# 平流层剩余环流及其时间演变特征

陈权亮 陈月娟

中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

**摘 要** 平流层剩余环流是由剩余速度 v<sup>\*</sup> 和 ω<sup>\*</sup> 构成的平流层经向-垂直环流,它对于对流层-平流层相互作用和物质交换起着十分重要的作用。作者利用 1979~2003 年 NCEP II 再分析资料计算了剩余速度 v<sup>\*</sup> 和 ω<sup>\*</sup>,并与数 值模拟结果进行了比较,再用计算的剩余环流讨论了它的季节变化、年际变化和长期变化趋势。计算结果表明,剩余环流的上升气流从低纬度赤道地区对流层顶上升到平流层下部,然后向极向下运动,在中纬度地区下沉,进 人对流层,这也就是 Brewer-Dobson 环流。计算结果同数值模拟结果比较一致。由此可见,可以利用 NCEP 资料 得到比较清晰的剩余环流和 Brewer-Dobson 环流。剩余环流有明显的季节变化,上升气流的中心随着季节的变化 在赤道地区南北移动,春秋季节其中心基本上位于赤道附近,南北半球大致呈对称分布,只是北半球副热带地区 的下沉气流要比南半球强。在冬夏季节,上升气流的中心分别位于南北纬 10°附近。北半球夏季的上升气流要比 南半球夏季的上升气流强,同时冬半球的下沉气流比夏半球的下沉气流强。剩余环流还有年际变化和准两年周 期振荡特征,在纬向风为西风位相时,赤道地区的上升气流比较弱;而在东风位相时,上升气流和水平方向的输送相对比较强。剩余环流的十年际变化表现为,1979~1983 年、1990~1995 年、2000~2003 年较强,其他年份则 较弱。在过去 25 年,就总的变化趋势而言,剩余环流的上升气流有所增强,平流层下部向中纬度地区的输送也有 所增强,环流整体形势是增强的。

关键词 平流层 剩余还流 Brewer-Dobson 环流 文章编号 1006 - 9895 (2007) 01 - 0137 - 08 中图分类号 P434 文献标识码 A

## Stratospheric Residual Circulation and Its Temporal and Spatial Evolution

## CHEN Quan-Liang and CHEN Yue-Juan

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

**Abstract** The stratospheric residual circulation is defined as the meridional and vertical components of the stratospheric motion while its latitudinal component is dominated, which plays an important role in the interaction and mass exchange between stratosphere and troposphere. The NCEP/NCAR Reanalysis Data from 1979 to 2003 are used to estimate the stratospheric residual circulation, and the model simulations are compared with the estimation. The results show that the estimation matches the model simulations well and the well-known Brewer-Dobson circulation can be clearly seen in the estimation. This work also shows that the residual circulation has obviously seasonal change. The center of ascending motion swings around the equator with seasonal variation. In spring and autumn, the center lies over the equator, and the ascending motion distribute symmetrically in the both hemispheres while the downwelling motion at the Northern middle latitudes is stronger than that of the Southern Hemisphere. In winter and summer, the center of upwelling lies at 10°S and 10°N, respectively. And the upwelling which appears in the Northern Hemisphere is stronger than that in the Southern Hemisphere while the downwelling in the winter hemisphere is stronger than that in the summer hemisphere. In addition, the residual circulation has interannual change

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40375012

作者简介 陈权亮, 男, 1979年7月出生, 博士生, 主要从事平流层 Brewer-Dobson 环流的研究。E-mail: cql@ustc. edu

**收稿日期** 2005-08-01, 2005-11-04 收修定稿

and quasi-biennial oscillation. The upwelling and horizontal transport is stronger in the easterly phase than those in the westerly phase of tropical zonal winds. The residual circulation decadal variation shows that the circulation is relatively stronger in those years: 1979 - 1983, 1990 - 1995, 2000 - 2003. Generally, the residual vertical velocity has been a little enhanced in the last 25 years, at the same time the transport towards middle latitude in low stratosphere also has become stronger.

Key words stratosphere, residual circulation, Brewer-Dobson circulation

# 1 引言

平流层大气动力学过程以水平方向的绕极气旋 为主。冬季极区平流层为一强大的绕极气旋环流, 夏季相反。维持在极区平流层的两个冬夏不同的环 流系统的活动及相互演变,是平流层大气的基本特 征。但是,在平流层中垂直-经圈方向的环流同样 也十分重要。在热带地区, Hadley 环流上升支可 以穿越对流层顶,空气质量由对流层向平流层输 送,而在中高纬地区,气流下沉回到对流层,使平 流层的空气质量向对流层输送,因此它在对流层和 平流层交换中起着十分重要的作用。在研究平流层 垂直-经向运动时,常常采用剩余环流。剩余环流 不同于传统的欧拉经圈环流。Andrews 等<sup>[1]</sup>的研 究指出,由波动所产生的平均经圈环流的输送与涡 动输送恰好相抵消,所以利用传统的欧拉经圈环流 来研究平流层中的输送不是很有效。Andrews 等[2]提出了拉格朗日方法(对每个气块沿运动的轨 迹取平均)来研究平流层中的输送,得到真正的输 送环流,也就是拉格朗日平均环流 (Lagrangrian mean circulation)。Andrews 等<sup>[1]</sup>和 McIntyre<sup>[3]</sup>还 详细讨论了拉格朗日平均环流与欧拉环流的关系, 他们用欧拉平均速度和涡动项的余差定义了一个剩 余速度  $\bar{v}^*$  和  $\bar{\omega}^*$ , 由  $\bar{v}^*$  和  $\bar{\omega}^*$  构成的在垂直经圈平 面上的环流称为剩余平均经圈环流(residual mean meridional circulation),通常简称为剩余环流(residual circulation),并指出剩余环流可以近似看成 是拉格朗日环流。Diane 等<sup>[4]</sup> 进一步对比了剩余环 流和拉格朗日平均环流,指出在不间断波的区域, 二者是十分吻合的。在间断波区域,二者有一定的 差异,但是究其值看来,差异也比较小。陈文和黄 荣辉归纳整理了上述研究工作,分析比较了行星波 定常保守时和行星波耗散时的剩余环流<sup>[5]</sup>,并构造 了一个34 层球坐标原始方程波-流相互耦合谱模

式,用剩余环流来讨论行星波对臭氧的输送<sup>[6,7]</sup>。 20002年,陈文和黄荣辉<sup>[8]</sup>再次用他们的计算结果 讨论了欧拉平均环流与剩余环流的差异以及 QBO 不同位相引起剩余环流的变化和对臭氧输送的差 异。

早在1949年, Brewer<sup>[9]</sup>提出:在热带,强积云 对流使空气穿过对流层顶进入平流层,由于热带地 区的对流层顶又高又冷,这样气团在低温的对流层 顶经过脱水,水汽混合比降低,随后气团在平流层 向下,向极地方向移动,在热带外是一支进入对流 层的返回流。随后, Dobson 等<sup>[10]</sup>指出这种向极向 下的环流(后来被称为 Brewer-Dobson 环流)是与 极地下平流层中观测到的高臭氧浓度一致的。 Haynes 等<sup>[11]</sup>指出,这种环流是由在热带外平流层 行星波引起的强迫而驱动的全球尺度的经向环流。 Dunkerton<sup>[12]</sup>的研究表明,应该将 Brewer-Dobson 环流理解为拉格朗日平均环流,而不是欧拉平均环 流。他认为,在低纬度地区,平流层下层相对是热 的,在高纬度地区平流层下层相对是冷的,因此平 流层下层的非绝热环流与 Brewer 和 Dobson 假定 的这种环流十分近似,这样就可以把平流层下层的 剩余环流认为是 Brewer-Dobson 环流。更多的研 究<sup>[13, 14]</sup>表明,剩余环流或 Brewer-Dobson 环流对 于平流层-对流层的交换及相互作用有着重要的意 义,同时它也对平流层的微量气体的分布和化学辐 射过程有着很大的影响。

平流层大气的垂直经圈环流,由于前期探空资料的匮乏,很多研究结果都来自理论分析和数值模拟,用实际资料计算平流层剩余环流和 Brewer-Dobson 环流被认为是非常困难的。而 NCEP 再分析 II 资料的出现,为我们研究剩余环流提供了可能。本文将利用 1979~2002 年的 NCEP 再分析资料来计算分析平流层剩余环流和 Brewer-Dobson 环流,与数值模拟结果作对比,并讨论其季节和年际变化特征。

# 2 资料和计算方法

本文所用的 NCEP 资料是美国国家环境预报 中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR) 联合 执行全球大气资料再分析计划发布的全球资料,共 有 17 层 (1000~10 hPa), 2.5°×2.5°经纬度网格。 本文所用的是从网上下载的从 1979 年到 2003 年的 月平均资料<sup>[15]</sup>。

在不同的垂直坐标系下计算剩余速度  $v^* 和 \omega^*$ 的公式有不同的表达形式。Andrews 等<sup>[1]</sup> 曾经给出在 Z 坐标下计算剩余速度的公式。为了便于用 NCEP 资料来计算,本文采用的是陈文和黄荣辉<sup>[8]</sup> 给出的 P 坐标系下的计算公式:

$$ar{v}^* = ar{v} - \left(rac{v' heta'}{ar{ heta}_p}
ight)_p, \ ar{\omega}^* = ar{\omega} + (a\cosarphi)^{-1} \left(\cosarphirac{\overline{v' heta'}}{ar{ heta}_p}
ight)_n,$$

其中, $\theta$ 是位温, *a* 是地球半径,  $\overline{v}$ 是经向平均风速,  $\overline{\omega}$ 是 *p* 坐标系的平均垂直速度, 下标 *p* 和  $\varphi$  表示对其求偏导。带"<sup>'</sup>"的是扰动量,带"<sup>---</sup>"的是

纬向平均量, 扰动量为该物理量与其纬向平均量的 差值。在绘图时, 将 $\bar{\omega}^*$ 转变成为 $\bar{\omega}^*(z \,$  坐标下的 垂直剩余速度)。

139

# 3 计算结果

## 3.1 剩余环流的平均分布

图1所示为各个季节的剩余环流矢量图。从图 1可以看出,总的来说,低纬度赤道地区,气流从 对流层中上层上升至平流层下层,最高可达到20 hPa附近,上升气流的强度随着高度的增加而减 小。在平流层下层,100~20 hPa气层中,气流还 向中纬度地区运动,在中高纬度附近下沉重新回到 对流层,下沉气流的强度随着高度的降低而增大。 在副热带以外到近极地地区,都是下沉气流,下沉 运动相对较小。其中,在对流层上层到平流层下 层,从热带到中纬度地区气流在热带地区上升,然 后气流向极向下运动,在副热带下沉回到对流层的 环流形势最为明显。这一环流就是前面所说的 Brewer-Dobson环流,它对于对流层-平流层的交 换有着十分重要的意义,本文主要讨论这部分的环





流。

比较图 1a~d,可以看出剩余环流的季节变化 特征。在不同的季节中,上升气流的中心随着季节 的变化在赤道地区南北移动, 春秋季节其中心基本 上位于赤道,南北半球环流大致呈对称分布,但是 北半球副热带地区的下沉气流要比南半球强。在冬 夏季节,上升气流的中心分别位于南北纬10°附近, 在赤道以外中高纬度地区, 气流基本都为下沉运 动,下沉气流的强度随着高度的降低而增大,下沉 气流的中心位于南北纬 25°附近,北半球冬季,下 沉运动在北纬25°最强,而在北半球夏季(即南半 球冬季),下沉运动在南纬25°最强,也就是说冬半 球的下沉运动要明显强于夏半球的下沉运动。在平 流层下部,有比较强的向两极的输送气流,最强的 区域位于南北纬 20°附近,而赤道地区和高纬度地 区,水平输送很小。此外,还计算到在极地附近区 域,冬季有比较弱的上升气流,而目随着高度的增 加, 这上升气流的强度有所增大。

下面,将计算结果与某些模拟结果作一比较。 文献[6]的图 3 给出了用 34 层模式模拟得到的剩余 环流,可以看出:其中气流在赤道地区上升,穿过 对流层顶进入平流层中下层,到高纬度地区下沉, 两个半球都是单圈环流的结构。上升气流的中心位 置北半球冬夏季节分别位于南北纬10°附近,上升 气流的大小随着高度增加而减小。而且冬季向极向 下的输送要强于夏季,陈文和黄荣辉<sup>[6]</sup>认为,这是 由于冬季有行星波的上传引起的。可见,我们用 NCEP 资料的计算结果与文献[6]的模拟结果基本 上是一致的,不同的是,他们的模拟结果中,上升 气流的高度可以达到近30 km,而且在30 km以上 平流层中上层,是从南半球到北半球的输运环流。 同时,在北半球的夏季,模拟的向极输送和下沉气 流更偏向两极,大约可以达到60°附近。

张弘等<sup>[16]</sup>和陈月娟等<sup>[17]</sup>利用 NCAR 的包含化 学、辐射、动力相互作用的二维模式 (SOCRA-TES)进行数值模拟实验,图 2 是模拟 5 年后平均 的各季节的剩余环流,其中赤道地区向上,热带外 地区向极向下输送的环流形势与用 NCEP 资料的 计算结果以及陈文、黄荣辉<sup>[6]</sup>的结果很相似。图 2 中,上升气流中心基本上位于赤道附近,只在南北



Fig. 2 Residual circulation simulated by NCAR two-dimension model: (a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

纬5°以内移动。模拟的下沉运动更向两极方向偏 移,大约可达到40°附近。用NCEP资料的计算结 果与陈月娟等<sup>[17]</sup>的模拟结果的数值稍有差异,前 者比后者相对要大一些。以上升运动为例,计算的 最强上升运动可以达到甚至超过0.8×10<sup>-3</sup> m/s, 模拟结果的值为0.5×10<sup>-3</sup> m/s 左右。在上述的两 个数值模拟中,在极地附近都没有模拟到上升运 动,而在实际计算结果中极地地区出现了上升气 流,这与理论研究以及数值模拟结果是不一致的, 有待探讨其原因。

### 3.2 剩余环流的季节变化

图 3 给出 2000~2003 年 100 hPa 等压面上 亚\* 随时间和纬度的变化。从图 3 可以更清晰的看出剩 余环流的季节变化和季节差异。图中阴影部分为 亚\*的正值区,也就是上升区域。如图3所示,上升 运动主要位于赤道低纬度带南北纬 20°以内,其中 心随着季节的变化在赤道地区南北移动。在冬夏两 季, ϖ\*分别存在着极值中心。从计算结果来看, 上 升运动是比较强的,中心的最大值可以达到 0.8× 10<sup>-3</sup> m/s,。同时,北半球夏季 w<sup>\*</sup>的中心值比冬 季 (南半球夏季) ϖ\* 的中心值明显要高, 几乎是其 两倍。中纬度地区皆为下沉运动,在南北半球分别 存在着两个中心,分别在 20°和 50°附近。总的来 说,在中低纬地区,无论是夏半年的上升运动还是 冬半年的下沉运动都是北半球比南半球强。另外, 在图 3 中也可以看到两半球各自的冬季在高纬近极 地区域,有弱的上升气流。



#### 3.3 剩余环流的年际变化

为了进一步分析剩余环流的年际变化,我们对  $\overline{v}^*$ 和 $\overline{w}^*$ 做了谐波分析,  $\overline{v}^*$ 取自南北纬 20°地区, ₩\*取自赤道地区,这两个位置的上升运动和水平 输送最强,对整个环流形势起着决定性的作用。通 过谐波分析,可以看到剩余环流除了有季节变化以 外,还有其他周期的变化。于是,我们进一步作了 带通滤波,图4给出在20°N、50 hPa 高度上 $\bar{v}^*$  随 时间的变化曲线以及滤去波长小于 21 个月和波长 大于 37 个月而留下的 22~36 个月周期的波动(虚 线表示)。由图 4 可以看出,  $\overline{v}^*$  的准两年周期振荡 (QBO)特征十分明显。这是因为热带平流层纬向 风的 QBO 会引起温度场的变化,从而引起大气层结 和动力输送的变化。对比纬向风 QBO (图略),可以 看到,在西风位相年, $\bar{v}^*$ 比较小;东风位相年, $\bar{v}^*$ 比 较大,只是 v\* 的转换比风场的转换稍有滞后,大概 在 2 个月左右。 $\overline{w}^*$ 的带通滤波(图略)的结果与 $\overline{v}^*$ 类似,也有准两年周期振荡的特征,表现为赤道上空 w\*的值在西风位相年比在东风位相年要小。

为了更好地看清楚在纬向风不同位相下剩余环 流的差异,我们分别对东风位相和西风位相下的剩 余环流的距平作了合成分析,其结果分别为图 5a、 b 所示。可以看出,东风位相时,在低纬度赤道地 区,30 hPa 以下向上的运动比多年平均强,向两极 的输送也比较强,产生了赤道地区上空的次级环



图 4 在 50 hPa、20°N 处 v\* 的时间序列图。实线为实际值,虚 线为滤波曲线,点划线为线性拟合曲线

Fig. 4 Time series of  $\bar{v}^*$  at 50 hPa, 20°N. Solid curve is the values form NCEP data, dashed curve is the oscillations of  $\bar{v}^*$  with periods longer than 20 months and shorter than 36 months, and dash-dotted line is the linear time trends



图 5 剩余环流距平的合成图: (a) 东风位相; (b) 西风位相; (c) 东风位相与西风位相的差值 Fig. 5 Composite residual circulation departure in (a) easterly phase, (b) westerly phase, and (c) their difference (a minus b)

流。在 20 hPa 以上, 次级环流则相反, 从图上可以 看出相反的两对环流圈。而在西风位相时,也存在 两对环流圈。30 hPa 以下,低纬度赤道地区以及南 半球近赤道地区为负的距平,说明赤道地区的向上 运动比平均情况弱;北半球  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  地区,  $\overline{w}^{*}$  为 明显的正距平,表明此地区的下沉运动明显比多年 平均弱;南半球20°~30°地区的情况相反,下沉运 动有所增强,但是增强的幅度很小;同时南北半球 20°~30°附近向两极的输送明显减弱。20 hPa 以 上,环流相反。图 5c 是东风位相与西风位相下剩 余环流距平的差值。可以看出, 30 hPa 以下, 有一 个在赤道地区上升,副热带地区下沉的差值环流, 这表明东风位相时在这一区域剩余环流(即 Brewer-Dobson 环流)比西风位相下的剩余环流强,这 个环流是热带纬向风的不同位相其风速切变引起的 次级环流所致。陈文和黄荣辉在文献「6~8]中用他 们的模拟结果讨论了 QBO 东风位相年和西风位相 年剩余环流的差异,指出在西风位相年,由于西风 切变,会导致赤道地区的下沉运动,减弱了上升气 流。而热带下平流层为东风位相时,则强迫出赤道 地区上空的次级环流。因此,在东风位相下的剩余 环流比西风位相下强些。由此可见,我们用 NCEP 资料计算的结果与他们的模拟结果是一致的。

陈月娟等<sup>[17]</sup>用 SOCRATES 的模拟结果详细 讨论了纬向风 QBO 的强迫造成的剩余环流的变 化,指出有 QBO 实验与无 QBO 实验的剩余环流之 差值在垂直方向上有三对环流圈,它们大致是对称 的。在西风位相最强时(见文献[17]中图 7c),它 在平流层下层 20 hPa 以下引起的差值环流是在热 带外地区上升,流向赤道附近再下沉,也就是与正 常的剩余环流方向相反,所以西风位相使剩余环流 减弱;而在东风位相最强时(见文献[17]中图 8c) 则相反,使剩余环流增强。20 hPa 以上环流形势 20 hPa 以下相反,两对环流圈的分布和我们用 NCEP 资料的计算结果是一致的。只是由于 NCEP 资料高度只达到 10 hPa,因此纬向风 QBO 在平流 层中上层对 v<sup>\*</sup> 和 w<sup>\*</sup> 的影响未能分析出来。

#### 3.4 剩余环流的长期变化趋势

近 25 年来,剩余环流的强度也发生了一定的 改变。图 6 给出不同高度  $\overline{v}$ \*和  $\overline{w}$ \*的距平变化、十 年际变化和线性变化趋势。我们在对  $\overline{v}$ \*和  $\overline{w}$ \*做 谐波分析时发现其年代际变化也比较明显。图 6 中 的虚线是经过带通滤波后留下的周期为 120~144 个月的变化曲线,可以看出,在对流层顶(100 hPa 附近),剩余环流有比较明显的十年际周期的变化。  $\overline{v}$ \*和  $\overline{w}$ \*的变化周期和位相有些不同。从 1979 年 到 80 年代末,1990 年到 90 年代末,上升运动都是 从强到弱变化的。在平流层下层 50 hPa 附近,剩 余环流也有十年际周期的变化,但是变化的振幅比 对流层顶的要小一些。

由图 6a、b 的线性拟合曲线可以看出,在过去的 25 年中,总的来说,无论在对流层顶 (100 hPa 附近),还是在平流层下层, $\varpi^*$ 的距平总趋势都在增加,上升运动是持续增强的。但在不同高度,其增强的趋势不同,在 100 hPa 附近,25 年间其增长值大约为 0.2×10<sup>-3</sup> m/s,而在 50 hPa 高度,其增长值约为 0.1×10<sup>-3</sup> m/s,这就是说,随着高度的增加,上升运动的增强幅度是减小的。

而向两极的运动,在各个高度上是不相同的。 图 6 c、d 是在北纬 20°的 v\* 的距平变化图。对比可



图 6 *v*<sup>\*</sup> 和 *w*<sup>\*</sup> 的距平变化图: (a) 20°N、100 hPa 处 *v*<sup>\*</sup>; (b) 20°N、50 hPa 处 *v*<sup>\*</sup>; (c) 赤道 100 hPa 处 *w*<sup>\*</sup>; (d) 赤道 50 hPa 处 *w*<sup>\*</sup> 。 实 线为距平值, 虚线为滤波曲线, 点划线为线性拟合曲线

Fig. 6 Time series of the departure of the  $\overline{v}^*$  and  $\overline{w}^*$ : (a)  $\overline{v}^*$  at 100 hPa, 20°N; (b)  $\overline{v}^*$  at 50 hPa, 20°N; (c)  $\overline{w}^*$  at 100 hPa over the equator; (d)  $\overline{w}^*$  at 50 hPa over the equator. The solid curves are the departures, dashed curves are the oscillations of  $\overline{v}^*$  and  $\overline{w}^*$  with periods longer than 120 months and shorter than 144 months, and the dash-dotted lines are the linear time trends

以看出, 在北半球对流层顶附近, v<sup>\*</sup> 是逐渐减小 的, 但变化的振幅很小, 仅为 0.05 m/s 左右。说 明在对流层顶附近, 向两极的输送是微弱减小的。 在平流层下层, 50 hPa 高度上, v<sup>\*</sup> 的距平是增加 的, 其距平的差值接近 0.1 m/s, 平流层中向极地 方向的输送是增强的, 其变化的振幅相对对流层顶 要大。

总的说来,近 25 年来,平流层下层赤道地区 和副热带地区的环流(也就是 Brewer-Dobson 环 流)的总的变化趋势,上升气流是增强的,平流层 下层中向极地的输送增强,而对流层顶的向两极输 送有微弱减小,整个环流形势是增强的。

## 4 结论

本文利用 NCEP II 资料,通过计算剩余速度, 并与数值模拟结果对比分析,得到了比较明显的剩 余环流和 Brewer-Dobson 环流。同时,本文还通过 谐波分析的方法,分析了剩余环流的季节和年际变 化,得到了如下的结论:

143

(1) 计算结果表明,低纬度赤道地区,上升气 流由对流层顶部进入到平流层下层,然后向极向下 运动,高度上可以达到 20 hPa 附近。气流在中纬 度地带下沉回到对流层。其结果与数值模拟结果基 本一致。所以,利用 NCEP 资料可以计算出比较清 晰的剩余环流, Brewer-Dobson 环流也可以看得比 较清楚。

(2)剩余环流有明显的季节差异,上升运动的中心随着季节的变化在赤道地区南北移动,春秋季节其中心基本上位于赤道,南北半球大致呈对称分布,北半球副热带地区的下沉气流要比南半球强。 在冬夏季节,上升气流的中心分别位于南北纬10°附近。北半球夏季的上升气流比南半球夏季的上升 气流要强,同时冬半球的下沉气流比夏半球的下沉 气流强。

(3)在平流层下层,剩余环流还有着十年际周期的变化和QBO现象。从1979年到80年代末、 1990年到90年代末,上升运动都是从强到弱变化的。在平均纬向风为东风位相时,剩余环流比西风位相下强些。

(4) 过去 25 年,剩余环流的强度也有一些变 化。在对流层顶到平流层下层,Brewer-Dobson 环 流的上升运动有所增强。在平流层下层,向极的输 送也有所增强,环流整体形势是增强的。

(5) 计算得到的剩余环流中,极地地区冬季出现了弱的上升气流,这与理论研究和数值模拟结果不一致,有待探讨其原因。

#### 参考文献 (References)

- [1] Andrews D G, McIntyre M E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. J. Atmos. Sci., 1976, 33: 2031~2048
- [2] Andrews D G, McIntyre M E. An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow. J. Fluid Mech., 1978, 89: 609~646
- McIntyre M E. Towards a Lagrangian-mean description of stratospheric circulations and chemical transport. *Philos. Rrans. Roy. Soc. London*, 1980, A296: 129~148
- [4] Pendlebury D, Shepherd T G. Planetary-wave-induced transport in the stratosphere. J. Atmos. Sci., 2003, 60: 1456~ 1470
- [5] 陈文,黄荣辉. 准定常行星波对大气中臭氧输运的动力作用. 大气科学, 1995, 19: 513~524
   Chen Wen, Huang Ronghui. The dynamical effect of planetary waves transport on ozone in the atmosphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1995, 19: 513~524
- [6] 陈文,黄荣辉.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,1996, 20:513~523

Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical simulation of the transport effect of planetary waves on the seasonal and interannual variations of ozone in the middle atmosphere. Part I. In the case of stationary flows. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1996, **20**:  $513 \sim 523$ 

[7] 陈文,黄荣辉.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, 1996, 20: 703~712

Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical simulation of the transport effect of planetary waves on the seasonal and interannual variations of ozone in the middle atmosphere. Part II. In the case of wave-flow interaction. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 703 $\sim$ 712

- [8] Chen Wen, Huang Ronghui. The propagation and transport effect of planetary waves in the Northern Hemisphere winter. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, **19**: 1113~1126
- [9] Brewer A M. Evidence for a world circulation provided by the measuremeant of helium and water vapor distribution in the stratosphere. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1949, 75: 351 ~363
- [10] Dobson G M B. Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere. Proceeding of Royal Society of London, 1956, A236: 187~193
- Haynes P H, McIntyre M E, Shepherd T G, et al. On the "downward control" of the extratropical diabatic circulations by eddy- induced mean zonal forces. J. Atmos. Sci., 1991, 48: 651~678
- [12] Dunkerton T. On the mean meridional mass motions of the stratosphere and mesosphere. J. Atmos. Sci., 1978, 35: 2325~2333
- Dhomse S, Weber M, Burrows J. Dynamical contribution to longterm ozone change. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 27~29
- [14] 王开存,李维亮,白立杰. 1984~2000年印度洋与中国地区 上空对流层中上层及平流层气溶胶变化和输送特征. 应用气 象学报,2004,15:32~40
  Wang Kaicun, Li Weiliang, Bai Lijie. Characteristics of change and transport of aerosols in the middle and upper troposphere and stratosphere over Indian Ocean and China in 1984-2000. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 2004, 15: 32~40
- [15] http:///www.ncep.noaa.gov
- [16] 张弘,陈月娟,吴北婴. 准两年振荡对大气中微量气体分布 的影响. 大气科学, 2000, 24: 103~110 Zhang Hong, Chen Yuejuan, Wu Beiying. Impact of the Quasi-Biennial Oscillation on the distribution of the trace gases in the stratosphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese): 2000, 24: 103~110
- [17] Chen Yuejuan, Zheng Bin, Zhang Hong. The feature of ozone Quasi-Biennial Oscillation in tropical stratosphere and its numerical simulation. Advanced in Atmospheric Sciences, 2002, 19: 777~793