

# 不同垂直加热率对爆发性气旋发展的影响<sup>\*</sup>

徐祥德 丁一汇 解以扬

(中国气象科学研究院,北京,100081) (天津市气象台,天津,300074)

仪清菊

(中国气象科学研究院,北京,100081)

## 摘 要

文章着眼于海洋温带气旋爆发性发展热力结构的影响效应问题。通过数值试验的结果表明,温带气旋发展状况对于垂直加热廓线分布具有突出的敏感性,若将垂直加热廓线“形变”,则可能导致海洋气旋的爆发性发展,并构成类似观测到的“气象炸弹”动力、热力结构,即“上干下湿”,“上冷下暖”的不稳定层结或“抽吸”结构,急流轴“断裂”形成的非地转偏差特征。从而揭示了垂直加热廓线特征在海洋气旋发展诸影响因子中的关键作用以及潜热释放分布与海洋气旋动力、热力结构形成的机理。

**关键词:** 垂直加热率,爆发性气旋,海洋气旋。

## 1 引 言

由于海洋风暴业务预报的困难,近年来,海洋“炸弹”气旋研究已成为海洋界、气象界的“热点”之一。但“炸弹”气旋的成因,尤其它的触发机制却是一个值得探讨的难题。

积云对流在热带气旋或海洋气旋整个生命中都起着重要作用。凝结潜热释放对于天气尺度的海洋气旋的发展有着显著贡献。对于海洋气旋有限区域,可将积云效应的大尺度热量和水汽方程写为

$$Q_1(x, y, p, t) = \frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{S} \bar{v} + \frac{\partial \bar{S} \bar{\omega}}{\partial p} = Q_R + L(\bar{c} - \bar{e}) - \frac{\partial \bar{S} \bar{\omega}}{\partial p} \quad (1)$$

$$Q_2(x, y, p, t) = -L \left( \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} \bar{v} + \frac{\partial \bar{q} \bar{\omega}}{\partial p} \right) = L(\bar{c} - \bar{e}) + L \frac{\partial \bar{q} \bar{\omega}}{\partial p} \quad (2)$$

式中“—”表示对海洋气旋区域的平均值,“ $\bar{\quad}$ ”表示对该区域平均的偏差值。 $S$  是干静力能, $Q_R$  是辐射加热率, $C$  是凝结率, $e$  是蒸发率, $q$  是水汽混合比, $Q_1$ 、 $Q_2$  分别表示海洋气旋区域的视热源和视水汽汇,式(1)、(2)右端项亦反映 $Q_1$ 由辐射冷却,净水汽凝结和由积云与乱流产生的小尺度涡旋垂直输送所决定; $Q_2$ 则决定于净的水汽凝结和积云等小尺度垂直输送。由此可见,积云对流的垂直运动对 $Q_1$ 、 $Q_2$ 分布特征有着明显的影响效应。由上式可

\* 初稿时间:1993年8月11日;修改稿时间:1994年1月8日。

资助课题:“八五”国家攻关项目(906—07)资助。

知,凝结潜热释放因素的时空分布对于天气尺度的海洋气旋热力结构的影响关系式可简写为

$$\left[ \begin{array}{c} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial \bar{q}}{\partial \alpha} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \mathcal{L}(\bar{T}, \bar{v}, Q_1(x, y, p, t)) \\ \mathcal{R}(\bar{q}, \bar{v}, Q_2(x, y, p, t)) \end{array} \right] \quad (3)$$

式(3)表明,凝结潜热释放因素  $Q_1, Q_2$  时空分布特征亦是海洋气旋发展的关键环节。对比热带气旋,深对流系统与温带海洋气旋加热结构可知,两者垂直分布特征存在着显著差异。Charney 和 Eliassen<sup>[1]</sup>提出用第二类条件不稳定机制(CISK)来解释热带气旋的发生、发展。此类热带气旋发展的概念模型,即为 CISK 机制的自激反馈效应,其热力强迫结构是基于最大加热层次位置偏高,即位于对流层上层;对于温带气旋爆发机制中的加热廓线特征及其气旋发展概念模型,Danard<sup>[2]</sup>指出,潜热释放造成低层最大辐合量是干绝热过程引起的辐合量的三倍。Nitta 和 Oqura<sup>[3]</sup>, Tokioka<sup>[4]</sup>的工作都揭示了与斜压强迫相关联的潜热释放对温带气旋发展的贡献。仪清菊,丁一汇<sup>[5]</sup>分析了温带气旋初生、爆发和成熟阶段加热场的演变,并指出,海洋气旋初生和爆发时刻,  $Q_1$  项低层加热显著;爆发阶段,对流层中层(500hPa)加热达到最强;成熟期加热极值层次则位于对流层上层(200hPa)。由  $Q_2$  垂直分布可发现,初生期,对流层中层是正值,高层和低层以负值为主。在爆发时有明显的转变,200hPa 以下各层均为正值(水汽),并在 700—500hPa 内达到最强。由上述分析结果可知,与热带气旋或台风系统相比,海洋爆发性气旋  $Q_1, Q_2$  最大加热层次明显偏低。这两类系统  $Q_1, Q_2$  最大加热层次显著差异的形成除了与冬、夏季节背景有关外,很大程度上与两类系统凝结潜热释放机制有关,即热带气旋爆发性发展阶段次级环流的增强与积云对流的 CISK 机制密切联系,而温带气旋爆发阶段次级环流的增加或潜热释放过程则与环境场斜压特征,锋面层云结构,即锋面气旋斜压能量转换有关。

因此,探讨海洋爆发性气旋对大气热量,水汽湍流通量垂直“分配比例”廓线的响应问题有着重要的现实意义。这个问题的研究,将有助于对海洋气旋爆发机理及其概念模型认识的深化,也可为研制海洋气旋数值预报模式提供新的设计思路。

## 2 模式试验方案与选例资料

本文采用 PSU 中尺度数值模式<sup>[6]</sup>,模式网格范围取  $31 \times 25$ ,格距为 150km,垂直层次为地面、850、700、500、400、300、200、150hPa。模式采用兰勃脱保角投影,垂直坐标取  $\sigma$  坐标,主要物理过程包括 Kuo-Anthes 积云对流参数化方案,次网格水平扩散,行星边界层物理过程有关方案。数值试验采用不同垂直加热廓线特征的积云对流参数化方案(见附表)。其中(1)、(2)为两个个例。

附表 各类方案最大加热层及其潜热、感热通量及水汽湍流垂直通量系数  $N_h, N_f$  值

个例(1) 个例(2)	A	B	C	D	E	F
	A	B		C		
加热极值层	600(hPa)	400(hPa)	500(hPa)	300hPa	400hPa	600hPa
$N_h, N_f$	$N_h \times 1$	$N_h \times 1$	$N_h \times 1$	$N_h \times 1$	$N_h \times 1.5$	$N_h \times 1.5$
	$N_f \times 1$	$N_f \times 1$	$N_f \times 1$	$N_f \times 1$	$N_f \times 1.5$	$N_f \times 1.5$

本文选取的个例(1)为 1979 年 3 月,个例(2)为同年 11 月,这两个海洋气旋的移动路径相似,即从日本岛大阪以东沿海出发,24h 内气旋迅速加深并移至日本岛中部以东海域,如图 1a,b 所示。但加深率不同,前者 24h 最大降压为 22hPa,后者 12h 最大降压为 14hPa,气旋的最低气压极值分别为 980,986hPa。

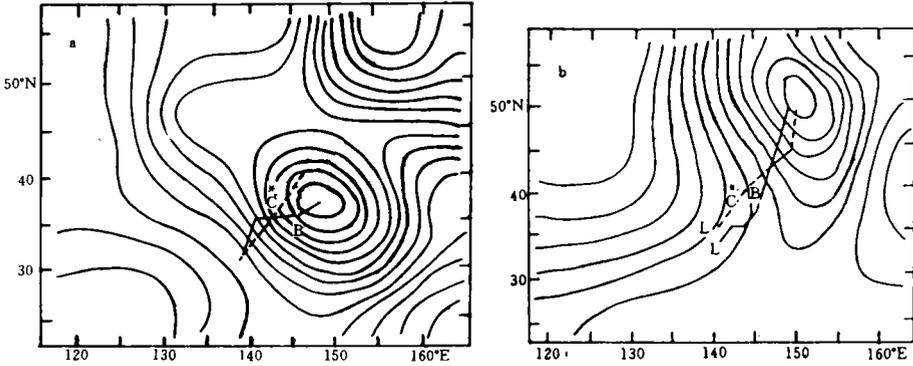


图 1 数值模式模拟海洋气旋移动路径与实况  
(a,1979 年 3 月个例;b,1978 年 11 月个例)

本文数值试验方案初始场资料取 1979 年 3 月 24 日 20 时,11 月 11 日 08 时欧洲中心(ECMWF), $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经、纬度网格点。

### 3 海洋气旋动力结构特征

海洋气旋初生阶段出现于大气低层,此阶段仅属于次天气尺度,其发展阶段则成为整个对流层或更深厚的大尺度温带气旋,此发展过程斜压不稳定和第二类条件不稳定(CISK)机制都起着关键作用。

海洋气旋爆发阶段凝结加热与垂直运动分布的诊断分析<sup>[5]</sup>表明, $Q_2$ 垂直时间剖面图与垂直运动剖面图分布特征十分相似,尤其垂直运动最强位置可近似作为凝结潜热释放极值层次。

考虑凝结加热  $Q_c$  与垂直运动或水汽分布的近似关系,可写如下形式:

$$Q_c(p) \approx -L_c \frac{\partial q_s(p)}{\partial p} \omega(p)$$

由上式可知,凝结加热  $Q_c$  与水汽垂直梯度,垂直运动存在着显著的相关。

对比海洋爆发性气旋和台风的垂直运动剖面图<sup>[5,6]</sup>可以发现,冬、春季海洋气旋垂直运动  $\omega_{max}$  发生在对流层中下层(600hPa);夏季台风垂直上升运动极值位于对流层上层(400hPa)。这表明,台风与海洋气旋发展的动力结构显著不同,且 CISK 机制的触发因子亦有差别。Rasmussen 从理论上解释为,当冷锋通过暖的下垫面时,形成的大气位势不稳定可导致类似 CISK 机制的发生,从而促使气旋强烈发展。值得注意的是,这类锋面附近动力、热力强迫所激发的次级环流或上升运动构成的 CISK 机制过程与台风积云对流自

激反馈效应既有区别又有相似之处,尤其与垂直运动结构相关的凝结加热廓线亦有显著差异。本文试图探讨这类热力强迫结构的“变异”与海洋气旋“爆发性发展”的关系。

从个例(1)(1979年3月24日20时初始场)海洋气旋区域动力、热力垂直结构亦可发现(图2和图3),海洋气旋垂直上升运动极值( $\omega_{max}$ )亦发生在对流层中、下层(600hPa),且同另一个例(2)(同年11月11日)的 $\omega$ 分布类似(图略)。值得注意的是,海洋气旋区域(中心“L”),600hPa层次有一对上升与下沉的极值中心,即近似于次级垂直环流(图2a),此次级垂直环流恰与温度垂直剖面图锋区配置(图2b)。上述诊断分析结果反映了海洋气旋锋面次级环流特征及其凝结加热机制中动力、热力结构。

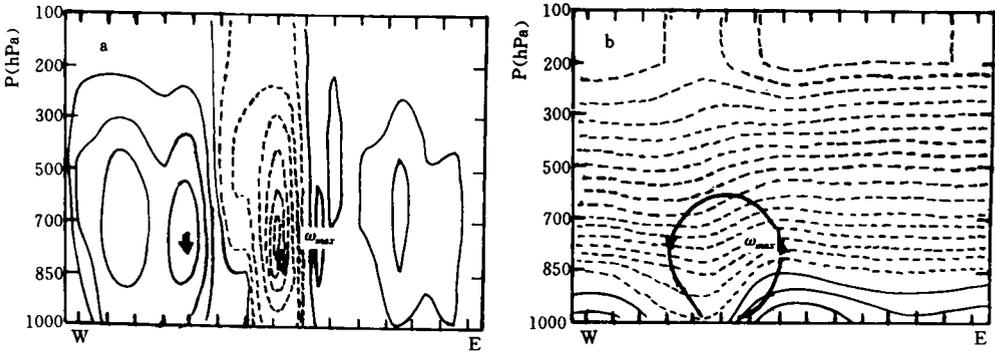


图2 个例(1)W—E垂直剖面图(实况)  
(a,垂直运动;b,温度)

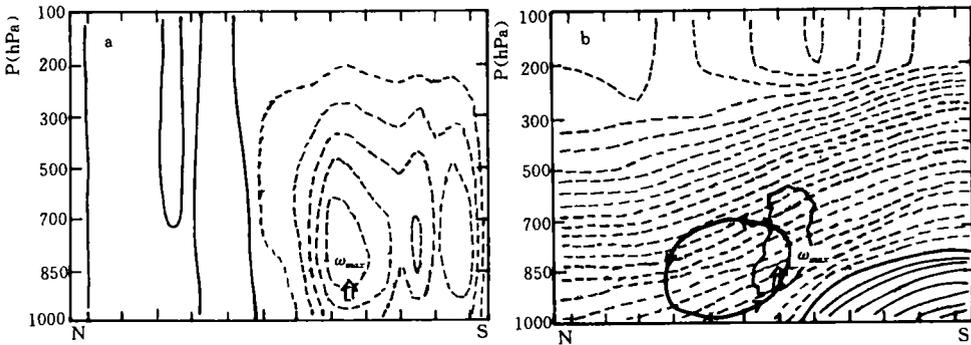


图3 (a)个例(1)N—S垂直运动剖面图(实况),(b)个例(1)N—S温度垂直结构(实况)

#### 4 海洋气旋“爆发性”特征与热力强迫垂直结构的相关

上述海洋气旋与热带气旋动力、热力结构的差异揭示了两者的潜热释放机制及其加热结构的区别。Hayashi 和 Golder<sup>[7]</sup>从一般干、湿模式的对比试验发现,潜热释放使静力稳定度减小,促使斜压不稳定增长,有利于气旋的发展,然而在潜热释放中,对流活动又占很重要的地位。正如 Bosart 指出的,积云对流的总体作用加上斜压过程是导致气旋爆发性

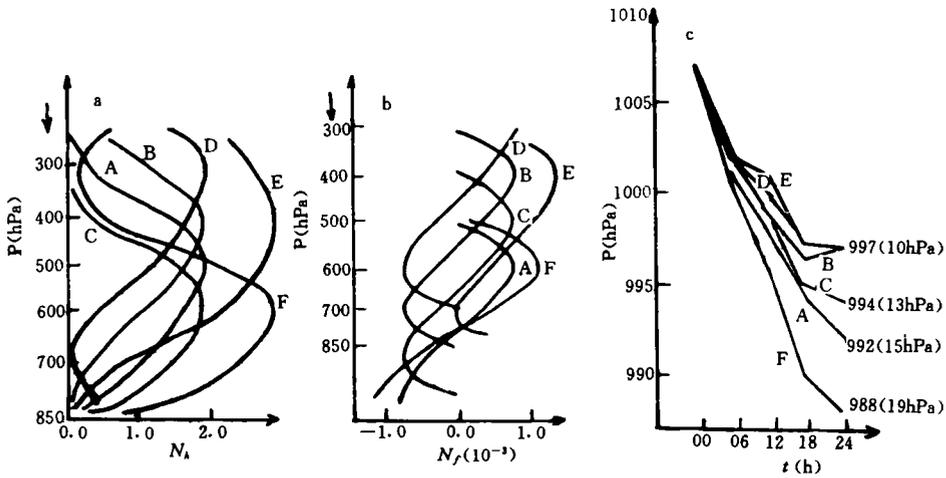


图 4 一个例(1)各试验方案的模拟结果

(a,各试验方案  $N_k$  廓线;b,各试验方案  $N_f$  廓线;c,各试验方案模拟气旋强度演变特征)

发展的强迫机制。因此,海洋气旋发展初期伴随斜压结构次级环流的潜热释放加热廓线可能与热带气旋,深对流系统有着显著差异,即加热廓线抛物线顶点产生向下位移趋势。本文数值试验结果表明(图 4),当  $N_k, N_f$  抛物廓线顶点位于对流层中下层(600hPa),海洋气旋最大日降压值为 15hPa ( $\frac{\Delta p_M}{\Delta p_M^*} \approx 7/10$ );当  $N_k, N_f$  抛物廓线顶点位于对流层上层(400hPa),海洋气旋最大日降压值反而减小为 10hPa ( $\frac{\Delta p_M}{\Delta p_M^*} \approx 5/10$ );若将垂直廓线顶点移至对流层中下层,且加大  $N_k, N_f$  系数,海洋气旋最大日降压值可增大到 19hPa ( $\frac{\Delta p_M}{\Delta p_M^*} \approx 9/10$ );但若抛物线顶点位于对流层上层加大  $N_k, N_f$  系数,结果却并不能使海洋气旋加深。以上模拟结果表明,海洋气旋上空与潜热释放相关的加热廓线抛物线顶点位置(即最大加热层次位置)是诱发气旋爆发性发展的关键因子,而潜热释放总量,即加热程度居次要地位。海洋气旋最大加热层次偏低有利于气旋爆发性发展现象,揭示出气旋低层锋面上凝结潜热释放及其次级环流起着触发因素的作用。

个例(2)(1979年11月11日08时为初始场)的三类试验方案(A、B、C)模拟气旋强度的结果(图略),与个例(1)相似,即方案(A)加热廓线最大加热层下降至600hPa,模拟12h降压值为8hPa ( $\frac{\Delta p_M}{\Delta p_M^*} \approx 4/7$ );模拟24h降压值为13hPa ( $\frac{\Delta p_M}{\Delta p_M^*} \approx 12/13$ ),日降压值接近实况。方案(B)、(C)加热廓线最大加热层次分别为400hPa、300hPa,模拟12h降压值分别减小为6hPa、4hPa,与实况比例为 $\frac{3}{7}, \frac{2}{7}$ ;模拟24h降压值仍为6hPa、4hPa,与实况比例为 $\frac{6}{13}, \frac{4}{13}$ ,日降压值与实况相差甚远。

## 5 加热廓线“形变”与“爆发型”不稳定结构

海洋气旋的爆发阶段往往与层结不稳定的触发因子相关。丁一汇、仪清菊的研究工作表明,海洋气旋的加强和成熟,温度场的垂直结构在爆发日前后有明显变化,其主要表现为对流层中下层温度有明显下降,而300hPa以上温度是增加的,其结果温度场的垂直分布在气旋爆发前后相反。在爆发前是“下暖上冷”,爆发后是“下冷上暖”,显然其温度层结是由较不稳定的状态逐渐演变成较稳定状态<sup>[5]</sup>。本节侧重于讨论加热廓线变化与层结稳定性状况的相关关系。数值试验结果表明,若采用方案(A),模式积分24h,海洋气旋变温、变湿垂直剖面呈显著“上冷下暖”,“上干下湿”热力不稳定结构(图5,6)。对比用方案(A)与(B)模拟的温、湿垂直结构可知,加热廓线最大加热层由400hPa下移至600hPa可导致对流层中、下层明显地增暖、增湿,尤其S—N, E—W垂直剖面(A)、(B)两方案温、湿偏差图上(图5b, 6b)“上冷下暖”、“上干下湿”的分布十分显著,这一模拟结果与气旋实况是一致的(图略)。这些模拟也反映了气旋的温、湿不稳定结构特征可能与锋面附近低层热力强迫、潜热释放有关。

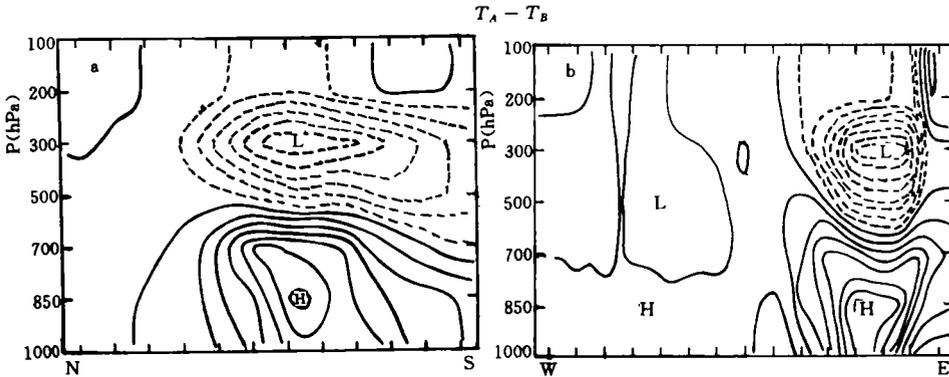


图5 A、B方案温度偏差垂直剖面图  
(a, N—S; b, W—E)

## 6 流场非地转动力结构对系统热力强迫的响应

海洋气旋爆发阶段,该区域可能发生强非地转动力结构,即高层最强的散度和垂直上升运动恰恰是在气旋发展速度最快的时刻,而不是中心气压降到最低时刻。本文试验结果亦表明,类似 Pumping 效应的上层强散度动力特征与系统热力强迫密切相关。

对比方案(A)与(B)模拟的流场可知,模式积分24h,由于加热廓线特征不同,海洋气旋区域高、低层散度结构差异显著,即方案(A)加热廓线抛物线顶点下移,高层辐散明显,低层辐合亦明显;而方案(B),高、低层散度差异小(如图7所示)。

由以上模拟结果可知,海洋气旋热力强迫垂直结构差异可导致动力结构演变的显著不同特征,可以认为热力强迫及其垂直结构起着气旋爆发性发展的触发作用。

另一方面,爆发性气旋的发生往往与高层特定的西风急流类型有关(高空急流轴及其分布),而上述高层强辐散特征(Pumping 效应)可能也与高空急流分布有关。由图8可见,

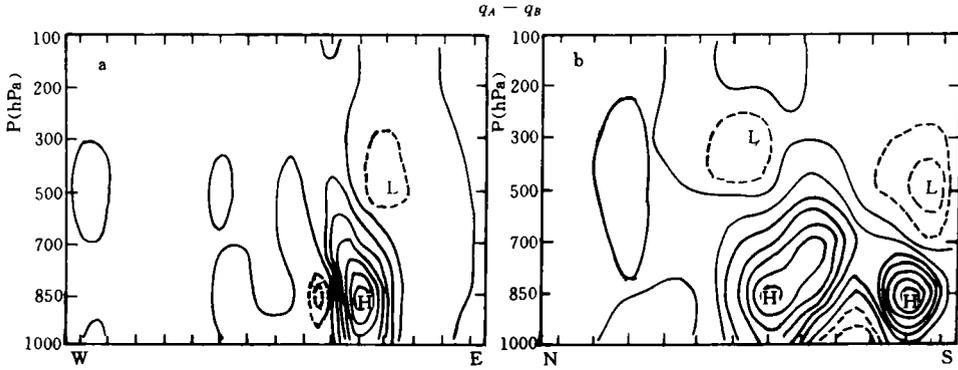


图 6 A、B 方案湿度偏差垂直剖面图  
(a, W-E; b, N-S)

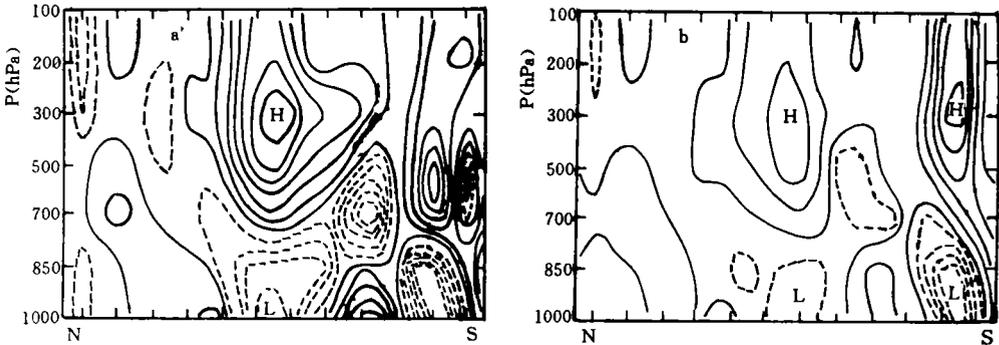


图 7 24h 与 0 时刻模拟散度偏差垂直剖面图  
(a, 方案(A); b, 方案(B))

方案(A)(加热廓线抛物线顶点下移),模式积分 24h200hPa 高空急流“断裂”显著,海洋气旋中心位于南支急流出口区北侧,北支急流入口区南侧(图 8b),且与个例(1)实际风速场特征(图 8a)相似。若采用方案(B),则上述高空急流特征并不显著(图略)。

由急流轴非地转分布动力模型(图 9)可知,上述模拟结果(图 8b)有关急流轴“断裂”特征可构成“叠加”的高空横向质量辐散区,即两个急流核之间非地转( $V_{ag}$ )构成的高空动力辐散区与低层辐合区相对应,有利于“抽吸”效应。

### 7 热力强迫结构与海洋气旋斜压波发展模型

气旋发展的概念模型强调了气旋斜压波发展因素。Anthes<sup>[8]</sup>等研究结果指出,对流层低层的斜压不稳定性对海洋气旋初期的发展是主要的,而潜热释放则是气旋后期发展的一个重要因素。根据动力不稳定理论,斜压不稳定被认为是中纬度天气尺度系统的主要启动机制。气旋发生的统计表明,爆发性气旋发生的高频区也是斜压区,因而斜压过程可能是温带低压发生和发展的前提条件。

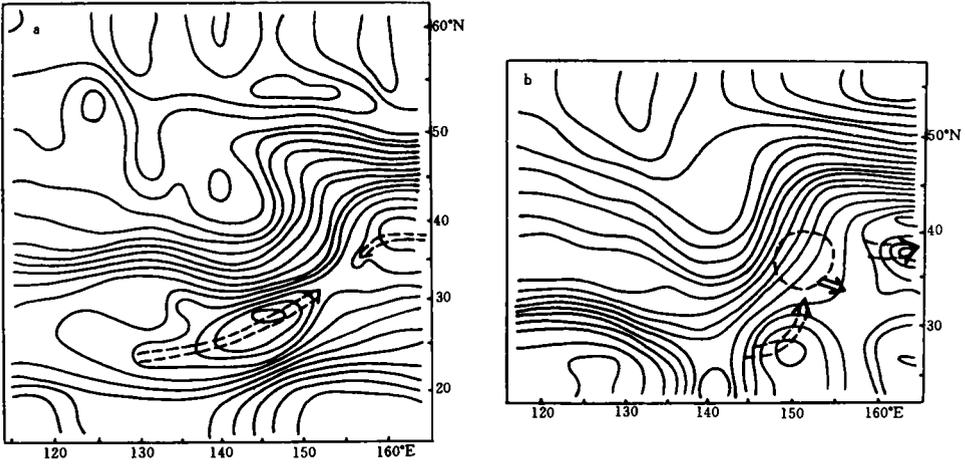


图8 200hPa 风场

(a, 实况; b, 24h 模拟结果。实线为等风速线, 双虚线为急流轴)

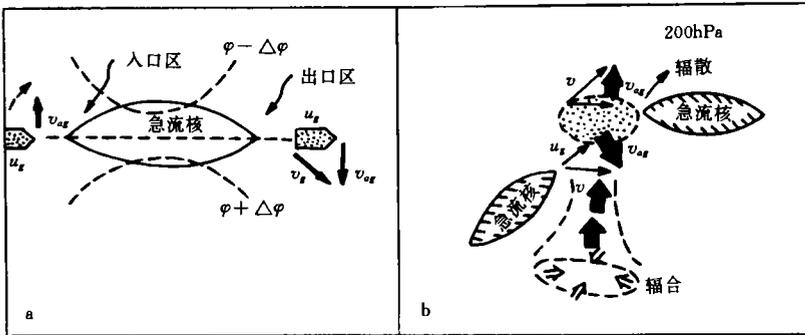


图9 急流非地转分布的动力模型

(a, 水平分布; b, 垂直分布)

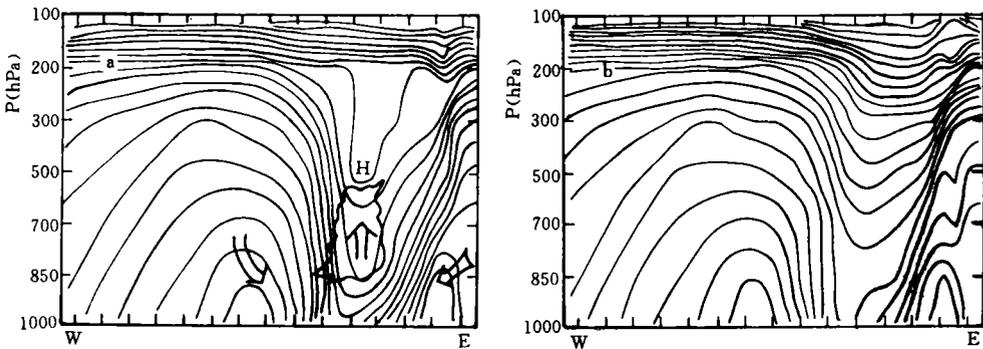


图10 模式积分 24h 模拟假相当位温垂直剖面图

(a, 方案 A; b 方案 B)

图 10a, b 分别为方案(A), (B)模式积分 24h, 模拟假相当位温垂直剖面图, 从图 10 可以发现, 不同热力强迫结构条件下模拟的锋面结构有显著差异, 方案(A)斜压波剖面图中锋面波动较方案(B)明显得多, 这表明热力强迫结构的变化可触发斜压波动结构及其不稳定层结的显著发展, 揭示了海洋气旋爆发阶段潜热释放与动力、热力结构特征的相关关系。

## 8 结 语

综上所述, 积云对流总体效应对于热带气旋或海洋气旋爆发性发展均起着关键作用, 但两者积云对流产生的加热结构存在显著差异。因此, 加热廓线特征作为“固定模型”显然并不能反映不同动力、热力结构的气旋发展机制, 尤其海洋爆发性气旋对于垂直加热廓线“形变”十分敏感。本文研究结果表明, 随着卫星、雷达等探测技术的发展, 对于各类气旋系统区域垂直加热廓线特征分布的客观测定已具备可行的条件, 即垂直加热廓线的客观程度以及对流参数化方案将有更大程度的改善, 这对海洋爆发性气旋的预报与理论研究均有显著的现实意义。

## 参考文献

- [ 1 ] Charney J G and Eliassen A. On the growth of the hurricane depression. *J Atmos Sci.* 1964. 21: 68—75.
- [ 2 ] Danard M B. On the influence of released latent heat on cyclone development. *J Appl Met.* 1964. 3: 27—37.
- [ 3 ] Nitta T and Ogura Y. Numerical simulation of the development of the intermediate scale cyclone in the moist model atmosphere. *J Atmos Sci.* 1972. 29: 1011—1024.
- [ 4 ] Tokioka T. A stability study of medium-scale disturbance with the inclusion of convection effects. *J Meteor Soc. Japan.* 1973. 51: 1—10.
- [ 5 ] 仪清菊, 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 ] Wang Pengyun, Xu Zixiu and Pan Zaitao. A case study of warm sector rainbands in North China. *Adv Atmos Sci.* 1990. 7(3): 354—365.
- [ 7 ] Hayashi Y and Golder D G. The effects of condensational heating on midlatitude transient waves in their mature stage: control experiment with a GFDL general circulation model. *J Atmos Sci.* 1981. 38. 2532—2539.
- [ 8 ] Anthes R A, Kuo Y H and Gyakum J R. Numerical simulations of a case of explosive marine cyclogenesis. *Mon Wea Rev.* 1983. 111. 1174—1188.

# THE EFFECT OF DIFFERENT VERTICAL HEATING RATES ON THE DEVELOPMENT OF THE EXPLOSIVE CYCLONE

Xu Xiangde      Ding Yihui

*(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)*

Xie Yiyang

*(Tianjing Meteorological Observatory, Tianjing, 300074)*

Yi Qingju

*(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)*

## Abstract

In this paper, the principal results are the following: the explosively deepening of marine cyclone is very sensitivity for the vertical heating profile, if the profile is adjusted to the suitable state, the explosive development of the cyclone appears and the thermodynamic struction of the cyclone or the state of upper jet stream in the model is similar to observational fact. This suggest that the state of the vertical heating profile plays an important role in explosively deepening of marine extratropical cyclone.

**Key words:** Vertical heating rate, Explosive cyclone, Marine cyclone.