

# 北京城市大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征及影响因素

王长科, 王跃思, 刘广仁(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029, E-mail: wck@dq.cern.ac.cn)

摘要: 北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化强烈, 全年北京时间 15:00 时前后为全天最低值, 最高值则出现在夜间, 日变化幅度为 23.2 ~ 39.0 μmol·mol<sup>-1</sup>, 夏季和秋季日变化幅度比冬季和春季大. 北京城区大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化明显, 最大值出现在冬季, 月平均浓度为 421.5 ~ 441.0 μmol·mol<sup>-1</sup>; 最小值则在夏季, 月平均浓度 367.4 ~ 371.6 μmol·mol<sup>-1</sup>. 北京 CO<sub>2</sub> 浓度的季节变化幅度明显高于附近的华北兴隆区域站和瓦里关山大陆本底站等的相应值, 其原因是北京 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化主要受人为取暖活动控制, 同时植被的季节变化也起一定作用. 1993 ~ 1995 年北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升较快, 平均增长率为 3.7%·a<sup>-1</sup>, 1995 年平均浓度达到最高, 为 409.7 ± 25.9 μmol·mol<sup>-1</sup>, 随后缓慢下降.

关键词: 大气 CO<sub>2</sub>; 温室气体; 城市环境; 北京

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)04-05-0013

## Characteristics of Atmospheric CO<sub>2</sub> Variations and Some Affecting Factors in Urban Area of Beijing

Wang Changke, Wang Yuesi, Liu Guangren (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China E-mail: wck@dq.cern.ac.cn)

**Abstract:** The diurnal variation of the atmospheric CO<sub>2</sub> at the urban area in Beijing displayed a very clear cycle, generally with the lowest value being recorded at about 15:00 local time and the highest in the nighttime. The differences between the maximums and the minimums ranged from 23.2 to 39.0 μmol·mol<sup>-1</sup> in the four seasons and the ones of summer and fall were bigger than that of winter and spring. It showed a large seasonal cycle with a maximum in winter, from 421.5 to 441.0 μmol·mol<sup>-1</sup>, and a minimum in summer, between 367.4 and 371.6 μmol·mol<sup>-1</sup>. The peak-to-peak amplitude of atmospheric CO<sub>2</sub> in Beijing, controlled mostly by the anthropogenic activities and seasonal variation of vegetation, was higher than that in Xinglong Station, Hebei Province and China Global Atmosphere Watch Baseline Observatory (Waliguan). The concentration of atmospheric CO<sub>2</sub> in Beijing increased rapidly at a mean growth rate of 3.7%·a<sup>-1</sup> from 1993 to 1995. After displaying a peak of 409.7 ± 25.9 μmol·mol<sup>-1</sup> in 1995, it decreased slowly.

**Keywords:** atmospheric CO<sub>2</sub>; greenhouse gases; urban environment; Beijing

在受人为影响的温室气体中 CO<sub>2</sub> 处于首位. 1000 ~ 1750 年大气 CO<sub>2</sub> 浓度为 280 μmol·mol<sup>-1</sup>, 2000 年背景大气 CO<sub>2</sub> 浓度达到 368 μmol·mol<sup>-1</sup>, 上升了 (31 ± 4)%<sup>[1]</sup>. 据预测 2100 年大气 CO<sub>2</sub> 浓度将上升到 490 ~ 1260 μmol·mol<sup>-1</sup>[1]. 大气中以 CO<sub>2</sub> 为首的温室气体的增加有可能引起全球气温增高, 全球气温升高将会导致海平面上升, 降水分布变异, 植被分布和生产力改变等一系列环境问题. 因此, 如何减少 CO<sub>2</sub> 等主要温室气体的排放已经成为各国政府

和科学家面临的主要挑战之一. 世界气象组织和美国国家海洋和大气局等在全世界各地已经建立了很多大气 CO<sub>2</sub> 观测站. 建立全球观测网的目的是将大气 CO<sub>2</sub> 的时空变化与长期传输模型相结合, 研究全球碳循环<sup>[2]</sup>. 同时许多国家开展了区域性大气 CO<sub>2</sub> 监测<sup>[3-4]</sup>, 有的还对城市大

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-01 B)

作者简介: 王长科 (1966 ~), 男, 博士, 主要从事温室气体与湿地环境研究.

收稿日期: 2002-09-12; 修订日期: 2002-11-24

气  $\text{CO}_2$  进行了观测<sup>[2,5,6]</sup>.我国在大气  $\text{CO}_2$  浓度监测和研究方面的工作较少,已开展的研究主要集中在西北边远地区<sup>[7~11]</sup>,少有涉及城市大气  $\text{CO}_2$  浓度的研究<sup>[12,10]</sup>.中科院大气物理研究所 1993 年开始对北京城区大气  $\text{CO}_2$  浓度进行长期观测,从 1999 年起又开始了每天 24h 不间断采样.本文根据所得监测结果对北京城区大气  $\text{CO}_2$  浓度变化特征及其影响因素进行初步分析.

## 1 采样与分析方法

采样点设在中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔(38° 58' N, 116° 22' E)32 m 高处.该塔位于北京市北四环中路与北三环中路之间,所处区域已属于城市建成区.空气样品在采样泵的作用下,经采集罩收集,过滤后通过输气管路直达分析实验室内(采样管材质为聚四氟乙烯,外径 6.3 mm,内径 4 mm).1992-11 开始,每周采样 1 次,每次同时采集 2 个重复样品.样品存储于 0.8 L 内表面电镀抛光的不锈钢瓶中.采样在北京时间 14:00 ~ 15:00 时进行,此时大气混合层较高,所采的样品和自由对流层的状况接近.1999-08 起至今采用温室气体连续监测系统每间隔 3 min 取样一次,24h 连续运转.

用改装过的 HP5890II 型气相色谱仪分析空气样品中  $\text{CO}_2$  浓度.通过一支不锈钢填充柱(长 3 m,内径 2 mm,内填 50 ~ 80 目 Porapak Q)将  $\text{CO}_2$  与空气中的其它组分分离后,将其在镍触媒催化下加氢转化为  $\text{CH}_4$ ,然后用气相色谱仪上的氢火焰离子检测器(FID)检测<sup>[13]</sup>.样品中  $\text{CO}_2$  浓度的定量采用外标曲线法.标准气来自中国国家标准物质中心和美国国家标准局(NIST).

全天 24h 不间断采样中每小时所采 20 个样品  $\text{CO}_2$  浓度的平均值作为该小时的  $\text{CO}_2$  浓度值,并以此讨论  $\text{CO}_2$  浓度日变化.所有天气状况下的浓度数据同等对待,但剔除超过 5 倍方差明显不合理的数据.如果一天中 3h 以上的时间没有浓度数据,则这天的数据不参加当月小时平均浓度的计算.根据周样  $\text{CO}_2$  平均浓度计

算出月平均浓度并用于讨论  $\text{CO}_2$  浓度季节变化. $\text{CO}_2$  年平均浓度是 12 个月平均浓度的平均值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 北京城市大气 $\text{CO}_2$ 浓度日变化的特点

我国北方地区季节划分一般是春季(3 ~ 5 月份)、夏季(6 ~ 8 月份)、秋季(9 ~ 11 月份)、冬季(本年度的 12 月份和下年度的 1 ~ 2 月份).北京市 11 月 15 日左右开始供暖,次年 3 月 15 日结束供暖,如把 3 月份划归春季,11 月份划归秋季显然都不合适.因此,在图 1 中分别以 1 月份、4 月份、7 月份和 10 月份北京大气  $\text{CO}_2$  日变化代表冬季、春季、秋季和夏季大气  $\text{CO}_2$  浓度日变化.从图 1 可以看出,北京大气  $\text{CO}_2$  浓度一年四季都存在明显的日变化,日变化过程的季节差异较大.

在所有季节全天  $\text{CO}_2$  浓度最低值均出现在北京时间 15:00 时前后(13:00 ~ 17:00 时),其原因是此时植物光合作用和对流输送等  $\text{CO}_2$  汇很活跃,笔者所监测的对流层底部的一部分大气  $\text{CO}_2$  不是被植物光合消耗掉了就是被输送到了高空.但是全天最高值出现的时间随季节变化:夏季和春季  $\text{CO}_2$  浓度全天最高值出现在 06:00 时,而冬季和秋季全天最高值在 22:00 时出现.夏季 17:00 时以后植物光合作用和对流输送变弱,也就是说大气  $\text{CO}_2$  汇强度逐渐减弱,土壤和生物呼吸以及工业生产等产生的  $\text{CO}_2$  便在近地层大气中积累, $\text{CO}_2$  浓度便逐渐上升,一直到 06:00 时左右出现峰值,在日出后才开始下降.冬季 19:00 ~ 22:00 时是北京一天中的 2 个采暖高峰时段之一<sup>[14]</sup>,22:00 时以后采暖锅炉燃烧量降低,公路上行驶的汽车也大量减少,也就是说大气  $\text{CO}_2$  源强度减弱,致使  $\text{CO}_2$  浓度开始降低.

夏季瓦里关山大陆本底站(36°18' N, 100° 54' E)  $\text{CO}_2$  浓度在北京时间 07:00 出现最高值,最低值出现在 15:00 ~ 18:00<sup>[15]</sup>.除去因所处经度不同导致的时差后(瓦里关山和北京经度相差约 15.5°,时间相差约 1h,即瓦里关山日出比北京晚 1h),两地最高值和最低值在一天内

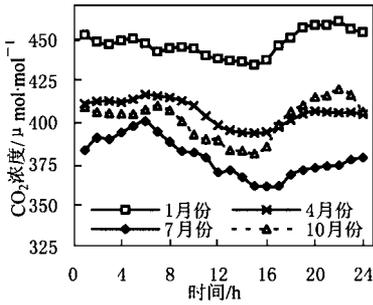


图 1 北京城区大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化

Fig.1 Diurnal variation of atmospheric CO<sub>2</sub> at an urban area in Beijing

的出现时间基本相似,表明夏季北京城市人类活动对 CO<sub>2</sub> 浓度日变化形式的影响不大.冬季的情形与夏季完全不同,瓦里关山在白天温度较高的 11:00~17:00(相当于北京的 10:00~16:00)大气 CO<sub>2</sub> 浓度较高,其余时间相对低一些.北半球温带陆地植物冬季大多已经落叶,陆地植被在一天内的各个时段 CO<sub>2</sub> 光合汇都很弱.瓦里关山白天大气 CO<sub>2</sub> 浓度比晚上高的原因是白天温度比晚上高,白天土壤呼吸排放出的 CO<sub>2</sub> 比晚上高.与之相反,北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度在温度较高的下午 12:00~17:00 比较低,而其余时间较高.温度较低时大气 CO<sub>2</sub> 浓度较高是取暖燃烧化石燃料排放出大量 CO<sub>2</sub> 的结果.北京与瓦里关山的对比说明,人为取暖活动是决定北京城市冬季大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化形式的主要因素.

春季、夏季、秋季和冬季北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化幅度分别为 23.2、39.0、38.7 和 26.2 μmol·mol<sup>-1</sup>,表明北京 CO<sub>2</sub> 浓度秋季和夏季的日变化幅度比冬季和春季大.瓦里关山站夏季小时浓度日振幅约 2 μmol·mol<sup>-1</sup>,其它季节都小于 0.5 μmol·mol<sup>-1</sup>[15].北京一年四季日变化幅度都比本底区域大得多.

北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化总的特点是在所有季节 CO<sub>2</sub> 浓度都是白天低夜间高.这种日变化形式与兰州市的明显不同.兰州市大气 CO<sub>2</sub> 浓度在春季和夏季也是夜间高白天低,但在冬季白天高、夜间低,这种特殊日变化应是由人为

CO<sub>2</sub> 排放昼高、夜低的变化引起的<sup>[10]</sup>.与兰州市一样,北京市冬季十分寒冷,植物和微生物新陈代谢活动微弱,工业污染也较严重,但北京冬季大气 CO<sub>2</sub> 日变化没有出现兰州市那样的情形,原因可能与地形有关,有待于进一步研究.

### 2.2 季节变化

#### 2.2.1 北京城市大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化特征

用 1993~2000 年同一月份 CO<sub>2</sub> 浓度的平均值作图,结果见图 2.图 2 清晰地表明北京大气 CO<sub>2</sub> 季节变化具有如下规律:总的来说,一年中月平均浓度最低值出现在 6~8 月份,变动范围为 367.4~371.6 μmol·mol<sup>-1</sup>;最高值则在 1~2 月份或 11~12 月份均可能出现,变动范围为 421.5~441.0 μmol·mol<sup>-1</sup>.

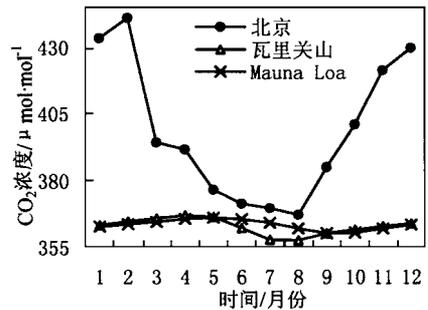


图 2 北京及其它观测站大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化

Fig.2 Seasonal variations of atmospheric CO<sub>2</sub> in Beijing, Mt. Waliguan and Mauna Loa

在全年最高值的出现时间方面,北京与清洁区域明显不同.瓦里关山站<sup>[16]</sup>和美国夏威夷 Mauna Loa 站(19°32' N, 155°35' W)<sup>[17]</sup>等全球大气本底站大气 CO<sub>2</sub> 一般在春季(4~5 月份)最高(表 1).北京春季大气 CO<sub>2</sub> 浓度虽然也较高,但冬季大气 CO<sub>2</sub> 浓度比春季还要高,原因是人为取暖燃烧化石燃料排出大量的 CO<sub>2</sub>.北京 CO<sub>2</sub> 浓度全年最低值出现的时间与瓦里关山相同,均为 7~8 月份,都与 Mauna Loa 不同(表 1).

北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化幅度平均值、最大值和最小值都远比华北兴隆区域站(39°48' N, 116°57' E)<sup>[18]</sup>、瓦里关山站<sup>[16]</sup>和夏威夷 Mauna Loa 站<sup>[17]</sup>所观测到的相应值高(表 1).

表 1 还显示出各地大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化幅度平均值、最大值和最小值与该地受人类活动干扰程度和植被的季节变化幅度成正相关,也就是说距离人类活动越近,人类活动影响强度越

大,植被的季节变化越明显,大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化幅度越大.说明人为活动强度和植被季节变化幅度是决定大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化幅度的主要因素.

表 1 北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化特征(1993~2000 年)

Table 1 The characteristics of seasonal variation of atmospheric CO<sub>2</sub> in Beijing (1993~2000)

观测点	季节变化幅度均值	季节变化幅度		月平均浓度最大值	月平均浓度最小值
	/μmol·mol <sup>-1</sup>	最大值/μmol·mol <sup>-1</sup>	最小值/μmol·mol <sup>-1</sup>	出现时间/月份	出现时间/月份
北京 325 m 气象塔	108.00	143.00	71.75	1~2, 11~12	7~8
华北兴隆区域站 <sup>1)</sup>	30.79	43.70	20.90		
瓦里关山大陆本底站	10.05	10.89	8.94	4, 5	7~8
夏威夷 Mauna Loa 站	5.92	6.60	4.97	5, 4	9~10

1) 1994~2000 年数据

### 2.2.2 影响城市大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化的因素

北京冬季寒冷,平均气温全年最低,采暖燃烧化石燃料排出大量 CO<sub>2</sub>,大气对流弱,同时由于绝大多数植物已经落叶,未落叶的常绿植物光合固定 CO<sub>2</sub> 的能力也很低,大气 CO<sub>2</sub> 源强度全年最大而汇最弱导致冬季大气 CO<sub>2</sub> 浓度全年最高;与春季和秋季相比,由于都不存在冬季采暖燃烧化石燃料这个大气 CO<sub>2</sub> 强排放源,大气 CO<sub>2</sub> 源都比较弱,但夏季炎热,气温较高,植物枝叶茂密,光照充足,降水充沛,植物光合作用强烈,可快速固定大气中的 CO<sub>2</sub>,夏季对流也活跃,近地面的 CO<sub>2</sub> 可被迅速输送到高空以及北京市周边地区.夏季大气 CO<sub>2</sub> 源强度较弱而汇在全年 4 个季节中最强,因而 CO<sub>2</sub> 浓度为全年最低值.上述分析说明,人为取暖活动和植被是决定北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化的主要因素.

### 2.3 长期变化

对北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度 8 年的连续监测表明,北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度没有象瓦里关山和 Mauna Loa 那样逐年上升(图 3).从图 3 可以看出,北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度 1993~1995 年为线性快速上升期,从 1993 年的(374.7 ± 23.5) μmol·mol<sup>-1</sup> 增加到 1995 年的(409.7 ± 25.9) μmol·mol<sup>-1</sup>,平均增长率为 3.7%·a<sup>-1</sup>,1995 年达到最高峰;1996~2000 年呈缓慢下降趋势,平均下降率为 0.9%·a<sup>-1</sup>,并在下降中有较大的年际波动,但在整体浓度水平上要比瓦里关山和

Mauna Loa 平均高 9.3%.

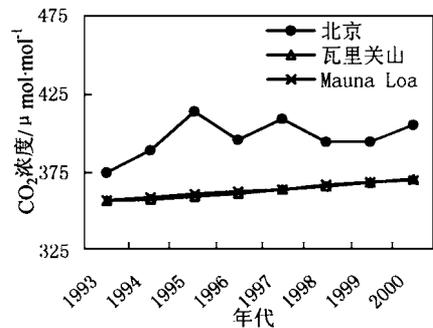


图 3 北京及其它观测站大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化趋势

Fig. 3 Trends of atmospheric CO<sub>2</sub> in Beijing, Mt. Waliguan and Mauna Loa

图 4 对 1993~2000 年北京市化石燃料年消耗量<sup>[19]</sup>与大气 CO<sub>2</sub> 浓度的变化趋势进行了对比.图 4 显示出 1993~1995 年化石燃料年消耗量与大气 CO<sub>2</sub> 浓度的变化趋势相同,都接近直线上升.但 1996 年以后,两者的走势有所不同,化石燃料年消耗量在缓慢上升中趋于平稳,而大气 CO<sub>2</sub> 浓度在缓慢下降.统计分析表明化石燃料总消耗量与大气 CO<sub>2</sub> 浓度之间有一定的正相关关系,相关性接近显著水平( $R = 0.695, n = 8, P = 0.055$ ).进一步分析发现,北京市煤炭年消耗量与大气 CO<sub>2</sub> 浓度显著正相关( $R = 0.775, n = 8, P = 0.024 < 0.05$ ),说明煤炭燃烧排放 CO<sub>2</sub> 是北京大气 CO<sub>2</sub> 的最重要来源,其强度在一定程度上决定着大气 CO<sub>2</sub> 浓

度水平。

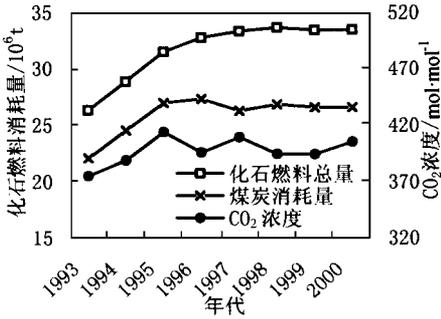


图 4 北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度与化石燃料消耗量的关系

Fig. 4 The relations between the fossil fuel consumption and at mospheric CO<sub>2</sub> concentration

1995 年以后,北京市化石燃料年消耗量基本平稳(图 4),也就是说大气 CO<sub>2</sub> 排放源强度基本稳定.大气 CO<sub>2</sub> 浓度的缓慢降低意味着存在一个逐渐增大的大气 CO<sub>2</sub> 汇,这个汇是不是面积逐渐增大的北京城市植被需要进行更深入的研究才能证实.

### 3 结论

(1) 北京大气 CO<sub>2</sub> 日变化强烈,模式是在北京时间 15:00 时前后 CO<sub>2</sub> 浓度出现全天最低值,在夜间(06:00 时或 22:00 时)出现最高值.日变化模式具有明显的季节差异.

(2) 北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变化明显,冬季出现全年最大值,夏季出现全年最小值.季节变化主要受由人为取暖活动和植物物候的季节变化所引起的 CO<sub>2</sub> 源汇强度改变控制.

(3) 1993~2000 年北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度先快速上升,1995 年平均浓度达到最高,随后缓慢下降.强度基本稳定的 CO<sub>2</sub> 源是导致北京 1995~2000 年北京大气 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐降低的重要因素.

### 参考文献:

- 1 IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report. 2001. 4~5.
- 2 Inoue H Y, Matsueda H. Measurements of at mospheric CO<sub>2</sub> from a meteorological tower in Tsukuba, Japan. *Tellus*, 2001, **53B**: 205~219.
- 3 Levin I, Graul R, Trivett B A N. Long-term observations of at mospheric CO<sub>2</sub> and carbon isotopes at continental sites in Germany. *Tellus*, 1995, **47B**: 23~34.
- 4 Bakwin P S, Tans P P. Measurements of carbon dioxide on

- a very tall tower. *Tellus*, 1995, **47B**: 535~549.
- 5 Idso S B, Idso C D, Balling C R Jr. Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO<sub>2</sub> concentration within a residential sector of the urban CO<sub>2</sub> dome of Phoenix, AZ, USA. *At mospheric Environment*, 2002, **36**: 1655~1660.
- 6 Grimmonda C S B, King T S, Cropleya D J et al. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: Methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 2002, **116**: S243~S254.
- 7 温玉璞,汤洁,邵志清等.瓦里关山大气二氧化碳浓度变化及地表排放影响的研究. *应用气象学报*, 1997, **8**(2): 129~136.
- 8 王木林,李兴生,程红兵.大气本底监测站的 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> 和 CO 浓度的初步分析.周秀骥主编.中国地区大气臭氧变化及其对气候环境变化的影响.北京:气象出版社, 1996. 38~47.
- 9 熊效振,王庚辰,温玉璞等.我国主要温室气体大气背景浓度的初步观测结果.王庚辰,温玉璞主编.温室气体浓度和排放监测及相关过程.北京:中国环境科学出版社, 1996. 39~44.
- 10 张柳明,徐永昌.中国西北地区大气 CO<sub>2</sub> 浓度及其碳、氧同位素组成特征. *科学通报*, 1992, (5): 441~444.
- 11 王明星,刘卫卫,吕国涛等.我国西北部沙漠地区大气甲烷浓度的季节变化和长期变化趋势. *科学通报*, 1989: 684~686.
- 12 蒋高明,黄银晓,韩兴国.城市与山地森林地区夏秋季大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化初探. *环境科学学报*, 1998, **18**(1): 108~111.
- 13 王跃思,纪宝明,王明星等.半干旱草原地区-温室气体 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 交换速率测定方法研究. *环境科学*, 2000, **21**(3): 6~10.
- 14 北京市气象局气候资料室.北京城市气候.北京:气象出版社, 1992. 3~6.
- 15 周凌琦,汤洁,温玉璞等.地面风对瓦里关山大气 CO<sub>2</sub> 本底浓度的影响分析. *环境科学学报*, 2002, **22**(2): 135~139.
- 16 CMDL/ NOAA. At mospheric CO<sub>2</sub> monthly mean concentration, Mt. Waliguan. In: WMO WDCGG DATA. Japan Meteorological Agency, Tokyo, 2002.
- 17 CMDL/ NOAA. At mospheric CO<sub>2</sub> monthly mean concentration, Mauna Loa. In: WMO WDCGG DATA. Japan Meteorological Agency, Tokyo, 2002.
- 18 王庚辰,温玉璞,孔琴心等.中国大陆上空 CO<sub>2</sub> 的本底浓度及其变化. *科学通报*, 2002, **47**(10): 780~783.
- 19 北京市统计局.北京统计年鉴(1993~2000).北京:中国统计出版社, 1993~2000.