

一次东北冷涡发展过程中的能量学研究^{*}

孙 力

(吉林省气象科学研究所, 长春, 130062)

摘 要

对一次典型的东北冷涡过程做了能量学分析。结果表明, 东北冷涡活动具有鲜明的阶段性能量学特征。东北冷涡发展之前, 各种能量之间的转换很小, 边界通量也处于正负相间的振荡状态。早期发展阶段, 扰动动能边界通量作用是至关重要的。随着非绝热加热制造扰动有效位能和扰动有效位能向扰动动能转换的大幅度增长, 以及外界扰动动能的大量输送和纬向平均动能向扰动动能转换的明显加强, 导致了东北冷涡的强烈发展, 即这一时期区域内部的能量过程也同样十分重要。东北冷涡的减弱是从有大量扰动动能转换成纬向平均动能开始的, 随后加上扰动有效位能向扰动动能转换以及边界通量作用的减弱, 使得冷涡逐渐衰亡。

关键词: 东北冷涡, 能量收支, 能量循环。

1 引 言

东北冷涡是东亚大气环流中的重要组成部分, 也是中国东北地区所特有的天气系统, 它一年四季均可出现, 移动比较缓慢, 可以不断再生发展, 具有一定的准静止性, 可带来连续数日的低温阴雨及暴雨天气, 因此对东北地区的天气气候有着很大影响。虽然过去人们对东北冷涡的气候规律和某些天气学特征做过一些分析^[1-3], 但对东北冷涡发生发展和维持的物理机制研究较少。这里试图从能量学角度针对这一问题进行探讨。

选取 1984 年 7 月 8~17 日的一次典型的东北冷涡活动由形成到发展再到减弱的过程作为研究对象(东北冷涡的定义标准与文献[1]相同)。为了与冷涡发展阶段的能量变化做对比, 还选择了 7 月 3~7 日这段时间作为冷涡发展的前期阶段, 也做了分析和计算。此次东北冷涡活动的特点是维持和持续发展时间较长, 强度大, 系统深厚, 闭合的气旋式环流一直发展到 200 hPa。伴随着冷涡的维持和发展, 东北地区出现了明显的低温阴雨天气, 在其强烈发展阶段, 系统的东部和东南部还出现了暴雨过程。此次冷涡的天气概况如下: 7 月 3~7 日, 是冷涡发展的前期阶段。东北地区虽有短波槽脊变化, 但没有冷涡活动(也没有气旋、台风等天气系统活动)。7 月 8~13 日是发展阶段, 这期间冷涡首先出现在东北地区的西北部, 然后向东偏南方向缓慢移动。在 8 至 10 日的冷涡早期发展阶段, 较强的低值系统主要出现在对流层的中高层, 而在对流层低层低涡并不很明显, 甚至地面原本

* 初稿时间: 1995 年 10 月 20 日; 修改稿时间: 1996 年 9 月 28 日。

资助课题: 中国气象局重点课题《东北冷涡研究》。

就不很强的低压还有所减弱。11日08时至20时此东北冷涡经历了短暂和并不太明显的衰减之后,从12日08时(图1)至13日20时又有了更强烈的发展,是冷涡的强烈发展阶段,这期间500 hPa低涡中心值下降了80 dagpm,与之对应的地面低压中心值也下降了16 hPa,这一点与冷涡的早期发展有所差别。14日20时至17日20时冷涡强度逐渐减弱,18日消失,故这段时间是冷涡的减弱阶段。

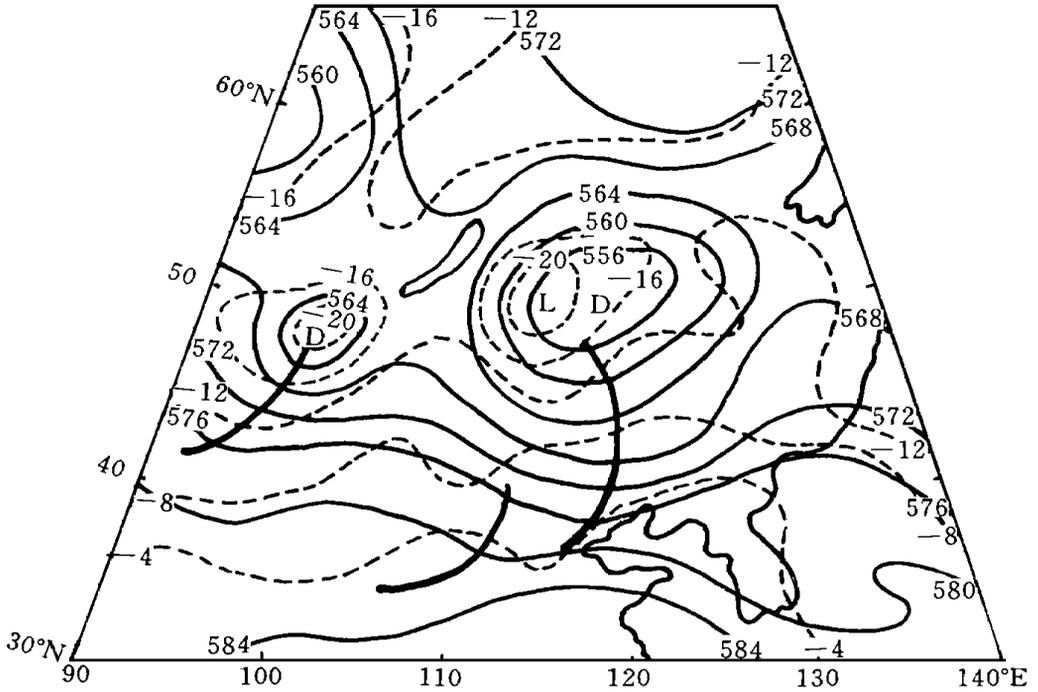


图1 1984年7月12日08时500 hPa天气图

2 资料和方法

本文使用 ECMWF 网格资料,水平格距 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;垂直方向插成10层,从1000 hPa至100 hPa,间隔100 hPa,所取区域范围是 $35^\circ \sim 60^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 140^\circ \text{E}$,垂直运动采用运动学方法加 O Brein 订正计算,并取齐次上下边界条件。

有限区域能量循环方程采用如下形式^[4]:

$$\frac{\partial A_z}{\partial t} = C(K_z - A_z) + C(A_E - A_z) + GA_z + BA_z$$

$$\frac{\partial A_E}{\partial t} = C(A_z - A_E) + C(K_E - A_E) + GA_E + BA_E$$

$$\frac{\partial K_z}{\partial t} = C(K_E - K_z) + C(A_z - K_z) + BK_z + B\Phi_z + D_z$$

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = C(K_Z - K_E) + C(A_E - K_E) + BK_E + B\Phi_E + D_E$$

$$A_Z = \int_{p_t}^{p_b} \frac{T^{**2}}{2\sigma} dp \quad \text{是纬向平均有效位能;}$$

$$A_E = \int_{p_t}^{p_b} \frac{T^{*2}}{2\sigma} dp \quad \text{是扰动有效位能;}$$

$$K_Z = \frac{1}{2g} \int_{p_t}^{p_b} \overline{([u]^2 + [v]^2)} dp \quad \text{是纬向平均动能;}$$

$$K_E = \frac{1}{2g} \int_{p_t}^{p_b} \overline{(u^{*2} + v^{*2})} dp \quad \text{是扰动动能;}$$

其中 $\sigma = g \cdot \frac{p}{R} \left(\frac{R}{c_p} \frac{[T]}{p} - \frac{\partial [T]}{\partial p} \right)$ 是大气静力稳定度, $[\]$ 表示纬向平均, $(\)$ 表示区域面积平均, $(\)^*$ 表示对面积平均的偏差, $(\)^{**}$ 表示纬向平均与面积平均的偏差, p_b 表示底层 (1000 hPa), p_t 表示顶层 (100 hPa)。

$$C(A_Z - A_E) = - \int_{p_t}^{p_b} \left(\frac{1}{r_0 \sigma} v^* T^* \cdot \frac{\partial T^{**}}{\partial \varphi} + \frac{1}{\sigma} \omega^* T^* \cdot \frac{\partial T^{**}}{\partial \varphi} \right) dp \quad \text{是纬向平均有效位能}$$

能与扰动有效位能的转换;

$$C(K_E - K_Z) = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\cos \varphi}{r_0} \overline{u^* v^* \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{[u]}{\cos \varphi} \right) + \frac{v^{*2}}{r_0} \frac{\partial [v]}{\partial \varphi} + \frac{\tan \varphi}{r_0} u^{*2} [v] + \omega^* u^* \frac{\partial [u]}{\partial \varphi}}$$

+ $\omega^* v^* \frac{\partial [v]}{\partial \varphi}$) dp 是纬向平均动能与扰动动能的转换;

$$C(A_Z - K_Z) = - \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{R}{p} \overline{\omega^* T^{**}} dp \quad \text{是纬向平均有效位能与纬向平均动能的转}$$

换;

$$C(A_E - K_E) = - \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{R}{p} \overline{\omega^* T^*} dp \quad \text{是扰动有效位能与扰动动能的转换;}$$

$$GA_Z = \int_{p_t}^{p_b} \frac{1}{c_p \sigma} \overline{Q^{**} T^{**}} dp \quad \text{是纬向平均有效位能的制造;}$$

$$GA_E = \int_{p_t}^{p_b} \frac{1}{c_p \sigma} \overline{Q^* T^*} dp \quad \text{是扰动有效位能的制造;}$$

其中, $Q = \frac{Q_0}{c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{r_0 \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{r_0} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{R}{c_p p} T \right) \omega$ 为总的非绝热加热。

$$BK_Z = - \frac{1}{2g r_0 \cos \varphi} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{(u(u^2 + v^2) - u(u^{*2} + v^{*2}))} dp +$$

$$\int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{(v(u^2 + v^2) \cos \varphi - v(u^{*2} + v^{*2}) \cos \varphi)} dp -$$

$$\frac{1}{2g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{(w(u^2 + v^2) - w(u^{*2} + v^{*2}))} dp$$

是纬向平均动能的边界通量;

$$BK_E = - \frac{1}{2g r_0 \cos \varphi} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{(u(u^{*2} + v^{*2}))} dp + \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial p} \overline{(v(u^{*2} + v^{*2}) \cos \varphi)} dp \} - \frac{1}{2g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial p} \overline{(\omega(u^{*2} + v^{*2}))} dp$$

是扰动动能的边界通量;

$$B\Phi = - \frac{1}{g r_0 \cos \varphi} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{(u\Phi - u^* \Phi^*)} dp + \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial p} \overline{([v][\Phi] \cos \varphi)} dp \} - \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial p} \overline{(\omega\Phi + \omega^* \Phi^*)} dp$$

是纬向平均位能输送;

$$B\Phi_E = - \frac{1}{g r_0 \cos \varphi} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{(u^* \Phi^*)} dp + \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial p} \overline{(v^* \Phi^* \cos \varphi)} dp \} - \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \frac{\partial}{\partial p} \overline{(\omega^* \Phi^*)} dp$$

是扰动位能输送;

上述能量循环方程的计算方法与文献[4]相同。此外, BA_z, BA_E 分别是纬向平均和扰动有效位能边界通量, D_z, D_E 表示网格尺度和次网格尺度的相互作用, 实际计算时均作为各自平衡方程的余项处理, 当然这其中也包含了各种误差。

3 结果分析

3.1 东北冷涡活动各阶段的能量收支平衡

图 2 表示研究区域内整层(100~1000 hPa) 纬向平均有效位能和动能以及扰动有效位能和动能的时间变化。可以看出, 在东北冷涡活动的不同阶段, 其能量变化的差别是明显的, 特别是扰动动能随时间的演变与这期间冷涡强度变化非常的一致, 发展前期(7月3~7日), K_E 值较小, 其变化也比较平稳。发展阶段(7月8~13日), K_E 值增长较快, 具体说, 在8~10日, 扰动动能大幅度增加, 11日略有减弱后, 12~13日又有了迅猛发展。减弱阶段(14~17日), K_E 值逐渐减弱。即 $\frac{\partial K_E}{\partial t}$ 能够较好地反映出东北冷涡发展过程的基本特征, 因而是反映冷涡活动强度变化的良好指标。纬向平均有效位能和动能以及扰动有效位能的变化也有比较明显的特点, 基本上都是在前期阶段减小, 而在发展阶段有所增加, 其中 A_E 是在冷涡活动开始强烈发展时达到最大, 而后逐渐减小, K_z 和 A_z 都是在冷涡发展到最强之后开始减弱的。

对比各种能量之间的相互转换函数发现(图 3a—d), $C(A_E - K_E), C(K_E - K_z), C(A_z - A_E)$ 和 $C(K_z - A_z)$ 在东北冷涡活动的不同阶段都具有较大的变化, 即使在同一阶段, 不同的转换函数之间也有较大差别。一些研究表明 A_E 到 K_E 的转换是天气尺度扰动中维持 K_E 值的主要过程, 文中的结果也证实了这一点, 但并不像某些气旋系统的发展从一开始 $C(A_E - K_E)$ 就占有主导地位^[4,5]。扰动有效位能到扰动动能的转换在冷涡发展前期虽有正负变化, 但数值不大, 就是到了冷涡的早期发展阶段, 该值虽然为正, 量值也较

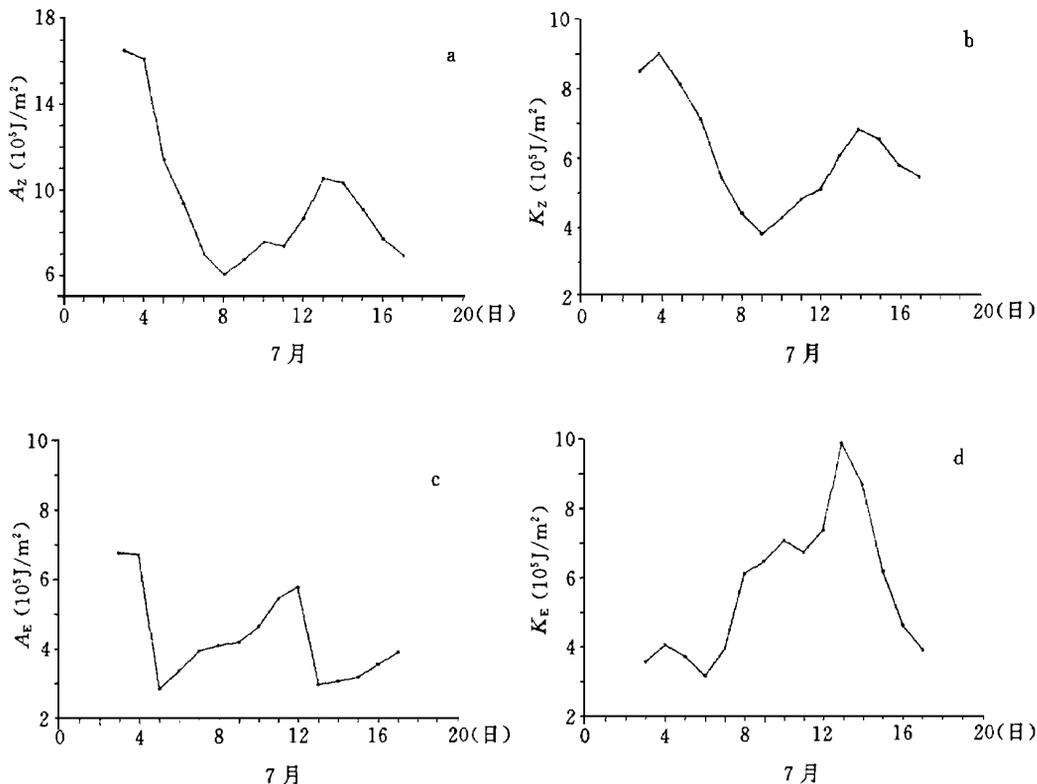


图2 区域平均垂直积分的纬向平均有效位能(a)和纬向平均动能(b)以及扰动有效位能(c)和扰动动能(d)的时间演变

(单位: 10^5 J/m^2)

小,说明 A_E 到 K_E 的转换对冷涡活动初期 K_E 值的大幅度增加并不太重要。只是到了 10 日以后,才有大量的扰动有效位能转换成扰动动能,这主要是由于冷涡形成后,随着系统上游冷空气的不断侵入,冷涡及其周围温度梯度加大,斜压性增强导致涡动中冷空气下沉,暖空气上升过程加剧造成的(图略),并且当冷涡开始强烈发展时,这种转换达到最大,即 A_E 到 K_E 的转换是冷涡迅猛发展的重要原因之一。Michaelides^[4,6] 等人的研究表明,对于某些中纬气旋系统的发展来说,基本气流动能自始至终地向气旋扰动动能转换是系统发展的主要特征之一,而另有一些研究表明,对于江淮气旋^[5]、西南涡^[7]和北上台风^[8,9]等天气系统,这种由正压不稳定造成的能量转换显得并不重要,甚至作用相反,本文的结果则说明 $C(K_E - K_z)$ 在东北冷涡发展的不同阶段,其作用是有差别的。扰动动能到平均动能的转换在系统发展之前,虽然也有正负相间的变化,但同样数值较小,从冷涡的早期发展一直到其开始强烈发展之前,纬向平均动能平均来说向扰动动能只是有量值不太大的转换,但当冷涡发展至最强时,这种转换也有了大幅度增加,也是此时 K_E 值增长的一个重要因素。而这恰好与此时系统垂直结构由斜压状态迅速向正压状态转变和区域内基本气流动能达最强时相对应。冷涡减弱时, $C(K_E - K_z)$ 迅速变为较大的正值,即有大量的扰动动能向纬向平均动能转换。纬向平均有效位能自始至终向扰动有效位能转换,但在冷

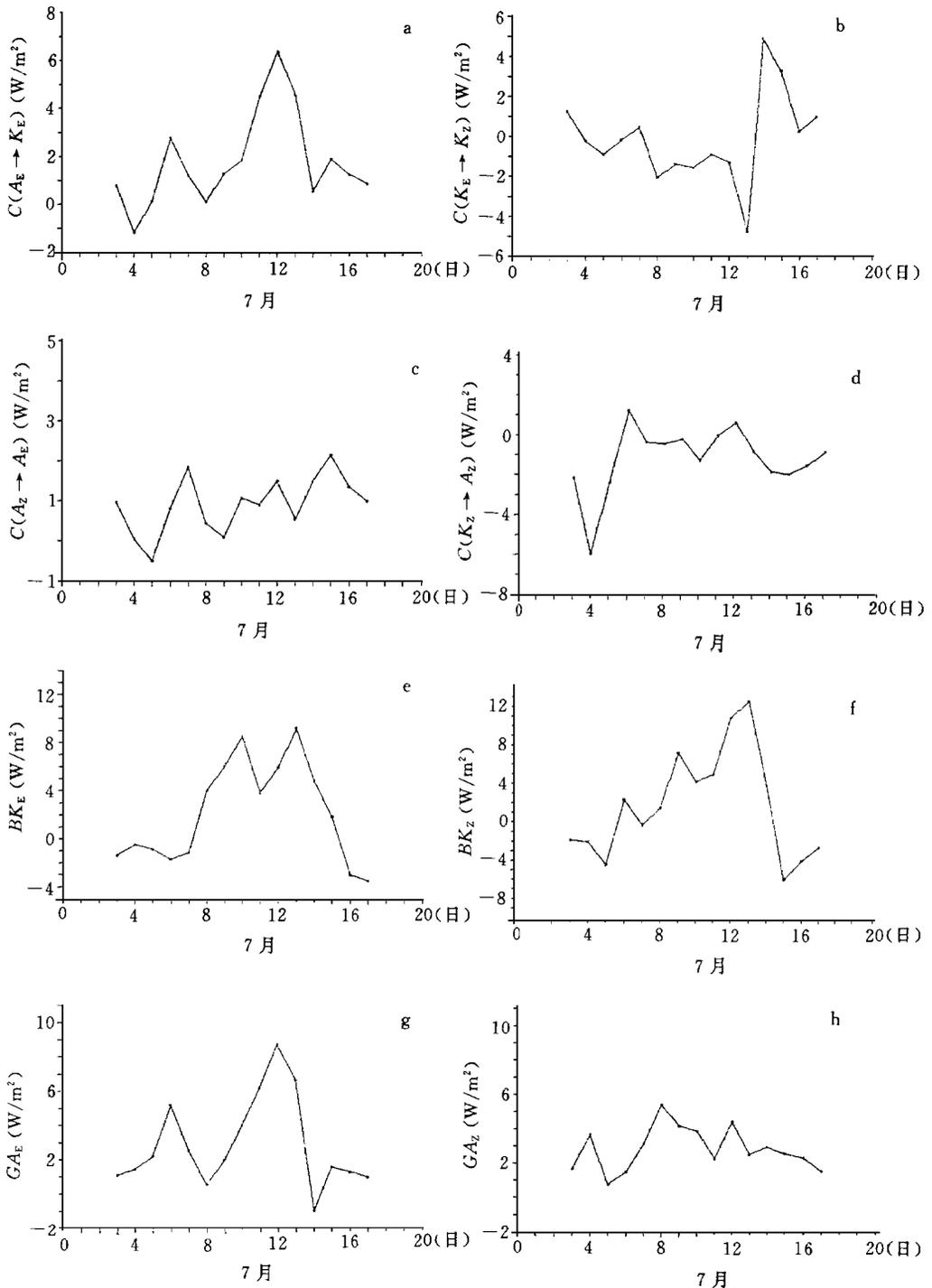


图3 区域平均垂直积分的能量转换函数及 BK_E , BK_Z , GA_E 和 GA_Z 的时间演变
 (a. $C(A_E \rightarrow K_E)$; b. $C(K_E \rightarrow K_Z)$; c. $C(A_Z \rightarrow A_E)$; d. $C(K_Z \rightarrow A_Z)$; e. 扰动动能边界通量;
 f. 纬向平均动能边界通量; g. 扰动有效位能制造; h. 纬向平均有效位能制造。单位: W/m^2)

涡发展阶段增加不明显,而在发展之前和减弱阶段减少也不甚明显。转换函数 $C(K_z, A_z)$ 的特点是,在冷涡发展之前和减弱阶段基本上是纬向平均有效位能向纬向平均动能转换,而在发展阶段,此值有正有负,转换微弱,变化也很小。

图 3e—h 表示区域平均垂直积分的纬向平均动能和扰动动能的边界通量以及纬向平均有效位能和扰动有效位能制造的时间演变情况。从中看出, BK_E 的特征是在冷涡发展之前,其变化平稳,且有数值不大的扰动动能通过区域边界向外输送,而在冷涡的发展和减弱阶段, BK_E 变化剧烈,具体表现是当冷涡活动向发展转变时,此值增加十分迅速,可以认为外部扰动动能通过区域边界向东北地区的大量输送是冷涡早期发展的主要原因。11 日 20 时此值一度稍有减弱,这与此时冷涡强度变化也是一致的。到冷涡的强烈发展阶段, BK_E 值再一次明显增强,是这一时期 K_E 大幅度增长的另一个主要原因。由此可见,外部环境大气扰动动能大量的和持续不断的输入对冷涡的维持和发展是至关重要的,对应于每日天气图上,可以看到,在东北冷涡较长时间的维持和发展过程中,不断有新鲜冷空气加以补充,表现为系统上游短波槽不断东移和合并到主槽中去以及小横槽的持续下摆。这与某些天气系统的生成和发展主要依靠系统内部能量学过程的特征有一定差别^[4, 5, 8, 10]。当冷涡减弱时, BK_E 迅速减小,直至变为负值。 BK_z 的变化表现为在冷涡发展之前,此值虽有正有负,但总的来说还是有纬向平均动能向外界输送,从发展初期开始, BK_z 增长较快,成为这一阶段 K_z 的主要来源,一直到冷涡达最强时达到极大,然后迅速减弱。扰动有效位能制造的演变也很有特点,发展之前和发展初期,虽然有非绝热加热形成的扰动有效位能制造,但数值不大,冷涡早期发展之后,随着降水的增加, GA_E 才开始迅速增长,并在冷涡强烈发展时数值达到最大,减弱阶段逐渐减小,这几乎与 $C(A_E, K_E)$ 的演变如出一辙。 GA_z 的变化特征是,无论在发展之前,发展之中还是减弱阶段,都存在有非绝热加热制造的平均有效位能,但其演变没有太明显的特点,即此例中, GA_z 对冷涡活动变化并不很敏感。

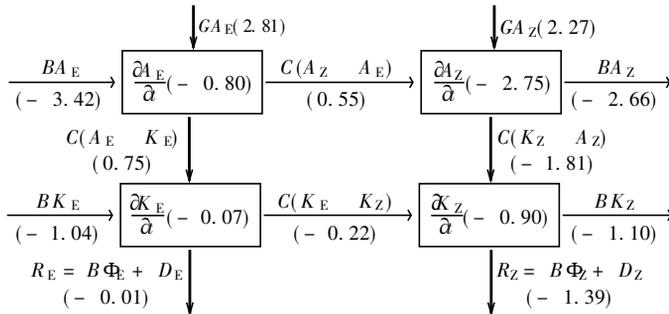
由以上分析,初步概括出东北冷涡活动各阶段能量循环的物理图像(图 4)。

前期阶段:该阶段虽然非绝热加热制造了一定的扰动有效位能,但由于纬向平均有效位能向扰动有效位能的转换不很大,以及巨大的边界负作用,使得 A_E 入不敷出,因此向 K_E 的转换很小,导致扰动动能不能克服较大的负边界通量和将其中的一部分转换成纬向平均动能之后有较大增长,反而稍有减弱,这时东北冷涡不能生成和发展。

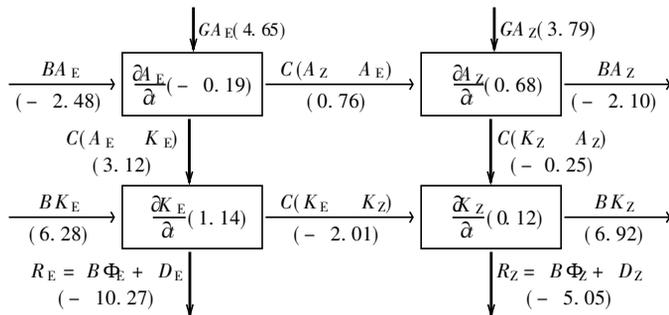
发展阶段:区域外部扰动动能的输入造成了东北冷涡的早期发展,随后,较强的非绝热加热大量地制造扰动有效位能,同时纬向平均有效位能在保持一定的增长后向 A_E 的转换也有所增加,使得扰动有效位能在抵消了较大的负边界作用后,仍有大量盈余向扰动动能转换,与系统发展之前相反,这一阶段始终存在着大量的外界扰动动能通过区域边界不断注入东北地区,又由于此时区域纬向平均动能也有所增加和基本气流变的越来越不稳定,导致有相当数量的纬向平均动能向扰动动能转换,这些有利因素使得 K_E 迅速增长,在克服了摩擦和扰动位能输送等消耗后,扰动动能还能维持在较高的水平上,东北冷涡活动加强。即对于此次东北冷涡由形成、维持到强烈发展的过程来说,区域外部的能量输入和区域内部各种能量相互转换的逐渐加强均有至关重要的影响。

减弱阶段:区域内有大量的扰动动能开始向纬向平均动能转换, K_E 边界通量的正作

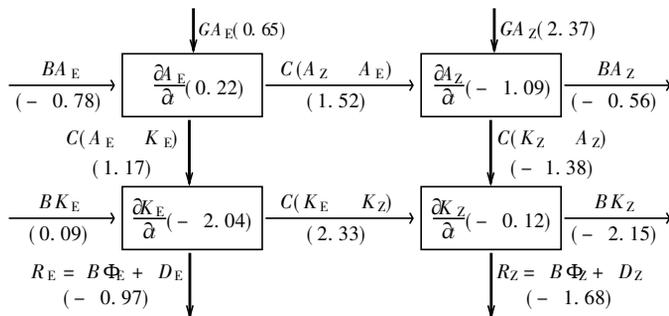
用也迅速减弱,同时,又由于非绝热加热制造的扰动有效位能减少及其向扰动动能的转换效率不高,使得 K_E 明显锐减,东北冷涡由活跃向减弱过渡。这时纬向平均有效位能和动能在较强的边界通量和摩擦等负作用下,也出现了入不敷出的情况。



(a)



(b)



(c)

图4 东北冷涡活动各阶段的能量循环

(a. 前期阶段; b. 发展阶段; c. 减弱阶段。单位: W/m^2)

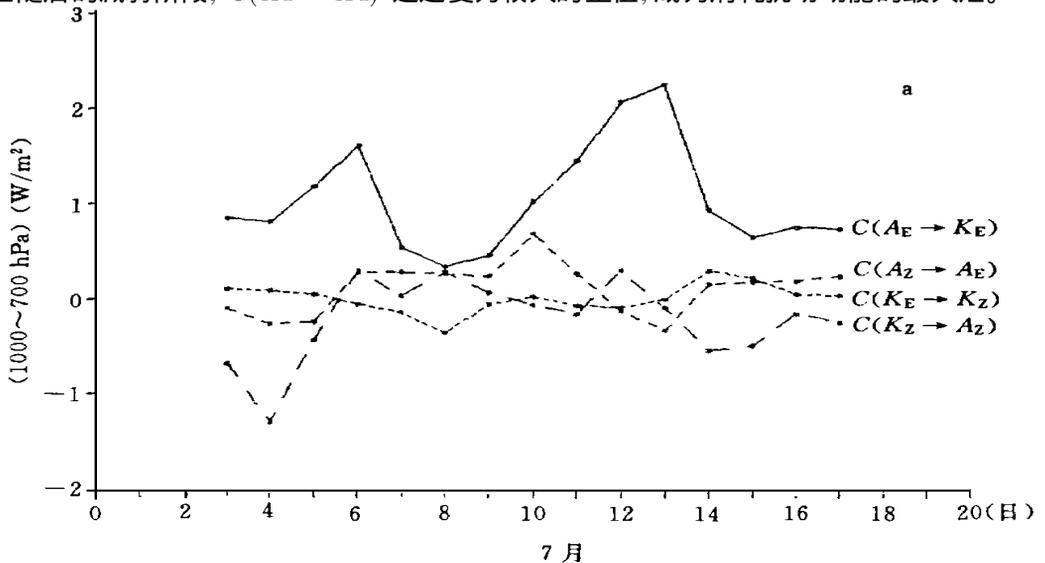
3.2 能量转换和输送的垂直分布

以 1000 ~ 700 hPa, 600 ~ 400 hPa 和 300 ~ 100 hPa 分别代表对流层低层、中层和高层,并且讨论了上述影响能量循环各因子的垂直分布特征(图 5)。发现各因子在垂直方向上的演变有时是很不一样的。

在对流层低层, 上述 4 种能量转换函数中, 只有扰动有效位能向扰动动能的转换变化比较剧烈, 且数值较大, 它在冷涡开始强烈发展之前明显增加, 并且当冷涡达最强时, 此值也出现极大。而在冷涡减弱阶段快速减少, 前期阶段出现振荡。值得注意的是, 在冷涡的早期发展阶段, 对流层低层的这种转换却维持在较低的水平上。这说明 $C(A_E \rightarrow K_E)$ 是冷涡活动低层系统明显增强的主要原因, 而发展早期低层系统的偏弱也与此转换效率不高有关。上面谈到纬向平均动能和扰动动能的边界通量对东北冷涡的发展是相当重要的, 但在对流层低层这种作用是次要的。图中还可以看出, 非绝热加热制造扰动有效位能是 A_E 的主要来源, 而从平均有效位能得到的扰动有效位能是次要的。

在对流层中层, 扰动有效位能向扰动动能的转换在冷涡的强烈发展阶段与低层相似有明显增加, 而在其发展早期, 这种转换也同样较小。与低层不同的是, 中层纬向平均动能向扰动动能的转换在经历了前期阶段和早期发展的平稳变化之后, 在冷涡的强烈发展阶段出现了幅度较大的增长, 即由纬向平均气流的正压不稳定所造成的向扰动动能的转换是这一时期 K_E 值增加的另一个重要原因。由非绝热加热制造的扰动有效位能的变化也与低层相类似, 同样是 A_E 的主要来源。与低层差别较大的是纬向平均动能和扰动动能边界通量的时间演变情况, 首先, 虽然 BK_E 在前期阶段变化平稳, 但到早期发展时, 该值就有了迅速增加, 并在该时期达到极大, 成为中层冷涡早期发展扰动动能快速增长的最主要来源, 其后经历了短暂的减弱之后, 到冷涡强烈发展时, 又再一次明显增加, 减弱阶段此值锐减直至变为负值。纬向平均动能的边界通量变化与扰动动能基本一致。

在对流层高层, BK_E 的演变与中层相类似, 外界扰动动能通过区域边界向东北地区的大量输送仍然是高层冷涡早期发展的最主要原因和其强烈发展的重要原因之一。不过该层在冷涡的发展阶段由非绝热加热制造的扰动有效位能以及扰动有效位能向扰动动能的转换与中层和低层相比都有所减弱, 是这一时期 K_E 值增长的次要原因。纬向平均动能向扰动动能的转换在冷涡的强烈发展阶段也与中层相类似同样有较大幅度的增长, 并且在随后的减弱阶段, $C(K_E \rightarrow K_Z)$ 迅速变为较大的正值, 成为消耗扰动动能的最大汇。



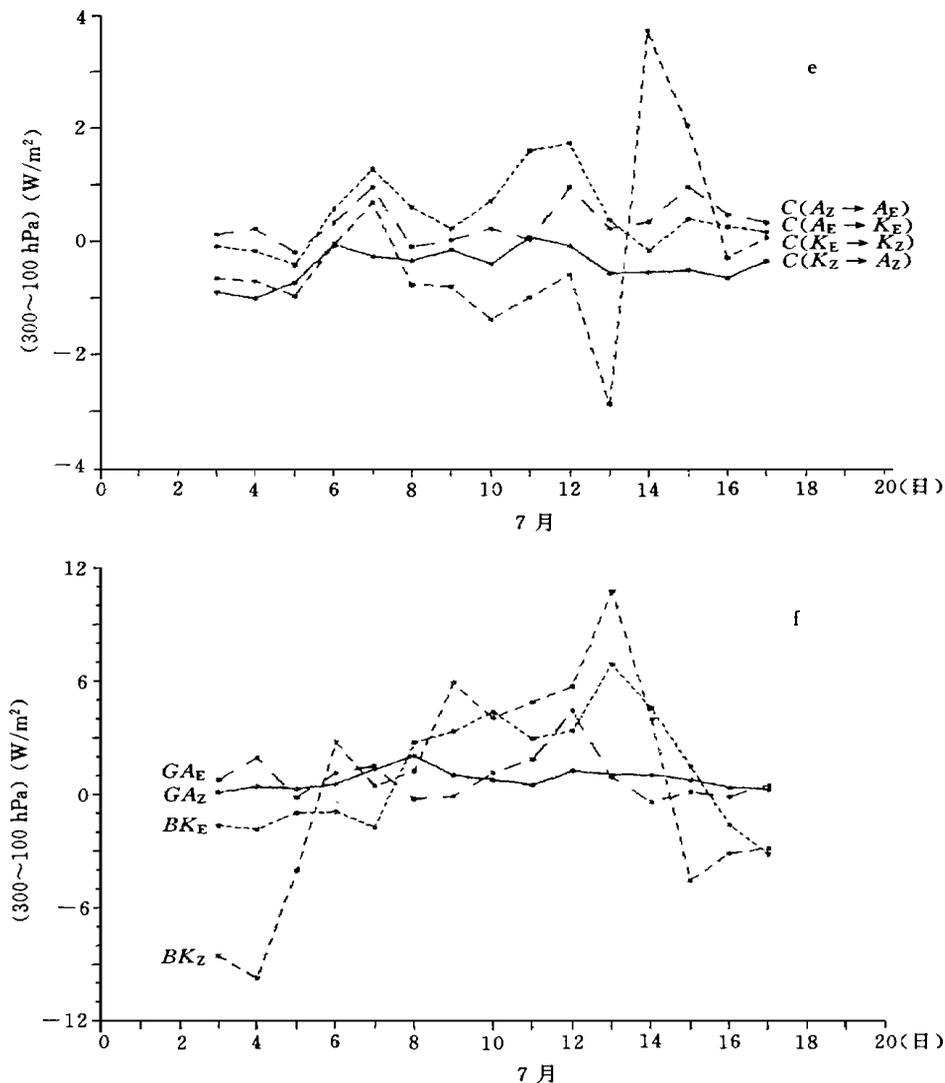


图 5 低、中、高层各种能量转换函数及 BK_E , BK_Z , GA_E 和 GA_Z 的时间演变

(a 和 b 表示低层 (1000 ~ 700 hPa); c 和 d 表示中层

(600 ~ 400 hPa); e 和 f 表示高层 (300 ~ 100 hPa)。单位: W/m^2)

为探讨此次冷涡发展过程中能量的垂直输送特征,还计算了动能的垂直通量散度 ($-\frac{\partial \omega K}{\partial \phi}$) 分布(见表 1),可以看出,冷涡发展初期,动能是从对流层低层和中层向高层输送,随着系统的发展,能量的垂直输送特征逐渐变化为,在低层,动能是向上输送,而在高层,则有大量的动能向下输送,使得中层出现了净的能量积累(7月11日20时例外,此时系统强度稍有减弱,动能输送特征与冷涡发展早期相类似),特别在冷涡的强烈发展阶段,这一特征更为明显,例如7月13日,对流层中层(700 ~ 400 hPa)可以有 $2.56 W/m^2$ 的动能盈得。因此能量的垂直输送对系统的发展也是有一定促进作用的。冷涡减弱阶段,通过

垂直运动, 对流层低层和中层失去动能, 而高层则是得到动能, 这一特征与系统发展早期相类似, 但输送强度明显减弱。

表 1 区域平均的动能垂直通量散度($-\frac{\partial \omega K}{\partial p}$)分布(1984年7月个例。单位: W/m^2)

hPa	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日
200~100	1.905	0.741	-0.573	1.748	2.028	-0.784	-1.085	0.046	0.388	0.812	0.047
300~200	0.952	0.214	-0.672	-1.161	1.355	-0.766	-1.052	-0.641	0.106	0.127	0.013
400~300	-0.213	0.045	0.417	-0.734	-1.140	0.388	0.214	-0.346	-0.211	-0.280	-0.004
500~400	-0.496	-0.015	0.702	0.522	-0.730	0.947	1.140	0.289	-0.128	-0.257	-0.022
600~500	-0.375	-0.069	0.285	0.036	-0.555	0.674	0.813	0.334	-0.050	-0.173	-0.039
700~600	-0.440	-0.079	0.097	-0.142	-0.422	0.298	0.389	0.288	-0.027	-0.126	-0.032
800~700	-0.455	-0.172	-0.043	-0.129	-0.265	-0.046	-0.096	0.133	-0.029	-0.082	-0.003
900~800	-0.446	-0.315	-0.122	-0.079	-0.160	-0.315	-0.181	-0.022	-0.032	-0.029	0.001
1000~900	-0.432	-0.350	-0.091	-0.061	-0.111	-0.396	-0.142	-0.082	-0.017	-0.001	-0.021

4 结 论

通过上述分析, 初步得到如下几点结论:

(1) 此次东北冷涡通过能量交换过程自始至终与区域外部环境大气存在着较为明显的相互作用。发展阶段, 它能不断地吸引其周围环境大气的纬向和扰动动能注入东北地区, 以维持和促使系统增强, 同时又将区域内一部分主要由非绝热加热制造的纬向和扰动有效位能向外输出。特别是区域外部扰动动能的大量输送, 不仅导致了东北冷涡的早期发展, 而且对它的维持, 特别是对其随后的强烈发展都起了十分重要的作用。而与某些天气尺度扰动主要依靠内部能量学过程就可以使系统得到充分发展的特征有一定差别。这也许是东北冷涡持续发展时间较长的关键因素之一。冷涡的减弱也与这种区域内部和外部的能量交换有关, 表现为此时纬向和扰动动能边界通量的正作用迅速减弱, 直至变为系统向外大量输出能量。

(2) 随着冷涡的形成, 系统内部的能量学过程显得越来越重要, 与外部环境大气的影 响一样, 对系统的维持和进一步发展也是至关重要的。冷涡早期发展之后, 尽管扰动动能边界通量作用曾一度稍有减弱, 但由于非绝热加热制造的扰动有效位能及其向扰动动能转换的大量增加对东北冷涡的继续维持具有重要贡献。特别是在冷涡的强烈发展阶段, 这种斜压位能转换以及由平均气流的不稳定导致的向扰动动能的正压转换都有了迅速增长, 也是造成系统强烈发展的关键因素。冷涡生成后的这种先是斜压发展, 然后斜压正压共同发展的特征是明显的。减弱阶段, 先是有大量的扰动动能转换成纬向平均动能, 然后其它能量转换因子也朝着不利于冷涡维持的方向发展。

(3) 影响东北冷涡系统能量循环各因子在垂直方向上的演变特征是不一样的, 外界扰动动能向东北地区的大量输送以及由于基本气流的不稳定造成的向扰动动能的正压转换是导致对流层中上层冷涡系统发展的主要原因; 而区域内斜压位能转换的逐渐增加对冷涡系统在对流层中下层的维持和加强具有重要贡献; 并且当上述各因子在它们所在的层

次上几乎同时达到极值时, 东北冷涡出现强烈发展。能量的垂直输送对系统的发展也有一定的促进作用, 冷涡发展早期和减弱阶段, 动能是从对流层中层和低层向高层输送, 强烈发展阶段, 低层的动能向上输送, 而高层则是向下输送, 导致对流层中层有明显的动能积累。

参考文献

- 1 孙力等. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系. 应用气象学报, 1994, 5(3): 297 ~ 303
- 2 孙力等. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析. 气象, 1995, 21(3): 7 ~ 10
- 3 郑秀雅等. 东北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 129 ~ 151
- 4 Michaelides S C. A spatial and temporal energetics analysis of a baroclinic disturbance in the Mediterranean. Mon Wea Rev, 1992, 120: 1224 ~ 1243
- 5 杨信杰. 江淮气旋的能量变化. 气象学报, 1988, 46(4): 486 ~ 490
- 6 Michaelides S C. Limited area energetics of Genoa cyclogenesis. Mon Wea Rev, 1987, 115: 13 ~ 26
- 7 丁治英等. 西南低涡动态的合成分析. 高原气象, 1991, 10(2): 156 ~ 165
- 8 胡坚. 转向台风活动在东亚季风环流变化中的作用. 大气科学, 1989, 13(3): 305 ~ 312
- 9 孙力等. 北上热带气旋发展与不发展的对比分析. 热带气象学报, 1993, 9(4): 326 ~ 334
- 10 孙淑清等. 中尺度低涡发展时高层流场特征及能量学研究. 大气科学, 1993, 17(2): 137 ~ 146

A ENERGETICS STUDY OF A NORTHEAST COLD VORTEX

Sun Li

(Jilin Research Institute of Meteorological Science, Changchun, 130062)

Abstract

Through the investigation into the energetics of a typical case of Northeast cold vortex it has been found that distinct features exist for different periods. Before the development of the cold vortex, the transformation among various energies and the variations of the boundary transfers are small. In the early developing stage of the cold vortex, the effect of boundary transfer of the eddy kinetic energy (EKE) is very important. Afterward the eddy available potential energy (EAPE) by the diabatic heating and the transformation from the zonal average kinetic energy to the EKE also increase rapidly. These factors lead to the intense development of the cold vortex.

Key words: Northeast cold vortex, Energy budget, Energy cycle.