

东北冷涡过程的能量学分析*

毛贤敏 曲晓波

(沈阳中心气象台, 沈阳, 110015)

摘 要

对一次较典型的东北冷涡过程作了能量学分析。结果表明, 冷涡涡动动能的主要收入来自涡动位能的转换($A_e - K_e$)。在冷涡发展期, 由外边界强气流入侵所产生的动能输入也十分重要。涡动动能的支出主要是转换为纬向气流的动能, 即 $K_e - K_z$, 其次是消耗项和成熟期以后的边界动能输出。冷涡过程涡动动能变化的绝对值以中、高空为大, 但相对变率却远小于低空。 $A_e - K_e$ 主要发生在700—300hPa 中空, 高空则为 $K_e - A_e$ 的转换。

关键词: 冷涡, 能量平衡, 涡动动能。

1 引 言

东北冷涡是影响中国东北地区的重要天气系统之一。对于瞬变涡旋, 已有不少人通过计算其能量的产生、转换和输送了解它们在大气环流中的地位。据 Lambert^[1], Holopainen^[2]等人的研究, 大气冷热源所产生的有效位能转换成能够维持大气环流的动能, 其中大部分是通过涡动位能和涡动动能这两个环节循环的。由 GFDL 及 NMC 资料计算表明^[3], 瞬变涡动位能约占总涡动位能的70%, 瞬变涡动动能约占总涡动动能的85%左右。由此可见, 瞬变涡旋在制约大气环流中起着非常关键的作用。

对于阿尔卑斯山的背风气旋^[4], 东海气旋^[5]和东北气旋^[6]等, 已做过不少能量学诊断分析。研究开放边界有限区域内的天气系统不同阶段的能量状况, 有利于了解其发生、发展的机制及其对周围大气和影响。Michaelides^[7]研究了地中海斜压扰动后指出, 在气旋发展的不同阶段、不同层次上, 能量的转换和输送在强度和方向上差别很大, 气旋在其生命后期是一个能量输出系统。

文中就一次东北冷涡过程作了能量学分析, 计算逐日以冷涡为主要天气系统的有限区域开放边界的能量平衡, 并对转换项作了垂直分布的讨论。

2 天气过程概述

1982年9月7日—11日东北地区出现了一次典型的冷涡发生、发展和减弱东移过程, 产生了明显的阴雨和降温天气。其中8—10日东北地区上空基本上由冷涡环流控制。图1给出

* 初稿时间: 1994年9月1日; 修改稿时间: 1995年10月12日。
资助课题: 中国气象局《东北冷涡研究》课题。

了7日、9日和11日0000UT C3d 的500hPa 天气图, 它们分别代表了冷涡发生前、强盛期及减弱东移时的形势。这次过程冷空气源地属北方极地路径。7日00时—12时, 具有较强风切变的横槽南下迅速形成冷涡, 是冷涡主要发展期。10日12时—11日00时为冷涡主要减弱期。

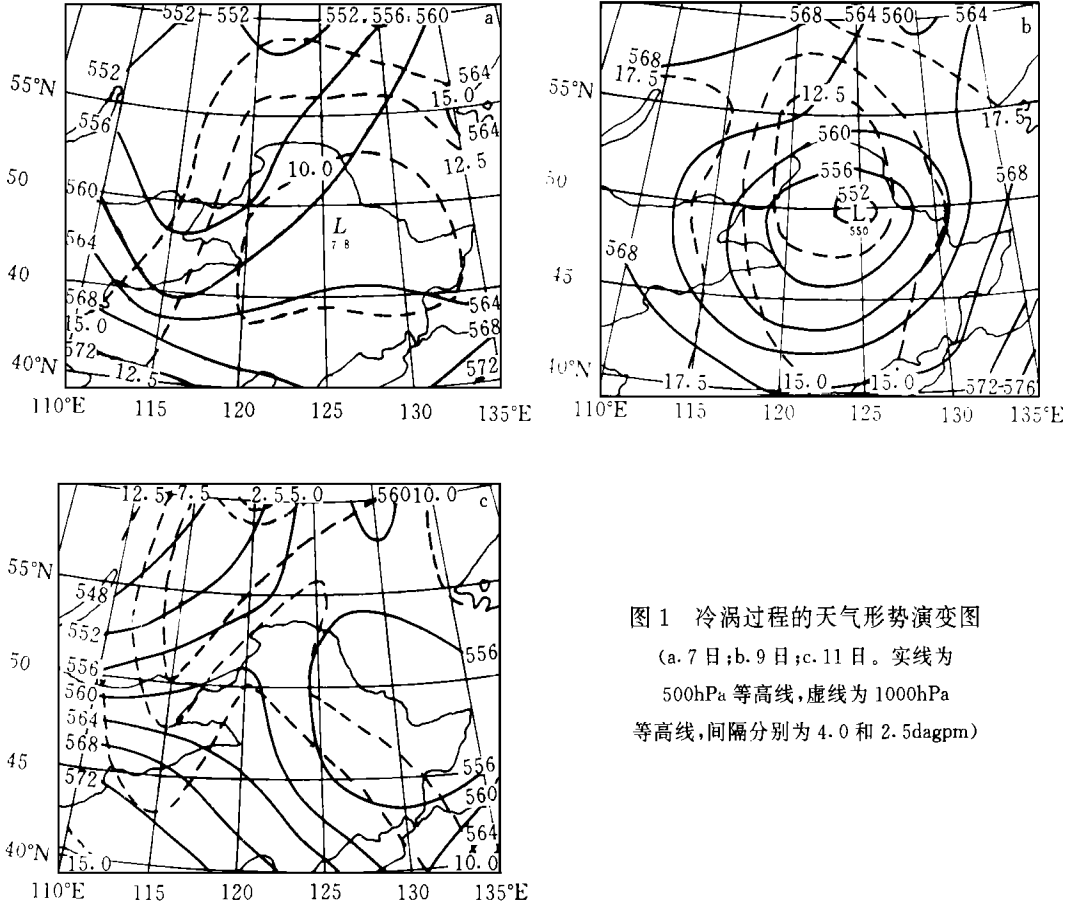


图 1 冷涡过程的天气形势演变图

(a. 7日; b. 9日; c. 11日。实线为 500hPa 等高线, 虚线为 1000hPa 等高线, 间隔分别为 4.0 和 2.5dagpm)

3 计算方法及资料

采用 Michaelides^[7] 和 Reiter^[8] 所引用的 Lorenz 能流图(见图2)。

能量平衡方程组为以下形式:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial A_z}{\partial t} = C(K_z - A_z) + C(A_e - A_z) + BA_z + G_z \\
 \frac{\partial K_z}{\partial t} = C(K_e - K_z) + C(A_z - K_z) + BK_z + R_z \\
 \frac{\partial A_e}{\partial t} = C(A_z - A_e) + C(K_e - A_e) + BA_e + G_e \\
 \frac{\partial K_e}{\partial t} = C(K_z - K_e) + C(A_e - K_e) + BK_e + R_e
 \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_z 为纬向有效位能, K_z 为纬向动能, A_e 为涡动位能, K_e 为涡动动能, $C(x - y)$ 表示转换项, 方向由 x 转换成 y , BA_z, BK_z, BA_e, BK_e 分别表示外界与有限区域间的输送项,

G_z 和 G_e 分别表示纬向动能和涡动动能的消耗。式(1)中的 G_z, G_e 和 R_z, R_e 均难于计算, 故从平衡方程中剩余项求得, 因此同时包含了计算误差。

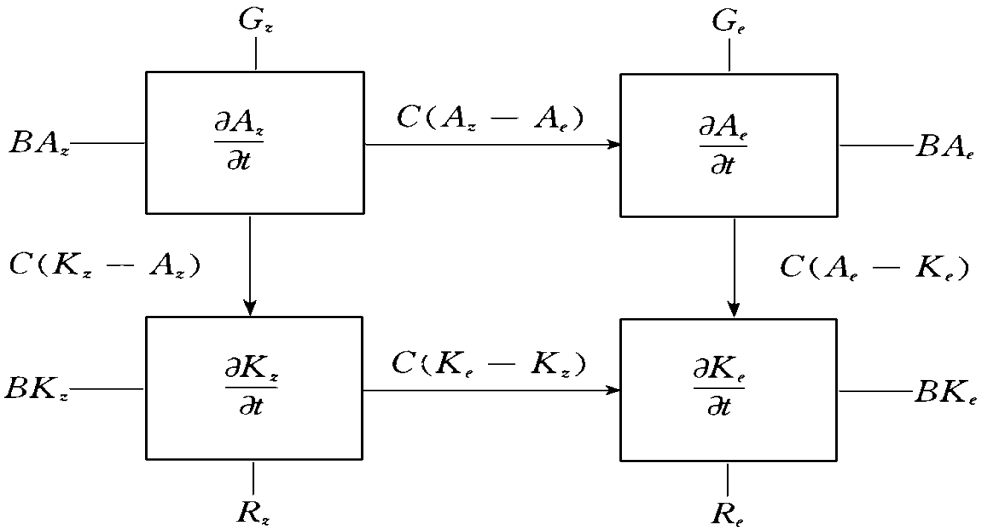


图2 Lorenz 能流图

开放边界的计算范围是40—60°N, 110—135°E, 5°×5°经纬格点。计算采用中央差分方案。垂直方向取10个标准层(1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100hPa)。使用逐步订正法计算风场。通过水平风场散度求得各层的垂直速度, 并假定1000hPa和100hPa处的垂直速度为零, 然后用O'Brien方法进行订正。

Lorenz 能流图是在能量平衡条件下, 分析大尺度涡旋与纬向气流间的能量产生、转换和输送过程的, 适用于大多数情况, 故具有统计意义。文中用来分析一次东北冷涡过程, 由于计算范围仅包括冷涡本身及其邻近区域, 纬向气流并未充分包括进来, 因而所得结论只表示了冷涡范围的能量学特征。

4 冷涡涡动动能变化及过程的能量平衡

4.1 涡动动能变化

涡动动能的大小基本上反映了冷涡环流的强弱。表1给出了计算范围内逐日涡动动能及其局地变化。可以看出, 7日12时至10日12时的涡动动能值明显高于6日和11日, 是冷涡持续期。局地变化最大正值为7日00时至12时, 最大负值为10日12时至11日00时, 两者分别对应于冷涡最迅速发展和最明显减弱期。另外, 9日12时至10日00时是冷涡最稳定时期, 局地变化最小(参见表1中下方加有粗线的数值)。

表1 逐日涡动动能 K_e (10^5J/m^2) 及其局地变化 $\frac{\partial K_e}{\partial t}$ (W/m^2) 表

| 日期 | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | | 11 | |
|-----------------------------------|-------|------|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-----|
| 时次 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 |
| K_e | 2.7 | 1.4 | 2.1 | <u>3.9</u> | <u>4.1</u> | <u>3.1</u> | <u>4.4</u> | <u>4.1</u> | <u>4.1</u> | <u>4.0</u> | 2.7 | 1.6 |
| $\frac{\partial K_e}{\partial t}$ | -2.94 | 1.59 | 4.13 | 0.56 | -2.36 | 2.90 | -0.69 | 0.09 | -0.31 | -2.99 | -2.50 | |

4.2 过程的能量平衡

为了分析冷涡各个阶段中能量平衡状况, 根据表1, 给出了7日00时—12时, 9日12时—10日00时和10日12时—11日00时的3幅能量平衡图(图3)。它们分别代表发展、稳定和减弱3个时期。

4.2.1 冷涡发展期

从图3a可见, 涡动动能的收入一半以上来自涡动位能的转换, 占53.0%, 体现了斜压能量释放的重要性。其次为边界输入, 占47.0%, 它是由于7日在贝加尔湖附近的强劲偏北气流所造成的(参见图1a)。涡动动能的支出主要是向纬向动能的转换, 其次是动能消耗。但此两项的和未达到收入的一半, 因此局地涡动动能积累较大, 达 4.13 W/m^2 , 使涡旋得以发展。

另外, 还可看到, 涡动位能主要来自纬向位能的转换。这可能与当时的环流经向度急剧加大有关。

4.2.2 冷涡成熟期

这时期(图3b)收支基本平衡, 涡动动能的局地变化不大, 只有 0.09 W/m^2 。动能收入全部依靠涡动位能的转换。由于环流已达极大, 所以消耗项(R_e)比发展期增加倍以上。同时涡动动能继续向纬向动能转换, 这两项仍为主要支出部分。

另外, 成熟期不再有强气流流入(参见图1b), 因而与发展期相反, 动能已经开始向边界输出。成熟期的涡动位能产生项(G_e)和涡动位能向动能的转换项($A_e - K_e$)均比发展期大, 说明当时斜压能量的形成和释放均比较强烈, 只是积累不多。

4.2.3 冷涡减弱期

减弱期(图3c)的最显著特点是涡动位能向涡动动能转换项明显减少, 而支出项比发展期反而更大, 因此出现涡动动能 -2.99 W/m^2 的局地变化。从图3中还可以看到, 减弱期 $K_e - K_e$ 的数值比以前更大, 说明冷涡为平均西风环流的维持起更大作用。

为了更清楚地表述发展、成熟和减弱3个时期的动能收支情况, 特绘制图4, 结合前面分析, 得到以下结果:

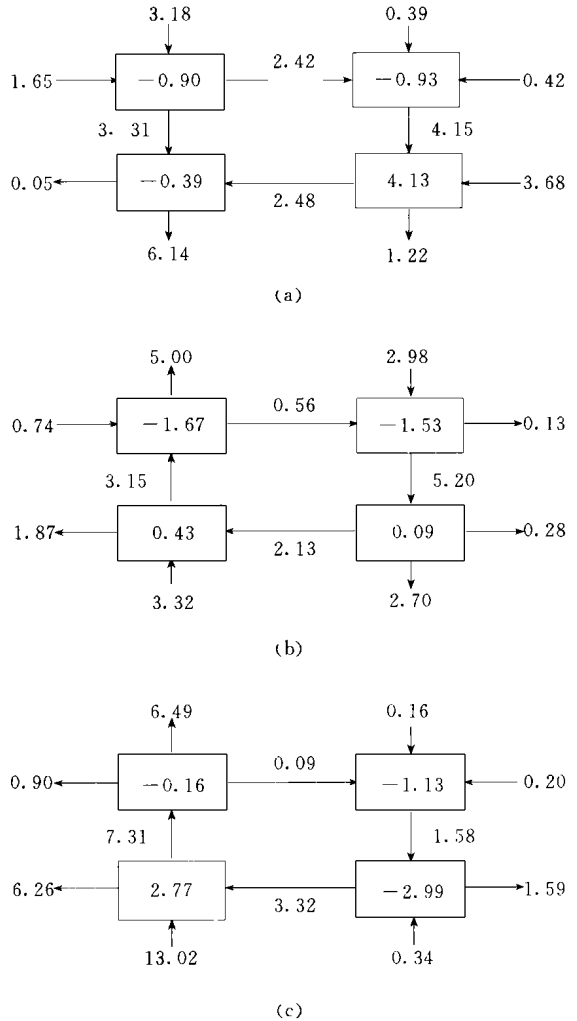


图3 能量平衡图(W/m^2)

(a. 1982年9月7日00时—1982年9月7日12时;

b. 1982年9月9日12时—1982年9月10日00时;

c. 1982年9月10日12时—1982年9月11日00时)

(1) A_e 、 K_e 始终是冷涡动能的主要收入项, 在成熟期达极大, 减弱期明显减少, 但全过程一直存在。

(2) 外界的强气流流入(一般伴有强切变的不稳定槽), 也是冷涡发展期的重要动能来源, 表现为开放边界的动能输入。文献[4]和[7]中也提到类似情况。

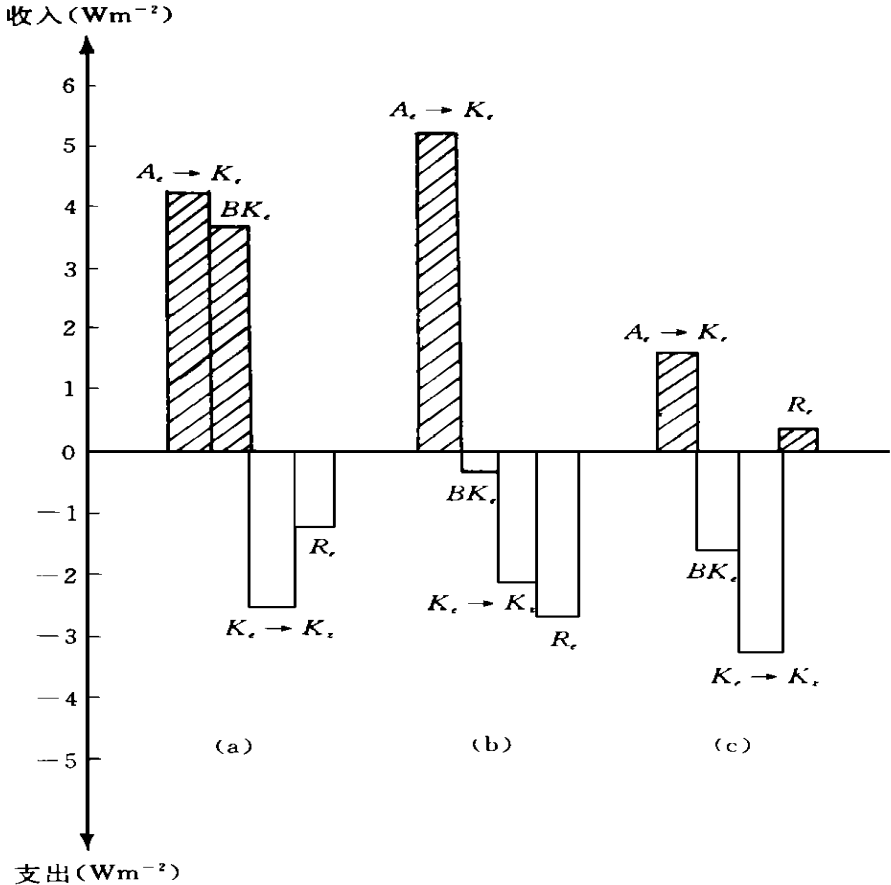


图4 冷涡各个时期的动能收支图

(a. 发展; b. 成熟; c. 减弱)

(3) 冷涡自始至终向西风气流贡献功能, 即 K_e 、 K_z 。在减弱期更大些。

(4) 冷涡动能的消耗项在成熟期达极大。

4.3 动能的边界输入(出)和消耗

冷涡动能除了通过 K_e 、 K_z 向西风环流输送外, 尚有边界输入(出)与消耗两项作用于周围大气。表2列出了整个过程的 BK_e 和 R_e 数值, 可以看出, 过程的 BK_e 正负分界十分清楚。前期为动能输入, 后期为动能输出。天气实践经验表明, 一般在冷涡前期发展期, 外围大都有强的偏西北气流侵入(伴有槽和冷吞)。这时外界的环境较强, 导致动能输入。后期为减弱期, 冷涡本身较强的环流流向外边界, 动能急剧输出。

表2 冷涡过程动能的边界输入(出)和消耗表($W m^{-2}$)

| 日期 | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | | 11 | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 时次 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 |
| BK_e | 0.26 | 0.66 | 3.68 | 4.24 | 2.38 | 0.77 | -0.10 | -0.28 | -0.83 | -1.59 | -1.61 | |
| R_e | -2.83 | -1.75 | -1.22 | -6.87 | -6.53 | -0.06 | -5.76 | -2.70 | 1.23 | 0.34 | 0.25 | |

整个过程动能消耗(R_e)基本上是负值,外向消耗。在减弱期有微小的正值出现,这里包含了计算误差,总之数值不大。

5 冷涡动能及主要收入项(A_e K_e)的垂直分布

以上分析了整个气柱(1000—100hPa)和在一定范围内的平均能量平衡状况。实际上,冷涡过程的能量及转换在垂直分布上有较大差异,其重要性在冷涡各个层次并不一样。Michaelides 计算结果表明^[7],地中海斜压气旋发展过程中的能量输送与转换,其中高空绝对值远远大于700hPa以下的低空。但他并未计算其高、低空的相对变率。东北冷涡能量及其转换的垂直分布情况如下:

5.1 涡动动能(K_e)

动能计算在垂直方向上分为6层,现把冷涡过程逐日各层的涡动动能值列于表3,表中标着“*”的数值为整个过程中该层的局地变化(分为增加与减少)最大时段。从表3中可清楚的看到,表1中所提到的7日发展和10—11日减弱的最大局地变化刚好与500hPa以上的高空变化相一致(绝对值起作用)。而对500hPa以下的中低空,涡旋迅速发展时段要比高空晚12h。这也就是冷涡不同于气旋的主要特点之一,前者高空环流形成先于低空,而后者恰好相反。当冷涡减弱时,则中低空先于高空36h,这一点与气旋相类似。

表3 逐日各层涡动动能 K_e 值(J^2/m^2)

| 日期 | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | | 11 | |
|----------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| hPa | 时次 | | | | | | | | | | | |
| | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 | 00 | 12 |
| 200—100 | 0.31 | 0.22 | 0.20* | 0.32* | 0.30 | 0.33 | 0.35 | 0.44 | 0.40 | 0.38* | 0.24* | 0.21 |
| 300—200 | 0.51 | 0.28 | 0.43* | 1.10* | 0.69 | 0.58 | 0.75 | 0.97 | 1.20 | 1.30* | 0.82* | 0.37 |
| 500—300 | 1.00 | 0.47 | 0.78* | 1.50* | 1.20 | 1.20 | 1.50 | 1.60 | 1.70 | 1.80* | 1.10* | 0.54 |
| 700—500 | 0.50 | 0.24 | 0.38 | 0.58* | 1.10* | 0.66 | 1.10* | 0.67* | 0.64 | 0.33 | 0.34 | 0.19 |
| 850—700 | 0.26 | 0.14 | 0.19 | 0.29* | 0.66* | 0.42 | 0.50* | 0.28* | 0.17 | 0.11 | 0.13 | 0.19 |
| 1000—850 | 0.08 | 0.05 | 0.11 | 0.11* | 0.23* | 0.20 | 0.13* | 0.06* | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.09 |

由于中高空风速较大,可以看到,中高空的动能绝对值明显大于低空。计算变化最大时段12h的各层相对变率($\frac{\Delta K_e}{K_e}$),结果列于表4。从表4中可以看到,中低空的相对变率显著大于高空,冷涡发展期甚至达2—3倍。这种动能剧变可能是诱发近地面中小尺度系统重要原因之一。

表4 各层最大变化时段的相对变率($\frac{\Delta K_e}{K_e}$)

| 日期 | 6 | | | | 7 | | | | 8 | | | | 9 | | | | 10 | | | | 11 | | | |
|----------|----|--|----|--|-------------------------------|--|----|--|----|--|----|--|--------------------------------|--|----|--|--------------------------------|--|----|--|----|--|----|--|
| | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | |
| 200—100 | | | | | $\frac{0.12}{0.31} = 38.7\%$ | | | | | | | | | | | | $\frac{-0.14}{0.31} = -45.2\%$ | | | | | | | |
| 300—200 | | | | | $\frac{0.67}{0.75} = 89.3\%$ | | | | | | | | | | | | $\frac{-0.48}{0.75} = -64.0\%$ | | | | | | | |
| 500—300 | | | | | $\frac{0.72}{1.20} = 60.0\%$ | | | | | | | | | | | | $\frac{-0.70}{1.20} = -58.3\%$ | | | | | | | |
| 700—500 | | | | | $\frac{0.52}{0.56} = 92.9\%$ | | | | | | | | $\frac{-0.42}{0.56} = -76.8\%$ | | | | | | | | | | | |
| 850—700 | | | | | $\frac{0.37}{0.28} = 132.1\%$ | | | | | | | | $\frac{-0.22}{0.28} = -78.6\%$ | | | | | | | | | | | |
| 1000—850 | | | | | $\frac{0.12}{0.10} = 120.0\%$ | | | | | | | | $\frac{-0.07}{0.10} = -70.0\%$ | | | | | | | | | | | |

5.2 主要收入项 A_e K_e

为了讨论冷涡动能的主要收入项 A_e K_e 的垂直分布, 表5给出了各层逐日涡动位能向涡动动能的转换数值, 负值表示 K_e A_e 。可以看出, 正转换的大值主要在700—300hPa 中空。值得注意的是, 300hPa 以上高空, 却明显发生相反的情况, 即涡动动能向涡动位能的转换, 其原因可能是300hPa 以上高空已经是平流层的缘故。

表5 各层逐日 A_e K_e 数值表(W/m^2)

| 日期 | 6 | | | | 7 | | | | 8 | | | | 9 | | | | 10 | | | | 11 | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|
| | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | | 00 | | 12 | |
| 200—100 | -0.77 | -0.14 | -2.00 | 0.00 | -0.59 | -1.50 | -1.50 | -2.30 | -1.20 | -1.10 | -3.80 | 0.68 | | | | | | | | | | | | |
| 300—200 | -1.60 | -2.20 | -5.60 | -0.59 | -0.18 | -3.60 | -0.99 | -2.20 | -0.43 | -0.52 | -2.00 | -0.17 | | | | | | | | | | | | |
| 500—300 | 1.60 | 4.90 | 8.20 | 2.90 | 5.00 | 1.60 | 5.10 | 6.20 | 5.00 | 0.99 | 4.90 | -0.77 | | | | | | | | | | | | |
| 700—500 | 0.02 | 1.20 | 3.00 | 1.80 | 3.50 | 1.00 | 2.40 | 2.70 | 1.70 | 0.83 | 2.70 | -0.54 | | | | | | | | | | | | |
| 850—700 | -0.41 | -0.35 | 0.39 | 0.25 | 0.92 | -0.03 | 0.45 | 0.49 | 0.43 | 0.12 | 0.99 | -0.04 | | | | | | | | | | | | |
| 1000—850 | -0.03 | -0.13 | 0.11 | 0.00 | 0.12 | -0.17 | 0.08 | 0.01 | 0.07 | -0.06 | 0.06 | -0.04 | | | | | | | | | | | | |

6 总 结

东北冷涡的发展和减弱过程是东亚大气环流演变的重要特征之一, 其能量学分析结果如下:

(1) 冷涡全过程的动能来源主要为涡动位能的转换和发展期的边界动能输入。支出主要是向纬向动能的转换和成熟期的动能消耗。

(2) 发展期, 涡动位能主要来自纬向位能的转换; 而边界动能输入则来自强气流的入侵。以上两项均说明当时经向环流加强对冷涡发展的重要性。

(3) 成熟期, 涡动位能的产生和转换成动能均达极大, 说明当时斜压能量释放最为强烈。

(4) 减弱期, 冷涡对于纬向气流的贡献, 即 K_e 、 K_z 和向外边界输出动能为最大, 它们反映了能量转换的正压过程。

(5) 东北冷涡的动能及其变化的绝对值, 中高空大于低空, 但低空的相对率却远大于中高空。

致谢: 塞浦路斯 Michaelides 博士提供部分计算程序, 在此深表谢忱。

参考文献

- [1] Lambert S J. Spectral energetics of the Canadian climate general circulation model. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1295– 1304.
- [2] Holopainen E Q. An observational study of the energy balance of the stationary disturbances in the atmosphere. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1970, 96: 626– 644.
- [3] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991. 107—114.
- [4] Michaelides Silas Chr. Limited area energetics of Genoa cyclogenesis. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 13– 26.
- [5] 仪菊清, 丁一汇. 东海地区温带气旋爆发性发展的动力学分析. *气象学报*, 1992, 50(2): 152—166.
- [6] 孙力等. 东北低压爆发性发展过程的诊断分析. *气象学报*, 1992, 50(3): 301—309.
- [7] Michaelides Silas Chr. A spatial and temporal energetics analysis of a baroclinic disturbance in the Mediterranean. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 1224– 1243.
- [8] Reiter E R. Mean and eddy motions in the atmosphere. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 200– 204.
- [9] Gerald D Bell and Daniel Keyser. Shear and curvature vorticity and potential-vorticity interchanges: interpretation and application to a cutoff cyclone event. *Mon Wea Rev*, 1993, 121: 76– 102.

ENERGETICS ANALYSIS OF A COLD VORTEX IN NORTHEAST CHINA

Mao Xianmin Qu Xiaobo

(Shenyang central Meteorological Observatory, Shenyang, 110015)

Abstract

An analysis of the energetics of a cold vortex in Northeast China is performed. The approach is based on the computation of an energy flow for and open atmospheric region in which this cold vortex is the major synoptic-scale feature. Following results have been obtained.

The conversion term $A_e - K_e$ acts as a main source of the eddy kinetic energy of the cold vortex. When the cold vortex is in developing period, the boundary inflow of the eddy kinetic energy is also important. The major sink of the eddy kinetic energy is $K_e - K_z$, the R_e and the boundary outflow after the mature stage of the cold vortex are the secondary important. The absolute value of the change of the eddy kinetic energy in the middle and upper troposphere is larger than that in the lower troposphere layer, but the result is contrary to the relative variability. The $A_e - K_e$ occurred mainly in the 700–300hPa, the contrary conversion from K_e occurred mainly in the 700–300hPa, the contrary conversion from K_e into A_e is appeared in the upper atmosphere above 300hPa.

Key words: Cold vortex, Energy balance, Eddy kinetic energy.