

邱金晶, 孙照渤. 2013. 夏季索马里越赤道气流垂直结构的变化特征及其与东亚夏季风活动的关系 [J]. 大气科学, 37 (5): 1129-1142, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12174. Qiu Jinjing, Sun Zhaobo. 2013. Variation characteristics of the vertical structure of the summer Somali cross-equatorial flow and its relationship with East Asia summer monsoon activity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1129-1142.

夏季索马里越赤道气流垂直结构的变化特征 及其与东亚夏季风活动的关系

邱金晶 孙照渤

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 采用 NCEP/NCAR 和 ERA40 再分析月平均资料, 对比分析夏季垂直尺度上五层 (1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa) 索马里越赤道气流 (SMJ) 的时空演变特征。指出对流层中低层 SMJ 存在不同的垂直结构, 且具有年际、年代际变化特征。夏季 SMJ 垂直结构主要呈现出全区一致、上下反相两种分布型 (“A”型和 “B”型), 细分为一致增强型 (“A+”型)、一致减弱型 (“A-”型)、上弱下强型 (“B+”型) 和上强下弱型 (“B-”型)。进一步分析指出, SMJ 垂直结构与东亚夏季风活动关系密切, SMJ “A+” (“A-”) 型垂直结构对应东亚夏季风偏强 (弱), 我国内蒙古东部、华北地区降水偏多 (少); 夏季 SMJ “B+” (“B-”) 型垂直结构对应东亚夏季风偏弱 (强), 我国江南、日本地区降水偏少 (多)。

关键词 索马里越赤道气流 垂直结构型 环流系统 东亚夏季风 降水

文章编号 1006-9895(2013)05-1129-14

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12174

Variation Characteristics of the Vertical Structure of the Summer Somali Cross-Equatorial Flow and Its Relationship with East Asia Summer Monsoon Activity

QIU Jinjing and SUN Zhaobo

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The spatiotemporal evolution of Somali cross-equatorial flow (SMJ) in summer at five levels (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa) are studied on the basis of National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data and ERA40 reanalysis monthly mean data. The results show that vertical structures of SMJ in the middle and lower troposphere differ, with interannual and interdecadal change characteristics. Two main vertical structure modes are clarified. The first is a consistent mode in the entire region (“A” mode), and the second is the vertically opposite mode (“B” mode). Thus, four vertical anomalous types of SMJ are observed to include consistently strong pattern (“A+” pattern), consistently weak pattern (“A-” pattern), higher weak and lower strong pattern (“B+” pattern), and higher strong and lower weak pattern (“B-” pattern). It is also indicated that the vertical structures of SMJ are closely related to East Asia summer monsoon activity. Specifically, the “A+” pattern (“A-” pattern) correlates strongly to the strong (weak) East Asia summer monsoon with more (less) rainfall in eastern Inner Mongolia and North China. The “B+” pattern (“B-” pattern) correlates strongly to the weak (strong) East

收稿日期 2012-10-21, 2013-03-29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40775059, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介 邱金晶, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 从事短期气候预测研究, E-mail: ttandyt@163.com

通讯作者 孙照渤, E-mail: nimzbs@163.com

Asia summer monsoon with less (more) rainfall in the southern area of the Yangtze River and Japan.

Keywords Somali cross-equatorial flow, Vertical structure mode, Circulation system, East Asia summer monsoon, Precipitation

1 引言

越赤道气流是热带大气环流的重要组成部分,是南、北半球间质量、动量、水汽交换的主要通道,是影响南、北半球天气气候异常的重要因素之一。上世纪 60 年代末,Findlater (1969) 首先发现了索马里急流,指出其对印度夏季风的爆发有重要作用。此后,越赤道气流引起广泛关注。研究表明,索马里越赤道气流(以下简称 SMJ)是最强大的低空越赤道气流,其强度具有明显的长期趋势变化和年际、年代际变化(李曾中等,1998,2000;施能等,2007;唐碧等,2009),还存在明显的周期变化特征,45°E 越赤道气流无论冬夏主要受 2~3 年周期的影响(彭维耿和蒋尚城,2003)。对索马里低空气流有关形成机制的模拟实验表明,在边界层中气流的发展主要决定于非绝热加热的海陆不均匀分布,与地形高低的关系较小,但地形高低对气流的强度、垂直伸展高度和风速轴线随高度的倾斜有影响(钱永甫等,1987)。越赤道气流的变化与全球范围内的大气环流密切相关(汤明敏等,1985;刘向文等,2009a,2009b)。另外,越赤道气流与季风的关系一直是热点问题,它们是相互联系和相互作用的两个系统(范可和王会军,2006)。曾庆存和李建平(2002)分析了季风及越赤道气流的本质关系。李崇银和吴静波(2002)、丛菁等(2007)、汪卫平和杨修群(2008)从不同角度研究了 SMJ 变化与亚洲夏季风活动的关系,而且这种关系可能在季节、年际、年代际尺度上存在差异。另外,SMJ 的强度变化会直接影响越赤道向东亚季风区的水汽输送量,对东亚夏季降水也有着显著的影响(王会军和薛峰,2003)。

有关夏季 SMJ 的时空特征及其影响研究有很多,但绝大部分研究都是基于某一空间层的越赤道气流。在较早的研究中,一般使用 850 hPa 越赤道气流作为研究对象(李曾中和楼光平,1987;徐建军等,1992),现在由于再分析资料的完善,发现气候平均下低层越赤道气流的最大值出现在 925 hPa(高辉和薛峰,2006),之后很多工作改选 925 hPa 层次进行研究(梁俊明和孙照渤,2005;汪卫

平和杨修群,2008;杜启倩等,2010)。近年来,有个别学者开始着眼于越赤道气流在垂直尺度上的变化特征。赵煜飞(2008)提出了越赤道气流以及赤道经向风异常的垂直传播模态,谢磊(2011)的研究表明近 60 年索马里低空越赤道气流核心在 925 hPa 和 850 hPa 这两个层次上交替出现,垂直结构随之发生变化。

本文利用观测分析资料分析研究了夏季 SMJ 的垂直结构,指出 SMJ 的垂直结构变化与东亚夏季风环流以及降水异常有密切关系。

2 资料与方法

所用资料有:1950~2010 年 NCEP/NCAR 再分析月平均资料,包括纬向风、经向风、地面气压场,其中垂直方向有 17 层,格点分辨率为 2.5°×2.5°。另取 1958~2002 年 ERA40 经向风月平均资料,垂直方向有 23 层,分辨率亦为 2.5°×2.5°,用以对比 NCEP/NCAR 资料结果。降水资料为 1950~2010 年全球陆地月降水资料(PREC/L),分辨率为 2.5°×2.5°。本文中夏季是指当年 6 月至 8 月平均。

主要采用经验正交函数展开(EOF)、Morlet 小波分析、相关分析、合成分析等方法,显著性检验为 t 分布检验。计算水汽输送通量、水汽通量散度的方法详见文献(黄荣辉等,1998)。

3 夏季对流层中低层 SMJ 垂直结构的时空特征及分型

3.1 夏季 SMJ 强度指数的定义

为了表征越赤道气流南北向输送的特征,本文把 2.5°S 到 2.5°N 之间 3 个格点上经向风的平均值作为越赤道气流。经向风在各经度上的值差别很大,形成了一些越赤道气流通道的。从图 1 可以看到,东半球夏季低空 30°E 以东主要存在 5 个越赤道气流大值中心,其中,中心位于 40°~50°E 的索马里越赤道气流最强,风速最大可达 11 m/s 以上,并且该位置上 2 m/s 的等风速线基本到达 600 hPa,可见 SMJ 在垂直尺度上较其他气流深厚得多。本文将研究对象设定为对流层中低层(1000 hPa 至 600 hPa)夏季 SMJ 的垂直结构(如无特别

说明，下文提到的 SMJ 垂直结构均指 1000 hPa 至 600 hPa 层次内的垂直结构。

首先要确定描述各层 SMJ 变化的特征序列。图 2 指示了夏季 1000 hPa 至 600 hPa 内五层 SMJ 核心风速所在的位置，可见不同层次上不仅 SMJ 的中心值存在差异，中心位置也略有偏移。从历年大值中心位置的变化来看，各层 SMJ 的中心位置不是固定的，但基本集中在一个较狭窄的区域内，也就是说各层 SMJ 都有一个窄而强的通道位置。本文根据杜启倩等（2010）的定义方法，通过对实际气流的计

算得到，1000 hPa 至 600 hPa 5 层 SMJ 每年最大值基本出现在以下通道：1000 hPa (45.0°~50.0°E)，925 hPa (42.5°~45.0°E)，850 hPa (42.5°~45.0°E)，700 hPa (42.5°~45.0°E)，600 hPa (45.0°~47.5°E)，然后以各层通道内的最大经向风作为该年夏季各层 SMJ 强度指数，记为 I_{SMJ} ，将五个高度层上的 SMJ 强度分别记为 $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 、 I_{SMJ850} 、 I_{SMJ700} 、 I_{SMJ600} 。

3.2 夏季 SMJ 垂直结构的时空演变特征

通过计算 61 年夏季各层 I_{SMJ} 间的相关系数，发现 $I_{SMJ1000}$ 和 I_{SMJ925} 、 I_{SMJ700} 和 I_{SMJ600} 密切相关，相关系数分别高达 0.80 和 0.87，但 $I_{SMJ1000}$ 与 I_{SMJ700} (I_{SMJ600}) 的相关系数仅为 -0.11 (-0.08)，没有通过显著性检验， I_{SMJ925} 与 I_{SMJ700} (I_{SMJ600}) 也不相关。这说明下层（指研究区域的下层：925 hPa、1000 hPa，下同）SMJ 与上层（指研究区域的上层：700 hPa、600 hPa，下同）SMJ 的时空演变特征存在较大的差异，下面将作详细讨论。

图 3 是 1950~2010 年夏季 5 层 I_{SMJ} 的年变化和累积距平图。分别求得 61 年 5 层 I_{SMJ} 的方差，发现 I_{SMJ700} 年际变化最强，方差约为 3.177，远大于其它 4 层， I_{SMJ600} 次之； $I_{SMJ1000}$ 年际变化相比之下最弱，方差仅为 0.191， I_{SMJ925} 次之。采用 Morlet 小波分析方法对强度指数时间序列进行周期分析，从各层 I_{SMJ} 的小波能量分布图（图略）可以看出，各高度层上 SMJ 年际变化均以 2~3 年周期为主，但存在

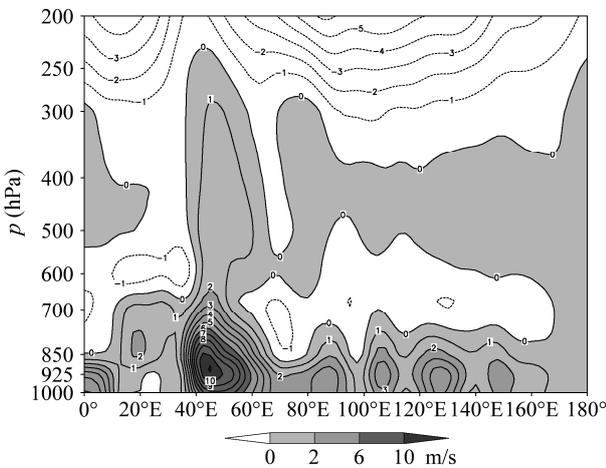


图 1 1950~2010 年夏季平均东半球沿 2.5°S~2.5°N 平均经向风(m/s) 的经度—高度剖面

Fig. 1 The longitude–altitude cross section of the average meridional wind speed (m/s) along 2.5°S–2.5°N in summer of Eastern Hemisphere for 1950–2010

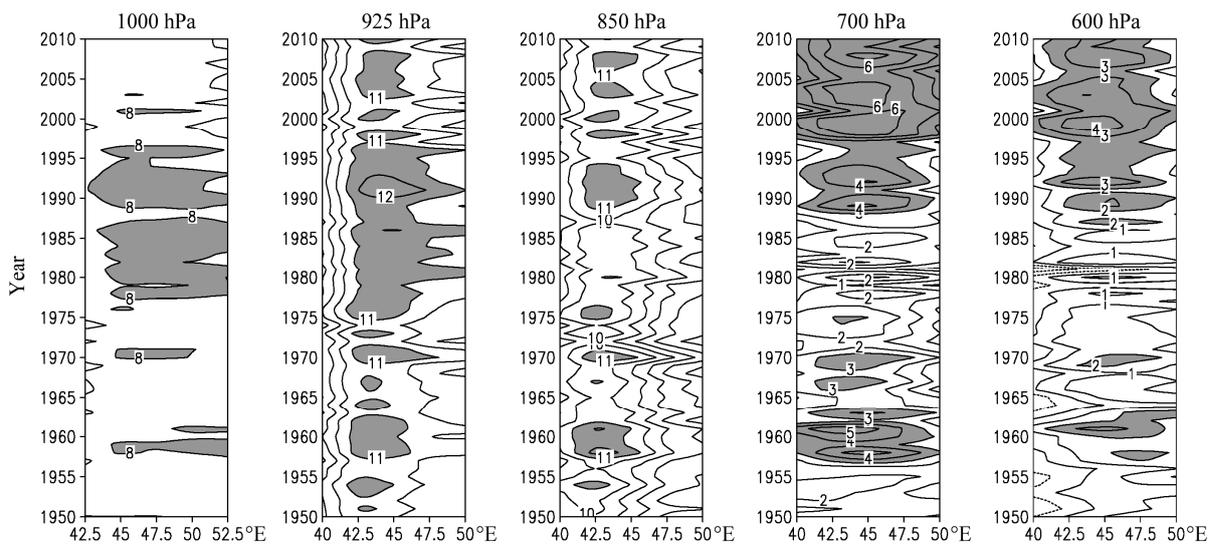


图 2 夏季索马里地区沿 2.5°S~2.5°N 平均经向风(m/s) 的经度—时间剖面（阴影区是各层核心风速区，从左到右分别为 1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa）

Fig. 2 The longitude–time cross sections of the Somali meridional wind speed (m/s) at 1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa averaged along 2.5°S–2.5°N in summer during 1950–2010. Shaded areas denote max intensity

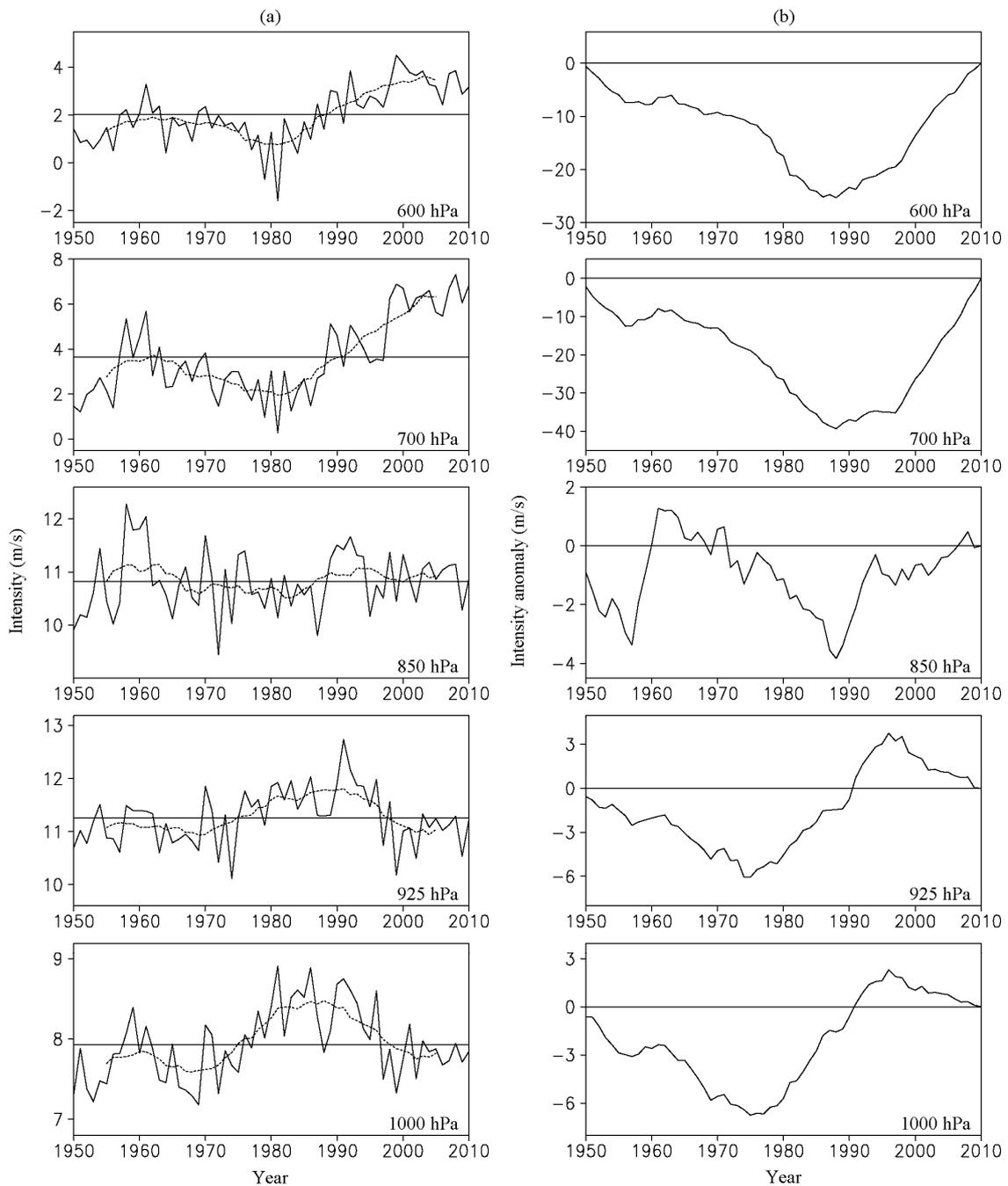


图3 1950~2010年夏季1000 hPa至600 hPa 5层 (a) SMJ强度 (m/s) 的年变化 (折线: 强度; 虚线: 11年滑动平均; 平直线: 平均值) 以及 (b) 累积距平

Fig. 3 (a) Time series of Somali cross-equatorial flow (SMJ) intensity at five levels in summer during 1950–2010 (Broken lines, dashed lines, and flat lines denote SMJ intensities, 11-year running averages, and 61-year averages, respectively); (b) accumulated SMJ intensity anomalies at five levels in summer during 1950–2010

的时段有所不同。1000 hPa、925 hPa、850 hPa 上该周期存在的时段为 1970 年代前期和 1990 年代后期，700 hPa、600 hPa 上该周期存在的时段为 1960 年代前期和 1970 年代末期至 1980 年代初期。

利用趋势系数来定量表示趋势变化的大小，拟合得出 1950~2010 年这 61 年里 I_{SMJ700} 、 I_{SMJ600} 整体

变化的趋势是快速上升的，其他层次 SMJ 较为平缓。除了长期趋势变化外，各层越赤道气流存在显著的年代际变化。图 3 中的虚线代表 11 a 滑动平均，可以看出， $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 的年代际变化基本一致，SMJ 在 1960 年代初开始减弱，1970 年代初期进入上升段，到 1980 年代末又开始减弱。 I_{SMJ850} 在 1960

年代为一个减弱段, 1980 年代为一个上升段, 其余时间变化平缓, 没有显著的年代际变化。 I_{SMJ700} 和 I_{SMJ600} 在 1950 年代中期快速增强, 1960 年代初进入迅速减弱阶段, 1980 年代初期又开始急剧上升。由前面的分析发现, 在年代际尺度上, 主要是 1970 年代、1990 年代这两个时段里 $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 与 I_{SMJ700} 、 I_{SMJ600} 处于明显不同的变化 (增强或减弱) 阶段。

从累积距平曲线明显的上下起伏来进一步探讨各层 SMJ 强度的年代际变化, 结合左图的滑动曲线, 可以看出 1950 至 2010 年间, $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 在 1950 年代至 1970 年代中期偏弱, 1970 年代中期以

后, 进入偏强阶段, 直至 1990 年代中期又开始偏弱。可见 $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 经历弱、强、弱三个阶段的年代际变化。 I_{SMJ850} 在 1950 年代中期至 1960 年代中期偏强, 1960 年代末至 1980 年代末偏弱, 1990 年代又开始偏强, 但是 I_{SMJ850} 变化幅度较小, 年代际变化相对较弱。 I_{SMJ700} 和 I_{SMJ600} 都在 1980 年代末经历由弱转强的年代际变化, 61 年内 I_{SMJ700} 、 I_{SMJ600} 主要经历弱、强两个阶段。经过对比分析, 发现年代际尺度上, 1950~2010 年间, $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 与 I_{SMJ700} 、 I_{SMJ600} 变化阶段是存在明显差异的。

图 4 是夏季 I_{SMJ} 、 I_{SMJ} 距平以及 11 年滑动平均

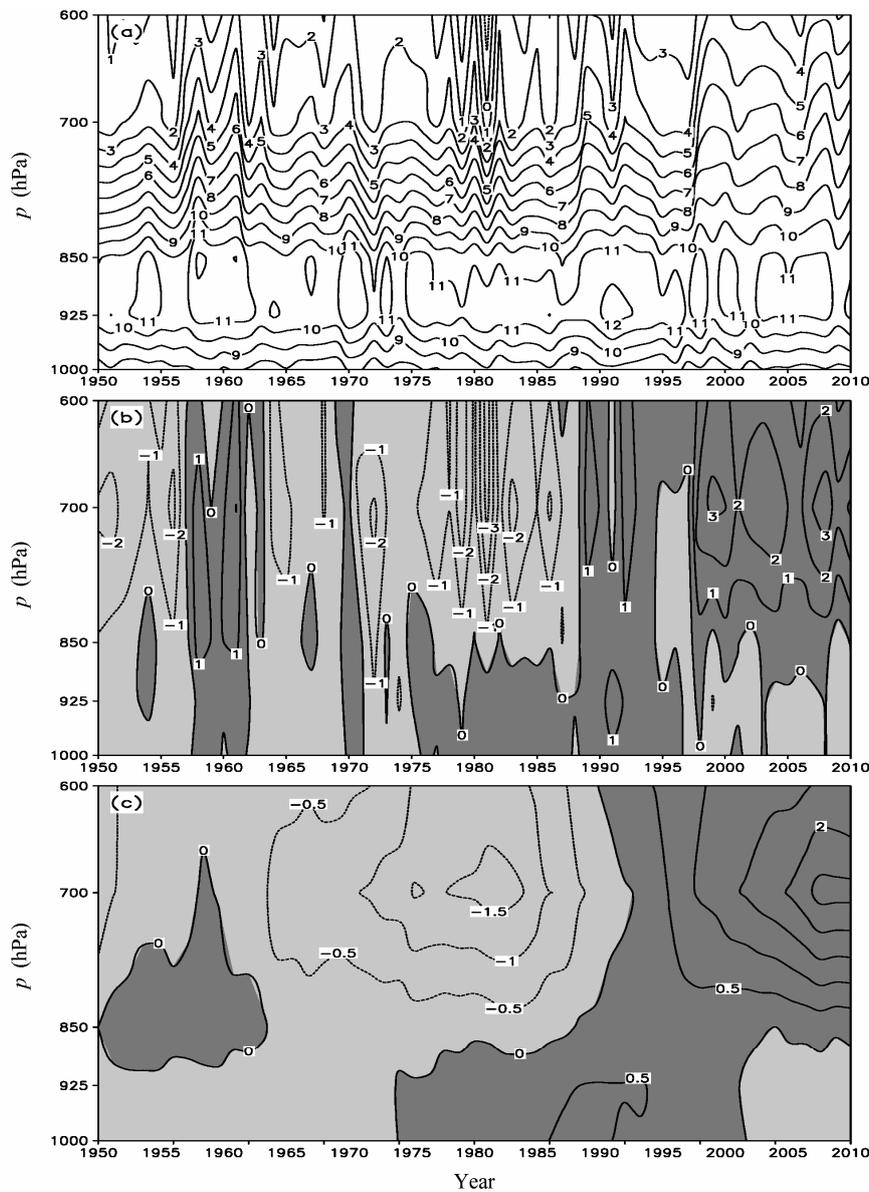


图 4 1950~2010 年 (a) 夏季 SMJ 强度 (m/s)、(b) SMJ 强度距平 (m/s) 以及 (c) 11 年滑动平均的 SMJ 强度距平的时间-高度剖面 (m/s)。深、浅阴影表示正、负距平

Fig. 4 The time-altitude cross sections of (a) SMJ intensity (m/s) and (b) intensity anomaly (m/s) in summer during 1950-2010, and (c) 11-year running averages of SMJ intensity anomaly (m/s). Dark (light) shaded areas denote positive (negative) departures

的 I_{SMJ} 距平的时间—高度剖面,从图 4a 中可以看出 1000 hPa 至 850 hPa 的 SMJ 为一致的南风,风速集中在 7~13 m/s 内,850 hPa 以上经向风速迅速减弱,700 hPa、600 hPa 高度上 SMJ 强度介于 -2~8 m/s 之间,变化幅度较大。谢磊 (2011) 曾得出,某些年份 SMJ 核心维持在 925 hPa 层次上,而某些年份 SMJ 向上延伸发展,核心上移至 850 hPa 层次,其垂直结构发生变化。不仅如此,从图 4b 可以看到上层 SMJ 强度距平与下层 SMJ 强度距平在有些年份里是同号的,有些年份是反号的,并且 61 年里强度距平绝对值的大值中心基本位于 700 hPa,上层 SMJ 强度变化较下层明显。由此可见,夏季 SMJ 存在不同的垂直结构。从图 4c 可知,SMJ 垂直结构经历了 3 次显著的年代际变化。1950 年代中期至 1970 年代中期,上层与下层 SMJ 强度距平均小于 0,其中 1960 年代中期至 1970 年代中期全区为一致的负距平,表明在这些时段内上、下层 SMJ 呈同位相变化,一致减弱;1970 年代中期至 1980 年代中后期,上、下层 SMJ 强度距平反号,呈反位相变化,1000 hPa、925 hPa SMJ 强度距平大于 0,强度偏强,而 700 hPa、600 hPa 高度上为明显的负距平,SMJ 强度偏弱;1980 年代末至 1990

年代中后期各层 SMJ 强度距平均大于 0,表明在上述时段里各层 SMJ 呈同位相变化,一致增强;1990 年代末期至 21 世纪初,上、下层 SMJ 强度呈反位相变化,1000 hPa、925 hPa 强度距平小于 0,SMJ 偏弱,而 700 hPa、600 hPa 高度上为明显的正距平,SMJ 强度偏强。

3.3 夏季 SMJ 垂直结构分型

为了更好地体现上层与下层的配置关系,首先将各层 I_{SMJ} 进行标准化,记为 I_{SMJ}^* ,五个高度层上分别记为 $I_{\text{SMJ}1000}^*$ 、 $I_{\text{SMJ}925}^*$ 、 $I_{\text{SMJ}850}^*$ 、 $I_{\text{SMJ}700}^*$ 、 $I_{\text{SMJ}600}^*$ 。用 61 年 (1950~2010 年) 夏季 5 层 (1000 hPa 至 600 hPa) I_{SMJ}^* 序列作 EOF 分析,来研究 SMJ 的主要垂直形态。结果发现前两个模态的累积方差贡献率超过 80%,能够反映夏季 SMJ 垂直结构异常的主要变化特征。

图 5a、c 是 EOF 分析的第一空间型以及对应的时间系数,EOF1 占 44.2%,对流层中低层内 SMJ 垂直结构表现为全区一致型(简称“A”型)。相应的时间系数 PC1 总体呈快速的上升趋势,具有显著的年际、年代际变化特征。当时间系数为正时,各层 SMJ 强度的标准化距平为一致的正值;反之,为一致的负值。本文把 SMJ 第一模态,即夏季 SMJ

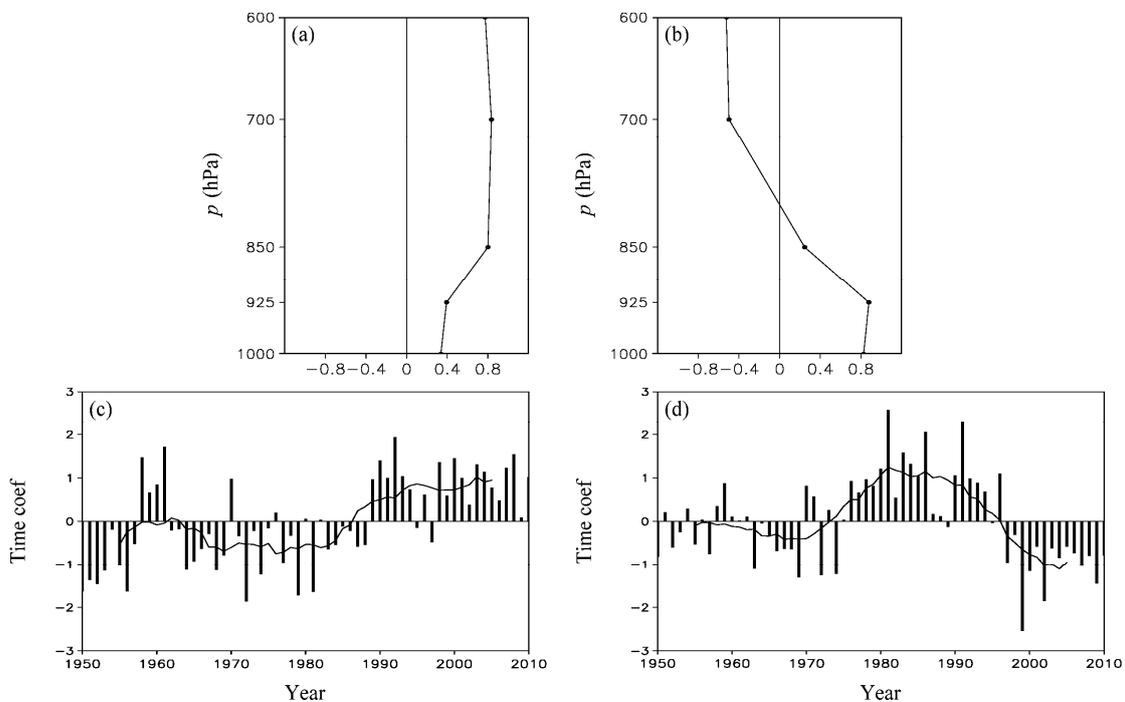


图 5 1950~2010 年夏季 SMJ 强度标准化距平的 EOF 第一模态 (a、c)、第二模态 (b、d): (a、b) 空间分布型; (c、d) 标准化的时间序列 (直方图) 及其 11 年滑动平均 (曲线)

Fig. 5 (a, c) Leading and (b, d) second EOF modes of standardized summer SMJ intensity anomaly for 1950–2010: (a, b) Spatial patterns; (c, d) normalized time series (bars) and its 11-year running mean (curve)

第一类垂直结构(“A”型)的正负位相分别称为一致增强型(简称“A+”型)和一致减弱型(简称“A-”型)。EOF 第一模态分析表明年代际尺度上, 1955~1986 年 PC1 对应负值, SMJ 垂直结构呈“A-”型。1987~2005 年 PC1 对应正值, 垂直结构呈“A+”型。图 5b、d 是 EOF 分析的第二空间型以及对应的时间系数, EOF2 占 40.7%, SMJ 垂直结构呈“-+”的偶极分布形态, 表现为上下反相型(简称“B”型)。相应的时间系数 PC2 也具有年际、年代际变化特征。本文把 SMJ 第二模态, 即夏季 SMJ 第二类垂直结构(“B”型)的正负位相分别称为上弱下强型(简称“B+”型)和上强下弱型(简称“B-”型)。第二模态分析表明年代际尺度上, 1955~1973 年, PC2 对应负值, SMJ 垂直结构体现“B-”型的特点, 1974~1996 年 PC2 为正值, 垂直结构呈“B+”型, 1997~2005 年 PC2 又为负值, 垂直结构对应“B-”型。分别对 PC1、PC2 进行 Morlet 小波分析(图略), 得知夏季 SMJ 两类垂直结构都具有 2~3 年左右的年际周期, 另外, “A”型结构还具有 3~4 年左右的周期, “B”型结构还存在准五年振荡。综上所述, 夏季 SMJ 垂直结构主要呈现出全区一致、上下反相两种分布型(“A”型和“B”型), 细分为一致增强型(“A+”型)、一致减弱型(“A-”型)、上弱下强型(“B+”型)和上强下弱型(“B-”型)。对照图 4b, 61 a 里 SMJ 垂直结构主要体现出了这四类分布型的特点, 可见该分类方式是比较合理的。

EOF 分析得到的 PC1、PC2 的时间变化分别反映了两类 SMJ 垂直结构的演变特征, 所以选用 PC1、PC2 作为表征“A”型垂直结构的指数 VS_1 和表征“B”型垂直结构的指数 VS_2 。

3.4 资料比较分析

为了加强研究结果的可信度, 下面采用 ERA40 再分析资料进行验证。前文定义所用的是 NCEP/NCAR 资料, 在这里使用前文定义的方法将两种资料的结果进行对比。利用 ERA40 资料对实际气流进行计算得到, 1000 hPa 至 600 hPa 5 层 SMJ 的通道为: 1000 hPa (47.5°E), 925 hPa (42.5°E), 850 hPa (40.0°~42.5°E), 700 hPa (40.0°~45.0°E), 600 hPa (37.5°~40°E)。相比于 NCEP/NCAR 资料, 1000 hPa、925 hPa 通道位置集中在一个经度上, 通道变窄, 850 hPa 通道位置向西偏移 2.5 个经度, 700 hPa 通道位置变宽, 向西扩展 2.5 个经度, 总体而

言, 这四层 SMJ 通道位置变化较小, 基本一致。不同的是, ERA40 资料 600 hPa 通道位置偏西 7.5 个经度, 变化幅度较大。

由 ERA40 资料得到描述各层 SMJ 强度变化的特征序列(图略), 发现 $I_{SMJ1000}$ 和 I_{SMJ925} 、 I_{SMJ700} 和 I_{SMJ600} 分别为高相关, 但上、下层 SMJ 的时空特征存在较大差异, 这与前文的结论是一致的。从气候平均值来看, ERA40 资料下 SMJ 最大值位于 850 hPa, 而非 NCEP/NCAR 资料得到的 925 hPa。从方差来看, I_{SMJ700} 年际变化最强, I_{SMJ600} 次之; $I_{SMJ1000}$ 年际变化相比之下最弱, I_{SMJ925} 次之, 这与同一时段 NCEP/NCAR 资料所得的结果基本一致。分别计算两种资料间 5 层 I_{SMJ} 的相关系数, 600 hPa 相关系数最小, 为 0.26, 通过 90% 的置信度检验, 700 hPa 的相关系数其次, 为 0.44, 通过了 99% 的置信度检验。年代际时间尺度上, $I_{SMJ1000}$ 、 I_{SMJ925} 均在 20 世纪 70 年代后期经历由弱转强的年代际变化, I_{SMJ700} 、 I_{SMJ600} 均在 20 世纪 80 年代中后期经历由弱转强的年代际变化, 这与前文的结论是十分相似的。

本文的研究对象为 SMJ 的垂直结构, 继续对 ERA40 资料得到的 1958~2002 年 1000 hPa 至 600 hPa 5 层 I_{SMJ}^* 序列作 EOF 分析(图 6), 对比同一时段 45 年 NCEP/NCAR 资料的 EOF 结果(图 7), SMJ 的垂直结构均主要呈现出全区一致(“A”型)和上下反相(“B”型)的分布特点, 与前文的结论十分相似。对两种资料得到的前两个模态的时间系数 PC1、PC2 分别求相关, 相关系数分别为 0.54 和 0.34, 相关系数均通过 99% 的置信度检验。图 6 和图 7 中时间系数的 11 年滑动平均曲线进一步表明了两种资料得到的 PC1、PC2 均存在显著的年代际信号, 且年代际变化十分相似, PC1 均在 1980 年代出现反位相的年代际变化, PC2 均在 1970 年代和 1990 年代先后出现反位相的年代际变化特征, 与前文的结论基本一致。不同的是, ERA40 资料得到的 PC2 在 1960 年代末期还存在一次显著的年代际转折, NCEP/NCAR 资料不存在这一特征。进一步将 1958~2002 年 NCEP/NCAR 资料得到的 PC1、PC2 与前文定义的 1950~2010 年 VS_1 和 VS_2 指数序列取同时段的 45 年, 再求相关, 得到相关系数为 0.86 和 0.83, 两者关系密切。最后将 ERA40 资料得到的 45 年 PC1、PC2 序列与前文定义的 VS_1 和 VS_2 指数取同时段, 再求相关, 得到相关系数为 0.52 和 0.47, 两者关系较好。可见, 两种 SMJ 垂直结构型

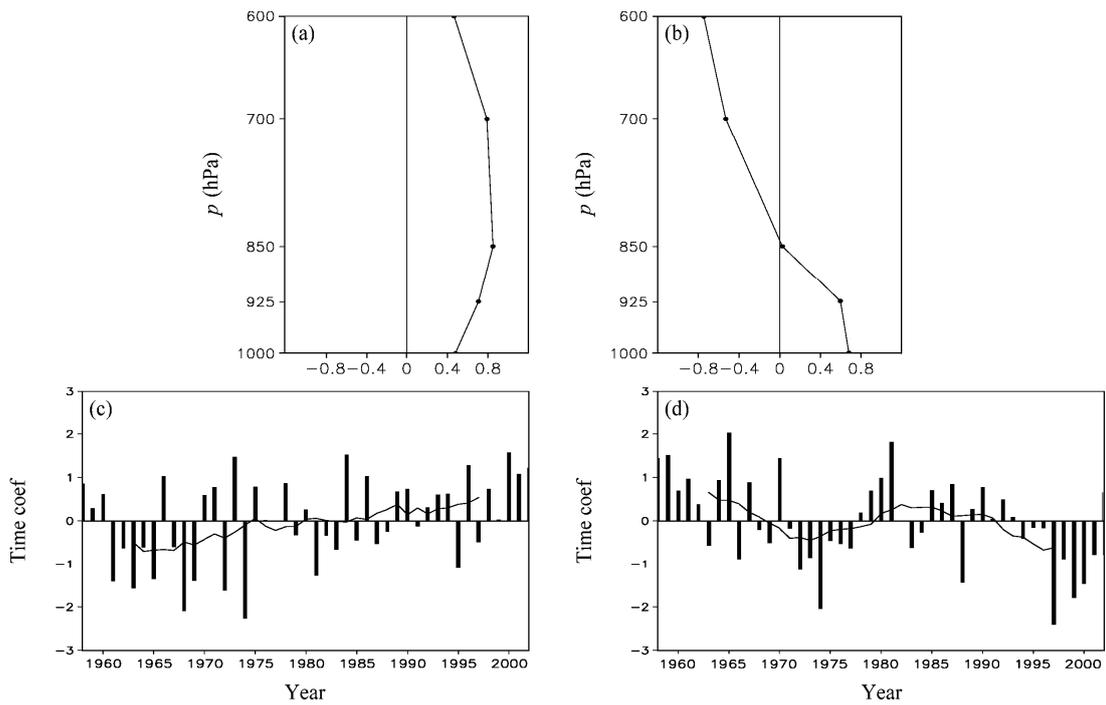


图 6 1958~2002 年 ERA40 资料夏季 SMJ 强度标准化距平的 EOF 第一模态 (a、c)、第二模态 (b、d): (a、b) 空间分布型; (c、d) 标准化的时间序列 (直方条) 及其 11 年滑动平均 (曲线)

Fig. 6 (a, c) Leading and (b, d) second EOF modes of standardized summer SMJ intensity anomaly for 1958–2002 ERA40 data: (a, b) Spatial patterns; (c, d) normalized time series (bars) and its 11-year running mean (curve)

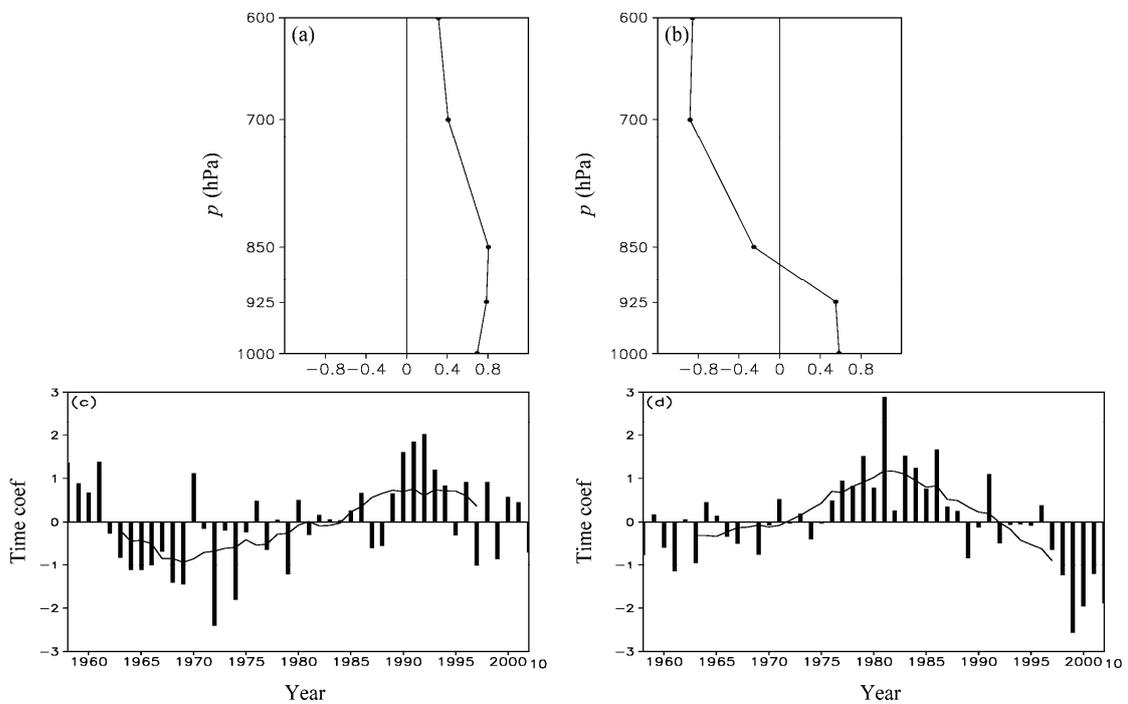


图 7 1958~2002 年 NCEP/NCAR 资料夏季 SMJ 强度标准化距平的 EOF 第一模态 (a、c)、第二模态 (b、d): (a、b) 空间分布型; (c、d) 标准化的时间序列 (直方条) 及其 11 年滑动平均 (曲线)

Fig. 7 (a, c) Leading and (b, d) second EOF modes of standardized summer SMJ intensity anomaly for 1958–2002 NCEP/NCAR data: (a, b) Spatial patterns; (c, d) normalized time series (bars) and its 11-year running mean (curve)

是比较稳定的, 不随资料或时间段不同而发生大的变动。

因此, NCEP/NCAR 资料和 ERA40 资料的研究结果有一些差别, 但是没有影响主要结论, 本文采用 NCEP/NCAR 资料是可以接受的, 下面继续采用 1950~2010 年 NCEP/NCAR 资料展开详细的讨论。

4 夏季 SMJ 垂直结构指数与大气环流的关系

刘向文等 (2009a) 指出, 越赤道气流的变化受南、北半球环流因子及赤道局地环流因子的影响。本文则进一步分析 SMJ 垂直结构变化对应的大气环流异常。首先为了突出垂直结构指数年际变异的因素, 把图 5c、d 所示的 VS_1 、 VS_2 指数序列, 先滤去长期变化趋势, 取得了去掉 61 年变化趋势后的指数。然后分别选取超过正、负 1.2 个标准差的年份为高、低指数年, 得到 VS_1 指数对应的高值

年为 1958、1959、1960、1961、1970、1990、1992, 共 7 年, 低值年为 1972、1974、1979、1981、1997, 共 5 年; VS_2 指数对应的高值年为 1980、1981、1983、1984、1986、1991、1996, 共 7 年, 低值年为 1963、1969、1972、1974、1999、2002、2009, 共 7 年。

分别对 VS_1 指数高值年和低值年的 925 hPa、700 hPa 距平风场进行合成分析。从 925 hPa 合成差值分布 (图 8a) 上可以看到, 南半球马达加斯加岛以南受异常反气旋环流控制, 北侧存在显著的南风异常。700 hPa 合成差值分布 (图 8b) 上, 南半球的差值风场与低层 925 hPa 的分布基本一致, 赤道地区 SMJ 通道以东存在一个显著的顺时针环流, 其西侧为南风异常。结合高、低值指数年的合成分布 (图略) 发现, 925 hPa、700 hPa 距平风场上, 南半球马斯克林高压偏强, 另外, 700 hPa 距平风场上 SMJ 通道以东存在顺时针的距平环流, 这样的环流背景对应 I_{SMJ925} 、 I_{SMJ700} 均偏强, SMJ 垂直结构呈 “A+” 型; 当 925 hPa、700 hPa 距平风场上, 南半

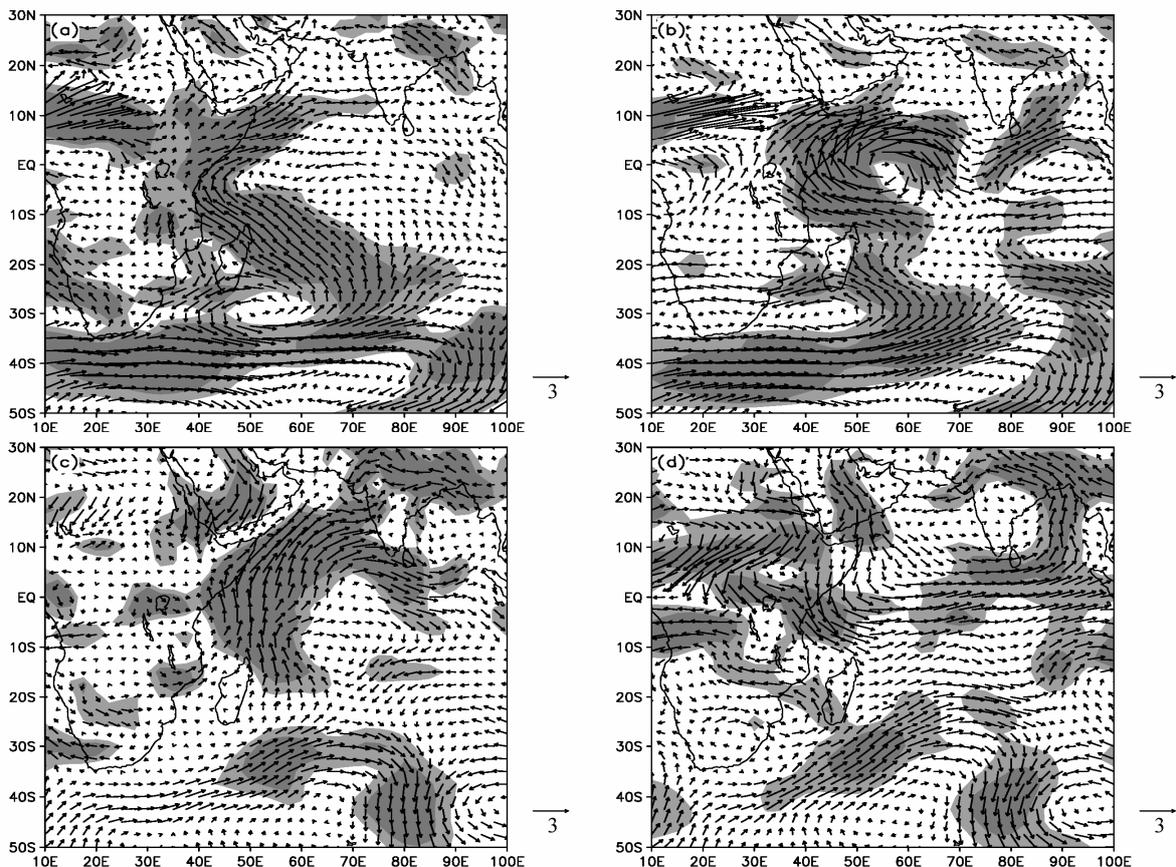


图 8 夏季 SMJ 垂直结构指数异常时同期 925 hPa (a、c)、700 hPa (b、d) 距平风场 (m/s) 合成差值分布 (高指数年减低指数年): (a、b) VS_1 指数; (c、d) VS_2 指数。浅、深阴影区表示风速通过了 95%、99% 置信度检验

Fig. 8 Composite differences of the wind vectors (m/s) at (a, c) 925 hPa and (b, d) 700 hPa in summer between high and low SMJ vertical structure indices: (a, b) VS_1 index, (c, d) VS_2 index. Shaded areas represent the differences significant above the 95% (light color) and 99% (dark color) confidence levels

球马斯克林高压偏弱, 700 hPa 距平风场上 SMJ 通道以东存在逆时针的距平环流, 这样的环流背景下 I_{SMJ925} 、 I_{SMJ700} 均偏弱, SMJ 垂直结构呈“A-”型。

接着对 VS_2 指数的高值年和低值年的 925 hPa、700 hPa 距平风场进行合成分析。从 925 hPa 合成差值分布(图 8c)上可以看到, 北半球阿拉伯海以南为显著的偏西风异常。700 hPa 合成差值分布(图 8d)上, 南半球马达加斯加岛以北为显著的西风异常, 北半球阿拉伯海及印度半岛受气旋性环流控制。结合高、低值指数年的合成分布(图略)发现, 925 hPa 距平风场上, 北半球阿拉伯海以南存在西风距平, 700 hPa 距平风场上南半球马达加斯加岛以北为西风距平, 北半球阿拉伯海及印度半岛受气旋性距平环流控制, 这样的环流背景对应 I_{SMJ925} 偏强、 I_{SMJ700} 偏弱, SMJ 垂直结构呈“B+”型; 当 925 hPa 距平风场上, 北半球阿拉伯海以南为东风距平, 700 hPa 距平风场上马达加斯加岛以北存在东风距平, 北半球阿拉伯海及印度半岛受反气旋性距平环流控制, 这样的环流背景下 I_{SMJ925} 偏弱、 I_{SMJ700} 偏强, SMJ 垂直结构呈“B-”型。

根据上述的分析可以看出, 与 SMJ “A”型垂直结构变化相联系的风场环流系统有 925 hPa、700 hPa 南半球马斯克林高压、以及 700 hPa 索马里地区附近的涡旋距平; 与 SMJ “B”型垂直结构变化相联系的系统为 925 hPa 北半球阿拉伯海以南的纬向风异常、700 hPa 南半球马达加斯加岛以北的纬向风异常、北半球阿拉伯海及印度半岛地区的涡旋距平。

5 夏季 SMJ 垂直结构指数与东亚夏季风环流和降水的关系

5.1 东亚夏季风环流

越赤道气流是亚洲夏季风的源头, 这里进一步

探讨夏季 SMJ 垂直结构指数与东亚夏季风的关系。采用施能等人(1996)的东亚夏季风强度指数, 绝对值大的正指数值表示弱夏季风, 绝对值大的负指数值表示强夏季风。图 9a 给出了 VS_1 指数和东亚夏季风强度指数的多年序列, 二者相关较好, 相关系数为 -0.35 (去掉了长期趋势), 通过了 99% 置信度检验, 另外可以看到前四十年里两者对应很好, 相关系数高达 -0.54。图 9b 给出了 VS_2 指数和东亚夏季风强度指数的时间序列, 二者为正相关, 相关系数为 0.33 (去掉了长期趋势), 同样通过了 99% 置信度检验。可见, 夏季 SMJ “A+” (“A-”) 型垂直结构对应强 (弱) 东亚夏季风, 夏季 SMJ “B+” (“B-”) 型垂直结构对应弱 (强) 东亚夏季风。

为了继续说明垂直结构指数与东亚夏季风的同期关系, 给出 VS_1 指数与 850 hPa 风场、地面气压场的同期相关分布, 如图 10a。可以看到 VS_1 指数与东亚夏季风存在显著的正相关, 从阴影区分布可知, 亚洲大陆上为显著的负相关区, 中心位于蒙古地区, 太平洋中部洋面上存在一个显著的正相关区。分析可得, 当 VS_1 指数偏高时, 亚洲大陆低压系统发展强盛, 海洋高压偏强, 在亚洲大陆和北太平洋之间形成了从海洋指向大陆的的东西向的异常气压梯度, 因此海陆热力对比增强, 对夏季风起加速作用; 反之, 当 VS_1 指数偏低时, 大陆热低压偏弱, 海洋高压亦偏弱, 它们之间存在从大陆指向海洋的东西向的异常气压梯度, 海陆热力对比不明显, 夏季风偏弱。采用前文挑选得到的典型年份, 对高、低 VS_1 指数年进行合成分析(图略), 可以进一步看到 VS_1 指数与东亚夏季风有很好的对应关系。因此, 夏季 SMJ “A+” (“A-”) 型结构对应强 (弱) 的东亚夏季风。

图 10b 为 VS_2 指数与 850 hPa 风场、地面气压

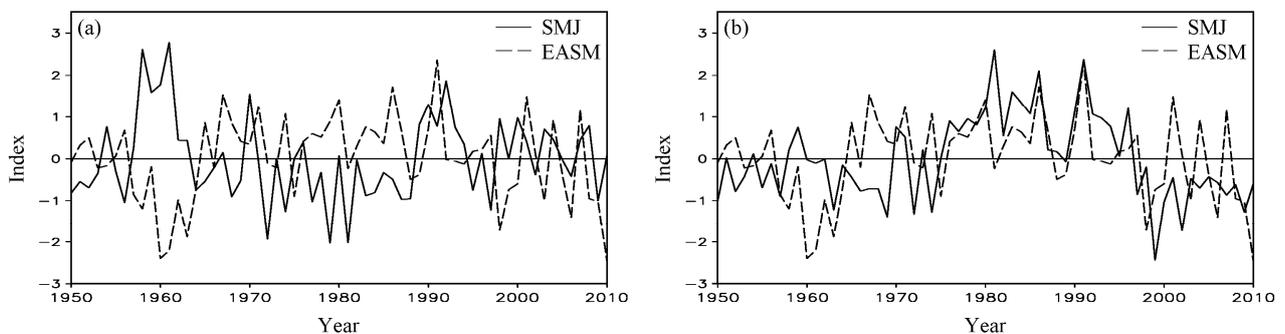


图 9 东亚夏季风强度指数和夏季 SMJ 垂直结构指数 (a) VS_1 、(b) VS_2 的时间变化 (已去掉线性趋势, 数值已标准化)

Fig. 9 Detrended and standardized East Asian summer monsoon index (dashed line) and (a) VS_1 index (solid line) and (b) VS_2 index (solid line) during 1950–2010

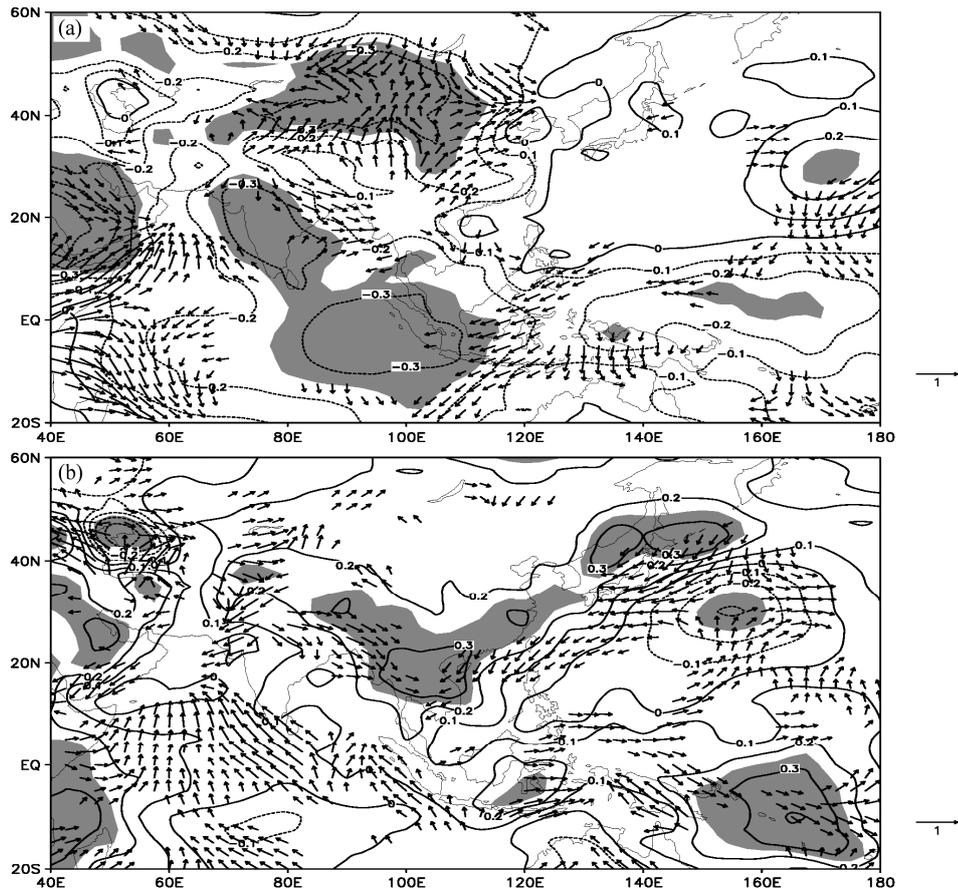


图 10 夏季 SMJ 垂直结构指数与同期 850 hPa 风场 (矢量)、地面气压场 (等值线) 的相关分布: (a) VS_1 指数; (b) VS_2 指数。阴影区表示与地面气压的相关系数通过了 95% 置信度检验, 箭头表示与风场的相关系数通过了 95% 置信度检验

Fig. 10 Contemporaneous correlations between indices and 850-hPa winds (vectors) and surface pressure (isolines) in summer: (a) VS_1 index; (b) VS_2 index. Shaded areas represent the correlations of indices with surface pressure significant above the 95% confidence level, arrows denote the correlations of indices with 850-hPa winds significant above the 95% confidence level

场的同期相关分布, 可以看到 VS_2 指数与东亚夏季风存在显著的负相关, 从阴影区分布可知, 东亚沿海地区为显著的正相关区, 西太平洋存在显著的负相关。分析可得, 当 VS_2 指数偏高时, 东亚地区地面气压增强, 西太平洋副热带高压偏弱, 两者之间形成了从大陆指向海洋的异常气压梯度, 东亚夏季风偏弱; 反之, 当 VS_2 指数偏低时, 东亚地区地面气压减弱, 西太平洋副热带高压偏强, 两者之间形成了从海洋指向大陆的异常气压梯度, 使得东亚夏季风偏强。对高、低 VS_2 指数年进行合成分析 (图略) 的结果也进一步说明了上述对应关系。因此, 夏季 SMJ “B+” (“B-”) 型结构对应弱 (强) 的东亚夏季风。

由上述可知, 夏季 SMJ 垂直结构异常时, 东亚海陆热力对比程度随之改变, 造成东亚夏季风的强度发生变化。值得一提的是, 与 VS_1 指数关系密切

的夏季风主要位于我国, 与 VS_2 指数关系密切的夏季风主要位于日本列岛及其附近海域。

5.2 东亚夏季降水特征

SMJ 对两半球间的水汽输送起着十分重要的作用, 它把水汽从冬半球输送到夏半球, 因此夏季 SMJ 垂直结构的异常很可能会造成东亚季风区内水汽输送异常, 并使降水发生变化。由于本文研究的对象是对流层中低层 (1000 hPa 至 600 hPa) 内 SMJ 的垂直结构, 这里分析 1000 hPa 至 600 hPa 厚度层内水汽通量的变化。

图 11a 中阴影部分表明 VS_1 指数和我国内蒙古东部、华北地区降水存在显著正相关。箭头表明我国东部地区 40°N 以南 VS_1 指数和水汽通量矢量在纬向和经向上都为正相关, 40°N 以北纬向为正相关, 经向为负相关。表明 VS_1 指数偏高时, SMJ 垂直结构对应 “A+” 型, 40°N 以南西南风水汽输送

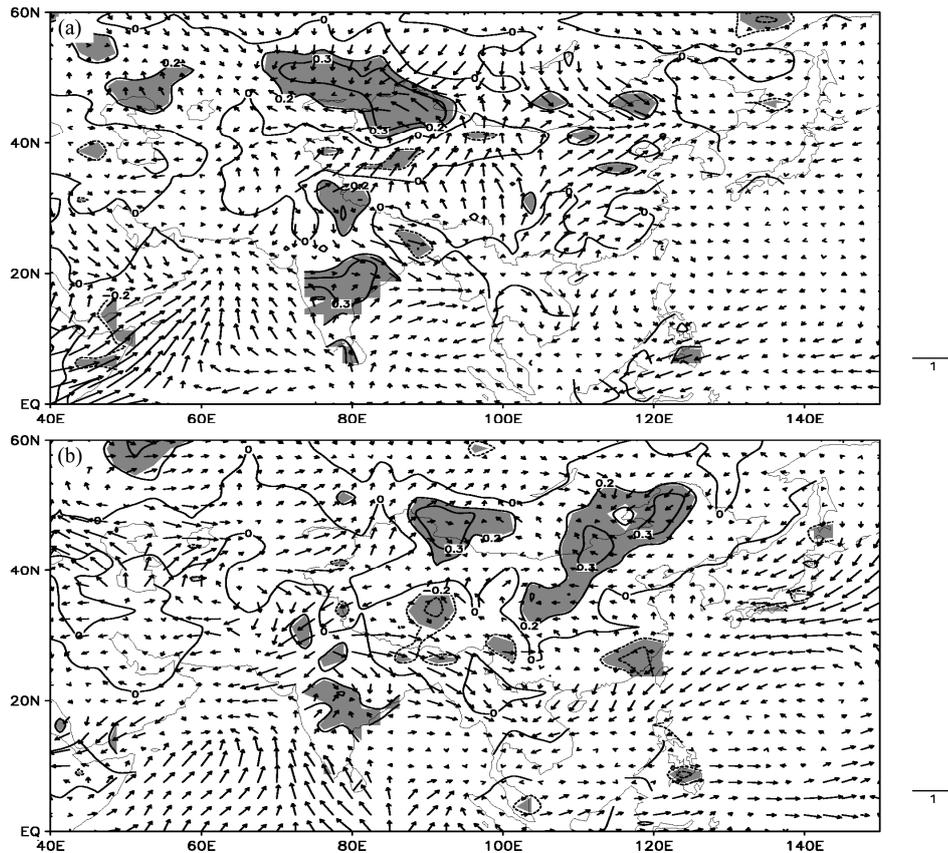


图 11 夏季 SMJ 垂直结构指数与同期 1000 hPa 至 600 hPa 垂直积分的水汽通量场 (矢量)、降水场 (等值线) 的相关分布: (a) VS_1 指数; (b) VS_2 指数。阴影区表示与降水的相关系数通过了 90% 置信度检验

Fig. 11 Contemporaneous correlations between indices and vertically integrated water vapor flux vectors from 1000 hPa to 600 hPa (vectors) and precipitation (isolines) in summer: (a) VS_1 index; (b) VS_2 index. Shaded areas represent the correlations of indices with precipitation significant above the 90% confidence level

加强, 40°N 以北西北风水汽输送加强, 水汽在我国内蒙古东部和华北地区辐合加强, 使得这些地区降水加强; 反之, VS_1 指数偏低时, SMJ 垂直结构对应“ $A-$ ”型, 内蒙古东部和华北地区降水减弱。由图 11b 可知 VS_2 指数偏高时, 即 SMJ 垂直结构为“ $B+$ ”型, 我国江南、日本西南风水汽输送减弱, 从而该地区的降水显著偏少; 反之, VS_2 指数偏低时, 即 SMJ 垂直结构为“ $B-$ ”型, 西南风水汽输送加强, 我国江南、日本降水显著偏多。另外, 两指数均与印度季风区降水关系显著, VS_2 指数还和内蒙古地区的降水有着显著的正相关。降水的形成条件十分复杂, 这里仅从水汽输送的角度进行了简单讨论, 需进一步从其它条件来分析。

结合图 11 和图 10 的矢量分布, 可知 VS_1 指数和 VS_2 指数分别与东亚季风区对流层中低层内水汽输送矢量的同期相关分布和两个指数分别与东亚夏季风环流的相关分布基本一致。综上, 夏季 SMJ

垂直结构的变化可以直接影响东亚西南季风, 同时改变对流层中低层内东亚季风区内的水汽输送量, 从而再影响东亚气候。虽然针对 SMJ 与夏季风活动的联系已有不少研究, 但这里从一个全新的角度阐释了这种联系, 侧重分析了 SMJ 垂直结构变化与东亚夏季风环流和降水的关系, 这有利于进一步认识季风活动规律。

6 小结与讨论

通过对夏季 SMJ 的分析以及资料的对比, 本文揭示了夏季对流层中低层 SMJ 存在不同的垂直结构, 并对垂直结构的时空演变特征进行了分析, 在此基础上对垂直结构型进行分类, 定义了结构指数, 最后着重讨论了 SMJ 垂直结构与大气环流、东亚夏季风的关系, 得到以下结论:

(1) 对流层中低层 SMJ 存在不同的垂直结构, 且具有显著的年际、年代际变化特征。夏季 SMJ

主要呈现出全区一致、上下反相两种分布型 (“A”型和 “B”型), 将其细分为四类, 即一致增强型 (“A+”型)、一致减弱型 (“A-”型)、上弱下强型 (“B+”型) 和上强下弱型 (“B-”型)。两种 SMJ 垂直结构型是比较稳定的, 不随资料或时间段不同而发生大的变动。

(2) 将 EOF 分析得到的前两个主要模态的时间系数分别作为表征 “A”型和 “B”型垂直结构的指数 VS_1 和 VS_2 , 对高指数年和低指数年的合成分析表明, SMJ “A”型垂直结构与 925 hPa、700 hPa 南半球马斯克林高压、以及 700 hPa 索马里地区附近的涡旋距平关系密切; SMJ “B”型垂直结构与 925 hPa 北半球阿拉伯海以南的纬向风异常、700 hPa 南半球马达加斯加岛以北的纬向风异常、北半球阿拉伯海及印度半岛地区的涡旋距平关系密切。

(3) 夏季 SMJ 垂直结构指数与东亚夏季风活动关系密切。当 VS_1 指数为高指数, 即 SMJ 呈 “A+”型垂直结构时, 海陆热力对比增强, 东亚夏季风偏强, 我国内蒙古东部、华北地区水汽辐合加强, 降水偏多; 反之亦然。当 VS_2 指数为高指数, 即 SMJ 呈 “B+”型垂直结构时, 海陆热力对比减弱, 东亚夏季风偏弱, 我国江南、日本地区水汽输送减弱, 降水偏少; 反之亦然。值得一提的是, 与 VS_1 指数关系密切的夏季风活动主要位于我国, 与 VS_2 指数关系密切的夏季风活动主要位于日本列岛及其附近海域。

最后需要说明的是, 本文给出的结果仅限于同期关系, 然而关于 SMJ 通道在垂直尺度上的偏移、SMJ 不同垂直结构的发生发展机制以及 SMJ 垂直结构如何与东亚海陆热力差异联系等问题都需要更深入的研究。

参考文献 (References)

- 丛菁, 管兆勇, 王黎娟. 2007. 夏季亚澳季风区两支越赤道气流年(代)际变化及其与夏季风活动的联系 [J]. 南京气象学院学报, 30 (6): 779–785. Cong Jing, Guan Zhaoyong, Wang Lijuan. 2007. Interannual (Interdecadal) variabilities of two cross-equatorial flows in association with the Asia summer monsoon variation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (6): 779–785.
- 杜启倩, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2010. 1950–2009 年夏季菲律宾低空越赤道气流的变化特征 [J]. 气象与减灾研究, 33 (3): 7–15. Du Qiqian, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2010. Variation characteristics of summer cross-equatorial flow over Philippines [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 33 (3): 7–15.
- 范可, 王会军. 2006. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. 大气科学, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between southern hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 402–412.
- Findlater J. 1969. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 95 (404): 362–380.
- 高辉, 薛峰. 2006. 越赤道气流的季节变化及其对南海夏季风爆发的影响 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 57–68. Gao Hui, Xue Feng. 2006. Seasonal variation of the cross-equatorial flows and their influences on the onset of South China Sea summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 57–68.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. 大气科学, 22 (4): 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1988. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 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 [J]. 大气科学, 26 (2): 185–192. Li Chongyin, Wu Jingbo. 2002. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (2): 185–192.
- 李曾中, 楼光平. 1987. 北半球夏季风时期东半球越赤道气流通道的研究 [J]. 大气科学, 11 (3): 313–319. Li Zengzhong, Lou Guangping. 1987. A study on the passages of cross-equatorial current during the southern monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (3): 313–319.
- 李曾中, 李月安, 晁淑懿. 1998. 越赤道气流与我国洪涝灾害关系的初探 [J]. 应用气象学报, 9 (增刊): 132–136. Li Zengzhong, Li Yuean, Chao Shuyi. 1998. Relationship between flood disasters over China and cross-equatorial flow (CEF) [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (Suppl.): 132–136.
- 李曾中, 钱传海, 孙除荣. 2000. 1991 年江淮暴雨与越赤道气流关系初步分析 [J]. 气象学报, 26 (5): 628–636. Li Zengzhong, Qian Chuanhai, Sun Churong. 2000. A preliminary analysis on the relationship between the cross-equatorial flow and the heavy rainfall over Yangtze and Huaihe River in 1991 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (5): 628–636.
- 梁俊明, 孙照渤. 2005. 索马里越赤道气流对越南降水变化的影响 [J]. 南京气象学院学报, 28 (5): 586–592. Liang Junming, Sun Zhaobo. 2005. Impacts of Somali cross-equatorial flow on precipitation in Vietnam [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (5): 586–592.
- 刘向文, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2009a. 105°E 和 125°E 越赤道气流与南、北半球环流变化的关系 [J]. 大气科学, 33 (3): 443–458. Liu Xiangwen, Sun Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2009a. Connection of 105°E and 125°E cross-equatorial flow with the southern and northern hemispheric circulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 443–458.
- 刘向文, 孙照渤, 李维京, 等. 2009b. 澳洲北部强/弱越赤道气流对应的

- 环流配置 [J]. 大气科学, 33 (6): 1348–1362. Liu Xiangwen, Sun Zhaobo, Li Weijing, et al. 2009b. The circulation configuration of strong/weak cross-equatorial flow to the north of Australia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1348–1362.
- 彭维耿, 蒋尚城. 2003. 越赤道气流特征及其年际变化特征初探 [J]. 热带气象学报, 19 (1): 87–93. Peng Weigeng, Jiang Shangcheng. 2003. The climatic characteristics of global cross-equatorial flow and its interannual variation in East Hemisphere [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (1): 87–93.
- 钱永甫, 王谦谦, 董一平, 等. 1987. 索马里低空气流的数值模拟 [J]. 大气科学, 11 (2): 176–184. Qian Yongfu, Wang Qianqian, Dong Yiping, et al. 1987. Numerical experiment of Somali jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (2): 176–184.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather–climate anomaly in China for last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (5): 575–583.
- 施能, 封国林, 顾骏强, 等. 2007. 1948~2004 年全球越赤道气流气候变化 [J]. 热带气象学报, 23 (4): 321–332. Shi Neng, Feng Guolin, Gu Junqiang, et al. 2007. The climatological variation of global cross-equatorial flow for the period of 1948–2004 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (4): 321–332.
- 唐碧, 郭品文, 杨丽萍. 2009. 东半球夏季低空越赤道气流的年际变化 [J]. 南京气象学院学报, 32 (2): 298–305. Tang Bi, Guo Pinwen, Yang Liping. 2009. Interannual variation of summer cross-equatorial flow in lower troposphere of Eastern Hemisphere [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32 (2): 298–305.
- 汤明敏, 黄士松, 周德佩. 1985. 全球越赤道气流的时空变化 [J]. 热带气象, (4): 287–296. Tang Mingmin, Huang Shisong, Zhou Depei. 1985. On the spatial and temporal variation of the cross-equatorial currents around the globe [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), (4): 287–296.
- 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 [J]. 地球物理学报, 46 (1): 18–25. Wang Huijun, Xue Feng. 2003. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 46 (1): 18–25.
- 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 [J]. 气象科学, 28 (2): 139–146. Wang Weiping, Yang Xiuqun. 2008. Variation of Somali jet and its impact on East Asian summer monsoon and associated China rainfall anomalies [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (2): 139–146.
- 谢磊. 2011. 夏季索马里低空越赤道气流变化特征及其与亚洲夏季风的关系 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 69pp. Xie Lei. 2011. Variation characteristics of summer Somali low-level cross-equatorial flow and its relationship with Asian summer monsoon [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 69pp.
- 徐建军, 王盘兴, 周顺武. 1992. 东半球跨赤道气流季节变化及其在 El Nino 年的异常 [J]. 南京气象学院学报, 15 (2): 37–44. Xu Jianjun, Wang Panxing, Zhou Shunwu. 1992. Seasonal variation of cross-equatorial flow in the Eastern Hemisphere and its anomaly during the El Nino event [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 15 (2): 37–44.
- 曾庆存, 李建平. 2002. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质 [J]. 大气科学, 26 (4): 433–448. Zeng Qingcun, Li Jianping. 2002. Interactions between the northern and southern hemispheric atmospheres and the essence of monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 433–448.
- 赵煜飞. 2008. 南、北半球大气的相互作用和越赤道气流的气候学研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 168pp. Zhao Yufei. 2008. Climatology of interactions between the northern and southern hemispheric atmospheres and cross-equatorial flow [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 168pp.