

李汀, 琚建华. 孟加拉湾西南季风与南海热带季风的气候特征比较. 地球物理学报, 2013, 56(1): 27-37, doi: 10. 6038/cjg20130103.

Li T, Ju J H. Comparison of climate features between the Southwest Summer Monsoon of the Bay of Bengal and the South China Sea Summer Monsoon. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(1): 27-37, doi: 10. 6038/cjg20130103.

## 孟加拉湾西南季风与南海热带季风的气候特征比较

李汀<sup>1</sup>, 琚建华<sup>2\*</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 云南省气象局, 昆明 650034

**摘 要** 本文运用 NCAR/NCEP 再分析数据和 APHRO\_MA\_V1003R1 降水数据, 对比分析了孟加拉湾西南季风和南海热带季风的气候特征异同以及对降水分布的影响, 得到如下结论: (1) 孟加拉湾西南季风比南海热带季风爆发更早、强度更强、持续时间更久、向北推进更北。(2) 孟加拉湾西南季风建立过程缓慢, 主要是索马里越赤道西南气流的逐渐加强和热带印度洋 ITCZ(赤道辐合带)的逐渐北移; 而南海热带季风建立过程迅速, 主要是东亚大槽的一次替换过程伴随西太平洋副热带高压的突然东撤和热带西太平洋 ITCZ 的突然北跳。(3) 孟加拉湾西南季风纬向分量较强, 季风建立前后主要变化在于偏西风的强度; 而南海西南季风经向分量较强, 季风建立后风向突然逆转, 东南风由于副高东撤而迅速被西南风取代。(4) 孟加拉湾西南季风撤退较快, 而南海季风则撤退较慢。(5) 根据季风进程将夏季风期划分为季风发展期(5月)、强盛期(6—8月)和减退期(9—10月)。其间对流活跃区的发展和推进、季风槽的位置以及对应降水区域均有明显差异。(6) 在夏季风期, 孟加拉湾和南海经度上分别存在着由 ITCZ 北抬引起的、在季风槽对流活跃区上升而在南北两侧下沉的、南北对称分布的季风经向次级环流。由于孟加拉湾和青藏高原强大热源的存在, 孟加拉湾上升区南北跨度比南海的更大; 孟加拉湾经圈环流更加稳定, 而南海经圈环流的南北摆动更明显; 孟加拉湾上升中心区比南海的偏北; 在季风减退期, 由于南海 ITCZ 撤退较慢, 其上升区比孟加拉湾上升区偏北。

**关键词** 孟加拉湾西南季风, 南海热带季风, 季风建立, 季风环流, 季风降水

doi: 10. 6038/cjg20130103

中图分类号 P732

收稿日期 2012-02-14, 2012-11-04 收修定稿

### Comparison of climate features between the Southwest Summer Monsoon of the Bay of Bengal and the South China Sea Summer Monsoon

LI Ting<sup>1</sup>, JU Jian-Hua<sup>2\*</sup>

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Yunnan Meteorological Administration, Kunming 650034, China

**Abstract** Adopting NCAR/NCEP reanalysis data and APHRO\_MA\_V1003R1 precipitation data, this paper compares and analyzes the similarities and differences of climate features and impacts on precipitation distribution between the Southwest Summer Monsoon (SSM) of Bay of Bengal (BOB) and the South China Sea Summer Monsoon (SCSSM). The results show that: (1)

**基金项目** 灾害天气国家重点实验室开放课题(2012LASW-A02)、公益性行业专项(气象)(GYHY201306022, 201006023)和中国科学院南海海洋研究所开放课题(LTO1203)共同资助。

**作者简介** 李汀, 女, 1981年生, 博士后, 研究方向: 季节内振荡、季风和海气相互作用。E-mail: iamtingtingting@126.com

\* **通讯作者** 琚建华, 男, 1956年生, 博士, 教授, 主要研究方向为全球气候变化和热带季风。E-mail: jujh@cma.gov.cn

Compared with SCSSM, the SSM of BOB establishes earlier and more intense, drives more northward, and its duration is longer. (2) The SSM of BOB establishes slowly because the Somali cross-equatorial flow is strengthened slowly and the Tropical Indian ITCZ (Inter-Tropical Convergence Zone) moves northward gradually. Whereas the SCSSM establishes quickly because of one time replacing process of East Asia Trough with sudden eastward enhancement of Western Pacific Subtropical High (WPSH) and sudden northward jump of Tropical Western Pacific ITCZ. (3) The zonal characteristics of BOB is stronger, and the main variation after monsoon establishment is the southwest wind strength; but the meridional characteristics of SCSSM are stronger, reversal of wind direction exists after monsoon establishment, and the southeast wind is replaced quickly by southwest wind because of eastward enhancement of WPSH. (4) The enhancement of SSM of BOB is quick while that of SCSSM is slow. (5) According to the monsoon process, Summer Monsoon (SM) period is divided into following stages: development (May), strengthening (June–August), and declining (September–October). In different periods, the development and movement of active convection areas, the positions of monsoon runs through and the corresponding precipitation areas have obvious differences. (6) In the SM period, monsoon meridional sub-circulations exist along the longitudes of BOB and SCS, respectively, which are distributed on south and north sides symmetrically, caused by northward movement of ITCZ, and ascend in the active convection region of monsoon trough and descends on south and north sides. Because of strong heat sources of BOB and the Tibetan Plateau, the meridional ascending span region of BOB is wider with north descending region north of the Plateau, while the descending region of SCS is more southerly. The meridional circulation of BOB is more stable and the meridional circulation of SCS swings in meridional direction is more obvious. The ascending center region of BOB is more northerly than that of SCS. In the decreasing period of SM, the ascending center region of BOB is more southerly than that of SCS, because ITCZ of SCS enhances slowly.

**Keywords** Southwest Summer Monsoon (SSM) of Bay of Bengal (BOB), South China Sea Summer Monsoon (SCSSM), Onset of monsoon, Monsoon circulation, Monsoon precipitation

## 1 引言

全世界有 60% 以上的人口生活在季风区<sup>[1]</sup>, 季风对于人们的影响不言而喻. 亚洲夏季风是全球季风最活跃和最重要的成员, 其变化不仅受到季风经典定义中海陆热力差异的影响, 还受到南北半球和东西半球之间热力差异的影响, 这也正是其复杂之处. 近几十年来对季风的研究<sup>[2]</sup>表明, 亚洲夏季风可分为两个独立的子系统, 即东亚夏季风和印度夏季风(或称为南亚夏季风), 两者存在诸多差异, 如琚建华等<sup>[3]</sup>指出东亚夏季风的热源在南海和西太平洋, 而印度夏季风的热源则在青藏高原和孟加拉湾. Wu 等<sup>[4]</sup>和 Liu 等<sup>[5]</sup>也证实了这一观点.

南海热带季风是东亚夏季风中重要的组成部

分, 也是东亚夏季风体系中最早建立的成员. 李崇银等<sup>[6-8]</sup>指出, 南海热带季风最基本的特征在于其建立的突发性及经向风分量的重要性, 在其爆发前后, 南亚和东南亚地区的对流层低层风场、高层位势高度场、大气湿度场和垂直运动场都发生显著变化, 西风加强和索马里越赤道气流对其有重要作用. 朱亚芬等<sup>[9]</sup>对比了降水、对流层低层风场、对流和对流层上部水汽亮温等不同指标, 揭示了南海夏季风特征. 谢安等<sup>[10]</sup>分析了南海夏季风期间水汽输送的特征. 陶诗言等<sup>[11]</sup>分析了南海夏季风对中国雨带演变特征的影响. 王启等<sup>[12]</sup>指出, 南海夏季风在 6 月的连续跃升对应江淮流域梅雨季节的降水, 而 7 月下旬的连续跃升则对应华南晚汛期和华北雨季的开始, 9 月后南海夏季风开始连续突降则标志着夏季风撤出中国大陆. 吴尚森等<sup>[13]</sup>统计了 4 种南海夏季风强度

指数与我国汛期降水和雨带类型之间的关系。

孟加拉湾西南季风可视为南亚季风系统的一部分,因此南亚夏季风也常称为西南季风。研究表明<sup>[14]</sup>,与南海和阿拉伯海相比,孟加拉湾的纬向西风(或西南风)不仅出现最早,并且在整个夏季风期间存在最大西南风速中心。刘屹岷<sup>[15-16]</sup>等指出了孟加拉湾西南季风的爆发与南海夏季风的爆发之间存在的物理联系,孟加拉湾季风气旋所释放出的凝结潜热有助于副热带高压撤出南海地区和南海夏季风的建立。段安民等<sup>[17]</sup>以季风区对流层中经向温度梯度来表征孟加拉湾西南季风的爆发,并对其进行了有效预测。Wu 等<sup>[18]</sup>研究了孟加拉湾季风爆发涡旋的形成和发展,指出孟加拉湾季风爆发与青藏高原—南亚海陆热力对比强迫下的孟加拉湾海气相互作用有关。

前人对亚洲夏季风的研究非常丰富,在此不再一一罗列。但就南亚季风系统而言,大多针对夏季(6—8月)印度季风爆发后的时段,而对于在初夏(5月)就爆发的孟加拉湾西南季风的研究有限。事实上孟加拉湾作为与中国西南地区最为接近的热带海洋地区,是我国西南地区乃至整个中国中东部水汽的主要来源地之一,其西南气流对于中国西南乃至华南等地降水和气候的作用不言而喻<sup>[19-20]</sup>。因此,研究孟加拉湾季风活动及其对降水的影响,对中国南部汛期的短期气候预测具有重要意义。本文对比分析了孟加拉湾西南季风和南海热带季风在爆发、推进、强度和持续期方面的异同以及在季风不同阶段的对流、环流形势,以期反映亚洲季风体系中各季风子系统之间的既独立又联系的特征。

## 2 资料和方法

本文采用 NCAR/NCEP 提供的 OLR、17 层风场( $u, v$ )和 12 层垂直速度场( $\omega$ )等逐日再分析资料<sup>[21]</sup>,水平分辨率均为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,时间范围为 1979 年 1 月 1 日—2008 年 12 月 31 日;日本气象厅人类自然与大气科学研究所提供的高分辨率亚洲降水及水资源评价资料(the Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources,即 APHRODITE)中亚季风区域(Monsoon Asia)的逐日降水数据 APHRO\_MA\_V1003R1<sup>[22]</sup>,水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,时间范围为 1979 年 1 月 1 日—2007 年 12 月 31 日。同时本文运用了合成分析、相关性分析及信

度检验等统计学方法。

## 3 季风的爆发、推进、强度与持续期

正如引言所述,东亚夏季风和南亚夏季风(也称印度季风)同属亚洲夏季风中的两个子系统,既有密切的联系又具有明显的独立性。从性质上来说,南亚夏季风属于典型的热带季风,而东亚夏季风受到热带海洋和中高纬度系统的共同影响,属于热带-副热带季风。孟加拉湾西南季风作为南亚夏季风的重要组成部分,南海热带季风作为东亚夏季风的重要组成部分,两者也存在着联系和差异。孟加拉湾西南季风主要受南半球马斯克林高压和印度次大陆南部西南越赤道气流的影响,由于其北侧受到巨大的青藏高原对北方冷空气的阻挡,相对而言比较简单;而南海热带季风则具有副热带季风的性质,同时受到印度洋西南气流、南海越赤道气流和副热带西太平洋副高的影响,特征更为复杂<sup>[23]</sup>。下面本文将首先从季风的爆发、强度和持续期的角度来对两者进行气候特征方面的比较。

季风的爆发时间是季风演变过程研究中的一个重要内容。在过去的研究中用于衡量季风爆发的标准不一而同,有的侧重于降水突增,有的侧重于对流加剧,有的侧重于环流突变(如盛行风的转向等),还有的综合考虑了环流场和加热场的双重因素等<sup>[24-31]</sup>。对于亚洲夏季风的爆发还存在一些争议,到底是南海夏季风先爆发<sup>[11]</sup>,还是孟加拉湾西南夏季风先爆发<sup>[6,32]</sup>,或者是孟加拉湾、中南半岛和南海夏季风同时爆发<sup>[33]</sup>,这一问题目前尚未达成共识。就孟加拉湾西南季风和南海热带季风而言,季风槽的建立是季风爆发的重要标志,因此对流层低层(850 hPa)西南风常被作为一个有效指标。图 1 是 1979—2008 年合成的孟加拉湾(图中记为 BOB,即 the Bay of Bengal,实线)和南海(图中记为 SCS,即 the South China Sea,扭线)850 hPa 上全风速在西南方向上的投影<sup>[34]</sup>(后简称为“西南风”)的逐日变化。其中孟加拉湾和南海的区域分别取为( $10^\circ\text{N}$ — $20^\circ\text{N}$ ,  $85^\circ\text{E}$ — $95^\circ\text{E}$ )和( $10^\circ\text{N}$ — $20^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{E}$ — $120^\circ\text{E}$ ),西南风  $v_{\text{sw}} = (u+v)/\sqrt{2}$ 。如图所示,在气候平均状态下,孟加拉湾从 4 月 8 日左右开始全境内转向为西南风,持续到 10 月 20 日左右结束;而南海则从 5 月 5 日左右才开始全境内转向为西南风,比孟加拉湾推迟约 1 个月,且仅持续到 9 月 24 日左右结束(比孟加拉湾提前约 1 个月结束),即孟加拉湾盛行西南风的持续

时间比南海延长约 2 个月. 同时孟加拉湾西南风的强度在整个夏季风期都比南海大大增强.

季风槽建立时, 除对流层低层盛行西南风外, 大范围深对流出现也是一个重要标志, OLR 资料可以很好反映对流的活跃程度,  $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  常被作为对流活跃(或称对流性积云多发区)的标准<sup>[35]</sup>. 图 2 是 1979—2008 年合成孟加拉湾(实线)和南海(扭线)平均 OLR 的逐日变化(单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 图中虚线为  $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . 如图, 孟加拉湾从 4 月 22 日起对流显著加强(平均 OLR 急剧下降), 5 月 10 日左右后进入对流活跃期(平均  $\text{OLR} < 235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 10 月 18 日后对流不再活跃(平均  $\text{OLR} > 235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ); 而南海则从 5 月 7 日起对流才显著加强, 5 月 14 日左右后进入对流活跃期, 均比孟加拉湾有所推迟, 而对流不再活跃的时间则与孟加拉湾比较一致. 同时, 与南海相比, 孟加拉湾对流的强度也明显偏强.

图 3 是 1979—2008 年合成 850 hPa 矢量风分别沿  $10^{\circ}\text{N}—20^{\circ}\text{N}$  (a)、 $85^{\circ}\text{E}—95^{\circ}\text{E}$  (b) 和  $110^{\circ}\text{E}—120^{\circ}\text{E}$  (c) 剖面的演变图, 其中阴影区是 850 hPa 西南风  $> 0$  的区域(其大小详见图例). 如图所示, 在  $10^{\circ}\text{N}—20^{\circ}\text{N}$  纬带上, 有三个明显的西南风最强区, 分别在阿拉伯海、孟加拉湾和南海, 分别对应了印度季风、孟加拉湾西南季风和南海热带季风在海上的

活动区域(或者说季风槽的位置). 在中南半岛, 自冬季开始就具有偏南风, 这是由于其东部的南海高压南侧的东风与热带印度洋的赤道西风在中南半岛汇合, 产生偏北气流沿中南半岛大陆桥北传, 因此较早出现偏南气流. 有研究表明, 这种偏南气流的出现与青藏高原地形的动力强迫作用有关<sup>[36]</sup>. 就孟加拉湾而言, 在 4 月以前都为东北风, 4 月第 5 候后开始出现弱的偏南风分量(此时主要是受印度大陆北部中纬度西风带的影响), 后逐渐向东扩张并加强, 随着印度洋越赤道气流的加强, 到 5 月第 2 候左右后孟加拉湾全境西南风加强, 孟加拉湾西南季风爆发, 至 10 月第 5 候时西南风消失, 转为偏东风; 就南海而言, 在 5 月第 1 候以前受强大的副热带高压控制, 南海都为偏东风, 5 月第 1 候时南海西部开始出现偏西风分量, 西南暖湿气流开始侵入南海地区, 5 月第 3 候时南海季风槽建立, 南海全境为西南风, 南海热带季风爆发, 直至 10 月第 1 候消失, 转为偏东风. 孟加拉湾和南海西南风在爆发时间、强度和持续时间上的差距与图 1 的结果一致. 同时也可看出, 孟加拉湾西南风的纬向分量较强, 而南海西南风则经向分量较强; 另外, 孟加拉湾西南风的产生和发展较为缓慢, 没有明显的风向逆转分界, 而南海则是偏东风突然被强大的西南风所取代, 因此这种对流层低层

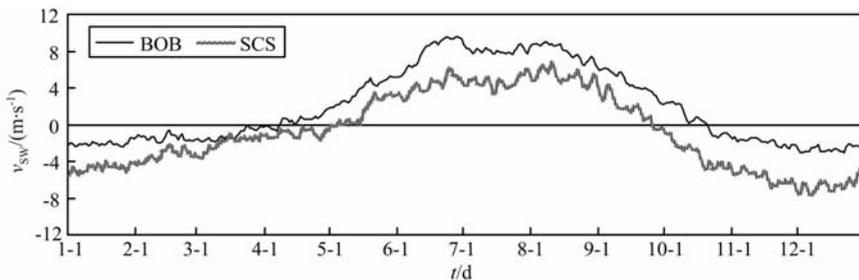


图 1 1979—2008 年合成孟加拉湾(BOB,  $10^{\circ}\text{N}—20^{\circ}\text{N}$ ,  $85^{\circ}\text{E}—95^{\circ}\text{E}$ , 实线)和南海(SCS,  $10^{\circ}\text{N}—20^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}—120^{\circ}\text{E}$ , 扭线)平均 850 hPa 西南风的逐日变化

Fig. 1 Daily variations of 850 hPa southwest wind averaged respectively in BOB ( $10^{\circ}\text{N}—20^{\circ}\text{N}$ ,  $85^{\circ}\text{E}—95^{\circ}\text{E}$ , solid line) and SCS ( $10^{\circ}\text{N}—20^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}—120^{\circ}\text{E}$ , twisting line) during 1979—2008

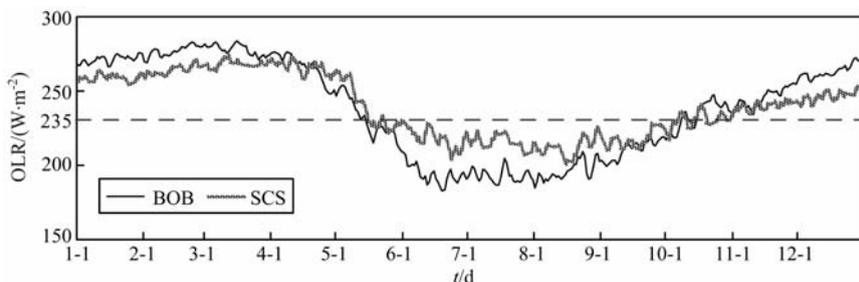


图 2 1979—2008 年合成孟加拉湾(实线)和南海(扭线)平均 OLR 的逐日变化

Fig. 2 Daily variations of OLR averaged respectively in BOB (solid line) and SCS (twisting line) during 1979—2008

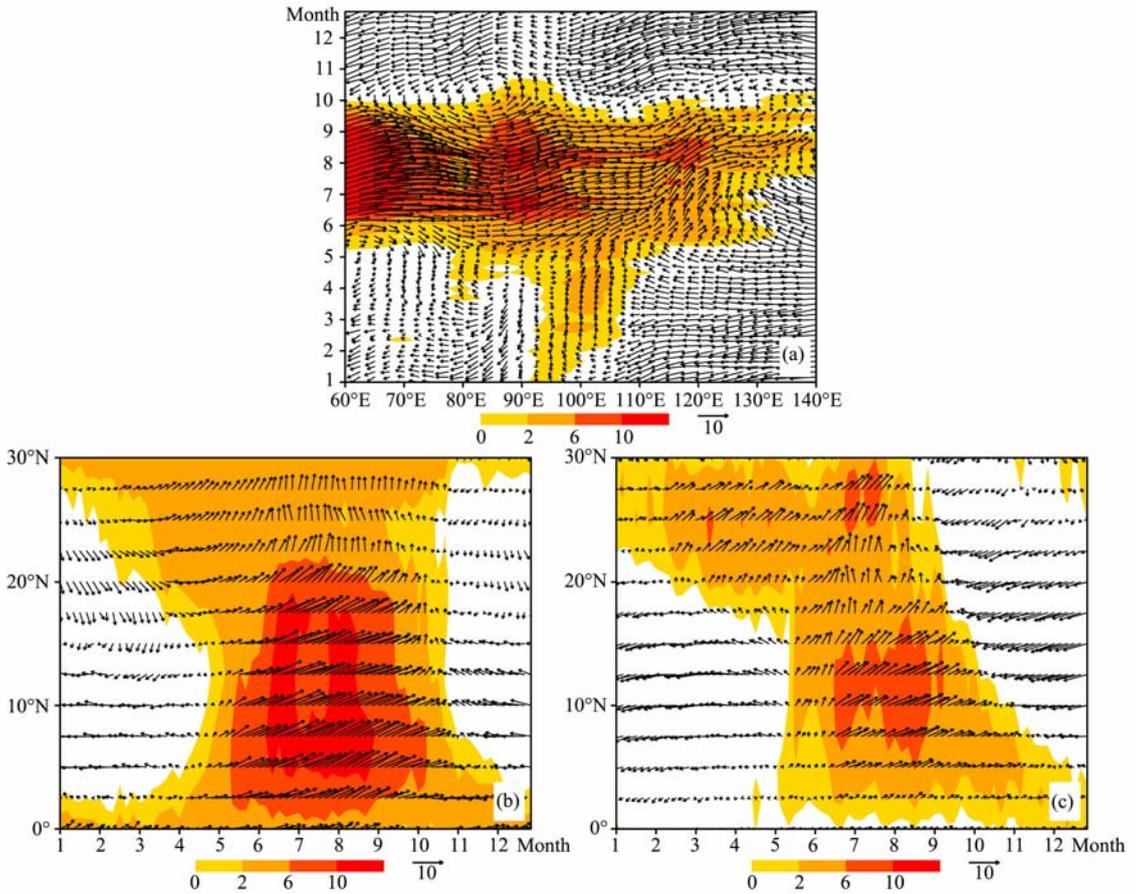


图3 1979—2008年合成850 hPa矢量风分别沿10°N—20°N (a)、85°E—95°E (b)和110°E—120°E (c)剖面的演变图(单位:m/s),其中阴影区是850 hPa西南风>0的区域

Fig. 3 Evolution of 850 hPa wind (unit:m/s) respectively along 10°N—20°N (a), 85°E—95°E (b) and 110°E—120°E (c) during 1979—2008. The shaded area is the region of 850 hPa southwest wind > 0

风向的突然逆转也常被作为南海季风爆发的标志.在图中还能看出,阿拉伯海在5月第3候出现了偏西风分量,随着索马里越赤道气流的加强,在6月第2候以后印度半岛上来的西北风被暖湿的西南风所取代,印度季风槽建立,印度夏季风爆发,并且西南风强度为亚洲该纬带上最强,持续到10月第1候时突然被偏北风切断,西南风的撤退很快.在图3b和3c中,孟加拉湾和南海西南风的演变过程的差异更加明显,孟加拉湾西南风自春季起随着印度洋越赤道气流的加强而从热带地区逐渐向北推进,而南海西南风则是在5月第2候时突然北跳,这与东亚大槽的一次替换过程和西太平洋副高的东撤相联系;同时,孟加拉湾西南风的向北推进可北至副热带25°N附近,而南海西南风的北进仅在20°N以南;另外,孟加拉湾西南风的撤退较快,从10月第5候后几乎是全境内迅速同时消失,而南海西南风则撤退较慢,从9月第2候后就开始南撤,直至10月第5候后才全面撤出南海地区.

图4是1979—2008年合成OLR分别沿10°N—20°N (a)、85°E—95°E (b)和110°E—120°E (c)剖面的演变图.如图所示,在10°N—20°N纬带上,对流活跃区最早于4月下旬出现在印尼群岛附近,但强度并不是最高.5月第2候左右在孟加拉湾东部对流开始活跃,并在5月中旬就形成了亚洲这一纬带上对流最强的区域,持续到10月中旬左右结束.有资料表明<sup>[37-38]</sup>,孟加拉湾东北部是全球热源最强中心,并且也是南亚季风的主要形成机制.在青藏高原南侧,由于南风分量受地形抬升作用而导致大量潜热释放,形成了孟加拉湾热源,因此这里对流也是最强的.在5月第3候左右南海大气热源中心形成<sup>[3-4]</sup>,对流开始活跃,南海季风槽建立,其强度缓慢加强,7月中旬后在亚洲这一纬带上为第二活跃的对流区,9月中旬后开始逐渐缓慢减弱,可持续到冬季.而阿拉伯海地区的对流则从6月才开始活跃,这标志着印度季风槽的建立和印度季风的爆发,其对流强度较弱,且集中在阿拉伯海东部地区,并逐渐向

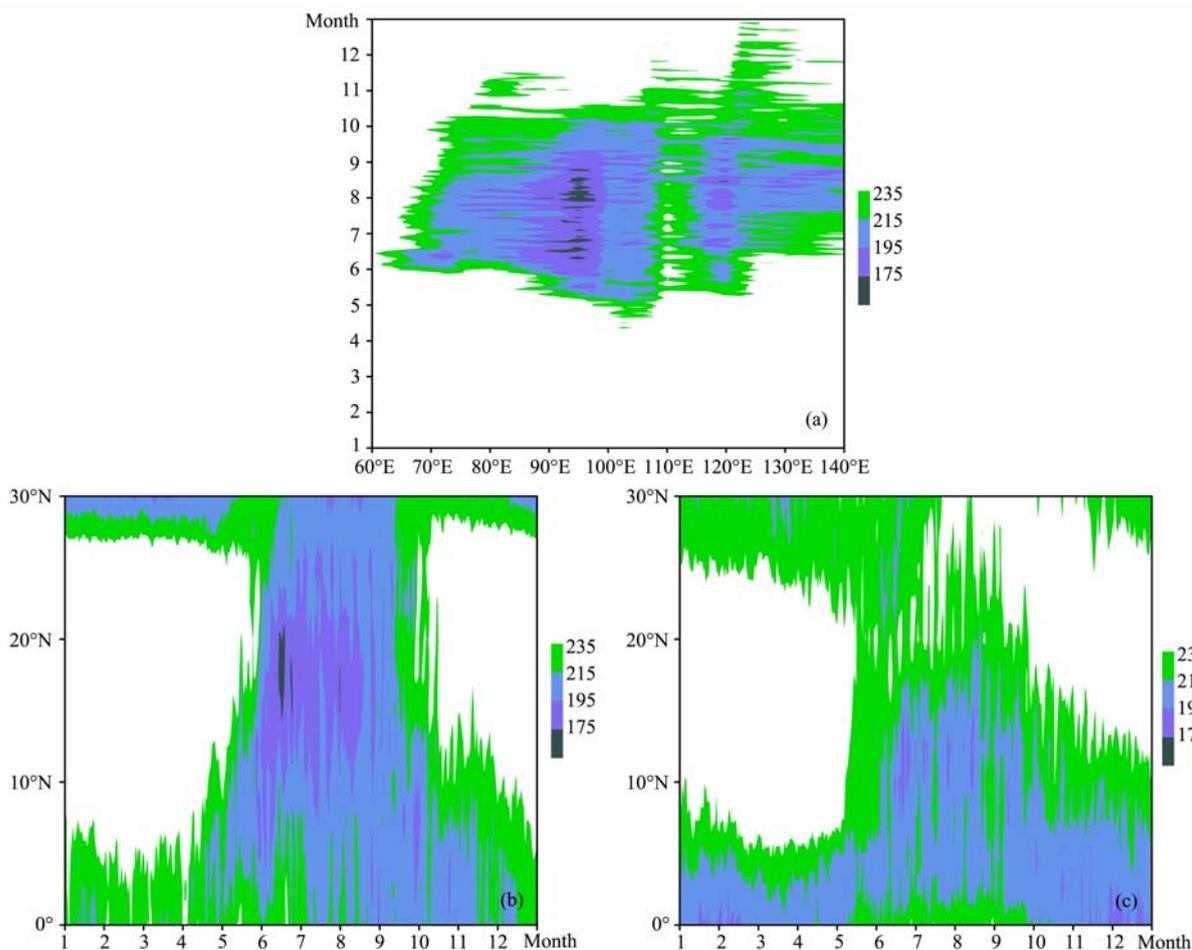


图4 1979—2008年合成 OLR 分别沿  $10^{\circ}N-20^{\circ}N$  (a)、 $85^{\circ}E-95^{\circ}E$  (b)和  $110^{\circ}E-120^{\circ}E$  (c)剖面的演变图(单位:  $W \cdot m^{-2}$ )  
Fig.4 Evolution of OLR (unit:  $W \cdot m^{-2}$ ) respectively along  $10^{\circ}N-20^{\circ}N$  (a),  $85^{\circ}E-95^{\circ}E$  (b) and  $110^{\circ}E-120^{\circ}E$  (c) during 1979–2008

东减弱收缩,在10月初就不再活跃。从图4b和4c的对比来看,孟加拉湾对流的活跃是个逐渐北进的过程,当地ITCZ(赤道辐合带)从4月上旬到6月初近两个月时间才从印度洋热带缓慢向北推进到孟加拉湾北部地区,而在南海则是在5月第2—3候时从菲律宾群岛以南的热带西太平洋地区突然北跳到南海,这与ITCZ春末夏初从热带向南海的突然北跳相联系;同时,孟加拉湾的对流比南海活跃,且可北至副热带地区,而南海则强度较弱,活跃区偏南,集中在 $20^{\circ}N$ 以南地区;另外,孟加拉湾对流活跃区的南撤较为迅速,10月初开始减弱撤退,10月中旬后在孟加拉湾南部有一个短暂的回升,11月后对流活跃区就基本消失,而在南海的对流撤退则较为缓慢,从10月初到12月末才全面撤出南海南部。

通过上述分析可以看出:第一,就季风的爆发、演变、持续和强度而言,无论我们选择的标准是对流还是对流层低层环流,其归根结底都着眼于季风槽。以不同标准确定出来的季风爆发时间会有差异,但总的来说,孟加拉湾西南季风的爆发比南海季风早、

强度比南海季风更强、持续时间比南海季风更久、向北推进比南海季风更北。第二,孟加拉湾西南季风的建立,主要是索马里越赤道西南气流的逐渐加剧和热带印度洋ITCZ的逐渐北移,因此其建立过程较为缓慢;而南海季风的建立,主要由于西太平洋副高突然东撤和热带西太平洋ITCZ突然北跳,因此其建立过程比较迅速。第三,孟加拉湾西南风的纬向分量较强,其季风建立前后的主要变化在于偏西风的强度;而南海西南风的经向分量较强,季风建立前后存在风向的突然逆转,偏东风由于副高东撤而迅速被强大的西南风取代。第四,孟加拉湾西南季风的撤退较快,而南海季风则撤退较慢。

#### 4 季风各个阶段的环流、对流形势和降水分布

根据3节中对于孟加拉湾西南季风和南海季风爆发和推进的分析,我们对季风阶段做出如下划分:

5—10 月为夏季风期,其中 5 月为季风发展期,6—8 月为季风强盛期,9—10 月为季风减退期. 下面我们对各个阶段的环流、对流形势和降水分布做出分析.

图 5 是 1979—2008 年在 5 月(a1、b1)、6—8 月(a2、b2)和 9—10 月(a3、b3)分别合成的 OLR(单位: $W \cdot m^{-2}$ )和 850 hPa 矢量风(单位:m/s)(a1— a3)以及逐日降水量(单位:mm/d)(b1—b3). 由于日本 APHRO\_MA\_V1003R1 降水资料仅到 2007 年,因此降水数据的合成只有 29 年,下同. 如图所示,5 月(季风开始期)时,对流活跃区主要位于中南半岛、孟加拉湾东南和热带东印度洋—印尼群岛一带,且西南风已经出现,向中南半岛等地输送暖湿气流,因此这些地区降水为正距平;在孟加拉湾北部偏西已经出现了两侧风向的转折,表明此处开始西南季风槽的初步建立(季风槽为东西向,南侧为偏西风,北侧为偏东风),通常槽前为上升气流,因此在孟加拉湾北部也出现了降水的显著正距平;此时副高已撤出南海地区,反气旋环流随之东撤到  $20^{\circ}N$  附

近的西太平洋上,南海地区为偏南风,加上来自热带印度洋的西南暖湿气流已经北上到了华南和中国东部,因此在这些地区也形成了降水正距平. 到 6—8 月(季风强盛期),对流活跃区显著加强,并北上到了  $10^{\circ}N-20^{\circ}N$ ,对流中心分别位于孟加拉湾东部和南海东部,这表明 ITCZ 已经从热带北抬到了上述地区,这种强对流也同时对应着西南季风槽和南海季风槽(或者说孟加拉湾季风低压和南海季风低压)的位置. 亚洲地区形成了两条明显的水汽通道,一条是强大的索马里越赤道气流,可达中南半岛,其途经的印度半岛和中南半岛等地都为降水正距平,尤其以印度半岛西岸、中南半岛西岸和孟加拉湾北部最显著. 同时在印尼群岛以东也出现热带西太平洋的越赤道气流的汇入,可越过南海地区到达中国东部,中国东部、华南等地具有明显降水. 在 9—10 月(季风减退期),ITCZ 已回撤到热带地区,对流活跃区南撤到印尼群岛以西的热带印度洋一带,季风区内西南风大为减弱,降水明显减少,孟加拉湾低压和南海

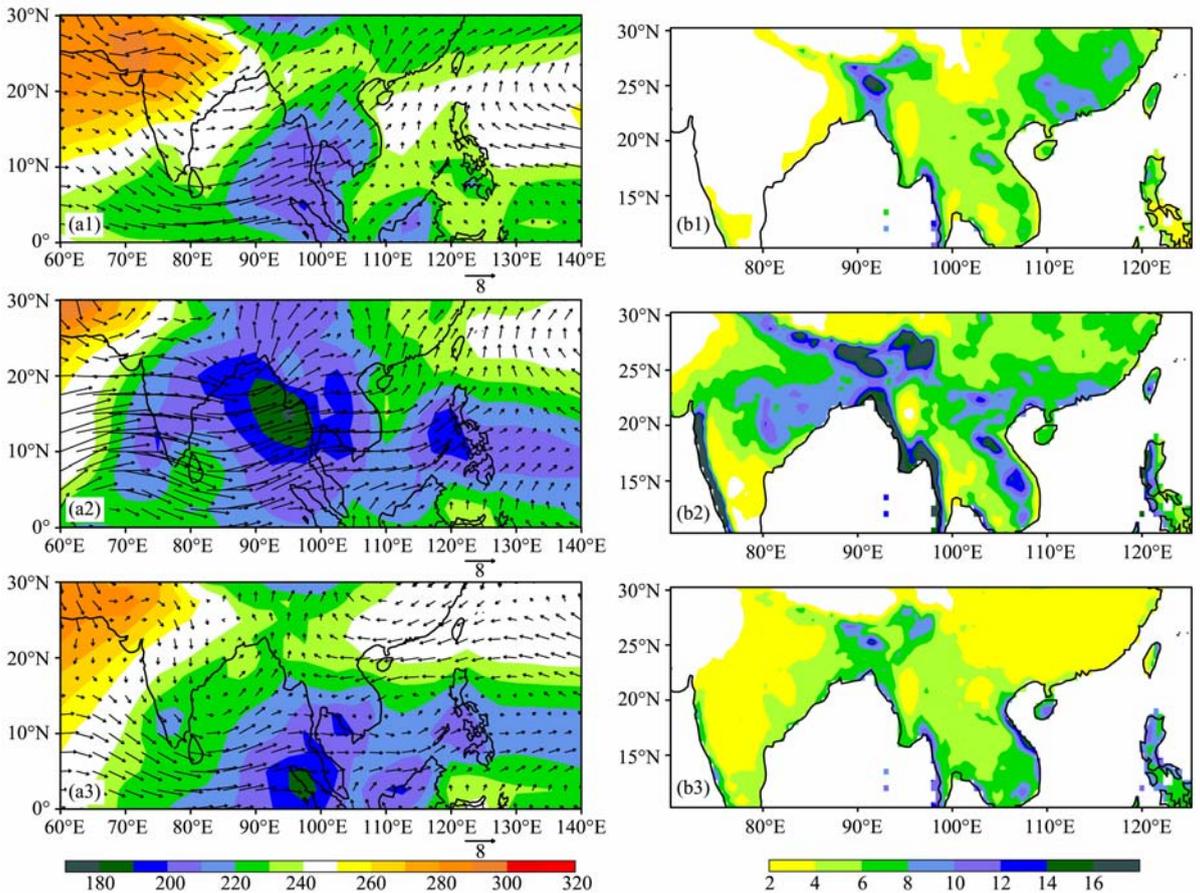


图 5 1979—2008 年在 5 月(a1、b1)、6—8 月(a2、b2)和 9—10 月(a3、b3)分别合成的 OLR(单位: $W \cdot m^{-2}$ )和 850 hPa 矢量风(单位:m/s)(a1— a3)以及逐日降水量(单位:mm/d)(b1—b3)

Fig. 5 OLR (unit:  $W \cdot m^{-2}$ ) and 850 hPa wind (unit: m/s) (a1— a3) and daily precipitation (unit: mm/d) (b1—b3) averaged respectively in May (a1, b1), Jun—Aug (a2, b2) and Sep—Oct (a3, b3) during 1979—2008

低压还有弱的存在,在孟加拉湾北部和南海还有弱的气旋性环流,孟加拉湾东南和南海南部还留有正在撤退的西南风,因此孟加拉湾北部、东岸和南海两岸还有显著降水。

为了能更好地体现孟加拉湾季风和南海季风的三维垂直结构特征,我们给出 1979—2008 年在 5 月

(a1、b1)、6—8 月 (a2、b2) 和 9—10 月 (a3、b3) 分别合成的沿 85°E—95°E (a1— a3) 和 110°E—120°E (b1—b3) 的垂直剖面上的流线图 (图 6)。如图所示, 5 月 (季风开始期) 时, 孟加拉湾和南海经度上都分别形成了垂直环流圈, 孟加拉湾经度上在 10°N 以南有一个在热带上升、在南半球 15°S 以下下沉的

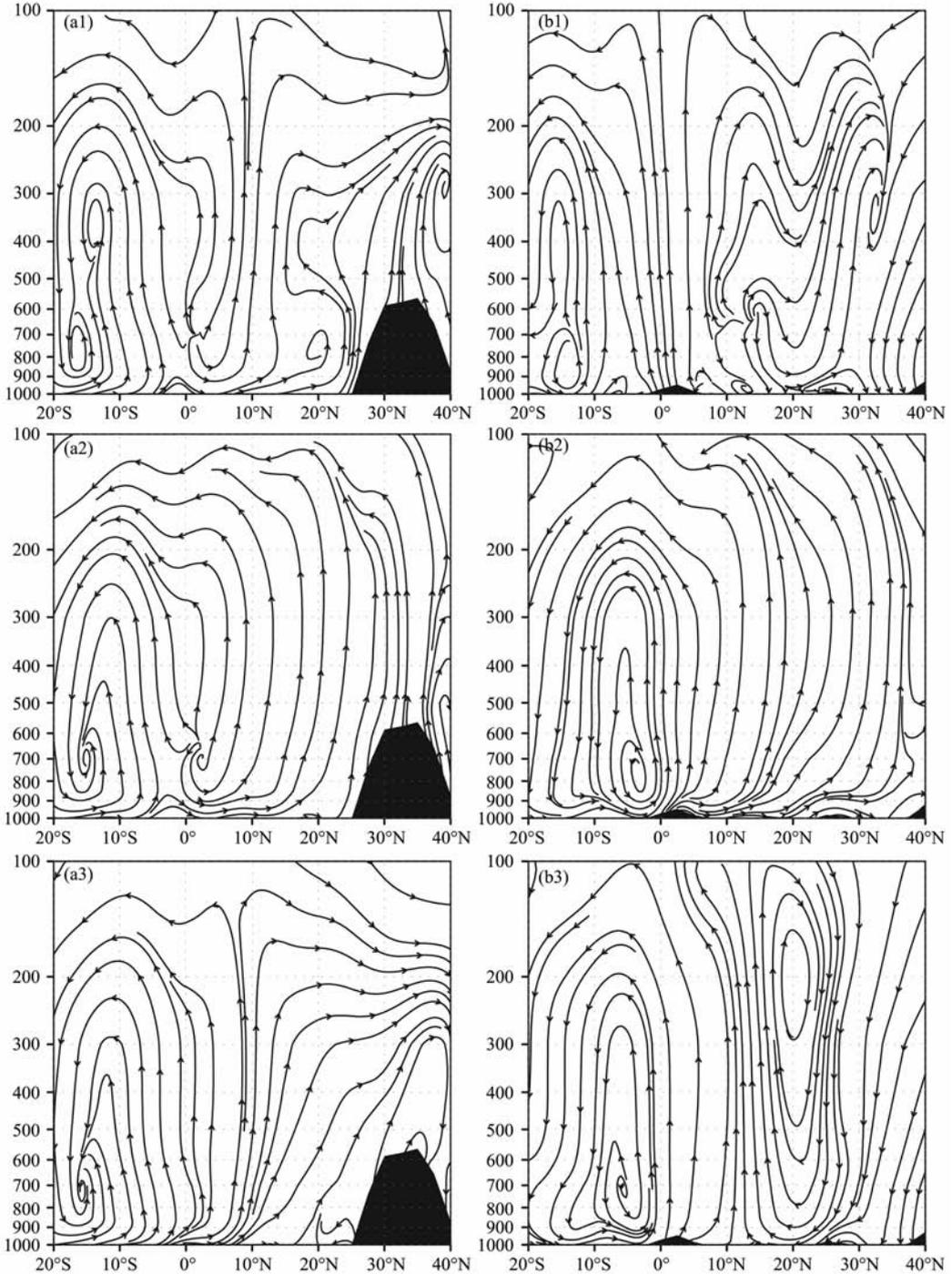


图 6 1979—2008 年在 5 月 (a1、b1)、6—8 月 (a2、b2) 和 9—10 月 (a3、b3) 分别合成的沿 85°E—95°E (a1— a3) 和 110°E—120°E (b1—b3) 的垂直剖面上的流线图

Fig. 6 Streams on vertical profiles respectively along 85°E—95°E (a1— a3) and 110°E—120°E (b1—b3) averaged in May (a1, b1), Jun—Aug (a2, b2) and Sep—Oct (a3, b3) during 1979—2008

经圈环流,在  $10^{\circ}\text{N}$  以北由于孟加拉湾东部热源和青藏高原巨大热源的存在,也为上升区;在南海经度上,经圈环流具有南北对称性, $15^{\circ}\text{S}$ — $15^{\circ}\text{N}$  的对流上升经高空辐散后分别在南侧的南半球副热带和北侧的华北地区下沉,这与琚建华等<sup>[3]</sup>分析的结果一致.6—8月(季风强盛期)时,由于对流活跃区加强并北抬到了孟加拉湾和南海地区,因此两地经圈环流的上升区也相应扩大并北移.孟加拉湾经度上,从南半球热带地区到青藏高原北部都为强大的上升气流,并在南半球  $15^{\circ}\text{S}$  以南下沉;在南海经度上,赤道以北都为上升气流,而在赤道以南下沉.9—10月(季风结束期)时,由于对流活跃区的减弱和南撤,经圈环流也相应地范围减小并南移,孟加拉湾经度上  $10^{\circ}\text{S}$ —青藏高原中部仍为上升区,经高空辐散后分别在南半球和青藏高原南侧下沉;在南海经度上, $5^{\circ}\text{N}$  南北两侧的经圈环流对称性很好,华南以北都为北侧经圈环流的下沉区.

从上述分析可知,首先,孟加拉湾和南海经度上在夏季风期内都存在着南北侧对称分布的经圈环流,但由于孟加拉湾和青藏高原强大热源的存在,一方面,孟加拉湾经圈环流上升区的南北向跨度比南海的更大,北侧下沉区通常在高原以北(图略),而南海的下沉区则相对偏南;另一方面,孟加拉湾经圈环流也比南海更加稳定,南海经圈环流的南北摆动更明显.其次,正如上文所述,在季风开始期和强盛期,热带东印度洋 ITCZ 的位置比热带西太平洋 ITCZ 偏北,孟加拉湾以南对流活跃区和上升中心区的位置也比南海以南对流活跃区和上升中心区偏北;在季风结束期时,由于南海 ITCZ 撤退较慢,因此上升中心区比孟加拉湾的偏北.需要指出的是,这里所说的经圈环流并不是 Hadley 环流, Hadley 环流本质上是一种热力环流,在赤道附近上升而在其南北两侧的副热带下沉;而经圈环流本质上是由于 ITCZ 北抬引起的次级经向环流,在季风槽对流活跃区上升而在南北两侧下沉,一般称为季风经向环流.另外,孟加拉湾的垂直速度比南海的更大(图略),在季风开始期和强盛期时尤其明显,这说明孟加拉湾的季风环流强度相对要更加强大,其对流也比南海更加活跃,这也与上文的分析结果相符.

## 5 结论和讨论

本文采用 NCAR/NCEP 提供的 OLR、风场和垂直速度资料和日本 APHRO\_MA\_V1003R1 降水

资料,分析了孟加拉湾西南季风和南海热带季风的气候特征异同以及对降水分布的影响.

总的来说,孟加拉湾西南季风比南海热带季风爆发更早、强度更强、持续时间更长、向北推进更北.孟加拉湾西南季风建立过程缓慢,主要是索马里越赤道西南气流的逐渐加剧和热带印度洋 ITCZ 的逐渐北移;而南海热带季风建立过程迅速,主要是东亚大槽的一次替换过程伴随西太平洋副高突然东撤和热带西太平洋 ITCZ 突然北跳.孟加拉湾西南风的纬向分量较强,季风建立后的主要变化在于偏西风的强度;而南海西南风的经向分量较强,季风建立后风向突然逆转,偏东风由于副高东撤而迅速被强大的西南风取代.另外,孟加拉湾西南季风的撤退较快,而南海季风则撤退较慢.

根据季风进程将夏季风期划分为季风发展期(5月)、强盛期(6—8月)和减退期(9—10月).季风开始期时,对流活跃区(ITCZ)主要位于热带东印度洋附近,西南季风槽初步建立,中南半岛、孟加拉湾北部、华南和中国东部为降水正距平.季风强盛期时,对流活跃中心加强并北上到孟加拉湾东部和南海东部,对应西南季风槽(孟加拉湾季风低压)和南海季风槽(南海季风低压)的位置.亚洲地区形成了两条明显的水汽通道,强大的索马里越赤道气流可达中南半岛,同时出现热带西太平洋越赤道气流的汇入,其途经的印度半岛、中南半岛、中国东部和华南等地具有明显降水.季风减退期时,随着对流活跃区回撤到热带,季风区内西南风减弱,降水明显减少.

在夏季风期内,孟加拉湾和南海都存在南北侧对称分布的经圈环流,这是由于 ITCZ 北抬引起的季风经向次级环流,在季风槽对流活跃区上升而在南北两侧下沉.由于孟加拉湾和青藏高原强大热源的存在,孟加拉湾上升区的南北跨度比南海的更大,北侧下沉区通常在高原以北,而南海的下沉区则相对偏南;孟加拉湾经圈环流更加稳定,而南海经圈环流的南北摆动更明显.由于 ITCZ 在热带东印度洋比在热带西太平洋的偏北,孟加拉湾上升区也比南海的偏北.季风结束期时,由于南海 ITCZ 撤退较慢,其上升区比孟加拉湾上升区偏北.

本文侧重于对比孟加拉湾西南季风和南海热带季风的气候特征异同,对于反映亚洲夏季风两个子系统间既联系又独立的特征具有一定意义,但限于篇幅,对产生这种气候特征异同的原因未作更全面的探讨.例如孟加拉湾西南季风比南海热带季风的爆发更早、强度更强、持续时间更长、向北推进

更北,这是否与它们的热源差异和季风性质差异有关? 类似问题还有待于今后工作的继续探索。

**致谢** 本文所使用的 OLR、矢量风、垂直速度和降水数据分别来自于 NACR/NCEP 和日本气象厅的无偿提供,同时两位匿名审稿专家和《地球物理学报》编辑对本文提出了宝贵的意见和建议,特此表示感谢!

### 参考文献 (References)

- [1] 江爱良. 全球变化与亚洲季风. 第四纪研究, 1995, (3): 232-242.  
Jiang A L. Global change and Asian monsoon. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1995, (3): 232-242.
- [2] He J H, Ju J H, Wen Z P, et al. A review of recent advances in research on Asian monsoon in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6): 972-992.
- [3] 据建华, 罗会邦. 一九八一年初夏东南亚地区大气热源结构及其对经向环流的影响. 热带气象学报, 1986, 2(2): 99-108.  
Ju J H, Luo H B. The structures of the atmospheric heat sources and the influences of the heat sources on the meridional circulation over south-east Asia in the early summer of 1981. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1986, 2(2): 99-108.
- [4] Wu G X, Zhang Y S. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over south Asia and the south China sea. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126(4): 913-927.
- [5] Liu Y M, Chan J C L, Mao J Y, et al. The role of Bay of Bengal convection in the onset of the 1998 South China Sea Summer Monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, 130(11): 2731-2744.
- [6] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 1999, 23(3): 257-266.  
Li C Y, Zhang L P. Summer monsoon activities in the South China Sea and its impacts. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1999, 23(3): 257-266.
- [7] 李崇银, 吴静波. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用. 大气科学, 2002, 26(2): 185-192.  
Li C Y, Wu J B. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 26(2): 185-192.
- [8] 李崇银, 屈昕. 伴随南海夏季风爆发的大尺度大气环流演变. 大气科学, 2000, 24(1): 1-14  
Li C Y, Qu X. Large scale atmospheric circulation evolutions associated with summer monsoon onset in the South China Sea. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, 24(1): 1-14.
- [9] 朱亚芬, 李弋林, 钱维宏. 不同资料揭示南海夏季风爆发特征的比较. 热带气象学报, 2001, 17(1): 34-44.  
Zhu Y F, Li G L, Qian W H. Comparison of the SCS summer monsoon onset-characteristics derived from different datasets. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, 17(1): 34-44.
- [10] 谢安, 宋焱云, 毛江玉等. 南海夏季风期间水汽输送的气候特征. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 425-434.  
Xie A, Song Y Y, Mao J Y, et al. Climatological characteristics of moisture transport during summer monsoon over South China Sea. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, 6(4): 425-434.
- [11] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. // *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 1987: 60-92.
- [12] 王启, 丁一汇. 南海夏季风演变的气候学特征. 气象学报, 1997, 55(4): 466-483.  
Wang Q, Ding Y H. Climatological aspects of evolution of summer monsoon over the northern South China Sea. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, 55(4): 466-483.
- [13] 吴尚森, 梁建茵, 李春晖. 南海夏季风强度与我国汛期降水的关系. 热带气象学报, 2003, 19(Z1): 25-36.  
Wu S S, Liang J Y, Li C H. Relationship between the intensity of South China Sea summer monsoon and the precipitation in raining seasons in China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, 19(Z1): 25-36.
- [14] 晏红明, 肖子牛, 杞明辉. 阿拉伯海和孟加拉湾夏季风气候特征的差异. 南京气象学院学报, 2003, 26(1): 96-101.  
Yan H M, Xiao Z N, Qi M H. Difference of climatic features between summer monsoon over Arabian Sea and Bay of Bengal. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, 26(1): 96-101.
- [15] 刘屹岷, 陈仲良, 毛江玉等. 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 I: 个例分析. 气象学报, 2003, 61(1): 1-9.  
Liu Y M, Chen Z L, Mao J Y, et al. Impacts of the onset of the Bay of Bengal monsoon on the onset of the South China Sea Monsoon. Part I: A case study. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 61(1): 1-9.
- [16] 刘屹岷, 陈仲良, 吴国雄. 孟加拉湾季风爆发对南海季风爆发的影响 II: 数值试验. 气象学报, 2003, 61(1): 10-19.  
Liu Y M, Chen Z L, Wu G X. Impacts of the onset of the Bay of Bengal monsoon on the onset of the South China Sea Monsoon. Part II: Numerical experiments. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 61(1): 10-19.
- [17] 段安民, 毛江玉, 吴国雄. 孟加拉湾季风爆发可预测性的分析和初步应用. 高原气象, 2004, 23(1): 18-25.  
Duan A M, Mao J Y, Wu G X. Predictability analysis and preliminary application of the Bay of Bengal summer monsoon onset. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, 23(1): 18-25.
- [18] Wu G X, Guan Y, Wang T M, et al. Vortex genesis over the Bay of Bengal in spring and its role in the onset of the Asian Summer Monsoon. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(1): 1-9.

- [19] 鲁亚斌, 解明恩, 谢三勇. 孟加拉湾水汽输送异常对云南 5 月降水的影响. 云南地理环境研究, 2004, 16(1): 19-24.  
Lu Y B, Xie M E, Xie S Y. Influence of the abnormal moisture transport at the Bay of Bengal on precipitation of Yunnan in May. *Yunnan Geographic Environment Research* (in Chinese), 2004, 16(1): 19-24.
- [20] 许晓林, 徐海明, 司东. 华南 6 月持续性致洪暴雨与孟加拉湾对流异常活跃的关系. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 463-471.  
Xu X L, Xu H M, Si D. Relationship between June sustained torrential rain in South China and anomalous convection over the Bay of Bengal. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, 30(4): 463-471.
- [21] Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K, et al. A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *SOLA, J-Stage*, 2009, 5: 137-140.
- [22] Murakami M. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area. *Mon. Wea. Rev.*, 1979, 107(8): 994-1013.
- [23] 潘静, 李崇银. 夏季南海季风槽与印度季风槽的气候特征之比较. 大气科学, 2006, 30(3): 377-390.  
Pan J, Li C Y. Comparison of climate characteristics between two summer monsoon troughs over the South China Sea and India. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, 30(3): 377-390.
- [24] Lau K M, Yang S. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, 14(2): 141-162.
- [25] 何金海, 徐海明, 周兵等. 关于南海夏季风建立的大尺度特征及其机制的讨论. 气候与环境研究, 2000, 5(4): 333-344.  
He J H, Xu H M, Zhou B, et al. Large scale features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2000, 5(4): 333-344.
- [26] Wang B, Lin H. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J. Climate*, 2002, 15(4): 386-398.
- [27] Matsumoto J. Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, 14(2): 231-245.
- [28] 谢安, 刘霞, 叶谦. 南海热带季风爆发特征及其指数. // 亚洲季风研究的新进展. 北京: 气象出版社, 1998: 132-142.  
Xie A, Liu X, Ye Q. The climatic characteristics of summer monsoon onset over South China Sea. // *The Recent Advances in Asian Monsoon Research* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998: 132-142.
- [29] 梁建茵, 吴尚森. 南海西南季风爆发日期及其影响因子. 大气科学, 2002, 26(6): 829-844.  
Liang J Y, Wu S S. A study of Southwest Monsoon onset date over the South China Sea and its impact factors. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 26(6): 829-844.
- [30] 朱敏, 张铭. 南亚夏季风爆发前后降水量时空变化特征. 热带气象学报, 2006, 22(2): 155-160.  
Zhu M, Zhang M. EOF expansion of precipitation during the Indian summer monsoon onset. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2006, 22(2): 155-160.
- [31] 阎俊岳. 南海西南季风爆发的气候特征. 气象学报, 1997, 55(2): 174-186.  
Yan J Y. Climatological characteristics on the onset of the South China Sea southwest monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, 55(2): 174-186.
- [32] 冯瑞权, 王安宇, 吴池盛等. 南海夏季风建立的气候特征 I——40 年平均. 热带气象学报, 2001, 17(4): 345-354.  
Feng R Q, Wang A Y, Wu C S, et al. Climatological features of the establishment of South China Sea Summer Monsoon I——40-year mean. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, 17(4): 345-354.
- [33] 钱永甫, 江静, 张艳等. 亚洲热带夏季风的首发地区和机理研究. 气象学报, 2004, 62(2): 129-139.  
Qian Y F, Jiang J, Zhang Y, et al. The earliest onset area of the tropical Asian Summer Monsoon and its mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, 62(2): 129-139.
- [34] 据建华, 钱诚, 曹杰. 东亚夏季风的季节内振荡研究. 大气科学, 2005, 29(2): 187-194.  
Ju J H, Qian C, Cao J. The intraseasonal oscillation of East Asian Summer Monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, 29(2): 187-194.
- [35] 周兵, 吴国雄, 梁潇云. 孟加拉湾深对流加热对东亚季风环流系统的影响. 气象学报, 2006, 64(1): 48-56.  
Zhou B, Wu G X, Liang X Y. Effect of BOB deep convection heating on East Asian monsoon circulation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, 64(1): 48-56.
- [36] Wu G X, Liu Y M, Wang T M, et al. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. *J. Hydro. Meteor. -Spec. Sect.*, 2007, 8: 770-789.
- [37] 张艳焕, 郭品文, 周慧. 孟加拉湾热源对亚洲夏季风环流系统的影响. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 1-8.  
Zhang Y H, Guo P W, Zhou H. Influence of heat source over the Bay of Bengal on Asian summer monsoon circulation and summer precipitation in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, 28(1): 1-8.
- [38] 包庆, Wang B, 刘屹岷等. 青藏高原增暖对东亚夏季风的影响——大气环流模式数值模拟研究. 大气科学, 2008, 32(5): 997-1005.  
Bao Q, Wang B, Liu Y M, et al. The impact of the Tibetan Plateau warming on the East Asian Summer Monsoon—A study of numerical simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(5): 997-1005.