

齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等, 2020. 2017年秋季四川阴雨寡照特征及成因分析[J]. 气象, 46(1): 37-49. Qi D M, Zhou C Y, Li Y Q, et al, 2020. Analysis of autumn rainy and sunless characteristics and its mechanism in Sichuan in 2017[J]. Meteor Mon, 46(1): 37-49(in Chinese).

2017年秋季四川阴雨寡照特征及成因分析*

齐冬梅^{1,2} 周长艳¹ 李跃清¹ 孙昭萱³

1 中国气象局成都高原气象研究所, 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

2 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

3 四川省气候中心, 成都 610072

提 要: 利用四川省气象台站逐日降水、日照时数资料, NCEP/NCAR逐日及逐月再分析资料和 NOAA提供的月平均海表温度资料, 通过现代学统计方法研究了2017年秋季四川阴雨寡照的主要特征及其成因。结果表明: 2017年9—10月四川秋雨绵绵天气特征明显, 呈现出雨日偏多、日照偏少、阴雨寡照持续时间长等特点。9月对流层中层贝加尔湖至巴尔喀什湖地区上空为宽广倾斜的低压槽, 有利于冷空气东移南下影响四川, 同时西太平洋副热带高压偏强西伸, 冷暖空气交汇于四川上空, 形成持续性降水。10月对流层中层西太平洋副热带高压偏北偏西偏强和印缅槽加深共同作用, 有利于来自孟加拉湾和西太平洋的水汽向四川输送, 为四川带来持续性降水。进一步分析发现, 9月Rossby波能量频散特征有利欧亚中高纬环流的持续和维持, 能量频散是巴尔喀什湖至贝加尔湖地区上空低压槽稳定维持的重要原因。此外, 9—10月赤道中东太平洋海温明显偏低, 且不断加强发展, 是西太平洋副热带高压偏强偏西偏北和印缅槽偏深的重要外强迫源。因此, 由海温外强迫和Rossby波能量频散造成的大气环流异常, 导致了9—10月四川秋雨期阴雨寡照天气的持续。

关键词: 秋季阴雨寡照, 西太平洋副热带高压, Rossby波能量频散, 海温异常

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.01.004

Analysis of Autumn Rainy and Sunless Characteristics and Its Mechanism in Sichuan in 2017

QI Dongmei^{1,2} ZHOU Changyan¹ LI Yueqing¹ SUN Zhaoxuan³

1 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

2 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3 Sichuan Climate Center, Chengdu 610072

Abstract: Based on the observed daily precipitation and sunshine hour data in Sichuan Province, the NCEP/NCAR reanalysis daily and monthly data, and the NOAA monthly sea surface temperature data, the variation characteristics of the autumn rainy and sunless weather and its mechanism of the Sichuan in 2017 have been analyzed by the modern statistics methods in this paper. The results showed that the stage characteristics of autumn rain in Sichuan from September to October of 2017 were obvious, showing the characteristics of more rainy days, less sunshine and longer duration of rainy and sunless weather. The area between Baykal Lake and Balkhash Lake was under a wide and inclined low trough in the middle layer of troposphere, which is beneficial to the movement of cold airflow to the southeast, influencing Sichuan.

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090103)、成都高原气象开放实验室基金课题(BROP201813)和高原大气与环境四川省重点实验室开放课题(PAEKL-2018-C4)共同资助

2018年5月25日收稿; 2019年7月31日收修定稿

第一作者: 齐冬梅, 主要从事气候和气候变化研究. Email: qidongmei1983@163.com

At the same time, the Western Pacific subtropical high was stronger, stretching more westward than normal, and finally the cold and warm airflows met in Sichuan and formed continuous precipitation in September. In October, the Western Pacific subtropical high was stronger, stretching more westward and northward than normal, while the Indian-Burma trough was deeper at 500 hPa, which is beneficial to the water vapor transport to Sichuan from Bay of Bengal and Western Pacific. This is favorable for the continuous precipitation in Sichuan. Further analysis showed that the characteristics of Rossby wave propagation is beneficial to the continuation and maintenance of the Eurasian circulation in the middle and high latitudes, and the Rossby wave energy dispersion is an important cause of maintaining the low trough on the area between Baykal Lake and Balkhash Lake in September. In addition, the sea surface temperature in the equatorial central and eastern Pacific obviously continues to be lower, making the Western Pacific subtropical high become stronger, stretching more westward and northward and Indian-Burma trough was deeper than normal from September to October. Therefore, the influence of the external forcing signal of sea surface temperature and the circulation anomaly caused by the Rossby wave energy dispersion led to the persistence of rainy and sunless weather in Sichuan from September to October of 2017.

Key words: rainy and sunless in autumn, Western Pacific subtropical high, Rossby wave energy dispersion, sea surface temperature anomaly

引 言

2017 年 9—10 月,四川省出现了持续性的阴雨寡照天气,长时间持续性的阴雨寡照对农业生产造成了严重影响:降水多、湿度大、光照少,使得田间积水多,作物光合作用弱,直接导致了农作物生育期、成熟期明显推迟,收获缓慢;同时,持续性阴雨寡照天气造成四川省大部农区耕层和深层土壤长时间处于过湿状态,部分地方湿害严重;对晚秋作物成熟收晒、小春作物备耕播种和移栽等农事操作造成严重影响;并影响红薯、蔬菜、再生稻、再生高粱的产量和品质,影响油菜根系发育及形成壮苗,甚至出现僵苗、死苗、烂根现象。因此,有必要对 2017 年四川秋雨特征及其成因进行细致分析,总结此类天气出现的原因,为四川天气、气候预测及应对农业气象灾害提供有力支撑。

四川秋季阴雨寡照天气是华西秋雨的重要组成部分,是秋季西南地区气候的主要特色,也是西南地区的气象灾害之一。早在 1958 年,高由禧和郭其蕴(1958)、高由禧(1958)就对华西秋雨做了研究,指出华西秋雨的形成是大气环流高低空不同步转变所致。冯丽文和郭其蕴(1983)、梁健洪(1989)、薛春芳等(2012)、蒋竹将等(2014)、罗霄等(2013)、王春学等(2014;2015b)分别用不同的方法分析了华西秋雨的周期性变化特征,发现这些阶段性变化与大气环流的变化有关。许多学者研究了华西秋雨强弱与

大气环流系统和外强迫系统的关系,得出了许多有意义的结论。白虎志和董文杰(2004)指出西太平洋副热带高压、印缅槽、贝加尔湖低槽是华西秋雨的主要影响系统。季国良和徐荣星(1990)研究发现高原西部冬季地表净辐射与华西秋雨存在大面积的正相关区。陈忠明等(2001)得出高原东部地面热源与华西秋雨存在显著的负相关关系,其影响比西部热源作用大。李跃清(1994)分析了四川盆地严重秋雨年和无秋雨年的热力特征及其差异性,发现四川盆地秋雨的变化与大气热力过程有密切关系。鲍媛媛等(2003)、李莹等(2012)、柳艳菊等(2012)、蔡芎宁等(2012)针对华西秋雨典型个例分析了秋雨特征及成因。近年来也有许多关于华西秋雨变化特征及其影响机理的分析(孙昭萱等,2013;刘佳等,2015;王春学等,2015a;赵佳玉等,2016;郑然等,2018),而对于四川秋季出现阴雨寡照天气特征及其成因的研究较少,对其影响机制的研究也欠缺。因此,本研究首先分析 2017 年秋季四川阴雨寡照天气的主要特征,进一步总结形成此异常天气的成因,探讨维持四川秋季阴雨寡照天气环流型和 Rossby 波能量频散以及海温外强迫之间的动力学关联,以期为四川天气预报及应对农业气象灾害提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所用资料包括 1961—2017 年四川省 156 个

站点的逐日降水、日照时数资料集、NCEP/NCAR 逐日及逐月再分析资料,资料的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,主要气象要素包括:位势高度场、水平经向风、水平纬向风、比湿;以及美国国家海洋和大气局(NOAA)提供的月平均海表温度(SST)资料,资料的水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。文中气候态取 1981—2010 年平均。

1.2 分析方法

研究方法包括相关分析、合成分析等统计诊断方法,利用 Takaya and Nakamura(1997;2001)推导的三维波作用通量(简称 T-N 通量)描述准定常 Rossby 波的能量频散特征。T-N 通量,在 WKB 近似假定下与波的位相无关,而与定常 Rossby 波列的局地群速度方向一致,反映了 Rossby 群波能量的频散方向。对应 T-N 通量(\mathbf{W})在对数气压坐标中的公式为:

$$\mathbf{W} = \frac{P}{2|\mathbf{U}|} \begin{vmatrix} U(v'^2 - \phi'v'_x) + V(-u'v' + \phi'u'_x) \\ U(-u'v' + \phi'u'_x) + V(u'^2 + \phi'u'_y) \\ \frac{f_0 R_a}{N^2 H_0} \{U(v'T' - \phi'T'_x) + \\ V(-u'T' - \phi'T'_y)\} \end{vmatrix}$$

式中: ϕ' 为准地转扰动流函数; u' 、 v' 为扰动准地转风分量, $\mathbf{U}(U,V)$ 为基本流场; R_a 为干气体常数; H_0 为标高; N^2 为 Brunt-Väisälä 频率; T 为温度。由于在计算 T-N 通量时,无须假设基本流场必须是纬向平均基本流场,可以包含纬向不均匀的纬向风场和经向风场。因此特别适合中高纬地区背景环流不平直的状况。

文中垂直积分水汽通量的计算公式如下:

$$\mathbf{Q} = Q_x \mathbf{i} + Q_y \mathbf{j} \quad (1)$$

其中,纬向水汽输送通量:

$$Q_x = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u \mathrm{d} p \quad (2)$$

经向水汽输送通量:

$$Q_y = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v \mathrm{d} p \quad (3)$$

式中: p_s 为地面气压; p_t 取 300 hPa; q 为比湿; g 为重力加速度。

2 2017 年秋季四川阴雨寡照天气的主要特征

2017 年四川秋雨于 8 月 29 日开始,比常年开

始期提前 1 d,11 月 2 日结束,秋雨日偏多 8.3 d,秋雨量偏多 14.9 mm。9—10 月,四川省阴雨天气较多,日照时数偏少,局部地区雨量大。从图 1 中可以看出,9 月四川省降水量分布不均,多阴雨天气,日照偏少。盆东北大部降水偏多 3 成~1 倍(局部偏多 1 倍以上,其中万源站降水量居历史同期第一位);川西高原中北部降水偏多 2~8 成;攀西地区中部降水偏多 1~3 成(图 1a)。9 月四川省平均降水日数为 17.9 d,位列历史同期第十八位。盆地大部降水日数在 10 d 以上,其中盆北山区和盆西南部分地区超过 18 d;川西高原北部降水日数为 23~26 d,中部为 18~23 d,南部为 10~15 d;攀西地区大部降水日数为 10~16 d(图 1c)。日照偏少区主要分布在盆地和川西高原,盆地大部分地区、川西高原阿坝州北部日照时数偏少 3 成左右,其中盆地东部偏少 4 成以上(图 1e)。

10 月平均降水量比常年同期偏多,秋绵雨天气特征明显,全省平均降水量较常年同期偏多 52%,位列历史同期第三位,仅次于 1980 年和 1963 年。川西高原北部、盆地北部偏多 1 倍以上,其中广元和剑阁偏多 2.5~2.8 倍,盆地东部、南部部分地区及凉山州少数县市偏多 5~9 成(图 1b)。四川省平均降水日数达 19.2 d,位列历史同期第二位。盆地大部地区降水日数在 16 d 以上,盆西北局部、盆南大部超过 22 d;川西高原北部超过 16 d,南部为 10~15 d;攀西地区大部为 10~18 d。盆地大部地区最长连续降水日数达 7 d,盆南局部超过 10 d(图 1d)。四川省平均日照时数仅为 60.3 h,较常年同期偏少 34%,为历史同期最少。盆地大部日照时数偏少 5 成左右,盆北和盆西南局地偏少达 7 成;川西高原大部偏少 1~2 成;攀西地区大部偏少 1 成左右(图 1f)。总体来看,四川 10 月以来雨日多、雨量大、日照少,阴雨寡照的秋绵雨天气尤为突出。特别值得注意的是,2017 年秋季四川出现的持续性阴雨寡照异常气候,给农业生产带来了严重的危害,关键生育期内受阴雨寡照影响,不利于秋收作物生产发育和产量形成,持续的阴雨寡照使四川大部农区耕层和深层土壤长时间处于过湿状态,部分地方湿害严重;并对晚秋作物成熟收晒、小春作物备耕播种和移栽等农事操作造成严重的不利影响。

综合考虑图 1 中 9、10 月降水日数偏多、日照时数偏少的站点,挑选出万源、沐川、蓬安、仪陇四站为代表站点进行分析(站点分布见图 1)。图 2 中降水

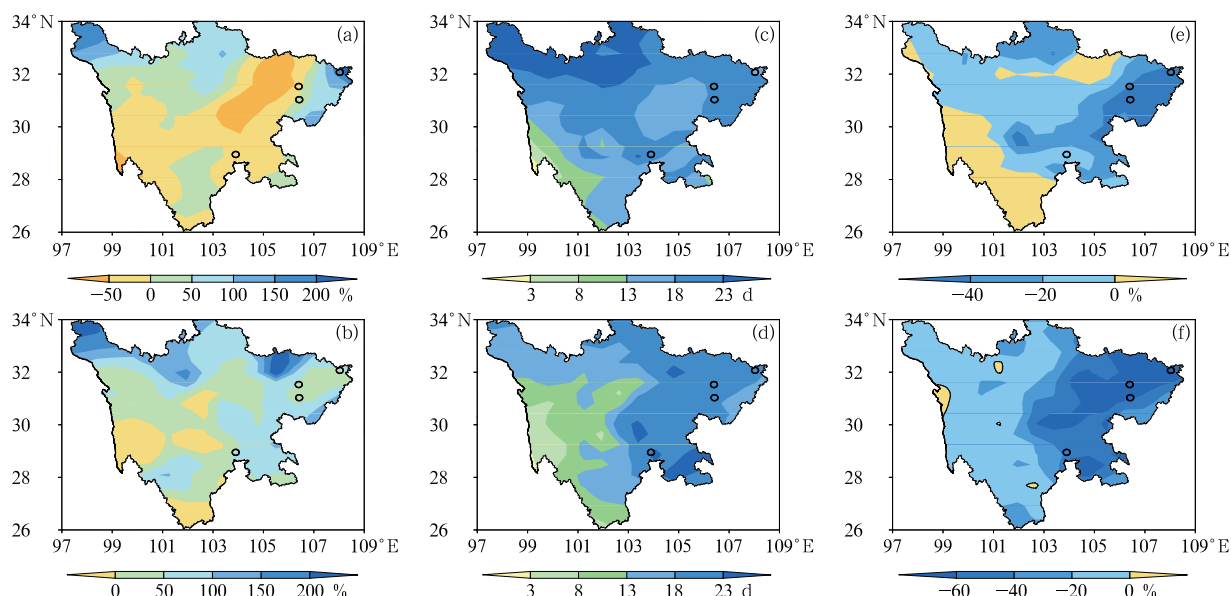


图 1 2017 年 9 月(a,c,e)、10 月(b,d,f)四川省降水量距平百分率(a,b),降水日数(c,d)和日照时数距平百分率(e,f)分布
(黑色圆圈为代表站点)

Fig. 1 Distribution of precipitation anomaly percentage (a, b), precipitation days (c, d), and sunshine hour anomaly percentage (e, f) in Sichuan in September (a, c, e) and October (b, d, f) 2017
(Black circle represents the typical stations)

量距平、日照时数距平是根据 2017 年秋雨期逐日降水量(日照时数)减去同期逐日多年平均降水量(日照时数)计算得出,从图 2 中可以看出,2017 年秋雨期万源站降水日数多达 42 d,降水期主要集中在 8 月末至 9 月上旬、9 月中旬和 10 月中旬。秋雨期日照时数偏少,仅 17 d 有日照,日照时数为 94.3 h,最长持续寡照日数达 10 d,日照时数距平在秋雨期有 53 d 为负值,最小值为-6.1 h,仅 11 d 为正值。沐川站降水日数多达 45 d,秋雨期日照时数偏少,仅 23 d 有日照,日照时数为 87.3 h,最长持续寡照日数达 12 d,日照时数距平有 48 d 为负值,最小值为-4.2 h,仅 16 d 为正值。蓬安站降水日数多达 42 d,秋雨期日照时数偏少,仅 14 d 有日照,日照时数为 63.7 h,最长持续寡照日数高达 24 d,日照时数距平有 58 d 为负值,最小值为-6.4 h,仅 6 d 为正值。仪陇站降水日数多达 40 d,秋雨期日照时数偏少,仅 19 d 有日照,日照时数为 79.1 h,最长持续寡照日数达 17 d,日照时数距平有 58 d 为负值,最小值为-7.2 h,仅 6 d 为正值。综上分析发现,万源、仪陇、蓬安站日照时数突破历史同期极小值,

2017 年秋雨期四川省持续阴雨寡照的特点是:雨日偏多、日照偏少、阴雨寡照持续时间长。

3 2017 年四川秋雨异常的主要成因

3.1 大尺度环流特征

四川秋季阴雨寡照天气的异常,必然是和大尺度环流系统的变化相联系的。四川位于青藏高原东侧,地形复杂,气候复杂多变,是气候变化的敏感脆弱区。秋季时频繁南下的冷空气沿青藏高原东南沿南下,与停滞在该区域的暖空气相遇使得锋面活动加剧而产生较长时间的阴雨天气。从 2017 年 9 月 500 hPa 高度场(图 3a)上可以看出,欧亚大陆中高纬呈“两槽一脊”环流型,两槽分别位于贝加尔湖至巴尔喀什湖地区上空、日本海地区上空,高压脊区在东欧平原附近上空。对比 2017 年 9 月 500 hPa 高度距平场(图 3c),9 月东欧平原附近上空为正距平区,贝加尔湖至巴尔喀什湖地区上空为负距平区,中心差值为-60 gpm,从乌拉尔山到我国东部形成了

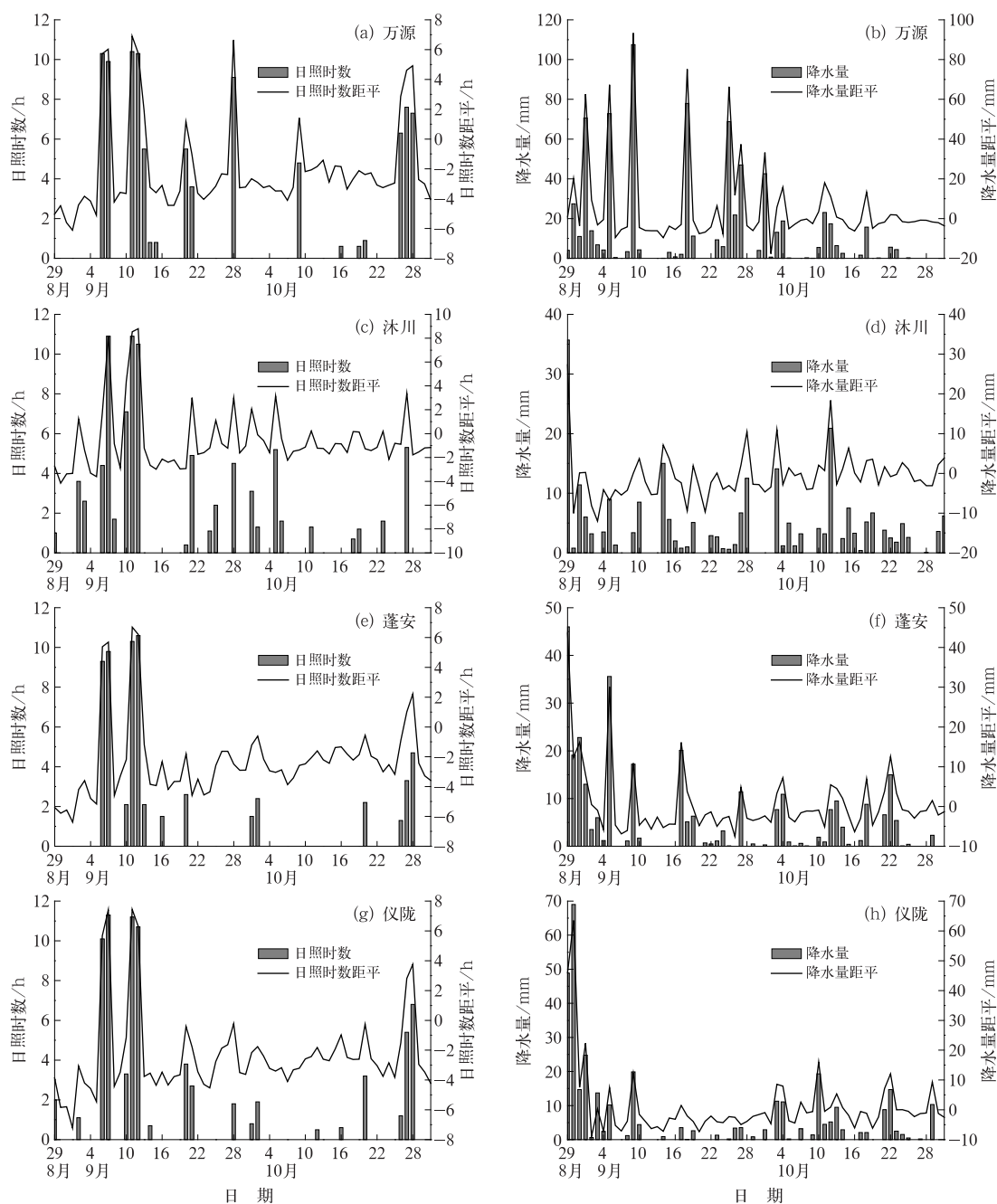


图2 2017年秋雨期四川省代表站点日照时数(a,c,e,g)和降水量(b,d,f,h)及其距平变化

Fig. 2 Time series of sunshine hour and anomaly (a, c, e, g), precipitation and anomaly (b, d, f, h) at representative stations in Sichuan in autumn rain period 2017

一个西北—东南向的“十一”波列。东欧平原附近上空高压脊偏强,贝加尔湖至巴尔喀什湖地区上空形成了宽广倾斜的低压槽,有利于贝加尔湖槽后冷空气分裂东移南下,不断向四川输送,同时西太平洋副热带高压(以下简称副高)偏强西伸,西脊点达到 25°N 、 90°E 附近。将南海的水汽源源不断向四川输送,冷暖空气持续交汇于四川一带,造成了该地持久

的阴雨寡照天气。

10月500 hPa高度场上,欧亚大陆中高纬以纬向型环流为主,长波槽位于东欧平原和鄂霍次克海地区上空,高压脊区在乌拉尔山地区上空,我国大部分地区处于平直的纬向环流控制下(图3b)。从500 hPa高度距平场图上看(图3d),两个负距平中心分别位于东欧平原和鄂霍次克海地区上空,说明

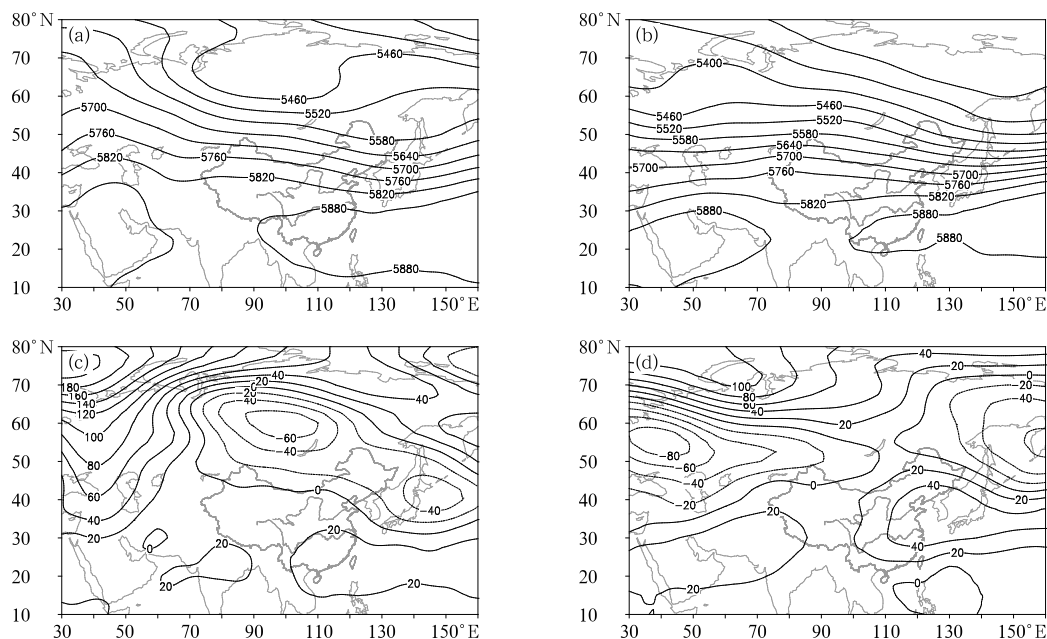


图 3 2017 年 9 月(a,c)和 10 月(b,d)500 hPa 位势高度场(a,b)及其距平场(c,d)(单位:gpm)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height (a, b) and anomalies (c, d) in September (a, c) and October (b, d) 2017 (unit: gpm)

东欧平原和鄂霍次克海地区上空低压槽均偏强;同时我国东部及沿海地区为正距平区,孟加拉湾和南海是一个低值区,说明副高偏北偏西偏强,印缅槽偏深,副高偏北偏西偏强和印缅槽加深共同作用,有利于来自孟加拉湾和西太平洋的水汽向四川输送,为四川带来持续性降水。

从图 4 中可以很好地看出 2017 年 9、10 月低层风场的辐合辐散,对比 9、10 月风场(图 4a,4b)及风场距平(图 4c,4d)发现,9 月(图 4a,4c)贝加尔湖槽后冷空气随着西北风东移南下,不断从高原北侧和高原南侧东移至四川地区,与来自南海、孟加拉湾的西南暖湿气流在四川地区上空形成对峙形势,导致四川出现持续性降雨。10 月(图 4b,4d)在南海洋面上有一个气旋性环流中心,其东北侧沿 29°N 在 $135^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 为一个反气旋性环流,气旋性环流东侧的东南风和反气旋性环流西侧的东南风汇合,增强了自西太平洋向大陆的东南风水汽输送。同时在我国东南部上空也有一个反气旋性环流,来自南海、西太平洋的暖湿气流源源不断的随着副高南侧的东南风向四川输送,同时来自孟加拉湾的暖湿气流也随着西南风向四川输送,有利于四川产生降水。

秋季是大气环流由夏季向冬季转换的过渡季

节,充足的水汽供应是维持降水的必要条件(周长艳等,2006)。分析 2017 年 9、10 月四川秋雨的水汽输送情况。图 5 是 9 月(图 5a)和 10 月(图 5b)整层水汽输送通量及水汽输送通量散度距平,对比 9、10 月整层水汽输送通量及其水汽输送通量散度(图略)可以看出,9 月来自南海、西太平洋地区的水汽随着东南风向四川输送,还有来自阿拉伯海、孟加拉湾的水汽沿着西南风经过高原南侧向四川输送,西风带也有弱的水汽向四川输送,同时有少量来自贝加尔湖地区的冷气流随着西北风向四川输送,水汽在四川上空汇合形成辐合中心,有利于四川形成降水。10 月(图 5b)来自南海、西太平洋的水汽沿着副高西南侧的东南气流向四川输送,来自阿拉伯海和孟加拉湾的水汽随着西南风向四川输送,同时西风带也有较弱的水汽向四川输送,在四川上空形成水汽通量异常辐合区,使得四川出现持续的降雨。比较而言,2017 年 9 月西南风水汽输送较强,同时有冷气流随着西北风向四川输送;10 月东南风水汽输送较强,没有明显的冷气流进入四川。10 月四川上空的水汽通量异常辐合区较 9 月明显加强,水汽输送强度比 9 月增强。

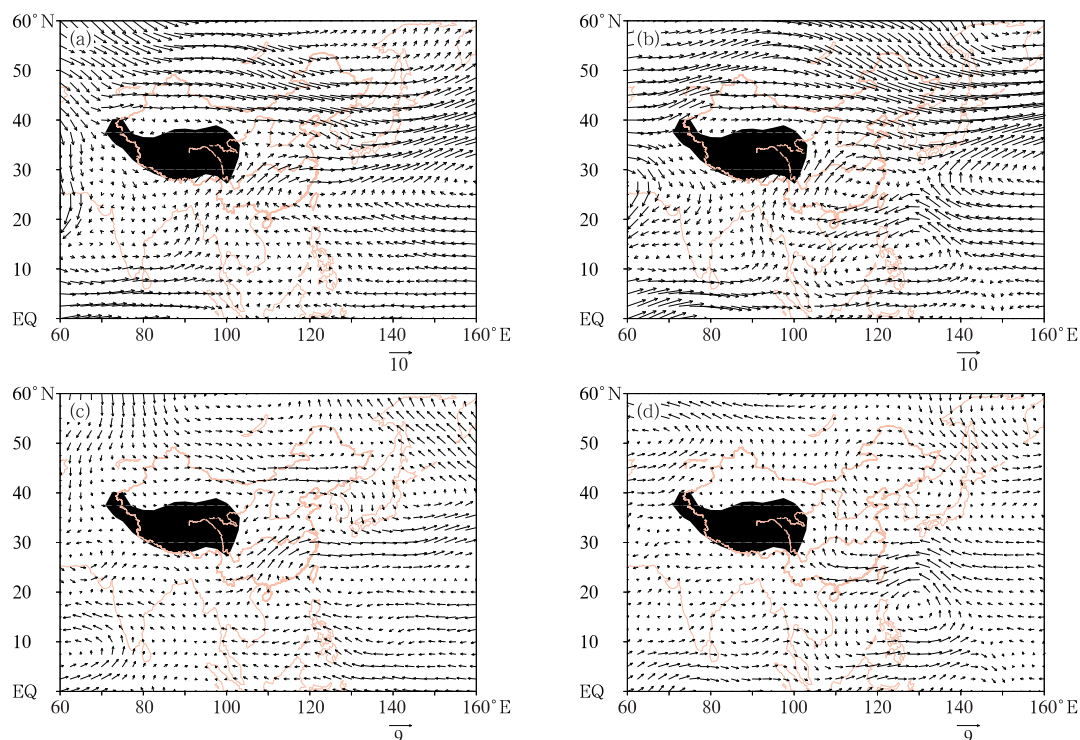


图 4 2017 年 9 月(a,c)和 10 月(b,d)700 hPa 风场(a,b)及其距平场(c,d)(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(黑色阴影指地形,下同)

Fig. 4 The 700 hPa wind (a, b) and anomalies (c, d) in September (a, c) and
October (b, d) 2017 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(Black shaded areas indicate topography, the same below)

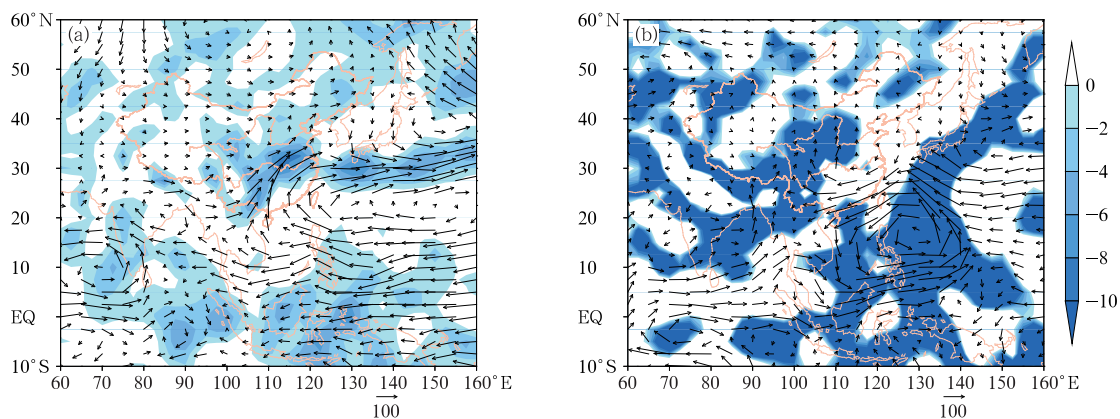


图 5 2017 年 9 月(a)和 10 月(b)整层积分水汽通量距平(矢量,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和
水汽通量散度距平(阴影,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Anomaly of moisture flux integrated (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and
divergence (colored area,
unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in September (a) and October (b) 2017

高由禧和郭其蕴(1958)研究发现,华西秋雨的起止日期和亚洲上空急流变化关系密切。冷空气活动强弱是四川秋季降水的一个重要影响因素,副热带高空西风急流的位置与冷空气活动位置关系密

切。从图 6 中发现 2017 年 9 月和 10 月四川秋雨异常偏多期间高空副热带西风急流变化非常明显。9 月(图 6a)200 hPa 西风急流稳定在 38°N 附近,急流中心强度较多年平均值偏强(图 6c),10 月(图 6b)

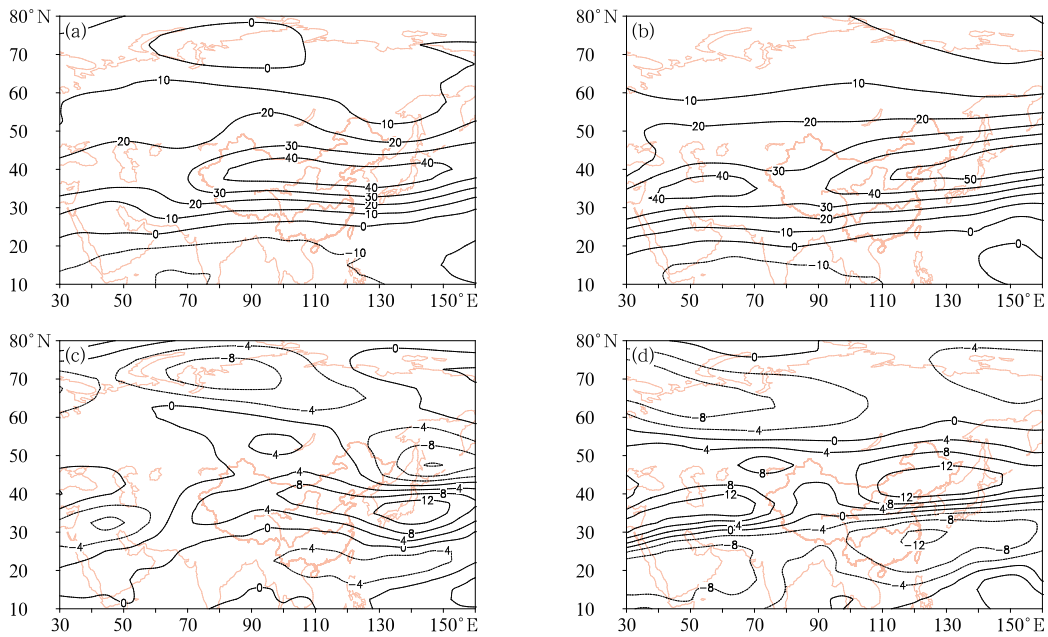


图 6 2017 年 9 月 (a,c) 和 10 月 (b,d) 200 hPa 纬向风场 (a,b) 及其距平场 (c,d) (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 The 200 hPa zonal wind (a, b) and anomalies (c, d) in September (a, c) and October (b, d) 2017 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

西风急流中心位置北抬至 40°N 附近, 中心强度较多年平均值偏强, 且急流偏强范围更大 (图 6d)。比较而言, 9 月冷空气活动较频繁, 容易南下影响四川, 对比图 4c 发现, 四川上空有偏北风距平, 冷空气南下明显, 四川地区冷暖空气交绥, 低空为气旋式距平环流, 引起辐合上升气流加强, 从而有利于四川降水偏多; 而 10 月副热带西风急流北抬, 纬向环流偏强, 致使冷空气活动较少且偏北, 不易南下到达四川。蔡芩宁等 (2012) 研究发现, 200 hPa 西风急流在 $40^\circ\sim 45^\circ\text{N}$ 建立并稳定维持时对应着华西秋雨偏强时段, 西风急流在 40°N 附近稳定维持时, 华西地区位于急流南侧的高空辐散区内, 对流层低层辐合触发了不稳定能量的释放, 产生上升运动, 且低层有利于低涡系统的生成和维持, 低层辐合、高层辐散的垂直环流配置提供了良好的动力抬升条件, 有利于长时间强降雨天气的形成。

3.2 波动通量

研究发现 (王文等, 2017; 潘婕等, 2008; 施宁等, 2009; 李明刚等, 2016), 在对流层中上层, Rossby 波能量由北大西洋向东至东亚及北太平洋地区的频散过程, 对影响我国气候的重要天气系统的形成与维持起着重要作用。陶诗言和卫捷 (2006) 认为, Rossby

波可以激发出我国沿海地区长波脊或长波槽的建立, 进而影响副高的移动。下面利用 T-N 通量探讨了秋季欧亚中高纬持续异常环流所对应的 Rossby 波的能量频散特征。图 7 中计算 T-N 通

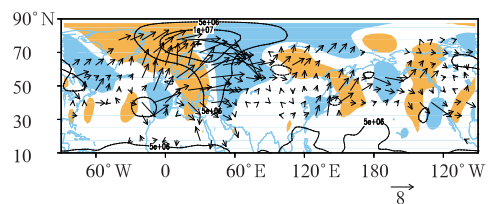


图 7 2017 年 9 月 500 hPa 流函数距平 (等值线, 间隔为 $5 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) 和对应的 T-N 通量 (箭头, 单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; 黄/蓝阴影区为 T-N 通量散度 $> 2 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ / $< -2 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的区域)

Fig. 7 The 500 hPa stream function anomaly (contour, with the interval of $5 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and its corresponding T-N flux (arrow, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; yellow/blue shading represents the region where the divergence of wave activity flux is more/less than $2 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / -2 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) in September 2017

量时,时间扰动是相对于1981—2010年每年9月平均的背景场而言。从图7中可以看出,9月对流层中层500 hPa北大西洋上空为T-N通量强辐散区,说明该地区是波源区,能量在该区域堆积并进一步向东欧—乌拉尔山频散,此后进一步向下游频散至贝加尔湖地区,在巴尔喀什湖附近地区T-N通量辐合,能量向东传输过程有利于巴尔喀什湖至贝加尔湖地区上空低压槽的维持。此后T-N通量继续向东频散至东亚地区,Rossby波能量频散过程中T-N通量辐合(蓝色阴影)和辐散(黄色阴影)交替出现,使得能量堆积系统进一步发展,并进一步向下游频散。上述T-N通量刻画了2017年9月Rossby波能量的频散与环流维持之间的联系,波能量从波源区向东频散至东亚及北太平洋地区,是9月500 hPa上空贝加尔湖低压槽得以发展和维持的重要原因。

综上所述,在对流层中高层,北大西洋是2017年9月Rossby波活动的主要波源区,Rossby波能量通过其能量的辐合辐散从波源区向东朝下游传播至东亚地区,该传播特征与持续性异常大气环流对应,引起了贝加尔湖低压槽的加深,有利于贝加尔湖槽后冷空气分裂东移南下,不断向四川输送。以上环流形势造成了2017年9月四川阴雨寡照天气的持续。

3.3 热带海温的影响

谌芸和施能(2003)、贾小龙等(2008)、韩晋平等(2013)、王春学等(2015a)、宗海锋(2017)、唐红玉等(2019)、赵俊虎和王永光(2019)研究表明,海温作为最强的年际气候信号之一,对我国气候异常有显著影响,特别是对我国秋季降水影响明显,La Niña事件是华西秋雨显著偏多的重要外强迫之一(李莹等,2012;柳艳菊等,2012)。那么,海温异常变化对四川

秋季降水是否有影响呢?从2017年海表温度距平分析来看(图8),从2017年8月以来赤道中东太平洋地区的海表温度迅速下降(图略),9月、10月赤道中东太平洋海温明显偏低,且不断加强发展,10月海温异常偏低区向西扩展到180°E以西,中心强度低于-0.8℃。9月、10月热带西太平洋地区均为海温正距平区,海温异常偏高。

过去许多研究表明,La Niña事件对我国秋季降水影响明显,甚至超过了对夏季的影响。从上文的分析也发现,2017年秋季赤道中东太平洋海温迅速转冷,那么秋季海温转冷之后大气的响应情况如何?大气的响应是否是影响四川阴雨寡照天气产生的主要原因呢?支蓉等(2018)研究发现夏、秋季赤道中东太平洋海温同号率达到88.9%,持续性非常好,2017年8月海温开始转冷,秋季时海温迅速转为较显著的偏冷状态。参考支蓉等(2018)的研究,挑选夏、秋季赤道中东太平洋海温持续偏冷且秋季赤道中东太平洋海温指数 $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ 的年份(1984、1988、1995、1998、1999、2000、2007、2010、2011年)进行合成分析,进一步找寻海温异常对四川秋季降水影响的可能机制,图9是海温异常年合成的9—10月500 hPa位势高度距平及700 hPa风场距平合成。结合500 hPa位势高度场(图略)及位势高度场距平合成(图9a),发现在夏、秋季海温异常年,9—10月500 hPa高度场上副高偏北偏西偏强,有利于来自西北太平洋和南海的水汽沿副高西沿向我国内陆输送。同时低纬度地区阿拉伯海至孟加拉湾地区上空为负距平区,表明印缅槽加深,有利于来自孟加拉湾的西南暖湿气流向四川输送。从700 hPa风场(图略)及风场距平合成(图9b)发现,来自南海和西太平洋地区的水汽沿着东南风距平持续向我国内陆输送,孟加拉湾地区上空水汽沿着偏西风距平向东

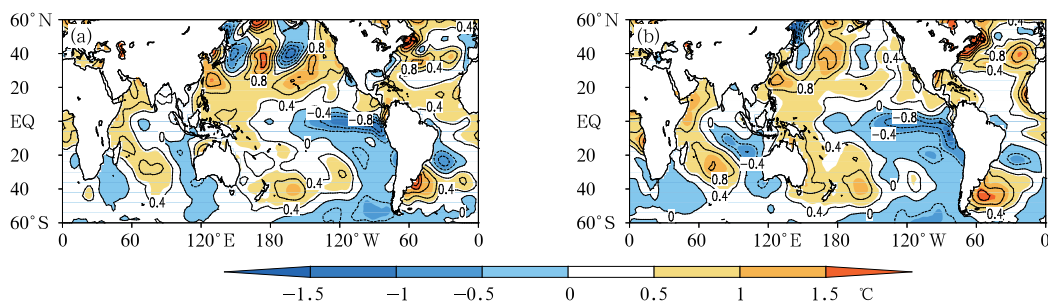


图8 2017年9月(a),10月(b)海表温度距平

Fig. 8 Sea surface temperature anomaly in September (a) and October (b) 2017

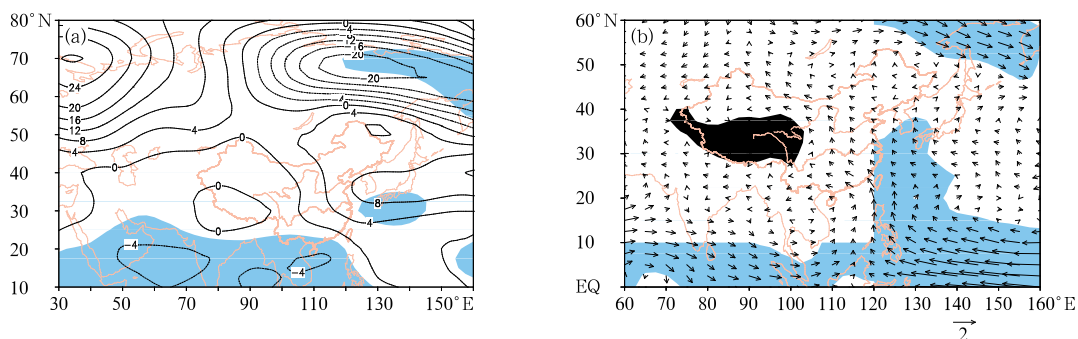


图 9 夏、秋季海温异常年 9—10 月 500 hPa 位势高度距平(a, 单位:gpm)及
700 hPa 风场距平合成(b, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(蓝色阴影为通过显著性水平检验的区域)

Fig. 9 Composite anomalies of 500 hPa geopotential height (a, unit: gpm) and
700 hPa wind (b, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in September—October of sea surface
temperature anomaly years
(Blue shading indicates the area passing the 0.05 significance level test)

输送,在中南半岛附近上空转为偏南风距平向四川输送,这两支偏南气流有利于将来自海洋的水汽源源不断向四川输送,同时四川处于副高西沿上升气流控制中,有利于四川 9—10 月形成持续性降水。

从上文分析结果发现,9—10 月赤道中东太平洋海温与副高及印缅槽关系密切,当秋季 9—10 月赤道中东太平洋海温异常偏低时,副高偏北偏西偏强,印缅槽偏深。同时对比 2017 年 9—10 月副高及印缅槽的异常特征发现,均反映出了对赤道中东太平洋海温异常偏低的响应特征,表明赤道中东太平洋海温对 2017 年 9—10 月大气环流的影响是很明显的。李栋梁等(2007)研究表明,当在 La Niña 位相时,赤道中东太平洋盛行下沉运动,赤道太平洋上低空是东风距平,高空是西风距平,赤道西太平洋、北印度洋及孟加拉湾上空上升运动加强,沃克环流明显,孟加拉湾上空的上升运动使得印缅槽增强。上述结论与我们合成分析的结果一致,可以认为赤道中东太平洋海温偏低时造成印缅槽偏强的可能途径与上述研究结果相同。过去大量研究表明(湛芸和施能,2003;贾小龙等,2008;顾薇等,2012;何珊珊等,2015;韩晋平等,2013),当赤道中东太平洋处于 La Niña 状态或出现负海温异常时,其上空大气对流活动受到抑制,而热带西太平洋上空对流旺盛,使得局地哈得来环流加强,其北侧下沉支加强,导致西北太平洋上空出现异常反气旋,进而引起副高加强西伸。Zhang et al(1996)的研究也表明,热带中东太平洋海温异常会引起对流加热异常,从而在大气

中产生 Rossby 波响应。当热带中东太平洋海温出现负异常时,对流异常冷却造成 Rossby 波响应在西北太平洋地区上空激发出反气旋异常,造成副高加强西伸。以上关于热带中东太平洋海温与副高关系的结论都与本文结果一致。

综上所述,在海温外强迫因子的影响下,2017 年秋季副高偏强偏西偏北,同时印缅槽偏深,为孟加拉湾及西太平洋地区的暖湿气流向四川输送奠定了基础,有利于四川 9—10 月降水量异常偏多,阴雨寡照天气持续。

4 结论和讨论

本文利用四川省气象台站逐日降水、日照时数资料、NCEP/NCAR 逐日及逐月再分析资料和 NO-NA 提供的月平均海表温度资料,通过多种分析方法研究了 2017 年秋季四川阴雨寡照的主要特征及造成该异常的成因,得到以下几点结论:

(1) 2017 年四川秋绵雨天气特征明显,主要呈现出雨日偏多、日照偏少、阴雨寡照持续时间长等特点。9 月全省雨量分布不均,局部地区雨量偏大,主要位于四川东部、北部,10 月秋雨范围进一步扩大,全省降水量明显偏多,日照时数为历史同期最少。持续性阴雨寡照异常气候,给农业生产带来了严重的危害。

(2) 2017 年 9 月对流层中层贝加尔湖至巴尔喀什湖地区上空为宽广倾斜的低压槽,有利于冷空气

东移南下影响四川,同时副高偏强西伸,有利于西太平洋水汽向四川输送,来自孟加拉湾的暖湿气流也随着西南风向四川输送,冷暖空气持续交汇于四川一带,形成持续性降水。10月对流层中层副高偏北偏西偏强和印缅槽加深共同作用,有利于来自孟加拉湾和西太平洋的水汽向我国内陆输送,为四川带来持续性降水。比较而言,10月四川上空的水汽通量异常辐合区较9月明显加强,水汽输送强度比9月增强。

(3) 2017年9月Rossby波能量的频散源地位于北大西洋上空,T-N通量通过能量的强烈辐合辐散向东亚地区传播能量,Rossby波传播特征与持续性异常环流对应,能量频散是巴尔喀什湖至贝加尔湖地区上空低压槽稳定维持的重要原因,贝加尔湖低压槽的加深有利于槽后冷空气东移南下向四川输送,冷暖空气持续在四川上空交汇,造成了2017年9月四川阴雨寡照天气的持续。

(4) 2017年9—10月赤道中东太平洋海温明显偏低,且不断加强发展,是四川9—10月降水量偏多的重要外强迫源。当赤道中东太平洋偏冷时,其上空大气对流活动受抑制,有利于副高偏强偏西偏北,同时印缅槽偏深,为孟加拉湾及西太平洋地区的暖湿气流向四川输送奠定了基础,有利于四川9—10月降水量异常偏多,阴雨寡照天气持续。

本文主要分析了2017年秋季四川阴雨寡照特征及其对应的异常环流型,并针对Rossby波能量频散和赤道中东太平洋海温异常对大气环流的影响进行了初步的诊断分析,对比分析结果发现,2017年9月T-N通量对大气环流的影响明显,而10月赤道中东太平洋海温异常偏低区比9月明显,向西扩展到 180°E 以西,且海温对大气的影响有明显的滞后效应,我们推测影响2017年9月和10月大气环流异常变化的主要影响因子不同,9月异常环流的变化主要由中高纬Rossby波能量频散引起,Rossby波能量通过其能量的辐合辐散从波源区向东朝下游传播至东亚地区,其能量传播引起了贝加尔湖低压槽的加深。而10月环流变化主要由热带海温外强迫引起,海温外强迫造成了副高偏强偏西偏北,同时印缅槽偏深,为孟加拉湾及西太平洋地区的暖湿气流向四川输送奠定了基础。同时对比3.1节大尺度环流场分析发现,9月贝加尔湖低压槽比10月强(图3),同时9月冷空气活动更频繁,容易影响四川(图6),而10月偏南风水汽输送较9月强

(图4),在四川上空水汽输送散度也较9月强(图5),进一步证明了上述推论。以上分析仅从统计诊断分析得出,其动力学影响机制等问题,有待在下一步工作中结合数值试验做深入分析。大气环流内部动力过程异常受外强迫因子海温异常变化的影响,那么,欧亚大陆中高纬Rossby波能量频散特征与外强迫因子海温异常的关系是怎样的呢?早在20世纪80年代,Gambo et al(1987)通过数值模拟发现,冬季北大西洋中纬度海温异常可以激发欧亚大陆上空从北大西洋传播到乌拉尔山以东地区的Rossby波列。近年来,相关研究进一步证实冬季欧亚遥相关(EU)型Rossby波列的外强迫主要来自北大西洋中部的海温异常,当冬季EU型出现显著正(负)异常时,北大西洋中部往往从前年秋季开始为暖(冷)SST,且该异常可持续到次年春季(乔少博等,2014;2015;Qiao and Feng,2016)。张庆云等(2018)研究发现,夏季欧亚大陆中高纬东传的Rossby波列位相变化受春季北大西洋关键区海温异常变化影响。那么,前期北大西洋海温异常是否也是秋季中高纬Rossby波能量频散的显著外强迫信号呢?我们还需要进一步通过数值模拟方法,深入探讨欧亚大陆中高纬Rossby波能量频散异常对前期北大西洋海温异常响应的物理过程。

参考文献

- 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 H Z, Dong W J, 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6):884-889(in Chinese).
- 鲍媛媛,阿不力米提,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 Y Y, Abulimiti, Li F, et al, 2003. Space-time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001[J]. J Appl Meteor Sci, 14(2):215-222(in Chinese).
- 蔡芎宁,康志明,牛若芸,等,2012. 2011年9月华西秋雨特征及成因分析[J]. 气象,38(7):828-833. Cai X N, Kang Z M, Niu R Y, et al, 2012. Analysis of features and physical mechanisms of 2011 autumn rainfall in West China[J]. Meteor Mon, 38(7):828-833(in Chinese).
- 湛芸,施能,2003. 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 Y, Shi N, 2003. El Nino/ENSO and climatic anomaly in the autumn of China[J]. J Trop Meteor, 19(2):137-146(in Chinese).
- 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 Z M, Liu F M, Zhao P, et al, 2001. Relationship between the surface heating fields over

- Qinghai-Xizang Plateau and precipitation of Southwest China in autumn[J]. Plateau Meteor, 20(1): 94-99(in Chinese).
- 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 L W, Guo Q Y, 1983. The fluctuation of autumn rain in South-West China[J]. Geogr Res, 2(1): 74-84(in Chinese).
- 高由禧, 1958. 东亚的秋高气爽[J]. 气象学报, 29(2): 83-92. Gao Y X, 1958. On the high autumn clear weather in China[J]. Acta Meteor Sin, 29(2): 83-92(in Chinese).
- 高由禧, 郭其蕴, 1958. 我国的秋雨现象[J]. 气象学报, 29(4): 264-273. Gao Y X, Guo Q Y, 1958. On the autumn raining area in China[J]. Acta Meteor Sin, 29(4): 264-273(in Chinese).
- 顾薇, 李维京, 陈丽娟, 等, 2012. 我国秋季降水的年际变化及与热带太平洋海温异常分布的关系[J]. 气候与环境研究, 17(4): 467-480. Gu W, Li W J, Chen L J, et al, 2012. Interannual variations of autumn precipitation in China and their relations to the distribution of tropical Pacific sea surface temperature[J]. Climatic Environ Res, 17(4): 467-480(in Chinese).
- 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. Han J P, Zhang R H, Su J Z, 2013. Relationship between cooling of tropical Pacific sea surface temperature and autumn precipitation in China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5): 1059-1071(in Chinese).
- 何珊珊, 张文君, 祁莉, 等, 2015. 两类厄尔尼诺事件发展年秋季印度洋海温异常特征对比[J]. 气象学报, 73(3): 515-528. He S S, Zhang W J, Qi L, et al, 2015. Contrasting SST anomalies over the Indian Ocean between the two types of El Niño events during boreal autumn[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 515-528(in Chinese).
- 季国良, 徐荣星, 1990. 青藏高原西部冬季地表净辐射与中国降水的关系[J]. 高原气象, 9(1): 23-31. Ji G L, Xu R X, 1990. Relationship between the surface net radiation in the Western Qinghai-Xizang Plateau and the precipitation in China[J]. Plateau Meteor, 9(1): 23-31(in Chinese).
- 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 X L, Zhang P Q, Chen L J, et al, 2008. Causality analysis of autumn rainfall anomalies in China in 2007[J]. Meteor Mon, 34(4): 86-94(in Chinese).
- 蒋竹将, 马振峰, 刘佳, 等, 2014. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J]. 大气科学, 38(1): 32-44. Jiang Z J, Ma Z F, Liu J, et al, 2014. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in western China[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 32-44(in Chinese).
- 李栋梁, 何金海, 汤绪, 等, 2007. 青藏高原地面加热场强度与 ENSO 循环的关系[J]. 高原气象, 26(1): 39-46. Li D L, He J H, Tang X, et al, 2007. The relationship between the intensity of surface heating fields over the Qinghai-Xizang Plateau and ENSO cycle[J]. Plateau Meteor, 26(1): 39-46(in Chinese).
- 李明刚, 管兆勇, 梅士龙, 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和 Rossby 波活动的联系[J]. 大气科学, 40(6): 1199-1214. Li M G, Guan Z Y, Mei S L, 2016. Interannual and interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities[J]. Chin J Atmos Sci, 40(6): 1199-1214(in Chinese).
- 李莹, 李维京, 艾婉秀, 等, 2012. 2011 年华西秋雨特征及其成因分析[J]. 气象科技进展, 2(3): 27-33. Li Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Analysis of autumn rainfall characteristics and its causes in West China in 2011[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(3): 27-33(in Chinese).
- 李跃清, 1994. 四川盆地秋雨异常的热力分析[J]. 四川气象, (1): 8-9, 29. Li Y Q, 1994. The thermal analysis of autumn rain anomalies in Sichuan Basin[J]. Plateau Moun Meteor Res, (1): 8-9, 29(in Chinese).
- 梁健洪, 1989. 华西秋雨的时空分布[J]. 地理科学, 9(1): 51-59. Liang J H, 1989. The regional and seasonal distribution of autumn rain in West China[J]. Sci Geogr Sin, 9(1): 51-59(in Chinese).
- 刘佳, 马振峰, 杨淑群, 等, 2015. 印度洋偶极子和华西秋雨的关系[J]. 高原气象, 34(4): 950-962. Liu J, Ma Z F, Yang S Q, et al, 2015. Relationship between Indian Ocean dipole and autumn rainfall in West China[J]. Plateau Meteor, 34(4): 950-962(in Chinese).
- 柳艳菊, 孙冷, 孙丞虎, 等, 2012. 2011 年秋季华西秋雨异常及成因分析[J]. 气象, 38(4): 456-463. Liu Y J, Sun L, Sun C H, et al, 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its possible mechanism[J]. Meteor Mon, 38(4): 456-463(in Chinese).
- 罗霄, 李栋梁, 王慧, 2013. 华西秋雨演变的新特征及其对大气环流的响应[J]. 高原气象, 32(4): 1019-1031. Luo X, Li D L, Wang H, 2013. New evolution features of autumn rainfall in West China and its responses to atmospheric circulation[J]. Plateau Meteor, 32(4): 1019-1031(in Chinese).
- 潘婕, 布和朝鲁, 纪立人, 等, 2008. 夏季欧亚中高纬环流持续异常事件的 Rossby 波传播特征[J]. 大气科学, 32(3): 615-628. Pan J, Buhe C, Ji L R, et al, 2008. Characteristics of Rossby wave propagation associated with the summertime persistent anomaly events of mid- and high-latitude Eurasia[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3): 615-628(in Chinese).
- 乔少博, 沈柏竹, 王晓娟, 等, 2014. 欧亚北部 2004 年以来频繁冷冬的特征分析及机理初探[J]. 气象学报, 72(6): 1143-1154. Qiao S B, Shen B Z, Wang X J, et al, 2014. Feature analysis and preliminary causes study of the frequent cooling winter in northern Eurasia since 2004[J]. Acta Meteor Sin, 72(6): 1143-1154(in Chinese).
- 乔少博, 张志森, 王晓娟, 等, 2015. 晚秋与后冬间欧亚遥相关型波列反相现象探究[J]. 气象学报, 73(4): 711-724. Qiao S B, Zhang Z S, Wang X J, et al, 2015. An investigation into the phase reversal of EU teleconnections from late autumn to the late winter[J]. Acta Meteor Sin, 73(4): 711-724(in Chinese).
- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等, 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中期演变过程的影响[J]. 大气科学, 33(5): 1087-1100. Shi N, Buhe C, Ji L R, et al, 2009. Impacts of

- mid- and high-latitude Rossby wave activities on the medium-range evolution of East Asia/Pacific events during the mid- and late summer[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(5): 1087-1100(in Chinese).
- 孙昭萱, 杨小波, 马振峰, 2013. 近 50 年西南地区秋雨监测指标的建立及成因分析[J]. *气象科技*, 41(5): 883-888. Sun Z X, Yang X B, Ma Z F, 2013. Monitoring index and causes of autumn rains over Southwest China in recent 50 years[J]. *Meteor Sci Technol*, 41(5): 883-888(in Chinese).
- 唐红玉, 吴遥, 董新宇, 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).
- 陶诗言, 卫捷, 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. *应用气象学报*, 17(5): 513-525. Tao S Y, Wei J, 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer[J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(5): 513-525(in Chinese).
- 王春学, 马振峰, 邵鹏程, 等, 2015a. 我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子[J]. *干旱区研究*, 32(6): 1113-1121. Wang C X, Ma Z F, Shao P C, et al, 2015a. Climate variation of Huaxi autumn rain and the impact factors influencing it[J]. *Arid Zone Res*, 32(6): 1113-1121(in Chinese).
- 王春学, 马振峰, 王佳津, 等, 2015b. 华西秋雨准 4 年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J]. *大气科学*, 39(3): 643-652. Wang C X, Ma Z F, Wang J J, et al, 2015b. The characteristics of Huaxi autumn rain and its relationship with sea surface temperatures over the equatorial Pacific[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(3): 643-652(in Chinese).
- 王春学, 马振峰, 张顺谦, 等, 2014. 华西秋雨逐日监测指数的建立及其分析[J]. *气象*, 40(8): 957-964. Wang C X, Ma Z F, Zhang S Q, et al, 2014. Establishment and analysis of the daily monitoring index for Huaxi autumn rain[J]. *Meteor Mon*, 40(8): 957-964(in Chinese).
- 王文, 许金萍, 蔡晓军, 等, 2017. 2013 年夏季长江中下游地区高温干旱的大气环流特征及成因分析[J]. *高原气象*, 36(6): 1595-1607. Wang W, Xu J P, Cai X J, et al, 2017. Analysis of atmospheric circulation characteristics and mechanism of heat wave and drought in summer of 2013 over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin[J]. *Plateau Meteor*, 36(6): 1595-1607(in Chinese).
- 薛春芳, 董文杰, 李青, 等, 2012. 近 50 年渭河流域秋雨的特征与成因分析[J]. *高原气象*, 31(2): 409-417. Xue C F, Dong W J, Li Q, et al, 2012. Climate characteristic and formative cause of autumn rain in Weihe River Basin in recent 50 years[J]. *Plateau Meteor*, 31(2): 409-417(in Chinese).
- 张庆云, 宣守丽, 孙淑清, 2018. 夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环流特征及前兆信号[J]. *大气科学*, 42(4): 935-950. Zhang Q Y, Xuan S L, Sun S Q, 2018. Anomalous circulation characteristics of intraseasonal variation of East Asian subtropical westerly jet in summer and precursory signals[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4): 935-950(in Chinese).
- 赵佳玉, 马振峰, 范广洲, 2016. 热带大气季节内振荡对华西秋雨的影响[J]. *高原气象*, 35(6): 1487-1497. Zhao J Y, Ma Z F, Fan G Z, 2016. Impact of the Madden-Julian oscillation on autumn rainfall in West China[J]. *Plateau Meteor*, 35(6): 1487-1497(in Chinese).
- 赵俊虎, 王永光, 2019. 2018 年秋季我国气候异常及成因分析[J]. *气象*, 45(4): 565-576. Zhao J H, Wang Y G, 2019. Features and possible causes of the climatic anomaly in China in autumn 2018[J]. *Meteor Mon*, 45(4): 565-576(in Chinese).
- 郑然, 刘嘉慧敏, 马振峰, 2018. 夏季西太平洋暖池热含量对华西秋雨的影响及可能的物理机制[J]. *气象学报*, 76(5): 714-725. Zheng R, Liu J H M, Ma Z F, 2018. Impacts of the summertime warm pool in the West Pacific on Huaxi autumn rain and its possible physical mechanism[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(5): 714-725(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).
- 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 C Y, Li Y Q, Li W, et al, 2006. Climatological characteristics of water vapor transport over East Asian and water vapor source in autumn[J]. *J Trop Meteor*, 22(4): 380-385(in Chinese).
- 宗海锋, 2017. 两个典型 ENSO 季节演变模态及其与我国东部降水的联系[J]. *大气科学*, 41(6): 1264-1283. Zong H F, 2017. Two typical ENSO seasonal evolution modes and their relations with rainfall over eastern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6): 1264-1283(in Chinese).
- Gambo K, Li L, Li W J, 1987. Numerical simulation of Eurasian teleconnection pattern in atmospheric circulation during the Northern Hemisphere winter[J]. *Adv Atmos Sci*, 4(4): 385-394.
- Qiao S B, Feng G L, 2016. Impact of the December North Atlantic oscillation on the following February East Asian trough[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(17): 10074-10088.
- Takaya K, Nakamura H, 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow[J]. *Geophys Res Lett*, 24(23): 2985-2988.
- Takaya K, Nakamura H, 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J]. *J Atmos Sci*, 58(6): 608-627.
- 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.