa multiplex*)、樟索(*Cinnamomum camphora*)、袋袋花(*Citrus aurantium*)、杜仲(*Eulomia ulmoides*)、无患子(*Sapindus mukorossi*)、山茶(*Camellia japonica*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、杉木(*Cunninghamia lanleotata*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、绵石栎(*Lithocarpus henryi*)、杜英(*Elaeocarpus chinensis*)、桂樨(*Qsmanthus fragrans*)、短柄抱栎(*Quercus glandulifera*)、毛竹

(*Phyllostachys pubescens*)、格药桤(*Eurya muricata*)、青冈栎(*Cyclobalanosis glaula*)、木荷(*Schima superba*)、垂柳(*Salix babylonica*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、桑(*Morus alba*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、梧桐(*Firmiana simplex*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、槐树(*Sophora japonica*)、合欢(*Albizzia julibrissin*)、夹竹桃(*Nerium indicum*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、榆(*Ulmus pumita*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、钻天杨(*Populus nigra*)、苦竹(*Pleiolblastus amarus*)、白栎(*Quercus fabri*)、河柳(腺柳、*Salix chaenomeloides*)、茶(*Camellia sinensis*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、五角枫(鸡爪槭、*Acer palmatum*)、珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)、二乔玉兰(*Magnolia soulangeana*)、大叶黄杨(冬青卫矛、*Euonymus japonicus*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、红果钓樟(*Lindera erythrocarpa*)、水青冈(*Fagus longipetiolata*)、小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsinaefolia*)、小红栲(*Castanopsis carlesii*)、榧树(*Torreya grandis*)、金钱松(*Pseudolarix kaempferi*)、薄叶润楠(*Machilus leptophylla*)、法国梧桐(*Platanus acerifolia*)、梓桐(*Trachycarpus fortunei*)、梓树(*Catapa ovata*)、箭竹(*Indocalamus latifolius*)、莲(*Nelumbo nucifera*)、芭蕉(*Musa basjoo*)、十大功劳(*Mahonia fortunei*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、无患子(*Sapindus mukorossi*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、香蒲(*Typha orientalis*)、落叶润楠(华东楠、*Machilus leptophylla*)、白榆(*Ulmus pumilla*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、长叶冻绿(*Rhamnus crenata*)、紫藤(*Wisteria sinensis*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、罗汉松(*Podocarpus macrophyllus*)、枇杷(*Eriobotrya japonica*)、山鸡椒(*Litsea cubeba*)、华山松(*Pinus armandii*)、檫木(*Sassafras tsumu*)、水稻(*Oryza sativa*)、芦苇(*Pragmites communis*)、大豆(*Glycine max*)、玉米(*Zea mays*)、黄檀(*Dalbergia hupeana*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、云实(*Caesalpinia fruticosa*)、苦楝(*Melia azedarach*)、算盘子(*Glochidion puberum*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)。

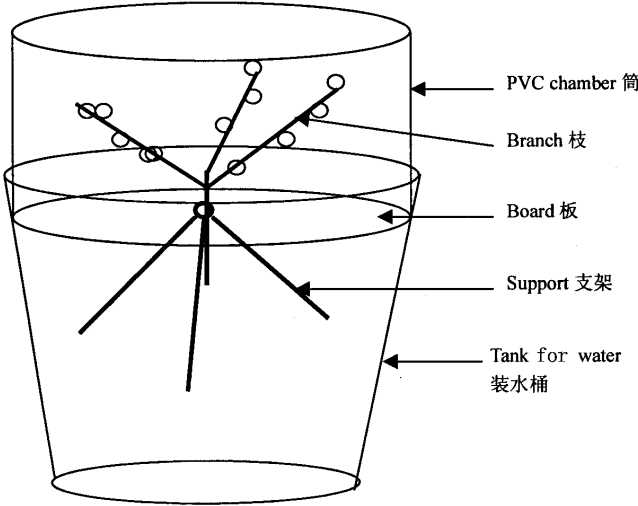


图1 采样装置

Fig.1 Sampling system

1.2 采样方法

本研究采用封闭式采样方法。采样装置是由两部分组成(图1),下部是一个普通塑料桶,上部为一个采样用的直径稍小于普通塑料桶的PVC筒,为了保证射入桶内的光线接近实际太阳辐射,塑料桶顶部为一聚四氟乙烯膜。该PVC桶体积为22.22 L(直径25.5 cm,高43.5 cm)。在实验时,普通塑料桶内盛满水,内置一个有三角架支撑的直径约为2 cm的空心管。在距桶沿5 cm处放置一中心有空的圆

塑料片,边沿正好与桶壁相切,中心正好与空心管相对应。植物枝将插在空心管内,植物叶将暴露在元塑料片以上的 PVC 桶内。并保证 PVC 桶与普通塑料桶间完全密封。为了研究环境因素对异戊二烯排放的影响,在采样过程中,光合有效辐射(PAR)及采样桶内的温度同时进行测定,桶内的温度利用康铜热电偶传感器,光合有效辐射 PAR 采用 Li 190SB 量子传感器,用 Campbell Scientific Inc. 的 21X 数据采集器记录。叶片温度近似考虑为采样过程中 PVC 筒内平均温度。先将野外采取的树枝置在密封的塑料桶内的支架上,用注射器从塑料桶中抽取一样品,过 1 min 后,再用另一注射器抽取另一样品。在室内用带光离子化检测器的色谱分析。采样结束后,收集树枝上的树叶,在 70 °C ~ 80 °C 温度下,经烘箱烘至恒重,然后称重用于计算异戊二烯排放通量。

1.3 分析方法

文献报道通常采用 GC-FID 方法测定植物排放的 VOC,但由于所采集样品中的 VOC 浓度很低,GC-FID 不能进行直接测定,而需要富集浓缩等复杂过程。这些过程容易造成样品中 VOC 污染及损耗(VOC 反应活性很强,易与样品中的臭氧反应)。用光离子化检测器(PID-100C,中科院生态环境研究中心)测定异戊二烯的浓度。

本研究采用 5% β,β' -氧二丙腈键合固定相(担体为 Chromosorb P NAN(60 ~ 80 目))为色谱固定相,填充于一长为 3 m,内径为 3 mm 的聚四氟乙烯管内。压缩空气通过分子筛和活性炭净化作为载气,流量控制在 10 ml·min⁻¹。柱温为室温,进样量为 1 ml。光离子化色谱仪(PID-100C)是一台环境温度下的色谱仪。环境温度的变化对测定结果有一定影响。为了确保分析的可靠性,仪器每相隔 2 h 标定 1 次。

标气采用丁烷、正丁烯、丁二烯和异戊二烯的混合标样,由国家标准物质研究所提供。测定所用色谱柱可有效分离异戊二烯和其它低碳氢化合物。对于萜类化合物如 α -蒎烯和 β -蒎烯等在该色谱柱上的保留时间超过 40 min。由于植物主要排放异戊二烯和萜类化合物,用该色谱柱分离异戊二烯不会受到干扰,并且,实验表明该仪器对异戊二烯的信号响应值与其浓度间存在良好线性(牟玉静等,1999)。因此,对分析植物异戊二烯排放,GC-PID 是一种简便可靠的方法。

1.4 排放通量计算

$$\frac{(C_1 - C_0) \times V \times 10^{-6}}{22.4} \times M_{iso} \times 10^6 \div W \quad (1)$$

式中 C_1 和 C_0 分别为第一和第二次采样气体的浓度, V 为采样箱的体积(22.22 L), M_{iso} 为异戊二烯的分子量(68), W 为样品的叶干重(g)。

1.5 排放参数

光和温度是异戊二烯排放的主要控制因素,为了预测植物异戊二烯的排放,Guenther 等提出以叶片温度和光为基础的几何算式(Guenther,1997;Guenther *et al*,1996):

$$E_{iso} = S \times C_L \times C_T \quad (2)$$

式中, E_{iso} 为异戊二烯的排放速率, S 为在一种标准温度($T_s = 303\text{ K}$)和标准光强(PAR = 1000 μE)下异戊二烯的排放因子, C_T 和 C_L 分别为温度和光相对标准条件下的校正项。光校正项为:

$$C_L = \frac{aC_{LL}L}{\sqrt{1+a2L2}}$$

(3)

式中,a(0.0027)和 C_{LL}(1.066)为经验常数,L 为 PAR(μE)。

表 1 太湖流域主要异戊二烯排放植物及其排放参数
Table 1 Isoprene emission from plants in Tai Lake basin

植物名 Species	排放潜力 (μg·g ⁻¹ dw·h ⁻¹) Potential emission
山茶 <i>Camellia japonica</i>	0.29
芭蕉 <i>Musa basjoo</i>	8.28
白栎 <i>Quercus fabri</i>	43.12,61.73,211.12
茶 <i>Camellia sinensis</i>	13.93
垂柳 <i>Salix babylonica</i>	132.91
刺槐 <i>Robinia pseudocacia</i>	79.71
短柄枹栎 <i>Quercus glandulifera</i>	222.17
法国梧桐 <i>Platanus acerifolia</i>	10.10
凤尾竹 <i>Bambusa multiplex</i>	60.20,103.67
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	74.22
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	97.48
合欢 <i>Albizia Jutibrissin</i>	70.18
河柳 <i>Salix chaenomeloides</i>	58.81
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	40.33
槐树 <i>Sophora japonica</i>	85.88
黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	34.12
箭竹 <i>Indocalamus latifolius</i>	4.87
苦楝 <i>Melia azedarach</i>	1.11
苦竹 <i>Pleiobcastus amarus</i>	86.03
莲 <i>Nelumbo nucifera</i>	246.92
芦苇 <i>Pragmites commanis</i>	47.12
罗汉松 <i>Podocarpus macrophytilus</i>	1.54
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	271.62
毛竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	116.04 ± 23.35
女贞 <i>Ligustrum Lucidum</i>	1.84
山鸡椒 <i>Litsea Cubeba</i>	3.37
十大功劳 <i>Mahonia fortunei</i>	50.41
柿子 <i>Diospyros glaucifolia</i>	4.14
算盘子 <i>Glochidion puberum</i>	9.16
甜槠 <i>Castanopris eyrei</i>	1.55
香蒲 <i>Typha orient</i>	6.41
水稻 <i>Oryca sativa</i>	2.49
云实 <i>Caesalpinia fruticosa</i>	7.68
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	4.27,16.34
梓桐 <i>Trachycarpus fortunei</i>	60.38
紫荆 <i>Lercis chinensis</i>	8.18
紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>	42.80
紫藤 <i>Wisteria sinensis</i>	1.41
钻天杨 <i>Populus nigra</i>	93.25,119.64

温度校正项为：

$$C_T = \frac{\exp[C_{T1}(T - T_S)/RT_S T]}{1 + \exp[C_{T2}(T - T_M)/RT_S T]}$$

(4)

式中, R 为气体常数($8.31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$), C_{T1} ($95000 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$), C_{T2} ($230000 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$) 和 T_M (314 K)。

将实际测定的排放通量,根据光强和温度校正因子,利用(2)式计算出标准温度和光强下各种植物排放参数。

2 实验结果

2.1 主要植物异戊二烯排放

在我们测定的植物中,只有部分植物排放的异戊二烯可以检测到(表 1),它们是山茶、

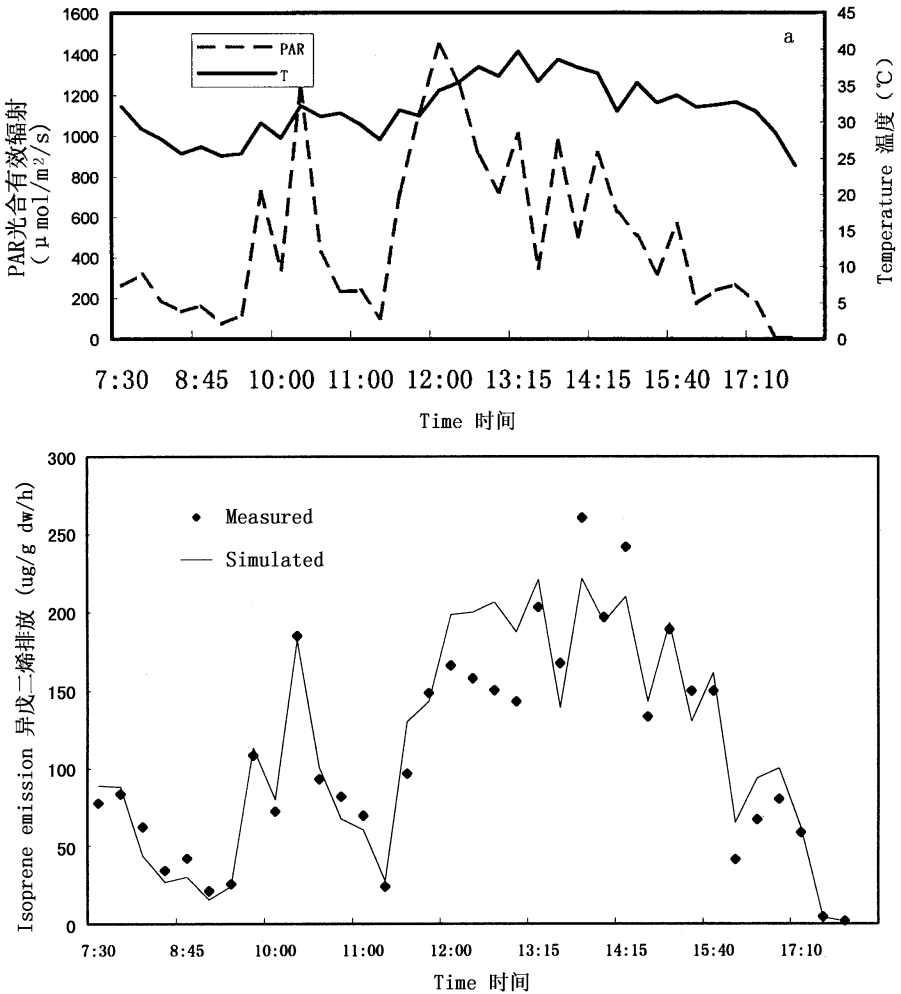


图 2 a. 温度(T)和光合有效辐射(PAR)的日变化, b. 毛竹异戊二烯排放的日变化实测值和模拟值
Fig.2 a. Diurnal change in temperature and photosynthetic active radiation (PAR), b. Diurnal change in isoprene emission measured and modeled from bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. De Lehaie)

芭蕉、白栎、茶、垂柳、刺槐、短柄枹栎、法国梧桐、凤尾竹、枫香、钻天杨、合欢、河柳(腺柳)、胡枝子、槐树、黄檀、箭竹、苦楝、苦竹、莲、芦苇、罗汉松、毛白杨、毛竹、女贞、山鸡椒、十大功劳、柿子、算盘子、甜槠、香蒲、水稻、杨树、云实、樟树、梓桐、紫荆、紫穗槐、紫藤。毛竹是太湖地区分布非常广泛的一种人工植被,毛竹大量异戊二烯排放,可能会影响到该地区的大气臭氧浓度。

在排放异戊二烯的植物中,其排放参数差异是相当大的(Kesselmeier *et al*,1999)。其中栎属的白栎和短柄枹栎、莲、毛竹、凤尾竹、钻天杨、垂柳等排放通量较大。在标准环境条件下,排放参数大于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

同时,也应该看到,植物的排放潜力是非常不稳定的,尽管对测定的通量值进行了温度和光照的影响纠正,但还是难以完全消除其他因素,如叶龄、立地条件等对排放潜力的影响。如白栎的排放潜力为 $43.12 \sim 211.12 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}\cdot\text{h}^{-1}$,毛竹的排放潜力为 $48.3 \sim 168.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.2 毛竹异戊二烯排放的日变化和模拟结果比较

影响植物排放异戊二烯的最主要因素是温度和光照。由于温度和光照具有明显的日变化,由此也造成了植物排放异戊二烯的日变化。在太湖流域分布比较广泛的毛竹的异戊二烯排放就明显地反映出了与温度和光照密切相关的日变化规律(图 2),特别是光照的影响

最为明显。在我们观测的天气中,早晨 7:30、10:00 和中午是晴朗的天空,阳光高照,异戊二烯的排放出现峰值。在早晨 8:30 和 11:00 时,天空云量明显增多,并伴有小雨,光照减弱,温度也稍有降低,异戊二烯的排放也相应减少。

将根据模型(2)~(4)和毛竹排放潜力(取所有毛竹观测值的平均值, $116.04 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{dw}\cdot\text{h}^{-1}$)计算的异戊二烯排放通量和实测的比较(图 3),发现两者具有很好的一致性,相关系数达 0.90。这说明,采用模型估算不同光照和温度下的异戊二烯排放是可信的。因此,可以利用该模型,再结合植物的叶生物量分布,就可以估算太湖流域的异戊二烯排放通量的分布(Guenther *et al*,1997)。

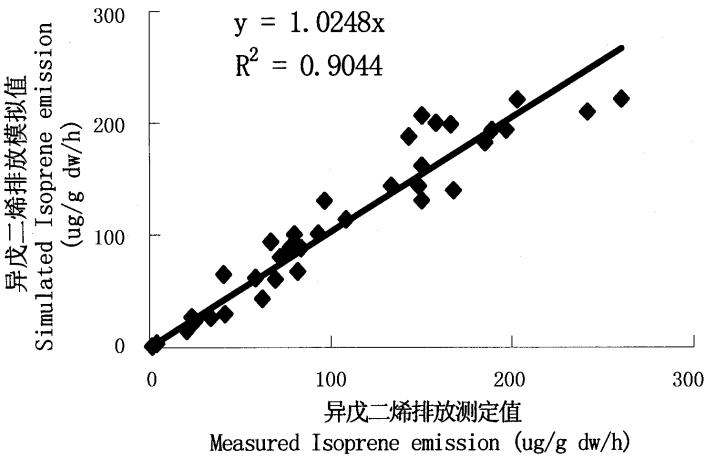


图 3 毛竹异戊二烯的实测值和模拟值的相关性
Fig.3 The relationship between measured and modeled isoprene emission from bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex H. De Lehaie)

总之,本文的研究结果表明,水母雪莲细胞内丰富的多糖和蛋白质,构成了其较强抗冻能力的物质基础。雪莲愈伤组织及悬浮培养细胞经低温锻炼后,抗冻能力明显提高。抗冻能力的发展同细胞蛋白质合成能力的增强成明显的正相关。进一步分析雪莲悬浮细胞分泌蛋白的生化特性,例如检测其是否为抗冻蛋白(卢存福等,1998),克隆抗冻基因,将为植物抗冻分子生物学的研究奠定基础。

参 考 文 献

- 卢存福,王红,简令成,匡廷云,1998. 植物抗冻蛋白研究进展. *生物化学与生物物理进展*, **25**(3):210~216
- 陈玉珍,卢存福,2000. 高山植物水母雪莲的组织培养. *特产研究*, **22**(1):9~17
- 青海植物志,1987. 西宁:青海人民出版社,643~644
- 简令成,1987. 种质的超低温保存. 见:植物生物技术(陈维伦主编),北京:科学出版社,191~209
- 简令成,吴素萱,1965. 植物抗寒性的细胞生物学研究——小麦越冬过程中细胞内物质的变化. *植物学报*, **13**(3):198~207
- 简令成,1992. 植物抗寒机理研究的新进展. *植物学通报*, **9**(3):17~22
- Arora R, Michael E W, 1995. Ultrastructural and protein changes in cell suspension cultures of peach associated with low temperature induced acclimation and abscisic acid treatment. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, **40**:17~24
- Chen H H, Li P H, 1980. Characteristics of cold acclimation and deacclimation in tuber-bearing frost hardiness during cold acclimation. *Plant physiol*, **65**:1146~1148
- Guy C L, 1990. Cold acclimation and freezing stress tolerance: role of protein synthesis. *Ann Rev Plant Pghysiol Plant Mol*, **41**:187~223
- Johson-Flanagan A M, Sing J, 1987. Alteration of gene expression during the induction of freezing tolerance in *Brassica napus* suspension culture. *Plant Physiol*, **85**:669~705
- Lamemmlu U K, 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, **227**:680~685
- Orr W, Leller W, Singh J, 1986. Induction of freezing tolerance in an embryogenic cell suspension culture of *Brassica napus* by abscisic acid at room temperature. *J Plant Physiol*, **126**:23~32
- Robertson A J, Gusta L V, Reaney M J T, Ishikawa M, 1988. Identification of proteins correlated with increased freezing tolerance in bromergrass cell cultures. *Plant Physiol*, **86**:344~347
- Robertson A J, Gusta L V, 1986. Abscisic acid and low temperature induced polypeptide changes in alfalfa (*Medicago sativa*) cell suspension cultures. *Can J Bot*, **64**:2758~2763
- Sakai A, 1962. Mechanism of the protective action of sugars against injury in plant cells. *Nature*, **193**(4810):89~90
- Steponkus P, 1967. Refinement of the TTC method of determing cold injury. *Plant Physiology*, **42**:1423~1426
- Smith B J, 1984. SDS polyacrylamid gel electrophoresis of proteins. In: Walker J M ed. *Methods in Molecular Biology*. Vol. I. Clifton NJ: Human Press, 42~45
- Weiser C J, 1970. Cold resistance and injury in woody plants. *Science*, **169**:1267~1278

(上接 230 页)

参 考 文 献

- 牟玉静,宋文质,张晓山,韩圣慧, 1999. 落叶树种的异戊二烯排放. *环境化学*, **18**(1):21~27
- Farentinos R C, Capretta P J, Kepner R E, 1981. Selective herbivory in Tassel-Eared Squarrels: role of monoterpenes in Ponderosa pines chosen as feeding trees. *Science*, **213**:1273~1275
- Guenther A, 1997. Seasonal and spatial variations in natural volatile organic compound emissions. *Eco Appl*, **7**:34~45
- Guenther A, Hewitt C, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, Mckay W A, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P, 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J Geophys Res*, **100**:5~17
- Guenther A, Zimmerman P, Harley R, 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluation and sensitivity analysis. *J Geophys Res*, **98**:12609~12617.
- Guenther A, Zimmerman P, Klinger L, Greenberg J, Ennis C, Davis K, Westberg H, Allwine G, Geron C, 1996. Estimates of regional natural volatile organic compound fluxes from enclosure and ambient measurements. *J Geophys Res*, **101**:1345~1359.
- Kesselmeier J, and Staudt M, 1999. Biogenic volatile organic compounds(VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *J Atmos Chem*, **33**:23~88