程智，高辉，曹勇. 2018. 索马里越赤道气流与淮河流域夏季降水关系的年代际增强 [J]. 大气科学, 42 (6): 1363−1377. Cheng Zhi, Gao Hui, Cao Yong. 2018. Decadal enhancement of connection between Somalia cross-equatorial flow and summer precipitation in Huaihe River basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1363−1377, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17216.

索马里越赤道气流与淮河流域夏季降水关系的年代际增强

程智[1] 高辉[2] 曹勇[3]

1 安徽气候中心，合肥 230031
2 国家气候中心，北京 100081
3 国家气象中心，北京 100081

摘 要 基于 1961～2016 年淮河流域 172 个测站逐日降水资料，分析了淮河夏季降水的多时间尺度变率，发现其具有显著的准两年周期，1990 年代以来亦呈现出明显的年代际变化。EOF 分析结果显示，淮河夏季降水的异常主要表现为全流域一致偏多或偏少型（第一模态），其方差贡献高达 37%。相比于长江中下游地区，淮河夏季降水与东亚 500 hPa 位势高度场上的 EAP 遥相关型关系很弱，但和对流层低层西南水汽输送有更好的对应关系，表现为从索马里半岛至淮河流域的多个正负交替的相关波列。这一波列表明当索马里越赤道气流加强时，通过热带印度洋西风的纽带作用加强了进入淮河流域的西南暖湿气流，并在淮河上空低层形成水汽辐合，造成淮河多雨，反之当索马里越赤道气流强度弱时，淮河夏季降水偏少。索马里越赤道气流和中国台站降水的空间相关同样显示出最显著的相关区位于淮河流域。进一步的分析发现，研究时段内二者关系并非稳定维持，而是表现出显著的年代际变化，近二十年来索马里越赤道气流对淮河流域夏季降水的影响明显增强，且在季节预测上的指示意义也在增强。这一增强的可能原因是索马里越赤道气流与流域南侧的经向水汽输送和西侧的纬向水汽输送的关系均发生了年代际反转，并且这两条水汽输送带对流域夏季降水的影响发生了年代际增强。

关键词 索马里越赤道气流 淮河流域 夏季降水 年代际

文章编号 1006-9895(2018)06-1363-15 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17216

Decadal Enhancement of Connection between Somalia Cross-Equatorial Flow and Summer Precipitation in Huaihe River Basin

CHENG Zhi[1], GAO Hui[2], CAO Yong[3]

1 *Anhui Climate Center*, *Hefei* 230031
2 *National Climate Center*, *Beijing* 100081
3 *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081

Abstract Multi-time-scale variations of summertime precipitation in Huaihe River basin during 1961−2016 are analyzed

收稿日期 2017-08-21；**网络预出版日期** 2018-03-29

作者简介 程智，男，1980 年出生，硕士，高级工程师，主要从事短期气候预测方面研究。E-mail: alexclimate@163.com

通讯作者 高辉，E-mail: gaohui@cma.gov.cn

资助项目 国家科技支撑计划项目 2015BAC03B04，气象预报业务关键技术发展专项 YBGJXM-2017-05，公益性行业（气象）科研专项 GYHY201306033，淮河流域气象开放研究基金 HRM201707

Funded by National Science and Technology Support Program (Grant 2015BAC03B04), Key Technology Fund of Meteorological Operational Forecast (YBGJXM-2017-05), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201306033), Meteorological Open Research Fund of Huaihe River Basin (Grant HRM201707)

based on daily precipitation observed at 172 meteorological stations. Results reveal a significant quasi-biennial cycle in the entire study period and a decadal cycle since the 1990s. EOF analysis shows that the anomalies of summer precipitation in the basin are mainly represented by a uniformly more or less anomaly mode in the whole basin (the first leading mode), which explains about 37% of the total variance. Compared with precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River, precipitation in Huaihe River basin has a poor relationship with the EAP teleconnection of 500 hPa geopotential height in East Asia, but has a much more significant relationship with the water vapor transport of southwesterly summer monsoon in the lower troposphere. Their correlation field displays an alternating positive–negative correlation wave trains from Somali Peninsula to Huaihe River basin. The wave trains indicate that when the Somalia cross-equatorial flow (SCEF) strengthens, the southwesterly moisture transport into Huaihe River basin increases due to the effects of the westerly winds over the tropical India Ocean, leading to water vapor convergence over Huaihe River basin in the lower troposphere and abnormally wet or flood climate there. On the contrary, dry or drought climate would occur when the SCEF is weak. The spatial correlation field between the SCEF and precipitation in China also shows that the most significant correlation region is located in Huaihe River basin. However, during the study period of this paper, the above relationship is not stable and exhibits an obvious interdecadal enhancement, indicating that the impact of the SCEF on summer precipitation in the basin has significantly enhanced in the recent two decades. This enhancement may be related to the changed relationships between the SCEF and the meridional water vapor transport on the southern side of Huaihe River basin and zonal water vapor transport on its western side, and the influence of the two water vapor conveyance belts on summer precipitation in Huaihe River Basin both have experienced interdecadal increase.

Keywords Somalia cross-equatorial flow, Huaihe River basin, Summer precipitation, Decadal

1 引言

淮河流域是我国重要的粮、棉、油主产区之一，对保障我国粮食安全、促进经济和生态可持续发展具有重要意义（高歌等，2008）。但由于淮河位于东部季风区南北气候过渡带，降水年际变率大，且雨季时间集中，在独特的地形和水文条件配合下易引发旱涝灾害，尤其是进入 21 世纪以来旱涝频发，例如 2003 年、2005 年和 2007 年都发生了严重的洪涝灾害，其中仅 2003 年淮河大涝就导致 5800 多万人受灾。2007 年淮河发生了新中国成立后仅次于 1954 年的全流域性大洪水，造成了严重的人员伤亡，直接经济损失高达 170 多亿元（肖子牛，2008）。而 2012 年和 2014 年又发生了严重的夏旱，分别造成了 35.6 亿元和 128.9 亿元经济损失（宋连春，2013，2015）。因此，加强淮河流域夏季旱涝预测技术的研究不仅是气候预测业务科研的重点工作之一，也是国家防灾减灾的迫切需求。

在造成淮河流域降水异常的诸多外强迫因子中，ENSO 作为气候系统年际变率的最强信号，一直以来被认为起着重要作用。研究表明，前冬 ENSO 不同的发展状态造成的影响并不相同。在厄尔尼诺发展年，夏季中国南海—菲律宾热带对流易减弱，在东亚 500 hPa 位势高度场上激发出经向“正—负—正”的波列异常，导致西太平洋副热带高压（简称副高）偏南，江淮多雨而黄河流域、华南少雨；在其衰减年则易形成经向“负—正—负”波列异常，导致副高偏北，江淮少雨而黄河流域多雨，拉尼娜的影响与厄尔尼诺大致相反，但没有后者的影响显著（Huang and Wu，1989；龚道溢和王绍武，1999）。Wang et al.（2008）认为厄尔尼诺衰减年和发展年分别对应着东亚夏季风两个主模态，在前者影响下 850 hPa 风场上中国东南部—西太平洋易存在大范围的反气旋异常，中国东部为中间型雨带，江淮易多雨，而在后者影响下 850 hPa 风场上东亚偏北风距平明显，中国东部为南北两极型雨带，江淮信号不明显。不同强度的厄尔尼诺事件产生的影响也有差异，强厄尔尼诺事件的影响更明确，有利于中国夏季呈南方型雨带，长江流域多雨而华南、华北少雨，中等强度厄尔尼诺事件的影响更容易受到北半球高纬大气环流异常和南半球异常信号的调制，6～7 月副高北部偏北风距平易导致副高偏弱偏东，反之副高强度和位置相反（薛峰和刘长征，2007）。除位相和强度外，不同分布型的厄尔尼诺产生的影响也不相同，相对于东部型而言中部型厄尔尼诺使得 Walker 环流的异常区域更偏西，在西北太平洋上空对流层中层激发出正位相的太平洋—日本（PJ）波列，Walker 环流的异常下沉支位于东亚副热带地区，菲律宾异常反气旋强度减弱，持续时间缩短，其位置会西移到我国南海地区，中国南方为异常的反气旋控制，易高温少雨（符淙斌和弗莱彻，1985；Yuan et al., 2012），但淮河流域

信号不明显。此外，大西洋海温也可对淮河夏季气候产生重要影响。例如，个例分析表明，2013 年北大西洋破纪录高海温是造成当年江淮—江南极端高温少雨的直接原因（孙建奇，2014）。

除海洋外，青藏高原也对东亚夏季气候异常有着重要作用。研究表明，青藏高原冬季积雪异常可通过融雪改变土壤湿度和地表温度，从而使得地表对大气感热加热的异常具有持续性，可以影响到东亚夏季风的强弱和中国东部的旱涝（钱永甫等，2003）。研究还发现，高原积雪偏多有利于春夏季青藏高原感热和上升运动减弱，与其南侧温度对比弱，即南北温度梯度变小，导致东亚夏季风强度弱，有利于初夏菲律宾反气旋的加强，与长江中下游和淮河南部地区夏季降水偏多、华北偏少的降水异常分布型有较好的对应关系（陈兴芳和宋文玲，2000；吴统文和钱正安，2000；张顺利和陶诗言，2001）。

大气环流系统尤其是东亚副热带环流系统自身也对淮河夏季降水有重要作用，但在早期的研究中通常将长江和淮河作为一个整体开展研究（合称为江淮地区）。如 Ding and Sun（2001）研究发现当东亚夏季风环流偏弱（强），江淮流域夏季降水易偏多（少），此外，若夏季南亚高压面积偏大、位置偏南和偏东，有利于江淮降水偏多，反之江淮降水偏少（钱永甫等，2002；朱玲等，2010），副热带西风急流和副高的两次北跳分别对应着江淮梅雨的开始和结束，6 月急流和副高位置偏北、7～8 月偏南都是有利于江淮地区降水偏多的形势（况雪源和张耀存，2006；宣守丽等，2011；李维京，2012）。从更大范围的环流配置看，当夏季鄂霍次克海阻高偏强、副高偏南，东亚自北向南出现“正—负—正”的东亚—太平洋（EAP）遥相关波列配置时，江淮夏季降水易偏多（黄荣辉等，2006），这其中热带西太平洋暖池对流活动（Huang and Li, 1987; Nitta, 1987）对这种经向异常波列起到了激发作用，但这种环流型降水异常区主要位于长江流域和淮河流域南部地区（赵振国，1999）。

由上述研究成果可知，淮河夏季降水异常受到东亚大气环流尤其是夏季风的影响，而东亚夏季风又受到其他地区大气环流的作用，尤其是近十多年来大量的研究纷纷揭示了南半球大气环流和下垫面异常对东亚夏季风的作用，南半球环流的异常前兆信号已成为东亚夏季风和中国东部汛期降水的重要预测因子之一（薛峰，2005）。这其中，南极涛动及其副热带分支的马斯克林高压和澳大利亚高压都扮演着关键角色（王会军和薛峰，2003；薛峰和何卷雄，2005；范可，2006；范可和王会军，2006；Fan and Wang，2007；高辉等，2012），而越赤道气流则在其中起到了南北半球水汽输送桥梁的作用，尤其是索马里越赤道气流建立时间早，中心强度也远远强于其它几支越赤道气流（高辉，2004）。索马里越赤道气流的稳定建立还会导致赤道印度洋地区西风的持续加强和向东扩展，并最终在南海地区形成西南气流（李崇银和吴静波，2002），可以影响南海夏季风建立的早晚（高辉，2004）。索马里越赤道气流的年际变化不仅影响到西南水汽输送的位置和强度（白慧和高辉，2017），也与东亚沿岸 500 hPa 的经向波列有一定联系，并和中国东部降水异常密切相关（王会军和薛峰，2003）。但目前关于索马里越赤道气流影响我国夏季降水的区域主要集中于华北、长江中下游及其以南地区（王会军和薛峰，2003；白慧和高辉，2017），其与淮河流域夏季降水的关系分析较少。那么索马里越赤道气流是否会对淮河夏季降水有重要影响？这一影响若存在，可否为该地区旱涝预测业务提供可用信息？这在近年来淮河流域夏季降水许多预测因子指示意义减弱的背景下显得尤为重要，也是本文的出发点。

2 资料简介

文中所用逐日降水资料取自中国气象局国家气象信息中心发布的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）》（任芝花等，2012）。该数据集集中解决了基础气象资料质量和国家级、省级存档资料不一致的问题，数据质量和空间分辨率（测站数）比之前观测降水资料均有明显提高，已在业务和科研中得到广泛应用。该套资料在中国大陆区域共有两千五百多个测站，本文选择位于淮河流域范围内的 172 个测站作为淮河降水代表测站。考虑到上世纪五十年代测站数普遍偏少且观 测不完整，本文选择 1961～2016 年作为研究时段。此外，在分析索马里越赤道气流影响淮河流域夏季降水的机制时，为将其与印度季风影响华北降水的机制相比较，采用了同时段的三套全球格点降水资料进行分析，即 CRU（Climatic Research Unit；Harris et al., 2014）、GPCC（Global Precipitation Climatology Centre；Schneider et al., 2017）和 PREC/L（Precipitation

Reconstruction Land；Chen et al., 2002），水平分辨率分别为 0.5°×0.5°、1°×1°和 1°×1°，参考 Jin and Wang（2017）的研究，将格点降水场求（20°～28°N，76°～87°E）的区域平均以代表与华北降水相关较好的印度中北部地区降水。

同时段大气环流资料为NCEP/NCAR逐日再分析数据集中的 500 hPa 位势高度场、850 hPa 水平风场和比湿场。该资料水平分辨率为 2.5°×2.5°（Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001）。基于索马里越赤道气流的气候态空间分布特征，以（2.5°S～2.5°N，40°～60°E）平均的 850 hPa 经向风速表征其强度（高辉，2004）。在分析索马里越赤道气流的低频变化特征时，采用 Vondrak 滤波器（郑大伟和董大南，1986）对序列进行了 7 年低通滤波分析。

3 淮河流域夏季降水的时空分布特征

淮河流域夏季旱涝频发的直接原因之一是其降水具有很强的年际变率，尤其是准两年振荡（魏凤英和张婷，2009）。淮河夏季降水的功率谱分析结果表明，在准 2 年周期处，其谱估计值超过了 α＝0.05 的红噪音标准谱（图略）。从 1961～2016 年淮河流域夏季降水量序列（图 1）中也可以看出其年际变化较为明显，例如 2003 年淮河极端洪涝和 1966 年淮河大旱（丁一汇，2008）。就气候平均而言，流域夏季降水量为 456.1 mm（图 1 中虚线），虽然这一气候值要小于长江中下游地区夏季降水量，但研究时段内淮河多年降水的标准差约占其降水量的 23%，而长江中下游地区夏季降水标准差为对应降水量的 18%（图略），即淮河流域夏季降水具有更大的年际变率。若以降水量标准化值超过一个标准差（低于一个负标准差）作为判断降水异常偏多偏少的标准，则在研究时段内的 56 年中，降水异常年共有 19 年，其中偏多年有 1963、1965、1971、1998、2000、2003、2005 和 2007 年，偏少年有 1961、1966、1978、1985、1988、1992、1997、1999、2002、2013 和 2014 年。除年际变率外，1990 年代以来淮河流域夏季降水亦呈现出一定的年代际变化特征，1990 年代降水相对较少，其中 1992、1997 和 1999 年降水均异常偏少，2000～2008 年处于偏多时段，其中 2000、2003、2005 和 2007 年汛期降水均异常偏多并引发洪灾，而 2009 年以来连续 8 年降水偏少，尤其是 2014 年异常偏少 3 成，夏季高温干旱明显。

图 2 为淮河流域夏季降水 EOF 前三个空间模态及时间系数标准化序列，这三个模态的方差贡献分别为 37%、17%和 9%，根据 North et al.（1982）研究，这三个模态是可以区分的。第一模态空间上表现为全流域一致偏多或偏少型，中心位于淮河干流至流域中部地区。从第一模态时间系数序列与整个流域夏季降水序列演变可以看出（图 1b），二者无论是年际还是年代际变化都呈现出高度一致（相关系数达 0.99），说明淮河流域降水异常主要由第一模态决定，也即全流域性的一致偏多偏少。第二模态空间上表现为南北反向型，以流域中部为界，南北两侧距平相反，这主要和中国东部主雨型分布有关，淮河南侧降水和长江流域降水变率更为一致，而其北侧降水则和华北降水变率更为接近。从图 2b 可知，其时间序列与整个流域夏季降水序列并无明

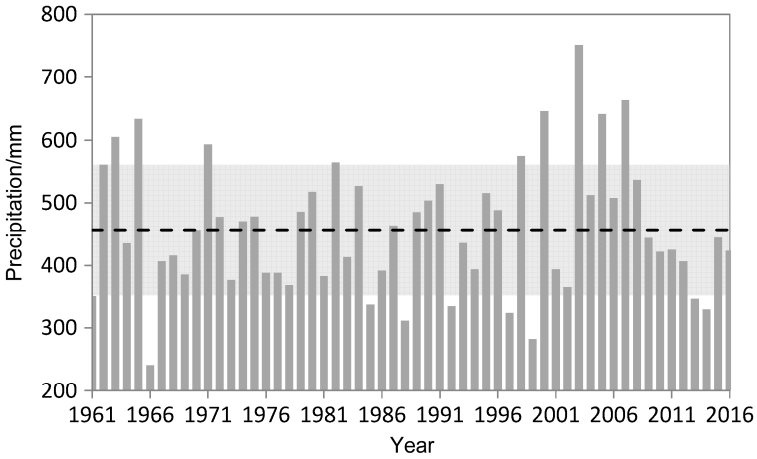

图 1 1961～2016 年淮河流域夏季降水量（直方图）、气候平均（虚线）和距离气候平均的一个标准差范围（阴影区）

Fig. 1 Summer precipitation in Huaihe River basin during 1961–2016 (histogram) and its climatological mean (dashed line). Shadow means the precipitation anomalies less than one standard deviation

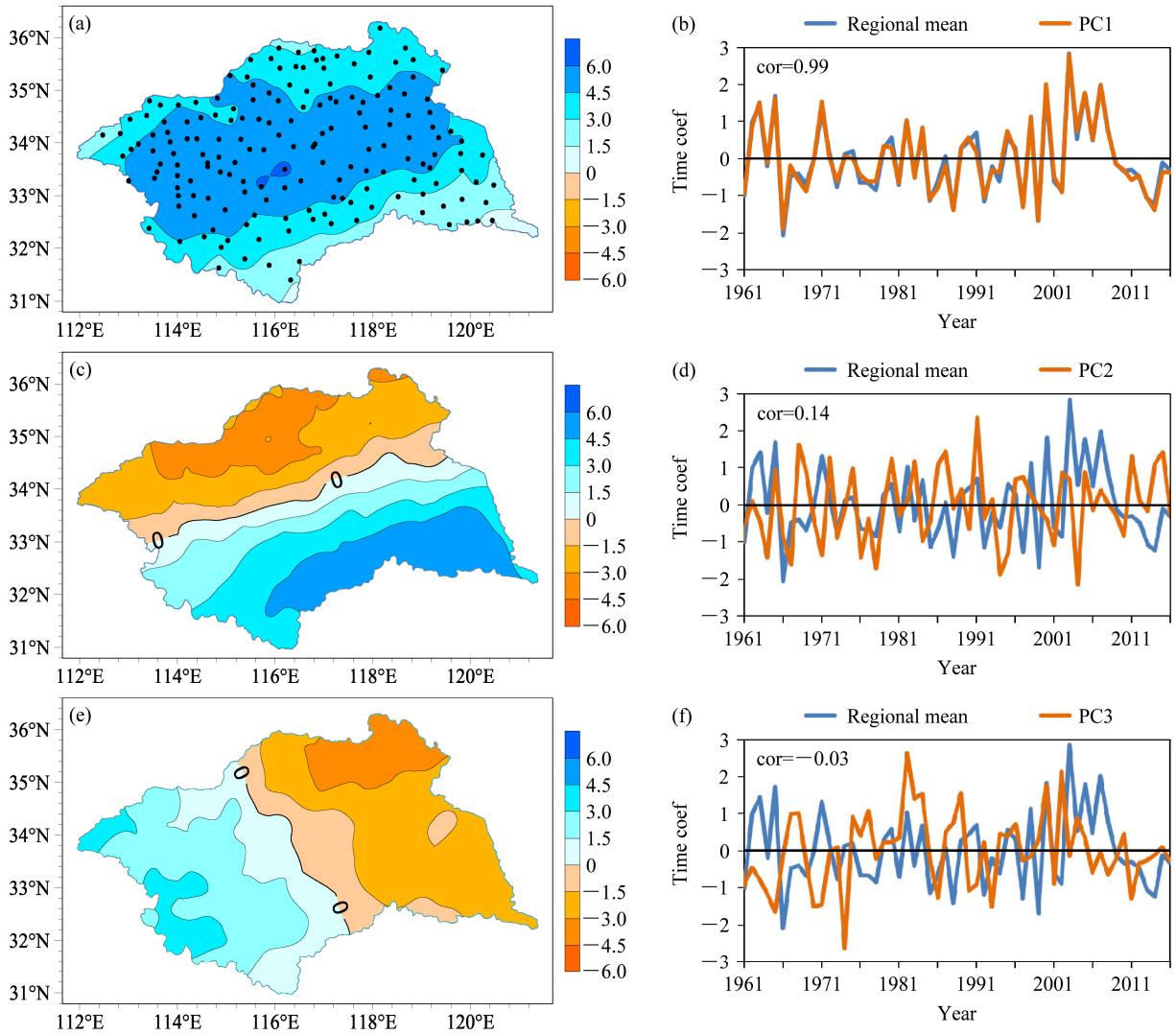

图 2　淮河流域夏季降水 EOF 前三个模态空间分布（左列）及标准化时间序列（右列）：（a、b）第一模态；（c、d）第二模态；（e、f）第三模态。（a）中黑点表示 172 个测站；（b、d、f）中蓝色线为淮河流域区域平均降水量标准化时间序列，橘色线为三个模态标准化时间系数

Fig. 2　Eigenvectors (left) and standardized time series (right) of the (a, b) first, (c, d) second and (e, f) third leading EOF modes of summer precipitation in Huaihe River basin. In (a), the black dots mean the locations of 172 observation stations. In (b, d, f), the blue curve means the standardized regional-mean precipitation and the orange curve means the standardized time series

显的一致变化特征，二者相关系数仅为 0.14。第三模态空间场为东西差异型，流域东西两侧距平反向，其时间序列与原序列的相关仅为−0.01。考虑到淮河流域降水具有一致的空间变化特征，且相比于其它流域，淮河流域范围较小，因此下文以流域 172 站平均降水作为流域降水，并分析其和大气环流的对应关系。

4　淮河流域夏季降水与索马里越赤道气流的关系

在气候平均场上（图 3），进入我国东部地区的热带水汽输送主要为源自孟加拉湾的西南水汽输送和来自 105°～120°E 经向水汽输送，前者可以追踪至索马里越赤道气流进入北半球后受柯氏力影响转向形成的热带印度洋西风，而印度洋西风的增强有利于将印度洋和孟加拉湾上空的暖湿水汽输送至我国。后者为经向风越过赤道后进入南海并进一步向北输送影响我国东部地区。作为东亚夏季风的重要组成部分（Tao and Chen，1987），这两支水汽输送路径和强度对我国东部夏季雨带的位置和强度的影响已被广泛研究（如乔云亭和林美静，2006；孙建华等，2016）。

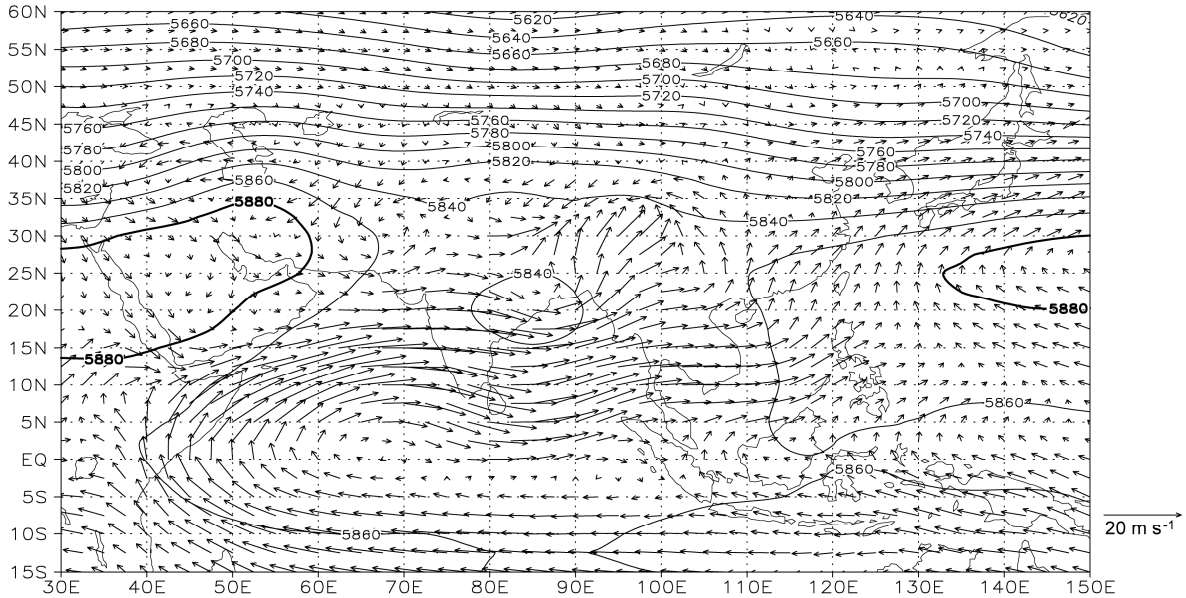

图 3 气候平均的夏季 850 hPa 风场（矢量箭头）和 500 hPa 位势高度场（等值线，粗线条为 5880 gpm 等值线）

Fig. 3 Climatology of 850-hPa wind (arrows) and 500-hPa geopotential height (contours) in summer. The two thick lines indicate the 5880gpm contour

为分析夏季风系统对淮河流域降水的影响，计算了流域夏季降水与同期 500 hPa 位势高度场及 850 hPa 水汽输送通量的相关系数（图 4）。可以看出，淮河降水与 500 hPa 位势高度场的相关较弱，尤其在东亚—西太平洋区域均未能通过 95%信度检验，相关系数值远低于长江流域与东亚副热带高度场的相关（图略）。从空间分布看，东亚至西太平洋的整个热带—高纬度地区均为弱的正相关，这同样和长江流域有很大差异，因为后者和位势高度场的相关呈现出明显的从低纬到高纬的“正—负—正”型 EAP 波列分布（黄刚和严中伟，1999）。

相比于 500 hPa 位势高度，淮河夏季降水与 850 hPa 水汽输送通量的相关更好。从图 4 可以看出，青藏高原东南侧—长江流域—日本海为一个显著的西南向相关场，对比图 3 可知，这对应于西南水汽输送偏强的形势。而在华北地区则为一个显著的东北向相关场，这就使得淮河流域低层南侧为西南风距平、北侧为东北风距平，构成气旋式距平环流分布，低层辐合加强，导致淮河夏季降水偏多。如果追踪淮河南侧的西南风异常，则可发现自北非至孟加拉湾上空均存在异常的气旋和反气旋式相关中心，即在索马里半岛上空为气旋式相关中心，这一中心的东侧恰好为索马里越赤道气流通道处，即当索马里越赤道气流偏强时，其进入北半球后易在东非上空激发出气旋式环流（图 4 中标注“C”处）。此外在阿拉伯海西侧为反气旋式相关中心（图 4 中标注“A”处），在印度西部为气旋式中心，在孟加拉湾上空为反气旋式中心。这些中心的分布刚好构成了从索马里半岛至淮河流域的一个正负交替的波列，这也表明当索马里越赤道气流加强后，通过热带印度洋西风的纽带作用可以加强进入淮河流域的西南暖湿气流，并在淮河上空低层形成水汽辐合，造成淮河多雨。

为进一步验证上述关系，图 5 给出了索马里越赤道气流和中国逐一站点降水的相关，可以看出最显著的相关区域恰好位于淮河至黄河下游地区，尤其是在淮河流域，大部分测站降水和索马里越赤道气流的相关性都通过了 95%信度检验，表明强的索马里气流有利于淮河流域夏季降水的增多，淮河易出现洪涝；反之当索马里越赤道气流强度弱时，淮河夏季降水减少，易出现旱情。从图 5 上还可以看出，另一个显著的正相关区位于西南地区东部和南部，这反映出西南水汽输送对这两个区域降水影响的一致性，而西南水汽输送和索马里越赤道气流的强弱有密切的关联。从图 5 还可以看出，淮河以南的长江中下游至华南北部为大片负相关区，但相关强度较弱。传统的夏季降水和雨型研究中常常将淮河和长江流域作为一个整体开展分析，并称为江淮地区（赵振国，1999），但近二十年来淮河和长江中下游夏季降水的异常却呈现出明显的反位相演

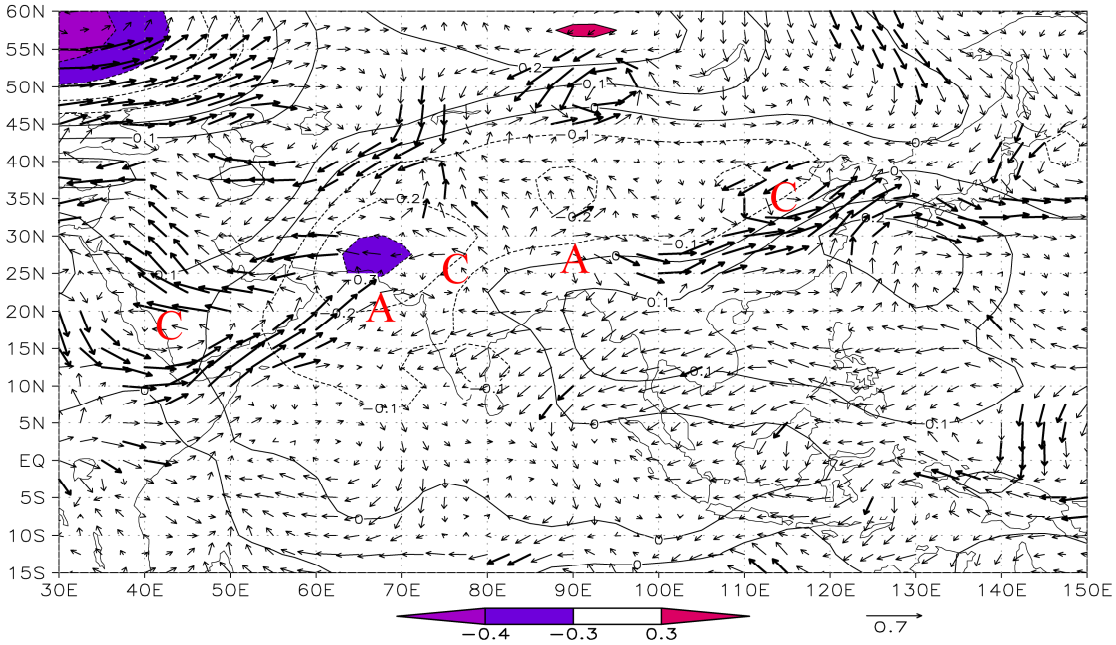

图 4 淮河流域夏季降水与 500 hPa 位势高度场（等值线和阴影，阴影区通过 95%信度检验）及 850 hPa 水汽输送（箭头，粗箭头表示水汽输送通量通过 95%信度检验）的相关系数，图中“C”和“A”分别对应气旋式和反气旋式相关中心

Fig. 4 Correlation coefficients of summer precipitation in Huaihe River basin with 500-hPa geopotential height (contours and shadings, shaded areas indicate the 95% confidence level) and 850 hPa wind (arrows, thick arrows indicate the 95% confidence level). “C” and “A” represent cyclonic and anticyclonic correlation centers, respectively

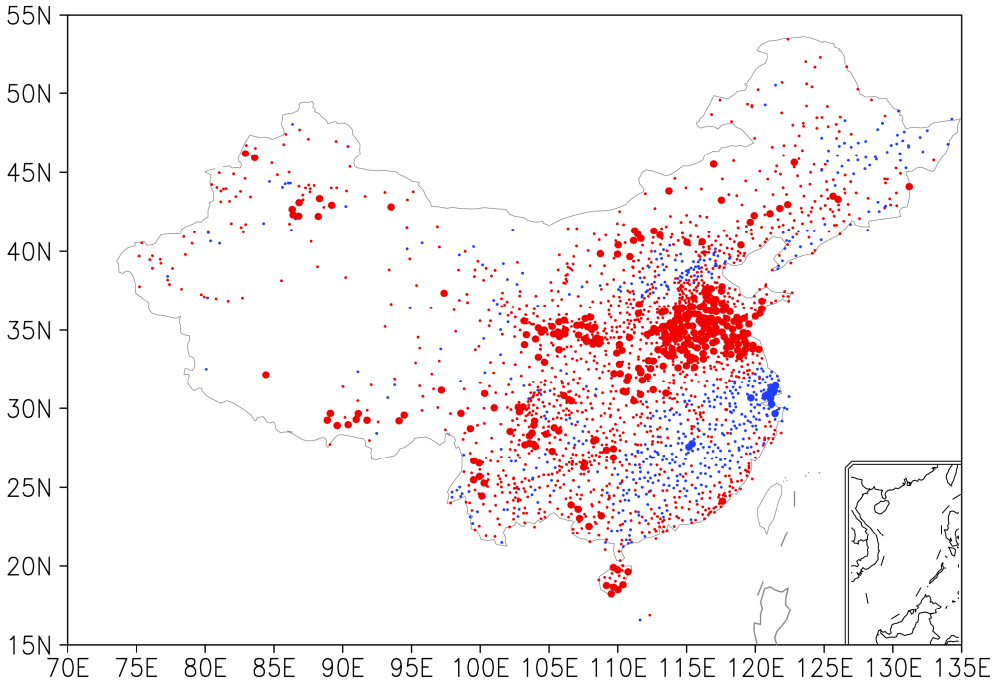

图 5 夏季索马里越赤道气流与中国降水相关（红色圆点为正相关，蓝色为负相关；大圆点通过 95%信度检验）

Fig. 5 Correlation map between Somalia cross-equatorial flow and summer precipitation in China (red and blue dots mean positive and negative values, respectively. Large dots represent values exceeding the 95% confidence level)

变（张庆云和郭恒，2014）。图 5 的结果显示，索马里越赤道气流的作用可能是造成这种反位相分布的一个可能因素，这其中的详细机制仍需进一步分析。

为进一步分析索马里越赤道气流影响淮河夏季降水的可能机制，计算了夏季索马里越赤道气流与 850 hPa 水汽输送通量的相关（图 6），图中粗箭头表示水汽输送通量的相关通过 95%信度检验。由图 6 可以看出类似于图 4 的反气旋—气旋式波列。若索马里气流强，其越过赤道后在其西侧激发气旋式异常中心，而在阿拉伯海北部为反气旋式异常中心，这样在印度半岛西侧易于激发出气旋式异常中心，这一气旋式异常中心有利于其下游孟加拉湾北部的反气旋异常中心。在淮河南部，较强的西南风距平激发出低层的气旋式环流异常中心，使淮河低层水汽辐合增强，从而有利于淮河夏季降水增多，同时淮河流域上空低层气旋式异常环流也不利于长江中下游—华南北部降水偏多，造成淮河和南方地区降水的反位相分布。对比图 4，自索马里北侧至淮河地区的波列非常相似。从图 6 还可以看出，在东亚副热带地区为反气旋环流相关场，在南海南部地区则为气旋式环流相关中心。王会军和薛峰（2003）分析了索马里急流与东亚 500 hPa 高度场的相关，认为夏季索马里急流的年际变化有全球范围内的环流与之联系，特别是东亚沿岸的波列状异常分布、南亚高压以及澳大利亚以南的偶极型异常分布。图 5 的结果也表明，通过与东亚经向波列相配合，索马里急流可以改变东亚夏季降水的水汽路径和强度异常，使得淮河流域夏季降水产生显著异常。

5 索马里越赤道气流与淮河流域降水关系的年代际增强

已有研究表明，淮河夏季降水具有明显的年代际变化特征。与之对应，夏季索马里越赤道气流强度也有明显的年代际波动。图 7a 给出了标准化后逐年夏季索马里越赤道气流强度及 7 年低通滤波。由该图可见索马里越赤道气流在上世纪 60～70 年代基本为负位相，之后正位相年份明显增多，尤其是 90 年代之后。整个研究时段内一元线性趋势相关系数为 0.48，通过 99%信度检验，表明索马里越赤道气流在整个研究时段内呈总体线性增强趋势。采用 Vondrak 滤波器对序列进行了 7 年低通滤波分析，发现研究时段内索马里越赤道气流经历了明显的先弱后强的年代际变化特征，近十年又有所下降。对比淮河流域夏季降水序列（图 1）不难看出，两条序列自 90 年代中期以来先增强后减弱的年代际变化特征非常相似。此外这一时段两者的年际变化也有一致之处，如 2000、2003、2007 年淮河大水年，索马里越赤道气流强度异常均超过了一个正

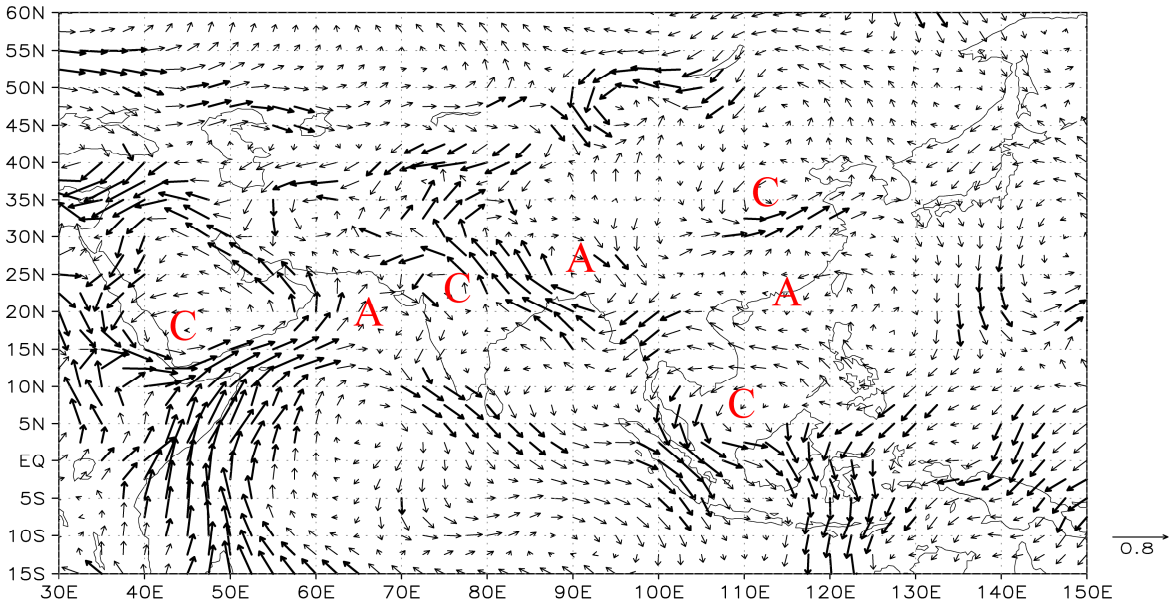

图 6 夏季索马里越赤道气流与 850 hPa 水汽输送（箭头，粗箭头表示通过了 95%信度检验）相关，图中“C”和“A”分别对应气旋式和反气旋式相关中心

Fig. 6 Correlation map between Somalia cross-equatorial flow and 850 hPa water vapor transport (arrows, thick arrows are for values at/above the 95% confidence level)

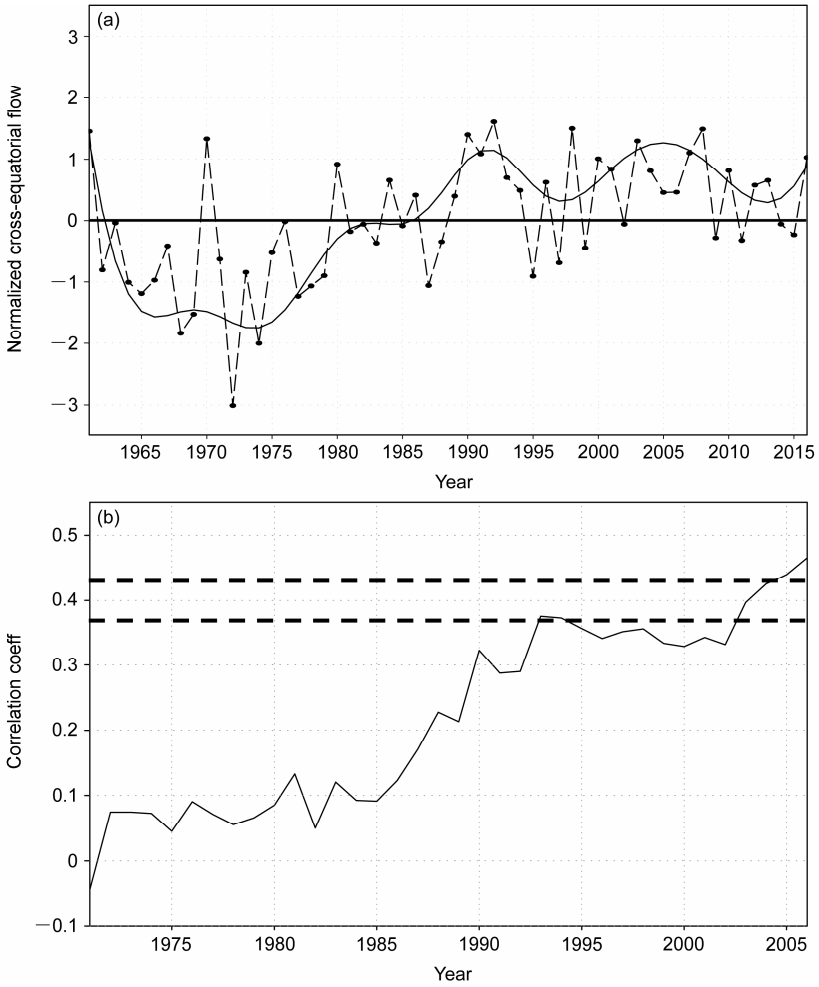

图 7 （a）逐年夏季索马里越赤道气流强度标准化序列及（b）其与淮河流域夏季降水的 21 年滑动相关。（a）中虚线代表索马里越赤道气流，实线为保留 7 年以上信号的低通滤波曲线；（b）中上下两条水平虚线分别对应 95%和 90% 信度水平检验

Fig. 7 (a) Normalized Summer Somalia cross-equatorial flow and (b) its 21-year running correlation with precipitation in Huaihe River basin. The dashed line in (a) represents Somalia cross-equatorial flow and solid line represents 7-year low frequency pass filter serial. The up and down dashed lines in (b) represent the 95% and 90% confidence levels respectively

标准差。

前文分析的是整个研究时段内二者的关系。但在研究时段内二者关系并非稳定，21 年滑动相关显示索马里越赤道气流和淮河降水关系呈年代际增强变化（图 7b）。在 1980 年代中期之前，二者相关性非常弱，仅维持在 0.1 左右，随后逐渐增强，并基本维持在 0.3 以上，近期可稳定达到 95%的信度水平。结合图 1 和图 7a 可知，1990 年代以来年代际和年际位相一致性变化导致二者关系显著增强，这也意味着近年来索马里越赤道气流对于淮河流域夏季降水在季节预测上的指示意义也在增强。

除相关外，分别对 1961～1985 年和 1991～2016 年两个时段合成了流域降水典型异常年 850 hPa 风场和 500 hPa 位势高度场的差值。结果表明，在 1990 年代之前的流域夏季降水典型偏多年，最明显的特征是副热带东亚—西太平洋存在显著的反气旋性差值中心，反之则为气旋性差值中心，但索马里越赤道气流无明显差异。在 1990 年代之后的典型偏多年，索马里附近的越赤道气流呈现异常增强的特征，中国南方地区的西南气流也偏强，与之对应的是东亚中纬度出现气旋性差值中心，中国南海和副热带西太平洋出现反气旋性差值中心，并且索马里半岛至淮河流域也存在与图 4 相似的正负交替的波列（图略），这些都表明引起淮河流域夏季降水异常的主要环流系统发生了年代际变化，在 1990 年代之后流域降水与索马里越赤道气流的关系明显增强。

为分析这种年代际增强的可能原因，图 8 计算

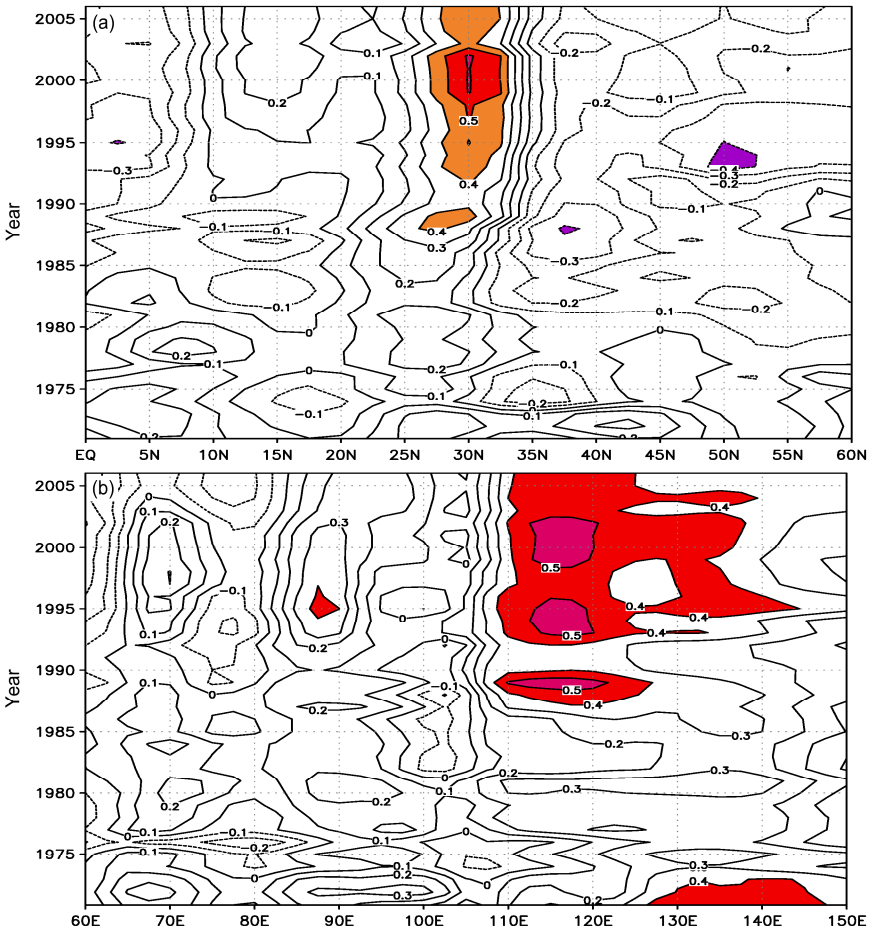

图 8 淮河流域夏季降水与 850 hPa（a）沿 110°～120°E 平均的经向水汽输送和（b）沿 30°～35°N 平均的纬向水汽输送的相关

Fig. 8 Correlation maps between summer precipitation in Huaihe River basin and water vapor fluxes at 850 hPa: (a) Meridional flux averaged over 110°–120°E; (b) zonal flux averaged over 30°–35°N)

了淮河流域夏季降水与 850 hPa 沿 110°～120°E 平均的经向水汽输送和沿 30°～35°N 平均的纬向水汽输送 21 年滑动相关。在和经向水汽输送滑动相关图上（图 8a）可以看出，在研究时段前期，经向水汽输送对流域夏季降水的影响相对较弱，虽然表现为正相关，但未能达到 95%信度水平，但之后在 27.5°～32.5°N 范围内相关明显增强，呈显著的正相关，表明江南北部—淮河流域南部地区向北的经向水汽输送加强有利于流域降水偏多、反之则偏少。此外在 35°N 以北地区则由前期的弱正相关转为后期的弱负相关，表明来自淮河以北的南下冷空气对淮河流域降水亦有一定的作用，但其贡献要明显弱于源自热带地区的南风气流。与之类似，图 9b 显示纬向水汽输送对流域夏季降水的相关在 1980 年代中期以后也显著加强，而之前则较弱，未能达到 95%的信度水平。和纬向水汽输送最显著的相关区集中于 110°～120°E，这一位置恰好是淮河流域，表明从西侧进入淮河的西风水汽强（弱）时，淮河降水易多（少）。这一结果和图 4 的结论一致。

大量研究表明，同作为亚澳季风系统的主要分支，南亚季风与东亚季风有密切联系，表现为印度夏季降水与东亚季风区降水的显著相关性，特别是与中国北方地区降水呈明显的正相关（梁平德，1988；Kripalani and Singh，1993；张人禾，1999；戴新刚等，2002；Wu，2002；刘芸芸和丁一汇，2008），这其中印度降水异常引起的大气加热场改变并通过全球遥相关型向下游东亚地区传播可能起到了重要作用（Wu，2002；Ding and Wang，2005）。那么，在索马里越赤道气流通过热带印度洋和孟加拉湾西风作用于淮河降水过程中，印度夏季风是否存在影响？为此基于 3 种降水再分析资料（CRU、GPCC、PRECL/L；Chen et al., 2002; Harris et al.,

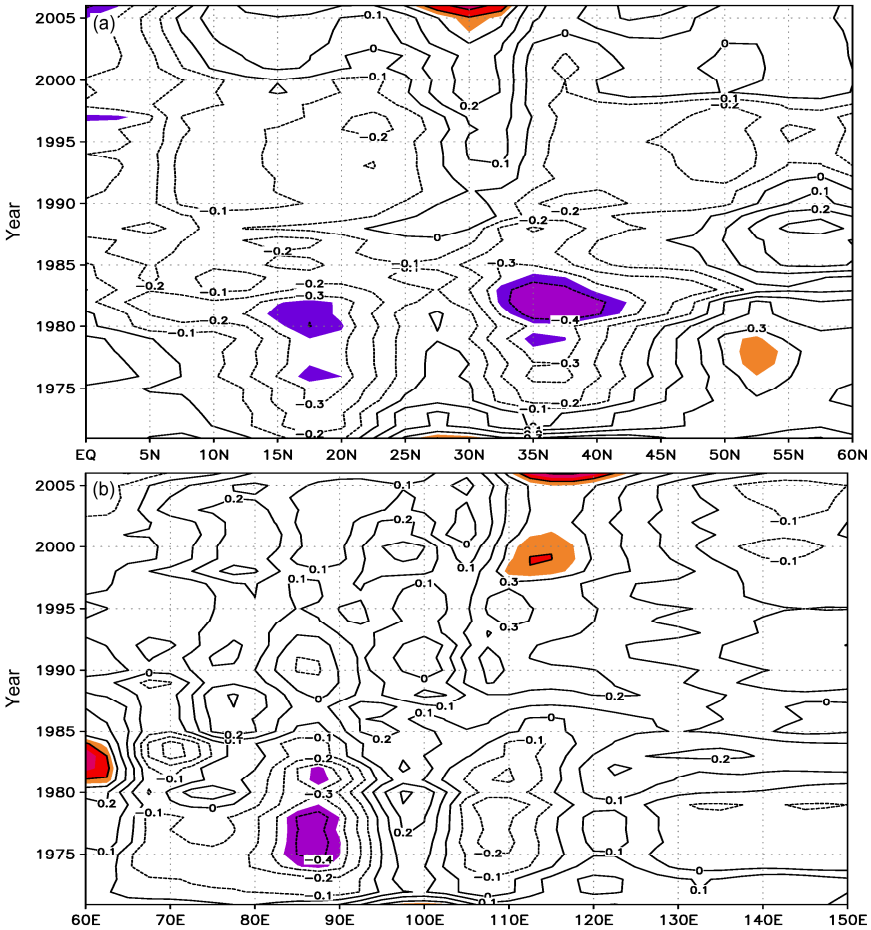

图 9　夏季索马里越赤道气流与 850 hPa（a）沿 110°～120°E 平均的经向水汽输送和（b）沿 30°～35°N 平均的纬向水汽输送相关

Fig. 9　Correlation maps between the SCEF and water vapor fluxes at 850 hPa: (a) Meridional flux averaged over 110°–120°E; (b) zonal flux averaged over 30°–35°N

2014; Schneider et al., 2017)，统计了夏季印度降水与淮河流域降水的关系。1961～2016 年期间再分析与观测的淮河流域夏季降水序列的相关系数分别为 0.96（CRU）、0.99（GPCC）和 0.92（PREC/L），表明这 3 种再分析资料在淮河流域的适用性较好。从再分析资料揭示的印度中北部地区（20°～28°N，76°～87°E 平均；Jin and Wang，2017）降水与淮河流域夏季降水的 21 年滑动相关系数变化（图略）可以看出，印度降水与淮河流域夏季降水从弱的正相关转为弱的负相关，但整个研究时段内相关均较弱，未通过 95%信度检验。这和图 5 揭示的黄淮以北地区尤其是华北夏季降水与索马里越赤道气流并无显著相关一致，表明淮河降水和华北降水的上游影响系统并不一致。

这种差异性还可以从淮河和华北各自区域平均的夏季降水与亚洲地区降水的同期相关场中看出（图略）。对淮河流域而言，除中国东部大陆上空降水相关分布呈现出华北—江淮—华南的“负—正—负”空间型外，在孟加拉湾北侧大陆也有一个通过显著性检验的正相关区，这反映出孟加拉湾地区水汽强弱对淮河降水的影响，这和前文结论一致。但淮河夏季降水和印度降水的关系非常微弱。而对于华北地区，除中国东部大陆外，最显著的正相关区位于印度中北部，而在孟加拉湾北侧大陆则没有明显的高相关区，这同样和前人研究结论一致，表明印度降水和中国东部降水最显著的相关区位于华北地区，而非淮河。由此可以推测，如果索马里越赤道气流强弱异常影响下游的淮河降水，那么这种影响路径并不同于印度夏季风影响华北的途径。它们关系的年代际增强可能是索马里越赤道气流与孟加拉湾西南水汽输送关系的年代际增强，并进而与淮河西侧的纬向水汽输送及南侧的经向

水汽输送关系增强所导致。

类似于图 8，图 9 给出了夏季索马里越赤道气流与 850 hPa 沿 110°～120°E 平均的经向水汽输送和沿 30°～35°N 平均的纬向水汽输送的 21 年滑动相关系数以揭示这一作用过程。图 9 同样显示出二者关系存在明显的年代际转折特征。以经向水汽输送为例（图 9a），在 1990 年代之前，东北以南地区均呈负相关，最明显的负相关出现在华北—淮河地区，但之后这种负相关不断减弱，并逐渐转为正相关，虽然正相关的数值要弱于图 8a，但二者相关型的时间变化较为接近。同样，在 30°～35°N 平均的纬向水汽输送上也存在这种转折。由图 9b 可以看出，在 19 世纪 80 年代中期之前，中国东部 100°～120°E 大部呈负相关，即索马里急流的偏强有利于向东水汽输送的减弱，反之加强，但之后这一负相关转为正相关，1990 年代中期以后更显著。即索马里越赤道气流与中国东部大部分地区的水汽输送关系发生了年代际变化，这种年代际增强造成当索马里越赤道气流强（弱）时，淮河南侧的经向水汽输送和西侧的纬向水汽输送均增强（减弱）。

6 结论与讨论

基于 1961～2016 年中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集，本文首先分析了淮河流域夏季降水的年际和年代际变化特征，发现虽然淮河流域夏季降水比长江中下游降水的气候值小，但具有更大的年际变率，同时亦呈现出明显的年代际变化。功率谱分析表明，淮河夏季降水具有显著的准 2 年周期。EOF 分析结果显示，淮河夏季降水的异常主要表现为全流域一致偏多或偏少型（第一模态），这一模态的方差贡献高达 37%。第二模态和第三模态空间上分别表现为南北反向型和东西反向型，方差贡献分别为 17%和 9%。

统计分析发现，相比于长江中下游地区，淮河夏季降水与东亚 500 hPa 位势高度场上的 PJ 波列或 EAP 遥相关型关系很弱，但和对流层低层西南水汽输送有更好的对应关系，表现为从索马里半岛至淮河流域的多个正负交替相关波列，这也表明当索马里越赤道气流加强后，通过热带印度洋西风的纽带作用加强了进入淮河流域的西南暖湿气流，并在淮河上空低层形成水汽辐合，造成淮河多雨。这种从索马里半岛至淮河流域的正负交替相关波列同样出现在索马里越赤道气流与 850 hPa 水汽输送通量的相关场上。而索马里越赤道气流和中国台站降水的空间相关场上最显著的相关区同样位于淮河流域。这些结果表明，若索马里气流强，其越过赤道后在其西侧激发气旋式异常中心，而在阿拉伯海北部为反气旋式异常中心，这样在印度半岛西侧易于激发出气旋式异常中心，这一气旋式异常中心有利于其下游孟加拉湾北部的反气旋异常中心。在淮河南部，较强的西南风距平激发出低层的气旋式异常中心，使淮河低层水汽辐合增强，从而有利于淮河夏季降水增多，反之当索马里越赤道气流强度弱时，淮河夏季降水偏少。

进一步分析了研究时段内索马里越赤道气流和淮河夏季降水的滑动相关，发现二者关系并非稳定维持，从 90 年代以来表现出明显的年代际增强特征，在季节预测上的指示意义得以增强。这一增强的可能原因是索马里越赤道气流与流域南侧的经向水汽输送和西侧的纬向水汽输送的关系均发生了年代际反转，并且这两条水汽输送带对流域夏季降水的影响发生了年代际增强。

已有研究揭示出印度季风系统影响中国东部夏季降水的大气遥相关型，如戴新刚等（2002）提出印度—东亚遥相关型，刘芸芸和丁一汇（2008）发现印度夏季风爆发后，形成从印度西海岸到达中国长江流域及日本南部地区的遥相关型，长江中下游梅雨滞后印度夏季风爆发约两周时间。华北-印度高相关关系结果也被 Kripalani and Singh（1993）验证。这种高相关性主要是通过中纬度亚洲夏季（mid-latitude Asian summer，简称 MAS）环流型得以联系（Wu，2002）。和 MAS 型相对应的两个反气旋距平环流中心一个位于（37.5°N，65°E），另一个位于（42.5°N，130°E），即华北地区。本文图 5 的结果也证实了遥相关波列在其中的重要作用，即通过与东亚经向波列相配合，索马里急流可以改变东亚夏季降水的水汽路径和强度异常，使得淮河流域夏季降水产生显著异常。但图 5 反映出的波列并不等同于印度季风系统影响中国华北降水的遥相关型，因此在索马里越赤道气流影响东亚夏季风的过程中，欧亚中纬度纬向波列对淮河降水的作用还有待基于大量个例进一步分析。此外，本文结果主要基于物理统计诊断研究得出，由于东亚夏季降水影响因子的多样性和南北半球相互作用的复杂性，文章对索马里越赤道气流影响下游环流系统尤其是东亚降水的详细机理还需要基于其它技术手段

如动力模式加以进一步分析。

参考文献（References）

白慧, 高辉. 2017. 索马里越赤道气流对西南雨季开始早晚的影响 [J]. 大气科学, 41 (4): 702–712. Bai Hui, Gao Hui. 2017. Influences of the Somalia cross-equatorial flow on the beginning date of rainy season in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 702–712, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16122.

Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. J. Hydrometeorol., 3 (3): 249–266, doi:10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2.

陈兴芳, 宋文玲. 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. 大气科学, 24 (5): 585–592. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 585–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.02.

戴新刚, 丑纪范, 吴国雄. 2002. 印度季风与东亚夏季环流的遥相关关系 [J]. 气象学报, 60 (5): 544–552. Dai Xingang, Chou Jifan, Wu Guoxiong. 2002. The teleconnection relationship between Indian monsoon and East Asian summer circulation [J]. Acta Meteorol. Sinica (in Chinese), 60 (5): 544–552, doi:10.11676/qxxb2002.064.

Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. J. Climate, 18 (17): 3483–3505, doi:10.1175/JCLI3473.1.

丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典 (综合卷) [M]. 北京: 气象出版社, 948pp. Ding Yihui. 2008. China's Meteorological Disasters Collection (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 948pp.

Ding Y H, Sun Y. 2001. A study on anomalous activities of East Asian summer monsoon during 1999 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 79 (6): 1119–1137, doi:10.2151/jmsj.79.1119.

范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (3): 672–679, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.009.

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.04.

Fan K, Wang H J. 2007. Dust storms in North China in 2002: A case study of the low frequency oscillation [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (1): 15–23, doi:10.1007/s00376-007-0015-z.

符淙斌, 弗莱彻 J. 1985."埃尔尼诺"(El Niño) 时期赤道增暖的两种类型 [J]. 科学通报, 8: 596−599. Fu Congbin, Fletcher J. 1985. Two types of warming over Equator during El Niño [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 8: 596-599, doi:10.1360/sb1985-30-10-1360.

高歌, 陈德亮, 徐影. 2008. 未来气候变化对淮河流域径流的可能影响 [J]. 应用气象学报, 19 (6): 741–748. Gao Ge, Chen Deliang, Xu Ying. 2008. Impact of climate change on runoff in the Huaihe River basin [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (6): 741–748, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2008.06.014.

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 [D]. 南京气象学院博士学位论文, 125–132. Gao Hui. 2004. Seasonal and interannual variations of the Southern Hemisphere circulation and their influences on East Asian summer monsoon [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 125–132.

高辉, 刘芸芸, 王永光, 等. 2012. 亚洲夏季风爆发早晚的新前兆信号: 冬季南极涛动 [J]. 科学通报, 57 (36): 3516–3521. Gao Hui, Liu Yunyun, Wang Yongguang, et al. 2013. Precursory influence of the Antarctic oscillation on the onset of Asian summer monsoon [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (6): 678–683, doi:10.1007/s11434-012-5455-x.

龚道溢, 王绍武. 1999. 近百年ENSO对全球陆地及中国降水的影响 [J]. 科学通报, 44 (3): 315–320. Gong D Y, Wang S W. 1999. ENSO influence on global land and precipitation in China over the past century [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 44 (3): 315–320, doi: 10.1360/csb1999-44-3-315.

Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—The CRU TS3.10 Dataset [J]. Int. J. Climatol., 34 (3): 623–642, doi:10.1002/joc.3711.

黄刚, 严中伟. 1999. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化 [J]. 科学通报, 44 (4):421-424. Huang Gang, Yan Zhongwei. 1999. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations [J]. Chinese Science Bulletin, 44 (14): 1325–1329, doi: 10.1360/csb1999-44-4-421.

黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecaldal variations of drought and flooding disasters in china and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730–743, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02.

Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// Proceedings of 1987 International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, 40–51.

Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Adv. Atmos. Sci., 6 (1): 21–32, doi:10.1007/BF02656915.

Jin Q J, Wang C E. 2017. A revival of Indian summer monsoon rainfall since 2002 [J]. Nature Climate Change, 7 (8): 587–594, doi: 10.1038/nclimate3348.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–472, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82 (2): 247–268, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247:

TNNYRM>2.3.CO;2.

Kripalani R H, Singh S V. 1993. Large scale aspects of India-China summer monsoon rainfall [J]. Adv. Atmos. Sci., 10 (1): 71–84, doi:10.1007/BF02656955.

况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 382–389, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.004.

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.02.04.

李维京. 2012. 现代气候业务 [M]. 北京: 气象出版社, 479pp. Li Weijing. 2012. Modern Climate Operation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 479pp.

梁平德. 1988. 印度夏季风与我国华北夏季降水量 [J]. 气象学报, 46 (1): 75−81. Liang Pingde. 1988. The Indian summer monsoon and the rainfall in north China in summer [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 46 (1): 75−81, doi:10.11676/qxxb1988.009.

刘芸芸, 丁一汇. 2008. 印度夏季风与中国华北降水的遥相关分析及数值模拟 [J]. 气象学报, 66 (5): 789−799. Liu Yunyun, Ding Yihui. 2008. Analysis and numerical simulation of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (5): 789−799, doi:10.11676/qxxb2008.072.

Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 65 (3): 373–390, doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373.

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea Rev., 110 (7): 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.

钱永甫, 张琼, 张学洪. 2002. 南亚高压与我国盛夏气候异常 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 38 (3): 295−307. Qian Yongfu, Zhang Qiong, Zhang Xuehong. 2002. The South Asian high and its effects on China's mid-summer climate abnormality [J]. J. Nanjing Univ. (Nat. Sci.) (in Chinese), 38 (3): 295pher, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2002.03.004.

钱永甫, 张艳, 郑益群. 2003. 青藏高原冬春季积雪异常对中国春夏季降水的影响 [J]. 干旱气象, 21 (3): 1–7. Yongfu, Zhang Yan, Zheng Yiqun. 2003. Impacts of the Tibetan Plateau snow anomaly in winter and spring on precipitation in China in spring and summer [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 21 (3): 1–7.

乔云亭, 林美静. 2006. 亚澳季风区的水汽输送特征 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 45 (6): 102–105. Qiao Yunting, Lin Meijing. 2006. The characteristics of moisture transport over Asian–Australian monsoon region [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 45 (6): 102–105, doi:10.3321/j.issn:0529-6579.2006.06.023.

任芝花, 余予, 邹凤玲, 等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测 [J]. 应用气象学报, 23 (6): 739–747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zou Fengling, et al. 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23 (6): 739–747, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.06.011.

Schneider U, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al. 2017. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) [J]. Atmosphere, 8 (3): 52, doi:10.3390/atmos8030052.

宋连春. 2013. 中国气象灾害年鉴 (2013) [M]. 北京: 气象出版社, 222pp. Song Lianchun. 2013. The Meteorology Disaster Almanac over China (2013) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 222pp.

宋连春. 2015. 中国气象灾害年鉴(2015) [M]. 北京: 气象出版社, 240pp. Song Lianchun. 2015. The Meteorology Disaster Almanac over China (2015) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 240pp.

孙建华, 汪汇洁, 卫捷, 等. 2016. 江淮区域持续性暴雨过程的水汽源地和输送特征 [J]. 气象学报, 74 (4): 542–555. Sun Jianhua, Wang Huijie, Wei Jie, et al. 2016. The sources and transportation of water vapor in persistent heavy rainfall events in the Yangtze–Huaihe River valley [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74 (4): 542–555, doi:10.11676/qxxb2016.047.

孙建奇. 2014. 2013 年北大西洋破纪录高海温与我国江淮-江南地区极端高温的关系 [J]. 科学通报, 59 (27): 3465–3470. Sun Jianqi. 2014. Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai–Jiangnan region of China in 2013 [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 59 (27): 3465–3470, doi:10.1007/s11434-014-0425-0.

Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. New York: Oxford University Press, 60–92.

Wang B, Wu Z W, Li J P, et al. 2008. How to measure the strength of the East Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 21 (17): 4449–4463, doi:10.1175/2008JCLI2183.1.

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, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2003.01.003.

魏凤英, 张婷. 2009. 淮河流域夏季降水的振荡特征及其与气候背景的联系 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39 (10): 1360–1374. Wei Fengying, Zhang Ting. 2009. Oscillation characteristics of summer precipitation in the Huaihe River valley and relevant climate background [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 53 (2): 301–316, doi:10.1007/s11430-009-0151-7.

Wu R G. 2002. A mid-latitude Asian circulation anomaly pattern in boreal summer and its connection with the Indian and East Asian summer monsoons [J]. Int. J Climatol., 22 (15): 1879–1895, doi:10.1002/joc.845.

吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析 [J]. 气象学报, 58 (5): 570–581. Wu Tongwen, Qian Zheng'an. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai–Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58 (5): 570–581, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.006.

肖子牛. 2008. 中国气象灾害年鉴 (2008) [M]. 北京: 气象出版社, 233pp. Xiao Ziniu. 2008. The Meteorology Disaster Almanac over China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 233pp.

宣守丽, 张庆云, 孙淑清. 2011. 夏季东亚高空急流月际变化与淮河流域降水异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 231–242. Xuan Shouli, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2011. Relationship between the monthly variation of the East Asia westerly jet and the Huaihe River valley rainfall anomaly in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 231-242, doi:10.3878/j.issn.1006-9585. 2011.02.12.

薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 401-408, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2005.03.13.

薛峰, 何卷雄. 2005. 南半球环流变化对西太平洋副高东西振荡的影响 [J]. 科学通报, 50 (14): 1532–1536. Xue Feng, He Juanxiong. 2005. Influence of the southern hemispheric circulation on East-West oscillation of the western Pacific subtropical high [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (14): 1532–1536, DOI:10.1360/982005-536.

薛峰, 刘长征. 2007. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响及其与强 ENSO 的对比分析 [J]. 科学通报, 52 (23): 2798–2805. Xue Feng, Liu Changzheng. 2007. The influence of moderate ENSO on summer rainfall in eastern China and its comparison with strong ENSO [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53 (5): 791–800, doi:10.3321/j. issn:0023-074x.2007.23.017.

Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q. 2012b. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the eastern and central Pacific El Niño: Possible effects of Indian Ocean SST [J]. J. Climate, 25 (22):7867-7883.

张庆云, 郭恒. 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究 [J]. 大气科学, 38 (4): 656–669. Zhang Qingyun, Guo Heng. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 656–669, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.1402.13240.

张人禾. 1999. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用 [J]. 高原气象, 18 (4): 567–574. Zhang Renhe. 1999. The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 567–574, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.011.

张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. 大气科学, 25 (3): 273–390. Zhang Shunli, Tao Shiyan. 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 273–390, DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07.

赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 297pp. Zhao Zhenguo. 1999. Summer Drought and Flood in China and Environmental Background (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 297pp.

郑大伟, 董大南. 1986. 用多级滤波器实现极移序列的窄带滤波 [J]. 天文学报, 27(4): 368–376. Zheng Dawei, Dong Da'nan. 1986. Realization of narrow band filtering of the polar motion data with multi-stage filter [J]. Acta Astronomica Sinica (in Chinese), 27 (4): 368–376, doi:10.15940/j. cnki.0001-5245.1986.04.010.

朱玲, 左洪超, 李强, 等. 2010. 夏季南亚高压的气候变化特征及其对中国东部降水的影响 [J]. 高原气象, 29 (3): 671–679. Zhu Ling, Zuo Hongchao, Li Qiang, et al. 2010. Characteristics of climate change of South Asia high in summer and its impact on precipitation in eastern China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 29 (3): 671–679.