

唐红玉, 吴遥, 董新宁, 等, 2019. 重庆 2017 年秋季降水异常成因分析[J]. 气象, 45(6): 799-810. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al, 2019. Causes analyses of precipitation anomaly in Chongqing in Autumn 2017 [J]. Meteor Mon, 45(6): 799-810 (in Chinese).

## 重庆 2017 年秋季降水异常成因分析\*

唐红玉 吴 遥 董新宁 白莹莹 魏麟晓 张 驰

重庆市气候中心, 重庆 401147

**提 要:** 2017 年秋季, 重庆降水出现前期异常偏多而后期异常偏少的特征。为分析造成降水季节内极端异常原因, 使用 1961 年以来重庆 34 个气象台站秋季(9 月上旬至 11 月下旬)逐日降水数据、NCEP/NECA 和 NOAA 逐日高度场、风场、水汽场、海温场等再分析资料, 采用相关、合成等统计诊断方法, 分析了 2017 年重庆地区秋季降水出现季节内异常变化的主要原因。环流的诊断分析表明: 2017 年重庆地区秋季降水出现明显旱涝转折、降水前多后少, 其成因是由于副热带高压长时间维持在重庆长江沿线及长江中下游一线, 中高纬度维持双阻型, 即乌拉尔山高压脊发展, 同时鄂霍茨克海阻塞高压的建立和维持, 使其西部低槽东移缓慢, 导致了重庆地区 9 月至 10 月上中旬强降水频发、降水异常偏多。10 月下旬西太平洋副热带高压异常减弱南退, 尤其在 11 月其闭合单体完全退出大陆, 低纬度地区的高压坝切断了水汽的向北输送; 中高纬度呈现西正东负的距平分布型, 贝加尔湖以东至鄂霍茨克海以西的大范围地区为负高度距平分布, 负距平南界位于我国河套北部地区, 冷空气路径偏东偏北, 不利于降水继续偏多, 发生由异常多向异常少的转折。此外海温强迫场的分析表明: 初秋中高纬度出现的双阻型环流异常可能与前期和同期西北太平洋海温的偏暖有关; 而前期热带印度洋海温的全区一致增暖模态和后期赤道东太平洋海温的异常可能是导致副热带地区大气环流(西太平洋副热带高压)异常的主要原因和外强迫因子。

**关键词:** 重庆, 秋季降水, 环流异常, 成因

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.006

## Causes Analyses of Precipitation Anomaly in Chongqing in Autumn 2017

TANG Hongyu WU Yao DONG Xinning BAI Yingying WEI Linxiao ZHANG Chi

Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

**Abstract:** This paper analyzes the precipitation in Chongqing that exhibits positive anomaly during the early autumn and negative anomaly during the late autumn in 2017. To diagnose the cause of this extreme anomaly in the precipitation season, this paper uses daily precipitation data observed by 34 meteorological stations in Chongqing since 1961 (from early September to late November), NCEP/NECA and NOAA daily height field, wind field, water vapor field, sea temperature field and other reanalysis data. Using correlation, composite and other statistical diagnostic methods, we analyze the abnormal changes in the autumn precipitation in Chongqing in 2017. The diagnosis of related circulations shows that in 2017, precipitation in Chongqing witnessed a sharp transition from droughts to floods. The cause of this situation is that the subtropical high maintained along the section of Yangtze River in Chongqing and the middle and lower reaches of the Yangtze River for a long time. At the same time the development of the double-resistance

\* 国家自然科学基金项目(41875111)、中国气象局核心业务发展专项(YBGJXM2018-05-04, YBGJXM2019-06-06)和中国气象局西南区域气象中心重大科研业务项目(西南区域 2014-1)共同资助

2018 年 3 月 30 日收稿; 2019 年 4 月 1 日收修定稿

第一作者: 唐红玉, 主要从事短期气候诊断预测业务和研究. Email: 782378285@qq.com

type (the high-ridge of the Ural Mountains), together with the establishment and maintenance of the Okhotsk Sea high, slowed the eastward movement of the low trough in the west, resulting in frequent heavy precipitation and abnormal precipitation amount from September to early and mid-October in Chongqing. In late October, the West Pacific subtropical high anomaly weakened southward. In November, when the closed monomer completely exited from the mainland, the high dam in the low latitude cut off the northward transport of water vapor. The mid-high latitude subtropical high showed a west-positive east-negative type anomalous distribution. The area from the east of Lake Baikal to the west of the Okhotsk Sea exhibited a negative anomaly. The south edge of negative anomaly was located in the northern part of Hetao Region. The cold air path was eastward and northward, not conducive to the continued precipitation. Thus, a transition from above normal to below normal precipitation occurred. The analysis of the SST anomaly field indicates that the double-restricted circulation anomaly in the early-autumn and high latitudes may be related to the leading and current warming of the SST and northwestern Pacific Ocean. The SST of tropical Indian Ocean Basin-Wide Mode of the whole region and SST in the equatorial eastern Pacific may be the main causes and external forcing factor of the anomalous atmospheric circulation (West Pacific subtropical high) in the subtropical region in the late autumn.

**Key words:** Chongqing, autumn precipitation, atmospheric circulation anomaly, cause

## 引 言

在全球气候变暖背景下,极端天气气候事件(洪水、干旱、高温、低温和台风等)出现的概率和强度逐渐增加(IPCC, 2007)。针对极端事件,全球的学者进行了大量研究工作(Alexander et al, 2006; Choi et al, 2009; Zhang et al, 2007; 高荣等, 2018)。而强降水往往引发山洪、泥石流等灾害使得其被广泛关注。以往的研究指出:强降水具有明显的地域性和季节性(丁一汇等, 2007; 任国玉等, 2010; 陈姣和张耀存, 2016; 姚世博等, 2017)。

近年来针对我国的气候异常,也有诸多研究,如对降水 6—7 月不同类型(沿淮型、沿江型和江南型)的极端降水事件的诊断研究中认为(杨玮等, 2017):强降水发生时,高低空环流出现了明显的异常,梅雨锋位置的差异决定了极端强降水的发生区域。对低纬度高原汛期强降水事件的研究,刘丽等(2011)指出:低纬高原汛期降水具有明显年代际特征,并通过诊断指出西太平洋和东印度洋海温状况可能是造成该地区强降水事件发生的重要原因。张夏琨等(2017)发现 2016 年 10 月全国降水偏多时,西太平洋副热带高压(以下简称副高或西太副高)位置明显偏西、强度偏强。通过对不同季节强降水事件的研究,胡泊等(2018)指出:东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水空间、时间上及主要影响的环流系统均

有明显的不同。李春晖等(2017)研究表明:华南春季降水具有明显的季节内振荡,并且在不同年代周边海温、北大西洋年代际振荡和大气环流的影响各不相同。可见在中国范围内,不同地区和不同季节甚至在不同的年代际背景下强降水具有明显的差异性。因此,非常有必要对重庆地区降水异常的特征及影响系统进行分析研究。

重庆市(以下简称重庆或重庆地区)位于我国青藏高原与长江中下游平原之间的过渡性地带,境内地形条件复杂,起伏变化大,西、北部与四川盆地接壤、东北部与秦岭、大巴山地相连,南依云贵高原,地势北部、东部、南部高,中、西部低。特殊的地理位置使得该地区气象灾害复杂多样。旱涝急转作为两种气象灾害,在短时间内出现往往会对社会生产和人民生活带来损失。以往的研究指出:西南地区夏季具有明显的旱涝急转特征,夏季旱涝急转与西太副高和中高纬度西风带具有很高的联系(孙小婷等, 2017)。封国林等(2012)研究表明:2011 年春末初夏长江中下地区旱涝急转不仅伴随着显著的环流异常,赤道中东太平洋及赤道印度洋海温也出现明显异常。但以往对较大范围旱涝急转的研究相对较多且大都集中在夏季,而对秋季气候异常的分析,有学者分析了全国或北方秋季气候异常的原因(吴国雄等, 2008; 刘扬和刘屹岷, 2016; 支蓉等, 2018; 聂羽等, 2016; 竺夏英和宋文玲, 2017),但研究相对较少,对重庆这种较小区域的相关分析研究更少。近几年

来,在重庆地区这种旱涝急转除了夏季以外,在秋季也频有发生,如2015年出现秋季前期异常偏多后期异常偏少的转折,2016年则出现了秋季前期偏少后期异常偏多的转换,对当地气候预测及防灾减灾服务工作提出了挑战。在以往的研究中对气候的异常研究主要集中在夏季,对秋季的研究相对较少,所以在对气象服务有更加精细化需求的今天,很有必要分析和研究该地区秋季降水异常变化的成因。

基于以上原因,本文对2017年重庆秋季降水异常偏多且出现前期异常偏多后期异常偏少(重庆2017年9—10月降水量为1961年以来同期最多,而11月降水量为1951年以来同期第五少)的成因进行诊断分析。针对降水的季节内变化,仔细分析了2017年重庆地区秋季降水出现季节内异常变化的主要影响因子,为进一步做好短期气候预测及服务性工作提供更好的参考依据。

## 1 资料与方法

大气环流资料来自美国NCEP中心提供的逐日、水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的位势高度场、风场、水汽场等再分析资料,时间段为1981年1月1日至2017年12月31日。NOAA提供的1974年6月1日至2017年12月31日逐日水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 大气射出长波辐射(OLR)资料,以及1981年10月29日至2017年12月31日逐周分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的全球海表温度(SST)等再分析资料。

本文使用的观测数据来源于重庆市气象局信息中心的重庆34个台站逐日数据集,旬资料统计时间段为秋季9月上旬至11月下旬。

本文采用的西太副高强度、面积、脊线位置、西伸脊点等采用刘芸芸等(2012)的定义,热带印度洋全区一致海温模态指数(IOBW)取自国家气候中心网站,网址为<http://cmdp.ncc-ma.net/download/precipitation/diagnosis/IOBW/IOBW.pdf>,其定义为热带印度洋( $10^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ} \sim 110^{\circ}\text{E}$ )区域格点平均海温距平。

本文定义的关键区综合强度指数是指乌拉尔山地区( $60^{\circ} \sim 75^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{E}$ )、贝加尔湖地区( $45^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ )和鄂霍茨克海地区( $45^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ )平均高度值和副高强度指数的积累标准值。

应用分析方法包括相关、合成等常用气候统计

诊断分析方法。

## 2 2017年重庆秋季降水异常特征

图1为重庆秋季降水量历年时间演变,可以看出,2017年秋季全市平均降水量为416.8 mm,较常年同期(258 mm)显著偏多6成,为1961年以来历史同期最多。但季节内降水分布极为不均,9月偏多近9成,为1951年以来同期第六多,仅次于1973、1979、2014、1970和1972年;10月偏多近9成,为1951年以来同期最多;11月偏少5成,为1951年以来的第五少,仅次于1998、1988、1974和1953年。在旬时间尺度上(图2),2017年重庆降水偏多时段主要集中在9月上旬至10月中旬,特别是9月上旬和10月上中旬降水显著偏多1倍以上,但10月下旬开始,重庆降水出现了明显转折,降水转为偏少,其中11月上旬偏少近9成,季节内降水时间分布异常不均。

由以上分析可见,2017年秋季重庆降水主要集中在季节中前期,其中9月上旬最为突出。重庆9月气候平均降水量为113.3 mm,而2017年9月上旬全市平均降水量就达121.7 mm,仅一旬的降水量就超过了月降水总量,这种异常是有气象资料记

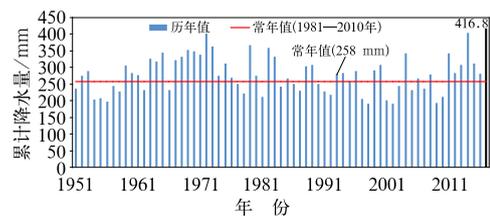


图1 1951—2017年重庆秋季降水量逐年变化  
Fig. 1 Annual variation of Chongqing autumn precipitation during 1951—2017

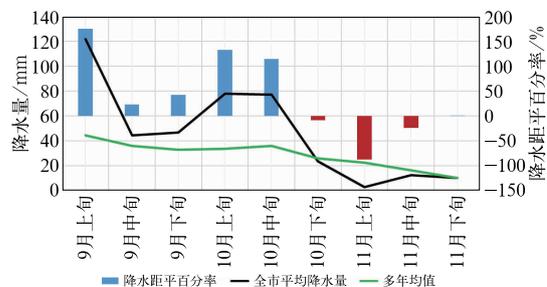


图2 2017年秋季重庆逐旬降水时间演变  
Fig. 2 Time evolution of dekad precipitation in Chongqing in autumn 2017

录以来少见的(为气象资料记录以来历史同期第三多),仅次于 1988 和 2013 年。除此以外,2017 年 10 月上旬和中旬降水也异常偏多,其中 10 月上旬全市平均降水量(77.7 mm)为有气象资料记录以来历史同期最多,10 月中旬(77 mm)为有气象资料记录以来历史同期次多,两旬的降水量均比常年同期偏多 1 倍以上。

### 3 重庆 2017 年秋季降水异常的成因分析

#### 3.1 2017 年 9 月降水异常的环流特征

气候的异常与大气环流的异常密不可分,大气环流异常往往是造成某一地区气候异常的直接原因。本文首先从大气环流异常,分析 2017 年重庆秋季,尤其是秋季中前期 9 月至 10 月上旬降水异常偏多的可能原因,以期揭示和了解影响重庆秋季降水异常的环流型。

从 2017 年 9 月 500 hPa 高度场及距平场可见,欧亚中高纬呈“两脊一槽”型环流控制(图 3),环流经向度大。中高纬度地区:新地岛以西至乌拉尔山及其以西地区高压脊明显,中心距平可达 12 dagpm 以上,而贝加尔湖以北到日本及东亚北部上空为低压槽控制,鄂霍茨克海至白令海上空为正距平控制,并有大于 6 dagpm 的正距平中心,鄂霍茨克海阻塞高压(以下简称阻高)发展明显。低纬度地区:西太副高较常年异常偏强、面积偏大、西伸脊点异常偏西,脊线位置偏南,588 dagpm 等值线正好压在重庆长江沿线及长江中下游一线,这种形势十分有利于孟加拉湾水汽沿着副高外围输送到长江流域,配合中高纬度乌拉尔山高压脊的发展,使贝加尔湖地区低压槽底部冷空气南压,致使来自副高外围的西南暖湿气流与中纬度北风分支往南输送的冷空气正好在长江沿线汇合,造成整个长江流域降水异常偏多。同时从整层(1000~300 hPa)积分的水汽输送场上也可以看到(图 4a),副高外围异常西南风水汽输送的部分南支分量异常偏强,自南向北、从东到西一直达到黄淮地区。在 850 hPa 高度上,菲律宾附近对流层低层为异常反气旋环流控制(图 4b),来自西太平洋的转向水汽输送明显偏强,其与中高纬的冷空

气配合,造成水汽通量异常辐合区主要位于三江源及长江沿线。由于鄂霍茨克海阻高的建立和维持,使其西部低槽东移缓慢,这种两脊一槽双阻型的环流形势维持时间较长,造成了 9 月重庆及长江中下游地区区域性强降水的频发和降水的异常偏多。

#### 3.2 2017 年 10—11 月降水异常转折的环流特征分析

图 5 是 2017 年 10 月上中旬、10 月下旬及 11 月 500 hPa 高度场及距平场。可以看出,与 9 月相比,10 月上中旬大气环流发生了较大调整(图 5a),表现为中高纬度环流的经向度较 9 月减弱,欧亚地区由原来的双阻型即“两脊一槽”型调整为从极地到热带的“+ - + -”环流型,即 60°N 以北是广阔的正距平区域;在 40°~60°N,从里海、威海到巴尔喀什湖、到贝加尔湖至鄂霍茨克海为带状负距平控制;从西亚到东亚为带状正距平控制区;低纬度 10°N 附近,从孟加拉湾到太平洋为负距平控制,低纬度热带地区台风等低值系统活跃(如台风卡努,10 月 16 日在广东湛江登陆),在其影响下西太副高位置转为较常年明显偏北,但其强度仍偏强、面积仍偏大,菲律宾附近对流层低层的异常反气旋消失,转而变为异常气旋控制(图 6b)。从水汽输送场看(图 6a),副高南侧低值系统外围的异常东风水汽输送在西南地区南部转向,部分南支分量偏强,自南向北一直输送到了河套地区,仍然有丰沛的水汽,虽与 9 月水汽输送的来源不同,但同样造成重庆 10 月上中旬降水的异常偏多。

至 10 月下旬,大气环流再次进行调整,在 80°E 以西,由高纬到低纬呈“+ - +”型分布,而在 80°E

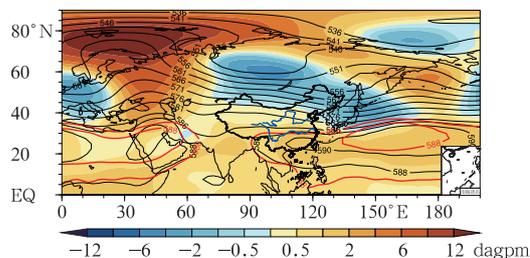


图 3 2017 年 9 月 500 hPa 平均环流场(等值线)和距平场(填色)

Fig. 3 The 500 hPa mean circulation (black contour) and anomaly (shaded) in September 2017

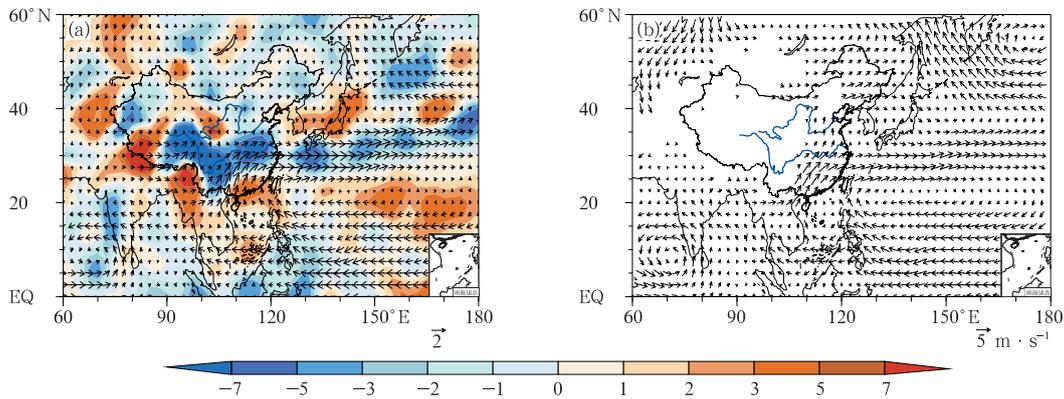


图 4 2017 年 9 月整层(1000~300 hPa)积分水汽输送(矢量,单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )及辐合辐散场距平场(阴影,单位: $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )(a)和 850 hPa 风场距平场(b)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of whole-layer (1000–300 hPa) vapor transport fluxes (vector, unit:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) and convergence and divergence anomaly (shaded, unit:  $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (a) and 850 hPa wind field anomaly (b) in September 2017

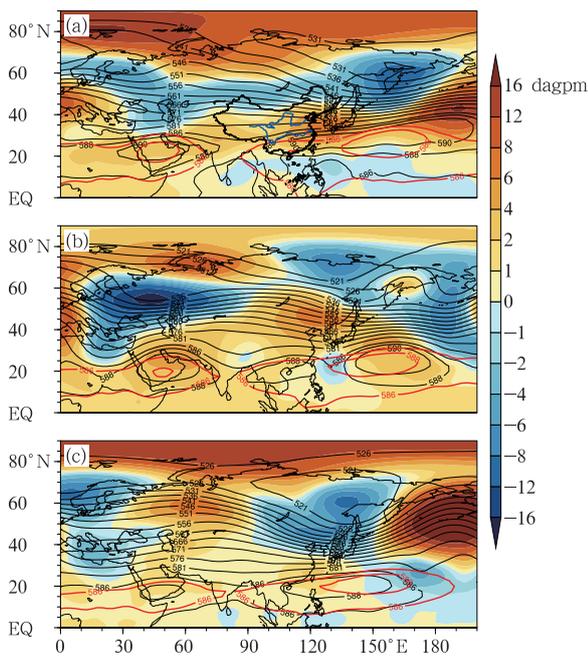


图 5 2017 年 10 月上中旬(a), 10 月下旬(b)及 11 月(c)500 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)及距平场(填色)

Fig. 5 The 500 hPa geopotential height field (black contour, unit: dagpm) and anomaly (shaded) in the first and second dekads October (a), third dekad of October (b), November (c) 2017

甸到我国华南地区,另外一部分控制在赤道太平洋西部偏北区域,比前期明显减弱南退(图 5b)。而菲律宾附近对流层低层的异常气旋较前期明显加强(图 6d)。从水汽输送场可见(图 6c),重庆上空无论副高外围还是其南侧低值系统外围的南风完全消失,转而由偏北风控制,水汽辐合条件已不存在。此时中高纬度既无冷空气南下至重庆地区,低纬度副高减弱后其外侧也无暖湿气流和水汽的输送配合,重庆降水即从异常多雨转向少雨。

11 月,500 hPa 高度场及距平场上(图 5c),大气环流再次发生调整,欧亚中高纬度地区环流经向度较 10 月下旬进一步加大,呈现西正东负的距平分布型,乌拉尔山脊再一次加强,而贝加尔湖以东到鄂霍茨克海以西及我国东北地区至日本海地区的大范围内地区为负高度距平分布,负距平南界位于我国河套北部地区,说明 11 月东亚大槽偏强,冷空气多影响我国河套以北及其以东地区。此时副高位置较常年偏西,强度和面积仍然大于常年同期,但其闭合单体已完全退出大陆,向东向南撤退至西太平洋地区。西太副高外围 586 dagpm 线和伊朗高压外围的 586 dagpm 线在  $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ 、 $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$  区域内形成了一个高压坝,该阶段输送我国的水汽通道被隔断,从 850 hPa 距平风场场上可以看出(图 6f),11 月在菲律宾附近对流层低层由前期异常气旋位置南移,受菲律宾东北部低值系统外围气流的影响,菲律宾以北地区转而为弱的反气旋,该反气旋南侧的东

以东,基本为北负南正。受低纬低值系统影响,副高由上中旬的带状型分裂为两部分,一部分控制在緬

风较弱,只影响到我国华南地区。从水汽输送场(图 6e)可见,西太副高外围南侧东风到我国大陆后转为西南风形成水汽的辐合,但影响位置偏南,仅影响到江南和华南地区,对重庆地区的影响和水汽输送偏弱,且印度洋上空也无偏南风和水汽的输送,非常不利于重庆地区降水的产生。故 11 月中高纬度冷空气位置偏东偏北,加之副热带地区西太平洋和印度洋无有利水汽条件输送,在这种环流型配置下,重庆地区降水异常偏少,从 9—10 月的多雨转而少雨。

通过对 2017 年秋季重庆地区,即对应的  $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$  上空 ( $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$  范围内) 平均整层 ( $1000\sim 300\text{ hPa}$ ) 积分水汽辐合辐散距平场逐日变化的分析(图 7),可以清楚地看到这种变化:在 9 月至 10 月上旬,重庆上空水汽辐合异常偏强,至 10 月中旬辐合程度虽有所减弱,但仍以弱的辐合为主,故此时的

降水已较前期有所减弱;至 10 月下旬至 11 月,重庆上空水汽的强辐合区已完全减弱或消失,从而造成了重庆降水发生了由多转少的明显的转折。

### 3.3 2017 秋季与典型多雨年环流特征对比分析

从前文分析可知,2017 年重庆秋季降水总体达到了历史同期最多,极其异常。那么降水为什么会如此异常?从重庆历史秋季典型多雨年的 500 hPa 环流合成分析(图略)可知,重庆典型秋季多雨年环流特征在中高纬度表现出西欧或乌拉尔山地区正高度场异常(阻高)、贝加尔湖地区为宽广的负高度场异常(低槽),在中低纬度则表现为西太副高异常偏西偏强。2017 年的环流同样也出现乌拉尔山地区阻高、贝加尔湖地区低槽和西太副高的异常偏强,但这种异常的环流特征是否也达到了“极端的程度”?

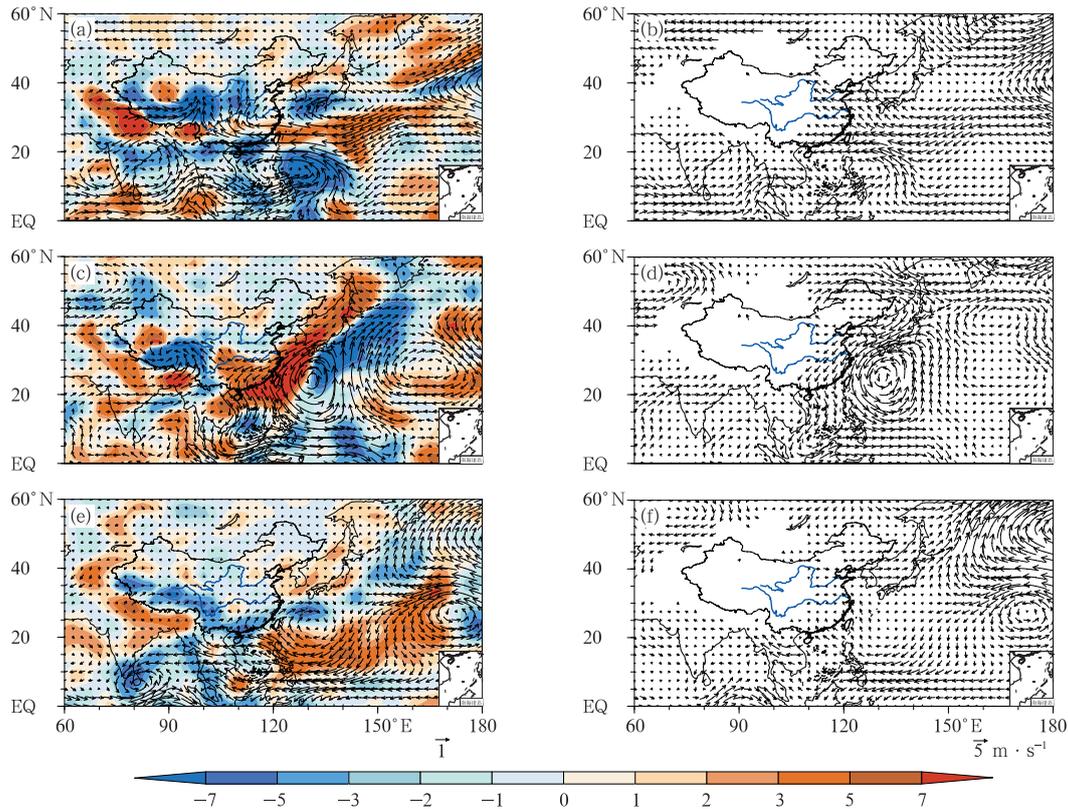


图 6 2017 年 10 月上中旬(a,b)、10 月下旬(c,d)及 11 月(e,f)整层积分水汽输送(矢量,单位:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )及辐合辐散场距平(阴影,单位:  $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (a,c,e) 和 850 hPa 风场(矢量,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (b,d,f)

Fig. 6 Spatial distribution of whole-layer vapor transportation fluxes (vector, unit:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) and convergence and divergence anomaly (shaded, unit:  $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (a, c, e) and 850 hPa wind field (vector, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (b, d, f) in the first and second dekads October (a, b), third dekad of October (c, d), November (e, f) 2017

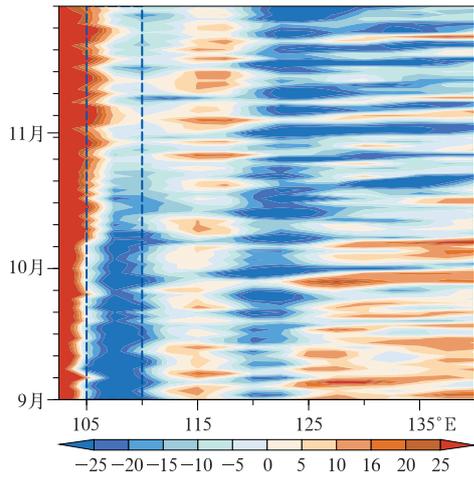


图 7 2017 年秋季重庆地区上空(25°~35°N、105°~110°E)平均整层(1000~300 hPa)积分水汽辐合辐散距平逐日变化  
(单位:  $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Fig. 7 Daily variation of the mean whole-layer (1000–300 hPa) moisture convergence and divergence anomalies (unit:  $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) in Chongqing (25°–35°N, 105°–110°E) in autumn 2017

为进一步分析 2017 年秋季环流异常的程度,计算并分析比较了 1981—2017 年乌拉尔山地区(60°~

75°N、40°~65°E)、贝加尔湖地区(45°~60°N、90°~120°E)500 hPa 高度场平均距平(图 8),可以看出,2017 年秋季乌拉尔山地区高度场异常偏高,比常年偏高 67.36 dagpm,偏高程度列 1981 年以来第五位(图 8a);贝加尔湖地区高度场较常年偏低 20.89 dagpm,负异常程度列 1981 年以来的同期第六位(图 8b);2017 年秋季西太副高压强度异常偏强,其强度指数达到 274.47,较常年同期偏强 140.96,为 1981 年以来第三强(图 8d),西太副高的西伸脊点西伸到 99.42°E,较常年同期偏西 17.34 个经度,偏西的程度虽不是历史极端,但为 1981 年以来同期第六位,也较异常。此外,在日常业务工作中发现,如果夏季至初秋鄂霍茨克海地区有阻高建立,也易造成重庆地区降水偏多,2017 年秋季 500 hPa 高度环流场上,鄂霍茨克海地区表现出阻高异常偏强的特征,这种特征在 9 月尤为明显。计算鄂霍茨克海地区(45°~60°N、150°E~180°)500 hPa 高度场距平发现,2017 年秋季该地区高度距平值比常年偏高 31.49 dagpm,列 1981 年以来历史第七高位(图 8c),故鄂霍茨克海阻高的偏强,也是重庆秋季降水偏多的重要原因之一。虽然上述各关键区高度场指标未达到历史极端,但计算分析 1981 年以来关键区高度值和副高强度指数的积累

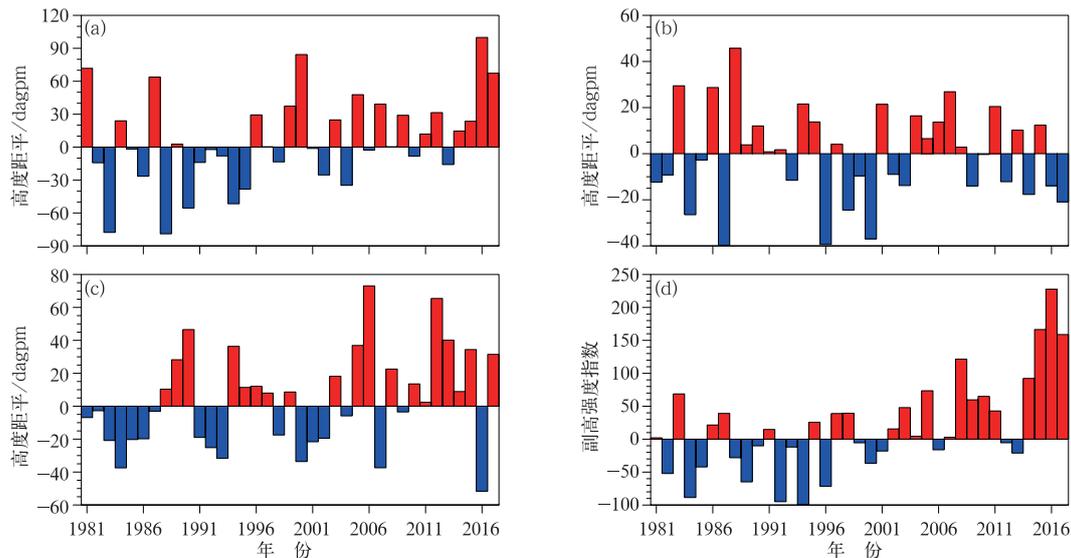


图 8 1981—2017 年秋季 500 hPa 关键区(a,b,c)平均高度距平及西太副高强度变化(d)

(a)乌拉尔山地区,(b)贝加尔湖地区,(c)鄂霍茨克海地区

Fig. 8 The average height anomaly value (a, b, c) and the western Pacific subtropical high strength index (d) in 500 hPa key area in autumns of 1981–2017

(a) Ural Mountains Region, (b) Lake Baikal Region, (c) Okhotsk Sea Region

标准值(定义为综合强度指数)发现,2017 年关键区各环流系统的综合强度指数为历史最强(图 9)。

故综上所述,虽然 2017 年秋季虽然各关键区指标异常程度未达到 1981 年以来的历史同期第一,但关键区环流系统相互配合,其综合强度指数为同期最强,在它们的综合影响下,在高、中、低纬度环流形势有力配合下,才造成重庆秋季降水的极端异常偏多。

对于 2017 年秋季重庆降水出现从 9 月的异常多到 11 月异常少的转折成因,除上文分析外,通过分析重庆 9 月和 11 月降水与同期 500 hPa 高度场的相关(图 10)可知,影响重庆 9 月降水的主要关键区是鄂霍茨克海地区和西太平洋副热带区(图 10a,均为正相关高值区),即高影响的大气活动中心是鄂霍茨克海阻高和西太副高,当这两个大气活动中心强度偏强时,重庆 9 月降水偏多。从上文分析可知 2017 年影响重庆的两个关键大气活动中心(鄂霍茨克海阻高和西太副高)异常偏强,从而造成了重庆 9 月降水的异常偏多。重庆 11 月降水与同期 500 hPa 高度场的相关分析显示(图 10b),影响重庆 11 月降水的关键区主要是日本海地区(正相关高值区),即高影响的大气活动中心是东亚大槽,当其偏强时,重庆 11 月降水偏少,从上文分析可知,2017 年 11 月东亚大槽异常偏强,是造成重庆 11 月降水异常偏少的重要原因之一。故 9 月鄂霍茨克海阻高和西太副高偏强至 11 月大气环流调整为东亚大槽偏强的冬季环流型后,重庆秋季降水发生了从多雨到少雨的转折,10 月为大气环流调整的过渡期,降水为前多后少。

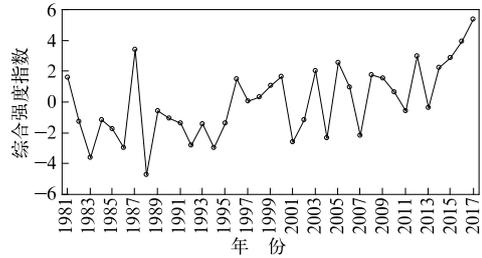


图 9 1981—2017 年秋季 500 hPa 关键区平均高度距平及副高强度指数的综合强度指数

Fig. 9 The 500 hPa key area comprehensive strength index from 1981 to 2017

#### 4 2017 年秋季大气环流异常的海温强迫影响分析

为寻找造成 2017 年大气环流异常,尤其是西太副高异常的外因,进一步分析海温外强迫因子的影响。以往的研究表明,海温可通过大气环流影响我国的降水(蔡榕硕等,2012;黄荣辉等,2016)。分析 2017 年夏、秋季海温距平分布可以看出夏季尽管赤道东太平洋海温无明显异常,但西北太平洋中纬度地区和印度洋地区偏暖明显,中心最高温度距平超过了 1℃(图 11)。至 2017 年秋季,赤道东太平洋海温出现了冷水位相,但印度洋仍是以偏暖为主的状态。从图 5 可以看出,副高自 2017 年春季开始就表现出持续偏强、偏西的特征,同时,从热带印度洋全区一致海温模态指数(IOBW,图 12)可以看出,印度

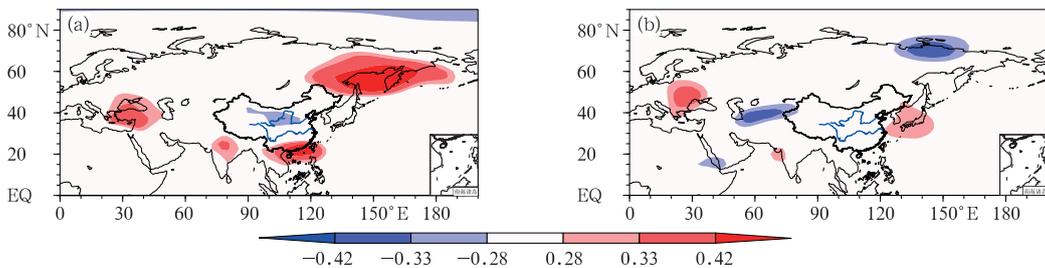


图 10 重庆 2017 年 9 月(a)和 11 月(b)降水与同期 500 hPa 高度场的相关图  
(阴影区通过了 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 10 Correlation diagram of precipitation with the 500 hPa height field of the same period in Chongqing in September (a) and November (b) 2017  
(Shaded has passed the significance test at 0.05 level)

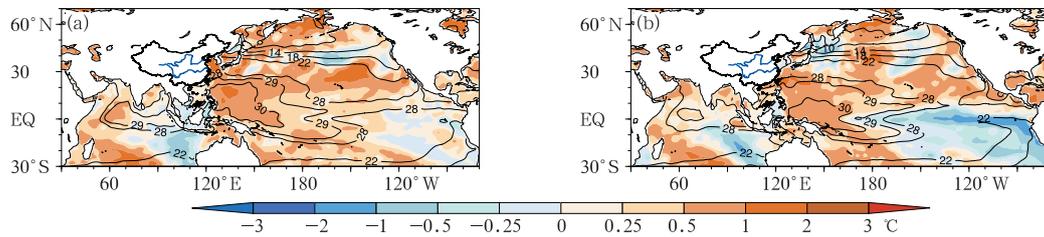


图 11 2017 年夏季(a)、秋季(b)海温平均场(等值线,单位:℃)及距平(填色)空间分布  
Fig. 11 Spatial distribution of the summer (a), autumn (b) SST (contour, unit: ℃) and analyzed anomaly field (shaded) in 2017

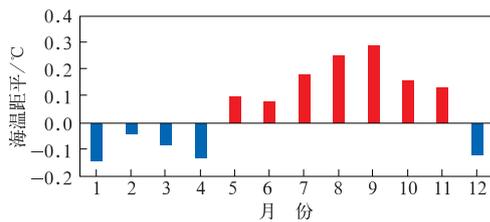


图 12 2017 年 IOBW 指数逐月演变  
Fig. 12 Temporal evolution of monthly IOBW index in January—December 2017

洋 2017 年夏、秋季均表现出持续偏暖的特征。通过分析前期和同期印度洋全区一致海温指数 IOBW 与秋季副高强度的相关可以看出(表 1),前期夏季 IOBW 指数与副高强度有很好的相关关系,与秋季副高强度的相关系数达 0.64,通过了 0.001 显著性水平检验,在秋季也有持续相关,秋季同期相关为 0.57,同样也通过了 0.001 显著性水平检验。可见前期夏季印度洋海温对秋季副高的影响作用比秋季同期影响更显著。

表 1 西太副高强度与 IOBW 指数的时间相关

Table 2 The western Pacific subtropical high strength correlated to the time of IOBW index

		IOBW							
		6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	夏季	秋季
副高 强度	9 月	0.39*	0.39*	0.44**	0.37*	0.3	0.23	0.43**	0.32*
	10 月	0.48**	0.46**	0.52***	0.52***	0.45**	0.38*	0.51**	0.47**
	11 月	0.6***	0.58***	0.59***	0.63***	0.67***	0.54***	0.62***	0.65***
	秋季	0.6***	0.58***	0.63***	0.61***	0.56***	0.45**	0.64***	0.57***

注:\*, \*\*, \*\*\* 分别表示通过 0.05、0.01、0.001 显著性水平检验。

Note: \*, \*\*, and \*\*\* mean having passed the significance tests at 0.05, 0.01 and 0.001 level respectively.

以往研究表明:副高加强西伸,位置易偏南,副高西侧大量水汽输送至我国南方地区,导致秋冬季我国南方易多雨(Zhou et al, 2010; Zhou and Wu, 2010; Zhou, 2011; Yuan et al, 2014)。对于 2017 年来说,前期夏季至同期秋季由于印度洋的持续偏暖(图 11),其对副高的持续影响,致使副高加强西伸,其西侧大量水汽输送至我国南方地区,导致重庆及长江中下游地区的多雨。因而,印度洋海温的持续偏暖可能是维持 2017 年 9—10 月西太副高持续偏强、偏西的重要外强迫因子,且这种分析结果与袁媛等(2017)分析结论一致,只是其影响持续到了初秋。故热带印度洋海温的全区一致增暖模态可能是导致副热带地区大气环流异常的最主要原因,也可能是导致重庆 2017 年秋季 9—10 月降水异常偏多的重要原因之一。至 11 月时(图略),赤道中东太平洋海

温负距平强度逐渐增强,已呈现 La Niña 状态,而印度洋暖海温较前期亦有明显的减弱趋势,赤道印度洋南部的暖中心已经消失,多呈现正常或弱的偏暖状态,此时其对大气的影 响已有所减弱或已不明显,副高也明显减弱,强度较常年偏弱。

对于中高纬地区大气环流的异常,武炳义和 张人禾(2011)的研究发现,夏季西北太平洋海温升高,有利于双阻塞高压型环流异常出现。陆日宇和黄荣辉(1998)的研究结果认为鄂霍次克海阻高与西北太平洋海温之间的联系是通过夏季该海域海温所激发出的经向遥相关波列。2017 年 9 月鄂霍次克海阻高的异常偏强可能与西北太平洋海温的异常偏暖有关,并对重庆初秋降水偏多起到了积极的作用。

在秋季太平洋和印度洋海温异常变化的过程中,大气对海温的响应可以通过分析大气射出长波

辐射(OLR)的变化和 Walker 环流及经向环流的变化来进行验证。对 2017 年秋季 9—11 月各月 OLR 距平场(图略)的分析表明,9 月,赤道菲律宾以南地区和赤道印度洋北部地区对流活动显著。Walker 环流(图 13a)虽显示出在赤道中西太平洋较强的上升运动和在中太平洋东部较强的下沉运动,大气对 La Niña 状态有了一定的响应。而赤道印度洋东部地区表现出的较强的上升运动,可通过 Hadley 环流(图 13d)在副热带地区下沉运动增强,引导西太副高的偏西和偏强,从而更好地为长江流域打开水汽输送通道,有利于造成长江流域降水的偏多,这与前文分析的结论是一致的。10 月,菲律宾附近地区的对流进一步加强,对流活动区域向北扩展到我国南海地区,而赤道印度洋地区的对流活动范围和强度已减弱至几乎消失。Walker 环流同时也显示出在赤道中西太平洋的上升运动较前期减弱,中太平洋东部的下沉运动在对流层中高层持续,而赤道印度洋东部地区前期表现出的较强的上升运动开始减

弱(图 13b),所以此时印度洋东部的弱上升运动,中纬度经向环流表现出加强的下沉运动(图 13e),说明其仍通过 Hadley 环流对副高造成影响。11 月,菲律宾附近地区的对流更加明显,对流活动区域向北界扩展至我国华南地区,对流活动南界扩展至澳大利亚北部地区,而赤道印度洋地区的对流活动重新开始活跃,但其活动范围较前期明显偏南。Walker 环流显示出在赤道西太平洋的上升运动基本与 10 月一致,而赤道印度洋东部地区为较强的上升运动(图 13c),大气对 La Niña 状态的响应。此时印度洋东部的弱的上升运动虽然仍可通过 Hadley 环流对副高造成影响(图 13f),但由其位置较前期偏东( $90^{\circ}\text{E}$  以东地区),其影响使得副高位置较前期易出现偏东的情况,同时,由于菲律宾附近地区的对流的明显加强和对流活动区域的明显向北扩张,致使对流层中低层菲律宾附近的气旋性环流异常加强,从而抑制了西太副高的发展加强和西伸,影响西太平洋向长江流域水汽的输送,加之中高纬度地区

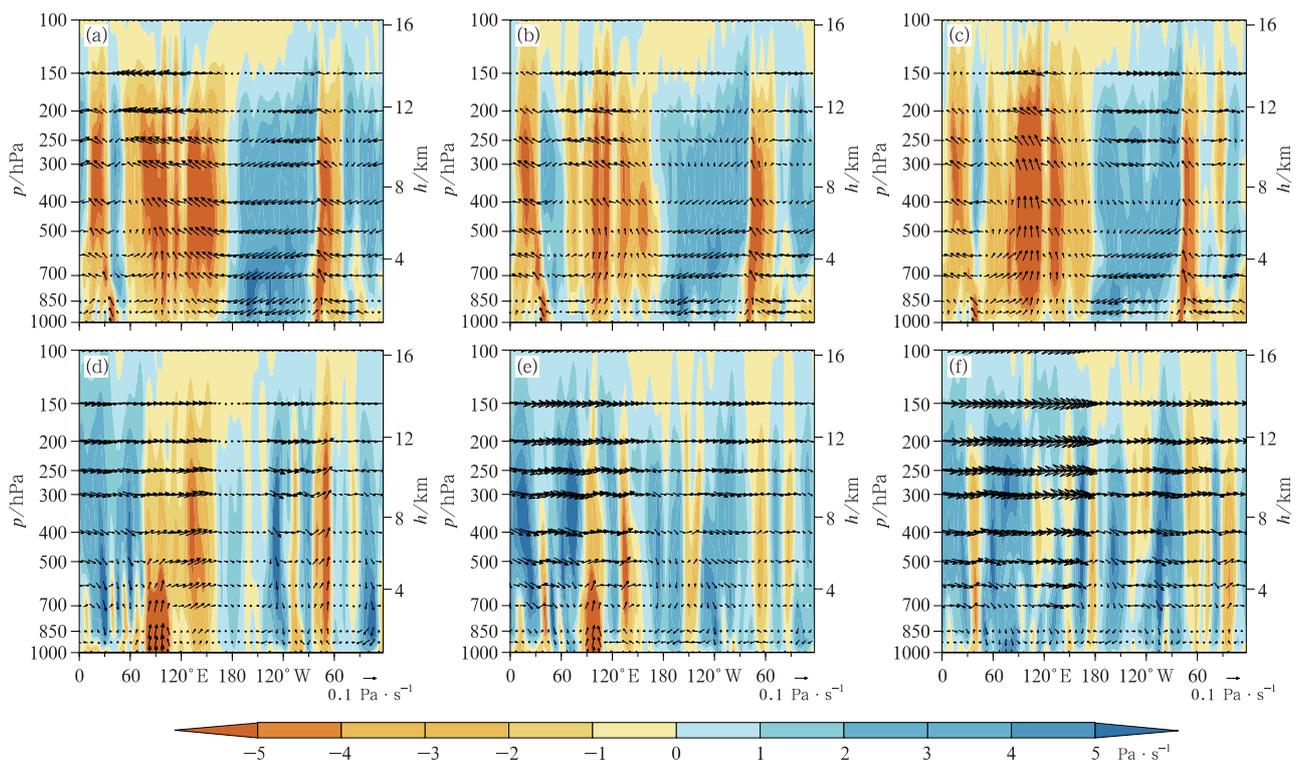


图 13 2017 年 9 月(a,d)、10 月(b,e)、11 月(c,f) Walker 环流(a,b,c)和中纬度  $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$  区域经向环流(d,e,f)剖面  
(矢量:  $-\omega$  与  $u$  风场合成距平, 阴影:  $\omega$  距平)

Fig. 13 Walker circulation (a, b, c) and mid-latitude meridional circulation (d, e, f) over  $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$  in September (a, d), October (b, e) and November (c, f) 2017  
(vector: anomaly of  $-\omega$  and  $u$  winds, shaded: anomaly of  $\omega$ )

冷空气偏东偏北,两者均不利造成11月长江流域降水偏多。

## 5 结论与讨论

(1) 重庆2017年秋季全市平均降水量为416.8 mm,为1961年以来历史最多。但季内降水时空分布异常不均匀,降水偏多时段主要集中在9月上旬至10月中旬,从10月下旬开始,重庆地区降水出现了从异常多到异常少的明显转折,时间分布异常不均。

(2) 在500 hPa环流形势场上,乌拉尔山阻高的发展、贝加尔湖低槽南压和西太副高的偏西偏强、加之鄂霍次克海阻高的发展和维持,最终在高、中、低纬度环流形势有力配合下,综合影响程度达到历史最强,造成了2017年重庆秋季降水历史最多的极端异常。

(3) 中高纬度大气环流的异常和西太副高特征的明显变化是导致重庆2017年秋季降水前多后少的主要原因。2017年9月中高纬度出现的双阻型环流异常可能与前期和同期西北太平洋海温的偏暖有关;而前期热带印度洋海温的全区一致增暖模态和后期赤道东太平洋海温的异常可能是导致副热带地区大气环流(西太副高)异常的最主要原因和外强迫因子。

(4) 天气尺度环流造成的极端强降水对短期气候可预测性的影响是极为复杂的问题,究竟从月预测或季预测角度如何考虑,还需要做更多深入的工作。虽然本文分析了前期和同期西北太平洋和印度洋海温异常对中高纬环流和副热带环流系统异常的可能的影响,但对于可能影响的机理和环流异常的其他外强迫因子等方面的问题,还需在今后的工作做更多细致的研究分析,作者将在今后的工作中继续进行分析和探讨。

## 参考文献

蔡榕硕,谭红建,黄荣辉,2012. 中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的关系[J]. 大气科学,36(1):35-46. Cai R S, Tan H J, Huang R H, 2012. The relationship between interannual variations of summer precipitation in Eastern China and the SST anomalies in the East China Sea and its adjacent seas[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1):35-46(in Chinese).

陈姣,张耀存,2016. 气候变化背景下陆地极端降水和温度变化区域差异[J]. 高原气象,35(4):955-968. Chen J, Zhang Y C, 2016.

Regional differences of land extreme precipitation and temperature changes under climate change condition[J]. Plateau Meteor, 35(4):955-968(in Chinese).

丁一汇,任国玉,石广玉,等,2007. 气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2(1):1-5. Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al, 2007. China's national assessment report on climate change (I): climate change in China and the future trend[J]. Adv Climate Change Res, 2(1):1-5(in Chinese).

封国林,杨涵清,张世轩,等,2012. 2011年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探[J]. 大气科学,36(5):1009-1026. Feng G L, Yang H W, Zhang S X, et al, 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011[J]. Chin J Atmos Sci, 36(5):1009-1026(in Chinese).

高荣,宋连春,钟海玲,2018. 2016年汛期中国降水极端特征及与1998年对比[J]. 气象,44(5):699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in china during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5):699-703(in Chinese).

胡泊,申红燕,王晓娟,等,2018. 东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水特征及环流型的异同性研究[J]. 大气科学,42(1):109-123. Hu P, Shen H Y, Wang X J, et al, 2018. A study on characteristics of precipitation and circulation pattern in early summer, midsummer and conventional summer in Northeast Asia[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1):109-123(in Chinese).

黄荣辉,皇甫静亮,刘永,等,2016. 西太平洋暖池对西北太平洋季风槽和台风活动影响过程及其机理的最近研究进展[J]. 大气科学,2016,40(5):877-896. Huang R H, Huangfu J L, Liu Y, et al, 2016. Progress in recent research on the processes and physical mechanisms involved in the influence of the Western Pacific warm pool on the monsoon trough and tropical cyclone activity over the Western North Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 40(5):877-896(in Chinese).

李春晖,潘蔚娟,李霞,等,2017. 华南春季降水及其季节内振荡强度的年代际变化特征[J]. 高原气象,36(2):491-500. Li C H, Pan W J, Li X, et al, 2017. Interdecadal variation characteristics of spring rainfall and its intraseasonal oscillation intensity in South China[J]. Plateau Meteor, 36(2):491-500(in Chinese).

刘丽,曹杰,何大明,等,2011. 中国低纬高原汛期强降水事件的年代际变化及其成因研究[J]. 大气科学,35(3):435-443. Liu L, Cao J, He D M, et al, 2011. The interdecadal variability of heavy rainfall events in flood season over low-latitude highlands of China and associated causes[J]. Chin J Atmos Sci, 35(3):435-443(in Chinese).

刘扬,刘屹岷,2016. 我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因[J]. 大气科学,40(6):1215-1226. Liu Y, Liu Y M, 2016. Spatial pattern and causes of interannual variability of autumn rainfall in Southwest China[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6):1215-1226(in Chinese).

- 刘芸芸,李维京,艾婉秀,等,2012.月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J].应用气象学报,23(4):414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly Western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 414-423(in Chinese).
- 陆日宇,黄荣辉,1998.东亚—太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响[J].大气科学,22(5):727-734. Lu R Y, Huang R H, 1998. Influence of East Asia/Pacific Teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the northeastern Asia in summer[J]. Sci Atmos Sin, 22(5): 727-734(in Chinese).
- 聂羽,孙冷,李清泉,等,2016.2015年秋季我国气候异常及暖湿成因分析[J].气象,42(4):507-513. Nie Y, Sun L, Li Q Q, et al, 2016. Possible causes for the warmer and wetter autumn in 2015 in China[J]. Meteor Mon, 42(4): 507-513(in Chinese).
- 任国玉,封国林,严中伟,2010.中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J].气候与环境研究,15(4):337-353. Ren G Y, Feng G L, Yan Z W, 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. Clim Environ Res, 15(4): 337-353(in Chinese).
- 孙小婷,李清泉,王黎娟,2017.我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常[J].大气科学,41(6):1332-1342. Sun X T, Li Q Q, Wang L J, 2017. Characteristics of long-cycle abrupt drought-flood alternations in Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1332-1342(in Chinese).
- 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 B Y, Zhang R H, 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 Sin, 69(2): 219-233(in Chinese).
- 吴国雄,刘屹岷,宇婧婧,等,2008.海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成[J].大气科学,32(4):720-740. Wu G X, Liu Y M, Yu J J, et al, 2008. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 720-740(in Chinese).
- 杨玮,徐敏,周顺武,等,2017.江淮流域6—7月极端强降水事件时空变化及环流异常[J].高原气象,36(3):718-735. Yang W, Xu M, Zhou S W, et al, 2017. Spatial-temporal variation of extreme precipitation events from June to July over Yangtze-Huaihe River Basin and the circulation anomalies[J]. Plateau Meteor, 36(3): 718-735(in Chinese).
- 姚世博,姜大膀,范广洲,2017.中国降水的季节性[J].大气科学,41(6):1191-1203. Yao S B, Jiang D B, Fan G Z, 2017. Seasonality of precipitation over China[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1191-1203(in Chinese).
- 袁媛,高辉,柳艳菊,2017.2016年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J].气象,43(1):115-121. Yuan Y, Gao H, Liu Y J, 2017. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016[J]. Meteor Mon, 43(1): 115-121(in Chinese).
- 张夏琨,牛若芸,卢晶,2017.2016年10月大气环流和天气分析[J].气象,43(1):122-128. Zhang X K, Niu R Y, Lu J, 2017. Analysis of the October 2016 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 43(1): 122-128(in Chinese).
- 支蓉,陈丽娟,竺夏英,2018.2017年秋季我国北方地区降水异常偏多成因分析[J].气象,44(4):572-581. Zhi R, Chen L J, Zhu X Y, 2018. Analysis of characteristics and causes of precipitation anomalies over northern China in autumn 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 572-581(in Chinese).
- 竺夏英,宋文玲,2017.2016年秋季中国气候特征及其可能成因[J].气象,43(4):495-500. Zhu X Y, Song W L, 2017. Features of climatic anomalies in China during the fall of 2016 and the possible causes[J]. Meteor Mon, 43(4): 495-500(in Chinese).
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al, 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J Geophys Res, 111: D05109. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Choi G, Collins D, Ren G Y, et al, 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955—2007[J]. Int J Climatol, 29(13): 1906-1925.
- IPCC, 2007. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK, New York, USA; Cambridge University Press.
- Yuan Y, Li C Y, Yang S, 2014. Characteristics of winter precipitation over southern China and East Asian winter monsoon associated with EL Niño and La Niña[J]. J Meteor Res, 28(1): 91-110.
- Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al, 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 448(7152): 461-465.
- Zhou L T, 2011. Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process[J]. Int J Climatol, 31(5): 677-686.
- Zhou L T, Tam C Y, Zhou W, et al, 2010. Influence of South China Sea SST and the ENSO on winter rainfall over South China[J]. Adv Atmos Sci, 27(4): 832-844.
- Zhou L T, Wu R G, 2010. Respective impacts of the East Asian winter monsoon and ENSO on winter rainfall in China[J]. J Geophys Res, 115(D2): D02107. DOI: 10.1029/2009JD012502.