大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

两次不同季风强度背景下的西行台风登陆过程降水特征对比分析

吴天贻 周玉淑 王咏青 梁亮 韩芙蓉 鹿翔

Comparative Analysis of Precipitation Characteristics of the Westward Typhoon Cases “Bilis” and “Sepat” during Landfall under Different Monsoon Intensities

WU Tianyi ZHOU Yushu WANG Yongqing LIANG Liang HAN Furong LU Xiang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20101

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

相似路径台风Soudelor(1513)与Matmo(1410)登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析

Analysis on Different Characteristics and Causes of Precipitation Distribution during the Landing of Typhoon "Soudelor" (1513) and Typhoon "Matmo" (1410) with Similar Tracks

大气科学. 2019, 43(2): 297 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17292

华东登陆热带气旋降水不同分布的对比分析

Comparative Analysis of Precipitation Distributions of Tropical Cyclones Making Landfall in East China

大气科学. 2020, 44(1): 27 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1906.18180

利用WRF-Chem模式模拟分析人为气溶胶对台风Fitow(1323) 强度及降水的影响

Simulations of Anthropogenic Aerosols Effects on the Intensity and Precipitation of Typhoon Fitow (1323) Using WRF-Chem Model

大气科学. 2017, 41(5): 960 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16216

两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析

大气科学. 2019, 43(6): 1399 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18239

台湾岛地形对登陆台风“莫兰蒂”(1614)强对流雨带发展影响的模拟研究

A Numerical Study of Taiwan Island Impacts on the Development of the Intensive Convective Rain-Band of Landfalling Typhoon "Meranti" (1614)

大气科学. 2019, 43(1): 27 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17217

2016年01号台风"尼伯特"对一次梅雨期降雨影响的数值试验

A Numerical Study of Typhoon "Nepartak" Impacts on a Precipitation Event during Meiyu Period

大气科学. 2018, 42(2): 383 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17149

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴天贻, 周玉淑, 王咏青, 等. 2021. 两次不同季风强度背景下的西行台风登陆过程降水特征对比分析 [J]. 大气科学, 45(6): 1173−1186. WU Tianyi, ZHOU Yushu, WANG Yongqing, et al. 2021. Comparative Analysis of Precipitation Characteristics of the Westward Typhoon Cases “Bilis” and “Sepat” during Landfall under Different Monsoon Intensities [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1173−1186. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20101

两次不同季风强度背景下的西行台风登陆过程降水特征对比分析

吴天贻[1] 周玉淑[2, 3] 王咏青[4] 梁亮[1] 韩芙蓉[1] 鹿翔[1]

1 金华市气象局，浙江金华 321000
2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴院重点实验室（LACS），北京 100029
3 中国科学院大学，北京 100049
4 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

摘 要 本文使用 CMORPH 卫星反演降水资料、日本再分析资料 JRA-55 和 FY-2E 卫星的云顶亮温（TBB）资料等，选取了登陆前后季风强度差异很大、路径形似且登陆后均在湘南地区引发强降水的 0604 号强热带风暴“碧利斯”和 0708 号台风“圣帕”，从对流发展的不稳定能量来源、抬升机制和环境风垂直切变方面进行对比，研究季风气流如何影响台风降水强度和分布。分析表明，在下垫面和地形基本一致的情况下，两台风导致强降水的主要成因不同，主要体现在引发对流并使对流维持的主要影响因子不同。与强季风背景密切相关的低层强烈辐合抬升和对流不稳定层结是导致“碧利斯”暴雨形成的主要因素，而弱季风背景下“圣帕”的暴雨则主要是局地地形抬升和斜压不稳定导致的。而且与“圣帕”降水相比，“碧利斯”降水存在明显的非对称性，季风气流可间接通过改变环境风垂直切变导致这种降水分布特征。

关键词 台风 季风 降水分布 对流
文章编号 1006-9895(2021)06-1173-14 **中图分类号** P447 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20101

Comparative Analysis of Precipitation Characteristics of the Westward Typhoon Cases “Bilis” and “Sepat” during Landfall under Different Monsoon Intensities

WU Tianyi[1], ZHOU Yushu[2, 3], WANG Yongqing[4], LIANG Liang[1], HAN Furong[1], and LU Xiang[1]

1 *Jinhua Meteorological Bureau of Zhejiang Province*, *Jinhua*, *Zhejiang* 321000
2 *Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms* (*LACS*), *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*,

收稿日期 2020-10-23；**网络预出版日期** 2020-12-23
作者简介 吴天贻，女，1993 年出生，硕士研究生，主要从事台风降水和暴雨天气学研究。E-mail: wutianyi2016@163.com
通讯作者 周玉淑，E-mail: zys@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41875070，吉林省科技发展计划项目 20180201035SF，金华市气象局青年项目 2020QN07，金华市气象局金华气象公共服务创新团队

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41875070), Key Scientific and Technology Research and Development Program of Jilin Province (Grant 20180201035SF), Jinhua Meteorological Bureau Youth Project (Grant 2020QN07), Jinhua Meteorological Bureau Jinhua Meteorological Public Service Innovation Team

Beijing 100029

3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

4 *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract From the aspects of unstable energy sources for convective development, uplifting mechanism, and vertical shear of environmental wind, this work studies how the monsoon flow affects the intensity and distribution of typhoon precipitation. For this, CMORPH (CPC morphing technique) satellite data product obtained from the CPC's (Climate Prediction Center) morphing technique, JRA-55 (55-year-old Japanese reanalysis products), and TBB (blackbody brightness temperature) data from the FY-2E (FengYun-2E) satellite were used, and the strong monsoon-influenced case 0604 "Bilis" and weak monsoon-influenced case 0708 "Sepat", which have similar paths and cause heavy precipitation in the southern area of the Hunan Province after landfall, were selected. The analysis showed that with a similar underlying surface and topography, the main causes of heavy precipitation of the two cases are different. This is mainly reflected in the factors that induce and maintain convection. The strong convergent updraft and convective instability under the strong monsoon background were the main factors leading to the heavy rain of "Bilis", while the rainstorm of "Sepat" was mainly due to the local orographic lift and baroclinic instability under the weak monsoon background. Moreover, the precipitation of "Bilis" was obviously asymmetric, which indicated that the monsoon flow could lead to asymmetric precipitation by changing the vertical shear of the environmental wind indirectly.

Keywords Typhoon, Monsoon, Precipitation distribution, Convective

1 引言

台风和夏季风都是影响我国降水的重要系统，且是我国夏季降水的主要来源（陈联寿和丁一汇, 1979）。生成于南海或西太平洋的台风在我国东南沿海登陆频繁，东南沿海也是东亚季风尤其是南海—西太平洋季风气流最为活跃的地区（陈联寿和许映龙, 2017）。东亚夏季风的平均建立时间大约在 5 月第 4 候（李崇银和张利平, 1999; 何金海等, 2001; 梁建茵和吴尚森, 2002; Wang et al., 2004），而初台风登陆我国的平均时间为 6 月 16 日（任福民等, 2007），基本上东亚夏季风爆发均发生在初台风登陆之前（吴恒强, 2002）。因此台风与季风涌相遇并相互作用的概率很大。

季风气流能否影响台风降水主要取决于登陆台风在与其发生相互作用时能否从季风气流中获得有利的动力环境条件、水汽、能量及涡量的补充。已有的研究表明，低空西南季风急流是登陆台风降水的主要水汽通道（黄明策等, 2005; Chen et al., 2010; 卢珊等, 2012），而且暖湿的季风气流也输送不稳定能量，在对流触发下释放的潜热能有利于登陆台风的维持（李英等, 2004; 张恒德和孔期, 2007）。此外西南季风气流与台风环流相互作用十分有利于中尺度对流系统 MCSs 的强烈发展（Chien et al., 2008）。

0604 号强热带风暴"碧利斯"（Bilis）登陆闽北期间，华南和南海盛行西南季风，登陆后残涡与季风涌相互作用不仅使得残涡获得能量而维持不消，并导致华东、华南多省份出现持续性特大暴雨（周海光, 2008; Gao et al., 2009; Wang et al., 2010; 周玉淑等, 2014）。Bilis 与 0908 号台风"莫拉克"（Morakot）这类导致强降水的台风，其共同特征是登陆前后环境场中均存在强盛西南季风气流，登陆后往往能长久维持，从而引发特大暴雨（余贞寿等, 2009）。而 0708 号超强台风"圣帕"（Sepat）是 2007 年登陆我国强度最强的台风，虽然 Sepat 登陆期间西南季风气流较弱，但由于 Sepat 强度强、结构紧密，在湖南郴州也导致了过程雨量达 516.1 mm 的强降水过程。

前人对 Bilis 与 Sepat 已经进行了一些有意义的对比工作。比如潘志祥等（2008）分析 Bilis 与 Sepat 造成湖南暴雨期间的水汽场特征发现，来自南海的西南气流与台风环流相互作用，在 Bilis 低压中心的南侧、对流层中低层形成了一个十分强大的水汽辐合区，而 Sepat 影响湖南暴雨期间，其水汽辐合主要位于南海的偏西南气流和台风东北气流形成的辐合区域。叶成志等（2009）对它们独特的水汽场特征进行对比分析发现，Sepat 暴雨区上空

水汽通量更强，但水汽通量辐合强度却小于 Bilis，水汽辐合层也不及后者深厚，但前者由于自身旋转性强，低压环流中心南部的切变维持时间较长，Bilis 水汽主要源地较 Sepat 更加偏南，水汽辐合更强，与南海季风的相互作用更显著。

现有的研究主要在对比 Bilis 与 Sepat 水汽场特征时涉及季风气流的影响。而本文则关注季风气流除了水汽场还可以从哪些方面来影响台风暴雨的强度和分布？本文将主要在对流发展的不稳定能量来源、抬升机制和环境风垂直切变方面对比 Bilis 和 Sepat 登陆后在湖南南部导致强降水的主要成因，进而探讨季风气流的强弱如何影响台风降水强度和分布，及其可能的影响机制。

2　资料介绍

本论文使用的资料主要有：（1）降水资料使用 2006～2007 年 CMORPH（Climate Prediction Center morphing technique）原始卫星反演逐时降水量产品，是以被动微波反演降水量为基准，对连续的静止卫星红外图像采用运动矢量方法估计被动微波反演降水的空间传播特征，进而做出高质量降水估计产品（Joyce et al., 2004）。降水数据的时间间隔为 30 min，空间分辨率约 8 km，覆盖了 60°S～60°N 的区域。用于分析台风降水分布与强度。数据来源：http://www.cpc.noaa.gov [2018-10-01]。（2）再分析资料数据集使用日本气象厅（JMA）提供的 2006～2007 年 JRA-55 数据集，时间分辨率为 6 h，水平空间分辨率为 1.25°×1.25°，垂直层数 60 层。用于分析高度场、风场、散度、假相当位温、水汽通量等物理量。数据来源：http://jra.kishou.go.jp [2018-11-02]。（3）台风 Bilis 和 Sepat 的最佳路径数据集使用中国气象局热带气旋资料中心提供的我国登陆台风逐 6 h 台风最佳路径资料，用于绘制台风路径图。数据来源：中国气象局热带气旋资料中心。（4）2006～2007 年风云二号静止气象卫星（FY-2E）标称格式 1 h 平均相当黑体亮度温度产品（TBB），中心经度 104.5°E，用于分析台风对流云带的位置以及对流强度。数据来源：风云卫星遥感数据服务网。

3　Bilis 和 Sepat 登陆过程概况及环流背景

3.1　台风登陆过程概况

0604 号强热带风暴 Bilis 于 2006 年 7 月 9 日（协调世界时，下同）在菲律宾以东洋面生成，11 日凌晨增强为强热带风暴，西北向移动。于 7 月 14 日 05 时登陆福建霞浦，登陆时中心附近最大风力 11 级（30 m s^{-1}），中心气压 975 hPa。Bilis 强度不强，登陆后以 10～15 km h^{-1} 的速度继续向偏西方向移动，15 日下午在江西西南部减弱为热带低气压，但仍旧维持自身低压环流，并向西南偏南方向移动，经过湖南、广西和云南，17 日晚在越南北部地区消失，在陆上维持了 5 日之久，路径见图 1a。

0708 号台风 Sepat 是 2007 年登陆我国强度最强的台风，于 8 月 13 日 20 时同样生成于菲律宾以东洋面，8 月 16～17 日发展成超强台风。8 月 19 日 02 时登陆福建惠安，西北向移动。登陆 24 h 后在江西减弱为热带低压并西折，经过湖南和广西。最终于 24 日 20 时在云南东部填塞，共在陆上维持 138 h，也是登陆后维持生命史较长的台风，路径见图 1c。

3.2　环流背景分析

2006 年 7 月 13 日 12 时起，500 hPa 副热带高压（简称副高）呈带状分布，副高脊线位置偏北维持在 35°N 附近，副高主体在太平洋，仅副高西北部狭长带可西伸至 110°E，Bilis 沿副高边缘向西北方向移动。登陆后，如图 1a 所示，副高逐渐东退至洋面，河套地区大陆高压发展，大陆高压东侧偏北气流阻止了 Bilis 北上，转而西行。在此过程中，东北地区的冷涡环流中虽然有浅槽向西南方发展，但由于高压脊的阻挡作用无法南下影响到 Bilis。在低纬，印度半岛和孟加拉湾一带有一个南支槽，引导阿拉伯半岛高压边缘的西北风急流南下与越赤道急流合并成一支偏西风急流。对流层上层深厚的南亚高压稳定维持在我国上空，Bilis 处于南亚高压的东南部，Bilis 以南低纬度高空则存在偏南风急流，因此南亚高压南支东风急流和向赤道急流为台风提供了良好的高空辐散条件（图 2a）。

Bilis 登陆前 850 hPa 存在三支越赤道气流，分别位于索马里一带、90°E 附近和 110°E 附近，这三支越赤道急流分别汇入偏西风气流，对应着三个西风大值区中心。偏西风急流有动量的补充，可以越过印度半岛、孟加拉湾和中南半岛，一直到达南海并维持急流强度。图 1b 为 2006 年 7 月 11～19 日 850 hPa 纬向风沿 115°E 的剖面，7 月 12 日之前，西风大值区基本位于 15°N 以南的海域，由于 Bilis

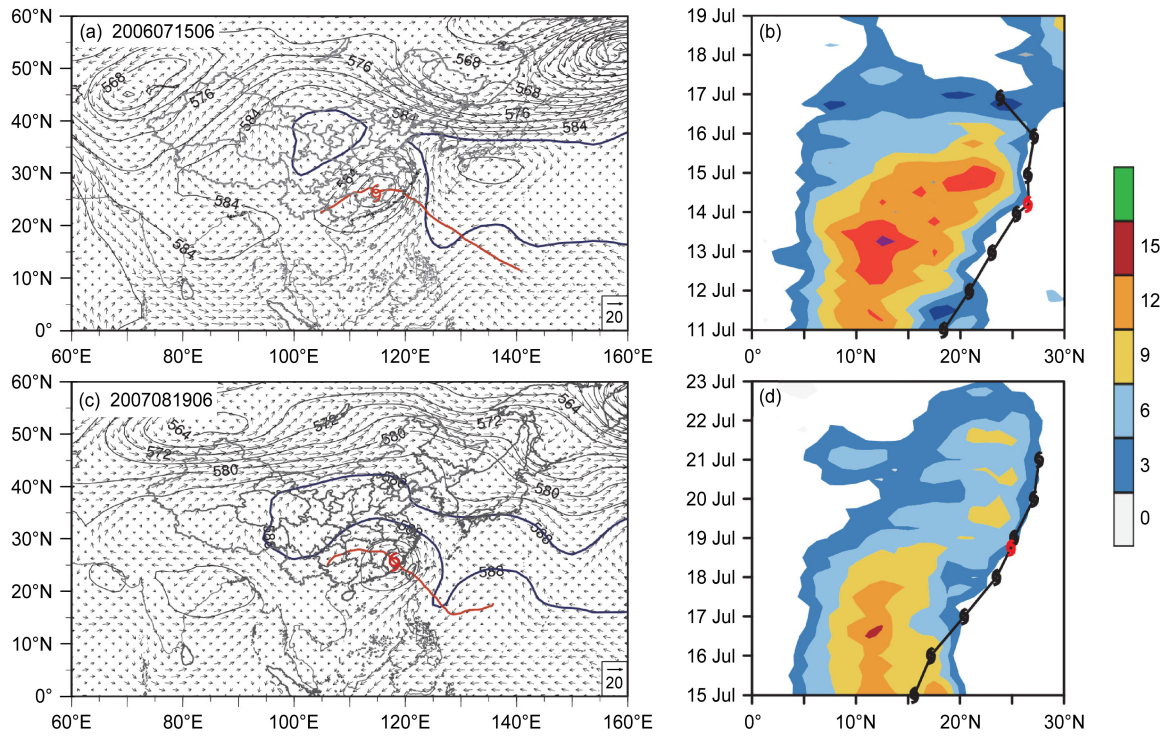

图 1 强热带风暴 Bilis：（a）2006 年 7 月 15 日 06 时（协调世界时，下同）500 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：dagpm）和 850 hPa 风场（黑色箭头，单位：m s^{-1}）；（b）2006 年 7 月 11～19 日 850 hPa 纬向风（单位：m s^{-1}）沿 115°E 的剖面。台风 Sepat：（c）2007 年 8 月 19 日 06 时 500 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：dagpm）和 850 hPa 风场（黑色箭头，单位：m s^{-1}）；（d）2007 年 8 月 15～23 日 850 hPa 纬向风（单位：m s^{-1}）沿 115°E 的剖面。图 a、c 中，红色线段表示台风路径，红色台风标志表示台风位置，蓝色粗实线表示 588 dagpm

Fig. 1 Super typhoon Bilis: (a) 500-hPa geopotential height (black solid lines, units: dagpm) and 850-hPa wind (black arrows, units: m s^{-1}) at 0600 UTC on 15 July 2006; (b) cross section of 850-hPa zonal wind (units: m s^{-1}) along 115°E from 11 July to 19 July 2006. Super typhoon Sepat: (c) 500-hPa geopotential height (black solid lines, units: dagpm) and 850-hPa wind (black arrows, units: m s^{-1}) at 0600 UTC on 19 August 2007; (d) cross section of 850-hPa zonal wind (units: m s^{-1}) along 115°E from 15 August to 23 August 2007. In Figs. a, c, the red lines indicate the typhoon path, the red typhoon signs indicate the typhoon position, and the thick blue solid lines represent 588 dagpm

逐渐进入我国东南海域，热带低压的动力抽吸作用吸引季风气流的北上，因此随着 Bilis 靠近我国海岸线，西风大值区开始逐渐向南海北部扩展并且季风气流的偏南风分量也增强。到 7 月 15 日 00 时，西风急流已经扩展至华南沿海。

Sepat 登陆前 500 hPa 亚洲中高纬呈“两槽一脊”形势，西太平洋副高强度强，日本南部有 592 dagpm 的高压中心，副高脊线呈东西向分布。副高西部脊线向大陆伸展，同时位于副高北部的东北短波槽由横转竖并南伸，2007 年 8 月 17 日 18 时副高分裂出大陆高压。东北低槽继续东移，大陆高压也在河套地区发展，登陆后，低槽减弱东移入海，槽后大范围的正变高使大陆副高增强并与西太平洋副高打通，两个副高主体再次合并，呈东西带状分布，此时的登陆台风受西太平洋副高偏东气流的引导向西移动（图 1c）。台风登陆后，对流层上层我国上空有两个反气旋中心，东部中心位于山东半岛一带，低纬度为东风急流，急流的纬向分量较小，高空系统并没有为 Sepat 营造良好的高空辐散条件（图 2b）。

如图 1d 所示，在 Sepat 登陆前后，低纬度同样存在三支越赤道气流，分别位于 50°E、90°E 和 120°E 附近。这三只越赤道气流共同形成了 850 hPa 高度上印度季风气流和南海季风气流，并在台风的牵引之下在南海形成季风涌。但由于 Sepat 背景场的副热带高压很强，在其登陆后甚至向西南伸展至中南半岛北部，副高南部的偏东气流控制中南半岛北部，导致偏西季风气流被限制在中南半岛南部与南海南部，这一支西南急流范围也较窄。

为更直观地比较两台风登陆期间季风气流水汽

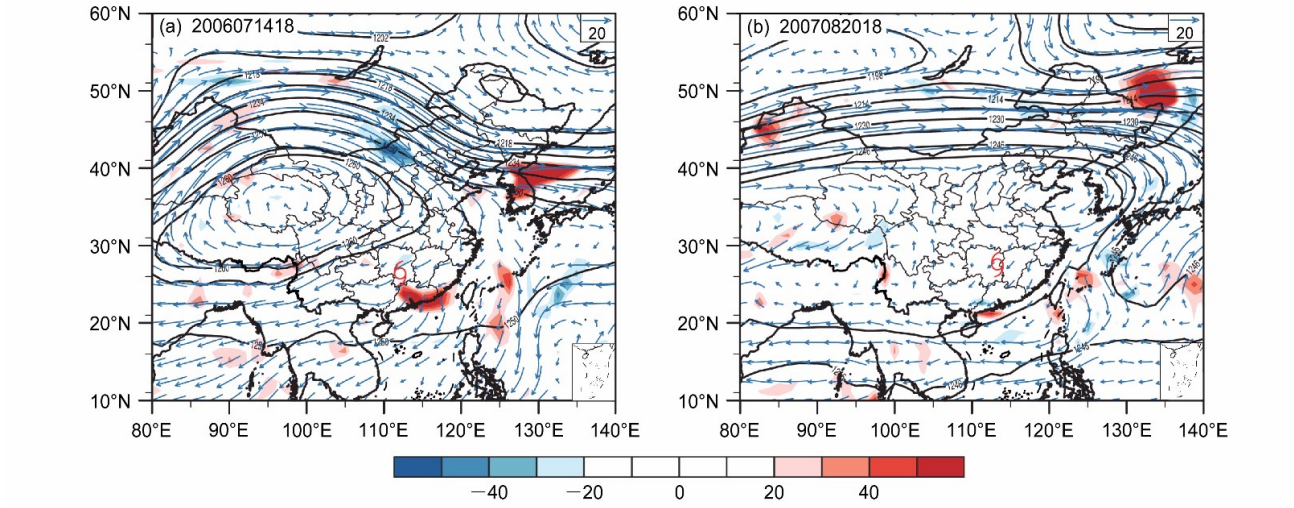

图 2　（a）2006 年 7 月 14 日 18 时 Bilis 的 200 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：dagpm）、风场（蓝色箭头，单位：m s^{-1}）、散度场（阴影，单位：10^{-6} s^{-1}），（b）2007 年 8 月 20 日 18 时 Sepat 的 200 hPa 高度场（黑色实线，单位：dagpm）、风场（蓝色箭头单位：m s^{-1}）、散度场（阴影，单位：10^{-6} s^{-1}）

Fig. 2　(a) 200-hPa geopotential height (black solid lines, units: dagpm), wind (blue arrows, units: m s^{-1}), and divergence (shadings, units: 10^{-6} s^{-1}) of Bilis at 1800 UTC on 14 July 2006; (b) 200-hPa geopotential height (black solid lines, units: dagpm), wind (blue arrows, units: m s^{-1}), and divergence (shadings, units: 10^{-6} s^{-1}) of Sepat at 1800 UTC on 20 August 2007

输送通道的差异，使用水平水汽通量来表示水汽输送的强度和方向。水汽通量（单位：g s^{-1} hPa^{-1} cm^{-1}）即表示水汽输送强度的物理量，它的定义是：在单位时间内，流经某一单位面积的水汽质量，这里使用的是水平水汽通量。计算公式为

$$\frac{1}{g}\boldsymbol{V}q=\frac{1}{g}(\boldsymbol{u}q+\boldsymbol{v}q), \qquad (1)$$

式中，g 为重力加速度，q 为比湿，$\boldsymbol{V}$ 为风矢量。图 3a、b 分别为 Bilis 登陆时和登陆后 36 h 的水汽通量输送场，可以发现 Bilis 登陆后水汽主要源于孟加拉湾和南海，并有两条输送通道：一条是印度季风低压南侧的水汽从孟加拉湾北部经中南半岛进入南海北部汇入低压，另一条从孟加拉湾南部经中南半岛南侧进入南海南部，由赤道缓冲带北侧和副高西侧的偏南气流携带并向北输入 Bilis 低压。两支水汽输送通道在 Bilis 登陆后丝毫没有减弱之势，反而持续向北涌，途经我国东南沿海，直到日本海。因此，Bilis 登陆后有充足的外来水汽补充。相比之下，Sepat 的水汽基本由环流自身从洋面卷携，在登陆后环流与洋面的接触被切断，并没有外来的水汽补充（图 3c、d），二者的水汽输送有明显区别。

4　Bilis 和 Sepat 降水分布特征

Bilis 登陆期间 2006 年 7 月 14～18 日，一路偏西移动，穿越福建、江西、湖南、广西各省，带来的暴雨强度之大，范围之广，持续时间之长，为历史罕见。Bilis 登陆前降水范围基本覆盖福建和浙江两省，最大 6 h 累计降水量超过 50 mm，出现在福建东部沿海。随后 Bilis 登陆，登陆后 6 h 在其中心的西南侧出现多个降水中心，主要位于广东境内，降水最强时每小时累计降水量可超过 50 mm。14 日 12 时以后，降水基本只分布在中心南侧，一开始雨带位于湖南南部至广东西南部呈东南—西北向带状分布，强降水中心出现在湖南南部和广东东南部沿海。这一雨带继续发展，强降水中心并向南移动，到 14 日 18 时最大 6 h 累计降水量已超过 100 mm，此阶段为 Bilis 的暴雨增幅阶段。此后 Bilis 西南侧降水强度开始减弱，但广西和福建又出现明显的降水增幅现象，这一阶段的降水增幅主要是季风涌与沿海地形导致。

Bilis 在陆上维持的 5 d 时间，登陆初期 14～15 日上午主要是在季风影响下的台风云系降水，后期 15 日中午至 18 日基本为季风槽云系降水，Bilis 自身环流的作用甚微。

Bilis 自身强度很弱，其生命史中强度最强阶段也仅为热带低压。但其登陆期间对流降水却长时间维持，主要原因是 Bilis 登陆前后，南海一带季风气流在三支越赤道急流的作用下维持急流强度，

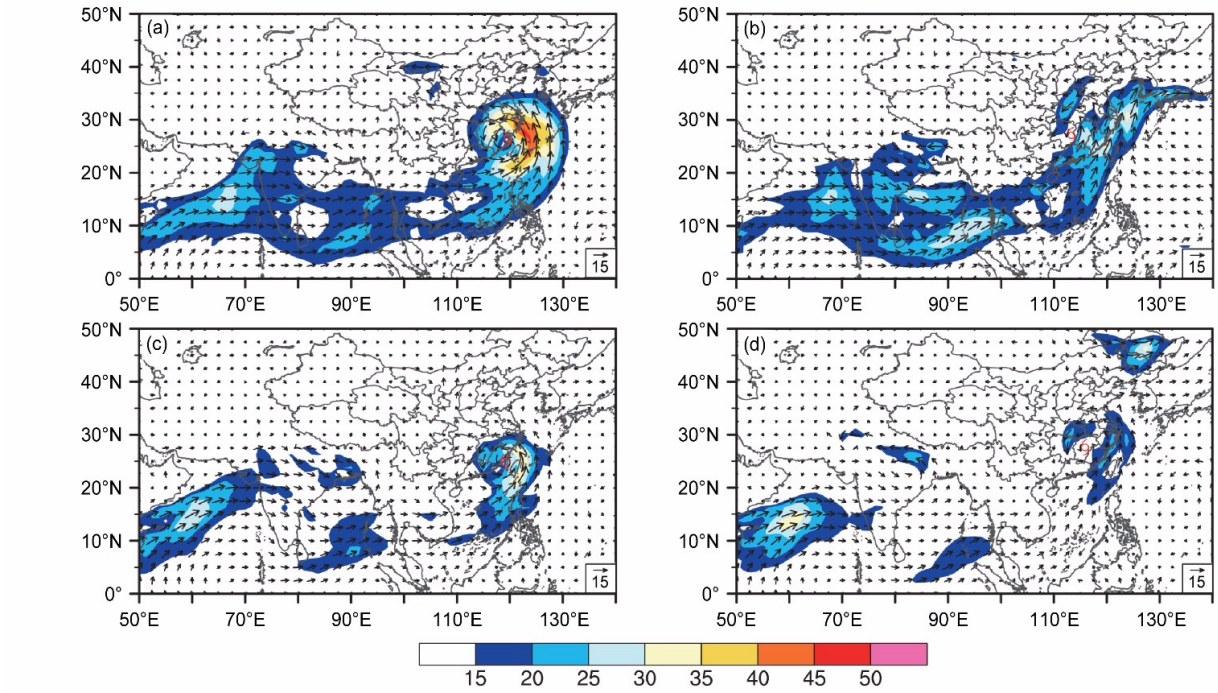

图 3 Bilis（a）2006 年 7 月 14 日 06 时（登陆时）、（b）2006 年 7 月 15 日 18 时（登陆后 36 h），Sepat（c）2007 年 8 月 18 日 18 时（登陆时），（d）2007 年 8 月 20 日 06 时（登陆后 36 h）850 hPa 水汽通量（阴影、箭头，单位：g s^{-1} hPa^{-1} cm^{-1}）

Fig. 3 850-hPa water vapor fluxes (shadings, arrows, units: g s^{-1} hPa^{-1} cm^{-1}) of Bilis (a) at 0600 UTC (landfall) on 14 July 2006; (b) at 1800 UTC (36 h after landfall) on 15 July 2006; 850-hPa water vapor fluxes (shadings, arrows, units: g s^{-1} hPa^{-1} cm^{-1}) of Sepat (c) at 1800 UTC (landfall) on 18 August 2007; (d) at 0600 UTC (36 h after landfall) on 20 August 2007

而热带低压的动力抽吸作用又吸引季风气流的北上，季风涌与残涡相互作用，共同导致了 Bilis 登陆过程强降水的发生与维持。

本文主要研究的是 Bilis 登陆初期和季风涌相互作用情况下的降水阶段。这一阶段仅占 Bilis 陆上维持时间的五分之一，湖南南部的暴雨也主要出现在这一阶段。Bilis 在湖南南部的暴雨特征为单位时间内降水强度很强，维持时间相比 Sepat 则较短。

Sepat 登陆我国时为强台风，结构紧密，登陆后在我国持续影响时间长达 7 d。Sepat 登陆后 3 h 内暴雨区基本均匀环绕在台风中心四周，为低压环流自身带来的强降水。登陆 3 h 后，暴雨区集中在台风移动方向右侧，暴雨强度骤增，暴雨落区从福建北部逐渐移至浙江南部。随后，雨带绕台风中心转动，降水强度减弱，暴雨区范围显著减小。至登陆后 10 h，右侧雨带基本消失。同时台风沿汕头—南岭—湖南西南部移动，在湖南东南部有一个暴雨中心开始发展，导致最大过程降水量出现在湖南郴州，达到 516.1 mm。

Sepat 给湘南地区带来的最大累计降水量超过 Bilis，但 Sepat 单位时间内降水强度低于 Bilis，也即 Sepat 降水持续时间比较长。这与 Sepat 登陆时强度强，自身结构紧密，低压环流中心填塞缓慢有一定的关系。

Bilis 和 Sepat 登陆后均在湖南南部导致暴雨过程，降水落区接近，Sepat 强降水中心位置略偏北。图 4 所示分别为 Bilis 和 Sepat 登陆后影响湘南地区的降水分布，Bilis 影响时段主要为 2006 年 7 月 14 日 09 时至 15 日 09 时，Sepat 影响时段主要为 2007 年 8 月 19 日 07 时至 22 日 07 时。Sepat 给湘南地区带来的最大累计降水量超过 Bilis，但 Sepat 单位时间内降水强度低于 Bilis，即 Sepat 导致的强降水持续时间比较长。

2006 年 7 月 14 日 18 时和 2007 年 8 月 20 日 18 时分别为 Bilis 和 Sepat 影响湘南阶段逐时累计降水最大的时次（图 5a、b）。下文中会选取这两个时次分析在地理位置、下垫面和地形基本一致的情况下，两次强降水发生过程主要影响因子的不同之处。

5 Bilis 和 Sepat 对流发展情况及条件

5.1 对流发展情况

从 Bilis 的 TBB 分布和演变情况可以发现，气

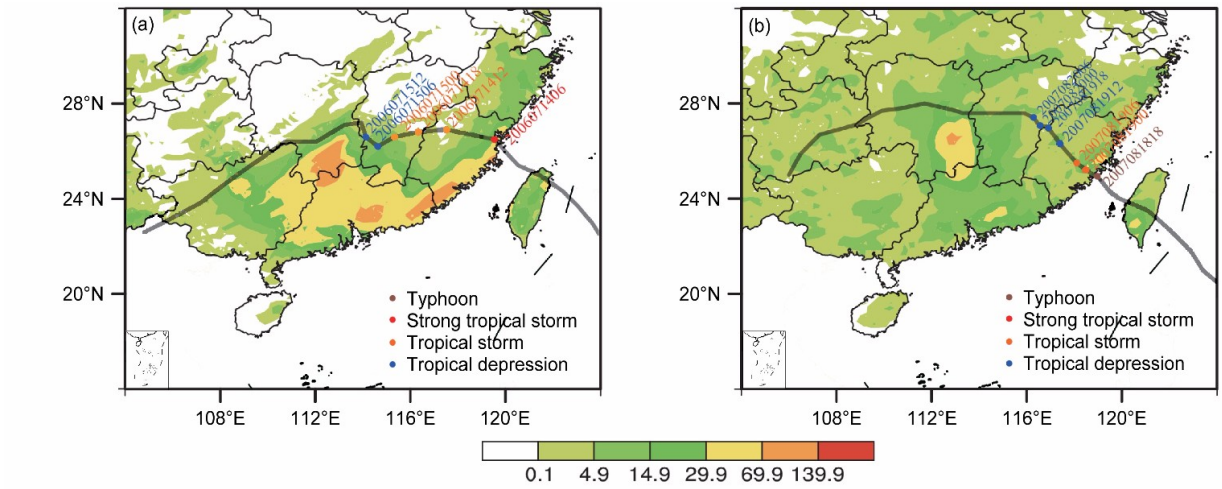

图 4　（a）Bilis 2006 年 7 月 14 日 09 时至 15 日 09 时和（b）Sepat 2007 年 8 月 19 日 07 时至 22 日 07 时平均降水强度 [单位：mm/(12 h)，由于 Sepat 降水持续时间长，过程降水量更大，但为了突出 Bilis 单位时间降水更强，因此图示阶段降水量已换算成每 12 h 降水量]。灰色线段为台风路径；线段上的数字，以 2006071406 为例，表示 2006 年 7 月 14 日 06 时

Fig. 4　Average precipitation intensity [units: mm/(12 h)] of (a) Bilis from 0900 UTC on 14 July 2006 to 0900 UTC on 15 July 2006, and (b) Sepat from 0700 July on 19 August 2007 to 0700 July on 22 August 2007. The precipitation of Sepat lasts for a longer time, the process precipitation of Sepat is larger, but to highlight the hourly precipitation of Bilis, the process precipitation has been converted into precipitation per 12 h. The gray line indicates the typhoon path. The numbers on gray lines, taking 2006071406 for example, represent 0600 UTC on 14 July 2006

旋环流外围出现的强对流云带主要归因于季风气流。首先在 Bilis 未登陆时，可以在图 6a 中发现两条明显的对流带，分别对应着印度季风低压南侧从孟加拉湾经中南半岛南侧进入南海北部的气流输送的水汽带，和由孟加拉湾南部经中南半岛南侧进入南海南部的水汽带。其中，北部对流带出现大片 TBB 低于−84°C 的区域，云顶亮温低，云顶高度高，说明对流发展十分旺盛。这一对流云带中，不断有中尺度对流系统在其西部发生发展，并在随 Bilis 环流向东移动过程中减弱消亡（图 6b）。这一对流云带随台风登陆北移，恰好处在北支水汽输送带与 Bilis 环流之间，对应着 Bilis 登陆后的非对称降水。这也说明季风气流在此次热带低压强对流触发降水的过程中起到决定性作用。

在 Bilis 登陆后的 18 h 内，强对流带呈现西北—东南走向，在湖南、广东、江西三省交界处也开始有明显的中尺度对流系统开始发展（图 6c），在 14 日 16 时交界处对流发展最为旺盛，发展强盛时 TBB 可以达到低于−84°C，湘南地区出现的暴雨则在 14 日 18 时达到最强。同时在其南侧，珠江三角洲一带也开始不断有对流发生发展，并且不断沿海岸线西移减弱消失，造成了广东和福建南部的强降水事件。

台风 Sepat 具有深厚完整的低压环流系统，在 Sepat 登陆前对流发展旺盛，有两条明显的外围螺旋带，其中一条螺旋带中出现对流发展至 TBB 低于−76°C 的区域（图 6d）。在 Sepat 登陆后由于下垫面的改变，水汽供应被切断，登陆区域对流迅速减弱（图 6e）。登陆后的两个阶段，19 日 09～16 时和 20 日 16 时至 21 日 06 时，湖南南部有明显的中尺度对流系统的发生发展，并且一直在局地维持，对流在 19 日 13 时和 20 日 21 时发展至最强，TBB 低于−68°C 的区域最大，对应降水也达到最强，每小时降水量超过 40 mm。Sepat 登陆后发展的中尺度对流恰好出现在湖南、广东和江西交界处的由南岭山脉构成的喇叭口地形（图 6f），台风自身环流的偏北风由于地形的抬升作用，配合环流自身积蓄的水汽为对流的发展提供了良好的条件。

5.2　对流发展不稳定能量来源和抬升机制分析

为了分析 Bilis 和 Sepat 导致湘南暴雨的对流发展不稳定能量来源和抬升机制，分析了假相当位温垂直分布和 850 hPa 等压面上的假相当位温。

假相当位温θ_{se}是集温度、气压、湿度于一体的表征大气中能量分布的物理量，作为反映大气不稳定能量的一个温湿特征量，在讨论能量发展、判断大气对流性稳定度等方面有着广泛用途，是暴雨诊

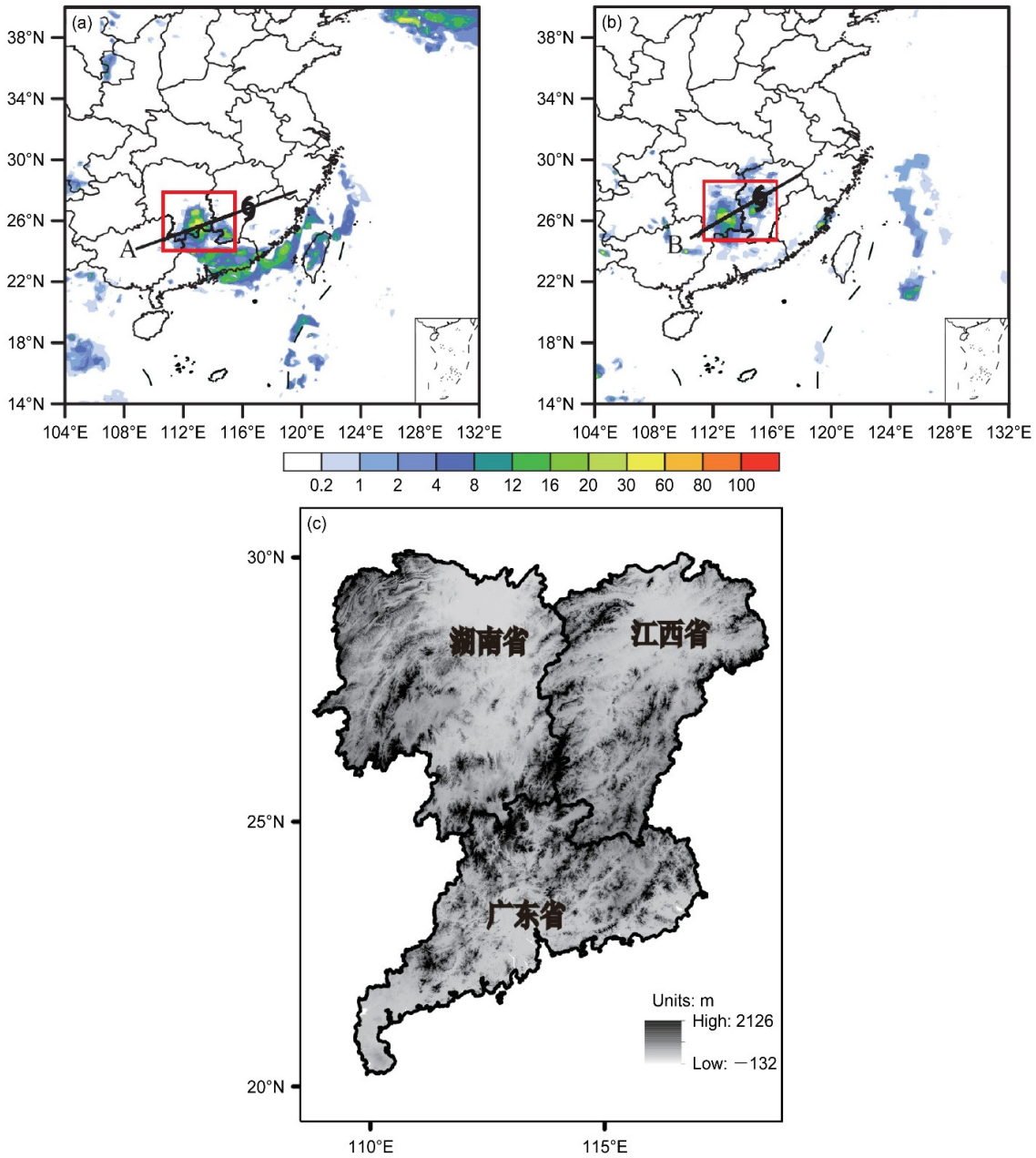

图 5 （a）2006 年 7 月 14 日 18 时 Bilis 逐小时累计降水量（单位：mm），（b）2007 年 8 月 20 日 18 时 Sepat 逐小时累计降水量（单位：mm），（c）湖南、江西和广东三省地形分布。图 a、b 中，线段 *A*、*B* 为图 8 的垂直剖线

Fig. 5 Hourly precipitation (units: mm) of (a) Bilis at 1800 UTC on 14 July 2006, (b) Sepat at 1800 UTC on 20 August 2007, (c) topographic map of the Hunan, Jiangxi, and Guangdong provinces. In Figs. a, b, lines *A* and *B* are the vertical section lines in Fig. 8

断的有力工具。其表达式为

$$\theta_{se}=\left(T+\frac{L}{c_p}q\right)\left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{R}{c_p}}, \qquad (2)$$

其中，T 为大气温度，L 为凝结潜热，c_p 为定压比热，q 为比湿，p 为气压，R 为比气体常数。

台风Bilis 7 月 14 日 18 时中心位置位于（26.8°N，116.4°E），而湘南的暴雨中心位于（25.5°N，112.5°E）附近。图 7a 中 105°E 附近上空上有一个明显的θ_{se}大值中心，这是西南季风水汽输送带携带着孟加拉湾和南海的水汽在气旋性环流的引导下，在台风自身环流西北侧与从中南半岛北上途经云南的气流相遇，暖湿气流集中于此。而在这一大值区上空 500 hPa高度上则是一个θ_{se}低值中心，对应着

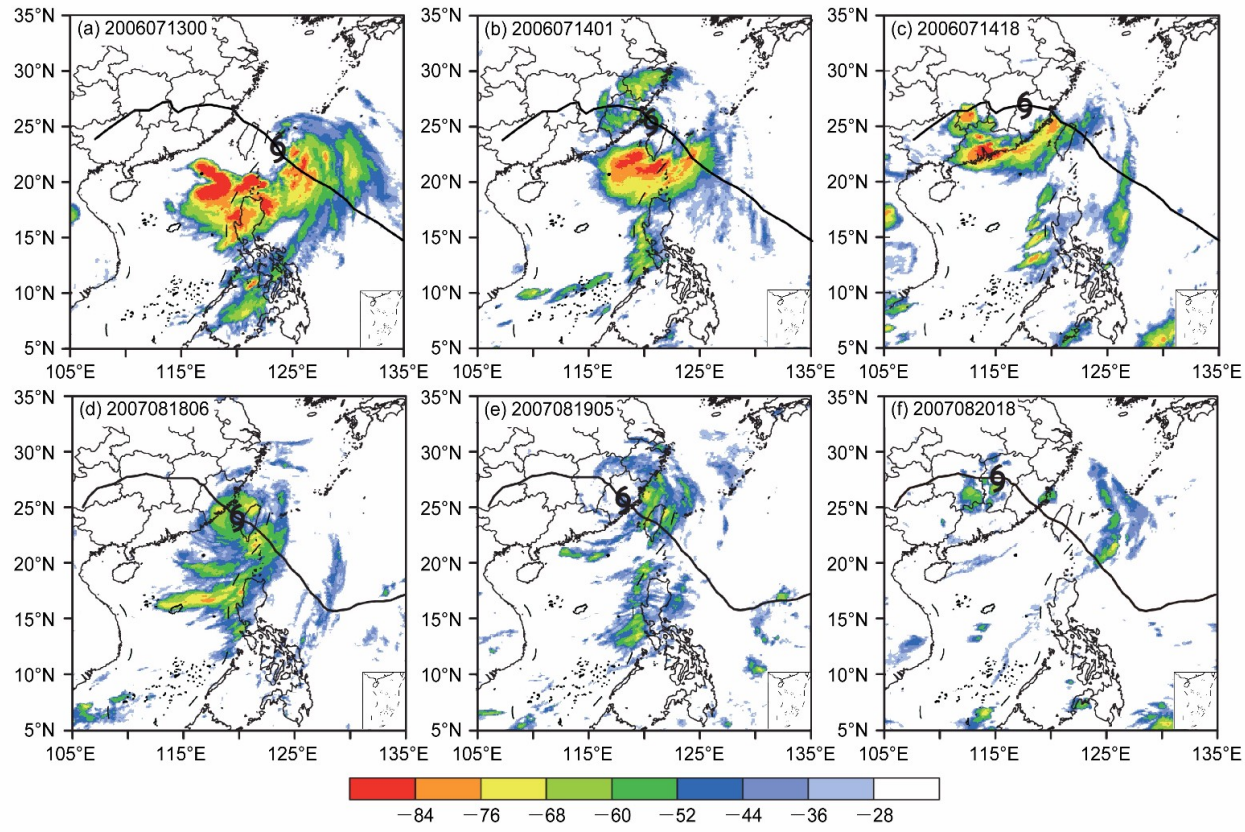

图 6　Bilis 2006 年 7 月（a）13 日 00 时、（b）14 日 01 时、（c）14 日 16 时，Sepat 2007 年 8 月（d）18 日 06 时、（e）19 日 05 时、（f）19 日 13 时逐时相当黑体温度（单位：°C）

Fig. 6　Blackbody temperature (units: °C) of Bilis at (a) 0000 UTC on 13 July 2006, (b) 0100 UTC on 14 July 2006, and (c) 1600 UTC on 14 July 2006. Blackbody temperature (units: °C) of Sepat at (d) 0600 UTC on 18 August 2007, (e) 0500 UTC on 19 August 2007, and (f) 1300 UTC on 19 August 2007

大陆高压。因此形成 100°～110°E 范围 800～700 hPa 高度等θ_{se}线密集区，为明显的对流不稳定层结，湘南正位于这一密集等θ_{se}线区域的边缘。13 日 06 时开始湖南南部至贵州南部一带上空 700 hPa 以下等θ_{se}线密集且随高度减小，形成明显的对流不稳定，14 日 06 时开始在 Bilis 环流西南侧明显的辐合上升运动触发下，此处的对流不稳定能量释放，导致维持 12 h 的暴雨事件。到 14 日 18 时降水强度达到峰值，对流不稳定层结仍维持。

台风 Sepat 8 月 20 日 18 时中心位置位于（27.6°N，115.2°E），而暴雨落区出现在（26.0°N，112.5°E）附近。Sepat 登陆前有从副高主体分裂出来的大陆高压控制我国华东、华南地区，有一个θ_{se}低值中心出现在 600 hPa 高度附近，形成了上干下湿的不稳定层结（图略）。随着 Sepat 的登陆，我国华东、华南地区被台风从海上携带的暖湿气团控制，中层的干性气团被迫西移，θ_{se}低值中心也随之西移。于是到 20 日 18 时，湘南地区上空等θ_{se}已呈陡立状，为对流中性层结，此时降水量级达到顶峰。

图 8a 为沿图 5a 中线段 *A*（以 Bilis 7 月 14 日 18 时中心位置和暴雨中心位置定出线段 *A*）所做垂直剖面，Bilis 这一阶段的降水落区总体呈东南—西北向带状分布（图 5a），有两个强降水中心，分别出现在湖南南部和广东东南部沿海。湖南南部的这一降水落区对应的地形（8a），其高度较 Sepat 降水区对应的地形低，并且是一片连绵的山脉。另外图 8a 中暴雨区上空的强且宽的垂直上升运动带其实位于 Bilis 中心的西南侧，是由于 Bilis 自身环流与西南季风急流之间形成的辐合带，配合着高层明显的辐散中心，形成的强烈的抬升运动。这一上升支范围宽广恰好包括了山脉，山脉地形会在一定程度上增强抬升运动，但却并不一定是主要触发条件。

图 8b 为图 5b 中沿线段 *B*（以 Sepat 8 月 20

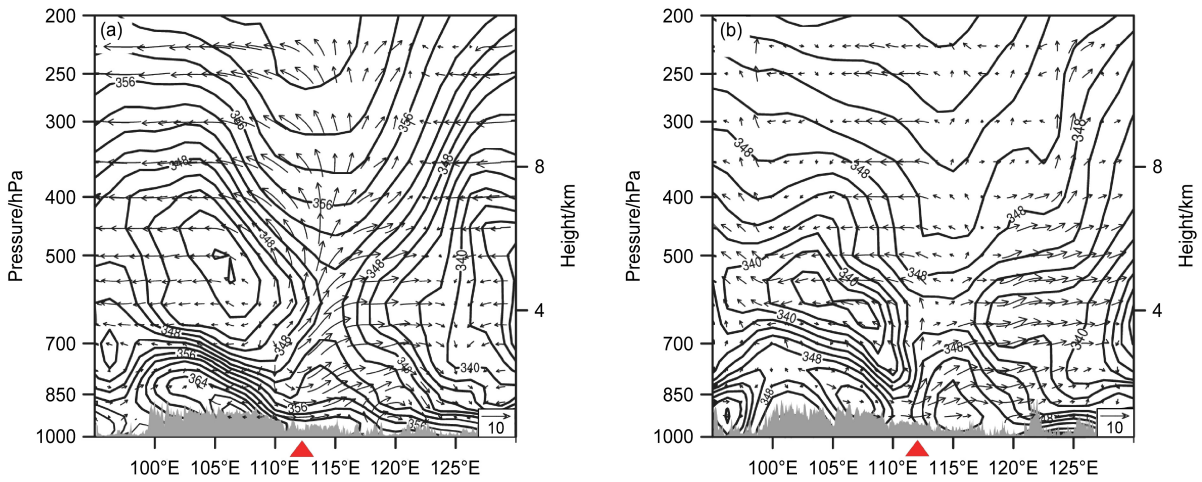

图 7 （a）Bilis 2006 年 7 月 14 日 18 时沿 25.5°N 和（b）Sepat 2007 年 8 月 20 日 18 时沿 26°N 假相当位温（等值线，单位：K），合成风矢量 [箭头，u（纬向风，单位：m s^{-1}）、-10ω（垂直风，单位：-10^{-1} Pa s^{-1}）] 的高度—经度剖面。红色三角形表示暴雨中心位置

Fig. 7 Height–longitude profiles of pseudo-equivalent potential temperature (contours, units: K) and composite wind [arrows, u (zonal wind, units: m s^{-1}), -10ω (vertical wind, units: -10^{-1} Pa s^{-1})] of along (a) 25.5°N at 1800 UTC on 14 July 2006, and (b) 26°N at 1800 UTC on 20 August 2007. The red triangles represent the centers of the rainstorm

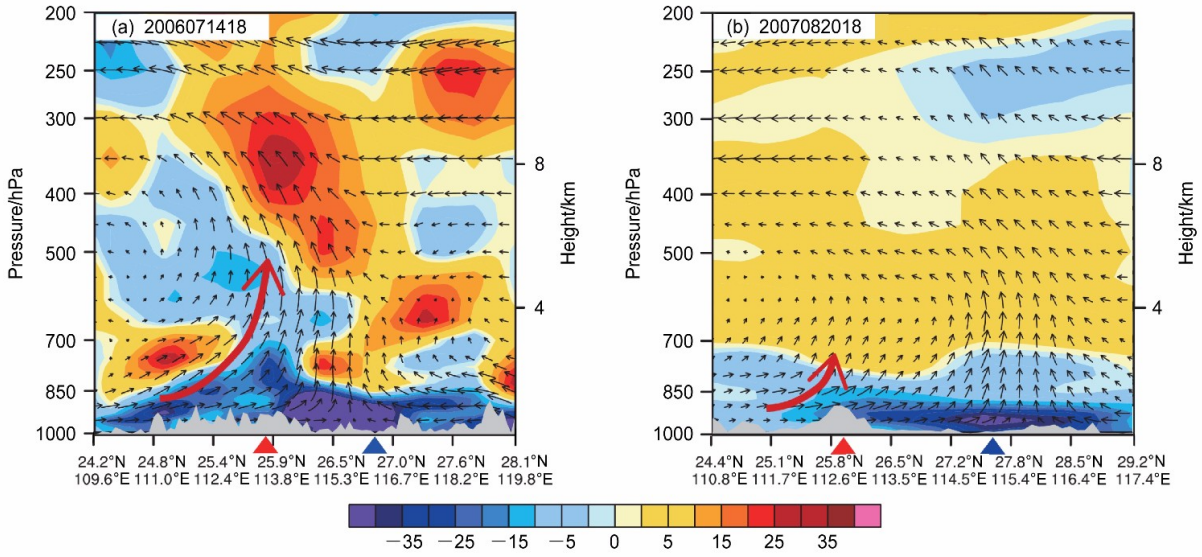

图 8 （a）Bilis 2006 年 7 月 14 日 18 时沿图 5a 中线段 A 和（b）Sepat 2007 年 8 月 20 日 18 时沿图 5b 中线段 B 的合成风矢量 [箭头，u、v（经向风，单位：m s^{-1}）、-10ω（垂直风，单位：-10^{-1} Pa s^{-1}）]，散度（阴影，单位：10^{-6} s^{-1}）的垂直剖面。红色和蓝色三角形分别表示暴雨和台风中心位置

Fig. 8 Composite wind [arrows, u, v (meridional wind, units: m s^{-1}), -10ω (vertical wind, units: -10^{-1} Pa s^{-1})] of u, v (meridional wind), -10ω (vector, units: m s^{-1}) and divergences (shadings, units: 10^{-6} s^{-1}) along (a) line A in Fig. 5a for Bilis at 1800 UTC on 14 July 2006 and (b) line B in Fig. 5b for Sepat at 1800 UTC on 20 August 2007. The red and blue triangles indicate the location of the rainstorm and typhoon center, respectively

日 18 时中心位置和暴雨中心位置定出线段 B）所做垂直剖面，Sepat 的降水区（红色三角形）更好地对应了湖南郴州的高耸地形（灰色阴影），这一地形上空有一小支与其对应的上升气流，是独立于蓝色三角形所表示的台风 Sepat 中心位置上空自身环流的垂直上升支的。因此考虑 Sepat 造成湖南郴州暴雨的触发条件可能主要是地形抬升。

Bilis 登陆后仍有很强的西南季风气流与之相连，因此这条水汽输送带携带着孟加拉湾和南海的水汽在气旋性环流的引导下，在台风自身环流西北

侧与从中南半岛北上途经云南的气流相遇，暖湿气流集中于四川、贵州一带，导致我国中南地区与东部的低压环流为θ_{se}大值区（图 9a）。而湘南的暴雨区位于暖湿气流向东伸展的暖舌内，等θ_{se}较为稀疏的区域，斜压不稳定能量并不明显。

而在 850 hPa 等压面（图 9b）上可以看到，台风 Sepat 环流的西北部，有一θ_{se}低值区向南伸展，导致台风环流西侧有比较明显的等θ_{se}线梯度，说明 Sepat 登陆后有北侧的偏干冷气流南下，在此积蓄斜压不稳定能量。依据湿位涡理论分析，在湿位涡守恒的制约下，由于θ_{se}面的倾斜，大气水平风垂直切变或湿斜压性的增加，能够导致垂直涡度的显著发展，湿等熵面倾斜越大，气旋性涡度增长越激烈，低层暖湿气流向上输送更为强烈，越容易造成暴雨天气。实况降水落区也与此相符，大暴雨主要发生在θ_{se}陡峭（图 8b）和密集区（9b）。

虽然热带低压 Bilis 和台风 Sepat 路径极为相似，且同样在湘南地区引发强降水事件，但引发对流并使对流维持的影响因素却有很大区别。热带低压 Bilis 登陆前后的对流云带基本与强盛的西南季风气流对应，季风气流带来的暖湿气流控制了我国中南、华南、华东大部分地区，导致大气对流不稳定，储存季风气流带来的能量，又有气旋性环流与季风气流的辐合上升动力作用配合导致了持续性暴雨的出现。

而台风 Sepat 虽然登陆后维持时间长，但是仅在湖南、江西、广东三省交界引发强降水。其暴雨形成的可能机制，主要是台风环流西北侧南下的干冷空气与台风环流的暖湿空气相遇，形成斜压不稳定层结，配合湘南地区地形激发的上升运动，不稳定能量释放，对流发展，引发暴雨。

6　Bilis 和 Sepat 环境风垂直切变分析

由于 Bilis 和 Sepat 登陆后降水分布差异很大，并主要体现在降水非对称性上。与 Sepat 相比，Bilis 降水存在明显的非对称性。以往研究揭示，台风环流内的对流和降水的非对称性与水平风的垂直风切变（以下简写为 VWS）关系极大，如 Corbosiero and Molinari（2002）研究了风的垂直切变对 35 个台风对流分布的影响，发现当环境风的垂直切变大于 5 m s^{-1} 时，90% 的闪电发生在顺切变方向两侧。Chen et al.（2006）利用 TRMM 卫星地面降水率资料研究了 VWS 对北半球大洋上台风降水分布的影响，结果表明当 VWS 大于 7.5 m s^{-1} 时，距台风中心 300 km 内最大降水率位于顺切变方向左侧。这些研究都指出，当 VWS 大于一定的阈值后，台风的对流与降水会出现明显的非对称分布，且对流与降水将出现在顺切变方向。本文分别选取 Bilis 和 Sepat 登陆后第 6 小时的风切情况进行分析，以揭示在强、弱季风背景下，这两个台风的 VWS 是否存在显著差异。参照 Palmer and Barnes（2002）的方法，以台风海平面最低气压点为中心，计算 10°×10°正方形网格区域 200 hPa 和 850 hPa 平均环境风矢量，其矢量差即为 VWS，其大小为

$$\mathrm{VWS}=\sqrt{(u_{200}-u_{850})^2+(v_{200}-v_{850})^2}, \qquad (3)$$

其中，VWS 表示环境风垂直切变的大小，u_{200} 和

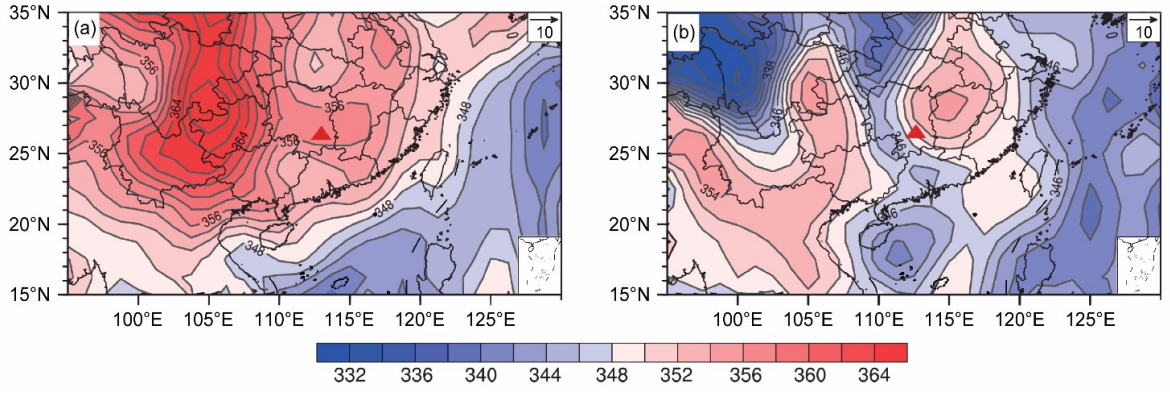

图 9　（a）Bilis 2006 年 7 月 14 日 18 时、（b）Sepat 2007 年 8 月 20 日 18 时 850 hPa 假相当位温（单位：K）。红色三角形表示降水中心位置

Fig. 9　850-hPa pseudo-equivalent potential temperature (units: K) for (a) Bilis at 1800 UTC on 14 July 2006 and (b) Sepat 1800 UTC on 20 August 2007. The red triangles indicate the locations of the rainstorm

u_{850} 分别表示 200 hPa 和 850 hPa 上的纬向风速，v_{200} 和 v_{850} 分别表示 200 hPa 和 850 hPa 上的经向风速。Bilis 的 VWS 为 15.9 m s^{-1}，Sepat 的 VWS 为 6.9 m s^{-1}，虽然方向几乎一致，均指向西南方向，但 Bilis 的 VWS 明显大于 Sepat。分析原因发现，低层 850 hPa 上的环境风向均为西南偏南方向，基本一致。但 Bilis 平均环境风场较强，Sepat 的平均环境风场则很弱，另外，对流层高层 200 hPa 上 Bilis 的环境风场也更强，从而导致了这种 VWS 强度上的差别。

以往的研究表明，强的 VWS 会抑制台风发展，但一定范围内的环境风切变很大程度上通过决定积云对流产生潜热集中的位置而决定降水的分布（Rogers et al., 2003; Chen et al., 2006; 李瑞等, 2014）。图 10 显示出，Bilis 降水基本分布在 VWS 顺切变方向的两侧，而 Sepat 降水分布非对称性相对较弱。

Bilis 登陆前后，南海一带有明显的季风涌，因此 Bilis 的环境风场基本被季风气流控制，为西南向，并且环境风强度也很强。而 Sepat 登陆前后季风气流不强，况且 Sepat 强度很强，生命史很长，登陆后其自身环流仍十分完整并具有很好的对称性，且在 10°×10°范围内并没有很强的其他天气系统存在。可以推断，对于 Bilis 和 Sepat 来讲，季风气流的强弱可以很大程度上导致 VWS 的大小，从而决定降水分布特征。因此，除了台风自身环流的影响外，季风系统还可能通过影响台风 VWS 的改变，间接影响到降水分布。

7 总结与讨论

Bilis 和 Sepat 路径相似，登陆后均在湘南地区引发强降水，强降水中心位置较为一致。分析这两次降水过程，发现在相同的地理位置，下垫面和地形一致，两个台风导致强降水的主要成因却不同，主要体现在对流发展的不稳定能量来源和抬升机制，而这些差异与环境场季风气流的强弱有很大的关系。本文通过对流发展的不稳定能量来源、抬升机制和环境风垂直切变方面对比 Bilis 和 Sepat 登陆后在湖南南部导致降水强度、分布特征及主要成因，以探讨季风气流的强弱如何影响台风降水强度和分布。

热带低压 Bilis 登陆前后的对流云带基本与强盛的西南季风气流对应，季风气流带来的暖湿气流控制了我国中南、华南、华东大部分地区，导致大气对流不稳定，又有气旋性环流与季风气流的辐合和高层明显的辐散中心的配置，形成强烈的抬升运动，引发暴雨。台风 Sepat 登陆时强度强，结构紧密，低压环流中心填塞缓慢，在湖南、江西、广东

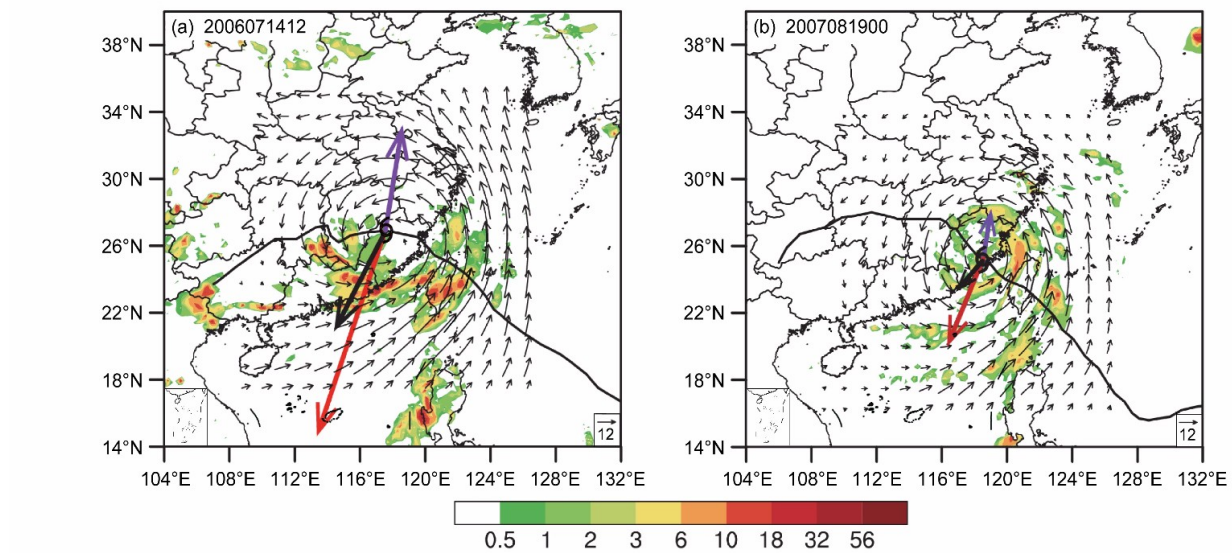

图 10 （a）2006 年 7 月 14 日 12 时 Bilis 和（b）2007 年 8 月 19 日 00 时 Sepat 逐时降水量（阴影，单位：mm）、距台风中心 10°×10°范围内 850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）。紫（黑）色粗箭头表示 850 hPa（200 hPa）平均环境风矢量，红色箭头表示 VWS

Fig. 10 Hourly precipitation (shadings, units: mm) and 850-hPa wind (arrows, units: m s^{-1}) in the range of 10°×10° from the typhoon center of (a) Bilis at 1200 UTC on 14 July 2006, and (b) Sepat at 0000 UTC on 19 August 2007. The bold purple (black) arrows represent 850-hPa (200-hPa) average environmental wind vector, and red arrows represent VWS (vertical wind shear)

三省交界引发的强降水持续时间长。其暴雨形成机制主要是，台风环流西北侧南下的干冷空气与台风环流内的暖湿空气相遇后，形成斜压不稳定层结，配合湘南地区地形激发的上升运动，导致不稳定能量释放，对流强烈发展后引发暴雨。

与强季风背景密切相关的低层强烈辐合抬升和对流不稳定层结是导致 Bilis 暴雨形成的主要因素，而弱季风背景下 Sepat 的暴雨则主要是局地地形抬升和斜压不稳定导致的。

分析两台风登陆后 6h 的 VWS 发现，与 Sepat 相比，Bilis 降水存在明显的非对称性，Bilis 降水基本分布在 VWS 顺切变方向的两侧。Bilis 的 VWS 矢量绝对值几乎 2.5 倍于 Sepat，对照两台风的降水分布特征，推断季风系统可通过影响台风 VWS 的改变影响其降水分布。

另外，Bilis 和 Sepat 的降水落区均在湘南地区，暴雨区都在湖南南部山区，山脉地形会在一定程度上增强抬升运动，但 Bilis 造成湘南暴雨的主要触发条件还需要后续进一步的模式研究验证。还有，Sepat 登陆后强度迅速减弱，在导致暴雨阶段其强度甚至弱于 Bilis，那么它们自身结构上的差异以及在降水过程中起到的作用，也需要进一步的研究。

参考文献（References）

陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1–26.　Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoons (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–26.

陈联寿, 许映龙. 2017. 中国台风特大暴雨综述 [J]. 气象与环境科学, 40(1): 3−10.　Chen Lianshou, Xu Yinglong. 2017. Review of typhoon very heavy rainfall in China [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 40(1): 3−10. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.01.001

Chen S S, Knaff J A, Marks Jr F D. 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. Mon. Wea. Rev., 134(11): 3190−3208. doi:10.1175/MWR3245.1

Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(5): 967−976. doi:10.1007/s00376-010-8171-y

Chien F C, Liu Y C, Lee C S. 2008. Heavy rainfall and southwesterly flow after the leaving of typhoon Mindulle (2004) from Taiwan [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 86(1): 17−41. doi:10.2151/jmsj.86.17

Corbosiero K L, Molinari J. 2002. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 130(8): 2110−2123. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2110:TEOVWS>2.0.CO;2

Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al. 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall [J]. Mon. Wea. Rev., 137(6): 1881−1897. doi:10.1175/2008MWR2669.1

何金海, 丁一汇, 高辉, 等. 2001. 南海夏季风建立日期的确定与季风指数 [M]. 北京: 气象出版社, 123pp.　He Jinhai, Ding Yihui, Gao Hui, et al. 2001. Establishment of the South China Sea Summer Monsoon Establishment Date and Monsoon Index (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 123pp.

黄明策, 姚才, 李菁. 2005. 低空急流对广西热带气旋特大暴雨的影响及概念模式 [J]. 广西气象, 26(1): 5−9.　Huang Mingce, Yao Cai, Li Jing. 2005. Analysis of the low-level jet (LLJ) effect on typhoon torrential rain in Guangxi and the conceptual model [J]. Journal of Guangxi Meteorology (in Chinese), 26(1): 5−9. doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2005.01.002

Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. Journal of Hydrometeorology, 5(3): 487−503. doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2

李崇银, 张利平. 1999. 南海夏季风活动及其影响 [J]. 大气科学, 23(3): 257−266.　Li Chongyin, Zhang Liping. 1999. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(3): 257−266. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.03.01

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 [J]. 气象学报, 62(2): 167−179.　Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62(2): 167−179. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.02.004

李瑞, 李本亮, 胡鹏, 等. 2014. 环境垂直风切变对 0509 号台风“麦莎”的影响分析 [J]. 海洋学研究, 32(2): 14−22.　Li Rui, Li Benliang, Hu Peng, et al. 2014. Effects of environmental vertical wind shear on Typhoon Matsa (0509) [J]. Journal of Marine Sciences (in Chinese), 32(2): 14−22.

梁建茵, 吴尚森. 2002. 南海西南季风爆发日期及其影响因子 [J]. 大气科学, 26(6): 829−844.　Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2002. A study of southwest monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(6): 829−844. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.11

卢珊, 王黎娟, 管兆勇, 等. 2012. 低纬季风涌影响登陆台风“榴莲”(0103) 和“碧利斯”(0604) 暴雨增幅的比较 [J]. 大气科学学报, 35(2): 175−185.　Lu Shan, Wang Lijuan, Guan Zhaoyong, et al. 2012. Comparison of impacts of low-latitude monsoon surge on the enhanced rainstorm from landing typhoons Durian and Bilis [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(2): 175−185. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2012.02.006

Palmer C K, Barnes G M. 2002. The effects of vertical wind shear as

diagnosed by the NCEP/NCAR reanalysis data on Northeast Pacific hurricane intensity [C]//Proceedings of the 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego: American Meteorological Society, 122–123.

潘志祥, 叶成志, 刘志雄, 等. 2008. “圣帕”、“碧利斯”影响湖南的对比分析 [J]. 气象, 34(7): 41−50. Pan Zhixiang, Ye Chengzhi, Liu Zhixiong, et al. 2008. Comparisons analysis of rainstorm processes in Hunan Province caused by typhoon Bilis and Sepat [J]. Meteorological Monthly, 34(7): 41−50. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.07.007

任福民, 王小玲, 董文杰, 等. 2007. 登陆中国初、终热带气旋的变化 [J]. 气候变化研究进展, 3(4): 224−228. Ren Fumin, Wang Xiaoling, Dong Wenjie, et al. 2007. Changes in the first-landfall and last-landfall tropical cyclones in China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3(4): 224−228. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.04.007

Rogers R, Chen S Y, Tenerelli J, et al. 2003. A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in hurricane Bonnie (1998) [J]. Mon. Wea. Rev., 131(8): 1577−1599. doi:10.1175//2546.1

Wang B, Lin H, Zhang Y, et al. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon [J]. J. Climate., 17(4): 699−710. doi:10.1175/2932.1

Wang D H, Li X F, Tao W K. 2010. Responses of vertical structures in convective and stratiform regions to large-scale forcing during the landfall of severe tropical storm Bilis (2006) [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(1): 33−46. doi:10.1007/s00376-009-8139-y

吴恒强. 2002. 影响广西的热带气旋与热带季风的某些关系 [J]. 气象, 28(9): 27−32. Wu Hengqiang. 2002. Relationships between tropical cyclone affecting Guangxi and tropical monsoon [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28(9): 27−32. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2002.09.006

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 [J]. 高原气象, 28(1): 98−107. Ye Chengzhi, Li Yunying, Li Zuxian, et al. 2009. Numerical study on the water vapor transports of the two landfalling cyclones affecting Hunan Province [J]. Plateau Meteorology, 28(1): 98−107. doi:10.1016/s1003-6326(09)60084-4

余贞寿, 陈敏, 叶子祥, 等. 2009. 相似路径热带气旋“海棠” (0505)和“碧利斯”(0604) 暴雨对比分析 [J]. 热带气象学报, 25(1): 37−47. Yu Zhenshou, Chen Min, Ye Zixiang, et al. 2009. Analysis of rainstorm associated with similar track tropical cyclones “HAITANG” (0505) and “BILIS” (0604) [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25(1): 37−47. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.01.005

张恒德, 孔期. 2007. 0604 号强热带风暴碧利斯异常强降水过程的诊断分析 [J]. 气象, 33(5): 42−48. Zhang Hengde, Kong Qi. 2007. Diagnostic analysis of severe tropical storm Bilis heavy rain event [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(5): 42−48. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.05.006

周海光. 2008. 强热带风暴碧利斯 (0604) 引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析 [J]. 大气科学, 32(6): 1289−1308. Zhou Haiguang. 2008. 3D structure of the heavy rainfall caused by BILIS (0604) with Doppler radar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(6): 1289−1308. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.05

周玉淑, 邓涤菲, 李建通. 2014. 登陆热带气旋 Bilis(0604) 暴雨增幅与风场结构变化 [J]. 大气科学, 38(3): 563−576. Zhou Yushu, Deng Difei, Li Jiantong. 2014. Rainstorm amplification of typhoon Bilis (0604) and its wind structural change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(3): 563−576. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12220