

郭世昌, 戴敏, 杨沛琼, 等. 2013. 全球平均经圈环流的基本特征及其与臭氧关系研究 [J]. 大气科学, 37 (1): 36–42, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11205. Guo Shichang, Dai Min, Yang Peiqiong, et al. 2013. Basic state of MMC and its correlation with atmospheric ozone variation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 36–42.

全球平均经圈环流的基本特征及其与臭氧关系研究

郭世昌¹ 戴敏¹ 杨沛琼¹ 黎成超¹ 常有礼¹ 刘煜² 吕达仁³

1 云南大学大气科学系, 昆明 650091

2 中国气象科学研究所, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

摘 要 本文利用 1957 年 9 月到 2002 年 8 月, 共 540 个月的 ERA-40 的经向风和臭氧质量混合比月平均资料, 分析研究了平均经圈环流 (MMC) 和 Hadley 环流强弱特征变化及其与臭氧变化的关系。分析指出: (1) 平均经圈环流与臭氧分布在垂直方向上有很好的对应和相关关系, 平均经圈环流是形成臭氧水平、垂直的气候平均态分布, 季节变化, 年代际变化的重要因素; (2) 垂直方向上北半球臭氧浓度的变化比南半球的变化更明显; (3) 典型相关分析表明平均经圈环流与臭氧浓度变化在不同的高度和纬度上有不同的相关关系, 臭氧与 Hadley 和 Ferrel 环流存在密切的相关关系, 特别是 Hadley 环流, 这表明 Hadley 环流在全球大气臭氧的变化中起重要作用。

关键词 典型相关分析 平均经圈环流 (MMC) 质量流函数 臭氧质量混合比

文章编号 1006-9895(2013)01-0036-07

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11205

Basic State of MMC and Its Correlation with Atmospheric Ozone Variation

GUO Shichang¹, DAI Min¹, YANG Peiqiong¹, LI Chengchao¹, CHANG Youli¹,
LIU Yu², and LÜ Daren³

1 Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The correlativity of mean meridional circulation (MMC)–ozone and the evolving relationship between Hadley circulation character and ozone are presented in this paper. Analysis on the basis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-40 meridional wind and ozone mass mixing ratio month averaged global data for 540 months from September 1957 to August 2002 revealed that correspondence and correlativity between MMC and ozone are strong in the vertical direction. MMC is a major factor in the formation of the average state distribution of horizontal and vertical ozone and seasonal and interdecadal change. In addition, the change in ozone concentration over the Northern Hemisphere in the vertical direction is more obvious than that in the Southern Hemisphere. Moreover, correlativity differs between MMC and ozone concentration at various altitudes and latitudes. Such close correlativity between ozone and Hadley circulation indicates that Hadley circulation plays an important role in

收稿日期 2011-10-28, 2012-07-16 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划资助项目 2010CB428605, 云南省应用基础研究计划 (重点) 项目 2011FA031, 云南省自然科学基金项目 2010CD013, 国家自然科学基金项目 41275072

作者简介 郭世昌, 男, 1958 年出生, 教授, 主要从事大气臭氧、紫外辐射及气候变化研究。E-mail: shchguo@ynu.edu.cn

global atmospheric ozone changes.

Keywords Canonical correlation, Mean meridional circulation (MMC), Mass flow function, Ozone mass mixing ratio

1 引言

平均经圈环流 (mean meridional circulation, MMC) 联系了低纬和中高纬的风场, 在大气环流的调整、全球能量平衡方面扮演重要角色, 是研究天气、气候变化时需要考虑的一个重要的问题, 很早就受到了气象学家们的重视。关于 MMC 的重要意义, 叶笃正和朱抱真 (1958)、洛伦茨 (1976) 等已进行过全面论述。构成 MMC 的主要系统是 Hadley 环流圈、Ferrel 环流圈和极地环流圈, 其中 Hadley 环流是南、北半球中低纬度地区大气中尺度和强度最大、研究历史最悠久的直接热力垂直经圈环流。

由于大气环流是一个相互影响、相互制约的整体, 热带地区的大气环流可以通过遥相关对全球大气环流以及全球气候产生影响 (Lau, 1997; Alexander et al., 2002; Yang and Liu, 2005)。作为热带大气中一个显著的大尺度环流因子, Hadley 环流通过角动量、水汽和能量的输送, 不仅影响着低纬大气活动, 而且也能影响到中高纬大气环流和气候的变化 (Oort and Peixoto, 1983; 吴国雄和 Tibaldi, 1988; Hou and Molod, 1995; Hou, 1998; Zhou and Wang, 2006)。由于 Hadley 环流一直上升到对流层顶附近, 而下平流层与上对流层可以有较强的物质、能量交换, 下平流层和上对流层之间的质量交换可以将引起臭氧损耗的气体输送到平流层, 这种交换还将臭氧富集的平流层空气向下输送到对流层 (杨健和吕达仁, 2003), 故而 Hadley 环流可能对平流层臭氧产生重要的影响。郭世昌等 (2008a, 2008b) 已通过表征不同 Hadley 环流特征的指数, 对 Hadley 环流与臭氧的关系进行过一些研究。那么, MMC 的变化和异常与臭氧变化之间是否存在联系? 在此, 本文将着眼于 MMC 的基本特征, 应用经验正交函数-典型相关分析 (EOF-CCA), 来研究其与臭氧变化的关系。

2 数据和方法

本文采用的经向风和臭氧质量混合比资料, 均来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 全球多层月平均资料。变量的月平均场在垂直方向分为 23 层,

即 23 个二维场, 依次是 1000、925、850、775、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10、7、5、3、2、1 hPa 等压面。每个二维场用间距为 2.5° 经、纬度网格点上的值来表示, X 方向从西向东共 144 个格点, 对应 $0^\circ\sim 357.5^\circ\text{E}$, Y 方向从南向北共 73 个格点, 对应 $90^\circ\text{S}\sim 90^\circ\text{N}$ 。

由于臭氧的分布在垂直方向上极不均匀, 所以将臭氧浓度的垂直分布分为 $400\sim 30$ hPa 和 $1000\sim 400$ hPa 两个层次进行分析。

3 结果分析和讨论

3.1 MMC 的季节、年代际变化特征

利用 ECMWF 的资料, 采用秦育婧等 (2006) 的叠加算法, 计算出质量流函数 ψ 场。在之前的工作中郭世昌等 (2008a, 2008b) 已经详细讨论过近 45 年的 MMC 气候态分布, 得知 MMC 具有很强的季节性。

在垂直平均的 MMC 质量流函数经向分布季节变化 (图 1) 中可以看到其季节变化在不同纬度带有不同的特征, 且很清楚地表现出了三圈环流的基本纬度位置、强弱和季节变化规律。季节变化主要集中在低纬度地区, 其中 Hadley 环流的季节变化在三圈环流中最为显著, 控制范围为 $35^\circ\text{S}\sim 40^\circ\text{N}$, 出现正、负交替的分布。10 月至次年的 4 月主要向北输送, 1 月达到最盛, 中心位于北半球; 4~10 月主要向南输送, 中心位于南半球, 随季节变化, 改变向南北输送的强度。其次有季节变化的 MMC 是

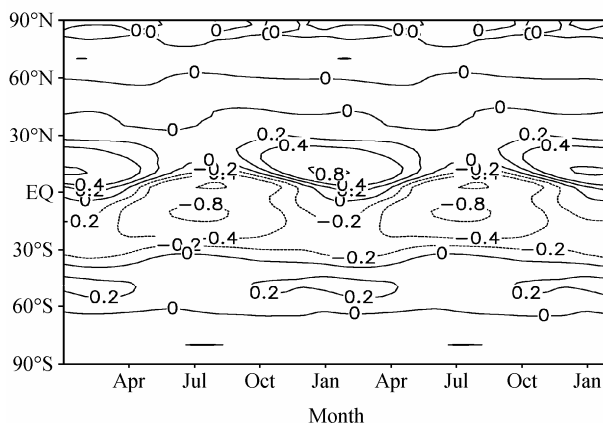


图 1 MMC 质量流函数的经向分布和季节变化 (单位: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$)

Fig. 1 Meridional distribution and seasonal change of MMC (mean meridional circulation) mass stream function (unit: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$)

南半球的 Ferrel 环流, 10 月到第二年的 4 月较强, 其余月份较弱, 且 Ferrel 环流在强度上还表现出了南北半球不对称。

在垂直平均质量流函数的距平场偏差图(图略)中我们发现, MMC 距平场在低纬度地区有明显的年际和年代际变化特征, 其他纬度不是很明显, 70 年代之前为负距平, 而后多表现为正距平。同时还可以发现有 3 个明显的正距平异常, 分别出现在 1973 年、1983 年、1998 年。为此, 我们对这三个年份做了进一步的分析, 在图 3 中给出了更清晰的图像。

Hadley 环流是低纬度地区主要的环流系统, 我们定义 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 区域里最大的质量流函数为北半球 Hadley 环流强度指数 (NHCI), $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{S}$ 区域里最大的质量流函数为南半球 Hadley 环流强度指数 (SHCI)。定义 Hadley 环流上升支强度 $\text{THCI} = |\text{NHCI}| + |\text{SHCI}|$ 。图 2 中可以看出 Hadley 环流上升支强度在 1975 年左右由负距平转换为正距平之后在 0 线附近摆动, 1990 年后正距平的趋势增强, 说明上升支的强度呈增强的趋势, 即向南北输送的强度都增强。除去季节变化的臭氧总量距平偏差的时间序列(图略)则发现: 全球平均臭氧总量在 1980 年前为正距平, 之后为负距平, 说明全球臭氧总量呈现减少的趋势。北半球、南半球的臭氧总量的变化趋势和全球臭氧总量的变化趋势基本相同; 赤道的臭氧总量也在 1980 年前为正距平, 之后为负距平, 但在 1990 年代后有增加的趋势。

可以看出 Hadley 环流强度和臭氧总量存在一个反向变化的关系。

对三个正距平异常年份的分析发现(图 3), 1973 年的正距平最大值出现在 1 月、 2.5°N 的位置, 量值超过平均值 $0.3 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$, 这种异常一直从 1972 年的 8 月维持到 1973 年的 2 月。1983 年的正距平最大值也出现在 1 月、 2.5°N 的位置, 量值超过平均值 $0.5 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$, 异常一直从 1982 年的 10 月维持到 1983 年的 7 月。1998 年的正距平最大值与 1983 年的一样, 出现在 1 月、 2.5°N 的位置, 量值超过了平均值 $0.5 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$, 从 1997 年的 10 月到 1998 年的 7 月都表现出这种异常。综合以上分析, 我们得出: (1) 三个异常年份正距平最大值均出现在 1 月份。(2) 正距平最大值均出现在 2.5°N 的位置。所表现出的正距平异常, 说明向北输送环流在上述 3 个时刻的突然增大。

3.2 垂直层次上 MMC 与臭氧的对应

将臭氧的经向垂直剖面与 MMC 叠加, 发现对流层中 MMC 与臭氧浓度的垂直和经向分布有很好的对应, 而平流层中臭氧的季节变化与 MMC 也有一定的联系。

从图 4 的 1000~400 hPa 臭氧质量混合比经向平均剖面与 MMC 的叠加图可以看到, MMC 与高浓度的臭氧有很好的对应, 特别是在 Hadley 环流控制的范围内, 说明了经圈环流, 特别是 Hadley 环流对臭氧的输送作用, 将高层含有高浓度臭氧的空气卷入环流中, 并随着环流输送到了对流层低层, 这

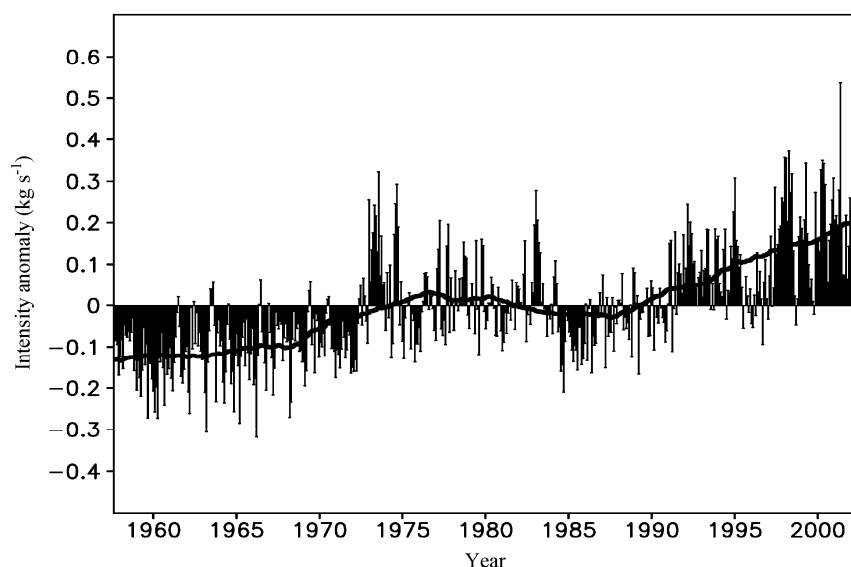
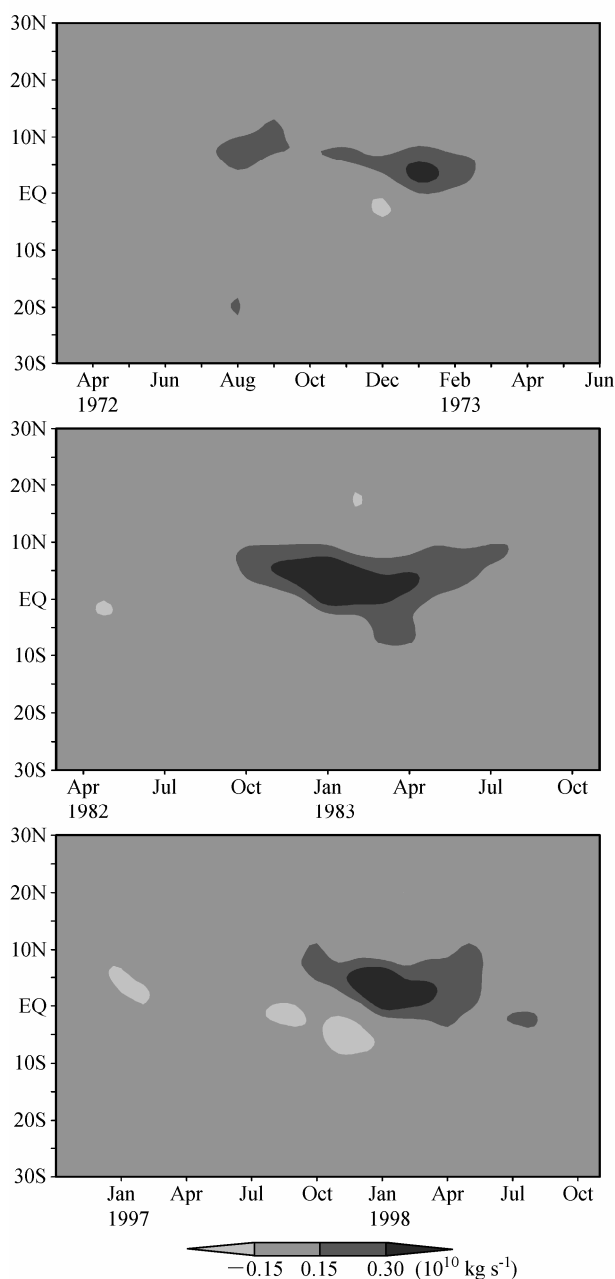


图 2 剔除季节变化的 Hadley 环流上升支强度的距平时间序列(直方图, 单位: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$) 和 11 年滑动平均曲线(实线)

Fig. 2 Time series (histogram) and 11-year moving average curve (solid line, unit: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$) of ascending branch intensity anomaly of Hadley cell

图3 MMC质量流函数距平场(单位: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$)Fig. 3 The MMC mass stream function anomalies field (unit: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$)

些含有高浓度臭氧的空气一直在环流(主要是Hadley环流)的控制中,这样就形成了臭氧在对流层中低纬度的气候态分布。同时卷入环流的高浓度臭氧空气随着MMC的季节变化而变化,形成了低层臭氧的季节变化特征。这主要是由于太阳活动导致了Hadley环流的季节变化,通过环流的变化,形成了臭氧的气候态分布。同时可以发现,在对流层垂直方向上,北半球臭氧浓度的变化比南半球的变化更明显,我们认为这是由于南北半球海陆分布不均

导致南北半球海陆热力差异进而引起环流差异而出现这种现象的。

近年来,平流层—对流层的交换(STE)是一个热点及难点问题,陈洪滨等(2006)指出该区域(STE)高度范围大致为5~20 km,而这个区域中的Brewer-Dobson环流对平流层微量气体的分布有着很大的影响。因此我们分析了400~30 hPa臭氧质量混合比经向平均剖面与MMC的叠加图(图4)。对于MMC来说,经向的质量流函数在平流层下部同样存在,只是量级远小于对流层,只有对流层的百分之一,但对空气质量同样有向南北半球输送的作用。可以看到MMC与低浓度的臭氧有很好的对应,特别是Hadley环流控制的纬度范围(35°S~40°N)内,MMC的下沉支与臭氧浓度向低层弯曲的位置有很好的对应,同样说明了经圈环流,特别是Hadley环流对臭氧的输送作用,环流将原本处于较高层次的高浓度臭氧带入较低的层次,即在Hadley环流控制的纬度范围(35°S~40°N)内的低浓度区。MMC对臭氧的输送作用随着季节变化而改变,形成了400~30 hPa以下的臭氧气候态分布。

大气臭氧在全球范围的分布特征及时空变化主要由大气化学和动力学过程来决定。大气化学过程决定了臭氧的产生和消亡,平流层的光化学过程造成了平流层中部的高浓度臭氧层的存在,垂直交换又可以将光化学过程所产生的臭氧从25~30 km层输送到平流层底层和对流层,再通过大型环流的输送,形成我们所观测到的臭氧垂直和水平分布的差异和变化。平流层大气臭氧的分布变化通过加热作用会影响温度场结构,进而对大气环流产生影响。

3.3 垂直剖面上臭氧与MMC的时空特征分析

为了进一步说明臭氧与MMC在垂直方向上的关系,对540个月的臭氧垂直经向剖面场与MMC场进行EOF-CCA的典型相关分析。通过EOF展开后,其前 k 个主分量的方差贡献率反映了臭氧垂直经向剖面场与MMC场的大尺度特征所占的比重,为了分析其大尺度特征,我们将第一特征向量方差贡献率和当累积方差贡献率达85%时所需主分量的个数列表(见表1)。由表1可见,臭氧垂直浓度的累积方差贡献率达85%时所需主分量个数都比MMC少,说明臭氧垂直浓度的大尺度特征比MMC的大尺度特征明显。

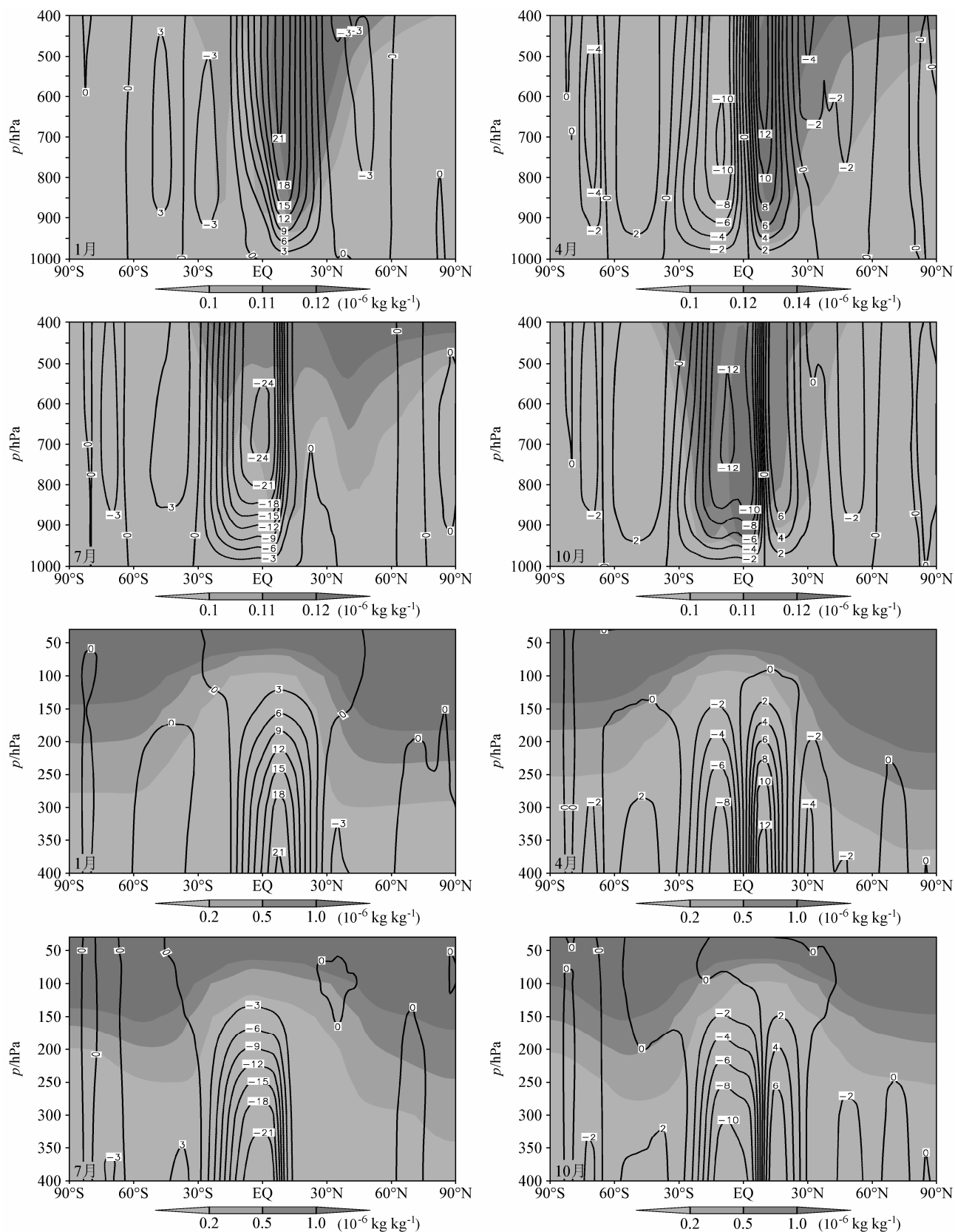


图4 1000~400 hPa、400~30 hPa 臭氧质量混合比(阴影)与MMC质量流函数(等值线,单位: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$) 经向平均剖面的叠加图

Fig. 4 Composites of meridionally averaged ozone mass mixing ratio (shaded areas) and MMC mass stream function for 1000-400 hPa, 400-30 hPa (contours, units: $10^{10} \text{ kg s}^{-1}$)

表 1 主分量累积方差贡献率

	第一特征向量的方差	累积方差贡献达 85%时
	贡献率	所需的主分量个数
臭氧浓度垂直场	21.33%	8
MMC	31.87%	23

图 5 为臭氧垂直经向剖面与 MMC 场第一特征向量场，图中量值为权重系数值。由图 5a 可见，臭氧场垂直经向剖面图呈现出南北半球反向变化的特征，北半球主要为负值，南半球主要为正值，并且随高度的增加有向两极倾斜的趋势。在两半球对流层的高纬地区则表现出南负北正的分布。两半球权重系数高值中心均出现在 200~60 hPa 的中高纬地区，从权重系数的绝对值来看，北半球臭氧浓度的变化比南半球的变化更明显。由图 5b 可见，MMC 由南半球到北半球呈现出“一、+、一、+、一”的分布特征。低纬地区从低层对流层一直到 40 hPa 附近都为权重系数大值区，表明低纬地区 MMC 的变化最为明显。

选取主分量累积方差贡献率达到 85%的情况进行 CCA 分析，并通过 χ^2 检验方法对典型相关分

析结果进行检验，臭氧垂直经向剖面场与 MMC 场的第一典型相关系数为 0.99，这表明臭氧浓度场与 MMC 的关系密切。于是我们把南、北半球高度场的第一对典型载荷特征向量绘成典型相关场图（图 6），进一步分析南北半球环流场的相互关系。

由图 6a 可见，在第一对典型相关场上臭氧场的典型载荷特征向量在南半球 300 hPa 以上的相关系数值较高。其中，中低纬地区为正相关，中高纬地区为负相关。而北半球除在中高纬的对流层有较弱的正相关区外，其余地区表现为负相关。图 6b 为第一对典型相关场的 MMC 场，在低纬对流层地区出现典型载荷特征向量的大值中心，这正好是 Hadley 环流所在的位置，在南半球 30°S 附近的对流层地区存在典型载荷特征向量的次大值中心，这恰是南半球的 Ferrel 环流所在区域。

从典型相关分析中我们发现 MMC 和臭氧存在着较好的相关性：当 MMC 场正相关区的 MMC 增强或减弱时，臭氧场中正相关区域的臭氧随之增强或减弱，而负相关区域的臭氧则相反地呈减弱或增强的趋势；反之亦然。同时，典型载荷特征向量绝对值的大小反映了选取的要素场的重要性，还反映出相关最大

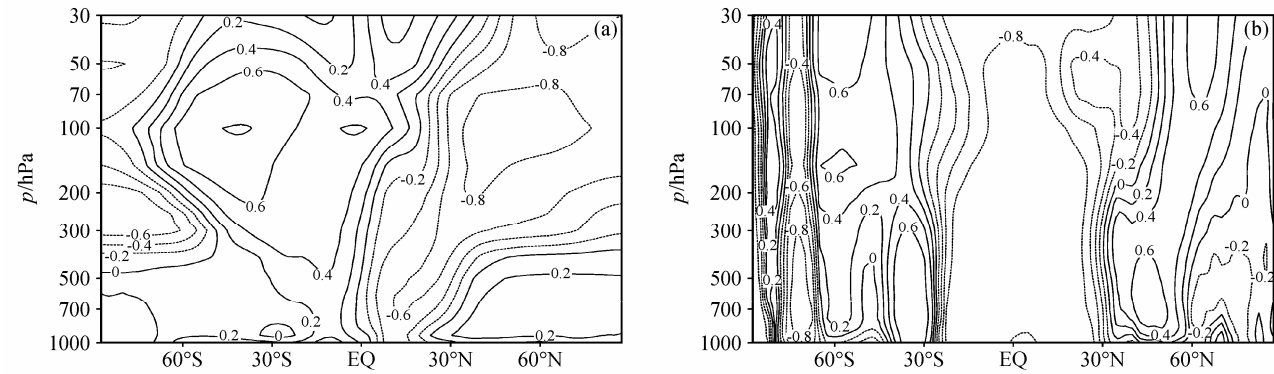


图 5 臭氧质量混合比 (a) 和 MMC 质量流函数 (b) 垂直—经向剖面的第一特征向量空间场
Fig. 5 The first eigenvector fields of vertical-meridional profiles of (a) ozone mass mixing ratio and (b) MMC mass stream function

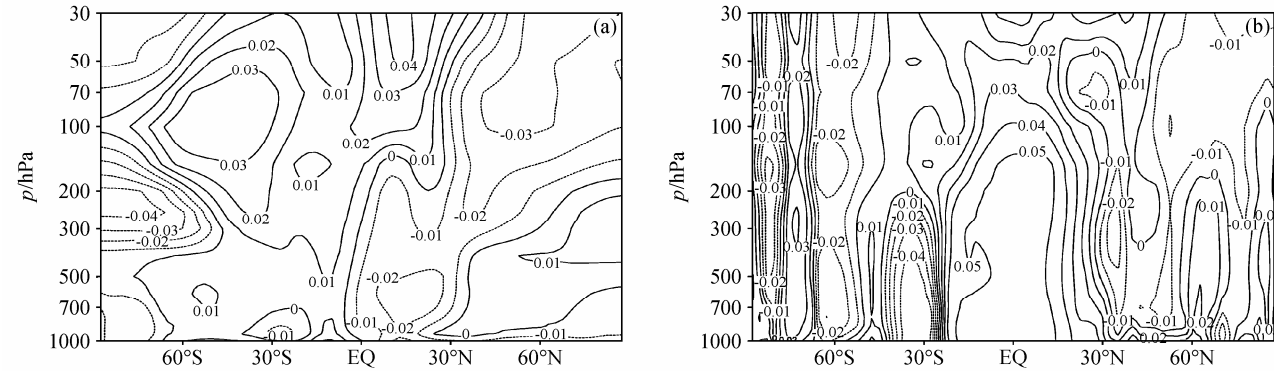


图 6 臭氧质量混合比 (a) 与 MMC 质量流函数 (b) 垂直—经向剖面的第一对典型相关场
Fig. 6 The first canonical correlation fields of vertical-meridional profiles of (a) ozone mass mixing ratio and (b) MMC mass stream function

区域的所在。低纬地区是载荷向量绝对值的大值区,说明 Hadley 和 Ferrel 环流在臭氧的变化中起着重要作用。由于中低纬热带大气有净热量收入,是全球主要的热源,在热力环流的作用下将对流层相对高浓度的臭氧向高纬输送,低纬环流与中、高纬环流关系十分密切,所以一旦低纬环流异常,中高纬环流就会随之变化,导致不同地区臭氧浓度的变化。对流层中的臭氧浓度增强或减弱所产生的温室效应对 Hadley 环流和 Ferrel 的增强或减弱又有一定的影响。

大气环流的变化与热带海洋的变化密切相关,西太平洋“暖池”区、El Niño 事件发生的东太平洋海区等都对大气环流变化产生着重要的影响,而这些海区都分布在低纬。因此低纬的 Hadley 环流是研究臭氧与 MMC 关系的一个关键区域,其对全球大气臭氧变化影响的机制还有待我们进一步深入研究。

4 结论与讨论

通过对 MMC 的基本特征及其与臭氧关系的初步研究,得出以下初步结论:

(1) MMC 具有很强的季节性, Hadley 环流是 MMC 中最显著的组成部分,1 月向北输送,7 月向南输送,4、10 月为过渡月份,上升支偏于赤道附近的处于夏季的半球,冬半球 Hadley 环流较强,夏半球较弱。在季节变化中 Hadley 环流的季节变化最突出,控制范围为 $35^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 。

(2) 平均经圈环流与臭氧在垂直方向上有很好的对应和相关关系。平均经圈环流是形成臭氧水平、垂直的气候平均态分布,季节变化,年代际变化的重要因素。

(3) 臭氧垂直浓度的大尺度特征比 MMC 的大尺度特征明显。

(4) MMC 与臭氧的典型载荷特征向量在对流层低纬度地区出现大值中心,说明在对流层中,臭氧主要与 MMC 中的 Hadley 环流及 Ferrel 环流存在密切的相关关系,这意味着 Hadley 和 Ferrel 环流在臭氧的变化中起着重要作用。当然,当对流层中臭氧浓度增强或减弱时,其温室效应也可能会通过影响温度场进而影响风压场而对低纬的经圈环流产生一定的影响,这值得关注。

参考文献 (References)

Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the

- global oceans [J]. *J. Climate*, 15: 2205–2231.
- 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 2006. 上对流层下平流层交换过程研究的进展与展望 [J]. *大气科学*, 30 (5): 813–820. Chen Hongbin, Bian Jianchun, Lü Daren. Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 813–820.
- 郭世昌, 戴敏, 李琼, 等. 2008a. 冬季 Hadley 环流活动与大气臭氧变化的关系研究 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 30 (2): 148–154. Guo Shichang, Dai Min, Li Qiong, et al. 2008a. Activity of the Hadley circulation and its correlations with the atmospheric ozone variation during the winter season [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (in Chinese)*, 30 (2): 143–154.
- 郭世昌, 李琼, 戴敏, 等. 2008b. Hadley 环流上升支特征及其与东亚臭氧变化的关系 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 30 (3): 269–275. Guo Shichang, Li Qiong, Dai Min, et al. 2008b. Features of Hadley circulation ascending branch and its relation to the variation of ozone in East Asia [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (in Chinese)*, 30 (3): 269–275.
- Hou A Y. 1998. Hadley circulation as a modulator of the extratropical climate [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (14): 2437–2457.
- Hou A Y, Molod A. 1995. Modulation of dynamic heating in the winter extratropics associated with the cross-equatorial Hadley circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (15): 2609–2626.
- Lau N C. 1997. Interactions between global SST anomalies and the mid-latitude atmospheric circulation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 21–33.
- 洛伦茨 E N. 1976. 大气环流的性质和理论 [M]. 北京: 科学出版社.
- Loreog E N. 1976. The Nature and Theory of the General Circulation of Atmosphere (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- Oort A H, Peixoto J P. 1983. Global angular momentum and energy balance requirements from observations [J]. *Advances in Geophysics*, 25: 355–490.
- 秦育婧, 王盘兴, 管兆勇, 等. 2006. 两种再分析资料的 Hadley 环流比较 [J]. *科学通报*, 51 (12): 1469–1473. Qin yujing, Wang Panxing, Guan Zhaoyong, et al. 2006. Differences of Hadley cells between two different reanalysis data [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 51 (12): 1469–1473.
- 吴国雄, Tibaldi S. 1988. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用 [J]. *大气科学*, 12 (1): 8–17. Wu Guoxiong, Tibaldi S. 1988. Roles of the mean meridional circulation in atmospheric budgets of angular momentum and sensible heat [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 12 (1): 8–17.
- Yang H J, Liu Z Y. 2005. Tropical-extratropical climate interaction as revealed in idealized coupled climate model experiments [J]. *Climate Dyn.*, 24: 863–879.
- 杨健, 吕达仁. 2003. 平流层—对流层交换研究进展 [J]. *地球科学进展*, 18 (3): 380–385. Yang Jian, Lü Daren. 2003. Progresses in the study of stratosphere-troposphere exchange [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 18 (3): 380–385.
- 叶笃正, 朱抱真. 1958. 大气环流的若干基本问题 [M]. 北京: 科学出版社. Ye Duzheng, Zhu Baozhen. 1958. A Number of Basic Problems of Atmospheric Circulation (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- Zhou B T, Wang H J. 2006. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D16109, doi: 10.1029/2005JD 007006.