

文章编号: 2096-1618(2021)04-0451-09

# 西南地区干湿演变特征及其对 ENSO 事件的响应

贾何佳, 李谢辉, 王磊, 陈子凡, 薛雨婷

(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, 四川 成都 610225)

**摘要:**针对近年来西南地区旱涝灾害频发的问题,利用西南地区 1968–2017 年 129 个气象站点逐日气象资料,采用 Mann-Kendall 检验、EOF 分析、相关和小波周期分析等方法,不仅对近 50 年西南地区干湿演变特征进行时空分析,而且讨论了干湿对 ENSO 事件的响应。结果表明,近 50 年西南地区主要呈现干旱化趋势,且具有明显的周期变化,在 20 世纪末到 21 世纪初有明显转折点;极润、重润和轻旱各季节发生频率随时间尺度增加而减小,秋冬季轻润和春冬季重旱发生频率随时间尺度增加而增加,极旱发生频率在各季节随时间尺度增加而增加;西藏西部、云南南部及贵州北部呈现干旱化,西藏东部、四川北部及云南中部呈现湿润化;各季节干湿有明显的空间差异;ENSO 事件对西南地区干湿影响具有滞后性,正影响随滞后时间由东向西移动,在滞后 3 个月时最显著。

**关键词:**应用气象;气象灾害;SPEI;EOF 分析;干湿演变特征;ENSO 事件;西南地区

**中图分类号:**P461

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.015

## 0 引言

干旱是一种长期现象,影响范围广,容易对人类社会造成严重的后果。在全球变暖趋势下,干旱已成为全球关注的问题。已有研究表明,中国目前整体上呈现干旱化趋势,且部分西南地区干旱化趋势显著<sup>[1]</sup>。干旱是影响水资源的重要因素,近年来西南地区干旱造成水资源短缺,对西南地区的生产生活和经济发展造成了严重影响,其干湿演变特征研究对西南地区的防灾减灾具有重要意义<sup>[2–3]</sup>。

目前大部分的研究主要是通过干旱指数来反应干湿程度。常用的指数有标准化降水指数 SPI(standardized precipitation index)、Palmer 干旱指数 PDSI(palmer drought severity index)、气象干旱指数 CI(composite index)和标准化降水蒸散指数 SPEI(standardized precipitation evapotranspiration index)等<sup>[4–6]</sup>。其中 SPEI 指数是应用最广泛、最理想的指数,是由 Vicente Serrano 等<sup>[7]</sup>在 SPI 指数的基础上,通过增加潜在蒸散的影响,为适应全球变暖大背景而构建的新干湿指数,同时考虑了降水与温度的影响,具有多尺度比较的特点。SPEI 指数自提出后就被国内外学者广泛应用于干湿研究,Polong 等<sup>[8]</sup>基于 SPEI 指数评估了肯尼亚塔纳河流域干湿事件的时空演变特征,并确定了其持续时间、强度和严重性。柴荣繁等<sup>[9]</sup>利用 SPEI 指数研究了中国干湿变化趋势及原因,发现由西北向东南呈现“湿–干–湿”趋势,西南流域显著变干。在进一步分析干湿形成机理时,许多研究发现 ENSO(El Niño-southern oscillation)事

件是影响干湿演变的一个重要因素,Byakatonda 等<sup>[10]</sup>利用多时间尺度上的 SPEI 指数,研究 SPEI 与 ENSO 的遥相关,发现温暖的海面温度与负的南方涛动指数相结合,对应于持续的负 SPEI 值,很可能导致干旱。Roy 等<sup>[11]</sup>研究了 ENSO 事件与印度夏季风的遥相关,发现印度东北中部的干旱年通常与 El Niño 年相吻合,而较湿润的年份与 La Niña 年相称。西南地区干旱频发,且近年来部分区域干旱的持续时间和强度在增长和加强。针对西南干旱,熊光洁等<sup>[12]</sup>分析了 3 种干旱指数在西南地区的适用性,发现 SPEI 指数适用于西南地区不同时间尺度的干旱分析,且具有较多优点。王东等<sup>[13]</sup>利用 SPEI 指数研究了西南地区干旱时空特征,发现西南地区近 53 年来呈干旱化趋势且强度逐渐增加。李军等<sup>[14]</sup>对西南地区农业区的干旱时空演变进行研究,发现西南地区农业区呈干旱化趋势。

但目前已有的研究大多都只针对干旱进行,并没有考虑在全球变暖背景下不同区域的湿润情况,对湿润各程度的变化趋势,在西南地区的分布以及湿润与 ENSO 联系的有关研究成果相对较少。因此主要基于西南地区 129 个气象站点 1968–2017 年的气象资料,利用 SPEI 指数,对西南地区 50 年来干湿情况的时空演变特征、突变、周期变化以及对 ENSO 事件的响应进行研究,以期能为西南地区旱涝灾害的防范提供科学依据。

## 1 数据资料与研究方法

### 1.1 研究区概况

从行政区划上,西南地区主要包括西藏、四川、云南、贵州和重庆 5 个省区市,位于 78°42'E ~ 110°11'E

收稿日期:2020-09-07

基金项目:科技部第二次青藏高原综合科学考察研究资助子项目(2019QZKK0105);风云三号(02 批)气象卫星地面应用系统工程资助子项目(ZQC-J19193)

和 $21^{\circ}13'N\sim36^{\circ}53'N$ 。地理上包括青藏高原东南部、四川盆地和云贵高原大部分,地势起伏大,且地貌复杂多变。气候上,西南地区受季风气候的影响,年平均气温介于 $14^{\circ}C\sim24^{\circ}C$ ,降水分布不均,年降水量在 $600\sim2,300\text{ mm}$ 。西南地区是中国主要的粮油生产基地,近年来西南地区干旱频发,给当地的经济活动与人民生活造成了巨大损失。

1.2 数据来源

如图1所示,主要选取了来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)西南地区129个气象站点的温度和降水逐日数据,资料时间跨度为1968–2017年。对其与ENSO事件响应研究的分析数据主要来自美国国家海洋和大气管理局(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/>)提供的同期南方涛动指数SOI(southern oscillation index)和来自国家气候中心《ENSO监测简报》的ENSO事件出现年份资料。

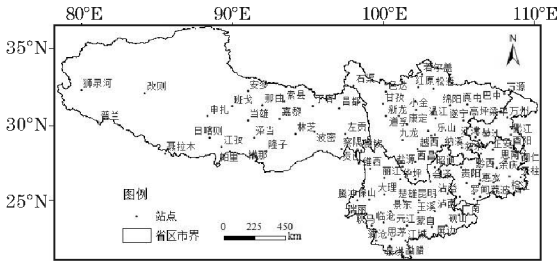


图1 西南地区及其气象站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数

计算SPEI指数有Penman\_Monteith(PM)与Thornthwaite两种方法,陈宏等<sup>[15]</sup>研究发现SPEI\_PM方法中中国南部地区对气温变化的反应较小,而刘晓冉等<sup>[16]</sup>发现西南地区近年来温度不断上升,温度对西南地区干湿影响越发重要。基于此,选用Thornthwaite方法计算SPEI指数,具体计算过程可参阅文献<sup>[17]</sup>。主要计算了西南地区129个站点1个月(SPEI1)、3个月(SPEI3)、6个月(SPEI6)、12个月(SPEI12)尺度的SPEI值。通过划分干湿等级,进行干湿演变特征分析。其中季节划分为春季(3–5月)、夏季(6–8月)、秋季(9–11月)和冬季(12–次年2月),SPEI干湿等级划分<sup>[18]</sup>如表1所示。

表1 SPEI指数干湿等级划分

等级	类型	SPEI 值
1	极润	$SPEI\geq2$
2	重润	$1.5\leq SPEI<2$
3	轻润	$1\leq SPEI<1.5$
4	正常	$-1<SPEI<1$
5	轻旱	$-1.5<SPEI\leq-1$
6	重旱	$-2<SPEI\leq-1.5$
7	极旱	$SPEI\leq-2$

1.3.2 小波分析

由于小波分析能清晰反应出SPEI值随时间序列的变化周期,并能对其未来发展趋势进行定量分析,因此利用MATLAB软件通过计算小波系数并绘制小波实部图与小波方差图,对西南地区SPEI值的变化周期及其发展情况进行分析。关于小波分析的具体计算过程可参阅文献<sup>[19]</sup>。

1.3.3 EOF分析

经验正交函数分析方法EOF(empirical orthogonal function)是分析研究区变量时空变化特征的常用办法,可最大程度地表征出整个研究区变量的变率结构。文中采用EOF分析整个西南地区SPEI1值的分布情况及其随时间变化的趋势。EOF分析的具体计算过程可参阅文献<sup>[20]</sup>。

2 结果与分析

2.1 西南地区干湿时间变化特征

2.1.1 季节变化特征

为更加直观地了解西南地区不同尺度不同季节各等级干湿的变化情况,将不同尺度每个季节3个月的SPEI平均值作为该季节的SPEI值,统计50年不同季节干湿发生频率,得到图2。

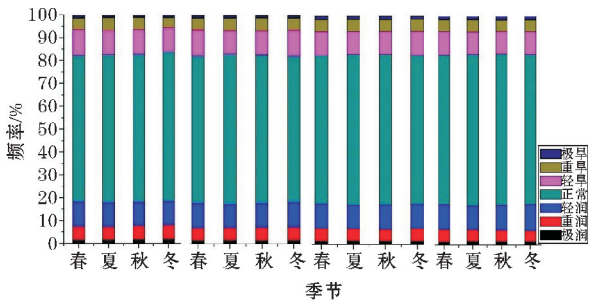


图2 不同时间尺度下西南地区各季节干湿的发生频率

由图2可知,春季SPEI极润发生频率在1、3、6月尺度保持稳定,在12月尺度有明显降低,发生频率在 $1.34\%\sim1.56\%$ ;重润发生频率随时间尺度增加而降低,发生频率在 $5.29\%\sim5.83\%$ ;轻润发生频率总体保持稳定;正常情况随时间尺度增加而增加,发生频率在 $64.12\%\sim65.26\%$ ;轻旱发生频率随时间尺度增加而减少,发生频率在 $10.36\%\sim11.44\%$ ;重旱发生频率随时间尺度增加而增加,发生频率在 $4.78\%\sim5.21\%$ ;极旱发生频率随时间尺度增加而增加,在6月尺度达到最大,发生频率在 $1.56\%\sim1.78\%$ 。

夏季SPEI极润频率1、6月尺度稳定,3月尺度达到最大,12月尺度最低,发生频率在 $1.46\%\sim1.63\%$ ;重润发生频率随时间尺度增加而降低,发生频率在 $5.14\%\sim5.72\%$ ;轻润发生频率总体保持稳定;正常情况随时间

尺度增加而增加,发生频率在64.79%~65.99%;轻旱发生频率随时间尺度增加而减少,发生频率在9.95%~10.68%;重旱发生频率在1、3、6月尺度随时间尺度增加而减小,在12月尺度有所增加,发生频率在5.14%~5.4%;极旱发生频率随时间尺度增加而增加,在6月尺度达到最大,发生频率在1.38%~1.73%。

秋季 SPEI 极润频率随时间尺度增加而减小,6月尺度大于3月尺度,频率在1.40%~1.74%;重润随时间尺度增加而减小,6月尺度小于3月尺度,频率在4.99%~5.96%;轻润随时间尺度增加而增加,频率在10.39%~10.90%;正常情况也随时间尺度增加,频率在64.40%~65.95%;轻旱随时间尺度增加而减小,频率在9.97%~10.95%;重旱发生频率随时间尺度增加

而减小,在3月尺度最大,达到5.32%;极旱频率随时间尺度增加而增加,在1.29%~1.79%。

冬季 SPEI 极润随时间尺度增加而减小,在1.36%~1.94%;重润也逐渐减小,频率在4.84%~6.02%;轻润随时间尺度增加而增加,6月尺度频率小于3月尺度;正常情况随时间尺度增加;轻旱发生频率在3月达到最大,为11.46%,随时间尺度减小;重旱随时间尺度增加而增加,6月尺度达到最大,为5.21%;极旱频率随时间尺度增加而增加,频率在1.34%~1.76%。

2.1.2 年变化特征

为进一步探讨西南地区干湿情况的年变化特征,主要选取各气象站点 SPEI12 作为年 SPEI 值进行分析,结果如图 3 所示。

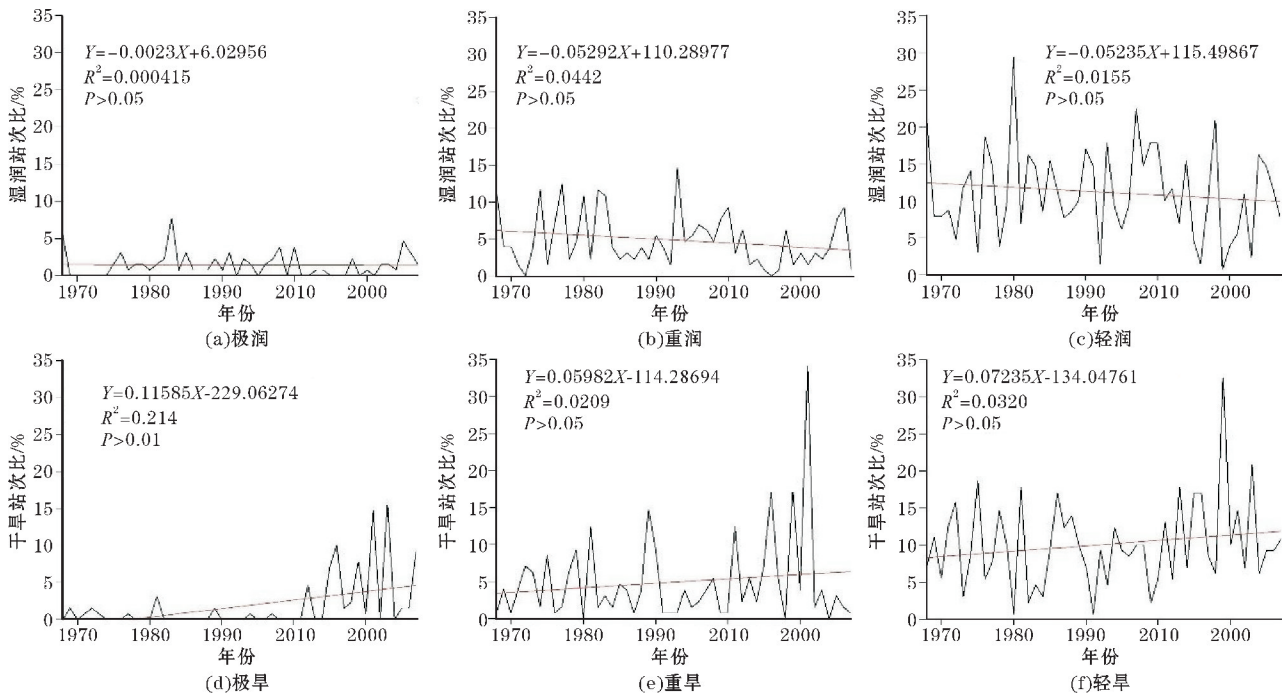


图 3 1968–2017 年西南地区各等级干湿站次比随时间的变化趋势

可以明显发现干旱各等级的站次比在近 50 年内呈现上升趋势,而湿润各等级站次比呈现下降趋势,其中极旱的站次比增加趋势最大,轻润的站次比下降趋势最大。对此显著性检验发现,只有极旱站次比上升趋势具有显著性,在0.01水平上显著相关,其余干旱和湿润站次比变化趋势均未通过0.05显著水平。表明整个西南地区在近 50 年内出现极端干旱的站点越来越多,西南地区极端干旱化趋势加重<sup>[21]</sup>,而极旱站次比显著增加的原因,一方面可能是由于极端干旱本身具有强持续性,另一方面可能是随着全球变暖干旱化的加强,更多的重度干旱转化为极端干旱。极旱站次比高值主要集中在 2000 年以后,尤其在 2010 年左右达到顶峰,查阅文献发现西南地区在 2009 年 9 月至 2010 年 3 月发生了严重的极端干旱,这与贾艳青等<sup>[22]</sup>的研究结果相一致。21 世纪初是西南地区极端干旱最为严重的时段,且达到 73% 的站点极端干旱持续时间超过 60 天。

2.1.3 突变特征

为了分析西南地区近 50 年的干湿变化情况,选取年 SPEI 值进行突变分析可得图 4~5,可以看出 1968–2017 年西南地区 SPEI 值基本呈现“下降–上升–下降”趋势,即呈现“干旱–湿润–干旱”的变化趋势。

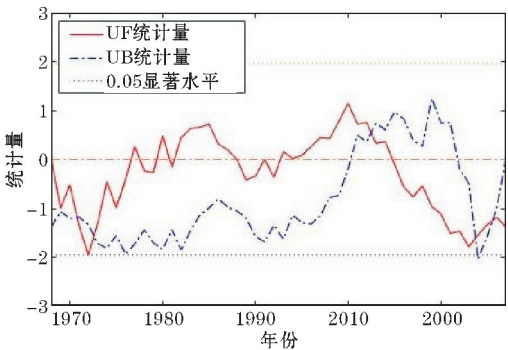


图 4 Mann-Kendall 突变检验



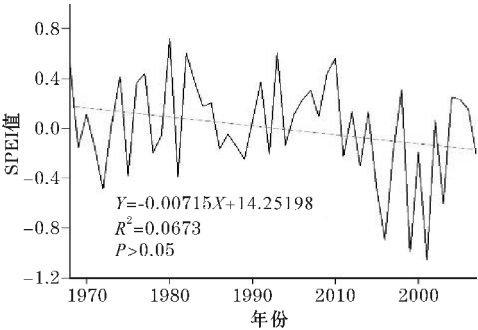
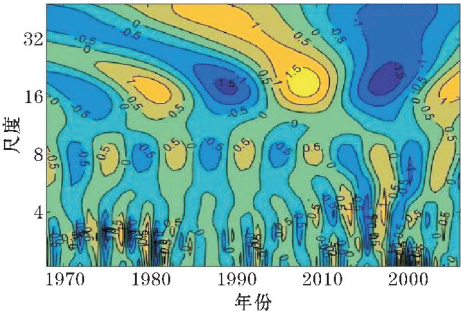
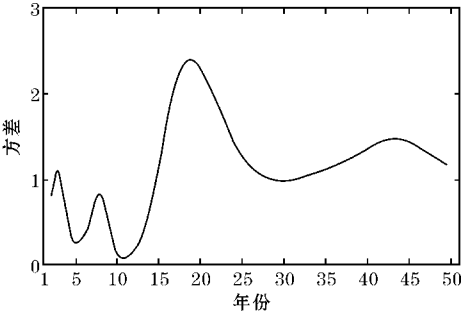


图5 1968–2017 年西南地区 SPEI 值的年变化

根据 Mann-Kendall 突变检验交点可以将近 50 年分为 3 个阶段(图 4),第 1 阶段为 1968–1973 年、第 2 阶段为 1974–2003 年、第 3 阶段为 2004–2017 年。其中,第 1 阶段均为负值,呈现干旱状态。第 2 阶段又可以细分为 3 个时期,前期 1974–1981 年主要为负值,呈现干旱状态;中期 1982–1990 年主要为正值,呈现湿润状态;后期 1991–2003 年主要为正值,呈现湿润状态。



(a)小波实部

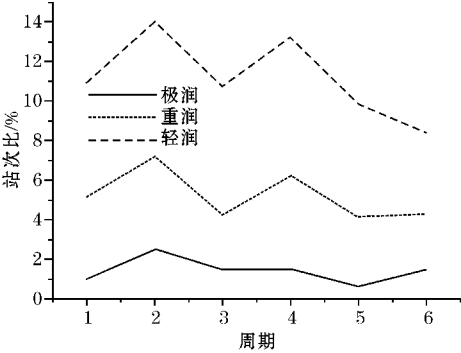


(b)方差

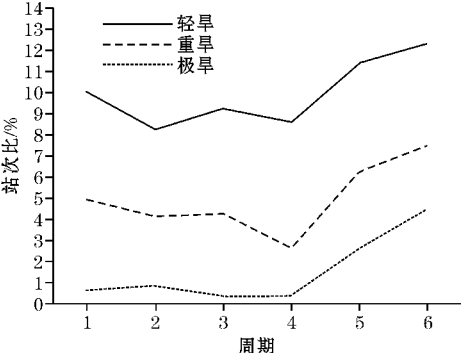
图6 1968–2017 年西南地区 SPEI 值的小波实部及方差分析

从周期来看,西南地区在近 50 年的年 SPEI 值主要存在 3 个时间尺度的变化,分别是 2~3 年,7~8 年,18~20 年。其中在 18~20 年的时间尺度上信号最强,周期性也应最强,但由于时间序列短的原因,18~20 年的周期性还需要增加时间序列进行验证。7~8 年信号也较强,SPEI 值存在近 7 次转换,说明 7~8

年的时间尺度为主要控制周期<sup>[24–25]</sup>。从 7~8 年尺度周期变化过程来看,干湿时间分布变化与图 5 的 SPEI 值变化较一致。但从 18~20 年尺度周期变化过程中可以发现,西南地区正处于干旱化周期中。为了进一步研究西南地区干湿的周期变化,对每个周期内各等级的站次比进行了统计,结果如图 7 所示。



(a)湿润



(b)干旱

图7 主周期内各等级干湿站次比变化

由图 7 可以看出,主周期内湿润站次比都呈现出“上升–下降–上升–下降–下降”的趋势,干旱站次比

都呈现出“下降–上升–下降–上升–上升”的趋势。其中轻润与轻旱变化幅度最大。6 个周期中第 4 个周期

到第 5 个周期发生转折最大,表明在 2000 年左右西南地区开始较为严重的干旱化<sup>[26]</sup>,这一结论与突变检验结果相一致。在第 2 和第 3 个周期中干旱站次比相对保持稳定。湿润最高值位于第 2 个周期内,与 1976–1984 年西南地区多雨现象相一致,后续湿润站次比持续下降。干旱站次比最高值位于第 6 个周期内,且呈上升趋势,这一结果也与 18~20 年尺度周期变化相

同,表明未来呈干旱化趋势。

2.2 西南地区干湿空间变化特征

2.2.1 各等级季节空间分布特征

为了分析西南地区不同季节各等级干湿的空间分布情况,将不同季节不同等级的干湿发生频率分别进行空间插值,结果如图 8 所示。

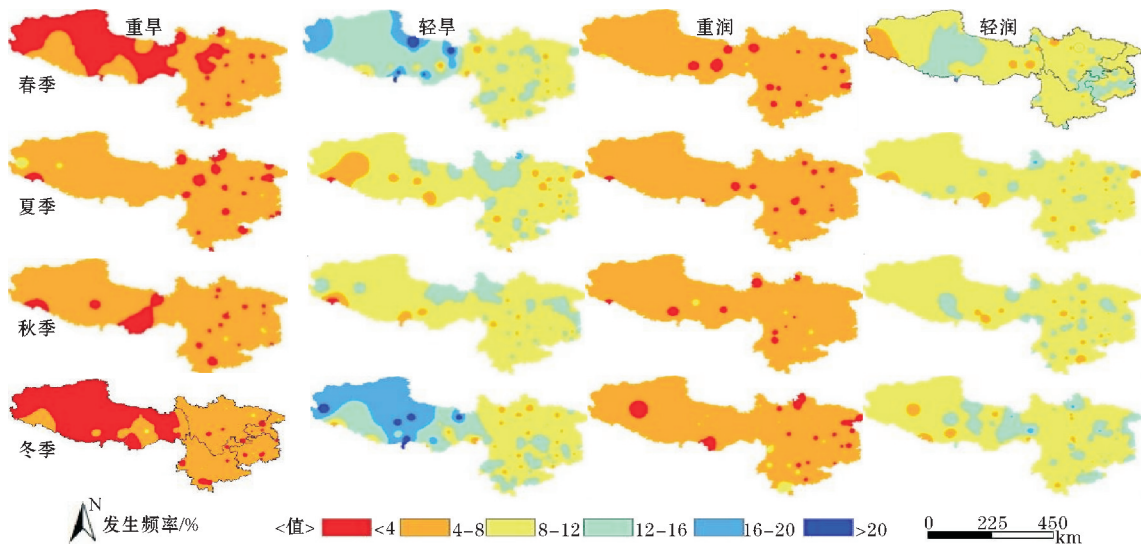


图 8 1968–2017 年西南地区各等级干湿发生频率季节空间变化

可以看出,各季节干湿发生频率分布特征存在明显差异。重旱发生频率在夏秋两季较高,整个西南地区发生频率在 4%~8%,春冬两季在云贵川、重庆及西藏南部等地频率较高。轻旱在四季发生频率都较高,大部分地区在 8%~12%,其中春冬两季高值区主要集中在西藏西部及中北部,夏秋两季集中在西藏与四川的交界处。重润发生的季节空间分布变化不大,发生频率保持在 4%~8%。轻润发生频率有所提高,在 8%~12%,春季在西藏中部有一块高值区,其他季节保持稳定。总体而言,春冬季节干旱发生频率更高,西藏地区轻旱更多,重旱更少。重润发生频率随季节

变化不大,轻润在春冬季发生频率较高,主要集中在四川东部、云南贵州交界处。此结果与熊光洁等<sup>[21]</sup>的研究结果部分一致,有所不同的主要原因是文中的西南地区中包括了对西藏自治区的分析。

2.2.2 SPEI 空间分布特征的 EOF 分析

为探究西南地区近 50 年干湿空间变化,选取 SPEI1 的每月数据进行 EOF 分解,表 2 为西南地区 SPEI 空间的 EOF 分析前 10 个模态的方差贡献,其中第一模态、第二模态和第三模态的解释方差分别为 24.71%、10.53% 和 8.93% (累积方差 44.1%)。图 9~11 为前 3 个模态的空间分布及时间系数。

表 2 SPEI 空间 EOF 分析前 10 个模态的方差贡献

单位: %

前十模态	第一模态	第二模态	第三模态	第四模态	第五模态	第六模态	第七模态	第八模态	第九模态	第十模态
方差贡献	24.71	10.53	8.930	6.630	5.43	4.39	4.08	3.45	2.97	2.63
累计贡献	24.71	35.24	44.16	50.80	56.23	60.62	64.7	68.15	71.12	73.75

可以看出,第一模态中西藏西部、四川东南部、云南南部及贵州北部呈现干旱化,西藏东部、四川北部及云南中部呈湿润;第一模态对应时间系数显示,在 1992 年由负相位变为正相位,表明 1992 年后西藏西部、四川东南部、云南南部及贵州北部呈现干旱化加剧,西藏东部、四川北部及云南中部呈湿润化。第二模

态中西藏东部、四川北部及云南呈干旱,西藏西部、四川南部及重庆呈湿润;第二模态对应的时间系数在 1992 年左右出现由正相位变为负相位转变的过程,表明 1992 年后西藏东部、四川北部及云南变湿润,西藏西部、四川南部及重庆变干旱;第三模态中西藏东西部、云南、贵州东北部及四川重庆东部呈干旱,西藏中

部和四川西北部呈湿润;第三模态时间系数在 1992 年左右出现由正相位变为负相位,表明 1992 年后西藏东西部、云南、贵州东北部及四川重庆东部变湿润,西藏中部和四川西北部变干旱。1992 年为西南地区干湿的转变年,与文中周期分析相验证统一。可以发现此结果与贾艳青等<sup>[22]</sup>的研究结论部分一致,干旱较为严重的站点主要分布在四川中北部、云南西南部和贵州西北部。对其原因分析认为,主要是因为西南地区降水量与气温空间上存在差异性,同时不同的地形和山地气候的垂直变化也有一定的影响,两者共同作用造成了西南地区干湿分布的不同。春季西风环流北撤和青藏高原感热贡献,夏冬季季风在云贵高原、横断山地和若尔盖高原被阻挡,均造成西藏西部、云南西南部和贵州北部温度高、降水少;同时川西北高原、横断山地和云贵高原海拔相对较高,风速和日照时数相对较大,蒸散量更大,更易形成干旱,最终造成了西藏西部、云南西南部和贵州北部的干旱更为严重。

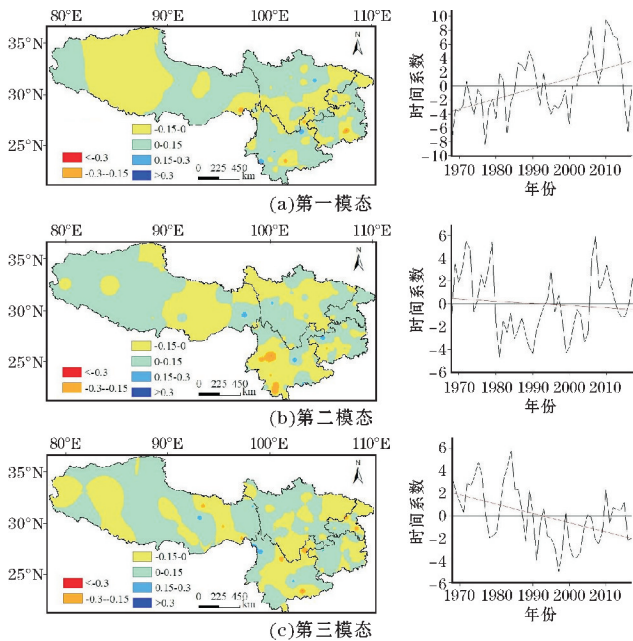


图 9 SPEI 空间 EOF 分析前 3 个模态的空间分布及时间系数

### 3 干湿特征对 ENSO 事件的响应

许多研究表明干湿演变与 ENSO 事件具有密切联系,大多干旱事件发生在 ElNiño 年,相反湿润大多发生在 LaNiña 年,且在 ENSO 活动的调制作用下,温度与湿度往往呈现反相关性。为研究 ENSO 事件对西南地区干湿情况的影响,统计了 1968–2017 年 ENSO 事件出现的时间次数及强度和 ENSO 年各等级干湿出现的站次及占比情况,结果如表 3~4 所示<sup>[27]</sup>。

表 3 1968–2017 年 ENSO 出现时间及强度					
暖事件	持续月份	强度	冷事件	持续月份	强度
1968.10–1970.02	17	弱	1970.07–1972.01	19	中
1972.05–1973.03	11	强	1973.06–1974.06	13	中
1976.09–1977.02	6	弱	1975.04–1976.04	13	中
1977.09–1978.02	6	弱	1984.10–1985.06	9	弱
1979.09–1980.01	5	弱	1988.05–1989.05	13	强
1982.04–1983.06	15	超强	1995.09–1996.03	7	弱
1986.08–1988.02	19	中	1998.07–2000.06	24	中
1991.05–1992.06	14	中	2000.10–2001.02	5	弱
1994.09–1995.03	7	中	2007.08–2008.05	10	中
1997.04–1998.04	13	超强	2010.06–2011.05	12	中
2002.05–2003.03	11	中	2011.08–2012.03	8	弱
2004.07–2005.01	7	弱			
2006.08–2007.01	6	弱			
2009.06–2010.04	11	中			
2014.10–2016.04	19	超强			

表 4 ENSO 年与近 50 年西南地区干湿各等级出现站次统计			
干湿等级	ENSO 年 发生站次数	近 50 年 发生站次数	占比/%
极润	690	1312	53
重润	2366	4539	52
轻润	4154	8119	51
轻旱	3799	8419	45
重旱	1837	3751	49
极旱	481	1074	45

可以看出,在 1968–2017 年总共发生了 26 次 ENSO 事件,其中 15 次 ENSO 暖事件,11 次 ENSO 冷事件。其中暖事件出现 3 次超强事件、1 次强事件、5 次中等事件和 6 次弱强度,冷事件出现 1 次强事件、6 次中等事件和 4 次弱事件。暖事件持续时间最长为 19 个月,分别为 1 次中等强度和 1 次超强强度。冷事件持续时间最长 24 个月,为中等强度。表 4 可以看出,湿润发生在 ENSO 年的次数远多于干旱发生在 ENSO 年的次数。其中西南地区极润事件 53% 的站次发生在 ENSO 年,重润事件有 52% 站次,轻润事件有 51% 站次,均超过了 50% 站次发生在 ENSO 年;干旱发生在 ENSO 年的站次稍低,在 40%~50%,重旱最高达到 49%。表明 ENSO 事件对西南地区的干湿变化具有重要影响。ElNiño 年时,赤道东太平洋海温异常升高,东太平洋 Hadley 环流增强,但西太平洋海温相对较低, Hadley 环流减弱,对流活动减弱,西太平洋副高相对增强,西南地区下沉气流增强,抑制印度洋的水汽输送,导致西南地区降水偏少;ElNiño 年冬季时,东亚冬季风减弱,而青藏高原南支西风强引起大量降雪,导致云南贵州南部降水增多;而 LaNiña 年时



则相反,西太平洋副高势力减弱,对流加强,有利于水汽输送和冷空气南下,导致西南地区降水增加<sup>[28]</sup>。随着全球变暖加剧,ENSO 暖事件频率增多,西南地区干旱情况将会愈发严重。

表 5 SOI 值与 SPEI 值各时间相关关系

时间	同期	滞后 1 月	滞后 2 月	滞后 3 月	滞后 4 月	滞后 5 月
相关性	-0.067	-0.051	-0.077	-0.1 *	-0.098 *	-0.086 *

注: \* 表示通过 0.05 水平的置信度检验

可以发现 ENSO 事件发生的同期,西南地区干湿对其响应并不显著,随着滞后时间增加,干湿对 ENSO 的响应逐渐显著,到滞后 3 个月时最为显著,最后显著性逐渐降低。为了更加深入分析 ENSO 事件对西南地区干湿的影响,选取表 3 中 ENSO 年的 SOI 值与同期 SPEI 值进行相关分析,得到图 12。分析可知,在同期相关关系中,在四川北部和云南东部,SOI 值与 SPEI

但 ENSO 事件对西南地区干湿影响并非同步,还需要一定的时间进行相互影响,即 ENSO 事件对西南地区干湿影响具有一定的滞后性<sup>[29]</sup>。表 5 是 SOI 值(south-ern oscillation index)与各时间 SPEI 值的相关分析。

值呈正相关,即 ENSO 冷事件越强,四川北部和云南东部越湿润;ENSO 暖事件越强,四川北部和云南东部越干旱。随滞后时间增加,西南地区对 ENSO 的正响应逐渐向西移动,到滞后 2 个月时,只有西藏西部呈正相关关系。在滞后 3 个月时达到最显著,几乎西南地区全部呈现负相关关系,其中西藏中北部和云南西部负相关关系最强,随后负相关关系区域减小。

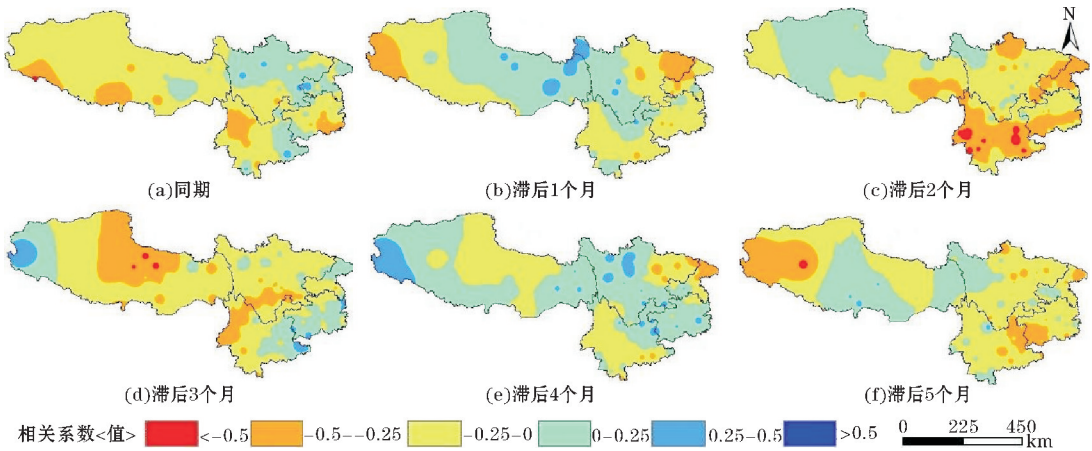


图 10 西南地区干湿对 ENSO 滞后不同时期的相关性分析

4 结论与讨论

基于标准化降水蒸散指数 (SPEI), 利用 1968 – 2017 年西南地区 129 个气象站点的数据资料,采用小波分析、M-K 突变检验、EOF 分析和相关分析等方法,研究了西南地区 50 年干湿时空演变特征及其对 ENSO 事件的响应,得到以下结论:

(1)从时间分布上来看,西南地区极润发生频率基本上随时间尺度先增加再减小;重润、轻旱发生频率随时间尺度增加而减小;轻润发生频率在春季、夏季基本保持稳定,在秋季、冬季随时间尺度增加而增加;重旱发生频率在春冬季随时间尺度增加,在夏秋季随时间尺度减小;极旱发生频率随时间尺度增加。近 50 年存在 8 年的周期变化,呈干旱化趋势,在 20 世纪末 21 世纪初发生突变,干旱增加,湿润减少。

(2)从空间分布上来看,第一模态中西藏西部、四川东南部及云贵北部呈现干旱化,西藏东部、四川北部及云南南部呈湿润,1992 年后西藏西部、四川东南部及云贵北部呈现干旱化加剧,西藏东部、四川北部及云南南部呈湿润化。第二模态中西藏东部、四川北部及云南呈干旱,西藏西部、四川南部及重庆呈湿润,1992 年后西藏东部、四川北部及云南变湿润,西藏西部、四川南部及重庆变干旱。

(3)各季节干湿分布有明显空间差异,重旱发生频率在夏秋两季较高,春冬两季在云贵川、重庆及西藏南部等地频率较高。轻旱在四季的发生频率都较高,其中春冬两季高值区主要集中在西藏西部及中北部,夏秋两季集中在西藏与四川的交界处。重润季节空间分布变化不大,轻润发生频率有所提高,春季在西藏中部有一块高值区,其他季节保持稳定。

(4)湿润相对于干旱更容易受到 ENSO 事件的影响。

ENSO 事件对西南地区干湿影响具有滞后性,在滞后3个月时达到最显著。SOI 值对西南地区干湿正影响随时间由东向西移动,在滞后3个月时全区转为负相关。

西南地区占中国陆地国土面积的24.5%,是中国实现西部大开发战略的重要发展区域之一,也是中国九大农业区之一。近年来西南地区干旱愈发严重,造成了大量的经济损失,研究西南地区干湿演变及成因已经迫在眉睫。在已有的研究中,文中研究结果与熊光洁等<sup>[12]</sup>对于西南地区干旱的研究类似,认为干旱频率增加区域大于降低区域,但大部分区域趋势并不明显。同时西南地区在2002年存在转折点且近50年干湿演变存在准8年周期变化的观点也在尹晗等<sup>[23]</sup>的研究中得到了验证。而王东等<sup>[26]</sup>研究表明西南地区21世纪初干旱发生频繁,四季中以秋季干旱化最为突出,这与文中研究结果部分一致。与其研究存在部分差异的原因主要是选取的研究区域有所不同,且不同研究时段也会造成结果有所差异。同时在全球变暖的大背景下选用了 Thornthwaite 公式计算 SPEI 值,对反映西南地区温度变化影响干湿分布方面能更明显,但风速和日照等因素对干湿分布也有一定影响。在研究西南地区干湿对 ENSO 事件的响应时,发现湿润事件站次比在 ENSO 年高于干旱事件站次比,这与王东等<sup>[13]</sup>研究结论上存在争议,通过分析后发现,ENSO 事件对西南地区干湿演变的影响具有滞后性,在3个月时最为显著,这也验证了刘琳等<sup>[30]</sup>的研究结论。ENSO 事件是影响西南地区干湿演变的因素之一,但青藏高原的热力作用、大气环流的热力和水分输送以及不同地形地貌等对西南地区干湿演变也有着重要作用,今后还需要深入分析西南地区干湿形成机制。同时,在分析西藏干湿特征时,还存在西藏面积大、气象站点少的问题,可能对西南地区整体干湿演变情况造成一定误差,对此可待后续观测数据资料的进一步补充或借助卫星数据来进行更深入的完善分析。

## 参考文献:

- [1] 李伟光,易雪,侯美亭,等.基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J].中国生态农业学报,2012,20(5):643-649.
- [2] 王文国,何明雄,潘科,等.四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J].自然资源学报,2011,26(9):1555-1565.
- [3] 刘斌涛,陶和平,孔博,等.云南省水资源时空分布格局及综合评价[J].自然资源学报,2014,29(3):454-465.
- [4] Kalisa W,Zhang J H,Igbawua T,et al. Spatio-temporal analysis of drought and return periods over the East African region using Standardized Precipitation Index from 1920 to 2016[J]. Agricultural Water Management,2020,237:106195.
- [5] Zuzulova V,Ika B. Identification of drought in western Slovakia by Palmer Drought Severity Index (PDSI) [J]. Acta Regionalia et Environmentalica, 2017,14(1):7-14.
- [6] 邹旭恺,任国玉,张强.基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):371-378.
- [7] Vicente serrano S M,Begueria S,Lopez moreno J I,et al. A multi-scalar drought Index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [8] Polong F,Chen H,Sun S,et al. Temporal and spatial evolution of the Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in the Tana River Basin, Kenya [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,138(1):777-792.
- [9] 柴荣繁,陈海山,孙善磊.基于 SPEI 的中国干湿变化趋势归因分析[J].气象科学,2018,38(4):423-431.
- [10] Byakatonda J, Parida BP, Moalafhi DB, et al. Investigating relationship between drought severity in Botswana and ENSO [J]. Natural Hazards, 2020,100(1):255-278.
- [11] Roy I,Tedeschi RG,Collins M. ENSO teleconnections to the Indian summer monsoon under changing climate [J]. International Journal of Climatology, 2019,39(6):3031-3042.
- [12] 熊光洁,王式功,李崇银,等.三种干旱指数对西南地区适用性分析[J].高原气象,2014,33(3):686-697.
- [13] 王东,张勃,安美玲,等.基于 SPEI 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析[J].自然资源学报,2014,29(6):1003-1016.
- [14] 李军,王兆礼,黄泽勤,等.基于 SPEI 的西南农业区气象干旱时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1142-1149.
- [15] Chen H,Sun J. Changes in drought characteristics over China using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Climate,



- 2015,28(13):5430-5447.
- [16] 刘晓冉,李国平,范广洲,等. 西南地区近 40 a 气温变化的时空特征分析[J]. 气象科学,2008(1):34-40.
- [17] 蔡思扬,左德鹏,徐宗学,等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(5):15-21.
- [18] 罗登泽,靳晓言,强皓凡,等. 基于 SPEI 的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析[J]. 水土保持研究,2019,26(2):227-233.
- [19] 王红瑞,刘达通,王成,等. 基于季节调整和趋势分解的水文序列小波周期分析模型及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(5):823-836.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:280.
- [21] 熊光洁,张博凯,李崇银,等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961-2012 年干旱变化特征分析[J]. 气候变化研究进展,2013,9(3):192-198.
- [22] 贾艳青,张勃,马彬,等. 1960-2015 年中国西南地区持续性干旱事件时空演变特征[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(5):171-176.
- [23] 尹晗. 中国西南地区干旱气候特征及 2009-2012 年干旱分析[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [24] 李亮,Pich L,蔡焕杰. 基于标准化降水蒸散指数的甘肃省干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(3):256-266.
- [25] 谢清霞,谷晓平,万雪丽,等. 西南地区干旱的变化特征及其与大气环流的关系[J]. 干旱区地理,2020,43(1):79-86.
- [26] 王东,张勃,张调风,等. 1960-2011 年西南地区干旱时空格局分析[J]. 水土保持通报,2013,33(6):152-156.
- [27] 李晓燕,翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究[J]. 气象学报,2000(1):102-109.
- [28] 许武成,王文,马劲松,等. 1951-2007 年的 ENSO 事件及其特征值[J]. 自然灾害学报,2009,18(4):18-24.
- [29] 曾钦文,殷美祥,曾思亮,等. 近 57a 河源地区降水变化特征及其与 ENSO 事件的关系[J]. 广东水利水电,2018(3):38-42.
- [30] 刘琳,徐宗学,杨晓静. 西南地区旱涝演变与 ENSO 事件的关系[J]. 资源科学,2019,41(11):2144-2153.

## Characteristics of Dry-wet Evolution and its Response to ENSO Events in Southwestern China

JIA Hejia, LI Xiehui, WANG Lei, CHEN Zifan, XUE Yuting

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

**Abstract:** Aimed at the problem of drought and flood disasters in southwest China in recent years, based on the daily meteorological data of 129 meteorological stations in Southwestern China from 1968 to 2017, using Mann-Kendall test, EOF analysis, correlation analysis and wavelet periodic analysis, a spatiotemporal analysis of the characteristics of dry-wet evolution in Southwestern China in recent 50 years was carried out, and the response of dryness-wetness to ENSO events was also discussed. The results show that in the past 50 years, the southwest region mainly showed the trend of drought and had obvious periodic changes, as well as there was an obvious turning point at the end of the 20th century and the beginning of the 21st century. The frequency of extreme moisture, heavy moisture and light drought decreased with the increase of time scale in each season; the frequency of light moisture in autumn and winter and heavy drought in spring and winter increased with the increase of time scale; the frequency of extreme drought increased with the increase of time scale in each season. The western Tibet, southern Yunnan and northern Guizhou showed aridity, while eastern Tibet, northern Sichuan and central Yunnan showed humidification. There are obvious spatial differences in the dryness and wetness of each season. ENSO events had a lag effect on the dryness and wetness in Southwestern China, and the positive effect moves from east to west with the increase of lag time, and the most significant of that is at the lag time of 3 months.

**Keywords:** applied meteorology; meteorological disaster; SPEI; ENSO events; EOF analysis; dry-wet evolution characteristics; Southwest China