

# 冬季海上爆发性气旋成因的动力学研究

张永刚 孙成志

(海军大连舰艇学院海洋气象教研室, 大连)

吕美仲 欧阳子济

(空军气象学院动力气象教研室, 南京)

## 摘 要

本文对 1979 年 1 月和 4 月发生于西北太平洋地区的两个爆发性气旋和一个非爆发性气旋, 应用位势涡度和 E-P 通量等进行了诊断分析。分析揭示, 爆发性气旋发生与发展, 不同于普通气旋的动力机制, 它是由于平流层底的涡度异常增大南侵和下旋层对流层扰动、上层冷空气下传形成的上下偶合垂直结构的发展性气旋。其动力主要来自上层强迫和下层的水汽输送产生的大量而集中的凝结潜热。

**关键词:** 爆发性气旋; 位势涡度; E-P 通量; 诊断分析

## 一、引 言

随着人类开发海洋和利用海洋能源所进行海上作业的日益增加, 特别是航海、海洋油气田勘探的需要。必须精细地了解和掌握海上灾害性天气系统。对于西北太平洋来说, 台风是夏秋时节发生频率及危害最大的天气系统。而对于冬季来说, 海上快速发展的爆发性气旋则是近年来发现的最令人可怕的天气系统。因为其发展迅速、强度大, 往往伴随着狂风和巨浪等恶劣天气, 给海上作业带来极大危害。

关于爆发性气旋的研究, 最早是由 Sanders (1980) 给出了定义。其后的这十几年里, 人们对发生于不同海区、不同类型的爆发性气旋, 给予了极大的重视和研究。

关于爆发性气旋发展机制近些年的研究, 大体上可分为两类: 一类是以潜热加热为主

的次天气尺度动力机制,这方面研究的有 Bosart (1981)、Authes (1983)、Reed (1986~1988)、Liou (1987)、李长青 (1989)、Yoshi (1990)、Kuo (1990)、赵其庚 (1994)。另一类是由 Bleck (1974)、Uccellini (1984, 1985, 1986)、Hoskins (1985)、Elsberry (1988) 等人强调以上空对流层顶折叠, 急流动量下传为主要动力机制形成的爆发性气旋。

本文通过位涡和 E-P 通量诊断指出: 爆发性气旋的快速发展, 是由于对流层顶异常增强的位涡环流下旋扰动移到对流层中层斜压带上形成的, 其表现为大量上层较冷空气和动量下传, 使地面斜压增强, 辐合增大, 并且由于上层较冷空气下传后, 其饱和水汽压相对较低, 致使对流层中下层的水汽汇合加大, 当对流层顶闭合涡旋移至低空斜压带气旋之上时, 上下耦合打通就形成了似乎轴对称的爆发性气旋。

## 二、资料介绍

为了对比分析, 共选了 3 个个例, 其中两个是天气尺度的爆发性气旋, 一个是天气尺度的非爆发性气旋。这三个气旋都发生在北太平洋西部洋面上。

第一个爆发性气旋 (1979 年 1 月 17 ~ 21 日 12GMT), 在 1 月 17 日 12GMT 中心气压为 1014hPa, 经过 48h, 于 19 日 12GMT 中心气压降为 956 hPa。48h, 内平均降压率达 1.6 贝吉龙, 其中前 24h 降压率高达 1.8 贝吉龙。

第二个爆发性气旋 (1979 年 4 月 29 ~ 5 月 1 日 12GMT) 在 4 月 30 日 00 GMT 中心气压为 1004hPa, 经 24h 于 5 月 1 日 00GMT 中心气压降为 972hPa, 36h 内平均降压率为 1.8 贝吉龙。

第三个为非爆发性气旋 (1979 年 4 月 23 ~ 26 日 12GMT), 该气旋 72 h 内累加积降压为 26 hpa。但任一时段内平均降压率都远小于 1 贝吉龙。三个气旋移动路径类似, 如图 1 所示, 这三个气旋发展前的高空形势特点与前人描述的类似, 都有高空槽与气旋相伴随, 高空有急流, 对于爆发性气旋它处于急流出口左侧, 在低空有较强的西南气流, 斜压带较强。本文不准备对此详述, 也不准备给出形势图 (在后面的诊断分析中所给出诊断结果平面场都附有风矢, 由此也可看到各层流场演变情况)。这里只想给出一点, 对于爆发性

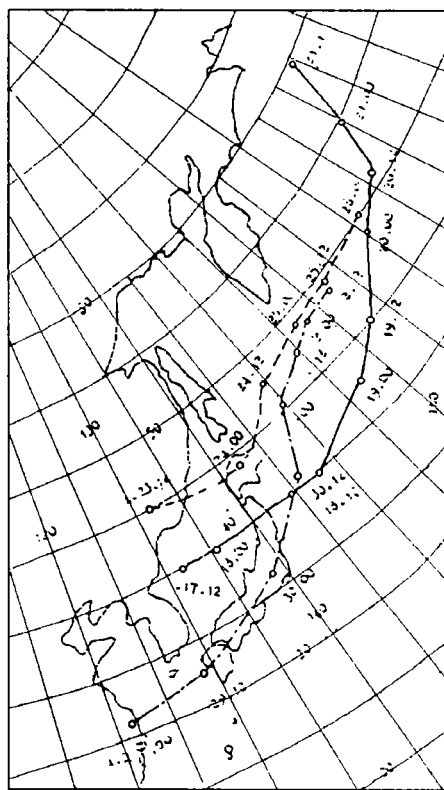


图 1 三个气旋移动路径图

气旋初始时气旋离槽较近，随着气旋发展，槽赶上了气旋而发展成深厚系统。对于非爆发性发展气旋，气旋中心与槽相距较远，在缓慢发展过程中气旋中心与槽之间距离始终保持，甚至到了后期气旋中心远远离槽东去，即气旋相对槽的移动速度加快，这意味着两类气旋高空系统直接垂直耦合的程度是有差别的。

本文采用了 FGGE3B 资料，经纬格距为  $1.875^{\circ}$ ，并用拉格朗日插值法将原资料内插成间隔 50hPa 共 20 层。

三、位涡诊断

位涡是反映流场特征的涡度与反映温度场特征的层结稳定度的组合量，它能综合反映大气运动状态和热力状态的特征。位涡定义为：

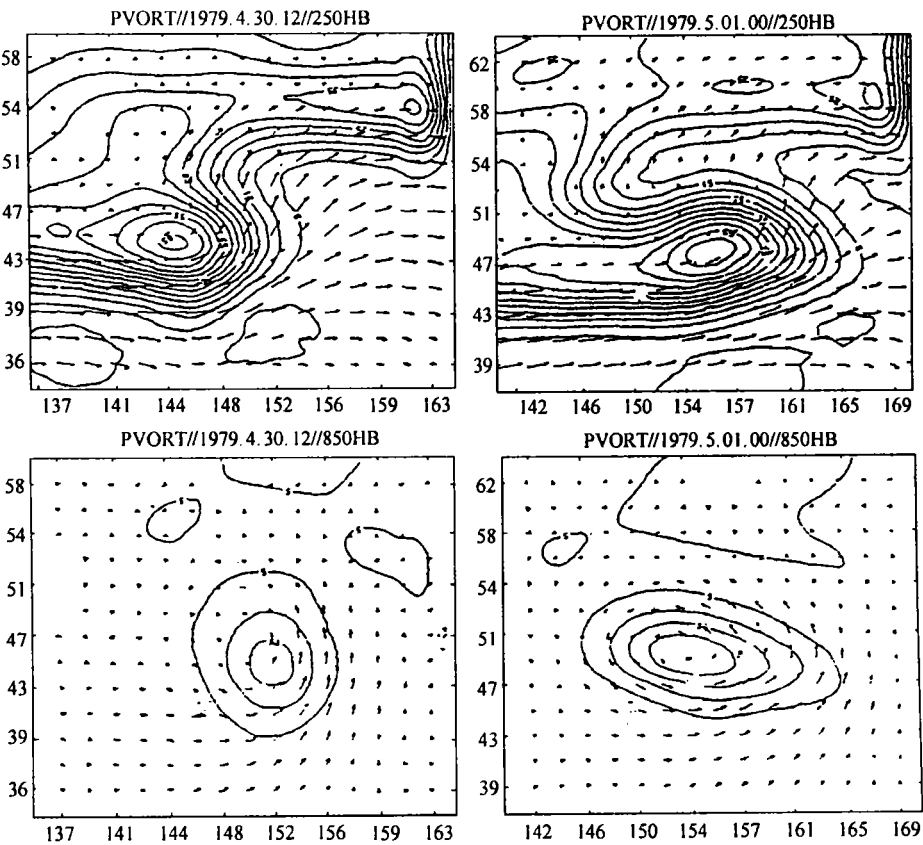


图 2 250MB 和 850MB 初始爆发和爆发强盛时刻的位涡水平分布图，  
图中矢量为风矢

$$P = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial P}$$

仿 Hoskins 定义, 定义一个位涡单位为

$$1PV = 10^{-4} mk / (s^3 \cdot hPa) = 10^{-6} m^2 k / (s \cdot kg)$$

图 2 是 4 月份爆发性气旋在其发展各阶段 250hPa、850hPa 上位涡的演变图。图中的位涡单位取 0.2 PV, 在图中还给出风矢量, 由此可看出流场形势和风速的分布。气旋在爆发性发展初始时刻 (4 月 30 日 12GMT) 与爆发性发展最盛时刻 (5 月 1 日 00GMT), 各层位涡分布有以下特点:

1. 250hPa 上有高位涡区, 它位于急流以北 (这里静力稳定度较高), 地面气旋中心在其东南方向。高位涡区随高空长波槽东移而向南扩展。

2. 在爆发性发展初始时刻及发展最盛时刻, 气旋中心上空 250hPa 上位涡平流很强, 而且强的位涡平流区正好覆盖在 850hPa 气旋中心偏东南方向的西南气流 (即低空斜压带) 之上。

3. 在爆发性发展后期, 250 hPa 高位涡中心并没减弱, 但气旋中心上空位涡平流已减弱, 强位涡平流区已位于气旋中心东北方向。500hPa 上不但高位涡中心强度减弱, 气旋中心上空位涡平流也大大减弱, 850hPa、500hPa 上气旋环流与高位涡区基本重叠在一起, 上下系统打通形成了一个较深的轴对称的气旋性环流系统。

1 月份爆发性气旋的例子, 位涡的分布特点与上述的情况类同。

很多人早就指出高层的位涡平流, 对爆发性气旋的发展具有很强的强迫作用。Hoskins 与 Uccellini 指出对流层以上平流中层异常高位涡区向南下, 沿等熵面发展 (即对流层顶向下伸长折叠), 对爆发性气旋的发展具有重要意义。我们的分析支持上述基本观点, 但我们的分析中可看出, 仅这一点就决定气旋爆发性发展可能还不充分, 应注意到对流层顶向下伸长, 仅当移到低空斜压带之上时, 气旋才能得以快速发展。因为对流层顶向下伸长, 它可强迫气旋发展, 若恰好迭置在斜压带之上, 加上高空较冷空气下沉, 相对饱和水汽压降低使水汽充沛就可引起凝结潜热释放, 并造成中下层位涡的迅速增强。根据 Hoskins 理论, 高值位涡区对应于气旋性环流, 气旋环流向上伸长的厚度正比于位涡系统的水平尺度, 反比于浮力振荡频率, 在这个例子中, 中层正位涡区范围大, 加热集中在中层暖区中, 层结是稳定的。因此, 极有利于气旋性环流向上向下伸长, 使气旋强烈的发展。事实上, 气旋强烈发展时, 高、低层气旋中心就趋于重合了。

我们认为, 高层位涡异常发展使对流层顶向下伸长, 它迭置在低层气旋扰动和斜压带之上, 造成气旋发展并出现强上升运动, 伴随非绝热加热作用使中低层位涡增强, 根据 Hoskins 理论, 强高位涡区伴随有气旋性环流并要向上、向下延伸, 高低层气旋性环流垂直耦合更加紧密, 于是造成气旋爆发性发展, 其发展过程强调了高层动力强迫, 强调了凝结潜热所起的自我激发作用。

此外, 我们对于非爆发性气旋也作了位涡分析, 相比其差异是显著的。对流层顶附近虽有较密集的等位涡线, 但位涡梯度比爆发性气旋小得多, 又无明显闭合的高值位涡中心,

等位涡线与流线走向大体一致,位涡平流较弱。中、下层上也没有明显闭合的高值位涡区,中、下层也没有位涡的明显增长。因此,气旋性环流也就得不到迅速的加强,气旋只是缓慢的发展。

### 3. E-P 通量分析

为了讨论气旋发展过程中基本气流与扰动的相互作用,我们作了 E-P 通量的诊断分析。在球坐标系中波作用量方程为

$$\frac{\partial A_m}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F} = 0$$

其中

$$A_m = \frac{1/2\alpha \cdot \cos\varphi \cdot \bar{q}'^2}{\partial \bar{q}/\alpha \partial \varphi}$$

$$\vec{F} = (F_\varphi, F_p) = (-\alpha \cdot \cos\varphi \bar{u}\bar{v}, f\alpha \cdot \cos\varphi \cdot \overline{\theta'v'} / \bar{\theta}_p)$$

$$\nabla \cdot \vec{F} = \frac{1}{\alpha \cos\varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (F_\varphi \cos\varphi) + \frac{\partial}{\partial p} F_p$$

而  $A_m$  为波作用密度,  $\vec{F}$  为 E-P 通量,  $q'_m$  为扰动位涡,  $\bar{p}$  为基本场位涡,  $\bar{\theta}_p = \partial \bar{\theta} / \partial p$ , 其它符号都是通用的。平均符号 “—” 指沿纬向平均。

波与基本气流相互作用,可用下述方程来定量诊断,其中  $U$  为基本西风气流。

$$\frac{\partial U}{\partial t} - f\bar{V}^* = \frac{1}{\alpha \cos\varphi} \nabla \cdot \vec{F}$$

$$\bar{V}^* = \bar{V} - \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\theta' \bar{V}'}{\bar{\theta}_p} \right)$$

由此可知,当 E-P 通量存在辐合时,其扰动增强,基本西风减速;反之扰动减弱,基本西风加速。

在实际计算中,为方便起见,对 E-P 通量在纬向通道里对质量积分。在  $P$  坐标中,纬向通道中质量元表示为:  $dm = 2\pi \cdot \alpha^2 \cdot g^{-1} \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi dp$

$$\text{由上式有: } \int \nabla \cdot \vec{F} \cdot dm = \int \Delta \cdot d\varphi dp$$

$$\text{其中 } \Delta = \frac{\partial}{\partial \varphi} (2\pi \cdot \alpha \cdot g^{-1} \cdot \cos\varphi \cdot F_\varphi) + \frac{\partial}{\partial p} (2\pi \cdot \alpha^2 \cdot g^{-1} \cdot \cos\varphi \cdot F_p)$$

为使 E-P 通量散度能在  $(\varphi, p)$  平面中清楚地表示出来,仍可以取 E-P 通量散度的形式为  $\Delta$ , 于是 E-P 通量散度重新定义为:

$$(\hat{F}_\varphi, \hat{F}_p) = 2\pi \cdot \alpha^2 \cdot g^{-1} \cdot \cos\varphi \cdot (\alpha^{-1} F_\varphi, F_p)$$

我们采用重新定义表达式计算 E-P 通量散度, 这相当于加上了一个权重因子。

图 3 是爆发性气旋中心的南北垂直剖面 E-P 通量散度图, 图 4 是非爆发性气旋中心的南北垂直剖面 E-P 通量散度图。由图 3 可见, 1 月 10 日 12GMT, 在爆发性气旋为初始发展时期, 在对流层上层开始有 E-P 通量弱的辐合, 11 日 12GMT 时, 气旋爆发性发展时, 从 600hPa ~ 100hPa 都出现 E-P 通量辐合区, 南部上空 200hPa 有强的辐合区中心, 北部低空 500hPa 有弱的辐散区中心。这反映了气旋爆发性发展过程中扰动场能量增强, 基本西风气流减速, 基本气流向扰动传输能量。另一个 4 月份爆发性气旋例子也有类似的特征, 不过一月爆发性气旋例子中, 该气旋发展更强些, E-P 通量的辐合更强。

两个非爆发性发展气旋, 其 E-P 通量辐合较弱, 主要出现在对流层顶 250hPa 附近, 而 E-P 通量辐散 250hPa 很强, 基本气流对于气旋发展不但不能提供能量, 而且还要向扰动吸取能量, 气旋为西风加速提供能量。图 4 是我们对 11 月份发生于我国东北地区的非爆发性北方气旋的 E-P 通量诊断, 也发现有同样的现象。

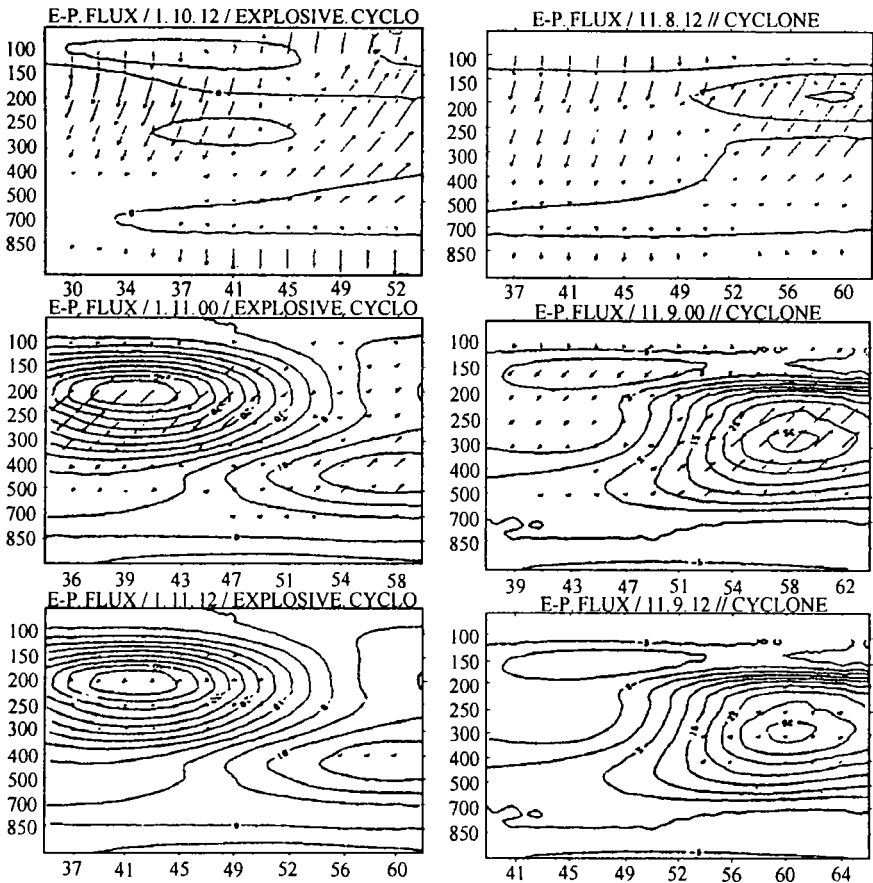


图 3 是爆发性气旋中心的南北垂直剖面 E-P 通量散度图 (单位:  $2.5 \times 10^{-5} \text{m}^3$ )

图 4 是非爆发性气旋中心的南北垂直剖面 E-P 通量散度图 (单位:  $1.0 \times 10^{-5} \text{m}^3$ )

总之,对于爆发性气旋来说。在其发展过程中,基本气流与扰动的相互作用是重要的。与非爆发性气旋的对比也可看出,爆发性气旋辐合通量是以中上空偏北下沉为主,而非爆发性气旋则是以辐合通量偏南中下层上升为主。

## 五、结 语

由位涡诊断分析,我们发现爆发性发展气旋与对流层顶向下伸长、折叠有关。我们还发现,由于凝结潜热释放而引起中层位涡增强对气旋爆发性发展有重要意义。因此我们认为 Hoskins 和 Uccellini 等提出的与平流层位涡异常发展相伴随的对流层顶向下伸展,它迭置在低层扰动之上,将导致气旋爆发性发展的观点是有意义的。这揭示了爆发性气旋发展与平流层和对流层之间相互作用联系在一起。由 E-P 通量诊断分析也可知,对于爆发性气旋,扰动场与基本场存在着很强的相互作用,平均气流为扰动发展提供了能量,在爆发性发展过程中平均西风减弱,而扰动增强。这两个例子中,大尺度凝结加热都是重要的,且最大加热中心出现在中层,使得中层位涡大大增强,由于层结是稳定的,高位涡区水平尺度也较大,因而与高层高位涡区伴随的气旋性环流向下伸展。因向下伸展的气旋性环流使地面气旋环流增强,这样就导致了气旋爆发性发展成为一个中心轴线近于垂直深厚的强低压系统。

从本文诊断结果可以发现,爆发性气旋产生虽然与潜热加热存在密切关系。但主要是由于对流层顶的折叠产生动量下传,当对流层顶涡旋移至低空气旋上空时,垂直耦合打通形成了突发性发展。从这一点上也可推断出,为什么许多数值模式无法良好的预报出爆发性发展,这可能是由于大多数模式都把大气上边界取为对流层顶并且为刚壁边界条件的缘故。

## 参 考 文 献

- [1] Sanders F. and J. R. Gyakam. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". Mon. Wea. Rev, 1980, 108, 1589~1606.
- [2] Roebber P. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones. Mon. Wea. Rev, 1984, 112, 1577~1589.
- [3] Anthes R. A., Y—H. kuo and J. R. Gyakum. Numerical simulations of a case of explosive marine cyclogenesis. Mon. Wea. Rev, 1983, 111, 1174~1188.
- [4] Reed R. J and M. D. Albright. A case study of explosive cyclogenesis in the eastern Pacific. Mon. Wea. Rev, 1986, 114, 2297~2319.
- [5] Liou C. S. and R. L. Elsberry. Heat budgets of analysis and forecasts of an explosive deepening maritime cyclone. Mon. Wea. Rev, 1987, 115, 1809~1824.
- [6] Bleck R. Short-range prediction in isentropic coordinates with filtered and unfiltered numerical model. Mon. Wea. Rev, 1974, 102, 813~829.
- [7] Bosar L. F. The President's Day snowstorm of 18~19 February 1981, A subsynoptic-scale event. 1979. Mon. Wea. Rev, 1981, 109, 1542~1566.
- [8] Uccellini L. W. The possible influence of upstream upper-level baroclinic processes on the development of the QEII storm. Mon. Wea. Rev, 1986, 114, 1019~1027.
- [9] ----- P. J. Kocm, ets. 1984, The Presidents Day Cyclone of 18~19 February 1984, Synoptic of view and analysis of the Subtropical jet streak influencing the pre-cyclogenetic Period. Mon. Wea. Rev, 1979, 112, 31~55.

- [10] ---- D. Keyser et al. The President's Day Cyclone of 18 ~ 19 February 1985, Amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, 113, 962 ~ 988.
- [11] Hoskins B. J. et al., On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1985, 111, 877 ~ 946.
- [12] Lange O. S. Workshop oceanic storm-September 1986. 1985. Canadian Meteorological and Oceanographic society newsletter, 1985, 14, 6 ~ 7.
- [13] Elsberry R. L. Upper-Level forcing of explosive cyclogenesis over the Ocean Based on operationally analyzed fields, weather and forecasting, 1988, 3, 205 ~ 206.
- [14] Yoshi OGURA and Hann-Ming et al. A case study of rapid cyclogenesis over Canada, Part I: Diagnostic study. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 118, 655 ~ 672.
- [15] Y-H Kuo and Simon low-Lam Prediction of Nine explosive cyclones over the western Atlantic Ocean with a Reymal Model, *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 118, 3 ~ 25.
- [16] Reed J. R. et al. The role of Latent Heat Release in explosive cyclogenesis, There example based on ECMWF Operational forecasts. *weather and Forecasting*, 1988, 3, 217 ~ 229.
- [17] Andrews D. G. and McInty M. E. Planetary waves in Horizontal and vertical shear, The Generalized Eliassen-Palm Relations and Mean Zonal Accelerations, *J. A. S.* 1976, 33, 2031 ~ 2047.
- [18] Edmon H. J. and Hoskins B. J. Eliassen-Palm Cross sections for the troposphere, *J. A. S.* 1980, 137, 2600 ~ 2616.
- [19] 李长青, 丁一汇. 西北太平洋爆发性气旋的诊断分析. *气象学报*, 1989, 47, 180 ~ 190.
- [20] 赵其庚等. 一个温带海洋气旋爆发性发展的动力学分析. *海洋学报*, 1994, 16, 30 ~ 37.
- [21] 张永刚, 李玉成. 促进线性频散特征 "Boussinesq 方程". *力学学报*, 1997, (2):



## A DYNAMIC STUDY OF OCEAN EXPLOSIVE CYCLOGENESIS DEVELOPMENTS

Zhang Yonggang      Shun Chengzhi

*(Dalian Naval Academy Ocean Weather Center, Dalian )*

Lu Meizhong      Ouyang Ziji

*(Force Weather Academy Dynamic Weather Center, Nanjing )*

### Abstract

A diagnostic analysis of both two explosive cyclogenesis and a general cyclone over western-northern pacific ocean in 1979 is studied by both potential vorticity and E-P flux. The analysis results demonstrate that explosive cyclogenesis development mechanism is stratosphere lower-level abnormal increase cold vorticity moving to southern and disturbance convective layer baroclinic band, and upper-level colder air flow down, upper-lower couple developing. The main dynamic mechanism is upper-layer force action and lower-layer aqueous vapour transports production large-convergence condensation latent heat.

**Key words:** explosive cyclogenesis; potential vorticity, E-P flux; diagnostic analysis