

夏季青藏高原低涡的能量场分析

杨 洋* 罗四维

(兰州高原大气物理研究所)

提 要

本文采用视热源方程,视水汽汇方程,扰动能量方程和涡度方程对1979年6月的三次低涡进行了分析和研究,得到了以下结论:在低涡生成和发展过程中,积云和乱流引起的总热量的垂直涡旋输送很大。当大气处于条件不稳定时, $\gamma_s < \gamma < \gamma_0$,积云和乱流的这种输送结果,使得低涡的正涡度增长上升到较高层次;另外,积云和乱流对总热量的垂直涡旋输送使得低涡内扰动有效位能增加,然后向扰动动能转换,使低涡得以生成和发展。

一、引 言

高原低涡是夏季青藏高原的主要降水系统。发展的高原低涡移出高原后,能造成高原东部地区很强的降水。因此研究高原低涡发生和发展机制具有很重要的意义。在过去的研究中,罗四维等^[1]曾对高原暖性低涡的发生和发展做过初步分析,认为适当的环流条件,较大的地气温差和湿度,强烈的位势不稳定并由此产生的对流凝结潜热是低涡生成的原因。杨伟愚等^[2]通过数值研究得到,高原地形的动力作用是高原主体及东侧频繁出现低涡系统的重要因素。钱正安^[3,4]则认为:低涡的生成与特定的加热场和特定的环流形势关系密切,如北脊南槽或高原切变线,由于正压不稳定有利于低涡胚胎形成,高原中西部不均匀加热使高原中西部的涡动动能增加,给低涡的生成提供能量。

Lorenzd Dell'osso^[5]用ECMWF有限区域格点模式对低涡的发生和发展进行了数值试验,认为地表感热对低涡的发展有减弱作用。Shen R. J.等^[6,7]用原始方程模式对低涡的发展也进行了研究,结果表明潜热对低涡的发展很重要,感热能加强高原中部低涡,但对南部接近拉萨的低涡作用不大,甚至抑制其发展。最近罗四维、杨洋^[8]的研究指出,在一定环流形势下,地面感热影响是高原低涡产生的重要原因。

本文着重分析高原低涡产生和发展过程中的热量场结构特点,感热和潜热是怎样对低涡的生成和发展起作用的。

本文1990年7月6日收到,12月25日收到修改稿。

* 现工作单位:贵州省气象研究所。

二、天气分析

FGGE III b 资料在高原上与实际情况有一定误差,为了更正确反映高原上的实际天气情况,我们采用全部科学实验资料,以 FGGE III b 资料为初值重新进行了客观分析^[9,10]。FGGE III b 资料经过加密资料订正后有明显改进,主要是 500hPa 低涡中心更接近实况,高原部分更是如此。以下所用的资料都是经过订正的 FGGE III b 资料,主要进行各层的风场与温度场订正。

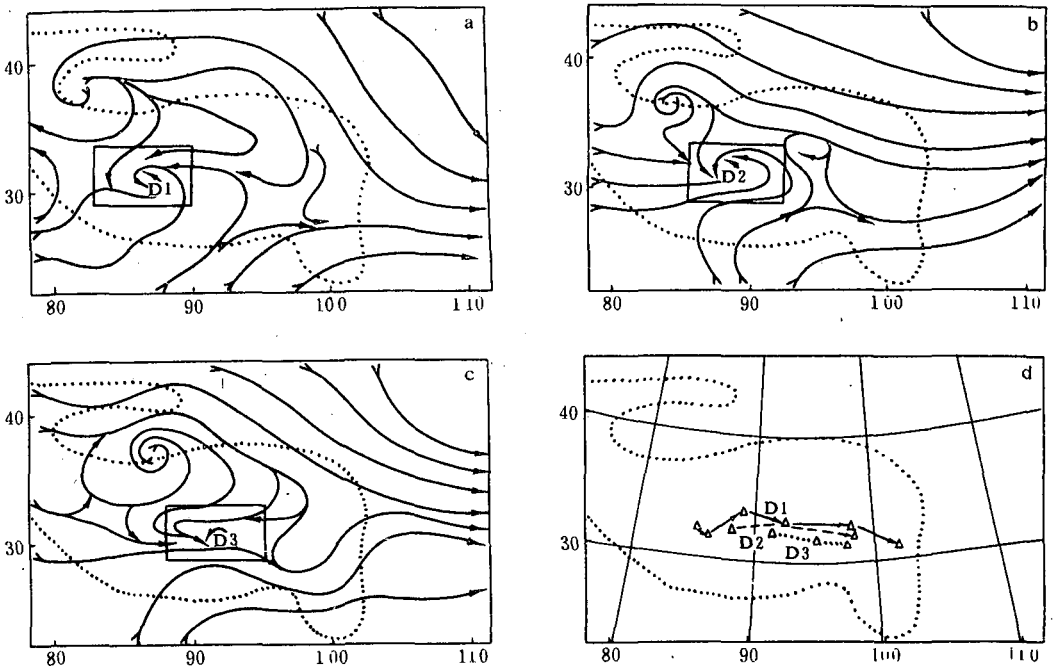


图 1 (a)1979 年 6 月 7 日 00 时 500hPa 流场(b)6 月 25 日 00 时 500hPa 流场
(c)6 月 26 日 00 时 500hPa 流场(d)低涡中心位置图(△表示低涡中心,点线为高原廓线)

图 1 是 500hPa 流场及低涡中心东移位置。6 月 6 日 12 时(U. T. 以下同),在 83°E、33°N 附近有一切变线(图略),12 小时后该切变线发展成一低涡,中心位置在 85.5°E、32.5°N(图 1a),以后低涡逐渐往东移动,10 日 00 时,低涡减弱变成一槽,以下称这次低涡为 D1。6 月 24 日 12 时,在 89°E、33°N 附近有一切变线,其北部为一高压系统(图略),12 小时后,该切变线发展成低涡,中心在 88.5°E、32.5°N(图 1b),以后低涡向东移动,26 日 00 时减弱成一槽,称这次低涡为 D2。6 月 25 日 12 时,在北纬 33°N,88°E 附近有一切变线(图略),26 日 00 时发展成一低涡(图 1c),到 27 日 12 时,该低涡减弱成低槽,称 D3。

三、诊断分析方法

本文所用的诊断方程有 σ 坐标系的视热源方程和视水汽汇方程^[11]。

视热源方程:

$$\begin{aligned} \bar{p}^* Q_1 &\equiv \frac{\partial \bar{p}^* \bar{T}}{\partial t} + \bar{V} \cdot (\bar{p}^* \bar{\nabla} T) + \frac{\partial \bar{p}^* \bar{\sigma} T}{\partial \sigma} - \frac{R \bar{T} \bar{\omega}}{c_p (\sigma + p_i / \bar{p}^*)} \\ &= \frac{L}{c_p} \bar{p}^* \bar{C}^* - \frac{\partial \bar{p}^* \bar{\sigma}' T'}{\partial \sigma} + \frac{R T' \bar{\omega}'}{c_p (\sigma + p_i / \bar{p}^*)} + \bar{p}^* Q_R \end{aligned} \quad (1)$$

Q_1 为视热源, 等式右第 1 项为潜热, 第 2+3 项为由积云和乱流引起的感热的垂直涡旋输送, 第 4 项为辐射冷却, C^* 代表降水量。

视水汽汇方程:

$$\begin{aligned} \bar{p}^* Q_2 &\equiv -\frac{L}{c_p} \left(\frac{\partial \bar{p}^* \bar{q}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{p}^* \bar{V} q + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\bar{p}^* \bar{\sigma}' q') \right) \\ &= \frac{L}{c_p} \bar{p}^* \bar{C}^* + \frac{L}{c_p} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\bar{p}^* \bar{\sigma}' q') \end{aligned} \quad (2)$$

Q_2 为视水汽汇, 等式右第 2 项为积云和乱流引起的潜热的垂直涡旋输送。

上两式已略去了水平涡旋输送项, 因该项与其他两项相比可以忽略不计。

将(1)式减(2)式:

$$\bar{p}^* (Q_1 - Q_2) = -\frac{\partial \bar{p}^* \bar{\sigma}' T'}{\partial \sigma} + \frac{R T' \bar{\omega}'}{c_p (\sigma + p_i / \bar{p}^*)} + \bar{p}^* Q_R - \frac{L}{c_p} \frac{\partial \bar{p}^* \bar{\sigma}' q'}{\partial \sigma} \quad (3)$$

Kuo 等^[11]指出, $\bar{p}^* Q_R$ 相对其他项可以略去, 这样(3)式中只有相对重要的两大项: 积云和乱流引起的感热的垂直涡旋输送项, 积云和乱流引起的潜热的垂直涡旋输送项。因此, 在忽略 $\bar{p}^* Q_R$ 的情况下, $\bar{p}^* (Q_1 - Q_2)$ 就为积云和乱流引起的总热量(感热和潜热)的垂直涡旋输送。如果没有积云和乱流的垂直涡旋输送并忽略辐射冷却, $(Q_1 - Q_2)$ 应为零, 换句话说, 在忽略辐射冷却的情况下, 如 Q_1 与 Q_2 的剖面差别较大, 积云和乱流引起的垂直涡旋输送就很重要^[12]。

在计算中, (1)式和(2)式的时间和空间微商均用中央差, 时间步长 $\Delta t = 12\text{h}$, 水平空间步长 $\Delta d = 80\text{km}$, 所用资料插值到 10 层 σ 面上。

为了了解低涡内的能量循环特征, 以下的分析中还采用了 Nitta^[13]推导的扰动有效位能和扰动动能方程:

$$\frac{\partial K'}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \bar{u}' v' - \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} \bar{u}' \omega' - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\phi}' v') - \frac{\partial}{\partial p} (\bar{\phi}' \omega') - \bar{\alpha}' \omega' + D' \quad (4)$$

$$\frac{\partial E'}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \frac{1}{\delta} \bar{v}' \alpha' + \bar{\alpha}' \omega' + \frac{R}{c_p \delta p} \bar{\alpha}' Q' \quad (5)$$

其中: $K' = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2)$ 为扰动动能, $E' = \frac{1}{2\delta} \alpha'^2$ 为扰动有效位能, $\delta = -\frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p}$,

“-”表示纬向平均, “'”表示纬向平均偏差, D' 表示耗散。经过坐标转换, 则有:

① 扰动动能的辐散辐合项:

$$\begin{aligned} -\left[\frac{\partial}{\partial p} (\bar{\phi}' \omega') \right] &= -\frac{1}{p^*} \left[\frac{\partial}{\partial \sigma} (\bar{\phi}' \omega') \right] \\ -\left[\frac{\partial}{\partial y} (\bar{\phi}' v') \right] &= -\left[\frac{\partial}{\partial y} (\bar{\phi}' v') \right]_{\sigma} - \frac{1}{p^*} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\bar{\phi}' v') \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_{\sigma} \end{aligned}$$

② 平均纬向动能 \bar{K} 与扰动动能 K' 的转换项:

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \overline{u'v'} = - \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)_\sigma - \frac{1}{p^*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_\sigma \right] \overline{u'v'}$$

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial p} \overline{u'\omega'} = - \frac{1}{p^*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} \overline{u'\omega'}$$

③ 扰动有效位能 E' 和扰动动能 K' 的转换项: $-\overline{\alpha'\omega'}$ 在两个坐标系里保持不变。

④ \bar{E} 和 E' 之间的转换项:

$$-\frac{1}{\delta} \left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right)_\sigma \overline{v'a'} = - \frac{1}{\delta} \left[\left(\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial y} \right)_\sigma - \frac{1}{p^*} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_\sigma \right] \overline{v'a'}$$

$$\delta = - \frac{1}{\rho \theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial p} = - \frac{1}{\rho \theta} \frac{1}{p^*} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \sigma}$$

⑤ $\frac{R}{c_p \delta p} \overline{\alpha'\theta'}$ 非绝热产生项: 在两个坐标系中不变。

以上计算限制在低涡范围内,如图 1 的方框所示,方框随低涡中心移动,保证低涡中心始终在方框内。

四、垂直积分的能量水平分布

计算从地面到 100hPa, 10 层等 σ 面上的 Q_1, Q_2 , 然后进行垂直积分, 得到 Q_1, Q_2 和 $(Q_1 - Q_2)$ 的水平分布图。由图 2 可见, 能量分布有以下特点: 在低涡中心附近总伴有较强的 Q_1, Q_2 和 $(Q_1 - Q_2)$ 中心; $Q_1, (Q_1 - Q_2)$ 中心在位置上与低涡中心不太一致, Q_2 中心与低涡中心较为一致。在低涡附近的 $Q_1, (Q_1 - Q_2)$ 中心值比 Q_2 中心值大得多, Q_1 的水平分布与 Q_2 的水平分布有明显的差异, 说明在低涡的发展过程中, 地表感热通量和蒸发都很强。

$D1, D2$ 和 $D3$ 在其他时次的能量分布也有以上特点, 在此不再重述(图略)。

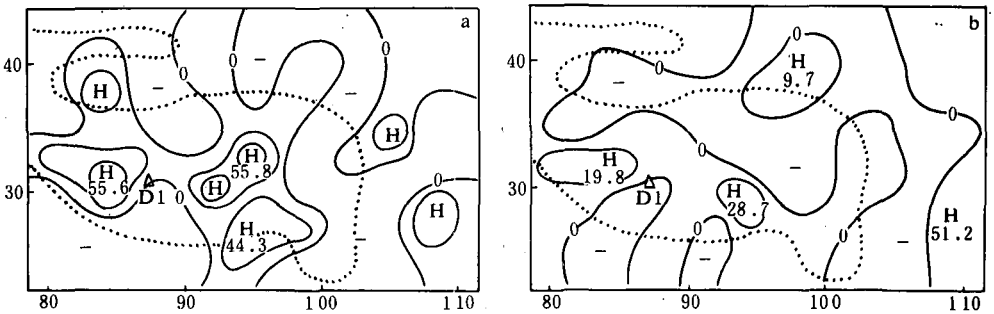


图 2 垂直积分的能量分布图

(a) 6 月 7 日 12 时 Q_1 (b) 6 月 7 日 12 时 Q_2 (c) 6 月 7 日 12 时 $(Q_1 - Q_2)$

(d) 26 日 00 时 Q_2 (e) 26 日 00 时 Q_1 (f) 26 日 00 时 $(Q_1 - Q_2)$

(图中“ Δ ”表示低涡中心, 点线为高原廓线, 单位 K/d,

$Q_1, (Q_1 - Q_2)$ 等值线间隔为 20K/d, Q_2 为 10K/d)

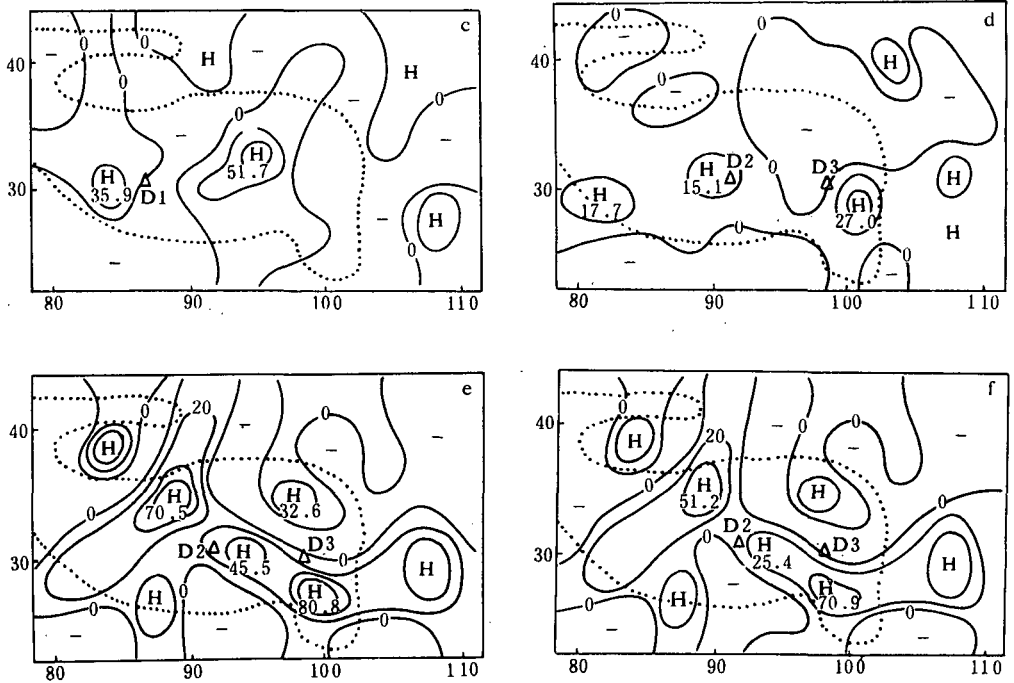


图2 (图题说明见上)

五、低涡范围内的能量垂直分布

将等 σ 面上的 Q_1, Q_2 及 $(Q_1 - Q_2)$ 在图1所示的方框区域内求平均,得到能量的垂直分布图,由于篇幅有限,只给出能量垂直分布的示意图(图3)。在三次低涡过程中,能量的垂直分布有以下共同特点: Q_1 的极大值在300hPa附近, Q_2 的极大值在500hPa附近, $(Q_1 - Q_2)$ 的极大值在250hPa附近, Q_1 的极大值高度比 Q_2 极大值高度高。由于 Q_1 的垂直剖面与 Q_2 的剖面有明显的差异,因此在低涡的发展过程中,积云和乱流引起的总热量(潜热和感热)的垂直涡旋输送很重要。钱正安等^[14]曾指出,夏季高原地区以对流云为主,大部分地区的对流云占总云量的60%以上,高原中部及沿江流域达90%以上,还指出高原低涡,切变线等是强对流活动的组织者。说明低涡与对流云有密切的联系,这在很大程度上支持了以上结论。

为了更好地分析低涡范围内能量的垂直分布结构与低涡发展的关系,将 p 坐标系里的热力学方程,散度方程代入涡度方程并在只考虑热量场对涡度场的贡献时,近似有:

$$\frac{d}{dt}(\zeta_r + f) \propto - \frac{1}{\gamma_a - \gamma} \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

钱正安等^[14]还指出,对于1979年青藏高原夏季(5-8月),大气总处于湿不稳定状态,即 $\gamma < \gamma_a$ 基本上是可以满足的。

由图3可以看出,在300hPa以下, Q_1 随气压减小而增大,即 $-\frac{\partial \theta_1}{\partial p} > 0$,那么, Q_1 使低涡范围内300hPa以下气柱的绝对涡度增加。如果没有积云和乱流的垂直涡旋输送, Q_1 的

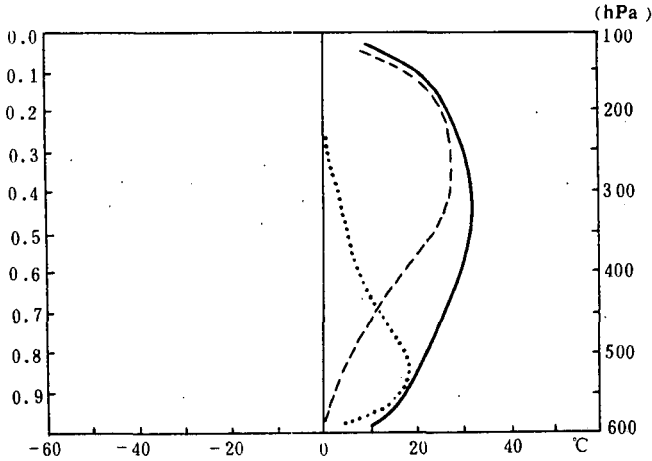


图 3 低涡范围内能量垂直分布示意图

(实线为 Q_1 , 点线为 Q_2 , 虚线为 $(Q_1 - Q_2)$)

剖面应与 Q_2 的剖面相同, Q_1 的极大值高度也应和 Q_2 的极大值高度基本相同;换句话说,正是由于积云和乱流对总热量(潜热和感热)垂直涡旋输送的结果,使 Q_1 的极值高度比 Q_2 的极大值高度高,从而使低涡范围内正涡度增长上升到较高层次。

六、低涡范围内的能量循环

采用前面介绍的扰动能量方程,我们计算了低涡范围内的 \bar{E} 与 E' , 非绝热加热与 E' , E' 与 K' , K' 与 \bar{K} 之间的转换及 K' 的辐散辐合,然后垂直积分。由于三次低涡的能量循环非常相同,在此只给出其平均循环图(图 4)。根据其发展过程分成四个阶段:(a)前期:低涡生成前 12 小时(即 D_2 的 24 日 12 时, D_3 的 25 日 12 时), (b)初期:低涡开始形成时期(即 D_1 的 7 日 00 时, D_2 的 25 日 00 时, D_3 的 26 日 00 时), (c)发展期:低涡生成后到低涡崩溃前(即 D_1 的 7 日 12 时, 8 日 00 时, 8 日 12 时, 9 日 00 时, 9 日 12 时; D_2 的 25 日 12 时, D_3 的 26 日 12 时), (d)消亡期:低涡减弱成槽的时期(即 D_2 26 日 00 时, D_3 27 日 00 时)。从图 4 中可以看出,对三次低涡的初期阶段,扰动有效位能 E' 的来源是 $\alpha'(Q_1 - Q_2)'$, 然后向 $\alpha'Q_2'$, \bar{K} 和 K' 转换,扰动动能 K' 的主要来源是 E' 和扰动动能的辐合, \bar{K} 对 K' 的转换很小。对于低涡的初期和发展期, E' 的主要来源是: $\alpha'(Q_1 - Q_2)'$, 而 $\alpha'Q_2'$ 向 E' 的转换较小,然后 E' 向 \bar{E} 和 K' 转换; K' 的主要来源是 E' 和 K' 的辐合,然后 K' 向 \bar{K} 转换及耗散。对于低涡消亡期, E' 的主要来源是 $\alpha'(Q_1 - Q_2)'$, 然后 E' 向 \bar{E} 和 $\alpha'Q_2'$ 转换, K' 的主要来源是 E' 和 K' 的辐合,然后 K' 向 \bar{K} 转换及耗散。上述过程说明在低涡的发展过程中,视水汽汇是有一定贡献的。

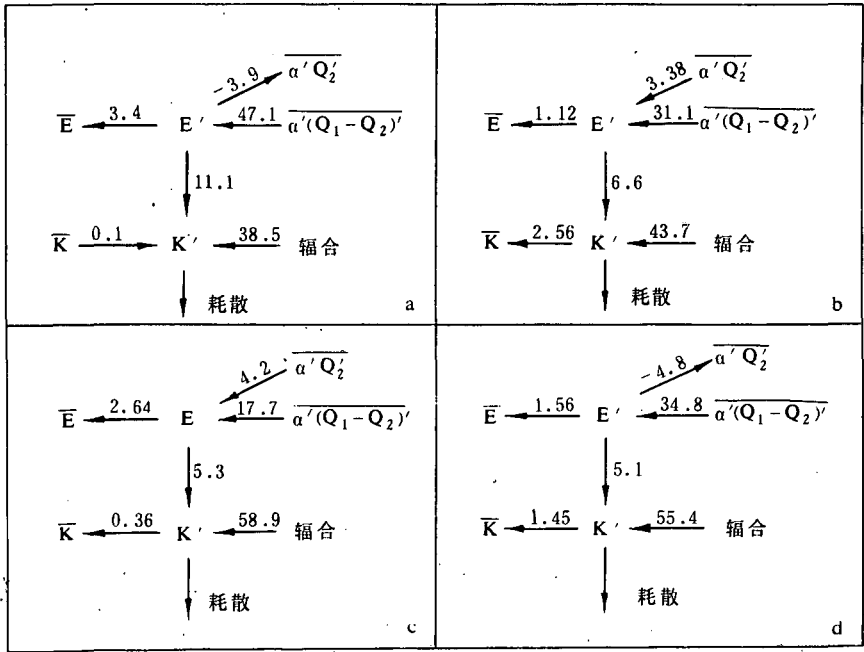


图4 三次低涡各个时期能量循环的平均值
(a)低涡前期 (b)初期 (c)发展期 (d)消亡期(单位: $10^{-4} \text{J/kg} \cdot \text{s}$)

七、结论与讨论

1. 在三次低涡的发展过程中,低涡范围的 Q_1 中心比 Q_2 的大得多, Q_1 垂直分布与 Q_2 的分布有着明显差别,说明在低涡的发展过程中高原的地表感热通量和蒸发很强。
2. Q_1 的极大值高度比 Q_2 的高,说明积云和乱流的垂直涡旋输送是很重要的。
3. $(Q_1 - Q_2)$ 总是使扰动有效位能增加,低涡的扰动动能主要来源于扰动有效位能和扰动动能的辐合。这就更进一步说明了积云和乱流的垂直涡旋输送对低涡发展的重要性。
4. 对于青藏高原夏季(5—8月),积云和乱流对总热量的垂直涡旋输送结果,使得低涡范围气柱的正涡度增长上升到较高层次。
5. 本文的计算中,忽略了辐射冷却项,因为它的量级相对其他项较小。本文的 Q_1 和 Q_2 及能量循环的计算是存在一定误差的,就目前来说,这些误差很难进行分析和订正。
6. 本文计算的 Q_1 和 Q_2 是某一时刻的瞬时值,单位取 K/d ,是瞬时值外推 24 小时的结果,即使是瞬时值,也比一般情况下大,这可能是本文计算中时间步长取得太大(12h),空间步长取得太小(80km)的缘故。

参 考 文 献

[1] 叶笃正,高由禧等,青藏高原气象学,122—126,科学出版社,1979年。

- [2] 杨伟恩等, 正压大气中青藏高原地形影响的数值试验, *高原气象*, 6, 2, 117—128, 1987。
- [3] 钱正安等, 1979年夏季青藏高原低涡的统计及低涡产生的气候因子探讨, *青藏高原气象科学实验文集*, 182—194, 科学出版社, 1979年。
- [4] 吕君宁、钱正安等, 夏季青藏高原低涡的综合结构, 195—205, 科学出版社, 1979年。
- [5] Lorenzd Dell'osso, and S. J. Chen, Numerical experiment on the genesis of vortices over the Qinghai-Tibet Plateau, *Tellus*, 38A, 236—250, 1986。
- [6] Shen, R. J. et al., Numerical simulation of the development of vortices over the Qinghai-Xizang Plateau, *Meleo. Atmos. Phys.*, 35, 70—95, 1986。
- [7] Shen, R. J. et al., Some aspects of the effects of sensible heating on the development of summer weather system over the Tibetan Plateau, *J. Atmos. Sci.*, 43, 2241—2260, 1986。
- [8] 罗四维、杨洋、吕世华, 青藏高原对夏季高原低涡发展影响的个案诊断分析, *高原气象*, 10, 1, 1991。
- [9] 黄敏等, 青藏高原及其附近地区资料的统计同化方案与试验, *高原气象*, 8, 27—38, 1989。
- [10] 罗四维等, 青藏高原地区 500hPa FGGE II b 风场订正方法及分析, *高原气象*, 9, 1, 1990。
- [11] Kuo, Y. H., et al., Mesoscale analysis of the Sichuan flood catastrophe, *M. W. R.*, 114, 1984—2003, 1986。
- [12] Yanai, M. S. et al., Determination of bulk properties of tropical cloud cluster from large-scale heat and moisture budgets., *J. Atmos. Sci.*, 30, 611—627, 1973。
- [13] Tsuyoshi Nitta, On the role of transient eddies in the tropical troposphere, *J. Meleo. Soc. Japan*, 48, 348—359, 1970。
- [14] 钱正安等, 1979年夏季高原对流云分析, *青藏高原气象科学实验文集(一)*, 234—257, 科学出版社, 1984年。

ENERGY ANALYSES OF VORTICES OVER THE QINGZANG PLATEAU IN SUMMER

Yang Yang Luo Siwei

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

Three vortices, which happened over the Qinghai-Tibet Plateau in June of 1979, are estimated in this paper by using apparent heat source equation, apparent moist sink equation, perturbation energy equations and vorticity equation.

During the genesis and development process of the vortices, the vertical eddy transport of total heat (sensible heat and latent heat) caused by cumulus and turbulence is very important. When the atmosphere is conditional instability, the eddy transport by cumulus and turbulence makes the layer of the increment of vortices absolute vorticity higher. In addition, the eddy transport of total heat makes disturbance effective potential energy increase and then it is transformed into disturbance kinetic energy. Thus, the vortices will generate and develop.