

中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因

黄荣辉¹ 陈际龙¹ 黄刚¹ 张启龙²

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

2 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

摘要 应用中国 160 测站降水资料和 ERA-40 再分析资料以及 EOF 和熵谱分析方法, 分析了我国夏季 (6~8 月) 降水和东亚水汽输送通量的年际变化, 表明中国 (特别是华南、长江流域和淮河流域以及华北等地区) 夏季降水具有 2~3 a 周期变化特征, 即准两年周期的振荡特征, 并表明中国降水的这种周期振荡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; 并且, 还利用 NCEP/NCAR 的海表温度和日本气象厅的沿 137°E 海温剖面观测资料, 分析了热带西太平洋表层与次表层海温的年际变化, 揭示了热带西太平洋热力状态的变化也有显著的准两年周期的变化特征。作者利用相关和集成分析来讨论热带西太平洋热状态的准两年周期振荡对中国夏季降水和东亚水汽输送的影响, 表明了热带西太平洋海温的准两年周期振荡对东亚夏季风及其所驱动的水汽输送都有很大影响。此外, 作者还利用东亚/太平洋型 (EAP 型) 遥相关理论, 简单地讨论了热带西太平洋热力状态的准两年周期振荡影响中国夏季风降水准两年周期变化的物理机制。

关键词 东亚夏季风 降水 准两年周期变化 热带西太平洋

文章编号 1006-9895(2006)04-0545-16

中图分类号 P641

文献标识码 A

The Quasi-Biennial Oscillation of Summer Monsoon Rainfall in China and Its Cause

HUANG Rong-Hui¹, CHEN Ji-Long¹, HUANG Gang¹, and ZHANG Qi-Long²

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

2 Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

Abstract The observed data of precipitation at 160 observational stations of China, the ERA-40 reanalysis data and the Empirical Orthogonal Function (EOF) and the entropy spectral analysis methods are applied to analyze the interannual variations of summer (June - August) rainfall in China and water vapor transport fluxes over East Asia. The results show that there is an obvious oscillation with a period of two or three years, i. e., the quasi-biennial oscillation, in the interannual variations of summer monsoon rainfall in China, especially in the eastern and southern parts of China including South China, the Yangtze River valley and the Huaihe River valley and North China. And it is also shown that this oscillation is closely associated with the quasi-biennial oscillation in the interannual variations of the water vapor transport fluxes by summer monsoon flow over East Asia. Furthermore, the interannual variations of sea temperature in the surface and subsurface of the tropical western Pacific are analyzed by using the sea surface temperature (SST) data from the NCEP/NCAR reanalysis dataset and the sea temperature data in the subsurface of the western Pacific along 137° E from Japan Meteorological Agency, respectively. And it is revealed that there is also a significant quasi-biennial oscillation in the interannual variations of thermal state of the tropical western Pacific.

收稿日期 2005-09-05, 2006-01-09 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575026, 40231005, 中科院知识创新工程重大方向项目 KZCX2-SW-210

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 主要从事行星波动力学、大气环流和气候动力学的研究工作。E-mail: hrh@lasg.iap.ac.cn. hrh@tea.ac.cn

In this paper, the correlative and composite analysis methods are applied to discuss the influence of the quasi-biennial oscillation of thermal state of the tropical western Pacific on summer rainfall in China and water vapor transport over East Asia, and it is shown that the quasi-biennial oscillation in the interannual variations of thermal state of the tropical western Pacific has a great impact on the East Asian summer monsoon and the water vapor transport driven by the monsoon flow. Besides, the influence of the quasi-biennial oscillation in the interannual variations of thermal state of the tropical western Pacific on the quasi-biennial oscillation in the interannual variations of the summer monsoon rainfall in China is simply discussed by using the teleconnection theory of the East Asia/Pacific (EAP) pattern.

From the above-mentioned analyses, the physical mechanism of the quasi-biennial oscillation of summer rainfall in China may be summarized as follows: If the thermal state of the tropical western Pacific is in a warming state during a winter, then the convective activities will be intensified around the Philippines in the following spring and summer, which can cause weak summer monsoon rainfall in the Yangtze River and the Huaihe River valleys through the EAP pattern teleconnection. And due to the intensification of the convective activities around the Philippines, a strong convergence of atmospheric circulation will appear over the tropical western Pacific. This will trigger a strong upwelling in the tropical western Pacific. As a consequence, the thermal state of this region will turn into a cooling one in the following winter. On the other hand, since the tropical western Pacific will in a cooling state during the following winter, the convective activities will weaken around the Philippines in the spring and summer of the third year, which can cause strong summer monsoon rainfall in the Yangtze River and the Huaihe River valleys through the EAP pattern teleconnection. And due to the weakening of the convective activities around the Philippines, a divergence of atmospheric circulation will appear over the tropical western Pacific in the spring and summer of the third year. As a consequence, the thermal state of these ocean regions will again turn into a warming one in the winter of the third year.

Key words the East Asian summer monsoon, rainfall, the quasi-biennial oscillation, the tropical western Pacific

1 引言

Reed 等^[1]以及 Veryard 和 Ebdon^[2]在 20 世纪 60 年代发现了热带平流层下层的纬向平均气流存在着周期为 26 个月的东风和西风互相交替出现的年际变化。通常把热带平流层纬向平均气流这种具有 26 个月周期的年际变化又称为准两年周期振荡 (Quasi-biennial oscillation, 简称为 QBO)。在此发现之后, 许多研究^[3~8]表明了热带海温、季风降水和环流也存在着 2~3a 周期的变化。由于此现象发生在对流层中, 为了避免与热带平流层的 QBO 现象相混淆, 一般把热带季风环流、降水、海温等具有 2~3 a 周期的年际变化称之为对流层准两年振荡 (Tropospheric biennial oscillation, 简称为 TBO)。

热带对流层准两年周期振荡 (TBO) 是亚澳季风区海-气耦合系统变化的基本特征之一。Mooley 和 Parthasarathy^[3]以及 Yasunari 和 Suppiah^[5]从观测事实的分析指出了在印度尼西亚和印度等热带季风降水的年际变化存在着 TBO。并且, Miao 等^[9]、Tian 等^[10]、殷宝玉等^[11]和 Chang 等^[12]的研

究也表明了东亚季风区的季风降水也存在着准两年周期振荡的现象。Lau 等^[13]、Barnett^[14]等和 Rasmussen 等^[15]的研究表明了亚澳季风环流、降水的准两年周期振荡是紧密与 ENSO 的时间尺度相关联的。

然而, 关于东亚季风区季风降水的准两年周期的研究迄今还是很不充分, 以前的研究所用的观测资料也比较短, 并且关于东亚季风区夏季降水的准两年周期振荡产生的机理迄今还不清楚, 关于这方面的研究还是比较少。因此, 有必要利用更长时间的降水资料和水汽资料进一步分析中国夏季降水和东亚季风区水汽输送的准两年周期振荡 (TBO), 并利用有关热带西太平洋海洋热状态的观测资料来分析东亚季风区夏季降水的准两年周期振荡的成因。为此, 本研究利用 1951~2000 年中国 160 个测站降水资料、CMAP 降水资料 (1979~2000 年)^[16]和 EAR-40 再分析资料 (1958~2000 年)^[17]、NCEP/NCAR 再分析资料集的海温资料和日本气象厅沿 137°E 次表面海温剖面资料, 分析热带西太平洋海温变化的准两年周期振荡及其对中国夏季降水和东亚地区水汽输送的准两年周期振荡的影响。

2 中国东部夏季降水的准两年周期振荡

为了研究中国夏季降水的年际变化规律, 本研

究应用了 EOF(Empirical Orthogonal Function) 分析方法来分析中国东部、中部、北部和南部 1951~2000 年夏季降水的年际变化规律。图 1a、b 分别是

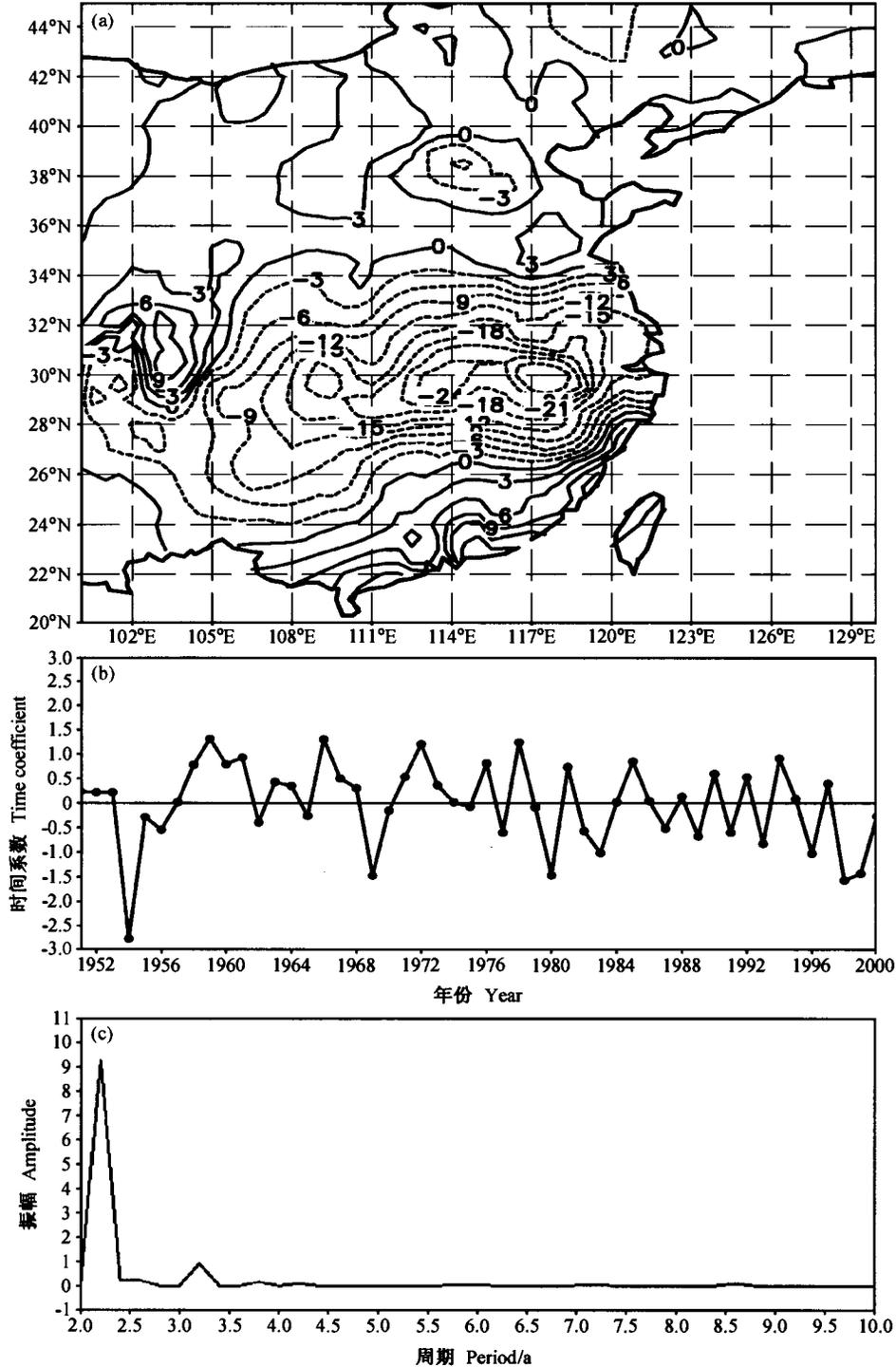


图1 1951~2000年中国夏季(6~8月)降水 EOF 分析第1主分量(EOF1)的空间分布(a)和时间系数系列(b)以及时间系数的熵谱分析(c)。EOF1说明总方差的16.40%

Fig. 1 The spatial distribution (a) and the corresponding time coefficient series (b) of the first component of EOF analysis (EOF1) of summer (Jun - Aug) rainfall in China from 1951 to 2000, and the entropy spectrum of the time coefficients (c). EOF1 explains 16.40% of the variance

中国夏季降水 EOF 分析第 1 主分量(即 EOF1)的空间分布和时间系数系列(第 1 主分量对方差的贡献为 16.40%)。正如图 1a 所示,中国夏季降水 EOF1 的空间分布在中国东部、中部、北部和南部呈现出一个经向三极子型分布,最强的负信号位于长江中、下游地区和江淮流域,而最大的正信号分别位于华南和华北地区。这表明华北地区夏季风降水异常往往与江淮流域的夏季风降水异常相反,若江淮流域夏季风降水偏多,则华北和华南两地区夏季风降水往往偏少;反之,若江淮流域夏季风降水偏少,则华北和华南地区夏季风降水往往偏多。并且,从图 1b 所示的中国夏季风降水 EOF 分析第 1 主分量时间系数的变化可以看到,从 20 世纪 70 年代中期到 90 年代末中国夏季风降水的准两年周期振荡很明显,而从 50 年代初到 70 年代中期这种周期的振荡并不明显。若应用频谱分析方法对中国夏季降水 EOF1 的时间系数进行分析,正如图 1c 所示,它呈现出以 2.0 a 周期为主要周期。这清楚说明了中国东部夏季风降水具有准两年周期振荡的特征。这个结果与 Lu 等^[18]对韩国和我国东部降水资料的分析结果是一样的。

为了更直观地表明中国夏季降水具有准两年周期振荡的年际变化特征,本节给出江淮流域(包括长江以北和淮河流域的清江、徐州、蚌埠、阜阳、南阳、信阳、东台、南京、合肥、安庆、汉口等 11 个测站)夏季降水距平百分率的年际变化。如图 2 所示,从 20 世纪 70 年代后期到 90 年代末江淮流

域夏季降水距平具有 2~3 a 周期变化为主要的年际变化特征。

此外,本文还利用 Xie 和 Arkin^[16]的 CMAP 降水资料集,分析东亚地区夏季降水的年际变化规律(图略)。从分析结果可以明显看到,由于 CMAP 降水资料是再分析资料,与用测站资料的分析结果有所不同,在 20 世纪 80 年代东亚夏季降水的准两年振荡并不明显,只是在 90 年代东亚夏季风降水的年际变化具有明显的准两年周期的振荡特征。这与中国东部夏季风降水的年际变化特征相同。

3 东亚夏季风水汽输送的准两年振荡及其对东亚夏季降水准两年振荡的影响

正如前面所述,中国夏季降水的年际变化具有明显的准两年周期的年际变化特征,而中国夏季降水在很大程度上受到东亚夏季风的影响。东亚夏季风从热带西太平洋、南海和孟加拉湾带来大量水汽到东亚地区,从而引起东亚地区的降水。正如黄荣辉等^[19]所指出,东亚季风区的降水主要来源于季风气流所引起的水汽平流,因此,东亚夏季风水汽输送的年际变化对东亚夏季降水年际变化有很大影响。为此,本节利用观测资料分析东亚和热带太平洋、南海和孟加拉湾地区水汽输送的年际变化特征。鉴于 NCEP/NCAR 再分析资料在 20 世纪 70 年代以前与实际偏差较大^[20],故本研究利用 EAR-

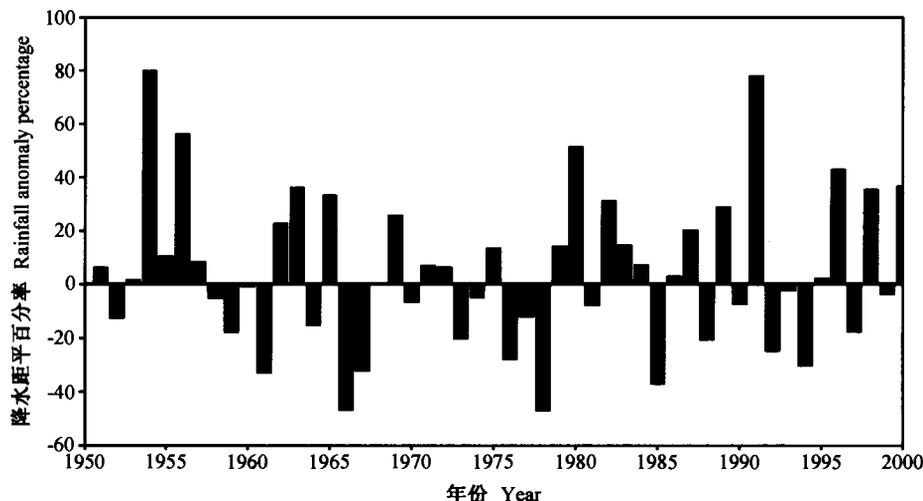


图 2 中国江淮流域 1951~2000 年夏季降水距平百分率的年际变化(取 1961~1990 年各月降水气候平均值为正常值)

Fig. 2 Interannual variations of the summer (Jun - Aug) rainfall anomaly percentage in the Yangtze River and Huaihe River valleys from 1951 to 2000. The climatological mean of monthly rainfalls in this region for 30 years from 1961 to 1990 is taken as the normal in the region

40 再分析资料来分析东亚地区和热带西太平洋地区夏季水汽输送的年际变化规律。

假设在 100 hPa 以上高空没有水汽, 水汽输送 $Q=(Q_{\lambda}, Q_{\varphi})$ 能够写成下式:

$$Q_{\lambda} = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_0} q \cdot u dp, \quad (1)$$

$$Q_{\varphi} = \frac{1}{g} \int_{100}^{p_0} q \cdot v dp, \quad (2)$$

其中, Q_{λ} 和 Q_{φ} 是纬向和经向的水汽输送, q 是比湿, u 和 v 是风场的纬向和经向分量, p_0 为海平面气压。

本研究利用 ERA-40 资料集 1958~2000 年再分析水汽和风场资料, 并应用 (1) 和 (2) 式计算了从南海、孟加拉湾和热带西太平洋到东亚地区上空夏季(6~8 月)水汽的经向和纬向输送通量, 并且应用 EOF 分析方法分析此区域的经向和纬向水汽输送通量的时空变化特征。

3.1 东亚和热带西太平洋经向水汽输送的准两年周期振荡及其对中国夏季降水的影响

黄荣辉等^[19]的研究表明了东亚夏季风系统的水汽输送有别于南亚季风系统, 东亚夏季风水汽输送的经向分量比纬向分量, 而南亚季风系统则主要是纬向分量, 并且表明东亚夏季风降水主要是由东亚夏季偏南气流所驱动的水汽输送(即水汽平流)和风场辐合所造成。因此, 分析孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空经向水汽输送的时空变化特征及其对中国地区降水的影响是很有必要的。图 3a、b 是从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空经向水汽输送的 EOF 分析第 1 主分量(可以说明总方差 24.2%)的空间分布和时间系数。从图 3a 可以看到, 在东亚地区和南海上空有一强的负信号区, 而在日本以南热带和副热带西太平洋上空有一个强的正信号区。这表明若从南海到东亚地区上空的经向水汽输送弱, 则在日本以南的热带和副热带西太平洋上空水汽的经向输送强; 反之, 若从南海到东亚上空水汽输送的经向分量强, 则在日本以南的热带和副热带西太平洋上空水汽的经向输送弱。这可能与西太平洋副热带高压的位置偏东或偏西有关。从图 3b 可以看到, 从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空水汽输送经向分量的 EOF 分析第 1 主分量的时间系数呈现出 2~3 a 周期的年际振荡。经最大熵谱分析,

这两个振幅相同的年际振荡周期为 2.0 a 和 3.5 a (图 3c)。

东亚和热带西太平洋经向水汽输送的准两年周期振荡在 EOF 分析第 2 主分量反映更明显。图 4a 和 b 分别是从小孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空水汽输送经向分量的 EOF 分析第 2 主分量(可以说明总方差 19.0%)的空间分布和时间系数。从图 4a 可以看到, 在中国东南部、韩国、日本以及南海和热带西太平洋上有一强的负信号区, 而从中印半岛经我国华中、华北到我国东北有一较强的正信号区。这说明: 若从中印半岛经华中、华北到东北经向水汽输送弱, 则从南海、热带西太平洋到副热带西太平洋和我国东南沿海的经向水汽输送弱; 反之, 若从中印半岛经华中、华北到东北经向水汽输送强, 则从南海、热带西太平洋到副热带西太平洋和我国东南沿海的经向水汽输送就强。并且, 从图 4b 可以看到, 从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空水汽经向水汽输送的 EOF 分析第 2 主分量的时间系数呈现出一个明显的准两年周期振荡的年际变化特征。经熵谱分析, 这个时间系数序列呈现出以 2.0 a 为主要周期的年际振荡特征(见图 4c)。

上述从南海、孟加拉湾和热带西太平洋到东亚区域的经向水汽输送的 EOF 分析结果, 清楚地表明了南海、孟加拉湾和热带西太平洋到东亚地区的经向水汽输送具有准两年周期的年际变化特征。

为了说明从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区的夏季风经向水汽输送的年际变化对中国夏季降水的年际变化有很大影响, 本研究进一步计算了这两者 EOF 分析时间系数的相关。计算结果表明: 从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空夏季经向水汽输送 EOF 分析第 2 主分量的时间系数与中国夏季降水的 EOF 分析第 1 主分量时间系数的相关系数, 在 1958~2000 年与 1977~2000 年期间分别达 0.33 和 0.44, 大大超过 95% 的显著性检验。这两个相关系数可以表明从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空夏季经向水汽输送 EOF 分析第 2 主分量时间系数的变化与图 1b 所示的中国夏季降水 EOF 分析第 1 主分量的时间系数的变化有很大相关性。并且, 从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区经向水汽输送 EOF 分析的第 1 主分量的时间系数与中国降水 EOF

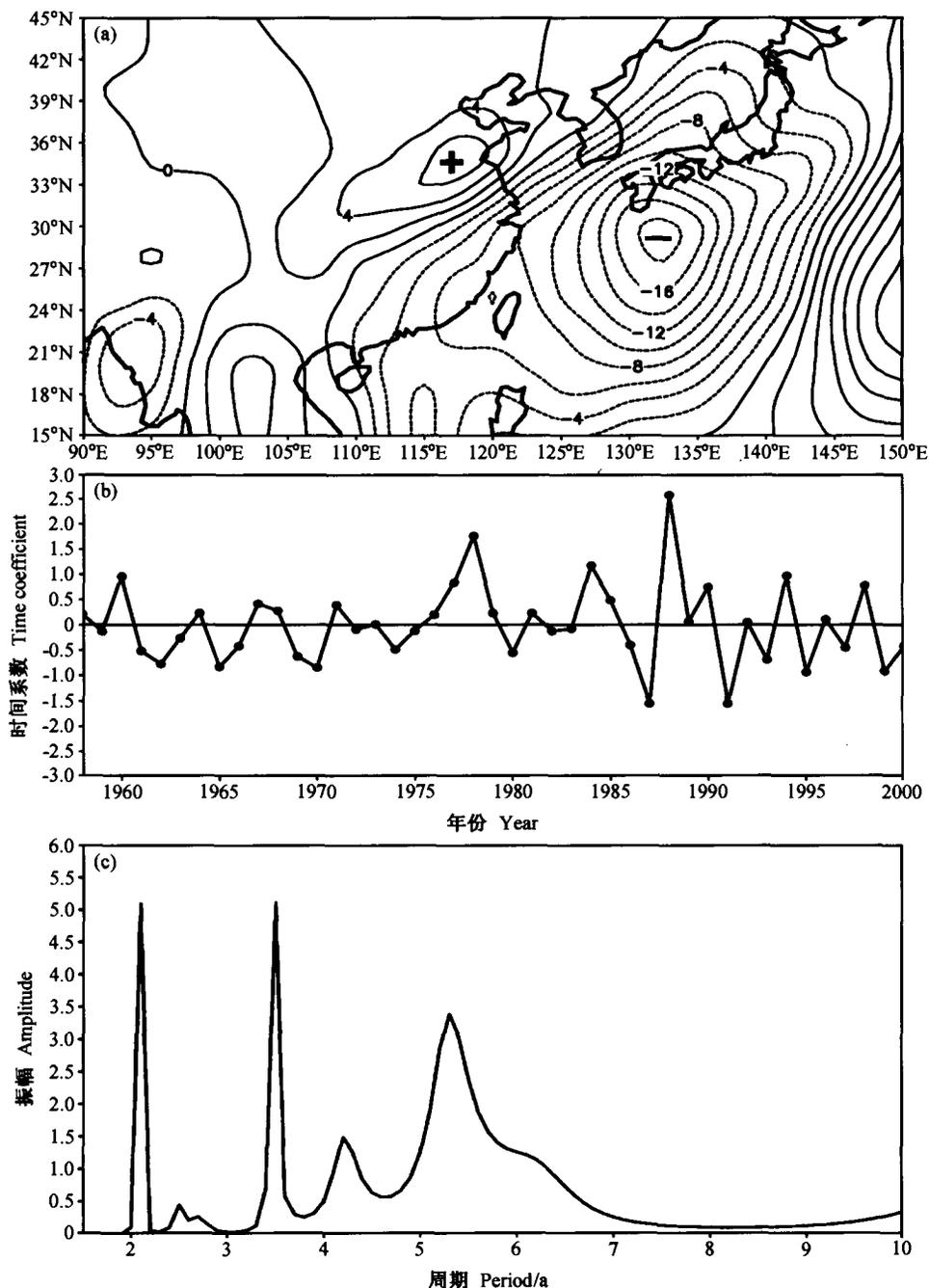


图3 从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空经向水汽输送通量的 EOF 分析第 1 主分量的空间分布 (a) 和时间系数 (b) 及时间系数的熵谱分析 (c) (资料取自 ERA-40 再分析资料)。EOF1 对方差的贡献为 24.2%

Fig. 3 The spatial distribution (a) and corresponding time coefficient series (b) of the first EOF component of meridional water vapor transports over the region from the Bay of Bengal, the South China Sea (SCS), the tropical western Pacific (TWP) to East Asia during summer (Jun - Aug), and the entropy spectrum of the corresponding time coefficients (c). The moisture and wind fields data are taken from the ERA-40 reanalysis dataset. EOF1 explains 24.2% of the variance

分析第 1 主分量时间系数在 1977~2000 年期间的相
关也达到 0.30。这些都表明由于从孟加拉湾、南海

和热带西太平洋到东亚地区上空季风气流所引起的
经向水汽输送具有准两年周期的振荡, 这才造成中

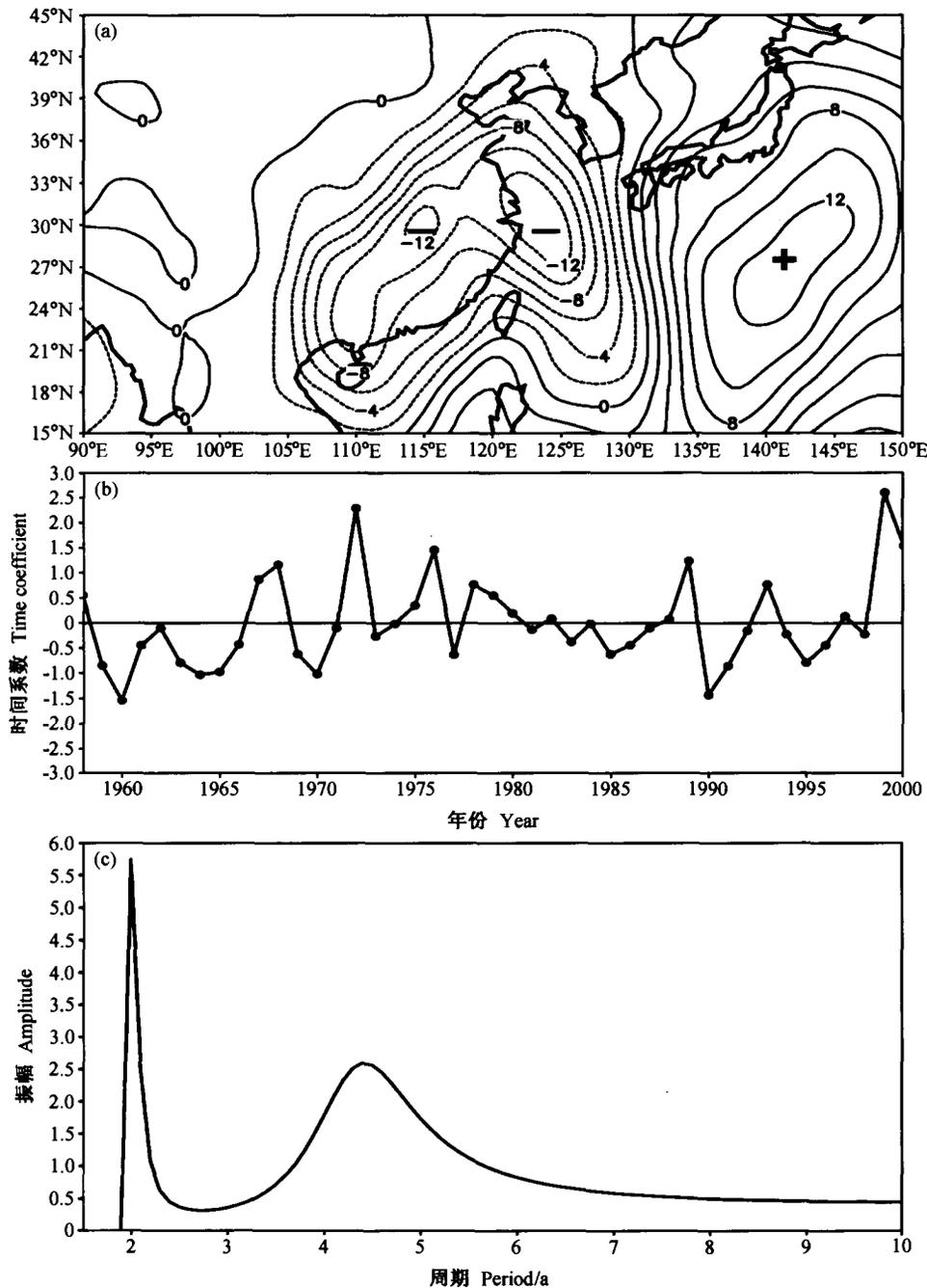


图 4 同图 3, 但为 EOF 分析第 2 主分量 (EOF2 对方差的贡献为 19.0%)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the second EOF component (EOF2 explains 19.0% of the variance)

国夏季降水具有准两年振荡的年际变化特征。

3.2 东亚和热带西太平洋夏季纬向水汽输送的准两年周期振荡及其对中国夏季降水年际变化的影响

本研究还对从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空纬向水汽输送进行了 EOF 分析

(图 5)。从上述地区夏季纬向水汽输送通量的 EOF 分析第 1 主分量 (可以说明总方差 43.6%) 的空间分布和时间系数系列可以看到: 从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空夏季纬向水汽输送通量 EOF1 的空间分布呈现出一个三极子型分布, 一个强的正信号区位于南海和热带西太平洋上空,

一个强的负信号区位于华东、韩国和日本上空,另一个较弱的正信号位于东北地区。这表明南海和热带西太平洋上空纬向水汽输送的变化与我国长江淮河流域、韩国和日本上空纬向水汽输送的变化是相反的。若前者强,则后者弱;相反,若前者弱,而后者就强。这与图 1a 所示的中国夏季降水 EOF 分析第 1 主分量的空间分布一致。然而,从孟加拉

湾、南海和热带西太平洋东亚上空夏季纬向水汽输送通量 EOF 分析第 1 主分量的时间系数 2~3 a 周期的变化不如 4~5 a 周期的振荡强,经熵谱分析,它以 5 a 为主要周期,而 2~3 a 为第二主周期(图略)。这表明东亚和热带西太平洋上空夏季水汽的纬向输送也具有准两年周期变化的成分。

从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区

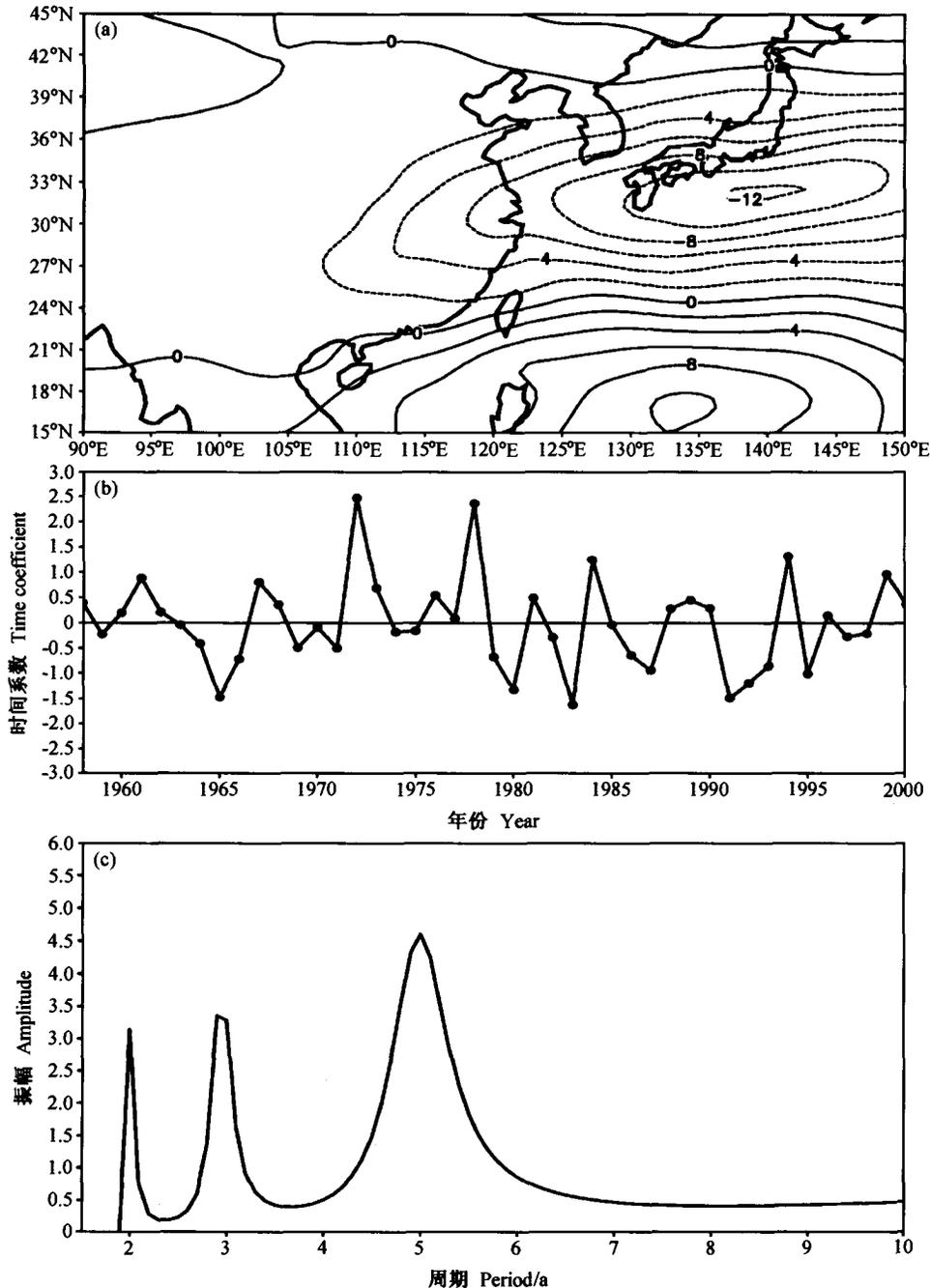


图 5 同图 3, 但为纬向水汽输送 (EOF1 对方差的贡献为 43.6%)

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the zonal water vapor transports (EOF1 explains 43.6% of the variance)

上空, 夏季纬向水汽输送 EOF1 的时间系数与中国夏季降水 EOF1 的时间系数的相关在 1958~2000 年与 1977~2000 年期间分别达 0.42 和 0.45, 也大大超过 95% 的显著性检验。这表明从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区的纬向水汽输送所具有准两年周期振荡成分对中国夏季降水的准两年振荡也有一定贡献。本研究还计算了从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区经向水汽输送的 EOF2 时间系数与纬向水汽输送的 EOF1 时间系数在 1958~2000 年和 1977~2000 年期间的相关, 这两个相关系数分别达到 0.49 和 0.62, 大大超过 99% 的显著性检验, 这不仅表明了两者相关很大, 也说明了从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空夏季经向水汽输送, 由于科里奥利力的作用也通过纬向水汽输送来影响中国夏季的降水变化。

从上面分析可以看到: 夏季东亚和热带西太平洋上空无论是经向还是纬向的水汽输送通量的年际变化都具有准两年周期变化特征, 并且, 它们与中国夏季降水有很高的相关系数。这些可以很好地说明中国夏季降水准两年周期振荡的成因。

4 热带西太平洋热状态的年际变化及其对东亚夏季风年际变化的影响

从上面的分析结果可以看到, 东亚和热带西太

平洋夏季水汽输送 (特别是经向水汽输送) 具有准两年周期的振荡特征。这种振荡特征是什么原因造成的, 目前还不太清楚, 对其研究也不多。Lau 和 Shen^[13] 提出东亚夏季风准两年周期振荡可能与热带东太平洋 SST 有关。然而, 无论是东亚地区, 还是南海和热带西太平洋上空的水汽输送或降水直接受热带西太平洋的海洋热状况所影响^[21~24], 这些研究从观测事实的分析提出: 热带西太平洋是全球海洋温度最高的海域, 全球暖海水大部分集中在这里, 这个海域又称暖池 (warm pool), 是大气热量主要供应地之一, 并且在暖池上空, 由于海表面附近海-气相互作用相当剧烈, 又处于 Walker 环流上升支, 故它的对流活动强, 大尺度气流与水汽的辐合导致了此海域上空大气对流的不断加强和大量的降水。因此, 暖池的热状况及其上空的对流活动不仅在维持热带纬圈环流起很大作用, 而且在经向对北半球夏季大气环流的变化也有很大作用, 特别是对东亚夏季风环流的变异起着十分重要的作用。

图 6 是 Niño.West ($0^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 SST 距平的年际变化, 从图中可以看到热带西太平洋 SST 的变化幅度不大, 一般在 1.0°C 之内。然而, 正如 Huang 和 Sun^[25] 所指出, 热带西太平洋热状态的年际变化还可以进一步从热

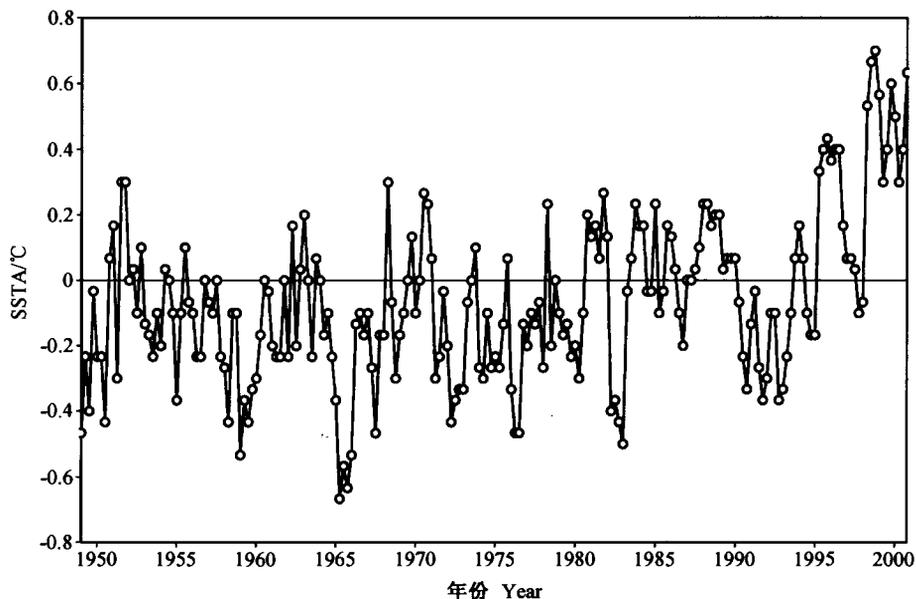


图 6 热带西太平洋 Niño.West ($0^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域平均的 SST 距平的年际变化 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 Interannual variations of the SST anomaly ($^{\circ}\text{C}$) averaged over the Niño.West region of the tropical western Pacific ($0^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$)

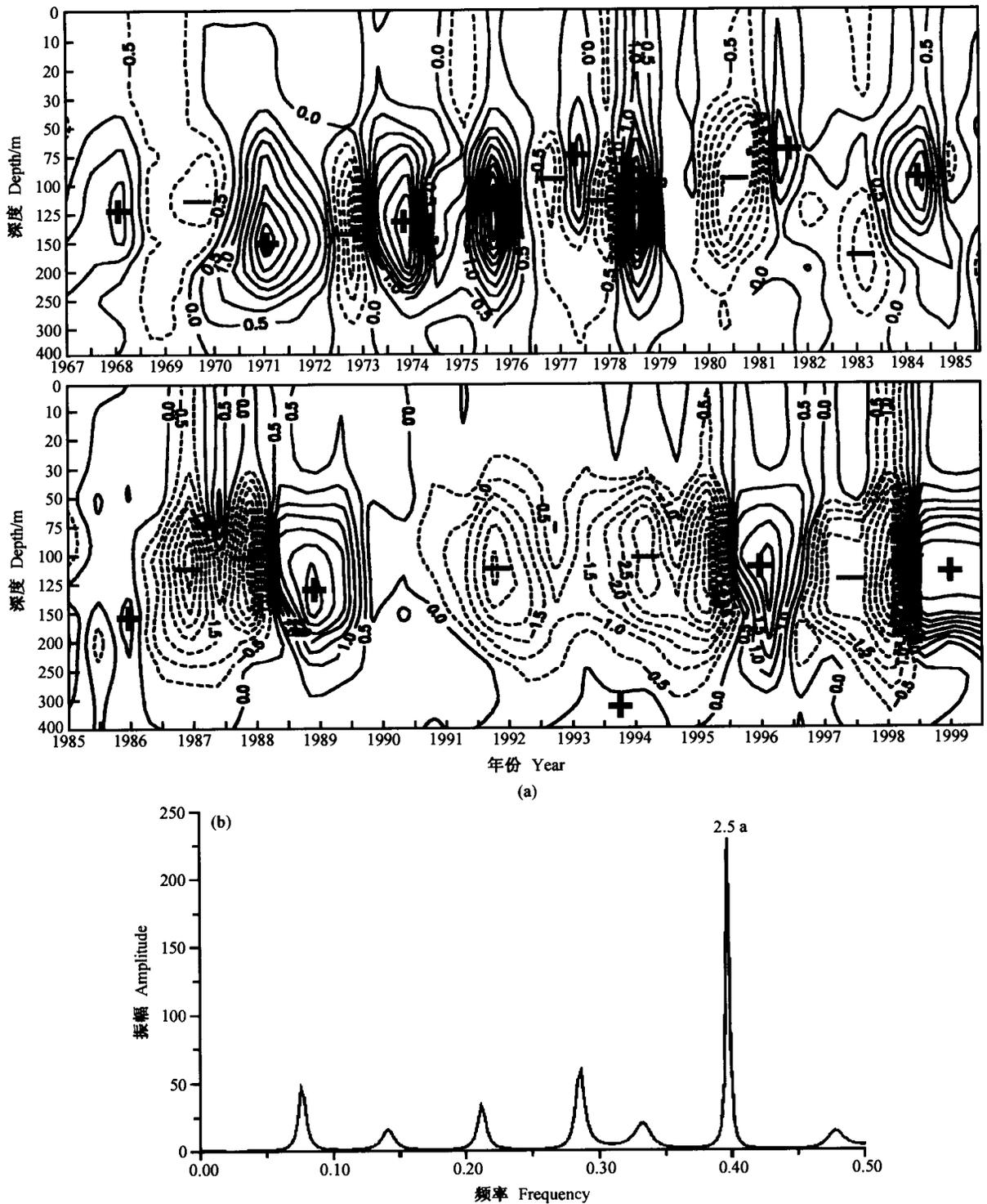


图 7 (a) 热带西太平洋次表层沿 137°E 的 5°N~10°N 平均的海温距平时面-深度剖面图(单位: °C) (资料取自文献[26]); (b) 热带西太平洋沿 137°E 150 m 深次表层 5°N~10°N 平均的冬季次表层海温距平的熵谱

Fig. 7 (a) The time-depth cross section of the sea temperature (ST) anomalies (°C) averaged over 5°N-10°N along 137°E in the subsurface of the tropical western Pacific (The data are taken from the dataset observed by the Oceanographic Research Vessel "Ryofu-Marui", JMA[26]); (b) the entropy spectrum of the winter sea temperature anomalies averaged over 5°N-10°N along 137°E in the 150 m subsurface of the tropical western Pacific

带西太平洋次表层海温的年际变化看到。为此, 本文利用日本气象厅“凌风号”科学考察船所观测的沿 137°E 表层和次表层的海温资料^[26], 分析了热带西太平洋海温的年际变化。从热带西太平洋次表层海温的年际变化方差也可以看到, 西太平洋暖池的海温在 50~250 m 深的次表层变化的均方差较大, 最大均方差位于 5°N~10°N, 150 m 深的次表层, 均方差可达到 4.0°C 以上^[27]。

图 7a 是西太平洋暖池次表层沿 137°E 的 5°N~10°N 平均的海温距平的时间-深度剖面图。把图 7 与图 6 相比较, 可以明显看到: 暖池次表层的海温距平的变化幅度要比表层海温距平的变化大得多, 最大距平可以达到 8.0°C 左右。因此, 利用暖池次表层的海温距平作为热带西太平洋热状态的表征可能更为合适。从图 7a 可以明显看到, 热带西太平洋次表层海温的变化具有准两年周期。图 7b 是热带西太平洋沿 137°E 的 150 m 深次表层 5°N~10°N 冬季海温距平的熵谱。从此熵谱可以明显看到, 热带西太平洋次表层冬季海温以 2.5 a 周期的振幅最大, 这说明热带西太平洋次表层海温具有明显的准两年周期振荡特征。

正如前面所述, Nitta^[23] 和 Huang 等^[24, 25] 的研究指出了热带西太平洋海洋的热状态变化对于东亚夏季风的年际变化有很大的影响, 并提出一个影响东亚夏季风变化的东亚/太平洋型 (EAP 型) 遥相

关 (详见第 6 节)。黄刚^[28] 根据 Nitta^[23] 和 Huang 等^[24] 所提出的 EAP 型遥相关型, 并利用 500 hPa 高度场距平定义了一个衡量东亚夏季风年际变化的 EAP 指数。在此基础上, 本文利用夏季 (6~8 月) 850 hPa 纬向风也定义了一个衡量东亚夏季风年际变化的季风指数 (East Asian summer monsoon index, 记为 I_{EAM}),

$$I_{EAM} = (\text{Nor} \cdot \Delta U_{850}^A - 2\text{Nor} \cdot \Delta U_{850}^B + \text{Nor} \cdot \Delta U_{850}^C), \quad (3)$$

其中, $\text{Nor} \cdot \Delta U_{850}^A$ 、 $\text{Nor} \cdot \Delta U_{850}^B$ 和 $\text{Nor} \cdot \Delta U_{850}^C$ 分别是夏季 850 hPa 面上 A (10°N~17.5°N, 110°E~140°E)、B (27.5°N~35.0°N, 120°E~150°E)、C (45°N~52.5°N, 130°E~160°E) 区域平均的纬向风标准化距平。图 8 中实线和虚线分别是本文所定义的 1958~2000 年东亚季风指数 I_{EAM} 与 Niño.West (0~14°N, 130°E~150°E) 区域平均的月 SST 距平以及与 Niño3.4 区域平均的月 SST 距平的超前、同时和落后相关系数的变化 (样本数在同时相关情况为 43 个)。 I_{EAM} 不仅在表征我国东部夏季季风降水的年际变化方面与黄刚^[28] 所定义的 EAP 指数具有同样的优点, 而且与热带西太平洋 SST 距平有更高的相关系数。从图 8 可以看到两者相关系数具有准两年的变化, 最大相关系数可达到 0.45。这表明热带西太平洋海表温度对于东亚夏季风的准两年周期的变化有很大影响。

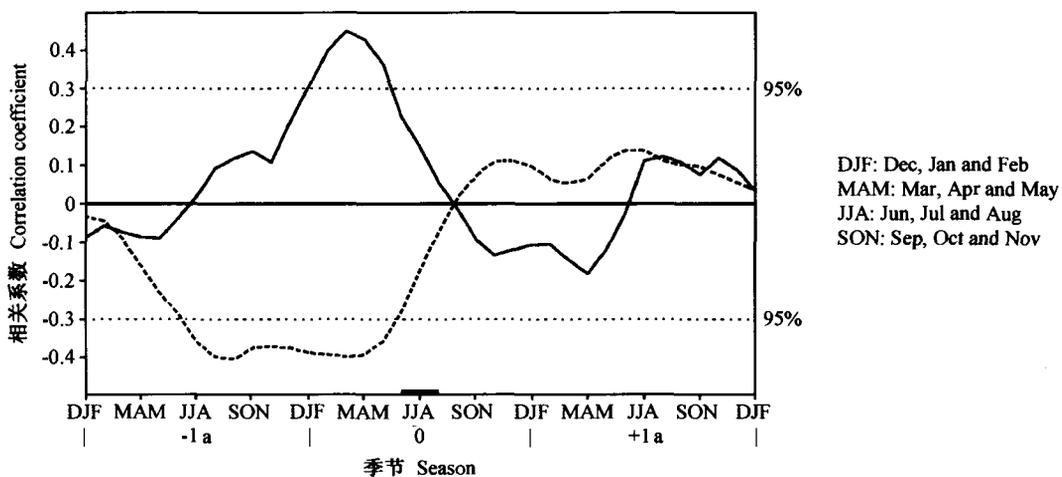


图 8 1958~2000 年 I_{EAM} 指数与 Niño.West (0~14°N, 130°E~150°E) (实线) 以及与 Niño3.4 (虚线) 区域平均的月 SSTA 的落后、同时和超前相关 (同时相关的样本数为 43)。横坐标 0 表示同时, “-”与“+”分别表示海温超前和落后

Fig. 8 The lagged correlations between the I_{EAM} defined in this paper and the monthly SST anomalies averaged over the regions of Niño.West (0°-14°N, 130°E-150°E) (solid line) and Niño 3.4 (dashed line) during 1958-2000. “0” denotes the simultaneous correlation, “-” and “+” the SSTA in the month before and after, respectively

5 热带西太平洋热状态的年际变化对东亚夏季水汽输送变化的影响

正如前节所述,热带西太平洋是全球海洋最高的海域,由于大量的水蒸汽从此海域的海洋蒸发到大气,从而给热带西太平洋、南海和东亚地区上空输送大量的水汽,因此,这个海域海温的变化将对东亚和热带西太平洋上空的水汽输送产生重要影响。为了说明这个影响,本研究利用 ERA-40 再分析资料计算并分析了热带西太平洋不同的热状态所对应的夏季从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区水汽输送通量的分布情况。图 9 是 1979~2000 热带西太平洋处于暖 and 冷状态夏季东亚和孟加拉湾、南海和热带西太平洋上空水汽通量矢量距平的合成分布图,可以看到从热带西太平洋到东亚地区,水汽输送通量距平矢量呈现出三极子式分布。正如图 9a 所示,当热带西太平洋处于暖状态时,在热带西太平洋上空有反气旋式水汽通量距平矢量分布;从华南、江南、南海北部到台湾以东的副热带西太平洋上空有一个明显气旋式水汽通量距平矢量的分布;而在我国黄淮流域和华北东部、东北以及日本、朝鲜半岛一带有明显的反气旋式水汽通量距平矢量分布。这说明在热带西太平洋处于暖状态时,有大量的暖湿空气从热带西太平洋向四周辐散,从中印半岛经华南到菲律宾以东地区有强的水汽辐合,造成华南地区的强降水,而在江淮流域有较强的水汽辐散,使得这些地区降水偏少。此外,在我国华北和河套地区也有偏南水汽的辐合,也使得此区域夏季降水偏多。从图 9b 可以看到,当热带西太平洋处于冷状态时,其水汽输送通量距平的矢量分布正好与上述暖池处于暖状态时的分布情况相反。在这种情况下,在热带西太平洋上空有气旋式水汽通量距平的矢量分布;从南海、华南到台湾以东的副热带西太平洋上空有反气旋式水汽通量距平的矢量分布;从江淮流域、华北东北部和东北地区,经朝鲜半岛到日本一带有明显的气旋式水汽通量距平矢量分布。这说明当热带西太平洋处于冷状态时,热带西太平洋暖湿空气向四周辐散和输送较弱,由于受江南、华南一带副热带高压的作用,大量的水汽从南海、孟加拉湾和副热带西太平洋输送到江淮流域、朝鲜半岛和日本一带,造成水汽在这些地区有较强的辐合,从而在这些地区有强

的降水,而在华南和华北夏季降水较弱。

6 热带西太平洋热力变化影响东亚夏季风准两年周期振荡的物理过程

上面的分析已表明了热带西太平洋海表与次表层的海温有准两年周期的振荡,并且它对东亚夏季风的准两年周期变化有重要的影响,这个影响的物理机制是值得进一步探讨的。正如第 4 节中所述, Nitta^[23]、Huang 等^[24, 25]以及黄荣辉和李维京^[29]从观测事实、准定常行星波传播理论和数值模拟系统地分析研究了热带西太平洋热状态和菲律宾周围对流活动加强后对北半球大气环流异常,特别是西太平洋副热带高压的影响。

Nitta^[23]、Huang 等^[24]以及黄荣辉和李维京^[29]提出热带西太平洋处于暖状态,在菲律宾周围对流强的夏季,从东南亚,经东亚、北太平洋到北美的西海岸明显存在着一个遥相关型。正如图 10 所示,当热带西太平洋处于暖状态,在菲律宾周围经南海到中印半岛有负距平分布,在我国江淮流域和以北的我国北方与日本本州有一片正距平分布,在这种情况下,西太平洋副热带高压位置偏北;并且,在鄂霍次克海上空有一片负距平,在阿拉斯加和阿留申地区有一片正距平;此外,在北美的北部与美国的西海岸上空有一片负距平,在墨西哥与美国南部上空有一片正距平。这个遥相关型称为东亚-太平洋型 (East Asia/Pacific, 简称 EAP 型),它对东亚和北美夏季气候变动 (variability) 和异常有很大影响。并且, Huang 和 Sun^[25]进一步从观测事实分析、动力理论和数值模拟系统地分析了热带西太平洋的热状态对暖池上空的对流活动和热带西太平洋副热带高压的影响,分析结果表明:热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对西太平洋副热带高压的强度与位置的变化起着十分重要的作用。当热带西太平洋暖池增暖时,从菲律宾周围经南海到中印半岛上空的对流活动将增强,西太平洋副热带高压的位置偏北,我国江淮流域夏季降水偏少;反之,则菲律宾周围的对流活动减弱,副热带高压偏南,江淮流域的降水偏多,黄河流域的降水偏少,易发生干旱。关于热带西太平洋热状态及其上空对流活动对东亚和热带西太平洋夏季风环流变化影响的物理机制已在参考文献^[23~25, 28, 29]中详细讨论,本文不再重复。

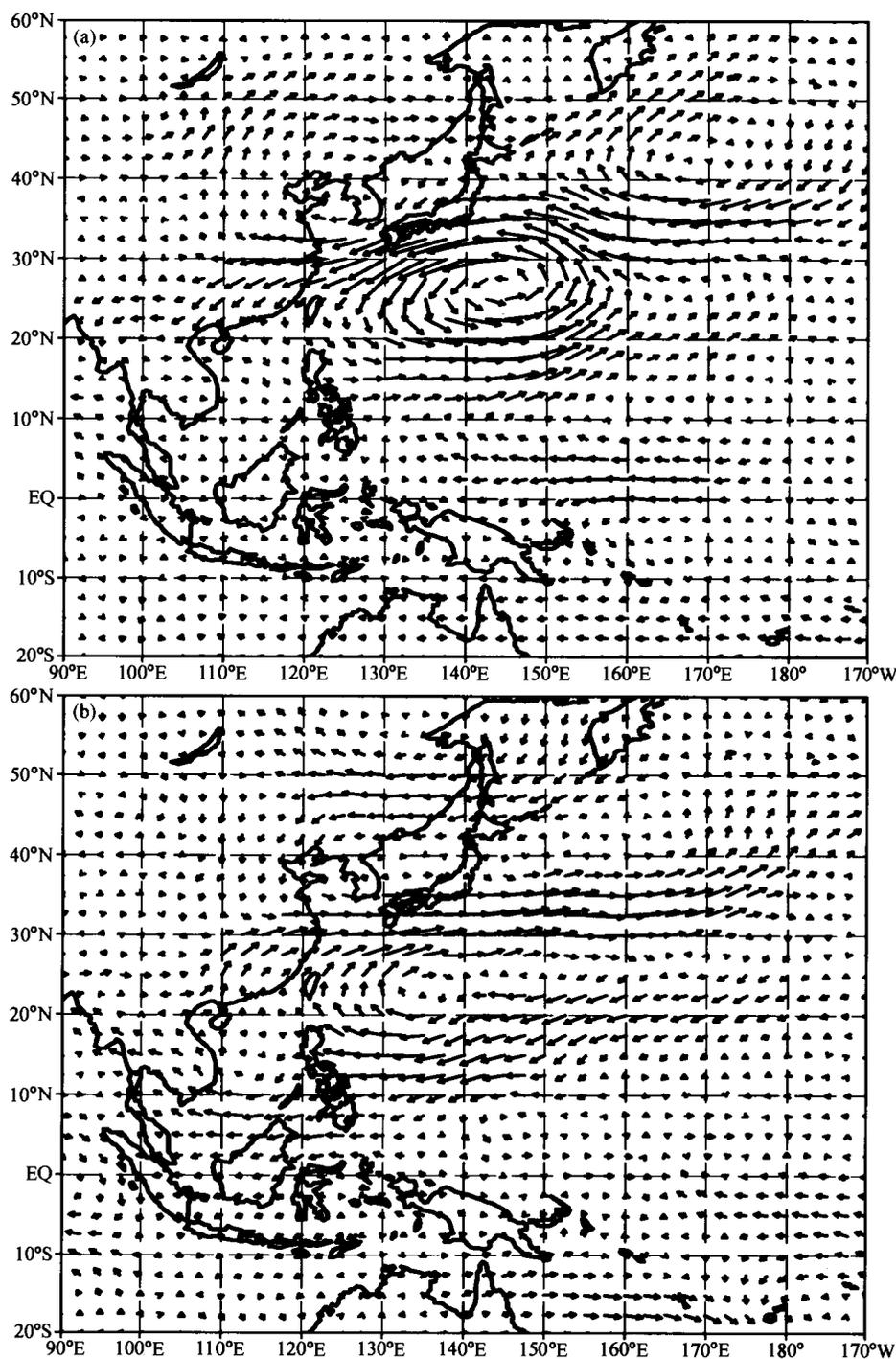


图 9 夏季热带西太平洋不同热状态时,从孟加拉湾、南海和热带西太平洋到东亚地区上空水汽输送通量距平矢量的合成分布(单位: $10^3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$):(a)热带西太平洋处于暖状态;(b)热带西太平洋处于冷状态.资料取之于 ERA-40 再分析资料

Fig. 9 The distributions of composite water vapor transport flux anomalies ($10^3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) over the region from the Bay of Bengal, the SCS and the TWP to East Asia in a warming state (a) and a cooling state (b) of the TWP. The moisture and wind fields data are taken from the ERA-40 reanalysis dataset

7 结论与讨论

本文通过观测资料分析,揭示了中国夏季降水

的年际变化具有准两年周期振荡的特征;并利用 ERA-40 再分析资料分析了东亚地区和孟加拉湾、南海和热带西太平洋上空季风气流所引起的水汽输送

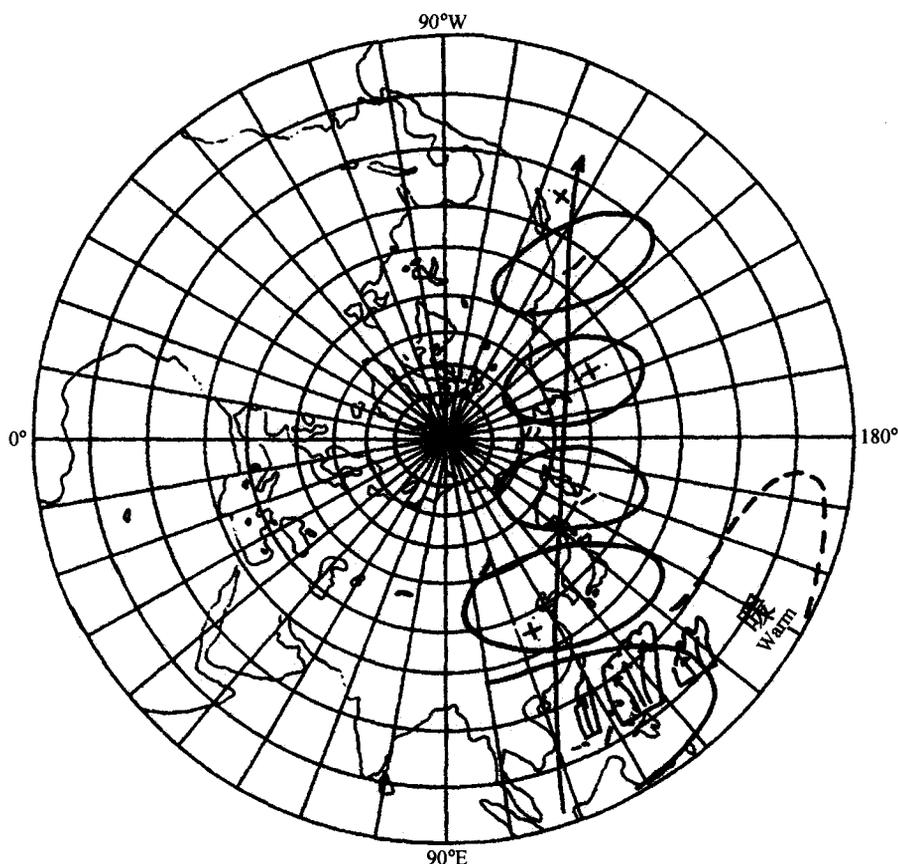


图 10 北半球夏季大气环流异常的东亚/太平洋型遥相关示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the East Asia/Pacific pattern teleconnection of the summertime circulation anomalies over the Northern Hemisphere

通量的年际变化,表明此区域季风所驱动的经向水汽输送具有明显准两年周期振荡,而纬向水汽输送也具有准两年周期振荡的成分,从而说明了中国夏季降水的准两年周期振荡(TBO)是由于东亚和热带西太平洋上空夏季季风所驱动的水汽输送的准两年周期振荡所引起。本文还利用实测资料分析热带西太平洋次表层海温的准两年周期振荡特征及其对东亚地区夏季风水汽输送和中国夏季降水的准两年周期振荡(TBO)的影响,并从理论上讨论其物理过程。

这些观测事实和理论上的讨论结果(图 11)表明:当某一年冬春季热带西太平洋海温上升,也就是热带西太平洋处于偏暖状态,这就会使得第二年春夏季菲律宾周围的热带西太平洋上空对流活动偏强,由于 EAP 型遥相关波列的影响,将会使得东亚和北半球上空夏季出现似图 11 所示的高度场异常分布,即西太平洋副热带高压偏北,这将导致我国长江、淮河流域、日本和韩国的夏季降水偏少。另一方面,从海洋方面看,由于第二年夏季热带西

太平洋面附近上空强对流活动所产生的强辐合将会造成热带西太平洋的海水上翻(upwelling)加强(将在另文讨论),从而导致秋冬季此海域海温开始下降,并使此海域的冬季及以后海表和次表层海温偏低。这样,由于第三年春夏季热带西太平洋海温处于冷状态,这就会使得春夏季菲律宾周围对流活动就减弱,夏季出现与图 10 所示相反的高度场异常分布,即西太平洋副热带高压偏南,从而引起我国长江、淮河流域、日本和韩国的夏季降水偏多。另一方面从海洋方面看,由于第三年春夏季热带西太平洋上空对流活动弱,西太平洋副热带高压偏南,这样造成热带西太平洋海表上空对流层下层气流辐合很弱,并出现反气旋距平环流分布,从而引起热带西太平洋的海水上翻减弱,这就导致秋冬季此海域海温开始上升,并使第三年春夏季此海域的海表和次表层海温又变成偏高。这样,热带西太平洋海一气耦合系统的变化经历了一个循环,这个循环周期大约为 2 a 左右。

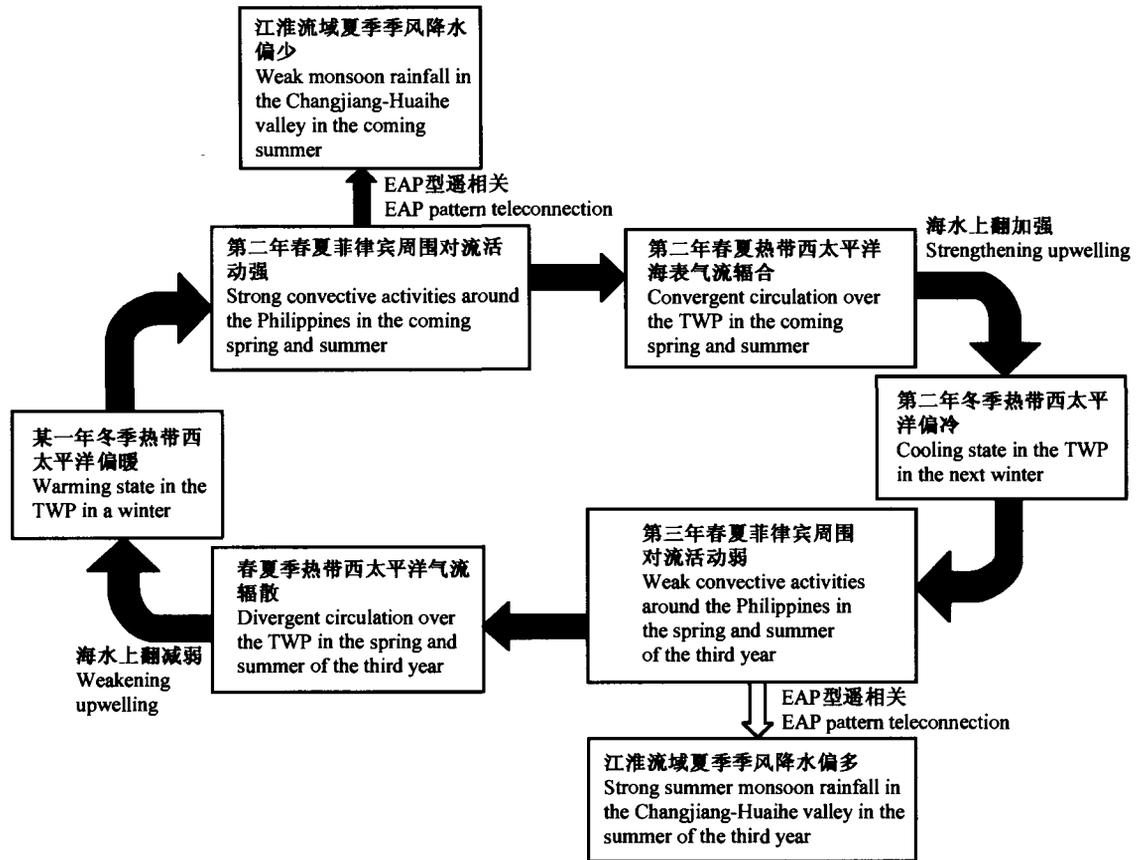


图 11 东亚夏季风准两年周期振荡 (TBO) 与热带西太平洋海-气耦合系统关联概念图

Fig. 11 Conceptive diagram of the quasi-biennial oscillation of East Asian summer monsoon related to the air - sea coupling system in the tropical western Pacific

从本文分析结果看，中国东部夏季降水的准两年周期振荡主要受热带西太平洋热力状态所影响。当然，南海和孟加拉湾的热力状态对中国夏季降水的准两年周期振荡也有一定影响。限于本文所研究的内容，不可能再阐述这两海域的热力状态的变化及其对中国夏季降水的准两年周期振荡的影响。因此，我们将进一步开展热带东印度洋和南海热力状态变化对中国夏季降水的准两年周期振荡的影响。此外，中国夏季降水的准两年周期振荡在 20 世纪 70 年代中期前并不太明显，而在 70 年代中后期以后比较明显，这种年代际变化成因也有待于进一步探讨。

参考文献 (References)

[1] Reed R, Cambell W J, Rasmusson L A, et al. Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere. *J. Geophys Res.*, 1961, **66**: 813~818

[2] Veryard R G, Ebdon R A. Fluctuations in tropical stratospheric winds. *Meteor. Mag.*, 1961, **90**: 125~143
 [3] Mooley D A, Parthasarathy B. Fluctuations in all-India summer monsoon rainfall during 1871 - 1978. *Climate Change*, 1984, **6**: 287~301
 [4] Meehl G. The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean region. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 27~50
 [5] Yasunari T, Suppiah R. Some problems on the interannual variability of Indonesian monsoon rainfall. *Tropical Rainfall Measurements*, edited by J. S. Theon and N. Fugono, Deepak, Hampton, Va., 1988. 113~122
 [6] Kiladis G N, Van Loon H. The Southern Oscillation. Part VII: Meteorological anomalies over the Indian and Pacific sectors associated with the extremes of the oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 120~136
 [7] Yasunari T. Impact of Indian monsoon on the coupled atmosphere/ocean system in the tropical Pacific. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1990, **44**: 29~41
 [8] Ropelewski C F, Halpert M S, Wang X. Observed tropo-

- spherical biennial variability and its relationship to the Southern Oscillation. *J. Climate*, 1992, **5**: 594~614
- [9] Miao J H, Lau K-M. Interannual variability of East Asian monsoon rainfall. *Quart. J. Appl. Meteor.*, 1990, **1**: 377~382
- [10] Tian S F, Yasunari T. Time and space structure of interannual variations in summer rainfall over China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70**: 585~596
- [11] 殷宝玉, 王连英, 黄荣辉. 东亚夏季风降水的准两年振荡及其可能的物理机制. 见: 黄荣辉等编. 灾害性气候的过程及诊断论文集. 北京: 气象出版社, 1996. 196~205
Yin Baoyu, Wang Lianying, Huang Ronghui. Quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in East Asia and its physical mechanism. *Collected Papers of the Project "Disastrous Climate Prediction and Its Impact on Agriculture and Water Resources"*. Huang Ronghui et al., Eds., Beijing: China Meteorological Press, 1996. 196~205
- [12] Chang C P, Zhang Y S, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. I, II. *J. Climate*, 2000, **13**: 4310~4340
- [13] Lau K-M, Shen P J. Annual cycle, quasi-biennial oscillation and Southern Oscillation in global precipitation. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 10975~10988
- [14] Barnett T P, Dumenil L, Schlese U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 661~685
- [15] Rasmussen E M, Wang X, Ropelewski C F. The biennial component of ENSO variability. *J. Mar. Syst.*, 1990, **1**: 71~90
- [16] Xie P, Arkin P A. Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates and numerical model prediction. *J. Climate*, 1997, **9**: 804~858
- [17] Uppala S. ECWMF Reanalysis, 1957~2001, ERA-40. *ERA-40 Project Report Series*, 2002, **3**: 1~10
- [18] Lu R Y, Chung Y S, Huang R H. Interannual variations of the precipitation in Korea and the comparison with those in China and Japan. *J. Korea Environ. Sci. Soc.*, 1995, **4**: 345~356
- [19] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 东亚季风区的水汽输送特征及其与印度季风区的差别. 大气科学, 1998, **22**: 460~469
Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon regions and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 460~469
- [20] Inoue T, Matsumoto J. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP/NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960 - 99. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, **82**: 951~958
- [21] Cornejo-Garrido A G, Stone P H. On the heat balance of the Walker circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1155~1162
- [22] Hartmann D, Hendon H, Houze R A. Some implications of the mesoscale circulations in tropical cloud clusters for large-scale dynamics and climate. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 113~121
- [23] Nitta Ts. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **64**: 373~390
- [24] Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia. *Proc. International Conference on the General Circulation of East Asia*, April 10 - 15, 1987, Chengdu, 40~51
- [25] Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B): 243~256
- [26] Japan Meteorological Agency. *Monthly Report on Climate System 1978~2000*
- [27] 叶笃正, 黄荣辉, 等. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科技出版社, 1992. 387pp
Ye Duzheng, Huang Ronghui, et al. *Studies on Regularity and Cause of Droughts and Floods in the Yangtze River Valley and the Yellow River Valley*. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1992. 387pp
- [28] 黄刚. 东亚夏季风环流异常指数与夏季气候变化关系的研究. 应用气象学报, 1999, **10**: 61~69
Huang Gang. Study on the East Asian monsoon circulation index and its relation to summer climate variability in East Asia. *J. Applied Meteor.* (in Chinese), 1999, **10**: 61~69
- [29] 黄荣辉, 李维京. 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. 大气科学, 1988, 特刊: 95~107
Huang Ronghui, Li Weijing. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia and physical mechanism. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1988, Special Issue: 95~107