

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0099

陈立华, 刘为福, 冷刚, 等. 西江干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 74-81. CHEN L H, LIU W F, LENG G, et al. Study on interannual and annual variation characteristics of runoff in the main stream of Xijiang River [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 74-81. (in Chinese)

西江干流径流年际及年内变化趋势分析

陈立华^{1,2,3}, 刘为福¹, 冷刚¹, 王焰¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 3. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 为了分析西江干流径流年际变化趋势及年内分配规律, 根据天峨、迁江、梧州三站 60 多年实测径流资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法、R/S 法、有序聚类法、滑动 T 检验法等多方法分别对径流年际变化的趋势性和突变性进行分析; 同时, 对表征径流年内分配的各指标进行趋势性检验和未来变化趋势预测。结果表明: 三站的 M-K 统计量 Z 值分别为 2.47、-2.38 和 -1.47, Hurst 指数分别为 0.72、0.83 和 0.80, 均大于 0.5; 天峨站和迁江站的突变点均为 2002 年, 梧州站的突变点为 1954 年和 2002 年; 西江径流 60 多年来显著减少, 且具有较强的持续性; 径流年内分配不均, 多集中在 4 月-9 月, 占年径流的 75% 左右; 2002 年后径流年内分配显著性地趋于均匀, 集中程度和变幅亦显著性地变小, 集中期前移 12 日左右。

关键词: 西江; 径流; M-K 趋势检验法; R/S 法; 年际变化趋势; 年内变化趋势

中图分类号: TV121 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2018)04-0074-08

Study on interannual and annual variation characteristics of runoff in the main stream of Xijiang River

CHEN Lihua^{1,2,3}, LIU Weifu¹, LENG Gang¹, WANG Yan¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to study the interannual variation trend and annual distribution of runoff in Xijiang River, we used Mann-Kendall trend test, R/S method, ordered cluster method, and sliding T test to analyze the variation trend and abrupt changes of interannual runoff, and we conducted trend tests and prediction of the future change trend for each index of annual runoff distribution. The analysis was based on the measured runoff data of the main stream of Xijiang River for over 60 years. The results showed that M-K statistic values in the three stations were -2.47, -2.38 and -1.47 respectively. The Hurst indexes of the three stations were 0.72, 0.83 and 0.80 respectively, all greater than 0.5. The abrupt change points at Tian'e and Qianjiang stations were both in 2002, while the abrupt change points at Wuzhou station were in 1954 and 2002. Xijiang River runoff has significantly declined over the past 60 years with a strong continuity. The annual distribution of runoff was uneven. The runoff concentrated during April to September, which accounted for about 75% of the annual runoff. After 2002, the annual distribution of runoff showed a remarkable tendency towards uniformity; the degree of concentration and variation amplitude both significantly decreased, and the concentration period moved about 12 days forward.

Key words: Xijiang River; runoff; Mann-Kendall trend test; R/S method; interannual variation trend; annual variation trend

收稿日期: 2018-04-22 修回日期: 2018-05-17 网络出版时间: 2018-05-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180525.1644.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405900); 国家自然科学基金(51469002; 51009029); 广西重点研发项目(桂科 AB16380284); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139218)

Funds: National Key Research and Development Program (2017YFC0405900); National Natural Science Foundation of China (51469002; 51009029); Key Research and Development Projects in Guangxi (Guike AB16380284); Guangxi Natural Science Foundation of China (2015GXNSFBA139218)

作者简介: 陈立华(1980-), 男, 福建三明人, 教授, 主要从事水资源配置与水文预报方面研究。E-mail: zgjclh@163.com

河川径流变化通常包含径流的量值变化和过程的结构变化^[1-3],前者包括径流总量、流量等数值上的变化,而后者侧重于年内不同时段径流组分分配情况。河川径流过程是气候条件和流域下垫面综合作用的产物^[4],气候变化及人类活动引起全球水文循环变化加剧,导致各种极端水文事件^[5-6]频繁发生。近年来珠江流域^[7-8]由气候变化引起的极端水文事件时有发生,西江作为珠江流域的主要水系干流,具有流域面积大、水文地质、地貌和覆盖条件复杂等特点,在气候变化及人类活动双重影响下,其河川径流发生不同程度的改变^[9-11],进而影响河床及水生态系统演变,增大流域水资源开发利用难度^[12-13],其中下游珠江三角洲河口地区供水安全问题亟待解决。随着珠江三角洲地区经济和人口快速增长,区域水资源短缺、水生态恶化、流域水资源调配能力低等问题日趋突出,特别是冬春季咸潮入侵对珠江三角洲地区 1500 万居民饮水安全构成极大威胁,而抑咸流量的 80% 来源于西江。因此,西江流域径流量变化与地表水文过程的研究备受关注,在水文要素量值变化方面已有一些研究成果^[14-15],但缺少对量值突变前后对比研究及对地表水文过程结构特征的研究。

近年来,径流趋势变化及突变分析成为径流变化规律分析的研究热点,目前对径流序列趋势分析的方法主要有 M-K 趋势检验法、小波分析法、R/S 分析法等。M-K 趋势检验法^[16]和 R/S 分析法^[17]相较于其他方法,具有原理简单、可操作性强、表征效果好等特点,故采用上述两种方法进行径流趋势变化分析。对径流序列突变分析的方法有滑动平均法、有序聚类法、滑动 T 检验法、Mann Kendall 法等。基于有序聚类法和滑动 T 检验法计算简单、资料要求低、结果直观等特点,在渭河流域^[18]、洞庭湖^[19]、新村流域^[20]等地区得到较好应用,故采用上述两种方法对径流进行综合突变诊断。对径流年内分配的研究方法,燕华云等^[21]将表示降水量年内分配的向量法引入径流集中度和集中期并结合不均匀系数、变化幅度等定量指标进行表示,以突变点划分径流阶段,对表征径流年内分配各指标进行了趋势性检验和未来变化趋势预测,以期对西江流域水资源合理开发利用及防洪减灾提供参考。

1 流域概况与分析方法

1.1 西江流域概况与研究数据

西江是珠江流域的主干流,自上而下依次为南盘江、红水河、黔江、浔江和西江五个河段,全长

2 075 km,流域面积达 35.31 万 km²。根据西江干流水文站点分布,河段径流代表性,及水文资料完整性、准确性和观测时间的持续性,选取西江干流天峨、迁江、梧州三站 60 多年的月平均流量资料,分析西江干流年际及年内变化趋势。三站分别位于天峨县六排镇、来宾市兴宾区迁江镇和梧州市,多年平均径流量分别为 1 800.4 m³/s、2 376.9 m³/s、7 567.2 m³/s^[14]。西江干流水文站点及资料情况见表 1。

表 1 西江干流水文站点

Tab. 1 Hydrological stations along the main stream of Xijiang River Basin

站名	地理坐标		河段	至思贤 沿距离 /km	集水面积 (占比) /km ² (%)	径流系列
	东经	北纬				
	天峨	107°10′				
迁江	108°58′	23°38′	红水河	599	128 938(36.5)	1952- 2015
梧州	111°20′	23°28′	西江	208	327 006(92.6)	1950- 2015

1.2 径流分析方法

Mann Kendall 法是由 Mann^[22] 1945 年首次提出,而后 Kendall^[23] 1975 年进行改进的一种被广泛应用于气象与水文时间序列的趋势分析^[24]的非参数检验方法。当 M-K 统计值 Z 的绝对值大于等于 1.28、1.64、2.32 时,表示对应的径流序列变化趋势分别通过了信度为 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

R/S 法是由 Hurst 在分析尼罗河水文资料时提出的一种分析方法^[25],可通过 R/S 法估算 Hurst 指数(0 < H < 1)来预测水文时间序列的未来趋势,是一种具有很强预测能力的非线性科学预测方法。

以有序聚类法来推求最优化分割点,使同类之间离差平方和较小,而类与类之间的离差平方和较大。该法原理^[26]清晰简单,但对于多个突变点需要进一步分割序列进行检验。

1.3 年内分配特征指标

采用径流不均匀系数 C_v、完全调节系数 C_r 表征径流年内分配均匀程度;通过最大月平均流量 R_{max}、最小月平均流量 R_{min} 与年平均流量之比,分别称为极大比 C_{max}、极小比 C_{min} 及极值比 C_m,表征径流相对变化幅度;引入集中度 C_n 和集中期 D 表征径流年内分配集中的程度和集中的重心出现月份。集中度就是将各月流量按一定角度以向量方式累加,其各分量之和的合成向量的模与年径流量的比值;集中期则是合成向量的方向,以角度表示,可以换算到月份,本研究从 1 月至 12 月每月的方位角 θ 分别为 0°, 30°, 60°, ..., 360°, 并将每个月平均流量

分解到 x 和 y 两个方向上。各指标计算公式见文献[21]。

2 径流年际变化特征

2.1 径流年际变化趋势分析

采用 M-K 方法及线性回归对西江干流天峨、迁江、梧州三个水文站年平均流量进行趋势分析, 结果见图 1 及表 2。

由表 2 可知, 20 世纪 60 年代至今, 三站流量序列 Z_c 均小于 0, 表明西江干流年平均流量总体呈下降趋势, 其中天峨、迁江站流量序列 $|Z_c| > Z_{c_{0.2}}$ (显著性 $\alpha = 0.05$ 的临界值为 1.64), 分别以 $-62.6 \text{ m}^3 / (10\text{a} \cdot \text{s})$ 和 $-63.7 \text{ m}^3 / (10\text{a} \cdot \text{s})$ 的趋势显著下降; 梧州站的 $|Z_c| = 1.47 < Z_{c_{0.2}}$, 未通过显著性检验, 其流量序列以 $-109.5 \text{ m}^3 / (10\text{a} \cdot \text{s})$ 的趋势不显著变化。

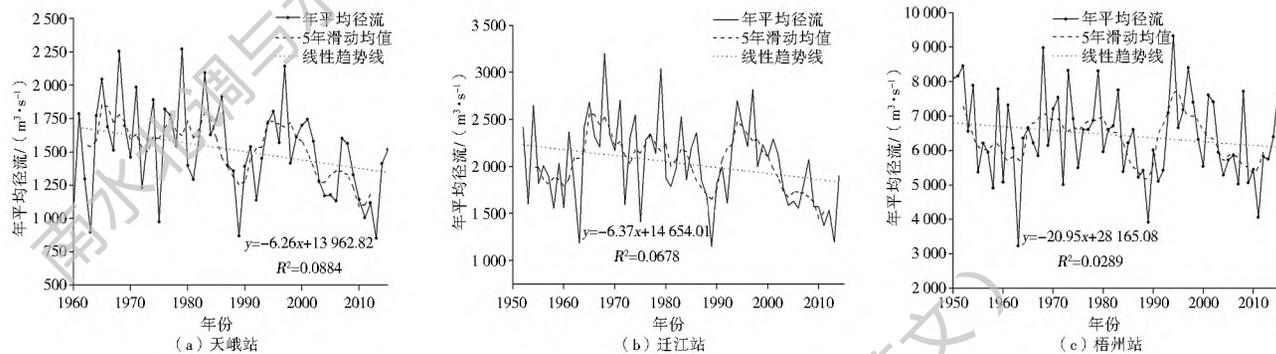


图 1 西江干流径流年际变化过程

Fig. 1 Interannual variation processes of runoff in the main stream of Xijiang River Basin

表 2 西江干流径流年际变化趋势

Tab. 2 Interannual variation trends of runoff in the main stream of Xijiang River Basin

水文站	多年平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	标准差	偏态系数	趋势	Z_c 值	$Z_{c_{0.2}}$ 值	显著性	H_0
天峨站	1 517.94	343.50	0.10	递减	-2.47	1.64	显著	拒绝
迁江站	2 032.21	448.22	0.25	递减	-2.38	1.64	显著	拒绝
梧州站	6 446.98	1 236.33	0.04	递减	-1.47	1.64	不显著	接受

H_0 : 原假设, 指年平均径流变化趋势不明显; 显著性检验水平为 0.05。

采用 R/S 法估算三站年平均流量 H_{urst} 指数 (见表 3), 可知三站径流序列 R/S 拟合曲线拟合度 R^2 值均超过 0.98, 表明拟合效果良好。三站 H_{urst} 指数分别为 0.72、0.83 和 0.80, 均明显大于 0.5, 表明未来年平均流量与过去 60 多年具相同的变化趋势。结合三站年平均流量 Z_c 统计值和 H_{urst} 指数可预测: 未来西江干流年平均流量仍将呈持续减少趋势, 其中中上游流域流量呈显著下降趋势, 而下游流量减少趋势不显著。

表 3 西江干流径流年际变化趋势持续性

Tab. 3 Continuity of interannual variation trend of runoff in the main stream of Xijiang River Basin

指标	天峨站	迁江站	梧州站
R^2 值	0.9929	0.9839	0.9872
H_{urst} 指数	0.7199	0.8267	0.8012

2.2 径流年际突变特征

采用累积距平和有序聚类法对天峨、迁江、梧州三站年平均流量突变特征进行综合检验 (见图 2)。

图 2(a) 至图 2(c) 为累计距平曲线, 三站均存在阶段变化, 阶段上升代表丰水年组, 阶段下降代表枯水年组。三站均在 2002 年累计距平值达到极大值, 为丰转枯节点。图 2(d) 至图 2(f) 为有序聚类法检验结果, 天峨站和迁江站的突变点均为 2002 年。梧州站在检验出 1954 年为突变点后, 考虑其后序列较长, 径流变化强烈, 可能存在第二个突变点, 对 1955-2015 年径流序列进行检测, 发现 2002 年为潜在突变点。

因累积距平和有序聚类法突变点检测结果存在不一致的缺点, 因此辅以滑动 T 检验法进一步对可能存在的突变点进行显著性检验, 结果见图 3。

经滑动 T 检验 (见图 3) 发现三站年径流均在 2002 年发生突变, 且均超过 0.05 置信水平 (对应临界值均为 2.0), 为显著突变点, 但原因有所差异。文献[9]采用可变范围 (RVA) 法评估龙滩水库建设与运行下对天峨站径流的影响发现水库修建后对逐月径流量有显著影响而对年径流量影响有限; 文献[11]通过比较分析 2006-2008 年龙滩水电站蓄水量与迁江站年径流量的响应关系发现其调蓄作用对

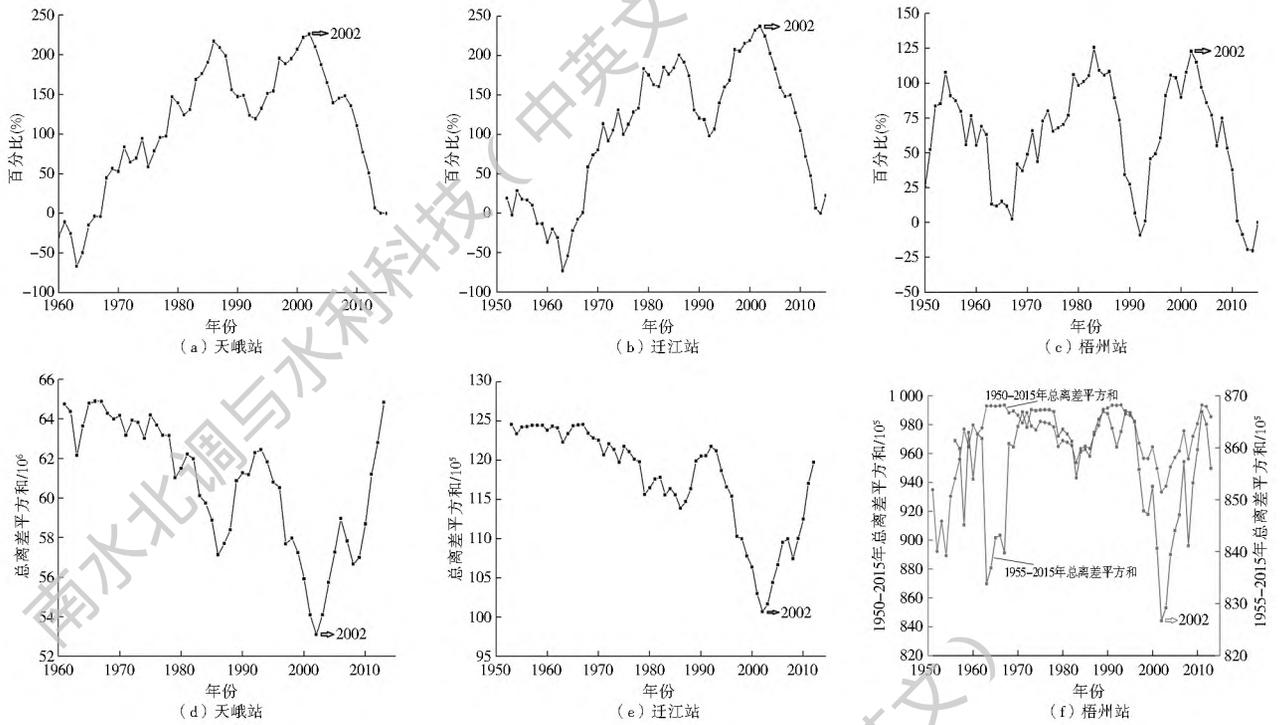


图2 西江干流径流年际变化突变检验

Fig. 2 Abrupt change test of interannual variation of runoff in the main stream of Xijiang River

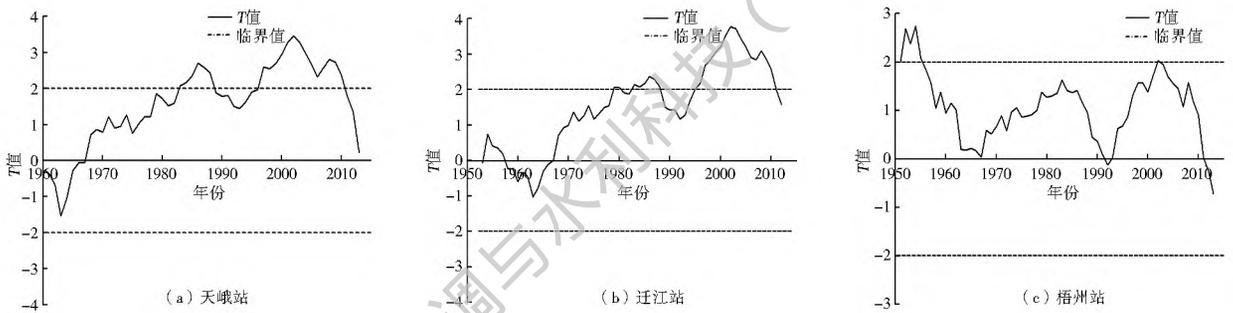


图3 滑动 T 检验结果

Fig. 3 The results of sliding T test

下游年径流量变化同样影响有限,因此2000年末投产运行的天生桥一级电站蓄水调节影响并非造成中上游年径流突变的主要原因。天峨站和迁江站来水单一,径流一致性较好,综合上述因素可知中上游径流突变主要受气候变化影响。下游梧州站年径流突变原因较为复杂,一方面,朱颖洁等^[10]基于神经网络年径流量模拟的气候变化和人类活动的定量分析认为气候变化是梧州站年径流量变化的主要原因;另一方面,迁江至梧州区间流域广阔,降水差异较大,且三大支流汇入致使水文情势复杂,加上2002年郁江百色水利枢纽大江截流的有限影响综合导致了下游年径流突变。因此,气候变化是西江干流年径流突变的主要原因,人类活动如水利工程建设的的影响有限。因三站年径流均在2002年发生突变,以2002年为分界点将研究数据分为两段,进一步探讨和分析西江干流年际及年内变化特征。

2.3 径流年际变化特征值

以突变节点(2002年)为分界点将序列划分为两段,统计分析三站径流突变前后特征值变化(见表4)。由表可知:(1)三站径流年际极值比与 C_v 值均较小,表明西江干流径流年际变幅平缓;(2)2002年前后两个时段,三站径流的时段特征值存在较大差异。2002后三站径流的时段均值、距平值、时段最大年径流、极值比和 C_v 值均低于前一时段的对应值,即干流径流年际变化趋于均匀,变幅减小,说明中上游梯级水库发挥了一定的调控作用;对于时段最小年径流,迁江站和梧州站增大,天峨站减小,一方面为2005年1月起通过天生桥一级、龙滩、岩滩、百色及长洲水利枢纽进行的枯季压咸补淡应急调水;另一方面流域干旱时有发生,如水文年2004-2005年和2009-2010年均特枯年、2006-2007年和2007-2008年为偏枯年,且龙滩上游的降水量少

于受多个暴雨中心影响的下游降水量^[27],这就造成了天峨站最小年径流较少,而迁江站和梧州站增大。

表 4 西江干流径流年际变化特征值

Tab. 4 Interannual variation characteristics of the runoff in the main stream of Xijiang River Basin

站名	统计时段	时段均值 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	距平值	时段最大年径流		时段最小年径流		极值比	C_v
				年份	最大年径流 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	年份	最小年径流 $/(m^3 \cdot s^{-1})$		
天峨站	1960-2001	1 598.08	80.14	1979	2 272.21	1989	870.05	2.61	0.22
	2002-2015	1 277.51	-240.43	2007	1 602.33	2013	853.23	1.88	0.15
	1960-2015	1 517.94	-	1979	2 272.21	2013	853.23	2.66	0.22
迁江站	1952-2001	2 126.50	94.29	1968	3 203.55	1989	1 151.78	2.78	0.21
	2002-2015	1 727.76	-304.46	2015	2 484.32	2013	1 195.03	2.08	0.16
	1952-2015	2 032.21	-	1968	3 203.55	1989	1 151.78	2.78	0.22
梧州站	1950-2001	6 580.79	133.81	1994	9 329.80	1963	3 228.37	2.89	0.19
	2002-2015	5 949.95	-497.02	2015	7 747.74	2011	4 066.63	1.91	0.16
	1950-2015	6 446.98	-	1994	9 329.80	1963	3 228.37	2.89	0.19

3 径流年内变化特征

3.1 径流年内分配及变化

随着西江干流梯级水电站相继建成运行,其径流年内分配波动明显增大^[9,11],有必要针对变化环境下的径流年内分配特征进行详细分析。由表 5 可知,上游天峨站夏季(6月-8月)占年径流量的 51.2%,冬季(12月-2月)仅占 9.6%,连续最大 4 个月为 6月-9月,占全年径流量的 63.5%;中游迁江站夏季占年径流量的 54.1%,冬季仅占 8.2%,连续最大 4 个月同样为 6月-9月,占全年径流量的 65.8%,两站各季的径流占比接近,具较高的一致性;而下游梧州站夏季占年径流量的 50.5%,冬季仅占 8.2%,春季增长明显,达到 20.1%,可见西江下游冬春交替之际补水形势依然严峻。

基于各阶段月平均径流计算得表征三站年内径流的均匀度、变化幅度及集中程度特征指标(见表 6),可知:(1)三站 C_v 、 C_r 值均较小,表明西江干流径流年内分配较均匀;(2)三站 C_m 、 C_{max} 、 C_{min} 值较接

近,梧州站略小,表明西江下游年内月径流变化幅度较小;(3)就集中期 D 而言,天峨站径流年内集中期为 7月下旬至 8月上旬,迁江站为 7月中旬至 8月初,而梧州站主要集中在 7月,基本与实测径流系列的平均月径流最大值出现时间相一致,表明集中度和集中期在量化径流年内分配方面很具代表性。(4)西江干流径流的年内分配在 2002 年前后存在较大差异,2002 年后的 C_v 、 C_r 、 C_m 、D 值明显变小, C_m 、 C_{max} 、 C_{min} 值向中值靠拢,表明西江干流径流年内分配趋于均匀,径流集中程度和变化幅度均减小,集中期前移约 12 日。

3.2 变化趋势分析

采用 M-K 法对三站各阶段年内月径流特征指标的趋势性进行检验(见表 7)。可知,(1)整个时域内,天峨站和迁江站年内月径流变化趋势一致性较高,两站 C_v 、 C_r 、 C_{max} 、 C_m 、 C_n 、D 序列的变化趋势均为显著下降, C_{min} 序列为显著上升,表明西江干流中上游径流年内分配显著性地趋于均匀,集中程度与变幅也显著性地变小;(2)下游梧州站年内月径流

表 5 西江干流径流年内分配

Tab. 5 The annual distribution of the runoff in the main stream of Xijiang River Basin

站名	季 月	春			夏			秋			冬		最大月	最小月	连续最大 4 个月		
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1			2	时间/月	百分率(%)
天峨站	月占比(%)	2.8	3.4	6.2	15.1	19.2	16.9	12.3	8.8	5.7	3.8	3.2	2.6	7	2	6-9	63.5
	季占比(%)	12.4			51.2			26.8			9.6						
迁江站	月占比(%)	2.5	3.4	7.5	16.3	20.1	17.7	11.7	7.5	5.1	3.3	2.6	2.3	7	2	6-9	65.8
	季占比(%)	13.4			54.1			24.3			8.2						
梧州站	月占比(%)	3.2	5.9	11.1	17.8	17.5	15.1	10.3	6.2	4.7	3.1	2.6	2.5	6	2	5-8	61.6
	季占比(%)	20.1			50.5			21.2			8.2						

表6 西江干流径流年内分配特征指标

Tab. 6 The annual distribution characteristics of the runoff in the main stream of Xijiang River Basin

站名/时间	统计时段	C_v	C_r	C_{max}	C_{min}	C_m	C_n	D
天峨站	1960-2001	0.78	0.35	2.48	0.24	10.26	0.51	8.2
	2002-2015	0.37	0.16	1.65	0.54	3.08	0.24	7.8
	1960-2015	0.69	0.31	2.31	0.32	7.29	0.46	8.1
迁江站	1952-2001	0.79	0.34	2.49	0.24	10.23	0.52	8.0
	2002-2015	0.53	0.23	1.99	0.44	4.52	0.34	7.5
	1952-2015	0.74	0.32	2.38	0.28	8.50	0.49	7.9
梧州站	1950-2001	0.70	0.32	2.19	0.28	7.89	0.48	7.6
	2002-2015	0.65	0.28	2.39	0.35	6.82	0.42	7.3
	1950-2015	0.68	0.31	2.15	0.30	7.13	0.46	7.5

注:集中期 D 表示径流集中月份。

表7 西江干流径流年内特征指标趋势变化

Tab. 7 Trend changes of characteristic indices of the annual runoff in the Xijiang River Basin

站名/统计值	统计时段	Z_{C_v}	Z_{C_r}	$Z_{C_{max}}$	$Z_{C_{min}}$	Z_{C_m}	Z_{C_n}	Z_D
天峨站	1960-2001	0.72	0.63	0.07	1.02	-0.48	0.20	-1.41*
	2002-2015	-2.19**	-2.19**	-2.08**	1.86**	-2.85***	-2.30**	0.66
	1960-2015	-3.24***	-3.39***	-3.03***	4.74***	-4.30**	-3.81***	-1.45*
迁江站	1952-2001	0.5	-0.52	0.42	1.37*	-0.65	-0.35	-1.04
	2002-2015	-3.18***	-2.63***	-3.5***	1.86**	-3.07***	-2.52**	0.77
	1952-2015	-2.72**	-3.36***	-2.09**	4.53***	-3.82**	-3.33***	-2.63***
梧州站	1950-2001	0.77	0.06	1.22	1.02	0.06	0.20	-0.64
	2002-2015	-2.52**	-2.41***	-1.53	0.77	-2.08**	-2.41***	0
	1950-2015	-0.61	-1.27	0.31	3.54***	-1.86**	-1.43*	-2.00**

注:通过 $\alpha=0.1, 0.05, 0.01$ 的显著性检验的临界值分别为 1.28, 1.64, 2.32 并分别以“*”、“**”、“***”表示,“-”号表示“下降”。

C_{min} 序列的变化趋势为显著上升, C_m 、 D 序列为显著下降, 其余指标变化不显著, 表明下游径流年内分配趋于均匀的变化不显著, 但集中程度与变幅为显著变小; (3) 2002 年后, 三站年内月径流的 C_v 、 C_r 、 C_{max} 、 C_{min} 、 C_m 、 C_n 值均为显著变化, 这是气候变化和人类活动加剧的结果。

3.3 R/S 分析

利用 R/S 法分析西江干流年内月径流特征指标序列的 $Hurst$ 指数(见表 8)。结果表明: 三站年内月径流的 $Hurst$ 指数均大于 0.5, 表明西江干流径流年内分配变化趋势与过去 60 多年径流具有相同的变化趋势。具体地, 从 C_v 、 C_r 的 $Hurst$ 值来看, 径流年内分配趋于均匀的持续性: 天峨> 梧州> 迁江; C_{max} 、 C_{min} 、 C_m 的 $Hurst$ 值表明, 年内月径流变化幅度变小趋势的持续性同样为: 天峨> 梧州> 迁江; 表明西江干流径流年内分配趋于均匀和年内变幅变小的持续性自上游至下游减弱, 但梧州站因干支流径流来水的复杂性, 呈现较强的持续性; 由 C_n 、 D 的 $Hurst$ 值可知, 三站径流集中度变小和集中期

前移的持续性为: 迁江> 天峨> 梧州, 分析认为, 天峨站经上游水库径流调节年内径流集中度变小和集中期迁移具较强的持续性, 迁江站则经梯级水库径流调节其持续性最强, 而梧州站虽然处于下游, 同样经过梯级电站调节, 但因来水多元化, 不确定性较大, 其持续性有所减弱。

表8 西江干流径流年内特征指标变化持续性

Tab. 8 Continuity of characteristic indices of the annual runoff in the Xijiang River Basin

站点	C_v	C_r	C_{max}	C_{min}	C_m	C_n	D
天峨站	0.8108	0.8196	0.8374	0.7180	0.7599	0.7738	0.6255
迁江站	0.6636	0.7217	0.8062	0.7365	0.6937	0.8089	0.6502
梧州站	0.7542	0.7611	0.7570	0.7627	0.7176	0.7625	0.6262

4 结论

(1) 根据西江三站 60 多年径流资料分析可知, 西江干流中上游天峨站与迁江站年平均流量均呈显著下降趋势, 且均在 2002 年发生突变; 下游梧州站年平均流量为不显著下降趋势, 突变点为 1954 年和

2002 年。说明 2002 年后西江流域径流受气候变化和人类活动干扰加剧, 还值得深入研究气候变化和人类活动对西江径流的影响。

(2) 西江干流径流多集中在 4 月-9 月, 冬春季占比低。2002 年后西江干流中上游径流年内分配强显著性地趋于均匀, 集中程度和变幅强显著性地变小; 下游径流年内分配趋于均匀, 但变化不显著, 说明迁江站至梧州站区间来水可控性较差。

(3) 天峨站径流集中期为 7 月下旬至 8 月上旬, 迁江站为 7 月中旬至 8 月初, 而梧州站主要集中在 7 月, 表明干流中上游来水对梧州流量影响有限, 若深入分析不同水平年梧州流量地区组成将对流域防洪、生态调度研究具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] HANNAH D M, SMITH B P G, GURNELL A M, et al. An approach to hydrograph classification[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(2): 317-338. DOI: 10. 1002/(SICI) 1099-1085(20000215) 14: 2< 317:: AID-HYP929> 3.0.CO; 2-T.
- [2] HARRIS N M, GURNELL A M, HANNAH D M, et al. Classification of river regimes: a context for hydroecology[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16-17): 2831-2848. DOI: 10. 1002/1099-1085(200011/12) 14: 16/17 < 2831:: AID-HYP122 > 3.3.CO; 2-F.
- [3] 郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 585-590. (ZHENG H X, LIU C M. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(6): 585-590. (in Chinese)) DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2003. 06.006.
- [4] 王云琦, 齐实, 孙阁, 等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响——以美国北卡罗莱纳州 Trent 流域为例[J]. *水科学进展*, 2011, 22(1): 51-58. (WANG Y Q, QI S, SUN G, et al. Impacts of climate and land use change on water resources in a watershed: a case study on the Trent River Basin in North Carolina, USA [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1): 51-58. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2011. 01. 006.
- [5] APU RV T, MEHROTRA R, SHARMA A, et al. Impact of climate change on floods in the Brahmaputra basin using CMIP5 decadal predictions[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 281-291.
- [6] TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change[J]. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138. DOI: 10. 3354/cr00953. issn: 0936577x.
- [7] DUAN L M, ZHANG J Y, LI W, et al. Multivariate properties of extreme precipitation events in the Pearl River Basin, China: Magnitude, frequency, timing, and related causes[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(21): 3662-3671. DOI: 10. 1002/hyp. 11286.
- [8] ZHENG Y H, HE Y H, CHEN X H. Spatiotemporal pattern of precipitation concentration and its possible causes in the Pearl River Basin, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161(10): 1020-1031. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2017. 06. 156.
- [9] 陈立华, 赖河涛, 叶明. 龙滩水库工程对红水河天峨站水文情势的影响分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(1): 394-402. (CHEN L H, LAI H T, YE M. Influence of Longtan Reservoir Project on hydrological regime of Hongshui River [J]. *Journal of Guangxi University(Nat Sci Ed)*, 2017, 42(1): 394-402. (in Chinese)) DOI: 10. 13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2017. 0394.
- [10] 朱颖洁, 郭纯青, 黄夏坤. 气候变化和人类活动影响下西江梧州站降水径流演变研究[J]. *水文*, 2010, 30(3): 50-55. (ZHUY J, GUO C Q, HUANG X K. Change of precipitation and runoff at Wuzhou Station on Xijiang River under influence of climate changes and human activities[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(3): 50-55. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2010. 03. 011.
- [11] 陈立华, 张利娜, 刘为福. 水电站运行影响下红水河下游水文情势分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2018(1): 397-405. (CHEN L H, ZHANG L N, LIU W F. Hydrologic analysis of the lower reaches of Hongshui river under operation of hydropower stations[J]. *Journal of Guangxi University(Nat Sci Ed)*, 2018(1): 397-405. (in Chinese)).
- [12] 宋晓猛, 张建业, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. *Journal of Hydraulic for Engineering*, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2013. 07001.
- [13] 邱临静. 气候要素变化和人类活动对延河流域径流泥沙影响的评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. (QIU L J. Evaluation of impacts of the climatic variable changes and human activity on the runoff and sediment in the Yanhe Watershed [D]. Yangling: North A& F University, 2012. (in Chinese)).
- [14] 陈立华, 叶明, 王佳佳, 等. 西江流域干流径流演变特征与趋势分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(4): 920-927. (CHEN L H, YE M, WANG J J, et al. Analysis on characteristics and tendency of annual runoff changes of main stream of Xijiang River Basin. [J]. *Journal of Guangxi University(Nat Sci Ed)*, 2014, 39(4): 920-927. (in Chinese)) DOI: 10. 13624/j. cnki. issn. 1001-7445. 2014. 04. 005.
- [15] 汪丽娜, 陈晓宏, 李粤安, 等. 西江流域径流演变规律研究[J]. *水文*, 2009, 29(4): 22-25. (WANG L N, CHEN X H, LI Y A, et al. Rules of runoff variation of Xijiang River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29(4): 22-25. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2009. 04. 005.
- [16] 王博, 邱现讹, 郜军艳. 滦河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. *人民黄河*, 2011, 33(8): 46-49. (WANG B, QIU X E, GAO J Y. Long-Term trends of major climate variables and runoff in Luanhe River Basin[J]. *Yellow River*, 2011, 33(8): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2011. 08. 016.
- [17] 张荣, 段震, 王文民, 等. 变化环境下大汶河水资源演变趋势及影响分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(1): 67-69. (ZHANG R,

- DUAN Z, WANG W M, et al. Water resources evolution and its influence analysis in Dawen River Basin under the changing environment[J]. Yellow River, 2015, 37(1): 67-69. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2015.01.017.
- [18] 田甜, 黄强, 郭爱军, 等. 基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2): 16-27. (TIAN T, HUANG Q, GUO A J, et al. Drought evolution characteristics in Wei River Basin based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 16-27. (in Chinese) DOI: 10.11660/slfdx.b.20160202.
- [19] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 1951-2014年洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 142-150. (DAI W, LYU D Q, LI J B, et al. Evolution characteristics and driving factors of runoff and sediment changes in Dongting Lake during 1951-2014[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 142-150. (in Chinese) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.02.02.
- [20] 赵天力, 雷德义, 胡彩虹. 新村流域径流变异诊断及影响因素定量分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 19-23. (ZHAO T L, LEI D Y, HU C H. Diagnose and analysis of variation and its inflect factors in Xincun Watershed[J]. Yellow River, 2016, 38(9): 19-23. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.09.006.
- [21] 燕华云, 杨贵林, 汪青春. 长江源区径流年内分配时程变化规律分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 526-529. (YAN H Y, YANG G L, WANG Q C. Change of annual runoff distribution in the headwaters of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 526-529. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2006.04.010.
- [22] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [23] KENDALL M G. Rank Correlation Method[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [24] 李玮, 段利民, 刘廷玺, 等. 1961-2015年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2153-2165. (LI W, DUAN L M, LIU T X, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation from 1961 to 2015 in the Eastern Inland River Basin of Inner Mongolian Plateau[J]. Resource Science, 2017, 39(11): 2153-2165. (in Chinese) DOI: 10.18402/resci.2017.11.13.
- [25] XU J H, CHEN Y N, LI W H, et al. Long term trend and fractal of annual runoff process in mainstream of Tarim River[J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(1): 77-84. DOI: 10.1007/s11769-008-0077-6.
- [26] 曹明亮, 张弛, 周惠成, 等. 丰满上游流域人类活动影响下的降雨径流变化趋势分析[J]. 水文, 2008, 28(5): 86-89. (CAO M L, ZHANG C, ZHOU H C, et al. Analysis of changing trend of rainfall and runoff under the influence of human activities in upstream of Fengman Watershed[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 86-89. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2008.05.021.
- [27] 姚章民, 杜勇, 张丽娜. 珠江流域暴雨天气系统与暴雨洪水特征分析[J]. 水文, 2015(2): 85-89. (YAO Z M, DU Y, ZHANG L N. Analysis of storm weather system and flood characteristic in Pearl River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2015(2): 85-89. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2015.02.018.

(上接第 65 页)

- [22] 文博. 四川省干旱时空分布特征研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2014. (WEN B. Research on temporal and spatial distribution of drought in Sichuan Province[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014. (in Chinese))
- [23] 李伟光, 易雪, 车秀芬, 等. 海南岛干湿概况与干旱发生特征[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(s2): 53-54. (LI W G, YI X, CHE X F, et al. Characteristics of drought and overview of wet and dry in hainan island[J]. Journal of Meteorological research and application, 2011, 32(s2): 53-54. (in Chinese) DOI: 1673-8411(2011)S2-0053-02.
- [24] 余国云. 丰水区域缺水期水资源调度研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (SHE G Y. Study on water resources scheduling in high water shortage period[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [25] 王胜, 吴坤梯, 陈明. 1961年以来海南岛降水变化趋势分析[J]. 气象研究与应用, 2006, 27(1): 24-27. (WANG S, WU K T, CHEN M. Analysis for precipitation change trend of Hainan Island since 1961[J]. Journal of Guang Xi Meteorology, 2006, 27(1): 24-27. (in Chinese))
- [26] 刘梅, 魏加华, 王峰. 渭河流域降水时空变化与干旱特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 193-197. (LIU M, WER J H, WANG F. Spatiotemporal variations of precipitation and drought characteristics in Wei River Basin[J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 193-197. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nstldqk.2015.02.001.