**文章编号**: 2096-1618(2022)04-0442-07

# 基于 MCI 指数的西南地区近 60 年夏季干旱特征

张　皓[1]，　毛文书[1]，　师春香[2]，　粟　运[1]，　高焕昕[1]
(1. 成都信息工程大学大气科学学院，四川 成都 610225；2. 国家气象信息中心，北京 100081)

**摘要**：为了对西南地区夏季干旱特征进行分析，利用西南地区 381 个气象站点 1961-2019 年 6-8 月的逐日 MCI 指数，采用经验正交函数分解方法、Morlet 小波分析等方法对西南地区近 60 年夏季干旱的空间分布特征及时间变化特征进行讨论。结果表明：(1)平均连续干旱日数(Mean CDD)在23 d左右。最长连续干旱日数(Max CDD)平均为25.53 d。(2)轻、中、重旱多发生在四川北部，重庆及贵州的东部区域；特旱多发生在云南中部和贵州西南部。(3)西南干旱日数主要分为，南北反向变化的第一模态，西南与东北反向变化的第二模态，贵州南部和四川东部与呈反向变化特征的第三模态，由西向东"-+-"纬向变化的第四模态。(4)西南地区轻旱日数存在 12 ~ 18 a尺度上的周期振荡；中旱日数存在一个准10 a的周期振荡，10 ~ 15 a尺度上有中旱日数"偏少—偏多—偏少"交替振荡；重旱日数存在15 a尺度上的周期振荡和准7 a尺度上的周期振荡及准5 a尺度上的周期振荡；20 a尺度上存在特旱日数的"偏少—偏多"的交替振荡和准5 a尺度上的周期振荡。

**关　键　词**：气象学；夏季干旱；西南地区；EOF 分解；小波分析
**中图分类号**：P426.616　　**文献标志码**：A
**doi**：10.16836/j.cnki.jcuit.2022.04.013

## 0　引言

随着全球气候持续变暖，导致极端天气气候事件发生强度和频率都有增强，给人类的生存和社会经济的可持续发展带来严重的影响。其中，干旱造成的损失最严重、范围最大，干旱被认为是世界上最严重的自然灾害类型之一。因此干旱事件得到了众多学者[1-4]的关注，成为研究全球气候变化的一项重要课题。

根据研究的方向和类型不同，美国气象学会将干旱分为 4 类：农业干旱、水文干旱、社会经济干旱及气象干旱[5]，本文主要研究气象干旱。钱正安等[6]发现在所有的异常气候中，干旱发生的频率最高，其造成的损失几乎占整个气象灾害损失的一半，旱灾损失严重与干旱发生的频率、干旱影响的时间及干旱面积有关。据世界气象组织 WMO 统计，常用的气象干旱指数超 50 种[7]。考虑蒸发、降水、温度等多要素的干旱指数有：帕默尔干旱指数(PDSI)[8]、标准化降水蒸散指数(SPEI)[9]、气象干旱综合指数(MCI)[10]。由于干旱的形成原因复杂，不同干旱指数对旱灾的监测能力差异较大。王聪晓等[11]利用 1961-2000 年的气象资料分析表明，标准化降水指数 SPI 能够有效反映四川地区的干旱特征；谢清霞等[12]利用 CI 指数研究了西南地区春旱分布特征；谢五三等[13]研究表明无论是在中国东北、西南或是长江中下游地区，较 SPI、SPEI 和 MI 指数，MCI 指数在干旱的时空诊断能力、典型干旱过程诊断能力、不合理跃变次数、与土壤墒情的相关性以及与干旱灾情的相关性等方面均是最优的。因此本文利用 MCI 指数对西南地区干旱特征分布情况进行分析，以全面分析高原山地区域气候变化特征，加深对西南地区干旱的认识，进一步提高西南地区的干旱监测水平和预测预警能力，为防御干旱灾害提供科学决策依据。

## 1　资料和方法

以中国西南地区为研究对象，包括四川、重庆、云南、贵州的大部分地区(97.35 °E ~ 110.18 °E，21.13 °N ~ 34.32 °N)，区域内 381 个站点分布及海拔高度从西北向东南逐渐下降(图 1)。川西高原地区海拔较高，平均海拔高度在2600 m以上，云贵高原中高山地区平均海拔在2000 m左右，东部山地地区平均海拔在1000 m以下；西南地区整体地形十分复杂，西高东低。主要分成 3 个地形单元：青藏高原高山山区、四川盆地及周围山地地区和云贵高原中高山山地丘陵区。

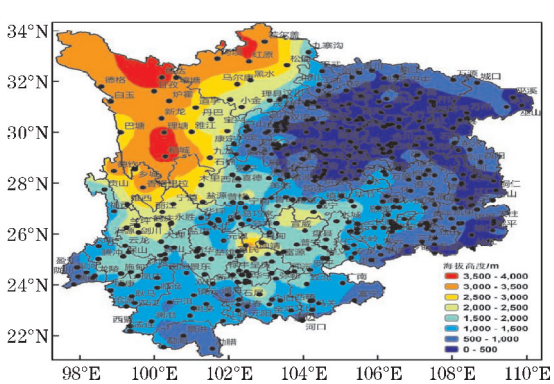



图 1　西南地区站点分布图

**收稿日期**：2021-06-22
**基金项目**：国家重点研发计划资助项目(2018YFC1506601)；国家自然科学基金资助项目(41775079)

使用中国气象局提供的 1961-2019 年西南地区四川省、云南省、贵州省和重庆市 381 个气象站逐日气温、降水量资料,按照 MCI 公式计算得到逐日的 MCI 指数。采用经验正交函数(empirical orthogonal function,EOF)分析[14-15]、小波分析[16]和气象综合指数 MCI 讨论西南地区近 60 年夏季干旱特征。

利用国家气候中心 2016 年 CI 指数的基础上修正的国家标准《气象干旱等级》[17],建立 MCI 干旱指数,计算公式如下:

$$MCI = a \times SPIW60 + b \times MI30 + c \times SPI90 + d \times SPI150$$

$$SPIW60 = SPI(WAP)$$

$$WAP = \sum_{n=0}^{60} (0.95^n P_n)$$

其中:SPIW60 为 60 d 的标准化权重降水指数,$P_n$ 是距离当天前第 $n$ 天的降水量;MI30 为30 d的湿润度指数;SPI90 和 SPI150 分别为90 d和150 d的标准化降水指数;$a$、$b$、$c$、$d$ 为不同指数的经验权重系数,根据季节和地区进行调整,以秦岭和淮河为界可以将中国划分为南方地区和北方地区,南方地区夏季(6-8 月)一般取为0.5、0.6、0.2、0.1。表 1 给出了 MCI 干旱等级的划分标准及对应干旱程度的表现情况。

表 1　气象干旱综合指数等级划分标准

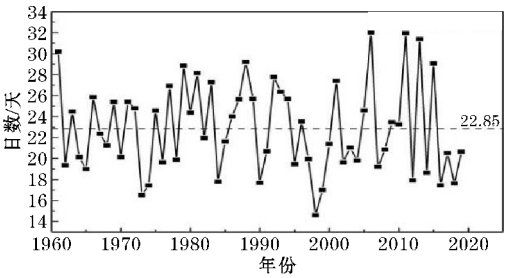
| 等级 | 类型 | MCI |
|---|---|---|
| 1 | 无旱 | >-0.5 |
| 2 | 轻旱 | -1.0 ~ -0.5 |
| 3 | 中旱 | -1.5 ~ -1.0 |
| 4 | 重旱 | -2.0 ~ -1.5 |
| 5 | 特旱 | <-2.0 |

根据世界气象组织定义的平均连续干旱日数(Mean CDD)和最长干旱日数和(Max CDD),以 MCI 值连续小于-0.5 日数的平均值和最大值来代替。根据中华人民共和国国家标准——气象干旱等级(GB / T2048122006)[18]:如果某一站点连续10 d处于轻旱以上的状态,代表该站干旱开始,直到该站点连续10 d处于无旱状态才表示该站点干旱解除。因此将干旱开始的第一天到干旱解除的最后一天所有日数之和定义为干旱影响时间。干旱强度为干旱影响时间里达到轻旱以上的干旱指数 MCI 值之和,因此其值越小代表了干旱的强度就越高。

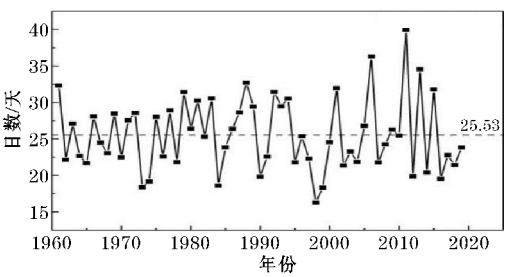
## 2　西南地区夏季干旱时间演变特征

### 2.1　夏季 Mean CDD 与 Max CDD 的时间变化

图 2 给出西南地区夏季 Mean CDD 与 Max CDD 的时间演变曲线,由图 2(a)可以发现,Mean CDD 平均在23 d左右,且波动很大,2000 年以后出现了 2006 年、2011 年、2013 年、2015 年 4 个高值的年份,平均连续干旱日数达到 1 个月。Max CDD 的变化(图 2b)的幅度相比于 Mean CDD 更大,平均在25.5 d。2011 年达到39.96 d。1998 年,Mean CDD 和 Max CDD 处于干旱的极小值。Max CDD 仅仅为16.27 d,Mean CDD 为14.61 d。




(a) Mean CDD

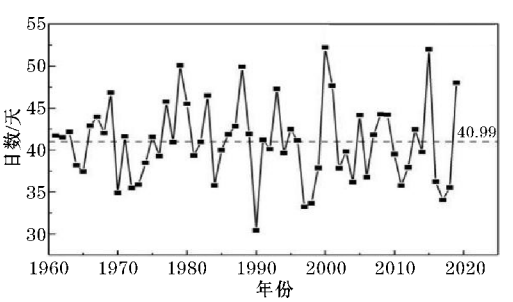



(b) Max CDD

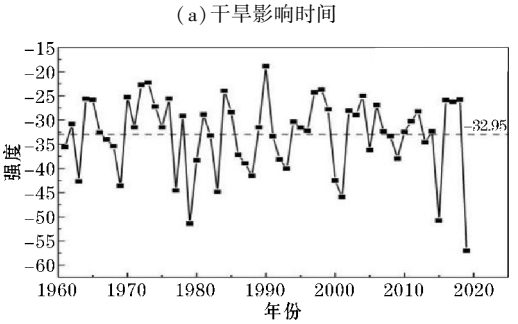
图 2　西南地区 Mean CDD、Max CDD 随时间的变化

### 2.2　夏季干旱影响时间与干旱强度的时间变化

从图 3 可以明显地看到西南地区干旱影响时间平均在40.99 d,1990 年以前影响时间波动变化较低,1979 年、1988 年、2000 年、2015 年为干旱影响时间的极大值,为50 d左右,1990 年存在极小值为30 d(图 3a)。平均干旱强度为-32.95,1979 年、2015 年、2019 年存在极大的干旱强度,达到-50,2019 年甚至达到-56.98,干旱强度在 21 世纪开始有增强的趋势(图 3b)。




(a)干旱影响时间




(b)干旱强度

图 3　西南地区夏季干旱影响时间及强度的时间变化

1961-2019 年,西南地区夏季干旱日数的变化如图 4 所示,平均每年夏季有31.50 d处于干旱状态,在1989 年、2006 年达到 50 多天。干旱日数在 1995-2005 年整体低于平均值,说明这段时间干旱影响的程度较其他年份低。21 世纪以来,干旱日数整体波动上升,在 2011 年极大值达62.27 d。

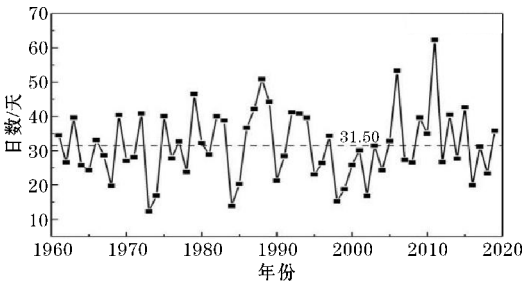



图 4 西南地区夏季干旱日数随时间变化

从西南地区夏季干旱日数的时间序列来看(图 5),夏季轻旱日数平均在14.45 d,1973 年之前波动较小,1973-2000 年,轻旱日数有减少的趋势,2000 年以后开始增加。1975 年、1989 年存在轻旱日数的极大值,最高达到19.71 d,1973 年、1984 年、1998 年存在轻旱日数的极小值,平均不到10 d,2000 年开始轻旱日数有增加的趋势(图 5a)。夏季中旱日数平均在9.32 d,相比于轻旱日数有所减少,从 1980-2010 年,中旱日数整体波动较大。2000 年开始中旱日数有增加趋势,1988 年存在极大值为19.34 d,极小值出现在1973 年,只有3.09 d(图 5b)。重旱以上等级开始对人类生活产生严重的影响,重旱的日数平均为4.82 d,2000 年以前在 8 ~ 12 d波动,变化较小。2000 年之后,重旱日数有减少的趋势,2011 年存在一个极大值,为13.94 d,1978 年、1999 年有极小值不足2 d,最小值在1984 年,只有0.86 d(图 5c)。特旱日数的平均值为2.92 d,略低于重旱日数,21 世纪以前特旱日数有所减少,21 世纪开始,特旱日数有增多的趋势,整体波动远远大于另外 3 种干旱等级,最高值在 2011 年达到14.08 d,最低值在 1984 年只有0.13 d(图 5d)。

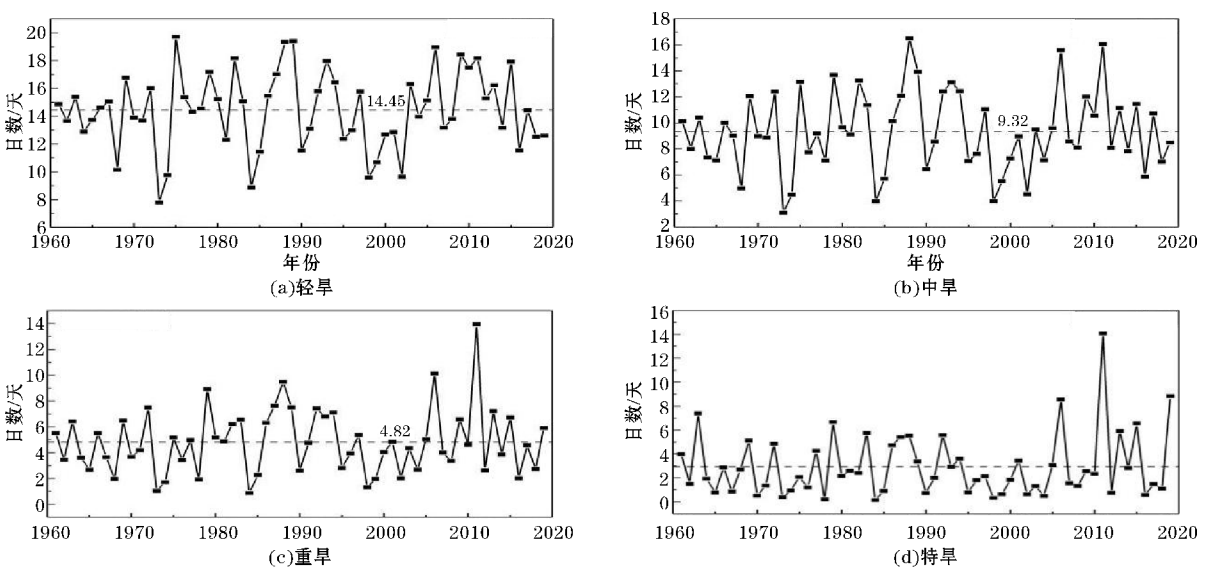



图 5 西南地区夏季轻旱、中旱、重旱、特旱日数随时间变化

## 2.3 西南地区夏季干旱日数的空间分布

西南夏季干旱日数的空间分布如图 6 所示,大值区位于四川北部,平均每年夏季有 63 ~ 70 d处于干旱的状态,重庆及贵州北部干旱日数相对整个西南地区属于较大值区,平均56.32 ~ 63.33 d,云南中部有一个异常大值中心,其周围地区干旱日数在30 d左右。

图 7 为西南地区各类干旱日数具体分布情况,轻旱的大值中心位于四川北部的德阳一带,夏季大约有30 d处于轻旱状态,重庆的东部及贵州的北部轻旱日数偏多,平均在27 d以上,贵州的西南部和云南的西南周边地区,其轻旱日数总体较少,平均15 d左右(图 7a)。中旱的大值区位置相比轻旱略有扩大东移,贵州东部德江、黎平等地中旱日数达到20 d以上,低值区仍为云贵高原的周围区域,为7.72 ~ 10.20 d(图 7b)。云贵高原存在一个重旱大值的异常中心,达8 d左右,其周围重旱发生日数明显偏少,整个西南地区轻、中、重旱日数呈现由西南向东北增加,四川的东

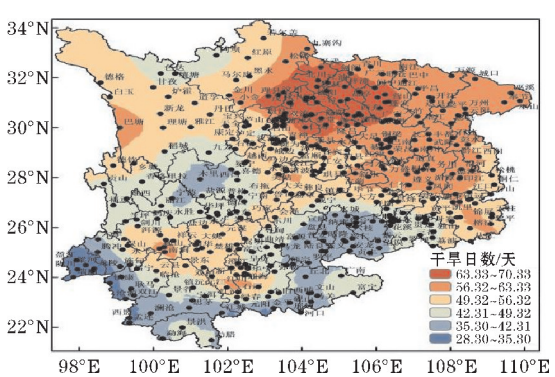



图 6 西南地区夏季干旱日数空间分布

北部存在重旱日数的极大值为11.02 d(图 7c)。特旱的分布基本为纬向的带状分布,云南中部至贵州西南部存在一个明显的大值区,特旱日数达6.66 d以上,四川盆地存在低值的异常中心,不到3 d,盆地的东侧也存在特旱日数的大值区。四川的北部,云南的西部和南部区域,特旱日数明显偏少。

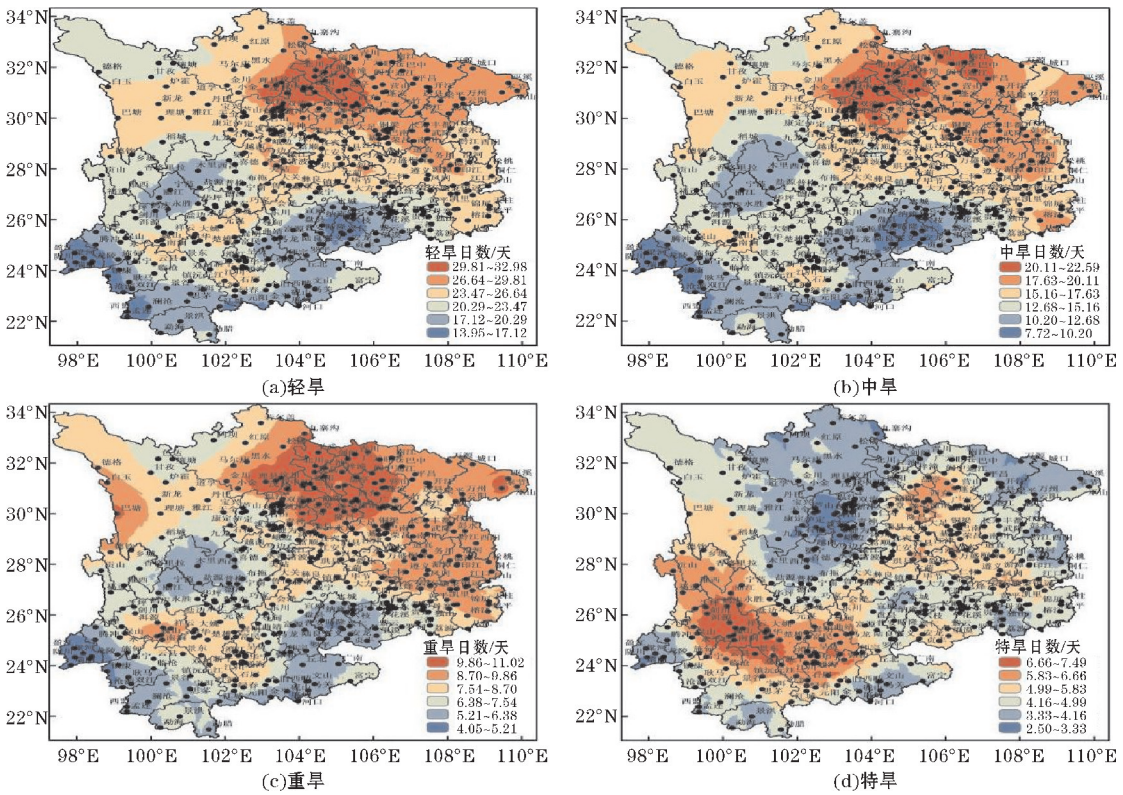



图 7　西南地区夏季轻旱、中旱、重旱、特旱日数空间分布

## 2.4　西南地区夏季干旱日数的 EOF 分析

为研究西南地区夏季干旱日数的时间和空间变化,通过对 1961–2019 年西南地区的干旱日数进行标准化处理,再进行 EOF 分析,得到各个主成分。前 4 个主成分结果见表 2。

表 2　干旱日数距平场夏季前 4 个主成分结果　　单位:%

| 参数 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| EOF 方差贡献 | 16.3 | 11.2 | 9.0 | 5.0 |
| EOF 累计方差 | 16.3 | 27.5 | 36.5 | 41.5 |

由表 2 知,前 4 个主成分的方差贡献率累积达到 41.5%,较准确地反映了西南地区干旱日数的时间和空间的分布模态。图 8反映出西南地区干旱日数异常的几种主要的大范围空间分布特征。图 8(a)给出了西南干旱日数距平场的第一特征场,全区表现为南北反向变化的结构特征。四川北部处于正值中心,云南大部分地区处于负值中心。说明西南地区呈现南干北湿,或南湿北干的分布特征,即南北差异是西南地区干旱日数的第一空间异常类型。这主要是由于大气环流异常导致降水量时空分布异常,部分区域降水量减少,导致该区域干旱事件[18]的发生。时间系数越大表示该地区干旱日数越多,结合图 8(b),1988 年、1992 年、2011 年 PC 值越大,其年份对应的干旱日数分布越接近第一模态给出的空间分布,即南湿北干;相反 PC 值越小,在 1994–2002 年西南地区基本呈现南干北湿的分布特征。

图 8(c)代表了西南地区西南与东北反向变化的第二特征场。重庆南部至贵州存在正值中心,负值中心有 2 个,四川东部及云南各有一个。结合图 5(d),1978 年、2015 年、2019 年存在 PC 的极大值,表示重庆南部至贵州干,四川东部以及云南湿的分布;相反在 1961 年、1965 年、1981 年、2011 年出现了重庆南部至贵州湿,四川东部及云南湿的分布特点。

如图 8(e)所示,贵州南部至云南南部一带和四川东部呈反向变化特征的第三模态,四川东部处于正值中心。结合图 8(f),在 1984 年、1998 年、2013 年,西南地区呈现了四川东部干,云南至贵州南部湿润的分布特点;在 1969 年、1978 年、1994 年,特别是 2006 年,云南至贵州南部出现干旱,四川东部偏湿的分布特点。

图 8(g)表征出了“–+–”的由西向东经向变化的第四特征场。说明西南地区呈现出“湿干湿”或者“干湿干”的分布特征。结合图 8(h),1961 年、1971 年、1988 年、1997 年等年由西向东出现“湿干湿”的经向分布;相反,在 1963 年、1991 年、2000 年、2007 年由西向东出现“干湿干”的经向分布。

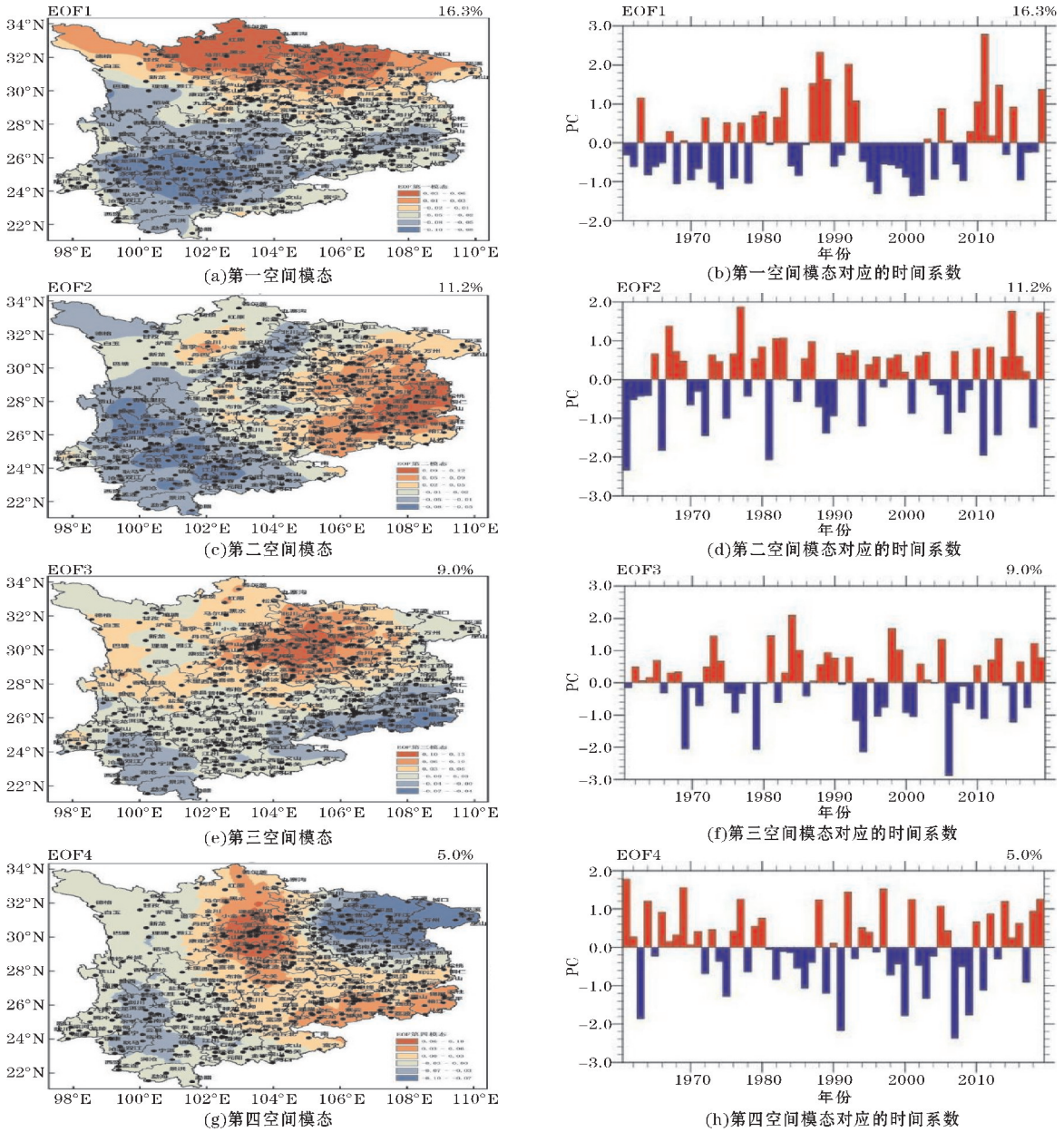



图 8 干旱日数距平场 EOF 分解得到的空间模态和对应的时间系数

## 2.5 西南地区夏季干旱日数的小波分析

为了解西南地区夏季各类干旱关于时间和尺度分析,利用小波变换将时间和频率局部变换,从而有效地从各类干旱日数的时间序列中挖掘隐藏信息。分析结果见图 9。

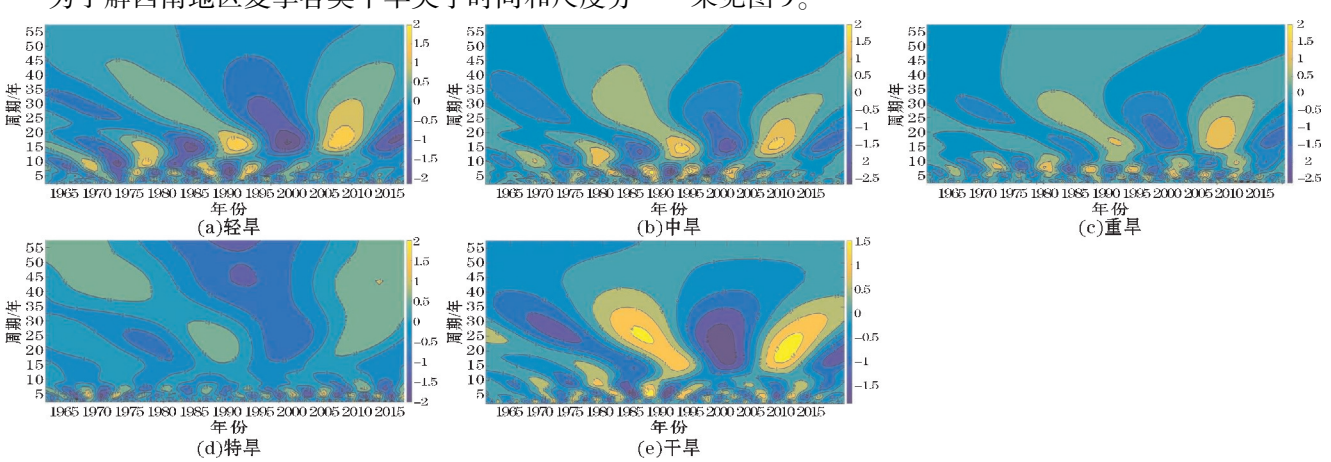



图 9 轻旱、中旱、重旱、特旱、干旱日数的小波分析结果

从轻旱日数的分析结果(图 9a)可知,西南地区1961-2019 年夏季的四类干旱等级在不同时间尺度上的周期振荡,等值线为负的代表干旱日数偏少,正的代表干旱日数偏多。轻旱日数在 1982-2012 年存在 12 ~ 18 a尺度上的周期振荡,从 2019 年对应的等值线来看,未来几年的轻旱日数可能会出现减少趋势,1975-2007 年存在 5 ~ 7 a尺度上的轻旱日数的"偏多—偏少—偏多"交替振荡 6 次。中旱日数在 1980 年之前存在一个准10 a的周期振荡,1985 年开始存在 10 ~ 15 a尺度上中旱日数"偏少—偏多—偏少"交替振荡 3 次,1995-2010 年有一个准5 a尺度的周期(图 9b)。1990 年起,重旱日数明显有 2 次15 a尺度上的周期振荡,1965-1993 年存在准7 a尺度上的周期振荡 4 次,1993 年之后存在准5 a尺度上的周期振荡(图 9c)。特旱日数随时间变化波动最大,1973-1993 年存在20 a尺度上特旱日数的"偏少—偏多"的交替振荡,1980-1990 年发生准5 a尺度上特旱日数"偏多—偏少"的周期振荡 2 次,1993-2017 年存在准3 a尺度上特旱日数"偏多—偏少"的周期振荡 8 次(图 9d)。西南地区夏季干旱日数在 20 世纪 90 年代以前存在一个25 a尺度的振荡周期,20 世纪末期开始出现 15 ~ 25 a尺度的周期振荡,从 2019 年对应这个周期的等值线来看,该等值线没有完全闭合,说明未来几年干旱可能存在减弱的趋势。1985-1995 年存在准5 a"湿—干—湿"的周期振荡,1980 年以前西南地区存在准10 a的弱的周期振荡(图 9e)。

## 3　结论和讨论

得出以下结论:

(1)Mean CDD 平均在23 d左右,Max CDD 的变化幅度相比于 Mean CDD 更大,2000 年以后出现了 2006 年、2011 年、2013 年、2015 年 4 个高值年份,平均连续干旱日数达到 1 个月。Max CDD 平均在25.5 d,2011 年达到 39.96 d。1998 年,Mean CDD 和 Max CDD 处于干旱的极小值。Max CDD 仅仅达到16.27 d,Mean CDD 为14.61 d。

(2)西南夏季干旱日数大值区位于四川北部,平均每年夏季有 63 ~ 70 d处于干旱状态,重庆及贵州北部干旱日数相对整个西南地区属于较大值区,平均在 56.32 ~ 63.33 d。轻旱的大值中心位于四川北部的德阳一带,夏季大约有30 d处于轻旱状态,重庆的东部以及贵州的北部轻旱日数偏多平均在27 d以上。中旱的大值区位置相比轻旱略有扩大东移,贵州东部德江、黎平等地中旱日数达到20 d以上,低值区仍为云贵高原的周围区域在7.72 ~ 10.20 d。云贵高原存在一个重旱大值的异常中心,达到8 d左右。整个西南地区轻、中、重旱日数呈现由西南向东北增加,四川东北部存在重旱日数的极大值为11.02 d。特旱的分布基本为纬向的带状分布,云南中部至贵州西南部存在一个明显的大值区,特旱日数达到6.66 d以上。

(3)西南干旱日数第一特征场表现为南、北反位向变化的结构特征。第二特征场有西南与东北反向变化的分布特征。贵州南部至云南南部一带和四川东部呈反向变化特征的第三模态,四川东部处于正值中心。由西向东"-+-"经向变化的第四特征场,1961 年、1971 年、1988 年、1997 年等年由西向东出现"湿干湿"的经向分布,在 1963 年、1991 年、2000 年、2007 年由西向东出现"干湿干"的经向分布特征。

(4)西南地区的轻旱日数存在准5 a和准15 a的显著振荡周期,中旱日数存在准5 a和准10 a的显著振荡周期,重旱日数存在准5 a、准7 a和15 a的显著振荡周期,特旱日数存在准3 a、准5 a和20 a的显著振荡周期。

由于西南地区地形的复杂性及控制该区域的环流系统多样性,使该地区的干旱分布不均匀。本文仅统计分析了西南地区各个区域夏季干旱的空间分布特征及时间变化特征。对于在全球变暖的大背景下,海洋和大气环流系统对该地区干旱产生的影响及机理未做研究,但是这方面的研究对指导该地区的天气预报及气候预测极其重要,所以对西南地区夏季干旱变化与各种环流系统变化的联系值得深入研究。如全球变暖背景下,青藏高原对变暖的响应是极为敏感的,而这种变化,对西南地区干旱又有何种影响?再者,厄尔尼诺产生时,副高位置偏南偏东,对西南地区夏季干旱又有何影响?影响机制是什么?等等问题都值得讨论。

## 参考文献:

[1]　黄荣辉,陈文,张强,等. 中国西北干旱区陆—气相互作用及其对东亚气候变化的影响[M]. 北京:气象出版社,2011.

[2]　McGrath G S,Sadler R,Fleming K,et al. Tropical cyclones and the ecohydrology of Australia's recent continental-scale drough[J]. Geophysical Research Letters,2012,39(3).

[3]　Dai A. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation during 1923-2010[J]. Climate Dynamics,2013,41 (3-4):633-646.

[4]　张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展,2015,30(2):196-213.

[5]　American Meteorological Society. Meteorological

drought:Pol icy statement[J]. Bulletin of American Meteorological Society,1997,78:847-849.
[6] 钱正安,吴统文,宋敏红,等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展,2001(1):28-38.
[7] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象,2017,35(5):709-723.
[8] 刘卫国,王曼,丁俊祥,等,帕默尔干旱指数在天山北坡典型绿洲干旱特征分析中的适用性[J]. 中国沙漠,2013,33(1):249-257.
[9] 王林,陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象,2013,33(2):423-431.
[10] 王慧敏,郝祥云,朱仲元. 基于综合气象干旱指数的干旱状况分析——以锡林河流域为例[J]. 水土保持研究,2019,26(2):326-336.
[11] 王聪晓,韦英英,叶晓冰,等. 四川地区干旱指标估算及干旱特征分析[J]. 农业灾害研究,2017,7(1):36-38.
[12] 谢清霞,李刚,袁晨,等. 基于 CI 指数的西南地区 1961-2012 年春季干旱分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象,2016,10(4):53-58.
[13] 谢五三,张强,李威,等. 干旱指数在中国东北、西南和长江中下游地区适用性分析[J/OL]. 高原气象,http://kns. cnki. net/kcms/detail/62. 1061. P. 20210308. 1349. 027. html,2021-05-11.
[14] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999.
[15] 范丽军,韦志刚,董文杰. 西北干旱区地气温差的时空特征分析[J]. 高原气象,2004,23(3):360-367.
[16] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(1):61.
[17] 张存杰,刘海波,宋艳玲,等. 气象干旱等级[Z]. GB/T20481-2016,中华人民共和国国家质量监督检查检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2016.
[18] 张强,邹旭恺,肖风劲,等. 气象干旱等级,GB/T2048122006,中华人民共和国国家标准[S]. 北京:中国标准出版社,2006:1-17.

# Characteristics of Summer Drought in Southwest China in Recent 60 a based on MCI Index

ZHANG Hao[1], MAO Wenshu[1], SHI Chunxiang[2], SU Yun[1], GAO Huanxin[1]
(1. College of Atmospheric Sciences, CUIT, Chengdu 610225, China; 2. National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China)

**Abstract**: In order to analyze the characteristics of summer drought in Southwest China was studied by the daily MCI drought index of 388 meteorological stations in summer from June to August during 1961-2019, the spatial and temporal characteristics of summer drought in Southwest China in recent 60 years were discussed in detail by using the empirical orthogonal function decomposition method and Morlet wavelet analysis. The results showed that: (1) The average continuous drought days (Mean CDD) is about 23 days. The longest continuous drought days (Max CDD) averaged 25.53 days. (2) Light, medium, and heavy droughts mostly occurred in northern Sichuan, Chongqing, and eastern Guizhou, and extreme droughts mostly occurred in central Yunnan and southwestern Guizhou. (3) Southwest drought days are mainly divided into the first mode of north-south reverse change; The second mode of southwest and northeast reverse change; The third model with reverse variation characteristics in southern Guizhou and eastern Sichuan; The fourth mode is the "Negative-Positive-Negative" latitudinal change pattern from west to east. (4) The number of days of light drought in Southwest China has periodic oscillation of 12-18 a scale. The number of days of medium drought has a periodic oscillation of quasi-10 a, and there is an alternating oscillation of "less-more-less" on the scale of 10-15 a. There are periodic oscillations at the 15 a scale, periodic oscillations at the quasi-7 a scale, and quasi-5 a scale in heavy drought days. On the 20 a scale, there are "less-more" alternating oscillations in the number of extreme drought days and periodic oscillations at the quasi-5 a scale.

**Keywords**: meteorological; summer drought; Southwest China; EOF decomposition; the wavelet analysis