

马蕴琦,任福民,冯恬,等.强热带风暴“碧利斯”(0604)极端降水研究回顾[J].海洋气象学报,2020,40(3):1-10.  
MA Yunqi, REN Fumin, FENG Tian, et al. Review of research on extreme precipitation induced by Severe Tropical Storm BILIS (2006) [J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(3): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.001. (in Chinese)

## 强热带风暴“碧利斯”(0604)极端降水研究回顾

马蕴琦<sup>1</sup>,任福民<sup>1</sup>,冯恬<sup>1,2</sup>,邱文玉<sup>3</sup>

(1.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081; 2.成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225; 3.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,江苏 南京 210044)

**摘要:** 强热带风暴“碧利斯”于2006年7月14日在我国福建省登陆,登陆后一路西行,在福建、浙江、湖南、江西、广东、广西多个省份产生强降水,其陆上维持时间之长、影响范围之广、降水极端性之强,在历史上极为罕见。“碧利斯”引发的降水主要有三个极值中心,分别对应着降水的三个阶段,其中第二阶段降水极端性最为突出,在湖南、江西和广东交界处发生了暴雨增幅,造成严重的洪涝灾害。为了更加全面地认识此次过程,本文对“碧利斯”产生极端降水的机制做了回顾总结,分别从有利的大尺度形势、中尺度系统的影响、地形作用、云微物理过程以及动力因子的诊断分析五个角度进行,最后对“碧利斯”极端降水区别于其他极端降水个例的机理以及进一步可能的研究方向进行了讨论。

**关键词:** 碧利斯; 极端降水; 成因; 回顾

中图分类号: P458.124 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2020)03-0001-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.001

## Review of research on extreme precipitation induced by Severe Tropical Storm BILIS (2006)

MA Yunqi<sup>1</sup>, REN Fumin<sup>1</sup>, FENG Tian<sup>1,2</sup>, QIU Wenyu<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract** After the landfall in Fujian Province on 14 July 2006, Severe Tropical Storm BILIS (2006) moved westward, producing heavy precipitation in many provinces, including Fujian, Zhejiang, Hunan, Jiangxi, Guangdong, and Guangxi. Its long duration on land, wide range of impact, and strong intensity of precipitation are extremely rare in history. The precipitation induced by BILIS mainly has three extreme value centers, corresponding to three stages of precipitation, respectively, among which the second stage is the most prominent. The rainstorm amplification occurs at the border of Hunan, Jiangxi, and Guangdong provinces, causing serious floods. To get a more comprehensive understanding of the process, the paper reviews the research on mechanism of the extreme precipitation induced by BILIS from the following 5 key aspects, including favorable large-scale situation, mesoscale system, topography, cloud

收稿日期: 2020-06-07; 修订日期: 2020-08-25

基金项目: 国家重点研发发展计划项目(2019YFC1510205); 国家自然科学基金项目(41675042)

作者简介: 马蕴琦,女,硕士研究生,主要从事台风降水研究,937717479@qq.com。

通信作者: 任福民,男,研究员,主要从事台风和极端天气气候事件研究, fmrn@163.com。

microphysical process, and diagnostic analysis of dynamic factors. Finally, the differences in the mechanism between the extreme precipitation induced by BILIS and other extreme precipitation cases and possible further researches on BILIS are discussed.

**Key words** BILIS; extreme precipitation; cause; review

## 引言

我国是世界上受台风影响最为严重的国家之一<sup>[1]</sup>,台风,尤其是登陆台风,能带来大风、暴雨和风暴潮,引发气象灾害,其中以暴雨灾害最为普遍<sup>[2]</sup>。台风是最强的暴雨天气系统<sup>[3]</sup>,往往伴随极端降水的发生,0604号台风“碧利斯”(强热带风暴级)就是一个典型的例子。“碧利斯”造成包括福建、浙江、江西、湖南、广东和广西在内的6个省份发生大暴雨甚至特大暴雨<sup>[4]</sup>,多个降水极值中心过程降水量超过400 mm。由于暴雨雨量大,引发了严重的汛情,受灾人员有2 962.2万人,因灾死亡612人,直接经济损失高达266亿元人民币<sup>[5]</sup>,造成的死亡人数为当时近十年最多。

近几十年来,为了提高预报精度、防台减灾,国内外气象工作者对台风极端降水的形成机理做了大量研究,主要可以归为三个方面:环境大气、台风内部结构<sup>[6-7]</sup>以及下垫面强迫的影响<sup>[8]</sup>,其中环境大气的作用包括水汽输送或急流<sup>[9-14]</sup>、冷空气<sup>[15]</sup>或西风槽<sup>[16-19]</sup>、垂直风切变<sup>[20-22]</sup>等。“碧利斯”影响范围广,引发灾害重,针对其极端降水成因从多方面展开研究。多数人从大尺度环流背景、水汽输送、西南季风、物理量诊断等方面进行了暴雨成因分析<sup>[23-26]</sup>,指出西北太平洋副热带高压的稳定少动为“碧利斯”产生持续性降水提供了稳定的背景场,西南季风的增强则提供了必要的水汽条件。石顺吉等<sup>[27]</sup>和余锦华等<sup>[28]</sup>发现环境垂直风切变对“碧利斯”一波非对称降水结构的形成有显著影响。滕代高等<sup>[29]</sup>指出涡合并和自激增长形成的中尺度系统与风暴涡旋的相互作用是“碧利斯”登陆后产生强降水的可能机制。叶成志和李昀英<sup>[30]</sup>发现湘东南向北开口的喇叭口地形的辐合抬升对湘东南暴雨有明显增幅作用。此外,REN and CUI<sup>[7]</sup>从云微物理角度揭示了“碧利斯”暴雨增幅成因。现有研究回顾主要是综合性的<sup>[31-35]</sup>,针对个例的总结较少<sup>[36-37]</sup>,并且缺乏对“碧利斯”的研究回顾。“碧利斯”引发暴雨形成的机制复杂,本文将对其极端降水成因回顾总结,以期对此次极端降水过程有较全面的认识。

文章第一部分介绍“碧利斯”概况,第二部分分别从有利的大尺度形势、中尺度系统的影响、地形作用、云微物理过程以及动力因子的诊断分析等5个方面做一个回顾总结,文章最后一部分讨论“碧利斯”极端降水机理的独特性以及进一步可能的研究方向。

## 1 “碧利斯”概况

“碧利斯”于2006年7月9日06时(世界时,UTC,下同)在菲律宾以东洋面上生成(图1a),11日凌晨增强为强热带风暴,13日15时登陆我国台湾省,14日04时50分在福建省北部的霞浦附近再次登陆,登陆时中心气压为975 hPa(图1b),中心附近最大风力达11级(最大风速 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。随后继续向西北偏西方向移动,14日08时在福建省闽侯县降级为热带风暴,15日08时在江西省境内进一步减弱为热带低压,此后其强度继续减弱,向西偏南方向移动,先后穿越湖南、广西等省区,最终“碧利斯”于17日晚在越南北部地区减弱消失。

“碧利斯”过程雨量大,极值中心主要有三个,分别对应着降水的三个阶段,三个阶段中以第二个阶段最为突出<sup>[38]</sup>。利用客观天气图分析法<sup>[39-41]</sup>(objective synoptic analysis technique, OSAT)分离台风降水,图2a是“碧利斯”的过程降水,降水期为7月12—17日,超过250 mm的极端降水主要有三个中心:福建东北部、湖南和广东的交界处以及广东东部和福建南部的沿海地区。极大值位于湖南和广东交界处,其中广东博罗站(569.4 mm)和湖南永兴站(504.2 mm)过程降水量均超过了500 mm。将“碧利斯”的过程降水分布(图2a)与我国东南丘陵地形(图2b)对比,发现三个极端降水中心分别位于我国浙闽丘陵东南沿海地区、南岭附近以及浙闽丘陵西南部的沿海地区,“碧利斯”引发的强降水可能与这些山脉地形存在密切联系。此次降水过程可分为三个阶段(图3):第一阶段是“碧利斯”登陆前后7月13日12时—14日12时(图3a),强降水中心出现在福建北部和浙江南部的沿海地区,降水普遍大于100 mm,从地理分布上这一阶段的降水中心出现在“碧利斯”的北侧;第三阶段降水发生在7月

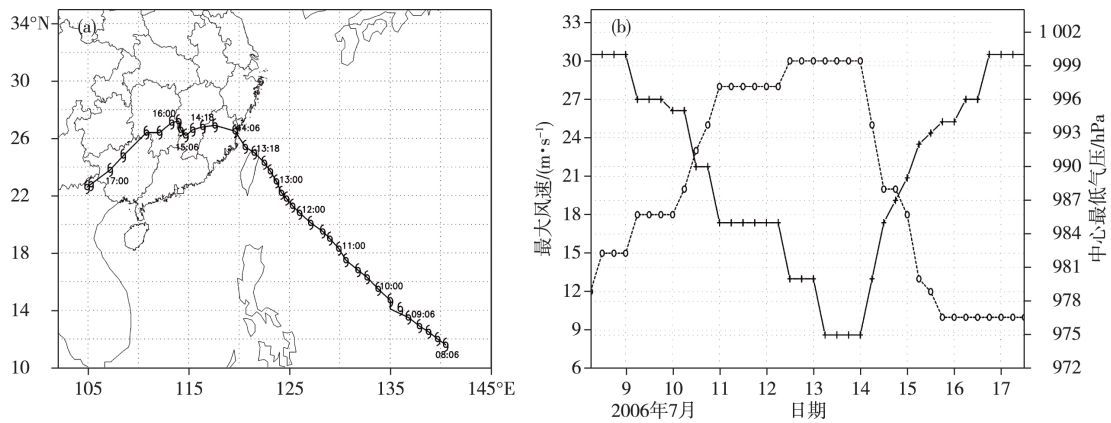


图 1 强热带风暴“碧利斯”(0604) 的移动路径 (a) 和最大风速(虚线, 单位:  $m \cdot s^{-1}$ )、中心最低气压(实线, 单位: hPa) 变化 (b) (引自周玉淑等<sup>[26]</sup>)

Fig.1 Track (a) of Severe Tropical Storm BILIS (2006) and changes of its maximum wind speed (dashed line, units:  $m \cdot s^{-1}$ ) and minimum air pressure (solid line, units: hPa) at the center (b) (Credit: ZHOU et al.<sup>[26]</sup>)

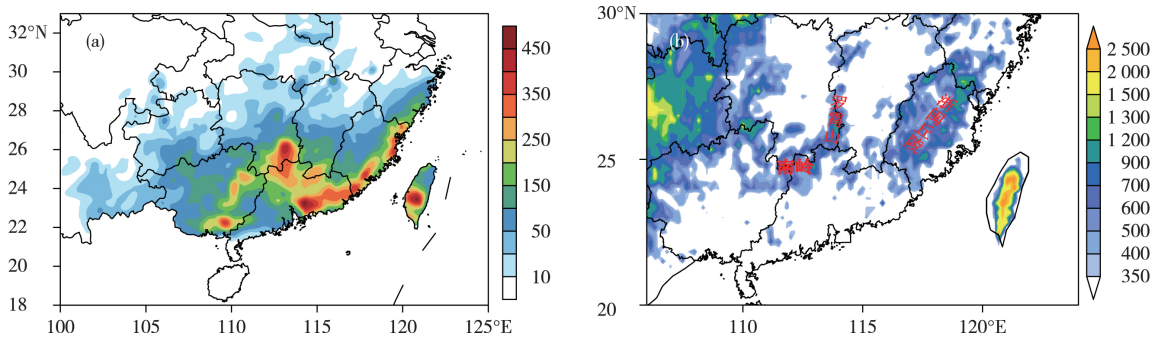


图 2 强热带风暴“碧利斯”(0604) 过程降水量分布 (a; 单位: mm) 与中国东南丘陵地形 (b; 单位: m)

Fig.2 Distribution of precipitation (a; units: mm) induced by BILIS (2006) and topographic map of Southeast Hills (b; units: m)

15 日 12 时—16 日 12 时(图 3c), 强降水中心位于广东和福建沿海地区, 强降水带(雨量  $R > 100$  mm) 从海岸向内陆延伸 100 km, 全长近 700 km; 相对于以上两个阶段, 发生在 7 月 14 日 12 时—15 日 12 时的第二阶段(图 3b) 降水极端性更为突出, 7 月 14 日 12—18 时湖南、广东和江西的交界处测站的 6 h 累计降水量极值小于 25 mm, 而到了 14 日 18 时—15 日 06 时测站的逐 6 h 累计降水量极值均超过 95 mm, 12 h 累计降水量极值达到特大暴雨(雨量  $R > 120$  mm) 级别<sup>[4]</sup>, 暴雨强度显著增强, 降水中心由“碧利斯”北侧移到其南侧, 广东东北部、江西南部 and 湖南南部地区此阶段 24 h 累计降雨量大于 100 mm, 湖南省记录的局部最大降雨量超过 250 mm。

## 2 “碧利斯”极端降水成因

成因分析<sup>[38]</sup> 表明, 第一阶段是由于内核环流和

外部雨带与沿海地形相互作用, 造成在环流右前侧的浙江和福建产生暴雨, 这是由陆地和海洋之间的差异引起的摩擦辐合造成的; 第三阶段的降水是由“碧利斯”环流与南海季风的相互作用以及在浙闽丘陵西南侧的沿海地区抬升造成的。由于第二阶段降水造成了大范围严重的洪涝灾害, 研究主要集中在这一阶段, 其极端降水机制较为复杂, 接下来将总结有利的大尺度形势、中尺度系统的影响、地形作用、云的微物理过程以及天气诊断分析等 5 个方面的研究。

### 2.1 有利的大尺度形势

暴雨尤其是特大暴雨是由多种环流与天气系统相互作用产生的<sup>[42]</sup>。研究主要从大陆高压、副热带高压和西南季风揭示“碧利斯”极端降水成因, 副热带高压主要影响“碧利斯”的路径和移速, 大陆高压和西南季风对其强度维持具有重要作用。

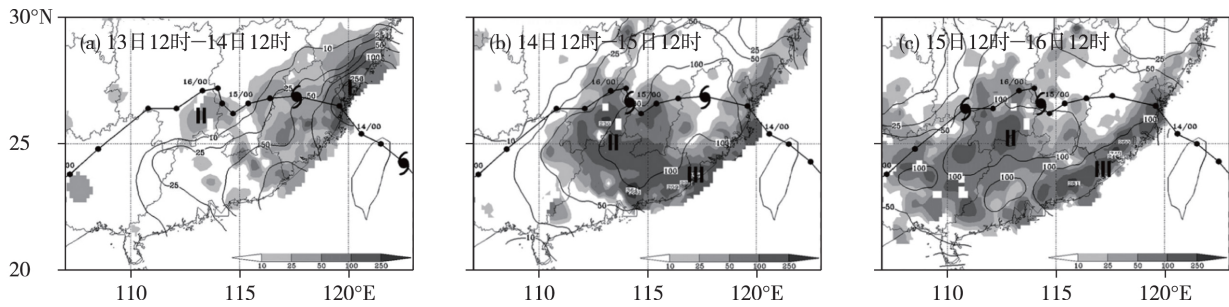


图3 强热带风暴“碧利斯”(0604)的观测降水量(阴影,单位:mm,I、II、III分别代表三个阶段的降水中心,台风符号是三个阶段起止时间风暴中心所在位置;a.7月13日12时—14日12时 b.7月14日12时—15日12时 c.7月15日12时—16日12时;引自GAO et al.<sup>[38]</sup>)

Fig.3 Observed precipitation (shaded, units: mm) induced by BILIS (2006) from 12:00 UTC 13 to 12:00 UTC 14 (a), from 12:00 UTC 14 to 12:00 UTC 15 (b), and from 12:00 UTC 15 to 12:00 UTC 16 (c) July 2006 (I, II, and III denote the centers of the three stages of precipitation; the locations of the storm centers at the starting and ending times for the three stages are marked by typhoon symbols; Credit: GAO et al.<sup>[38]</sup>)

“碧利斯”登陆后,东亚中纬度地区为两槽一脊的环流形势且稳定少动(图4a),副热带高压加强西伸与大陆高压脊打通,在低压环流北部形成一个强大高压坝,“碧利斯”处在北部的大陆高压、东部的副热带高压和南部的低纬赤道高压环流包围之中。在此环流背景下,风暴环流与高压系统相互作用,一方面导致“碧利斯”登陆后缓慢西行,另一方面有利于其气旋性环流的维持,这种有利的大尺度环流造成了持续强烈的台风暴雨<sup>[5 43]</sup>。此间,大陆高压的加强不仅阻止了风暴的北进,还导致“碧利斯”西北象限的东北风加强,使“碧利斯”登陆后仍能维持较大的动量输送,同时还增强了“碧利斯”高层的辐散,有利于其残涡维持和强降水的持续<sup>[44]</sup>。

稳定的水汽输送也是热带气旋强降水产生的重要条件<sup>[45]</sup>,李英等<sup>[9]</sup>指出登陆后的热带气旋若与一支低空水汽通道连接,则热带气旋可长久维持,反之则迅速消亡。“碧利斯”登陆24 h左右后减弱

为热带低压,其残涡在陆上维持近96 h,研究<sup>[46]</sup>发现其登陆后一直与一条水汽通量强输送带连接,7月15日00时,环流东侧最大水汽通量甚至超过 $45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,如此强的水汽输送非常少见。强的水汽输送与天气系统密切相关:15日后南海季风准周和准双周振荡由负值变为正值(以南风为主),南海季风爆发,使降水得以加强和维持。在此期间,索马里急流和 $80^\circ \sim 100^\circ \text{E}$ 越赤道气流也加强北抬,同样增强了水汽和潜热的输送<sup>[47-48]</sup>。戴竹君等<sup>[49]</sup>进一步通过模拟水汽输送路径,发现在暴雨增幅前水汽主要从热带气旋环流的东北侧进入,主要输送850 hPa以上的大气;增幅后的水汽主要来源于中低层孟加拉湾的西南气流,这是由于西南季风加强(图4b),季风涌爆发使原先断裂的水汽输送通道被打通<sup>[50]</sup>(图5b)。充沛的水汽输送不仅加剧了对流不稳定,低层辐合与高层辐散也增强,从而产生强的抽吸效应,为大暴雨的产生提供了动力

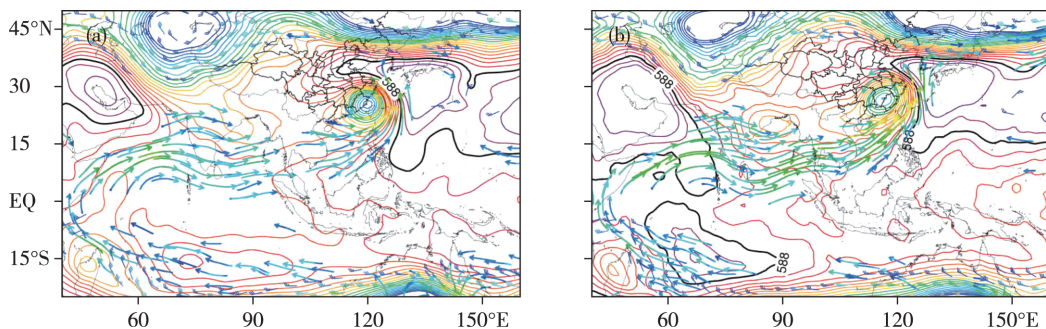


图4 2006年7月14日00时(a)和18时(b)高低空环流场(等值线:500 hPa高度场,单位:dagpm;风向杆:200 hPa风速大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速矢,矢量箭头:850 hPa风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速矢;引自王黎娟等<sup>[4]</sup>)

Fig.4 Circulation field at 00:00 UTC (a) and 18:00 UTC (b) 14 July 2006 (contour for geopotential height at 500 hPa, units: dagpm; wind shaft for wind barb with speed larger than  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  at 200 hPa; arrow for wind barb with speed larger than  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  at 850 hPa; Credit: WANG et al.<sup>[4]</sup>)

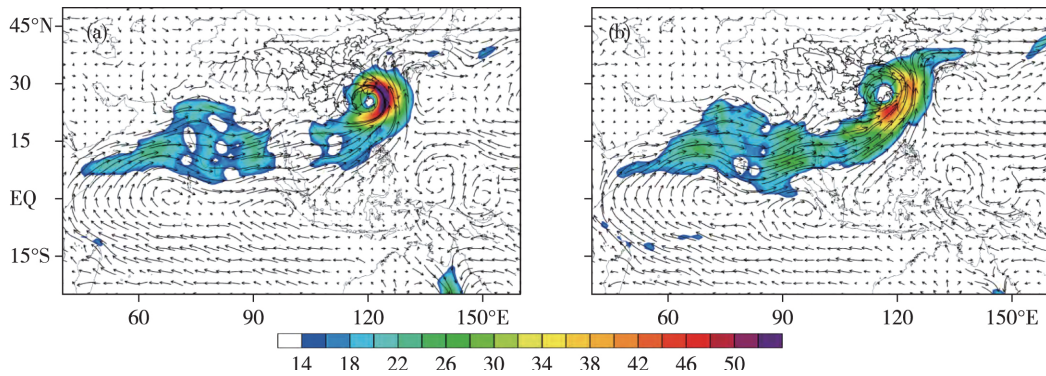


图5 2006年7月14日00时(a)和18时(b)850 hPa水汽通量(单位:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 阴影区为水汽通量大于  $15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  的区域; 引自王黎娟等<sup>[4]</sup>)

Fig.5 Water vapor flux at 850 hPa at 00:00 UTC (a) and 18:00 UTC (b) 14 July 2006 (units:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; shaded area for water vapor flux larger than  $15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; Credit: WANG et al.<sup>[4]</sup>)

抬升条件<sup>[24]</sup>, 造成华南暴雨增幅<sup>[51-52]</sup>。

## 2.2 中尺度系统的影响

研究<sup>[53-54]</sup>表明, 中尺度对流系统(MCS)往往是造成台风特大暴雨的重要因素之一, 台风登陆后, 其周围的中小尺度系统或云团与残涡的合并往往是台风暴雨增幅的一种可能机制<sup>[55]</sup>。丁一汇<sup>[37]</sup>也指出, 普遍测到的  $10^1 \sim 10^2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的这种雨强是高低压这类天气系统解释不了的, 它们实际是由暴雨中的中尺度天气系统造成的。

“碧利斯”登陆发生暴雨时, 从常规地面观测资料、雷达资料以及卫星红外云图可以发现在强降水地区有 MCS 发生发展, 这与西南季风以及垂直风切变密切相关。在“碧利斯”引发暴雨增幅时, 降水中心附近对流层低层的相当位温  $\theta_e$  高值区从地面向上发展, 是对流不稳定最显著的区域<sup>[56, 57]</sup>, 且7月14—17日一直处于季风活跃期<sup>[58]</sup>, 强西南季风的持续维持为风暴输送大量水汽和不稳定能量<sup>[59]</sup>。此外, 对流层中上层的干空气层对不稳定能量有一定的累积作用<sup>[60]</sup>, 大陆高压以北的冷空气与来自低纬的西南季风的作用也有利于该地区不稳定能量的储存<sup>[29]</sup>。在此背景下, 低压环流的动力抬升作用导致不稳定能量释放, 使华南上空产生中尺度涡、中尺度辐合线以及中尺度辐合中心, 这为 MCS 的发展和维持提供了有利的环境条件, 从而华南地区多 MCS 发生发展<sup>[61]</sup>。此外, 环境垂直风切变产生次级环流, 使“碧利斯”环流的西南侧为上升气流, MCS 多生成于低压环流的西南象限<sup>[57]</sup>, 这也是降水分布不对称的原因之一。湖南南部的强降水就是在垂直切变强迫的次级环流约束下, MCS 在湿不稳定条件下迅速发展, 并在向南移动的过程中增强所产

生的。

中尺度分析<sup>[62]</sup>还揭示出中尺度系统通过不同尺度涡旋自组织过程产生。初始时刻是多个小尺度云块或云团, 通过合并增长为较大尺度的  $\gamma$  中尺度和  $\beta$  中尺度云团, 最后多个中尺度云团再合并成天气尺度云团, 产生的多尺度对流云团不断移近风暴与风暴云系结合, 从而产生强烈的降水。

## 2.3 地形作用

“碧利斯”登陆后, 地形主要影响湘东南的降水, 位于粤北、赣南的降雨主体似乎与地形关系不大<sup>[38]</sup>。湖南省东、南、西三面被山地环绕, 东邻东北—西南向的罗霄山脉, 南倚准东西向的南岭山脉, 三面环山的分布形成一个向北开口的喇叭口地形。研究不仅揭示了 NNE—SSW 向暴雨带与罗霄山迎风面走向一致(图 6a), 而且也认识到地形通过强迫抬升和喇叭口地形的辐合作用使降水大为增强。

根据雷达和地面加密观测资料分析可知, 7月14日14时有大片混合性回波在江西西南部生成, 并沿着罗霄山脉发展成强回波中心带, 23时在“碧利斯”缓慢西移过程中, 回波整体不断向西南方向移动, 并且在湘东南地区形成窄带回波的“列车效应”。结合红外云图的黑体亮温(TBB)分布可以发现在15日02时, 湘东南黑体亮温  $t_{\text{BB}} < -62 \text{ }^\circ\text{C}$  的云团面积不断扩大, 并在该云团内部出现了黑体亮温  $t_{\text{BB}} < -80 \text{ }^\circ\text{C}$  的亮云核, 资兴站在15日02—03时雨强达到  $67.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 出现的这种特大雨强从天气尺度环流、水汽条件等很难解释, 这可能与湘东南的特殊地形密切相关。

由7月15日08时925 hPa 流场和地形分布

(图 6b) 可以看出, 在湘东南有明显一致的西北气流与罗霄山脉相交(交角接近  $60^\circ$ )。湘东南地形对“碧利斯”中这支偏北强风速气流的阻挡和强迫抬升, 一方面有利于水汽输送和中尺度对流系统发生、发展<sup>[30]</sup>, 另一方面地形的抬升作用与地面中尺度辐合线产生的上升运动相结合, 加强了产生特大暴雨的动力作用, 位于罗霄山和南岭夹角处的湘东

南出现强降水<sup>[63]</sup>, 特大暴雨中心永兴县连续 10 h 的雨强超过  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 其中 2 h 最大雨量可达 50 mm; 王晓芳和胡伯威<sup>[64]</sup> 根据 PIERRHUMBERT 等人的理论推算发现, 这种地形强迫上升和对暴雨的触发不在山坡上, 而在迎风坡上游平原地区(即湘东南)。

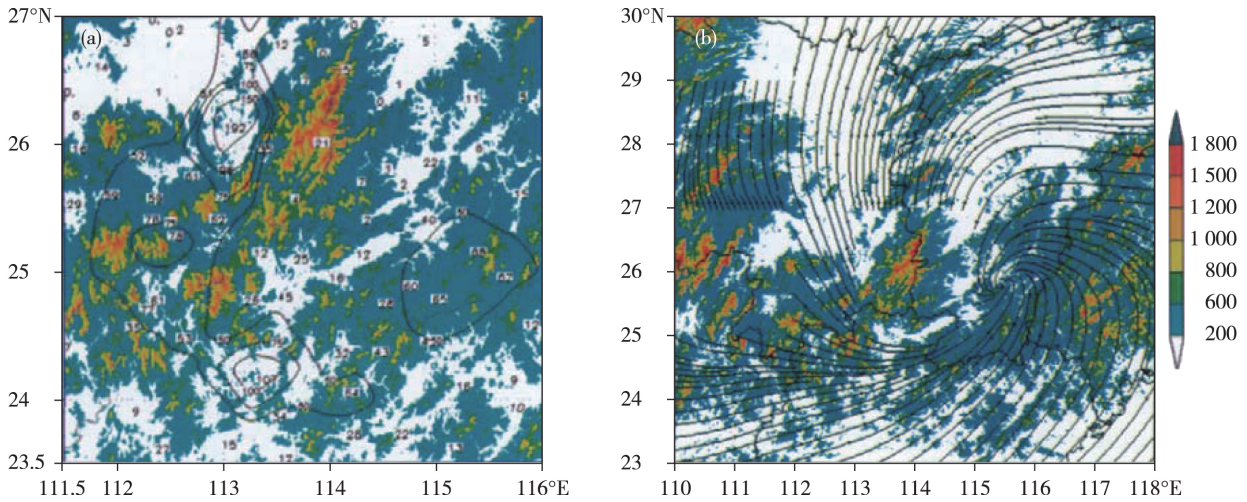


图 6 2006 年 7 月 15 日 00—06 时 6 h 降水分布 (a; 阴影为地形高度) 和 00 时 925 hPa 流场 (b) (引自王晓芳和胡伯威<sup>[64]</sup>)  
 Fig.6 Distribution of precipitation from 00:00 UTC to 06:00 UTC (a; shaded for topographic height) and circulation field at 925 hPa at 00:00 UTC 15 July 2006 (b) (Credit: WANG and HU<sup>[64]</sup>)

### 2.4 云微物理过程的影响

“碧利斯”登陆后, 广东、湖南、江西三省交界处出现暴雨增幅, REN and CUI<sup>[7]</sup> 指出随着季风涌爆发, 季风与低压环流相互作用, 水汽输送和抬升加强, 水汽凝结成云水的过程也增强。云水增加主要

通过两个途径对暴雨增幅产生贡献(图 7): 一是云水与雨水碰并收集促进雨水含量增加 (Pracw), 二是云中雪粒子增加与霰粒子碰进而融化成雨水 (Pgmlt)。汪亚萍等<sup>[65]</sup> 在此基础上利用高分辨率数值模拟资料, 将“碧利斯”产生的降水分为对流降水

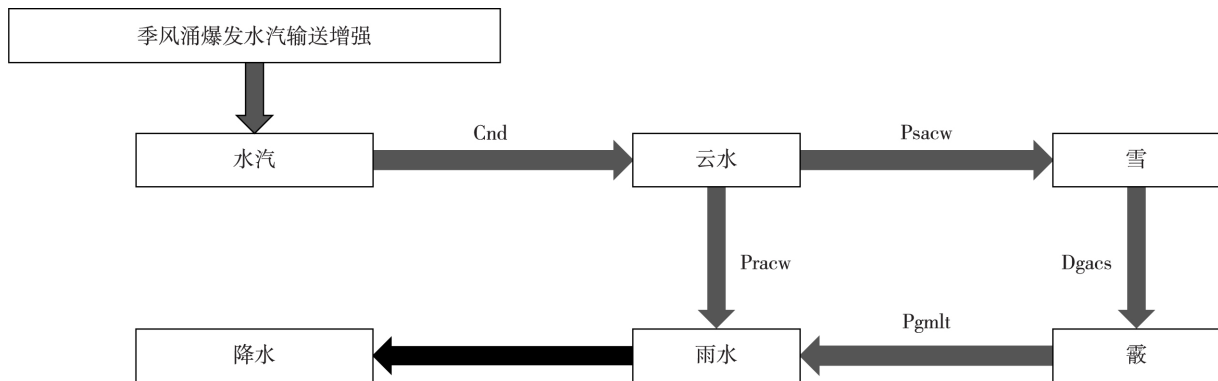


图 7 强热带风暴“碧利斯”(0604)暴雨增幅云微物理成因示意图(图中 Cnd 表示过饱和水汽凝结成云水, Psacw 表示雪粒子碰并云水造成雪粒子增长, Pracw 表示雨滴碰并云水造成雨滴增长, Pgmlt 表示霰粒子融化成雨滴, Dgacs 表示霰粒子碰并雪粒子干增长; 示意图引自 REN and CUI<sup>[7]</sup>)

Fig.7 Flow chart of cloud microphysical cause of rainstorm amplification associated with BILIS (2006) (Cnd for condensation of supersaturated vapor to cloud water, Psacw for snow accretion of cloud water, Pracw for rain accretion of cloud water, Pgmlt for melting of graupel, Dgacs for accretion of snow by graupel; Credit: REN and CUI<sup>[7]</sup>)

和层云降水,发现暴雨增幅发生时段,对流降水对暴雨增幅的贡献较大。刘圣楠和崔晓鹏<sup>[66]</sup>进一步指出,暴雨发生时段,“霰融化造成雨滴增长”与“云滴与雨滴碰并”过程比暴雨发生前更加活跃,尤其是“霰融化造成雨滴增长”增强更明显。

### 2.5 动力因子的诊断分析

“碧利斯”在第二阶段的降水明显表现出是对流降水,此次强降水是在水汽充分、不稳定层结以及抬升条件都得到满足的条件下产生的。在暴雨发生时,强降水地区上空低层为西南气流,水汽输送较强,而高层是西北风,水汽含量少,这样就形成了上干下湿的结构,产生不稳定层结,加上强的垂直上升气流,使得大量湿空气抬升释放大量的凝结潜热,而且高低不同的环流形势使“碧利斯”在登陆华南沿海后产生高层辐散、低层辐合,有利于上升运动的加强<sup>[23,42]</sup>,研究表明这种垂直运动与地形、垂直风切变、温度平流以及锋生作用相关,这四个方面可能是产生第二阶段强降水所必要的抬升机制<sup>[38]</sup>。此外,有研究<sup>[67]</sup>选取湿热力平流参数、广义对流涡度矢量垂直分量、水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量、热力散度垂直通量、热力切变平流参数和 $Q$  矢量散度等8个动力因子进行分析,发现水汽螺旋度、热力螺旋度、散度垂直通量以及热力散度垂直通量等4个因子与小时降水量变化以及云水凝物相关性强,能很好地指示降水云系的发展以及地面降水过程的发生。同时,王黎娟等<sup>[4]</sup>对“碧利斯”暴雨增幅过程进行高分辨率数值模拟并诊断分析,表明散度垂直通量以及湿位涡分布与暴雨增幅降水均有良好的对应关系,对强降水落区有着较好的指示意义,其中垂直散度通量的对应关系更好。

## 3 总结与展望

基于国内部分气象专家对0604号强热带风暴“碧利斯”的研究成果,从有利的大尺度形势、中尺度系统的影响、地形作用、云微物理过程的影响以及动力因子的诊断分析等5个方面对强热带风暴“碧利斯”引发极端降水的成因进行总结,显示,大部分研究集中在降水的第二阶段,即暴雨及暴雨增幅过程,得出极端降水是由多尺度系统相互作用以及地形等有利因素共同影响的结果:在稳定的背景场中,“碧利斯”缓慢西行,西南季风爆发是环流得以维持并产生极端降水的主要原因;中尺度系统演变发展与低压环流相互作用是暴雨增幅的可能机制;地形是湘东南产生特大暴雨的重要原因;广

东、湖南、江西交界处暴雨增幅的发生主要通过两个途径,一是云水增加与雨水碰并增加降水和雪粒子增加与霰粒子碰并进而融化成雨水,二是通过诊断分析可知此次暴雨是在水汽、不稳定性以及抬升条件都满足的条件下产生的对流降水,上升运动强烈。

“碧利斯”强度不强,登陆一天后减弱为热带低压,其残涡在陆上维持四天之久,降水强度大,引发灾害重,降水分布不均匀,具有这些特点主要在于“碧利斯”极端降水成因存在自身独特性:1)通常,台风登陆后受大陆高压阻挡时往往移动变慢、强度迅速减弱,暴雨也难以维持;而“碧利斯”登陆后虽受大陆高压的阻挡,高压却使低压环流西北象限的东北风加强,为“碧利斯”输送较大动量,有益于低压环流的维持。2)“碧利斯”登陆期间处于西南季风活跃期,索马里急流与 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$  跨赤道气流也加强北抬,在此有利环境下,季风涌爆发,水汽输送之强非常少见。此间,西南季风、跨赤道气流的加强与低压环流的“默契配合”是个例的一大特色,也是其长时间维持的重要原因之一。3)“碧利斯”与南海季风相互作用,激发中尺度强降水系统不断发生,“碧利斯”不仅起到携带水汽的作用,还有动力抬升作用,这是季风和台风相互作用的典型例子。

尽管“碧利斯”暴雨成因的研究取得很多成果,但是目前对此个例的研究仍有待进一步深入:1)相对于第二阶段,第一和第三阶段的极端降水成因研究较少。然而,第一与第三阶段均达到极端降水的程度,且同样造成严重的灾害,那么,第一和第三阶段的极端降水成因是什么?具有怎样的独特性?与第二阶段降水有什么不同?2)“碧利斯”降水一个重要特征是雨量分布高度不对称,登陆后降水主要出现在路径左侧,现有研究已从西南季风和中小尺度系统的角度进行解释,还有研究指出环境垂直风切变对“碧利斯”非对称降水发挥着极为重要的作用。既然如此,垂直风切变是如何影响“碧利斯”降水分布的?对其强度是否有明显影响?地形、“碧利斯”移速、强度等对非对称降水是否也有重要影响?3)南海季风是影响“碧利斯”极端降水的重要因子,其与热带风暴相互作用产生大暴雨的物理机制,有待于从能量转化的角度进行探讨。

针对强热带风暴“碧利斯”引发大范围极端降水的过程,尽管对此次路径预报较为准确,却远远低估了对第二阶段降水强度的预报,是值得深入思考的问题:这不仅涉及台风极端降水形成的复杂过

程,也与中尺度天气的有限观测、目前数值模式对极端降水的有限预报能力有关。因此,加强对台风极端降水形成机理及其预报方法研究将是一个长期的过程。

### 参考文献:

- [1] 陈联寿,孟智勇.我国热带气旋研究十年进展[J].大气科学,2001,25(3):420-432.
- [2] CHEN L S, LI Y, CHENG Z Q. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(5): 967-976.
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 121-133.
- [4] 王黎娟,任晨平,崔晓鹏,等.“碧利斯”暴雨增幅高分辨率数值模拟及诊断分析[J].大气科学学报,2013,36(2):147-157.
- [5] 康志明,陈涛,钱传海,等.0604号强热带风暴“碧利斯”特大暴雨的诊断研究[J].高原气象,2008,27(3):596-607.
- [6] 陈联寿,许映龙.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,2017,40(1):3-10.
- [7] REN C P, CUI X P. The cloud-microphysical cause of torrential rainfall amplification associated with Bilis (0604) [J]. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57(9): 2100-2111.
- [8] 骆荣宗. 9012号台风中尺度螺旋雨带与暴雨的观测分析[J].热带气象学报,1997,13(2):173-179.
- [9] 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[J].气象学报,2004,62(2):167-179.
- [10] 李英,陈联寿,徐祥德.水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J].大气科学,2005,29(1):91-98.
- [11] 程正泉,陈联寿,李英.登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J].气象学报,2009,67(5):840-850.
- [12] 董美莹,陈联寿,李英,等.登陆热带气旋降水增幅的合成诊断分析[J].气象学报,2011,69(6):964-977.
- [13] 程正泉,陈联寿,李英.登陆热带气旋与夏季风相互作用对暴雨的影响[J].应用气象学报,2012,23(6):660-671.
- [14] MURE-RAVAUD M, ISHIDA K, KAVVAS M L, et al. Numerical reconstruction of the intense precipitation and moisture transport fields for six tropical cyclones affecting the eastern United States [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 665: 1111-1124.
- [15] DONG M Y, CHEN L S, LI Y, et al. Numerical study of cold air impact on rainfall reinforcement associated with Tropical Cyclone TALIM (2005): I. Impact of different cold air intensity [J]. *J Trop Meteor*, 2013, 19(1): 87-96.
- [16] FOLEY G R, HANSTRUM B N. The capture of tropical cyclones by cold fronts off the west coast of Australia [J]. *Wea Forecasting*, 1994, 9(4): 577-592.
- [17] DIMEGO G J, BOSART L F. The transformation of Tropical Storm AGNES into an extratropical cyclone. Part I: The observed fields and vertical motion computations [J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(5): 385-411.
- [18] HARR P A, ELSBERRY R L, HOGAN T F. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II: The impact of midlatitude circulation characteristics [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(8): 2634-2653.
- [19] KLEIN P M, HARR P A, ELSBERRY R L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: Midlatitude and tropical cyclone contributions to reintensification [J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(9): 2240-2259.
- [20] FRANK W M, RITCHIE E A. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes [J]. *Mon Wea Rev*, 2001, 129(9): 2249-2269.
- [21] ROGERS R, CHEN S Y, TENERELLI J, et al. A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in Hurricane BONNIE (1998) [J]. *Mon Wea Rev*, 2003, 131(8): 1577-1599.
- [22] CHEN S Y S, KNAFF J A, MARKS F D Jr. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(11): 3190-3208.
- [23] 刘爱鸣,林毅,刘铭,等.“碧利斯”和“格美”登陆后暴雨强度不同的天气学对比分析[J].气象,2007,33(5):36-41,129.
- [24] 张建海,薛根元,陈红梅,等.西南季风水汽输送对热带气旋 Bilis 降水影响分析和数值试验[J].科技导报,2008,26(23):74-82.
- [25] 朱健.强热带风暴“碧利斯”的暴雨特征和成因分析[J].气象科学,2010,30(1):93-98.
- [26] 周玉淑,邓涤菲,李建通.登陆热带气旋 Bilis(0604)暴雨增幅与风场结构变化[J].大气科学,2014,38(3):563-576.
- [27] 石顺吉,余锦华,张大林.热带风暴 Bilis(2006)登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨[J].热带海洋学报,2009,28(1):34-42.
- [28] 余锦华,谈哲敏,石顺吉.强热带风暴 Bilis(2006)登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨[C]//中国气象学会.第十四届全国热带气旋科学讨论会论文集.北



- 京: 气象出版社, 2007: 317-321.
- [29] 滕代高, 罗哲贤, 代刊, 等. 登陆热带风暴 Bilis(2006) 暴雨特征及其可能原因[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(3): 369-380.
- [30] 叶成志, 李昀英. 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[J]. 气象学报, 2011, 69(3): 496-507.
- [31] 陈联寿. 登陆台风特大暴雨成因分析[J]. 气象, 1977, 3(11): 10-12.
- [32] 李江南, 龚志鹏, 王安宇, 等. 近十年来台风暴雨研究的若干进展与讨论[J]. 热带地理, 2004, 24(2): 113-117.
- [33] 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 近10年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象, 2005, 31(12): 3-9.
- [34] 陈联寿, 许映龙. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 3-10.
- [35] 任福民, 杨慧. 1949年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 526-540.
- [36] WU C C. Typhoon Morakot: Key findings from the Journal TAO for improving prediction of extreme rains at landfall[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2013, 94(2): 155-160.
- [37] 丁一汇. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 411-424.
- [38] GAO S Z, MENG Z Y, ZHANG F Q, et al. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with Severe Tropical Storm BILIS (2006) after its landfall[J]. Mon Wea Rev, 2009, 137(6): 1881-1897.
- [39] 任福民, GLEASON B, EASTERLING D. 一种识别热带气旋降水的数值方法[J]. 热带气象学报, 2001, 17(3): 308-313.
- [40] REN F M, WANG Y M, WANG X L, et al. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations[J]. Adv Atmos Sci, 2007, 24(4): 700-711.
- [41] 任福民, 吴国雄, 王小玲, 等. 近60年影响中国之热带气旋[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 17-33.
- [42] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 25-32.
- [43] 张恒德, 孔期. 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, 2007, 33(5): 42-48.
- [44] 程正泉, 刘燕. 大陆高压对“碧利斯”(STS0604)强降水的影响分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会2007年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集. 北京: 气象出版社, 2007: 501-506.
- [45] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 91-98.
- [46] 顾春利, 倪允琪, 徐幼平, 等. 南海地区准单、双周震荡对“碧利斯”降水维持影响分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 7-13.
- [47] 戴竹君, 王黎娟, 管兆勇, 等. 登陆热带风暴“Bilis”维持和暴雨增幅与低纬水汽输送的关系及其数值试验[J]. 热带气象学报, 2014, 30(1): 45-54.
- [48] WANG L J, DAI Z J, HE J L. Numerical simulation of the relationship between the maintenance and increase in heavy rainfall of the landing Tropical Storm BILIS and moisture transport from lower latitudes[J]. J Trop Meteor, 2017, 23(1): 47-57.
- [49] 戴竹君, 王黎娟, 管兆勇, 等. 热带风暴“Bilis”(0604)暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 422-432.
- [50] 卢珊, 王黎娟, 管兆勇, 等. 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, 2012, 35(2): 175-185.
- [51] WANG L J, LU S, GUAN Z Y, et al. Effects of low-latitude monsoon surge on the increase in downpour from Tropical Storm BILIS[J]. J Trop Meteor, 2010, 16(2): 101-108.
- [52] 叶成志, 李昀英. 湘东南地形对“碧利斯”台风暴雨增幅作用的分析[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(2): 122-129.
- [53] 林毅, 刘爱鸣, 林新彬. 台风中尺度对流云团与中尺度暴雨相互关系的综合分析[J]. 热带气象学报, 2002, 18(4): 393-398.
- [54] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报, 2006, 64(1): 57-71.
- [55] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 672-681.
- [56] 陈德花, 寿绍文, 张玲, 等. “碧利斯”引发强降水过程的湿位涡诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 37-41.
- [57] 钱传海, 路秀娟, 陈涛. 引起“碧利斯”强降水的MCS数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(4): 11-19.
- [58] 蒋小平, 刘春霞, 费志宾, 等. 南海夏季风对强热带风暴 Bilis(0604) 引发暴雨的影响[J]. 热带气象学报, 2008, 24(4): 379-384.
- [59] LIU C X, JIANG X P, FEI Z B, et al. The influence of South China Sea summer monsoon on the rainstorm associated with the landfalling strong tropical storm BILIS (0604)[J]. J Trop Meteor, 2008, 14(2): 153-156.
- [60] 郭英莲, 徐海明. 对流层中上层干空气对“碧利斯”台风暴雨的影响[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 98-109.
- [61] 闫非, 李艳伟, 周毓荃, 等. 受“碧利斯”影响的一次中尺度对流系统模拟研究[J]. 大气科学学报, 2012, 35(6): 737-745.
- [62] 滕代高, 高云, 代刊, 等. 涡旋自组织过程影响0604号热带气旋 Bilis 降水的数值研究[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 433-442.

- [63] 姚蓉,黎祖贤,叶成志,等.强热带风暴“碧利斯”特大暴雨山洪成因分析[J].气象,2007,33(8):40-46.
- [64] 王晓芳,胡伯威.地形对0604号“碧利斯”登陆台风暴雨的影响[J].暴雨灾害,2007,26(2):97-102.
- [65] 汪亚萍,崔晓鹏,任晨平,等.“碧利斯”(0604)暴雨过程不同类型降水云微物理特征分析[J].大气科学,2015,39(3):548-558.
- [66] 刘圣楠,崔晓鹏.“碧利斯”(2006)暴雨过程降水强度和降水效率分析[J].大气科学,2018,42(1):192-208.
- [67] 汪亚萍,崔晓鹏,冉令坤,等.动力因子对2006“碧利斯”台风暴雨的诊断分析[J].大气科学,2015,39(4):747-756.