

北京市两种主要温室气体浓度的日变化

李晶 王跃思 刘强* 王明星

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 通过对北京地区 CH_4 和 CO_2 浓度日变化将近一年的连续监测和数据分析, 发现它们日变化从总体上来看具有较强的规律性, CO_2 的日变化有明显的双峰结构, 而 CH_4 则是单峰的结构。化石燃料的燃烧, 对 CO_2 日变化峰值出现的时间有着明显的影响, 且 CH_4 和 CO_2 的日变化具有较好的相关性。源汇强度的变化和昼夜气象因素的周期变化, 是两种温室气体形成稳定日变化形式的主要因子。

关键词 温室气体 CH_4 CO_2 日变化

文章编号 1006-9585 (2006) 01-0049-08 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Diurnal Variation of Two Greenhouse Gases in Beijing

LI Jing, WANG Yue-Si, LIU Qiang, and WANG Ming-Xing

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract One year continuous measurements on methane and carbon dioxide were carried out in Beijing. Their diurnal variation and relationship are studied in detail. Analyzing results indicate that diurnal variation of carbon dioxide has a pattern with two peaks, while methane's diurnal variation with one peak. Statistical analysis also shows that correlation of this two greenhouse gases' diurnal variation is highly significant. The pattern of these two greenhouse gases' diurnal variation can be attributed to periodical variation of daily meteorological factor and their source-sink structure.

Key words greenhouse gases, CH_4 , CO_2 , diurnal variation

1 引言

地球大气中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 O_3 、CFCs 等温室气体的总浓度仅占大气浓度的 0.1% 左右^[1]。已有的监测实验和研究都表明, 从工业化革命以来大气中这些温室气体的浓度发生了显著的变化^[2~4]。其中 CO_2 、 CH_4 是受人类活动影响较明显的两种主要温室气体。目前, 在全球长寿命且均匀混合的温室气体浓度变化引起的辐射强迫中,

CO_2 占 60%, CH_4 占 20%。对大气中 CO_2 和 CH_4 行为的研究, 将有助于人们了解地球气候的变化过程, 有利于改进预测气候的未来变化趋势。

大气中 CO_2 的主要源有化石燃料燃烧、水泥生产、土地利用变化、生物呼吸、海洋吸收等; 主要汇包括陆地生态系统光合作用、海洋吸收、沉积在陆地和海洋中的有机和无机碳^[5,6]。而大气中 CH_4 的源来自各种微生物厌氧过程及燃烧和能源开采过程; 主要的汇是与对流层中的 OH 相互作用而消失^[7,8]。从大气中 CO_2 和 CH_4 的源汇构成

收稿日期 2004-03-16 收到, 2005-11-05 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-SW-01 和国家自然科学基金资助项目 40222202

作者简介 李晶, 女, 1972 年出生, 博士, 副研究员。主要从事温室气体和污染物等方面的观测和数值模拟研究。

E-mail: ljing@mail.iap.ac.cn

* 大气物理所博士研究生, 现已到中国科学院青藏高原研究所工作

来看,它们具有一定的同源性,即化石燃料的燃烧对它们在大气中浓度的变化产生较大的影响,尤其是在城市这种人类活动密集的地区,这种影响可能更大。因此有必要对二者在城市大气中的浓度变化进行对比研究。

CO₂、CH₄在大气中浓度的变化一直受到人们的关注。持续性的大气中 CO₂ 浓度的直接监测大约从 20 世纪中叶开始^[9];对全球大气中 CH₄ 浓度有代表性的系统观测是从 20 世纪 80 年代开始的^[10~12]。目前,在国内国际上,都已有对这两种温室气体本底浓度的连续监测和研究,并相继在全球的不同经纬度地区建立起本底监测网,但这些台站大多建立在岛屿和海岸,在城市地区开展高强度高密度的连续监测还不多见。近几十年来,对于 CO₂、CH₄ 已在全球或区域本底条件下进行了长期研究,但城市地区有关 CO₂、CH₄ 的研究尚少^[13~15]。而城市作为人类活动的中心,其温室气体浓度的变化规律对于我们认识温室气体的源、汇有着相当大的意义,所积累的数据,对城市污染模式、气体排放模式的建立和应用都有很高的应用价值。

2 实验方法和仪器

为了实现北京大气温室气体高密度的连续监测,中国科学院大气物理所大气化学实验室自行研制了一套温室气体自动监测系统,该系统由样品采集、自动进样分析、自动记录处理和标定等 4 个部分组成。其中自动进样分析是整个监测系统的核心,以 HP5890 气相色谱仪为分析仪器,对色谱仪气路、电路加以改造,配合自行研制的自动进样系统^[16],利用气相色谱仪的控制程序完成自动进样、分析。GC 输出信号经过控制计算机的数模转换后由 HP2070AA 化学工作站软件处理数据,进行积分并输出报告。这套温室气体自动监测系统同时采用两种方法标定,以获得更好的精度,有效地控制系统误差:一是本套系统自身自动进样插标;二是利用时间序列采样器采得的气样,在 HP6820 色谱仪上手动进样分析,作为 HP5890 色谱仪的对比实验。经实践证明,HP5890 系统工作比较稳定,对于我们要求的连续变化趋势研究,其精度和稳定性都可以得到保证。

采样系统由采集罩、过滤器、输气管路、采样泵、时间序列采样器等组成。采样泵 24 h 采样,可定时将样品储存,也可直接进入 GC 分析。经过长时间的运行与不断的改造,目前该系统运行可靠,自动性能好,所得数据符合实验要求的精度和稳定性,系统已比较完善。

采样点设在中国科学院大气物理研究所气象观测塔(39°58'27"N, 116°22'20"E)第 3 层,高 32 m,空气可自由流动。1999 年 8 月至 2000 年 7 月采用温室气体连续监测系统每间隔 3 min 自动取样分析一次,24 h 连续运转,每小时所采 20 个样品中 CO₂ 浓度的平均值作为该小时的 CO₂ 浓度值。

3 数据的处理

考虑到系统运转情况和实际获取的有效数据,把 1999 年 8 月到 2000 年 7 月期间获得的数据作为进一步分析的基础。

3.1 误差分析

实验的误差分为系统误差和偶然误差。对于温室气体自动监测系统的偶然误差,由于采用了自动进样分析系统,稳定性、重复性相当好,加上进样间隔短,数据密度大,作为小时平均所得的结果可以把偶然误差降到最低,因此偶然误差相当小,可以忽略不计。温室气体自动监测系统的系统误差来源有三方面:一是气相色谱仪的误差;二是 CO₂ 转化为 CH₄ 造成的误差;三是采集、进样系统造成的误差。总的来说,由于温室气体的日变化幅度大约为 10%,而系统综合误差小近一个量级,日变化幅度远大于由系统误差造成的变化幅度,故所得的数据用于日变化形势分析是可靠的。

另外,采样点的选择也对数据是否有代表性,所得结果有无意义有着很大的关系。一般认为,32 m 处相对我们关心的气体大气混合较好,有很好的代表性和稳定性。

综上所述,实验误差相对研究目的和要求在许可的范围之内,所得的数据有很好的代表性,可用于进一步研究分析。

3.2 处理方法

3.2.1 异常值的确定

由于实验误差的存在和极端局地气候的影响,

原始实验数据中不可避免的存在一些异常值。为了能使实验数据更真实地反映北京温室气体日变化的一般规律, 需要把这些异常值加以剔除。具体方法如下:

X_{ij} 表示某月第 j 天第 i 小时对浓度的测定值, $\bar{X}_i$ 表示当月第 i 小时所有测定值的算术平均值, $S(X_i)$ 为相应的标准偏差, 计算

$$L_{ij} = \frac{|X_{ij} - \bar{X}_i|}{S(X_i)},$$

L_{ij} 反映了测定值对平均值的偏离程度。在正常状态下, 测定值 X_{ij} 有一定的变化范围, 也就是说 L_{ij} 在一定范围内变动是正常的, 反映了浓度自身的变化规律。当 L_{ij} 超出这一范围时, 说明测定值是不可靠的, 不能反映浓度变化的真实情况。根据经验, 在本研究中将 $L_{ij} \geq 2.5$ 相应的测定值认定为异常值, 这些测定值或是实验误差太大造成的, 需要剔除; 或是极端特例, 对研究日变化的一般规律来说, 不具有代表性, 也需要加以剔除。

3.2.2 数据的校正

这套温室气体自动监测系统在长时间的运行过程中不断地发展完善, 同时也存在一些不可抗拒因素(如更换标气等)对数据质量的影响。

在同一地点我们还平行进行了温室气体周平均浓度变化的监测实验(以下简称周平均实验)。周平均实验持续时间长且比较稳定, 样品用带氢火焰离子检测器(FID)的气相色谱仪(GC)HP5890 进行分析, 仪器的灵敏度完全足以保证浓度测定的精确度; 所用标准气分别来自美国国家标准局(NBS)和德国的 IFU-FGH, 这两个标气定期互标, 并定期与日常使用的二级标气相比较, 以保证其精确度和监视其浓度的漂移。因此, 周平均实验提供的资料可以和世界上其他资料进行直接比较, 现已有许多成果在国内外发表。周平均实验的采样在北京时间(下同)14:00~15:00 进行, 采样频率为每周 1~2 次, 每次同时采集两个样品, 在仪器允许的标准偏差内, 每个样品分析 3 次, 用 6 次分析结果平均计算出每次采集的大气样品中温室气体含量。

从对本次监测实验原始数据的统计分析来看, CO_2 和 CH_4 的浓度日变化都在下午 15:00 左右达到最小值, 而且此时数据的离散度也最小(具体分析见本文以后的章节), 说明此时采样获得的数

据最为稳定, 能够代表 CO_2 和 CH_4 在大气中的浓度水平。所以在本研究根据周平均实验的结果对日变化原始数据进行再校正, 以进一步减小误差, 并使之与其他数据集具有可比性。

具体方法是根据周平均浓度监测实验的数据, 计算出 1999 年 8 月到 2000 年 6 月间各月的平均浓度 $\bar{C}_w$; 把本次实验中相应月份中 13:00 到 15:00 的浓度平均值记为 $\bar{C}_d$, 令

$$F \times \bar{C}_d = \bar{C}_w,$$

可以得到相应各月的校正系数 F 。

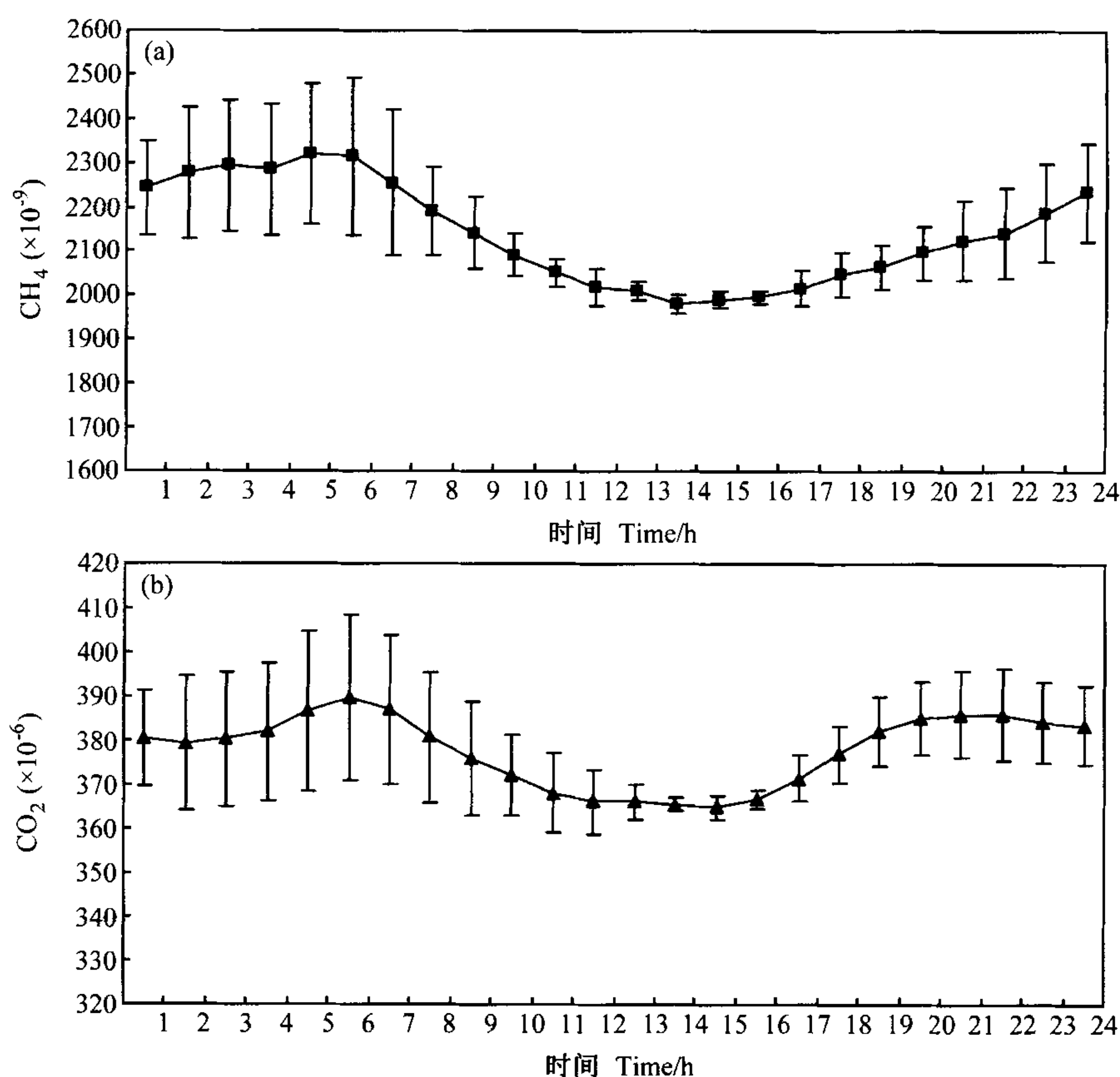
4 结果与讨论

在下面的讨论中, 以 3、4、5 月为春季; 6、7、8 月为夏季; 9、10、11 为秋季; 12 月和下一年的 1、2 月为冬季。其中, 11、12、1、2、3 月为供暖季, 其余月份为非供暖季。

4.1 平均日变化的总体情况

图 1 是由 1999 年 8 月~2000 年 7 月所有监测数据平均得到, 其中图 1a 为 CH_4 的变化情况, 图 1b 为 CO_2 的变化情况。从图中可以看到 CH_4 和 CO_2 的日变化总体上具有较强的规律性, 它们的浓度在凌晨 6:00 左右达到日变化最高值, 其中 CH_4 为 2318×10^{-9} (体积分数, 下同), CO_2 为 390×10^{-6} ; 下午 15:00 左右达到日变化的最低值, 其中 CH_4 为 1982×10^{-9} , CO_2 为 365×10^{-6} 。不同的是 CO_2 的日变化有明显的双峰结构, 在下午达到最低值之后迅速回升, 21:00~22:00 之间出现一个局部最高值 386×10^{-6} , 之后, 浓度有所下降, 下降趋势一直持续到凌晨 2:00 左右, 达到 379×10^{-6} , 然后继续升高至日变化的最高值。而 CH_4 在达到最低值后, 一直处于较缓慢上升状态, 直到日变化的最高值, 基本上是单峰的结构。从 CH_4 和 CO_2 的平均日变化对比来看, 最突出的特点是它们都在下午 15:00 左右浓度值最低, 浓度变化范围小; 且都在 6:00 左右到达最高值, 而在浓度变化的高值区, 浓度变化范围大。

对这两种温室气体日变化的原因可以做如下分析: 对于 CO_2 , 日间由于对流输送和光合作用等汇比较活跃, 因此浓度比较低, 在这些汇作用最强的 15:00 左右浓度达到最低值; 日落后, 汇

图1 1999年8月~2000年7月间CH₄ (a) 和CO₂ (b) 平均日变化Fig. 1 Diurnal variations of CH₄ (a) and CO₂ (b)

的活动迅速减弱, CO₂浓度便逐渐上升, 一直上升到6:00左右日出后再下降, 而21:00左右的峰, 很可能是化石燃料燃烧(如交通工具、餐饮、取暖等)造成的源排放形成的。一般来说, 21:00以后交通、餐饮、取暖等活动的高峰期已过, CO₂排放减少, 其浓度暂时下降。对于CH₄, 生物源较强, 人类活动的影响较小, 源减少的影响小于累积效应, 所以21:00不会出现与CO₂一样的峰值。

CH₄的浓度在午后最低, 原因和CO₂有所不同。大气中CH₄的主要汇是与OH自由基的反应, 而城市大气中OH自由基的源包括O₃光解、HNO₂光解以及HO₂与NO反应, 且与光照强度具有一定的正相关性^[17,18]。日间, 随着污染物的积累和光照强度的增加, 大气中OH自由基的浓度在中午时分达到日变化的峰值^[19], CH₄的分解速度也达到最大, 加上此时较强的大气对流输送作用, CH₄浓度迅速下降, 在15:00左右达到最低值。然而随夜晚的来临, 光照减弱并逐渐停止,

CH₄的分解也逐渐停止, 同时由于夜间对流输送弱, CH₄不断积累因而达到浓度最大值。

以上分析结果表明, 日变化模态的原因是CH₄和CO₂源汇强度的变化以及边界层高度和大气稳定度等气象因素共同作用的结果。下面的研究也说明了这一结果。

2001年1~3月在北京进行的有关大气边界层和大气化学的综合试验研究表明: 北京近地面风的日变化基本上呈双波型, 在100 m以下, 主要的低谷和高峰出现在日出前(04:00~07:00)和午后(14:00~17:00), 次低和次高分别在夜晚(20:00左右)及凌晨(02:00左右), 白天的风速大于夜间; 140 m以上, 夜间的风速大于白天^[20]。有关模型研究也表明, 北京城市地区混和层高度夜间一般在100~200 m之间, 日出以后地表被加热, 导致混合层中湍流活动不断增强, 从而使得混合层高度不断升高, 在14:00至16:00左右达到最大, 约为1 km^[21]。一般来说, 城市地区夜间大气稳定度逐渐升高, 在凌晨达到最高值, 同时

边界层厚度较低,这时影响温室气体浓度水平的主要因素是它们源的变化,清晨 6:00 在大气稳定度发生变化之前达到最高值;而城市地区白天大气稳定度逐渐降低,在中午达到最低值,14:00 左右又开始上升,同时两种温室气体的汇也随气温不断上升,在中午左右达到最大值,加上白天大气边界层厚度较夜间为大,使温室气体在较大范围内充分混合,最接近背景浓度,所以这两种温室气体都在 14:00 左右达到日变化的最低值,且浓度变化最小。

4.2 不同季节的平均日变化

CH₄ 的日变化在不同季节里的变化规律不尽相同。图 2 是不同季节中 CH₄ 的日变化。与上面全年平均日变化的情况类似,春季、夏季和秋季的日变化都呈现出单峰、单谷的模式,且最高值都出现在早上 6:00 左右,区别在于北京夏、秋、春 3 季的浓度水平依次降低。其原因是在这 3 个季节 CH₄ 生物源较强,且强度依次降低,而同时 CH₄ 的土壤吸收、与 OH 自由基反应和对流扩散

等汇基本保持不变,使其累积的浓度也依次降低。而冬季,CH₄ 在夜间浓度变化不大,没有出现峰值的原因,可以解释为生物源受到遏制,而非生物源的变化还没有大到影响其浓度水平的程度。从 CH₄ 供暖季节和非供暖季节的对比也可以看出这一点。

CO₂ 在不同季节的日变化规律也各有特点。图 3 是不同季节中 CO₂ 的日变化。冬季和春季大气中 CO₂ 浓度日变化曲线均呈明显双峰形,峰值和谷值的出现时间与全年基本一致,不同的是冬季 22:00 的峰值比 6:00 的高。导致冬季 22:00 大气 CO₂ 浓度出现最高值的主要原因是采暖和汽车尾气的排放,22:00 以前采暖锅炉和大量正在行驶的汽车排出的 CO₂ 使大气中 CO₂ 浓度持续上升,加之天黑以后边界层稳定程度加强,对流扩散减弱,植物光合作用停止,源增加而汇减少等原因的共同作用,造成在 22:00 出现冬季大气 CO₂ 浓度最高值。22:00 以后给办公楼供暖的锅炉停烧,公路上行驶的汽车减少,大气中 CO₂ 浓度又有所

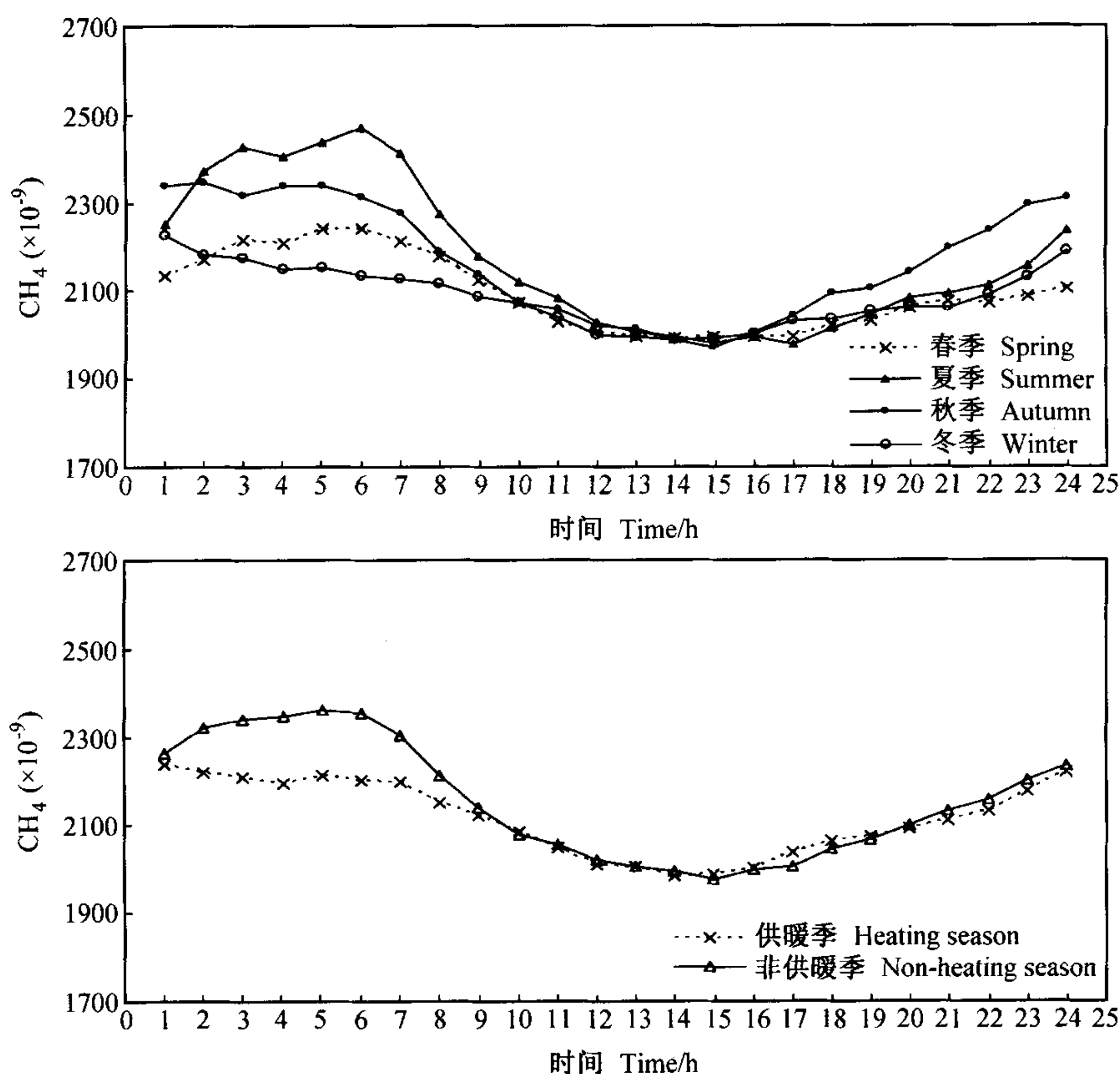
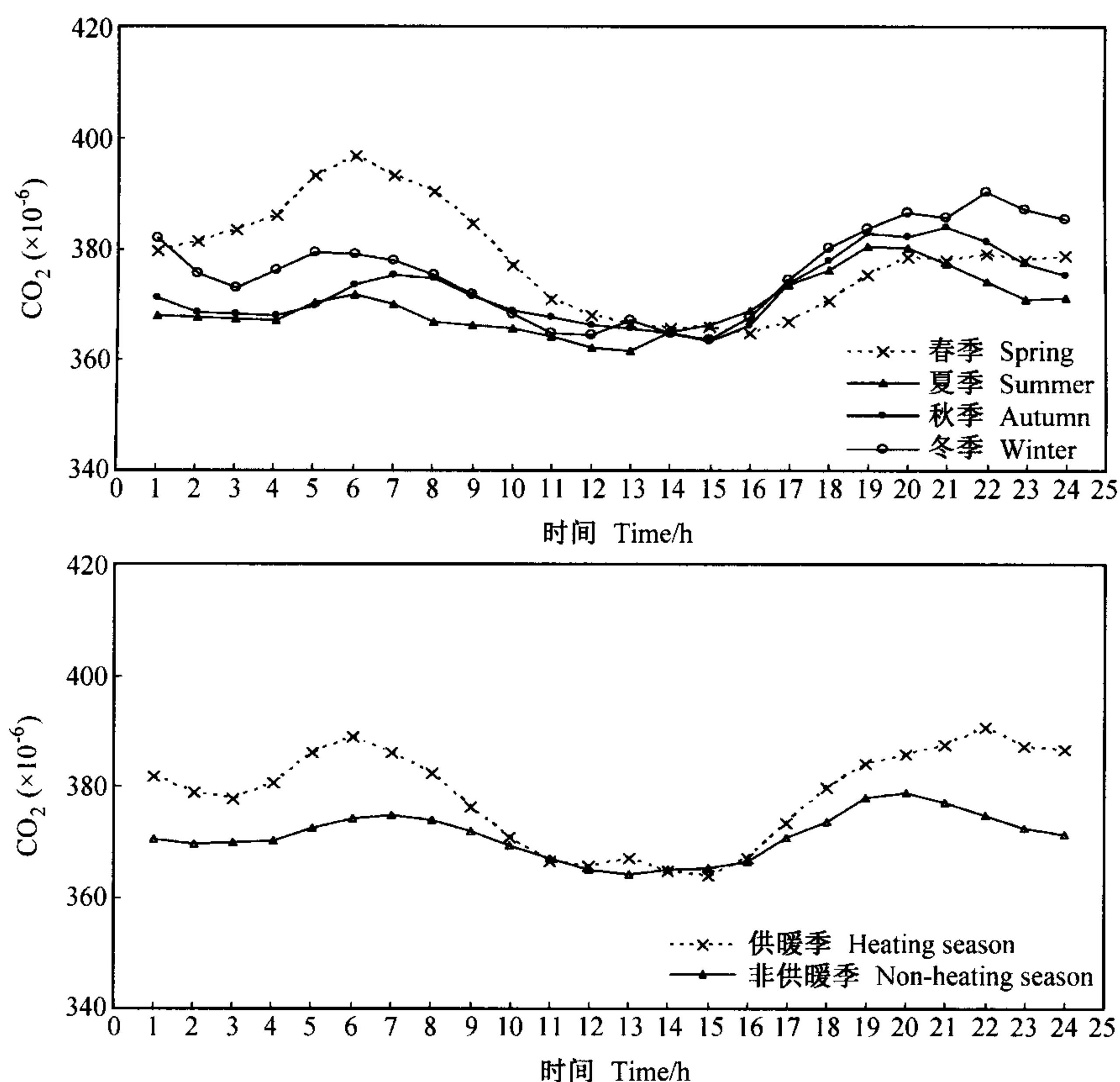
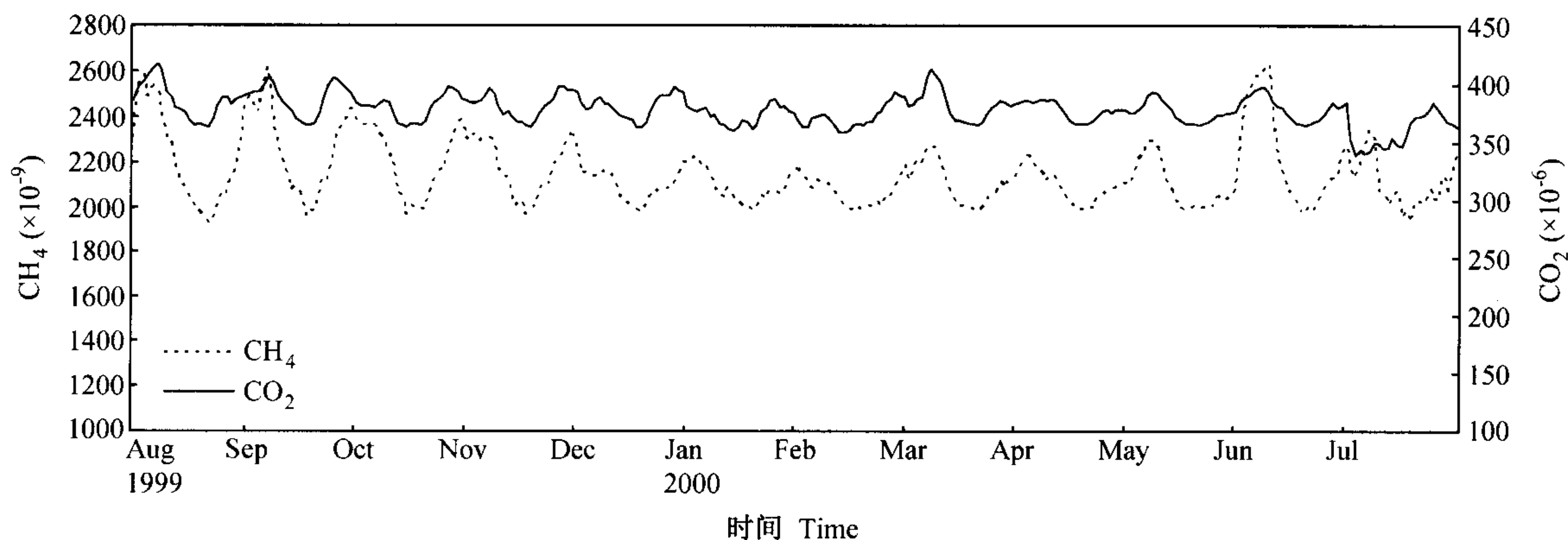


图 2 1999 年 8 月~2000 年 7 月 CH₄ 不同季节的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of CH₄ in different seasons

图3 1999年8月~2000年7月CO₂不同季节的日变化Fig. 3 Diurnal variations of CO₂ in different seasons图4 1998年8月~2000年7月CH₄与CO₂浓度日变化对比(月平均)Fig. 4 Relationship of CH₄ and CO₂'s diurnal variations (monthly average)

降低。夏季和秋季大气CO₂日变化亦呈双峰结构,但第二个峰不明显,并且出现的时间要早,整体浓度水平也要比其他两季要低。这是因为夏季和春季日间由于植物进行光合作用固定了大量CO₂,致使大气中CO₂浓度处在低水平,而且因为不需采暖,化石燃料燃烧产生的CO₂降到最低,因此,造成第二个峰的因素可能只有汽车尾气的排放。从供暖季和非供暖季的日变化对比,也说明了供

暖对CO₂日变化规律的影响是非常大的。

4.3 CH₄与CO₂日变化的相关性分析

把1999年8月~2000年7月所有数据按月平均,形成不同月份(12个月)的平均日变化数据(每个月24个)系列,共得到两组288个数据。图4为不同月份CH₄与CO₂浓度日变化的对比情况。图4清楚地显示了CH₄和CO₂的日变化具有相似的变化趋势,但它们之间是否存在相关性以

及相关性如何还需要进一步的分析。

本文采用 Spearman 相关分析法(这种非参数化相关性检验方法的好处在于无需考虑变量的分布情况^[22])。对 CH₄ 与 CO₂ 浓度月平均日变化进行了相关性检验,得到二者在 $\alpha=0.01$ 水平上的相关系数为 0.740,表明二者具有显著的相关性。无论是 CH₄ 还是 CO₂,其大气浓度日变化的最根本原因是源和汇的相互作用。造成这种相关性的原因可能有两点:一是因为具有相同的排放源,如化石燃料的燃烧;二是因对流层高度变化和大气稳定度变化等气象条件的影响,使这两种温室气体的稀释和扩散具有相同的规律性。结合前面不同季节日变化规律的讨论可以看出,化石燃料燃烧对 CO₂ 浓度的影响比较大,而对 CH₄ 浓度变化的影响比较小。这两种温室气体日变化的相关性可能更多是由于气象条件周期性变化造成的。

5 结论

通过对以上分析结果的讨论可以得出以下结论:

(1) CH₄ 和 CO₂ 的日变化从总体上来看具有较强的规律性。他们的浓度在凌晨 6:00 达到最高值,下午 15:00 达到最低值。不同的是 CO₂ 的日变化有明显的双峰结构,而 CH₄ 基本上是单峰的结构。

(2) 形成 CH₄ 和 CO₂ 日变化模态的原因,是它们源汇强度变化和边界层高度和大气稳定度等气象因素共同作用的结果。

(3) CH₄ 和 CO₂ 在下午 14:00 左右浓度值最低,浓度变化范围小,最接近背景浓度,是低密度监测长期变化趋势研究的合理采样时间段。

(4) 化石燃料的燃烧,特别是冬季采暖和汽车尾气排放对 CO₂ 日变化规律有着明显的影响。

(5) CH₄ 和 CO₂ 的日变化具有较好的相关性,而这种相关性主要取决于边界层气象条件的周期性变化。

致 谢 参加本文实验工作的有刘广仁、张文、顾青峰、以及北京 325 m 铁塔维护人员,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 王明星. 大气化学(第二版). 北京:气象出版社,1999. 144~147
Wang Mingxing. *Atmospheric Chemistry* (2nd edition) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 144~147
- [2] IPCC. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 745~772
- [3] Houghton J. 全球变暖. 北京:气象出版社,1998, 15~51
Houghton J. *Global Warming* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998. 15~51
- [4] 杨昕,王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述. 地球科学进展, 2000, 16 (3): 427~435
Yang Xin, Wang Mingxing. Reviews of several aspects of terrestrial carbon cycling. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2000, 16 (3): 427~435
- [5] Gunter W D, Wong S, Cheel D B, et al. Large CO₂ sinks: their role in the mitigation of greenhouse gases from an international, national (Canadian) and provincial (Alberta) perspective. *Applied Energy*, 1998, 61: 209~227
- [6] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soil. *Global Biogeochemistry Cycle*, 1995, 9: 23~26
- [7] Crutzen P J. Methane's sinks and sources. *Nature*, 1991, 350: 380~381
- [8] Crutzen P J. On the role of CH₄ in atmospheric chemistry: sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources. *Ambio*, 1995, 24: 52~55
- [9] Keeling C D, Bacastow R B, Bainbridge A E, et al. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, 1976, 28: 538~551
- [10] Seiler W, Conrad R, Scharffe D. Field studies of methane emission from termite nests into the atmosphere and measurement of methane uptake by tropical soils. *J. Atmos. Chem.*, 1984, 1: 171~186
- [11] Khalil M A K, Rasmussen R A, Moraes F. Atmospheric methane at Cape Meares: analysis of a high resolution data base and its environmental implications. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 14753~14770
- [12] Steele L P, Dlugokencky E J, Lang P M, et al. Slowing down of the global accumulation of atmospheric methane during the 1980's. *Nature*, 1992, 358: 313~316
- [13] 胡玉琼,王跃思,纪宝明,等. 内蒙古草原温室气体排放日变化规律研究. 南京气象学院学报, 2003, 26 (1): 29~37

- Hu Yuqiong, Wang Yuesi, Ji Baoming, et al. Diurnal variations of greenhouse gas emissions from a Nei Mongol grassland. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (1): 29~37
- [14] 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 通量的同时观测及其日变化. 科学通报, 2000, **45** (3): 318~322
- Dong Yunshe, Zhang Shen, Qi Yuchun, et al. Simultaneous measurement of CO_2 , N_2O , CH_4 flux in a Nei Mongol grassland. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45** (3): 318~322
- [15] 安俊琳, 李昕, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气 O_3 、 NO_x 和 CO 浓度变化的观测实验. 环境科学, 2003, **24** (6): 43~47
- An Junlin, Li Xin, Wang Yuesi, et al. Measurements of atmospheric boundary layer O_3 , NO_x and CO in summer with Beijing 325 m meteorological tower. *Environmental Science* (in Chinese), 2003, **24** (6): 43~47
- [16] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4** (10): 84~90
- Wang Yuesi, Liu Guangren, Wang Yinghong, et al. Simultaneous measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control* (in Chinese), 2003, **4** (10): 84~90
- [17] Ehhalt D H, Dorn H P, Poppe D. The chemistry of the hydroxyl radical in the troposphere. *Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, 1991, **97B**: 17~34
- [18] Ehhalt D H, Rohrer F. Dependence of the OH concentration on solar UV. *J. Geophys. Res.* 2000, **105** (D3): 3565~3571
- [19] 任信荣, 王会祥, 邵可声, 等. 北京市大气 OH 自由基测量结果及其特征. 环境科学, 2002, **23** (4): 24~27
- Ren Xinrong, Wang Huixiang, Shao Kesheng, et al. Determination and characteristics of OH radical in urban atmosphere in Beijing. *Environmental Science* (in Chinese), 2002, **23** (4): 24~27
- [20] 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰, 等. 冬季北京城市近地层的气象特征. 应用气象学报, 2002, **13** (增刊): 34~42
- Lu Longhua, Bian Lingen, Cheng Yanjie, et al. Meteorological characteristics of the ground layer in Beijing in winter. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Suppl.): 34~42
- [21] 刘树华, 李洁, 文平辉. 城市及乡村大气边界层结构的数值模拟. 北京大学学报 (自然科学版), 2002, **38** (1): 90~97
- Liu Shuhua, Li Jie, Wen Pinghui. Numerical simulation of atmospheric boundary-layer structure over urban and rural areas. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2002, **38** (1): 90~97
- [22] Hays W L. *Statistics* (3rd edition). New York: CBS College Publishing, 1981