

冬季一次次天气尺度渤海气旋的动能制造*

辛宝恒 刘 红

(天津市气象科学研究所)

应用 FGGE-III, 资料对 1979 年 11 月 24 日—25 日一次快速发展并造成渤海二号船翻沉事故的次天气尺度渤海气旋进行了局地动能收支分析。

气旋发展期间通过垂直气柱侧边界的动能、势能净通量是辐散的, 气旋发展的能源主要依赖于动能产生项、动能转换项以及网格区域不能分辨的尺度运动作用。气旋控制期间边界层风场的增强, 其外部能源主要依赖于通过侧边界的动能、势能净通量辐合, 内部主要依赖于动能产生项和动能转换项。

与前人研究过的天气尺度气旋相比较, 这次气旋在发展阶段的动能产生和剩余源项 [E] 的数值都较大。

最后还对感热输送等问题进行了简单的讨论。

1. 基本方程及处理方法

选用局地动能收支方程

$$\left[\frac{\partial K}{\partial t} \right] = -[\nabla \cdot \mathbf{V}K] - \left[\frac{\partial \omega K}{\partial P} \right] - [\mathbf{V} \cdot \nabla \phi] - [E] \quad (1)$$

(1) 式中的方括号表示对垂直积分总量的区域平均。(1) 式左边为动能局地变化项, 右边第一项和第二项为所考虑区域边界的水平和垂直动能通量辐合, 第三项为越过等压线气流的动能产生项。最后一项为摩擦耗散项, 它还包含有计算网格区域不能分辨的尺度运动对动能的净供给量以及各种资料 and 计算误差在内, 该项并被当作余数项来处理。

对动能产生项使用连续方程可得

$$-[\mathbf{V} \cdot \nabla \phi] = -[\nabla \cdot \mathbf{V}\phi] - \left[\frac{\partial \omega \phi}{\partial P} \right] - [\omega \alpha] \quad (2)$$

按 Eddy^[1]和 Kung^[2]的讨论, 为适合于有限小区域(2)式可改写为

$$-[\mathbf{V} \cdot \nabla \phi] = -[\nabla \cdot \mathbf{V}\phi] - [\omega^* \alpha^*] - \left[\frac{\partial \omega^* \phi^*}{\partial P} \right] + RS \quad (3)$$

$$RS = -[\bar{\omega} \bar{\alpha}] - \left[\frac{\partial \bar{\omega} \bar{\phi}}{\partial P} \right] \quad (4)$$

(3) 式右边第二项和第三项分别为计算网格区域可分辨的尺度系统有效位能对动能转换和势能的垂直输送。按 Kung^[3]的考虑, RS 仍当作余数项来处理, RS 的垂直总量为计算网格区域不能分辨的较大尺度运动对动能的净供给量。

产生项 $-\mathbf{V} \cdot \nabla \phi$ 的计算可直接使用 FGGE-III, 1.875 经纬度格距点上的 ϕ 值进行, 无需对 ϕ 值进行内插, 因而其计算是可靠的。水平势能通量辐合 $-\nabla \cdot \mathbf{V}\phi$ 的计算却是非常困难的, 这是由于对流层中上层 $\mathbf{V}\phi$ 的量级太大, 使得 $-\nabla \cdot \mathbf{V}\phi$ 的计算失去可靠性。在此, 我们也采用 Kung^[3] 的类似处理, 使用 $-\nabla \cdot \mathbf{V}\phi^*$ 来代替 $-\nabla \cdot \mathbf{V}\phi$, $-\nabla \cdot \mathbf{V}\phi^*$ 是用计算区域边界上的 ϕ^* 和分量乘积的线积分来

* 本文于 1987 年 11 月 11 日收到, 1988 年 12 月 19 日收到修改稿。

计算的。

图 1 和图 2 分别给出了气旋发展期间 1979 年 11 月 24 日 20 时 500 hPa 图和 1000 hPa 图上的 FGGE-III 的风场资料。可以看出,配合高空形势在渤海和日本海各发展起一个气旋性闭合环流。由于其发展迅速,其尺度又明显小于天气尺度,我们称之为次天气尺度气旋。该气旋的强度及其中心位置在常规地图上是很难确定的。随着气旋的发展,到 25 日凌晨处于秦皇岛外海气旋西北象限的渤海二号船除了一些人为的因素外,因遭受到 20 m/s 以上东北大风的袭击而沉没。

计算区域范围为 $36.36\text{--}41.25^\circ\text{N}$, $118.13\text{--}123.75^\circ\text{E}$, 其总面积为 $3.07 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。使用 FGGE-III, 1.875 经纬度网格距资料, 共选 $6 \times 6 = 36$ 个网格点。该区域刚好与 24 日 20 时渤海气旋所占据的 D 区域相重合(图 2)。分析时又把 D 区域划分为气旋的北半部(D_N) 和气旋的南半部(D_S) 两部分。对 100—1000 hPa 之间共分 10 层和 6 个时次进行计算。

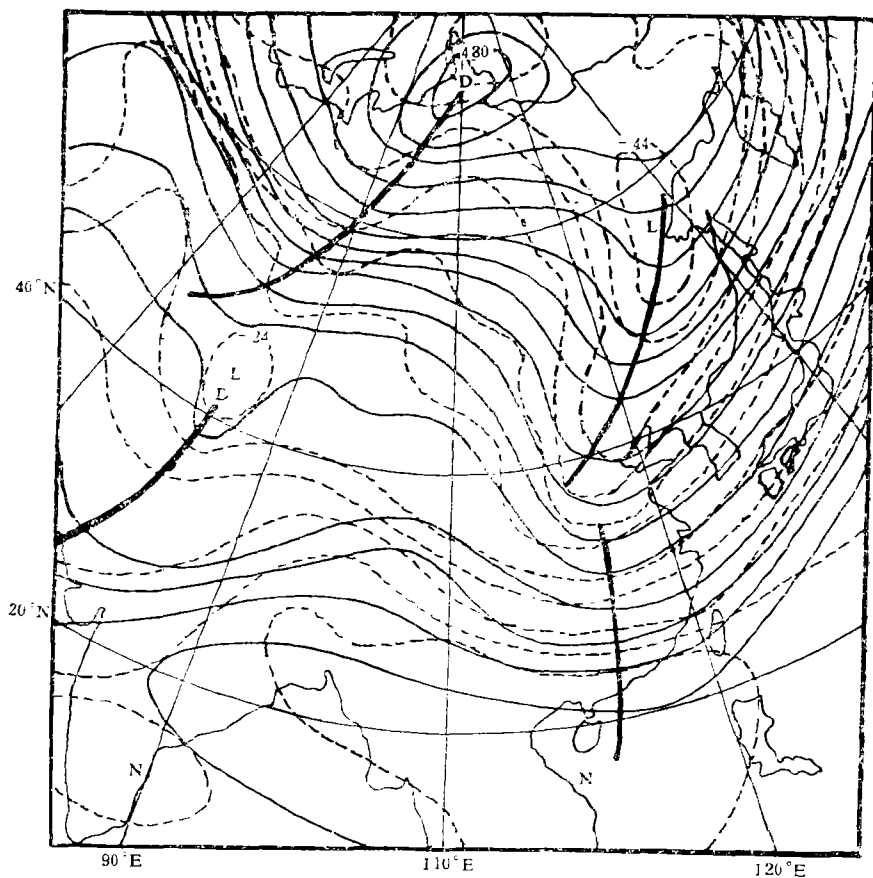


图 1 1979 年 11 月 24 日 20 时 500 hPa 图

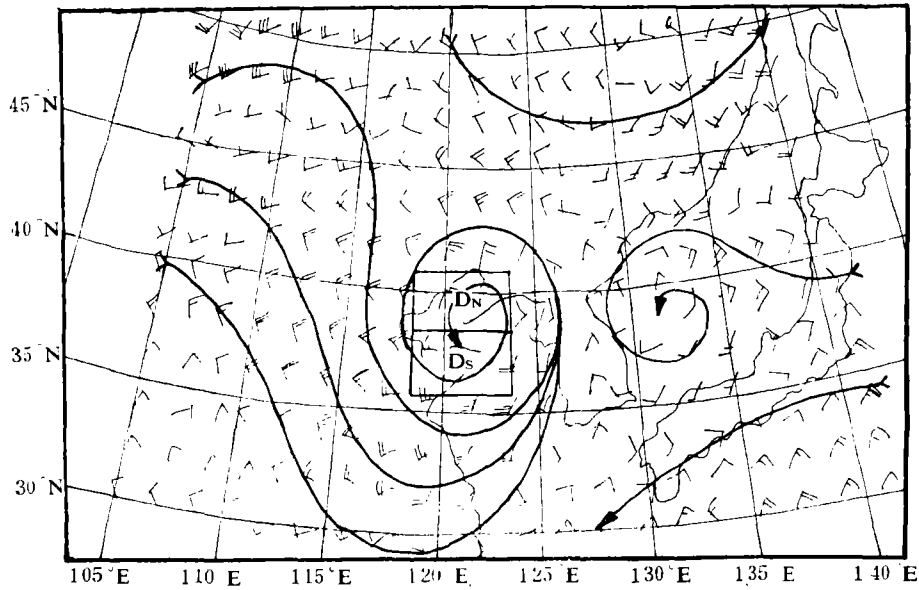


图 2 1979年11月24日20时1000 hPa由FGGE-III₀合成风场图

2. 垂直积分总量的结果分析

表 1 给出了不同时段各项垂直积分总量的区域平均值。在气旋发展过程中 D_S 较 D_N 区域平均动能

表 1

时间	区域	$[K]^*$	$\left[\frac{\Delta K}{\Delta t}\right]$	$-\left[\nabla \cdot \mathbf{V}K\right]$	$[E]$	$-\left[\mathbf{V} \cdot \nabla \phi\right]$	$-\left[\nabla \cdot \mathbf{V}\phi\right]$	$-\left[\frac{\partial \omega^* \phi^*}{\partial p}\right]$	$-\left[\omega^* \alpha^*\right]$	RS
23日 20时	D_N	27.76	1.13	56.57	50.31	-5.13	23.93	-0.30	-8.88	-19.88
	D_S	21.44	12.29	22.90	-3.99	-14.60	17.91	-0.30	-6.13	-26.08
	D	24.58	6.71	39.76	23.19	-9.86	20.88	-0.30	-7.50	-22.94
24日 08时	D_N	28.25	-7.52	-82.39	-42.41	32.46	-34.70	-0.40	-8.73	76.29
	D_S	26.75	17.03	20.36	-5.94	-9.27	-20.55	-0.10	1.53	9.85
	D	27.48	4.91	-31.02	-24.33	11.60	-27.58	-0.25	-3.60	43.03
24日 20时	D_N	21.52	-18.85	-46.38	28.55	56.08	-6.10	-0.30	-4.01	66.49
	D_S	36.14	-6.50	-13.49	45.37	52.36	-7.08	-0.80	1.87	58.37
	D	28.82	-12.92	-29.94	37.20	54.22	-6.52	-0.55	-1.07	62.36
25日 08时	D_N	11.47	-14.88	-1.00	14.48	0.60	28.85	-0.30	9.19	-37.14
	D_S	21.14	-22.25	-39.52	9.46	26.73	13.46	-0.60	0.25	13.62
	D	16.32	-16.24	-20.24	11.97	13.67	21.93	-0.45	4.72	-12.53
25日 20时	D_N	12.67	0.03	16.13	16.57	0.47	20.37	-1.20	1.60	-20.30
	D_S	16.92	-5.83	0.29	24.96	18.84	14.64	-0.58	2.87	1.91
	D	14.79	-2.91	8.23	20.30	9.16	17.57	-0.90	2.24	-9.75
26日 08时	D_N	11.50	-2.71	-6.96	-22.04	-17.79	7.61	0.10	-1.84	-23.66
	D_S	16.10	-1.90	-9.14	-16.05	-8.81	13.88	-0.30	0.53	-22.92
	D	13.80	-2.29	-8.05	-19.11	-13.35	10.75	-0.10	-0.66	-23.42

* $[K]$ 为 10^8Jm^{-2} ,其余为 Wm^{-2}

表 2

作 者	计算区域(10^{13}m^2)	$-\mathbf{V}\cdot\nabla\phi$ *	$[E]$ *
Kongay等(1976)	0.1	17.1	-1.9
Kung等(1974)	1.0	16.2	16.7
Robertson等(1980)	0.3	7.1	10.9
本文结果	0.03	54.22	37.20

*单位为 Wm^{-2}

$[K]$ 有较明显增长,到 24 日 20 时 D_s 区域中的 $[K]$ 值已增至 $36.14 \times 10^5 \text{Jm}^{-2}$ 。不过,由于采用的是局地收支分析和 $[\Delta K/\Delta t]$ 采用的是中央差法,在 24 日 20 时 $[\Delta K/\Delta t]$ 反而出现了负值。这表明,25 日 08 时随着气旋移走而动能迅速下降。在气旋发展过程前后(24 日 20 时和 25 日 08 时), $-\mathbf{V}\cdot\nabla K$ 始终保持为负值,在 24 日 20 时 $-\mathbf{V}\cdot\nabla\phi$ 也为负值。就是说在气旋发展期间不仅不能通过边界水平净通量辐合得到动能和势能的补给,反而由气旋区域向外流失了部分能量。这是与 Kung^[4] 对气旋性气流控制区域担负着对下游地区能量输出的结果相一致的。 $[E]$ 项在 24 日 20 时呈现明显的正值,表明在气旋发展期间有着较强的动能耗散。按照 Kung^[4] 的考虑, $[E]$ 为负值可解释为网格点区域不能分辨的那些尺度运动的动能净供给量。当然, $[E]$ 项的量级和符号都是相对的,它还包含着资料 and 计算误差在内。产生项 $-\mathbf{V}\cdot\nabla\phi$ 和 RS 项在 24 日 20 时分别达到 54.22Wm^{-2} 和 62.36Wm^{-2} 。相对(3)式来讲, Kung^[3] 认为 RS 为正值 为网格点区域不能分辨的那些较大尺度运动的动能净供给量。其它各项如 $-\omega^*a^*$ 、 $-\partial\omega^*\phi/\partial p$ 都呈现为较小的正值或负值,还看不出对气旋发展总体的明显作用。(1)式中的 $-\partial\omega K/\partial p$ 垂直积分为零。 $-\omega^*a^*$ 为负值可解释为涡动对有效位能的恢复和储存的贡献。

现将本文计算的产生项 $-\mathbf{V}\cdot\nabla\phi$ 和 $[E]$ 项与由 Cressman^[5] 给出的一些气旋计算结果相比较(表 2)。

由表 2 可看出,本文计算的两项结果都较列出的其它计算结果明显偏大。这一方面由于我们计算的是气旋个例而其它结果都是若干气旋的平均状况,其计算区域也较本文大 1—2 个量级。另一方面也可能次天气尺度气旋较天气尺度气旋内部运动更为剧烈。

3. 行星边界层风场增强的能量学特征

应指出的是,在渤海气旋发展期间(24 日 20 时)由动能收支各项的垂直廓线(图略)得知,尽管一些项如动能、势能的水平通量辐合垂直积分总量为负值,但在边界层以内收支各项(除耗散项外)都对动能释放有正的贡献。图 3 和图 4 给出了 1000—850 hPa 各项积分与动能 $[K]$ 的比较廓线。

由图 3 和图 4 比较看出,随着气旋的发展渤海不同区域的 $[K]$ 是与收支各项基本保持为同步变化关系。渤海二号船翻沉正处于 D_s 区域不断增大的动能 $[K]$ 中。另外,从量级上看,图 4 较图 3 中的要大,产生项和势能水平通量辐合可能是边界层内风场增强的显著因子。就其能源来讲,可认为动能、势能水平净通量是 D 区域边界层内风场增强的外部源,产生项和转换项为内部源。

4. 感热输送的定性讨论

文献^[6-8]等都曾论证过海洋对大气的感热输送对气旋产生和发展的重要性。本文利用千里岩岛屿站(黄海北部)资料对气旋发展时期的感热输送作一粗略估算。应用以下熟知公式

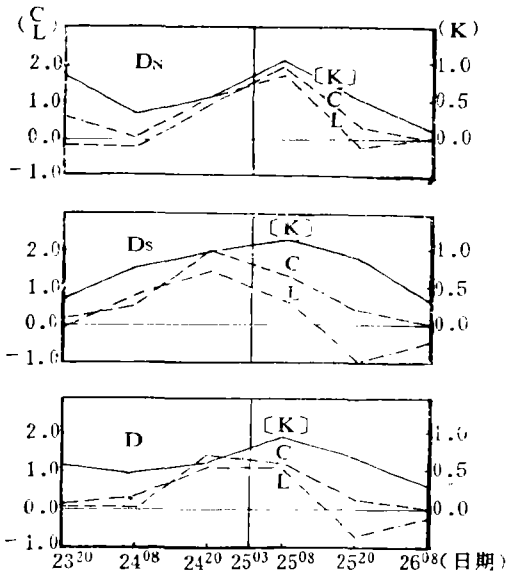


图3 由1000—850 hPa积分的[K], $C = -[\omega^* \alpha^*]$ 和 $L = -[\nabla \cdot \mathbf{V}K]$ 廓线 ([K]为 10^5Jm^{-2} , 其余为 Wm^{-2})

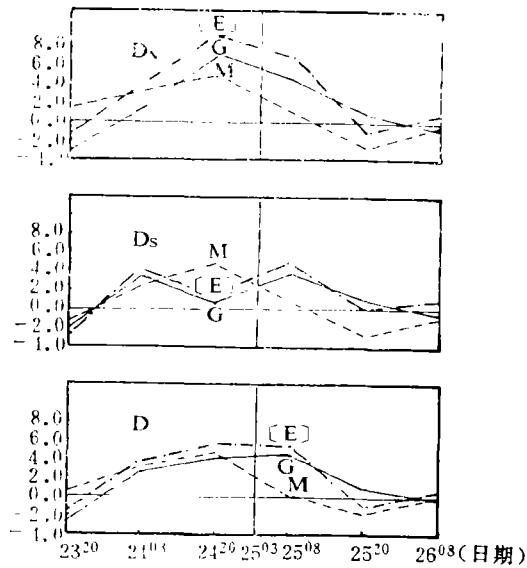


图4 由1000—350 hPa积分的 $G = -[\mathbf{V} \cdot \nabla \phi]$, $M = -[\nabla \cdot \mathbf{V}\phi]$ 和 E 廓线(单位为 Wm^{-2})

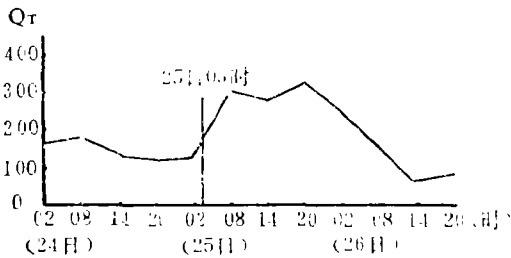


图5 气旋附近千里岩海区感热通量廓线(Wm^{-2})

$$\dot{Q}_T = \rho c_p K(z) [T(0) - T(z)] V(z) \quad (5)$$

式中 $K(z)$ 为10米处的拖曳系数, 取值为0.002. $T(0)$, $T(z)$ 和 $V(z)$ 分别是海面温度、约10米处气温和风速. ρ 近似取值 ρ_0 , c_p 为定压比热. 计算结果如图5所示.

可以看出, 在气旋产生、发展直到移走之前(25日02时), 感热通量保持较大值, 最大值出现在气旋后部的偏北气流里. 然而, 在气旋发展阶段, 感热输送量是巨增的.

仇永炎等^[1]曾设想海面感热通量对500 hPa高度场的影响, 当这种加热场处于槽前时槽加强, 处于槽后时槽衰退. 可以预料, 对处于如图1所示的北支槽下游广大海域都会得出如图5所示的类似结果的. 无疑会导致北支槽进一步加强, 从而促进了渤海次天气尺度气旋的产生和发展.

致谢: 本文得到了仇永炎教授的热情指导和帮助, 朱亚芬同志帮助作了部分计算, 在此谨表衷心谢意.

参 考 文 献

[1] Eddy, A., Kinetic energy production in a mid-latitude storm, *J. Appl. Meteor.*, 2, 4, 569—575, 1965.
 [2] Kung, E. C., et al., Energy transformation in middle latitude disturbances, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101, 793—815, 1975.
 [3] Kung, E. C., Large-scale energy transformation in the intense winter monsoon over the Kuroshio region, *J. Meteor. Soc. Japan*, 55, 498—510, 1977.
 [4] Kung, E. C., Energetics characteristics of the Asian winter monsoon in the source region, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 4, 857—370, 1981.

- [5] Cressman, G. P., Energy transformations in the East Asia—West Pacific jet stream, *Mon. Wea. Rev.*, 112, 3, 563—574, 1984.
- [6] 辛宝恒. 有效位能产生诊断研究的进展, *气象科技*, 6, 1983.
- [7] Johnson, D. R., The available potential energy of storms, *J. Atmos. Sci.*, 27, 727—741, 1970.
- [8] Min, K. D., et al., The generation of available potential energy by sensible heating along the East Coast of Asia and North America, *J. Meteor. Soc. Japan*, 52, 204—217, 1974.
- [9] 仇永炎、陈国范. 洋面加热场和高空波动之间位相差的某些经验关系. *气象学报*, 25, 4, 465—475, 1965.

KINETIC ENERGY PRODUCTION DURING THE DEVELOPMENT OF A SUBSYNOPTIC SCALE BOHAI CYCLONE IN WINTER

Xin Baoheng

Liu Hong

(*Meteorological Institute in Tian jin*)

Abstract

An analysis of the kinetic energy budget for a quickly developmental subsynoptic scale Bohai cyclone is made by using FGGE-III, data for the period 24—25 November 1979.

The results show that net flux of potential energy and kinetic energy across the lateral boundary of vertical column for the area used in this study is divergent, and energy sources needed at the development stages of cyclone disturbance depend mainly on the kinetic energy generation, conversion and the larger scale processes which are not resolved with the given network point area. About wind field intensification within planet boundary layer during the cyclone control, the external energy sources depend mainly on the boundary layer kinetic, potential energy net flux convergence, the internal energy sources depend mainly on kinetic energy generation and kinetic energy conversion.