四川盆地夏季降水年际变化的主模态分析*

郑然1陈丽娟^{2,3*}李维京^{2,3}王顺久1马振峰1梁宁⁴刘嘉慧敏⁵

1 四川省气候中心, 成都 610072

2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

3国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京100081

4青海省海南藏族自治州气象局,共和,813099

5 陕西省气象台, 西安 721001

摘要 利用 1979-2018 年四川盆地 134 站夏季降水观测资料、ERA-Interim 再分析 资料以及英国气象局哈德莱中心的海表温度及海冰资料,对比分析了四川盆地夏季降水异常 主模态及其同期大气环流和前期海温海冰演变特征的差异,以探讨其形成机制及前期预测信 号。结果表明:四川盆地夏季降水存在两类优势空间模态:全区一致型和东西反相型,在 20 世纪 80 年代多出现东西反相型,90 年代到 21 世纪初以一致型为主,进入 21 世纪 10 年代 后又多表现为东西反相型。不同模态所对应的大气环流和海温海冰的演变具有明显差异,全 区一致型降水分布受低纬系统影响显著,在 500hPa 高度场上主要表现为西太平洋副热带高 压的位置及强度异常;850hPa 风场为辐合或辐散特征,受到来自孟加拉湾、南海、西太平洋 三条水汽通道的共同影响,其中与南海水汽通道的相关性最高,一致型降水多/少年水汽在 盆地区域南北边界为同收/同支;环流可能受到前期 ENSO 事件衰减的显著影响。东西反相型 降水分布受中高纬环流的影响较大,在 500hPa 高度场上的特征类似于极地欧亚型 (POL)遥 相关;水汽在区域南北边界为一收一支,西多东少型为南收北支,而西少东多型为北收南支, 与西太平洋水汽通道关系显著;环流可能受到前期北极海冰异常的影响。

Funded by National Key Research and Development Program of China(Grant 2018YFC1506006), Special Project for Forecasters of China Meteorological Administration(Grant CMAYBY2019-101), Sichuan Provincial Key Laboratory Science and Technology Development Fund Project(Grant SCQXKJQN202110), Innovation and Development project of China Meteorological Administration(Grant CXFZ2021J018), China Meteorological Administration Southwest Region Business Capability Improvement Team

收稿日期 2021-09-02; 网络预出版日期

作者简介 郑然,女,1990年出生,硕士,工程师,主要从事短期气候预测研究, E-mail: zhengran0512@163.com

^{*}通讯作者 陈丽娟, E-mail: <u>chenlj@cma.gov.cn</u>

^{*}资助项目 国家重点研发计划重点专项 2018YFC1506006,中国气象局预报员专项 CMAYBY2019-101,高原 与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金项目 SCQXKJQN202110,中国气象局创新 发展专项 CXFZ2021J018,中国气象局西南地区业务能力提升攻关团队

关键词: 夏季降水主模态; 环流特征; 水汽输送; 海温; 海冰

文章编号 中图分类号 P46 文献标识码 A

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21167

The interannual variation of the leading modes of

summertime precipitation in Sichuan Basin

ZHENG Ran¹ CHEN Lijuan^{2,3*} LI Weijing^{2,3} Wang Shunjiu¹ MA Zhenfeng¹ LIANG

Ning⁴ LIU Jiahuimin⁴

1 Sichuan Climate Center, Chengdu 610072, China

- 2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
- ³ Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
- 4 Hainan Prefecture in Qinghai Province Meteorological Bureau, Gonghe 813099, China
- 5 Meteorological observatory in Shaanxi province, Xian 721001, China

Abstract Based on the precipitation observation data of 134 stations in Sichuan Basin, the ERA-Interim reanalysis datasets, sea surface temperature (SST) and sea ice datasets from the Met Office Hadley Centre, this study investigates two major modes of summer precipitation over Sichuan Basin through empirical orthogonal function (EOF) method and linear regression technique. It is found that EOF1 shows the consistent pattern in whole region, and EOF2 reflects an inverse pattern between the east and west of Sichuan Basin. The dominant mode is the east-west reversed pattern in the 1980s and the consistent pattern from the 1990s to the beginning of the 21st century. In recent years, the inverse pattern restore to the dominant position. Further research shows that the EOF1 of precipitation is significantly affected by the lowlatitude circulation in 500hPa geo-potential height, especially by the western Pacific subtropical high (WPSH). The 850hPa wind over the basin is controlled by convergent or divergent fields. It is jointly affected by the Bay of Bengal, South China Sea, and Western Pacific water vapor channels. The South China Sea vapor channel may play the key role. The more or less precipitation of EOF1 is corresponding with the consistent input or output of water vapor at the North-South boundary of the basin. The pre-signal for most cases in EOF1 may come from the decaying phase of the El Nino-Southern Oscillation (ENSO). However, the EOF2 is greatly related to the mid and high latitude circulation in 500hPa, which similar to the Polar/Eurasia (POL) pattern. The EOF2 mode with more in the west and less in the east of Basin is connected with the input of the south border and the output of the north border, and vice versa. The EOF2 pattern has a significant relationship with the water vapor channel in the western Pacific. The pre-signal for most cases in EOF2 may originate from the variability of Arctic sea ice.

Keywords: Dominant modes; Circulation characteristic; Water vapor transportation; Sea surface temperature anomaly; Sea ice

引言

四川盆地位于中国腹心地带,主要包括四川省中东部和重庆市,也称川渝盆 地,是高原大地形与我国中东部平原的过渡区。特殊的地理位置使其同时受热带 季风和副热带季风的影响,降水的年际变率较大,在全球气候变暖背景下,该区 域夏季旱涝灾害发生的频率趋于增加。四川盆地人口众多,农业较为发达,且地 处长江上游地区,其旱涝异常不仅影响盆地区域,所形成的径流多寡对长江中下 游地区也有显著影响。因此,深入认识盆地夏季旱涝异常特征、成因及预测信号 对提高预测水平、为防灾减灾提供科学决策依据具有重要意义。

季节尺度降水预测的重点在于旱涝的空间分布,因此降水主模态的分析是降水异常研究的基础及关键环节。针对夏季降水异常空间分布,自 20 世纪 70 年代以来,大量研究工作将我国东部夏季降水雨带从南至北划分为三类或四类(廖荃 荪等,1981;孙林海等,2005),并探讨了不同雨带的形成机制及预测信号(黄 荣辉等,2011;赵俊虎和封国林,2015;赵俊虎等,2016;杨柳等,2018,2021; 王欢和李栋梁,2020)。然而更多的研究主要关注我国东部地区,针对西部地区 降水异常型的研究相对较少。四川盆地由于地形特殊,造成降水成因较为复杂, 且由降水异常引起的次生灾害影响大,因此有必要开展深入的研究。四川盆地夏 季降水主要存在"东西振荡","一致分布"和"南北振荡"三种分布型,其中 前两个模态的方差贡献较大(马振峰和谭友邦,2004),盆地西部和盆地东部夏 季降水序列分别与我国夏季降水第1类雨型(即多雨带位于我国北方)和第2类

上世纪后半期,川渝盆地降水和水资源量总体减少,东、西部降水变化呈相 反趋势(周长艳等,2006;Lu and Ye,2011)。北半球中高纬乌拉尔山为高压脊、 巴尔喀什湖至贝加尔湖之间为低压槽以及亚洲东部为高压脊的"两脊一槽"型, 西太平洋副热带高压偏北、南亚高压西部增强、西风急流轴线偏北是造成盆地西 部降水偏多的主要环流形势。而东亚中高纬地区为经向型环流,西太副高偏南、 西风急流轴线偏南则有利于盆地东部降水偏多(蒋兴文等,2007;周长艳等,2008; 陈权亮等,2010;杨小波等,2014)。季风对盆地降水的影响在东西部也存在差 异性,盆西降水异常与高原夏季风有关,盆东降水异常与东亚夏季风和高原夏季 风都有关,可能以东亚夏季风为主(白莹莹等,2011,2014)。此外,高原及其 周边热力作用、大气季节内振荡等均可对盆地降水东西反相模态产生影响(陈忠 明等,2003;岑思弦等,2014;蒋文杰等,2015)。

针对全区一致型降水,学者多通过旱涝等级指数、区域降水指数或站点降水 区域平均等方法(鲍媛媛等,2007;李永华等,2011),将四川盆地降水作为整 体进行研究,这可能对典型降水空间型对应的环流背景分析造成一定认识偏差。 还有研究表明,四川盆地夏季旱涝与夏季西太平洋副高和南亚高压的南北位置的 变化关系密切。二者偏北时,易出现干旱;反之,出现洪涝的可能性较大(李永 华,2010)。此外,青藏高原的热力作用也可通过影响高原上空高度场,导致四 川盆地夏季降水的旱涝异常(李跃清,2003;李永华等,2011)。

上述有关四川盆地夏季降水的变化及成因的研究多针对某一个降水模态,缺 乏不同降水模态之间的差异对比分析和影响机理研究。在每年的汛期预测业务中, 主要多雨带的确定仍存在一定难度,而不同降水异常型的影响系统也可能存在较 大差异,厘清这种差异及成因有助于更好地理解降水异常型的可预报性来源和预 测信号的传递机制,为进一步提高预测能力做好铺垫。

基于此,本文对四川盆地近 40 年夏季降水场进行 EOF 分解,分析主要降水 空间型的演变及其对应的环流特征,并分析降水不同空间型的水汽输送状况及外 强迫信号源,从而为提高四川盆地夏季降水的精细化预测提供基础。

1 资料与方法



1.1 资料选取

文中所用数据包括: (1)全国气象台站逐月降水资料,通过质量控制,选

取四川盆地 134 个站点,如图 1 所示,研究时段为 1979 年到 2018 年; (2) 欧 洲中期天气预报中心(ECMWF)的逐月位势高度场、风场等再分析数据(ERA-Interim) (<u>https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-</u> <u>moda/levtype=sfc</u>

/[2021-05-01]),水平分辨率为0.75°×0.75°;(4)英国哈德来(Hadley) 中心的逐月海表温度(SST)数据及逐月平均海冰密集度资料(Rayner et al.,2003),水平分辨率为1°×1°。如无特殊说明,气候值均采用1981-2010 年的30年平均。

1.2 方法介绍

(1)水汽输送通量:本文通过计算水汽通量来表征水汽输送特征。其中水汽通量 方法参考杨柳等(2018),具体如下:

对于单位面积空气柱,总的大气水汽输送通量矢量Q计算公式为:

$$Q = 1/g \int_{300}^{p_s} V \cdot q dp , \qquad (1)$$

纬向和经向水汽输送通量分别为:

$$Q_{\lambda} = 1/g \int_{300}^{P_{s}} \mathbf{u} \cdot q dp , \qquad (2)$$

$$Q_{\varphi} = 1/g \int_{300}^{p_s} v \cdot q dp ,$$

边界积分的水汽输送表示为:

$$F_{\lambda} = \int_{y_1}^{y_2} Q_{\lambda} \, dy, \qquad (4)$$

$$F_{\varphi} = \int_{x_1}^{x_2} Q_{\varphi} \, dx, \qquad (5)$$

式中: q为比湿, g为重力加速度, P_s 为地面气压, x_1 , x_2 和 y_1 , y_2 为边界的起

始、终止经度和纬度。在计算整层水汽输送时,为消除地形对整层水汽输送的 影响,垂直积分从地表开始,由于大气中的水汽主要集中于低层,整层水汽输 送积分到 300hPa。

(2)文中使用了经验正交函数分解(EOF)、合成、回归及 student T 检验方法。



2 四川盆地夏季降水主模态的时空分布特征及环流型

对盆地 1979-2018 年夏季(6-8 月,以下同)降水进行 EOF 展开。结果显示 EOF1 为全区一致型(图 2a),方差贡献率为 23.91%,结合其标准化后的时间 系数 PC1(图 2c)可以看到,20世纪 80年代到 90年代,盆地降水经历了一致 减少-增多趋势变化,进入 21世纪后趋势不明显,但一致偏少出现的概率较 大,同时个别年份降水异常的振幅较大,如 1998 夏季异常偏多和 2006 年夏季 异常偏少。EOF2 为降水东西反相型(图 2b),方差贡献率为 21.29%,接近于 EOF1 的方差贡献,说明近 40年来 EOF2 的出现频率也是相对较高的。从其标准 化后的时间系数 PC2(图 2d)可以看到,在 20世纪 80年代有上升趋势,80年 代末到 21世纪初期,PC2存在明显下降特征,结合降水模态,显示在这段时期 内四川盆地西部降水有减少趋势,而东部降水有增多趋势,与周长艳等 (2006)的研究结果一致。但是近十几年来,PC2 又表现为显著上升特征,即

盆地夏季降水西多东少分布的态势又有所加强。结合 PC1 和 PC2 的变化特征可 知,川渝盆地夏季降水在 20 世纪 80 年代多出现东西反相型,在 90 年代到 21 世纪初以一致型为主,进入 21 世纪 10 年代后又多为东西反相型。前两个模态 累计方差为 45.2%,远高于其他模态(第三模态开始方差贡献未超过 10%),因 此选取前两个模态作为四川盆地夏季降水主模态进行分析。分别选取第一、二 模态标准化时间系数大于 0.8 个标准差的年份作为降水主模态异常年份,对于 其中重复的年份根据标准化指数的绝对值大小进行划分。从而得到 PC1 正异常 年份有: 1980、1983、1984、1987、1998、2007年共6年; PC1负异常年份 有: 1992、1994、1997、2001、2004、2006、2011年共7年。PC2正异常年份 有: 1981、1988、1990、2010、2013、2018年共6年; PC2负异常年份有: 1982、1986、2002、2008、2015、2016年共6年,用于后文分析。



Fig 1 The EOF1 (a) and EOF2 (b) mode of the summer rainfall for 1979–2018 in Sichuan Basin and their associated time series PC1 (c) and PC2 (d) (the bars in c and d are the PC1 and PC2, and the solid line is five-year moving average of PC)

进一步分析四川盆地降水主模态的大尺度环流特征。为突出环流的年际变 化,本文将 PC 减去其一元线性回归值,利用去趋势后的 PC1、PC2 分别回归同 期夏季 500hPa 高度场、850hPa 风场及 200hPa 纬向风场异常。盆地降水一致偏 多模态对应 500hPa 高度场的环流异常(图 3a)显示,欧亚中纬度地区西高东 低,东亚地区从热带至中高纬地区为南高北低型分布。即乌拉尔地区高度场为 正距平,蒙古、我国东北到日本一带高度场为负距平,而我国南方到西太平洋 上空为显著正距平,此种环流型有利于夏季西太平洋副热带高压(下文简称西 太副高)偏强偏西偏南,该特征在PC1正负异常年的588线合成图(图3d)上 也可以得到验证。回归的850hPa风场异常(图3b)与500hPa高度场一致,高 低空为明显的相当正压结构,南海到菲律宾以东为强大的反气旋性环流,我国 东北、日本一带为气旋性环流,二者共同作用引导热带西太平洋、南海水汽向 四川盆地输送,巴尔喀什湖上空至乌拉尔山地区存在较强的反气旋环流异常, 其东侧的偏北风引导北方冷空气沿高原东侧南下,与暖湿气流在四川盆地交 汇,造成盆地夏季降水一致偏多。从回归的200hPa纬向风场异常(图3c)可 以看到,夏季东亚副热带西风急流主要位于40°N附近,西风急流轴北侧为东 风负异常,南侧为西风异常,对应东亚急流在我国上空位置偏南,有利于四川 盆地上空为显著的辐散异常。此外有研究指出,当东亚副热带西风急流异常偏 南时,南亚高压偏强,位置偏南偏东,500hPa等高线经向度加大,冷空气易南 下,同时副高偏西偏南(沉雪源和张耀存,2006;杨小波等,2014),副高外 围水汽由南海向盆地输送,这与500hPa高度场及850hPa风场的配置一致。降 水一致偏少年,环流场异常特征与上述分析完全相反。



图 3 PC1 回归 500hPa 高度场异常(a,单位:gpm)、850hPa 风场异常(b,单位:m/s)、200hPa 纬向

风场异常(c,单位:m/s)及PC1正(红色)、负(蓝色)异常年5880gpm线合成(d)(黑色方框为四 川盆地所在位置;abc中填色为回归场通过显著性检验的区域,绝对值大于0.304、0.393分别表示置信水 平达到95%和99%,冷、暖色分别表示负、正异常区;图c中的虚线为纬向风速大于25m/s和30m/s的气

候平均态,图d中黑色实线为气候平均态)

Fig.3 500 hPa geopotential height anomaly (a, unit: gpm)、 850 hPa wind anomaly (b, unit: m/s)、 200 hPa zonal wind anomaly (c, unit: m/s) regressed upon PC1 and synthesized 5880 gpm (d) based on PC1 positive phase (red line) and negative phase (blue line) (black box is the position of Sichuan Basin; Filled areas with absolute values greater than 0.304 and 0.393 represent the 95% and 99% confidence levels, Cold and warm colors indicate negative and positive anomaly areas respectively; the line in (c) is climate mean of the horizontal wind speeds greater than 25m/s and 30m/s respectively; the black line in (d) is climate mean of 5880 gpm)

利用去趋势的 PC2 序列回归环流场,当降水为西多东少时,500hPa 高度场 上(图 4a)欧亚中高纬存在一条西北-东南走向的"+-+" 波列,即欧亚大 陆次极区高度场为正异常、巴尔喀什湖到贝加尔湖一带高度场为负异常、正负 异常中心分别位于巴伦支海和贝加尔湖附近,这种环流形式类似于极地-欧亚遥 相关型(POL型)负位相,这与大型斜槽斜脊的环流特征相似(Bueh et al. 2011; He and Black, 2016)。极地遥相关负位相使得整个中纬度欧亚大陆 范围内的阻塞高压活动加强,冷空气大范围堆积在斜槽区(高妮,2019)。阻 塞形势是北半球中高纬常见的异常环流型(张庆云和陶诗言,1998),鄂霍次 克海、贝加尔湖、乌拉尔山是阻塞高压发生频次较高的地区。从回归的 500hPa 高度场异常可以看到,贝加尔湖附近为显著的负异常区,选取 50°-60°N, 80°-110°E代表贝加尔湖(贝湖)区(龚振淞等, 2004),根据 PC2 正负异 常年对相应的 500hPa 高度场进行合成(图 4d),在 PC2 正值年,贝湖区高度场 为负异常,是槽区;而 PC2 负值年,贝湖区高度场为正异常,是脊区。PC2 与 贝湖区高度场指数的相关系数为-0.26,置信水平通过90%。此外,我国东北部 到日本一带存在显著正异常中心。回归的 850hPa 风场异常(图 4b)显示,欧 亚中高纬环流异常显著,贝加尔湖到我国北部一带存在强大的气旋性环流异 常,加强了日本到我国东北一带的反气旋性环流,该反气旋与南海气旋共同作 用,使得较强的偏东及偏东北气流携带西太平洋水汽进入内陆,受云贵高原阻 挡作用在高原东侧分为南北两支,四川盆地主要受偏南分支气流的影响,同时

青藏高原阻挡作用使得水汽在盆地西部堆积抬升,与贝加尔湖异常气旋性环流 引导的沿高原东侧南下的冷空气相结合,产生有效降水。从 PC2 回归的 200hPa 纬向风场上可以看到(图 4c),40°-50°N的平均西风为正异常,40°N以南 和 60°N以北为东风异常,与贝加尔湖区高度场偏低有较好的对应。以上分析 显示该降水模态受低纬系统影响较小,而中高纬环流系统的影响占据主导地 位。



图 4 a、b、c 同图 3, 但为 PC2 回归结果; 图 d 为 PC2 高低值年贝湖区 500hPa 高度场平均的异常合成值 (单位: gpm)

Fig.4 a, b, c are the same as in Fig.3 but for regressed on PC2; d is synthesized 500hPa geopotential height (unit:gpm) anomaly averaged over Baikal area based on PC2 value.

3 四川盆地夏季降水主模态的水汽输送差异

以上分析看出,四川盆地夏季降水第一、二模态的环流背景存在显著的差异性。对应降水一致偏多模态,来自低纬的水汽影响较大,其上空对流层低层为南 北风切变区,易形成辐合或辐散。而对应东西反相型降水模态,来自低纬的水汽 输送减弱,受中高纬环流的影响较大,对流层低层为一致偏南风或偏北风。为更 加细致的对比两种主模态的水汽条件,计算了四川盆地 1979 年至 2018 年夏季平 均的整层水汽通量输送矢量(图5),可见夏季进入四川盆地的水汽主要有三支: 第一支是印度西南季风气流经孟加拉湾和中印半岛北上的水汽;第二支是越赤道 气流与南亚季风在南海汇合北上进入川渝;第三支是西太平洋水汽沿西太副高外 围西南侧的东南季风进入我国陆地,并与南海北上的水汽汇合,从川渝地区东侧 边界进入。根据平均水汽输送特征,参照周晓霞等(2008)、李永华(2010)定 义水汽通道的方法,有3条影响四川盆地的主要水汽通道:(1)孟加拉湾通道 (20°N, 85°-100°E),表征来自孟加拉湾向北的水汽输送; (2)南海通道 (22.5°N, 100°-110°E),表征来自印度洋、中南半岛转向及来自南海的水 汽输送; (3) 西太平洋通道(25°-35°N, 120°E), 表征来自南海转向及西 太平洋的水汽输送。表1给出了1979-2018年夏季各水汽通道与四川盆地夏季降 水 PC1 和 PC2 序列的相关系数。三条水汽通道均与第一模态时间系数呈显著正相 关,其中南海水汽通道的相关性最高,显著性水平达到 99%,表明全区一致降水 模态受经向水汽输送的影响更为显著。第二模态时间系数仅与太平洋水汽通道的 相关性通过显著性检验,表明东西反相降水模态主要受西太平洋纬向水汽输送的 影响。



图 5 1979-2018 年夏季平均水汽输送特征(单位: kgm⁻¹s⁻¹,黑色方框为四川盆地所在位置) Fig. 5 The average water vapor transportation features in summer from 1979 to 2018 (unit: kgm⁻¹s⁻¹, black box is the position of Sichuan Basin)

表1 3条水汽通道与四川盆地夏季降水 PC1/PC2 的相关系数

Table 1 The correlation coefficient of water vapor transportation channels and PC1/PC2 of

	孟加拉湾通道	南海通道	太平洋通道
PC1	0.27*	0.66**	0.45**
PC2	-0.12	-0.20	-0.26*

summer rainfall over Sichuan Basin

注: *、**分别表示置信水平达到 90%、99%

进一步分析不同模态的水汽收支差异,对四川盆地夏季降水第一、二模态正 负异常年各边界水汽异常进行合成。 西边界和南边界的水汽通量为正、 东边界和 北边界的水汽通量为负时,代表水汽通过边界向区域内输送,反之则表示由区域 内向外输出。从不同模态的边界水汽收支(图6)可以看到,在一致型模态下,正 异常年水汽总体收支为正,负异常年总体收支为负,与降水分布有较好的对应。 二者的差异主要在南北边界和东边界,在降水一致偏多年,南北边界都表现为水 汽收入, 而降水一致偏少年南北边界则均为水汽支出。同时, 东边界在正负异常 年表现为相反的特征,在降水一致偏多年为支出,偏少年为收入。PC1 正位相对 应水汽净收入远高于负位相对应的净支出,即降水偏多的异常特征更显著。东西 反相模态的边界在正负异常年的合成中表现为完全相反的特征。 经向上, 与第一 模态南北边界同收同支不同, 西多东少年经向上均为南风输送, 而西少东多年均 为北风输送,这与 850hPa 风场异常的回归是一致的。在纬向上,西多东少年的 东西边界均表现为输出特征,而东多西少年东西边界则均为输入。从水汽量级来 看,无论第一模态还是第二模态,盆地降水形成均以经向水汽来源占主导地位, 其差异在于全区一致降水偏多/少型为盆地的南北两边界表现同收/同支;而东西 反相降水型则表现为一收一支,其中西多东少型为南收北支,而西少东多型为北 收南支。







Fig.6 The water vapor budget (unit:kg/s) of positive (a,c) and negative (b,d) phase of PC1 (a,b) and PC2 (c,d) of summer rainfall pattern over Sichuan Basin (red arrow represent output and blue arrow means input)

4 四川盆地夏季降水主模态的前期外强迫信号

季节尺度大气环流的异常往往受到海温、海冰等外强迫因子变化的影响,因此为进一步认识影响四川盆地降水变化的大气环流异常形成的原因,探讨了外强 迫信号的可能作用。首先利用 PC1 和 PC2 分别回归前期 1 到 8 月的海温距平场。 可以看到,全区一致降水偏多模态对应的海温场(图 7)在前期冬季赤道东太平 洋存在较大范围的显著暖水区,至初春逐渐减弱消失,这与 ENS0 事件衰减年的 海温分布演变一致。即 ENS0 事件在当年春夏季为发展阶段,秋冬季节达到成熟 阶段,到次年春夏季为衰减阶段(Wang, 1995)。根据美国气候预测中心(CPC) 对 ENS0 历史事件的统计,对夏季降水主模态典型异常年份对应的 1-8 月海温演 变进行分析,如表 2 所示,在降水一致偏多典型异常的 6 年中,有 5 年是厄尔尼 诺衰减年,占 83%,1 年为厄尔尼诺持续年。在一致偏少的典型异常 7 年中,有 3 年为拉尼娜衰减年,占43%,其余为3年中性年、1年厄尔尼诺发展年。说明 降水一致型的海温背景具有非对称性,降水一致偏多年的海温演变特征较为一致, 多出现在 ENSO 事件衰减年或中性年。进一步计算 NINO3.4 指数与 PC1 的超前滞 后相关(图 8),当 NINO3.4 指数超前 10 个月的时候,二者相关系数的显著性 水平已达到 95%,并可维持到超前4个月。在厄尔尼诺衰减年夏季,贝加尔湖附 近为反气旋性环流异常,东亚东北部为气旋性环流异常,二者共同作用可引导北 方冷空气南下;而菲律宾以东洋面至中南半岛为强大反气旋性环流异常,西太副 高偏强、偏南、西伸(孙旭光和杨修群,2005),引导水汽向盆地输送与冷空气 结合产生降水,造成盆地夏季降水偏多。以上结果表明,在年际变化尺度上,ENSO 的演变趋势与四川盆地夏季降水一致模态关系密切。

此外,作为亚洲夏季风各种能量及水汽输送重要源地之一的印度洋地区,从 前期冬季开始也存在显著相关区域,其显著相关可一直持续到初夏。印度洋热力 异常作为"第二推动力"的海陆热力差异,对印度洋-太平洋海温配置及大气环 流具有重要作用,热带印度洋海温异常模态和南印度洋偶极子模态对夏季风及东 亚降水有明显影响(陈丽娟等, 2013)。选取热带印度洋全区海温(IOBW)指数、 热带印度洋偶极子(TIOD)指数、副热带南印度洋偶极子(SIOD)指数分别与 PC1 进行超前滞后相关(图 8)。可以看到, TIOD 指数与 PC1 的相关在超前 10 个月 时置信水平达到 95%,此后相关系数随时间增长,到超前 7 个月达到最大,置信 水平达到 99%。唐红玉等(2020)研究指出当上一年 11 月 TIOD 正位相时,次年 夏季环流场上表现为乌山阻高明显、中纬度 30°-37°N 多低值系统,西太副高 偏强、偏南的特征,这与盆地降水一致偏多模态的环流特征一致。而当 ENSO 和 TIOD 同时发生,二者通过异常的赤道大气纬向垂直环流联系,使得两事件有显 著的相关并相互维持(Li and Mu, 2001), 当二者同为正位相时, 两大洋间的 连带关系使得太平洋暖池地区下沉运动加强,进一步对次年长江流域夏季降水产 生影响(李琰等,2007)。热带印度洋常随着厄尔尼诺事件逐渐变暖,并在滞后 于厄尔尼诺事件成熟一个季度达到峰值(袁媛, 2008)。IOBW 指数与 PC1 的相关 在超前7个月时置信水平达到95%,可一直维持到超前一个月,滞后于NINO3.4 指数。近年来的研究表明,印度洋海温在 ENSO 衰减年起重要的"充电器"作用, 海温一致增暖(变冷)可通过海气相互作用激发赤道印度洋到西太平洋的异常

Walker 环流圈,加强(减弱)西太副高的强度,延续 ENSO 对大气环流和气候异常的影响(Wu and Kirtman, 2004; Xie et al., 2009),从而进一步影响水汽向盆地的输送,造成降水一致偏多(偏少)。南印度洋偶极子与 PC1 的相关在超前3 到 5 个月时置信水平达到 95%。研究指出,SIOD 主要出现在冬春季,到夏季可通过影响海洋大陆上空 SST 异常影响对流活动,进一步影响副高强度,造成来自太平洋的赤道东风水汽输送和印度洋的赤道西风水汽在海洋大陆的辐合辐散,然后进入我国,进而影响夏季降水(杨明珠和丁一汇,2007)。以上分析表明,低纬海洋的海温异常对四川盆地夏季降水第一模态的年际变化具有一定的指示意



图 7 PC1 回归前期 1-8 月(a-h)海温(绝对值大于 0.304、0.393 的填色区域分别表示置信水平达到 95%和 99%)

Fig.7 SSTA (unit: °C) from January to August regressed upon PC1 (Filled areas with absolute values greater than 0.304 and 0.393 represent the 95% and 99% confidence levels respectively)





从 PC2 回归的海温距平场可以看到(图 9),在西多东少降水模态下,前期 1 到 4 月与海温相关不明显,仅在 5 月开始在赤道东太平洋地区出现显著负相 关,后期显著范围逐渐扩大、强度增强,表现为拉尼娜事件发展的特征。在典型 西多东少异常的 6 年里,有两年为厄尔尼诺衰减到拉尼娜发展特征,占 33%,两 年中性年,一年拉尼娜衰减年,一年厄尔尼诺衰减年。在东多西少异常的典型 6 年中,4 年为拉尼<u>娜</u>发展年,占 67%,其余两年分别为拉尼娜衰减和厄尔尼诺衰 减特征。说明东西反相降水模态多出现于 ENSO 事件发展年,与全区一致型类 似,海温异常影响的显著性同样具有不对称性,在东多西少年海温影响的一致性 较高。东西反相模态与 ENSO 事件发展时间接近,印度洋海温异常的相关也是同 样的特征,说明其受前期热带海洋的影响较小。有研究指出,四川盆地夏季降水 东西反相模态时间系数与前期 1 月黑潮区和加利福尼亚冷流区存在范围较大的 显著正相关(杨佑洪,1997)。由于研究资料的差异,本文在前期海温异常相关 场上未见较大范围的显著相关区域。

从上文第二主模态的环流分析可知,中高纬环流的影响更为显著。除海温外, 欧亚中高纬大气遥相关可能与北极海冰关系密切(张若楠和武炳义,2011;王素 艳等,2021),海冰异常可以通过影响下垫面热通量的异常分布进一步影响大气 环流。图 10 给出了 PC2 高低值年春季北极海冰的差值场分布,可以看出在芭芬 湾区域海冰明显偏少,选取(55°-58°W,51°-53°E)作为芭芬湾关键区,该 区春季海冰覆盖度面积指数与 PC2 相关性为-0.28,置信水平达到 90%。前期芭 芬湾海冰偏少有利于湍流热通量加强,可激发欧亚大陆准定常行星波(Wu et al.,2013),通过热力和动力作用进一步激发夏季欧亚遥相关波列(张若楠等, 2018)。以上分析表明,前期春季北极海冰异常对四川盆地夏季降水第二主模态 的年际变化具有一定指示意义。



图 10 PC2 高低值年合成的前期春季海冰密集度差值场(黑色点表示差值场的置信水平达到 90%) Fig.10 Composite differences of the Arctic sea ice concentration in preceding spring between high and low PC2 years (black dots represent the 90% confidence level)

表 2	四川盆地夏季降水主模态典型异常年的 ENSO 特征	
-----	---------------------------	--

 Table2 The sea surface temperature anomaly tendency of the main summer rainfall modes over Sichuan Basin

 全区一致
 ENSO 特征
 全区一致
 ENSO 特征
 西多东少
 ENSO 特征
 东多西少
 ENSO 特征

1981

中性年

1982

El nino

中性年

偏少

1990

偏多

1980

El nino

	衰减						发展
1983	El nino	1994	中性年	1988	El nino	1986	El nino
	衰减				衰减-La		发展
					nina 发展		
1984	La nina	1997	El nino	1992	El nino	2002	El nino
	衰减		发展		衰减		发展
1987	El nino	2001	La nina	2010	El nino	2008	La nina
	持续		衰减		衰减−La		衰减
					nina 发展		
1998	El nino	2004	中性-E1	2013	中性年	2015	El nino
	衰减		nino 发展				发展
2007	El nino	2006	La nina	2018	La nina	2016	El nino
	衰减- La		衰减	K	衰减		衰减
	nina 衰减						
		2011	La nina		•		
			衰减				

5 结论与讨论





本文采用 1979-2018 年四川盆地夏季逐月降水资料及经验正交分解的方法 得到了四川盆地夏季降水的主模态,并对不同模态的环流配置和海温海冰异常变 化趋势进行了分析,得到如下主要结论:

(1)1979-2018年,四川盆地夏季降水的主模态为一致型和东西反相型,两 个模态方差贡献相近,累计解释方差约为45%。盆地夏季降水在20世纪80年代 多出现东西反相型,在20世纪90年代到21世纪初以一致型为主,进入21世纪 10年代后又以东西反相型占优。

(2)降水一致型模态受低纬环流的影响较大,其上空对流层低层为南北风的辐合或辐散。盆地降水一致偏多模态年夏季,副热带急流轴位置偏南,南亚高压偏强,位置偏南偏东;西太副高偏强偏西偏南;盆地上空为南北风交汇区,巴尔喀什湖上空至乌拉尔山地区上空存在较强的反气旋环流异常,其东侧的偏北风引导北方冷空气沿高原东侧南下,与南海到菲律宾以东强大的反气旋性环流引导的暖湿气流交汇,造成四川盆地夏季降水一致偏多。降水一致偏少年,环流场异常特征与上述分析完全相反。

(3)降水东西反相型模态受中高纬度环流的影响较大,对流层低层为一致 偏南风或偏北风。盆地降水西多东少时,欧亚大陆次极区高度场为正异常,巴尔 喀什湖到贝加尔湖一带为负异常,类似于极地-欧亚遥相关型(POL型)负位相, 贝加尔湖阻塞形势显著;日本岛至我国东北一带的反气旋环流与南海气旋共同作 用,使得较强的偏东及偏东北气流携带西太平洋水汽进入内陆,受云贵高原阻挡 作用在高原东侧分为南北两支,四川盆地主要受南支气流的影响,同时青藏高原 的阻挡作用使得水汽在盆地西部堆积抬升,与贝加尔湖异常气旋性环流引导的沿 高原东侧南下的冷空气相结合,产生有效降水。盆地上空为一致偏南气流。盆地 降水东多西少时,环流形势相反。

(4)四川盆地主要有三条水汽通道,分别为孟加拉湾通道、南海通道和西太平洋通道。全区一致型降水与三个通道水汽相关均显著,其中南海水汽通道的相关性最高;东西反相型与西太平洋水汽通道关系密切。从盆地各边界水汽收支看,经向水汽量级较大,对降水异常产生重要影响。一致型降水偏多/少年,水汽在区域南北边界表现为同收/同支,而东西反相型降水水汽在南北边界为一收一支,其中西多东少型为南收北支,而西少东多型为北收南支。

(5)盆地夏季降水第一主模态受低纬中东太平洋及印度洋海温异常的影响显著,多发生于 ENSO 事件衰减年,厄尔尼诺的影响比拉尼娜显著,具有非对称性。第二主模态东西反相型受海冰影响显著。

值得注意的是,本文仅从 ENSO 循环和海冰覆盖特征的大背景探讨了海温海 冰对四川盆地夏季降水主模态的影响。近年来的研究表明,夏季环流特征对东部 型、中部型不同 ENSO 事件的响应是具有明显差异的,积雪也是影响夏季降水的 重要因子(陈丽娟等,2016; Chen et al., 2019),因此外强迫特征对盆地降 水的影响机理还需进一步研究,并基于多影响因子建立客观预报模型,都是非常 重要的方向并具有业务应用价值。

参考文献

鲍媛媛,康志明,金荣花,等. 2007. 川渝地区夏季旱涝与海温异常浅析 [J]. 气象.33(5):89-93. Bao Y Y, Kang Z M, Jin R H, et al. 2007. Analysis of floods and droughts in Chongqing and east Sichuan [J]. Meteor Mon (in Chinese), 33(5):89-93.

白莹莹, 张焱, 高阳华, 等. 2011.四川盆地降水变化的区域差异 [J]. 地理科学,31(4):478-484. Bai Ying-ying, Zhang Y, Gao Y H, et al. 2011.Spatial differences of precipitation over Sichuan Basin [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 31(4):478-484.

- 白莹莹, 张焱, 李强, 等. 2014. 四川盆地夏季降水区域差异及其与季风的联系初探 [J]. 气象, 40(4): 440-449. Bai Y Y, Zhang Y, Li Q, et al.2014.Preliminary study on regional difference of summer rainfall in Sichuan Basin and their connections with summer monsoons [J]. Meteor. Mon (in Chinese), 40(4): 440-449.
- Bueh C, Shi N, Xie Z. 2011. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over Southern China in January 2008 [J]. Atomospheric Science Letters, 12(3):273-280.
- 岑思弦, 巩远发, 赖欣. 2014. 青藏高原及其周围地区大气热源对川渝盆地夏季降水的影响
 [J]. 高原气象,33(5):1182-1189. Cen S X, Gong Y F, Lai X. 2014. Impact of heat source over qinghai-xizang plateau and its surrounding areas on rainfall in Sichuan-Chongqing basin in summer [J]. Plateau Meteor (in Chinese), 33(5):1182-1189.
- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. 应用 气象学报.24(5):521-532.Chen L J, Yuan Y, Yang M Z. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. Journal of Applied Meteorological science (in Chinese), 24(5): 521-532.
- 陈丽娟,顾薇,丁婷,等. 2016. 2015 年汛期气候预测先兆信号的综合分析 [J]. 气象. 42(4): 496-506. Chen Lijuan, Gu Wei, Ding Ting. et al. 2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015 [J]. Metor. Mon (in Chinese), 42(4):496-506.
- Chen L J, Gu W, Li W J. 2019. Why is the East Asian summer monsoon extremely strong in 2018? —Collaborative effects of SST and snow cover anomalies [J]. J. Meteor. Res., 33(4), 593–608, doi: 10.1007/s13351-019-8200-4
- 陈权亮,倪长健,万文龙. 2010. 川渝盆地夏季旱涝变化特征及成因分析 [J].高原气象, 29(3):587-594. Chen Q L, Ni C J, Wan W L. 2010. Features of summer precipitation change of the chuanyu basin and its relationship with large-scale circulation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(3):587-594.
- 陈忠明, 闵文彬, 刘富明. 2003. 青藏高原地表热源异常与四川盆地夏季降水的关联 [J]. 气象.29(5): 9-12. Chen Z M, Min W B, Liu F M. 2003. Relationship between surface heating fields over Qinghai-Xizang plateau and precipitation in Sichuan Basin during summer [J]. Meteor Mon (in Chinese), 29(5): 9-12.
- 高妮. 2019. 月极地/欧亚遥相关型的新界定及其天气影响 [D]. 成都信息工程大学硕士学位 论文. Gao N. 2019. New definition of POL type and its weather impact in May [D]. M. S. thesis, Chengdu University of Information Technology.
- 龚振淞,王永光,许力. 2004. 2003 年夏季中高纬环流与淮河流域降水 [J] 气象.30(2):30-33. Gong Z S, Wang Y G, Xu L. 2004. Middle-high latitude circulation and rainfall of huaihe river basin in the summer of 2003 [J]. Metor. Mon (in Chinese), 30(2):30-33.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽 输送的关系 [J]. 大气科学,35 (4): 589–606. Huang R H, Chen J L, Liu Y. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606.
- He J, Black RX. 2016. Heat budget analysis of Northern Hemisphere high-latitude spring onset events [J]. Journal of Geophysical Research-Atomosphere. 121(17):10113-10137.
- 蒋文杰,马振峰,范广洲. 2015. MJO 与四川盆地夏季降水的关系 [J]. 成都信息工程学院学

报.30(6): 600-608. Jiang W J, Ma Z F, Fan G Z. 2015. Relationship between MJO and summer precipitation over Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu University of information technology (in Chinese), 30(6): 600-608.

- 蒋兴文,李跃清,李春,等. 2007.四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响 [J]. 高原 气象, 26(3):476-484. Jiang X W, Li Y Q, Li C, et al. 2007. Characteristic of summer water vapor transportation in Sichuan Basin and its relationship with regional drought and flood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(3):476-484.
- 况雪源,张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. 高 原气象.25(3): 382-289. Kuang X Y, Zhang Y C. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle lower reaches of Yangtze River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25(3):382-289.
- Li C Y, Mu M Q. 2001. The influence of the Indian Ocean dipole on atmospheric circulation and climate [J]. Adv Atmos Sci.,18(5):831-843.
- 李琰, 王亚非, 魏东. 2007. 前期热带太平洋、印度洋海温异常对长江流域及以南地区 6 月 降水的影响 [J].气象学报.65(3):393-405.Li Y,Wang Y F,Wei D. 2007. Effects of anomalous SST in tropical Indian ocean and Pacific ocean on next June rainfall over the Yangtze river baisn and area south of the basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (3): 393-405.
- 李永华. 2010. 西南地区东部夏季旱涝变化规律及其成因研究 [D]. 南京信息工程大学理学 博士学位论文. Li Y H. 2010. Study on the variation and causation of floods/droughts in Eastern Southwest China. Ph. D. dissertation.Nanjing University of Information Science and Technology..
- 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. 大气科学, 35(3):422-434. Li Y H, Lu C H, Xu H M, et al. 2011. Contemporaneous relationship s between summer atmospheric heat source over the Tibetan Pl at eau and drought/ flood in east ern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3):422-434.
- 李跃清. 2003. 青藏高原地面加热及上空环流场与东侧旱涝预测的关系 [J]. 大气科学, 27(1):107-114.Li Y Q. 2003. Surface heating in the Tibetan plateau and general circulation over it and their relations with the prediction of drought-flood at its eastern side [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(1):107-114.
- 廖荃荪, 陈桂英, 陈国珍. 1981. 长期天气预报文集 [M]. 北京: 气象出版社,103–114. Liao Quansun, Chen Guiying, Chen Guozhen. 1981. Long-Term Weather Forecast Corpus [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 103–114.
- Lu R Y, Ye H. 2011. Decreasing trend in summer precipitation over the Western Sichuan Basin since the 1950s [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4:2,114-117.
- 马振峰,谭友邦. 2004. 预测川渝地区汛期降水量的一种物理统计模型 [J]. 大气科学. 28(1):138-145. Ma Z F, Tan Y B. 2004. A physical statistic model for predicting the rainfall during flood season in Sichuan-Chongqing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(1):138-145.
- Rayner, N. A.; Parker, D. E.; Horton, E. B.; Folland, C. K.; Alexander, L. V.; Rowell, D. P.; Kent, E. C.; Kaplan, A. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century J. Geophys. Res.Vol. 108, No. D14, 4407 10.1029/2002JD002670.
- 孙林海,赵振国,许力,等.2005. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析 [J].应

用气象学报, 16(增刊): 56-62. Sun L H, Zhao Z G, Xu L, et al. Study of summer rain pattern in monsoon region of East China and its circulation cause [J]. Appl Meteor Sci (in Chinese), 16(supply): 56-62.

- 孙旭光,杨修群. 2005. El Nino 演变不同阶段东亚大气环流年际异常型的数值模拟 [J]. 地球 物理学报,48(3):501-510. Sun X G, Yang X Q. 2005. Numerical modeling of interannual anomalous atmospheric circulation patterns over East Asia during different stages of an El Nino event. Chinese J. Geophys (in Chinese).
- 唐红玉,吴遥,董新宁,等. 2020. 赤道印度洋偶极子对重庆夏季降水的影响分析 [J]. 海洋 气象学报,40(2):52-61. Tang H Y, Wu Y, Dong X N, et al. 2020. Impact analysis of equatorial Indian Ocean dipole on summer precipitation in Chongqing [J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 40(2):52-61.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Nino onset in the last four decades [J]. J Climate, 8(2):267-285.
- 王欢,李栋梁. 2020.21世纪初青藏高原感热年代际增强对中国东部季风雨带关键区夏季降水年代际转折的影响 [J]. 地球物理学报,63(2):412-426. Wang H, Li D L. 2020. Impact of decadal variability in sensible heat over the Tibetan Plateau on decadal transition of summer precipitation over dominant regions of monsoon rainfall band in eastern China since the early 2000s [J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 63(2):412-426.
- 王素艳,纳丽,王璠,等. 2021. 海冰和海温对西北地区中部 6 月降水异常的协同影响[J].干 旱区地理.44(1):63-72. Wang S Y, Na L, Wang F, et al. 2021. Synergistic effects of ice and sea surface temperature on the precipitation abnormal in June in the central part of northwest China [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 44(1):63-72.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia [J]. J Climate,26(15):5523-5536.
- Wu R, Kirtman B. 2004. Understanding the impacts of the Indian Ocean on ENSO variability in a coupled GCM [J]. J Climate.17:4019-4031.
- Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Nino [J]. J Climate.22:730-747.
- 杨柳,赵俊虎,封国林. 2018. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异 [J]. 大 气科学, 42 (1): 81-95. Yang L, Zhao J H, Feng G L. 2018. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over eastern China monsoon region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 81-95.
- 杨柳, 赵俊虎, 封国林. 2021. 中国北方季风区盛夏典型雨型的大气环流背景和海表温度演 变特征 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 493–508. Yang L, Zhao J H, Feng G L. 2021. Background of Atmospheric Circulation and SST Evolution Features of Typical Midsummer Rainfall Patternsin the Northern China Monsoon Region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 493–508.
- 杨明珠,丁一汇. 2007. 中国夏季降水对南印度洋偶极子的响应研究 [J]. 大气科学. 31(4): 685-694. Yang M Z, Ding Y H. 2007. A study of the impact of south Indian Ocean dipole on the summer rainfall in China [J].Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(4): 685-694.
- 杨小波,杨淑群,马振峰. 2014. 夏季东亚副热带西风急流位置对川渝地区降水的影响 [J].高 原气象,33(2):384-393. Yang X B, Yang S Q, Ma Z F. 2014. Influence of the position of east asian subtropical westerly jet in summer on precipitation over Sichuan-Chongqing region [J].

Plateau Meteor (in Chinese), 33(2):384-393.

- 杨佑洪. 1997. 四川盆地 5—9 月降水与 500hPa 高度场和海温的 [J]. 四川气象.04:24-26.Yang Y H. 1997. The relationship between precipitation and 500hPa altitude field and sea temperature in the Sichuan Basin from May to September [J]. Sichuan Meteorology (in Chinese), 04:24-26.
- 袁媛. 2008. 热带印度洋海温异常及其与 ENSO 事件的相互联系 [D]. 中国科学院大气物理 研究所. Ph. D. dissertation.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 张庆云,陶诗言. 1998. 亚洲中高纬环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报.56(2):199-211. Zhang Q Y, Tao S Y. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on east Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 56(2):199-211.
- 张若楠,孙丞虎,李维京. 2018. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响 [J]. 地球物理学报,61(1):91-105. Zhang R N, Sun C H, Li W J.2018. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China [J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 61(1):91-105.
- 张若楠, 武炳义. 2011. 北半球大气对春季北极海冰异常响应的数值模拟 [J]. 大气科学, 35(5):847-862. Zhang R N, Wu B Y. 2011. The Northern Hemisphere Atmospheric Response to Spring Arctic Sea Ice Anomalies in CAM3.0 Model [J]. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(5):847-862.
- 赵俊虎, 封国林. 2015. 全球变暖背景下中国东部夏季三类雨型预测概念模型新建 [J]. 中国 科学: 地球科学, 45: 414 - 426. Zhao J H, Feng G L. 2014. Reconstruction of Conceptual Prediction Model for the Three Rainfall Patterns in the summer of eastern China under global warming [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 57: 3047 - 3061.
- 赵俊虎,杨柳,曾星宇,等. 2016. 夏季长江中下游和华南两类雨型的环流特征及预测信号
 [J]. 大气科学,40 (6): 1182–1198. Zhao J H, Yang L, Zeng X Y, et al. 2016. Analysis of atmospheric circulation and prediction signals for summer rainfall patterns in southern China
 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1182–1198.
- 周长艳, 李跃清, 房静, 等. 2008. 高原东侧川渝盆地东西部夏季降水及其大尺度环流特征 [J].高原山地气象研究.28(2):1-9. Zhou C Y, Li Y Q, Fang J, et al.2008. Features of the summer precipitation in the west and east of Sichuan and Chongqing basin and the eastern side of the plateau and the relating general circulation [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28(2):1-9.
- 周长艳,李跃清,彭俊. 2006. 高原东侧川渝盆地降水与水资源特征及变化 [J].大气科学. 30(6):217-226. Zhou C Y, Li Y Q, Peng J. 2006. The characteristics and variation of precipitation and water resource of Sichuan and Chongqing basin on the eastern side of the plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2006.30(6):217-226.
- 周晓霞,丁一汇,王盘兴. 2008. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 66(1): 59-70.Zhou X X,Ding Y H,Wang P X. 2008. Moisture transpotr in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 66(1): 59-70.