

考虑水文变异的信江下游河道生态流量研究

刘渊博*,李明,王伟,姚普静,张瑞环

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要:【目的】探究水文变异对信江下游河道生态流量的影响,为变化环境下流域生态保护与水资源优化配置提供科学依据。【方法】基于信江下游梅港站 1954—2020 年径流序列,综合多种方法构建水文变异综合检验体系识别其变异点并划分变异期;采用逐月最小生态流量法和平水年逐月频率年内展布法分别推求各时期变异前、后河道内最小及适宜生态流量;最后结合改进的 Tennant 法对生态流量计算结果进行等级评价。【结果】①信江下游径流序列在 1992 年和 2003 年发生中度变异,据此将研究期划分为天然期、第一变异期和第二变异期 3 个阶段。②系统计算了各时期相应的天然、次天然、现状及不考虑水文变异四种条件下的最小与适宜生态流量,并基于改进的 Tennant 法评价结果,验证了计算结果的合理性与可靠性。③降雨突增提升了次天然状态下生态流量的生态效益,但极端水文事件频发和人类活动加剧共同导致现状河流生态系统面临一定生态退化风险。【结论】水文变异显著改变了信江下游生态流量过程,天然状态生态需水等级均达到“好”及以上,次天然状态下相对理想,建议优先考虑天然生态流量过程并参考次天然状态,为流域水资源可持续利用与生态保护提供决策参考。

关键词: 生态流量; 水文变异点; 综合变异检验; 改进 Tennant 法; 信江下游

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号:

收稿日期/Received: 2026-01-14

修回日期/Received: 2026-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(42202278); 江西省自然科学基金项目(20252BAC240688); 南方城市高浊水体水环境综合治理关键技术及应用研究(XBY-YBKJ-2023-06)。

第一作者:刘渊博(1990—),男,高级工程师,硕士研究生,从事水生态治理、修复、水处理方面的研究。E-mail: 512311760@qq.com。

河流流量及流态的动态变化是河流生态系统中诸多基本生态过程中的主要驱动力^[1,2]。然而,随着全球气候变化不确定性加剧及人类活动强度持续增强,许多河流水文时间序列呈现出不同程度的非一致性变化,即水文变异^[3]。此类变异不仅破坏了河流生态系统的稳定性,更对其生态功能与生物多样性产生深远影响,使得水资源管理面临前所未有的复杂挑战^[4]。因此,面对河流生态系统日益脆弱的现状,亟须在充分考虑水文变异的基础上,系统开展河道内生态流量计算研究,科学确定生态需水量,以有效保护河流生态系统,促进其实现可持续的良性循环。

据统计,迄今为止国内外已发展出逾 200 种生态流量估算方法,通常可归纳为水文学法、水力学法、整体分析法以及栖息地法 4 大类^[5]。其中,水文学法因所需水文资料易于获取、通用性强等优势,在实践中得到了广泛应用,代表性方法包括 Tennant 法、NGPRP 法、逐月最小生态径流法、年内展布法和逐月频率计算法及 7Q10 法等^[6-9]。然而,这些方法在估算生态流量时普遍忽视了水文序列的一致性。当水文序列发生变异后,其总体分布特征往往发生变化,河流生态系统实际的生态需水状态亦将随之发生相应改变^[10]。鉴于此,近年来越来越多的学者开始侧重于展开水文变异条件下的生态流量研究。在此类研究中,需首先识别水文变异点,并据此将水文序列划分为不同时段,再分别对不同时段的水文序列进行生态流量计算^[11]。刘剑宇等^[4]综合运用累积距平、有序聚类等 8 种方法诊断鄱阳湖流域水文变异情况,并基于 15 种概率分布函数推求出变异前、后的生态流量及其满足率。黄兵等^[12]采用 Mann-Kendall (M-K) 与滑动 t 检验法识别洞庭湖水文变异点,结合最优分布函数计算生态水位,证实了三峡等水利工程集中蓄水降低了其满足率。Zhang Yiming 等^[13]利用 M-K 检验识别了金沙江径流突变点,并结合 IHA 法量化其水文改变程度,再以改进月径流频率法估算了适宜生态流量。Chen Xue 等^[14]将滑动 t 检验法与 GRU 模型相耦合,重构了抚河下游变异后的径流序列,并利用 7Q 动态频率法计算了各时期的生态流量,以保障河流基本生态需求。何山等^[15]通过 M-K 检验确定长江源区径流序列变异点为 2003 年,并综合运用水文学方法、生态适宜性理论及流量时期法计算了变异前、后的生态流量。以上研究表明,综合多种变异点检验与生态流量计算方法,对流域径流变异前、后生态需水差异进行评估是必要且可行的。然而,目前尚未形成可综合量化多种水文变异检验结果的统一体系,识别结果易陷入片面;同时,在生态流量计算方法选用时,普遍忽视了变异期水文序列缩短、流域径流特征及生态保护目标等关键约束,致使计算结果难以贴合实际生态需求。

信江作为鄱阳湖流域五大支流之一,与饶河并

称赣东北的母亲河,也是江西水运“两横一纵”国家高等级航道网之一。近年来,在气候变化与人类活动双重影响下,信江流域水文情势发生显著改变,洪旱等极端水文事件频发,对区域社会经济的可持续发展构成了严峻挑战。段小宁等^[3]研究发现,尽管信江年均径流量整体呈微弱上升趋势,但进入 21 世纪后,因蓄水、引水工程的集中建设及河道过度采砂等人类活动加剧,下游梅港站控制断面河道水位显著下降。这凸显了在流域水资源开发利用强度不断提升的背景下,经济社会用水需求与河流生态流量保障之间的矛盾日益突出。王时梅等^[16]采用 Tennant 法、7Q10 法和最小月平均流量法,对信江下游生态流量进行计算及满足率分析,并建议将最小生态流量设定为年均径流量的 10%。然而,目前针对信江流域水文变异分析与生态流量估算的研究仍较为薄弱,尤其缺乏将二者有机结合的系统性研究。

鉴于此,本文以信江下游为研究对象,基于长序列实测径流资料,构建基于综合权重排序与多方法交叉验证的水文变异综合检验体系,识别变异点并划分变异期,选用平水年逐月最小生态流量法和逐月频率年内展布法分别量化变异前、后的最小和适宜生态流量过程,并基于信江特有的水文节律与鱼类产卵期特征改进生态流量评价标准,对比分析不同变异期河道生态流量状态差异,阐明水文变异对其影响,为信江流域的水资源优化配置与生态保护提供必要的管理参考与数据支撑。

1 区域概况与数据来源

1.1 信江概况

信江发源于浙赣边境的怀玉山南麓,其干流位于江西省东北部,流经上饶、鹰潭等城市后汇入鄱阳湖,是鄱阳湖水系五大河流之一。该河位于东经 116°31'~119°29'和北纬 27°33'~29°01',全长约 313 km,河道平均比降 2.6‰,流域总面积达 1.76 万 km²。流域地势东南高、西北低,上游为侵蚀山地,中下游以丘陵、平原为主,间布河谷平原。该流域属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 18℃,气候温和,降水充沛,多年均降雨量为 1 845 mm,且年内分配不均,多集中于春夏两季。目前,流域内已建成七一、界牌、七星、大坳水库以及信州、伦潭水利枢纽等主要水利工程,未来规划将进一步推进水库扩容、梯级航运开发及多项航电枢纽优化工程,全面提升流域水资源调控能力和综合开发水平。信江流域水系概况及主要水文站和水利工程分布见图 1。

1.2 数据来源

信江干流自上游至下游依次有上饶站、弋阳站和梅港站等水文监测站(见图 1),其中位于信江下游的梅港水文站,控制断面集水面积约占信江全

流域面积的 88.3%，面积约 1.55 万 km²，是该河汇入鄱阳湖的关键控制断面。因此，本文径流数据采用梅港水文站 1954—2020 年间共 67 年的实测日径流数据，其由江西省上饶水文局提供。流域内同期降雨量及蒸发量等气象站数据来源于中国气象局 (<http://data.cma.cn/>)。

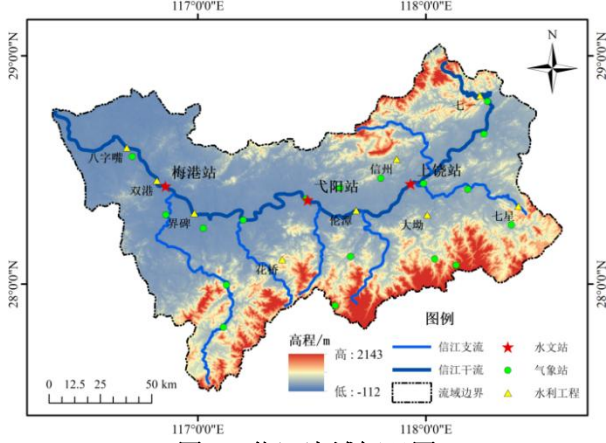


图 1 信江流域概况图

Fig.1 Overview map of the Xinjiang River Basin

2 研究方法

2.1 水文变异综合检验

为克服单一水文变异点检验方法所固有的局限性，提高检验结果的可靠性，本文选取了在水文突变研究领域广泛应用的 8 种方法，构建了一套水文变异综合检验体系^[11]，以此进行水文变异点综合识别，具体实施步骤如下：

1) 运用 R/S 分析法计算 Hurst 系数^[4]，以此初步检验水文变异程度。

2) 采用 M-K、累积距平、滑动 t 、滑动秩和、有序聚类、Cramer 和 Yamamoto 法等 7 种方法^[17-19]，进行变异点综合检验。

3) 将检测出的变异点在各种方法中按其显著水平从高到低排序，并标注序号。

4) 对于每一个变异点 d_i ，假设共有 m 种方法检测出 d_i ，其中在第 j 种方法中 d_i 的排序序号记为 $R(d_{ij})$ ，则可采用式 (1) 计算 d_i 在所有检测出其的方法中排序序号均值 $\bar{R}(d_i)$ 。

$$\bar{R}(d_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R(d_{ij}) \quad (1)$$

式中： i 为所有方法共检测出变异点的个数，其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

5) 将 $\bar{R}(d_i)$ 与其所占权重 ω_i 相乘，得到该变异点的综合序号，其中 $\omega_i = m/7$ 。

6) 根据所有变异点的综合序号从小到大进行最终排序，排序越靠前说明其变异特征越显著，据此确定最终变异点。

2.2 生态流量计算方法

2.2.1 平水年逐月最小生态流量法

最小生态流量是指为保障河流生态系统结构与功能健康所必需的最低流量过程，常被作为评价河流生态状况的关键流量阈值指标^[20]。NGPRP 法^[21]充分考虑了“丰、平、枯”不同水文年型之间的差异，以平水年组中各月 90% 保证率对应的径流量作为最小生态流量。该方法由于涉及年型划分与保证率选择，对径流序列的长度要求较高。相比之下，逐月最小生态径流法^[22]以各月天然径流的最小值为基准，逐月确定相应的最小生态流量，进而得到全年的最小生态径流过程。然而，该方法容易受到极端枯水年份的干扰，可能导致所设定的流量值偏低，无法充分保障水生生物的基本需求。鉴于本研究中水文变异期的划分而导致单一时期水文序列长度显著缩短的情况，并结合水生生物保护的实际情况，本文选择采用更适用于水文变异下的平水年逐月最小生态流量法^[7]计算水文变异下的最小生态流量。具体步骤如下：首先，对逐日径流量数据进行统计分析，依据年均径流量距平百分数划分各时期平水年组，即 $|(Q_{b,n} - \bar{Q}_b) / \bar{Q}_b| \leq 10\%$ ，其中 b 代表变异期， n 代表年份， $Q_{b,n}$ 和 $\bar{Q}_b$ 分别为第 b 变异期的第 n 年径流量和多年平均径流量；随后，分别提取各平水年组年内各月的平均流量序列，记为 Q_m ，并取其最小值 $Q_{\min,m} = \min(Q_{n,m})$ 作为该月的最小生态流量，其中 m 代表月份，最终构建出各时期全年最小生态径流过程。

2.2.2 逐月频率年内展布法

适宜生态流量，作为与河流生态环境适配度最佳的径流过程，是评估河流生态健康状态的另一项关键指标^[23]。逐月频率年内展布法^[7]是将年内展布法^[8]和逐月频率计算法^[22]进行有机融合并加以扩展，能够更系统地反映同一时段内河流的整体径流动态及其季节变化规律。该方法首先对长时间序列的天然月均径流数据进行频率分析；然后，依据不同季节生态需水特征，设定差异化的保证率标准：夏季（6—8 月）是信江流域鱼类产卵育肥关键期，需保障较高的流量，故取较低的 50% 保证率以匹配产卵期所需的较优流量条件；春秋两季（3—5 月、9—11 月）取 75% 保证率，可兼顾生态需水保障与水资源合理利用；冬季（12 月至次年 2 月）生态需水相对较低，采用 80% 的高保证率以保障枯季河流基本生态功能与生态系统稳定性^[24]。基于各季节在对应保证率下的径流量，进一步计算相同季节与同一保证率下的月径流量均值比率，并以该保证率所对应的多年月均径流变化为参照，推求河道的适宜生态径流过程。其计算公式如下：

$$Q_{s,m} = \alpha_p \bar{Q}_m \quad (2)$$

式中： $Q_{s,m}$ 为第 m 月（ m 代表月份序号）的适宜生态流量； $\bar{Q}_m$ 为第 m 月的多年月均径流量平均值； α_p 为同一季节内某一设计保证率 p （ p 分别取 50%、75%和 80%）所对应月径流量均值和该季节多年月均径流量均值的比值。

2.2.3 改进的 Tennant 法

Tennant 法^[16]作为生态流量研究中应用最为广泛的水文学方法，以多年平均流量百分数为基础，设定了 8 种等级的河流生态流量推荐基流标准。同时，结合水生生物的生命周期特征，将全年划分为鱼类产卵育肥期（4—9 月）与一般需水期（当年 10 月至次年 3 月），从宏观层面为河流生态需水的合理配置提供依据。然而，传统 Tennant 法未能充分考量年内河流径流丰枯变化、水生植物生长节律及其他水生生物活动强度的季节性差异，更缺乏与流域地理气候、生态环境特性的融合，难以精准匹配实际生态需水规律^[25]。

为使 Tennant 法评价标准更符合信江特有的地理气候、水文节律与生态特性，本文首先基于梅港站径流资料统计，将原方法中的时段重新划分为 3 个时间段：丰水期（4—6 月），该时段径流量占比超全年 50%，远高于其他时段，且与信江主要经济鱼类的产卵高峰期完全吻合；平水期（2—3 月、7—8 月），径流相对平稳，处于产卵过渡期与汛末落水期，水生生物活动强度适中；枯水期（9 月至次年 1 月），为年内枯水时段，径流显著减少，生态需水保障压力最大。并在此基础上，结合信江下游河道生态环境现状与各时期水生生物保护目标，对原方法中部分推荐基流标准进行适当调整（详见表 1）：为强化鱼类产卵期高流量保障，将丰水期“最佳范围”等级下限由 60%提高至 65%、“差或最差”等级下限由 10%提高至 15%；考虑到南方河流枯水期仍需维持一定基础流量，以保障底栖动物、藻类等类群的生存与栖息地稳定，故将其“一般流量”等级下限由原 10%上调至 15%；平水期则综合原方法丰、枯水期推荐标准进行折中修订，以更好衔接两个时期修订后的推荐基流标准。最后，依据改进后的标准对生态流量计算结果所对应的河道生态状态等级进行评价。

表 1 改进 Tennant 法的生态流量标准

Tab 1 Ecological flow criteria based on the modified Tennant method

河道流量 状态	推荐基流标准（占多年平均流量的百分比/%）		
	丰水期	平水期	枯水期
最大	200	200	200
最佳范围	65—100	60—100	60—100
极好	60	50	40
非常好	50	40	30
好	40	30	20
一般	30	20	15

差或最差	15	10	10
极差	0—10	0—10	0—10

3 结果与分析

3.1 水文变异点综合识别

运用 Hurst 系数法对信江下游梅港水文站的径流序列进行初步变异检验，得到梅港站的 Hurst 系数值为 0.713 5。结合变异程度分级标准^[26]，该径流序列具有一定的可持续性，属于中度变异水平。为进一步识别变异点，分别采用 M-K、累积距平、滑动 T、滑动秩和、有序聚类、Cramer 和 Yamamoto 法等 7 种突变检验方法进行深入识别，部分检验结果如图 2 所示。其中，M-K 检验结果（图 2（a））显示，梅港断面的径流序列可能在 1983 年、2003 年、2005 年、2007 年和 2008 年前后发生突变；在滑动 T 检验（图 2（b））中，设置子区间为 5 年，结果显示共有 1978 年、2003 年和 2004 年 3 处的 T 统计量超过了 0.05 显著水平的临界值，且变异程度 2003 年 > 1978 年 > 2004 年；此外，有序聚类法和 Cramer 法的变异检验结果（图 2（c）、（d））均表明，信江下游径流序列可能在 1992 年前后发生明显突变。

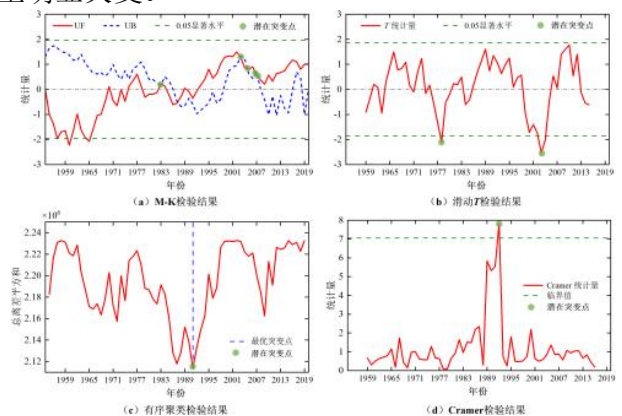


图 2 梅港水文站径流序列变异点检验部分结果
Fig.2 Partial results of the change-point detection test for the runoff series at Meigang Station

鉴于单一方法在不同流域中的适用性存在局限，且其检验结果可能存在片面性或误差，本研究构建了基于上述多种突变检验法检验结果的水文变异综合检验体系，通过计算各潜在变异点的综合权重与综合序号进行综合检验及排序，具体结果见表 2。由此可知，1992 年和 2003 年均被多种方法共同检出，综合序号均为 2.33，显著领先于其他潜在变异点，说明其变异特征最为突出；其他变异点大多仅通过单一方法的显著性检验，综合序号偏大，仅能反映径流序列的局部波动或短期突变，不具备主导性变异特征。因此，最终确定信江下游梅港站径流序列的突变年为 1992 年和 2003 年。值得注意的是，信江流域分别于 1992 年和 2003 年建成并投入运行界牌水库和大坳水库，其总库容量分别达 1.86 亿 m^3 和 2.76 亿

m³，水库的调蓄作用势必将显著改变径流序列，与综合识别出的变异年份高度吻合，进一步验证了检验结果的可靠性。

表2 梅港水文站径流序列变异点综合检验结果
Tab 2 Comprehensive change-point detection results for the runoff series at Meigang Station

可能变异点	序号均值	检验方法	综合权重	综合序号	最终变异点
1992 年	1.00	有序聚类、Cramer、Yamamoto	0.43	2.33	1992 年和 2003 年
2003 年	1.00	M-K、滑动 T、滑动秩和	0.43	2.33	
1991 年	1.00	累积距平	0.14	7.00	
2004 年	2.50	滑动 T、滑动秩和	0.29	8.75	
1987 年	4.00	累积距平	0.29	14.00	
1978 年	2.00	滑动 T	0.14	14.00	
2005 年	2.00	M-K	0.14	14.00	
2007 年	3.00	M-K	0.14	21.00	
2008 年	4.00	M-K	0.14	28.00	
1983 年	5.00	M-K	0.14	35.00	

根据石建军等^[27]研究成果，并结合上述确定的水文变异年，将信江下游梅港站 1954—2020 年径流水文序列划分为 3 个时期：1954—1991 年为天然期；1992—2002 年为第一变异期，此时人类干扰较弱，即次天然状态；2003—2020 年为第二变异期，人类干扰显著增强，即现状条件。下文将分别推求这 3 种状态下对应的天然、次天然和现状生态流量。此外，为对比水文变异对生态流量计算的影响，增设不考虑水文变异条件，即直接采用 1954—2020 年全序列径流数据统一计算生态流量，该条件未识别变异点、未进行水文分期，仅作为未考虑非一致性的对照情景。

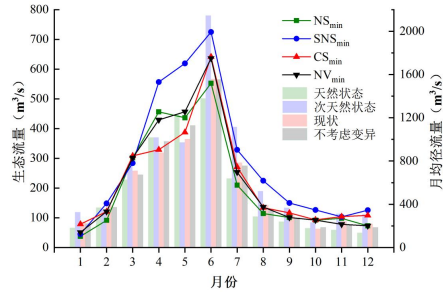
3.2 生态流量计算结果

为明确呈现生态径流在各条件下的变化特征，本文分别推求了天然状态、次天然状态、现状以及不考虑水文变异的四种条件下的最小生态流量与适宜生态流量。各条件对应的最小生态流量依次定义为 NS_{min}、SNS_{min}、CS_{min}、NV_{min}，适宜生态流量则相应表示为 NS_{suit}、SNS_{suit}、CS_{suit}、NV_{suit}。

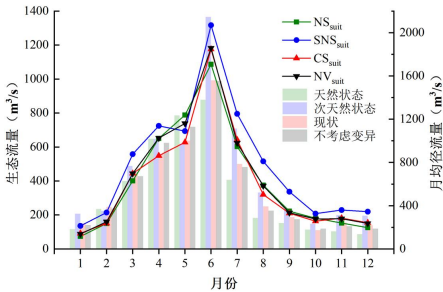
3.2.1 最小生态流量结果

基于平水年逐月最小生态流量法，计算得到信江下游梅港站不同状态条件下的最小生态流量过程线，如图 3（a）所示。天然状态下最小生态流量呈现“先升后降，再升再降”趋势，2—4 月升速较快，6—7 月需水量则骤降，需水高峰期出现在 4 月（456.13 m³/s）和 6 月（552.53 m³/s），而在枯水期各月生态需水量普遍较低，其过程主要由

天然水文节律驱动。次天然状态下最小生态流量呈先升后降的单峰型变化，需水高峰期同样出现在 6 月，达到 724.90 m³/s，并且整体上各月的最小生态流量均高于其他状态下的相应流量，尤其是在丰水期，这与第一变异期流域降雨显著增加、径流整体抬升直接相关。现状条件下最小生态流量在 2—3 月升速较快，随后在 3—5 月增速有所放缓，之后再次加快，并于 6 月达到高峰期，随后逐渐下降，总体趋势与天然最小生态流量接近，则反映出第二变异期人类活动对流域径流的调节效应增强。不考虑水文变异影响的最小生态流量除在 4—5 月略高于现状外，其余月份则与现状最小生态流量十分接近。总体而言，梅港站同月最小生态流量以次天然状态为最高，天然状态、现状以及不考虑变异条件下的最小生态需水在丰水期呈现一定差异，而其余月份则较为一致。



(a) 梅港断面最小生态流量



(b) 梅港断面适宜生态流量

图3 生态流量过程

Fig.3 Ecological flow hydrograph

3.2.2 适宜生态流量结果

以变异年为分界点，采用逐月频率年内展布法分析了信江下游梅港站水文变异前后各状态的适宜生态流量。由图 3（b）可知，适宜生态流量的整体变化趋势在天然状态、次天然状态、现状和考虑变异 4 种条件下基本相似。其中，天然状态下 1—6 月的适宜生态流量呈逐月递增，并于 6 月达到高峰值 1 061.88 m³/s，随后开始逐月下降，其整体过程与流域天然水文节律高度同步。次天然状态下适宜生态流量整体过程优于其他 3 种状态，表现出更优的水文条件，这与该时期降雨增多、径流条件整体改善密切相关。但在 5 月受径流影响，流量出现短暂回落，需水量在 6 月高峰期达到 1 292.88 m³/s。此外，适宜生态流量在现状条件下整体呈现出先升后降的单峰型变化特征，与天然状态和不考虑水文变异影响的径流趋势较为接近。然而，在丰

水期三者之间仍显现出一定的差异性，如 4—5 月适宜生态流量值的表现天然状态>不考虑变异影响>现状，而在 6 月高峰期则表现为不考虑变异影响>现状>天然状态，体现了水库调蓄等人类活动对径流年内分配过程的调节效应。整体上看，梅港站在四种不同状态下所呈现出的适宜生态流量变化过程具有高度的相似性，并展现出明显的季节性特征，其中丰水期流量变化速率较快，平水期次之，枯水期则趋于稳定。

综合分析信江下游最小生态流量与适宜生态流量变化情况，发现两者在相同状态条件下总体变化趋势基本一致。具体而言，最小生态流量与适宜生态流量数值在 3—8 月差异较明显，而在 12 月至次年 2 月期间则较为接近。从年内分布来看，除 4—6 月丰水期因生态需水量较大导致流量较大外，其余月份的生态流量均维持在相对稳定的状态。此外，最小和适宜生态流量过程的下限均表现出较好的稳定性，大致分别维持在 40 m³/s 和 60 m³/s 以上。

3.3 生态流量评价

对比天然状态下最小生态流量占多年平均流量的百分比（表 3），梅港站在丰水期（4—6 月）的次天然状态和不考虑变异的最小生态流量占比分别减少 1.77% 和 2.05%，而在现状条件下占比则增加了 4.39%；在平水期（2—3 月和 7—8 月）次天然状态、现状和不考虑变异条件下三者均下降，

降幅分别为 0.37%、1.92% 和 1.06%；而在枯水期（9 月至次年 11 月）则分别增加 8.06%、减少 1.19% 和增加 6.20%。基于改进 Tennant 法的评价结果表明，在丰水期天然状态和现状的最小生态流量均达到“好”的河道流量状态等级，次天然和不考虑变异则为“一般”等级；平水期 4 种状态的最小生态流量均达到“好”等级，而枯水期则均能达到“非常好”或“极好”状态等级，可见整体上全年河道流量状态呈现枯水期最优，平水期次之，丰水期相对较差的特征，这主要与生态需水标准随水文情势由枯至丰递增，以及径流波动性同步增强有关。

梅港站的适宜生态流量占多年平均流量的百分比在丰水期次天然状态、现状和不考虑变异条件下与天然状态下适宜生态流量占比相比，均呈现不同程度的下降，降幅分别为 0.75%、3.69% 和 2.00%，可见受丰水期径流稳定性下降影响，各状态下适宜生态流量的保障难度均有所增加；而在平水期和枯水期，次天然状态和现状的适宜生态流量均呈增加，增幅分别为 3.83% 和 1.23%、7.10% 和 0.80%；但不考虑变异条件下的适宜生态流量在平水期和枯水期均呈显著下降，降幅分别达到 6.09% 和 6.18%。从改进 Tennant 法评价结果来看，除丰水期现状和枯水期不考虑变异下的河道流量状态等级为“极好”外，其余条件下的适宜生态流量均能达到“最佳”等级。

表 3 梅港水文站断面改进 Tennant 评价结果

Tab 3 Evaluation results using the modified Tennant method at the cross-section of the Meigang Hydrological Station

类型	径流条件	占多年平均流量的百分比/%			改进 Tennant 法评价结果		
		丰水期	平水期	枯水期	丰水期	平水期	枯水期
最小生态流量	天然状态	41.58	37.73	36.88	好	好	非常好
	次天然状态	39.81	37.36	44.94	一般	好	极好
	现状	45.97	35.81	35.69	好	好	非常好
	不考虑变异	39.53	36.67	43.08	一般	好	极好
适宜生态流量	天然状态	68.26	70.84	64.35	最佳	最佳	最佳
	次天然状态	67.51	74.67	71.45	最佳	最佳	最佳
	现状	64.57	72.07	65.15	极好	最佳	最佳
	不考虑变异	66.26	64.75	58.17	最佳	最佳	极好

4 讨论

4.1 水文变异成因

在水文变异综合检验体系中，综合权重按变异点被检出的方法数占总方法数的比例计算，体现了多方法交叉验证的原则，即被更多方法检出的变异点具有更高的可信度，在已有研究中被广泛采用

[13,26]。然而，这种赋权方式并未考虑不同检验方法在变异识别中的灵敏度差异，理论上可能引入一定的不确定性，但鉴于 1992 年和 2003 年变异点在 M-K 检验、滑动 T 检验、Cramer 法等多种方法中均被检出且综合排序靠前，其作为关键变异点的结论具有较高稳健性和可靠性。

基于上述识别结果并结合图 3 可知，次天然状态下的生态流量值明显占优，主要源于 20 世纪 90

年代区域气候条件发生明显变化,导致信江流域径流量发生突变性增长。在第一变异期内,流域内的水利工程建设尚处于起步阶段,水库数量相对较少、总库容相对有限,对径流的调蓄能力尚显薄弱,难以对天然水文过程形成显著影响。据气象统计数据,该时期信江中下游地区的年均降水量由天然期的1 797 mm增至2 145 mm,增幅达 19.36%,呈显著上升趋势,同期暴雨、特大暴雨频次明显增加,加之蒸发量下降,进一步促进了河川径流的累积^[28]。受此影响,第一变异期内信江下游梅港站年均径流量由天然期的536.96 m³/s激增至702.29 m³/s,增幅高达 30.79%,生态流量也随之显著提升。可见,降水与径流的同步突变在定量上高度吻合,表明气候变化是 1992 年水文变异的决定性驱动因素,也印证了将其作为天然期与第一变异期分界点的合理性。

现状下的最小和适宜生态流量与天然状态较相近,但由于受气候变化与人类活动的双重影响,二者均明显低于次天然状态。自 2003 年第二次变异期开始,信江中下游年均降雨量回落至1 935 mm,但极端降雨事件的强度和频率持续上升,且季节性分布不均现象愈发突出,导致河道基础径流补给不足^[29]。此外,1998 年长江特大洪水后,鄱阳湖流域大范围实施了“平垸行洪、退田还湖”政策,信江流域水域面积有所扩大,地表水体蒸发量相应增加,间接削减了河道径流^[3]。同期,以大垵水库和伦潭水利枢纽等为代表的一批骨干水利工程相继建成并投入运行,流域水资源开发进入了快速发展阶段,截至 2020 年末,流域年均蓄水总量超过 8.86 亿 m³^[30]。水利工程的截流调蓄与库区水面蒸发量的增加,对径流同样起到削减作用。不容忽视的是,进入 21 世纪后,信江流域经济快速发展,所辖市县生产总值从 2003 年的不足 300 亿元增长至 2020 年的约3 096亿元,年均增速达 13.50%;水资源利用程度随经济扩张持续提升,2020 年流域地表供水量增至 19.32 亿 m³,这也成为该时期河道径流和生态流量减少的又一人为驱动因素。上述分析表明,2003 年前后水库库容与供水规模均呈跃升式增长,人类活动对径流的调控与消耗能力显著增强,并与极端气候的不利变化相叠加,共同构成了此次水文变异的复合驱动机制,支撑了将 2003 年作为第二变异期起点的分期判断。

4.2 生态流量结果分析

1) 天然状态下信江下游最小生态流量在丰、平、枯水期的评价等级均为“好”和“非常好”,适宜生态流量则全部达到“最佳”等级,说明该状态径流过程受自然水文节律主导、人类扰动微弱,流量过程可稳定匹配河道基础生态维系与水生生物生存需求,但此阶段丰水期的最小生态流量已接近“好”等级流量范围的下限,表明该时期的河流

生态系统稳定性仍存在一定脆弱性。

2) 次天然状态下生态流量过程揭示了气候变化对信江下游生态需水的双重影响。一方面,该时期降水量显著增加,流域径流量整体抬升、枯水期基流补给充足,生态需水得到有效保障,最小生态流量等级提升至“极好”,适宜生态流量也进一步稳固在“最佳”水平,表明降雨量增加提升了河流生态系统的抗干扰能力,为水生生物的生长繁殖创造了更有利条件,体现了气候变化的积极影响。另一方面,同期极端降雨事件频发,径流过程变异性增强,原本脆弱的丰水期生态系统稳定性受到冲击,信江下游最小生态流量等级由“好”降至“一般”,适宜生态流量占比亦略有下降,已逼近“最佳”等级流量范围下限,反映出气候变化扰动带来的负向效应。

3) 现状下信江下游生态流量过程受气候变化与人类活动的双重驱动,反映了二者对河道生态系统的叠加负面影响。梅港站丰水期最小生态流量因平水年径流稳定性增强,生态需水等级回升至天然状态的“好”水平;但枯水期最小生态流量却劣于次天然状态,回降至“非常好”且趋近于“好”,说明进入第二变异期后,虽然降水量显著减少,但极端降雨强度与频率持续上升,季节性分布不均加剧;同时,流域总库容及蓄水量大幅增长,人类对径流的调控能力显著增强。在此双重作用下,信江下游径流呈现“枯水更枯、丰水更丰”的极化趋势,枯水期基流保障能力减弱,对生态系统的稳定性构成潜在威胁。信江下游现状的适宜生态流量虽优于最小生态流量,但与天然和次天然状态相比,丰水期的适宜生态流量仍有不同程度的下降,其评级也未能达到“最佳”。可见丰水期正值社会经济用水高峰,此时河流生态系统承受着更高的生态风险与压力。

4) 生态流量过程在不考虑水文变异的条件下,因未区分水文变异的阶段性特征,平滑了径流与生态需水的时空差异,仅能整体表征信江下游的生态需水特征。梅港站的适宜生态流量均处于“极好”或“最佳”,而最小生态流量在丰、平、枯水期的评价等级则分别为“一般”“好”和“极好”。由此可见,随着径流量的递减,其与实际河道基本生态需水的匹配度反而增强,保障程度逐步提升。整体而言,该状态下的生态流量过程较接近于天然状态的生态流量过程。

4.3 决策参考

在以上分析中,本文推荐的次天然状态最小和适宜生态流量过程与信江下游现行水库调度高度匹配,各月阈值可直接作为生态调度目标纳入水库群联合调度方案。具体而言,丰水期(4—6月)可将适宜生态流量作为生态目标约束,与防洪、发电进行多目标协调;枯水期(9月至次年1月)可

将最小生态流量设为不可突破的保障底线。同时,考虑到信江下游现状河道生态系统受气候变化与人类活动双重胁迫,存在一定的生态风险,建议在未来 10 年间,优先考虑以天然状态生态流量作为保障底线,在水量条件允许时适当向次天然状态靠拢,逐步提升生态流量保障水平,为流域水资源可持续利用与生态保护提供科学支撑。此外,需要说明的是,本文构建的“水文变异综合检验—分期生态流量计算—改进 Tennant 法评价”方法体系,适用于水文资料完备、存在水文变异特征的中小河流,尤其是湿润季风区河流;对于受强水库调控的流域,应用时需结合水库调度数据对变异点识别与生态流量计算结果进行修正,但该方法体系的整体框架与技术逻辑仍具有普适参考价值。

5 结论

本文以信江下游为研究对象,基于水文变异综合检验体系划分水文序列,采用多种改进的生态流量计算方法推求变异前后下游河道最小和适宜生态流量过程,并对各水文期生态流量进行等级评定,得出以下结论:

(1)经 Hurst 系数及滑动 t 等 7 种突变检验方

法的综合识别,明确信江下游梅港站径流时间序列发生了变异,整体属中度变异水平,变异点为 1992 年和 2003 年,其中 1992 年变异归因于气候变化,而 2003 年变异主要由气候与人类活动的共同影响导致,并以这两个变异点为界,将序列划分为天然期、第一变异期和第二变异期。

(2)利用平水年逐月最小生态流量法和逐月频率年内展布法,分别计算得到信江下游梅港站在天然状态、次天然状态、现状及不考虑水文变异条件下的年内最小生态流量和适宜生态流量过程;并基于时段细化与标准修订的 Tennant 法对 4 种状态下丰、平、枯水期的生态流量进行评价,验证了计算结果的合理性和可靠性。

(3)根据改进的 Tennant 法评价结果,信江下游生态系统在天然状态下受人类干扰较轻,生态需水等级达到“好”及以上;在降雨突增背景下,次天然状态下生态流量过程呈现相对理想的生态需水水平,反映出气候变化的显著影响;现状河流生态系统在气候及人类活动双重作用下面临着更高的生态风险;不考虑变异条件下生态流量与天然状态较接近,体现了河道整体生态需水过程;为保护流域生态,应优先考虑天然生态流量过程,并以次天然状态生态流量为最终目标。

参考文献

- [1]肖睿,黄伟,李琴,等.基于 PCA-RF 的抚河下游生态最相关水文指标优选及演变分析[J].长江流域资源与环境,2024,33(7):1563-1575. [Xiao Rui, Huang Wei, Li Qin, et al. Optimization and change analysis of the ecological relevant hydrological indicators in the lower reaches of the Fu River based on PCA-RF[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2024,33(7):1563-1575.]
- [2]张改兰,季树勋,杨俊男,等.生态补水的补偿激励机制研究:以宁波市清水环通工程为例[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(4):72-80. [Zhang Gailan, Ji Shuxun, Yang Junnan, et al. Compensation and incentive mechanism for Ecological water supplement: a case study of the Qingshuihuantong Project in Ningbo[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(4):72-80.]
- [3]段小宁,李国芳,李国文,等.信江流域水文情势变化及归因分析[J].水利水电工程学报,2024(2):34-43. [Duan Xiaoning, Li Guofang, Li Guowen, et al. Analysis of hydrologic regime change and attribution in the Xinjiang River Basin[J].Hydro-science and Engineering,2024(2):34-43.]
- [4]刘剑宇,张强,顾西辉.水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J].生态学报,2015,35(16):5477-5485. [Liu Jianyu, Zhang Qiang, Gu Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(16):5477-5485.]
- [5]李学武,黄领梅.基于多种水文学方法的秦岭北麓典型河流生态流量分析[J].水电能源科学,2024,42(1):10-13,17. [Li Xuewu, Huang Lingmei. Ecological flow analysis of typical rivers in the northern foothills of the Qinling Mountains based on multiple hydrological methods[J].Hydroelectric Energy Science,2024,42(1):10-13,17.]
- [6]Karimi, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K., et al. Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve[J].Acta Geophysica,2021,69(1):285-293.
- [7]任黎,高家琛,杨灏宇,等.考虑水文变异的漾弓江干流生态流量计算[J].人民长江,2022,53(5):82-87,100. [Ren Li, Gao Jiachen, Yang Haoyu, et al. Calculation of ecological flow in Yanggong River trunk stream considering hydrological variation[J].Yangtze River,2022,53(5):82-87,100.]
- [8]陈雪,徐富刚,李琴,等.基于水情变化的河流生态流量阈值及多时间尺度保障率计算[J].水资源保护,2024,40(4):128-136,156. [Chen Xue, Xu Fugang, Li Qin, et al. River ecological flow threshold and multi-time scale guarantee rate calculation based on hydrological regime changes[J].Water Resource Protection,2024,40(4):128-136.]
- [9]皇甫欣予,陈星,田传冲,等.曹娥江适宜生态流量计算和评价研究[J].水文,2024,44(3):60-66. [Huangfu Xinyu, Chen Xing, Tian Chuanchong, et al. Calculation and evaluation of suitable ecological flow in Cao'e River[J].Hydrology,2024,44(3):60-66.]
- [10]郭文献,王高振,朱志鹏,等.乌江生态流量及其保障研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(5):31-37. [Guo Wenxian, Wang Gaozhen, Zhu Zhipeng, et al. Research on Ecological Flow and Its Guarantee in Wujiang River[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2024,45(5):31-37.]
- [11]黄成剑,解阳阳,刘赛艳,等.考虑水文变异的大通河生态需水研究[J].水文,2022,42(3):32-36,19. [Huang Chengjian, Xie Yangyang, Liu Saiyan, et al. Monthly precipitation interval forecast based on bootstrap and extreme learning machine[J].Hydrology,2022,42(3):32-36,19.]
- [12]黄兵,姜恒,廖小红,等.水文变异条件下的洞庭湖生态水位

- 研究[J].中国农村水利水电,2019(3):88-91,96.[Huang Bing,Jiang Heng,Liao Xiaohong ,et al.Evaluation of ecological water-level in the Dongting Lake with hydrological alterations[J].China Rural Water and Hydropower,2019(3):88-91,96.]
- [13]Zhang Yiming,et al.Study on the ecological flow and its guarantee degree considering hydrological variation.Ecological Indicators,2024,159:111594.
- [14]Chen Xue,Li Qin,JIA Z,et al.Study on the evolution of ecological flow in river and its guarantee degree during different hydrological periods[J].Journal of Cleaner Production,2025,490:144761.
- [15]何山,许继军,洪晓峰.水文变异条件下长江源区生态流量研究[J].水生态学杂志,2025,46(4):106-118.[He Shan,Xu Jijun,Hong Xiaofeng.Ecological flow evaluation in the source region of Yangtze River following hydrological alteration[J].Journal of Hydroecology,2025,46(4):106-118.]
- [16]王时梅,段红星,殷勇.梅港水文站生态流量确定及分析[J].江西水利科技,2020,46(6):456-460.[Wang Shimei,Duan Hongxing,Yin Yong.Determination and analysis of ecological flow in Meigang hydrological station.Jiangxi Hydraulic Science and Technology,2020,46(6):456-460.]
- [17]陈朝阳,徐金鹏,管新建,等.径流变化特征分析及生态需水保证率评估[J].水力发电,2021,47(5):17-22,29.[Chen Chaoyang,Xu Jinpeng,Guan Xinjian,et al.Analysis of runoff change characteristics and assessment of ecological water demand guarantee rate[J].Water Power,2021,47(5):17-22,29.]
- [18]Liu Saiyan,Qin Zhang,Yangyang Xie,et al.Evaluation of minimum and suitable ecological flows of an inland basin in China considering hydrological variation[J].Water,2023,15(4):649.
- [19]李洪涛,赵龙,李丹,等.基于生态水文变异特征的济南南部山区河流生态需水研究[J].水土保持通报,2024,44(4):371-382.[Li Hongtao,Zhao Long,Li Dan,et al.Ecological water demand of rivers in southern mountainous area of Jinan based on characteristics of ecohydrological variation[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2024,44(4):371-382.]
- [20]郭文献,夏自强.对计算河道最小生态流量湿周法的改进研究[J].水力发电学报,2009,28(3):171-175,163. [Guo Wenxian, Xia Ziqiang. Improved research on wetted perimeter method to calculate minimum stream ecological discharge.[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(3):171-175,163.]
- [21]李阳,林锦.小水电站减脱水段最小生态流量计算:以盘溪梯级水电站为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):536-543.[Li Yang,Lin Jin.Calculation of minimum ecological flow in dewatering section of small hydropower stations:Taking Panxi cascade hydropower stations as an example[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(3):536-543.]
- [22]莫崇勋,阮俞理,莫桂燕,等.考虑水文变异的河道生态径流研究[J].水力发电,2017,43(10):27-30.[Mo Chongxun,Ruan Yuli,Mo Guiyan,et al. Study on ecological flow with the considerations of hydrological mutations[J].Water Power,2017,43(10):27-30.]
- [23]徐淑琴,王亚超,乐静,等.考虑水文变异的水库生态流量研究[J].东北农业大学学报,2020,51(1):83-89.[Xu Shuqin,Wang Yachao,Le Jing, et al.Study on ecological flow calculation under condition of hydrological variability[J].Journal of Northeast Agricultural University,2020,51(1):83-89.]
- [24]谢洪,肖娟,范肖予,等.汾河上中游生态径流量计算研究[J].水电能源科学,2017,35(9):25-27,21.[Xie Hong, Xiao Juan, Fan Xiaoyu, et al.Ecological runoff calculation of upper and middle reaches of Fenhe River[J].Hydroelectric Energy Science,2017,35(9):25-27,21.]
- [25]田沉,付兴涛.基于改进 Tennant 法的汾河生态基流研究[J].水电能源科学,2022,40(9):44-47.[Tian Chen,Fu Xingtao.Study on ecological base flow of Fenhe River based on improved tennant method[J].Water Resources and Power,2022,40(9):44-47.]
- [26]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.]
- [27]石建军,冯民权,黄强,等.水文变异条件下文峪河生态径流过程的推估方法[J].水力发电学报,2014,33(4):28-35.[Shi Jianjun, Feng Minquan, Huang Qiang, et al. An approach to estimation of environmental flow process in Wenyu river under hydrological variation conditions[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(4):28-35.]
- [28]孙鹏,张强,陈晓宏.鄱阳湖流域枯水径流演变特征、成因与影响[J].地理研究,2011,30(9):1702-1712.[Sun Peng,Zhang Qiang,Chen Xiaohong.Changing properties of low stream flow in the Poyang Lake basin:Possible causes and implications[J].Geographical Research,2011,30(9):1702-1712.]
- [29]危文广,罗志雄,湛祖安,等.信江流域水沙情势演变及其对降雨和人类活动的响应[J].江西水利科技,2025,51(2):103-109.[Wei Wenguang,Luo Zhixiong,Chen Zu'an.Evolution of water and sediment regime and its response to precipitation and human activities in the Xinjiang River Basin[J].Jiangxi Hydraulic Science & Technology,2025,51(2):103-109.]
- [30]邓晓宇,张强,孙鹏,等.气候变化和人类活动对信江流域径流影响模拟[J].热带地理,2014,34(3):293-301.[Deng Xiaoyu,Zhang Qiang Sun Peng,et al..Assessment of impacts of climate change and human activities on runoff with HSPF for the Xinjiang River Basin[J].Tropical Geography,2014,34(3):293-301.]

Study on Ecological Flow in the Lower Reaches of the Xinjiang River Considering Hydrological Variations

Liu Yuanbo*, Li Ming, Wang Wei, Yao Pujing, Zhang Ruihuan

(Northwest Engineering Corporation Limited, Power China, Xi'an, Shanxi 710100, China)

Abstract: 【Objective】 To explore the impact of hydrological variations on the ecological flow of the lower reaches of the Xinjiang River, and to provide a scientific basis for watershed ecological protection and optimal allocation of water

resources under changing environments. **【Methods】** Based on the runoff series of Meigang Station in the lower reaches of the Xinjiang River from 1954 to 2020, a comprehensive hydrological variation test system was constructed by integrating various methods to identify the variability points and divide the variability periods. The monthly minimum ecological flow method and the monthly frequency distribution method of normal years were used to calculate the minimum and suitable ecological flows before and after the variation in each period, respectively. Finally, the evaluation results of ecological flow calculation were graded based on the improved Tennant method. **【Results】** (1) The runoff series of the lower reaches of the Xinjiang River experienced moderate variability in 1992 and 2003, and was divided into the natural period, the first variation period, and the second variation period accordingly. (2) The minimum and suitable ecological flows under four conditions of natural, sub-natural, current status, and ignoring hydrological variability were systematically calculated for each period, and the rationality and reliability of the calculation results were verified based on the evaluation results of the improved Tennant method. (3) The sudden increase in rainfall enhanced the ecological benefits of the ecological flow in the sub-natural state, but the frequent occurrence of extreme hydrological events and the intensification of human activities jointly led to certain ecological risks for the current river ecosystem. **【Conclusion】** Hydrological variability significantly changed the ecological flow process of the lower reaches of the Xinjiang River. The ecological water demand grades in the natural state all reached "good" and above, while it was relatively ideal in the sub-natural state. It is recommended to give priority to the natural ecological flow process and refer to the sub-natural state, so as to provide decision-making references for the sustainable utilization of water resources and ecological protection of the watershed.

Keywords: Ecological flow; Hydrological variation point; Comprehensive variation test; Improved Tennant method; Lower reaches of the Xinjiang River

(编辑:×××)