

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.

我国冬季降水年际变化的主模态分析

王林^{1, 2} 冯娟¹

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

2 国家海洋局海洋—大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005

摘 要 利用我国 160 站的观测资料、NCEP/NCAR 再分析资料以及英国气象局哈德莱中心的海表面温度 (SST) 资料, 分析了我国冬季降水年际变化的主模态以及与其相联系的大气环流异常和海温异常。结果表明, 在年际变化的时间尺度上, 我国冬季降水主要表现为长江以南地区降水量的一致变化 (EOF1) 和华南、西南地区与新疆北部、华北和长江中下游地区降水反位相振荡的变化 (EOF2) 两个主模态, 它们分别可以解释年际变化总方差的 49.6% 和 17.3%, 并具有显著的 2~4 年周期。此外, 这两个模态也有明显的年代际信号, EOF1 表现为 20 世纪 80 年代中期以前南方地区冬季降水偏少, 1988 年之后转为偏多, 而进入 21 世纪后逐渐接近历史平均值并有再次转为偏少的趋势, 而 EOF2 表现为 1980 年至 2005 年新疆北部和长江中下游地区的冬季降水出现年代际增多, 而华南地区的冬季降水出现年代际减少。进一步通过回归分析表明, 我国冬季降水年际变化的 EOF1 与 ENSO 循环以及东亚冬季风强度的变化有密切的关系, 当 ENSO 处于其暖 (冷) 位相的冬季时, 东亚冬季风系统偏弱 (强), 来自孟加拉湾和南海的异常水汽输送在我国南方地区形成辐合 (辐散), 从而有利于该地区降水异常偏多 (少)。与我国冬季降水年际变化 EOF2 相联系的环流表现为欧亚大陆上空具有相当正压结构的一个波列, 该波列对应于东亚沿岸的异常北 (南) 风, 进而引起长江中下游地区水汽辐散 (辐合) 和华南地区水汽辐合 (辐散), 有利于南正 (负) 北负 (正) 的降水异常分布。赤道中东太平洋和北大西洋挪威海地区的 SST 异常分别与这两个模态具有紧密的联系, 并对这两个模态具有一定的潜在预报意义。

关键词 冬季降水 年际变化 主模态 大气环流 海表面温度

文章编号 1006-9895 (2011) 06-1105-12

中图分类号 P426

文献标识码 A

Two Major Modes of the Wintertime Precipitation over China

WANG Lin^{1,2} and FENG Juan¹

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, State Oceanic Administration, Xiamen 361005

Abstract Based on the observed precipitation data from 160 China stations, the NCEP/NCAR reanalysis dataset and the sea surface temperature (SST) dataset from the Met Office Hadley Centre, this study investigates two major modes of wintertime precipitation over China through empirical orthogonal function (EOF) method and associated atmospheric circulation and SST through linear regression method. It reveals that the first two EOF modes account for 49.6% and 17.3% of the total variance, respectively, and can be well separated from the remaining modes. EOF1 reflects the strength of wintertime precipitation over southeastern China. The associated principal component

收稿日期 2011-01-13, 2011-03-30 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-QN204, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421405, 国家自然科学基金资助项目 41025017, 国家海洋局海洋—大气化学与全球变化重点实验室开放基金 GCMAC0901

作者简介 王林, 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事东亚冬季风和气候动力学方面的研究。E-mail: wanglin@mail.iap.ac.cn

(PC1) has significant interannual variability with 2–4 year period. Its interdecadal variations suggest that the wintertime precipitation over southeastern China was below (above) normal before (after) the mid-1980s, and has a slight decreasing trend in recent years. EOF2 delineates an out-of-phase relationship between South China and the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as the northern part of Xinjiang. The associated time series (PC2) also has a clear 2–4 year period and an interdecadal component, which experiences a clear trend towards its negative polarity from 1980 to 2005. Further analysis suggests that EOF1 is closely related to the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the East Asian winter monsoon (EAWM). When warm (cold) ENSO is in its mature phase, the EAWM is weak (strong), the anomalous water vapor transport from the Bay of Bengal and the South China Sea converges (diverges) over southeastern China and favors more (less) precipitation in this region. The SST anomalies over the tropical eastern Pacific have significant relationship with the variation of EOF1, and may act as a potential predictor for this mode. The variation of EOF2 is closely associated with a barotropic wave train across the Eurasian continent originating from the North Atlantic, which can induce anomalous northerlies (southerlies) along the coasts of southeastern China. It then causes the divergence (convergence) of water vapor flux in the lower reaches of the Yangtze River and opposite condition in South China, and therefore favors a positive (negative) phase of EOF2. The SST anomalies around the Norwegian Sea over the North Atlantic have the closest relationship with the variations of EOF2, and may act as a potential predictor with a leading time of 7 months.

Key words winter precipitation, interannual variation, major modes, atmospheric circulation, sea surface temperature

1 引言

我国的冬季气候主要受到东亚冬季风的影响, 后者的异常往往会给我国带来寒潮、低温、暴雪、冰冻等灾害(丁一汇, 1990; 陈隆勋等, 1991; 黄荣辉等, 2008)。在以往对东亚冬季风的研究中, 关注较多的是寒潮(陶诗言, 1957; 丁一汇, 1990; 王遵娅和丁一汇, 2006)和气温(李崇银, 1989; Chen et al., 2000; 康丽华等, 2006, 2009; Wang et al., 2009a, 2009b, 2010; 刘实等, 2010)的变化特征, 以及与此相联系的物理机制(武炳义和黄荣辉, 1999; Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002; Chen et al., 2005; 陈文和康丽华, 2006; 陈文等, 2008; Wang et al., 2009b), 而对冬季降水的研究则相对要少一些。这一方面是因为东亚冬季风控制的地区通常比较干冷(陈隆勋等, 1991; 陈文等, 2008; 黄荣辉等, 2008), 冬季降水占全年降水的比重也比较小(图 1b)(Chen et al., 2009), 另一方面可能因为冬季降水的异常往往并不会像东亚夏季风那样引起巨大的洪涝灾害(Huang et al., 2003; 黄荣辉等, 2003)。

事实上, 冬季降水的异常变化也可能造成灾害因而具有重要的影响。一方面, 降水的多寡能够直接影响到作物的生长和次年的农业产量。南方冬季降水过多容易造成湿害, 会影响到小麦、油菜等多

种作物根系的生长, 而降水过少则会造成土壤墒情偏低, 不利于作物过冬和次年的春耕。例如, 2008 年末至 2009 年初的北方旱情便造成一千万公顷作物受灾, 四百万人饮用水缺乏, 仅安徽一省的直接经济损失便高达 16 亿元人民币(Gao and Yang, 2009)。另一方面, 若异常偏多的降水以雪或冻雨的形式出现, 则不仅会给大众的交通出行造成不便, 甚至还可能威胁到人民的生命财产安全。例如, 2008 年初发生在我国南方的雨雪冰冻灾害给电力、交通、农业等部门造成极大的不利影响, 仅直接经济损失就超过 1500 亿元人民币, 并造成 129 人死亡, 其影响之广泛和损失之巨大为建国以来同类灾害之最(陶诗言和卫捷, 2008; 赵琳娜等, 2008; Zhou et al., 2011)。

与夏季降水相比, 目前关于我国冬季降水的研究要少一些。Xu and Chan (2002) 分析了我国冬季降水的区域特征及其时间变化, 指出我国不同区域的冬季降水存在年际和年代际变化特征。陶诗言和张庆云(1998)以及何溪澄等(2006)均发现南方冬季降水在 El Niño 年异常偏多, 而在 La Niña 年异常偏少。Feng et al. (2010) 进一步指出, 典型的 ENSO 和 ENSO Modoki 对东南亚和我国南方冬季降水的影响有显著差异, 且这种差异是由大气对 ENSO 和 ENSO Modoki 在西太平洋不同的非绝热加热产生局地响应造成的。王林等(2011)的研究

表明, 北太平洋涛动的正(负)位相会利于我国江淮及其以南地区的冬季降水增加(减少), 其中变化最显著的区域位于淮河流域。施能(1996)发现我国整体的冬季降水在强冬季风年偏少, 而在弱冬季风年偏多, Wang and Chen (2010) 通过对多个东亚冬季风指数的分析进一步证实了这一结果。曾剑等(2010)指出南方冬季降水对东亚冬季风有显著的区域性响应, 且冬季风越强降水的响应越明显, Zhou (2010) 和 Zhou and Wu (2010) 的研究则认为东亚冬季风和 ENSO 对南方降水的影响具有相对独立的特征。这些工作所关注的多是不同因子对我国特定区域冬季降水的影响, 但我国冬季降水自身的变化特征是什么目前尚不清楚。而研究我国冬季降水的主要时空变化特征以及与此相联系的大气环流, 不仅有利于了解我国冬季降水的变化原因, 也有助于预报冬季降水的年际变化。因此, 本文就将通过 EOF 分析的方法来研究我国冬季降水年际变化的主模态, 并分析与此相联系的大气环流和海温特征。

2 数据和方法

本文使用的降水资料为中国气象局发布的全国 160 个台站的月平均降水数据, 时段为 1951 年 1 月至今。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) 发布的全球逐月再分析数据 (Kalnay et al., 1996)。该资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 个气压层, 资料时段为 1948 年 1 月至今。海温资料为英国气象局哈德莱中心提供的全球逐月海表面温度 (SST) 数据 (Rayner et al., 2003), 该资料水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 时段为 1870 年 1 月至今。

与分析我国冬季气温年际变化时的方法 (康丽华等, 2006, 2009) 类似, 本文也采用经验正交函数 (EOF) 分解的方法来得到冬季降水变化的主要空间模态及其相应的时间系数, 并用小波分析的方法 (Torrence and Compo, 1998) 来考察降水时间变化的特征。在分析与各降水模态对应的大气环流和海温状况时, 我们采用一元线性回归的方法, 并采用 t 检验来验证其显著性。本文所考虑的时间段为 1951 年 1 月至 2010 年 12 月, 季节的划分采取 3~5 月为春季, 9~11 月为秋季, 12 月和次年 1~2

月为冬季。这样便得到 1951~2009 共计 59 年的冬季数据, 其中约定 1951 是指 1951/1952 年冬季。

3 我国冬季降水年际变化的两个主模态

在分析降水年际变化的主模态之前, 首先给出冬季降水的总体情况。由图 1a 可见, 我国冬季降水主要集中在 100°E 以东的黄河以南地区, 降水量均超过 25 mm, 最大降水发生在江南地区, 降水量

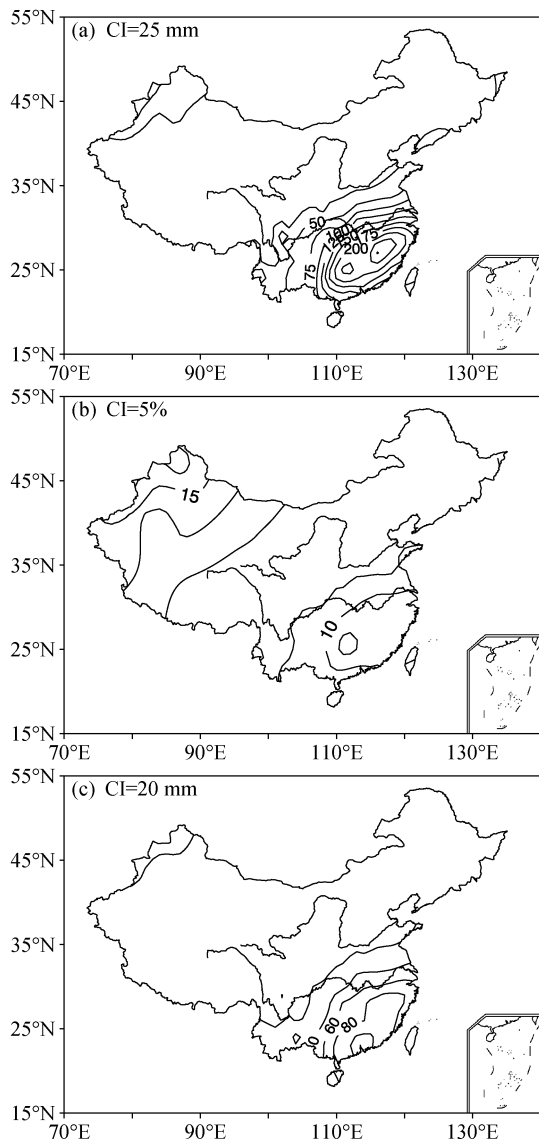


图 1 1951~2009 年我国冬季降水的气候态 (a)、占全年降水的百分比 (b) 以及年际变化的标准差 (c)。CI 表示等值线间隔 (下同)
Fig. 1 (a) The climatology of wintertime precipitation, (b) the percentage of wintertime precipitation to the annual total precipitation, and (c) the interannual standard deviation of wintertime precipitation over China for the period 1951–2009. CI is contour interval (the same below)

超过 200 mm。这一降水量仅占全年总降水的 10% 左右 (图 1b), 但年际变化的标准差却多在 40 mm 以上, 最多可达 100 mm (图 1c), 说明尽管该地区的冬季降水总量相对其他季节比较小, 但其年际变化的幅度却并不小。此外, 新疆的西北部是冬季降水的次大值区, 部分地区可以达到 50 mm 以上 (图 1a), 该地区的冬季降水占年降水的比重在 15% 左右, 部分地区可达 20% 以上 (图 1b), 年际变化的标准差可达 20 mm 以上 (图 1c), 说明新疆地区的冬季降水是相对比较重要的, 并且也存在较大的年际变化。

对 1951 年至 2009 年我国 160 站冬季降水场做 EOF 分析, 便能得到主要空间模态和各模态的时间变化特征, 为了能够表示实际的变化量级, EOF 的空间模态不直接用特征向量场, 而是通过对标准化的时间序列进行回归来表示。其中前两个模态分别解释了总方差的 49.6% 和 17.3%。按照 North et al. (1982) 的标准, 这两个模态可以同其他的模态区分开, 并且是彼此可分的。

图 2 给出了我国冬季降水 EOF 前两个模态的空间分布及其对应的标准化的时间序列。可以看到, EOF1 表现为 100°E 以东的长江以南地区有一致的显著正异常, 其中心位于珠江三角洲地区, 强度可达 90 mm 以上。此外, 尽管黄河中下游地区变化的绝对值比较小, 但也基本都超过 95% 信度检验 (图 2a)。这一空间分布与冬季降水的气候态 (图 1a) 非常相似, 说明 EOF1 主要反映了我国冬季降水尤其是南方地区降水量的一致变化。事实上, EOF1 对应的时间系数 (图 2b) 和我国冬季 160 站的总体降水量序列的相关系数高达 0.97, 远远超过 99% 信度水平。这说明与夏季降水呈现三极子和偶极子分布 (Huang et al., 2007) 不同, 降水总量的一致变化是我国冬季降水年际变化最重要的变化特征, 这一特征占冬季降水年际变化总方差的近 50%。相应的时间序列具有明显的年际变化特征, 小波分析显示其具有显著的 2~4 年周期 (图 3a)。此外, 该时间序列也具有一定的年代际变化特征: 在 20 世纪 80 年代中期以前以负位相为

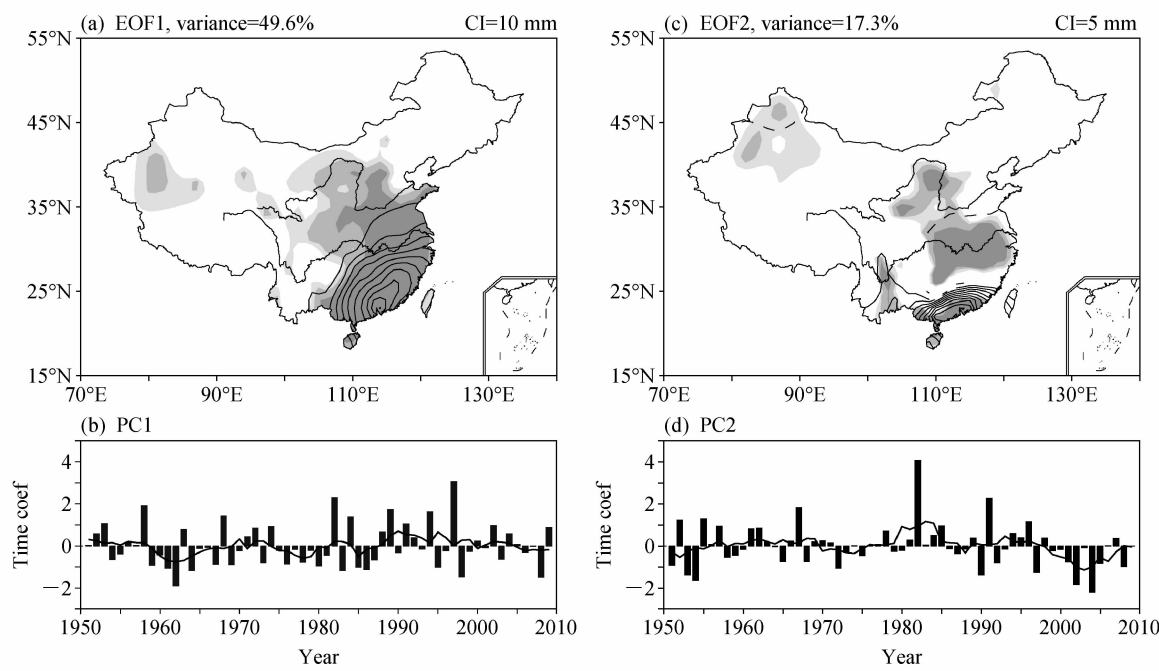


图 2 1951~2009 年我国冬季降水年际变化 EOF 的 (a、b) 第一模态和 (c、d) 第二模态: (a、c) 空间分布型 (单位: mm, 正、负值分别用实线和虚线表示, 零线已去掉。浅、中、深阴影分别表示 90%、95%、99% 信度); (b、d) 标准化的时间序列 (直方图) 及其 7 年滑动平均 (曲线)

Fig. 2 (a, b) EOF1 and (c, d) EOF2 of wintertime precipitation for 1951–2009 in China; (a, c) Regression map based on normalized time series (units; mm); (b, d) normalized time series (bars) and its 7-year running mean (curve). In (a) and (c), positive (negative) values are indicated by solid (dashed) contours; zero lines are omitted; light, middle, and dark shadings indicate 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

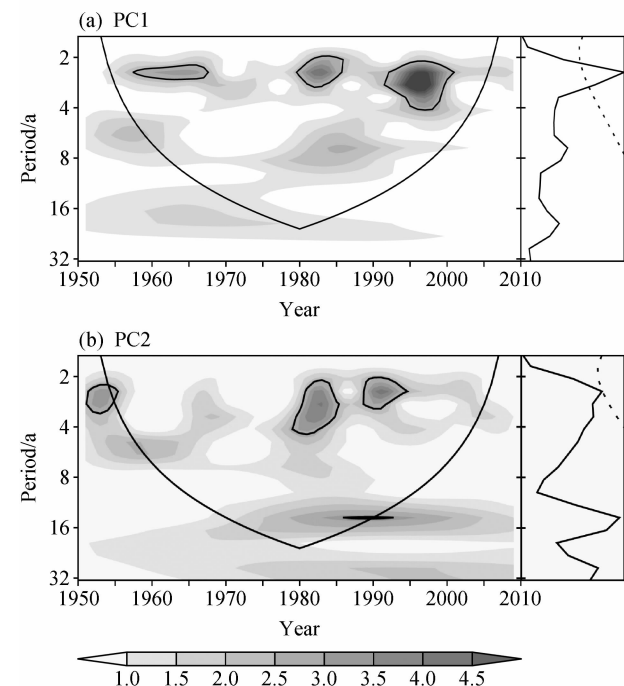


图3 1951~2009年我国冬季降水 (a) EOF1 和 (b) EOF2 对应的时间序列的 Morlet 小波分析。分图左侧为局地小波功率谱 (阴影), 右侧为全小波谱 (曲线); 左侧闭合等值线和右侧点线为 90% 信度标准

Fig. 3 The local wavelet power spectra (left shading) and the global wavelet spectra (right curve) for the principal components (PCs) of wintertime precipitation over China based on Morlet wavelet for the period 1951–2009; (a) PC1; (b) PC2. Contours in the local wavelet power spectra and dotted lines in the global wavelet spectra indicate the 90% confidence level

主, 南方地区冬季降水偏少, 1988 年之后转为年代际正位相, 南方地区降水偏多, 而进入 21 世纪后逐渐接近零值并有向负位相转变的趋势, 这几次位相转变的时间恰好与东亚冬季风强度的年代际变化相对应 (康丽华等, 2006; Wang et al., 2009b), 因而可能是受到东亚冬季风强度年代际变化的影响。

如图 2c 所示, EOF2 的空间分布特征主要表现为华南、西南地区与新疆北部、华北和长江中下游地区降水的反位相振荡形势。尽管由于降水气候态的差异 (图 1a), 北方地区的变化相对较弱, 但这种南北振荡的信号依然非常显著 (图 2c)。相应的时间序列也具有明显的年际变化特征 (图 2d), 变化周期也以 2~4 年为主 (图 3b)。此外, 小波功率谱显示该模态在 1990 年左右具有较强的年代际变化

信号 (图 3b), 其时间序列也表明自 20 世纪 80 年代初至 2005 年左右有明显的年代际减弱 (图 2d), 说明近年来新疆北部和长江中下游地区的冬季降水具有增多的趋势, 而华南地区的冬季降水具有减少的趋势。

4 与两个主模态相联系的大气环流和海温特征

4.1 大气环流异常

我国冬季降水的变化必然受到东亚冬季风系统的影响, 而后者是一个对流层低—中—高层耦合的系统 (陈隆勋等, 1991; Chen et al., 2000; Wang et al., 2009a; Li and Yang, 2010)。因此, 选取对流层不同层面的具有代表性的气象要素与上节中得到的我国冬季降水的 EOF 时间序列做回归分析 (图 4~7), 以考察与我国冬季降水年际变化相联系的大气环流的变化特征。

图 4 是与我国冬季降水 EOF1 相联系的大气环流场。由图 4a 可以看到, 当我国南方冬季降水一致偏多时, 以日本北部为中心的整个西太平洋地区的海平面气压异常偏高, 而西伯利亚地区的海平面气压异常偏低。同时, 500 hPa 高度上, 日本和乌拉尔山附近分别有正负位势高度异常, 表明东亚大槽和乌拉尔山地区的阻塞环流异常偏弱 (图 4b)。200 hPa 高度上, 纬向风场在东亚地区表现为急流核心区西风减速, 而急流核南北两侧的西风加强 (图 4c、f)。这些环流场的异常变化在东亚地区都超过了 95% 的信度检验, 并且东亚沿岸有南风异常 (图 4d), 温度异常偏高 (图 4e), 表明东亚冬季风整体偏弱。在这种环流形势下, 一方面异常的南风会从低纬度带来更多的水汽 [图 5 (见文后彩图)], 另一方面东亚急流减弱, 其入口区的次级环流会在 20°N~35°N 的中国东部区域产生异常的上升运动 (图 4f), 这两个因素都有利于我国南方地区降水的增加。事实上, 以上环流异常与 ENSO 暖位相时的环流形势也非常相似, 计算 EOF1 的时间序列与 Niño3 指数和东亚冬季风指数 (Chen et al., 2000) 的相关系数, 均超过 99% 信度检验 (表 1), 说明 ENSO 的暖位相和弱东亚冬季风是有利于我国尤其是南方地区的冬季降水呈一致型增加, 这与此前一些研究 (施能, 1996; 陶诗言和张庆云, 1998; Feng et al., 2010; Wang and Chen, 2010) 也是一

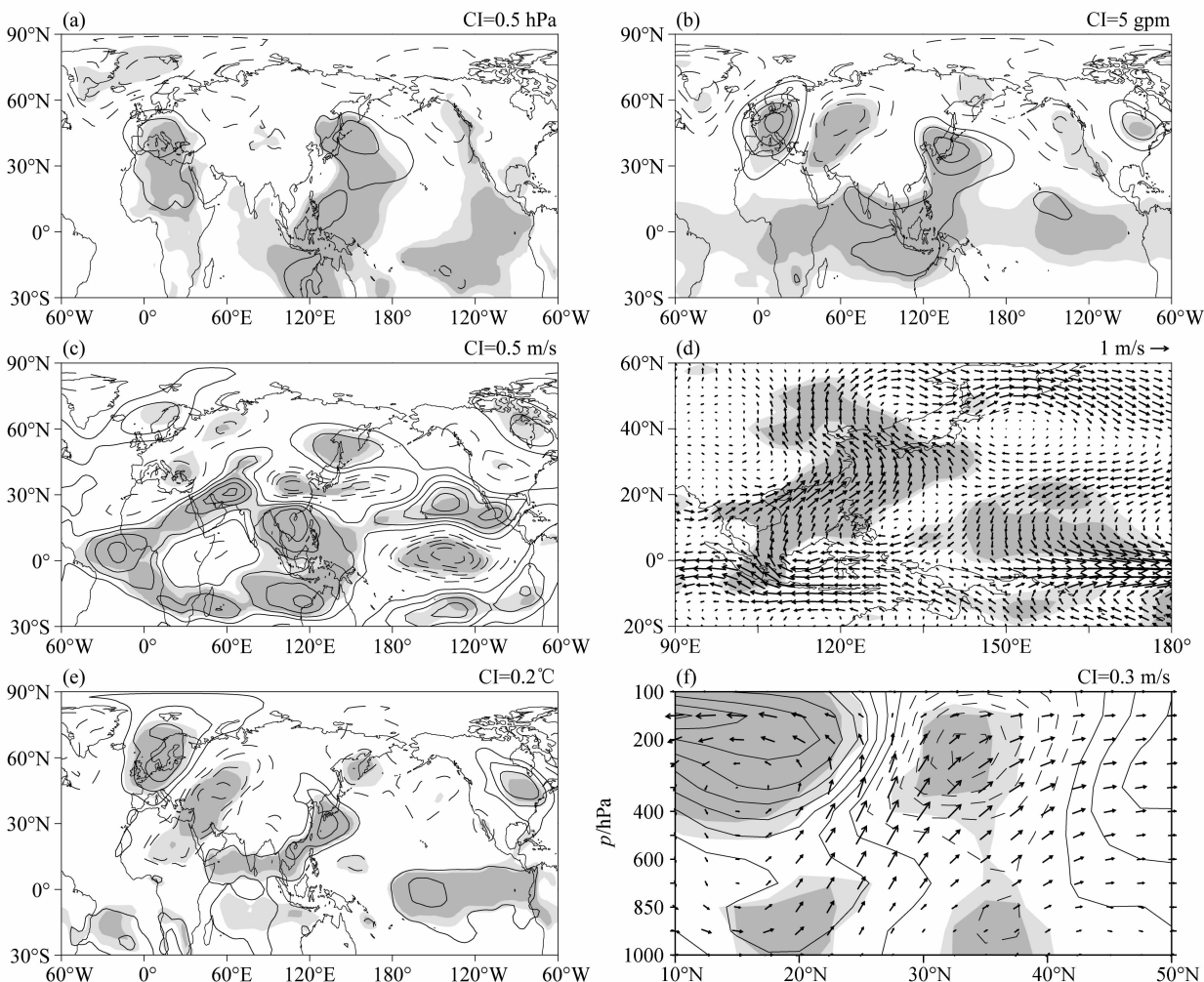


图 4 1951~2009 年我国冬季降水 EOF1 对应的时间序列对各气象要素的回归：(a) 海平面气压场；(b) 500 hPa 位势高度场；(c) 200 hPa 纬向风场；(d) 850 hPa 风矢量场；(e) 850 hPa 温度场；(f) 100°E~130°E 平均的纬向风场和经圈环流场(箭头)。实(虚)等值线：正(负)值；零线已省略；深、浅阴影：通过 99%、95% 信度检验

Fig. 4 The regression maps of (a) sea level pressure, (b) 500-hPa geopotential height, (c) 200-hPa zonal wind, (d) 850-hPa wind, (e) 850-hPa air temperature, and (f) zonal wind and vertical circulation averaged over 100°E–130°E on the normalized first principal component (PC1) of wintertime precipitation over China for the period 1951–2009. Solid (dashed) contours: positive (negative) values; zero lines are omitted; light and dark shadings indicate 95% and 99% confidence levels, respectively

表 1 降水的两个 PC 与各因子的相关系数
Table 1 The correlation coefficients between the two principal component time series and several factors

	PC1	PC2
Nino3 指数	0.46 **	0.06
Scandinavia 型指数	−0.07	−0.25 *
东亚冬季风指数	−0.59 **	0.21

注：**：99%信度；*：90%信度。

致的。进一步对整层水汽输送的分析表明，引起我国南方冬季降水增加的水汽主要有两支，分别来自

孟加拉湾和南海(图 5)，这两支水汽在以上环流形势的作用下在西北太平洋呈现以菲律宾南部为中心的反气旋式的水汽输送异常，在自中南半岛经南海北部一直延伸到日本南部的区域形成水汽的异常辐合(图 5)，从而利于南方地区的冬季降水增加。

与我国冬季降水 EOF2 相联系的大气环流场异常主要出现在东亚及其上游地区(图 6)。对应于 EOF2 的正位相，我国江南地区以及里海北部的海平面气压异常偏低(图 6a)，这一信号在 850 hPa 和 500 hPa 高度场上更为清晰，表现为一个自北大

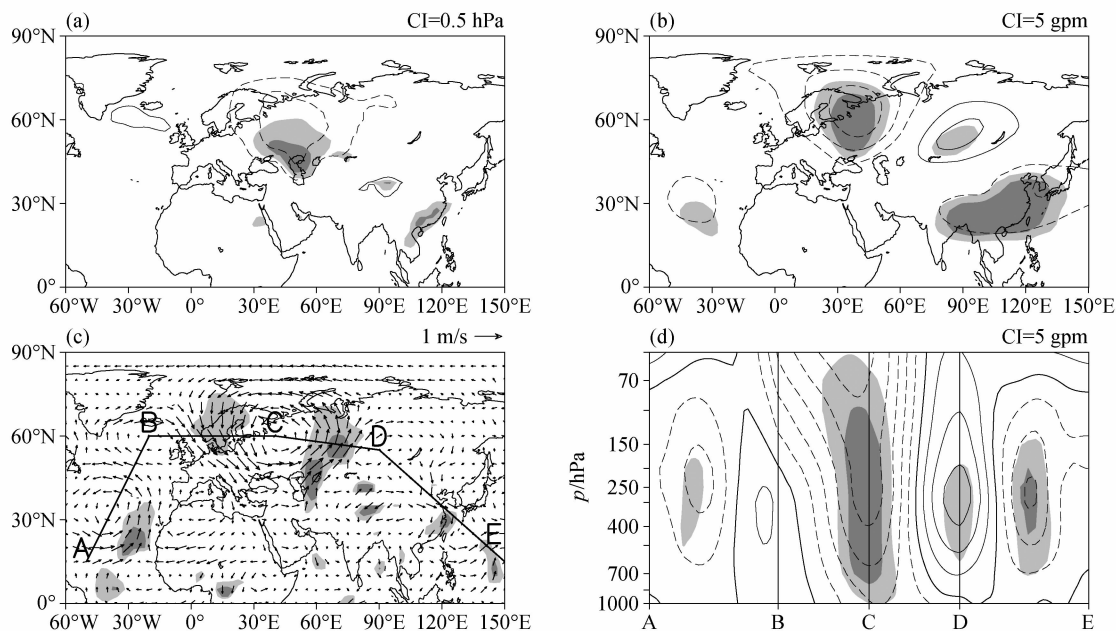


图6 1951~2009年我国冬季降水 EOF2 对应的时间序列对各气象要素的回归：(a) 海平面气压场；(b) 500 hPa 位势高度场；(c) 850 hPa 风矢量场；(d) 沿 c 图中 ABCDE 所做的位势高度垂直剖面场。实（虚）等值线：正（负）值；(a)、(b) 中零线已省略；深、浅阴影表示通过 99%、95% 信度检验

Fig. 6 The regression maps of (a) sea level pressure, (b) 500-hPa geopotential height, (c) 850-hPa wind, and (d) vertical section of geopotential height along the lines indicated by ABCDE in (c) on the normalized second principal component (PC2) of wintertime precipitation over China for the period 1951–2009. Solid (dashed) contours: positive (negative) values; zero lines are omitted in (a) and (b); light and dark shadings indicate 95% and 99% confidence levels, respectively

西洋经北欧和西伯利亚到达我国的波列（图 6b、c）。沿波列各中心所做的垂直剖面（图 6d）表明，垂直方向上该波列具有相当正压结构，在 300 hPa 左右的对流层高层信号最明显，水平方向上在北大西洋信号较弱，而在欧亚大陆信号较强，其中北欧地区的中心最强，从地面一直到平流层下层都具有显著的信号，这一结构与斯堪的纳维亚遥相关（Barnston and Livezey, 1987; Bueh and Nakamura, 2007）非常相似。EOF2 的时间序列与同期的斯堪的纳维亚型指数（取自 <http://www.noaa.gov/> [2010-10-09]）的相关系数为-0.25，超过 90% 信度检验（表 1），说明斯堪的纳维亚遥相关的负位相在一定程度上有利于我国华南冬季降水增加而新疆北部和长江中下游地区降水减少。从水汽输送角度来看，我国东部沿岸的异常北风（图 6c）会造成异常的向南水汽输送，从而在长江三角洲和长江中下游地区形成水汽辐散 [图 7（见文后彩图）]，不利于降水增加。同时，这一异常的向南水汽输送与来自孟加拉湾的水汽在华南地区辐合（图 7），因而利

于该地区降水的增加。

4.2 海温异常

大气环流的异常往往会与海温、积雪等大气外强迫的变化相联系，因此分析与我国冬季降水相联系的大气外强迫的信号，对于进一步认识我国冬季降水变化的成因有一定帮助。此外，由于外强迫信号的持续性一般都比环流异常的持续性要好，因此寻找有效的外强迫信号可能会对预测大气环流和降水的变化具有潜在的意义。之前的一些研究表明，我国冬季气候的变化与 SST 的变化具有紧密的联系（李崇银，1989; Chen et al., 2000），在这一部分，我们将主要分析与我国冬季降水年际变化相联系的 SST 的分布情况。

图 8 是与我国冬季降水 EOF1 相联系的 SST 分布场。可以看到，在同期的冬季（图 8b），太平洋的 SST 呈现类似 ENSO 成熟期的异常分布：赤道中东太平洋的 SST 异常偏高，而菲律宾以东的副热带西太平洋 SST 异常偏低，从印度洋经我国东南沿海一直到日本南部的 SST 异常偏高，这些

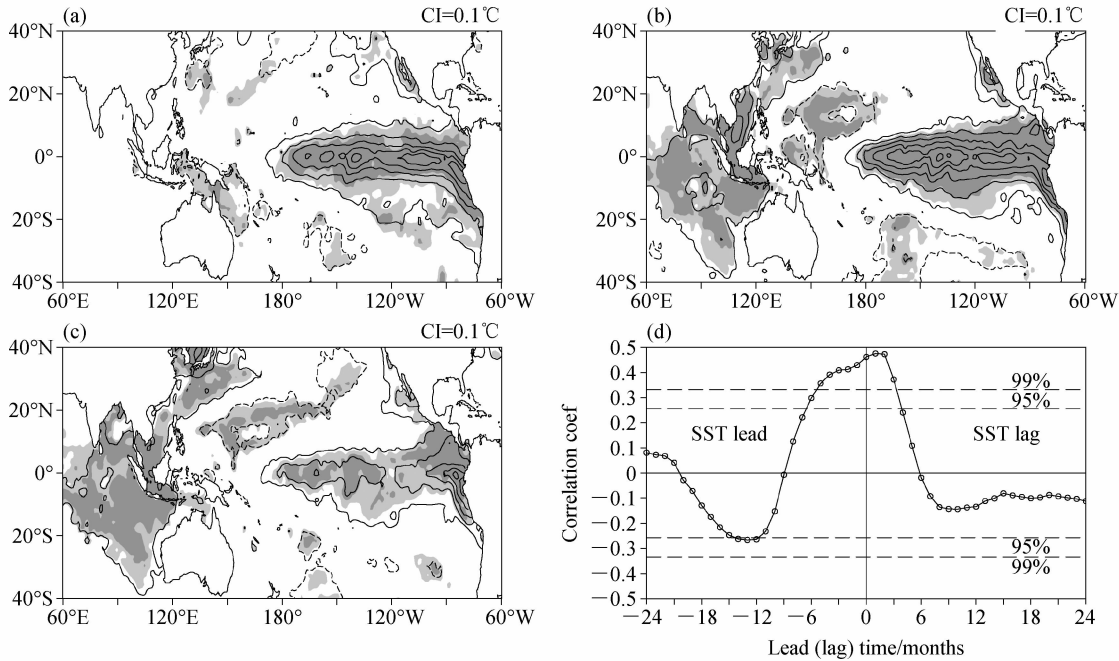


图 8 1951~2009 年我国冬季降水 EOF1 对应的时间序列对 SST 的回归 (a-c) 以及与 Niño3 指数的超前滞后相关 (d): (a) 前期秋季; (b) 同期冬季; (c) 后期春季。实 (虚) 等值线: 正 (负) 值; 零线已省略; 深、浅阴影: 通过 99%、95% 信度检验
Fig. 8 The regression maps of (a) preceding autumn, (b) simultaneous winter, and (c) succeeding spring SST on the normalized first principal component (PC1) of wintertime precipitation over China for the period 1951–2009. (d) The lead/lag correlation between PC1 of wintertime precipitation over China and Niño3 index. Solid (dashed) contours: positive (negative) values; zero lines are omitted; dark and light shadings indicate 99% and 95% confidence levels, respectively

异常信号都通过了 95% 信度检验。为了进一步研究这一海温分布的时间发展, 我们将降水 EOF1 的时间序列与 SST 做超前滞后的回归, 发现赤道中东太平洋的 SST 正信号在前期秋季便已出现 (图 8a), 并可以持续到次年春季 (图 8c), 而印度洋到日本南部的 SST 正信号则可以一直持续到次年的春季 (图 8c)。这种海温异常的发展与典型的 ENSO 循环非常相似。进一步计算 Niño3 指数与冬季降水 EOF1 时间序列的超前滞后相关发现, 当 Niño3 指数超前 5 个月的时候, 二者的相关系数便已超过了 99% 信度, 并且相关系数随时间一直增长, 在 Niño3 指数滞后 2 个月的时候达到最大 (图 8d)。以上结果表明, 在年际变化尺度上, ENSO 循环与我国冬季降水的 EOF1 存在紧密的联系, 而这种联系是通过菲律宾附近的异常反气旋和东亚沿岸的异常南风 (图 4d) (Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000) 来实现的。此外, 超前滞后相关的分析表明, 赤道中东太平洋的 SST 异常对我国冬季降水 EOF1 的变化具有一定的先期预示意义。

与我国冬季降水 EOF2 相联系的 SST 异常信号主要位于大西洋 (图 9)。对应于 EOF2 的正位相, 从前期秋季一直到次年春季在北大西洋的挪威海和热带大西洋地区都有超过 95% 信度的 SST 负异常信号 (图 9a-c), 说明这两个区域的 SST 变化与我国冬季降水年际变化的 EOF2 具有较为紧密的联系。进一步分别计算了北大西洋 (60°N~75°N, 10°W~10°E) 和热带大西洋 (5°S~5°N, 50°W~10°E) SST 与冬季降水 EOF2 时间序列的超前滞后相关, 发现当北大西洋 SST 超前 7 个月时便与 EOF2 时间序列出现超过 99% 信度的显著相关, 这一显著信号可以一直持续到同期冬季 (图 9d)。然而热带大西洋 SST 与 EOF2 时间序列的显著相关只有在 SST 超前 1~2 个月时才能超过 99% 信度, 并且其同期相关系数比北大西洋 SST 与 EOF2 时间序列的相关系数要低 (图 9d)。事实上, 在分析与 EOF2 相关的环流异常时也可以看到, 与 EOF2 相联系的波列在北大西洋地区较弱, 而在欧亚大陆上空尤其是北欧地区最强 (图 6d)。这些结果都表

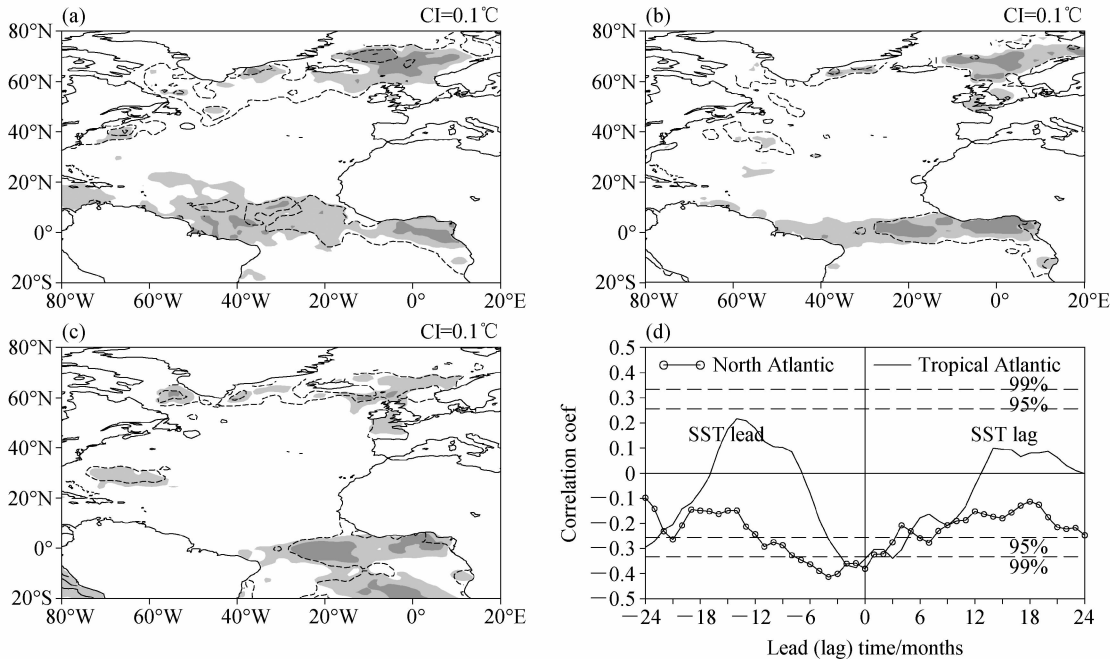


图9 1951~2009年我国冬季降水 EOF2 对应的时间序列对 SST 的回归 (a-c) 以及与北大西洋 (60°N~75°N, 10°W~10°E) 和热带大西洋 (5°S~5°N, 50°W~10°E) SST 的超前滞后相关 (d); (a) 前期秋季; (b) 同期冬季; (c) 后期春季。实 (虚) 等值线: 正 (负) 值; 零线已省略; 深、浅阴影: 通过 99%、95% 信度检验

Fig. 9 The regression maps of (a) preceding autumn, (b) simultaneous winter, and (c) succeeding spring SST on the normalized second principal component (PC2) of wintertime precipitation over China for the period 1951–2009. (d) The lead/lag correlation between PC2 of winter-time precipitation over China and area-averaged SST over the North Atlantic (60°N–75°N, 10°W–10°E) and the tropical Atlantic (5°S–5°N, 50°W–10°E). Solid (dashed) contours; positive (negative) values; zero lines are omitted; dark and light shadings indicate 99% and 95% confidence levels, respectively

明,北大西洋挪威海附近的 SST 与我国冬季降水 EOF2 的联系较热带大西洋 SST 更为紧密,并且具有更好的先期预示意义。

5 总结

本文利用多种资料,通过 EOF 分解的方法分析了我国冬季降水年际变化的主要模态及其对应的大气环流异常和海温异常。结果表明,我国冬季降水年际变化的 EOF1 反映了长江以南地区降水量的一致变化,该模态解释了冬季降水年际变化总方差的近 50%。同时,由于我国冬季降水主要集中在南方地区,因而这一模态在一定程度上也反映了我国冬季总降水量的变化。该模态的时间变化具有显著的 2~4 年周期,同时也有一定的年代际变化特征,表现为 20 世纪 80 年代中期以前南方地区冬季降水偏少,1988 年之后转为偏多,而进入 21 世纪后逐渐接近历史平均值并有再次转为偏少的趋势,降水

的这种年代际变化可能受到东亚冬季风强度年代际变化的影响。我国冬季降水的 EOF2 解释了年际变化总方差的 17.3%,主要反映华南、西南地区与新疆北部、华北和长江中下游地区降水的反位相振荡形势。其时间变化也以 2~4 年周期为主,并在 1980 年至 2005 年有明显的年代际减弱,表明近年来新疆北部和长江中下游地区的冬季降水有年代际增多,而华南地区的冬季降水有年代际减少。

进一步分析与这两个模态相联系的大气环流和海温异常表明,我国冬季降水年际变化的 EOF1 与 ENSO 循环以及东亚冬季风强度的变化有密切的关系,当 ENSO 处于其暖 (冷) 位相的冬季时,东亚冬季风系统偏弱 (强),来自孟加拉湾和南海的异常水汽输送会在我国南方地区形成辐合 (辐散),从而造成该地区降水异常偏多 (少),赤道中东太平洋的 SST 异常对该模态具有一定的潜在预报意

义。与我国冬季降水年际变化 EOF2 相联系的环流表现为欧亚大陆上空具有相当正压结构的类似斯堪的纳维亚型的一个波列, 该波列会引起东亚沿岸的异常北(南)风, 从而造成长江中下游地区水汽辐散(辐合), 而华南地区水汽辐合(辐散), 形成南正(负)北负(正)的降水异常分布, 北大西洋挪威海地区的 SST 异常对该模态具有较好的潜在预报意义。

本文的结果表明, 对近 60 年而言 ENSO 和北大西洋海温是影响我国冬季降水年际变化的重要外强迫因子。然而, 最近有研究指出 ENSO 与东亚冬季气候尤其是地面气温的关系依赖于 PDO 的位相并在 1976 年之后存在年代际减弱 (Wang et al., 2008), 在这种情况下 ENSO 与我国冬季降水的关系是否发生了变化, 是一个值得继续研究的问题。同时, 对于北大西洋海温与欧亚大陆上空波列之间的联系, 目前的结果仅限于统计关系, 由于中纬度地区的海气相互作用较为复杂, 其具体的过程和物理机制还需进一步研究。

致谢 感谢陈际龙博士提供水汽通量资料。

参考文献 (References)

- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (6): 1083–1126.
- Bueh C, Nakamura H. 2007. Scandinavian pattern and its climatic impact [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133 (629): 2117–2131.
- 陈隆勋, 朱乾根, 罗汇邦, 等. 1991. 东亚季风 [M]. 北京: 气象出版社, 362 pp. Chen L X, Zhu Q G, Luo H B, et al. 1991. East Asian Monsoon (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 362 pp.
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17 (1): 46–60.
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D14110, doi: 10.1029/2004JD005669.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. *大气科学*, 30 (5): 863–870.
- Chen W, Kang L H. 2006. Linkage between the Arctic Oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 863–870.
- 陈文, 顾雷, 魏科, 等. 2008. 东亚季风系统的动力过程和准定常行星波活动的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 950–966. Chen W, Gu L, Wei K, et al. 2008. Studies of the dynamic processes of East Asian monsoon system and the quasi-stationary planetary wave activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 950–966.
- Chen W, Wang L, Xue Y K, 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 (10): 1381–1394.
- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究 [J]. *热带气象学报*, 6 (2): 119–128. Ding Y H. 1990. A statistical study of winter monsoons in East Asia [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 6 (2): 119–128.
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D24122, doi: 10.1029/2010JD014761.
- Gao H, Yang S. 2009. A severe drought event in northern China in winter 2008–2009 and the possible influences of La Niña and Tibetan Plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, D24104, doi: 10.1029/2009JD012430.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (10): 2073–2076.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 2006. 中国南方地区冬季风降水异常的分析 [J]. *气象学报*, 64 (5): 594–604. He X C, Ding Y H, He J H, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (5): 594–604.
- 黄荣辉, 李崇银, 王绍武. 2003. 我国旱涝重大气候灾害及其形成机理研究 [M]. 北京: 气象出版社, 483pp. Huang R H, Li C Y, Wang S W. 2003. Research on Severe Climatic Disasters of Droughts and Floods and Formation Mechanism of These Disasters [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 483 pp.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (1): 55–69.
- Huang R H, Chen J L, Huang G. 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.
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 691–719. Huang R H, Gu L, Chen J L, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 691–719.

- 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.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 330–339.
- Kang L H, Chen W, Wei K. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 330–339.
- 康丽华, 陈文, 王林, 等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系 [J]. *气候与环境研究*, 14 (1): 45–53.
- Kang L H, Chen W, Wang L, et al. 2009. Interannual variations of winter temperature in China and their relationship with the atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (1): 45–53.
- 李崇银. 1989. 中国东部地区的暖冬与厄尼诺 [J]. *科学通报*, 34 (4): 283–286.
- Li C Y. 1989. Warmer winter in eastern China and El Niño [J]. *Chinese Science Bulletin*, 34 (21): 1801–1805.
- Li Y Q, Yang S. 2010. A dynamical index for the East Asian winter monsoon [J]. *J. Climate*, 23 (15): 4255–4262.
- 刘实, 布和朝鲁, 陶诗言, 等. 2010. 东亚冬季风强度的统计预测方法研究 [J]. *大气科学*, 34 (1): 35–44.
- Liu Shi, Bueh Cholaw, Tao Shiyang, et al. 2010. A study of the statistical prediction method for the East Asian winter monsoon intensity [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 35–44.
- 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.
- 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, D4407, doi: 10.1029/2002JD002670.
- 施能. 1996. 近 40 年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系 [J]. *应用气象学报*, 7 (2): 175–182.
- Shi N. 1996. Features of the East Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 7 (2): 175–182.
- 陶诗言. 1957. 阻塞形势破坏时期的东亚一次寒潮过程 [J]. *气象学报*, 28 (1): 63–74.
- Tao S Y. 1957. A synoptic and aerological study on a cold wave in the Far East during the period of the break down of the blocking situation over Euroasia and Atlantic [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 28 (1): 63–74.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 22 (4): 399–407.
- Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 399–407.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 337–350.
- Tao S Y, Wei J. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 337–350.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (1): 61–78.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20702, doi: 10.1029/2008GL035287.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2009a. Interannual variations of East Asian trough axis at 500 hPa and its association with the East Asian winter monsoon pathway [J]. *J. Climate*, 22 (3): 600–614.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009b. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. *J. Climate*, 22 (18): 4860–4872.
- Wang L, Chen W. 2010. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (4): 855–870, doi: 10.1007/s00376-00009-09094-00373.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2010. Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate [J]. *International Journal of Climatology*, 30 (1): 153–158.
- 王林, 陈文, 冯瑞权, 等. 2011. 北太平洋涛动的季节演变及其与我国冬春气候异常的联系 [J]. *大气科学*, 35 (3): 393–402.
- Wang Lin, Chen Wen, Feng Soikun, et al. 2011. The seasonal march of the North Pacific Oscillation and its association with the interannual variations of China's climate in boreal winter and spring [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (3): 393–402.
- 王遵亲, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1068–1076.
- Wang Z Y, Ding Y H. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. *Chinese Journal of the Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1068–1076.
- 武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. *大气科学*, 23 (6): 641–651.
- Wu B Y, Huang R H. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J]. *Chinese Journal of the Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (6): 641–651.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (19): doi: 10.1029/2002GL015373.
- Xu J J, Chan J C L. 2002. Interannual and interdecadal variability of winter precipitation over China in relation to global sea level pres-

sure anomalies [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (5): 914–926.

曾剑, 张强, 王同美. 2010. 东亚冬季风与中国南方冬季降水的关系分析 [J]. *高原气象*, 29 (4): 975–981. Zeng J, Zhang Q, Wang T M. 2010. Analysis on relationship of East-Asian winter monsoon intensity and winter precipitation in southern China [J]. *Plateau Meteorology*, 29 (4): 975–981.

Zhang R H, 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 (1): 49–62.

赵琳娜, 马清云, 杨贵明, 等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 556–566. Zhao L N, Ma Q Y, Yang G M, et al. 2008.

Disasters and its impact of a severe snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 13 (4): 556–566.

Zhou L T. 2010. Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process [J]. *International Journal of Climatology*, 31: 677–686, doi: 10.1002/joc.2101.

Zhou L T, Wu R G. 2010. Respective impacts of the East Asian winter monsoon and ENSO on winter rainfall in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D02107, doi: 10.1029/2009JD012502.

Zhou B Z, Gu L H, Ding Y H, et al. 2011. The great 2008 Chinese ice storm: Its socioeconomic–ecological impact and sustainability lessons learned [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92 (1): 47–60.

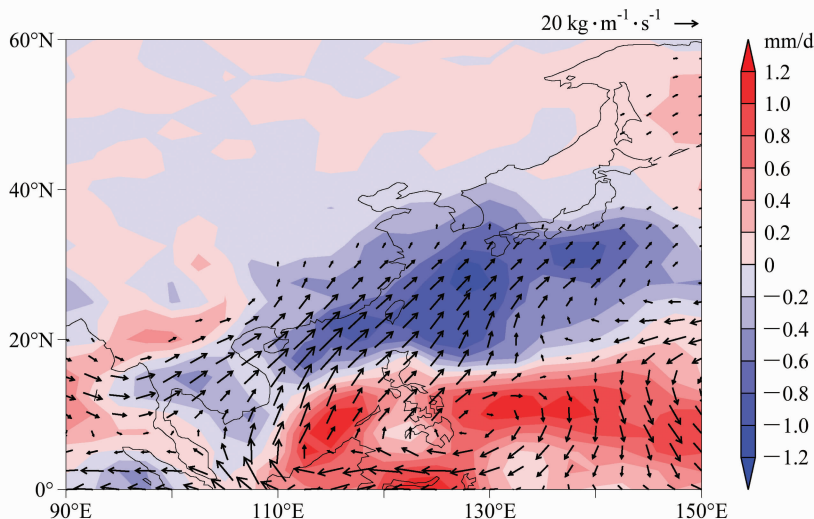


图 5 1951~2009 年我国冬季降水 EOF1 对应的时间序列对整层水汽输送通量 (箭头) 和整层水汽输送通量散度 (阴影) 的回归

Fig. 5 The regression map of water vapor transport (arrow) and its divergence (shading) on the normalized first principal component (PC1) of wintertime precipitation over China for the period 1951–2009

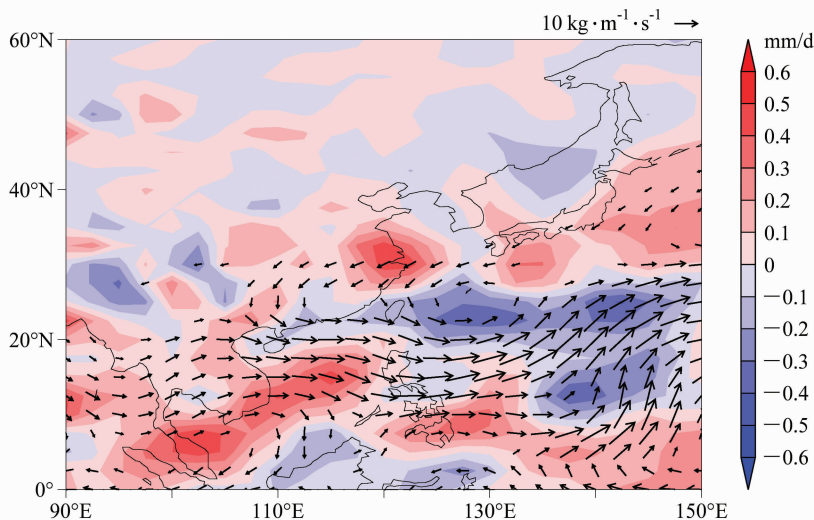


图 7 同图 5, 但为 EOF2

Fig. 7 As in Fig. 5, but for EOF2