

文章编号: 2096-1618(2024)05-0581-08

近50年云南省降水区域特征分析

安冉^{1,2}, 肖天贵^{1,2}, 鄢晓茜^{1,2}, 李跃清³, 王静⁴

(1. 成都信息工程大学云南自然灾害防御技术研发中心, 云南 昆明 650034; 2. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 3. 成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 4. 云南省机场集团, 云南 昆明 650500)

摘要:为分析云南省降水时空特征, 利用云南省115个国家气象站1971–2020年降水资料, 运用旋转经验正交函数方法(EOF)对降水变化特征开展空间分区讨论, 结合累积距平分析、Mann-Kendall法、Bernaola-Galvan分割算法、滑动 t 检验、集合经验模态分解(EEMD)、Hurst指数等方法分析各空间型所对应的时间序列, 对降水变化趋势、突变时间、变化周期及未来趋势进行讨论。结果表明: (1)近50年来云南降水可分为5个主要区域, 1区为滇中以东区、2区为滇南区、3区为滇西区、4区为滇西北区、5区为滇东北区。(2)云南省5个降水分区均存在有显著的变化周期; 总体上看, 大部分区域(1、3、4、5区)有显著的准3 a、准6 a的年际尺度变化周期; (3)各分区突变发生时间有所不同, 2002、2008、2018年为全部区域均发生突变的主要时间节点; (4)各个空间型降水的主要周期及突变时间有一定差异, 但近50年年均降水均呈现减少的变化趋势, 其中3区(滇西区)减少最为显著, 5个降水分区均在未来呈现出与历史相一致的减少变化趋势。

关键词:气候变化; 降水; EOF; EEMD; 云南

中图分类号: P467

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcui.2024.05.010

0 引言

云南省地处中国西南部, 境内多山, 全省地势呈现自北向南阶梯状下降的样貌, 是一个低纬高原, 以山地为主的边疆内陆省份。其气候类型为季风气候, 在东亚季风和南亚季风的影响下, 具有干湿季分明的特点。云南山高坡陡、河流纵横、断陷盆地星罗棋布的地形, 复杂多样、破碎松散的地貌为滑坡、泥石流等地质灾害的频繁发生提供了必要的物源条件和内在因素^[1]。

目前, 中国已有不少学者关注云南省的降水并进行了多方面的研究与讨论。段长春等^[2]运用 EOF 和合成分析方法讨论云南汛期旱涝特征及大气环流特征, 指出云南省各地汛期降水具有一致性; 刘丽等^[3]运用 EOF 等方法针对云南北端强降水事件进行讨论; 刘瑜等^[4]通过趋势分析和突变检验讨论云南降水在近40 a减少的趋势变化; 陶云等^[5]分析表明云南降水量在正态统计分布上既有区域性又具有局地性, 同测站降水量的正态性按月份有所差异; 赵宁坤等^[6]集中讨论了云南雨季降水的空间区域特征, 除了对降水序列本身进行特征分析^[6–9]外, 还有许多有关大气环流系统影响的分析^[10–14]。郑建萌等^[15]针对云南冬季极端降水, 探讨北极涛动基于厄尔尼诺背景下激发的罗

斯贝波环流影响情况; 李汀等^[16]对云南主汛期季节内振荡及热带大气季节内振荡活动两者间的响应关系进行了研究; 陈艳等^[17]讨论了2015年春季云南东部降水异常受到的低频振荡影响; 晏红明^[18]关注海温异常对云南5月降水主要模态的影响; 万云霞等^[19]研究重心为低纬高原水汽输送的影响上; 张万诚等^[20]选取典型年对云南秋冬季降水的水汽输送情况进行讨论; 章慧英等^[21]针对云南地区研究了北极极涡变化特征及其和降水的联系。

虽然关于降水的研究内容丰富, 但现有研究针对云南省降水区域性特征讨论较少, 故本文利用1971–2020年云南近50 a的降水资料, 运用 EOF、Mann-Kendall、EEMD、Hurst 指数等方法, 分析云南省降水变化的区域特征、突变周期、变化趋势, 对研究云南省全年降水量变化情况的分区特征、生态环境建设、加强本地防灾减灾工作都有现实意义。

1 数据与方法

1.1 研究区域与数据

气象数据来源于国家气象信息中心, 综合考虑气象站缺测、时间范围一致性等因素, 选取云南省共115个站点及其1971–2020年的逐日降水资料。站点分布及海拔如图1所示。

收稿日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金集成资助项目(91937301); 云南省重点研发计划资助项目(202203AC100006、202203AC100005), 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK010408)

通信作者: 王静. E-mail: 837551476@qq.com

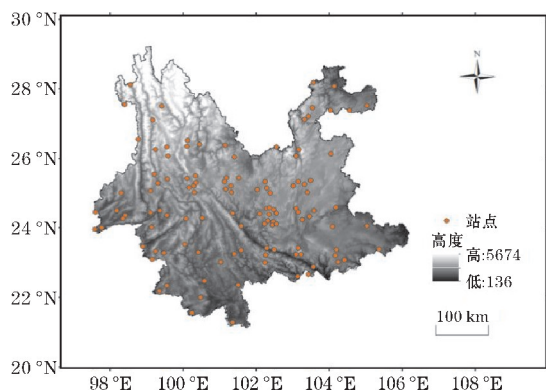


图1 云南省站点分布

1.2 研究方法

(1) REOF 旋转经验正交函数 (rotated empirical orthogonal function), 是以 EOF 分析方法为基础的, 建立在其方法之上^[22], 将特征向量轴旋转至某一位置, 使旋转后的因子能够将极大极小值两极分化, 实现以较小的区域范围体现出与主成分信息高度相关的高荷载值, 使分离空间的结构清晰, 辨识度更高, 克服 EOF 的局限性^[23-24], 更好地表现出不同地理区域的因子特征。本文采用 REOF 方法并利用 ArcGIS 软件将云南省降水在空间上进行分区。

(2) 突变分析方法。本文运用累积距平法 (COV)、Mann-Kendall (M-K) 法、BG (Bernaola-Galvan) 分割算法、滑动 t 检验等多方法, 对云南省年均降水的突变时间进行分析讨论。累积距平法能够有效减少系统漂移和环境因素产生误差所带来的影响, 准确度和可靠性良好; M-K 法对于数据本身要求较低, 对水文及气象等非正态分布数据有较好的处理效果; 滑动 t 检验手动设置子序列时段, 比较数据序列间平均值的差异情况, 看其是否达到一定的显著性水平^[25]; BG 分割算法则更加适用于非平稳时间序列, 通过对分割后的子序列进行重复分割操作, 至不可继续分割, 最终实现对突变点检验^[26]。

(3) EEMD (ensemble empirical mode decomposition) 作为改进的经验模态分析方法^[27-28], 是一种以白噪声相辅的改进 EMD 方法, 适用于非平稳及非线性信号, 通过叠加白噪声进行多次模式分解, 能够较好地抑制 EMD 分解后 IMF 分量间存在的各模态相互叠加的影响。近些年, EEMD 分析方法大量运用于对数据序列尺度量级的变化特征^[29] 及其趋势预测分析^[28-30] 的研究。本文对信号序列进行 EEMD 分解, 对得到的 4 个 IMF 分量及一个残余量 (res) 进行研究讨论。

(4) Hurst 指数值可以很好地体现序列的趋势情况。其取值在 0~1, 以 0.5 为分界线, 当 H 值等于 0.5 时, 可以认为序列没有自相关性, 即其未来变化趋势与现有序列无关, 其未来变化具有一定随机性; 当 H 值

大于 0.5 时, 可以认为序列在未来的变化与序列本身有相关性, 未来将继续延续其变化趋势, H 值越接近 1, 相关性越强; 当 H 值小于 0.5 时, 可以认为序列在未来的变化与序列本身有负相关性, 未来的变化趋势将与过去相反。

2 云南省降水空间分区

本文选取 REOF 方法对云南省年均降水的变化进行空间分区。经计算, 前 5 个空间分区的累计方差贡献率为 62.49% (见表 1), 能够表征研究区年均降水的变化特征及空间分区特征的相关性。

表1 前5个 REOF 分解模态方差贡献率和累计方差贡献率 单位: %

分区	方差贡献率	累计方差贡献率
1 区	21.81	21.81
2 区	21.08	42.90
3 区	8.05	50.95
4 区	7.09	58.04
5 区	4.44	62.49

运用 Arcgis 软件反距离权重插值, 绘制等值线图并填色 (见图 2), 取空间模态荷载量绝对值大于等于 0.12 的部分对应为高值区, 将云南地区年均降水序列的变化划分为 5 个区。1 区 (图 2a) 为滇中以东区, 载荷向量场方差贡献率为 21.81%, 高值区位于云南中东部, 共涵盖 31 个站点, 低值区位于西南部地区; 2 区 (图 2b) 为滇南区, 载荷向量场高值区位于云南西南部, 与 1 区中低值区域相对应, 共覆盖 31 个站点, 方差贡献率值为 21.08%; 3 区 (图 2c) 为滇西区, 载荷向量场方差贡献率为 8.05%, 高值区位于云南西部, 所覆盖面积和其他区相比较小, 包含有 21 个站点; 4 区 (图 2d) 为滇西北区, 载荷向量场方差贡献率为 7.09%, 高值区域位于云南西北部, 此时低值区域分布在云南南部及西部地区, 高值区共覆盖 19 个站点; 5 区 (图 2e) 滇东北区载荷向量场方差贡献率为 4.44%, 位于东北部的高值中心明显强于东南部地区的高值区, 所覆盖面积较小, 共覆盖 13 个站点。从 REOF 对云南地区年均降水分区图 (图 2f) 可以看出, 分区情况效果较好, 与云南复杂多山的地形地貌特征相符合, 且与以往的相关研究具有一致性^[8]。

3 云南省各分区降水趋势分析

图 3 为云南 5 个年均降水变化分区的波动情况, 云南省及其 5 个降水分区年均降水的气候倾向率均为负值, 表示 1971~2020 年云南省年均降水均呈现减少的变化趋势, 其中 3 区的减少趋势最为显著 (32.32 mm/10 a)。

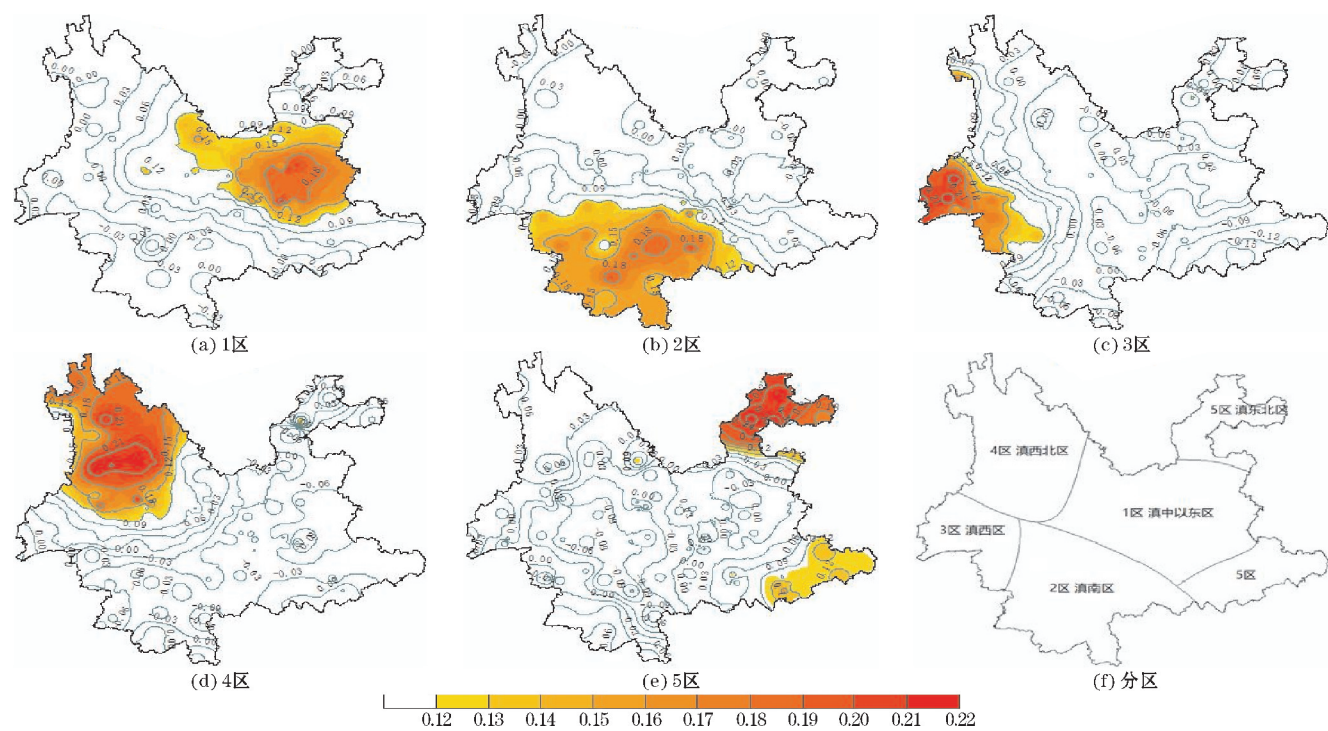


图 2 1971–2020 年云南省降水 REOF 分解的特征向量空间分布及分区情况

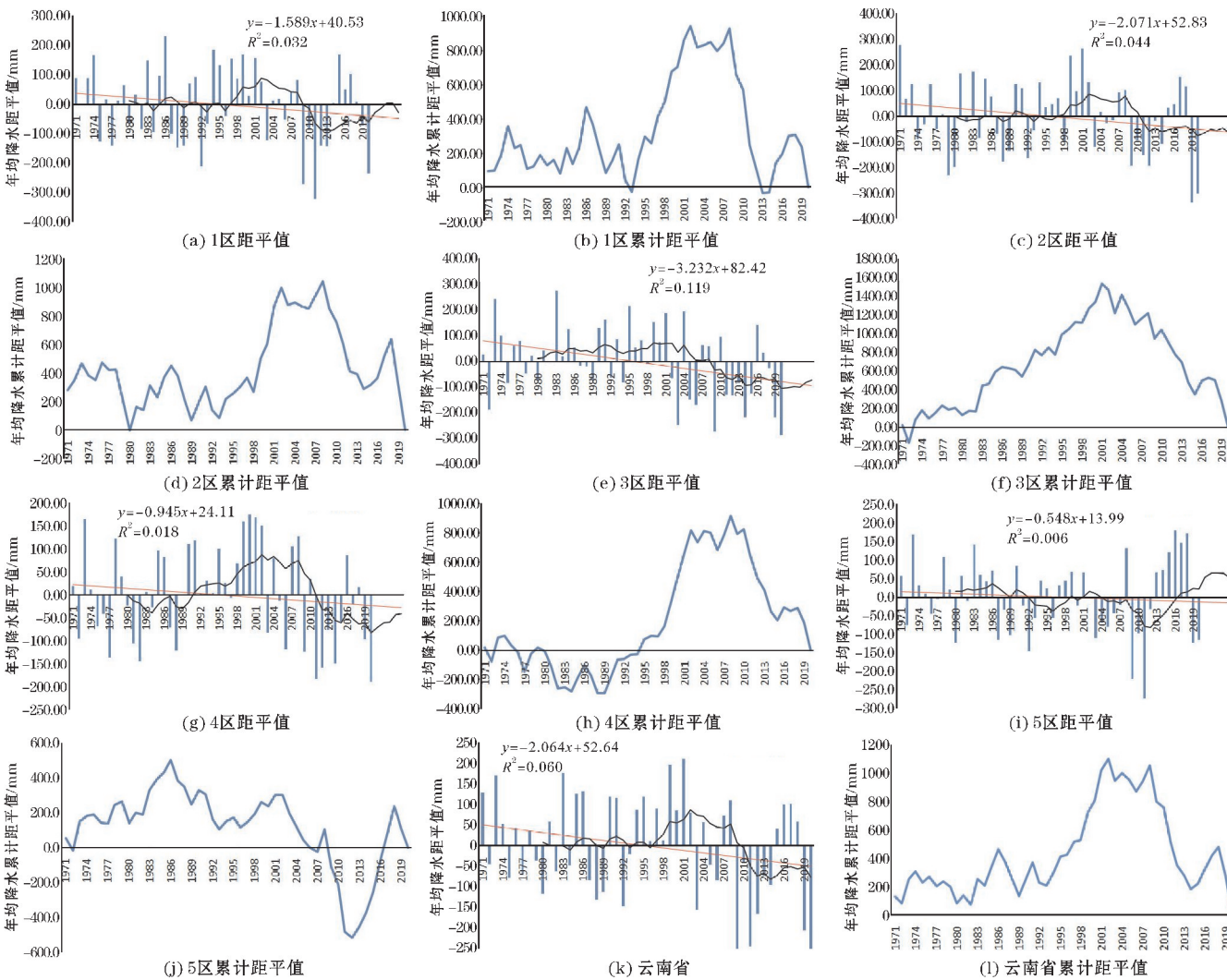


图 3 1971–2020 年云南省及其各降水分区年均降水距平值及累计距平值(黑色实线为年均降水 10 a 滑动平均,红色实线为年均降水距平值线性变化)

1区、2区的年均降水变化情况相似(图3a、3c),在累计距平值变化图上可以看到,1区、2区的年均降水都呈现出先波动变化,直至1992年后呈现出明显的增加趋势,并持续至2002年左右,而在2002–2008年无明显变化后开始转变为减少的变化趋势,后以2014年、2018年为节点有先增加后减少的变化。2区的减幅为20.71 mm/10 a,略大于1区15.89 mm/10 a的减幅,故2区年均降水的减少趋势略强于1区。3区的年均降水以32.32 mm/10 a的速率减少,是云南5个降水分区中减少趋势最强的区域,1972年从短暂减少的形势转为持续增加的形势,时间持续至2002年左右,属于湿润期,后转为持续下降的趋势,转变为相对干期。4区的年均降水减少速率为9.45 mm/10 a,在1994年前及2002–2010年持续波动变化,1994–2001年持续增加,2010–2020年呈现减少趋势。5区的年均降水呈现为较弱的减少趋势,为5.48 mm/10 a,在1992–1986年、1996–2002年及1986–1996年几个时间段内,分别呈现出波动增加和波动减少的趋势,而在2002年后,以2013年为时间节点,前后分别为年均降

水显著减少的相对干期,以及显著增加的相对湿润期,其中在2008年左右有一次波动变化,而增加趋势在2018年发生转变,由增加变为减少的变化趋势。

由图3(k)及图3(l)可以看到,云南省全域年均降水距平值及累计距平值变化形势与1区、2区情况相同。综合看来,各区的突变发生时间有差异,但在2002年左右,云南全域的年均降水有一次干突变,使得年均降水由增加转为减少的变化趋势。

4 云南省各分区降水突变情况

利用 Mann-Kendall 方法对5种不同旋转荷载区域的年均降水趋势进行分析(图4)。UFk 或 UBk 大于0的部分,表现出降水序列的上升增加趋势,UFk 或 UBk 超过0.05显著性检验的部分,则表现出显著的上升或下降趋势;UFk 和 UBk 相交的节点为突变发生对应时间点。由图4可知,在5个主要旋转荷载区域内,降水序列 UFk 曲线变化基本均未超过 $u_{0.05} = 1.96$ 显著性水平的变化,整体以下降的趋势为主。

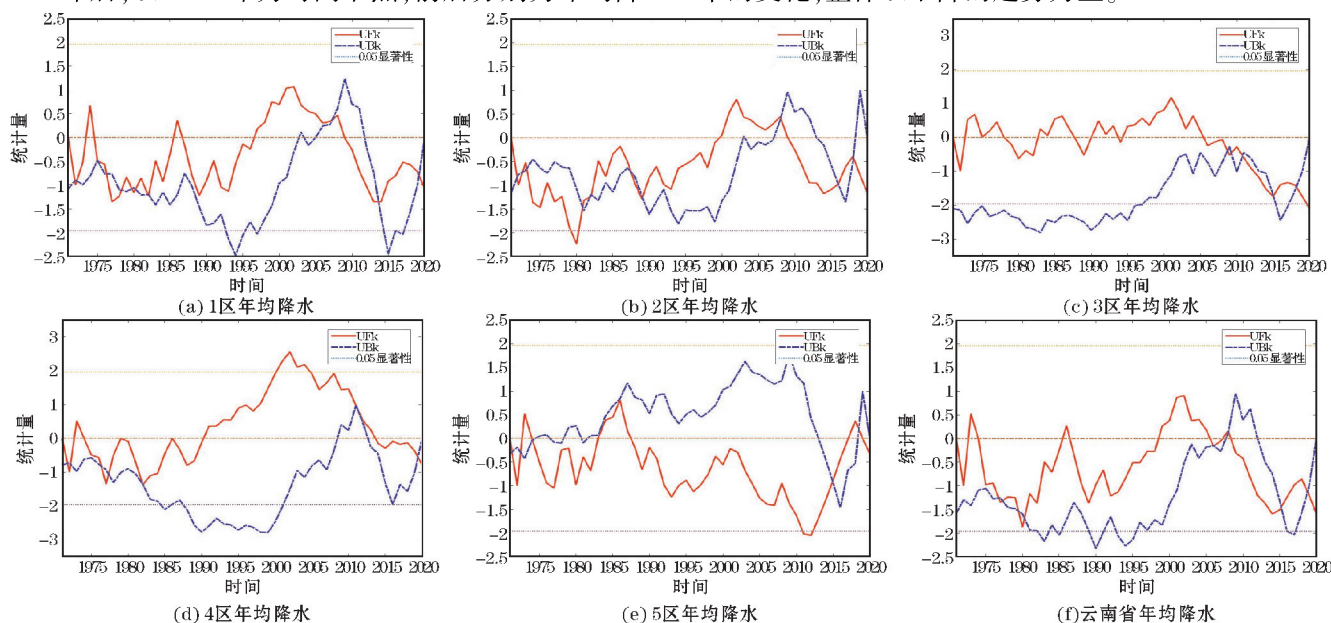


图4 云南省及各分区年均降水 M-K 变化

由图4(a)可见,1区内的降水整体为波动变化形势,在1971–1975、1985–1986年在0值上下波动,1997–2009年有上升的趋势,其余时间均为下降趋势;根据UFk和UBk的交点判断,在1972、1975–1982年发生有时间较为接近的几次突变,2008、2013、2019年有突变发生,其中,2008年的突变呈现弱的上升趋势。2区内的降水整体为波动下降的形势(图4b),仅在2000–2009年有弱的上升形势,1971–1985年下降趋势明显,且在1980年左右达到最高,下降趋势最为显著,超过 $u_{0.05} = 1.96$ 显著性水平,但持续显著下降的时间较短。在1972、1981、1987–1989、2008、2018年有突变发生。3区内的UFk曲线在2008年突变发生前均在0值上下波动,相较于其他区域,变化趋势更不明

显,在2012突变年后呈现下降趋势。结合UFk和UBk曲线,2009、2015、2018年发生突变。4区内的降水序列UFk变化曲线在1990–2013年有上升趋势(图4d),且在2002–2005年上升趋势最为显著,超过 $u_{0.05} = 1.96$ 显著性水平,其余时段波动变化,有弱的下降趋势。突变发生在1971、1978、1982、2010、2019年。5区内的降水序列UFk变化曲线在1989–2016年有下降趋势(图4e),在1971–1989、2016–2020年均均在0值上下波动。在1971–1974年有3次间隔较短的突变,在1985–1987、2015、2018年发生突变。

云南省降水序列UFk变化曲线整体在0值下方(图4f),在1972–1980年、1986–1989年、2002–2014年呈现下降趋势,突变发生在1977、1980、2008、2015、2018年。

表 2 1971–2020 年云南年均降水变化突变点综合诊断

参数	年均降水量序列突变点(年)														
	1 区			2 区			3 区		4 区			5 区			云南
累积距平	1992	2002	2008	1980	2002	2008	1972	2001	1986	2008		1986	2002	2013	1992 2002 2008 2013 2018
M-K 法	1978–1980	2008		1972	1981	1987	2009	2015 2018	1971	1978	1982	1972	1985	2015	1997 1980 2008 2015 2013 2019
BG 分割法	2008			1973	2019		1972	2002	1989	2009		2013			2002 2019
滑动 t 检验															
5 a 子序列	2001–2002 *			2008 **	2013 *		\\		1997 *	2002 *		2002 **	2013 **		2002 * 2008 * 2013 *
10 a 子序列	2002 **			2002 *	2008 *		2002 * 2004 *		1989 **	2002 *		1986 *	2002 *		2002 ** 2004 ** 2008 *
15 a 子序列	2005 *			\\			2001 * 2004 *		1989 *	2002 *		\\			2002 * 2004 *
									2004 *						

注: *、** 分别表示通过 0.05、0.01 的显著性检测。

表 2 为运用累积距平、M-K 法、滑动 t 检验、BG 分割算法,检验云南省及其各降水分区的突变点。对比分析得出,5 个降水分区均有多个明显突变点,1 区、2 区突变发生时间相似,在 1992 年、2013 年左右发生湿突变,在 2008 年、2018 年左右发生干突变。3 区明显突变发生在 2001–2002 年;4 区在 1982–1989 年有间隔较短的多次突变,在 2002–2008 年发生干突变;5 区在 1986 年、2002 年以及 2018 年发生干突变,在 2013

年左右有一次湿突变发生;云南省年均降水在 1992 年、2013 年左右发生湿突变,在 2008 年、2018 年左右发生干突变。

5 云南省各分区降水周期提取

对 1971–2020 年云南省及其各降水分区进行 EE-MD 分解(图 5),5 个降水分区均可分解为 4 个 IMF 分

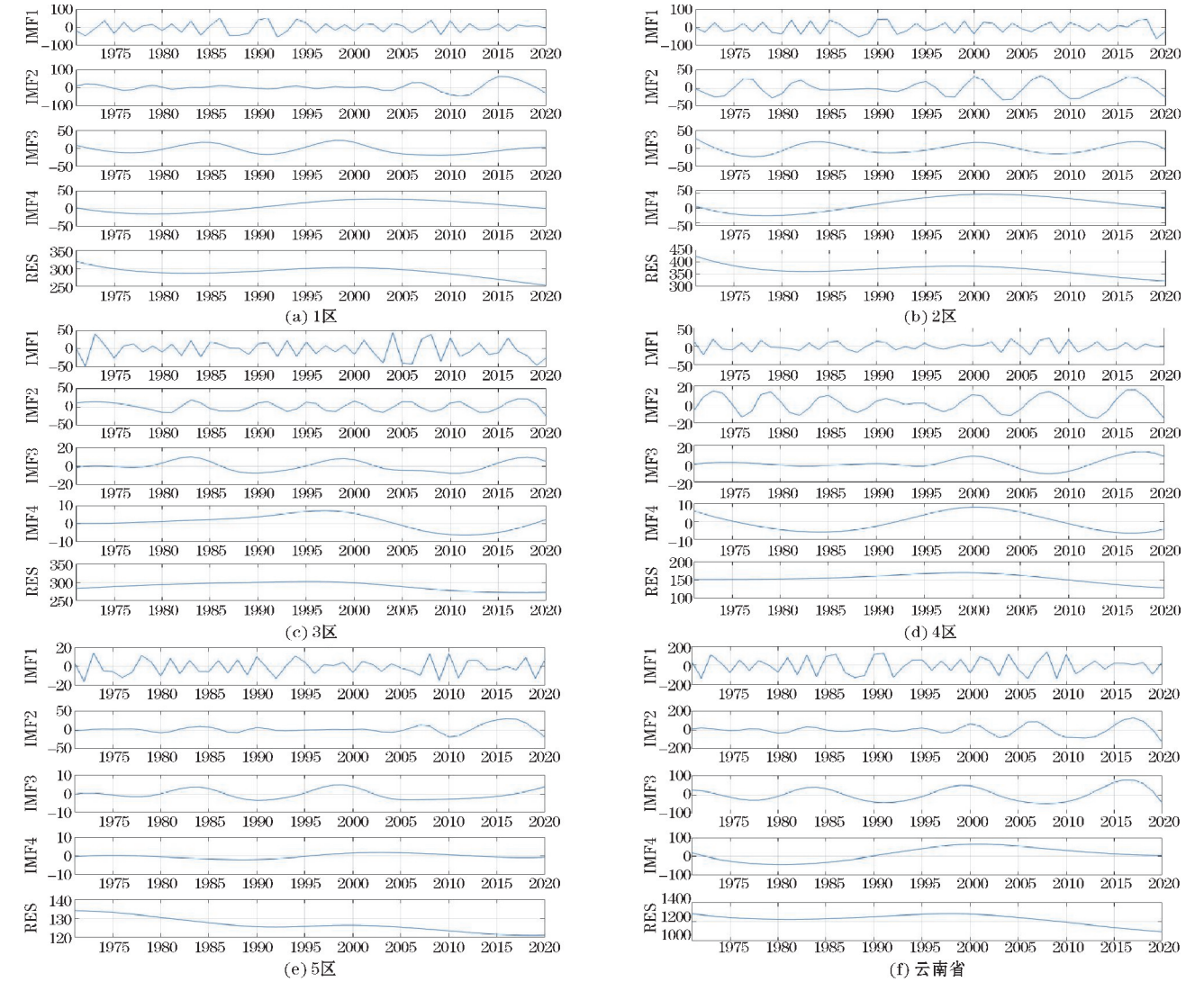


图 5 1971–2020 年云南省及其各分区的降水序列 EEMD 分解

量及 1 个残余量(趋势项 res),res 的变化情况可以用来表示序列随时间变化的总体变化情况。由 res 序列变化形势(图 5)可以看到,云南全域未来年均降水均呈现下降趋势,其中 1、2、5 区均在整体减少的趋势期间有一段较弱的增加,3 区及 4 区则为由较平稳的弱上升转为下降的趋势。

表 3 为云南省及其 5 个降水分区 IMF 的周期、方差贡献率及相关系数。由表 3 可以看到,云南 5 个降水空间分区的 IMF1、IMF2 的方差贡献率较高,表明降水存在明显的准 3 a、准 6 a 年际变化周期。1 区具有准 3 a、6 a、16 a、50 a 的主周期变化,表明其降水具有准 3 a、准 6 a 的年际尺度周期特征,以及准 17 a、准 50 a 的年代际尺度周期特征。准 3 a 对应 IMF1 分量方差贡献率最高达 41.24%,且与原序列相关性最高,说明准 3 a 周期变化占主导地位;IMF2 分量方差贡献及相关性较好,准 6 a 周期也较为明显。在云南降水分区 1 区中,

以准 3 a 及准 6 a 的变化周期为主。2 区具有准 3 a、7 a、16 a、50 a 的主周期变化,结合各分量的方差贡献率及相关系数,能够看到 2 区主要表现为准 3 a 和准 16 a 的周期特征。相比 IMF1 分量,IMF2、IMF3 分量方差贡献率及相关系数均较差。3 区具有准 3 a、6 a、10 a、50 a 的主周期变化,准 3 a 对应 IMF1 分量方差贡献率最高达 69.09%,相关系数为 0.82,远远高于其余分量,说明准 3 a 周期在 3 区占主导地位。4 区具有准 3 a、6 a、13 a、50 a 的主周期变化,IMF1、IMF2 相关性强、方差贡献率高,有明显的准 3 a 及准 6 a 周期振荡特征。5 区具有准 3 a、6 a、17 a、25 a 的主周期变化,在年际尺度上具有准 3 a、准 6 a 的周期特征,年代际尺度上有准 17 a、准 25 a 的周期特征,准 6 a 对应 IMF2 分量方差贡献率以及相关系数相较 IMF1 分量最高,表明准 6 a 周期变化更为明显,准 3 a 的周期特征次之。

表 3 云南省及其各降水分区 IMF 周期、方差贡献率和相关系数

分区	周期/a				方差贡献率/%					相关系数				
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	res	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	res
1 区	2.78	5.56	16.67	50	41.24	24.03	7.34	8.65	18.75	0.68	0.53	0.42	0.03	0.17
2 区	2.94	7.14	16.67	50	35.60	15.52	6.95	26.17	15.77	0.74	0.47	0.38	0.12	0.12
3 区	2.78	6.25	10.00	50	69.09	17.26	4.10	1.67	7.87	0.82	0.36	0.18	0.27	0.43
4 区	3.13	6.25	12.5	50	42.30	24.47	9.92	6.66	16.65	0.72	0.56	0.08	0.42	0.38
5 区	3.13	6.25	16.67	25	34.63	54.01	2.96	0.66	7.74	0.59	0.70	0.28	-0.09	0.11
云南	2.94	6.25	16.67	50	48.32	17.72	7.84	7.78	18.34	0.72	0.55	0.37	0.12	0.14

云南省具有准 3 a、7 a、16 a、50 a 的主周期变化,结合各分量的方差贡献率及相关系数,可以看到云南省主要表现为准 3 a 的周期特征。IMF1 分量方差贡献率最高且相关关系最好。可以看到,通过 EEMD 分解得到的 4 个 IMF 分量,均表现为以年际变化为主的准年代际和年际双重周期变化。云南省的年均降水具有明显的准 3 a 周期特征,以及在 5 区更为明显的准 6 a 振荡周期特征。

6 云南省各分区降水趋势预测

由表 4 可见,云南地区 5 个降水空间分区的 Hurst 指数均大于 0.5,降水存在比较明显的 Hurst 现象,具有正持续性,研究区未来的年均降水将延续过去变化

趋势的可能性大,即年均降水在未来呈现出与历史相一致的减少变化趋势。根据统计结果可以看到,各分区内各个站点 Hurst 指数主要分布在 0.6~0.7,其次是 0.5~0.6 及 0.7~0.8,104 个站点(90.4%)在 0.5~0.8,仅有 7 个站点(6.1%)Hurst 值大于 0.8,持续减少趋势最为显著,而全域 60.9% 的站点在 0.6~0.8,即大部分站点都呈现出较明显的减少变化趋势,29.5% 的站点在 0.5~0.6,Hurst 现象相对较弱,此外还有 4 个站点(3.5%)Hurst 值小于 0.5,认为其未来有弱增加的变化趋势。2 区降水序列 Hurst 值为 0.5669,变化趋势弱,虽然与总体变化趋势一致,但就未来更长时期看,变化趋势可能发生变化,具有一定随机性;4 区、5 区 Hurst 值分别为 0.8239 和 0.7908,远大于 0.5,未来年均降水有强的持续减少趋势。

表 4 云南各分区年均降水 Hurst 指数及不同变化趋势站点数量

分区	历史趋势	Hurst 指数	未来趋势	>0.8	0.7~0.8	0.6~0.7	0.5~0.6	<0.5
1 区	减少	0.6499	减少	2	8	12	8	1
2 区	减少	0.5669	减少	1	1	12	15	2
3 区	减少	0.7077	减少	2	1	10	7	1
4 区	减少	0.8239	减少	2	11	6	0	0
5 区	减少	0.7908	减少	0	0	9	4	0
合计百分率/%				6.1	18.3	42.6	29.5	3.5

7 结论与展望

利用云南省 115 个国家气象站 1971–2020 年降水资料,运用旋转经验正交函数(EOF)方法对降水变化特征开展空间分区讨论,结合累积距平分析、Mann-Kendall 法、BG 分割算法、滑动 t 检验、Hurst 指数等方法分析各空间型所对应的时间序列,对降水变化趋势、突变时间、变化周期及未来趋势进行了讨论,结论如下。

(1)根据云南省降水量 REOF 分析可得:近 50 a 云南降水可分 5 个主要区域,1 区为滇中以东区、2 区为滇南区、3 区为滇西区、4 区为滇西北部、5 区为滇东北区。是与云南复杂多山地地形地貌特征相符合,且与以往的相关研究具有一致性的。

(2)云南省 5 个降水分区均存在有显著的变化周期:总体上看,大部分区域(1、3、4、5 区)有显著的准 3 a、准 6 a 的年际尺度变化周期,弱的准 16 a、准 50 a 年代际变化周期;2 区则存在显著的准 3 a 的年际尺度、准 16 a 的年代际尺度变化周期。

(3)各分区突变发生时间有所不同,2002、2008、2018 年为全部区域均发生突变的主要时间节点。

(4)就整体而言,云南省近 50 a 的降水变化具有一致性,均呈现出减少的变化形势,其中 3 区(滇西区)减少最为显著,降水在 1990–2000 年左右有弱的增加,其余时段均呈现为降水减少的变化形势。根据 Hurst 指数分析可见,云南省 5 个分区的年均降水在未来均呈现出与历史相一致的减少变化趋势。

参考文献:

- [1] 秦剑,解明恩,刘瑜,等. 云南气象灾害总论[M]. 北京:气象出版社,2000.
- [2] 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(2):402–408.
- [3] 刘丽,陶云. 云南省汛期极端强降水事件的气候特征[J]. 干旱气象,2012,30(1):15–20.
- [4] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学,2010,25(1):39–44+63.
- [5] 陶云,段旭. 云南降水正态分布特征的初探[J]. 气象科学,2003(2):161–167.
- [6] 赵宁坤,孙俊奎,尤卫红,等. 云南省雨季降水量变化的区域特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版),2009,31(6):592–599.
- [7] 吴尧,肖天贵,赵平,等. 2008–2020 年成都地区盛夏降水时空分布特征[J]. 水土保持研究,2022,29(5):343–349.
- [8] 严谨,赵勇. 中亚降水和气温的时空演变特征[J]. 成都信息工程大学学报,2022,37(5):592–600.
- [9] 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.
- [10] 王映思,肖天贵,董雪峰,等. 东亚和南亚季风协同作用对西南地区夏季降水的影响[J]. 气象学报,2021,79(4):541–557.
- [11] 王瑞英,肖天贵. 西南地区雨季降水的时空分布及预报试验[J]. 气象科学,2020,40(3):354–362.
- [12] Wang Dong, Du Shuang Chen, et al. Multiscale variability of China's historical flood/drought index and precipitation teleconnections with ENSO using wavelet analyses[J]. Theoretical and Applied Climatology,2022,149(3/4):1583–1597.
- [13] Yang Mingxin, Xiao Tianguai, Zhao Ping, et al. Joint effect of East Asia-Pacific and Scandinavian teleconnections on summer precipitation in Southwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology,2022,150(3/4):1477–1493.
- [14] Wang Yingsi, Xiao Tianguai, Dong Xuefeng, et al. Influence of 30–60 Days Intraseasonal Oscillation of East Asian Summer Monsoon on Precipitation in Southwest China[J]. Atmosphere,2022,13(8):1222.
- [15] 郑建萌,姚愚,李蕊,等. El Niño 背景下 AO 激发 Rossby 波对云南冬季极端降水的影响[J]. 高原气象,2021,40(4):840–852.
- [16] 李汀,琚建华. 亚洲夏季风季节内振荡对云南主汛期降水的影响 II: 云南主汛期季节内振荡活动过程及其对 MJO 活动的响应[J]. 高原气象,2013,32(3):626–634.
- [17] 陈艳,张万诚,陶云,等. 低频振荡对 2015 年春季云南东部降水异常的影响[J]. 气象,2021,47(7):805–816.
- [18] 晏红明. 海温异常对云南 5 月降水主要模态的影响[J]. 高原山地气象研究,2022,42(2):1–11.
- [19] 万云霞,晏红明,金燕,等. 低纬高原水汽输送特征及其对云南气候的影响[J]. 高原气象,2020,39(5):925–934.
- [20] 张万诚,万云霞,任菊章,等. 水汽输送异常对 2009 年秋、冬季云南降水的影响研究[J]. 高原气象,2011,30(6):1534–1542.

- [21] 章慧英, 闫生杰. 北極極渦变化特征与云南降水量的关系[J]. 气象科技, 2015, 43(3): 488–496.
- [22] Chang C H, Lee H, Do S K, et al. Operational forecasting inundation extents using REOF analysis (FIER) over lower Mekong and its potential economic impact on agriculture[J]. Environmental Modelling & Software, 2023, 162: 105643.
- [23] 徐碧裕, 叶朗明, 胡丽华, 等. 1968–2017 年广东汛期降水 REOF 分型特征[J]. 广东气象, 2020, 42(6): 5–9.
- [24] Bi Shuoben, Qiu Xiangkai, Wang Guojie, et al. Spatial distribution characteristics of drought disasters in Hunan Province of China from 1644 to 1911 based on EOF and REOF methods[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(16): 533.
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [26] 封国林, 龚志强, 董文杰, 等. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. 物理学报, 2005, 54(11): 5494–5499.
- [27] Shabbir Maha, Chand Sohail, Iqbal Farhat. Prediction of river inflow of the major tributaries of Indus river basin using hybrids of EEMD and LMD methods [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2023, 16(4): 257.
- [28] 刘晓琼, 孙曦亮, 刘彦随, 等. 基于 REOF-EEMD 的西南地区气候变化区域分异特征[J]. 地理研究, 2020, 39(5): 1215–1232.
- [29] 李玉霞, 陈玲玲, 江亭桂, 等. 基于 EEMD 的太阳活动对印度夏季风的多尺度胁迫分析. 地理科学, 2018, 38(4): 628–635.
- [30] 徐岩岩, 常军. 基于 DERF2.0 模式 1–52 天最低温度逐日预报的检验评估. 高原气象, 2018, 37(4): 1042–1050.

Analysis of Regional Characteristics of Precipitation in Yunnan Province in the Last 50 Years

AN Ran^{1,2}, XIAO Tianguai^{1,2}, YAN Xiaoxi^{1,2}, LI Yueqing³, WANG Jing⁴

(1. Yunnan R&D Institute of Natural Disaster on Chengdu University of Information and Technology, Kunming 650034, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225, China; 3. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China; 4. Yunnan Airport Group, Kunming 650500, China)

Abstract: To analyze the spatiotemporal characteristics of precipitation in Yunnan Province over the past 50 years, precipitation data from 115 national meteorological stations in Yunnan Province from 1971 to 2020. The rotating empirical orthogonal function (REOF) method was employed to examine the spatial patterns of precipitation changes. Various analytical techniques such as cumulative anomaly analysis, Mann-Kendall method, Bernaola-Galvan segmentation algorithm, sliding t-test, set empirical mode decomposition (EEMD), and Hurst index were applied to analyze the time series corresponding to each spatial type. The trend, mutation time, change cycle, and future trends of precipitation were discussed. The results show that: (1) In the past 50 years, precipitation in Yunnan can be divided into five main regions: Zone 1 is to the east of central Yunnan, Zone 2 is to the south of Yunnan, Zone 3 is to the west of Yunnan, Zone 4 is to the northwest of Yunnan, and Zone 5 is to the northeast of Yunnan. (2) There are significant change cycles in all five precipitation zones in Yunnan Province: overall, most regions (1, 3, 4, and 5) have significant interannual scale change cycles of quasi 3 a and quasi 6 a; (3) The occurrence time of mutations varies among different regions, with 2002, 2008, and 2018 being the main time nodes for all regions to experience mutations; (4) There are certain differences in the main cycles and mutation times of various spatial types of precipitation, but the average annual precipitation in the past 50 years has shown a decreasing trend, with the most significant decrease in the three regions (western Yunnan), and the five precipitation regions showing a consistent decreasing trend in the future with history.

Keywords: climate change; precipitation; REOF; EEMD; Yunnan Province