

贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等. 2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象,2011,37(4):446-453.

2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响^{*}

贾小龙 陈丽娟 龚振淞 王遵娅 袁 媛 孙丞虎

中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心 北京 100081

提 要: 为了及时总结气候异常发生的成因,提高气候预测准确率,本文利用历史和实时观测资料以及物理机制诊断等方法,对我国 2010 年气候异常的成因进行了初步分析。结果表明,2010 年是进入 21 世纪以来气候最为异常的一年。海洋异常特征主要有:2009 年 6 月至 2010 年 4 月,赤道太平洋发生一次中等强度的厄尔尼诺事件,2010 年 7 月又迅速进入拉尼娜状态;而热带印度洋海温距平的发展经历了全区一致型暖海温异常和负偶极型海温模态两个阶段;北大西洋海温距平表现为“三极子”型特征。受海温异常强迫和海气相互作用的影响,北半球大气环流的主要特征有:西太平洋副热带高压在 10 月之前受厄尔尼诺影响而异常偏强偏西,之后受拉尼娜影响而异常偏弱偏东,副高脊线位置也表现出明显的阶段性特征;夏季中高纬地区出现明显的阻塞形势;南海夏季风为 1951 年以来最弱的一年,东亚夏季风也异常偏弱。此外,2009/2010 年冬季北极涛动出现近 60 年来最强负异常。在海温异常强迫和大气内部动力过程共同作用下的环流异常是造成 2010 年中国气候异常的主要原因。

关键词: 厄尔尼诺, 拉尼娜, 大气环流, 气候异常

Anomalies of Ocean and Atmospheric Circulation in 2010 and Their Impacts on Climate in China

JIA Xiaolong CHEN Lijuan GONG Zhensong WANG Zunya YUAN Yuan SUN Chenghu

The Laboratory of Climate Study of CMA, National Climate Center, Beijing 100081

Abstract: In order to conclude the reasons of climatic anomaly and improve the skill of climatic prediction, the observation data and physical mechanism diagnostic method were used to analyze the climatic anomaly reasons in 2010. Results showed that the climatic anomaly in 2010 ranked the first within recent 10 years and the abnormality of ocean and atmospheric circulation features may lead to that. A moderate El Nino event occurred from June of 2009 to April of 2010 and followed by La Nina event from July of 2010. The tropical Indian Ocean sea surface temperature anomaly (SSTA) experienced two important periods: from basin-wide warming to negative Indian Ocean Dipole (IOD) mode, and North Atlantic SSTA was characterized as triple mode in the same period. Due to the influences forced by SSTA and interaction between ocean and atmosphere, the atmospheric circulation over the Northern Hemisphere showed the dominant anomalies which have been featured as response as follows: subtropical high over the West Pacific (SHWP) was stronger than normal and further west to its normal position because of El Nino event before October of 2010, and afterwards it was weaker than normal and further east to its normal position due to La Nina event, and the location of its ridge line also showed significant stage characteristics. The strength of the South China Sea summer monsoon was the weakest since 1951 and East Asian monsoon was weaker than normal; Blocking highs were located over middle-high latitudes in Boreal summer. Furthermore, the

* 科技部科技支撑项目(2009BAC51B05)、国家自然科学基金(40905035)和 973 项目(2010CB428606)共同资助

2011 年 3 月 9 日收稿; 2011 年 3 月 15 日收修定稿

第一作者:贾小龙,主要从事气候异常诊断和气候预测研究与应用工作。Email:jjaxl@cma.gov.cn

通讯作者:陈丽娟,Email:chenlj@cma.gov.cn

Arctic Oscillation ranked the extreme negative phase in 2009/2010 winter within 60 years. SSTA forcing and internal atmospheric dynamic processes may lead to the climatic anomaly in China in 2010.

Key words: El Nino, La Nina, atmospheric circulation, climatic anomaly

引言

在全球变暖的背景下,极端天气气候事件频发,政府和公众对气候预测的服务需求增加。多年来,气候预测业务人员在完成气候预测及服务的同时,及时对发生的气候异常成因作总结分析,有利于增强对气候系统的认识,也有利于提高气候预测准确率^[1-3]。本文即基于这样的思路,利用实况和历史监测资料分析、物理机制诊断等方法对2010年的气候异常特征、成因进行比较全面的分析,方便气候预测和服务领域的科研业务人员及时了解相关信息。

2010年的中国气候异常特征可以归纳为:旱涝灾害相连,冷热时空交替,极端天气气候事件频发,从而使得气象灾害造成的损失为进入21世纪以来之最。全年降水偏多,年暴雨日数为1961年以来第三位,但季节和区域分布不均。年平均气温偏高,列1961年以来第十位,年高温日数为1961年以来第一位;其中春季气温偏低、冬夏秋均偏高,季节转换总体偏晚。气象灾害主要有区域性严重干旱、多流域暴雨洪涝、强降雨及其引发的地质灾害、暴雪和低温冷冻害、热带气旋生成数异常偏少、大范围持续高温热浪、频繁的沙尘天气过程、局地强对流等,均给社会经济和人民生命财产安全带来严重影响。下面简述各季节气候的总体特征和主要气象事件。

2009/2010年冬季(2009年12月至2010年2月),全国平均降水量较常年同期略偏多,气温较常年同期偏高,其中西南地区降水异常偏少、温度偏高。主要气象事件有:新疆北部1—3月出现有气象记录以来最为严重的雪灾。

春季(3—5月),全国平均降水量较常年同期偏多,为1961年以来第二位。全国平均气温较常年同期略偏低,为1997年以来同期首次低于常年值。主要气象事件有:西南地区出现有气象记录以来最严重的秋冬春连旱,东北、华北发生近40年罕见冬春持续低温,3月江南出现历史罕见早汛,春季北方沙尘天气过程较近10年同期平均值偏多、影响范围广、局地强度高。

夏季(6—8月),全国平均降水量比常年同期略

偏多,平均气温比常年同期偏高,为1961年以来最高值。季内我国主要雨带的变化表现出了明显的阶段性和持续性特征,在每一个阶段均降水强度大、范围广,造成的洪涝灾害严重。同时,旱涝交替,高温干旱与暴雨洪涝并存,干旱和洪涝灾害均较常年同期偏重。主要气象事件有:6—7月华北及内蒙古中东部夏旱明显,5—7月14次强降雨轮番袭击南方,汛情严重^[4];7月中旬至9月上旬,北方部分地区出现严重暴雨洪涝^[5];8月7日,甘肃舟曲发生特大山洪泥石流灾害;初夏东北多地最高气温破历史极值;夏季全国高温频繁、强度高、范围大。

秋季(9—11月),全国平均降水量总体较常年同期偏多,分布呈北多南少特征。大部地区气温较常年同期偏高。主要气象事件有:10—12月,华北、黄淮等地由于持续少雨或无雨,气象干旱迅速发展;10月上中旬海南出现历史罕见持续性强降水过程。

2010年,西北太平洋和南海共有14个热带气旋(中心附近最大风力不小于8级)生成,生成个数较常年(平均27个)明显偏少,其中有7个在中国登陆,与常年持平,登陆台风占生成台风的比例为1951年以来最高值。热带气旋登陆地点集中,灾情总体偏轻,但“灿都”、“凡亚比”^[6]、“鲇鱼”造成的损失较重。

全球海面温度异常(sea surface temperature anomaly, SSTA)和大气环流异常是造成我国2010年气候异常的重要原因。本文主要从这两个方面进行初步的分析。

1 海温异常

2010年太平洋、印度洋、北大西洋海表温度距平分布型均表现出明显异常的特征。

2009年6月开始的厄尔尼诺事件于2010年5月结束,本次事件于2009年12月达到峰值,持续11个月,强度中等;随后赤道中东太平洋海温于2010年7月迅速进入拉尼娜状态(即Nino 2区平均SSTA $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$),并于11月达到拉尼娜事件的标准^[7]。12月,拉尼娜事件继续发展加强(图1)。分析表明,2010年赤道中东太平洋海温由厄尔尼诺

暖位相转为拉尼娜冷位相的速度为 1951 年以来第一位。与此同时,南方涛动指数(southern oscillation index, SOI)也由负异常迅速转为正异常,表明随着海温由暖位相向冷位相的迅速转换,热带大气对海洋的响应也非常迅速。西太平洋副热带高压的变化和热带对流异常直接受到热带太平洋海温异常分布型的影响^[8-10]

厄尔尼诺事件转换为拉尼娜事件仅仅经过 2 个月时间,是什么原因促成了这种快速转化呢?初步分析认为,自厄尔尼诺事件结束后,赤道西太平洋地区始终维持较强的异常东风,其不断激发的上翻开尔文波东传,促进了拉尼娜事件的快速发展^[11-15]。而赤道西太平洋异常东风的来源,与春夏季印度洋海温全区一致偏暖模态有关,它所激发的东传开尔文波,加强了西太平洋副高南侧的东风^[16-18]。关于厄尔尼诺事件转换为拉尼娜事件速度快的成因还需要进行深入分析。

2010 年的热带印度洋,海温距平的发展表现出两个重要的特点。首先是全区一致的暖海温异常,这一模态不仅是热带印度洋海温距平的最主要模态^[10],也是对前期厄尔尼诺事件的滞后响应,在滞后 3~4 个月时相关系数最高^[19]。从逐月的海温距平图上可以看到(图略),热带印度洋的全区一致增暖模态大约在 2—3 月发展到最强,之后稍有减弱,但一直维持到 6 月。其次是热带印度洋负偶极型海温模态。这一模态从 2010 年 7 月开始发展,表现为热带西印度洋的负海温距平和热带东南印度洋的正海温距平,其在 10 月发展到最强,之后很快减弱(图 2)。2010 年热带印度洋全区一致的暖海温异常造成的局地环流异常有利于春末夏初西太平洋副热带高压异常偏强^[20]。

北大西洋区域海温表现为“三极型海温异常”分布形势,即 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 和 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 为负距平区, $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 的北大西洋西部为正距平区, Sutton 等^[21]对大西洋 SST 的 EOF 分析第一个分量、Grotzner 等^[22]基于大气环流和大西洋 SST 的相关分析都曾得到类似的三极型分布。关于这种分布形势对大气环流及气候的作用,有一些数值模拟工作也进行了相应研究^[23-25]。潘婕^[26]在对夏季欧亚中高纬持续流型的影响因子分析中发现, E 型过程^[27]前期春季 SSTa 也在北大西洋存在类似的“三极”分布,她通过数值试验将北大西洋 SSTa 提取出来作为外强迫来考察大气对它的响应,证明北大西洋海域的前

春海温异常对入夏后的欧亚中高纬环流形势存在影响,有利于欧亚中纬度地区出现 E 和 C 型经向环流,从而对我国气候异常有明显的影 响。2010 年夏季中后期经向环流发展可能受到大西洋海温异常的影响。

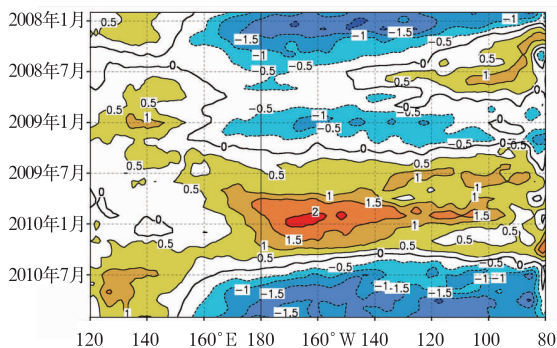


图 1 赤道太平洋海面温度距平
时间-经度剖面(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 1 Time-longitude section of
tropical Pacific SSTA (unit: $^{\circ}\text{C}$)

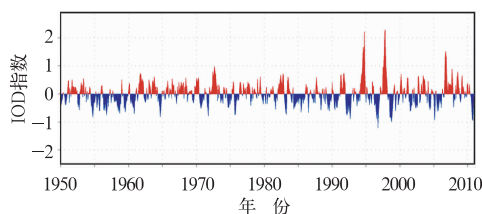


图 2 1950 年 1 月—2011 年 1 月热带印度洋
海温异常偶极子 (Indian Ocean Dipole, IOD)
指数的时间序列 (来源: CMA)

Fig. 2 Time series of IOD over Tropical
Indian Ocean from January 1950 to
January 2011 (source: CMA)

2 北半球大气环流

2010 年北半球大气环流异常包括中高纬度环流异常、副热带环流异常和热带对流异常。

2.1 中高纬度环流异常

2009/2010 年冬季,北半球高纬度环流异常表现为典型的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)负位相特征:500 hPa 高度距平场上(图 3a),极区高度场异常偏高,北太平洋东北部、北大西洋至欧洲东部和贝加尔湖附近高度场异常偏低,而乌拉尔山地区高度场偏高,导致欧亚地区经向环流占优势(图 4),尤

其是 1 月份,极涡偏向东北亚地区,有利于极地强冷空气南下影响我国,导致 2009/2010 年冬季,新疆北部、内蒙古、东北和华北的我国北方地区温度较常年同期偏低。

2010 年春季,北半球高纬度地区环流异常基本上持续了冬季以来的 AO 负位相特征,中纬度欧亚

地区乌拉尔山附近高度场偏高,贝加尔湖附近的亚洲北部地区高度场异常偏低(图 3b),亚洲地区以经向环流占优势(图 4),冷空气活动频繁,造成沙尘天气过程较近 10 年偏多,我国大部地区温度较常年偏低,尤其是北方地区温度偏低明显,造成东北、华北、内蒙古等地发生罕见的冬春持续低温灾害。

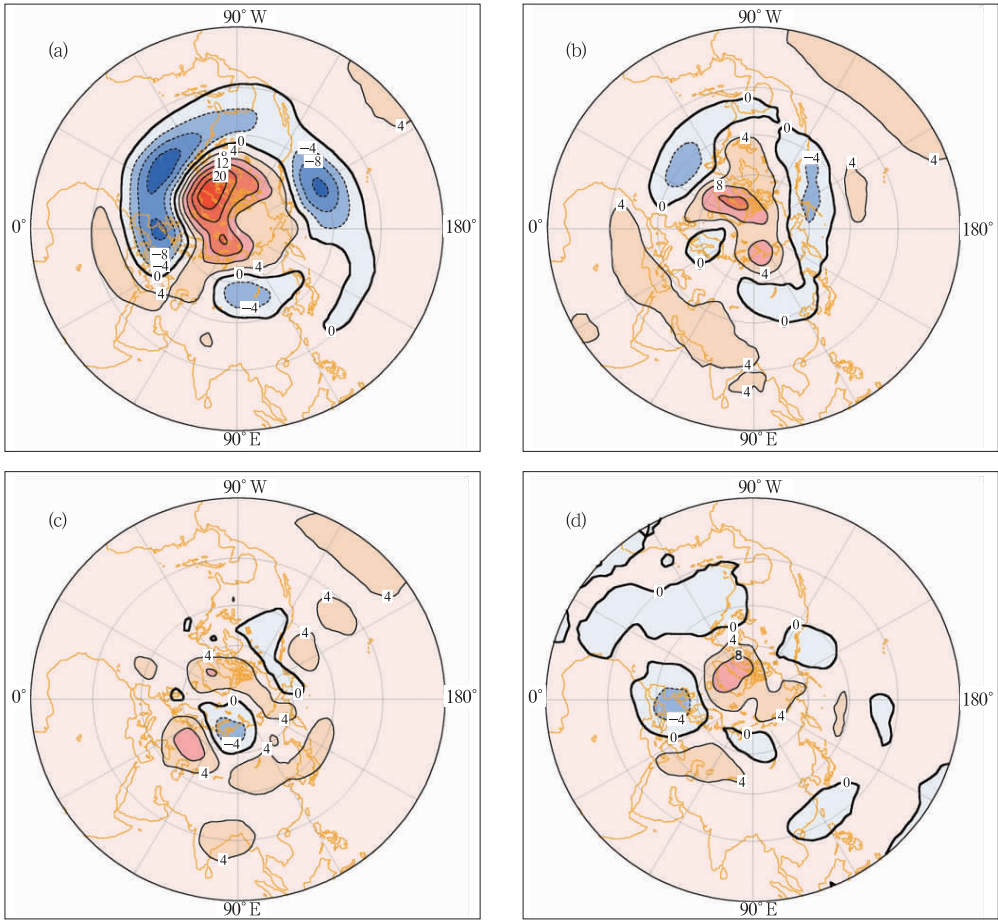


图 3 2009/2010 年北半球 500 hPa 高度场距平(单位: dagpm) 冬季(a)、2010 年春季(b)、夏季(c)和秋季(d)

Fig. 3 500 hPa geopotential heights over Northern Hemisphere in 2009/2010 winter (a), 2010 spring (b), summer (c) and autumn (d) (unit: dagpm)

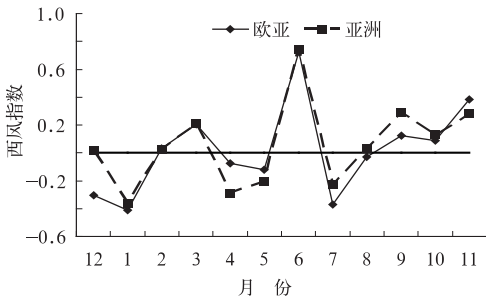


图 4 2009 年 12 月至 2010 年 11 月亚洲和欧亚西风指数变化

Fig. 4 Westly index over Asia (dashed) and Eurasia (solid) from December of 2009 to November of 2010

2010 年夏季,西风带 500 hPa 位势高度场整体偏高,乌拉尔山附近有明显阻塞形势(图 3c),从西风环流指数看(图 4),夏季整体以纬向环流为主,其中 7 月和 8 月初经向环流占优势,造成我国夏季大部地区温度偏高,尤其是北方地区偏高显著。

2010 年秋季,北半球欧亚地区 500 hPa 高度场整体偏高,尤其是亚洲西部中高纬地区(图 3d),欧亚和亚洲地区纬向环流占优势(图 4),造成我国秋季大部地区温度偏高,尤其是我国西部和北方地区偏高明显。

2.2 副热带系统

2009 年 12 月至 2010 年 9 月,西太平洋副热带高压(以下简称副高)的面积和强度(环流指数定义见文献[27])均较常年同期异常偏强,10 月以后迅速减弱;副高脊线南北位置月际差异明显,其中 2010 年 1,3,8,9 和 10 月明显偏北,而 2009 年 12 月,及 2010 年 2,5,6 和 11 月明显偏南,其他月份接近正常;2009 年 12 月至 2010 年 9 月,副高西伸脊点明显偏西,10—11 月转为明显偏东(图 5)。2010 年 10 月之前,副高明显偏强和偏西,反映了赤道太平洋厄尔尼诺事件的影响;10 月之后,副高明显减弱东退,与 7 月赤道太平洋海温进入拉尼娜状态密切相关。2010 年副高的变化特征明显受到赤道太平洋海温异常和印度洋海温异常分布的影响^[8,20]。副高强度和位置变化配合中高纬度环流异常对

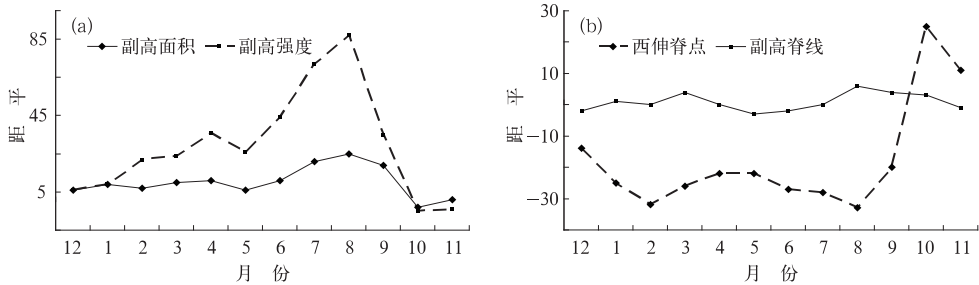


图 5 2009 年 12 月—2010 年 11 月西太平洋副高指数距平变化

Fig. 5 STWP index anomaly from December of 2009 to November of 2010

2010 年入夏以来,副高异常对旱涝交替及主雨带推进有重要的影响。副高自入夏以来强度异常偏强,西伸脊点偏西,副高偏强偏西有利于引导副高西侧来自低纬度地区水汽向我国大陆的输送,而受副高控制的地区,由于副高异常偏强则造成高温干旱。同时,副高脊线南北位置表现出明显的阶段性特征,7 月中旬之前,副高脊线较常年平均异常偏南,造成长江中下游地区入梅偏晚,使得 6 月中旬至 7 月上旬主要多雨带位于江南北部,7 月 8—16 日,随着副高的进一步北抬,长江中下游地区遭受了严重的暴雨洪涝。7 月中旬之后,副高明显北抬,脊线一直维持较常年平均偏北的位置,使得我国雨带北进至黄淮及其以北地区,我国北方及西部地区降水过程频繁。

2.3 热带对流活动

2010 年热带太平洋($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$)射出长波辐射(outgoing long-wave radiation, OLR)距平的时间-

2010 年我国各季节气候尤其是汛期气候异常造成明显影响^[28]。

冬季和春季,西太平洋副高面积较常年偏大、强度偏强,有利于西北太平洋和南海地区的水汽向东亚大陆输送,加之中高纬度地区经向环流明显,冷空气活动频繁,这种环流的配置造成了 2010 年我国冬春季节北方大部地区降水偏多,气温偏低。另外,冬春由于副热带高压面积异常偏大,冬季 588 dagpm 线已经西伸至孟加拉湾,而春季整个副热带地区都几乎为 588 dagpm 控制,由于受强大副高控制,印缅槽偏弱,使得来自孟加拉湾进入我国西南地区的水汽输送偏弱,造成西南地区冬春降水异常偏少,气温异常偏高;再加上 2009 年夏秋西南地区降水持续偏少,导致了西南地区发生历史罕见的秋冬春持续特大干旱。

经度剖面图(图 6)可以看出:7 月中旬之前,南海及西太平洋暖池区的对流活动偏弱,尤其在 2009/2010 年冬季和 2010 年春末夏初对流异常偏弱,对流偏弱易造成副高偏南,而 7 月中旬之后,对流活动明显加强,对流增强导致副高明显北抬。2010 年 6 月以前,在南海和西太平洋地区只有 1 个热带气旋生成,较常年同期(4~5 个)异常偏少,与该地区对流活动偏弱密切相关。另外,对流活跃区主要位于 145°E 以西的地区,这也是 2010 年 145°E 以东太平洋地区没有热带气旋生成的重要原因之一。

3 亚洲夏季风

亚洲地区的夏季风主要包括南海季风、印度季风和东亚夏季风。不同区域的季风、不同季风的强度以及季风活跃时段对我国夏季降水异常的分布都会产生明显的影响^[29-32]。

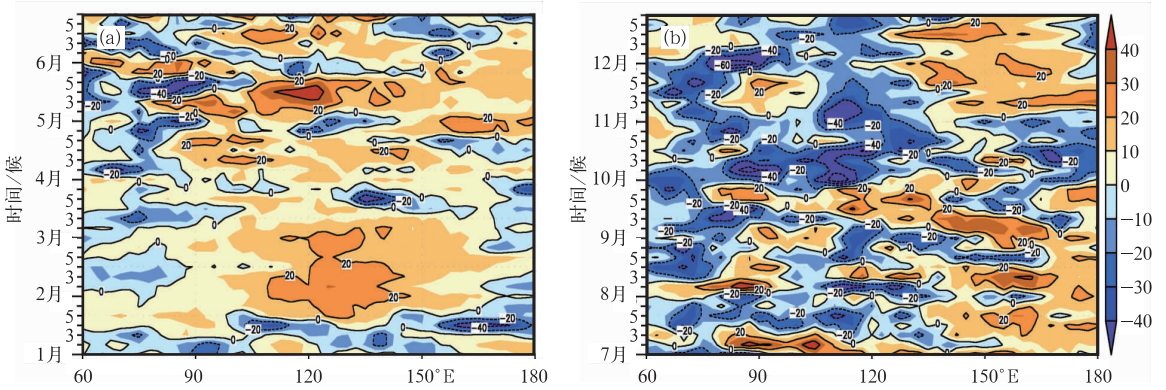


图 6 2010 年热带太平洋(10°~20°N)射出长波辐射(OLR)距平(单位:W·m⁻²)时间-经度剖面图
(a) 2010 年 1—6 月; (b) 2010 年 7—12 月

Fig. 6 Time-longitude section of OLR over tropical Pacific (10°~20°N) in the first half year (a) and the second half year (b) of 2010 (unit: W·m⁻²)

3.1 南海夏季风

2010 年南海夏季风于 5 月第 5 候爆发,较常年爆发时间(5 月第 4 候)偏晚 1 候,于 10 月第 5 候结束,较多年平均时间(9 月第 6 候)偏晚 5 候,为 1951 年以来结束最晚、强度最弱的一年。南海夏季风强度指数^[33]的逐候演变显示,自 5 月第 5 候南海夏季风全面爆发后,除 5 月第 5 候至 6 月第 1 候、9 月第 1—2 候两个时段强度略偏强外,其余时段强度总体较常年同期异常偏弱(图 7)。

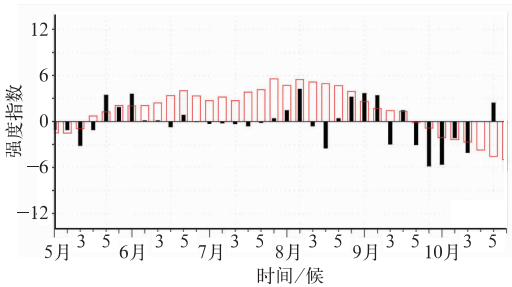


图 7 2010 年 5—10 月逐候南海季风强度指数变化(来源:CMA)
空心柱为多年平均值

Fig. 7 Dekadly index South China Sea monsoon strength from May to October in 2010 (source: CMA)
hollow column: climate average

3.2 东亚夏季风

由于副热带地区夏季风的复杂性,目前有多种不同指标对其进行描述,这些指标从不同的角度和侧面刻画了副热带地区夏季风的特征。张庆云等^[34]定义的副热带季风是东亚热带季风槽区(10°

~20°N, 100°~150°E)与东亚副热带地区(25°~35°N, 100°~150°E)6—8 月平均的 850 hPa 风场的纬向风距平差,它的强弱能较好地反映中国夏季雨带的位置变化,副热带季风越强,表征西太平洋副高位置偏北,东亚梅雨锋强度较弱,长江流域梅雨锋降水比常年偏少,反之亦然。该指数在 2010 年夏季为负值,表明东亚副热带夏季风偏弱(图 8),我国长江中游及江南降水偏多。

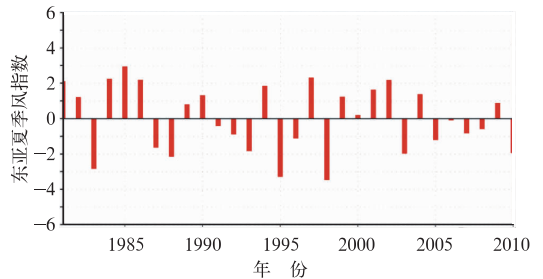


图 8 东亚夏季风指数变化(来源:CMA)
Fig. 8 Annual series of East Asia monsoon index (source: CMA)

3.3 夏季风雨带进退特征

受南海夏季风、东亚夏季风以及中纬度环流系统的影响,2010 年的夏季风雨带的进退特征表现为:2010 年 5 月第 5 候至 6 月第 6 候,南海夏季风总体偏弱,东亚副热带夏季风也偏弱,季风前沿主要维持在华南至江南一带,位置较常年偏南。7 月第 1 候,夏季风前沿推进到长江中下游至江淮一带。随着东亚副热带季风涌和西北太平洋副热带高压的向北推进,我国东部地区的主雨带也发生明显变化,6 月我国东部主雨带在长江以南地区;7 月第 1—3 候,主雨带位

于长江中下游地区;7月第4—5候,主雨带推进到江淮、黄淮一带;8月第5候,东亚副热带季风前沿北推至华北,华北进入雨季;9月第2候,伴随着副高脊线的南撤,我国东部雨带也由东北南部、华北回落到华北南部和黄淮;9月下旬开始,暖湿气团迅速南撤到 25°N 以南地区,由于这一时期低纬度热带系统异常活跃,暖湿气团在该地维持了近1个月左右的时间,造成了我国华南沿海及南海地区发生持续降水;10月第5候,随着北方干冷空气向南伸入到华南沿海和南海北部地区,南海地区的热力性质发生了明显改变,夏季风开始撤离南海地区,南海夏季风结束,2010年我国夏季风降水结束。

4 台风活动异常

2010年在西北太平洋和我国南海共有14个热带气旋生成,较常年同期偏少13个,其中有7个登陆我国,与常年同期持平;初次登陆我国时间为7月12日,较常年偏晚,末次登陆我国时间为10月13日,也较常年偏晚。热带气旋在 120°E 以西生成3个,在 $120^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 生成11个,但是在 145°E 以东没有热带气旋生成。

与正常年相比,2010年热带气旋活跃季节的季风槽位置偏西10个经度,在季风槽异常偏西的情况下,西太平洋低纬地区海洋被单一偏东气流所控制,不利于气旋性涡旋生成,是造成2010年热带气旋生成位置异常偏于 145°E 以西地区的主要原因。热带气旋生成位置偏西,加上副热带环流季节内变化特征的有利配合,有利于热带气旋登陆我国沿海地区。这也是热带气旋生成总数偏少而登陆没有偏少的重要原因。季风槽和副热带环流特征明显受到2010年太平洋异常海温分布型的影响,关于2010年热带气旋异常的成因分析将另文详述。

5 小 结

2010年的中国气候异常明显受到全球海温异常和大气环流异常的影响。全球海洋大气环流异常的主要表现为:2009年6月至2010年4月,热带太平洋发生了一次中等强度的厄尔尼诺事件,之后于2010年7月又迅速进入拉尼娜状态,从暖位相转换到冷位相的速度列1951年以来第一位,海气相互作用强;而同期热带印度洋海温距平的发展经历了全

区一致型暖海温异常和负偶极型海温模态两个阶段;北大西洋海温距平表现为“三极型海温异常”特征。北半球大气环流明显受到海温异常强迫的影响,西太平洋副热带高压在10月之前受厄尔尼诺影响而异常偏强偏西,之后受拉尼娜影响而异常偏弱偏东,副高脊线位置也表现出明显的阶段性特征;夏季中高纬度地区出现明显的阻塞形势;东亚夏季风总体异常偏弱。此外,2009/2010年冬季AO出现近60年来最强负异常。受大气环流系统组合异常的影响,2010年季风雨带的季节性进退和温度异常呈现鲜明的特征。在海温外强迫和大气内部动力过程共同作用下的环流异常是造成2010年我国气候异常的主要原因。

本文仅从海洋和大气环流异常角度对2010年气候异常进行了初步分析。在全球变暖背景下,形成极端事件和气候异常的机制更加复杂,对于影响2010年我国气候异常的物理机制还需要进行更深入的研究和分析。

参考文献

- [1] 高辉,王永光. 2007年海温和大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象, 2008, 34(4): 107-112.
- [2] 张培群,贾小龙,王永光. 2008年海洋和大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象, 2009, 35(4): 112-117.
- [3] 艾婉秀,孙林海,宋文玲. 2009年海洋和大气环流异常及对对中国气候的影响[J]. 气象, 2010, 36(4): 101-105.
- [4] 孔期. 2010年6月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2010, 36(9): 120-125.
- [5] 赵伟. 2010年8月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2010, 36(11): 109-114.
- [6] 黄奕武,赵伟. 2010年9月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2010, 36(12): 116-121.
- [7] 李晓燕,翟盘茂. ENSO事件指数与指标研究[J]. 气象学报, 2000, 58(1): 102-109.
- [8] 黄荣辉,李维京. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制[J]. 大气科学, 1988, 12(特刊): 107-116.
- [9] 黄荣辉. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究[J]. 大气科学, 1990, 14(1): 108-117.
- [10] 晏红明,肖子牛,谢应齐. 近50年热带印度洋海温距平场的时空特征分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(2): 180-188.
- [11] Weisberg R H, Wang C Z. A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño Southern Oscillation[J]. Geophys Res Lett, 1997a, 24: 779-782.
- [12] Weisberg R H, Wang C Z. Slow variability in the equatorial west-central Pacific in relation to ENSO [J]. J Climate, 1997b, 10: 1998-2017.

- [13] Wang C Z, Weisberg R H, Virmani J I. Western Pacific interannual variability associated with the El Niño Southern Oscillation[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104:5131-5149.
- [14] Kug J S, Kang I S. Interactive feedback between ENSO and the Indian Ocean[J]. *J Climate*, 2006, 19:1784-1801.
- [15] Lau K M, Wu H T. Principal modes of rainfall-SST variability of the Asian summer monsoon: A reassessment of monsoon-ENSO relationship[J]. *J Climate*, 2001, 14:2880-2895.
- [16] Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L02708, doi: 10. 1029/2006GL028571.
- [17] Wu B, Zhou T, Li T. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate[J]. *J Climate*, 2009, 22:2992-3005.
- [18] Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J Climate*, 2009, 22:730-747.
- [19] 袁媛. 热带印度洋海温异常及其与 ENSO 事件的相互联系[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2008.
- [20] Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset[J]. *Int J Climatol*, 2008, 28(12):1579-1587.
- [21] Sutton R T, Norton W A, Jewson S P. The North Atlantic Oscillation—What role for the ocean[J]. *Atmos Sci Lett*, 2000, 1:89-100.
- [22] Grotzner A, Latif M, Barnet T P. A decadal climate cycle in the North Atlantic Ocean as simulated by the ECHO coupled GCM[J]. *J Climate*, 1998, 11:831-847.
- [23] Peng S L, Robinson W A, Li S L. North Atlantic SST forcing of the NAO and relationships with intrinsic hemispheric variability[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(8), 1276, doi: 10. 1029/2001GL014043.
- [24] Peng S L, Robinson W A, Li S L. Mechanisms for the NAO responses to the North Atlantic SST tripole[J]. *J Climate*, 2003, 16(12): 1987-2004.
- [25] Li S L, Robinson W A, Peng S L. Influence of the North Atlantic SST tripole on northwest African rainfall[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D19), 4594, doi: 10. 1029/2002JD003130.
- [26] 潘婕. 夏季欧亚中高纬持续异常环流研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2007.
- [27] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [28] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用[M]. 北京:气象出版社, 2000.
- [29] 赵汉光, 张先恭. 东亚季风和我国夏季雨带的关系[J]. *气象*, 1996, 22(4):8-12.
- [30] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响[J]. *大气科学*, 1999, 23(2):257-266.
- [31] 孙颖, 丁一汇. 1997年东亚夏季风异常活动在汛期降水中的作用[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(3):277-287.
- [32] 赵平, 周自江. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系[J]. *气象学报*, 2005, 63(6):933-941.
- [33] 何敏, 许力, 宋文玲. 南海夏季风爆发日期和强度的短期气候预测方法研究[J]. *气象*, 2002, 28(10):9-13.
- [34] 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J]. *气象学报*, 2003, 61(4):559-568.