

2000 年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化^{*}

杨 健 吕达仁

(中国科学院大气物理研究所中层大气与遥感理论和技术研究部, 北京 100029)

摘 要 用 2000 年 NCEP 资料, P 坐标下 Wei 公式诊断北半球平流层、对流层交换的季节变化。主要结论: (1) 热带西太平洋是物质由对流层向平流层输送的主要通道, 并有明显的季节性东西移动。由于 2000 年赤道辐合带偏弱, 因此秋季通量最大。(2) 中高纬度地区同时存在向上、向下的通量, 大尺度槽区伴随着平流层向下的输送。一年中冬春季向下的输送强, 夏秋季较弱, 其季节变化与大尺度环流的季节性变化一致。(3) 东亚地区存在很强的平流层向下输送, 且中心位置移动不大。只占北半球 5.6% 面积的东亚其年净交换量竟占北半球的 29%, 这说明东亚地区的平流层与对流层之间的质量交换对北半球平流层、对流层交换研究的重要性。

关键词: 北半球; 平流层; 对流层; 交换; 季节变化

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0294-07 **中图分类号** P434^{*}.5 **文献标识码** A

1 引言

平流层与对流层之间的质量交换 (STE) 对于研究两个区域的化学成分变化都很重要。长期的大尺度的交换过程对气候变化有一定影响, 短时间的区域的交换过程对局地空气质量有一定影响。平流层和对流层之间的质量交换可以将引起 O_3 损耗的气体, 如 CFCs、 NO_2 、 H_2O 等, 输送到平流层。大量证据表明, 从对流层输送到平流层的人为排放物, 引起了平流层 O_3 的损耗反应。这种交换还将 O_3 富集的平流层空气向下输送到对流层。平流层到对流层的输送不仅包含平流层臭氧 (包括与 O_3 损耗有关的物质) 的清除机制, 而且也代表了对流层化学系统中 O_3 及其他活性物质的输入。Lelieveld^[1] 认为平流层、对流层交换对上对流层臭氧有很大影响, 在对流层下层 STE 只对辐射和光化学不活跃地区的臭氧影响很大, 在其他地区地面臭氧的季节循环主要由光化学过程控制。Davies 和 Schuepbach^[2] 认为来自平流层的臭氧富集的空气可以被输送到近地面或对流层中下部。然而, 即使在那些经常发生气旋和对流层顶折叠的地区, 如北美东北部^[3] 和日本海附近^[4] 这种强烈的事件也很少发生。

穿越对流层顶的质量输送是大气模式中的一个关键过程, 然而我们现在还不能完

2002-08-09 收到, 2003-02-08 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40333034 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-217 共同资助

全理解和模拟穿越对流层顶的输送过程。通过观测我们可以理解平流层、对流层交换过程，但观测具有一定局限性。其一，它只能限制在很小的区域、很短的时间范围；其二，观测所关注的是 STE 发生后的一些结果，如对流层顶折叠区臭氧富集空气的存在，而不是 STE 本身如穿越对流层顶的空气质量通量。现在的一些数值天气预报模式与全球气象观测资料的同化结果可以提供全球的环流资料，如 NCEP、ECMWF 资料。我们可以利用上述资料对穿越对流层顶的空气质量通量进行诊断，克服已有观测的局限性。如果这些资料能够提供足够精度的对流层顶本身的运动情况以及对流层顶面上风场的变化情况，那么通过 Wei 公式^[5]，我们可以在很大的时间和空间尺度上对向上、向下的穿越对流层顶的通量进行研究。

对于全球的平流层、对流层交换的认识主要是通过区域现象的研究得到的。Reiter^[6]通过个例研究得到大尺度的纬向平均的质量循环，他指出在年平均的尺度上 Hadley 环流是对流层向平流层输送的主要机制，中高纬度地区平流层向对流层的输送主要发生在大尺度涡旋附近。Spaete 等^[7]和 Lamarque 等^[8]的研究也是针对个例进行的，这并不能回答整个北半球长期的穿越对流层顶通量问题。Hoerling 等^[9]和 Siegmund 等^[10]的研究尽管考虑了整个北半球，但是他们的研究只局限于冬季的一个月份（1 月份）。国内平流层、对流层交换研究起步较晚，丛春华等^[11]用 19 年的 NCEP 资料分析了青藏高原平流层、对流层的质量交换，指出高原上空 STE 的季节变化与垂直环流的季节变化一致。郑向东^[12]探讨了天气过程对对流层臭氧垂直分布的影响，指出低空的上升运动与高空的下沉运动对臭氧次峰的形成有重要作用。本文作者将通过分析 2000 年全年的 NCEP 资料以给出北半球 STE 的季节变化图像。

2 资料 and 计算公式

我们用 2000 年一天 4 次的 NCEP 再分析资料，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，垂直方向为 26 个等压面层。

P 坐标系下计算穿越对流层顶通量（CTF）的 Wei 公式^[1]为

$$F(\rho) = -g^{-1} \left(\frac{DP}{Dt} - \frac{\partial P_{\text{tp}}}{\partial t} - V \cdot \nabla P_{\text{tp}} \right) = \left(\frac{1}{g} (V \cdot \nabla P)_{\text{tp}} - \frac{\omega}{g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial P_{\text{tp}}}{\partial t}$$
$$= F_{\text{AM}} + F_{\text{TM}}, \tag{1}$$

其中， $\omega = DP/Dt$ 为垂直速度， V 为水平风场， P_{tp} 为对流层顶的气压， F_{AM} 为空气运动引起的质量交换， F_{TM} 为对流层顶运动引起的质量交换。

本文对流层顶的选择为：北半球 $30 \sim 90^{\circ}\text{N}$ 采用 $3.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ K kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 动力学对流层顶 (P_{dyn})， $0 \sim 10^{\circ}\text{N}$ 以 380 K 等位温面定义热力学对流层顶 $P_{380\text{K}}$ ， $10 \sim 30^{\circ}\text{N}$ 的对流层顶用两种定义的权重平均

$$P = WP_{\text{dyn}} + (1 - W)P_{380\text{K}} \tag{2}$$

其中， $W = A \text{sech} \phi + B \phi^2 + C$ ， $\phi = 30^{\circ}$ 时， $W = 1$ ； $\phi = 10^{\circ}$ 时， $W = 0$ ； $\phi = 20^{\circ}$ 时， $W = 0.5$ 。

3 北半球 STE 的季节变化特征

我们主要分析北半球 STE 季节变化的大尺度特征，因此将结果在空间上进行滤波

以强调大尺度特征。采用 Schaack^[13]的方法进行滤波,首先在纬圈方向通过 Fourier 变换滤掉波长小于 60 个格距的波,然后在经圈方向上采用低通滤波先进行四次 (2, 3, 2) 的变换再进行一次 (−1, 5, −1) 的逆变换。

我们每隔 6 小时计算一次北半球向上、向下穿越对流层顶的通量,然后进行滤波和时间平均,给出穿越对流层顶通量的季平均分布图 (图 1)。

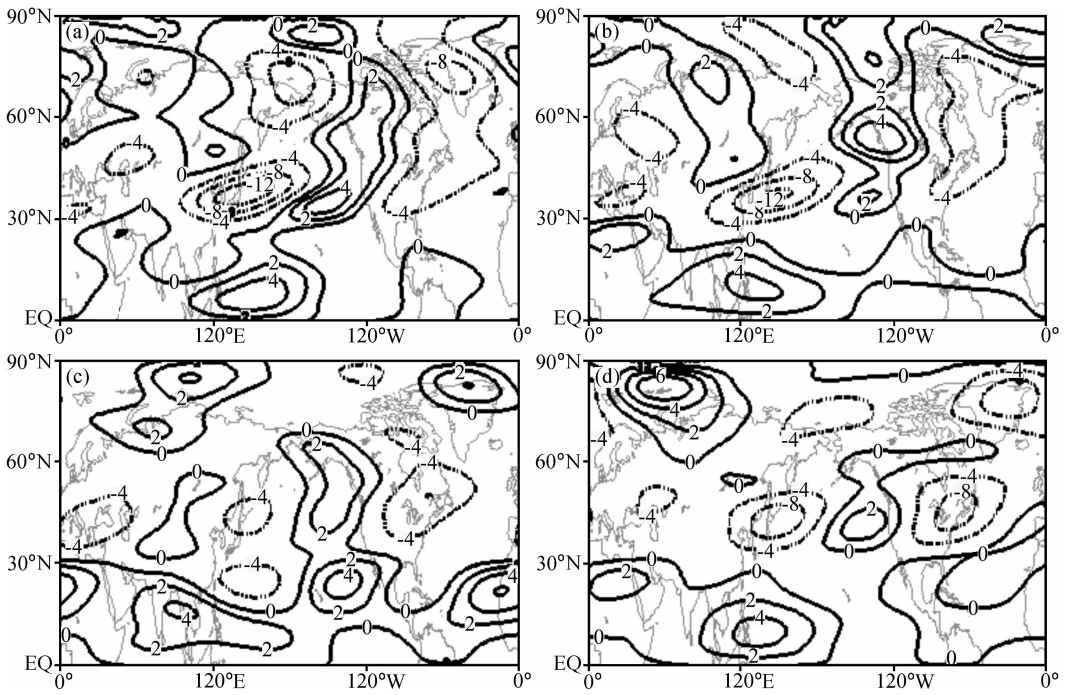


图 1 四季季平均穿过对流层顶通量 (单位: $10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

(a) 冬季; (b) 春季; (c) 夏季; (d) 秋季

点线: 负值, 代表由平流层向对流层的通量; 实线: 正值, 代表由对流层向平流层的通量

3.1 热带地区

首先,我们分析 30°N 以南热带地区的 CTF 季节变化。由图 1 可以看到冬季由对流层向上输送的通量主要在热带西太平洋,最大值达 $4\times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。春季向上输送的区域西移并延伸到印度洋,最大值不变,同时非洲北部也存在向上的通量。夏季西太平洋地区向上输送的最大值出现在孟加拉湾,非洲北部向上输送区域西移。秋季延伸到印度洋的向上输送区域向东移回到太平洋西部,通量最大值为 $6\times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,非洲北部向上输送的区域也东移。由上述分析可以看到,热带西太平洋是热带地区物质由对流层向平流层输送的主要通道,向上输送区域随季节东西移动具有明显的季节变化,秋季向上的通量最大。

热带地区受 Hadley 环流上升支的影响,空气质量由对流层向平流层输送,这主要是穿越对流层顶的非绝热过程造成的^[9],其中热带深对流是向上输送的主要机制。赤道辐合带是热带上升运动的集中地区,其深厚积云对流旺盛。它一般位于热带西太平洋地区,当厄尔尼诺发生时对流区将东移。始于 1998 年秋季的 La Niña 到 2000 年 1 月份达到顶峰,于 2000 年春季结束。因此,2000 年热带对流活动冬春季偏强,夏季偏

弱，赤道辐合带偏弱^[14]。这是造成 2000 年热带地区向上输送的最大值出现在秋季而不是夏季的主要原因。

3.2 中高纬地区

然后，我们分析 30°N 以北中高纬地区 CTF 的季节变化。图 1 显示中高纬度地区同时存在向上、向下的通量，并且向上与向下的通量交错出现。冬季东亚地区、北美东部、地中海附近以及欧洲西南部存在平流层向下的通量，其中东亚地区通量最大达到 $-12 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。春季，东亚的中心依然存在且强度不变，北美的中心南移并减弱，白令海峡附近的中心也减弱并向西北方向移动，欧洲西南部的中心向西北方向移动强度不变，地中海的中心向东移动强度也不变。夏季，平流层向对流层的输送明显减弱，东亚的中心一分为二并减弱到 $-4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，北美的中心向更南方向移动，白令海峡及欧洲南部向下输送中心消失，地中海的中心向北延伸范围变大。秋季，东亚的中心合二为一并加强，北美南部的中心也加强，其东北部也出现了负值中心，白令海峡附近向下输送的中心重新出现，地中海处的中心向东北方向移动。值得注意的是，秋季，北欧有一很强的正中心，即存在很强的对流层到平流层的输送，其强度达 $9 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，高于热带地区对流层向上的通量，而其他季节对流层向上的输送并不强。由于我们只分析了一年的数据，是否在其他年份这一地区也存在很强的向上输送还有待于进一步研究。由上述分析可见，在中高纬度地区平流层向对流层的输送主要出现在大尺度槽区附近，局地的沿穿越对流层顶等熵面的绝热过程占主导地位，一年中冬春季平流层向下的输送强，夏秋季较弱。

冬季北半球中高纬度是以极地为中心环绕纬圈的西风环流，西风带中有尺度很大的槽脊，其中三个明显的大槽分别为亚洲东岸的东亚大槽、北美东岸的北美大槽和乌拉尔山西部的欧洲浅槽。在三槽之间并列着三个脊，脊的强度比槽弱得多。与槽区相对应的是平流层向下的输送，与脊区相对应的是对流层向上的输送。夏季，槽脊明显减弱，西风带显著北移，槽脊的位置也发生很大变动。东亚大槽东移入海，原欧洲浅槽已不存在而变为脊，欧洲西岸和贝加尔湖地区各出现一个浅槽，北美大槽位置与冬季相比略为东移。由于夏季槽强度大大减弱，导致 STE 交换量也减弱。由此可见，CTF 的季节变化趋势与大尺度大气环流的季节变化有很好的一致性。

3.3 东亚地区

最后，我们以 (30~60°N, 100~150°E) 区域代表东亚地区，分析该地区的交换量。从图 1 中可清楚地看到，东亚地区除夏季外其他三季都存在很强的平流层向下的输送通量，其中冬季最大为 $-12 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，春秋季节居中，夏季最低为 $-4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，而且向下输送的中心位置移动不大。值得我们注意的是面积仅占北半球 5.6% 的东亚，其年净交换量却占北半球的 29%。我们统计的 2000 年北半球穿越对流层顶的净交换量为 $-5.9 \times 10^{17} \text{ kg}$ ，东亚为 $-1.7 \times 10^{17} \text{ kg}$ 。北半球由平流层进入对流层的质量为 $23.7 \times 10^{17} \text{ kg}$ ，东亚为 $2.8 \times 10^{17} \text{ kg}$ ，占北半球的 12%。北半球由对流层进入到平流层的质量为 $17.8 \times 10^{17} \text{ kg}$ ，东亚为 $1.1 \times 10^{17} \text{ kg}$ ，占北半球的 6.4%。这说明东亚地区的 STE 在全球平流层、对流层交换研究中占有重要地位。

东亚由于海陆分布和高原地形的影响，其大气环流具有很多特殊性质，影响该地区的天气和气候。而东亚大气环流又和全球大气环流在整个大气运动中相互制约从而

影响全球气候。因此,东亚地区平流层、对流层交换的研究对全球 STE 的研究具有重要意义。中纬度 STE 主要通过两种过程完成:一是沿等熵面的绝热过程,主要由涡动来完成如对流层顶折叠、高空槽及切断低压等;另一种是跨越等熵面的非绝热过程,主要是小尺度混合及湍流过程。东亚为气旋多发区,切断低压出现频繁,极锋急流和副热带急流活动活跃,因此东亚地区的重大天气气候系统对 STE 有重要影响。杨健等^[15]对东亚切断低压引起的平流层、对流层交换进行了个例模拟研究。现在东亚 STE 的研究还处于起步阶段,对东亚 STE 机制及其定量化有待于进一步深入研究。

3.4 月平均、纬向平均通量季节变化

我们将月平均的通量沿纬向平均给出其季节变化图 [图 2 (见图版)]。从中可以看出 30°N 以南的热带地区和 75°N 以北的极区其通量为正值,即由对流层向平流层输送。热带地区向上的输送跨越的纬度范围比极区宽,而且由对流层向上输送的区域从冬到夏逐渐向北移动,然后从夏到冬逐渐向南移动。热带地区受 Hadley 环流上升支的影响,物质由对流层到平流层输送,因此太阳辐射随季节南北移动是其季节变化的主要原因。

极区对流层向上的通量在 10 月份最强为 $4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 它的季节变化并不明显。极区和热带的 STE 机制不同,热带以非绝热运动为主,极区以绝热运动为主,而图 2 中显示它们的强度相差不多。Hoerling^[9]最先发现了这一奇怪的现象,但是至今我们还无法将其合理解释。

中纬度地区输送很有意思, 60°N 左右为对流层到平流层的输送,在其南北两侧为平流层到对流层的输送。从冬季到夏季向上和向下输送的区域都由南向北移动,从夏季到冬季向南移动。向上、向下的输送与中纬度地区费雷尔环流的上升、下沉一致,而且其南北移动也与经向环流圈的季节性移动保持一致,即在北半球夏季向北移,冬季向南移。

由上述分析可见,纬向平均的向上、向下通量及其季节变化主要受经圈环流控制,但 75°N 以北的极区,其向上的输送还无法合理解释。

3.5 Wei 公式中不同部分对通量的贡献

P 坐标系下穿越对流层顶通量的计算公式 (1) 表明,CTF 可以表示为空气运动和对流层顶运动引起的通量之和,其中空气运动又可分为水平运动和垂直运动。以下我们将分析上述三种运动对总通量贡献的大小。图 3 (见图版) 给出季平均、纬向平均的穿越对流层顶通量及空气的水平运动、垂直运动和对流层顶运动引起的 CTF。从图 3 可以很明显地看到空气的水平运动和垂直运动对交换量的贡献很大,对流层顶的运动对 CTF 的贡献很小。热带地区除夏季外,其他季节中垂直运动对通量的贡献最大,夏季, $0 \sim 10^{\circ}\text{N}$ 水平运动对通量的贡献最大,这是由于 2000 年夏季赤道辐合带偏弱的原因。中高纬度地区的 CTF 是水平运动分量和垂直运动分量两个大量的小差,水平运动与垂直运动引起的 CTF 位相相反但是绝对值相差不大。这说明中高纬度地区空气的垂直运动及水平运动对纬向和季平均交换通量的贡献相当。有趣的是水平运动与垂直运动都呈双峰结构,在 60°N 附近为谷区,对此我们需要更多的资料来研究。

4 结论

本文用 2000 年 NCEP 资料分析了北半球穿越对流层顶通量的季节变化特征。主要结论为:

(1) 热带西太平洋是物质由对流层向平流层输送的主要通道, 其位置随季节东西移动。中高纬地区平流层向对流层的输送主要出现在大尺度槽区附近, 冬春季向下输送强, 夏秋季较弱, 穿越对流层顶通量的季节变化与大尺度环流的季节变化一致。

(2) 东亚地区存在很强的平流层向下的输送, 只占北半球 5.6% 面积的东亚其年净交换量竟占北半球的 29%, 这说明东亚 STE 研究对北半球 STE 交换研究的重要性。

(3) 纬向平均通量及其季节变化主要受经圈环流的控制。热带地区垂直运动对 CTF 贡献最大, 中高纬地区水平与垂直分量位相相反, 穿越对流层顶通量为水平和垂直分量两个大量的小差。

本文只用了一年的 NCEP 资料, 并不能代表气候状况, 下一步我们将用长期的资料进行诊断以给出气候意义上的结论。东亚由于其特殊的地理位置和大气环流特征使得其平流层、对流层交换的研究更具意义, 对东亚 STE 机制及其定量研究也是我们进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 Lelieveld, J., and J. D. Frank, What controls tropospheric ozone? *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**, 3531~3551.
- 2 Davies, T. D., and E. Schuepbach, Episodes of high ozone concentrations at the Earth's surface resulting from transport down from the upper troposphere/lower stratosphere: a review and case studies, *Atmospheric Environment*, 1994, **28**, 53~68.
- 3 Chung, Y. S., and T. Dann, Observations of stratospheric ozone at the ground level in Regina, Canada, *Atmospheric Environment*, 1985, **19**, 157~162.
- 4 Wakamatsu, S., I. Uno, H. Ueda et al., Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere, *Atmospheric Environment*, 1989, **23**, 1815~1826.
- 5 Wei, M. Y., A new formulation of the exchange of mass and trace constituents between the stratosphere and the troposphere, *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**, 3079~3086.
- 6 Reiter, E. R., Stratospheric-tropospheric exchange processes, *Rev. Geophys.*, 1975, **13**, 459~474.
- 7 Spaete, P., D. R. Johnson, and T. K. Schaack, Stratospheric-tropospheric mass exchange during the President's Day storm, *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**, 424~439.
- 8 Lamarque, J. F., and P. G. Hess, Cross-tropopause mass exchange and potential vorticity budget in a simulated tropopause folding, *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**, 2246~2269.
- 9 Hoerling, M. P., T. K. Schaack, and A. J. Lenzen, A global analysis of stratospheric tropospheric exchange during northern winter, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 162~172.
- 10 Seigmund, P. C., P. F. J. van Velthoven, and H. Kelder, Cross-tropopause transport in the extratropical northern winter hemisphere, diagnosed from high-resolution ECMWF data, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**, 1921~1941.
- 11 丛春华等, 青藏高原及其邻近地区上空平流层—对流层之间大气的质量交换, 科学通报, 2001, **46** (22), 1914~1918.
- 12 郑向东, 对流层臭氧垂直分布结构及其变化的分析, 北京大学博士学位论文, 2000.

13 Schaack, T. K., D. R. Johnson, and M. Y. Wei, The three-dimension distribution of atmospheric heating during the GWE, *Tellus*, 1990, **42A**, 305~327.

14 王永光, 2000 年北半球大气环流特征及其对中国气候的影响, *气象*, 2001, **26** (4), 12~15.

15 杨健、吕达仁, 东亚地区一次切断低压引起的平流层、对流层交换数值模拟研究, *大气科学*, 2003, **27** (6), 1031~1044.

Diagnosed Seasonal Variation of Stratosphere-Troposphere Exchange in the Northern Hemisphere by 2000 Data

Yang Jian, and Lü Daren

(Division of Middle Atmosphere and Remote Sounding Theory and Technology, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The seasonal variation of stratosphere-troposphere mass exchange in 2000 year is diagnosed by Wei formula in pressure coordinate. The main results are as follows: (1) The west Pacific in the tropic is the main channel of the upward transport from the troposphere to the stratosphere with the obviously seasonal shift. The largest net flux from the troposphere to the stratosphere appears in autumn due to the weak of equator convergence belt in 2000. (2) The upward and downward transport of mass in the middle and high latitude accompany with each other. Downward transport from the stratosphere to the troposphere mainly appears near the large-scale trough. The stronger transport into troposphere appears in winter and spring, the weaker in summer and autumn. The seasonal variation of upward transport is consistent with the variation of the large scale circumfluent. (3) Strong downward fluxes of air mass from the stratosphere appear in eastern Asia. Although its area accounts 5.6% of the Northern Hemisphere (NH), the net exchange value reaches 29% of the total mass exchange in NH. This means the STE in the eastern Asia is important for the Northern Hemisphere.

Key word: the Northern Hemisphere; stratosphere; troposphere; exchange; seasonal variation