

王卫国, 杨芳园, 王颢樾等. 2015. 利用 ERA-Interim 资料对平流层 Brewer-Dobson 环流变化趋势的分析. 地球物理学报, 58(2): 371-382, doi:10.6038/cjg20150203.

Wang W G, Yang F Y, Wang H Y, et al. 2015. The distribution characters of the stratospheric Brewer-Dobson circulation inferred from ERA-Interim. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(2): 371-382, doi:10.6038/cjg20150203.

利用 ERA-Interim 资料对平流层 Brewer-Dobson 环流变化趋势的分析

王卫国¹, 杨芳园², 王颢樾¹, 杨韬³, 余珂⁴, 梁蜀昆¹, 樊雯璇¹

1 云南大学大气科学系, 昆明 650091

2 昆明市气象局, 昆明 650034

3 玉溪市气象局, 玉溪 653100

4 云南省气象信息中心, 昆明 650034

摘要 选用每天 12:00 UTC 时次的逐日 ERA-Interim 再分析资料, 根据 transformed Eulerian-mean (TEM) 方程通过积分剩余速度 \bar{v}^* , 研究了 1979—2011 年间 Brewer-Dobson (BD) 环流的时空演变规律. 并将其与 downward control (DC) 原理研究的结果进行比较, 同时还探讨了平流层温度与 BD 环流之间的相互联系. 结果表明, 由 TEM 方程通过积分剩余速度 \bar{v}^* 估算的 BD 环流与利用 DC 原理估算的环流相比较, 在热带地区的形势更加明显. 环流在热带对流层中上层上升至平流层中下层, 最高可达 1 hPa 等压面附近. 然后在热带外向极向下运动, 最后在中高纬度下沉回到对流层. BD 环流的上升中心及质量通量均随季节的变化产生变动, 环流在冬半球的形势显著地强于夏半球. 在春季和秋季期间, 环流呈现出南北两半球的对称形势. 从全球尺度物质输送的角度来看, 在过去的 33a 间平流层 BD 环流的长期变化趋势是减弱的, 且在平流层中下层减弱是明显的. 环流的减弱趋势与纬向平均温度的长期变化趋势相匹配.

关键词 Brewer-Dobson 环流; 剩余速度; 质量通量; 纬向平均温度

doi:10.6038/cjg20150203

中图分类号 P401

收稿日期 2014-03-24, 2014-11-23 收修定稿

The distribution characters of the stratospheric Brewer-Dobson circulation inferred from ERA-Interim

WANG Wei-Guo¹, YANG Fang-Yuan², WANG Hao-Yue¹, YANG Tao³,
YU Ke⁴, LIANG Shu-Kun¹, FAN Wen-Xuan¹

1 Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

2 Meteorological Bureau of Kunming, Kunming 650034, China

3 Meteorological Bureau of Yuxi, Yuxi 653100, China

4 Meteorological Information Center of Yunnan Province, Kunming 650034, China

Abstract The spatial-temporal distribution characters of trace gases in the stratosphere and troposphere are affected by the Brewer-Dobson (BD) circulation. Understanding the distribution characters of BD circulation is very important to further study the influence of stratosphere and troposphere exchange and forecast the global climate change.

基金项目 国家自然科学基金项目(41275045, 41305037), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB428605), 国家自然科学基金重点项(U1133603), 云南省应用基础研究项目(2013FB005)资助.

作者简介 王卫国, 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事大气环境变化与气候效应的研究. E-mail: wangwg@ynu.edu.cn

The BD circulation is described as the Lagrangian-mean circulation, it is difficult to diagnose directly from meteorological observations. The methods of the transformed Eulerian-mean (TEM) equations, and integrating residual meridional velocity in the vertical were used to analyze the spatial-temporal distribution characters of BD circulation, by using the ERA-Interim reanalysis data for 1979—2011 at 12:00 UTC. We further compared the distribution characters of BD circulation with the result calculated by the method of DC (downward control) principle and studied the relationship between the stratospheric zonal mean temperature and BD circulation.

The BD circulation was calculated from ERA-Interim reanalysis data for 1979—2011 by integrating residual meridional velocity in the vertical. The results showed that: (1) The ascending centers of BD circulation were varied with seasons. It ascended at 30° S in the stratosphere for December to February (DJF), for June to August (JJA) it ascended between 25° N and 30° N, the circulation pattern in the winter hemisphere is stronger than the summer hemisphere. In March to May (MAM) and September to November (SON), the ascending center were between equator to 5° N, and circulation were relatively symmetrically for two hemispheres. (2) The maximum mass flux in the tropical and extratropical northern hemisphere appeared during DJF, the minimum appeared during JJA. The mass flux in extratropical southern hemisphere was just the opposite. Mass flux across the 100 hPa and 50 hPa pressure surface in tropical and extratropical trended to decreasing, and also had obviously seasonal variation. (3) The long-term trend of stratospheric zonal mean temperature was consistent with the long-term weakening trend of BD circulation, this indicated that the global BD circulation has been weakened. Meanwhile, the zonal mean temperature in different altitude and latitude bands varied with seasons.

From the perspective of the global mass transportation, the stratospheric BD circulation has been weakened in the past 33 years, especially in the middle and lower stratosphere, and was consistent with the long-term trend of temperature. This weakened trend was consistent with the observation study in the age of stratospheric air and other model results. But the method of DC principle, GCMs model and other studies showed that the stratospheric BD circulation has been enhanced in the past years. Using different methods and data would lead the trend estimation of BD circulation were unreliable. Therefore, further research will be required to improve the reliability of BD circulation.

Keywords Brewer-Dobson circulation; Residual velocity; Mass flux; Zonal mean temperature

1 引言

Brewer(1949)和 Dobson(1952)的研究表明,平流层中化学示踪物的分布变化是受全球尺度环流的影响,这一环流在平流层中是缓慢的、半球尺度的单圈经向环流.它从热带对流层顶上升进入平流层,然后在中高纬度向极向下运动,最后下沉回到对流层,称为 Brewer-Dobson(BD)环流,通常也称作平流层经向剩余环流. BD 环流通过耦合作用影响着平流层-对流层的物质和能量交换,从而改变着平流层、对流层的热力和动力结构,以及大气中各种痕量成

分的含量分布,进而影响全球的气候变化(王卫国等,2006;Roscoe,2006).因此,探究 BD 环流的空间分布特征及时间演变规律,对进一步认识平流层-对流层之间的相互作用和物质(特别是水汽、气溶胶、臭氧等痕量气体成分)交换,以及对全球气候变化的预测都具有十分重要的科学意义.

由于 BD 环流被描述为拉格朗日运动,而直接测量拉格朗日平均运动是难以实现的.直接利用拉格朗日方法来得到真实的环流形势,以及定量估算出环流的强度变化也是非常困难的(Rosenlof, 1995).为此,Andrews 等(1987)通过研究,给出了变换欧拉平均(transformed Eulerian-mean, TEM)

方程,用于代替计算平流层中的拉格朗日平均运动。同样,Haynes 等(1991)提出了利用向下控制(downward control,DC)原理来估算剩余平均环流,并指出中纬度波的强迫以及来自对流层的行星波和重力波,在上传过程中的破碎或消散是驱动经向环流的机制。Holton(1990)、Rosenlof 等(1993,1995)的研究表明,热带向上以及热带外向下的质量通量随季节而变,最大值出现在北半球冬季,最小值则出现在北半球夏季。Roscoe(2006)的研究指出,BD 环流在 1970s 是增强的,而在 1990s 有一个弱的减弱,其环流的变化趋势与 NO_2 , N_2O , H_2O , CO_2 等气体成分的含量变化有关。Seviour 等(2012)利用 1989—2009 年的 ERA-Interim 资料,通过积分 \bar{v}^* 研究了热带 70 hPa 等压面向上的质量通量,结果显示 BD 环流在近 20a 呈现出减弱的趋势。

陈文和黄荣辉(1995)对比研究了行星波定常保守时和非定常时的剩余环流形势。且指出只有当耗散的行星波传播到平流层,强迫出剩余环流后,行星波对大气中的臭氧才有明显的输送。同时,他们还构造了一个 34 层球坐标原始方程的波-流相互耦合谱模式,用于研究定常流下(陈文和黄荣辉,1996a)和非常定流下(陈文和黄荣辉,1996b)行星波通过剩余环流对臭氧的输送作用。张弘等(2001)还研究了准两年振荡(quasi-biennial oscillation, QBO)在不同位相下,剩余环流的变化及其对臭氧输送的影响。陈权亮和陈月娟(2007)利用 NCEP 资料通过计算剩余速度,分析了平流层 BD 环流的季节、年际变化以及长期变化趋势。邓淑梅(2007)的研究表明,BD 环流在北半球以及中高纬度地区的演变受平流层爆发性增温的影响。

王卫国等(2013)曾利用 DC 原理研究了 BD 环流的季节和年际变化特征。由于 DC 原理在赤道及春秋季节的局限性,以及重力波拖曳力(gravity wave drag, GWD)对 BD 环流的重要性。本文将尝试利用另外一种方法,即由 TEM 方程通过积分剩余速度 \bar{v}^* 来研究 BD 环流的时空演变规律,且将其与 DC 原理研究的结果进行比较。同时,还将探讨平流层温度与 BD 环流之间的相互联系,以进一步验证环流的变化趋势。

2 资料与方法

选用 ERA-Interim 的 1979—2011 年每天 12:00UTC 时次逐日的全球 U, V, ω 风场及 T 温度场网格化的

再分析资料,资料的时间序列长度为 33a。由于日平均资料所产生的平滑效应使其精确度不够,故此仅选用 12:00UTC 时次的高时间分辨率资料,能对大气进行更加广泛而精确的描述。欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF),最新提供的从 1979 年至今覆盖全球大气的再分析资料 ERA-Interim,与 ERA-40 再分析资料类似,但在原有的基础上进行了一些改进。在数据同化中使用了 ECMWF 积分预报系统(Integrated Forecast System, IFS)模式,同时还使用了 4 维变量资料同化系统(4D-Var)。资料的时间分辨率为 6 h,1 天提供 4 个时次的的数据,即 00,06,12,18UTC。空间水平分辨率为 1.5° (经度) \times 1.5° (纬度),垂直方向的分辨率为 37 层(1000~1 hPa 等压面)。

根据 TEM 方程, p 坐标系下的剩余速度(Edmon et al., 1980)定义为

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \frac{\partial}{\partial p}(\bar{v}\bar{\theta}'/\bar{\theta}_p), \quad (1a)$$

$$\bar{\omega}^* = \bar{\omega} + \frac{1}{a\cos\varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi}(\cos\varphi \bar{v}\bar{\theta}'/\bar{\theta}_p), \quad (1b)$$

式中, \bar{v}^* 和 $\bar{\omega}^*$ 分别表示经向和垂直方向的剩余速度, a 是地球半径, φ 为纬度, θ 是位温, “'”与“-”分别表示扰动量和纬向平均量,下标 φ 和 p 则为对其求偏导数。

利用方程(1a)可计算出剩余经向速度 \bar{v}^* , 根据质量流函数与剩余速度的关系(Holton, 1990),在垂直方向上通过积分 \bar{v}^* 来估算流函数 Ψ 。为方便计算将方程两边同除重力加速度 g , 并沿 p 积分,则流函数的表达式为

$$\Psi(\varphi, p) = \frac{\cos\varphi}{g} \int_p^0 \bar{v}^* dp', \quad (2)$$

流函数的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

通过方程(2)获得的流函数 Ψ 值,以及根据 Holton(1990)给出的计算垂直质量通量的公式,则可计算穿越某一等压面,从纬度 φ_0 到极地的质量通量总量。利用 Ψ 在极地为零的边界条件,热带外南北两半球净向下的质量通量是由 $|\Psi|$ 取最大值的纬度所决定的,在这一纬度上剩余垂直速度的方向也刚好发生改变。因此,可将该纬度称为“转向纬度”(turnaround latitudes, TLs),并令 φ_S 和 φ_N 分别表示南北两半球 Ψ 达到极值时的 TLs。很显然,南北两半球热带外质量通量的表达式分别为

$$\begin{aligned} F_m(\text{N}) &= -2\pi a\Psi(\varphi_N), \text{ North,} \\ F_m(\text{S}) &= 2\pi a\Psi(\varphi_S), \text{ South,} \end{aligned} \quad (3)$$

根据质量守恒定理,热带净向上的质量通量应等于热带外南北两半球净向下的质量通量总和,则有

$$F_m(T) = 2\pi a[\Psi(\varphi_N) - \Psi(\varphi_S)]. \quad (4)$$

3 Brewer-Dobson 环流的空间演变

图 1 所示的是根据方程(2),通过积分 \bar{v}^* 计算的 1979—2011 年间不同季节 12 月—次年 2 月(DJF),3—5 月(MAM),6—8 月(JJA)和 9—11 月(SON)期间,各季节内平均剩余速度流函数的纬度-高度剖面图.与利用 DC 原理计算的流函数(王卫国等,2013)相比较,在此给出的 BD 环流在热带地区的形势更加清晰.环流在热带对流层中上层上升至平流层中下层,最高可达 1 hPa 等压面附近.然后在热带外向极向下运动,最后在中高纬度下沉回到对流层.

从图 1 中可看出,在 4 个不同的季节里 BD 环流的上升中心随季节而变动.在对流层中 DJF 和

JJA 期间,上升中心分别位于南北纬度 10° 附近.而在平流层中,DJF 期间上升中心位于 30°S 附近,高度可达到 1 hPa 等压面,且 BD 环流在北半球的形势要明显强于南半球. JJA 期间环流的上升中心已移至 25°N — 30°N 附近,其中心强度以及上升高度稍弱于 DJF 期间北半球的形势.但仍可看到, JJA 期间南半球的环流形势要强于北半球.换言之, BD 环流在冬半球的形势要明显强于夏半球.在 MAM 与 SON 期间上升中心均位于赤道— 5°N 附近,上升高度大约在 10 hPa 等压面附近,环流在南北两半球呈对称形势.这与利用 DC 原理分析的结果(王卫国等,2013)相一致.

对流层的环流上升区在赤道— 15° 附近,而在 15° — 30° 间为下沉区.且在 30° — 60° 又呈现出上升运动,随后从 60° —极地再转为下沉运动,并表现出低纬度的上升运动强度要大于中高纬度.在平流层中, DJF 期间环流的上升区位于 30°S — 30°N 间, JJA 期间则在 15°N —赤道附近为上升区, MAM 与

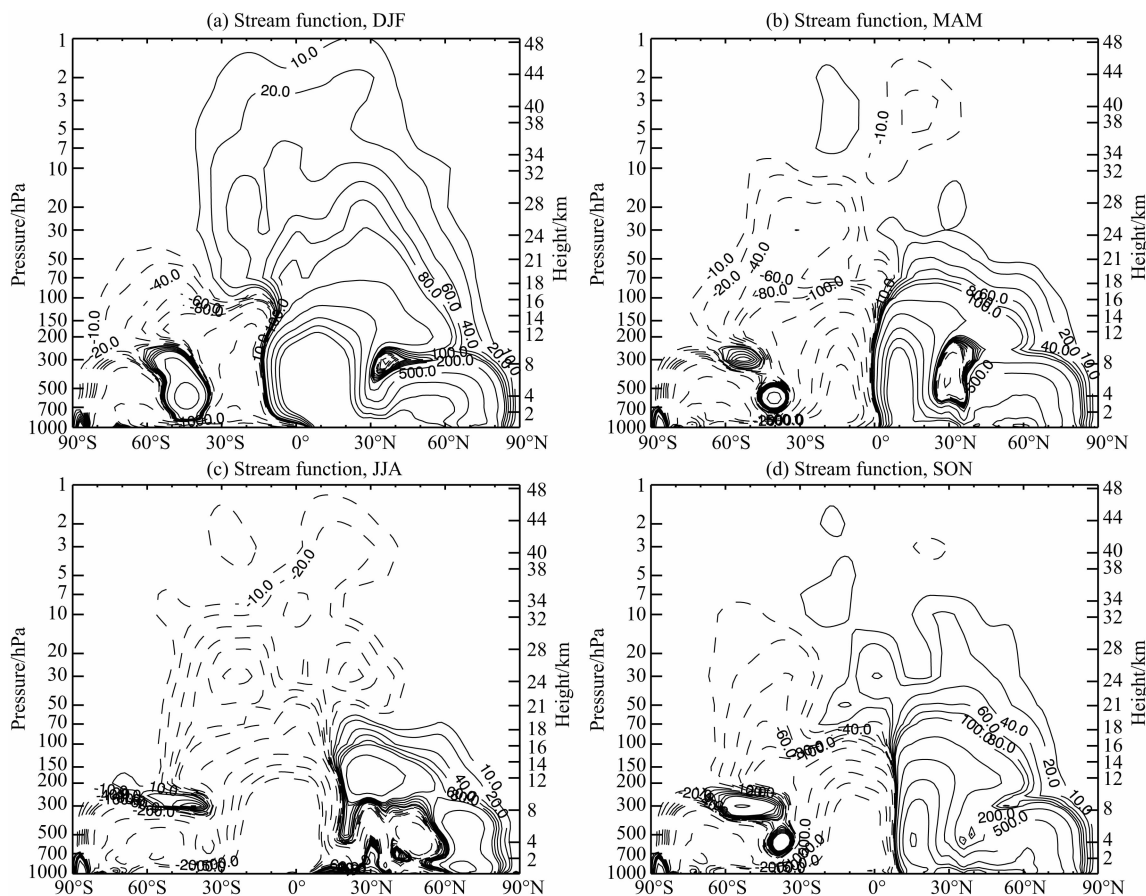


图 1 1979—2011 年不同季节平均剩余环流流函数的纬度-高度剖面图(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 等值线的间隔是 $\pm 10, \pm 20, \pm 40, \pm 60, \pm 80, \pm 100, \pm 200, \pm 500, \pm 1000, \pm 1500, \pm 2000$

Fig. 1 Latitude-altitude cross section of residual circulation stream function calculated for 1979—2011 (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

The contour levels are $\pm 10, \pm 20, \pm 40, \pm 60, \pm 80, \pm 100, \pm 200, \pm 500, \pm 1000, \pm 1500, \pm 2000$

SON 期间上升区在赤道附近,4 个季节里的下沉运动区均大约存在于 30° —极地间.由此给出的 BD 环流形势与应用模式 (Rosenlof and Holton, 1993; Rosenlof, 1995), 以及利用再分析资料通过积分剩余速度 \bar{w}^* (Seviour et al., 2012) 估算出的 BD 环流形势是相类似的.

4 Brewer-Dobson 环流的时间演变

4.1 质量通量的季节变化

表 1 给出了不同季节穿越南北两半球热带外 100 hPa 等压面,向下的质量通量和流函数达到极值时所在纬度的分布.同时,表中还将这一计算结果与利用 CCM2 模式输出的 \bar{w}^* (Rosenlof and Holton, 1993), 以及通过 UKMO (1979—1989 年) 数据考虑

重力波得到的结果进行比较.为了消除不同时间段资料所造成的差异性,在表 1 和表 2 中给出的是对 1979—1989 年同一时间段质量通量的计算结果.从表 1 中看到,用 3 种不同方法计算的结果,在北半球有类似的季节变动,而在南半球季节的变动则存在一些差异.由方程(3)计算出的北半球质量通量最大值在 DJF 期间达 $13.9 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值则出现在 JJA 期间为 $3.7 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 年平均为 $8.83 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. 南半球质量通量最大值出现于 JJA 期间为 $9.9 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值在 DJF 期间为 $2.1 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 年平均值为 $5.88 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. 其他两种方法给出的最大值和最小值均分别出现在 MAM 与 DJF 期间.从表 1 中还可看出,北半球质量通量的最大值远大于南半球的最大值,这与行星波在北半球冬季更加强盛相一致.

表 1 1979—1989 年热带外不同季节 100 hPa 等压面向下的质量通量变化及其与 Rosenlof 和 Holton (1993) 的计算结果对比 (单位: $10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 1 Extratropical downward mass flux at 100 hPa, compared with the results from Rosenlof and Holton (1993) calculated for 1979—1989 (unit: $10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

季节	北半球						南半球					
	ERA-Interim		CCM2		UKMO		ERA-Interim		CCM2		UKMO	
	纬度	通量	纬度	通量	纬度	通量	纬度	通量	纬度	通量	纬度	通量
DJF	18.0°N	13.9	16.5°N	12.5	16.5°N	12.6	46.5°S	2.1	38.5°S	3.2	16.5°S	3.5
MAM	15.0°N	7.9	31.2°N	7.4	31.2°N	8.6	15.0°S	7.5	16.5°S	7.2	9.2°S	5.9
JJA	28.5°N	3.7	45.9°N	3.2	45.9°N	3.2	15.0°S	9.9	16.5°S	5.8	20.2°S	5.7
SON	24.0°N	9.8	31.2°N	8.0	34.8°N	6.6	15.0°S	4.0	42.2°S	3.9	42.2°S	3.9
Mean		8.83		7.78		7.75		5.88		5.03		4.75

表 2 是不同季节穿越热带地区 100 hPa 等压面向上的质量通量的计算结果比较.由方程(4)计算的向上质量通量最大值出现在 DJF 期间为 $15.9 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值为 JJA 期间 $13.6 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $14.68 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. 通过对比可知,3 种数据计算得到的热带地区质量通量均有同样的季节波动特征.

质量通量在热带以及热带外南北两半球随季节变动的特征,与图 1 所示的 BD 环流随季节的分布变化形势是一致的,表现为冬半球的质量通量要强于夏半球.通过表 1 和表 2 中 3 种方法的对比表明,不同数据计算得到的质量通量有同样的季节波动特征,但在纬度和质量通量的具体数值方面仍存在一定的差异性.造成这些差异的原因是多方面的,首先是计算方法的差异性,另外从资料的来源和资料的误差上也存在着差异性.

表 2 1979—1989 年热带区域 100 hPa 等压面向上的质量通量 (单位: $10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), 与表 1 类似

Table 2 Tropical upward mass flux at 100 hPa calculated for 1979—1989 (unit: $10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), as in Table 1

季节	热带		
	ERA-Interim	CCM2	UKMO
DJF	15.9	15.7	16.1
MAM	15.4	14.6	14.5
JJA	13.6	9.0	8.9
SON	13.8	11.2	10.5
Mean	14.68	12.63	12.50

4.2 质量通量的年际变化

对 BD 环流演变趋势的探讨,可通过质量通量随时间的变化而再现其演变特征.图 2 给出了热带和热带外穿越 100 hPa 和 50 hPa 等压面,向上及向

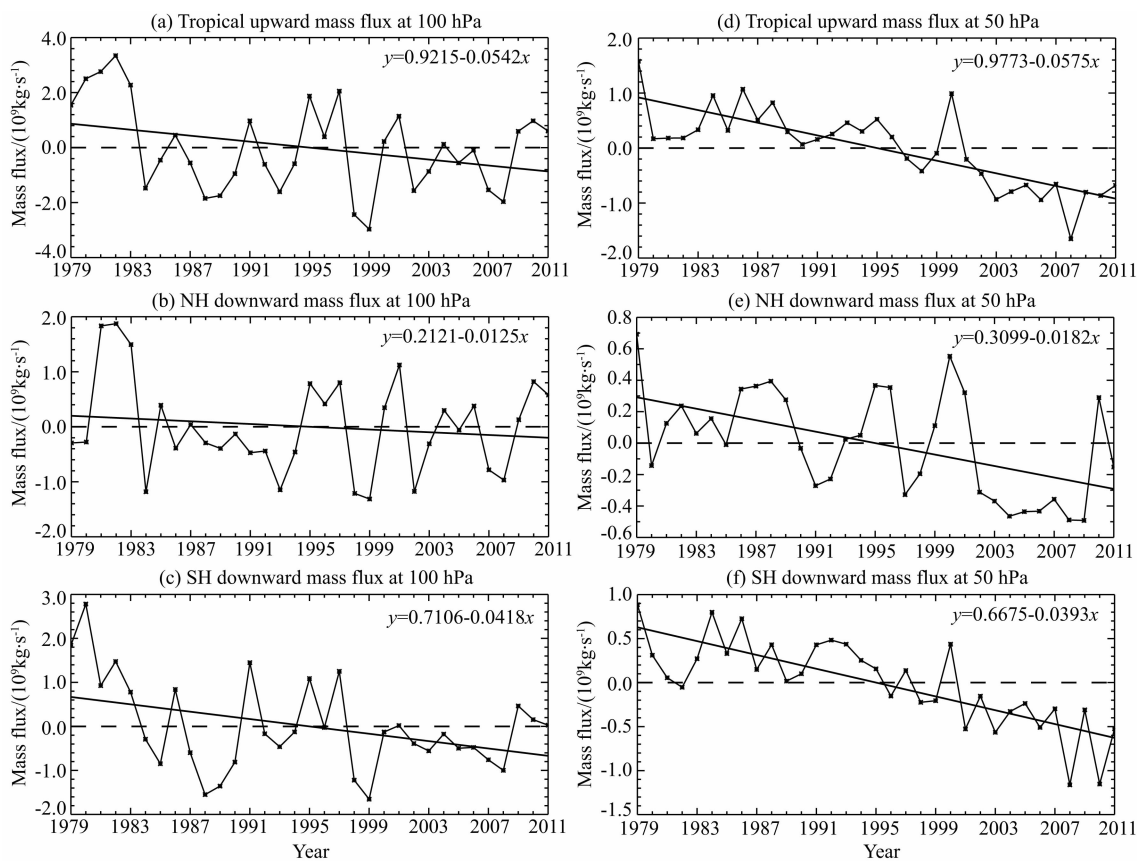


图2 热带及热带外南北两半球 100 hPa, 50 hPa 等压面质量通量的距平时间序列图(曲线为距平值, 直线为线性拟合, 虚线为 0 值)

(a) 热带地区 100 hPa; (b) 北半球 100 hPa; (c) 南半球 100 hPa; (d) —(f) 为 50 hPa, 与(a) —(c) 对应的区域相同。

Fig. 2 Time series of the departure of tropical and extratropical mass flux at 100 hPa and 50 hPa

(The curved lines indicate the departures, the straight lines indicate the linear trends, the dotted lines indicate 0)

(a) Tropical 100hPa; (b) Northern Hemisphere (NH), 100hPa; (c) Southern Hemisphere (SH), 100hPa;

(d) —(f) As (a) —(c), except for 50 hPa.

下的质量通量时间序列距平图。从图中可看出, 1979—2011 年的 33a 间从对流层进入平流层下层, 以及由平流层下层进入对流层的质量通量都呈现出减弱的趋势。在图 2a—2c 中 1979—1983 年间, 100 hPa 等压面附近向上和向下的质量通量都较强, 且呈现出先增强再减弱的变化过程。热带与热带外北半球的最大值均出现在 1982 年, 南半球最大值出现在 1980 年。从 1983—1999 年间, 质量通量呈减弱趋势, 最小值均出现在 1999 年, 期间质量通量在 1995, 1997 年出现了一个明显的增强过程。2009—2011 年质量通量有微弱的增强趋势, 且都高于 33a 的平均值, 但仍处于自 1979 年以来的低值区。由图 2d—2f 看到, 在 50 hPa 等压面附近质量通量从 1979—1999 年呈现减弱趋势, 最大值出现在 1979 年, 但 2000 年有明显的增强, 2000—2011 年间质量通量的减弱更加显著。

表 3 给出了图 2 中的质量通量距平序列的回归系数及相关系数。可以看到, 33a 间热带 100 hPa 等压面的质量通量减弱了 $1.79 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 50 hPa 等压面的质量通量减弱了 $1.90 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在热带外北半球 100 hPa 等压面上质量通量减弱了 $0.41 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 50 hPa 等压面减弱了 $0.60 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。热带外南半球 100 hPa 等压面上质量通量减弱了

表 3 100 hPa 与 50 hPa 等压面上质量通量距平序列的回归系数(单位: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) 以及相关系数
Table 3 The regression and correlation coefficients of the departure of mass flux (units: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) at 100 hPa and 50 hPa

	100 hPa			50 hPa		
	Tropical	NH	SH	Tropical	NH	SH
回归系数	-5.42	-1.25	-4.18	-5.75	-1.82	-3.93
相关系数	-0.33	0.14	0.39*	-0.79*	0.53*	0.89*

注: “*” 表示通过了 95% 的显著性检验, 其中 $r_a = 0.3440$ 。

$1.38 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 50 hPa 等压面减弱了 $1.30 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. 由此可见,随着高度的增加,热带及热带外北半球质量通量减弱的幅度有所增加,而热带外南半球质量通量减弱的幅度减少. 仅除热带及热带外北半球 100 hPa 等压面的区域,其余区域质量通量的趋势变化均通过了 95% 的显著性检验.

为进一步研究 BD 环流在不同季节里,各高度上的年际变化趋势,表 4 给出了不同季节 100 hPa 和 50 hPa 等压面上质量通量距平序列的回归系数及相关系数. 通过分析可知,质量通量的变化在不同季节的不同高度上均存在差异. 除不同区域的少数

季节外,不同高度上质量通量都呈减弱趋势. 且在 50 hPa 等压面上通过 95% 显著性检验的季节,较 100 hPa 等压面偏多. 50 hPa 等压面上不同季节的质量通量变化趋势是显著的.

综上所述,在过去 33a 间 100 hPa 及 50 hPa 等压面附近的质量通量,在热带及热带外均呈减弱趋势,由此显现出 BD 环流在近 33a 中呈减弱趋势. 在平流层中下层的减弱趋势尤其显著,这与 Seviour 等(2012)的研究结果是相一致的. 但 BD 环流在不同季节的不同高度,以及不同年际和年代际时间段的变化趋势则又有所不同.

表 4 不同季节 100 hPa 和 50 hPa 等压面上质量通量的距平序列回归系数(单位: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)以及相关系数

Table 4 The regression and correlation coefficients of the departure of mass flux (units: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) at 100 hPa and 50 hPa in different seasons

Season	100 hPa						50 hPa					
	Tropical		NH		SH		Tropical		NH		SH	
	回归系数	相关系数	回归系数	相关系数	回归系数	相关系数	回归系数	相关系数	回归系数	相关系数	回归系数	相关系数
DJF	-3.23	-0.17	-2.14	-0.14	-1.10	-0.11	-5.37	-0.54*	-6.29	-0.61*	0.91	0.29
MAM	-15.24	-0.54*	-7.52	-0.51*	-7.72	-0.45*	-7.64	-0.77*	-1.81	-0.34*	-5.82	-0.83*
JJA	-3.78	-0.18	2.39	0.20	-6.18	-0.38*	-6.96	-0.64*	0.46	0.13	-7.43	-0.67*
SON	3.34	0.14	2.51	0.21	0.83	0.05	-3.81	-0.45*	-0.63	-0.11	-3.19	-0.46

注:“*”表示通过了 95% 的显著性检验,其中 $r_\alpha = 0.3440$. r_α 是在确定显著性水平 α 下的相关系数. 若 $|r| > r_\alpha$, 表明变化趋势是显著的.

5 与 DC 原理的对比研究

图 3 和图 4 分别给出的是积分 \bar{v}^* 以及利用 DC 原理计算的 100 hPa 和 50 hPa 等压面上,剩余环流函数在不同季节的分布变化形势. 通过对比可知,由两种方法计算的流函数在不同季节的不同纬度,以及不同高度上都存在差异. 从分布形势看,两种方法仅在中高纬度地区流函数分布具有一定的相似性,而 50 hPa 等压面上的差异性要明显地大于 100 hPa 等压面,即随着高度的增加二者的差异有所增大. 低纬度地区的差异要明显地大于中高纬度,但随着高度的增加差异有所减小. 通过对比分析流函数的数值有,除个别季节外,南北两半球高纬度地区利用 DC 原理计算的剩余流函数,要比积分 \bar{v}^* 估算的值偏大,在中低纬度 DC 原理估算的值又明显小于积分 \bar{v}^* 得到的值. 而在图 3d 和图 4d 的 SON 期间,100 hPa 和 50 hPa 等压面上的 60°S 附近,DC 估算的剩余流函数值与 \bar{v}^* 估算的出现了较明显的差异. 产生这些差异的可能原因是:(1) TEM 方程在春秋两季节有一定的局限性,使这两季期间的流函数差

异要比 DJF 与 JJA 期间的误差大.(2)在利用 DC 原理估算剩余流函数时,忽略了 GWD 的作用从而导致了流函数值的偏差.(3) DC 原理在热带地区是不适用的,因此在低纬度二者计算的剩余流函数的差异更大.

从图中还可看出,通过积分计算的剩余流函数,在北半球 4 个季节中的不同高度上达到极值的纬度位置,大约在 20°N — 30°N . 在南半球除 JJA 期间外,极值出现在 10°S — 15°S ,而 JJA 期间则位于赤道附近. 这与利用模式 (Rosenlof and Holton, 1993; Rosenlof, 1995) 估算的 JJA 期间,剩余流函数在南半球出现极值的位置存在一定的差异,引起差异的原因有待于进一步的分析研究.

由于 DC 原理是利用变换的欧拉方程,通过求解 E-P 通量 (Eliassen-Palm flux) 得到的流函数,而积分 \bar{v}^* 是直接采用风场资料通过积分求解出的流函数. 通过对比研究两种方法计算得到的 BD 环流形势和剩余流函数,在 100 hPa 等压面的分布形势发现,除在平流层中部分环流形势没有 DC 原理给出的规整外,环流的整体变化形势是类似的. 由积分剩余速度 \bar{v}^* 方法给出的热带地区环流的上升中心,

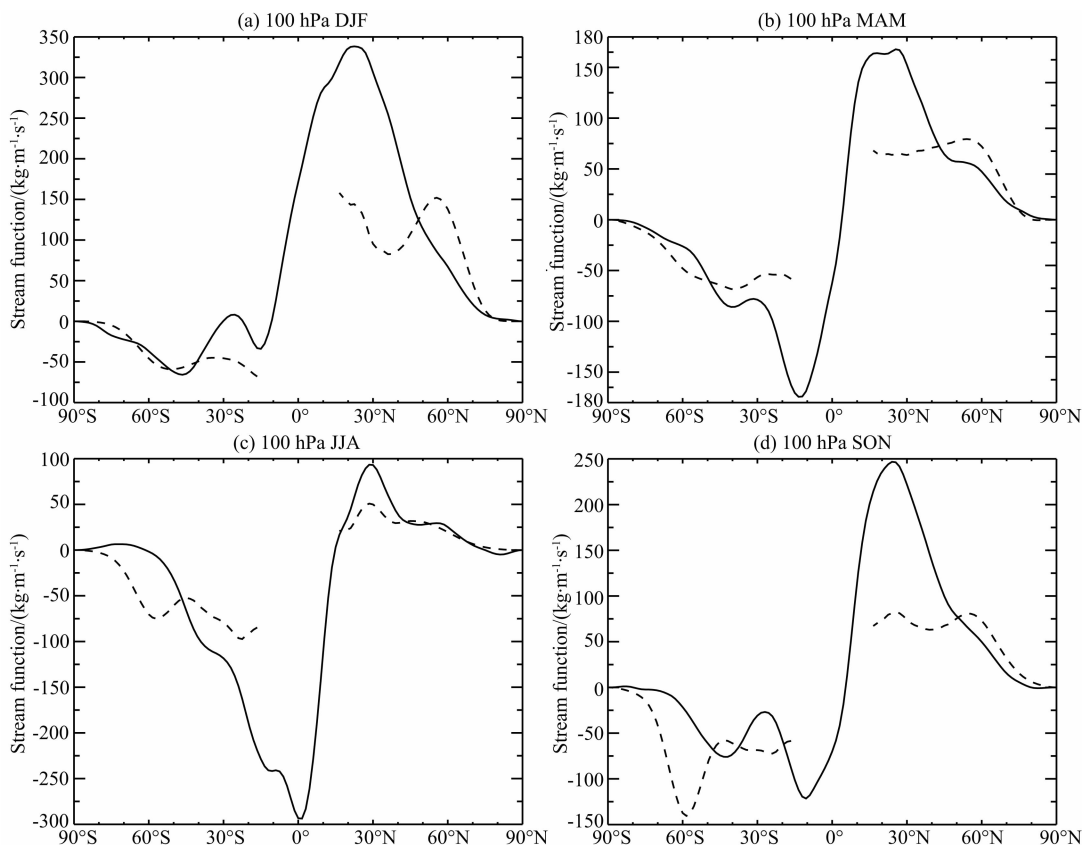


图3 积分剩余经向速度(实线)以及利用DC原理(虚线)计算的1979—2011年不同季节100 hPa等压面剩余环流函数分布比较

Fig. 3 Residual circulation stream function at 100 hPa calculated for 1979—2011 in different seasons, calculated by integrating \bar{v}^* (solid line) and the method of DC (dashed line)

随季节的南北变动更加清晰。而且该方法在计算剩余流函数时,直接积分方程(1)计算得到剩余速度,并没有忽略GWD的作用。Seviour等(2012)指出70%的年平均上升质量通量是由波驱动引起的,在利用ERA-Interim积分剩余速度的计算中,其他的纬向强迫 \bar{X} (如,GWD)仅为4%,由此得到的环流形势更接近真实情况。需指出的是,在计算过程中两种方法均会产生相应的误差,且两种方法得到的结果有所不同,至于哪种方法计算的结果与实际情况更为符合接近,有待于进一步的验证。

6 纬向平均温度的时间演变

平流层温度场的分布变化与臭氧、水汽、气溶胶和温室气体等痕量成分的含量变化有着十分密切的联系。臭氧吸收太阳紫外辐射使得温度升高,而温室气体的辐射效应将导致温度的降低。同时,平流层动力与大气化学过程也将影响着平流层温度的变化。然而,在全球尺度中影响平流层纬向平均温度分布

的主要动力过程是BD环流(Young et al., 2011)。全球平流层温度的变化又将引起大气痕量成分含量分布的改变,进而导致平流层重力波和行星波等的相应变化,并可使BD环流的分布形势发生改变。在平流层中温度的分布变化与动力过程、大气化学反应之间存在着非常重要的反馈机理。

已有的研究表明,热带及热带外平流层温度的异常变化与BD环流的变化息息相关。当环流弱(强)于平均年份时(Randel et al., 2002),热带的温度场异常的暖(冷),而热带外则异常的冷(暖)。图5给出了不同高度的不同纬度带纬向平均温度的距平时间序列图。同时,表5给出了纬向平均温度距平变化趋势的回归系数及相关系数。如图所示,1979—2011年的33a间热带地区100 hPa等压面附近(图5a),温度是逐年明显升高的,幅度为0.81 K。特别是2001—2011年间升温更明显,这与前面分析的100 hPa等压面附近热带地区环流的减弱趋势相匹配。然而,在热带地区平流层中下层(图5d),温度出现了明显的下降趋势,幅度达1.70 K。这与此高度

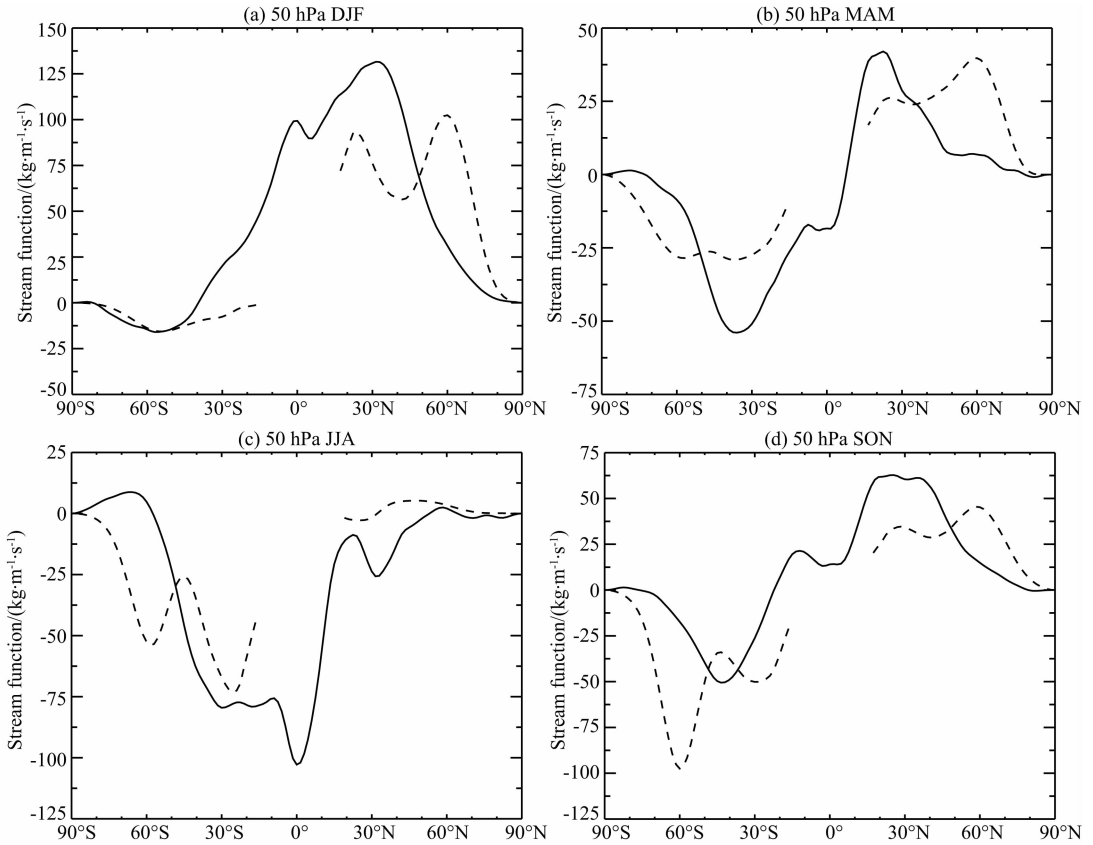


图4 1979—2011年不同季节50 hPa等压面上两种方法计算的剩余环流流函数分布比较,与图3相同

Fig. 4 Residual circulation stream function at 50 hPa calculated for 1979—2011 in different seasons, calculated by two methods, as in Fig. 3

上热带地区环流的长期减弱趋势不相一致。

在100 hPa和50 hPa等压面上南北两半球中高纬度,纬向温度的长期变化均呈下降趋势(图5b, 5c, 5e, 5f)。由表5可知,温度的下降趋势不是很显著。在北半球,100 hPa等压面降温幅度仅为0.05 K, 50 hPa等压面为0.86 K。可见,随着高度的增加,降温幅度更大。而南半球与之相反,100 hPa等压面降温幅度为1.96 K, 50 hPa等压面则是0.62 K。结果表明,温度在南北两半球中高纬度长期的变化趋势与南北两半球BD环流的长期减弱趋势是相匹配的。

同样,对不同高度的不同纬度带纬向温度随季节变化趋势的分析(图略),结果表明,在不同季节的不同高度纬向温度变化也存在差异性,更进一步反映了平流层温度与BD环流是相互影响的。

由以上的分析显现出,当BD环流呈减弱趋势时,与热带100 hPa等压面纬向平均温度的升高,以及南北两半球中高纬度100 hPa, 50 hPa等压面纬向平均温度的下降趋势相匹配。这进一步论证了利用TEM方程通过积分剩余速度 \bar{v} ,得出的全球BD环流呈减弱趋势的结果。而环流的减弱与热带

表5 100 hPa和50 hPa等压面纬向平均温度距平序列的回归系数(单位: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$)以及相关系数

Table 5 The regression and correlation coefficients of the departure of zonal mean temperature (unit: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$) at 100 hPa and 50 hPa

	100 hPa			50 hPa		
	EQ	45°N— 90°N	45°S— 90°S	EQ	45°N— 90°N	45°S— 90°S
回归系数	2.44	-0.14	-5.93	-5.14	-2.6	-1.88
相关系数	0.5478*	-0.0175	-0.5310*	-0.5202*	-0.3491*	-0.1920

50 hPa等压面温度的下降趋势不相匹配,正如前面所提及的平流层的温度变化与臭氧含量、温室气体等有关。因此,需进一步研究这些大气成分对平流层温度的影响,进而解释引起二者不一致的具体影响机制。Seviour等(2012)的研究同样表明,热带地区70 hPa等压面附近温度的下降趋势与70 hPa等压面向上的质量通量的减弱趋势之间也存在着不相匹配的现象,且解释为ERA-Interim再分析数据中没有考虑到臭氧对各气象要素的影响是引起二者不一

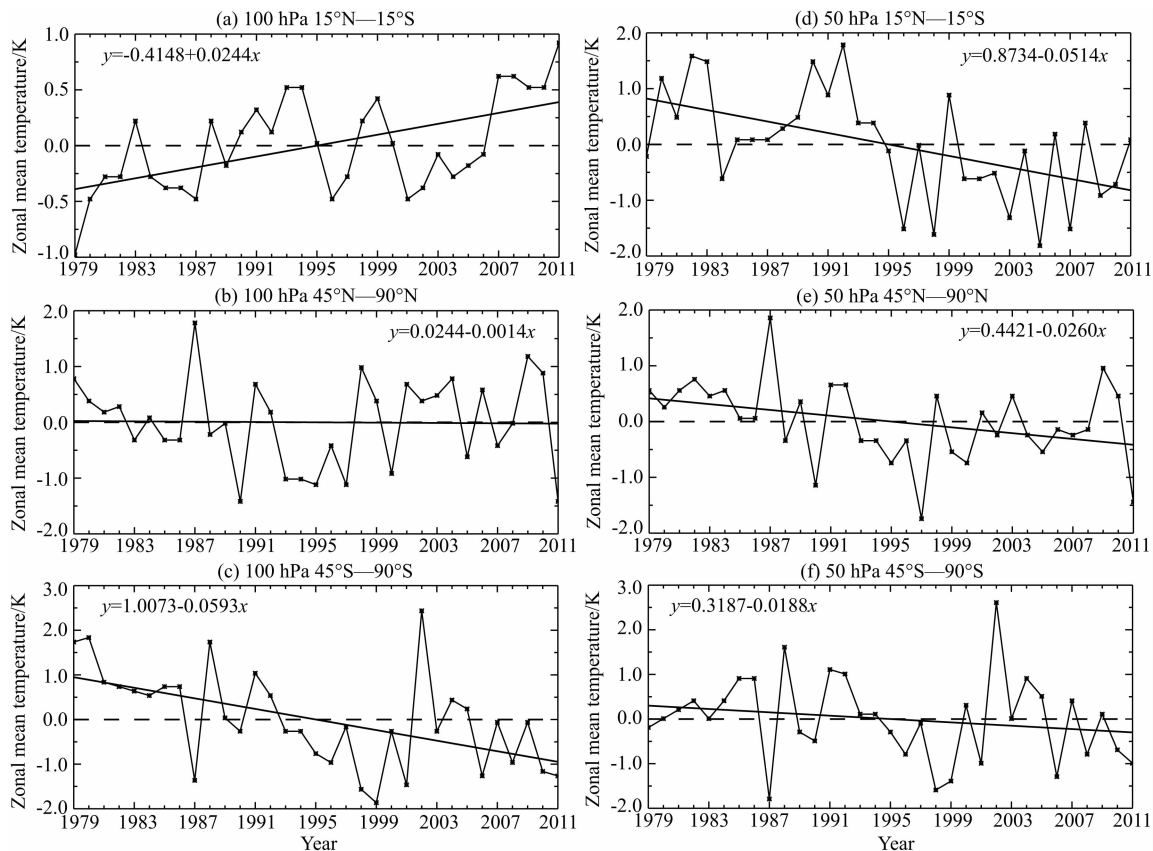


图 5 100 hPa 和 50 hPa 等压面不同纬度带纬向平均温度的距平时间序列图

(a) 100 hPa, 15°N—15°S; (b) 100 hPa, 45°N—90°N; (c) 100 hPa, 45°S—90°S; (d)–(f) 为 50 hPa, 与 (a)–(c) 对应的区域相同。

Fig. 5 Time series of the departure of zonal mean temperature in different latitudinal band at 100 hPa and 50 hPa

(a) 100 hPa, 15°N—15°S; (b) 100 hPa, 45°N—90°N; (c) 100 hPa, 45°S—90°S; (d)–(f) as (a)–(c), except for 50 hPa.

致的原因。

7 结论与讨论

选用 ERA-Interim 再分析资料,通过积分剩余速度 \bar{v}^* 研究了 1979—2011 年间 BD 环流的时空演变规律,并将其与 DC 原理研究的结果进行比较,同时对纬向平均温度与 BD 环流长期演变趋势之间的相互联系进行了分析,得到以下的结论和认识:

(1) BD 环流的上升中心随季节变动. 在平流层 DJF 期间上升中心位于 30°S 附近, JJA 期间环流的上升中心移至 25°N—30°N 之间, 环流在冬半球的形势明显强于夏半球. MAM 与 SON 期间上升中心位于赤道—5°N 附近, 环流在南北两半球呈对称形势. 然而, 在不同高度上的不同大气环流系统之间的季节转换及其相互作用, 也将影响着 BD 环流上升中心季节移动的快慢, 以及最终可能到达的最南或最北的经纬度位置, 从而导致了 BD 环流上升中心位置随季节和年际的变动呈现出差异性. 由于 BD

环流的上升运动能使大气低层的物质和能量向高层运输, 因而影响着全球天气和气候系统的变化. 特别是人类活动可通过 BD 环流上升中心的季节移动, 而导致全球气候的改变.

(2) 由于平流层行星波存在着显著的季节变化, 使得 BD 环流也有类似的季节变动. 在热带和热带外北半球质量通量的最大值均出现在 DJF 期间, 最小值则出现在 JJA 期间. 热带外南半球质量通量最大值出现在 JJA 期间, 最小值出现在 DJF 期间. 在热带和热带外 100 hPa 和 50 hPa 等压面向上和向下的质量通量均为减弱趋势, 且质量通量在平流层中下层的减弱趋势是显著的. 但在不同季节的不同高度上, 质量通量的长期变化趋势则有所不同. 因此, BD 环流在不同季节的不同高度上的变化趋势也并不完全相一致, 存在着随季节性的变动.

(3) 除热带 50 hPa 等压面纬向平均温度的变化趋势外, 在热带 100 hPa 等压面及热带外南北两半球中高纬度 100 hPa 和 50 hPa 等压面纬向平均温度的长期变化趋势, 与 BD 环流的长期减弱趋势

相匹配。因此,揭示出全球 BD 环流是呈现减弱趋势的。同时,不同高度上不同纬度带的纬向平均温度也存在着随季节性的变动。

(4) 利用 GCMs 模式(Butchart et al., 2006)研究表明,近些年来平流层 BD 环流是增强的。根据 DC 原理利用 CCSR/NIES CCM REF2 模式数据(Okamoto et al., 2011),研究了 21 世纪以来 BD 环流的长期演变趋势,结果表明 BD 环流也是增强的。王卫国等(2013)通过应用 DC 原理分析的 BD 环流在过去的 33a 间也呈微弱的增强趋势。但是为了与模式研究的 BD 环流的长期变化结果相比较,一些学者使用示踪物资料对环流进行了相关研究,结果显示环流并没有出现增强的现象。从 1990 年在南极进行的 NO_y 测量(Cook and Roscoe, 2009),并没有观测到 BD 环流有明显的增强趋势。利用六氟化硫(SF₆)和 CO₂ 混合比(Engel et al., 2009)通过估算平流层痕量气体成分寿命表明,从 1975—2005 年 BD 环流并没有增强的现象。采用 1980—2009 年的 ERA-Interim 资料(Seviour et al., 2012)研究的 BD 环流也呈现减弱的趋势。这与我们的研究结果相一致。Iwasaki 等(2009)的研究表明,不同的研究方法以及数据中存在的差异性,使得 BD 环流的趋势估算不可靠。尽管我们通过积分 \bar{v}^* 估算出的 BD 环流的分布形势及长期变化趋势,与一些学者运用其他方法和资料所得到的结果比较类似,但在未来的工作中,仍需要进一步研究来提高趋势变化估算的可靠性。

致谢 感谢 European Center for Medium-range Weather Forecasts 提供的数据。

References

Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics. San Diego, Calif.: Academic, 489PP.

Brewer A W. 1949. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 75(326): 351-363.

Butchart N, Scaife A A, Bourqui M, et al. 2006. Simulations of anthropogenic change in the strength of the Brewer-Dobson circulation. *Climate Dynamics*, 27(7-8): 727-741.

Chen Q L, Chen Y J. 2007. Stratospheric residual circulation and its temporal and spatial evolution. *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(1): 137-144.

Chen W, Huang R H. 1995. The dynamics planetary wave transport on ozone in the atmosphere. *Scientia Atmospherica*

Sinica (in Chinese), 19(5): 513-524.

Chen W, Huang R H. 1996a. The numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part I: The case of steady mean flows. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 20(5): 513-523.

Chen W, Huang R H. 1996b. A numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part II. The case of wave-flow interaction. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 20(6): 703-712.

Cook P A, Roscoe H K. 2009. Variability and trends in stratospheric NO₂ in Antarctic summer, and implications for stratospheric NO_y. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(11): 3601-3612.

Deng S M. 2007. Study on the dynamical process of stratospheric sudden warming and its effects on the distribution of trace gases [Ph. D. thesis] (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China.

Dobson G M B. 1952. Ozone in the Earth's atmosphere. *Endeavour*, 11: 215-219.

Edmon H J Jr, Hoskins B J, McIntyre M E. 1980. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. *Journal of the Atmospheric Science*, 37(12): 2600-2616.

Engel A, Möbius T, Bönisch H, et al. 2009. Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years. *Nature Geosci.*, 2(1): 28-31.

Haynes P H, McIntyre M E, Shepherd T G, et al. 1991. On the "downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(4): 651-678.

Holton J R. 1990. On the global exchange of mass between the stratosphere and troposphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(3): 392-395.

Iwasaki T, Hamada H, Miyazaki K. 2009. Comparisons of Brewer-Dobson circulations diagnosed from reanalyses. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87(6): 997-1006.

Okamoto K, Sato K, Akiyoshi H. 2011. A study on the formation and trend of the Brewer-Dobson circulation. *J. Geophys. Res.*, 116: D10117.

Randel W J, Garcia R R, Wu F. 2002. Time-dependent upwelling in the tropical lower stratosphere estimated from the zonal-mean momentum budget. *J. Atmos. Sci.*, 59(13): 2141-2152.

Roscoe H K. 2006. The Brewer-Dobson circulation in the stratosphere and mesosphere -Is there a trend? *Advances in Space Research*, 38(11): 2446-2451.

Rosenlof K H, Holton J R. 1993. Estimates of the stratospheric residual circulation using the downward control principle. *Journal of Geophysical Research*, 98(D6): 10465-10479.

Rosenlof K H. 1995. Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 100(D3): 5173-5191.

- Seviour W J M, Butchart N, Hardiman S C. 2012. The Brewer-Dobson circulation inferred from ERA-Interim. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(665): 878-888.
- Wang W G, Fan W X, Wu J, et al. 2006. A study of spatial-temporal evolution of the global cross-tropopause ozone mass flux. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(6): 1595-1607.
- Wang W G, Yang F Y, Zheng J M, et al. 2013. A study on the trend of the Brewer-Dobson circulation in light of the downward control principle. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)* (in Chinese), 35(3): 328-337.
- Young P J, Thompson D W J, Rosenlof K H, et al. 2011. The seasonal cycle and interannual variability in stratospheric temperatures and links to the Brewer-Dobson circulation: an analysis of MSU and SSU data. *Journal of Climate*, 24(23): 6243-6258.
- Zhang H, Chen Y J, Wu B Y. 2001. Impact of the quasi-biennial oscillation on the distribution of the trace gases in the stratosphere. *Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24(1): 103-110.

附中文参考文献

- 陈权亮, 陈月娟. 2007. 平流层剩余环流及其时间演变特征. *大气科学*, 31(1): 137-144.
- 陈文, 黄荣辉. 1995. 准定常行星波对大气中臭氧输运的动力作用. *大气科学*, 19(5): 513-524.
- 陈文, 黄荣辉. 1996a. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 I. 常定流的情况. *大气科学*, 20(5): 513-523.
- 陈文, 黄荣辉. 1996b. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 II. 波流相互作用的情况. *大气科学*, 20(6): 703-712.
- 邓淑梅. 2007. 平流层爆发性增温的动力学过程及其对微量气体分布影响的研究[博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 王卫国, 樊雯璇, 吴润等. 2006. 全球平流层-对流层之间臭氧通量的时空演变研究. *地球物理学报*, 49(6): 1595-1607.
- 王卫国, 杨芳园, 郑建萌等. 2013. 利用向下控制原理对 Brewer-Dobson 环流变化趋势的研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 35(3): 328-337.
- 张弘, 陈月娟, 吴北婴. 2001. 准两年振荡对大气中微量气体分布的影响. *大气科学*, 24(1): 103-110.

(本文编辑 何燕)