

孙冷,任福民,王遵娅,等. 2011 年 8 月气候异常及成因分析[J]. 气象,2012,38(5):615-622.

2011 年 8 月气候异常及成因分析^{*}

孙 冷 任福民 王遵娅 刘芸芸 柳艳菊 王朋岭 王东阡

国家气候中心,北京 100081

提 要: 在总结 2011 年 8 月我国气候异常与大气环流特征的基础上,针对西南干旱和热带气旋活动偏少两大气候异常事件的成因进行了分析。结果表明:高度场偏高、西太平洋副热带高压偏强、夏季风偏弱和水汽条件较差等大气环流异常是导致高温干旱的主要原因;中部型拉尼娜事件的滞后影响和印度洋偏暖的影响是西南干旱的重要外强迫条件。南海对流活动偏弱,菲律宾以东季风槽位置偏北,热带气旋活动区域垂直风切偏大,西北太平洋副热带高压偏强等因素导致热带气旋活动偏少。

关键词: 气候异常,西南干旱,热带气旋,成因分析

Analysis of Climate Anomaly and Causation in August 2011

SUN Leng REN Fumin WANG Zunya LIU Yunyun

LIU Yanju WANG Pengling WANG Dongqian

National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Climate anomaly and atmospheric circulation features were analyzed over China in August 2011. Causation of drought in Southwest China (SWC) and less tropical cyclone (TC) activities over the western North Pacific and the South China Sea (SCS) were studied in this paper. Results showed that anomalous atmospheric circulation including positive 500 hPa geopotential height anomaly, the stronger West Pacific subtropical high (WPSH), weak summer monsoon, weak vapor transportation was the main reason for the SWC drought. Moreover, the SWC drought might be caused by the lag impact of 2010/2011 central Pacific La Nina event and warm mode of the Indian Ocean. In addition, less TC activities were due to the combined impacts of multi-factors including weak convection over the SCS, abnormally northward monsoon trough east of Philippines, large vertical shear anomalies and the stronger WPSH.

Key words: climate anomaly, drought in Southwest China, tropical cyclone, causation analysis

引 言

月尺度的气候异常分析是短期气候业务与科研工作的一项重要内容,气候异常的可能成因诊断也一直是气候科研的重点和难点,前人在年度、季节或汛期气候异常及成因分析方面已经做了很多工作^[1-8],但开展月尺度气候异常的可能成因诊断却是

刚刚起步,目前在这方面的工作还比较少。

2011 年 8 月,全球气候呈暖干态势。月平均气温异常偏高主要出现在东亚地区,而月降水量异常偏少主要分布在欧亚中纬度及附近地区。与此相应,中国气候总体上表现为高温少雨。月平均气温异常偏高主要出现在我国西北、华北北部和西南地区,月降水量异常偏少主要集中分布在西南地区。由于气温偏高而降水偏少,我国西南等地干旱发展。

^{*} 国家自然科学基金项目(41005037),国家科技支撑计划(2009BAC51B02)和公益性行业(气象)科研专项(HX-GYHY200806009)共同资助

2011 年 10 月 20 日收稿; 2012 年 1 月 17 日收修定稿

第一作者:孙冷,主要从事极端气候事件监测与成因分析研究. Email:sunleng@cma.gov.cn

另外,因南海对流活动偏弱等导致热带气旋活动异常偏少。总体来看,气候异常特征显著。本文在分析总结气候异常特征的基础上,主要着重从气候背景和年代际变化、大气环流(副热带高压、季风、垂直风切变)和海洋下垫面环境等多个因素综合影响的角度,试图揭示气候异常事件形成的可能成因,为推动国家级气候业务科研发展,进一步做好气候监测预测,特别是极端天气气候事件的监测预测工作提供参考和依据。

1 资料与方法

本文降水和气温观测资料来自国家气候中心气候监测系统,再分析资料取自美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的NCEP/NCAR数据集,海温资料为美国国家海洋大气局(NOAA)公布的表层海温资料(NOAA Extended Reconstructed SST V2),1950—2010年热带气旋资料取自中国气象局编写的《热带气旋年鉴》,2011年热带气旋资料取自中国气象局中央气象台提供的西北太平洋和南海热带气旋纪要表和热带气旋路径资料,热带气旋等级使用2006年开始实行的国家标准。文中所统计的西北太平洋和南海热带气旋(中心附近最大风力 ≥ 8 级,即 $17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,以下简称TC),包括日界线以西、赤道以北范围内生成的热带气旋。副热带高压强度和副热带高压西伸脊点指数采用国家气候中心定义的西北太平洋副热带高压活动指数。文中提及的TC资料常年值和大尺度物理量异常所使用的气候态为30年(1971—2000年)资料平均值。

2 2011年8月中国气候异常特征

8月,在全球暖干气候的背景下,我国大部地区气温偏高,异常偏高主要出现在我国北方和西南地区等地,全国平均气温(21.3°C)为历史同期第4高值;我国大部地区降水偏少,月降水量异常偏少主要集中分布在西南地区东部等地,全国平均月降水量(80.6 mm)为历史同期第5小值。月内影响较大的异常气候特征和气候事件主要包括以下几个方面:西部地区出现了两次极端高温过程;西南地区干旱发展;西北太平洋和南海热带气旋活动异常偏少。

2.1 我国西部地区出现2次极端高温天气过程

全国共142站出现极端高温,其中19站突破历史极值,主要分布在西南地区东部[四川长宁(43.5°C)、贵州赤水(43.2°C)和云南盐津(42.8°C)等地]。高温过程主要发生在两个时段内:7—14日(西北地区)和13—20日(西南、江南和华南等地)。全国共158站出现极端连续高温日数事件,其中11站达到或突破历史极值,主要分布于重庆、云南和四川。

2.2 西南地区东部及广西等地干旱发展

8月31日气象干旱监测显示,贵州大部、重庆西部、四川南部、云南中东部、广西西北部、广东北部等地存在中到重度气象干旱,其中云南东部、贵州西南部、广西西北部达特旱(图1a)。从逐日演变来看(图1b),西南干旱自年初开始,表现出阶段性,8月份旱情最为严重,进入秋季以后逐渐缓解。

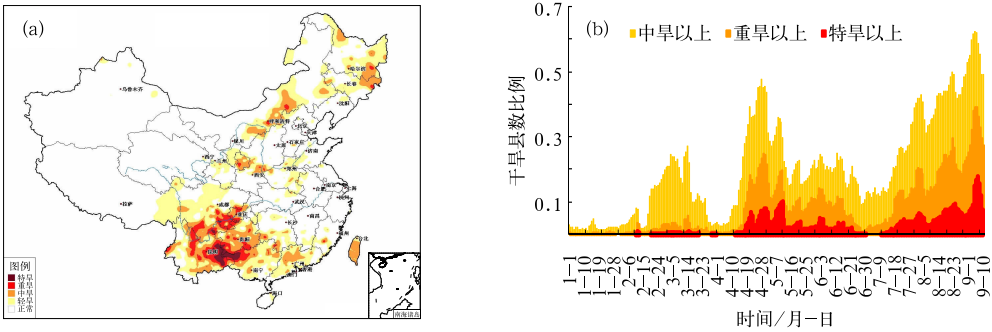


图1 2011年8月31日全国气象干旱监测(a)和年初至9月上旬西南地区干旱县数比例逐日演变(b)

Fig. 1 Drought monitoring (a) over China on 31 August 2011 and time series (b) of drought county proportion in SWC Southwest China

高温干旱对西南等地的农业、水资源、水利发电、生态环境和人们生活造成了较为严重的影响。据相关部门 8 月底统计,贵州、云南、重庆、四川、广西 5 省(区、市)累计受灾人口 3876.3 万人,1039.8 万人、537.7 万头大牲畜发生临时性饮水困难;农作物受灾面积 334.4 万 hm^2 ,绝收面积 55.0 万 hm^2 ;直接经济损失约 213 亿元,其中贵州、云南损失严重^[9]。

2.3 热带气旋生成与登陆个数均偏少一半

2011 年 8 月,在西北太平洋和我国南海海域共有 3 个编号 TC,较常年同期偏少近一半。其中仅第 11 号热带风暴南玛都登陆我国,登陆 TC 个数较常年同期偏少一半。

“南玛都”于 29 日 4 时在台湾台东县沿海登陆后,31 日 2 时又在福建晋江市沿海再次登陆,登陆时中心附近最大风力有 8 级($20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。受其影响,福建出现大风和暴雨,其中莆田市过程雨量达 564.5 mm,最大日降水量达 371.5 mm。全省 123.2 多万人受灾,9 人死亡,34.3 万人紧急转移安置,直接经济损失 25.6 亿元^[9]。总体来看,8 月 TC 活动异常偏少,影响较小,造成的损失较轻。

3 中国异常气候事件的可能成因

2011 年 8 月,大气环流和热带海气特征表现为:500 hPa 高度场以偏高为主,西太平洋副热带高压(10°N 以北, $110^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$)偏强,阶段性西进东退,夏季风偏弱,北半球和欧亚积雪面积为历史同期最小,印度洋偏暖,赤道中东太平洋偏冷,南海和菲律宾以东对流不活跃。受大气环流和海洋等因素的共同影响,我国南方出现大范围持续高温天气,局部

地区最高气温破历史纪录;贵州、云南、重庆、四川、广西等地持续少雨高温,伏旱发展加剧;热带气旋活动异常偏少,仅“南玛都”登陆我国。以下分别从年代际背景、大气环流异常和海洋影响等几个方面来重点分析我国西南干旱和热带气旋活动异常偏少两大气候事件的可能成因。

3.1 西南干旱

由于持续高温少雨,西南等地干旱发展。事实上,我国西南地区地处亚热带,地形复杂,起伏较大,既包括青藏高原东南部和云贵高原,又包括四川盆地及其周边山地。受地形、地貌的影响,地面散热困难,发生干旱的频率较高^[10],雨季来临之前或是少雨年基本都处于旱季,干旱类型也多样,分为春旱、夏旱^[11]、伏旱、冬春连旱、冬春夏旱等。近年来,西南地区处于干旱频发的时期^[12]。从气候角度来看,导致干旱的主要原因是大气环流异常。下沉运动偏强、湿度偏小以及强的偏北或偏西气流控制等要素综合作用,导致旱情发生并维持或发展^[13]。而海洋等下垫面环境是导致干旱发生的大气外强迫因素。综合来看,西南干旱形成大体有三个层面的原因:直接原因、相应的大气环流异常及影响大气环流异常的外强迫。2011 年西南干旱就是由以上几方面共同作用的结果,具体分析如下。

3.1.1 持续高温少雨是造成西南等地严重干旱的直接原因

不仅 8 月全国大部地区高温少雨,其实自年初以来西南等地一直持续高温少雨。2011 年 1—8 月云南、贵州、四川和重庆西南地区 4 省(市)平均降水量 641.0 mm,比常年同期(828.6 mm)偏少 23%,为近 61 年来历史同期最少(图 2a),区域平均无降

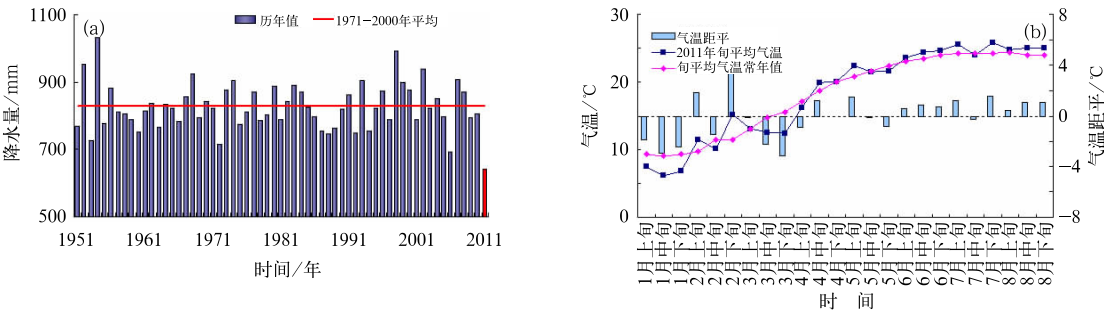


图 2 西南 4 省(市)1—8 月平均降水量 1951—2011 年变化(单位:mm)(a)和 2011 年逐旬气温及距平(单位:℃)演变(b)

Fig. 2 Series of precipitation (unit: mm) in Southwest China during January—August 1951—2011 (a), and the dekad mean temperature and anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$) in 2011 (b)

水日数为历史同期最多;气温自 4 月中旬开始持续偏高(图 2b),5—8 月平均气温为历史同期第 2 高,贵州省为历史同期最高。由于降水持续偏少,而气温又持续偏高,致使旱情不断发展。而且从年代际背景来看,西南地区处于高温少雨的年代际背景下。这也是最近几年,西南干旱频发且持续时间较长,冬春夏连旱等现象发生的原因之一。分析发现,西南高温干旱最直接的原因就是气温一直偏高而降水又持续偏少。

3.1.2 大气环流异常是导致西南干旱的主要原因

西南地区自年初以来高度场一直偏高,长时间处于正距平控制之下(图 3),特别是受到大陆高压脊和副热带高压系统的影响,但拉尼娜次年西太平洋副热带高压不稳定,月际和月内变化均显著。8 月 500 hPa 平均位势高度及距平场显示(图 4),欧亚中高纬环流呈现“两脊一槽”型分布,我国大部地区处于正高度距平控制之下,西南地区大部为低于 10 gpm 的正高度距平控制,这种位势高度场的分布形势,不利于南来水气的输送,为干旱的发展和维持提供了有利的环流形势。同时西太平洋副热带高压面积偏大、强度偏强,月内呈阶段性西进东退特征,西伸脊点或达到 100°E(图 5a)或与大陆高压相连(图 5b),脊线位置也阶段性地偏南,致使西南地区高层为辐合气流,低层辐散气流,干旱区处于反气旋控制的下沉运动中心,造成高温酷暑的气候状况,有利于干旱发展。

研究表明,青藏高原夏季干旱指数与东亚夏季风指数呈负相关,即东亚夏季风越弱,西北及青藏高

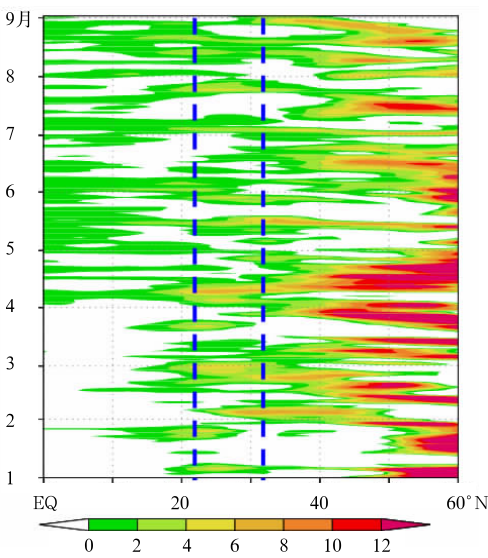


图 3 2011 年 1—8 月西南地区(100°~110°E) 500 hPa 平均位势高度距平时间-纬度剖面(单位: dagpm)

Fig. 3 Time-latitude section of daily mean 500 hPa geopotential height anomalies averaged over Southwest China (100°–110°E) during January–August 2001 (unit: dagpm)

原地区夏季越干旱^[11]。青藏高原东南部为西南旱区的一部分。2011 年 8 月也表现出相同的特点,南海和东亚夏季风强度均偏弱,西南干旱。季风强度偏弱在 8 月中尤其明显,南海季风强度指数达到 -4,较常年同期(7)异常偏弱,东亚夏季风强度也较常年同期偏弱 2.6(图 6)。这是由于季风偏弱,我国

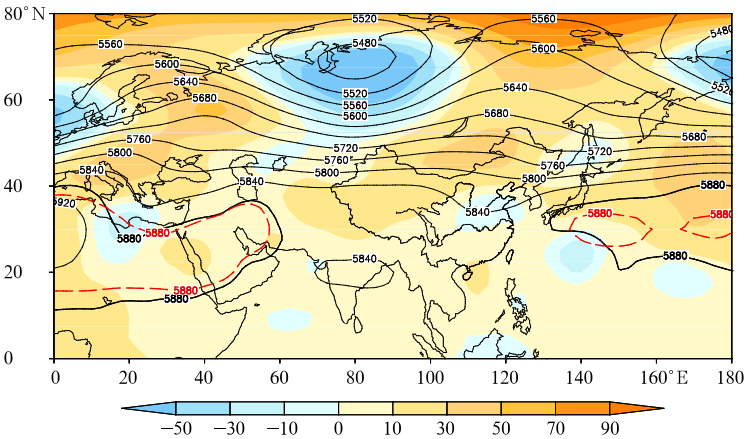


图 4 2011 年 8 月东北半球 500 hPa 平均位势高度及距平场 (单位:gpm),虚线为常年 5880 gpm

Fig. 4 Monthly mean 500 hPa geopotential heights and anomalies for August 2011 (unit: gpm), 5880 gpm of climatology in dashed lines

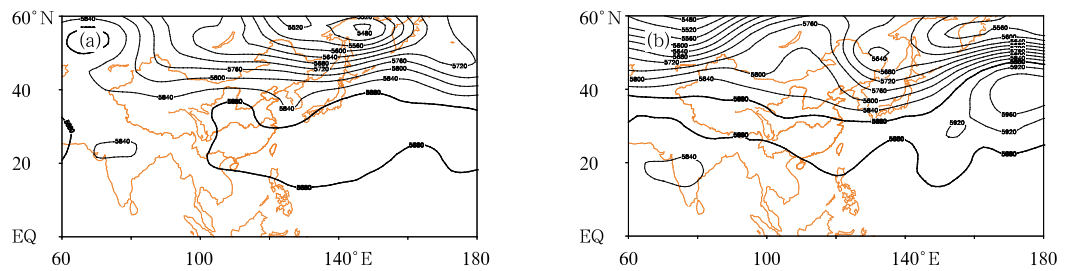


图 5 2011 年 8 月 14 日(a)和 20 日(b)500 hPa 位势高度场(单位: gpm),虚线为常年 5880 gpm
Fig. 5 Daily 500 hPa geopotential heights on 14 (a) and 20 (b) August 2011 (unit: gpm),
5880 gpm of climatology in dashed lines

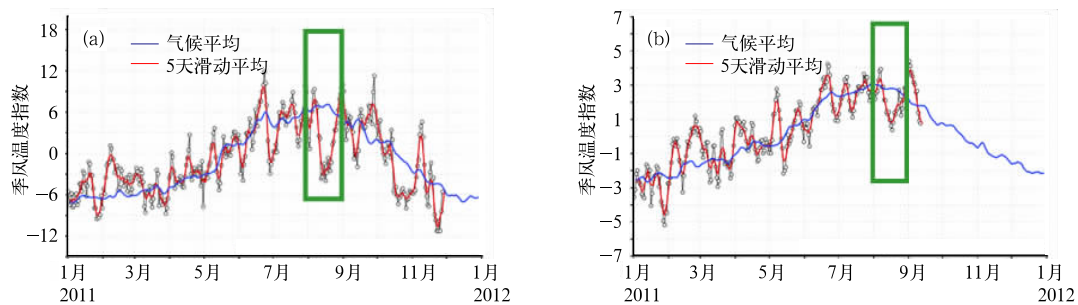


图 6 南海(a)和东亚(b)季风强度指数逐日变化(方框表示 8 月)
Fig. 6 South China Sea (a) and East Asian (b) monsoon indices (August being boxed off)

北方季风区汛期降水在 7 月下旬强度达到盛期,随后东部季风区主要雨带开始向南撤,8 月多雨区主要分布在黄河与长江之间,而西南地区偏少。而且由于季风偏弱,季风水汽输送路径偏南,旱区没有明显的水汽输送(图 7a)。从水汽输送矢量距平图上可以看出,常年自西南方向输送我国的水汽路径没有建立,反而是来自西北太平洋地区的水汽向西南输送,说明来自孟加拉湾和赤道印度洋索马里西南水汽输送较常年明显偏弱(图 7b)。同时,从高纬西

伯利亚低压下游的低压槽带来的冷空气影响偏北,冷空气无法与水汽交汇。而且西太平洋副热带高压南侧的东南水汽输送也偏弱,导致南方大部分地区缺少充足的水汽来源,水汽条件较差,在我国西南地区为水汽辐散区(图 7b),因而干旱发展。

3. 1. 3 海洋等外强迫因素的影响

导致大气环流异常的原因之一就是海洋下垫面环境等外强迫因素的影响。2010 年 7 月至 2011 年 3 月赤道中东太平洋发生了一次中等强度的中部型

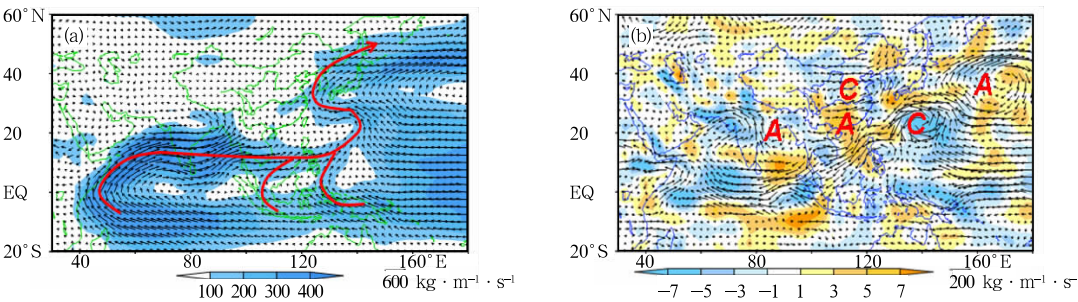


图 7 2011 年 8 月整层水汽输送(a)和距平($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及水汽通量散度($10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)(b)
阴影区在(a)中表示水汽输送大于 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,在(b)中黄色正值表示辐散,蓝色负值表示辐合
Fig. 7 The 1000—300 hPa vapor transportation (a) and anomalies ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and
moisture flux divergence ($10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)(b) August 2011
(shading denoting vapor transportation over $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (a), yellow shading and positive value
denoting divergence, blue shading and negative value denoting convergence (b))

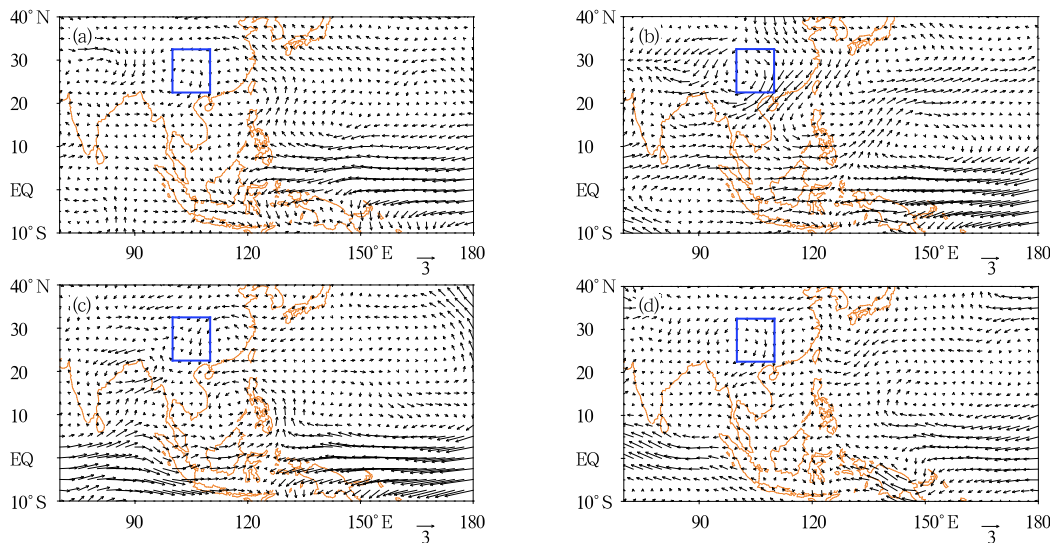


图 8 中部型拉尼娜年秋(a)、冬(c)、春(b)、夏(d)四季 850 hPa 流场异常特征
(图中方框表示西南地区,为反气旋控制)
Fig. 8 Composite 850 hPa wind anomalies for central Pacific La Nina in autumn (a),
winter (c), spring (b) and summer (d)
(the rectangle denoting Southwest China, controlled by anticyclones)

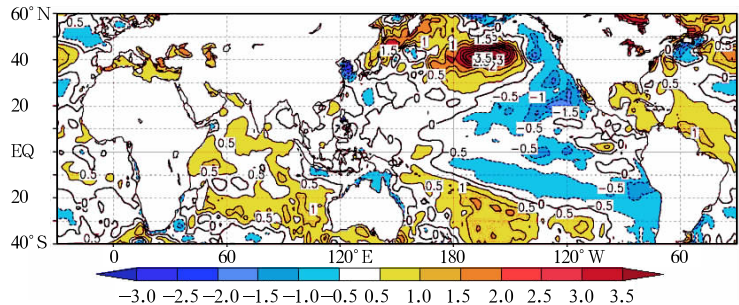


图 9 2011 年 8 月平均海表温度距平(°C)
Fig. 9 The monthly mean sea surface temperature anomalies (°C) in August 2011

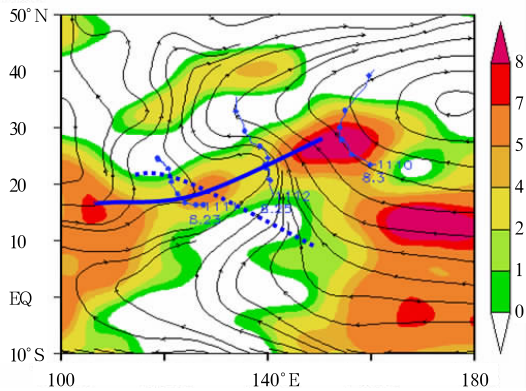


图 10 2011 年 8 月 850 hPa 流场、季风槽位置
(月平均为蓝粗实线,气候平均为蓝虚线)、
高低层纬向风垂直切变($U_{200\text{ hPa}} - U_{850\text{ hPa}}$)
距平(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,图中彩色阴影)和
3 个编号热带气旋路径图
Fig. 10 The 850 hPa wind (streamline),
monsoon trough (blue bold solid denoting
monthly mean, blue dashed denoting
climatological mean), vertical wind shear
anomalies ($U_{200\text{ hPa}} - U_{850\text{ hPa}}$, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, color
shading) and tracks of 3 TCs in August 2011

拉尼娜事件。通过相似年(2000、2001、2008 和 2011 年)850 hPa 异常风场的合成分析表明,异常性反气旋会出现在中部型拉尼娜事件爆发年的秋季,并一直持续到次年夏季。特别是在春夏两季,异常性反气旋更为明显(图 8)。8 月,受中部型拉尼娜事件的影响,西南地区盛行东北风,为异常反气旋性环流控制(图 7b),不利于对流降水的形成,结果加剧了干旱的程度。

另外,相关研究发现,印度洋暖池的变化与中国西南地区降水呈负相关,即印度洋异常偏暖,则中国西南地区降水偏少。这种相关性与水汽输送有关,因为印度洋暖池异常偏暖期间,亚洲季风系统异常偏弱^[14]。同时,赤道中印度洋海温异常通过影响海洋大陆附近辐散激发的马初诺-吉尔(Matsuno-Gill)响应影响副热带高压系统,当印度洋异常增暖时,西太平洋副热带高压强度增强,面积扩大^[15],这与 2011 年 8 月实况一致。从月平均海表温度距平分

布图上可以看出,2011 年 8 月印度洋全区一致偏暖(图 9),受其影响,西南季风偏弱,南海热带对流的异常偏弱,从而导致对流降水偏少,西南干旱。

3.2 热带气旋活动偏少

8 月是一年中 TC 活动最为频繁的月份,编号与登陆个数均为最多。从年代际背景来看,目前也处于编号正常而登陆偏多的时期,而 2011 年实况却相反。针对这种 TC 活动异常偏少的情况,我们进行了系统的分析,究其原因主要有以下几个方面。

3.2.1 南海对流活动偏弱无 TC 生成

2011 年 8 月南海季风偏弱,对流活动亦明显偏弱,不利于气旋性涡旋的产生,因此没有 TC 在南海生成,这是导致生成 TC 个数总体偏少的一个重要原因。盛夏南海没有 TC 生成,这在最近 10 年中,仅 2004 年与今年相同。

表 1 近 10 年夏季各月南海生成 TC 频数
Table 1 Numbers of TCs forming in SCS
during June—August 2001—2011

年	6 月	7 月	8 月	7—8 月
2001	1	0	2	2
2002	0	1	2	3
2003	1	1	0	1
2004	2	0	0	0
2005	0	1	0	1
2006	1	0	1	1
2007	0	1	1	2
2008	0	0	1	1
2009	1	1	1	2
2010	0	1	2	3
2011	2	0	0	0

3.2.2 菲律宾以东季风槽位置偏北

研究表明;西北太平洋和南海有 70% 以上的 TC 生成于季风槽中^[16-20]。2011 年 8 月菲律宾以东季风槽位置较常年同期异常偏北(图 10),使得西北太平洋 TC 生成源地附近盛行东北风,导致常年季风槽活跃的菲律宾以东洋面非常不利于气旋性涡旋生成。8 月生成的 3 个 TC 均发生于菲律宾以东以北的季风槽中。

3.2.3 垂直风切变偏大

热带辐合区高空气流和低空气流的风速差也影响着 TC 的生成,差值大导致能量不能集中,不利 TC 生成。2011 年 8 月西北太平洋和中国南海 TC 活动区域大部垂直风切变(即高层 200 hPa 与低层 850 hPa 纬向风之差)较常年同期偏大 2~8 m·s⁻¹

(图 10),不利于热带气旋生成偏多。

3.2.4 西太平洋副热带高压偏强

2011 年 8 月,西太平洋副热带高压面积指数为 30,强度指数为 57,分别较常年同期面积(22)偏大、强度(38)偏强。西北太平洋在强大的副高控制下,下沉气流异常强,抑制了对流活动的发展,导致 TC 生成个数异常偏少。

3.2.5 MJO 不活跃

热带大气季节内振荡(MJO)是热带大气活动的强信号。MJO 对于南海季风活跃程度和西北太平洋 TC 活动有十分重要影响。8 月上中旬 MJO 不活跃,下旬处于 2~3 位相,均不利于 TC 生成。

3.2.6 印度洋偏暖

TC 活动某种程度上受海温变化和 ENSO 循环的影响。有研究表明,ENSO 事件主要影响西北太平洋和南海热带气旋的生成位置偏东或偏西,而东印度洋海温偏低或偏高则影响热带气旋生成频数的多少^[21-22]。2011 年 8 月印度洋全区一致偏暖(图 9),这可能是导致西北太平洋和中国南海编号热带气旋偏少的重要原因。因为东印度洋海温偏高会通过加热机制激发大气暖性开文波东传,使赤道西太平洋海平面气压下降,对流层低层向赤道地区辐合,相应地引起赤道外的同期响应,导致西北太平洋和中国南海 TC 活动区域形成反气旋,从而抑制了 TC 生成^[21-22]。

4 结 论

2011 年 8 月大气环流和热带海气特征表现为:500 hPa 高度场以偏高为主,西太平洋副热带高压偏强,阶段性西进东退,夏季风偏弱,北半球和欧亚积雪偏少,赤道中东太平洋偏冷,南海和菲律宾以东对流不活跃。在此环流背景下,我国大部地区气温偏高,降水偏少。与此相应,气候异常事件主要是西南等地高温干旱和 TC 活动异常偏少,两个事件的成因分别归纳如下。

4.1 西南干旱

- (1) 处于高温少雨的年代际背景下,自 2001 年年初以来持续高温少雨是导致西南干旱的直接原因。
- (2) 大气环流异常是导致西南干旱的主要原因。西南地区自年初以来高度场一直偏高,长时间处于正距平控制,特别是 8 月受大陆高压脊和副热

带高压系统的影响,致使西南地区高层为辐合气流,低层辐散气流,干旱区处于下沉运动中心,造成晴热为主的气候状况。另一方面,西南季风明显偏弱,季风水汽输送路径偏南,旱区没有水汽输送;同时从高纬西伯利亚低压下游的低压槽带来的冷空气影响偏北,冷空气无法与水汽交汇,水汽条件较差,因而干旱发展。

(3) 海洋下垫面环境等外强迫因素的影响。2010 年 7 月至 2011 年 3 月赤道中东太平洋发生了一次中等强度的中部型拉尼娜事件。受中部型拉尼娜影响,西南地区盛行东北风,为异常反气旋性环流控制。相似年合成分析表明,异常性反气旋自拉尼娜爆发年的秋季就出现,持续到结束年夏季。特别是在春夏季,异常性反气旋更为明显。西南地区受反气旋控制,盛行下沉气流,不利于对流降水的形成,导致干旱。同时,印度洋异常偏暖,也是导致西南干旱的因素之一。

4.2 热带气旋活动偏少

(1) 南海对流活动较常年同期明显偏弱,导致该区域无 TC 生成,这是导致生成热带气旋个数总体偏少的一个重要原因。

(2) 菲律宾以东季风槽位置较常年同期异常偏北,使得西北太平洋 TC 生成源地附近盛行东北风,使得常年季风槽活跃的菲律宾以东洋面非常不利于气旋性涡旋生成。

(3) TC 活动区域风切偏大,不利于 TC 生成偏多。

(4) 西北太平洋副热带高压偏强、面积偏大,在强大的副高控制下,下沉气流异常强,使得对流活动不易发展,TC 生成偏少。

(5) 另外,印度洋偏暖和 MJO 不活跃也导致 TC 活动偏少。

致谢:感谢国家气候中心系统室唐进跃提供的海温距平资料,感谢国家气候中心监测室、预测室、评估室的同仁提供素材。

参考文献

- [1] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,2008,66(5):808-825.
- [2] 卫捷,张庆云,陶诗言. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析[J]. 大气科学,2004,28(1):125-136.
- [3] 卫捷,陈红,孙建华,等. 2006 年夏季中国的异常气候—中国科学院大气物理研究所短期气候预测检验[J]. 气候与环境研究,2007,12(1):1-7.
- [4] 姚玉璧,董安祥,张秀云,等. 中国夏季区域干旱特征比较研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(1):248-264.
- [5] 孙冷. 1999 年我国天气气候特点[J]. 气象,2000,26(4):20-24.
- [6] 李维京. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J]. 气象,1999,25(4):20-25.
- [7] 李德,杨太明,张学贤,等. 2008—2009 年宿州秋冬低温干旱成因分析与影响评估[J]. 气象,2011,37(5):615-621.
- [8] 翟盘茂. 全球变暖背景下的气候服务[J]. 气象,2011,37(3):257-262.
- [9] 国家气候中心. 2011 年 8 月全国气候影响评价.
- [10] Broccoli A J, Manabe S. The effects of orography on midlatitude Northern Hemisphere dry climates[J]. Journal of Climate, 1992, 5: 1181-1201.
- [11] 晏红明,段旭,程建刚. 2005 年春季云南异常干旱的成因分析[J]. 热带气象学报,2007,23(3):300-306.
- [12] 彭京备,张庆云,布和朝鲁. 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,2007,12(3):464-474.
- [13] 王素萍,王劲松,冯建英. 2010 年秋季全国干旱状况及其影响与成因[J]. 干旱气象,2010,28(4):499-505.
- [14] 杨宇星. 印度洋暖池的变异及其对亚洲气候的影响[D]. 中国海洋大学. 2006.
- [15] 钱代丽. 西太平洋副高面积变动与热带印度洋—太平洋海温异常的联系及其对中国降水的影响[D]. 南京信息工程大学. 2008.
- [16] Gray W M. The formation of tropical cyclones[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1998, 67: 37-69.
- [17] McBride J L. Tropical cyclone formation. Chapter 3, Global Perspectives on Tropical Cyclones[C]. Tech. Doc WMO/TD No. 693, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1995:63-105.
- [18] 王磊,陈光华,黄荣辉. 影响登陆我国不同区域热带气旋活动的大尺度环流定量分析[J]. 大气科学,2009,33(5):916-922.
- [19] 黄荣辉,陈光华. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J]. 气象学报,2007,65(5):683-694.
- [20] 孙颖,丁一汇. 1998 和 1999 年西北太平洋热带气旋的异常特征及其大尺度条件[J]. 气象学报,2002,60(5):527-537.
- [21] Zhan R, Wang Y, Lei X. Contributions of ENSO and East Indian Ocean SSTA to the interannual variability of Northwest Pacific tropical cyclone frequency[J]. Journal of Climate, 2011, 24: 509-521.
- [22] 孙冷. 2010 年西北太平洋热带气旋活动特征及成因的初步分析[J]. 气象,2011,37(8):923-930.