

亚洲夏季风爆发前后西北太平洋和孟加拉湾 热带气旋活动统计特征^{*}

任素玲^{1,2} 刘屹岷¹ 吴国雄¹

REN Suling^{1,2} LIU Yimin¹ WU Guoxiong¹

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟实验室, 北京, 100029

2. 国家卫星气象中心, 北京, 100081

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

2. *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2015-11-18 收稿, 2016-07-22 改回.

任素玲, 刘屹岷, 吴国雄. 2016. 亚洲夏季风爆发前后西北太平洋和孟加拉湾热带气旋活动统计特征. 气象学报, 74(6):837-849

Ren Suling, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2016. Statistical characteristics of the tropical cyclone activities over the Northwest Pacific and the Bay of Bengal during the Asian summer monsoon onset. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(6):837-849

Abstract Climatologically, the Asian summer monsoon (ASM) onset first occurs at the Bay of Bengal (BOB) and then spreads to the South China Sea (SCS) and Indian subcontinent. The onset usually lasts for about one month. The summer monsoon onsets in different areas show apparent inter-annual variations. The relationship between the tropical cyclone (storm) over the northwestern Pacific and BOB during the ASM onset is analyzed using the datasets from 1951 to 2010. Results show that there are tropical storm activities over the BOB during the BOB summer monsoon onset in 36 a. The earlier onset years are coincident with years of higher probability of up to 80% for tropical storm occurrence. For the three types of the BOB summer monsoon onset (early, normal and late), the high frequency of the BOB tropical storm appears several days before the BOB summer monsoon onset, and the tropical cyclones over the northwestern Pacific become active before the high frequency occurrence of the BOB tropical storm. For the early BOB summer monsoon onset years, tropical cyclones occur in about 40%–50% of the years over the northwestern Pacific, and the tropical cyclones usually occur over the SCS and near the Philippines in the second pentad of April. When the BOB summer monsoon onset is normal, the tropical cyclones usually occur to the east of the Philippines in the fourth pentad of April. When the BOB summer monsoon onset is late, the tropical cyclones most likely occur over the Pacific, which is the easternmost among the areas of tropical cyclone occurrence corresponding to the three types of monsoon onset in early May. During the SCS summer monsoon onsets from 1951 to 2010, there are tropical cyclone activities over the northwestern Pacific in 29 a. In the early and normal SCS summer monsoon onset years, the frequency of tropical cyclone activities is high. The tropical cyclone over the northwestern Pacific usually becomes active on the SCS summer monsoon onset date or several days later. That is, the tropical cyclone activity over the northwestern Pacific intensifies first before the Asian summer monsoon onset, followed by the enhanced BOB tropical storm activity and the Asian summer monsoon onset. In early and normal onset years of the Asian summer monsoon, the tropical cyclone activity over the northwestern Pacific intensifies again after the BOB summer monsoon onset, and the SCS summer monsoon breaks out subsequently.

Key words Asian summer monsoon onset, Tropical cyclone over the northwestern Pacific, Tropical storm over the Bay of Bengal, Statistical characteristics

* 资助课题: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010402、NSFC 91437219)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406001)。

作者简介: 任素玲, 主要从事气象卫星资料在天气和气候分析中的应用研究工作。E-mail: rensli@cma.gov.cn

摘要 亚洲夏季风爆发始于孟加拉湾,然后向中国南海和印度次大陆扩展,其过程约持续 1 个月。各地区夏季风爆发时间呈明显的年际变化。利用热带气旋资料和气象再分析资料,统计了 1951—2010 年孟加拉湾和中国南海夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋、孟加拉湾气旋风暴活动和夏季风爆发的关系。结果表明,在孟加拉湾夏季风爆发过程中,共有 36 a 出现孟加拉湾气旋风暴,并且夏季风爆发偏早年出现风暴的几率最高,为 80%。在孟加拉湾夏季风爆发偏早、正常和偏晚 3 种类型中,孟加拉湾风暴活动频率高峰期多出现在夏季风爆发前后几天内。并且在孟加拉湾风暴活动频率高峰出现前期,西北太平洋热带气旋最先出现活动频率高峰。孟加拉湾夏季风爆发前有 40%—50% 的年份西北太平洋出现热带气旋活动,其中,夏季风爆发偏早年,爆发前西北太平洋热带气旋活跃的时间偏早(4 月第 2 候),且多活动在中国南海和菲律宾附近;爆发正常年,西北太平洋热带气旋活跃的时间为 4 月第 4 候,多活动在略偏东的海域;爆发偏晚年,西北太平洋热带气旋活跃的时间为 5 月初,活动区域最偏东。中国南海夏季风爆发过程中,60 a 中共有 29 a 西北太平出现热带气旋,其中爆发偏早和正常年出现热带气旋的频率较高,并且热带气旋多出现在爆发当日和爆发后一段时间。整体来看,亚洲夏季风爆发前,西北太平洋热带气旋活动频率最先开始增强,然后孟加拉湾风暴开始活跃并伴随着孟加拉湾夏季风爆发,夏季风爆发偏早和正常年,孟加拉湾夏季风爆发后,西北太平洋热带气旋再次增强,中国南海夏季风爆发。

关键词 亚洲夏季风爆发,西北太平洋热带气旋,孟加拉湾风暴,统计特征

中图法分类号 P466

1 引言

气候平均而言,亚洲夏季风最先在孟加拉湾爆发,且大部分伴随着热带风暴或季风爆发性气旋的发生、发展(Wu, et al, 1998; Xu, et al, 2001; 毛江玉, 2001; 吴国雄等, 2013)。以往关于亚洲夏季风爆发前热带风暴的研究重点多为发生季风爆发性气旋的孟加拉湾和阿拉伯海海域(Liu, et al, 2002),产生爆发性气旋的原因为对流层环流高、低空耦合的结果。对流层低层,青藏高原和南亚海-陆热力差异调控区域海-气相互作用,导致春季在孟加拉湾形成区域暖池和爆发性涡旋,引发副热带高压带首先在孟加拉湾东部断裂,从而“锚定”和激发亚洲夏季风首先在孟加拉湾东部至中印半岛西部爆发(Wu, et al, 1998, 2011, 2012)。对流层高层,青藏高原的热力强迫作用所引起的中南半岛对流发展,还可诱导高空的南亚(青藏)高压向西北方向发展,促使其所对应的高空动力抽吸向西移至孟加拉湾南部,从而也影响着孟加拉湾季风爆发性涡旋的发生、发展和向北运动(Liu, et al, 2012)。

孟加拉湾夏季风爆发时间呈现明显的年际变化。Wu 等(2013)研究了 2008 年孟加拉湾夏季风爆发偏早的原因,通过诊断分析和西北太平洋热带气旋加热试验表明,4 月中下旬西北太平洋热带气旋活动会造成南亚高压非对称不稳定发展,南亚高压中心迅速西移至中南半岛上空,激发孟加拉湾夏季风爆发性涡旋的发展,进而触发夏季风爆发。这

种触发过程和机理是否具有普遍意义?以往对发生在西北太平洋(包括中国南海)热带气旋影响孟加拉湾夏季风爆发的研究尚少。关于亚洲夏季风和西北太平洋热带气旋活动关系的研究主要集中在中国南海(简称南海)夏季风爆发以后西北太平洋热带气旋的生成和活动特征。已有的研究表明,西北太平洋热带气旋活动与亚洲夏季风的活跃与中断或季风槽的位置和强度变化有关。Harr 等(1995)指出,西北太平洋夏季风活跃会造成热带气旋频繁。Gray (1979)指出,季风槽的位置对西北太平洋热带气旋的活动区域有较大影响。并且,强夏季风年西北太平洋热带气旋生成频率较高(孙秀荣等, 2003; 王慧等, 2006),季风槽的加强对热带气旋的生成位置和移动路径有重要影响(Harr, et al, 1991; 孙颖等, 2002; 高建芸等, 2008)。

另一个问题是南海夏季风爆发一般位于孟加拉湾夏季风爆发之后(Liu, et al, 2002),其爆发时间年际变化与西北太平洋热带气旋活动有怎样的关联? Mao 等(2008)研究了南海热带气旋对 2006 年南海夏季风爆发的作用,表明当年南海夏季风爆发和热带气旋的触发有关。从多年历史资料的统计结果来看(黄菲等, 2010),南海夏季风爆发前后西北太平洋(南海)热带气旋活动有明显变化,爆发后 3 候西北太平洋热带气旋个数和活动频率比爆发前 3 候明显增强,表明夏季风爆发有利于西北太平洋(南海)热带气旋生成,另外,大多数南海夏季风爆发偏早年,夏季风爆发前两候和爆发时西北太平洋有热

带气旋活动,大多数南海夏季风爆发偏晚年,爆发前2候及爆发后西北太平洋没有热带气旋活动,这一结果表明,南海夏季风爆发偏早有可能与西北太平洋热带气旋活动有一定的关系。

由此可见,前期对夏季风爆发的研究集中在气候平均和个例分析,本研究旨在考察 Wu 等(2013)个例研究中提出的西太平洋热带气旋触发孟加拉湾夏季风进而造成南海夏季风爆发的过程是否具有普遍意义,并在 Wu 等(2013)研究的基础上,通过热带气旋活动数据以及气象再分析数据,统计 1951—2010 年孟加拉湾和南海夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋和孟加拉湾热带风暴活动状况(精确到日),提取热带气旋活动影响亚洲夏季风爆发的信息,以期对西北太平洋热带气旋活动触发孟加拉湾风暴进而引起夏季风爆发提供具有普遍规律的观测依据。

2 研究资料和方法

2.1 资料

所用热带气旋(风暴)资料为美国联合台风预警中心(JTWC)最佳路径数据集(Yu, et al, 2007),包括热带气旋发生的区域(西北太平洋或北印度洋)、编号、发生的时间、中心位置、中心附近最大风速等信息,资料为每天 4 个时次:00、06、12 和 18 时(世界时,下同)。统计热带气旋活动频率时一天中有几次定位信息活动频率就为几。

文中计算夏季风活动指标温度数据为 NCEP/NCAR 再分析资料集(Kalnay, et al, 1996),垂直方向 26 层,水平空间分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,为日平均资料。

2.2 孟加拉湾和南海夏季风活动指标计算方法

毛江玉(2001)对比分析了 $\partial T / \partial y$ 、 U_{850} (850 hPa 纬向风)和 OLR(射出长波辐射)3 个夏季风指数的相关关系,指出对流层中上层(500—200 hPa)经向温度梯度指数和降水具有较强的相关,环流场的改变和降水的发生取决于温度场结构的本质变化,对流层中高层平均北暖南冷的对流层温度梯度结构的建立能反映亚洲各季风区夏季风爆发共同的本质特征。因此,文中将利用 500—200 hPa 平均温度的经向梯度来分别定义孟加拉湾和南海夏季风爆发时间。孟加拉湾夏季风区为(5° — 20° N, 85° — 100° E),南海夏季风区为(5° — 20° N, 110° — 120° E)。

当对流层中上层平均温度经向梯度由负值变成正值稳定维持 5 d 且 10 d 内出现负值的时间不超过 2 d 定义为夏季风爆发。由此定义的孟加拉湾夏季风气候平均爆发时间为 5 月 7 日,南海夏季风气候平均爆发时间为 5 月 15 日(图 1)。与毛江玉(2001)给出的结果基本一致。

利用上述夏季风爆发指标可以分别确定 1951—2010 年孟加拉湾和南海夏季风爆发时间,据此计算出孟加拉湾和南海夏季风爆发日期的标准偏差均约为 8 d。因此,定义孟加拉湾夏季风正常爆发时间为 5 月 3—11 日(气候平均爆发时间 5 月 7 日前后各推 4 d),5 月 3 日之前为爆发偏早年,5 月 11 日以后为爆发偏晚年。定义南海夏季风正常爆发日期为 5 月 11—19 日(气候平均爆发时间 5 月 15 日前后各推 4 d),5 月 11 日之前为爆发偏早年,5 月 19 日之后为爆发偏晚年。表 1 给出了孟加拉湾和南海夏季风爆发时间分类情况,可以看出,孟加拉湾夏季风正常爆发年有 29 a,偏早年有 15 a,偏晚年有 16 a;南海夏季风正常爆发年有 25 a,偏早年有 22 a,偏晚年有 13 a。孟加拉湾和南海夏季风爆发都偏早的年有 10 a,爆发都正常的年有 17 a,爆发都偏晚年有 9 a。虽然多数年份(60 a 中有 36 a)两个区域夏季风爆发时间早晚比较一致(表 1 中黑色下划线数字),但是还是有些年份孟加拉湾和南海夏季风爆发时间早晚分类不同。因此,有必要根据夏季风爆发的时间早晚分别对这两个区域进行分类统计。

2.3 亚洲夏季风爆发定义

一般认为亚洲夏季风区包括孟加拉湾、南海和印度,文中定义亚洲夏季风爆发时间为 3 个季风区夏季风最先爆发的时间。例如在某一年如果夏季风最先在孟加拉湾爆发,则孟加拉湾夏季风爆发的时间即为当年亚洲夏季风爆发的时间。

3 孟加拉湾夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋和孟加拉湾风暴活动特征

孟加拉湾夏季风爆发和孟加拉湾气旋风暴或爆发性涡旋的活动关系密切(颜京辉, 2005; 关月, 2010; Wu, et al, 2011)。从 Wu 等(2013)个例和数值模式模拟分析可知,孟加拉湾夏季风爆发前,在有利的大尺度环流条件下,南海和菲律宾以东热带气旋活动均能造成孟加拉湾地区气旋风暴的发展,进而触发孟加拉湾夏季风爆发。本节将分析孟加拉湾

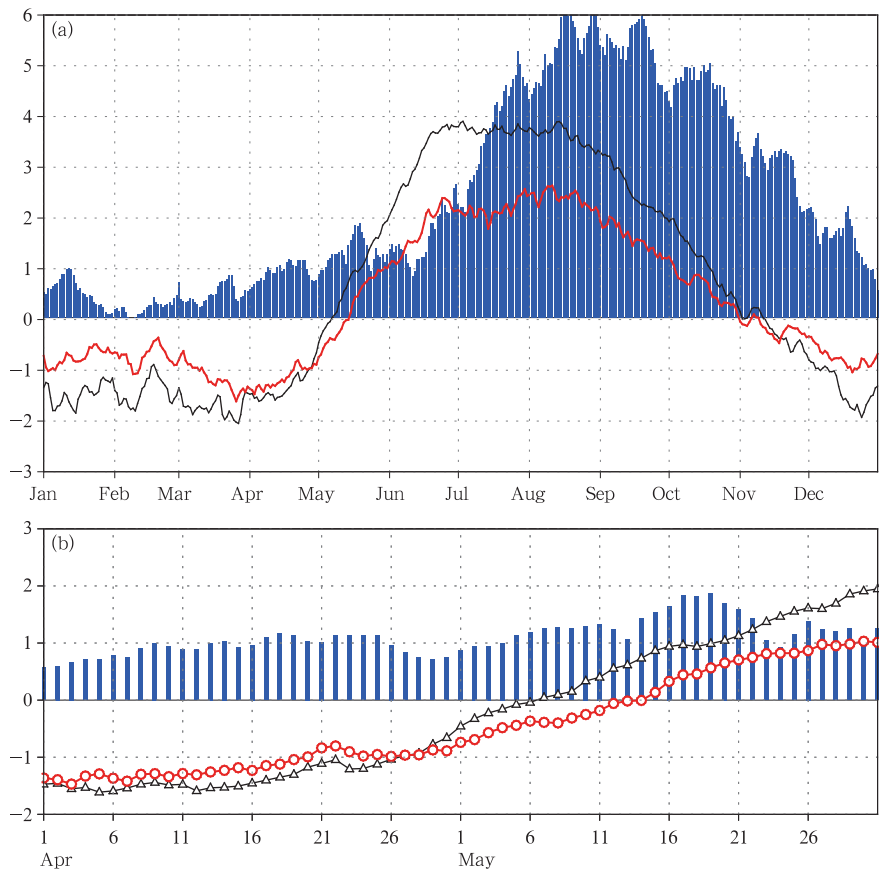


图 1 1951—2010 年平均西北太平洋热带气旋活动频率(蓝色柱,单位: d^{-1})和夏季风指标(黑线:孟加拉湾;红线:南海,单位: $^{\circ}\text{C}$)(a. 全年, b. 4 月 1 日—5 月 31 日)

Fig. 1 Frequencies (blue bar, unit: d^{-1}) of the northwestern Pacific tropical cyclone occurrence from 1951 to 2010 and the climatological summer monsoon indices (black curve: BOB, red curve: SCS, unit: $^{\circ}\text{C}$) (a. annual, b. from 1 April–31 May)

表 1 1951—2010 年孟加拉湾和南海夏季风爆发时间分类
Table 1 The classification of the BOB and SCS summer monsoon onset dates from 1951 to 2010

	偏早年	正常年	偏晚年
孟加拉湾 夏季风	1956 , 1958, 1966, 1968, 1970 , 1971 , 1975 , 1976 , 1982 , 1994 , 1996 , 1999, 2004, 2006 , 2008	1951, 1953, 1954, 1955, 1961, 1962 , 1964, 1965, 1972 , 1973, 1977 , 1978 , 1979 , 1980 , 1981 , 1984 , 1985, 1986 , 1988, 1989 , 1992 , 1995 , 1997 , 2000, 2001, 2002 , 2003 , 2005 , 2007	1952, 1957, 1959, 1960, 1963 , 1967, 1969, 1974 , 1983 , 1987 , 1990, 1991 , 1993 , 1998 , 2009 , 2010
南海 夏季风	1951, 1952, 1953, 1954, 1955, 1956 , 1961, 1964, 1965, 1966, 1970 , 1971 , 1973, 1975 , 1976 , 1982 , 1994 , 1996 , 2000, 2001, 2006 , 2008	1957, 1958, 1959, 1960, 1962 , 1967, 1969, 1972 , 1977 , 1978 , 1979 , 1980 , 1981 , 1984 , 1986 , 1989 , 1990, 1992 , 1995 , 1997 , 2002 , 2003 , 2004, 2005 , 2007	1963 , 1968, 1974 , 1983 , 1985, 1987 , 1988, 1991 , 1993 , 1998 , 1999, 2009 , 2010
一致年数	10	17	9

注:黑体下划线为夏季风爆发早晚一致年份。

夏季风爆发前西北太平洋热带气旋和孟加拉湾气旋风暴活动特征,为 Wu 等(2013)研究中关于西北太平洋(包括南海)热带气旋触发孟加拉湾热带风暴生

成进而引起孟加拉湾夏季风爆发理论提供观测事实依据。

由 60 a 平均状况可知(图 1b),4 月 8—26 日,

西北太平洋热带气旋活动频率增强,由4月初的0.5次/d增至1次/d。4月26日后,西北太平洋热带气旋活动减弱,5月2日后再次增至约1次/d,5月15—20日西北太平洋热带气旋活动频率达到6月中旬以前的最高状态(2次/d)(图1a)。即气候平均孟加拉湾夏季风爆发(5月7日)前10—25 d以及爆发后1—15 d,西北太平洋热带气旋活动相对活跃。第2次活动频率增强时间对应着南海夏季风爆发。

文中定义在夏季风爆发前10 d以及爆发后5 d如果西北太平洋有热带气旋活动则认为在本年度夏季风爆发过程中有热带气旋活动。定义中包括了夏季风爆发后5 d,是因为强热带对流云团发展成热带低压进而增强为开始编号的热带风暴需要一定的时间,有时甚至需要几天,而在强热带对流云团强度逐渐增强的过程中,类似于台风降水潜热释放的作用已经出现(Wu, et al, 2013),也同样可能对夏季风爆发造成影响。以下按照孟加拉湾夏季风爆发早、中和晚3类来分析夏季风爆发期间西北太平洋热带气旋的活动状况。

3.1 孟加拉湾夏季风爆发期间西北太平洋热带气旋活动特征

1951—2010年,孟加拉湾夏季风爆发过程中西北太平洋出现热带气旋活动的年份有28 a,约占总

年份的46.7%。其中,爆发偏早的15 a中7 a有热带气旋活动(1956、1971、1975、1976、1996、1999和2008年),占总年份的46.7%;正常爆发的29 a中有13 a有热带气旋活动(1951、1954、1955、1979、1980、1981、1986、1989、1995、1997、2000、2001和2005年),占总年份的44.8%;爆发偏晚的16 a中有8 a有热带气旋活动(1957、1963、1967、1974、1990、1991、1993和2009年),占总年份的50%。孟加拉湾夏季风爆发早、中、晚3种类型中夏季风爆发期间西北太平洋出现热带气旋活动的概率基本相同,均约为50%。

图2给出了1951—2010年3种类型孟加拉湾夏季风爆发过程中,西北太平洋热带气旋活动路径。爆发偏早年,西北太平洋热带气旋多活动在南海以及菲律宾附近洋面(110°—130°E),除1996年外,其他6 a中热带气旋都影响到该区域;爆发正常年,西北太平洋热带气旋多活动在(120°—145°E)附近的热带和副热带地区,较爆发偏早年热带气旋活动位置略偏东;爆发偏晚年,西北太平洋热带气旋多活动在(140°—160°E)附近的洋面上,是位置最偏东的一类。从统计分析来看,孟加拉湾夏季风爆发早晚和夏季风爆发前西北太平洋热带气旋活动的经度范围有一定的关系,其动力和热力机制尚需进一步研究。

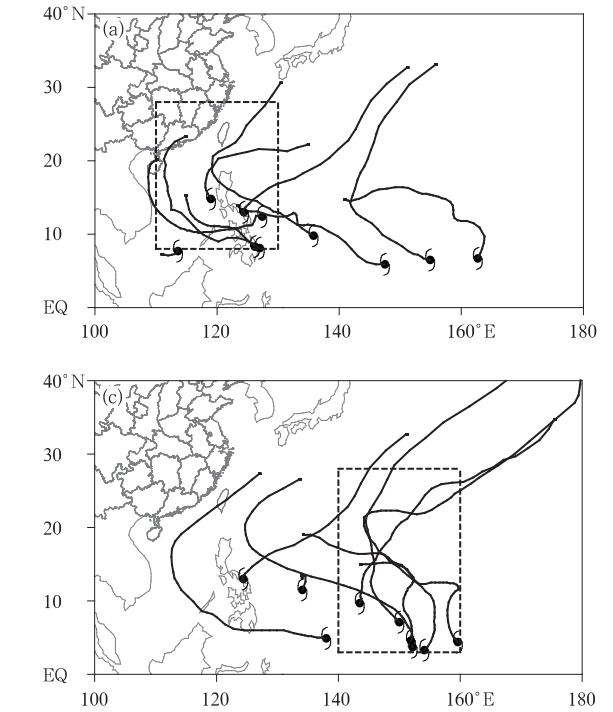


图2 1951—2010年孟加拉湾夏季风爆发前10 d和后5 d西北太平洋热带气旋路径
(a. 爆发偏早年, b. 爆发正常年, c. 爆发偏晚年)
Fig. 2 Tropical cyclone tracks over the northwestern Pacific 10 d before and 5 d after the BOB summer monsoon onset from 1951 to 2010 (a. early onset years, b. normal onset years, c. late onset years)

从孟加拉湾夏季风早、中、晚 3 种爆发类型对应的夏季风指标和西北太平洋热带气旋、孟加拉湾风暴活动频率关系(图 3)可以看出,在孟加拉湾夏季风爆发偏早年(图 3a),爆发(4 月 30 日)前后西北太平洋热带气旋活动频率出现 2 个相对峰值,一个峰

值位于 4 月 9 日,最高平均日活动次数为 3,直到 4 月 14 日西北太平洋热带气旋活动频率都维持较高的状态,另一个峰值位于 5 月 17 日,孟加拉湾夏季风爆发后,5 月 6 日开始,西北太平洋热带气旋再次活跃,最高日平均活动次数为 5。在孟加拉湾夏季

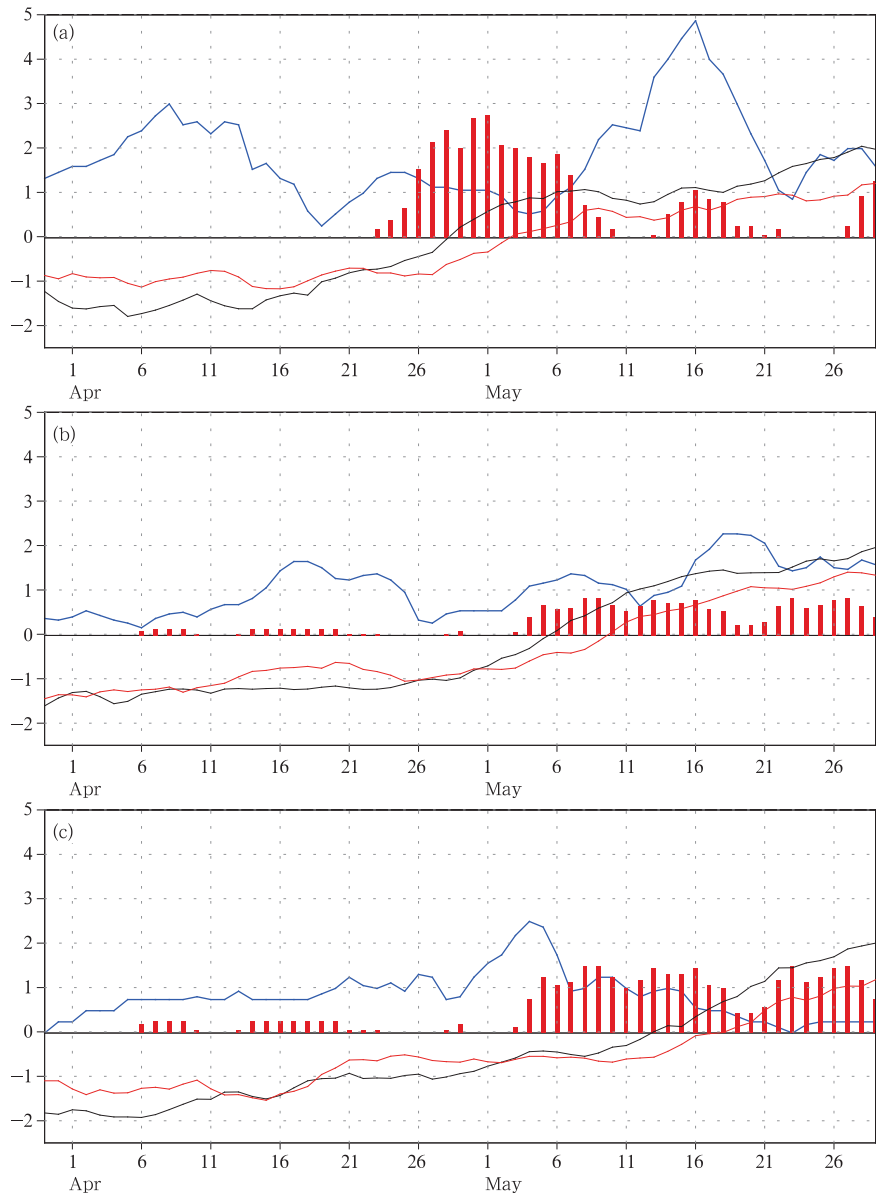


图 3 1951—2010 年孟加拉湾夏季风偏早年(a)、正常年(b)和偏晚年(c)平均西北太平洋热带气旋活动频率(蓝线,单位: d^{-1})、孟加拉湾热带风暴活动频率(橙色柱,单位: d^{-1})和夏季风活动指标(黑线:孟加拉湾;红线:南海,单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.3 Frequencies of the northwestern Pacific tropical cyclone (blue curve, unit: d^{-1}) and the BOB tropical storm (orange bar, unit: d^{-1}) and the summer monsoon activity indices (black curve: the BOB, red curve: the SCS, unit: $^{\circ}\text{C}$) from 1951 to 2010. (a), (b) and (c) are for early, normal, and late BOB summer monsoon onset years respectively

风爆发正常年(图 3b),同样在爆发(5 月 7 日)前后西北太平洋热带气旋活动频率出现 2 个相对峰值,一个位于 4 月 19 日(爆发前 18 天),另一个位于 5 月 20 日(爆发后 13 天),热带气旋最高活动频率较爆发偏早年弱。在孟加拉湾夏季风爆发偏晚年(图 3c),爆发(5 月 14 日)前 9 天(5 月 5 日)西北太平洋热带气旋出现活动频率高峰,峰值的强度达 2.5 次/d,而爆发后较长一段时间内西北太平洋热带气旋活动较弱,6 月中旬后才开始增强。

3.2 孟加拉湾夏季风爆发期间孟加拉湾风暴活动特征

已有的研究表明,孟加拉湾夏季风爆发和孟加拉湾风暴或爆发性涡旋的活动有关(颜京辉,2005;关月,2010;吴国雄等,2010)。3.1 节统计分析结果表明,孟加拉湾夏季风爆发前,西北太平洋热带气旋活动频率高峰出现的早晚和经度范围与爆发早晚有一定的对应关系。为了更清楚地了解孟加拉湾夏季风爆发期间孟加拉湾风暴的活动是促发的主要因素还是确实和西北太平洋热带气旋活动一定有关,有必要进一步分析夏季风爆发期间孟加拉湾风暴的活动特征以及孟加拉湾风暴和西北太平洋热带气旋活动的先后关系。

由统计分析可知,1951—2010 年,孟加拉湾夏季风爆发期间,孟加拉湾有热带风暴活动的年份共 36 a(表 2)。其中,爆发偏早的 15 a 中有 13 a 孟加拉湾出现风暴,约占总年数的 87%;爆发正常的 29 a 中有 13 a 出现孟加拉湾风暴,约占总年数的 45%;爆发偏晚的 16 a 中有 10 a 出现孟加拉湾热带风暴,约占总年数的 63%。因此,孟加拉湾夏季风爆发过

程中,大多数年份夏季风爆发过程中均伴随着孟加拉湾风暴活动。

1951—2010 年,孟加拉湾夏季风爆发偏早的 15 a 中,爆发过程中均存在西北太平洋热带气旋或孟加拉湾风暴活动,其中,只存在孟加拉湾风暴的年份有 8 a,只存在西北太平洋热带气旋的年份有 2 a,西北太平洋热带气旋和孟加拉湾风暴都出现的年份有 5 a。孟加拉湾夏季风正常和偏晚爆发的年份中,绝大部分年份都有西北太平洋热带气旋活动或孟加拉湾热带风暴活动,其中,同时出现西北太平洋热带气旋和孟加拉湾热带风暴的年份均为 4 a。其中,1954 年孟加拉湾风暴早于西北太平洋热带气旋生成,1963 和 1974 年风暴发生在偏西的印度半岛南部。因此,在过去的 60 年中,孟加拉湾夏季风爆发过程中和 Wu 等(2013)个例分析中(2008 年)夏季风爆发过程相似的个例共有 9 a,分别为 1955、1956、1967、1971、1976、1900、1996、1997 和 2008 年(图 4)。

如果将条件放宽至孟加拉湾风暴生成前 15 d 西北太平洋存在热带气旋活动,则 1966、1975、1979 和 2003 年也出现和 2008 年类似的孟加拉湾夏季风爆发过程(图略)。从逐年夏季风爆发指标和热带气旋活动频率(图 4)可以看出,在这些个例中,孟加拉湾风暴多生成在夏季风爆发前后 1—2 d 内并持续一段时间。孟加拉湾风暴的生成源地集中在孟加拉湾东南部海域,移动路径为西北行、北行或转向(图 5),而西北太平洋热带气旋的生成源地在经度上跨度较大(115°—170°E),这与 3.1 节分析的结果一致。

表 2 1951—2010 年孟加拉湾夏季风爆发、西北太平洋热带气旋和孟加拉湾风暴活动分类
Table 2 Classification of the BOB summer monsoon onset dates, and the northwestern Pacific tropical cyclones and BOB tropical storm activities from 1951 to 2010

类别	偏早年	正常年	偏晚年
有西北太平洋热带气旋和孟加拉湾热带风暴	1956、1971、1976、1996、2008	1954、1955、1979、1997	1963、1967、1974、1990
只有孟加拉湾热带风暴	1958、1966、1968、1970、1982、1994、2004、2006	1953、1961、1962、1964、1965、1977、1978、2002、2003	1952、1959、1960、1969、1998、2010
只有西北太平洋热带气旋	1975、1999	1951、1955、1980、1981、1986、1989、1995、2000、2001、2005	1957、1991、1993、2009
无西北太平洋热带气旋和孟加拉湾热带风暴	无	1972、1973、1984、1985、1988、2007	1983、1987

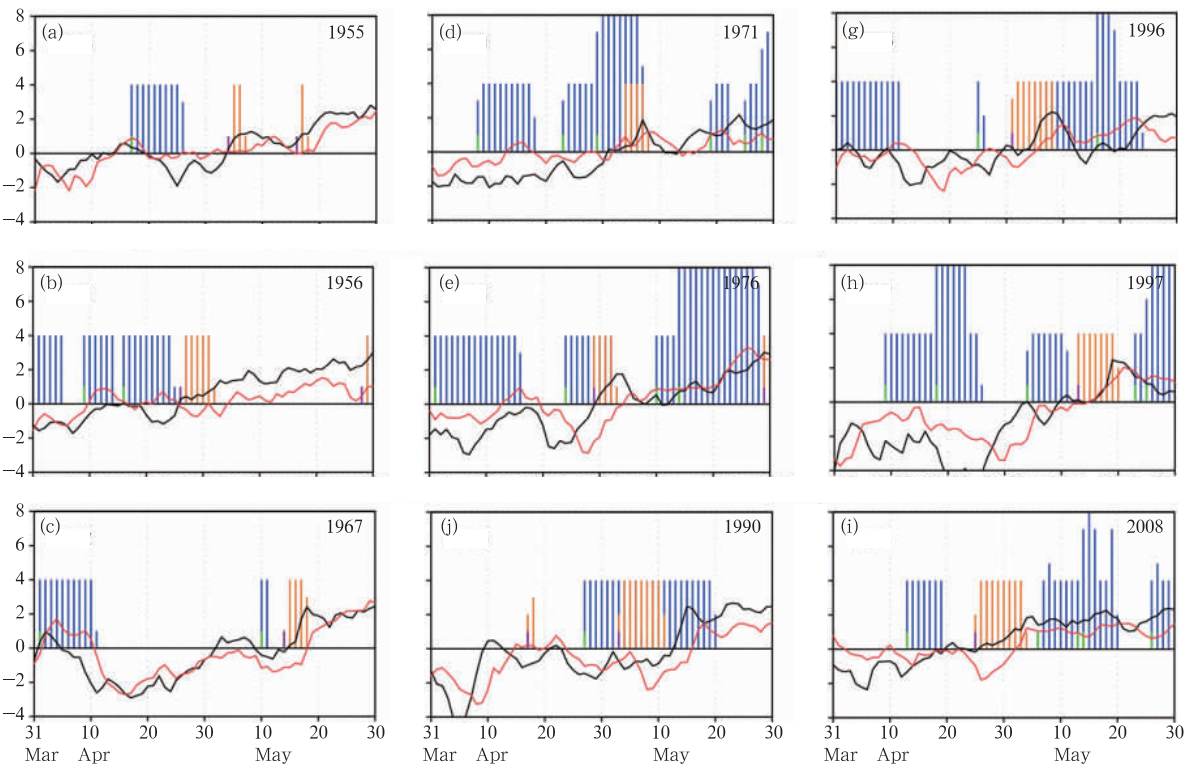


图 4 西北太平洋热带气旋活动频率(蓝色柱,单位: d^{-1})和生成个数(绿色柱,单位: d^{-1})、孟加拉湾热带风暴活动频率(橙色柱,单位: d^{-1} ,符号和图中相反,为正值)和生成个数(紫色柱,单位: d^{-1} ,符号和图中相反,为正值)及夏季风活动指标(黑线:孟加拉湾,红线:南海,单位: $^{\circ}\text{C}$)
(a - i. 1955、1956、1967、1971、1976、1990、1996、1997、2008 年)

Fig. 4 Frequencies (blue bars for the northwestern Pacific and orange bars for BOB, unit: d^{-1}) and the genesis frequencies (green bars for the northwestern Pacific and purple bars for BOB, unit: y^{-1}) of the tropical cyclone and the summer monsoon activity indices (black curve: BOB, red curve: SCS, unit: $^{\circ}\text{C}$)
(a - i. 1955, 1956, 1967, 1971, 1976, 1990, 1996, 1997, 2008)

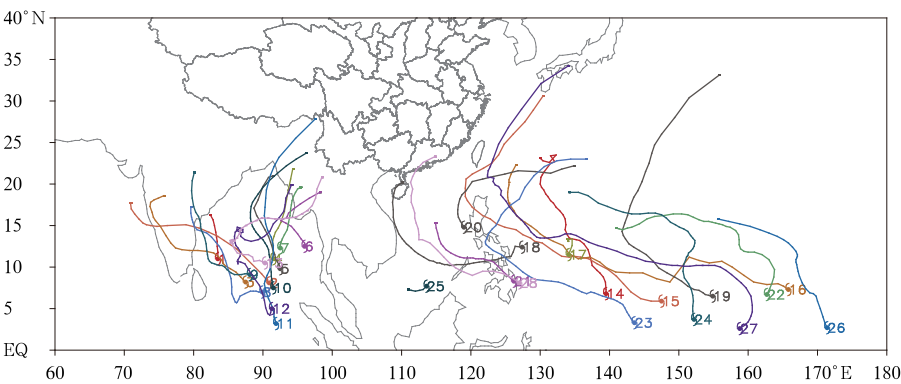


图 5 图 4 中西北太平洋热带气旋和孟加拉湾热带风暴路径,相同颜色为同一年(包括 1966、1975、1979 和 2003 年)

Fig. 5 Storm tracks for the northwestern Pacific tropical cyclones and the BOB tropical storms shown in Fig. 4 The same color represents the same year (including 1966, 1975, 1979 and 2003)

由平均分布可以看出,在孟加拉湾夏季风爆发 偏早年(图 3a),孟加拉湾夏季风爆发前 5 d 风暴开

始活跃,夏季风爆发后 1—2 d(5 月 1—2 日)风暴活动频率最大,为 2.5 次/d,夏季风爆发 10 d 后,活动减弱。值得关注的是,在 3 种孟加拉湾夏季风爆发类型中,孟加拉湾夏季风爆发过程中西北太平洋热带气旋活动频率高峰时间均早于孟加拉湾热带风暴,并且孟加拉湾风暴的最大活动频率和前期西北太平洋热带气旋活动最大频率基本成正比。偏早爆发年中,4 月 9 日西北太平洋热带气旋活动最高频率为 3 次/d,对应的孟加拉湾风暴最高活动频率约为 2.8 次/d;正常爆发年中,4 月 19 日西北太平洋热带气旋活动最高频率为 1.5 次/d,对应的孟加拉湾风暴最高活动频率约为 0.8 次/d;偏晚爆发年中,5 月 5 日西北太平洋热带气旋活动最高频率为 2.5 次/d,对应的孟加拉湾风暴最高活动频率约为 1.5 次/d。即 4 月中下旬西北太平洋热带气旋活跃时孟加拉湾夏季风爆发时孟加拉湾风暴更活跃。

本节分析表明,孟加拉湾夏季风爆发前西北太平洋热带气旋最先出现活动频率高峰,然后孟加拉湾风暴活动频率才开始增强并且孟加拉湾夏季风爆发。这一观测事实说明西北太平洋热带气旋活动造成孟加拉湾风暴生成和夏季风爆发是普遍存在的。

4 南海夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋活动特征

第 3 节分析表明,在整个亚洲夏季风爆发的进

程中,西北太平洋热带气旋最先活跃,而南海夏季风区是距离西北太平洋热带气旋活动最近的区域,西北太平洋热带气旋活动和南海夏季风爆发关系是值得深入讨论的问题。本节将通过日平均数据,分析南海夏季风爆发过程中,西北太平洋热带气旋和南海季风爆发时间的关系。

1951—2010 年,南海夏季风爆发期间西北太平洋出现热带气旋活动的有 29 a,占总年数的 48.3%。其中,爆发偏早的 22 a 中 13 a 西北太平洋有热带气旋活动,占总年数的 59%(表 3);爆发正常的 25 a 中 13 a 西北太平洋有热带气旋活动,占总年数的 52%,而爆发偏晚的 13 a 中仅有 3 a 出现热带气旋活动,占总年数的 23%。因此,南海夏季风爆发偏早和正常年中,南海夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋活跃,而南海夏季风爆发偏晚年中西北太平洋热带气旋活动较弱。黄少妮等(2013)关于南海夏季风爆发早晚和西北太平洋海温的关系指出,夏季风爆发前,EQ—20°N,125°—155°E 区域的海温正距平时,有利于夏季风爆发偏早。而肖子牛等(2009)的研究表明,冬春季节西北太平洋海温持续偏高时,有利于对流层低层风场的辐合,造成赤道辐合带活跃和台风活动频繁,因此,本节统计结果显示的南海夏季风爆发偏早和正常年季风爆发前西北太平洋热带气旋活跃有可能和西北太平洋海温有一定的关系,其相互关系尚需进一步分析研究。

表 3 1951—2010 年南海夏季风爆发、西北太平洋热带气旋活动分类
Table 3 The classification of the BOB summer monsoon onset dates and the northwestern Pacific tropical cyclones from 1951 to 2010

类别	偏早年	正常年	偏晚年
有西北太平洋热带气旋	1951、1954、1955、1956、1964、1971、1975、1976、1996、2000、2001、2006、2008	1957、1967、1979、1980、1981、1986、1989、1990、1995、1997、2002、2004、2007	1985、1993、2009
占总年数的比例	59%	52%	23%

图 6 给出了南海夏季风爆发早、中、晚 3 种类型中夏季风爆发过程中西北太平洋热带气旋移动路径。爆发偏早年,夏季风爆发前后热带气旋多生成于 125°—140°E 附近,然后向西北方向移动,主要影响范围为 110°—140°E 的南海、菲律宾及其附近洋面;爆发正常年,夏季风爆发前后热带气旋多生成于 135°—150°E 附近,热带气旋主要影响范围为 120°E

以东海域,较爆发偏早年位置略偏东,这和孟加拉湾夏季风爆发过程中西北太平洋热带气旋活动区域大致吻合;爆发偏晚年,热带气旋活动较弱,气旋的生成和活动区域没有明显特征。南海夏季风爆发偏早年 and 正常年西北太平洋热带气旋主要活动区域和孟加拉湾夏季风爆发偏早年和正常年基本相似,即夏季风爆发偏早的年份热带气旋活动更偏西。

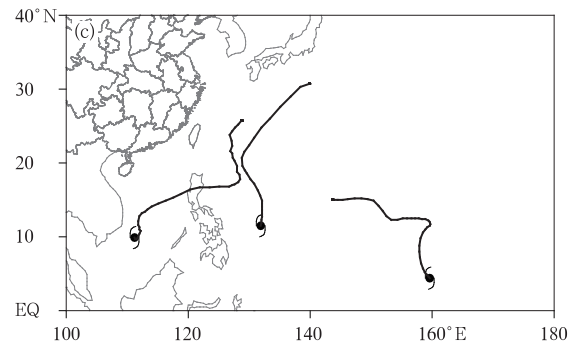
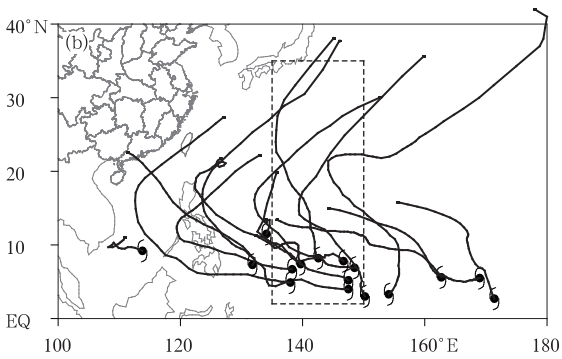
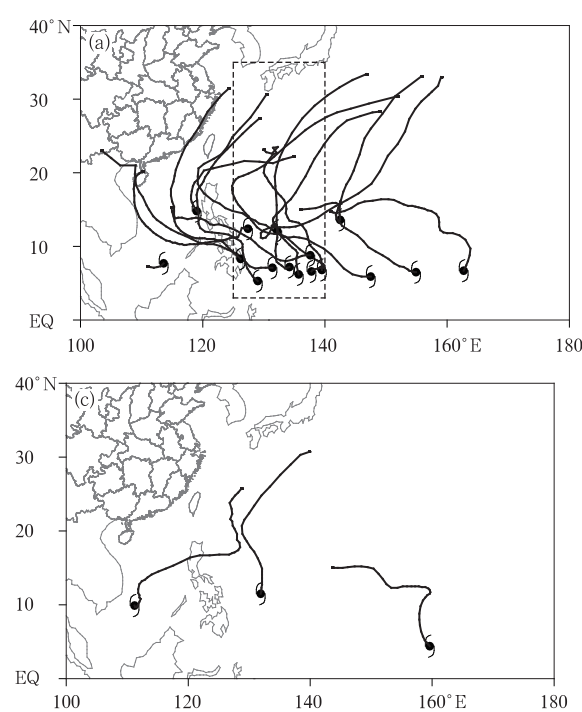


图6 1951—2010年南海夏季风爆发偏早年夏季风爆发前10 d和后5 d西北太平洋热带气旋路径
(a. 爆发偏早年, b. 爆发正常年, c. 爆发偏晚年)

Fig. 6 Tropical cyclone tracks over northwestern Pacific 10 d before and 5 d after the SCS summer monsoon onset from 1951 to 2010 (a. early onset years, b. normal onset years, c. late onset years)

在南海夏季风爆发偏早年(图 7a),平均而言,3月中旬—4月底,西北太平洋热带气旋活动频率维持在1次/d,5月3日爆发时,西北太平洋热带气旋活动开始增强,爆发后5 d左右,热带气旋活动频率达2.5次/d,并维持至5月20日前后,即在南海夏季风爆发偏早年份,5月3日夏季风爆发后,5月上旬末和中旬西北太平洋热带气旋活跃。南海夏季风爆发正常年(图 7b),4月10—25日,西北太平洋热带气旋活动频率约为1.5次/d,较偏早爆发年份略强,4月25日—5月13日爆发前20 d前后,西北太平洋热带气旋活动频率维持在较低的状态,约为1次/d,5月14日南海夏季风爆发后,热带气旋活动频率迅速增强,5月19日达到活动频率高峰(3次/d)。即在南海夏季风爆发正常年份,西北太平洋热带气旋活动频率在爆发时开始增强,5 d后达到最强。南海夏季风爆发偏晚年份(图 7c),爆发前(4月25—5月7日)西北太平洋热带气旋活动出现较高频率,比正常爆发年份中的4月10—25日约偏晚15 d,南海夏季风爆发(爆发日期为5月22日)前15 d以及爆发后较长时间西北太平洋热带气旋活动都较弱。和南海夏季风爆发偏早和正常年份有明显不同,在南海夏季风爆发偏早和正常年份中,夏

季风爆发伴随着西北太平洋热带气旋活动增强。即在南海夏季风爆发期,更多的情况是西北太平洋热带气旋在南海夏季风爆发后或者伴随着季风爆发而生成,这和刘屹岷等(2003a,2003b)的研究结果不矛盾,南海夏季风的爆发和孟加拉湾夏季风的影响有关,而南海夏季风活动会影响西北太平洋台风的

5 结论和讨论

通过近60年热带气旋资料以及气象再分析资料,按照夏季风爆发的早、中、晚3种情况分别分析了孟加拉湾和南海夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋和孟加拉湾风暴活动情况,主要得到以下结论:

(1)在孟加拉湾夏季风爆发过程中,60 a中共有36 a孟加拉湾出现热带风暴,并且夏季风爆发偏早的年份出现风暴的几率最高,为80%。在孟加拉湾夏季风爆发偏早、正常和偏晚3种类型中,孟加拉湾风暴活动频率高峰期多出现在爆发前后几天内。并且在孟加拉湾风暴活动频率高峰期出现前期,西北太平洋热带气旋最先出现活动频率高峰。

(2)孟加拉湾夏季风爆发前有40%—50%的年份西北太平洋出现热带气旋活动,其中孟加拉湾夏

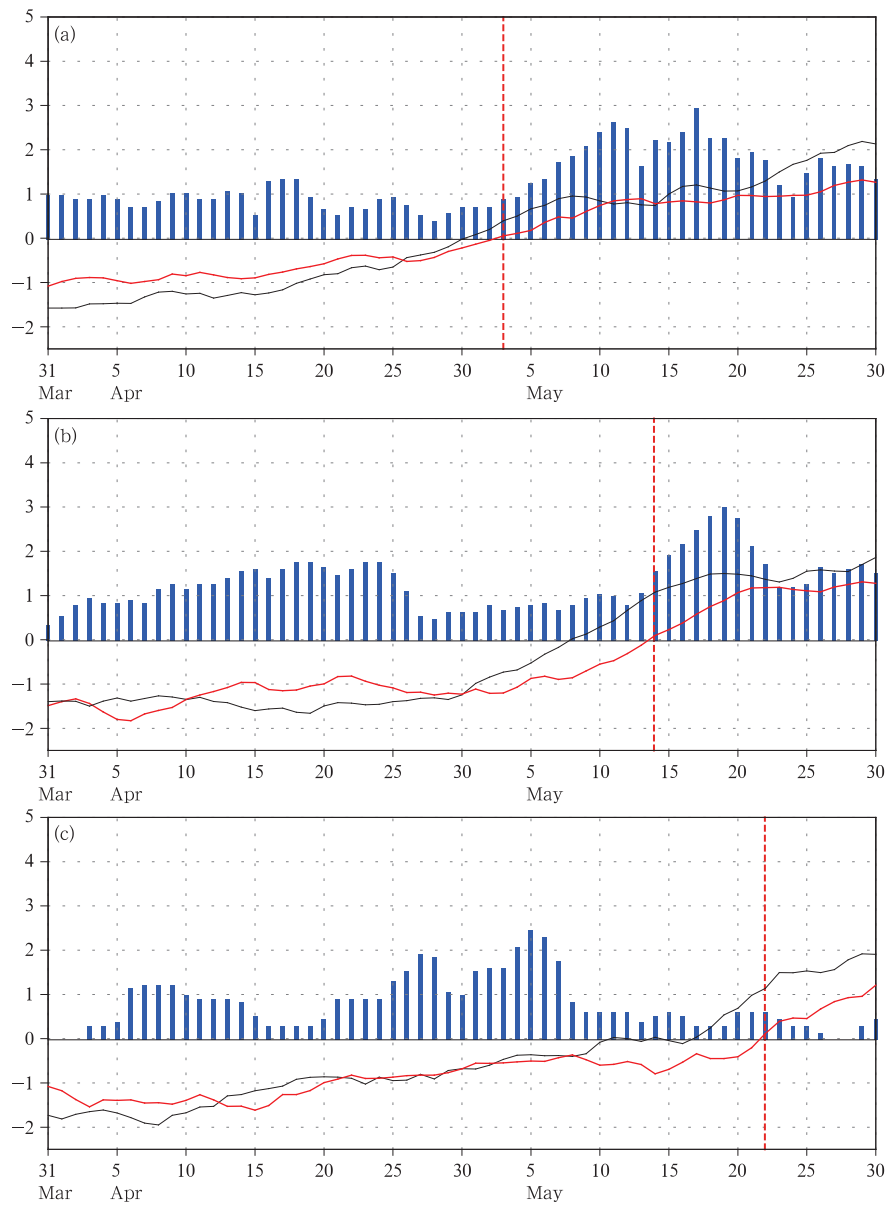


图 7 1951—2010 南海夏季风偏早年(a,共 22 a)、正常年(b,共 25 a)和偏晚年(c,共 13 a)西北太平洋热带气旋平均活动频率(蓝色柱,单位: d^{-1})和夏季风活动指标(黑线:孟加拉湾;红色实线:南海,单位: $^{\circ}C$)(竖虚线:季风爆发日)

Fig. 7 Frequencies (blue bars, unit: d^{-1}) of the northwestern Pacific tropical cyclones from 1951 to 2010 (a: early onset years, b: normal years, c: late onset years) and the summer monsoon activity indices (black curve: BOB, red curve: SCS, unit: $^{\circ}C$) (dashed line: monsoon onset date)

季风爆发偏早年份,夏季风爆发前西北太平洋热带气旋活跃的时间偏早,为 4 月第 2 候,并且多活动在南海和菲律宾附近;爆发正常年份,西北太平洋热带气旋活跃的时间是 4 月第 4 候,多活动在略偏东的海域;爆发偏晚年份,西北太平洋热带气旋活跃的时间为 5 月初,活动区域最偏东。

(3)气候平均来看,孟加拉湾夏季风爆发后,在南海夏季风爆发过程中,60 a 中有 29 a 西北太平洋出现热带气旋,其中爆发偏早和正常年份出现热带气旋的频率较高,并且热带气旋多出现在夏季风爆发当日和爆发后一段时间。

整体来看,亚洲夏季风爆发前,西北太平洋热带

气旋活动频率最先开始增强,然后孟加拉湾风暴开始活跃并伴随着孟加拉湾夏季风爆发,夏季风爆发偏早和正常年份,孟加拉湾夏季风爆发后,西北太平洋热带气旋再次增强,南海夏季风爆发。这一观测事实,为西北太平洋热带气旋触发孟加拉湾热带风暴生成,进一步造成孟加拉湾夏季风爆发过程提供有力的证据。

通过统计分析得出了一些结论,但是尚存在一些需深入研究的问题。首先,统计分析发现,孟加拉湾和南海夏季风爆发早晚与夏季风爆发前后西北太平洋热带气旋活动的经度范围有一定的联系,这种联系的动力和热力过程仍需进一步的研究;此外,西北太平洋热带气旋活动能够造成孟加拉湾风暴的生成,但是在有些年,孟加拉湾夏季风爆发前只有西北太平洋热带气旋活动而没有出现孟加拉湾风暴,这两种不同的类型中,西北太平洋热带气旋强度、位置以及大气环流和海洋等状况有何不同?对这些问题的深入研究将能更好地理解西北太平洋热带气旋活动对亚洲夏季风异常爆发的触发机制。

参考文献

高建芸, 张秀芝, 江志红等. 2008. 西北太平洋季风槽异常与热带气旋活动. 海洋学报, 30(3): 35-47. Gao J Y, Zhang X Z, Jiang Z H, et al. 2008. Anomalous western North Pacific monsoon trough and tropical cyclone activities. Acta Oceanol Sinica, 30(3): 35-47 (in Chinese)

关月. 2010. 海气相互作用对孟加拉湾夏季风爆发涡旋的形成和亚洲季风爆发的影响[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 115pp. Guan Y. 2010. The Influence of air sea interaction on the formation of monsoon onset vortex over BOB and the Asian summer monsoon onset[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 115pp (in Chinese)

黄菲, 李元妮. 2010. 南海夏季风爆发与西北太平洋热带气旋活动. 中国海洋大学学报, 40(8): 1-10. Huang F, Li Y N. 2010. Relationship between the South China Sea summer monsoon onset and the tropical cyclone activity in the western North Pacific. Period Ocean Univ China, 40(8): 1-10 (in Chinese)

黄少妮, 黄菲. 2013. 南海夏季风爆发早晚的海温预报指数. 中国海洋大学学报, 43(10): 8-15. Huang S N, Huang F. 2013. Sea surface temperature prediction indices for the South China Sea summer monsoon onset. Period Ocean Univ China, 43(10): 8-15 (in Chinese)

刘屹岷, 陈仲良, 毛江玉等. 2003a. 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, 61(1): 1-9. Liu Y M, Chen Z L, Mao J Y, et al. 2003a. 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 Meteor Sinica, 61(1): 1-9 (in Chinese)

刘屹岷, 陈仲良, 吴国雄. 2003b. 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, 61(1): 10-19. Liu Y M, Chen Z L, Wu G X. 2003b. Impacts of the onset of the Bay of Bengal monsoon on the onset of the South China Sea monsoon, Part II: Numerical experiments. Acta Meteor Sinica, 61(1): 10-19 (in Chinese)

毛江玉. 2001. 季节转换期间副高形态变异和季风爆发机制研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 139pp. Mao J Y. Variation in the configuration of subtropical anticyclone during seasonal transition and the mechanism of Asian monsoon onset [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 139pp (in Chinese)

孙秀荣, 端义宏. 2003. 对东亚夏季风与西北太平洋热带气旋频数关系的初步分析. 大气科学, 27(1): 67-74. Sun X R, Duan Y H. 2003. A study of the relationships between the East Asian summer monsoon and the tropical cyclone frequency in the northwestern Pacific. Chinese J Atmos Sci, 27(1): 67-74 (in Chinese)

孙颖, 丁一汇. 2002. 1998 和 1999 年西北太平洋热带气旋的活动异常特征及其大尺度条件. 气象学报, 60(5): 527-537. Sun Y, Ding Y H. 2002. Anomalous activities of tropical cyclone over the western North Pacific and the related large-scale circulation features during 1998 and 1999. Acta Meteor Sinica, 60(5): 527-537 (in Chinese)

王慧, 丁一汇, 何金海. 2006. 西北太平洋夏季风变化对台风生成的影响. 气象学报, 64(3): 345-356. Wang H, Ding Y H, He J H. 2006. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis. Acta Meteor Sinica, 64(3): 345-356 (in Chinese)

吴国雄, 段安民, 刘屹岷等. 2013. 关于亚洲夏季风爆发的动力学研究的若干近期进展. 大气科学, 37(2): 211-228. Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. 2013. Recent advances in the study on the dynamics of the Asian summer monsoon onset. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 211-228 (in Chinese)

肖子牛, 梁红丽, 李崇银. 2009. 夏季西北太平洋和南中国海台风生成与前期冬春主要环境条件的关系. 气象学报, 67(1): 90-99. Xiao Z N, Liang H L, Li C Y. 2009. The relationship between the summer typhoon genesis over the western North Pacific and South China Sea and the main climatic conditions in the preceding winter to spring. Acta Meteor Sinica, 67(1): 90-99 (in Chinese)

颜京辉. 2005. 亚洲夏季风的爆发和推进过程及副热带高压形态的变异[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 147pp. Yan J H. 2005. The onset and process of Asian summer monsoon and the variation of the subtropical high [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 147pp (in Chinese)

Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure and likely

- role in the tropical circulation//Supplement of Meteorology over the Tropical Oceans. UK:Royal Meteorological Society, 155-218
- Harr P A, Elsberry R L. 1991. Tropical cyclone track characteristics as a function of large-scale circulation anomalies. *Mon Wea Rev*, 119(6): 1448-1468
- Harr P A, Elsberry R L. 1995. Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics. *Mon Wea Rev*, 123(5): 1225-1246
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-471
- Liu B Q, He J H, Wang L J. 2012. On a possible mechanism for southern Asian convection influencing the South Asian High establishment during winter to summer transition. *J Trop Meteor*, 18(4): 473-484
- Liu Y M, Chan J C L, Mao J Y, et al. 2002. The role of Bay of Bengal convection in the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon. *Mon Wea Rev*, 130(11): 2731-2744
- Mao J Y, Wu G X. 2008. Influences of typhoon Chanchu on the 2006 South China Sea summer monsoon onset. *Geophys Res Lett*, 35(12): L12809, doi: 10.1029/2008GL033810
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea. *Mon Wea Rev*, 126(4): 913-927
- Wu G X, Guan Y, Wang T M, et al. 2011. Vortex genesis over the Bay of Bengal in spring and its role in the onset of the Asian summer monsoon. *Sci China:Earth Sci*, 54(1): 1-9
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Scientific Reports*, 2: 404, doi: 10.1038/srep00404
- Wu G X, Ren S L, Xu J M, et al. 2013. Impact of tropical cyclone development on the instability of South Asian High and the summer monsoon onset over Bay of Bengal. *Climate Dyn*, 41(9): 2603-2616, doi: 10.1007/s00382-013-1766-0
- Xu J J, Chan J C L. 2001. First transition of the Asian summer monsoon in 1998 and the effect of the Tibet-tropical Indian ocean thermal contrast. *J Meteor Soc Japan*, 79(1B): 241-253
- Yu H, Hu C H, Jiang L Y. 2007. Comparison of three tropical cyclone intensity datasets. *Acta Meteor Sinica*, 21(1): 121-128