

吕爱民, 文永仁, 李英. 2013. 一次孟加拉湾风暴 Akash (0701) 对我国西南地区强降水过程的影响分析 [J]. 大气科学, 37 (1): 160–170, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12040. Lü Aimin, Wen Yongren, Li Ying. 2013. Study of the impact of tropical cyclone Akash (0701) over the Bay of Bengal on a heavy rainfall event in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 160–170.

一次孟加拉湾风暴 Akash (0701) 对我国西南地区强降水过程的影响分析

吕爱民¹ 文永仁² 李英¹

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 云南省气象服务中心, 昆明 650034

摘要 孟加拉湾地区是全球热带气旋频繁活动的海域之一, 孟加拉湾风暴常对我国青藏高原和西南地区造成严重影响。孟加拉湾风暴 Akash (0701) 于 2007 年 5 月 15~17 日引发了云南、广西等地一次持续性强降水过程。本文利用地面降水资料、NCEP (the National Centers for Atmospheric Prediction) /NCAR (the National Center for Atmospheric Research) 再分析资料和 JMA (Japan Meteorological agency) 卫星 TBB (Black Body Temperature) 资料, 研究 Akash 对我国西南地区这次强降水过程的影响。结果表明: 这次强降水过程发生在 Akash 与青藏高原低槽密切配合的形势下。Akash 登陆减弱期间其对流云团移上青藏高原, 加强槽前云系引发强降水。受孟加拉湾风暴高层辐散影响, 南亚高压加强并北上控制我国西南地区, 这增强了降水区的高空辐散, 有利于上升运动发展。同时孟加拉湾风暴为降水区提供了充足的水汽输送。降水区的水汽净流入、湿斜压性增长以及强烈条件性对称不稳定是这次强降水产生的有利条件。研究还发现, 低纬高原地形对孟加拉湾风暴偏南风的强迫抬升加剧了降水区的上升运动, 有助于强降水的产生。

关键词 孟加拉湾 风暴 强降水 西南地区

文章编号 1006-9895(2013)01-0160-11

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12040

Study of the Impact of Tropical Cyclone Akash (0701) over the Bay of Bengal on a Heavy Rainfall Event in Southwest China

LÜ Aimin¹, WEN Yongren², and LI Ying¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Yunnan Meteorological Serve Center, Kunming 650034

Abstract The Bay of Bengal is known as a breeding ground for tropical cyclones. The storm activities in the Bay of Bengal have considerable impact on the weather over the Qinghai-Xizang Plateau and southwestern China. In 2007, cyclone Akash (0701) resulted in a continuous precipitation event over southwestern China during May 15–17. In this study, the mechanism of heavy rainfall induced by Akash is investigated based on precipitation data from NOAA, NCEP/NCAR reanalysis data, and satellite TBB data from JMA (Japan Meteorological Agency). We found that heavy rainfall occurred when Akash interacted with a westerly trough over the Tibetan Plateau. The cloud clusters that separated from the Akash cloud system ascended in a northwardly direction to the lower latitude plateau strengthening the trough

收稿日期 2012-03-07 2012-09-05 收修定稿

资助项目 国家公益性行业(气象)科研专项 GYHY201106005, 国家自然科学基金项目 41275066、40975032

作者简介 吕爱民, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事热带气旋研究。E-mail: lvaimin0424@126.com

通讯作者 李英, E-mail: liying@cams.cma.gov.cn

clouds and causing extremely heavy rainfall. Influenced by the strong divergence at the upper levels of Akash during its northward movement, the South Asia high strengthened, moved northward dominating the area over southwestern China, which enhanced the upper troposphere divergence, and in turn, strengthened Akash's ascending motion. The storm transported large amounts of water vapor to the heavy rainfall area. The net inflow of water vapor, the growth of moist baroclinicity, and the strong conditional symmetric instability were all favorable for the development of this heavy rainfall event. We also found that the low-altitude plateau topography increased the ascending motion by forcing an uplifting southerly flow, which enhanced the heavy rainfall.

Keywords Bay of Bengal, Tropical cyclone, Heavy rainfall, Southwest China

1 引言

印度洋孟加拉湾地区是全球热带气旋频繁活动的海域之一。孟加拉湾热带风暴(简称孟湾风暴,下同),常对周围临近国家或地区造成严重影响。如其偏北移动,可使孟加拉国出现大海潮,青藏高原产生暴风雪;偏东移动,常对缅甸、中南半岛和我国西南地区有较大影响;偏西移动则可对印度、斯里兰卡等国造成重大影响(段旭等,2009)。近年来带来严重灾害的孟湾风暴并不少,如:1991年4月29日,孟湾风暴(9102)登陆,致使孟加拉国的四分之一沦为汪洋,近1000万人受灾(施国强,1995)。2007年11月15日孟湾风暴“锡德”(SIDR)横扫孟加拉国南部海岸,给当地带来暴雨和洪水,云南香格里拉县普降暴雪。2008年5月2日,孟湾风暴“纳尔吉斯”(NARGIS)在缅甸的伊洛瓦底江口登陆,造成了自1991年4月以来孟湾风暴最惨重灾害。还有2010年5月,孟湾风暴“莱拉”(LAILA)在印度东部安得拉邦的巴帕特拉市登陆,引发了洪水,同时我国西藏东南部出现强降水。可见孟湾风暴的影响十分严重。

关于孟湾风暴的活动和影响有不少研究。北京大学地球物理系热带天气研究组和国家海洋局预报总台热带天气预报研究组(1974)初步统计了孟加拉湾风暴活动特征及其对我国天气的影响;李玉柱(1981)统计分析了初夏孟湾风暴的若干特征;王友恒和王素贤(1988,1989)发现孟湾风暴主要出现在春秋两季的双峰型特征,分析了北印度洋热带风暴与我国西藏地区降水的关系;王允宽等(1996)研究了青藏高原地形对孟湾风暴降水的影响。杨祖芳等(2000)对比分析两个孟湾风暴对我国降水的影响,发现降水落区和强度的差别主要决定于中纬度冷空气活动及中低纬系统的相互作用。我国西南地区降水与孟湾风暴活动关系十分密切。陈于湘和朱抱真(1985)指出云南早雨季开始

与孟加拉湾风暴首次出现时间有关。韦革宁和廖胜石(2000)研究了孟湾风暴对广西降水影响。李英等(2003a,2003b)对初夏孟加拉湾对流云团北上低纬高原的动力学条件及其影响下高原强降水的发生机制进行了分析。段旭等(2004)分析了6个影响低纬高原的孟湾风暴,认为孟湾风暴、副热带高压和南支槽的位置和强度对低纬高原的降水影响很大;张腾飞等(2006)、鲁亚斌等(2006)发现孟湾风暴以分裂中尺度对流云团、外围云系以及本身减弱云系沿孟湾槽前和副热带高压外围的西南气流北上影响云南。近年中尺度数值模式被广泛应用于孟湾风暴的研究。Mohanty等(2004)用MM5模式模拟了奥里萨邦超级风暴(1999)。Pattanayak和Mohanty(2008)发现WRF比MM5对印度洋热带风暴的模拟效果更好。许美玲等(2007)、王曼等(2009)分别对登陆孟湾风暴结构的演变特征进行数值模拟,并与西太平洋登陆台风的结构变化做了比较;董海萍等(2007)、王曼等(2011)针对低纬高原地形对孟湾风暴及其强降水影响进行了数值试验。

尽管关于孟湾风暴活动特征及其影响机理已取得一定认识,但对孟湾风暴影响低纬高原的物理过程及其强降水的产生机制仍不十分清楚。本文以2007年孟湾风暴Akash(0701)影响下云南、广西等地发生的持续性强降水过程为例,研究孟湾风暴对我国西南地区的影响方式、与中纬度系统的相互作用以及强降水发生机理。采用NCEP(the National Centers for Atmospheric Prediction)/NCAR(the National Center for Atmospheric Research)每6 h一次 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的再分析格点资料、全球降水观测资料、以及日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)云顶亮温(Black Body Temperature, TBB)资料进行分析。

2 Akash 活动、环流背景和云图特征

2.1 风暴活动和降水

2007年第一个孟湾风暴Akash于5月13日00

时(协调世界时 UTC, 下同)在孟加拉湾北部(14.4°N , 91.2°E)附近海面上生成(图 1), 近中心最大风速 25 m s^{-1} , 近中心海平面最低气压 1000 hPa , 并偏北缓慢移动。13 日 18 时, 北移到 16.30°N 附近, 最大风速增强至 35 m s^{-1} , 最低气压减小至 997 hPa , 加强为热带风暴。14 日 18 时, 最大风速加强为 65 m s^{-1} , 最低气压减小为 976 hPa , 进一步

加强为强热带风暴。此后继续偏北移动, 强度减弱。于 14 日 20 时在孟加拉国东南部吉大港区科克斯巴扎尔附近登陆, 最大风速 30 m s^{-1} 。登陆后北移减弱, 于 16 日向北并入青藏高原南侧西风槽。

Akash 活动过程中, 我国西南地区发生一次长时间大范围强降水过程。图 2a 给出 Akash 影响期间 2007 年 5 月 14 日 00 时~18 日 00 时累计降水

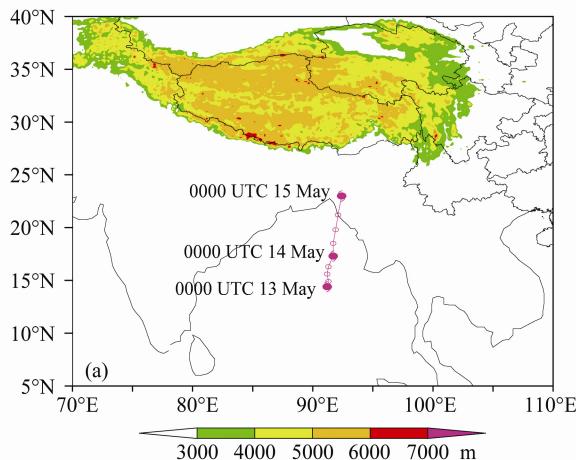


图 1 孟湾风暴 Akash 移动路径 (a) (阴影表示地形, 单位: m) 以及孟湾风暴 Akash 近中心海平面最低气压 (p_{\min} , 单位: hPa) 和近中心最大风速 (V_{\max} , 单位: m s^{-1}) (b) 的时间演变图 (5月 13 日 00 时~15 日 00 时)

Fig. 1 (a) Track of Akash over the Bay of Bengal at 6-h interval (shading: elevation, units: m) and (b) Akash minimum sea level pressure and maximum wind speed curves from 0000 UTC 13 May to 0000 UTC 15 May 2007

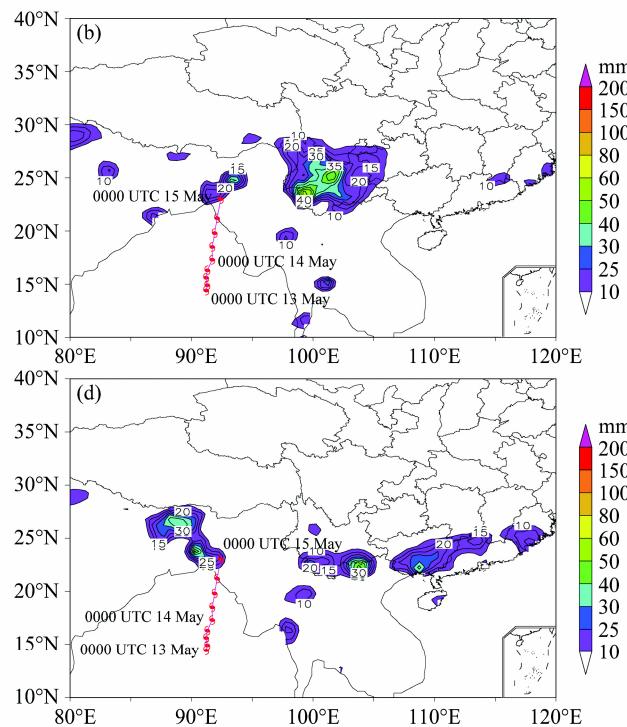
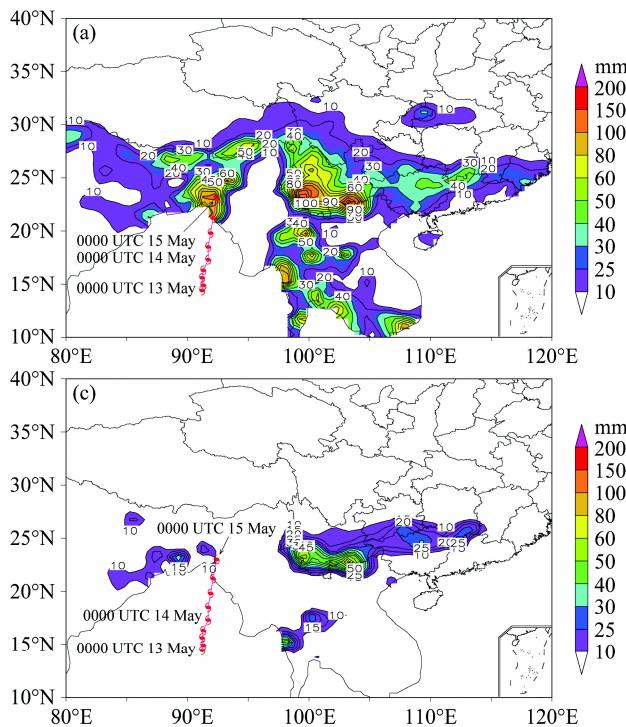


图 2 2007 年 5 月 (a) 14 日 00 时~18 日 00 时累计降水量以及 (b) 16 日、(c) 17 日、(d) 18 日逐日 24 h 累计降水分布 (单位: mm)。: 风暴中心位置

Fig. 2 Distributions of (a) accumulated precipitation (units: mm) from 0000 UTC 14 May to 0000 UTC 18 May and daily precipitation on (b) 16 May, (c) 17 May, and (d) 18 May in 2007. : denotes the position of Akash center

分布, 可见此间强降水主要出现在中南半岛、孟湾北部至青藏高原南部、我国西南和华南地区。逐日 24 h 累计降水分布(图 2b-d)显示, 风暴生成和发展期间, 我国西南地区的降水不明显, 仅出现在云南西北部(图略)。西南地区降水主要发生在 15 日 00 时以后, 对应风暴登陆后减弱阶段, 图 2b 显示。15 日 00 时到 16 日 00 时, 云南大部分地区以及周围西藏东南部、四川南部、贵州西部为一强降水区, 最大日降水量超过 60 mm(图 2b)。16 日 00 时到 17 日(图 2c), 风暴并入西风槽, 强降水区域向东南移动, 呈东西向带状, 降水中心分别位于云南南部和广西北部, 强日降水量仍达 60 mm。18 日 00 时, 风暴消失, 降水带南压断裂, 范围和强度明显减小(图 2d)。此后西南地区降水消失。由此可见,

孟湾风暴登陆之后及并入西风槽期间, 从 15 日 00 时至 18 日 00 时, 我国西南地区自北向南出现一次强降水过程。

2.2 环流背景和云图特征

500 hPa 高度场显示(图 3a-c), 孟湾风暴 Akash 活动期间中高纬西风槽活动频繁。13 日 00 时(图略), 孟湾风暴 Akash 在阿拉伯副热带高压和西北太平洋副热带高压(以下简称副高)之间生成, 并沿副高西侧偏南气流向北移动。同时在其北方青藏高原上也有一闭合低压活动。14 日 00 时(图 3a), 青藏高原上的低压东移至 100°E 附近, 其余留的槽区与北上的风暴趋于合并。孟湾风暴外围西南气流与副高外围的西南气流叠加后加强, 控制云南上空。15 日 00 时(图 3b), 风暴登陆北上至 25°N 附

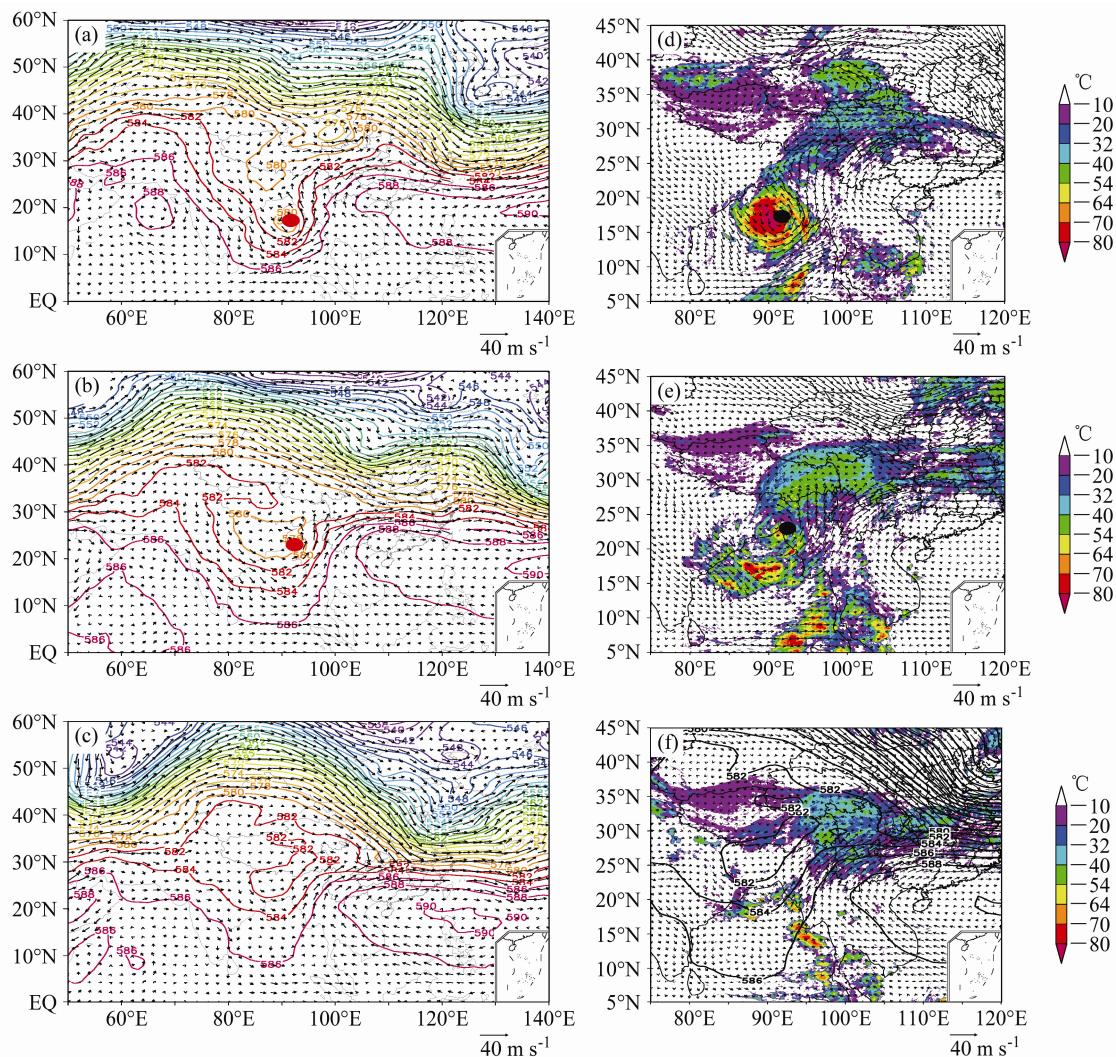


图 3 (a、b、c) 500 hPa 风场与位势高度(等值线, 单位: dagpm)和(d、e、f) 500 hPa 风场与 TBB(阴影, 单位: °C)合成图: (a, d) 14 日 00 时; (b, e) 15 日 00 时; (c, f) 16 日 00 时。红色点: 风暴中心位置

Fig. 3 Distributions of (a, b, c) wind vectors and geopotential height (contour, units: dagpm) at 500 hPa, (d, e, f) TBB (shaded) and wind vectors at 500 hPa: (a, d) 0000 UTC 14 May; (b, e) 0000 UTC 15 May; (c, f) 0000 UTC 16 May. 红色点表示 Akash 中心

近, 500 hPa 上低压环流与副高之间形成的西南气流控制云南, 而高原槽继续东移, 冷空气和西南暖湿气流交汇于川滇之间, 而地面冷锋已经进入云南(图略), 冷空气侵入暖湿气流内, 形成了有利的降水形势。16日00时(图3c), 风暴明显减弱, 我国西南地区仍为其低压环流与副高之间形成的西南气流控制, 地面冷锋快速向南推进至滇西南。

从卫星TBB分布看(图3d-f)。13日开始(图略), 孟加拉湾就有低压云团发展, 风暴初生时云系结构不对称, 南侧云系发展旺盛, 而北侧较弱, 云团分散, 有中尺度对流云团沿副高外围向东北移动, 但除滇西边缘地区出现降水外, 西南地区无降水。此时青藏高原上对应低压系统也有云系发展。14日00时(图3d), 风暴加强, 气旋性环流半径约500 km, 其对流云团紧凑, 趋于对称, 其北侧也有云带发展, 但未影响到云南。而受高原低槽东移影响, 在西藏东部与四川一带可见东北—西南向带状槽前云系。风暴登陆后(图3e), 云系减弱, 结构松散, 其对流云团在强偏南气流引导下北上并入低槽云带, 并得到强烈发展加强。这一混合云带位于川滇之间, 随后南压进入云南。16日(图3f), 孟湾风暴主体的云系减弱消失, 但其残留对流云团与高原云系形成的混合云带仍然维持在云贵高原上空, 并南压影响西南地区。

由此可见, 我国西南这次强降水过程与孟湾风暴Akash的活动密切相关, 发生在孟湾风暴与青藏高原低压系统相互配合的形势下。孟湾风暴减弱期间其对流云团移上低纬高原, 使低槽云系得到强烈发展加强, 引发西南地区强降水。

3 孟湾风暴对低纬高原的影响

3.1 孟湾风暴对高原地区高低空流场的影响

200 hPa 高空环流和风速场显示(4a、b), 风暴生成之前南亚高压环流中心位于中南半岛上空。13日(图略), 孟湾风暴在14.4°N, 91.2°E附近生成, 高空有较强辐散。南亚高压中心位于其东北侧18°N, 99°E附近。14日00时(图4a), 南亚高压范围有所扩大, 中南半岛至孟加拉湾北部均为反气旋环流区, 中心位于20°N, 100°E附近(图中G所示), 其西侧由于孟湾风暴发展, 高层强辐散, 中心值达到 $7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 这有利于南压高压的加强。15日00时(图4b), 随着孟湾风暴北移, 南亚高压环流主体也东北移, 中心位于云南南部, 强度有

所加强, 24 h 位势高度升高了20 gpm。17日之后, 高压减弱西退至孟加拉湾地区。可见, 随着孟湾风暴的发展, 南压高压有所加强, 并北上控制我国西南上空, 这增强了强降水区的高空辐散, 有利于低层辐合加强, 上升运动发展。

从700 hPa 风场分布来看(图4c、d), 14日(图4c), 强风速区位于风暴附近以及副高外围。副高外围的强东南气流从南中国海经过越南、泰国到达我国云南地区, 与风暴东侧的较强偏南气流在云南与缅甸交界地区汇合。随着风暴北上影响, 15日00时(图4d), 滇西南风速明显加强, 风速达到 20 m s^{-1} 以上。风暴与副高之间形成强偏南气流, 并与南下偏北气流交汇, 在滇西北形成了东西向辐合带, 16日之后辐合带南压影响西南地区(图略)。

3.2 孟湾风暴对高原地区的水汽输送

从13日00时至16日00时700 hPa 水汽通量场可以看出(图5), 与低层强风速分布对应, 强降水区水汽来源有两个, 一是副高西南侧的水汽通道, 将南海等地的水汽输送至降水区; 二是来自风暴环流从孟加拉湾海面卷入的水汽, 其强度比副高外围东南气流带来的明显大。13日到14日(图5a), 降水区的水汽输送以副高边缘的东南气流为主, 此时降水并不明显。随着孟湾风暴登陆, 副高东退, 以孟湾风暴输送的水汽占主导。15日至16日(图5b), 强水汽通量值中心位于云南, 值均过 $24 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa s}^{-1}$, 出现持续性强降水。说明孟湾风暴为这次低纬高原强降水提供了主要水汽供应。

上述分析表明, 孟湾风暴一方面增强了我国西南地区上空的上升运动条件, 另一方面提供了充足的水汽输送, 这均有利于强降水的发生。

4 孟湾风暴对强降水条件的贡献

4.1 孟湾风暴对暴雨区水汽收支的影响

源源不断的水汽供应是持续性强降水的一个重要条件, 取暴雨区域为(图4c-d 中方框所示): 22°N~28°N, 98°E~105°E, 计算四个方向截面的水汽收支。计算公式如下(东、南、西、北四个方向分别用 F_E 、 F_S 、 F_W 、 F_N 表示, 总的用 F 表示):

$$E_S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_0} q v d p d \lambda, \quad (1)$$

$$F_N = - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_0} q v d p d \lambda, \quad (2)$$

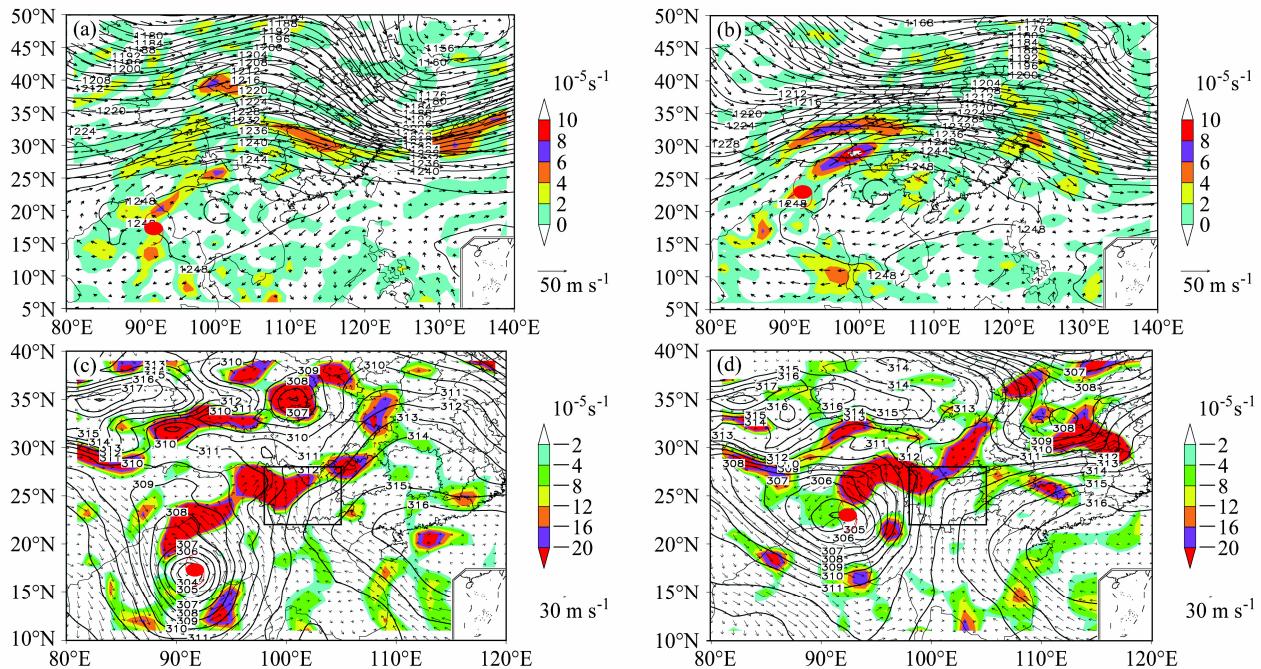


图 4 200 hPa (a, b) 和 700 hPa (c, d) 风场、散度 (单位: 10^{-5} s^{-1}) 和位势高度 (单位: dagpm) 分布图 (阴影表示散度, 200 hPa 仅给出正值, 700 hPa 仅给出负值); (a, c) 14 日 00 时, “G”表示高压环流中心; (b, d) 15 日 00 时, 方框表示主要暴雨区; 红点: 风暴中心位置

Fig. 4 (a, b) 200-hPa wind vectors, geopotential height (solid lines, units: dagpm), and divergence (shaded, only positive values shown); (c, d) 700-hPa wind vectors, geopotential height, and divergence (shaded, only negative values shown): (a, c) 0000 UTC 14 May, ‘G’ indicates high pressure circulation center; (b, d) 0000 UTC 15 May, the small box indicates the main heavy rainfall area. 红点 denotes the position of Akash center

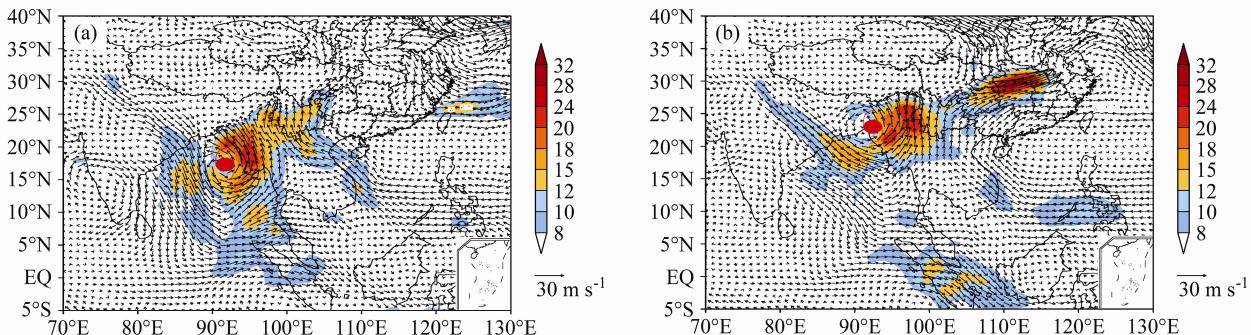


图 5 700 hPa 风场 (矢量) 和水汽通量 (阴影) (单位: $10^{-3} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa s}^{-1}$) 分布图: (a) 14 日 00 时; (b) 15 日 00 时。红点: 风暴中心位置

Fig. 5 700-hPa wind vectors and vapor fluxes (shaded, units: $10^{-3} \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa s}^{-1}$): (a) 0000 UTC 14 May; (b) 0000 UTC 15 May. 红点 denotes the position of Akash center

$$F_E = - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_0} q u d p d \varphi, \quad (3)$$

$$F_W = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_0} q u d p d \varphi, \quad (4)$$

其中, p_s 为表面气压, p_0 为 100 hPa, λ 为经度, φ 为纬度, q 为比湿, u 为纬向风速, v 为经向风速, g 为重力加速度; 总的水汽通量公式为:

$$F = F_S + F_N + F_W + F_E, \quad (5)$$

正值表示水汽流入暴雨区, 负值表示水汽从暴雨区流出。

图 6 显示强降水区四个边界的水汽水平通量及其总和。从四个方向的水汽收支来看, 降水区南边界 (点虚线) 主要为水汽流入, 从 13 日到 16 日均为较强正值, 3 个峰值分别在 14 日、15 日、16 日。北边界 (长虚线) 13~14 日 18 时为负值, 之后变为正值, 这与北风进入暴雨区有关。降水区水汽的流出主要在西边界 (长短虚线), 13~18 日均为较强负值, 东边界 (短虚线) 次之, 降水过程中以负值为主。从四个边界水汽通量总和 (实线) 来看, 15 日以前, 降水区总的水汽收支为负, 有水汽净流出, 15~17 日迅速增大转为正值, 说明有水汽净流

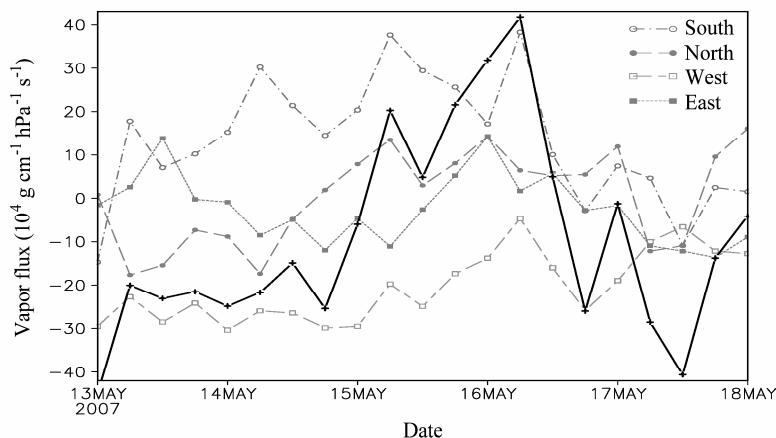


图 6 2007年5月13日00时~18日00时强降水区四个边界的水汽水平通量及其总和(从地表积分到100 hPa)(单位: $10^4 \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 6 Vapor fluxes (integrated from surface to 100 hPa) (units: $10^4 \text{ g cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$) for the heavy rainfall area from east, west, north, and south boundaries, and the total during 13–18 May 2007

入, 15 日、16 日有两个明显的峰值, 与强降水发生时间对应, 17 日之后又减弱。可见降水区水汽净流入对强降水发生非常重要, 而其主要来自南方的水汽流入, 与孟湾风暴北上带来的水汽供应密切相关。

4.2 孟湾风暴对暴雨区锋生的影响

上述分析表明, 这次降水过程发生在孟湾风暴与高原西风槽相互作用下。孟湾风暴暖湿气流与槽后冷空气相交汇, 有强烈的锋生。分析强降水区域 700 hPa 相当位温 θ_e (equivalent potential temperature) 分布图可以发现(图 7a–b)。13 日(图略), 青藏高原小槽后部的冷空气与副高暖空气相遇, 在云南北部形成弱锋区。虽然已经存在锋区, 但是高原上还没有降水出现。14 日 00 时(图 7a), 锋区相当位温经向梯度(阴影区)为 $-2 \sim -4 \text{ K}/100 \text{ km}$, 此时暖湿中心位于孟湾风暴西侧, 西南地区降水不明显。15 日 00 时(图 7b), 随孟湾风暴登陆, 暖湿气流主体到达云南, 同时北方冷空气侵入云南, 冷暖空气的交汇有利于锋区加强, 之后开始出现降水。16 日 00 时, 强锋区移至滇中地区(图略), 锋区明显加强, 相当位温经向梯度增强为 $-8 \sim -10 \text{ K}/100 \text{ km}$, 高原上的降水范围扩大, 强度加强。17 日之后, 锋面减弱并南移至云南南部(图略), 降水带也随之南移, 降水强度减弱。15 日~16 日的强烈锋生, 为到达的暖湿空气提供了抬升条件, 是孟湾风暴与冷空气相互作用的一个表现。

沿强降水区的经向流场(用纬向风 u 与 $-100 \times w$ 制作) 和相当位温垂直剖面图可以进一步分析冷空气与孟湾风暴输送暖湿空气的相互作用, 图 7c、d 显

示, 强降水发生前(图 7c), $24^\circ\text{N} \sim 27^\circ\text{N}$ 就存在上升气流, 但没有强降水发生, 这与低层仍然被冷空气占据, 层结呈垂直对流稳定有关。15 日 00 时(图 7d), 孟湾风暴输送的暖湿空气到达云南, 同时冷空气南下侵入加强, 冷暖空气对峙处($26^\circ\text{N} \sim 28^\circ\text{N}$) 等相当位温线密集区趋于陡立。说明冷、暖空气交汇激烈, 大气对流稳定性降低。15~16 日在 $23^\circ\text{N} \sim 28^\circ\text{N}$ 区域暴雨发生。17 日之后, 孟湾风暴减弱消失, 西南地区上空被北方冷空气的下沉运动占据(图略), 降水分散、减弱。可见孟湾风暴输送的暖湿气流对加强锋面触发降水十分关键。

尽管暖湿气流的交汇使大气垂直对流稳定性减弱, 但受冷锋影响, 大部分降水区仍以对流稳定性层结为主。下面对斜压不稳定性进行分析。Bennetts 和 Hoskins (1979) 的研究指出, 湿位涡 (moist potential vorticity, MPV) 小于零是大气发生条件性对称不稳定的充分必要条件。图 8 显示过强降水量中心(102°E) 的湿位涡经向—垂直剖面图, 13 日 00 时(图略), $22^\circ\text{N} \sim 26^\circ\text{N}$ 云南省大部分区域主要为 MPV 正值, 说明大气层结以稳定为主, 且斜压性很弱(湿位涡的第二分量, 即湿斜压项 MPV2 较小), 同时在北方 34°N 以北中高层有 MPV2 的强负值中心。14 日 00 时(图 8a) $28^\circ\text{N} \sim 32^\circ\text{N}$ 区域出现 MPV 强负值。15 日 00 时(图 8b), MPV 负值向南伸展至 26°N 。16 日 00 时(图略) MPV 负值进一步南下, $24^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ 都为强的 MPV 负值。而此间 25°N 以北低层大气是垂直对流稳定的, 说明条件性对称不稳定得到发展。从 MPV2 的分布(等值线)看出, MPV 负值的增强伴随着 MPV2 负值增强, 说明强

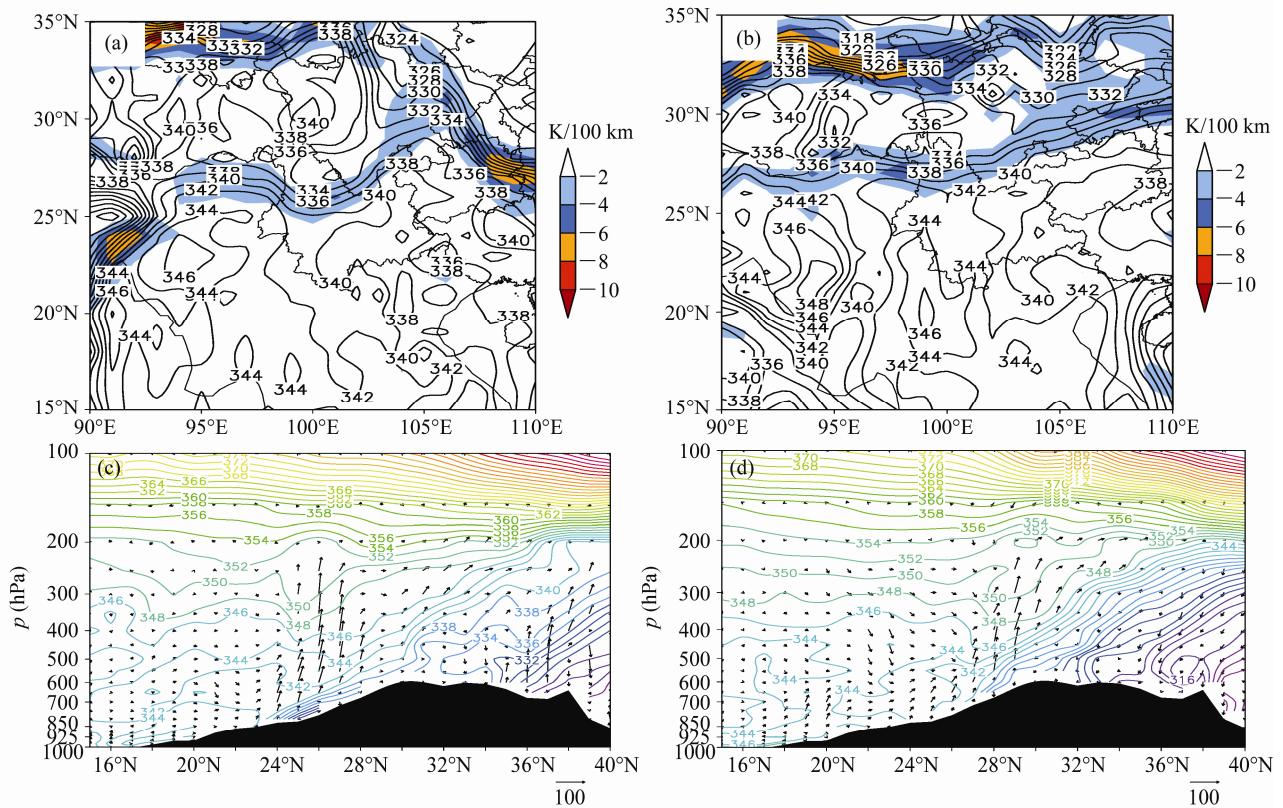


图 7 (a, b) 700 hPa θ_e (等值线, 单位: K) 及经向梯度 (阴影, 单位: K/100 km), (c, d) 沿 102°E 垂直环流和 θ_e 垂直剖面图 (经向风速单位: m s^{-1} ; 垂直速度单位: 0.01 m s^{-1}) (黑色阴影表示地形): (a, c) 14 日 00 时; (b, d) 15 日 00 时

Fig. 7 (a, b) Distributions of equivalent potential temperature (contour, units: K) and its meridional gradient (shaded) at 700 hPa, (c, d) meridional-vertical sections of equivalent potential temperature (contour, units: K) and vertical wind vectors ($u, -100w$) (u units: m s^{-1} , w units: 0.01 m s^{-1}) along 102°E (shaded area shows terrain): (a, c) 0000 UTC 14 May; (b, d) 0000 UTC 16 May

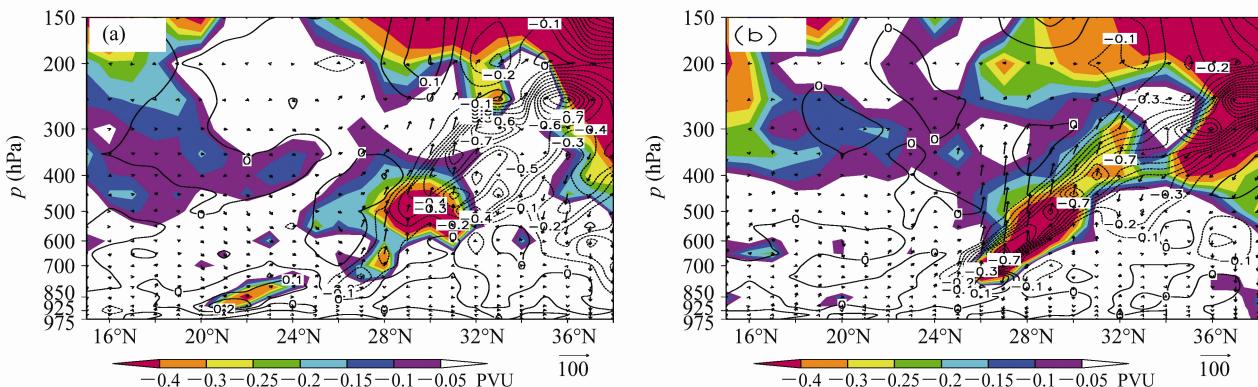


图 8 过 102°E MPV 及 MPV2 (单位: PVU, $1 \text{ PVU}=10^{-6} \text{ m}^2 \text{ k s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) 经向一垂直剖面图: (a) 14 日 00 时; (b) 15 日 00 时。阴影表示 MPV 负值, 等值线表示 MPV2, 箭头表示风矢量

Fig. 8 Meridional-vertical sections of moist potential vorticity (MPV) (shaded: $\text{MPV} \leq 0$) and MPV2 (the second component of MPV, contour) along 102°E (units: PVU) (vectors show wind, units: m s^{-1}): (a) 0000 UTC 14 May; (b) 0000 UTC 15 May

烈的斜压不稳定与湿斜压性显著增强有关。15~16 日的强 MPV 负值对应强降水。此后, 低纬高原 MPV 强负值带减弱消失, 强降水也随之减弱消失。

由此可见, 这次强降水主要与条件性对称不稳定有关, 湿斜压性的发展起重要作用。而孟湾风暴

暖湿气流的贡献在于加强锋生、使斜压性发展。王子谦等 (2010) 利用湿位涡诊断分析和倾斜涡度发展理论, 研究了孟湾风暴 SIDR (0704) 北上造成的青藏高原暴雪天气, 发现条件性对称不稳定是暴雪发生、发展的一种重要机制。

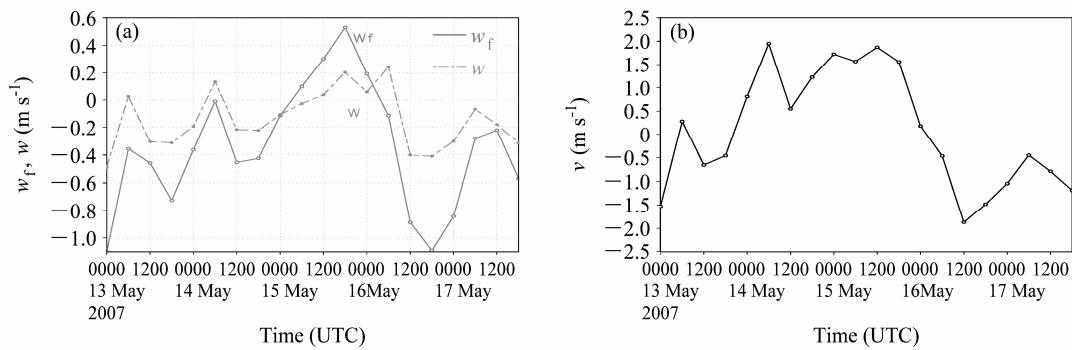


图 9 2007 年 5 月 13 日 00 时~17 日 18 时强降水区区域平均的地形强迫垂直运动 w_f 和总垂直运动 w (a) 以及经向风 (b) 时间演变 (单位: m s^{-1})
Fig. 9 Temporal evolutions of (a) w_f , vertical velocity w and (b) meridional wind averaged over heavy rainfall area from 0000 UTC 13 May to 1800 UTC 17 May 2007

4.3 孟湾风暴影响下地形对偏南气流的强迫

强降水与地形有着密切的关系, 气流越过山脉时会引起波动, 迎风坡上升, 背风坡下沉。一些模拟试验(高坤等, 1994; 贝耐芳和赵思维, 2005; 韩志伟等, 1999; 王鹏云等, 1998)也证实了山脉迎风坡的强迫抬升作用, 喇叭口地形的辐合作用, 以及地形通过影响某些物理过程对降水产生增幅作用等, 从而对强降水的落区及降水量产生影响。那么, 孟湾风暴偏南气流在地形影响下对强降水的产生有何作用呢?

孟加拉国大部分是冲积平原, 其西为印度的东高止山脉, 东为缅甸的阿拉干山脉, 北为喜马拉雅山脉。孟加拉陆地仅高出海平面 1.5 m, 而我国云贵高原平均海拔在 1000 m 以上。因此, 从孟加拉湾到我国低纬高原海拔高度不断升高, 存在明显的海拔梯度。大地形对气流有一定的强迫抬升作用, 地形强迫垂直运动 w_f 的计算公式为

$$w_f = \mathbf{V}_s \cdot \nabla h, \quad (6)$$

其中, \mathbf{V}_s 是地表风速矢量, h 是地形高度。参考 Wu et al (2002) 做法, 将 \mathbf{V}_s 取为 $\sigma = 0.995$ 的风矢量来计算 w_f 。图 9a 和 b 显示了强降水区域平均的地形强迫垂直运动和总垂直运动以及经向风的时间演变, 可以看出地形强迫作用与风向有密切关系, 孟湾风暴影响期间, 经向风由北风(13~14 日 00 时)转为南风(15~16 日), 地形强迫由下沉运动变为上升运动。 w_f 在 $0.10\sim0.50 \text{ m s}^{-1}$ 之间变化, 均超过相应时刻的总垂直运动 w , 最强 w_f 出现在 15 日 18 时, 数值约为 0.50 m s^{-1} , 而 w 仅为 0.20 m s^{-1} 。16 日 00 时~17 日 00 时, 由于北风南下, 降水区区域平均经向风转为北风, w_f 为负值, 地形强迫出下沉运动, 此时强降水出现在云南

南部。

由此可见孟湾风暴偏南暖湿气流在低纬高原地形的强迫下, 上升运动加强, 有利于产生强降水。董美莹等(2011)研究发现台风“Talim”(0513)强降水期间大别山区地形强迫垂直运动速度所占比重在 50% 左右, Wu et al. (2002) 研究得到台风“Herb”(9608)造成强降水时台湾岛中央山脉地形强迫垂直速度约占 60% 比重。

5 结论与讨论

通过对 2007 年 5 月 15~17 日孟湾风暴 Akash (0701) 影响下我国西南地区一次强降水天气过程的分析, 得到以下认识:

(1) 这次强降水过程发生在孟湾风暴与青藏高原低槽密切配合的形势下。Akash 登陆减弱期间其对流云团移上青藏高原, 与南下冷空气相互作用, 加强槽前云系引发强降水。

(2) 受北上孟湾风暴高层辐散影响, 南亚高压加强北上控制我国西南地区, 从而增强了降水区的高空辐散, 有利于上升运动发展。同时孟湾风暴为降水区提供了充足的水汽输送。

(3) 源源不断的水汽输送、湿斜压性增长以及强烈条件性对称不稳定, 是次强降水的产生的有利条件。而孟湾风暴在水汽供应、激发斜压不稳定中起着重要作用。

(4) 低纬高原地形对孟湾风暴影响下出现的偏南风强迫抬升加剧了降水区暖湿气流的上升运动, 有助于这次强降水的产生。

本文工作主要讨论了孟湾风暴 Akash (0701) 在这次西南强降水中的作用及其影响下强降水的发生机制, 对于孟湾风暴云团移上高原的动

力机制，低纬高原的复杂地形对降水的影响等还需要进一步探讨。

参考文献 (References)

- 北京大学地球物理系热带天气研究组, 国家海洋局预报总台热带天气预报研究组. 1976. 孟加拉湾风暴的活动及其对我国天气的影响 [C]// 热带天气会议文集. 北京: 科学出版社, 58–69. Tropical Weather Research Group of Department of Geophysics, Peking University, Tropical Weather Forecast Research Group of National Ocean Bureau Total Forecast Station. 1976. The Bay of Bengal storm activity and its influence on China's weather [C]// Proceedings of Conference on Tropical Weather (in Chinese). Beijing: Science Press, 58–69.
- 贝耐芳, 赵思雄. 2005. 一次引发台湾地区强降水的锋面及中尺度系统分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 474–491. Bei Naifang, Zhao Sixiong. 2005. Diagnosis analysis of severe heavy rainfall in Taiwan area during heavy rainfall experiment in South China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 474–491.
- Bennetts D A, Hoskins B J. 1979. Conditional symmetric instability—A possible explanation for frontal rainbands [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 105 (446): 945–962.
- 陈于湘, 朱抱真. 1985. 热带季风爆发前云南雨季的天气学特征 [J]. 大气科学, 9 (1): 101–106. Chen Yuxiang, Zhu Baozhen. 1985. The synoptic features of rain season in Yunnan Province before outbreak of tropical monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (Scientia Atmosferica Sinica) (in Chinese), 9 (1): 101–106.
- 段旭, 李英, 许美玲, 等. 2004. 低纬高原地区中尺度天气分析与预报 [M]. 北京: 气象出版社, 54–58. Duan Xu, Li Ying, Xu Meiling, et al. 2004. Mesoscale Weather Analysis and Forecast of Low Latitude Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 54–58.
- 段旭, 陶云, 寸灿琼, 等. 2009. 孟加拉湾风暴时空分布和活动规律统计特征 [J]. 高原气象, 28 (3): 634–641. Duan Xu, Tao Yun, Cun Canqiong, et al. 2009. Temporal and spatial distributions of storms over the Bay of Bengal and its activity characteristic [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 634–641.
- 董美莹, 陈联寿, 程正泉, 等. 2011. 地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究 [J]. 高原气象, 30 (3): 700–710. Dong Meiying, Chen Lianshou, Cheng Zhengquan, et al. 2011. Numerical study of topography effect on rainfall reinforcement associated with tropical cyclone ‘Talim’ [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (3): 700–710.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2007. 低纬高原地形对强降水过程影响的数值试验研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 381–396. Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun, et al. 2007. A numerical simulation of topography on heavy rainfall in lower latitude plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 381–396.
- 高坤, 翟国庆, 俞樟孝, 等. 1994. 华东中尺度地形对浙北暴雨影响的模拟研究 [J]. 气象学报, 52 (2): 157–164. Gao Kun, Zhai Guoqing, Yu Zhangxiao, et al. 1994. The simulation study of the meso-scale orographic effects on heavy rain in East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (2): 157–164.
- 韩志伟, 张美根, 雷孝恩. 1999. 复杂地形局地环流的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 4 (2): 210–223. Han Zhiwei, Zhang Meigen, Lei Xiaoen, et al. 1999. Numerical simulation of regional circulation in complex terrain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (2): 210–223.
- 李英, 郭荣芬, 索渺清, 等. 2003a. 初夏孟加拉湾对流云团北上低纬高原的初步研究 [J]. 热带气象学报, 19 (3): 277–284. Li Ying, Guo Rongfen, Suo Miaoqing, et al. 2003a. Elementary study on northward movement of convective cloud cluster over the Bay of Bengal to the low latitude plateau during early summer [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (3): 277–284.
- 李英, 张腾飞, 索渺清. 2003b. 孟加拉湾云团影响下云南强降水分析 [J]. 气象科学, 23 (2): 185–191. Li Ying, Zhang Tengfei, Suo Miaoqing. 2003b. Analysis on Yunnan severe precipitation aroused by convective cloud cluster over the Bay of Bengal during early summer [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 23 (2): 185–191.
- 李玉柱. 1981. 初夏孟加拉湾风暴的若干特征 [J]. 气象, 7 (5): 13–22. Li Yuzhu. 1981. Some features of the early summer storm over the Bay of Bengal [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 7 (5): 13–22.
- 鲁亚斌, 张腾飞, 徐八林, 等. 2006. 一次孟加拉湾风暴和冷空气影响下滇西大暴雨中尺度分析 [J]. 应用气象学报, 17 (2): 201–205. Lu Yabin, Zhang Tengfei, Xu Balin, et al. 2006. Mesoscale analysis on a heavy rain associated with a Bengal Bay storm and cold air in West Yunnan [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (2): 201–205.
- Mohanty U C, Mandal M, Raman S. 2004. Simulation of Orissa super cyclone (1999) using PSU/NCAR mesoscale model [J]. Natural Hazards, 31 (2): 373–390.
- Pattanayak S, Mohanty U C. 2008. A comparative study on performance of MM5 and WRF models in simulation of tropical cyclones over Indian seas [J]. Current Science, 95 (7): 923–936.
- 施国强. 1995. 1991年孟加拉湾特大台风灾害 [J]. 自然灾害学报, 4 (1): 98–103. Shi Guoqiang. 1995. The extremely severe typhoon disaster in the Bangladesh in 1991 [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 4 (1): 98–103.
- 韦革宁, 廖胜石. 2000. 孟加拉湾风暴云系对广西“99.10”大范围长时降水的影响 [J]. 广西气象, 21 (4): 12–14. Wei Gening, Liao Shengshi. 2000. The effect of Bangladesh Gulf storm cloud system on the ‘99.10’ wide-range and long-duration rainfall in Guangxi [J]. Journal of Guangxi Meteorology (in Chinese), 21 (4): 12–14.
- Wu C C, Yen T H, Kuo Y H, et al. 2002. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I : The topographic effect [J]. Wea. Forecasting, 17 (5): 1001–1015.
- 王曼, 李华宏, 段旭, 等. 2009. 登陆孟加拉湾风暴结构个例分析与数值模拟 [J]. 气象科技, 37 (1): 12–18. Wang Man, Li Huahong, Duan Xu, et al. 2009. Structure analysis and numerical simulation of a landing Bengal storm [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (1): 12–18.
- 王曼, 段旭, 李华宏, 等. 2011. 孟加拉湾风暴 Mala 登陆期间地形敏感试验 [J]. 气象学报, 69 (3): 486–495. Wang Man, Duan Xu, Li Huahong, et al. 2011. A sensitivity experiment to the orographic effect on the Bengal storm of Mala during its landing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (3): 486–495.

- 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 numerical 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.
- 王允宽, 吴迪生, 曹勇生, 等. 1996. 青藏高原地形对孟加拉湾热带气旋降水的影响 [J]. 大气科学, 20 (4): 446–451. Wang Yunkuan, Wu Disheng, Cao Yongsheng, et al. 1996. Comparative study on the effect of the Qinghai-Xizang Plateau on tropical cyclone over the Bay of Bengal [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (4): 446–451.
- 王友恒, 王素贤. 1988. 孟加拉湾热带风暴的初步分析 [J]. 气象, 14 (6): 19–22. Wang Youheng, Wang Suxian. 1988. A preliminary study of tropical cyclone over the Bay of Bengal [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 14 (6): 19–22.
- 王友恒, 王素贤. 1989. 北印度洋热带风暴及其与西藏降水的关系 [J]. 气象, 15 (11): 38–43. Wang Youheng, Wang Suxian. 1989. North India ocean tropical storm and its relationship with the precipitation in Tibet Plateau [J]. Meteorology (in Chinese), 15 (11): 38–43.
- 王子谦, 朱伟军, 段安民. 2010. 孟湾风暴影响高原暴雪的个例分析: 基于倾斜涡度发展的研究 [J]. 高原气象, 29 (3): 703–711. Wang Ziqian, Zhu Weijun, Duan Anmin. 2010. A case study of snowstorm in Tibetan Plateau induced by Bay of Bengal storm: Based on the theory of slantwise vorticity development [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (3): 703–711.
- 许美玲, 张秀年, 杨素雨. 2007. 孟加拉湾风暴影响低纬高原的环流和云图特征分析 [J]. 热带气象学报, 23 (4): 395–400. Xu Meiling, Zhang Xiunian, Yang Suyu. 2007. Ambient fields and satellite pictures characteristic analysis by the Bengal Bay storm in low-latitude plateau [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (4): 395–400.
- 杨祖芳, 李月安, 李伟华. 2000. 两个孟加拉湾风暴对我国降水不同影响的对比分析 [J]. 海洋预报, 17 (4): 41–46. Yang Zufang, Li Yuean, Li Weihua. 2000. Comparative analysis of the different effects of two Bay of Bengal storms on precipitation in China [J]. Marine Forecast (in Chinese), 17 (4): 41–46.
- 张腾飞, 段旭, 张杰. 2006. 初夏孟湾风暴造成云南连续性强降水的中尺度分析 [J]. 热带气象学报, 22 (1): 67–73. Zhang Tengfei, Duan Xu, Zhang Jie. 2006. Mesoscale analysis of Yunnan successive heavy precipitation caused by storms over the Bay of Bengal in the early summer [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (1): 67–73.