

60~70°S 臭氧总量的 QBO 和 ENSO 信号

邹 捍 郜永祺

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要 本文利用 Nimbus-7 上搭载的臭氧总量观测光谱仪 (TOMS) 得到的 60~70°S 纬圈中臭氧总量资料, 分析研究了该地区臭氧总量准两年振荡 (QBO) 和 ENSO 信号的纬向分布, 指出在该纬圈臭氧总量的长期变化中包含着的 QBO 和 ENSO 信号。同时, 本文还分析研究了沿纬圈分布的大气臭氧总量季节变化和长期变化趋势, 指出在该纬圈各个季节中臭氧总量呈下降趋势, 以 60~100°W 十月份的下降最大, 达到 -9.3 DU/a 。研究同时表明: 臭氧总量季节变化、长期变化趋势、以及 QBO 信号的纬向分布都在西南极上空出现异常。本文对此进行了讨论, 认为这是西南极海陆分布调整大气环流及大气波动造成对臭氧总量分布和变化的影响。

关键词 臭氧总量 季节变化 QBO ENSO

1 前言

大气中的臭氧是一种温室气体, 它吸收太阳的短波辐射和地气系统的长波辐射, 加热大气。通过调整大气的加热场, 大气臭氧含量和分布的变化能够影响全球气候变化。同时, 大气中的臭氧吸收来自太阳的紫外辐射, 使地球的人类及生物圈受到保护。波长小于 242 nm 的太阳辐射在平流层上层分解氧分子 (O_2) 为氧原子 (O), 氧原子与其它氧分子反应生成臭氧 (O_3)。臭氧的消亡主要是通过光化学反应和有氮、氢氧根、氯和溴参与的催化反应。同时, 大气环流及涡旋的输运对臭氧的分布起着重要的作用^[1~3]。在对臭氧分布和变化的研究中, 人们发现全球大部分地区的臭氧总量在不断下降^[4~9]。

自南极臭氧洞被发现以来^[10], 南极上空臭氧的变化引起了科学家的极大重视, 大量的研究工作揭示出南极臭氧洞的特征及形成机制, 指出, 在极夜期间, 极强而均匀的极地涡旋 (绕极环流) 阻止了较低纬度向极地的臭氧输送。同时, 发生在南极极夜平流层冰晶云中的非均相化学反应使该地区的臭氧减少, 从而造成春季的臭氧最小值。春季太阳升起以后, 南半球地形的不均匀加热使得大气波动增强, 极地涡旋减弱, 臭氧的南北向输送也增强。平流层温度的上升使冰晶云逐渐消散, 破坏臭氧的非均相化学反应停止, 南极地区臭氧总量得以恢复^[2,11,12]。

60~70°S 纬度带位于南极大陆边缘的南大洋上, 同时处于在南极臭氧洞形成中起重要作用的极地涡旋中。该纬度带是南极地区臭氧与外界交换的一个必经区域。但是, 值得注意的是, 该纬圈中西南极地形分布的不均匀可能对该地区大气环流及行星波动产

生影响,从而影响臭氧总量分布及变化的特征。因此,研究该纬度带沿纬圈分布的臭氧季节变化、变化趋势及其与气候信号的关系是非常重要的。过去的一些研究曾将这一地区作为全球的一部分,研究了该地区臭氧的纬向平均特征及其与气候信号的关系。例如,Bowman 等^[13]利用 TOMS 资料给出了全球纬向平均的臭氧总量分布。Stolarski 等^[7,8]研究了包括 $60\sim 70^{\circ}\text{S}$ 的全球纬圈平均臭氧总量变化趋势的季节分布。Bowman 等^[14~16]研究了高纬度地区纬向平均或单站的臭氧准两年振荡,得到了较好的 QBO 信号。但是,到目前为止,对该纬度带中臭氧总量沿纬向分布的变化特征尚缺乏研究。科学家们^[17~19]曾研究了大气臭氧中的 ENSO 信号,指出在赤道太平洋地区臭氧总量的长期变化中存在明显的 ENSO 信号。这种大气臭氧 ENSO 信号与大气环流及大气温度的 ENSO 振荡之间存在很好的相关,并且可以在赤道地区以外观测到大气臭氧中的 ENSO 信号。但是,对于南半球高纬度的臭氧总量 ENSO 信号尚无详细讨论。

本文将就 $60\sim 70^{\circ}\text{S}$ 纬圈臭氧总量季节变化、变化趋势、QBO 信号和 ENSO 信号的纬向分布进行研究,以加深对南半球高纬度地区臭氧总量分布及变化的认识,同时探索西南极海陆分布的不均匀对臭氧总量分布和变化的影响。

2 资料

本文使用的大气臭氧总量资料是美国宇航局(NASA)提供的 Nimbus-7 卫星上搭载的臭氧总量观测光谱仪(TOMS)得到的全球大气臭氧分布资料(TOMS Ozone Version 6)。时间区间为 1979 年 1 月~1991 年 12 月;覆盖区域为全球(除极夜区域外);时间分辨率为 1 d;水平空间分辨率为 1 纬度 $\times$ 1.25 经度;单位为 DU。为进行本文所述的研究,从上述资料集中提取 $60\sim 70^{\circ}\text{S}$ 中的臭氧总量,并将资料平均到 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 格点上,再进行经向平均得到沿纬向分布的每 5 个经度的臭氧总量资料。

本文中,赤道大气环流准两年振荡(QBO)指数取标准化后的新加坡上空 30 hPa 纬向风。南方涛动指数(SOI)使用标准化后 Tahiti 岛(18°S , 150°W)和 Darwin (12°S , 131°E)两地海平面气压梯度。

3 分析与讨论

3.1 季节变化

在 1979~1991 年中进行时间平均,可计算出沿 $60\sim 70^{\circ}\text{S}$ 纬圈各经度臭氧总量的季节变化(图 1)。进行纬向平均得到该纬圈中臭氧总量的季节变化(图 2)。从图 2 可以看出:该纬圈中臭氧总量的气候平均值为 321 DU,最大值为 358 DU(11 月),最小值为 306 DU(9 月)。在该纬度带中,春季(9 月)臭氧总量的极小值并不明显,秋季的臭氧总量(4 月,307 DU)与其相当。从纬向分布看(图 1),春秋两季的臭氧总量极小值主要出现在 60°W (南极半岛附近),分别在 5、9 月份,其极大值在 12 月。纬向平均中 11 月份的极大值实际上发生在 160°E 附近(中心为 396 DU)。Bowman 等^[13]研究了南半球各纬圈平均的臭氧总量季节变化,指出南半球中纬度($30\sim 60^{\circ}\text{S}$)臭氧总量季节变化的极大值在 11 月份,极小值在 4 月份;而 70°S 以上纬度的极小值在

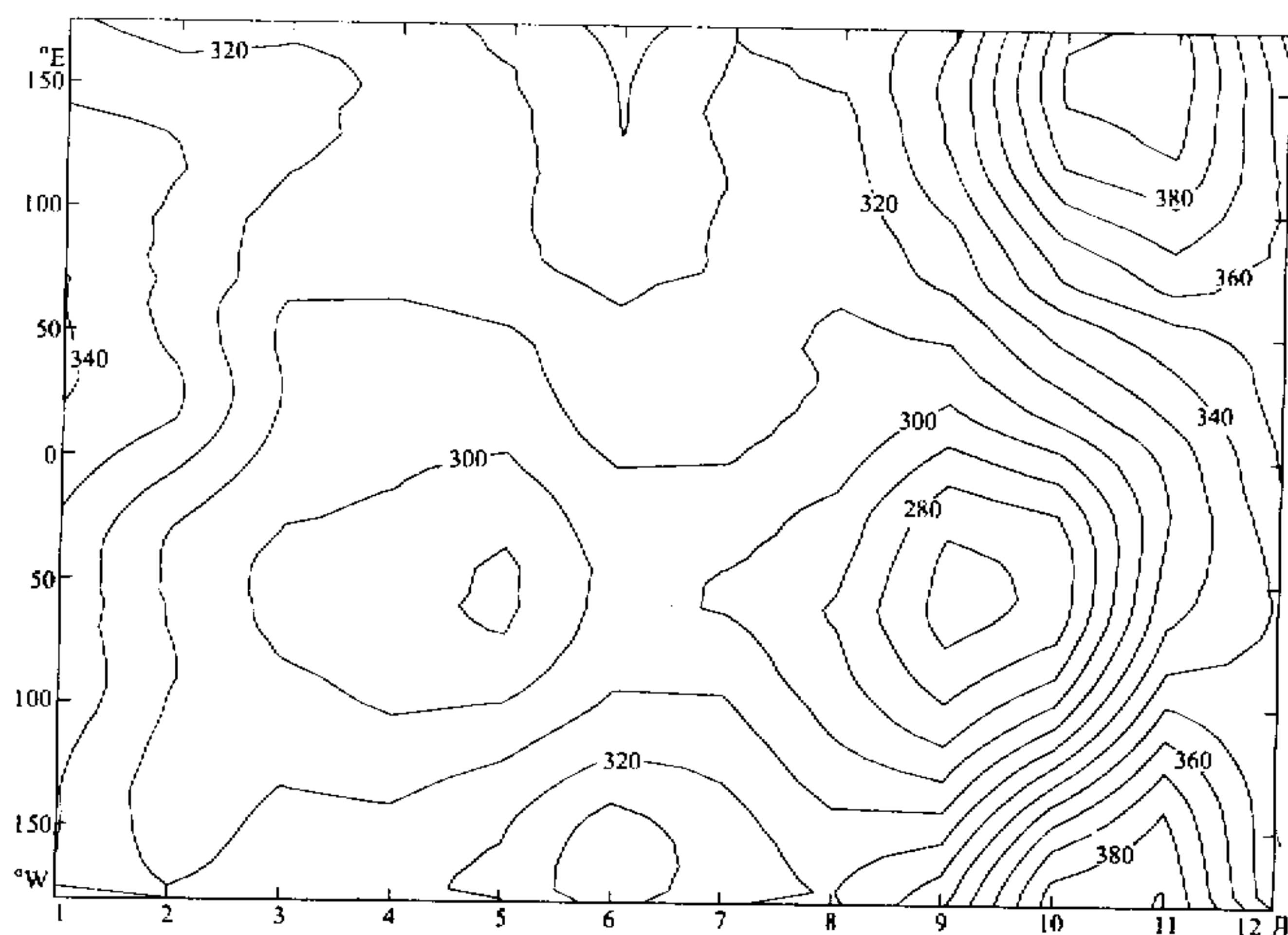


图 1 60~70°S 臭氧总量的经度-季节分布。等值线间隔 10 DU

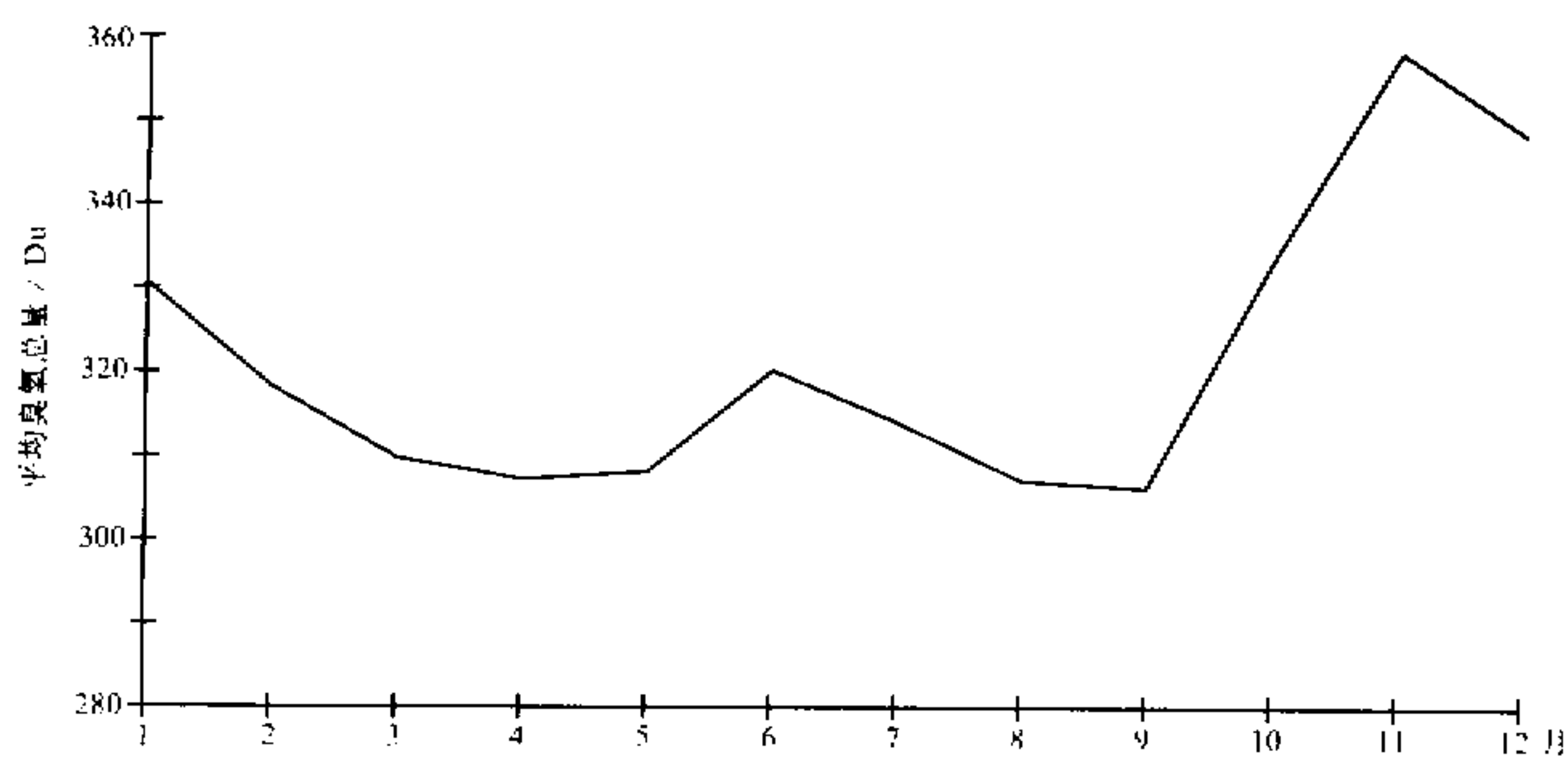


图 2 60~70°S 臭氧总量纬向平均的季节变化

10 月份 (南极臭氧洞), 另一个极小值在春季, 其极大值在冬季。由此可以看出: 在 60~70°S 中, 60°W 附近的臭氧季节变化基本与南极大陆上空臭氧总量的季节变化相一致, 而 160°E 附近的季节变化则基本代表了南半球中纬度的变化特征。在 60~70°S 中, 这一纬向季节变化特征可能是由于南极半岛附近西南极海陆分布造成的下垫面加热不均匀所引起的。这种不均匀的加热可以产生较同纬度其它地区强烈的大气波动, 从而

使得该地区臭氧的南北交换增强。因此,这一地区的臭氧总量季节变化带有较强的南极大陆臭氧总量季节变化的特征。总之,60~70°S 臭氧总量的季节变化是由南半球中纬度与南极大陆臭氧总量季节变化特征两部分组成的。

3.2 变化趋势

很多科学工作者对全球臭氧总量的长期变化趋势进行了研究^[7~9],指出除赤道少数地区外全球大部分地区的臭氧总量正在减少。使用线性回归的方法,本文计算了60~70°S 纬圈中各经度上臭氧总量变化趋势的季节分布(图3)和该纬度带平均的臭氧总量变化趋势(图4)。从图4可以看出:60~70°S 纬圈的中臭氧总量在1979~1991这13年中的各个月份中都呈现出下降趋势。变化趋势的年平均值为-3.59 DU/a,最小值为-7.04 DU/a(10月份),最大值为-1.61 DU/a(2月份)。这一结果与文献[8]的纬圈平均结果相近。由图3的纬向分布可以看出:对纬向平均极小值的主要贡献来自60~100°W。从南半球纬向平均臭氧总量长期变化的季节变化^[8]来看,臭氧总量的减少主要在60°S以南,其最大减少率在南极极点(10月份),而30~60°S中的臭氧总量减少明显缓慢。就时间和减少幅度而言,60~100°W中的臭氧最大递减率(-9.30 DU/a,10月份)与南极大陆的臭氧总量变化趋势相符。其它经度的变化趋势与中纬度臭氧总量趋势的季节分布相同。这也表明,南极半岛附近西南极的海陆分布使该地区臭氧总量变化趋势的季节分布与南极大陆臭氧总量变化趋势的季节分布相接近。

3.3 QBO

由于赤道地区上传 Kelvin 波和混合 Rossby 重力波在一定条件下产生准两年周期的平流层西风 and 东风加速(QBO)^[20]。平流层东西风的变化通过热成风平衡关系影响该

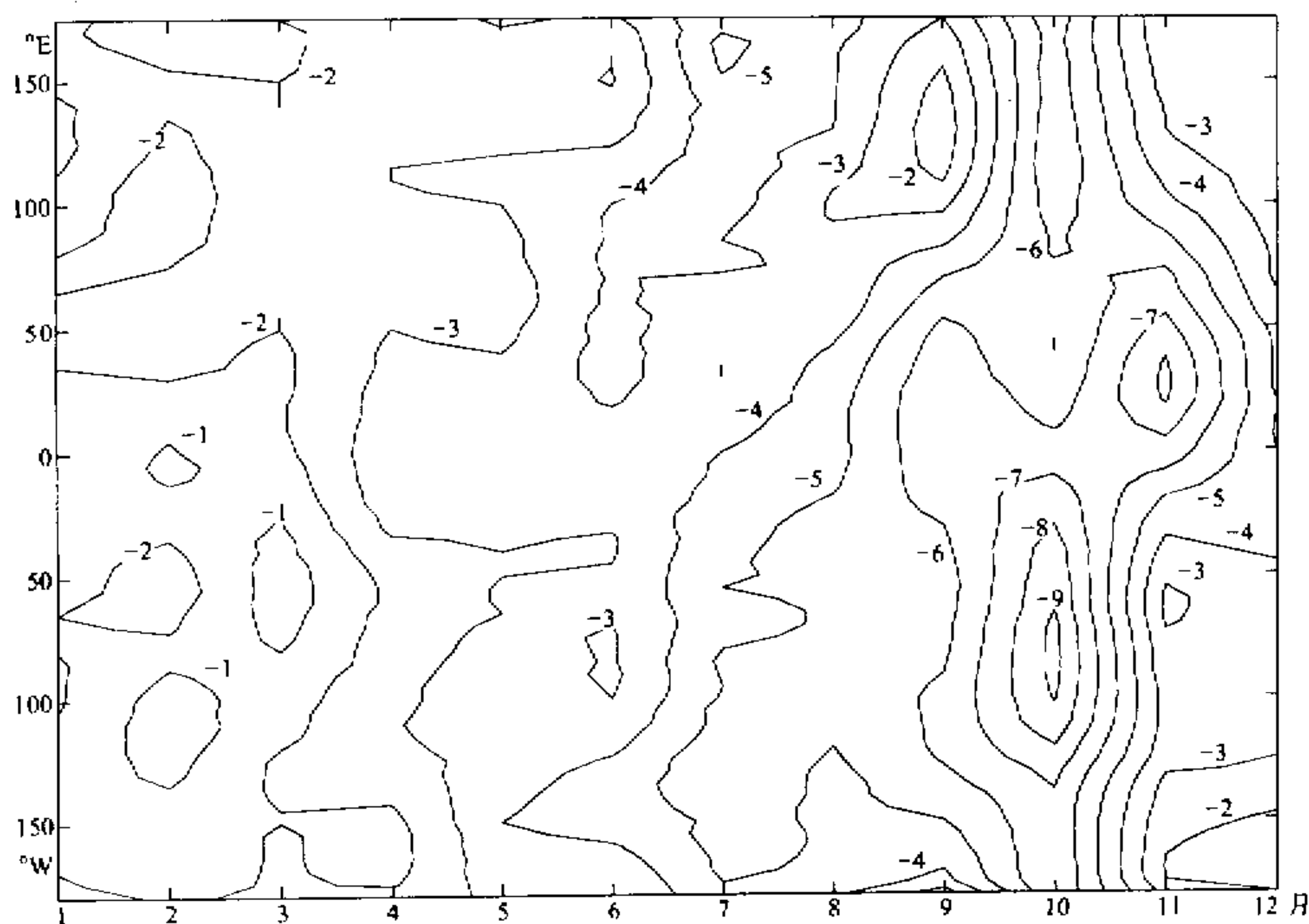


图3 60~70°S 臭氧总量长期变化趋势的经度-季节分布。等值线间隔 1 DU/a

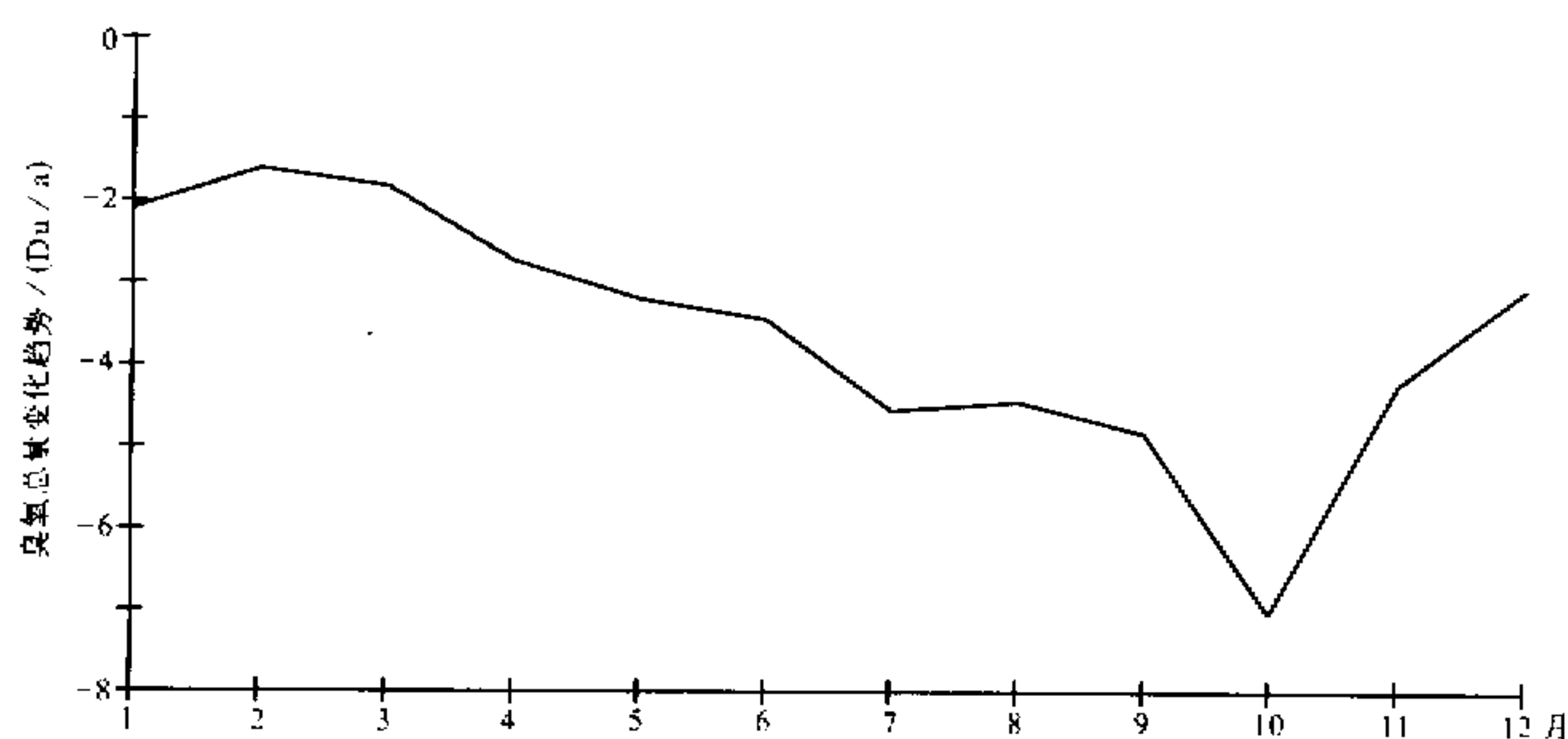


图 4 60~70°S 臭氧总量长期变化趋势纬向平均季节变化

地区平流层低层的温度场。由温度场的变化, 可以诱导出经向环流的变化, 从而调整 Hadley 环流。因此, 赤道地区的 QBO 可以影响到赤道以外的地区。通过 QBO 对大气环流的影响, 行星波动对臭氧的输送也受到 QBO 的影响^[14,21,22]。因此, 赤道地区以外的臭氧中可以存在 QBO 信号。

从臭氧总量资料中减去第一节中所述的季节变化, 并进行 7 点平滑, 我们可以得到 60~70°S 纬圈中臭氧总量的距平值 (图 5)。从图 5 中我们可以看到在各个经度上臭氧总量距平中存在着周期为 22~31 个月的低频振荡。

从新加坡上空 30 hPa 的西风风速减去季节变化, 并进行标准化和 7 点平滑, 我们可以得到大气环流的准两年振荡 (QBO) 指数。将 QBO 指数的逐月变化与 60~70°S 纬圈中臭氧距平的平均值比较 (图 6), 我们可以看到 60~70°S 臭氧总量的距平值中存在着与 QBO 指数相关的周期性变化。

由于准两年振荡本身就不是标准的周期变化, 因此有必要按 QBO 的变化周期检查臭氧总量的变化。我们对臭氧总量距平值进行了“强加信号” (superimposed “epoch”) 处理^[16], 即以 QBO 指数由负值变为正值 (即新加坡上空 30 hPa 纬向风由东风变为西风) 的各月份作为“零”, 将超前和滞后 27 个月以内的臭氧总量距平值进行平均得到臭氧与 QBO 指数相关的变化 (图 7)。Naujokat^[23]和 Labitzke 等^[24]曾指出赤道西风 QBO 指数变化的平均周期为 28 个月, 东风和西风区间分别为 10 和 18 个月。因此, 在图 7 中超前 18 个月和滞后 10 个月以上结果的置信度较低。

从图 7 可以看出: 在超前赤道平流层东西风转换的 -2~12 个月中, 60~70°S 纬圈的大部分经度上臭氧总量距平值为负值, 区间长度为 14 个月。在滞后 -2~-19 个月中, 臭氧距平值为正值, 区间长度为 17 个月。同时, 在超前 12~24 个月臭氧距平值也为正值, 区间长度为 12 个月。基本上可以说: 赤道平流层东风对应 60~70°S 纬圈中臭氧总量的正距平, 而西风则对应臭氧总量的负距平。但是, 值得注意的是: 在以 0~60°W 为中心的经度范围内臭氧总量距平值变化出现位相偏移, 滞后大约 4~5 个月;

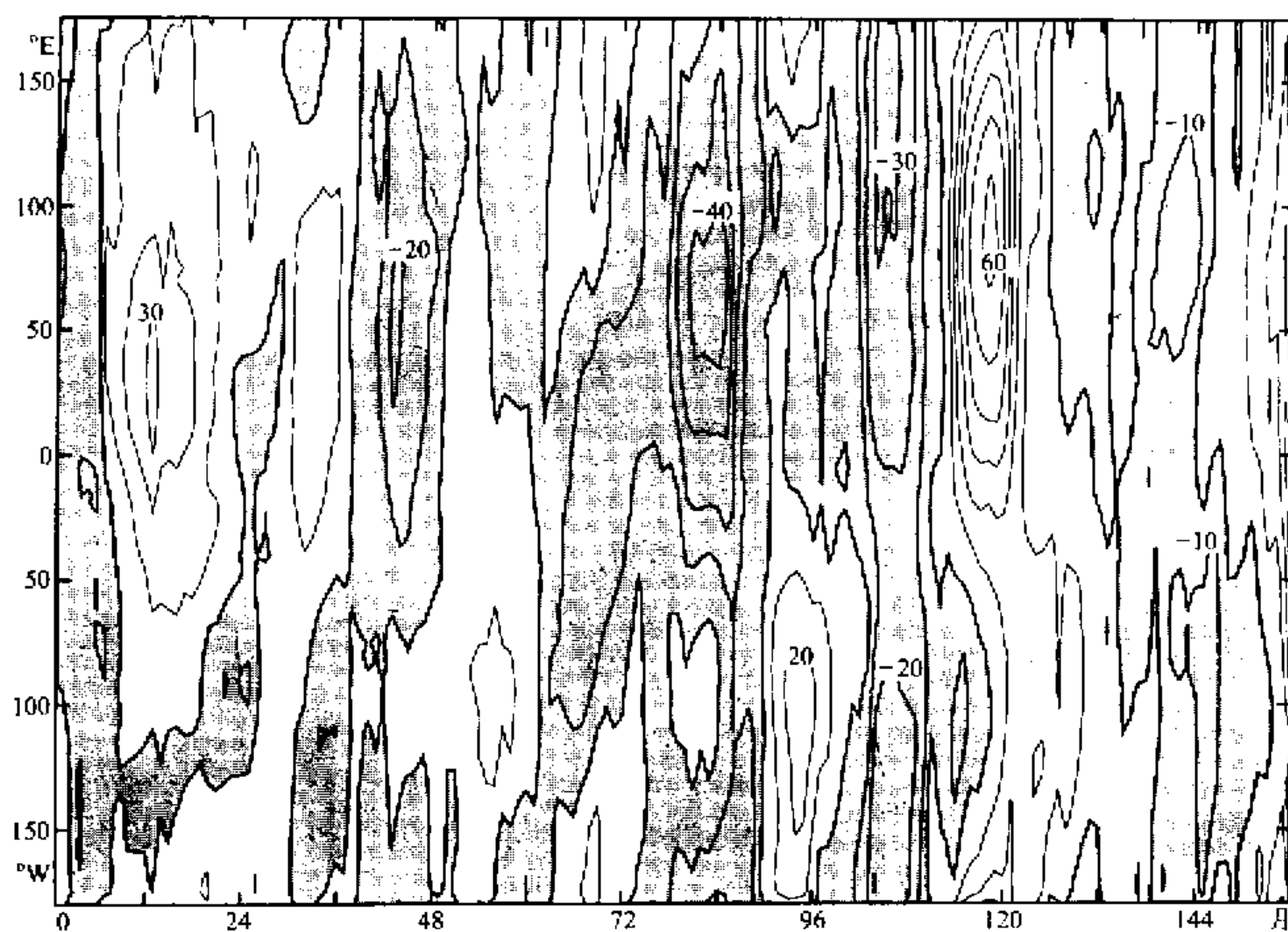


图 5 60~70°S 臭氧总量距平值的经度-季节分布。等值线间隔 10 DU，阴影区为负值

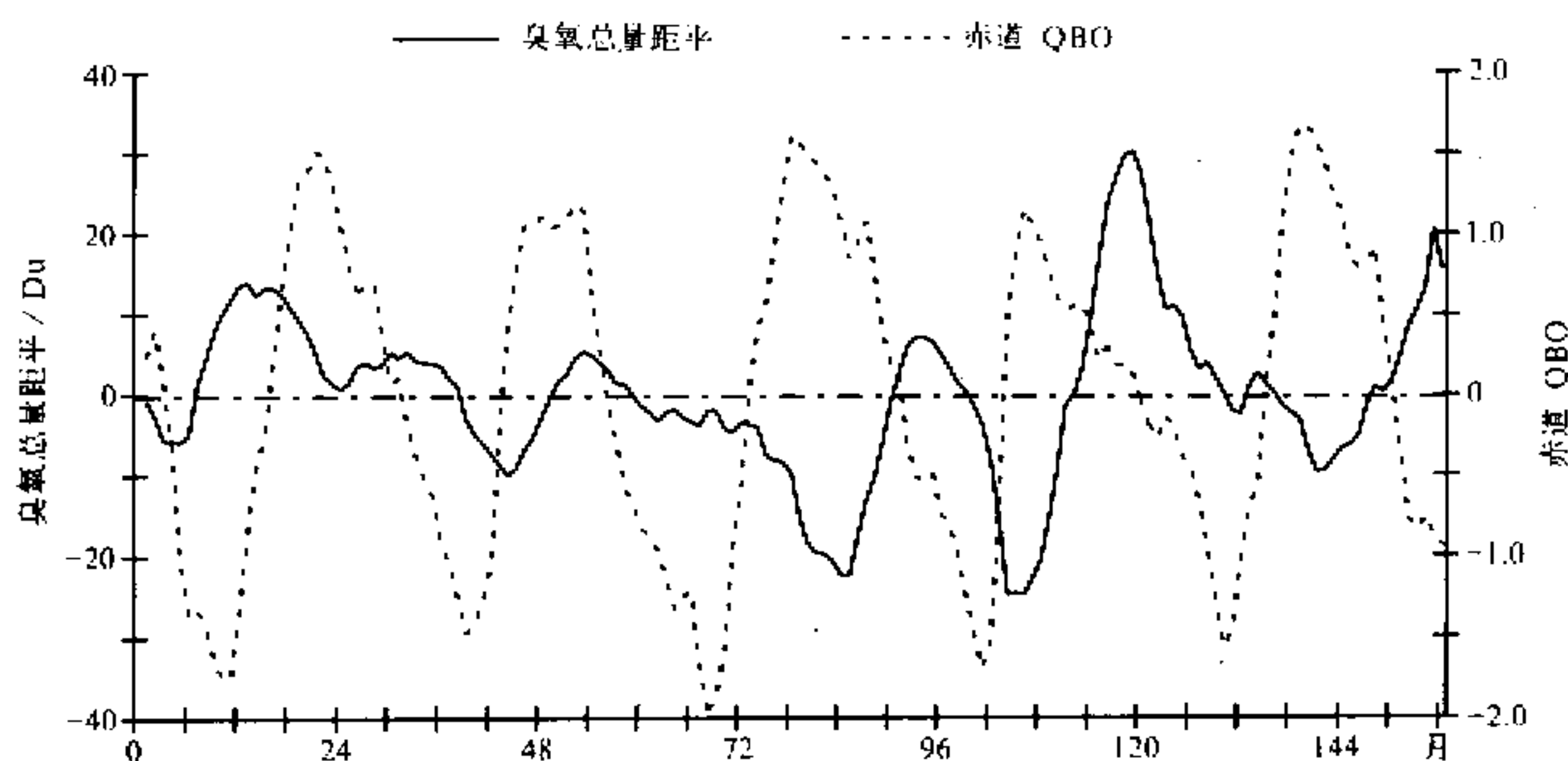


图 6 60~70°S 平均臭氧总量距平值与赤道 QBO 指数

在 60~120°W 左右出现位相超前大约 3 个月。这两个位相偏移位于南极半岛 (60°W) 的两侧，再次说明了西南极海陆分布的重要性。如前所述，南极半岛附近西南极相对于东南极异常的海陆分布，可以导致在该区域异常的大气波动及垂直运动。这种异常的大气波动和垂直运动可以影响该地区臭氧 QBO 信号。但其具体过程尚待进一步研究。

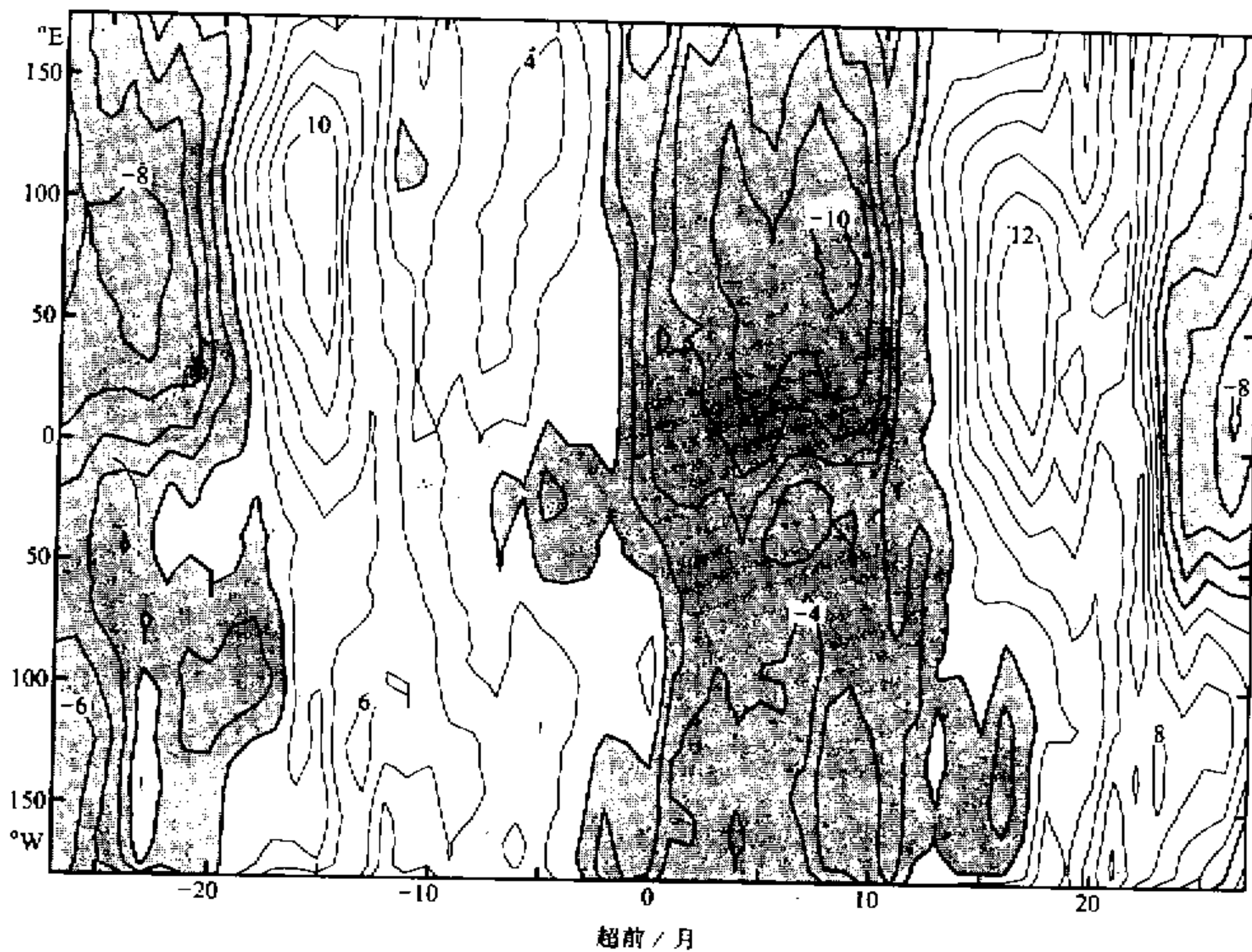


图 7 与赤道 QBO 指数相关的 60~70°S 臭氧总量距平值的经度-季节分布。
等值线间隔 2 DU, 阴影区为负值

3.4 ENSO

东西太平洋海平面气压在长期变化中存在着明显的反相关。这是一种影响全球气候异常的现象,称为南方涛动(SO)。它与厄尔尼诺现象紧密相关,被统称为 ENSO。由于 ENSO 的发生可以影响到全球的大气及海洋环流^[25],因此以大气为载体的大气臭氧也将受到这一现象的影响。在大气臭氧的长期变化中也应存在 ENSO 信号。研究指出:El Nino 事件时,在赤道东太平洋海域,海表温度上升使得该地区的对流和垂直运动增强,从而引起对流层顶的升高^[17]。抬高的对流层顶有利于使贫臭氧的对流层大气进入平流层低层,因而引起大气臭氧总量减少。在赤道西太平洋大气臭氧将相对增加。依靠 Hadley 环流和大气波动的传播,这种大气臭氧的振荡也将影响到高纬度。

从第 3.3 节中得到的臭氧总量的时间距平值中减去臭氧总量的纬向平均值,我们可以得到 60~70°S 中臭氧总量的纬向距平值(图 8)。我们可以看到在 60~70°S 中存在着若干年为周期的臭氧总量东高西低和西高东低的低频振荡。与大气南方涛动指数(SOI)(图 9)相对照,在 SOI 明显异常的时,我们可以发现 60~70°S 臭氧总量的分布与 SOI 具有相反的位相。例如,1979 年 1 月起的第 40~50、92~110 个月,SOI 为负值(太平洋气压为西高东低),同时,60~70°S 中 100°W~100°E 臭氧总量分布为东高西低。第 114~130 个月,SOI 为正值(太平洋气压为东高西低),同时,60~70°S 中 100°W~100°E 臭氧总量分布为西高东低。因此,我们可以认为南半球高纬度的臭氧总量也受到全球范围内 ENSO 的影响,存在明显的 ENSO 信号。

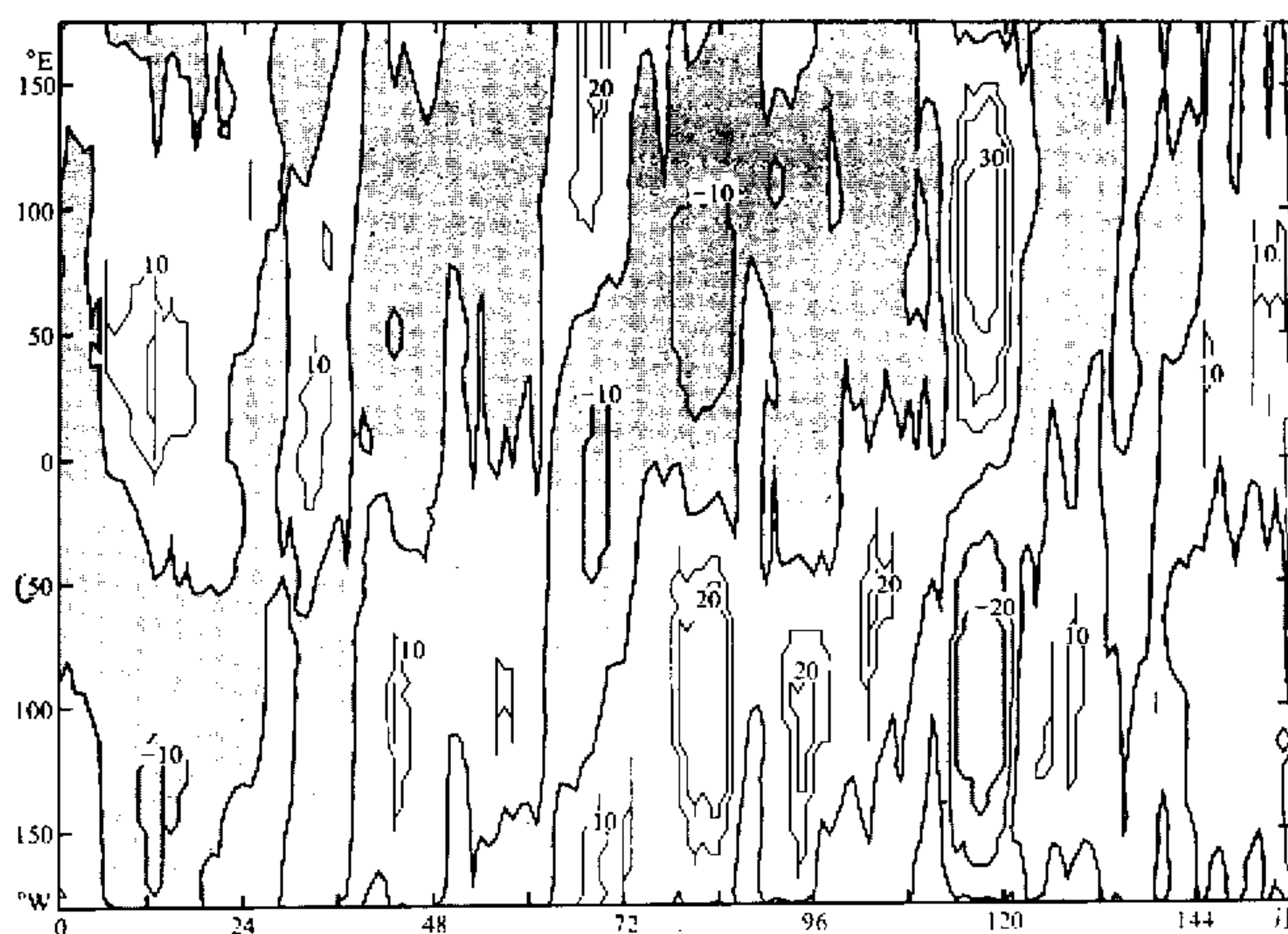


图8 60~70°S 臭氧总量纬向距平的经度-时间分布。等值线间隔为 10 DU, 阴影区为负值

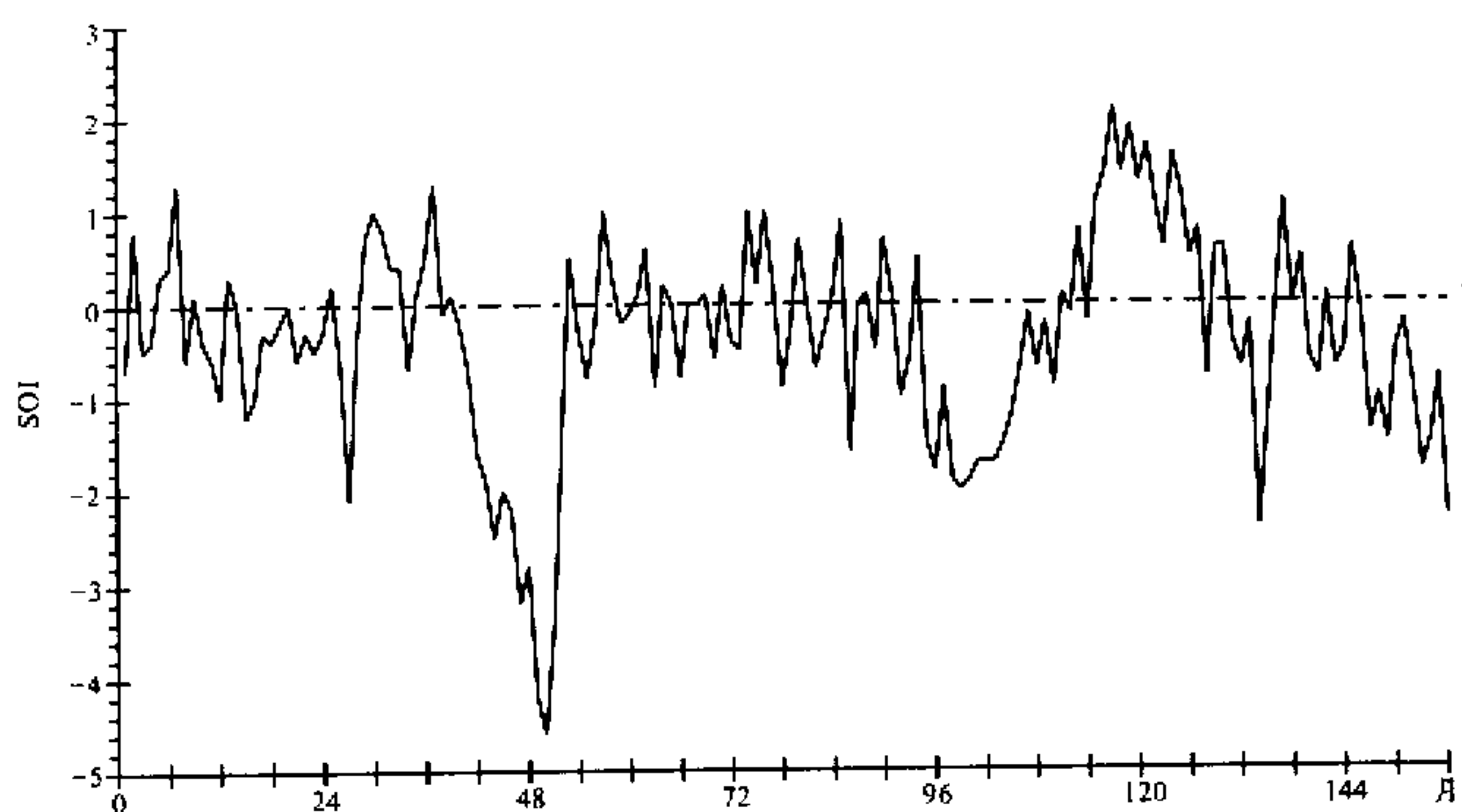


图9 南方涛动指数 (SOI)

4 结论

通过对 60~70°S 纬圈中臭氧总量季节变化、变化趋势和 QBO 沿纬向分布的研究, 我们可以得到如下结论:

(1) 南极半岛附近臭氧总量的季节变化接近于南极大陆上空臭氧总量的季节变化, 而其它经度臭氧总量的季节变化接近于中纬度臭氧总量的季节变化。

(2) 南极半岛附近臭氧总量变化趋势的季节分布接近于南极大陆上空臭氧总量变化趋势的季节分布, 而其它经度臭氧总量变化趋势的季节分布接近于中纬度臭氧总量变化趋势的季节分布。

(3) 南极半岛附近, 臭氧总量 QBO 与赤道西风 QBO 之间的位相差产生较大变化。

(4) 除南极半岛附近地区外, 60~70°S 纬圈上臭氧总量 QBO 与赤道地区平流层西风 QBO 之间位相相反。

由此, 可以看出西南极海陆分布的存在影响了该地区臭氧总量的季节变化、变化趋势和准两年振荡。

(5) 在南半球高纬度, 我们同样可以观测到大气臭氧总量中的厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 信号。

致 谢 中国科学院大气物理研究所的高登义和宋正山教授对此工作给予了有意义的讨论和帮助, 作者在此向他们表示衷心的感谢。同时, 作者在此向提供 TOMS 臭氧总量资料的 Ms. Patricia T. Guimaraes, Dr. Richard D. Mcpeters, Dr. Arlin J. Krueger, Mr. David E. Larko (NASA Goddard Space Flight Center) 表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 WMO, 1985, Atmospheric ozone 1985, Assessment of our understanding of process controlling its distribution and change, Global ozone research and monitoring project, rept. 16, Geneva.
- 2 WMO, 1991, Scientific assessment of ozone depletion: 1991, Global ozone research and monitoring project, rept. 25, Geneva.
- 3 Holton, J. R., 1992, *An introduction to dynamic meteorology*, Americ Press, Inc., San Diego, California, USA.
- 4 魏鼎文、赵延亮、秦芳、郭世昌, 1994, 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化, 科学通报, 39(16), 1509~1511.
- 5 郑向东、周秀骥、陆龙骅、郭松, 1995, 1993 年中山站南极臭氧洞“臭氧洞”的观测研究, 科学通报, 40(6), 533~535.
- 6 Zhou, Xiuji and Chao Luo, 1994, Ozone valley over Tibetan Plateau, *Acta Meteorologica Sinica*, 8(4), 505~506.
- 7 Reinsel, G. C., G. C. Tiao, D. J. Wuebbles, J. B. Kerr, A. J. Miller, R. M. Nagatani, L. Bishop and L. H. Ying, 1994, Seasonal trend analysis of published ground-based and TOMS total ozone data through 1991, *J. Geophys. Res.*, 99(D3), 5449~5464.
- 8 Stolarski, R., R. Bojkov, L. Bishop, C. Zerefos, J. Stachelin and J. Zawodny, 1992, Measured trends in stratospheric ozone, *Science*, 256, 342~349.
- 9 Zou Han, 1996, Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet, *Geophys. Res. Lett.*, 23(9), 1029~1032.
- 10 Farman, J. G. and J. D. Shaklin, 1985, Large losses of total ozone in Antarctic reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207~210.
- 11 曲绍厚, 1992, 南极上空“臭氧洞”形成和演变分析研究, 高原气象, 11(1), 83~89.
- 12 邹捍, 1990, 1988 年 8 月下旬南极平流层爆发性增温及其与臭氧的关系, 南极研究, 2(3), 25~28.
- 13 Bowman, K. P. and A. J. Krueger, 1985, A global climatology of total ozone from the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), *J. Geophys. Res.*, 90, 7967~7976.
- 14 Bowman, K. P., 1989, Global pattern of the quasi-biennial oscillation in total ozone, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3328~

- 3343.
- 15 Tung, K. K. and H. Yang, 1994, Global QBO in circulation and ozone, I, reexamination of observational evidence, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 2699~2707.
 - 16 Sitnov, S. A., 1996, Vertical structure of the extratropic quasi-biennial oscillation in ozone, temperature, and wind derived from ozonesonde data, *J. Geophys. Res.*, **101**(D8), 12855~12866.
 - 17 Shiotani, M., 1992, Annual, quasi-biennial, and El Nino-Southern Oscillation (ENSO) time-scale variations in equatorial ozone, *J. Geophys. Res.*, **97**, 7625~7633.
 - 18 Randel, W. J. and J. B. Cobb, 1994, Coherent variation of monthly mean total ozone and lower stratospheric temperature, *J. Geophys. Res.*, **99**(D3), 5433~5447.
 - 19 Stephenson, D. B. and J.-F. Royer, 1995, Low-frequency variability of total ozone mapping spectrometer and general circulation model total ozone stationary waves associated with the El Nino / Southern Oscillation for the period 1979-1988, *J. Geophys. Res.*, **100**(D4), 7337~7346.
 - 20 Holton, J. R. and R. S. Lindzen, 1972, An update theory for quasi-biennial oscillation of the tropical stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1076~1080.
 - 21 Holton, J. R. and H.-C. Tan, 1982, The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation in total ozone, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2200~2208.
 - 22 Dunkerton, T. J. and M. P. Baldwin, 1991, Quasi-biennial oscillation of planetary fluxes in the northern hemispheric winter, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1043~1061.
 - 23 Naujokat, B., 1986, An update of the observed quasi-biennial oscillation of the stratosphere winds over the tropics, *J. Atmos. Sci.*, **43**, 1873~1877.
 - 24 Labitzke, K. and H. van Loon, 1988, Associations between the 11-year solar cycle, the QBO, and the atmosphere, I, The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere winter, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **50**, 197~206.
 - 25 巢纪平, 1993, 厄尔尼诺和南方涛动动力学, 北京: 气象出版社.

QBO and ENSO Signals in Total Ozone over 60~70°S

Zou Han and Gao Yongqi

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

Abstract This article discusses the zonal distribution of seasonal variation, trends and quasi-biennial oscillation (QBO) and El Nino / Southern Oscillation (ENSO) in total ozone over 60~70°S, using data from the Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) on board of Nimbus 7. It is revealed that there are recognizable QBO and ENSO signals in the long term variation of TOMS ozone in 60~70°S, and the QBO signal is significantly modulated at the longitudes in the Western Antarctica around the Antarctica Peninsula. In addition, this study analyses the seasonal variation and trends in TOMS ozone in this latitude zone. The downward trends are found over the entire zone, and the maximum of ozone decreasing (-9.3 DU/a) is in 60~100°W, in October months. In the zonal distribution of the ozone seasonal variation and trends, the obvious differences are found in the West Antarctica near the Antarctica Peninsula from at other longitudes. Discussion on the impact of the Antarctica Peninsula on the ozone distribution and variation is made in this article.

Key words total ozone seasonal variation QBO ENSO