

翟永胜,孙仁豪,魏祎,等.基于多种水文学方法适应性评价的小流域河流分级生态流量计算研究[J].人民珠江,2025,46(12):92-98.

基于多种水文学方法适应性评价的小流域河流 分级生态流量计算研究

翟永胜¹,孙仁豪²,魏祎¹,张青¹,李叶³,李晓英^{2*}

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100024;2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;
3. 辽宁省河库管理服务中心(辽宁省水文局),辽宁 沈阳 110003)

摘要:为满足不同生态环境功能需求,生态流量需与区域水文特征相一致。选用Tennant法、改进FDC法和改进年内展布法等多种水文学方法分别计算河流最小、适宜和最优分级生态流量。采用Pearson相关系数和偏差系数分析不同方法计算的生态流量与河流天然流量水文节律的一致性,结合生态流量满足率指标,评估各方法计算的生态流量适应性。以云南四岔河为例,分析结果表明:Tennant法未考虑月际径流差异;改进FDC法偏差系数较低,枯水年份生态流量满足率较高且稳定,但相关系数在平枯水年份相对较小;改进年内展布法相关系数最高,偏差系数较小,与天然流量过程的拟合程度最优。建议考虑适应性评价结果,针对不同来水情况,四岔河生态流量综合采用改进FDC法和改进年内展布法的分析结果。研究成果可为协调四岔河流域水资源开发利用与水生生态健康保护提供科学依据,为其他类似流域河流生态流量确定提供参考。

关键词:分级生态流量;适应性评价;改进FDC法;改进年内展布法;四岔河

中图分类号:TV213.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2025)12-0092-07

Research on Calculation of Graded Ecological Flow for Small River Basins Based on Adaptive Evaluation of Various Hydrological Methods

ZHAI Yongsheng¹, SUN Renhao², WEI Yi¹, ZHANG Qing¹, LI Ye³, LI Xiaoying^{2*}

(1. Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China; 2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Liaoning River and Reservoir Management Service Center (Liaoning Hydrology Bureau), Shenyang 110003, China)

Abstract: Under the current severe water ecological crisis exacerbated by climate extremes, population growth, and economic development, in order to effectively meet the demands for different ecological environmental functions, the ecological flow property of the river should be consistent with the regional hydrological characteristics of the study area. In this paper, various hydrological methods such as the Tennant method, the improved flow duration curve (FDC) method, and the improved annual distribution method were selected to calculate the minimum, appropriate, and optimal ecological flow levels of the river. The Pearson correlation coefficient and deviation coefficient were used as evaluation indexes to assess the consistency between ecological flow and the natural hydrological rhythm of the river flow. Combined with the indicator of ecological flow satisfaction rate, the adaptability of the ecological flow of the river calculated by different hydrological methods was evaluated. A study of the ecological flow of the Sichuan River in Yunnan Province was conducted as a case. The research results indicate that the Tennant method for the ecological flow does not take into account the

基金项目:国家自然科学基金项目(52279013);湖南省重大水利科技项目(XSKJ2024064-06)

收稿日期:2025-08-07 **修回日期:**2025-09-10 **网络首发日期:**2025-10-22

作者简介:翟永胜(1993—),男,研究方向为水利规划、水生态治理。E-mail:813251433@qq.com

通信作者:李晓英(1978—),女,博士,副教授,研究方向为水资源规划与利用。E-mail:lix3@hhu.edu.cn

dynamic variations in monthly runoff of the river, due to its oversimplified classification into wet and dry seasons throughout the year. As a result, the ecological flow exhibits the lowest correlation coefficient and the highest deviation coefficient compared to other methods' results. The ecological flow of the Sicha River calculated by the improved FDC method has a lower deviation coefficient with the natural hydrological rhythm, and the ecological flow satisfaction rate in dry years is higher and more stable, but its correlation coefficient is relatively small in normal and dry years compared with the other methods' results. The ecological flow of the river calculated by the improved annual distribution method achieves the highest correlation coefficient with the natural hydrological rhythm, and its deviation coefficient shows a decreasing trend from wet year to dry year, demonstrating the best fit to the natural flow process of the river. Considering various hydrological scenarios and the diverse adaptability results of the ecological flow of the Sicha River calculated by different hydrological methods, this paper recommends integrating the comprehensive research results derived from both the improved FDC method and the improved annual distribution method for determining the ecological flow of the Sicha River. The research achievement provides a scientific basis for coordinating water resources development and utilization and ecological health conservation in the Sicha River basin, and offers a valuable reference and practical guide for confirming the ecological flow and carrying out the rational ecological regulation of the rivers in other similar basins.

Keywords: graded ecological flow; adaptive evaluation; improved FDC method; improved annual distribution method; Sicha River

受极端气候、人口增长和经济发展的影响,水资源供需矛盾加剧^[1-2],河流生态系统面临着前所未有的压力^[3],河流天然水文情势发生改变,枯水期的生态流量(Ecological Flow, EF)常难以保证^[4]。河流生态流量的科学确定与保障,对维持河流生态系统健康、实现水资源可持续利用具有重要意义。为满足不同的生态环境功能需求,生态流量不再是恒定不变的数值,而应是与区域水文特征相关联的分级变动数值。由于小型流域通常缺乏具体的生态监测资料,一般选取通用性较强的水文学方法计算河流生态流量。

众多学者针对不同区域和河流特征开展了大量研究。邓武彬等^[5]为体现河流水文情势区域差异性,基于多种常用水文学方法计算江西省乐安河的生态流量,通过对比分析确定了更符合南方山区河流水文情势的生态流量计算方法;潘扎荣等^[6]根据河流天然径流的年内变化特征及其对生态水文过程的动态需求,提出了年内展布法,并应用于淮河干流的生态流量计算;张卫国等^[7]为减小极端水文事件的影响,寻求稳定的同期均值比,针对径流资料进行改进,提出了改进年内展布法。李梦瑶等^[8]为体现生态流量的时空变化动态特征,利用多种水文学方法和湿周法对汾河生态流量进行了计算与分析,其结果可为汾河中游生态修复工作提供参

考。金纯等^[9]利用水文学法和水力学法计算了大渡河上游最小生态流量,并结合鱼类产卵育幼分析了各方法的优缺点。高勋等^[10]通过对生态需水要素进行分析,采用RVA法^[11]计算了生态流速和水位。李昌文^[12]提出了一种改进的流量历时曲线法(Flow Duration Curve, FDC),确定了汉江各级生态流量配置方案;李阳等^[13]利用多种水文学方法计算清水河生态流量,并结合水文节律和生态流量保证率,对比枯、汛2个时期各种方法的优劣度,可为小流域确定适宜生态流量提供参考。

目前对小流域河流的分级生态流量研究较少,为合理确定小流域河流生态流量,本文以云南四岔河为例,应用多种水文学方法计算河流生态流量,综合分析各方法计算河流生态流量的年际变化规律,采用Pearson相关系数和偏差系数分析生态流量与河流水文节律一致性,结合生态流量满足率评估不同方法的适应性,确定河流各级生态流量过程,为协调流域水资源开发利用与水生态健康保护提供科学依据。

1 研究方法

为适应不同的生态保护目标,实现水资源的合理分配,需确定各级生态流量标准。生态流量分级越细,越能更好地平衡水资源的供需关系,但实际

的水资源分配管理难度越大。目前生态流量分级方法主要基于 Tennant 法等差数列分级思想进行划分,但不同级别的生态流量与河流不同来水情况反映的水文情势难以匹配。因此,本文采用 Tennant 法、改进年内展布法和改进 FDC 法,针对丰平枯不同典型年,分别划分河流最优、适宜和最小三级生态流量。其中,Tennant 法基于长系列径流数据,通过设定不同百分率划分生态流量等级;改进年内展布法和改进 FDC 法考虑年际水文差异,分别利用丰、平、枯水系列年份的径流资料计算最优、适宜和最小生态流量。

1.1 河流生态流量计算

a)Tennant 法。Tennant 法^[14]将河流的流量与其生态环境功能相联系,通过分析历史流量数据评估和设定不同生态环境目标下维持河流生态系统健康所需的最小流量。该方法简单易行,适用于缺乏复杂模型和大量数据的流域,可以根据历史流量数据快速估算出分级生态流量,满足不同生态保护目标下的流量需求,详细分级见表 1。本文取最佳、很好和一般级别的生态流量作为最优、适宜和最小生态流量。

表 1 Tennant 法分级河道内生态环境状况及河流生态流量

Tab. 1 Graded instream ecological conditions and ecological flow for rivers based on Tennant method

不同流量百分比对应河道内生态状况	生态流量占同时段多年平均天然流量百分比/%	
	枯水期	丰水期
最佳	60~100	60~100
优秀	40	60
很好	30	50
良好	20	40
一般	10	30
差	10	10
极差	0~10	0~10

b)改进年内展布法。考虑河流年际和年内生态水文过程的动态变化,年内展布法基于长系列径流资料,将年际径流按年平均流量保证率 $P < 25\%$ 、

$25\% \leq P \leq 75\%$ 、 $P > 75\%$ 分别划分为丰、平、枯水年组,年内划分为丰水期和枯水期 2 个时期,并将丰、平、枯水年组不同时期内各月份的最小月平均流量改进为 90% 保证率对应的流量,求其时期平均值,再与多年同期平均流量计算同期均值比^[15],利用丰、平、枯水年组各月多年平均流量和同期均值比分别确定各月最优、适宜和最小生态流量。该方法通过引入 90% 保证率的径流量,有效避免了极端值的影响,同时采用分时段计算同期均值比的方法,能够更准确地反映河流的年内径流变化特点。见式(1)—(3):

$$\bar{Q}_{(90\%)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Q_{i(90\%)} \quad (1)$$

$$\eta = \bar{Q}_{(90\%)} / \bar{Q} \quad (2)$$

$$EF_i = \bar{Q}_i \times \eta \quad (3)$$

式中: $Q_{i(90\%)}$ 为各水平年各时期内第 i 月 90% 保证率对应的月平均流量, $i = 1, 2, \dots, m$; m 为丰水期或枯水期的月数; $\bar{Q}_{(90\%)}$ 为各水平年各时期内各月 90% 保证率流量的平均流量; $\bar{Q}$ 为各水平年各时期多年同期平均流量; η 为各水平年各时期的同期均值比; EF_i 为各水平年各时期第 i 月的生态流量; $\bar{Q}_i$ 为各水平年第 i 月的多年月平均流量。

c)改进 FDC 法。改进 FDC 法根据长系列径流资料,分别对各月平均流量进行排频,将各月的日流量系列按月平均流量保证率 $P < 25\%$ 、 $25\% \leq P \leq 75\%$ 、 $P > 75\%$ 分别划分为丰、平、枯水年组。绘制各年组、逐月份的日流量 FDC,取 90% 和 95% 历时点对应流量的平均值作为各年组逐月生态流量^[12]。该方法通过划分年组能够积极响应径流的年际和逐月丰枯变化,反映河流长期流量分布规律,减小极端流量影响,见式(4):

$$EF_{(ik)} = \frac{Q_{90(ik)} + Q_{95(ik)}}{2} \quad (4)$$

式中: $k = 1, 2, 3$, 代表丰、平和枯水年组; $i = 1, 2, \dots, 12$, 代表 1—12 月; $EF_{(ik)}$ 为第 k 水平年组第 i 月份的生态流量; $Q_{90(ik)}$ 和 $Q_{95(ik)}$ 分别为第 k 水平年组第 i 月份 FDC 上的 90% 和 95% 历时点流量。

1.2 生态流量适应性评价

a)生态流量与河流水文节律一致性分析。天然流量过程是维护河流生态系统健康稳定的最佳过程^[16],生态流量过程应符合河流天然水文节律。将各方法计算的生态流量过程与河流天然流量过程进行相关性分析,得到 Pearson 相关系数 R ,该值越接近 1 表示两者相关性越高;为减小数据总体的偏斜影响,将生态流量过程与河流天然流量的中位数进行偏差分析,偏差系数 F 越小则表示二者离散程度越小^[17],见式(5)、(6):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{12} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{12} (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

$$F = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{X_i - Z_i}{Z_i} \right)^2} \quad (6)$$

式中: R 为 Pearson 相关系数; F 为偏差系数; X_i 和 $\bar{X}$ 为生态流量过程及其均值; Y_i 和 $\bar{Y}$ 为天然流量过程及其均值; Z_i 为第 i 月天然流量的中位数。

b)生态流量满足率。在统计分析期内,河道内天然流量大于计算所得生态流量的时长占总时长的比值为生态流量满足率,采用月平均天然流量评估河流生态流量的保证水平,见式(7):

$$D_i = (T_{bi}/T_i) \times 100\%, i = 1, 2 \cdots 12 \quad (7)$$

式中: D_i 为第 i 月的生态流量满足率; T_{bi} 为统计分析期内第 i 月天然流量大于该月生态流量的月数; T_i 为统计分析期内第 i 月的总数。

2 四岔河生态流量确定与结果分析

2.1 研究区域概况

云南四岔河属红河流域南溪河上段左岸一级支流。河流全长 32.1 km,平均比降 3.28‰,流域面积 541 km²。四岔河流域地处云南低纬高原,属亚热带山地季风气候。流域径流以降雨为主要来源,径流特性与降雨基本一致,丰枯季水量悬殊,径流主要集中于丰水期(6—10月),枯水期水量少。四岔河流域无实测水文资料,径流资料选取邻近的披枝水文站作为参证站计算。利用水文比拟法,经流域多年平均降雨量、径流面积修正后得 1983 年 6 月至

2020 年 5 月共 38 a 的长系列径流资料,据以开展四岔河分级生态流量研究。

2.2 生态流量计算结果

利用长系列径流资料绘制水量差积曲线,确定丰平枯水系列年份,考虑四岔河属于红河上段,流域生态水文分区位于滇中北高原中水—少水区^[18],按照云南省中、小河流生态基流指标,其生态基流原则上不应低于同期流量均值的 20%^[19],对应丰平枯不同来水年份统计的天然流量过程、生态基流和 3 种水文学方法计算的生态流量过程见图 1—3、表 2。由表可知,丰水年份和平水年份各方法计算生态流量均大于生态基流,而枯水年份 Tennant 法计算生态流量在整个枯水期均未能达到生态基流要求。

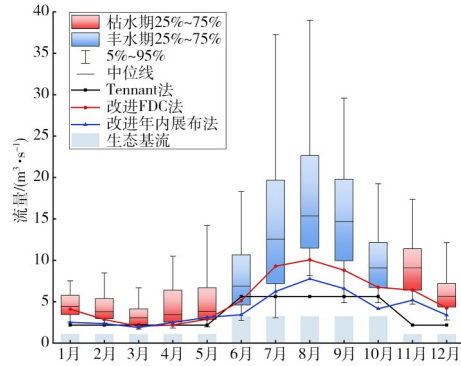


图1 丰水年份统计天然流量与对应各水文学方法确定生态流量过程

Fig. 1 Statistical natural flow and corresponding ecological flow processes determined by various hydrological methods in wet years

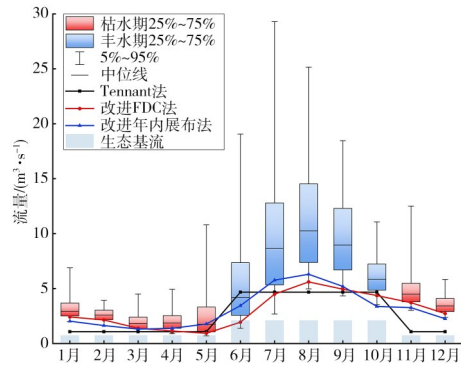


图2 平水年份统计天然流量与对应各水文学方法确定生态流量过程

Fig. 2 Statistical natural flow and corresponding ecological flow processes determined by various hydrological methods in normal years

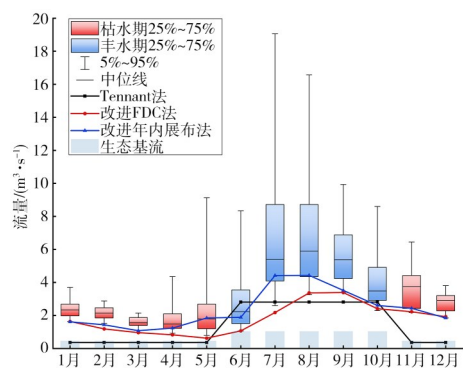


图3 枯水年份统计天然流量与对应各水文学方法确定生态流量过程

Fig. 3 Statistical natural flow and corresponding ecological flow processes determined by various hydrological methods in dry years

2.3 结果综合分析

a)水文节律一致性分析。水文节律作为维持

河流生态系统功能的关键驱动因素,通过河道流量的周期性变化构建生物生境多样性,其稳定性是维持河道地貌形态和水质自净等基础生态功能以及保障鱼类等水生生物正常繁殖活动的重要基础。四岔河现有分布鱼类包括云南倒刺鲃、云南裂腹鱼等,其繁殖和洄游期通常在雨季初期,此时需要保持河道顺畅以及较高流量,避免因流量不足导致洄游受阻。由图1—3可知各水文学方法计算生态流量结果相差较大,但生态流量过程趋势基本一致,除Tennant法外均具有逐月差异性,表现为丰水期生态流量较大,枯水期较小,能反映河流年内丰枯变化的水文情势。各方法计算生态流量与河流天然流量的相关系数和偏差系数计算结果见表3。

表2 不同水平年生态基流及各水文学方法计算生态流量过程

Tab. 2 Ecological baseflow processes under different hydrological years and ecological flow processes determined from various hydrological methods													
单位:m³/s													
年份	项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
丰水	生态基流	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	1.07	1.07
	Tennant法	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	5.62	5.62	5.62	5.62	5.62	2.17	2.17
	改进FDC法	4.11	2.85	2.03	2.20	2.89	5.13	9.29	10.06	8.81	6.74	6.41	4.24
	改进年内展布法	2.50	2.36	1.89	2.49	3.11	3.43	6.24	7.77	6.59	4.15	5.18	3.38
平水	生态基流	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	0.73	0.73
	Tennant法	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	1.08	1.08
	改进FDC法	2.42	2.15	1.39	1.15	0.93	1.94	4.50	5.61	4.95	4.37	3.72	2.73
	改进年内展布法	2.04	1.64	1.32	1.38	1.78	3.45	5.77	6.31	5.20	3.38	3.27	2.26
枯水	生态基流	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	0.46	0.46
	Tennant法	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	0.36	0.36
	改进FDC法	1.64	1.19	0.96	0.83	0.63	1.07	2.18	3.37	3.39	2.41	2.23	1.93
	改进年内展布法	1.62	1.44	1.08	1.24	1.85	1.89	4.42	4.43	3.52	2.61	2.44	1.85

表3 不同水平年各水文学方法计算生态流量与天然流量相关系数和偏差系数

水文学法	丰水年份		平水年份		枯水年份	
	相关系数	偏差系数	相关系数	偏差系数	相关系数	偏差系数
Tennant法	0.77	0.54	0.82	0.55	0.80	0.66
改进FDC法	0.93	0.34	0.86	0.43	0.70	0.41
改进年内展布法	0.94	0.47	0.99	0.37	0.96	0.25

由表 3 可知,Tennant 法在不同水平年的相关系数最低、偏差系数最大,整体表现最差。其主要原因是该方法仅将全年划分为丰水期和枯水期,忽略了月际径流变化特征,导致计算结果与水文节律一致性较差。其余方法均能较好反映河流流量的月际变化规律,与实际水文过程具有更高的匹配度。改进 FDC 法的偏差系数总体保持在较小水平,表明该方法通过年组的划分,能在多数月份使生态流量较好地贴近天然流量中位数;但相关系数在平水年份和枯水年份相对较小,表明随着天然流量的减少,该方法计算结果与天然流量过程的一致性减弱。改进年内展布法的偏差系数在丰水年份、平水年份和枯水年份依次减小,表明该方法计算生态流量在来水较少条件下与天然流量过程有更高的拟合度,其原因是该方法基于同期均值比设计,随着来水减少,各月 90% 保证率对应的流量与多年月平均流量的差距逐渐减小,同期均值比逐渐增大;其相关系数在不同水平年均最高,说明分时段计算同期均值比能更准确地反映径流的年内变化趋势。

b)生态流量满足率分析。考虑到平水年份和丰水年份水资源充沛,生态需水保障条件较好,而枯水年份水资源供需矛盾大,生态流量保证难度较大,因此生态流量满足率分析聚焦于枯水年份,且该水平年选择适宜生态流量计算方法时应着重考虑其结果的生态流量满足率。生态流量满足率的高低受生态流量取值和河流天然流量的共同影响,当生态流量取值过大时满足率会降低,反之满足率会随之提高,而当河流遭遇极端枯水情况时,生态流量取值相对合理,满足率也可能难以达到 100%。根据式(7)计算得到枯水年份 3 种方法各月的生态流量满足率见图 4。由图可知,3 种方法的计算结果在多数月份表现出较高的生态流量满足率。其中改进 FDC 法计算结果的满足率最为稳定,除 12 月外,其余各月均达到 100%。而 Tennant 法和改进年内展布法的结果存在一定波动:Tennant 法计算结果在 6 月的生态流量满足率为 82%,改进年内展布法计算结果在 5、7、11 月的生态流量满足率分别为 87%、87%、92%。综合以上分析,针对流域水文特

征和不同来水条件,应采用多种方法结合确定分级生态流量。平水年份和丰水年份径流较为充沛,生态流量计算方法的选择应着重反映水文节律。因此四岔河生态流量计算方法在丰水年份推荐采用相关系数较高且偏差系数最小的改进 FDC 法,平水年份则采用相关系数最高且偏差系数最小的改进年内展布法。枯水年份径流量显著减少,在兼顾水文节律匹配性的同时,需重点保障生态流量的满足率,因此推荐采用生态流量满足率最高且稳定性良好的改进 FDC 法。综合改进 FDC 法和改进年内展布法的计算结果,确定四岔河最优、适宜和最小生态流量过程见图 5。

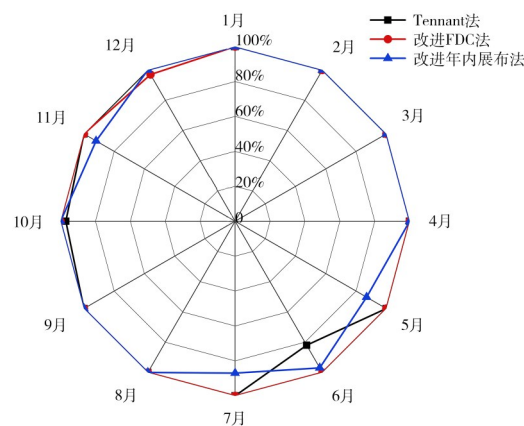


图 4 枯水年份各水文学方法计算逐月生态流量满足率

Fig. 4 Monthly ecological flow satisfaction calculated by various hydrological methods in dry years

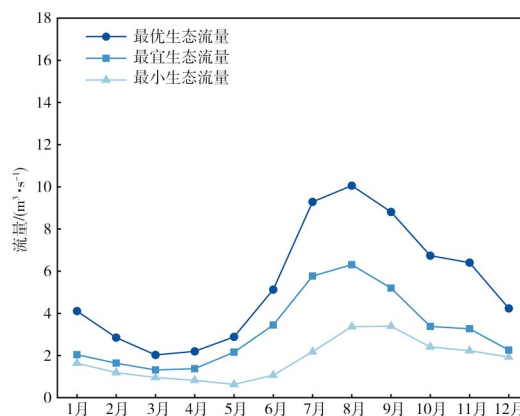


图 5 四岔河分级生态流量过程

Fig. 5 Graded ecological flow processes of the Sichu River

3 结论

以云南四岔河为例,基于多种水文学方法开展河流生态流量研究,并综合各方法的适应性评价,得出以下结论。

a)Tennant法因仅划分丰水期和枯水期,未考虑年内各月径流的动态变化,导致其计算的生态流量与水文节律匹配度较低。改进FDC法计算结果在不同水平年均表现出较小的偏差系数,且在枯水年具有较高且稳定的生态流量满足率,表现出较强的保障能力;但相关系数从丰水年份到枯水年份呈递减趋势,反映其在低流量条件下对水文过程时变特征的捕捉能力有所减弱。改进年内展布法计算结果在不同水平年均具有最高的相关系数,偏差系数从丰水年份到枯水年份呈递减趋势,与天然流量过程的拟合程度最优。

b)综合各方法适应性,建议将改进FDC法计算的丰水年份和枯水年份生态流量分别作为四岔河流域最优和最小生态流量过程,其各月生态流量数值分别介于 $1.99\sim 10.06\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.63\sim 3.39\text{ m}^3/\text{s}$;将改进年内展布法计算的平水年生态流量作为适宜生态流量过程,其各月生态流量数值介于 $1.32\sim 6.31\text{ m}^3/\text{s}$ 。该分级生态流量方案能兼顾水文节律与生态需水保障,可为四岔河流域和相似小流域的水资源合理配置与水生态保护提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李姣,李学辉. 基于Tennant改进法的云南高开发利用河流生态流量研究[J]. 人民珠江,2023,44(2):70-75.
- [2] PETTS G E, MORALES Y, SADLER J P. Linking hydrology and biology in assessing water needs for riverine ecosystems [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(10): 2247 - 2251.
- [3] 吴艺涵,王煜. 河流生态流量监测研究现状与展望[J]. 人民珠江,2022,43(5):43-49.
- [4] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. Nature, 2010, 467(7315): 555 - 561.
- [5] 邓武彬,李小梅,孙璟,等. 南方山区河流水文情势分析及其生态流量计算方法研究[J]. 节水灌溉,2025(3):30-35.
- [6] 潘扎荣,阮晓红,徐静. 河道基本生态需水的年内展布算法[J]. 水利学报,2013,44(1):119-126.
- [7] 张卫国,杨淇翔,张修宇. 基于改进年内展布法的河道基本生态需水过程分析研究[J]. 水电能源科学,2024,42(7):16-19,136.
- [8] 李梦瑶,付兴涛. 汾河中游河道生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):45-53.
- [9] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):8-14.
- [10] 高勋,陈星,卢娟娟,等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):55-61,106.
- [11] TANG Y M, CHEN L H, SHE Z Y. Evaluation of instream ecological flow with consideration of ecological responses to hydrological variations in the downstream Hongshui River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 130. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108104.
- [12] 李昌文. 基于改进Tennant法和敏感生态需求的河流生态需水关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [13] 李阳,邹进,张雷,等. 基于水文学法的小流域生态流量研究[J]. 水电能源科学,2023,41(8):52-55.
- [14] KARAKOYUN Y, DÖNMEZ A H, YUMURTACI Z. Comparison of environmental flow assessment methods with a case study on a runoff river-type hydropower plant using hydrological methods [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190 (12). DOI:10.1007/S10661-018-7107-3.
- [15] 梁荣军,王越隆,陈胜团,等. 改进年内展布法在漓江生态流量中的应用[J]. 长江技术经济,2022,6(3):44-49.
- [16] 涂晶晶,陈森林,艾学山,等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法[J]. 水资源保护,2015,31(1):99-105.
- [17] 赵渔亨,晁立强,王远坤,等. 基于水文学法的生态流量适宜性评价研究[J]. 人民长江,2024,55(2):101-108,124.
- [18] 郭建威. 云南省山区性中小河流生态环境流量研究[D]. 武汉:长江科学院,2011.
- [19] 杨文寿,邓东明. 云南省中小河流水资源开发河流生态流量探讨[J]. 中国农村水利水电,2009(10):50-52.

(责任编辑:程 茜)