

董祝雷, 任宝华, 郑建秋, 等. 2016. 前冬澳大利亚周边海温与我国长江流域夏季降水的联系 [J]. 大气科学, 40 (6): 1273–1283. Dong Zhulei, Ren Baohua, Zheng Jianqiu, et al. 2016. The relationship between prior-winter SST around Austria and summer rainfall in the Yangtze River valley of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1273–1283, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15284.

# 前冬澳大利亚周边海温与我国长江流域夏季降水的联系

董祝雷 任保华 郑建秋 卢国阳 徐迪

中国科学技术大学, 合肥 230026

**摘 要** 利用 1980~2012 年 Hadley 中心的 HadISST 再分析海温资料、美国 NCEP/NCAR 月平均再分析资料和中国 160 站月平均降水资料, 研究了前冬澳大利亚周边海温与长江流域夏季降水关系。研究表明, 澳大利亚周边冬季逐月海表温度距平 (SSTA) EOF 分解第一模态具有全区一致模形式, 澳大利亚周边海温一致模具有季节持续性, 可从前一年冬季一直维持到当年的夏季。用 Niño3.4 指数剔除海温场中 ENSO 线性信号后, 表明澳大利亚周边海温一致模可能是独立于 ENSO 位相的区域局地现象。基于冬季澳大利亚周边海温一致模形式, 定义了表征长江流域夏季降水一致模指数 (CMI), 对长江流域夏季降水具有一定的短期预测意义。澳大利亚周边海温一致模与长江流域夏季降水显著相关, 一方面是因为澳大利亚周边海温异常能激发南北半球遥相关, 造成西太平洋副热带高压异常, 从而影响长江流域夏季降水; 另一方面, 澳大利亚周边海温异常导致热带地区南北半球对流异常, 尤其使得菲律宾周边地区的对流活动异常, 进而造成长江流域夏季降水异常。

**关键词** 澳大利亚周边海温 长江流域 夏季降水 一致模指数 热带对流

文章编号 1006-9895(2016)06-1273-11

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15284

## The Relationship Between Prior-winter SST around Austria and Summer Rainfall in the Yangtze River Valley of China

DONG Zhulei, REN Baohua, ZHENG Jianqiu, LU Guoyang, and XU Di

University of Science and Technology of China, Hefei 230026

**Abstract** The HadISST (Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature) dataset, the NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research) monthly reanalysis data, and monthly precipitation data collected at 160 stations in mainland China from 1980 to 2012 are used to study the relationship between the summer rainfall over Yangtze River valley in China and the prior-winter Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA) around Austria. Results show that the leading mode of the monthly SSTA around Austria revealed by the Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis exhibits the characteristics of consistent SST variation

收稿日期 2015-10-13; 网络预出版日期 2016-04-19

作者简介 董祝雷, 男, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事东亚夏季风降水与海气相互作用研究。E-mail: dongzhl@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 任保华, E-mail: ren@ustc.edu.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB417403, 中国科学院战略性先导科技专项——过去百年气候增暖及成因 XDA05090402, 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室课题 LTO1502

**Funded by** National Basic Research Program of China (Grant 2012CB417403), Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA05090402), Program of State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (Grant LTO1502)

trend over the entire region, and the SSTA around Austria has a seasonal continuity, which can persist from the prior-winter through the following summer. Analysis of the Niño3.4 index with the ENSO linear signal removed in the SST field shows that the consistent mode may be a local phenomenon that is independent of ENSO events. Based on the consistent mode of prior-winter SSTA around Austria, the Consistent Mode Index (CMI) is defined to characterize the influence of SSTA around Austria on the summer rainfall in the Yangtze River valley. The CMI has certain implications for short-term forecast of summer precipitation in the Yangtze River valley. The prior-winter SSTA around Austria may affect East Asian summer atmospheric circulations in two ways. First, the prior-winter SSTA signal around Australia can persist through the following summer and trigger a teleconnection wave train between the Northern and Southern Hemispheres, leading to an abnormal West Pacific Subtropical High (WPSH) that subsequently affects the summer precipitation in the Yangtze River valley. Second, the SSTA around Australia can result in abnormal convections in the tropics in both hemispheres, especially abnormal convection activities over the Philippine Sea, and eventually lead to anomalous changes in summer rainfall in the Yangtze River valley.

**Keywords** SSTA around Austria, Yangtze River valley, Summer rainfall, CMI (consistent mode index), Tropical convection

## 1 引言

降水是一种重要的天气过程,对国民经济建设和生产有着重要的影响,我国降水不仅在区域上分布不均,而且各个季节降水量相差较大,众多学者对我国降水机理进行了深入的研究和探讨,取得了重要成果(邓伟涛等,2009;黄荣辉等,2011;吕俊梅等,2014)。季风和 ENSO (El Niño–Southern Oscillation) 作为影响亚洲气候变化最主要的天气系统,对我国降水有重要作用。Huang and Wu (1989) 和黄荣辉 (1990) 研究指出,当 ENSO 处于不同发展阶段,对我国不同区域降水量多寡有不同的影响。但是近 20 年来中国夏季降水与 ENSO 的相关性已大大衰减(高辉和王永光,2007)。Wang et al. (2008) 研究指出亚澳季风区的年际变化与 ENSO 的关系密切,自 20 世纪 70 年代以来,ENSO 与印度夏季风的负相关减弱,而与北太平洋西部及东南亚季风降水的正相关增强。热带西太平洋与印度洋为我国夏季风降水提供了充足的水汽,其海表温度变化对我国降水有着重要影响。Huang and Li (1987) 和 Nitta (1987) 研究指出,热带西太平洋暖池对流活动强烈会激发东亚/太平洋 (EAP) 遥相关型,使得西太平洋副高加强并向北伸展到我国长江中下游区域,造成高温少雨天气。李琰等 (2007) 和王庆元等 (2013) 研究发现前期海温为 El Niño 和正 IOD (Indian Ocean Dipole, IOD) 时,横跨热带印度洋—太平洋的沃克环流减弱,导致西太平洋—海洋大陆的负降水异常,在 Matsuno-Gill 效应下西太平洋形成反气旋异常环流。冬、春季印度洋海温年际变率模态异常,可能是通过印度洋区域纬向风异常的经向大气遥相关,导致菲律宾海地

区对流活动发生变化,进而影响夏季西太平洋副热带高压(简称西太副高)的变化,并最终影响我国东部地区夏季降水(徐志清和范可,2012)。

南半球环流的变化作为北半球气候变化的前期因子被广大学者来研究。马斯克林高压(马高)和澳大利亚高压(澳高)对东亚夏季风降水有重要影响,马高增强后能量频散作用使得澳高增强,105°~120°E 附近越赤道气流增强,导致西太平洋副高强度偏强,长江中下游地区降水量偏多(薛峰等,2003;Xue et al.,2003),澳高和马高的不同配置,与华北夏季降水亦有一定的联系(于勇等,2009)。南极涛动 (Antarctic Oscillation, AAO) 作为南半球环流年际变化最主要的模态对北半球尤其是东亚夏季风降水有着重要影响(南素兰和李建平,2005;范可,2006;范可和王会军,2006;孙丹等,2013;郑菲等,2014)。

影响长江流域夏季降水的因子众多(郭玲等,2012),大多数学者集中研究某一个特定事件(现象)与中国区域的降水关系,如 ENSO 事件、太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO)、印度洋偶极子,南极涛动 (AAO) 等。刘舸等 (2008) 研究发现,澳大利亚东侧位势高度异常与长江中下游夏季降水显著相关,并指出这可能是澳大利亚东侧海温异常造成的。周波涛 (2011) 进一步研究了澳大利亚东侧冬季海温异常与长江流域夏季降水之间的关系以及物理机制。以上研究关注澳大利亚东侧海温变化对长江流域夏季降水的影响,而对澳大利亚周边海温变化缺少认识和研究,澳大利亚周边海温变化是怎样的?其变化是否是局地现象?本文将主要研究澳大利亚周边海温主模态及其内在联系,以及澳大利亚周边海温主模态与中国长江

流域夏季降水的关系及其具体的影响机制。

## 2 资料和方法

本文采用的资料主要有：1980~2012年NCAR/NCEP再分析资料的位势高度场、风场 ( $u, v, w$ )，比湿 ( $q$ )，向外长波辐射 (OLR) 的月平均资料，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。Hadley环流中心提供的1889~2013年的SST月资料，空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。国家气候中心提供的中国160站月降水量观测资料，时间尺度为1951~2012年，其中，长江中下游区域的代表站 [根据张庆云和郭恒 (2014)] 选取为：上海、南京、合肥、杭州、屯溪、安庆、九江、汉口、钟祥、宜昌、岳阳、常德、宁波、贵溪、南昌、衢县、长沙。

本文运用了EOF分析、回归分析、相关分析和合成分析方法。其中，单位气柱整层大气水汽输送通量矢量 $Q$ 的计算方法为

$$Q = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} qV dp, \quad (1)$$

纬向与经向水汽通量分别为

$$\begin{cases} Q_u = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} qu dp, \\ Q_v = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} qv dp, \end{cases} \quad (2)$$

其中， $V$ 为风矢量， $u, v$ 分别为纬向和经向风速分量， $q$ 是各层大气的比湿， $p_s$ 为海平面气压。

为了剔除ENSO信号的可能影响，本文采用An (2003) 提出的处理方法，剔除海温场中ENSO信号，具体方法为

$$\zeta = \zeta^* - \frac{Z \times \text{cov}(\zeta^*, Z)}{\text{var}(Z)}, \quad (3)$$

式中， $\zeta^*$ 为去除ENSO信号前海温场， $\zeta$ 为去除ENSO信号后的海温场， $Z$ 为Niño3.4指数 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/nina34.data> [2015-05-01])， $\text{cov}$ 为去除ENSO信号前海温场与Niño3.4指数的协方差， $\text{var}$ 为Niño3.4指数的方差。文中若无特殊说明，夏季 (JJA) 均指北半球6、7、8月，冬季 (DJF) 是指前一年的12月和当年的1、2月。

## 3 澳大利亚周边海温主模态

利用EOF分析发现，澳大利亚周边逐月海温距平EOF分解主要有两种模态，其中第一模态 (图1a) 表现为澳大利亚周边海温变化一致模，是澳大利亚

周边海温的主导模态，解释方差为24.9%。图1c为用Niño3.4指数剔除海温场中ENSO线性信号后，澳大利亚周边海温分布，可见剔除ENSO线性型号后，澳大利亚周边海温仍表现出一致模形式，解释方差基本不变，为23.0%。无论是原场还是剔除ENSO线性信号后的海温场，主分量PC1均具有年代际变化 (图1b、d)，在1990年代中期之前，海温一致模表现出偏冷的模态，其后表现为一致增暖的形式，两者相关系数达到0.8988，说明ENSO信号对澳大利亚周边海温一致模影响较小。EOF分析表明澳大利亚周边海温，尤其是澳大利亚东、西两侧海温变化具有同步性。用澳大利亚周边海温主模态冬季时间序列 (PC1) 与中国160站夏季降水回归分析 (图2)，发现冬季PC1与长江流域夏季降水有正相关，原始海温场PC1与长江流域降水相关显著性不明显，剔除ENSO线性信号后海温场PC1与长江流域部分地区相关显著，因此澳大利亚周边海温一致模与长江流域夏季降水之间有一定的联系，有必要对澳大利亚周边海温与长江流域夏季降水做进一步的研究。

选取长江流域17站夏季平均降水量作为长江流域夏季降水指数 (Summer Rainfall Index, SRI)，并将长江流域夏季降水指数SRI与冬季澳大利亚周边海温作相关分析，发现长江流域夏季降水与澳大利亚周边海温有显著正相关，最大相关区域位于澳大利亚东西两侧洋面 (图3)，最大相关系数均超过0.4，超过95%的信度水平，这一相关分布与澳大利亚周边海温一致模非常相似，进一步佐证了海温一致模与长江流域夏季降水之间的联系。那么是否用澳大利亚东西两侧海温一致模定义长江流域夏季降水会更好的预报意义呢？如图3所示，分别在澳大利亚东、西侧洋面与中国长江流域夏季降水最大相关区各选取一个区域 [A ( $27^{\circ} \sim 32^{\circ}S, 161^{\circ} \sim 166^{\circ}E$ )], B ( $13^{\circ} \sim 18^{\circ}S, 105^{\circ} \sim 110^{\circ}E$ ) ]，运用回归分析，求出表征长江流域夏季降水的指数，定义为澳大利亚东西两侧海温一致模指数，简称一致模指数 (Consistent Mode Index, CMI)：

$$I_{CM} = 0.48T_A + 0.37T_B, \quad (4)$$

其中， $I_{CM}$ 表示一致模指数， $T_A, T_B$ 分别表示A、B区域的SSTA。

图4为1980~2012年长江流域夏季降水指数SRI与一致模指数时间序列，从中可以看出，一致模指数与长江流域夏季降水变化具有很好的一致性，两者的相关系数达到了0.63，超过了99%的信

度检验。为了进一步检验一致模指数与中国东部夏季降水的关系，将一致模指数与中国 160 站降水做相关分析（图 5a），发现一致模指数与长江流域夏

季降水有显著的正相关。基于一致模指数挑选的高值年与低值年（表 1）长江流域夏季降水异常合成场（图 5b、5c），表明，一致模指数高值年，长江

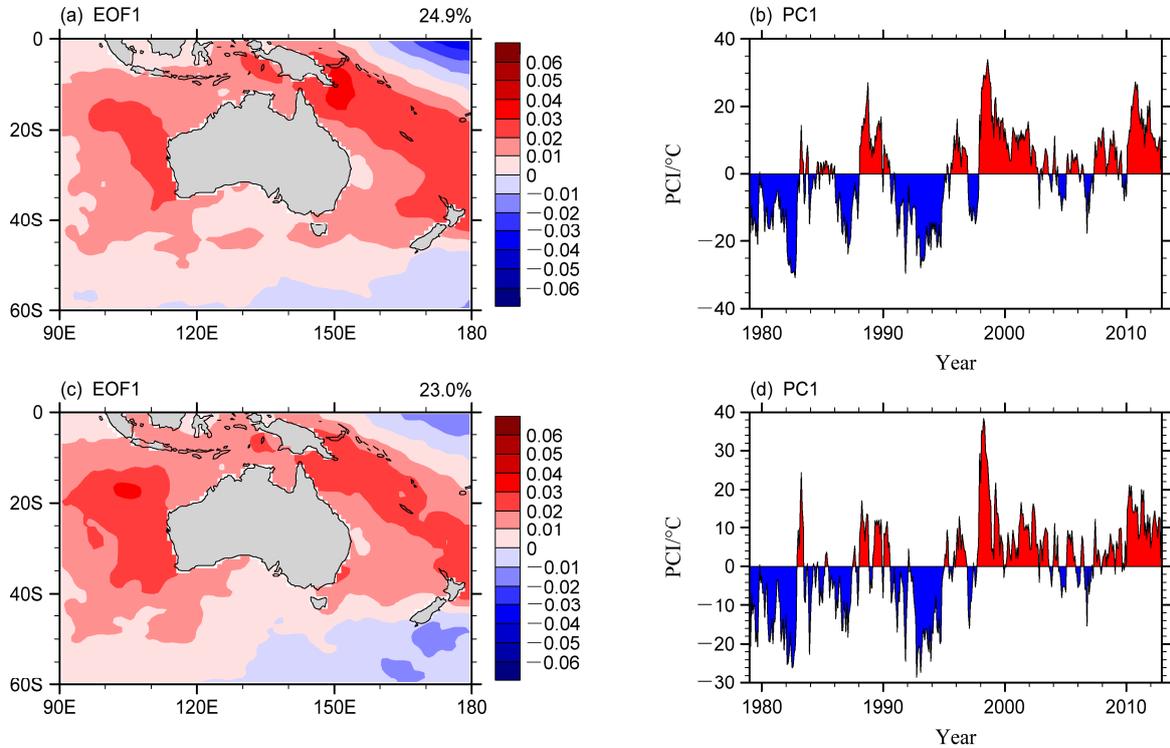


图 1 1979 年 1 月至 2012 年 12 月澳大利亚周边逐月海表温度距平 (SSTA) 的 EOF 分析主模态 (EOF1, 左列) 以及对应的主分量 (PC1, 右列): (a)、(b) 原始场; (c)、(d) 剔除 ENSO 线性信号后  
Fig. 1 The first EOF mode (EOF1, left column) of SSTA around Austria and corresponding principal component (PC1, right column) for Jan 1979 to Dec 2012: (a), (b) The original fields; (c), (d) the linear signal of ENSO is removed

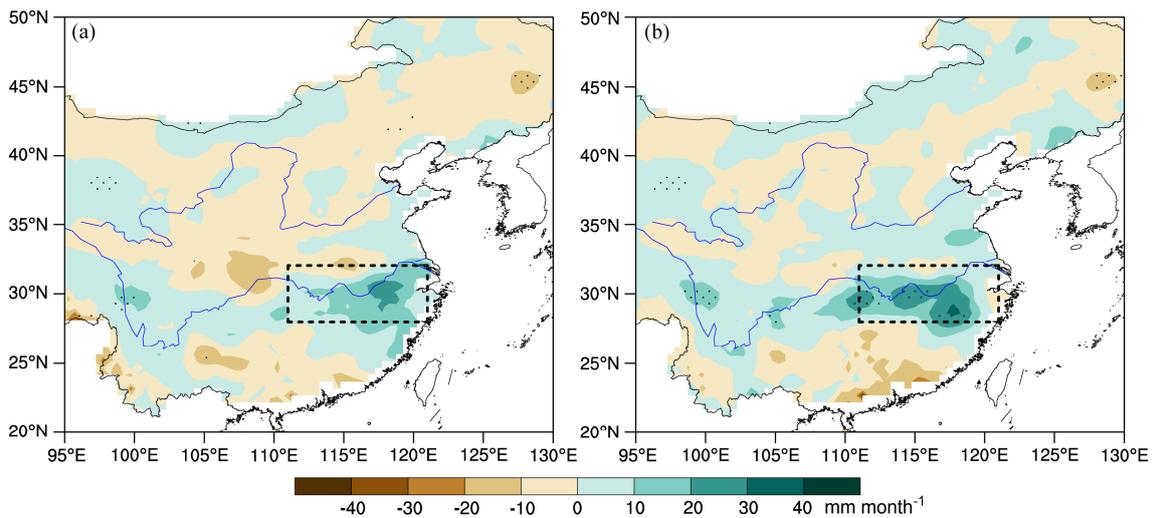


图 2 去除 ENSO 线性信号 (a) 前、(b) 后，冬季时间序列的 PC1 与中国 160 站夏季降水回归分布 (单位: mm month<sup>-1</sup>)。虚线方框区域表示长江流域; 打点区域超过 90% 信度检验  
Fig. 2 The regression (units: mm month<sup>-1</sup>) between the PC1 of prior-winter time series and summer rainfall at 160 stations in China: (a) Before removing the linear signal of ENSO; (b) after removing the linear signal of ENSO. The area shown in the box is the Yangtze River valley; the dotted areas denote regression above the 90% confidence level

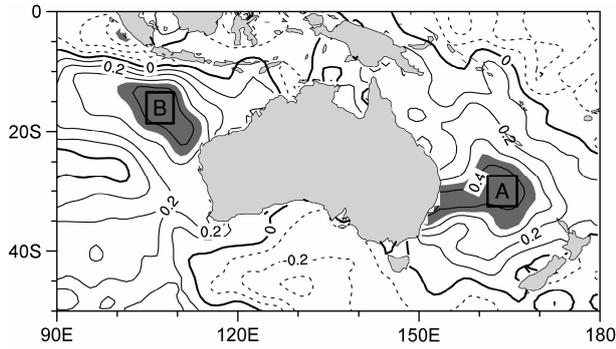


图3 1980~2012年长江流域夏季降水指数SRI与冬季澳大利亚周边海表温度相关系数分布。A、B方框区域表示海温关键区；深色阴影区通过95%信度检验

Fig. 3 Correlation coefficient between the Summer Rainfall Index (SRI) in the Yangtze River valley and the prior-winter sea surface temperature around Austria during 1980–2012. Areas A and B shown in the box are the key regions of SST; the dark shaded areas denote correlation above the 95% confidence level

流域有明显的降水正距平，中心最大降水距平超过  $100 \text{ mm month}^{-1}$ ，而在一致模指数低值年，长江流域夏季降水则为负距平，中心最大值比一致模指数

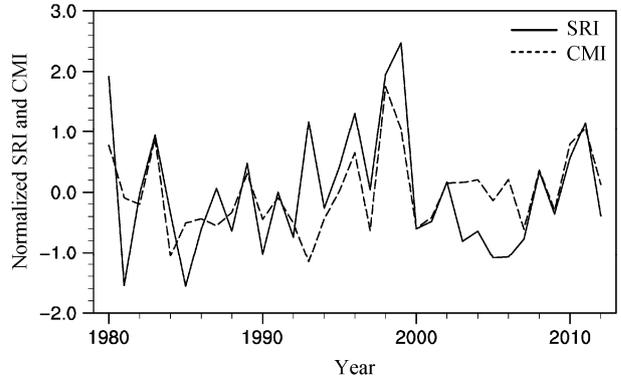


图4 1980~2012年长江流域夏季降水指数SRI与一致模指数CMI的标准化时间序列

Fig. 4 Normalized time series of the summer rainfall index (SRI) and consistent mode index (CMI) over Yangtze River valley

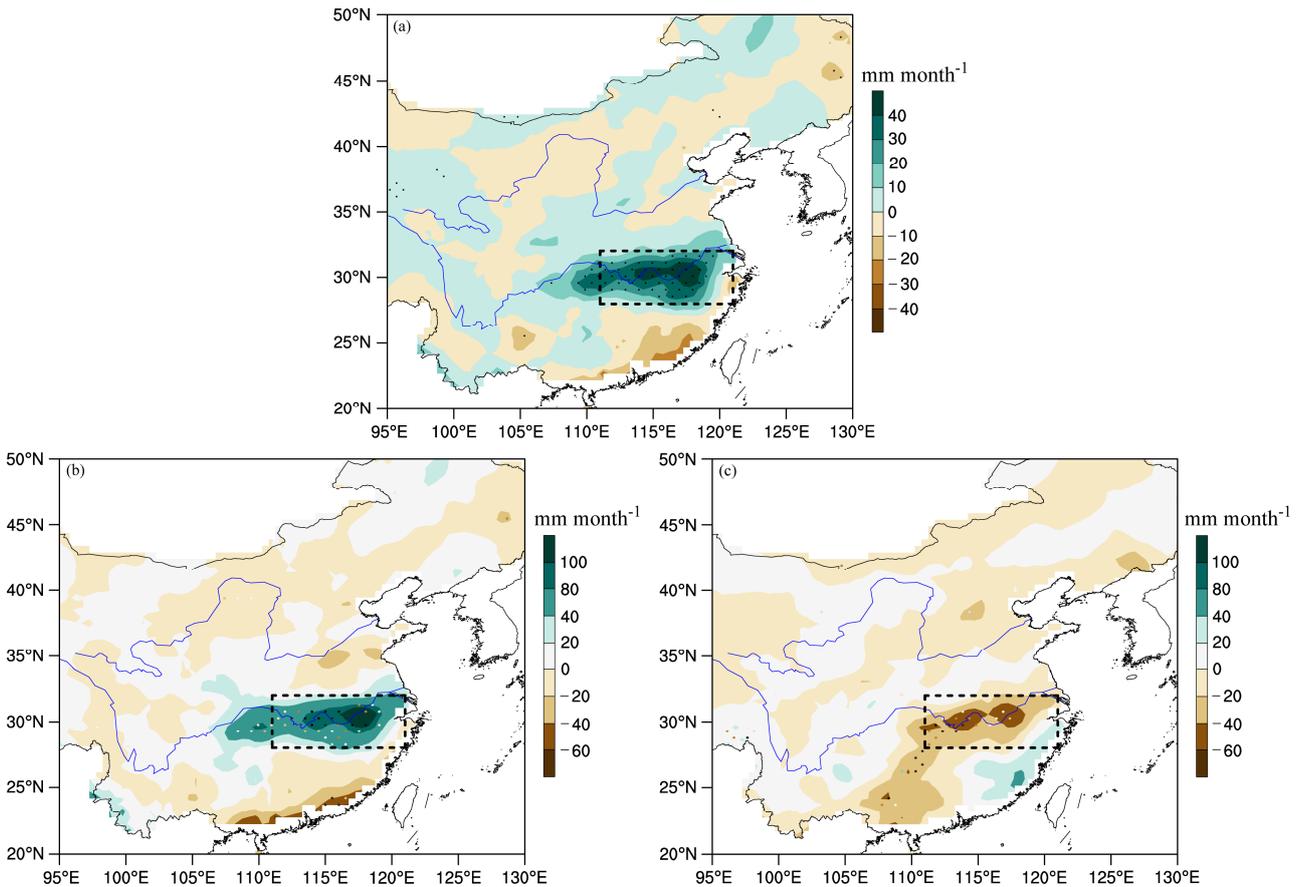


图5 (a)一致模指数与中国160站降水量回归分布。一致模指数 (b) 高值年、(c) 低值年降水距平(单位:  $\text{mm month}^{-1}$ ) 合成场。虚线方框区域表示长江流域；打点区域超过90%信度检验

Fig. 5 (a) The regression (units:  $\text{mm month}^{-1}$ ) of CMI and summer rainfall at 160 stations in China. The composite distributions of precipitation anomalies (shaded, units:  $\text{mm month}^{-1}$ ) for (b) high CMI years and (c) low CMI years. The area shown in the box is the Yangtze River valley; areas above 90% confidence level are dotted

高值年低, 为  $60 \text{ mm month}^{-1}$ 。以上表明一致模指数对长江流域夏季降水有很好的指示性。

#### 4 海温一致模影响长江流域夏季降水可能的物理机制

中高纬地区夏季大气环流分布形式对我国夏季风降水量多寡及雨带位置有着重要的影响。图 6 为 1980~2012 年一致模指数与逐季节 500 hPa 位势高度场回归分布。在冬季 (图 6a), 澳大利亚周边海温异常暖, 激发周边位势高度场异常, 使得南北半球位势高度场呈现出遥相关。这一信号到春季 (图 6b) 和夏季 (图 6c) 虽然有所减弱, 但仍然存在。到夏季, 这一遥相关型, 使得西太副高强度偏强, 位置偏西偏南。在北半球 8 月, 热带对流强迫南北半球气压场遥相关, 这种遥相关有利于中国大陆  $30^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$  区域降水量增加 (Hines and Bromwich, 2002)。Liu et al. (2010) 研究指出澳大利亚东侧 500 hPa 位势高度场与西太平洋地区位势高度场存在遥相关, 印度洋海温异常延伸至南北半球热带和副热带地区, 可能是导致南北半球位势高度遥相关的原因。对低层 (850 hPa) 环流场分析发现, 从冬季到夏季 (图 6d-f), 赤道太平洋上空异常东风建立并加强, 而

在澳大利亚东西两侧洋面上, 分别有异常反气旋和气旋环流生成, 削弱了低层  $105^{\circ} \sim 130^{\circ}\text{E}$  之间的越赤道气流, 不利于副高北抬; 在夏季, 西太平洋上出现异常反气旋环流, 有利于东亚地区水汽输送。以上表明冬季澳大利亚东西两侧海温异常响应为长江流域夏季降水异常提供了异常的环流条件。澳大利亚周边海温异常, 使得澳大利亚东侧气压正异常, 西侧为弱的负异常, 激发南北半球位势高度场遥相关, 即在南半球极地地区有负的位势高度异常, 而在西太平洋有正的位势高度异常, 南北半球形成 “- + +” 型遥相关, 从而造成长江流域夏季降水异常。

为了进一步研究冬季海温一致模与长江流域夏季降水之间的联系, 我们根据一致模指数超过正 (负) 0.8 个标准差, 挑选出东西两侧海温异常暖 (冷) 年份 (见表 1)。从上面的分析知道, 冬季澳大利亚周边海温第一模态表现为全区海温的一致模 (图 3), 对于接下来的春季和夏季, 其海温分布又是怎样的? 图 7 为一致模指数高值年归类的 ENSO 年和非 ENSO 年澳大利亚东西两侧海温异常合成图。澳大利亚东西两侧海温从前冬到夏季, 呈现出明显的一致变暖形式, 表明澳大利亚东西两侧海温变化具有季节延续性, 这与周波涛 (2011) 的

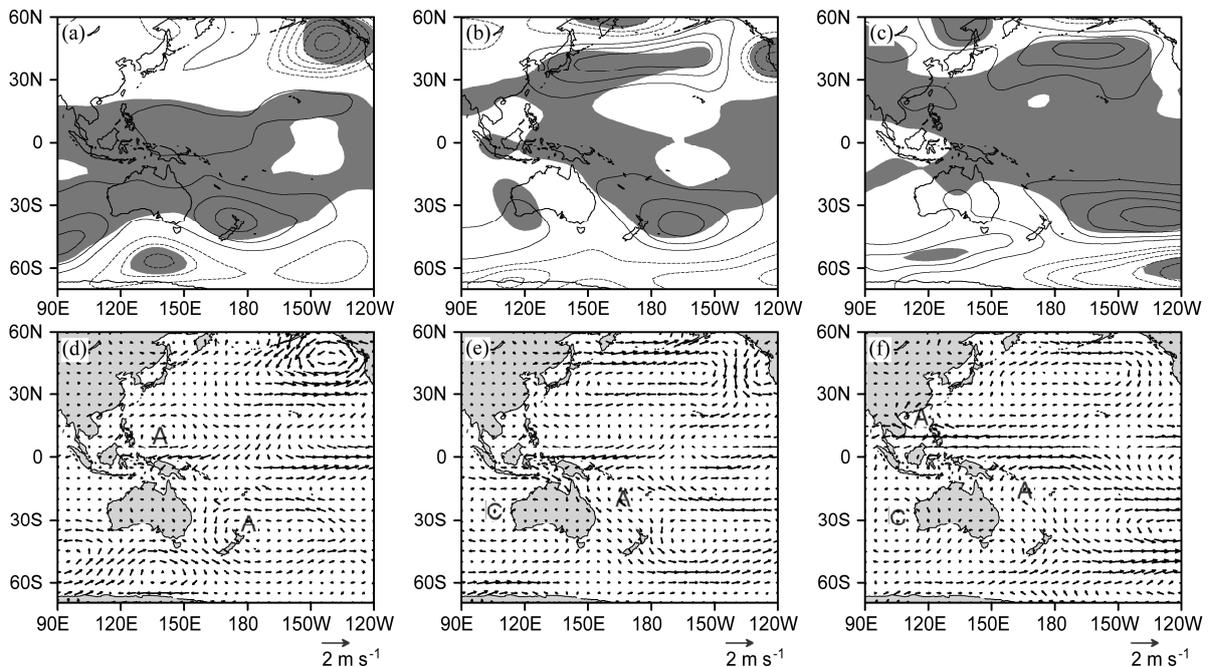


图 6 一致模指数与 500 hPa 位势高度场 (上, 单位: gpm)、850 hPa 风场 (下, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 回归分布: (a, d) 冬季, (b, e) 春季, (c, f) 夏季。图 a-c 的阴影区表示超过 90% 信度检验

Fig. 6 Regressions between CMI and 500-hPa geopotential height (top panels, units: gpm), 850-hPa wind (bottom panels, units:  $\text{m s}^{-1}$ ): (a, d) Winter, (b, e) spring, (c, f) summer. Areas in Figs. a-c above 90% confidence level are shaded

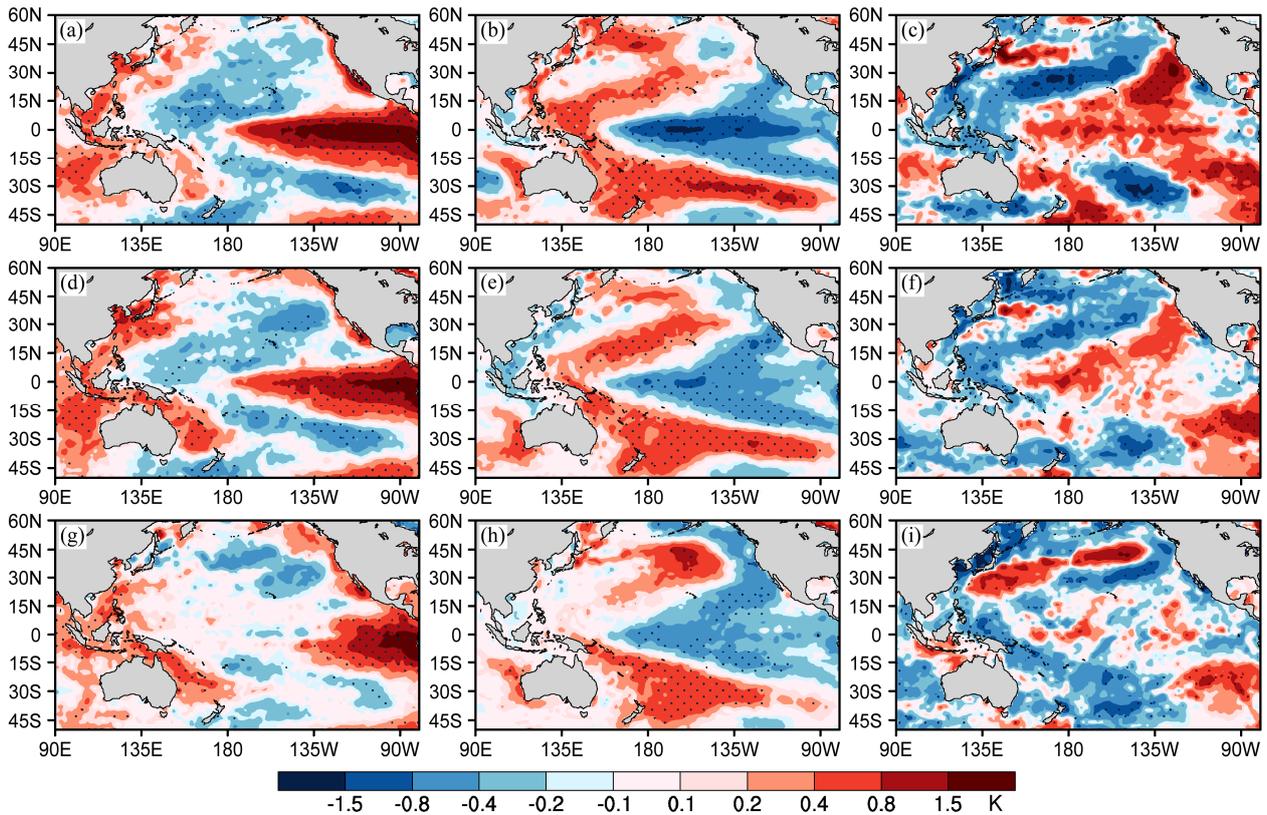


图7 一致模指数高值年对应的 El Niño 事件 (左列)、La Niña 事件 (中列)、非 ENSO 年 (右列) 海表温度距平 (单位: K) 分布: (a)、(b)、(c) 冬季; (d)、(e)、(f) 春季; (g)、(h)、(i) 夏季。打点区域通过 90% 信度检验

Fig. 7 Composite fields of SSTA (units: K) around Austria for the El Niño events (left), La Niña events (middle), and Non-ENSO events (right) corresponding to high CMI years: (a), (b), (c) The prior-winter; (d), (e), (f) spring; (g), (h), (i) summer. Areas above 90% confidence level are dotted

研究澳大利亚东侧海温信号有自身持续性的结论类似。一致模指数低值年 (图8), 这种现象没有一致模指数高值年明显, 但一定程度上反映了澳大利亚东西两侧海温的季节延续性。并且澳大利亚东西两侧海温异常暖 (冷) 年, 从热带到中国南海地区海温呈现出变暖 (冷) 的趋势, 这种海温分布形式, 削弱 (增强) 了亚洲大陆与周边海域之间的温差, 从而使东亚夏季风减弱 (增强)。而弱 (强) 东亚夏季风使得夏季水汽输送偏南 (偏北), 进而造成我国夏季雨带偏南 (偏北) (施能等, 1996)。除此之外, 不难发现, 在一致模指数高 (低) 值年, 无论是 El Niño 年还是 La Niña 年, 澳大利亚东西两侧海温都表现为一致变暖 (冷) 的分布形式。从一致模指数高低值年海温距平合成结果看, 无论是 ENSO 年还是非 ENSO 年, 均能反映澳大利亚东西两侧海温一致模的存在。对 850 hPa 环流场季节演变分析 (图略) 发现, 其结果与一致模回归分析结论类似。综上所述可以看出, 一致模通过激发南北半球位势高度

场遥相关, 减弱越赤道气流, 进而影响我国长江流域夏季降水, 这一机理是不同于 ENSO 作用的, 与黄荣辉 (1990) 结果不一致, 因此澳大利亚周边海温一致模可能是独立于 ENSO 事件的局地现象。

表 1 海表温度异常暖年 (CMI 高值年) 和异常冷 (CMI 低值年) 所对应的 ENSO 事件。粗字体代表本文根据一致模指数选取的长江流域夏季降水异常年

Table 1 ENSO events corresponding to sea surface temperature anomalies (SSTA) years based on CMI. Bold means summer precipitation anomalies years in the Yangtze River valley according to CMI

	El Niño 年		La Niña 年		非 ENSO 年
	年份	强度	年份	强度	
海温异常暖	1982/ <b>1983</b>	强	1995/ <b>1996</b>	弱	<b>1979/1980</b>
	1997/ <b>1998</b>	强	1998/ <b>1999</b>	中	
	2009/ <b>2010</b>	中	2010/ <b>2011</b>	强	
海温异常冷	1986/ <b>1987</b>	中	1983/ <b>1984</b>	弱	<b>1996/1997</b>
	1991/ <b>1992</b>	中	1984/ <b>1985</b>	中	
	2006/ <b>2007</b>	弱	1999/ <b>2000</b>	强	

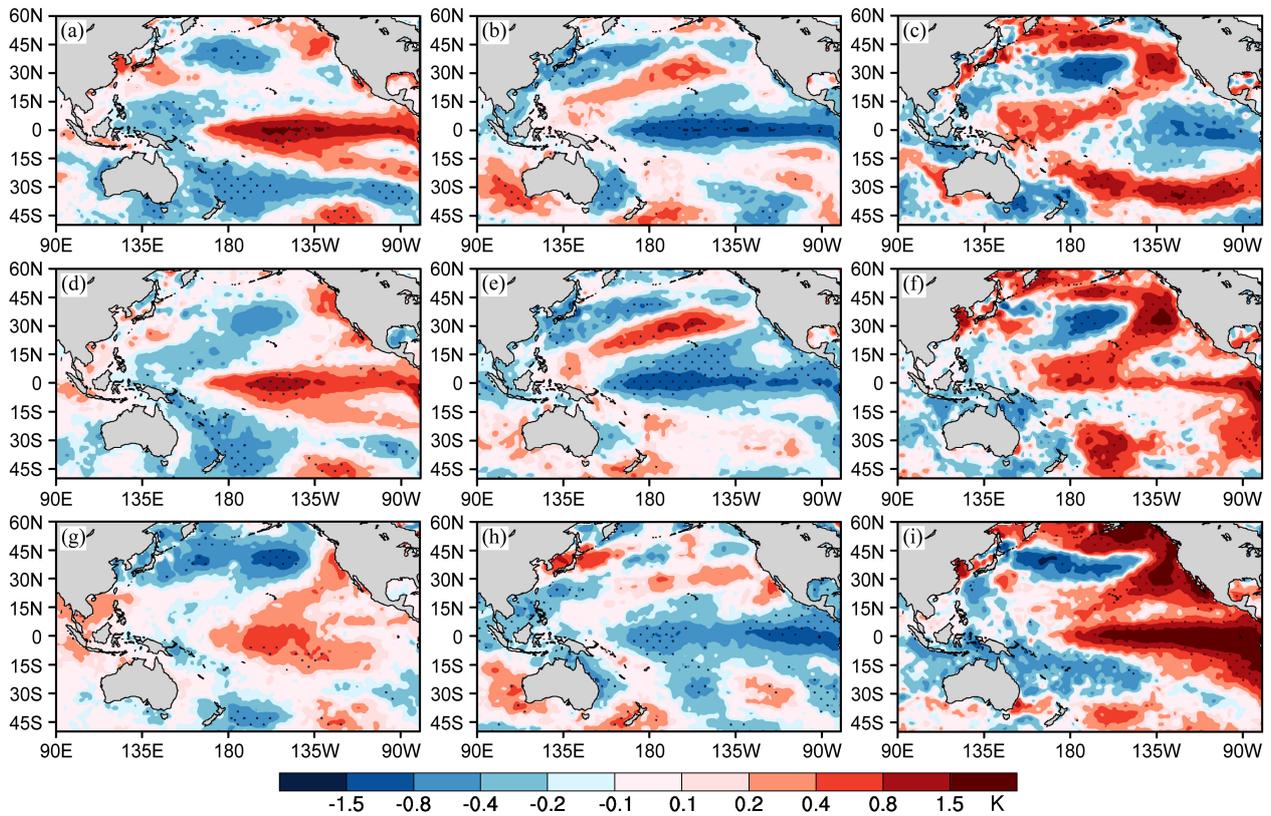


图 8 同图 7, 但为一致模指数低值年  
Fig. 8 As in Fig.7, but for low CMI years

另外我们计算了东亚地区整层水汽通量 (图 9), 从一致模指数高值年 (图 9a) 整层水汽通量可以看到, 东西两侧海温异常暖年, 在西太平洋上有一异常反气旋性环流, 副高南侧的偏南气流水汽输送明显增强, 强水汽输送带由菲律宾群岛以东的洋面经南海北部北上, 与北支气流在我国长江流域汇合, 形成一支强劲的水汽输送带, 为长江流域提供了充沛的水汽来源, 有利于长江流域夏季降水异常偏多。而在一致模指数低值年 (图 9b) 整层水汽通量则呈现出弱的气旋性环流形式, 西太平洋输送到长江流域的水汽通量减少。从一致模指数高值年与低值年差值场 (图 9c) 上可见, 澳大利亚东西两侧海温异常暖年, 长江流域的水汽主要通过东南支水汽路径输送的, 水汽源主要来自于我国南海及以西的太平洋。

海温合成场表明, 从冬季到夏季, 东西两侧海温一直呈现出正(负)异常, 即东西两侧海温正(负)异常可一直持续到夏季, 具有季节延续性。这种较暖(冷)的下垫面, 促进(抑制)了夏季澳大利亚

到赤道地区气流辐合上升气流 (图 10a), 增强(减弱)了菲律宾群岛附近西太平洋地区的下沉运动, 进一步增强(抑制)长江流域上升气流, 即东西两侧海温异常暖年(冷年), 增强(减弱)了澳大利亚北部到赤道地区、菲律宾群岛和中国长江流域的“上升”——“下沉”——“上升”经向环流模式。上文指出, 当东西两侧海温异常暖时, 偏南气流为长江流域提供了充足的水汽, 而这种环流模式, 易于长江流域降水增加。

为了进一步验证以上的结论, 利用向外长波辐射 (OLR) 场, 探究澳大利亚东西侧海温异常年份热带地区对流变化 (图 10b), 发现在东西两侧海温异常暖年, OLR 在南北半球中低纬易形成“+ - -”的经向分布形式, 即一致模高值年, 澳大利亚北部到赤道地区海温偏暖, 有利于对流生成和发展, 而在菲律宾附近的西太平洋, 对流则受到抑制, 长江流域对流明显加强。夏季热带西太平洋通过影响副热带高压强度和位置, 影响东亚夏季风降水, 热带西太平洋对流活动强(弱)时, 西太副高位置偏北

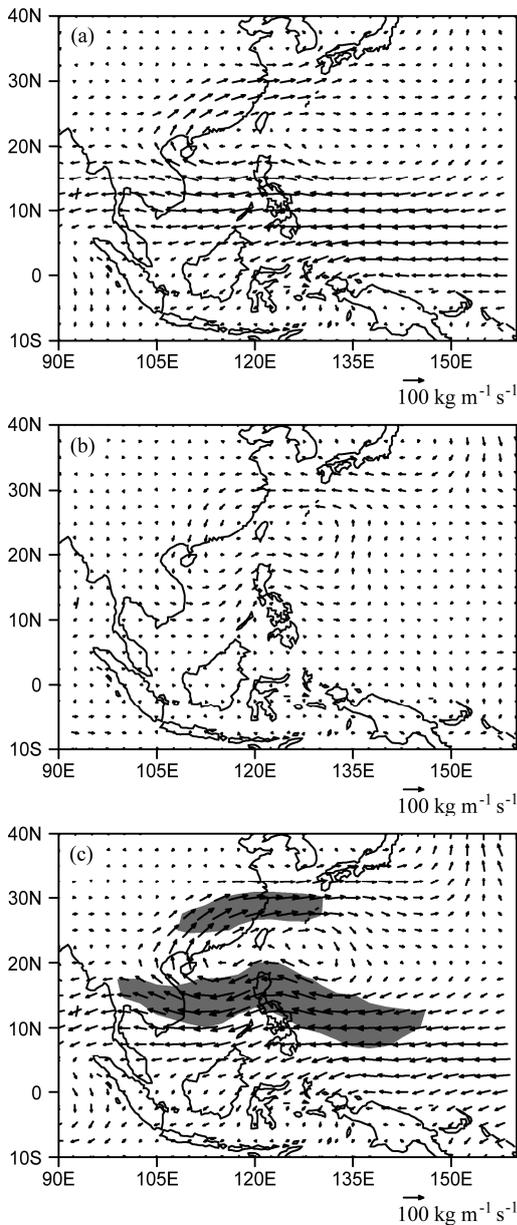


图9 一致模指数 (a) 高值年和 (b) 低值年水汽输送通量 (箭头, 单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 合成及 (c) 合成差值场, 阴影部分通过95%的信度检验

Fig. 9 Composite water vapor transport fluxes (arrows, units:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) in (a) high CMI years, (b) low CMI years, and (c) the differences of composite water vapor transport fluxes between high and low CMI years over the middle and lower reaches of the Yangtze River in summer. Areas in Fig. c above 95% confidence level are shaded

(南) 偏西 (东), 长江流域降水显著偏少 (多) (黄荣辉和孙凤英, 1994a, 1994b; 闵锦忠等, 2005)。

### 5 小结和讨论

本文利用 1980~2012 年 Hadley 中心的 HadISST

再分析海温资料、美国 NCEP/NCAR 月平均再分析资料和中国 160 站月平均降水资料, 研究了冬季澳大利亚周边海温与长江流域夏季降水关系。研究表明:

长江流域夏季降水与冬季澳大利亚东西两侧海表温度有显著正相关关系。运用 EOF 分析发现, 澳大利亚周边海温主模态表现为全区一致模形式, 并根据海温一致模形式定义了表征长江流域夏季降水的一致模指数 (CMI)。该指数在一定程度上反映了长江流域夏季旱涝状况, 即当澳大利亚东西两侧海温异常偏暖 (冷), 长江流域夏季降水量异常偏多 (少)。用 Niño3.4 指数剔除海温场中的 ENSO 信号后做 EOF 分析和海温场的合成分析表明, 澳大利亚周边海温一致模可能是独立于 ENSO 事件的局地现象。

根据一致模指数高低值年海温场合成分析表明, 澳大利亚周边海温一致模具有季节持续性, 其异常可以从冬季一直持续到夏季。通过海温场合成也能看出澳大利亚周边海温一致模是不随 ENSO 事件位相改变而变化的, 再次说明, 海温一致模可能是独立于 ENSO 位相的分布形式。澳大利亚东西两侧海温与长江流域夏季降水具有同位相变化: 一方面由于东西两侧海温异常能够激发南北半球高度场遥相关, 使得夏季西太平洋副高强度和位置发生显著变化, 西北太平洋上空有异常反气旋环流, 副高南侧的偏南气流水汽输送变化异常, 导致输送到长江流域水汽通量异常; 另一方面, 一致模指数高 (低) 值年, 即澳大利亚东西两侧海温异常暖 (冷) 年, 导致澳大利亚北部到赤道一带对流加强 (减弱), 菲律宾附近对流受到抑制 (加强), 而长江流域对流旺盛 (削弱), 经向 OLR 场表现为 “- + -” 模式, 这种分布形式有利于长江流域夏季降水量异常偏多。

本文初步研究了澳大利亚周边冬季海温与长江流域夏季降水的关系, 发现冬季澳大利亚海温一致模对长江流域夏季降水有一定的预报意义, 并指出澳大利亚周边海温一致模可能是独立于 ENSO 事件的局地现象, 其对我国长江流域夏季降水的作用不同于 ENSO, 但 ENSO 事件与澳大利亚周边海温一致型对我国夏季降水是否存在共同作用, 还有待进一步探讨研究。由此可见影响长江流域夏季降水的因子众多, 作用机理复杂。关于冬季澳大利亚周边海温一致模对长江流域夏季降水影响机理还有

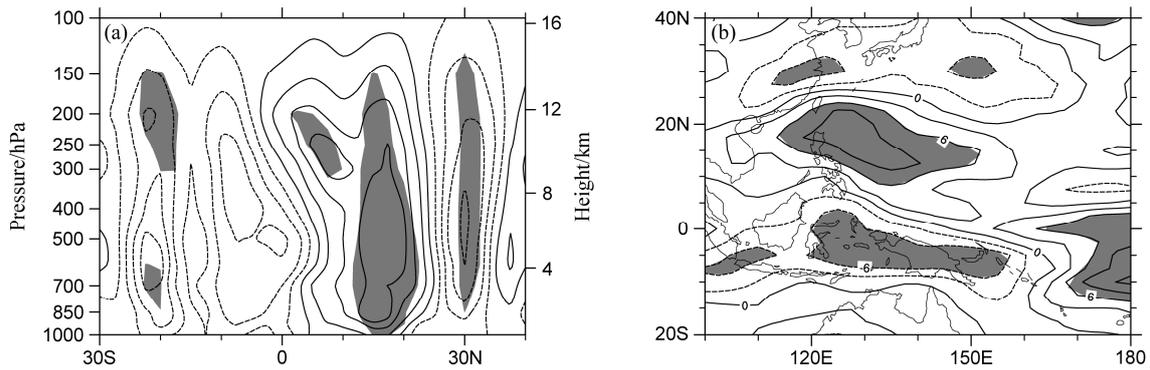


图 10 (a)  $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  平均的一致模指数高值年与低值年垂直速度差值场 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ )。阴影区表示通过 90% 信度检验, 负值 (虚线) 表示有上升运动, 正值 (实线) 表示有下沉运动。(b) 一致模指数高值年与低值年 OLR 差值场 (单位:  $\text{W m}^{-2}$ )。阴影区域表示绝对值大于  $6 \text{ W m}^{-2}$ , 负值 (虚线) 表示对流加强, 正值 (实线) 表示对流抑制

Fig. 10 (a) The composite differences of vertical wind (contours, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) between high and low CMI years averaged over  $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ . Areas above 90% confidence level are shaded; the negative values (dashed lines) indicate ascending motion and the positive values (solid lines) represent descending motion. (b) The composite differences of outgoing longwave radiation (units:  $\text{W m}^{-2}$ ) between high and low CMI years. Shaded areas represent absolute values greater than  $6 \text{ W m}^{-2}$ ; the negative values (dashed lines) indicate the convection is strengthened and the positive values (solid lines) mean the convection is suppressed

待进一步完善和模式验证。

致谢 非常感谢两位匿名审稿专家和编辑部提出的宝贵意见!

### 参考文献 (References)

- An S I. 2003. Conditional maximum covariance analysis and its application to the tropical Indian Ocean SST and surface wind stress anomalies [J]. *J. Climate*, 16 (17): 2932–2938, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2932:CMCAAI>2.0.CO;2.
- 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.
- 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.
- 高辉, 王永光. 2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究 [J]. *气象学报*, 65 (1): 131–137.
- Gao Hui, Wang Yongguang. 2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2007, 65 (1): 131–137, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.01.013.
- 郭玲, 何金海, 祝从文. 2012. 影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估 [J]. *大气科学*, 36 (2): 337–349.
- Guo Ling, He Jinhai, Zhu Congwen. 2012. Evaluations of prior potential predictors for the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 337–349, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11060.
- Hines K M, Bromwich D H. 2002. A pole to pole west Pacific atmospheric teleconnection during August [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D18): 4359, doi:10.1029/2001JD001335.
- 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. *大气科学*, 14 (1): 108–117.
- Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 14 (1): 108–117, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1990.01.14.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994a. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. *大气科学*, 18 (2): 141–151.
- Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994a. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western Pacific warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 18 (2): 141–151, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.02.02.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994b. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响 [J]. *大气科学*, 18 (4): 456–465.
- Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994b. Impact of the convective activities over the western tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 18 (4): 456–465, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.04.10.
- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific for the subtropical high over East Asia [C]//Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China, 40–45.
- 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.
- 李琰, 王亚飞, 魏东. 2007. 前期热带太平洋、印度洋海温异常对长江流域及以南地区 6 月降水的影响 [J]. 气象学报, 65 (3): 393–405. Li Yan, Wang Yafei, Wei Dong. 2007. Effects of anomalous SST in tropical Indian Ocean and Pacific Ocean on next June rainfall over the Yangtze River basin and area south of the basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (3): 393–405, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.03.008.
- Liu G, Ji L R, Sun S Q, et al. 2010. An inter-hemispheric teleconnection and a possible mechanism for its formation [J]. Adv. Atmos. Sci., 27 (3): 629–638, doi:10.1007/s00376-009-8172-x.
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 大气科学, 32 (2): 231–241. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2008. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 231–241, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.04.
- 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因 [J]. 大气科学, 38 (4): 782–794. Lü Junmei, Zhu Congwen, Ju Jianhua, et al. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 years and its possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 782–794, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227.
- 南素兰, 李建平. 2005. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系: I 基本事实 [J]. 气象学报, 63 (6): 837–846. Nan Sulan, Li Jianping. 2005. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. Part I: Basic facts [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (3): 837–846, doi:10.11676/qxxb2005.080.
- 闵锦忠, 李春, 吴芑. 2005. 夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系的研究 [J]. 大气科学, 29 (6): 947–954. Min Jinzhong, Li Chun, Wu Peng. 2005. A study of the relationship between summer tropical convection over the Western Pacific and the rainfall in the middle–lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 947–954, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.10.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 65 (3): 373–390.
- 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 (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 孙丹, 薛峰, 周天军. 2013. 不同年代际背景下南半球环流变化对中国夏季降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 51–62. Sun Dan, Xue Feng, Zhou Tianjun. 2013. Influence of Southern Hemisphere circulation on summer rainfall in China under various decadal backgrounds [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 51–62, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11007.
- Wang Bin, Yang Jing, Zhou Tianjun, et al. 2008. Interdecadal changes in the major modes of Asian–Australian monsoon variability: Strengthening relationship with ENSO since the late 1970s [J]. J. Climate, 21 (8): 1771–1789, doi:10.1175/2007JCLI1981.1.
- 王庆元, 李琰, 张楠, 等. 2013. 前期热带海温分布型对 6 月西北太平洋异常反气旋环流的影响 [J]. 热带气象学报, 29 (5): 874–880. Wang Qingyuan, Li Yan, Zhang Nan, et al. 2013. Possible impacts of the tropical ocean SST anomaly on the Northwest Pacific analysis anticyclone in June [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (5): 874–880, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.05.018.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 879–888, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11176.
- Xue F, Jiang D P, Lang X M, et al. 2003. Influence of the Mascarene high and Australian high on the summer monsoon in East Asia: Ensemble simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (5): 799–809, doi:10.1007/BF02915405.
- 薛峰, 王会军, 何金海. 2003. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响 [J]. 科学通报, 48 (3): 287–291.
- Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (5): 492–497, doi:10.1007/BF03183258.
- 于勇, 牛生杰, 刘海文, 等. 2009. 华北盛夏降水年代际变化与南半球环流异常的关系 [J]. 大气科学学报, 32 (5): 661–666. Yu Yong, Niu Shengjie, Liu Haiwen, et al. 2009. Anomaly patterns of Southern Hemispheric atmospheric circulation associated with interdecadal variability of summer precipitation in North China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 661–666, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.05.009.
- 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.
- 郑菲, 李建平, 刘婷. 2014. 南半球环状模气候影响的若干研究进展 [J]. 气象学报, 72 (5): 926–939. Zheng Fei, Li Jianping, Liu Ting. 2014. Some advances in studies of the climatic impacts of the Southern Hemisphere annular mode [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72 (5): 926–939, doi:10.11676/qxxb2014.074.
- 周波涛. 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制 [J]. 科学通报, 56 (16): 1301–1307. Zhou Botao. 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism [J]. Chinese Science Bulletin, 56 (17): 1821–1827, doi:10.1007/s11434-011-4497-9.