

段旭, 张瑾文. 2015. “双峰”期孟加拉湾风暴对西南水汽输送的贡献 [J]. 大气科学, 39 (3): 526–534, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14131. Duan Xu, Zhang Jinwen. 2015. The contribution of storms over the Bay of Bengal to southwest water vapor transport during double-peak periods [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 526–534.

“双峰”期孟加拉湾风暴对西南水汽输送的贡献

段旭 张瑾文

云南省气象科学研究所, 昆明 650034

摘 要 5 月和 10~11 月是孟加拉湾风暴活动的两个“峰值”期, 风暴对西南水汽输送有重要影响, 本文利用 2001~2010 年 10 年的 JTWC (Joint Typhoon Warning Centre) 风暴资料和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) /NCAR (National Center for Atmospheric Research) $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 研究风暴“双峰”期对西南水汽输送的贡献, 结果表明: 风暴水汽向北输送最强, 其次是向东输送, 其它方向的输送较弱; 在风暴中心区域及西南水汽通道, 各层和整层的通量均大于气候平均值, 风暴的西南水汽输送特征显著; 两个“峰值”期风暴的经向水汽输送比纬向几乎大一倍, 5 月“峰值”期孟加拉湾风暴在西南方向的实际水汽输送总量约是 10~11 月的 2 倍, 孟加拉湾风暴前“峰值”期 (5 月) 对水汽输送的影响大于后“峰值”期 (10~11 月), 孟加拉湾风暴是 5 月西南水汽输送的主要系统之一。

关键词 孟加拉湾风暴 西南水汽输送 “双峰”期 平均贡献率 实际贡献率

文章编号 1006-9895(2015)03-0526-09

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14131

The Contribution of Storms over the Bay of Bengal to Southwest Water Vapor Transport during Double-Peak Periods

DUAN Xu and ZHANG Jinwen

Yunnan Institute of Meteorology Sciences, Kunming 650034

Abstract Storms of the Bay of Bengal have an important impact on southwest water vapor transportation, with double-peak periods (May and Oct–Nov) occurring in storm active stage. According to 2001–2010 JTWC (Joint Typhoon Warning Centre) storm data and NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR (National Center for Atmospheric Research) $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data on southwest water vapor transportation in double-peak periods, the storm water vapor is transported most strongly northward, followed by eastward transportation. Transportation in other directions is weaker. In the center and southwestern areas of the storm, each layer of water flux and all layers combined are higher than the climate average value for the southwest. In the double-peak periods, storm meridional moisture transportation is double than that of zonal transport. The actual southwest water vapor transportation for storms in May is twice as large as that in Oct–Nov. The effect of water vapor transport prior to the peak period (May) for storms in the Bay of Bengal is greater than that after the peak period (Oct–Nov). the Bay of Bengal storms are therefore one of the main systems for southwest water vapor transportation in May.

Keywords The Bay of Bengal storm, Southwest water vapor transportation, Double-peak periods, Average contribution rate, Actual contribution rate

收稿日期 2014-02-25; 网络预出版日期 2014-08-25

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 41365006

作者简介 段旭, 男, 1960 年出生, 正研级高工, 主要从事天气和气候研究. E-mail: ynmodx@sina.com

1 引言

据统计, 超过 70% 的孟加拉湾风暴在中南半岛北部、孟加拉国和印度半岛北部一带登陆 (段旭等, 2009), 对青藏高原和云贵高原地区的降水造成较大的影响, 水汽输送甚至可达到我国长江中下游地区 (吕爱民等, 2013), 其中, 三分之二的登陆风暴出现在“双峰”期 (5 月和 10~11 月)。因此, 孟加拉湾风暴“双峰”期对西南水汽输送有重要的影响。

关于孟加拉湾地区西南水汽输送对我国的影响, 许多学者做过相关研究。卓嘎等 (2012) 分析西藏地区水汽输送的气候特征后指出, 西藏地区冬、春、秋季的水汽主要来自中纬度西风带水汽输送, 夏季水汽主要来自阿拉伯海、孟加拉湾、南海和西太平洋地区; 周长艳等 (2005) 认为西太平洋地区的水汽输送以及来自孟加拉湾和高原地区的水汽输送分别是长江流域旱、涝年的重要影响因素; 李秀珍等 (2010) 认为春、秋两季输送至华南的水汽主要来源于孟加拉湾及副热带西太平洋; 江志红等 (2013) 基于拉格朗日方法对江淮梅雨水汽输送特征分析后指出, 孟加拉湾、中国南海、太平洋和印度洋的水汽输送对江淮梅雨的异常有重要影响, 梅雨偏多年来自孟加拉湾的水汽输送较多; 鲁亚斌等 (2004)、陈艳等 (2006) 针对云南 5 月降水异常的研究后发现, 5 月云南上空为一致的西南风水汽输送, 主要由来自印度半岛北部的副热带西风水汽输送、热带印度洋及孟加拉湾西南风水汽输送汇合而成, 孟加拉湾水汽输送发生异常对云南 5 月降水有重要影响; 黄荣辉和陈际龙 (2010) 指出, 由于亚洲夏季风从孟加拉湾、南海和热带西太平洋输送大量水汽到我国东部季风区, 故在东部季风区夏季经向水汽输送通量比纬向水汽输送通量大; 周晓霞等 (2008) 则认为, 夏季风爆发后, 大量水汽从南半球输送到亚洲季风区, 水汽辐合增加最大在孟加拉湾、中南半岛和南海地区, 中国大陆的水汽主要经南海北边界输入; 周玉淑等 (2014) 在研究台风 Bilis 时发现, 暴雨增幅的时段与高低层无旋风的风速加大和辐合增强是一致的, 而无旋风风速加大增强了水汽的输送; 晏红明等 (2013)、王澄海和崔洋 (2011) 在研究高原地区雨季开始和结束以及东亚夏季风建立前青藏高原地气温差变化特征时均指出, 孟加拉湾热带气旋活动频次及西

南水汽输送是重要因素之一; 周顺武等 (2011) 研究了青藏高原汛期降水的时空分布特征, 认为初夏高原南侧更多的受到孟加拉湾风暴影响, 导致高原上降水的南北反向型分布。上述研究证实了孟加拉湾地区是西南水汽输送的重要源地, 但没有讨论孟加拉湾风暴在西南水汽输送中的作用。

孟加拉湾风暴带来的西南水汽输送, 在许多个例分析中均有描述 (王敏等, 2010; 伏阳虎等, 2009; 周国莲等, 2006; 周倩等, 2011; 杨祖芳等, 2000; 刘瑜等, 2007; 巩远发等, 2004; 张腾飞等, 2006), 均认为风暴产生的西南水汽输送为西南地区持续强降水提供了有利的水汽条件, 同时也是造成高原地区产生暴雨 (雪) 的主要天气系统之一。但这些研究只是定性分析了孟加拉湾风暴在西南水汽输送中的作用, 没有具体分析风暴在西南水汽输送所起到的作用和贡献大小, 本文将讨论孟加拉湾风暴“双峰”期对西南水汽输送的贡献。

2 资料和方法

孟加拉湾风暴登陆路径选用 JTWC (Joint Typhoon Warning Centre) 公布的孟加拉湾风暴资料, 2001~2010 年共有 13 个孟加拉湾风暴在 15°N 以北登陆, 其中 5 月“峰值”期出现 7 个, 10~11 月“峰值”期 6 个 (图 1), 全部发生在风暴活动的“双峰”期。

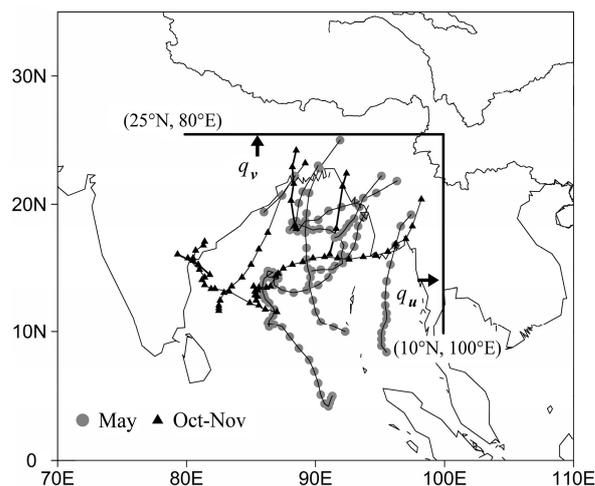


图 1 2001~2010 年“双峰”期孟加拉湾风暴 15°N 以北登陆路径和水汽输送: 南风输送 (25°N, 80°~100°E); 西风输送 (10°~25°N, 100°E)

Fig. 1 Landing path of the Bay of Bengal storm to the north of 15°N and water vapor transport in double-peak periods from 2001 to 2010 [southerly transport: (25°N, 80°~100°E); westerly transport: (10°~25°N, 100°E)]

水汽通量的计算是利用 2001~2010 年 5 月和 10~11 月逐日逐 6 小时 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research) $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。“双峰”期水汽通量气候平均值是指 2001~2010 年 5 月(或 10~11 月)逐日逐 6 小时水汽通量的平均值,孟加拉湾风暴水汽通量是指 7 个风暴(5 月)或 6 个风暴(10~11 月)时段水汽通量的平均值,整层水汽通量从 1000 hPa 积分到 100 hPa。文中分别选取沿 25°N (经度范围: $80^\circ \sim 100^\circ\text{E}$)和沿 100°E (纬度范围: $0 \sim 25^\circ\text{N}$)的两个垂直剖面来讨论风暴对西南水汽输送的贡献。由于仅考虑风暴西南方向的水汽输送,在垂直剖面计算水汽通量时均只计算南风分量和西风分量,即

$$F_S = qv, \quad (\text{当 } v < 0 \text{ 时, } F_S = 0) \quad (1)$$

$$F_W = qu, \quad (\text{当 } u < 0 \text{ 时, } F_W = 0) \quad (2)$$

式(1)和(2)中, F_S 、 F_W 、 q 、 v 和 u 分别为南风水汽通量、西风水汽通量、比湿、经向风速和纬向风速。风暴个例统计时段的标准为当风暴的生命周期 $\leq 4 \text{ d}$ 时,选取风暴实际的生命周期并后延 1d;若风暴的生命周期 $\geq 4 \text{ d}$ 时,取停止编号前的 4d 并后延 1d。

风暴西南水汽输送平均贡献率用式(3)表示,即

$$M_F = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F}, \quad (3)$$

其中, F 为某一时刻的 F_S 或 F_W , m 为 7 个(5 月)或 6 个风暴(10~11 月)过程逐日逐 6 小时总时次数(即风暴过程天数乘 4 个时次), n 为 5 月或 10~11 月逐日逐 6 小时总数(31 天或 61 天乘 10 年乘 4 个时次)。

风暴西南水汽输送实际贡献率用式(4)表示,即

$$A_F = \frac{\sum_{i=1}^m F}{\sum_{i=1}^n F}, \quad (4)$$

其中, F 、 m 、 n 的意义同式(3)。

风暴西南水汽平均贡献率是风暴个例在统计时段中水汽输送总量按时次平均后的平均值分别

与对应的 5 月(或 10~11 月)多年水汽总量按时次平均后的平均值的百分比,定量说明在风暴持续时段中,在平均时次上,风暴对水汽输送的贡献。风暴西南水汽输送实际贡献率是风暴个例在统计时段中水汽输送的累积总量分别与对应的 5 月(或 10~11 月)多年水汽总量的百分比,能够反映多个孟加拉湾风暴个例在多年的 5 月(或 10~11 月)中,在西南方向上对水汽输送的实际贡献。

3 风暴“双峰”期水汽输送状况及差异

5 月“峰值”期孟加拉湾风暴的水汽以西南方向输送为主,由于对流层低层 700 hPa 低于青藏高原高度,风暴的水汽输送首先呈较强的向北输送,遇青藏高原阻挡后沿高原边缘向东输送,而其他方向的输送较弱(图 2a)。中层 500 hPa 上风暴水汽自西南向东北方向输送的特征明显(图 2b),在经向上呈现出先向北输送,然后向东输送。比较而言,低层的水汽输送较高层强烈,向北的输送量较大。

从风暴整层水汽通量平均值的分布看(图 2c),仍然呈西南水汽输送特征。用风暴平均水汽通量减去气候值来衡量风暴在西南水汽输送中的贡献(图 2d),发现风暴对水汽输送的影响是显著的;其水汽输送路径与气候平均态基本一致,表明由孟加拉湾风暴产生的水汽输送与以孟加拉湾为源地的西南水汽输送是密切相关的,5 月“峰值”期孟加拉湾风暴是西南水汽输送的重要天气系统之一。

10~11 月“峰值”期风暴水汽输送形态与 5 月“峰值”期相似(图 3),以西南水汽输送为主,输送量相对较小(图 3a-c),与 5 月气候差值图(图 2d)相比,10~11 月差值中心范围较小,但西南水汽通道分布特征明显,次中心位于华南地区,说明 10~11 月孟加拉湾风暴对西南向的水汽输送在范围上大于 5 月,孟加拉湾地区是西南及华南地区秋季水汽来源的地区之一。

图 4 是两个“峰值”期整层孟加拉湾风暴水汽输送通量平均值的差值图,由图 4 可知,5 月风暴西南水汽输送较大,比 10~11 月大 $10 \sim 30 \text{ g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$;差值中心主要位于西南水汽通道上,在孟加拉湾西北部的陆地上(青藏高原西侧)有一些水汽差值的次中心,说明 5 月“峰值”期水

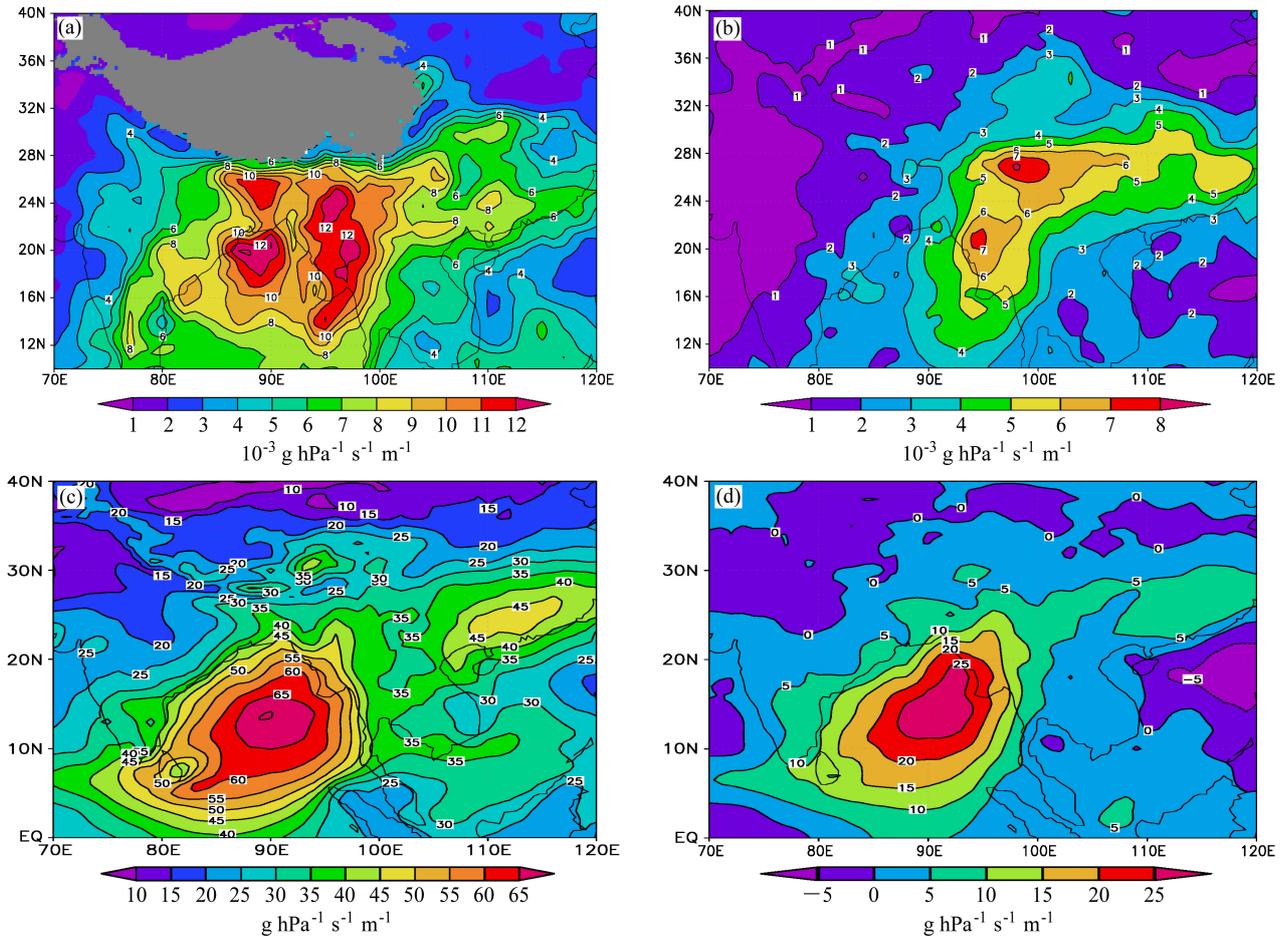


图2 5月“峰值”期孟加拉湾风暴 (a) 700 hPa、(b) 500 hPa 平均水汽通量 (单位: $10^{-3} \text{ g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) 和 (c) 整层平均水汽通量 (单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) 及其 (d) 与气候平均的差值 (单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$)

Fig. 2 Average water vapor flux (units: $10^{-3} \text{ g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) at (a) 700 hPa and (b) 500 hPa, and (c) average water vapor flux in the whole layer (units: $\text{g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) and (d) its difference from climatological average (units: $\text{g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) for the Bay of Bengal storm in May peak period

汽输送除沿西南水汽通道输送外, 向北和向西北的水汽输送也较大。5月风暴西南水汽输送强劲, 主要原因是索马里越赤道气流的建立和向东传播, 孟加拉湾和中南半岛地区对流层中低层流场发生了巨变, 由原来的偏东气流转为强劲的西南气流, 而10~11月西南季风急剧减弱, 强劲的西南气流由孟加拉湾东退到了中南半岛北部, 导致风暴西南水汽输送较弱(段旭和段玮, 2015)。

综合分析图3和图4可知, 虽然风暴西南方向的水汽输送10~11月弱于5月, 但其差值场的数值与气候平均场相比较, 在西南水汽输送通道上, 风暴整层平均水汽输送量是气候平均的2倍, 而且 $15 \text{ g hPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 的等值线范围较气候平均差值图偏北偏东, 说明孟加拉湾风暴对西南向的水汽输送的强度和范围都有重要的影响。

4 风暴“双峰”期对西南水汽输送的贡献

上节讨论了“双峰”期孟加拉湾风暴及气候平均态水汽输送状况及其差异, 定性分析了风暴对西南水汽输送的贡献。下节将通过沿 25°N 垂直剖面和沿 100°E 垂直剖面的水汽输送分析, 定量分析由风暴产生的水汽向北、向东方向输送所占比例, 讨论风暴对西南水汽输送的贡献率。在计算沿纬向和沿经向的垂直剖面水汽通量时, 由北风和东风产生的水汽通量输送被认为不属于孟加拉湾风暴系统, 因此为了避免抵消西南水汽输送的绝对贡献率, 令北风分量和东风分量产生的水汽通量为零[如式(1)、(2)]。

图5a是5月“峰值”期沿 25°N 纬向垂直剖面

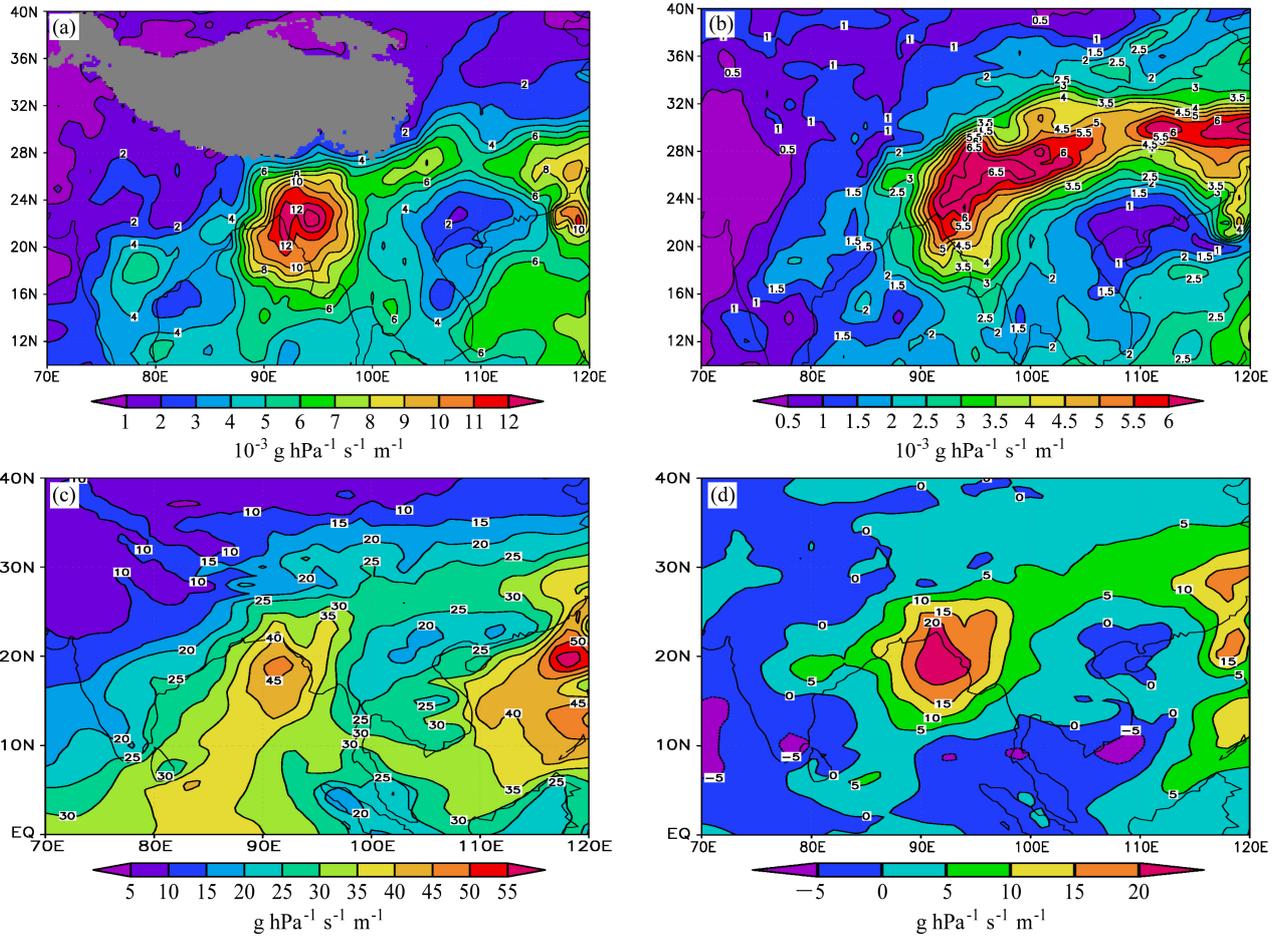


图3 同图2, 但为10~11月
Fig. 3 The same as Fig. 2, but for Oct–Nov peak period

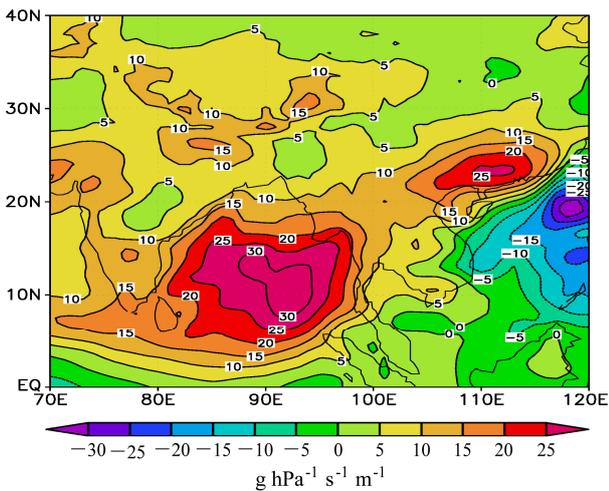


图4 孟加拉湾风暴整层平均水汽通量5月与10~11月差值(单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$)
Fig. 4 Average water vapor flux difference in the whole layer for the Bay of Bengal storm between May and Oct–Nov (units: $\text{g hPa}^{-1} \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$)

上南风分量在风暴过程中平均水汽输送与气候平均值之比, 图中除在 ($80^{\circ}\sim 87^{\circ}\text{E}$, $800\sim 500 \text{ hPa}$) 和 ($86^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$, 200 hPa 以上) 两个区域, 风暴产生的水汽输送平均贡献率小于 100%, 说明风暴向北产生的水汽输送小于气候平均值, 即风暴对水汽的输送在这两个区域为负贡献(负贡献表示该区域不是风暴水汽输送的主要通道, 风暴导致的水汽输送弱于其它天气系统, 下同), 图中的其他区域风暴的水汽输送贡献率均大于 100%, 说明风暴的水汽输送大于气候平均值, 即风暴对水汽输送有正贡献。其中, 在对流层中层 ($700\sim 250 \text{ hPa}$) 风暴的水汽输送贡献率是气候平均值的 2~3 倍, 大值中心位于孟加拉湾正北方向 90°E 附近的对流层中层。孟加拉湾风暴的水汽平均贡献率的总体分布是在对流层中低层东部大于西部, 中高层西部大于东部, 表明在经向上, 风暴水汽输送的正贡献区域偏东, 且正贡献分布随高度向西倾斜。

图 5b 是沿 100°E 风暴水汽输送贡献率的经向垂直剖面图, 图中 18°N 以南, 对流层中低层 (500 hPa 以下) 风暴水汽输送率大于 100%, 为正贡献, 中高层 (500 hPa 以上) 水汽输送为负贡献; 20°N 以北, 对流层低层 (700 hPa 以下) 风暴水汽输送为负贡献, 中高层 (700 hPa 以上) 为正贡献, 表明风暴向东的水汽输送正贡献区域随高度向北倾斜。与南风分量水汽输送平均贡献率 (图 5a) 相比, 西风分量的平均贡献率明显偏小。

图 6 是 5 月“峰值”值期风暴水汽输送的实际贡献率 (即: 风暴存在统计时段内西南方向水汽通量的总量占整个气候统计时段内西南方向水汽通量总量的比例), 在图 6 中, 5 月“峰值”期水汽输送的实际贡献率分布趋势与平均贡献率 (图 5) 基本一致。其中, 沿 25°N 的经向垂直剖面图 (图 6a)

中, 南风分量的实际贡献率大部分区域为 20%~30%, 也就是说 5 月由南风分量带来的经向水汽输送中约有 20%~30% 为孟加拉湾风暴所作的贡献; 而在由西风分量带来的纬向水汽输送中 (图 6b), 风暴所作的实际贡献率为 12%~20%, 西风水汽输送略小于南风。综合分析 5 月“峰值”期孟加拉湾风暴水汽输送的平均贡献率和实际贡献率表明, 孟加拉湾风暴向北的水汽输送均大于向东的输送, 南风水汽输送的中心分布带随高度有向东倾斜的趋势, 西风水汽输送中心分布向北倾斜。

图 7a 是 10~11 月“峰值”期沿 25°N 纬向垂直剖面南风分量风暴过程平均水汽输送与气候平均值之比。在图中除西侧低层 (700 hPa 以下) 和 400~200 hPa 间风暴产生的平均水汽输送为负贡献外, 其他区域几乎均为较大的正贡献。其中, 90°~

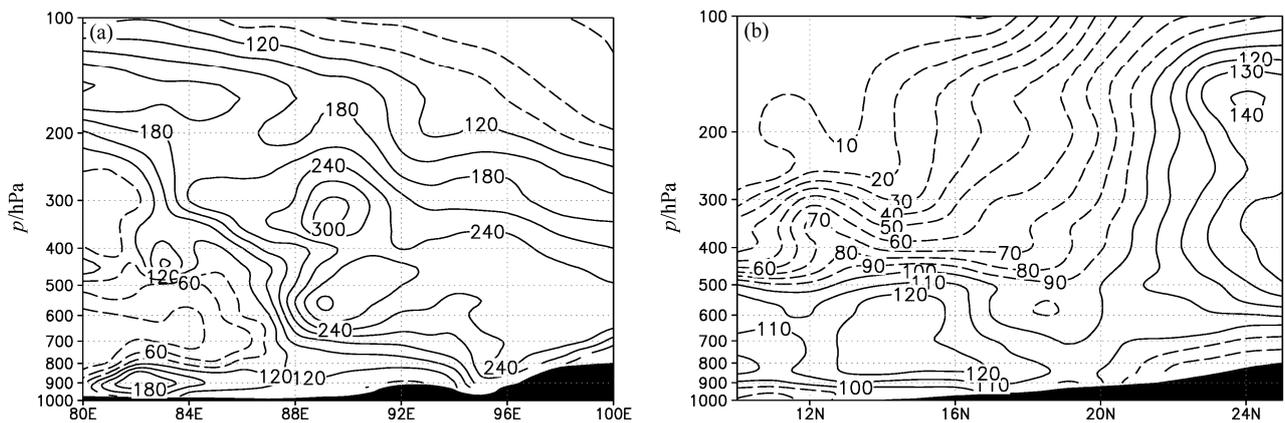


图 5 5 月“峰值”期 (a) 沿 25°N 和 (b) 沿 100°E 垂直剖面上水汽通量风暴过程平均值与气候平均值之比 (单位: %, 阴影区为地形)

Fig. 5 Vertical section along (a) 25°N and (b) 100°E for the ratio between the average in water vapor flux of storm process and the climate average in May peak period (units: %; shadow: terrain)

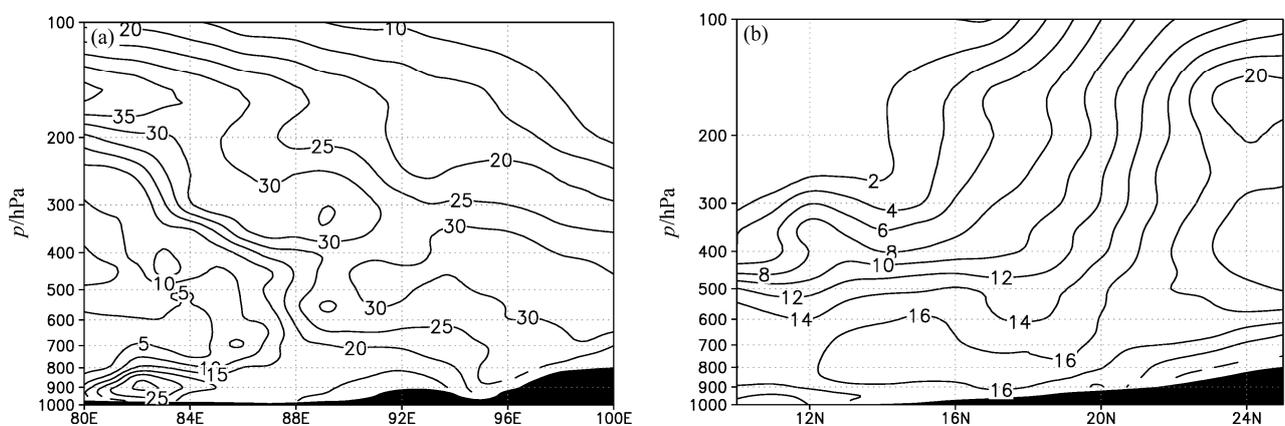


图 6 5 月“峰值”期 (a) 沿 25°N 和 (b) 沿 100°E 垂直剖面上水汽通量风暴过程总量与气候总量之比 (单位: %, 阴影区为地形)

Fig. 6 Vertical section along (a) 25°N and (b) 100°E for the ratio between the total of water vapor flux in storm process and the climate total in May peak period (units: %; shadow: terrain)

100°E 对流层中低层水汽输送约为气候平均值的 3~4 倍, 其余地区的平均贡献率也超过了 200%, 正贡献区域随高度向西倾斜。图 7b 是风暴过程西风分量水汽输送平均值与气候平均值之比沿 100°E 的经向垂直剖面图, 图中 20°N 以北对流层低层 (750 hPa 以下) 风暴水汽输送为弱的负贡献, 剖面的中低层水汽输送大部分为正贡献。其中, 贡献率超 200% 的区域为 10°~15°N 间的低层和 15°~20°N 间的中层。对流层高层为水汽输送负贡献区域, 低纬度区域高层甚至水汽输送为零。正贡献水汽输送大值带随高度向北倾斜。与南风分量水汽输送平均贡献率 (图 7a) 相比, 西风分量的平均贡献率仍明显偏小。

从 10~11 月“峰值”期风暴水汽输送实际贡献率分布图 (图 8) 来看, 实际贡献率分布形态与平均贡献率 (图 7) 一致。其中, 在图 8a 中, 南风分量的实际贡献率大部分区域为 8%~16%, 即在

10~11 月由南风分量带来的纬向水汽输送中有 8%~16% 为孟加拉湾风暴所作的贡献, 而西风分量正贡献区域风暴所作的实际贡献率为 5%~9% (图 8b), 说明孟加拉湾风暴向北的水汽输送大于向东的水汽输送。

比较两个“峰值”期孟加拉湾风暴的水汽输送的平均贡献率图 (图 5 和图 7), 其共同特点是: 无论是平均贡献率还是实际贡献率, 向北的纬向水汽输送都比向东的经向水汽输送大, 约大一倍; 风暴对水汽输送的大值带位于对流层中层, 这是否与高原大地的影响有关还需进一步研究; 纬向剖面图中水汽输送大值区随高度向东倾斜, 经向剖面图中则向北倾斜, 表明孟加拉湾风暴水汽输送通道主要是西南方向。不同之处在于, 5 月“峰值”期的实际贡献率是 10~11 月“峰值”期的 2 倍, 考虑到 5 月和 10~11 月两个“峰值”期风暴统计的个例数之比为 7:6, 气候平均的天数之比为 310:610,

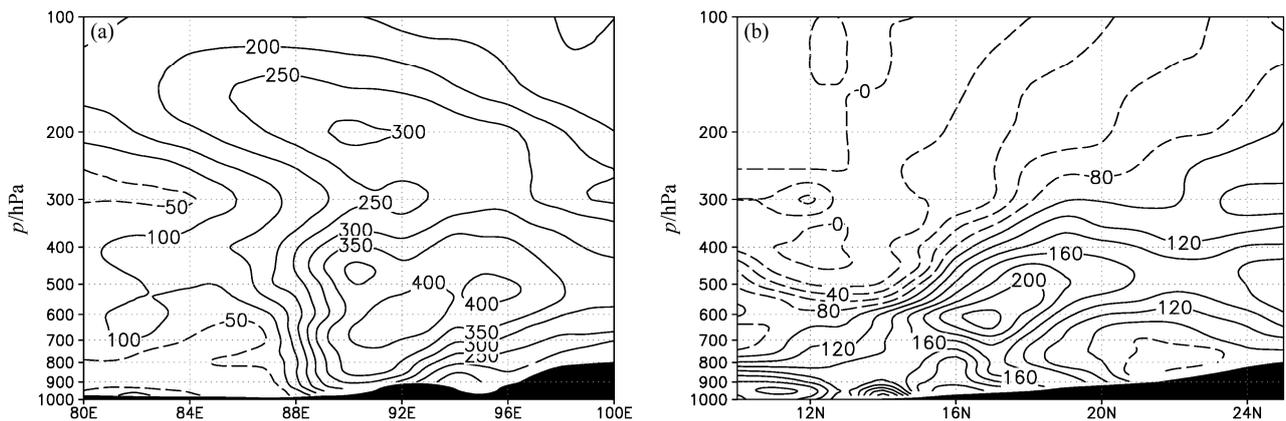


图 7 同图 5, 但为 10~11 月

Fig. 7 The same as Fig.5, but for Oct–Nov peak period

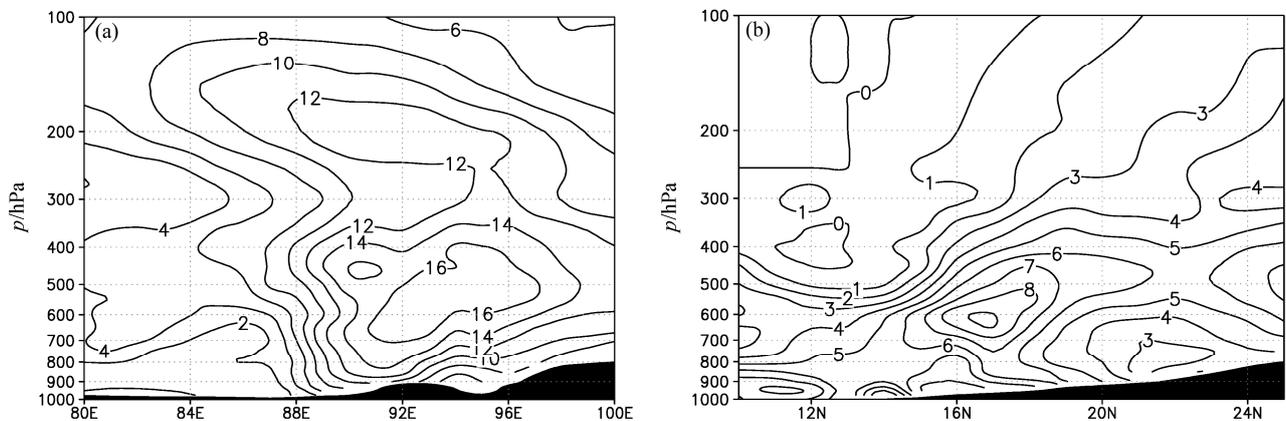


图 8 同图 6, 但为 10~11 月

Fig. 8 The same as Fig.6, but for Oct–Nov peak period

从而说明在 5 月“峰值”期孟加拉湾风暴在西南方向上对水汽输送的实际输送量是 10~11 月“峰值”期的 4 倍, 如果扣除掉 10~11 月样本容量是 5 月样本容量两倍的影响, 那么 5 月“峰值”期孟加拉湾风暴在西南方向的实际水汽输送总量约是 10~11 月的 2 倍, 说明了孟加拉湾风暴前“峰值”期(5 月)对水汽输送的影响大于后“峰值”期(10~11 月), 孟加拉湾风暴是 5 月西南水汽输送的主要系统之一。

5 小结

在孟加拉湾风暴 5 月和 10~11 月的两个“峰值”期, 风暴表现出较强的西南水汽输送特征, 其中向北的输送较强, 但受到高原阻挡, 其次是向东的输送。通过合成分析表明: 孟加拉湾风暴各层和整层的水汽通量在风暴中心区域及西南水汽通道上均高于气候平均值, 表明风暴对西南水汽输送的贡献是显著的。

通过分析沿 25°N 纬向垂直剖面 and 沿 100°E 经向垂直剖面的西南水汽输送贡献率表明: 两个“峰值”期风暴的南风水汽输送比西风水汽输送几乎大一倍, 且经向水汽输送的正贡献中心位于 90°E, 对流层中层 700~500 hPa, 正贡献区域随高度向东倾斜, 而纬向水汽输送的正贡献区域随高度向北倾斜, 表明孟加拉湾风暴水汽输送通道主要是西南方向; 风暴的西南水汽平均贡献率, 10~11 月“峰值”期比 5 月“峰值”期约大一倍, 而实际贡献率则 5 月“峰值”期比 10~11 月“峰值”期大一倍。如果扣除掉 10~11 月样本容量是 5 月样本容量两倍的影响, 那么 5 月“峰值”期孟加拉湾风暴在西南方向的实际水汽输送总量约是 10~11 月的 2 倍, 说明了孟加拉湾风暴前峰值期(5 月)对水汽输送的影响大于后“峰值”期(10~11 月), 孟加拉湾风暴是 5 月西南水汽输送的主要系统之一。

参考文献 (References)

陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响 [J]. 大气科学, 30 (1): 25-37. Chen Yan, Ding Yihui, Xiao Ziniu, et al. 2006. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 25-37.

段旭, 段玮. 2015. 孟加拉湾风暴对高原地区降水的影响 [J]. 高原气象,

34 (1): 1-10. Duan Xu, Duan Wei. 2015. Impact of Storms over the Bay of Bengal on Precipitation over Plateau area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (1): 1-10.

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. 2013. Temporal and spatial distributions of storms over the Bay of Bengal and its activity characteristic [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 634-641.

伏阳虎, 王兴, 晋扎, 等. 2009. 西藏 2008 年 10 月 26~28 日孟加拉湾风暴强降水分析 [J]. 西藏科技, 34 (7): 38-43. Fu Yanghu, Wang Xing, Jin Zha, et al. 2009. The strong precipitation analysis of Bengal storm from October 26-28 days 2008 in Tibet [J]. Tibet Science and Technology (in Chinese), 34 (7): 38-43.

巩远发, 纪立人, 段廷扬. 2004. 青藏高原雨季的降水特征与东亚夏季风爆发 [J]. 高原气象, 23 (3): 313-322. Gong Yuanfa, Ji Liren, Duan Tingyang. 2004. Precipitation character of rainy season of Qinghai-Xizang Plateau and onset over East Asia monsoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (3): 313-322.

黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34 (6): 1035-1045. Huang Ronghui, Chen Jilong. 2010. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1035-1045.

江志红, 任伟, 刘征宇, 等. 2013. 基于拉格朗日方法的江淮梅雨水汽输送特征分析 [J]. 气象学报, 71 (2): 295-304. Jiang Zhihong, Ren Wei, Liu Zhengyu, et al. 2013. Analysis of water vapor transport characteristics during the Meiyu over the Yangtze-Huaihe River valley using the Lagrangian method [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (2): 295-304.

李秀珍, 梁卫, 温之平. 2010. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其与降水异常的联系 [J]. 热带气象学报, 26 (5): 626-632. Li Xiuzhen, Liang Wei, Wen Zhiping. 2010. Characteristics of the atmospheric water vapor and its relationship with rainfall in South China in northern autumn, winter and spring [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (5): 626-632.

刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 2007. 初夏孟加拉湾低压与云南雨季开始期 [J]. 高原气象, 26 (3): 572-578. Liu Yu, Zhao Erxu, Huang Wei, et al. 2007. The lows over the Bay of Bengal in early summer and beginning time of rainy season of Yunnan Province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (3): 572-578.

鲁亚斌, 解明恩, 谢三勇. 2004. 孟加拉湾水汽输送异常对云南 5 月降水的影响 [J]. 云南地理环境研究, 16 (1): 19-24. Lu Yabin, Xie Mingen, Xie Sanyong. 2004. Influence of abnormal moisture transport at the Bay of Bengal on precipitation of Yunnan in May [J]. Yunnan Geographic Environment Research (in Chinese), 16 (1): 19-24.

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. 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.

- 王澄海, 崔洋. 2011. 东亚季风建立前青藏高原地气温差变化特征 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 586–596. Wang Chenghai, Cui Yang. 2011. Characteristics of the difference of temperature between surface and atmosphere over the Tibetan Plateau in the early stage of East Asian Summer Monsoon onset [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 586–596.
- 王敏, 孙树峻, 王雪. 2010. 青藏高原东南侧一次大范围暴雨天气过程的诊断分析 [J]. 高原山地气象研究, 30 (4): 47–50. Wang Min, Sun Shujun, Wang Xue. 2010. Diagnosis Analysis of a heavy torrential rain in the Southeast of Tibetan Plateau [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 30 (4): 47–50.
- 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 impact of different rainfall in China two storm over the Bay of Bengal [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 17 (4): 41–46.
- 晏红明, 李清泉, 孙丞虎, 等. 2013. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究 [J]. 大气科学, 37 (5): 1111–1128. Yan Hongming, Li Qingquan, Sun Chenghu, et al. 2013. Criterion for determining the onset and end of the rainy season in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1111–1128.
- 张腾飞, 段旭, 张杰. 2006. 初夏孟加拉湾风暴造成云南连续性强降雨的中尺度分析 [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.
- 周长艳, 李跃清. 2005. 长江上游地区水汽输送的气候特征 [J]. 长江科学院院报, 22 (5): 18–22. Zhou Changyan, Li Yueqing. 2005. Climatological characteristics of water vapor transport over upstream area of Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute (in Chinese), 22 (5): 18–22.
- 周国莲, 鲁亚斌, 张腾飞, 等. 2006. 一次孟加拉湾风暴影响下云南持续性暴雨天气诊断分析 [J]. 气象科技, 34 (3): 280–285. Zhou Guolian, Lu Yabin, Zhang Tengfei, et al. 2006. Diagnostic analysis of a persistent heavy rainfall in Yunnan influenced by Bay of Bengal tropical cyclone [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 34 (3): 280–285.
- 周顺武, 王传辉, 杜军, 等. 2011. 青藏高原汛期降水的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 723–732. Zhou Shunwu, Wang Chuanhui, Du Jun, et al. 2011. Characteristics of spatial and temporal distribution of precipitation in flood season over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 723–732.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 66 (1): 59–70. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (1): 59–70.
- 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.
- 周倩, 程一帆, 周甘霖, 等. 2011. 2008年10月青藏高原东部一次区域暴雪过程及气候背景分析 [J]. 高原气象, 30 (1): 22–29. Zhou Qian, Cheng Yifan, Zhou Ganlin, et al. 2011. A regional snowstorm process in the eastern Tibetan Plateau in October 2008 and climatic background analysis [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (1): 22–29.
- 卓嘎, 罗布, 周长艳. 2012. 1980~2009年西藏地区水汽输送的气候特征 [J]. 冰川冻土, 34 (4): 783–794. Zhou Ga, Luo Bu, Zhou Changyan. 2012. Climate characteristics of water vapor transport over Tibet region in 1980–2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 34 (4): 783–794.