

# 1962-2016 年滇中地区夏季旱涝急转时空演变特征

赵琳<sup>1</sup> 何萍<sup>21</sup>

(1. 百色学院管理科学与工程学院, 广西 百色 533000;

2. 楚雄师范学院地理科学与旅游管理学院, 云南 楚雄 675000)

**【摘要】:** 基于 1962-2016 年滇中地区 37 个气象站点 6-9 月降水资料, 通过计算长、短周期旱涝急转指数, 研究滇中地区夏季旱涝急转时空特征。结果表明: 滇中地区夏季旱涝急转以干旱转雨涝为主, 自 20 世纪 90 年代以来旱涝急转较频繁; 长、短周期 6-7 月和 8-9 月旱涝急转均存在时间尺度为 10-20a 的周期变化, 未来几年仍将处于干旱转雨涝时段; 旱涝急转显著增长趋势的空间分布呈分散性; 长周期旱涝急转呈自西南向东北递减的空间分布, 短周期 7-8 月旱涝急转空间分布最广。

**【关键词】:** 旱涝急转 时空特征 滇中地区

**【中图分类号】:** P641.12 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1005-8141(2020)08-0823-06

研究表明, 1998-2013 年全球陆地表面平均气温上升趋势出现停滞现象, 但海洋平均温度仍然处于持续上升趋势<sup>[1,2]</sup>, 全球气候变暖的形势依然严峻。在此背景下, 我国干旱、洪涝等气象灾害频率呈增长趋势, 长江中下游、华南和西南地区旱涝并存、旱涝急转现象时有发生。旱涝并存、旱涝急转成为学者们研究旱涝异常问题的新热点。旱涝急转是指在研究时期内, 先发生持续干旱而后发生雨涝, 或者先发生雨涝而后发生持续干旱, 且在短时间内出现干旱、雨涝相互转换的现象<sup>③</sup>。由于旱涝急转的转折期短, 比单纯的干旱、洪涝灾害的损害更大, 传统排涝抗旱模式难以有效解决, 因此旱涝急转时空演变规律亟待研究。

近年来, 众多学者对不同区域的夏季旱涝急转时空演变特征进行了研究。闪丽洁、张利平、陈心池<sup>④</sup>认为, 长江中下游流域夏季旱涝急转以雨涝转干旱事件为主, 而干旱转雨涝事件主要发生在长江中下游流域北岸; 何慧、廖雪萍、陆虹等<sup>⑤</sup>研究了华南地区 1961-2014 年 5-8 月的旱涝急转特征, 并从区域变化特征上把华南地区分成 5 个气候区; 黄茹研究发现, 淮河流域旱涝急转事件主要发生在 6-8 月且分布广泛<sup>⑥</sup>; 白恒、严登明、翁白莎等研究表明, 皖北地区夏季旱涝急转事件均为干旱转雨涝事件<sup>[7]</sup>; 王容、李湘虎、薛晨阳等<sup>⑧</sup>认为, 鄱阳湖流域旱涝急转在不同年代之间存在一定的时空差异; 刘宇峰、原志华、郭玲霞<sup>⑨</sup>等通过研究 1961-2013 年 5-8 月山西省夏季旱涝急转事件时空演变特征, 发现山西省旱涝急转事件在空间分布上存在南北差异; 邢彩盈等<sup>[10]</sup>、孙鹏等<sup>[11]</sup>、张瑞等<sup>[12]</sup>分别对海南岛、东江流域、长江荆南三口地区也进行了旱涝急转时空特征研究。综合以往旱涝急转时空特征的研究, 发现对旱涝急转现象进行研究的时间段集中在夏季 5-8 月, 研究区域集中在华南地区、长江中下游地区和淮河流域。

滇中地区属于亚热带高原季风气候, 干湿季节分明, 6-9 月降水量约占全年降水量的 3/4, 也是一年中降水量最集中的时段<sup>[13]</sup>。因此本文选用 6-9 月降水量代表滇中地区夏季降水量。随着全球气候变化, 滇中地区夏季也出现旱涝急转现象, 但相关研究较少。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41465001)。

**作者简介:** 赵琳(1996-), 女, 瑶族, 广西壮族自治区金秀人, 硕士, 讲师, 主要从事气象、气候与自然地理综合研究。何萍(1965-), 女, 重庆市人, 教授, 硕士生导师, 主要从事气象、气候与自然地理综合研究。

滇中地区作为云南省经济社会发展的“火车头”和重要的粮食生产基地,研究该地区夏季旱涝急转特征对整个云南省旱涝急转现象具有十分典型的意义。鉴于此,本文选用 1962-2016 年滇中地区 6-9 月降水数据,基于长、短周期旱涝急转指数,从时间变化规律和空间分布特征两个维度研究滇中地区夏季旱涝急转现象,力求为滇中地区旱涝急转成因研究积累经验,进一步为该地区工农业生产和水利工程发挥更好的防灾减灾作用提供理论参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

本文中的降水数据均来自于中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>),采用的气象站点为滇中地区内建站较早且分布较为均匀的站点,主要包括昆明、楚雄和红塔等 37 个国家基本气象站点。对一些无记录的降水数据,采用 MATLAB 软件的线性拟合插值法对空缺数据进行插值,最终得到滇中地区 37 个气象站点 1962-2016 年 6-9 月完整且连续的日降水数据。研究区地理位置及相应气象站点空间分布见图 1。

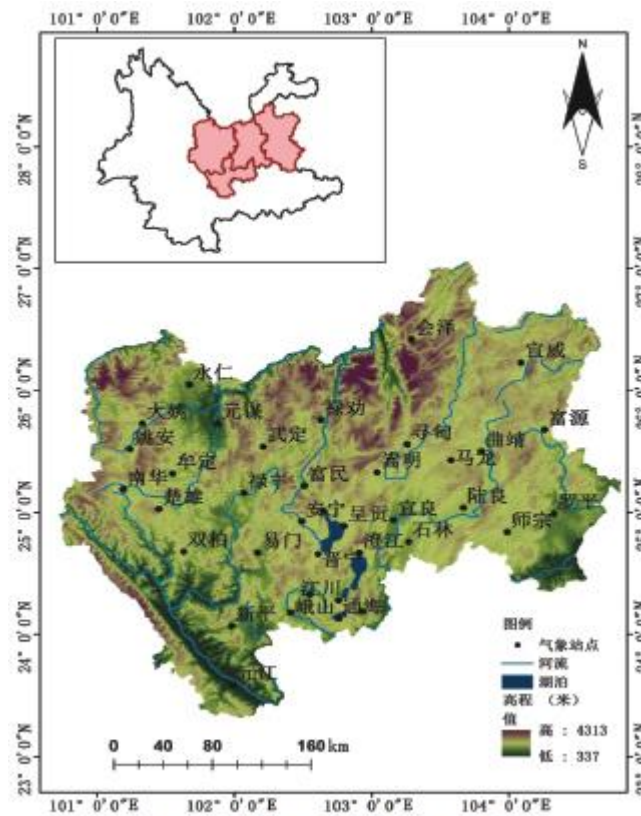


图 1 滇中地区气象站点空间分布

### 1.2 研究方法

本文以 6-9 月降水量为研究对象,利用长、短周期旱涝急转指数分析滇中地区夏季旱涝急转时空特征。依据滇中地区气候特点,定义长周期旱涝急转指数的时间尺度为两个月,如 6-7 月为干旱,8-9 月为雨涝,是干旱转雨涝事件;反之,则为雨涝转干旱事件。短周期旱涝急转指数以月为单位,旱涝急转事件指的是相邻月份,一个月份为干旱,另一个月份为雨涝,是干旱转雨涝事件;反之,则为雨涝转干旱事件。目前,旱涝急转指数在国内还没有统一的定义,本文结合吴志伟、闪丽洁等<sup>[14,15]</sup>对长江流域提出的旱涝急转指数,将每个站点 6-9 月逐月降水量进行标准化处理,再分别计算短周期旱涝急转指数(SDFAI)和长周期旱

涝急转指数(LDFAI)。计算公式为:

$$SDFAI = (R_j - R_i) \times (|R_i| + |R_j|) \times 3.2^{-|R_i + R_j|}$$

$$j = i + 1 (i = 6, 7, 8, 9) \dots\dots\dots (1)$$

$$LDFAI = (R_{89} - R_{67}) \times (|R_{67}| + |R_{89}|) \times 2^{-|R_{67} \times R_{89}|} \dots\dots\dots (2)$$

式中, Ri,Rj 分别表示 6-9 月份每个月的标准化的降水量; R67 为 6-7 月的标准化的降水量;R89 为 8-9 月的标准化的降水量; $(R_i - R_j)$ 、 $(R_{89} - R_{67})$  分别为旱涝急转强度; $(|R_i| + |R_j|)$ 、 $(|R_{67}| + |R_{89}|)$  分别为旱涝强度; $3.2^{-|R_i + R_j|}$ 、 $2^{-|R_{67} \times R_{89}|}$  分别为权重系数,作用是增加旱涝急转事件所占权重,降低全干旱或全洪涝事件的权重<sup>[16]</sup>。当旱涝急转指数值大于 1 时,即干旱转雨涝;旱涝急转指数值小于-1 时,即雨涝转干旱。旱涝急转指数的绝对值越大,表明旱涝急转越严重。

## 2 滇中地区夏季旱涝急转时间变化规律

### 2.1 长周期旱涝急转时间变化

由表 1 可知,近 55 年滇中地区发生旱涝急转 13 次,其中干旱转雨涝事件的频率为 14.5%,雨涝转干旱事件的频率为 9.1%,说明该地区旱涝急转以干旱转雨涝事件为主。由图 2 可知,滇中地区 LD-FAI 最大值为 1983 年的 6.13,最小值为 2008 年的-5.64。近 55 年夏季 LDFAI 总体以-0.06 / 10a 的速率下降,虽然下降趋势未通过  $\alpha = 0.05$  的显著水平检验,但是在一定程度上反映了夏季长周期雨涝转干旱事件增多而干旱转雨涝事件减少的趋势。从 5a 滑动平均曲线来看,20 世纪 90 年代以后的曲线波动变化较频繁,旱涝急转现象较为突出,特别是 21 世纪以后,LDFAI 呈现出负值趋势,雨涝转干旱事件偏多,这与孙小婷、李清泉、王黎娟<sup>[17]</sup>对西南地区夏季长周期旱涝急转的研究结果一致。

表 1 滇中地区长周期旱涝急转事件统计结果

事件类型	次数	频率 (%)	年份
干旱转雨涝	8	14.5	1980、1983、1987、1988、1993、1999、2015、2016
雨涝转干旱	5	9.1	1970、1990、1998、2001、2008

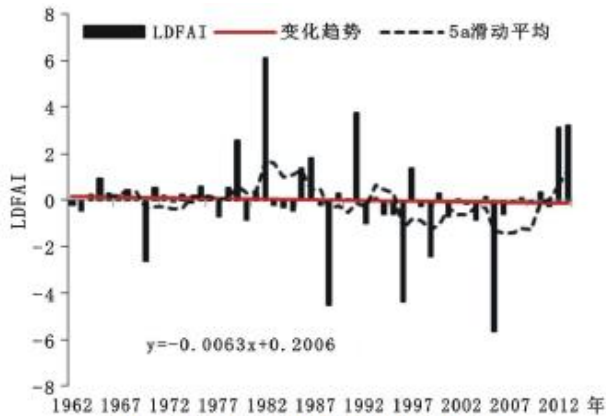


图 2 滇中地区长周期旱涝急转的变化趋势

## 2.2 短周期旱涝急转时间变化

从表 2 可见,近 55 年滇中地区短周期旱涝急转发生频次最高的是干旱转雨涝事件,其中干旱转雨涝事件发生了 14 次,雨涝转干旱事件发生了 12 次。如图 3a 所示,6-7 月 SDFAI 总体以 0.15 / 10a 的速率上升,且通过  $\alpha = 0.05$  的显著水平检验,反映了过去 55 年滇中地区 6-7 月雨涝转干旱事件减少而干旱转雨涝事件增多,其中 1999 年 6-7 月发生了严重的干旱转雨涝事件,SDFAI 值高达 5.57,1965 年 SDFAI 值最小为-4.51。5a 滑动平均曲线显示,1996-2016 年间曲线波动变化较剧烈,即该研究时段旱涝急转相对频繁。如图 3b 所示,7-8 月 SDFAI 总体以 0.06 / 10a 的速率下降,但未通过  $\alpha = 0.05$  的显著水平检验,其中 1980 年 7-8 月发生严重的干旱转雨涝事件,7-8 月旱涝急转指数绝对值相对较小,旱涝急转强度相对弱。如图 3c 所示,8-9 月 SDFAI 总体以 0.02 / 10a 的速率上升且未通过  $\alpha = 0.05$  的显著水平检验。从 5a 滑动平均曲线来看,20 世纪 90 年代以来,滇中地区 SDFAI 呈现“上升一下降一上升”的波动变化,表明该时段旱涝急转偏多。以上分析发现,滇中地区旱涝急转比其他地区更加频繁,强度也更大<sup>[18-20]</sup>。何萍、李於霄、付永梅等<sup>[21]</sup>研究发现滇中地区降水受人口和城市面积的影响最大,20 世纪 90 年代后,滇中地区城市化进程的加快对旱涝急转现象变得频繁有一定的影响。

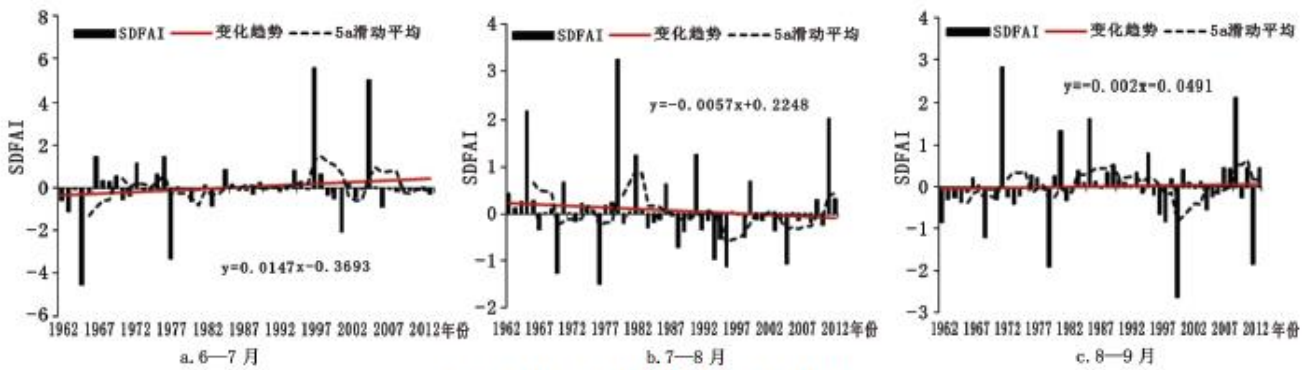


图 3 滇中地区短周期旱涝急转的变化趋势

表 2 滇中地区短周期旱涝急转事件统计结果

时段	干旱转雨涝		雨涝转干旱	
	次数	频率 (%)	次数	频率 (%)
6-7 月	5	9.1	4	7.3
7-8 月	5	9.1	4	7.3
8-9 月	4	7.3	4	7.3

## 2.3 旱涝急转周期变化

采用小波分析法不仅可得到滇中地区夏季旱涝急转周期变化时间尺度,还可对旱涝急转进行短期预测。旱涝急转小波变化图中红色渐变部分为干旱转雨涝时段,蓝色渐变部分为雨涝转干旱时段,小波系数绝对值越大即颜色越深,表示该时间尺度上的变化越显著。1962-2016 年滇中地区长周期旱涝急转存在两个不同时间尺度明显的周期振荡,分别为 5-10a、10-20a;时间尺度为 5-10a 在 20 世纪 80-90 年代周期变化显著;时间尺度为 10-20a 贯穿整个研究时段,20 世纪 90 年代-2016 年周期振荡最明显,且 2016 年处曲线未闭合,说明未来长周期旱涝急转仍处在干旱转雨涝时段(图 4a)。1962-2016 年滇中地区短周期 6-7 月旱涝急转指数存在时间尺度为 10-20a 较明显的周期振荡,且在 20 世纪 90 年代后期-2016 年的周期振荡最明显(图 4b)。短周期 7-8 月旱涝急转存在两个不同时间尺度明显的周期振荡,时间尺度为 5-15a 存在于 20 世纪 60-90 年代;时间尺度为 15-20a 贯穿于 20 世纪 80 年代-2016 年(图 4c)。夏季短周期 8-9 月旱涝急转时间尺度为 0-10a 存在于 20 世纪 70 年代-80 年代,2000-2016

年;时间尺度为 10-20a 具有全域性,旱涝急转经历“涝转旱-旱转涝-涝转旱-旱转涝-涝转旱-旱转涝”6 个循环交替周期,且 2016 年处曲线未闭合,表明未来 8-9 月旱涝急转仍处于干旱转雨涝时段(图 4d)。

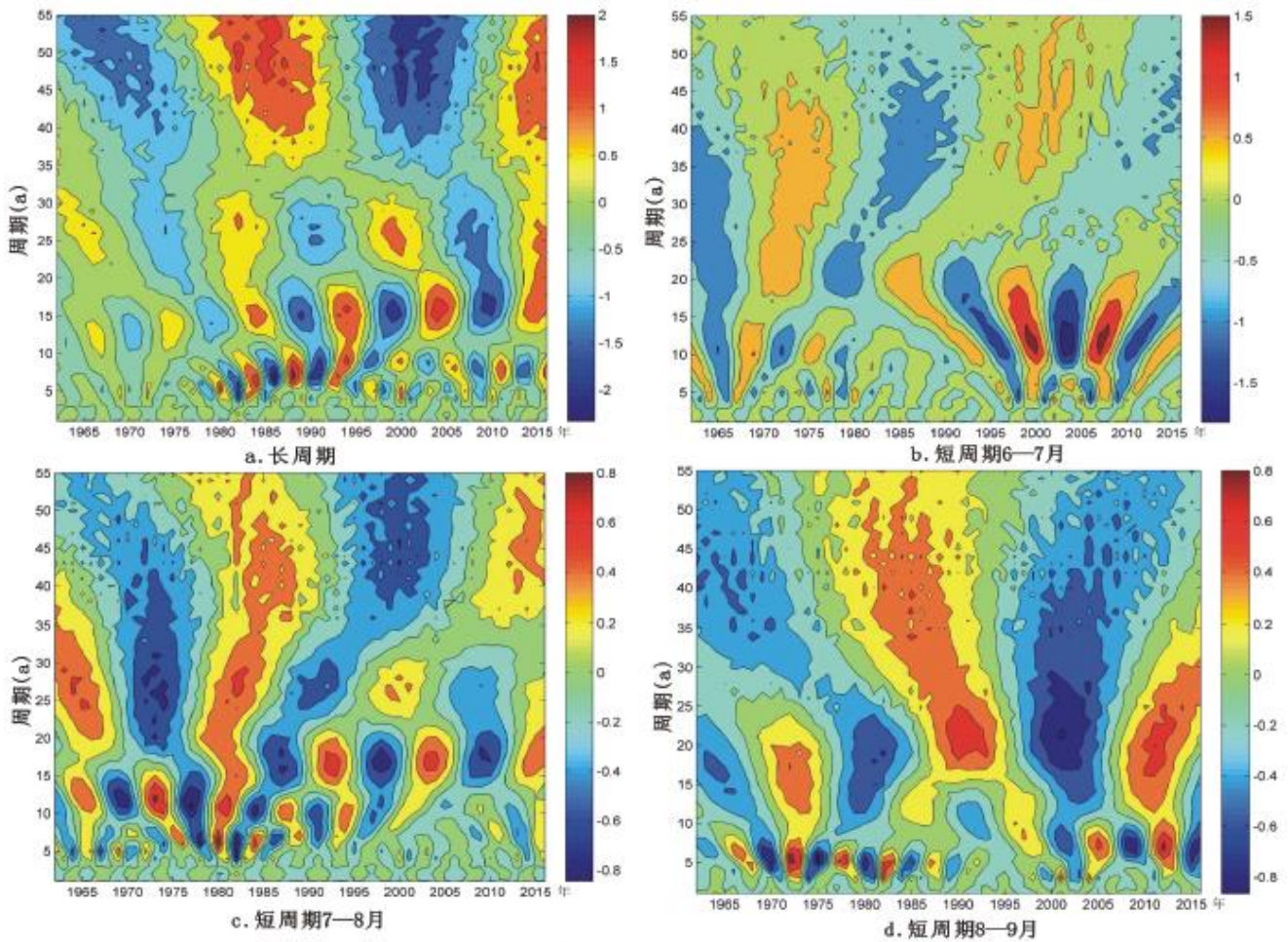


图 4 滇中地区旱涝急转小波变化

### 3 滇中地区夏季旱涝急转空间分布特征

#### 3.1 旱涝急转趋势变化空间分布

旱涝急转指数趋势值为正,表明该地区以干旱转雨涝事件为主;旱涝急转指数趋势值为负,表明该地区以雨涝转干旱事件为主。旱涝急转指数趋势通过  $\alpha=0.05$  显著水平检验,反映该事件呈显著增多趋势。长周期旱涝急转指数趋势正值呈片状分布在滇中地区西南部即以干旱转雨涝事件为主,其他地区趋势值以负值为主,其中富源、师宗通过  $\alpha=0.05$  显著水平检验,说明雨涝转干旱事件呈显著增多趋势(图 5a)。大部分地区短周期 6-7 月旱涝急转指数趋势值为正值,除滇中地区中部、东南部为负值,其中富民通过  $\alpha=0.05$  显著水平检验,反映其旱涝急转有向雨涝转干旱事件发展的趋势(图 5b)。短周期 7-8 月旱涝急转指数趋势正值呈片状分布在滇中地区中部和西南部,其他地区以负值为主,其中寻甸、马龙、麒麟及富源通过  $\alpha=0.05$  显著水平检验,表明这些地区雨涝转干旱事件呈显著增多趋势(图 5c)。短周期 8-9 月旱涝急转指数趋势值在空间分布上以正值为主,其中南华、双柏及永仁通过  $\alpha=0.05$  显著水平检验,说明这些地区干旱转雨涝事件呈显著增多趋势(图 5d)。以上分析发现,滇中地区大部分区域旱涝急转的增多趋势不显著,而部分区域旱涝急转显著的增多趋势呈斑块状分布。

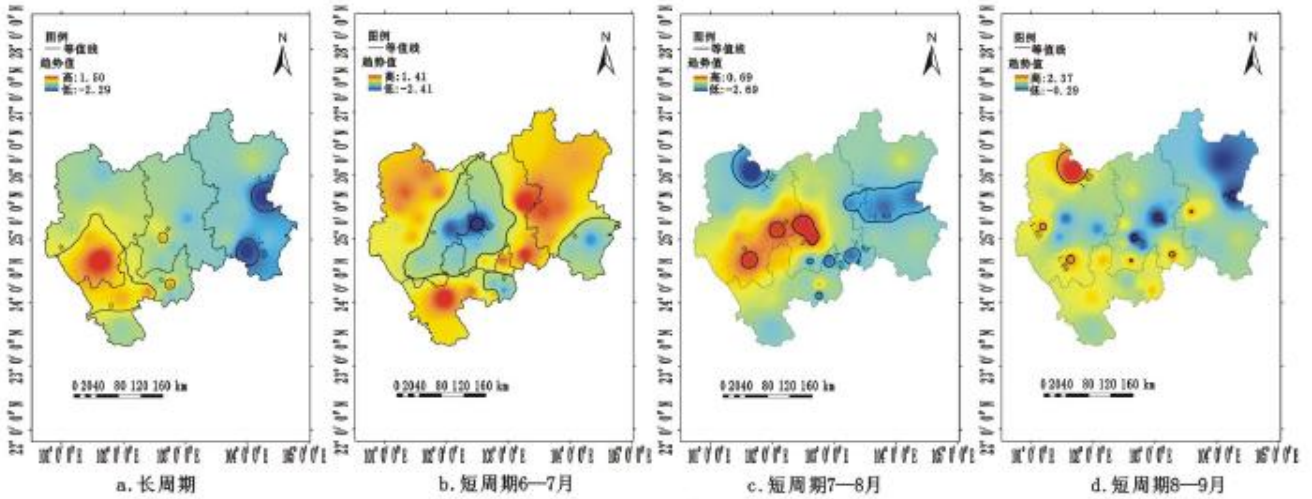


图5 滇中地区旱涝急转事件空间变化趋势

### 3.2 旱涝急转空间分布特征分析

采用经验正交函数分解 (EOF) 可得到滇中地区夏季旱涝急转空间分布特征。长周期和短周期 6-7 月、7-8 月、8-9 月前 5 个空间模态的方差贡献率如表 3 所示。第一特征向量的方差贡献率分别为 64.9%、29.6%、16.1%、18.2%，居于主体地位，是表征长、短周期旱涝急转空间分布的主要形态。由图 6a 可知，长周期旱涝急转第一特征向量荷载值空间分布大致呈现西南向东北递减的特征，表明夏季滇中地区西南部易受长周期旱涝急转事件影响；短周期 6-7 月旱涝急转在滇中地区的空间分布特征为“北多南少”。第一特征向量荷载值高达 0.31，说明滇中地区北部是 6-7 月发生旱涝急转的高发区且程度较严重 (图 6b)。短周期 7-8 月旱涝急转第一特征向量荷载值除滇中地区东南部和西北部较低，其他地区相对较高，表明 7-8 月滇中大部分地区相对容易发生旱涝急转 (图 6c)；短周期 8-9 月旱涝急转第一特征向量荷载值的高值中心位于玉溪市的新平和曲靖市的宣威，低值中心位于楚雄市的南华，说明 8-9 月新平和宣威容易受到旱涝急转影响属于敏感区 (图 6d)。由此可见，滇中地区西南和东北部更容易出现夏季旱涝急转，这与段长春、朱勇、尤卫红<sup>[22]</sup>的结果相似。

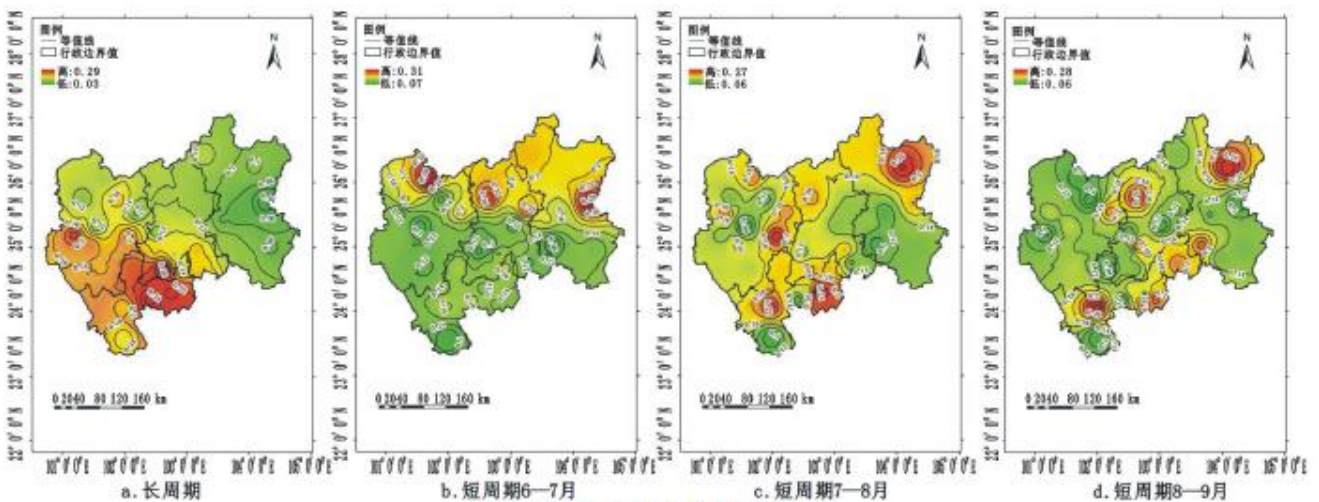


图6 滇中地区旱涝急转事件空间分布

表3 EOF 前 5 个空间模态的方差贡献率 (%)

空间模态	1	2	3	4	5
------	---	---	---	---	---

长周期	64.9	8.9	7.6	6.5	5.0
短周期 6-7 月	29.6	8.3	7.5	5.3	4.8
短周期 7-8 月	16.1	6.2	4.1	3.9	3.0
短周期 8-9 月	18.2	5.4	4.9	3.4	3.0

### 3.3 应对旱涝急转的建议

本文结合滇中地区旱涝急转时空特征提出应对旱涝急转的建议。①水利工程方面，滇中地区以中小型水利工程为主，在持续干旱时中小型水利应对居民、工业、农业用水显得力不从心，加之 20 世纪 50、60 年代建成的大多数水利工程蓄水防洪能力已大大下降，所以建设大型水利工程和修复水利工程是应对旱涝急转发生的有效措施。滇中地区未来几年旱涝急转处在干旱转雨涝时段，特别是楚雄州的南华、双柏、永仁干旱转雨涝事件呈显著增多趋势，这些城镇应提高防洪工程标准，完善防洪设施并及时清理河道，降低洪涝灾害的发生。②生态建设方面，虽然近年来滇池、抚仙湖、阳宗海的生态环境质量持续变好，但杞麓湖和星云湖生态环境质量明显变差，其水质与生态环境质量存在一致性<sup>[23]</sup>。因此，应加强对滇中地区各大湖泊生态环境防治工作，改善湖泊生态环境，逐渐恢复其原有的水域功能，使各大湖泊对旱涝急转具有缓解作用。在易发生夏季旱涝急转的滇中地区西南和东北部大力开展水源涵养林工程建设，重点在西南部的元江流域和东北部的革香河流域、可渡河流域和牛栏江流域植树造林，涵养水土。③预警方面，针对旱涝急转的转变过程历时较短的特点，应密切关注夏季中短期天气变化，随时监测河道和水库的水量变化，加强对短期持续降水或持续无降水的监控，气象、水文等相关部门应紧密合作，保证信息互通，提高对旱涝急转的灵敏度，为排涝抗旱工作提供及时准确的信息。④应急预案方面，从过去应对干旱和洪涝灾害的工作中吸取经验，不断完善旱涝急转防汛抗旱预案，制定的应急预案应具有针对性和可操作性。

## 4 结论与讨论

学者对滇中地区降水异常的研究多集中在总降水量异常上，对降水季节内异常的研究较少，然而旱涝急转是季节内降水异常的典型代表。本文基于 1962-2016 年滇中地区 37 个气象站点 6-9 月降水量，分析了滇中地区夏季旱涝急转时空分布特征，主要结论如下：①近 55 年滇中地区夏季旱涝急转以干旱转雨涝事件为主，且 20 世纪 90 年代以来滇中地区旱涝急转较为频繁，短周期 6-7 月旱涝急转呈显著上升的趋势，即干旱转雨涝事件显著增多。②1962-2016 年滇中地区夏季旱涝急转存在明显的周期变化，长、短周期 6-7 月和 8-9 月的旱涝急转均存在时间尺度为 10—20a 的周期变化。从未闭合曲线中可看出，未来几年滇中地区旱涝急转处于干旱转雨涝时段。③旱涝急转显著增长趋势呈斑块状的空间分布，富源、师宗长周期雨涝转干旱事件有显著增多的趋势，富民、寻甸、马龙、麒麟、富源短周期旱涝急转有向雨涝转干旱发展的趋势，南华、永仁、双柏则相反。④长周期旱涝急转表现为自西南向东北减少的空间分布，短周期 6-7 月旱涝急转空间上呈现“南少北多”的分布特征，7-8 月旱涝急转覆盖范围最广，滇中地区西南和东北部更容易出现夏季旱涝急转。

夏季滇中地区受东南季风和西南季风共同作用，并受到青藏高原的影响，影响季节内降水多寡的因素众多。由于数据资料 and 文章篇幅限制，本文未能从水汽输送和大气环流角度揭示滇中地区夏季旱涝急转发生强度高于其他地区的原因。20 世纪 90 年代以后，滇中地区旱涝急转现象变得频繁，这也许是对全球气候变暖的响应。此外，东北部的乌蒙山脉和西南部的哀牢山脉可能是导致滇中地区东北和西南部更容易出现夏季旱涝急转的重要因素。为进一步了解滇中地区夏季旱涝急转，这些问题今后应开展更多、更深入的研究。

### 参考文献:

[1] LIC Y, J P HUANG, Y L HE, et al. Atmospheric Warming Slowdown during 1998-2013 Associated with Increasing Ocean Heat Content [J]. Adv. Atmos. Sci., 2019, 36(11): 1188-1202.

- 
- [2]Viktor Gouretski. A New Global Ocean Hydrographic Climatology[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2019, 12(3):226-229.
- [3]何慧, 陆虹. 广西 2013 年夏季旱涝急转特征[J].热带地理, 2014, 34(6):767-775.
- [4]闪丽洁, 张利平, 陈心池. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12):2100-2107.
- [5]何慧, 廖雪萍, 陆虹, 等. 华南地区 1961-2014 年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报, 2016, 71(1)=130-141.
- [6]黄茹. 淮河流域旱涝急转事件演变及应对研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院博士学位论文, 2015.
- [7]白恒, 严登明, 翁白莎, 等. 皖北地区旱涝演变及急转特征[J].水电能源科学, 2019, 37(1): 1-4. .
- [8]王容, 李相虎, 薛晨阳, 等. 1960-2012 年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征[J].湖泊科学, 2020, 32(1):207-222.
- [9]刘宇峰, 原志华, 郭玲霞, 等. 1961-2013 年山西省夏季旱涝急转时空演变特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(4):332-340.
- [10]邢彩盈, 胡德强, 吴胜安, 等. 海南岛后汛期旱涝急转及其海气异常特征分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 568-577.
- [11]孙鹏, 刘春玲, 张强. 东江流域汛期旱涝急转的时空演变特征[J].人民珠江, 2012, 6(5):29-34.
- [12]张瑞, 吕殿青, 李景保, 1951-2016 年长江荆南三口地区旱涝演变与急转特征分析[J].水土保持学报, 2018, 32(3):132-139.
- [13]赵琳, 何萍, 1967-2016 年云南高原中部城市群降水时空变化特征分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(3):71-78.
- [14]WU Z W, LI J P, HE J H. Large-scale Atmospheric Singularities and Summer Long-cycle Droughts-floods Abrupt Alternation in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 2027-2034.
- [15]闪丽洁, 张利平, 张艳军, 等. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系[J]. 地理学报, 2018, 73(1):25-40.
- [16]吴志伟. 长江中下游夏季风降水“旱涝并存、旱涝急转”现象的研究[D]. 南京:南京信息工程大学硕士学位论文, 2006.
- [17]孙小婷, 李清泉, 王黎娟. 我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常[J]. 大气科学, 2017, 41(6):1332-1342.
- [18]程智, 丁小俊, 徐敏, 等. 长江中下游地区典型旱涝急转气候特征研究[J].长江流域资源与环境, 2012, 21(Z1): 115-120.
- [19]杨星星, 杨云川, 邓思敏, 等. 广西月尺度旱涝急转时空演变特征[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 192-203.

---

[20]张玉琴, 李栋梁. 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征研究[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(4): 430-444.

[21]何萍, 李矜霄, 付永梅, 等. 滇中城市降水特征及其成因分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 626-634.

[22]段长春, 朱勇, 尤卫红. 云南汛期旱涝特征及成因分析[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 402-408.

[23]朱泓, 王金亮, 程峰, 等. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1289-1297.