

临安区域大气本底站 CO₂ 浓度特征及其碳源汇变化研究

浦静姣¹, 徐宏辉¹, 康丽莉¹, 马千里²

(1. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017; 2. 临安区域大气本底站, 浙江 临安 311307)

摘要: 通过分析 2006 年 8 月 ~ 2009 年 7 月临安区域大气本底站 Flask 瓶采样获得的 CO₂ 浓度特征, 结合碳追踪模式的模拟结果, 研究了长三角地区碳源汇变化对 CO₂ 浓度的影响。结果表明, 临安区域大气本底站的 CO₂ 浓度分布在 $368.3 \times 10^{-6} \sim 414.8 \times 10^{-6}$ 之间, 具有较明显的季节波动变化特征, 冬季高、夏季低, 浓度年较差接近 20.5×10^{-6} ; CO₂ 浓度平均增幅达 $3.2 \times 10^{-6}/a$, 增速较快。长三角地区 CO₂ 通量分布主要与化石燃料燃烧、生物圈的吸收/排放、海洋吸收/排放有关, 生物质燃烧对碳通量的贡献较小。化石燃料燃烧是该地区重要的碳源, 生物圈和海洋是重要的碳汇。临安区域大气本底站 CO₂ 浓度的季节变化趋势与长三角地区化石燃料燃烧和生物圈吸收/排放的碳通量变化较为一致。

关键词: CO₂; 碳源汇; 临安区域大气本底站; 瓶采样; 浓度特征

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2221-05

Characteristics of Atmospheric CO₂ Concentration and Variation of Carbon Source & Sink at Lin'an Regional Background Station

PU Jing-jiao¹, XU Hong-hui¹, KANG Li-li¹, MA Qian-li²

(1. Zhejiang Meteorological Science Institute, Hangzhou 310017, China; 2. Lin'an Regional Background Station, Zhejiang Lin'an 311307, China)

Abstract: Characteristics of Atmospheric CO₂ concentration obtained by Flask measurements were analyzed at Lin'an regional background station from August 2006 to July 2009. According to the simulation results of carbon tracking model, the impact of carbon sources and sinks on CO₂ concentration was evaluated in Yangtze River Delta. The results revealed that atmospheric CO₂ concentrations at Lin'an regional background station were between 368.3×10^{-6} and 414.8×10^{-6} . The CO₂ concentration varied as seasons change, with maximum in winter and minimum in summer; the annual difference was about 20.5×10^{-6} . The long-term trend of CO₂ concentration showed rapid growth year by year; the average growth rate was about $3.2 \times 10^{-6}/a$. CO₂ flux of Yangtze River Delta was mainly contributed by fossil fuel burning, terrestrial biosphere exchange and ocean exchange, while the contribution of fire emission was small. CO₂ flux from fossil fuel burning played an important role in carbon source; terrestrial biosphere and ocean were important carbon sinks in this area. Seasonal variations of CO₂ concentration at Lin'an regional background station were consistent with CO₂ fluxes from fossil fuel burning and terrestrial biosphere exchange.

Key words: CO₂; carbon source and sink; Lin'an regional background station; flask sampling; concentration characteristics

CO₂ 作为一种主要的温室气体, 其浓度水平是研究气候变化的核心问题, 备受国际社会的广泛关注。IPCC 第 4 次评估报告指出, CO₂ 作为一种长寿命的温室气体, 其浓度的增加会影响地球气候的总辐射强迫^[1]。自 1750 年以来, CO₂ 浓度增加了 38%, 大气 CO₂ 增加所产生的辐射强迫达到 $(1.66 \pm 0.17) W/m^2$ ^[2]。人类活动排放是导致大气 CO₂ 增加的直接原因, 化石燃料燃烧、水泥生产和土地利用变化等对大气 CO₂ 浓度具有重要影响^[3]。长三角地区经济发展快速, 研究掌握该地区的 CO₂ 浓度水平及其碳源汇变化特征, 能够为应对气候变化和实施合理的减排计划提供理论依据和技术支持。

对于温室气体的研究, 美国自 1958 年起就开始

在夏威夷 Mauna Loa 站开展大气 CO₂ 浓度的长期观测, 目前已有 60 多个国家的 200 多个站点加入世界气象组织大气本底观测网 (WMO/GAW)。Valentino 等^[4]通过对瑞士 Jungraujoch 站和法国 Puy de Dôme 站的 O₂、CO₂ 观测, 发现当地大气中 CO₂ 在不断增加。Tsutsumi 等^[5]对东亚地区 Yonagunijima 岛的温室气体进行了长期观测, 以 CO 浓度的变化特征为依据, 分别研究了区域污染和自然背景状况下的温室气体变化趋势。我国在青海瓦里关全球基准站已

收稿日期: 2010-10-20; 修订日期: 2011-03-07

基金项目: 公益性行业科研专项 (GYHY200806026); 浙江省公益技术研究社会发展项目 (2010C33161); 浙江省气象科技计划项目 (2010TD04)

作者简介: 浦静姣 (1981 ~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: pujingjiao@hotmail.com

开展了 10 多年的温室气体研究,建立了瓦里关大气 CO_2 和 CH_4 观测数据的质量控制和本底值筛选方法,研究了瓦里关温室气体的本底变化特征,并结合气团后向轨迹簇和下垫面的源汇探讨人为源和自然生态系统源汇对瓦里关大气 CO_2 浓度的贡献^[6~10]. 文献[11~13]对我国青海瓦里关、北京上甸子、浙江临安和黑龙江龙凤山 4 个区域本底站的温室气体浓度进行了对比研究,分析这 4 个典型区域的温室气体本底浓度变化特征. 天津近海和太湖流域等地也开展了主要温室气体的浓度特征研究^[14,15].

临安区域大气本底站代表了我国华东经济发达地区和长江三角洲地区大气成分的本底特征. 本研究通过分析 2006 年 8 月~2009 年 7 月临安区域大气本底站 Flask 瓶采样获得的 CO_2 浓度分布特征,并结合碳追踪模式(Carbontracker)模拟估算的该地区 CO_2 通量分布,来探讨长三角地区碳源汇变化对 CO_2 浓度的影响.

1 数据获取

采样点设在临安区域大气本底站,该站是我国最早建立的大气成分本底国家野外站之一,已被纳入世界气象组织区域大气本底观测网. 该站坐落于浙江省临安市横畈镇大罗村(东经 $119^\circ 44'$, 北纬 $30^\circ 18'$, 海拔 138.6 m),温室气体样品的采集和分析参照 WMO/GAW 推荐的方法,采用便携式采样器和 Flask 硬质玻璃瓶采样,实验室分析采用非色散红外吸收方法(NDIR). 采样频率为 1 次/周,选择在正午至下午时段采样,采样期间主要避开雨、雾、霾、沙尘等天气,风速 $> 2 \text{ m/s}$. 更为详细的样品采集处理及数据质量控制方法参见文献[11]. 本研究时段为 2006 年 8 月~2009 年 7 月,其间有效观测次数共 144 次,观测到的 CO_2 浓度分布范围在 368.3×10^{-6} ~ 414.8×10^{-6} 之间.

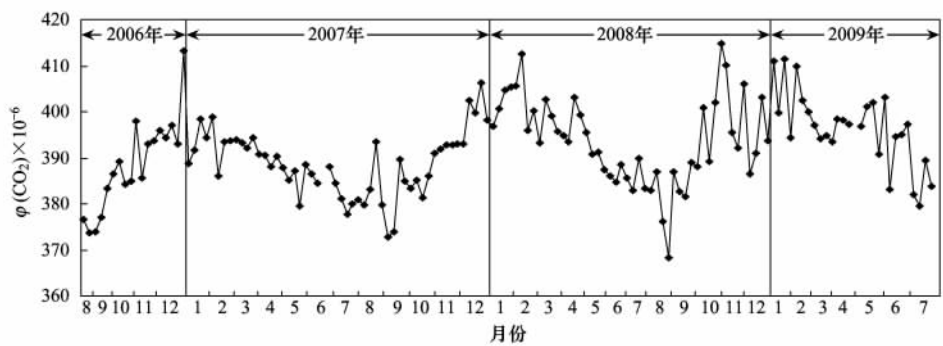
由美国国家海洋与大气局地球系统研究实验室(NOAA/ESRL)碳循环温室气体团队开发的碳追踪模式(Carbontracker),可以用于长期、持续地模拟大气中的 CO_2 分布,追踪地球表面 CO_2 的吸收与排放情况. 该模式系统涵盖了 4 种地表 CO_2 源汇——化石燃料的燃烧排放、生物质的燃烧排放、生物圈的吸收与排放、海洋的吸收与排放,并结合欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的气象资料和地面监测站点的 CO_2 浓度观测资料,采用 TM5 大气化学传输模式,模拟全球范围内的 CO_2 浓度分布和通量水平,以初步实现全球 CO_2 吸收与排放量的估算. 这里采用

2007~2008 年 Carbontracker 模式(CT2009 版本)的输出结果^[16], CO_2 浓度的空间分辨率为 $3^\circ \times 2^\circ$, CO_2 通量的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, CO_2 全球年通量估算值与不确定度为: $4.6 \pm 3.1 \text{ Pg/a}$ (2007 年)、 $3.4 \pm 3.3 \text{ Pg/a}$ (2008 年).

2 临安区域大气本底站 CO_2 浓度的时间分布特征

2006 年 8 月~2009 年 7 月 Flask 瓶采样观测的 CO_2 浓度分布如图 1 所示. 从图 1 中可以发现,临安地区的 CO_2 浓度随季节更替有着较明显的波动变化. 本研究参照文献[17]中的数据分析方法,对连续 3a 的 CO_2 浓度进行 Lanczos 滤波处理,得到临安大气本底站 CO_2 浓度的季节波动分布,如图 2 所示. CO_2 的季节变化特征主要表现为冬季高、夏季低,其中 1 月最高,8 月最低,浓度年较差接近 20.5×10^{-6} . 这与太湖流域、华东淮安、北京城区、上甸子区域本底站等地的季节分布特征均较为相似^[11, 15, 18, 19],但与全球大气本底站的情况明显不同,青海瓦里关站^[20]的 CO_2 浓度高值一般出现在 4 月份,低值出现在 8 月,浓度年较差约 9.4×10^{-6} ,夏威夷 Mauna Loa 站^[21]的高值一般出现在 5 月份,低值出现在 9 月,浓度年较差约 6.0×10^{-6} . 瓦里关站地处内陆高原,远离工业和人口密集区, Mauna Loa 站位于夏威夷岛,2 个站点受到人类活动的影响均较小. 而临安区域本底站与上甸子区域本底站相似,地处经济发展密集区,人口、城市聚集,由于冬季该地区能源消费量较高,造成临安站 1 月 CO_2 浓度值较高;同时,长三角地区植被覆盖良好,植被生长的季节变化也会造成大气 CO_2 的浓度冬季高、夏季低;此外,临安站处于亚热带季风区,夏季盛行东南风,主要受海洋性气团影响,浓度值较低,冬季盛行西北风,受大陆性气团影响,浓度值较高.

将观测的 CO_2 浓度去除季节波动后,得到 CO_2 浓度的长期变化趋势分布. 临安地区 CO_2 浓度的长期变化趋势表现为逐渐升高的态势,2006 年 8 月~2009 年 7 月 CO_2 浓度的平均增幅达到 $3.2 \times 10^{-6}/\text{a}$,明显高于同期的瓦里关站和 Mauna Loa 站的年增幅^[20, 21](约 $1.7 \times 10^{-6}/\text{a}$),也高于近 10 年全球平均增长率^[2]($1.9 \times 10^{-6}/\text{a}$). 临安地区的 CO_2 增长速率较快,可能与当地经济快速发展、能源消耗急剧增加密切相关. 2006~2008 年长三角地区的能源消耗量增长了 15.6%^[22],能源消耗量的增加可能是造成该地区大气 CO_2 浓度升高的重要原因.



数据经中国气象科学研究院温室气体实验室分析、质控处理

图 1 2006 年 8 月 ~ 2009 年 7 月临安区域大气本底站 Flask 瓶采样分析的 CO₂ 浓度分布

Fig. 1 CO₂ concentration obtained by Flask measurements at Lin'an regional background station from 2006-08 to 2009-07

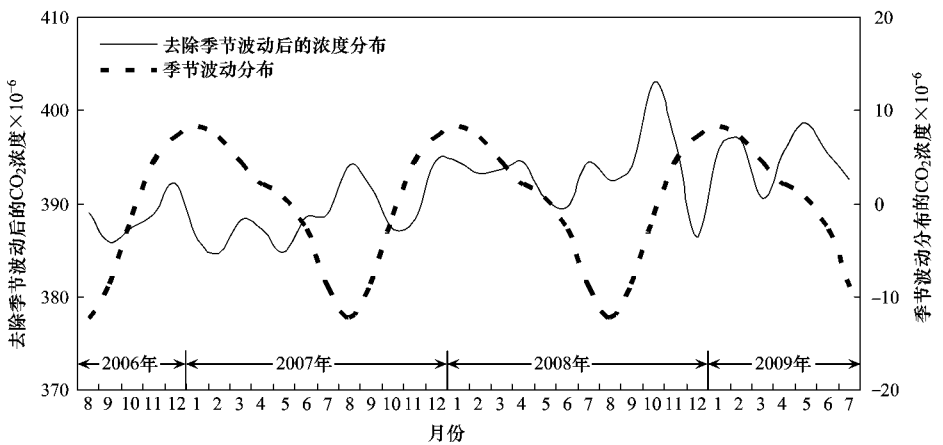


图 2 临安区域大气本底站 CO₂ 浓度的季节分布特征

Fig. 2 Seasonal variation of CO₂ concentration at Lin'an regional background station

3 长三角地区碳源汇变化对 CO₂ 浓度的影响

3.1 CT2009 模式检验

图 3 是 2007 ~ 2008 年临安区域大气本底站 CO₂ 浓度观测值与模拟结果的比较. 由图 3 可见, CT2009 模式模拟的 CO₂ 浓度与观测值较为接近, 模拟效果较好, 可以基本反映出当地 CO₂ 浓度的分布水平和变化趋势, 两者的相关系数达到 0.73, 相对偏差在 $\pm 4.4\%$ 以内. 但是在 2007 年 1 ~ 5 月, CT2009 模式模拟的 CO₂ 浓度普遍较观测值偏高, 这可能是由于其间临安站所在地区的气温较常年偏高^[23], 导致光合作用增强, CO₂ 观测浓度较同期偏低, 而 CT2009 模式的空间分辨率较低, 尚不足以表现出局地气温的偏高, 因此可能会造成模拟结果偏高.

3.2 长三角地区碳源汇变化对 CO₂ 浓度的影响

根据临安本底站 2007、2008 年的气团后向轨

迹分布情况, 选取对临安站有直接影响的 24h 后向轨迹分布范围 ($115.5^{\circ} \sim 125.5^{\circ}\text{E}$ 、 $25.5^{\circ} \sim 35.5^{\circ}\text{N}$, 如图 4 所示) 作为研究区域, 结合 CT2009 模式输出, 将研究范围内各网格通量根据距离加权平均计算 CO₂ 月通量, 得到如图 5 所示的分布图. 可见, CO₂ 通量随着季节变化, 形成周期性的变化分布特征. 在长三角地区, CO₂ 通量的变化与化石燃料燃烧、生物质燃烧、生物圈的吸收/排放、海洋的吸收/排放有关. 其中, 生物质燃烧表现为碳源, 并且它对该地区碳通量的贡献较小, 仅占 1% 左右. 化石燃料燃烧亦表现为碳源, 对碳通量的贡献较大, 且季节变化明显, 主要表现为夏季小、冬季大, 年较差达到 $1.1 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}$ 左右. 生物圈的影响作用与季节有关, 在冬季, 生物圈的呼吸作用强于光合作用, 总体上表现为碳源; 到夏季, 光合作用增强, 主要表现为碳汇; 冬夏季的季节碳通量差异明显, 变化范围在 $-4.6 \sim 1.8 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}$ 之间. 海洋对碳

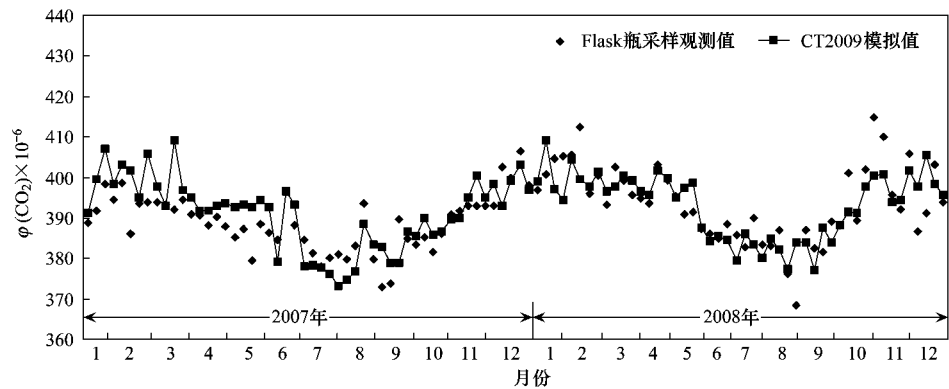
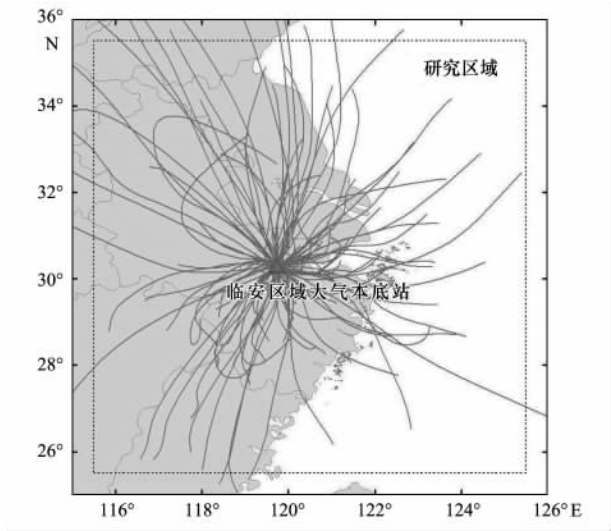


图3 临安区域大气本底站 CO₂ 浓度观测值与 CT2009 模拟结果的比较

Fig. 3 Comparison of observed and modeled CO₂ concentration at Lin'an regional background station

通量的影响也与季节相关,但变化范围较小,在 $-0.5 \sim 0.1 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}$ 间,主要表现为碳汇,在夏季表现为碳源。



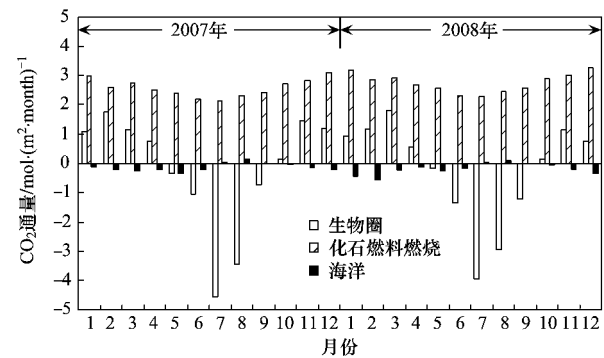
图中黑线为 2007~2008 年观测期间临安区域大气本底站的 24 h 气团后向轨迹

图4 研究区域示意

Fig. 4 Map of research domain

总体来看,在这 4 种地表 CO₂ 源汇的共同作用下,夏季主要表现为碳汇,其余季节则均表现为碳源。长三角地区 CO₂ 浓度的变化主要受到化石燃料燃烧和生物圈的影响较大,浓度的季节变化趋势与它们的通量变化一致,相关系数分别达到 0.83、

0.76。化石燃料燃烧对碳源的贡献在 60% 以上,2008 年长三角地区的能耗(以标准煤计)为 47 546 万 t,比 2007 年增长 5.3%^[22],2008 年化石燃料的碳通量值比 2007 年增加了 $2.1 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (见表 1),这可能是导致该地区 CO₂ 浓度升高的重要原因。生物圈总体上表现为碳汇,2007 年、2008 年长三角地区的植被覆盖情况虽然没有明显变化,但是由于大气 CO₂ 浓度的增加会促进植物的生长,从而导致 2008 年生物圈的净汇通量有所增加。海洋吸收/排放的年净通量值在 $-2.0 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 左右,是长三角地区重要的碳汇之一。



生物质燃烧源量级在 $10^{-2} \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{month})^{-1}$, 因此图中忽略

图5 2007~2008 年长三角地区逐月 CO₂ 通量分布

Fig. 5 Monthly carbon dioxide flux of Yangtze River Delta from 2007 to 2008

表1 2007~2008 年长三角地区 CO₂ 年通量分布/ $\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
Table 1 Annual carbon dioxide flux of Yangtze River Delta from 2007 to 2008

年份	化石燃料燃烧	生物质燃烧	生物圈吸收/排放	海洋吸收/排放	汇总
2007	30.9	0.2	-2.6	-1.6	26.9
2008	33.0	0.2	-3.1	-2.2	27.9

4 结论

(1)通过对 2006 年 8 月~2009 年 7 月临安区域大气本底站 Flask 瓶采样得到的 CO₂ 浓度进行分析,发现该地区的 CO₂ 浓度具有较明显的季节波动变化特征,冬季高、夏季低,其中 1 月最高,8 月最低,浓度年较差接近 20.5×10^{-6} 。整体上该地区 CO₂ 浓度增长较快,平均增幅达到 $3.2 \times 10^{-6}/\text{a}$,高于同期全球平均增长率。

(2)长三角地区 CO₂ 通量的变化主要与化石燃料燃烧、生物圈的吸收/排放、海洋吸收/排放有关,生物质燃烧对碳通量的贡献较小。生物质燃烧和化石燃料燃烧均表现为碳源,其中化石燃料燃烧对碳源的贡献较大,且季节变化明显,与 CO₂ 浓度的季节变化趋势一致。生物圈、海洋的吸收/排放对碳通量的影响作用与季节有关;生物圈吸收/排放的碳通量季节变化幅度较大,导致该地区在夏季表现为碳汇,其季节波动趋势亦与 CO₂ 浓度的变化分布一致;海洋碳通量的季节变化幅度较小,年净通量值在 $-2.0 \text{ mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 左右,是长三角地区重要的碳汇。

致谢:感谢中国气象科学研究院温室气体实验室提供经质量控制的 Flask 瓶采样分析数据,以及临安区域大气本底站业务人员在野外现场的辛勤工作。

参考文献:

[1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [A]. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] 世界气象组织. 2008 年温室气体公报 [EB/OL]. <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/GHGbulletin.html>, 2009-11-23.

[3] 贺玉龙,戴本林. 大气中 CO₂ 的源与汇及其含量增加对环境的影响 [J]. 工业安全与环保, 2010, **36** (5): 25-27.

[4] Valentino F L, Leuenberger M, Uglietti C, *et al.* Measurements and trend analysis of O₂, CO₂ and δ¹³C of CO₂ from the high altitude research station Junfgraujoch, Switzerland — A comparison with the observations from the remote site Puy de Dôme, France [J]. Science of the Total Environment, 2008, **391** (2-3): 203-210.

[5] Tsutsumi Y, Mori K, Ikegami M, *et al.* Long-term trends of greenhouse gases in regional and background events observed during 1998-2004 at Yonagunijima located to the east of the Asian continent [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40** (30): 5868-5879.

[6] 周凌晞,汤洁,温玉璞,等. 地面风对瓦里关山大气 CO₂ 本底浓度的影响分析 [J]. 环境科学学报, 2002, **22** (2): 135-139.

[7] 周凌晞,李金龙,温玉璞,等. 瓦里关山大气 CO₂ 及其 δ¹³C 本底变化 [J]. 环境科学学报, 2003, **23** (3): 295-300.

[8] 周凌晞,周秀骥,张晓春,等. 瓦里关温室气体本底研究的主要进展 [J]. 气象学报, 2007, **65** (3): 458-468.

[9] 张芳,周凌晞,刘立新,等. 瓦里关气相色谱法大气 CO₂ 和 CH₄ 在线观测数据处理分析 [J]. 环境科学, 2010, **31** (10): 2267-2272.

[10] 方双喜,周凌晞,张芳,等. 双通道气相色谱法观测本底大气中的 CH₄、CO、N₂O 和 SF₆ [J]. 环境科学学报, 2010, **30** (1): 52-59.

[11] 刘立新,周凌晞,张晓春,等. 我国 4 个国家级本底站大气 CO₂ 浓度变化特征 [J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2009, **39** (2): 222-228.

[12] 刘立新,周凌晞,温民,等. 中国 4 个国家级野外站大气 CH₄ 本底浓度变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 2009, **5** (5): 285-290.

[13] 周凌晞,刘立新,张晓春,等. 我国温室气体本底浓度网络化观测的初步结果 [J]. 应用气象学报, 2008, **19** (6): 641-645.

[14] 孔少飞,陆炳,韩斌,等. 天津近海大气中 CH₄、N₂O 和 CO₂ 季节变化分析 [J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2010, **40** (5): 666-676.

[15] 嵇晓燕,杨龙元,王跃思,等. 太湖流域近地表主要温室气体本底浓度特征 [J]. 环境监测管理与技术, 2006, **18** (3): 11-15.

[16] Carbon Tracker 2009 results provided by NOAA ESRL, Boulder, Colorado, USA [EB/OL]. <http://carbontracker.noaa.gov>.

[17] Tsutsumi Y, Mori K, Hirahara T, *et al.* Technical report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases [EB/OL]. WMO/TD-No. 1473, <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/products/publication.html>, 2009.

[18] 尹起范,盛振环,魏科霞,等. 淮南市大气 CO₂ 浓度变化规律及影响因素的探索 [J]. 环境科学与技术, 2009, **32** (4): 54-57.

[19] 王长科,王跃思,刘广仁. 北京城市大气 CO₂ 浓度变化特征及影响因素 [J]. 环境科学, 2003, **24** (4): 13-17.

[20] CMDL/NOAA. Atmospheric CO₂ monthly mean concentration, Mt. Waliguan [A]. In: WMO WDCGG DATA [M]. Tokyo: Japan Meteorological Agency, 2009.

[21] CMDL/NOAA. Atmospheric CO₂ monthly mean concentration, Mauna Loa [A]. In: WMO WDCGG DATA [M]. Tokyo: Japan Meteorological Agency, 2009.

[22] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2009 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.

[23] 浙江省气候中心. 浙江省气候影响评价 2007 年 1 月~5 月. [EB/OL]. <http://www.zjmb.gov.cn/zjqx/attaches/col15/>. 2007.