

## 北半球风暴轴附近的能量转换\*

邓兴秀\*\* 孙照渤

(南京气象学院气象学系,南京,210044)

**摘要** 用1980~1983年的ECMWF客观分析资料,对任选一年的任意月份、正常年和厄尔尼诺年的特别月份天气尺度涡动能量及其与时间平均气流之间的能量转换项进行了分析。结果表明:在风暴轴区域,天气尺度涡动动能和天气尺度涡动有效位能最大,天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量转换也最剧烈;在风暴轴的入口区、出口区,天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量转换是反向的,从而使风暴轴维持在比较常定的区域。

**关键词** 风暴轴,天气尺度,涡动,能量转换

**分类号** P434.5

北半球最强的带通涡动(2.5~6天)集中在两个纬向拉长的方差极大值区域,这与太平洋和大西洋上空的风暴轴相一致。正如Blackmon等人<sup>[1]</sup>和Lau<sup>[2]</sup>指出的,基于时间滤波资料的统计分析证明,天气尺度涡动有规律地沿着风暴轴发生。根据Lau的研究,北半球风暴轴能够用Simmons和Hoskins<sup>[3]</sup>的发展中的斜压波的生命史模式来解释。

近年来,在气候动力学和短期气候预测理论研究中,瞬变波与时间平均气流的相互作用日益受到重视。曾庆存<sup>[4]</sup>就曾研究过瞬变波与时间平均气流的相互关系。

瞬变扰动能量学的基本特点表现在与斜压不稳定扰动有关。本文主要研究天气尺度瞬变涡动能量分布,及其与时间平均气流间能量转换的地理分布并对不同年份进行比较。天气尺度涡动在北半球最活跃的区域为风暴轴地区。我们曾研究了北半球风暴轴随时间的演变特点<sup>[5]</sup>,因此本文的着眼点也主要分析风暴轴附近的能量分布及其与平均气流的能量交换。

### 1 资料和方法

本文用1980~1983年部分(1980年9月~1981年2月;1981年5月~1981年7月;1982年9月~1983年2月;1983年5月~1983年7月)ECMWF每天一次(12:00GMT)客观分析网格点资料,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬度。采用了 $20^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{N}$ 范围内的500hPa位势高度场和纬向风速场资料,500hPa温度场与经向风速场资料,700hPa和300hPa温度场资料。

采用数字滤波方法以获得天气尺度涡动(2.5~6天)资料。为此,使用了一个我们以前所设计的31点带通对称滤波器,具体的设计和计算方法可参见文献[6]。

\* 本文由国家关键研究项目“气候动力学和气候预测理论研究”资助

\*\* 现在上海台风研究所工作

收稿日期:1994-02-28,改回日期:1994-08-11

## 2 方程的推导

出发方程为  $x, y$  方向的动力学方程和热力学方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} &= f v_a - \varphi_x + F_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} &= -f u_a - \varphi_y + F_y \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial p} &= \frac{\kappa}{p} \omega T + Q\end{aligned}$$

其中,  $\kappa = \frac{R}{c_p} = 0.286$ , 下标“a”表示地转风分量, 其余符号都是气象中的常用表示法, 不再一一说明。方程中的任一变量  $s$  可以分解成两部分(两天以下分量已除去)

$$s = s' + \bar{s}$$

其中,  $s'$  表示天气尺度涡动部分, 用带通滤波方法获得,  $\bar{s}$  为周期大于 6 天的定常部分或称为时间平均部分。

本文定义几个物理量, 包括涡动动能 ( $K_T$ )、涡动有效位能 ( $A_T$ )、时间平均动能 ( $\bar{K}_M$ ) 和时间平均有效位能 ( $\bar{A}_M$ ) 等, 定义式为

$$\begin{aligned}K_T &= \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) & \bar{K}_T &= \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \\ A_T &= (T')^2/2r & \bar{A}_T &= \overline{(T')^2}/2r \\ \bar{K}_M &= \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2) & \bar{A}_M &= \bar{T}^2/2r\end{aligned}$$

$r$  为静力稳定度, 表达式为

$$r = -\frac{p}{R} \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial p} - \frac{\kappa}{p} \bar{T} \right)$$

由出发方程及上述定义可以推得

时间平均动能方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \bar{K}_M &= - \left( \frac{\partial}{\partial x} \bar{u} \bar{K}_M + \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} \bar{K}_M + \frac{\partial}{\partial p} \bar{\omega} \bar{K}_M \right) - \bar{u} \left( \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'u'} + \frac{\partial}{\partial p} \overline{\omega'u'} \right) \\ &\quad - \bar{v} \left( \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'v'} + \frac{\partial}{\partial p} \overline{\omega'v'} \right) + f(\overline{u\bar{v}_a} - \overline{v\bar{u}_a}) - (\overline{u\bar{\varphi}_x} + \overline{v\bar{\varphi}_y}) + (\overline{u\bar{F}_x} + \overline{v\bar{F}_y})\end{aligned}$$

时间平均有效位能方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \bar{A}_M &= - \left( \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \bar{A}_M + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} \bar{A}_M + \bar{\omega} \frac{\partial}{\partial p} \bar{A}_M \right) \\ &\quad - \frac{\bar{T}}{r} \left( \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'T'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'T'} \right) - \frac{R}{p} \overline{\omega'T'} + \frac{1}{r} \bar{Q} \bar{T} + \frac{2\kappa}{p} \bar{\omega} \bar{A}_M\end{aligned}$$

天气尺度涡动动能方程

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \bar{K}_T &= - \left( \frac{\partial}{\partial x} \bar{u} \bar{K}_T + \frac{\partial}{\partial y} \bar{v} \bar{K}_T + \frac{\partial}{\partial p} \bar{\omega} \bar{K}_T \right) & \text{A} \\ &\quad - \left. \begin{aligned} & - \left( \overline{u'u'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ & - \left( \overline{v'u'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \overline{v'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \\ & - \left( \overline{\omega'u'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} + \overline{\omega'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} \right) \end{aligned} \right\} & \text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + f(\overline{u'v'_s} - \overline{v'u'_s}) & \text{D} \\
 & - (\overline{u'\phi'_x} + \overline{v'\phi'_y}) & \text{E} \\
 & + (\overline{u'F'_x} + \overline{v'F'_y}) & \text{F}
 \end{aligned}$$

其中,气压梯度力做功项(E)可分解成三项

$$\begin{aligned}
 -(\overline{u'\phi'_x} + \overline{v'\phi'_y}) &= -\left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{u'\phi} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'\phi}\right) & \text{E}_1 \\
 & - \frac{\partial}{\partial p} \overline{\omega'\phi} & \text{E}_2 \\
 & - \frac{R}{p} \overline{\omega'T'} & \text{E}_3
 \end{aligned}$$

天气尺度涡动有效位能方程

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \overline{A_T} &= -\left(\overline{u} \frac{\partial \overline{A_T}}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial \overline{A_T}}{\partial y} + \overline{\omega} \frac{\partial \overline{A_T}}{\partial p}\right) & \text{G} \\
 & - \frac{1}{r} (\overline{u'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} + \overline{v'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y}) + \frac{R}{p} \overline{\omega'T'} & \text{I} \\
 & + \frac{1}{r} \overline{Q'T'} & \text{J} \\
 & + \frac{2\kappa}{p} \overline{\omega} \overline{A_T} & \text{K}
 \end{aligned}$$

应该指出,在推导过程中,忽略了静力稳定度随  $x, y, p$  的变化。

比较涡动动能方程和时间平均动能方程、涡动有效位能方程和时间平均有效位能方程,可以发现一些共同项,但在不同的方程中符号相反,从而确定了如下一些能量转换项。

a) 时间平均动能与涡动动能之间的正压转换项(在此忽略了动量的垂直平流项)

$$I(K_M, K_T) = -\left(\overline{u'u'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \overline{u'v'} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x}\right) - \left(\overline{v'u'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \overline{v'v'} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y}\right)$$

当  $I(K_M, K_T) > 0$  时,时间平均动能向涡动动能转换;而当  $I(K_M, K_T) < 0$  时,涡动动能向时间平均动能转换。

b) 时间平均有效位能和涡动有效位能之间的转换项

$$I(A_M, A_T) = -\frac{1}{r} (\overline{u'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x} + \overline{u'v'T'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial y})$$

当  $I(A_M, A_T) > 0$  时,时间平均有效位能向涡动有效位能转换;  $I(A_M, A_T) < 0$  时,涡动有效位能向时间平均有效位能转换。

c) 涡动有效位能和涡动动能之间的斜压转换项

$$I(A_T, K_T) = -\frac{R}{p} \overline{\omega'T'}$$

当  $I(A_T, K_T) > 0$  时,涡动有效位能向涡动动能转换;而当  $I(A_T, K_T) < 0$  时,涡动动能向涡动有效位能转换。

### 3 能量分析

#### 3.1 1982年11月份涡动能量及其与时间平均气流能量的相互转换分析

对任选的1982年11月份,用31点带通(2.5~6天)滤波器对1982年10月至1982年12月间逐日500hPa位势高度场进行滤波。图1为1982年11月位势高度带通滤波资料的方差月

平均地理分布。图上纬向拉长的方差极大值区域所对应的分别就是太平洋和大西洋风暴轴的位置。

我们计算了 1982 年 11 月的涡动动能 ( $\bar{K}_T$ )、涡动有效位能 ( $\bar{A}_T$ )、时间平均动能与涡动动能的正压转换项  $I(K_M, K_T)$ 、时间平均有效位能和涡动有效位能之间的转换项  $I(A_M, A_T)$  及涡动有效位能和涡动动能之间的斜压转换项  $I(A_T, K_T)$ ，并绘出了以上各量月平均的地理分布图(图 2)。从图上可以发现,对应方差图上纬向拉长的极大值区域即风暴轴区域的涡动动能和涡动有效位能是最大的,这表明风暴轴区域确实是天气尺度涡动的强活动区。风暴轴区域的天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量交换也是最剧烈的。

众所周知,风暴轴始端是新生的天气尺度涡动,而末端则是趋于灭亡的天气尺度涡动。从图 2c、d、e 可见,在风暴轴始、末端,天气尺度涡动与时间平均气流之间能量转换是反向的。在风暴轴始端,时间平均动能向涡动动能转换,时间平均有效位能向涡动有效位能转换。涡动有效位能又向涡动动能转换。这些转换的效应均使天气尺度涡动动能增加,天气尺度涡动得到发展,发展了的天气尺度涡动沿着风暴轴向东传播。当天气尺度涡动动能达到最大值以后,必有反方向的能量转换。于是在风暴轴末端,涡动动能向时间平均动能转换,涡动动能向涡动有效位能转换,涡动有效位能又向时间平均有效位能转换,从而增加了时间平均气流的能量,减少了天气尺度涡动的能量,使天气尺度涡动减弱乃至消亡。而在风暴轴始端(入口区)又有新生的天气尺度涡动,不断从时间平均气流中得到能量,逐渐增强,然后向东传播至末端(出口区)而减弱、衰亡,如此循环往复,不断有天气尺度涡动有规律地沿着风暴轴发生。这种能量转换特点与 Simmons 和 Hoskins 斜压波生命史的模式结论是相吻合的。

从上面的分析可知,风暴轴从时间平均气流中获得能量有两种方式。一是时间平均动能向涡动动能的直接转换,这是通过涡动的动量通量来实现的;另一种方式是时间平均有效位能借助于涡动有效位能的媒介作用向涡动动能转换。时间平均有效位能向涡动有效位能的转换是通过涡动的热量通量来实现的;而涡动有效位能向涡动动能的转换是通过高空北方来的冷空气下沉,而低空南方来的暖空气上升来实现的。

### 3.2 正常年和厄尔尼诺年涡动能量及其与时间平均气流能量的相互转换分析

上面的结论仅仅是根据一个月的情况得到的,为了更加全面了解风暴轴区域天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量转换特点及其时间变化,选择三个具有代表性的月份进行能量分析,它们是:冬季代表月份 1 月、“六月突变”月份 6 月、“十月突变”月份 10 月。我们知道,1982~1983 年厄尔尼诺事件开始于 1982 年秋,结束于 1983 年夏。文献[7]确定该厄尔尼诺事件发生时段为 1982 年 9 月~1983 年 9 月,在冬、春季达鼎盛。该文还指出 1980 年秋~1981 年

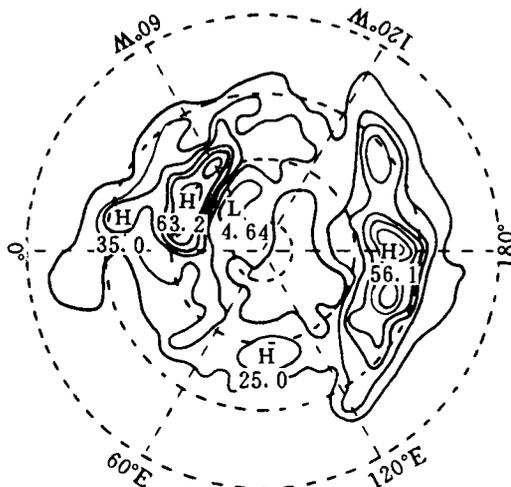


图 1 1982 年 11 月北半球 500hPa 位势高度距 31 点带通滤波方差月平均图

等值线间隔为 8.0 dagpm, 最外纬圈为 20°N

Fig. 1 Plots of monthly mean 31-point bandpass filtered variance for November 1982 northern 500 hPa height, contoured at 8.0 dagpm with the outermost parallel being 20°N

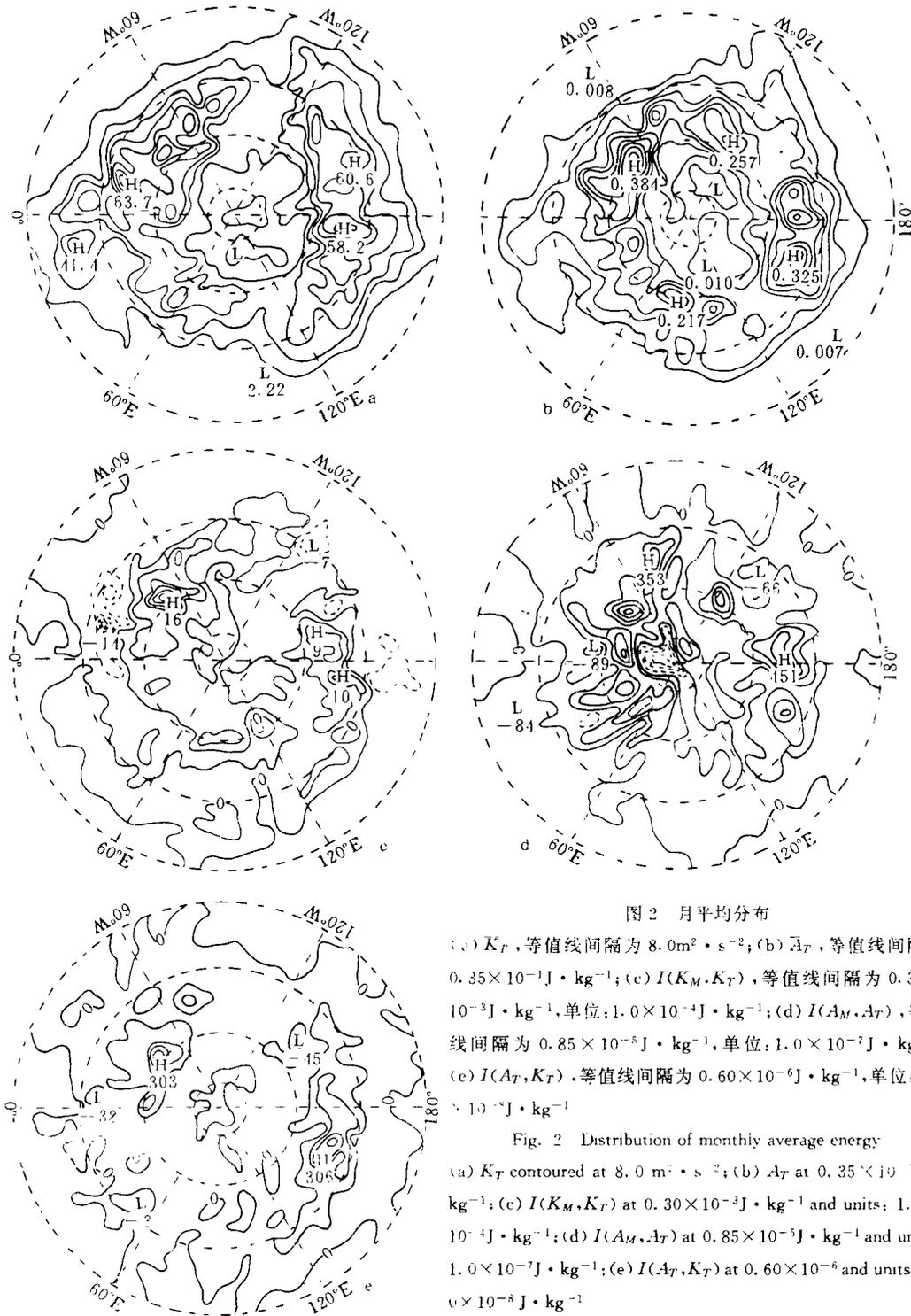


图2 月平均分布

(a)  $K_T$ , 等值线间隔为  $8.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ; (b)  $A_T$ , 等值线间隔为  $0.35 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; (c)  $I(K_M, K_T)$ , 等值线间隔为  $0.30 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 单位:  $1.0 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; (d)  $I(A_M, A_T)$ , 等值线间隔为  $0.85 \times 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 单位:  $1.0 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; (e)  $I(A_T, K_T)$ , 等值线间隔为  $0.60 \times 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 单位:  $1.0 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Fig. 2 Distribution of monthly average energy

(a)  $K_T$  contoured at  $8.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ; (b)  $A_T$  at  $0.35 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; (c)  $I(K_M, K_T)$  at  $0.30 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  and units:  $1.0 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; (d)  $I(A_M, A_T)$  at  $0.85 \times 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  and units:  $1.0 \times 10^{-7} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; (e)  $I(A_T, K_T)$  at  $0.60 \times 10^{-6}$  and units:  $1.0 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

夏是海表温度较正常的时期。据此,我们选定1980年秋~1981年夏为正常年,1982年秋~1983年夏为厄尔尼诺年。

对1980年10月与1982年10月,1981年1月与1983年1月,1980年6月与1983年6

月,重复 3.1 中的工作,得到以上各月的北半球 500hPa 带通滤波位势高度方差月平均图,涡动动能、涡动有效位能、时间平均动能与涡动动能转换项、时间平均有效位能与涡动有效位能转换项、涡动有效位能与涡动动能转换项的月平均地理分布图(图略)。从上面这些图可以看出:无论是正常年还是异常年,也无论是冬季代表月份还是过渡季节代表月份,对应于纬向拉长的方差极大值区域的天气尺度涡动动能和涡动有效位能是最大的,天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量转换也是最剧烈的。 $I(K_M, K_T)$  与  $I(A_M, A_T)$  及  $I(A_T, K_T)$  极值中心位置分布也都一致表明:在风暴轴始、末端,天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量转换是反向的。风暴轴在入口区不断获得时间平均气流的能量,其中绝大部分是时间平均动能,而在风暴轴出口区消耗本身的能量,从而使风暴轴维持在比较常定的区域。

从上面的分析,可得出一些共同的结论,但正常年和厄尔尼诺年的天气尺度涡动能量及其与时间平均气流能量转换项的大小还是有明显差异的,这从附表可以看出。另外,从附表还可以看到,风暴轴区域冬季代表月的涡动动能极值最大,6 月的涡动动能极值最小,10 月的涡动动能极值介于两者之间。由此可见,风暴轴区域的涡动动能也存在着明显的季节性变化。

附表 太平洋和大西洋风暴轴区域各月平均的能量极大值及各能量转换项极值

(单位:  $J \cdot kg^{-1}$ )

Table Monthly mean energy maxima and extrema of the conversion terms ( $J \cdot kg^{-1}$ ) for the storm track belts in the Pacific and Atlantic

	太 平 洋						大 西 洋					
	1980 年	1981 年	1981 年	1982 年	1983 年	1983 年	1980 年	1981 年	1981 年	1982 年	1983 年	1983 年
	10 月	1 月	6 月	10 月	1 月	6 月	10 月	1 月	6 月	10 月	1 月	6 月
$\bar{Z}^2$	47.3	34.4	30.0	44.3	64.9	49.3	67.7	66.7	27.0	71.8	49.1	49.4
$\bar{K}_T$	56.9	58.9	31.1	80.9	113.0	52.8	71.5	88.1	53.0	62.6	58.1	48.4
$\bar{A}_T$	0.352	0.206	0.121	0.228	0.212	0.172	0.271	0.272	0.191	0.207	0.301	0.171
$I(K_M, K_T)$	0.7	0.65	0.373	0.583	0.73	0.53	0.74	1.14	0.306	0.996	0.601	0.51
$10^{-3}$	-0.67	-0.71	-0.64	-1.196	-1.59	-1.27	-0.57	-0.89	-0.535	-0.989	-1.14	-0.47
$I(A_M, A_T)$	3.24	2.76	1.86	3.62	4.47	2.93	3.80	8.28	3.20	3.22	4.30	2.54
$10^{-3}$	-1.92	-0.63	-0.65	-0.64	-0.84	-0.58	-0.94	-3.16	-0.59	-0.75	-2.16	-1.71
$I(A_T, K_T)$	2.92	2.40	0.71	1.73	4.35	2.77	1.51	2.70	1.34	1.36	2.00	1.59
$10^{-6}$	-0.29	-0.18	-0.09	-0.47	-0.49	-0.32	-0.26	-0.43	-0.12	-0.35	-1.14	-0.33

## 4 结 论

本文分析了北半球风暴轴附近的能量分布特点,并研究了时间平均气流能量对于北半球风暴轴的维持所起到的作用,主要结论归纳如下。

(1) 在风暴轴区域,天气尺度涡动动能和有效位能最大,天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量交换也最剧烈。

(2) 在风暴轴的始、末端,天气尺度涡动与时间平均气流之间的能量转换是反向的。风暴轴在入口区不断获得时间平均气流的能量,其中绝大部分是时间平均动能;而在风暴轴出口区消耗本身的能量,从而使风暴轴维持在比较常定的区域。

(3) 风暴轴区域的天气尺度涡动动能存在着明显的季节变化。

### 参 考 文 献

- 1 Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation. *JAS*, 1977, 34(7): 1040~1053
- 2 Lau N C. The structure and energetics of transient disturbances in the Northern Hemisphere wintertime circulation. *JAS*, 1979, 36(6): 982~995
- 3 Simmons A J, Hoskins B J. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves. *JAS*, 1978, 35(3): 414~432
- 4 Zeng Qingcun. On the evolution and interaction of disturbances and zonal flow in rotating barotropic atmosphere. *JMS Japan*, 1982, 60(1): 24~31
- 5 Sun Zhaobo, Deng Xingxiu. Temporal variation characteristics of storm tracks in the Northern Hemisphere. In: Ye Duzheng, Taroh Matsuno, Zeng Qingcun, et al eds. *Climate Variability*. Beijing: Meteorological Press. 1993. 191~198
- 6 孙照渤. 热带外地区大气中 40-60 天振荡的统计特征. 见: 章基嘉主编. 长期天气预报论文集. 北京: 海洋出版社, 1992, 29~35
- 7 ENSO 监测小组(由赵汉光执笔). 厄尔尼诺事件的划分标准和指数. *气象*, 1989, 15(3): 37~38

## ENERGY CONVERSION IN THE VICINITY OF NORTHERN STORM TRACK

Deng Xingxiu Sun Zhaobo

(Department of Meteorology, NIM, 210044, Nanjing, PRC)

**Abstract** Using 1980~1983 ECMWF objective analyses investigation is made of the energy conversion between synoptic eddies and time mean flow for any month of a selected year, and a particular month of a normal and an El Niño year. Evidence suggests that in the track region the synoptic eddy kinetic energy and effective potential energy are maximal so that energy conversion between such eddies and time mean flow are strongest; in the entrance and exit sectors of the track the conversion is reversed in direction such that the storm track is maintained in a more steady area.

**Keywords** storm track, synoptic scale, eddy, energy conversion