第 54 卷 第 3 期　　气 象 学 报　　Vol. 54, No. 3
1996 年 6 月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Jun., 1996

大尺度瞬变涡旋经向热量和水汽通量在纬向平均气流形成中的效应*

付超　　李维亮

（中国气象科学研究院，北京，100081）

摘　要

在一个纬向平均模式中加入大尺度瞬变涡旋经向热量和水汽通量参数化方案。模拟出涡动通量的空间分布和时间变化。实验表明，涡动通量在中高、纬地区大气能量输送过程中起重要作用。应用上述参数化方案提高了模式的模拟能力。

关键词：纬向平均模式，参数化，大尺度瞬变涡旋，涡动通量。

1　引　言

李维亮等(1989)[1]发展了一个比较完善的纬向平均模式，并成功地应用于季风的研究。早期的模式尚存在着一些不足(如模拟的冬半球副热带西风急流偏强等)，其原因可能是忽略了天气尺度涡旋的作用，仅靠简单的湍流扩散作用难以提供一个逼真的纬向平均环流形势。为此，李维亮等(1993)[2]研究了纬向平均模式中的大尺度涡旋动量通量参数化过程。本文则侧重于研究热量和水汽通量参数化。

2　模式介绍

这是一个二维原始方程模式，垂直方向有 5 层，使用 σ 座标，水平方向使用球座标。通量形式的方程组为：

$$\frac{\mathrm{d}\pi u}{\mathrm{d}t} = (f + \frac{n}{a}u)\pi v + F_{u1} + F_{u2} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\pi v}{\mathrm{d}t} = -(f + \frac{n}{a}v)\pi u - (\pi\frac{\partial\Phi}{a\partial\varphi} + \pi RT\frac{\partial \ln P}{a\partial\varphi}) + F_{v1} + F_{v2} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\pi T}{\mathrm{d}t} = \frac{\pi\alpha\sigma}{c_p}(\frac{\partial\pi}{\partial t} + \frac{v}{a}\frac{\partial\pi}{\partial\varphi} + \frac{\pi\dot{\sigma}}{\sigma}) + \frac{\pi}{c_p}Q + F_{T1} + F_{T2} \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}\pi q}{\mathrm{d}t} = \pi(Q_l + Q_c) + F_{q1} + F_{q2} \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}(\frac{\partial p_s}{\partial t} + \pi\dot{\sigma}) + \frac{1}{am}\frac{\partial}{\partial\varphi}(\pi v m) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma} = -\pi\alpha \tag{6}$$

* 初稿时间：1994 年 5 月 14 日；修改稿时间：1995 年 2 月 25 日。

$$\frac{\partial \pi}{\partial t}+\frac{1}{am}\int_0^1 \frac{\partial}{\partial \varphi}(\pi v m)\mathrm{d}\sigma=0 \tag{7}$$

$$\alpha=\frac{RT}{P} \tag{8}$$

其中

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial x}{\partial t}+\frac{1}{am}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\pi x v m)+\frac{\partial}{\partial \sigma}(\pi x \dot{\sigma}) \tag{9}$$

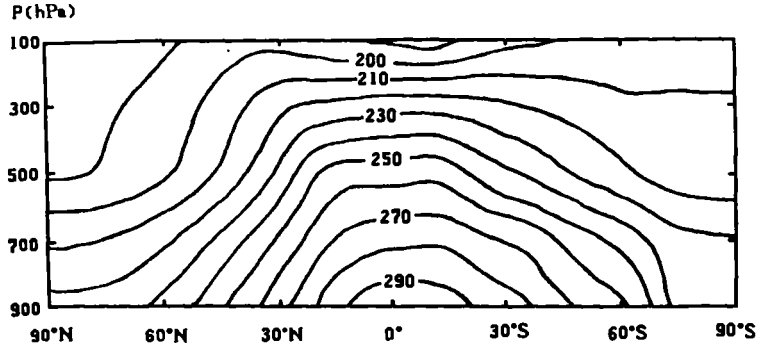

图1 没有涡旋输送的对照实验模拟的1月纬向平均温度场(单位:K)

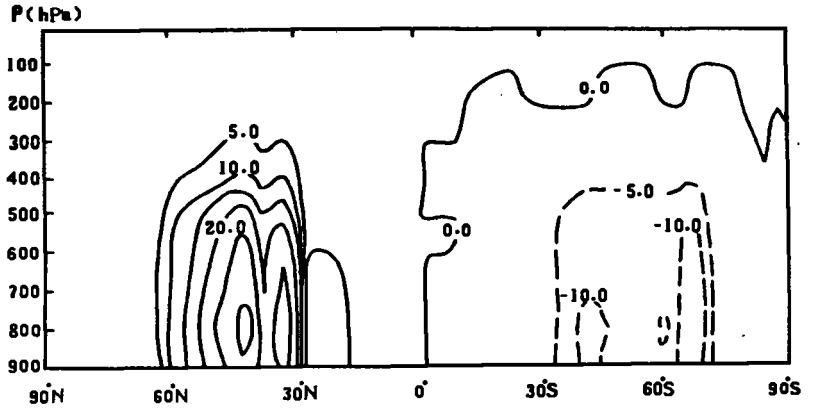

图2 有涡旋热量输送实验模拟的1月平均涡动热量通量(单位:K·m s^{-1})

x 是任意物理量，$m=\cos\varphi$，$n=\mathrm{tg}\varphi$，常用的物理量 $u,v,T,q,\pi,\dot{\sigma},\Phi,\alpha$ 均表示其纬向平均量。关于方程组详细的说明可参见文献[1]和[2]。有一点要指明的是，这里的 F_{u1},F_{v1},F_{T1} 和 F_{q1} 表示湍流扩散项(包括水平和垂直作用项)，F_{u2},F_{v2},F_{T2} 和 F_{q2} 表示大尺度涡旋作用项，本文中 $F_{u2}=0,F_{v2}=0$；

$$F_{T2}=-\frac{1}{am}\frac{\partial}{\partial \varphi}(\pi \overline{v'T'}m);$$

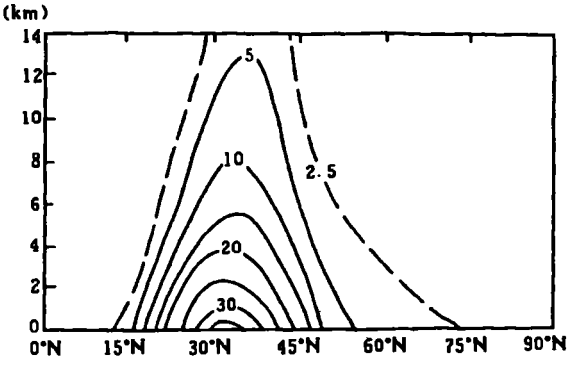

图3 Branscome(1983)利用气候资料计算的北半球1月水平涡动热量通量(单位:K·m s^{-1})

$$F_{q2} = -\frac{1}{am}\frac{\partial}{\partial\varphi}(\pi\overline{v'q'}m)。$$

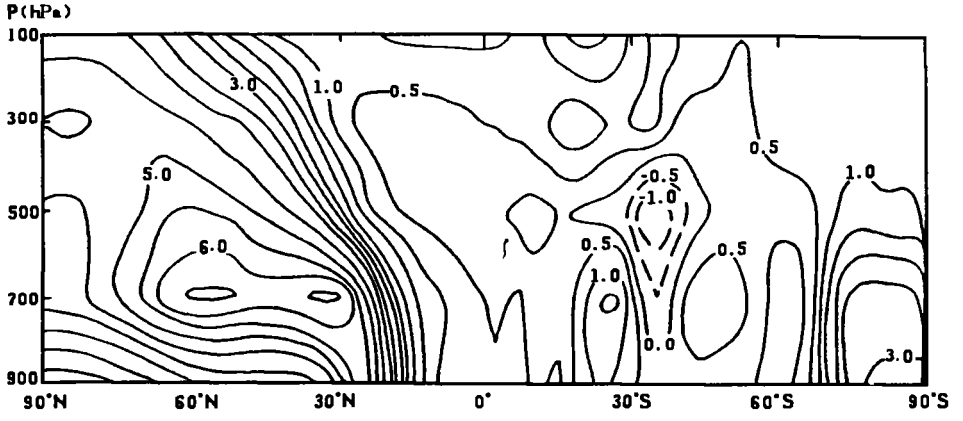

图 4　有涡旋热量输送实验模拟的 1 月平均温度场减去对照实验模拟的 1 月平均温度场(图 1)所得的差值场(单位:K)

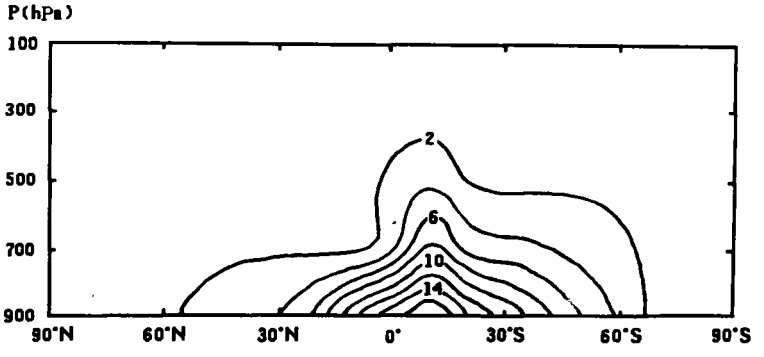

图 5　没有涡旋输送的对照实验模拟的 1 月纬向平均水汽场(单位:g kg^{-1})

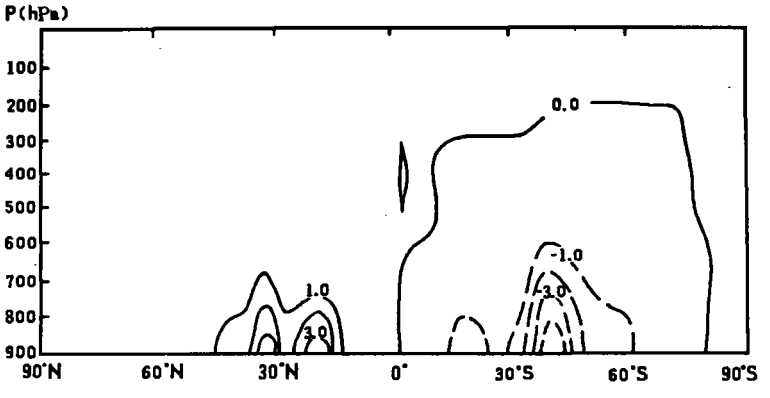

图 6　有涡旋水汽通量输送实验模拟的 1 月平均涡动水汽通量(单位:g kg^{-1} · m s^{-1})

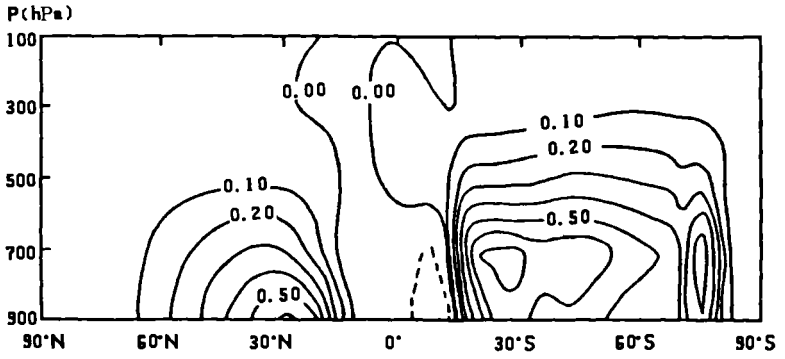

图7 同图4相似，但为水汽差值场(单位：g kg^{-1})

3 涡动通量参数化

对于涡动热通量的研究经历了从线性理论(混合长理论)到非线性理论漫长的发展过程。Branscome(1983)[3]提出了β平面上源于斜压不稳定的大尺度涡旋热通量参数化方案，随后的研究者们Held(1978)[4]，Stone等(1987，1990)[5]对此方案给予了很高的评价。我们应用了这个方案，并给了其参数γ的有效范围。

$$\overline{V'T'}=\begin{cases}\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{R}{C_P}}\frac{Agd^2H_w}{f^2\theta_w}\left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)_w e^{-\frac{2}{b}}\left(1-e^{-\frac{2}{b}}\right) & 0<\gamma<\gamma_0\\ 0 & \gamma>\gamma_0 \text{ 或 } \gamma<0\end{cases}\tag{10}$$

式中应用了$\theta'=T'\left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{R}{C_P}}$线性关系，$P_0=1000\text{hPa}$；斜压波垂直尺度$d=\frac{H_w}{1+\gamma}$；$\gamma$是表征“$\beta$效应”的无量纲参数，$\gamma=\frac{\beta N_w^2H_w}{f^2\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_w}$；下标$w$表示物理量的垂直平均，对任意$X$有：$X_w=\frac{1}{D}\int_0^\infty Xe^{-\frac{z}{b}}\mathrm{d}z$；$D=\frac{1}{\sqrt{4k^2+1}-1}$；$k$是最不稳定斜压波的波数，$k=\frac{1+\gamma}{2}$；$H_w$是大气标高；$N^2$是Brünt-Vaisala频率；$f$是柯氏参数，$\beta=\frac{\partial f}{\partial y}$；$A$是常数，取$A=0.6$；在本文中$\gamma_0=17$，它反映了当$\gamma\gg1$时，这种参数化方案不再实用的局限性。

另一方面，Leovy(1973)[6]假定水汽混合比q的变化取决于温度变化，由Clausius-Clapeyon方程推导出：

$$\overline{v'q'}=h\frac{\partial q_s(T)}{\partial T}\overline{v'T'}\tag{11}$$

其中h为相对湿度；q_S为饱和比湿。把涡动热量通量和涡动水汽通量对高度积分，得到各纬圈上的涡动感热和涡动潜热为：

$$E_1=\int_0^1 2\times3.14\times R\cos\varphi c_p\overline{v'T'}\cdot\pi/g\mathrm{d}\sigma\tag{12}$$

$$E_2=\int_0^1 2\times3.14\times R\cos\varphi L\overline{v'q'}\cdot\pi/g\mathrm{d}\sigma\tag{13}$$

式中 c_p 是定压比热,L 是水汽凝结潜热。

4 数值实验

我们所进行的数值实验,在对照实验中 $F_{T2}=F_{q2}=0$;有涡旋热量输送实验 $F_{T2}=-\frac{1}{am}\frac{\partial}{\partial\varphi}(\pi\overline{v'T'}m)$,且 $F_{q2}=0$;有涡旋水汽输送实验 $F_{q2}=-\frac{1}{am}\frac{\partial}{\partial\varphi}(\pi\overline{v'q'}m)$,且 $F_{T2}=0$。

在纬向平均模式中,时间步长是 $6min$,对涡旋项的处理同其它外源项一样是每 $1h$ 计算一次的。取 4 月份气候平均场作为初值场,从 5 月份开始积分,每个实验积分时间都是 1a。这 3 个实验结果对基本场的模拟都比较成功,为了比较它们的差异,做了有涡旋通量输送实验的基本场减去没有涡旋通量输送的对照实验的基本场的差值场,由于篇幅有限,这里着重对 1 月份的结果进行分析。

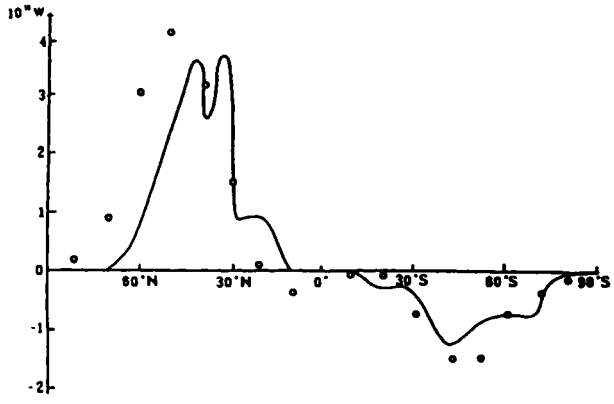

图 8 1 月平均垂直积分的向北输送涡动感热通量(单位:10^{15}W)
(o 代表 Oort 和 Peicoto(1983)分析 12 月－1 月－2 月平均值)

图 1 与 Oort(1983)[7]客观分析场相比,冬半球中高纬温度水平梯度略偏大。比较图 2 和图 3 发现,模拟的涡动热量通量在北半球的强度和分布上基本上同用气候资料给出的结果一致。由于 Branscome 方案中没有考虑行星波,所以在计算结果中尚缺少对流层高层的次极大值(参见文献[7])。图 4 表明,在图 2 中存在较强涡动热通量的北半球,有明显的增温,特别是在中高纬地区(700hPa 高度)有两个＋6.5K 的增温中心。南半球由于涡动热通量比较弱,作用不很显著,只在高纬地区有弱的增温。图 4 说明了大尺度涡旋有把能量向中高纬输送的作用,输送的强度同大气的斜压性有正相关。1 月份北半球副热带上空西风急流处有极强的斜压不稳定性,产生了较强的涡旋输送。

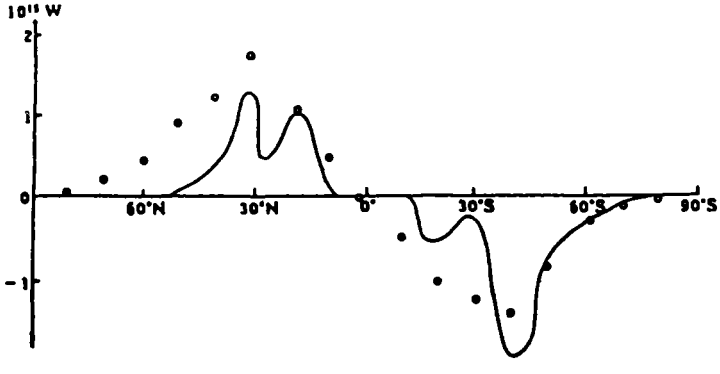

图 9　1 月平均垂直积分的向北输送涡动潜热通量(单位:10^{15}W)
(o 代表 Oort 和 Peicoto(1983)分析 12 月－1 月－2 月平均值)

由此可见,大尺度涡旋热量输送有两个重要意义。其一,它反映较真实的中高纬地区

大气能量输送过程；其二，在它的作用下，原模式对中高纬温度水平梯度模拟偏大和西风急流模拟偏强的情况有很大改善。

图5模拟的涡动水汽通量在热带以外地区与客观分析值很一致。图6表明涡旋作用使两个半球中高纬广大地区有增湿效应。

图8和图9表明了模拟的涡动感热和潜热在中高纬地区的高值，同客观分析值是一致的。

5 小 结

在纬向平均模式中加入大尺度瞬变涡旋热量和水汽通量参数化方案，再现了在中高纬地区大气能量输送的一种重要过程。应用此方案提高了纬向平均模式的模拟能力。

致谢：本文得到了陈隆勋教授的指导，特此致谢。

参考文献

[1] Li Weiliang, Chen Longxun, Zhou Xiuji and Gong Wei. The numerical simulation of the two-dimensional dynamical climate model with mountain forcing. Acta Meteorological Sinica, 1989, 3: 312－327.

[2] Li Weiliang, Gong Wei and Wang Wei Chyung. Development of two-dimensional physical-dynamical climate model. Acta Meteorological Sinica, 1993, 7: 129－146.

[3] Branscome L E. A parameterization of transient eddy heat flux on a beta-plane. J Atmos Sci, 1983b, 40: 2508－2521.

[4] Held L M. The vertical scale of an unstable baroclinic wave and its importance for eddy heat parameterization. J Atmos Sci, 1978, 35: 572－576.

[5] Stone P H, Yao M S. Development of a two-dimensional statistical-dynamical model. Part 3: The parameterization of the eddy fluxes of heat and moisture. J Climate, 1990, 3: 726－740.

[6] Leovy C B. Exchange of water vapor between the atmosphere and surface of Mars. Icarus, 1973, 18: 120－125.

[7] Oort A B, Peixoto J P. Global angular momentum and the energy balance requirments from observation. Advances in Geophysics, Theory in Climate, Saltzman B, Ed, Academic Press, 1983, 25: 355－490.

PARAMETERIZATIONS OF LARGE-SCALE EDDY HEAT AND MOISTURE IN A ZONALLY AVERAGED DYNAMIC MODEL

Fu Chao Li weiliang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing*, 100081)

Abstract

In this paper, the transport of large-scale eddy heat and moisture are parameterized in a two-dimensional zonally averaged model. The parameterized eddy fluxes simulated the seasonal and latitudinal variations reasonably well. Compared with noninteractive test, some very effective strong feedbacks effect between the modeled zonal-mean climate and parameterized meridional eddy transport is identified.

Key words: Zonal averaged model, Parameterization, Large-scale transient eddy, Eddy flux.