

胡彩霞,董璇,翁士创等.东江流域径流情势演变及其归因分析[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

东江流域径流情势演变及其归因分析

胡彩霞^{1,3,4},董璇²,翁士创^{3,4},赵钰洁^{3,4}

(1.珠江水文水资源勘测中心,广东 广州 510610;2.华南师范大学,广东 广州 510631;3.水利部珠江水利委员会水文局,广东 广州 510610;4.东江流域水资源与生态环境野外科学观测研究站,广东 惠州 516100)

摘要:在全球气候变化与人类活动双重影响下,东江流域径流情势发生了显著变化,对其水资源安全保障提出了新挑战。本研究基于东江干流龙川、河源、岭下、博罗四个水文站1956—2023年实测径流序列及断面以上雨面雨量数据,采用水文变异诊断系统识别径流与降水的变异特征,并运用基于降雨—径流关系的归因分析方法,定量分离气候变化与人类活动对径流变异的贡献。结果表明:径流变异呈现显著的年内分配特征,枯水期径流普遍呈跳跃上升趋势,变异点集中于1968—1974年,与流域内新丰江、枫树坝、白盆珠三大水库相继运行后的枯期补水调度基本吻合;丰水期径流多呈跳跃下降趋势,变异点集中在2008、2019年,反映水库削峰及干旱调控的叠加影响。年径流序列方面,河源站与岭下站于2019年发生跳跃向下变异,年径流量显著减少,反映出流域综合管理对径流过程的调控作用。降水变异主要发生在5、6和10月,各断面变异年份表现一致,且均呈跳跃下降变异,而全年面降雨序列未发生显著变异。人类活动是驱动径流演变的主导因素,枯水期贡献率普遍超过90%,丰水期多数月份亦达80%以上;3、4月气候变化贡献率显著升高,与华南前汛期降水变率大及ENSO事件的强烈调制作用密切相关。研究成果揭示了东江流域径流演变的时空分异规律及其驱动机制,可为流域水资源优化调度、供水安全保障及适应气候变化提供科学依据。

关键词:径流演变;水文变异诊断;气候变化;人类活动;降雨—径流关系;归因分析;东江流域

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号:1001-9235(XXXX)XX-0001-15

在全球气候持续变暖的背景下,陆地水循环系统正经历深刻变化。IPCC第六次评估报告指出,全球约36亿人口承受着气候变化带来的高压影响,极端降水与干旱事件频发^[1]。水文循环的异常变化不仅重构了水资源时空分布格局,更通过供水失衡、洪涝灾害等路径对社会经济和生态系统构成系统性威胁。径流作为水循环的关键环节,综合反映了气候条件、下垫面状况及人类活动的共同作用,其演变规律的研究对于水资源科学管理、防洪减灾及区域可持续发展具有重要的理论价值和现实意义^[2-3]。

近年来,径流演变研究在方法与归因分析方面取得了显著进展。方法上,从滑动平均、累积距平

发展到Mann-Kendall检验、小波分析、有序聚类及综合诊断系统^[4],其中谢平^[5]提出的水文变异诊断系统通过三层诊断结构,较好地解决了单一检验方法结果不稳定的问题,已在多个流域应用^[6-8]。归因方面,基于Budyko假设的弹性系数法、水文模拟法、降雨—径流关系法等定量分离方法日趋成熟^[9-11]。已有研究表明,气候变化通过改变降水、蒸发等气象要素直接影响径流过程,而人类活动如水库调度、土地利用变化、取用水等则通过改变下垫面条件和径流路径对径流产生干扰^[12-13]。然而,现有研究仍存在明显不足:空间尺度上,多聚焦于重点子流域或单一水文站点,缺乏对全流域上下游多站点协同诊断的区域系统性;时间尺度上,定量归因多

基金项目:广东省科技计划项目(2024B1212040001);广东省科技计划项目(2023B1212070031)

收稿日期:XXXX-XX-XX **修回日期:**XXXX-XX-XX

作者简介:胡彩霞(1986—),女,硕士,高级工程师,主要从事水文水资源调查评价工作。

聚焦于年尺度^[9],针对径流年内分配变异特征及各月份变异驱动因素的精细解析有待深化。这些不足限制了变化环境下径流演变规律认识的深度及水资源调度管理的精细化水平。

东江是珠江流域三大水系之一,承担着为广州、深圳、东莞、惠州及香港特别行政区等粤港澳大湾区核心城市供水的重任,供水人口逾4 000万,其水资源安全保障地位极为重要^[14]。东江流域水资源受气候变化与人类活动双重驱动,流域内已建成新丰江、枫树坝、白盆珠三大控制性水库^[15],其“削峰补枯”调度显著改变了径流年内分配,同时ENSO等大尺度气候因子强烈调制春季降水^[16-17]。综上,本研究聚焦以下3个核心科学问题:①在气候波动与水库调蓄共同作用下,东江流域径流序列是否存在显著变异?②不同月份径流变异的特征、强度及时间节点有何差异?③气候变化与人类活动对径流变异的贡献率在年尺度和月尺度上分别如何?

基于此,本研究以东江干流龙川、河源、岭下、博罗4个水文站为研究对象,采用水文变异诊断系统对1956—2023年各月及全年径流序列进行变异识别与检验;在此基础上,运用基于降雨-径流关系的归因分析方法,定量分离气候变化与人类活动对径流变异的贡献率,系统揭示东江流域径流演变的时空特征及其驱动机制。研究成果可为东江流域水资源优化调度、供水安全保障及适应气候变化提供科学依据,对于深化变化环境下南方湿润区径流演变规律的认识亦具有重要参考价值。

1 研究区概况

东江是珠江流域三大水系之一,发源于江西省寻乌县,自东北向西南流经广东河源、惠州、东莞等地,于虎门注入珠江口,干流全长约562 km,流域总面积约3.53万km²,见图1。该流域地处亚热带季风气候区,多年平均降水量约1 750 mm,降水时空分布不均,汛期(4—9月)降水量占全年的80%以上,径流年际变化大,丰枯交替明显。作为我国南方重要的水源涵养区和水资源战略储备区,东江承担着为广州、深圳、东莞、惠州及香港特别行政区等

粤港澳大湾区核心城市供水的重任,供水人口逾4 000万,其水资源安全保障地位极为重要^[16]。受气候变化和人类活动双重驱动,东江流域径流情势已发生显著变化。流域内先后建成了新丰江、枫树坝、白盆珠三大控制性水库,总库容达170.48亿m³,占流域总库容的76%^[15]。水库群通过“削峰补枯”的调度方式,改变了径流的年内分配格局。与此同时,华南地区春季降水受厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)等大尺度气候因子的强烈调制,降水变率较大^[16-17]。汛期,水库以拦蓄洪水为主,减轻下游防洪压力;枯水期则加大下泄流量,保障河道生态基流与供水需求。这种调度模式直接改变了天然径流的年内分配格局,可能导致汛期月份径流减少、枯水月份径流增加的不同向变异。除水库调蓄外,流域内还分布着东江水源工程、东深供水工程等大型取用水工程,对河川径流形成直接消耗;同时,珠三角城市群快速扩张带来的不透水面增加、水土保持工程及河道采砂等人类活动,也在不同程度上干扰着径流过程。在上述气候波动与密集人类活动的双重驱动下,东江径流序列极有可能发生显著的阶段性或季节性变异,且以水库群联合调度为代表的人类活动预计在变异中占据主导地位。

2 研究数据及方法

2.1 数据来源与处理

本研究选取东江干流具有代表性的龙川、河源、岭下、博罗四个水文站作为研究对象,采用礼亨、寻乌、石角、忠信、灯塔、蓝塘、和平、黄田、龙川、清林径、博罗、惠阳、观音阁、平山、九洲和高潭站16个站点的逐月降水数据以及龙川、河源、岭下和博罗站的逐月经流数据,数据起止系列均为1956—2023年,见图2。数据来源为珠江区第三次水资源调查评价成果及水文年鉴。对数据进行完整性检查,剔除因仪器故障或记录缺失导致的异常值,缺失值采用相邻年份同月均值进行插补,确保各站点序列连续。所有站点均具有完整的经度、纬度信息。将雨量站列表(含经纬度)导入ArcGIS Pro,使

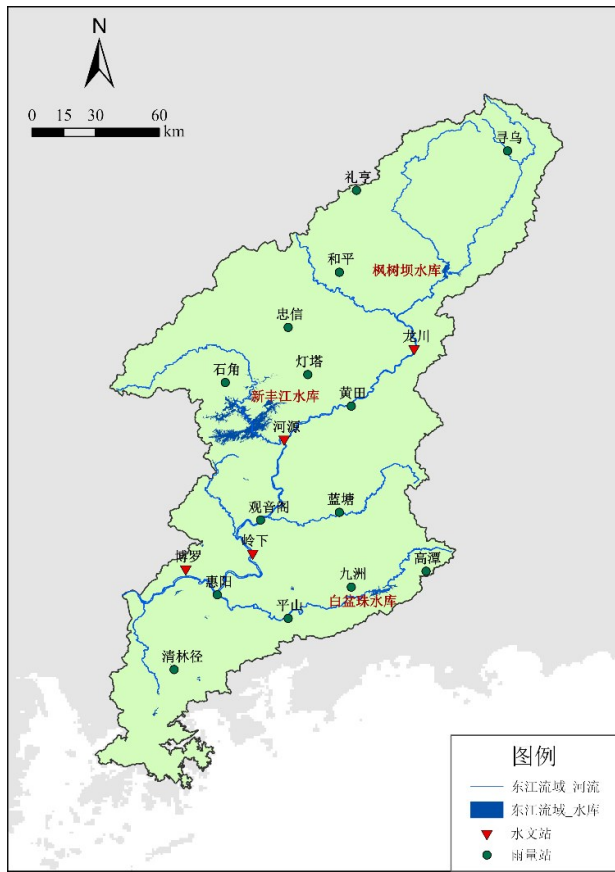


图1 东江流域区域概况

Fig. 1 Overview of the Dongjiang River Basin

用“XY表转点”工具生成点要素类,并投影到WGS 1984 UTM Zone 49N坐标系。在此基础上,利用ArcGIS Pro平台的地统计分析工具,采用普通克里金(Ordinary Kriging)方法,半变异函数模型选择球面模型(Spherical),再将输出栅格像元大小统一为100 m,处理范围与东江流域边界一致。接着,将流域划分为四个子区域(龙川以上、河源以上、岭下以上、博罗以上),利用“分区统计表(Zonal Statistics as Table)”工具,以各子区域面为分区,提取每个栅格像元在子区域内的平均值,得到各子区域逐月面雨量(单位:mm)。最终生成每个子区域1956—2023年逐月面雨量序列,用于后续径流模拟分析。此外,研究通过与同期实测年径流深序列的同步分析验证面雨量计算结果的合理性。统计结果表明,4个断面年面雨量与年径流深的皮尔逊相关系数均稳定在0.9左右,呈极强线性正相关。图2显示,两者年际变化过程高度一致,丰枯交替节奏匹配。从

水文机制看,降水是研究区径流的主导补给来源,年尺度下蒸发、地下水调蓄及人类活动的影响相对有限,上述强相关性与同步性符合流域水文循环基本规律。个别年份两者变幅差异主要由水利工程调度、取水等因素导致,不影响整体合理性。综上,本次面雨量计算结果可靠,可作为后续研究的基础数据。

2.2 水文变异诊断系统

水文序列是气候条件、下垫面状况及人类活动等多种因素综合作用的产物,其变化规律可通过确定性成分与随机性成分的分解来刻画。确定性成分主要包括趋势、跳跃和周期成分,而随机性成分则反映了系统固有的随机波动特性。当水文序列的统计特征(如分布形式或分布参数)在整个时间范围内发生显著变化时,即认为该序列发生了水文变异,此时序列不再满足“一致性”要求,传统的频率计算方法将不再适用。

为系统识别和检验水文序列的变异特性,谢平^[5]提出了水文变异诊断系统。该系统集成了多种变异检测方法,由初步诊断、详细诊断和综合诊断三个层次构成,能够全面识别序列的变异形式(趋势或跳跃)、变异程度以及最可能的变异发生时间,较好地解决了单一检验方法结果不稳定、多种方法结论不一致的问题。水文变异诊断系统路线见图3。

2.2.1 初步诊断

初步诊断主要从整体上判断序列是否存在变异。采用过程线法、滑动平均法以及Hurst系数法对序列进行初步检验。其中,Hurst系数能够表征序列的长期相关性:当Hurst系数等于0.5时,序列为纯随机过程;当系数大于0.5时,序列具有正持续性,即未来的变化趋势与当前一致;当系数小于0.5时,则表现为反持续性。通过Hurst系数与分数布朗运动相关函数的关系,可以对序列的变异程度进行分级,划分为无变异、弱变异、中变异、强变异和巨变异五个等级。若初步诊断判定序列存在变异,则转入详细诊断环节;若无明显变异,则需结合成因调查进行确认。

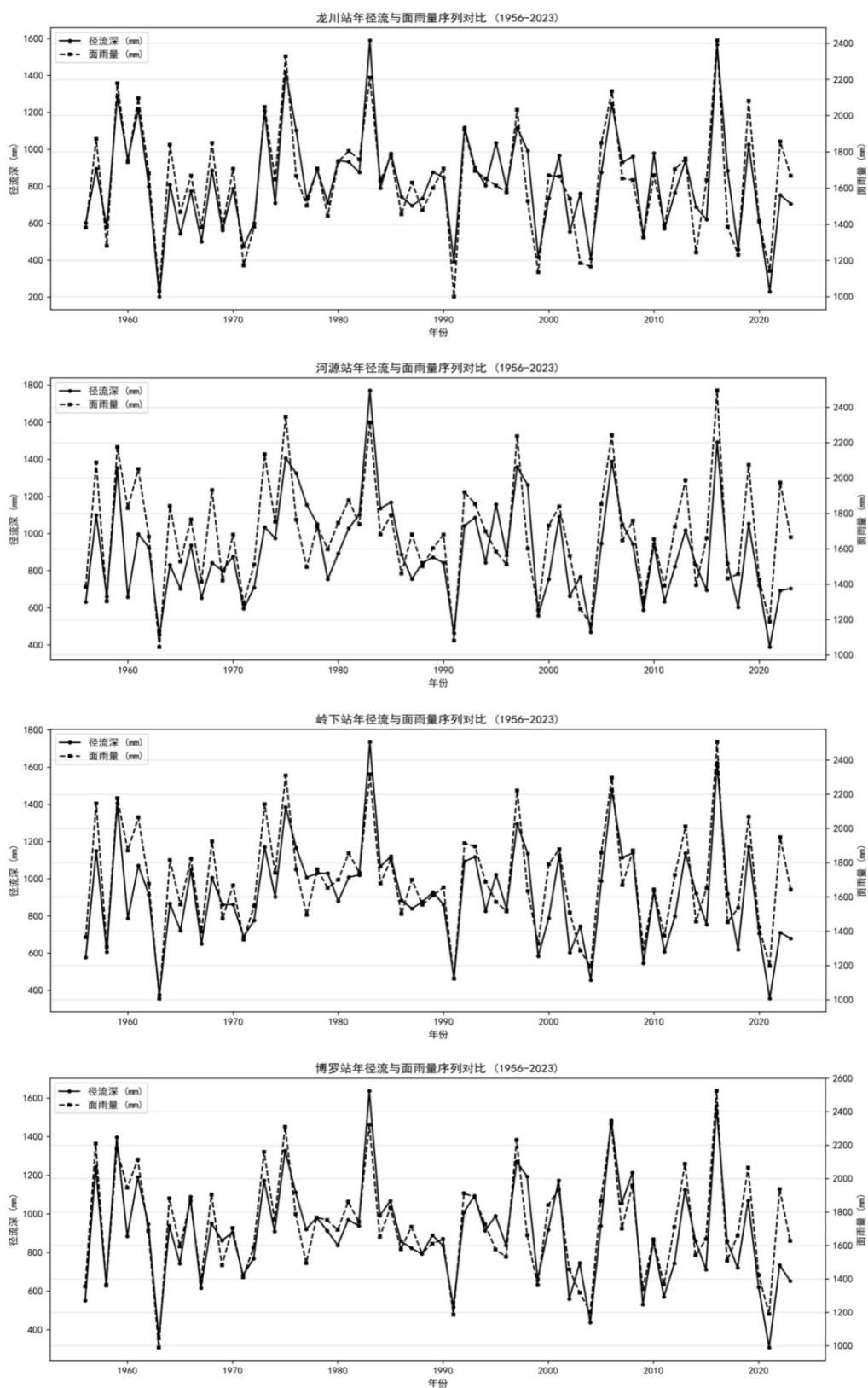


图2 主要站点径流量与面雨量序列对比

Fig. 2 Comparison between runoff and areal precipitation series at major hydrological stations

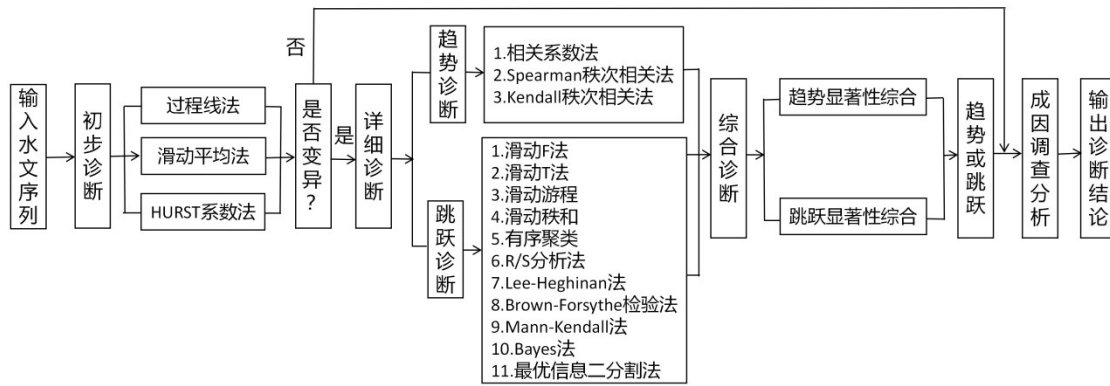


图3 水文变异诊断系统路线

Fig. 3 Framework of the hydrological alteration diagnosis system

2.2.2 详细诊断

详细诊断阶段分别针对趋势变异和跳跃变异采用多种检验方法进行综合分析。对于趋势变异,采用基于线性趋势相关系数的趋势检验法、Spearman 秩次相关检验法和 Kendall 秩次相关检验法,判断序列是否存在显著的趋势变化。对于跳跃变异,则综合运用有序聚类法、Lee-Heghinian 法、秩和检验法、滑动 F 检验法、滑动 T 检验法、游程检验法、最优信息二分割模型、R/S 分析法、Brown-Forsythe 法、Mann-Kendall 法以及贝叶斯方法等多种检验手段,识别可能的跳跃点及其显著性。

2.2.3 综合诊断

综合诊断阶段对详细诊断的结论进行集成分析。首先,对趋势诊断结果进行趋势综合,将各方法判断趋势显著性的结果求和,若综合显著性大于等于 1,则认为趋势显著。对于跳跃变异,则采用权重综合和显著性综合两种方式进行处理。各检验方法的权重通过向量相似度原理及统计试验获得,克服了主观赋权的随意性。将各方法检验出的可能跳跃点按其权重进行累加,权重之和最大的点即为最可能跳跃点;同时,对跳跃点的显著性进行综合评判。最后,引入效率系数,比较水文序列与跳跃成分或趋势成分的拟合优度,以效率系数较大者作为最终确定的变异形式。

2.2.4 诊断结果输出与成因验证

综合诊断完成后,系统输出最可能的变异点、

变异形式及变异程度。为增强诊断结果的可信度,还需结合区域实际水文调查资料进行物理成因分析,验证诊断结论与实际情况的一致性。通过成因调查,可以进一步确认变异点年份的合理性,并分析变异产生的可能原因,如水库修建、土地利用变化、取用水活动等。

2.3 归因分析方法

为定量区分气候变化和人类活动对东江流域径流序列变异的影响程度,本文采用基于降雨-径流关系的归因分析方法^[18]。该方法适用于能够建立稳定降雨-径流关系的流域,尤其适合长时间序列资料较为完整的地区。其所需数据仅为降雨和径流,获取相对容易,且能够定量分离气候变化和人类活动的贡献,结果直观易于理解。方法的不确定性主要来源于降雨-径流关系曲线拟合形式的选择(本文采用对数函数,但线性、幂函数等不同形式可能导致结果差异);基准期与变化期划分的准确性,变异点识别误差会直接传导至归因结果;此外,方法假设气候变化与人类活动的贡献是可线性分离的,未考虑两者之间可能存在的交互作用。针对曲线拟合形式的不确定性,本研究通过计算拟合合格率进行控制,确保所选函数形式具有较好的代表性。对于变异点识别的不确定性,水文变异诊断系统通过多种方法的综合集成予以降低。总而言之,该方法以径流形成原理为基础,认为降雨与径流之间存在一定的关系,气候变化和人类活动通过

改变下垫面条件、水循环过程及用水方式,破坏了水文序列的一致性,反映在降雨-径流关系图上则表现为变异前后降雨径流关系曲线不再重合。通过比较变异前后不同气候条件和人类活动影响下降雨与径流的关系,可以分离出气候变化和人类活动对径流变化的贡献率。具体流程如下:

在基准期划分基础上,分别建立基准期和变化期的降雨-径流关系曲线。考虑到线性拟合可能存在交叉,且对数曲线能更好地反映径流系数随降雨变化的非线性特征,优先采用对数函数进行拟合。对于基准期(天然期),设其降雨-径流关系为:

$$R_1 = f_1(P) = a_1 \ln(P) + b_1 \quad (1)$$

对于变化期(受气候变化和人类活动影响期),其降雨-径流关系为:

$$R_2 = f_2(P) = a_2 \ln(P) + b_2 \quad (2)$$

式中: P 为面雨量,mm; R 为径流深,mm。拟合过程中,采用最小二乘法估计参数,并以相对误差在 $\pm 25\%$ 以内作为合格标准,计算拟合合格率,确保降雨-径流关系曲线具有较好的代表性。

接着,设基准期和变化期实测降雨均值分别为 $\overline{P}_1$ 和 $\overline{P}_2$,通过降雨-径流关系曲线插值得到对应的径流深:

$$R_1 = f_1(\overline{P}_1), R_2 = f_2(\overline{P}_2) \quad (3)$$

R_1 视为基准期降雨 $\overline{P}_1$ 在天然下垫面条件下产生的径流深(mm); R_2 视为变化期降雨 $\overline{P}_2$ 在变化期下垫面条件下产生的径流深(mm)。则气候变化与人类活动共同作用导致的径流总变化量 ΔR (mm)为:

$$\Delta R = R_2 - R_1 \quad (4)$$

进一步,采用两种途径分别计算气候变化和人类活动的贡献量。首先,将变化期降雨 $\overline{P}_2$ 代入基准期曲线,得到 $R'_2 = f_1(\overline{P}_2)$,表示若人类活动不变、仅气候变化时的径流深;将基准期降雨 $\overline{P}_1$ 代入变化期曲线,得到 $R'_1 = f_2(\overline{P}_1)$,表示若气候不变、仅人类活动影响时的径流深。由此,气候变化造成的径流变化量 ΔR_q (mm)可表示为两种途径计算结果的均值:

$$\Delta R_q = \frac{(R'_2 - R_1) + (R_2 - R'_1)}{2} \quad (5)$$

式中: $(R'_2 - R_1)$ 反映了在基准期下垫面条件下,仅由降雨变化所导致的径流变化量; $(R_2 - R'_1)$ 则反映了在基准期气候条件下,仅由下垫面变化对径流过程的影响。取两者均值可降低单一插值方式带来的曲线拟合误差。

人类活动造成的径流变化量 ΔR_d (mm)为:

$$\Delta R_d = \Delta R - \Delta R_q \quad (6)$$

最后,气候变化和人类活动对径流变异的贡献率分别为:

$$\eta_q = \frac{\Delta R_q}{\Delta R} \times 100\%, \eta_d = \frac{\Delta R_d}{\Delta R} \times 100\% \quad (7)$$

式中: η_q 为气候变化贡献率(%); η_d 为人类活动贡献率(%)。根据上述公式,当 ΔR 与 ΔR_q 方向一致时, η_q 为正值,反之则为负值; η_d 同理。该方法通过取两种计算途径的平均值,减弱了单一插值方式带来的曲线拟合误差,提高了归因分析的可靠性。对于发生变异的月份和全年序列,分别采用上述步骤进行归因计算,得到各站点不同时期径流变化中气候变化和人类活动的贡献比例。

3 研究结果

3.1 径流序列变异诊断结果

本研究采用水文变异诊断系统,选取 $\alpha=0.05$ 作为第一置信度水平、 $\beta=0.01$ 作为第二置信度水平,对东江干流龙川、河源、岭下、博罗4个水文站1956-2023年的月均及年均径流序列开展了变异分析,结果见表1。

从各站点的变异情况来看,龙川站共有9个月份的径流序列发生变异,包括1~6、8、11、12月,变异程度以中变异和弱变异为主。其中,1—4、11、12月呈跳跃向上变异,而5、6、8月表现为跳跃向下变异,全年序列未检测到显著变异。河源站除6月和10月未检测到明显变异外,其余10个月份均发生变异,变异程度以中变异为主,变异方向与龙川站基本一致,即枯水期(1—4、11、12月)径流显著上升,丰水期(5、7—9月)径流明显下降,全年径流序列呈跳跃向下变异。岭下站共有8个月份发生变异,包括1—5、8、11、12月,变异程度以中变异和弱变异为

表1 各水文站径流序列的变异诊断结果

Tab. 1 Hydrological alteration diagnosis results of runoff series at four hydrological stations

时间序列	龙川			河源			岭下			博罗		
	Hurst系数	变异程度	诊断结论	Hurst系数	变异程度	诊断结论	Hurst系数	变异程度	诊断结论	Hurst系数	变异程度	诊断结论
1月	0.787	中	1972(+)↑	0.831	中	1974(+)↑	0.828	中	1968(+)↑	0.809	中	1971(+)↑
2月	0.694	弱	1973(+)↑	0.743	中	1973(+)↑	0.712	中	1973(+)↑	0.665	弱	1973(+)↑
3月	0.667	弱	1979(+)↑	0.707	中	1973(+)↑	0.691	弱	1981(+)↑	0.683	弱	1981(+)↑
4月	0.700	中	1972(+)↑	0.745	中	1972(+)↑	0.714	中	1972(+)↑	0.711	中	1972(+)↑
5月	0.702	中	2019(+)↓	0.691	弱	2016(+)↓	0.692	弱	2016(+)↓	0.618	无	—
6月	0.698	中	1968(+)↓	0.627	无	—	0.648	无	—	0.637	无	—
7月	0.662	无	—	0.701	中	2008(+)↓	0.647	无	—	0.646	无	—
8月	0.687	弱	2008(+)↓	0.791	中	2008(+)↓	0.739	中	2008(+)↓	0.708	中	2019(+)↓
9月	0.624	无	—	0.683	弱	1961(+)↓	0.642	无	—	0.645	无	—
10月	0.664	无	—	0.726	无	—	0.697	无	—	0.658	无	—
11月	0.795	中	1973(+)↑	0.749	中	1973(+)↑	0.746	中	1959(+)↑	0.689	弱	1959(+)↑
12月	0.798	中	1969(+)↑	0.777	中	1972(+)↑	0.782	中	1967(+)↑	0.783	中	1969(+)↑
全年	0.646	无	—	0.736	中	2019(+)↓	0.658	弱	2019(+)↓	0.616	无	—

主,变异方向与河源站保持一致。博罗站变异月份最少,共有7个月份(1—4、8、11、12月)发生变异,变异程度以中变异和弱变异为主,变异方向与岭下站保持一致。

从变异程度的定量统计来看,上、中游站点(龙川、河源、岭下)中变异比例分别为50%、67%和50%,而下游博罗站中变异比例仅为33%,以弱变异为主。这表明上、中游地区受水库群调蓄等人类活动影响更为显著,径流过程受到相对更强的干扰;下游地区由于区间汇流的调节作用,变异强度明显减弱,反映出流域对径流变化的缓冲能力。

在年内分配方面,枯水期(11月至次年4月)各站点普遍呈现跳跃向上的变异特征,表明枯季径流量显著增加;丰水期(5—9月)则以跳跃向下为主,尤其在5、8和9月表现最为突出,径流量明显削减。年际变化方面,河源站和岭下站的全年径流序列均发生跳跃向下变异,变异点均为2019年,表明近年来年径流量呈现减少趋势;而龙川站与博罗站的全年序列未检测到显著变异,径流变化相对平稳。

根据表2的径流序列阶段性变化率及统计显著性结果,东江流域各站点径流在变异年前后呈现显著的阶段性差异。枯水期(11月至次年4月)各站点径流普遍跳跃上升,变化率介于36.7%~92.8%之间,且多数月份 $p<0.01$,统计显著性良好,表明水库群枯期补水调度对枯季径流产生了显著的增量效应。丰水期(5—8月)径流多呈跳跃下降,变化率介于-20.9%~-41.0%,其中5月、8月 p 值多小于0.05,反映水库削峰及干旱调控的叠加影响,6月、7月部分站点 p 值略高于0.05,可能与样本量或降雨年际波动有关。年径流序列仅河源站与岭下站检测到变异,变化率均为-22.6%,但 $p>0.05$,统计证据相对较弱。

3.2 降水序列变异诊断结果

根据东江流域龙川、河源、岭下、博罗4个控制断面以上面雨量序列的水文变异诊断结果,各断面在不同月份表现出一定程度的变异特征。

5月份的面降雨变异最为突出,4个断面在该月份均检测到中变异,都呈跳跃向下变异,且变异年

表2 径流序列阶段性变化率及统计显著性
Tab. 2 Change rates and statistical significance before and after runoff alteration

时间序列	龙川			河源			岭下			博罗		
	变异年份	变化率(%)	p值	变异年份	变化率(%)	p值	变异年份	变化率(%)	p值	变异年份	变化率(%)	p值
1月	1972	89.1	0	1974	81.4	0	1968	84.5	0	1971	78.6	0
2月	1973	46.6	0.003 9	1973	44.6	0.000 1	1973	44.3	0.000 7	1973	40.7	0.001 5
3月	1979	69.6	0.006 7	1973	52.9	0.002 9	—	—	—	1981	55.7	0.000 9
4月	1972	51.7	0.017 1	1972	40.7	0.009 7	1972	45.5	0.011 6	1972	44.4	0.026 5
5月	2019	-36.8	0.070 4	2016	-28.5	0.020 7	2016	-27	0.046 7	—	—	—
6月	1968	-28.8	0.1641	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7月	—	—	—	2008	-20.9	0.092 1	—	—	—	—	—	—
8月	2008	-23.9	0.049 3	2008	-32.6	0.002 2	2008	-25	0.013 7	2019	-41	0.031 5
9月	—	—	—	1961	-13.3	0.943 8	—	—	—	—	—	—
10月	—	—	—	1973	—	—	—	—	—	—	—	—
11月	1973	55.5	0.000 5	1972	36.7	0.002 4	1959	81.7	0.045 4	1959	57.2	0.113 5
12月	1969	92.8	0	2019	60.4	0.000 1	1967	62.8	0.000 4	1969	59.3	0.000 1
全年	—	—	—	1973	-22.6	0.123 6	2019	-22.6	0.126 7	—	—	—

份均为1989年,表现出全流域具有一致性的下降特征。这一现象说明在1989年前后,东江流域春末降雨发生了较为明显的转折,降雨量整体下降,且这种变化在空间上具有较好的同步性,覆盖了从上游至下游的整个流域范围。

6月份同样在4个断面中均检测到变异,但变异程度在空间上存在一定差异。龙川、河源断面为中变异,岭下、博罗断面为弱变异,变异方向均为向下,变异年份集中在1968年。

10月也是变异最为显著的月份之一,四个断面在该月份均表现为中变异,均呈跳跃向下变异,变异年份均为1978年。这一结果反映出秋季降雨在1978年前后发生了较为统一的减少变化。

相比之下,枯水期月份仅在龙川以上断面的2、3、11月,河源以上断面的2月出现了弱变异,其余月份如1、12月等均未检测到显著变异,说明枯水期降雨变化不明显,整体保持相对稳定。全年面雨量序列在所有断面均未发生显著变异,表明年降雨总量的一致性较好,降雨变化主要体现在部分月份的阶

段性减少上,而非全年总量的显著改变。

总体来看,东江流域面雨量的演变趋势表现为春末、夏初及秋季降雨的明显减少,且这种减少在空间上具有较好的同步性,尤以5、6、10月最为显著。其中5和10月的变化在4个断面中均表现为中变异,变异年份一致,反映出流域尺度上降雨变化的整体性特征;6月份的变化则呈现出上游强于下游的空间分异特点,见表3。

3.3 径流演变归因分析

基于对东江流域四个代表站点的径流演变归因分析(图4),人类活动对径流变异的贡献率在枯水期普遍超过90%,在丰水期部分月份可达80%以上,远高于气候变化贡献率,定量表明人类活动是驱动径流演变的主导因素。从年内各月份的具体数据来看,人类活动对径流变异的贡献占据绝对主导地位。在枯水期(11月至次年4月),人类活动对径流变异的影响极为显著,几乎完全主导了径流的变化过程。例如,龙川站1、2、11、12月径流变异的人类活动贡献率分别为96.89%、100.17%、93.89%

表3 各站点断面以上面雨量序列变异诊断结果
Tab. 3 Results of hydrological alteration diagnosis for areal precipitation upstream of each station

时间序 列	龙川以上			河源以上			岭下以上			博罗以上		
	Hurst系 数	变异 程度	诊断结论	Hurst系 数	变异 程度	诊断结论	Hurst系 数	变异 程度	诊断结论	Hurst系 数	变异 程度	诊断结论
1月	0.543	无	—	0.547	无	—	0.559	无	—	0.563	无	—
2月	0.686	弱	1959(+) $\downarrow$	0.659	弱	1959(+) $\downarrow$	0.652	无	—	0.642	无	—
3月	0.679	弱	1977(+) $\uparrow$	0.634	无	—	0.627	无	—	0.63	无	—
4月	0.684	无	—	0.695	无	—	0.695	无	—	0.694	无	—
5月	0.717	中	1989(+) $\downarrow$	0.725	中	1989(+) $\downarrow$	0.725	中	1989(+) $\downarrow$	0.711	中	1989(+) $\downarrow$
6月	0.708	中	1968(+) $\downarrow$	0.702	中	1968(+) $\downarrow$	0.696	弱	1968(+) $\downarrow$	0.688	弱	1968(+) $\downarrow$
7月	0.674	无	—	0.649	无	—	0.641	无	—	0.637	无	—
8月	0.551	无	—	0.587	无	—	0.616	无	—	0.627	无	—
9月	0.584	无	—	0.597	无	—	0.597	无	—	0.611	无	—
10月	0.704	中	1978(+) $\downarrow$	0.699	中	1978(+) $\downarrow$	0.697	中	1978(+) $\downarrow$	0.702	中	1978(+) $\downarrow$
11月	0.659	弱	2005(+) $\uparrow$	0.653	无	—	0.643	无	—	0.631	无	—
12月	0.568	无	—	0.582	无	—	0.592	无	—	0.603	无	—
全年	0.548	无	—	0.543	无	—	0.522	无	—	0.5	无	—

和93.86%，均超93%；河源站1、2、11、12月（分别为98.49%、102.63%、96.97%、100.01%）均超96%；岭下站1、2、11、12月（分别为92.02%、103.69%、105.76%、100.26%）均超92%；博罗站1、2、11、12月（分别为96.14%、106.33%、108.77%、96.7%）均超96%。部分丰水期月份也检测到了径流变异，但气候变化的贡献相对有限，如河源站5、7、8月气候变化贡献率分别仅有17.33%、19.1%及4.54%。各站点在3、4月份的气候变化对径流变异的贡献率显著高于其他月份，例如龙川站3、4月气候变化贡献率分别为66.42%、52.73%，岭下站4月为50.39%，博罗站4月为55.82%。此外，部分月份如河源站6月、岭下站11月、博罗站11月等，气候变化贡献率出现负值，分别为-17.83%、-5.76%、-8.77%，这说明在这些时段内，若无气候变化的微弱正向或负向干扰，人类活动对径流减少或增加的驱动作用将更为纯粹和强烈。综上所述，无论是枯水期还是丰水期，人类活动均为东江流域径流演变的核心影响因素，其对大部分变异月份的贡献率普遍维持在90%

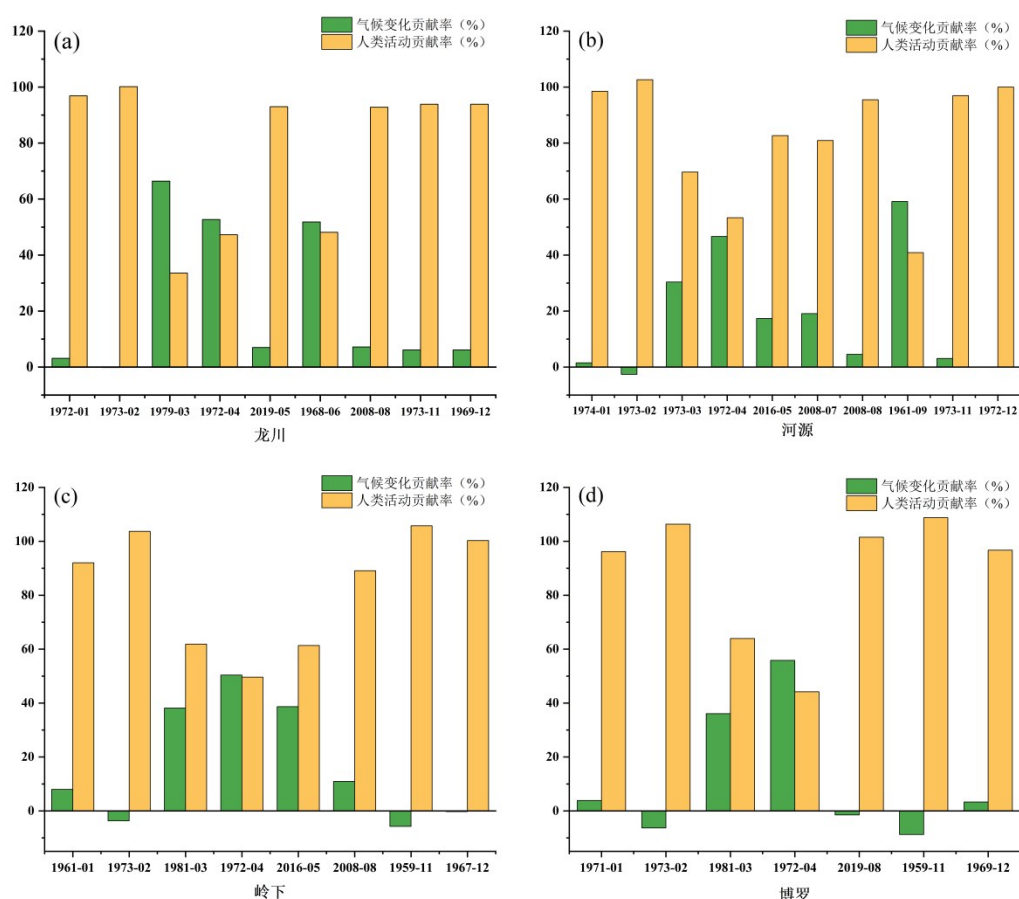
左右或以上，远超气候变化所产生的水文效应。

4 讨论

4.1 水库群调度与流域管理对径流变异的调控效应

东江流域径流序列的变异诊断结果表明，各站点径流在枯水期普遍呈现跳跃上升变异，而在丰水期则多表现为跳跃下降变异，变异年份主要集中在1968—1974年、2008、2019年等时段。归因分析进一步揭示，人类活动是驱动上述变异的主导因素，多数变异月份的人类活动贡献率超过90%。

从水库群建设历程来看，新丰江、枫树坝和白盆珠三大水库总集雨面积11 740 km²，占东江流域总面积的33.2%，在防洪、供水、生态保护方面发挥着关键作用^[14]。新丰江水库于1958年动工、1962年正式运行，枫树坝水库于1970年动工、1973年蓄水，白盆珠水库于1973年动工、1985年蓄水^[12]。水库在枯水期加大下泄流量以保障下游供水及生态需水，导致枯季径流显著增加；而在丰水期，水库通过蓄



注:图中部分月份人类活动贡献率超过100%或出现负值,是由于气候变化与人类活动对径流变化的作用方向相反,在基于降雨-径流关系曲线的插值计算中,二者贡献率相互抵消或叠加所致。例如当气候变化贡献为负(即有利于径流减少)而人类活动贡献为正(有利于径流增加)时,人类活动贡献率可能超过100%;反之则出现负值。

图4 发生变异的径流序列归因分析结果

Fig. 4 Attribution analysis of altered runoff series

洪削峰减少下泄,致使径流量明显削减,这种“削峰补枯”的调控效应使得变异方向在枯水期和丰水期出现了明显的不同。表1中龙川和河源站1—4、11、12月、岭下和博罗站1、2、4、12月等枯水期月份的跳跃上升变异(变异点为1973年前后),与水库相继投入运行后枯水期补水的调度目标直接相关。这一判断得到了谢静红等^[19]研究的支持,他们指出东江流域洪水的变异并非由降雨变异导致,而是与枫树坝水库和新丰江水库的建设时间基本吻合。此外,赖天铨^[9]发现东江流域降水增加、蒸发减少也是导致径流量增加的重要原因;王斌^[13]则指出20世纪70年代前后东江流域降水存在显著的2~4 a周期变化,这可能是变异年份多集中在20世纪70年代前

后的另一原因。

涂新军等^[20-21]量化分解了东江径流年内分配特征的影响因素,结果表明水利工程水量调节对径流年内分配特征的影响贡献率约为-33.5%,新丰江、枫树坝和白盆珠三大水库的影响贡献率分别约为-21%、-10%和-2%,这一结论与本研究归因分析中枯水期径流跳跃上升、丰水期径流跳跃下降的结果相互印证。庄胜杰等^[22]的研究表明,水量调度实施后博罗断面枯水年流量达标率由42%提高到59%,龙川断面由86%提高到98%,在枯水期降雨来水相似条件下博罗断面平均流量由276 m³/s提高到387 m³/s。这些定量数据直接证明三大水库的枯期补水调度在缓解枯季干旱、保障下游供水方面发挥了实

质性作用。

在流域尺度上,气候变化的影响通常是宏观且趋于一致的,理论上应导致上、中、下游径流表现出相似的变异特征。然而,表1的变异诊断结果表明,东江干流上游和中游站点发生变异的月份数及其变异程度,均显著高于下游博罗站,呈现出沿程递减的趋势。归因结果显示,径流变异受人类活动影响显著高于气候因素,且东江流域的新丰江、枫树坝和白盆珠三大水库均集中在上游。因此,位于上游的龙川、河源、岭下等水文站受到的径流调节影响最为直接和强烈^[13],水文序列的一致性因此遭到系统性破坏,从而检测出更多月份的显著变异。相比之下,下游博罗站由于距离上游水库群较远,受其直接调控影响减弱,且能接收更多来自未调控支流的区间汇流,因而变异月份减少,变异程度多为弱变异。

人类活动对东江流域径流的影响不仅体现在水库调度上,还表现为下垫面条件的改变和流域综合管理。近年来流域水资源管理策略的调整,以及极端气候事件频发背景下的水库调度响应对径流序列产生了明显影响。2020—2021年,东江流域遭遇自1956年以来最严重的连续干旱^[15];此外,2019年12月修改发布的《广东省东江水量调度管理办法》确立了对三大水库联合调度机制,这种调度规则的微调可能在年尺度上表现为径流序列的突变。河源站和岭下站的全年径流序列在2019年发生了跳跃向下变异,反映出流域综合管理对径流过程的调控作用。

4.2 气候变化与ENSO对径流变异的调制作用

3、4月部分站点的径流变异的影响因素表现出不同于其他枯水月份的特征。归因分析结果显示,龙川站3、4月、岭下站4月气候变化贡献率超50%,博罗站4月达55.82%,显著高于其他枯水月份。这一现象与东江流域春汛期的气候背景密切相关,3、4月为华南前汛期开端,此时东亚季风开始活跃,降水变率较大^[23-25]。自然降雨的增多直接驱动径流量上升,导致气候变化(尤其是降水量)对径流变化的贡献率显著提升。另一方面,3—4月正值水库枯期

向汛期转换的过渡阶段,水利工程的径流调控力度相对有限,未能充分缓冲降水波动对径流的冲击。根据《广东省东江水量调度管理办法》,3月仍处于枯水期调度计划(10月1日至次年3月31日)的末期,水库以保障下游供水为主要目标,下泄流量相对稳定;4月则处于枯水期向汛期转换的过渡窗口,水库在保障防洪安全的前提下开始逐步蓄水,出库流量未进入“削峰”高强度阶段。这一过渡期内水库调蓄对径流过程的调控作用相对有限,难以有效平抑降水波动带来的径流变化。此外,3—4月正值春耕用水高峰期,农业灌溉用水量增加,对径流变化也产生了一定影响。东江流域作为粤港澳大湾区核心水源地,春灌用水需求在一定程度上加剧了径流的波动。上述自然与人为因素的综合效应,使得气候变化对同期径流的贡献率在3—4月显著高于其他枯水月份。

除人类活动外,厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)作为全球尺度最强的年际气候信号,对东江流域降水及径流过程也具有显著的调制作用。ENSO事件通过改变西太平洋副热带高压的位置和强度,影响东亚季风水汽输送,进而调控华南地区的降水时空分布^[13,17]。厄尔尼诺年,赤道东太平洋海温异常升高,华南春季降水往往偏多;而拉尼娜年,华南春季降水则普遍偏少^[16]。这种ENSO驱动的降水异常,直接传导至径流过程,导致径流出现相应的年际波动。20世纪70年代前后,东江流域降水存在显著的2~4 a周期变化,这一周期与ENSO事件的2~7 a准周期基本吻合^[13]。ENSO事件通过调节降水时空分布,对东江径流的年际变率产生了显著影响。王斌等^[13]的研究发现,1959—2018年,东江流域汛期降水以10.8 mm/10a的幅度减少,非汛期降水以6.5 mm/10 a幅度增加。表1中龙川站3月(1979年)、4月(1972年)以及博罗站4月(1972年)等变异年份,均处于20世纪70年代ENSO事件活跃期。1972—1973年发生了强厄尔尼诺事件,随后1973—1974年转为拉尼娜事件,这种ENSO的快速转换可能加剧了径流的年际变率,使径流序列在短期内出现显著变异。归因分析中龙川站3月气候变化贡献

率达66.42%、博罗站4月达55.82%,显著高于其他枯水月份,也从侧面印证了ENSO对春季径流的强烈影响。

岭下站11月、博罗站11月等月份的气候变化贡献率出现负值(分别为-5.76%、-8.77%)。从物理机制上分析,华南地区秋季降水呈减少趋势(表3中10月降水变异为向下跳跃),降水偏少使得天然径流补给不足,而水库为保障下游供水往往加大下泄,人类活动贡献表现为正向。两者方向相反,从而出现气候变化贡献率为负的计算结果。此外,负贡献率也可能与降雨-径流关系曲线外延插值带来的计算误差有关,但不会改变人类活动是径流变异主导因素的核心结论。

4.3 研究不足与展望

本文采用基于降雨-径流关系的归因分析方法,分别对各月份径流序列进行独立归因,隐含的假设是各月份径流仅与同月面雨量相关,未着重考虑前期径流或土壤湿度对后续月份的影响。这一简化处理主要基于以下两方面考虑:其一,东江流域地处湿润的华南地区,土壤有效厚度小^[26-27],前期土壤含水量对径流的影响相对较小,月尺度上径流对当月降水的响应较为迅速且直接;其二,本文的归因分析聚焦于径流序列的长期突变特征及其统计趋势,而非短期水文预报,采用同月降雨-径流关系进行归因在同类研究中已有广泛应用^[7,18]。因此,该简化处理在研究目的下具有合理性。

然而,月份径流之间的水文连续性确实存在。例如,春季(3—4月)径流量的增加会导致土壤湿度升高,进而可能影响5月份径流对降水的响应程度,使得归因结果中5月份的人类活动贡献率可能被略微高估或低估。从本文的结果来看(图4),5月份各站点径流下降变异的人类活动贡献率普遍在70%以上,远高于气候变化贡献率,即使考虑前期径流的微弱影响,也不改变“人类活动主导5月径流变异”的核心结论。对于归因结果中气候变化贡献率出现负值(如河源站6月、博罗站11月等)的月份,前期径流的影响可能使负值幅度略有调整,但不会改变其数值符号方向。总体而言,本文的简化处理

对主要结论的影响较小。

未来研究可进一步引入考虑前期影响的水文模型(如SWAT、VIC等),或采用月尺度水量平衡模型模拟前期土壤含水量对径流的影响,以更精细地分离气候变化与人类活动的贡献。此外,也可尝试构建多变量归因框架,将前期径流作为协变量纳入降雨-径流关系,以量化前期条件对归因结果的潜在影响。

综上所述,东江流域径流序列的变异是气候变化与人类活动共同作用的结果,但人类活动占据绝对主导地位。3、4月径流变异中气候变化贡献率显著升高,与华南前汛期降水变率大、ENSO事件影响显著密切相关。未来研究可进一步量化水库调蓄、植被变化与气候因子的交互作用,为流域水资源调控和适应气候变化提供更精细的科学依据。

5 结论

本文以东江干流4个水文站1956—2023年实测径流序列及相应断面以上面雨量序列为对象,采用水文变异诊断系统识别径流和降水序列的变异特征,并基于降雨-径流关系的归因方法定量分离气候变化与人类活动对径流变异的贡献率。系统揭示了东江流域径流情势的演变特征及其驱动机制。主要发现与管理启示如下:

a)径流变异具有显著年内分配特征,揭示了水库群调度对天然径流过程的重塑效应。枯水期呈跳跃上升趋势,变异点集中于1968—1974年,与三大水库相继运行后枯期补水调度基本吻合;丰水期呈跳跃下降趋势,变异点在2008、2019年更集中,反映水库削峰及干旱调控的叠加影响。年径流方面,河源站与岭下站于2019年均发生跳跃向下变异,进一步印证了流域综合管理对径流过程的系统性调控。调度实践中应关注水库群联合调度对径流年内分配的累积效应,尤其需警惕丰水期过度削峰可能导致的河道生态流量不足问题,建议建立动态调控阈值,兼顾防洪安全与生态保护。

b)降水变异集中在5、6、10月,各断面变异年份一致(1989年、1968年、1978年),均呈跳跃下降趋

势。这一同步性表明降水变异主要受大尺度气候模态控制,而非局地人类活动干扰。同时对比径流变异诊断结果这几个月份并未表现出与降水较好的同步性,表明降水作为背景因子,其对径流的效应远小于人类活动。鉴于上述降水变异特征,建议在制定中长期供水规划时,将降水减少趋势纳入风险情景,尤其是5-6月梅汛期和10月秋早期的来水不确定性增大,需提前预留水库调节库容。

c)归因分析表明,人类活动是驱动径流演变的主导因素,枯水期贡献率超90%,丰水期普遍超80%。3、4月气候变化贡献率显著升高,可能与华南ENSO事件对春季降水的强烈调制作用密切相关。本研究首次在东江流域明确了人类活动贡献率的季节差异——枯水期几乎完全由水库调度主导,丰水期虽仍以人类活动为主,但气候波动的影响不可忽视,尤其在春季ENSO敏感时段。基于此研究,建议在水资源调度管理中加强以下方面的考虑:枯水期调度应优先保障供水安全,同时兼顾下游生态基流,可探索基于径流变异点的自适应补水规则;丰水期需强化气象-水文耦合预警,利用ENSO预测信号提前调整水库蓄泄计划,降低极端干旱或洪涝风险;春季(3—4月)应加强跨部门联合会商,将气候预测纳入实时调度决策,提高水资源调配的前瞻性。

综上,本研究系统揭示了东江流域径流变异的时空分布规律及其驱动机制,定量区分了自然与人为因素的相对作用,为流域水资源精细化调度提供了科学依据。建议后续管理中:①建立基于变异点识别的动态调度方案,实现水库群从“经验调度”向“机理-数据协同调度”升级;②将ENSO等气候因子纳入中长期来水预报模型,提升应对气候波动的韧性;③针对枯水期与丰水期的差异化驱动机制,分别制定补水与削峰的弹性策略。上述成果对粤港澳大湾区的水资源可持续利用具有重要决策支撑价值。

参考文献:

[1] The IPCC Sixth Assessment Report on Climate Change Impacts

- [J]. Wiley, 2022, 48(2): 629-633.
- [2] 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)
- [3] Gudmundsson L, Brunner I M, Döll P, et al. Past and future change in global river flows [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2025, 7(1): 1-17.
- [4] 胡彩霞, 王任超, 翁士创. 基于水文变异诊断系统的珠江区水资源时空变异分析[J]. 人民珠江, 2025, 46(11): 55-64.
Hu Caixia, Wang Renchao, Weng Shichuang. Spatio-temporal Variation Analysis of Water Resources in the Pearl River Region Based on Hydrological Variation Diagnosis System [J]. Pearl River, 2025, 46(11): 55-64.
- [5] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 85-91.
Xie Ping, Chen Guangcai, Lei Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 85-91. (in Chinese)
- [6] 何睿, 庞博, 张兰影. 基于水文变异诊断系统的黑河流域上中游径流序列变异[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1937-1942.
He Rui, Pang Bo, Zhang Lanying. Hydrological alteration diagnosis of runoff series in the upper and middle reaches of Heihe River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1937-1942. (in Chinese)
- [7] 许斌, 邹磊, 姚立强, 等. 长江中下游径流情势演变及其归因分析[J]. 人民长江, 2022, 53(4): 91-97.
Xu Bin, Zou Lei, Yao Liqiang, et al. Evolution and attribution analysis of runoff regime in middle and lower reaches of Changjiang River [J]. Yangtze River, 2022, 53(4): 91-97. (in Chinese)
- [8] 胡彩霞, 王任超, 赵江艳, 等. 基于变异分析的气候变化与水电工程水文水资源效应研究: 以东江龙川站为例[J]. 人民珠江, 2018, 39(3): 1-6.
Hu Caixia, Wang Renchao, Zhao Jiangyan, et al. Effects of the Climate Change and Hydropower Project on the Characteristics of the Hydrology and Water Resources Based on Variation Analysis—A Case Study on Longchun Hydrologic Station in Dongjiang River Basin [J]. Pearl River, 2018, 39(3): 1-6. (in Chinese)
- [9] 赖天程, 张强, 张正浩, 等. 人类活动与气候变化对东江流域径流变化贡献率定量分析[J]. 中山大学学报(自然科学版),

- 2016, 55(4):136-145.
- Lai Tianzeng, Zhang Qiang, Zhang Zhenghao, et al. Quantitative evaluations of fractional contribution of human activities and climate changes to the streamflow variations across the East River basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(4):136-145. (in Chinese)
- [10] 张珂璠, 王文婷, 杨阳. 基于Budyko假设的珠江流域年径流变化归因[J]. *水文*, 2025, 45(5):86-93.
- Zhang Yufan, Wang Wenting, Yang Yang. Attribution Analysis of Annual Runoff Changes in the Pearl River Basin Based on Budyko Hypothesis [J]. *Journal of China Hydrology*, 2025, 45(5):86-93. (in Chinese)
- [11] Wang X, Li H, Huang W, et al. Attribution Identification of Runoff Changes Based on the Budyko Elasticity Coefficient Method: A Case Study of the Middle and Upper Reaches of the Jinghe River in the Yellow River Basin [J]. *Atmosphere*, 2024, 16(1):6.
- [12] 张正浩, 张强, 邓晓宇, 等. 东江流域水利工程对流域地表水过程影响模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4):684-695.
- Zhang Zhenghao, Zhang Qiang, Deng Xiaoyu, et al. Hydrological Effects of Water Reservoirs on Fluvial Hydrological Processes for the East River Basin Using Statistical Modeling Technique [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4):684-695. (in Chinese)
- [13] 王斌, 马志鹏, 刘晋, 等. 东江流域降水时空变化及其与ENSO事件的响应关系[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(1):6-9.
- Wang Bin, Ma Zhipeng, Liu Jin, et al. Study on Spatial-temporal Characteristics of Precipitation and Response Relationship of ENSO Events in Dongjiang River Basin [J]. *Water Resources and Power*. 2021, 39(1):6-9. (in Chinese)
- [14] 宋利祥, 刘宇, 何用, 等. 东江流域控制性水利工程联合调度策略与机制探讨[J]. *中国水利*, 2024(4):34-41.
- Song Lixiang, Liu Yu, He Yong, et al. Research on the Joint Dispatching Strategy and Mechanism of Controlled Water Engineering in the Dongjiang River Basin [J]. *China Water Resources*, 2024(4):34-41. (in Chinese)
- [15] 成忠理, 陈颖毅, 郑亚峰, 等. 广东省东江流域2020—2021年抗旱管理实践与思考[J]. *中国防汛抗旱*, 2025, 35(4):32-35.
- Cheng Zhongli, Chen Yingyi, Zheng Yafeng, et al. Practice and reflection on drought fighting management in the Dongjiang River Basin of Guangdong Province from 2020 to 2021 [J]. *China Flood & Drought Management*, 2025, 35(4):32-35. (in Chinese)
- [16] 魏迎光, 梁萍, 任广成, 等. 北太平洋海温与华南东部过渡季节(2—3月)降水的关系[J]. *海洋预报*, 2012, 29(2):59-63.
- Wei Yingguang, Liang Ping, Ren Guangcheng, et al. Relationship between sea surface temperature in the northern Pacific and rainfall in the east part of Southern China in February-March [J]. *Marine Forecasts*, 2012, 29(2):59-63. (in Chinese)
- [17] 李宏毅, 林朝晖, 宋燕, 等. 我国华南3月份降水异常的可能影响因子分析[J]. *大气科学*, 2013, 37(3):719-730.
- Li Hongyi, Lin Zhaohui, Song Yan, et al. Analysis of the Possible Factors that Influence March Precipitation Anomalies over South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(3):719-730. (in Chinese)
- [18] 谢平, 刘媛, 杨桂莲, 等. 乌力吉木仁河三级区水资源变异及归因分析[J]. *水文*, 2012, 32(2):40-43, 39.
- Xie Ping, Liu Yuan, Yang Guilian, et al. Attribution Analysis of Water Resources Alteration in the Third Grade Wulijimurenhe [J]. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(2):40-43, 39. (in Chinese)
- [19] 谢静红, 谢平, 许斌, 等. 东江流域多尺度洪水序列变异分析[J]. *水资源研究*, 2012, 1(5):370-374.
- Xie Jinghong, Xie Ping, Xu Bin, et al. Analysis of Multi-Scale Flood Series Alteration in the East River Basin [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2012, 1(5):370-374. (in Chinese)
- [20] 涂新军, 陈晓宏, 张强, 等. 东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解[J]. *水科学进展*, 2012, 23(4):493-501.
- Tu Xinjun, Chen Xiaohong, Zhang Qiang. Streamflow annual distribution and its influencing factors in Dongjiang River, South China [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4):493-501. (in Chinese)
- [21] Tu X, Singh P V, Chen X, et al. Intra-annual Distribution of Streamflow and Individual Impacts of Climate Change and Human Activities in the Dongjiang River Basin, China [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(8):2677-2695.
- [22] 庄胜杰, 成忠理, 郑亚峰, 等. 水量调度实施对东江流域径流影响分析[J]. *人民珠江*, 2024, 45(11):14-23.
- Zhuang Shengjie, Cheng Zhongli, Zheng Yafeng, et al. Influence of Water Regulation on Runoff in Dongjiang River Basin [J]. *Pearl River*, 2024, 45(11):14-23. (in Chinese)
- [23] Hou R, Zhang W, Hu S, et al. Rapid Indian Ocean warming fuels more frequent extreme pre-flood season rainfall over southern China [J]. *National science review*, 2025, 12(10). DOI: 10.1093/nsr/nwaf298.
- [24] 陈剑飞, 刘会鹏, 黄明策, 等. 华南前汛期暴雨多寡的热动力差异分析[J]. *气象研究与应用*, 2025, 46(1):1-8.
- Chen Jianfei, Liu Huipeng, Huang Mingce, et al. Analysis of the thermodynamical differences in the rainstorm anomalies during

- the pre-flood season in South China[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2025, 46(1): 1-8. (in Chinese)
- [25] 陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇, 等. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30(4): 385-400.
- Chen Lijuan, Zhao Junhu, Gu Wei, et al. Advances of Research and Application on Major Rainy Seasons in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(4): 385-400. (in Chinese)
- [26] 黄日超, 陈喜, 孙一萌, 等. 流域土壤有效厚度水平衡验证及其对陆面水碳通量模拟的影响[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 807-816.
- Huang Richao, Chen Xi, Sun Yimeng, et al. Validation of watershed soil effective depth based on water balance and its effect on [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 807-816. (in Chinese)
- [27] Zhang Y, Wu T, Lei L, et al. Effects of parent material on soil hydraulic properties in subtropical hilly area of Southern China [J]. Catena, 2024. DOI: 10. 1016/j. catena. 2024. 108210.

Evolution of runoff regime in the Dongjiang River Basin and its attribution analysis

HU Caixia^{1,3,4}, DONG Xuan², WENG Shichuang^{3,4}, ZHAO Yujie^{3,4}

(1. Pearl River Hydrology and Water Resources Survey Center, Guangzhou 510610, China; 2. South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 3. Hydrology Bureau of Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510610, China; 4. Guangdong Provincial Observation and Research Station for Water Resources and Ecological Environment in Dongjiang River Basin, Huizhou 516100, China)

Abstract: Under the dual influences of global climate change and human activities, the runoff dynamics in the Dongjiang River Basin have undergone significant changes, posing new challenges to water resource security. Based on measured runoff sequences from 1956 to 2023 at four hydrological stations (Longchuan, Heyuan, Lingxia, and Boluo) along the main stream of the Dongjiang River, along with precipitation data above the gauging sections, this study employs a hydrological variability diagnostic system to identify the variability characteristics of runoff and precipitation. Using an attribution analysis method based on the rainfall-runoff relationship, the contributions of climate change and human activities to runoff variability were quantitatively separated. Results indicate that runoff variability exhibits distinct seasonal distribution patterns. During the dry season, runoff generally shows a jumping upward trend, with variability points concentrated between 1968 and 1974, aligning with the operational water replenishment scheduling of the Three Major Reservoirs (Xinfengjiang, Fengshuba, and Bai Puzhu) in the basin during the dry season. In contrast, runoff during the wet season mostly exhibits a jumping downward trend, with variability points concentrated in 2008 and 2019, reflecting the combined effects of reservoir flood regulation and drought control. For annual runoff sequences, the Heyuan and Lingxia stations experienced a jumping downward variability in 2019, with significant reductions in annual runoff, reflecting the regulatory role of comprehensive basin management on runoff processes. Precipitation variability primarily occurs in May, June, and October, with consistent variability years across all sections, all showing a jumping downward trend, while the annual pan-precipitation sequence did not exhibit significant variability. Human activities are the dominant driver of runoff evolution, with contribution rates exceeding 90% during the dry season and reaching over 80% in most months during the wet season. The contribution rate of climate change significantly increased in March and April, closely related to the high variability of the pre-monsoon rainfall in South China and the strong modulation effects of ENSO events. These findings reveal the spatiotemporal differentiation patterns and driving mechanisms of runoff evolution in the Dongjiang River Basin, providing a scientific basis for optimized water resource management, water supply security, and climate change adaptation in the region.

Keywords: runoff evolution; hydrological alteration diagnosis; climate change; human activities; rainfall-runoff relationship; attribution analysis; Dongjiang River Basin

(责任编辑:李燕珊)