

内蒙古草原挥发性有机物排放通量的研究

白建辉¹, 王庚辰¹, 任丽新¹, Brad Baker², Patrick Zimmerman², 梁宝生³ (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, E-mail: jianhuib @263.sina.com; 2. South Dakota School of Mines and Technology, USA; 3. 北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要: 2002 年夏季, 利用静态箱方法, 对我国内蒙古草原生态系统挥发性有机物的排放进行了首次测量, 同时观测了太阳辐射、温湿度等参数。结果表明, 异戊二烯是草地挥发性有机物排放中的主要成分。异戊二烯的排放有明显的日变化、逐日变化和季节变化规律。因子分析表明, 可见光辐射、温度、水汽含量是影响异戊二烯排放的主要因素, 而且可见光辐射是控制其排放过程的最主要因子。根据相关分析, 在考虑影响异戊二烯的排放因子时, 不仅要考虑通常的影响因子——可见光辐射、温度, 还要考虑水汽的作用。箱方法的使用不可避免地造成箱内外太阳辐射、温湿度等的差别, 因此, 必须考虑修正采样箱对挥发性有机物排放通量带来的影响。2002 年夏季, 异戊二烯排放通量(C)的最大值为 $1649.3 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。6、8、9 月采样期间异戊二烯排放通量的日平均值分别为 886.6、707.0、427.2 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

关键词: 内蒙古草原; 异戊二烯; 挥发性有机物; 可见光辐射; 温度

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2003)06-07-0016

The Emission Flux of Volatile Organic Compounds in the Inner Mongolia Grassland

Bai Jianhui¹, Wang Gengchen¹, Ren Lixin¹, Brad Baker², Patrick Zimmerman², Liang Baosheng³ (1. LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China, E-mail: jianhuib @263.sina.com; 2. South Dakota School of Mines and Technology, USA; 3. Environmental College of Peking University, Beijing 100871)

Abstract: During the summer season of 2002, emissions of volatile organic compounds were firstly measured by a static enclosure technique at a grassland site in the Inner Mongolia grassland. The parameters including solar radiation, air temperature and relative humidity were also measured in the same time period. The results showed that isoprene was the main component of volatile organic compounds emitted from the grassland. Isoprene exhibited an evident diurnal, daily and seasonal variation. Solar visible radiation, air temperature and water vapor content were the main factors to affect isoprene emission, and solar visible radiation was the most important factor to control the isoprene emission. Base on the correlation analysis, when considering the affecting factors of isoprene emission, it is not only to consider solar visible radiation, temperature, but also the water vapor. It is impossible to avoid the changes of solar radiation, temperature and humidity between inside and outside the chamber by using the enclosure technique. So, it is necessary to take these effects into the considerations and modify isoprene emission. In summer 2002, the maximum emission flux (C) of isoprene was $1649.3 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and monthly averaged emission flux (C) in June, August and September were 886.6, 707.0 and 427.2 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively.

Key words: Inner Mongolia; isoprene; volatile organic compounds; solar visible radiation; air temperature

大气中的化学成分是全球环境中的重要组成部分, 其中痕量气体的变化是相当快的^[1]。地表排放的挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOC)对于确定大气中痕量气体的浓度具有重要作用, 因此, 研究其排放过程是非常必要的。某些树种异戊二烯的排放对于大气化学

具有明显的影响^[2], 如异戊二烯的氧化影响着

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40175031); 美国国家自然科学基金资助项目(0131785)

作者简介: 白建辉(1964~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为植物挥发性有机物、太阳紫外辐射和臭氧及其光化学。

收稿日期: 2003-02-01; 修订日期: 2003-06-05

OH 自由基和臭氧的浓度.另外,植物排放以及受其排放影响的微量气体在大气物理和化学过程中起着关键作用,对于地球上的气候及其变化具有一定影响^[3,4].全球每年 90 % 以上的非甲烷 VOC 来源于植物排放,其中异戊二烯的贡献占一半左右,这使得它成为单一、最大的 VOC 排放源.定量地研究大气化学,需要估算 VOC 自然源的排放通量^[5].由于化学成分和树木种类数量庞大,因而生物 VOC 源的特征比较复杂,故植物 VOC 的研究集中于主要的碳氢化合物(如异戊二烯和一些单萜烯)及温带的主要树种方面^[6].

在 VOC 研究方面,国外开展得比较早,许多单位如美国的国家大气研究中心(NCAR)、麻省理工学院(MIT)等均做了大量工作^[2,4~7],我国很多单位的科学家近年来也开展了大量研究^[8~14],测量了我国不同地区、典型树种 VOC (主要包括异戊二烯和单萜烯)的排放通量.但目前国内外对于草地生态系统 VOC 的排放知之甚少^[15],因此,对于尚未研究的,在全球尺度上具有广泛代表性的我国温带半干旱草原开展 VOC 的研究将具有重要意义和科学价值.本文简要介绍利用静态箱方法测量内蒙古草原 VOC 排放的主要结果.

1 实验简介

1.1 实验样地

实验地点选择在中国科学院内蒙古草原生态系统研究定位站,位于内蒙古锡林郭勒草原白音锡勒牧场($43^{\circ}26' \sim 44^{\circ}08' \text{N}$, $116^{\circ}04' \sim 117^{\circ}05' \text{E}$).气候属半干旱草原气候,年平均气温为 -0.4°C ,最热月(7月)平均温度 18.8°C ,草原植物生长期约 150d.年降水量 350 mm,6~9月的降水量约占全年的 80%,降水量的季节和年变化非常大^[16].实验具体地点设在羊草样地,面积为 $400 \text{ m} \times 600 \text{ m}$,位于锡林河南岸的低丘宽谷地带,海拔 1200~1250 m,丘陵相对高度 20~30 m.土壤为暗栗钙土.组成羊草群落的植物约 86 种,分属于 28 科,67 属,常见者约 45 种,广旱生根茎禾草羊草占优势,其次以大针茅、落草、冰草等旱生密丛禾草,禾草以外杂类

草约 75 种^[16].

1.2 采样

气体采样箱由箱体和基座组成,箱体材料为 5 mm 厚有机玻璃,基座材料为 5 mm 厚不锈钢板,基座高 15 cm,埋入地下 10 cm,槽宽 10 mm,内填弹性橡胶材料.箱体内顶部安置 2 个小风扇以及温湿度探头,罩箱期间将温湿度探头安置于草丛内.采样箱尺寸: $90 \text{ cm} \times 90 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,加上基座高度,箱净高约 35 cm.采样泵是德国生产 KNF Neuberger, PM 9659-022 型采样泵.采样不锈钢瓶由美国南达科他州矿物和技术学校提供,内壁电镀抛光,体积约为 4 L.采样前钢瓶均在实验室内抽真空,并用高纯 N_2 冲洗 2~3 次,真空可达 0.01 hPa.

气体采样为密闭式采样.采样箱罩在所选样地上后立即采本底样品,经过一段时间后采第 2 次样品.采样后钢瓶压力一般大于 0.16 MPa.气体样品由气相色谱仪(美国 Varian 公司 3400 型,GC-FID)以及质谱仪分析,气相色谱仪的分析条件为:载气为高纯氢气,流速为 4.96 mL/min;燃气为高纯氢气,流速为 24.6 mL/min;补偿气为高纯氮气,流速为 24.6 mL/min;助燃气为压缩空气,流速 285.8 mL/min;检测器温度为 280°C .气体样品首先进入进样器,然后再进入色谱柱进行分离,分析结果由计算机处理.进样器程序升温条件为:在 -50°C 低温浓缩样品,进样状态停留 0.01 min 之后,以 $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度 3 min 内升温到 225°C ,保持 30 min.色谱柱程序升温条件为:初温 0°C ,保持 5 min 后,以 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率 50 min 升温到 200°C ,然后保持 5 min.

罩箱时间的确定:2002 年 5 月份草刚长出,对定位站外的羊草样地进行了不同罩箱时间的实验,采样时间为中午前后,当罩箱时间大于 30 min 后,异戊二烯的峰才可以由气相色谱仪得到.为保证 2002 年实验所采每次样品都有异戊二烯及其它色谱峰出现,并参考国外草地 VOC 实验的罩箱时间^[15],2002 年 6~9 月采样罩箱时间一般为 30~40 min.

实验期间,同步观测太阳辐射,包括总辐

射、散射辐射、可见光辐射、紫外辐射,以及采样箱内外的温湿度和风向、风速等。太阳辐射仪器为国产 TBQ-4-1 型,表头感应波段分别为 270 ~ 3200 nm、400 ~ 3200 nm、700 ~ 3200 nm,灵敏度为 5 ~ 10 mV/(kW·m⁻²),稳定性均 ≤ ±2%。同时,还有美国 Eppley 公司生产 TUVR 紫外表。

2 实验结果和初步结论

箱方法气体排放通量的计算方法为^[15]:

$$E = h \cdot \Delta c / \Delta t \tag{1}$$

式中, h 为采样箱体的高度,单位 m; Δc 为罩箱前后箱体内气体浓度之差,单位(以 C 计) $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Δt 为罩箱时间,单位 h。

利用气相色谱仪分析所采气体样品,得到了异戊二烯、丙烯、丙烷、异丁烯、丁烷、2-甲基戊烷、 α -蒎烯、 β -蒎烯、苈烯、萜烯、柠檬烯、乙醛、丙酸甲酯等成分,以及一些未定成分。在所有样品中,以异戊二烯为主要成分。6、8、9 月所有气体样品的分析结果表明,异戊二烯占总挥发性有机物的比例绝大部分在 70% ~ 94.9%,3 个月的平均值分别为 91.6%、73.4%和 81.5%,

总平均为 82.2%。本文主要给出异戊二烯的变化特征。

2.1 日变化

2002 年 6、8、9 月对同一块羊草样地排放的气体进行了采样和分析,并首先研究其日变化规律。一天内采样 5 次,采样时间间隔一般为 2 h。采样时间内,每 5 min 记录箱内外温湿度、云量等。太阳辐射采样和记录频率为 1 Hz。

图 1 给出实验期间异戊二烯排放通量的日变化。按时间顺序,图中分别给出 6 月 26、27、28 日,8 月 13、15、16 日,8 月 31 日和 9 月 2、3 日异戊二烯的排放通量。可以看到异戊二烯的排放通量有明显的日变化特征,早晚比较小,中午前后达一日最大值。这 9 d 的天气,绝大部分为晴天,但即使在晴天,云量的变化一天之内有时也比较大,因此异戊二烯的日变化在某些日期不是很有规律。个别天气,如 6 月 26 日大部分时间为云天,云量在 13:00 前基本为 9、10, 15:00 后多为 3、4,这造成 6 月 26 日异戊二烯排放通量明显小于后 2 d。

Kirstine 等^[13]对牧场草地 VOC 的测量结

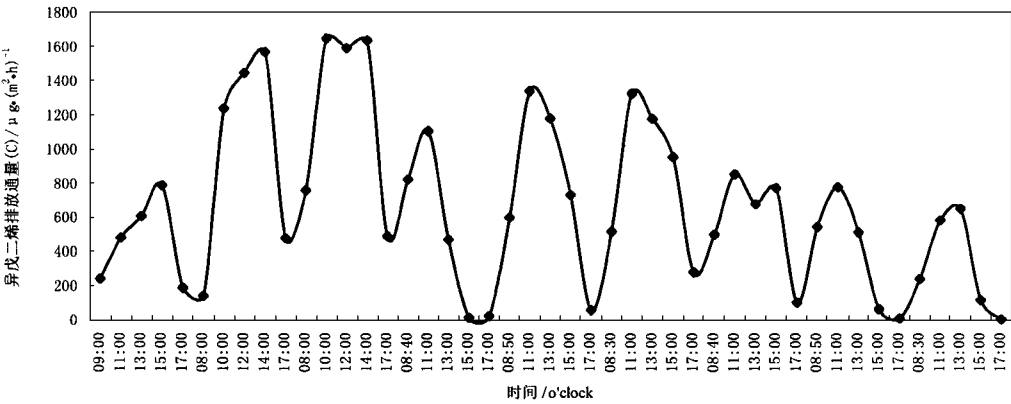


图 1 异戊二烯排放通量的日变化

Fig.1 The diurnal variation of isoprene emission flux

果表明,VOC 的排放通量(C)约为 3200 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,主要是中午前后排放,其主要组分为含氧的 VOC,异戊二烯和单萜烯所占比例很小。研究表明,国内外所测 VOC 排放的日变化特征是一致的。本研究异戊二烯排放通量小于 Kirstine 的总 VOC 排放,这是可以理解的,因为异

戊二烯只是 VOC 的一个组分。Fukui 等对草地 VOC 的测量结果为,异戊二烯排放通量(C)的平均值(4~10 月)为 5.4 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,最大值为 28 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。观测期间也测到过 233 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的高值^[17]。本实验 6~9 月的平均值为 673.6 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,最高值为 1649.3

$\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ (表 1), 远高于 Fukui 等人的结果. 6、8、9 月异戊二烯排放通量的最大值、最小值和平均值详见表 1. 由于影响异戊二烯排放的因子有很多, 除光合有效辐射、温湿度以外, 还有其它因素如降雨量、土壤种类与养分等. 2002 年内蒙古草原的降水量比往年明显增加,

表 1 2002 年 6、8、9 月异戊二烯排放通量 (C) 的最大值、最小值和平均值/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$
Table 1 The maximum, minimum and averaged emission fluxes (C) of isoprene during June, August and September, 2002 / $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$

6 月			8 月			9 月		
最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1649.3	140.4	886.6	1340.1	13.6	707.0	856.0	3.1	427.2

主要外部因子有光合有效辐射、气温等, 所以图 2 给出平行观测的可见光辐射、空气温度等的日变化曲线. 其中, 可见光辐射为罩箱期间的累积值, 空气温度为箱外罩箱期间的平均值. 可以

草的长势也比往年好很多. 同时草的种类也可能是一个关键因素. 其它的影响因素本文下面将有所涉及. 但目前由于笔者缺少对含氧 VOC 的分析, 详细的对比以及原因探讨等还有待以后深入研究.

一般认为控制森林和草地异戊二烯排放的

发现, 可见光辐射与气温日变化规律比较明显, 且异戊二烯、可见光辐射与气温等的日变化规律基本相似.

由于植物的呼吸与其体内外的水汽压差有

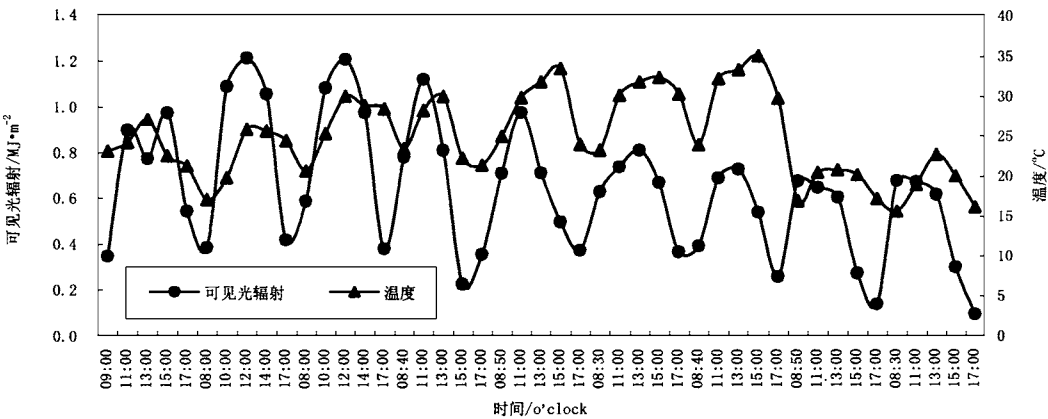


图 2 可见光辐射和温度的日变化

Fig. 2 The diurnal variations of solar visible radiation and air temperature

关, 所以相对湿度 (%) 和大气中的水汽含量可能会影响异戊二烯的排放过程, 图 3 给出箱外相对湿度和大气中水汽含量的日变化曲线. 相对湿度和大气中水汽含量虽然有一些日变化, 但与前面介绍的各项相比日变化不是很有规律, 二者的相关系数 (45 组数据) 为 0.75. 箱内温湿度和水汽含量等的日变化规律与箱外大致类似, 45 组数据的相关系数为 0.38, 不同之处主要在于箱内各量一般要大于箱外各量. 由于影响异戊二烯排放通量的因子较多, 而且箱内

外各量对其产生的影响可能不同, 仅从各量的变化曲线很难看出. 所以对异戊二烯排放通量与箱内外各量进行相关分析, 来看一下影响异戊二烯排放的主要因子. 表 2 给出实验期间 45 组数据异戊二烯与各项的相关系数.

可见光辐射是影响异戊二烯排放的最主要因子, 其次是温度和湿度, 相对湿度对其排放影响非常小. 相比之下, 箱内的温度和湿度比箱外的温度和湿度对异戊二烯的排放更重要一些. 这是因为箱内各量直接作用并控

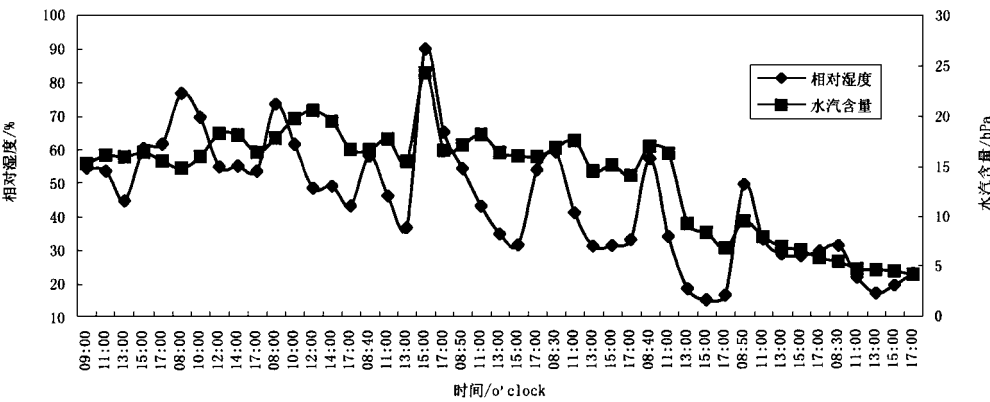


图 3 相对湿度和水汽含量的日变化

Fig.3 The diurnal variations of relative humidity and water vapor content

表 2 异戊二烯与各量的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between isoprene and its factors

各测量量	可见光辐射	箱内温度	箱内相对湿度	箱内水汽含量	箱外温度	箱外相对湿度	箱外水汽含量
	/ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$	/ $^{\circ}\text{C}$	/ %	/ hPa	/ $^{\circ}\text{C}$	/ %	/ hPa
相关系数	0.862	0.815	0.023	0.79	0.477	0.082	0.462

制其排放过程,与排放过程密切相关.采样箱的使用,隔离了箱内外的空气交换,因此,箱外部温湿度等气象参量对异戊二烯排放过程的影响程度自然要降低很多.实验中发现,罩箱一段时间后,箱内温度和湿度上升较快,二者上升速率明显与太阳辐射和箱外气温有关,而且采样箱对太阳总辐射有明显的衰减作用.因此,在不影响气体样品采样的条件下,应尽量减小罩箱时间,尽量减小罩箱对自然环境的破坏程度.采样箱的使用不可避免地衰减了箱外的可见光辐射,改变了箱内外的温湿度等,因此,为准确估算异戊二烯的排放通量,应该建立异戊二烯的排放模式,修正采样箱引起异戊二烯排放的变化,以得到自然状况下异戊二烯的排放通量,这一工作将另文讨论.另外,2002 年 6、8、9 月的气体样品分析结果表明,罩箱开始时的本底浓度与罩箱后的浓度之比为 0.09%~3.93%,可见本底浓度相对是很低的.由于草地生态系统异戊二烯排放通量比较低,箱方法可能是目前比较合适的研究方法.

仔细对比异戊二烯排放通量与可见光辐射、温湿度、水汽含量等的日变化和逐日变化,

很难发现异戊二烯排放通量与某一单一因子之间比较好的对应关系,虽然它与某一因子的相关系数比较大.这说明影响或控制异戊二烯排放的物理、化学、生物等过程是非常复杂的,不是几个量之间简单的数量关系.因此应该从控制其排放过程有关的物理、化学、生物等机制方面考虑建立模型,以准确了解和估算草地异戊二烯的排放通量.

2.2 逐日变化

将异戊二烯的排放通量以及各个测量参数进行日平均计算,可以得到各量的日平均值.图 4 给出 2002 年 6、8、9 月异戊二烯排放通量和可见光辐射的日平均变化曲线,图 5 给出平行观测的箱内温度和水汽含量日平均的变化曲线.

由相关分析得到,日平均的异戊二烯排放通量与可见光辐射、箱内温度和水汽含量的相关系数分别为 0.815、0.743、0.728.对于日平均情况而言,可见光辐射仍然是影响异戊二烯排放的主要因子,其次是箱内温度和水汽含量.以前在分析影响植物 VOC 排放的因子时,大多只注意光合有效辐射(或可见光辐射)和温度的作用,对水汽含量重视不够.从对数据的分析来

看,水汽含量也是一个不应忽视的因子.因为植物体内外的水汽压之差对植物呼吸(或植物表面气孔开合程度)有重要的影响,所以在建立 VOC 排放模式时应考虑水汽的作用.

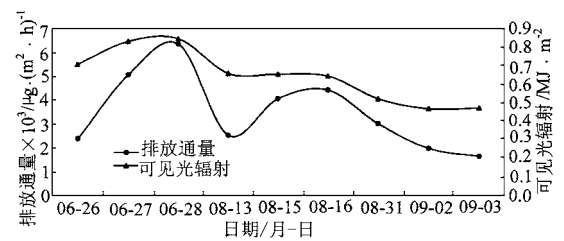


图 4 排放通量和可见光辐射的日平均

Fig. 4 The daily averages of isoprene emission flux and solar visible radiation

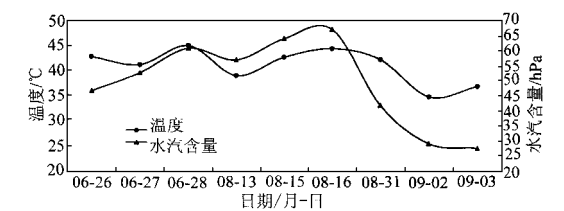


图 5 箱内温度和水汽含量的日平均

Fig. 5 The daily averages of temperature and water vapor content inside the chamber

因为可见光辐射是影响异戊二烯排放的最主要因子,而箱方法的使用又不可避免地造成箱内太阳辐射的衰减,所以必然对异戊二烯的排放通量带来影响.实验期间在采样样地对箱内罩箱前后的太阳总辐射进行了测量,表 3 给出不同时间多组实验数据的平均值.

表 3 采样箱内罩箱前后的太阳总辐射 / $W \cdot m^{-2}$

Table 3 The solar global radiation inside and outside the chamber / $W \cdot m^{-2}$

时 间	9:10	9:30	11:41	13:53
罩箱后	377.4	41.68	685.5	420.6
罩箱前	576.7	61.51	823.7	545.5
透过率/ %	65.4	67.76	83.22	77.1

太阳高度角较高时透过率较大,而太阳高度角较低时透过率较小,这可能与方型采样箱表面的反射及散射作用早晚较大有关.早晚异戊二烯的排放较小,因太阳辐射箱内外差别对排放通量的影响相对较小.而中午前后,排放通

量比较大,箱体内外 20 % ~ 30 % 太阳辐射的差别必将造成排放通量较大的差别.因此,使用箱方法测量气体排放时,如果在采样箱内没有测量太阳辐射,而使用箱外太阳辐射的话,应该考虑采样箱对太阳辐射的衰减作用,特别是在排放模式建立的过程中.推而广之,凡涉及到箱方法以及气体排放通量与太阳总辐射、可见光辐射有关的情形时,均应考虑因箱内外太阳辐射之差引起排放通量的差别.

2.3 季节变化

如果以 3 d 的平均值来表示月平均,它虽然与实际月平均有一定的差别,但在一定程度上还是可以反映异戊二烯及其影响因子随季节变化的大致情况.表 4 中给出 6、8、9 月各量 3 d 的平均值以及变化率.

表 4 2002 年 6、8、9 月各量 3 d 的平均值

Table 4 The averaged values of all parameters during June, August and September 2002

时 间	排放通量 (C) $\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	可见光 辐射 $MJ \cdot m^{-2}$	箱内 温度 / $^{\circ}C$	箱内水 汽含量 / hPa
6 月	886.6	0.76	42.0	54.2
8 月	707.0	0.62	42.1	57.4
9 月	427.2	0.49	37.9	32.7
8 ~ 6 月变化率/ %	- 20.3	- 18.4	0.24	5.9
9 ~ 8 月变化率/ %	- 39.6	- 21.0	- 10.0	- 43.0

综合来看,2002 年夏季,随季节的推移,6、8、9 月异戊二烯的排放通量在下降,它与可见光辐射的变化趋势比较一致,与箱内温度和水汽含量的变化也大体类似.箱内温度和水汽含量 8 月份略高于 6 月份,然后降低,这是与其它各量微小区别之处.表 4 同时给出排放通量与 3 个影响因子相邻 2 月的变化率.可以看到,6 ~ 8 月箱内温度和水汽含量略微增加,而可见光辐射减少 18.4 %,排放通量减少 20.3 %,这说明排放通量的变化受可见光辐射影响较大.8 ~ 9 月,3 个影响因子不同程度下降的综合作用,造成排放通量更大的减少率.类似的现象也可以从图 1 中看到,9 月 3 日 17:00 异戊二烯排放通量(C)约为 $3.1 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$,是 2002 年夏季的最低值,其影响因子大多也为夏季的最低值.

3 结论

首次对我国内蒙古草原 VOC 排放通量测量的结果表明,异戊二烯的排放有非常明显的日变化、逐日变化、季节变化规律。2002 年夏季,异戊二烯排放通量(C)的最大值为 $1649.3 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。影响其排放通量的主要因子有可见光辐射、温度、水汽含量,可见光辐射是控制异戊二烯排放的最主要因子,它提供了草地生长、呼吸、气体排放等过程的外部能量来源。在考虑影响异戊二烯排放的因子时,除了考虑通常的影响因子,即可见光辐射、温度外,还要考虑水汽的作用。对于异戊二烯排放而言,温度、水汽含量在采样箱内比采样箱外起的作用要大。异戊二烯排放通量与其各影响因子之间的关系比较复杂,不是简单的线性关系,因此,应该考虑有一定物理、化学、生物机制的模式或经验模式。在建立异戊二烯排放模式时,应该考虑可见光辐射、温度、水汽含量等因素的综合作用,同时还要考虑修正采样箱的使用对排放通量带来的影响。

致谢:衷心感谢中国科学院大气物理研究所王勇、北京大学白郁华和王志辉等同志对本工作提供的帮助,以及中国科学院内蒙古生态系统定位研究站白永飞、潘庆民、周玉林、韩剑梅、方桂霞、潘春梅和张艳慧等同志给予的大力支持。

参考文献:

- Brasseur G P, Orlando J J, Tyndall G S. Atmospheric Chemistry and Globe Change. Oxford, New York: Oxford, University Press, 1999.
- Guenther A, Bill Baugh, Guy Brasseur, Jim Greenberg, et al. Isoprene emission estimates and uncertainties for the central African EXPRESSO study domain. J. Geophys. Res., 1999, **104** (D23): 30625 ~ 30639.
- Sharkey T D, Holland E A, Mooney H A. Trace gas emissions by plants. San Diego, California: Academic Press, 1991. 153 ~ 184.
- Guenther A, Hewitt C, Erickson D, Fall R, Geron C et al. A global model of natural volatile organic compound emissions. J. Geophys. Res., 1995, **100** (D5): 8873 ~ 8892.
- Guenther A. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland landscapes. Atmos. Environ., 1994, **28**(6): 1197 ~ 1210.
- Guenther A, Alan J Hills. Eddy covariance measurement of isoprene fluxes. J. Geophys. Res., 1998, **103** (D11): 13145 ~ 13152.
- Donahue N, Prinn R. Nonmethane hydrocarbon chemistry in the remote marine boundary layer. J. Geophys. Res., 1990, **95**: 18387 ~ 18411.
- 李金龙, 白郁华, 胡建信等. 油松排放萜烯类化合物浓度的日变化及排放速率的研究. 中国环境科学, 1994, **14** (4): 165 ~ 169.
- 邵敏, 赵美萍, 白郁华等. 北京地区大气中非甲烷碳氢化合物(NMHC)的人为源排放特征. 中国环境科学, 1994, **14**(1): 6 ~ 11.
- 白郁华, 梁宝生, 李金龙, 唐孝炎. 中国地区植物排放的非甲烷总烃天然源研究. 见: 周秀骥主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一). 北京: 气象出版社, 1996. 120 ~ 127.
- 徐晓斌, 向荣彪, 丁国安等. 中国大陆本底大气 NMHC 的浓度和构成及其与臭氧的关系. 见: 周秀骥主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一). 北京: 气象出版社, 1996. 67 ~ 81.
- 张福珠, 苗鸿, 鲁纯. 落叶阔叶林释放异戊二烯的研究. 环境科学, 1994, **15**(1): 1 ~ 5.
- 白建辉, 王明星, Graham J, Prinn R G, 黄忠良. 森林排放非甲烷碳氢化合物的初步研究. 大气科学, 1998, **12**(2): 247 ~ 251.
- 白建辉, 王明星, Graham J, Prinn R G. 亚热带森林非甲烷碳氢化合物的研究 II. 日变化. 气候与环境研究, 2001, **6**(4): 456 ~ 466.
- Wayne Kirstine, Ian Galbally, Yuerong Ye, Martin Hooper. Emissions of volatile organic compounds (primarily oxygenated species) from pasture. J. Geophys. Res., 1998, **103** (D9): 10605 ~ 10619.
- 姜恕. 中国科学院内蒙古生态草原系统定位站的建立和研究工作概述. 草原生态系统研究(第1集). 北京: 科学出版社, 1985. 1 ~ 11.
- Yoshiko Fukui, Paul V Dosky. Air-surface exchange of non-methane organic compounds at a grassland site: Seasonal variations and stressed emissions. J. Geophys. Res., 1998, **103** (D11): 13153 ~ 13168.