

顾伟宗, 陈丽娟, 左金清, 等. 2016. 多因子协同作用对 1992 年和 1998 年黄淮地区夏季降水异常的影响 [J]. 大气科学, 40 (4): 743–755. Gu Weizong, Chen Lijuan, Zuo Jinjing, et al. 2016. Combined effect of multiple factors on the summer rainfall anomalies over the Huanghe–Huaihe valley in 1992 and 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (4): 743–755, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15179.

多因子协同作用对 1992 年和 1998 年黄淮地区 夏季降水异常的影响

顾伟宗^{1,2} 陈丽娟^{2,3} 左金清² 李维京^{2,3}

1 山东省气候中心, 济南 250031

2 中国气象局国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 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, 南京 210044

摘 要 1991 年 5 月和 1997 年 4 月赤道中东太平洋均发生了 El Niño 事件, 但是 1992 年夏季黄淮地区降水异常偏少, 而 1998 年夏季却异常偏多。分析结果显示, 1992 年夏季西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 偏东, 中高纬阻塞高压偏弱, 黄淮地区降水异常偏少; 而 1998 年夏季, 副高偏西, 中高纬阻塞高压活动频繁, 黄淮地区降水异常偏多。对海温外强迫信号的诊断和数值模式试验显示: 当西太平洋对流活动偏弱时, 有利于副高西伸; 鄂霍茨克海及以东海温偏高时, 其上空的阻塞高压增强; 北大西洋中纬度地区海温偏高时, 有利于后期乌拉尔山高压脊明显增强。即在赤道中东太平洋发生 El Niño 事件的背景下, 西太平洋对流、鄂霍茨克海附近亲潮区域和北大西洋中纬度区域海温异常可能是导致黄淮区域 1992 年夏季和 1998 年夏季降水差异大的主要原因。该工作显示仅根据 El Niño 事件的发生时间和强度无法完全预测黄淮地区夏季降水变化, 需要综合考虑西太平洋对流、鄂霍茨克海附近海域和北大西洋中纬度区域海温异常对季风环流的影响, 从多因子协同作用的角度诊断和预测黄淮地区夏季降水异常趋势, 提高预测能力。

关键词 多因子 降水 副热带高压 阻塞高压 线性斜压模式

文章编号 1006-9895(2016)04-0743-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15179

Combined Effect of Multiple Factors on the Summer Rainfall Anomalies over the Huanghe–Huaihe Valley in 1992 and 1998

GU Weizong^{1,2}, CHEN Lijuan^{2,3}, ZUO Jinjing², and LI Weijing^{2,3}

1 Shandong Climate Center, Jinan 250031

2 Laboratory of Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract El Niño events developed in the equatorial central–eastern Pacific in the spring of both 1991 and 1997. The former began in May and the latter in April. However, a dry summer occurred over the Huanghe–Huaihe valley in 1992,

收稿日期 2014-11-03; 网络预出版日期 2015-10-26

作者简介 顾伟宗, 男, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事气候异常诊断和预测方法研究和应用, E-mail: longmarch529@163.com

通讯作者 陈丽娟, E-mail: chenlj@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430203, 国家自然科学基金项目 41275073, 公益性行业科研专项 GYHY201306033、GYHY201406022

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2013CB430203), National Natural Science Foundation of China (Grant 41275073), China Meteorological Administration Special Public Welfare Research Fund (Grants GYHY201306033, GYHY201406022)

but a wet summer prevailed in 1998. Also, the summer circulation anomalies showed different patterns over the Eurasia–Northwest Pacific region between 1992 and 1998. In the summer of 1992, the Northwest Pacific subtropical high (NWPSH) shifted eastward and the blocking high activities over the Eurasian midlatitudes were weaker than normal, resulting in below-normal rainfall anomalies over the Huanghe–Huaihe valley. In contrast, the NWPSH shifted westward and the blocking high activities over the Eurasian midlatitudes were intensified in the summer of 1998, leading to a wet summer over the Huanghe–Huaihe valley. Further diagnosis and model experiment results indicate that the contrasting pattern of summer rainfall anomalies over the Huanghe–Huaihe valley between 1992 and 1998 was probably due to the Northwest Pacific convection activities anomalies, as well as SST anomalies over the Sea of Okhotsk, its adjacent region, and the midlatitudes of the North Atlantic. The summer Northwest Pacific convection activities were intensified (weakened) in 1992 (1998), which favored an eastward (westward) shift of the NWPSH. Additionally, the warm SST anomalies over the Sea of Okhotsk and adjacent region favored the intensified blocking high activities, whereas the warm SST anomalies over the midlatitudes of the North Atlantic favored the intensified blocking high activities over the Urals. These results reveal that a large proportion of the interannual variability of the summer rainfall anomalies over the Huanghe–Huaihe valley cannot be explained solely by the El Niño signals; rather, it is also related to the Northwest Pacific convection activities and SST anomalies over the Sea of Okhotsk and the midlatitudes of the North Atlantic. Therefore, the combined effect of multiple factors should be considered for improving the predictability of summer rainfall anomalies over the Huanghe–Huaihe valley on the seasonal to interannual timescale.

Keywords Multiple factors, Rainfall, Subtropical high, Blocking high, Linear baroclinic model

1 引言

黄淮区域地处我国南方雨量丰沛和北方干旱少雨的过渡地带,夏季降水量集中了年降水量的 45%~65%,同时降水的年际变化很大,降水量最多年与最少年相差悬殊,是我国旱涝灾害最为严重的地区之一。由于影响该区域夏季降水的因子比较复杂,黄淮区域的夏季旱涝预测准确率偏低,因此提高黄淮地区的夏季旱涝预测对于国家防灾减灾非常重要。

海温异常作为外强迫信号是短期气候预测的重要依据,尤其是热带太平洋 ENSO 循环对东亚夏季风和我国东部夏季降水有明显的影响(符淙斌和滕星林, 1988; Huang and Wu, 1989; Zhang et al., 1996; 赵振国, 1996; 陶诗言和张庆云, 1998; 金祖辉和陶诗言, 1999; Zhang et al., 1999; Wang et al., 2000; 陈文, 2002; 黄荣辉和陈文, 2002; 赵亮等, 2006), 大量研究涉及 ENSO 循环过程与东亚夏季风的联系及其对我国降水的影响。例如, 金祖辉和陶诗言(1999)的研究认为: ENSO 发展年夏季, 我国东部地区以雨量偏少为主, 多雨带位于江淮之间; ENSO 恢复年夏季, 长江及江南地区雨量偏多, 其南北两边偏少。陈文(2002)通过合成 El Niño 事件分析发现: El Niño 发展期的夏季, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)偏弱, 同时影响我国的西南气流偏弱, 从而导致江淮地区和南方沿海地区多雨, 长江中游和华北地区少雨; 而 El Niño 衰亡期的夏季, 副高偏强, 同时影响我国的西南气流偏

强, 从而引起江淮地区少雨, 华北、东北以及洞庭湖、鄱阳湖地区多雨。赵亮等(2006)利用 Niño3 指数, 把 ENSO 循环不同位相的夏季划分为 4 类并进行聚类分析, 发现 El Niño 发展期夏季, 淮河流域降水往往偏多, 长江中下游降水偏少; El Niño 衰减期夏季, 长江中下游地区降水往往偏多, 淮河流域降水往往偏少。

值得关注的是, 1991 年 5 月开始赤道中东太平洋发生了一次中等偏强的中部型 El Niño 事件, 该次事件持续到 1992 年 6 月结束, 持续时间 14 个月。1997 年 4 月开始的赤道中东太平洋增温事件, 持续到 1998 年 5 月, 持续时间 14 个月, 是 20 世纪最强的一次混合型 El Niño 事件。两次 El Niño 事件发生的时间、持续时间都接近, 然而对应次年中国东部夏季降水的差异很大。1992 年, 东南沿海和华北河套地区降水偏多, 长江流域、黄淮地区和华北南部及东北的大部分地区降水偏少, 中国东部降水总体呈明显偏少的分布特征。1998 年, 长江流域、黄淮地区、东北地区降水明显偏多, 河套地区降水偏少。总体而言, 1992 年和 1998 年夏季, 中国东部降水异常分布型基本相反(图 1), 特别是黄淮地区(30.0°~36.5°N, 105°~123°E, 区域定义见 Chen et al., 2009), 1992 年夏季降水偏少 19.1%, 1998 年偏多 23.3%。关于 1998 年的长江洪涝灾害形成原因已有大量研究, 同期的环流特征为: 副高偏强偏南, 亚洲中高纬度经向环流发展, 鄂霍茨克海与贝加尔湖阻塞建立, 季节内伴随低频振荡活动(陶诗言等,

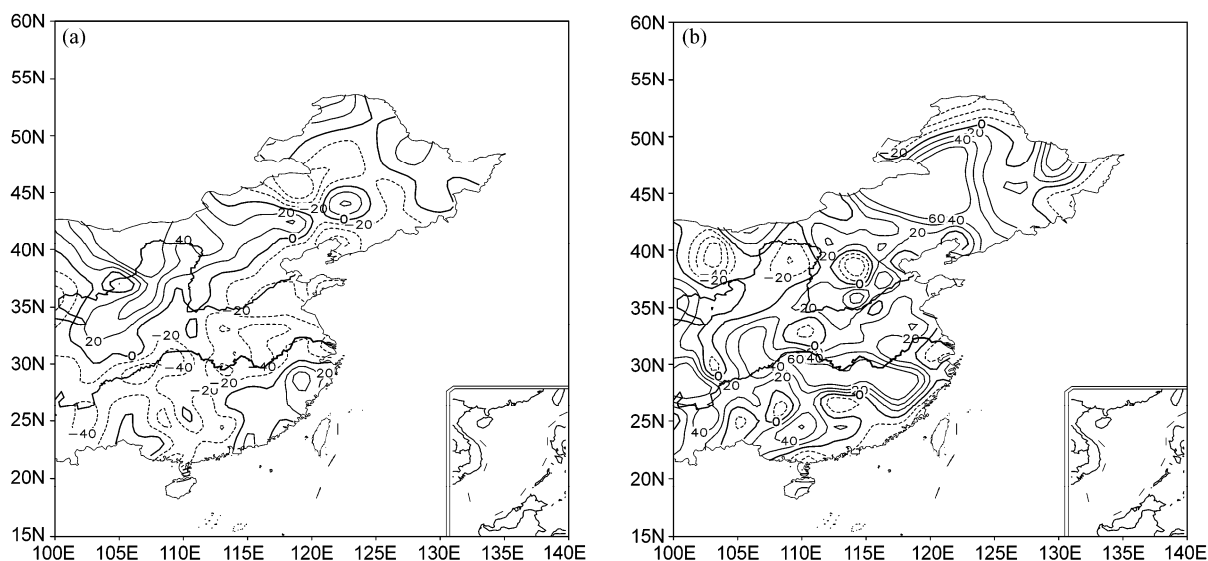


图1 中国东部夏季降水距平百分率(单位: %)分布: (a) 1992 年; (b) 1998 年

Fig. 1 Rainfall anomalies percentage (units: %) over East China in the summers of (a) 1992 and (b) 1998

1998; 李维京, 1999; 徐国强和朱乾根, 2002); 从外强迫来看, 前期 El Niño 事件, 以及前冬青藏高原积雪偏多(黄荣辉等, 1998; 李维京, 1999; 陶玫等, 2012)是导致此次洪涝灾害主要原因。但是对 1992 年夏季降水异常原因的研究较少, 尤其是对黄淮地区的关注更少。在同样的 El Niño 事件发生的背景下, 黄淮地区降水差异如此之大, 也值得进行对比分析, 为气候异常诊断和气候预测提供信息。

El Niño/La Niña 作为气候年际变化的强信号, 对全球许多地区的气候有重要影响, 无疑是短期气候预测的一个重要因子。但是对于 1992 年和 1998 年夏季降水异常来说, 仅仅依据前期的 El Niño 现象无法做出正确预测。本文将在对比 1992 年和 1998 年夏季降水及大气环流异常的基础上, 通过诊断和数值模式试验分析不同海域海温异常对这两年夏季环流变化的作用, 探讨多因子协同作用对黄淮地区夏季降水的可能影响。

2 资料和方法

2.1 资料选取

本文用到的资料包括: (1) 国家气候中心整理的全国 160 站逐月降水资料。(2) NCEP/NCAR 再分析月平均资料 (Kalnay et al., 1996), 包括逐月的 500 hPa 位势高度场, 多层的风场、比湿以及地表气压, 网格分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间为 1961~2011 年; OLR (outgoing longwave radiation) 资料, 网格分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间为 1974~2013 年。(3)

海温资料为美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 提供的线性最优插值 (OIV) 全球海温数据, 网格点分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (Reynolds et al., 2002), 时间为 1961~2011 年。文中各变量气候标准值均采用 1981~2010 年平均。

2.2 线性斜压模式简介

本文数值试验使用的模式为线性斜压模式 (Linear Baroclinic Model, 简称 LBM)。该模式是一个基于原始方程组的全球时变谱模式, 基本态为根据再分析资料 (NCEP/NCAR) 计算得到的气候平均场。模式的水平分辨率为 T42, 垂直方向为 σ 坐标, 共 20 层。在 $\sigma \geq 0.9$ 和 $\sigma \leq 0.03$ 的各层上 Rayleigh 摩擦和牛顿阻尼设为 1 d^{-1} , 其他层则为 30 d^{-1} ; 双谱扩散系数为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^4 \text{ s}^{-1}$ 。有关该模式的动力框架及参数设置方面的详细介绍参见 Watanabe and Kimoto (2000) 和 Watanabe and Jin (2003) 的研究工作。在上述给定参数的情况下, 斜压模式积分 20 天后即可达到稳定状态 (Zuo et al., 2013)。本文数值试验中对此模式进行 30 天的积分, 取最后 5 天的平均结果进行分析。

3 1992 年与 1998 年夏季大气环流特征差异

东亚夏季风的强弱与中国东部夏季降水异常关系密切 (黄荣辉等, 2003), 根据张庆云等 (2003) 定义的东亚夏季风指数, 1992 年夏季东亚夏季风指数约为 -1.2, 夏季风偏弱, 1998 年东亚夏季风指数

约为-4.1, 夏季风明显偏弱。这表明, 1992 和 1998 年 ENSO 事件对东亚季风环流有明显影响。这种影响是由热带太平洋海温异常产生的对流活动异常分布引起的, 其热力异常结构有利于在西太平洋和我国南海地区强迫出反气旋环流异常 (Wang et al., 2000), 造成东亚夏季风环流偏弱 (黄荣辉和陈文, 2002; 张庆云和陶诗言, 2003)。

副高是影响我国东部夏季降水的重要系统之一, 它的位置、强度变化都会对降水造成很大影响。孙淑清和马淑杰 (2003) 的研究认为: 自冬至夏赤道太平洋海温呈 El Niño 型分布时, 副高强度偏强, 位置偏南, 西伸明显, 面积偏大。综合分析 1992 年和 1998 年副热带高压特征指数 (表 1, 定义见赵振国, 1999) 可以发现, 这两年夏季副高面积指数均较常年偏大, 强度指数均偏强, 但是位置差异较大。1992 年副高西伸脊点 7 月略偏西, 8 月偏东, 而 1998 年盛夏副高均偏西; 1992 年副高北界接近常年到偏北, 尤其是 8 月偏北偏东明显; 而 1998 年 7 月则略偏南、8 月接近常年。所以从副高的特征指数来看, 副高位置差异可能是造成这两年降水差异的重要原因, 1998 年副高特征更符合孙淑清和马淑杰 (2003) 的研究结果, 而 1992 年差异较大。

表 1 1992 年和 1998 年的 7~8 月副高特征指数

Table 1 Northwest Pacific subtropical high indexes in July–August 1992 and 1998

年份	面积指数/gpm		强度指数/gpm		西伸脊点		北界指数	
	7 月	8 月	7 月	8 月	7 月	8 月	7 月	8 月
1992 年	31	28	69	69	115°E	135°E	31°N	37°N
1998 年	41	44	70	94	100°E	95°E	29°N	32°N
气候值	27	26	54	50	118°E	119°E	31°N	32°N

降水异常一方面与大气环流异常关系密切, 另一方面受到水汽输送条件的影响。1992 年夏季北半球 500 hPa 高度距平场呈三波型特征, 欧亚地区上空呈现两槽一脊分布形势。乌拉尔山上空、鄂霍茨克海上空为明显负距平, 表明 1992 年 7、8 月份中高纬度阻塞高压活动较弱, 东北低压明显偏强, 阿留申上空的负距平值达到-40 gpm, 即纬向环流占优势。在这种环流形势下中高纬冷空气活动较弱。另一方面, 西北太平洋上空异常反气旋环流中心位于日本群岛东南部的海洋上 (图 2a), 使得来自孟加拉湾和南海上空的水汽沿着反气旋西侧的西南气流直接进入西北太平洋上空, 而到达中国东南沿海和黄淮地区的水汽明显偏少, 且黄淮地区上空为

水汽辐散区 (图 2c)。所以, 1992 年夏季欧亚中高纬阻塞高压和低纬度水汽输送的偏弱, 导致了黄淮地区降水异常偏少。

1998 年 7、8 月份, 北半球 500 hPa 高度场上, 乌拉尔山上空和鄂霍茨克海上空为两个明显的正距平中心, 中高纬度为“双阻”型, 阻塞高压活动频繁, 南海、菲律宾地区的异常反气旋较强, 控制我国华南地区, 东亚中纬度地区为低压带, 东亚上空从北向南为典型的“+ - +”的东亚遥相关波列, 以经向环流为主, 冷空气从贝加尔湖附近向南扩散。另一方面, 西北太平洋上空的异常反气旋环流 (图 2b) 主要位于南海至菲律宾地区, 比 1992 年夏季的反气旋环流中心 (图 2a) 明显偏西, 反气旋西北侧的西南风明显偏强, 使得夏季风影响到长江以北的黄淮地区, 来自孟加拉湾和南海上空的水汽明显偏多, 水汽通量辐合中心位于黄淮地区上空 (图 2d)。可见, 1998 年夏季欧亚中高纬双阻活跃, 热带海洋向我国东部大陆的水汽输送非常充足, 并在黄淮地区上空形成水汽通量辐合中心, 造成该地区降水明显偏多。

从上面的对比分析可以看到: 造成 1992 年和 1998 年夏季降水差别之大的主要原因可能是副高位置和中高纬阻塞高压活动。1992 年夏季副高偏东, 沿着副高西北侧暖湿气流的大值区主要在西北太平洋, 输送到黄淮地区的水汽相对较少, 中高纬阻塞活动较少, 冷空气较弱, 黄淮地区上空水汽辐合较弱, 导致黄淮地区夏季降水较少。而 1998 年夏季, 副高异常偏西, 沿着副高西侧的西南暖湿气流偏西, 携带大量水汽输送到黄淮地区, 同时中高纬出现双阻形势, 冷空气活动频繁, 黄淮上空水汽辐合较强, 导致黄淮地区夏季降水容易偏多。从环流特征分析可以发现, 阻塞高压活动对黄淮地区夏季降水异常非常重要, 但是在月、季预报中如何预测阻高活动是十分困难的事情, 一方面阻高活动受大气外强迫的影响, 另一方面还受大气内部动力过程制约, 而后者难度更大。下面从这两年前期外强迫信号的角度分析其对中纬度环流的可能影响。

4 1992 年与 1998 年海温异常分布差异及对东亚环流的影响

4.1 海温异常影响的诊断分析

从上节分析可以看出, 造成 1992 年和 1998 年夏季降水差异的主要环流特征是副高位置和中高

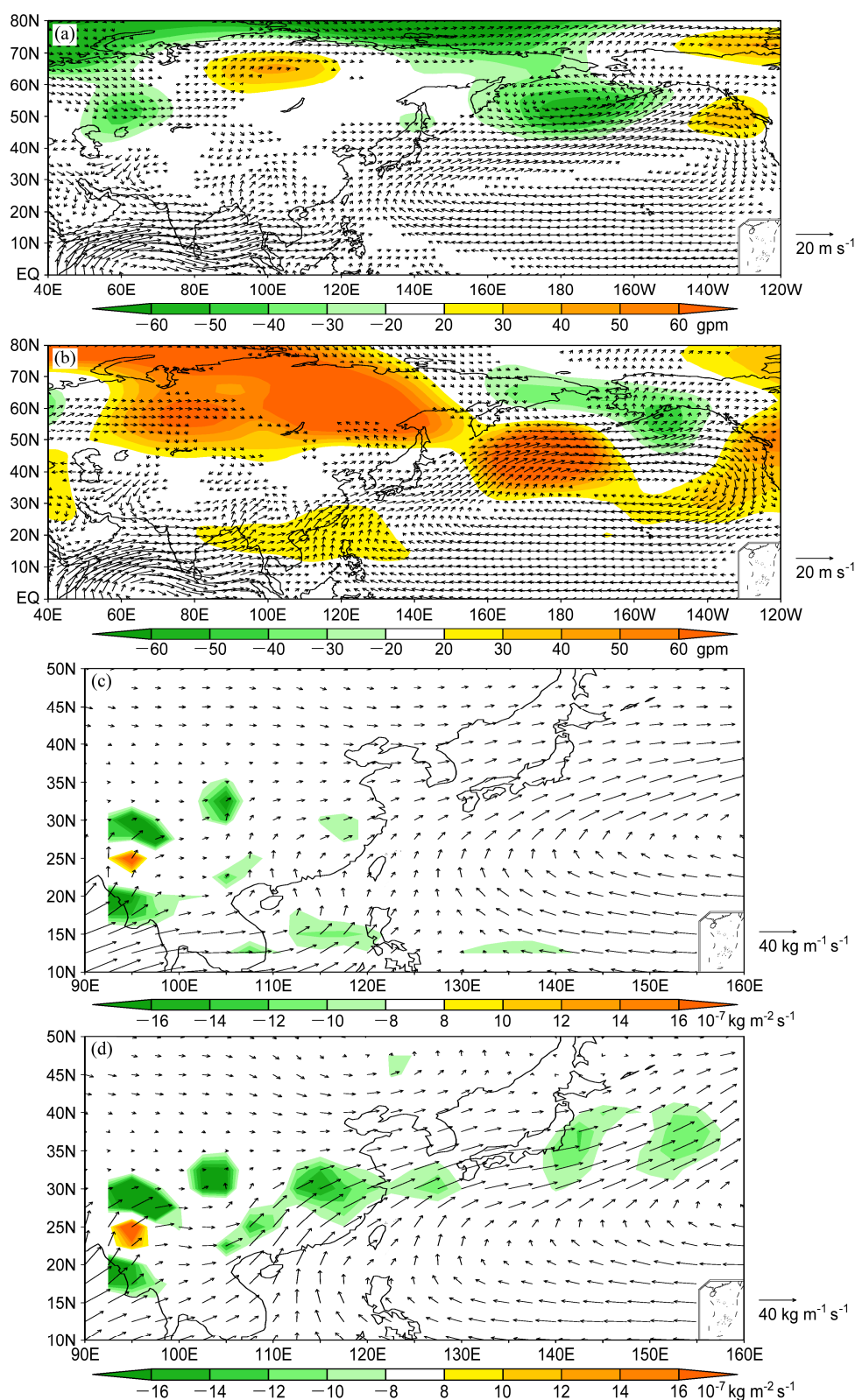


图2 (a) 1992 年和 (b) 1998 年夏季 850 hPa 风场异常 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和位势高度距平场 (阴影, 单位: gpm) 以及 (c) 1992 年和 (d) 1998 年夏季从地表到 300 hPa 积分水汽通量 (箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 和水汽通量散度 (阴影, 单位: $10^{-7} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 Anomalies of wind (vectors, units: m s^{-1}) and the geopotential height (shaded, units: gpm) at 850 hPa in the summers of (a) 1992 and (b) 1998, and the integrated water vapor fluxes (from the surface to 300 hPa, vectors, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and the associated divergence (shaded, units: $10^{-7} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in the summers of (c) 1992 and (d) 1998

纬阻塞高压活动。又是什么原因导致这两年夏季副高位置的不同？夏季阻塞高压活动存在显著差异的原因是什么？海温作为年际变化的主要外强迫源，如何影响上述环流系统？下面将作进一步分析。

首先对比 1992 年和 1998 年前期冬季海温分布差异，以 1 月份为例（图 3a），海温差别较大的地区在北半球中高纬海区和热带东太平洋地区。1992 年 1 月，鄂霍茨克海附近海域为负距平，北大西洋中部区域也为明显的负距平，热带东太平洋海温偏高，西北太平洋海温偏低。1998 年 1 月，鄂霍茨克

海附近海域为正距平，北大西洋中纬度区域海温偏高，西北太平洋海温和热带中东太平洋海温也偏高，而在热带印度洋和热带西太平洋区域，这两年的差别不明显。

从冬季到夏季，1992 年和 1998 年北半球中高纬海域海温变化差异增大（以 7 月为例，图 3b），1992 年 7 月，30°N 以北、180°经度以西的西北太平洋海温明显偏低，30°N 以北、180°经度以东的东北太平洋海温明显偏高，北太平洋海域呈西冷东暖型；同时北大西洋中高纬海温明显偏低，局部海域偏低 2°C 左右；热带中太平洋和东太平洋海温均较

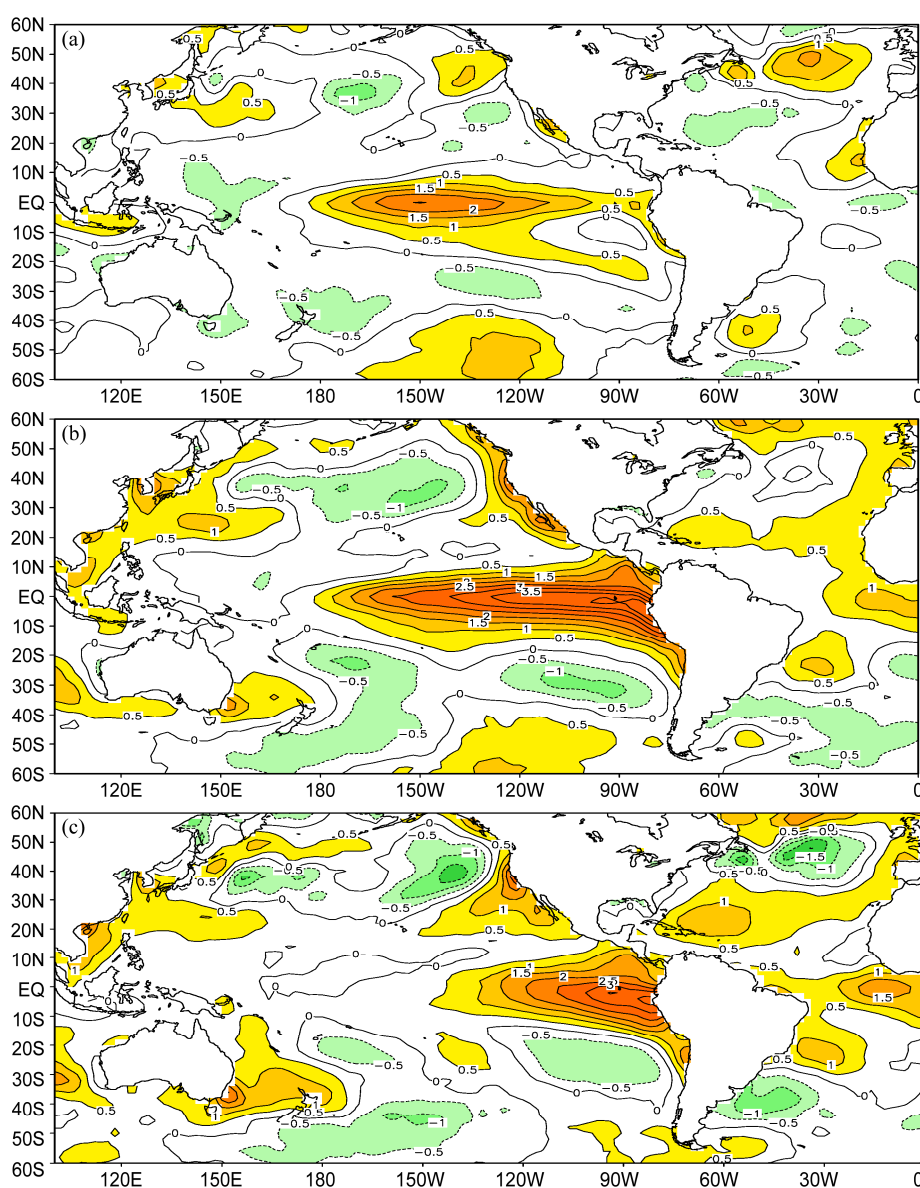
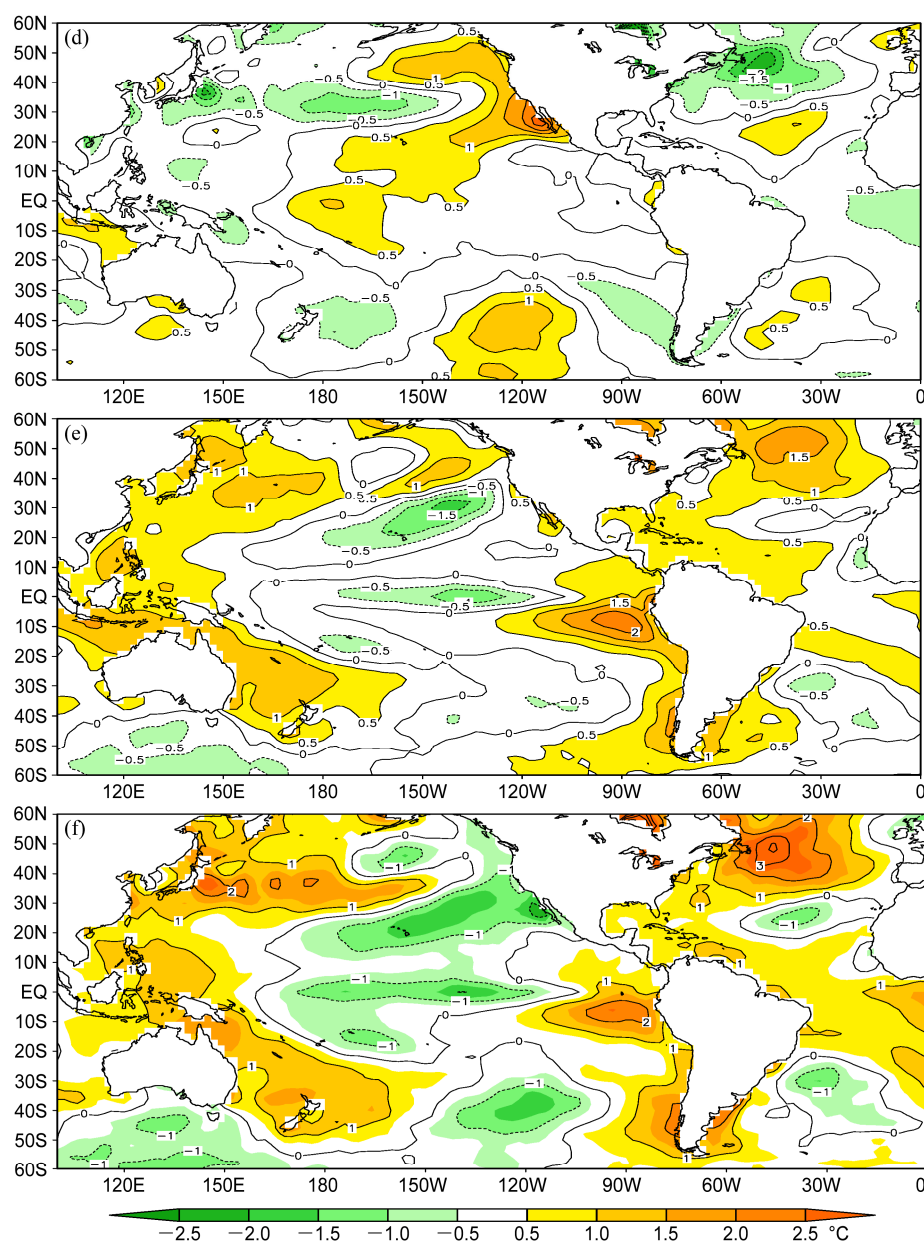


图3 (a) 1992 和 (b) 1998 年 1 月全球海温距平以及 (c) 两者差 (1998 年减 1992 年) 值分布。(d) - (f) 同图 (a) - (c)，但为 7 月。阴影表示海温差值大于 0.5°C 或小于 -0.5°C 的区域

Fig. 3 SST anomalies in January of (a) 1992 and (b) 1998, and (c) the difference between 1998 and 1992 (the former minus the latter). (d-f) As in (a-c), but for July. Shadings denote values greater than 0.5°C or less than -0.5°C

图 3 (续)
Fig. 3 (Continued)

常年略偏低, 热带太平洋海温从西到东为“ $-+-$ ”分布。而在 1998 年 7 月, 无论是北太平洋还是北大西洋, 中高纬海域海温呈现出与 1992 年夏季海温相反的分形势, 北太平洋为西暖东冷型; 北大西洋中高纬海温明显偏高, 局部海域偏高 2°C 左右, 西北太平洋海温明显偏高; 同时热带西太平洋和东太平洋海温偏高, 热带太平洋海温从西到东为“ $+--$ ”分布。这两年 7 月海温的差异更明显。

以上对比分析显示, 1992 年和 1998 年夏季西太平洋、鄂霍茨克海附近亲潮区域和北大西洋中纬

度区域海温的反位相分布形势, 可能是导致这两年夏季西北太平洋和欧亚中高纬度大气环流异常存在显著差异的主要原因。为了验证此猜测, 下面将从观测诊断和数值试验的角度做进一步分析。

关于西太平洋海温和对流活动异常对副高的影响已有许多研究, 而且结论基本一致。一般认为, 前期 El Niño 事件由成熟期转变为衰减期时, 热带西太平洋海温次表层变冷, 菲律宾附近对流活动减弱, 致使副高偏西偏南 (如黄荣辉等, 1998)。对比 1992 年和 1998 年 7~8 月的次表层海温和 OLR

(outgoing longwave radiation) 距平场分布(图略), 这两年的次表层海温都已经转冷, 但是 1998 年西太平洋的对流活动比 1992 年明显偏弱, 这种差异在 8 月份表现的更明显(图 4)。1992 年 8 月, 从南海中南部到日本以南的西北太平洋上空 OLR 值明显偏小, OLR 负距平值达到 -20 W m^{-2} , 对流活跃, 造成副高主体偏东, 位于 140°E 以东, 副高西伸脊点不到 140°E , 脊线明显较常年偏北(图 4a); 而 1998 年 8 月, 西北太平洋上空 OLR 值明显偏大, OLR 正距平值达到 30 W m^{-2} 以上, 在菲律宾区域及其附近的对流活动明显受到抑制, 有利于副高偏大偏西偏南, 副高主体西伸到 100°E 附近(图 4b)。西太平洋对流活动异常的显著差异, 可能是造成 1992 年和 1998 年副高位置变化特征明显不同的主要原因。

大量诊断分析和数值试验结果表明, 北太平洋海温异常对大气环流的强迫作用是显著的(Namias et al., 1988), 大气环流模式拟合(Palmer and Sun,

1985; Pitcher et al., 1988) 的大气环流对中纬度海温异常的响应是统计显著的, 具有与低频大气遥相关相似的特征。此外, 况雪源等(2009)的研究认为, 西太平洋黑潮暖流加热, 可导致中高纬大陆海洋交接地区出现反气旋性差值环流。因此, 1998 年夏季鄂霍茨克海及其以东洋面海温变暖, 这可能有利于该地区上空对流层中部高压的形成, 使得鄂霍茨克海上空阻塞高压增强。

1992 年和 1998 年夏季海温差异显著的第三个关键区域是北大西洋中纬度地区。徐海明等(2001)通过数值试验指出, 西北大西洋海温异常偏暖时, 可在阿拉斯加上空以及欧亚大陆上空激发出反气旋性差值环流, 从而对整个北半球大气环流产生一定影响。

综合上述研究, 当西太平洋对流偏弱、鄂霍茨克海及其以东洋面海温和北大西洋中纬度地区海温同时偏高时, 在其协同作用下, 副高偏西, 乌拉尔山和鄂霍茨克海地区容易出现双阻的形势, 这种环

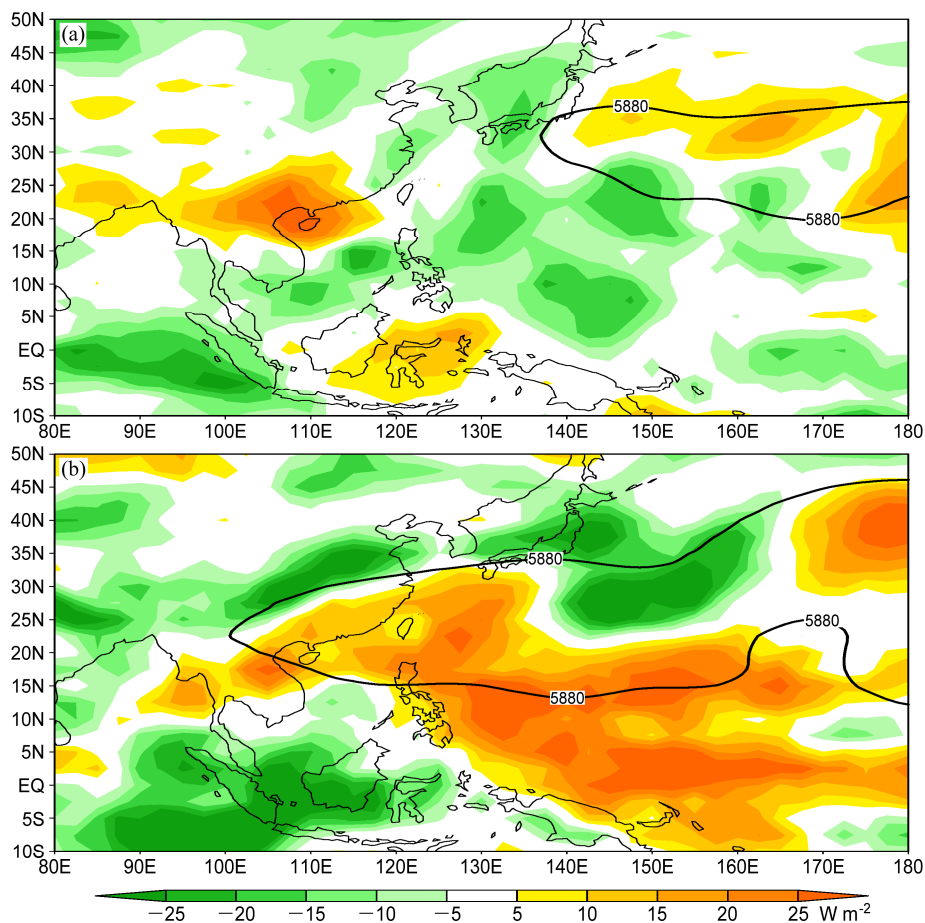


图 4 (a) 1992 年和 (b) 1998 年 8 月 OLR 距平场(阴影, 单位: W m^{-2}) 与 500 hPa 高度场 5880 gpm 等值线

Fig. 4 Distribution of OLR anomalies (shaded, units: W m^{-2}) and the 5880 gpm contours on 500-hPa geopotential height in August of (a) 1992 and (b) 1998

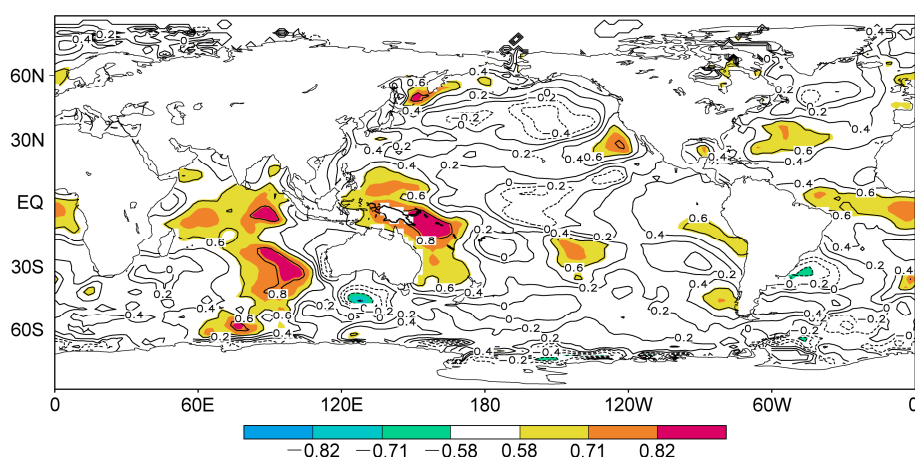


图 5 黄淮地区夏季降水距平与前期冬季海温距平的相关系数分布。浅色至深色阴影分别表示 90%、95% 和 99% 信度水平

Fig. 5 Correlation coefficients between the summer rainfall anomalies averaged over the Huanghe-Huaihe region and the pre-winter SST anomalies. Shading from light to dark indicates 90%, 95%, and 99% confidence level, respectively

流形势与 El Niño 背景下黄淮流域夏季降水偏多的形势基本一致, 反之黄淮地区夏季降水偏少。

影响黄淮地区夏季降水的海温从前期冬季到夏季有没有变化或持续的影响? 文中计算了夏季降水距平和前期冬、春季和同期夏季海温距平的相关。与前冬的高相关区域主要位于印度洋和西太平洋区域、西北太平洋区域、加利福尼亚以西、北大西洋中纬度地区、大西洋赤道地区(图 5), 均为显著正相关。与春季海温距平的高相关区域主要位于热带印度洋和热带西太平洋区域、亲潮区域、北大西洋中纬度地区(图略), 与同期夏季海温距平的高相关区域主要位于热带印度洋、黑潮区域、亲潮以东洋面、北大西洋中纬度地区(图略)。从前期和同期的相关系数分布来看, 与黄淮地区夏季降水为持续高相关的海温关键区主要有三个: 赤道附近的印度洋和西太平洋区域 ($10^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$), 鄂霍茨克海附近海域 ($50^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$), 北大西洋中纬度区域 ($20^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{W}$), 从前期冬季、春季一直到同期夏季对黄淮流域的降水都有显著相关, 这与上文中个例分析的结果一致。

从海温外强迫来看, 1992 年和 1998 年夏季印度洋—热带西太平洋海温差别不大(图 3), 主要差异是西太平洋对流活动季节内的变化引起的副高位置变化。下面主要针对西北太平洋海温和中高纬海温异常可能导致的中高纬环流异常进行数值试验, 进一步验证造成黄淮区域 1992 年夏季和 1998 年夏季降水的环流差异形成原因。

4.2 海温异常影响机理的数值试验

利用一个简单的线性斜压模式(Watanabe and Kimoto, 2000; Watanabe and Jin, 2003)进行数值试验, 以验证鄂霍茨克海附近海域和北大西洋中纬度区域海温异常对大气环流的影响。

试验一: 将强迫源中心放置在鄂霍茨克海附近 ($50^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$) 海域, 在该区域加上海温正异常。图 6 为 500 hPa 高度场对该强迫源的稳定响应, 可以看到在鄂霍茨克海及其以东的阿留申地区上空高度场为明显的正距平中心, 中心强度达到 55 gpm。即当该区域海温偏高时, 容易导致鄂霍茨克海至阿留申上空高压明显偏强, 这与 1998 年黄淮地区降水偏多时 500 hPa 高度场上, 鄂霍茨克海至阿留申上空的分布形势一致。而该分布型与黄淮地区夏季降水偏多时环流形势一致。

试验二: 将正的热源异常中心放置于北大西洋中纬度 ($20^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{W}$) 区域, 其中最大加热率位于对流层低层。图 7 显示了 500 hPa 高度场对该强迫源的稳定响应, 可以看到在乌拉尔山上空出现明显的正距平中心, 中心强度达到 30 gpm, 这与观测资料得到的结果中乌拉尔山上空为明显的正距平中心是一致的, 即北大西洋中纬度海温为正异常时, 容易导致欧亚中高纬度上空阻塞高压的形成, 这与徐海明等(2001)的数值模式模拟结果比较一致。

5 结论和讨论

在 El Niño 发生的背景下, 1992 年夏季黄淮地

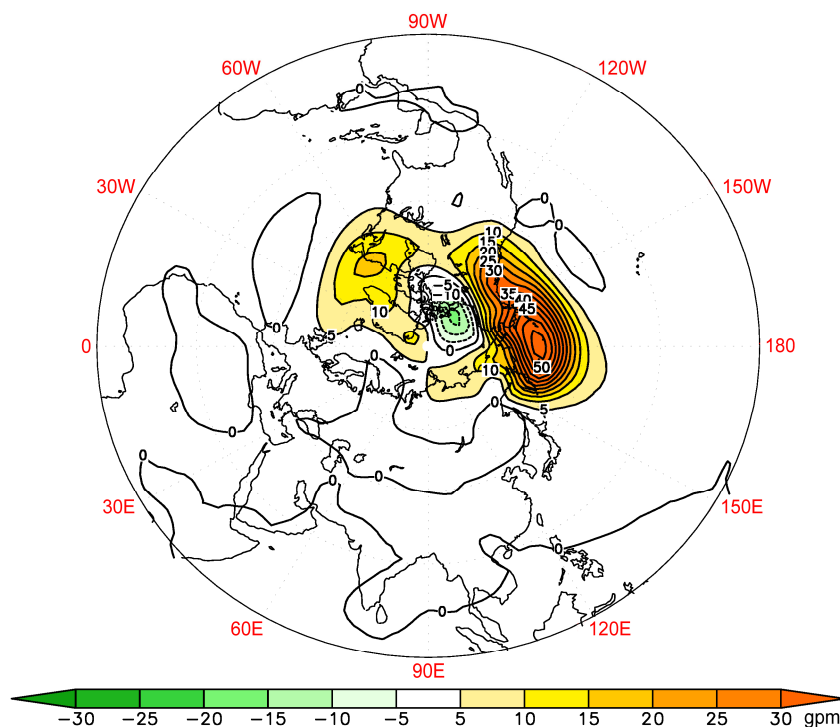


图6 线性斜压模式中 500 hPa 高度场对鄂霍茨克海热源异常的响应 (单位: gpm)

Fig. 6 Responses of the geopotential height anomalies at 500 hPa to the anomalous heating forcing over the Sea of Okhotsk in a linear baroclinic model (units: gpm)

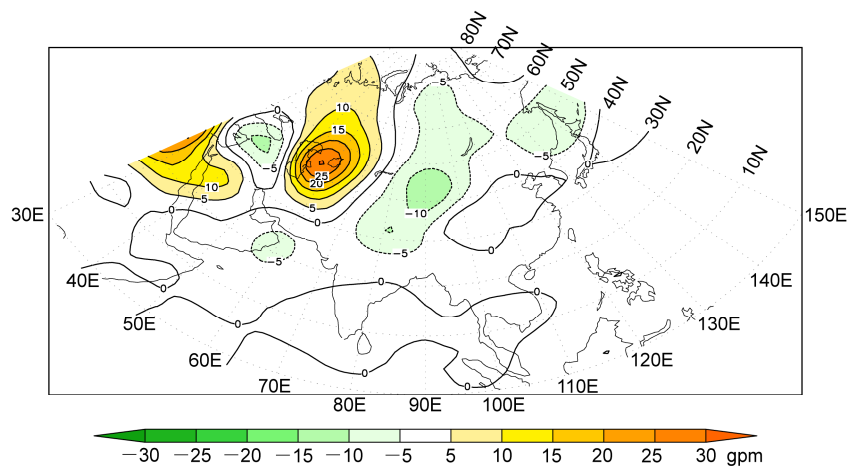


图7 线性斜压模式中 500 hPa 高度场对北大西洋中部热源异常的响应 (单位: gpm)

Fig. 7 Responses of the geopotential height anomalies at 500 hPa to the anomalous heating forcing over the central North Atlantic in a linear baroclinic model (units: gpm)

区降水异常偏少, 而 1998 年却异常偏多。本文通过对大气环流、水汽输送、黄淮地区夏季降水异常前期海温信号的观测诊断分析, 以及海温热力异常强迫的数值试验, 探讨了 1992 年和 1998 年夏季黄淮地区降水异常的可能成因。得出如下结论:

(1) 1992 年和 1998 年前期冬季均发生了 El Niño 事件, 且事件的发生时间、发展周期、结束时

间均较相似, 但是这两年夏季西北太平洋和欧亚中高纬度地区大气环流变化特征却明显不同, 并导致了黄淮地区截然相反的降水异常分布。其中, 1998 年夏季副高异常偏西, 欧亚中高纬阻塞高压活动频繁, 使得同期黄淮地区降水异常偏多; 而 1992 年夏季, 副高异常偏北, 欧亚中高纬阻塞高压活动偏弱, 导致同期黄淮地区降水异常偏少。

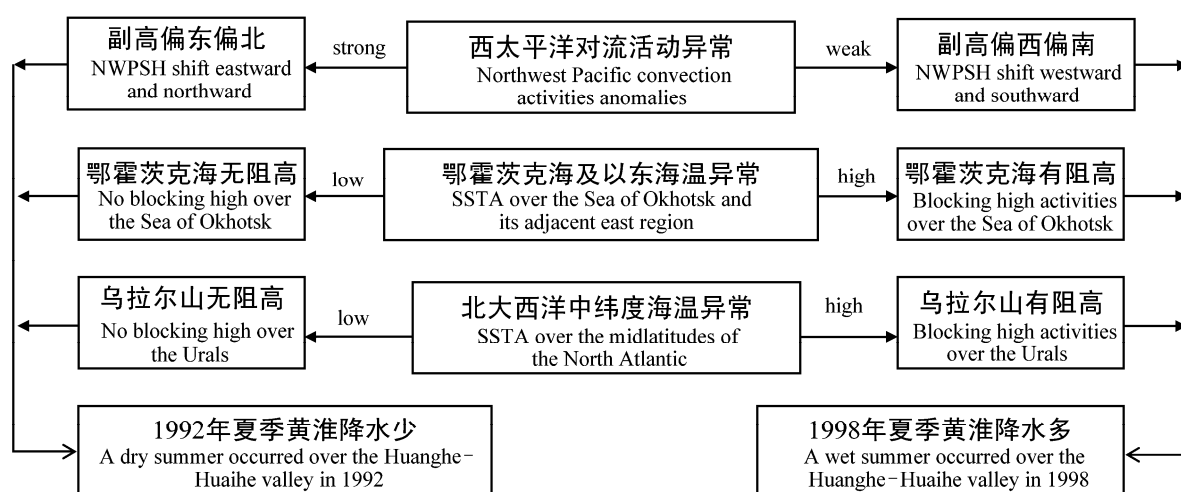


图 8 造成 1992 年和 1998 年夏季黄淮地区降水差异的影响因子示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the possible mechanism responsible for the summer rainfall anomalies over the Huanghe-Huaihe valley in 1992 and 1998

(2) 除热带中东太平洋海温异常外, 西太平洋对流活动强弱、鄂霍茨克海附近海域和北大西洋中纬度地区海温异常的不同可能是导致 1992 年和 1998 年夏季欧亚地区环流型不同, 从而进一步造成黄淮地区降水差异的主要原因 (图 8)。1998 年夏季热带西太平洋上空 OLR 值偏大, 对流受到抑制, 有利于副高偏强偏西偏南。诊断和线性斜压模式的模拟结果均表明, 鄂霍茨克海及以东洋面海温偏暖时, 鄂霍茨克海上空的阻塞高压活动易于增强; 北大西洋中纬度地区海温偏高时, 有利于后期乌拉尔山高压脊明显增强, 这些特征导致 1998 年东亚夏季环流有利于黄淮地区降水异常偏多。而 1992 年夏季对应的西太平洋对流、鄂霍茨克海海温、北大西洋中纬度地区海温均与 1998 年同期不同, 东亚环流特征也不同, 黄淮地区降水偏少。

(3) 1992 年和 1998 年夏季黄淮地区降水差异显示, 即使出现强 El Niño 事件背景下, 黄淮地区夏季降水仍可能不同。El Niño 事件对热带和副热带环流存在显著的影响, 但在不同事件中西北太平洋异常反气旋的位置往往存在差异。1992 年夏季西北太平洋异常反气旋位于菲律宾东北洋面, 而 1998 年夏季异常反气旋位于南海和菲律宾附近地区。除此之外, 欧亚中高纬度环流型 (尤其是乌拉尔山和鄂霍茨克阻塞高压活动) 的变化对黄淮降水异常也起到决定性作用, 而阻塞活动受到北大西洋中部和鄂霍茨克海附近海区等中纬度地区海温异常的明显影响。所以, 黄淮地区夏季降水更多地表现为多因子协同作用的结果。

本文基于 1992 和 1998 年两个个例, 从海温异常外强迫因子入手, 分析了影响黄淮地区夏季降水的不同区域的关键因子, 探讨多因子协同作用对区域降水的影响。事实上, 除海温这一外强迫因素外, 其他因素如欧亚积雪 (穆松宁和周广庆, 2010)、海冰 (武炳义和张人禾, 2011)、青藏高原热力情况 (李栋梁等, 2003)、南半球环流异常 (薛峰, 2005; 范可和王会军, 2006; 薛峰, 2008) 等也会对东亚夏季风和黄淮地区夏季降水产生重要影响, 因此在未来的工作中需要进一步研究更多的因子对黄淮地区夏季降水异常的协同作用。

参考文献 (References)

- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. 大气科学, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 595–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- Chen Lijuan, Chen Deliang, Wang Huijun, et al. 2009. Regionalization of precipitation regimes in China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2 (5): 301–307, doi:10.1080/16742834.2009.11446818.
- 范可, 王会军. 2006. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. 大气科学, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between southern hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 402–412, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.04.
- 符淙斌, 滕星林. 1988. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系 [J]. 大气科学, 12 (S1): 133–141. Fu Congbin, Teng Xinglin. 1988. Climate anomalies in China associated with El Niño/Southern Oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12

- (S1): 133–141, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.11.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 146–159. Huang Ronghui, Chen Wen, 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (2): 146–159, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.02.003.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Adv. Atmos. Sci., 6 (1): 21–32, doi:10.1007/BF02656915.
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 300–313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 300–313, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.02.
- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究 [J]. 大气科学, 27 (4): 484–502. Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 484–502, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.05.
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. 大气科学, 23 (6): 663–672. Jin Zuhui, Tao Shiyuan. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (6): 663–672, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.03.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 况雪源, 张耀存, 刘健, 等. 2009. 冬季黑潮暖流区加热异常对东亚副热带西风急流影响的数值研究 [J]. 大气科学, 33 (1): 81–89. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun, Liu Jian. 2009. A numerical study of the effect of anomalous surface heating in the Kuroshio current region in winter on the East Asian subtropical westerly jet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 81–89, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.07.
- 李栋梁, 魏丽, 李维京, 等. 2003. 青藏高原地面感热对北半球大气环流和中国气候异常的影响 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 60–70. Li Dongliang, Wei Li, Li Weijing, et al. 2003. The effect of surface sensible heat flux of the Qinghai-Xizang Plateau on general circulation over the Northern Hemisphere and climatic anomaly of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 60–70, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2003.01.008.
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. 气象, 25 (4): 20–25. Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 25 (4): 20–25, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.04.004.
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. 大气科学, 34 (1): 213–226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 213–226, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.20.
- Namias J, Yuan X J, Cayan D R. 1988. Persistence of North Pacific sea surface temperature and atmospheric flow patterns [J]. J. Climate, 1 (7): 682–703, doi:10.1175/1520-0442(1988)001<0682:PONPSS>2.0.CO;2.
- Palmer T N, Sun Z B. 1985. A modelling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the northwest Atlantic and the atmospheric general circulation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111 (470): 947–975, doi:10.1002/qj.49711147003.
- Pitcher E J, Blackmon M L, Bates G T, et al. 1988. The effect of North Pacific sea surface temperature anomalies on the January climate of a general circulation model [J]. J. Atmos. Sci., 45 (2): 173–188, doi:10.1175/1520-0469(1988)045<0173:TEONPS>2.0.CO;2.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. J. Climate, 15 (13): 1609–1625, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2.
- 孙淑清, 马淑杰. 2003. 海温异常对东亚夏季风及长江流域降水影响的分析及数值试验 [J]. 大气科学, 27 (1): 36–52. Sun Shuqing, Ma Shujie. 2003. Analysis and numerical experiment on the relationship between the 1998 summer monsoon activities and SSTA in tropical regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 36–52, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.01.04.
- 陶玫, 蒋薇, 项瑛, 等. 2012. 1998 和 2010 年长江流域汛期洪涝成因对比分析 [J]. 气象科学, 32 (3): 282–287. Tao Mei, Jiang Wei, Xiang Ying, et al. 2012. Comparative analysis of the flooding causes over Yangtze River in 1998 and 2010 [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 32 (3): 282–287, doi:10.3969/2012jms.0022.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科学, 22 (4): 399–407. Tao Shiyuan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 399–407, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.02.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 290–299. Tao Shiyuan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 1998. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 290–299, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.01.
- 武炳义, 张人禾. 2011. 东亚夏季风年际变率及其与中、高纬度大气环流以及外强迫异常的联系 [J]. 气象学报, 69 (2): 219–233. Wu Bingyi, Zhang Renhe. 2011. Interannual variability of the East Asian summer monsoon and its association with the anomalous atmospheric circulation over the mid-high latitudes and external forcing [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (2): 219–233, doi:10.11676/qjxb2011.019.
- 徐国强, 朱乾根. 2002. 1998 年我国东部大陆夏季风特征研究 [J]. 气象, 28 (3): 8–13. Xu Guoqiang, Zhu Qiang. 2002. Study of summer monsoon features of 1998 in eastern China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 28 (3): 8–13, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2002.03.002.
- 徐海明, 何金海, 董敏. 2001. 江淮入梅的年际变化及其与北大西洋涛动和海温异常的联系 [J]. 气象学报, 59 (6): 694–706. Xu Haiming, He Jinhai, Dong Min. 2001. Interannual variability of the Meiyu onset and its association with North Atlantic oscillation and SSTA over North

- Atlantic [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 59 (6): 694–706, doi:10.11676/qxxb2001.073.
- 薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 401–408, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2005.03.13.
- 薛峰. 2008. 强 La Niña 背景下的东亚夏季风异常与 1989 年和 1999 年中国夏季降水的对比分析 [J]. *大气科学*, 32 (3): 423–431. Xue Feng. 2008. East Asian summer monsoon anomalies in strong La Niña years and comparison of summer precipitation in China between 1989 and 1999 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (3): 423–431, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.01.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- Watanabe M, Kimoto M. 2000. Atmosphere–ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 126 (570): 3343–3369, doi:10.1002/qj.49712657017.
- Watanabe M, Jin Feifei. 2003. A moist linear baroclinic model: Coupled dynamical convective response to El Niño [J]. *J. Climate*, 16 (8): 1121–1139, doi:10.1175/1520-0442(2003)16<1121:AMLBMC>2.0.CO;2.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. *大气科学*, 27 (3): 369–380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (3): 369–380, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.07.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61 (5): 559–569. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (5): 559–569, doi:10.11676/qxxb2003.056.
- 赵亮, 邹力, 王成林, 等. 2006. ENSO 年东亚夏季风异常对中国江、淮流域夏季降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 22 (4): 360–367. Zhao Liang, Zou Li, Wang Chenglin, et al. 2006. Impacts of the East Asian summer monsoon anomaly during the ENSO event period on the summer precipitation in the lower–middle reaches of the Yangtze River and Huaihe River valley [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 22 (4): 360–367.
- 赵振国. 1996. El Niño 现象对北半球大气环流和中国降水的影响 [J]. *大气科学*, 20 (4): 422–428. Zhao Zhenguo. 1996. Impact of El Niño events on atmospheric circulations in the Northern Hemisphere and precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 20 (4): 422–428, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.04.06.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 297pp. Zhao Zhenguo. 1999. Summer Drought and Flood in China and Environmental Background (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 297pp.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the ‘86/87’ and ‘91/92’ events [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74 (1): 49–62.
- Zhang R, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16 (2): 229–241, doi:10.1007/BF02973084.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (4): 1173–1186, doi:10.1007/s00376-012-2125-5.