

韩晋平, 张人禾, 苏京志. 2013. 中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷却的关系 [J]. 大气科学, 37 (5): 1059–1071, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12042. Han Jinping, Zhang Renhe, Su Jingzhi. 2013. Relationship between cooling of tropical Pacific sea surface temperature and autumn precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1059–1071.

中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷却的关系

韩晋平 张人禾 苏京志

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 本文利用 1951~2011 年中国 160 站降水、NCEP/NCAR 再分析资料和 NOAA 延长重建海表温度 (NOAA extended reconstructed SST) 资料, 研究了中国 9 月北方秋雨的年际变化特征及其成因, 并用 ECHAM5 大气环流模式开展了数值试验, 最后对 2011 年 9 月历史罕见秋雨进行了分析。研究发现, 中国北方秋雨有明显的年际和年代际变化, 19 世纪 60 年代到 1980 年代中期, 北方秋雨偏多, 1950 年代、1980 年代后期和 1990 年代秋雨偏少。北方秋雨与西太平洋副热带高压的西伸有密切联系, 北方秋雨偏多时, 副热带高压偏西偏强, 有利于偏南风向北输送水汽并在中国北方辐合。西太平洋副热带高压的加强西伸与热带中太平洋的海表冷却密切相关, 偏低的热带中太平洋海表温度 (CTSSTI) 使其上的对流活动受到抑制, 热带西太平洋对流异常旺盛, 在西北太平洋出现异常反气旋, 加强东亚—西北太平洋的 EAP 波列, 引起西太平洋副热带高压明显西伸, 导致秋雨偏多。反之, 热带中太平洋海表偏暖, 副热带高压偏弱偏南, 秋雨偏少。2011 年 9 月北方秋雨的环流异常及成因与统计分析和数值模拟结果基本一致。

关键词 北方秋雨 热带中太平洋海表冷却 EAP 波列 西太平洋副热带高压

文章编号 1006-9895(2013)05-1059-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12042

Relationship between Cooling of Tropical Pacific Sea Surface Temperature and Autumn Precipitation in China

HAN Jinping, ZHANG Renhe, and SU Jingzhi

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Autumn precipitation in North China (APNC) is studied for 1951–2011 by using 160-station observed monthly precipitation in China, National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) Reanalysis data, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) extended reconstructed sea surface temperature (SST), and the ECHAM5 general circulation model. In addition, the APNC and anomalous circulations recorded in September 2011 are compared with the statistical and numerical results. It is determined that the APNC shows dramatic interannual and interdecadal variability. The APNC was in a positive phase during the 1960s to early 1980s and in a negative phase in the 1950s, mid-late 1980s, and 1990s. Moreover, the strengthened APNC is closely related to westward stretching of the western Pacific subtropical high (WPSH). The cooling SST in the central tropical Pacific depresses the atmospheric convection over the region and exerts Rossby waves to enhance the convection over the western tropical Pacific. The local Hadley circulation is connected to convection over same region. The strengthened local Hadley circulation leads to anomalous anticyclones in the northwestern Pacific and is favorable for the westward

收稿日期 2012-03-08, 2013-03-04 收修定稿

资助项目 中国气象局公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY200906018, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421404, 中国气象科学研究院基本科研业务费 2010Z003、2012Z001, 国家自然科学基金项目 41005045、41221064

作者简介 韩晋平, 女, 1978 年出生, 博士, 从事东亚季风变化及其机理研究。E-mail: hanjp@cma.cma.gov.cn

movement of the WPSH via East Asia-Pacific (EAP) teleconnection, which increases the APNC. In 2011, negative SST anomalies in the central tropical Pacific and anomalous circulation contributed to extreme above-normal precipitation, which is consistent with the statistical and model experiment results.

Keywords North China autumn precipitation, Central tropical Pacific cooling, EAP teleconnection, Western Pacific subtropical high

1 引言

立秋以后,中国大部分地区秋高气爽,降水稀少,但在西部出现持续性阴雨,这被称为秋雨。绵绵秋雨会导致河流水位上涨,例如汉江、嘉陵江、渭河等流域,在水文上称为秋汛。尽管秋季降水比夏季少,但由于降水持续,雨区集中,且此时正值秋季作物生长,冬季作物播种及水库的蓄水期,秋雨异常可能给农业生产带来严重的影响。另一方面,中国西部地形复杂,多山地,异常秋雨常能引起滑坡和泥石流等地质灾害,造成人员伤亡和经济损失。

早在 1958 年,高由禧(1958)、高由禧和郭其蕴(1958)就注意到秋雨主要发生中国西部。随后的学者对秋雨的时空分布特征进行了分析。徐桂玉和林春育(1994)用 EOF 方法将华西秋雨分为三类,即纬向型、经向型和全区型。冯丽文和郭其蕴(1983)发现 9 月华西秋雨有 3 年和 17 年的周期,10 月的周期为 13 年。白虎志和董文杰(2004)发现华西秋雨有年代际变化特征,1960 年代到 1970 年代初、1980 年代初北多南少,1970 年代后,1980 年代后到 20 世纪北少南多。在全球变暖背景下,我国北方部分地区气候向暖湿转变(施雅风等, 2002),华西秋雨显著增多(张存杰等, 2003)。

连绵秋雨与持续性异常环流场和稳定外强迫因子有密切联系。徐桂玉和林春育(1994), 谌芸和施能(2003a)的研究指出 500 hPa 欧亚环流型与华西秋雨异常紧密相关。中高纬环流系统与西太平洋副热带高压的相互作用是秋雨异常的重要条件(鲍媛媛等, 2003; 郁淑华, 2004; 周长艳等, 2006; 牛宁和李建平, 2007; 彭京备等, 2007; 贾小龙等, 2008; 简茂球和乔云亭, 2012)。许多研究发现,海表温度异常是影响中国秋雨的重要因子(黄荣辉等, 2012)。Zhang et al. (1999) 和 Zhang and Sumi (2002) 指出 ENSO 盛期华南秋季降水增多, 龚道溢和王绍武(1998)、李耀辉等(2000)、谌芸和施能(2003b)的研究发现 El Niño 年,西北地

区秋雨偏少,江南秋雨偏多。刘宣飞和袁慧珍(2006)的研究表明 ENSO 调制 IOD 与秋雨的关系,IOD 正位相年,我国西南地区和黄河流域的秋季降水均偏多,当 IOD 正位相年且同时伴随 El Niño 发生时,黄河流域的秋季降水转为负异常。Niu and Li (2008) 的研究发现西太平洋海表温度与华南秋季降水是正相关关系。此外,陆面热状况也是影响我国秋雨的因素,陈忠明等(2001)的研究表明青藏高原东部的地表热状况与华西秋雨有显著的负相关关系。

秋雨通常定义为 9~10 月,然而,作为夏季风由中国北方向南撤退的表现特征之一,秋雨也经历了快速南落的过程,中国北方秋雨集中在 9 月,西南地区的秋雨可以持续到 10 月,二者变化很不一致,例如 2011 年 9 月,中国北方发生了历史罕见的秋雨,引起严重的城市内涝和泥石流等地质灾害,此时西南地区秋雨偏少,二者变化不同步。以往对定义在 9~10 月的秋雨研究,混淆了不同月份之间的差异,鉴于北方秋雨跟西南秋雨在时间和空间上变化都不一致,需要把二者分开研究,这样不仅更为合理,也将进一步提高对秋雨的科学认识。另一方面,10 月以后大气环流发生突变,环流背景从夏季型转为冬季型,之后北方地区以偏北风为主,因此用 9 月降水代表北方秋雨更合理。本文以 9 月北方秋雨为研究对象,从 2011 年北方秋雨入手,研究影响北方秋雨的海温关键区及其可能的影响机制。需要说明的是,9 月中国北方秋雨区气温在 20°C~30°C 间,较少降雪,降水以液态降雨为主。

2 资料与试验方案

本文利用了国家气候中心提供的全国 160 站月降水资料(<http://ncc.cma.gov.cn/cn/> [2012-09-03]), 大气环流和向外长波辐射(OLR)均为 NCEP/NCAR 再分析资料,分辨率为 2.5°×2.5° (Kalnay et al., 1996), 全球海表温度(SST)资料是 NOAA 延长重建海表温度(NOAA extended reconstructed SST) 资料

(Smith et al., 2008), 分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。降水资料, 大气环流再分析资料和全球海表温度资料的时间长度为 1951~2011 年, OLR 资料为 1979~2011 年。本文所指气候态为 1951~2010 年共 60 年的平均值。

本文还利用 ECHAM5 大气环流模式进行数值试验。ECHAM5 是德国马普气象研究所 (Max-Planck Institute for Meteorology) 发展的第 5 代 ECHAM 大气环流谱模式 (Roeckner et al., 2003), 它是在欧洲中期天气预报中心的天气预报模式 (ECMWF) 基础上发展的, 这里采用的是 ECHAM5.4 版, 水平分辨率为 T63, 垂直方向 19 层。ECHAM5 是当前模拟性能较好的全球模式之一, 美国气象学会的期刊 “Journal of Climate” 2006 年 19 卷 16 期较为全面地介绍了模式的能量平衡, 水循环以及模拟性能等内容。为使结果更清

晰, 参考第 5 部分热带中太平洋海表温度指数的均方差, 设计了两组数值试验, A 组热带中太平洋海表温度暖异常试验, 即在 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{W}$), 范围内气候平均 SST 增加 0.5°C , 其他海区用气候平均的 SST。B 组热带中太平洋 SST 冷异常试验, 异常区域同 A 组, 但异常量为气候平均 SST 减小 0.5°C , 其他海区用气候平均的 SST, 两组试验均连续积分 40 年, 取后 30 年进行分析, B 减 A 表示热带中太平洋 SST 冷却对气候的影响。

3 2011 年 9 月中国北方秋雨的特征

2011 年 9 月北方发生了强度罕见的秋雨, 图 1a 为全国降水分布图, 由图可见在中国南方和北方各有一条雨带, 北方雨带位于 33°N , 中心在西北地区东部, 最大降水超过 400 mm, 南方雨带位于西

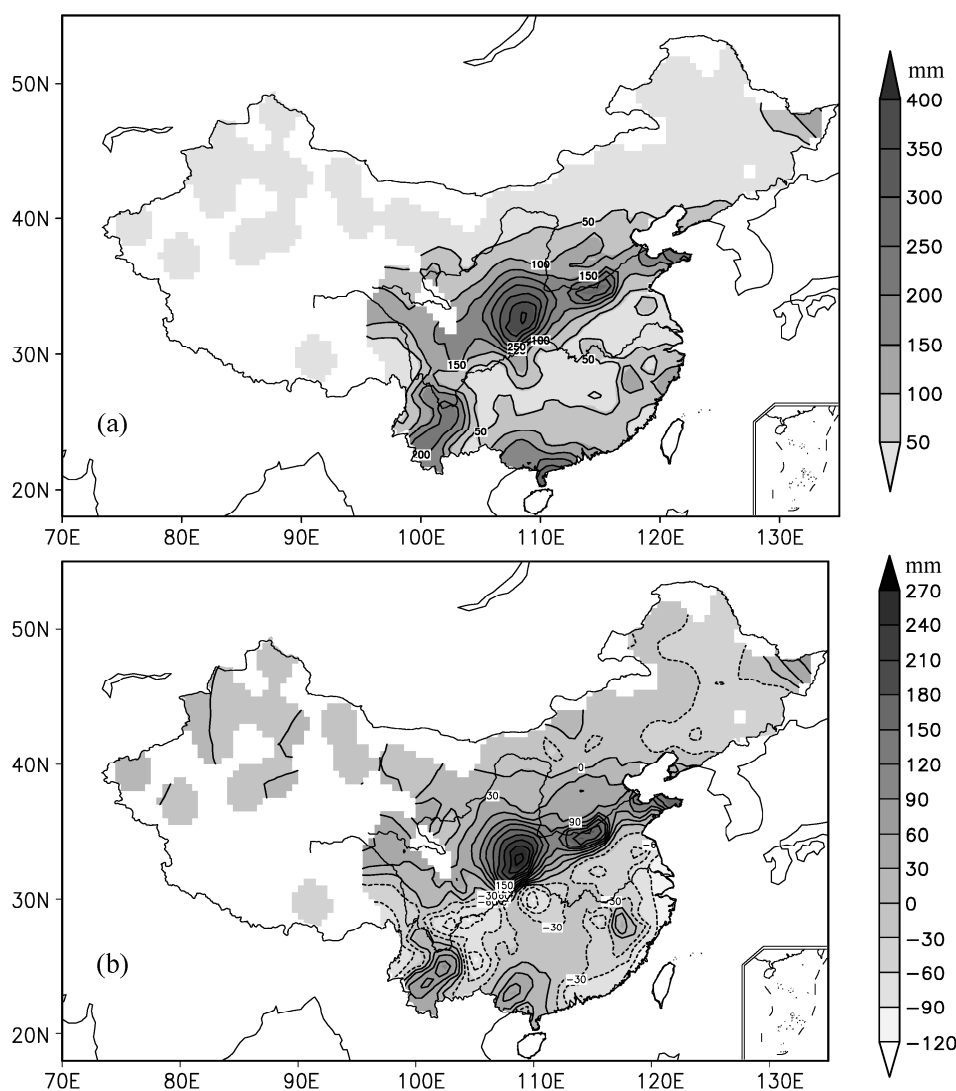


图 1 2011 年 9 月 (a) 全国降水总量和 (b) 降水距平 (单位: mm)

Fig. 1 (a) Autumn precipitation and (b) precipitation anomaly in China in September 2011

南—华南, 最大降水量 200 mm 左右, 最大降水中心位于西南地区。由降水距平分布 (图 1b) 可见, 西北地区东部—黄河中下游 ($32^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) 是异常强降雨带, 最大降水异常超过 200 mm。两个降水异常中心分别出现在西北地区东部和黄河下游区域, 前者最强, 后者较弱。由图 1 可见, 2011 年 9 月秋雨主要位于中国北方地区, 西南地区降水偏少, 这说明北方秋雨与西南秋雨不同步。

为了方便研究, 考虑到图 1b 所示的降水异常分布, 本文将 ($32^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$) 定义为北方秋雨区, 该区的平均降水作为秋雨指数, 如图 2 所示。中国北方秋雨的气候平均值为 79.4 mm, 均方差为 35.6 mm, 占气候平均值的 45%, 即北方秋雨年际变率大。秋雨还存在显著的年代际变化, 1960 年代到 1980 年代中期, 北方秋雨偏多, 1950 年代、1980 年代后期和 1990 年代偏少, 进入 21 世纪以后, 北方秋雨再次进入较多的时期, 2011 年是

60 年来北方秋雨最多的年份, 达到 163 mm, 为气候平均值的 2 倍多。

从北方秋雨指数与同期全国降水相关来看 (图 3), 显著正相关区在 ($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, 105°E) 以东的北方地区, 代表 9 月秋雨的主要位置, 除西南地区有零星显著负相关区外, 其他地区的相关均不显著, 这表明我们上述定义的北方秋雨指数能够较好代表 9 月北方秋雨区。

4 与北方秋雨相联系的大气环流变化

北方秋雨的持续性异常往往与稳定维持的大气环流异常紧密相连。图 4 是北方秋雨与大气环流的回归, 由图 4a 可见, 位于东亚—西北太平洋的强大反气旋环流是重要的影响系统, 其西南侧为强盛的西南风, 它携带的暖湿水汽是秋雨形成的必要条件之一。同时, 亚洲北部青藏高原以北的高纬地区有一气旋, 由于处于高纬内陆地区, 其南侧的偏

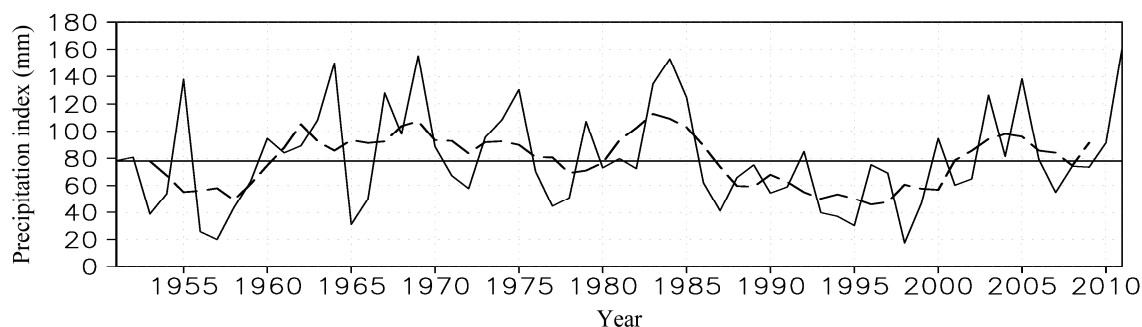


图 2 北方秋雨指数, 粗虚线为 5 年滑动平均, 直线为 1951~2010 年气候平均值, 为 79.4 (单位: mm)

Fig. 2 Autumn precipitation index (solid curve) with the 5-year running mean (bold dashed curve). The climatic mean for 1951–2010 is 79.4 mm (solid line)

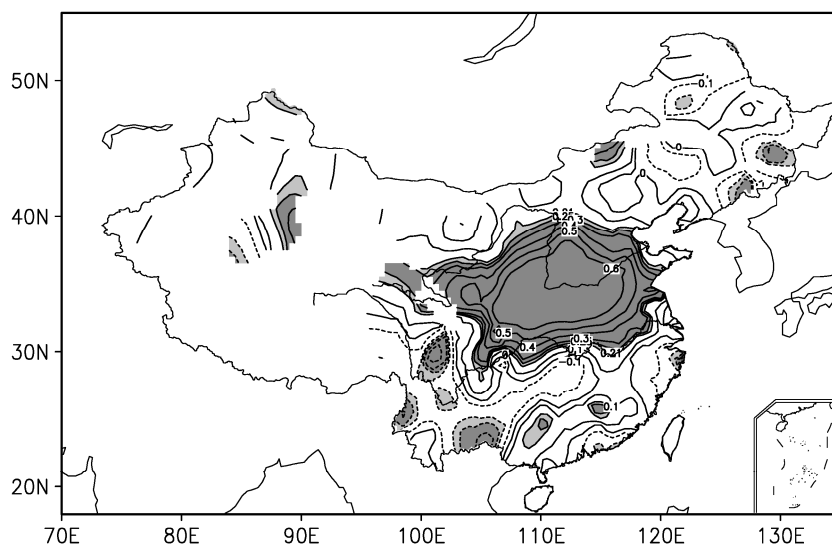


图 3 北方秋雨指数与 9 月降水的相关, 深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验

Fig. 3 The correlation between the autumn precipitation index and the September precipitation in China. The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels

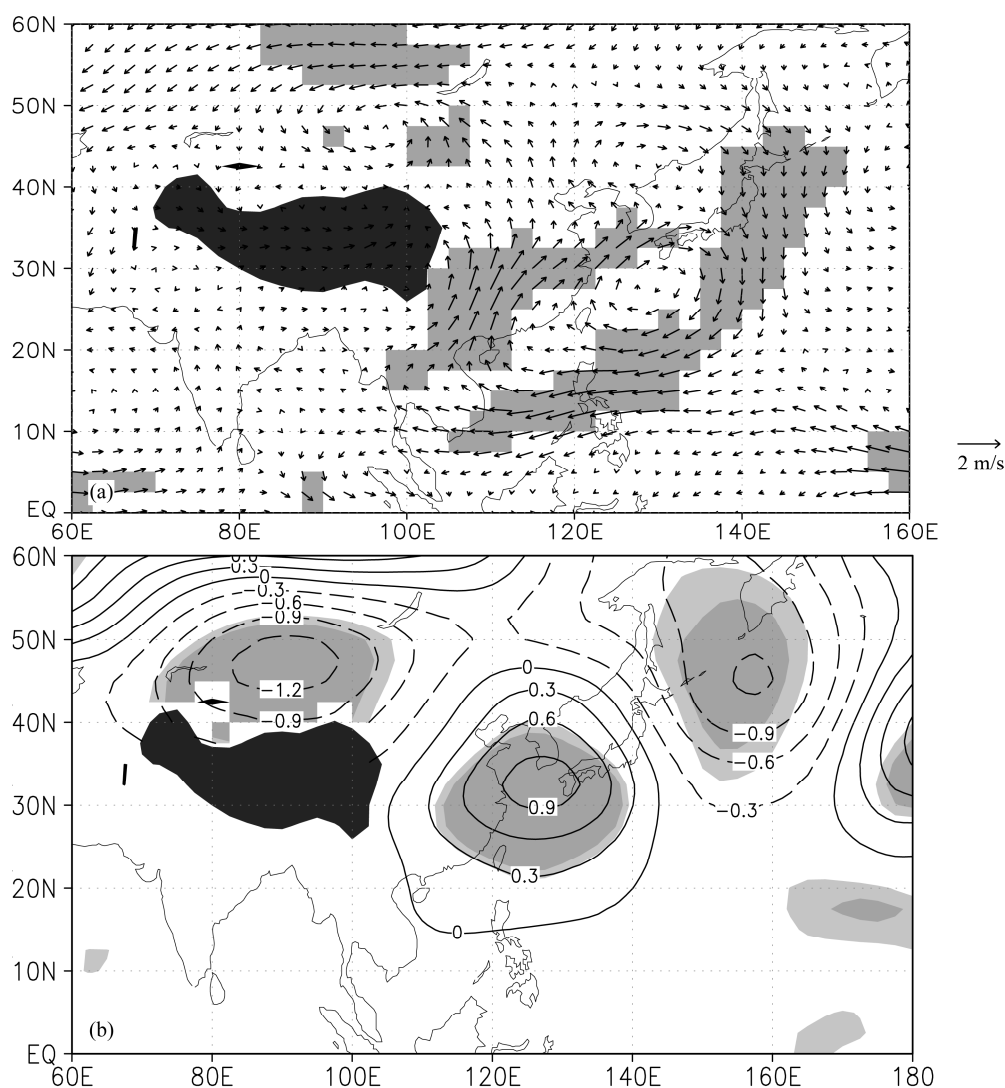


图4 对北方秋雨指数回归的 (a) 850 hPa 风场 (单位: m/s) 和 (b) 500 hPa 高度场 (单位: dagpm)。深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验, 黑色区域为海拔大于 2500 m 的地形

Fig. 4 The regressed (a) 850-hPa wind vectors and (b) 500-hPa geopotential height (dagpm) on the autumn precipitation index. The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels. The black area is topography above 2500 m

西风寒冷干燥, 暖湿气流和干冷空气在高原东北侧汇合, 对应北方秋雨区。图 4a 表明东亚—西北太平洋反气旋的维持有利于异常强盛偏南风的稳定, 这是北方秋雨持续异常的必要水汽条件。

稳定的偏南风是显著的海—陆气压梯度引起的。从 500 hPa 位势高度回归场上来看 (图 4b), 巴尔喀什湖—贝加尔湖是负相关区, 东亚—西北太平洋地区为正相关。这表明, 大陆与邻近海区有显著的气压对比, 气压梯度从海洋指向大陆, 非常有利于东亚形成异常偏南风。同时, 正相关区西伸进入中国东部, 表明北方秋雨偏多时, 西太平洋副热带高压深入大陆, 更有利于其西侧的暖湿气流输送到中国西部, 同时中国东部受高压下沉气流影

响, 降水稀少。另外, 需要指出的是, 图 4b 中东亚沿岸为高度场正异常, 日本东北方为负异常, 低纬海洋性大陆为较弱的负异常, 即从低纬热带到高纬异常高度场表现为负—正—负的异常分布, 这是典型的 EAP 波列 (Huang and Sun, 1992) 分布型, 它是影响东亚气候异常的重要环流形势。

5 热带太平洋海温异常在秋雨形成中的作用

由图 4 可知, 西太平洋副热带高压是影响北方秋雨的重要因子, 它的位置和强度都受海洋热力状况的影响。图 5 是与秋雨相关的同期海表温度分布, 图中可见热带中太平洋地区为显著的负相关

区, 暖池和菲律宾以东的海表温度为正相关区, 这说明热带中太平洋的海表冷却和暖池及菲律宾以东偏暖的海温跟中国北方秋雨有密切关联。由于热带中太平洋海温早在 7 月就出现显著异常, 并维持到 10 月以后, 而暖池和菲律宾以东的海表异常仅在同期出现并且范围较小, 因此以下分析热带中太平洋海表温度异常与秋雨的关系。

为了分析热带中太平洋海温异常与秋雨的联系, 我们选取 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$) 范围内区域平均的海表温度作为热带中太平洋海表温度指数, 记为 CTSSTI, 它的时间变化如图 6 所示, 图中同时给出了北方秋雨指数。由图可见, CTSSTI 的长期变化趋势不明显, 均方差为 0.54, CTSSTI 与北方秋雨有显著的负相关, 相关系数为 -0.31 , 通过 95% 显著性检验。此外, CTSSTI 还有年代际尺

度的变化, 与秋雨的年代际变化表现出反位相特征, 1980 年代以前, CTSSTI 以负位相为主, 1980 年代以后为正位相, 2005 年以后, CTSSTI 呈现下降趋势, 以 9 年滑动平均表示年代际尺度, 则二者的相关系数为 -0.43 , 通过 95% 的显著性检验。

CTSSTI 与秋雨的关系有较长时间的持续性, 从二者的超前一滞后相关 (图 7) 可见, 在异常秋雨发生前 4 个月, 二者的负相关关系已通过显著性检验。二者的相关在同期达到最大。北方秋雨发生后的 3 个月, CTSSTI 与秋雨的负相关关系仍显著, 这是因为海表温度有较好的持续性。因此, 图 7 表明热带中太平洋海表温度异常的持续性是北方秋雨的先兆信号, 这对北方秋雨的预测是有意义的。

CTSSTI 与中国北方秋雨指数有较好的负相关

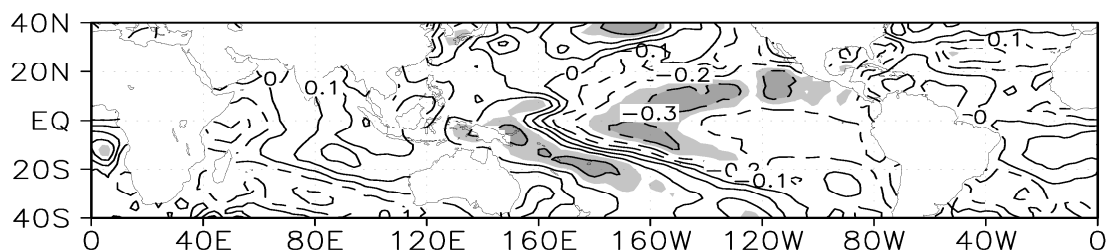


图 5 北方秋雨与 9 月 SST 的相关分布。深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验

Fig. 5 Correlation between the autumn precipitation index and the sea surface temperature (SST). The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels

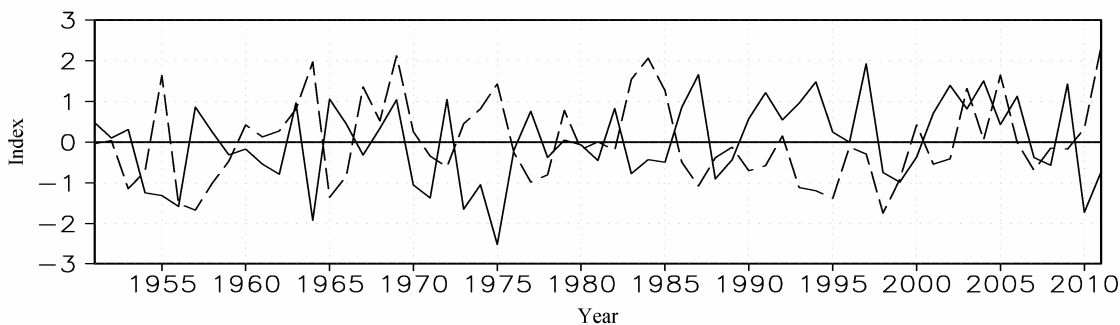


图 6 标准化的 9 月 CTSST 指数 (实线) 与北方秋雨指数 (虚线)

Fig. 6 Normalized central tropical Pacific sea surface temperature index (CTSSTI) (solid curve) and the autumn precipitation index (dashed curve)

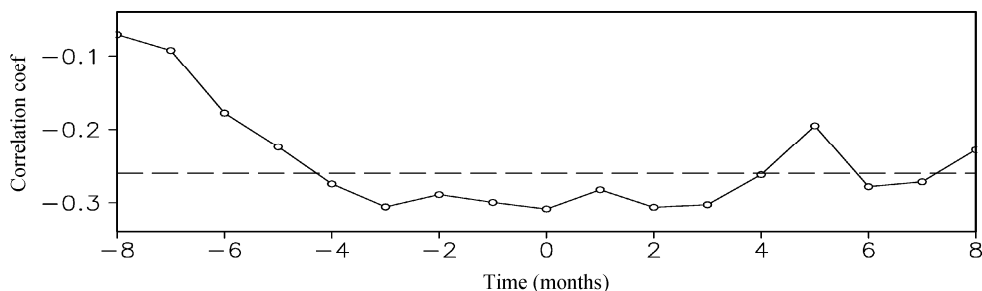


图 7 CTSSTI 与秋雨指数的超前一滞后相关。虚线为 95% 显著性检验水平

Fig. 7 Lead-lag correlation between CTSSTI index and the autumn precipitation index. The dashed line indicates the 95% confidence level

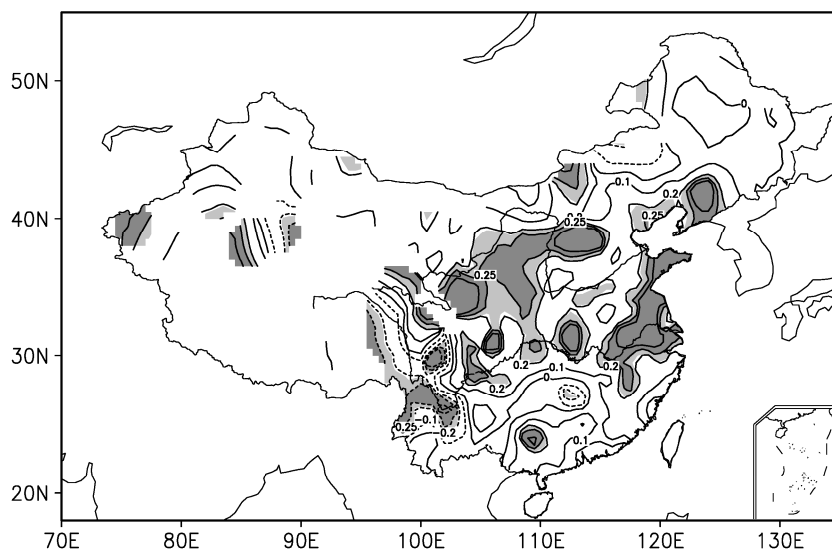


图8 CTSST 指数与9月降水的相关(反号), 深(浅)阴影区通过95%(90%)显著性检验

Fig. 8 The correlation between the negative CTSST index and the September precipitation in China. The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels

关系, 它对中国秋雨的影响是怎样的? 为了便于比较, 下文中我们将与 CTSSTI 相关的降水场和环流场均取负号, 用以表示与异常偏冷海表温度相联系的变化。图 8 中, 正相关区主要位于 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, 其中西北地区东部和江淮地区东部通过显著性检验, 与图 3 一致, 这表明负 CTSSTI 与中国北方秋雨有密切联系。此外, 二者也有不同之处, 图 8 中东北地区为正相关, 且其东南部通过显著性检验, 图 3 中这里为不显著的负相关。其他地区, 尽管符号不完全相同, 但是都不能通过检验。

为进一步说明热带中太平洋异常对北方秋雨的作用, 我们计算了与负 CTSSTI 相关联的大气环流场, 结果在图 9 给出。图 9a, 东亚—西北太平洋为反气旋式环流, 热带太平洋地区盛行东风异常, 在中南半岛转为西南风, 使得中国东部地区均为西南风控制, 这与图 4a 一致, 表明热带中太平洋的海表温度冷异常与中国东部的偏南风异常有紧密联系。

风场是高度场配置的体现。图 9b 是负 CTSSTI 与 500 hPa 高度场的相关, 图中巴尔喀什湖与贝加尔湖间为高度负异常, 东亚—西北太平洋为高度正异常, 二者间为偏南风, 即图 9a 中的异常偏南风是高低气压差引起的。另外, 东亚沿岸从低纬到高纬为负—正—负的异常分布型, 呈现与图 4b 相似的 EAP 波列。

热带中太平洋海表温度偏冷可以引起大气中

对流活动异常, 图 10 是偏冷的 CTSSTI 与 OLR 的同期相关, 由图可见, 150°E 以东的热带太平洋地区为明显正相关, 热带西太平洋暖池区为显著的负相关, 即热带中东太平洋的对流活动受到抑制, 出现异常下沉运动, 西太平洋对流活动异常旺盛, 上升运动活跃, 旺盛的对流向北可以达到南海地区, 因此, 热带中太平洋海表冷却造成热带西太平洋对流活跃。

热带西太平洋上升运动旺盛会引起东亚—西太平洋的经向环流异常。从局地垂直运动来看(图 11), 热带西太平洋上升气流活跃, 对流旺盛, 其北侧 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 下沉运动增强, 在 700 hPa 以下尤其显著, 即局地 Hadley 环流增强。Hadley 环流的下沉支对应西太平洋副热带高压位置, 异常下沉运动对应 EAP 波列位于中纬度的正相关区, 与图 9 相比, 垂直运动位置偏南, 这是因为副热带高压脊线随高度的向北倾斜(对流层中层以下)。根据质量补偿, 下沉运动区的北侧 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 存在另一上升运动区, 它与北方秋雨区位置一致。这表明, 热带中太平洋海表温度偏冷, 西太平洋对流异常活跃, 加强了局地 Hadley 环流, 使其北侧的下沉运动和秋雨区的上升运动均加强, 也就是说, 热带中太平洋海表冷却, 使热带西太平洋的对流旺盛, 加强了东亚沿岸的 EAP 波列, 增强了偏南风, 使北方秋雨区处于气流辐合上升区, 造成多降水。反之, 当热带中太平洋海表增暖时, 北方秋雨偏少。

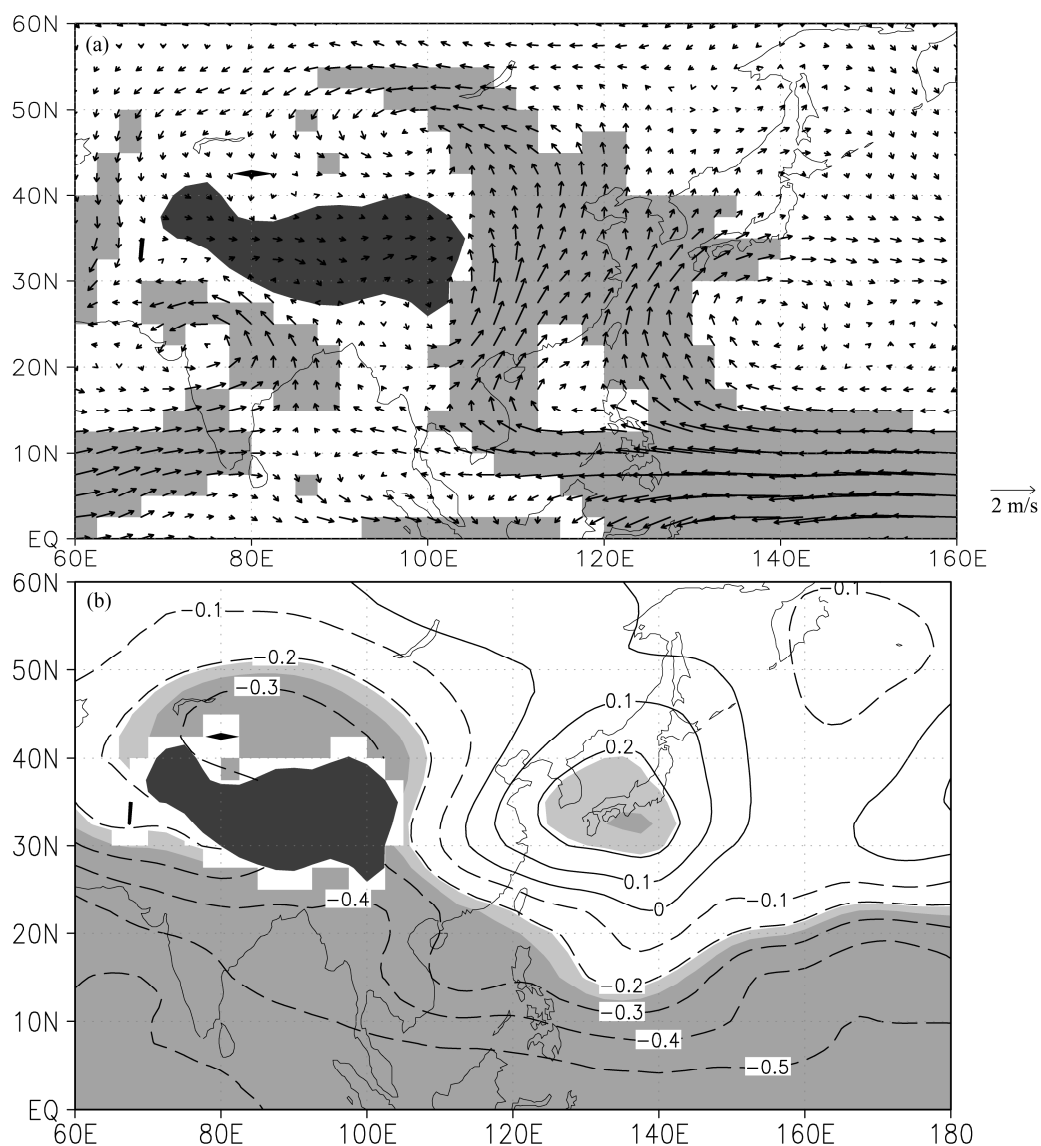


图9 对 CTSSTI 回归的 (a) 850 hPa 风场 (反号, 单位: m/s) 和 (b) 500 hPa 高度场 (反号, 单位: dagpm)。深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验, 黑色区域为海拔大于 2500 m 的地形

Fig. 9 (a) The regressed 850-hPa wind vectors, and (b) the 500-hPa geopotential height on the negative CTSSTI. The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels. The black area is topography above 2500 m

以上的分析表明, 当热带中太平洋出现负海温异常时, 其上空的对流受到抑制, 热带西太平洋的对流旺盛, 从而使局地的 Hadley 环流加强, 其北侧的下沉支随之增强, 出现异常反气旋, 加强 EAP 波列, 这就导致西太平洋副热带高压加强西伸, 副高西侧的偏南风引导水汽输送, 造成北方秋雨偏多, 反之偏少。Zhang et al. (1996) 的研究表明, 热带太平洋的海表温度异常可以引起对流加热异常, 在大气中产生 Rossby 波响应。对于负海温异常, 对流异常冷却造成大气中的 Rossby 波响应在西北太平洋地区激发出反气旋异常, 造成了副高的

加强西伸, 本文与此一致。

6 热带中太平洋海表温度异常的数值试验

为了进一步验证上述统计分析的结果, 本文利用 ECHAM 5 大气环流模式进行了敏感性试验, 结果如图 12 所示。

图 12a 是模拟的热带中太平洋 SST 冷异常时的 850 hPa 风场异常, 海表冷却导致热带西太平洋地区为东风异常, 东亚沿岸为偏南风, 有利于水汽向北输送, 这与前述统计分析结果一致, 只是模拟

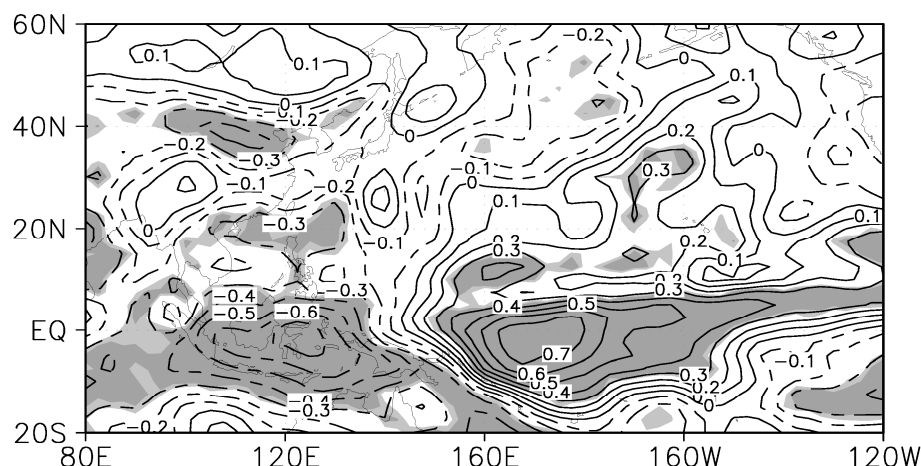


图 10 CTSSTI 与同期 OLR 的相关 (反号), 深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验

Fig. 10 The correlation between the negative CTSSTI and outgoing longwave radiation (OLR). The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels

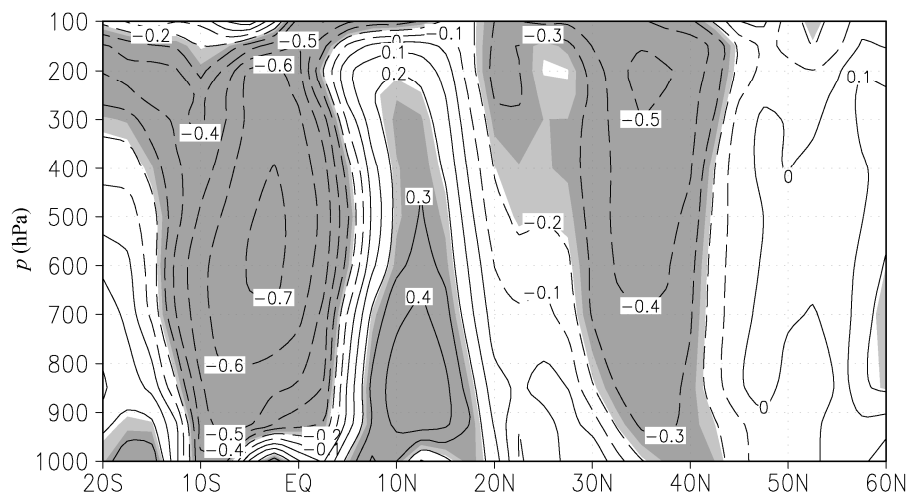


图 11 CTSSTI 与 (110°~130°E) 垂直速度的相关 (反号), 深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验

Fig. 11 The correlation between the negative CTSSTI and the vertical velocity averaged over 110°–130°E. The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels

的风场显著区偏小且位置偏北, 这是因为模拟的副热带西北太平洋的异常反气旋较弱。

图 12b 是模拟的 500 hPa 高度场, 从热带到高纬存在一个明显的负—正—负遥相关, 即 EAP 波列, 热带和高纬为负异常, 中纬度为正异常, 这与图 4b 和图 9b 还是比较一致的。

目前大多数全球模式对东亚降水模拟能力很有限, ECHAM 5 也存在类似的问题, 这里仅以 850 hPa 辐合场大致表示雨区的位置, 如图 13 所示。由图可见, 最大的辐合区位于 (36°N, 105°E) 附近, 与图 1 中北方秋雨区位置总体一致的。

因此, 敏感性试验表明, 热带中太平洋海表冷却会激发出 Rossby 响应, 在西北太平洋地区出现

异常反气旋, 使副热带高压加强西伸, 引导水汽在北方秋雨区辐合, 造成降水偏多。

7 对 2011 年 9 月北方秋雨的讨论

2011 年 9 月中国北方秋雨的范围和强度为近 60 年罕见, 下面我们将分析大气环流和热带中太平洋海表热状况异常在这次事件中的作用, 对比它与前述分析结果的异同。

从 2011 年 9 月低层环流异常场来看 (图 14a), 热带中太平洋以西为东风异常, 以东为西风异常, 即这里低层风场辐散, 中国东部 35°N 以南盛行偏南风, 35°~45°N 为偏东风, 中国北方地区处于气流辐合区。巴尔喀什湖以东, 贝加尔湖的西南为一个

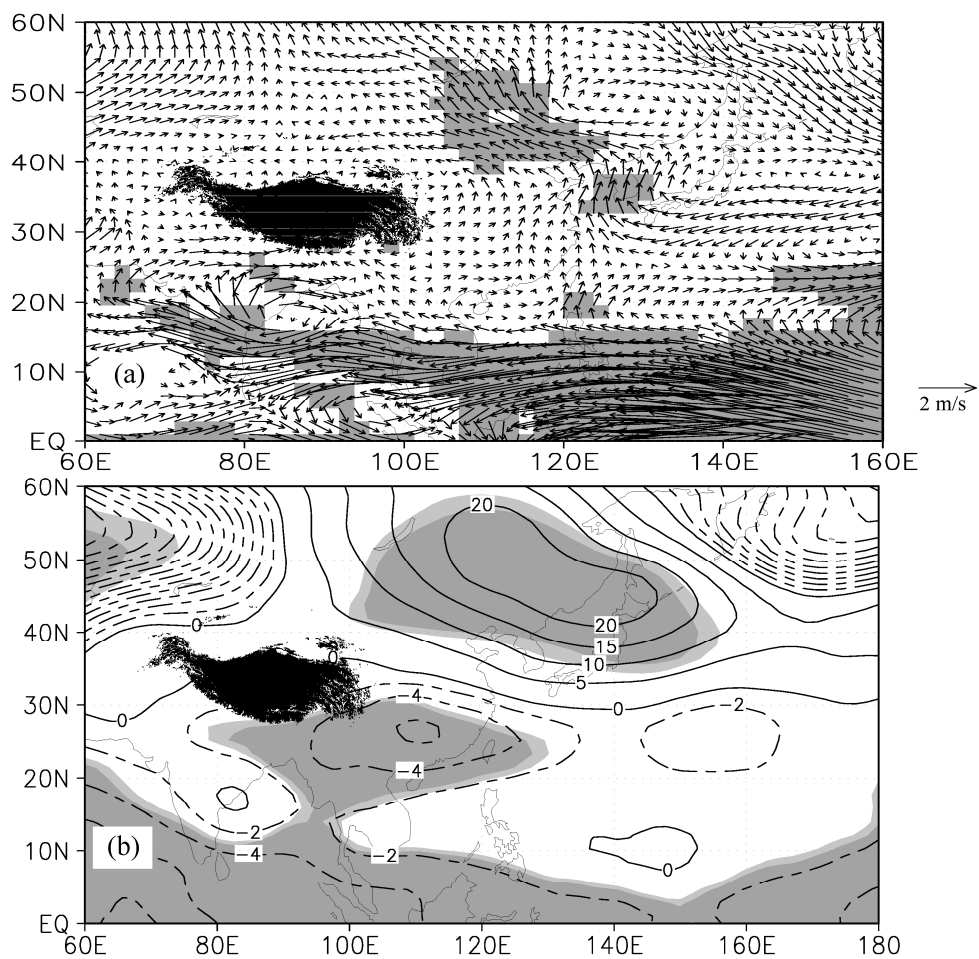


图 12 模拟的 (a) 850 hPa 风场异常 (单位: m/s) 和 (b) 500 hPa 位势高度异常 (单位: gpm)。深 (浅) 阴影区通过 95% (90%) 显著性检验, 黑色阴影为青藏高原

Fig. 12 (a) The wind vector anomalies at 850-hPa (m/s), and (b) the geopotential height anomalies (gpm) at 500 hPa in the numerical experiment. The dark (light) shadings indicate the 95% (90%) confidence levels; the black shadow is the Tibetan Plateau

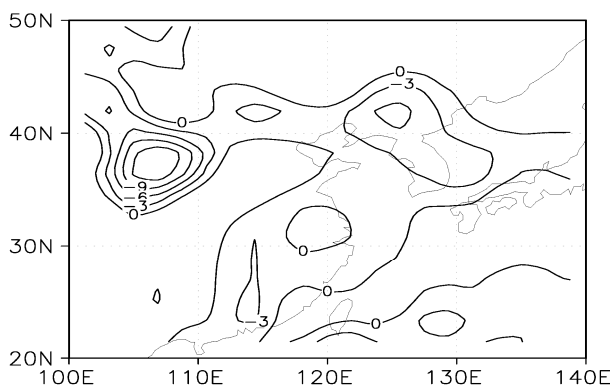


图 13 模拟的 850 hPa 辐合场异常 (单位: 10^{-7} s^{-1})

Fig. 13 The anomalous convergence field at 850 hPa in the numerical experiment (10^{-7} s^{-1})

气旋, 中国南方和日本以东的北太平洋上分别有两个反气旋, 二者间的副热带西太平洋上是一个气旋。中国东南上空的副热带反气旋与图 4a 具有较

好的一致性, 但不同之处在于其东部出现了异常气旋。据统计, 2011 年 9 月先后有 7 个台风途经或停留在此, 因此异常气旋的出现是频繁的台风活动引起的。

台风影响下的环流形势在 500 hPa 高度场 (图 14b) 可以看得更清晰, 中国东部和日本以东的西北太平洋有两个异常高压区, 30°N 的西北太平洋为低压区。总体来看, 两个高压区仍是一体的, 异常低压使副热带高压变形为两个部分, 主体移到海洋上, 另一部分高压深入大陆。尽管频繁出现的台风减弱了海上的副热带高压, 但在中国东部大陆上空仍为正高度异常, 副热带高压西侧的偏南风仍然保持向北的水汽输送, 这种环流形势造成 2011 年 9 月中国北方异常偏多的降水。

图 15 是 2011 年 9 月的海温距平, 热带中太平洋的 SST 偏低, 最冷区低于 -0.6°C , 这与图 5 所

示的海温空间分布一致。冷海温异常会使其上的对流受到抑制(图 16), 激发出的大气 Rossby 波使得西北太平洋地区出现反气旋异常, 造成了西太平洋副热带高压的加强西伸。同时, 热带西太平洋地区的 SST 变暖 0.3°C 以上, 这可能是促使台风活动频繁的原因之一。

2011 年 9 月的 OLR 异常如图 16 所示, 由于热

带中东太平洋海表温度负异常, 160°E 以东的对流受到抑制, 同时还发现西太平洋—南海的对流活跃, 这与前面分析结果一致。

台风与环流的影响是相互的, 西太平洋副热带高压外围气流能引导台风移动, 台风的移动也影响副热带高压。当台风移动到副热带高压西侧时, 通常副热带高压东退, 使东亚—西北太平洋处于低气

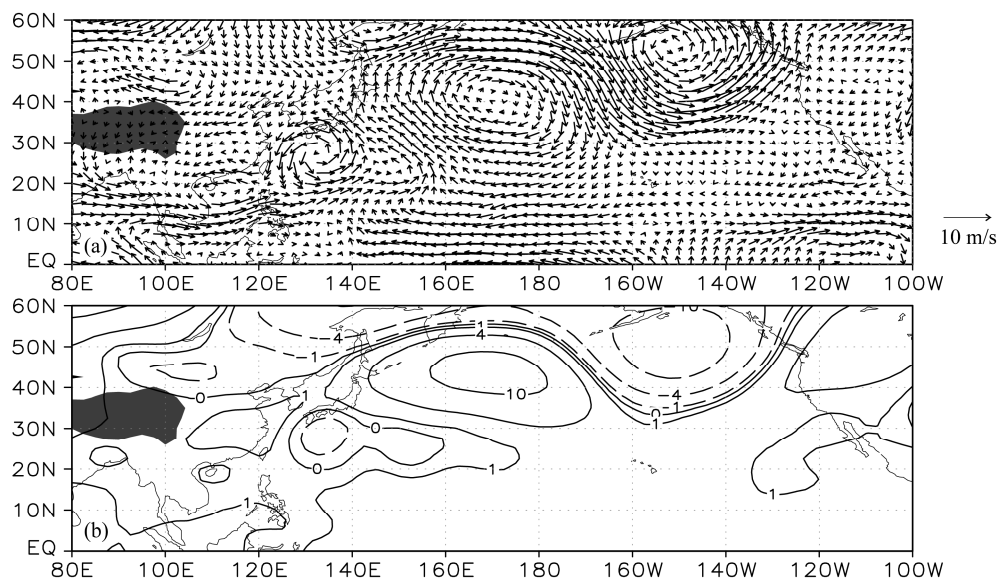


图 14 2011 年 9 月环流的距平场: (a) 850 hPa 风场 (单位: m/s); (b) 500 hPa 位势高度场 (单位: dagpm)。黑色区域为海拔大于 2500 m 的地形
Fig. 14 The anomalous circulations in September 2011: (a) 850-hPa wind field (m/s); (b) 500-hPa geopotential height (dagpm). The black area is topography above 2500 m

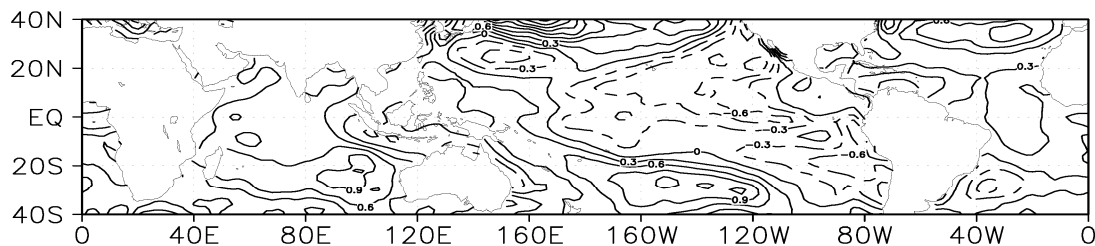


图 15 2011 年 9 月 SST 距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 15 SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) in September 2011

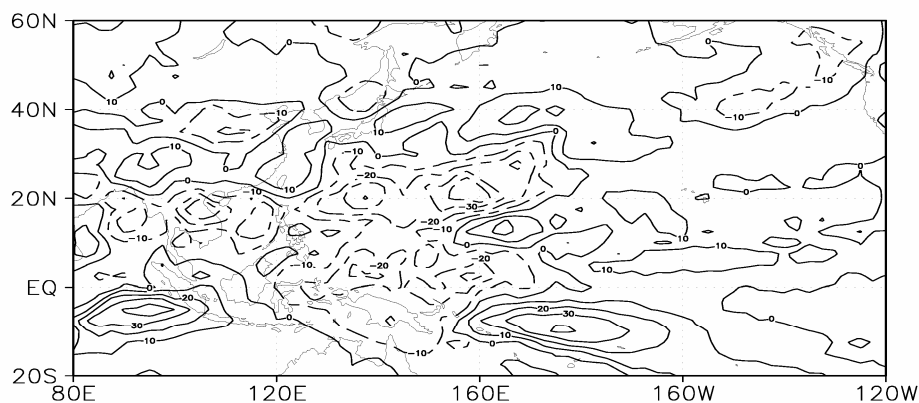


图 16 2011 年 9 月 OLR 距平 (单位: W/m^2), 等值线间隔 10 W/m^2

Fig. 16 The anomalous OLR in September 2011 with interval 10 W/m^2

压背景下。2011 年 9 月, 副热带高压明显偏西, 偏强, 频繁台风的活动使副热带高压分裂为两部分, 主体在 140°E 以东的太平洋上, 中国南方滞留了小部分, 正是这部分滞留的副热带高压的维持使偏南风稳定地为雨区提供了水汽条件, 导致了历史罕见的北方秋雨。换句话说, 热带中太平洋 SST 偏冷, 副热带高压偏西偏强的条件下, 台风活动使环流场变形导致部分西太平洋副热带高压异常西伸, 深入中国大陆, 加强了偏南风的稳定维持, 造成中国北方秋雨偏多。

8 总结与讨论

本文利用 1951~2011 年中国 160 站的降水资料, NCEP/NCAR 大气环流资料 NOAA 延长重建海表温度资料, OLR 资料以及 ECHAM 5 大气环流模式研究了中国北方秋雨的年际变化特征及成因。研究发现, 中国北方秋雨具有明显的年际和年代际变化, 但长期变化趋势不明显, 1960 年代到 1980 年代中期, 是北方秋雨偏多的时期, 1950 年代、1980 年代后期和 1990 年代偏少, 2000 年以后, 秋雨再次进入较多的时期, 2011 年是 60 年来降水最多的年份, 达到 163 mm。

北方秋雨与西太平洋副热带高压异常西伸有密切关系, 当秋雨偏多时, 西太平洋副热带高压显著西伸, 其西侧的偏南风对水汽的向北输送是北方秋雨出现的重要水汽条件。热带中太平洋的海表冷却是引起环流异常的原因, 当热带中太平洋海表温度偏低时, 其上的对流受到抑制, 热带西太平洋的对流异常活跃, 导致局地 Hadley 环流增强, 使 30°N 的下沉运动增强, 西北太平洋出现异常反气旋, 引起 EAP 波列异常, 这使得西太平洋副热带高压明显西伸, 其西侧的偏南风向北输送充足水汽, 并在中国北方辐合, 造成秋雨偏多。反之, 当热带中太平洋海表温度异常偏低时, 不利于北方秋雨偏多。此外, 热带中太平洋异常 SST 与北方秋雨的相关关系有很好的持续性, 这对北方秋雨的预测具有一定意义。

本文分析了热带中太平洋海表冷却对中国北方秋雨的影响, 没有考虑 ENSO 循环对秋雨的影响。由于热带中太平洋海表温度异常与 ENSO 循环有密切关系, 目前已有大量研究表明, ENSO 不同发展位相, 对气候的影响不同 (Zhang et al., 1996; Gao et al., 2006), 而且 ENSO 对东亚气候的影响长期来

看是不稳定的 (Wang, 2002)。在 La Niña 发展和衰亡阶段, 热带中太平洋海表温度均表现为负异常, 这就自然地引出另一个问题, 在 La Niña 不同演变阶段, 中国北方秋雨有何异同? 影响机制是否相同? 这将是复杂的问题, 不仅需要对历史观测资料进行细致分析, 还需要借助数值模式进行深入研究。另外, 热带中太平洋海表温度与中国北方秋雨的关系还可能有多时间尺度问题, 图 6 显示二者在年代际时间尺度上也有显著关系, 这也许跟气候背景有关。总之, 还有许多问题值得进一步研究。

致谢 感谢审稿专家和编辑提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 白虎志, 董文杰. 2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析 [J]. 高原气象, 23 (6): 884–889. Bai Huzhi, Dong Wenjie. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (6): 884–889.
- 鲍媛媛, 阿布力米提, 李峰. 等. 2003. 2001 年华西秋雨时空分布特点及其成因分析 [J]. 应用气象学报, 14 (2): 215–222. Bao Yuanyuan, Abulimiti, Li Feng, et al. 2003. Space-time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (2): 215–222.
- 湛芸, 施能. 2003a. 我国秋季降水、温度的时空分布特征及气候变化 [J]. 南京气象学院学报, 26 (5): 622–630. Chen Yun, Shi Neng. 2003a. Spatial and temporal distribution of autumn precipitation and temperature in China and climatic change [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (5): 622–630.
- 湛芸, 施能. 2003b. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常 [J]. 热带气象学报, 19 (2): 137–146. Chen Yun, Shi Neng. 2003b. El Niño/ENSO and climatic anomaly in the autumn of China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (2): 137–146.
- 陈忠明, 刘富明, 赵平. 等. 2001. 青藏高原地表热状况与华西秋雨 [J]. 高原气象, 20 (1): 94–99. Chen Zhongming, Liu Fuming, Zhao Ping, et al. 2001. Relationship between the surface heating fields over Qinghai-Xizang Plateau and precipitation of Southwest China in autumn [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (1): 94–99.
- 冯丽文, 郭其蕴. 1983. 华西秋雨的多年变化 [J]. 地理研究, 2 (1): 74–84. Feng Liwen, Guo Qiyun. 1983. The fluctuation of autumn rain in south-west China [J]. Geographical Research (in Chinese), 2 (1): 74–84.
- Gao H, Wang Y G, He J H. 2006. Weakening significance of ENSO as a predictor of summer precipitation in China [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L09807, doi:10.1029/2005GL025511.
- 高由禧. 1958. 东亚的秋高气爽 [J]. 气象学报, 29 (2): 83–92. Gao Youxi. 1958. On the high autumn clear weather in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 83–92.
- 高由禧, 郭其蕴. 1958. 我国的秋雨现象 [J]. 气象学报, 29 (4): 264–273. Gao Youxi, Guo Qiyun. 1958. The autumn rainfall in China [J]. Acta

- Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 264–273.
- 龚道溢, 王绍武. 1998. ENSO 对中国四季降水的影响 [J]. 自然灾害学报, 7 (4): 44–52. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1998. Impact of ENSO on the seasonal rainfall in China [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 7 (4): 44–52.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 70 (1): 243–256.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 443–457. Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 443–457.
- 贾小龙, 张培群, 陈丽娟, 等. 2008. 2007 年我国秋季降水异常的成因分析 [J]. 气象, 34 (4): 86–94. Jia Xiaolong, Zhang Peiqun, Chen Lijuan, et al. 2008. Causality analysis of autumn rainfall anomalies in China in 2007 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (4): 86–94.
- 简茂球, 乔云亭. 2012. 华南秋旱的大气环流异常特征 [J]. 大气科学, 36 (1): 204–214. Jian Maoqiu, Qiao Yunting. 2012. Characteristics of general circulation anomalies related to the drought events in fall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 204–214.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–471.
- 李耀辉, 李栋梁, 赵庆云, 等. 2000. ENSO 对中国西北地区秋季异常降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 5 (2): 205–213. Li Yaohui, Li Dongliang, Zhao Qingyun, et al. 2000. Effect of ENSO on the autumn rainfall anomaly in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (2): 205–213.
- 刘宣飞, 袁慧珍. 2006. ENSO 对印度洋偶极子与中国秋季降水关系的影响 [J]. 南京气象学院学报, 29 (6): 762–768. Liu Xuanfei, Yuan Huizhen. 2006. Effects of ENSO on the relationship between IOD and autumn rainfall in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (6): 762–768.
- 牛宁, 李建平. 2007. 2004 年中国长江以南地区严重秋旱特征及其同期大气环流异常 [J]. 大气科学, 31 (2): 254–264. Niu Ning, Li Jianping. 2007. The features of the heavy drought occurring to the south of the Yangtze River in China as well as the anomalies of atmospheric circulation in autumn 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 254–264.
- Niu N, Li J P. 2008. Interannual variability of autumn precipitation over South China and its relation to atmospheric circulation and SST anomalies [J]. Adv. Atmos. Sci., 25 (1): 117–125.
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 467–474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Bueh Chalow. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 467–474.
- Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L, et al. 2003. The Atmospheric General Circulation Model ECHAM 5. Part I: Model Description [M]. Hamburg, Germany: Max-Planck-Institute for Meteorology, 2003, Rep. 349.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24 (3): 219–226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (3): 219–226.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. J. Climate, 21: 2283–2296.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon ENSO relations [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (1): 1–11.
- 徐桂玉, 林春育. 1994. 华西秋雨特征及成因探讨 [J]. 气象科学, 12 (4): 149–154. Xu Guiyu, Lin Chunyu. 1994. Survey on the causes and features of autumn rain in western China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 12 (4): 149–154.
- 郁淑华. 2004. 一次华西秋季大暴雨的水汽分析 [J]. 高原气象, 23 (5): 689–696. Yu Shuhua. 2004. Vapour analysis of a heavy rain in west of China in autumn [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (5): 689–696.
- 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 157–164. Zhang Cunjie, Gao Xuejie, Zhao Hongyan. 2003. Impact of global warming on autumn precipitation in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 157–164.
- Zhang R H, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and autumn [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80: 213–227.
- 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 H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 16: 229–241.
- 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 2006. 东亚地区秋季水汽输送特征及水汽源地分析 [J]. 热带气象学报, 22 (4): 380–385. Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, et al. 2006. Climatological characteristics of water vapor transport over East Asia and water vapor source in autumn [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (4): 380–385.