

1983—2023 年漓江上游降雨时空演变特征精细解析

徐珂¹, 陈炼钢¹, 吴树诚², 张永锋³, 粟忠², 陈诺⁴

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 广西壮族自治区桂林水文中心, 广西 桂林 541000; 3. 桂林市水利电力勘测设计研究院, 广西 桂林 541001;
4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以桂林防洪及水资源保障的关键区域漓江上游为研究区, 基于泰森多边形法将 1983—2023 年 38 个雨量观测站逐日实测降水量数据转换为 13 个子流域的面降水量数据, 采用 Mann-Kendall 趋势检验和极点对称模态分解方法, 按水文年从全年、主汛期、后汛期和枯水期 4 个时间尺度解析降雨的时空演变特征, 并采用时间与空间变差系数揭示降雨时空不均匀度。结果表明:流域年降水量和主汛期降水量分别以 11.36 mm/a 和 9.10 mm/a 的速率显著增长, 后汛期和枯水期降水量总体无明显趋势, 漓江上游流域汛期洪涝风险增加;流域年内降雨时空分配不均, 13 个子流域多年时间变差系数均值为 2.174, 时间不均匀度呈不显著增大趋势, 丰枯差异越来越大, 全年、主汛期和枯水期空间变差系数呈不显著下降趋势, 降雨空间分布趋于均匀, 而后汛期空间不均匀度呈不显著增大趋势, 该时段水库群调控难度增大;漓江上游降雨在不同的时空尺度都出现了明显变化且变化特征不一致, 上游水库群的防洪与兴利调度以及桂林的城市防洪难度更高, 漓江生态景观流量保障也面临更大的不确定性。

关键词:降雨; 变化趋势; 时空不均匀度; 多尺度; 漓江上游

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0085-09

Detailed analysis of spatiotemporal evolution characteristics of rainfall in the upper Lijiang River Basin from 1983 to 2023//XU Ke¹, CHEN Liangang¹, WU Shucheng², ZHANG Yongfeng³, SU Zhong², CHEN Nuo⁴(1. Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Guilin Hydrological Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541000, China; 3. Guilin Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Guilin 541001, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the upper Lijiang River Basin, a critical area for flood control and water resources security in Guilin, as the study area, the daily measured rainfall data of 38 rainfall observation stations from 1983 to 2023 were converted into areal rainfall data of 13 spatial sub-basins based on the Thiessen polygon method. The Mann-Kendall trend test and the extreme-point symmetric mode decomposition (ESMD) method were employed to analyze the temporal and spatial evolution characteristics of rainfall across four temporal scales: the entire hydrological year, the main flood season, the post-flood season, and the dry season. The spatial and temporal unevenness of rainfall was revealed based on the temporal and spatial variation coefficients. The results indicate that the annual rainfall and the rainfall during the main flood season increased significantly at rates of 11.36 mm/a and 9.10 mm/a, respectively, while the rainfall in the post-flood season and the dry season showed no significant trend, which enhanced the risk of flooding during the flood season in the upper Lijiang River Basin. The annual distribution of rainfall in the basin was spatially and temporally uneven, and the average temporal variation coefficient of the 13 spatial sub-basins was 2.174, indicating a non-significant increasing trend in temporal inhomogeneity and a widening disparity between wet and dry periods. Spatial variation coefficients exhibited a slightly decreasing trend throughout the entire year, the main flood season, and the dry season, suggesting the spatial distribution of rainfall tends to be more uniform, while spatial inhomogeneity increased slightly during the post-flood season, complicating the regulation of reservoir groups during this period. The rainfall in the upper Lijiang River Basin has exhibited distinct and inconsistent changes at different temporal and spatial scales. These changes increase the complexity of flood control and

基金项目:广西重点研发计划项目(桂科 AB22080093, 桂科 AB22035075)
作者简介:徐珂(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源、水平衡健康调控技术研究。E-mail: nhrxk1128@163.com
通信作者:张永锋(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事水文水资源规划设计与研究。E-mail: eros0226@163.com

beneficial operation for the upstream reservoir groups, elevate the challenge for urban flood control in Guilin, and introduce greater uncertainty in the ecological landscape flow guarantee of the Lijiang River.

Key words: rainfall; variation trend; spatial and temporal inhomogeneity; multi-scale; the upper Lijiang River

降雨作为水循环的重要组成部分,对自然环境水资源补给、生态系统维持以及人类社会可持续发展具有重要意义^[1-2]。近年来,受全球气候变化和城市化建设影响,各地区对水资源合理配置、城市洪涝防灾减灾日益重视^[3-6],众多学者围绕降雨或极端降雨演变规律、降雨与径流、气温响应关系等关键问题展开了广泛而深入的研究^[7-11]。例如:Wang 等^[12]提出了层次离散-连续小波分解(HDCWD)模型并用于识别黄河流域降雨的主要周期及其时空特征;Dommo 等^[13]利用密西西比河流域 769 个气象站的逐日降雨记录,通过 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验统计评估了 9 个极端降雨指数的时空变化和趋势,同时还对可能影响极端降雨指数空间格局和趋势的因素进行了分析;张金萍等^[14]采用小波分析和集对分析方法研究了郑州市 1963—2012 年降雨-径流关系的多时间尺度特征。

漓江是我国著名的风景名胜区,为典型的雨源型河流,丰枯变化剧烈^[15-17]。在全球气候变化的背景下,近年来流域极端降雨事件呈多发趋势^[18-19],洪旱灾害时有发生,对流域社会经济和生态环境构成了严重威胁。2022 年 7 月至 2023 年 3 月,漓江流域遭遇持续干旱;2023 年 3 月 20 日漓江流量下降至 18.68 m³/s,远低于通航保障流量 45 m³/s,导致航道中断;2024 年 6 月中旬漓江上游持续强降雨引发洪水,桂林水文站于 6 月 20 日出现 148.88 m 的洪峰水位,创 1936 年以来历史新高,造成城区严重内涝。降雨规律的变化会对整个流域的社会经济特别是漓江生态景观用水的保障产生深远影响。

目前关于漓江流域或广西地区降雨规律的研究在时间尺度的统计上多采用全年降雨数据,且缺乏对子流域尺度的精细化研究^[20-21],难以全面揭示流域内降雨变化的区域差异。为了弥补这一研究空白,本文利用 M-K 趋势检验和极点对称模态分解(extreme-point symmetric mode decomposition, ESMD)方法,从多个时间尺度系统探讨了漓江上游各子流域降雨的时间变化趋势和空间分布特征,以期为桂林城区的洪涝防控、漓江生态景观用水保障及水资源优化配置提供科学依据。

1 研究区概况

漓江是珠江流域西江水系的重要支流之一,发源于广西壮族自治区桂林市北部猫儿山,下至平乐

水文站,流域面积 12 159 km²。将磨盘山码头以上河段及良丰河与潮田河流域纳入研究区域,总集水面积约 4 097 km²,河流总长约 132 km。

漓江上游地形差异明显^[22],从发源地海拔 2 141 m 的猫儿山逐步过渡到海拔 150 m 左右的岩溶峰林平原,青狮潭、斧子口、川江和小溶江 4 座防洪补水水库都位于北部山区,思安江水库则位于支流潮田河上游山区,多年平均降水量从北部山区的 2 500~3 000 mm 下降到桂林城区的 1 500~2 000 mm。漓江流域属亚热带季风气候区,受太阳强热辐射和季风环流影响,四季分明,雨量充沛,但年际年内变化大,多雨年与少雨年的降水量可相差 1 000 mm 以上。年内 3—8 月丰水期降水量约占全年降水量的 80%,4—6 月主汛期降水量约占全年降水量的 50%,易形成暴雨性洪水,而 9 月至次年 2 月枯水期的少雨易导致河道干枯。截至 2023 年,桂林站日均流量最高达 4 540 m³/s(1998 年 6 月 24 日),最低仅为 5.3 m³/s(1974 年 11 月 29 日)。

由于漓江景观河流的特点,堤防建设不能过高,导致桂林市城区河道现状起淹流量约 3 000 m³/s,仅相当于天然 2 年一遇洪水(2 990 m³/s),防洪压力非常大;同时旅游航运又要求河道流量不能过低,要求桂林水文站与下游支流潮田河合计流量不低于 60 m³/s,枯水期多年平均需补水流量高达 38 m³/s。因此,受水资源丰枯剧烈变化及防洪补水特殊需求的双重制约,漓江防洪与水资源保障面临的难度和挑战非常大。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究区域雨量站设置时间参差不齐,至 1983 年司门、鲤鱼塘、高寨设立后,漓江上游雨情观测站网基本完备;因此采用流域内及周边 38 个雨量站 1983—2023 年逐日降雨资料开展研究。时段分期上,根据流域水文气象特征及防洪和水资源保障的需求,在水文年(3 月至次年 2 月)分析的基础上,进一步分析主汛期(4 月 1 日至 7 月 10 日)、后汛期(7 月 11 日至 8 月 31 日)、枯水期(9 月至次年 2 月)的演变特征。空间分区上,根据漓江上游地形差异和水库分布将流域细分为 13 个子流域,各子流域基本情况见表 1,主要站点情况及流域划分如图 1 所示。

表 1 各子流域基本情况

子流域名称	子流域编号	集水面积/km ²
青狮潭水库以上	U1	474
斧子口水库以上	U2	314
川江水库以上	U3	264
小溶江水库以上	U4	127
思安江水库以上	U5	134
川江/斧子口坝址—灵河河口	D1	279
灵河流域	D2	239
青狮潭水库—甘棠江河口	D3	307
灵河河口—甘棠江河口	D4	371
甘棠江河口—桂林水文站	D5	393
桂林水文站—潮田河口	D6	458
良丰河流域	D7	443
思安江水库—潮田河口	D8	295

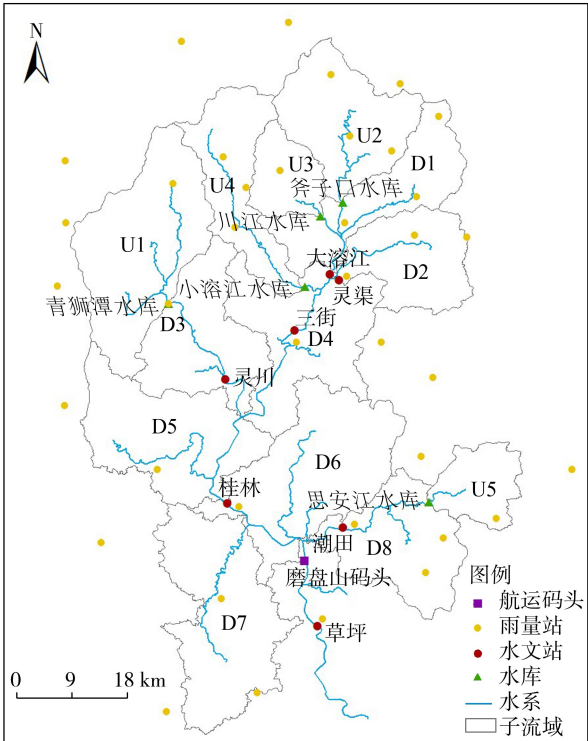


图 1 漓江上游流域概况及子流域划分

2.2 研究方法

研究首先采用线性拟合法与 M-K 趋势检验法对降雨系列整体规律进行初步诊断,再结合累积距平法与 ESMD 方法获取 1983—2023 年漓江上游流域降雨时程与空间分布上更详细的变化特征,最后通过计算各子流域降雨时间变差系数及不同时间尺度下流域整体的空间变差系数并作降雨时空不均匀度趋势分析。M-K 趋势检验法具有适用范围广、不受少数异常值影响的特点^[23],是水文与气象领域应用较多的非参数统计方法^[24],能够量化表征水文序列整体趋势及显著性。ESMD 方法能够将水文序列分解为不同时间尺度的模态分量和最佳适应曲线即趋势余项,进一步精细揭示降雨的年际变化规律^[25-26]。变差系数(C_v)可用于衡量年度降雨分布

及年际间的均匀性^[15],能使不同均值的数据分布具有可比性。对于固定的某个研究区域,可基于降水序列多年数据计算其时间变差系数,与其他地区对比以表明各区域降雨的相对变异性,即时间不均匀度;对于固定的某一研究年份,可基于不同地区当年的降雨数据计算其空间变差系数,以反映当年降雨特征的空间差异性,即空间不均匀度;进一步对多年空间变差系数数据进行趋势分析,能够在一定程度上揭示降雨空间分布模式的年际变化特征。

3 结果与分析

3.1 年降水量的演变特征

采用线性拟合、累积距平与 ESMD 方法分析 1983—2023 年漓江上游流域年降水量变化特征,结果如图 2 所示。由图 2 可知,流域多年平均降水量为 2 141.52 mm,并以 11.36 mm/a 的速率增长;2007 年降水量最少,为 1 553.56 mm,2015 年降水量最多,达 2 993.40 mm,降雨变化起伏大。累积距平图表明,1983—2011 年流域年降水量呈波动下降趋势,2012 年后降水量增长幅度明显,主要是前期降雨多数低于多年均值造成的;ESMD 趋势余项曲线表明流域年降水量呈较稳定的上升趋势。

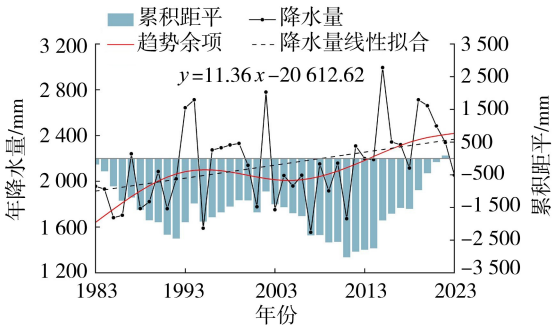


图 2 年降水量变化特征

表 2 为漓江上游各子流域年降水序列 M-K 趋势检验结果。当 Z 统计值大于 0 时,序列存在上升趋势;当 Z 统计值为 0 时,序列无明显趋势倾向;当 Z 统计值小于 0 时,序列存在下降趋势。当 Z 的绝对值大于等于 1.96 时,表示通过了置信度为 95% 显著性双侧检验,趋势显著^[27]。由表 2 可知,全流域整体年降水量 Z 统计值为 2.752,通过了 95% 显著性检验,增长趋势显著,与线性拟合结果一致。从两组子流域分类上看,五库库区与五库以下区域各子流域年降水量变化规律基本相同,均为增长趋势,除五库以下区域 D4 子流域降水量增长趋势不显著外,其他各子流域年降水量增长趋势显著,且五库以下区域增长趋势更为明显。

表 2 各子流域年降水序列 M-K 趋势检验结果			
子流域分类	子流域编号	多年平均年降水量/mm	Z 统计值
五库库区	U1	2 429. 810	2. 145 *
	U2	2 690. 758	2. 078 *
	U3	2 696. 001	2. 437 *
	U4	2 672. 409	2. 055 *
	U5	1 747. 496	2. 617 *
	小计	2 496. 212	2. 235 *
五库以下区域	D1	2 335. 126	2. 347 *
	D2	2 021. 577	3. 066 *
	D3	2 171. 309	2. 078 *
	D4	2 096. 319	1. 651
	D5	1 951. 733	2. 797 *
	D6	1 837. 111	2. 774 *
	D7	1 828. 171	2. 909 *
	D8	1 717. 341	2. 729 *
	小计	1 976. 176	2. 752 *
流域整体		2 141. 515	2. 752 *

注：“*”表示通过 95%显著性检验,趋势显著;无“*”表示未通过 95%显著性检验,趋势不显著。下同。

利用 ESMD 方法分解五库库区和五库以下区域各子流域年降水序列得到的趋势余项并拟合降雨线性变化速率,结果如图 3 所示。由图 3 可见,两组子流域分类降水量变化趋势总体相同,均为波动上升趋势,两组子流域年降水量均呈“增—减—增”的变化规律,但五库库区降水量明显高于五库以下区域且年际波动起伏更大,主要是由水库库区山地与库区以下河谷平原地形差异引起的;五库库区降水量线性拟合结果表明其降水量增长速度略快于五库以下区域,但 2019 年之后趋势余项曲线出现下降趋势,而五库以下区域降水量稳定增长。D1 子流域位

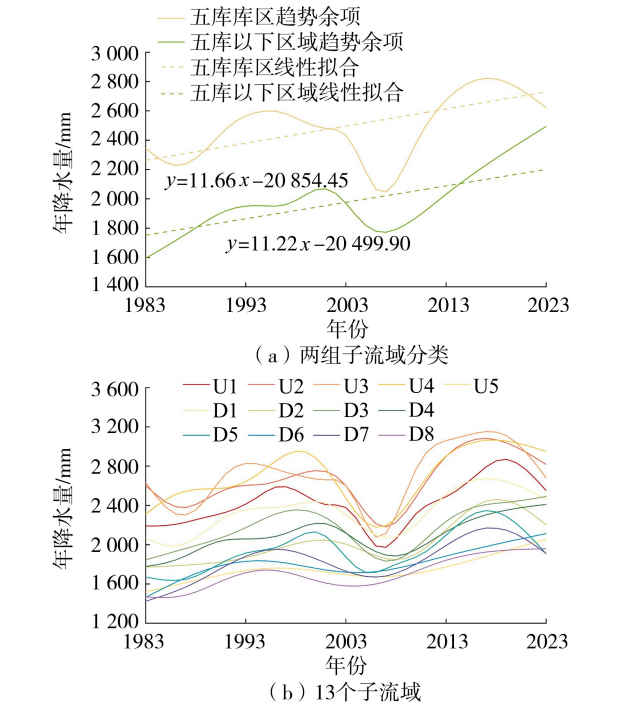


图 3 各子流域年降水序列 ESMD 分解趋势余项曲线

于漓江发源地海拔较高的山区,地形与五库库区相似,降雨变化规律较为接近,年降水量变化起伏较大;U5 和 D8 子流域位于潮田河流域,年降水量变化相对平稳。

从时程上看,流域年降水量增加一方面能够提高水库和河流储水量,改善水资源的供应状况,但另一方面可能导致洪水频率和强度增加,加大防洪压力;从空间上看,五库库区较五库以下区域年降水量更大且变幅更大,对水库防洪及兴利调度的要求更高,且五库以下区域年降水量增长趋势明显,将增加桂林城区的防洪压力。

3.2 年内不同分期降水量的演变特征

3.2.1 主汛期

4 月 1 日至 7 月 10 日是漓江流域的主汛期,降水量约占全年降水量的 50%,是防汛的关键时段,因此主汛期降水量的变化对桂林城区的防洪安全及水库的防洪调度影响明显。主汛期降水量变化特征如图 4 所示。流域 1983—2023 年主汛期降雨与全年降雨变化规律基本一致,呈波动上升趋势,降水量线性拟合增加速率为 9. 10 mm/a,仅在 1998—2007 年间出现了下降,这与李启芬等^[28]发现的广西在 1998—2013 年夏季降水量较 1981—2017 年多年平均偏少的规律相符。

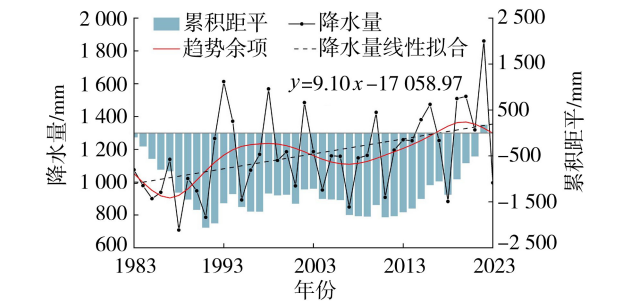


图 4 主汛期降水量变化特征

由各子流域主汛期降水序列 M-K 趋势检验结果(表 3)可知,全流域主汛期多年平均降水量为 1 172. 67 mm,Z 统计值为 2. 954,通过 95%显著性检验,增长趋势显著,与线性拟合结果一致;五库库区与五库以下区域均呈显著增长趋势,且五库以下区域比五库库区的 Z 统计值更大,主汛期降水量增长趋势更明显,可能增加桂林城区的防洪压力。各子流域变化规律基本相同,均为增长趋势,除 U4 子流域降水量增长趋势不显著外,其他各子流域降水量增长趋势显著。

图 5 表明两组子流域分类降水量变化趋势总体相同,均为波动上升趋势,但五库库区较五库以下区域主汛期降水量变化波动起伏大,降雨增加速率更快,但平均降水量增速比五库以下区域更慢;各子流

域中,D1 子流域与五库库区降雨演变规律较为同步,U5 与 U8 子流域波动变化最和缓。

表 3 各子流域主汛期降水序列 M-K 趋势检验结果

子流域分类	子流域编号	多年平均主汛期降水量/mm	Z 统计值
五库库区	U1	1 344. 685	2. 392 *
	U2	1 495. 063	2. 078 *
	U3	1 508. 406	2. 415 *
	U4	1 492. 486	1. 808
	U5	887. 654	2. 437 *
	小计	1 378. 925	2. 303 *
五库以下区域	D1	1 273. 899	2. 213 *
	D2	1 099. 840	2. 595 *
	D3	1 219. 369	2. 415 *
	D4	1 167. 705	2. 437 *
	D5	1 059. 886	3. 561 *
	D6	995. 323	3. 156 *
	D7	982. 737	2. 842 *
	D8	897. 382	3. 291 *
	小计	1 076. 533	3. 201 *
	流域整体	1 172. 675	2. 954 *

明显。2000 年之前,累积距平值上下浮动明显,2000 年之后累积距平值逐渐减小,干旱情况增加,致使后汛期降水量趋势余项曲线前期波动较后期波动幅度大,且整体呈下降趋势。

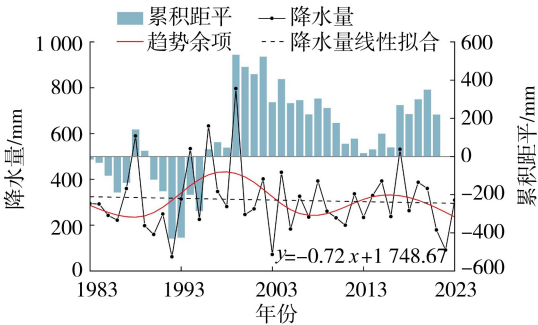


图 6 后汛期降水量变化特征

M-K 趋势检验结果(表 4)表明,流域后汛期整体降水量无明显趋势,五库库区后汛期降水量不显著增加对水库蓄水总体有利,五库以下区域无明显趋势但其中多个子流域降水量不显著减少将导致下游河道补水压力增大。各子流域中,U1、D2~D5 和 D7 子流域后汛期降雨与大分类演变规律不同;U1 子流域主要雨量控制站黄梅和青狮潭库区后汛期降雨 Z 统计值分别为-0.438 和-0.281,致使 U1 子流域降水量呈不显著下降趋势,将对青狮潭水库兴利蓄水产生不利影响;D2~D5 子流域主要雨量控制站严关、青狮潭库区和庙头后汛期降雨 Z 统计值分别为-0.281、-0.281 和-0.809,导致这几个子流域降水量均呈不显著下降趋势;D7 子流域主要雨量控制站良丰和仁和后汛期降雨 Z 统计值分别为-0.079、-0.326,因此 D7 后汛期降雨呈不显著下降趋势。

表 4 各子流域后汛期降水序列 M-K 趋势检验结果

子流域分类	子流域编号	多年平均后汛期降水量/mm	Z 统计值
五库库区	U1	371. 354	-0. 461
	U2	366. 092	0. 281
	U3	381. 407	0. 483
	U4	407. 216	0. 393
	U5	282. 590	0. 393
	小计	369. 032	0. 213
五库以下区域	D1	294. 683	0. 056
	D2	252. 855	-0. 101
	D3	321. 268	-0. 168
	D4	290. 629	-0. 685
	D5	293. 362	-0. 303
	D6	267. 083	0. 393
	D7	269. 041	-0. 034
	D8	271. 411	0. 438
	小计	282. 210	0
流域整体		309. 814	0

由趋势余项曲线(图 7)可知,两组子流域线性拟合后汛期降水量结果均呈不显著下降趋势,五库

图 5 各子流域主汛期降水序列 ESMD 分解趋势余项曲线

3.2.2 后汛期

7 月 11 日至 8 月 31 日为漓江流域的后汛期,降水量约占全年降水量的 15%,该时段在保障防洪安全的同时还承担着极高的水资源兴利任务,旅游旺季对河道内景观航运用水保障要求高,同时又是农业灌溉用水的高峰期和水库蓄水期,因此后汛期降雨的变化对流域内水工程的防洪兴利调度至关重要。

由后汛期降水量变化特征(图 6)可知,后汛期降水量线性下降速率约为-0.72 mm/a,下降趋势不

以下区域下降趋势更明显,但五库库区后汛期降水量呈先减后增的趋势;五库以下区域后汛期降水量则存在“减—增—减—增—减”较大幅度的波动情况,且 2017 年之后降水量下降趋势明显。

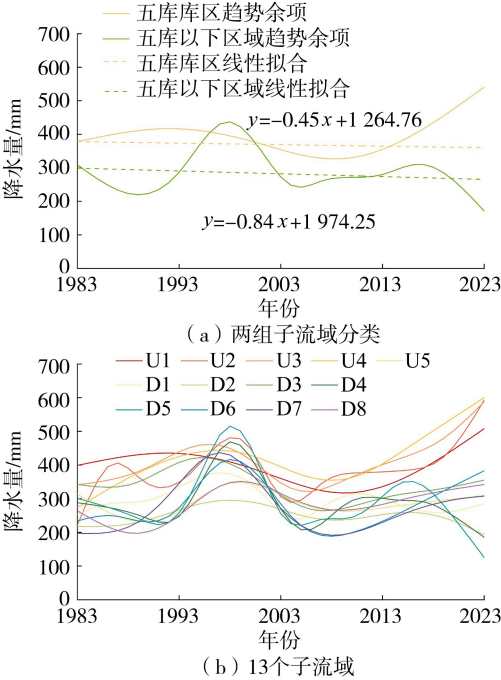


图 7 各子流域后汛期降水序列 ESMD 分解趋势余项曲线

3.2.3 枯水期

9 月至次年 2 月为漓江流域的枯水期,降水量仅约占全年降水量的 20%,但由于漓江景观河流的特点对河道内景观航运需水要求高,因此枯水期降雨的变化对漓江景观航运用水保障影响明显。

图 8 中 1983—2023 年漓江上游枯水期原始降水量线性拟合初步结果为不显著增加趋势,但极有可能是 2015 年出现异常冬汛(枯水期降水量 1 119.07 mm)引起的。因此将 2015 年异常值处理为多年平均枯水期降水量 485.9 mm 后重新计算,线性拟合结果由原始以 1.32 mm/a 速率增长变为以 -0.007 mm/a 速率缓慢下降。去异常值后的 ESMD 趋势余项曲线无明显起伏,但累积距平值自 1994 年之后下降趋势明显,出现了 5 次较明显的±200 mm 以上的波动,表明枯水期降水量减少且不确定性较大,对库区水资源储备和库区下游旅游景观与航运状况维持不利。

计算各子流域去除异常值后的 M-K 趋势检验统计值,记为 Z' ,与原始枯水期降水量平均值和 Z 统计值共同列于表 5 中。可知流域整体统计值 $Z=0.213$, $Z'=0.034$,说明漓江上游枯水期降水量呈不显著的增加趋势;五库库区枯水期降水量总体不显著增加,五库以下区域枯水期降水量总体不显著减少。U2、U3、U5 呈不显著下降趋势,D2、D5、D7、D8

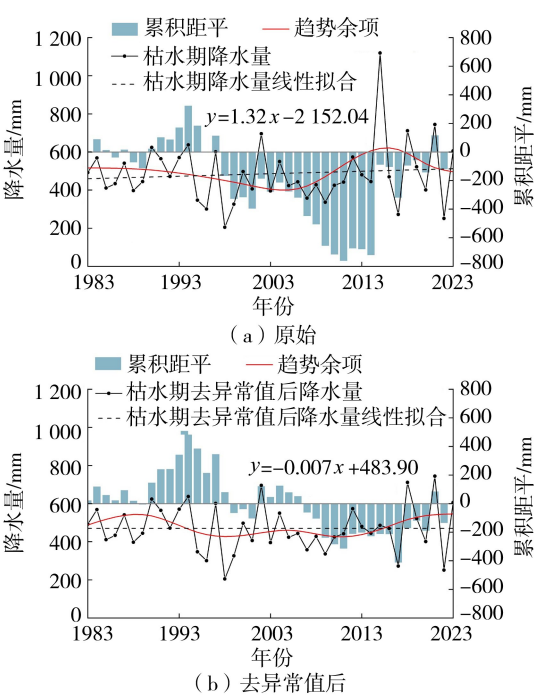


图 8 枯水期降水量变化特征

表 5 各子流域枯水期降水序列 M-K 趋势检验结果

子流域分类	子流域编号	多年平均枯水期降水量/mm	Z 统计值	Z'统计值
五库库区	U1	529.963	0.393	0.303
	U2	612.577	0.034	-0.124
	U3	595.551	-0.011	-0.191
	U4	569.989	0.303	0.124
	U5	431.351	0.034	-0.124
	小计	553.994	0.236	0.124
五库以下区域	D1	561.904	0.011	-0.168
	D2	486.967	0.348	0.146
	D3	458.415	-0.258	-0.371
	D4	463.849	-0.573	-0.775
	D5	444.121	0.236	0.011
	D6	422.874	0.146	-0.056
	D7	429.981	0.371	0.168
	D8	407.472	0.505	0.303
	小计	454.158	0.079	-0.101
流域整体		485.900	0.213	0.034

子流域出现不显著增加趋势,也是由于主要雨量控制站枯水期降雨与大分类变化规律不同引起的。

从趋势余项曲线图(图 9)可以看到,五库库区枯水期降水量波动上升,五库以下区域枯水期降水量波动下降,2017 年之后降雨减少趋势明显,变化规律与 M-K 趋势检验结果相符。

3.3 降雨时空不均匀度的演变特征

漓江流域降雨存在非常明显的时空不均匀性。变差系数 C_v 是衡量数据集中各值相对于均值分散程度的指标, C_v 值越大,表示数据分布越分散,数据中各个值相对于均值的变化范围越大;反之, C_v 值越小,表示数据中各个值相对于均值的变化范围越小,即数据分布越集中。

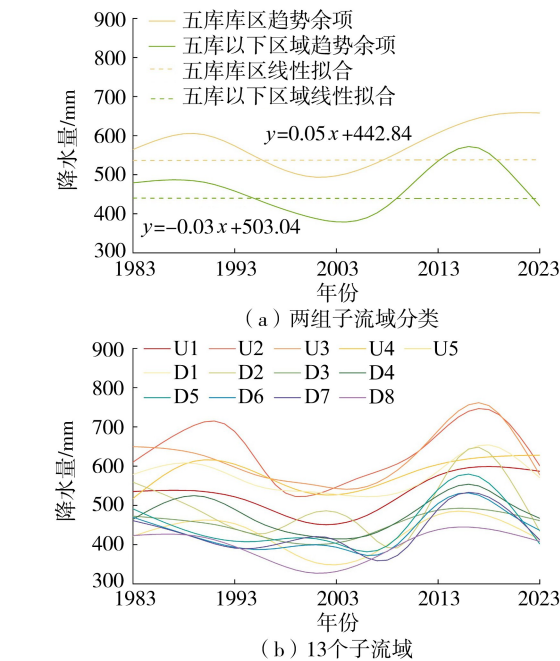


图9 各子流域枯水期降水序列ESMD趋势余项曲线

3.3.1 时间不均匀度

计算1983—2023年各子流域逐年日降雨数据的变差系数,以每个子流域的多年平均 C_v 值作为该区的时间变差系数。分析各子流域变差系数的多年变化趋势以反映降雨时间不均匀度,结果见表6。

表6 时间变差系数M-K趋势检验结果

子流域分类	子流域编号	C_v 均值	Z 统计值
五库库区	U1	2.330	0.258
	U2	2.392	-0.236
	U3	2.484	-0.416
	U4	2.355	0
	U5	2.361	0.663
	小计	2.236	0.079
五库以下区域	D1	2.377	0.168
	D2	2.481	0.640
	D3	2.463	0.281
	D4	2.487	0.056
	D5	2.474	0.505
	D6	2.463	0.842
	D7	2.469	2.370
	D8	2.477	0.528
	小计	2.251	0.932
流域整体		2.174	0.730

从表6可见,流域整体时间变差系数均值为2.174,Z统计值为0.730,呈不显著上升趋势,表明1983—2023年漓江上游降雨年内分配变得更不均匀,丰枯差异越来越大,极端降雨事件与干旱灾害可能增多。各子流域分类中,D7子流域时间变差系数上升趋势最为明显,导致良丰河流域防洪与兴利调度的难度加大;U2、U3子流域降雨时间变差系数呈下降趋势,U2子流域主要雨量控制站华江(权重32.2%)与U3子流域主要雨量控制站川江(权重

75.1%)降雨时间变差系数的Z统计值分别为-0.730和-0.326,综合导致两区时间变差系数呈不显著下降趋势,表明斧子口与川江两个水库库区降雨的年内分配有均匀化的趋势。

3.3.2 空间不均匀度

以13个子流域1983—2023年4个时段分期的降水量为基础,逐年计算每个时段分期所有子流域的变差系数 C_v ,并求出多年均值作为每个时段分期的空间变差系数。分析4个时段分期下变差系数的多年变化趋势以反映降雨空间不均匀度,结果见表7。

表7 空间变差系数M-K趋势检验结果

时段分期	C_v 均值	Z 统计值
全年	0.168	-1.045
主汛期	0.193	-0.461
后汛期	0.226	0.371
枯水期	0.158	-0.281

从表7可见,全年、主汛期、后汛期和枯水期降水量的空间变差系数分别为0.168、0.193、0.226和0.158,其中全年、主汛期和枯水期的Z统计值为负值,空间变差系数呈不显著下降趋势,表明在这3个时间尺度上漓江上游降雨的空间分布有均匀化的趋势,有助于提高水资源量可预测性。后汛期的空间变差系数Z统计值为正值,呈不显著上升趋势,表明在后汛期降雨的空间分布愈发不均匀,各地区降雨差异性增大,一方面可能造成部分库区来水量骤增而另一区域来水量不足,增加水库调度的复杂性;另一方面,区域降水量的差异性加大可能使洪水预报精度降低,影响调度决策的准确性,同时也加大了库容分配风险,使得在防洪安全与水资源利用效率之间的平衡更难把握。

4 结论

a. 1983—2023年漓江上游流域多年平均降水量为2141.51mm,并以11.36mm/a的速率显著增长;流域降雨变化较大,1983—2011年降水量呈波动下降趋势,但2012年后降水量增幅明显;五库库区和五库以下区域的各子流域年降水量均呈增长趋势,仅五库以下区域的灵河河口—甘棠江河口流域降水量增长趋势不显著;五库以下区域的降水量增长趋势较五库库区更为明显,但五库库区降水量的年际波动更大,导致城区防洪及水库兴利调度面临的挑战更高。

b. 全流域主汛期多年平均降水量为1172.67mm,呈显著波动上升趋势,线性拟合增加速率为9.10mm/a,与全年降雨变化规律基本一致,

且五库以下区域比五库库区降水量增长趋势更明显,导致上游水库群防洪调度的压力上升、桂林城区洪涝风险增大;后汛期降水量无明显趋势,五库库区整体无明显趋势,除青狮潭水库降水量呈不显著下降趋势外,其他4个水库降水量呈不显著增加趋势,总体上有利于水库蓄水,五库以下区域整体无明显趋势,但其中有多个子流域降水量不显著减少,对下游农业灌溉及旅游航运用水保障不利;枯水期降水量除去异常值后无明显趋势,但近年来降雨减少速率较快,五库库区降水量总体呈不显著增加趋势,五库以下区域降水量总体呈不显著减少趋势,一定程度上有利于枯水期蓄水,但漓江河道补水面临更大困难。

c. 漓江上游1983—2023年降雨时间变差系数均值为2.174,时间不均匀度较大且呈不显著增大趋势,表明年内降雨时程分配更不均匀,丰枯差异越来越大,极端降雨事件和干旱灾害有增多的趋势;漓江上游降雨的空间分布在全年、主汛期和枯水期趋于均匀化,有助于提高水资源量可预测性;而后汛期的空间差异则有增大趋势,导致上游4个水库的防洪兴利调度面临更大不确定性。

参考文献:

[1] 王政友. 降水对土壤水资源的补给及其制约因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(2): 157-160. (WANG Zhengyou. Analysis of water resources supplement in soil from rainfall and constraint factors[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(2): 157-160. (in Chinese))

[2] 王焱, 史海匀. 粤港澳大湾区极端降雨的时空变化及其驱动因素探究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 28-37. (WANG Yao, SHI Haiyun. Exploring spatiotemporal variations and driving factors of extreme precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 28-37. (in Chinese))

[3] 宋晓猛, 张建云, 贺瑞敏, 等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 153-165. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese))

[4] 许诺, 陈东景. 基于水足迹的水资源利用与经济高质量发展脱钩关系研究[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 20-27. (XU Nuo, CHEN Dongjing. Research on decoupling relationship between water resource utilization and high-quality economic development based on water footprint[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 20-27. (in Chinese))

[5] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))

[6] 刘攀, 桑学锋, 张思琦, 等. 多水源多用户水资源时空动态适配方法研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 123-130. (LIU Pan, SANG Xuefeng, ZHANG Siqi, et al. Research on spatiotemporal dynamic adaptation method for multi-source and multi-user water resources[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 123-130. (in Chinese))

[7] SI Peng, LI Qingxiang, CHEN Xiaoyang, et al. Construction of daily precipitation series and the observational characteristics of extreme precipitation in Tianjin, China during 1888-2022[J]. Advances in Climate Change Research, 2024, 15(1): 52-61.

[8] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 1-8. (in Chinese))

[9] 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 Quidong, 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. (in Chinese))

[10] RAO G V, REDDY K V, SRINIVASAN R, et al. Spatiotemporal analysis of rainfall extremes in the flood-prone Nagavali and Vamsadhara Basins in eastern India[J]. Weather and Climate Extremes, 2020, 29: 100265.

[11] 张长征, 沈婷, 徐慎晖, 等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41(1): 55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))

[12] WANG Wenzhuo, DONG Ningpeng, YOU Jinjun, et al. Spatiotemporal variations of the precipitation in the Yellow River Basin considering climate and instrumental disturbance[J]. Environmental Modelling & Software, 2025, 183: 106204.

[13] DOMMO A, ALOYSIUS N, LUPO A, et al. Spatial and

- temporal analysis and trends of extreme precipitation over the Mississippi River Basin, USA during 1988-2017[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 56: 101954.
- [14] 张金萍, 王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 1-6. (ZHANG Jinping, WANG Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 1-6. (in Chinese))
- [15] 魏炜, 莫崇勋, 覃家飞, 等. 综合考虑单调与非单调特征的季节尺度降雨趋势研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 571-578. (WEI Wei, MO Chongxun, QIN Jiafei, et al. A study of seasonal scale rainfall trends integrating monotonic and non-monotonic features [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2023, 48(3): 571-578. (in Chinese))
- [16] 黄丹, 郭纯青, 习丽丽, 等. 漓江流域旱涝拐点研究[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(1): 53-59. (HUANG Dan, GUO Chunqing, XI Lili, et al. Turning points of drought and flood in Lijiang river basin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2015, 35(1): 53-59. (in Chinese))
- [17] 张姣, 胡庆芳, 黄璟胜, 等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22. (ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 15-22. (in Chinese))
- [18] 杨家桢, 杨云川, 杨淇淇, 等. 1951—2015 年广西极端降雨时空演变特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 84-93. (YANG Jiazhen, YANG Yunchuan, YANG Qiqi, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in Guangxi from 1951 to 2015 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 84-93. (in Chinese))
- [19] 谢志高, 贾文豪, 王霞雨, 等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 128-136. (in Chinese))
- [20] WANG Hailun, YAN Wende, WANG Jinye, et al. Exploring distribution rules and variation trends of precipitation in the upper Lijiang River from 1951 to 2016, Guangxi Province, China [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 105(Sup1): 1-5.
- [21] 陈征兰, 陈燕丽, 莫伟华, 等. 1961—2021 年广西红树林生态区极端降雨事件时空变化特征[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(3): 9-14. (CHEN Zhenglan, CHEN Yanli, MO Weihua, et al. Temporal and spatial variations of extreme rainfall events in mangrove biome of Guangxi from 1961 to 2021 [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(3): 9-14. (in Chinese))
- [22] 黄滢, 黄小燕, 林文桦, 等. 广西“雨窝”降雨特征及成因分析[J]. 气象与环境科学, 2023, 46(3): 47-54. (HUANG Ying, HUANG Xiaoyan, LIN Wenhua, et al. Analysis on characteristics and causes of the “Rain Nest” in Guangxi Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2023, 46(3): 47-54. (in Chinese))
- [23] 杨永德. 漓江上游水资源可持续利用研究[D]. 长沙: 中南林学院, 2005.
- [24] 段志鹏, 李继清. 基于极点对称模态分解的北京市降水特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(3): 17-21. (DUAN Zhipeng, LI Jiqing. Multi-scale fluctuation of precipitation in Beijing revealed by ESMD analysis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(3): 17-21. (in Chinese))
- [25] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J]. 科技通报, 2016, 32(6): 47-50. (CHEN Zhongping, XU Qiang. Analysis of precipitation characteristics in Jinhua by Mann-Kendall test method [J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(6): 47-50. (in Chinese))
- [26] 夏春旭, 柳春光. 基于小波变换和极点对称模态分解对近断层多脉冲地震动的联合分析研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 697-704. (XIA Chunxu, LIU Chunguang. Conjoint analysis of near-fault multi-pulse ground motion based on wavelet transformation and extreme-point symmetric mode decomposition [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 697-704. (in Chinese))
- [27] 商滢, 江竹. 黄河源区降水径流变化特征及响应分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 106-112. (SHANG Ying, JIANG Zhu. Characteristics and response analysis of precipitation and runoff in the source area of the Yellow River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(2): 106-112. (in Chinese))
- [28] 李启芬, 吴哲红, 王兴菊, 等. 1981 年以来中国夏季降水变化特征及其与 SST 和前期环流的联系[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 58-67. (LI Qifen, WU Zhehong, WANG Xingju, et al. The characteristics of summer precipitation in China since 1981 and its relationship with SST and pre-circulation [J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 58-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 10 - 12 编辑: 俞云利)