

藏东南地区近二十年降水分区及时空演化特征

鲁 响,赵伟华

地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学),成都 610059

[摘要] 在全球变暖的背景下,藏东南地区的降水变化不仅会影响区域水资源分布,同时还对区域的水循环、冻土演变等产生重要影响,因此深入研究该地区的降水时空格局及演化规律,对区域生态环境保护具有重要意义。对藏东南地区 76 个气象站点 2000—2021 年的降水数据,采用反距离权重插值(IDW)、旋转经验正交函数(REOF)、Sen's 斜率估计、Mann-Kendall 趋势检验和 Morlet 小波分析等方法分析了该地区降水的时空分布及演化特征。结果表明:藏东南地区降水空间和时间上总体表现为“东高西低”“雨热同期”。基于旋转经验正交函数将研究区划分为 10 个子区域。不同子区域间降水分区特征明显,其中东部的 I 区、II 区、IV 区、VI 区和 X 区降水呈现增加趋势,其余子区域降水均呈现不同程度降低趋势;各分区的年平均降水量在近 20 年内均有突变产生,且不同分区间的平均降水量波动周期有所差异。以上成果可为藏东南地区生态环境保护措施的制定提供支持。

[关键词] 藏东南地区;降水分区;旋转经验正交函数;突变检验;降水周期

[分类号] P426.614

[文献标志码] A

Characteristics of precipitation and its spatiotemporal evolution in southeast Tibet in the last two decades

LU Xiang, ZHAO Weihua

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China

Abstract: In the background of global warming, changes in precipitation in southeast Tibet will not only influence the distribution of regional water resources, but will also have an important impact on the regional water cycle and the evolution of permafrost. In this paper, we analyze the spatial and temporal distributions as well as the characteristics of evolution of precipitation recorded at 76 meteorological stations in southeast Tibet from 2000 to 2021 by using inverse distance weighted

[收稿日期] 2023-06-25。

[基金项目] 水电水利规划设计总院委外科技课题(DJ-ZDXM-2019-3);四川省自然科学基金面上项目(2022NSFSC0408)

[第一作者] 鲁响(1998—),男,硕士研究生,研究方向:地质灾害与生态环境。E-mail:1321720545@qq.com。

[通信作者] 赵伟华(1985—),女,博士,副教授,研究方向:地质灾害演化机理及监测预警。E-mail:zhaoweihua15@cdut.edu.cn。

[引用格式] 鲁响,赵伟华,2024. 藏东南地区近二十年降水分区及时空演化特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),51(4):698-707.

Lu X, Zhao W H, 2024. Characteristics of precipitation and its spatiotemporal evolution in southeast Tibet in the last two decades[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4):698-707.

interpolation, the rotational empirical orthogonal function (REOF), Sen's method of slope estimation, Manne-Kendall trend test, and Morlet wavelet analysis. The results show that precipitation in southeast Tibet was generally high in the east and low in the west, while raining and hot during the same period occurred in the same season. We used the REOF, to divide the study area into 10 sub-regions. The precipitation in different sub-regions exhibited prominent regional characteristics. It showed a trend of increases in the eastern regions I, II, IV, VI and X trendvarying degrees. The annual average precipitation and period sub-region. The results can provide support for the formulation of ecological and environmental protection in southeast Tibet.

Key words: southeast Tibet; division; rotational empirical orthogonal function; mutation test; precipitation cycle

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告(2021年8月发布)显示,自20世纪以来的全球地表平均温度已上升约 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;并指出,从未来20年的平均温度变化来看,全球升温预计将达到或超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Allan et al., 2021)。在全球变暖的背景下,全球降水的变化也很明显。降水的变率对水资源管理、农业生产和旱涝预报有重要意义(Bernstein et al., 2008)。

青藏高原被誉为“世界第三极”和“全球气候变化的驱动和放大区”(Zhang et al., 2023),气候变化更为显著。有研究表明,青藏高原气温的上升速率超过了同期北半球同一纬向带以及全球的气温线性上升速率(Qiu et al., 2008)。藏东南地区处于青藏高原的降水高值区,其近几十年降水格局也发生了显著变化。李生辰等(2007)指出,在1970—2004年时间段内藏东南地区降水呈显著增加趋势,增加速率达到 $54.5\text{ mm}/10\text{ a}$;齐文文等(2013)基于TRMM数据研究了青藏高原降水的空间和季节分布特征,发现1998—2011年藏东南地区雨季开始早、结束晚,降水量大,且降水主要集中在雨季;龚成麒等(2022)利用小波分析、旋转经验正交函数、M-K检验等方法分析了青藏高原85个站点的降水资料,得到了青藏高原地区降水分区和演化特征;白宇轩等(2022)、李朝月等(2023)对藏东南气象站的逐日降水资料展开分析,指出藏东南极端降水指数呈增加趋势;任丽莹(2021)利用CMIP6模式数据对藏东南地区降水分布进行研究,认为由于受地形阻挡,低海拔地区各季节降水多于高海拔地区;李天航和刘宣飞(2016)基于降水再分析资料,指出青藏高原东南角早春降雨主要受西南风速的高值中心控制;邓明枫等(2017)利用气象站点日降水数据揭示了区域最大日降雨规模与频率的特征。

藏东南地区幅员辽阔,海拔差异悬殊,降雨的时空不均匀性十分突出,现有的针对藏东南地区的降水研究,无法很好地反映细部区域降雨的时空分布特征,且部分研究数据相对陈旧,不能呈现近期降水变化规律。同时,该区域生态环境脆弱,是中国地质灾害多发区域。为了更好地进行生态环境保护,降低因降雨诱发灾害造成的损失,本文采用反距离权重插值法(IDW)、旋转经验函数(REOF)、M-K趋势检验和小波分析等方法对藏东南地区2000—2021年76个站点的降水数据的空间区域差异特征、变化趋势展开研究,研究成果将有助于加深对藏东南地区气候变化的认识。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

藏东南地区(北纬 $26.9^{\circ}\sim 34.2^{\circ}$,东经 $89.7^{\circ}\sim 104.8^{\circ}$)由青藏高原中东部和四川盆地西部地区共同组成(图1)。区域包括了拉萨、山南、林芝、昌都、甘孜以及四川盆地的乐山、眉山及成都部分区域,东西长约 $1\ 500\text{ km}$,宽约 500 km ,研究区内有大渡河、雅砻江、金沙江、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等多条大江大河穿过。区域地势总体呈西高东低,平均海拔 $3\ 000\text{ m}$ 以上,岭谷高差最大可达 $5\ 000\text{ m}$ 以上(郭长宝等,2017)。研究区横跨多个气候区,气候差异显著,在季风和地形的共同作用下,造就了区域降水空间异质性大、水文条件复杂。

1.2 数据来源

本文所采用的数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)总处理的数据集,共计76个站点(四川区域内54个,西藏区域内22个),数据集包括2000—2021年的月降水量以及站点的元数据,对于缺测的数据采用线性内插法进行插补。站点分布位置如图1所示。

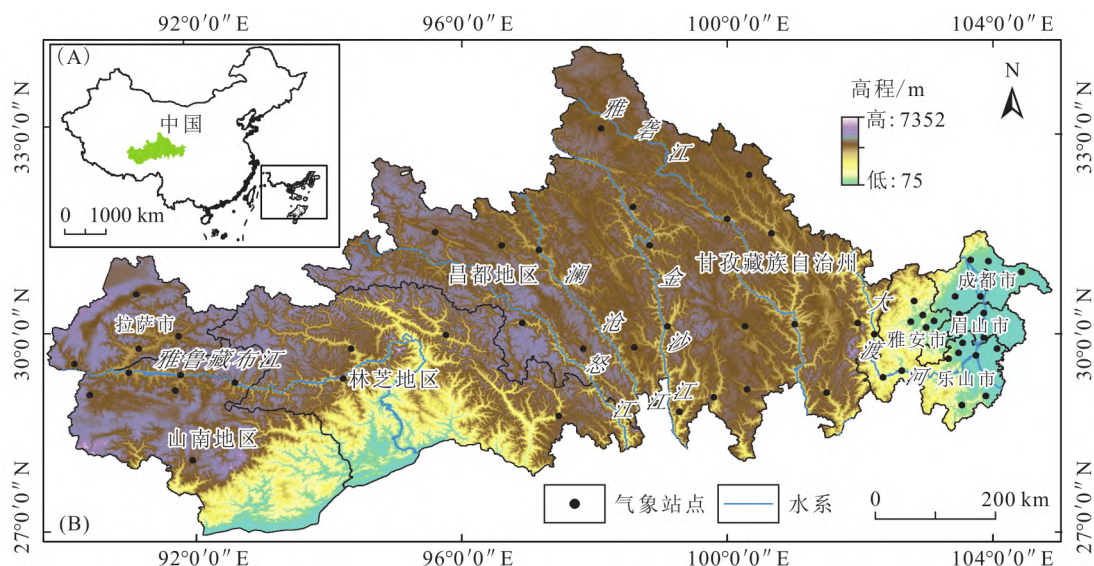


图 1 研究区位置及站点分布

Fig. 1 Location and distribution of meteorological stations in the study area (A)研究区位置图(审图号:GS(2016)2923号);(B)研究区地形及站点分布

2 研究方法

2.1 反距离权重插值(IDW)

反距离权重插值法(IDW)是基于 Tobler 定理提出的一种简单的插值方法。其原理是在空间上越靠近的事物或现象就越相似,主要通过定义更高的幂值,进一步强调最近点,邻近数据将受到最大影响,则其在最近点处取得的权值为最大(刘光孟等,2010)。一般表达式为:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^a \frac{Z_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^a \frac{1}{d_i}} \quad (1)$$

式中: Z_0 为 O 点(某个气象站点)的估计值; Z_i 为控制点 i 的 Z 值; d_i 为控制点 i 与点 O 间的距离; a 为在估算中用到的控制点数目,本文中 a 取 8。

2.2 经验正交函数(EOF)和旋转经验正交函数(EOF)

经验正交函数(EOF)最早是由 Pearson (1901) 提出来,20 世纪 50 年代中期 Lorenz(1951) 将其引入大气科学研究中。它可以将气候因子分解为正交特征向量,反映气象因子的时空分布结构。对于由 m 个站点和 n 个观测组成的气候变量矩阵,可以将 $X_{m \times n}$ 正交分解为 p 个空间特征向量和对应的时间权重系数的线性组合,将变量场的主要信息集中由几个典型特征向量表现出来。

$$X_{m \times n} = V_{m \times p} \cdot T_{p \times n} \quad (2)$$

式中: $V_{m \times p}$ 为空间矩阵; $T_{p \times n}$ 为时间序列矩阵;本文 m 取 76, n 取 22。

但 EOF 也会导致空间结构的复杂性和物理解释的困难(Hannachi et al.,2007)。为了解决 EOF 分析的局限性,研究人员对 EOF 进行了“旋转”,称为旋转 EOF(EOF)。

$$X_{m \times n} = V_{p \times p} T_{p \times m}^* + U_{m \times n} \quad (3)$$

式中: $T_{p \times m}^*$ ($p < m$) 为时间序列矩阵; $V_{p \times p}$ 为空间矩阵; $U_{m \times n}$ 为仅与 X 相关的特殊因子。标准化变量的公因子为自变量,其均值为 0,方差为 1。

在 EOF 分析中,旋转后的主成分的意义主要在于对被研究变量的相关性的空间分布特征表示。这使得与主成分相关的高载荷因子只集中于某一小区域上,而其余区域的载荷因子尽可能接近于零。因此,显著异常出现在区域现象占主导地位的地方,这使得空间模态更容易解释,空间结构更容易检测(Hannachi et al.,2006)。本文利用经验正交函数(EOF)对藏东南地区年降水数据进行分解,对通过 North 检验(一种验证经验正交函数分解出的结果是否有实际物理意义的方法)的主成分,进行最大方差旋转,构建降水数据的空间模式(EOFs),并进行反距离权重插值,据此开展研究区区域划分。

2.3 M-K 趋势检验

Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法。Mann H B(1945)和 Kendall M G(1938)提

出了原理并发展了这一方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于降水的时间序列分析。该方法在假定 n 个样本量的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 随机独立的条件下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{var(S_k)}}, (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: UF_k 是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列, n 取 22; S_k 为秩序列,表示某时刻序列中刚好比 x_i 值大的数据点数量。 S_k 由下式计算得出:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, (2 \leq k \leq n) \quad (5)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (6)$$

$E(S_k)$ 和 $var(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,可由下式算出:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} x_i > x_j \\ var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (7)$$

当 $UF_k > 0$ 或 < 0 时,序列呈现增加或减少趋势。 UF_k 曲线超过信度线 (α 是置信度,值为 0.05),表明变化趋势显著。将时间序列 x 逆序,重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k$,得到逆向统计序列 UB_k 。

进行 Sen's 斜率估计(一种基于中位数差的趋势斜率估计方法,用于判别降水变化速率和趋势),单位为 mm/10a,其计算公式为:

$$Sen's = Median\left(\frac{x_i - x_j}{j - i}\right) \quad \forall j > i \quad (8)$$

式中: x_i, x_j 分别为时间序列数据。

2.4 小波分析

小波分析最早由法国地质学家 Morlet J 引入到信号分析中,后经 Grossman 和 Meyer 等完善,被广泛应用于气象和气候序列的时频结构分析中(魏凤英,2007)。在气候分析中,小波变换在显示气候序列尺度和气候变化的时间位置等方面具有显著优势。连续小波变换的定义为:

$$\omega f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

式中: a 为频率参数; b 为时间参数,表示波动在时间上的平移; $f(t)$ 为连续时间信号; $g\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波函数的复共轭; $\omega f(a, b)$ 为小波变换系数,小波系数绝对值越大,时间尺度变化越显著,峰值对应的时间尺度是序列的主周期。

小波方差为小波系数的平方积分得到:

$$var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega_f(a, b)|^2 db \quad (10)$$

小波方差反映了小波系数的振荡强弱,可以据此更准确地推断出序列在哪个周期波动最为显著。

3 结果分析

3.1 区域降水空间分布特征

通过对藏东南地区 2000—2021 年多年平均降水量进行反距离权重插值,得到区域降水空间分布图(图 2)。研究区降水空间分布不均匀,总的趋势是自东向西降水量逐渐递减。大渡河以东的区域,年均雨量均在 1 100 mm 以上,为研究区

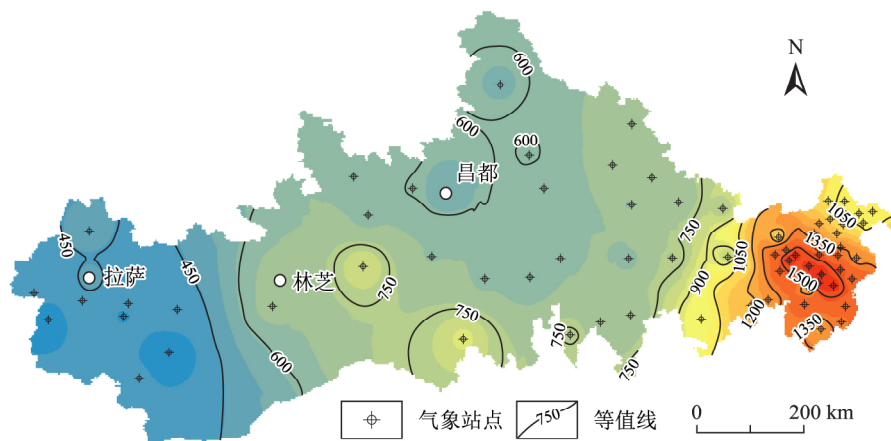


图 2 藏东南多年平均降水空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of mean annual precipitation in southeast Tibet

降水的高值区。雅安地区由于其处于四川盆地向青藏高原的过渡地带,季风携带的暖湿气流受山脉阻挡,与来自高原的冷空气在此处汇合形成大量降雨,局部区域多年平均降水量达到了 1 300 mm 以上。大渡河以西,随海拔升高地区多年平均降水量逐渐降低。昌都地区和甘孜州等地区,由于季风携带的暖湿气流在爬升高原的过程中大部分的水汽在沿途降水的过程中大量减少了,只余下少部分的水汽可以到达高原上,区域多年平均降水量小于 750 mm,部分区域降水量更是低于 600 mm。林芝地区由于喜马拉雅山脉和念青唐古拉山脉由西向东平行伸展,东部与横断山脉对接,阻挡了南下的北方寒流。同时,东南低处正好面向印度洋开了一个大缺口,孟加拉湾暖湿气流顺雅鲁藏布江而上,为林芝地区带来充沛的降水,形成了林芝特殊的海洋性季风气候,使得区域多年平均降水量高于 600 mm。其中,在雅鲁藏布江河谷地区多年平均降水量更是超过 750 mm,多年平均降水量明显多于青藏高原周边地区,为研究区第二个降水高值中心。林芝地区以西,随着向青藏高原腹地深入,受区域地形的影响,降水量呈逐步递减趋势,拉萨、山南等大部分区域多年平均降水量低于 450 mm,是整个研究区降水量最少的区域。

3.2 区域降水时间分布特征

藏东南地区 2000—2021 年降水时间序列和月降水分布如图 3、图 4 所示。区域年均降水量约以 1.29 mm/10a 的速率小幅上升但不显著。降水的年际变化波动明显,最大波动幅度达到了 198.05 mm,多年平均降水量为 903.8 mm。其中,2012—2017 年区域降水较为充沛且有较为明显的上升趋势,2018—2020 年降水显著偏少,仅有多年平均水平的 89%。研究区月均降水量呈

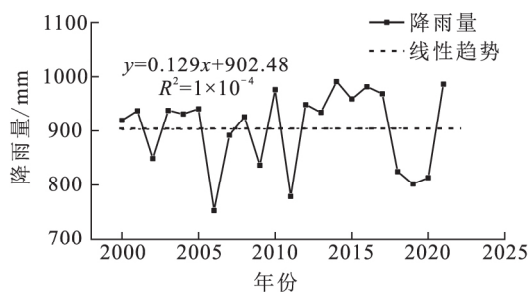


图 3 藏东南地区年均降水变化趋势
Fig. 3 Trend of average annual precipitation in southeast Tibet

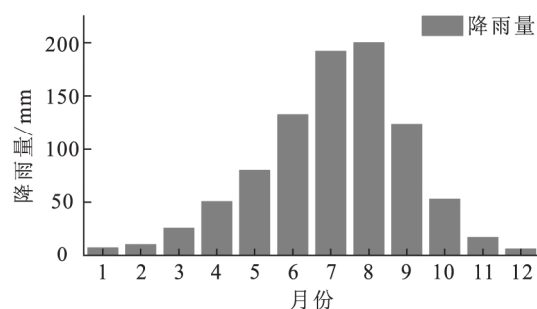


图 4 藏东南地区月降水量分布
Fig. 4 Distribution of monthly precipitation in southeast Tibet

现单峰分布,在 8 月降水量达到峰值,为 200.37 mm。一年之中降水基本集中在 5—9 月,占全年降水量的 80.8%,表现为雨热同期。12 月—翌年 2 月降水稀少,只占全年降水的 2.8%。

3.3 分区降水时空演化特征

由于藏东南地区东西跨度大,地形和气候类型复杂,降水时空分布差异显著,局地特征明显,区域降水的时间演化趋势不足以反映局部地区的降水时间演化特征。因此,本文采用旋转经验正交函数(EOF)对藏东南地区 2000—2021 年的年降水数据进行区域划分。其中,EOF 第一个模态的方差贡献率达到了 42.4%,之后的模态的方差贡献率急剧降低,前 10 个主成分累计方差贡献率达到了 79.0%,且均通过了 North 检验。提取前 10 个主成分进行最大方差旋转,旋转后模态的方差贡献比旋转前的分布更均匀,可以更好地反映局部区域的降水特征(表 1)。

表 1 前 10 个模态 EOF 和 REOF 方差贡献率
Table 1 Contributions of variances in the EOF and REOF to the top 10 modalities

模态	EOF		REOF	
	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	42.4	42.4	14.1	14.1
2	18.2	60.6	12.0	26.1
3	8.3	68.9	10.1	36.2
4	4.1	73.0	8.7	44.9
5	2.8	75.8	7.1	52.0
6	1.8	77.6	6.7	58.7
7	0.7	78.3	5.4	64.1
8	0.4	78.7	5.3	69.4
9	0.2	78.9	5.2	74.8
10	0.1	79.0	4.3	79.0

各模态旋转后载荷的反距离权重插值图,如图 5 所示。第一模态高载荷区位于四川盆地的成都地区和眉山东部地区,区域雨量丰富、四季分明,方差贡献率为 14.1%;第二模态位于四川盆地西缘,大渡河以西的雅安以及眉山西部地区,为成都平原向青藏高原的过渡带,全年有降水的日数超过 200 天,降水集中于夏季,多夜雨、降雨强度大,方差贡献率为 12.0%;第三模态位于甘孜地区和昌都地区的南部区域,方差贡献率为 10.1%;第四模态高载荷区域主要位于乐山地区,区域地势西南高、东北低,受季风影响和地形的抬升作用,气候湿润、年降水充沛,方差贡献率为 8.7%;第五模态位于青藏高原中东部的拉萨、山南等地区,区域海拔高、气候寒冷,全年降水稀少,是

研究区降水的最低值区域,方差贡献率为 7.1%;第六模态高载荷区位于甘孜地区的雅砻江流域,区域地形起伏大,气候复杂多变,属干冷的大陆性气候,方差贡献率为 6.7%;第七模态位于大渡河与雅砻江之间的康定、丹巴、九龙等地区,方差贡献率为 5.4%;第八模态位于林芝地区,受季风和暖流影响,为青藏高原的降水中心,方差贡献率为 5.3%;第九模态高载荷区为负值,位于研究区内澜沧江、怒江流域的北部部分区域,方差贡献率为 5.2%;第十模态位于甘孜州最北部的石渠地区,属北亚寒带气候区,降水以雨水、雪、冰雹等多种形式产生,方差贡献率为 4.3%。以各模态插值载荷绝对值大于 0.15 为界限,对藏东南地区进行降水分区,得到 10 个区域的分布如图 6 所示。

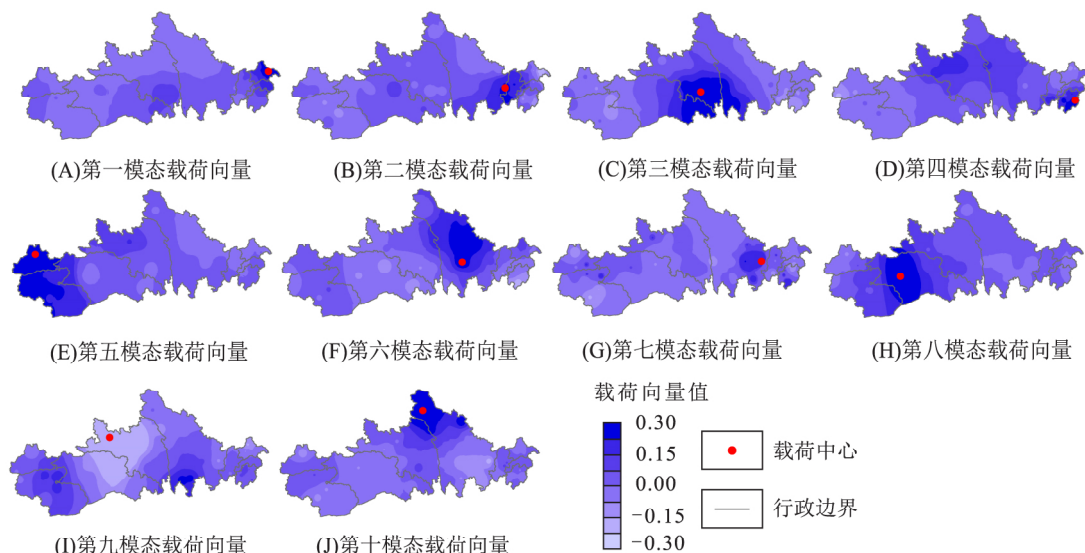


图 5 各模态载荷向量空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of load vectors for each modality

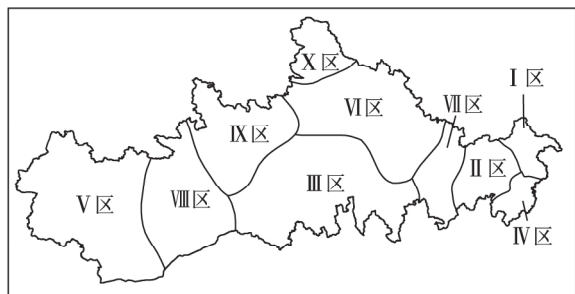


图 6 藏东南地区降水分区示意图
Fig. 6 Schematic diagram of precipitation based zoning of southeast Tibet

3.3.1 分区降水趋势分析

以每个区所含站点的平均降水量作为该区年

均降水量,使用 Sen's 斜率估计对藏东南地区各分区的 2000—2021 年降水量趋势分析结果如表 2 所示。I 区、II 区和 IV 区近 22 年降水变化均表现为上升趋势,IV 区的降水量上升趋势也最为明显,达到了 104.84 mm/10a,且通过了 0.001 显著性水平检验。位于雅砻江流域的 VI 区和 X 区降水量也呈现出小幅度上升趋势。其余分区的降水量均有不用程度的下降,III 区降水量的下降趋势达到了 76.96 mm/10a,为所有分区中最大,且通过了 0.01 显著性水平检验。V 区的降水量以 12.19 mm/10a 的速率小幅下降,为所有下降分区中速率最小。

表 2 分区降水 Sen's 斜率估计

Table 2 Estimation of Sen's slope of zonal precipitation

分区	Sen's 估计/(mm·10a ⁻¹)	是否显著
I 区	46.27	否
II 区	25.36	否
III 区	-76.96***	是
IV 区	104.84**	是
V 区	-12.19	否
VI 区	30.14	否
VII 区	-21.57	否
VIII 区	-29.14	否
IX 区	-23.69	否
X 区	24.53	否

注:***表示通过 0.001 显著性检验,**表示通过 0.01 显著性检验。

3.3.2 分区降水突变检验

旋转空间模态对应的时间系数,可以反映相关分区降雨随时间的演变特征。时间系数的绝对值越大,表明这一时刻的这种分布结构越典型,极大值中心亦越明显(魏凤英,2007)。因此,采用 M-K 法对各分区模态对应的时间序列进行突变检验($\alpha=0.05$),识别各分区降水量发生突变的年份。

图 7 中 UF_k 表示顺序时间秩序列, UB_k 为 UF_k 的逆序列,当 2 条折线相交时,说明降水在此时刻产生突变。据此可知,21 世纪以来,藏东南各子分区均存在降水突变现象。其中,位于雅砻江以西的分区降水突变现象最为明显,I 区降水量在 2001,2005,2020 年发生突变,II 区在 2005,

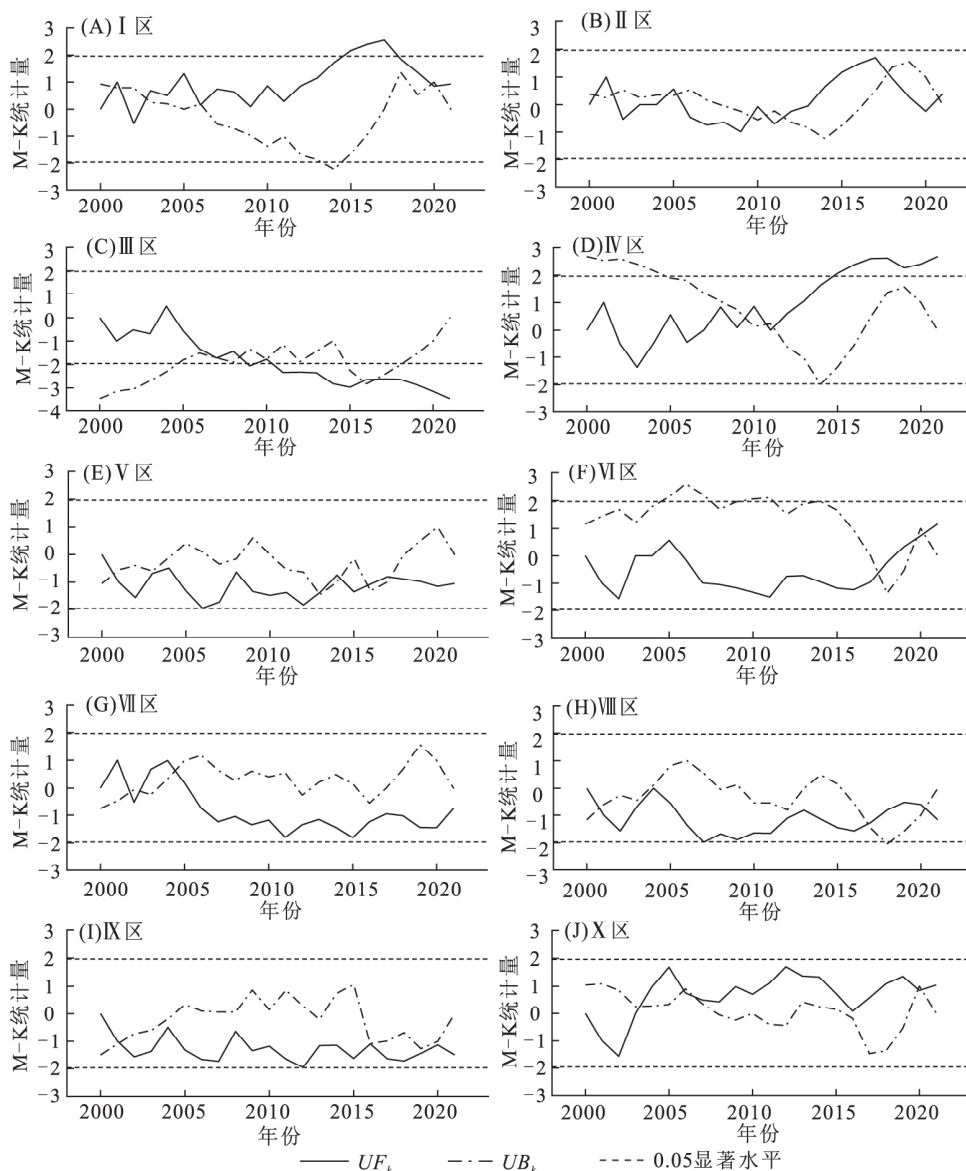


图 7 藏东南地区各分区降水突变检验

Fig. 7 Mutation test of precipitation in various sub-regions of southeast Tibet

2010,2016 年发生突变,Ⅳ区降水量在 2015 年有较明显的突变现象。这 3 个分区降水在 2010—2016 年时间段内有明显上升趋势。在 2016 年左右,Ⅰ区和Ⅳ区增加趋势更是超过 0.05 显著水平界限。在 2016 年后,Ⅰ区和Ⅱ区降水呈下降趋势,Ⅳ区降水下降趋势不明显,造成这种差异的原因可能与分区局部地形差异和局地小气候有关。Ⅲ区降水量在 2006—2010 年发生多次突变,降水量在 2006 年以后总体呈显著下降趋势。Ⅴ区在 2001,2013 和 2015 年发生突变,Ⅵ区的降水量在 2020 年产生了突变,Ⅶ区在 2001 和 2020 年发生突变,Ⅹ区在 2004 年、2006 年和 2020 年发生突变,Ⅷ区和Ⅸ区在 2001 年和 2016 年发生降水突变,但突变后未呈现出显著的增加或减少的趋势。

近些年,许多学者也开展了针对青藏高原降水演化趋势、极端降水等问题的研究,对青藏高原地区降水变化从不同角度分析了其内在原因(Cui et al.,2020;白大勇等,2022;王闯等,2022;陈荣等,2023;张文青等,2023)。综合分析,引起区域降水突变频繁的原因,可能与全球碳排放量增加、全球变暖和冰川消亡等因素有较大的相关性。全球性的气候变化,造成青藏高原大气环流发生改变,进而导致高原地区水汽输送格局改变,使得区域年际降水不稳定。

3.3.3 降水周期变化

对各分区的 2000—2021 年年降水量进行连续小波分析,可以较好地反映各分区降水的周期变化。图 8 为各分区的小波方差图,不同分区的

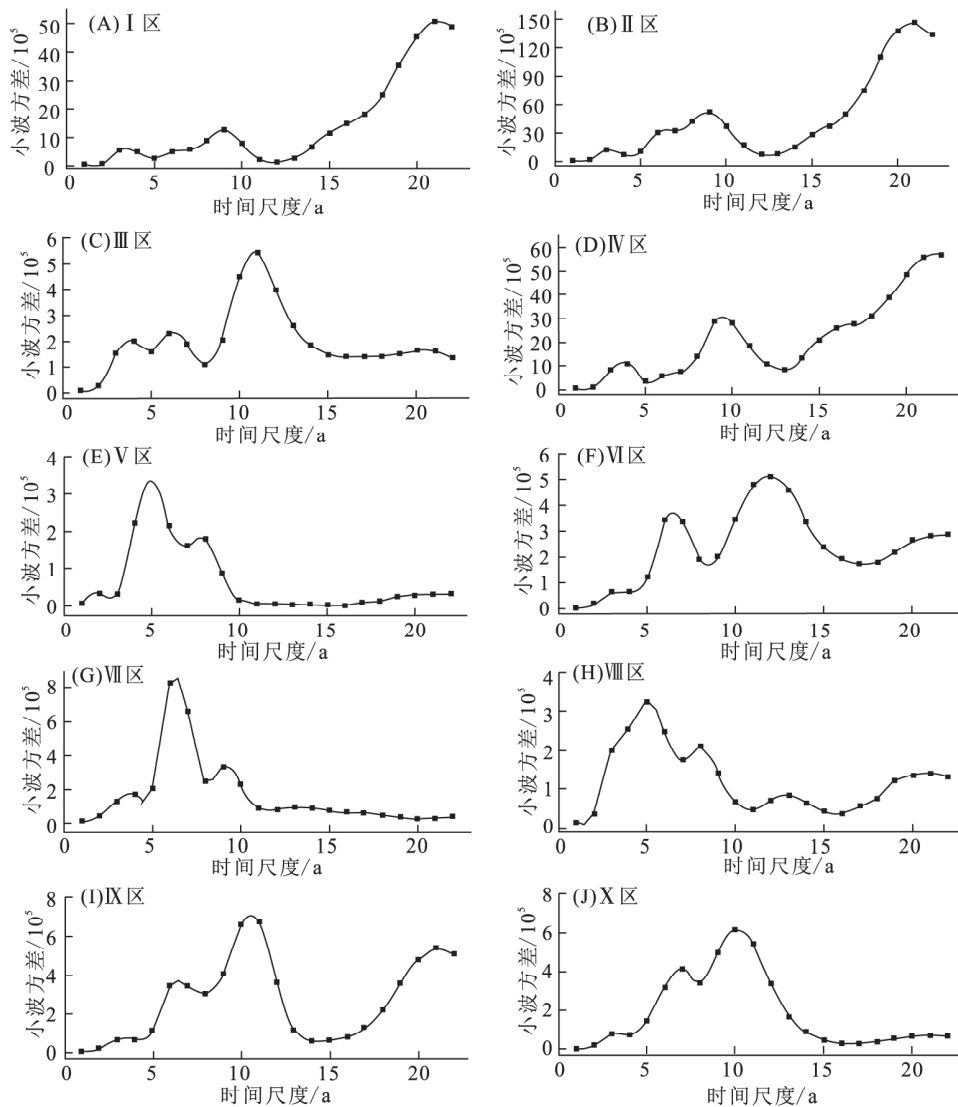


图 8 藏东南地区各分区小波方差图
Fig. 8 Plot of variance in the wavelets by partition in southeast Tibet

降水周期性变换有所差异。位于雅砻江以西的 I 区、II 区和 IV 区近 22 年内降水未呈现出明显的周期性变化,说明此区域降水受气候变化影响较为显著,有较强的随机性。甘孜及昌都大部分区域(III 区、IX 区、VI 区、X 区)存在 10—12 年降水周期性变化。林芝及拉萨地区(V 区、VII 区)和雅砻江流域部分区域(VIII 区)存在一个 5—6 年的短周期。

4 结论

a. 藏东南地区多年平均降水在空间上分布不均匀,四川盆地西部地区和林芝地区分别为研究区降水中心和次降水中心。时间上,区域月降水呈“单峰式”分布,表现为“雨热同期”,年际降水波动幅度大,近 22 年总体以 1.29 mm/10a 的速率小幅增加。

b. 采用旋转经验正交函数(REOF)对藏东南地区降水空间分布结构进行分析,依据各模态高载荷值的空间分布位置,将研究区划分为 10 个子区域。

c. 2000—2021 年期间,位于四川盆地西部区域以及甘孜州北部区域的分区降水量有不同幅度的增加趋势,其余分区的降水均呈现减少趋势,其中位于甘孜地区、昌都地区南部的 III 区降水降低最为显著。

d. 近 22 年内,除 III 区、IV 区和 VI 区外,其余分区模态对应的时间序列均经历了 2 次以上的突变。大部分分区的降水有明显的周期变化,其中 III 区、IX 区、VI 区和 X 区的降水周期变化在 10 年以上,V 区、VII 区和 VIII 区的降水周期变化在 10 年以内。位于大渡河以东的 I 区、II 区和 IV 区的降水未发现明显周期性变化。

[参 考 文 献]

- 白大勇,曹裔,张勇,2022. 近 60 年青海省极端降水时空分布特征分析[J]. 人民长江,53(10):59—64.
- Bai D Y, Cao Y, Zhang Y, 2022. Temporal and spatial distribution of extreme precipitation in Qinghai Province in recent 60 years[J]. Yangtze River, 53(10):59—64. (in Chinese)
- 白宇轩,杜军,王挺,等,2022. 1971~2020 年藏东南极端降水指数的时空变化特征[J]. 高原山地气象研究,42(3):31—40.
- Bai Y X, Du J, Wang T, *et al.*, 2022. Spatio-temporal change of extreme precipitation index of southeastern

- Tibet from 1971 to 2020[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 42(3):31—40. (in Chinese)
- 陈荣,段克勤,尚激,等,2023. 基于 CMIP6 模式数据的 1961—2099 年青藏高原降水变化特征分析[J]. 高原气象,42(2):294—304.
- Chen R, Duan K Q, Shang W, *et al.*, 2023. Characteristics of precipitation change over the Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2099 based on CMIP6 Models[J]. Plateau Meteorology, 42(2):294—304. (in Chinese)
- 邓明枫,陈宁生,王涛,等,2017. 藏东南地区日降雨极值的波动变化[J]. 自然灾害学报,26(2):152—159.
- Deng M F, Chen N S, Wang T, *et al.*, 2017. Fluctuation of daily rainfall extreme in Southeastern Tibet[J]. Journal of Natural Disasters, 26(2):152—159. (in Chinese)
- 龚成麒,董晓华,魏冲,等,2022. 1978—2018 年青藏高原降水区划及各区降水量时空演变特征[J]. 水资源与水工程学报,33(5):96—108.
- Gong C Q, Dong X H, Wei C, *et al.*, 2022. Precipitation division of the Qinghai-Tibet Plateau from 1978 to 2018 and spatiotemporal evolution characteristics of each zone[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 33(5):96—108. (in Chinese)
- 郭长宝,张永双,蒋良文,等,2017. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质,31(5):877—889.
- Guo C B, Zhang Y S, Jiang L W, *et al.*, 2017. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 31(5):877—889. (in Chinese)
- 李朝月,崔鹏,郝建盛,等,2023. 1960 年以来藏东南地区气温和降水的变化特征[J]. 高原气象,42(2):344—358.
- Li C Y, Cui P, Hao J S, *et al.*, 2023. Variation characteristics of temperature and precipitation over the southeast Xizang since 1960 [J]. Plateau Meteorology, 42(2):344—358. (in Chinese)
- 李生辰,徐亮,郭英香,等,2007. 近 34a 青藏高原年降水变化及其分区[J]. 中国沙漠,27(2):307—314.
- Li S C, Xu L, Guo Y X, *et al.*, 2007. Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 years [J]. Journal of Desert Research, 27(2):307—314. (in Chinese)
- 李天航,刘宣飞,2016. 高原东南角早春雨的气候特征及其成因研究[J]. 热带气象学报,32(5):717—724.
- Li T H, Liu X F, 2016. Climatic features of early spring

- rains over southeastern Tibetan Plateau and their causes[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 32(5): 717–724. (in Chinese)
- 刘光孟,汪云甲,王允,2010. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. *中国科技论文在线*, 5(11): 879–884.
- Liu G M, Wang Y J, Wang Y, 2010. Impact of inverse distance weighted interpolation factors on interpolation error[J]. *China Science and Technology Papers Online*, 5(11): 879–884. (in Chinese)
- 齐文文,张百平,庞宇,等,2013. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. *地理科学*, 33(8): 999–1005.
- Qi W W, Zhang B P, Pang Y, *et al.*, 2013. TRMM-data-based spatial and seasonal patterns of precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 33(8): 999–1005. (in Chinese)
- 任丽莹,2021. 1980—2018年藏东南降水时空变化及其预估[D]. 西安:陕西师范大学档案馆.
- Ren L Y, 2021. Spatiotemporal Variation and Projection of Precipitation in Southeastern Tibet from 1980 to 2018 [D]. Xi'an: The Archive of Shaanxi Normal University. (in Chinese)
- 王闯,戴长雷,宋成杰,等,2022. 青藏高原气候变化的时空分布特征分析[J]. *人民黄河*, 44(9): 76–82.
- Wang C, Dai C L, Song C J, *et al.*, 2022. Analysis of the temporal and spatial distribution characteristics of climate change in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Yellow River*, 44(9): 76–82. (in Chinese)
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社.
- Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese)
- 张文青,刘浏,伦玉蕊,等,2023. 青藏高原未来极端降水时空变化特征及海拔依赖性研究[J]. *水土保持学报*, 37(2): 149–158+216.
- Zhang W Q, Liu L, Lun Y R, *et al.*, 2023. Spatial-temporal variation characteristics of future extreme precipitation and its elevation dependency over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 37(2): 149–158+216. (in Chinese)
- Allan R P, Hawkins E, Bellouin N, *et al.*, 2021. IPCC, 2021: Summary for Policymakers [R]. Cambridge: Cambridge University Press; 1–2. doi: 10.1017/9781009157896.001.
- Bernstein L, Bosch P, Canziani O, *et al.*, 2008. IPCC, 2007: Climate change 2007: Synthesis report [R]. Geneva: Switzerland Press; 2–4. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>.
- Cui Y, Zhang B, Huang H, *et al.*, 2020. Identification of seasonal sub-regions of the drought in the North China Plain [J]. *Water*, 12(12): 3447.
- Hannachi A, Jolliffe I T, Stephenson D B, *et al.*, 2006. In search of simple structures in climate: Simplifying EOFs [J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(1): 7–28.
- Hannachi A, Jolliffe I T, Stephenson D B, 2007. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review [J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(9): 1119–1152.
- Kendall M G, 1938. A new measure of rank correlation [J]. *Biometrika*, 30(1/2): 81–93.
- Lorenz E N, 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 8(1): 52–59.
- Mann H B, 1945. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*: 245–259.
- Pearson K L, 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11): 559–572.
- Qiu J, 2008. China: The third pole [J]. *Nature*, 454(7203): 393–397.
- Zhang Q, Shen Z, Pokhrel Y, *et al.*, 2023. Oceanic climate changes threaten the sustainability of Asia's water tower [J]. *Nature*, 615(7950): 87–93.

(责任编辑:魏 巍)