

引用格式: 谭红梅, 贺中华, 陈莉会, 冯椰林, 顾小林. 贵州省极端降雨特征及其影响因素[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 748-758.

TAN Hongmei, HE Zhonghua, CHEN Lihui, FENG Yelin, GU Xiaolin. Characteristics of extreme rainfall and its influencing factors in Guizhou province, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(5): 748-758.

贵州省极端降雨特征及其影响因子

谭红梅¹, 贺中华^{1,2*}, 陈莉会¹, 冯椰林¹, 顾小林³

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001;

3. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002)

摘要: 不同地区在下垫面结构、气候等方面存在区域异质性, 极端降雨表现出不同演变趋势和独特的空间分布格局。贵州喀斯特地貌类型复杂, 影响降雨空间再分配, 极端降雨频发, 地质灾害严重。针对贵州省极端气候的研究, 大多关注其时空特征与模式数据预估, 缺乏对其重现期特征及不同尺度影响因子的分析。本文基于贵州省 31 个站点 1990—2020 年逐日降雨数据计算极端降雨, 采用 8 种分布函数对其拟合并选出各站点的最优分布函数, 分析贵州省极端降雨重现期特征, 探讨其不同尺度影响因子。结果表明: (1) 近 31 年来贵州省极端降雨在时间上呈不显著增加趋势, 空间上呈“南高北低、东高西低”的分布格局。(2) Weibull 分布函数对贵州省大部分站点的极端降雨拟合效果最佳; 极端降雨的估计值随重现期增加而增大, 在不同重现期均呈南高北低的分布格局, 且南北差异随重现期增加而逐渐减弱。(3) 大尺度影响因子中厄尔尼诺对极端降雨的影响最大; 局地尺度因子中温度、高程、二氧化碳为极端降雨的主要影响因子。研究结果可为贵州省防洪减灾提供科学指导。

关键词: 极端降雨; 概率分布函数; 随机森林算法; 地理探测器; 贵州省

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

全球气温升高、水文循环加快, 造成全球极端气候事件频发, 影响人类社会的可持续健康发展^[1-2]。极端降雨是极端气候的典型表现, 具有突发性、破坏性、区域性等特点, 易诱发滑坡、洪水等地质灾害^[3]。分析极端降雨特征及其影响因子, 可为区域防灾减灾和经济可持续性发展, 提供坚实、科学的决策依据。

不同地区在下垫面结构、气候等方面存在区域异质性, 极端降雨也表现出不同演变趋势和独特的分布格局^[4]。因此需要采用不同的分布模型拟合极端降雨系列, 以得到更合理的极端降雨值。当前

绝大多数研究都以一个分布模型来拟合区域极端降雨^[5-6], 少有基于全部气象站点观测极端降雨值的拟合模型来研究区域极端降雨值分布。此外, 针对极端降雨影响因子的探究, 多数学者已证明 ENSO、太阳黑子等大尺度因子对极端降雨有较强影响^[7-8], 而少有人考虑到区域因子对极端降雨也有着不可忽视的作用, 例如区域气候、下垫面结构以及温室气体的排放等。就区域气候而言, 温度对气块的上升与凝结起决定作用, 必然对降雨产生影响; 根据克劳修斯-克拉珀龙方程 (Clausius-Clapeyron), 假设相对湿度保持不变的条件下, 气温升高 1 ℃, 大气

收稿日期 (Received date): 2023-06-20; 改回日期 (Accepted date): 2023-10-11

基金项目 (Foundation item): 贵州省水利厅自然科学基金 (KT202237); 国家自然科学基金 (u1612441, 41471032)。[National Natural Science Foundation of Guizhou Provincial Water Resources Bureau (KT202237); National Natural Science Foundation of China (u1612441, 41471032)]

作者简介 (Biography): 谭红梅 (2000 -), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向: 喀斯特水文水资源与遥感。[TAN Hongmei (2000 -), female, born in Zunyi, Guizhou province, M. Sc. candidate, research on karst hydrology and water resources and remote sensing] E-mail: ketan_biu@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 贺中华 (1976 -), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 喀斯特水文水资源与遥感。[HE Zhonghua, male, Ph. D., professor, research on karst hydrology and water resources and remote sensing] E-mail: hezhonghua7621@126.com

持水能力增加约 7%^[9],气温变化影响极端降雨强度^[10]。下垫面结构可以显著影响区域小气候和降水的形成,从而影响极端降雨^[11]。例如,有学者^[12]探讨了局地地形地貌对西南地区极端气候的影响,确认地形地貌严重影响极端气候。此外,温室气体的排放造成全球升温,加剧水文循环,造成极端降雨。在探究极端降雨局地尺度影响因子时,极少有研究从区域气候、下垫面、温室气体排放三方面进行综合量化分析。建立基于站点观测极值的极端降雨值分布模型,从不同尺度影响因子全面探究其对极端降雨的影响,将提高极端降雨重现期准确度。

中国贵州省同时受到来自印度洋的西南季风与太平洋的东南季风的影响,降水充足。贵州喀斯特地貌类型复杂,影响降雨空间再分配^[13],加剧极端降雨的形成,导致地质灾害频发。以往针对贵州省极端气候的研究较少,且大多关注其时空特征与模式数据预估^[14-15],缺乏对其重现期特征及不同尺度影响因子的研究。本文基于贵州省 31 个站点 1990—2020 年逐日降雨数据,采用 8 种分布函数对其拟合并选出各站点的最优分布函数,探究其不同尺度影响因子,分析贵州省极端降雨重现期特征,以为贵州省防洪减灾提供科学指导。

1 研究区概况

贵州省地处中国西南部,其经纬度范围为

103°36′~109°35′E、24°37′~29°13′N(图 1)。全省面积 17.6 万 km²,喀斯特地貌分布广泛、面积占 73.8%。贵州省境内河网密布,以乌蒙山—苗岭为分水岭,分属长江、珠江流域^[16]。全省气候温暖、降水丰沛,多年平均降雨量超 1100 mm,但降雨时空分布不均,易发生极端降雨。

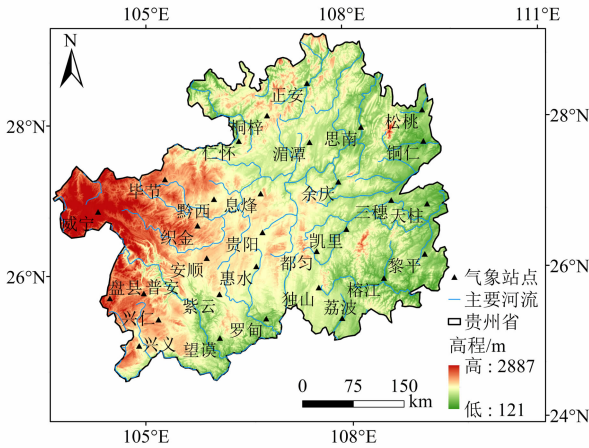


图 1 研究区高程和站点分布图
Fig. 1 Geomorphology of the study area and meteorological observation stations distribution

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

本研究基于贵州 31 个站点 1990—2020 年逐日降雨数据(研究数据详细信息见表 1),借助软件 RClimDex 计算得到强降水量(R95p)表征极端降雨。

表 1 研究数据基本信息

Tab. 1 Informations of research data

数据名称	空间分辨率/m	时间分辨率	数据来源
降水量		1 d	中国气象数据网
太阳黑子数(Sunspot)		1 a	比利时皇家天文台
太平洋年代际震荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)		1 a	美国国家海洋和大气管理局
南方涛动指数(Southern Oscillation Index, SOI)		1 a	美国国家海洋和大气管理局
多元 ENSO 指数(Multivariate ENSO Index, MEI)		1 个月	中国气象局
东亚季风指数(East Asian Summer Monsoon Index, EASMI)		1 a	http://lijianping. cn/dct/page/1
南亚夏季季风指数(South Asian Summer Monsoon Index, SASMI)		1 a	http://lijianping. cn/dct/page/1
温度(T)		1 d	中国气象数据网
土地利用数据(LUCC)	30	5 a	中国科学院资源环境科学与数据中心
高程(DEM)	30		地理空间数据云
坡度(Slope)	30		基于高程数据提取
坡向(Aspect)	30		基于高程数据提取
二氧化碳(CO ₂)		1 a	中国碳核算数据库

2.2 研究方法

本研究选用 8 种分布函数拟合并选出贵州省 31 个站点的最优分布函数,分析贵州省极端降雨重现期特征。随后利用随机森林算法、地理探测器探究其不同尺度影响因子。

2.2.1 分布函数及最优模型选择

本研究选用 Normal 分布、Log-normal 分布、Gamma 分布、Logistic 分布、Log-logistic 分布、Extreme value (EV) 分布、Generalized extreme value (GEV) 分布、Weibull 分布 8 种分布函数拟合贵州省 R95p 序列。优选分布线型方法选用基于假设检验的 Anderson-Darling (A-D)^[17]、Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验^[18],和基于准则的 Akaike Information Criterion (AIC)^[19]、Information Criterion (BIC)^[19] 优选分布线型。

2.2.2 随机森林算法

随机森林^[20]是一种基于统计学习理论的组合分类智能算法。本文将采用其衡量大尺度影响因素的重要度,计算公式如下:

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t D_{Gkij}}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^t D_{Gkij}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, P_k 为第 k 个指标的在所有指标中的重要程度, P_k 值越大则表示第 k 个指标越重要; D_{Gkij} 为第 k 个指标在第 i 棵树的第 j 个节点的残差平方和减少值; t 、 n 、 m 分别为单棵树的节点数、分类树棵数和总指标个数。

2.2.3 地理探测器

地理探测器^[21-22]可以探测地理现象空间异质性,揭示其背后的驱动力,原理为:如因变量受自变量的重要影响,则其空间分布存在一定相似性。本文利用地理探测器探测区域因子对 R95p 空间分异的影响,因子探测计算公式如下:

$$Q = 1 - \left(\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \right) \quad (2)$$

式中, Q 为因子对 R95p 空间分异的影响力,取值区间为 $[0, 1]$; $h = 1, 2, \dots, L$ 为探测因子的分层; N 和 N_h 分别为全区和分层 h 的样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别为全区和分层 h 的方差。交互探测 Q 计算方法同因子探测 Q 。

3 结果与分析

3.1 极端降雨特征

3.1.1 极端降雨时空特征分析

贵州省 1990—2020 年 R95p 为 203.52 ~ 508.10 mm (图 2), 多年平均强降水量为 329.93 mm。在时间变化上, R95p 呈不显著增加趋势, 从 246.90 mm (1990 年) 增加到 458.09 mm (2020 年), 上升速率为 7.75/10a ($p > 0.1$)。最小值出现在 2013 年 (203.52 mm), 最大值出现在 2014 年 (508.10 mm), 极差 304.58 mm。此外, 1999 年与 2020 年 R95p 值也较高, 分别达到 445.67 mm、458.09 mm。

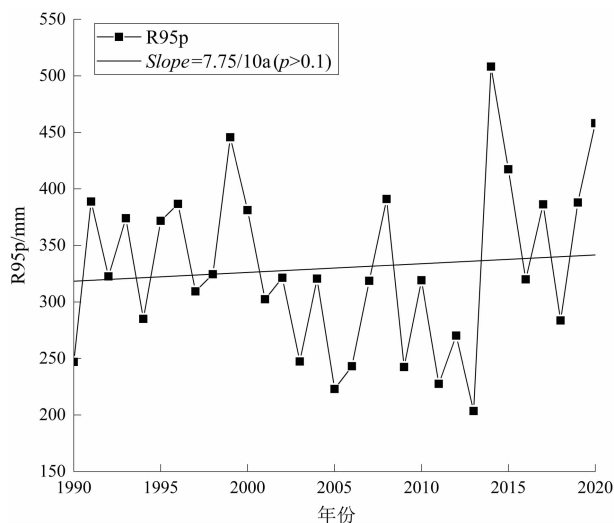


图 2 R95p 时间变化趋势

Fig. 2 R95p time change trend

近 31 年来贵州省 R95p 呈“南高北低、东高西低”的空间分布格局 (图 3a), 高值集中在安顺、都匀与兴义附近, 最大值达 431.05 mm; 低值中心位于毕节、威宁一带, 最小值 (220.02 mm) 约为最大值的二分之一。这可能是因为贵州省东南部地区属于迎风坡, 便于水汽输送, 降雨量级较大; 而西部由于乌蒙山的阻挡, 来自太平洋和印度洋的水汽无法深入, 导致该地降水较少^[23-24]。对贵州省 R95p 进行趋势分析^[25-26], 结果表明贵州省大部分区域 R95p 呈增加趋势 (图 3b), 面积占 72.29%, 其中威宁位于强显著增加趋势中心; 剩余 27.71% 的区域呈减小趋势, 减小趋势中心位于盘县与兴义。全省仅 2.06%

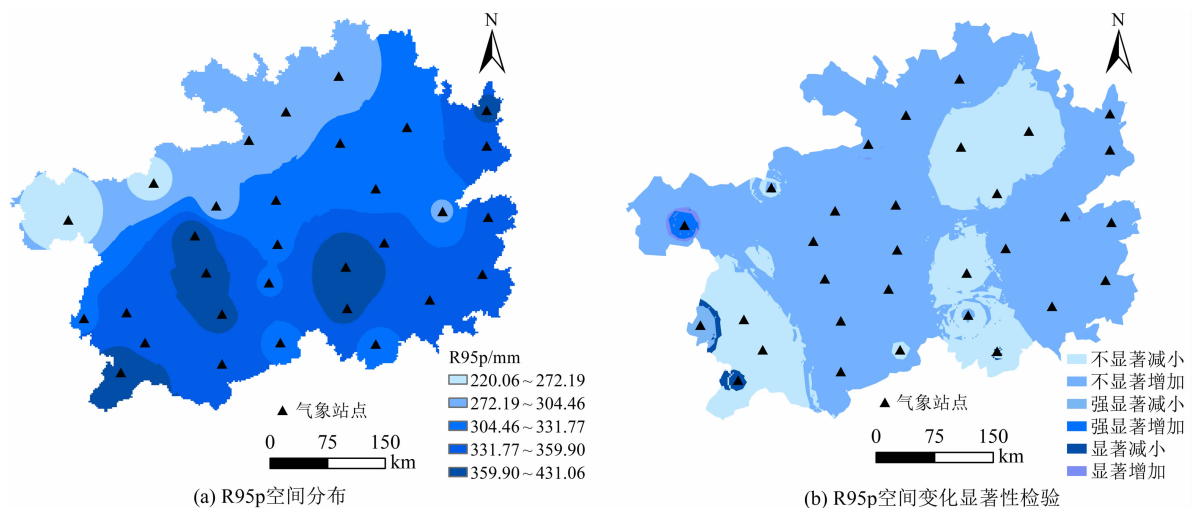


图3 R95p 空间分布图与空间变化显著性检验图

Fig. 3 R95p spatial distribution and test of significance in spatial variation

的区域变化显著。

3.1.2 拟合优度检验

本研究利用 8 种分布函数、4 种检验方法对贵州 31 个站点 R95p 进行最优拟合,选出各站点的最优概率分布函数。例如湄潭站,R95p 密度函数图(图 4)与分布函数图(图 5)反映出 Weibull 函数是 R95p 的最优分布函数,EV 函数对其拟合效果相对较差。根据最优函数空间分布图可知(图 6),Weibull 函数对贵州省 71% 站点的拟合效果最佳,说明该模型比较适合探究贵州极端降雨的时空演化;其次是 GEV 分布函数,站点占比 10%;而 EV 分布对各站点的拟合效果均未达到最优。研究结果与

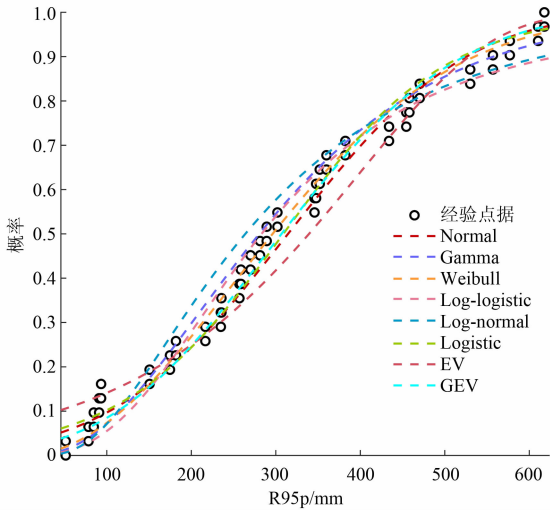


图5 R95p 分布函数图

Fig. 5 R95p distribution function chart

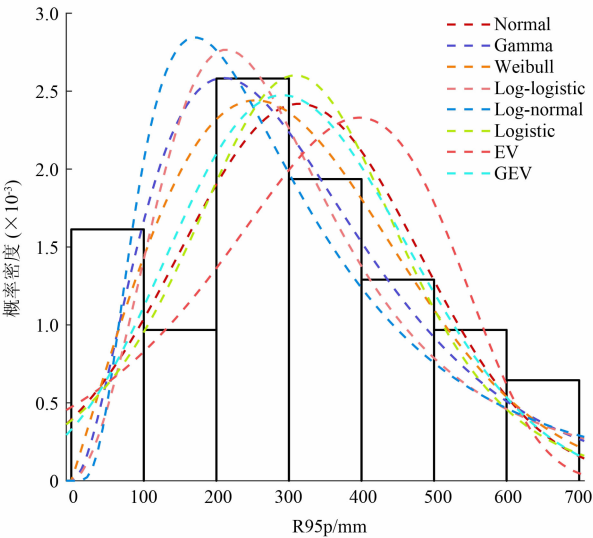


图4 R95p 密度函数图

Fig. 4 R95p density function chart

查雪婷^[27]、唐莉^[28]等人结果一致。

3.2 极端降雨重现期分析

根据各站点最优概率分布模型,计算 5 年、25 年、50 年以及 100 年重现期的 R95p 估计值(图 7)。研究发现贵州省 R95p 估计值随重现期增加而增大,且在不同重现期均呈南高北低的分布格局,这与历史 R95p 分布特征相似。由于受地形、海拔等影响,R95p 高值中心主要位于南部兴义、都匀附近,低值集中分布于西北部毕节、威宁一带,不同重现期最低值均出现在毕节。但随着重现期增加,极端降雨南北差异逐渐减弱,高值区域逐渐聚拢,兴义、都匀两个高值中心更突出;低值区域则以毕节、威宁为中

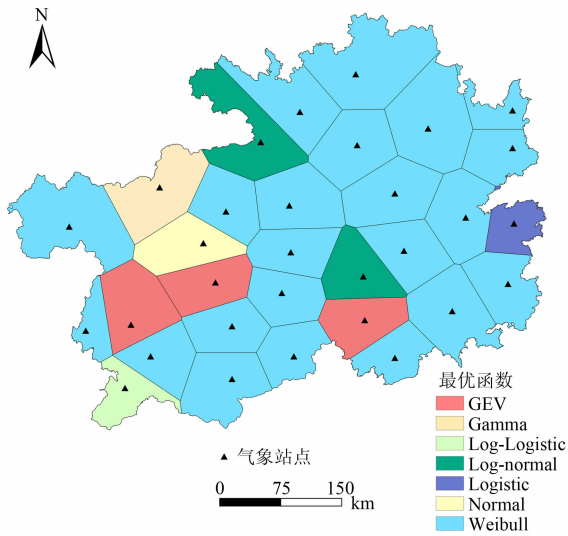


图6 R95p 最优函数空间分布
Fig. 6 R95p spatial distribution of optimal function

心扩散。这可能与重现期越大,极端降雨高值发生的概率越小,其影响的区域范围也越小的变化规律有关。

3.3 极端降雨影响因子

3.3.1 大尺度影响因子

为分析大尺度因子对极端降雨的影响,本研究选取太阳活动因子 Sunspot 与大气环流 5 个因子 (MEI、SASMI、PDO、EASMI、SOI),采用随机森林算法探究 6 因子对 R95p 的重要性(图 8)。结果显示,大气环流因子 MEI 对 R95p 的影响最大,相对重要性达到 20.49%。这可能因为 MEI 是反映厄尔尼诺强弱的综合性指标,厄尔尼诺对不同纬度尤其赤道和低纬度地区的海温产生影响,它通过影响大气环流进而影响极端降雨。由于贵州省位于低纬度地区,降雨深受厄尔尼诺影响。与大气环流因子相比,太阳活动因子 Sunspot 影响最小(14.84%),这可能是由于 Sunspot 主要通过增强地球表面太阳辐射,使植被蒸腾和水体蒸发过程加剧,增加暖湿气流中的水分,从而增加降雨;同时,贵州地形复杂多样,影响降雨、太阳辐射的再分配,一定程度上削弱太阳辐射对降雨的促进作用,这进一步说明贵州省极端降雨除受大尺度因子影响外,还受区域因子影响。

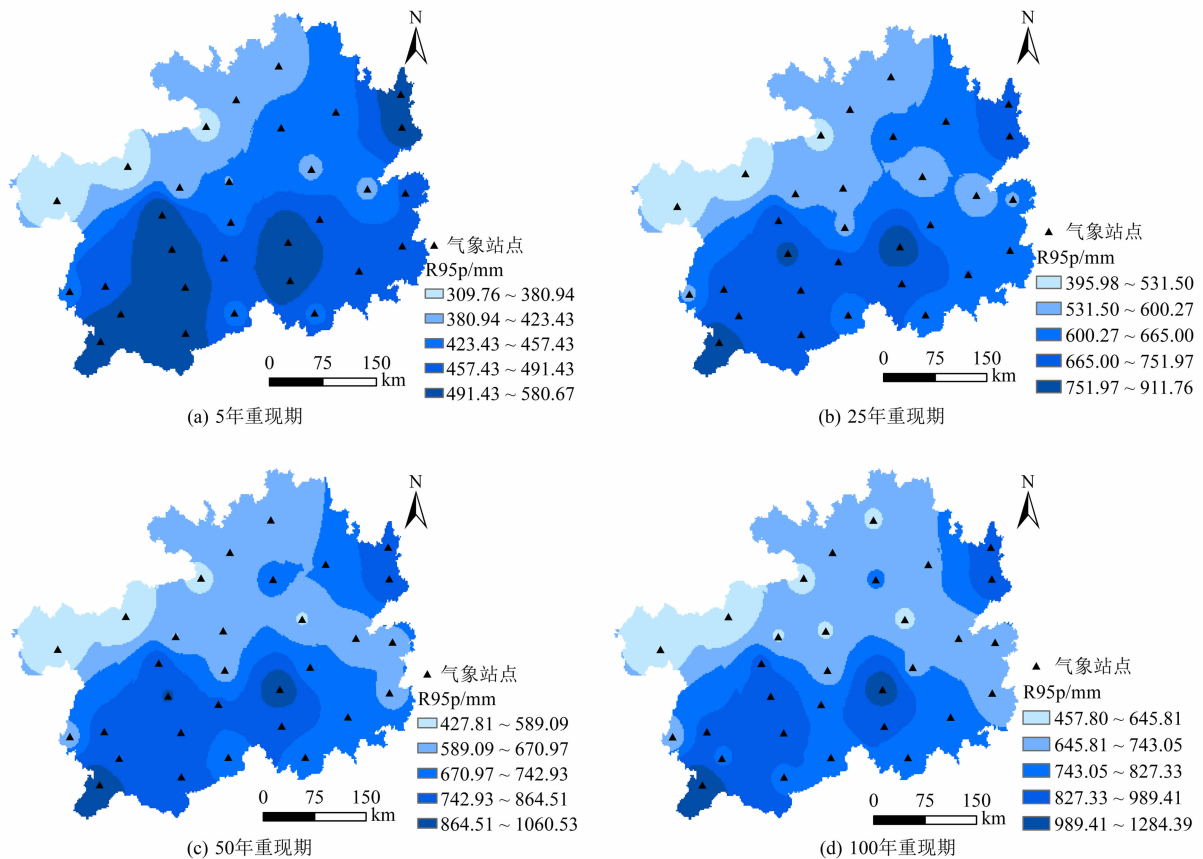


图7 R95p 重现期空间分布图
Fig. 7 R95p recurrence spatial distribution

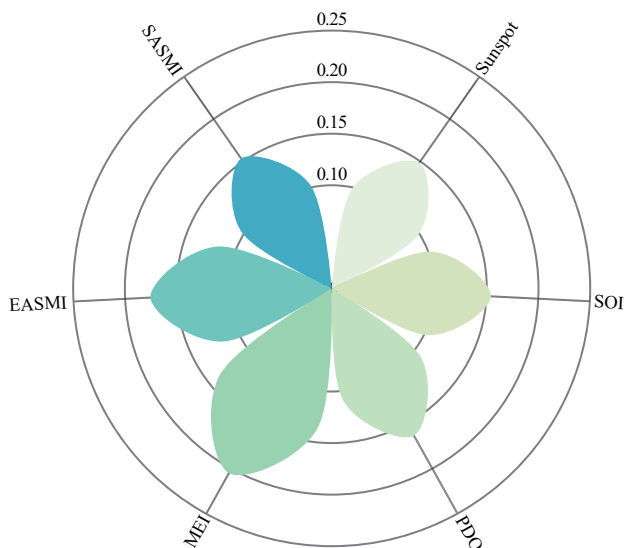


图8 影响因子重要性分析图

Fig. 8 Impact factor importance analysis chart

3.3.2 局地尺度影响因素

在地理探测器中,不同离散化方法(等间断、自然间断、分位数间断和几何间断)对探测结果具有重要影响。除此之外,在中断数的参数组合上,如何寻求连续变量的最大 Q (参数组合以最大 Q 为标准)也是地理探测器分析中的重点和难点。鉴于此,本研究首先对离散化方法和中断数参数组合进行了最优筛选,并在此基础上研究1990—2020年各影响因子及其交互作用,揭示影响贵州省R95p空间分异的主导因子。

图9汇总了各因子不同离散化方法与中断数的参数组合,大部分因子最佳离散化方法为自然间断法与等间断法,且中断数为10级以上。从各年份单因子探测结果来看(图10),1990年各探测因子对R95p的影响力(Q 值)从大到小依次为温度(47.33%)、高程(12.32%)、二氧化碳(8.79%)、土地利用(4.79%)、坡度(1.10%)、坡向(0.94%)。温度的 Q 值远大于其他因子,为R95p的主导驱动因子;坡度与坡向的影响力接近且数值较小,说明两者对R95p的影响程度接近且相对较弱。2000年各探测因子对R95p的影响力总体不突出,由大到小依次为温度(21.87%)、高程(15.51%)、二氧化碳(8.69%)、土地利用(1.36%)、坡向(0.82%)、坡度(0.47%),其中温度为R95p的主导驱动因子,坡度影响力最小。2010年 Q 值为四年中整体最大,由小到大为土地利用(0.69%)、坡向(0.99%)、坡度

(2.38%)、高程(8.62%)、二氧化碳(19.95%)、温度(55.80%)。最大 Q 值(温度)超50%,说明2010年R95p与温度关系密切,其次是二氧化碳;土地利用对R95p影响最小。2020年主要影响因子 Q 值均大于20%,分别为温度(28.47%)、高程(21.63%);最小 Q 值为坡度(0.82%)。综上可知,贵州省极端降雨的主导影响因子为温度,温度不仅影响蒸散发强度,还对海陆热力性质产生影响,进而影响极端降雨。其他主要影响因子为高程、二氧化碳,其中高程在影响水汽输送的同时,还对温度产生影响;而温室气体促进全球变暖、全球水文循环加剧,导致极端降雨事件^[29]。

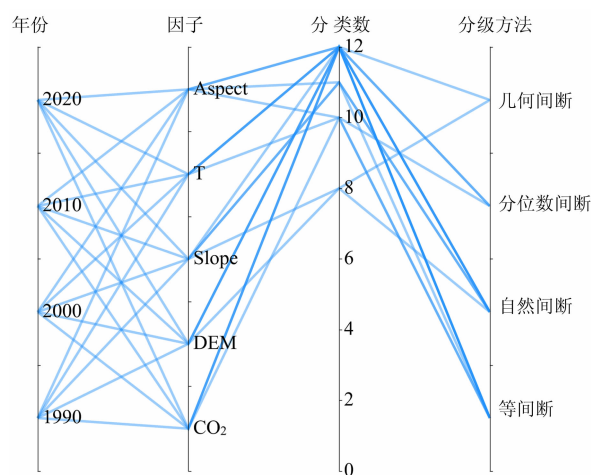


图9 离散型探测因子最佳分类方法与中断数汇总图

Fig. 9 Optimal classification method of discrete detection factor and interruption number chart

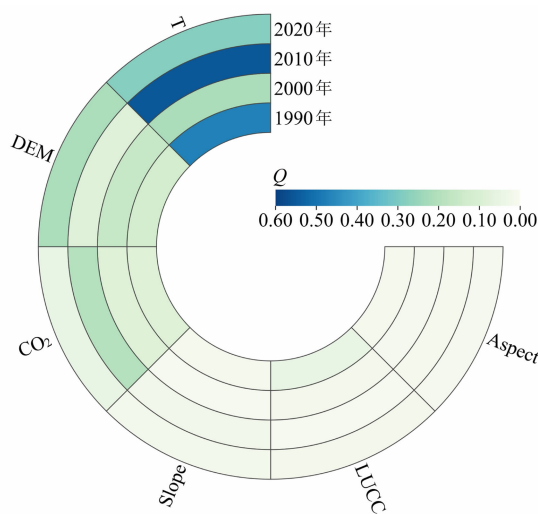


图10 单一因子探测结果图

Fig. 10 Single factor detection results

交互探测结果表明(图 11),交互因子间的 Q 值均大于单因子 Q 值,即交互作用大于单一作用,这说明极端降雨并非受单一因子的影响,而是多种因子共同作用的结果。1990 年主要驱动因子为温度 \cap 二氧化碳(57.07%)、温度 \cap 高程(53.08%)、温度 \cap 坡向(50.53%),温度 \cap 坡度(50.44%)的 Q 值也超过 50%;主要交互因子均与温度相关,说明温度与 R95p 关系密切;交互作用最小的因子为坡度 \cap 土地利用(6.85%)。2000 年交互因子影响力整体偏低,温度 \cap 二氧化碳(40.95%)、温度 \cap 高程(34.71%)、温度 \cap 坡度(28.68%)为主要驱动因子;影响力最低的交互因子(坡度 \cap 土地利用(3.36%))与 1990 年相同。与单因子探测结果相

似,2010 年的 Q 值最突出,最大 Q 值(温度 \cap 二氧化碳)高达 75.64%;其次为温度 \cap 高程(60.84%)、温度 \cap 坡向(58.46%);与温度交互产生的影响力均大于 55%,说明温度和这些因子协同作用较强,共同对 R95p 产生较大影响。2020 年的主要驱动因子与 1990、2010 年相同, Q 值分别为 44.26%、42.79%、31.11%。综上,不同年份主要交互因子均为温度与高程、二氧化碳、坡向交互组合。

4 讨论

研究选取指数 R95p 表征贵州省极端降雨,优选各站点最优分布模型并分析其时空特征。在极端

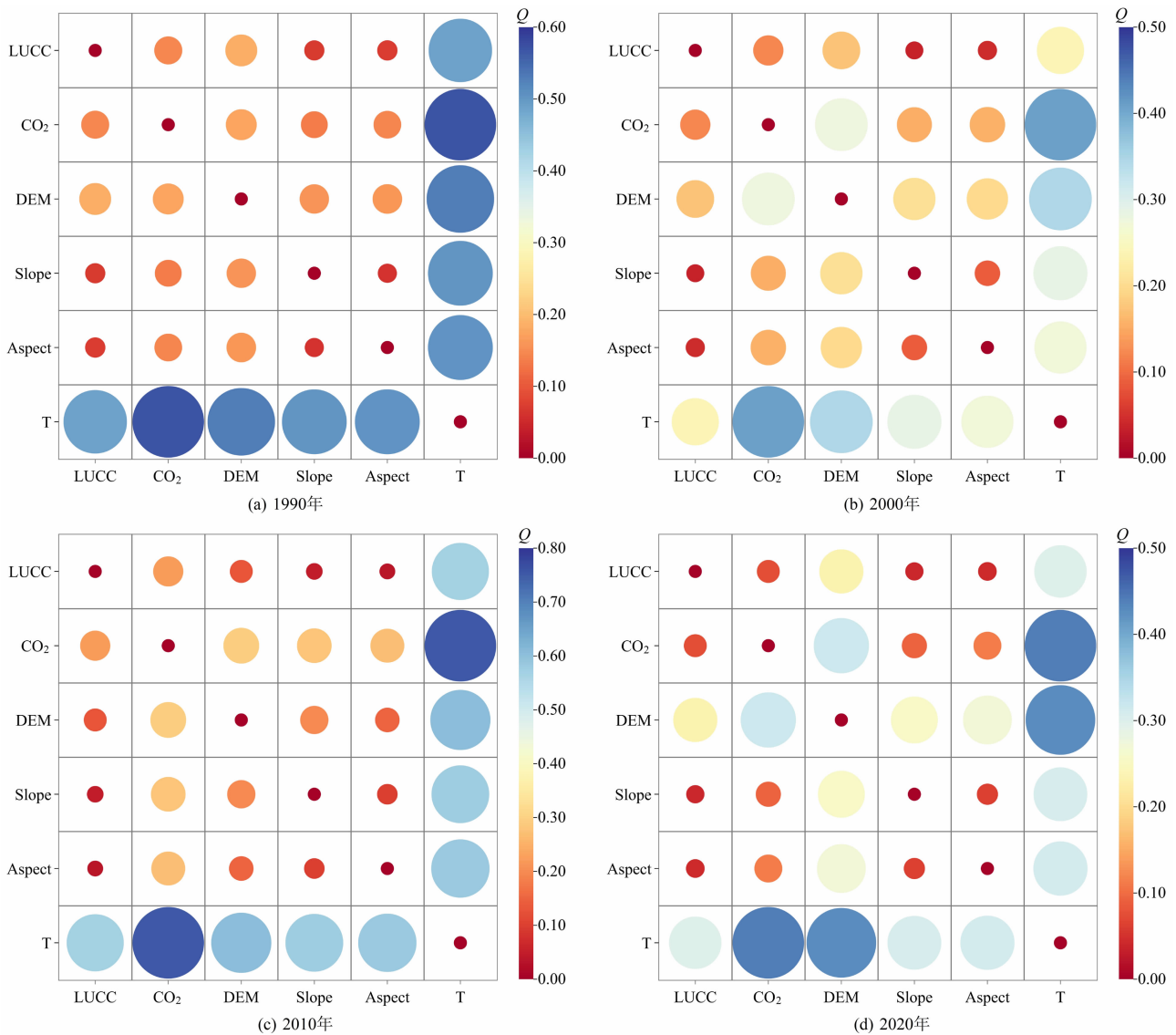


图 11 双因子交互探测结果图

Fig. 11 Two-factor interaction detection result graph

降雨阈值研究中,国际上常选择第 95、99 个百分位的值。贵州省地貌类型特殊、土层薄、保水能力差,极易受到降雨侵蚀,R95p 指数在贵州省已表现出极强的极端性,且在时间上具有较好的连续性,故研究在诸多极端降雨指标中选取 R95p 表征贵州省极端降雨进行特征分析。研究时段内,贵州省极端降雨呈增加趋势,与前人研究结果较一致^[30-31]。2014 年贵州省降雨极端性突出,同年发生了“6·2 贵州特大暴雨”事件,与历史记录相符,进一步证明 R95p 适用于贵州。部分年份降雨总量偏多,但极端性不突出,说明极端降雨主要是降雨强度大、时间短综合导致的结果,降雨量只是其必要不充分条件^[32]。贵州省极端降雨呈“南高北低、东高西低”的分布格局,主要受地势西高东低的影响,西部高耸乌蒙山,降雨偏少,而东南部属于迎风坡,南海水汽由此向北输送,故贵州东南部降雨充沛,易形成极端降雨。利用多种分布函数进行拟合时发现,Weibull 函数对贵州大部分站点极端降雨拟合效果最佳,这可能是因为极端事件的概率分布符合特定的规律,按照超阈值取样的数据适合采用 Weibull 函数拟合^[33]。

探讨贵州省极端降雨不同尺度影响因子时发现,大气环流、太阳活动等大尺度影响因子中,MEI 对贵州极端降雨的影响最大,太阳黑子影响相对较小。在厄尔尼诺时期,赤道太平洋西部海水变冷,上升气流下沉,降雨减少^[34]。贵州省位于太平洋西北侧,厄尔尼诺影响其降雨的多少,进而影响极端降雨的产生。太阳黑子通过增强区域表面太阳辐射,改变温度和气压梯度、水分蒸散发,导致大气活动异常、大气中水分含量变化^[35]。但复杂的地形地貌会再分配太阳辐射和降雨,一定程度上,贵州省复杂的地形地貌削弱了太阳黑子的作用,这也说明贵州省极端降雨还受地形地貌等区域因子影响。在区域气候、下垫面以及温室气体排放等局地尺度影响因子中,区域气候(温度)对极端降雨影响最大。温度作为降雨形成的三大必要条件之一,能抬升并凝结水汽,直接影响降雨的形成。此外,贵州处于内陆地区,具有典型的海陆热力差异规律,海陆温差致使大量水汽从海洋输送过来,并由此带来大量降雨。区域下垫面结构(高程)、温室气体(二氧化碳)也深刻影响着极端降雨。高程可通过影响水汽输送而影响降雨,贵州省地势西高东低,高程差异较大,显著影

响水汽输送过程;与此同时,高程还会通过影响温度而对降雨产生影响。因子交互探测时也发现,温度与高程对极端降雨的交互作用突出,这也体现出地理环境的整体性。气候变暖主要取决于温室气体的排放^[36],温室气体浓度越高导致温室效应越显著,极端降雨事件越频繁,故极端降雨受温室气体的影响较大。

极端降雨对贵州省的资源环境保护、社会经济发展等造成严重影响,本研究采用年尺度指标分析其特征,一定程度上会弱化特征信息,结果不够精细。为更精确探讨极端降雨特征,可从月尺度、日尺度指标进行分析。此外,由于极端降雨的特殊性与复杂性,研究虽然选取了不同尺度、不同角度影响因子,但因因子数量较少,不够全面,存在一定局限性。为进一步明确其影响机制,可加入气压变化、城市化进程、云量变化等因子进行更深入、全面的探讨。

5 结论

为全面地探讨极端降雨特征及其影响因子,本文采用 8 种分布函数拟合贵州省 31 个站点极端降雨,优选出各站点的最优分布函数,分析贵州省极端降雨重现期特征,探讨其不同尺度影响因子,得到以下结论。

(1) 1990—2020 年贵州省 R95p 在时间上呈不显著增加趋势,最小值出现在 2013 年,2014 年紧接着出现最大值;空间上呈“南高北低、东高西低”的分布格局,高值中心位于安顺、都匀与兴义附近,低值主要集中于毕节、威宁一带。

(2) Weibull 分布函数对贵州省 71% 站点的 R95p 拟合效果最佳,其次是 GEV 分布函数,站点占比 10%。

(3) 贵州省 R95p 的估计量随重现期的增加而增大,在不同重现期均呈南高北低的分布格局,与历史时期相似,且南北差异随重现期增加而逐渐减弱。

(4) 大尺度因子中,MEI 对贵州 R95p 影响最大,太阳黑子相对较小;局地尺度因子中,温度、高程与二氧化碳对 R95p 影响力最大;因子间交互作用均增强,R95p 主要交互影响因子为温度与二氧化碳,其次是温度与高程。

参考文献 (References)

- [1] 徐飞, 张汶海, 赵玲玲, 等. 1960—2018 年珠江流域极端气温时空变化特征[J]. 山地学报, 2022, **40**(3): 343–354. [XU Fei, ZHANG Wenhai, ZHAO Lingling, et al. Spatio-temporal variability in extreme temperature from 1960 to 2018 in the Pearl River basin, China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(3): 343–354] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000676
- [2] OLIVER E C J, DONAT M G, BURROWS M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century [J]. Nature Communications, 2018, **9**(1): 1324. DOI: 10.1038/s41467–018–03732–9
- [3] 甘露, 刘睿, 冀琴, 等. 四川省极端降水事件时空演变特征[J]. 山地学报, 2021, **39**(1): 10–24. [GAN Lu, LIU Rui, JI Qin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics analysis of extreme precipitation in Sichuan province, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(1): 10–24] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000572
- [4] LI Linchao, ZOU Yufeng, LI Yi, et al. Trends, change points and spatial variability in extreme precipitation events from 1961 to 2017 in China [J]. Hydrology Research, 2020, **51**(3): 484–504. DOI: 10.2166/nh.2020.095
- [5] 曹瑜, 游庆龙, 马茜蓉, 等. 青藏高原夏季极端降水概率分布特征[J]. 高原气象, 2017, **36**(5): 1176–1187. [CAO Yu, YOU Qinglong, MA Qianrong, et al. Probability distribution for the summer extreme precipitation in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2017, **36**(5): 1176–1187] DOI: 10.7522/j.issn.1000–0534.2016.00131
- [6] 史维良, 车璐阳, 李涛. 陕西省汛期极端降水概率分布及综合危险性评估[J]. 干旱区地理, 2023, **46**(9): 1407–1417. [SHI Weiliang, CHE Luyang, LI Tao. Probability distribution and comprehensive risk assessment of extreme precipitation in flood season in Shaanxi province [J]. Arid Land Geography, 2023, **46**(9): 1407–1417] DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2022.567
- [7] 陈子凡, 王磊, 李谢辉, 等. 西南地区极端降水时空变化特征及其与强 ENSO 事件的关系[J]. 高原气象, 2022, **41**(3): 604–616. [CHEN Zifan, WANG Lei, LI Xiehui, et al. Spatiotemporal change characteristics of extreme precipitation in south-western China and its relationship with intense ENSO events [J]. Plateau Meteorology, 2022, **41**(3): 604–616] DOI: 10.7522/j.issn.1000–0534.2022.00004
- [8] 邹磊, 夏军, 张印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(5): 1264–1274. [ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin. Spatial-temporal characteristics of extreme precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(5): 1264–1274] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202105023
- [9] WENTZ F J, RICCIARDULLI L, HILBURN K, et al. How much more rain will global warming bring [J]. Science, 2007, **317**(5835): 233–235. DOI: 10.1126/science.1140746
- [10] 王卫平, 刘永强, 赵求东, 等. 新疆地区极端降水时空变化特征及对气温变化的响应[J]. 农业工程学报, 2022, **38**(4): 133–142. [WANG Weiping, LIU Yongqiang, ZHAO Qiudong, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation and its response to temperature change in Xinjiang, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, **38**(4): 133–142] DOI: 10.11975/j.issn.1002–6819.2022.04.016
- [11] MIAO Chiyuan, DUAN Qingyun, SUN Qiaohong, et al. Non-uniform changes in different categories of precipitation intensity across China and the associated large-scale circulations [J]. Environmental Research Letters, 2019, **14**(2): 025004. DOI: 10.1088/1748–9326/aaf306
- [12] LIU Meixian, XU Xianli, SUN Alex. Decreasing spatial variability in precipitation extremes in southwestern China and the local/large-scale influencing factors [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(13): 6480–6488. DOI: 10.1002/2014JD022886
- [13] 韦小茶, 周秋文, 张继, 等. 1982—2016 年广西 NDVI 时空变化及其影响因素[J]. 山地学报, 2020, **38**(4): 520–531. [WEI Xiaocha, ZHOU Qiuwen, ZHANG Ji, et al. Spatial-temporal changes of NDVI and its influence factors in Guangxi, China during 1982–2016 [J]. Mountain Research, 2020, **38**(4): 520–531] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000530
- [14] 冯椰林, 贺中华, 焦树林, 等. 基于 CMIP6 气候模式的贵州省极端降水情景预估[J]. 水土保持研究, 2023, **30**(1): 282–290. [FENG Yelin, HE Zhonghua, JIAO Shulin, et al. Scenario prediction of extreme precipitation in Guizhou province based on CMIP6 climate model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, **30**(1): 282–290] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20220621.004
- [15] 张娇艳, 李扬, 张东海, 等. 基于 CMIP5 全球气候模式的 21 世纪贵州省极端降水事件预估[J]. 中国农业气象, 2017, **38**(10): 655–662. [ZHANG Jiaoyan, LI Yang, ZHANG Donghai, et al. Projected changes in extreme precipitation events in Guizhou based on CMIP5 simulations over the 21st century [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, **38**(10): 655–662] DOI: 10.3969/j.issn.1000–6362.2017.10.004
- [16] 贺中华, 陈晓翔. 基于土壤因素耦合的喀斯特流域水文干旱模拟——以贵州省为例[J]. 地理科学, 2013, **33**(6): 724–734. [HE Zhonghua, CHEN Xiaoxiang. The hydrological drought simulating in karst basin based on coupled soil factors-taking Guizhou province as a case [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(6): 724–734] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2013.06.016
- [17] 张玉虎, 王琛茜, 刘凯利, 等. 不同概率分布函数降雨极值的适用性分析[J]. 地理科学, 2015, **35**(11): 1460–1467. [ZHANG Yuhu, WANG Chenxi, LIU Kaili, et al. Applicability of different probability distributions to estimated extreme rainfall [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, **35**(11): 1460–1467]

- DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.11.015
- [18] ZHAO Ruxin, WANG Huixiao, ZHAN Chesheng, et al. Comparative analysis of probability distributions for the Standardized Precipitation Index and drought evolution in China during 1961 – 2015 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, **139**(3–4): 1363 – 1377. DOI: 10.1007/s00704-019-03050-0
- [19] 王晶. 偏正态分布拟合真实数据的效果研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022: 49. [WANG Jing. A study of the effect of fitting real data to the skew-normal distribution [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022: 49] DOI: 10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000043
- [20] 吴孝情, 陈晓宏, 唐亦汉, 等. 珠江流域非平稳性降雨极值时空变化特征及其成因[J]. 水利学报, 2015, **46**(9): 1055 – 1063. [WU Xiaqing, CHEN Xiaohong, TANG Yihan, et al. Spatiotemporal variations and the causes of non-stationary extreme precipitation in the Pearl River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(9): 1055 – 1063] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20141415
- [21] 徐勇, 郭振东, 郑志威, 等. 2000—2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测[J]. 环境科学, 2023, **44**(7): 3724 – 3737. [XU Yong, GUO Zhendong, ZHENG Zhiwei, et al. Spatio-temporal variation and multi-dimensional detection of driving mechanism of PM_{2.5} concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 2000 to 2021 [J]. Environmental Science, 2023, **44**(7): 3724 – 3737] DOI: 10.13227/j.hjks.202207276
- [22] 肖瑶, 赵林, 邹德富, 等. 基于地理探测器的青藏高原多年冻土分布影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2021, **43**(1): 311 – 321. [XIAO Yao, ZHAO Lin, ZOU Defu, et al. Analyses of the influence factors of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau based on geographical detector [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, **43**(1): 311 – 321] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0063
- [23] 卢瑞荆. 贵州暴雨洪涝的气候特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 88. [LU Ruijing. Analysis of climate characteristic of rainstorm in Guizhou province [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 88] DOI: 10.7666/d.Y1703527
- [24] 丁立国. 贵州山地复杂地形下暴雨洪涝灾害风险研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022: 60. [DING Ligu. Study on the risk of heavy rainfall and flooding in the complex terrain of Guizhou mountains [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2022: 60] DOI: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2022.000181
- [25] 王涛, 伊丽努尔·阿力甫江, 李思颖, 等. 三种趋势分析法在东帕米尔高原降水特征分析中的应用[J]. 气象, 2022, **48**(10): 1312 – 1320. [WANG Tao, YILINUER Alifujiang, LI Siying, et al. Three trend analysis methods in precipitation characteristic analysis of eastern Pamirs [J]. Meteorological Monthly, 2022, **48**(10): 1312 – 1320] DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.080501
- [26] 徐乔婷, 陈涟, 范月华, 等. 基于 SPEI 指数的兰州干旱特征与气候指数的关系[J]. 水文, 2021, **41**(2): 56 – 62. [XU Qiaoting, CHEN Lian, FAN Yuehua, et al. Relationship between Lanzhou drought and climate indices based on SPEI index [J]. Journal of China Hydrology, 2021, **41**(2): 56 – 62] DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200213
- [27] 查雪婷. 淮河流域极端降水时空演变特征及重现期研究[D]. 蚌埠: 安徽财经大学, 2022: 65. [ZHA Xueting. Spatial and temporal evolution characteristics and recurrence periods of extreme precipitation in the Huaihe River basin [D]. Bengbu: Anhui University of Finance and Economics, 2022: 65] DOI: 10.26916/d.cnki.gahcc.2022.000518
- [28] 唐莉, 杨冰冰, 魏希, 等. 气候变化对江西省主汛期降雨极值时空差异的影响研究[J]. 水利水电技术, 2023, **54**(1): 53 – 63. [TANG Li, YANG Bingbing, WEI Xi, et al. Study on the impact of climate change on the extreme rainfall distribution in main flood season of Jiangxi province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, **54**(1): 53 – 63] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.005
- [29] 黄国如, 陈易德, 姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. 水科学进展, 2021, **32**(2): 161 – 170. [HUANG Guoru, CHEN Yisi, YAO Zhijun. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization [J]. Advances in Water Science, 2021, **32**(2): 161 – 170] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.001
- [30] QIAO Panjie, GONG Zhiqiang, LIU Weiqi, et al. Extreme rainfall synchronization network between southwest China and Asia-Pacific region [J]. Climate Dynamics, 2021, **57**: 3207 – 3221. DOI: 10.1007/s00382-021-05865-y
- [31] 王昊. 西南地区极端气候指数时空变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 81. [WANG Hao. Temporal and spatial variation of extreme climate indices and its impact on NDVI in southwestern China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019: 81] DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2019.000881
- [32] 李帅, 陈鲜艳, 龚文婷, 等. 1961—2020 年三峡区间降水极值特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(10): 2166 – 2175. [LI Shuai, CHEN Xianyan, GONG Wenting, et al. Characteristics of precipitation extremes in Three Gorges Reservoir intervening basin during 1961 – 2020 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(10): 2166 – 2175] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202210006
- [33] 孔锋, 孙劭. 基于 SSPs 的未来全球陆地极端降水强度的空间分异特征预估[J]. 灾害学, 2021, **36**(4): 107 – 112 + 118. [KONG Feng, SUN Shao. Spatial differentiation prediction of global land extreme precipitation intensity based on SSPs [J].

- Journal of Catastrophology, 2021, **36**(4): 107 – 112 + 118] DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.018
- [34] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年降雨侵蚀力影响研究 [J]. 地理科学, 2016, **36**(10): 1573 – 1580. [CHEN Shifa. Impact of ENSO on rainfall erosivity in Shaoguan city during 1951 – 2013 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, **36**(10): 1573 – 1580] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.10.015
- [35] LAN Yongchao, KANG Ersi, MA Quanjie, et al. Runoff of the upper Yellow River above Tangnag: Characteristics, evolution and changing trends [J]. Journal of Geographical Sciences, 2001, **11**(3): 46 – 53. DOI: 10.1007/bf02892313
- [36] ANDERSON T R, HAWKINS E, JONES P D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: From the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models [J]. Endeavour, 2016, **40**(3): 178 – 187. DOI: 10.1016/j.endeavour.2016.07.002

Characteristics of Extreme Rainfall and Its Influencing Factors in Guizhou Province, China

TAN Hongmei¹, HE Zhonghua^{1, 2*}, CHEN Lihui¹, FENG Yelin¹, GU Xiaolin³

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Guizhou Mountain Resources and Environmental Remote Sensing Application Laboratory, Guiyang 550001, China;

3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

Abstract: Different geographical zones have regional heterogeneity in underlying earth surface structure and microclimate, which result in different trends and unique spatial pattern of extreme rainfalls in these zones. In Guizhou province of China, there are complex karst landforms, which lead to spatial redistribution of rainfall, frequent extreme rainfall, and geohazard occurrences. Research on extreme climate in Guizhou mostly paid attention to its spatio-temporal characteristics and modeling, but lacked of analysis on its recurrence interval and influencing factors on different scales.

This study investigated the characteristics of extreme rainfall recurrence period in Guizhou province and discussed influence factors on different scales. Daily rainfall data from 1990 to 2020 at 31 meteorological observation stations throughout the province were collected to calculate extreme precipitation, followed by 8 distribution functions to be selected for the determination of an optimal distribution function of each site.

This research had the following results. (1) In the past 31 years, there has been no significant increase in extreme rainfall in Guizhou province, with a spatial pattern of “high in the south and low in the north, high in the east and low in the west”. (2) The Weibull distribution function was the best fit for extreme rainfall at most stations; the estimation of extreme rainfall increased with the increase of recurrence period; the estimated values in each recurrence period showed a distribution pattern of “high in the south and low in the north”; the difference between the north and the south gradually weakened with the increase of recurrence period. (3) Among the large-scale influencing factors, El Nino had the greatest impact on extreme rainfall; among the local-scale influencing factors, temperature, elevation, and carbon dioxide were the main factors regulating extreme rainfalls.

Key words: extreme rainfall; probability distribution function; random forest algorithm; geodetector; Guizhou province

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)