

孙颖, 徐海明, 邓洁淳. 2014. 太平洋—日本遥相关型的年代际变化特征及其成因 [J]. 大气科学, 38 (6): 1055–1065, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13273. Sun Ying, Xu Haiming, Deng Jiechun. 2014. Interdecadal variation in Pacific–Japan teleconnection patterns and possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1055–1065.

太平洋—日本遥相关型的年代际变化特征及其成因

孙 颖^{1,2} 徐海明^{1,2} 邓洁淳^{1,2}

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘 要 本文首先利用 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及中国 753 站降水资料对太平洋—日本 (Pacific–Japan, 简称 P–J) 遥相关型在上世纪 70 年代末期气候突变前后的年代际变化特征进行了分析研究。结果表明, 在气候突变前后, P–J 遥相关型的位置发生了显著的变化, 气候突变以后其位置明显向西向南偏移。这种位置的变化同样也反映在纬向风场、高度场上。研究结果还表明, 气候突变前后 P–J 遥相关型的年代际变化与热带太平洋和印度洋海温变化有关。气候突变之前, P–J 遥相关型的变化与前期热带太平洋和印度洋海温不存在显著的相关; 但在气候突变之后, P–J 遥相关型与前期冬春季的热带太平洋、印度洋海温之间存在大范围的显著相关区。这种 P–J 遥相关型与热带太平洋、印度洋海温相关关系的年代改变可能与 1970 年代中期以后赤道中东太平洋海温变化振幅明显增强有关。随后, 本文采用一个高分辨率的大气环流模式, 通过一系列的数值试验也进一步证实了 1970 年代末期热带太平洋和印度洋海温的年代际变化确实可致使 P–J 遥相关型位置发生相应的改变。

关键词 P–J (Pacific–Japan) 遥相关型 年代际变化 气候突变 热带海温

文章编号 1006–9895(2014)06–1055–11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13273

Interdecadal Variation in Pacific–Japan Teleconnection Patterns and Possible Causes

SUN Ying^{1,2}, XU Haiming^{1,2}, and DENG Jiechun^{1,2}

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory of Meteorological Disasters of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST), Nanjing 210044

² College of Atmospheric Science, NUIST, Nanjing 210044

Abstract Based on NCEP/NCAR, the ERA-40 reanalysis dataset, and the precipitation dataset from 753 stations in China, the interdecadal variation of the summer Pacific–Japan (P–J) teleconnection pattern is investigated. Results indicate that the summer P–J teleconnection pattern experienced a marked interdecadal variation around the late 1970s, with its major teleconnection centers shifting southwestward. This interdecadal variation is clearly reflected in the fields of 850 hPa zonal wind and 500 hPa geopotential heights. This study also shows that the P–J teleconnection pattern in interdecadal variation is closely related to interdecadal variations in sea surface temperature (SST) over the tropical Pacific and Indian Oceans. Prior to the late 1970s, no high correlation coefficients are found between the summer P–J teleconnection pattern and its previous winter SST. However, after that, the P–J teleconnection pattern is found to be highly correlated to the SST over the tropical Pacific and Indian Oceans, both in the previous winter and spring. This

收稿日期 2013–09–25, 2014–02–20 收修定稿

资助项目 国家重大科学研究计划项目——“太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候变化的调控作用” 2012CB955600, 国家自然科学基金项目 41275094, 江苏高校优势学科建设工程项目 PAPP, 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介 孙颖, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 研究方向为区域气候与海气相互作用。E-mail: sunying88@foxmail.com

通讯作者 徐海明, E-mail: hxu@nuist.edu.cn

interdecadal change in the relationship between the P-J teleconnection pattern and the SSTs over the tropical Pacific and Indian Ocean is probably due to the fact that the SST interannual variability over the tropical central and eastern Pacific has increased remarkably since the late 1970s. A high-resolution atmospheric general circulation model (GCM) is used to examine the effect of SSTs over the tropical Pacific and Indian Oceans on the interdecadal variation in the P-J teleconnection pattern through a model control experiment and several sensitivity experiments. GCM results further confirm that the interdecadal variation in SSTs over the tropical Pacific and Indian Oceans can indeed lead to the interdecadal variability of the P-J teleconnection pattern.

Keywords P-J (Pacific–Japan) teleconnection pattern, Interdecadal variation, Abrupt climate change, Tropical SST

1 引言

夏季东亚气候异常和西北太平洋气候变化有着密切的联系,在很大程度上可以认为是一个不可分割的整体。但这种联系一直没有被发现,直到 20 世纪 80 年代后期有了数年的卫星观测资料之后。在此期间, Huang and Li (1987)、黄荣辉和李维京 (1988) 和 Nitta (1987) 分别指出东亚气候和西北太平洋气候之间存在着联系,而这种联系可通过大气遥相关建立起来,即通过东亚—太平洋(简称 EAP)或太平洋—日本遥相关(简称 P-J 遥相关)。这些研究首次明确提出了东亚和西北太平洋气候之间存在着密切的联系,并引发了随后大量的相关研究。

早期大量的研究关注于这种遥相关型的形成机制。Kurihara and Tsuyuki (1987) 通过一个正压模式的数值试验,发现菲律宾附近的大气对流可以激发出北传的二维罗斯贝波,其水平结构类似于观测到的 P-J 遥相关型。Huang and Li (1987)、黄荣辉和李维京 (1988) 则发现赤道西太平洋夏季热源异常能够激发出类似于 EAP 的波形。Huang (2004) 在上述基础上定义了 EAP 指数。Wakabayashi and Kawamura (2004) 则是在正交函数分解的基础上,通过图形中心节点的分布位置定义了 P-J 指数。这些遥相关指数被广泛用来揭示西北太平洋气候异常与东亚气候异常之间的关系,并应用于短期气候预测,特别是我国东部夏季降水异常的预测。需要指出的是,这些遥相关指数的定义都建立在该遥相关型中心节点位置不变的前提下,但是东亚—太平洋遥相关型的位置是否保持不变,到目前为止还没有相关的研究工作。

已有大量研究表明,20 世纪 70 年代末期气候系统发生了显著的年代际变化。例如,大气环流基本态发生了显著改变,两个半球中纬度西风显著加强(朱锦红等, 2003),东亚季风减弱(Wang et al., 2001) 等等。海洋方面,赤道中东太平洋增暖,西

北太平洋冷却(Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997),由 ENSO 产生的印度洋海温异常的强度也发生了显著变化(Xie et al., 2009)。已经有研究指出,北大西洋涛动(NAO)中心节点的位置存在明显的年代际变化,其主要的节点特别是北部节点的位置在 1970 年代末期之后明显向东移动(Jung et al., 2003; Moore et al., 2013),这种位置的变化不仅反映在气压场上,在温度场和湍流热通量场也有表现。P-J 型作为影响东亚—太平洋区域的遥相关型,是否也具有类似的变化特征?因此,本文的研究主要关注于气候突变前后东亚—太平洋型遥相关是否也会发生相应的变化,特别是 P-J 遥相关型的主要节点位置是否也会发生改变,并探究引起该变化的原因。

2 资料和方法

2.1 资料说明

本文采用的资料包括:中国气象局国家气象信息中心提供的 1960~1999 年全国 753 站月平均降水资料;NCEP/NCAR 全球大气再分析资料计划(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001)和欧洲中期数值预报中心(ECMWF)全球大气 40 年再分析资料计划(ERA-40)(Simmons and Gibson, 2000; Uppala et al., 2005)的月平均数据,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;英国气象局 Hadley 中心的海表面温度资料(Rayner et al., 2003)(Hadley Centre Sea-ice and Sea-surface Temperature Data Set Version 1, HadISST1),水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

2.2 方法说明

本文通过对涡度场进行经验正交函数分解(EOF)来定义 P-J 遥相关型,即利用经过球谐函数滤波的 850 hPa 相对涡度异常场在东亚—西北太平洋区域($0^{\circ} \sim 60^{\circ}N$, $100^{\circ} \sim 160^{\circ}E$)进行 EOF 展开,然后将相对涡度异常场回归到第一特征向量(EOF1)的时间系数(PC1)上,所得的涡度回归

场在东亚-太平洋区域呈现一明显的经向波列，该波列即为 P-J 遥相关 (Kosaka and Nakamura, 2006, 2010; Kosaka et al., 2013)。选择 850 hPa 高度层，是由于该层大气变量受地形的影响较地面小，同时又与地面降水相关紧密，而 P-J 遥相关型发现之初就被认为是与对流性降水相关密切 (Nitta, 1987; Kurihara, 1989; Ogasawara and Kawamura, 2007; Hsu and Lin, 2007)。此外，定义上述 PC1 为 P-J 遥相关型指数，用于后面的计算。与遥相关的传统定义方法点相关 (Wallace and Gutzler, 1981) 相比，区域 EOF 分析得到 P-J 遥相关中心节点的计算过程具有客观性，更适用于本文计算比较 P-J 遥相关型位置的年代际变化。

为了更好地反映大尺度的大气环流特征，需要在 P-J 遥相关型计算前，采用球谐函数将相对涡度异常场进行平滑。球谐函数采用 (Hoskins, 1980; Sardeshmukh and Hoskins, 1984) 文章中的方法，其计算公式为

$$\bar{f}(\lambda, \theta) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{N(m)} S_n^m F_n^m P_n^m(\cos\theta) e^{im\lambda}, \quad (1)$$

$$S_n = \exp\left[-\left(\frac{n(n+1)}{n_0(n_0+1)}\right)^r\right], \quad (2)$$

在公式 (1) 中， λ 是经度， θ 是余纬， $P_n^m(\cos\theta)$ 为标准化连带勒让德函数； $n-m$ 是除极点外北极和南极之间的零点数目，因而 $l=n-m+1$ 表示经圈大圆上的波数， m 为纬向波数， $n+l$ 为球谐函数在经圈大圆和纬向圆周上的波数总和，通常把 n 称为总波数 (曹鸿兴, 2001; 李志锦和纪立人, 1996)。 M 、 $N(m)$ 为谐波的截断数，即沿纬圈和经圈分解的最大波数。截断有两种方式：三角截断和平行四边形截断，其中三角截断 $M=N(m)$ ，它可以在全球给出相同空间分辨率。这里选用三角截断，且令 $M=N(m)=47$ 。 S_n^m 可用于逐步减小球谐系数的振幅 (Hoskins, 1980; Sardeshmukh and Hoskins, 1984)，在公式 (2) 中， n_0 是球谐系数振幅衰弱为原振幅 $e^{-1}=0.3678795$ 处的波数， r 为球谐系数的衰减率，这里取 $n_0=24$ ， $r=2$ 。

本文中大气视热源 (Q_1) 由公式 (3) 计算得到 (Yanai et al., 1973)：

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0}\right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right], \quad (3)$$

其中， T 为温度， q 为比湿， ω 为 p 坐标的垂直速度， \mathbf{V} 为水平风矢量； $p_0=1000$ hPa， $k=R/c_p$ 。

3 P-J 遥相关型年代际变化特征的观测事实

3.1 P-J 遥相关型的年代际变化

图 1 是利用 ERA-40 和 NCEP/NCAR 两套再分析资料计算得到的夏季 P-J 遥相关型。由图可见，P-J 遥相关型具有纬向伸长、经向正负交替的结构，中心节点分别位于菲律宾海域、中国台湾东部海域以及日本附近，这与 Nitta (1987)、Kosaka and Nakamura (2006) 以及 Lu (2002) 等人的研究结果相一致。

考虑到 1976~1979 年间存在明显的气候突变，这里对 1960~1979 年和 1980~1999 年两个时段分别讨论。图 1 分别给出了两个时段 P-J 遥相关型的分布。分析 ERA-40 资料，由图 1a、b 可知，P-J 遥相关型存在四个节点中心，中心位置从 1960~1979 年到 1980~1999 年均明显向西向南偏移，且偏移程度由南向北依次增加。其中，最北的回归中心在气候突变前位于鄂霍次克海西部海域，而在气候突变后，其位置移至俄罗斯阿穆尔河下游，向西移了约 6 个经距，同时向南移了近 5 个纬距；而最南侧的回归中心在气候突变前位于菲律宾东部海域，而在气候突变后，其位置落在菲律宾南部的海域，向西移了近 10 个经距，向南移了 5 个多纬距。NCEP/NCAR 资料同样也反映出了气候突变前后 P-J 型位置的移动 (图 1c、d)，进一步验证了结果的可靠性。

3.2 纬向风和高度场上反映出的年代际变化特征

前人的研究表明，P-J 遥相关型与大气环流的一些要素场之间有很好的相关性。Wang et al. (2001) 利用 850 hPa 纬向风场的差值定义对流指数，用以反映菲律宾附近的对流变化，该指数的定义是以 P-J 遥相关型与纬向风场之间的关联性为前提。Huang and Li (1987) 和 Huang (2004) 利用 500 hPa 高度场定义 EAP 型遥相关，而 P-J 型和 EAP 型在本质上具有一致性，可见 P-J 遥相关型与纬向风场以及高度场之间具有很好的配置关系。那么在气候突变前后，P-J 遥相关型的年代际变化在其他气象要素场上是否有相应的变化特征？下面利用 ERA-40 资料分析与 P-J 型相关的各要素场的年代际变化。

图 2 分别给出了夏季 850 hPa 纬向风和 500 hPa 位势高度对 P-J 遥相关型指数的回归场。由图 2a、b

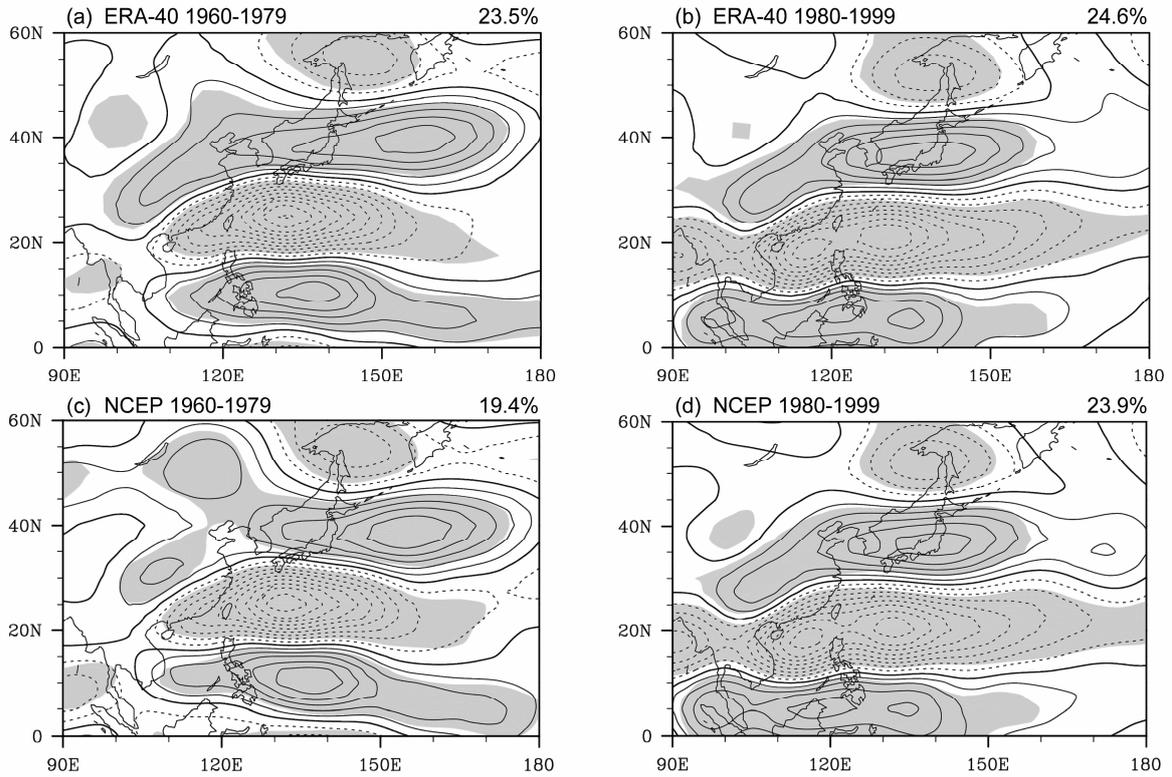


图 1 (a、c) 1960~1979 年和 (b、d) 1980~1999 年夏季 P-J 遥相关型; (a、b) ERA-40; (c、d) NCEP/NCAR。等值线为回归的相对涡度 (单位: $10^{-6} s^{-1}$) 异常场, 间隔为 0.5; 阴影区域为通过 95% 信度检验的区域; 图右上角的百分数为各自 EOF1 的方差贡献率
Fig. 1 Pacific-Japan (P-J) teleconnection patterns in summer (JJA) (a, c) from 1960 to 1979 and (b, d) from 1980 to 1999 based on (a, b) ERA-40 and (c, d) NCEP/NCAR data. Contour lines indicate regressed positive and negative anomalies of relative vorticity (units: $10^{-6} s^{-1}$), contour interval is 0.5; shading represents the 95% confidence level, based on the t statistic; the variance fraction explained by EOF1 is denoted at the top-right corner

可见, 在 850 hPa 纬向风的回归场上同样存在经向分布的遥相关型, 其分布与 P-J 遥相关型的波列形式类似, 但其中心位置以及波长大小与 P-J 遥相关型波列有所不同。值得注意的是, 两个时段内均存在三个完整的异常中心, 其中心位置都在两个时段间发生了改变。1960~1979 年间, 位于菲律宾东北部海域的中心在气候突变之后向西南移至菲律宾西部, 且波列的偏移程度由北向南依次增加, 这与 P-J 遥相关型的移动特征相一致。

此外, 纬向风场与 P-J 遥相关型之间的相关性在气候突变前后有所改变, 低纬地区强度增强, 相关范围增大, 而中纬地区强度减弱。

图 2c、d 为夏季 500 hPa 高度场分别回归到两个时段 P-J 遥相关型指数上的异常场。可以看到, 在 1960~1979 年间, P-J 遥相关型与 500 hPa 高度场之间相关性较弱; 在气候突变之后 1980~1999 年间, 相关性在低纬地区增强, 中纬地区减弱, 并且其中心位置明显向西向南移动, 这与 P-J 遥相关

型与纬向风场之间相关性在气候突变前后的变化特征相一致。此外, 在该时段内回归中心也由两个变为三个。Huang (2004) 利用 500 hPa 高度场定义 EAP 指数:

$$I_{EAP} = -0.25Z'_s(60^\circ N, 125^\circ E) + 0.50Z'_s(40^\circ N, 125^\circ E) - 0.25Z'_s(20^\circ N, 125^\circ E), \quad (4)$$

其定义的中心位置与 1980~1999 年时段回归图中的中心位置一致, 这清楚表明 P-J 遥相关型与 EAP 遥相关型之间在本质上具有一致性, 同时也表明基于 500 hPa 位势高度场定义的 EAP 遥相关型的位置在气候突变前后也相应发生了变化。

3.3 P-J 遥相关型与我国夏季降水

从 P-J 遥相关型的研究之初, 有关它的研究就与我国夏季降水异常紧密相连 (Nitta, 1987)。黄荣辉 (1990) 指出, 江淮流域旱涝的发生不仅与菲律宾周围的对流活动有关, 而且也与从菲律宾经东亚到北美的东亚—太平洋型 (EAP 型) 夏季遥相关

相联系。由前面的分析知道，P-J 遥相关型的位置存在明显的年代际变化，那么其对我国夏季降水的影响是否也会发生年代际的变化呢？图 3 给出了我国 753 站夏季降水分别对两个不同时段 P-J 遥相关型指数的回归场。对比图 3a 和 b 可知，在 1960~1979 年期间，P-J 遥相关型对中国夏季降水存在显著影响的范围主要局限于长江以北的江苏、安徽、

湖北以及河南南部。而在 1980~1999 年间，对夏季降水的显著影响范围明显扩大，除了江淮流域以外，P-J 遥相关型还可影响到长江以南的重庆、贵州、湖南、江西和浙江等省份，甚至对我国青藏高原地区的降水也存在显著影响。基于相关系数与方差贡献之间的关系（李红梅等，2008），这里计算 P-J 遥相关型对中国夏季降水的贡献，发现 P-J 遥相

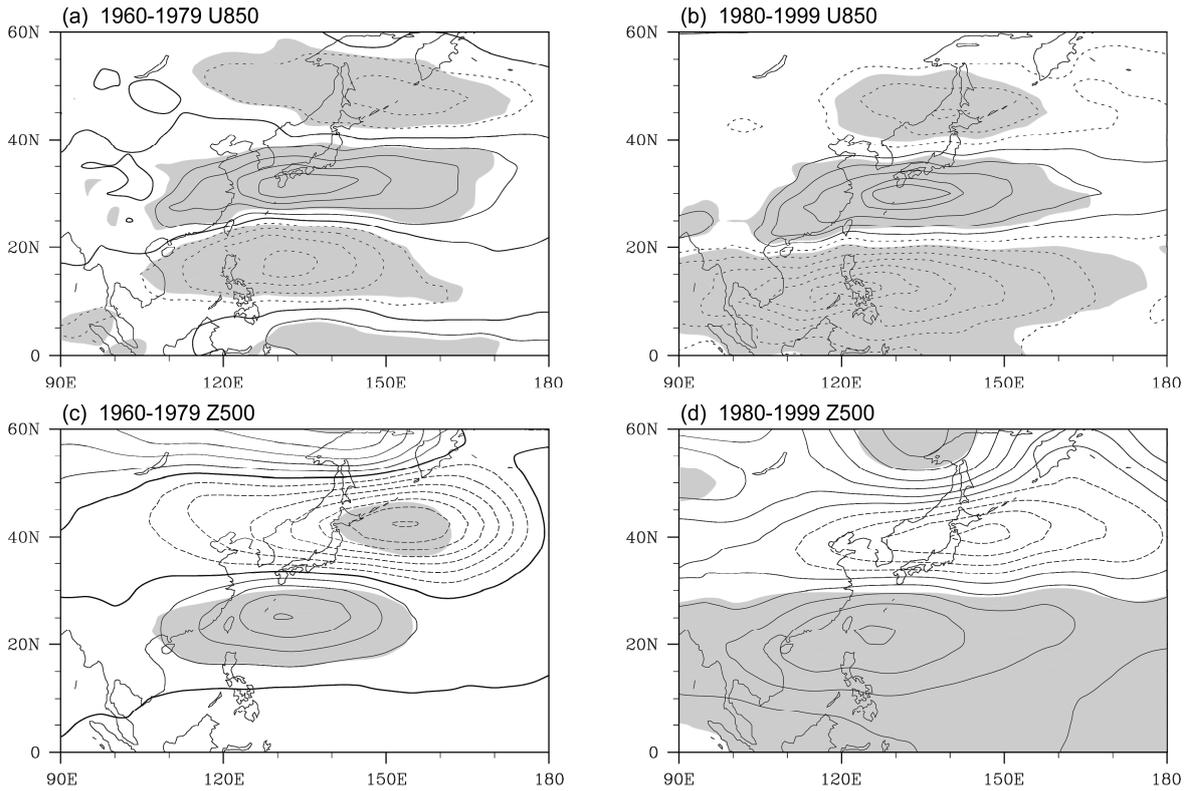


图 2 1960~1979 年(左)和 1980~1999 年(右) (a, b) 850 hPa 纬向风场 (m s^{-1}) 和 (c, d) 500 hPa 高度场 (gpm) 分别与同期 P-J 遥相关型指数的回归分析。(a, b) 与 (c, d) 等值线间隔分别为 0.5 和 2.5；阴影区域通过 95% 信度检验

Fig. 2 (a, b) 850-hPa zonal wind (m s^{-1}) and (c, d) 500-hPa geopotential height (gpm) regressed on the corresponding P-J teleconnection pattern index (a, c) from 1960 to 1979 and (b, d) from 1980 to 1999. Contour intervals are 0.5 in (a, b) and 2.5 in (c, d); shading represents the 95% confidence level

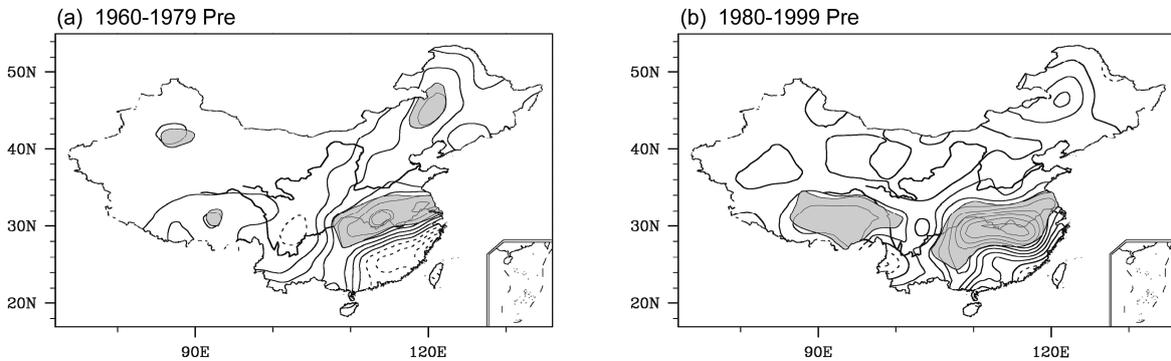


图 3 (a) 1960~1979 年和 (b) 1980~1999 年夏季降水 (mm d^{-1}) 分别与同期 P-J 遥相关型指数的回归分析。等值线间隔为 0.5；阴影区域通过 95% 信度检验的区域

Fig. 3 Summer precipitation (mm d^{-1}) regressed on the corresponding P-J index (a) from 1960 to 1979 and (b) from 1980 to 1999. Contour interval is 0.5; shading represents the 95% confidence level

关型对我国夏季降水的影响强度在气候突变前后有所改变。1960~1979 年间 P-J 遥相关型方差贡献率最大约为 18%，而 1980~1999 年间的影响强度则明显偏强，此时 P-J 遥相关型的方差贡献率最大超过了 30% (图略)，这进一步表明了 P-J 遥相关型对我国夏季降水的变化具有一定的指示意义。上述分析可知，P-J 遥相关型在气候突变前后对我国夏季降水的影响程度及其范围都发生明显的改变，这种 P-J 遥相关型与我国夏季降水间关系的年代际改变对于预测我国夏季降水异常具有重要的指示意义。

4 P-J 遥相关型的年代际变化与大气热源和海温的关系

很多的学者从不同角度出发，发现 P-J 遥相关型的激发和维持与大气热源和海洋热力异常有关 (Nitta, 1987; Kurihara, 1989; Lu, 2002)。因此，P-J 遥相关型位置的年代际变化可能与大气热源和海洋热力异常的变化有关。

图 4 为夏季大气视热源 (Q_1) 分别回归到两个时段 P-J 遥相关型指数上的异常场。由图可见，大气视热源的回归场同样存在经向的遥相关型，其分布与 P-J 遥相关型的波列形式类似，只是回归正值中心不明显。值得注意的是，该回归场中负值区的位置在气候突变之后也发生了变化，由中国台湾东部海域移动到菲律宾及其以东，向西向南偏移，与 P-J 遥相关型的位置变化一致。此外，大气视热源与 P-J 遥相关型之间的相关性在气候突变之后有所改变，低纬地区强度增强，相关范围增大，这与 850 hPa 纬向风和 500 hPa 位势高度的回归场的变化特征相一致，说明东亚—太平洋地区大气视热源与环流要素场是同步变化的。此外，对 1980~1999 年 OLR 场进行回归的结果与图 4b 相似 (图略)，表明大气视热源的变化主要与菲律宾附近的对流性降水有关。

海温作为大气变化的一个外强迫源，其变化可以通过海气相互作用过程影响大气。Wang et al. (2001) 指出，菲律宾低层反气旋将 ENSO 的信号传递到东亚，进而影响东亚地区的气候。因此，P-J 遥相关型的变化可能与热带海温异常有关。图 5 分别给出了前期冬季、春季以及同期海温回归到夏季 P-J 遥相关型指数的回归场。由图可知，1960~1979 年期间，前期冬季以及春季海温与 P-J 遥相关型不存在显著的相关区，只有在夏季同期时海温与 P-J

遥相关型之间存在弱相关。在 1980~1999 年期间，热带海温与 P-J 遥相关型之间则存在大范围的显著相关区，其中前期冬季海温与 P-J 遥相关型的显著相关区主要出现在赤道中东太平洋、热带西北太平洋和印度洋，尤其在热带中东太平洋，两者之间相关性异常显著，其相关分布与 ENSO 时期海温异常的分布型相一致 (Alexander et al., 2004)。此外，随着海温超前月份的缩短，赤道中东太平洋海温对 P-J 遥相关型的影响逐渐减小，到同期夏季，两者之间的显著相关区趋于消失，而印度洋海温对 P-J 遥相关型的影响则一直持续到夏季。热带太平洋和印度洋海温异常对 P-J 遥相关型的这种影响方式与 ENSO 对东亚夏季气候的影响方式相一致，即通过印度洋的电容器效应 (Xie et al., 2009) 将这种信号持续到次年的夏季。由此可以推测，气候突变之后赤道中东太平洋、印度洋海温与 P-J 遥相关型的这种联系与 ENSO 事件密不可分，且 P-J 遥相关型在气候突变前后位置的变化也与热带海温的年代际变化有关。

为了更清楚地揭示 P-J 遥相关型与前期冬季海温之间相关性的变化，图 6 中给出了 1960~1999 年 P-J 遥相关型时间系数和 Niño3.4 区冬季海温异常随时间的演变。由图可知，大致以 1970 年代末期为界，在此之前 P-J 遥相关型与海温之间相关程度较小，相关系数仅为 -0.02744，未通过显著性检验；而在此之后，P-J 遥相关型与海温之间表现出明显的正相关，相关系数为 0.707513，并通过了 99% 的信度检验。清楚表明，1980 年前后 P-J 遥相关型与赤道中东太平洋海温之间的关系发生了年代际转折，也表明本文以 1970 年代末作为气候突变的分界是较为合理的。

图 7 分别给出了气候突变前后两个时段冬季平均海温的标准差。可以看出，在 1960~1979 年间，海温年际变化明显的区域主要位于赤道中东太平洋、北太平洋、南太平洋、南印度洋，但各海域海温方差差异较小；在 1980~1999 年间，赤道中东太平洋海温方差明显增大，海温年际变化较大的区域类似于 ENSO 事件时海温的分布，这说明在气候突变之后，ENSO 的年际变化明显增强。

由于 P-J 遥相关型与海温之间的相关性在气候突变前后有着显著的差异，而在气候突变之后以赤道中东太平洋海温异常为主要特征的 ENSO 的年际变化有一定程度的增强，可见热带太平洋和印度洋

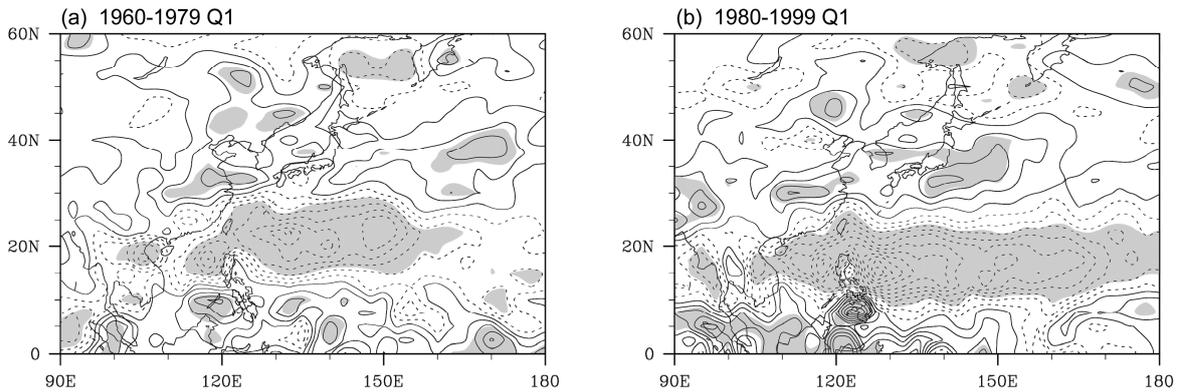


图4 (a) 1960~1979 年和 (b) 1980~1999 年大气视热源 ($W s^{-2}$) 分别与同期 P-J 遥相关型指数的回归分析。等值线间隔为 3; 阴影区域通过 95% 信度检验

Fig. 4 The apparent heat source ($W s^{-2}$) regressed on the corresponding P-J index from (a) 1960 to 1979 and (b) from 1980 to 1999. Contour interval is 3; shading represents the 95% confidence level

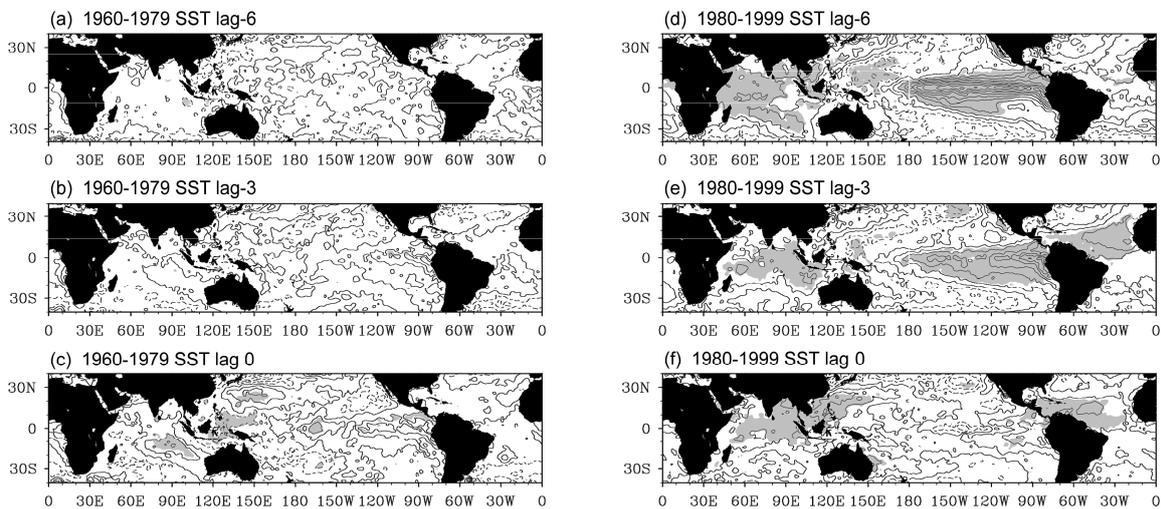


图5 1960~1979 年 (左) 和 1980~1999 年 (右) 前期 (a, d) 冬季、(b, e) 春季和 (c, f) 同期夏季海温 ($^{\circ}C$) 与对应时段夏季 P-J 遥相关型指数的回归分析。等值线间隔为 0.1; 阴影区域通过 95% 信度检验

Fig. 5 Previous (a, d) winter, (b, e) spring, and (c, f) summer SST ($^{\circ}C$) regressed on the corresponding summer P-J index from 1960 to 1979 (left) and from 1980 to 1999 (right). Contour interval is 0.1; shading represents the 95% confidence level

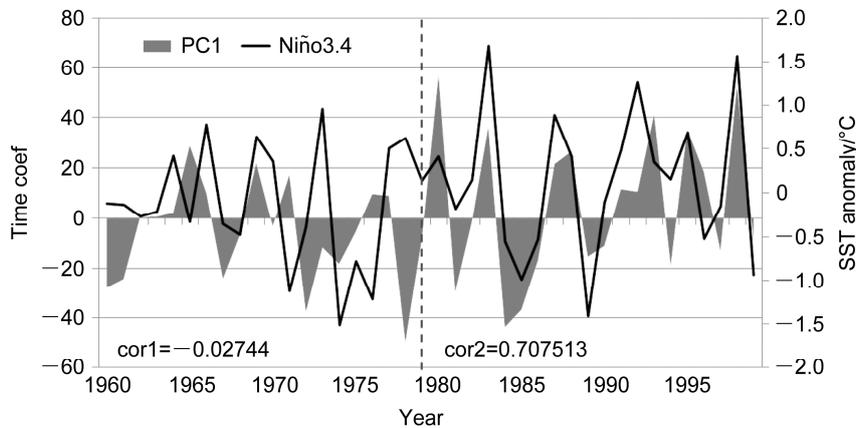


图6 1960~1999 年 P-J 遥相关型指数 (阴影) 和 Niño3.4 区冬季平均海温的距平 (实线) 随时间的演变, 纵坐标左侧标注为时间系数, 纵坐标右侧标注为海温距平 ($^{\circ}C$)

Fig. 6 Niño3.4 index averaged in winter (shading) and P-J index averaged in summer (solid line) from 1960 to 1999. The left vertical ordinate represents the P-J index, and the right vertical ordinate represents Niño3.4 index

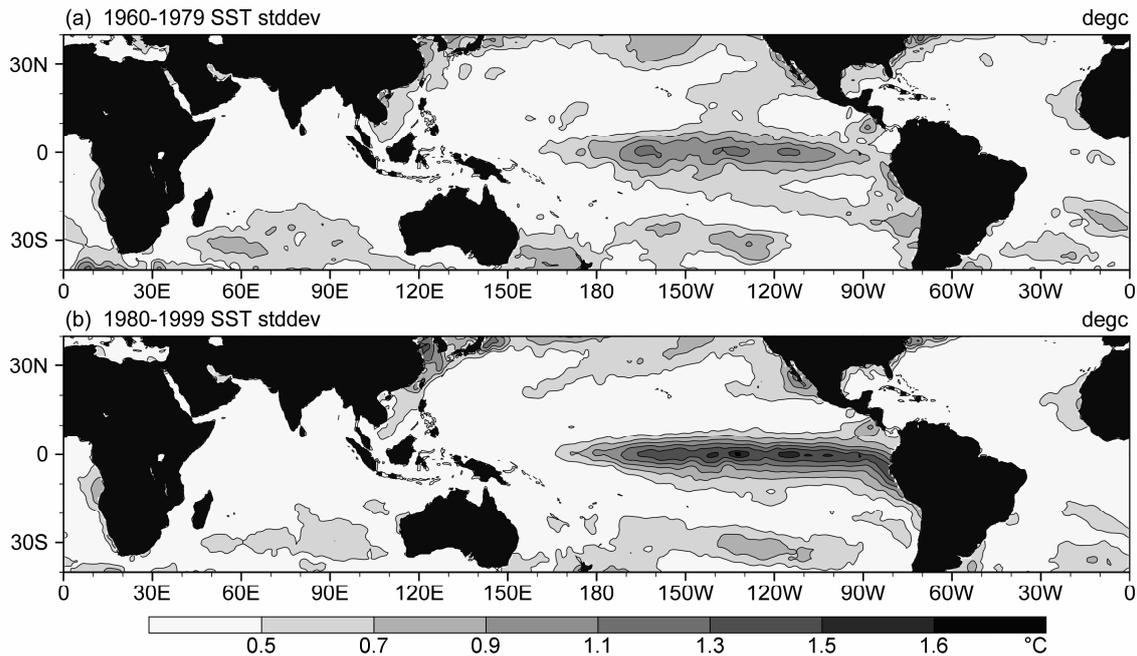


图7 (a) 1960~1979年和(b) 1980~1999年冬季平均海温年际变化的标准差(°C),其中等值线间隔为0.2°C

Fig. 7 Standard deviation of mean SST (°C) in winter during (a) 1960-1979 and (b) 1980-1999. Contour interval is 0.2

海温的年代际变化可能是造成 P-J 遥相关型年代际变化的主要原因。下一节我们将利用大气环流模式来验证热带海温的年代际变化对 P-J 遥相关位置变化的影响。

5 模式模拟

5.1 模式简介

本文采用 CAM5.1(The Community Atmosphere Model Version 5.1) 全球大气环流模式,该模式是美国国家大气科学研究中心(NCAR)大气环流模式的新版本,作为通用地球系统模式(The Community Earth System Model)第三版 CESM1_0_3 的大气模块,于 2011 年 6 月中旬对外发布。CAM 是由 NCAR 研发的全球大气环流模式,一共经历了 CCM0、CCM1、CCM2、CCM3、CAM2、CAM3、CAM4、CAM5 的发展过程,从 CAM4 到 CAM5,物理参数化方案有了实质性的修改,将原来的干对流参数化方案改为湿对流参数化方案,更新了湿边界层和浅积云对流方案,改进了对垂直热输送、水汽、水平动量等的模拟(Neale et al., 2010),因此, CAM5 模式能够更好地模拟出与对流性降水相关密切的 P-J 遥相关型。

5.2 试验方案介绍

本文的研究选取水平分辨率为 $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ 的高

分辨率 CAM5.1 模式,模式垂直方向上采用 $\sigma-p$ 混合坐标,共分为 30 层,模式层顶高度约为 3.643 hPa。为了研究在气候突变前后热带海温场对 P-J 遥相关型位置变化的影响,本文设计了三个数值试验,即一个控制试验和两个敏感性试验。

控制试验 (CTRL): 使用英国气象局哈德莱中心 1850~2011 年的月平均海温资料 (HadISST) 作为海洋边界条件,因此在模式的运行过程中同时保持了海温的季节变化和年际变化。模式从 1975 年积分至 1999 年共 25 年,取后 20 年 (1980~1999 年) 的模拟结果进行分析。

海温替换试验 (SST-6079): 将控制试验中 1980~1999 年热带地区 ($30^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{S}$) 的月平均海温用 1960~1979 年热带地区月平均海温进行替换 (替换区与非替换区边界采用线性缓变处理),其他与 CTRL 相同。

气候海温试验 (SST-CLIM): 将 CTRL 试验中 1980~1999 年热带地区海温用 1960~1999 年多年气候平均的海温进行替换 (替换区与非替换区边界采用线性缓变处理),即只保留海温的季节变化,去除了海温的年际变化,其他与 CTRL 相同。

5.3 结果分析

图 8 分别给出了基于观测资料和三个模式试验结果计算的 P-J 遥相关型。由图 8b 可见,模式控制

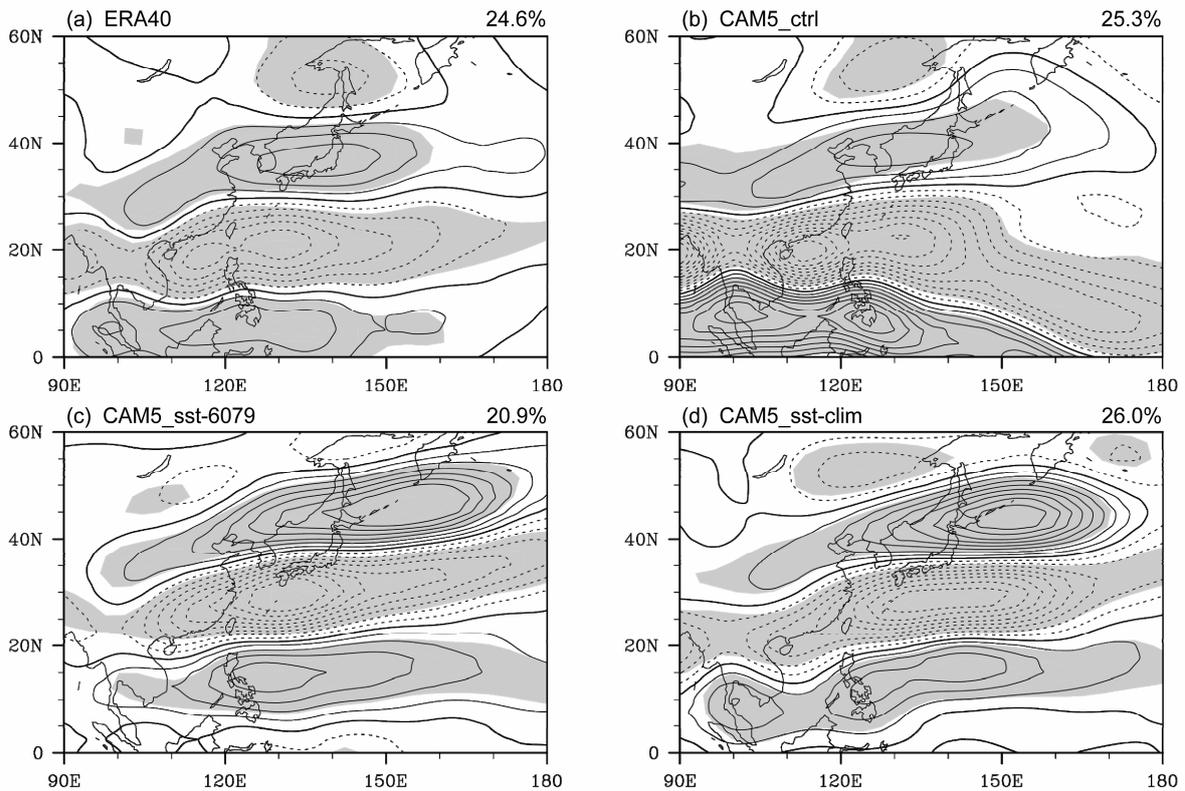


图 8 1980~1999 年夏季 P-J 遥相关型: (a) ERA-40; (b) CTRL; (c) SST-6079; (d) SST-CLIM. 等值线为回归的相对涡度 (单位: $10^{-6} s^{-1}$) 异常场, 间隔为 0.5; 阴影区域通过 95% 信度检验; 图右上角的百分数为各自 EOF1 的方差贡献率

Fig. 8 The P-J teleconnection pattern in summer (JJA) from 1980 to 1999: (a) ERA-40 observations; (b) expt CTRL; (c) expt SST-6079; (d) expt SST-CLIM. Contours indicate regressed positive and negative anomalies of relative vorticity (units: $10^{-6} s^{-1}$), contour interval is 0.5; shading represents the 95% confidence level, based on the t statistic; the variance fraction explained by EOF1 is denoted at the top-right corner

试验中, P-J 遥相关型呈现出纬向伸长、经向正负交替的波列形式, 其正负中心位置与再分析资料计算的 P-J 型趋近 (图 8a)。P-J 遥相关型的中心位置自南向北分别位于菲律宾西南部海域、中国台湾西南部海域、日本西南部和鄂霍次克海西部。通过计算模式控制试验和观测资料中两种 P-J 遥相关型之间的相关系数, 发现两种的相关系数高达 0.81, 远远通过了 99% 信度的显著性检验。对比图 8a 和 b 可以看出, CAM5.1 模式较好地模拟出了 P-J 遥相关型水平分布特征。

当控制试验中热带海温替换为 1960~1979 年海温后, 模式也模拟出了 P-J 遥相关型 (图 8c), 其水平结构同样表现出纬向伸长、经向正负交替的波列形式。但对比图 8b 和 c 可以看出, P-J 遥相关型的位置发生了明显改变, 图 8b 的中心位置相较于图 8c 明显向西向南偏移, 也进一步表明了 1980~1999 年间热带海温的变化是造成 P-J 遥相关型位置移动的重要原因。而这两个时段海温的差异主要表

现为以 ENSO 增强为标志的热带中东太平洋海温的变化, 因此, P-J 遥相关型位置的年代际变化与 1970 年代后 ENSO 的年代际增强有关。

图 8d 给出了气候海温试验中 P-J 遥相关型的分布, 其结构也是一经向传播的波列, 但是相比于图 8b, 其位置偏东偏北; 相对于图 8c, 其位置偏东。在气候海温试验中也出现 P-J 遥相关型, 这表明 P-J 遥相关型是大气内部的固有模态, 它可以独立于海温强迫而存在, 这与 Kosaka et al. (2013) 的研究结果相一致。此外, 通过对图 8b 和 d 的对比分析, 同样可以说明热带海温的变化可以引起 P-J 遥相关型位置的变化。

6 结论

本文利用 ERA-40 和 NCEP/NCAR 再分析资料以及 Hadley 海温等资料, 分析了 20 世纪 70 年代末期气候突变前后 P-J 遥相关型的年代际变化特征, 并探讨了造成 P-J 遥相关型年代际变化的原

因。取得以下几点主要结果:

(1) 气候突变前后 P-J 遥相关型的位置发生了明显的年代际变化。气候突变以后其中心位置明显向西向南偏移, 这种位置的变化同样反映在纬向风场、高度场上, 并且 P-J 遥相关型与上述要素场的相关性在气候突变之后有所增强。

(2) P-J 遥相关型位置的年代际变化与热带太平洋、印度洋海温的异常改变有关。在气候突变前后, P-J 遥相关型与热带太平洋和印度洋海温之间的关系发生了明显的变化。气候突变之前, P-J 遥相关型与前期冬季、春季热带太平洋和印度洋海温之间不存在显著相关, 只与同期海温存在弱的相关; 气候突变之后, P-J 遥相关型与前期冬季、春季和同期大范围区域海温存在显著相关。

(3) 利用 CAM5.1 全球环流模式模拟了 1980~1999 年间的 P-J 遥相关型, 发现该模式能较逼真地模拟 1980~1999 年间的 P-J 遥相关型。当改变模式中的热带海温场, 将热带海温场替换成 1960~1979 年热带海温后, P-J 遥相关型的中心位置明显发生了改变, 其位置与 1960~1979 年 P-J 遥相关型中心位置相一致。结果表明, 热带海温场在气候突变前后的变化是导致 P-J 遥相关型位置偏移的主要原因。

参考文献 (References)

- Alexander M A, Lau N C, Scott J D. 2004. Broadening the atmospheric bridge paradigm: ENSO teleconnections to the tropical west Pacific-Indian Oceans over the seasonal cycle and to the North Pacific in summer [J]. *Amer. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, 147: 85-103.
- 曹鸿兴. 2001. 模式气候的球谐谱分析 [J]. *气候与环境研究*, 6 (1): 12-18. Cao Hongxing. 2001. Spectral analysis of model climate with spherical harmonics function [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (1): 12-18.
- Hoskins B J. 1980. Representation of the earth topography using spherical harmonics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108 (1): 111-115.
- Hsu H H, Lin S M. 2007. Asymmetry of the tripole rainfall pattern during the East Asian summer [J]. *J. Climate*, 20 (17): 4443-4458.
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (1): 41-52.
- 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. *大气科学*, 14 (1): 108-117. Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 14 (1): 108-117.
- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// *Proceedings of the International Conference on the General Circulation of East Asia*. Chengdu, China, 40-45.
- 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 (S1): 107-116. 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12 (S1): 107-116.
- Jung T, Hilmer M, Ruprecht E, et al. 2003. Characteristics of the recent eastward shift of interannual NAO variability [J]. *J. Climate*, 16: 3371-3382.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-471.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (2): 247-267.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132: 2009-2030.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2010. Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan pattern [J]. *J. Climate*, 23: 5085-5108.
- Kosaka Y, Xie S P, Lau N C, et al. 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the northwestern Pacific [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110 (19): 7574-7579.
- Kurihara K. 1989. A climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western North Pacific [J]. *Geophys. Mag.*, 43: 45-104.
- Kurihara K, Tsuyuki T. 1987. Development of the barotropic high around Japan and its association with Rossby wave-like propagations over the North Pacific: Analysis of August 1984 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 237-246.
- 李红梅, 周天军, 宇如聪. 2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析 [J]. *大气科学*, 32 (2): 358-370. Li Hongmei, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Analysis of July-August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958-2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 358-370.
- 李志锦, 纪立人. 1996. 实际预报可预报性的时空依赖性分析 [J]. *大气科学*, 20 (3): 290-297. Li Zhijin, Ji Liren. 1996. Analysis of the dependence of predictability on spatial and temporal scales from operational forecasts [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 20 (3): 290-297.
- Lu R Y. 2002. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (6): 1004-1028.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 1069-1079.
- Moore G W K, Renfrew I A, Pickart R S. 2013. Multidecadal mobility of the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 26 (8): 2453-2466.
- Neale R B, Chen C C, Gettelman A, et al. 2010. Description of the NCAR

- Community Atmosphere Model (CAM5.0) [R]. NCAR TECHNICAL NOTE NCAR/TN-486+STR, 7-8.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373-390.
- Ogasawara T, Kawamura R. 2007. Combined effects of teleconnection patterns on anomalous summer weather in Japan [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85: 11-24.
- 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): doi:10.1029/2002JD002670.
- Sardeshmukh P D, Hoskins B I. 1984. Spatial smoothing on the sphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112 (12): 2524-2529.
- Simmons A J, Gibson J K. 2000. The ERA-40 project plan [R]. ERA-40 Project Rep. Series 1, ECMWF. Reading, UK.
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961-3012.
- Wakabayashi S, Kawamura R. 2004. Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82: 1577-1588.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109 (4): 784-812.
- Wang B, Wu R G, Lau K M. 2001. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific-East Asian monsoons [J]. *J. Climate*, 14: 4073-4090.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 730-747.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. *J. Atmos. Sci.*, 30 (4): 611-627.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93 [J]. *J. Climate*, 10(5): 1004-1020.
- 朱锦红, 王绍武, 张向东, 等. 2003. 全球气候变暖背景下的大气环流基本模态 [J]. *自然科学进展*, 13 (4): 417-421. Zhu Jinhong, Wang Shaowu, Zhang Xiangdong, et al. 2003. Basic modes of the general circulations under the global warming [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 13 (4): 417-421.