

青藏高原臭氧的 ENSO^{*}

邹捍 季崇萍 周立波 王维 蹇泳啸

(中国科学院大气物理研究所环境与极地研究部, 北京 100029)

摘要 通过对臭氧卫星观测资料及大气环流资料的分析, 研究了青藏高原上空臭氧年际变化中的 ENSO 信号, 并与同纬度无山区及赤道地区进行比较。研究指出: 在 El Niño 年 (南方涛动指数为负), 青藏高原臭氧总量偏大, 在 La Niña 年 (南方涛动指数为正), 青藏高原臭氧总量偏小。同时讨论了与 ENSO 事件有关的大气环流物质输送。

关键词: 臭氧; ENSO; 青藏高原

1 引言

ENSO 是一种重要的热带大气海洋异常现象^[1~3], 通过大气波动的输送, 可以造成全球范围的气候异常^[4,5]。在 ENSO 年中, 赤道东太平洋海温升高, 对流活动加强, 对流层顶抬升, 从而造成整层气柱臭氧含量下降。因此, 作为大气“示踪”气体, ENSO 事件中赤道东太平洋臭氧偏小, 西太平洋偏大^[6]。邹捍的研究工作^[7]指出: 在南半球高纬度 60~70°S 地区, 臭氧变化中包含较强的 ENSO 信号, 1988 年强 La Niña 事件时, 60~70°S 臭氧分布与赤道太平洋 SST 成反位相分布, 即太平洋区对应的经度上臭氧分布东高西低, 臭氧 ENSO 信号的最大时间振幅为 50 DU 左右^[7]。Quiroz^[8]指出, El Niño 事件时, 副热带西风急流加强, 在这种环流背景下, 大气 Rossby 波水平和垂直两个方向的传播使赤道地区的环流异常被输送到中高纬; 当风场处于东风位相时, Rossby 波的传播受到抑制, 不利于赤道地区环流异常向中高纬输送。Zerofos^[9]指出南方涛动指数 (SOI) 与北美、日本、欧洲北部的臭氧总量存在统计意义上的滞后相关。Langford^[10]指出, SOI 与北美对流层臭氧距平的相关系数达 0.7, ENSO 造成对流层中 5% 的臭氧含量变化。

青藏高原的热力作用强烈影响着该地区乃至全球的大气环流^[11]。这一地区大气臭氧的长期变化势必带有这种热力影响的特征。邹捍等^[12,13]发现青藏高原上空臭氧亏损的季节变化与该地区地表加热造成的物质抬升过程密切相关, 其主要亏损由大气动力输送过程引起。本文试图从 TOMS 臭氧总量资料及大气环流资料中, 分析研究青藏高原臭氧变化与 ENSO 的关系, 并与其他地区 (赤道地区, 同纬度无山区) 进行比较。

2 资料及方法

本研究采用的臭氧总量资料为: 美国宇航局 (NASA) 提供的 TOMS 7 全球大气

2000-02-05 收到, 2000-03-06 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 40075029 和中国科学院大气物理研究所重点知识创新项目 8-2212 共同资助

臭氧总量格点资料, 时间区间为 1979 年 1 月~1992 年 12 月, 水平分辨率为纬度 1.00 度和经度 1.25 度, 单位为 DU。本文选取了 3 个区域: 25~40°N, 75~105°E (青藏高原)、25~40°N 中除青藏高原以外地区 (同纬度无山区)、5°S~5°N, 175°W~180°E (赤道地区), 使用面积加权平均[即 $\cos(\text{纬度})$ 加权平均], 得到区域平均臭氧总量。本文使用的太阳活动指数为标准化后的 10.7 cm 太阳辐射通量, 使用的准两年振荡 (QBO) 指数为标准化以后的新加坡 30 hPa 纬向风, 使用的 SOI 为标准化后的塔希堤 (Tahiti) 站与达尔文 (Darwin) 站海平面气压差。

3 分析及讨论

3.1 臭氧总量的季节变化

图 1 给出了赤道、青藏高原及同纬度无山区大气臭氧总量多年平均季节变化。可以看出, 赤道地区大气臭氧总量季节变化在 1 月达到最小值 250 DU, 9 月达到最大值 271 DU, 振幅为 21 DU; 青藏高原地区臭氧总量季节变化在 10 月达到最小值 269 DU, 3 月达到最大值 306 DU, 振幅为 37 DU; 与青藏高原同纬度的无山地区臭氧总量季节变化在 11 月达到最小值 273 DU, 4 月达到最大值 324 DU, 振幅为 51 DU (上述平均值计算的标准差均小于 12 DU)。由此可见, 赤道地区与中纬度大气臭氧季节变化的振幅和位相存在较大差异。与同纬度无山区臭氧总量季节变化相比, 青藏高原臭氧季节变化位相超前 1~2 个月, 振幅也大大减少。赤道臭氧的产生率在一年中几乎不变, 在中纬度夏季高, 冬季低, 纬度高于 60 度的区域, 冬季的产生率可以忽略不计。但是, 在各个纬度和季节臭氧含量与其产生率之间并没有直接的对应关系^[14], 臭氧水平分布的差异和变化主要是由水平涡旋和平均径圈环流的输送造成的^[15,16]。由于夏季赤道平流层向外的臭氧输送小于冬季, 该地区夏季臭氧以积累为主, 所以到秋季臭氧总量达到最大值^[17]。同理, 冬季大量臭氧从赤道送向中纬度, 青藏高原和无山区臭氧总量在冬季得以积累, 在春季达到最大值。

青藏高原被抬升的地表面吸收太阳辐射加热大气, 在对流层中形成较周围地区高的热源。这一“被抬高”的热源在对流层较高的位置形成对流及涡旋, 造成物质向上输送。对流层中向上输送的贫臭氧空气将造成整层气柱中臭氧含量下降^[12,13]。青藏高原局地臭氧亏损使该地区大气臭氧含量在各个季节均低于同纬度无山地区。高原的臭氧亏损在春季最为严重^[12], 使得臭氧季节变化的最大值受到抑制, 因此, 该地区臭氧总量季节变化的振幅也小于同纬度无山地区。

3.2 臭氧总量的年际变化

为了研究臭氧的年际变化, 从臭氧总量中除去上一节讨论的季节变化并对距平值进行 7 个月平滑处理 (使用 7 个月平滑处理的目的是过滤掉半年以下的小时间尺度扰动)。图 2 给出了赤道、青藏高原及同纬度无山区大气臭氧距平的年际变化。可以看到上述三个地区臭氧距平在 1979~1983 年较高, 自 1983 年之后逐渐下降, 1985~1987 年达到最低水平, 之后又有所回升, 但未达到原来的水平。这一变化趋势与该时间区间内的太阳活动变化相一致, 充分反映了太阳活动对大气臭氧的影响。其影响过程为: 太阳活动使得达到高层 (80 km) 大气附近的辐射能发生改变, 大气臭氧层将因太阳辐射

光化学过程而发生变化; 同时, 由于臭氧吸收太阳紫外辐射对平流层大气的热力和动力状况起着决定性的作用, 太阳辐射变化将引起大气环流和涡旋物质输送的变化, 这种变化必将造成臭氧分布的变化。另外, 从赤道和中纬度臭氧的年际变化逐渐减小的过程中, 还可以看出化学过程造成的臭氧含量的递减趋势。

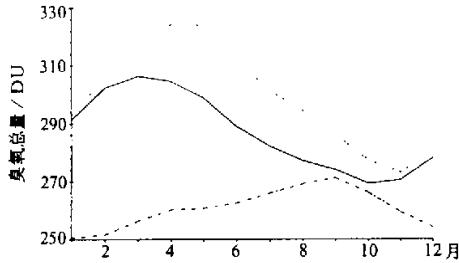


图1 大气臭氧总量多年平均季节变化

实线: 青藏高原; 虚线: 同纬度
无山区: 点实线: 赤道地区

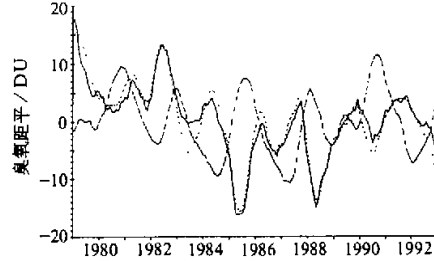


图2 大气臭氧距平时间序列

实线: 青藏高原; 虚线: 同纬度
无山区: 点实线: 赤道地区

Bowman 等^[18]指出, 赤道及以外地区大气臭氧中存在着 QBO 信号。由图 2 还可以看到, 青藏高原臭氧的年际变化中存在着明显的准两年振荡。与赤道地区平流层风场 QBO (见图 3) 相比较, 赤道地区臭氧和平流层西风的准两年振荡呈同位相变化, 而青藏高原和无山区臭氧 QBO 与热带平流层纬向风 QBO 位相相反, 也就是说, 当热带平流层东风时, 青藏高原和无山区臭氧总量偏大, 西风时, 臭氧总量偏小。

3.3 臭氧总量的 ENSO

为了分析 ENSO 对臭氧变化的影响, 必须排除太阳活动、臭氧化学亏损引起的臭氧减少趋势以及 QBO 的影响, 对于这三个时间序列也作 7 个月平滑处理。因此, 采用线性回归的方法提取臭氧变化中的 ENSO 信号。回归方程为

$$A = a_1 I_s + a_2 S + a_3 I_{\text{QBO}} + R,$$

其中, A 为臭氧距平, I_s 为太阳活动指数, S 为臭氧亏损趋势, I_{QBO} 为准两年振荡指数, R 为包含 ENSO 振荡的余项, a_1 、 a_2 和 a_3 为回归系数。青藏高原、无山区和赤道地区回归方程的复相关系数分别为 0.75、0.74 和 0.76。其 F 检验值分别为 72.13、67.18 和 72.98。由此可见, 其复回归关系显著, 臭氧年际变化明显包含了太阳活动、化学亏损和 QBO 的影响。图 4 显示利用上述回归方程得到的青藏高原、同纬度无山区和赤道地区臭氧 ENSO 信号。

由图 4 可以看出, 上述三个地区的臭氧年际变化均呈现出 3~5 年周期振荡。赤道地区臭氧余项最大值为 8 DU (1983 年 8 月), 最小值为 5 DU (1990 年 6 月); 青藏高原臭氧余项最大值为 9 DU (1982 年 5 月), 最小值为 -11 DU (1985 年 7 月); 同纬度无山区臭氧余项最大值为 10 DU (1982 年 5 月), 最小值为 -10 DU (1985 年 7 月); 在强度较大的 El Niño 期间 (1982~1983 年、1986~1987 年、1991 年) 青藏高原地区臭氧总量偏大, 在强 La Niña 期间 (1988 年) 臭氧总量偏小。但也可以看到, 臭氧总

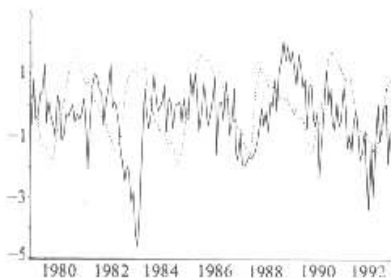


图3 南方涛动指数 SOI (实线) 和 QBO 指数 (虚线) 时间序列

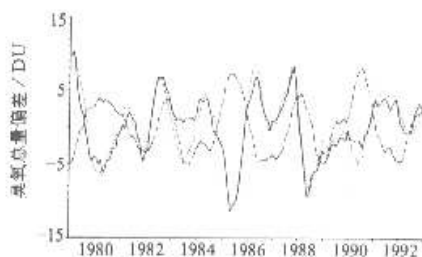


图4 除去太阳活动、化学亏损和 QBO 的臭氧偏差
实线: 青藏高原; 虚线: 同纬度
无山区; 点实线: 赤道地区

量偏小并不总与 La Niña 事件相联系, 例如 1980/1981、1985/1986 属于正常年份, 但臭氧也有较大的负距平 (-6 DU 和 -11 DU)。

图 5 给出了赤道地区 ($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$) 臭氧总量的纬向距平。与图 3 比较, 可以看到赤道地区臭氧总量变化中存在明显的 ENSO 信号, 东西太平洋臭氧总量的振荡与 ENSO 反位相。图 6 给出了 $25 \sim 40^{\circ}\text{N}$ 臭氧总量的纬向距平, 可以看出, 不同于南半球高纬度^[7], 该地区臭氧纬向分布没有出现明显的东西太平洋区域年际间振荡, 其东西太平洋区域的距平差远远小于 TOMS 资料的观测误差 (3%、大约 9 DU)。

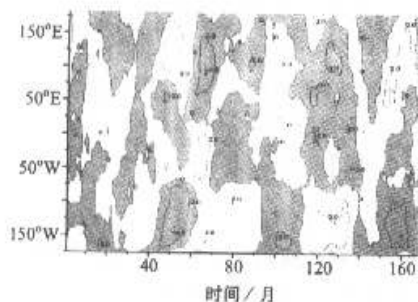


图5 赤道地区臭氧变化的纬向距平
等值线间距: 2 DU, 阴影区为负值

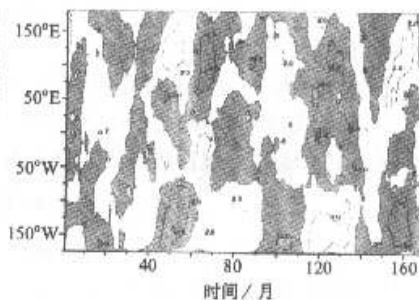


图6 $25 \sim 40^{\circ}\text{N}$ 地区臭氧变化的纬向距平
等值线间距: 2 DU, 阴影区为负值

与南半球中高纬度相比^[7], 可以看出: 在 ENSO 事件时, 青藏高原所在的北半球中纬度东西太平洋地区不存在明显的臭氧空间振荡 (见图 6), 但是存在整个纬圈臭氧与 ENSO 指数间的反位相振荡 (见图 4)。上述振荡过程可以用 Quiroz 等^[17]对大气环流 ENSO 振荡的分析来解释: El Niño 事件时, 如果副热带西风急流加强, Rossby 波水平和垂直两个方向的传播使赤道地区的环流异常被输送到中高纬; 当风场处于东风位相时, Rossby 波的传播受到抑制, 不利于赤道地区环流异常向中高纬的输送。另外, 从邹捍对南半球中高纬度臭氧 ENSO 信号的分析 (见参考文献[7]中图 5) 可见, 南半

球中高纬度臭氧 ENSO 信号的振幅大约为 50 DU, 而青藏高原及其同纬度无山区的臭氧 ENSO 振荡最大振幅约为 20 DU, 远远小于南半球。因此, ENSO 事件对北半球中高纬度臭氧变化的影响以及 ENSO 振荡向高纬度的传播动力学过程和路径等问题都有待于进一步的研究。

4 结论

从上述研究中可以得到如下结论:

- (1) 青藏高原臭氧总量的季节变化受到大气环流沿经圈物质输送的影响。
- (2) 青藏高原臭氧总量的年际变化受到太阳辐射周期变化、化学亏损过程以及 QBO 的明显影响。
- (3) 青藏高原及同纬度无山区臭氧总量的年际变化存在 3~5 年的周期振荡, 最大振幅为 20 DU, 远小于南半球中高纬度臭氧 ENSO 信号的振幅, 其位相在强 El Niño 和 La Niña 事件时与 SOI 呈反相关。
- (4) 在强 El Niño 和 La Niña 事件时, 北半球中高纬度臭氧变化没有明显的东西太平洋区域间的振荡, 这与南半球中高纬度的臭氧 ENSO 信号不同。
- (5) ENSO 振荡向北半球中高纬度的传播以及对该地区臭氧总量的影响机制还有待于进一步的研究。

致 谢 感谢美国 Ozone Processing Team, NASA / Goddard Space Flight Center 提供有关臭氧总量资料, the National Research Council of Canada 提供 10.7 cm 太阳辐射通量资料, NCAR 提供标准 SOI 和 QBO 指数。

参 考 文 献

- 1 Walker, G. T. and E. W. Bliss, World weather V, *Mem. R. Meteor. Soc.*, 1932, **4**, 53~84.
- 2 Horel, J. D. and J. M. Wallace, Planetary-scale atmosphere phenomena associated with the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**, 813~829.
- 3 Karoly, D. J., Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño / Southern Oscillation event, *J. Clim.*, 1989, **2**, 1239~1252.
- 4 Simmons, A. J., The forcing of stationary wave motion by tropical diabatic heating, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1982, **108**, 503~534.
- 5 Holton, J. R. and H. -C. Tan, The influence of the equatorial quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**, 2200~2208.
- 6 Shiotani, M., Annual, quasi-biennial, and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) time-scale variations in equatorial ozone, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 7625~7633.
- 7 Zou Han and Gao Yongqi, Long-term variation in TOMS ozone over 60~70°S, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**, 2295~2298.
- 8 Quiroz, R. S., Relationships among the stratospheric and tropospheric zonal flows and Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 143~154.
- 9 Zerefos, C. S., F. B. Alkviadis and I. S. Zosmas, On the relative importance of quasi-biennial and El Niño / Southern Oscillation in the revised total ozone records, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 10135~10144.
- 10 Langford, A. O., M. H. Proffitt, T. E. VaZandt and J.-F. Lamarque, Modulation of tropospheric ozone by a

- propagating gravity wave, *J. Geophys. Res.*, **101**(D21), 26605~26613.
- 11 叶笃正, 高由禧等, 青藏高原气象学, 北京: 科学出版社, 1979, 213pp.
 - 12 Zou Han, Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**, 1029~1032.
 - 13 Zou Han and Gao Yongqi, Vertical ozone profile over Tibet using Sage I and II data, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**, 505~512.
 - 14 王贵勤等, 大气臭氧研究, 北京: 科学出版社, 1985, 494pp.
 - 15 Dukerton, T. J., and M. P. Baldwin, Quasi-biennial modulation of planetary-wave fluxes in the Northern Hemispheric winter, *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**, 1043~1061.
 - 16 Holton, J. R., *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academy Press, San Diego, California, USA, 3rd Ed., 1992, 403~432.
 - 17 WMO, Atmosphere ozone 1985, Assessment of our understanding of process controlling its distribution and change, Global ozone research and monitoring project, 1985, Rep. 16, Geneva, 331~143.

ENSO Signal in Total Ozone over Tibet

Zou Han, Ji Chongping, Zhou Libo, Wang Wei and Jiang Yongxiao

(*Environment and Polar Program, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract Based on the analysis of satellite ozone observation and atmospheric circulation data, this study discusses the ENSO signal in the inter-annual variation of Tibet total ozone, comparing with the tropics and non-mountain zone at the same latitudes of Tibet. It is shown that the Tibet ozone increases in El Niño events and decreases in La Niña events, with weakened amplitudes compared with the Southern Hemisphere. In addition this article discusses the mass transportation related to the ozone variations.

Key words: ozone; ENSO; Tibet.