

湘粤交界山区性河流生态流量确定方法研究

易之睿^{1*}, 曾 杭¹, 王 进²

¹长沙理工大学水利与海洋工程学院, 湖南 长沙

²广东省水文局广州水文分局, 广东 广州

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年8月26日

摘 要

生态流量是维系河流生态系统健康的核心要素。武江坪石水文站作为湘粤跨省流域的关键控制节点, 处于湘粤边境岭南生态屏障带, 其生态流量的科学确定对区域水资源协同管理具有重要意义。本文基于坪石站1956~2021年逐月流量数据, 在全面分析坪石站径流量年际及年内变化特性基础上, 采用近10年最枯月均流量法、 Q_p 法(设计保证率最枯月平均流量法)、Tennant法(河流最小月平均实测流量法)和逐月平均流量频率曲线法等水文定量分析方法, 开展多方法对比研究。结果表明: 不同方法计算的枯水期生态流量值为8.5~10.9 m^3/s , 其中 Q_p 法与Tennant法因兼具理论严谨性与操作可行性, 更适用于本流域管理实践; 研究结果与《北江流域生态流量保障方案》的10 m^3/s 控制目标高度契合, 可为华南山区性河流生态流量精细化管理提供技术支撑。

关键词

水文水资源, 生态流量, 定量化方法, 武江坪石站

Research on the Determination Method of Ecological Flow of Mountain Rivers at the Border of Hunan and Guangdong Province

Zhirui Yi^{1*}, Hang Zeng¹, Jin Wang²

¹School of Water Resources and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

²Guangzhou Hydrological Branch of Guangdong Provincial Hydrological Bureau, Guangzhou Guangdong

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

作者简介: 易之睿(2006-), 男, 长沙理工大学水利与海洋工程学院本科在读学生。

*通讯作者 Email: 12517975@qq.com

文章引用: 易之睿, 曾杭, 王进. 湘粤交界山区性河流生态流量确定方法研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(4): 425-433.

DOI: 10.12677/jwrr.2025.144046

Abstract

Ecological flow is a core element in maintaining the health of river ecosystems. The Wujiang Pingshi Hydrologic Station, as a key control node in the cross provincial watershed of Hunan and Guangdong provinces, is located in the Lingnan ecological barrier zone on the Hunan Guangdong border. The scientific determination of its ecological flow is of great significance for the coordinated management of regional water resources. Based on the monthly flow data of Pingshi Station from 1956 to 2021, this article took comprehensive analysis of the interannual and intra-annual variation characteristics of the runoff at Pingshi Station, and multiple hydrological quantitative analysis methods such as the driest month flow method, Q_p method (design guarantee rate driest month average flow method), Tennant method (minimum monthly average measured flow method of rivers), and monthly flow frequency curve method were used to conduct comparative research. The results showed that the ecological flow threshold during the dry season calculated by different methods ranged from 8.5 to 10.9 m^3/s . Among them, the Q_p method and Tennant method were more suitable for the management practice of this watershed due to their theoretical rigor and operational feasibility; The research results are highly consistent with the 10 m^3/s control target of the "Beijiang River Ecological Flow Guarantee Plan", which can provide technical support for the fine management of ecological flow in mountainous rivers in South China.

Keywords

Hydrology and Water Resources, Ecological Flow, Quantitative Methods, Wujiang Pingshi Station

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河流保持一定流量对维持生态系统的完整性、支持生物多样性以及保障人类社会的可持续发展至关重要。河流生态流量(Ecological Flow)的概念最早出现是来源于维持河流系统基本功能,其核心思想是从维护水生生物最低流量要求的角度出发,提出维持河道生态健康的流量推荐值[1]-[3]。河流生态流量计算方法众多,包括水文学法、水力学法、生态栖息地法、整体分析法等。其中,水文学法具有简单快速、资料收集难度小、容易标准化、容易测验与考核等优点得到了广泛的应用。基于水文学法的生态流量计算方法又可细分为:近10年最枯月均流量法、 Q_p (设计保证率最枯月平均流量法)、Tennant法(河流最小月平均实测流量法)、逐月平均流量频率曲线法等[4]。本研究在分析比较这些方法的特点和适应性基础上,以位于湘粤交界的武江上游为计算实例,分析其上游控制水文站坪石站径流量的年际及年内变化特性,并对其1956~2021年逐月平均流量资料进行计算分析,确定了 Q_p 法及Tennant法因计算结果合理,且实操性和适应性好,为华南其他山区性河流生态流量确定具有重要参考意义。

2. 研究区域与研究数据

武江,又名武水,是珠江水系北江干流上源之一,流域范围见图1。发源于湖南临武县三峰岭北麓,流经湖南省的临武、宜章和广东省的乐昌、乳源、曲江、韶关市区,于韶关市区沙洲尾与浈江汇合,称北江。

依据《广东省第三次水资源调查评价成果报告》,武江干流长260 km,集水面积7119 km^2 ,其中上游的湖南省境内干流长为108 km,流域面积分别为3350 km^2 ,流域面积占比分别广东52.9%和湖南47.1%。坪石水文

站位于武江干流韶关市坪石镇灵石坝村,为珠江流域北江水系武江上游控制站,位于东经 113°04'、北纬 25°28' (见图 1),集水面积为 3567 km²,占武江流域集水面积的 50.4%,河长为 136 km,至河口距离为 124 km,平均河道坡降为 1.41%,计算分析所用数据资料为坪石水文站 1956~2021 年共 66 年的逐月平均流量。

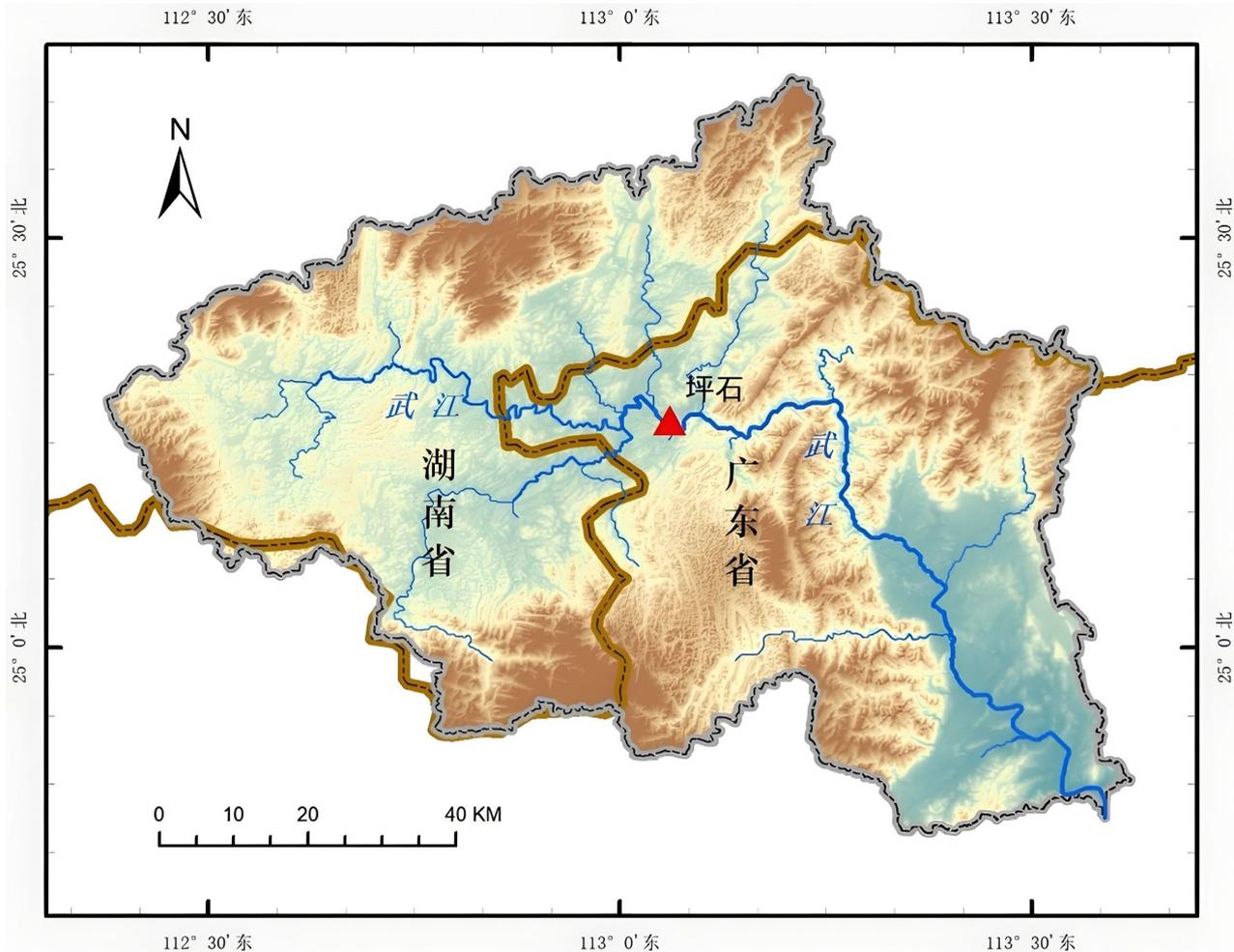


图 1. 武江流域示意图

3. 研究方法

3.1. 近 10 年最枯月平均流量法

该方法利用近 10 年最枯月流量作为生态流量,简单且实用性强,适用于缺乏长系列水文资料的河流。

3.2. Q_p 法

Q_p 法即设计保证率最枯月平均流量法,根据河流控制断面长系列($n > 30$ 年)的天然月平均流量资料,用每年的最枯月平均流量进行频率分析计算,选择设计保证率的最枯月平均流量作为河流控制断面的生态流量。保证率 P 根据流域水资源开发利用程度、规模、来水情况等实际情况确定,一般取 90%或 95%。

3.3. Tennant 法

Tennant 法即河流最小月实测平均流量法,按照河道内不同生态状况对应的多年平均天然流量百分比来确定

生态流量，推荐的百分比范围见表 1 [4] [5]。在水资源短缺、用水紧张的河流，可选择表中“良好”分级数据。在水资源较丰沛的河流，可选择表中“很好”分级数据。

表 1. Tennant 法推荐的生态流量占天然流量百分比范围

不同流量百分比对应河道内生态状况	占天然流量百分比(%)	
	年内水量较枯时段	年内水量较丰时段
最佳	60~100	
优秀	40	60
很好	30	50
良好	20	40
一般或较差	10	30
差或最小	10	10
极差	0~10	0~10

3.4. 频率曲线法

频率曲线法即用各月平均流量的长系列资料进行频率分析计算，将设计频率的月平均流量作为对应月份的河流控制断面生态流量，频率通常取 90%或 95%，一般要求有 30 年及以上的月平均流量系列数据。

4. 计算过程与结果分析

4.1. 天然径流量变化分析

4.1.1. 径流量年际变化特征分析

武江坪石站多年平均天然径流量值为 31.5 亿 m³，多年平均径流深为 942 mm，高于湖南省全省多年平均径流深(794.2 mm)，略低于广东省全省多年平均径流深(992 mm)，符合我国降水从东南沿海向西北内陆递减的总体趋势。

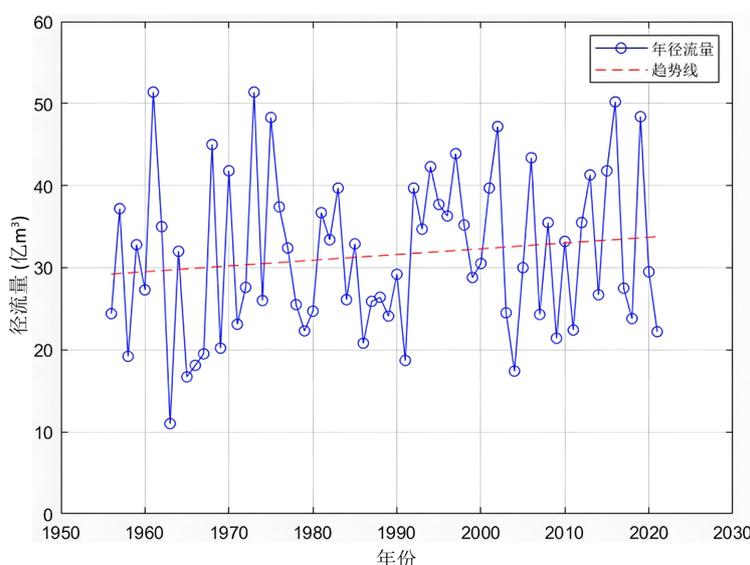


图 2. 坪石站年径流过程线

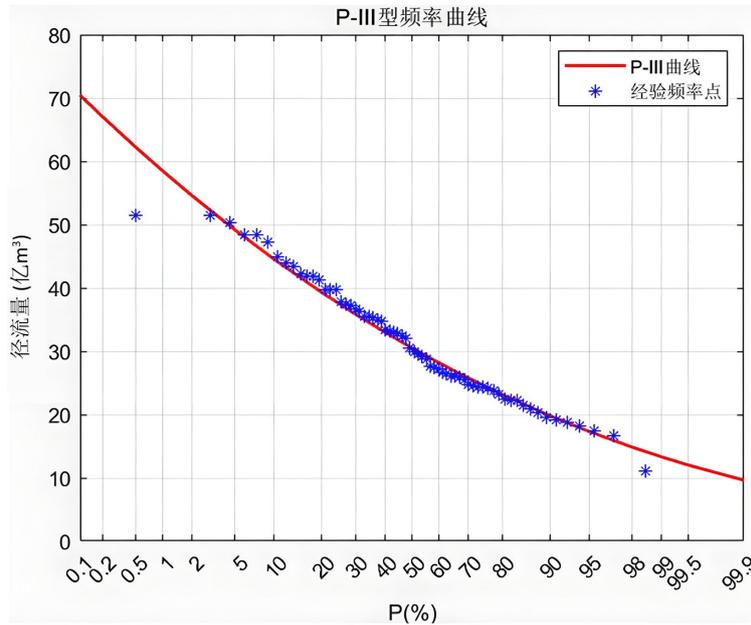


图 3. 坪石站年径流量 P-III 型频率分布曲线

武江坪石站年天然径流量过程线见图 2，径流量的年际变化很大，其中，极大值为 51.4 亿 m³ (1973 年)，极小值为 11.0 亿 m³ (1963 年)，极值比达到 4.7；线性趋势线总体呈略微上升趋势，年均增幅为 0.07 亿 m³。

武江坪石站年径流量 P-III 型频率分布曲线见图 3，其均值为 31.5 亿 m³，变差系数 Cv 为 0.31，偏态系数 Cs 为 0.62，设计保证率 50%、75%、90% 的年径流量分别为 30.5 亿 m³、24.4 亿 m³、19.8 亿 m³，略高于湘粤两省北江分水方案中相应来水频率的下泄水量控制指标(分别为 29.64 亿 m³、22.20 亿 m³、17.36 亿 m³)。

4.1.2. 径流量年内分配特征分析

坪石站多年平均各月径流量情况见表 2，各月径流量分布箱线图见图 4。年内各月径流量呈单峰分布，年内分配不均匀。径流量最大的月份为 5 月，单月占全年径流量的比例达到 17.5%；径流量最大 4 个月为 3~6 月，占全年径流量的比例达到 58.2%；3 月径流量在全年排第 4 位，大于 7 月、8 月、9 月等月份径流量，表明武江的开汛时间较早，且径流量集中在前汛期；7 月后的各月径流量迅速减小，7~9 月 3 个月的径流量合计仅占全年的 22.3%，较易出现“伏旱”；最枯月为 11 月、12 月和 1 月。箱线图的上方有较多的离群值，表明月份的径流量在部分年份会大幅偏离正常范围。

表 2. 坪石站多年平均月径流量表

月份	月径流量 亿 m ³	占比%	月份	月径流量 亿 m ³	占比%
1	1.14	3.6	7	2.65	8.4
2	1.58	5.0	8	2.59	8.2
3	3.00	9.5	9	1.78	5.6
春小计	5.72	18.2	秋小计	7.02	22.3
4	4.41	14.0	10	1.39	4.4
5	5.50	17.5	11	1.16	3.7
6	5.42	17.2	12	0.97	3.1
夏小计	15.34	48.7	冬小计	3.53	11.2

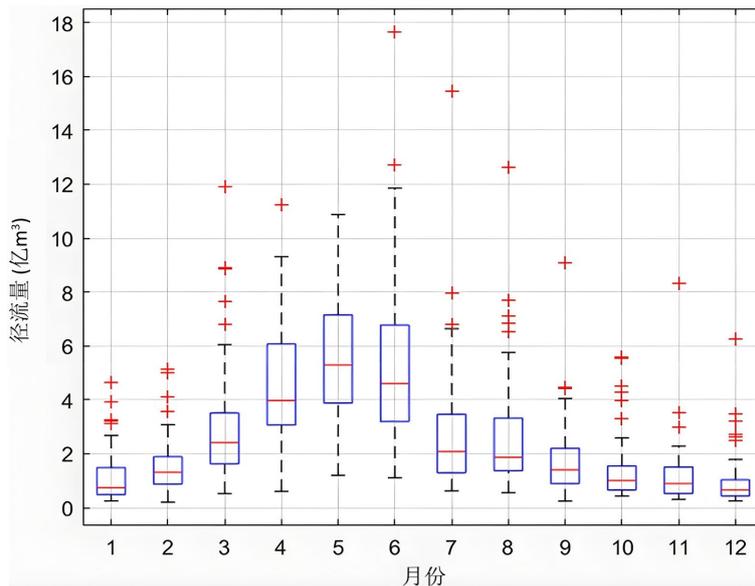


图 4. 坪石站月径流量箱线图

4.2. 生态流量计算

4.2.1. 近 10 年最枯月平均流量法

1956~2021 年的逐月平均流量统计表明，坪石站各年内的最枯月大部分出现在 12 月(占比 40.9%)或 1 月(占比 24.2%)，同时在 2、4、9、10、11 等月份也有一定概率出现。以 10 年的时间宽度，使用滑动法求取每 10 年最枯月平均流量(如 1965 年数值为 1956~1965 年时间跨度，见图 5 蓝色圆圈)。结果显示，接近 10 年最小月平均流量得到的生态流量呈阶段性跳跃变化，数值分别有 9.4、13.9、12.4、11.8、9.1、……，起伏不定，其中最大值为 16.4 m³/s (2019、2020 年)，最小值为 8.5 m³/s (1999~2008 年)，最大值是最小值的 1.9 倍，变化幅度较大，不具有稳定性。

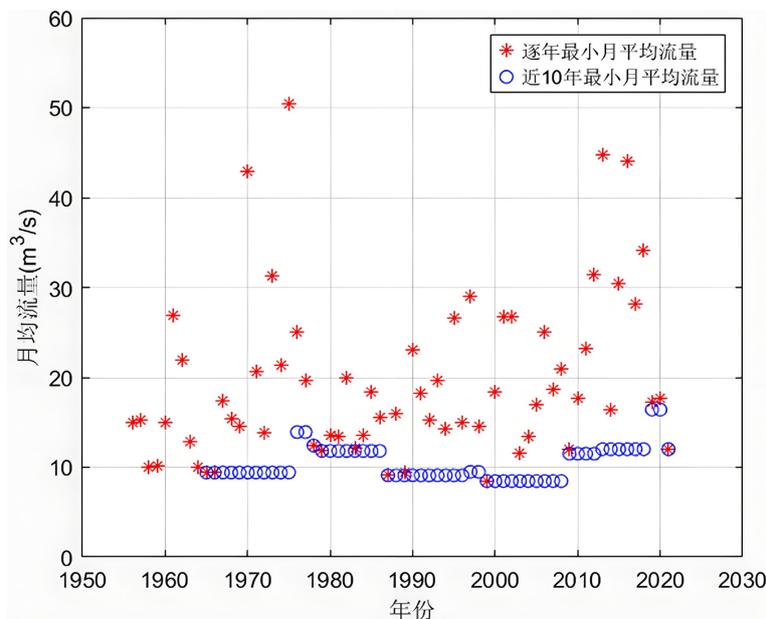


图 5. 近 10 年最小月平均流量法求生态流量

4.2.2. Q_p 法(不同频率最枯月平均流量法)

统计坪石站 1956~2021 年的最枯月平均流量，并以 P-III 型频率分布曲线排频分析，见图 6。得到最枯月平均流量值为 $19.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。变差系数 C_v 为 0.50，偏态系数 $C_s = 3.5C_v$ ，90%和 95%两个保证率 P 下的最枯月平均流量分别为 $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9.36 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

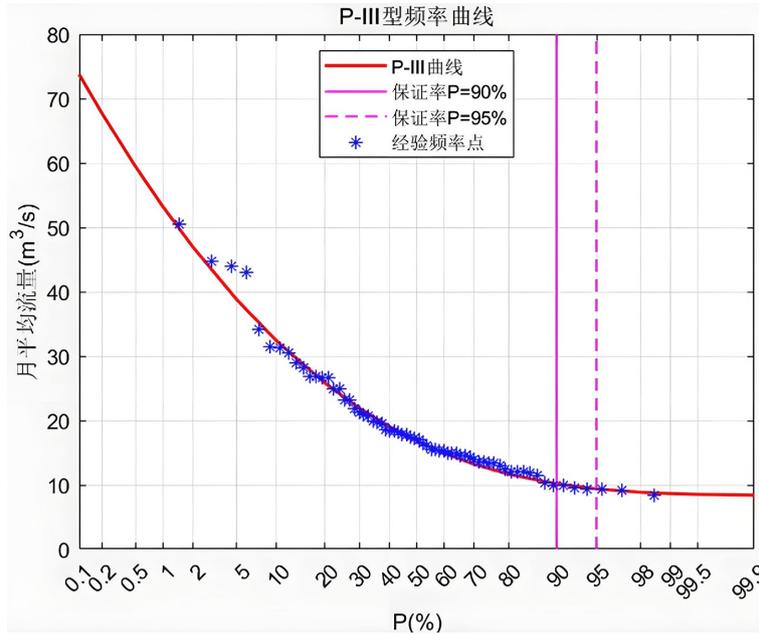


图 6. Q_p 法求生态流量

4.2.3. Tennant 法

武汉坪石站 1956~2021 年多年平均流量(记作 $Q_{多平}$)为 $101 \text{ m}^3/\text{s}$ 。统计坪石站各月流量达到各级流量限值的比例，见表 3。本文提出 Tennant 法方案分丰枯两期确定：① 把流量值前 6 位的 3~8 月共 6 个月作为丰水期，生态流量目标定为 $20\% Q_{多平}$ (即 $20.2 \text{ m}^3/\text{s}$)；② 流量值后 6 位的 1~2、9~12 月作为枯水期，生态流量目标定为 $10\% Q_{多平}$ (即 $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$)。若要使各月流量达到限值的比例超过 95%作为控制目标，丰水期生态流量为 $20\% Q_{多平}$ (即 $20.2 \text{ m}^3/\text{s}$)，枯水期生态流量为 $10\% Q_{多平}$ (即 $10.1 \text{ m}^3/\text{s}$)即可满足要求。

表 3. 坪石站各月流量达到各级流量限值比例

月份	达到各级流量限值的比例(%)				
	$50\% Q_{多平}$	$40\% Q_{多平}$	$30\% Q_{多平}$	$20\% Q_{多平}$	$10\% Q_{多平}$
一月	28.8	34.8	48.5	68.2	<u>98.5</u>
二月	53.0	68.2	86.4	92.4	<u>97.0</u>
三月	84.8	90.9	<u>97.0</u>	<u>98.5</u>	<u>100.0</u>
四月	<u>95.5</u>	<u>97.0</u>	<u>98.5</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>
五月	<u>98.5</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>
六月	<u>98.5</u>	<u>98.5</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>
七月	71.2	83.3	90.9	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>
八月	75.8	86.4	93.9	<u>98.5</u>	<u>100.0</u>

续表

九月	54.5	69.7	81.8	93.9	<u>98.5</u>
十月	27.3	42.4	66.7	87.9	<u>100.0</u>
十一月	30.3	42.4	53.0	72.7	<u>100.0</u>
十二月	18.2	24.2	37.9	59.1	<u>97.0</u>

本表中流量达到限值比例大于 95%的数字标注下划线。

表 4. 坪石站各月频率曲线法生态流量计算表

月份	平均值	Cv	Cs	Q _{90%}	Q _{95%}	Q _{90%} /Q _{95%}
一月	42.3	0.92	2.59	13.0	12.4	1.05
二月	65.1	0.65	1.70	23.8	20.2	1.18
三月	113	0.84	2.19	32.3	28.7	1.13
四月	172	0.52	1.24	76.3	62.9	1.21
五月	205	0.38	0.38	109	86.1	1.27
六月	208	0.57	1.47	87.5	73.7	1.19
七月	97.6	0.77	1.84	27.6	22.4	1.23
八月	96.2	0.82	1.96	25.1	20.6	1.22
九月	67.9	0.70	1.68	21.6	17.4	1.24
十月	51.3	0.84	2.35	16.5	15.4	1.07
十一月	44.7	0.72	1.88	14.8	12.7	1.17
十二月	36.5	1.00	2.80	10.9	10.5	1.04

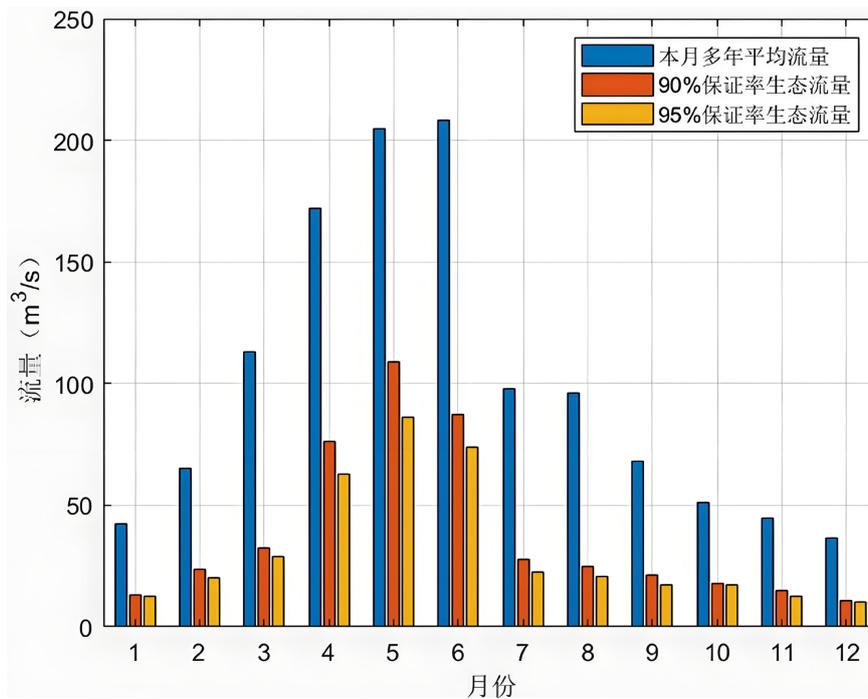


图 7. 各月频率曲线法求生态流量图

4.2.4. 月平均流量频率曲线法

用坪石站 66 年各月平均流量资料系列构建水文频率曲线, 分别按照 90%和 95%保证率相应的月平均流量作为对应月份的生态流量, 结果见表 4 和图 7。可见, 此方法得到的各月生态流量各不相同, 总体呈单峰分布, 其中, 5 月最大, 4 月和 6 月次之, 其他月份与 4~6 月相比要偏小幅度大, 并从中间月份向年初、向年末依次递减。12 月的生态流量最小, 90%和 95%保证率的生态流量分别为 $10.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.3. 分析与讨论

前述 4 种基于水文学的生态流量计算方法各有优缺点。近 10 年最枯月平均流量法需要的水文资料系列较短, 但是计算结果呈阶段性跳跃变化, 且变幅较大。 Q_p 法(不同频率最枯月平均流量法)、Tennant 法(河流最小月实测平均流量法)和各月平均流量频率曲线法 3 种方法一般需要 30 年以上的月度水文资料, 并且都采用水文频率分析方法, 计算结果比较稳定, 其中, Q_p 法全年采用 1 个生态流量控制目标, Tennant 法一般采用丰水期和枯水期 2 个生态流量控制目标, 而各月频率曲线法则有 12 个月的生态流量控制目标。从水资源管理的可操作性来讲, Q_p 法和 Tennant 法两种方法更为适宜。具体到武江上游坪石站, 4 种方法计算得到最枯月生态流量目标为 $8.5\sim 10.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 相差不大。同时, 与《北江流域生态流量保障方案》(试行)规定的坪石站生态流量与调度管理目标为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 对比[6], 也是高度契合。

5. 结论与建议

1) 武江坪石站径流量年际变化较大, 年内分配不均匀, 开汛较早, 径流过程呈单峰分布, 径流量主要集中在前汛期(4~6 月), 后汛期和枯水期径流量较小。

2) 近 10 年最枯月平均流量法、 Q_p 法、Tennant 法和各月平均流量频率曲线法等四种基于水文学的生态流量计算方法得到的坪石站最枯月平均流量 $8.5\sim 10.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 相差不大。

3) 从理论严谨性以及水资源管理的可操作性来考虑, Q_p 法和 Tennant 法这两种生态流量确定方法更为适宜。

4) 生态流量确定方法是水资源管理和生态保护的核心问题, 随着生态基础数据的完善以及水资源精细化管理需求提高, 建议未来进一步融合科技与政策工具, 从单一水文指标向多维度、动态化方向不断完善生态流量计算方法, 以实现经济社会可持续发展目标。

参考文献

- [1] 刘悦忆, 朱金峰, 赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 23-34.
- [2] 孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 河流生态需水量研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 112-115.
- [3] 郭利丹, 夏自强, 林虹, 等. 生态径流评价中的 Tennant 应用[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1787-1792.
- [4] 宋兰兰, 陆桂华. 生态环境需水研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2004(3): 57-61.
- [5] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范(SL/T 712-2021) [EB/OL]. <https://www.waizi.org.cn/bz/122250.html>, 2025-07-31.
- [6] 水利部珠江水利委员会. 北江流域生态流量保障方案(试行) [Z].