

刘屹岷, 洪洁莉, 刘超, 等. 2013. 淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常 [J]. 大气科学, 37 (2): 439–450, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12313. Liu Yimin, Hong Jieli, Liu Chao, et al. 2013. Meiyu flooding of Huaihe River valley and anomaly of seasonal variation of subtropical anticyclone over the western Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 439–450.

淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常

刘屹岷¹ 洪洁莉² 刘超^{1,3} 张鹏飞^{1,3}

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

² 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 基于台站观测和卫星观测资料及再分析数据集, 本文研究了 6 月淮河洪涝发生时中国东部降雨型及与雨带异常相联系的环流特征、环流的季节推进异常及其机理。结果发现 6 月淮河流域洪涝与亚洲环流和中国东部降水联合模态的第二模态密切相关。该模态在我国东部降水表现为以长江为界北增南减的“梅雨偶极型”分布, 对应的低层风场呈现出倾斜的以台湾为界, 以南西太平洋是异常气旋环流, 以北为反气旋环流, 即西太平洋副热带高压偏北, 淮河流域上存在异常西南风; 同时阿拉伯海上是异常反气旋, 印度上空西风偏强、降水显著偏多。这些特征是东亚和西太平洋季风区季节推进超前的反映, 且与前期春季澳大利亚东北向海域海洋热含量异常偏高显著相关。该关键区海洋热含量变化是太平洋热含量变化第一模态——三极型变化的一部分, 即当菲律宾以东的西太平洋和澳大利亚东北向海域海洋热含量增加, 赤道中东太平洋热含量减少。该三极型海洋热含量异常从春到夏信号稳定, 它激发正感热加热异常控制菲律宾以东到夏威夷以北的广大热带—副热带西太平洋地区, 其北侧黑潮延伸区为负感热区。两者共同作用激发出局地反气旋在北、气旋在南, 使对流层低层西太平洋副热带高压偏北。因此春季三极型海洋热含量通过影响对流层低层西太平洋副热带高压异常北移对东亚—西太平洋季节推进提前和 6 月淮河梅雨洪涝发生起重要作用, 可作为季节预测的前期因子之一。

关键词 淮河洪涝 副热带高压 季节推进异常 热带海洋热含量异常

文章编号 1006-9895(2013)02-0439-12

中图分类号 P461+.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12313

Meiyu Flooding of Huaihe River Valley and Anomaly of Seasonal Variation of Subtropical Anticyclone over the Western Pacific

LIU Yimin¹, HONG Jieli², LIU Chao^{1,3}, and ZHANG Pengfei^{1,3}

¹ State Key Lab of Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² National Climate Center, Beijing 100081

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The rainfall pattern and circulation features associated with the Meiyu flooding of the Huaihe River valley, China in June are investigated by data analyses. The Meiyu flooding of the Huaihe River valley in June is associated with the second joint Singular Value Decomposition (SVD) mode of the Asia–Pacific circulation and rainfall. It is characterized as a ‘Meiyu dipole mode’ in eastern China with more rainfall to the north of the Yangtze River and less to the south. An anomaly anticyclonic circulation lies to the north of Taiwan and an anomaly cyclonic circulation lies to the south over the

收稿日期 2012-10-08, 2012-11-01 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40925015 和科技部国家重点基础研究专项 2010CB950403

作者简介 刘屹岷, 女, 1965 年出生, 博士, 研究员, 主要从事气候动力学研究。E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

western Pacific in the lower troposphere. Moreover, an anticyclone is located over the Arabian Sea and the westerly winds and rainfall are strengthened over India. The above anomalies represent the lead variation in the seasonal evolution over the eastern Asia-Pacific area, and are related to the triple pattern in the oceanic heat content in the Pacific Ocean in spring. The 'triple pattern' heat anomaly stimulates the anomalies of the sea surface sensible heating and the associated subtropical anticyclone in the western Pacific. As a result, the 'Meiyu dipole mode' is induced. A heat content index can be defined and can be considered as one prediction index for Meiyu flooding events of the Huaihe River valley.

Keywords Flooding of the Huaihe River valley, Subtropical anticyclone over the western Pacific, Anomaly of seasonal variation, Oceanic heat content anomaly

1 引言

我国地处世界最大陆地板块欧亚大陆东部、最大的海洋太平洋西侧,在大尺度海陆热力差异和高耸的青藏高原共同影响下,环流的季节变化明显。东亚夏季风在 6 月和 7 月将雨带推进至江淮流域形成“梅雨”(Qian et al., 2009),东亚夏季风异常引起的梅雨洪涝干旱等气象灾害严重影响我国东部经济发展和人民生命安全。科学上,梅雨期降雨受东亚大气环流的控制,是包括海陆气相互作用的亚洲气候的组成部分,对其异常的研究及其预测具有重要的科学意义和应用价值。

梅雨降水异常的直接原因是东亚夏季风的大气环流出现异常。东亚夏季风虽然是副热带季风系统,但与中高纬度和低纬大气环流系统联系紧密。Tao and Chen (1987) 系统提出东亚夏季风主要受南海季风槽、梅雨锋、西太平洋副热带高压、青藏高原以及北方冷空气的影响。陶诗言和卫捷(2006)将北方冷空气的影响进一步解释为高空副热带急流的静止Rossby波,强调静止Rossby波列对东亚夏季气候的变化有较大影响。张庆云和陶诗言(1998)研究发现当鄂霍茨克海高压建立并稳定时,亚洲中高纬度及东亚东部地区的距平场易形成“负正负”的距平波列,东亚地区距平波列常常造成东亚夏季梅雨期降水偏多,反之偏少。周学鸣等(1995)的数值试验表明,乌拉尔阻高作为一个激发源能激发出一支东南—西北的定常波列,其高空反气旋辐散环流恰好位于长江中下游地区,同时它增强东亚西风急流,有利于扰动的发展。陆日宇和黄荣辉(1998)指出当夏季东北亚阻塞高压频发时,江淮地区降水偏多;而当夏季东北亚阻塞高压维持日数少时,江淮地区降水偏少。

西太平洋副热带高压(简称西太副高)西北侧低空西南气流向东亚地区输送水汽,副高的强度、位置直接与副热带雨带相联系。刘还珠等(2006)

研究指出2003年夏季我国东部旱涝分明,长江以南高温少雨、淮河流域持续多雨、强降水过程频繁等特点是与西太平洋副热带高压活动有关。陶诗言和卫捷(2006)研究表明夏季我国东部暴雨带位置的变动,受西太副高西伸北跳(南撤东退)的调节。副高的变异可以视为西北太平洋气旋/反气旋环流异常,又与热带环流以及中高纬环流紧密联系在一起(陆日宇和富元海, 2009)。吴国雄等(2008)阐明夏季我国江淮流域的暴雨均发生在特定的高低空副高配置中。副高长轴随高度增加北倾的配置在我国沿海强迫出一个较为定常的动力性的局地次级经圈环流,下沉运动位于华南,上升运动位于江淮。它叠加在大尺度上升气流上,使江淮流域至日本一线成为初夏上升运动和降水易于发展的区域。

东亚夏季风和梅雨的年际变率受到上述大气内部动力调整过程的影响外,其大尺度持续异常更受到外界强迫的影响(Lau et al., 2000),包括传统 ENSO (Huang and Wu, 1989; Wang et al., 2000); 中太平洋增暖(Weng et al., 2007; Weng et al., 2011; Feng et al., 2011),北大西洋涛动和海温异常(徐海明等, 2001),陆面热力状况以及高原积雪(钱永甫等, 2003; Wu and Qian, 2003),北极海冰(刘宗秀和曹鸿兴, 1994)等诸多因子。总的来说,关于海洋对梅雨影响的研究大多是研究海洋表面温度(SST)的影响,并基于其异常进行预测。事实上,海洋热含量包括了海洋上层整体的热力状况,比 SST 具有更强的“记忆”能力,异常信号更加稳定。这一更稳定的海洋热状况变量的异常对梅雨期大气环流异常有着怎样的影响?是否存在预测梅雨异常的前期海洋热含量异常信号?

长江和淮河流域相比邻,中心位置南北纬度相差不到 5° ,通常被合称为江淮流域。近年来的几次较大洪涝灾害发生在淮河流域,如进入 21 世纪以来 2003、2005 和 2007 年。而在上世纪九十年代

1998、1999 在长江流域发生严重洪涝。这引起了不少气象学者对淮河和长江洪涝差异的关注。毕宝贵等(2004)和魏凤英和张婷(2009)的研究发现淮河洪涝年副高总体偏强偏西。钱维宏等(2009)提出江南梅雨与淮河梅雨年际异常变化上有显著不同。马音等(2011)研究和比较了我国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景, 主要分析大气环流和海温异常差别。Hong and Liu (2012)合成分析和数值试验发现 6 月淮河洪涝年和长江洪涝年, 在对流层中高纬均存在相当正压的 Rossby 波列, 但槽、脊分布相反。阿拉伯海—印度对流加强有利于淮河地区发生洪涝, 而西太平洋暖池对流偏弱有利于长江流域洪涝。

江南梅雨位于华南地区以北至沿江, 集中在六月下旬开始; 而淮河梅雨位于长江中下游以北, 时间集中在 7 月上中旬。6 月淮河洪涝是否和环流季节推进异常有关? 本文的研究目的是理解梅雨期淮河洪涝与环流季节推进特别是西太平洋副热带高压季节变化的联系, 重点在于研究热带海洋上层变化对淮河洪涝和环流季节推进异常的影响、其中的过程和机理及可能的短期气候预测信号。全文将分为 5 节, 第 2 节介绍所用资料和方法, 第 3 节分析 6 月梅雨期东亚环流和降水主要模态、其与环流季节推进的联系, 第 4 节研究淮河洪涝与热带海洋热含量变化的联系、可能的来自海洋热含量的前期预测信号。最后第 5 节是总结和讨论。

2 资料和方法

考虑到所用资料共同时段, 如没有特殊指出, 本文选取 1979~2007 年资料进行研究, 气候态为该时期的平均。

2.1 资料

(1) 降水数据集

本文主要研究梅雨期中国东部降水的年际变率, 降水资料包括中国 2500 台站降水, 全球陆面降水 PrecL (Precipitation Reconstruction over Land) 和全球降水数据集 GPCP (Global Precipitation Climatology Project)。PrecL 和 GPCP 水平分辨率分别为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

(2) 大气数据集

主要采用的是 JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis) 再分析数据集, 为了验证 JRA-25 资料是否有代表性, 还使用 NCEP2 (NCEP-DOE Atmospheric

Model Intercomparison Project reanalysis) 和 ERA-Interim (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) 再分析进行比较。

(3) 海洋数据集

采用 SODA (Simple Ocean Data Assimilation) 再分析资料, 水平分辨率是 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 垂直方向共有 40 层。

海洋上层 (0~700 m) 海洋热含量资料由美国国家海洋数据中心 (National Oceanographic Data Center, NODC) 提供, 资料是覆盖全球, 分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 只提供季节平均和年平均, 一年分为 1~3 月、4~6 月、7~9 月、10~12 月四个季节。这套资料融入了许多现场观测资料, 如深海测温仪 (Bathythermograph) 包括投弃式海水测温仪 (Expendable Bathythermographs) 和机械式深海测温仪 (Mechanical Bathythermographs) 以及电导温盐仪器 (Conductivity Temperature Depth) 和 Argo 漂流浮标, 较为可靠。

NODC 热含量只有季节平均资料, 对于分析季节内尺度变化有一定局限性。本文还利用 SODA 资料, 计算了逐月上层 700 m 海洋热含量 (1979~2007)。

热含量公式参照 Antonov et al. (2004):

$$hc = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{z_1}^{z_2} \rho_0 c_p T a^2 \cos \phi dz d\phi d\lambda, \quad (1)$$

式中 ρ_0 为海水密度, 取为定常 1020 kg m^{-3} , 实际海水随着盐度和温度都会发生变化, 但是这些变化相对于温度的变化对海水热含量变化的作用较小。 a 为地球半径取为 6372 m, c_p 为海水比热取为 $4187 \text{ J}^\circ\text{C kg}^{-1}$, T 是海温, ϕ 为纬度, λ 为经度, z 为海水深度。同 NODC 资料, 从海表 0 m 积分至 700 m。

(4) 海气界面通量资料

海气界面的湍流通量资料采用 OAflux (Objective Analysis Flux), 包括感热、潜热、短波辐射和长波辐射 4 个分量。资料的时间尺度为 1951~2006 年, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ (Yu and Weller, 2007; Yu et al., 2008)。

(5) 向外长波辐射 OLR (Outgoing Longwave Radiation)

使用美国 NOAA 的逐月资料, 空间范围为全球, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

2.2 统计方法

应用的统计方法包括合成分析, 线性相关和回

归, EOF (Empirical Orthogonal Function) 分解和奇异值分解 (SVD, Singular Value Decomposition)。奇异值分解方法旨在最大限度分离出两个场的高相关区, 找出两个变量场之间相互影响的关键空间结构。

3 6 月梅雨期东亚环流和降水主要模态

6 月至 7 月随着太阳直射点不断北进, 大气环流随之调整, 最为直接结果是东亚梅雨 6 月和 7 月降雨分布的差别。从图 1 中可以发现中国东部降水极大值区域从 6 月至 7 月是向北推进的。6 月大值区主要是华南和长江以南 25°N 左右, 而 7 月大值区向北推移至淮河流域 34°N 附近。东北和华北地区的降水也相应增多。另一特点是, 6 月降水大于

8 mm d^{-1} 的区域范围大于 7 月大于 8 mm d^{-1} 的范围, 气候平均降水量值 6 月长江流域大于 7 月淮河流域。图 1c 给出了更为直观 7 月与 6 月降水的偏差。7 月与 6 月降水差异是以长江为界淮河流域降水偏多、长江以南降水偏少的“梅雨偶极型”分布。

GPCP 分析结果与站点资料在中国范围一致 (洪洁莉, 2012), 7 月与 6 月差异还反映在印度季风区, 阿拉伯海上降水是减少的, 而印度半岛北部是增加的, 总体概括为东撤北进。在东亚季风区差异也呈现带状分布。我国长江以南的华南大部及日本以南为东北—西南走向的带状降水偏少区, 而其北侧从淮河流域至朝鲜半岛一带是降水偏多 (图略, 参见图 2c)。

有意思的是: 图 1c 所反映的以长江为界淮河

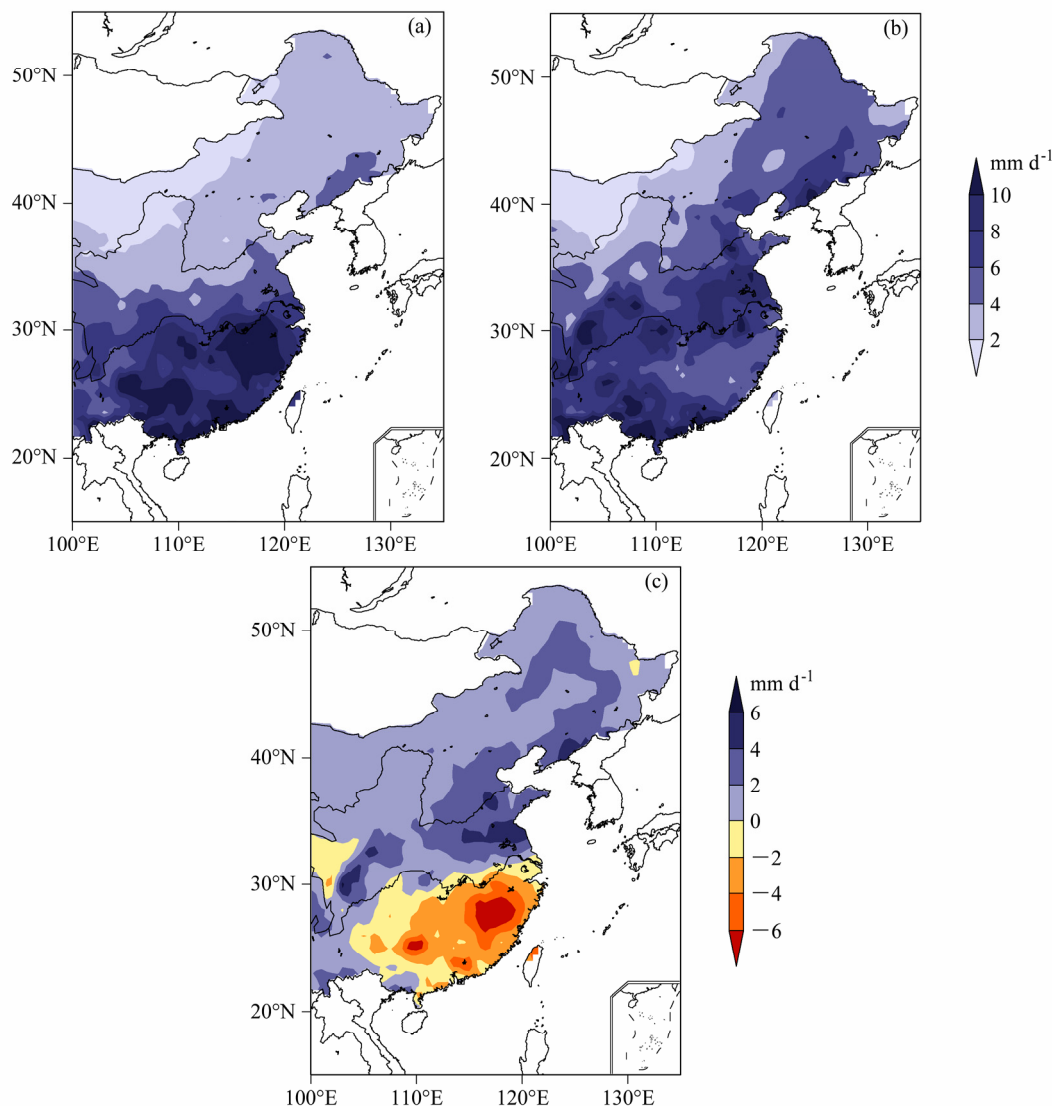


图 1 气候平均 (1979~2007) 台站降水: (a) 6 月, (b) 7 月, (c) 7 月和 6 月差异

Fig. 1 Climatology rainfall (1979–2007) of station observation: (a) June, (b) July, (c) the difference between July and June

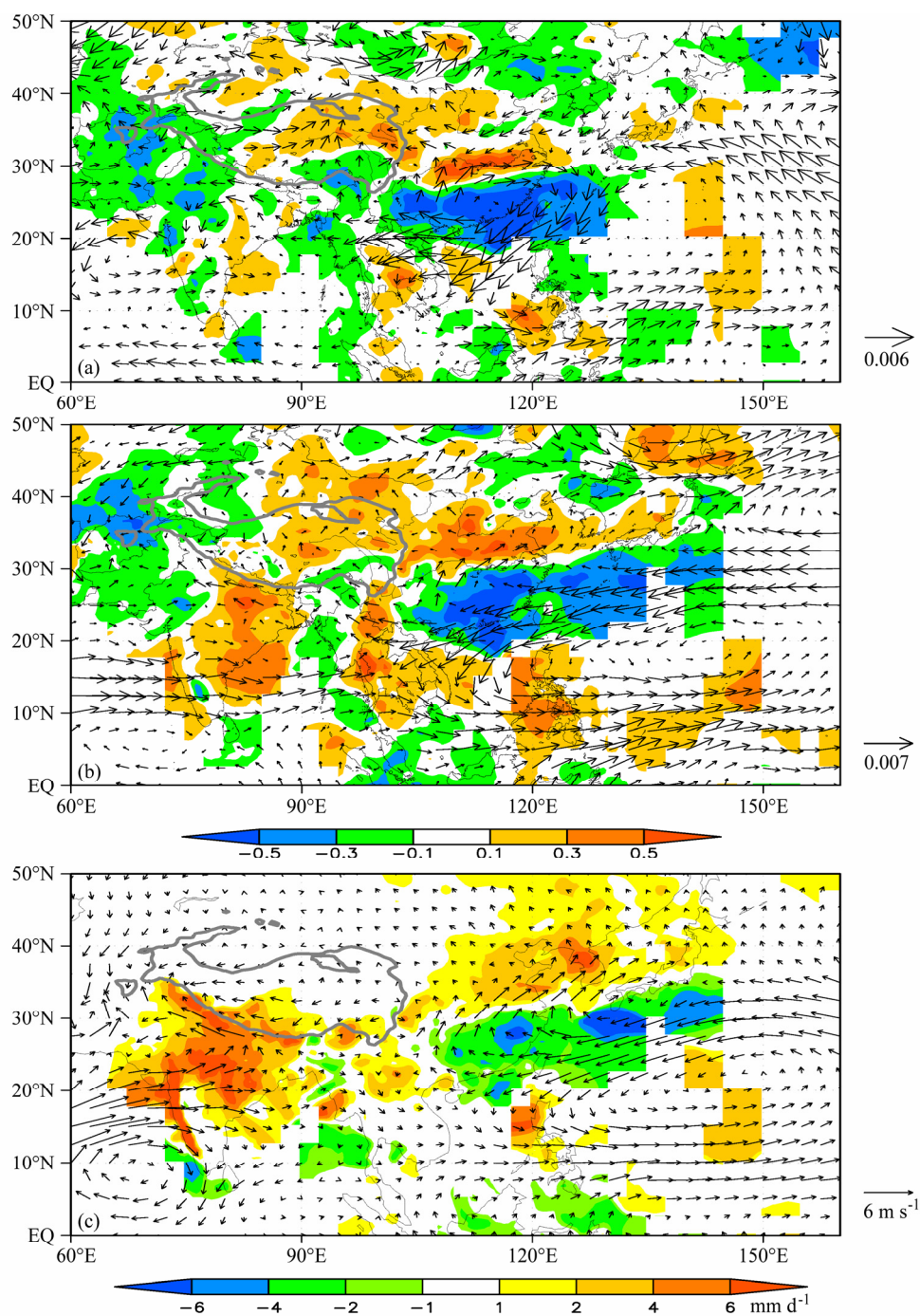


图2 (a, b) 基于6月台站降水和200 hPa位势高度场SVD分解方法得到的第一(a)和第二(b)模态时间序列回归的850 hPa风场分布型和PrecL降水系数; (c) 气候平均850 hPa风场和PrecL降水场7月与6月差异

Fig. 2 (a) Regressed wind (vector) and precipitation of PrecL (shaded) with the first component of SVD of June station rainfall and 200-hPa geopotential height; (b) same as (a), but for the second component of SVD; (c) the differences between July and June climatological 850-hPa winds (vector) and PrecL rainfalls (shaded)

流域降水偏多、长江以南降水偏少的“梅雨偶极型”分布与6月合成的淮河洪涝年与长江洪涝年降水场之差(Hong and Liu, 2012, 图3f)的主要特征一致。是否意味着“梅雨偶极型”是6月梅雨的一种主要模态? 为了说明欧亚大陆以及西北太平

洋对流层环流与中国6月降水的相关分布, 下面利用SVD方法进行研究。

首先基于JRA-25资料中200 hPa位势高度场和中国台站降水进行SVD分解得到200 hPa位势高度和降水距平的前两个模态, 其解释方差分别占总方

差的 25.1% 和 18.3% (Hong and Liu, 2012)。NCEP2 和 ERA-Interim 的结果类似。然后利用这两个模态时间序列与对流层低层 850 hPa 风场和全球陆面降水进行回归, 图 2a 和 b 为其回归系数。可见与台站降水 SVD 分析结果一致, 第一模态回归降水大值在长江流域, 华南和华北降水距平与之相反, 呈现“三明治”结构; 回归风场表明当长江流域降水偏多时从东亚近海到我国东部中南地区形成一异常闭合反气旋。该反气旋的西南气流与来自日本以南的东风在长江流域辐合, 为持续性降水提供条件。反气旋以东热带一副热带西太平洋上维持异常气旋环流, 在阿拉伯海上有也存在一异常气旋 (图 2a)。第二模态时间系数回归全球陆地降水模态 (图 2b) 也与 SVD 分解得到的降水第二主模态是一致的, 即淮河流域与长江以南地区降水变化相反的“梅雨偶极型”模态, 同时印度上空降水显著增加。与第一模态时间系数回归风场 (图 2a) 不同, 第二模态时间系数回归的低层风场 (图 2b), 呈现出倾斜地以台湾为界, 以南西太平洋是异常气旋环流, 以北为反气旋环流, 即西太副高偏北, 对应淮河流域上存在异常西南风, 但是没有形成闭合反气旋; 与印度降水增加相关联, 印度上空西风偏强, 阿拉伯海上是异常反气旋。

图 2c 给出气候平均环流和 PrecL 降水 7 月与 6 月之差。在我国东部降水同样表现出以长江为界南北反向的“梅雨偶极型”模态。环流场上, 7 月相对 6 月的差异是在我国南部及附近海域有一异常反气旋, 500 hPa 上西太副高也偏北; 而南海及其以东的西太平洋是异常气旋环流, 阿拉伯海上是反气旋式环流增加。上述差异均与淮河洪涝时环流及降水特征 (图 2b) 一致, 说明 6 月淮河发生洪涝是大尺度环流季节推进异常即季节超前的结果。与 Guo and Liu (2008) 研究 2003 年淮河洪涝时发现热带台风推动季节进程的结果一致。

4 淮河洪涝与热带海洋热含量变化的联系

上节研究阐明了 6 月发生淮河洪涝与环流和梅雨季节提前向北发展有关。另一方面如引言所述, 已有研究发现表明西太平洋或印度洋 SST 与东亚夏季风联系紧密。

本节将分析基于具有更长时间“记忆”的海洋热含量在春季的变化及其与亚洲环流季节推进

异常和淮河洪涝的关系。

我们先考察海洋热含量的年际变率的基本特征, 这可通过方差分析得到。图 3a 可见 4~6 月方差较大的区域位于澳大利亚东北向的南太平洋辐合带, 黑潮附近海域和菲律宾以东邻近海域。这些区域海洋热含量相对于其他海域年际变率大。基于 SODA 资料计算得到的 4~6 月海洋上层 700 m 热含量的方差 (图略, 参见洪洁莉, 2012, 图 6.3) 除在南赤道印度洋和东赤道太平洋也存在大值中心外, 其他大值中心区域与 NODC 的热含量方差一致。说明澳大利亚东北向的南太平洋赤道辐合带热含量变率最大是可信的。

为讨论淮河洪涝与热含量异常的关系, 图 3b 给出了反映淮河洪涝年“梅雨偶极型”的 SVD 第二模态时间系数与热含量的相关。从澳大利亚东北向海域热含量变率大值区至赤道地区两者存在显著高相关, 意味着春季该区海洋热含量变化对 6 月季节推进和淮河洪涝有指示意义。正的相关还存在于菲律宾以东, 负相关则位于日本及其以南黑潮区域和东赤道太平洋。综合考虑热含量变率和正高相关区域为关键区, 定义一热含量指数, 即将区域 ($15^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $160^{\circ}\text{E}\sim 190^{\circ}\text{E}$) 海洋热含量的区域平均定义为海洋热含量指数 (Heat Content index, HCI), 来表征关键区域热含量的变化。

图 3c 中红线给出 4~6 月 NODC HCI 指数随着时间变化曲线。可见 HCI 有明显年际变化, 同时存在年代际变化。从 2000 年开始与 2000 年前的变化规律有明显不同。HCI 指数在 2000 年以后持续偏高。而 HCI 偏高时, 淮河容易偏涝 (图略, 参见洪洁莉, 2012)。正是从 2000 年以后淮河发生洪涝次数明显增多, 因此春季太平洋热带和副热带海洋热含量在 2000 年后的变化可能是 6 月淮河发生洪涝的原因之一。利用 HCI 指数异常合成的 6 月我国东部降水距平分布证实在年际变化上, 当关键区域 4~6 月平均海洋热含量偏多 (少) 时淮河流域以及华北地区降水偏多 (少), 长江以南华南地区降水偏少 (多) (图略, 参见洪洁莉, 2012, 图 6.8b)。总之, 6 月我国东部以长江为界南北降水“梅雨偶极型”分布和前期热带南太平洋关键区域海洋热含量异常存在较密切联系。

那么关键区热带南太平洋海洋热含量异常是如何影响北半球副热带地区大气环流? 事实上 HCI 指数变化不仅是关键海区热含量改变, 它反映的是

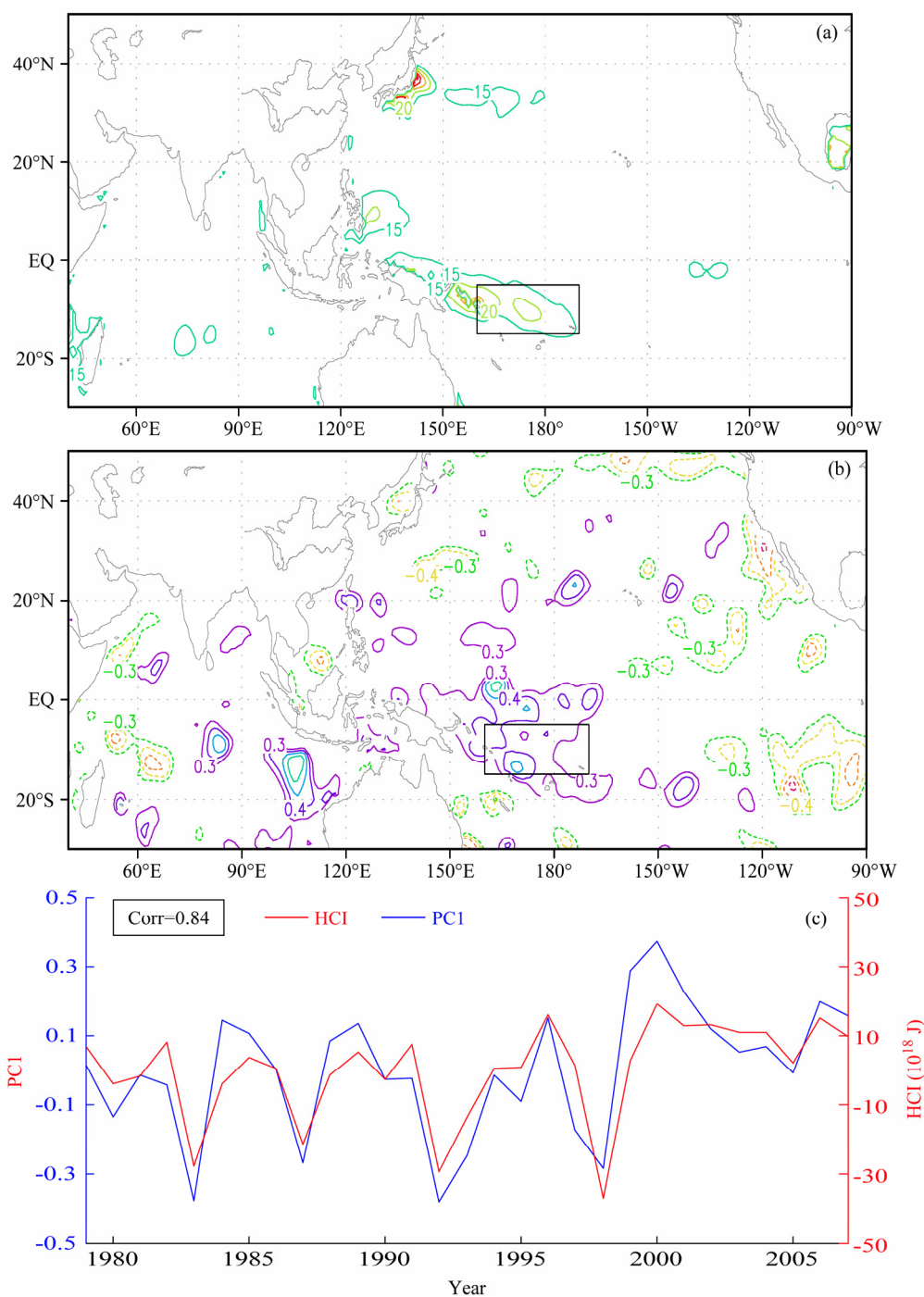


图3 (a) 4~6月NODC海洋热含量的标准方差分布(单位: 10^{18}J); (b) SVD分解第二模态时间主成分与4~6月NODC海洋热含量的相关系数(等值线为超过90%置信度水平); (c) 4~6月NODC热含量指数HCI(红线)和热含量EOF第一模态的时间序列(蓝线)。方框为定义HCI指数的关键区域,下同

Fig. 3 (a) The variance of oceanic heat content of NODC during April-June (units: 10^{18}J); (b) the correlation coefficient between the second component of SVD and oceanic heat content of NODC (Contours signify the 90% confidence level); (c) the time series of Heat Content Index (HCI) of NODC (red) and the time series of first component of EOF of oceanic heat content (blue). The HCI is defined as the average oceanic heat content for the rectangular area (the same below)

太平洋热含量的一种异常分布型。图3c中蓝线是4~6月NODC太平洋热含量EOF第一模态(图6a)的时间序列。EOF第一模态系数的时间序列(图3c蓝线)与HCI(图3c红线)的相关为0.84,表明可

以用定义的热含量指示图6a所示太平洋海洋热含量三极型的分布,即菲律宾以东的西太平洋和澳大利亚东北向海域同位相,但与赤道中东太平洋热含量呈相反变化的形态。

海气相互作用是通过海气界面动量、热量和水汽交换及反馈过程而影响大气。当 HCI 为正值即其所指示的关键海域和热带西太平洋海洋热含量偏多时,海洋对其上大气产生正的表面感热加热(图 4a)。环流向热源适应(吴国雄和刘屹岷, 2000),气块得到不稳定能量,受热上升、低层风场向加热区辐合,并激发出气旋式环流(图 4b、c)。在南半球,感热异常加热区位于海洋大陆以东至澳大利亚东北的关键区及以南地区,气流在关键区南部辐合

强烈,造成该地区对流不稳定,对流增多(图 5a)。在北半球,显著的正感热异常控制菲律宾以东到夏威夷以北的广大热带—副热带西太平洋地区,其北侧黑潮延伸区为负感热区。两者共同作用激发出局地反气旋在北、气旋在南,使对流层低层西太平洋副热带高压偏北(图 4b、c)。该环流型与上节通过 SVD 系数回归得到 6 月淮河洪涝型环流场(图 2b)和 7 月与 6 月季节差异场(图 2c)一致。偏北的异常反气旋影响到我国东部,低层 850 hPa 风场及水

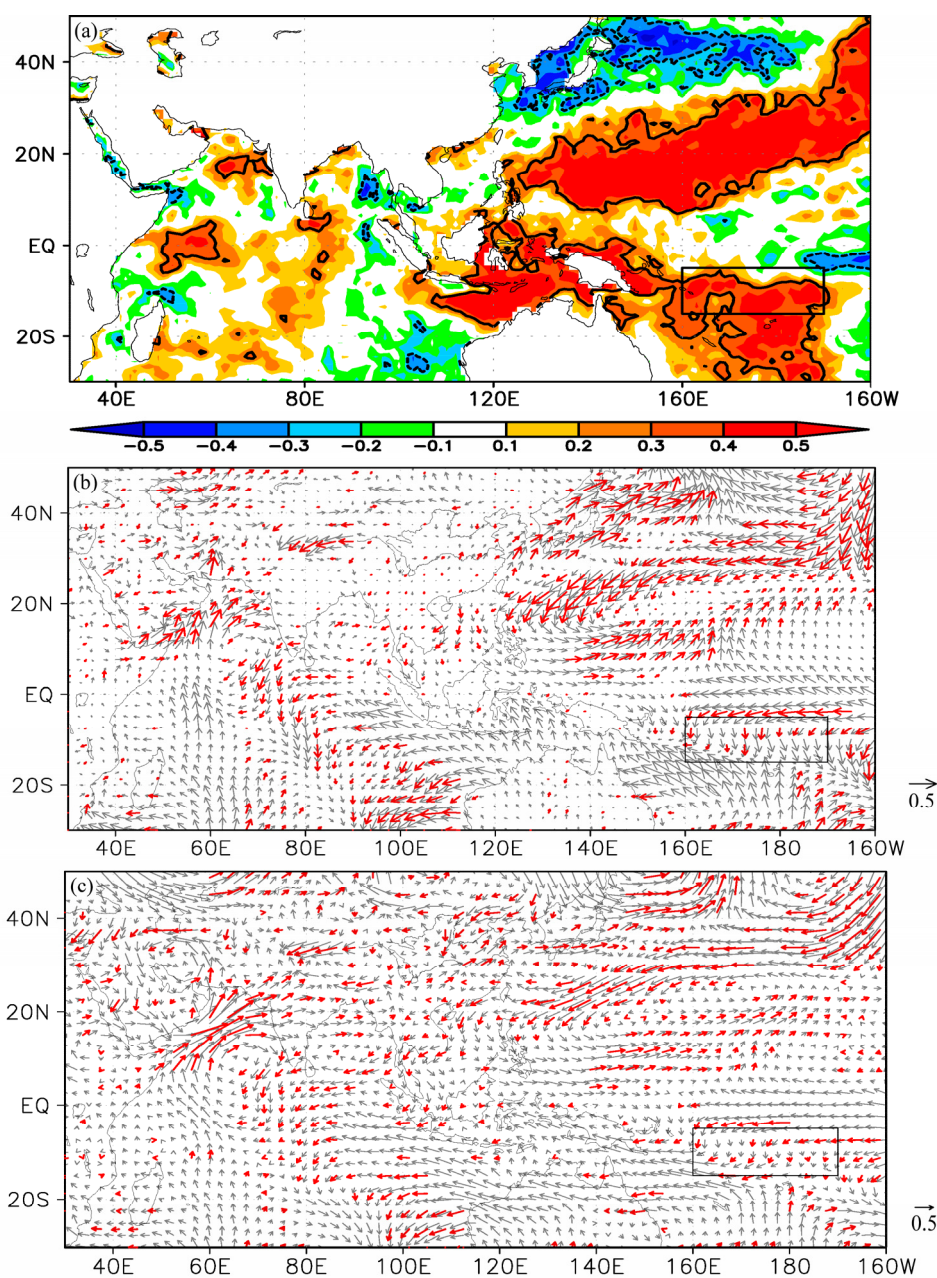


图 4 4~6 月 NODC 热含量指数与表面感热通量的相关系数 (a) 和基于热含量指数回归的 6 月 10 m 风场 (b)、850 hPa 风场 (c) 的系数。(a) 中等值线和 (b、c) 中红色箭头表示分别表示通过 90% 信度检验

Fig. 4 (a) The correlation between April-June NODC HCI and surface sensible heat flux in June; the regressed with winds (b) at 10 m and (c) at 850 hPa in June based on April-June NODC HCI. The contours in (a) and red vectors in (b) and (c) mean the 90% confidence level

汽在长江以北的淮河流域辐合, 长江以南辐散 (图 4c), 呈现出“梅雨偶极型”对应的环流特征 (图 2b)。因此春季太平洋海洋热含量三极型异常可能是 6 月东亚地区和西太平洋副热带高压季节推进提前、淮河发生洪涝的重要原因之一。

对应太平洋三极型海洋热含量分布, 阿拉伯海上空低层风场是一反气旋异常 (图 4b, c), 与之关联的印度对流偏强 (图 5a), 也与图 2b 和 c 一致, 反映了季节推进提前的特征。同时, 也与 Hong and Liu (2012) 指出的异常强的印度对流是淮河洪涝发生重要原因的结果一致。Zhang (2001) 曾指出, 来自印度季风的水汽输送与东亚上空水汽输送的关系具有反相变化的特征。太平洋三极型海洋热含量异常导致热带西太平洋为气旋式环流异常 (图 4c)、热带水汽输送偏弱, 可能有助于从阿拉伯海到中南半岛出现反气旋式环流, 阿拉伯海西北是气旋式环流, 印度半岛低空上西风偏强, 降水偏多 (图

4c, 5a)。另一方面, 印度上空低层西风增加和热带西太平洋上出现气旋式环流异常可能与夏季热带地区 30~60 天低频振荡 (MJO) 位相有关 (Maloney and Hartmann, 1998)。但阿拉伯海环流异常和印度对流增加与太平洋海洋热含量三极型变化的关联, 还需进一步研究。

上述环流与对流位置还体现了环流对对流加热的 Gill 模态响应。在北半球对流层低层气旋中心总是位于对流加热中心西北侧, 反映出环流对加热的反馈。另一方面, 与太平洋海洋热含量三极型异常和印度对流增强相关联的对流层高层异常信号也很显著。200 hPa 位势高度场上, 中高纬度存在 Rossby 波波列, 其中在贝加尔湖上空为一显著阻塞高压, 其上、下游是负位势高度异常, 北太平洋上空是正异常信号 (图 5b)。与 6 月淮河洪涝发生时欧亚大陆上空出现“单阻”相似 (Hong and Liu, 2012), 利于淮河洪涝发生。

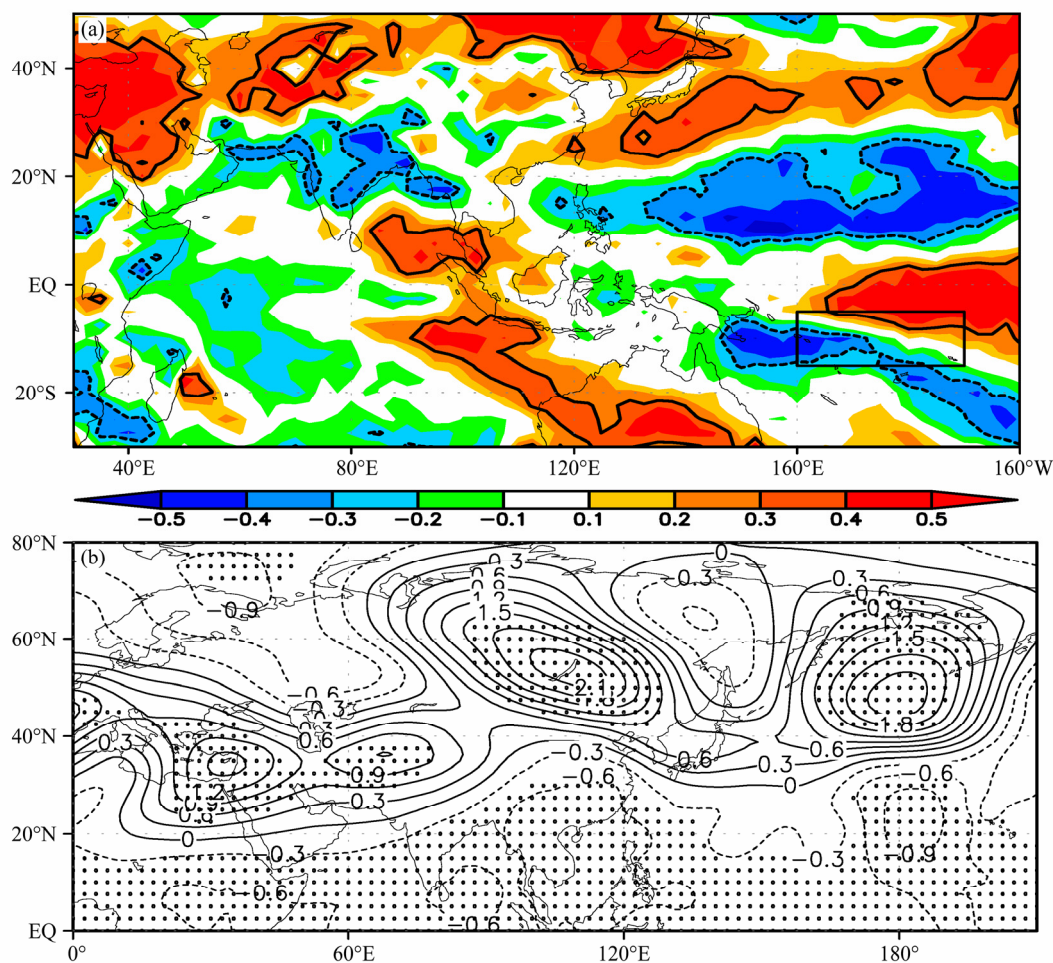


图 5 4~6 月 NODC 热含量指数与 6 月 OLR (a) 和 6 月 200 hPa 位势高度场相关系数 (b)。(a) 中等值线和 (b) 中打点区域通过 90% 信度水平

Fig. 5 The correlations between the April-June NODC HCI and (a) OLR, (b) geopotential height at 200 hPa in June, respectively. Contours in (a) and dotted areas in (b) mean 90% confidence level

海洋热含量变化具有持续性和稳定性。图 6 是 NODC 资料 4~6 月平均和基于 SODA 资料计算的 4、5、6 月各月热含量的 EOF 第一模态。NODC 4~6 月热含量第一模态方差占总方差的 22%。与 NODC 资料 4~6 月平均 (图 6a) 相似, SODA 资料 4、5、6 月各月热含量的第一模态 (图 6b-d) 均表现出热带西太平洋和澳大利亚东北向海域与赤道中东太平洋热含量呈相反变化的特征, 其中变率幅度最大的区域就是本文定义的热含量指数的区域, SODA

第一模态的时间变化与 NODC 4~6 月 EOF1 时间系数的相关分别为 0.96, 0.95, 0.90, 均远超过 99% 的信度水平。另外, 基于 4 月 SODA 计算得到的 EOF1 时间序列与 6 月感热的分布 (图 7) 也与 4~6 月 NODC 热含量指数与表面感热通量相关的分布 (图 4a) 非常接近, 即为在西太平洋黑潮附近和赤道中太平洋是向大气的负感热通量, 而从海洋大陆在北半球向东北方向、南半球位于澳大利亚以东热带中太平洋上是正的表面感热异常。因此可用

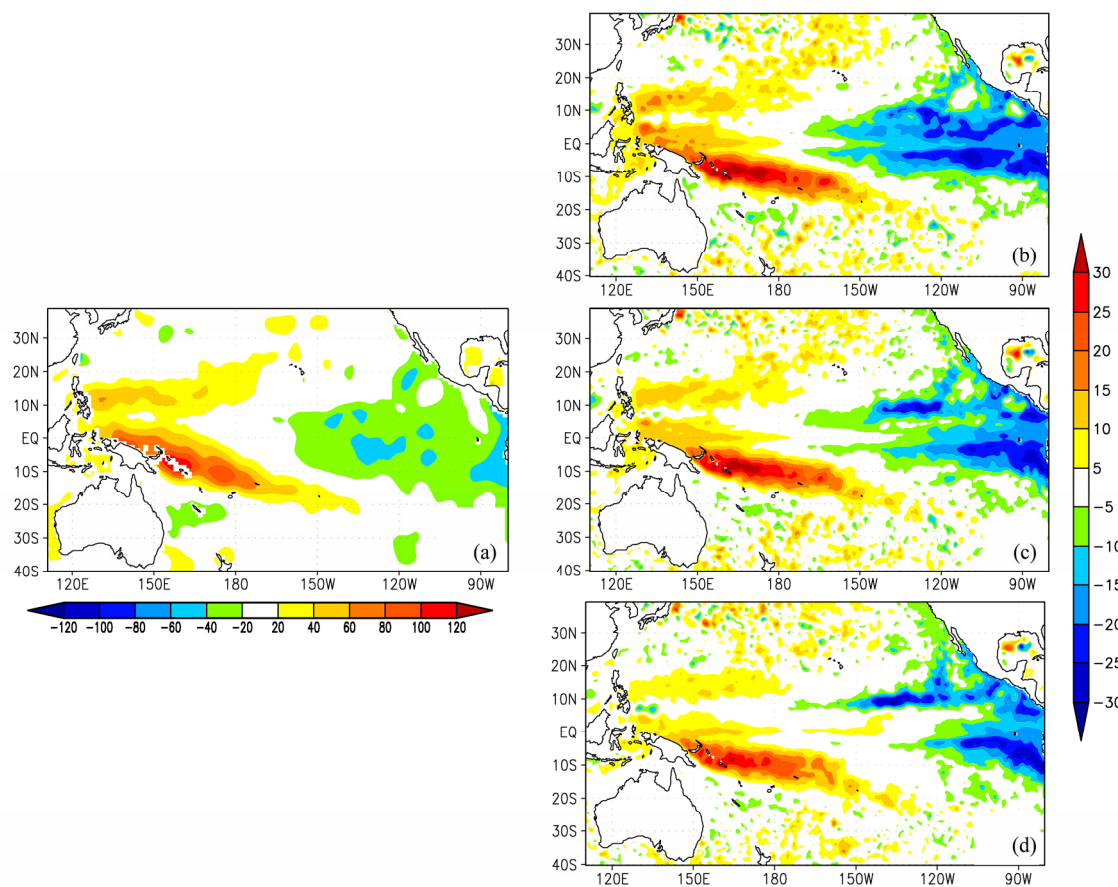


图 6 (a) 4~6 月 NODC 热含量 EOF 分解第一模态; SODA 资料 (b) 4 月、(c) 5 月、(d) 6 月热含量 EOF 分解第一模态

Fig. 6 (a) Spatial distribution of the first EOF mode of April-June NODC heat content; (b, c, d) same as (a), but for SODA heat content in (b) April, (c) May, and (d) June, respectively

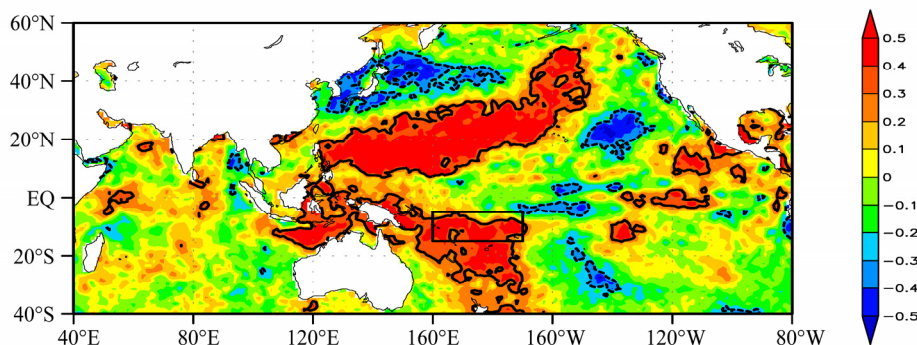


图 7 4 月 SODA 资料海洋热含量指数和 6 月洋面感热通量相关系数。等值线内表示通过 90% 信度检验的区域

Fig. 7 The correlation coefficient between the SODA HCI in April and the surface sensible heat flux in June. The contours mean 90% confidence level

4 月或 5 月关键区平均的海洋热含量指数作为预测 6 月淮河洪涝的因子之一。

5 总结和讨论

淮河流域和长江流域经济发达, 洪涝灾害的发生对于当地社会和经济影响严重。1990 年代梅雨期洪涝主要发生在长江流域, 但 2000 年后主要发生在淮河流域。本文基于台站和卫星观测及再分析资料研究了 6 月淮河洪涝发生时中国东部降雨型及与雨带异常相联系的环流特征、环流季节推进异常及其机理。得到的结果如下:

(1) 东亚和西太平洋季风区 7 月与 6 月相比, 雨带向北推移, 在我国差异表现为以长江为界降水北增南减的分布。与之相关联环流系统西太副高、西风急流轴位置等都向北移动。热带地区, 与 6 月相比, 7 月低层索马里急流加强北进, 阿拉伯海存在反气旋改变, 印度季风降水增加。

(2) 6 月淮河流域发生洪涝与亚洲环流和降水联合模式的第二模式密切相关, 在我国东部表现为以长江为界降水北增南减的“梅雨偶极型”分布, 同时印度上空降水显著偏多。对应的低层风场呈现出倾斜的以台湾为界, 以南的西太平洋是异常气旋环流, 以北为反气旋环流, 即西太副高偏北, 淮河流域上存在异常西南风; 印度上空西风增加, 阿拉伯海上是异常反气旋。因此 6 月“梅雨偶极型”降水和相应环流异常反映了东亚和西太平洋季风区季节推进超前。

(3) “梅雨偶极型”异常与前期澳大利亚东北向海域上海洋热含量变化显著相关。该关键区海洋热含量变化是太平洋热含量变化第一模态的一部分, 呈现三极型, 即当菲律宾以东西太平洋和澳大利亚东北向海域热含量增加, 赤道中东太平洋热含量减少。该三极型海洋热含量异常激发的正感热加热异常控制了菲律宾以东到夏威夷以北的广大热带—副热带西太平洋地区, 其北侧黑潮延伸区为负感热区。两者共同作用激发出局地反气旋在北、气旋在南, 使对流层低层西太平洋副热带高压偏北。因此春季三极型海洋热含量通过影响对流层低层西太平洋副热带高压北移和西太对流异常对东亚—西太平洋季节推进提前和淮河梅雨洪涝发生起重要作用, 并进一步影响对流层高层, 可能是 6 月东亚地区和西太平洋副热带高压季节推进提前、淮河发生洪涝的原因之一。

与 SST 太平洋年际变化主要模态 ENSO 相比, 春季海洋热含量第一模态反映了热带太平洋 ENSO 衰减期的部分特征。但与之显著差别在于海洋热含量具有更好的稳定性, 在春季特征明显。更为重要的是其主要信号位于西太平洋, 尤其是位于北半球的北支信号更接近东亚地区从而可能比传统 ENSO 信号对我国短期气候预测有更好指示意义。

本文研究了热带海洋的作用, 实际上影响梅雨和东亚季风的动力过程还很多。另一方面, 本文关注的是月平均尺度的大气环流变化, 季节内振荡对东亚季节进程和我国气候的影响及相关的季节预测值得进一步研究。

参考文献 (References)

- Antonov J I, Levitus S, Boyer T P. 2004. Climatological annual cycle of ocean heat content [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L04304, doi:10.1029/2003GL018851.
- 毕宝贵, 矫海燕, 廖要明, 等. 2004. 2003 年淮河流域大洪水的雨情、水情特征分析 [J]. *应用气象学报*, 15 (6): 681–687. Bi Baogui, Jiao Meiyuan, Liao Yaoming, et al. 2004. Analysis of precipitation and river flow in the Huaihe River basins during the summer of 2003 [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 15 (6): 681–687.
- Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases [J]. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2217
- Guo L, Liu Y M. 2008. The effects of diabatic heating on asymmetric instability and the Asian extreme climate events [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100: 195–206.
- 洪洁莉. 2012. 淮河流域和长江流域梅雨洪涝期大气环流差异及其机理研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 121pp. Hong Jieli. 2012. Differences of atmospheric circulation between the periods of Huaihe River and Yangtze River valley flooding during Meiyu and the mechanism [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 121pp.
- Hong Jieli, Liu Yimin. 2012. Contrasts of atmospheric circulation and associated tropical convection between Huaihe valley and Yangtze River valley during Meiyu flooding [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (4): 755–768.
- Huang R H, Wu Y. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 6: 21–32.
- Lau K M, Kim K M, Yang S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 13: 2461–2482.
- 刘还珠, 赵声蓉, 赵翠光, 等. 2006. 2003 年夏季异常天气与西太副高和南亚高压演变特征的分析 [J]. *高原气象*, 25 (2): 169–178. Liu Huanzhu, Zhao Shengrong, Zhao Cuiguang, et al. 2006. Weather abnormal and evolutions of western Pacific subtropical high and South Asian high in summer of 2003 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (2): 169–178.

- 刘宗秀, 曹鸿兴. 1994. 北极海冰对我国梅雨及气候预报的指示意义 [J]. 气象, 20 (11): 21–24. Liu Zongxiu, Cao Hongxing. 1994. Teleconnection between Arctic ice and Meiyu over the middle and lower reaches of Changjiang River [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 20 (11): 21–24.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1998. 东亚—太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响 [J]. 大气科学, 22 (5): 727–734. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1998. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (5): 727–734.
- 陆日宇, 富元海. 2009. 夏季东亚和西北太平洋地区的气候变异及其机理 [J]. 地球科学进展, 24 (2): 123–131. Lu Riyu, Fu Yuanhai. 2009. Summer climate variability in East Asia and the western North Pacific and its mechanisms [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24 (2): 123–131.
- 马音, 陈文, 王林. 2011. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较 [J]. 气象学报, 69 (2): 334–343. Ma Yin, Chen Wen, Wang Lin. 2011. A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between the Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (2): 334–343.
- Maloney E D, Hartmann D L. 1998. Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian oscillation [J]. J. Climate, 11: 2387–2403.
- 钱维宏, 朱江, 王永光, 等. 2009. 江淮梅雨和赤道太平洋区域海温变化的关系 [J]. 科学通报, 54 (1): 79–84. Qian Weihong, Zhu Jiang, Wang Yongguang, et al. 2009. Regional relationship between the Jiang-Huai Meiyu and equatorial surface-subsurface temperature anomalies [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 54 (1): 79–84.
- Qian W H, Zhu J, Wang Y G, et al. 2009. Regional relationship between the Jiang-Huai Meiyu and the equatorial surface-subsurface temperature anomalies [J]. Chinese Science Bulletin, 54 (1): 113–119, DOI:10.1007/s11434-008-0410-6
- 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. Qian 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.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research of the East Asian summer monsoon in China [J] // Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. 应用气象学报, 17 (5): 513–525. Tao Shiyuan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the west Pacific in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (5): 513–525.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asia teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13: 1517–1536.
- 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), 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 in China Ser D—Earth Sciences (in Chinese), 39 (10): 1360–1374.
- Weng H Y, Ashok K, Behera S, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer [J]. Climate Dyn., 29: 113–129.
- Weng Hengyi, Wu Guoxiong, Liu Yimin, et al. 2011. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans [J]. Climate Dyn., 36: 769–782, DOI: 10.1007/s00382-009-0658-9
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I: 热力适应和过流 [J]. 大气科学, 24 (4): 433–446. Wu Guoxiong, Liu Yimin. 2000. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone. Part I: Thermal adaptation and overshooting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 433–446.
- 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 2008. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成 [J]. 大气科学, 32 (4): 720–740. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Yu Jingjing, et al. 2008. Modulation of land–sea distribution on air–sea interaction and formation of subtropical anticyclones [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 720–740.
- Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. J. Climate, 16: 2038–2051.
- 徐海明, 何金海, 周兵. 2001. 江淮入梅前后大气环流的演变特征和西太平洋副高北跳西伸的可能机制 [J]. 应用气象学报, 12 (2): 150–158. Xu Haiming, He Jinhai, Zhou Bing. 2001. The features of atmospheric circulation during Meiyu onset and possible mechanisms for westward extension (northward shift) of Pacific subtropical high [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (2): 150–158.
- Yu L, Weller R A. 2007. Objectively analyzed air–sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88: 527–539.
- Yu L, Jin X, Weller R A. 2008. Multidecade global flux datasets from the Objectively Analyzed Air–sea Fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables [R]. OAFlux Project Technical Report, OA-2008-01, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, 64pp.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 56(2): 199–211. Zhang Qingyun, Tao Shiyuan. 1998. Influence of Asian mid high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56(2): 199–211.
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18: 1005–1017.
- 周学鸣, 何金海, 叶榕生. 1995. 乌拉尔阻塞高压影响亚洲夏季风环流和我国东部旱涝的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 18: 25–32. Zhou Xueming, He Jinhai, Ye Rongsheng. 1995. Numerical experiments with effects of Ural blocking high on East Asian summer monsoon circulation and drought/flood events in East China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18: 25–32.