

吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因 [J]. 大气科学, 38 (4): 782–794, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227. Lü Junmei, Zhu Congwen, Ju Jianhua, et al. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 years and its possible causes. [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 782–794.

近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因

吕俊梅¹ 祝从文¹ 琚建华² 林祥¹

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 云南省气象局, 昆明 650034

摘 要 本文利用测站降水观测资料分析过去一百多年中国东部华北、长江流域以及华南夏季降水的年代际变化特征发现, 尽管这三个地区的夏季降水具有不同的年代际转折时期, 但是均同时在 1910 年代初期、1920 年代初期、1940 年代中期、1960 年代中期、1970 年代末期以及 1990 年代初期发生了跃变。近一百年间不同年代际时期东部夏季降水的分布型主要以南正北负或者南负北正的偶极型为主, 并且无论是偶极型分布还是三极型分布, 两个相邻年代际时期中国东部降水分布型发生完全反向变化的概率较高 (60%)。此外, 夏季的 PDO、冬季的 AO 以及春季的北极海冰也同时在 1920 年代末期、1940 年代中期、1970 年代末期以及 1990 年代中期左右发生了跃变, 这几次跃变时期与中国东部三个不同地区夏季降水发生跃变的时期一致, 表现出近百年来太平洋年代振荡 (PDO)、北极涛动 (AO) 以及北极海冰这三个因子对中国东部夏季降水年代际变化的协同作用。

在年代际时间尺度上, 夏季的 PDO 与华北夏季降水显著负相关。PDO 的年代际变化能够在 500 hPa 位势高度场中激发出太平洋—日本 (PJ) 型年代际遥相关波列; 同时在 850 hPa 风场中激发出类似于影响华北夏季降水年代际变化的大气环流型, 从而影响华北降水的年代际变化。冬半年的 AO 与长江流域夏季降水存在显著正相关关系。冬季到春季正位相的 AO 导致亚洲大陆南部处于湿冷状态, 土壤湿度的记忆性可将这种状态延续到夏季。因此, 夏季海陆热力对比减弱, 东亚夏季风发生年代际减弱, 相应地长江流域的降水年代际增多。春季北极海冰与华南夏季降水显著负相关, 北极海冰的年代际异常能在 500 hPa 位势高度场中激发出与静止 Rossby 波异常传播相联系的欧亚—华南年代际遥相关波列, 从而影响华南降水的年代际变化。

关键词 中国东部 夏季降水 年代际变化

文章编号 1006-9895(2014)04-0782-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227

Interdecadal Variability in Summer Precipitation over East China during the Past 100 Years and Its Possible Causes

LÜ Junmei¹, ZHU Congwen¹, JU Jianhua², and LIN Xiang¹

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Yunnan Provincial Meteorological Service, Kunming 650034

Abstract In this paper, the interdecadal variations of rainfall over North China, the Yangtze River valley, and South China during the past 100 years are examined using weather station data. The results show that the rainfall over these

收稿日期 2013-07-28, 2014-01-08 收修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项子课题 XDA05090408, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB417205, 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY200906017, 中国气象科学研究院基本科研业务费项目 2010Z001、2013Z002, 人力资源和社会保障部留学回国人员择优资助项目

作者简介 吕俊梅, 女, 1972 年出生, 副研究员, 主要从事东亚季风研究。E-mail: wind-ljm@163.com

通讯作者 琚建华, E-mail: jujh@cma.gov.cn

three regions underwent simultaneous shifts in the early 1910 s, the early 1920s, the middle 1940 s, the middle 1960s, the late 1970 s, and the early 1990 s, although there are different interdecadal shifting periods. During the past 100 years the distribution patterns of summer rainfall over eastern China are primarily characterized by dipoles, such as “positive south and negative north” or “positive north and negative south” in different interdecadal periods. Furthermore, the probability of the totally reverse distribution patterns during two adjacent interdecadal periods is higher (60%) whether they are dipolar or tripolar. In addition, summer Pacific Decadal Oscillation (PDO), winter Arctic Oscillation (AO), and spring arctic sea ice also showed synchronous shifts around the late 1920s, the middle 1940s, the late 1970s, and the middle 1990s, consistent with the shifting periods of summer precipitation over three regions of eastern China, suggesting that PDO, AO, and arctic sea ice have played a synergetic role in the interdecadal variation of summer rainfall over eastern China during the past 100 years.

At interdecadal time scales, PDO in summer is significantly negatively correlated with summer rainfall in North China. The interdecadal variability of PDO may generate interdecadal wave trains of Pacific-Japan (PJ) interconnection pattern at 500-hPa geopotential height and atmospheric circulation in the 850-hPa wind field, which is similar to that affecting the interdecadal variation of summer rainfall over North China. Consequently, summer rainfall over North China showed interdecadal variation. The AO in wintertime is significantly positively correlated with summer rainfall over the Yangtze River valley. When AO enters its positive interdecadal phase from winter to spring, it causes an increase of precipitation and a decrease in temperature over the southern Eurasian continent. The cold and wet state over the southern Eurasian continent persists from winter to summer because of the memory of soil humidity. It causes the weakening of sea-land contrast in summer. As a result, the East Asian summer monsoon experiences interdecadal weakening. Correspondingly, the rainfall over the Yangtze River valley shows interdecadal increase. Spring Arctic sea ice is significantly negatively correlated with summer rainfall over South China. Interdecadal variation in Arctic sea ice can generate interdecadal wave trains of the Eurasia-South China interconnection pattern associated with the anomalous propagation of stationary Rossby waves at 500-hPa geopotential height, which affects the interdecadal variation in rainfall over South China.

Keywords East China, Summer precipitation, Interdecadal variation

1 引言

气候的变化具有多时间尺度特征, 年代际气候变化介于长期气候变化趋势和年际气候变化之间, 并且为年际气候变化提供的气候背景。例如华北地区降水在 1965 年左右发生了一次跃变, 降水由明显偏多的时期进入明显偏少的时期; 并且在 1970 年代末又发生了一次跃变, 降水再次减少, 华北干旱化持续并加剧, 使得华北地区水资源日益缺乏(严中伟等, 1990; 严中伟, 1992; 黄荣辉等, 1999; 琚建华等, 2006; Tu et al., 2010)。由于认识到年代际气候变化的重要性, 人们对气候年代际变化特征及其成因开展了大量的研究。结果表明, 20 世纪 70 年代后期到 80 年代初期全球气候出现了一次年代际跃变。气候跃变发生后, 亚洲季风环流发生年代际减弱(Wang, 2001); 冬季西伯利亚冷高压减弱, 500 hPa 高度上北半球中高纬度的西风环流更平直(Yu and Lin, 2002)。北大西洋涛动(NAO)以及北太平洋涛动(NPO)等大气环流的年代际变化与此次气候跃变之间也具有密切的联系(Li and Li, 2000)。此外, 中国的降水和气温也具有明显的

年代际变化特征(Gong and Ho, 2002; 吕俊梅等, 2004; 顾薇等, 2005)。中国夏季降水在 1970 年代末期发生了较为明显的年代际转折, 在此之前, 我国东部降水表现为南北涝中间旱(+-+)的特征; 此后东部降水呈现中间涝南北旱(-+-)的三极型分布。1990 年代初期, 我国东部降水又转变成南涝北旱的偶极型分布(张庆云等, 2007; 黄荣辉等, 2011; Ding et al., 2008; 马音等, 2012)。

关于中国气候发生年代际变化的原因, Ju et al. (2005) 认为北极涛动(AO)在 1970 年代末期进入正指数位相使得东亚夏季风环流发生年代际减弱, 这是导致中国东部夏季降水型发生年代际变化的主要原因。黄荣辉等(2006)指出发生在 1970 年代中后期的东亚气候的年代际变化可能是由于热带中东太平洋发生了“类似于 El Niño 型”分布的年代际海温距平异常, 这不仅引起东亚和西太平洋上空太平洋-日本(PJ)型遥相关环流的年代际变化, 还使得东亚夏季风变弱。值得注意的是, 1976/77 年以后热带印度洋自身海温变率增强, 其上空激发出的大气异常通过波动传播到东亚地区, 使得热带印度洋对东亚夏季气候的影响明显

增强 (Huang et al., 2010)。Ding et al. (2009) 认为 1977 年以后青藏高原冬春积雪增加, 与此同时赤道中东太平洋增暖, 导致东亚夏季风减弱, 中国雨带位置偏南。还有研究发现华北降水的年代际异常与太平洋年代际振荡 (PDO) 有显著关系 (杨修群等, 2005; 张庆云等, 2007)。

我国气象观测站的数据大多起始于 1951 年, 因此研究中国气候年代际变化的资料长度通常仅限于五十年左右。近来也有一些研究使用一百多年的资料来分析中国气候的年代际变化, 王绍武等 (2002) 利用重建的 1880 年以来中国东部 35 个站的四季降水量资料, 研究了 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的十年际变化特征。Ding et al. (2008, 2009) 用同样的资料研究了一百多年来中国东部不同地区华北、长江淮河流域以及华南夏季降水的年代变化特征及其与东亚夏季风的关系。陈隆勋等 (2004) 研究了近 80 年来中国气温和降水的年代际变化特征。我们过去的研究表明近一百多年中国东部不同区域降水发生年代际跃变的时期有所不同 (吕俊梅等, 2009)。尽管人们对近百年中国气候年代际变化特征有了初步的认识, 但是我们仍然不清楚在降水发生跃变的不同时期中国东部不同区域夏季降水的分布型有何变化? 过去大量的研究仅仅考虑单个因子, 例如 PDO (杨修群等, 2005) 或者 AO (Ju et al., 2005) 对中国夏季降水年代际变化的作用, 有必要探讨多个因子的共同作用; 进而研究华北、长江流域和华南这三个地区降水发生年代际变化的物理原因。本文将针对这些问题进行研究, 期望能够加深人们对近百年中国夏季降水年代际变化特征及其成因的认识和理解。

2 资料和方法

本文使用王绍武等人根据降水观测记录和气候历史资料重建的 1880~2002 年中国东部 35 个站的四季降水量序列 (王绍武等, 2000)、新中国成立前中国气象台站月降水观测资料 (吕俊梅等, 2009) 以及中国 160 站 1951~2010 年的月降水资料, 将这三套资料按相同站点在时间上连接起来得到 1900~2010 年的长时间降水资料。华北地区的代表台站选取太原、北京、天津、济南、青岛、西安、郑州、徐州、呼和浩特及朝阳; 其中天津和青岛站的降水资料在过去一百多年间无缺测, 但是没有包

括在王绍武重建的 35 站中。长江流域的代表台站选取信阳、南京、重庆、宜昌、汉口、九江、上海、长沙、温州。华南的代表台站选取贵阳、吉安、桂林、福州、南宁、广州、汕头。此外, 我们用到 1961~2010 年的 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 哈德莱中心 1900~2010 年的海温海冰资料以及 Chen et al. (2002) 根据器测资料重建的全球陆地降水资料 (PREC-L)。PDO 指数 (Mantua et al., 1997) 和 AO 指数 (Thompson and Wallace, 1998) 可以从网站上下载, 时间同样取 1900~2010 年。

离散功率谱分析被用于提取夏季降水的显著变化周期; 滑动 t 检验被用于检测过去一百多年华北、长江流域以及华南夏季降水发生跃变的时期。为了分析年代际时间尺度上降水年代际变化的特征以及原因, 我们将降水指数、PDO 指数、AO 指数、北极海冰指数以及大气环流场进行 9 年滑动平均处理, 再来进行相关分析以及典型相关分析。由于滤波后有效自由度降低, 本文使用蒙特卡罗方法计算得到 9 年和 27 年滑动平均滤波以后相关系数显著性检验的临界值。此外, 我们还计算了 300 hPa 等压面上的 E-P 通量以便诊断静止 Rossby 波的异常传播特征, 计算公式参见吕俊梅等 (2006)。

3 近百年中国东部夏季降水年代际变化观测事实

首先根据所选取的华北、长江流域以及华南的代表测站构造这三个区域 1900~2010 年的夏季降水指数, 如图 1a 所示。然后对这三个降水指数做离散功率谱分析, 结果表明, 华北和华南夏季降水最显著的变化周期分别是 13 a 和 27 a, 属于年代际时间尺度; 而长江流域夏季降水的最显著周期是 2.2 a, 属于年际时间尺度。总的来说, 东部三个地区的夏季降水在年代际时间尺度上具有 40 a、27 a 以及 9 a 的显著周期; 而在年际时间尺度上具有 2 a 和 4 a 的显著变化周期 (图 1b)。

为了获得三个地区夏季降水发生跃变的时期, 我们分别对华北、长江流域和华南的夏季降水指数做滑动 t 检验, 结果如图 2 所示。1900~2010 年华北夏季降水分别在 1912 年、1921 年、1938 年、1947 年、1964 年和 1979 年发生了跃变。长江流域的夏季降水则在 1922 年、1948 年、1958 年、1979 年、1992 年以及 2001 年发生了跃变。华南夏季降水发生跃变的时期分别为 1911 年、1924 年、1967

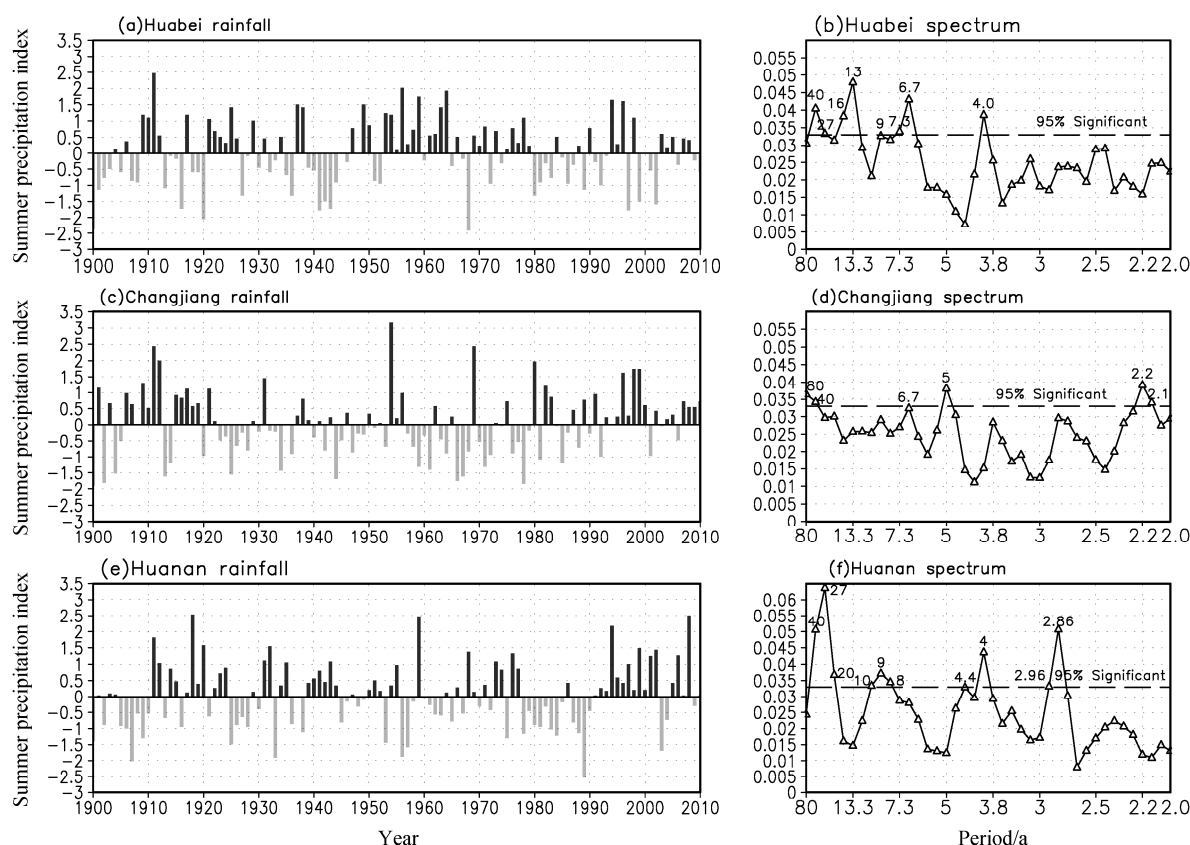


图1 1900~2010年中国东部 (a, b) 华北、(c, d) 长江流域以及 (e, f) 华南地区夏季降水指数 (左) 及其离散功率谱分析 (右)

Fig. 1 Summer precipitation indices over (a, b) North China, (c, d) the Yangtze River valley, and (e, f) South China (left) and their spectrum analysis (right) from year 1900 to 2010

年、1978 年和 1991 年。可见, 三个区域夏季降水发生跃变的时期各有不同, 但是也大概同时在 1910 年代初期、1920 年代初期、1940 年代中期、1960 年代中期、1970 年代末期以及 1990 年代初期发生跃变。其中, 1920 年代初期、1960 年代中期、1970 年代末期的跃变已经被过去很多研究所证实 (Yamamoto et al., 1986; Fu and Fletcher, 1988; 严中伟, 1992; Wang et al., 2004; 吕俊梅等, 2009), 最近一次发生于 1990 年代初期的跃变也在 Ding et al. (2008) 以及黄荣辉等 (2011) 的研究中被发现。

根据中国东部三个地区夏季降水发生跃变的不同时期, 我们将其中任何一个地区降水发生跃变的时间作为一个节点划分时间段, 这样可以将 1900~2010 年划分为 10 个时期, 再根据每个时期平均的各个台站的降水距平百分率来画不同降水跃变时期中国东部夏季降水距平百分率分布图 (图 3)。如图 3 所示, 过去一百多年中仅有三个时期, 亦即 1900~1911 年、1968~1978 年、1979~1992

年中国东部夏季降水表现为“+ - +”或者“+ - -”的三极型分布特征, 其余七个时期降水均呈现南正北负或者南负北正的偶极型分布。值得注意的是 1912~1923 年降水的异常型为“+ - +”, 紧接下来的时期 1924~1938 年降水转变为完全相反的“- + -”异常型。类似地, 1939~1947 年降水异常型为“- - +”, 紧接着 1948~1958 年出现完全相反的“- + -”的降水异常型。对于三极型降水异常型, 分别在 1968~1978 年以及 1979~1992 年这两个相邻的时期出现了“- + -”向“- - -”的反向变化。而 1993~2001 年以及 2002~2010 年降水连续表现出“- + -”的分布特征, 2002 年以后长江流域的降水稍微减少, 主要的多雨带从以前一时期的长江流域北移到淮河流域, 但是“- + -”的分布特征仍然维持。此外, 我们还注意到无论是三极型向偶极型降水转变, 还是偶极型向三极型降水转变, 最先的变化均发生于华南地区。例如 1900~1911 年以及 1912~1923 年这两个时期, 因为华南的降水由偏少变为偏

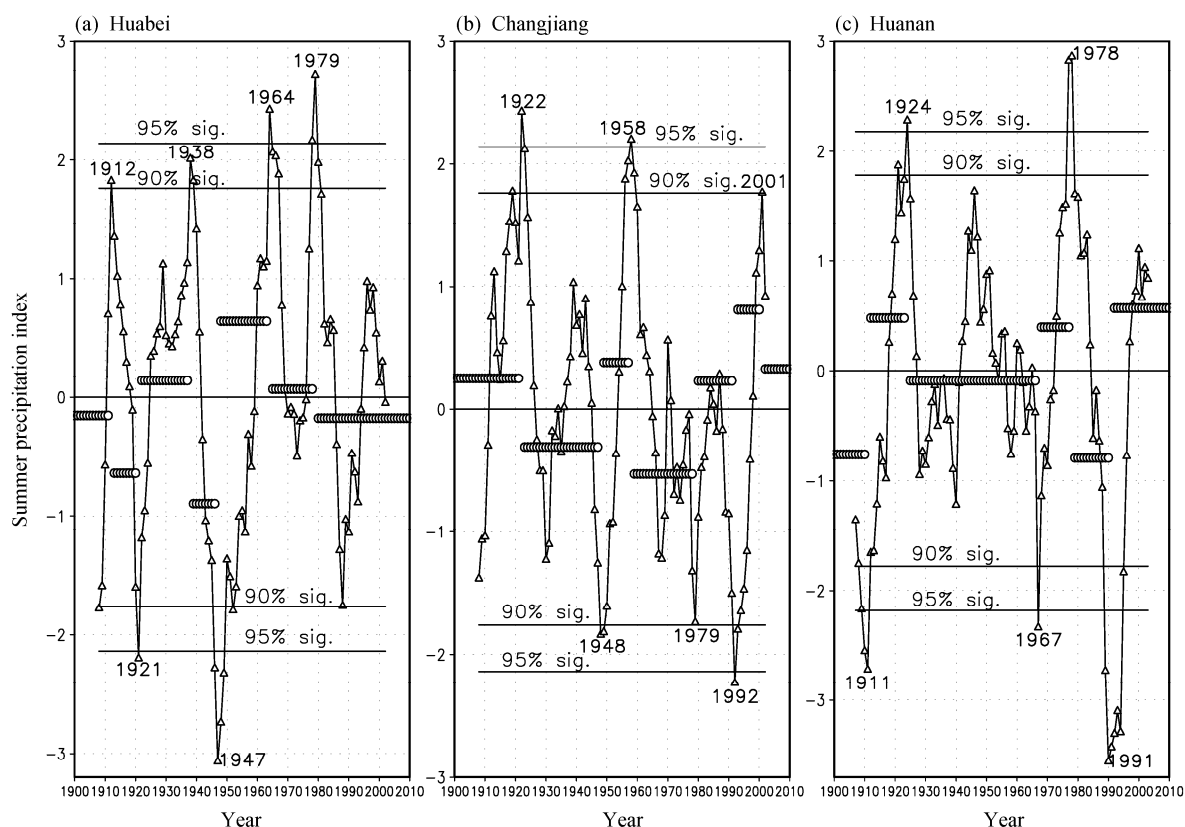


图2 (a) 华北、(b) 长江流域、(c) 华南夏季降水指数的滑动 t 检验, 图中圆圈表示各个跃变时期降水指数的平均值

Fig. 2 Sliding t -test of summer precipitation indices in (a) North China, (b) the Yangtze River valley, and (c) South China. Open circles denote the averages of precipitation indices in every shifting period

多, 降水的分布型也相应地由三极型变为了偶极型。类似的还有 1959~1967 年以及 1968~1978 年这两个时期, 当华南降水由偏少变为偏多, 降水分布型由偶极型变为三极型。

总之, 在过去一百多年间我国东部夏季降水的年代际异常型主要是以偶极型分布为主, 这与黄荣辉等人 (2011) 选用 1958~2000 年降水资料分析表明我国降水年代际变化的第一模态为三极型分布不同。不过黄荣辉等人也指出 1993 年以后偶极型模态的作用增强, 这与我们得到的结论是一致的。此外, 无论降水出现偶极型或是三极型异常, 两个相邻时期降水分布型发生完全相反的转变的可能性比较大 (60%)。这为我们进行中国东部降水型的年代际变化预测提供了新的思路。

4 中国东部夏季降水年代际变化的物理原因

过去在研究中国降水发生年代际变化的原因时发现, 1970 年代后期以来 AO 进入正指数位相、热带太平洋和印度洋海温上升、青藏高原冬春积雪

增加导致东亚夏季风年代际减弱, 从而中国降水也出现了华北和华南降水减少, 相反长江流域降水增多的年代际变化 (Ju et al., 2005; Ding et al., 2009; 黄荣辉等, 2006)。这些研究主要从东亚夏季风强度变化的角度来统一地解释中国东部不同地区降水发生年代际变化的原因。但是正如本文前面所指出的, 中国东部不同地区夏季降水发生年代际跃变的时期并不完全相同。因此有必要分别研究华北、长江流域以及华南这三个地区降水发生年代际变化的原因。

根据 Wu et al. (2009) 的研究, 春季北极海冰 EOF2 模态表现为巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、白令海以及巴芬湾海冰偏多, 而格陵兰海和北极区海冰偏少。海冰的这种异常型态能在夏季激发出沿欧亚大陆北部向华南传播的波列, 对华南降水有着重要影响作用。我们将春季北极海冰 EOF2 模态对应的时间系数定义为北极海冰指数, 以便研究在年代际时间尺度上春季北极海冰异常对降水的作用。因此, 本文除了使用 PDO 和 AO 这两个我们已经知道的影响中国降水年代际变化的因子来进行分

析，还使用了北极海冰。

表 1 给出在年代际时间尺度上中国东部各区夏季降水与 PDO、AO 以及北极海冰指数的相关系数，其中 PDO 和 AO 指数的时间为 1900~2010 年。北极海冰资料虽然也有一百多年，但是根据过去的研究，北极海冰资料在 1960 年以后较为可信，所以这里我们选取 1961~2010 年的北极海冰指数来进行计算。可见，经过 9 年和 27 年滑动平均滤波后，夏季的 PDO 与华北夏季降水存在显著负相关，冬半年（Dec-Jan-Feb-Mar-Apr, DJFMA）的 AO 与长江流域的夏季降水显著正相关，春季的北极海冰与华南的夏季降水显著负相关。此外，经过 27 年滑动滤波以后，冬半年的 AO 与华北夏季降水也存在显著负相关关系。

我们已经知道在年代际时间尺度上，PDO 指数与华北夏季降水指数具有较好的负相关关系。事实上，根据 PDO 指数与华北夏季降水指数 9 年滑动平均曲线可见，在过去一百多年间，1925~1945 年以及 1977~2010 年当 PDO 处于暖位相时，华北降水年代际偏少，而 1946~1976 年当 PDO 处于冷位相时，华北降水年代际偏多。并且华北夏季降水发生年代转折的时间和 PDO 冷暖位相的转折时间具有较好的一致性（图略）。根据 PDO 指数、AO 指数以及北极海冰指数的滑动 *t* 检验可知（图略），这三个因子均在 1920 年代末期、1940 年代中期、1970 年代末期以及 1990 年代中期左右发生了跃变，这些时期与前面我们给出的中国东部三个区域夏季降水发生年代际转折的时期一致，暗示着过去一百年来夏季的 PDO、冬季的 AO 以及春季的北极海冰的协同作用在某种程度上影响着中国东部夏季降水的年代变化。

下面分别讨论 PDO、AO 和北极海冰影响中国东部三个地区夏季降水的物理机制和过程。在此

部分所有资料均取 1961~2010 年，首先对资料进行 9 年滑动平均处理，然后再进行其他的分析和计算。图 4a 给出了华北夏季降水指数与同期 850 hPa 风场的相关。很明显，导致华北降水年代际偏多的主要大气环流异常型为蒙古国附近有一个异常气旋性环流中心，台湾以东的洋面上西太平洋副热带高压异常偏强偏西。同时东亚夏季风异常偏强，起源于印度洋和南海的西南季风与副热带高压外围的西南气流汇合并控制我国东部地区至华北。由于夏季的 PDO 与夏季华北降水显著负相关，为了便于比较，我们将夏季的 PDO 指数乘于-1，再与同期的 850 hPa 风场求相关，结果如图 4b 所示。可见 PDO 的年代际变化所激发出来的大气环流异常型与导致华北降水年代际异常的环流形势非常类似，表明 PDO 是导致华北夏季降水年代际变化的重要原因。

为了更进一步揭示 PDO 影响华北夏季降水年代际变化的物理机制，我们将经过 9 年滑动平均处理的夏季 500 hPa 位势高度场与同期太平洋海温场进行典型相关分析，结果见图 5。当西北太平洋中高纬地区海温偏冷，而赤道中东太平洋海温偏暖，也即太平洋呈现 PDO 暖位相的分布型时，500 hPa 位势高度场表现为负的太平洋-日本（PJ）型遥相关。也即暖池附近至北美西部出现“+ - + - +”的负 PJ 型年代际遥相关波列。过去的研究表明（黄荣辉和孙凤英，1994），负的 PJ 型遥相关波列使得长江中下游至日本地区降水偏多，华北降水偏少。与此相反，当 PDO 处于冷的年代际位相时期，500 hPa 位势高度场中激发出正的 PJ 型年代际遥相关波列，此时长江中下游地区至日本出现干旱，华北降水偏多。因此，1976 年左右 PDO 从冷的年代际位相进入暖的年代际位相是导致太平洋-日本地区 PJ 型年代际遥相关波列由正位相转变为负位相，从

表 1 中国东部各区夏季（Jun-Jul-Aug, JJA）降水量与夏季 PDO 指数、冬半年（DJFMA）AO 指数以及春季（Mar-Apr-May, MAM）北极海冰指数在年代际时间尺度上的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between summer (Jun-Jul-Aug, JJA) rainfall over eastern China and JJA Pacific Decadal Oscillation (PDO) index, wintertime (Dec-Jan-Feb-Mar-Apr, DJFMA) Arctic Oscillation (AO) index, and spring (Mar-Apr-May, MAM) Arctic sea ice index at interdecadal time scale

	9 年滑动平均滤波后相关系数			27 年滑动平均滤波后相关系数		
	华北降水量	长江降水量	华南降水量	华北降水量	长江降水量	华南降水量
夏季 PDO 指数	-0.55**	0.27	-0.12	-0.90***	0.61	0.08
冬半年 AO 指数	-0.24	0.58***	0.06	-0.68*	0.79**	0.32
春季海冰指数	-0.47	-0.32	-0.93**	0.27	-0.83	-0.94**

*通过 0.10 显著性检验，**通过 0.05 显著性检验，***通过 0.01 显著性检验

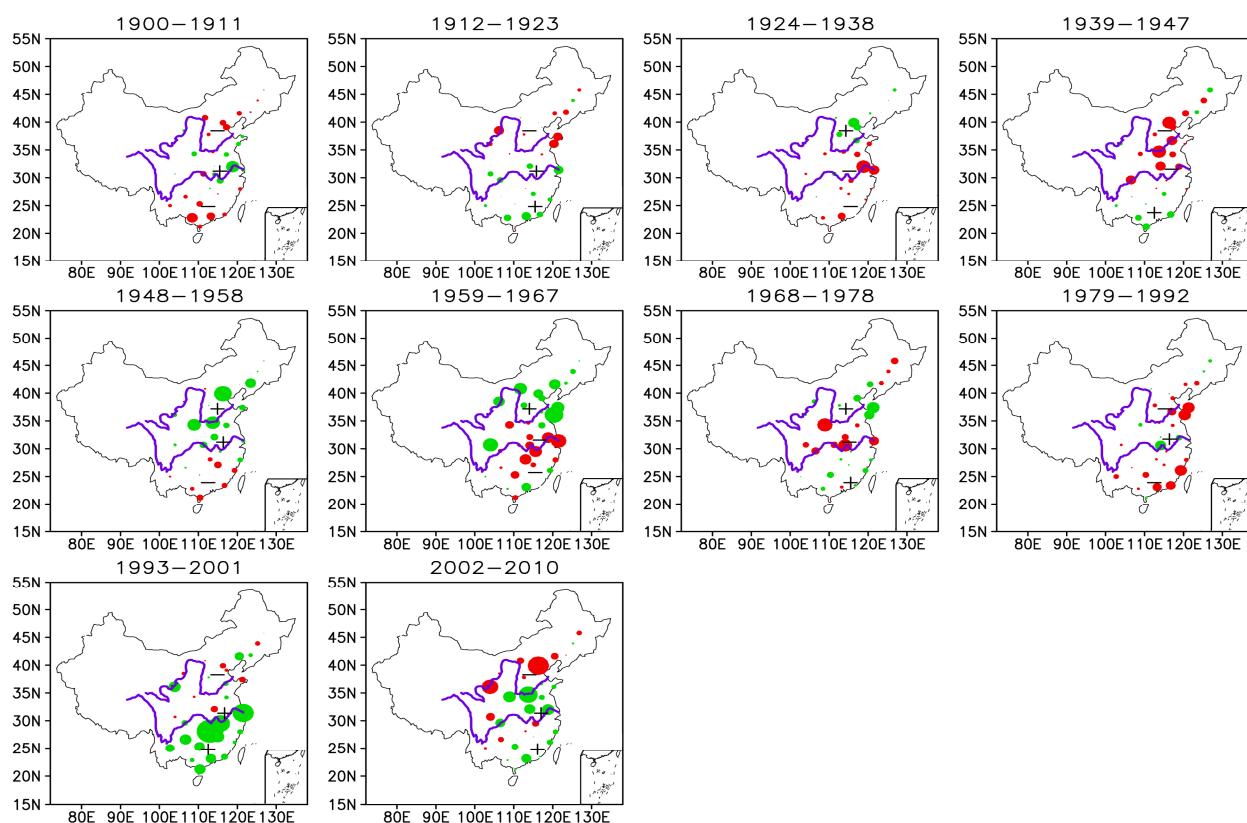


图3 1900~2010年不同降水跃变时期中国东部夏季降水距平百分率分布

Fig. 3 Distribution of summer rainfall percentage departures over eastern China in different shifting periods from year 1900 to 2010

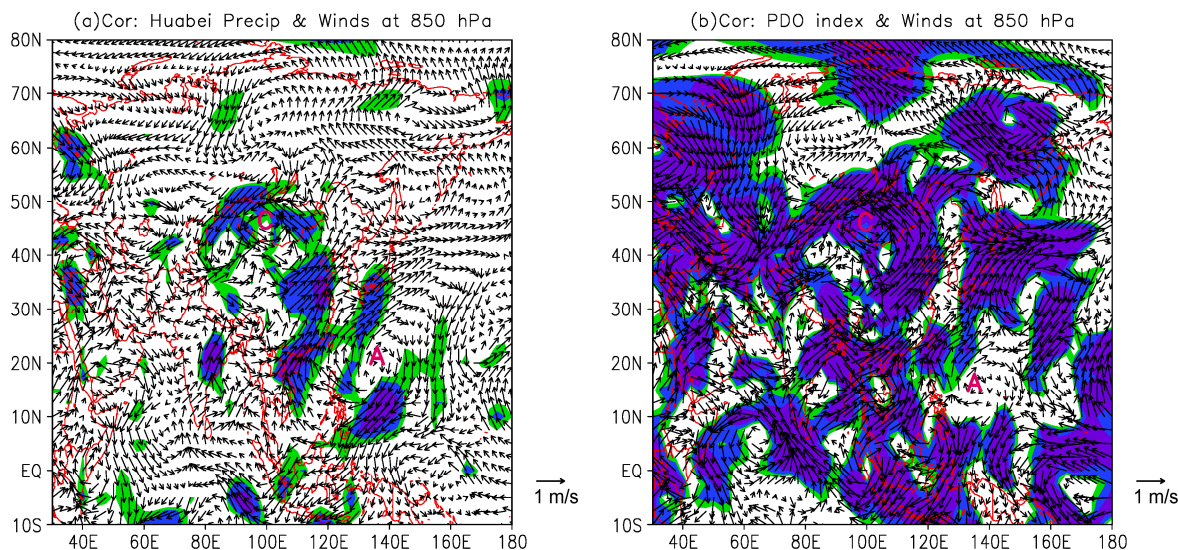


图4 华北 (a) 夏季降水指数以及 (b) 夏季 PDO 指数与夏季 850 hPa 风场的相关。绿色、蓝色和紫色阴影表示全风速通过 0.10、0.05 和 0.01 显著性检验, 字母 “C” 表示气旋中心, 字母 “A” 表示反气旋中心, 由于 PDO 指数与降水为负相关关系, 为了便于比较, (b) 中的矢量乘以 -1

Fig. 4 The correlation of summer wind field at 850 hPa with (a) summer rainfall over North China and (b) summer PDO index, respectively. Areas with the norms of wind vectors exceeding the 90%, 95%, and 99% confidence levels are shaded in green, blue, and purple, respectively. Letter “A” (“C”) denotes anticyclone (cyclone). The vectors in (b) were multiplied by -1 for convenient comparison because of the negative correlation between the PDO index and rainfall

而导致华北夏季降水也相应地发生年代际跃变的主要原因。

年代际时间尺度上长江流域夏季降水指数与同期 850 hPa 风场的相关如图 6a 所示。蒙古国附近

有一异常反气旋中心, 该反气旋引导中高纬的异常偏北气流南下, 控制我国东北、华北和中部地区, 暗示着东亚夏季风减弱。另外长江口附近有一个异常气旋中心, 与之相应的气旋性切变导致长江流域夏季降水年代际偏多。图 6b 给出冬半年 (DJFMA) AO 指数与夏季 850 hPa 风场的相关, 可见与冬半年 AO 的年代际变化相关的大气环流异常形势和导致长江流域夏季降水年代际偏多的环流形势十分相似, 表明冬半年 AO 的变化对长江流域夏季降水

的年代际变化有显著的作用。

然而, 有必要进一步分析冬半年 AO 通过何种途径影响夏季长江流域的降水。图 7 显示冬半年 AO 指数与同期降水及地表面气温的相关。当冬半年 AO 处于正位相的时候, 南支西风槽中的南支槽异常加深, 青藏高原和我国西南、华南的降水异常偏多, 中南半岛中部以及印度半岛南部的降水也偏多。与此同时中亚至青藏高原以及南亚东部、东南亚北部至我国西南地区地表面气温偏低。因此当

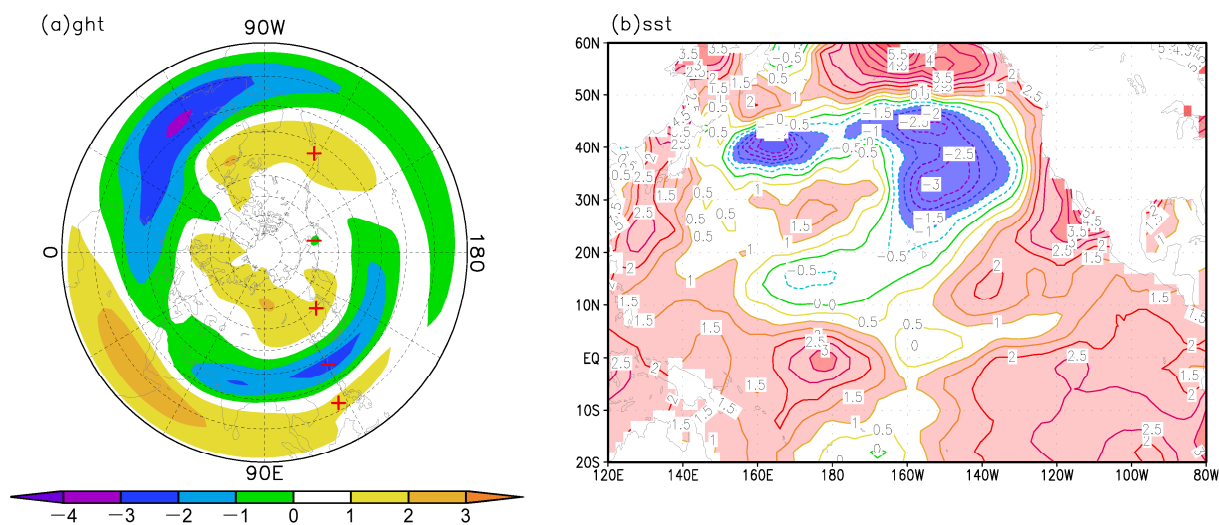


图 5 夏季 (a) 500 hPa 位势高度场与 (b) 太平洋海温场的典型相关分析

Fig. 5 Canonical correlation between (a) geopotential height at 500 hPa and (b) SST in Pacific in summer

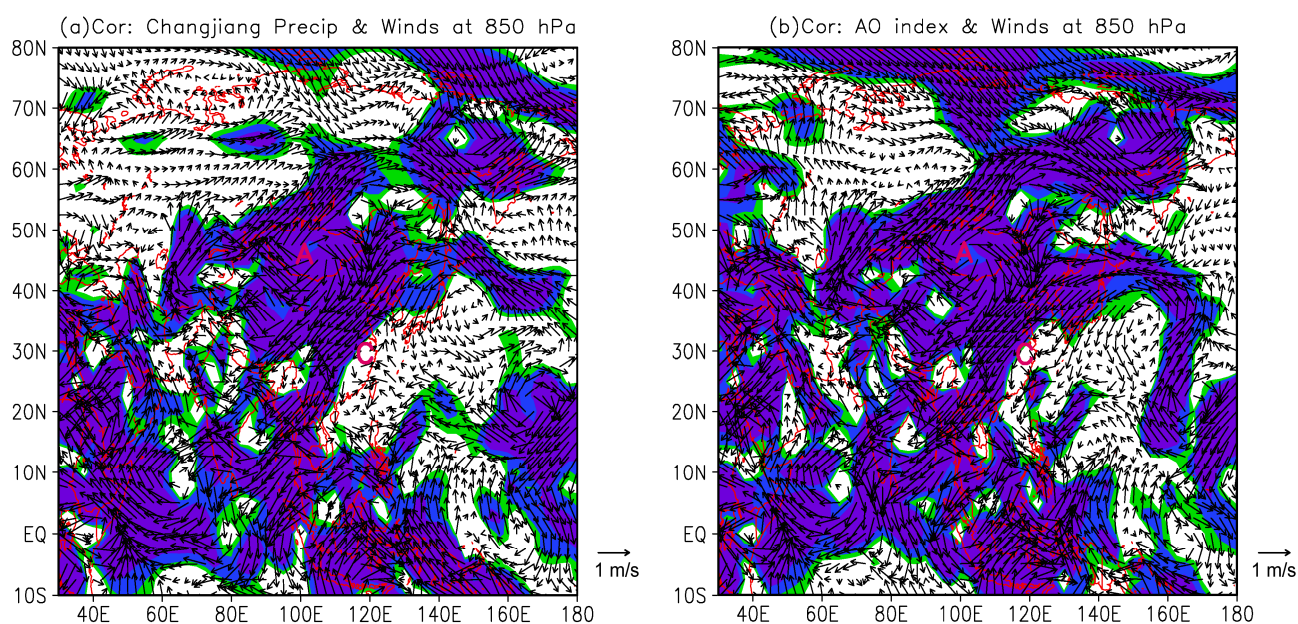


图 6 长江流域 (a) 夏季降水指数以及 (b) 冬半年 (DJFMA) AO 指数与夏季 850 hPa 风场的相关, 图中绿色、蓝色、紫色阴影表示全风速通过 0.10、0.05 和 0.01 显著性检验

Fig. 6 The correlation of summer wind field at 850 hPa with (a) summer rainfall over the Yangtze River valley and (b) wintertime (DJFMA) AO index, respectively. Areas with the norms of wind vectors exceeding the 90%, 95%, and 99% confidence levels are shaded in green, blue, and purple, respectively

AO 在 1970 年代末期进入正指数位相使得冬春季青藏高原至华南以及南亚东部至东南亚北部持续偏冷偏湿, 土壤湿度的记忆性使得下垫面湿冷的状况持续到夏季, 导致东亚夏季风爆发时海陆热力差较小, 东亚夏季风发生年代际减弱, 长江流域夏季降水年代际增多。

图 8a 显示年代际时间尺度上华南夏季降水指

数与同期 850 hPa 风场的相关。贝加尔湖以东地区存在一个异常的反气旋中心, 反气旋东南侧的东北气流控制我国东北到华北地区, 此外西太平洋副热带高压偏强, 位置偏东偏南, 副热带高压外围的西南气流控制我国东南沿海地区, 华南地区存在一个气旋性切变, 有利于华南降水偏多。在对流层中层(图 8b), 500 hPa 位势高度场上存在一个起源于巴

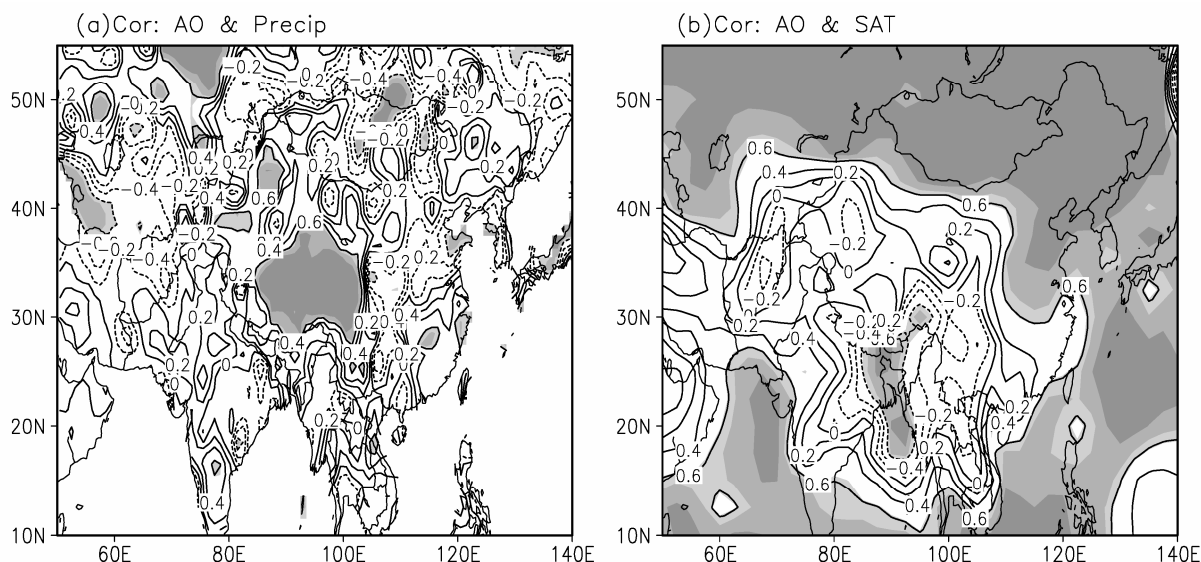


图 7 冬半年 (DJFMA) AO 指数与同期 (a) 降水以及 (b) 地表面气温的相关, 图中浅灰、中灰、暗灰阴影表示通过 0.10、0.05 和 0.01 显著性检验
Fig. 7 Correlation of wintertime (DJFMA) AO index with simultaneous (a) precipitation and (b) surface air temperature. Areas with the correlation exceeding the 90%, 95%, and 99% confidence levels are shaded in light, medium, and dark gray

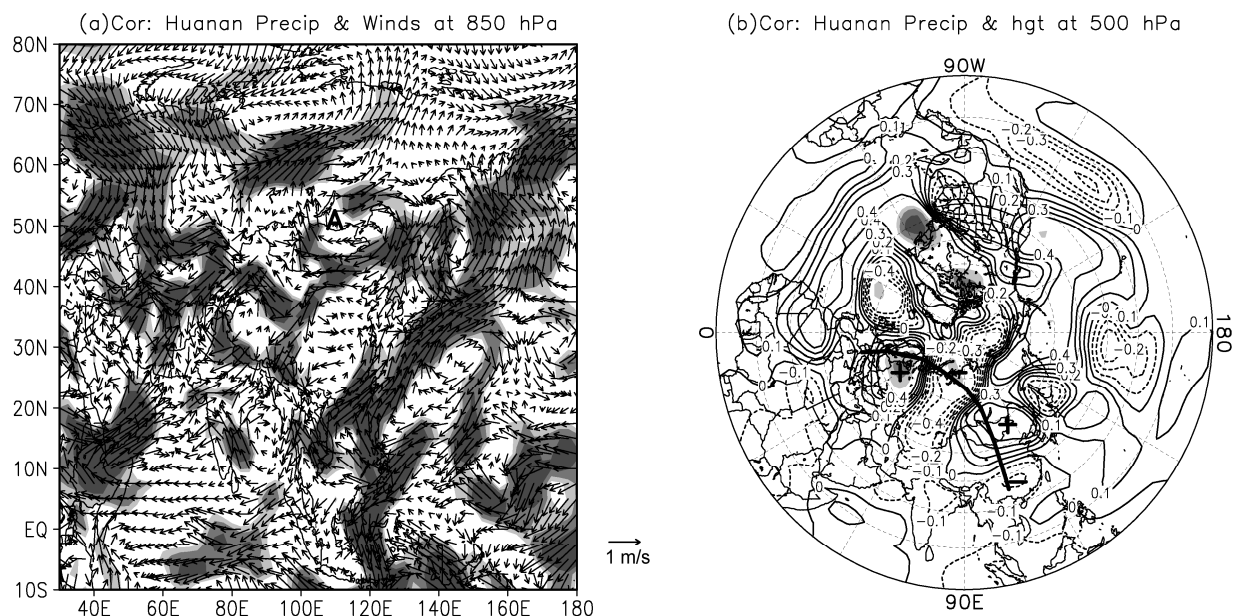


图 8 华南夏季降水指数与夏季 (a) 850 hPa 风场以及 (b) 500 hPa 位势高度场的相关, 图中浅灰、中灰、暗灰阴影表示全风速或者位势高度通过 0.10、0.05 和 0.01 显著性检验

Fig. 8 The correlation of summer rainfall over South China with summer (a) wind field at 850 hPa and (b) geopotential height at 500 hPa, respectively. Areas with the norms of wind vectors or geopotential height exceeding the 90%, 95%, and 99% confidence levels are shaded in light, medium, and dark gray, respectively

伦支海附近, 经过喀拉海、贝加尔湖以东到华南的“+ - + -”的年代际遥相关波列, 根据 Wu et al. (2009) 的研究这个遥相关波列可以影响华南降水。我们将这个遥相关波列称为欧亚—华南遥相关波列。因此, 上述对流层高低层的大气环流配置使得华南夏季降水年代际偏多。

前面我们已经提到过, 春季北极海冰指数与华南夏季降水在年代际时间尺度上存在显著的负相关关系。同样的, 为了便于与图 8 进行比较, 将经过 9 年滑动平均的春季北极海冰指数乘于 -1 再与夏季 850 hPa 风场以及 500 hPa 位势高度场求相关, 结果如图 9 所示。很清楚, 前期春季北极海冰的异常能够在 500 hPa 位势高度场上激发出与图 8b 几乎一样的沿欧亚大陆北部地区到华南地区的“+ - + -”的年代际欧亚—华南遥相关波列(图 9b)。而与春季北极海冰异常相关的 850 hPa 风场(图 9a)具有和图 8a 非常类似的特征, 唯一的差别是图 8a 中位于贝加尔湖以东地区的异常反气旋中心位置东南移至我国东北北部(图 9a)。因此, 春季北极海冰的异常对华南降水的年代际变化有着重要影响作用。

事实上, 从春季北极海冰指数以及华南夏季降水指数 9 年滑动平均时间序列的演变来看(图略), 1970 年代末北极海冰指数进入正位相时期, 相应地华南降水进入年代际偏少时期; 而 1992 年左右北极海冰指数由正变为负, 此时巴伦支海、喀拉海、拉普捷夫海、白令海以及巴芬湾海冰偏少, 而格陵兰海和北极区海冰偏多, 海冰的这种异常变化, 在欧亚大陆北部至华南地区激发出“+ - + -”的年代际欧亚—华南遥相关波列, 使得华南的夏季降水由年代际偏少变为偏多。

为了解释春季北极海冰异常导致夏季 500 hPa 位势高度场中欧亚—华南遥相关波列产生的机制。图 10 给出春季北极海冰指数与夏季 300 hPa 等压面上 E-P 通量以及 E-P 通量散度的相关。图中阴影表示 E-P 通量散度超过 0.10 以上的显著性检验的高相关区域, 字母“C”和“D”分别表示辐合和辐散。可见, 春季北极海冰异常延滞影响夏季北半球静止 Rossby 波的传播, 春季巴伦支海、喀拉海的海冰偏多有利于夏季起源于巴伦支海附近的静止 Rossby 波经欧亚大陆北部地区向华南地区传播, 静止 Rossby 波的能量频散可以激发出欧亚大陆北部至华南地区的大气遥相关波列, 使得夏季华南降水异

常偏少。因此, 春季北极海冰通过激发出异常的静止 Rossby 波向华南传播从而影响华南夏季降水。

5 结论和讨论

近一百多年来中国东部华北、长江流域和华南的夏季降水同时在 1910 年代初期、1920 年代初期、1940 年代中期、1960 年代中期、1970 年代末期以及 1990 年代初期发生年代际转折, 然而每个地区的夏季降水也有各自不同的年代际转折时期。根据不同年代际时期三个地区夏季降水的分布型来看, 过去一百多年中国东部夏季降水主要以偶极型的分布特征为主。然而无论是三极型分布还是偶极型分布, 在两个相邻的年代际时期, 降水分布型转变为完全相反的分布型的概率较高(60%)。需要注意的是, 夏季的 PDO、冬半年的 AO、春季的北极海冰同时在 1920 年代末期、1940 年代中期、1970 年代末期以及 1990 年代中期左右发生了跃变。这些时期与中国东部三个不同地区夏季降水同时发生年代际转折的时期相吻合, 表明这三个因子在某种程度上对中国东部夏季降水的年代际变化具有协同一致的作用。

研究华北、长江流域以及华南夏季降水发生年代际变化的原因发现, 在年代际时间尺度上, 夏季的 PDO 与夏季华北降水具有显著负相关关系; 冬半年的 AO 与长江流域的夏季降水显著正相关; 春季的北极海冰指数与华南夏季降水显著负相关。进一步分析 PDO、AO 和北极海冰影响中国东部不同地区夏季降水年代际变化的过程和机制, 得出以下结论:

(1) 夏季与 PDO 相联系的太平洋海表面温度的年代际异常不仅能够在对流层下层的 850 hPa 风场上激发出导致华北降水年代际变化的大气环流异常型, 也能够 在 500 hPa 位势高度场上激发出年代际的 PJ 型遥相关波列, 使得华北降水发生年代际异常变化。

(2) 冬半年当 AO 处于年代际的正位相时期, 此时南支西风中的南支槽异常活跃加深, 使得冬季到春季青藏高原至华南以及南亚东北部至东南亚北部地区降水偏多, 同时这些地区的地表面气温偏低。大范围的土壤湿度增加可以增强土壤的记忆性, 使土壤将这种冷湿的信号持续记忆到夏季, 从而夏季亚洲大陆南部偏冷, 然而印度洋和西太平洋偏暖。因此, 海陆热力差减小, 导致东亚夏季风发

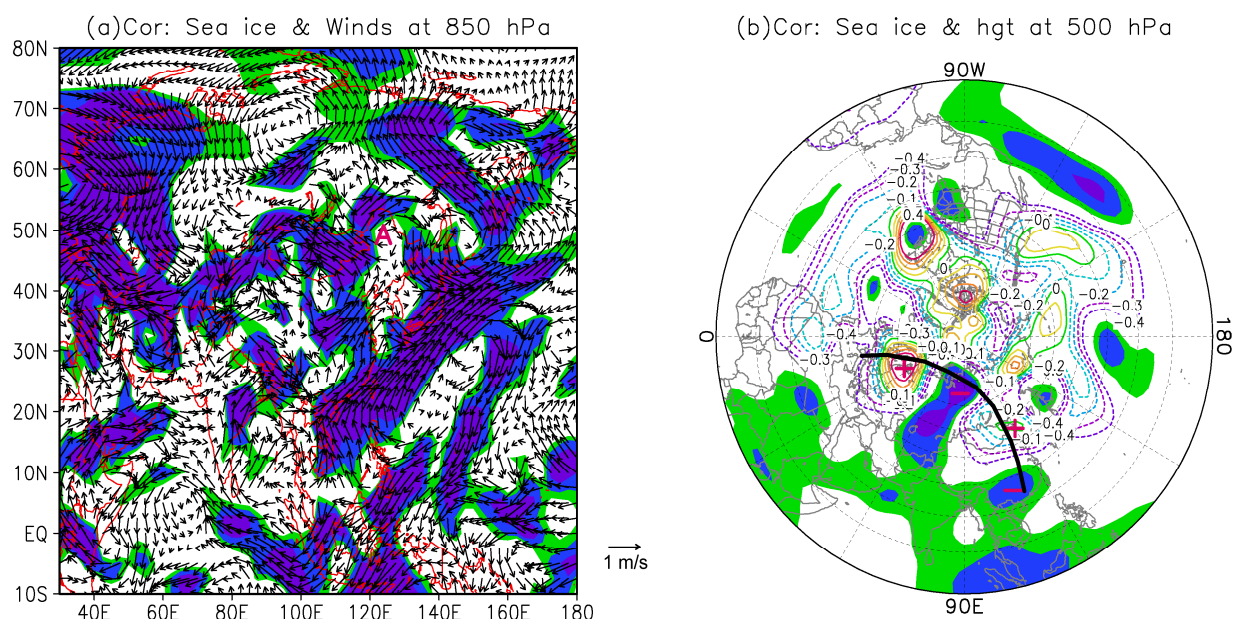


图9 春季负的北极海冰指数与夏季 850 hPa 风场 (a) 以及 500 hPa 位势高度场 (b) 的相关, 图中绿色、蓝色和紫色阴影表示全风速或位势高度通过 0.10、0.05 和 0.01 显著性检验

Fig. 9 Correlation of negative spring Arctic sea ice index with (a) summer wind field at 850 hPa and (b) geopotential height at 500 hPa, respectively. Areas with the norms of wind vectors or geopotential height exceeding the 90%, 95%, and 99% confidence levels are shaded in green, blue, and purple, respectively

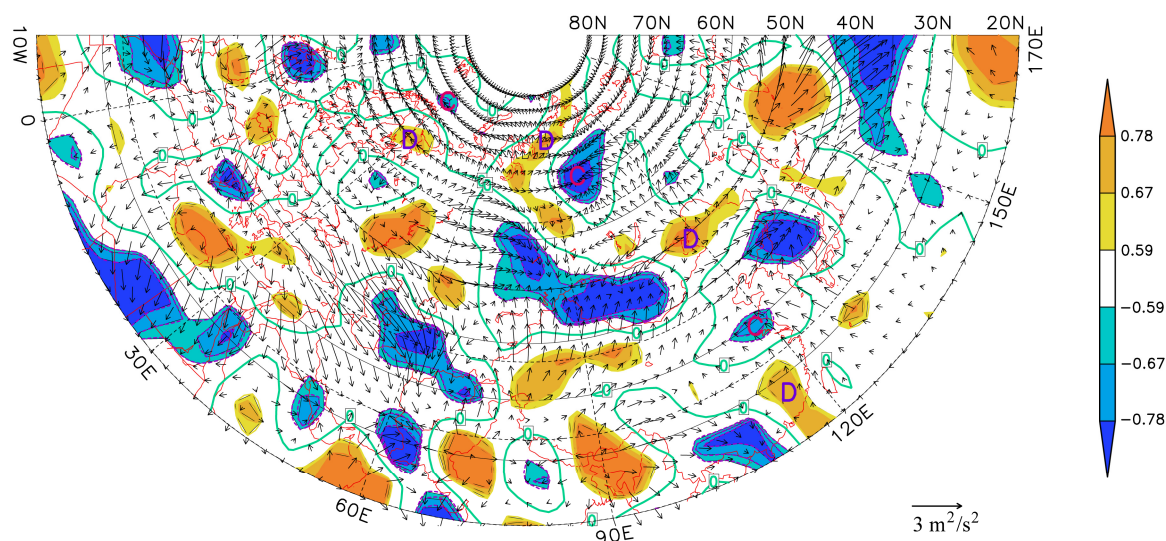


图10 春季北极海冰指数与夏季 300 hPa 等压面上 Eliassen-Palm (E-P) 通量的回归 (矢量, 单位: m^2/s^2) 以及春季北极海冰指数与 EP 通量散度的相关 (等值线和阴影, 阴影为通过显著性检验的相关区), 图中浅、中、深蓝 (黄) 阴影表示相关系数通过 0.10、0.05 和 0.01 显著性检验, 字母 “C” 表示辐合 (蓝色), 字母 “D” 表示辐散 (黄色)

Fig. 10 Regression of spring Arctic sea ice index with summer Eliassen-Palm (E-P) flux at 300 hPa (vectors, unit: m^2/s^2) and correlation of spring Arctic sea ice index with summer divergence of EP flux at 300 hPa (contour and shading). Areas with the correlation coefficient exceeding the 90%, 95%, and 99% confidence levels are shaded in light, medium, dark blue (yellow). Letter “C”: convergence (blue); letter “D”: divergence (yellow)

生年代际的减弱, 相应地, 长江流域的夏季降水年代际增多。当冬半年 AO 进入年代际负位相时期时, 情形正好相反。

(3) 春季北极海冰的年代际变化同样能在对流层低层的 850 hPa 风场以及对流层中层的 500 hPa

位势高度场上激发出导致华南夏季降水年代际变化的大气环流形势。春季北极海冰影响夏季华南降水的物理过程是, 春季巴伦支海和喀拉海附近的北极海冰异常偏多使得夏季北半球高纬起源于巴伦支海附近的静止 Rossby 波经过欧亚大陆北部和东

亚向华南传播, Rossby 波的能量频散能够激发出欧亚—华南型年代际遥相关波列, 从而影响华南夏季降水的年代际变化。

总之, 中国东部华北、长江流域和华南的夏季降水发生年代际变化的原因各不相同, 但是三个不同影响因子的协同作用也导致了我国东部三个地区的夏季降水同时发生了年代际转折。因此, 我们应该加强对夏季 PDO、冬半年 AO 以及春季北极海冰年代际变化转折时期的监测和预测研究, 以提高我们对我国东部不同地区夏季降水年代际变化的预测能力。

参考文献 (References)

- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. 气象学报, 62 (5): 634–645. Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 634–645.
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. J. Hydrometeor., 3: 249–266.
- Ding Y H, 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]. Int. J. Climatol., 28: 1139–1161.
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes [J]. Int. J. Climatol., 29: 1926–1944.
- Fu C B, Fletcher J. 1988. Large signals of climatic variation over the ocean in the Asian monsoon region [J]. Adv. Atmos. Sci., 5 (4): 389–404.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (10): 78–1–78–4, doi:10.1029/2001GL014523.
- 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.
- Huang G, Hu K M, Xie S P. 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970's: An atmospheric GCM study [J]. J. Climate, 23 (10): 5294–5304.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. 大气科学, 18 (2): 141–151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (2): 141–151.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465–476.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730–743.
- Ju J H, Lü J M, Cao J, et al. 2005. Possible impacts of the Arctic Oscillation on the interdecadal variation of summer monsoon rainfall in East Asia [J]. Adv. Atmos. Sci., 22 (1): 39–48.
- 据建华, 吕俊梅, 任菊章. 2006. 北极涛动年代际变化对华北地区干旱化的影响 [J]. 高原气象, 25 (1): 74–81. Ju Jianhua, Lü Junmei, Ren Juzhang. 2006. The effect of interdecadal variations of Arctic Oscillation on aridization in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (1): 74–81.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–471.
- Li C Y, Li G L. 2000. The NPO/NAO and Interdecadal climate variation in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 17 (4): 555–561.
- 吕俊梅, 任菊章, 据建华. 2004. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响 [J]. 热带气象学报, 20 (1): 73–80. Lü Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. 2004. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 20 (1): 73–80.
- 吕俊梅, 据建华, 江剑民. 2009. 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变 [J]. 大气科学, 33 (3): 524–536. Lü Junmei, Ju Jianhua, Jiang Jianmin. 2009. Interdecadal regime shifts of regional precipitation over eastern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 524–536.
- 吕俊梅, 据建华, 张庆云, 等. 2006. 热带西太平洋海温距平与 Rossby 波传播对 1993 和 1994 年东亚夏季风异常影响的差异 [J]. 大气科学, 30 (5): 977–987. Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. 2006. Differences of influences of tropical western Pacific SST anomaly and Rossby wave propagation on East Asian monsoon in the summers of 1993 and 1994 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 977–987.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11050. 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.
- 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.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 25: 1297–1300.
- Tu K, Yan Z W, Dong W J. 2010. Climatic jumps in precipitation and extremes in drying North China during 1954–2006 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88 (1): 29–42.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 376–386.
- 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 1880's–1990's [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 60 (5): 637–639.
- Wang S W, Zhu J H, Cai J N. 2004. Interdecadal variability of temperature and precipitation in China since 1880 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (3): 307–313.
- 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 等. 2000. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率 [J]. *地理学报*, 55 (3): 281–293. Wang Shaowu, Gong Daoyi, Ye Jinlin, et al. 2000. Seasonal precipitation series of eastern China since 1880 and the variability [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 55 (3): 281–293.
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. 2009. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09501, doi:10.1029/2009GL037299.
- Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K, et al. 1986. An analysis of climatic jump [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64 (2): 273–281.
- 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.
- 严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 1990. 60 年代北半球夏季气候跃变——I 降水和温度变化 [J]. *中国科学 B 辑*, 41 (1): 97–103. Yan Zhongwei, Ji Jingjun, Ye Duzheng. 1990. The climatic jump of Northern Hemisphere summer during the 1960s: I The variation of precipitation and temperature [J]. *Sci. China (Series B)* (in Chinese), 41 (1): 97–103.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48 (4): 789–797. Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48 (4): 789–797.
- Yu S Q, Lin X C. 2002. Climatic jump from late 1970s to early 1980s and its effect [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 16 (1): 62–74.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. *大气科学*, 31: 1290–1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31: 1290–1300.