中国大陆上空 CO₂ 的本底浓度及其变化

王庚辰^① 温玉璞^② 孔琴心^① 任丽新^① 王木林^②

(^①中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; ^②中国气象局气象科学研究所, 北京 100081. E-mail: wanggc@mimi.cnc.ac.cn)

摘要 基于中国境内对大气中 CO₂ 浓度的长期监测资料, 对中国大陆上空大气中 CO₂ 本底浓度的变化趋势和特征进行了分析研究. 结果表明, 1991~2000 年间, 中国大陆上空 CO₂ 本底浓度呈明显的增长趋势, 其平均年增长值为 1.59 μL/L, 平均年增长率为 0.44%. CO₂ 本底浓度值有明显的季节变化, 其变化幅度平均为 10.35 μL/L. 同时还讨论了中国大陆上空 CO₂ 浓度值的区域变化特征以及人类活动对这种变化的可能影响.

关键词 CO₂ 本底浓度 中国大陆 CO₂ 增长率 CO₂ 季节变化 CO₂ 区域变化 CO₂ 变化趋势

地球大气中 CO₂ 浓度的增长趋势及其对人类生存环境可能产生的影响, 一直是全球气候环境变化研究中的重要内容, 也是当前全世界科学家和有关政府部门所关心的重大全球环境问题之一. 在全球范围内, 由于 CO₂ 的源汇分布特征以及大气环流的影响, CO₂ 在大气中的浓度有着明显的时空变化. 通常是选择不同纬度的长期观测资料来评估不同纬度地区和全球平均状态下 CO₂ 浓度的长期变化趋势, 同时分析其变化速率. 为此, 自 20 世纪 50 年代末以来, 先后在世界不同地区建立起了多个观测站, 对大气中 CO₂ 的全球本底浓度和区域背景浓度的变化进行长期监测, 试图获得不同尺度范围内大气中 CO₂ 浓度的变化趋势. 对来自世界各地观测结果的分析表明, 近 10 多年来, 大气中的 CO₂ 浓度发生了人们意料之外的变化^[1~3]. 不仅如此, 20 世纪 90 年代在全球范围内发生了许多重要气候异常事件, 一些科学家认为, 这些异常气候事件与大气中的 CO₂ 浓度的变化有着某种因果关系, 从而引起了人们对近 10 多年来大气中 CO₂ 浓度变化的极大关注^[1,4~6]. 科学家们对近 10 多年来大气中 CO₂ 浓度的变化特征一直在进行多学科的综合分析研究, 试图对其变化特征做出科学的解释, 以便为评价大气中 CO₂ 浓度变化对气候、环境的影响以及采取相应对策提供科学依据^[7~10]. 由于分布在世界各地的大气 CO₂ 本底浓度监测站绝大多数位于海岛和沿海地区, 到目前为止, 人们对大陆地区上空, 尤其是欧亚大陆地区上空 CO₂ 本底浓度的变化特征还缺乏认识. 但是, 大陆地区是陆地生态系统和人类活动集中的区域, 是对大气中 CO₂ 浓度变化特征产生重要影响的区域, 正是由于这一原因, 分析中国上空 CO₂ 本底浓度的监测结果, 对

认识陆地上空 CO₂ 本底浓度的变化特征, 尤其是对评价人类活动对大气中 CO₂ 本底浓度变化的影响有着十分重要的科学意义. 本文的目的是给出近些年来中国大陆上空 CO₂ 本底浓度的研究结果, 分析和讨论中国大陆上空 CO₂ 本底浓度的变化趋势及其季节、区域变化特征.

1 中国上空 CO₂ 本底浓度的变化趋势

中国科学工作者从 1985 年以来先后在甘肃省民勤和青海省五道梁等地区开展了大气污染物背景浓度值的观测研究工作, 并于 20 世纪 80 年代末在青海省瓦里关山兴建了大气污染本底监测站, 开始了对大气中 CO₂ 浓度变化的规范化监测. 瓦里关山站是国内外有关专家遵照全球大气本底污染监测网 (BAPMoN) 的有关规范^[11], 经过多次考察和预研究之后确定的. 这一规范对基准站址选择的核心要求是在站区半径 100 km 范围内没有明显的 CO₂ 污染源和汇, 并且在今后至少 50 年内其周围的土地利用情况无显著变化. 瓦里关山站符合这一基本要求, 因此被世界气象组织 (WMO) 列为 BAPMoN 代表大陆尺度的基准站. 在瓦里关山站上, 对大气中 CO₂ 浓度的监测采用通用的现场监测以及现场大气采样和室内气相色谱仪分析等方法, 其采样技术、样品分析技术以及资料的有效性选择等均按 WMO 的有关规定进行^[11~13]. 不仅如此, 采用 WMO 统一提供的 CO₂ 标气保证了所得 CO₂ 数据与全球 BAPMoN 其他监测站数据的可比性. 因此所获得的资料可认为是排除了局地污染源影响, 代表着中国大陆上空的背景污染状况.

对青海瓦里关山站和甘肃民勤站获得的大气中 CO₂ 浓度资料的分析表明, 同全球平均状况类似, 中国大陆上空 CO₂ 浓度呈逐年增长趋势. 图 1 是根据瓦

图 1 中国大陆上空 CO₂ 本底浓度值的变化趋势

里关山站的监测资料给出的中国大陆上空 CO₂ 本底浓度值的年际变化趋势, 可以发现, 自 1991 年至今大气中的 CO₂ 浓度增加了 14.36 μL/L, 平均年增长量约为 1.59 μL/L, 平均年增长率为 0.44%, 这接近于全球的平均水平. 同期, 位于夏威夷的 Mauna Loa 站监测到的相应值分别为 1.55 μL/L 和 0.43%^[3].

2 中国上空 CO₂ 本底浓度的年际变化速率

从全球平均而言, 近 10 多年来大气中 CO₂ 浓度的增长速率没有多大变化, 仍然维持在年增长量为 1.5 μL/L 左右的水平, 但是某些年份其增长速率的变化却是显著的. 其间, 在 1987/1988, 1994/1995 和 1997/1998 年观测到了全球范围内 CO₂ 浓度的高增长量, 而在 1989/1990, 1992/1993 和 1996 年却观测到了很低的增长量. 1992 年全球平均大气中 CO₂ 的年增长量仅为 0.60 μL/L. 这种变化在北半球中纬地区表现得尤为明显, 在 1992/1993 年间, 在北半球高纬某些地区, 甚至出现了大气中 CO₂ 浓度的负增长量^[3,10,14]. 对大气中 CO₂ 本底浓度年增长率的这种显著的年际变化, 科学家们目前尚没有一个确定的科学解释^[10,15,16].

对中国大陆上空 CO₂ 本底浓度变化的进一步分析发现, 其年增长值有较大的年际变化. 其中 1992/1993 年间, 同全球其他地区一样, 在中国上空观测到了 CO₂ 本底浓度年增长的最小值, 年增长量仅为 0.80 μL/L, 相应的年增长率为 0.22%, 这些值略高于相应的全球平均值. 而在 1997/1998 年间却出现了近 10 年来 CO₂ 年增长量 2.13 μL/L 的最高值. 对

Mauna Loa 站同期观测资料的分析结果表明, 近 10 年来, 其 CO₂ 本底浓度年增长值的最小值也出现在 1992/1993 年间, 其年增长量和相应的年增长率分别为 0.44 μL/L 和 0.12%. 可见, 虽然 1992/1993 年间在全球范围内观测到了大气中 CO₂ 本底浓度年增长率大大减慢, 但位于海岛的 Mauna Loa 上空 CO₂ 浓度增长的减慢速率明显大于相应的全球平均值, 也大于中国大陆上空观测到的相应值. 图 2 给出了近 10 年来中国大陆上空 CO₂ 本底浓度年增长量的年际变化.

为比较起见, 图 2 中同时给出了根据 Mauna Loa 站观测资料得到的相应值的年际变化. 可以发现, 近 10 年来, 尽管两个地区上空 CO₂ 本底浓度的平均增长速率十分接近(1.58%和 1.55%), 但这一增长速率的年际变化却有着明显的差异. 中国大陆上空在经历了 1992/1993 年的 CO₂ 浓度增长速率急剧放慢之后, 于 1998 年和 1999 年却观测到了较大的增长值, 年增长量分别达到了 2.13 和 1.88 μL/L, 相应的年增长率分别为 0.58%和 0.52%, 而 Mauna Loa 站的监测资料则显示, 在 1992/1993 年大气中 CO₂ 浓度年增长量出现 0.44 μL/L 的低值之后, 于 1995 年、1996 年和 1998 年均出现了大气中 CO₂ 本底浓度较大幅度的增长, 其中在 1998 年, 夏威夷群岛上空大气中 CO₂ 本底浓度的年增长量达到了 3.02 μL/L, 相应的年增长率为 0.83%. 图 2 显示, 近 10 年来, 中国上空 CO₂ 本底浓度的年增长量的年际变化范围(0.80~2.13 μL/L)远小于同期夏威夷群岛上空的相应值(0.44~3.02 μL/L), 这说明, 与海洋上空相比, 大陆地区植被的存在和人类活动对大气中 CO₂ 本底浓度年增长量的变化有着

图 2 中国大陆上空 CO₂ 本底浓度年增长量的变化

重要的调节作用。

3 中国上空大气中 CO₂ 本底浓度的季节变化

大气中 CO₂ 浓度的季节变化主要受陆地生态系统吸收和排放 CO₂ 的影响,同时海洋吸收以及某些人类活动(如生物质燃烧等)也会影响这种季节变化^[1,17]。正是由于这种原因,与南半球相比,大气中 CO₂ 浓度的季节性变化在北半球表现得十分显著。从图 1 的大气中 CO₂ 本底浓度年际变化曲线中可以发现,中国大陆上空 CO₂ 浓度呈现明显的季节性周期变化。平均而言,一年中月平均浓度最高值多出现在 4 月下旬或 5 月初,最低值则出现在每年的 7~8 月份。在观测期间,季节变化幅度的最大值为 12.49 μL/L (1991 年),最小值为 8.97 μL/L (1994 年),平均季节变化幅度为 10.35 μL/L。同期在 Mouna Loa 观测到大气中 CO₂ 本底浓度季节变化的最大值为 6.92 μL/L (1991 年),最小值为 5.48 μL/L (1998 年),平均季节变化幅度为 6.24 μL/L。可见中国大陆上空 CO₂ 本底浓度值的季节变化幅度明显大于 Mouna Loa 的相应值,这主要是由于 Mouna Loa 站位于较低纬度和较少受植被和人类活动影响。

4 中国上空大气中 CO₂ 浓度的区域变化特征

在大气 CO₂ 研究中,人们除了研究全球尺度范围内大气中的 CO₂ 浓度变化外,还十分关心大气中 CO₂ 浓度的区域性变化。大气中 CO₂ 浓度的区域变化主要取决于其源、汇的分布及其变化。根据分布在全

球各地的实际监测资料,人们已经发现,在北半球和南半球,在陆地上空和海洋上空,大气中 CO₂ 的本底浓度及其变化特征有着明显的差异。由于受陆地生态系统和人类活动的影响,在北半球大气中 CO₂ 本底浓度的区域差异及其变化特征尤为明显。中国正处在国民经济快速发展时期,由于各地区的发展水平差异较大,因此必然会导致大气中 CO₂ 浓度值的区域差别。为认识中国大陆上空 CO₂ 浓度的区域变化特征,自 1993 年以来,我们在华北地区兴隆观测站开展了大气中 CO₂ 背景浓度的监测工作,下面仅对青海瓦里关山站和华北兴隆站同期的监测结果进行对比分析。

兴隆站地处华北地区,站址位于远离局地污染源的山上。根据对监测站所处的具体地理位置和气象条件分析,可以认为该站的监测资料代表中国华北地区上空 CO₂ 浓度的区域背景值。和大陆本底站相比,兴隆站大气中的 CO₂ 浓度变化显然会受到人类活动较多的影响。由于下垫面植被类型的差异,兴隆站大气中 CO₂ 浓度的年际变化中也会具有较明显的季节变化特征。华北地区是人类活动较多的地区,工农业生产和交通运输业等在近些年来也有较大幅度的发展,这些都会对华北地区大气中 CO₂ 浓度的背景水平及其变化特征产生影响。表 1 给出了 1994~2000 年间中国大陆本底站瓦里关山和区域背景站兴隆上空 CO₂ 浓度变化的某些特征。

表 1 中国上空 CO₂ 浓度区域变化的某些特征(1994~2000 年)

地区	平均值 /μL · L ⁻¹	平均年增长量 /μL · L ⁻¹	平均年增长率/%	季节变化幅度均值 /μL · L ⁻¹	季节变化幅度最大值 /μL · L ⁻¹	季节变化幅度最小值 /μL · L ⁻¹
青海瓦里关山站	364.11	1.72	0.48	10.35	11.13	8.97
华北兴隆站	370.64	1.83	0.51	30.79	43.70	20.90

分析 1994~2000 年间瓦里关山站和兴隆站观测到的大气中 CO₂ 浓度的年际变化特征可以发现, 大气中 CO₂ 浓度的增长趋势在两个地区都是很明显的, 但观测期间两地区大气中 CO₂ 浓度的变化特征却显示出较大区域差别. 就平均状态而言, 华北地区大气中 CO₂ 浓度的区域背景值明显高于相应的大陆本底值. 兴隆站大气中 CO₂ 浓度从 1994 年的 358.88 μL/L 增至 2000 年的 369.85 μL/L, 平均年增长量为 1.83 μL/L, 平均年增长率为 0.51%, 而同期瓦里关山站大气中 CO₂ 浓度的相应增长值分别为 1.72 μL/L 和 0.48%. 重要的是, 华北地区大气中 CO₂ 背景浓度在一年之内的变化幅度明显大于青海地区的相应值. 应当特别指出的是, 1999 和 2000 年, 兴隆站大气中的 CO₂ 浓度出现负增长, 这与瓦里关山观测到的 CO₂ 浓度大气本底值的增量变化有较大的差别. 中国大陆上空大气中 CO₂ 浓度值及其变化特征的这种区域差别除了受本地区下垫面及植被特征影响之外, 华北地区工农业生产及交通运输业的发展以及能源结构调整等人类活动显然是最主要的原因.

5 结论

- (i) 近 10 年来, 中国大陆上空 CO₂ 本底浓度呈逐年增长趋势, 平均年增长量为 1.59 μL/L, 平均年增长率为 0.44%, 但年增长率的年际变化较大, 1993 年的年增长量最小, 仅为 0.80 μL/L, 而 1998 年的年增长量却高达 2.13 μL/L.
- (ii) 中国大陆上空 CO₂ 本底浓度值在一年之内呈现明显的季节变化, 低值出现在 7~8 月, 高值出现在 4~5 月, 其季节变化幅度平均为 10.35 μL/L.
- (iii) 中国华北地区上空 CO₂ 背景浓度值明显高于大陆本底值, 其季节变化幅度也大大高于代表大陆尺度的相应值.
- (iv) 与海洋大气相比, 大陆地区植被的存在和人类活动对大气中 CO₂ 本底浓度年增长量的变化有重要的调节作用.

致谢 本工作受“八五”和“九五”国家重点科技攻关计划(项目编号: 85-913-01-01, 96-911-01-04)和国家自然科学基金(批准号: 40075028)资助.

参 考 文 献

1 Dettinger M D, Ghil M. Seasonal and interannual variations of atmospheric CO₂ and climate. *Tellus*, 1998, 50B(1): 1~24

2 WMO. World Data Center for Greenhouse Gases (WDCGG) Data Summary. WDCGG, 1998, 15: 3~28

3 WMO. World Data Center for Greenhouse Gases (WDCGG) Data Summary. WDCGG, 2000, 22: 1~22

4 Kerr R A. It's official: Humans are behind most of global warming. *Science*, 2001, 291(5504): 566

5 Bradley R. 1000 years of climate change. *Science*, 2000, 288(5470): 1353~1355

6 Zwiers F W, Weaver A J. The cause of 20th century warming. *Science*, 2000, 290(5499): 2081~2083

7 Bell G D, Halpert M S, Ropelewski C F, et al. Climate assessment for 1998. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80(5): S1~S48

8 Prentice I C. The carbon cycle and atmospheric CO₂. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. *IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis* (Chapter 3). Cambridge: Cambridge Univ Press, 2001. 183~237

9 Houghton J T, Meira L G, Filho B A, et al. IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1996. 1~572

10 Schindler D W. The mysterious missing sink. *Nature*, 1999, 398(6723): 105~106

11 WMO. International Operations Handbook for Measurement of Background Atmospheric Pollution. Geneva: World Meteorological Organization, 1978, 491: 1~10

12 WMO. Operations Manual for Sampling and Analysis Techniques for Chemical Constituents in Air and Precipitation. Geneva: World Meteorological Organization, 1971, 299: 1~23

13 Wen Y P, Shao Z Q, Xu X B, et al. Observation and investigation of variability of baseline CO₂ concentration over Waliguan Mountain in Qinghai Province of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 8(3): 255~262

14 Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 1995, 375(6533): 666~670

15 刘再华. 大气 CO₂ 两个重要的汇. *科学通报*, 2000, 45(21): 2348~2351

16 方精云, 唐艳鸿, 小泉博, 等. 高纬冬季下垫面释放 CO₂ 的证据. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(6): 559~563

17 Wittenberg U, Heiman M, Esser G, et al. On the influence of biomass burning on the seasonal CO₂ signal as observed at monitoring stations. *Global Biogeochem Cycle*, 1998, 12: 531~544

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-10-780>

(2001-12-30 收稿, 2002-02-21 收修改稿)