

水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验

李 英 陈联寿 徐祥德

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 Bilis (0010) 是一个登陆后长久维持的热带气旋, 其维持期间与一条西南风低空急流水汽通道长时间保持联结。用中尺度模式 MM5V3 对其维持过程进行模拟, 并通过多个敏感性试验, 研究不同方向水汽输送对热带气旋在陆上维持和降水的影响。结果表明: 外界持续的水汽输送有利于热带气旋气旋性环流在陆地上维持, 减缓其登陆后的强度衰减。水汽输送通过影响热带气旋的热力结构来影响热带气旋强度, 充沛的水汽供应有利于热带气旋暖心维持。外界水汽输送有助于热带气旋雨带中的强对流活动, 使雨量加强。而对流活动过程中水汽凝结潜热释放是热带气旋获得能量继续维持的重要条件。结果还表明, 南边界水汽输送对热带气旋维持和降水的影响最为明显, 其次是东边界。来自北界和西界水汽的影响微弱。

关键词 水汽 热带气旋 登陆 维持 降水 试验

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0091-08

中图分类号 P444

文献标识码 A

Numerical Experiments of the Impact of Moisture Transportation on Sustaining of the Landfalling Tropical Cyclone and Precipitation

LI Ying, CHEN Lian-Shou, and XU Xiang-De

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Tropical cyclones are mainly driven by the energy from the release of latent heat which has a close relation to the moisture supply. As to the landfalling tropical cyclone, the moisture transportation plays an important role in its sustention over land. Bilis was sustained over land with 3 days long. The major characteristic of Bilis is that there existed a moisture transportation channel connected with the right circle of Bilis. This process would keep Bilis supplied with water vapor after it landed. Numerical experiments are is performed with PSU/NCAR MM5V3 to study the impact of moisture transportations from different directions on Bilis 'sustention and precipitation. Results demonstrate that moisture supply is favorable for maintaining Bilis 'circulation over land. It is found that (1) Bilis would decrease obviously without the moisture transportation from all lateral boundaries (2) moisture transportation affects the thermodynamic structure of typhoon to a great extent and plentiful water vapor is helpful to maintain Bilis 'warm core (3) plentiful moisture supply contributes to typhoon rainfall and convective activities which play a major role in typhoon sustention due to moisture condensation and latent heat release (4) the moisture transportation from the south lateral boundary has the most distinct impact on Bilis 'intensity and rainfall rather than from the other three boundaries.

Key words moisture, tropical cyclone, landfall, sustaining, precipitation, numerical experiment

1 引言

热带气旋 (TC) 主要能源是水汽凝结释放的潜热, 潜热加热作用造成 TC 暖心。水汽收支过程通过形成台风暖心来影响台风强度^[1]。TC 登陆后, 直接

取自海面的水汽被切断, TC 因摩擦耗散而减弱消亡。但亦有不少登陆后维持不消的例子, 如 7503 号台风、9711 号台风等, 均在陆地上维持 3~5 天, 甚至再次加强。统计研究^[2]表明, 登陆 TC 的维持与其登陆季节、登陆地区、登陆时的强度、陆表状况、环流背景

收稿日期 2003-12-15 收到, 2004-03-13 收到修改稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40175019 和国家科技部公益重点项目 2001DIA20026

作者简介 李英, 女, 1968 年出生, 博士生, 高级工程师, 目前从事登陆热带气旋的研究。E-mail: liying 6342@sina.com

等因子有关。陈联寿^[3]指出台风登陆后在陆地上维持不消的几个条件：台风环流保持水汽供应、具有正涡度的输入、中尺度对流系统的并入、获得斜压能量以及高空辐散增强等。其中，台风环流的水汽输入是其维持的重要条件。Emanuel^[4]和 Holland^[5]的研究结果表明，TC 未来的强度变化与环境湿度有正相关。丁一汇等^[6]和丁治英等^[7]分析台风水汽收支与其降水的关系，结果表明水汽输送对台风降水有明显影响。Rodgers 等^[8]和 West^[9]则强调 TC 降水与其强度变化的关系，指出 TC 环流中心附近降水释放潜热对其强度变化有重要影响。谭锐志等^[10]分析登陆台风 Freda (8407) 的衰减过程，认为水汽水平输送的减少大大抑制了台风内对流的发展和潜热释放，是其衰亡原因之一。梁力等^[11]和严光华等^[12]分析 9012 台风登陆后维持不消的机制，结果表明西南风低空急流将大量潮湿空气卷入台风是其获得潜热长期不消的重要因素。李英等^[13]曾对登陆后长久维持和迅速消亡两组 TC 的水汽输送特征进行对比，发现前者登陆后其环流仍与一支西南风低空急流水汽输送通道联结，而后者很快与水汽通道断开。0010 号台风 Bilis 就是其中一个登陆后长久维持的例子。本文用中尺度模式 MM5V3 对其陆上维持过程进行模拟，并通过一组敏感性试验，探讨不同水汽输送对 TC 在陆上维持及降水的影响。

2 模式、试验方案以及资料

用 PSU/NCAR 非静力平衡中尺度模式 MM5V3，设计双向反馈两重嵌套网格（如图 1a）。粗、细网格格距分别为：54 km，18 km，使用 30 min 和 10 min 地

形数据。模式区域中心点为 (28°N, 116°E)，格点数分别为 43 × 43 和 91 × 91，垂直方向 23 层 σ 坐标。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。

设计 6 种方案进行试验，包括一个控制试验和 5 个敏感性试验。分别是：

控制试验：模拟 Bilis 登陆维持过程，并为各敏感性试验提供对比；

敏感性试验 NALL：无外界水汽输送；

敏感性试验 NS：无南界水汽输送；

敏感性试验 NE：无东界水汽输送；

敏感性试验 NN：无北界水汽输送；

敏感性试验 NW：无西界水汽输送。

后四项试验的目的在于讨论各方向水汽输送对 TC 维持的相对重要性。通过修改模式粗网格不同侧边界上的水汽量来控制水汽输送的方向和大小。在各敏感性试验积分过程中，将相应侧边界上的比湿及其变化倾向取为 0 值。以细网格输出结果分析 TC 强度和降水对不同水汽输送的响应。所用资料为常规地面、探空观测资料和热带气旋年鉴资料^[14]以及国家气象中心提供的 T106 一日四次的全球分析场。其水平分辨率为 1.125° × 1.125°，垂直方向 17 层。

3 Bilis 登陆后的水汽输送和收支特征

0010 号台风 Bilis 穿过台湾岛后于 2000 年 8 月 23 日 10 时（北京时，下同）在福建晋江登陆（图 1a）。登陆时中心气压 965 hPa，登陆后移向西北，24 日 02

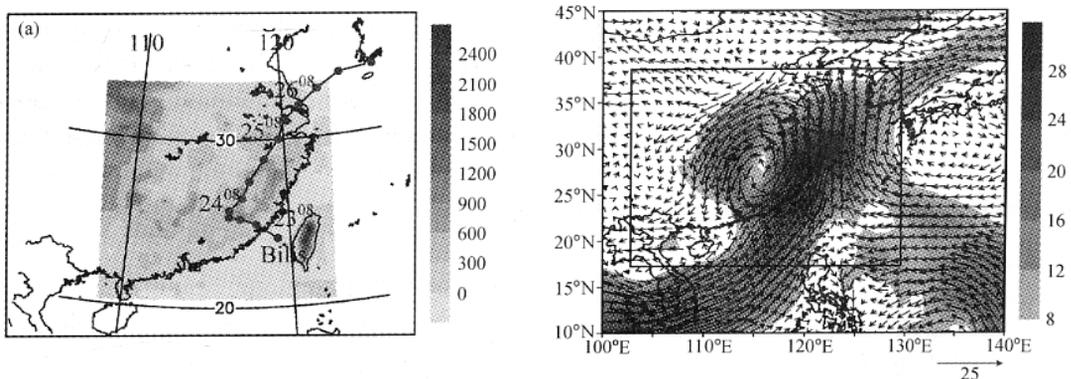


图 1 (a) Bilis 登陆路径 (次/6 小时) 和模式粗 (外框) 细网格区域及细网格地形高度 (阴影单位: m); (b) Bilis 登陆约 36 小时 850 hPa 流场和水汽通量 (阴影表示 $\geq 8.0 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), 方框指示模式的粗网格范围

Fig. 1 (a) Bilis' track with 6 h intervals and coarse-mesh domain (frame), fine-mesh domain and topographic height (shaded areas units: m); (b) 850 hPa stream field and moisture flux distribution (only values $\geq 8.0 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ shaded) at 36 h after landfall, the rectangle area indicates the simulated domain

时后转为热带低压。之后折向东北继续北上，在我国江苏发生变性并停滞。26 日 08 时后移入黄海消失。在此过程中，Bilis 强度衰减缓慢，气旋性环流保持完整。并与一条西南风低空急流带长时间相接，不断从其带来的海上湿空气中获得水汽补充。图 1b 给出 Bilis 登陆约 36 h (8 月 24 日 20 时) 850 hPa 流场以及水汽通量场。可以看出，登陆约 36 h，Bilis 仍与一西南风水汽通量大值带 (阴影) 保持联结。另外，自东南方也有弱水汽加入 TC 环流。

以图 1b 内方框为 TC 区域侧边界，考察不同方向水汽输送情况。以输入 TC 为正，则 TC 南、北、西、东侧边界上的水汽通量分别为： qv/g ， $-qv/g$ ， qu/g 和 $-qu/g$ 。图 2 显示 Bilis 登陆约 36 h 四个侧边界上水汽通量的垂直分布，可以看出，TC 区域南边界的水汽流入量 (正值) 最大。其输入带在 500 hPa 以下中低层，大值中心位于 850 hPa 高度以下；东边界水汽于南部低层进入 TC 区域，于北部中低层流出；西界和北界水汽以输出为主，其中北界有少部分水汽流入。总体而言，水汽经 TC 侧边界的流入大于流出。通过各侧边界的水汽量在登陆不同时次的不同 (图略)，登陆前期水汽通量明显，后期逐渐减弱，但不

同时期水汽通量在各边界上的分布均相似。

模拟区域的设计和积分时段考虑了 Bilis 的水汽输送特征。以图 1b 的方框为模拟区域 (方框选取的原则是不破坏台风的主体环流并能“截断”外界水汽输送)，以 Bilis 登陆后约 12 h，即 2000 年 8 月 23 日 20 时为初始场，积分 60 h 至其入海时刻 (2000 年 8 月 26 日 08 时)，对其在陆地上的强度变化和降水进行模拟。

4 试验结果分析

表 1 给出积分期间 Bilis 6 小时一次的海平面气压实况及各试验的细网格输出结果。

4.1 控制试验

表 1 显示，初始时刻控制试验 Bilis 的中心海平面气压 (p) 与观测值有较大的差距，这主要是客观分析场对 TC 强度的描述偏弱所致。但积分 6 h 以后，控制试验预报的 p 值及其变化趋势与观测吻合，并成功预报出 24 日 08 时 (积分 12 h) 以后 TC 低压缓慢衰减的过程。考察模式输出的 700 hPa 流场发现 (图略)，控制试验模拟的流场分布与客观分析十分接近。但 TC 中心位置比观测偏西 1~2 经距。控制试验

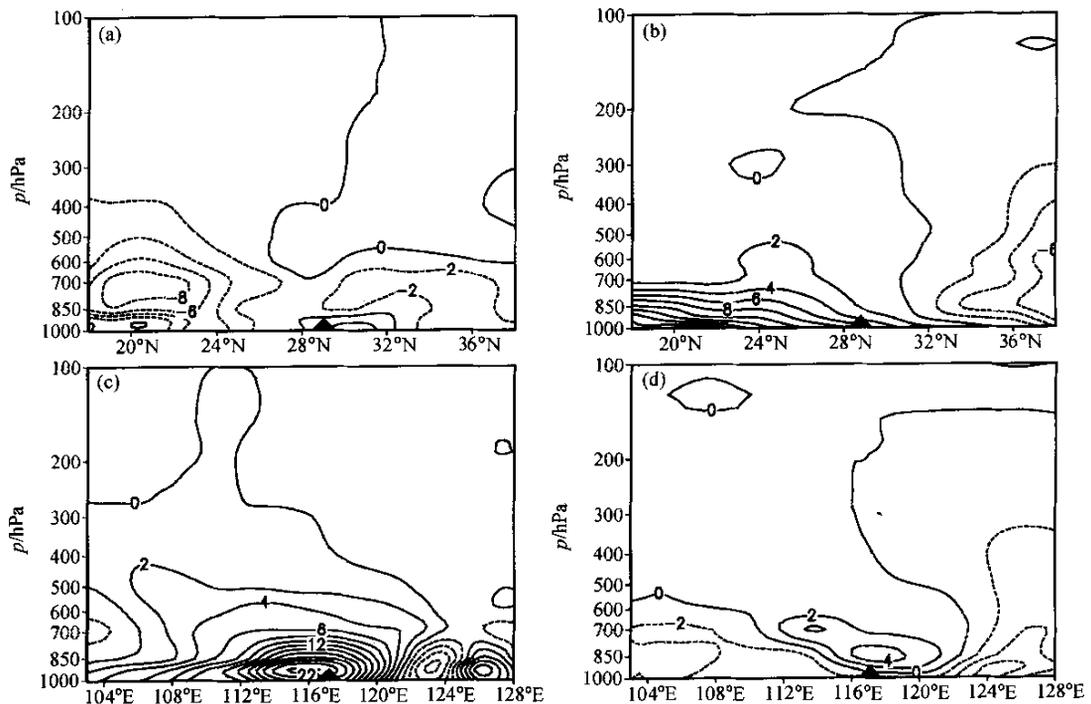


图 2 Bilis 登陆约 36 h 西 (a) 东 (b) 南 (c) 和北 (d) 四个侧边界上水汽通量 (单位： $g \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-1}$) 的垂直分布 (图中三角提示 Bilis 中心经纬度)

Fig. 2 Vertical sections of moisture flux ($g \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-1}$) through western (a), eastern (b), southern (c) and northern (d) lateral boundaries respectively at 36 h after landfall (the triangle indicates the location of the Bilis' center)

对 Bilis 维持和强度变化的模拟基本成功。

4.2 敏感性试验

4.2.1 TC 中心气压的响应

图 3 给出各敏感性试验预报的 p 值与控制试验 p 值 (参见表 1) 的偏差。图 3 显示, 各试验均对 TC 强度起衰减作用, 其中试验 NALL 对低压的填塞作用最为明显, 积分 24~48 h 衰减了 4~7 hPa, 积分 48 h 后衰减了 8~9 hPa, 积分 60 h 低压填塞至 1008 hPa, TC 气旋性环流几乎消失。这说明外界水汽截断对 TC 强度的影响非常明显。

表 1 试验时段 Bilis 海平面气压 (单位: hPa) 实况以及试验结果

Table 1 Bilis' sea level Pressure (p) of observation and simulations (units: hPa) during the integration period

积分时间/h Integration time	实况 Observation	控制试验 Control expt	NALL	NS	NE	NN	NW
0	985	995	995	995	995	995	995
6	992	997	998	998	997	998	998
12	997	998	999	999	999	999	999
18	997	998	1000	999	999	999	999
24	998	998	1001	1000	999	998	998
30	998	998	1002	1001	999	999	999
36	1000	998	1003	1003	1000	1000	999
42	1000	999	1005	1004	1000	1000	1000
48	1000	999	1006	1005	1001	1000	1000
54	1000	999	1007	1006	1001	1000	1000
60	1002	999	1008	1007	1001	1000	1000

试验 NS 对 TC 强度的衰减作用与试验 NALL 十分接近。积分 24 h 以后对 TC 的衰减幅度为 4~8 hPa, 仅次于试验 NALL, 比试验 NE, NN 和 NW 的衰减作用则强得多。说明在 TC 的四个侧边界中, 南边界水汽输送对 TC 维持的作用最为重要。

试验 NE 也对 TC 强度产生衰减, 但最强仅为 2 hPa。说明来自东边界水汽输送对 TC 强度的影响很小。

北界和西界以输出水汽为主, 仅有少量水汽流入。试验 NN 和试验 NW 对 TC 的衰减十分微弱, 北、西方向的水汽输送对 TC 维持影响几乎可以忽略。

图 3 还表明, 试验 NALL 和 NS 对 TC 低压的明显衰减出现在积分 24 h 以后, 这主要与外界水汽切断后 TC 区域内仍保留不少之前获得的以及自身携带的水汽有关。

由此可见, 登陆后 TC 的强度变化对水汽输送条件比较敏感。外界水汽供应有利于 TC 维持。与其他边界相比, 南边界水汽输送最为重要。下面分析不同水汽输送对 TC 结构、降水及对流活动的影响。积分 48 h 后, 试验 NALL 和 NS 预报的 Bilis 低压环流中心

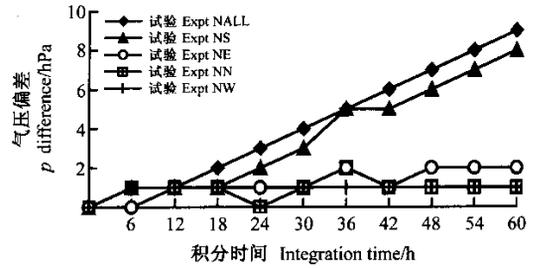


图 3 各敏感性试验与控制试验 TC 中心海平面气压偏差

Fig. 3 p differences between the sensitive experiments and the control experiment

与控制试验偏差约 2 个经纬距, 其他积分时段及其余试验的偏差很小。故这里用控制试验与敏感性试验的差场来分析水汽影响。

4.2.2 TC 风场的响应

下面以敏感性试验比湿 (q) 减去控制试验 q 所得差场表示水汽的减少量, 以控制实验风分量 (u , v) 分别减去与敏感性试验 u , v 所得环流差场来考察 TC 的衰减情况。低层环流差场中的气旋性环流越明显, 说明敏感性试验中 TC 环流的衰减越厉害。

图 4 给出 NALL 试验与控制试验的 850 hPa 比湿差场以及控制试验与 NALL 试验的环流差场。图 4 显示, 不考虑 Bilis 与外界水汽交换时, 积分过程中四个侧边界上 q 均减少 (阴影), 以南界为最, 东界次之, 北、西界微弱。积分 12 小时 (图 4a), TC 区域南、东边界上的水汽已开始减少, 而其内核区 (原点指示控制试验中 TC 中心位置) 水汽减少还很微弱。边界上 q 的减少随时间增强并向 TC 区域内扩展。积分 24 h 后 (图 4b~d), 边界上水汽的减少影响到 TC 中心区域, TC 中心附近的水汽明显减少。对应不同积分阶段, Bilis 的环流有不同程度的衰减。从控制试验与 NALL 试验的 850 hPa 环流差场看 (图 4e~h), 积分 12 小时 (图 4e), 仅 TC 东部风场辐合略有减弱, 还看不出其气旋性环流的衰减, 说明 NALL 试验气旋性环流还很强, 与控制试验抵消了。积分 24 h 以后, 环流差场 (图 4f~h) 中气旋性环流的衰减越来越明显, 说明 NALL 试验中 TC 环流越来越微弱, 而控制试验 TC 环流逐渐占主导。积分 60 h (图略), NALL 中 TC 环流基本消失, 环流差场中只剩下控制试验的 TC 流场。说明截断水汽输送条件将使 TC 环流很快消亡。可以看出, 登陆 TC 的维持对外界水汽输送比较敏感。

图 5 显示积分 48 h 各敏感性试验中的水汽输送状况及对 TC 环流的影响。不考虑南界水汽输送时 (试验 NS), TC 区域水汽量的减少最明显 (图 5a),

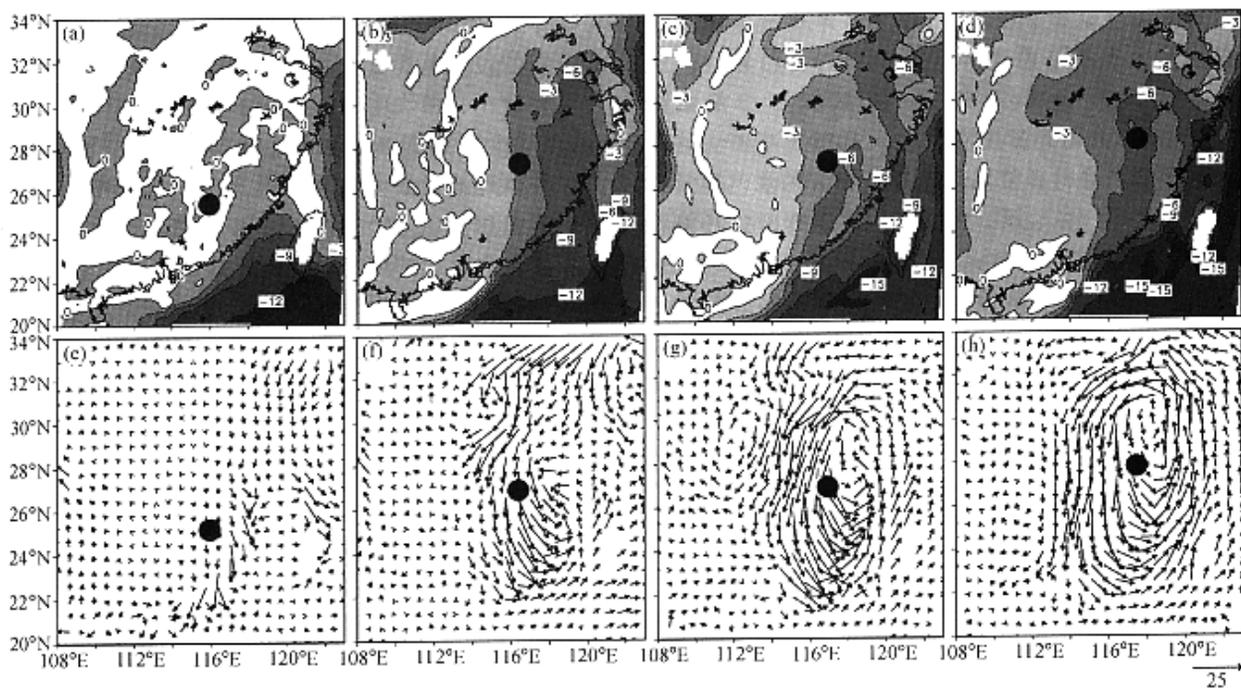


图4 NALL 试验与控制试验的 850 hPa 比湿 q 差场 (a~d, 单位: $g \cdot kg^{-1}$) 及控制试验与 NALL 试验的环流差场 (e~h), 圆点指示控制试验 TC 中心位置 (下同), (a),(e)积分 12 h;(b),(f)积分 24 h;(c),(g)积分 36 h;(d),(h)积分 48 h

Fig. 4 Specific humidity differences ($g \cdot kg^{-1}$, top panels) between NALL experiment and the control experiment and vector field differences (bottom panels) between the control experiment and NALL experiment after 12 h(a, e), 24 h (b, f), 36 h (c, g) and 48 h (d, h) integration (the dots indicate TC centers in the control experiment)

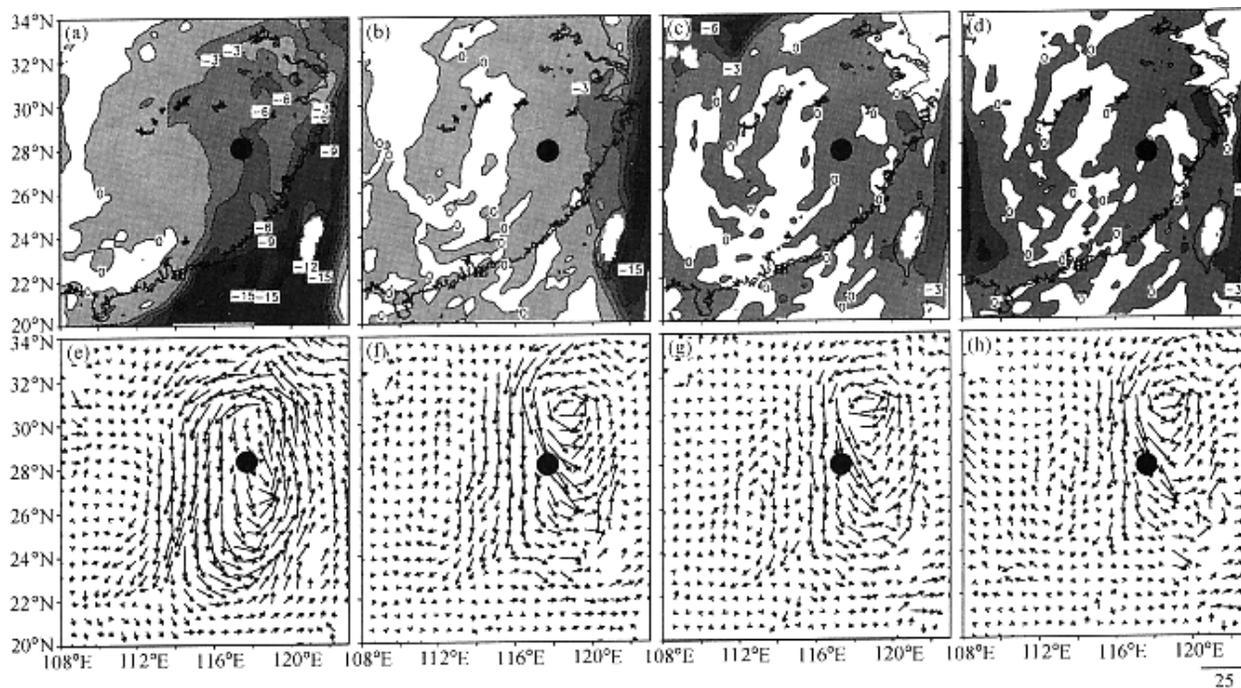


图5 各敏感性试验积分 48 小时 850 hPa 上比湿 q 的减少 (a~d) 及控制试验与各试验的环流差场 (e~h):(a),(e) NS;(b),(f) NE;(c),(g) NN;(d),(h) NW

Fig. 5 The same as Fig. 4, but for Exp. NS (a, e), Exp. NE (b, f), Exp. NN (c, g) and Exp. NW (d, h) after 48 h integration

其次是东界(试验 NE, 图 5b), 北界和西界的水汽以输出为主。不考虑北界(试验 NN)、西界(试验 NW)的水汽交换时, 仍引起 TC 区域 q 少量减少(图 5c, d), 此时东界的水汽输入也有所减弱。这可能与边界水汽条件改变后低压环流引起的水汽质量调整有关。图 5e~h 显示, 南界无水汽输送时, 环流差场中的气旋性环流最为明显, 说明试验 NS 的环流衰减最厉害(图 5e)。试验 NE, NN 和 NW 环流差场中的气旋性环流比试验 NS 弱(图 5f~h), 说明这些试验中 TC 环流衰减不如试验 NS 明显。前述分析表明, 试验 NE、NN 和 NW 中 TC 气压的衰减仅为 1~2 hPa, 但图 5f~h 中控制试验 TC 中心(圆点)东北方仍具有较明显气旋性环流, 这与敏感性试验积分 48 h 后仍具有较强气旋性环流且环流中心比控制试验偏东有关。

分析表明, 外界水汽输送对登陆 TC 气旋性环流的维持有明显影响。TC 登陆后如能从环流中获得外界水汽供应, 则能在陆上继续维持。其中来自南边界的水汽输送对 TC 维持最为重要。

4.2.3 TC 热力场的响应

图 6a~d 为积分过程中过 TC 中心的经向剖面上控制试验与 NALL 试验之间的位温差, 图中显示, 不

考虑 TC 外界水汽输送时, 积分 12 h(图 6a), TC 中心上空的位温差为正值, 说明 TC 加热减弱。但此时位温差较小, 最大中心值仅为 1.2 K。积分 24 h 以后(水汽减少影响到 TC 区域), TC 中心上空位温差增大, 并以近地层最为明显。积分 48 h(图 6d), 近地面位温差达 6 K, 而 500 hPa 高度附近增至 3 K。即切断外界水汽引起的加热减弱主要出现在低层, 其次是中层, 表明外界水汽主要从低空输送给 TC。TC 低层热量的丧失主要与来自海洋的暖湿气流被阻断有关, 而中高层主要与水汽垂直输送量和潜热释放量的减少有关。由此可见, 切断外界水汽供应时, TC 的加热程度减少, 不利于其暖心结构维持。

图 6e~h 为积分 36 h 过 TC 中心经向剖面上控制试验与各敏感性试验的位温差, 从中可以看出不同水汽输送对 TC 热力结构的影响。试验 NS 中 TC 上空气温的减少最为明显, 尤其在低层; 试验 NE, NN 和 NW 对气温的削减不明显。即不考虑南界水汽输送时, TC 暖心最不易维持, 而来自东界、北界和西界的水汽输送影响不明显。TC 低压衰减程度与其气温的削减程度对应。可见, 水汽输送量有利于 TC 的加热, 水汽输送通过影响 TC 的热力结构而影响 TC 维持。

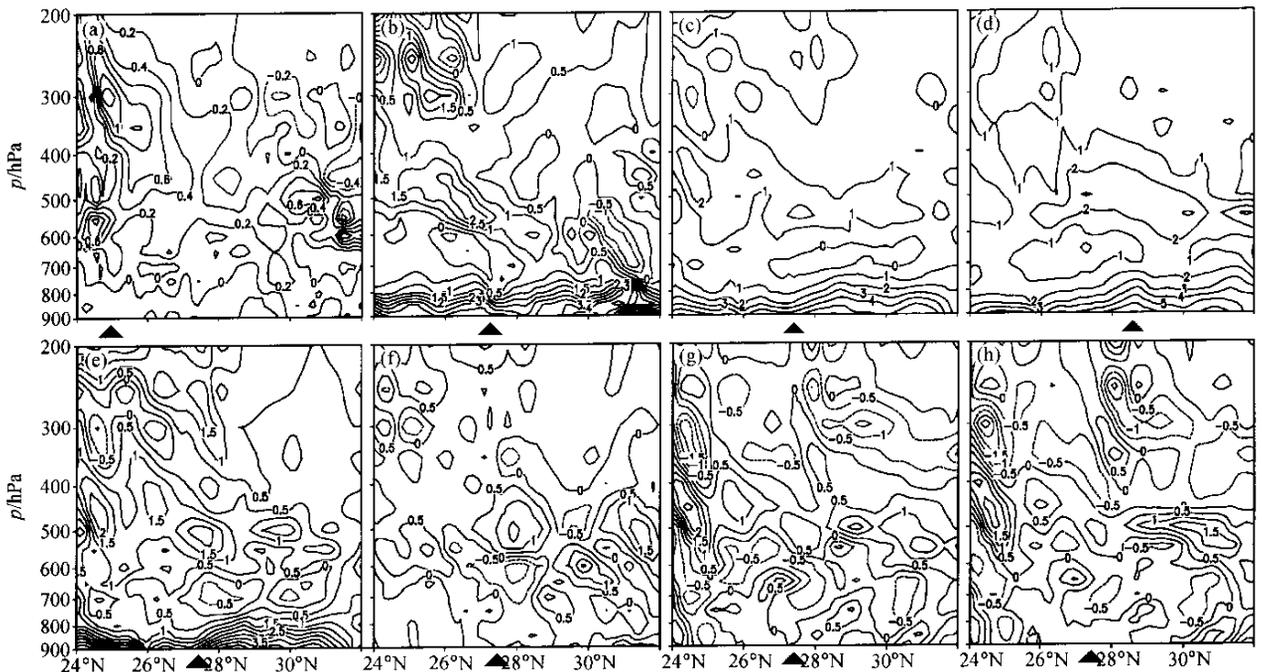


图 6 过 TC 中心的经向垂直剖面上控制试验与各敏感性试验之间的位温差(三角形: 控制试验 TC 中心位置): (a) NALL 积分 12 h; (b) NALL 积分 24 h; (c) NALL 积分 36 h; (d) NALL 积分 48 h; (e) NS 积分 36 h; (f) NE 积分 36 h; (g) NN 积分 36 h; (h) NW 积分 36 h

Fig. 6 Meridional vertical sections across TC centers of potential temperature differences between the control experiment and different sensitive experiments (the triangles indicate TC centers in the control experiment). (a), (b), (c), (d) Exp. NALL after 12 h, 24 h, 36 h and 48 h integration; (e), (f), (g), (h) Exp. NS, Exp. NE, Exp. NN and Exp. NW after 36 h integration

4.2.4 TC 降水的响应

水汽是降雨的重要条件，不同水汽输送必然影响 TC 降水。West^[9]指出，TC 正的强度变化出现在最大降水量增长之后。控制试验结果（图 7a）显示，积分 60 h 累计 100 mm 以上的降水分布在 115°E 以东，28°N 以南我国沿海一带，并有 500 mm 以上的强降水中心。最大降水量比实况^[13]偏多 100 mm 左右，降水

分布与实况大体一致。与控制试验相比，无水汽输送试验（图 7b）TC 降水范围明显收缩，降水量也显著减少。无南界水汽输送试验结果与之相似（图 7c），而试验 NE（图 7d），NN（图 7e）和 NW（图 7f）降水量的减少均不十分明显。可以看出，水汽输送是南边界水汽输送直接影响登陆 TC 降水强度和降水范围。

模式根据其输出的水汽凝结量计算了降水强度 I ，

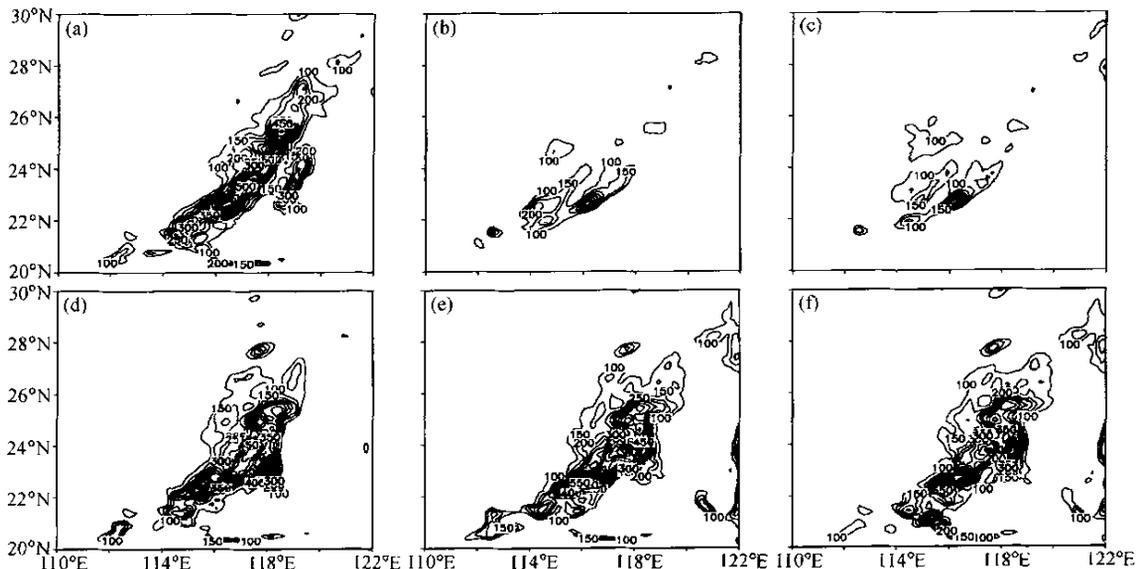


图 7 各敏感性试验积分 60 h 累计降水量分布 (≥ 100 mm 降水区): (a) 控制试验; (b) NALL; (c) NS; (d) NE; (e) NN; (f) NW
 Fig. 7 The total rainfall distributions of the control experiment (a), Exp. NALL (b), Exp. NS (c), Exp. NE (d), Exp. NN (e) and Exp. NW (f) after 60 h integration (only values ≥ 100 mm indicated)

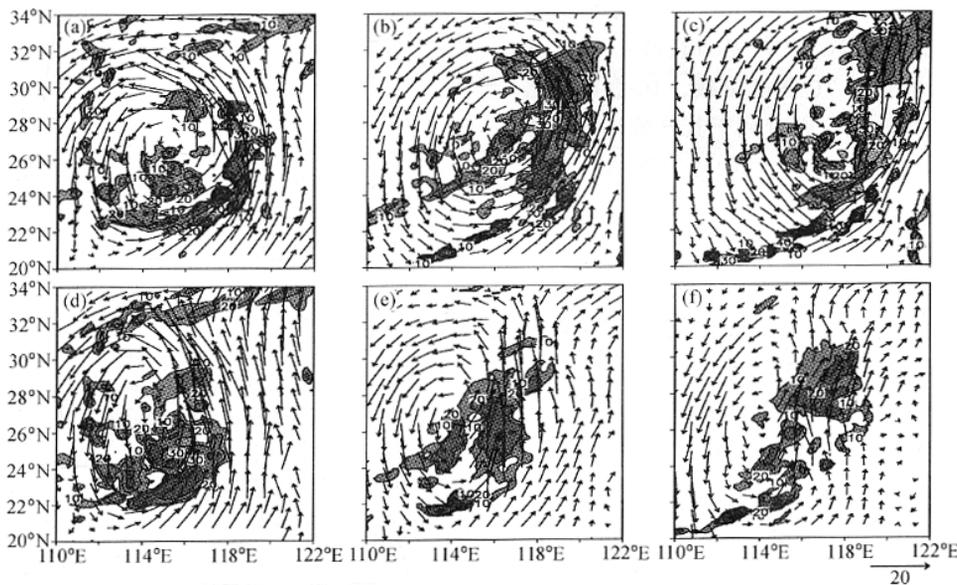


图 8 控制试验 (上) 和 NALL 试验 (下) 模拟的 850 hPa 雷达回波强度分布 (阴影表示 ≥ 10 dBZ): (a), (d) 积分 24 h; (b), (e) 积分 42 h; (c), (f) 积分 60 h
 Fig. 8 Simulated radar reflectivity intensity distributions (only values ≥ 10 dBZ shaded) in the control experiment (top panels) and Exp. NALL (bottom panels) after 24 h (a, d), 42 h (b, e) and 60 h (c, f) integration

并根据雷达反射率因子 Z 与 I 的关系式求出 Z 值, 最后换算为雷达回波强度的分贝数 (单位: dBZ)^[15]。从不同试验的雷达回波强度分布可了解水汽输送对 TC 环流中对流活动的影响。图 8 显示控制试验和试验 NALL 的 850 hPa 高度雷达回波及流场。可以看出, 积分 24 h (图 8a), 控制试验 Bilis 环流中具有螺旋式的对流云带, 其中 40 dBZ 的强回波区分布不均匀, 主要出现在气旋性环流东部, 与其强降水位置对应。此时, 截断外界水汽输送引起的水汽减少刚影响到 TC 区域, 但 118°E 以东区域对流云带已消失 (图 8d), Bilis 对流云带范围缩小, 强度有所减弱, 螺旋结构不明显。与控制试验相比, 位置偏西 0.5 个经度。积分 42 小时, 控制试验 Bilis 北上减弱, 环流拉长, 但其东部仍维持较强对流云带, 具有 30 dBZ 较强回波单体 (图 8b)。NALL 试验最强回波强度减弱至 20 dBZ (图 8e); 积分至 60 h, 控制试验的对流云带断裂, 结构趋于松散, 但其环流中仍有 30 dBZ 的较强回波出现 (图 8c), 而 NALL 云带分散减弱, TC 气旋性环流不明显 (图 8f)。由此可见, 截断水汽对 TC 环流中的对流活动有明显削弱。而对流活动是水汽凝结潜热释放, TC 获得能量维持其暖心的重要过程。

5 小结

用非静力中尺度模式 MM5V3 对台风 Bilis 在陆地上的维持过程进行模拟, 并设计了 5 组方案来测试不同水汽输送对 TC 维持和降水的影响, 结果表明: 外界水汽输送条件对登陆 TC 的维持和衰减有明显影响。水汽供应可减缓登陆 TC 强度衰减, TC 登陆后若能继续获得外界水汽补充, 则有利于其气旋性环流在陆上维持。水汽输送通过影响 TC 的热力结构来影响 TC 强度, 充沛的水汽供应有利于 TC 暖心维持。水汽输送有助于 TC 环流中的强对流活动, 增加降水量。而对流活动中水汽凝结、潜热释放是 TC 获得能量继续维持的重要条件。与其他边界相比, 南边界水汽输送对 TC 维持影响最为明显, 其次是东边界, 北界和西界影响微弱。

参考文献

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979, 491pp
Chen Lianshou, Ding Yihui. *Introduction to the Western Pacific Typhoons* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979, 491pp
- [2] 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 tropical cyclones making landfall on China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20** (1): 14~23
- [3] Chen Lianshou. Decay after landfall. WMO/TD, 1998, 875: 1~5
- [4] Holland G J. The maximum potential intensity of tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, 1997, **54**: 2519~2541
- [5] Emanuel K A. The maximum intensity of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **54**: 1143~1155
- [6] 丁一汇, 刘月贞. 7507 号台风中水汽收支的研究. 海洋学报, 1986, **8** (3): 291~301
Ding Yihui, Liu Yuezheng. Study of water vapor budget on Typhoon 7507. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1986, **8** (3): 291~301
- [7] 丁治英, 陈久康. 台风暴雨与环境水汽场的数值试验. 南京气象学院学报, 1995, **18** (1): 33~38
Ding Zhiying, Chen Jiukang. Numerical simulation of the typhoon rainstorm in relation to environmental vapor regime. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1995, **18** (1): 33~38
- [8] Rodgers E B, Pierce H F. A satellite observational study of precipitation characteristics in western North Pacific tropical cyclones. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, **34**: 2587~2599
- [9] West D A. The use of SSM/I rainfall to predict eastern North Pacific tropical cyclone intensity change. Symposium on Tropical Cyclone Intensity Change, 78th AMS Annual Meeting, Phoenix, Arizona, January 11~16, Preprint, 1998, 49~50
- [10] 谭锐志, 梁必骐. 登陆台风衰减和变性的对比研究. 中山大学学报 (自然科学版), 1989, **28** (4): 15~21
Tan Ruizhi, Liang Bijie. A study on decaying and transition of landfalling typhoon. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sungatseni* (in Chinese), 1989, **28** (4): 15~21
- [11] 梁力, 吴志伟, 严光华. 9012 热带气旋登陆后维持不消的动力机制. 热带气象学报, 1995, **11** (1): 26~34
Liang Li, Wu Zhiwei, Yan Guanghua. The dynamic mechanism maintaining typhoon 9012 in active stage long after landfall. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, **11** (1): 26~34
- [12] 严光华, 林仲平, 吴志伟. 9012 热带气旋登陆后维持的卫星云图和垂直结构特征分析. 台湾海峡, 1995, **14** (2): 174~180
Yan Guanghua, Lin Zhongping, Wu Zhiwei. Analysis on satellite images and vertical structure characteristics of typhoon 9012 during its sustaining period after landfall. *Taiwan Straits* (in Chinese), 1995, **14** (2): 174~180
- [13] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征. 气象学报, 2004, **61** (2): 167~179
Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (2): 167~179
- [14] 中国气象局编. 热带气旋年鉴 (2000). 北京: 气象出版社, 2001, 118pp
China Meteorological Administration. *Tropical Cyclone Year Book* (2000) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001, 118pp
- [15] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕编. 雷达气象学, 北京: 气象出版社, 2001, 511pp
Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi (Editors). *Radar Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001, 511pp