

王黎娟, 卢珊, 管兆勇, 等. 2010. 台风“榴莲”陆上维持及暴雨增幅的大尺度环流特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 511-521. Wang Lijuan, Lu Shan, Guan Zhaoyong, et al. 2010. Large scale circulation features of the maintenance and increase in torrential rains from the landing typhoon durian [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 511-521.

台风“榴莲”陆上维持及暴雨增幅的大尺度环流特征

王黎娟 卢珊 管兆勇 何洁琳

南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

摘要 利用“CMA-STI热带气旋最佳路径集”、NCEP/NCAR再分析资料及地面加密观测资料, 分析了2001年0103号台风“榴莲”陆上维持及暴雨增幅的大尺度环流特征。结果表明, “榴莲”登陆后正好位于低压带中, 中纬度西风槽加强南伸, 构成典型的“北槽南涡”, 阻碍西太平洋副热带高压西伸, 使得“榴莲”陆上长时间维持。西风槽后的西北气流将中纬度冷空气输送至低纬, 在“榴莲”环流北部外围与东南风暖湿气流汇合, 有利于强降水发生。此外, 索马里和100°E越赤道气流增强显著, 加强西南季风, 从阿拉伯海东部, 经孟加拉湾和中南半岛中南部, 直至南海北部到广西大部形成一条完整的水汽输送带, 充沛的水汽直达“榴莲”东北侧, 有利于该时段暴雨增幅。低纬夏季风10~20天低频振荡处于极端活跃位相时, 低纬低频西风偏北及低频水汽向北输送至广西南部, 有利于低层辐合并提供充足水汽, 对“榴莲”暴雨增幅有重要作用。

关键词 台风陆上维持 暴雨增幅 环流特征 季节内振荡

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0511-11 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

Large Scale Circulation Features of the Maintenance and Increase in Torrential Rains from the Landing Typhoon Durian

WANG Lijuan, LU Shan, GUAN Zhaoyong, and HE Jielin

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Using the dataset of CMA-STI Tropical Cyclone Optimal Tracks, NCEP/NCAR reanalysis, and the intensive surface observations, the large scale circulation features of the maintenance and increase in torrential rains from the landing typhoon Durian (0103) were studied. The results showed that Durian, after landing, was just located in the low pressure zone, forming a pattern of “north trough and south vortex” with a strongly developing mid-latitude westerly trough, which blocked the strengthening and westward extension of western Pacific subtropical high, allowing Durian’s cyclonic circulation to be maintained. The northwest flow behind the trough transported the cold air from the mid-latitude to the low-latitude and converged southeast warm moist air in Durian’s northern periphery, leading to the occurrence of heavy precipitation. In addition, the Somalia and 100°E cross-equatorial flow increased significantly with the result that the southwest monsoon was enhanced and a whole band of high-valued vapor fluxes stretched from the eastern Arabian Sea via the Bay of Bengal, central and southern Indo-China Peninsula and the northern South China Sea into Guangxi, which transported abundant vapor into northeast of Durian, making

收稿日期 2009-12-30 收到, 2010-03-09 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2007BAC29B02、高校博士点新教师基金课题 20093228120001 和江苏省“青蓝工程”

作者简介 王黎娟, 女, 1970年出生, 博士, 副教授, 主要从事季风与海气相互作用研究。E-mail: wljfw@163.com

for the increasing of precipitation during this period. When in an extremely active stage of the 10–20 day intraseasonal oscillation of low latitude summer monsoon, low-frequency west winds and vapor northward spread to the south of Guangxi, thus responsible for convergence at lower levels and providing plentiful vapor, which played an important role in the sharp increase in rainfall from Durian.

Key words maintenance over land of the typhoon, increase in torrential rains, large scale circulation, intraseasonal oscillation (ISO)

1 引言

登陆台风暴雨增幅的研究一直是台风领域关心的重点。研究表明,进入中纬度的热带气旋,受西风槽的作用变性为锋面气旋从而强烈发展,导致暴雨或暴雨突然增幅(朱岩洪等,2000)。低空急流可以为登陆台风提供水汽输送,有利于台风陆上维持和暴雨发展(朱健和何海滨,2008)。此外,伴随热带气旋登陆华南的南海季风槽对热带气旋暴雨无论是从时间、空间上,还是强度上均有强烈的增幅作用(卢山等,2008)。潮湿气流向岸地形的辐合作用将会使台风暴雨增长,雨区范围扩大(陈联寿等,2004),数值模拟表明台湾山区两侧地形对气旋式环流的辐合抬升使台湾暴雨出现强烈增幅(王鹏云,1998)。可见,登陆热带气旋引发的强降水不仅与热带气旋本身的强度、尺度、结构等有关,还与下垫面特性、环境场的多尺度系统相互作用有关,其影响机制十分复杂(李江南等,2003)。登陆台风在什么环流背景下会发生暴雨增幅?大尺度环流对台风的维持和暴

雨增幅有何作用?这些问题的研究和认识对理解登陆台风暴雨增幅的成因具有重要意义。本文以登陆后陆上长时间维持并引发大暴雨造成巨大灾害的台风“榴莲”为例,利用“CMA-STI热带气旋最佳路径数据集”、NCEP/NCAR再分析资料及地面加密观测资料,分析登陆台风陆上长时间维持和暴雨增幅的大尺度环流特征,以了解登陆台风暴雨增幅的外部环境条件,为登陆台风降水预报提供科学依据。

2 “榴莲”概况及登陆前后强度和降水变化特征

0103号台风“榴莲”于2001年6月30日下午在南海中部生成,在向西北行进中逐渐发展为台风,于7月2日03~04时(北京时间,下同)登陆广东湛江,强度稍有减弱,后西移穿过雷州半岛进入北部湾,下午14时在钦州市南部再次登陆,之后“榴莲”缓慢西北行,在广西境内引发了大范围暴雨灾害,7月3日晚最终消亡于越南境内(图1)。这次过程具有降水集中、强度大、范

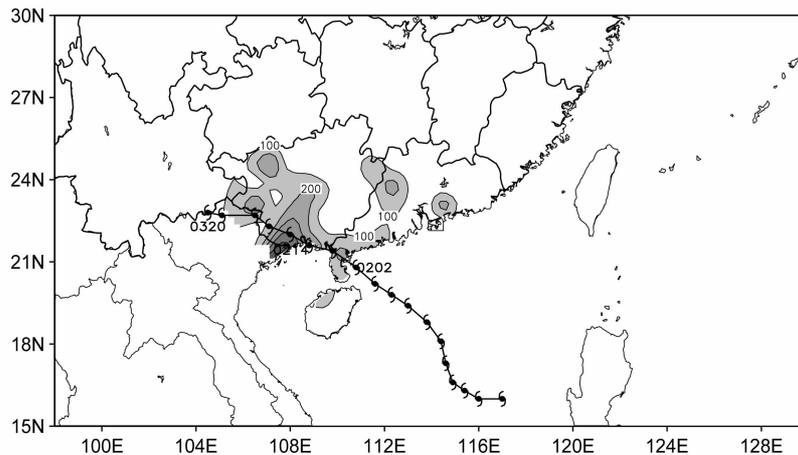


图1 2001年7月2日02时~3日20时“榴莲”降水实况(单位:mm)和6h移动路径

Fig. 1 Measured precipitation (mm) for typhoon Durian from 0200 LST 2 July to 2000 LST 3 July 2001 and its 6-h track

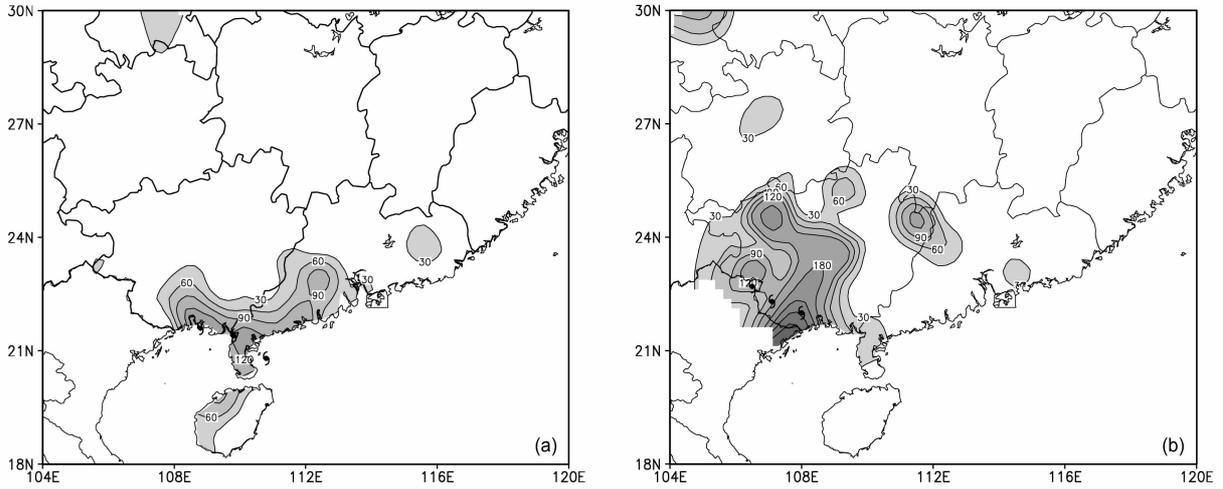


图 2 2001 年 7 月 (a) 2 日 02 时~20 时, (b) 2 日 20 时~3 日 14 时累计降水量 (单位: mm)。阴影区为降水大于等于 30 mm 的区域
 Fig. 2 Cumulative rainfall (mm) (a) from 0200 LST to 2000 LST 2 July and (b) form 2000 LST 2 July to 1400 LST 3 July 2001. Re-
 gions with rainfall equal to or greater than 30 mm are shaded

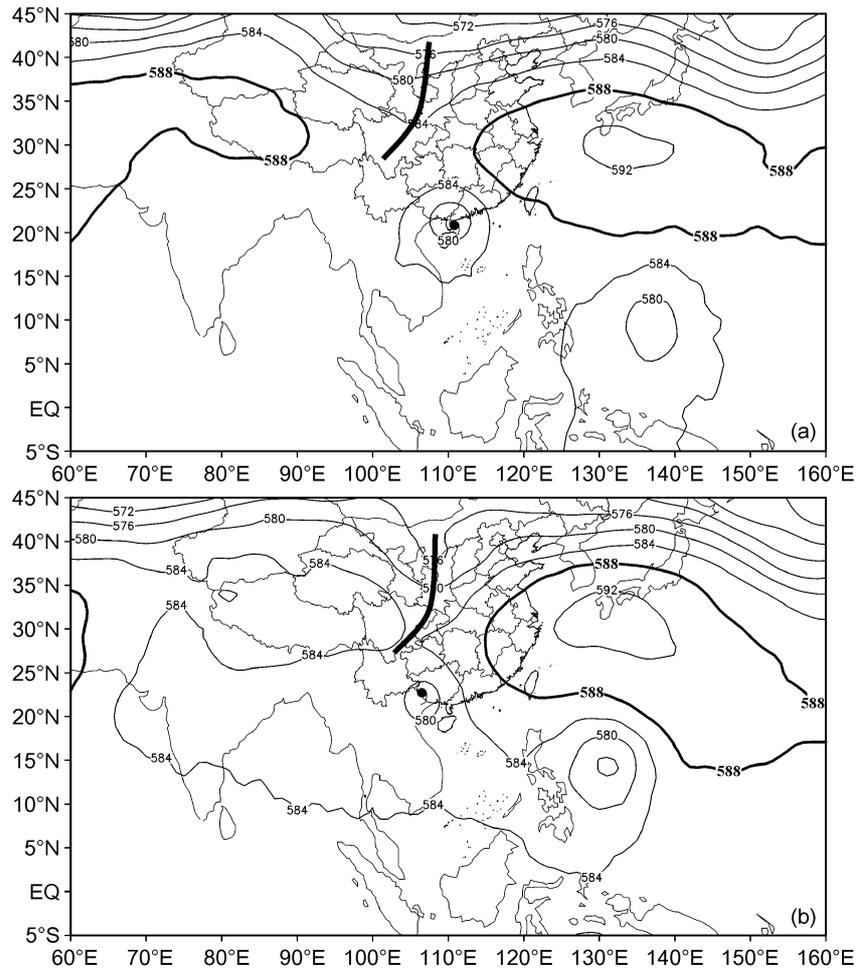


图 3 500 hPa 位势高度场 (单位: dagpm): (a) 7 月 2 日 02 时; (b) 7 月 3 日 08 时。图中粗实线为槽线
 Fig. 3 500-hPa heights (dagpm) : (a) 0200 LST 2 July; (b) 0800 LST 3 July. The heavy solid line denotes the westerly trough line

围广的特点。

观察其强度变化发现,从登陆前的 2 日 02 时至登陆后的 2 日 20 时,“榴莲”迅速减弱,中心气压增加了 20 hPa,而从 2 日 20 时至 3 日 14 时,相同的时间内气压仅增加了 5 hPa,强度减弱速度明显减缓。与强度变化相对应,这两个时间段内的降水特征也有很大不同,不论从强度上还是持续时间上,第二时段的降水过程都要强于第一时段(姚才, 2003)。在第一时段,降水主要分布在粤南、桂南及琼西,降水量一般为 30~90 mm(图 2a);在第二时段,降水急剧增幅,主要分布在桂西南,一般为 90~180 mm,中心值高达 360 mm(图 2b)。

3 大尺度环流特征

对于大多数西移登陆的热带气旋,一般在登陆后迅速减弱,且登陆时越强的热带气旋,衰减得越厉害(李英等, 2004a)。而“榴莲”在登陆初期强度迅速减弱,之后减弱幅度明显减小,但却伴随有范围更广、强度更大的大暴雨发生,这主要在与“榴莲”处于有利的大尺度环流场中密切相关。

3.1 西风槽和副热带高压的影响

7 月 2 日 02 时,“榴莲”登陆前夕,500 hPa 上(图 3a),西太平洋副热带高压西脊点伸至 112°E 附近,高原西部受大陆高压控制,在这两个

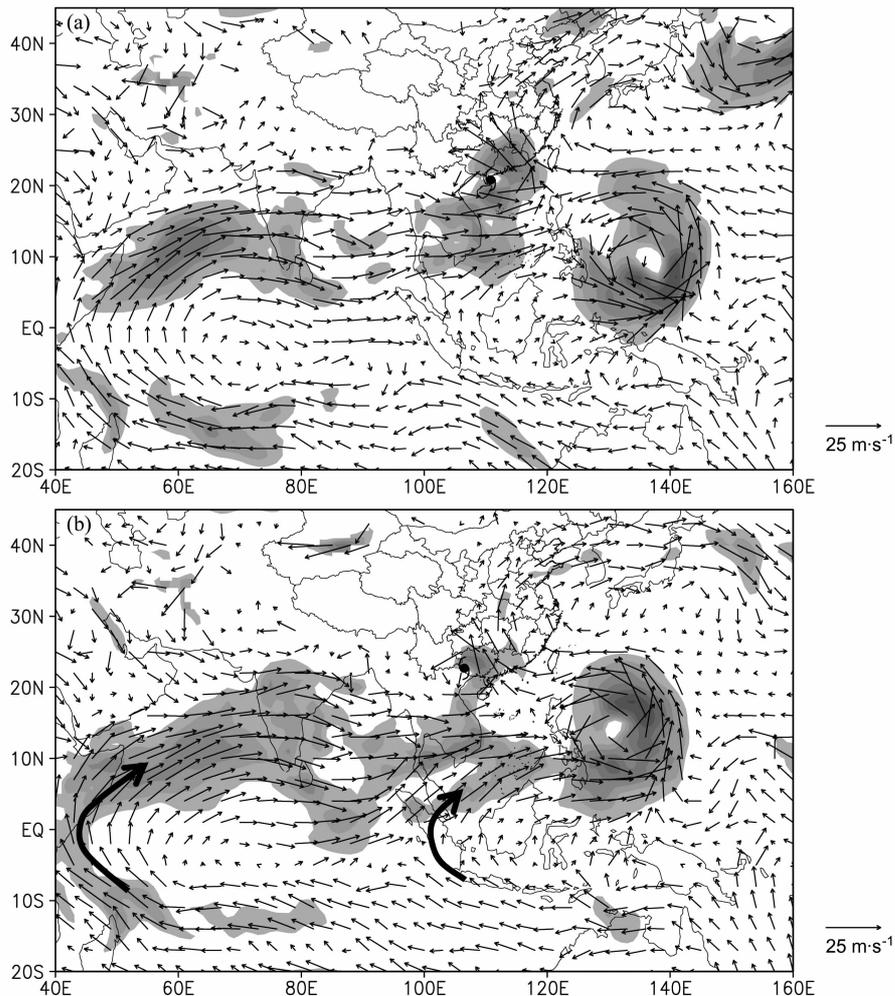


图 4 850 hPa 风场 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 7 月 2 日 02 时; (b) 7 月 3 日 08 时。阴影区为全风速大于等于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域

Fig. 4 850-hPa wind fields ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 0200 LST 2 July; (b) 0800 LST 3 July. Regions with speed wind equal to or greater than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded

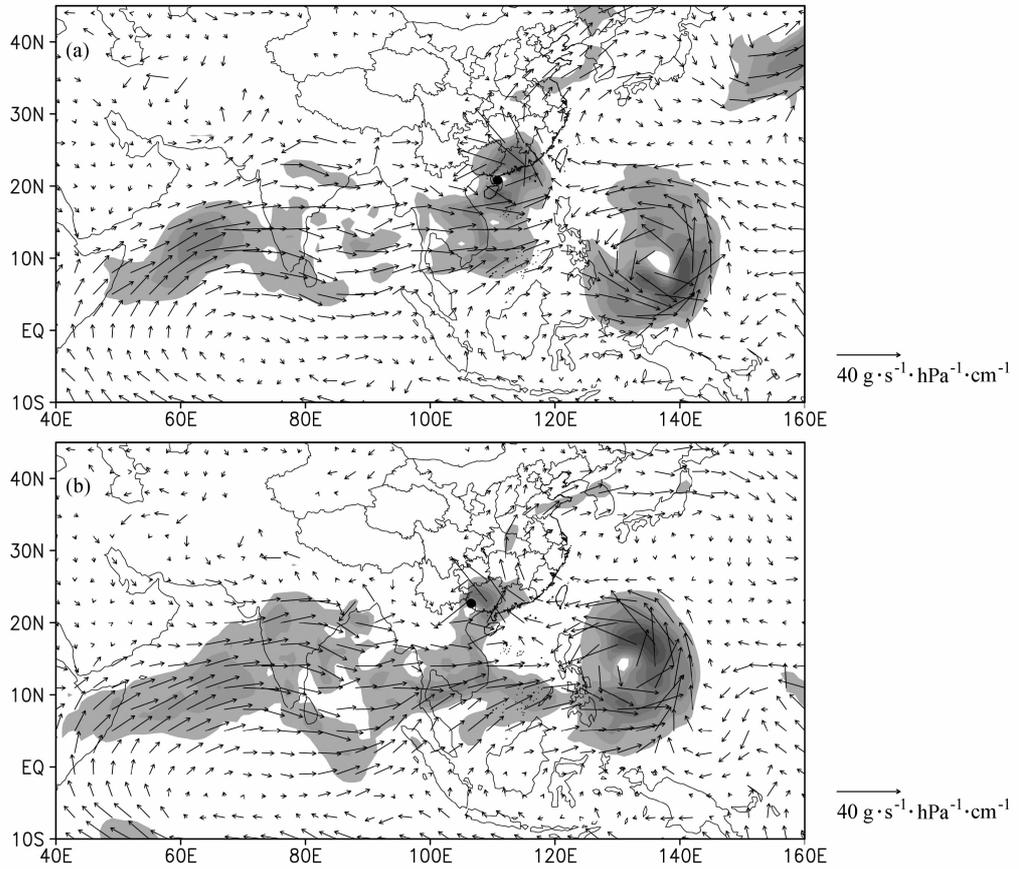


图 5 850 hPa 水汽通量：(a) 7 月 2 日 02 时、(b) 7 月 3 日 08 时。阴影区为水汽通量大于等于 $15 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的区域

Fig. 5 850-hPa vapor fluxes: (a) 0200 LST 2 July; (b) 0800 LST 3 July. Regions with vapor flux equal to or greater than $15 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ are shaded

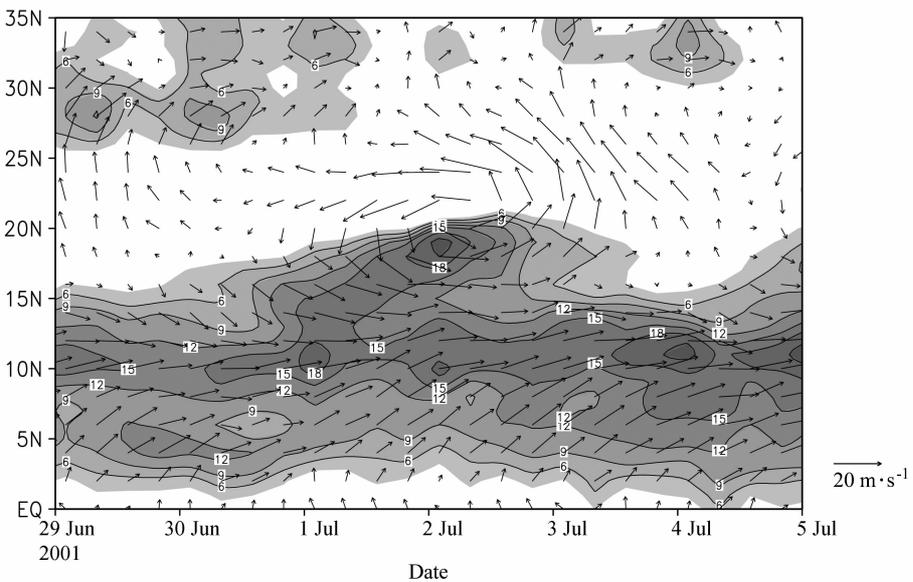


图 6 850 hPa 沿 110°E 纬向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 等值线) 和风矢量的时间-纬度剖面图。阴影区代表纬向风大于等于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 6 Time-latitude cross section of 850-hPa zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (isoline) and wind vectors along 110°E . Regions with zonal wind equal to or greater than $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ are shaded

块状高压之间形成了宽阔的南北贯通的低压带，此低压带北部的西风槽强烈发展东移，槽前的不稳定能量给即将登陆的台风予以补充，两者的叠加作用致使粤南、桂南等地区出现强降水。“榴莲”位于副高西南侧，偏东南引导气流有利于“榴莲”向西北行进并登陆。“榴莲”登陆后正好位于低压带中（图 3b），中纬度西风槽进一步加深，向南伸展，构成了典型的“北槽南涡”天气形势。也正是由于中纬度西风槽向南发展，阻碍了西太平洋副热带高压加强西伸，西脊点较图 3a 有所东退，这种形势的配置十分有利于“榴莲”的滞留，也为暴雨增幅提供了有利的环流背景。另一方面，西风槽后的西北气流将中纬度冷空气输送至低纬，影响广西地区，使之在“榴莲”环流北部外围与东南风暖湿气流汇合，有利于大范围强降水发生。

3.2 低纬度西南季风和越赤道气流的影响

登陆热带气旋的暴雨强度与其水汽供应密切相关，不同的水汽来源会造成登陆热带气旋差异明显（刘舸等，2007），有暴雨产生的登陆热带气旋，往往有一条长而强的水汽通道连接海洋和热带气旋（李英等，2004b）。“榴莲”之所以能在登陆后维持并出现暴雨急剧增幅，另一个重要原因就是强盛的西南季风及其所带来的充沛水汽。早在“榴莲”登陆湛江之前，南海西南季风就已经侵入台风南侧，这支季风来源于南半球的冬季风

跨越赤道后转向的夏季风。7月2日02时，随着台风中心接近湛江，南海季风侵入“榴莲”环流系统，由于风速大值区在孟加拉湾有所断裂，所以并未形成完整的西南季风带（图 4a），水汽主要来自于南海地区，来自阿拉伯海的水汽输送大值带在孟加拉湾有所中断（图 5a），西太平洋水汽输送大值主要集中在菲律宾以东洋面 0104 号台风“尤特”附近。之后索马里急流和 100°E 附近的越赤道气流逐渐增强，使得阿拉伯海和孟加拉湾上空的风速加大，促进了西南季风的进一步发展（图略）。3日08时（图 4b），在“榴莲”首次登陆 28 小时之后，加强的西南季风，从阿拉伯海、孟加拉湾、中南半岛至北部湾为一条完整的西南风带和水汽输送带，与来自西太平洋副热带高压西南侧的东南气流在广西南部汇合，一并注入到“榴莲”东北部环流中，一方面与台风气旋性环流叠加，一方面为“榴莲”补充丰富的水汽（图 5b），使之在陆上维持并产生暴雨增幅。

从 850 hPa 纬向风和风矢量时间-纬度剖面图（图 6）可以看出，从 2001 年 6 月 30 日起，原本位于南海南部（ 15°N 以南）的西风大值区开始向北部扩展，7 月 2~3 日强盛的西风抵达南海北部至广西沿海一带，汇入“榴莲”环流系统，对其陆上维持起到了重要作用。另外，从 700 hPa 沿赤道经向风距平时间-经度剖面（图 7）上可以看出，在“榴莲”登陆期间，从 7 月 2 日后期开

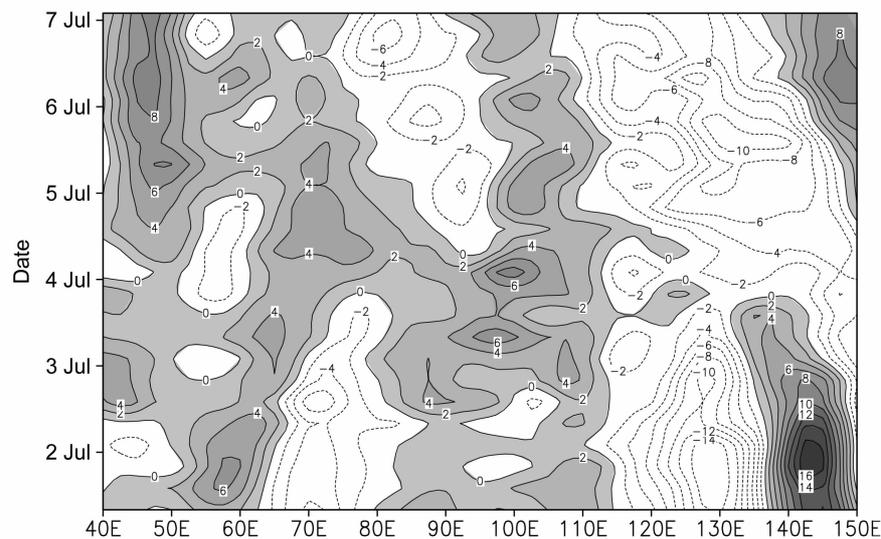


图 7 700 hPa 沿赤道经向风距平（单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）时间-经度剖面图。阴影部分代表正距平区

Fig. 7 Time-longitude section of 700-hPa meridional wind departures ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along the equator. The positive departure regions are shaded

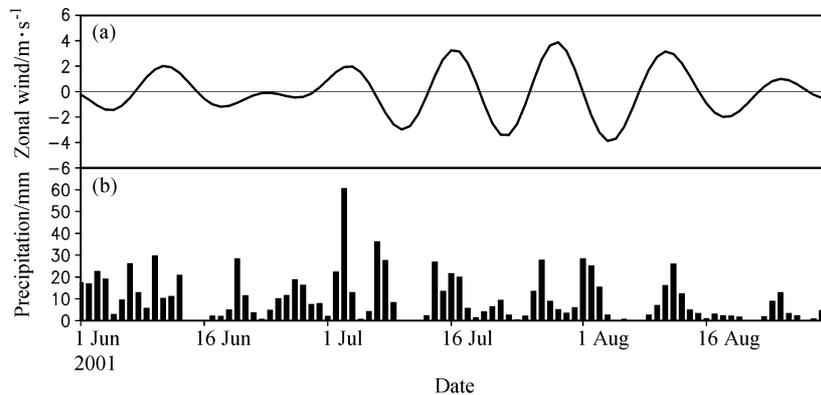


图8 2001年6~8月(a)南海北部地区(15°N~22°N, 105°E~115°E)850 hPa纬向风分量10~20天滤波曲线,及(b)广西西南部地区(22°N~25°N, 105°E~110°E)平均降水逐日演变

Fig. 8 (a) The 10-20 day filtered curve of 850-hPa zonal wind over the north of the South China Sea and (b) daily area mean rainfall over the southwest of Guangxi from June to August 2001

始,除索马里为赤道经向风正距平外,90°E越赤道气流增强东传,3~4日100°E附近为赤道经向风正距平大值区,达6~8 m·s⁻¹,越赤道气流增强显著,进一步加强西南季风,把来自热带海洋的大量水汽、热量和动量注入了“榴莲”低压环流,使之能在陆上长时间维持。

4 低纬夏季风季节内振荡对暴雨增幅的影响

在天气和季节尺度上,东亚夏季风对热带气旋的台风频数及生成位置均有很大影响(孙秀荣和端义宏,2003)。当季风与登陆台风相互结合时,往往造成降水的强烈增幅,从而导致我国沿海地区的洪涝灾害(李丽和郑勇,2008)。

但夏季风建立后,并不是定常不变的,而是忽强忽弱,呈明显的季节内振荡。研究发现,东亚季风区的季节内变率主要表现出两种时段的振荡,其一为30~60天振荡,另一种为10~20天振荡(据建华等,2007)。夏季风的爆发、活跃和中断与二者密切相关(王慧等,2006; Krishnamurti et al., 1982)。分析2001年南海北部至粤桂南部地区夏季风季节内振荡,发现30~60天低频振幅明显小于10~20天低频振幅,因此选取2001年夏季10~20天为低频振荡主周期(图8a),与广西西南部逐日平均降水(图8b)比较发现,主振荡周期波动趋势与降水的多寡有较好的

对应关系。特别是7月3日的波峰对应着该时段的降水峰值,表明当10~20天季节内振荡处于极端活跃期时,对“榴莲”的暴雨增幅有重要影响。

进一步分析2001年10~20天带通滤波后的低层低频纬向风沿113°E传播特征(图9),发现2001年6~7月份存在明显的低频西风北传过程。从6月底开始,赤道低纬地区的低频振荡由负位相转为正位相,低频西风出现,并向北传播,7月3日达到20°N,侵入“榴莲”南部环流,使其减弱变缓,对其陆上维持起到了重要作用,有利

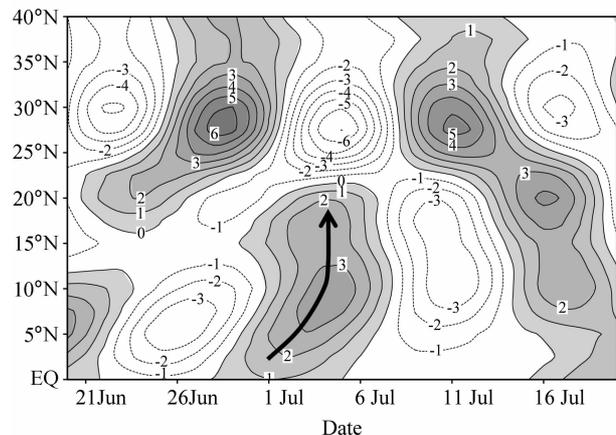


图9 10~20天滤波850 hPa纬向风沿(单位: m·s⁻¹)113°E的纬度-时间剖面图。阴影区表示低频西风

Fig. 9 Time-latitude section of the 10-20 day filtered 850-hPa zonal winds (m·s⁻¹) along 113°E. Regions with low-frequency west wind are shaded

于该时段降水急剧增幅。

根据图 8a, 将 2001 年夏季风低频过程划分为 8 个位相 (Chan et al., 2002)。分别是: 6 月 29 日 (位相 1), 7 月 1 日 (位相 2), 7 月 3 日 (位相 3), 7 月 5 日 (位相 4), 7 月 7 日 (位相 5), 7 月 9 日 (位相 6), 7 月 11 日 (位相 7), 7 月 13 日 (位相 8)。其中位相 1 和 5 为转换位相, 位相 1 表示振荡由中断向活跃的过渡, 位相 5 表示活跃向中断的过渡; 位相 3 表示活跃期的波峰, 位相 7 表示中断期的波谷; 位相 2、4、6、8 表示振幅达到峰(谷)值一半的位相。

分析 850 hPa 不同位相低频风场发现, 6 月 29 日 (位相 1), 季风开始由中断期向活跃期转换, 南海东北部、华南沿海由一强低频反气旋环流控制 (图 10a)。而后季风开始活跃 (位相 2), 低频西风已经占据北部湾地区, 华南地区的低频反气旋性环流减弱, 菲律宾附近洋面的低频气旋性环流向西北传播至南海北部 (图 10b)。7 月 3 日 (位相 3), 即低频振荡处于极端活跃位相时, 广西和华南大部为低频气旋性环流北部的偏东气流控制, 与此同时, 中南半岛地区的低频西风进一步侵入北部湾地区, 两支气流交汇于广西西南

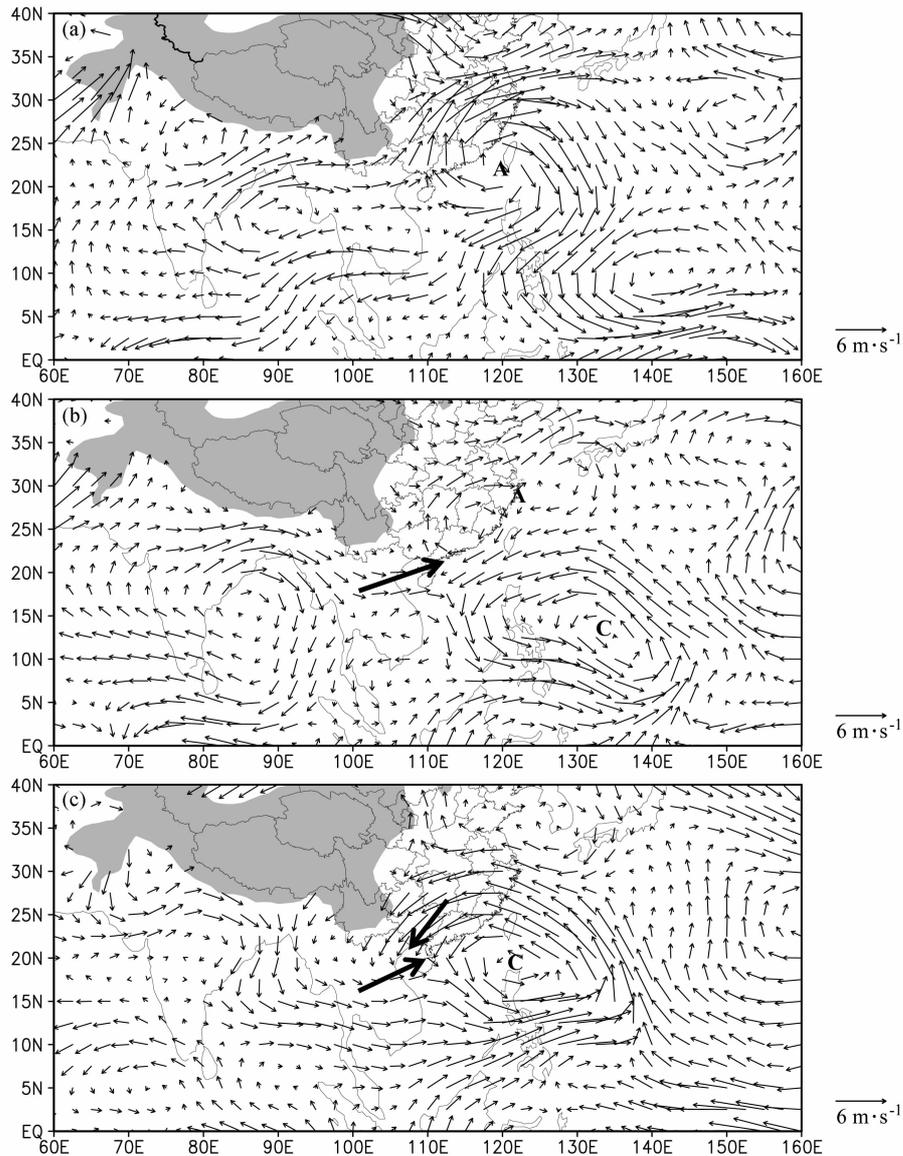


图 10 850 hPa 低频风场在 1~3 位相上的演变特征: (a) 位相 1; (b) 位相 2; (c) 位相 3
Fig. 10 Evolution of 850-hPa low-frequency winds: (a) Phase 1; (b) phase 2; (c) phase 3

部，有利于低层辐合（图 10c），与“榴莲”该时段在广西西南部的急剧降水增幅相一致，表明低纬季风低频振荡对登陆台风降水增幅具有重要影响。

从低频水汽通量在 8 个位相上的演变过程来看，6 月 29 日（位相 1），季风从中断期到活跃期过渡，主要的低频水汽辐合区位于浙江和福建北部（图 11a），海南岛南部海域有一弱辐合区，为中南半岛低频西风和南海低频东风水汽输送辐合所致。7 月 1 日（位相 2），广西南部沿海及北部湾附近为低频水汽辐合大值区，这主要由于来自

孟加拉湾经中南半岛的低频水汽输送加强，与来自西太平洋和南海的低频水汽输送在广西南部辐合所致，原位于浙江和福建的辐合大值区消失（图 11b）。7 月 3 日，即极端活跃位相（位相 3），中南半岛北部低频水汽输送进一步加强，来自西太平洋和南海的东风水汽输送北抬，二者辐合加强且范围扩大，广西大部都为强的低频水汽辐合区控制（图 11c），与“榴莲”该时段在广西西南部的暴雨急剧增幅相一致。可见低纬低频水汽输送在北传过程中，为“榴莲”提供了充足的水汽，对降水增幅确有重要的作用。

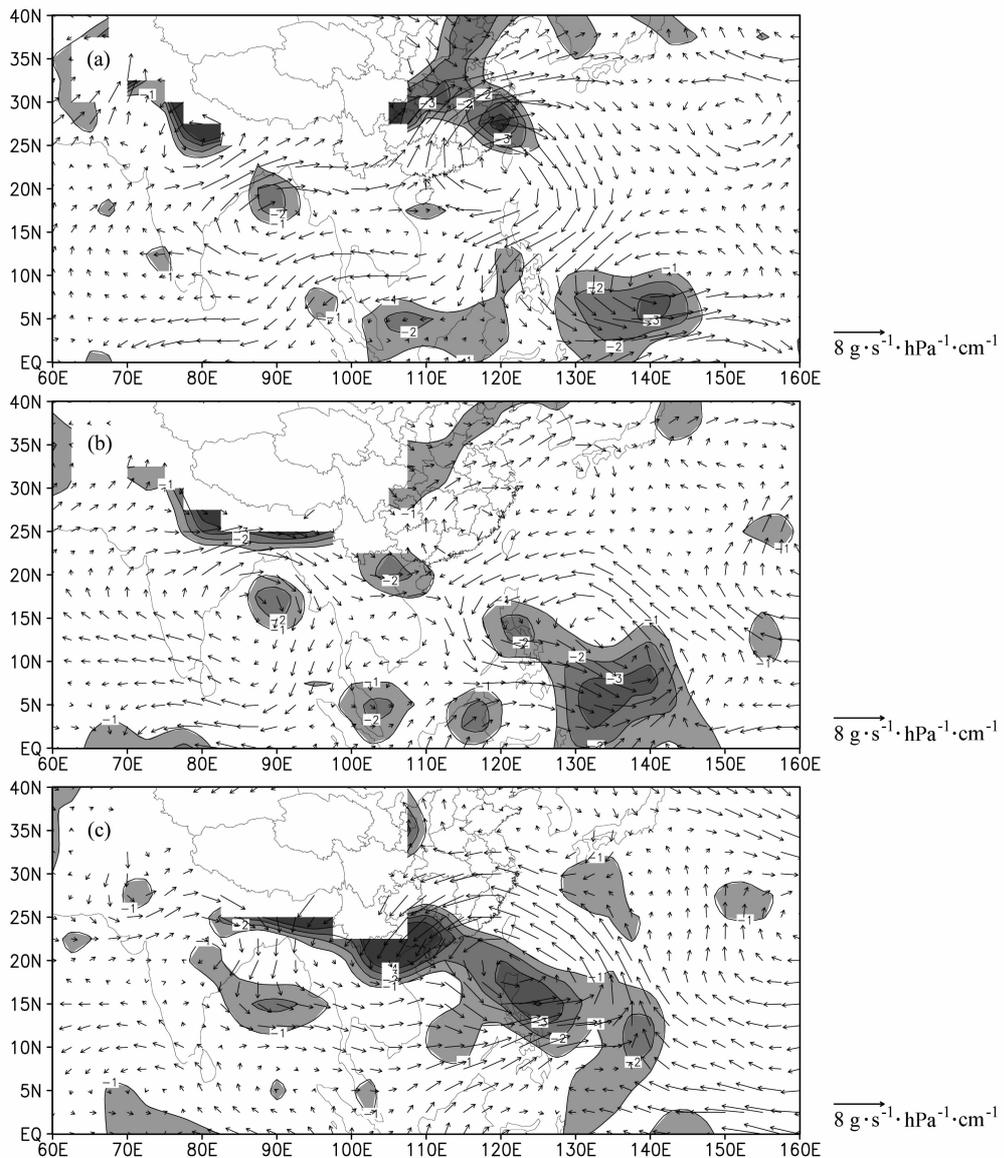


图 11 850 hPa 低频水汽通量在 1~3 位相上的演变特征：(a) 位相 1；(b) 位相 2；(c) 位相 3。阴影区为水汽通量辐合区

Fig. 11 Evolution of 850-hPa low-frequency vapor fluxes: (a) Phase 1; (b) phase 2; (c) phase 3. The flux convergence regions are shaded

5 结论

0103 号台风“榴莲”登陆后经历了登陆初期强度迅速减弱,之后减弱幅度明显减小,但却伴随有范围更广、强度更大的暴雨增幅阶段,造成了广西南部历史罕见的洪涝灾害。本文对“榴莲”陆上维持及暴雨增幅的大尺度环流特征进行了分析,结论如下:

(1)“榴莲”登陆后正好位于低压带中,中纬度西风槽进一步加深,向南伸展,构成了典型的“北槽南涡”天气形势。也正是由于中纬度西风槽向南发展,阻碍了西太平洋副热带高压加强西伸,使得这一形势在“榴莲”陆上期间能够稳定维持。西风槽后的西北气流将中纬度冷空气输送至低纬,影响广西地区,使之在“榴莲”环流北部外围与东南风暖湿气流汇合,有利于强降水发生;

(2)7月初,索马里和 100°E 越赤道气流增强显著,加强西南季风,从阿拉伯海东部,经孟加拉湾和中南半岛中南部,直至南海北部到广西大部形成一条完整的水汽输送带,充沛的水汽直达“榴莲”东北侧,有利于该时段暴雨增幅;

(3)低纬夏季风 $10\sim 20$ 天低频振荡对“榴莲”登陆后暴雨增幅有重要作用。低频振荡处于极端活跃位相时,低纬低频西风偏北及低频水汽向北输送至广西南部,有利于低层辐合并提供充足水汽,引发“榴莲”在广西西南部的暴雨急剧增幅。

参考文献 (References)

- Chan J C L, Ai W, Xu J. 2002. Mechanisms responsible for the maintenance of the 1998 South China Sea summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80 (5): 1103-1113.
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. *气象学报*, 62 (5): 541-548. Chen Lianshou, Luo Zhexian, Li Ying. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 541-548.
- 琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 2007. 东亚季风涌对我国东部大尺度降水过程的影响分析 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1129-1139. Ju Jianhua, Sun Dan, Lv Junmei. 2007. The influence of the East Asian monsoon stream on the large scale precipitation course in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1129-1139.
- Krishnamurti T N, Subrahmanyam D. 1982. The 30-50 day mode at 850 mb during MONEX [J]. *J. Atmos. Sci.*, 39: 2088-2095.
- 李江南, 王安宇, 杨兆礼, 等. 2003. 台风暴雨的研究进展 [J]. *热带气象学报*, 19 (增): 152-159. Li Jiangnan, Wang Anyu, Yang Zhaoli, et al. 2003. Advancement in the study of typhoon rainstorm [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 19 (suppl.): 152-159.
- 李丽, 郑勇. 2008. 1996~2006年韶关热带气旋暴雨统计分析 [J]. *广东气象*, 30 (4): 37-38. Li Li, Zheng Yong. 2008. Statistical analysis of cyclone heavy rainfall in Shaoguan from 1996 to 2006 [J]. *Guangdong Meteorology (in Chinese)*, 30 (4): 37-38.
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004a. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. *热带气象学报*, 20 (1): 14-29. Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 20 (1): 14-29.
- 李英, 陈联寿, 王继志. 2004b. 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 landing [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 62 (2): 167-179.
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2007. 2006年夏季西太平洋热带气旋活动的初步研究 [J]. *气候与环境研究*, 12 (6): 738-750. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2007. A preliminary study on activities of tropical cyclones over the western North Pacific during the summer in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (6): 738-750.
- 卢山, 吴乃庚, 薛登智. 2008. 南海季风槽影响下热带气旋暴雨增幅的研究 [J]. *气象*, 34 (6): 53-59. Lu Shan, Wu Naigeng, Xue Dengzhi. 2008. Research on the enhancement of tropical cyclone rainstorm influenced by monsoon trough of South China Sea [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (6): 53-59.
- 孙秀荣, 端义宏. 2003. 对东亚夏季风与西北太平洋热带气旋频数关系的初步分析 [J]. *大气科学*, 27 (1): 67-74. Sun Xiurong, Duan Yihong. 2003. A study of the relationships between the East Asian summer monsoon and the tropical cyclone frequency in the north western Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (1): 67-74.
- 王慧, 丁一汇, 何金海. 2006. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响 [J]. *气象学报*, 64 (2): 345-356. Wang Hui, Ding Yihui, He Jinhai. 2006. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 64 (2): 345-356.
- 王鹏云. 1998. 台湾岛地形对台风暴雨影响的数值研究 [J]. *气候与环境研究*, 3 (3): 235-246. Wang Pengyun. 1998. A nu-

- merical study on the effects of orography of Taiwan island on typhoon induced heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (3): 235-246.
- 姚才. 2003. 0103 号台风“榴莲”强度变化特征及暴雨成因的分析 [J]. 热带气象学报, 19 (增): 180-188. Yao Cai. 2003. Variations of typhoon Durian (0103) intensity and analysis of heavy rain causes [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (suppl.): 180-188.
- 朱健, 何海滨. 2008. 0604 和 0605 号台风的数值模拟与暴雨成因对比分析 [J]. 南京气象学院学报, 31 (4): 530-538. Zhu Jian, He Haibin. 2008. Numerical simulation and precipitation analysis of typhoon 0604 and 0605 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (4): 530-538.
- 朱岩洪, 陈联寿, 徐祥德. 2000. 中纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (5): 669-675. Zhu Yanhong, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 669-675.