

梁军, 陈联寿, 张胜军, 等. 冷空气影响辽东半岛热带气旋降水的数值试验. 大气科学, 2008, **32** (5): 1107~1118

Liang Jun, Chen Lianshou, Zhang Shengjun, et al. Numerical study of impact of cold air on rainfall of tropical cyclone over Liaodong Peninsula. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1107~1118

冷空气影响辽东半岛热带气旋降水的数值试验

梁军¹ 陈联寿² 张胜军² 李英²

1 大连市气象台, 大连 116001

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 Matsa (0509) 是直接登陆辽东半岛的变性台风, 利用 MM5v3 模式对 2005 年 8 月 8~9 日在山东半岛和辽东半岛发生的暴雨过程进行模拟, 并通过敏感试验研究冷空气对辽东半岛热带气旋降水的影响。结果表明: 冷空气入侵热带气旋外围, 对辽东半岛地区对流云团的强度、上升运动及其降水具有明显的增强作用。对流层中下层弱冷空气和对流层中上层较强冷空气的作用, 使辽东半岛地区的回波强度和上升运动明显加强, 有利于半岛地区暴雨增幅, 其中对流层中上层较强冷空气对辽东半岛暴雨的作用显著。无冷空气影响或对流层中下层强冷空气作用时, 辽东半岛上空的上升运动和回波强度明显减弱, 强对流维持时间短, 半岛地区的降水量明显减少。

关键词 冷空气 热带气旋 辽东半岛 暴雨

文章编号 1006-9895 (2008) 05-1107-12

中图分类号 P444

文献标识码 A

Numerical Study of Impact of Cold Air on Rainfall of Tropical Cyclone over Liaodong Peninsula

LIANG Jun¹, CHEN Lianshou², ZHANG Shengjun², and LI Ying²

1 *Dalian Meteorological Observatory, Dalian 116001*

2 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract Matsa (0509) is an extratropical transition (ET) typhoon which made landfall in Liaodong Peninsula in 2005. The PSU/NCAR non-hydrostatic mesoscale model MM5 is used to simulate the heavy rainfall process in Shandong Peninsula and Liaodong Peninsula during 8-9 August 2005. Several sets of numerical simulations are performed to study the impact of cold air on the rainfall of landfall tropical cyclone (TC) over Liaodong Peninsula. Results indicate that the intensity of convective cloud clusters, vertical upward motion and precipitation in Liaodong Peninsula are increased obviously when the cold air is invading the external area of TC. Both of the weak cold air in the lower and middle troposphere and the rather strong cold air in the upper troposphere can lead to notable intensification of radar reflectivity and ascending motion in Liaodong Peninsula, which is favorable for enhancement of precipitation there. The latter effect is more significant than the former one. Without the impact of cold air in the lower and middle troposphere, the heavy rainfall center would occur in the north of Liaodong Peninsula. The severe cold air in the lower and middle troposphere can result in the weakening of vertical velocity and TC circulation over Liaodong Peninsula, thus TC rainfall decreases remarkably in that area.

Key words cold air, tropical cyclone, Liaodong Peninsula, heavy rainfall

1 引言

冷空气扩散到台风气柱外围增加了位势不稳定能量, 当其与台风相互作用时, 使台风环流中下层出现锋生现象, 增加了水平力管效应。同时, 其抬升作用使暖湿气流沿锋面上滑, 锋后的冷性气流向南下沉, 这有利于斜压位能的释放和对流运动的发展^[1]。李志楠等^[2]对河北台风 Herb (9608) 外围暴雨的研究表明, 对流层中高层大尺度西风槽及相对应的冷平流与台风低压环流相互隔离, 近地面有弱冷空气从东北向南扩散与台风右侧的东南暖湿气流形成辐合切变线, 以 10 h 的时间间隔连续生成 3 个中尺度对流云团, 造成强降水天气。朱佩君等^[3]分析 Winnie (9711) 台风的演变过程发现, 对流层中高层冷空气的下沉入侵及对流层低层暖湿气流的向北输送, 使其形成西冷东暖的热力结构, 中纬度锋区由于锋生得到加强, Winnie 西侧的云系随着冷空气进一步加强而迅速消亡, Winnie 变性为具有宽广暖锋云系和狭长冷锋云系的锋面气旋。张经珍等^[4]分析山东半岛 Paul (9907) 热带气旋暴雨的成因发现, 对流层中下层强度适宜的冷空气作用, 使大量集中在边界层内的水汽得以向上输送, 并触发了 700 hPa 以下辐合线上的中尺度扰动, 使得地面伴有锋生现象, 造成热带气旋所经地区的大暴雨天气。于希里等^[5]诊断分析 1996 年 7 月 1 日夜間至 2 日凌晨发生在山东半岛北部沿海地区的一次局地强对流天气发现, 500 hPa 冷空气活动造成华北地区 -12°C 的降温, 但 700 hPa 以下, 特别是对流层低层对应高层降温区为大片的暖湿气流, 上升运动加强, 有利于强对流云团的形成和发展。毕宝贵等^[6, 7]对陕南大暴雨的数值模拟表明, 冷空气从中层侵入西北地区东部, 造成该地对流降水的加强。阎凤霞等^[8]研究干侵入在 2003 年 7 月 4 日 20 时~5 日 20 时 (北京时, 下同) 的一次江淮暴雨过程的作用时发现, 高层干冷空气向下注入, 导致地面锋后气温降低, 气压升高, 风速增大, 锋前低层辐合增强, 上升速度加大, 促进了新的对流运动, 使降水进一步增强。

冷空气侵入台风的强度和位置不同, 对降水的作用差异较大。崔晶等^[9]分析冷空气对 Kai-tak (0004) 台风降水的作用时发现, 冷空气从台风西南卷入, 切断了南部的能量输送, 使台风南部螺旋

云带迅速减弱, 而冷空气自西北东南下与台风外围的切变线相互作用, 则有利于锋生, 导致降水增强。钮学新等^[10]对冷空气在 Sinlaku (0216) 台风暴雨中的作用进行了数值模拟, 结果表明, 强或弱冷空气侵入台风中心, 中心附近的降水量均有减少, 强冷空气可使降水量减少一半, 约 150 mm, 弱冷空气作用减少约 120 mm。强度不同的冷空气作用于台风北侧及外围, 过程雨量可增幅 80~120 mm。冷空气越强, 其影响区域的上升速度和水汽辐合减小越快, 越不利于降水的产生。

Winnie 和 Matsa (0509) 是两个影响辽东半岛并产生暴雨的热带气旋 (TC)。Winnie 北上与中纬度高空槽相互作用, 并发生耦合^[11], 半岛地区出现锋生现象, 锋区陡立带维持时间长, 变性加强激发对流云团的生成、发展, 该地产生的降水量较大。Matsa 影响半岛时, 西风带冷空气偏北, 北上过程中只是靠近中纬度高空槽底部, 没有耦合过程, 变性略有加强后迅速减弱, 降水量仅为 Winnie 的一半。何立富等^[12]分析 Matsa 的结构和外围暴雨分布特征发现, 其东侧和北侧的积云对流旺盛, 地面正涡度中心位于其东侧。Matsa 东侧暖、西侧冷, 具有明显不对称结构。但有关中高纬西风带冷空气的强度对辽东半岛 TC 暴雨的作用还没有专门的探讨。本文以 Matsa 为例, 对其降水过程进行数值模拟, 并通过敏感试验探讨冷空气的强度对辽东半岛 TC 暴雨的影响。

2 台风 Matsa 登陆北上的降水特征

台风 Matsa 于 2005 年 8 月 6 日 02 时在浙江登陆, 登陆时中心气压为 950 hPa。Matsa 继续北上经过安徽、江苏、山东后, 减弱为热带风暴, 8 日 14 时从莱州湾进入渤海, 向东北方向移动, 于 9 日 07:20 在大连旅顺的龙王塘再次登陆后减弱消失, 登陆时中心气压为 995 hPa。8 月 7 日 14~20 时, 对流层下层有弱冷空气自西向东移至长江中游到黄淮地区, 弱冷空气主要堆积在 700 hPa 以下、 115°E 以西的大气层内, 西风带较强冷空气最南端伸至 40°N 附近 (图 1a、b、d、e)。随着 Matsa 的北上, 其北部的东北气流引导中纬度弱冷空气与 Matsa 东侧的东南暖湿气流相互作用, 使 TC 附近形成明显的辐合^[13], 8 月 8 日 02 时变性^[12], 强度没有明显加强, 中心海平面气压比变性前仅下降 2 hPa

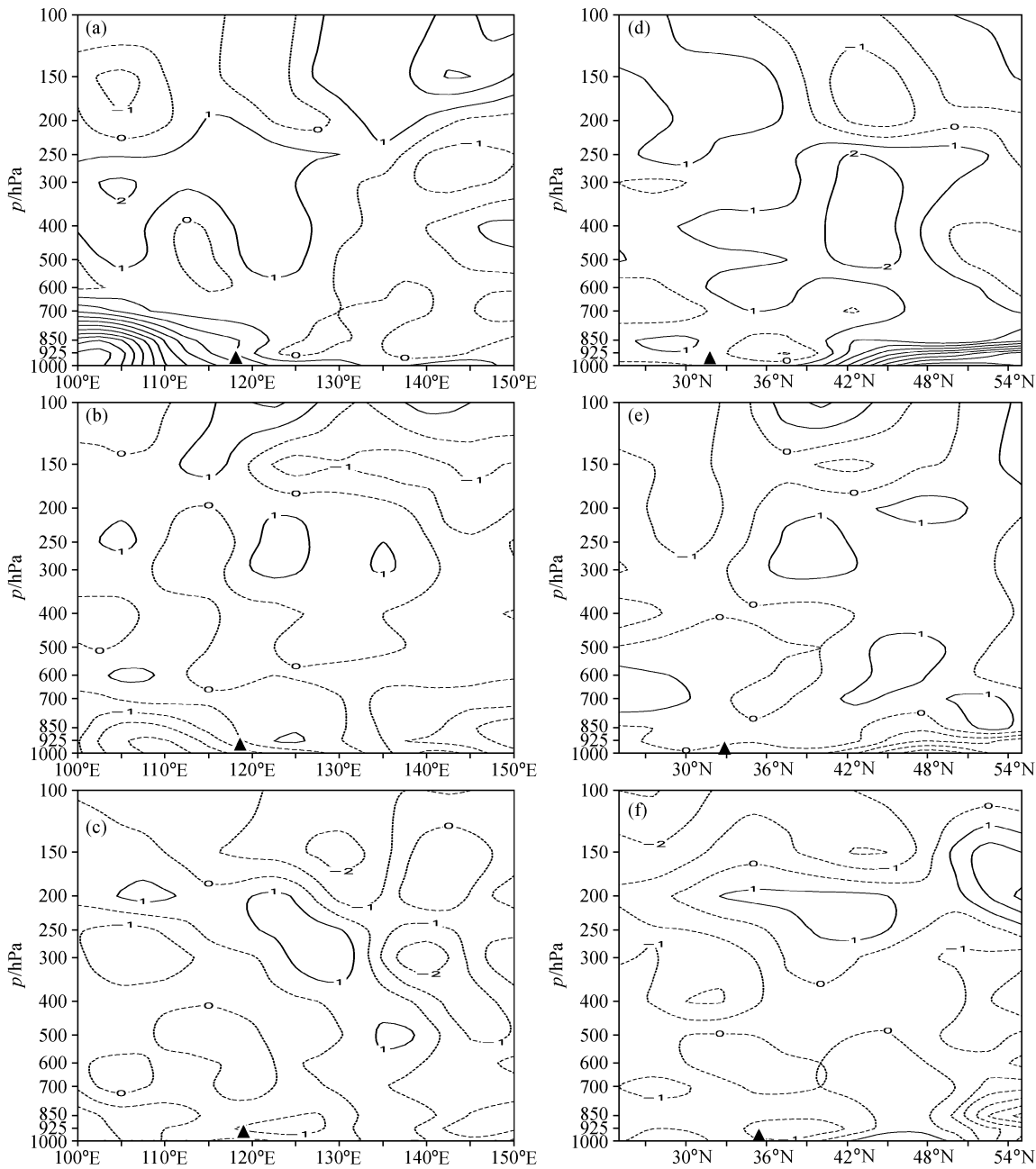


图 1 2005 年 8 月 7~8 日 6 h 变温 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的纬向 (a~c) 和 经向 (d~f) 垂直剖面: (a、d) 7 日 14 时; (b、e) 7 日 20 时; (c、f) 8 日 08 时。三角形表示台风位置

Fig. 1 (a~c) Longitude-height and (d~f) latitude-height cross-sections of 6 h temperature difference ($^{\circ}\text{C}$) from 7 Aug to 8 Aug 2005: (a, d) 1400 LST 7 Aug; (b, e) 2000 LST 7 Aug; (c, d) 0800 LST 8 Aug. The triangle indicates the location of Matsa's center

(图略)。8 日 08 时, 负变温最大, 冷空气主体北移至 45°N 以北 (图 1c、f), 大连的强降水已经开始, 14 时后, 降水停止 (图 2)。

Matsa 登陆北上期间红外云图的演变表明, 辽东半岛地区热带气旋暴雨云团具有中尺度单体对流 (MCC) 系统的特征 (图 3)。8 日 02 时 Matsa 外围

云系已经影响大连, 云团内部有 2 个内核, 云顶亮温均低于 -60°C , 此时 FY-2C 对应的两个云团内核的云顶亮温分别达到 -77°C 和 -81°C (图略), 强对流云团位于大连南部。随着对流单体的合并及山东半岛对流云团的北上补充, 形成中尺度对流系统 (MCS), 该系统的北上使大连地区从 8 日 04 时

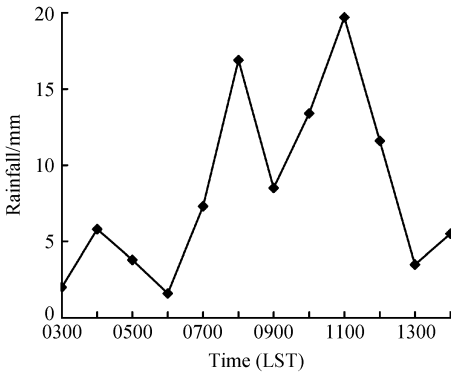


图2 2005年8月8日 Matsa 影响大连时的1 h 实况降水量
Fig. 2 Observed 1 h rainfall at Dalian on 8 Aug 2005

开始降水强度明显加强,12 时,该云团对大连东南部降水的影响基本结束。与此同时,从 MCS 分裂出的另一个 MCC 随环境风向东北方向移动,影响大连东北部地区,该云团没有对流云团的补充,对流发展不旺盛,生命史较前一个短,东北部地区的强降水在 8 日 16 时便结束。导致辽东半岛地区暴雨到大暴雨的主要影响系统是两个 β 中尺度云团。

3 模式、试验方案及资料

本文采用非静力中尺度数值模式 MM5V3,设计双向反馈两重嵌套网格(图 4)。粗、细网格格距

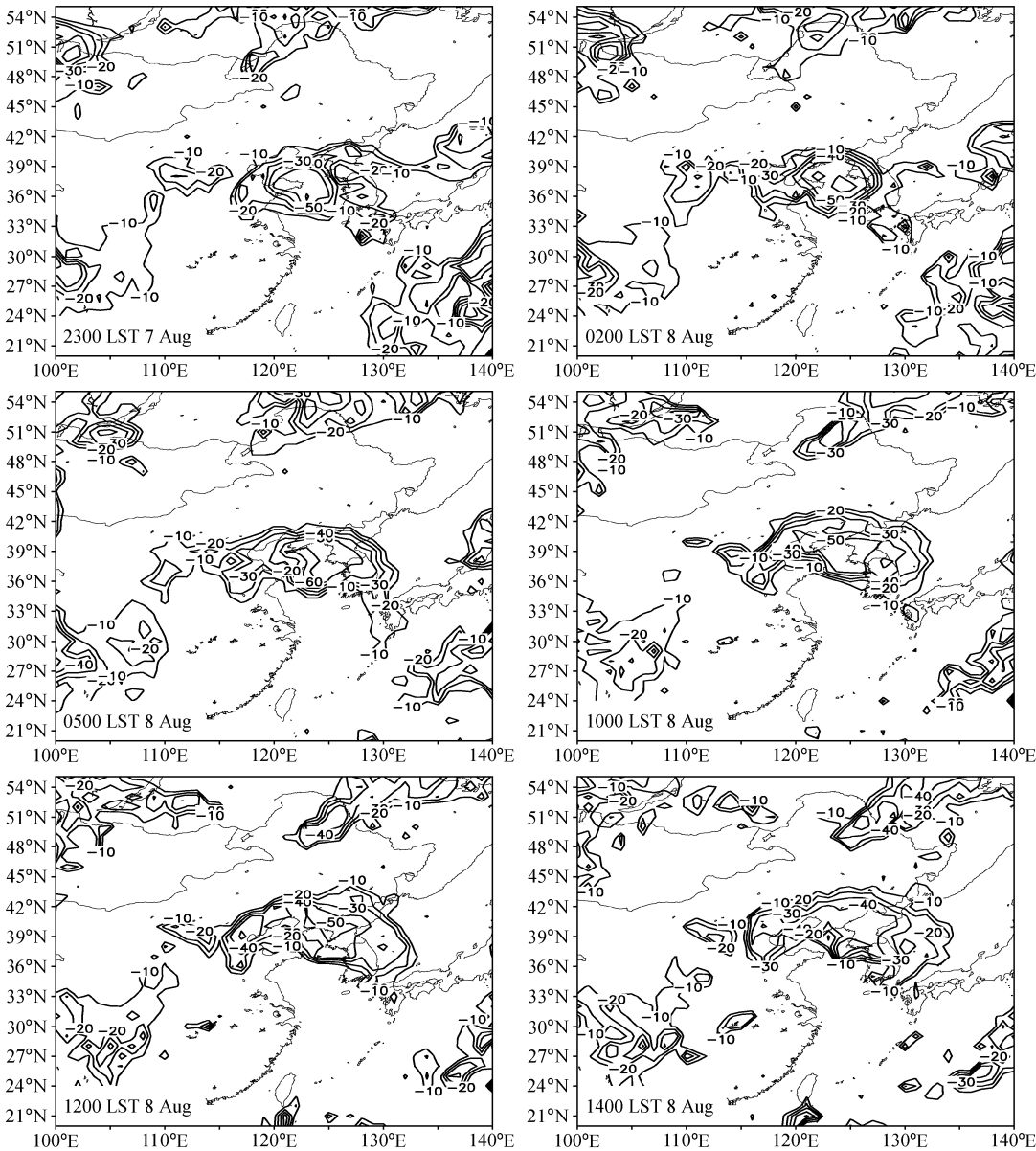


图3 2005年8月7日23时~8日14时 TBB 演变图(单位:℃)
Fig. 3 Evolution of black-body temperature (TBB, °C) from 2300 LST 7 Aug to 1400 LST 8 Aug 2005

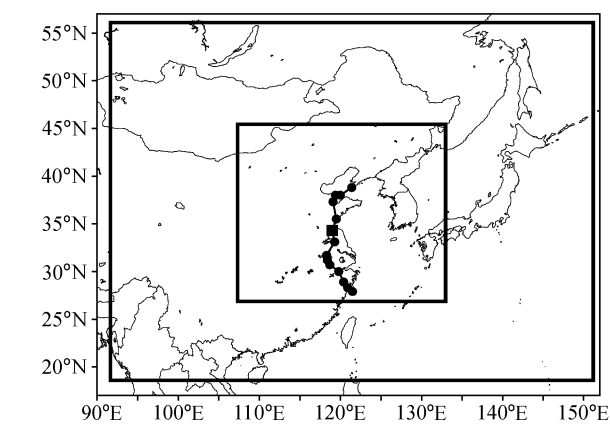


图4 模式的粗、细网格区域及 Matsa 的移动路径 (小黑方块为变性位置)

Fig. 4 The domains with coarse mesh and fine mesh in the simulation and Matsa's track after landfall (The blackened square indicates the location of Matsa's extratropical transition)

分别为 60 km 和 20 km，使用 30' 和 10' 地形数据。模式中心点为 (37°N, 122°E)，格点数为 67×67, 91×91, 垂直方向 23 层 σ 坐标。粗细网格分别采用 Blackadar 和 MRF 行星边界层参数化方案，均采用 Grell 对流参数化方案和 Reisner 软雹方案。侧边界为 6 h 时变边界。

采用气象信息综合分析处理系统 (MICAPS) 的高空、地面站点资料、NCEP 一天 4 次的再分析资料、全国 600 个基准观测站的降水资料及中央气象台发布的台风报。NCEP 资料的水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times2.5^{\circ}$ ，垂直方向 17 层。初值资料用 NCEP 资料，并与高空、地面 MICAPS 站点资料一起进行四维同化处理。

在研究中低纬度系统相互作用引发华北暴雨时，将西风带弱冷空气分为行星边界层及对流层中层两部分^[14]。其中对流层中层弱冷空气表现为 500 hPa 西风槽有 24 h 的负变温不小于 -5°C 的弱冷中心相对应。由此，设计了 5 种方案进行试验，包括一个控制试验和 4 个敏感试验。冷空气影响热带气旋中心北侧 300 km 以外的地区，影响区域南北约 7 个纬距，东西约 12 个经距。北部边缘降温最大 (或升温最小)，温度变化随纬度升高逐渐向东北倾斜 (图 5)。本文根据冷空气活动的特征，以 2005 年 8 月 7 日 14 时为模式积分初始时间，积分步长取 120 s，积分 42 h，对这一期间不同强度、不同分布的冷空气对辽东半岛 TC 降水的影响进行模

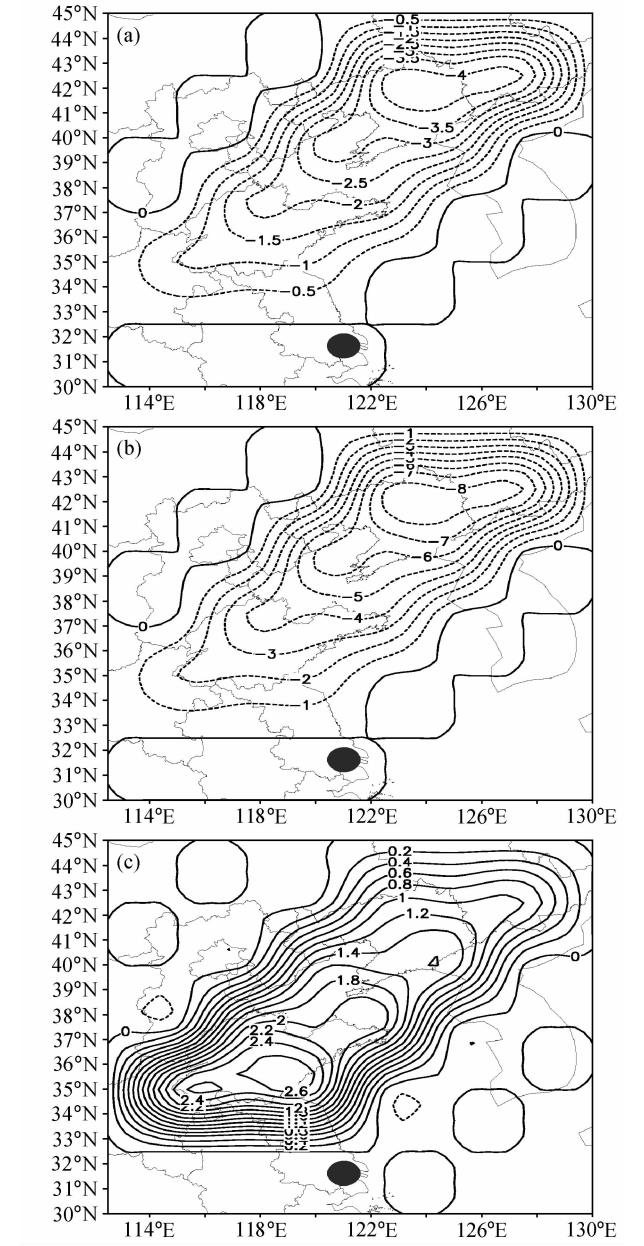


图5 敏感试验初始场的温度变化分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 试验 1; (b) 试验 2、4; (c) 试验 3。黑圆点表示台风位置

Fig. 5 Temperature variation ($^{\circ}\text{C}$) distribution of initial fields in the sensitivity experiments; (a) Expt 1; (b) Expts 2 and 4; (c) Expt 3. The dots indicate TC centers

拟。模式输出的结果均为细网格的计算结果。

控制试验：对辽东半岛 TC 降水进行模拟，并作为各敏感试验对比的基础。

敏感试验 1：对流层中下层 (1000~500 hPa) 局部降温 1~4 $^{\circ}\text{C}$ (图 5a)。

敏感试验 2：对流层中上层 (600~100 hPa) 局部降温 2~8 $^{\circ}\text{C}$ (图 5b)。

敏感试验 3: 对流层中下层 (1000~500 hPa) 局部升温 1~2.5℃ (图 5c)。

敏感试验 4: 对流层中下层 (1000~500 hPa) 局部降温 2~8℃ (图 5b)。

4 Matsa 路径、强度和降水的数值模拟

4.1 TC 中心气压和路径的对比

表 1 显示了 Matsa 6 h 一次的海平面气压实况及各敏感试验的输出结果。控制试验积分 6 h 后海平面气压误差明显增大, 积分 30 h 内最大误差为 6 hPa。登陆北上 TC 由于外界水汽输送被切断, 其强度大多迅速衰减。北上至中纬度的 TC 若与冷空气相互作用, 有的可能变性加强, 有的变性后迅速减弱。各敏感试验表明冷空气的强弱对 TC 强度均起一定作用。其中没有冷空气作用 (试验 3) 的填塞作用最弱, 对流层中下层强冷空气扫过辽东半岛 (试验 4), TC 强度衰减得最快。

各敏感试验中, 积分 24 h 内 Matsa 的中心位置均比实况偏南, 之后有冷空气作用的台风预报位置较实况偏东, 无冷空气作用的台风预报位置较实况偏西, 中心位置最大误差在 2° 左右 (图 6)。实况 TC 进入渤海后, 由于下垫面海表温度 (SST) 在渤海呈西南-东北向的暖温脊走向 (图略), TC 的趋暖性使其向东偏折, 而冷空气的作用使其向相反的方向移动。

4.2 TC 降水的对比

控制试验的模拟结果显示, 有 3 个强降水中心, 分别在渤海西岸、山东半岛北部和辽东半岛地

区。山东半岛的东北沿海实况降水超过 150 mm, 预报的降水量在 160 mm, 山东西北部的降水实况与预报误差在 70 mm 左右, 控制试验成功地预报了两个强降水中心的落区。辽东半岛的实况总降水量全区在 100 mm 左右, 最大的降水在半岛的东北地区, 有 180 mm 的降水中心, 预报的全区降水在 90~100 mm 之间, 强降水中心分布在半岛的东北部, 降水量大于 140 mm (图 7), 暴雨预报的 T_s 评分为 100%。

分析积分 42 h 各敏感试验与控制试验的雨量差值发现, 冷空气的强度对山东和辽东半岛的降水有较大影响。对流层中下层弱冷空气影响 Matsa 外围及北侧后, 山东西北部的降水变化不大, 山东东北部沿海地区降水量略有增加, 山东半岛东北部和辽东半岛强降水中心区域雨量均增加, 辽东半岛增加 30 mm (图 8a)。对流层中上层较强冷空气影响时, 山东半岛北部和辽东半岛南部地区降水均有增幅, 辽东半岛东北部的强降水中心增幅最大, 比控制试验增加 70 mm 以上 (图 8b)。试验 3 由于 TC 外围无冷空气作用, 辽东半岛的降水明显减少, 半岛的东南部减少近 50 mm, 强降雨带随冷空气中心的西进北抬向华北地区偏移 (图 8c)。当中下层强冷空气南下时, 山东东部沿海地区和辽东半岛大部分地区降水明显减少, 强冷空气的南下东移, 使强降水雨带向西南和偏东方向移动 (图 8d)。试验结果表明, 对流层中下层弱冷空气和中上层较强冷空气影响 Matsa 北侧的降水云系时, 有助于辽东半岛 TC 降水的增加, 其中以对流层中上层较强冷空气影响产生的雨量增幅最大。中高层的冷平流作用使

表 1 2005 年 8 月试验阶段 Matsa 海平面气压实况及试验结果 (单位: hPa)

Table 1 Matsa's sea level pressure (hPa) from observation and simulation during the experiment period of 2005

时间	实况	控制试验	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4
7 日 14 时	994	992	992	992	992	992
7 日 20 时	995	998	997	998	996	998
8 日 02 时	993	999	999	999	998	999
8 日 08 时	995	1000	1000	1000	999	1001
8 日 14 时	995	1000	1000	1000	999	1001
8 日 20 时	995	1000	1000	1000	999	1001
9 日 02 时	993	999	1001	1000	999	1002
9 日 08 时	995	1001	1001	1000	1000	1002

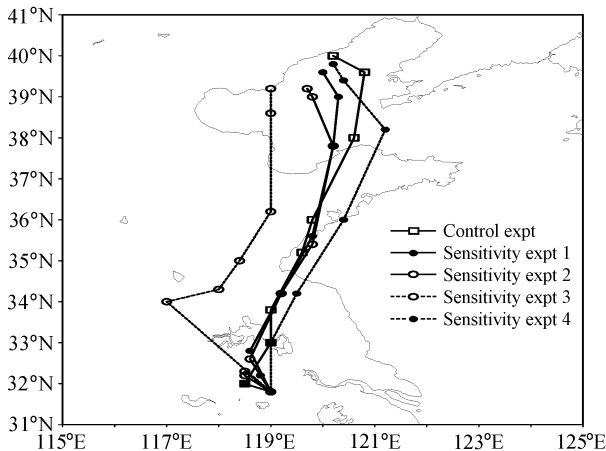


图 6 Matsa 控制试验和各敏感试验的路径分布

Fig. 6 Matsa tracks with 6 h interval in the control and sensitivity experiments

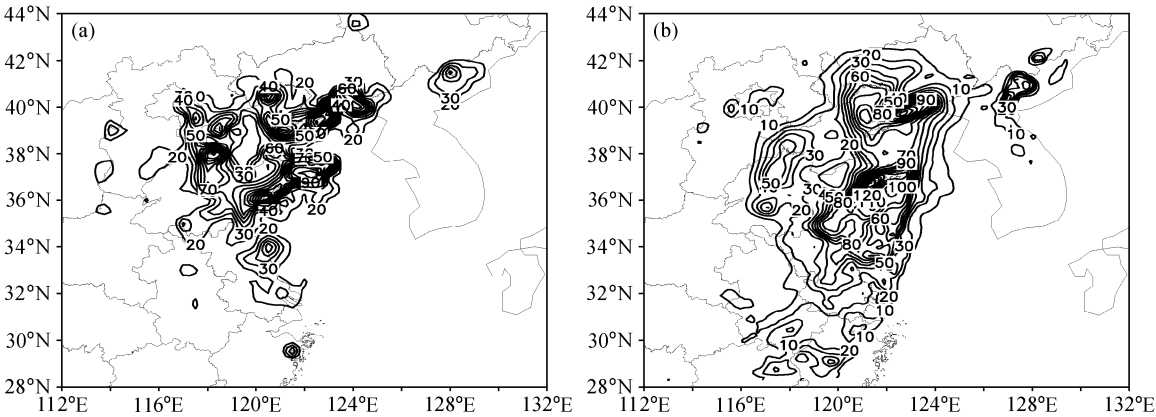


图 7 42 h 累计实况降水分布 (a) 和控制试验积分 42 h 的累计降水分布 (b) (单位: mm)
Fig. 7 42-h accumulated precipitation (mm) distributions: (a) Observation; (b) MM5 output

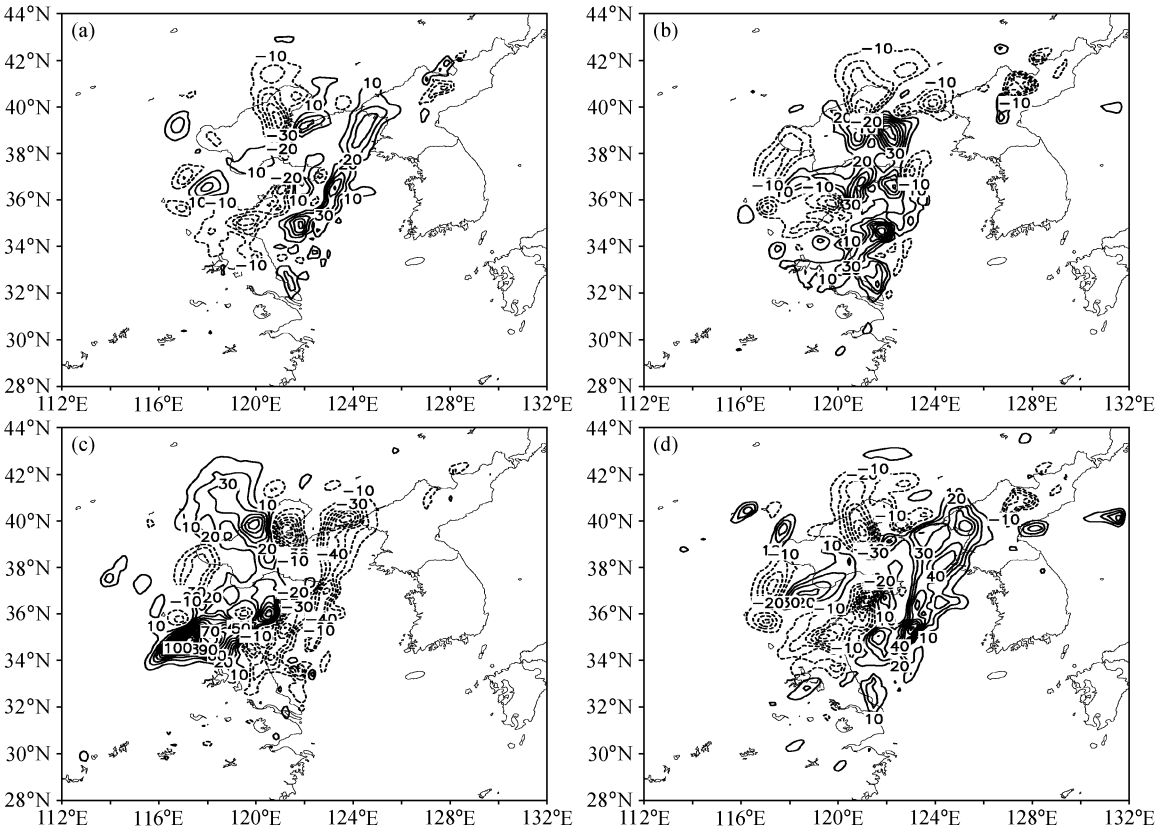


图 8 各敏感试验和控制试验之间的累计降水量差 (单位: mm): (a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4
Fig. 8 42-h accumulated precipitation differences (mm) between sensitivity and control experiments: (a) Expt 1; (b) Expt 2; (c) Expt 3; (d) Expt 4

台风斜压性增强^[3], 同时暖湿空气向上输送更加强
烈, 有利于 Matsa 气旋环流的维持。

5 Matsa 降水试验的诊断分析

5.1 动力场分析

不同试验的模拟雷达回波强度和垂直速度的分

布表明了冷空气对 TC 环流中对流活动的影响。控
制试验中, TC 变性后 (积分 12 h), Matsa 中心附
近, 即山东半岛东北部沿海地区上空, 有一正涡度柱,
正涡度向上伸至 350 hPa, 最大正涡度在 700 hPa 以下
(图略)。与正涡度柱相对应的为伸展至 200 hPa 的
上升运动区, 最大垂直速度超过 40 cm/s (图略)。

随着台风中心的北上,南面的对流中心在北移过程中逐渐加强。积分 24 h,大于 40 dBZ 的强回波区分布不均匀,主要出现在气旋性环流的东部。此时,辽东半岛南部地区的回波强度增强至 40 dBZ,强降水位置和时间与其相对应(图略)。积分 12 h,对流层中下层弱冷空气(图 9a) 或对流层中上层强冷空气(图 9b) 影响时,Matsa 气旋环流中的对流活动均比控制试验强,试验 2 的上升运动最强,向上伸展至 200 hPa,最大垂直速度超过 60 cm/s(图 10b)。正涡度中心强度随 TC 北上维持,靠近辽东半岛时逐渐加强(图略)。试验 1 的上升运动弱于试验 2 的(图 10a),正涡度中心强度与试验 2 相差不多,但没有加强过程。无冷空气影响或对流层中下层强冷空气影响时,辽东半岛上空的回波明显减弱(图 9c 和 9d),上升运动的伸展高度明显小于试验 1 和 2 的(图 10c 和 10d),试验 4 与试验 3 相比,

回波更强些,辽东半岛上空辐合上升运动维持的时间略长。

5.2 热力场分析

Matsa 登陆北上影响辽东半岛期间,冷空气由东北地区扩散西南下,从 850 hPa 以下低层大气侵入 TC 环流。由控制试验的 3 h 温度增量垂直分布(图略)可看出,2005 年 8 月 7 日 20 时,虽然较强冷空气主体维持在 117°E 以西,40°N 以北,但 40°N 以南弱冷空气已侵入 Matsa 外围。8 日 02 时,925 hPa 以下出现不稳定层结,台风开始变性。05~08 时上升运动最强,不稳定层结上升至 850 hPa 附近,但 Matsa 东西和南北两侧温度梯度不大,没有明显的锋生过程,其强度略有加强。FY-2C 卫星的 TBB 资料显示,在冷空气与 Matsa 外围相互作用的同时,其降水云系已远离中心,沿东部海岸线从 36°N 附近一直北上至 40°N 以北(图 3)。在此

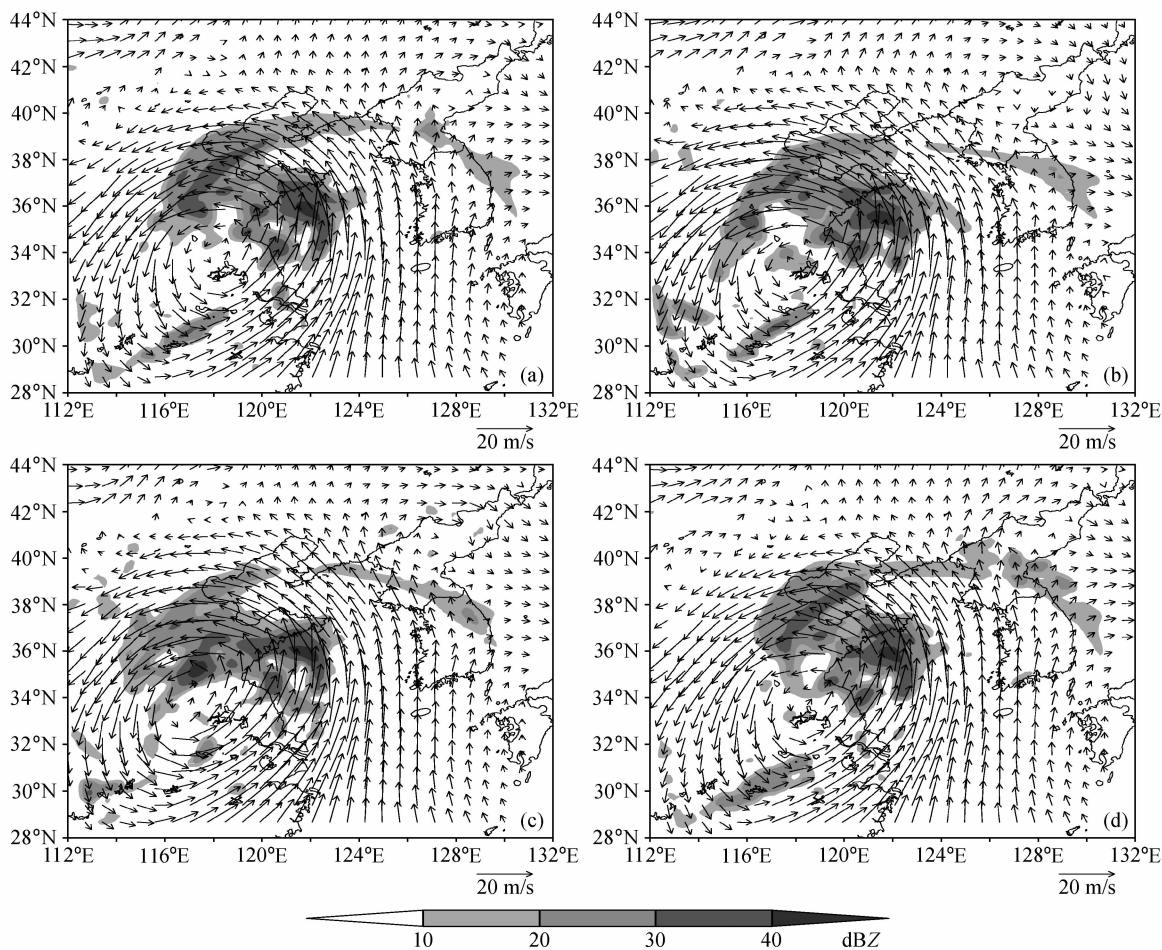


图 9 各敏感试验模拟的 850 hPa 风场(箭头)和雷达回波强度分布(阴影 ≥ 10 dBZ): (a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4
Fig. 9 Simulated 850-hPa wind (vector) fields and radar reflectivity intensity distribution (only ≥ 10 dBZ shaded) in the sensitivity experiments: (a) Expt 1; (b) Expt 2; (c) Expt 3; (d) Expt 4

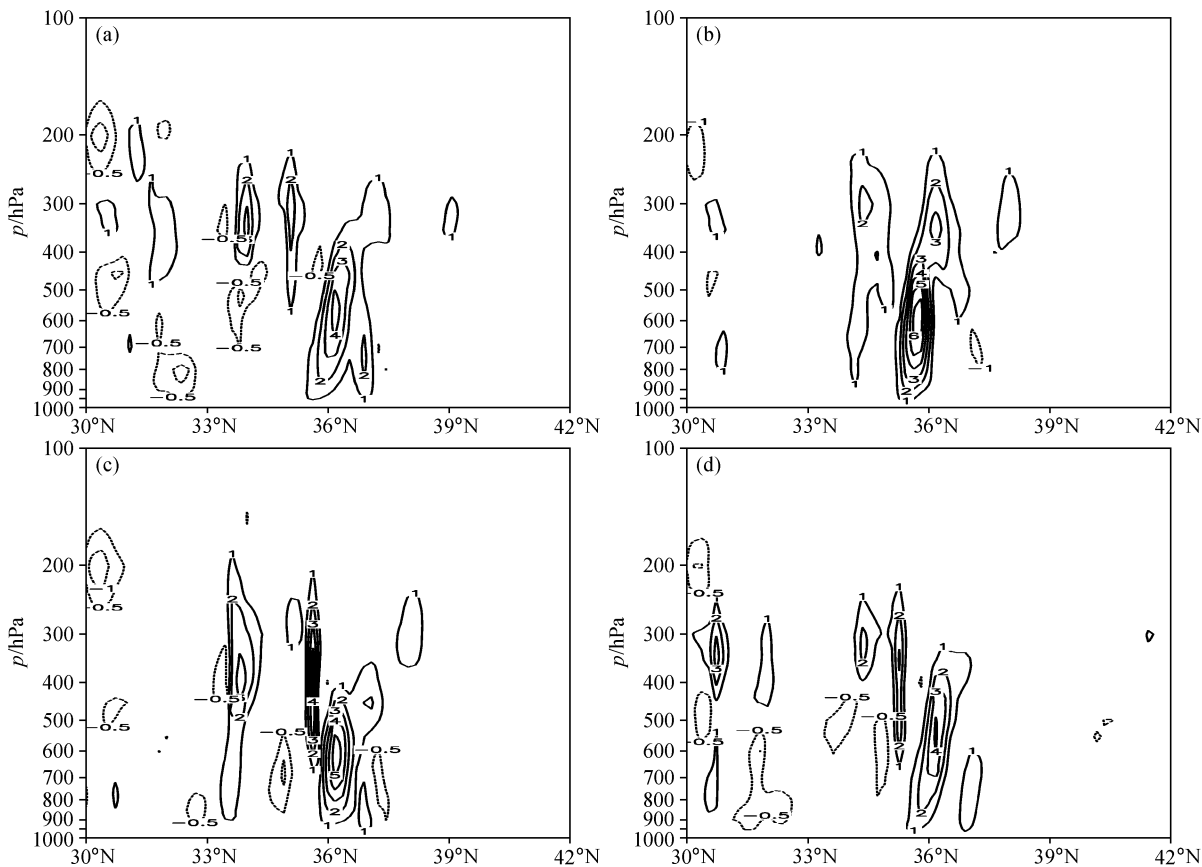


图 10 各敏感试验过 121.6°E (大连) 的垂直速度剖面 (单位: 10 cm/s): (a) 试验 1; (b) 试验 2; (c) 试验 3; (d) 试验 4

Fig. 10 Vertical sections of vertical velocity (10 cm/s) across 121.6°E in the sensitivity experiments; (a) Expt 1; (b) Expt 2; (c) Expt 3; (d) Expt 4

期间, 850 hPa 以下始终有冷空气活动, 08 时分别在 116°E 和 119°E 有对流发展, 辽东半岛的强降水开始。由于水汽凝结释放潜热, 08~14 时, 半岛上空 600~500 hPa 出现正的温度增量中心 (图 11), 上升运动加强, 地面降水出现增幅 (图 2)。14 时后, 台风外围的冷空气强度迅速减弱, 对流层上层的辐散作用消失, 半岛地区的降水逐渐停止。

图 12 为积分 12 h 各敏感试验过 121.6°E 的相当位温经向垂直剖面。敏感试验表明, 北方冷空气均由中低层侵入 TC 环流, 与其外围相互作用。控制试验中 (图略), 台风中心上空低层有 θ_e 大值区向上伸至 700 hPa 附近, 相应的, 高层 θ_e 大值区向下伸至 400 hPa, 中层为相对低值区。台风北部有两个 θ_e 低值区, 分别在 36°N 和 39°N 附近, 北方较强冷空气在 45°N 以北。36°N 即山东半岛西部的弱冷空气与台风外围作用, θ_e 等值线梯度不大, Matsa 变性没有明显加强。偏北的低值区即辽东半岛

地区 θ_e 线较密集, 冷空气与远离台风中心的降水云系相互作用, 暖湿气团沿冷下垫面爬升, 上升运动加强, 导致半岛地区的强降水。

敏感试验中, 主要探讨南下导致 Matsa 变性的北方冷源地的冷空气强度变化对辽东半岛降水的影响。当台风中心偏南时, 其中心附近的热力结构受冷空气的影响不大, 而在 39°N 附近, 冷空气作用直接影响 TC 的热力结构。试验 1 (图 12a) 和试验 4 (图 12d) 由于中下层冷空气加强, 低层大气的加热程度减弱, 尤其是试验 4 中, 冷气团迅速扫过半岛地区, 低空的暖湿气流被阻断, 不利于其气旋环流的维持^[15]。对比试验 1 和 4 变性后强降水发生期间的 300 hPa 动能变化发现, 试验 1 的动能增幅为 0.6×10^2 J/kg, 试验 4 的为 0.3×10^2 J/kg, 即对流层中下层弱冷空气与 Matsa 外围暖湿气流的相互作用比强冷空气的作用更有利于动能的补充, 从而造成动能输入增加地区的强降水的维持^[16]。

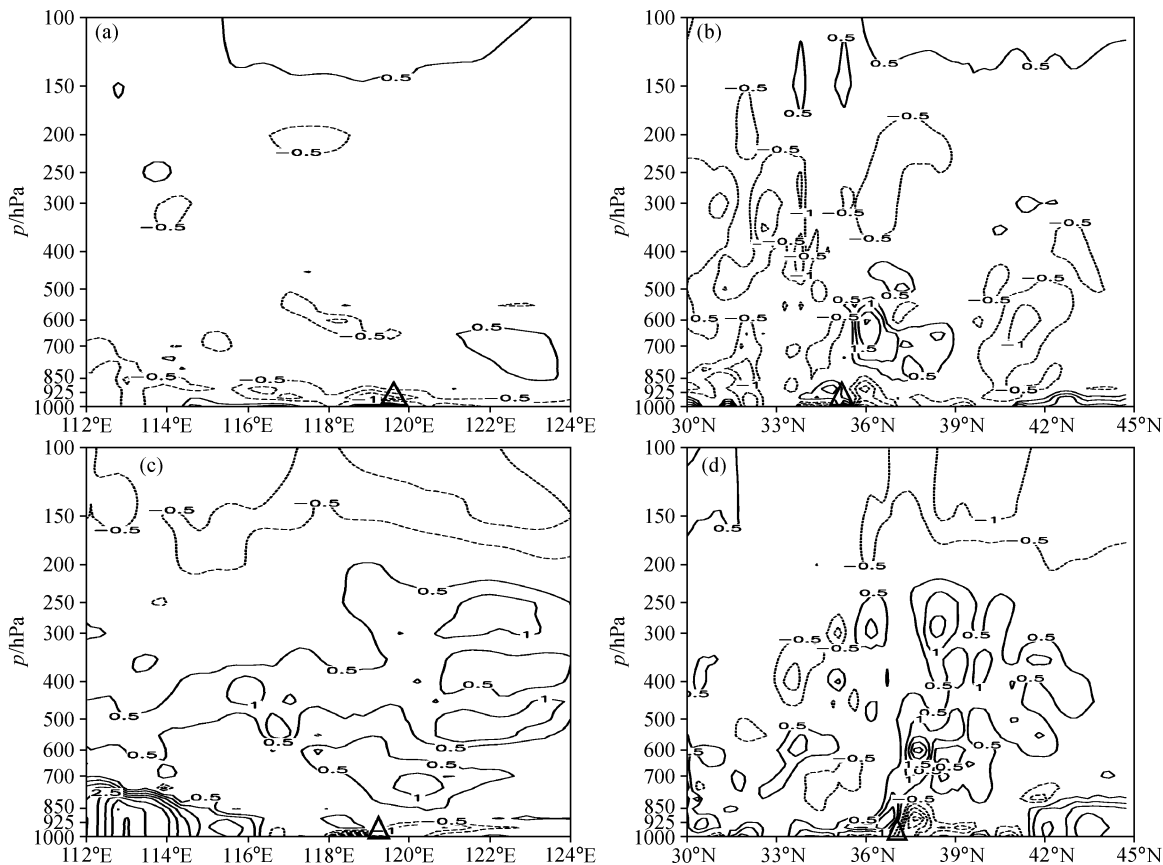


图 11 2005 年 8 月 8 日 3 h 变温 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的纬向 (a、c) 和 经向 (b、d) 垂直剖面: (a、b) 08 时; (c、d) 14 时。三角形表示台风位置 (下同)

Fig. 11 (a, c) Longitude-height and (b, d) latitude-height cross-sections of 3 h temperature difference ($^{\circ}\text{C}$) on 8 Aug 2005: (a, b) 0800 LST; (c, d) 1400 LST. The triangle indicates the location of Matsa's center (the same below)

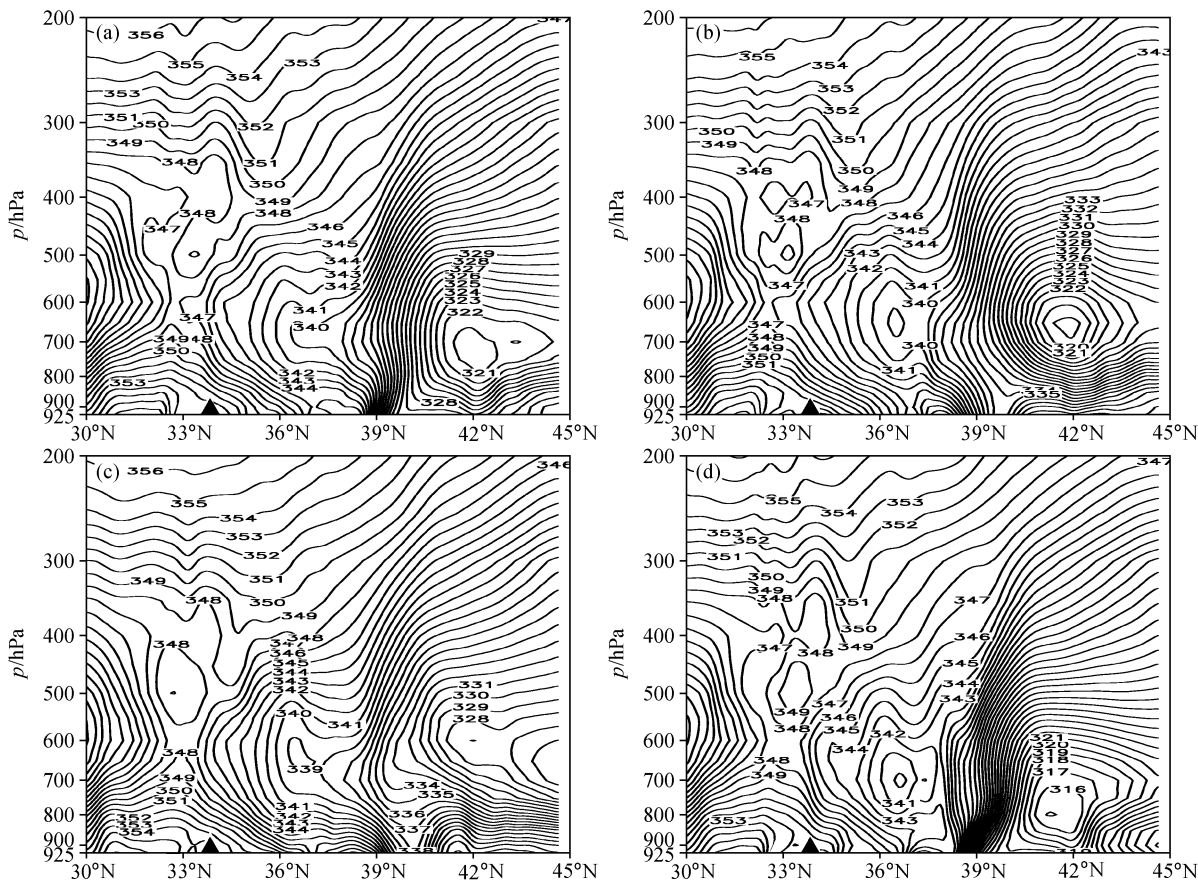
试验 2 (图 12b) 和试验 3 (图 12c) 的低层大气的加热程度加强, 低空的水汽输送有利于 TC 环流的加强和维持, 但试验 3 中冷空气最弱, TC 获得动能补充的时间明显少于试验 2 的, 分析 900 hPa 3 h 变温和相当位温发现 (图略), 只有试验 2 有明显的锋生加强过程, 其获得动能补充的时间也最长。因此, 进入中纬度后, 低空的水汽输送、降水区动能的补充有利于 TC 暴雨的产生和增幅。

6 小结

登陆北上的 TC 在靠近中纬度时, 若其残涡与西风带强度适宜的冷空气相互作用, 可使 TC 气旋性环流加强, 导致其所影响地区的强降水发生。Matsa 登陆北上期间, 冷空气主体偏西、偏北, 只有对流层下层弱冷空气在 35°N 以南与其外围作用, 台风在变性没有明显加强阶段影响辽东半岛,

造成半岛地区的暴雨天气。在以 Matsa 为例模拟辽东半岛 TC 暴雨的基础上, 利用敏感试验研究不同强度及垂直分布的冷空气对辽东半岛 TC 暴雨的作用, 结果表明:

冷空气的作用, 可使影响地区降水云团的强度和上升运动不同程度地加强。同时, 也影响了 TC 低压环流的维持时间和变性过程。对流层中下层弱冷空气和对流层中上层较强冷空气的作用, 使辽东半岛地区的回波强度和上升运动明显加强, 对流层低层出现锋生, 造成半岛地区暴雨增幅。其中对流层中上层较强冷空气的影响, 使 Matsa 北上过程中变性加强, 强对流中心维持超过 12 h, 导致辽东半岛全区大暴雨天气。无冷空气影响或对流层中下层强冷空气作用时, 辽东半岛上空的上升运动和回波强度明显减弱, 强对流维持时间短, 半岛地区没有锋生过程 (无冷空气影响) 或锋区快速移出半岛地



- Province during 8 and 9 June 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (5): 747~761
- [7] 毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 2002 年 6 月 8~9 日陕南大暴雨数值模拟研究. *大气科学*, 2005, **29** (5): 814~826
- Bi Baogui, Liu Yuewei, Li Zechun. Numerical simulations of extremely heavy rain in the southern Shaanxi Province during 8~9 June 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 814~826
- [8] 阎凤霞, 寿绍文, 张艳玲, 等. 一次江淮暴雨过程中干空气侵入的诊断分析. *南京气象学院学报*, 2005, **28** (1): 117~124
- Yan Fengxia, Shou Shaowen, Zhang Yanling, et al. Diagnostic analysis of dry intrusion in a rainstorm process. *Journal Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, **28** (1): 117~124
- [9] 崔晶, 张丰启. 冷空气侵入对启德台风降水的作用分析. *山东气象*, 2002, **22** (3): 19~21
- Cui Jing, Zhang Fengqi. The analysis for the action of cold air on precipitation of typhoon "Kai-Tak". *Journal of Shandong Meteorology* (in Chinese), 2002, **22** (3): 19~21
- [10] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验. *气象学报*, 2005, **63** (1): 57~68
- Niu Xuexin, Du Huiliang, Liu Jianyong. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoon Sinlaku (0216). *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (1): 57~68
- [11] 李英, 陈联寿, 雷小途. Winnie(1997)和 Bilis(2000)变性过程的湿位涡分析. *热带气象学报*, 2005, **21** (2): 142~152
- Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. Moisture potential vorticity analysis on the extratropical transition processes of Winnie (1997) and Bilis (2000). *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21** (2): 142~152
- [12] 何立富, 尹洁, 陈涛, 等. 0509 号台风麦莎的结构与外围暴雨分布特征. *气象*, 2006, **32** (3): 93~100
- He Lifu, Yin Jie, Chen Tao, et al. Analysis of structure and heavy rain of landing typhoon Maisha. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, **32** (3): 93~100
- [13] 何立富, 梁生俊, 毛卫星, 等. 0513 号台风泰利异常强降雨过程的综合分析. *气象*, 2006, **32** (4): 84~90
- He Lifu, Liang Shengjun, Mao Weixing, et al. Analysis of torrential rain event of landing typhoon Tailim. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, **32** (4): 84~90
- [14] 《华北暴雨》编写组. 华北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 24~53
- Compilers of *Heavy Rainfall in North China*. *Heavy Rainfall in North China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992. 24~53
- [15] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验. *大气科学*, 2005, **29** (1): 91~98
- Li Ying, Chen Lianshou, Xu Xiangde. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of landfalling tropical cyclone and precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 91~98
- [16] 张苏平, 李春, 白燕, 等. 一次北方台风暴雨(9406)能量特征分析. *大气科学*, 2006, **30** (4): 645~659
- Zhang Suping, Li Chun, Bai Yan, et al. Energy analysis on a heavy storm case in North China caused by typhoon No. 9406. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (4): 645~659