

石文静, 肖子牛. 2013. 近 60 年索马里急流越赤道水汽输送的变化特征及对中国初夏降水的影响. 气象, 39(1): 39-45.

# 近 60 年索马里急流越赤道水汽输送的变化特征及对中国初夏降水的影响<sup>\*</sup>

石文静<sup>1</sup> 肖子牛<sup>2,3</sup>

1 南京信息工程大学, 大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

3 中科院大气物理研究所, 北京 100029

**提 要:** 利用近 60 年(1951—2010 年)的 NCEP/NCAR 再分析风、比湿、地面气压及降水资料, 建立了一个越赤道水汽输送强度指数来表征索马里急流的强度, 并从季节、年际、年代际变化及突变等不同侧面出发, 比较系统地分析了索马里急流越赤道水汽输送强度的变化特征, 并进一步分析了它与我国初夏降水异常的关系及这种关系随时间的年代际变化特点。分析结果表明: 进入 20 世纪 90 年代之后, 索马里急流风速强度有明显的减弱趋势, 而水汽输送强度无显著变化; 与索马里急流风速强度相比, 水汽输送强度与我国初夏 6 月降水量的关系更为密切。索马里急流弱年对应长江以北的华北地区初夏降水偏少, 反之亦然。此外, 索马里水汽输送对我国北方初夏降水的影响在 1982 年后明显加强。

**关键词:** 索马里急流, 水汽输送, 中国初夏降水

**中图分类号:** P461

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.005

## Variation of the Cross-Equatorial Moisture Transport in Somali and Its Impact on China Early Summer Rainfall in Nearly 60 Years

SHI Wenjing<sup>1</sup> XIAO Ziniu<sup>2,3</sup>

1 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 CMA Training Centre, Beijing 100081

3 Institute of Atmosphere Physics, CAS, Beijing 100029

**Abstract:** Based on the NCEP / NCAR wind field, specific humidity, surface pressure and precipitation re-analysis data from 1951 to 2010, a cross-equatorial moisture transport intensity index is established to characterize the strength of the Somali jet (SMJ), and the seasonal, interannual, decadal variations and mutations of the SMJ cross-equatorial moisture transport intensity are studied, while comparing with the traditional SMJ wind speed intensity index. In addition, the relationship between SMJ and the China early summer precipitation is analyzed. Based on the above analysis, the decadal changes of this relationship are revealed. Main results are as follows. After the 1990s, the SMJ wind speed intensity index is weakening, but the SMJ water vapor transport has no significant variations; compared with the SMJ wind speed strength, the SMJ water vapor transmission intensity is associated with the China early summer rainfall more closely. When the SMJ is weaker, rainfall decreased in the Huanghe-Huaihe River Basin and North China in early summer, and vice versa. Besides, this correlation has been strengthened in recent 30 years.

**Key words:** Somali jet (SMJ), moisture transport, China early summer rainfall

\* 国家自然科学基金面上项目(41175051)和国家重大科学研究计划(2012CB957804)共同资助

2012 年 3 月 2 日收稿; 2012 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者: 石文静, 主要从事海气相互作用研究. Email: shiwenjing\_005@163.com

通信作者: 肖子牛, 主要从事气候动力学研究. Email: xiaozn@cma.gov.cn

## 引 言

索马里急流(Somali Jet)是夏季最为强盛的大气系统之一,它与南北半球水汽输送、物质、动量、能量交换和大气环流变化密切相关。20 世纪 60 年代初期,陶诗言等(1962)就从天气分析的角度指出两个半球大气环流之间有密切的关系。60 年代末期,Findlater(1969)发现了索马里低空急流,随后人们就对其开展了动力学和数值模拟的研究(Krishnamurti et al, 1976; Bannon, 1979)。70 年代末期以后,随着观测资料的增多,索马里急流的时空结构逐渐获得了广泛的认识,对索马里急流和其他几支越赤道气流的对比分析表明,索马里急流是最强的越赤道水汽输送通道,有明显的季节变化特征(王继志等, 1982; 王兴东等, 1984),并且与南半球马斯克林高压、澳大利亚高压系统的变化以及副热带高压(以下简称副高)脊线北抬至  $25^{\circ}\text{N}$  有密切的联系(杨修群等, 1989; 何金海等, 1991; 徐祥德等, 1993; 许金镜等, 2006)。作为亚洲地区水汽输送的重要环节,以及亚洲季风的重要组成部分,索马里急流是联系印度洋和亚洲气候的重要桥梁,其变化和异常对亚洲地区的天气气候和旱涝异常有重要的影响(黄荣辉等, 1998; 李崇银等, 1999; Xue et al, 1999; 徐祥德等, 2002; 李崇银等, 2002),因此,该领域的研究一直受到国内外专家学者的重视。

随着对索马里急流的研究工作的深入,人们发现,多时间尺度是索马里急流的重要变化特征之一。与年际变化相比,索马里急流的年代际变化趋势更为明显,其年代际尺度上在 1948—2005 年期间有先减弱后增强的变化趋势(汪卫平等, 2008),由于索马里急流在东半球南北物质能量交换中有着关键的作用(Xue et al, 2004; 王会军等, 2003),且以夏季的交换最为显著(张燕等, 2008),夏季异常向北的越赤道质量净输送主要通过亚洲季风区的西南气流完成,特别是索马里越赤道急流从对流层低层到高层的向北输送有很大的贡献。因此,索马里急流水汽输送的变化特征研究具有科学意义。

近年来,印度洋对东亚气候的影响受到重视(肖子牛等, 2002; 张人禾等, 2005; 龚振淞等, 2006),索马里急流及其延伸的亚洲季风环流是联系印度洋和东亚气候的重要桥梁。过去的研究主要是从索马里急流风强度的角度来揭示其变化特征及其与东亚气

候的联系,而很少有通过研究索马里急流越赤道水汽输送的强度来描述其变化特征及其对东亚气候和我国旱涝异常的影响。此外,最近已有许多专家学者对索马里急流与东亚夏季降水的联系做了相关研究,如王会军等(2003)、汪卫平等(2008)及唐碧(2008)均在文章中涉及到了索马里急流与东亚或中国夏季降水的关系。然而,研究结果显示索马里急流与中国夏季降水的相关性并不十分理想,对于其他季节的降水如初夏降水的相关研究甚少。基于以上分析,本文研究旨在探寻索马里急流越赤道水汽输送强度的变化特征及其与中国初夏降水的联系。

## 1 资料和方法

本文所用资料包括:(1)1951 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日的 NCEP/NCAR 再分析的全球逐日平均 17 层风场( $u, v$  分量)、8 层比湿( $q$ )以及相应的地面气压( $P_s$ )资料,分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  经纬度。文中根据需要逐日资料处理成逐候资料(李晓峰等, 2006)。(2)1951 年 1 月至 2010 年 12 月的重建月平均全球陆地降水资料(Visualize Precipitation Reconstruction over Land, PREC/L),分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  经纬度。文中夏季被定义为 6—8 月平均。全文所用的相关系数信度检验均为  $t$  分布检验。

## 2 东半球越赤道气流水汽输送的时空变化特征

### 2.1 越赤道气流多年平均的气候分布特征

为了揭示东半球越赤道气流对水汽输送的通道以及强度变化的时空分布特征,图 1 给出了 1951—2010 年平均的东半球越赤道气流经向水汽输送的气候平均分布。由图可见,夏季东半球有 5 条越赤道气流通道: $45^{\circ}\text{E}$  通道(索马里急流)、 $90^{\circ}\text{E}$  通道(孟加拉湾越赤道气流)、 $105^{\circ}\text{E}$  通道(南海越赤道气流)、 $125^{\circ}\text{E}$  (苏拉维西越赤道气流)以及  $150^{\circ}\text{E}$  通道(新几内亚越赤道气流)(韩慎友, 2002; 高辉, 2004; 李曾中, 1986)。其中索马里急流尤为强盛,不论是在空间尺度上还是时间尺度上均强于其他 4 条通道。从空间位置上看,它的中心位于  $40^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{E}$ ,从近地面到 700 hPa 高度均有表现(汪卫平等, 2008); 而从时间变化上看,它存在明显的季节变化。越赤

道气流由向南水汽输送转为向北水汽输送的过程即为索马里急流的建立过程。相对于其他 4 支气流,

索马里急流最早开始建立,而另外 4 支气流形成相对较晚。

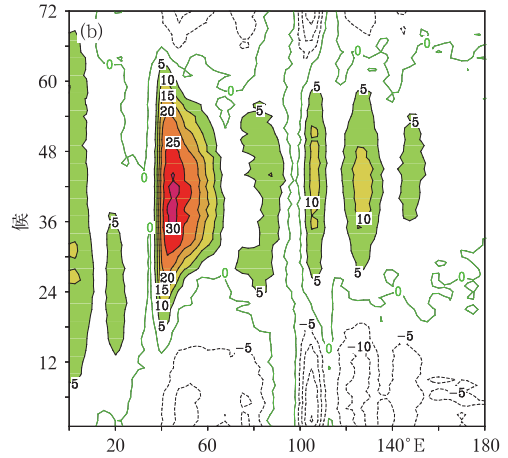
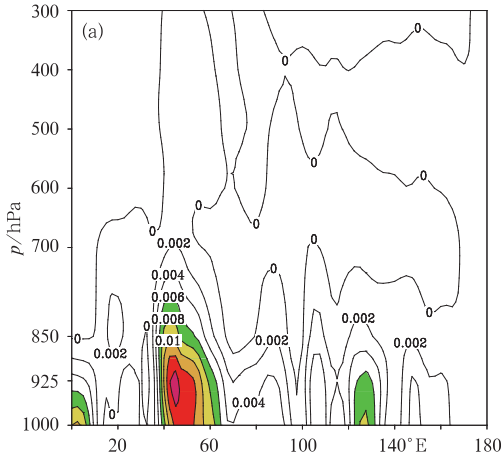


图 1 1951—2010 年东半球越赤道气流经向水汽输送的多年气候平均分布 (单位:  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a) 夏季沿赤道经向水汽输送随经度-高度分布, (b) 沿赤道从地面积分到 700 hPa 高度的经向水汽输送随经度-候分布

Fig. 1 Climatological distribution of the meridional moisture transport of the Eastern Hemisphere lower-level cross-equatorial flow for 1951—2010 (unit:  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a) the longitude-altitude distribution of the meridional moisture flux along the equator during summer, (b) the longitude-pentad distribution of the meridional moisture flux vertically integrated from surface to 700 hPa along the equator

目前,用来表征索马里急流强度的主流方法是取 925 hPa 高度上索马里急流区的平均经向风来代表索马里急流的强度指标。而本文中用索马里急流区平均的垂直积分(从地面积分到 700 hPa 高度)水汽通量的经向分量来衡量索马里急流的强度。采取的索马里急流区为  $0^{\circ}\text{S} \sim 0^{\circ}\text{N}$ 、 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{E}$ 。为了研究索马里急流越赤道水汽输送强度的季节变化特征,及其与传统意义上的索马里急流强度的异同。图 2 给出了 60 a 平均索马里急流强度逐候的年内变化。从图中可看出,越赤道水汽输送强度和风速强度表征出的索马里急流均于第 15 候(一年 72 候)左右开始发展,32—46 候达到最强,随后逐渐减弱,直到 65 候左右开始消失。这说明两种方法所表征出的索马里急流强度的季节变化趋势基本一致。

趋势,而水汽输送强度无显著变化。从图 3b 中可以更清晰地分辨出:70 年代中期之前两种强度指标的变化趋于一致,而之后二者的变化趋势出现了较大的差异。从图中可见,索马里急流的风速强度在 20 世

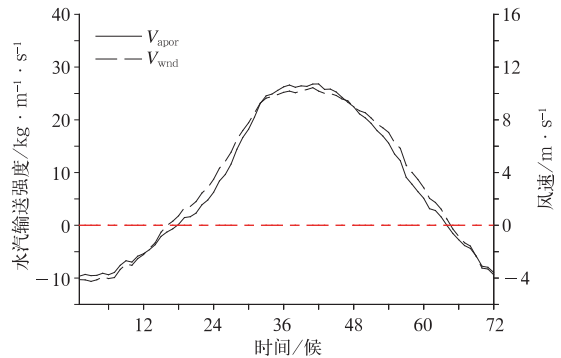


图 2 1951—2010 年多年气候平均的索马里急流强度指标的季节变化 (图中实线代表水汽输送强度,单位:  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 虚线代表风速强度,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 2 The seasonal variation of the climatological SMJ water vapor transport (solid line, unit:  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and wind speed (dashed line, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) intensity index during 1951—2010

### 2.2 索马里急流的强度变化及其突变特征

图 3a 和 3b 分别给出了 1951—2010 年夏季索马里急流强度的标准化距平及其累计距平曲线。图 3 表明两种夏季索马里急流强度指数均存在明显的年际、年代际变化。值得注意的是,进入 20 世纪 90 年代之后,索马里急流风速强度有明显的减弱

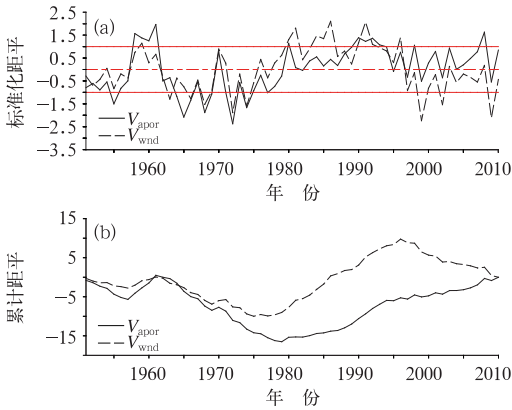


图 3 1951—2010 年夏季索马里急流强度的标准化距平(a)及其累计距平(b)曲线  
(图中实线代表水汽输送强度, 虚线代表风速强度)

Fig. 3 The normalized time series (a) and accumulative intensity anomaly curves (b) of the summer SMJ moisture transport (solid line) and wind speed (dashed line) intensity during 1951—2010

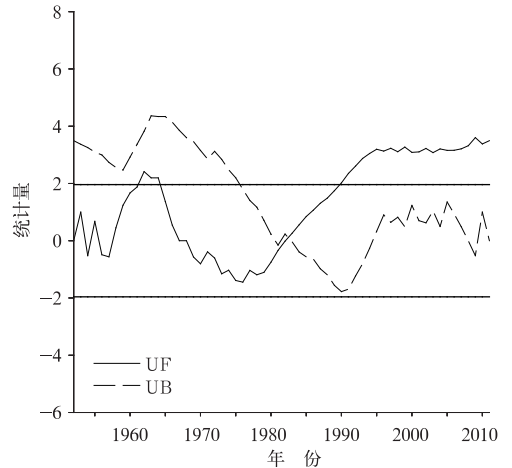


图 4 夏季索马里急流越赤道水汽输送强度的 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 4 Abrupt changes in intensity of the summer SMJ cross-equatorial water vapor transport as detected with Mann-Kendall test [Solid (dashed) lines denote the progressive (retrograde) statistical series, while horizontal lines at values of  $\pm 1.96$  denote the 0.05 level of significance]

纪 70 年代末期之前呈现波动减弱趋势,之后至 90 年代中期为较强的位相,90 年代中期之后显著减弱。而从水汽输送角度来看,70 年代中期之前和风速强度的变化基本一致,除在 1960 年附近较强外,基本为缓慢减弱;70 年代中期之后增强并基本维持,与风速相比,没有出现 90 年代后期的显著减弱趋势。此外,分析 3—10 月逐月的索马里急流强度标准化距平曲线发现,索马里急流水汽输送和风速两个强度指数的变化差异主要体现在 6—9 月,除此以外的其他月份的变化曲线没有明显的差异(图略)。

采用 Mann-Kendall 法对夏季索马里急流越赤道水汽输送强度指标进行突变检测,结果显示:夏季索马里急流水汽输送强度(图 4)突变发生在 20 世纪 80 年代初期的 1982 年左右,之后强度增强,且自 1990 年起为一个显著较强的时期。

### 3 索马里急流越赤道水汽输送强度与中国初夏降水的关系

为了研究索马里急流越赤道水汽输送对我国初夏降水的影响,分别分析初夏 5 和 6 月索马里急流水汽输送强度和中国降水的关系,可以发现其与我国西南降水成负相关,而与华北降水为正相关关系,其中与我国 6 月降水的同期相关关系最为显著。

图 5a 给出了索马里急流越赤道水汽输送强度与我国 6 月降水的同期相关分布。从图中可见,6 月索马里急流水汽输送强度与我国初夏降水主要存在正相关。显著正相关区域主要位于黄淮流域及华北一带;而青藏高原东南缘存在小片负相关区。这表明,当 6 月索马里急流增强时,我国黄淮流域及华北地区初夏降水偏多而青藏高原东部地区初夏降水偏少,反之亦然。对比传统意义上的索马里急流风速强度(图 5b)可以发现,初夏索马里急流水汽输送强度与我国初夏 6 月的降水的正相关范围更大,相关系数在不少地区达到 0.4 以上,因此索马里急流水汽输送强度与我国初夏 6 月降水的相关性更好一些。

从上述索马里急流水汽输送强度的变化特征可见,其强度在 20 世纪 80 年代初期有明显变化。索马里急流水汽输送强度对中国初夏的降水的影响是否有变化? 图 6 给出了 1982 年前后它们之间的相关系数分布,从图中可见,1951—1982 年的二者的显著正相关区主要零星地分散在长江以北,华南南部、青藏高原东南缘和新疆西部为负相关;而 1983—2010 年二者的相关性明显加强,长江以北的华北地区存在大片显著正相关区。这种相关关系的变化说明索马里越赤道气流的水汽输送与我国初夏

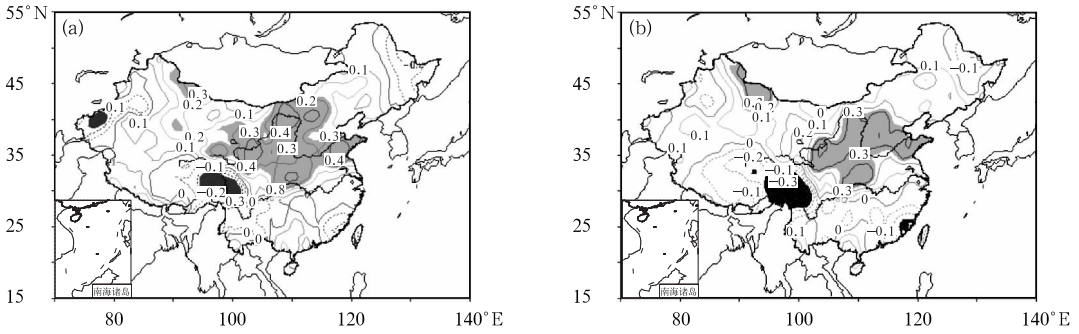


图 5 1951—2010 年索马里急流与中国 6 月降水的同期相关系数分布

(a) 水汽输送强度, (b) 风速强度

(阴影区为显著性检验超过 0.05 的区域)

Fig. 5 Simultaneous correlations between the SMJ intensity anomaly and the China rainfall anomaly in June for (a) moisture transports, and (b) wind speed intensity from 1951 to 2010

(The regions with significance level no less than 0.05 are shaded)

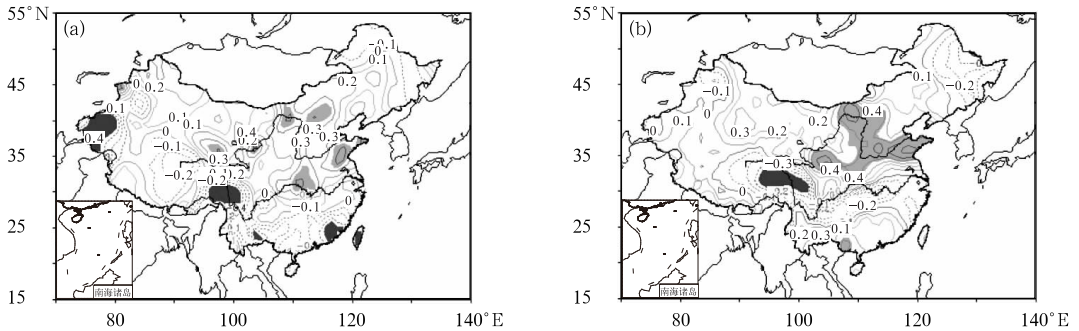


图 6 1951—1982 年(a)和 1983—2010 年(b)索马里急流越赤道水汽输送与中国 6 月降水的同期相关分布

(阴影区为显著性检验超过 0.05 的区域)

Fig. 6 Simultaneous correlations between the SMJ moisture transport intensity anomaly and China rainfall anomaly in June during (a) 1951—1982, and (b) 1983—2010

(The regions with significance level no less than 0.05 are shaded)

降水的联系存在年代际变化,与我国北方降水的联系在最近得到了加强。

我们还可以从 6 月索马里越赤道气流的水汽输送强度的最强和最弱的典型年降水的合成直接看到二者之间的联系。1951—2010 年水汽输送强度按 0.7 个标准差选取强弱年,则强年为:1958、1959、1960、1970、1980、1984、1986、1987、1990、1993、1994、1996、2007 和 2008 年;弱年为:1953、1962、1963、1964、1965、1966、1968、1969、1972、1974、1983、1997、1999 和 2009 年。图 7 为 6 月索马里越赤道气流的水汽输送强弱年中国降水距平的合成图,由图可见当索马里越赤道气流的水汽输送偏强时,山东半岛和黄河上游小部地区初夏 6 月降水偏

多,青藏高原东南缘小部地区降水偏少;反之,当索马里越赤道气流的水汽输送偏弱时,长江以北的华北大片地区初夏降水偏少,华南南部降水偏多,这与相关分析所得出的与我国西南降水成负相关,而与华北降水成正相关的结论是一致的。

为了考察 1982 年索马里水汽输送发生突变后对中国初夏降水的不同影响,分别取 1982 年前后两个不同时段的水汽输送强年和弱年合成分析其降水距平的分布,如图 8 所示 1951—1982 年和 1983—2010 年两个时间段的强弱年降水距平的合成分布出现了显著差异,1983—2010 年索马里水汽输送强度偏强时,黄河上游流域降水偏多,西藏东部降水偏少,而 1951—1982 年这些地区的降水并无显著变

化;反之,索马里水汽输送偏弱时,长江以北的华北地区降水偏少,较 1982 年前华北地区降水偏少的区域显著增大,而华南降水在 1982 年前显著偏多,

1982 年后无显著差异。这再次说明索马里水汽输送对我国北方初夏降水的影响在 1982 年后明显加强。

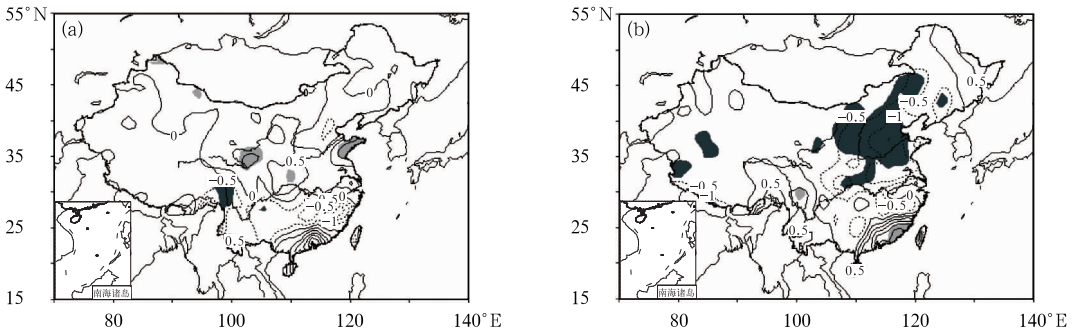


图 7 1951—2010 年 6 月索马里越赤道气流的水汽输送强弱年

中国初夏降水距平的合成(单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

(a) 强年合成, (b) 弱年合成

(阴影区为显著性检验超过 0.05 的区域)

Fig. 7 Composite differences of China rainfall anomaly in June (unit:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

(a) between strong and normal and (b) between weak and normal cross-equatorial

water vapor transmission years for Somali jet during 1951—2010

(The regions with significance level no less than 0.05 are shaded)

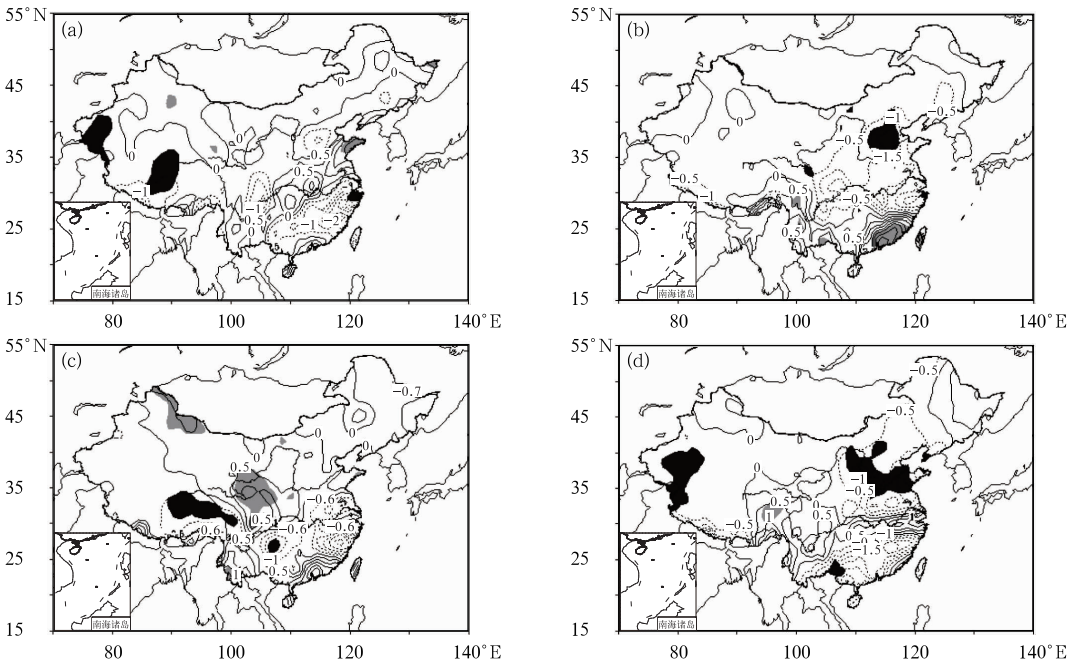


图 8 突变年前后 6 月索马里越赤道气流的水汽输送强弱年中国初夏降水距平的合成(单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )

(a)和(b) 1951—1982 年, (c)和(d) 1983—2010 年, (a)和(c) 强年合成, (b)和(d) 弱年合成

(阴影区为显著性检验超过 0.05 的区域)

Fig. 8 Composite differences of China rainfall anomaly in June (unit:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) (a,c) between strong

and normal and (b,d) between weak and normal cross-equatorial water vapor transmission years for

Somali jet during (a,b) 1951—1982, and (c,d) 1983—2010

(The regions with significance level no less than 0.05 are shaded)

## 4 小 结

本文利用近60 a的NCEP/NCAR再分析风、比湿、地面气压以及降水资料,研究了索马里急流越赤道水汽输送强度的季节变化、年际、年代际变化及其突变特征,比较了水汽输送强度和急流风速强度变化特征的异同,并分析了索马里急流越赤道水汽输送强度与我国初夏降水异常的联系及这种联系随时间的变化特点。结果表明:

(1)索马里急流越赤道水汽输送强度存在明显的季节变化,夏季最为强盛,它的中心位于 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{E}$ ,从近地面到700 hPa高度均有表现。

(2)在季节内变化上,索马里急流越赤道水汽输送强度和风速强度变化趋势趋于一致;在年际、年代际变化上,两种夏季索马里急流强度指数的变化出现了明显差异,索马里急流风速强度进入20世纪90年代之后,有明显的减弱趋势,而水汽输送强度无显著变化。夏季索马里急流水汽输送强度存在明显突变,突变开始于20世纪80年代初期。

(3)通过相关系数及合成分析研究表明,索马里急流水汽输送强度与我国初夏6月的降水存在相关性,显著正相关区主要位于黄淮流域及华北一带,负相关区位于青藏高原东部。当索马里越赤道气流的水汽输送偏强时,山东半岛和黄河上游小部分地区6月降水偏多,青藏高原东南缘降水偏少;反之,长江以北的华北大片地区初夏降水偏少,华南南部降水偏多。此外,研究还表明索马里急流越赤道水汽输送对我国北方初夏降水的影响在1982年后得到了明显的加强。其原因有待以后做更深入的研究。

## 参考文献

高辉. 2004. 南半球大气环流的季节和年际变化及其对东亚夏季风的影响. 南京:南京信息工程大学大气科学系, 26-27.

龚振源, 何敏. 2006. 长江流域夏季降水与全球海温关系的分析. 气象, 32(1): 56-61.

韩慎友. 2002. 越赤道气流时空变化特征及其与我国夏季降水和西北太平洋热带气旋发生频数的关系. 南京:南京信息工程大学大气科学系, 15-16.

何金海, 李俊, 李永平. 1991. 澳大利亚冷空气活动影响东亚夏季风的过程——数值试验. 气象学报, 49(2): 162-169.

黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区的水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. 大气科学, 22(4): 460-469.

李崇银, 吴静波. 2002. 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, 26(2): 185-192.

李崇银, 张利平. 1999. 南海夏季风活动及其影响. 大气科学, 23(3): 257-266.

李晓峰, 郭品文, 董丽娜, 等. 2006. 夏季索马里急流的建立及其影响机制. 南京气象学院学报, 29(5): 599-605.

李曾中. 1986. 越赤道气流与中国天气关系的初步统计分析. 气象, 4(1): 11-14.

唐碧. 2008. 越赤道气流的年际、年代际变化研究. 南京:南京信息工程大学大气科学系, 21-22.

陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 1962. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征. 气象学报, 32(2): 91-102.

王会军, 薛峰. 2003. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响. 地球物理学报, 46(1): 18-25.

王继志, 李麦村. 1982. 源于澳洲过赤道气流与中国季风环流和降水. 大气科学, 6(1): 1-10.

汪卫平, 杨修群. 2008. 索马里急流变异及其与东亚夏季风和中国降水异常的关系. 气象科学, 28(2): 139-146.

王兴东, 陶诗言. 1984. 西太平洋越赤道气流的初步研究. 海洋学报, 6(2): 160-173.

肖子牛, 晏红明, 李崇银. 2002. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系. 热带气象学报, 18(4): 335-344.

许金镜, 温珍治, 何芬. 2006. 越赤道气流对副高脊线北抬至 $25^{\circ}\text{N}$ 的影响. 气象, 32(8): 81-87.

徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 2002. 青藏高原一季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝常的关系. 气象学报, 60(3): 259-265.

徐祥德, 赵天良, 何金海, 等. 1993. 澳洲大陆热力强迫对南北半球环流异常的影响效应. 大气科学, 17(6): 641-650.

杨修群, 黄士松. 1989. 马斯克林高压的强度变化对大气环流影响的数值试验. 气象科学, 9(2): 125-138.

张人禾, 李强. 2005. 热带海洋变异对东亚季风的影响. 气象, 30(12): 22-26.

张燕, 黄菲, 宫晓庆. 2008. NCEP/NCAR再分析资料中南北半球大气质量交换的特征研究. 热带气象, 24(1): 74-80.

Bannon P R. 1979. On the dynamics of the East African jet I: Simulation of mean conditions for July. J Atmos Sci, 36(11): 2139-2152.

Findlater J. 1969. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer. Q J R Meteor Soc, 95(404): 362-380.

Krishnamurti T N, Molinari J, Pan Hualu. 1976. Numerical simulation of the Somali Jet. J Atmos Sci, 33(12): 2350-2362.

Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. 2004. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 82(4): 1173-1186.

Xue Feng, Zeng Qingcun. 1999. Diagnostic study on seasonality and interannual variability of wind field. Adv Atmos Sci, 16(4): 537-543.