

邹梦, 乔少博, 吴永萍, 等. 2017. 热带印度洋—西太平洋水汽输送异常对中国东部夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 41 (5): 988–998. Zou Meng, Qiao Shaobo, Wu Yongping, et al. 2017. Effects of anomalous water vapor transport from tropical Indian Ocean–western Pacific on summer rainfall in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (5): 988–998, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16232.

热带印度洋—西太平洋水汽输送异常对中国 东部夏季降水的影响

邹梦¹ 乔少博² 吴永萍¹ 封国林^{1,3}

¹ 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002

² 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

³ 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用 1979~2015 年 NCEP/NCAR 发布的月平均全球再分析资料, 分析了热带印度洋—西太平洋水汽输送异常对中国东部夏季降水的影响及其形成机理。研究结果表明: 热带印度洋—西太平洋地区 (10°S~30°N, 60°~140°E) 夏季异常水汽输送主要包括两个模态, 他们可以解释总的水汽输送异常 34% 的方差。其中, 第一模态 (EOF1) 表现为异常水汽沿反气旋从热带西太平洋经过南海及孟加拉湾输送到中国东部上空, 对应南海、孟加拉湾水汽路径输送均偏多, 此时西太平洋副热带高压显著偏强, 异常水汽在长江中下游地区辐合并伴随显著上升运动, 有利于长江中下游降水偏多; 第二模态 (EOF2) 表现为异常水汽从热带印度洋沿阿拉伯海、印度半岛、中南半岛等呈反气旋式输送, 华南上空相应出现气旋式水汽输送异常, 并对应异常水汽辐合和上升运动, 有利于华南降水偏多。就可能的成因而言, EOF1 与 ENSO 关系密切, 表现为前冬热带中东太平洋显著偏暖, 夏季同期热带北印度洋、南海上空显著偏暖, 造成西太平洋副热带高压显著偏强, 异常水汽主要来源于热带西太平洋和南海; EOF2 与同期热带印度洋偶极子 (TIOD) 异常有关, TIOD 为正位相时热带印度洋上空出现异常东风, 华南上空出现异常气旋并伴随水汽异常辐合, 异常水汽主要来源于热带南印度洋。

关键词 热带印度洋—西太平洋 水汽输送异常 ENSO 长江中下游 华南

文章编号 1006-9895(2017)05-0988-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16232

Effects of Anomalous Water Vapor Transport from Tropical Indian Ocean–Western Pacific on Summer Rainfall in Eastern China

ZOU Meng¹, QIAO Shaobo², WU Yongping¹, and FENG Guolin^{1,3}

¹ College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002

² College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

³ National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Using monthly reanalysis datasets of NCEP/NCAR for 1979–2015, the impact of anomalous water vapor transport from the tropical Indian Ocean–western Pacific on summer precipitation in eastern China was analyzed in this

收稿日期 2016-09-13; **网络预出版日期** 2017-02-27

作者简介 邹梦, 女, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事水分循环研究。E-mail: mengzou2016@163.com

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41530531、41375078、41505061、41375079, 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB430204

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41530531, 41375078, 41505061, 41375079), National Basic Research Program of China (Grant 2013CB430204)

paper. The results show that the summertime anomalous water vapor transport from the tropical India Ocean—western Pacific (10°S – 30°N , 60° – 140°E) to eastern China mainly includes two modes, which can explain 34% of the total water vapor transport variance. The first mode (EOF1) shows anomalous water vapor transport from the tropical western Pacific across the South China Sea and the Bay of Bengal to eastern China along the western flank of the anticyclone. The water vapor transport from the South China Sea and the Bay of Bengal both are abnormally high. Meanwhile, the WPSH (western Pacific subtropical high) is significantly stronger than normal, and anomalous water vapor convergence occurs over the middle and lower reaches of the Yangtze River valley accompanied with significant upward movements, which are favorable for precipitation over this region. The second mode (EOF2) shows anomalies of anticyclonic water vapor transport from the tropical India Ocean across the Arabia sea, India Peninsula, and Indo-China Peninsula and anomalies of cyclonic water vapor transport over southern China, which lead to anomalous water vapor convergence and ascending motions over southern China. As a result, more precipitation occurs in southern China. Furthermore, possible external causes for the above two modes were analyzed. Results indicate that the EOF1 is closely related to ENSO. SST (sea surface temperature) over the tropical eastern Pacific in the preceding winter was significantly warmer than normal, while SSTs over the tropical North India Ocean and the South China Sea in the subsequent summer were significantly warmer than normal. These SST anomalies resulted in a significantly strong WPSH and anomalously high water vapor mainly originated from the tropical western Pacific and the South China Sea. The EOF2 is related to the simultaneous positive phase of the tropical Indian Ocean Dipole (IOD). The anomalous easterly winds appeared over the tropical India Ocean when the IOD was positive phase, which was linked to anomalous cyclonic circulation and moisture convergence over South China. The anomalous water vapor mainly originated from the tropical southern India Ocean.

Keywords Tropical Indian Ocean—western Pacific, Anomalous water vapor, ENSO, Middle and lower reaches of the Yangtze River, South China

1 引言

中国东部地处亚洲季风区。早在 80 多年前,我国著名气象学家竺可桢(1934)首先提出东亚夏季风对中国降水的影响。受东亚夏季风的影响,来自孟加拉湾、南海和热带西太平洋等地的水汽给我国东部带来充沛降水。东亚夏季风的进退对应水汽输送的增强和减弱,造成了中国东部降水雨带北进和南撤(涂长望和黄土松, 1944; 陆渝蓉和高国栋, 1987)。就整个夏季而言,中国东部降水的年际变化主要受到东亚夏季风强弱的影响(黄荣辉等, 2006; Huang et al., 2007),例如,施能等(1996)、Zhang (2001)、张庆云等(2003)指出东亚季风偏强(弱)时,西太平洋副热带高压位置偏北(南),此时有利于长江降水偏少(偏多),华北降水偏多(偏少)。与此同时,我国东部夏季降水的年代际变化也显著受到东亚夏季风的调控作用(Huang et al., 2004),例如,黄荣辉等(1999)、周连童和黄荣辉(2003)、周晓霞等(2008)指出伴随东亚夏季风在 20 世纪 70 年代中后期年代际减弱,中国东部容易出现“南涝北旱”的降水格局。Kwon et al. (2007)、邓伟涛等(2009)的研究表明了,在 20 世纪 90 年代中期东亚夏季风又发生了一次明显的年代际变化,这次变化的特征是中国华南地区夏季降

水明显增加。类似的, Ding et al. (2008) 的研究也表明了中国东部夏季降水分别于 1978 年和 1992 年前后发生了两次显著的年代际变化,这两次年代际变化特征是东亚夏季风降水雨带明显南移。

东亚夏季风通过影响西太平洋副热带高压等环流系统及相应的水汽输送从而影响夏季主雨带的位置,季风性水汽输送及其来源是研究降水的重点之一。早在 20 世纪 50 年代,谢义炳和戴武杰(1959)、Murakami (1959)就指出中国夏季降水的两个水汽来源:一是从太平洋高压南沿以南风及东南风的形式进入我国内陆,二是印度低压的东南方以西南风的形式进入我国西南部。Simmonds et al. (1999)利用 ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 风场资料和 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 的降水资料,通过计算水汽通量差值场指出来源于孟加拉湾和南海地区的水汽对中国东部地区夏季降水造成重要影响。陈际龙和黄荣辉(2008)、黄荣辉等(2011)指出中国东部夏季降水异常的三级子型分布主要由东亚—西北太平洋地区水汽输送的偶极子型异常引起。田红等(2002)利用 EOF 分析得出中国东部夏季降水多的时期南海异常水汽输送方向是由西太平洋进入的。对不同地区而言,不同水汽路径对该地区的降水贡献存在显著差

异。例如, 谢安等(2002)指出来自孟加拉湾经中南半岛的水汽输入是长江中下游地区降水的主要水汽来源。Zhou and Yu(2005)利用 EOF 分析得到长江中下游地区降水的水汽直接来源于孟加拉湾和南海, 但最初来源于菲律宾海。吕梅等(1998)、Chu et al.(2016)通过沿纬圈上的空气质点的轨迹积分来反映气流对水汽的输送, 得到华南的水汽源地主要来自孟加拉湾和南海。史学丽和丁一汇(2000)从气候平均场上得到华南地区暴雨过程贡献最大的是来自南海季风区的水汽输送。

以往的研究主要集中于东亚夏季风与中国东部夏季降水的关系及其与夏季风相关联的水汽输送异常对降水的影响, 水汽输送异常大多时候仅仅被作为一个诊断工具, 缺乏直接对水汽输送异常进行刻画, 而事实上水汽输送异常与降水异常具有更直接、密切联系, 通过水汽输送异常可以更直接、客观的表征其对降水的影响, 因此有必要直接从水汽输送的角度来研究其对降水的影响。考虑到中国东部夏季降水主要水汽来源于热带印度洋—西太平洋区域, 本文拟刻画该区域(10°S~30°N, 60°~140°E)异常的水汽输送, 直接从水汽输送角度探讨热带印度洋—西太平洋的水汽输送异常与中国东部降水的关系及其机理。

2 资料和方法

本文所用资料: NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 发布的逐月全球再分析资料, 包括 2 m 地面温度场、分辨率为 2.5°×2.5°的海平面气压场和垂直方向自 1000 hPa 至 10 hPa 共有 17 层的位势高度场、风场、比湿、垂直速度资料; 分辨率为 2.0°×2.0°的 NOAA ERSST (The Extended Reconstructed Sea Surface Temperature of National Oceanic and Atmospheric Administration) 的逐月海面温度资料; 分辨率为 1.0°×1.0°的 OAF flux (Objectively Analyzed air-sea Fluxes) 的逐月蒸发资料; 国家气候中心 1979~2015 年 160 个站的月平均降水资料。资料时间均为 1979 年 1 月至 2015 年 8 月。文中夏季时段为当年 6 月至 8 月, 春季时段为当年的 3 月至 5 月, 冬季时段为当年的 12 月至次年 2 月, 气候态取 1981~2010 年的平均。

热带印度洋海温偶极子 (TIOD) 指数定义为区域 (10°S~10°N, 50°~70°E) 与区域 (10°S~0°, 90°~110°E) 海表温度距平的区域平均值之差 (Saji et al., 1999; Webster et al., 1999; 肖莺等, 2009)。

副热带南印度洋偶极子 (SIOD) 指数定义为区域 (45°~30°S, 45°~75°E) 与区域 (25°~15°S, 80°~100°E) 内的海表温度距平的区域平均值之差 (晏红明等, 2009)。单位气柱整层大气水汽输送通量矢量 \mathbf{Q} 可以分解为经向和纬向水汽输送通量, 计算方法分别为

$$Q_u(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, t) u(x, y, t) dp, \quad (1)$$

$$Q_v(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, t) v(x, y, t) dp, \quad (2)$$

式中, u 、 v 为该单位气柱内各层大气的纬向、经向风速, q 是各层大气的比湿, g 是重力加速度, 从地面 (p_s) 到 300 hPa 的垂直积分作为整层积分。

本文主要采用多元经验正交函数 (EOF) 分析方法 (Wang et al., 2000; 顾泽等, 2007), 对热带印度洋—西太平洋区域 (10°S~30°N, 60°~140°E) 的整层水汽输送通量 (Q_u , Q_v) 的标准化场做多元 EOF 分解。另外还采用了回归分析、合成分析以及相关分析气象常用的分析方法。

3 热带印度洋—西太平洋夏季平均水汽输送路径和时空变化特征

图 1 是东亚地区夏季平均水汽通量分布的流线图, 从图中可以看出, 影响我国的水汽路径主要包含四条: 第一条是由印度洋经过孟加拉湾沿西南方向到达我国南部, 且从量级上来看此条水汽路径最大, 也就是输送到我国的水汽最多; 第二条是由南海输送到我国东南地区, 从量级上来看仅次于孟加拉湾水汽路径; 再次之的是由热带西太平洋经菲律宾海输送到我国东部的水汽, 为第三条水汽路径; 第四条水汽路径, 即量级最小的水汽路径表现为通过西风带输送到我国西北地区。这与目前公认的存在西太平洋、孟加拉湾、南海及西风带四条水汽路径的研究结论相一致 (谢义炳和戴武杰, 1959; 叶敏和封国林, 2015)。其中, 来自热带西太平洋、孟加拉湾及南海的水汽输送对中国东部夏季降水起主导作用 (黄荣辉和陈际龙, 2010)。

考虑到热带西太平洋、孟加拉湾和南海这三条水汽路径的异常配置及其时空变化决定了东亚夏季降水的异常分布情况。对 1979~2015 年热带印

度洋—西太平洋区域 ($10^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 的夏季水汽输送通量 (Q_u , Q_v) 的标准化场进行了多元 EOF 分解, 得到两个主模态, 第一模态 (EOF1) 和第二模态 (EOF2), 其解释的方差分别为 21.6% 和 12.4%。按照 North et al. (1982) 的准则, 这两个主分量彼此可分, 并且可以和其他主分量区分开, 因此可以表征该区域的水汽输送异常的主要分

布类型。图 2a 给出了 1979~2015 年热带印度洋—西太平洋夏季异常水汽输送 EOF 分解第一模态空间分布图。从图中可以看出, 异常水汽从热带西太平洋向西在 110°E 附近分成两支。其中, 一支经过南海输送到我国华南地区, 在西北太平洋上空构成异常反气旋, 对应南海水汽输送偏多, 对应区域均通过显著性检验; 另外一支继续向西经孟加拉湾后

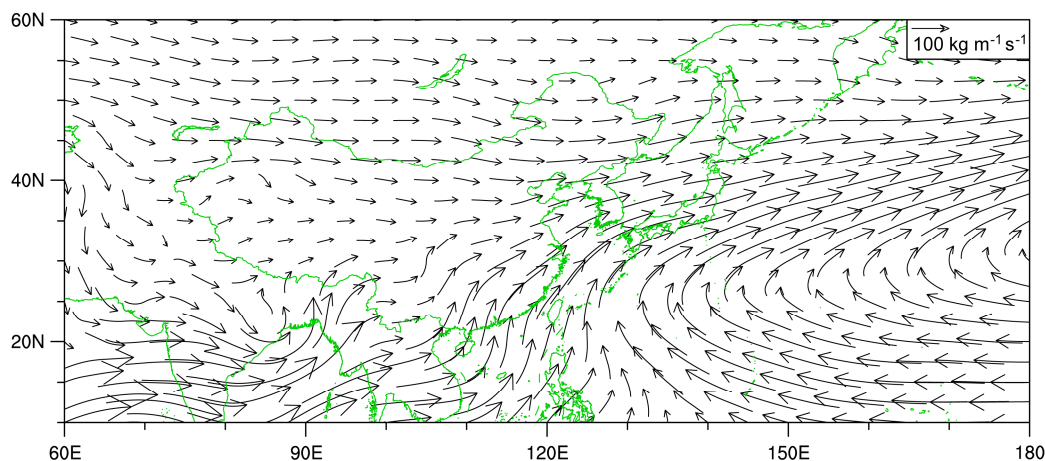


图 1 1981~2010 年东亚地区夏季平均的水汽通量 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 分布

Fig. 1 Spatial pattern of mean summer water vapor fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) over eastern Asia for 1981–2010

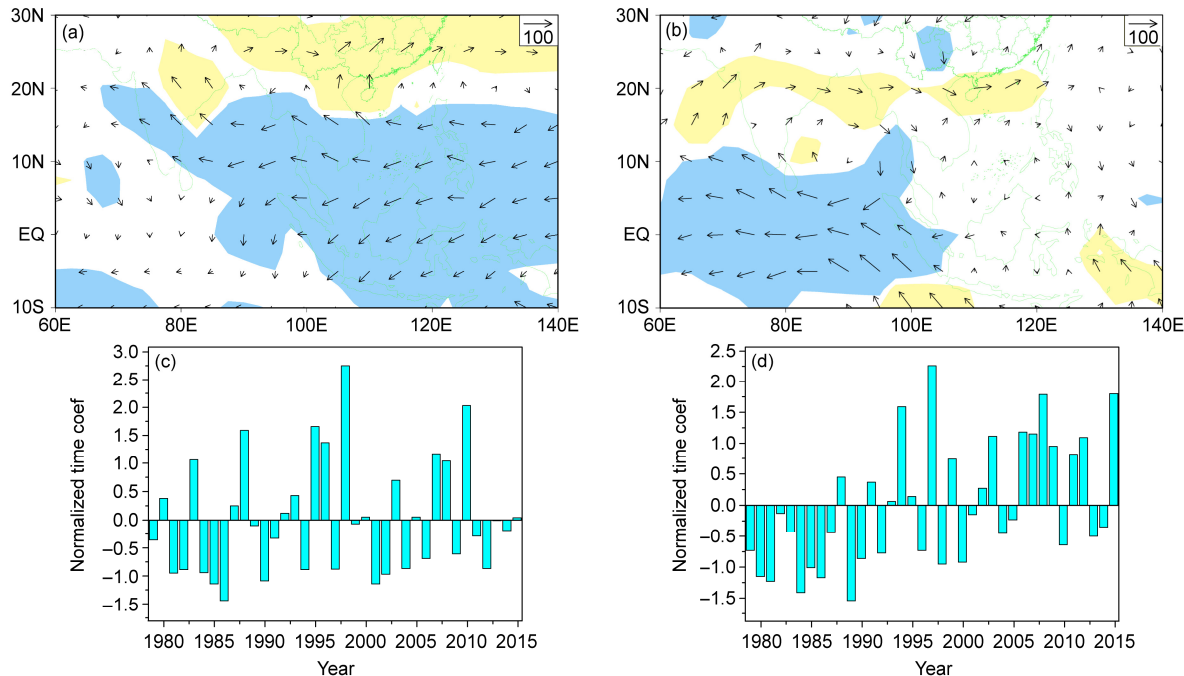


图 2 1979~2015 年热带印度洋—西太平洋夏季水汽输送标准化场的 (a) EOF 第一模态的空间分布型及其对应的 (c) 标准化时间系数 (PC1), (b) EOF 第二模态的空间分布型及其对应的 (d) 标准化时间系数 (PC2)。图 a、b 中阴影表示风场分量 u 或者 v 的值通过 99% 信度水平检验, 黄 (蓝) 色阴影表示 t 检验中的 t 值小于 (大于) 负 (正) 的临界值, 下同

Fig. 2 (a) Spatial pattern of the first EOF mode and (c) the corresponding normalized time coefficients (PC1), (b) spatial pattern of the second EOF mode and (d) the corresponding normalized time coefficients (PC2) of standardized water vapor transport fluxes over the tropical Indian Ocean—western Pacific for 1979–2015. In Figs. a and b, shaded areas indicate values of component u or component v pass the test t at 99% confidence level, yellow (blue) shaded areas represent values of t less (more) than negative (positive) thresholds, the same below

转为向北再向东沿青藏高原南侧输送到我国西南地区, 同样构成异常反气旋, 对应孟加拉湾水汽输送偏多, 相应区域都通过了显著性检验。图 2c 给出了 EOF1 的时间序列 (PC1), 可以看出, PC1 主要表现出显著的年际变化特征, 其中 1988 年、1995 年、1998 年、2010 年均明显为正异常年, 1998 年达到最大; 1985 年、1986 年、1990 年、2001 年均明显为负异常年, 1986 年达到最小。图 2b 给出了热带印度洋—西太平洋夏季异常水汽输送 EOF 分解第二模态空间分布图, 从图中可以看出, 异常水汽主要从热带印度洋向西至阿拉伯海再向东到达印度半岛、中南半岛上空后分成南北两支, 其中南支向南到达热带印度洋并构成异常反气旋, 北支沿东南沿海继续向东并在华南上空构成异常气旋, 此时对应孟加拉湾、南海及热带西太平洋水汽输送异常均不明显。同时, 热带印度洋上空构成的反气旋以及华南上空构成的异常气旋附近区域均通过了显著性检验。图 2d 给出了 EOF2 的时间序列 (PC2), PC2 表现出明显的年代际变化特征, 以 1993 年为界, 在 1993 年以前的年份其时间系数大都为负值, 一共出现 11 年负异常年, 其中 1984 年、1989 年为明显负异常年; 而 1993 年以后的年份其时间系数大都为正值, 一共出现 11 年正异常年, 其中 1997 年、2008 年和 2015 年均明显为正异常年。

图 3a、b 是 PC1、PC2 分别对整层水汽通量的一元线性回归分布。从图中可以看出回归得到的空间分布与 EOF1、EOF2 的空间分布是完全一致的。对于 PC1 回归的整层水汽通量而言, 异常水汽主要是从西太平洋向西在 110°E 附近分成两支, 右边一支经过南海输送到我国华南地区, 左边一支继续向西经孟加拉湾后转为向北并向东沿青藏高原南侧输送到我国西南地区, 显著区域主要位于 90°E 以东的海洋大陆和热带西太平洋。对于 PC2 回归的整层水汽通量而言, 异常水汽主要从热带印度洋到中南半岛上空后分成南北两支, 其中南支到达热带印度洋, 北支沿东南沿海到达华南上空, 显著区域主要位于热带印度洋地区和华南沿海。考虑到 EOF1、EOF2 是基于垂直积分后的水汽输送通量 (Q_u , Q_v) 的标准化场展开所得, 其空间分布在对流层中低层的表现可能有所不同。对比图 3a、c、e 可以看出, EOF1 在整层、500 hPa 和 850 hPa 的空间分布是类似的, 均表现为在西北太平洋呈异常反气旋, 且 850 hPa 异常水汽量级大于 500 hPa, 表明对流层低层水汽在

右边一支水汽输送中起到主导作用。不同之处在于由于地形原因低层水汽在青藏高原处无法继续向北, 而 500 hPa 异常水汽沿西太平洋向西在孟加拉湾附近转而向北经过青藏高原输送到我国, 这与整层水汽的输送特征是一致的。因此对流层中层水汽对左边一支水汽输送贡献更大。同样的, 从图 3b、d、f 可以看出, EOF2 表现出北印度洋上空异常反气旋式水汽输送分布在整层、500 hPa 和 850 hPa 都是显著的, 考虑到对流层低层水汽通量的量级更大, 因此对流层低层水汽对整层贡献更大, 而华南上空的异常气旋式水汽输送分布在整层和 500 hPa 显著, 在 850 hPa 上不显著, 因此对流层中层水汽对整层华南上空的异常气旋式水汽输送有重要作用。

4 热带印度洋—西太平洋水汽异常输送与中国东部夏季降水关系

为了进一步研究热带印度洋—西太平洋两条主要异常水汽路径与中国东部夏季降水的关系, 图 4 分别给出了 PC1、PC2 与中国东部夏季降水距平百分率的一元线性回归分布。可以看出, PC1 与中国东部夏季降水主要呈正相关, 显著相关区主要覆盖了长江中下游地区, 该区域大部分地区通过了 90% 的信度水平检验, 即 PC1 偏大 (偏小) 时有利于长江中下游地区夏季降水偏多 (偏少) (图 4a)。以 30°N 附近为分界线, PC2 与 30°N 以南地区夏季降水呈正相关, 显著正相关区主要覆盖了华南地区, 基本上通过了 90% 的信度水平检验, 即 PC2 偏大 (偏小) 时有利于华南地区夏季降水偏多 (偏少) (图 4b)。除此之外, PC2 与河套地区、黑龙江北部等地区降水呈显著负相关, 对这些地区的夏季降水也有一定的指示意义。

为了探究主要异常水汽输送影响中国东部夏季降水的初步成因, 图 5 给出了 PC1、PC2 对 500 hPa, 850 hPa 水汽输送通量的辐散、辐合一元线性回归分布。从图 5a、c 可以看出, PC1 在对流层中层与低层均对应长江中下游地区上空存在异常水汽显著辐合, 而热带西太平洋、南海地区上空表现为异常水汽显著辐散; 同样的, 从图 5b、d 可以看出, PC2 对应华南沿海地区上空为异常水汽显著辐合, 热带东印度洋地区上空为异常水汽显著辐散。

进一步取 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 纬向平均, 图 6 给出了 PC1、PC2 与不同位势高度垂直速度的一元线性回归分布。很明显 PC1 对应 30°N 附近的长江中下游

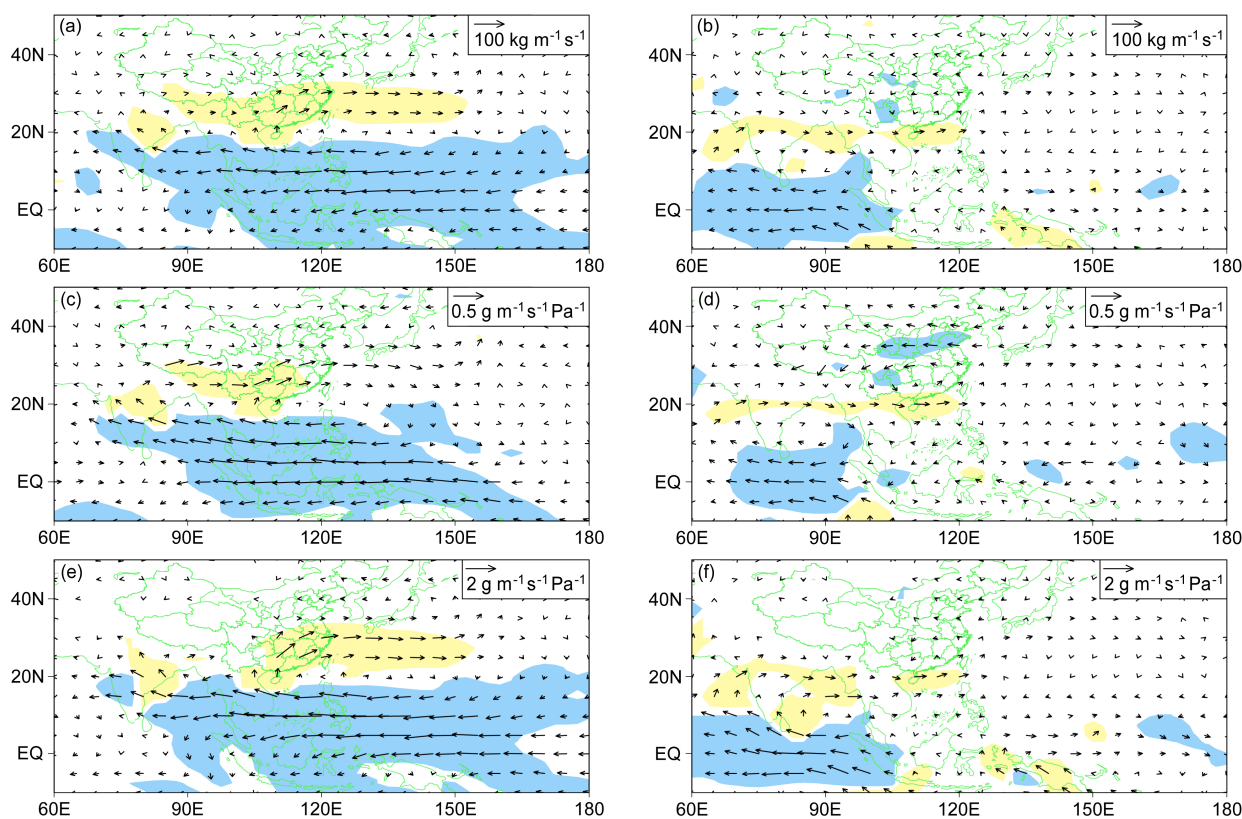


图3 PC1 与 (a) 整层的水汽通量 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)、(c) 500 hPa 的水汽通量 (单位: $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)、(e) 850 hPa 的水汽通量 (单位: $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) 的一元线性回归分布; PC2 与 (b) 整层的水汽通量 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)、(d) 500 hPa 的水汽通量 (单位: $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)、(f) 850 hPa 的水汽通量 (单位: $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) 的一元线性回归分布

Fig. 3 Linear regression maps of PC1 with water vapor fluxes for (a) the entire troposphere (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), (c) 500 hPa (units: $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), (e) 850 hPa (units: $\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$). (b), (d), (f) As in (a), (c), (e), but for PC2

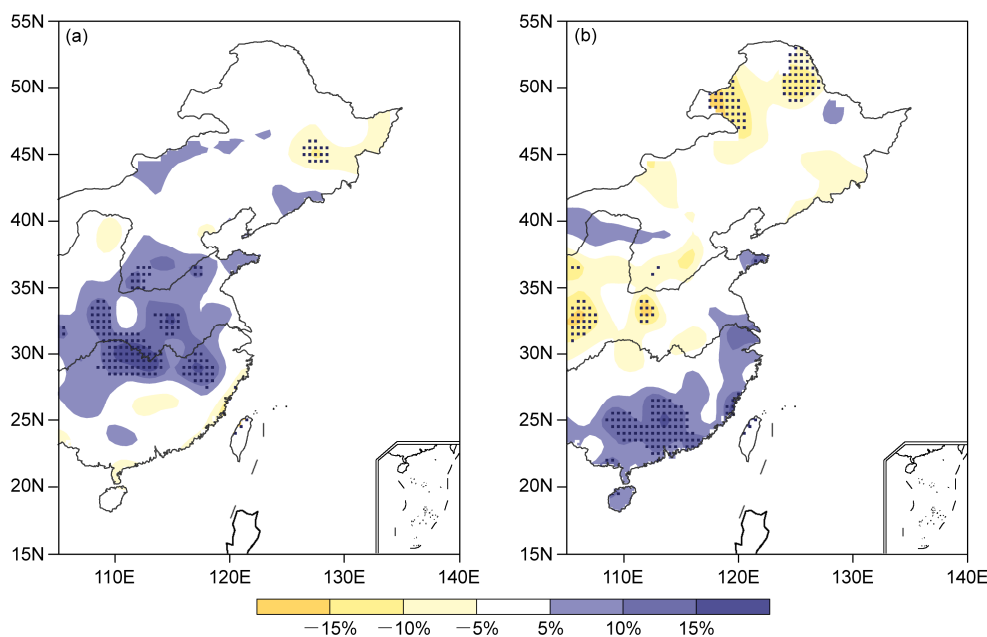


图4 (a) PC1 与中国东部夏季降水距平百分率的一元线性回归分布; (b) 同 (a), 但为 PC2。图中黑点区域代表降水距平百分率通过 90% 信度水平的检验

Fig. 4 (a) Linear regression maps of PC1 with percentage of summer precipitation anomalies over eastern China. (b) As in (a), but for PC2. Black dotted areas indicate the percentage of precipitation anomalies significance at 90% confidence level

地区上空为显著上升运动,同时伴随异常水汽辐合(图 5a、c),有利于长江中下游地区降水偏多(图 6a)。从图 6b 可以看出,PC2 对应 20°~25°N 附近的华南地区上空为显著上升运动,再加上该地区上空存在异常水汽辐合(图 5b、d),有利于华南地区的降水偏多。除此之外,PC1 还对应从赤道到长江中下游地区存在“+ -”异常波列分布,PC2 也对应华南地区南侧上空有异常下沉运动,这表明这两个地区的异常上升运动及水汽辐合可能与热带地

区海表面温度(SST)的调控作用有关。

5 热带印度洋—西太平洋异常水汽输送与海温、蒸发的关系

图 7 给出了 PC1、PC2 与前冬、春季及夏季 SST 的一元线性回归分布。可以看出,PC1 对应前冬热带中东太平洋显著偏暖,即有利于 El Niño 现象发生,春季热带中东太平洋偏暖程度明显减弱,至夏季表现为 El Niño 现象完全衰减,甚至热带中东太

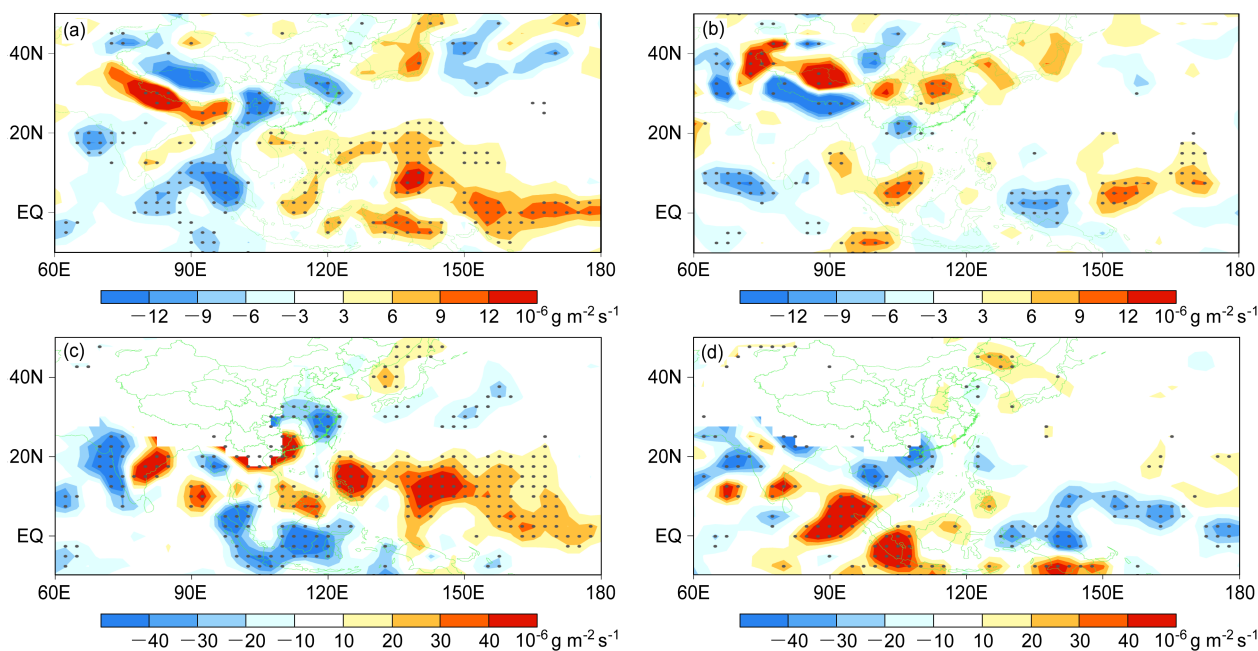


图 5 PC1 对 (a) 500 hPa、(c) 850 hPa 水汽输送通量的辐散 (红色阴影)、辐合 (蓝色阴影) 一元线性回归分布。(b、d) 同 (a、c) 但为 PC2。图中黑点区域代表通过 90% 信度水平的检验

Fig. 5 Linear regression maps of PC1 with the divergence (red shadings) and convergence (blue shadings) of water vapor fluxes at (a) 500 hPa, (c) 850 hPa. (b, d) As in (a, c), but for PC2. Black dotted areas indicate regression significance at 90% confidence level

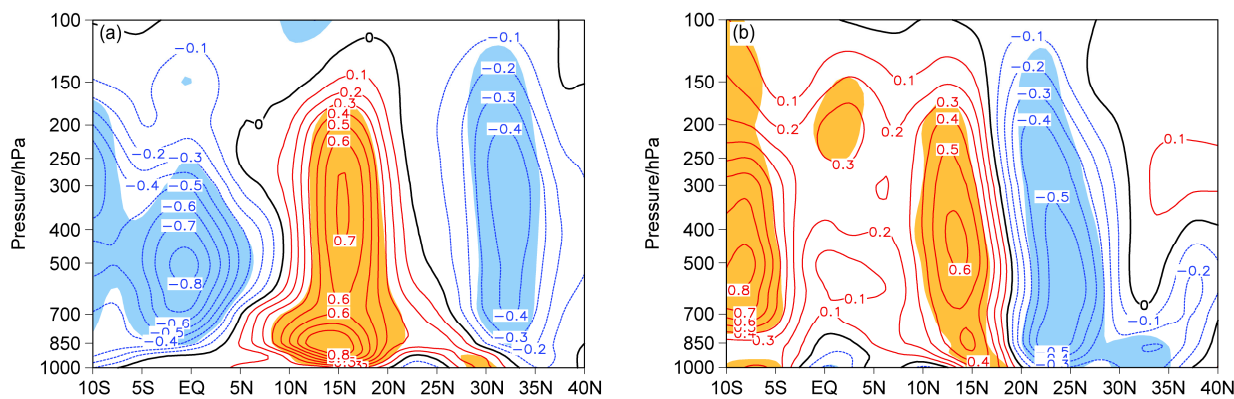


图 6 (a) PC1 与不同位势高度垂直速度 (单位: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) 的一元线性回归分布。(b) 同 (a), 但为 PC2。图中阴影代表通过 95% 信度水平的检验

Fig. 6 (a) Linear regression maps of PC1 with the vertical velocity (units: $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$) at different geopotential height. (b) As in (a), but for PC2. Shaded areas indicate regression significance at 95% confidence level

平洋 SST 由偏暖转为偏冷 (图 7a、c、e)。El Niño 衰减后对后期夏季东亚—西北太平洋气候的影响主要通过印度洋电容器效应来实现 (Xie et al., 2009)。可以发现, 热带印度洋、南海及我国沿海等地区偏暖 SST 可一直从前冬持续到夏季, 夏季表现为热带北印度洋、南海等地区 SST 显著偏暖 (图 7a、c、e)。夏季热带北印度洋、南海等地区偏暖的 SST 可以加热上空对流层大气并激发暖性 Kelvin 波东传, 进一步通过 Ekman 辐散作用造成西北太平洋出现异常反气旋, 从而增强西太平洋副热带高压, 异常水汽沿着副高边缘输送造成长江中下游地区上空水汽辐合并伴随上升运动, 有利于长江中下游地区降水偏多 (Xie et al., 2009)。由 PC2 对前冬、春季、夏季 SST 的一元线性回归分布可以看出, PC2 对应前冬和春季都表现为热带西南印度洋偏暖, 对应 SIOD 中西南极比较明显, PC2 与前冬 SIOD 指数与相关系数为 0.34, 通过了 95% 信度水平检验。因此对于前冬和春季可能是印度洋地区异常纬向风的经向大气遥相关使得热带印度洋盛行西风异常, 导致春、夏季海洋性大陆对流减弱, 造成华南地区夏季降水增多 (徐志清和范可, 2012, 2014; 陈丽娟等, 2013); 同期夏季主要为热带西印度洋 SST 显著偏暖, 热带东南印度洋相应偏冷, 对应 TIOD 正位相。进一步计算可知 PC2 和夏季 TIOD 指数的相关系数为 0.74, 远远超过 99% 信度水平检验。当 TIOD 为正位相时, 赤道印度洋盛行东风, 热带北印度洋上空形成异常反气旋, 华南地区上空为异常气旋并伴随水汽异常辐合和上升运动, 有利于华南降水偏多。这与肖子牛等 (2002)、唐卫亚和孙照渤 (2005) 等的相关研究是一致的。因此, PC1 主要受到 ENSO 的调控作用, 而 PC2 可能与前冬及春季的 SIOD 和同期夏季 TIOD 影响有关。

为了进一步研究热带印度洋—西太平洋主要异常水汽输送分别对应的可能的水汽来源, 图 8 给出了 PC1、PC2 与 1979~2015 年夏季蒸发量的一元线性回归分布。从图中可以看出, PC1 对应的是热带西太平洋、南海地区蒸发量显著偏多, 同时结合图 5 可以看出热带西太平洋、南海地区均存在异常水汽辐散, 因此 EOF1 对应的异常的水汽源地可能是热带西太平洋及南海地区; 同样的, PC2 对应热带南印度洋与海洋大陆地区蒸发量显著偏多, 且热带南印度洋地区存在水汽异常辐合 (图 5), 因此 EOF2 对应的异常水汽源地可能是热带南印度洋。

6 结论与讨论

通过对 1979~2015 年夏季热带印度洋—西太平洋地区异常水汽输送标准化场进行 EOF 分解, 得到两个主模态, 他们可以解释总的水汽输送异常 34% 的方差。其中, 第一模态 (EOF1) 表现为异常水汽沿反气旋从热带西太平洋经过南海及孟加拉湾输送到中国东部上空, 对应孟加拉湾和南海水汽输送均显著偏多, 异常水汽在长江中下游地区上空辐合并伴随显著上升运动, 有利于长江中下游降水偏多; 第二模态 (EOF2) 表现为异常水汽从热带印度洋沿阿拉伯海、印度半岛、中南半岛等呈反气旋式输送, 华南上空相应出现气旋式水汽输送异常, 并对应异常水汽辐合和显著上升运动, 有利于华南降水偏多。

就可能的外部成因而言, EOF1 与 ENSO 关系密切, 表现为前冬热带中东太平洋 SST 显著偏暖, 至同期夏季热带北印度洋、南海 SST 显著偏暖, 造成西太平洋副热带高压显著偏强, 异常水汽正是沿着副高边缘移动才会造成长江中下游水汽辐合及显著上升运动, 有利于长江中下游地区降水偏多, 此时异常水汽主要来源于热带西太平洋和南海; EOF2 可能与前冬以及春季的 SIOD 有关, 但主要与同期 TIOD 异常有关, 当 TIOD 为正位相时, 热带印度洋上空出现异常东风, 异常水汽从热带印度洋沿阿拉伯海、印度半岛、中南半岛等呈反气旋式输送, 华南上空相应出现气旋式水汽输送异常, 并对应异常水汽辐合和上升运动, 有利于华南降水偏多, 此时异常水汽主要来源于热带南印度洋。

从前面分析可以看出, 除 TIOD 正位相以外, PC2 还对应夏季同期热带中东太平洋 SST 偏暖, 以及对应前冬和春季的 SIOD 中西南极比较明显, 所以应该进一步考虑 El Niño 发展年的夏季和前冬及春季的 SIOD 对 EOF2 的影响, 同时由于 ENSO 与 TIOD 的影响并不是相互独立的 (钱玮和管兆勇, 2007), 相关研究表明 TIOD 在 El Niño 期间对东亚季风区的天气气候的影响更大 (闫晓勇和张铭, 2004; 刘宣飞等, 2008), 所以还需要在扣除 ENSO 影响的基础上单独考虑 TIOD 对 EOF2 的影响。与此同时, 目前工作主要侧重同期海温异常对 EOF2 的影响机制, 而仅仅从统计上来考虑 TIOD 的影响是不够充分的, 其他区域如南海, 热带东太平洋的可能影响以及相关的数值试验模拟等工作需要进一步展开。另外, 文章中的水汽源地均是基于水汽

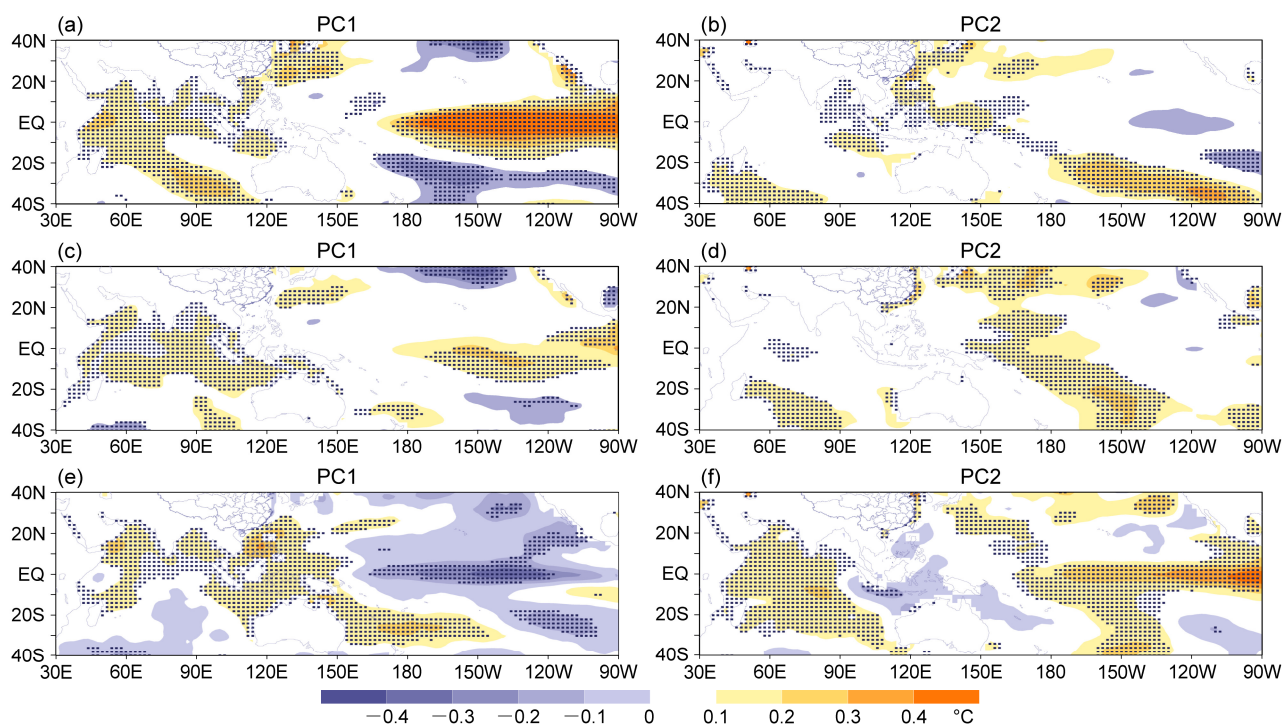


图7 PC1 与 (a) 前冬海温 (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(c) 春季海温 (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(e) 夏季海温 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的一元线性回归分布。(b、d、f) 同 (a、c、e), 但为 PC2。图中黑点区域代表通过 90% 信度水平的检验

Fig. 7 Linear regression maps of PC1 with the SST (units: $^{\circ}\text{C}$) in the (a) preceding winter, (d) spring, and (f) summer. (b, d, f) As in (a, c, e), but for PC2. Black dotted areas indicate regression significance at 90% confidence level

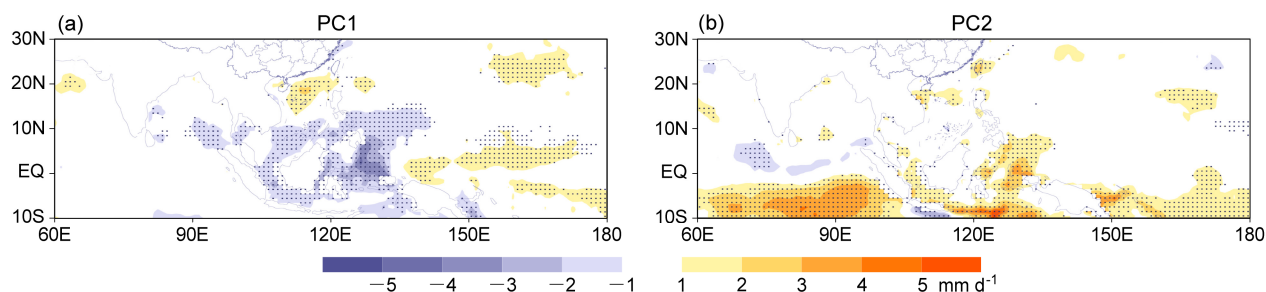


图8 (a) PC1 与夏季热带印度洋—西太平洋蒸发量 (单位: mm d^{-1}) 的一元线性回归分布。(b) 同 (a), 但为 PC2。图中黑点区域代表通过 90% 信度水平的检验

Fig. 8 (a) Linear regression maps of PC1 with summer evaporation (units: mm d^{-1}) over the tropical India Ocean–western Pacific. (b) As in (a), but for PC2. Black dots areas indicate regression significance at 90% confidence level

的辐散辐合以及蒸发量的计算得到的, 需要进一步通过拉格朗日粒子扩散模型来模拟验证。因此, 对上述内容的探索将是我们下一步工作的重点。

参考文献 (References)

陈际龙, 黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 51 (2): 352–359. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2008. Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 51 (2): 352–359,

doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2008.02.007.

陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. 应用气象学报, 24 (5): 521–532. Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (5): 521–532, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.002.

Chu Q C, Wang Q G, Qiao S B, et al. 2016. Feature analysis and primary causes of pre-flood season “cumulative effect” of torrential rain over South China [J]. Theor. Appl. Climatol., doi:10.1007/s00704-016-1947-y.

邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及

- 其与北太平洋海温的关系 [J]. 大气科学, 33 (4): 835–846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 835–846, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.16.
- Ding Yihui, Wang Zunya, Sun Ying. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. Int. J. Climatol., 28 (9): 1139–1161, doi:10.1002/joc.1615.
- 顾泽, 封国林, 顾骏强, 等. 2007. 我国盛夏 500 hPa 风场的 EOF 分析及其与大尺度气候异常的关系 [J]. 气象科学, 27 (3): 246–252. Gu Ze, Feng Guolin, Gu Junqiang, et al. 2007. EOF of 500 hPa wind fields and its relationship to large scale abnormal climate in midsummer of China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (3): 246–252, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.03.002.
- 黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34 (6): 1035–1045. Huang Ronghui, Chen Jilong. 2010. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (6): 1035–1045.
- 黄荣辉, 徐子红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 18 (4): 465–476, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. 大气科学, 30 (4): 545–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 545–560, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.01.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01.
- Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. 2004. Climate variations of the summer monsoon over China [M]//Chang C P. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 837–844.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (6): 993–1023, doi:10.1007/s00376-007-0993-x.
- Kwon M, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (21): L21706, doi:10.1029/2007GL031977.
- 刘宣飞, 袁慧珍, 管兆勇. 2008. ENSO 对 IOD 与中国夏季降水关系的影响 [J]. 热带气象学报, 24 (5): 502–506. Liu Xuanfei, Yuan Huizhen, Guan Zhaoyong. 2008. Effects of ENSO on the relationship between IOD and China summer rainfall [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (5): 502–506, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.05.009.
- 陆渝蓉, 高国栋. 1987. 物理气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 645pp.
- Lu Yurong, Gao Guodong. 1987. Physical Climatology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 645pp.
- 吕梅, 成新喜, 陈中一, 等. 1998. 1994 年华南暴雨期间夏季风的特征及其对水汽的输送 [J]. 热带气象学报, 14 (2): 135–141. LÜ Mei, Cheng Xinxi, Chen Zhongyi, et al. 1998. The character of summer monsoon and its transport to moisture in the range of South-China heavy rain of 1994 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 14 (2): 135–141.
- Murakami T. 1959. The general circulation and water vapor balance over the Far East during the rainy season [J]. Geophys. Mag., 29 (2): 137–171.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F. 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.
- 钱玮, 管兆勇. 2007. 中国南方夏季降水与热带印度洋偶极型海温异常的联系 [J]. 南京气象学院学报, 30 (1): 9–16. Qian Wei, Guan Zhaoyong. 2007. Relationships between SSTA of tropical Indian Ocean and summer rainfall in southern China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (1): 9–16.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. Nature, 401 (6715): 360–363.
- 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 Qiangen, 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 史学丽, 丁一汇. 2000. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的研究 [J]. 气象学报, 58 (6): 666–678. Shi Xueli, Ding Yihui. 2000. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in 1994 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58 (6): 666–678, doi:10.11676/qxxb2000.068.
- Simmonds I, Bi D H, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer [J]. J. Climate, 12 (5): 1353–1367, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1353:AWVFAI>2.0.CO;2.
- 苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化 [J]. 大气科学, 34 (3): 611–628. Su Tonghua, Xue Feng. 2010. The intraseasonal variation of summer monsoon circulation and rainfall in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 611–628, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.13.
- 唐卫亚, 孙照渤. 2005. 印度洋海温偶极振荡对东亚环流及降水影响 [J]. 南京气象学院学报, 28 (3): 316–322. Tang Weiya, Sun Zhaobo. 2005. Effect of IOD on East Asian circulation and precipitation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (3): 316–322, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.03.005.
- 田红, 郭品文, 陆维松. 2002. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 25 (4): 496–502. Tian Hong, Guo Pinwen, Lu Weisong. 2002. Features of water vapor transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (4): 496–502,

- doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2002.04.009.
- 涂长望, 黄士松. 1944. 中国夏季风之进退 [J]. 气象学报, 18 (1): 81–92. Tu Changwang, Huang Shisong. 1944. The advance and retreat of the summer monsoon in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 18 (1): 81–92.
- Wang Bin, Wu Renguang, Fu Xiaohua. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13 (9): 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean–atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98 [J]. Nature, 401 (6751): 356–360, doi:10.1038/43848.
- 肖葛, 张祖强, 何金海. 2009. 印度洋偶极子研究进展综述 [J]. 热带气象学报, 25 (5): 621–627. Xiao Ying, Zhang Zuqiang, He Jinhai. 2009. Progresses in the studies on Indian Ocean dipoles [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (5): 621–627, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.014.
- 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 [J]. 热带气象学报, 18 (4): 335–344. Xiao Ziniu, Yan Hongming, Li Chongyin. 2002. The relationship between Indian Ocean SSTA dipole index and the precipitation and temperature over China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (4): 335–344, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.04.006.
- 谢安, 毛江玉, 宋焱云, 等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征 [J]. 应用气象学报, 13 (1): 67–77. Xie An, Mao Jiangyu, Song Yanyun, et al. 2002. Climatological characteristics of moisture transport over Yangtze River basin [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (1): 67–77, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.01.008.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算 [J]. 气象学报, 30 (2): 173–185. Xie Yibing, Dai Wujie. 1959. Certain computational results of water vapour transport over eastern China for a selected synoptic case [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 30 (2): 173–185, doi:10.11676/qxxb1959.021.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on indo-western pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22 (3): 730–747.
- 徐志清, 范可. 2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程 [J]. 大气科学, 36 (5): 879–888. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2012. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over eastern China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (5): 879–888, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11176.
- 徐志清, 范可. 2014. 印度洋海温异常年际变率模态对中国东部地区夏季降水影响机制的数值试验 [J]. 气候与环境研究, 19 (1): 31–40. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2014. Simulating the mechanism of the interannual variability mode of the Indian Ocean sea surface temperature anomalies impacting on the summer rainfall over eastern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (1): 31–40, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12114.
- 闫晓勇, 张铭. 2004. 赤道东太平洋海温异常期间印度洋偶极子对东亚季风区影响的数值模拟 [J]. 热带气象学报, 20 (4): 375–382. Yan Xiaoyong, Zhang Ming. 2004. Numerical simulation of the Indian Ocean dipole influence on climate variations over East Asian monsoon region during equator East Pacific SSTA [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (4): 375–382.
- 晏红明, 李崇银, 周文. 2009. 南印度洋副热带偶极模在 ENSO 事件中的作用 [J]. 地球物理学报, 52 (10): 2436–2449. Yan Hongming, Li Chongyin, Zhou Wen. 2009. Influence of subtropical dipole pattern in southern Indian Ocean on ENSO event [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 52 (10): 2436–2449, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.003.
- 叶敏, 封国林. 2015. 长江中下游地区夏季降水的水汽路径的客观量化研究 [J]. 大气科学, 39 (4): 777–788. Ye Min, Feng Guolin. 2015. Objective quantification of moisture transport that influences summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 777–788, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14208.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (5): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (5): 559–568, doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2003.05.005.
- Zhang Renhe. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (5): 1005–1017.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274–290, doi:10.3969/j.issn.1006-9895.2003.03.003.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 66 (1): 59–70. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (1): 59–70, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.01.006.
- Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110 (D8): D08104, doi:10.1029/2004JD005413.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. 地理学报, 1 (1): 1–27. Zhu Kezhen. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 1 (1): 1–27, doi:10.11821/xb193401001.