

李崇银. 2019. 关于年代际气候变化可能机制的研究 [J]. 气候与环境研究, 24 (1): 1-21. Li Chongyin. 2019. On possible mechanisms of interdecadal climate variability [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (1): 1-21, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18088.

关于年代际气候变化可能机制的研究

李崇银^{1,2}

1 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 年代际气候变化作为年际和月季气候变化的重要背景, 往往影响着年际和月季时间尺度的气候及特征。随着科学的发展进步和社会需求的提高, 年代际气候变化已成为人们关注的重要问题。作为气候动力学和气候预测研究的重要内容之一, 年代际气候变化及其动力学机制的研究在国内外都在蓬勃开展, 并取得了不少的成果。本文除简要介绍了中国气候的年代际变化特征, 将着重就年代际气候变化的可能机制作一个系统的综合性讨论, 内容主要包括全球主要海温变化模态的影响、气候系统相互关系年代际变化的影响、大气行星尺度系统年代际变化的影响, 以及太阳活动及火山爆发的影响等。大家知道, 年代际气候变化研究十分重要, 但也可以看到年代际气候变化的动力学机制却十分复杂, 不少问题还没有搞的十分清楚, 需要加大力量进行深入研究; 我们相信, 深入的研究结果必将对年代际气候变化的预测提供可靠的科学依据, 进而推动年代际气候变化的业务预测及其能力的提高。

关键词 年代际气候变化 可能机制 主要海温模态 气候系统相互关系 太阳活动及火山爆发

文章编号 1006-9585 (2019) 01-0001-21

中图分类号 P463

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18088

On Possible Mechanisms of Interdecadal Climate Variability

LI Chongyin^{1,2}

1 *Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101*

2 *State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract As an important background of month-seasonal and interannual climate variations, interdecadal climate variation often affects climate features with interannual and month-seasonal time scales. Along with the development and progress of science and the rise of social requirement, interdecadal climate variability has become an important issue that has attracted more attentions. As one of important contents on climate dynamics and climate foreshadow, research has been launched vigorously in the world. Some research achievements have been published. In this paper, we will focus on systematic and comprehensive discussion on possible mechanisms of interdecadal climate variability. The major contents include: Influences of main patterns of ocean temperature in the global; influences of interdecadal variation of climate system relationship; influences of interdecadal variation of the atmospheric system on the planetary scale; and impacts of solar activities and volcano eruptions. As we know, studies on interdecadal climate variability are important, but the dynamic mechanism of interdecadal climate variability is so complicated. There are more problems that still remain unsolved and need further in-depth study. We believe that further in-depth research achievements will be able to provide

收稿日期 2018-07-03; **网络预出版日期** 2018-10-20

作者简介 李崇银, 男, 1940年出生, 教授/研究员, 主要从事天气气候变化及其动力学研究。E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41490642

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41490642)

reliable scientific basis for the foreshadow of interdecadal climate variation, promote professional work of interdecadal climate variation forecast and improve the forecasting capability.

Keywords Interdecadal climate variability, Possible mechanism, Major patterns of the ocean temperature, Climate system relationship, Solar activity and volcano eruption

1 引言

科学发展、社会经济进步和人类生产活动的需 求已使 10 年及年代际时间尺度的气候变化成为人们关注的重要问题之一。1980 年代, 一些研究结果使人们逐渐开始认识到年际变化特征突出的赤道中东太平洋 ENSO 的活动在 1976~1978 年出现了突变现象 (Quinn and Neal, 1984), 进而指出除年际变化外 ENSO 循环还存在年代际变化特征 (Nitta et al., 1989; Wang, 1995; 钱维宏等, 1998)。1990 年代中期的一些研究明确提出了年代际气候变化问题 (Trenberth, 1990; Tanimoto et al., 1993; Kushnir, 1994; Trenberth and Hurrell, 1994), 并在国际 CLIVER (气候变化及可预报性研究) 计划中明确将年代际气候变化作为重要研究内容之一 (WCPR, CLIVAR, 1995)。其后, 年代际气候变化便在国内外广泛开展起来, 并取得一系列有意义的成果 (Latif and Barnett, 1996; Zhang et al., 1997; Li and Li, 2000; 穆明权和李崇银, 2000; 李崇银等, 2002; Li et al., 2004; Weng et al., 2004; Zhou et al., 2006; 顾薇等, 2007; 马音等, 2012), 包括海表温度 (SST) 的年代际变化特征, 大气温度及降水的年代际变化, 以及年代际海温异常与年代际气候变化 (特别是降水) 的联系及可能影响等; 其中也包括对于年代际气候变化研究的一些综合性讨论和评述。

年代际气候变化是气候在 10 年至几十年时间尺度的一种变化, 这种时间尺度的气候变化又往往显示出突变的特征, 因此也就有了年代际突变的提法及研究。年代际突变虽然存在不同的形式, 主要包括均值突变、趋势突变和变化频率 (变率) 突变等 (李崇银, 2000)。但无论是那种形式的突变, 都将是 从一种气候状态特征转变到另外一种气候状态特征, 而两种气候状态存在着相当大的差异。因此, 为了认识气候变化、进而预测气候变化, 人们都十分重视对年代际气候突变的研究。除了上面提到的 ENSO 活动在 1970 年代末的年代际突变以及相关的大气环流和气候要素在同时期存

在的年代际突变之外, 有关大气环流和气候年代际变化及其与海温异常关系的研究也已有不少 (李崇银和廖清海, 1996; 张琼等, 2000; 顾薇等, 2005; Gu et al., 2009)。而 Diaz (1986) 的研究表明北半球大陆温度在 1960 年代也出现过一次气候突变现象, 整个北半球对流层下部的平均温度在 1963~1964 年突然由持续的正距平转为持续的负距平; 中国学者 (Yan et al., 1990; 严中伟, 1992; 叶笃正和严仲伟, 1993) 的一些研究指出北半球夏季气候在 1960 年代发生过突变。其后李崇银等的研究也表明 (Li and Li, 1999), NAO (北大西洋涛动)、NPO (北太平洋涛动) 及中国气候确实在 1960 年代发生过一次突变。后面我们的讨论也将表明, 东亚夏季风系统及其影响下的气候在 1990 年代也出现过一次明显的突变现象, 尽管其具体突变时间尚有一些分歧。

有关年代际气候变化研究的深入, 年代际气候变化机制的研究也在国内外相继开展, 但因其复杂性, 要很好揭示它还是相当困难的事情, 有待进一步深入研究。这里, 我们除了进一步讨论中国气候的年代际变化外, 将就年代际气候变化的可能机制作一个综合性讨论, 目的是在让大家看到年代际气候变化动力学机制的复杂性的同时, 能更加投入力量进行深入研究, 从而推动年代际气候变化的业务预测及其能力的提高。

2 中国气候的年代际变化

已有的研究清楚表明, 无论是降水还是温度, 中国气候的变化也都还存在着明显年代际的特征 (王绍武等, 1998; 张庆云, 1999; Li and Li, 2000; 王绍武等, 2002; Li et al., 2004)。例如, 20 世纪后半期的 4~9 月降水量的年代际变化就比较强烈, 1950 年代中国东部多雨, 华北尤甚; 1960 年代淮河以北到华北降水略多, 但长江及其以南以少雨为主; 1970 年代淮河少雨, 华北北部及江南降水略多, 但 1960~1970 年代对全国来讲是较为干旱的年代; 1980 年代的特点是长江流域多雨、华北及华南干旱; 1990 年代长江及江南降水有所增加, 华北干旱

持续 (Li et al., 2004; 顾薇等, 2005)。图 1 给出的是华北地区夏季降水距平的情况, 明显存在主要周期为 11 年左右的年代际变化特征。图 2 是中国东部夏季降水的 EOF 分析第一模态 (江淮多雨, 华南少雨) 的时间变化谱和小波分析结果, 也可以看到年代际变化相当显著, 主要周期为 8~12 年和 20~30 年左右。

中国气温的年代际变化也十分清楚, 气温不仅平均值在 1970 年代末 1980 年代初有突变 (增温) 现象, 而且气温的分布型态也有突变; 夏季的平均最低和最高气温的距平场由 1950 年代的南高 (正距平) 北低 (负距平) 转变成 1980~1990 年代的南低北高 (王绍武等, 1998)。图 3 是中国东部地

区冬季温度异常 (距平) 的时间变化及其功率谱特征, 很显然, 除年际变化外年代际变化也很明显, 主要周期为 16 年左右。

中国气候与东亚季风活动有密切关系, 特别是东亚夏季风的变化与中国旱涝发生联系密切。因此有关东亚夏季风的年代际变化也是大家关注的重要问题。最近的研究表明, 东亚夏季风活动在 1990 年代出现过一次年代际变化, 但具体时间却有大同小异的研究结果。有研究认为是在 1990 年代初发生了东亚夏季风, 特别是夏季风降水的年代际转变 (Ding et al., 2008; Wu et al., 2010; Liu et al., 2011); 也有研究认为东亚夏季风的这次年代际变化发生在 1990 年代中期 (Kwon et al., 2007); 还有研究

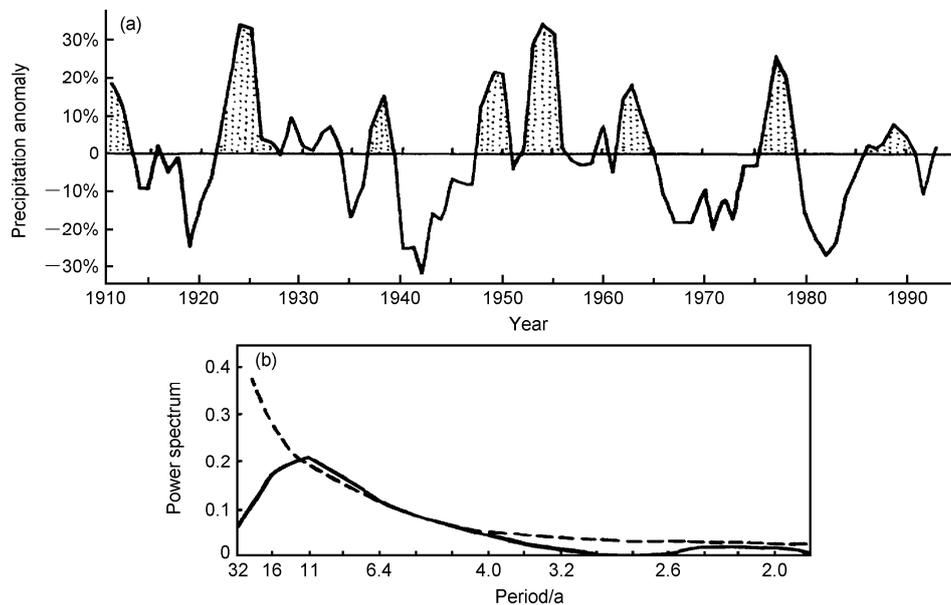


图 1 中国华北地区 (北京、天津和保定) 夏季 (a) 降水量距平的时间变化及 (b) 其功率谱特征 (李崇银, 2000)

Fig. 1 (a) Temporal variation and (b) power spectrum of summer precipitation anomalies in northern China (Beijing, Tianjing, and Baoding) (Li Chongyin, 2000)

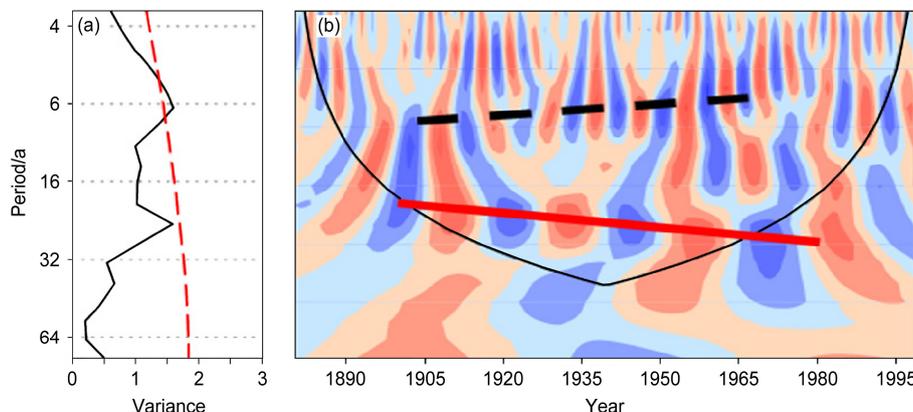


图 2 中国东部夏季降水量 EOF 第一主分量 PC1 的 (a) 方差谱和 (b) 小波分析结果

Fig. 2 (a) Variance spectrum and (b) wavelet analysis of summer precipitation EOF PC1 (Principal Component) in eastern China

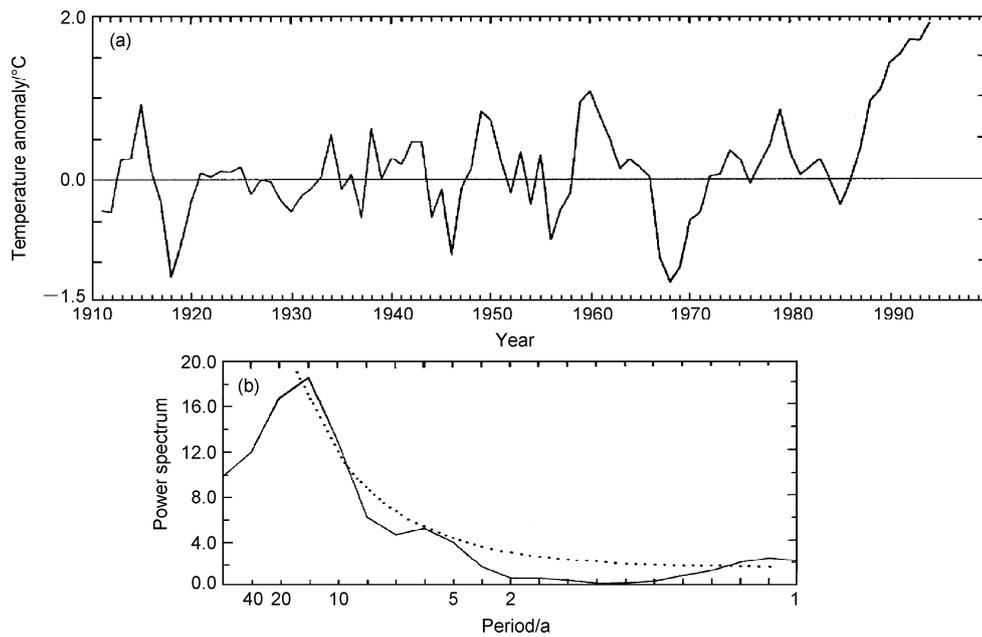


图3 中国东部冬季气温异常的 (a) 时间变化及其 (b) 功率谱特征

Fig. 3 (a) Temporal variation and (b) power spectrum of temperature anomalies in winter (December–February) in eastern China

认为东亚夏季风的这次年代际变化发生在 1990 年代末期 (Huang et al., 2012)。

东亚夏季风的活动一般用夏季风指数来描写, 而已有的夏季风指数有好多种, 我们参照郭其蕴 (1983) 的定义, 用经度带气压差表示的夏季风指数来描写夏季风活动。图 4 给出的是所得到的东亚夏季风指数的时间变化特征, 由图不难发现从 1948 年到 2010 年, 东亚夏季风指数存在着 4 个不同的阶段, 其中 1960 年代中期到 1970 年代末期是东亚夏季风最强的时期, 1970 年代末期到 1990 年代中期是东亚夏季风较强的时期, 而 1960 年代中期之前和 1990 年代中期之后是东亚夏季风最弱的时期。依据东亚夏季风指数的时间变化, 过去已有研究指出的年代际突变特征 (1960 年代中期和 1970 年代末期) 在这里也有明显反映, 而且 1990 年代中期也可以认为出现了年代际突变的特征。对其指数进行的 Mann-Kendall (M-K) 检验结果也表明两条曲线在 1994/1995 年有明显的交叉 (图略), 意味着东亚夏季风活动在 1994/1995 年左右确实有年代际突变发生。

降水量是夏季风及其变化的突出体现, 中国夏季降水量变化可以在一定程度上反映夏季风的变化情况。图 5 给出的是 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 经度带平均的夏季降水量的时间—纬度剖面, 可以看到, 在 22°N 附近 (可表示华南地区), 1970 年代后期到

1990 年代中期的降水量相对偏少, 而在 1995 年及其后的降水量明显偏多; 同样, 在 $24^{\circ}\text{N}\sim 28^{\circ}\text{N}$ 纬度带 (可表示江南地区), 1970 年代后期到 1990 年代中期的降水量明显偏少, 而在 1995 年及其后的降水量相对偏多。因此, 从中国东部 30°N 以南夏季降水量的角度也可以认为东亚夏季风在 1990 年代中期 (1994/1995 年) 出现了一次年代际变化。

3 海温变化主要模态的影响

由于海洋过程相对比较缓慢, 尤其是大尺度海洋系统变化的时间尺度都较长, 因此人们在考虑年代际气候变化的时候往往都会想到海洋的变化及影响。而且提出年代际气候变化概念, 也最是从与海洋有关系的 NAO 和 NPO 的研究结果揭示出的 (Trenberth, 1990; Kawamura, 1994; Latif and Barnett, 1994; Trenberth and Hurrell, 1994; Hurrell, 1995)。其后, 国内外的一些学者也都从海洋特别是海温的变化来研究年代际气候变化问题 (李崇银和廖清海, 1996; Zhang et al., 1997; Li, 1998; Bond and Harrison, 2000; 吕俊梅等, 2005; Li et al., 2006), 这里我们也先来讨论全球海温的主要模态, 以及它们与年代际气候变化的联系。

3.1 北太平洋 PDO 模及其影响

基于经验正交函数分解 (EOF) 方法, 一些学

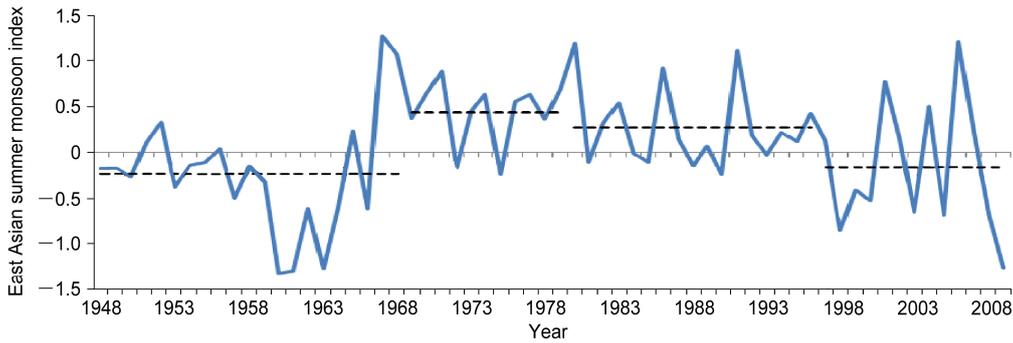


图4 1948~2010年东亚夏季风指数的时间变化特征
Fig. 4 Temporal variation of the East Asian summer monsoon index during 1948–2010

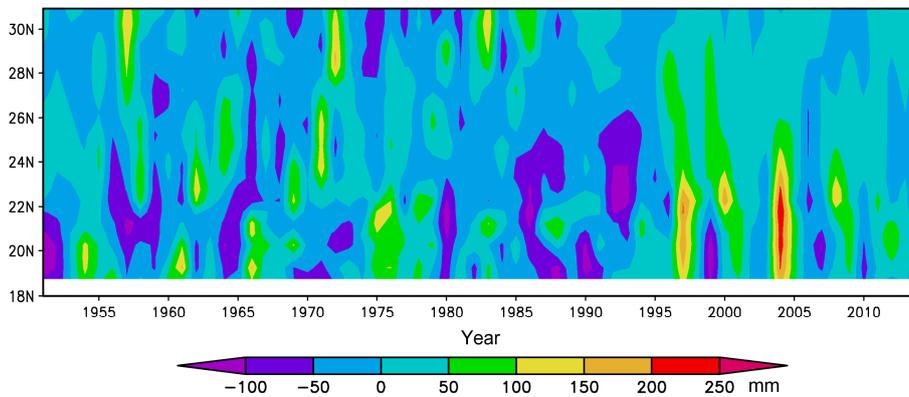


图5 1951~2014年110°E~120°E平均30°N以南夏季降水距平的纬度—时间剖面
Fig. 5 Latitude–time cross section of summer precipitation anomalies averaged over (south of 30°N, 110°E–120°E) during 1951–2014

者将北太平洋 SST 的年代际变化型称之为“类 ENSO 模” (Zhang et al., 1997), 其后又将这一主分量叫做太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO)。利用近 100 年 Hadley 中心的 SST 资料, 其功率谱分析表明北太平洋 SST 的变化主要有两个年代际谱峰, 分别是 25~35 年准周期模和 7~10 年准周期模 (李崇银和咸鹏, 2003)。图 6 给出了两个北太平洋 SST 年代际模的形势, 很显然, 这两个年代际模都不同于 ENSO 模, 而有其自己的特有形态; 两者又有其十分相似的特征。进一步分析两个年代际模的时间演变可以发现其正负异常中心有沿北太平洋海盆作顺时针旋转的特征 (图略)。因此北太平洋海温年代际模难于仅仅视为一种涛动, 实际上它具有涛动和旋转双重特性。

利用 NCEP 再分析资料, 研究表明北太平洋年代际模对气候的影响很明显, 其结果又是十分类似的。无论对应于 7~10 年模还是 25~35 年模, 在其正位相或负位相, 全球海平面气压场, 500 hPa

高度场和 1000 hPa 风场均有相当类似的响应形势; 但对应正位相的形势却与对应负位相的形势有近乎相反的特征。以 500 hPa 高度场为例, 对应北太平洋海温年代际模的正 (负) 位相, 冬季北太平洋和欧亚大陆的北部、格陵兰以及南极地区为 500 hPa 高度负 (正) 距平 (图略)。鉴于篇幅关系, 我们这里仅给出对应北太平洋海温年代际模的正 (负) 位相, 全球主要地区降水量异常的不同分布特征 (图 7)。由图 7 我们可以清楚地看到, 在北太平洋海温年代际模的正 (负) 位相期, 东亚沿海地区为多 (少) 雨; 美洲东南部地区将少 (多) 雨; 澳大利亚东部地区会多 (少) 雨, 而西部地区会少 (多) 雨。上述这些结果充分说明, 北太平洋海温年代际异常模态对全球气候都有着重要的影响, 实际工作中需要很好考虑。

3.2 南太平洋的 SPDO 模及其影响

由于资料的原因, 过去大家对南太平洋海温变化的研究很少。最近我们 (李刚等, 2012; Li et al., 2012) 将南太平洋 59 年 (1951 年 1 月至 2009

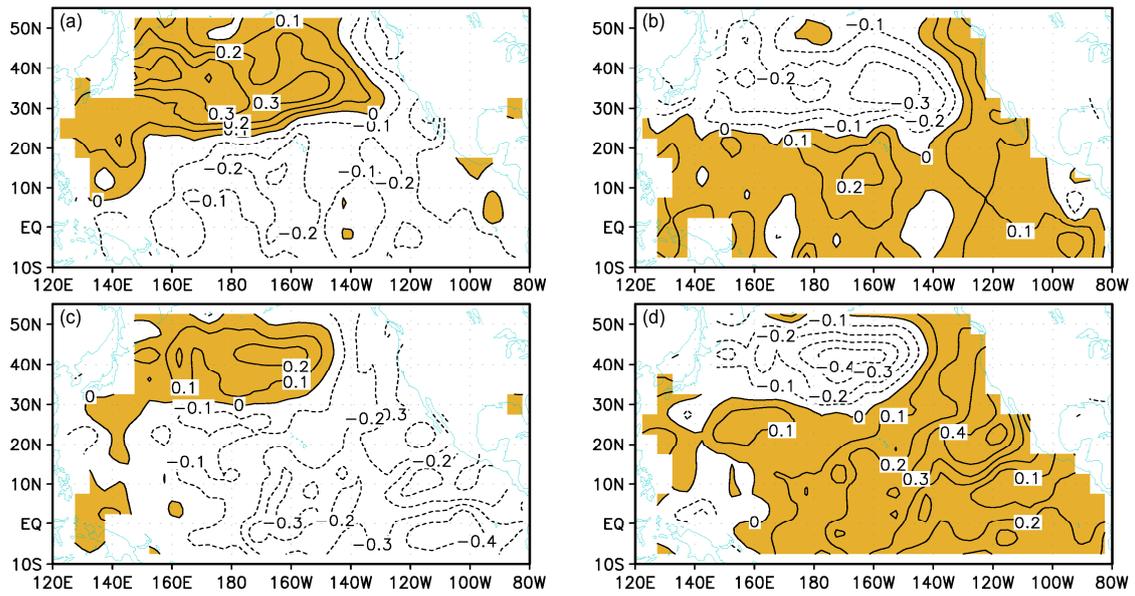


图 6 北太平洋 SST 年代际变化的 (a, b) 25~35 年模和 (c, d) 7~10 年模的正位相及负位相模态形势: (a, c) 正位相; (b, d) 负位相 (Li and Xian, 2003)

Fig. 6 The patterns of (a, b) 25~35-a and (c, d) 7~10-a interdecadal modes of SSTA (SST anomaly) in the North Pacific: (a, c) Positive phase; (b, d) negative phase (Li and Xian, 2003)

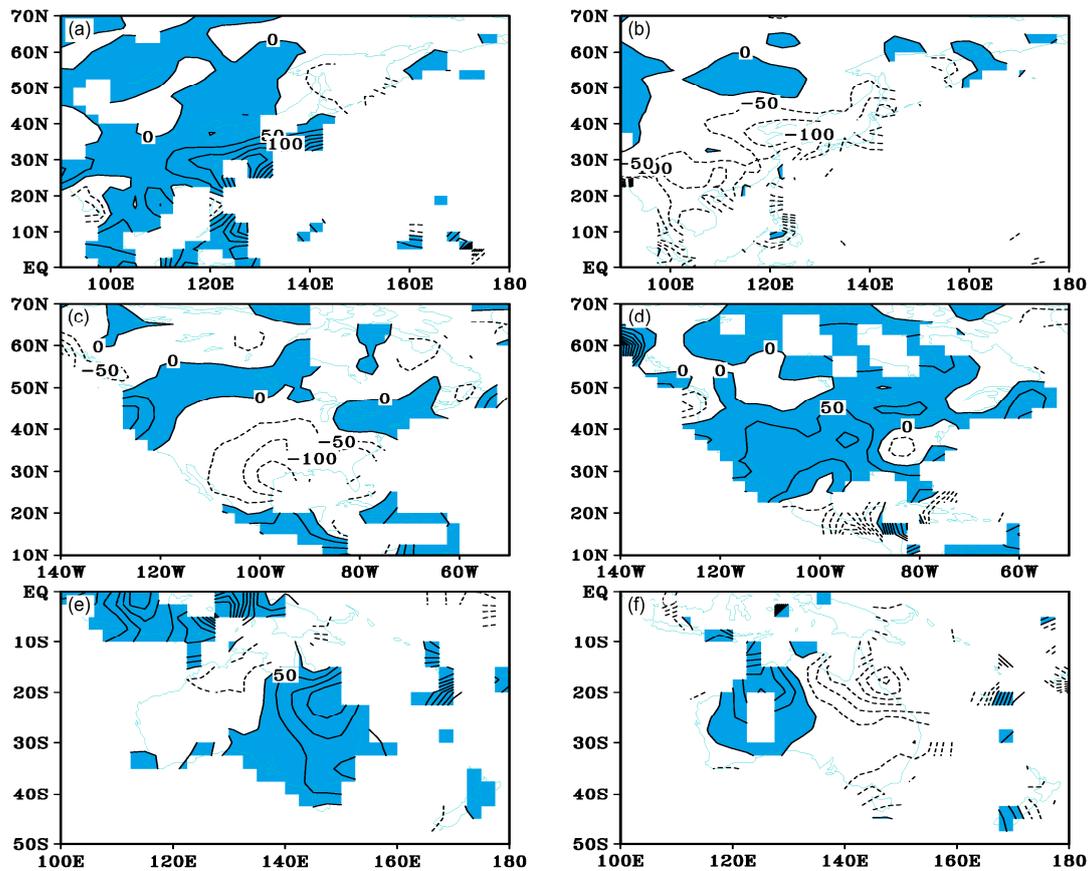


图 7 对应北太平洋海温 25~35 年模的正位相 (左列) 和负位相 (右列) 形势时 (a, b) 东亚、(c, d) 北美和 (e, f) 澳大利亚地区的年降水量异常 (单位: mm, 阴影区域为正距平) 分布 (Li and Xian, 2003)

Fig. 7 Distributions of annual precipitation anomalies (units: mm, shadings are for positive anomalies) in (a, b) East Asia, (c, d) North America, and (e, f) Australia corresponding to positive (left column) and negative (right column) phases of SSTA mode with 25~35-a period in the North Pacific (Li and Xian, 2003)

年 12 月，共 708 个月) 的海表温度距平进行 EOF 分解，其分解的第 1 分量的空间模态和小波谱如图 8 所示。因为其时间变化和小波谱都清楚表明主要为年代际变化特征，因此将它定义为南太平洋年代际振荡 (SPDO) 模态。从图中可看出，正异常区域主要位于南太平洋东北部副热带海域以及 40°S 以南的南太平洋高纬海域，正异常中心位于 (50°S~60°S, 155°W~120°W) 海域，中心值超过 0.3 °C；负异常区域主要位于南太平洋中纬海域，从澳大利亚—新西兰附近海域向东延伸，呈“舌状”结构，负异常中心有两个，分别位于 (30°S, 135°W~120°W) 海域和新西兰附近海域，前者的强度略大于后者。很显然，它主要反映了南美西部副热带太平洋、南太平洋高纬海域与南太平洋中纬海域的反相变化特征，可以认为它主要是一个经向型模态。其与 Shakun and Shaman (2009) 的结果存在一定的相似性，但他们的结果表明位于新西兰附近海域的负异常中心强度大于位于 (30°S, 135°W~120°W) 海域的强度，这可能是由于所用资料以及时间长度的差异造成的。

表 1 给出的是 SPDO (South Pacific Decadal Oscillation) 和 PDO 指数以及去除 ENSO 影响后的指数 (SPDO_{re} 和 PDO_{re}) 间的相关系数。从表中可看出，SPDO 指数与 SPDO_{re} 指数的相关系数为 0.62，明显小于 PDO 和 PDO_{re} 的相关系数 (0.8)，表明 ENSO 对 SPDO 的影响要大于对 PDO 的影响。这可能是由于与 ENSO 有关的赤道中东太平洋海温分布的非对称性造成的，因为位于南太平洋与 ENSO 有关的海温分布范围要大于位于北太平洋的海温 (Shakun and Shaman, 2009)，所以南太平洋海温与 ENSO 的关系可能更加紧密。此外，还可发现，SPDO_{re} 和 PDO_{re} 的相关系数 (0.2) 明显小于 SPDO 和 PDO 的相关系数 (0.46)，表明 ENSO 对 SPDO 和 PDO 的关系具有十分重要的作用，它似乎是连接两者的“纽带”。SPDO 和 PDO 可能是太平洋年代变化 (Pacific Decadal Variability, PDV) 分别在南、北太平洋的体现 (Shakun and Shaman, 2009)，已有的研究认为太平洋年代变化是一种太平洋海盆尺度的现象，它基本沿赤道南北对称；而且它的空间模态可用 ENSO 循环过程中的发展期、成熟期和衰退期的

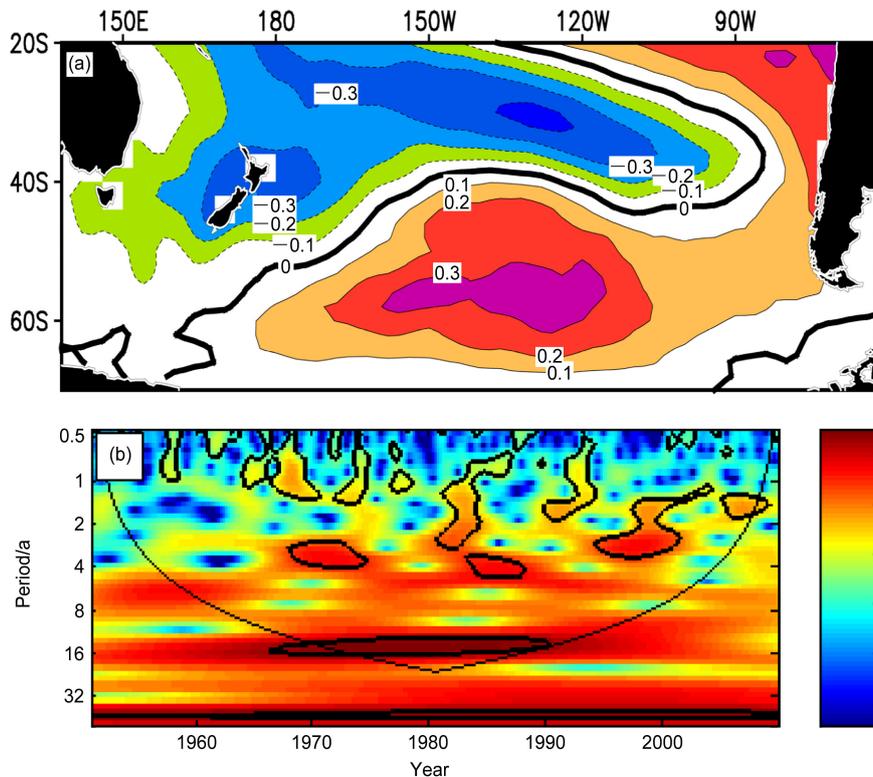


图 8 南太平洋月平均海表温度距平 (a) EOF 第 1 模态的空间模态特征 (单位: °C) 及 (b) 小波局地功率谱的分布 (李刚等, 2012)
Fig. 8 (a) EOF-1 (first EOF mode) pattern of monthly SSTA in the southern Pacific (°C) and (b) the wavelet power spectrum distribution (Li Gang et al., 2012)

空间模态来表示 (Chen et al., 2008), 于是认为太平洋年代变化 (PDV) 表示的可能仅仅是长期 ENSO 循环的平均状态。由此可知, ENSO 与太平洋年代变化存在密切的联系, 去除 ENSO 信号后, 太平洋年代变化可能会发生一定程度的变化, 而这些变化可能是导致 SPDO 和 PDO 关系发生改变的原因。

表 1 SPDO 和 PDO 指数以及去除 ENSO 信号后的 SPDO 和 PDO 指数 (SPDO_{re} 和 PDO_{re}) 之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between SPDO (South Pacific Decadal Oscillation) index, PDO (Pacific Decadal Oscillation) index, SPDO_{re} index, PDO_{re} index (SPDO and PDO indexes after removing the ENSO signal)

	NPDO 指数	NPDO _{re} 指数	SPDO 指数	SPDO _{re} 指数
NPDO 指数	1	—	—	—
NPDO _{re} 指数	0.88 [●]	1	—	—
SPDO 指数	0.46 [●]	0.22 [■]	1	—
SPDO _{re} 指数	0.16 [▲]	0.20 [■]	0.62 [●]	1

注: ●、■和▲上标的分别表示通过 0.001、0.05 和 0.1 置信度检验。

资料分析表明 SPDO 在年代际尺度上不仅与华南地区降水异常存在显著的负相关关系, 而且还与东北及华北地区降水异常存在显著的正相关关系 (图 9)。当 SPDO 处于正位相时, 东北及华北地区降水异常偏多, 而华南地区降水异常偏少, 可能形成“北涝南旱”的降水分布形势, 反之则形成“北旱南涝”的降水分布形势。此外, 值得注意的是, 与滑动平均之前相比, SPDO 与江淮地区的降水异常在年代际尺度上的关系偏弱, 这可能表明 SPDO 对江淮地区降水的影响主要体现在年际尺度上。另外, SPDO 与华北地区降水的负相关关系并不稳定, 例如在 1930 年代中后期至 1970 年代中和 1980 年代中以后, SPDO 与华北降水呈明显的正相关关系, 在 SPDO 正位相时华北降水以偏多为主, 而在 SPDO 为负位相时华北降水又转为偏少为主; 但在 1930 年代中之前和 1970 年代中至 1980 年代, SPDO 与华北降水呈反相关关系, SPDO 为

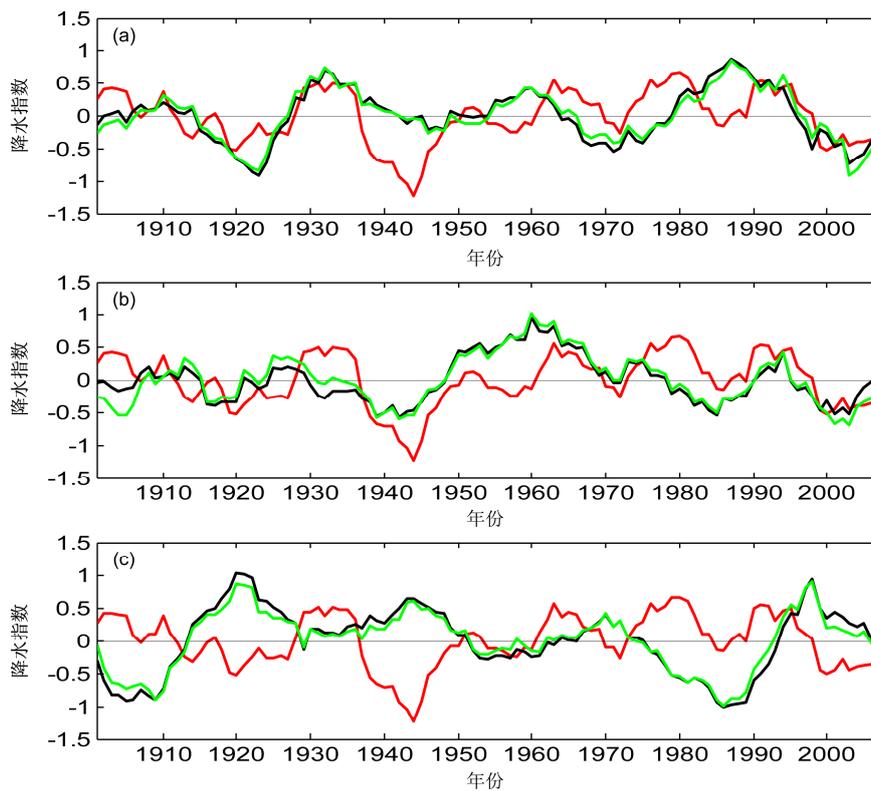


图 9 SPDO 指数和我国 (a) 东北、(b) 华北及 (c) 华南区域降水指数的年代际变化。红线表示去除 NPDO 影响后的 9 年滑动平均 SPDO 指数, 黑线和绿线为降水指数 9 年滑动平均结果, 黑线为 CRU (Climatic Research Unit) 3.10.01 降水资料, 绿线为 GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) V6 降水资料

Fig. 9 Interdecadal variations of the SPDO index and regional precipitation indexes in (a) Northeast China, (b) North China, and (c) South China. The red lines indicate the nine-year running average of SPDO index excluding the NPDO impact; the black and green lines show nine-year-running averages of precipitation indexes using the CRU (Climatic Research Unit) 3.10.01 data and GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) V6 data, respectively

正位相时华北降水偏少，而 SPDO 转为负位相时华北降水又偏多，这可能是导致 SPDO 在年际时间尺度上与华北地区降水关系不显著的主要原因。当然，上述影响与海温异常所导致的大气环流异常有着密切的关系。

3.3 南印度洋洋的 SIOD 模及其影响

资料分析表明南印度洋各月的 SST 均方差都明显大于北印度洋，而且均方差大值区的位置各月都比较固定，大值中心基本稳定于 (30°S~40°S, 60°E~80°E) 范围内；同时，在印度洋东部 10°S~20°S 附近的地区，大部分月份还都存在另外一个方差闭合中心。那么两个方差大值中心区 SST 的变化是否有反相变化的特征呢？进一步分析两海区 (25°S~40°S, 65°E~80°E) 和 (10°S~20°S, 95°E~105°E) 平均的标准化 SSTA 的年际变化曲线 (图略)，可以发现两个海区的 SSTA 呈明显的反相变化特征，两者的相关系数为 -0.3，超过 99% 的信度水平。因此可以认为，西南印度洋 SSTA 和南印度洋东部 SSTA 的确存在相反的变化趋势，可以将其称作南印度洋偶极型振荡 (SIOD)。图 10 给出的是以 (25°S~40°S, 65°E~80°E) 区

域平均 SST 为基础 (点)，分别所求得与印度洋 9 月、10 月、11 月和 12 月 SST 的相关系数分布特征。可以清楚看到，在南印度洋存在一个较为稳定的东北—西南向的偶极子型模态，它就是 SIOD 模态。

通过大量的相关分析，我们发现夏、秋季 (南半球冬、春季) 的南印度洋偶极子指数与同期及后期，尤其是后期热带地区的大气环流异常有密切的关系 (图略)。分别对 7~10 月南印度洋偶极子正、负位相年次年夏季的 100 hPa 高度场进行合成，其结果表明，整个亚洲季风区均在 100 hPa 高度场的强大南亚高压控制之下。但正位相年次年夏季南亚高压 16800 gpm 线已经越过了 105°E，表明南亚高压位置明显偏东；而对应 SIOD 的负位相，南亚高压位置偏西 (图 11)。过去已有的研究表明，如果南亚高压的位置偏东，强度偏强，将有利于长江流域夏季降水的增加 (陶诗言和朱福康, 1964; Zhang and Wu, 2002); 而中国华南地区因受南亚高压控制，易干旱少雨。用 7~10 月平均的南印度洋偶极子指数与次年中国夏季 (6~8 月) 降水进行相关分析，其结果确实表明南印度洋偶极子指数与次

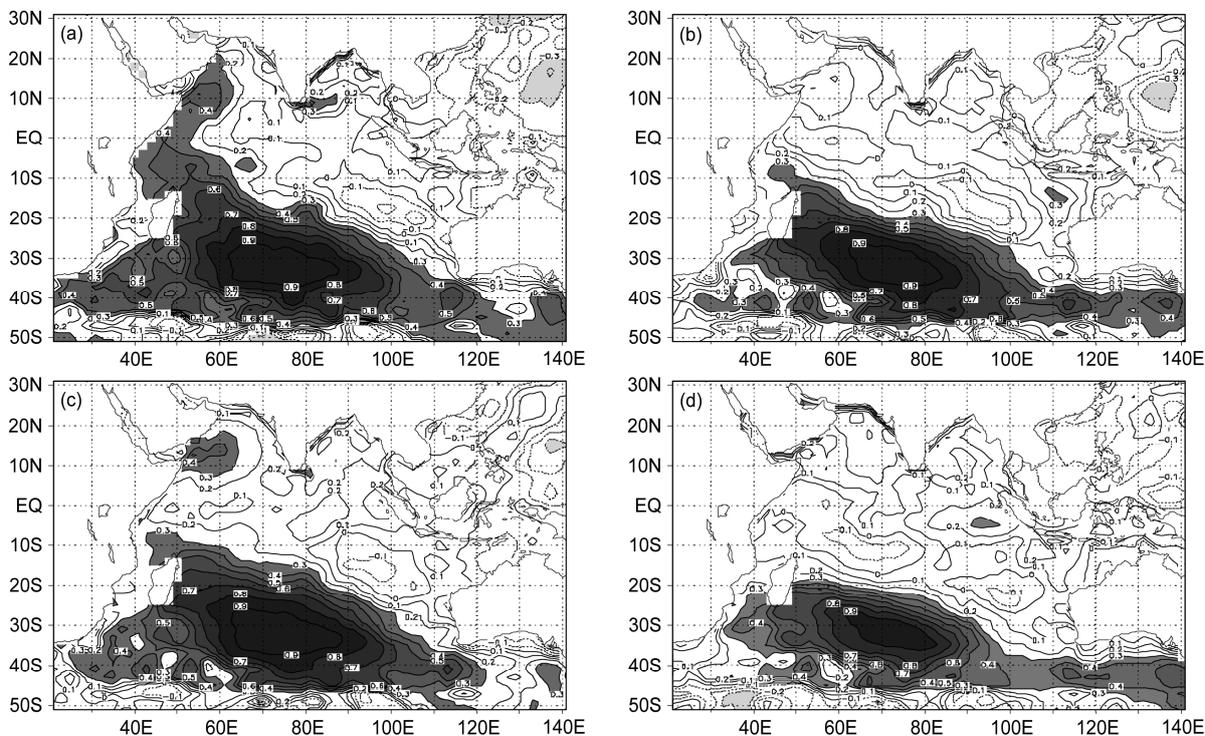


图 10 印度洋 (a) 9 月、(b) 10 月、(c) 11 月和 (d) 12 月 SST 与 (25°S~40°S, 65°E~80°E) 区域平均 SST 的相关系数分布特征
Fig. 10 Correlation coefficient distributions of SST in the Indian Ocean in (a) September, (b) October, (c) November, and (d) December, respectively with SST averaged over (25°S~40°S, 65°E~80°E)

年长江流域夏季降水呈显著的正相关，而与华南和东北、山东半岛的夏季降水成负相关（图略）。上述这些结果清楚说明，SIOD 对于东亚的大气环流和天气气候有着相当重要的影响，在实际业务工作中需要给予足够的重视。

3.4 北大西洋的三极子模及其影响

资料的合成分析或者回归分析都清楚地表明，冬季北大西洋海温存在着一个三极子模态，图 12 给出了北大西洋冬季海温三极子模态的基本特征及其指数的功率谱，很显然这个模态具有 12 年左右周期的年代际变化特征。进一步分析表明上述

三极子模态与中国次年的夏季梅雨雨量及梅雨持续时间都有很好的关系。

图 13 分别给出了经过 9~16 年带滤波的梅雨雨量、梅雨持续时间和北大西洋海温三极子模态指数的时间变化，可以看到，无论是梅雨雨量还是梅雨所持续的时间都与北大西洋三极子模态指数有很好的正相关关系。这些结果清楚表明，在年代际时间尺度上冬季北大西洋海温的三极子模态与中国的梅雨有十分显著的关系。至于冬季北大西洋海温三极子模态如何影响次年夏季中国梅雨的过程和机理，在相关的文章中已经有一些讨论（包括

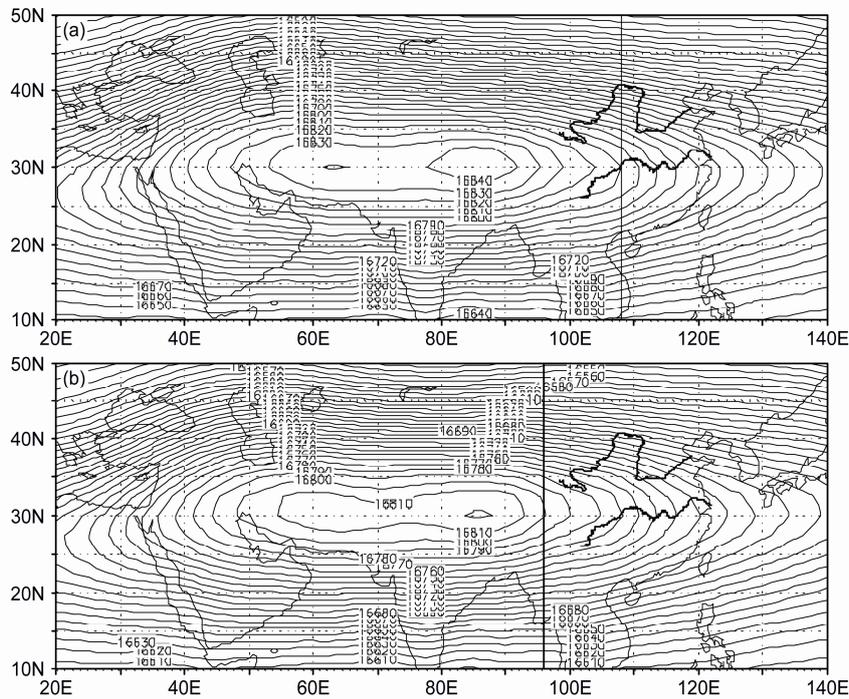


图 11 南印度洋海温偶极子 (a) 正、(b) 负位相对应次年夏季 (6~8 月) 的 100 hPa 高度场 (单位: gpm) (贾小龙和李崇银, 2005)

Fig. 11 Geopotential height (gpm) at 100 hPa in the subsequent summer (June–August) corresponding to (a) positive and (b) negative phases of the SIOD (Subtropical Indian Ocean Dipole) (Jia Xiaolong and Li Chongyin, 2005)

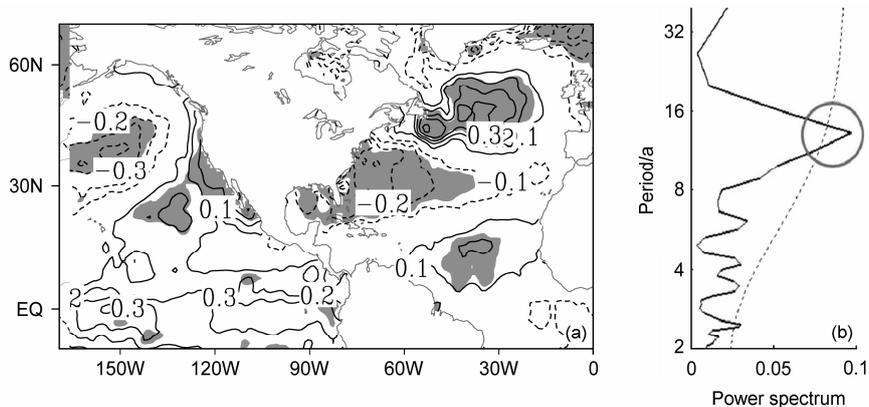


图 12 北大西洋冬季 (a) SSTA 的三极子模态及其 (b) 指数的功率谱特征 (Gu et al., 2009)

Fig. 12 (a) The tripolar mode of SSTA in the North Atlantic in the winter and (b) the power spectrum of its index (Gu et al., 2009)

欧亚大陆的积雪、行星波列的作用等)，这里就不去再费笔墨。

4 气候系统相互关系年代际变化的影响

大家知道，印度夏季风降水与 El Niño 有很好的负相关关系，在 El Niño 年印度夏季降水量较少，稻谷的产量也就减少；而在 La Nina 年印度夏季降水量增加，稻谷产量也就增加。但是 Kumar et al. (1999) 的研究指出，自 1980 年代之后以来，ENSO 与印度夏季风的相关关系非常显著的减弱；Chang et al. (2001) 的分析也得到同样的结果，并认为大

西洋的环流异常可能起了重要作用。由于印度夏季的降水除了与 ENSO 有关系之外，也与阿拉伯海的海温、赤道印度洋偶极子等有关关系。因此我们对印度夏季降水与 Nino3 指数、阿拉伯海海温 (AOT) 指数、赤道印度洋偶极子 (IOD) 指数和南印度洋偶极子 (SIOD) 指数分别进行 21 年滑动相关的分析，它们的相关系数的时间变化如图 14 所示。可以清楚看到，不仅印度夏季降水与 ENSO 的关系存在年代际变化，其它影响因子，包括阿拉伯海海温指数、赤道印度洋偶极子指数和南印度洋偶极子指数，与印度夏季降水的关系也都有年代际变化特征。换句话说，气候系统相互关系的年代际变化，必然对气候变化产生影响，从而成为年代际气候变

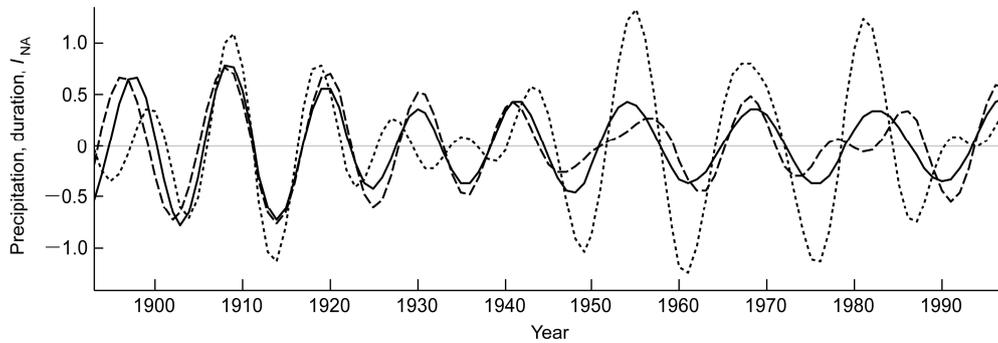


图 13 经过 9~16 年带通滤波的梅雨雨量 (实线)、梅雨持续时间 (虚线) 和北大西洋海温三极子模态指数 (I_{NA} , 点线) 的时间变化 (Gu et al., 2009)
Fig. 13 Temporal variations of the 9-16-a band-pass filtered Meiyu precipitation (solid line), Meiyu duration (dashed line), and I_{NA} (North Atlantic Tripole index, dotted line)

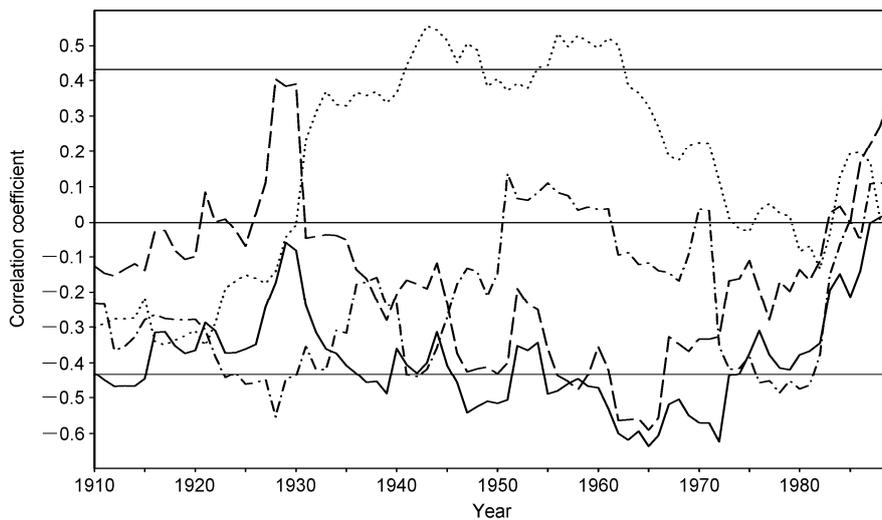


图 14 Nino3 指数 (实线)、阿拉伯海海温指数 (虚线)、南印度洋偶极子指数 (点线)、赤道印度洋偶极子指数 (点虚线) 与全印度降水的 21 年滑动相关系数的时间变化。两条横线是 0.05 置信度的相关系数检验线 (Wang et al., 2006)
Fig. 14 Correlation (based on a 21-a sliding window) of Indian rainfall and Nino3 index (solid line), the SST indices in the Arabian Sea (dashed line), IOD (Indian Ocean Dipole) index (dotted line), and SIOD index (dotted-dashed line). The 5% significant levels are indicated as two horizontal lines (Wang et al., 2006)

化的一个重要物理机制。

我们的一系列研究表明，东亚冬季风的活动与 ENSO 存在明显的相互作用关系，强的频繁东亚冬季风活动通过赤道西太平洋地区西风的加强和强对流的激发对 El Niño 的发生有一定的触发作用；而 El Niño 发生后又将对东亚冬季风活动起削弱作用（李崇银，1988），一般在 El Niño 年冬季东亚冬季风偏弱、东亚地区气温偏高；在 La Nina 年冬季东亚冬季风偏强、东亚地区气温偏低（李崇银，1989；Li，1990）。但是，后来也有研究指出，ENSO 与东亚冬季风的关系并不是完全稳定的，在在 20 世纪 70 年代中期之后有一定的削弱（王会军和贺圣平，2012）；有人进一步研究认为 ENSO 与东亚冬季风的关系，有可能会受到北太平洋 PDO 的调制（Wang et al.，2008）。也就是说，ENSO 与东亚冬季风的关系也存在着年代际变化，进而也就会引起气候的年代际变化。

需要特别指出，各个气候系统间的关系及其变化是十分复杂的，既有外源强迫的作用，也有系统内部及系统间的动力过程的影响。这些方面都还需要深入研究，进而全面认识气候变化，尤其是年代际气候变化的本质，为提高气候预测提供可靠的科学依据。

5 大气行星尺度系统年代际变化的影响

有关年代际气候变化的系统研究最是从海面水温的变化开始的，这是因为海洋过程相对比较缓慢，年代际变化信号较为显著。但是大气环流系统的年代际变化特征也是十分清楚的，而且这种大气环流系统的年代际变化同气候要素（降水和温度）的年代际变化有十分紧密的联系和匹配关系。同月季和年际气候变化相类似，年代际气候异常也与一定的年代际大气环流型相对应。

国内外都有研究表明 NAO（北大西洋涛动）和 NPO（北太平洋涛动）都是南北向的大尺度跷跷板式大气质量场的振荡现象。1990 年代的研究表明，NAO 存在明显的年代际变化；而北太平洋的大气和海洋状况也有年代际变化特征（Trenberth and Hurrell，1994）。中国的气候变化不仅同 NPO 有关，也受到 NAO 的明显影响，有关 NAO 和 NPO 的年代际变化研究也得到了重视。对 NAO 和 NPO 指数所进行的分析研究表明，不仅近期以来 NAO 和 NPO 指数都有明显的增幅特征，而且它们在 1960 年代初都有极为明显的突变特征（图 15）。同时，

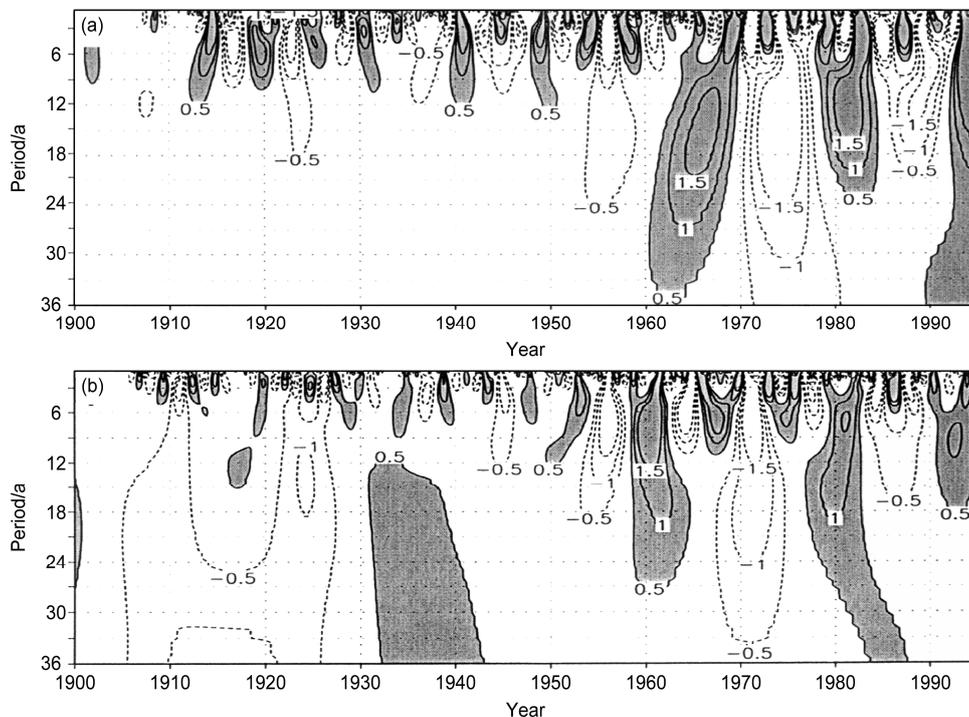


图 15 (a) NAO 指数和 (b) NPO 指数的小波功率谱特征 (Li and Li, 2000)

Fig. 15 Wavelet spectra of the (a) NAO (North Atlantic Oscillation) index and (b) NPO (North Pacific Oscillation) index (Li and Li, 2000)

NAO 和 NPO 的这种突变同全球气候在 1960 年代的突变也十分一致 (Li and Li, 1999)。因此可以认为, NPO 和 NAO 的年代际变化对中国乃至全球气候在 1960 年代的突变有着重要的影响。也有研究表明, 东亚冬季风的年际和年代际变化同北大西洋涛动 (NAO) 有着密切的关系。因为东亚冬季风偏强 (弱) 的表现之一是西伯利亚地面冷高压的偏强 (弱); 而强 (弱) 西伯利亚地面冷高压又与 NAO 指数呈负相关。冬季的 NAO 异常对中国夏季气候也有明显影响, 强 NAO 一般对应强东亚夏季风的形势 (武炳义和黄荣辉, 1999)。

近一段时期, 人们都比较关注 AO (北极涛动) 的变化及其对东亚和其它地区天气气候的影响。实际上 AO 除了年际变化之外, 年代际变化也是十分显著的。图 16 给出了北极涛动指数的时间变化特征, 可以明显看到它的年代际变化的存在, 1957~1970 年期间, AO 指数表现为较小的正值, 1976~1987 年, AO 指数基本为正, 而其后到 2000 年左右, AO 指数基本为负值。

大家知道南亚高压是亚洲夏季风系统的重要组成部分, 也是夏季最为重要的大气环流系统, 它的变化及异常与东亚夏季风的活动及气候异常有明显的关系 (张琼等, 2000; Zhang and Wu, 2002)。图 17 给出的是经过低通滤波的夏季 20°N~32.5°N 纬带平均 200 hPa 位势高度距平的经度—时间剖面, 它在一定程度上可以反映南亚高压强度的变化特征。由图可以看到在 1950 年到 1960 年代初, 整体处于较弱的负距平期; 1960 年代初到 1970 年代末, 整体处于较强的负距平期; 1980 年代末到 1990 年代初, 整体处于较强的正距平期; 而 1990 年代初到 2004 年左右, 又处于明显负距平期。从这些 200 hPa 高度距平的演变特征, 不仅表

明了亚洲夏季风系统分别在 1960 年代初、1970 年代末生的年代际突变, 也清楚表明 1990 年代中期发生的夏季风系统突变。用南亚高压的强度指数也可以清楚表现出南亚高压强度的年代际变化特征 (图略), 而且对 1960 年代中期、1970 年代末期和 1990 年代中期的几次气候突变也揭示的十分清楚。

6 太阳活动及火山爆发的影响

作为大气和海洋运动能量基本来源的太阳, 无疑在大气等系统的运动和变化中同样起着重要的作用, 太阳活动与地球气候的关系及其影响也一直为科学界所关注 (Friis-Christensen and Lassen, 1991; National Research Council, 1994; Friis-Christensen, 2000; Haigh, 2003)。太阳活动包含着许多物理过程, 最为熟知和典型的因子是所谓太阳辐照度 (irradiance) 和太阳黑子 (sunspot) 数的变化。科学家们也早就注意到太阳活动与地球上的天气气候变化有一定的关系, 例如有研究指出, 英国的大气闪电次数与太阳黑子数的时间变化之间存在正相关关系, 在太阳黑子多的年份, 英国大气闪电也多 (Stringfellow, 1974)。而太阳黑子的全影和半影比率 R_s 与北半球地面气温之间也存在着一定的关系, 它们在长时间的变化趋势上有正相关, R_s 值大时, 北半球气温偏高 (Hoyt, 1979)。对南半球天气气候的分析研究也表明其与太阳活动有一定的关系, 例如太阳黑子循环与澳大利亚东部副热带高压脊线的纬度位置的变化间存在一定关系。也有研究表明, 通过一定的动力学过程太阳活动将影响印度季风的变化 (Kodera, 2004)。对于大家都十分关注的全球变化问题, 当然人类活动所导致的

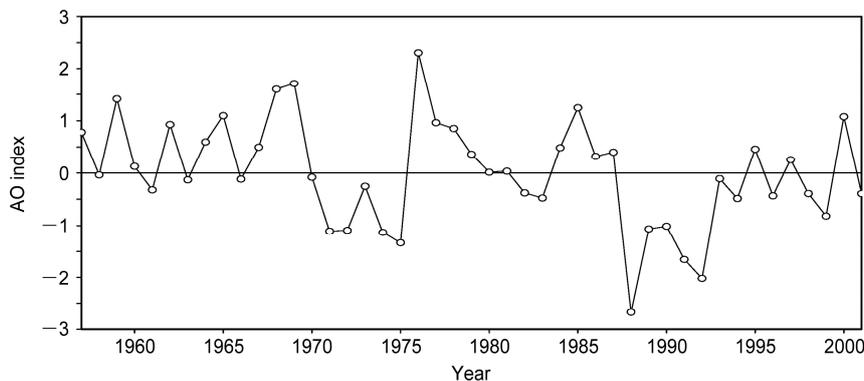


图 16 AO 指数的时间变化
Fig. 16 Temporal variation of the AO (Arctic Oscillation) index

温室气体含量的急剧增加是重要原因；但也有学者认为也要注意太阳活动对气候变化带来的影响（李崇银等，2003；Lean et al., 2005）。

中国东部的夏季降水尤其是“梅雨”，对中国的经济和人民生活都有着重要影响。太阳黑子数的变化有非常显著的 11 年周期（年代际）特征，那么太阳活动的这种准十年时间尺度变化是否也会影响“梅雨”的长期变化呢？利用较长时间的梅雨资料，我们分析了梅雨量年际变化与太阳活动的联系，其结果表明它们之间确实存在着一定的关

系。图 18 分别给出的是太阳黑子数和江淮梅雨量变化的小波分析结果，图中非常清楚地表明，它们都有两个极其相近的最显著的主要周期，即 11 年左右和 30~40 年周期。太阳活动与梅雨量的小波交叉谱分析结果表明太阳活动与中国夏季降水，尤其是与梅雨量存在着既显著又复杂的相关关系，而且它们间的相关关系还随时间有明显的年代际变化特征（图略）。对于 11 年周期谱段，在 1900~1940 年期间梅雨降水有滞后太阳黑子约 3~4 年的正相关，且滞后时间存在逐渐增长的趋势；在 1940~1970 年期

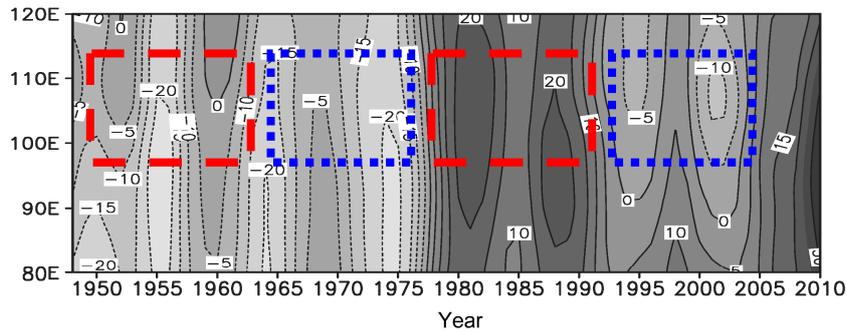


图 17 20°N~32.5°N 平均夏季低通滤波的 200 hPa 位势高度距平（单位：gpm）的经度—时间剖面

Fig. 17 Longitude-time cross section of low pass filtered summer geopotential height anomalies (gpm) at 200 hPa averaged over 20°N-32.5°N

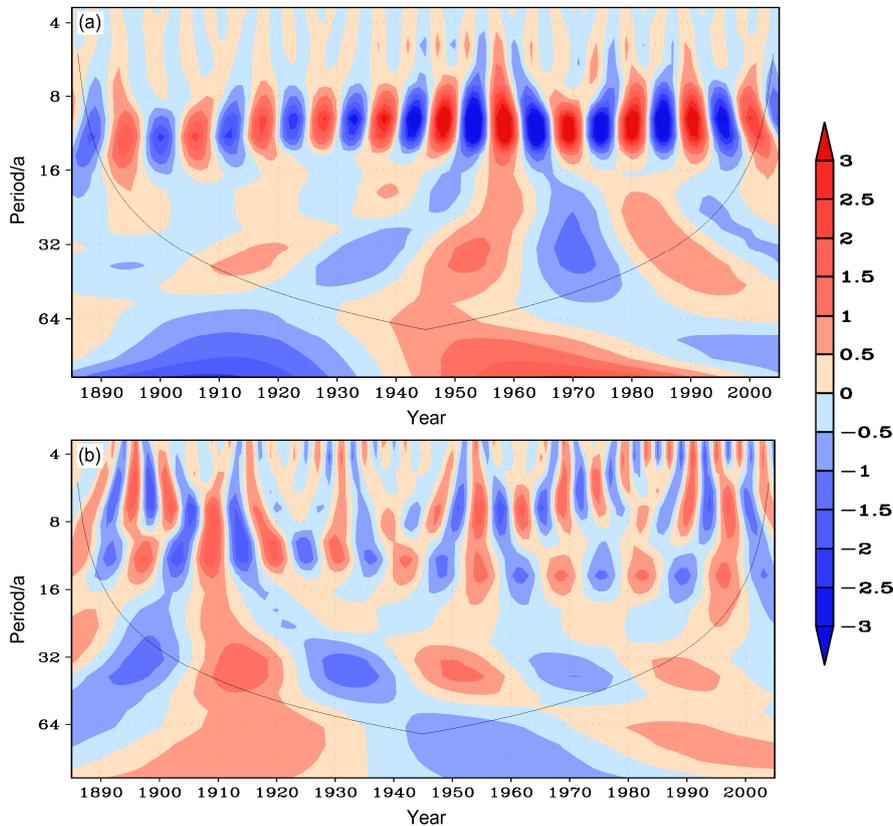


图 18 (a) 太阳黑子数和 (b) 江淮梅雨量变化的小波分析结果（潘静等，2010）

Fig. 18 Wavelet analyses of (a) the sunspot and (b) the Jiang-Huai Meiyu (Pan Jing et al., 2010)

间梅雨降水有滞后太阳黑子约 1~4 年的负相关，且滞后时间也存在逐渐增长的趋势；在 1970 年之后其相关性有由正相关向负相关的转变特征。

对应强太阳活动年和弱太阳活动年，北半球平流层冬季环流会有明显的差异，图 19 表示 10 hPa 冬季北半球位势高度异常场的合成结果。可以明显看到，在强、弱不同的太阳活动期对应着截然不同的北半球冬季位势高度异常场。在强太阳活动年，平流层 10 hPa 在北半球区域基本上分布着位势高度的正异常，正异常中心位于极区偏北美大陆的位置；两个呈对称状的负异常中心分别位于太平洋西北部和大西洋东北部地区。而在弱太阳活动年，北极区虽也出现正异常，中心位置也与强年比较一致，但强度绝

对值要弱于强年；而且对应强年出现负位势高度异常中心的地方却为两个正异常中心，太平洋西北部的正异常中心更强一些。这里的合成结果说明，在强、弱太阳活动年，平流层的高度异常分布是相当不同的，甚至是相反的（对应的极值中心均通过了 95% 的信度检验）。从合成图还可以发现，当太阳活动比较强烈的时候，对应的北半球冬季平流层的极涡是比较弱的；而对应弱太阳活动年则相反。

多年来的观测和分析研究，在关于太阳活动影响天气气候变化方面也已有了一些初步看法，尽管尚未形成完整的理论。归纳起来我们可以将它们概况为直接影响和间接影响，具体也可认为有如下几种可能途径，并可给出一个示意图（图 20）。为了认

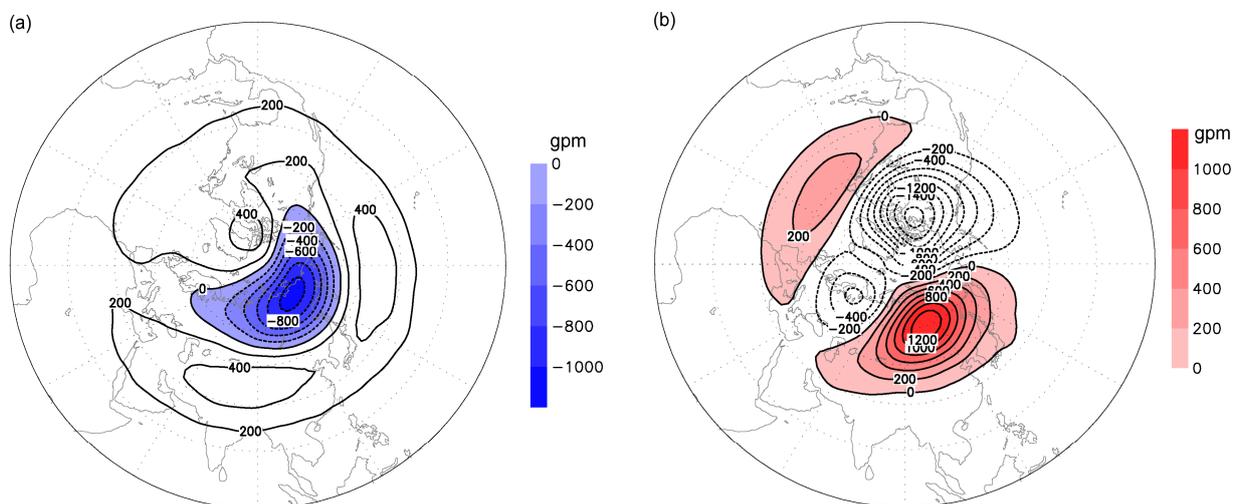


图 19 (a) 强、(b) 弱太阳活动时期所对应的冬季北半球 10 hPa 位势高度异常场 (单位: gpm) 的合成形势 (潘静等, 2010)

Fig. 19 Geopotential height anomalies (gpm) at 10 hPa in the winter averaged for (a) high solar activity period and (b) low solar activity period (Pan Jing et al., 2010)

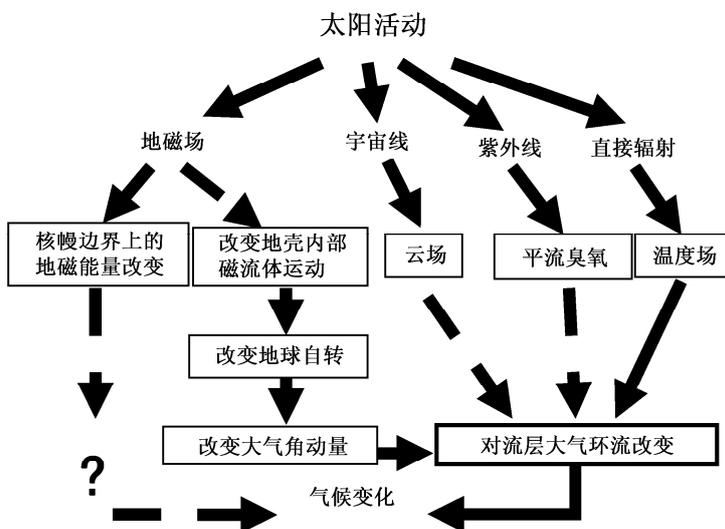


图 20 太阳活动影响气候变化的可能途径示意图 (李崇银, 2007)

Fig. 20 The sketch map of possible path about influences of the solar activity on the climate (Li Chongyin, 2007)

识具体物理过程,下面我们再做一些文字讨论,便于进一步了解。

(1) 太阳活动→太阳辐射量→地表温度→大气环流→天气气候变化。这是最直接的影响方式 (Reid, 1991; 卫捷等, 1999), 但太阳辐射量的改变比较小, 如何通过非线性放大过程而发生作用, 是一个须要深入研究的问题。

(2) 太阳活动→地球大气电离程度→大气经圈环流→天气气候变化。一些观测研究已表明, 在太阳黑子的高峰期, 地球大气的电离程度比较强, 尤其是在高纬度地区。这样, 在电磁场的作用下, 高纬度大气电离化的增强将导致高纬地区大气直接经圈环流的加强。经圈环流的加强, 将使空气的南北交换加强, 大气活动中心会明显增强, 全球的降水量也可能增多 (Svensmark, 1998)。同时, 大气电离程度的变化还必然引起高层大气中离子含量的改变, 高离子含量的空气被带到对流层, 可能影响到云和降水过程, 一般也将有利于降水 (Reid, 1991)。

(3) 太阳活动→紫外辐射→臭氧层→平流层热状况→天气气候。卫星的观测表明, 平流层上层的臭氧混合比与太阳辐射加热有明显的正相关关系 (Dickinson, 1975; Hood, 1987; Chandra, 1991), 太阳辐射加热强, 在 2 hPa 高度处的臭氧混合比就高。这样, 太阳活动 (太阳黑子多) 所引起的辐射量 (尤其是紫外辐射) 的增加将使得平流层的臭氧量及其分布发生变化, 从而引起平流层热状况的变化。平流层热状况的变化必将引起平流层温度场的变化, 平流层大气环流亦将发生变化, 进而通过行星波的异常影响对流层大气环流的改变, 最终引起天气气候的变化 (Baldwin and Dunkerton, 2005; 李崇银等, 2008)。

(4) 太阳活动→地球磁场→地球自转速度 (或地磁能量) →大气和海洋环流→天气气候变化。太阳活动引起地球磁场的变化, 地磁场变化将引起地壳内部磁流体 (溶浆) 运动的改变。即地球磁场的变化将引起地球外核流动的改变, 而外核流动的改变通过核幔耦合作用, 包括电磁耦合、粘性耦合、热力耦合和地形耦合等过程, 又将对地幔产生影响 (Rochester, 1962; Hide, 1969; Song and Richards, 1996), 然后可引起地球自转 (日长) 的变化 (Jault and Le Mouél, 1991; Voorhies, 1991)。地球自转速度的变化, 通过地球与大气和海洋的角动量交换

将引起大气环流和海洋环流的变化, 最终影响天气气候。同时, 地磁场的变化也将引起核幔边界上的地磁能量改变 (傅容珊等, 1999; Zhong et al., 1999), 这种能量通过一定的方式传到地面也可以影响天气气候变化。已有研究表明, 地磁场的变化与地球气候异常之间也确实存在一定的关系, 通过地球核—幔间的焦耳能释放可能是一种联系方式 (高晓清等, 2002)。

关于地磁场异常与天气气候变化的关系, 已不是一个新的问题。国内外学者已注意到地磁场改变对气候变化的影响, 并有一些研究结果表明地磁场的异常与某些灾害性天气的发生有关 (Gribbin, 1981; 曾小苹等, 1992)。这里不想多去作介绍, 我们仅就最近的国家“973”计划 (中国气象局, 2012) 中一个子课题的一些研究结果给予讨论介绍。图 21 给出的分别是 1961~2011 年地磁场指数与 10 m 高度上风速间的相关系数 (0.40 超过 99.9% 信度), 以及 1961~2015 年地磁场指数与 AO 指数间的相关系数 (0.35 超过 99.9% 信度)。可以清楚看到, 地磁场指数的变化与地表风速以及 AO 指数的变化有着很好的相关性, 说明它们的变化之间存在一定的关系。这也可以间接说明, 太阳活动通过影响地磁场的变化, 将会对气候变化起着间接的影响。

火山爆发带来的大量火山灰将改变大气的成分和辐射特征, 也会导致气候的变化。而火山的强烈或大量爆发又存在一定的年代际变化特征, 它对年代际气候变化也就有一定的影响。图 22 给出了 1880~1980 年地球火山爆发情况与北半球温度异常的情况, 很显然, 地球火山的爆发存在一定的年代际变化特征; 而北半球温度的异常与火山爆发有明显的关系, 火山爆发多或强 (少或弱) 对应着温度偏低 (高)。

基于 GEWEX 全球气溶胶气候计划的资料所进行的分析 Mishchenko and Geogdzhayer (2007) 曾指出, 过去 10~20 年地球大气的增暖趋势可能与到达地面的向下太阳辐射量的增加有关, 而这种辐射量的增加可能是这期间火山爆发减少所导致的对流层气溶胶减少的贡献 (图略)。

7 结语

中国气候的变化与全球各地一样, 存在着明显的年代际变化特征。这不仅在涉及年代际气候变化

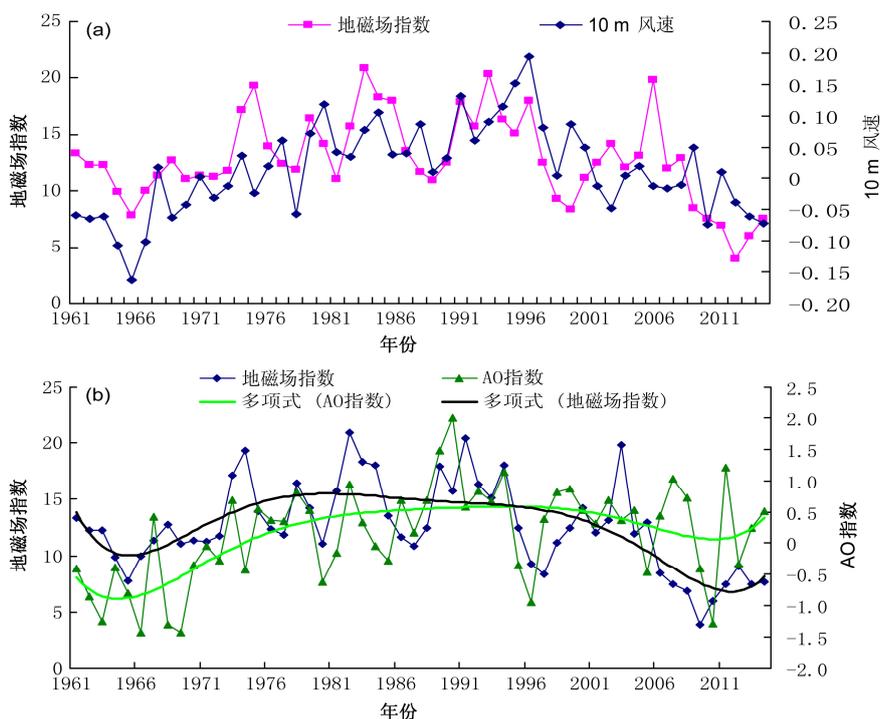


图 21 (a) 1961~2011 年地磁场指数与离地 10 m 处风速的时间变化 (相关系数为 0.40, 超过 99.9%信度), 以及 (b) 1961~2015 年地磁场指数与 AO 指数的时间变化 (相关系数为 0.347, 超过 99.9%信度) (金巍等, 2017)

Fig. 21 Temporal variations of the geomagnetic field index and wind speed at 10 m during 1961–2011 (the correlation coefficient is 0.4, which is at/above the 99.9% confidence level) and AO index during 1961–2015 (the correlation coefficient is 0.347, which is at/above the 99.9% confidence level) (Jin Wei et al., 2017)

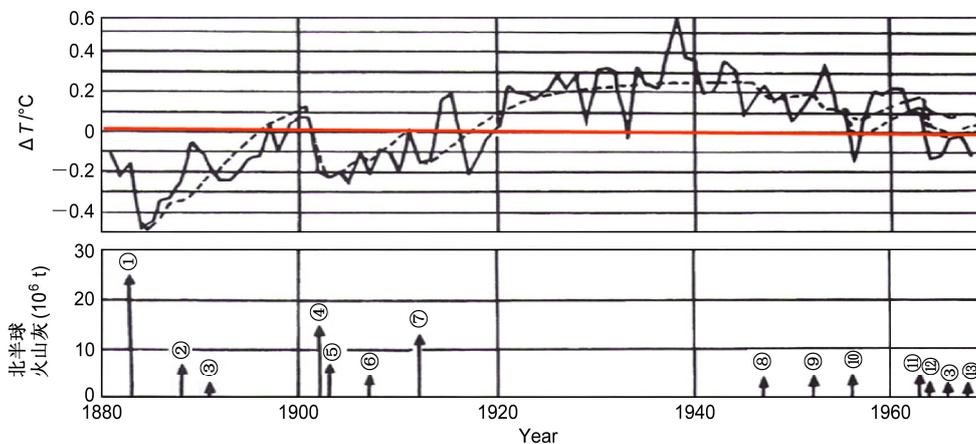


图 22 1880~1980 年北半球温度异常与火山爆发。图中虚线是计算的地面温度响应 (Kondratyev, 1988)

Fig. 22 Temperature anomalies in the Northern Hemisphere and volcano eruptions during 1880–1980. The dotted line is computed surface temperature response (Kondratyev, 1988)

时需要考虑, 在有关年际乃至月季气候变化的研究和业务预报预测时也要注意。

年代际气候变化的物理过程和动力学机制十分复杂, 目前还没有完全搞的非常清楚, 需要进一步深入研究。不过现在我们可以将年代际气候变化的可能机制综合归纳为: 全球海洋温度异常的主要年代际模态的影响, 气候系统间相互关系的年代际

变化影响, 太阳活动和火山爆发的影响, 以及大气行星尺度系统年代际变化的影响等。过去大家对海洋热状态异常的影响关注比较多, 上面后三种影响也需要引起我们更多注意。

还要指出一点, 观测资料的分析 and 数值模拟都十分清楚地表明, 地球大气的几个主要行星尺度环流系统, 如 NAO、NPO、东亚大槽、西太平洋副热

带高压和亚洲季风系统等都存在明显的年代际变化特征；它们的年代际变化必然引起某些地区气候的年代际变化。虽然大气环流的年代际变化必然受到外界强迫影响，但大气内部动力过程也有不可忽视的作用（李崇银，2000；张庆云等，2007）。因此，年代际气候变化的机理既有海洋变化等外强迫的重要作用，也要考虑大气内部动力过程，同时也要研究外强迫和内部动力过程的相互作用。

参考文献 (References)

- Baldwin M P, Dunkerton T J. 2005. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67 (1-2): 71-82, doi:10.1016/j.jastp.2004.07.018.
- Bond N A, Harrison D E. 2000. The Pacific decadal oscillation, air-sea interaction and central North Pacific winter atmospheric regimes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (5): 731-724, doi:10.1029/1999GL010847.
- Chandra S. 1991. The solar UV related changes in total ozone from a solar rotation to a solar cycle [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 18 (5): 837-840, doi:10.1029/91GL00850.
- Chang C P, Harr P, Ju J H. 2001. Possible roles of Atlantic circulations on the weakening Indian Monsoon rainfall-ENSO relationship [J]. *J. Climate*, 14 (11): 2376-2380, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2376:PROACO>2.0.CO;2.
- Chen J Y, Del Genio A D, Carlson B E, et al. 2008. The spatiotemporal structure of twentieth-century climate variations in observations and reanalyses. Part II: Pacific pan-decadal Variability [J]. *J. Climate*, 21 (11): 2634-2650, doi:10.1175/2007JCLI2012.1.
- Diaz H F. 1986. An analysis of twentieth century climate fluctuations in northern North America [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25 (11): 1625-1657, doi:10.1175/1520-0450(1986)025<1625:AAOTCC>2.0.CO;2.
- Dickinson R E. 1975. Solar variability and the lower atmosphere [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56 (12): 1240-1248, doi:10.1175/1520-0477(1975)056<1240:SVATLA>2.0.CO;2.
- Ding Y Y, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (9): 1139-1161, doi:10.1002/joc.1615.
- Friis-Christensen E, Lassen K. 1991. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate [J]. *Science*, 245 (5032): 698-700, doi:10.1126/science.254.5032.698.
- Friis-Christensen E. 2000. Solar variability and climate—A summary [J]. *Space Science Reviews*, 94 (1-2): 411-421, doi:10.1023/A:1026776902940.
- 傅容珊, 李力刚, 郑大伟, 等. 1999. 核幔边界动力学——地球自转十年尺度波动 [J]. *地球科学进展*, 19 (4): 541-548. Fu Rongshan, Li Ligang, Zheng Dawei, et al. 1999. Dynamics of the core-mantle boundary and the decadal fluctuation in the earth's rotation [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 19 (4): 541-548, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.1999.06.0541.
- 高晓清, 柳艳香, 董文杰, 等. 2002. 地磁场与气候变化关系的新探索 [J]. *高原气象*, 21 (4): 395-401. Gao Xiaqing, Liu Yanxiang, Dong Wenjie, et al. 2002. New evidences for the relationship between climate change and geomagnetic field [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (4): 395-401, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2002.04.009.
- Gribbin J. 1981. Geomagnetism and climate [J]. *New Science*, 89 (1239): 350-353.
- 顾薇, 李崇银, 杨辉. 2005. 中国东部夏季主要降水型的年代际变化及趋势分析 [J]. *气象学报*, 63 (5): 728-739. Gu Wei, Li Chongyin, Yang Hui. 2005. Analysis on interdecadal variation of summer rainfall and its trend in East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (5): 728-739, doi:10.11676/qxxb2005.070.
- 顾薇, 李崇银, 潘静. 2007. 太平洋—印度洋海温与我国东部旱涝型年代际变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 12 (2): 113-123. Gu Wei, Li Chongyin, Pan Jing. 2007. Relationship between interdecadal variation of North Pacific-equatorial Indian Ocean SST and transition of rainfall pattern in East China around the 1970s [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (2): 113-123, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.02.001.
- Gu W, Li C Y, Wang X, et al. 2009. Linkage between Mei-yu precipitation and North Atlantic SST on the decadal timescale [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (1): 101-108, doi:10.1007/s00376-009-0101-5.
- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. *地理学报*, 38 (3): 207-217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 38(3): 207-217, doi:10.11821/xb198303001.
- Haigh J D. 2003. The effects of solar variability on the Earth's climate [J]. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361 (1802): 95-111, doi:10.1098/rsta.2002.1111.
- Hide R. 1969. Interaction between the Earth's liquid core and solid mantle [J]. *Nature*, 222 (5198): 1055-1056, doi:10.1038/2221055a0.
- Hood L L. 1987. Solar ultraviolet radiation induced variations in the stratosphere and mesosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 92 (D1): 876-888, doi:10.1029/JD092iD01p00876.
- Hoyt D V. 1979. Variations in sunspot structure and climate [J]. *Climate Change*, 2 (1): 79-92, doi:10.1007/BF00138229.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (5): 910-942, doi:10.1007/s00376-012-2015-x.
- Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 269 (5224): 676-679, doi:10.1126/science.269.5224.676.
- Jault D, Le Mouél J L. 1991. Exchange of angular momentum between the core and the mantle [J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 43 (2): 111-129.
- 贾小龙, 李崇银. 2005. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响 [J]. *地球物理学报*, 48 (6): 1238-1249. Jia Xiaolong, Li Chongyin. 2005. Dipole oscillation in the southern Indian Ocean and its impacts on climate [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 48 (6): 1238-1249, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.06.004.
- 金巍, 张效信, 宋燕, 等. 2017. 地磁活动对气候要素影响的研究进展

- [J]. 地球物理学报, 60 (4): 1276–1283. Jin Wei, Zhang Xiaoxin, Song Yan, et al. 2017. Progress of research on the effect of geomagnetic activity on climatic elements [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60 (4): 1276–1283, doi:10.6038/cjg20170404.
- Kawamura R, 1994. A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales [J]. J. Phys. Oceanogr., 24 (3): 707–715, doi:10.1175/1520-0485(1994)024<0707:AREAOG>2.0.CO;2.
- Kodera K. 2004. Solar influence on the Indian Ocean monsoon through dynamical processes [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (24): L24209, doi:10.1029/2004GL020928.
- Kondratyev K Y. 1988. Climate Shocks: Natural and Anthropogenic [M]. New York: John Wiley & Sons, 576pp.
- Kumar K K, Rajagopalan B, Cane M A. 1999. On the weakening relationship between the Indian monsoon and ENSO [J]. Science, 284 (5423): 2156–2159, doi:10.1126/science.284.5423.2156.
- Kushnir Y. 1994. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions [J]. J. Climate, 7 (1): 141–157, doi:10.1175/1520-0442(1994)007<0141:IVINAS>2.0.CO;2.
- Kwon M, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid–1990s [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (21): L21706, doi:10.1029/2007GL031977.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. Science, 266 (5185): 634–637, doi:10.1126/science.266.5185.634.
- Latif M, Barnett T P. 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability [J]. J. Climate, 9 (10): 2407–2423, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2407:DCVOTN>2.0.CO;2.
- Lean J, Rottman G, Harder J, et al. 2005. SOCR contributions to new understanding of global change and solar variability [J]. Solar Physics, 230 (1–2): 27–53, doi:10.1007/s11207-005-1527-2.
- 李崇银. 1988. 频繁的强大东亚槽活动与 El Niño 发生 [J]. 中国科学 (B), (6), 667–674. Li Chongyin. 1989. Frequent activities of stronger aerotroughs in East Asia in wintertime and the occurrence of the El Niño event [J]. Science in China (Series B: Chemistry), 32 (8): 976–985.
- 李崇银. 1989. 中国东部地区的暖冬与厄尼诺 [J]. 科学通报, (4): 283–286. Li Chongyin. 1989. Warmer winter in eastern China and El Niño [J]. Chinese Science Bulletin, 34 (21): 1801–1805.
- Li C Y. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 7 (1): 36–46, doi:10.1007/BF02919166.
- 李崇银, 廖清海. 1996. 东亚和西北太平洋地区气候的准 10 年尺度振荡及其可能机制 [J]. 气候与环境研究, 1 (2): 124–133. Li Chongyin, Liao Qinghai. 1996. Quasi-decadal oscillation of climate in East Asia/northwestern Pacific region and possible mechanism [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 1 (2): 124–133, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1996.02.03.
- Li C Y. 1998. The quasi-decadal oscillation of air–sea system in the Northwestern Pacific region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 15 (1): 31–40, doi:10.1007/s00376-998-0015-7.
- Li C Y, Li G L. 1999. Variation of the NAO and NPO associated with climate jump in the 1960s [J]. Chinese Science Bulletin, 44 (21): 1983–1987, doi:10.1007/BF02887124.
- 李崇银. 2000. 气候动力学引论 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 503pp. Li Chongyin. 2000. An Introduction to Climate Dynamics (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 503pp.
- Li C Y, Li G L. 2000. The NPO/NAO and interdecadal climate variation in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17 (4): 555–561, doi:10.1007/s00376-000-0018-5.
- 李崇银, 朱锦红, 孙照勃. 2002. 年代际气候变化研究 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 209–219. Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. 2002. The study interdecadal climate variation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (2): 209–219, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2002.02.08.
- 李崇银, 咸鹏. 2003. 北太平洋海温年代际变化与大气环流和气候的异常 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 258–273. Li Chongyin, Xian Peng. 2003. Interdecadal variation of SST in the North Pacific and the anomalies of atmospheric circulation and climate [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 258–273, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2003.03.02.
- 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 2003. 全球增暖的另一可能原因初探 [J]. 大气科学, 27 (5): 789–797. Li Chongyin, Weng Hengyi, Gao Xiaoping, et al. 2003. Initial investigation of another possible reason to cause global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 789–797, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.05.01.
- Li C Y, Xian P. 2003. Atmospheric anomalies related to interdecadal variability of SST in the North Pacific [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (6): 859–874, doi:10.1007/BF02915510.
- Li C Y, He J H, Zhu J H. 2004. A review of decadal/interdecadal climate variation studies in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (3): 425–436, doi:10.1007/BF02915569.
- Li C Y, Zhou W, Jia X L, et al. 2006. Decadal/interdecadal variations of the ocean temperature and its impacts on climate [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 23 (6): 964–981, doi:10.1007/s00376-006-0964-7.
- 李崇银. 2005. 太阳活动如何影响天气气候变化 [M]//李喜先. 21 世纪 100 个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 97–102. Li Chongyin. 2005. How the solar activity affect on weather and climate variations [M]//One Hundred Scientific Difficult Problems during 21 Century. Beijing: Science Press, 97–102.
- 李崇银, 潘静, 顾薇. 2008. 冬季平流层北极涛动(AO)及其变化 [M]//平流层气候. 北京: 气象出版社, 402pp. Li Chongyin, Pan Jing, Gu Wei. 2008. The Arctic Oscillation and its variation in the stratosphere [M]//Stratosphere Climate (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 402pp.
- 李刚, 李崇银, 谭言科, 等. 2012. 北半球冬季南太平洋海表温度异常的主要模态及其与 ENSO 的关系 [J]. 海洋学报, 34 (2): 48–56. Li Gang, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2012. Principal modes of the boreal wintertime SSTA in the South Pacific and their relationships with the ENSO [J]. Acta Ocean. Sinica, 2012, 34 (2): 48–56.
- Li G, Li C Y, Tan Y K, et al. 2012. Seasonal evolution of dominant modes in South Pacific SST and relationship with ENSO [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (6): 1238–1248, doi:10.1007/s00376-012-1191-z.
- Li G, Li C Y, Tan Y K, et al. 2014. Observed relationship of boreal winter

- South Pacific tripole SSTA with eastern China rainfall during the following boreal spring [J]. *J. Climate*, 27 (21): 8094–8106, doi:10.1175/JCLI-D-14-00074.1.
- Liu Y, Huang G, Huang R H. 2011. Inter-decadal variability of summer rainfall in eastern China detected by the Lepage test [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 106 (3–4): 481–488, doi:10.1007/s00704-011-0442-8.
- 吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 等. 2005. 太平洋海温场两种不同时间尺度气候模态的分析 [J]. *海洋学报*, 27 (5): 30–37. Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. 2005. The analysis of two climate patterns on different time scales in Pacific sea temperature fields [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 27 (5): 30–37, doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2005.05.005.
- 马音, 陈文, 冯瑞权, 等. 2012. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系 [J]. *大气科学*, 36 (2): 397–410. Ma Yin, Chen Wen, Fong Soikun, et al. 2012. Interannual and interdecadal variations of precipitation over eastern China during Meiyu season and their relationships with the atmospheric circulation and SST [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 397–410, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11050.
- Mishchenko M I, Geogdzhayev I V. 2007. GACP data show potential climate impact of aerosols [R]. *GEWEX News*, 2007.
- 穆明权, 李崇银. 2000. 大气环流的年代际变化 I. 观测资料的分析 [J]. *气候与环境研究*, 5 (3): 233–241. Mu Mingquan, Li Chongyin. 2000. Interdecadal variations of atmospheric circulation I. Observational analyses [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (3): 233–241, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2000.03.01.
- National Research Council. 1994. *Solar Influences on Global Change* [M]. Washington, DC: National Academy Press, 163pp, doi:10.17226/4778.
- Nitta T, Yamada S. 1989. Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67 (3): 375–383, doi:10.2151/jmsj1965.67.3_375.
- 潘静, 李崇银, 顾薇. 2010. 太阳活动对中国东部夏季降水异常的可能影响. *气象科学*, 30 (5): 574–581. Pan Jing, Li Chongyin, Gu Wei. 2010. The Possible impact of solar activity on summer rainfall anomaly in eastern China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (5): 574–581, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.05.002.
- 钱维宏, 朱亚芬, 叶谦. 1998. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率 [J]. *科学通报*, 43 (10): 1098–1102. Qian Weihong, Zhu Yafen, Ye Qian. 1999. Interannual and interdecadal variabilities in SST anomaly over the eastern equatorial Pacific [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44 (6): 568–571.
- Quinn W H, Neal V T. 1984. Recent climate change and the 1982–1983 El Niño[C]//*Proceedings of the Eighth Annual Climate Diagnostic Workshop*. U.S. Dep. Commer., NOAA, 148–154.
- Reid G C. 1991. Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record [J]. *J. Geophys. Res.*, 96 (D2): 2835–2844, doi:10.1029/90JD02274.
- Rochester M G. 1962. Geomagnetic core-mantle coupling [J]. *J. Geophys. Res.*, 67 (12): 4833–4836, doi:10.1029/JZ067i012p04833.
- Shakun J D, Shaman J. 2009. Tropical origins of North and South Pacific decadal variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (19): L19711, doi:10.1029/2009GL040313.
- Song X D, Richards P G. 1996. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core [J]. *Nature*, 382 (6588): 221–224, doi:10.1038/382221a0.
- Stringfellow M F. 1974. Lightning incidence in Britain and the solar cycle [J]. *Nature*, 249 (5455): 332–336, doi:10.1038/249332a0.
- Svensmark H. 1998. Influence of cosmic rays on Earth's climate [J]. *Physical Review Letters*, 81 (22): 5027–5029, doi:10.1103/PhysRevLett.81.5027.
- Tanimoto Y, Hanawa K, Toba Y, et al. 1993. Characteristic variations of sea surface temperature with multiple time scales in the North Pacific [J]. *J. Climate*, 6 (6): 1153–1160, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1153:CVOSST>2.0.CO;2.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. *气象学报*, 34 (4): 385–396. Tao Shiyan, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 34 (4): 385–396, doi:10.11676/qxxb1964.039.
- Trenberth K E. 1990. Recent Observed Interdecadal Climate Changes in the Northern Hemisphere [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71 (7): 988–993, doi:10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 9 (6): 303–319, doi:10.1007/BF00204745.
- Voorhies C V. 1991. Coupling an inviscid core to an electrically insulating mantle [J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 43 (2): 131–156, doi:10.5636/jgg.43.131.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades [J]. *J. Climate*, 8 (2): 267–285, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0267:ICIENO>2.0.CO;2.
- 王会军, 贺圣平. 2012. ENSO 和东亚冬季风之关系在 20 世纪 70 年代中期之后的减弱 [J]. *科学通报*, 57 (19): 1713–1718. Wang Huijun, He Shengping. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (27): 3535–3540.
- 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 (20): L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- 王绍武, 叶谨琳, 龚道溢, 等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立 [J]. *应用气象学报*, 9 (4): 392–401. Wang Shaowu, Ye Jinglin, Gong Daoyi, et al. 1998. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9 (4): 392–401.
- 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红, 等. 2002. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化 [J]. *气象学报*, 60 (5): 637–639. Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong, et al. 2002. The interdecadal variations of annual precipitation in China during 1880s–1990s [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (5): 637–639, doi:10.11676/qxxb2002.076.
- Wang X, Li C Y, Zhou W. 2006. Interdecadal variation of the relationship between Indian rainfall and SSTA modes in the Indian Ocean [J]. *Int. J. Climatol.*, 26: 595–606, DOI: 10.1002/joc.1283.
- WCRP, CLIVAR. 1995. *A Study on climate variability and predictability* [R]. Science Plan. WCRP No. 89, WMO/TD No. 690, Geneva, 172pp.

- 卫捷, 汤懋苍, 冯松, 等. 1999. 亚洲季风年代际振荡及与天文因子的相关 [J]. 高原气象, 18 (2): 179–184. Wei Jie, Tang Maocang, Feng Song, et al. 1999. Interdecadal fluctuation of Asian summer monsoon and their relation to astronomical factors [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 179–184, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.02.006.
- Weng H Y, Sumi A, Takayabu Y N, et al. 2004. Interannual-Interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951–2000 Part II: Dominant timescales [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (2): 789–804, doi:10.2151/jmsj.2004.789.
- 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 Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic oscillation on East Asia winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (6): 641–651, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.01.
- Wu R G, Wen Z P, Song Y, et al. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23 (9): 2389–2403, doi:10.1175/2009JCLI3336.1.
- Yan Z W, Ji J J, Ye D Z. 1990. Northern hemispheric summer climatic jump in the 1960s (I)-Rainfall and temperature [J]. Science in China Series B, 33 (9): 1092–1101.
- 严中伟. 1992. 60年代北半球夏季气候跃变过程的初步分析 [J]. 大气科学, 16 (1): 111–119. Yan Zhongwei. 1992. A primary analysis of the process of the 1960s Northern Hemispheric summer climatic jump [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16 (1): 111–119, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.01.16.
- 叶笃正, 严仲伟. 1993. 历史上的气候突变 [M]//气候变化. 北京: 气象出版社, 3–14. Ye Duzheng, Yan Zhongwei. 1993. Climate Jumps in the History (in Chinese) [M]// Climate Variability. Beijing: China Meteorological Press, 3–14.
- 曾小萃, 林云芳, 续善荣. 1992. 地球磁场大面积短暂异常与灾害性天气相关性初探 [J]. 自然灾害学报, 1 (2): 59–65. Zeng Xiaoping, Lin Yunfang and Xu Shanrong. 1992. A tentative approach to the relationship between geomagnetic short-periodic anomaly and the weather disaster [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 1 (2): 59–65, doi:10.13577/j.jnd.1992.0207.
- 张琼, 钱永甫, 张学洪. 2000. 南亚高压的年际和年代际变化 [J]. 大气科学, 24 (1): 67–78. Zhang Qiong, Qian Yongfu, Zhang Xuehong. 2000. Interannual and interdecadal variations of the South Asia High [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (1): 67–78, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.01.07.
- Zhang Q, Wu G X. 2002. The Bimodality of the 100 hPa South Asia High and its relationship to the climate anomaly over East Asia in summer [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80 (4): 733–744, doi:10.2151/jmsj.80.733.
- 张庆云. 1999. 1880年以来华北降水及水资源的变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 486–495. Zhang Qingyun. 1999. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 486–495, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.003.
- 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学过程及外强迫因子关系 [J]. 大气科学, 31 (6): 1290–1300. Zhang Qingyun, Lv Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal processes and external forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31 (6): 1290–1300.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. J. Climate, 10 (5): 1004–1020, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2.
- 中国气象局. 2012. 天文与地球运动因子对气候变化的影响研究 2012年—2016年 [R]. No. 2012CB957800. Xiao Ziniu. 2012. A study on impacts of astronomical and earthly motility factors on climate change [R]. No. 2012CB957800.
- Zhong M, Naitoh I, Kitoh A. 2003. Atmospheric, Hydrological, and ocean current contributions to Earth's annual wobble and length-of-day signals based on output from a climate model [J]. J. Geophys. Res., 108 (B1): 2057, doi:10.1029/2001JB000457.
- Zhou W, Li C, Chan J C L. 2006. The interdecadal variations of the summer monsoon rainfall over South China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 93 (3–4): 165–175, doi:10.1007/s00703-006-0184-9.