

凯里市1960~2021年极值降水特征及重现期分析

杨胜忠*, 袁芳菊, 刘坝勋

贵州省黔东南州气象局, 贵州 凯里

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

凯里市是贵州省黔东南苗族侗族自治州州府所在地, 是贵州省主要中心城市之一。采用线性趋势分析法、M-K突变检验法和皮尔逊III型方法对凯里市1960~2021年近62a极值降水进行特征及重现期分析。研究表明: 年降水量变率为5.6 mm/10a, 在2015年发生由少到多的突变, 日最大降水量、1小时最大降水量、最大连续降水量年际变化趋势不显著, 均没有发生突变; ≥ 0.1 mm降水日数呈稳定缓慢减少趋势, 变率为0.6 d/10a, 在2011年发生由少到多的突变。最长连续降水日数、最长连续无降水日数、 ≥ 10.0 mm降水日数和 ≥ 50.0 mm降水日数变化趋势不显著, 没有发生突变。年降水量、最大日降水量、1小时最大降水量、最大连续降水量、最长连续降水日数和最长连续无降水日数重现期值随着年限的增大, 数值也明显呈皮尔逊III型分布增长趋势, 日降水量重现期从5a~1000a增幅超过3倍, 其余增幅在2倍左右。凯里市各极值降水特征变化规律研究成果对农业种植结构调整具有一定的参考意义。

关键词

凯里, 降水, M-K突变检验, 皮尔逊III型, 重现期

Analysis of Extreme Precipitation Characteristics and Return Period in Kaili City from 1960 to 2021

Shengzhong Yang*, Fangju Yuan, Xunxun Liu

Qiandongnan Meteorological Bureau, Kaili Guizhou

Received: Dec. 28th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

*第一作者。

Abstract

Kaili is the capital of Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture, and one of the main central cities in Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture, Guizhou Province. The characteristics and return period of extreme precipitation in Kaili City from 1960 to 2021 were analyzed by linear trend analysis, M-K mutation test and Pearson III. The results show that the annual precipitation variability was 5.6 mm/10a, and there was an abrupt change from less to more in 2015. The interannual variation trends of daily maximum precipitation, hourly maximum precipitation and maximum continuous precipitation were not significant, and there was no abrupt change. The rainy days with daily rainfall ≥ 0.1 mm show a steady and slow decreasing trend, with a rate of 0.6 d/10a, and there was a sudden change from less to more in 2011. The trend of the longest continuous precipitation days, the longest continuous non-precipitation days, the rainy days with daily rainfall ≥ 10.0 mm and the rainy days with daily rainfall ≥ 50.0 mm was not significant, and there was no mutation. The return period of annual precipitation, maximum daily precipitation, 1 hour maximum precipitation, maximum continuous precipitation, the longest number of continuous precipitation days and the longest number of continuous non-precipitation days is also significantly Pearson III distribution growth trend. The return period of daily precipitation from 5a to 1000a increased more than 3 times, and the rest increased about 2 times. The return period can be used as an important reference for the call threshold of meteorological disaster prevention and mitigation services.

Keywords

Kaili, Precipitation, M-K Mutation Test, Pearson III, Return Period

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

凯里市是贵州省黔东南苗族侗族自治州州府所在地，是贵州省主要中心城市之一。凯里市属中亚热带温和湿润气候区，是典型的季风气候，具有雨热同季，降水相对集中，分布不均等特点。受全球气候变化影响，极端天气气候事件呈随机性、不均匀性频发、强发，造成了严重的人员伤亡和经济损失[1] [2] [3] [4]。随着城市进程化的推进，城镇内涝已成为气象灾害主要灾种之一。2021年河南郑州“7·20”特大暴雨无论是在量级还是强度上，都远远突破了历史极值[5] [6]。降水致灾原因主要是降水极端性造成的，特别是降水极端偏多大于排洪设计标准时，极易出现洪水和城镇内涝等灾害。陈子凡等[7]研究表明，西南地区在1969~2020年整体呈现降水频率和强度增大，极端降水增多的趋势。贵州强降水研究较多，近年来的研究成果主要有[8] [9] [10] [11] [12]，但对强降水极值的研究相对较少。研究通过对凯里市国家气象站1960~2021年极值降水量进行特征分析，为凯里市城镇内涝防灾减灾提供科学参考依据。

2. 资料和方法

2.1. 资料

降水资料来源于黔东南州气象局，站点为凯里国家级气象站，站点位于凯里市城区内，对城区城镇内涝具有很好的代表性。时间序列为1960~2021年，资料包括逐年降水量、年日最大降水量、年1小时最大降水量、年最大连续降水量、年最长连续降水日数、年最长连续无降水日数、年日降水量 ≥ 0.1 mm

降水日数、年日降水量 ≥ 0.1 mm 降水日数、年日降水量 ≥ 50.0 mm 降水日数。

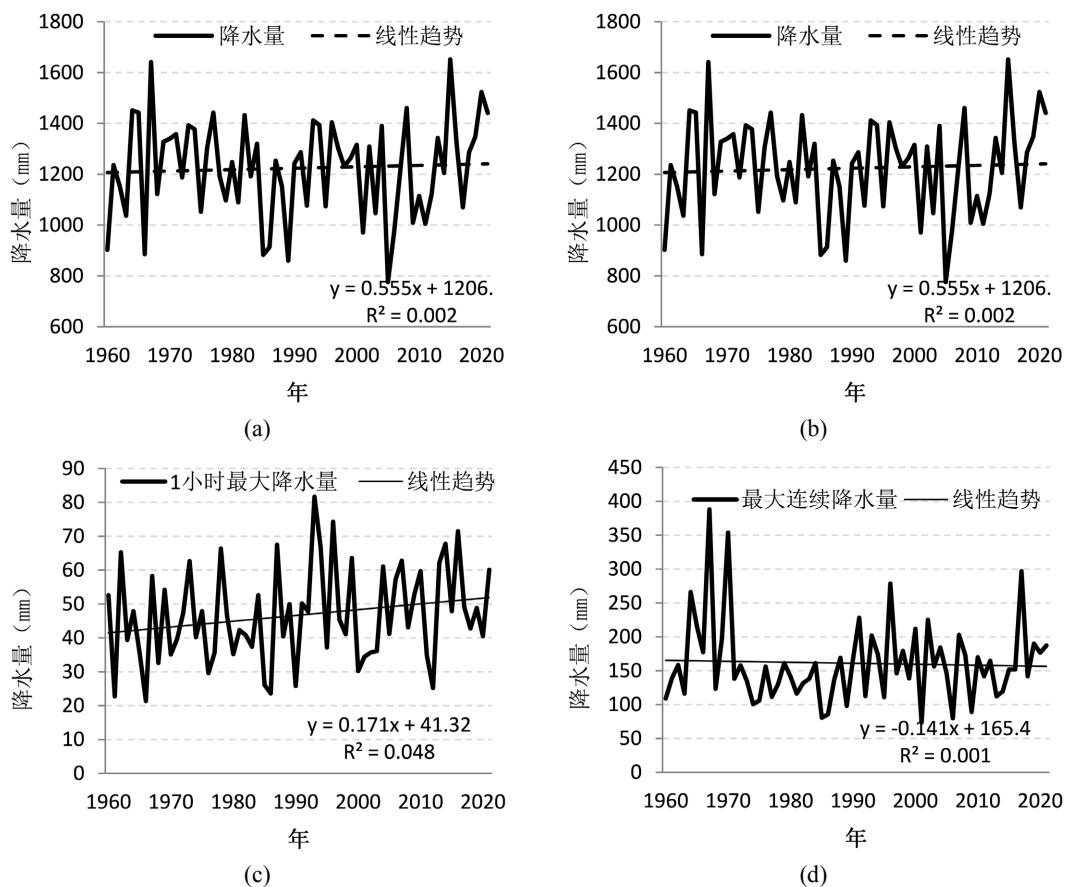
2.2. 研究方法

降水变化特征采用线性趋势分析法和 M-K 突变检验法[13] [14] [15] [16] [17]。M-K 突变检验法是一种气候诊断和预测技术方法，常用于判断气候序列中是否存在气候突变，当 $U_f > 0$ ，说明持续增长趋势，值在显著性水平线上，说明通过显著性检验， U_f 和 U_b 曲线的交点在置信水平区间内，并且确定交点具体年份，说明该年份呈现突变性增长趋势。如果交点不位于置信水平区间范围内，说明交点没有通过检验，不具有突变性。在研究中，显著性水平 $\alpha = 0.01$ ，置信水平区间为 $[-2.58, 2.58]$ 。重现期的研究方法较多，主要有指数分布、耿贝尔 I 型分布、皮尔逊 III 型分布、韦布尔分布等[18] [19] [20] [21]。皮尔逊 III 型分布研究方法是气象水文科研广泛应用的概率分布模型，对重现期的分析效果较好，本研究采用此方法。

3. 降水特征分析

3.1. 年降水量

凯里市 1960~2021 年近 62a 逐年降水量总体呈增加趋势，见图 1(a)，变化率不显著，以 5.6 mm/10a 的速度增长。多年平均降水量为 1223.8 mm，最大值出现在 2015 年 1651.9 mm，最小值出现在 2005 年 776.1 mm。各年降水分布极为不均，从整个趋势来分析，降水量呈周期的偏少 - 偏多 - 偏少 - 偏多 - 偏少 - 偏多的变化特征，在 1960~1966、1978~1989、2000~2011 年呈偏少趋势，其余时段呈偏多趋势，易形成洪涝和气象干旱。通过 M-K 突变检验发现，见图 2(a)，降水量在 1978 年开始呈现突变性增长趋势，在 2015 年通过显著性检验，发生突变。



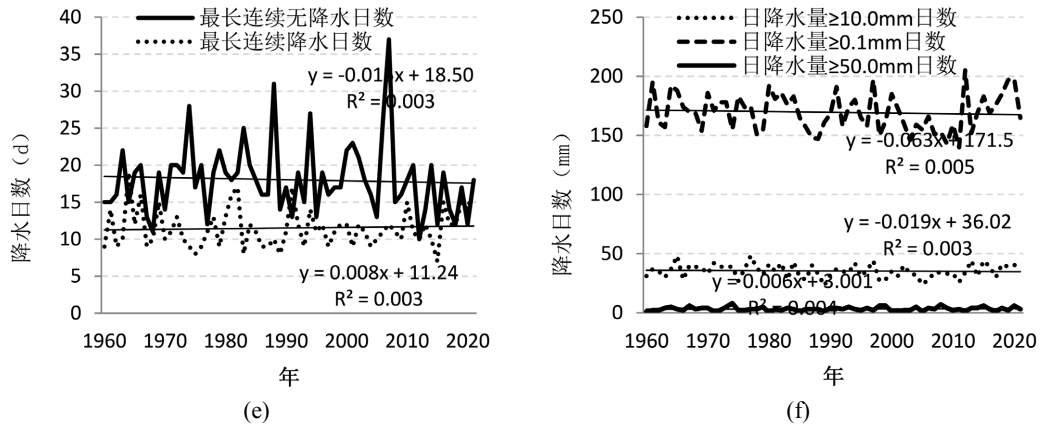
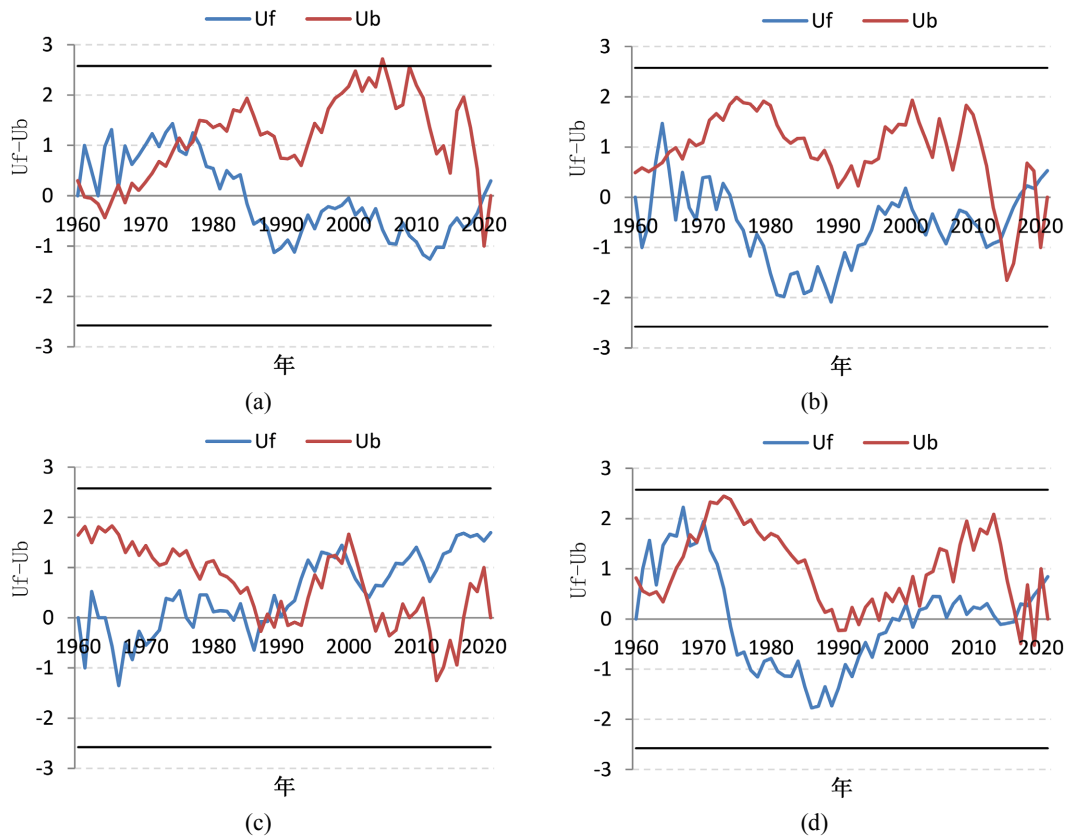


Figure 1. Trend chart of precipitation and precipitation days. (a) Annual precipitation; (b) Annual maximum daily precipitation; (c) Maximum rainfall per hour in a year; (d) Maximum continuous precipitation; (e) The longest continuous precipitation days and the longest continuous no precipitation days; (f) Daily precipitation ≥ 0.1 , ≥ 10.0 , ≥ 50.0 rainy days

图 1. 降水量和降水日数变化趋势图。(a) 年降水量; (b) 年最大日降水量; (c) 年 1 小时最大降水量; (d) 最大连续降水量; (e) 最长连续降水日数和最长连续无降水日数; (f) 日降水量 ≥ 0.1 、 ≥ 10.0 、 ≥ 50.0 雨日数

3.2. 年最大日降水量和年 1 小时最大降水量

凯里市近 62a 年最大日降水量总体呈增加趋势，变化率不显著，以 1.4 mm/10a 的速度增长，没有发生突变，见图 1(b)和图 2(b)。各年分布极为不均，存在少 - 多的周期性变化，最大值出现在 1970 年 256.5 mm，其次是 1996 年 248.6 mm，1980 年最少为 48.1 mm。其中， ≥ 200 mm 以上的年份为 2a， ≥ 100 mm 且 < 200 mm 的年份为 23a， ≥ 50 mm 且 < 100 mm 的年份为 36a， < 50 mm 的年份为 1a。



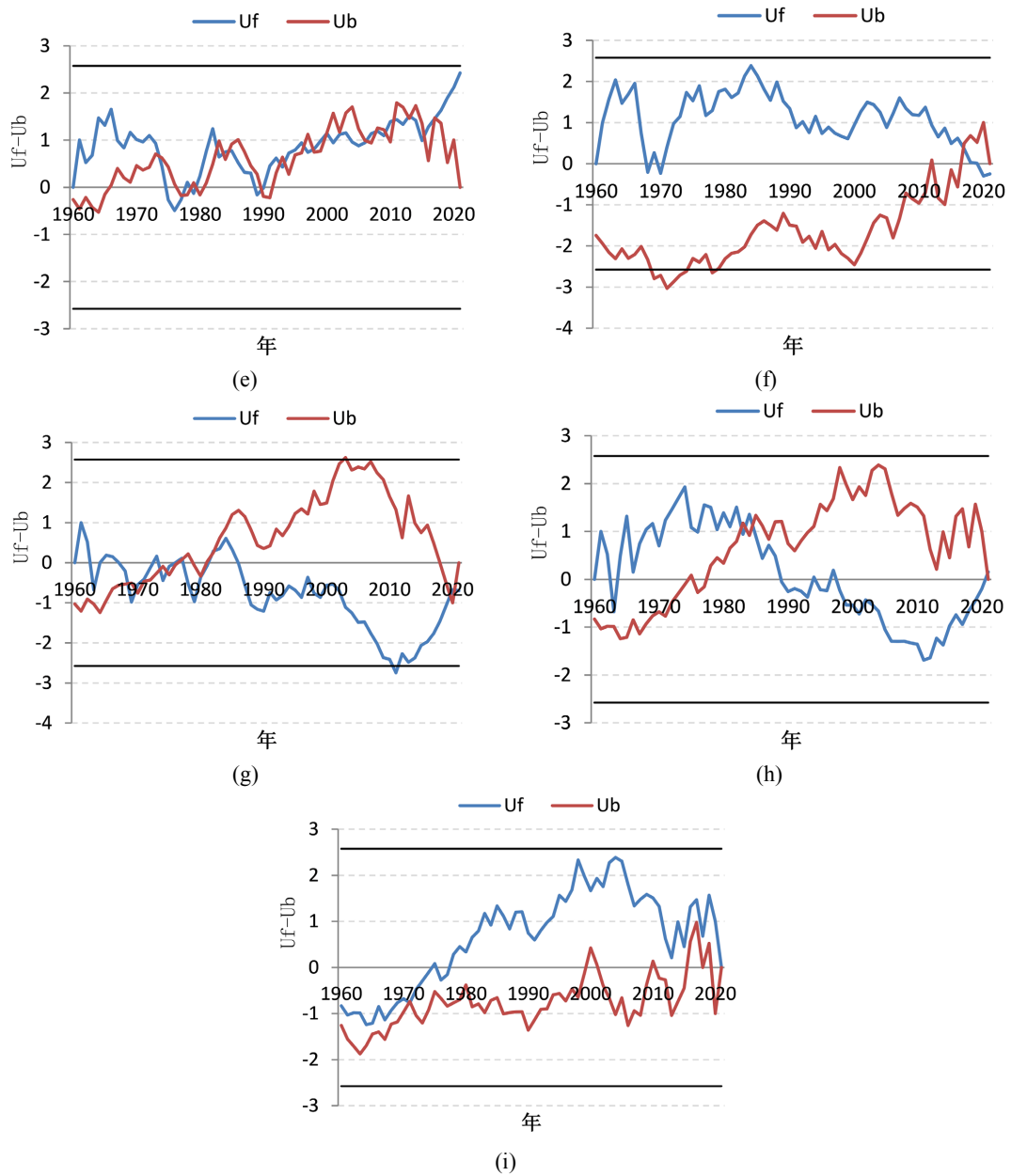


Figure 2. M-K mutation test of precipitation and precipitation days. (a) Annual precipitation; (b) Annual maximum daily precipitation; (c) Maximum rainfall per hour in a year; (d) Maximum continuous precipitation; (e) The longest continuous precipitation days; (f) The longest continuous no precipitation days; (g) Number of ≥ 0.1 mm rainy days; (h) Number of ≥ 10.0 mm rainy days; (i) Number of ≥ 50.0 mm rainy days

图 2. 降水量和降水日数 M-K 突变检验。(a) 年降水量; (b) 年最大日降水量; (c) 年 1 小时最大降水量; (d) 最大连续降水量; (e) 最长连续降水日数; (f) 最长连续无降水日数; (g) ≥ 0.1 mm 降水日数; (h) ≥ 10.0 mm 降水日数; (i) ≥ 50.0 mm 降水日数

通过最大日降水量与年降水量进行相关性分析, 相关系数为 0.51, 说明最大日降水量与年降水量相关性较小, 即最大日降水量对于年降水量的贡献不起决定性因素。

凯里市近 62a 年 1 小时最大降水量呈缓慢增长的趋势, 没有发生突变, 见图 1(c)和图 2(c), 以 1.7 mm/10a 的速度增长, 与年最大日降水量一样, 存在多 - 少的周期性变化, 最大值出现在 1993 年, 81.7 mm, 最小值出现在 1965 年, 21.4 mm, 两者相差近 4 倍。

对 1 小时最大降水量与日最大降水量进行相关性分析, 相关系数为 0.39, 说明两者之间的相关性较小。日降水量偏多除了小时降水量多外, 还需要长时间的持续性。

3.3. 最大连续降水量

凯里市近 62a 最大连续降水量呈缓慢下降趋势, 没有发生突变, 见图 1(d)和图 2(d), 变化率为 $-1.4 \text{ mm}/10\text{a}$ 。各年分布极为不均, 大值区主要出现在三个时段, 1967 年前后、1996 年前后和 2017 年前后, 分别为 388.0 mm、278.7 mm、296.8 mm。对最大连续降水量与年降水量进行相关分析, 相关系数为 0.49, 相关性不强, 说明单次最大连续降水量对年降水量的贡献不起决定性因素。

3.4. 最长连续降水日数和最长连续无降水日数

凯里市近 62a 逐年最长连续降水日数呈稳定略上升趋势, 见图 1(e), 平均值为 11.5 d, 最长时间出现在 1964 年, 19 d, 最短出现在 2015 年, 7 d。最长连续降水日数与最长连续降水量之间的相关性不显著, 1964 年出现 19 d 连续降水日数时, 降水量为 167.7 mm, 而 1967 年连续过程降水日数仅 9 d, 降水量达 388.0 mm。连续无降水日数是影响气象干旱的一个重要指标。凯里市近 62a 最长连续无降水日数呈稳定略下降趋势, 平均值为 18 d, 最长时间出现在 2007 年, 为 37 d, 最短时间出现在 2012 年, 为 10 d, 相差 27 d。连续无降水日数越长, 是造成气象干旱的程度越严重的重要因素之一。通过 M-K 突变分析, 最长连续降水日数和最长连续无降水日数均没有发生突变, 见图 2(e)和图 2(f)。

3.5. 降水日数

降水日数见图 1(f), 凯里市近 62a 逐年 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的降水日数呈稳定略下降趋势, 平均值为 169.5 d, 高值区主要出现在 2012 年, 205 d, 低值区出现在 2011 年, 140 d, 相差 65 d。

近 62a 逐年 $\geq 10.0 \text{ mm}$ 的降水日数也呈稳定下降趋势, 平均值为 35.4 d, 最大值出现在 1977 年, 为 48 d, 最小值出现在 1989 年, 为 23 d。近 62a 逐年 $\geq 50.0 \text{ mm}$ 的降水日数同样呈稳定少变趋势, 平均值为 3.2 d, 最大值出现在 1974 年, 为 8 d, 最小值出现在 1980 年, 为 0 d。通过 M-K 突变分析, $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的降水日数在 1982 年开始呈现突变性减少趋势, 在 2011 年通过显著性检验, 见图 2(g), 发生突变, $\geq 10.0 \text{ mm}$ 的降水日数和 $\geq 50.0 \text{ mm}$ 的降水日数没有发生突变, 见图 2(h)和图 2(i)。

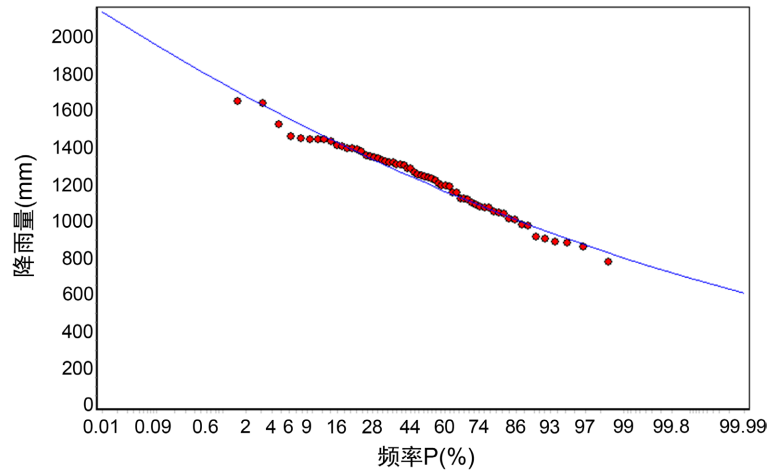
4. 重现期分析

重现期[22]是指在多次试验中某一事件重复出现的时间间隔的平均数。具有统计平均概念, 不能机械地认为多少年一定出现一次。如“百年一遇、千年一遇”的雨量并不是指大于等于这个雨量刚好一百年或一千年仅出现一次, 现实中也许一百年或一千年中这样的值出现好几次, 也许一次也不会出现。降水量重现期对工程设计非常重要, 是城镇内涝、道路排水设计、大型水库设计等的重要依据。

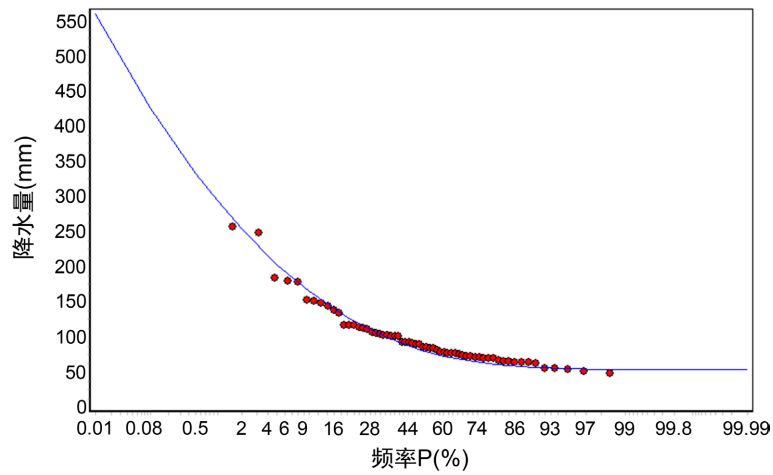
利用皮尔逊 III 型分布方法对凯里市近 62a 降水量、最大日降水量、1 小时最大降水量、最大连续降水量、最长连续降水日数和最长连续无降水日数进行频率和重现期分析, 见图 3。由图上可以看出, 选取最优的 C_v 和 C_s 参数值, 皮尔逊 III 型对于各降水极值的模拟效果较好, 各样本点均分布在理论线附近。利用 χ^2 进行检验[23], 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 查表得临界值为 3.84, 检验计算得各降水极值要素的 χ^2 值均小于 3.84, 因此得出各降水极值分布符合皮尔逊 III 型分布, 模拟效果较好, 完全通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 χ^2 检验。

研究表明凯里市近 62a 年降水量、最大日降水量、1 小时最大降水量、最大连续降水量、最长连续降水日数和最长连续无降水日数的重现期见表 1 所示。选取合适的 C_v 和 C_s 参数值, 分别计算出重现期为 5a、10a、20a、50a、100a、200a、500a 和 1000a 的值, 随着重现期年限的增大, 数值也明显呈非线性增

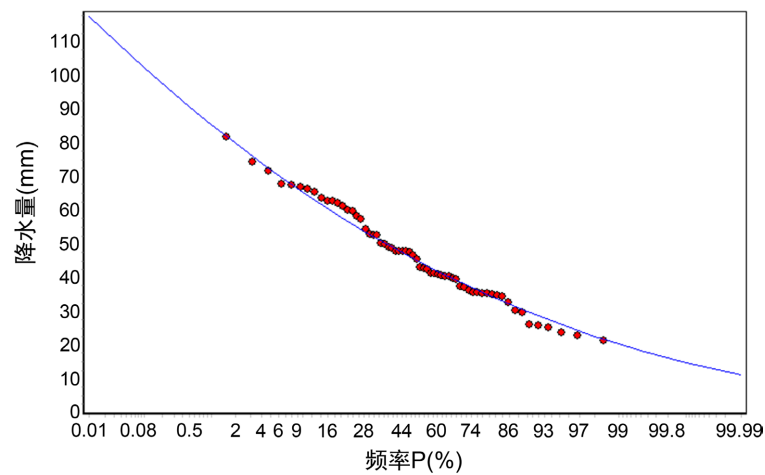
加趋势。年降水量 5a 重现期为 1391.9 mm, 10a 为 1492.5 mm, 100a 为 1750.5 mm, 重现期大于 5a 的年份可认为是多雨天, 近 62a 年降水量大于 1391.9 mm 共 13a, 大于 10a 重现期 1492.5 mm 的仅 3a, 与实际情况准 6a 略有误差, 但总体模拟效果仍较好。近 62a 年最大日降水量 5a 重现期为 127.6 mm, ≥ 127.6 mm



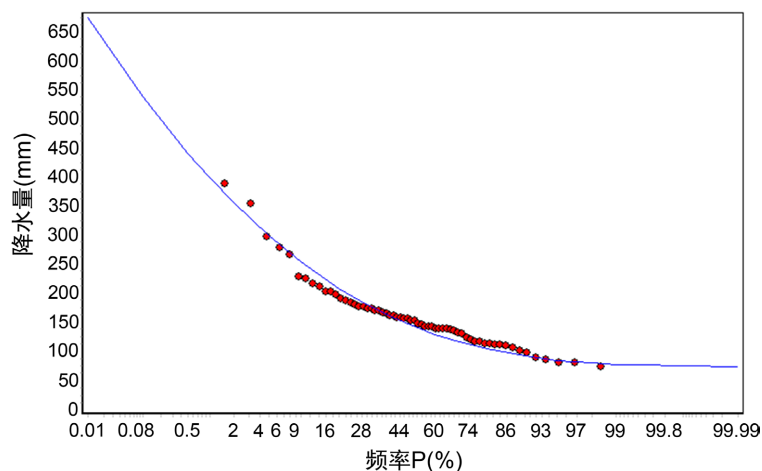
(a)



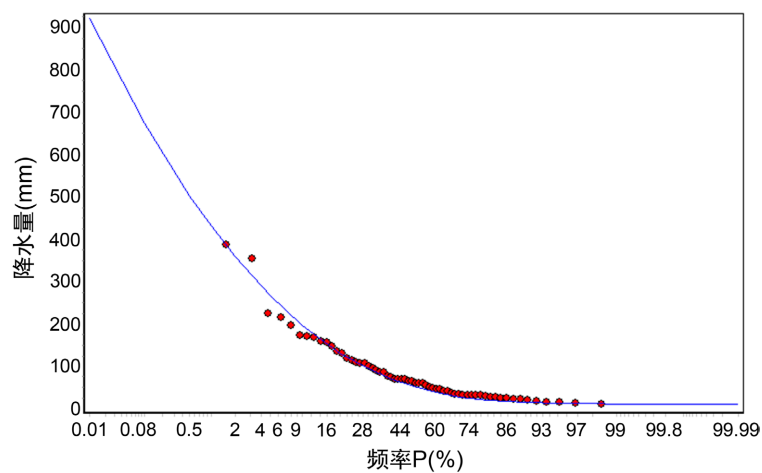
(a)



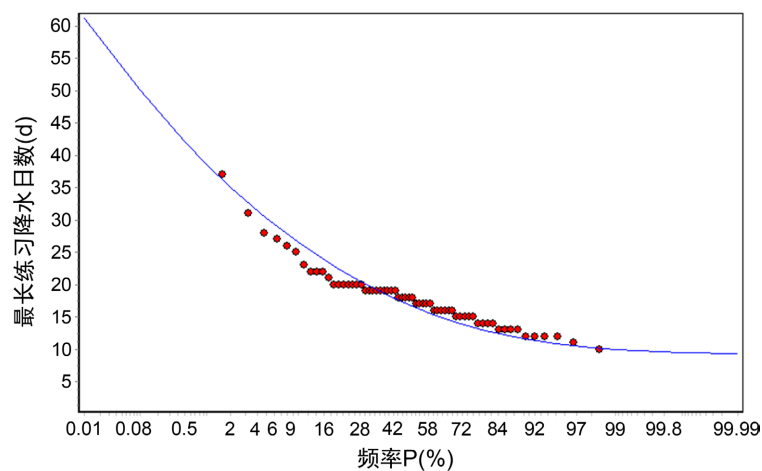
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 3. Pearson III frequency diagram (The red dot is the sample value, and the solid line is the simulated value). (a) Annual precipitation; (b) Annual maximum daily precipitation; (c) maximum rainfall per hour in a year; (d) Maximum continuous precipitation; (e) The longest continuous precipitation days; (f) The longest continuous no precipitation days

图 3. 皮尔逊 III 型频率图(红色圆点为样本值, 实线为模拟值)。(a) 年降水量; (b) 年最大日降水量; (c) 年 1 小时最大降水量; (d) 最大连续降水量; (e) 最长连续降水日数; (f) 最长连续无降水日数

的共 11a, 50a 重现期降水量增加至近 2 倍, 1000a 增至 3 倍多, 增幅较显著。年 1 小时最大降水量、最大连续降水量、最长连续降水日数和最长连续无降水日数 5~1000a 的重现期模拟值增幅不显著, 增加约 2 倍左右。随着全球极端天气事件的频发, 极端降水量各极值突变增大或减少的概率也会越来越大, 如河南郑州 7·20 特大暴雨, 只有提高重现期的设计标准, 才能有效应对各种极端降水灾害。

Table 1. Return period of extreme precipitation

表 1. 各极值降水重现期

项目	设计参数		平均	重现期							
	Cv	Cs		5a	10a	20a	50a	100a	200a	500a	1000a
年降水量	0.17	0.34	1223.8	1391.9	1492.5	1579.2	1680.6	1750.5	1816.1	1897.7	1956.4
最大日降水量	0.52	2.32	98.9	127.6	164.8	203.0	254.4	293.8	333.4	386.1	426.1
1 小时最大降水量	0.30	0.60	46.7	58.0	65.4	72.0	79.8	85.4	90.7	97.4	102.2
最大连续降水量	0.44	1.60	160.9	208.1	253.9	298.2	355.6	398.2	440.4	495.8	537.3
最长连续降水日数	0.24	0.87	11.5	13.7	15.3	16.8	18.6	19.8	21.1	22.6	23.8
最长连续无降水日数	0.35	1.41	18.1	22.5	26.5	30.3	35.1	38.6	42.1	46.7	50.1

5. 结论与讨论

本文基于凯里市 1960~2021 年近 62a 的降水极值资料, 通过趋势分析法、M-K 突变检验法和皮尔逊 III 型分析了各降水极值的变化特征和重现期, 得出以下结论:

1) 近 62a 凯里市年降水量变率为 5.6 mm/10a, 在 2015 年发生由少到多的突变, 日最大降水量、1 小时最大降水量、最大连续降水量年际变化趋势不显著, 均没有发生突变, 其中日最大降水量、1 小时最大降水量呈缓慢增多趋势, 最大连续降水量呈缓慢减少趋势; 从降水日数分析得出, ≥ 0.1 mm 降水日数呈稳定缓慢减少趋势, 变率为 0.6 d/10a, 在 2011 年发生突变。最长连续降水日数、最长连续无降水日数、 ≥ 10.0 mm 降水日数和 ≥ 50.0 mm 降水日数年际变化趋势不显著, 没有发生突变。

2) 确定最优的 Cv 和 Cs 参数值, 年降水量、最大日降水量、1 小时最大降水量、最大连续降水量、最长连续降水日数和最长连续无降水日数 5a、10a、20a、50a、100a、200a、500a 和 1000a 重现期数值随着重现期年限的增大, 数值也明显呈皮尔逊 III 型分布增长趋势, 日降水量重现期从 5~1000a 增幅超过 3 倍, 年降水量、1 小时最大降水量、最大连续降水量、最长连续降水日数和最长连续无降水日数增幅在 2 倍左右。

3) 重现期是一个理论的统计平均值, 在我国, 城市内涝、排洪及许多重大工程的防洪标准均以重现期来设计。如根据国家《室外排水设计标准》(GB 50014-2021)相关规定, 凯里市作为中等城市, 其内涝暴雨设计重现期标准为 20~30a。20a 重现期暴雨对应数值为 203 mm。因此, 当凯里市日降水量大于 203 mm 这一标准时, 发生内涝的可能性极大。气象部门在做好气象监测和预报预警, 开展决策叫应服务时, 可根据重现期数值来确定叫应阈值。

基金项目

黔东南州科技计划项目黔东南科合 J 字[2021] 76 号: 强降水对清水江流域水库调度和水灾隐患点的影响研究。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization (WMO) (2021) State of the Global Climate 2020 (WMO No. 1264). World Meteorological Organization (WMO), Geneva.
- [2] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] Westra, S., Alexander, L.V. and Zwiers, F.W. (2013) Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *Journal of Climate*, **26**, 3904-3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- [4] 马丽娟, 效存德, 康世昌. 全球主要山地气候变化特征和异同——IPCC AR6 WGI 报告和 SROCC 综合解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 605-621.
- [5] 王振亚, 姚成, 董俊玲等. 郑州 7·20 治特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22.
- [6] 左璇, 朱业玉, 郭鹏, 等. 郑州市短历时强降水变化特征及重现期研究[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(2): 25-32.
- [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.
- [8] 姚越, 赵华荣, 刘圣锋. 贵州省 1960-2017 年降水时空变化特征[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 105-111.
- [9] 肖蕾, 杜小玲, 武正敏, 等. 贵州省短时强降水时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(4): 383-392.
- [10] 周智晖, 顾欣, 陈杨等. 近 10a 黔东南区域站与国家站降水时空对比分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 88-93.
- [11] 杨平, 谢智沛. 黔东南州 2019 年 6-7 月降水异常分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(5): 82-87.
- [12] 潘影, 邓世有, 王珏. 黔东南州近 40a 夏季降水时空分布及异常年环流特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(4): 50-55.
- [13] 龙柯吉, 郭旭, 陈朝平, 王佳津. 四川省降水相态时空分布及变化特征[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(1): 21-26.
- [14] 严小冬, 张皓, 杨涛, 等. 1961-2019 年贵阳冬季凝冻时空特征与异常成因[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(2): 94-101.
- [15] 廖麒麟, 徐仁鹏, 谢雨竹, 等. 绵阳市度日数特征及其变化趋势分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(1): 72-76.
- [16] 杨向权, 肖静. 基于 Mann-Kendall 的海南岛降水变化趋势及突变分析[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(2): 27-30.
- [17] 苏万磊. 基于 Mann-Kendall 的秦皇岛市降水多时间尺度分析[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(11): 23-26.
- [18] 肖鹏, 陈怡蓓, 郑文权, 等. 达州主城区暴雨强度总公式计算及对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(2): 29-33.
- [19] 张伶俐, 成坤, 刘春泽, 等. 长白山地区暴雨特征及重现期几种计算方法对比[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 21-27.
- [20] 王俊超, 彭涛, 王清. 乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 267-275.
- [21] 唐明. 暴雨特征信息的时空尺度及重现期的探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(2): 49-53.
- [22] 王晓明, 高学杰. 什么是千年一遇事件?——论灾害事件的发生概率和重现期[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 628.
- [23] 杨士恩, 郭晓霞, 衣霞, 等. 聊城市日最大降水量分布特征及其重现期的推算[J]. 山东气象, 2009, 29(4): 28-30.