

1993 年初夏中国东部沿海爆发性气旋 形成条件的数值模拟试验

杨福全

(中国气象局培训中心, 北京, 100081)

摘 要

文中利用 PSU/NCAR 中尺度模式 MM4 对 1993 年 6 月初发生在中国东部沿海地区的一次爆发性气旋进行了数值试验。结果表明: 初夏季节在中国东部沿海气旋爆发性发展必须具备下面两个条件: (1) 高空南北支急流中分别存在发展的低槽系统, 北部低槽伴有冷空气, 南部低槽伴有强暖湿空气, 两低槽在中国东部沿海合并后形成一个深槽, 引起地面气旋爆发性发展; (2) 东部沿海对流层低层形成一个强水汽通道, 这个水汽通道将携带的大量和能量的暖湿空气向气旋爆发地区输送。

关键词: 爆发性气旋; 南北低槽合并; 强水汽通道。

1 引 言

在中高纬度的洋面或者陆地上, 一些温带气旋在条件适宜的情况下可以得到爆发性发展。这些爆发性气旋的产生不仅在地理位置上明显的密集性, 而且在时间上也具有相对的集中性^[1]。东亚地区爆发性气旋在冬季以 12, 1, 2 月份为最多, 而北美地区的爆发性气旋在 1 月份为最多^[2, 3]。近年来的数值模拟结果表明, 高空的槽脊结构、急流、低层锋面和急流、潜热释放、边界层中的显热与潜热通量的输送都可能是爆发性气旋发展的必要条件, 但是都不能独立导致气旋的爆发性发展。在某一对较小区域的较短时间内的各种因素的非线性相互作用对爆发性气旋的发展是至关重要的^[4-7]。

目前大部分国内外工作研究的重点都集中在对冬、春两季发生的爆发性气旋的研究上, 对于初夏季节的爆发性气旋所进行的研究非常少。本文所讨论的爆发性气旋正是一个 6 月初发生在中国东部沿海地区的爆发性气旋。这次爆发性气旋的发展主要是由位于江淮流域地区的初生气旋在北移入海后, 在爆发性发展的前期, 由于受到洋面的感热及凝结潜热释放等因素的影响, 同时在对流层中层的南北两支低槽合并后在中国东部沿海形成一个深槽, 另外在对流层低层中国东部沿海形成一个从南向北强水汽输送通道, 把水汽和能量源源不断地向气旋爆发地输送。本文目的在于探讨在中国东部沿海初夏季节产生爆发性气旋的过程中南北低槽的合并、低层水汽通道以及对流中低层的不稳定对爆发性气旋发展的作用。

2 爆发气旋形成的天气形势特点概述

图1是根据东亚地区每隔6h一次常规地面报绘制的气旋中心气压变化曲线。1993年6月1日12UTC到6月2日00UTC是气旋爆发性发展阶段。气旋中心气压下降了19.6 hPa, 经过纬度调整后的气压下降率为2.2贝吉隆, 按照Sanders(1986)的分类, 这是一个强爆发性气旋。这次爆发性气旋过程的主要特点可以分为以下几点:

2.1 南北急流中的低槽合并

在5月30日00UTC 500 hPa等压面上在南北两支急流中分别存在一个不稳定扰动短波槽。5月31日00UTC, 北部急流中的低槽从95°E移动到115°E, 槽线走向变为东北—西南向, 南部短波槽在5月30日12UTC—5月31日00UTC迅速增强, 与其相联系的斜压区也进一步增强(图2a)。北支槽在5月31日00UTC至5月31日12UTC之间虽然位置少动, 但槽线走向由东北—西南向变为北东北—南西南向, 而且槽后冷空气进一步加强, 在12h槽后冷中心温度下降了8℃, 这表明北支急流上的扰动将进一步加强。6月1日00UTC(图2b)北支槽及其后部的冷空气在45°~50°N, 110°~115°E之间维持少动, 槽线方向变为北西北—南东南方向。南支扰动到5月31日00UTC东移至110°E, 波长变小, 振幅加大, 到6月1日00UTC槽线走向和北部扰动的槽线走向变为相同。6月1日12UTC, 由于北部低槽下游被迅速发展的暖高压脊所控制, 所以北部槽所对应的冷空气不能东移, 而只能沿槽线南下注入到南部扰动中而导致南北扰动的合并(图2c)。6月2日00UTC南北两支低槽合并, 在中国东部沿海形成一个低涡, 地面气旋得到爆发性发展(图2d)。

2.2 对流层低层形成强水汽通道向气旋爆发地区输送大量水汽和能量

5月30日12UTC在850 hPa等压面上广州附近有14 m/s的偏南风急流中心, 这个急流中心到31日00UTC增加到19 m/s, 范围进一步扩大, 这样在30°N以南形成大面积急流输送带。5月31日12UTC急流输送带中心向北移动至20°。到6月1日00UTC急流输送带向北迅速扩展至东海至渤海湾, 从而在中国东部沿海海岸形成一个中心风速大于16 m/s的南北向急流水汽输送通道, 这个水汽输送通道南北跨越20个纬度, 从而向爆发性气旋的发生地区输送了大量的水汽。

3 数值模式和试验方案设计

为了考察在这次爆发性气旋发展过程中南北低槽的合并过程和沿中国东部沿海的水汽通道以及对流层中低层不稳定对气旋爆发性发展所起的作用, 我们利用MM4模拟这次爆发性气旋的发展过程。模拟过程中东西方向的格点数取为65, 南北方向的格点数为61。水平格距为90 km, 积分中心点取为(37°N, 120°E)。在试验过程中采用改变模式初始形式场的方法来验证上述3种因素对气旋爆发性发展所起的作用。

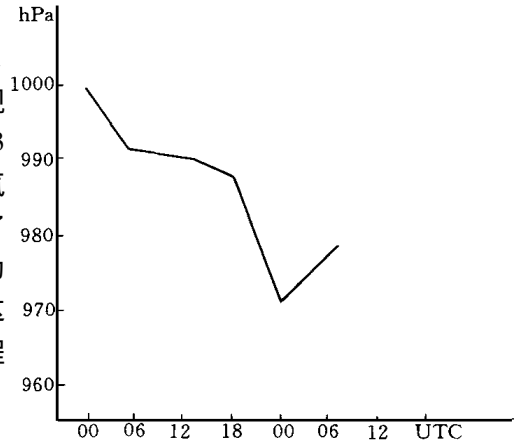


图1 爆发性气旋中心气压变化曲线

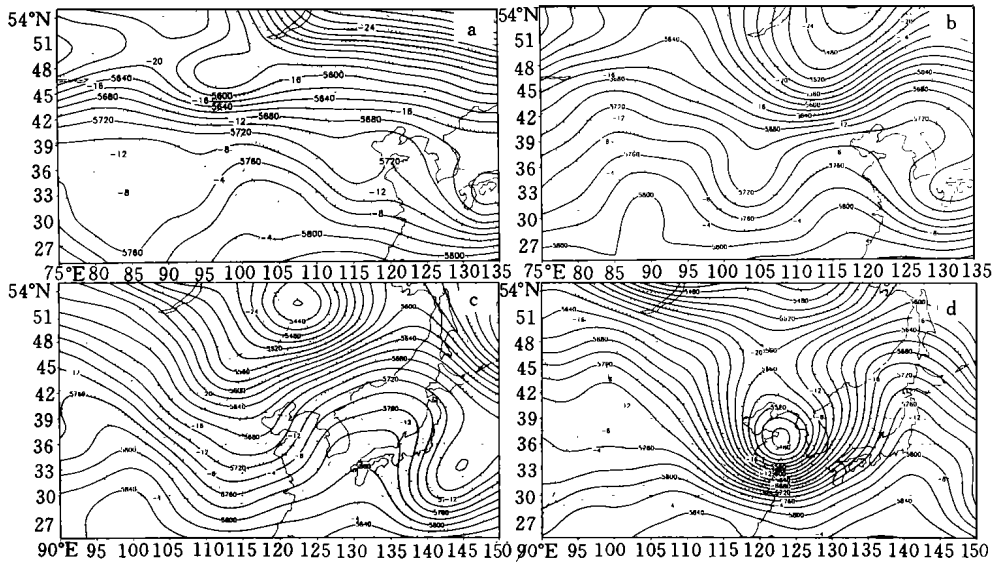


图 2 500 hPa 等压面高度场演变

(a. 5月31日 00UTC; b. 6月1日 00UTC; c. 6月1日 12UTC; d. 6月2日 00UTC)

MM4 模式在垂直方向上分为 16 层, 模式层顶 $P_t = 10$ hPa, 模式在垂直方向上分为 16 层, $\sigma = 1.0, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.84, 0.78, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.0$ 。侧边界条件为时变海绵边界条件, 其中大尺度趋势由线性内插 12 h 的观测资料获得。行星边界层采用高分辨参数化方案。积云对流参数化采用郭晓岚-Anthens 参数化方案。模式地形是采用美国国家气候中心的东亚地区 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格点数据为背景场, 利用东亚地区的实际地形进行客观分析内插而得到的。

Zupanski 和 Mcginley^[8]在用模式研究 Alpine Lee 气旋发展因素时采用对模式积分初始场进行平滑过滤的方法削弱某些物理因素的作用。然后利用所得到的积分结果和初始场没有经过改变的积分结果进行比较, 从而得出这些物理因素所起的作用, 他们对模式的初始场高低层分别进行了 1000 次和 200 次, 从而使得地面有效位能和高层位势涡度减少 $1/4$ 和 $1/3$ 以上。

为了改变模式的初始场, 我们采用对模式初始场进行平滑滤波, 在试验中采用下面的 9 点平滑公式对积分初始场进行平滑:

$$\bar{A}_{i,j} = A_{i,j} + \frac{S(1-S)}{2}(A_{i+1,j} + A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i,j-1} - 4A_{i,j}) + \frac{S^2}{4}(A_{i+1,j+1} + A_{i-1,j+1} + A_{i-1,j-1} + A_{i+1,j-1} - 4A_{i,j})$$

其中 $\bar{A}_{i,j}$ 为平滑后的要素场。其响应函数为

$$R = [1 - 2S \sin^2(\frac{kx}{2})] \times [1 - 2S \sin^2(\frac{ky}{2})]$$

其中 $k = \frac{2}{L_x} = \frac{2}{L_y} = \frac{2}{L}$ 为 x 和 y 方向上的波数, $x = y = 90$ km 为模式的网格距。

当 $S = 0.50$, 平滑 m 次时, 其相应函数变为

$$R(L, m) = [\cos^2(\frac{90}{L})]^{2m}$$

这个平滑滤波器可以有效地将波长很短的波动滤掉。比如, 波长为 $2x$ (x 为水平格距) 的波动被完全平滑掉, 波长为 $5x$ 波长的波动被平滑为是原来的 $1/10$ 。

具体的平滑方法如下:

- (1) 对北部的低槽系统平滑: 将 $J = 32, 61$ 的 U, V, Q, T, H 进行平滑。
- (2) 对南部的水汽通量平滑: 将 $J = 1, 31$ 的 U, V, Q 进行平滑。

4 试验结果讨论

4.1 北部急流中的低槽系被平滑削弱

下面是北部低槽系统经过平滑之后而得到的地面低压中心的气压值(表 1)。

表 1 北部平滑次数与地面预报低压中心的气压值(单位: hPa)

	初始	6 h	12 h	18 h	24 h	30 h	36 h
0	999	996	993	990	981	984	986
100	999	浅槽	浅槽	992	988	989	989
200	999	浅槽	浅槽	993	989	990	992
500	999	浅槽	浅槽	994	991	992	995
750	999	浅槽	浅槽	995	992	992	995
1000	999	浅槽	浅槽	996	992	992	995

当北部系统被平滑削弱到一定程度后, 地面低压为什么不能获得爆发性发展? 前面我们已经对爆发性气旋发展区应该具备的一些必要条件进行了分析, 下面我们讨论北部系统被平滑 500 次后的积分情况。

4.1.1 北部系统削弱后不能造成对流层中层南北低槽系统的合并

图 3 是 500 hPa 等压面上的高度场的变化。可以看到当北部系统没有经过平滑时, 南北低槽在积分 12 h 后开始合并, 并且在积分 24 h 后在黄渤海地区形成一个闭合低涡中心。而北部低槽经过平滑削弱后, 南部低槽仍然向北移动而不能形成南北低槽的合并, 南部低槽在积分 24 h 后在东海地区形成一个低槽, 而没有形成一个势力比较强的合并, 南部低槽在积分 24 h 后在东海地区形成一个低槽, 而没有形成一个势力比较强的低涡中心。所以北部低槽具有一定强度而且能够和南部低槽合并而在中国的东海岸地区形成一个势力强大的低槽是造成在这一地区形成爆发性气旋的重要前提。

在地面上, 当北部的地面低压被平滑削弱后, 40°N 以北不再有闭合低压系统存在, 地面只有江淮流域低压, 积分 12 h 后, 地面低压中心的气压下降至 997 hPa, 积分至 24 h, 低压中心的气压降至 991 hPa, 这时地面中心的气压值降低到最低值。

4.1.2 高层位涡场减弱, 不能产生“对流层顶折叠”

图 4 是平滑后的 200 hPa 等压面上积分位势涡度对比。没有平滑前, 积分初始时刻在气旋爆发地上游有一个位涡为 6.1 PVU 的正中心, 这个位涡正中心伴随强冷空气积分 12 h 后向东扩展, 并在积分 24 h 后在气旋爆发地区的高层形成一个位涡 4.6 PVU 的正

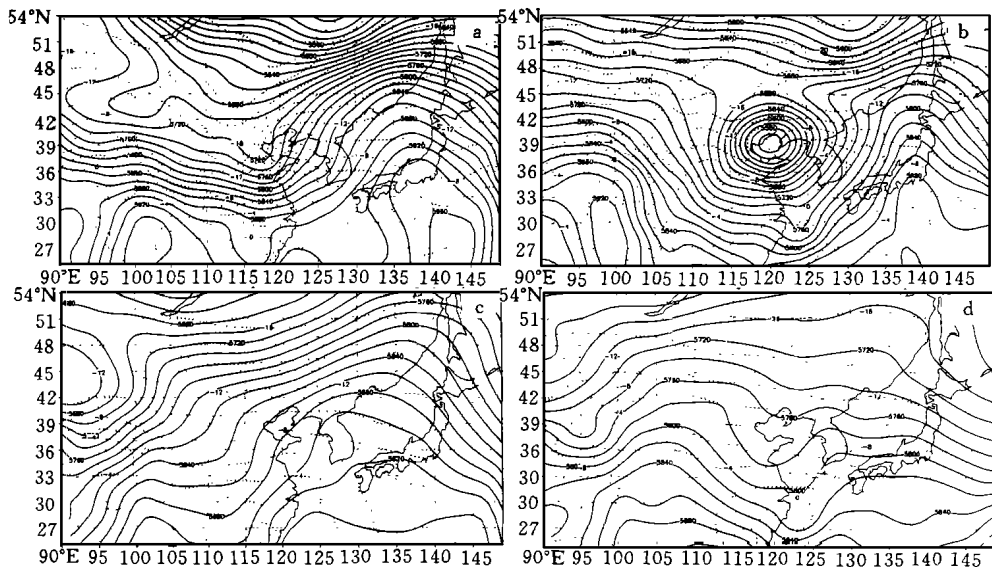


图 3 北部低槽系统被平滑削弱后 500 hPa 等压面高度场对比

(a. 未平滑初始场积分 12 h; b. 初始场平滑后积分 12 h; c. 未平滑初始场积分 24 h; d. 初始场平滑后积分 24 h)

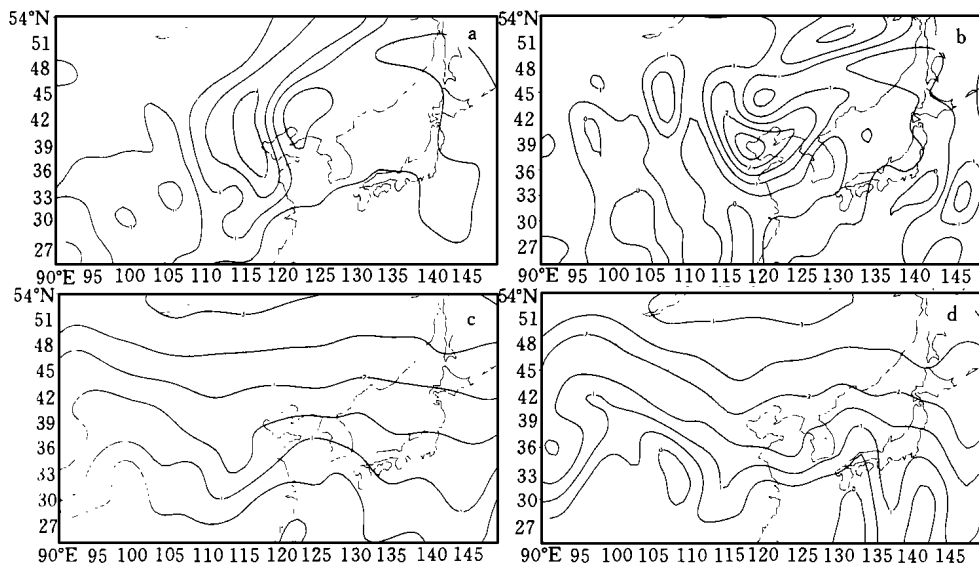


图 4 北部低槽被平滑前后 200 hPa 等压面位势涡度场变化对比

(a. 未平滑初始场积分 12 h; b. 初始场平滑后积分 12 h; c. 不平滑初始场积分 24 h; d. 初始场平滑后积分 24 h)

值中心。而在北部低槽被平滑削弱后, 位涡大于 2.0 PVU 的高位势涡度的大气没有下沉, 这说明高空的位涡场对低层系统的发展没有什么贡献。这说明, 在北部系统没有被经过平滑削弱的情况下, 高层的高位涡场一直对它下游的地面低压的发展有贡献。只有北部冷空气的强度在到一定程度后才能使地面气旋得当爆发性发展。

4.1.3 在气旋产生地区气旋的对流层高层不能形成强辐散场

爆发性气旋的一个重要特征是对流层高层有非常明显的辐散区域。而当北部系统经过平滑削弱后,在原气旋爆发地区及其下游高原始终没有出现强辐散场。积分 12 h 后,在朝鲜半岛北部只能出现一个中心值为 $2.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的辐散中心,这个辐散中心到积分 24 h 后仅为 $24.2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。这种强度的辐散场是不能造成高层大气的辐散的这样就不会对底层的大气产生强烈的抽吸现象,地面低压也就不能获得爆发性发展。

4.2 北部急流中低槽系统不变,南部低层水汽通道平滑被削弱后的积分结果

为了考察南部对流层低层的水汽通道平滑的削弱对爆发性气旋的发展的影响,我们对南部的低层的比湿以及风场进行平滑试验,所得到的结果通过表 2 可以看出:

表 2 南部水汽通量平滑次数与地面预报低压中心的气压值(单位: hPa)

	初始	6 h	12 h	18 h	24 h	30 h	36 h
0	999	996	993	990	981	984	986
100	999	浅槽	浅槽	990	984	985	988
200	999	浅槽	浅槽	990	985	987	990
500	999	浅槽	浅槽	993	987	988	992
750	999	浅槽	浅槽	995	992	991	993
1000	999	浅槽	浅槽	998	995	995	997

在南部水汽通道强度被平滑 500 次后,地面气旋只能 30°N 以南发展,这要比原来的气旋爆发地点偏南 800 km 左右。下面对平滑 500 次后的南部低层水汽和能量输送进行分析。

(1) 水汽通道被减弱后,南部急流中的低槽系统不能和北部急流中的低槽合并,地面初生气旋不向北移动发展,在中国东部沿海不能形成爆发性气旋。在南部水汽通道被平滑削弱后,积分 12 h 后,在地面上只能在 25°N 以南,生成一个低压中心。随着积分时间的增加,这个低压中心一直在 25°N 以南,没有向北移动。当积分 24 h 后,在 30°N 以南气旋加深,中心气压为 985 hPa,以后随积分时间增加,这个低压可是减弱东移,但一直在 30°N 以南,这说明如果没有南部水汽通道的存在,南部急流中的低槽将不能发展,同时地面上的低压也不可能向北移动发展,这样就不能在中国东部沿海造成气旋的爆性发展。

(2) 水汽通道被减弱后,向黄渤海地区的水汽和能量输送减弱消失,只能在积分 12 h 后在 25°N 以南产生较强的水汽和能量的输送。

图 5 是南部水汽通道被平滑削弱后的 850 hPa 等压面上的水汽输送对比。南部水汽通道经过 500 次平滑后,水汽输送得到明显削弱。积分 6 h 后,水汽输送带中心在 20°N 以南。积分 12 h 后,这个水汽输送中心没有向北伸展。积分 24 h 后位置却一直没有向北移动。这样南部的水汽输送始终不能向北伸延到 30°N 以北,从而不能向气旋爆发地区输送大量水汽。

5 结论

由上面的讨论可以看出:初夏在中国东部沿海地区形成爆发性气旋的必要条件是:

(1) 对流层中高层在南北急流中各存在一个低槽系统,而且这两个低槽系统足够强,南北两个低槽合并后,地面气旋获得爆发性发展了。

(2) 对流层有强水汽通道向气旋发展地区输送水汽和能量,这为气旋发展提供了足

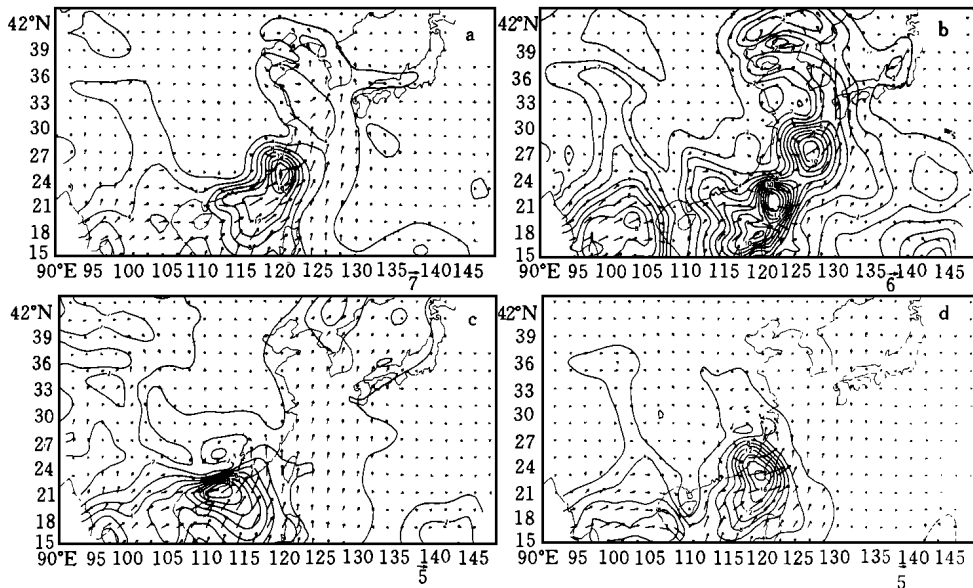


图 5 南部水汽输送通道平滑削弱后水汽输送结果对比

(a. 初始场平滑后积分 12 h; b. 未平滑初始场积分 12 h; c. 初始场平滑后积分 24 h; d. 未平滑初始场积分 24 h)

够的能量发展。

由于在初夏季节产生爆发性气旋比较少, 所以本研究得出的结果具有一定的局限性, 所得的结论尚待以后用相似的个例进一步进行验证。

致谢: 本文是在陈受钧教授的指导下完成的, 同时得到北京大学地球物理系暴雨监测与预报国家重点实验室王洪庆副教授的大力帮助下, 在此深表感谢。

参考文献:

- 1 Bosart, L F, Lin S C. A diagnostic analysis of the Presidents day storm of February 1979. *Mon Wea Rev.* 1984, 112, 2148- 2177
- 2 陈受钧. 地面摩擦和青藏高原对东北海岸气旋发展的影响. *气象学报*, 1987, 45(4): 495 ~ 499
- 3 董立清等. 中国东部的爆发性气旋. *气象学报*, 1989, 47(3): 371 ~ 375
- 4 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
- 5 Anthes R A, Kuo Y-H, Gyakum J R. Numerical simulation of a case of explosive marine cyclogenesis. *Mon Wea Rev.* 1987, 111: 1174- 1188
- 6 Hoskins B J, Berrisford P. A potential vorticity perspective of the storm of 15-16 October 1987. *Weather.* 1988, 43: 122- 129
- 7 Uccellini L W, Keyser D, Brill K F, et al. The Praidents Day cyclone of 18- 19 February 1979, influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. *Mon Wea Rev.* 1985, 113: 962- 988
- 8 Zupanski M, McGinley J. Numerical analysis of the influence of Jetsand M on tains on Alpine Lee Cyclogenese. *Mon Wea Rev.* 1989, 117: 154- 176

SIMULATION ON FORMATION PREREQUISITES OF EXPLOSIVE CYCLONE OF EARLY JUNE 1993

Yang Fuquan

(Training Center of Chinese Meteorological Bureau, Beijing, 100081)

Abstract

In this paper, the PSU/NACR MM4 model are employed to investigate the prerequisite conditions to a explosive cyclone which happened in June 1–2 1993 at Yellow Sea. Several smoothing test are conducted and the result shows that the merge of the troughs associated with the northern cold air and the southern moist jet, the strong low-level moisture transport channel are two indispensable factors to the explosive cyclone development which happens in China's eastern coastal area in early summer.

Key words: Explosive cyclone, Low trough merge, Low-level vapor transport channel.