

UC Irvine

UC Irvine Previously Published Works

Title

Volatile organic compound emission fluxes from a temperate forest in Changbai Mountain

Permalink

<https://escholarship.org/uc/item/8d1035cr>

Journal

Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae, 32(3)

ISSN

0253-2468

Authors

Bai, J
Lin, F
Wan, X
et al.

Publication Date

2012-03-01

Copyright Information

This work is made available under the terms of a Creative Commons Attribution License, available at <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Peer reviewed

白建辉, 林凤友, 万晓伟, 等. 2012. 长白山温带森林挥发性有机物的排放通量[J]. 环境科学学报, 32(3): 545-554

Bai J H, Lin F Y, Wan X W, et al. 2012. Volatile organic compound emission fluxes from a temperate forest in Changbai Mountain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(3): 545-554

长白山温带森林挥发性有机物的排放通量

白建辉^{1,*}, 林凤友², 万晓伟¹, Guenther Alex³, Turnipseed Andrew³, Duhl Tiffany³

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院长白山森林生态系统定位研究站, 延吉 133613

3. 美国国家大气研究中心, Boulder CO 80307

收稿日期: 2011-05-24 修回日期: 2011-08-09 录用日期: 2011-08-31

摘要: 2010 年夏季, 在长白山温带森林开展了挥发性有机物 (VOC) 排放通量以及气象参数、PAR 的综合测量。VOC 排放通量采用松弛涡流积累 (Relaxed Eddy Accumulation) 技术在森林冠层上进行测量。初步发现长白山阔叶林主要排放 α -蒎烯、 β -蒎烯、苧烯、香桉烯、月桂烯、萹烯、柠檬烯、罗勒烯、松油烯、缬花烯、萜品油烯、三环烯等。研究表明, 长白山阔叶混交林 VOC 排放有明显的日变化——早晚较低和中午前后较高。2010 年夏季, 单萜烯总排放通量的平均值为 $0.242 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其变化范围为 $0.005 \sim 1.668 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 各成分排放通量的平均值 (和最大值) 分别为 α -蒎烯 $0.072 (0.234)$ 、苧烯 $0.028 (0.356)$ 、月桂烯 $0.027 (0.433)$ 、萹烯 $0.023 (0.173)$ 、柠檬烯 $0.037 (0.197)$ 、罗勒烯 $0.016 (0.168)$ 、萜品油烯 $0.053 (0.320)$ 、缬花烯 $0.067 (0.755) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。研究还发现 VOC 排放通量与气温之间存在一定的联系。

关键词: 挥发性有机物; 单萜烯; 排放通量; 温带森林

文章编号: 0253-2468(2012)03-545-10 中图分类号: X51 文献标识码: A

Volatile organic compound emission fluxes from a temperate forest in Changbai Mountain

BAI Jianhui^{1,*}, LIN Fengyou², WAN Xiaowei¹, Guenther Alex³, Turnipseed Andrew³, Duhl Tiffany³

1. LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2. Research Station of Changbai Mountain Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences, Yanji 133613

3. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307, USA

Received 24 May 2011; received in revised form 9 August 2011; accepted 31 August 2011

Abstract: Measurements of volatile organic compound (VOC) emission fluxes, meteorological parameters, solar global radiation and photosynthetically active radiation (PAR) were carried out in a temperate forest, Changbai Mountain, China during the summer season in 2010. VOC flux measurements were made by using relaxed eddy accumulation (REA) technique on an above canopy tower. It was found that the dominate monoterpenes emitted from this mixed forest were α -pinene, β -pinene, camphene, sabinene, myrcene, carene, limonene, ocimene, terpinene, cymene, terpinolene, and tricyclene. VOC emission and air temperature were correlated and there were evident diurnal variations, i. e., lower emissions in the morning and late evening, and the highest emissions around the noon. During the summer of 2010, the mean monoterpene emission flux was $0.242 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, and ranged from 0.005 to $1.668 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. The average and maximum of emission fluxes ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) were 0.072 and 0.234 for α -pinene, 0.028 and 0.356 for camphene, 0.027 and 0.433 for myrcene, 0.023 and 0.173 for camphene, 0.037 and 0.197 for limonene, 0.016 and 0.168 for ocimene, 0.053 and 0.320 for terpinolene, and 0.067 and 0.755 for cymene, respectively.

Keywords: volatile organic compounds; monoterpene; emissions flux; temperate forest

1 引言 (Introduction)

陆地植物伴随其生理活动排放出大量的挥发性有机物 (VOC), 研究表明 (Guenther, 1994;

Guenther 等, 1995), 全球尺度 VOC 生物源排放远高于人为源排放, 全球生物 VOC 排放为 $1150 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中 90% 以上来源于植物排放, 异戊二烯和单萜烯对总排放的贡献分别为 44% 和 11%, 即异戊二烯是

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40975082)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40975082)

作者简介: 白建辉 (1964—), 男, 研究员, E-mail: bjh@mail.iap.ac.cn; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: BAI Jianhui (1964—), male, professor, E-mail: bjh@mail.iap.ac.cn; * Corresponding author

最大的 VOC 排放源. 因而国内外研究主要集中于异戊二烯和单萜烯.

VOC 具有高度的化学活性,它在大气化学、大气环境、气候变化、碳收支等方面起着重要作用,越来越引起各国科学家和学者们的高度重视,其主要影响方面包括:对流层 O_3 光化学、大气氧化能力、光化学烟雾的形成、OH 自由基的生成、与 NO_3 自由基的反应、CO 的产生、有机酸的形成、 NO_x 的光化学转化、二次有机气溶胶的产生及云的成核等方面 (Guenther *et al.*, 1995; Thomas *et al.*, 1991; Fehsenfeld *et al.*, 1992; Brasseur *et al.*, 1999a; Baker *et al.*, 2005). 植物排放 VOC 的活性高于人为源排放 VOC 的活性 (Atkinson 和 Arey, 2003), 因而植物 VOC 排在区域和全球大气化学中所起的作用将更加重要. 植物排放到大气中的 VOC 将影响大气中其他微量气体, 并且通过大气物理、大气化学和光化学等过程对地球上的气候起着调节作用, 这是由于 VOC 中的一些成分本身就是辐射活性的, 另外, VOC 还影响着其他气体 (包括辐射活性气体)、 O_3 、 NO_2 、OH 自由基等, 进而影响着大气中的辐射平衡以及辐射能量的利用和分配 (Guenther *et al.*, 1995; Brasseur *et al.*, 1999b; Bai, 2009; 白建辉, 2010). 全球碳循环源汇方面仍有很大的不确定性 (Brasseur *et al.*, 1999b), 因而应重视并考虑植物以 VOC 形式释放到大气中的碳 (Guenther, 2002; Kesselmeier *et al.*, 2002). 研究表明, 在不同地区、不同植物以 VOC 形式排放到大气中的碳 (以及占碳交换的比例) 存在明显差别 (Greenberg *et al.*, 2003; 白建辉和 Baker, 2005), 在某些地区可能具有重要贡献, 如对南非林区 VOC 的研究表明 (Greenberg *et al.*, 2003), 萜烯排放大约占碳日净交换的 25%.

大气中化学成分是全球气候和变化研究中的重要内容, 研究发现大气中痕量气体的组分有很大的时空变化, 因而, 准确获取区域以及全球尺度上各类生态系统 VOC 的排放速率、排放通量是各种化学、光化学模式所必需的. 基于可靠的 VOC 排放测量数据, 我们才有可能依靠各种模式来研究和准确评价目前及未来 VOC 对对流层化学和光化学 (如 O_3 变化、二次有机气溶胶形成)、区域和全球大气化学、区域及全球气候及变化等的影响和相互作用.

因此, 准确测定和获得全球不同地区代表性植物 (森林、草地等) VOC 的排放速率、排放通量, 研究并确定各影响因子和 VOC 排放间的相互关系及其

定量影响, 估算未来气候变化背景下它们的排放通量及其变化趋势, 这些研究对于了解大气化学、大气环境、气候及其变化等内在规律性将具有重要的科学价值. 相对于准确了解全球以及我国 VOC 的排放而言, 国内外目前开展的 VOC 研究 (特别是不同地区排放因子的准确测定等) 都显得很有限, 而且当前的模式也有一定的不确定性. 中国地大物博, 物种丰富, 又跨几个气候带, 如何准确、尽快地获取目前不同地区以及全国生物 VOC 的排放通量及其变化规律是我们面临的重要任务.

VOC 测量和研究包括: 全球不同地区大气中 VOC 浓度的测定、不同地区代表性植物 (树种、草种等) VOC 排放速率、排放通量的测定、不同地区以及全球 (包括我国) VOC 排放通量的估算等 (Guenther, 1994, 2002; Guenther *et al.*, 1995, 1996, 1999; Thomas *et al.*, 1991; Fehsenfeld *et al.*, 1992; Baker *et al.*, 2005; Atkinson 和 Arey, 2003; Brasseur *et al.*, 1999a, 1999b; Kesselmeier *et al.*, 2002; Klinger *et al.*, 2002). 其研究尺度包括叶面、树枝、冠层、区域尺度等, 研究方法包括静态和动态箱方法、梯度法、微气象方法 (涡度相关、REA (Relaxed Eddy Accumulation)) 等, 研究手段上使用了铁塔、系留气球、飞机、卫星等, 测量和分析仪器包括色谱、质谱、REA 系统、FIS (Fast Isoprene System) 系统、PTR-MS (Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometer) 等. NCAR 科学家对不同国家、不同地区代表性树种 VOC 的排放做了长期、系统的实验室内外测量及模式研究, 建立和发展了 VOC 排放模式 (Guenther, 1994, 2002; Guenther *et al.*, 1995; 1999; 2006). 近年来, Guenther 等 (2006) 又将 VOC 全球和区域模式 (MEGAN) 在很多方面做了改进, 其空间分辨率约为 1 km^2 . 除了上面 Guenther 等的模型外, 还有一些基于光合过程的模型 (Niinemets *et al.*, 1999; Arneth *et al.*, 2007; Pacifico *et al.*, 2011) 被学者们用于 VOC 排放的估算.

目前, 我国 VOC 的研究在很多方面都有了长足进展 (李金龙等, 1994; 邵敏等, 1994; 张福珠等, 1994; 白郁华等, 1996; 牟玉静等, 1999; 张莉等, 2003; 闫雁等, 2005; 杨丹菁等, 2001; 王效科等, 2002; 白建辉等, 2003; 白建辉和 Baker, 2004; 白建辉等, 2004; 李庆军和 Klinger, 2001; He *et al.*, 2004; 王永峰和李庆军, 2005; Zheng *et al.*, 2010; 司徒淑婷等, 2009, 2010; Wang *et al.*, 2011). 研究范围包括

生物源和人为源排放,研究地点涉及森林(及其主要树种)、草地、城市,研究内容包括 VOC 排放通量、排放速率的测定以及我国部分地区和全国排放量的估算. 测量排放通量、排放速率目前以箱方法为主,涡度相关方法使用还很少(白建辉等,2004). 目前,我们已经获得了我国一些地区(北京、云南、广州、太湖流域、长江三角洲、内蒙古等)代表性树种以及草地 VOC 的排放速率和排放通量的测量值,也利用国内外测量的排放速率和 Guenther 的模型估算了北京、珠江三角洲地区(Wang *et al.*, 2003; 司徒淑娉等, 2009; Wang *et al.*, 2011)以及全国 VOC 的排放(Klinger *et al.*, 2002). 我们虽然对于一些地区主要树种异戊二烯和萜烯排放的日变化特征有了初步了解,但仍然缺乏对它们的日-日之间、月、季、年变化规律特别是冠层尺度上森林 VOC 排放的准确了解和模拟,因此对于这些地区以及全国 VOC 排放的估算仍很不确定.

对比目前结果,中外科学家对我国某些地区代表性植物排放速率的测量结果及全国 VOC 排放量估算等方面还存在差别,主要影响因素包括:不同研究者使用了不同的测定方法与技术、操作方法的差别;测定条件的差别;封闭采样(enclosure)以及箱方法采样的局限性;不同研究者利用封闭采样方法测量同一树种异戊二烯排放速率存在差别(源于被测量植物的叶、枝干、年龄的不同以及对叶和枝干干扰的差别等),对萜烯而言差别更大;同一树种排放速率在地区、季节方面的变化(Sharkey *et al.*, 1999);将某一地区单一树种的排放速率应用到其他地区的适应性;(在树种数量及单一树种)测量样本量的有限;很多地区 PAR(影响 VOC 排放的重要因素)监测的缺乏. 以上因素都将造成利用模式对区域、我国以及全球 VOC 排放估算中存在不确定性(Guenther *et al.*, 1995; Baker *et al.*, 2005; 白建辉和王庚辰, 2004; 司徒淑娉等, 2009, 2010). 因此,一定区域范围 VOC 排放通量的直接测量就显得十分重要,它可以直接提供可靠的实测结果,还可用于模式的建立、检验及其发展.

近年发展起来的涡度相关技术被用于 VOC 排放通量的测量,它排除了采样罩或采样箱对周围环境的干扰,可直接测量植物冠层的排放通量,它比由测量单一树种 VOC 的排放来估算区域 VOC 的排放通量更加直接和准确,并有助于模式的发展及验证. 随着测量技术的逐渐成熟,它的优越性已越来

越突出(Guenther 和 Hills, 1998; Geron *et al.*, 2002; Greenberg *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 1999, 2005; Held *et al.*, 2008). 目前国内外利用涡度相关测量 VOC 排放通量的时间大都比较短,为全面、准确了解和掌握冠层尺度森林 VOC 的排放规律,长时间跨度-覆盖植物生长季以及不同年份生长季的测量是必要的,它将为提供不同时间尺度更多有价值的信息.

长白山针阔混交林是我国东部中温带湿润气候区最主要的森林植被类型,是中国东北样带东部最典型的生态系统(金昌杰等, 2000). 目前,我们还缺乏对该区域森林排放通量、典型树种 VOC 排放速率的测量和了解,已有的测量数据(如 Klinger *et al.*, 2002)尚不能满足对该区域森林 VOC 排放的准确估算. 因而较为系统地测定和研究长白山针阔混交林冠层尺度 VOC 的排放通量及主要控制因子,并在此基础上建立经验模型,并利用国际上通用的 Guenther 模型来模拟和研究该区域 VOC 的排放,对于准确了解我国温带森林 VOC 的排放现状和排放量将具有重要的科学意义和价值,进而推动和增强我们在大气化学和光化学、大气环境、辐射平衡、森林碳排放、气候及其变化等相关领域的研究. 本文主要介绍 2010 年长白山阔叶林生长季 VOC 排放通量的测量结果.

2 测量概况(Observation and instruments)

VOC 排放通量的测量设在中国科学院长白山森林生态系统定位站 1 号标准地阔叶红松林(42°24'N, 128°6'E, 海拔 738 m)内. 该区属季风温带大陆气候,年均降水量 600~900 mm,主要集中在 6~8 月. 周围下垫面比较平坦,林下土壤为山地暗棕色森林土,林型为成熟原始林,主要乔木有红松(*Pinus koraiensis*)、椴树(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*). 林分为复层结构,下木覆盖度 40%,平均株高 26 m. 优势树龄在 200 年左右. 周围主要树种所占比例可参见文献(邹春静等, 2001). 灌木有东北溲疏(*Deutzia amurensis*)、假色槭(*Acer pseudosieboldiarum*)、青楷槭(*A. tegmentosum*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)等. 草本包括苔草(*Carex spp.*)、山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、木贼(*Equisetum hiemale*)和一些蕨类(吴家兵等, 2005; 关德新等, 2006; 金昌杰等, 2000). 观测林地建有 62

m 的气象观测塔,并设有 7 个高度(2.5、8、22、26、32、50、60 m)的观测平台。

测量 VOC 通量的仪器为松弛涡度积累(REA)系统,由采样器、三维超声风速仪及其数据采集器(美国 Campbell 公司)等主要部件组成。该系统安装于观测塔的 32 m 平台,超声风速仪探头和气体进气口高出周围冠层 9 m 左右。根据三维超声风速仪所测垂直风速的大小和方向,气体由数据采集器和采样泵控制自动采入上下两个独立的不锈钢采样管(内填 Tenax、carbograph 填料)内,采样频率为 10 Hz,采样时间为 0.5 h。三维超声风速仪的采样频率也为 10 Hz。采样一般选择在晴好、无雨的天气。气体样品的采集主要包括每次一对“上”、“下”的样品,间或采集一些“中间”以及空白样品。当垂直风速小于某一范围($\pm 0.6\sigma_w$, σ_w 为垂直风速的标准偏差)时,气体被自动采集到“中间”样品采集管。当垂直风速超出此范围时,气体将视垂直风速的方向被分别采集到“上”、“下”两个采样管内(Guenther 和 Hills, 1998; Baker *et al.*, 1999; Geron *et al.*, 2002; Greenberg *et al.*, 2003; Held *et al.*, 2008)。空白样品的采集:采样开始时打开采样管一端密封口,采样结束时,封闭此端口。为排除臭氧等氧化剂对所采气体样品的影响,每个采样管前均加有过滤器,其主要成分为碘化钾。

太阳辐射传感器安放在长白山森林生态系统定位站内的楼顶,测量项目包括总辐射、直接辐射、可见光辐射、光合有效辐射(PAR)等,该系统近年来在一些台站使用,性能良好。为确保数据质量,实验前做了标定。其详细参数可参见文献(白建辉, 2010)。

VOC 测量时间为 2010 年 6 月 28 日至 8 月 25 日,此期间包括 3 个实验时段:6 月 28 日至 7 月 9 日、7 月 19 日至 7 月 30 日、8 月 12 日至 8 月 25 日。为了解 VOC 排放的日变化以及日-日之间的变化,气体采样包括①日变化采样,每日 5 次,时间间隔为 3 h,②中午前后的连续采样,每日 2 次。7、8 月份,长白山地区云的变化较快,在采集日变化气体样品时,时常遇到一些情形:早晨少云,但随着时间推移,云量增长以及变化都较大。2010 年夏季共采集气体样品 150 个,包括采集到“上”、“下”、“中间”采样管中样品以及空白样品。采集后的 VOC 气体样品尽快送回实验室冰箱内保存,温度在 5 °C 左右。样品由美国国家大气研究中心(NCAR)分析,气体样品

的进样、气相色谱和质谱的分析条件和分析方法等可参见文献(Greenberg *et al.*, 1999a, 1999b; Bai *et al.*, 2002)。

2010 年 6 月 28 日至 8 月 25 日期间,同步开展了太阳辐射的测量,测量时间为日出至日落,每日多次检查该系统,以保证整套系统的正常运行、辐射表头的清洁等。

REA 采用涡度相关原理来测量 VOC 的排放通量(Businger 和 Oncley, 1990; Baker *et al.*, 1999; Greenberg *et al.*, 2003; Geron *et al.*, 2002; Held *et al.*, 2008)。为得到统计意义上各种尺度上涡度的样本量以及用于准确分析足够高的气体浓度,采样时间一般为 0.5 h(Harley *et al.*, 2003)。采样过程中,气体的采样速率要正比于垂直风速,但在测量技术上这一点难于实现,因而 REA 采用了恒定的采样速率,所以此方法被称作松弛涡度积累。某一成分排放通量 F_i ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 的计算采用公式(1)(Held *et al.*, 2008):

$$F_i = b\sigma_w(C_{\text{up}} - C_{\text{down}}) \quad (1)$$

式中, σ_w 是垂直风速的标准偏差 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), b 是经验系数, C_{up} 和 C_{down} 分别是上下两个采样管中某一成分的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。系数 b 根据尺度的相似性由温度和热通量来计算。

3 实验结果与讨论 (Results and discussion)

对气体样品的初步分析表明,长白山阔叶红松林区排放的 VOC 成分主要包括 α -蒎烯(α -pinene)、 β -蒎烯(β -pinene)、蒈烯(camphene)、香桉烯(sabinene)、月桂烯(myrcene)、萜烯(carene)、柠檬烯(limonene)、罗勒烯(ocimene)、松油烯(terpinene)、缙花烃(cymene)、萜品油烯(terpinolene)、三环烯(tricyclene)等。图 1 给出 2010 年夏季长白山阔叶林 VOC 主要成分的排放通量和气温,图中排放通量所缺数据为没有通量以及通量为负值的。排放通量为负值的情况可能包括大气状况比较稳定、排放通量很小(或已接近为零)。全文时间段的表示方法:某一时刻值(如 6:30)表示其前 0.5 h(如 6:00—6:30)的平均值。从 VOC 排放通量的日变化(6 月 28 日、7 月 9 日、7 月 19 日、7 月 30 日、8 月 12 日、8 月 24 日)来看,大部分成分的排放早晚较低,中午前后达到一日的最大值。叶温或气温是控制绝大部分单萜烯排放的主要因子,VOC 排放通量的最大值和气温的最大值在一些日期大致同步出现,如 6 月 28 日、8 月 12 日,在

另外一些日期也有不同步的,如7月19日. PAR也是控制某些单萜烯(如 α -蒎烯、柠檬烯)排放的因子(Greenberg *et al.*, 2003; Kesselmeier *et al.*, 2000), 分析 VOC 主要成分的排放通量与 PAR 之间的关系, 没有发现它们之间良好的线性关系. 2010 年夏季的 3 个实验段, 不同日期中午前后单萜烯各成分的排放通量有明显的变化, 而且变化比较复杂, 各成分的排放通量与气温之间也没有较好的对应关

系或线性关系. 因此, 根据目前测量数据以及 Guenther *et al.* (1995) 的研究结果, 未来应该寻求和研究 VOC 排放通量与 PAR、温度之间的非线性关系. 综合评价 3 个实验段单萜烯的排放, 大部分单萜烯的排放通量以 B 段最大、C 段次之、A 段最低; 但蒎烯、蒎烯、蒎品油烯等的排放通量以 C 段最大、B 段次之、A 段最小.

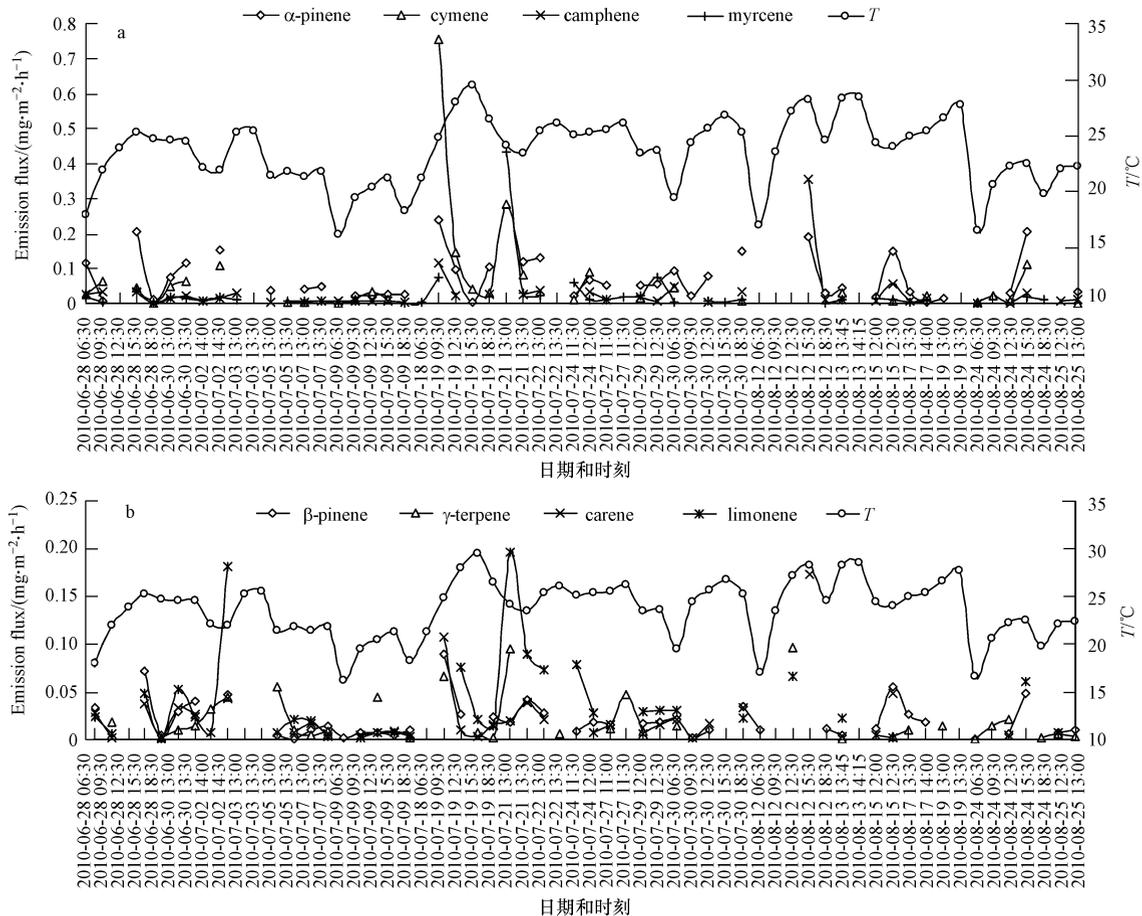


图 1 长白山阔叶混交林挥发性有机物的排放通量和气温

Fig. 1 Emission flux of volatile organic compounds and air temperature at a broadleaf mixed forest in Changbai Mountain

为详细了解 3 个实验段单萜烯的排放状况, 表 1 给出实验期间排放通量 0.5 h 的平均值、最大值、最小值.

由于单萜烯各个成分的排放通量都比较小, 为易于分析和了解它们整体的变化规律, 将所测单萜烯成分的排放通量求和, 得到单萜烯的总排放通量. 图 2 给出单萜烯排放通量以及气温的变化曲线, 从 6 d (6 月 28 日、7 月 9 日、7 月 19 日、7 月 30 日、8 月 12 日、8 月 24 日) 日变化的测量结果可以看到, 单萜烯排放通量一般是早晨排放较低, 然后逐渐增

加, 在中午前后 (大多在 12:00—15:30) 达到一日的最大值, 之后下降到一日的较低值. 单萜烯的排放多表现为单峰. 还可以发现, 很多情形下一日排放的最大值与气温最大值出现较为一致 (如 7 月 9 日、8 月 12 日和 24 日). 同一日期中午前后 2 次连续采样的排放通量: 排放通量大多比较接近, 如 7 月 5、13、24、27、29 日和 8 月 17、25 日等; 但也有少数日期排放通量的变化较大, 如 7 月 2、21、22 日以及 8 月 13 日. 不同日期中午前后 2 次连续采样的排放通量: 虽然少数情形比较接近, 如 7 月 5 日和 7 月 13 日, 但

大多表现为日-日间较大的变化,如 6 月 30 日与 7 月 27 日等。
5 或 7 日、7 月 21 日与 7 月 22 日、7 月 24 日与 7

表 1 2010 年夏季 A、B、C 时段长白山阔叶林单萜烯的排放通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)

Table 1 Monoterpene emission fluxes at time periods of A, B and C in 2010 summer

成分	排放通量/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$								
	A 时段			B 时段			C 时段		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
α -pinene	0.065	0.206	0.007	0.087	0.239	0.005	0.063	0.205	0.001
camphene	0.014	0.033	0.001	0.032	0.116	0.003	0.043	0.356	0.001
β -pinene	0.019	0.072	0	0.024	0.090	0.001	0.017	0.055	0
myrcene	0.011	0.040	0.001	0.053	0.433	0.004	0.009	0.019	0
carene	0.016	0.043	0.001	0.022	0.107	0.002	0.047	0.173	0.002
terpinene	0.003	0.006	0	0.006	0.009	0.004	0.010	0.032	0
limonene	0.026	0.182	0	0.057	0.197	0.013	0.027	0.066	0
ocimene	0.008	0.030	0	0.019	0.086	0	0.022	0.168	0
terpinene	0.011	0.021	0	0.022	0.056	0.004	0.006	0.020	0.002
terpinolene	0.006	0.019	0	0.058	0.058	0.058	0.092	0.320	0
cymene	0.033	0.110	0	0.137	0.755	0.009	0.026	0.110	0

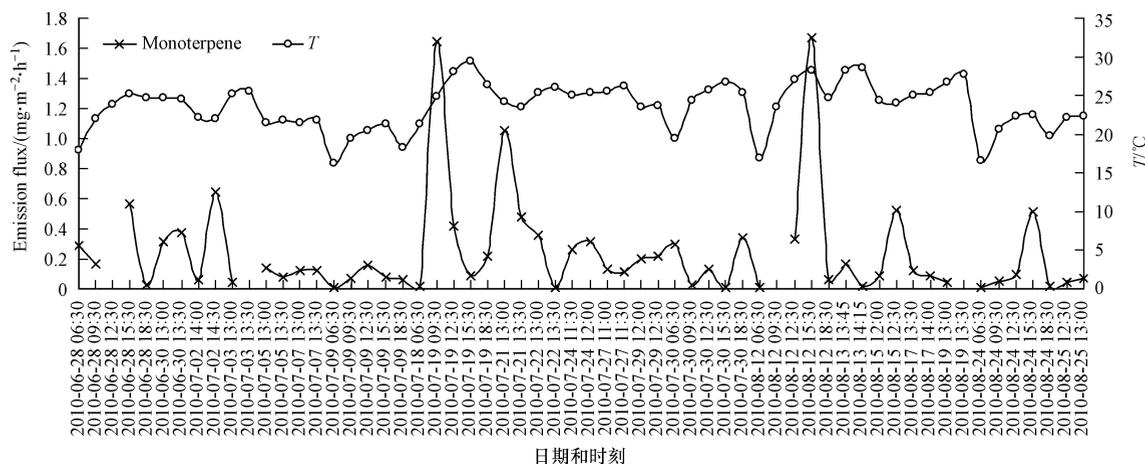


图 2 长白山阔叶混交林单萜烯的排放通量和气温

Fig. 2 Emission flux of monoterpene and air temperature at a broadleave mixed forest in Changbai Moutain

由于某些单萜烯的排放对于光具有依赖性,即受到光合有效辐射(PAR)的影响,所以图 3 给出单萜烯排放通量和 PAR 0.5 h 平均值的变化曲线.对于日变化而言,单萜烯排放通量与气温具有相似性,另外,在大多日期,单萜烯排放通量的峰值滞后于气温峰值的出现,如 7 月 9 日、8 月 12 日和 24 日,在个别日期也有提前,如 7 月 19 日、7 月 30 日,单萜烯排放的日变化为 W 型,同步的气温和 PAR 则显示出比较典型的单峰日变化特征,这表明单萜烯的排放除受到 PAR、温度的影响外,还受到其他因素的影响.观测表明,该日采样时段云量大致在 10-8—10-10 变化,日面时隐时现.进一步分析两个

日变化采样结果,7 月 19 日和 30 日各参数 5 次采样的平均值(及其变化范围)介绍如下:排放通量分别为 0.48(1.64~0.01)、0.16(0.34~0.01) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, PAR 分别为 777.6(1733.6~31.6)、626.6(1215.1~58.7) $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温度分别为 25.3(30.2~18.6)、24.2(26.6~18.9) $^{\circ}\text{C}$,地面水汽压 21.7(24.1~20.2)、22.4(23.9~19.4)hPa.可见各参数的平均值和最大值 7 月 19 日大多高于 7 月 30 日,它们平均值的比分别为:排放通量为 2.99、PAR 为 1.24、温度为 1.05、地面水汽压为 0.97.观测记录为:7 月 18 日一天有小雨,7 月 19 日晴,云量大多为 4,15:00 和 18:00 云量分别为 7、9.风向为西

南风.7月30日除6:00云量为3外,其余时段多为9、10,风向多为西风.7月19和30日水汽的差别不大;PAR和温度都为比较典型的日变化且19日之值(特别是PAR)均明显高于30日的相应值,从而

造成19日排放通量是30日的3倍.7月19日PAR及温度的下降明显受到云的影响.另外,这两天风向的变化可能引起排放源对采样点排放通量的贡献不同,从而造成排放通量的变化.

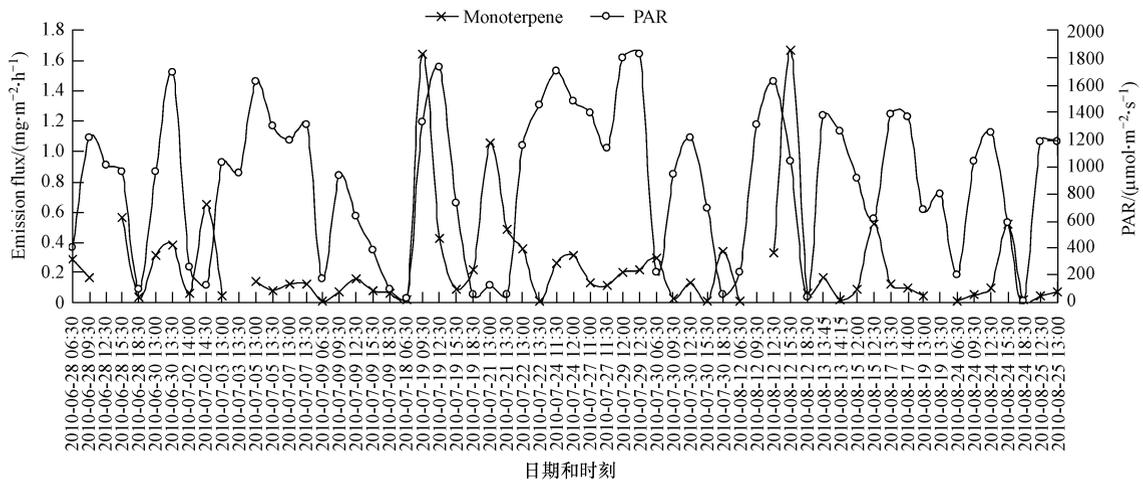


图3 长白山阔叶混交林单萜烯的排放通量和光合有效辐射(PAR)

Fig. 3 Emission flux of monoterpene and photosynthetically active radiation (PAR) at a broadleaf mixed forest in Changbai Mountain

2010年夏季,单萜烯排放通量的平均值为 $0.242 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其最大值为 $1.668 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,出现在8月12日的15:00—15:30时段.该时段云量为2/10,气温为 28.2°C ,PAR为 $1034.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度为45.3%.单萜烯排放通量在A、B、C时段的平均值分别为 0.185 、 0.316 、 $0.218 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,总体上,以B时段排放最大,C时段次之,A时段最小.

长白山落叶林单萜烯的排放通量显示出明显的日变化和日-日间的变化,其排放通量与气温或PAR有较为一致的变化特征,在最大值出现时间上存在差别.个别情况下,单萜烯的排放还比较复杂,表现出与气温和PAR不一致的变化特征,因而,除气温和PAR因子外,还应考虑其他因素(如水分)、排放通量与气温和PAR的非线性关系.2010年夏季实验期间,采样一般选择较好的晴天,但一日之内长白山地区天气变化较快,云的变化、湍流强度的变化都将直接或间接地影响VOC的排放过程和排放通量.7月30日,单萜烯排放没有表现出与气温或PAR较为一致且为单峰的日变化特征,表明还有其他因子影响着单萜烯的排放过程.该日云量的变化对于植物生理活动、气温、PAR在大气中的衰减及被植物利用等方面将产生影响,因而可能造成VOC排放不规律的日变化.研究发现,内蒙古草原VOC的排放也受到了云的影响(白建辉,2006).进一步分析,此日气温、PAR虽然受到云及其变化的

影响,但二者仍表现出比较典型的日变化特征,这说明除云量外还可能还有其他因素影响着VOC的排放.

气体样品每次采样的时间虽然仅仅0.5h,但由于植物排放VOC较高的化学活性,未来还应该考虑化学和光化学反应对于VOC排放过程及其排放通量的影响.同时,还需考虑影响植物VOC排放的其他因素,包括植物自身生长(如营养、水分供给、树龄)以及周围大气、土壤环境等.

在A、B、C实验段,气温和PAR的平均值分别为 22.0 、 25.0 、 23.8°C 和 817.7 、 957.4 、 $903.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;单萜烯排放与气温、PAR(B时段排放最大,C时段次之,A时段最小)表现出很好地一致性(图4).这反映了气温、PAR作为主要因子通过某种机制影响着VOC的排放.单萜烯及其各组分的排放通量与气温或PAR之间的关系在0.5h和月平均的时间尺度上有显著的差别.因此,研究它们之间存在良好相互作用关系的最佳时间尺度,将有利于我们对VOC排放过程的理解和模拟.单萜烯的排放有一部分是光依赖的,另外还有不依赖于光的,因此,关于单萜烯排放与PAR之间的关系还有待更细致的研究.

利用REA技术测量的非洲热带稀树草原单萜烯的排放通量为 $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (Greenberg *et al.*, 2003),相比之下,长白山阔叶林单萜烯的排放要明

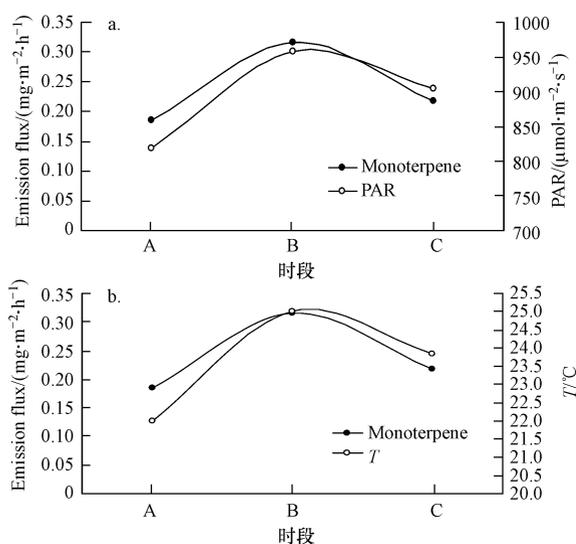


图4 A、B、C时段的单萜烯排放通量与PAR和气温的关系
Fig. 4 Emission flux of monoterpane and PAR (a) and air temperature (T) (b) at A, B and C time periods

显低一些。这表明森林类型、地理位置、季节等诸多方面的不同将造成单萜烯排放通量的显著差别。

4 初步结论 (Preliminary conclusions)

2010年夏季,在长白山温带森林开展了VOC排放通量、PAR、气象参数等的综合测量,初步发现长白山阔叶林VOC的排放的主要成分为 α -蒎烯、 β -蒎烯、茨烯、香桉烯、月桂烯、萜烯、柠檬烯、罗勒烯、松油烯、缬花烯、萜品油烯、三环烯,它们的日变化规律比较明显,早晚排放较低,中午前后达到一日的最高值。2010年夏季,单萜烯总排放通量的平均值为 0.242 (变化范围为 $0.005 \sim 1.668$) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;其中, α -蒎烯、茨烯、月桂烯、萜烯、柠檬烯、罗勒烯、萜品油烯、缬花烯等的排放通量分别为 0.072 ($0.234 \sim 0.001$)、 0.028 ($0.356 \sim 0.001$)、 0.027 ($0.433 \sim 0.000$)、 0.023 ($0.173 \sim 0.001$)、 0.037 ($0.197 \sim 0.000$)、 0.016 ($0.168 \sim 0.000$)、 0.053 ($0.320 \sim 0.000$)、 0.067 ($0.755 \sim 0.000$) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。VOC的排放与其影响因子气温之间具有一定联系。大多数情形下,中午前后样品的分析结果表明,单萜烯排放通量在同一日期两个连续时段比较接近,在不同日期则存在显著的日-日间的变化。

致谢:感谢中国科学院长白山森林生态系统定位站韩士杰、张军辉研究员以及徐浩、李东、宋国正、闫伟等同仁给予的帮助,感谢中国科学院大气物理研究所陈洪滨、王庚辰研究员以及吴翼美、岑炬辉、张金强等同仁的支持和所做的工作。

责任作者简介:白建辉(1964—),研究员,研究方向为太阳辐射、臭氧及其光化学、挥发性有机物。E-mail: jianhuib@sina.com.

参考文献 (References):

- Ameth A, Niinemets U, Pressley S, *et al.* 2007. Process-based estimates of terrestrial ecosystem isoprene emissions: incorporating the effects of a direct CO_2 -isoprene interaction [J]. *Atmos Chem Phys*, 7:31-53, doi:10.5194/acp-7-31-2007
- Atkinson R, Arey J. 2003. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds a review [J]. *Atmos Environ*, 37: S197-S219
- Bai J H, Wang M X, Hu F, *et al.* 2002. Analyzing method on biological volatile organic compounds [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19(1):64-72
- 白建辉,王庚辰,任丽新,等. 2003. 内蒙古草原挥发性有机物排放通量的研究 [J]. *环境科学*, 24(6):16-22
- Bai J H, Wang G C, Ren L X, *et al.* 2003. The emission flux of volatile organic compounds in the Inner Mongolia Grassland [J]. *Environmental Science*, 24(6):16-22 (in Chinese)
- 白建辉,王庚辰. 2004. 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法 [J]. *环境科学研究*, 17(6):15-18
- Bai J H, Wang G C. 2004. A calculating method of photosynthetically active radiation in the Inner Mongolia Grassland [J]. *Research of Environmental Science*, 17(6):15-18 (in Chinese)
- 白建辉,Brad Baker. 2004. 草地异戊二烯排放通量影响因子的研究 [J]. *大气科学*, 28(5):783-794
- Bai J H, Baker B. 2004. Study on the affecting factors of isoprene emission at grassland [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 28(5):783-794 (in Chinese)
- 白建辉,Baker B, Johnson C, 等. 2004. 西双版纳热带森林挥发性有机物的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 24(2):142-146
- Bai J H, Baker B, Johnson C, *et al.* 2004. Observational studies on volatile organic compounds of the tropical forest in Xishuangbanna [J]. *China Environmental Science*, 24(2):142-146 (in Chinese)
- 白建辉,Baker B. 2005. 内蒙古草原典型草地异戊二烯的排放特征 [J]. *环境科学学报*, 25(3):285-292
- Bai J H, Baker B. 2005. Emission characteristics of isoprene at typical grassland in the Inner Mongolia grassland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 25(3):285-292 (in Chinese)
- 白建辉. 2006. 多云天气异戊二烯排放通量的计算 [J]. *环境科学研究*, 19(1):99-103
- Bai J H. 2006. The calculation of isoprene emission flux under cloudy sky conditions [J]. *Research of Environmental Science*, 19(1):99-103 (in Chinese)
- Bai J H. 2009. UV attenuation in the cloudy atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 62(3):211-228, doi:10.1007/s10874-010-9149-y
- 白建辉. 2010. 华北地区紫外与可见光辐射在大气中的传输 [J]. *环境科学学报*, 30(5):915-925

- Bai J H. 2010. The transmission of solar UV and visible radiation in the atmosphere over North China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30 (5):915-925 (in Chinese)
- Baker B, Guenther A, Greenberg J, *et al.* 1999. Canopy fluxes of 2-methyl-3-buten-2-ol over a ponderosa pine forest by relaxed eddy accumulation: Field data and model comparison [J]. *J Geophys Res*, 104, 26107-26114
- Baker B, Bai J H, Johnson C, *et al.* 2005. Wet and dry season ecosystem level fluxes of isoprene and monoterpenes from a Southeast Asian secondary forest and rubber tree plantation [J]. *Atmos Environ*, 39: 381-390
- Brasseur G P, Orlando J J, Tyndall G S. 1999a. Atmospheric Chemistry and Globe Change[M]. Oxford: Oxford University Press. 325-347
- Brasseur G P, Orlando J J, Tyndall G S. 1999b. Atmospheric chemistry and global change[M]. Oxford: Oxford University Press. 167-174
- Businger J A, Oncley S P. 1990. Flux measurement with conditional sampling [J]. *J Atmos Ocean Tech*, 7:349-352
- Fehsenfeld F, Callvert J, Fall R, *et al.* 1992. Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry[J]. *Global Biochem Cycles*, 6 (4): 389-430
- Fuentes J D, Lerdau M, Atkinson R, *et al.* 2000. Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer A review [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81:1537-1575
- Geron C, Guenther A, Greenberg J, *et al.* 2002. Biogenic volatile organic compound emissions from a lowland tropical wet forest in Costa Rica [J]. *Atmos Env*, 36: 3793-3802
- Greenberg J P, Guenther A, Zimmerman P, *et al.* 1999a. Tethered Balloon measurements of biogenic VOCs in the atmospheric boundary layer [J]. *Atmos Env*, 33: 855-867
- Greenberg J P, Guenther A B, Madronich S, *et al.* 1999b. Biogenic VOC emissions and chemistry along the EXPRESSO transect in central Africa[J]. *J Geophys Res*, 104 (D23): 30659-30671
- Greenberg J P, Guenther A, Harley P, *et al.* 2003. Eddy flux and leaf-level measurements of biogenic VOC emissions from mopane woodland of Botswana [J]. *J Geophys Res*, 108 (D13), doi:10.1029/2002JD002317, 8466
- 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 等. 2006. 长白山红松针阔混交林 CO₂ 通量的日变化与季节变化[J]. *林业科学*, 42(10):123-128
- Guan D X, Wu J B, Jin C J, *et al.* 2006. Diurnal and seasonal variation of CO₂ flux above the Korean pine and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 42 (10): 123-128 (in Chinese)
- Guenther A. 1994. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U. S. woodland landscapes [J]. *Atmos Environ*, 28 (6): 1197-1210
- Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, *et al.* 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *J Geophys Res*, 100 (D5): 8873-8892
- Guenther A, Otter L, Zimmerman P, *et al.* 1996. Biogenic hydrocarbon emissions from southern African savanna [J]. *J Geophys Res*, 101: 25859-25865
- Guenther A B, Hills A J. 1998. Eddy covariance measurement of isoprene fluxes [J]. *J Geophys Res*, 103 (D11): 13145-13152
- Guenther, A, Baugh B, Brasseur G, *et al.* 1999. Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African EXPRESSO study domain [J]. *J Geophys Res*, 104 (30): 30625-30639
- Guenther A. 2002. The contribution of reactive carbon emissions from vegetation to the carbon balance of terrestrial ecosystems [J]. *Chemosphere*, 49: 837-844
- Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* 2006. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) [J]. *Atmos Chem Phys*, 6: 3181-3210
- He N P, Han X G, Sun W, *et al.* 2004. Biogenic VOCs emission inventory development of temperate grassland vegetation in Xilin River Basin, Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 16(6): 1024-1032
- Held A, Patton E, Rizzo L, *et al.* 2008. Relaxed eddy accumulation simulations of aerosol number fluxes and potential proxy scalars [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, Doi 10.1007/s10546-008-9327-5
- 金昌杰, 关德新, 朱廷曜. 2000. 长白山阔叶红松林太阳辐射分光谱特征 [J]. *应用生态学报*, 11(1): 19-21
- Jin C J, Guan D X, Zhu T Y. 2000. Spectral characteristics of solar radiation in broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11 (1): 19-21 (in Chinese)
- Kesselmeier J, Ciccioli P, Kuhn U, *et al.* 2002. Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget [J]. *Global Biogeochemical Cycles*. 16(4): 1126, doi:10.1029/2001GB001813
- Klinger L F, Li Q J, Guenther A B, *et al.* 2002. Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [J]. *J Geophys Res*, 107 (D21): 4603, doi:10.1029/2001JD001076
- 李金龙, 白郁华, 胡建信, 等. 1994. 油松排放萜烯类化合物浓度的日变化及排放速率的研究 [J]. *中国环境科学*, 14(4): 165-169
- Li J L, Bai Y H, Hu J X, *et al.* 1994. Diurnal variation in the concentration of terpenes and its estimation rate measurements from oil pine [J]. *China Environmental Sciences*, 14(4): 165-169 (in Chinese)
- 李庆军, Klinger L F. 2001. 中国不同气候带植被挥发性有机化合物通量与生态系统演替的相关性 [J]. *植物学报*, 43 (10): 1065-1071
- Li Q J, Klinger L F. 2001. The correlation between the volatile organic compound emissions and the vegetation succession of the ecosystems in different climate zones of China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 43 (10): 1065-1071 (in Chinese)
- 牟玉静, 宋文质, 张晓山, 等. 1999. 落叶阔叶树异戊二烯排放研究 [J]. *环境化学*, 18(1): 21-27
- Mu Y J, Song W Z, Zhang X S, *et al.* 1999. Study on emissions of isoprene from deciduous and broad leaf trees [J]. *Environmental Chemistry*, 18(1): 21-27 (in Chinese)
- Niinemets U, Tenhunen J D, Harley P C, *et al.* 1999. A model of isoprene emission based on energetic requirements for isoprene synthesis and leaf photosynthetic properties for Liquidambar and Quercus [J]. *Plant Cell Environ*, 22: 1319-1335

- Pacifico F, Harrison S P, Jones C D, *et al.* 2011. Evaluation of a photosynthesis-based biogenic isoprene emission scheme in JULES and simulation of isoprene emissions under present-day climate conditions[J]. *Atmos Chem Phys*, 11: 4371-4389
- Rosenstiel N, Potosnak M J, Griffin K L, *et al.* 2003. Increased CO₂ uncouples growth and isoprene emission in an agriforest ecosystem [J]. *Nature*, 421: 256-259
- Serca D, Guenther A, Klinger L, *et al.* 2001. Bouka-Biona and J. Loemba-Ndembi, EXPRESSO flux measurements at upland and lowland Congo tropical forest site[J]. *Tellus*, 53B:220-234
- Steiner A, Luo C, Huang Y, *et al.* 2002. Past and present-day biogenic volatile organic compound emissions in East Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 36: 4895-4905
- Sharkey T D, Singsaas E L, Lerdau M, *et al.* 1999. Weather effects on isoprene emission capacity and applications in emissions Algorithms [J]. *Ecol Appl*, 9(4):1132-1137
- Sharkey T D, Holland E A, Mooney H, *et al.* 1991. Trace gas emission by plants [M]. San Diego, California: Academic Press, Inc.
- 邵敏, 赵美萍, 白郁华, 等. 1994. 北京地区大气中非甲烷碳氢化合物 (NMHC) 的人为源排放特征[J]. *中国环境科学*, 14(1): 6-11
- Shao M, Zhao M P, Bai Y H, *et al.* 1994. Study on emission characteristics of nonmethane hydrocarbons from anthropogenic sources in the atmosphere of Beijing [J]. *China Environmental Sciences*, 14(1):6-11 (in Chinese)
- 司徒淑婷, 王雪梅, Guenther Alex, 等. 2009. 典型夏季珠江三角洲地区植被的异戊二烯排放[J]. *环境科学学报*, 29(4): 822-829
- Situ S P, Wang X M, Guenther A, *et al.* 2009. Typical summer time isoprene emission from vegetation in the Pearl River Delta region, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(4): 822-829 (in Chinese)
- 司徒淑婷, 王雪梅, Guenther Alex, 等. 2010. 气象模拟误差对异戊二烯排放估算的影响[J]. *环境科学学报*, 30(12): 2383-2391
- Situ S P, Wang X M, Guenther A, *et al.* 2010. Impacts of errors in meteorological simulations on estimation of isoprene emission [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(12): 2383-2391 (in Chinese)
- 王效科, 牟玉静, 欧阳志云, 等. 2002. 太湖流域主要植物异戊二烯排放研究[J]. *植物学通报*, 19(2):224-230
- Wang X K, Mu Y J, Ouyang Z Y, *et al.* 2002. Study on emission of isoprene from major plants living in Taihu basin[J]. *Chinses Bulletin of Botany*, 19(2):224-230 (in Chinese)
- Wang Z H, Bai Y H, Zhang S Y. 2003. A biogenic volatile organic compounds emission inventory for Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 37: 3771-3782
- 王永峰, 李庆军. 2005. 陆地生态系统植物挥发性有机化合物的排放及其生态学功能研究进展[J]. *植物生态学报*, 29(3):487-496
- Wang Y F, Li Q J. 2005. BVOCs emitted from plants of terrestrial ecosystem and their ecological functions [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 29(3):487-496 (in Chinese)
- Wang X M, Situ S P, Guenther A, *et al.* 2011. Spatiotemporal variability of biogenic terpenoid emissions in Pearl River Delta, China, with high-resolution land-cover and meteorological data [J]. *Tellus*, Doi: 10.1111/j. 1600-0889. 2010.00523. x
- 吴家兵, 关德新, 赵晓松, 等. 2005. 长白山阔叶红松林二氧化碳浓度特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1):49-53
- Wu J B, Guan D X, Zhao X S, *et al.* 2005. CO₂ concentration character in broad leaved Korean pine forest of Changbai Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(1):49-53 (in Chinese)
- 杨丹青, 潘南明, 白郁华, 等. 2001. 珠三角地区林木天然源碳氢化合物的排放及其对臭氧浓度的影响[J]. *广州环境科学*, 16(3): 34-38
- Yang D J, Pan N M, Bai Y H, *et al.* 2001. A study on hydrocarbon compounds emitted from natural forest sources in Pearl River Delta [J]. *Guangzhou Environmental Sciences*, 16(3): 34-38 (in Chinese)
- 闫雁, 王志辉, 白郁华, 等. 2005. 中国植被 VOC 排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 25(1):110-114
- Yan Y, Wang Z H, Bai Y H, *et al.* 2005. Establishment of vegetation VOC emission inventory in China [J]. *China Environmental Science*, 25(1):110-114 (in Chinese)
- 张福珠, 苗鸿, 鲁纯. 1994. 落叶阔叶林释放异戊二烯的研究[J]. *环境科学*, 15(1): 1-5
- Zhang F Z, Miao H, Lu C. 1994. The study on isoprene emission from a deciduous and broadleaf forest [J]. *Environmental Science*, 15(1): 1-5 (in Chinese)
- 张莉, 王效科, 欧阳志云, 等. 2003. 中国森林生态系统的异戊二烯排放研究[J]. *环境科学*, 24(1):8-15
- Zhang L, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* 2003. Estimation of isoprene emission from forest ecosystems in China [J]. *Environmental Science*, 24(1):8-15 (in Chinese)
- Zheng J Y, Zheng Z Y, Yu Y F, *et al.* 2010. Temporal spatial characteristics and uncertainty of biological VOC emissions in the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 1960-1969
- 邹春静, 韩士杰, 张军辉. 2001. 阔叶红松林树种间竞争关系及其营林意义[J]. *生态学杂志*, 20(4):35-38
- Zou C J, Han S J, Zhang J H. 2001. Competition relationship among tree species in broad-leaved Korean pine mixed forest and its significance for managing the forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 20(4):35-38 (in Chinese)