

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.

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

黄荣辉 陈际龙 刘永

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

摘 要 本文利用 1958~2000 年 ERA-40 再分析每日资料 and 我国 516 台站降水资料以及 EOF 方法, 分析了我国东部季风区夏季降水异常主模态的年代际变化特征及其与东亚上空水汽输送通量时空变化的关系。分析结果表明了我国东部季风区夏季降水的时空变化存在两种主模态: 第 1 主模态不仅显示出明显的准两年周期振荡的年际变化特征且也有明显的年代际变化, 在空间上具有经向三极子型分布; 第 2 主模态显示出明显的年代际变化特征, 且在空间上具有经向偶极子型分布。这表明了这两主模态有明显的年代际变化, 在 1958~1977 年期间我国东部夏季降水异常分布为从南到北“+ - +”经向三极子型分布, 而在 1978~1992 年期间降水异常出现了与 1958~1977 年相反的分布, 为从南到北“- + -”经向三极子型分布。然而, 在 1993~1998 年期间, 由于第 2 主模态的作用增大, 我国东部夏季降水异常为从南到北经向三极子型与“- + -”偶极子型模态的结合, 这使华南夏季降水明显增加。并且, 分析结果还表明: 这两主模态的年代际变化与东亚上空夏季水汽输送通量的时空变化密切相关, 它不仅与东亚和西北太平洋上空似如东亚/太平洋型 (EAP 型) 遥相关波列分布的夏季水汽输送通量异常年代际变化有关, 而且与欧亚上空中高纬度西风带似如欧亚型 (EU 型) 遥相关波列的夏季水汽输送通量异常年代际变化密切相关。

关键词 降水 主模态 水汽输送 通量 时空变化

文章编号 1006-9895 (2011) 04-0589-18

中图分类号 P461

文献标识码 A

Interdecadal Variation of the Leading Modes of Summertime Precipitation Anomalies over Eastern China and Its Association with Water Vapor Transport over East Asia

HUANG Ronghui, CHEN Jilong, and LIU Yong

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

Abstract Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies in the monsoon regions of eastern China and its association with the spatio-temporal variations of summertime water vapor transport fluxes over East Asia are analyzed by using the daily data of the ERA-40 reanalysis and precipitation data at 516 observational stations of China for 1958–2000 and the EOF analysis method. The analysis results show that there are two leading modes in the spatio-temporal variations of summertime precipitation anomalies over the monsoon region of

收稿日期 2010-07-12, 2010-03-25 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB950403、2009CB421405, 国家自然科学基金资助项目 40975046, 国家公益性行业(气象)专项 GYHY201006021, 国家自然科学基金资助项目 40730952

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 主要从事大气环流理论和气候动力学研究。E-mail: hrh@mail.iap.ac.cn.

eastern China: The first leading mode exhibits not only a characteristic of obvious interannual variation with a quasi-biennial oscillation, but also a feature of interdecadal variability, and its spatial distribution is of a meridional tripole pattern. And the second leading mode exhibits a characteristic of obvious interdecadal variability, and its spatial distribution is of a meridional dipole pattern. This shows that these two leading modes have a significant interdecadal variability. During the period of 1958–1977, the distribution of summertime precipitation anomalies in eastern China exhibited a “+—+” meridional tripole pattern from the south to the north, and the distribution of precipitation anomalies for 1978–1992 showed a “—+—” meridional tripole pattern in the region, which was opposite to that for 1958–1977, but during the period of 1993–1998, since the role of the second leading mode in summertime precipitation anomalies in eastern China was intensified, the distribution of summertime precipitation in this region showed a combination of “+—+” meridional tripole pattern and “+—” meridional pattern, which caused the increase of summertime precipitation in South China. Moreover, the analysis results also show that the interdecadal variation of these two leading modes is closely associated with the spatio-temporal variations of summertime water vapor transport fluxes over East Asia, which is associated not only with the interdecadal variation of the EAP pattern teleconnection-like wave-train distribution of summertime water vapor transport flux anomalies over East Asia and the western North Pacific, but also with the interdecadal variation of the EU pattern teleconnection-like wave-train distribution of summertime water vapor transport flux anomalies in the westerly zone over middle and high latitudes of Eurasia.

Key words precipitation, leading mode, water vapor transport, flux, spatio-temporal variations

1 引言

水分循环是涉及到气候系统各子系统的一个重要过程。而在水分循环中,降水和水汽输送起着重要作用,海洋向陆地输送大量水汽,它是大气中水汽的主要源泉。从海洋输送来的水汽在陆地经凝结变成降水,又形成陆地的水分循环。在我国东部季风区,亚洲季风从孟加拉湾、南海和热带西太平洋给此区域带来大量水汽,使此地区有充沛的降水。在 70 多年前,我国著名气候学家竺可桢 (1934) 首先提出东亚夏季风对中国降水的影响。之后,涂长望和黄仕松 (1944) 研究了东亚夏季风的进退对中国降水雨带北进和南撤的影响。他们的研究开辟了关于东亚夏季风变化及其对我国降水影响的研究之路。继他们之后, Tao and Chen (1987) 提出了东亚夏季风系统的概念,并且从环流结构论述了东亚夏季风系统是和一个既与南亚季风系统有联系又有相对独立的季风环流系统。

关于东亚夏季风系统降水的年际变化已有不少研究。许多研究指出了东亚夏季风降水存在着准两年周期振荡 (缪锦海和 Lau, 1990; Tian and Yasunari, 1992; Chang et al. 2000), 并且, Huang et al. (2004)、黄荣辉等 (2006) 指出了中国东部夏季降水的准两年周期振荡是与东亚上空夏季风水汽输

送通量的准两年周期振荡密切相关, 并是热带西太平洋热力变化准两年周期所引起的。此外, Ding (2007) 也指出了准两年周期振荡也是亚洲季风年际变化的主模态。近年来, 随着全球气候变化研究热潮的兴起, 对于东亚夏季风年代际变化研究逐渐深入。黄荣辉等 (1999)、周连童和黄荣辉 (2003) 从东亚夏季风降水的变化提出了在 20 世纪 70 年代中后期东亚夏季气候发生了一次明显的年代际变化, 并指出这次年代际变化主要特征是: 夏季到达华北地区偏南风明显变弱且降水明显偏少, 而长江、淮河流域降水明显增强; 并且, 黄荣辉等 (1999)、Huang et al. (2004) 指出发生在 20 世纪 70 年代中后期及之后的东亚夏季气候年代际变化可能是由于热带东太平洋发生了年代际的 “El Niño 现象” 所引起, 而张庆云等 (2007) 以及邓伟涛等 (2009) 指出, 中国夏季降水的年代际变化与北太平洋中纬度海温年代际变化 (PDO) 有关。最近, Huang et al. (2007) 利用中国 160 站降水资料进行分析, 分析结果表明了中国东部季风区夏季降水存在着两个主模态, 即从南到北经向三极子型和偶极子型分布模态, 并表明了这两模态不仅有年际变化, 而且有明显的年代际变化。Kwon et al. (2007) 的研究表明了, 在 20 世纪 90 年代中期东亚夏季风又发生了一次明显的年代际变化, 这次变化

是中国南部夏季降水明显增加为特征。Ding et al (2008) 的研究也表明了中国东部夏季降水分别于 1978 年和 1992 年前后发生了两次显著的年代际变化, 这两次年代际变化特征是东亚夏季风降水雨带明显南移。邓伟涛等 (2009) 也指出了中国夏季降水型在 20 世纪中后期和 90 年代初发生了明显的年代际变化。

亚洲季风区夏季降水的变化是与此区域上空水汽输送的变化紧密相关。黄荣辉等 (1998)、陈际龙和黄荣辉 (2007) 还研究了东亚季风区与南亚季风区夏季水汽输送特征的差异, 指出了东亚季风区夏季水汽输送特征明显不同于南亚季风区的水汽输送特征, 东亚季风区夏季经向水汽输送分量很大, 而南亚季风区夏季水汽输送以纬向输送为主, 且东亚季风区夏季降水主要由水汽平流和季风环流的辐合所引起, 而南亚季风区夏季降水主要依赖于季风环流的辐合。最近, 关于亚洲季风夏季水汽输送的时空变化特征已引起一些学者的兴趣。Zhang (2001) 指出, 印度夏季风系统的水汽输送与东亚夏季风系统的水汽输送呈现反相关。Zhou et al. (2010) 利用 NCEP/NCAR 再分析资料的分析也表明了印度季风区水汽输送 5~7 月份最强, 主要是纬向输送, 而东亚季风区水汽输送 6~7 月份最强, 经向输送分量非常大, 特别从南海向北的水汽输送很重要, 并且还指出了亚洲季风区夏季水汽输送场 EOF1 的时间系数从 1951~2005 年呈下降趋势。因此, 研究我国东部季风区降水的时空变化特征及其与东亚夏季水汽输送的关联, 这对于认识东亚季风区夏季旱涝灾害和水分循环的变异特征具有重要科学意义。

鉴于许多研究指出了东亚季风区夏季降水在 20 世纪 70 年代中后期和 90 年代初存在明显的年代际变化 (黄荣辉等, 1999; 黄荣辉等, 2006; 陈际龙和黄荣辉, 2007; 张庆云等, 2007; Kwon et al., 2007; Ding et al., 2008; 邓伟涛等, 2009), 那么, 这些变化与 Huang et al. (2007) 所指出的我国东部季风区降水异常主模态的年代际变化有何关联? 并且, 由于东亚季风区夏季降水的时空变化是与季风区水汽输送的时空变化密切相关, 因此, 有必要从更详细的降水观测资料和再分析资料来分析我国东部季风区夏季降水与东亚地区上空水汽输送通量在年代际时间尺度上的变化特征及其它它们之间的关

联, 从而来说明东亚季风区夏季水汽输送的年代际变化对我国东部夏季降水年代际变化的影响。为此, 本文从我国 756 个降水观测站中挑选出 516 站降水资料, 并利用 ERA-40 每日 4 个时次的比湿和风场再分析资料以及有关 EOF 分析方法, 来分析研究我国东部降水异常主模态的年代际变化特征以及东亚夏季水汽输送变化之间的关系, 并且, 通过东亚季风区及欧亚上空中高纬度西风带夏季水汽输送通量异常波列分布的年代际变化进一步讨论夏季水汽输送通量异常的变化对我国东部季风区夏季降水异常主模态年代际变化的影响。

2 我国东部夏季降水时空变化的主模态

Huang et al. (2007) 从我国 160 个降水观测站资料分析了我国东部夏季降水的时空变化特征, 指出了我国东部季风区夏季降水存在着两个主模态, 即经向三极子型和偶极子型模态。但是, 他们当时主要分析了降水的年际变化, 对模态的年代际变化没有详细分析。为此, 本节利用更详细降水资料, 即从全国 756 降水观测站资料集挑出 516 站降水资料, 并利用 EOF 分析方法来分析我国东部季风区夏季降水时空变化的主模态。

2.1 我国东部季风区夏季降水时空变化的主模态

2.1.1 第 1 主模态

图 1a 和图 1b 分别是我国东部 1958~2000 年夏季降水 EOF1 的空间分布和相应的时间系数序列。从图 1a 可以看到, 我国东部季风区夏季降水 EOF1 的空间分布呈现从南到北“+ - +”经向三极子型分布, 并且, 从图 1b 可以明显看到, 我国东部季风区夏季降水 EOF1 的时间系数从 20 世纪 70 年代中后期起呈现 2~3 年周期的年际变化特征, 即准两年周期振荡。

从图 1b 还可以看到, 我国东部季风区夏季降水的 EOF1 时间系数还有明显的年代际变化。此外, 从图 1c 所示的我国东部季风区夏季降水时空变化第 1 主模态时间系数的小波分析可以看到: 它除了 2~3 年周期变化外, 还有一个 8 年左右的年代际变化, 在 20 世纪 90 年代初, 这个周期的变化特别明显。从 20 世纪 50 年代到 70 年代中后期 (大约 1958~1977 年), EOF1 的时间系数为正, 结合图 1a 可以看到, 这时期华南及华北和东北南部

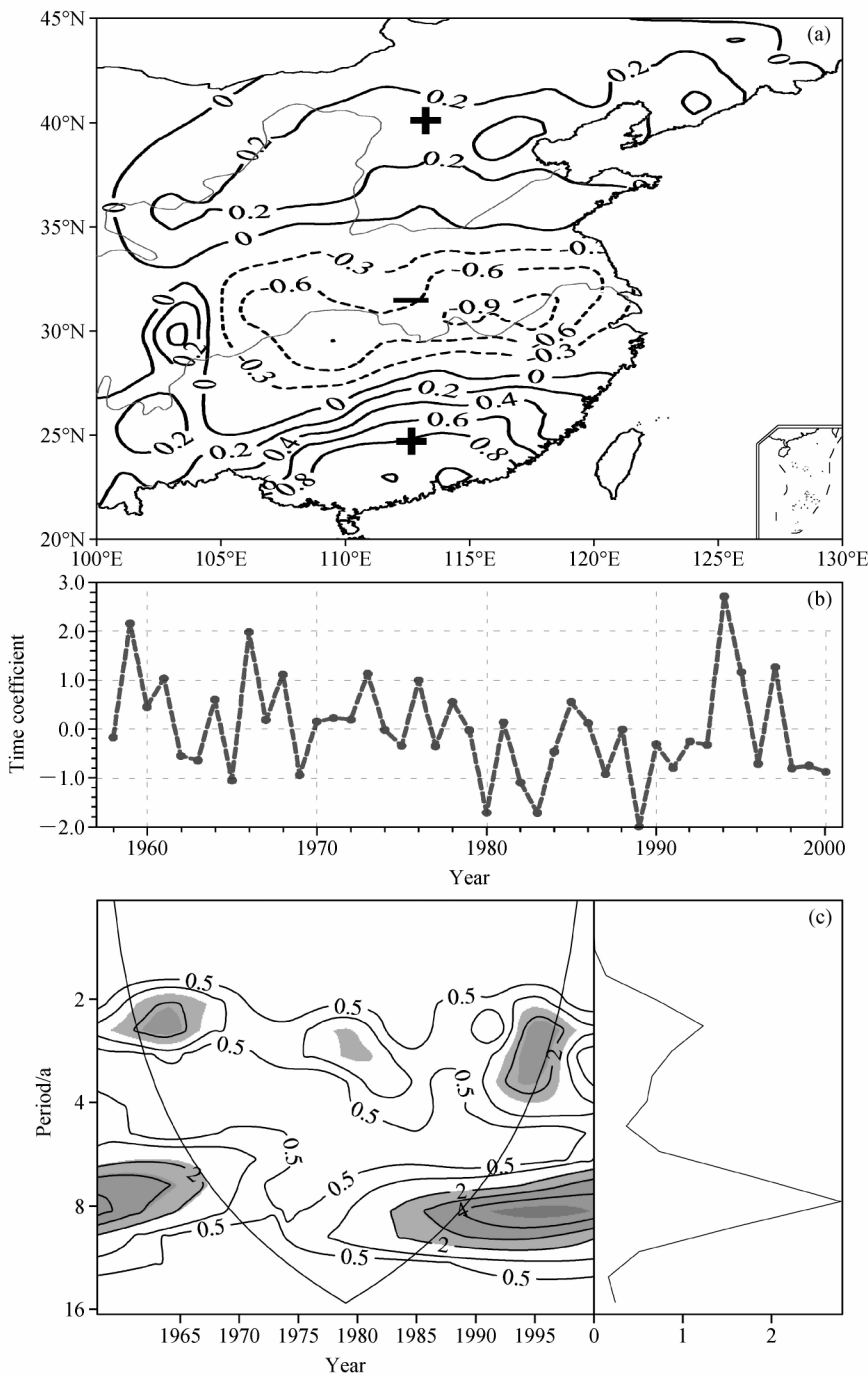


图1 我国东部 1958~2000 年夏季降水 EOF 分析第 1 主分量 [EOF1 (对方差的贡献为 15.3%)] 的空间分布 (a, 实、虚线表示正、负信号) 和相应的时间系数序列 (b) 以及时间系数的小波分析 (c)。降水资料取自中国气象局 756 测站降水资料集 (下同)

Fig. 1 (a) Spatial distribution and (b) corresponding time coefficient series of the first component of EOF analysis (EOF1) of summertime precipitation in eastern China for 1958–2000 and (c) the analysis of wavelet spectrum of the time series. The solid and dashed lines in (a) indicate positive and negative signals, respectively, and the EOF1 explains 15.3% of the variance. The precipitation data is from the precipitation dataset at 756 stations of China by China Meteorological Administration (CMA)

地区夏季降水偏多, 而长江、淮河流域夏季降水偏少, 这表明了这时期我国东部夏季降水异常第一主模态为从南到北“+ - +”经向三极子型分布; 从

70 年代中后期到 90 年代初 (大约在 1978~1992 年), EOF1 的时间系数为负, 结合图 1a 可以看到, 这时期华南和华北地区夏季降水偏少, 而长江流域

和东北地区夏季降水偏多, 这表明了这时期我国东部夏季降水异常第一主模态与 1958~1977 年时期夏季降水异常主模态的空间分布相反, 为从南到北“一十一”经向三极子型分布; 从 90 年代初到 90 年代末 (大约在 1993~1998 年), EOF1 的时间系数从负又变成正, 结合图 1a 可以看到, 华南及华北和东北南部地区夏季降水又偏多, 而长江、淮河流域应偏少, 这与 1958~1977 年时期夏季降水异常模态的分布相同, 为从南到北经向“十一十”经向三极子型分布。然而, 这时期我国东部夏季降水的实况却是华北和东北南部降水有所增加, 而华南地区夏季降水明显偏多, 洪涝灾害频繁发生, 而长江、淮河流域夏季降水却没有减少, 这可能是我国东部季风区夏季降水时空变化另一模态在起作用。

2.1.2 第 2 主模态

图 2a 和图 2b 分别是 1958~2000 年我国东部夏季降水 EOF2 的空间分布和相应的时间系数序列。与图 1a 所示的我国东部季风区夏季降水 EOF1 的空间分布相比较, 在图 2a 所示的我国东部季风区夏季降水 EOF2 的空间分布显示出与图 1a 不同的分布, 它出现了一个从南到北“一十”经向偶极子型分布。并且, 与图 1b 所示的我国东部季风区夏季降水 EOF1 时间序列相比较, 在图 2b 所示的我国东部季风区夏季降水 EOF2 的时间序列不仅有 3~4 年周期的年际变化, 而且更显示出年代际变化。此外, 从图 2c 所示的我国东部季风区夏季降水时空变化第二主模态时间系数的小波分析可以看到: 它除了有大约 3~4 年周期变化外, 还有一个 6 年左右的年际变化, 这个周期的变化在 20 世纪 70 年代初特别明显。此外, 还有一个 10 年以上的年代际变化 (受边界影响意义不大), 特别从 20 世纪 90 年代初到 90 年代末 (大约 1993~1998 年), EOF2 的时间系数序列从正变成较大的负, 结合图 2a 可以看到, 此模态反映了从 20 世纪 90 年代初到 90 年代末华北和东北南部夏季降水应偏少, 而长江流域和华南地区夏季降水应偏多, 这表明这时期我国东部夏季降水第二模态为从南到北“十一”经向偶极子型分布。然而, 在此时期华北和东北南部夏季降水也有所增多, 这是由于第一模态所起的作用。

从上分析可以看到, 我国东部季风区夏季降水的时空变化有两个主模态, 即在空间分布上从南到北为经向三极子型和经向偶极子型, 这两个模态对

方差的贡献为 28.5%。并且, 无论是经向三极子型模态或是经向偶极子型模态, 它们不仅有年际变化, 而且有很明显的年代际变化。

2.2 我国东部夏季降水主模态的年代际变化

关于我国东部季风区夏季降水的年际变化特征及其与水汽输送的关系已在黄荣辉等 (2006) 的文章中讨论了, 本文不再重复。因此, 本节从图 1a、b 和图 2a、b 进一步列表更清楚地分析和讨论上述两个主模态的年代际变化。如表 1 所示, 在 1958~1977 年时期, 我国东部季风区夏季降水异常第 1 主模态空间分布是“十一十”经向三极子型分布, 即华北和华南地区夏季降水偏多, 而长江、淮河流域夏季降水偏少; 在 1978~1992 年时期, 我国东部夏季降水异常第 1 主模态空间分布型变成与 1958~1977 年时期相反的分布, 即“一十一”经向三极子分布, 也就是华北和华南地区夏季降水偏少, 而长江、淮河流域夏季降水偏多。在 1993~1998 年时期, 我国东部夏季降水异常型从第一模态看, 应是“十一十”经向三极子型, 即华北和东北南部夏季降水应偏多, 江南和华南地区降水应偏多, 而长江和淮河流域降水应偏少。

并且, 如表 2 所示, 在 1958~1977 年时期, 我国东部夏季降水第 2 主模态空间分布从南到北呈现“一十”经向偶极子型分布, 即华北和东北南部地区夏季降水偏多, 长江、淮河流域和华南地区夏季

表 1 我国东部季风区夏季降水第 1 模态的年代际变化
Table 1 The interdecadal variation of the EOF1 of summer rainfall in the monsoon region of eastern China

地区	年代		
	1958~1977 年	1978~1992 年	1993~1998 年
华北和东北南部	+	-	+
长江和淮河流域	-	+	-
华南	+	-	+

表 2 我国东部季风区夏季降水第 2 模态的年代际变化
Table 2 The interdecadal variation of the EOF2 of summer rainfall in the monsoon region of eastern China

地区	年代		
	1958~1977 年	1978~1992 年	1993~1998 年
华北和东北南部	+	+	-
长江和淮河流域	-	-	+
华南	-	-	+

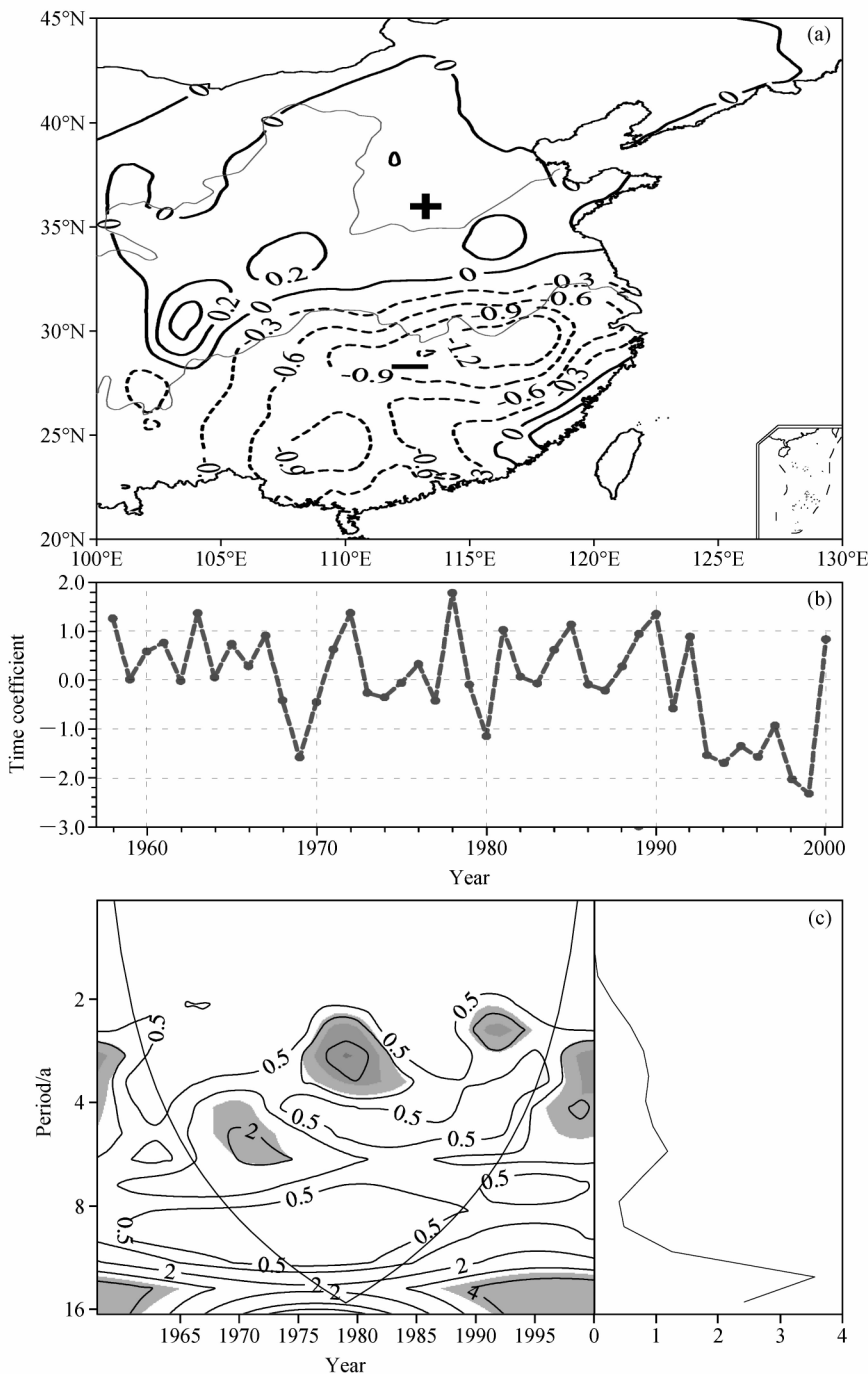


图2 同图1, 但为 EOF2 (对方差的贡献为 13.2%)

Fig. 2 As in Fig. 1 except for EOF2, the EOF2 explains 13.2 % of the variance

降水偏少; 在 1978~1992 年时期, 我国东部夏季降水第 2 模态空间分布与 1958~1977 年时期的分布型相同; 在 1993~1998 年时期, 我国东部夏季降水第 2 模态空间分布出现了与 1992 年之前不同的空间分布型, 即出现了从南到北“+”经向偶极子型分布, 即华北和东北南部地区夏季降水偏

少, 而长江、淮河流域和华南地区夏季降水偏多, 并且, 它的时间系数明显增大。正是由于在此时期我国东部夏季降水时空变化第 1 和第 2 模态 (即 EOF1 和 EOF2) 在华南地区均偏多产生叠加, 致使华南地区在此时期夏季降水严重偏多, 洪涝灾害频繁发生, 而在长江流域及华北和东北南部地区两

模态却产生相反作用，致使长江流域降水没有偏少，而华北和东北南部夏季降水并没有明显偏多。

我国东部季风区夏季降水异常空间分布的年代际变化是与上述两个主模态空间分布的年代际变化密切相关。

2.3 我国东部季风区夏季降水异常的年代际变化特征及其与夏季降水主模态的关系

为了更清楚地看到我国东部季风区夏季降水异常的年代际变化与夏季降水主模态空间分布型的年代际变化的关系，本节首先从我国 756 站降水资料所挑出 516 站夏季降水资料来分析我国夏季降水异常的年代际分布。图 3a~d 分别是我国 1958~1977 年、1978~1992 年、1993~1998 年和 1999~2009 年期间平均的夏季降水距平百分率的分布。从图 3a 可以看到，在 1958~1977 年期间，我国东

部华北和华南地区夏季降水偏多，出现正距平，洪涝灾害频繁发生，而长江流域和江淮地区夏季降水偏少，出现负距平，这正是上面所述的我国夏季降水异常从南到北的经向“+ - +”三极子型分布。并且，从图 3b 可以看到，在 1978~1992 年期间，我国东部季风区夏季降水距平分布出现了与 1958~1977 年期间相反的分布，在华北和东北南部及华南地区夏季降水偏少，出现负距平，发生了持续性干旱灾害，而长江流域、汉水和四川盆地夏季降水偏多，出现了正距平，在此时期长江流域出现了多次洪涝灾害，这正是上面所述的我国东部夏季降水异常从南到北的经向“- + -”三极子型分布。这些与邓伟涛等 (2009) 的分析结果一致。而从图 3c 可以看到，在 1993~1998 年期间，我国东部夏季从南到北出现了降水偏多的现象，不仅在华南地区降

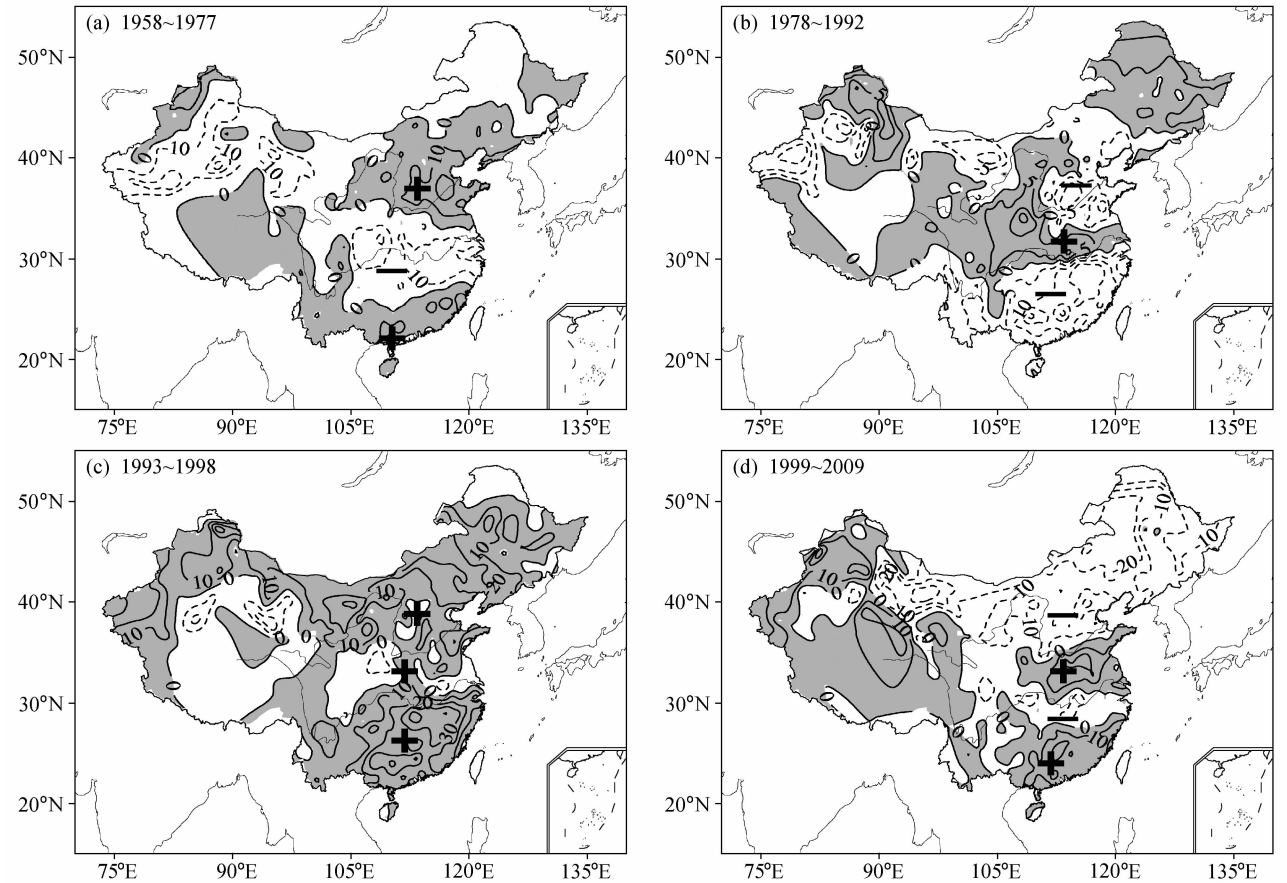


图 3 我国各时期平均的夏季 (6~8 月) 降水距平百分率 (%) 分布图: (a) 1958~1977 年; (b) 1978~1992 年; (c) 1993~1998 年; (d) 1999~2009 年。实、虚线: 正、负距平; 阴影: 正距平
Fig. 3 Distributions of summertime (Jun - Aug) precipitation anomaly percentages averaged for (a) 1958 - 1977, (b) 1978 - 1992, (c) 1993 - 1998, and (d) 1999 - 2009 in China. The solid and dashed lines indicate positive and negative anomalies, respectively, and positive anomalies are shaded

水出现了较大的正距平, 洪涝灾害频繁发生, 而且在长江、淮河流域夏季降水也出现了正距平, 华北和东北西部地区夏季降水也有弱的正距平, 在此期间华北地区从 70 年代中后期到 90 年代初期间所发生的持续干旱有所缓和, 这是上面所述的我国东部夏季降水异常从南到北的经向“十一+”三极子型与经向“十一”偶极子型分布的叠加。此外, 从图 4d 可以看到, 在 1999~2009 年期间, 我国东部夏季降水在东北和华北地区偏少, 出现明显负距平, 而从华南地区到淮河流域 (除长江沿岸地区) 夏季降水偏多, 从而形成了“南涝北旱”的降水异常分布型, 即出现了从南到北“十一”经向偶极子型分布。邓伟涛等 (2009) 指出我国东部夏季降水在 20 世纪 90 年代初从经向“十一+”三极子分布变成从北到南“一十”偶极子型分布。本文分析结果表明, 从 20 世纪 90 年代初偶极子型模态开始起作用, 到 90 年代末我国东部夏季降水异常才从经向三极子型变成偶极子型分布。

在上一节关于我国东部季风区夏季降水异常的年代际变化分析的基础上, 本节再详细讨论我国东部季风区夏季降水异常的年代际变化与我国东部夏季降水主模态的关系。图 4 是沿我国东部 115°E (110°E~120°E 的平均) 夏季 (6~8 月) 降水距平百分率的时间—纬度剖面图。从图 4 可以清楚看到, 我国东部夏季降水异常分布有很明显的年代际变化。如图 4 所示, 在 1958~1977 年期间, 我国东

部夏季降水异常分布是: 华北和东北南部地区降水明显偏强, 有较大的正距平, 而在长江流域和江淮流域偏少, 有明显的负距平, 华南地区也是降水偏强, 有正距平, 即出现了与表 1 相同的从南到北“十一+”经向三极子型分布; 并且, 在 1978~1992 年期间, 我国东部夏季降水异常的分布发生很明显的年代际变化, 这时期降水异常分布正好与 1958~1977 年期间的分布相反, 即在我国华北和东北南部地区降水偏少, 有明显的负距平, 出现持续性干旱, 长江流域和江淮流域降水偏多, 有明显的正距平, 洪涝灾害频繁发生, 而华南地区有很明显的负距平, 降水明显偏少, 出现了与表 1 相同的从南到北“一十一”经向三极子型分布。这反映这时期东亚夏季偏南季风减弱。但是, 这时期东北中部和北部降水却从偏少变成偏多, 同样, 我国西北干旱/半干旱区夏季降水在这时期也增加 (Huang et al., 2004), 这反映中纬度西风带水汽输送强盛。关于发生在 20 世纪 70 年代中后期东亚夏季风和气候异常的年代际变化及其成因, 黄荣辉等 (1999)、Huang et al. (2004, 2007) 已做了详细讨论, 并指出这可能是由于热带太平洋发生的“年代际 El Niño 现象”引起东亚夏季风减弱所致。最近, Ding et al. (2008) 从亚洲季风的年代际变化也指出了亚洲夏季风在 1978 年前后发生了明显减弱的年代际变化。

此外, 从图 4 还可以看到, 我国东部夏季降水

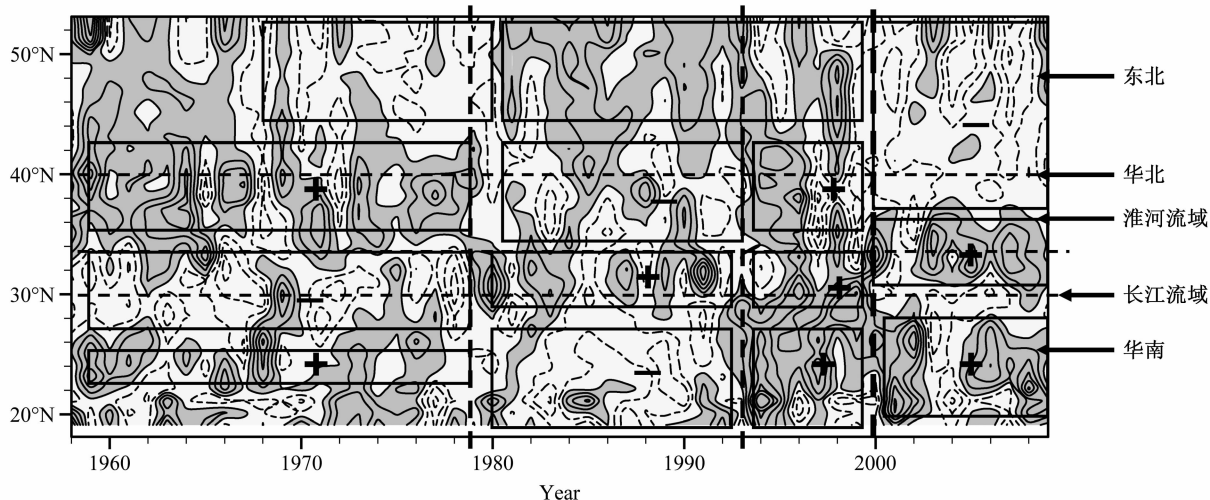


图 4 我国东部沿 115°E (110°E~120°E 的平均) 夏季 (6~8 月) 降水距平百分率 (%) 的纬度—时间剖面图。实、虚线: 正、负距平; 阴影: 正距平

Fig. 4 Latitude-time cross section of summertime (Jun-Aug) precipitation anomaly percentage along 115°E (average for 110°E-120°E) in eastern China. The solid and dashed lines indicate positive and negative anomalies, respectively, and positive anomalies are shaded

异常在 1993 年又发生了明显的年代际变化, 在 1993~1998 年期间, 我国东部季风区夏季降水距平的分布是: 华南地区明显正距平, 降水明显增多, 而华北和东北南部降水也有正距平, 表明此区域降水比 1978~1992 年期间增多, 干旱有所缓和, 在长江流域和江淮流域也有正距平, 表明这两流域降水并没有比 1978~1992 年期间减少。这表明了在这时期我国东部降水异常出现了从南到北一致增多的趋势。正如前面所分析, 这是由于在图 2a、b 所示的我国东部夏季季风降水第 2 模态在此时期的影响增大的原因。因此, 我国东部季风区在 1993~1998 年期间夏季降水异常是第一模态的从南到北“+ - +”经向三极子型分布与第 2 模态的经向“+ -”偶极子型分布的叠加。Kwon et al. (2007) 指出了东亚夏季风在 20 世纪 90 年代中期发生了一次明显的年代际变化, Ding et al. (2008) 的研究也表明了亚洲夏季风在 1992 年前后又发生了一次年代际变化。本文分析结果表明, 这次中国东部季风降水的年代际变化是第 1 主模态和第 2 主模态共同作用的结果。

同样, 从图 4 还可以看到, 在 1999 年中国东部夏季降水又发生了一次明显的年代际变化。这次年代际变化表现为我国华北和东北降水明显减少, 而淮河流域和华南地区夏季降水继续偏多, 从而形成了“南涝(除沿长江附近地区)北旱”的降水异常分布型。这表明了我国东部夏季季风降水异常分布型完全从三极子型变成偶极子型。关于此次降水和环流的年代次变化特征已在 Huang et al. (2010) 详细讨论, 本文不再重复。

从上述关于我国东部夏季降水异常分布的年代际变化及其与我国东部夏季降水主模态的关系分析可以看到: 在 20 世纪 70 年代中后期之后我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化只是与 70 年代中后期之前的降水异常模态符号相反, 但仍是三极子型分布。这可能是由于在这两个时期我国夏季降水第 2 模态的时间系数还比较小, 使得第 1 模态起主要作用。因此, 在这两时期我国东部夏季降水异常的空间分布类似于第 1 模态的空间分布。然而, 发生在 20 世纪 90 年代初期夏季降水异常模态的年代际变化却是夏季降水异常模态转换的开始, 在 1993~1998 年时期, 我国东部夏季降水异常第 2 模态的时间系数明显变大, 因此, 在此时期我国东部

夏季降水异常的空间分布既不同于第 1 模态的空间分布, 又不同于第 2 模态的空间分布, 而是这两主模态空间分布的叠加, 即经向三极子型与经向偶极子型的叠加。到了 90 年代末, 我国东部夏季降水异常模态, 从经向三极子型完全变成经向偶极子型(除长江流域), 这可能由于在 1999 年之后我国东部夏季降水第 2 主模态起主要作用所致。

3 东亚夏季水汽输送通量的时空变化特征及其与中国东部夏季降水异常模态的关系

由于我国东部夏季降水的时空变化是直接与东亚季风区夏季水汽输送的时空变化密切相关, 因此, 在下方我们将分析东亚夏季水汽输送通量的时空变化特征。

3.1 水汽输送通量

假设 100 hPa 以上大气没有水汽, 这样, 单位气柱整层大气水汽输送通量 $Q = (Q_\lambda, Q_\varphi)$ 可由下式来计算, 即

$$Q = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} \mathbf{V} \cdot q dp = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} (u, v) \cdot q dp. \quad (1)$$

由 (1) 式分别可得纬向和经向水汽输送通量 Q_λ 和 Q_φ 的计算公式如下:

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} u \cdot q dp, \quad (2)$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_s} v \cdot q dp, \quad (3)$$

上式中 q 为某单位气柱的比湿, u 和 v 分别为东西风和南北风分量, p_s 是地表气压, 考虑到我国西部地形复杂, 故 p_s 取为随 λ 、 φ 而变化的地表气压。

依据与利用我国测站降水资料所分析的我国降水年际和年代际变化相比较的结果, 似乎利用 ERA-40 再分析资料所计算的水汽输送通量更合理(陈际龙和黄荣辉, 2007), 因此, 在下面的计算就采用 ERA-40 再分析资料。在本研究中首先利用 ERA-40 的 1958~2000 年 6~8 月每日 4 个时次的比湿 (q) 和风场 (u 、 v) 以及地表气压 p_s 的再分析资料, 并应用 (2) 和 (3) 式计算出我国东部季风区及其周围地区夏季每日 4 个时次的纬向和经向水汽输送通量, 并由 4 个时次的水汽输送通量计算出的日平均水汽输送通量, 之后, 由每日纬向和经向水

汽输送通量再计算出 1958~2000 年夏季各月(6~8 月)的水汽输送通量。这样,就可利用所计算的 1958~2000 年夏季各月的水汽输送通量来分析我国东部夏季水汽输送通量的时空变化特征及其与降水变化的关系。

3.2 东亚夏季纬向水汽输送通量时空变化的主模态

3.2.1 第 1 主模态

本节首先利用从 ERA-40 每日 4 时次再分析资料所计算的 1958~2000 年夏季东亚地区夏季纬向水汽输送通量来分析东亚夏季水汽输送通量的时空变化特征。图 5 是东亚地区上空 1958~2000 年夏

季纬向水汽输送通量的 EOF 分析第 1 模态(EOF1 可以说明方差 43.1%)的空间分布和相应的时间系数序列。从图 5a 可以明显看到,在我国东部季风区、南海、东海和黄渤海以及日本和朝鲜半岛上空夏季纬向水汽通量的 EOF1 空间分布明显存在着一个从南到北“+ - +”的经向三极子型的分布。并且,从图 5b 可以看到:东亚地区夏季纬向水汽输送通量 EOF1 的时间系数从 20 世纪 70 年代中后期起(大约从 1977 年)呈现 2~3 年周期的年际变化特征,即准两年周期振荡。此外,从图 5c 所示的东亚地区夏季纬向水汽输送通量时空变化第 1 主模态

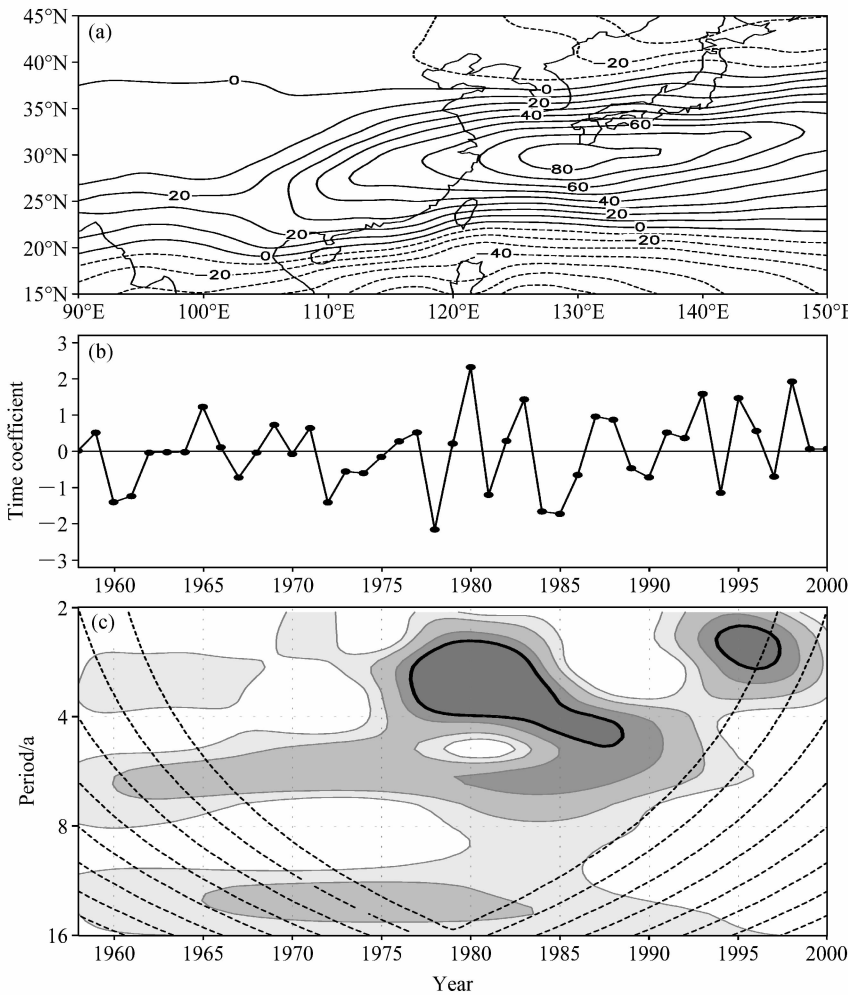


图 5 东亚 1958~2000 年夏季纬向水汽输送通量 EOF 分析第 1 主分量(对方差的贡献为 43.1%)的空间分布 (a) 和相应的时间系数序列 (b) 以及时间系数的小波分析 (c)。(a) 实、虚线表示正(向东输送)、负(向西输送)信号;湿度、风场和 p_s 资料取自 ERA-40 再分析资料 (Uppala et al., 2005)

Fig. 5 (a) Spatial distribution and (b) corresponding time coefficient series of the first component of EOF analysis (EOF1) of summertime zonal water vapor transport fluxes over East Asia for 1958 - 2000 and (c) the analysis of wavelet spectrum of the time series. The solid and dashed lines in (a) indicate positive (eastward transport) and negative (westward transport) signals, respectively, and the EOF1 explains 43.1% of the variance. The data of moisture, wind field, and p_s are from the ERA-40 reanalysis (e. g., Uppala et al., 2005)

时间系数的小波分析可以看到：它除了 2~3 年周期变化外（在 20 世纪 70 年代中后期起变得明显），还有一个 10 年以上的年代际变化，但从 20 世纪 80 年代起这个周期的变化变得不明显。

3.2.2 第 2 主模态

由于在以前的研究中，没有很好分析夏季纬向水汽输送通量的 EOF2 特征，为此，本节将较详细分析和讨论东亚地区上空夏季纬向水汽输送通量 EOF2 的空间分布和相应的时间系数序列（见图 6）（EOF2 可以说明方差 17.7%）。与图 5a 所示的 EOF1 空间分布相比较，在图 6a 所示的东亚地区夏季纬向水汽通量 EOF2 的空间分布出现了与图 5（a）明显不同的分布，在我国华南和南海、我国东部、华北、黄渤海和东海以及朝鲜半岛和日本等地区显示出明显的从南到北“十一”经向偶极子型分布；并且，在图 6b 所示的东亚地区上空夏季纬向

水汽通量 EOF2 的时间系数序列不仅具有 3~4 年周期的年际振荡特征，而且显示出较弱的年代际变化。此外，从图 6c 所示的东亚地区夏季纬向水汽输送通量时空变化第 2 主模态时间系数的小波分析可以看到：它除了 2~3 年周期变化外，还有一个 8 年左右的年代际变化，但从 20 世纪 80 年代起这个周期的变化变得不明显。此外，还有一个 16 年左右的年代际变化。从 20 世纪 70 年代中后期到 90 年代初，EOF2 的时间系数比 50 年代中后期到 70 年代中后期有一个变正的趋势，结合图 6a，这表明：在华北、朝鲜半岛和日本地区在 20 世纪 70 年代中后期到 90 年代初向东水汽输送通量偏弱，而华南、江南和热带西太平洋上空在此时期夏季向东水汽输送通量偏强。然而，从 90 年代初到 90 年代末，即 EOF2 时间系数在此时期又发生年代际变负的趋势，结合图 6a，这表明华北、朝鲜半岛和日本

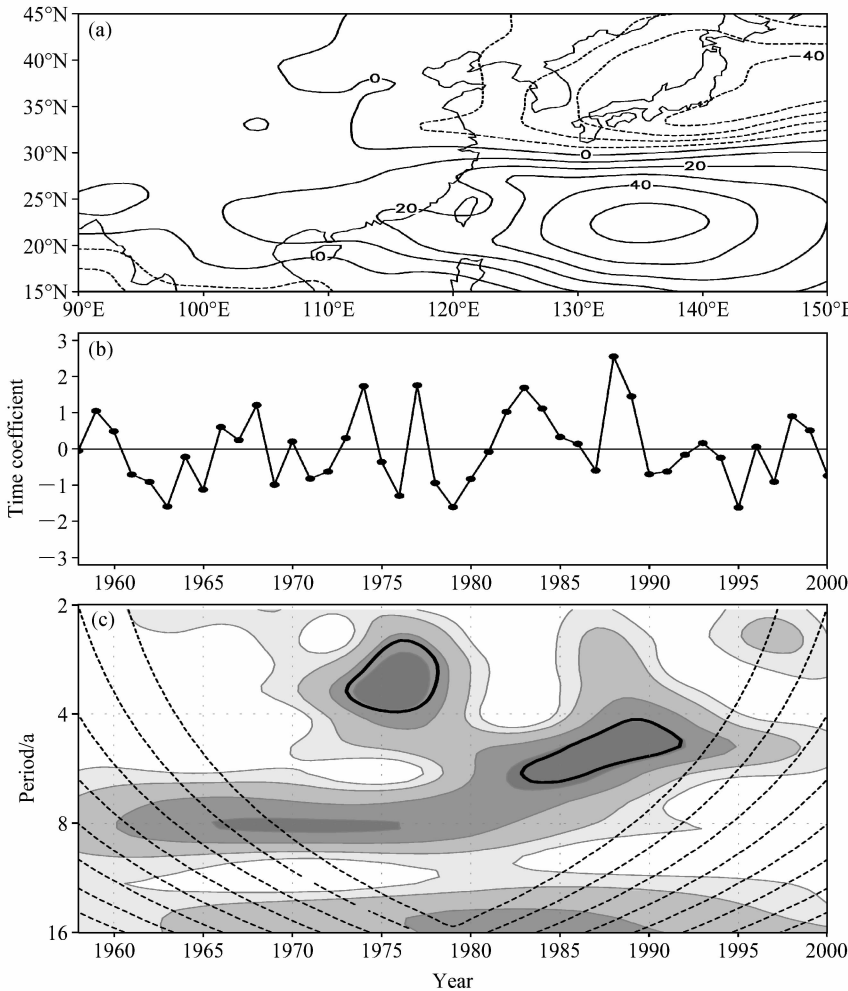


图 6 同图 5，但为 EOF2（对总方差的贡献为 17.7%）
Fig. 6 As in Fig. 5 except for EOF2, the EOF2 explains 17.7 % of the variance

上空向东水汽输送通量增强,而江南和华南地区上空向东的水汽输送通量偏弱,或向西的水汽输送通量偏强。

从上分析可以看到,东亚夏季纬向水汽输送通量时空变化有两个主模态,即在空间分布上经向三极子型与经向偶极子型,这两个模态对总方差的贡献为 60.8%。

3.3 东亚夏季经向水汽输送通量时空变化的主模态

3.3.1 第 1 主模态

图 7 是利用 ERA-40 每日 4 时次再分析资料所计算的东亚上空 1958~2000 年夏季经向水汽输送通量的 EOF 分析第 1 模态 (EOF1, 可以说明方差 23.0%) 的空间分布和相应的时间系数序列。从图 7a 还可以看到,我国东部和华南地区上空与日本及以南的西北太平洋上空夏季经向水汽输送通量存在反相变化。这说明:若我国东部和华南地区上空夏

季向北水汽输送强,则在日本及以南地区上空夏季向北水汽输送偏弱;反之,若我国东部和华南地区上空夏季向北水汽输送偏弱,则在日本及以南地区上空向北水汽输送偏强。这可能是由于夏季西太平洋反气旋环流的变化所造成。并且,从图 7b 可以看到:东亚地区夏季经向水汽输送通量 EOF1 的时间系数不仅呈现明显的 2~3 年周期的年际变化特征,即准两年周期振荡,而且呈现明显的年代际变化。此外,从图 7c 所示的东亚地区夏季经向水汽输送通量时空变化第 1 主模态时间系数的小波分析可以看到:它除了 2~3 年周期变化外,从 20 世纪 80 年代,8 年左右的年代际变化以及 10 年以上的年代际变化变得更明显。在 1958~1971 年期间,EOF1 的时间系数为正;在 1972~1992 年期间,EOF1 时间系数有变负的趋势;在 1993~1998 年期间,EOF1 时间系数又有变正的趋势。把图 7b 所

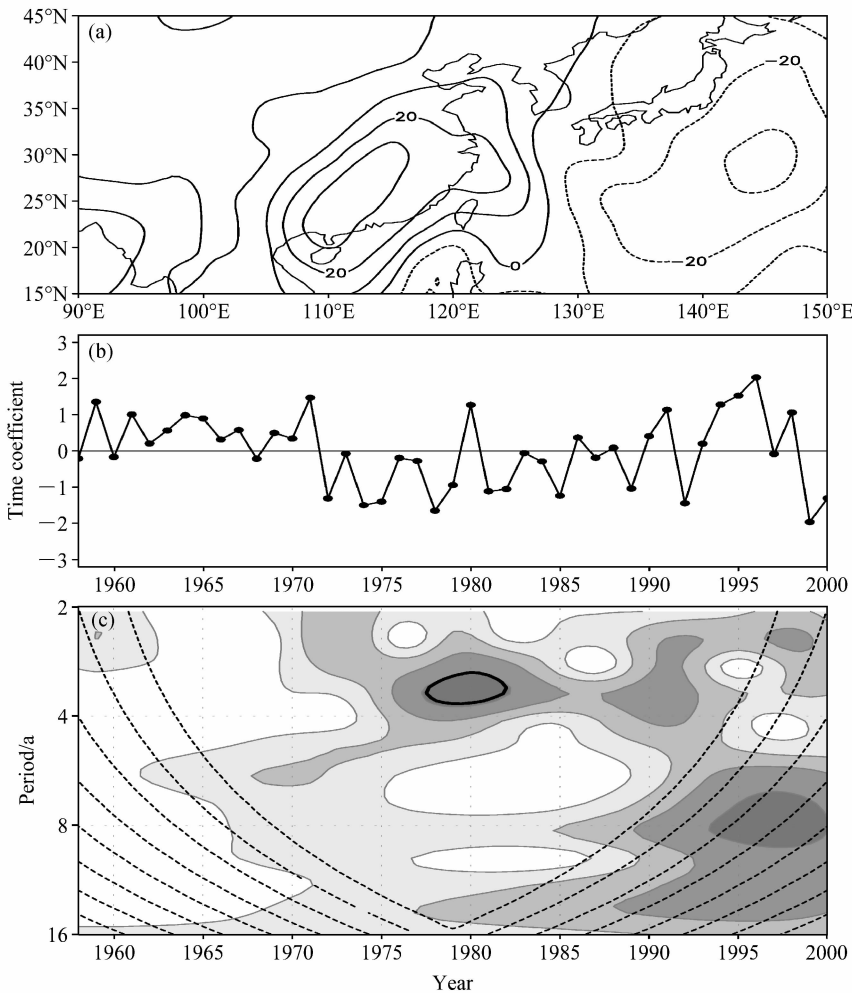


图 7 同图 5, 但为夏季经向水汽输送通量的 EOF1 (对方差的贡献为 23.0%)
Fig. 7 As in Fig. 5 except for the EOF1 of summertime meridional water vapor transport fluxes, and EOF1 explains 23.0 % of the variance

示的时间系数的年代际变化再结合图 7a 所示的 EOF2 空间分布可以看到：20 世纪从 50 年代末到 70 年代初我国东部和华南地区夏季向北水汽输送偏强；从 70 年代初到 90 年代初期间，上述地区夏季向北水汽输送偏弱，这造成了华北地区在此时期夏季降水偏少，出现持续性干旱；从 90 年代初到 90 年代末，上述地区夏季向北水汽输送又偏强，这使得华北地区夏季降水有所增加。

3.3.2 第 2 主模态

图 8 是东亚地区上空夏季经向水汽输送通量 EOF2 的空间分布和相应的时间系数序列。与图 7a 所示的 EOF1 空间分布相比较，在图 8a 所示的东亚地区夏季经向水汽输送 EOF2 的空间分布显示出从我国中部经我国东部、黄渤海和东海、朝鲜半岛和日本上空呈现一个纬向“+ - +”的波列结构；并且从图 8b 可以看到，我国东部及周围地区夏季

经向水汽输送 EOF2 的时间系数呈现出 3~4 年周期的年际变化特征。此外，从图 8c 所示的东亚地区夏季经向水汽输送通量时空变化的第 2 主模态时间系数的小波分析可以看到它除了 3~4 年周期的年际变化外，还有一个 6~7 年周期的年际变化，这个周期变化在 20 世纪 80~90 年代变得明显。

从上分析可以看到，东亚夏季经向水汽输送通量时空变化也有两个主模态（对方差的贡献 38.7%），即西南—东北向的三极子型分布型和纬向三极子分布型。这两个模态在我国东部都是出现南北一致分布的变化。

若把上述由 ERA-40 每日 4 个时次再分析资料的比湿和风场所分析东亚地区夏季纬向和经向水汽输送通量的 EOF1 和 EOF2 与由 ERA-40 再分析资料的月平均比湿和风场所分析的东亚地区夏季纬向和经向水汽通量的 EOF1 和 EOF2 (Huang et al.

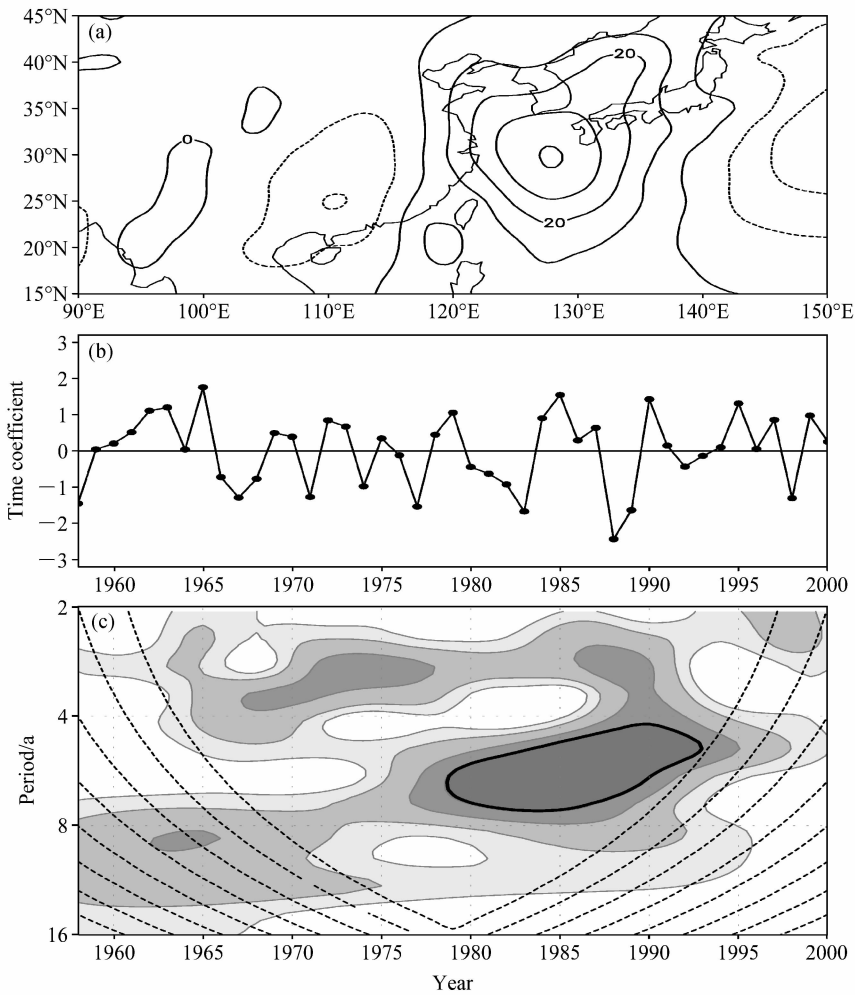


图 8 同图 7，但为 EOF2（对方差的贡献为 15.7%）
Fig. 8 As in Fig. 7 except for EOF2, the EOF2 explains 15.7 % of the variance

2004; 黄荣辉等, 2006) 做比较, 则可以看到, 无论它们的空间分布模态和相应的时间系数大致相同, 但它们还是存在一些差别。但从分析结果看, 似乎用 ERA-40 每日 4 个时次的比湿和风场再分析资料计算的水汽输送通量所分析的 EOF1 和 EOF2 的结果更合理。

4 我国东部夏季降水异常模态的年代际变化与东亚水汽输送通量时空变化的关系

关于我国东部季风区夏季降水准两年周期的年际变化及其与东亚夏季水汽输送通量准两年周期的年际变化的关系及其机理, 这已在黄荣辉等 (2006) 的文章中详细讨论了, 并且 Chen et al. (2008) 也讨论了东亚夏季风水汽输送的异常模态及其与我国夏季降水型之间的关系。故本文不再重复。本文着重分析在年代际时间尺度上我国东部夏季降水异常主模态与东亚上空夏季水汽输送通量时空变化的关系。

4.1 我国东部季风区夏季降水异常的年代际变化与东亚上空水汽输送变化的关系

从图 5a 和图 6a 可以看到, 东亚上空夏季纬向水汽输送有两个主模态, 即经向三极子模态和经向偶极子模态。由于第 1 主模态, 如图 5b 所示, 主要反映东亚上空夏季纬向水汽输送的年际变化, 而第 2 主模态, 如图 6b 所示, 主要反映了东亚上空夏季纬向水汽输送较弱的年代际变化特征。并且, 从图 7a 和图 8a 可以看到, 东亚上空夏季经向水汽输送通量也有两个主模态, 这两个模态的空间分布在我国东部表现为从南到北一致的变化, 而从图 7b 可以看到东亚夏季经向水汽输送通量的第一主模态存在明显的年代际变化。结合图 7b 与图 7a 可以看到: 在 1958~1971 年期间, 我国东部季风区上空夏季从南向北的经向水汽输送通量偏强; 1972~1992 年期间, 我国东部季风区上空夏季从南到北的经向水汽输送通量偏弱; 1993~1998 年期间, 我国东部季风区夏季从南到北的经向水汽输送通量又偏强。然而, 从 1999 年之后, 我国东部季风区夏季从南到北的经向水汽输送通量又偏弱。

把图 1a、图 2a 与图 5a、图 6a 做比较, 可以看到: 图 1a 和图 2a 所示的我国东部夏季降水异常两个主模态的空间分布与图 5a 和图 6a 所示的东亚上

空夏季纬向水汽输送通量时空变化两个主模态的空间分布有相似之处, 即经向三极子型和经向偶极子型分布。然而, 图 3 和图 4 所示的我国东部夏季降水异常的年代际变化却主要受图 7a 和图 7b 所示的东亚上空经向水汽输送通量第 1 主模态年代际变化的调控。

4.2 我国东部季风区夏季降水异常主模态的年代际变化与欧亚上空水汽输送异常波列的年代际变化之间的关系

从黄荣辉和陈际龙 (2010) 的推导可以看到, 某个区域的降水主要依赖于此区域水汽输送的辐合, 若某区域水汽输送通量距平矢量为气旋性分布, 则此区域有水汽辐合的异常, 降水将增多; 反之, 若水汽输送通量距平矢量为反气旋性分布, 则此区域有水汽辐散的异常, 降水将减少。因此, 我国东部夏季降水异常模态的年代际变化可以从东亚及周围地区夏季水汽输送通量距平矢量分布的年代际变化更清楚看到, 为此, 我们又进一步分析欧亚地区上空夏季水汽输送通量距平矢量分布的年代际变化。

图 9a-c 分别是 1958~1977 年、1978~1992 年和 1993~1999 年期间平均的东亚及周围地区夏季水汽通量距平矢量的分布。从图 9a 可以看到, 在 1958~1977 年期间, 从我国华南和南海经我国长江和淮河流域及日本和韩国到我国东北和日本海上空夏季水汽输送通量距平矢量呈现一个似如 Nitta (1987)、Huang and Li (1987) 以及黄荣辉和李维京 (1988) 所提出的东亚/太平洋型 (EAP 型) 波列分布。这个分布是: 在从南海到菲律宾周围上空有一反气旋式分布, 在我国华南和长江流域到日本南部的副热带西太平洋上空有一气旋式分布, 在我国从华北东部经黄淮地区到日本海上空有一反气旋式分布, 在日本海和库页岛上空有一气旋式分布; 并且, 在中纬度西风带从西北欧经蒙古高原到我国东部季风区和日本上空夏季水汽输送距平矢量也呈现一个西北—东南向似如 Wallace and Gutzler (1981) 所提出的欧亚型 (EU 型) 遥相关波列分布, 这个分布是: 在西北欧上空有一反气旋式分布, 在乌拉尔山上空有一气旋式分布, 在贝加尔湖和蒙古高原上空有一反气旋式分布, 在华北地区上空有一气旋式分布, 在黄淮地区、黄海和日本上空有一反气旋式分布。这引起了在华北东部和黄淮地

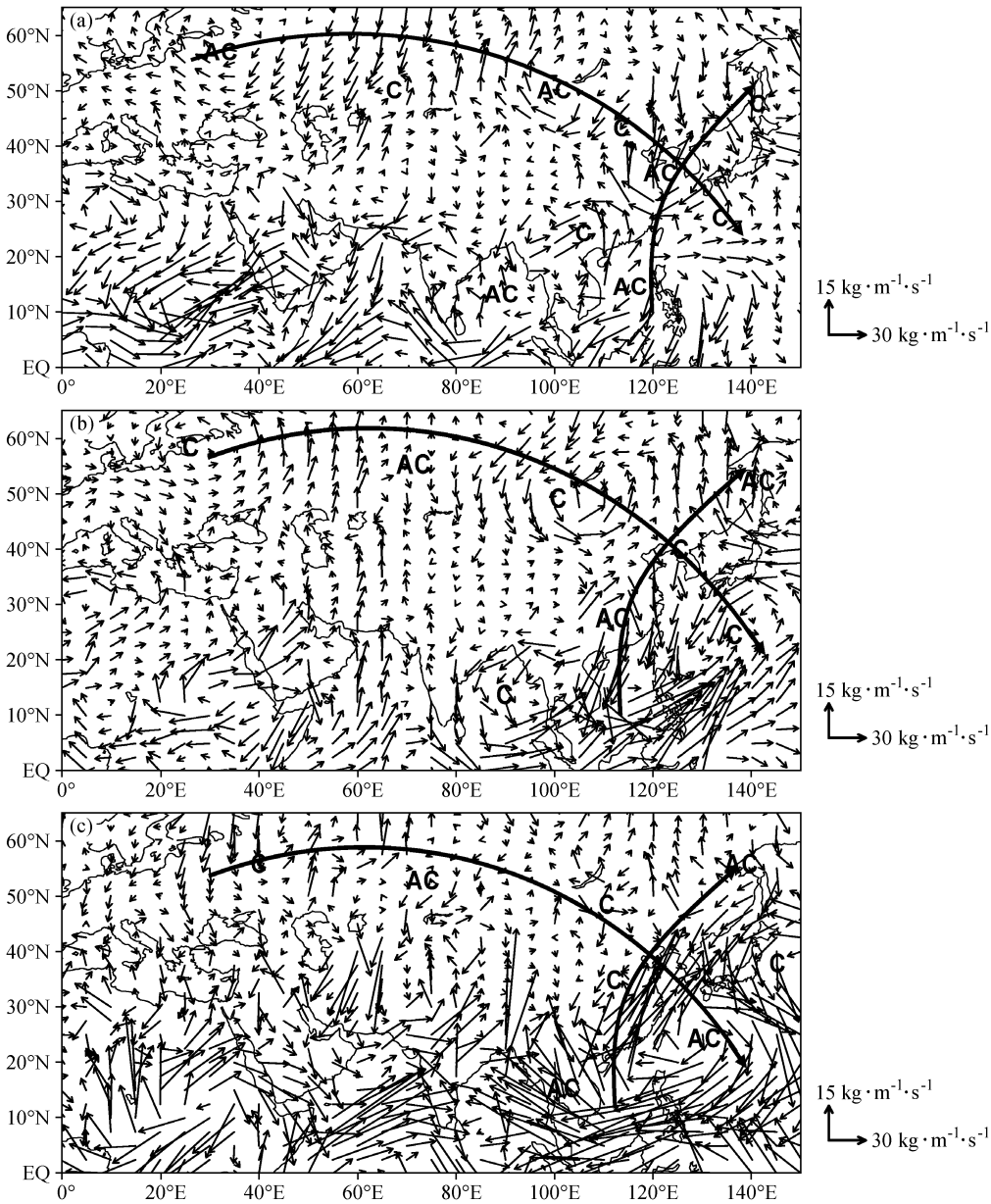


图9 欧亚上空 (a) 1958~1977 年、(b) 1978~1992 年和 (c) 1993~1998 年期间平均的夏季水汽输送通量距平矢量分布 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。湿度、风场和 p_s 取自 ERA-40 再分析资料 (Uppala et al., 2005)

Fig. 9 Anomaly distributions of summertime water vapor transport flux vectors averaged for (a) 1958–1977, (b) 1978–1992, and (c) 1993–1998 (units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). The data of moisture, wind field, and p_s are from the ERA-40 reanalysis (e.g., Uppala et al., 2005)

区上空有较强的向北水汽输送通量距平,即向北水汽输送偏强。正是由于这两个水汽输送通量距平矢量波列的交叉和相互作用,我国东部夏季降水异常才出现了从南到北“+ - +”的经向三极子型分布。

然而,在 1958~1977 年期间欧亚地区上空夏季水汽输送通量距平矢量的波列分布到了 1978 年之后产生了相反变化。从图 9b 与图 9a 的比较可以

发现,在图 9b 所示的 1978~1992 年期间无论在欧亚中高纬西风带地区或是东亚季风区上空夏季水汽输送通量距平矢量的波列分布都与图 9a 所示的 1958~1977 年期间的水汽输送通量距平矢量的波列分布相反。正如图 9b 所示,在从南海到菲律宾周围及东北侧上空有一气旋分布,在我国华南和长江流域有一反气旋式分布,在我国黄海和朝鲜半岛有一弱的气旋式分布,日本南部西太平洋上空有一

强的气旋式分布,在库页岛和鄂霍次克海上空有一反气旋式分布;并且,在中高纬度西风带的西北欧上空有一气旋式分布,在乌拉尔山周围有一气旋式分布,在贝加尔湖和蒙古高原有一较强的气旋式分布,在朝鲜半岛有一气旋式分布。这引起了从黄淮地区经黄海和东海到东南沿海上空有向南的水汽输送距平,表明此时期在我国东部季风区夏季向北水汽输送偏弱。因此,在 1978~1992 年期间,我国东部从南到北夏季降水异常存在“一十一”的经向三极子型分布。

如图 9c 所示,在 1993~1998 年期间,欧亚上空夏季水汽输送通量距平矢量分布存在着与图 9a 和图 9b 均有一些不同的分布。这时期在欧亚大陆中高纬度西风带地区水汽输送通量距平虽然其分布型有点类似于图 9a 所示的分布型,但通量距平值显著变小,且 EU 型波列分布不很清楚,特别在贝加尔湖和蒙古高原上空的反气旋式分布范围收缩,这表明来自大西洋沿中高纬度西风带的水汽输送变弱。并且,在东亚地区的水汽输送通量距平矢量从南海到菲律宾东北侧有一强的反气旋式分布,从我国东部经朝鲜半岛到日本上空有一气旋式分布,在库页岛和鄂霍次克海上空有一反气旋式分布,这类类似于 EAP 型的波列分布。这引起了在我国东部沿海及黄海和东海上空有强向北水汽输送距平,表明在此期间有强的向北水汽输送。因此,在 1993~1998 年期间,我国东部夏季降水异常分布呈现出经向三极子型和经向偶极子型的结合。

从上分析可以看到,我国东部季风区夏季降水异常主模态的年代际变化不仅与从菲律宾周围往北传播的似如 EAP 型遥相关的水汽输送通量距平波列分布的年代际变化有关,而且也与中高纬度西风带传播的似如 EU 型遥相关的水汽输送通量异常波列变化有关。

5 结论和讨论

本文利用 1958~2000 年 ERA-40 每日 4 个时次再分析资料 and 我国 516 台站降水资料以及 EOF 方法分析了我国东部季风区夏季降水异常主模态的年代际变化特征及其与东亚上空水汽输送通量时空变化的关系。分析结果表明了我国东部季风区夏季降水的时空变化存在着两个主模态:第 1 主模态不仅显示出明显的准两年周期振荡的年际变化特征,

而且也有明显的年代际变化,在空间上具有经向三极子型分布;第 2 主模态显示出明显的年代际变化特征,且在空间上具有经向偶极子型分布。这表明了我国东部季风区夏季降水异常主模态有明显的年代际变化,在 1958~1977 年期间我国东部夏季降水异常分布为从南到北“一十一”经向三极子型分布,而在 1978~1992 年期间降水异常出现了与 1958~1977 年相反的分布,为从南到北“一十一”经向三极子型分布。然而,在 1993~1998 年期间,由于第 2 主模态的作用增大,我国东部夏季降水异常为从南到北经向“一十一”三极子型与“一十一”偶极子型的叠加。并且,分析结果还表明:我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化与东亚上空夏季水汽输送通量的时空变化密切相关,这说明了我国东部夏季降水异常的年代际变化不仅与夏季从南海和菲律宾周围经我国东部和日本南部到鄂霍次克海上空似如 EAP 型遥相关波列的水汽输送通量距平分布的年代际变化有关,而且与夏季欧亚中高纬度西风带似如欧亚型(EU 型)遥相关波列水汽输送通量异常分布的年代际变化有关。

本文分析结果一方面说明了利用测站资料作 EOF 分析与利用再分析资料作 EOF 分析,其结果会有差别;另一方面也表明了中国夏季降水的年代际转型与东亚和西太平洋地区低层环流的转型并不同步。这可能是由于降水不仅仅依赖于由季风环流所驱动的水汽平流,而且还依赖于环流场的辐合(黄荣辉和陈际龙,2010),而这两者的年代际变化并不一致。从东亚地区夏季纬向水汽输送的 EOF2 和经向水汽输送的 EOF1 时间系数变化来看,在 20 世纪 80 年代末有一个明显的变化,东亚和西太平洋上空向北水汽输送从弱又变为偏强。张人禾等(2008)从利用低层大气环流所定义的 2 个东亚夏季风指数都表明东亚夏季风在 20 世纪 80 年代末发生了一次年代际转型。然而,本文利用中国测站资料来研究夏季降水的年代际转型却发生在 20 世纪 90 年代初。

从上面分析可以看到,关于东亚地区夏季风降水异常年代际变化的成因是比较复杂的,它不仅与影响东亚地区夏季水汽输送的太平洋中纬度海温年代际变化(PDO)有关(张庆云等,2007;邓伟涛等,2009),而且与欧亚上空中高纬度西风带水汽输送的大西洋海温年代际变化和中高纬度环流有

关。并且, 夏季蒙古高原上空的环流和热带西太平洋上空环流的年代际变化对于我国东部季风区夏季降水异常的主模态年际变化起着十分重要的作用, 因此, 关于这两区域上空环流年代际变化的成因应该进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. I, II [J]. *J. Climate*, 13: 4310–4340.
- 陈际龙, 黄荣辉. 2007. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究. II. 夏季风水汽输送 [J]. *大气科学*, 31: 766–778. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2007. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon subsystem. Part II: Water vapor transport by summer monsoon [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31: 766–778.
- Chen Jilong, Chan Johny C L, Zhou Wen, et al. 2008. Anomalous modes of moisture transport by East Asian summer monsoon and associated rainfall patterns in China [C]. *Extended Abstracts of Third WCRP International Conference on Reanalysis*, 2008. http://wcrp.ipst.jussieu.fr/workshop/Reanalysis2008/Documents/G3-332_ea.pdf.
- 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*, 21: 835–845.
- 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 J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33: 835–845.
- Ding Yihui. 2007. The variability of the Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B: 21–54.
- Ding Yihui, Wang Zunya, Sun Ying. 2008. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *Int. J. Climatol.*, 28: 1139–1161.
- Huang Gang, Liu Yong, Huang Ronghui. 2011. The interannual variability of summer rainfall in the arid and semiarid regions of northern China and its association with the Northern Hemisphere circumglobal teleconnection [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28: 257–268.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]. *Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia*. Chengdu, 10–15, April, 1987, 40–51.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12 (特刊): 107–106. Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 29 (Special Issue): 20–36.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. *大气科学*, 22: 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22: 460–469.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18: 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 18: 465–476.
- Huang Ronghui, Huang Gang, Wei Zhigang. 2004. Climate variations of the summer monsoon over China [M]//Chang C P. *East Asian Monsoon*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 213–270.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. *大气科学*, 30: 545–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 30: 545–560.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. *大气科学*, 30: 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of the drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 30: 730–743.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24: 993–1023.
- 黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. *大气科学*, 34 (6): 1035–1045. Huang Ronghui, Chen Jilong. 2009. Characteristics of the summertime water vapor transports over the eastern part of China and those over the western part of China and their difference [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (6): 1035–1045.
- Kwon Min-Ho, Jhun Jong-Ghap, Ha Kyung-Ja. 2007. Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L21706, doi: 10.1029/2007GL031977.
- 缪锦海, Lau K M. 1990. 东亚季风降水的年际变化 [J]. *应用气象学报*, 1: 377–382. Miao J H, Lau K M. 1990. Interannual variability of the East Asian monsoon rainfall [J]. *Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese)*, 1: 377–382.
- Nitta Ts. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation

- [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64: 373–400.
- Tao Shiyun, Chen Longsun. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, 60–92.
- Tian S F, Yasunari T. 1992. Time and space structure of interannual variations in summer rainfall over China [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70: 585–596.
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 夏季风进退 [J]. *气象杂志*, 18: 1–20.
- Tu Changwang, Huang Shisong. 1944. The advance and retreat of the summer monsoon [J]. *Meteor. Mag. (in Chinese)*, 18: 1–20.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnection in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 100: 748–812.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. *大气科学*, 31: 1290–1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31: 1290–1300.
- Zhang Renhe. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 1005–1017.
- 张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因 [J]. *气象学报*, 66: 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66: 697–706.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. *气候与环境研究*, 8: 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8: 274–290.
- Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2010. Moisture transport in the Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 24: 31–42.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. *地理学报*, 1: 1–27. Zhu Kezhen. 1934. Southeast monsoon and rainfall in China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 1: 1–27.