

西双版纳热带森林挥发性有机物的观测研究

白建辉^{1*}, Bradly Baker², Curtis Johnson², 李庆军³, 王永峰³, 赵崇奖³, Lee Klinger⁴, Alex Guenther⁴, Jim Greenberg⁴ (1.中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室,北京 100029; 2.South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City 57701; 3.中国科学院西双版纳热带植物园,云南 昆明 650223; 4.National Center for Atmospheric Research, Boulder 80307)

摘要: 2002年7月中旬利用异戊二烯通量测定系统对云南西双版纳热带森林异戊二烯的排放通量进行了连续测量,同时对光合有效辐射(PAR)、气温、湿度、风等参数进行了观测.结果表明,热带地区人工橡胶林区域湿季异戊二烯的排放有明显的日变化规律,中午前后为一天中的最大值,异戊二烯排放通量的日平均值在 $0.85\sim 0.24\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 之间.对小时值和日平均值而言,异戊二烯的排放与PAR和气温的变化规律比较一致,但它对PAR比气温更加敏感.不同的天气状况对异戊二烯的排放有非常明显的影响.橡胶林是一个单萜烯排放者,其单萜烯的排放速率明显依赖于PAR.橡胶林和热带雨林冠层上空异戊二烯和单萜烯的浓度也有明显的日变化规律,而且橡胶林区域的异戊二烯和单萜烯的浓度均明显高于热带雨林.

关键词: 异戊二烯; 单萜烯; 排放通量; 光合有效辐射; 橡胶林; 热带雨林

中图分类号: X503.235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2004)02-0142-05

Observational studies on volatile organic compounds of the tropical forest in Xishuangbanna. BAI Jian-hui¹, Bradly Baker², Curtis Johnson², LI Qing-jun³, WANG Yong-feng³, ZHAO Chong-jiang³, Lee Klinger⁴, Alex Guenther⁴, Jim Greenberg⁴ (1.Laboratory for Middle Atmosphere Layer and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2.South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City 57701, USA; 3.Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; 4.National Center for Atmospheric Research, Boulder 80307, USA). *China Environmental Science*, 2004,24(2): 142~146

Abstract: Continuous measurement of isoprene emission flux of tropical forest in Xishuangbanna, Yunnan utilizing isoprene flux measurement system was conducted in July 2002; meanwhile, investigation of parameters such as photosynthetically active radiation (PAR), air temperature, humidity and wind were conducted. The emission of isoprene in artificial rubber trees area in the wet season exhibited an obvious diurnal variation, with maximum value around noon, and daily averaged emission flux of $0.85\sim 0.24\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Hourly and daily average emission flux of isoprene were relatively in accordance with the variation rule of PAR and air temperature, but being more sensitive with PAR than with air temperature. The emission of isoprene was very obviously influenced by different weather conditions. Rubber trees were monoterpene emitters with emission rate dependence markedly on PAR. The concentrations of isoprene and monoterpenes on the corolla of rubber trees and tropical rain forest also exhibited an obvious diurnal variation rule, and the concentrations of isoprene and monoterpenes in the rubber trees area were obviously higher than in the tropical rain forest.

Key words: isoprene; monoterpenes; emission flux; photosynthetically active radiation; rubber trees; tropical rain forest

植物排放量最大的活性碳氢化合物是异戊二烯^[1],因其化学活性及在大气臭氧化学和光化学过程中的重要作用,受到有关学者的关注.其关键性的工作是准确测定来源于植物异戊二烯及其他挥发性有机物(VOC)的排放通量,确定控制VOC排放过程的主要因子,准确模拟植物

的排放规律.建立符合真实大气条件下区域和全

收稿日期: 2003-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40175031); 国家自然科学基金委员会国际合作与交流项目(40211120378); 美国国家自然科学基金资助项目(0131785)

* 责任作者, 副研究员, bjh@mail.iap.ac.cn

球尺度的 VOC 排放模式、以及大气化学与传输模型.热带森林是 VOC 的主要排放源,由于我国热带森林独特的地理与气候条件,对其 VOC 排放特征进行研究将具有重要的科学价值.

森林冠层上部异戊二烯通量的测量技术有多种^[2],它们均依赖于一些假设,某些情况下会产生较大的误差^[3].近年来,快速异戊二烯传感器已被成功地运用于森林冠层异戊二烯通量的测量^[4].本实验利用异戊二烯通量测定系统(简称 FIS),测量了云南西双版纳人工橡胶林区域湿季异戊二烯的排放通量,了解了其排放规律及相关影响因子,同时对该地区不同林区大气中异戊二烯和单萜烯的变化特征做了初步研究.

1 实验部分

1.1 实验区概况

实验地点设在云南省中国科学院西双版纳热带植物园(21°55′25″N,101°16′05″E),位于西双版纳自然保护区内.该区属热带季风气候,全区太阳总辐射、日照、气温、降雨量、土壤状况等可参考文献^[5].实验地区月平均气温在 15.2~ 24.6 °C,年平均值为 20.9 °C.月降雨量为 21.0~ 305.9mm,年降雨量为 1532.0mm,7~8 月份的降雨量约为全年的 40%.月降雨天数 1~2 月为 5~6d,7~8 月为 25d;年降雨天数为 174.5d.月日照时数为 7 月 114.4h,3 月为 192.2h,年日照时数为 1862.6h.

1.2 观测方法

实验时间为 2002 年 7 月 4 日~7 月 20 日.整套实验仪器安装在人工橡胶林内高 35m 的观测塔顶部,高出周围冠层 5~10m.观测塔周围地势比较平坦,植被以人工橡胶林为主.FIS 适于长期、连续、无人执守的野外观测,由异戊二烯传感器、臭氧发生器与监视器、三维超声风速仪等组成.该系统配有光子计数器、催化转化器和温度控制等,其详细介绍可参阅文献^[4].

同时,观测了植物冠层上部的光合有效辐射(PAR)(仪器为 LI-190SA,LI-COR)、温度、湿度、三维风速、异戊二烯浓度等.所有观测数据由计算机自动采集和记录.整套系统每日 24h 连续工

作,采样频率为 10Hz.实验期间,在另一观测塔(位于 2km 处热带雨林林区)对林冠层上空白天的空气进行了逐时采样,所采气体样品由美国南达科他州矿物与技术学校实验室分析.异戊二烯排放通量(简称 IsoFlux,下同)由下式计算:

$$F = w'c' \tag{1}$$

式中: F 为瞬时通量; w' 和 c' 分别为垂直风速与异戊二烯混合比的瞬时脉动量.

通过对 F 进行时间积分,得到平均垂直涡度相关通量,本实验取 30min.对原始实验数据进行去线性、坐标旋转(以调整到垂直风速的平均值为零)等处理,得到准确的 IsoFlux,详细计算可参考文献^[4].

2 实验结果

2.1 排放通量

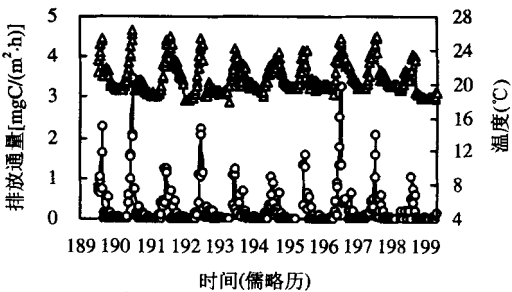


图 1 异戊二烯排放通量和气温的变化曲线
Fig.1 The variation curves of isoprene emission flux and air temperature
—○— 排放通量 —△— 温度

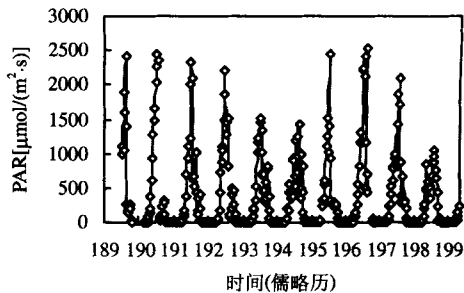


图 2 光合有效辐射的变化曲线
Fig.2 The variation curve of PAR

由实验数据和式(1)可得到异戊二烯 0.5h 的

排放通量,同时计算了光合有效辐射(PAR)、温度等 0.5h 间隔的平均值.图 1 为 IsoFlux 和气温的变化曲线,图 2 为 PAR 的变化曲线.

IsoFlux 具有明显的日变化规律,早晚较小,中午前后为一天的最大值,日落后至次日日出前一般接近于零,即异戊二烯在夜间基本没有排放.这与国外对森林 IsoFlux 的观测结果比较一致^[4].而且,IsoFlux 表现出与 PAR、气温比较一致的日变化和逐日变化规律.实验期间人工橡胶林 IsoFlux 的最大值为 3.47mgC/(m²·h)(190 日).影响 IsoFlux 的主要因子除 PAR 外,还受其他因素(如云、降雨等)影响.多云天气,IsoFlux 比晴天明显下降,如 193,194,198d.这 3d IsoFlux 最大值约降为晴天的 1/3 左右.2002 年夏季,该实验区云的变化比较快且没有规律,PAR 受云和降雨的衰减,不同程度地减少了 IsoFlux.

对实际天气 169 组数据进行统计分析,得到 IsoFlux(*F*)与气温(*T*)和 PAR 间的相关系数 *R* 分别为 0.64 和 0.81,其关系式分别为 $F=0.22T-4.22$ 和 $F=0.0008PAR-0.07$. IsoFlux 依赖于气温和 PAR,但它对 PAR 比气温更加敏感,这可以从图 1,图 2 中看到.对 IsoFlux 与 PAR 和气温做多元分析,它们的 *R* 值为 0.82,其关系式为 $F=0.00078PAR+0.027T-0.62$.根据该关系式计算了 IsoFlux,结果见图 3.

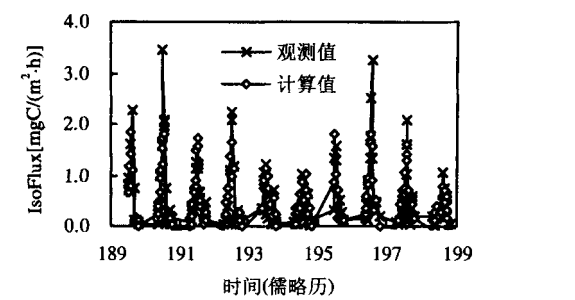


图 3 异戊二烯排放通量的观测值和计算值
Fig.3 The observed and calculated emission flux of isoprene

从图 3 可见,计算值与观测值的变化规律基本一致,但在数值上存在很大差别,很多计算值与

观测值的比大于 2,有的可以达到 7.国外利用模式模拟 IsoFlux(小时值)的结果,相对偏差在 50% 以内的模拟值占 67%^[7].Guenther 的 G93 和 G91 模式以及其他的 7 种模式的模拟结果,模拟值与观测值的相对偏差分别为小于 21%、53%和 25%~78%^[8].需要注意的是,在比较不同模式的计算结果时,应该考虑不同的采样方法和技术(如叶面尺度、树枝尺度、冠层尺度等,密闭式采样方法、微气象方法等)对排放通量产生的影响.因此,只是基于 IsoFlux 与气温、PAR 之间简单的数量关系,来计算 IsoFlux 不是很准确,必须寻找有一定物理和化学机理的计算方法或模式.

对白天 IsoFlux 做日平均计算,得到了 7 月 9 日~17 日 IsoFlux 的日平均.为了解不同天气的 IsoFlux,分别计算了晴天(190,196d)、阴天(194,198d)和所有天气的 IsoFlux、PAR、温度等的日平均值,以及晴天与阴天各量的比值,见表 1.

表 1 晴天、阴天和所有天气状况下异戊二烯的排放通量、PAR、温度等的日平均值

Table 1 The daily averages of isoprene emission flux, PAR and air temperature in clear sky, cloudy sky and all skies			
天气状况	排放通量 [mgC/(m ² ·h)]	温度 (°C)	PAR [μmol/(m ² ·s)]
晴天	0.75	22.1	892.1
阴天	0.25	21.4	546.6
所有天气	0.46	21.7	699.6
晴天/阴天	3.00	1.0	1.6

9d 的 IsoFlux 平均值为 0.46mgC/(m²·h),其最大值和最小值分别为 0.85mgC/(m²·h)和 0.24mgC/(m²·h),分别对应 9d 内 PAR 最大和最小的那一天,即 7 月 15,7 月 17 日,这两天的气温分别对应着 9d 内的较高值(22.6°C)和较低值(22.1°C).不同天气条件下 IsoFlux 存在很大的差别,其主要原因是 PAR 和温度的变化,且 IsoFlux 受 PAR 的影响要比气温大,同时云量及其变化也是一个不可忽视的重要因素,它通过对 PAR 的影响控制着异戊二烯的排放.这 9 天 IsoFlux 与气温、

PAR 日平均值的相关系数(R)分别为 0.39 和 0.89. IsoFlux 与气温和 PAR 之间不是简单的线性关系. 对日平均值而言, IsoFlux 对 PAR 比对气温更加敏感, 这与小时值特征一致. 因此, 对 IsoFlux 而言, PAR 是比气温更加重要的一个因子. IsoFlux 与气温、PAR 等日平均值的 R 为 0.92, 比小时值有所提高, 其关系式为 $F=0.006PAR-0.08T+1.34$. 利用该关系式计算了 9 天 IsoFlux, 图 4 给出了它们的观测值、计算值以及二者之比.

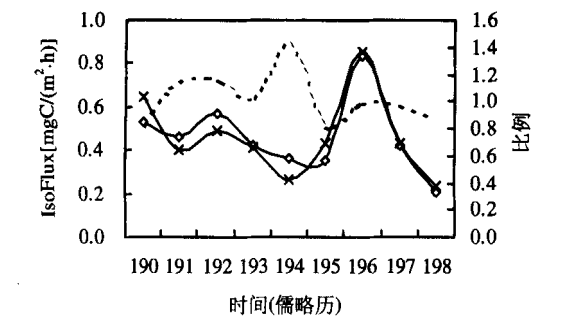


图 4 异戊二烯排放通量的观测值和计算值以及二者之比

Fig.4 The observed and calculated emission flux of isoprene and their ratios
—◇— 计算值 —x— 观测值 ----- 计算值/观测值

计算值与观测值的变化比较一致, 其比值在 0.8~1.4 之间, 与小时值相比, 计算值与观测值更加接近. 根据在观测塔周围对不同树木叶面尺度的封闭式气体采样和分析结果, 橡胶林是一个单萜烯的排放者, 其排放速率约为 $21\mu\text{gC}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 而

异戊二烯的排放速率相对较低, 一般小于 $1.0\mu\text{gC}/(\text{g}\cdot\text{h})$. 当 PAR 与温度分别在 $50\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 28°C 与 $675\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 35°C 时, 单萜烯的排放速率分别为 $1.4\mu\text{gC}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 $21.0\mu\text{gC}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 这意味着橡胶树单萜烯的排放速率明显依赖于 PAR. 从橡胶林和热带雨林(另一次生林)采样塔林冠层上空空气样品的分析结果看, 两个林区均有比较大的单萜烯排放(热带雨林地采样塔周围没有橡胶林).

热带地区橡胶林与亚热带地区不同树种异戊二烯的排放速率有所不同, 其排放通量不是很大. 原因除了与树种、树龄、树的生长状况等有关外, 还与光照、气温以及叶面温度、相对湿度等有关^[9].

2.2 VOC 浓度的日变化

实验期间, 采集了人工橡胶林和热带雨林冠层上空 4d 和 2d 的空气样品, 并对其进行了测定, 分析方法等详见文献^[10]. 结果表明, 2 个林区冠层上空异戊二烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、蒎烯、柠檬烯等均有明显的日变化, 特别是人工橡胶林. 通常, 一天之内单萜烯浓度的最大值出现在中午和午后, 不同日期单萜烯浓度的最大值与 PAR、温度以及云的影响等因素有关. 相比而言, 人工橡胶林异戊二烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、蒎烯、柠檬烯等的浓度要高于热带雨林, 且异戊二烯的浓度也远高于单萜烯浓度 1 个量级以上. 表 2 为两个林区单萜烯浓度的平均值、最大值和最小值.

表 2 人工橡胶林和热带雨林冠层上空异戊二烯、单萜烯浓度的平均值、最大值、最小值
Table 2 The daily averages, maximum and minimum of the concentrations of isoprene and monoterpenes above the canopy of the artificial rubber trees and rain forest (10⁻⁹)

浓度	异戊二烯			α -蒎烯		β -蒎烯		蒎烯		柠檬烯	
	FIS	橡胶林	热带雨林	橡胶林	热带雨林	橡胶林	热带雨林	橡胶林	热带雨林	橡胶林	热带雨林
平均值	1.432	1.015	0.824	0.153	0.037	0.092	0.019	0.039	0.022	0.037	0.018
最大值	5.773	2.997	2.255	0.382	0.096	0.296	0.069	0.092	0.091	0.095	0.060
最小值	0.010	0.015	0.004	0.042	0.009	0.008	0.002	0.007	0.004	0.011	0.003

FIS 为异戊二烯通量测定系统测定值. 人工橡胶林的异戊二烯浓度的平均值、最大值均高于热带雨林, 二者在数量级上基本一致. 单萜烯浓度的平均值、最大值、最小值也是人工橡胶林均高于

热带雨林,对 α 蒎烯、 β 蒎烯而言,还存在量级上的差别.说明不同林区不同单萜烯的排放过程、排放潜势可能存在很大的差别,因此有必要对它们的排放过程、控制因子等进行分类、详细的研究.

3 讨论

大多数异戊二烯的排放模式建立在晴天监测的基础上,所得结果较好.本研究中,7~9月是当地的雨季(湿季).因此,模式对热带地区 VOC 模拟的结果与实际情况存在着较大差别,热带地区夏季,云与降水的影响造成了 VOC 排放比较大的变化,与晴天相比有很大的差别.因此,需要进一步加强热带地区植物在夏季不同天气状况下 VOC 排放的测量和模拟研究.多云情况下,云的变化非常复杂,云量、云状、云高等的变化将造成林冠层上部、冠层内、以及地面光合有效辐射比较大的变化.云与辐射的关系不仅是辐射传输中的关键问题,也是确定实际天气状况下 IsoFlux 的关键问题.在未来异戊二烯排放模式建立的过程中,应该考虑到云的影响.

4 结语

2002 年夏季对西双版纳热带森林异戊二烯排放通量(IsoFlux)研究的结果表明,人工橡胶林区域 IsoFlux 日变化特征明显,其日平均变化范围为 $0.85\sim 0.24\text{mgC}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. IsoFlux 表现出与 PAR、气温比较一致的变化规律,并且对 PAR 最为敏感,IsoFlux 与 PAR、气温之间的关系是非线性的.云和降雨对异戊二烯的排放有明显影响.橡胶林是一个单萜烯排放者,其单萜烯的排放速率明显依赖于 PAR,并高于异戊二烯的排放速率.橡胶林和热带雨林冠层上空异戊二烯和单萜烯的浓度也有显著的日变化特征,而且人工橡胶林区域的异戊二烯和单萜烯的浓度均明显高于热带雨林.

参考文献:

- [1] Guenther A, Hewitt C, Erickson D, *et al.* A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *J. Geophys. Res.*,

1995,100(D5):8873-8892.

- [2] Guenther. Isoprene fluxes measured by enclosure, relaxed eddy accumulation, surface-layer gradient, mixed-layer gradient, and mass balance techniques [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996,101:18555-18568.
- [3] Dabberdt W F, Kenschow D H, Horst T W, *et al.* Atmosphere-surface exchange measurements [J]. *Science*, 1993, 260:1472-1481.
- [4] Guenther Alex B, Hills Alan J. Eddy covariance measurement of isoprene fluxes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998,103(D11):13145-13152.
- [5] 云南省林业调查规划院.云南自然保护区 [M]. 北京:中国林业出版社,1989.39-54.
- [6] Hills A J, Zimmerman P R. Isoprene measurement by ozone-induced chemiluminescence [J]. *Anal. Chem.*, 1990,62: 1055-1060.
- [7] Geron C D, Guenther Alex B, Pierce Thomas E. An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994,99(D6):12773-12791.
- [8] Guenther A, Zimmerman P, Harley P, *et al.* Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993,98(D7): 12609-12617.
- [9] 白建辉,王明星,Graham J,等.亚热带森林非甲烷碳化合物的研究(II). 日变化 [J]. *气候与环境研究*,2001,6(4):456-466.
- [10] Bai Jianhui, Wang Mingxing, Hu fei, *et al.* Analyzing method on biological volatile organic compounds [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002,19(1):64-72.

作者简介:白建辉(1964-),男,河北安国人,博士,副研究员,主要从事植物挥发性有机物、对流层臭氧与其前体物(氮氧化物、VOC等)相互关系和变化规律、太阳紫外辐射等方面的研究.发表论文 40 余篇.