

近40年四川地区夏季降水时空分布特征分析

薛苏桓¹, 李晓婧²

(1. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307; 2. 中国民用航空飞行学院 航空气象学院, 四川 广汉 618307)

摘要:基于1981—2020年四川地区CN05格点化观测数据集中的逐月降水数据,利用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)、旋转正交函数(rotated empirical orthogonal function, REOF)、趋势分析法、Mann-Kendall突变检验法(曼-肯德尔法)及Morlet小波分析法等方法,研究四川地区夏季降水的整体变化趋势、空间分布特征及时间变化规律。结果表明,近40年来四川地区夏季降水总体变化特征呈减少趋势,整体上呈南多北少的特点,在1982年左右发生突变,并且存在20年左右尺度的长周期变化和4~6年、8~12年两个尺度的短周期变化。

关键词:四川地区;夏季降水;时空分布

中图分类号:P426.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)22-0246-07

近年来,在全球气候变暖的大背景下,国内正在面临着诸多的气候和环境问题,越来越多的公众及科学家开始关注气候变化这一重要问题。降水是地球气候系统中最为重要的水文过程之一,对自然环境和人类社会具有重大影响。随着全球气候变化的加剧,对降水时空分布的深入研究同时成为气象学和水资源管理领域的关注重点。理解降水的时空变化特征对于预测极端天气事件、合理规划水资源利用及应对气候变化的挑战至关重要。

四川地区作为中国西南地区的重要组成部分,其降水时空变化特征对于该地区的水资源管理、农业生产和生态环境保护具有重要意义。随着全球气候变化的不断发展,四川地区的降水格局可能发生了显著的变化,这对于地方经济社会的可持续发展带来了新的挑战。因此,深入研究四川地区降水的时空变化特征,对于了解其气候系统的响应和适应策略具有重要的科学价值。四川地区位于中国西南地区,地理位置优越,地形复杂多样,以盆地、高山和丘陵为主要地貌类型。这种复杂地形的存在给降水的时空分布带来了显著影响。过去几十年来,许多研究已经揭示了降水时空分布的复杂性和多样性。郑然等^[1]利用四川盆地站点资料对盆地夏季降水年际变化进行主模态分析,发现四川盆地存在两类优势空间模态,分别为全区一致型和东西

反向型。邹用昌等^[2]对全国极端降水事件频次及降水量的统计结果表明我国大部分地区极端降水量在降水总量的趋势变化中占主导地位,四川盆地不仅为极端降水频次极大值区,且其极端降水频次呈上升趋势。薛雨婷等^[3]采用EOF分析等方法分析了近几十年西南地区夏季不同等级降水的时空变化特征,发现西南地区夏季降水量最多,西南地区夏季总降水量变化主要表现为西藏、四川、重庆降水量增加,云南、贵州趋势相对平缓,其中川西、川东和渝北增加明显。陈超等^[4]通过统计四川盆地近50年来的气温、降水变化趋势,了解到四川盆地的增暖趋势相较于全球有滞后性,同时该地区降水总量呈现减少趋势。周长艳等^[5]用气象常规观测资料分析四川省近50年来的降水量变化,发现四川盆地西部及中部降水量呈现减少趋势,盆地东部降水量增加。白莹莹等^[6]利用美国国家环境预报中心与美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)再分析资料对四川盆地不同区域降水变化特征的研究结果显示,四川盆地西部降水减少,东部降水变化趋势不明显;曾维亮和向卫国^[7]利用降水集中指数探究四川盆地的降水集中程度,结果表明,50年来该地区降水呈现不明显减少趋势,四川盆地西部降水较东部降水更

收稿日期:2023-08-14

基金项目:民航飞行技术与飞行安全重点实验室自主研究项目(FZ2020ZZ05)。

作者简介:薛苏桓(1999—),男,四川苍溪人,中国民用航空飞行学院空中交通管理学院,硕士研究生,研究方向为航空交通运输、航空气象;通信作者李晓婧(1982—),女,四川乐山人,中国民用航空飞行学院航空气象学院,副教授,硕士研究生导师,研究方向为航空气象。

集中。这些研究表明,利用不同分析资料,采用不同分析方法,得到的研究结论略有差异。刘子堂等^[8]对四川盆地近 50 年极端降水事件时空变化特征进行分析,发现四川盆地降水强度及频率呈东多西少的分布特征。但可以肯定的是,四川盆地降水具有区域性差异,且盆地东部与西部降水呈反相位变化,这一特殊现象还有待更多针对性的探讨。

本文在以往的研究基础上综合运用 EOF 方法、REOF 方法、趋势分析法、M-K 突变检验及 Morlet 小波分析法等方法分析研究四川地区近 40 年夏季降水的时空分布特征。研究结果将为四川地区的气候适应策略和水资源管理提供重要的科学依据,同时对于更好地理解全球气候变化对于区域降水的影响也具有一定的参考价值。

1 资料选取

1.1 数据来源

本文所使用的数据为中国科学院气候变化研究中心的 CN05 格点化观测数据集中的逐月降水数据,该数据是基于 2 400 多个中国地面气象电台的观测资料通过插值建立起来的一套 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 经纬度分辨率的逐月格点化数据集^[9],所选取的时间段为 1981—2020 年夏季(6—8 月)。

1.2 研究方法

采用 EOF、REOF、趋势分析法、M-K 突变检验法分析四川地区近 40 年降水序列的长期变化趋势及突变情况,采用 Morlet 小波分析法对近 40 年四川地区降水序列进行周期分析。

其中,EOF 方法是分析矩阵数据结构特征,并提取主要数据特征量的一种方法;REOF 可以较好地反映不同地域的变化和相关分布状况,揭示主要的变化模态;Mann-Kendall 突变检验法通常用于趋势的显著性检验,因而被广泛应用于降水趋势检验研究;小波分析是一种分析信号时间尺度的多分辨率分析方法,可以有效分析径流和气候变化过程的周期性。

2 年际变化

为分析四川地区近 40 年夏季降水的变化趋势,计算得到 1981—2020 年四川地区夏季降水量距平值,如图 1 所示。结果显示,近 40 年四川地区夏季降水量年际变化较明显,且上下波动范围较大。拟合得到的降水线性分布线为: $y = -0.126x + 252.52$,年际变化率为 -0.126 mm/年 ,该结果表明,近 40 年来四川地区夏季降水量整体呈减少趋势且平均每年减少 1.3 mm 。大气中水汽饱和度与含量与气温呈正相关,在全球变暖背景下,水汽饱和

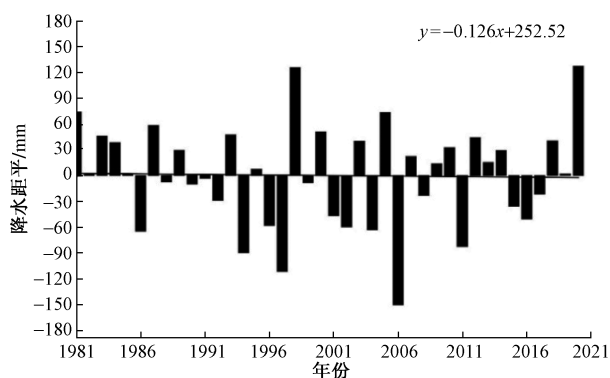


图 1 1981—2020 年四川地区夏季降水量距平值

程度加大,大气可降水量增加,导致近年来区域降水变化较大。位于趋势线上方的属于夏季降水量偏多的年份,分别为 1981 年、1983 年、1984 年、1987 年、1989 年、1993 年、1995 年、1998 年、2000 年、2003 年、2005 年、2007 年、2009 年、2010 年、2012 年、2013 年、2014 年、2018 年、2019 年、2020 年,累积降水量最高超出平均值 123 mm ,出现于 1998 年;位于趋势线下方的则是夏季降水量偏少的年份,分别为 1982 年、1985 年、1986 年、1988 年、1990 年、1991 年、1992 年、1994 年、1996 年、1997 年、1999 年、2001 年、2002 年、2004 年、2006 年、2008 年、2011 年、2015 年、2016 年、2017 年,累积降水量最低低于平均降水量 152 mm ,出现于 2006 年。在 20 个多雨年中,比较集中地出现在 20 世纪 80 年代和 90 年代后期;在 20 个少雨年中,集中出现在 20 世纪 90 年代中期及 21 世纪初期。综上所述,四川地区在 20 世纪 80 年代涝情较为严重,而在 20 世纪 90 年代中期及 21 世纪初期旱情较为严重。

通过 CN05 降水数据绘制出四川地区近 40 年夏季降水量空间分布如图 2 所示,从而进一步分析四川地区夏季降水的空间分布特征。结果显示,四川地区夏季降水空间分布不太均匀,整体上呈南多北少的特点,夏季降水量由北向南逐渐递增。由于四川地区地形特殊复杂,具有四川盆地及川西高原等地形架构,四川地区呈现多雨区和少雨区交替分布的特征,大部分地区夏季平均降水量在 500 mm 左右,但是存在一个夏季降水高值区,位于四川地区中部一带,其夏季平均降水量可达到 800 mm 及以上。高值区的形成离不开四川地区的特殊地形地貌影响。受西南涡和高原季风影响的川西高原一带的降水量偏少^[10],在四川西部的石渠及九寨沟一带为夏季降水低值区,降水量仅在 300 mm 以内,当西南地区夏季降水量偏少时该地区的旱情较为突出。

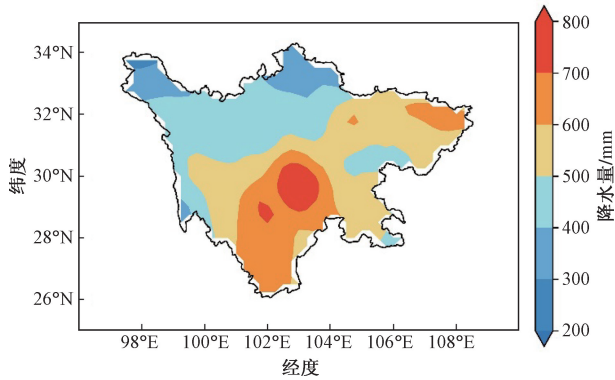


图2 1981—2020年四川地区夏季平均降水量空间分布

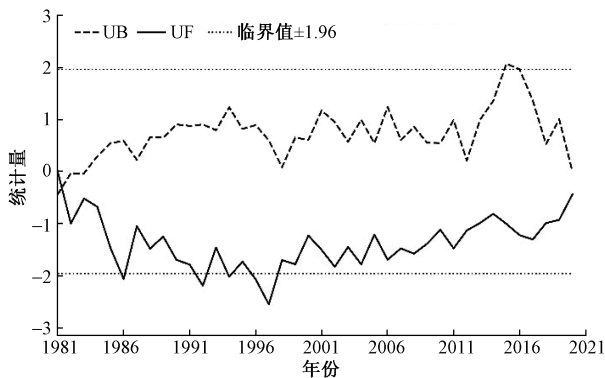


图3 1981—2020年四川地区夏季降水 M-K 统计量曲线

利用 Mann-Kendall 突变检验法对四川地区夏季降水进行突变检验,如图 3 所示。该曲线通过了 0.05 显著性检验,显著性水平 $\alpha=0.05$,对应临界值为 ± 1.96 。由 UF 曲线可知,1981—2021 年,四川地区夏季降水呈不明显波动式下降趋势,1996 年左右降水的下降趋势达到了 0.05 显著性水平,说明 1996 年降水量下降趋势明显。UF 和 UB 的交点位置出现在 0.05 显著性水平临界线之间且仅此一个,出现在 1982 年前后,故四川地区夏季降水在 1982 年发生突变。

采用小波分析法对 1981—2020 年四川地区夏季降水进行周期分析,得到小波系数实部等值线图如图 4 所示,小波系数为正时则表示多雨时间,反之,小波系数为负时则表示少雨时间。由该实部等值线图中可知,四川地区夏季降水量存在 3 个明显的时间特征尺度,包含了 4~6 年、8~12 年、15~24 年尺度的周期变化,在 4~6 年的时间尺度上,1998—2011 年的降水量周期特征比较明显,此阶段经历了 3 个干湿转变期;在 8~12 年的时间尺度上,1981—2018 年的降水量周期特征都非常的明显,该阶段经历了 4 个干湿周期的转变;在 15~24 年的时间尺度上,1981—2015 年的降水量周期特征同样明显,经

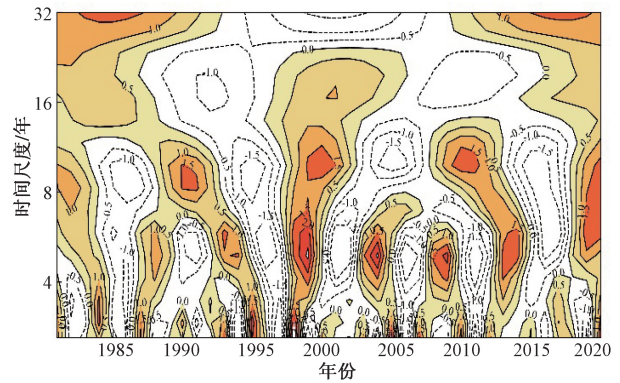


图4 1981—2020年四川地区夏季降水小波系数实部等值线图

历了 2 个干湿转变。四川地区 1981—1988 年夏季降水量较充沛,1989—1997 年为降水偏少的时期,1998—2006 年为降水比较充沛的时期,2007—2015 年为降水偏少的时期。

3 时空分布特征分析

3.1 四川地区夏季降水 EOF 分析

为了更好地研究分析四川地区不同区域夏季降水场的时空分布特征,采用经验正交函数(EOF)与旋转经验正交函数(REOF)对四川地区 1981—2020 年夏季降水数据进行时空分解并对所得到的空间模态进行显著性检验,最终选取显著分离且方差贡献较大的 3 个特征向量场作为四川地区夏季降水的模态进行分析研究,EOF 结果如表 1 所示。表 1 中为 EOF 分析中前 3 个模态的方差贡献率及累积方差贡献率,得到经 EOF 显著分离的前 3 个特征根的累积方差贡献率为 63.87%,因此前 3 个特征向量可以较好地模拟出四川地区近 40 年来夏季降水场的 3 种空间分布类型,即全区一致干(湿)型、中间偏北干(湿)其余地区湿(干)型、东西反向型。

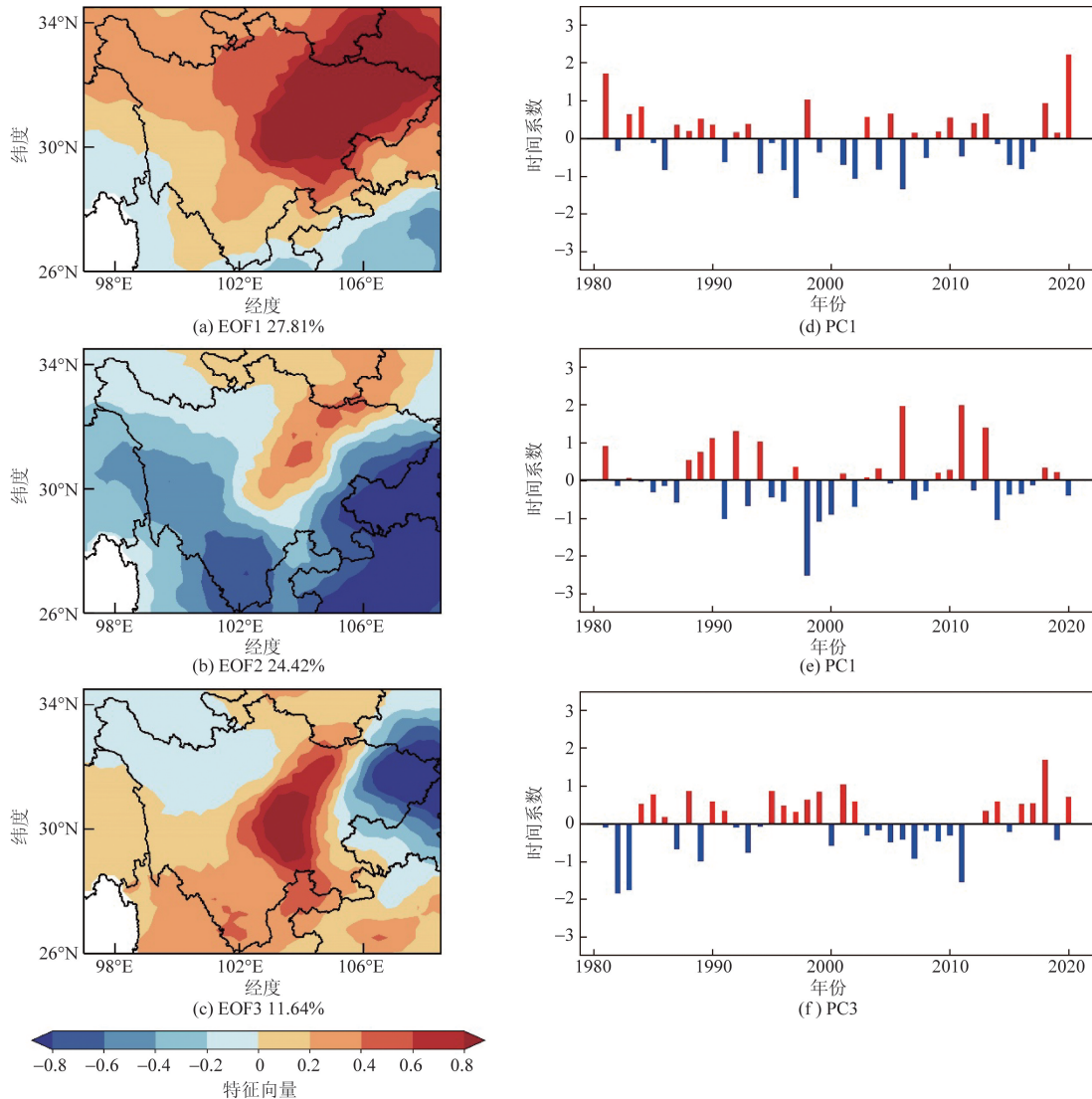
对四川地区近 40 年夏季降水数据进行 EOF 分析并通过了 North 检验,分解后得到四川地区夏季降水场三种模态的时空分布,如图 5 所示。EOF 空间模态反映了四川地区夏季降水的空间分布特征,EOF 时间系数则反映了四川地区夏季降水的时间变化规律。时间系数的正负号对应特征向量的方向,时间系数为正值时表示与空间模态变化方向一致,为负值则相反,且系数绝对值大小与模态典型程度成正比,绝对值越大表明该时刻降水空间分布类型越典型。

表 1 1981—2020 年四川地区夏季降水 EOF 分析
前 3 个特征向量方差贡献

模态	1	2	3
方差贡献率/%	27.81	24.42	11.64
累计方差贡献率/%	27.81	52.23	63.87

由图 5(a)可知,第一载荷向量场方差贡献率占总向量场的 27.81%,它也是四川地区 1981—2020 年夏季降水的主模态,反映四川地区夏季降水最主要的典型场。第一模态描述的四川地区降水空间分布整体呈负值,表明第一模态下西南地区夏季降水整体的空间变化趋势具有高度一致性,即表现为当年夏季全区一致湿或全区一致干,为第一分布型。其中负值高值区位于四川地区东北部,该区域对降水的敏感程度较高。结合图 5(d)降水时间分布序列来看,由于第一空间模态均为负,对应的时间系数为负的年份为夏涝年,其中 2020 年的时间系数最小,说明该年夏季降水量异常偏多,与第一模态吻合程度较高;对应的时间系数为正的年份则为夏旱年,其中 2006 年时间系数最大,说明该年夏季降水量异常偏少。由图 5(b)可知,第二特征向量方

差贡献率为 24.42%,分布格局大致以若尔盖北部-雅安-资阳东部-巴中北部为界,分界线呈“V”字形,界内为负值区,界外为正值区,负值中心位于成都、德阳及广元等地,正值中心位于攀枝花一带,为第二雨型。第二模态反映四川地区夏季降水存在反相位特征,即表现为中间偏北地区降雨量偏多较湿润时,其余地区降水量偏少较干燥;反之,中间偏北地区较干燥时,其余地区较湿润。由图 5(e)分析降水分布序列可知,超过一半的年份时间系数为正值,表现为中间偏北干其余地区湿型,降水表现为由中间向其他地区逐渐增加,典型年份为 1998 年;时间系数表现为负值的年份则表现为中间偏北湿其他地区干型,典型年份为 2006 年、2011 年。1998 年时间系数最大,此时“V”形界内降水偏少,其他地区较为湿润,此时与第二模态吻合程度较高。



图(a)~图(c)为空间分布特征,图(d)~图(f)为时间分布特征

图 5 四川地区 1981—2020 年夏季降水 EOF 分析

图5(c)中第三特征向量方差贡献率为11.64%,其空间分布特征表现以阿坝以及甘孜北部和达州、巴中、广安、南充地区为正值区,其余地区为负值区。正值中心位于达州北部以及巴中东部等地,负值中心位于成都、眉山一带,表现为第三雨型。第三雨型也反映四川地区夏季降水的反相位特征。

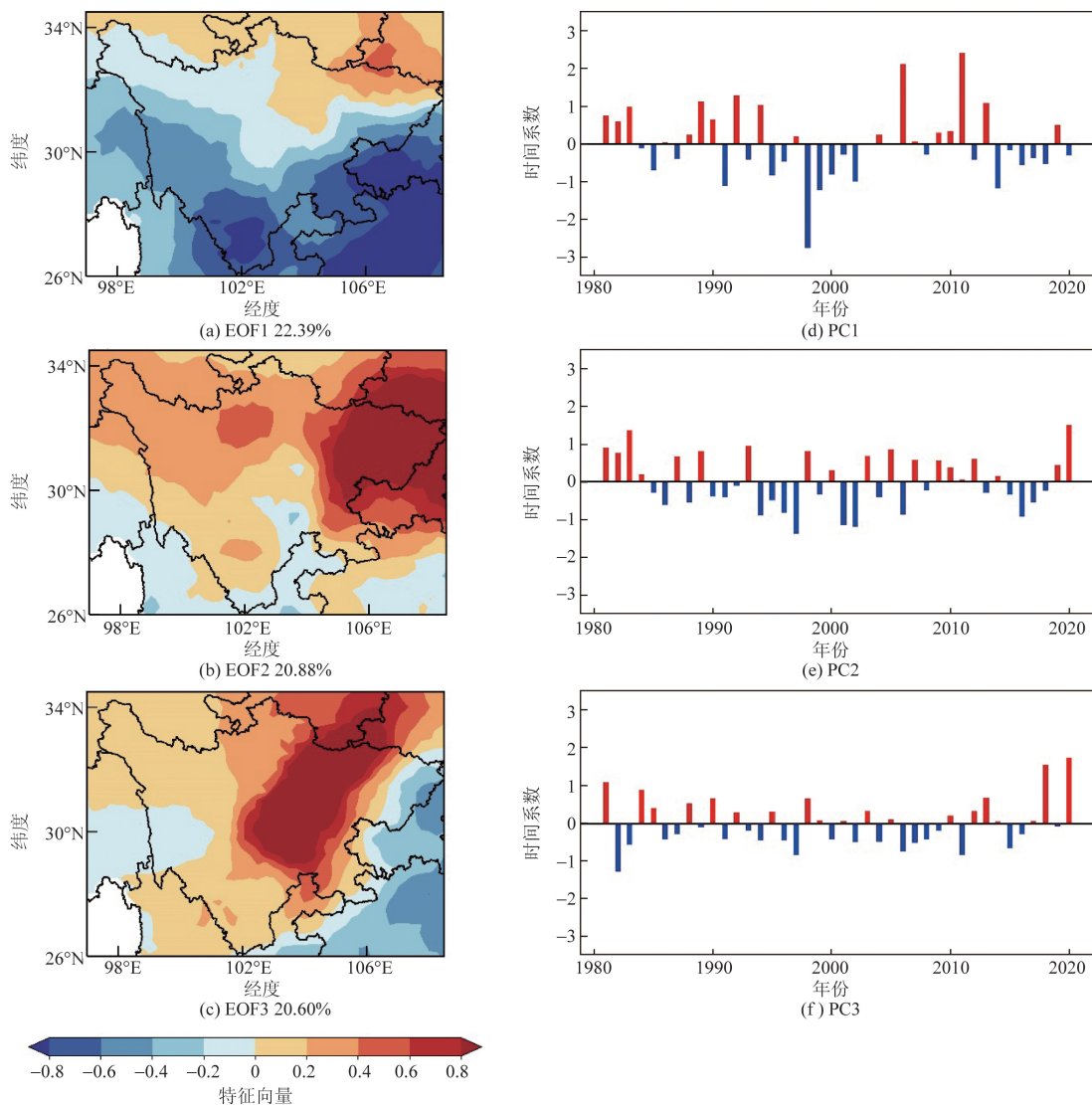
由图5(f)分析第三模态的时间分布特征可得,1984—2002年以及2013—2020年基本为负值,表现为南北湿东西干,典型年份为2018年;其余年份基本为正值,表现为南北干东西湿,典型年份为1982年。其中1982年、1983年时间系数较大,此时阿坝以及甘孜北部和达州、巴中、广安、南充地区降水量丰富,其他地区降水量偏少,与第三模态吻合度较高。

3.2 四川地区夏季降水 REOF 分析

采用旋转经验正交函数(EOF)对四川地区1981—2020年夏季降水数据进行时空分解并对得到的空间模态进行显著性检验,最终选取显著分离且方差贡献较大的3个特征向量场作为四川地区夏季降水的模态进行分析研究,EOF结果如表2所示。表2中为 EOF 分析中前3个模态的方差贡献率和累积方差贡献率,得到经 EOF 显著分离的前3个特征根的累积方差贡献率达63.87%。

与经验正交函数(EOF)的空间分布相比较,旋转经验正交函数(EOF)分布更加均匀,并且能够表现出更细微的地理分区。

对四川地区1981—2020年夏季降水进行 EOF 分型后得到前3个模态如图6所示, EOF 空间模态反映四川地区夏季降水的空间分布特征,



图(a)~图(c)为空间分布特征,图(d)~图(f)为时间分布特征

图6 四川地区1981—2020年夏季降水 REOF 分析

表 2 1981—2020 年四川地区夏季降水 REOF 分析
前 3 个特征向量方差贡献

模态	1	2	3
方差贡献率/%	22.39	20.88	20.60
累计方差贡献率/%	22.39	43.27	63.87

REOF 时间系数则反映四川地区夏季降水的时间变化规律。

如图 6(a)所示,第一模态空间分布表现为高值区集中在四川地区东北部,范围很小,高值中心在广元一带;图 6(d)为四川地区夏季降水的时间分布特征,时间系数对应空间模态的表现能力,时间系数为正值时,其对应年份的降水量接近该模态正向分布,反之则接近该模态的反向分布。时间系数越大时,降水数据与对应的空间模态相关性越好,反之则越差。由图 6(d)可知,第一模态时间系数序列负值偏多,对应第一模态的反向分布,即四川地区东北部降水偏少,其他地区降水偏多。

由图 6(b)可知,第二模态的空间分布特征表现为高值区集中在四川东部,高值中心则位于广元东部、巴中、达州、南充以及广安等地,覆盖面积较大。图 6(e)是该模态下对应的时间序列,可以看出时间系数序列呈交替式分布,当时间系数为正值时,对应第二模态的正向分布,即四川地区乐山、凉山南部和攀枝花一带降水偏少,其余地方降水偏多;时间系数为负值时,对应第二模态的反向分布,即四川地区乐山、凉山南部和攀枝花一带降水偏多,其余地方降水偏少。

图 6(c)为第三模态的空间分布特征,其高值区集中与四川地区整个中部及北部,高值中心位于广元、绵阳、德阳、成都、遂宁、资阳、眉山、乐山、自贡等地,覆盖面积非常之广,几乎占据了整个四川地区的一半。该模态下对应的时间系数序列如图 6(f)所示,1981—2020 年四川地区夏季降水呈年际震荡,总体呈现为两年降水偏多(偏少)后接着两年降水偏少(偏多)的形势。

4 结论

通过对四川地区 1981—2020 年夏季降水的时空分布特征研究,可有效发现四川地区夏季降水的潜在规律,进而推断出未来的降水的变化趋势,做到对自然灾害的有效防护,为四川地区的水资源管理及防灾减灾工作提供一定的理论依据。

1)近 40 年四川地区夏季(6—8 月)降水量总体变化特征呈减少趋势,整体上呈南多北少的特点,

夏季降水量由北向南逐渐递增。M-K 突变检验显示四川地区夏季降水在 1982 年左右发生突变。小波分析发现四川地区夏季(6—8 月)降水存在 20 年左右尺度的长周期变化和 4~6 年、8~12 年两个尺度的短周期变化。

2)从 EOF 分析结果可得,四川地区夏季(6—8 月)降水 EOF 分析主要有三种类型,即全区一致干(湿)型、中间偏北干(湿)其余地区湿(干)型、东西反向型,其中全区一致型为四川地区夏季降水场的主模态。主模态下的夏季降水呈年际振荡,其中 2020 年是主模态下的典型夏涝年,2006 年是主模态下的典型夏旱年。

3)从 REOF 进一步分析结果可得,存在三个敏感变化区,可分为东北区、东区、中北区,第一模态时间系数年际变化较明显,第二模态和第三模态时间系数年际变化不显著,主模态显示四川地区东北部降水偏少,其他地区降水偏多为主要分布型。

本文着重分析了近 40 年四川地区夏季(6—8 月)降水的时空分布特征,但对影响四川地区降水时空分布特征的因子分析不足,在以后的研究中将做进一步分析探讨。

参考文献

- [1] 郑然,陈丽娟,李维京,等.四川盆地夏季降水年际变化的主模态分析[J].大气科学,2022,46(6):1454-1468.
- [2] 邹用昌,杨修群,孙旭光,等.我国极端降水过程频数时空变化的季节差异[J].南京大学学报:自然科学版,2009,45(1):98-109.
- [3] 薛雨婷,李谢辉,王磊,等.1976—2017 年西南地区夏季不同等级降水时空变化特征[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(2):137-145.
- [4] 陈超,庞艳梅,潘学标.近半个世纪以来四川盆地气温和降水的变化特征[J].中国农业气象,2010,31:27-31.
- [5] 周长艳,岑思弦,李跃清,等.四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J].地理学报,2011(5):619-630.
- [6] 白莹莹,张焱,高阳华,等.四川盆地降水变化的区域差异[J].地理科学,2011,31(4):478-484.
- [7] 曾维亮,向卫国.四川盆地降水集中指数年代际突变分析[J].成都信息工程学院学报,2015,30(6):616-620.
- [8] 刘子堂,李谢辉,杨静坤.四川盆地极端降水事件时空变化特征及未来趋势分析[J].成都信息工程大学学报,2022,37(4):456-463.
- [9] 吴佳,高学杰.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比[J].地球物理学报,2013(4):1102-1111.
- [10] 栗运,毛文书,师春香,等.西南地区近 60 年夏季降水的区域特征[J].成都信息工程大学学报,2020,35(5):560-565.

Analysis of Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Summer Precipitation in Sichuan in the Past 40 Years

XUE Suhuan¹, LI Xiaojing²

(1. Air Traffic Management College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China;

2. School of Aeronautical Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: Based on the monthly precipitation data of CN05 grid observation data set in Sichuan from 1981 to 2020, the overall variation trend, spatial distribution characteristics and temporal variation rule of summer precipitation in Sichuan were studied by means of EOF, REOF, trend analysis, M-K mutation test and Morlet wavelet analysis. The results are as follows. In the past 40 years, the overall variation characteristics of summer precipitation in Sichuan showed a decreasing trend, and the overall characteristics are more in the south and less in the north. The abrupt change occurred around 1982, and there are long period changes at the scale of 20 years and short period changes at the scale of 4 to 6 years and 8 to 12 years.

Keywords: Sichuan area; summer precipitation; spatiotemporal distribution