热带气旋在黄海北部转向引发暴雨的环境场特征及数值试验分析

梁军[1,2] 陈联寿[3] 李英[3]

1 兰州大学大气科学学院，兰州 730000
2 大连市气象台，大连 116001
3 中国气象科学研究院，北京 100081

摘 要 选取登陆北上在辽东半岛地区形成大暴雨的 9216 号（Polly）台风为例，采用 NCEP 全球分析资料，利用 MM5 中尺度非静力模式，对其环境流场和影响期间冷空气的作用进行诊断分析，并对下垫面海温对 Polly 的强度、路径、低层辐合和水汽通量及降水的影响进行数值模拟，结果表明，Polly 影响期间，稳定在 125°E 附近的副热带高压使低值系统偏北移动，并靠近中纬度斜压锋区，使低值系统得到发展的同时并阻挡着其东移出海；高空辐散、低层辐合相叠置，高空急流在 35°N 以北，呈非纬向，有利于垂直上升运动的加强和 Polly 的向北移动；辽东半岛地区为低空急流水汽输送辐合区；登路北上过程中，中纬度斜压锋区穿过 Polly，使其获得斜压能量变性发展为温带气旋；黄海北部海面表层温度升高使热带气旋移动路径向海温暖舌区域偏折，低层辐合和水汽输送明显加强，降水量显著增加。

关键词 黄海北部 热带气旋暴雨 大尺度环流 海温作用

文章编号 1006－9895（2007）05－1011－10 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

The Characteristics of Large-Scale Circulation of Torrential Rain Associated with the Tropical Cyclone Turning in the Northern Yellow Sea and Numerical Experiments

LIANG Jun[1,2], CHEN Lian-Shou[3], and LI Ying[3]

1 *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000
2 *Dalian Meteorological Observatory, Dalian* 116001
3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081

Abstract Choosing typhoon Polly (9216) which moved northward after its landfall and induced heavy downpour in the Liaodong Peninsula, the authors carry out the diagnostic analyses on the environmental fields and the role of cold air in the occurrence using the NCEP global analysis data and the non-hydrostatic version of the mesoscale model MM5. Furthermore, the numerical simulations are conducted to investigate the effect of sea surface temperature (SST) on the track, intensity, lower layer convergence and moisture flux as well as precipitation of typhoon Polly. The results indicate that the steady subtropical high about 125°E results in that typhoon Polly moves northward and approaches a baroclinic frontal zone, thus fails to move eastward into sea while it is reinvigorated. Superposition between the upper layer divergence and the lower layer convergence, and the non-zonal upper level jet located to the north of 35°N are favorable for intensification of upward movement in vertical and northward tracking of typhoon

收稿日期 2006－04－26，2006－09－04 收修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301，国家自然科学基金资助项目 40575018
作者简介 梁军，女，1967 年出生，高级工程师，主要从事短期天气预报工作。E-mail：qinldj@163.com

Polly. During typhoon Polly passing through the Liaodong Peninsula where there exists a convergence moisture transported by lower level jet, the baroclinic frontal zone in middle latitudes traverses typhoon Polly, and energizes it by way of baroclinic energy, and finally makes it develop into an extratropical cyclone. Increase of SST in the north of the Yellow Sea drives the tropical cyclone tracking towards or deflecting to a warm SST area, and leads to significant intensification of lower layer convergence and moisture transport, and therefore notable enhancement of precipitation.

Key words northern Yellow Sea, tropical cyclone torrential rain, large scale circulation, effect of sea surface temperature

1 引言

台风暴雨的灾害往往超过其强风造成的灾害[1]。通过对辽东半岛及黄海、渤海海域热带气旋(TC)的灾害、运动、强度和影响特征的分析[2, 3]发现，变性TC对辽东半岛的危害以暴雨为重。辽东半岛三面环拥着渤海、渤海海峡、黄海北部（图1)，TC在北上登陆再次入海过程中受到浅海大陆架和海岸地形作用，使TC结构发生突变，相应地与结构相关的强度、运动和风雨分布随之发生变化[4]。TC暴雨不仅与环境流场、冷空气和地形有关，还与海面温度（SST）相关[5]。

9216(Polly)是当年影响我国最强的热带气旋，在其北上过程中与冷空气相互作用变性加强[6]造成辽东半岛地区历史上罕见的大暴雨、局部特大暴雨天气。陶祖钰等[7]分析发现，Polly在地面涡度、散度、风场及对流层低层温度场具有不对称结构，登陆后始终处于高空急流右后方的强辐散区下，造成大范围的暴雨。丁治英等[8]研究了Polly暴雨增幅与台风α中尺度重力惯性波的关系，结果表明，积云对流潜热加热使非地转风场扰动加强，导致重力惯性波波幅加大，上升运动增强，暴雨增幅显著。徐夏囡[9]分析Polly影响辽东半岛期间的暴雨特征发现，大雨量带集中在半岛东南侧，这与东北-西南走向的千山山脉的地形作用有关。郑庆林等[10]研究东南海岸线与TC暴雨增幅的关系时指出，当海岸线扩展后，Polly登陆提前，降水提前发生在“虚假”陆地上，暴雨落区随海岸线扩展而移动。海岸线扩展引起沿岸地形坡度变缓，对TC暴雨幅度有一定削弱作用。端义宏等[11, 12]通过海温对TC强度影响的数值试验表明，不同经向海温梯度的海域对经过它的TC强度有不同的作用。当海温自南向北增加时，TC强度加深，海温梯度越大，TC加深越大。当海温自南向北减少时，TC强度减弱，逐渐填塞，海温梯度越大，TC填塞速度越快。辽东半岛漫长的海岸线都是TC可能登陆的地区，黄渤海海温变化对TC强度、路径及辽东半岛地区的TC暴雨的影响还没有专门的探讨，本文在讨论影响Polly路径、强度变化的环境流场的同时，通过数值试验着眼于海温对TC暴雨的影响，为正确预报北上TC的后期路径和山东、河北、辽东半岛地区的TC暴雨量级提供一定参考。

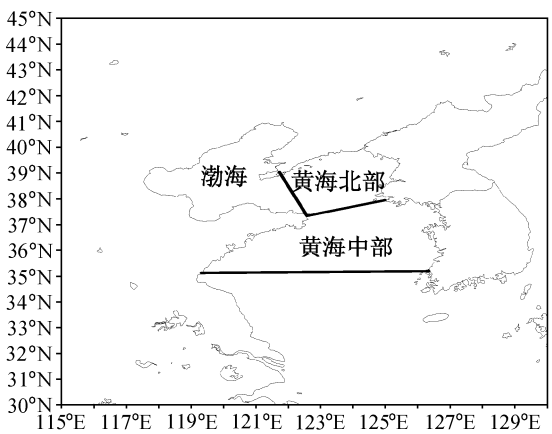

图1 黄渤海域分布图（包括渤海、黄海北部和中部）

Fig. 1 Distribution of the Yellow Sea and Bohai Sea (including the Bohai Sea and the northern and central Yellow Sea)

2 台风概况、资料及试验方案

Polly（图2）于1992年8月31日夜间在赣皖交界地区分裂出一个副中心，沿台风倒槽向偏北方向移动。9月1日低压中心进入苏北转向东北方向移动，穿过山东半岛进入黄海北部，最后消失在朝鲜。受台风倒槽和诱生低压的影响，辽东半岛地区普降大暴雨，局部特大暴雨。过程（9月1日～3日）最大降水量为271 mm（长海），8月31日12时～9月1日12时（国际协调时，下同）降水量分别为：大连232 mm、旅顺146 mm、长海253 mm、金州145 mm、瓦房店123 mm、普兰店138 mm、

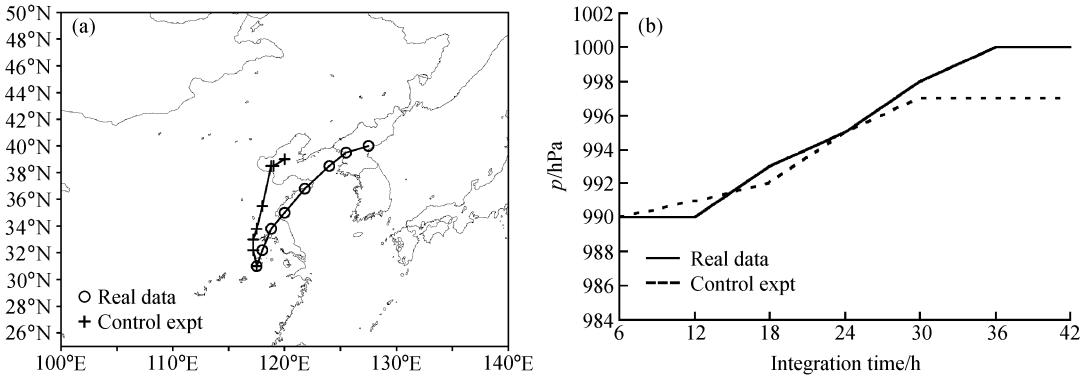

图 2　Polly 路径对比（a）和 Polly 中心海平面气压变化（b）

Fig. 2　Tracks of Polly with 6-h interval (a) and its minimum sea level pressure curves (b)

庄河 136 mm。

热带气旋的强度、中心位置等数据取自中央气象局整编的《台风年鉴》[13]。所用格点资料为每天 4 次，2.5°×2.5°的 NCEP 全球再分析资料和日本气象厅气象研究所（JEXAM 项目）3 小时一次 1°×1°的云顶亮温资料。海温资料使用 NCEP/NCAR 提供的周平均 OISST 资料。

使用 UCAR/PSU 的 MM5 第三版非静力模式[14]对台风路径和暴雨进行模拟。模拟区域以（35°N，121°E）为中心，模式水平分辨率为54 km，格点数为 85×85。模拟时间为 8 月 31 日 18 时到 9 月 2 日 18 时，积分 48 小时。模式中使用 Kain-Fritsch 对流参数化方案，计算格点尺度的饱和降水使用 Reisner 软雹方案，边界层参数化采用高分辨率的 MRF 方案，选用流入/流出松弛侧边界条件并考虑了云辐射物理过程。由于 Polly 于 8 月 31 日 18 时分裂出副中心，台风中心强度和位置均有较大变化，因此，我们将 MM5 模式中提供的 Bogus 人造台风[15]加入实际的初始场来研究 Polly 的路径和降水。在分析近百年中国近海海温变化[16]，特别是黄渤海水温 7～9 月变化特点[17]的基础上，设计敏感试验方案如下：

控制试验：黄渤海域海温不变。

敏感性试验 SST1：黄海北部海温升高 1℃。

敏感性试验 SST2：黄海北部海温升高 2℃。

敏感性试验 SST3：黄海北部海温升高 4℃。

敏感性试验 SST4：黄海北部海温降低 1℃。

敏感性试验 SST5：黄海北部海温降低 2℃。

敏感性试验 SST6：黄海北部海温降低 4℃。

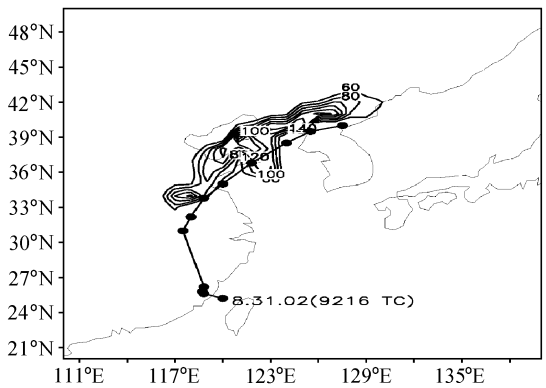

图 3　Polly 9 月 1～3 日总雨量图和路径

Fig. 3　Total rainfall amount (mm) and the tracks of Polly during 1－3 Sep

3　控制试验分析

模式对 Polly 的强度、降水和移动趋势具有较好的模拟能力，但积分 30 h 后路径偏差较大（图 2a）。Polly 控制试验的中心气压与实况相比，最大误差为 3 hPa（图 2b），控制试验预报辽东半岛地区的总降水量在 160～180 mm 之间，实况大部分地区的降水总量在 120～150 mm 之间，全区性大暴雨预报正确。但沿黄海北部东北-西南向的海岸线各站实况降水量与控制试验降水量的误差较大，有两站超过 90 mm，这与海岸线和 TC 之间的地形辐合有一定的关系。模式对辽东半岛地区全区性的 TC 暴雨有较好的模拟作用（图 3、4）。

3.1　500 hPa 高度场

Polly 影响辽东半岛期间，副热带高压（简称副高）与其西侧低压间的等值线密集区始终维持在 120°E～125°E，副高呈南北向。Polly 在沿副高后

部北上的过程中，即8月31日18时起，5880 gpm线开始西进，9月1日00时，当其接近125°E时，辽东半岛地区暴雨开始，与此同时，在40°N～55°N的内蒙古西部有西风槽东移，Polly获得正涡度输送，有利于其发展。03时后，TC与西风槽耦合，每小时降水量明显加强，05～06时大连站每小时降水量达47.9 mm。(图5a)。09时，当5880 gpm线再次西进至125°E时，脊线顺转，低值系统东移北上，辽东半岛地区降水开始减弱。当副高继续西进至125°E以西，同时Polly位于西风槽后时，辽东半岛地区的强降水结束(图5b)。

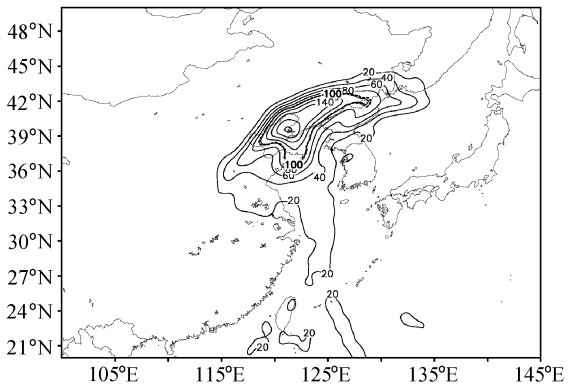

图4 Polly控制试验的总雨量预报结果

Fig. 4 Total rainfall amount (mm) during 1－3 Sep for Polly control experiment

3.2 散度涡度场

对流层上部的水平辐散使对流层中下层的上升运动持续不断，对产生较大暴雨有重要指示意义。9月1日00时起，850 hPa涡度场上，辽东半岛地区为正涡度，此时200 hPa散度场上，该地区为正散度，强降水开始。03～06时，低层辐合和高层辐散明显加强，09时达到极值，850 hPa涡度超过$25\times10^{-5}s^{-1}$，相应的，200 hPa散度超过$10\times10^{-5}s^{-1}$(图6)。之后，辽东半岛地区上空850 hPa辐合中心值和200 hPa辐散中心值开始减弱，强中心向北抬，降水逐渐停止。从200 hPa风场(阴影区为风速≥28 m/s)可看出，在强降水发生期间，辽东半岛地区处于非纬向高空急流区内，且急流一直在

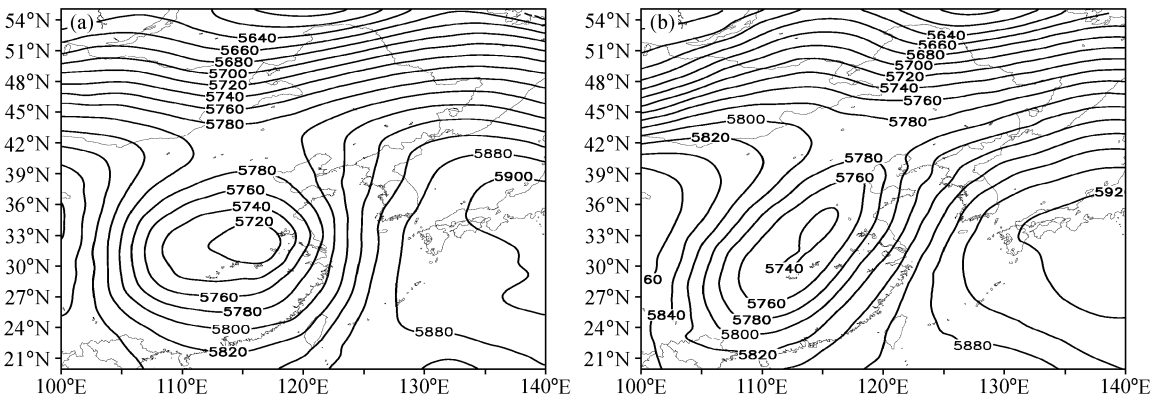

图5 Polly 8月31日21时(a)和9月1日12时(b) 500 hPa高度场(单位：gpm)

Fig. 5 500 hPa height (gpm) field at 2100 UTC 31 Aug (a) and 1200 UTC 1 Sep (b) in 1992

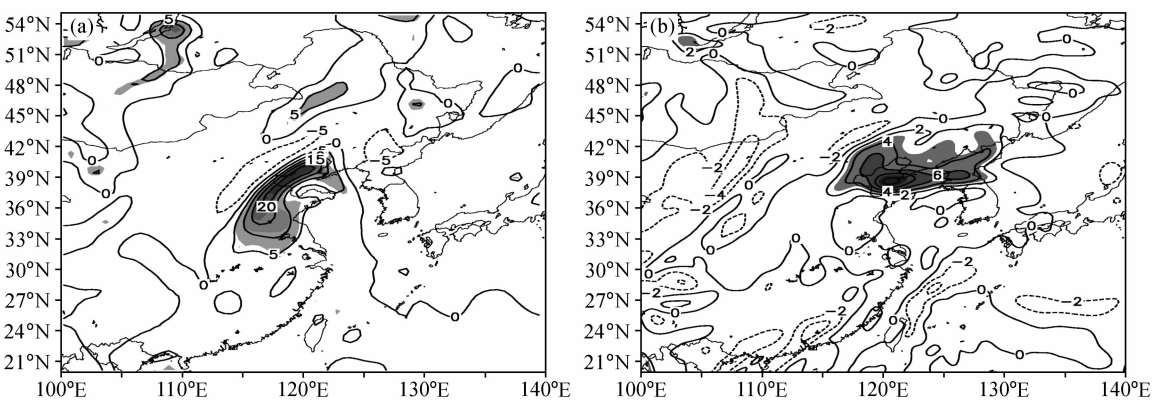

图6 Polly 9月1日09时850 hPa涡度(单位：$10^{-5}s^{-1}$)场(a)和200 hPa散度(单位：$10^{-5}s^{-1}$)场(b)

Fig. 6 850 hPa vorticity ($10^{-5}s^{-1}$) field (a) and 200 hPa divergence ($10^{-5}s^{-1}$) field (b) at 0900 UTC 1 Sep 1992

35°N 以北（图 7），非纬向风的辐散及 Polly 的北上使低层辐合加强，导致辽东半岛地区的大暴雨。

3.3　水汽

水汽辐合是降水的基本条件。Polly 的水汽来源包括来自洋面的东南急流和来自内陆的西南暖湿气流(图 8)。8 月 31 日 21 时开始，辽东半岛地区为水汽辐合区，9 月 1 日 00 时该地区水汽通量散度为-4.8×10^{-7} g・s^{-1}・cm^{-2}・hPa^{-1}，暴雨开始。03～06 时，水汽输送明显加强，09 时辽东半岛地区的水汽通量散度达极值，中心值小于-17×10^{-7} g・s^{-1}・cm^{-2}・hPa^{-1}，这一时段暴雨突然增幅(图 9a)。随后，水汽通量散度中心向北移动，9 月 1 日 15 时辽东半岛地区水汽通量散度已升至-2×10^{-7} g・s^{-1}・cm^{-2}・hPa^{-1}以上，降水强度明显减弱，9 月 1 日 18 时，水汽产生辐散，TC 暴雨结束。

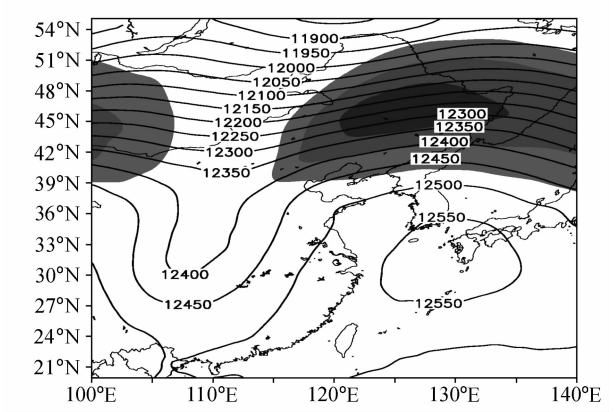

图 7　Polly 9 月 1 日 03 时 200 hPa 高度场（单位：gpm）和风速场（阴影区为风速≥28 m/s）

Fig. 7　200 hPa height (gpm) field and wind speed field (shaded areas indicate wind speed≥28 m/s) at 0300 UTC 1 Sep 1992

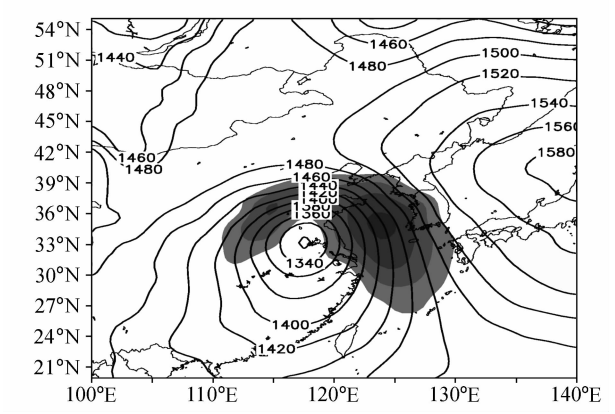

图 8　Polly 9 月 1 日 00 时 850 hPa 高度场（单位：gpm）和风速场（阴影区为风速≥16 m/s）

Fig. 8　850 hPa height (gpm) field and wind speed field (shaded areas indicate wind speed≥16 m/s) at 0000 UTC 1 Sep 1992

3.4　冷空气

冷空气有利于位势不稳定的增强、低空辐合的加强和斜压能量的释放。Polly 影响半岛初期，对流层中层 3 h 变温为负，半岛东南部有大片地区 3h 变温小于-1.5℃，相应地，在大片负变温区的低层对应着大范围正变温区，最大 3 h 变温大于 2℃(图 10)，对流运动加强，半岛地区强降水开始。与此同时，200 hPa 等压面上，辽东半岛地区 3 h 变温为负（图略），这种高空冷却有利于冰晶的核化，为降水的维持提供了粒子条件[18]。Polly 北上期间，有冷锋穿过其中（图 9b），且在辽东半岛地区的东部和北部出现明显的冷中心（图 9c），对应于模拟的云图[19]，低压环流的北部为宽阔的暖锋云系，云区向冷空气一侧凸起，强度较强；夏季极地冷空气南下至中纬度已增温变性，冷平流弱，斜压性较小，南部狭长的冷锋云系较弱，但已呈现出发展中气旋的特征（图 9d）。与此同时，半岛地区暖气团的强迫抬升作用逐渐强烈，9 月 1 日 00 时～12 时，上升运动最强（图 11a），强降水也发生在该时段内。随着凝结潜热的释放（图 11b），进一步加强了低空辐合和上升运动。12 时后，潜热变化不大，上升运动明显减弱，强降水逐渐停止。

4　敏感试验分析

4.1　TC 中心气压的响应

当海表温度由渤海至黄海北部沿纬向升温时(敏感试验黄海北部海温均大于 27℃)，台风的趋暖性使得 Polly 向海温的暖舌区域移动，积分 36 h 后，台风路径发生明显偏折。海温纬向增温越大，Polly 移动路径越向黄海北部偏折（图 12b）。但积分 36 h 之前，TC 在陆地上向北移动，黄海北部 SST 升高或降低对其海平面中心气压值影响不大，实况与控制试验和敏感试验的误差为 1 hPa（图 12a），积分 36h 时，TC 中心都移入渤海，黄渤海域的 SST 都超过 25℃，而此时各敏感试验与该海域相对应的 850 hPa 上空的气温在 16～18℃之间，暖水面的水汽和热量使得 TC 的辐合加强，中心气压值明显减小。当黄海北部 SST 升高时，渤海海域相对为一个冷水区，向东的梯度风使 TC 沿纬向辐散。反之，当黄海北部 SST 降低时，偏东风使 TC 沿纬向辐合（图 12a）。因此，积分 36 h 时后，由于

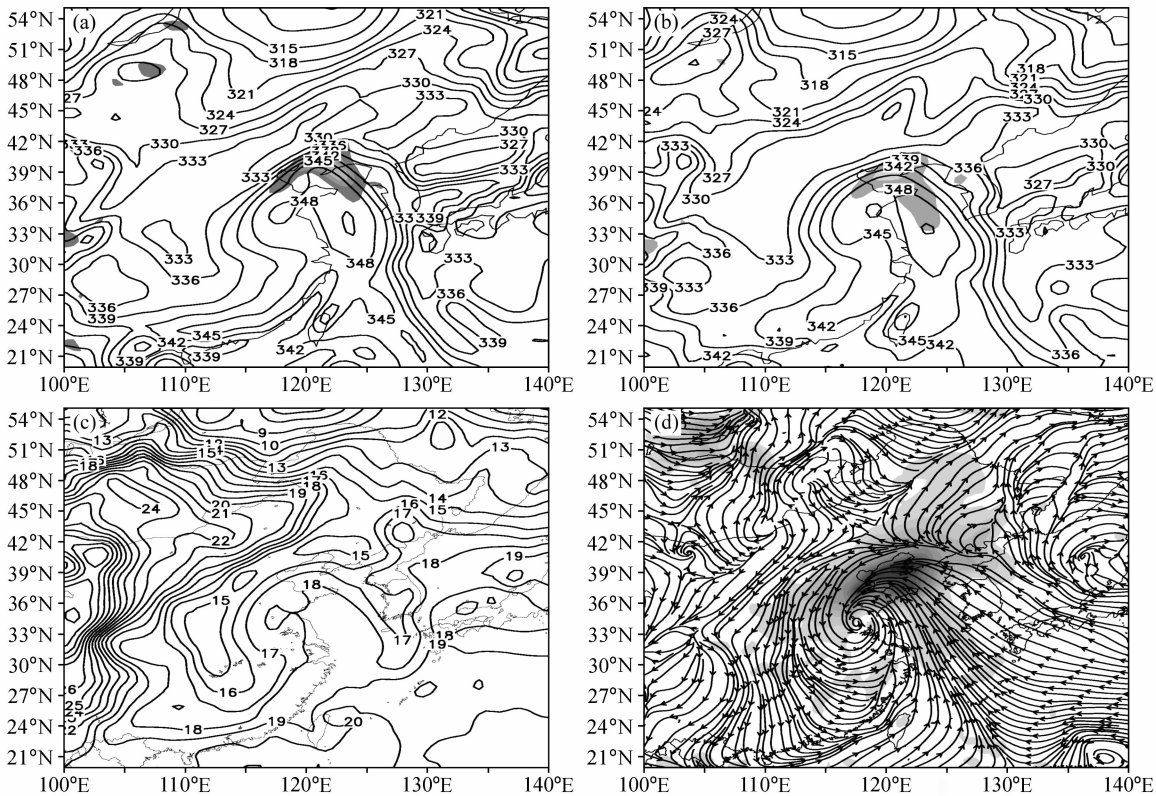

图 9 Polly 9 月 1 日 09 时 (a)、03 时 (b) 850 hPa 假相当位温 (单位：K)，03 时 850 hPa 温度(单位：℃) (c) 以及模拟的云图和 1000 hPa 流场 (d)。(a)、(b) 中阴影为小于-2×10^{-7}g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}的水汽通量散度，(d) 中阴影为模式输出的大于 0 kg/kg 的固态水和液态水的总混合比

Fig. 9 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (K) at 0900 UTC (a) and 0300 UTC (b) 1 Sep, 850 hPa temperature (℃) (c) and simulated cloud chart and 1000 hPa streamline field (d) at 0300 UTC 1 Sep. Shaded areas in (a) and (b) indicate divergence of moisture flux $\leqslant-2\times10^{-7}$g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}, shaded areas in (d) indicate the total mixing ratio of liquid water and solid water >0 kg/kg

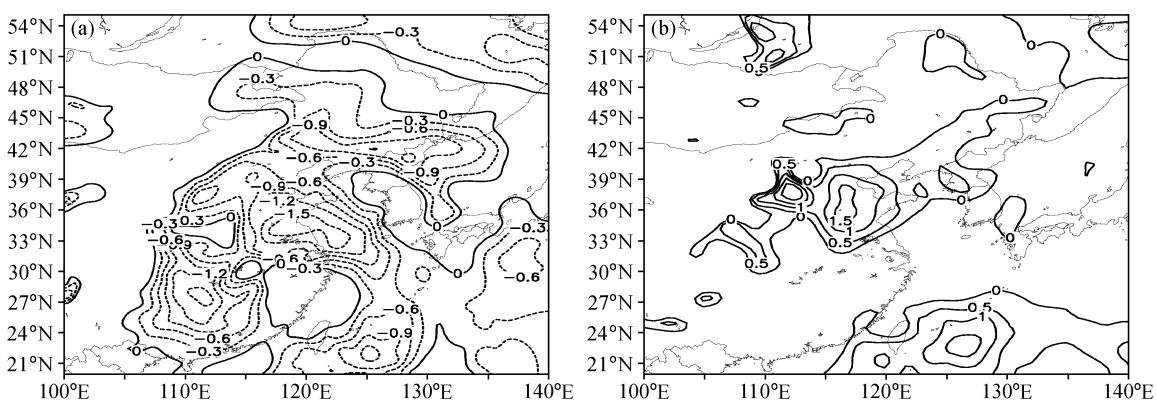

图 10 Polly 8 月 31 日 18～21 时 500 hPa (a) 和 850 hPa (b) 的 3 h 温度增量 (单位：℃)

Fig. 10 3-h temperature increment (℃) at 500 hPa (a) and 850 hPa (b) during 1800－2100 UTC 31 Aug 1992

黄渤海暖水区的作用，TC 中心气压值减弱，黄海北部 SST 沿纬向升高 (降低) 时，TC 中心气压值减弱的程度慢 (快)。

4.2 TC 热力场的响应

分析 Polly 的位置和 TBB 资料显示的其外围云系的的位置 (图 13) 发现，降水云系远离 TC 中

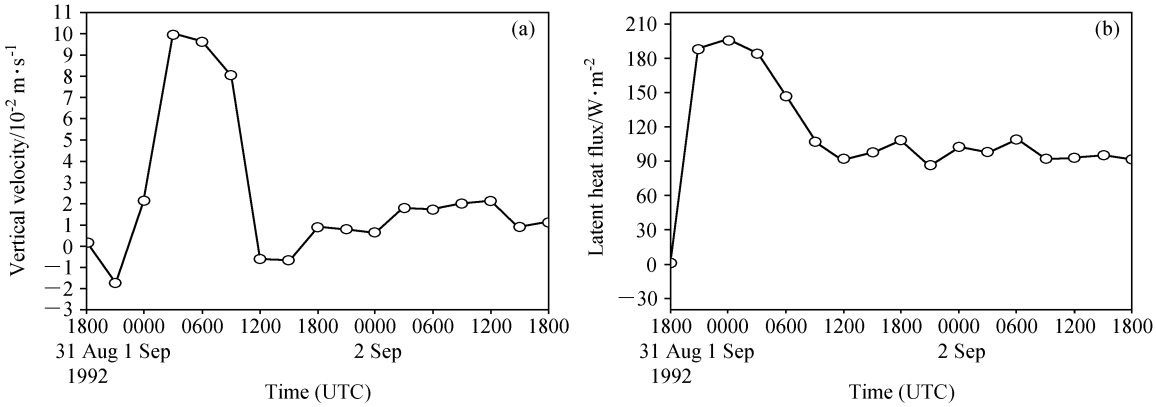

图 11　积分 48 h 区域（38.9°N～39.9°N，121°E～122°E）平均垂直速度（a）和潜热通量（b）时间演变

Fig. 11　Time evolution of the simulated vertical velocity (a) and latent heat flux (b) averaged over region (38.9°N－39.9°N, 121°E－122°E)

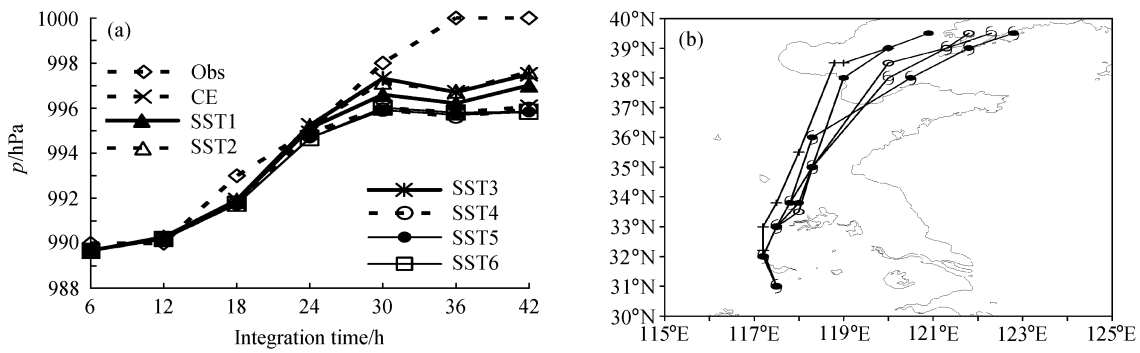

图 12　各敏感试验和控制试验（CE）TC 中心气压（a）和路径（b）。（b）中，十字线表示控制试验，实心圆、空心圆、空心台风、实心台风分别表示海温升高 1℃、2℃、4℃、5℃

Fig. 12　Polly's sea level pressure (a) and tracks (b) with 6-h interval in the sensitive experiments and the control experiment (CE). In (b), cross line denotes the control experiment, lines with blackened circle, open circle, open typhoon mark, blackened typhoon mark denote SST rising 1℃, 2℃, 4℃, 5℃, respectively

心，积分初始时刻降水云系已影响辽东半岛地区[20]，主要降水时间集中在 9 月 1 日 00 时～9 月 1 日 15 时。图 14a～f 为积分过程中过 121.6°E 的经向剖面图上控制试验和各敏感试验之间的位温差（辽东半岛地区的纬度范围在 38°N～40°N 之间）。积分 3 h 之前，黄海北部 SST 升高时，辽东半岛上空的位温差就为负值，说明降水云系吸收的水汽量增加。积分 12 h，增幅明显加大（图 14a～c），此时大连 1 h 的实况降水量达到 47.9 mm 。反之，黄海北部 SST 降低时，辽东半岛上空的位温差为正值，说明降水云系吸收的水汽量减少（图 14d～f）。水汽引起的加热增加或减弱主要出现在低层，说明水汽主要从低空输送。当强降水发生后，中高层的加热明显增强，这与水汽的垂直输送和潜热的凝结释放有关（图略）。SST 的变化通过水汽输送量来影响辽东半岛地区的降水。

4.3　TC 降水的响应

下垫面海温的增加使得 Polly 低层辐合和大气层结的不稳定性均有所加强，导致降水量的提高。当黄海北部海表温度依次升高 1、2、4℃，积分 6 h 后，850 hPa 的涡度场明显加强，09 时，涡度增幅达极值，均超过 $10\times10^{-5}\,s^{-1}$，增温 4℃时，涡度增幅最大（图 15a）。海表温度的升高使得辽东半岛南部的水汽辐合在积分 6 h 后开始加强，积分 12 h 后水汽辐合最强，增温 4℃时，水汽通量散度降低 $-8\ g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}$ 以下（图略）。相应地，辽东半岛地区的降水量明显增加，降水量增幅超过 20 mm（图 15b）。反之，黄海北部海表温度依次降低 1、2、4℃，积分 6 h 后，850 hPa 的涡度场开始减弱，但变化幅度不大（图略）。海温增温越大，TC 降水越强，降水量对海表温度变化的响应时间为 6～12 h（图 15b）。

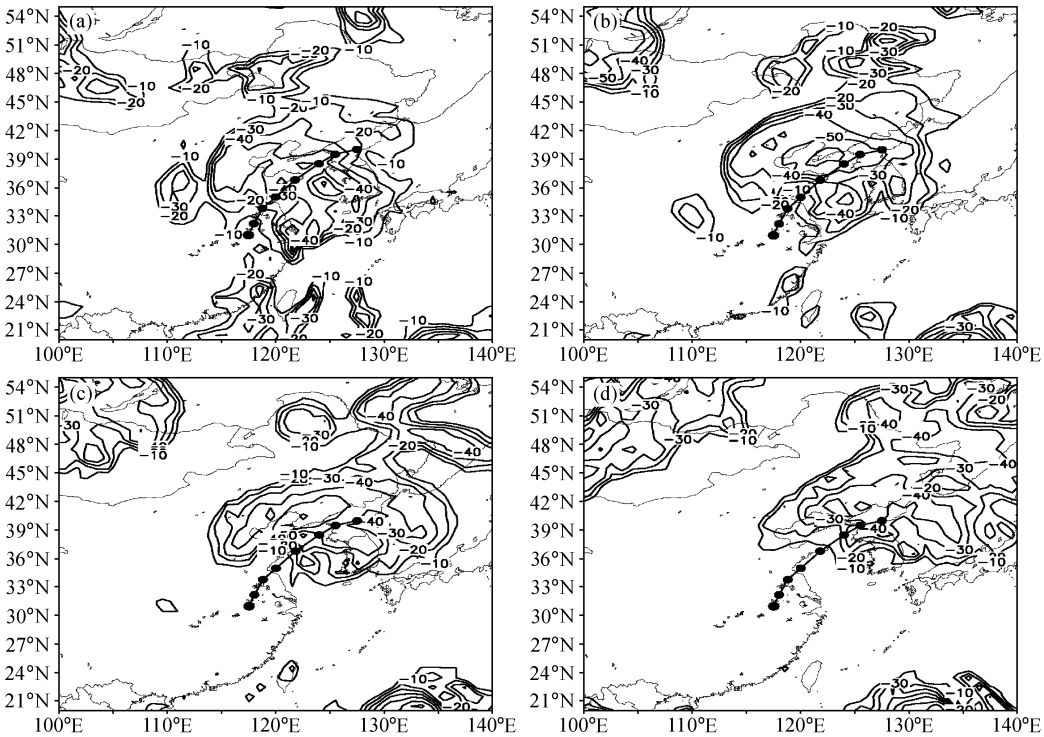

图 13 Polly 每 6 h 的 T_{BB}(单位：℃）分布和移动路径（初始时刻为 8 月 31 日 18 时）：(a) 1800 UTC 31 Aug；；(b) 0000 UTC 1 Sep；(c) 0600 UTC 1 Sep；(d) 1200 UTC 1 Sep

Fig. 13 T_{BB}(℃) distributions and tracks of Polly with 6-h interval (The initial time is 1800 UTC 31 Aug)：(a) 1800 UTC 31 Aug；(b) 0000 UTC 1 Sep；(c) 0600 UTC 1 Sep；(d) 1200 UTC 1 Sep

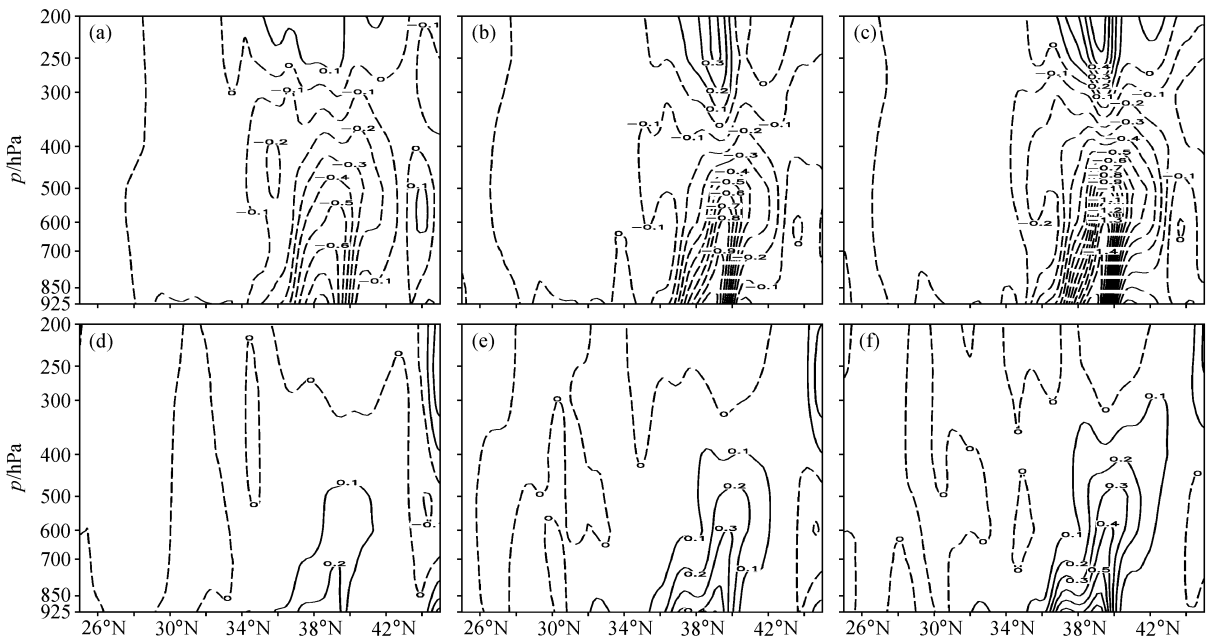

图 14 积分 12 h 过 121.6°E 的经向剖面图上控制试验和各敏感试验之间的位温差（a～f 分别为敏感试验 1～6）

Fig. 14 Meridional-vertical sections across 121.6°E of potential temperature differences between the control experiment and different sensitive experiments after 12 h integration [(a)-(f) are Expts SST1, SST2, SST3, SST4, SST5, SST6, respectively]

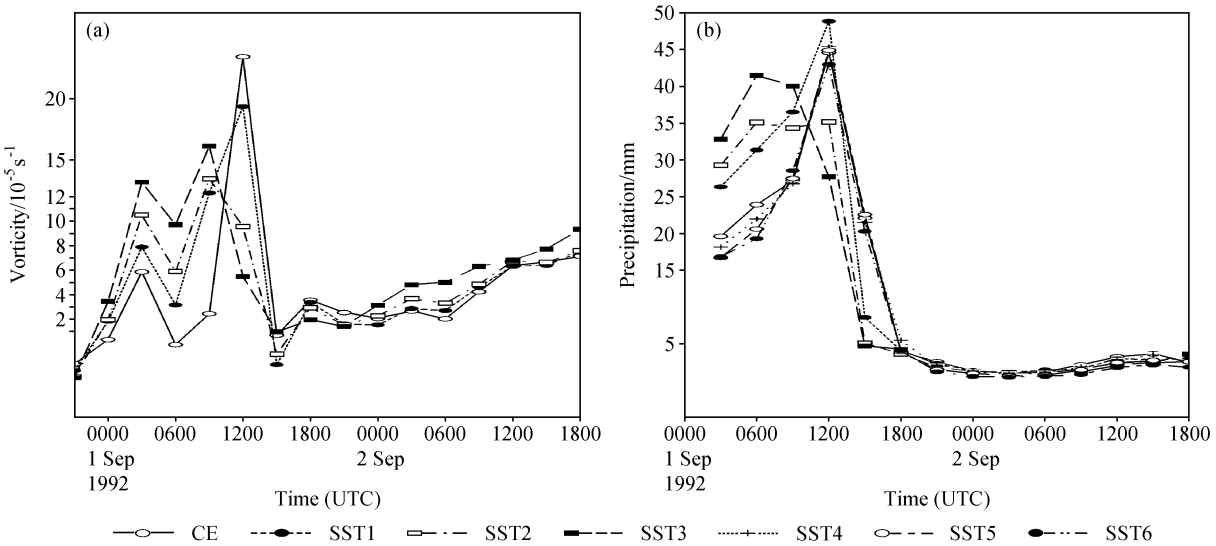

图 15　Polly 敏感试验的 850 hPa 涡度（a）和 3 h 降水量（b）随时间的变化

Fig. 15　Time evolutions of 850 hPa vorticity (a) and 3-h precipitation (b) in the Polly simulation experiments

5　总结

本文对 Polly 影响辽东半岛期间 TC 暴雨的环境特征进行了诊断分析，并从海温的角度，用数值试验方法研究了海温从渤海至黄海北部纬向升高或降低时，对辽东半岛 TC 暴雨的影响。结果表明：

（1）TC 沿副热带高压（西脊点在 120°E～125°E 之间）后部向偏北移动且处于西风槽前，低值系统发展加强。

（2）高空辐散低层辐合相叠置，高空急流在 35°N 以北，呈非纬向，有利于垂直上升运动的加强和 TC 外围云系北移与西风带高空槽云系耦合。

（3）辽东半岛地区为低空急流水汽输送辐合区。

（4）TC 北上过程中，中纬度斜压锋区穿过其中，使其获得斜压能量，变性发展为温带气旋。

（5）黄海北部海温升高使 TC 移动路径向海温暖舌区域偏折，即强辐合中心更靠近半岛。

（6）黄海北部海温升高，低层辐合和水汽输送明显加强，降水量显著增加。海温增温越大，TC 降水越强。黄海北部海温降低，低层辐合和水汽输送略有减弱，降水量减少不明显。降水量对海温变化的响应时间为 6～12 h。

辽东半岛环绕着渤海、渤海海峡和黄海北部，渤海最高温度出现在 6 月，黄海北部最高温度则出现在 8 月。在 4～7 月份，特别是 7 月，成山头附近海域冷涌上翻，海温偏低，通过本研究可论证，在此期间，TC 多绕过冷海域，偏东移出，对辽东半岛的降水影响不大[3]。7 月后，随着黄海北部海温的升高及副热带高压的第二次北跳，登路北上的 TC 对辽东半岛的强降水有直接影响。

参考文献(References)

[1] 陶诗言，等. 中国之暴雨. 北京：科学出版社，1980. 225pp
Tao Shiyan, et al. *Torrential Rain of China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 147～204

[2] 梁军，陈联寿，吴士杰，等. 影响黄渤海域热带气旋的灾害分析. 自然灾害学报，2007，**16**（2）：27～33
Liang Jun, Chen Lianshou, Wu Shijie, et al. Analysis of disaster of tropical cyclone affecting Huanghai Sea and Bohai Sea. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 2007, **16** (2): 27～33

[3] 梁军，陈联寿. 影响辽东半岛热带气旋运动、强度和影响的特征. 热带气象学报，2005，**21**（4）：410～419
Liang Jun, Chen Lianshou. Motion and intensity and impact characteristics of tropical cyclone affecting the Liaodong Peninsula. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2005, **21** (4): 410～419

[4] 陈联寿，罗哲贤，李英. 登陆热带气旋研究的进展. 气象学报，2004，**62**（5）：541～549
Chen Lianshou, Luo Zhexian, Li Ying. Research advances on tropical cyclone landfall process. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 541～549

[5] 陈联寿，丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京：科学出版社，

1979. 399～428

Chen Lianshou, Ding Yihui. *Introduction of the Western Pacific Typhoon* (in Chinese), Beijing: Science Press, 1979. 399～428

[6] 李英，陈联寿，张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征. 热带气象学报，2004，**20** (1)：14～23

Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. Statistical characteristics of landfalling tropical cyclone. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20** (1): 14～23

[7] 陶祖钰，田佰军，黄伟. 登陆台风暴雨和台风的不对称结构. 热带气象学报，1994，**10** (1)：69～77

Tao Zuyu, Tian Baijun, Huang Wei. Asymmetry structure and torrential rain of landing Typhoon 9216. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1994, **10** (1): 69～77

[8] 丁治英，陈久康. 台风中-α尺度重力惯性波的发展与暴雨增幅. 热带气象学报，1996，**12** (4)：333～340

Ding Zhiying, Chen Jiukang. The relation between the development of meso-α scale internal inertial gravity wave and the enhancement of rainstorm. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1996, **12** (4): 333～340

[9] 徐夏囡. 9216号台风登陆后的降水分析. 台风科学、业务实验和天气动力学理论的研究（第一分册），北京：气象出版社，1996. 52～59

Xu Xianan. Precipitation characteristics of landing Typhoon 9216. *On Science, Operational Experiments and Dynamics of Typhoon* (Volume 1) (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 1996, 52～59

[10] 郑庆林，吴军，蒋平. 我国东南海岸线分布对9216号台风暴雨增幅影响的数值研究. 热带气象学报，1996，**12** (4)：304～313

Zheng Qinglin, Wu Jun, Jiang Ping. Numerical study on the effect of the distribution of the southeast sealine of China on the amplifying of the torrential rain of the landing typhoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1996, **12** (4): 304～313

[11] 端义宏，秦增灏，顾建峰. 海温变化对热带气旋强度影响的数值实验 (I)——热带气旋强度的数值模拟和海温实验. 台风科学、业务实验和天气动力学理论的研究（第三分册）. 北京：气象出版社，1996. 129～134

Duan Yihong, Qin Zenghao, Gu Jianfeng. The numerical study of the effect of SST on tropical cyclone intensity (I)—The numerical simulation of TC intensity and SST experiments. *On Science, Operational Experiments and Dynamics of Typhoon* (Volume 3)(in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 1996. 129～134

[12] 端义宏，秦增灏，顾建峰. 海温变化对热带气旋强度影响的数值实验 (II)——海气耦合模式的实验结果. 台风科学、业务实验和天气动力学理论的研究（第三分册）. 北京：气象出版社，1996. 135～140

Duan Yihong, Qin Zenghao, Gu Jianfeng. The numerical study of the influence of SST on the intensity of TC (II)—The result in the air-sea couple model. *On Science, Operational Experiments and Dynamics of Typhoon* (Volume 3) (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 1996. 135～140

[13] 中国气象局编. 热带气旋年鉴(1992). 北京：气象出版社，1993，123pp

China Meteorological Administration. *Tropical Cyclone Yearbook* (1992) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 123pp

[14] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale Model (MM5). NCAR TECHNICAL NOTE, NCAR/TN-398 + STR, 1994

[15] Low-Nam S, Davis C. Development of a tropical cyclone bogussing scheme for the MM5 system. Preprint, The Eleventh PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, June 25-27, 2001, Boulder, Colorado, 130～134

[16] 张秀芝，裘越芳，吴迅英. 近百年中国近海海温变化. 气候与环境研究，2005，**10** (4)：799～807

Zhang Xiuzhi, Qiu Yuefang, Wu Xunying. The long-term change for sea surface temperature in the last 100 years in the offshore sea of China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 799～807

[17] 陈锦年，乐肯堂. 黄、渤海水温变异特性及其对埃尔尼诺现象和气温变化的响应. 海洋学报，1993，**15** (3)：126～132

Chen Jinnian, Yue Kentang. Characteristics of water temperature variation in the Yellow and Bohai Seas and their response to El Niño and air temperature change. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1993, **15** (3): 126～132

[18] 黎清才，王成恕，曹刚锋. 登陆北上台风暴雨突发性增强的一种机制研究. 大气科学，1998，**22** (2)：199～206

LI Qingcai, Wang Chengshu, Cao Gangfeng. A mechanism study of torrential rain intensifying due to landing typhoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1998, **22** (2): 199～206

[19] 朱佩君，陈敏，陶祖钰，等. 登陆台风Winnie (1997) 的数值模拟研究 I：结果检验和云系的模拟. 气象学报，2002，**60** (5)：553～559

Zhu Peijun, Chen Min, Tao Zuyu, et al. Numerical simulation of typhoon Winnie (1997) after landfall. Part I: Model verification and model clouds. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 553～559

[20] 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 the landfalling tropical cyclone and precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 91～98