0577-6619/2011/69(3)-0496-07 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

热带气旋“碧利斯”与南海季风相互作用的强水汽特征数值研究*

叶成志[1,2] 李昀英[3]
YE Chengzhi[1,2] LI Yunying[3]

1. 中国气象局武汉暴雨研究所，武汉，430074
2. 湖南省气象台，长沙，410007
3. 中国人民解放军理工大学气象学院，南京，211101
1. *Institute for Heavy Rainfall*, *China Meteorological Administration*, *Wuhan* 430074, *China*
2. *Hunan Meteorological Bureau*, *Changsha* 410007, *China*
3. *Institute of Meteorology*, *PLA University of Science and Technology*, *Nanjing* 211101, *China*
2009-03-21 收稿，2011-02-03 改回.

Ye Chengzhi, Li Yunying. 2011. A numerical study of the characteristics of strong moisture transport as a result of the interaction of tropical storm Bilis with the South China Sea monsoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(3): 496-507

Abstract The landing of a strong tropical storm named Bilis (200604) created the favourable conditions for the formation of a long-lasting low-pressure system, whose interaction with the South China Sea (SCS) monsoon led to a peculiar rainfall in the southeastern part of Hunan Province. Based on various conventional observations, unconventional fine-grid observations, the NCEP reanalysis data, and the data from the meso-scale Advanced Regional Eta-coordinate Model (AREM), this study performed numerical simulation and diagnostic analysis of the characteristics of moisture transport during the heavy torrential rainfall process. A sensitive experiment was designed to reveal the specific water vapor source and the flow channel for the torrential rainfall in the southeastern part of Hunan. The results indicate that the interaction of Storm Bilis (2006) with the SCS monsoon played a key role in the moisture transportation during the heavy rainfall event. East of the storm center, there maintained a band of strong southerlies that carried moist air from the SCS monsoon to the north of the storm, where the moisture was continuously transported to southeastern Hunan by the increased northeast winds. The intercrossing of these northern and southern moisture currents formed a deep moist layer and strong vapor convergence over the southeastern Human. It played the most important role in maintaining Storm Bilis for a long period and producing the heavy rainfall over the southeastern part of Human.
Key words Tropical storm Bilis, Torrential rainfall, Monsoon, Moisture transportation

摘 要 强热带风暴“碧利斯”(0604)登陆后其低压环流较长时间地维持，并与南海季风相互作用，造成湖南省东南部发生历史罕见的特大致洪暴雨。文中应用多种常规、非常规细网格观测资料及 NECP 再分析资料，结合暴雨中尺度数值预报模式 AREM 对该暴雨过程的强水汽场特征进行了数值模拟和诊断分析，并设计水汽敏感性试验，进一步揭示造成湘东南特大暴雨的水汽通道和水汽来源。结果表明：“碧利斯”低压环流南侧的西南气流对湘东南暴雨区起到了主要水汽输送作用，且随着“碧利斯”逆时针旋转，水汽沿着环流中心东侧的强风速带夹卷到环流北侧，并通过增强的东北风源源不断地输送至湘东南。这南北两支主要水汽通道在湘东南长时间交汇，形成了湘东南暴雨区深厚的湿层和强水汽辐合，对“碧利斯”低压环流较长时间的维持及对湘东南特大暴雨的形成和发展有重要的作用。

---

* 资助课题：国家财政部/科技部公益类行业专项(GYHY200906010)、气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M35)、国家重点基础研究专项(2010CB951904)、国家自然科学基金项目(41075034)。
作者简介：叶成志，主要从事暴雨中尺度数值研究。E-mail：wfziyuye2001@yahoo.com.cn

关键词 “碧利斯”,暴雨,南海季风,水汽输送
中图法分类号 P458.1+24

1 引 言

水汽条件是登陆热带气旋(TC)陆上维持的一个重要条件,强的水汽输送也是台风暴雨增大的一个主要原因(陈联寿等,2001,2002,2004;Li,et al,2007)。有时不同台风虽具有类似的环流特征、相似的强度和移动路径,却可能造成完全迥异的降水强度和风雨分布特点,这可能与台风环流相关联的水汽场特征差异有关。国际上对于台风水汽的研究一般基于台风自身水汽垂直发展及其影响,Reed 等(1986)指出,由于水汽的上升运动引起的潜热释放,导致热带风暴中低层的静力不稳定;Bosart 等(2000)通过分析夏末初秋墨西哥湾的海温指出,海温的变化可能导致热带风暴和飓风水汽输送改变;Sobel 等(2005)通过分析厄尔尼诺与西北太平洋热带气旋的关系指出,赤道附近的西风带水汽通道的异常,也将影响热带风暴的形成。中国许多气象学者针对台风水汽场特征研究也作了大量的诊断分析和模拟试验,朱洪岩等(2000)通过数值模拟分析,强调了台风东侧的低层水汽输送对加强中纬度西风槽前降雨强度有重要作用;林爱兰等(2004)通过对强、弱热带西南季风作对比试验,结果表明西南季风加强了环境场的水汽通量输送,从而对热带气旋“黄蜂(0214)”的动力结构、热力结构和移动路径都有一定的影响;张建海等(2006)研究发现台风“云娜(0414)”登陆后低层水汽输送的非对称分布与降水落区有较好对应关系,水汽输送通过影响台风的热力结构来影响台风的强度;吴启树等(2006)分析了中低层水汽变化对 0010 号台风强度及降水的影响;丁治英等(1995)则揭示了台风中心右侧水汽通道区的水汽输送对 8407 号台风降水的重要性。

一般而言,绝大多数 TC 登陆因海面水汽和潜热通量被切断、能量被摩擦耗散而快速减弱,但 0604 号强热带风暴“碧利斯”登陆后其低气压环流经久不消,历时 5 天,在中国东南部造成了特大洪灾,尤其是湖南省东南部发生了连续性特大暴雨过程,造成极其严重的人员伤亡和财产损失。它所造成的强降水有两个主要特点:(1)登陆后的降水强度和范围均大于登陆时,其深入内陆降雨强度之大,持续时间之长,影响范围之广,在历史上极为少见;(2)最强降水不在风暴中心附近,而是出现在气旋性环流南侧与地面辐合线附近,这与一般的台风暴雨的分布特点不同。那么这种暴雨分布特点是否与其水汽场特征有关?其水汽场特征又是如何影响湘东南的降水强度和范围?为了更加深入和定量地分析此次湘东南特大暴雨过程中水汽的具体输送和收支状况,揭示其水汽来源和输送通道,本文利用气象、水文加密观测资料及 NECP 再分析资料,结合中尺度数值预报模式 AREM(宇如聪,1994,1995;曾庆存等,1994)的模拟结果,在水汽敏感性试验的基础上,结合区域平均水汽收支方程的计算结果来进行其水汽场特征的诊断分析和数值研究。以便有助于研究与南海季风相互作用(蒋小平等,2008)而造成的强水汽输送条件下台风暴雨的分布特征,为做好此类极端天气的预报服务提供更多更好的着眼点和思路。

2 过程概况和天气气候背景分析

0604 号热带风暴“碧利斯”于 2006 年 7 月 9 日在菲律宾以东洋面上生成,11 日下午加强为强热带风暴,13 日 23 时(北京时,下同)在台湾省宜兰登陆后,于 14 日 12 时 50 分在福建省霞浦北壁镇沿海再次登陆。登陆时中心气压 975 hPa,近中心最大风力 11 级,风速 30 m/s。登陆后以 10—15 km/h 的速度继续向西北偏西方向移动,15 日下午在江西西南部减弱为热带低压并缓慢地向西偏南方向移动,经过湖南、广西和云南,于 18 日晚在云南东部减弱并且消失。受其影响,湖南、福建、广东、广西、江西、云南省(区)部分地区,相继发生严重暴雨洪涝、山洪和地质灾害,尤其是湖南省东南部发生连续性特大暴雨过程,造成极其严重的人员伤亡和财产损失。据统计,7 月 14—17 日,湖南省 42 个县市降水超过 50 mm,24 个县市超过 100 mm,11 个县市超过 200 mm,4 个县市超过 300 mm,2 个县市超过 400 mm,其中资兴市东江库区龙溪站为 631.8 mm(水文站),永兴达 471.9 mm,均超过 500 年一遇降雨强度。暴雨引发山洪爆发,江河水位突涨。15 日 05 时东江水库出现建库以来入库最大洪水,洪峰达 9300 m^3/s,为百年一遇。耒水上涨 10 m 多,超警戒

水位 5.88 m,超历史最高水位 1.53 m,并且在超历史最高水位情况下维持 38 h。最终导致湘江干流全线超警戒水位,出现自 1994 年以来最大的洪水。全省 729 万人受灾,经济损失超过 78 亿元,死亡 417 人,失踪 109 人,综合评估为特大型气象灾害。

从 500 hPa 高度场环流形势调整和演变可以分析"碧利斯"登陆后低压环流长久维持的大尺度环流特征。7 月 10 日 08 时,500 hPa 锋区位于 40°N 附近偏北地带,亚洲北部地区为宽广的低槽区。副热带高压(副高)在 125°E 以东洋面上,呈块状分布。11 日 08 时,锋区北抬,副高西伸加强,轴向由 NNE 向 SSW 开始顺转,其西南部偏东南气流为台风的西北行进提供了引导气流。12 日 08 时以后,随着"碧利斯"进入南海东部,副高东撤北抬到 30°N 以北,其西侧的引导气流促使"碧利斯"偏北分量加大。13 日 20 时随着贝加尔湖高压脊的发展加强,华北高压形成并逐渐西扩,强度也不断增强,形成大陆高压与海上副高对峙的态势。14 日 20 时在其登陆后,减弱成的热带低压环流,处于北侧强大的大陆高压、东侧的副高和南侧的低纬赤道高压环流所形成的鞍型场包围之中,引导气流较弱,主要在内力的作用下,以西行为主。在其西行过程中,副高西伸加强,副高与台风之间的位势梯度加大使南风加强或维持(任素玲等,2007),"碧利斯"东侧的水汽输送通道得以维持或加强。水汽的充分供应使"碧利斯"登陆后强度非但没有迅速衰减,反而维持了较长时间,并与增强的南海季风相互作用,激发了低压环流内部中尺度强对流系统发生、发展,对湘东南暴雨的产生起到了组织和促进作用。

据国家气候中心 2006 年 5 月发布的第 1 期季风监测报告表明:5 月第 4 候,对流层低层索马里和80°E 附近越赤道气流均较第 3 候明显加强,监测区内出现了明显的西南风,同时南海地区对流活动明显加强、北抬,南海夏季风爆发。第 5 候对流层高层南海地区上空东北气流明显加强,对流层低层索马里越赤道气流亦进一步加强,中南半岛完全被西南风所控制,大尺度环流背景及华南地区天气实况显示东亚夏季风环流形势已经建立。从 7 月第 3 候候平均 850 hPa 水汽输送图来看(图 1),越赤道气流与孟加拉湾气流合并后进入南海的西南气流,携带了大量的水汽。同时,分析南海监测区域纬向风指数表明(图 2),6 月下旬南海纬向风指数开始加大,7 月 6—13 日一直在加强,在"碧利斯"登陆时达到最大,随后逐渐减弱,7 月 15—17 日仍处于季风活跃期。强盛的南海季风既为"碧利斯"登陆后强度的维持提供了充足的潜热源,又为暴雨区上空输送了充足水汽和能量。

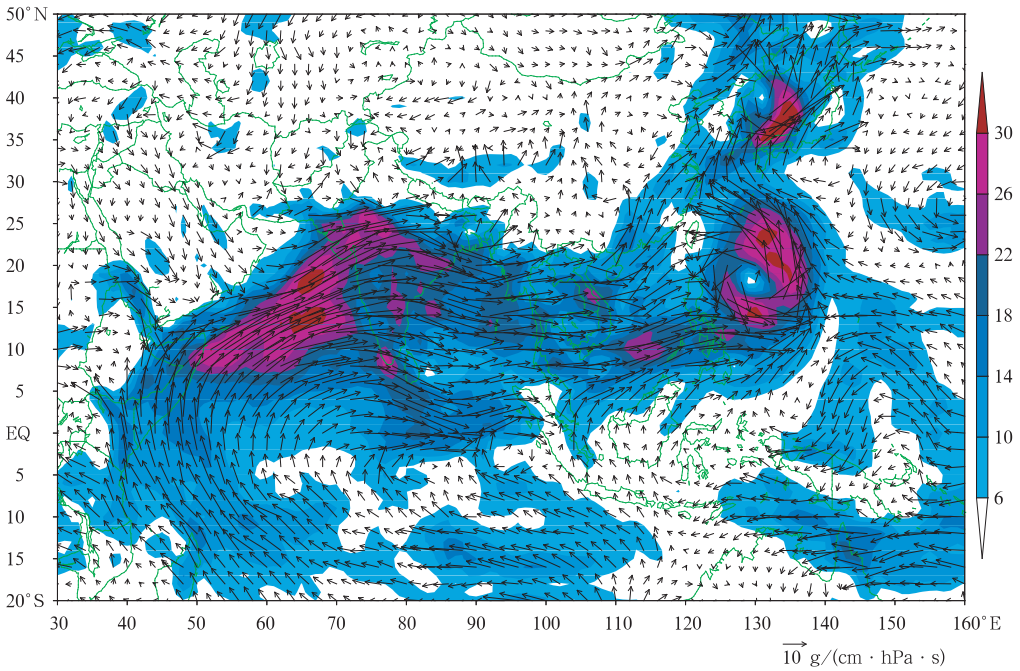

图 1 2006 年 7 月 11—15 日候平均 850 hPa 水汽通量(单位:g/(cm·hPa·s))分布

Fig.1 Pentad-averaged 850 hPa vapor flux (unit: g/(cm·hPa·s)) transportaion over 11 to 15 July 2006

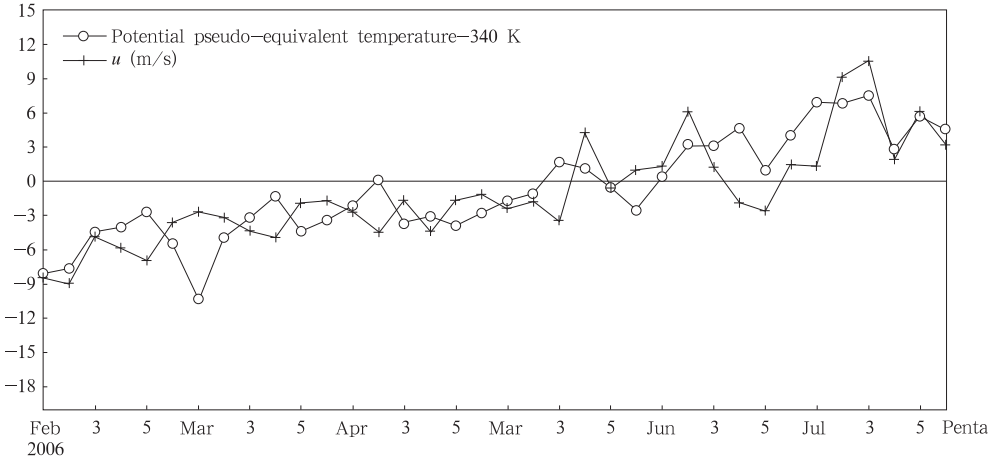

图 2 2006 年 2—7 月南海监测区域纬向风(单位:m/s)和假相当位温 (单位:K) 变化

Fig. 2 Variations of the zonal wind (unit: m/s) and potential pseudo-equivalent temperatures (unit: K) over the monitering area of the South China Sea during the period of February to July 2006

此外,从 1 月第 4 候至 7 月第 3 候 110°—120°E 候平均假相当位温时间-纬度剖面图(图略)上看,7 月第 3 候 15°—35°N 范围内假相当位温达到了自 2006 年以来的最高值(350—360 K),对应露点温度也达到了高值(18—20℃),由此表明该区域已处于高温高湿和高能阶段,有利于扰动形成和对流不稳定能量产生,形成了有利于强降水产生的热力条件。

3 AREM 模式简介及模拟试验方案设计

3.1 模式简介

本文使用的模式是中国科学院大气物理研究所 LASG 实验室建立的中尺度暴雨数值预报模式 AREM,该模式从 20 世纪 90 年代中期开始在中国的气象、水文、环境和军事气象保障的科研和业务单位得到了广泛应用。从近几年开展的汛期业务试验效果来看(宇如聪等,2004;王叶红等,2003;李昀英等,2010),对东亚暴雨特别是长江流域梅雨锋暴雨具有较强的模拟和预报能力,目前又被用于对热带气旋数值模拟研究和预报技术开发方面。

3.2 模拟试验设计

模式运行范围为(0°—50°N,80°—140°E,)水平分辨率 37 km×37 km。物理过程中,积云对流采用改进的 Betts 调整方案(Betts,1986),大尺度降水采用显式云雨方案(Xu,et al,1998),边界层采用非局地边界层方案 (Holtslag,et al,1993),由于是针对短期天气过程的模拟,辐射采用仅考虑地表辐射平衡的方案(Ghan,et al,1982),陆面过程采用 BATS 方案(Dickinson,et al,1993) 。模拟初值选用 2006 年 7 月 13 日 20 时 NCEP 的客观分析场,不嵌入人造台风方案,每 6 h 一次的时变侧边界值,连续积分 60 h,逐时输出一次模拟变量场,称为参照试验(Exp_ctl)。

4 与南海季风相互作用的强水汽场特征的诊断分析和数值研究

4.1 参照试验模拟效果分析

是否能对大气环流特征和暴雨落区、强度以及主要影响时段等做出较准确的模拟,是检验模式性能优劣的主要度量指标,而好的模式性能则是本文进行数值实验和诊断分析的基础。下面分别从"碧利斯"移动路径、强度、大尺度环流背景、低层风场特征、水汽场及降水场等多方面进行对比检验。由于模式对于地形以下的结果并未输出,所以等压面图上部分区域等值线显得不完整。

4.1.1 "碧利斯"移动路径和强度的模拟与检验

从实测和模拟的台风路径对比图(图 3) 中可以发现,模式较准确地再现了"碧利斯"登陆前后 60 h 移动和演变的全过程。虽然总体预报路径偏西偏北(这可能与"碧利斯"强度模拟偏弱有关),而且随着预报时效延长,偏差明显增大。但在其移动过程中,模拟位置的最大偏移量在 100 km 以内,而且两次登陆的时间、地点以及整个过程的移向、移速的时变

特征也与实况大致吻合,因此模式对“碧利斯”登陆时间及移动路径的模拟是比较成功的。

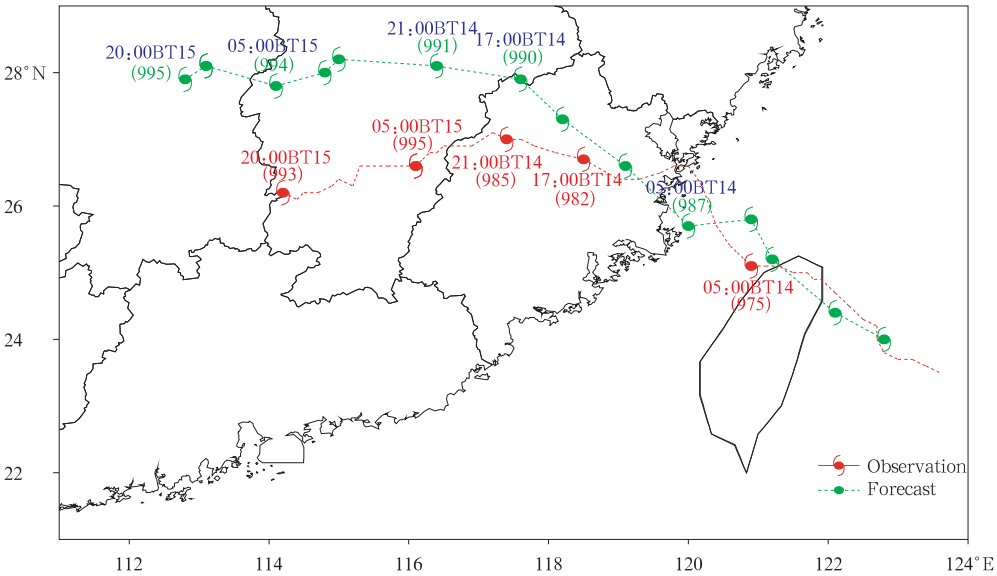

图 3 13 日 21 时—15 日 20 时强热带风暴“碧利斯”路径实况(红线)和模拟预报(绿线)

Fig. 3 Tracks of the tropical storm “Bilis” from 21:00 BT 13 to 20:00 BT 15

(red line: observation; green line: forcast)

4.1.2 形势场的模拟与检验

模式对大尺度天气形势、中低层环流特征及引导气流有较强的模拟能力,是台风移动路径和强度准确刻画的前提。对比分析 7 月 15 日 20 时 500 hPa 高度场、850 hPa 风矢量的实况(图 4a)及模拟可知(图 4b),AREM 模式很好地刻画了“碧利斯”发展演变的大尺度环流背景特征,模拟的副热带高压和大陆高压位置、形状与强度以及中高纬度锋面系统位置、强度与分析场十分接近。此外,该模式对“碧利斯”低层风场的分布和结构及其引导气流也作了较好的再现。但模拟的台风强度偏弱,这可能是受模式初值的影响(程锐等,2007)。此外,由于模式采用静力平衡的动力框架,而且模拟的格距还不够精细(37 km),也可能会影响台风强度的模拟效果;因此,如果具备更精确的初值,进一步提高模式分辨率,将会得到更好的刻画。

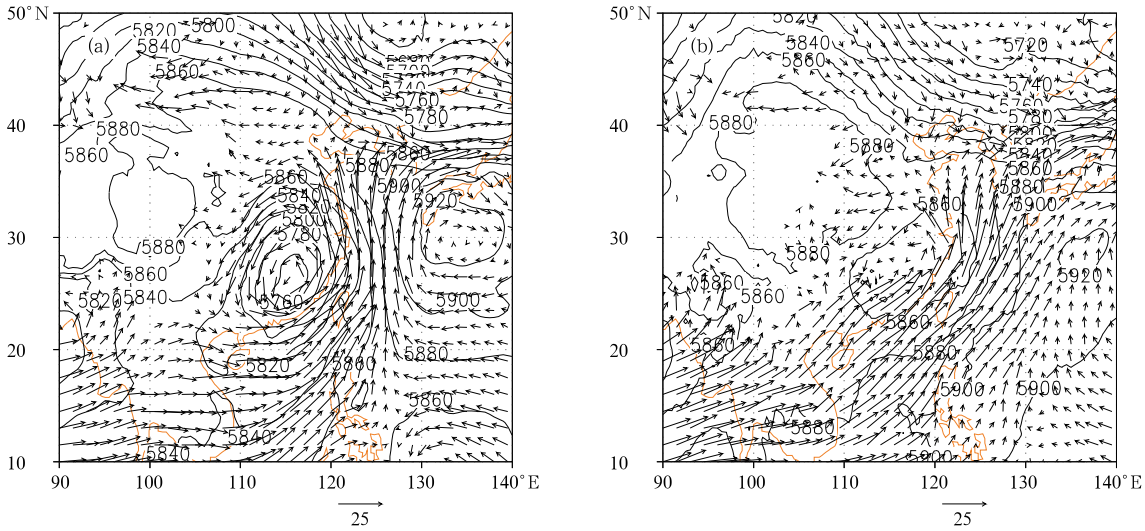

图 4 2006 年 7 月 15 日 20 时 500 hPa 高度场(单位:gpm)与 850 hPa 风矢量叠加分布

(a. NCEP 资料分析结果,b. 模拟)

Fig. 4 500 hPa geopotential fields (unit: gpm) and 850 hPa wind fields at 20:00 BT 15 July 2006

(a. NECP reanalysis, b. AREM simulation)

4.1.3 水汽场的模拟与检验

从2006年7月15日14时即“碧利斯”影响湖南的最强时段的水汽通量散度实况(图5a)可以看出,从湖南东南部、广东北部至江西南部有一条强的水汽通量辐合带,中心值达到了 -1.0×10^{-4} g/(cm^2·hPa·s)。对比分析图5b,可见模式模拟的水汽通量辐合强度总体上虽较实况略偏强(中心强度高达 -2.5×10^{-4} g/(cm^2·hPa·s))、位置略偏南,但强水汽辐合区形状、范围及中心位置等均与实况较吻合。由此可见,模式对水汽场特征较好的模拟性能是本文进行水汽敏感性实验的基础。

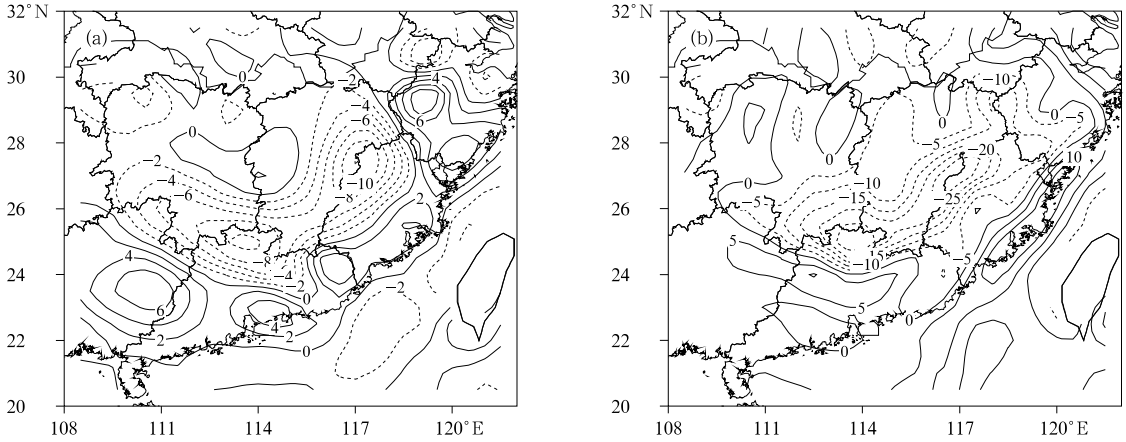

图5 2006年7月15日14时850 hPa水汽通量散度分布

(a.实况,b.模拟;单位:10^{-5} g/(cm^2·hPa·s))

Fig.5 850 hPa divergences of water vapor flux at 14:00 BT 15 July 2006

(a. NECP reanalysis, b. AREM simulation; unit: 10^{-5} g/(cm^2·hPa·s))

4.1.4 降水场的模拟与检验

从参照试验的模拟结果(图6b)与实况对照(图6a)来看,模式对湘东南暴雨落区、强度有很好的刻画,大暴雨中心位置较实况虽略为偏南,但对其形状、走势和中心强度仍有细致描述。模式在27°N以北的湘赣交界处模拟出一条东北—西南走向的虚假条状降水带,这可能与模式模拟的台风低压环流中心位置偏北及湘赣交界的地形影响有关。

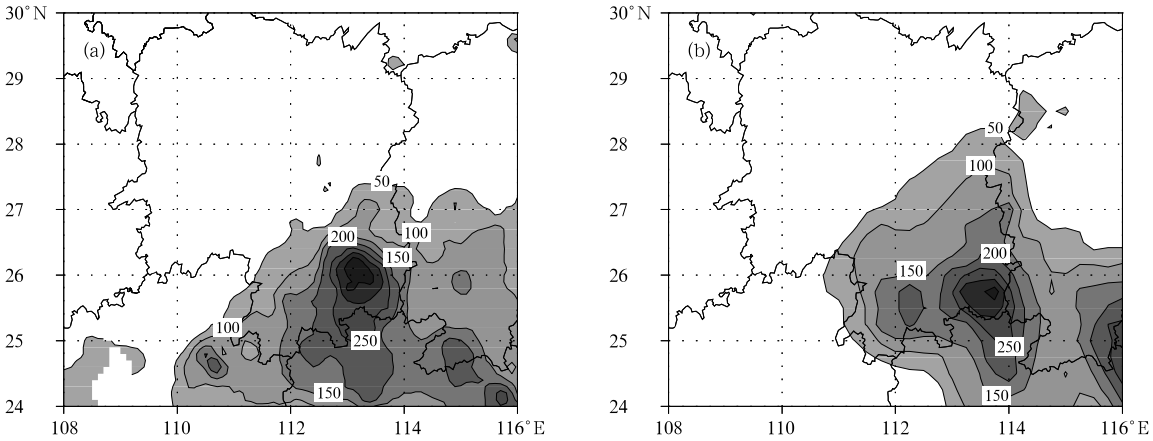

图6 2006年7月14日08时—16日08时降水实况(a)与参照试验降水模拟结果(b)(单位:mm)

Fig.6 48-h accumulated precipitations (mm) from 08:00 BT 14 to 08:00 BT 16 July 2006

(a. observation; b. model simulation)

为了进一步检验模式对湘东南区域逐时降水的模拟能力,针对湘东南最强降水区域(24.5°—26.5°N,112°—114°E)平均逐时降水量及演变趋势进行了对比分析。对比分析模式模拟(虚线)和观测(实线)的区域平均逐时降水变化曲线(图7)可知,模式对湘东南降水最强时段的时变特征具有一定的模拟能力,对其降水分别在15日03、14时出现峰值及之后强度逐渐减弱的演变趋势也有较好的刻画。但是在定量描述方面,存在对最强降水的峰值模拟偏弱,而在大部分时段内模拟降水量比实况偏大的问题。这可能是由于本文模拟试验所采用的模式版本分辨率不高,以至于对极端降水的模拟性能偏弱,这也是下一步研究工作需改进的一个重要方面(赵磊刚,2007;叶成志等,2009)。

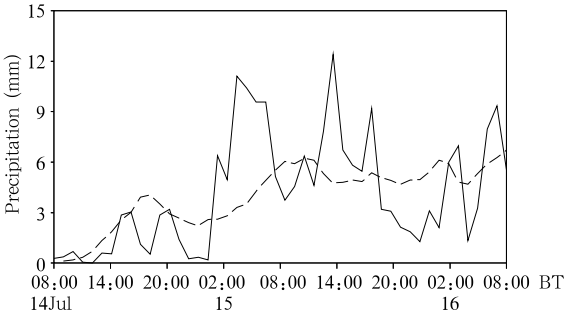

图7 2006年7月14日08时—16日08时湘东南地区(24.5°—26.5°N,112°—114°E)平均逐时降水量(单位:mm)的时间演变(实线:观测;虚线:模拟)

Fig.7 Hourly region-averaged precipitations (mm) from 08:00 BT 14 to 08:00 BT 16 July 2006 over the region (24.5°-26.5°N, 112°-114°E) derived from the observation (solid line) and the simulation (dashed line)

4.2 水汽场诊断分析

本文通过覆盖湘东南地区的区域平均水汽收支方程来分析湘东南特大暴雨过程中水汽的具体输送和收支状况,所选的计算区域为(25.5°—27.0°N,112°—114°E)。

区域平均水汽收支方程(丁一汇等,1988;丁一汇,1989,2005)为

$$\frac{1}{\sigma g}\int_{p_u}^{p_s}\int_{\sigma}\left[\frac{\partial q}{\partial t}+\nabla\cdot q\boldsymbol{v}+\frac{\partial q\omega}{\partial p}\right]\mathrm{d}p\mathrm{d}\sigma=-m+E_s \tag{1}$$

其中,σ 为选定区域,p_s 为地面气压,p_u 为顶层气压,$\frac{1}{g}\frac{\partial q}{\partial t}$是水汽的局地变化项,$\frac{1}{\sigma g}\nabla\cdot q\boldsymbol{v}$ 是水汽通量项(或称水汽通量散度),$\frac{1}{\sigma g}\frac{\partial q\omega}{\partial p}$是水汽垂直输送项,$m$ 是水汽凝结项(或称降水项),E_s 是蒸发项,方程在各垂直层上计算(Li,et al,2009),为了具体分析"碧利斯"的水汽来源,本文仅计算区域平均水汽方程的左边各项。

图8中实线、短虚线和长虚线分别表示水汽局地变化$\frac{1}{g}\frac{\partial q}{\partial t}$、水汽通量散度$\frac{1}{\sigma g}\nabla\cdot q\boldsymbol{v}$ 和水汽垂直输送$\frac{1}{\sigma g}\frac{\partial q\omega}{\partial p}$的时间和区域平均值随高度的变化曲线,在各项量值上,水汽局地变化比另2项小一个数量级,表明水汽局地变化相对水汽垂直输送和水汽通量散度是小项,但是对比分析三者的垂直分布仍然可以得到有意义的结论。从图8中$\frac{1}{g}\frac{\partial q}{\partial t}$的变化曲线可以清楚地看到,区域局地水汽从低层一直到200 hPa均为正值或接近于0,表明区域局地水汽从低层一直到对流层高层都是变化不大或增加的。从$\frac{1}{\sigma g}\nabla\cdot q\boldsymbol{v}$ 的变化曲线可以看出,在地面至750 hPa为水汽辐合层,但是水汽辐合主要集中在800 hPa以下,750 hPa以上转为水汽弱辐散。从$\frac{1}{\sigma g}\frac{\partial q\omega}{\partial p}$的变化曲线(负值表示水汽向上输送)可以看出,从近地面一直到200 hPa高空均为向上水汽垂直输送。此外,区域内水汽的垂直输送从地面至600 hPa是逐渐增强的,600—300 hPa仍维持较强的垂直输送状态,300 hPa以上垂直输送有所减弱。由$\frac{1}{\sigma g}\nabla\cdot q\boldsymbol{v}$和$\frac{1}{\sigma g}\frac{\partial q\omega}{\partial p}$的变化曲线对比可知,在800 hPa以下,前者的绝对量值大于后者,而在800 hPa以上则刚好相反,这表明在800 hPa以下,水汽水平辐合相对水汽垂直输送对区域上空局地水汽变化起主要作用,而在800 hPa以上,水汽垂直输送相对于水汽水平辐合对局地水汽变化起主要作用。由于水汽的辐合和垂直输送,水汽的局地变化量略有增加。以上分析表明:在"碧利斯"对湘东南的主要影响时段内,区

域近地面至 800 hPa 高度,水汽以平流输送为主,以水平通量辐合的形式在暴雨区上空大量汇聚,经由强烈的垂直上升运动输送至对流层中高层。

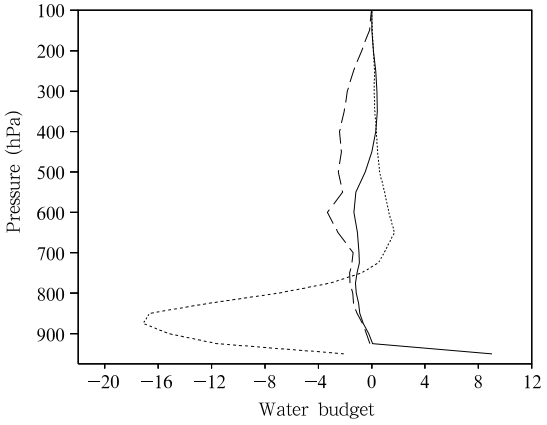

图 8 "碧利斯"时间及区域(25.5°—27.0°N,112°—114°E)平均的水汽收支垂直廓线
(实线:水汽局地变化,单位:10^{-6} g/(cm^2 · hPa · s);
短虚线:水汽通量散度,单位:10^{-5} g/(cm^2 · hPa · s);
长虚线:水汽垂直输送,单位:10^{-5} g/(cm^2 · hPa · s))

Fig. 8 Temporal and region-averaged profiles of the moisture budgets for Bilis over the region (25.5°-27.0°N,112°-114°E)
(solid lines are for the local change of moisture, unit: 10^{-6} g/(cm^2 · hPa · s);
short dashed lines are for the moisture flux divergence, unit: 10^{-5} g/(cm^2 · hPa · s); and
long dashed lines are for the vertical transport of moisture, unit: 10^{-5} g/(cm^2 · hPa · s))

4.3 模式水汽敏感性试验结果分析

以上诊断分析表明,"碧利斯"造成的湘东南特大暴雨的水汽主要源于对流层中低层风场辐合造成的水汽通量辐合,但是究竟湘东南计算区域的哪个边界对水汽通量辐合起主要作用呢?下面利用模式逐时输出的资料,采用空气质点三维轨迹计算方法(朱艳秋,1992;Wernli ,et al,1997),计算暴雨区上空 700 hPa 空气质点的轨迹,并设计模式水汽敏感性试验(徐祥德等,2003;李英等,2005),进一步揭示造成湘东南特大暴雨的水汽通道和水汽来源(章志英,2004)。

从模式积分第 60 小时向前回推得到暴雨区上空 700 hPa 上 25 个空气质点的轨迹形态(图 9)上看,区域上空 700 hPa 高度的空气质点主要来源于 800 hPa 以下低层,空气质点运动具有北边的空气质点从高层下沉而南边的从低层爬升的特点,揭示了"碧利斯"造成的湘东南特大暴雨过程的两条主要水汽通道,一条是与南海季风相联系的西南水汽通道,通过 850 hPa 的水汽通量输送和风场环流特点分析(图略),该水汽输送高值区有两个主要来源:(1)来源于孟加拉湾跨越中南半岛南部的偏西气流输送,(2)来源于 105°E 附近的越赤道西南急流输送。两者在南海中东部汇合并延伸到"碧利斯"环流内部,在暴雨区上空出现一条中心值为 -1.0×10^{-4} g/(cm^2 · hPa · s)的水汽通量辐合带(图 5)。另一条是与 TC 低压环流相联系的偏北水汽通道,结合 850 hPa 探空实况资料(图略)分析来看,"碧利斯"低压环流北侧的东北风从 13 日 20 时的 4 m/s 增加到 14 日 20 时的 12 m/s,并一直维持到 16 日 08 时,之后逐渐减弱,其风速的变化与湘东南暴雨开始、持续和转弱的时间基本同步。这支急流带下的弱冷空气使"碧利斯"低压环流获得斜压能量,增加了位势不稳定性,并加强了该低压环流的上升支,提供凝结释放潜热能量。南北两条主要的水汽通道在湘东南地区较长时间交汇,前者是由西南方向进入的暖湿气流,后者是从环流北侧流入的受环境温度影响的相对较冷的水汽,由此产生了强烈的水汽辐合和动力抬升,对该区域暴雨的强度和持续时间造成重要影响。

为了分析这两条主要水汽通道对湘东南暴雨区形成的作用,根据空气质点的运动轨迹,分别选定(23°—25°N,112°—114°E)和(28°—30°N,112°—114°E)这 2 个区域(分别为图 9 中黑色虚线框和黑色实线框),考察 4 个侧边界上水汽通量平均场的垂直分布特征(图 10)。分析可知,对湘东南南侧区域而言(图 10a),各层西、南界水汽通量的垂直分布相似,几乎整层均为流入,特别是 700 hPa 以下均为深厚的水汽辐合层;而东、北边界水汽通量从地面至对流层顶几乎全为正值,表明东、北侧是水汽的主要流出方向。对湘东南北侧区域而言(图 10b),刚好相反,东、北侧自地面至对流层顶几乎全是弱的水汽辐合,是主要的水汽流入方向,并经西、南侧流出,且其东、北侧的水汽辐合强度远不及图 10a 所示的西、南侧的强度大,由此进一步证明了南海季风对此次湘东南暴雨区起到了主要的水汽输送作用,且随着"碧利斯"逆时针旋转,将水汽输送到低压环流北侧,并通过增强的东北风将水汽源源不断地输送至湘东南。这两支水汽通道在湘东南长时间交汇,形成了湘东南暴雨区深厚的湿层和强水汽通量辐合,是造成此次特大暴雨过程的重要原因之一。

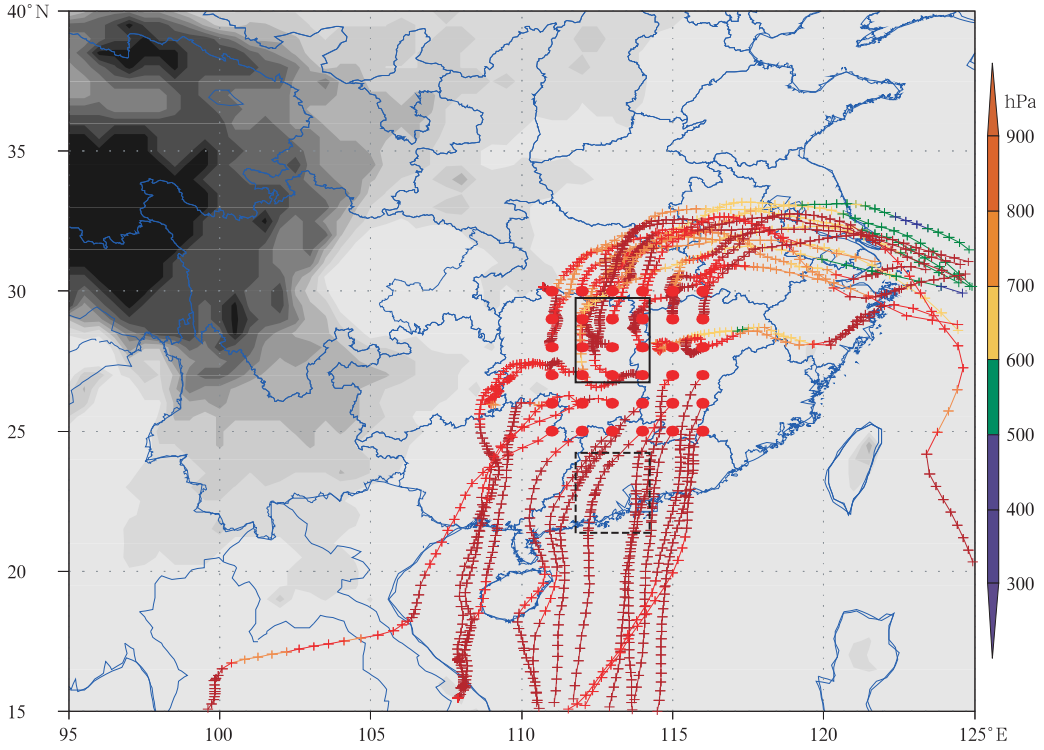

图 9 “碧利斯”暴雨区上空 700 hPa 前 60 h 的空气质点轨迹

(颜色表示气压高度，灰色阴影为海拔高度，间隔：1000 m)

Fig. 9 Air parcels tracks starting from their positions located 60 h before over the simulative torrential rain area of Bilis (the bright colors stand for the pressure level and the gray colors stand for the elevation with the interval of 1000 m)

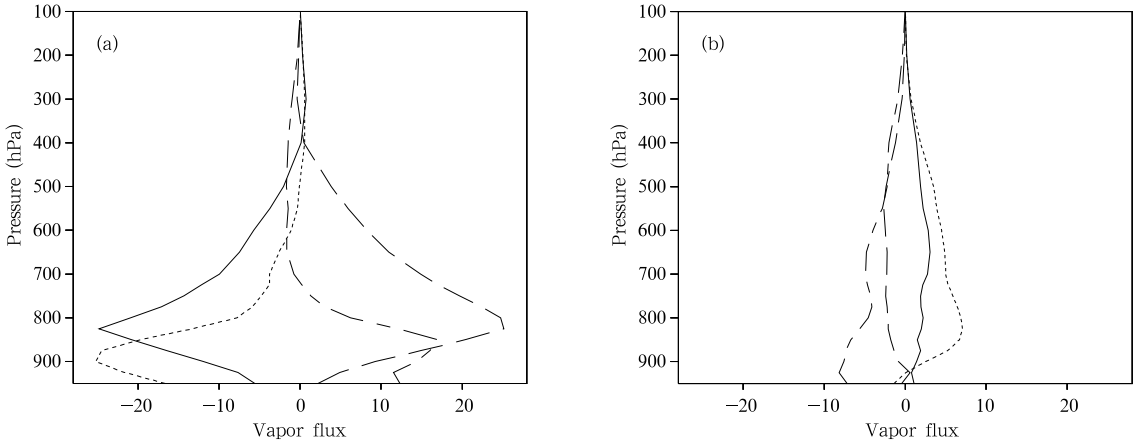

图 10 7 月 15 日 08 时—16 日 08 时各侧边界水汽通量平均值的垂直变化曲线

(a. 区域(23°—25°N,112°—114°E)；b. 区域(28°—30°N,112°—114°E)；实线代表西边界，长虚线代表东边界，短虚线代表南边界，长短虚线代表北边界。负值为流入，正值为流出；单位：10^{-1} g/(cm·hPa·s))；

Fig. 10 Vertical profiles of the moisture fluxes through each of the boundaries of the areas during 08:00 BT 15 to 08:00 BT 16 July (the solid line is for the west boundary, long dashed line is for the east, short dashed line is for the south, and the long to short dashed line is for the north, and the negative value stands for the input while the positive for the output; unit: 10^{-1} g/(cm·hPa·s))

(a. for the area (23°−25°N, 112°−114°E); b. for the area (28°−30°N, 112°−114°E))

为了进一步定量分析上述结果,设计了如表1所示的水汽场敏感性试验。如判断纬度在30°N时,设 $\Delta vq = v(j)q(j) - v(j+1)q(j+1) = 0$,即向南(模式坐标向南为正)的水汽输送通量为0;如判断纬度在22°N时,设 $\Delta vq = v(j+1)q(j+1) - v(j)q(j) = 0$,即向北的水汽输送通量为0。整个模式层都如此处理,即水汽边界厚度为整层。追踪质点轨迹可发现,在22°N,水汽都是由南向北输送,而在30°N,水汽都是由北向南输送(图9)。高层水汽略有反向输送的情况,但试验只截断水汽的单向输送,反向输送是允许的。

表1 水汽敏感性试验方案设计

Table1 The moisture sensitivity experiment design

试验名称	试验方法	试验目的
Exp_ctl	BATS陆面过程	参照试验
Exp_south	初始水汽量不变,在模式积分过程中,设105°—120°E关键区内通过22°N边界的向北水汽通量为0	检验南支水汽的作用
Exp_north	初始水汽量不变,在模式积分过程中,设105°—120°E关键区内通过30°N边界的向南水汽通量为0	检验北支水汽的作用

首先,通过水汽敏感性试验检查24 h降水预报(前12 h作为模式的起转过程不分析)。分析图11可知,截断了关键区内南支的水汽输送,发现湘东南主要强降水区虽得以刻画,但湘东南的暴雨区形状和强度有所改变,尤其是中心强度明显减弱,强中心位置也向南偏移,湘东南的降水是原来驻留在22°N以北的关键区内的水汽造成的。值得关注的是,由于此时间段强降水中心不在湘东南,截断了关键区内南支的水汽输送后,位于强降水中心的华东沿海地区,模拟的降水量较实况明显减弱,说明关闭南侧水汽通量对“碧利斯”的暴雨落区和强度影响很大;截断了关键区内北支的水汽输送,湘东南强降水范围和强度虽明显减小,但对台风暴雨中心即华东沿海地区降水影响不大。

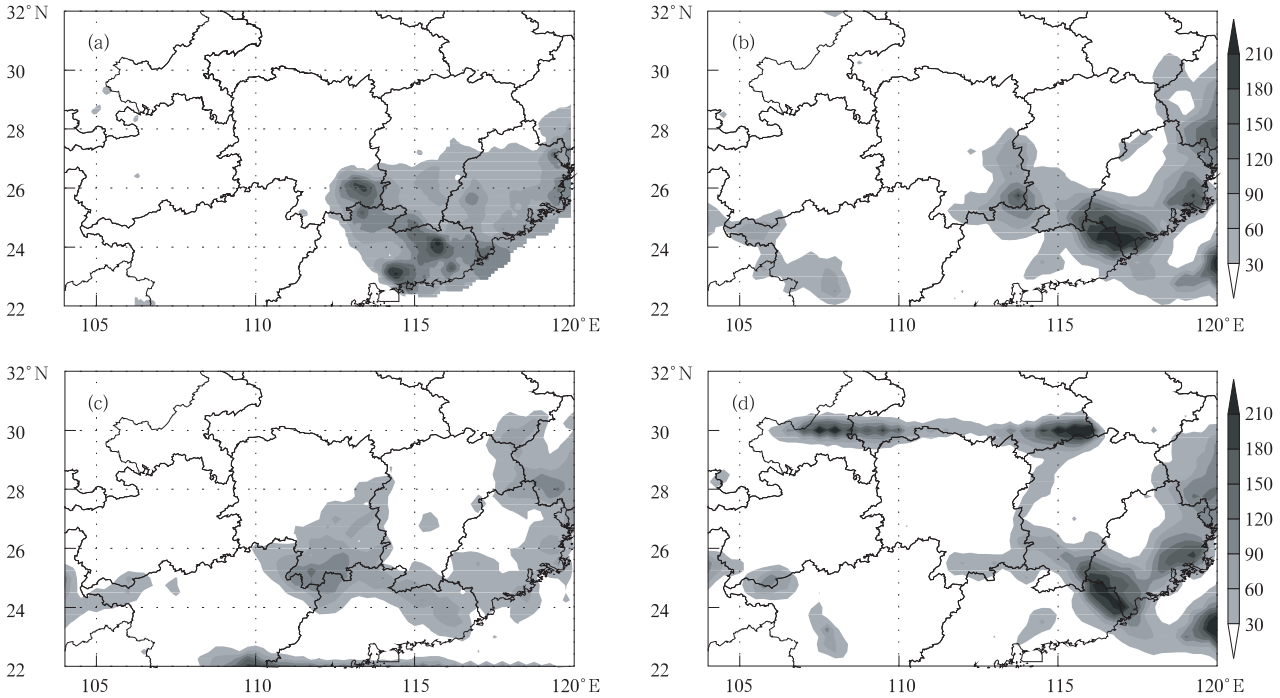

图11 2006年7月14日08时—15日08时降水实况(a)及控制试验(b)、水汽敏感性试验Exp_south(c)、Exp_north(d)模拟的降水量(单位:mm)

Fig. 11 24 h accumulative rainfalls from the observation (a), Exp_ sensitive_ controlling (b), Exp_south (c) and Exp_north (d) from 08:00 BT 14 to 08:00 BT 15 July 2006 (unit: mm)

而将南、北二支水汽截断 48 h 后，分析图 12 可知，截断了关键区内南支的水汽输送，整个“碧利斯”低压环流造成的暴雨区消失，由于关键区内累积的水汽前一天已全部降落地面，又无后续的南支水汽输送，从而明显地影响了降水的分布，进一步说明了南支水汽输送对暴雨的形成和发展起至关重要的作用。而截断了关键区内北支的水汽输送，湘东南强降水范围和强度虽较控制试验有所减小，但仍维持着一定强度的大到暴雨区，“碧利斯”低压环流南侧的强降水雨带也较完整，这是由于此时间段，”碧利斯“低压环流已经西移至湘赣边界，水汽直接从东南方向输送到湘东南造成的降水。配合敏感性试验输出的 850 hPa 高度场(图略)分析，水汽截断后，“碧利斯”低压环流明显减弱，且截断南支水汽比北支水汽更明显，到 15 日 08 时已没有一环相对完整的低压环流存在。由此说明“碧利斯”低压环流南侧的西南风是更为直接和重要的水汽输送，对暴雨落区、强度影响很大。东北侧的水汽其实也是西南侧水汽随着“碧利斯”低压环流逆时针旋转行进，沿着环流中心东侧的强风速带夹卷到环流北侧聚集而成的，是该低压环流与南海季风相互作用的结果。

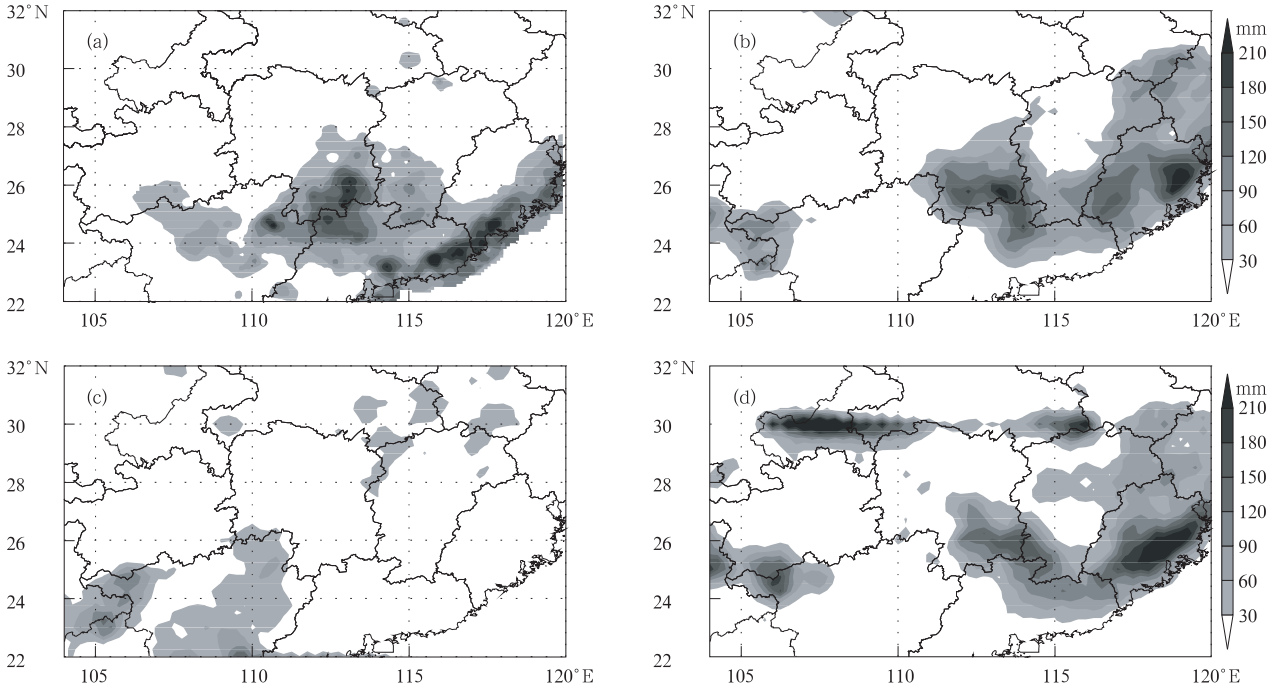

图 12 降水实况(a)及控制试验(b)、水汽敏感性试验 Exp_south(c)、Exp_north(d)模拟的 7 月 15 日 08 时—16 日 08 时降水量(单位：mm)

Fig. 12 As in Fig. 11 but from 08:00 BT 15 to 08:00 BT 16

5 结论与讨论

强热带风暴“碧利斯”(0604)登陆后其低压环流较长时间地维持，并与南海季风相互作用，造成了湖南省东南部历史罕见的特大致洪暴雨。本文针对该暴雨天气过程，应用多种常规、非常观细网格观测资料及 NECP 再分析资料，结合暴雨中尺度数值预报 AREM 模式对该暴雨过程的强水汽场特征进行了数值模拟和诊断分析，结果表明：

(1)AREM 模式以 NCEP 分析资料为初值，在不考虑引入台风 Bogus 资料的情况下，较好地刻画了强热带风暴“碧利斯”发展及演变过程中大气环流特征、低层风场的分布和结构及其引导气流，从而对其登陆时间、移动路径及暴雨落区、强度和时变特征均有较好的模拟能力。但也存在模拟的台风强度偏弱以及对最强降水的峰值模拟偏弱等方面的不足，如果提高模式分辨率，改善初值，将进一步优化模拟性能。

(2)有利的环境场条件决定了“碧利斯”登陆后移动的路径和强度的维持，登陆后其低压环流较长时间地维持，并与南海季风相互作用，对湘东南暴雨的产生起到了重要的组织和促进作用。

(3)来自南海北部与副高西南侧的西南风急流和“碧利斯”低压环流西北侧的东北风急流所产生的两支主要水汽通道在湘东南长时间交汇，形成了湘

东南暴雨区深厚的湿层和强水汽辐合,充沛的水汽输送对"碧利斯"低压环流较长时间的维持及对湘东南特大暴雨的形成和发展有重要的作用。

(4)南海季风涌对此次湘东南暴雨区起到了主要水汽输送作用,对暴雨落区、强度影响很大;且随着"碧利斯"逆时针旋转,将水汽输送到低压环流北侧,并通过增强的东北风将水汽源源不断地输送至湘东南。东北侧的水汽其实也是西南侧水汽随着"碧利斯"低压环流逆时针旋转行进,沿着环流中心东侧的强风速带夹卷到环流北侧聚集而成的,是该低压环流与南海季风相互作用的结果。

致谢:中国气象科学研究院陈联寿院士、中国科学院大气物理研究所周晓平研究员对本文提出了很多宝贵的意见和建议。

参考文献

陈联寿,孟智勇.2001.我国热带气旋研究十年进展.大气科学,25(3):420-432

陈联寿,徐祥德,罗哲贤等.2002.热带气旋动力学引论.北京:气象出版社,317pp

陈联寿,罗哲贤,李英.2004.登陆热带气旋研究的进展.气象学报,62(5):541-548

程锐,叶成志,许爱华等.2007.台风"云娜"的热动力结构模拟试验研究.暴雨灾害,26(2):103-108

丁一汇,王笑芳.1988.1983年长江中游梅雨期的热源和热汇分析.热带气象学报,4(2):134-145

丁一汇.1989.天气动力学中的诊断分析方法.北京:科学出版社,293pp

丁一汇.2005.高等天气学.北京:气象出版社,585pp

丁治英,陈久康.1995.台风暴雨与环境水汽场的数值试验.南京气象学报学报,18(1):33-38

蒋小平,刘春霞,费志宾等.2008.南海夏季风对强热带风暴Bilis(0604)引发暴雨的影响.热带气象学报,24(4):379-384

李英,陈联寿,王继志.2004.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,62(2):167-179

李英,陈联寿,徐祥德.2005.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,29(1):91-98

李昀英,叶成志,钟中.2010.陆面参数化方案对两例不同类型暴雨可预报性的影响.大气科学,34(2):407-417

林爱兰,万齐林,梁建茵等.2004.热带西南季风对0214号热带气旋"黄蜂"的影响.气象学报,62(6):841-850

任素玲,刘屹岷,吴国雄.2007.西太平洋副热带高压和台风相互作用的数值试验研究.气象科学,65(3):229-340

吴启树,沈桐立,苏银兰等.2006.2000年第10号台风的水汽分析与试验.气象科学,26(4):384-391

王叶红,王志斌.2003.AREM模式对2002年汛期降水的实时预报试验.气象,31(2):17-22

徐祥德,苗秋菊,王继志等.2003.梅雨期区域边界水汽输送模型及其数值试验.大气科学进展,20(3):333-342

宇如聪.1994.一个η坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的实时预报试验.大气科学,18(3):284-292

宇如聪,曾庆存,彭贵康等.1994."雅安天漏"研究II:数值预报实验.大气科学,18(6):535-551

宇如聪,徐幼平.2004.AREM及其对2003年汛期降水的模拟.气象学报,62(6):715-723

叶成志,李昀英,黎祖贤.2009.两次严重影响湖南的登陆台风水汽场特征数值模拟.高原气象,28(1):98-107

曾庆存,宇如聪,彭贵康等.1994."雅安天漏"研究Ⅲ:特征、物理量结构及其形成机制.大气科学,18(6):649-659

张建海,薛根元,沈桐立.2006.台风Rananim数值模拟试验及其结构特征分析.气象科技,34(4):370-375

朱洪岩,陈联寿,徐祥德.2000.中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究.大气科学,24(5):669-675

朱艳秋,廖洞贤.1992.三维空气质点轨迹的计算.应用气象学报,3(3):328-333

章志英.2004.梅雨锋低涡系统三维流场结构的分析.浙江大学学报,31(5):580-588

赵磊刚.2007.0604号"碧利斯"台风暴雨的数值模拟与诊断分析[D].南京:解放军理工大学.14-20

Betts A K. 1986. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. Quart J Roy Met Soc, 112(473): 677-691

Bosart L F, Bracken W E, Molinari J, et al. 2000. Environmental influences on the rapid intensification of Hurricane Opal (1995) over the Gulf of Mexico. Mon Wea Rev, 128(2): 322-352

Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P K. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version le as coupled to the NCAR community climate model. NCAR Tech Note NCAR/TN-387+STR, 72pp

Ghan S J, Lingaas J W, Schlesinger M E, et al. 1982. A documentation of the OSU two-level atmospheric general circulation model. Report No. 35, Climate Research Institute, Oregon State University, 395 pp

Holtslag A A M, Boville B A. 1993. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. J Climate, 6(10): 1825-1842

Li Ying, Chen Lianshou. 2007. Numerical study on impact of the boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclones. Acta Meteor Sinica, 21(1): 34-46

Li Yunying, Yu Rucong, Fu Yunfei, et al. 2009. A case study on the triggering of thermal convective precipitation. Acta Meteor Sinica, 23(4): 455-467

Reed R J, Albright M D. 1986. A case study of explosive cyclogenesis in the eastern Pacific. Mon Wea Rev, 114(12): 2297-2319

Sobel A H, Camargo S J. 2005. Influence of western North Pacific tropical cyclones on their large-scale environment. J Atmos Sci, 62(9): 3396-3407

Wernli H, Davies H C. 1997. A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications. Quart J Roy Meteor Soc, 123(538): 467-489

Xu Y P, Xia D Q, Qian Y Y. 1998. The water-bearing numerical model and its operational forecasting experiments Part II: the operational forecasting experiments. Adv Atmos Sci, 15(3): 321-336

Yu Rucong. 1995. Application of a shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an E-grid Regional Forecast Model. Adv Atmos Sci, 12(1): 13-19