

顾薇, 李维京, 陈丽娟, 等. 2012. 我国秋季降水的年际变化及与热带太平洋海温异常分布的关系 [J]. 气候与环境研究, 17 (4): 467–480, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10164. Gu Wei, Li Weijing, Chen Lijuan, et al. 2012. Interannual variations of autumn precipitation in China and their relations to the distribution of tropical Pacific sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 467–480.

我国秋季降水的年际变化及与热带太平洋海温异常分布的关系

顾薇 李维京 陈丽娟 贾小龙

国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 利用我国 160 个站点 58 年 (1951~2008 年) 的降水资料、NCEP/NCAR 再分析环流资料和 Hadley 海表温度资料, 对我国秋季降水年际变化的特征和可能成因进行了分析。结果显示, 秋季降水前两模态分别反映长江流域及以南地区和长江以北的江淮、黄淮、华北、四川盆地北部至河套等地降水的变化, 两降水模态的变化都以年际尺度为主, 年代际变化特征不明显。就环流形势而言, 第一模态的年际变化主要与西太平洋副热带高压的强度及相应的对流层低层菲律宾群岛附近的异常气旋/反气旋联系紧密, 第二模态的年际变化则可能受到副热带高压的南北位置和相应的日本岛附近的异常气旋/反气旋的影响。同时, 两模态及相应的异常环流还分别与热带东印度洋和热带西太平洋附近的异常垂直运动关系密切, 热带地区的异常垂直运动可能通过经圈方向的异常环流影响到东亚地区。此外, 两降水模态不仅与热带地区的异常环流关系密切, 而且与热带海温异常也存在紧密的联系。与两模态相关联的热带太平洋海温异常显示出不同的分布特征, 当热带东太平洋偏暖/冷, 西太平洋偏冷/暖时, 长江以南地区降水偏多/少。而当热带东太平洋和中太平洋一致偏暖/冷时, 长江以北地区降水易偏少/多。两降水模态与热带海温及热带地区异常环流之间的密切关系显示热带太平洋海温异常的不同分布可能通过激发不同的热带地区异常垂直环流形势而对降水产生影响。

关键词 秋季降水 西太平洋副热带高压 热带垂直环流 热带太平洋海温异常

文章编号 1006-9585 (2012) 04-0467-14 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10164

Interannual Variations of Autumn Precipitation in China and Their Relations to the Distribution of Tropical Pacific Sea Surface Temperature

GU Wei, LI Weijing, CHEN Lijuan, and JIA Xiaolong

Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The interannual variations of the autumn precipitation in China and their possible causes are analyzed, using the China precipitation data of 160 stations from 1951 to 2008, the NCEP/NCAR reanalysis data, and the sea surface temperature data from the Hadley Center. EOF analysis of the autumn precipitation shows that the first EOF mode mainly reflects the precipitation south of the Yangtze River and the second EOF mode depicts the variation of the precipitation north of the Yangtze River. Both of the two principal components (PC) are characterized with distinct interannual variations, and do not exhibit obvious interdecadal characteristics. Analysis of the circulation situation shows that the first PC is mainly related to the strength of the western Pacific subtropical high and the corresponding anomalous cyclone/anti-cyclone over the Philippines. The second PC is closely connected to the northward/southward

收稿日期 2010-05-06 收到, 2012-03-20 收到修定稿

资助项目 科技部科技支撑项目 2009BAC51B05、2007BAC29B04, 公益性行业科研专项 GYHY200906015、GYHY201006038

作者简介 顾薇, 女, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事短期气候预测相关研究。E-mail: guwei@cma.gov.cn

movement of the western Pacific subtropical high and the anomalous cyclone/anti-cyclone near Japan. Meanwhile, the first and the second PC are also closely related to the anomalous tropical vertical motion near the east Indian Ocean and the western Pacific, respectively. And the anomalous tropical vertical motion may exert an influence on East Asia circulation through the anomalous meridional circulation. Further analysis reveals that besides the tropical circulation, the two PCs are also closely related to the tropical SST anomaly. The first PC is positively correlated to the east tropical Pacific SST anomaly and negatively correlated to the tropical western Pacific, and the second PC is positively related to both the middle and the tropical eastern Pacific. It is therefore indicated that the different distribution of the tropical Pacific SST anomaly may cause the variation of different precipitation mode through different anomalous tropical circulation.

Key words autumn precipitation, western Pacific subtropical high, tropical circulation, tropical Pacific SST anomaly

1 引言

关于我国降水的变化规律及成因,以往针对冬、夏两个季节研究的比较多(Weng et al., 1999; 张庆云等, 2003; 陈文等, 2006; 王林和冯娟, 2011),而对春、秋两季,尤其是秋季的旱涝特征和成因则研究的相对较少。事实上,秋季是东亚大气环流由夏季型向冬季型转换的过渡季节,我国很多地区仍会发生各种旱涝灾害。由于秋季处于秋粮生长、收割、仓储,以及冬小麦播种的关键阶段,因此秋季的旱涝灾害不仅会影响人们的日常生活,而且可能会给农业生产造成严重损失。例如,2004年9月四川、重庆等地遭受局地性特大暴雨洪涝灾害,直接经济损失达 55×10^8 多元;同年9~11月华南和长江中下游地区发生大范围严重秋旱,直接经济损失超 60×10^8 元(徐良炎和姜允迪, 2005)。2002年甘肃出现了近50年罕见的秋旱,长时间的高温少雨严重影响秋季作物的产量,并导致水资源严重紧缺(刘德祥等, 2003)。2009年秋至2010年春,我国西南地区发生了近50年来最严重的干旱,影响到约 2500×10^4 人的生活用水,造成西南多地的粮食歉收(Barriopedro et al., 2012; 黄荣辉等, 2012),并造成我国当年的水电发电量减少约20%(Barriopedro et al., 2012)。可见,我国秋季的旱涝对于人民生活乃至国家的粮食安全都具有十分重要的意义。因此,非常有必要对我国秋季降水的变化特征和变化规律进行深入的研究。

就空间分布而言,无论是从秋季降水量还是秋季降水占全年降水的百分比来看,华西地区(包括四川、贵州、云南、甘肃和陕西等地)都是大值中心所在之处,这说明该地区是全国秋季降水的重点区域,因此以往很多关于秋季降水的工作都是针

对“华西秋雨”而展开的(何敏, 1984; 谌芸和施能, 2003a)。此外,除华西地区,华南、长江中下游等地的秋季降水量也比较大,占全年降水的15%左右,“秋雨”现象也较为明显(谌芸和施能, 2003a; Niu and Li, 2008; Chen et al., 2009)。针对华西、华南和长江中下游等几个秋季降水的重点区域,许多学者分析了影响降水的大气环流形势,并指出西太平洋副热带高压、贝加尔湖槽、印缅槽和欧亚大陆冷高压等是影响这些地区秋季降水的主要环流系统(何敏, 1984; 谌芸和施能, 2003b; 白虎志和董文杰, 2004; Niu and Li, 2008)。在影响秋季降水的外强迫因子方面,以往研究考虑最多的是ENSO。研究显示,ENSO作为秋季降水的重要影响因子,它对秋季降水的影响甚至比对夏季降水的影响更加显著:通常在El Niño年,我国秋季降水容易出现“南多北少”的异常分布,而在La Niña年,秋季降水则容易出现“南少北多”的异常分布特征(龚道溢和王绍武, 1998; 谌芸和施能, 2003b)。在相关的机制方面,Zhang (1999)通过研究指出,在El Niño盛期的秋季,西太平洋海洋性大陆附近的对流减弱会造成对流冷却异常,从而激发出大气Rossby波响应,在西北太平洋产生反气旋异常,使得东亚沿岸对流层低层出现偏南风异常,导致秋季我国南方降水显著偏多。除ENSO外,印度洋偶极子、西太平洋、北太平洋、南印度洋海温异常,以及高原地面热源等也都可能对我国秋季降水有显著影响(陈忠明等, 2001; 刘宣飞和袁慧珍, 2006; Niu and Li, 2008)。

通过以上回顾可以看到,我国学者已对秋季降水进行了比较多的分析,得到了许多有意义的结论。然而,无论在特征分析还是在成因分析方面,之前的研究主要是针对某一特定区域(如华西、华南)来进行的,相对而言,针对我国整体秋季降水

模态的研究还比较少。事实上,降水的主要模态通常能够反映发生频率较高的某种降水异常空间分布型,对主要模态的分析可以更好地了解秋季降水的时、空间变化特征;同时,由于不同模态的变化往往由不同影响因子所导致,因而针对降水模态的分析也更有利于寻找影响降水的因子。因此,本文将主要针对秋季降水年际变化的前两个模态,对其变化特征及可能的影响因子进行分析。

2 数据和方法

本文所用的降水数据为中国气象局公布的我国 160 站逐月降水资料(1951~2008 年)。大气环流资料为美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的第一版的全球逐月再分析数据(Kalnay et al., 1996),资料时段为 1948~2008 年。该套资料水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度),包括多种要素,本文主要用到了 500 hPa 位势高度场、各层水平风场以及垂直速度场。海温数据采用了英国哈得来中心(Hadley Center)提供的逐月海表温度资料(Rayner et al., 2003),该套资料时段为 1870~2008 年,水平分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)。

在分析秋季降水的主要模态时,我们采用了经验正交函数(EOF)分解的方法。由于 EOF 方法可以提取气象要素场中能够解释原始数据最大方差的空间型,因此在研究气象要素场主导的时空变化模态上非常有效。在研究与主要降水模态相关的环流和海温时,我们均采用一元线性回归的方法,并采用 t 检验来验证其显著性。在本文中,我们考虑

秋季(9~11 月)平均的状况,研究的时段为 1951~2008 年。

3 秋季降水的主要模态及其年际变化特征

就气候平均情况而言,在我国绝大多数地区,秋季降水比夏季明显减少。秋季平均的降水分布图(图 1a)显示,同夏季降水相类似,秋季降水也具有南多北少的分布特征,较为丰沛的降水主要出现在长江流域及以南地区,在这些地区秋季平均降水可达 200 mm 以上,降水大值中心出现在四川东部附近,平均可达到 300 mm 以上。与夏季降水不同的是,秋季最明显的降水出现在华西地区,从秋季降水占年降水的百分比图上可以看到(图 1b),华西大部分地区秋季降水占全年降水的比例都在 20%以上,尤其是陕西南部的关中平原附近比例最大,可达到 30%以上。

我们对秋季降水进行了 EOF 分解,所得第一模态(EOF1)、第二模态(EOF2)的解释方差分别为 20.1%和 10.2%,依据 North et al. (1982)的判别标准,这两个模态相对于其他模态都是可分的。EOF1(图 2a)在长江流域及其以南地区表现出一致变化的特征,其大值中心位于湖南东部和江西西部附近,通过显著性检验;其余地区的信号比较弱并且不显著,这说明 EOF1 主要描述了长江流域及其南地区降水全区一致的变化。从第一主分量(PC1)的时间演变(图 2b)可以看出,在整个时段内该模态的变化都以年际尺度为主,在 1980 年代以后则更加清楚的显示出准两年的变化特征。在 58 年中,

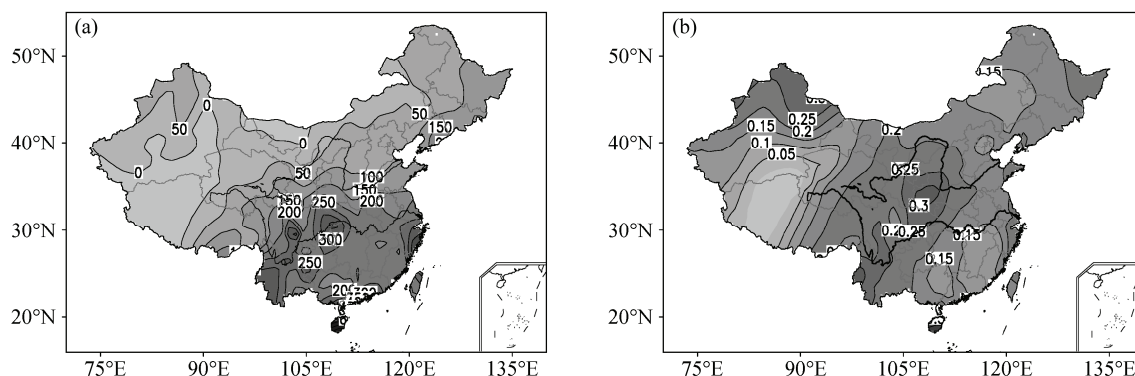


图 1 (a) 气候平均的秋季降水量(单位: mm)和 (b) 秋季降水量占全年降水量的百分比

Fig. 1 (a) The climatology of autumn precipitation (mm) and (b) the percentage of autumn precipitation

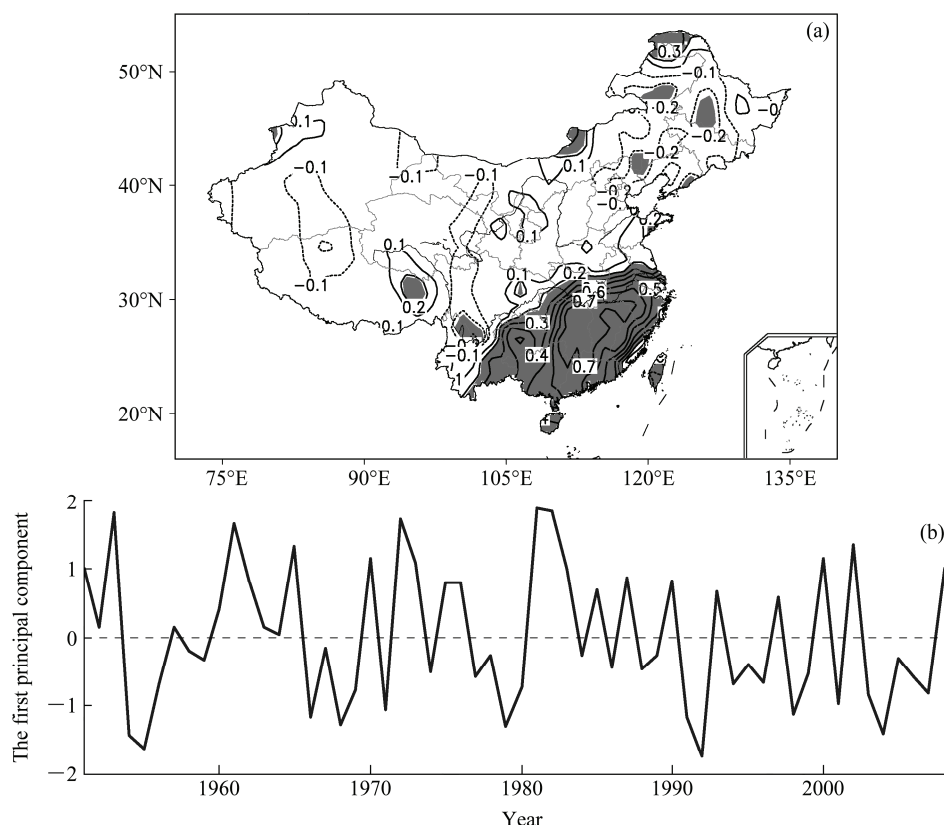


图2 我国秋季降水 EOF 分解的 (a) 第一主模态 (阴影区表示超过 90% 信度水平的区域) 和 (b) 第一主分量

Fig. 2 (a) The first leading EOF mode (the shadings indicate the areas exceeding the 90% confidence level) and (b) the first PC (principal component) of autumn precipitation

PC1 并没有表现出特别明显的年代际变化特征或长期变化趋势,这与夏季降水的变化(陈文等, 2006; 邓伟涛等, 2009)和冬季降水(王林和冯娟, 2011)的变化是不同的。PC1 的小波功率谱(图 4a)进一步显示, EOF1 在 1951~2008 年 58 年间都具有显著的年际变化特征, 显著的中心周期在 2~5 a 左右。除此以外, 在 1970 年代末期之前, 该分量还表现出显著的准 10 年的变化特征, 1970 年代末期以后, 这种准 10 a 变化则大大减弱。

秋季降水 EOF2 (图 3a) 主要反映长江以北地区降水的变化, 显著区域主要分布在长江以北的江淮、黄淮、华北、河套至四川盆地北部等地, 这包括了除云南、贵州以外华西的大部分地区; 在长江以南则表现为与上述地区反相变化的较弱的信号。第二主分量 (PC2) 的时间演变 (图 3b) 也表现出明显的年际变化特征; 此外, 从 1980 年代初期至今, PC2 显示出明显的上升趋势, 说明在这期间, 上述长江以北地区的秋季降水有减少的趋势。从 PC2 的小波功率谱 (图 4b) 则可以看

到, EOF2 的变化主要以 3~4 a 周期为显著特征, 在 1960 年代期间, 降水表现出显著的准 3 a 变化, 在 1970 年代初开始年际变率有所减弱、周期略有增大, 进入 1990 年代之后, 准 3 a 的年际变化信号又重新增强。

上述分析显示, 两降水模态所反映的显著区域涵盖了秋雨现象明显的华西、华南和长江中下游等地区, 说明这两个模态可以较全面的反映秋雨重点地区降水的变化。同时, 对于华西地区而言, EOF1 和 EOF2 分别反映华西地区南部和中北部的变化, 说明整个华西秋雨区降水的变化并不一致, 其南部和中北部地区降水的变化具有一定的独立性, 而针对两模态的分析有利于了解华西这两个区域降水变化的不同特征和机制。分析还显示, 秋季降水前两个主分量的年际变化十分明显, 都表现出显著的 2~5 a 的周期特征。此外, 两模态的变化还都显示出较为明显的年代际特征。PC1 在 1970 年代末期之前表现出显著的准 10 a 变化, 但在 1970 年代末期之后则明显减弱。PC2 年际

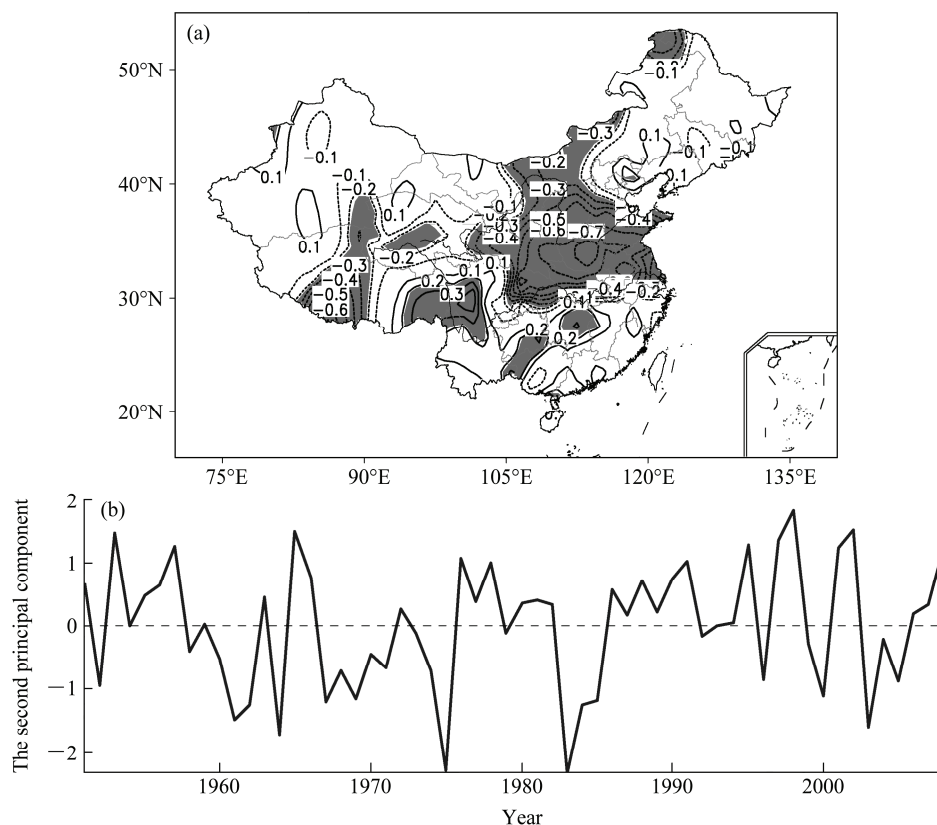


图3 我国秋季降水 EOF 分解的 (a) 第二主模态 (阴影区表示超过 90% 信度水平的区域) 和 (b) 第二主分量

Fig. 3 (a) The second leading EOF mode (the shadings indicate the areas exceeding the 90% confidence level) and (b) the second PC of autumn precipitation

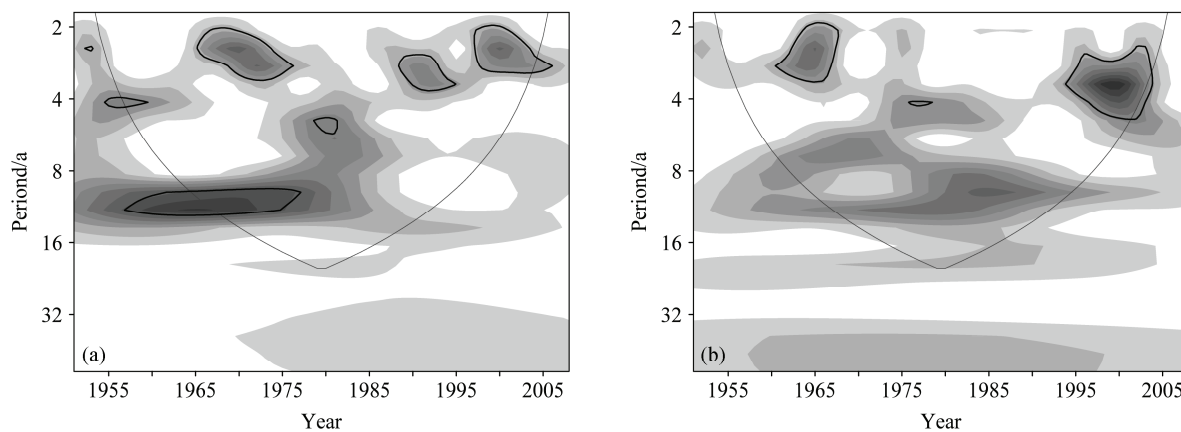


图4 我国秋季降水 (a) 第一主分量、(b) 第二主分量的小波功率谱。弧线外侧表示受边界效应影响较大的区域, 黑色实线内表示超过 90% 信度水平的区域

Fig. 4 The wavelet power spectrum of (a) the first and (b) the second PC. The thin black curve indicates the cone of influence where edge effect might distort the result, the thick black curve indicate the 90% confidence level

变化的周期特征也显示出明显的年代际特征, 在 1970 年代前后准 3 a 的年际振荡明显减弱、周期略有增大, 进入 1990 年代之后, 准 3 a 的年际变化信号又重新增强。接下来的分析我们主要针对降水年际尺度的变化, 对与其相对应的大气环流形势与海温异常进行分析。

4 与秋季降水两模态变化相联系的大气环流异常

从降水 EOF1 对应的环流异常可以看到, 当长江流域及以南地区降水偏多时, 东亚东部 500 hPa

高度场上出现南正北负的高度异常,其中北部的负高度中心分别位于日本北部的东亚沿岸和里海的东北部附近,尽管南部的正异常强度比北部的负异常明显偏弱,但在菲律宾以北地区的变化也较为显著(图 5a)。由于秋季西太平洋副热带高压(简称副高)的平均位置在 20°N 附近(图略),这种高

度异常的分布特征意味着副高偏强的形势。相应的, 850 hPa 水平风场回归场(图 5b)显示,在菲律宾以东地区存在一个显著的反气旋异常,受到该反气旋西部偏南风的影响,我国南方大部分地区出现西南风异常,这种形势有利于更多的水汽由南至北输送到南方地区,从而导致降水偏多,这一结论

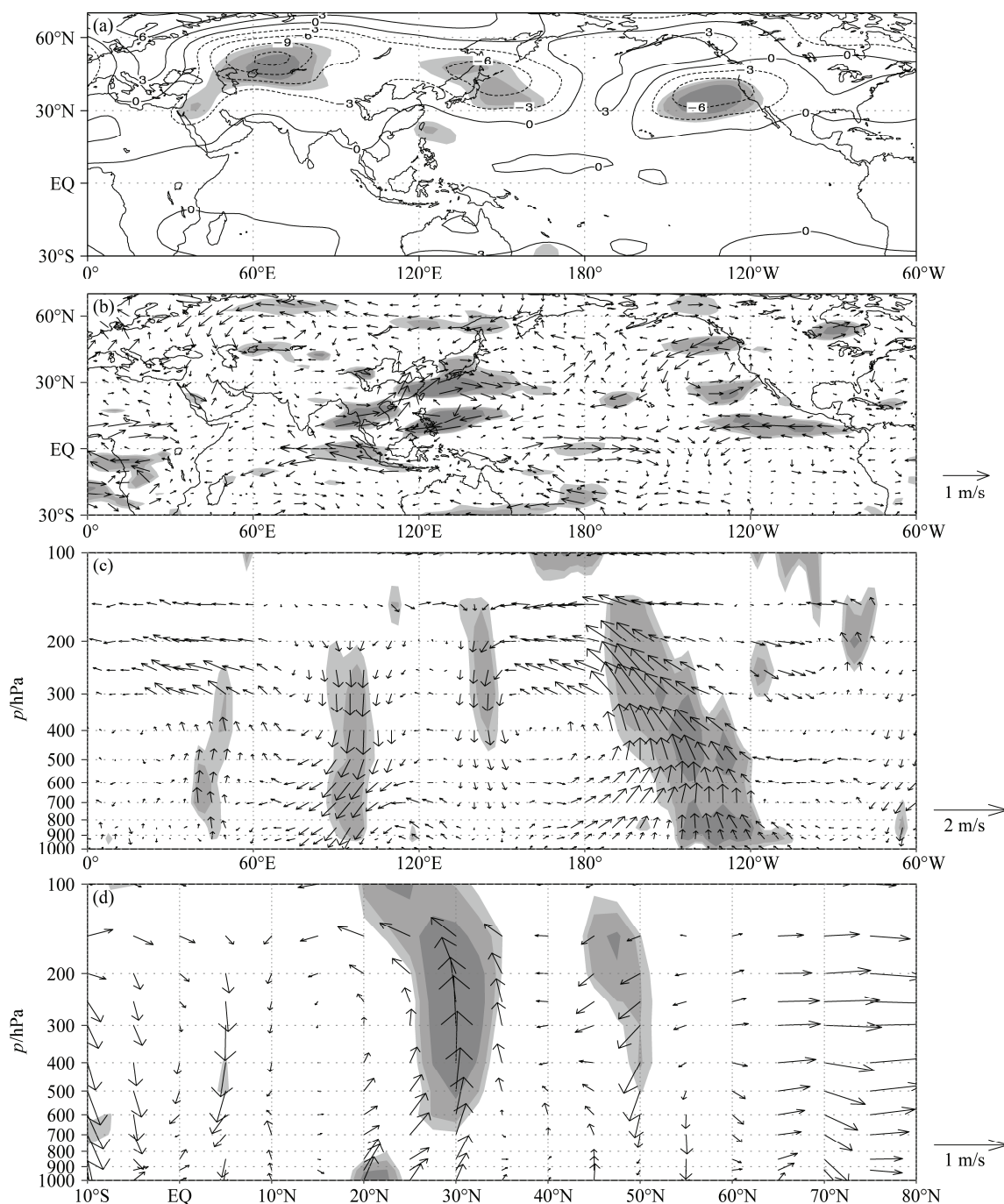


图 5 根据降水第一主分量回归的 (a) 500 hPa 高度场(单位: gpm)、(b) 850 hPa 风场分布和 (c) 10°S – 10°N 平均、(d) 90°E – 125°E 平均风场的垂直剖面。深、中、浅色阴影分别表示超过 99%、95% 和 90% 信度水平的区域

Fig.5 Regression of (a) 500-hPa height (gpm), (b) 850-hPa wind field, (c) zonal-vertical wind field averaged over 10°S – 10°N and (d) meridional-vertical wind field averaged over 90°E – 125°E on the first leading PC. The dark, middle, and light shadings indicate the 99%, 95%, and 90% confidence levels, respectively

与 Niu and Li (2008) 对秋季南方降水的分析结果是一致的。此外, 从 850 hPa 风场回归场 (图 5b) 还可以看到, 除了菲律宾附近的异常反气旋以外, 热带中太平洋和东太平洋地区也出现显著的纬向风异常, 说明 EOF1 的异常可能还与热带地区的异常环流有一定的联系。根据 PC1 回归的热带地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 平均纬向—垂直风场 (图 5c) 显示, Walker 环流出现明显的异常, 在热带太平洋和热带印度洋上空分别存在一个逆时针和一个顺时针方向的异常垂直环流圈, 两异常环流圈相应的下沉支分别出现在西太平洋和东印度洋附近, 异常下沉运动在 100°E 附近的最为显著, 因此我们选择 100°E 附近 $90^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 这一范围, 计算了这一区域平均的经向—垂直风场的回归情况。结果显示 (图 5d), 在经向上分布着一个与局地 Hadley 环流方向相反的异常垂直环流圈, 对应于热带地区的下沉气流, 在 30°N 附近出现异常上升运动, 相应的, 在对流层低层 30°N 以南出现偏南风异常, 从而有利于菲律宾附近异常反气旋的维持及南方降水的偏多。以上分析显示, 降水 EOF1 的变化受到副高的强度及菲律宾附近异常气旋/反气旋的直接影响, 而上述异常形势可能又与热带东印度洋至西太平洋附近的异常垂直运动以及经向上类似于 Hadley 环流的异常形势存在密切关系。

利用同样的方法对与降水 EOF2 相联系的环流形势进行分析可以发现, 当长江以北地区降水偏少时, 500 hPa 高度场在东亚东部 20°N 以南分布着显著的正高度异常, 以北的日本南部附近则出现一个显著的负异常高度中心 (图 6a)。这种“南正北负”的异常形势意味着副高位置的异常偏南。对应于北部的负异常高度中心, 在回归的 850 hPa 风场 (图 6b) 上, 日本岛附近出现一个气旋式异常环流, 在这个异常气旋的影响下, 我国北方中、东部大部分地区出现异常偏北风, 这种形势不利于南方暖湿气流的北上, 从而不利于北方地区降水的产生。从 850 hPa 风场 (图 6b) 上还可以看到, 热带中东太平洋地区也存在显著的异常西风, 说明 EOF2 的变化也可能与热带地区的异常环流存在着密切的关系。回归的热带地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 平均经度—高度风场 (图 6c) 显示, 在太平洋上空分布着一个显著的逆时针方向的异常垂直环流圈, 显著上升、下沉运动分别出现在东、西太平洋附近, 与第一模态相比这一环流圈更加偏东。此外, 与 EOF1 对应于东印度

洋附近的异常垂直运动不同, EOF2 的变化与印度洋地区异常环流的关系并不明显, 因此相对应的热带地区异常垂直运动的位置也明显偏东, 主要出现在西太平洋地区 ($110^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 附近。为了分析这种热带地区的异常垂直运动对东亚的影响, 我们选择东亚东岸附近的经度范围 ($110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$), 对这一范围内平均的经向环流情况进行分析。结果 (图 6d) 显示, 在经圈方向上热带到中纬度地区 $10^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 和 $15^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 范围内分别出现两个连续的异常垂直环流圈, 其中北部顺时针方向的异常环流圈有利于低层 $15^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间出现异常偏北风, 同时, $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 附近的异常下沉气流也有利于异常辐散形势的出现, 从而会对北方地区降水产生抑制作用。可见, 降水 EOF2 的异常变化主要受到副高南北位置以及低层日本岛附近异常气旋/反气旋的直接影响, 同时, 降水及上述异常环流又与热带西太平洋地区的异常垂直运动及异常经向环流存在密切的关系。

对环流形势的分析显示, 两模态都与西太平洋副高的异常及其相应的低层风场异常有密切的关系。EOF1 主要与副高的强度及菲律宾附近的反气旋/气旋相联系, 而 EOF2 则主要与副高的位置及日本岛附近的气旋/反气旋密切相关。此外, 两模态还显示出与热带地区异常环流的密切关系, EOF1 主要与热带东印度洋至西太平洋地区 (100°E 附近) 的异常垂直运动相联系, 并通过经向上类似于 Hadley 环流的异常与东亚地区环流的变化相联系。EOF2 则与热带西太平洋地区 (150°E 附近) 的异常垂直运动相联系, 该地区的异常垂直运动可能通过经圈方向上从热带到中纬度两个连续的异常环流圈对东亚地区的形势产生影响。这说明两降水模态及相应的关键环流系统都可能受到来自于热带地区异常环流的影响, 而热带地区异常环流往往与其下垫面的海温异常状况存在密切联系, 因此在下节中, 我们主要对两降水模态与热带地区海温异常之间的关系进行分析。

5 秋季降水两模态与海温之间的关系

图 7a-7d 分别显示了与降水 EOF1 对应的海温异常的季节演变情况。结果显示, 对应于降水 EOF1 的正位相, 即长江以南地区降水偏多的情况, 早在

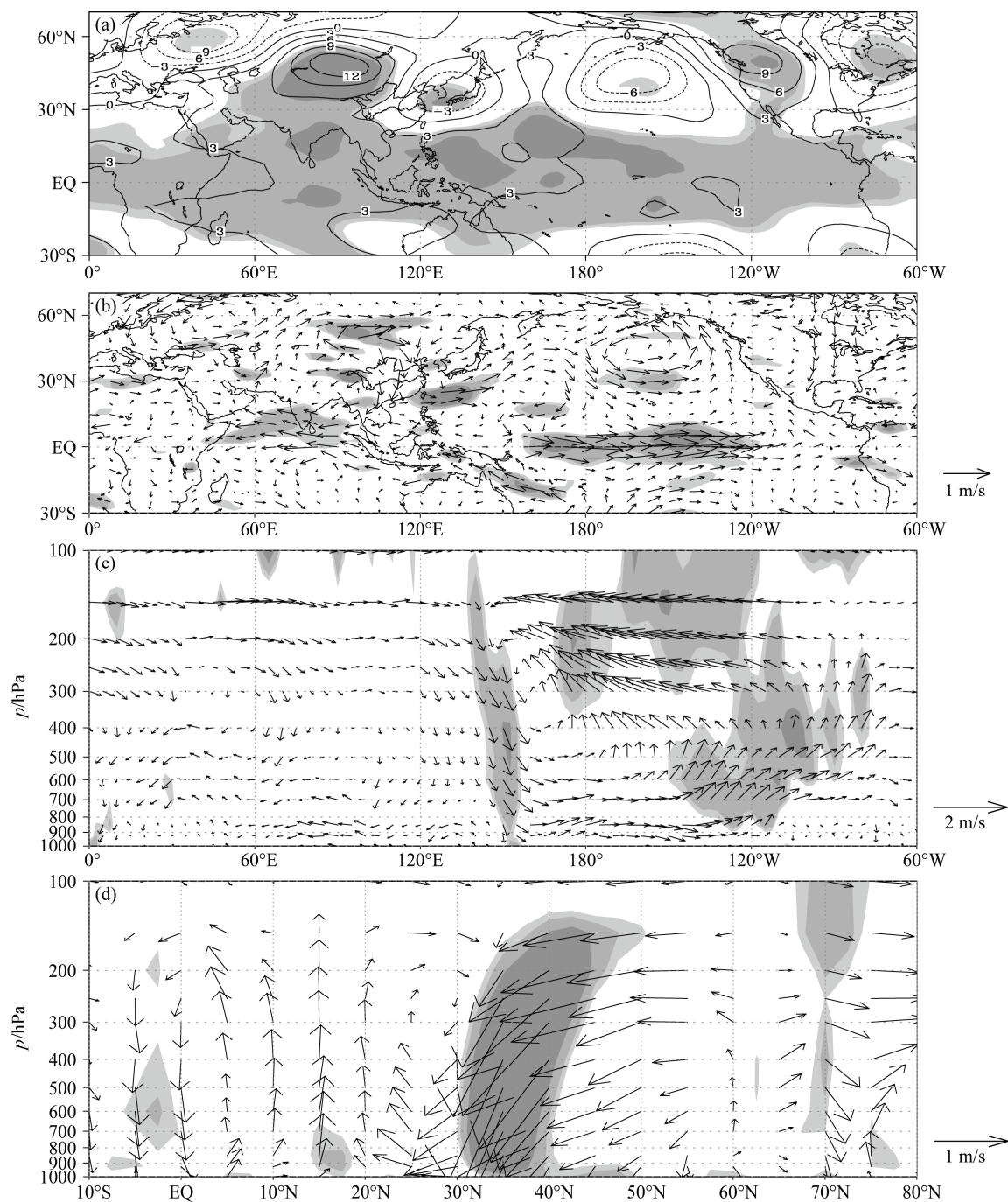


图6 根据降水第二主分量回归的 (a) 500 hPa 高度场 (单位: gpm)、(b) 850 hPa 风场、(c) 10°S~10°N 平均的纬向—垂直风场和 (d) 100°E~130°E 平均经向—垂直风场。深、中、浅色阴影分别表示超过 99%、95% 和 90% 信度水平的区域

Fig. 6 Regression of (a) 500-hPa height (gpm), (b) 850-hPa wind field, (c) zonal-vertical wind field averaged over 10°S–10°N, and (d) meridional-vertical wind field averaged over 90°E–125°E on the second leading PC. The dark, middle, and light shadings indicate the 99%, 95%, and 90% confidence levels, respectively

前期春季 (图 7a), 热带东太平洋就已出现显著的正海温异常, 正异常主要分布在 110°W 以东的热带地区。在随后的夏季 (图 7b), 热带东太平洋的显著正异常明显增强并向西扩展, 西伸至 150°W 附

近, 同时在热带西太平洋 (110°E~160°E) 附近则出现显著的海温负异常, 负异常的经向范围比正异常要大, 并呈西南—东北向一直延伸至中纬度地区。在秋季 (图 7c), 热带东太平洋地区的正异常

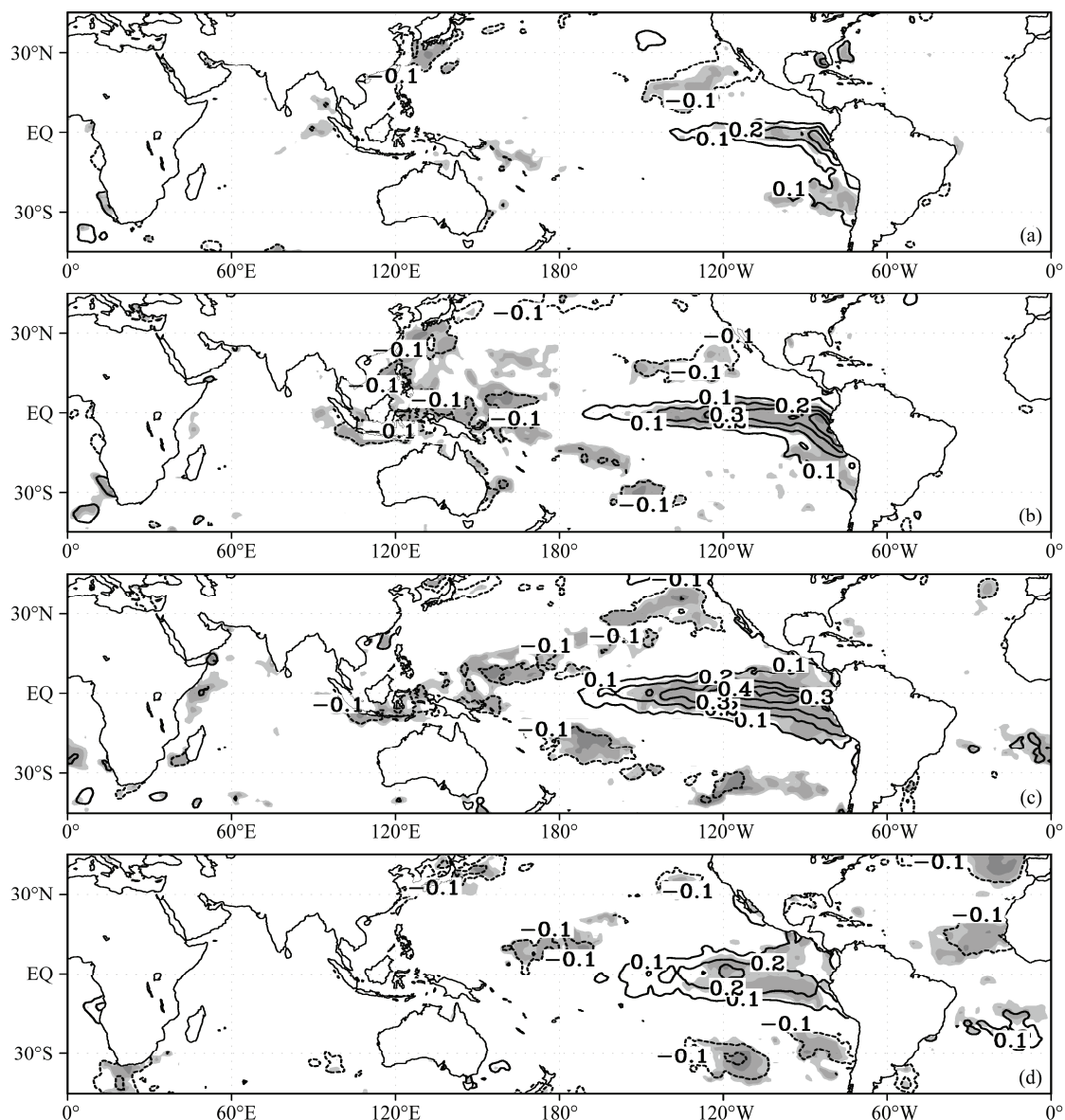


图7 根据秋季降水第一主分量回归的(a)春季、(b)夏季、(c)秋季和(d)冬季异常海温场(单位: $^{\circ}\text{C}$)。深、中、浅色阴影分别表示超过99%、95%和90%信度水平的区域

Fig.7 Regression of the (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter SST anomaly ($^{\circ}\text{C}$) on the first leading PC. The dark, middle, and light shadings indicate the 99%, 95%, and 90% confidence levels, respectively

继续增强, 经向范围也略有扩大, 但纬向范围基本没有变化, 仍然维持在 150°W 以东地区。与此同时, 虽然西太平洋附近仍然分布着负海温异常, 但其经向范围比夏季明显减小, 并分别向东北和东南方向延伸。在随后的冬季(图 7d), 热带东太平洋的正海温异常强度比秋季明显减弱并且范围也向东收缩, 西太平洋的显著负异常则基本消失。上述热带东、西太平洋海温异常从春到冬的演变显示出与 ENSO 的发展演变非常类似的特征(陈文, 2002;

黄荣辉等, 2003), 说明降水 EOF1 与 ENSO 之间存在密切关系。以前研究(Zhang, 1999)显示 El Niño 对秋季华南地区降水有显著影响, 本文的上述结论与已有研究结果是一致的。当热带太平洋呈东暖、西冷的海温异常分布时, 我国长江流域及以南地区秋季降水容易偏多。反之, 当热带太平洋呈现东冷、西暖的异常分布时, 长江流域及以南地区降水则容易偏少。

降水 EOF2 对应的海温异常主要也分布在热带

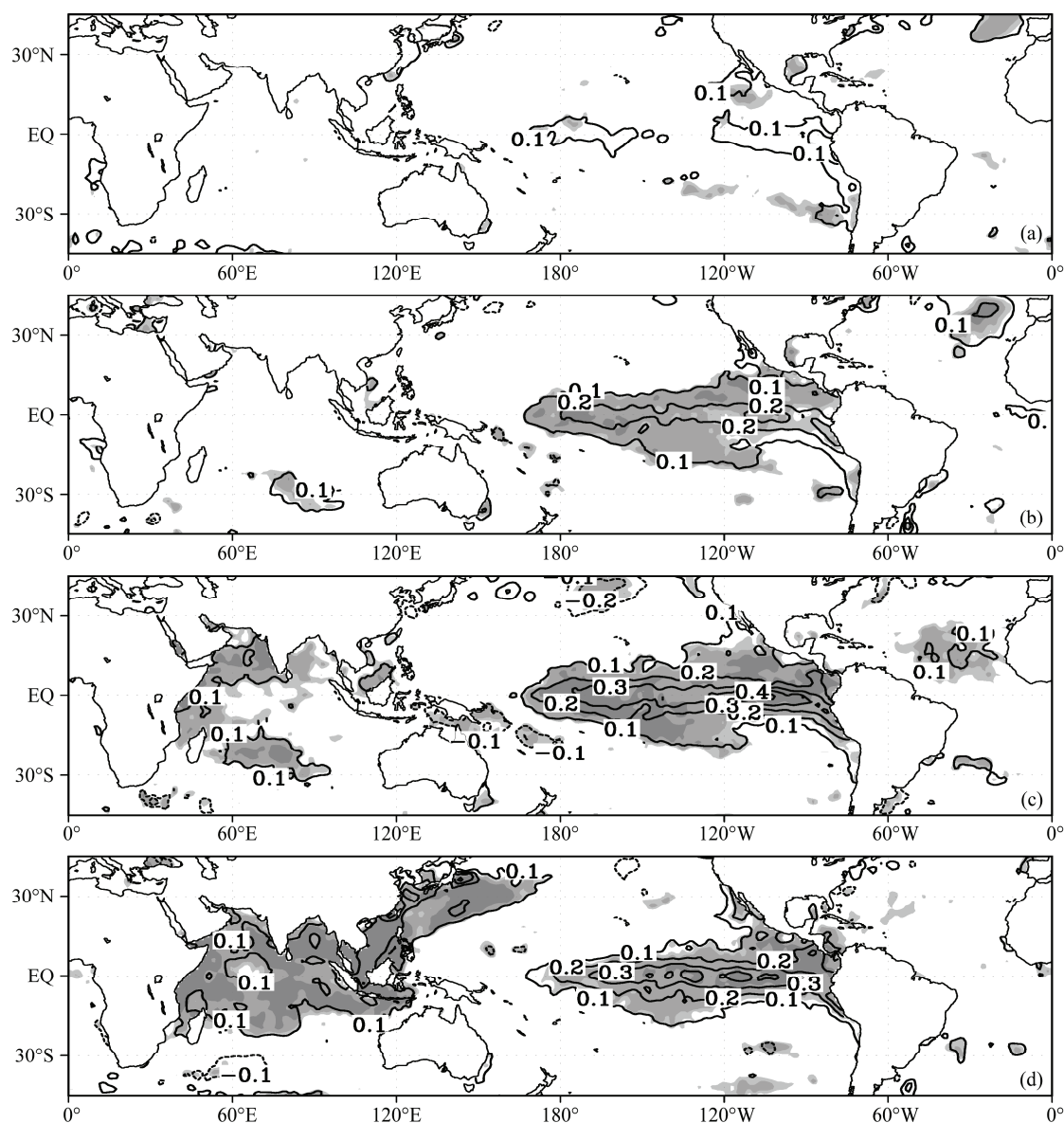


图8 同图7, 但为根据秋季降水第二主分量回归的海温场

Fig.8 Same as Fig.7, but for regression of the SST anomaly on the second leading PC

太平洋地区。回归的海温图(图8)显示,当长江以北地区降水偏少时,在春季(图8a)热带中太平洋(180°附近)有弱的正异常出现。在夏季(图8b),海温正异常大大加强,范围也明显扩大,在160°E以东的整个热带中、东太平洋地区均出现显著的海温正异常。在秋季(图8c),热带中、东太平洋显著的正海温异常进一步加强,与此同时,在印度洋西部和南部局部地区也出现显著的正海温异常。冬季(图8d)热带中、东太平洋显著的正海温异常依然持续,同时印度洋的正海温异常也比秋季明显加强,并进一步向东向北扩展,一直延伸至日本以东的西北太平洋地区。上述海温异常的演变特征显

示,EOF2的异常主要与热带中太平洋至东太平洋地区海温异常从前期夏季至随后冬季的发展维持有密切关系,同时也与秋、冬季印度洋及日本以东的西北太平洋海温异常联系紧密。考虑到海温对大气影响具有滞后性,因此在本文中我们重点关注前、同期的海温关键区,即热带中、东太平洋海温异常。不难看出,热带中、东太平洋海温异常这种从春到冬的演变特征也显示出类似于ENSO的特征,这样就可以得出EOF1和EOF2都与ENSO存在显著关系这一看似矛盾的结论。事实上,对比图7和图8可以看到,虽然都在热带东太平洋有显著信号,并且显示出与ENSO的发展演变相类似的特

征, 但 EOF2 对应的热带太平洋海温异常分布与 EOF1 存在明显的不同。EOF1 对应的海温异常的经向、纬向尺度都较小, 主要出现在 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 之间的热带东太平洋地区 (150°W 以东)。而与 EOF2 相联系的海温异常的经、纬向尺度都较大, 分布在 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 之间的热带中、东太平洋地区 (170°E 以东)。此外, 对应于 EOF2 的变化, 秋、冬季印度洋也有显著的异常出现, 而与第一模态相联系的海温异常则在印度洋没有显著的信号出现。由此可见, 热带太平洋海温异常的不同分布可能分别会影响到这两个模态, 其中热带太平洋地区海温东、西相反的异常分布与长江流域以南地区的降水异常联系紧密, 而热带中、东太平洋海温一致的异常分布则与长江以北地区降水的变化存在密切关系。

为了更加清楚的看到两降水模态与热带太平洋海温异常分布之间的关系, 我们根据海温异常分布特征, 选择 Niño3 区代表热带东太平洋、Niño4 区代表热带中太平洋, ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 区域表示热带西太平洋, 并用标准化的 Niño3 指数与热带西太平洋指数之差来表示热带太平洋海温东、西相反的异常分布特征 (简称 EWI), 用标准化的 Niño3 指数与 Niño4 指数之和来反映热带中、东太平洋海温异常一致变化的特征 (简称 ECI)。根据 EWI 和 ECI 回归的海温场分别清楚的显示出了热带太平洋东、西相反和热带中、东太平洋一致的分布特征 (图略)。3 个月滑动平均的 EWI 海温指

数与两降水主分量之间的超前滞后相关 (图 9a) 显示, EWI 与 PC1 之间存在密切的关系, 显著的正相关在 5 月前后得以建立, 在 7~9 月最为显著, 相关系数超过了 99% 的信度水平, 说明海温在超前 2 个月时与 PC1 的关系最为显著。由于海温对大气的影 响具有滞后性 (Frankignoul and Hasselmann, 1977), 这种超前相关关系意味着前期的海温异常分布可能会对秋季降水 EOF1 产生影响。但是同时, 该海温指数 EWI 与 PC2 也显示出一定的正相关关系, 不过显著性要弱于其与 PC1 的关系, 没有达到 99% 的信度标准, 而且最显著的正相关出现在 10 月, 表现为一种同期相关关系。因此, EWI 与两降水主分量的超前滞后相关主要显示了这种东西相反的海温异常分布对 EOF1 的变化具有比较好的预示意义。另一个表示热带中、东太平洋海温一致变化的 ECI 指数与主分量的超前滞后相关显示, 该指数与 PC2 的变化存在显著的正相关, 但与 PC1 的相关并没有达到显著性标准。ECI 与 PC2 的显著正相关关系也是从 5 月开始出现, 在 8~11 月最为显著, 超过了 99% 的信度水平, 也显示出海温对于降水的一种超前相关关系, 体现了海温异常分布对降水 EOF2 的可能影响。综上, 超前滞后相关的结果说明热带太平洋东西相反的海温异常可能会对长江流域以南地区降水 (EOF1) 产生影响, 而热带中、东太平洋一致的正常海温可能会影响到长江以北地区的降水 (EOF2)。

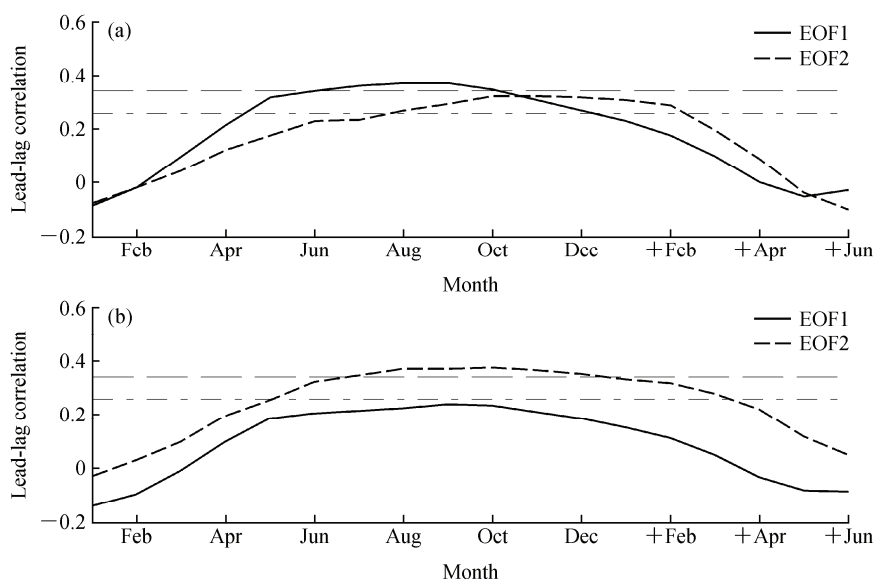


图 9 (a) EWI、(b) ECI 与两降水模态的超前一滞后相关。图中点划线和长虚线分别表示 95% 和 99% 信度水平, 横坐标表示月份, “+” 号表示次年
Fig. 9 The lead-lag correlation between (a) the EWI (East-West tropical Pacific Index), (b) the ECI (East-Central tropical Pacific Index) and the first and the second leading PC. The long dashed and dash-dotted lines indicate the 99% and 95% confidence levels, respectively, the x-axis denotes the month, and the plus sign indicates the month of the following year

6 总结与讨论

本文主要针对我国秋季降水的前两个模态,对其年际变化特征、与大气环流和海温异常之间的联系进行了分析。EOF 分析显示,降水第一模态主要反映长江流域及以南地区降水的变化,第二模态主要反映长江以北的江淮、黄淮、华北、河套至四川盆地北部等地降水的变化。小波分析显示,秋季降水的前两模态都以年际变化为主,没有表现出明显的年代际变化特征。

对环流形势的分析显示,反映长江以南降水变化的 EOF1 主要受到副高强度的影响。当副高偏强时,在菲律宾群岛附近出现异常反气旋,受其影响,我国南方会出现西南风异常,有利于暖湿气流由南至北输送到南方地区,从而导致降水增加。反之,当副高偏弱时,南方地区则会出现东北风异常,会对降水产生抑制作用。反映长江以北降水的 EOF2 主要受到副高南北位置的影响。当副高偏南时,日本岛附近出现一个异常气旋,导致我国北方大部分地区产生偏北风异常,阻碍了南方暖湿气流的北上,从而造成北方地区降水偏少。反之,当副高偏北时,北方大部分地区为异常偏南风,秋季降水偏多。进一步分析显示,前两降水模态及上述相应的异常环流形势又与热带地区异常环流之间联系紧密。EOF1 主要与热带东印度洋地区附近的异常垂直运动存在最显著的关系。当热带东印度洋至西太平洋地区附近出现显著的异常垂直运动,相应的在该区域经圈方向上会产生局地异常 Hadley 环流,导致在 $25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间出现显著的异常垂直运动,有利于对流层低层 30°N 以南出现异常经向风以及异常辐合/辐散形势,从而有利于菲律宾附近异常气旋/反气旋的产生,并影响我国南方地区的降水。相应于 EOF2 的变化,热带西太平洋地区则表现出最明显的异常垂直运动,同时,在 $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 范围内经向上出现两个连续的异常环流圈,分别位于 $10^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 和 $15^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$,其中北部的异常环流圈会通过低层经向风异常及异常辐合辐散形势,利于日本岛附近异常气旋/反气旋的产生,从而导致 30°N 以北地区降水发生异常。

由于热带地区异常环流的变化往往受到其下垫面海温异常的影响,这意味着热带海温异常可能会通过热带地区异常环流而影响到降水的变化。对

海温的分析显示,虽然两模态对应的海温异常都显示出与 ENSO 发展演变相类似的特征,但对应于两降水模态的变化,整个热带太平洋海温异常显示出不同的分布特征,其中 EOF1 与前、同期热带太平洋东、西相反海温异常分布关系密切,而 EOF2 则可能受到热带中、东太平洋一致的海温异常的影响。

以前研究(陈烈庭, 1977; Zhang et al., 1996)曾指出当热带太平洋海温东暖西冷时,热带太平洋地区会出现异常反 Walker 环流,热带西太平洋地区出现异常上升运动,导致在经圈方向上热带西太平洋至东亚地区出现异常反 Hadley 环流,从而影响到我国的环流和降水。本文关于降水第一模态的分析与上述研究结果是相符合的。本文的结果显示,降水第一模态与热带太平洋东西相反的海温异常分布密切相关,同时,相应的大气环流形势显示出明显的异常 Walker 环流及热带东印度洋至西太平洋附近的一个异常局地 Hadley 环流圈,说明热带太平洋海温的这种异常分布会通过异常 Walker 环流,影响到热带东印度洋至西太平洋地区的异常垂直运动,并通过经圈方向上的异常 Hadley 环流,在我国南方地区产生异常经向风,而导致降水第一模态发生异常。与第一模态相比,降水第二模态对应的热带太平洋海温异常分布和热带地区垂直环流都明显不同。第二模态对应的海温异常的显著区主要分布在中、东太平洋,在热带西太平洋并没有显著相反的信号。同时,第二模态相应的大气环流场显示,热带印度洋上空没有明显异常环流出现,且热带太平洋上空的异常 Walker 环流圈比第一模态对应的情况也偏东,这导致热带地区的异常垂直运动比第一模态明显偏东,相应的,在经圈方向上也并没有出现类似于 Hadley 环流的异常,而是表现为从热带到中纬度地区的两个连续垂直环流圈。可见,热带中、东太平洋一致的海温异常分布可能通过太平洋上空偏东的异常 Walker 环流,使得热带地区明显的异常垂直运动更为偏东,主要出现在西太平洋地区 (150°E) 附近,并通过在经圈方向上热带到中纬度地区的两个连续异常环流圈,影响到我国北方地区。总的来说,两模态所对应的海温和大气环流形势的差异说明,热带太平洋不同的海温异常分布可能对热带地区异常环流形势产生不同的影响,并通过东亚地区附近经圈方向上从热带到中纬度地区不同的异常环流形势,而对我国降水的分布产生完全不同的影响。

参考文献 (References)

- Barriopedro D, Gouveia C M, Trigo R M, et al. 2012. The 2009-2010 drought in China: possible causes and impacts on vegetation[J]. *Journal of Hydrometeorology*, doi: 10.1175/JHM-D-11-074.1.
- 白虎志, 董文杰. 2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. *高原气象*, 23 (6): 884-889. Bai Huzhi, Dong Wenjie. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over southwest China[J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 23 (6): 884-889.
- 陈烈庭. 1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响[J]. *大气科学*, (1): 1-12. Chen Lieting. 1977. Impacts of the equatorial eastern Pacific SSTA on tropical atmospheric circulation and the precipitation of the rainy season in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), (1): 1-12.
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J]. *大气科学*, 26 (5): 595-610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (5): 595-610.
- 陈文, 康丽华, 王玓. 2006. 我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析[J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 259-269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in China and global sea surface temperature[J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (3): 259-269.
- Chen Wen, Wang Lin, Xue Yongkang, et al. 2009. Variabilities of the spring river runoff system in East China and their relations to precipitation and sea surface temperature[J]. *International Journal of Climatology*, 29: 1381-1394.
- 谌芸, 施能. 2003a. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. *热带气象学报*, 19 (2): 137-146. Chen Yun, Shi Neng. 2003. EL Niño/ENSO and climatic anomaly in the autumn of China[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 19 (2): 137-146.
- 谌芸, 施能. 2003b. 我国秋季降水、温度的时空分布特征及气候变化[J]. *南京气象学院学报*, 26 (5): 622-630. Chen Yun, Shi Neng. 2003. Spatial and temporal distribution of autumn precipitation and temperature in China and climatic change[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 26 (5): 622-630.
- 陈忠明, 刘富明, 赵平, 等. 2001. 青藏高原地表热状况与华西秋雨[J]. *高原气象*, 20 (1): 94-99. Chen Zhongming, Liu Fuming, Zhao Ping, et al. 2001. Relationship between the surface heating fields over Qinghai Xizang Plateau and precipitation of southwest China in autumn[J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 20 (1): 94-99.
- 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.
- Frankignoul C, Hasselmann K. 1977. Stochastic climate models. Part II-Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability[J]. *Tellus*, 29 (4): 289-305, doi:10.1111/j.2153-3490.1977.tb00740.x.
- 龚道溢, 王绍武. 1998. ENSO 对中国四季降水的影响[J]. *自然灾害学报*, 7 (4): 44-52. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1998. Impact of ENSO on the seasonal rainfall in China[J]. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 7 (4): 44-52.
- 何敏. 1984. 我国主要秋雨区的分布及长期预报[J]. *气象*, 10 (9): 10-13.
- He Min. 1984. The distribution and long-term predicting of Chinese autumn precipitation[J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 10 (9): 10-13.
- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究[J]. *大气科学*, 27 (4): 484-502. Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (4): 484-502.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. *大气科学*, 36 (3): 443-457. Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (3): 443-457.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437-471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 刘德祥, 董安详, 瞿汶. 2003. 甘肃 2002 年伏秋连旱的气候异常及成因诊断[J]. *干旱气象*, 21 (4): 27-31. Liu Dexiang, Dong Anxiang, Qu Wen. 2003. The dynamic diagnose on the abnormality and cause of summer and autumn continuous arid of 2002 in Gansu province[J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 21 (4): 27-31.
- 刘宣飞, 袁慧珍. 2006. ENSO 对印度洋偶极子与中国秋季降水关系的影响[J]. *南京气象学院学报*, 29 (6): 762-768. Liu Xuanfei, Yuan Huizhen. 2006. Effects of ENSO on the relationship between IOD and autumn rainfall in China[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 29 (6): 762-768.
- Niu Ning, Li Jianping. 2008. Interannual variability of autumn precipitation over South China and its relation to atmospheric circulation and SST anomalies[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (1): 117-125, doi: 10.1007/s00376-008-0117-2.
- 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.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14): 4407, doi: 10.1029/2002JD002670.
- 王林, 冯娟. 2011. 我国冬季降水年际变化的主模态分析[J]. *大气科学*, 35 (6): 1105-1116. Wang Lin, Feng Juan. 2011. Two major modes of the wintertime precipitation over China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1105-1116.
- Weng Hengyi, Lau K M, Xue Yongkang. 1999. Multi-scale summer rainfall variability over China and its long-term link to global sea surface temperature variability[J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77 (4): 845-857.

- 徐良炎, 姜允迪. 2005. 2004 年我国天气气候特点[J]. 气象, 31 (4): 35-38.
- Xu Liangyan, Jiang Yundi. 2005. Characteristics of weather and climate in China during 2004[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (4): 35-38.
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征[J]. 气候与环境研究, 8 (3): 307-318. Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 307-318.
- Zhang Renhe. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 16: 229-241.
- Zhang Renhe, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 74: 49-62.