

张丽亭, 逢勇, 汪静娴, 等. 基于鱼类生境所需水文-水力特征的生态流量计算方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 100-112. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.009

ZHANG Liting, PANG Yong, WANG Jingxian, et al. A method for determining the basic ecological flow of riverways through comprehensive hydrology, water conservancy, and habitat simulation analysis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 100-112. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.009

基于鱼类生境所需水文-水力特征的生态流量计算方法

张丽亭^{1,2}, 逢勇^{1,2}, 汪静娴^{1,2}, 季汇玲^{1,2}, 张舒文^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:【目的】为保障叶尔羌河的生态用水并科学合理确定生态流量,【方法】基于长系列水文资料,采用面积比指数法对研究河段进行径流推求,得出控制断面长系列径流成果;根据径流计算数据和实测断面信息,使用水力学计算方法得出在不同流量条件下的水深、湿周、流速和水面宽等水力特性。同时,结合鱼类栖息地需求的水力参数,运用 Tennant 法、湿周法、Q90 法和生态水力学法等四种不同方法综合确定该断面的生态流量。根据生态流量计算结果,分析天然来流和生态流量下泄两种情形下的下游断面水文水力特征变化情况。【结果】通过对多种计算方法进行比较分析,确定在叶尔羌河流域米斯克尼坝址断面,枯水期(10月至次年3月)的最小下泄生态流量为多年平均流量的10%,即14.3 m³/s;而在鱼类繁殖期和丰水期(4月至9月),下泄的生态流量应为多年平均流量的30%,即42.9 m³/s。采取以上计算结果进行生态流量下泄,下游河道断面水力参数均有不同程度的改变,与平水年天然来流相比流量降低79.6%、流速降低48.3%、水深减小31.4%、水面宽减小26.1%。【结论】以上基于鱼类生境需求,结合水文学、水力学方法的河道生态流量计算方法较为合理,且能根据鱼类产卵时间划分出精确的生态流量。河道内仅下泄生态流量会导致断面水深、水面宽、流速等水力参数发生较大的改变,在保证鱼类生态流量的同时还需考虑流量减少对其他动物或植被的影响。

关键词: 生态流量; 鱼类生境; 计算方法; 叶尔羌河; 径流还原; 影响因素; 水资源

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0100-13



A method for determining the basic ecological flow of riverways through comprehensive hydrology, water conservancy, and habitat simulation analysis

ZHANG Liting^{1,2}, PANG Yong^{1,2}, WANG Jingxian^{1,2}, JI Huiling^{1,2}, ZHANG Shuwen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-09-06; 录用日期: 2024-09-13; 网络出版日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52000100)

作者简介: 张丽亭(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水环境数学模型研究。E-mail: 1819296579@qq.com

通信作者: 逢勇(1958—), 男, 教授, 博士, 主要从事环境规划与评价研究。E-mail: pangyonghhu@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] To ensure the ecological water use of the Yarkand River and scientifically determine the ecological flow rate, [Methods] the area ratio index method based on long-term hydrological data was utilized to calculate the runoff of the studied river section. This approach yielded the long-term runoff result for the control section. Using these runoff calculations and measured cross-sectional information, hydraulic calculation method was applied to obtain hydraulic characteristics such as water depth, wetted perimeter, flow velocity, and water surface width under different flow conditions. To comprehensively determine the ecological flow rate of the section, there are four different method employeee: the Tennant method, the wetted perimeter method, the Q90 method, and the ecological hydraulic method. These method were based on the hydraulic parameters required for fish habitat. Subsequently, the changes in hydrological and hydraulic characteristics of downstream sections under two scenarios: natural inflow and ecological flow discharge. [Results] By comparing and analyzing multiple calculation method, the minimum ecological discharge during the dry season (October to March of the following year) at the Miskni dam site section in the Yarkand River Basin is 10% of the average annual flow, which is $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$. During the breeding season of fish and the wet season (April to September), the ecological flow discharge should be 30% of the average annual flow, which is $42.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Using these ecological flow discharge calculations, changes in the hydraulic parameters of the downstream river section. Compared to the natural inflow in normal years, the flow rate decreased by 79.6%, the flow velocity decreased by 48.3%, the water depth decreased by 31.4%, and the water surface width decreased by 26.1%. [Conclusion] The calculation method for river ecological flow, based on the habitat requirements of fish and combined with hydrological and hydraulic method, is relatively reasonable. It can accurately determine the ecological flow according to the spawning time of fish. However, releasing only the ecological flow in the river can cause significant changes in hydraulic parameters such as cross-sectional water depth, water surface width, and flow velocity. While ensuring the ecological flow for fish, the impact of reduced flow on other animals or vegetation should also be considered.

Keywords: ecological flow; fish habitat; calculation methods; Yarkant River; runoff reduction; influence factors; water resources

0 引言

由于水资源利用开发程度较高以及气候变化等原因, 导致河道径流量下降^[1], 使得生态环境的水量需求被挤压, 造成河道生态系统结构和功能的下降^[2]。这不仅关系到水生生物的生存繁衍, 还影响到河流、湖泊的地质地貌、水文特征等。生态流量是确保水生态环境可持续发展和有效管理的关键指标^[3], 其概念是指维持河流生态系统结果和功能所需的流量^[4]。学者们对生态流量组成要素进行了研究, 主要包括生态基流^[5-6]、洪水脉冲^[7-8]、生物敏感期流量^[9-11]。目前, 生态流量计算方法根据所需资料及侧重点大致可分为水文学法、水力学法、生境模拟法^[12-14]。

水文学法相比其他方法更早提出, 主要基于长系列径流数据, 取多年平均流量特定百分比或通过频率曲线来确定生态流量^[15], 这类方法计算简单但针对性较低; 应用较多的水文学法有 Q 法、Tennant 法等^[5-16]; 基于不同的目标, 学者们对水文学方法进行了广泛地应用与改进。其中水文学法中的 Tennant 法由于计算简便、所需资料少, 目前应用较多, 许多学者将 Tennant 法与其他分析方法相结合得到改进后的 Tennant 法。李计生等^[17]运用 Tennant 改进法进行讨

论河生态流量计算; VERMA 等^[18]基于 Tennant 法和 72 个水文指标评估印度达莫达尔流域的生态流量; DAI 等^[19]将物质元素分析法 (ME) 与 Tennant 法相结合对刘家坪水电站生态流量进行评价。

水力学法相比水文学法更为深入, 结合河道断面信息和水文数据得到流量与水力参数之间的关系, 通过水力参数来评估生态流量。这类方法考虑了河道的形态变化^[20], 关注水深、湿周、流速等水力参数的变化, 水力学法包括湿周法^[21]和 R2-CROSS 法^[22-23]。水文学法和水力学法侧重于河流的物理特性, 没有考虑河流的生物特征, 但因这些方法具有实用性、高效性和较强的适用性等特点而得到广泛使用^[24]。李紫妍等^[25]运用变化范围法 (RVA) 结合 Q90 法对汉江子午河进行生态流量计算; 史方方等^[26]选用改进湿周法对汉江上游三个断面最小生态流量进行定量估算。

水文学法和水力学法确定的最小生态流量只考虑河道水文及物理特性, 而不能保证满足河流生态系统的完整性, 而生境模拟法考虑了河道内生物关于流速、水深、水面宽等生境需求, 是一种更为可靠的评价方法, 同时, 生境模拟法需要更多鱼类习性资料, 计算方法也比水文学法和水力学法更为复杂。生境模拟法是在水力学法基础上进一步发展而来的, 基于

水文数据、水力学参数和生物特性, 模拟不同流量条件下的生态系统响应情况, 以此确定适宜生物生长繁殖的生态流量。生境模拟法包括生态水力学法、生境分析法等^[27-28]。近年来许多学者对生境模拟法进行了广泛地应用与改进, 但仍存在一些不足。比如关注生境要素较少, 侯俊等^[29]选取水深、流速两个要素利用生境模拟法对雅鲁藏布江进行环境流量计算, 未选取其他与鱼类生境相关的要素。此外还存在计算方法不够全面的问题, 吕翠美等^[30]以灌河为例运用生境模拟法和 Tennant 法计算出四大家鱼生长繁殖所需的生态基流, 未采用水力学方法对计算结果进行验证。黄冬菁等^[28]兼顾水文、水力、生境三种角度进行生态流量计算, 但未考虑生态流量下泄相比天然来水引起的下游断面水力参数变化。本研究选用的生态流量计算方法考虑水文学、水力学和生境三个角度, 采用最大水深、平均水深、流速、水面宽、湿周、过水断面面积 6 个生境要素进行评估, 并根据生态流量计算结果分析天然来流和生态流量下泄两种情形下的下游断面水文水力特征变化情况。

以上每种生态流量方法都有特定的应用场景和适用条件, 选取计算方法时需考虑评价河段的自身特性及掌握的资料情况, 在平衡高效性和精确性的情况下确定合适的方法。研究河段位于叶尔羌河中游, 地势险峻, 附近水文站有长系列水文资料, 河段下游有叶尔羌河特有鱼类国家级水产种质资源保护区, 有重要的生态保护目标。根据研究河段长系列水文资料, 采用面积比指数法对研究河段进行径流推求, 得出控制断面长系列径流成果; 选取鱼类作为指示物种, 主要采用生境模拟法中的生态水力学法, 同时结合 Tennant 法、Q90 法和湿周法, 对叶尔羌河中游的控制断面进行生态流量的计算。这四种方法涵盖了水文学、水力学和生境分析三个方面, 其中生态水力学法考虑了水深、流速、水面宽、湿周、过水断面面积多个生境要素。最后根据生态流量计算结果分析生态流量下泄相对天然来流对下游断面水力参数的影响。

1 研究区和数据来源

1.1 研究区概况

叶尔羌河流域在塔里木盆地西南边缘, 位于新疆维吾尔自治区南部, 是塔里木河四源之一, 是塔里木河的第一大支流。叶尔羌河流域范围介于 74°28'E—80°54'E, 34°50'N—40°31'N 之间(见图 1)。叶尔羌河发源于喀喇昆仑山, 总体由西南流向

东北, 沿途汇入克勒青河、巴什却普河、布伦木河、大同河、塔什库尔干河后, 经卡群水文站流出山区, 干流长度 1 097 km。米斯克尼水电站为叶尔羌河中游的龙头水库电站, 工程在塔什库尔干塔吉克自治县境内, 坝址控制流域面积 23 490 km², 厂址控制流域面积 23 568 km²。工程厂址下游 30 km 外为叶尔羌河特有鱼类国家级水产种质资源保护区。叶尔羌河干流中游设有库鲁克栏干水文站(控制流域面积 29 993 km²)、卡群水文站(控制流域面积 47 218 km²)。库鲁克栏干水文站位于米斯克尼水电站工程坝址下游约 165 km 处, 卡群水文站位于米斯克尼水电站工程坝址下游约 267 km 处。本研究以上述两个水文站作为主要设计参证站。

1.2 数据来源

水文数据采用《中华人民共和国水文年鉴: 第 3 册》内陆河湖水文资料中 1954—2019 年卡群站、库鲁克栏干站实测流量数据。站点基本情况如表 1 所列。

河道地形数据来源于工程现场实测断面数据。鱼类数据来源于《新疆叶尔羌河米斯克尼水电站工程对叶尔羌河特有鱼类国家级水产种质资源保护区影响专题论证报告》。米斯克尼水电站工程位于叶尔羌河特有鱼类国家级水产种质资源保护区上游 110 km, 主要保护对象为斑重唇鱼、厚唇裂腹鱼、宽口裂腹鱼、重唇裂腹鱼、塔里木裂腹鱼、叶尔羌高原鳅、长身高原鳅、隆额高原鳅等。上述鱼类形态及生活特性信息如表 2 所列。

2 研究方法

2.1 径流系列推求

米斯克尼水电站工程坝址位于新疆叶尔羌河干流中上游, 坝址以上流域内无水文站, 坝址下游较近的水文站有库鲁克栏干水文站和卡群水文站, 本次径流计算设计参证站选用库鲁克栏干、卡群水文站, 径流系列长度采用 1954—2019 年共计 66 a 的逐月径流。

库鲁克栏干水文站以上流域为受人类活动影响较小的流域, 无需进行还原计算。卡群水文站上游现已建规模较大的水利工程有阿尔塔什水利枢纽(叶尔羌河)及下坂地水利枢纽(塔什库尔干河)。其中, 阿尔塔什水利枢纽于 2019 年 11 月下闸蓄水; 下坂地水利枢纽于 2010 年 1 月下闸蓄水。因此, 应对卡群站 2010—2019 年实测径流系列进行还原计算, 保证该站点径流系列的一致性。由于未收集到下坂地水利枢纽的运行资料, 本次根据卡群站及库鲁克栏干站天然



图 1 研究区域水系分布
Fig. 1 Study area hydrological distribution

表 1 叶尔羌河干中上游主要水文站基本情况

Table 1 Basic information of main hydrological stations in the upper and middle reaches of Yarkand River

站 名	测站位置	集水面积 /km ²	观测项目及观测年限			
			水 位	流 量	降 水	泥 沙
卡 群	莎车县喀群乡	47 218	1954 至今	1954 至今	1959 至今	1959 年 1 月—1968 年 4 月、 1972—1980 年、1982 年至今
库鲁克栏干	塔什库尔干县 大同乡	29 993	1959 年 7 月—1967 年、1970 年 7—9 月、 1971 年 7 月至今	1959 年 7 月—1967 年、1970 年 7—9 月、1971 年 7 月至 今	1960—1967 年、 1970 年 6—9 月、 1971 年 7—9 月、 1972 年至今	1966 年、1978 年 6 月—1980 年、1982 年至今

情况实测同步期(1960—1967 年及 1971—2009 年)的年径流量系列建立相关关系(见图 2),其相关性较好,据此相关关系插补得到卡群站 2010—2019 年天

然情况下的年径流量系列,而后进一步还原得到卡群站 2010—2019 年的逐月月均流量系列,计算流程如图 3 所示。

表 2 鱼类适宜生境的水力学参数

种 类	水深/m	流速/m·s ⁻¹	繁殖期	体长均值/mm
斑重唇鱼	0.1~0.8	0.3~1.0	4—6月	113.82
厚唇裂腹鱼	≥0.4	0.5~2.5	5—7月	235.05
宽口裂腹鱼				198.00
重唇裂腹鱼				154.06
塔里木裂腹鱼				142.08
叶尔羌高原鳅	0.1~1.0		5—8月	93.22
长身高原鳅			4—7月	104.42
隆额高原鳅				107.21
总 结	≥0.4	≥0.5	4—9月	≤235.00

卡群水文站具有 1954—2019 年的实测径流系列资料，而库鲁克栏干水文站有部分年份资料缺失，需插补延长。库鲁克栏干水文站有 1959 年 7 月—1967 年 12 月、1970 年 7 月—9 月、1971 年 7 月—2019 年 12 月的实测径流系列资料，为了使库鲁克栏干与卡群水文站具有长度一致的径流系列，需要对库鲁克栏干水文站 1954 年 1 月—1959 年 6 月、1968 年 1 月—1970 年 6 月、1970 年 10 月—1971 年 6 月的月平均流量进行插补延长。首先根据卡群站与库鲁克栏干站的相关关系对库鲁克栏干站年均流量进行插补延长，其次在控制年均流量的情况下进行月平均流量的插补延长。

基于卡群站和库鲁克栏干站的径流还原计算和插补延长成果，可进行坝址处的径流系列推求，具体方法是：根据卡群站、库鲁克栏干站两水文站的控制集水面积及多年平均年均流量成果，计算得到两站年均流量间的面积比指数 a ，而后利用该面积比指数将库鲁克栏干站的年径流量系列比拟至米斯克尼坝址。坝址年径流量系列进一步参照库鲁克栏干站历年年径流量的年内分配比例进行分配。面积比指数法计算公式^[31]为

$$Q_{MS} = Q_C \times (F_S/F_C)^a \quad (1)$$

式中， Q_{MS} 为设计流量(m^3/s)； Q_C 为参证站设计流量(m^3/s)； F_S 为设计站集水面积(km^2)； F_C 为参证站集水面积(km^2)； a 为面积比指数。

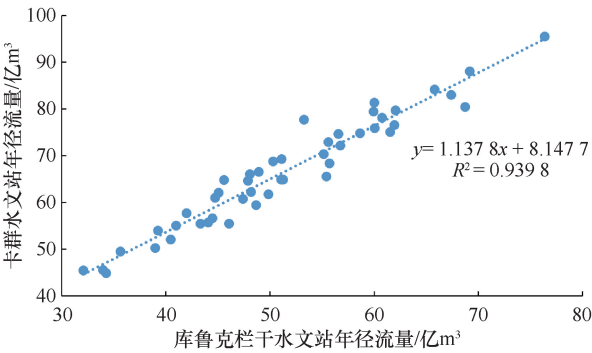


图 2 卡群站和库鲁克栏干站径流相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of runoff between Kaqun Station and Kuluke Langan Station

2.2 生态流量计算方法

2.2.1 Tennant 法

Tennant 法将全年分为枯水期、丰水期两个时段，提出在不同流量状况描述下对应的生态流量要求(以多年平均流量作为参照)^[32]。比如流量状况等级“最

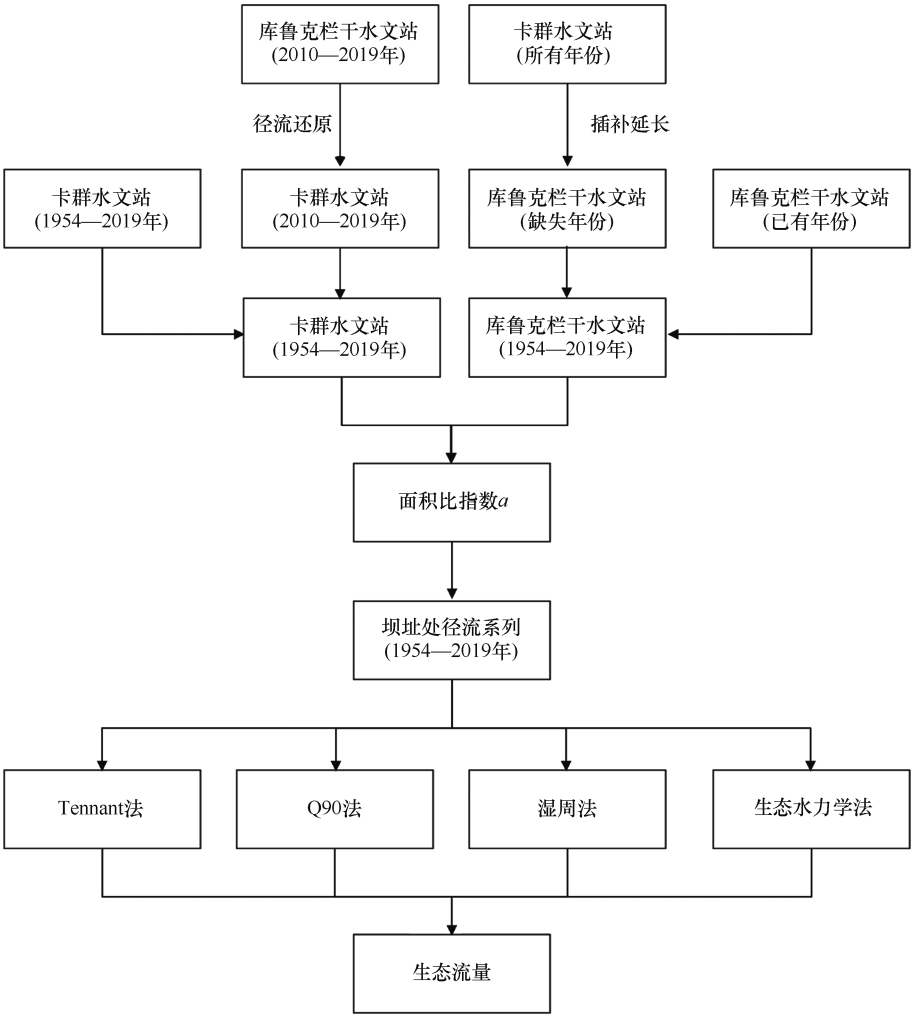


图 3 研究方法流程

Fig. 3 Research method flowchart

佳”和“极差”对应的推荐基流分别为60%~100%、0%~10%；“良好”对应的枯水期推荐基流为20%，丰水期推荐基流为40%；“一般或较差”对应的的枯水期推荐基流为10%，丰水期推荐基流为30%。

2.2.2 Q90法

Q90法作为一种水文学生态流量计算方法，基于河流上的控制断面长系列(超过30 a)观测的天然月平均流量(Q)数据，通过分析每年的最低流量月份，选取在90%频率下出现的最低流量月份平均值作为河流控制断面的生态流量^[16]。

2.2.3 湿周法

湿周法是一种基于水力学计算的生态流量计算方法，将湿周作为指标评估水生生物栖息地质量，具体措施是建立湿周与流量之间的关系曲线，通过识别湿周与流量关系曲线的拐点，作为水生生物的生态基流^[21]。湿周法适用于河道断面为稳定的宽浅矩形和抛物线型的河道。实测断面类型的判断结合弗劳德数法和深泓线线性回归法来分析，两种方法分别侧重于断面的水流特征和河床地形学特征。

(1)深泓线线性回归法。深泓线线性回归法是一种深潭、浅滩判定方法，该方法是将沿河道深泓线的河床高程进行回归方程拟合。根据河段的长短可选择一次方程、二次方程或三次方程进行拟合^[33]。

(2)弗劳德数法。基于实测断面数据采用曼宁公式计算得到多年平均流量下流速 V 和水深 H ，采用弗劳德数公式计算出各断面下的弗劳德数并求出平均值，将该值作为浅滩断面和深潭断面判定分界，弗劳德数大于平均值为浅滩断面，小于平均值为深潭断面^[34]。弗劳德数计算公式为

$$Fr = \sqrt{\frac{V^2}{gH}}$$
 (2)

式中， g 为重力加速度(m/s^2)； V 为多年平均流量下的断面平均流速(m/s)； H 为多年平均流量下的断面平均水深(m)。

2.2.4 生态水力学法

生态水力学法利用鱼类对河流水深、流速等水力生境参数的需求来评估河流的生态状况，可应用于计算和分析河流的水生生物的生态流量^[35]。本文选用生态水力学法进行鱼类繁殖期生态流量计算。水力生境参数采用曼宁公式计算，即

$$C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$$
 (3)

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot j}$$
 (4)

$$Q = A \cdot V$$
 (5)

式中， C 为谢才系数； R 为水力半径(m)； n 为糙率； j 为比降； V 为平均流速(m/s)； Q 为流量(m^3/s)。

(1)评估标准确定。《水利水电工程生态流量计算与泄放设计规范》(SL/T 820—2023)(以下简称《规范》)中提出了推荐取值，水力生境参数的计算结果按该规范的推荐取值设定的标准进行评价(见表3)。叶尔羌河在工程河段内的鱼类性成熟体长最大为0.235 m，最大水深需达到性成熟鱼类体长的2~3倍，即最低标准 $\geq 0.705 \text{ m}$ 。平均水深和平均流速按照鱼类生长繁殖需要分别调整为0.4 m/s和0.5 m/s。由于叶尔羌河在米斯克尼水电站工程的河段坡度较大，且断面形状变化较大，水面宽度和过水断面面积在天然情况下很难达到判定标准，故降低标准。

表3 生态水力学法评估标准

Table 3 Ecological hydrological method assessment criteria

生境参数	指标标准		
	推荐最低标准	调整后最低标准	累计河段长度的百分比
最大水深	性成熟鱼类体长的2~3倍	$\geq 0.705 \text{ m}$	$\geq 95\%$
平均水深	$\geq 0.3 \text{ m}$	$\geq 0.4 \text{ m}$	$\geq 95\%$
平均流速	$\geq 0.3 \text{ m/s}$	$\geq 0.5 \text{ m/s}$	$\geq 95\%$
水面宽度	$\geq 30 \text{ m}$	$\geq 20 \text{ m}$	$\geq 95\%$
湿周率	$\geq 50\%$	$\geq 50\%$	$\geq 95\%$
过水断面面积	$\geq 30 \text{ m}^2$	$\geq 20 \text{ m}^2$	$\geq 95\%$

(2)计算工况和断面设置。为了较全面地了解坝下类天然间段水力生境参数分布特点，分别取多年平均流量(143.0 m^3/s)的10%、15%、18%、20%、23%、25%、28%、30%，即14.3 m^3/s 、21.5 m^3/s 、25.7 m^3/s 、28.6 m^3/s 、32.9 m^3/s 、35.8 m^3/s 、40.0 m^3/s 、42.9 m^3/s 等8个模拟工况。计算断面为17个减水河段典型断面。

3 计算结果及分析

3.1 径流推求结果

首先，根据卡群站和库鲁克栏干站两个水文站的控制集水面积以及1954—2019年的多年平均年均流量数据，计算得出两站年均流量之间的面积比指数为0.57。随后，利用该指数，将库鲁克栏干站的年径流量数据比拟到米斯克尼水电站坝址，从而得出了米斯克尼坝址在1954—2019年间的年径流量数据系列(见图4)。接着，根据米斯克尼坝址的年径流量数据，按照库鲁克栏干站历年年径流量的年内分配比例进行分配，最终推算出了米斯克尼坝址在1954—2019年逐月径流系列。米斯克尼坝址的多年平均流量为

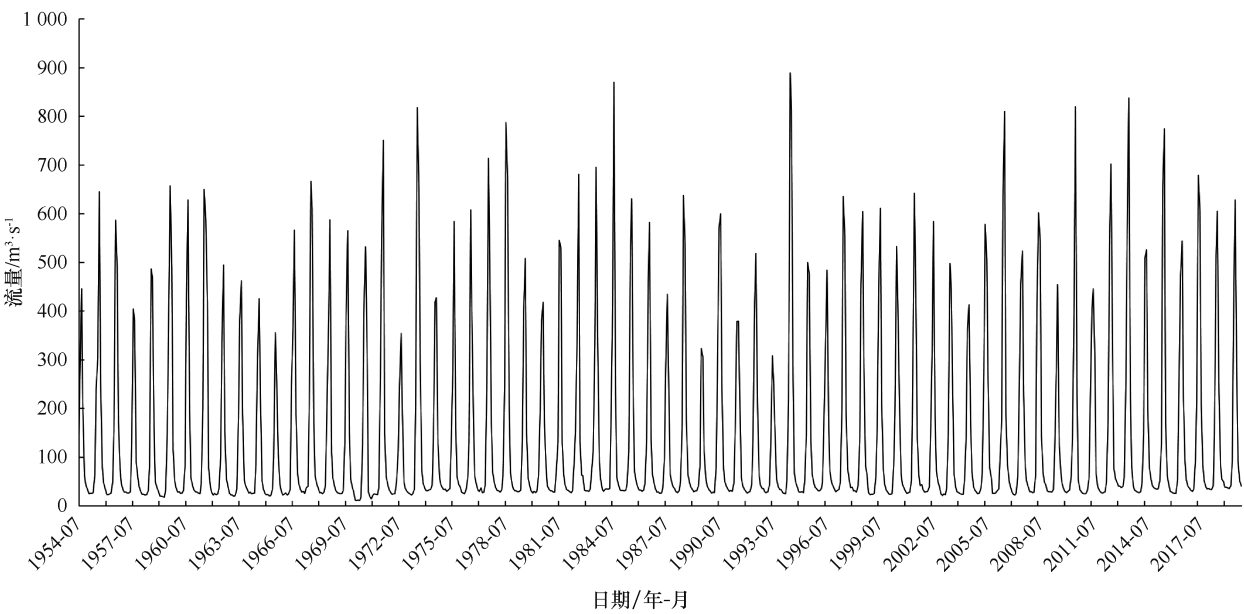


图4 米斯克尼坝址径流推求成果

Fig.4 Results of runoff calculation at Miskni Dam site

143 m³/s，平均年径流量 45.3 亿 m³，丰水期为 6—9 月，期间流量占全年流量的 81.9%，枯水期为 10 月至次年 5 月。

3.2 生态流量计算

3.2.1 Tennant 法

在此工程的减水河段中，生境质量应该至少保持在“一般”等级。对于坝址断面，在丰水期(4 月—9 月)，下泄的生态流量取坝址断面多年平均天然流量(143.0 m³/s)的 30%；而在枯水期(10 月至次年 3 月)，下泄的生态流量为坝址断面多年平均天然流量(143.0 m³/s)的 10%。由 Tennant 法计算出减水河段多年平均流量条件下的生态基流量，如表 4 所列。

表 4 减水河段内不同时段生态流量成果 m³/s

Table 4 Ecological flow results table of different time periods in the reduced water river section m³/s

断面位置	最小流量	枯水期	丰水期
		10 月至次年 3 月	4 月—9 月
米斯克尼坝址	14.3	14.3	42.9

3.2.2 Q90 法

在米斯克尼坝址，年内流量最低的月份是 3 月。为了计算经验频率，选取 1954—2019 年的每年最枯月月均流量作为连续实测数据序列。经验频率计算采用经验频率公式 $p = \frac{m}{n+1} \times 100\%$ 。之后使用矩法公式对统计参数进行初步估计，并采用 P-III 型曲线作为频率计算的线性目标曲线。频率曲线如图 5 所示。取

90%保证率下对应的月均流量为 Q90 法所得生态流量值，对应值为 22.86 m³/s。

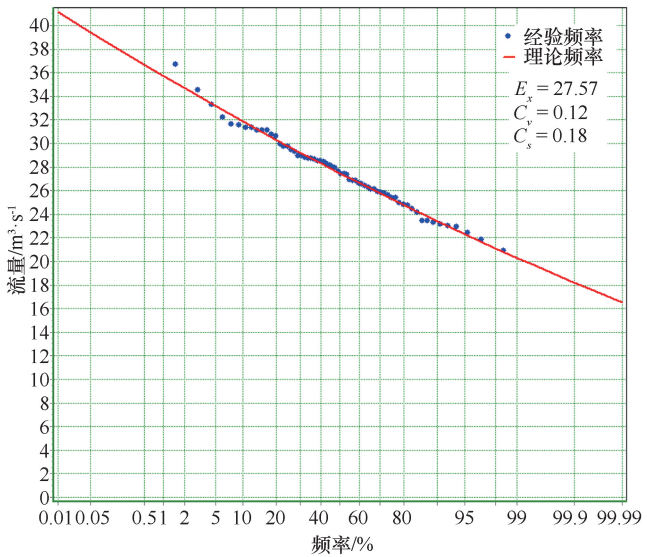


图5 米斯克尼坝址多年最枯月月均流量

Fig.5 Average flow in the driest month over multiple years at the Misiki Dam site

3.2.3 湿周法

(1)浅滩断面判别结果。深泓线线性回归拟合结果如图 6 所示，实测深泓线值高于曲线拟合深泓线值的断面为浅滩断面，反之为深潭断面，19 个断面中有 15 个是浅滩断面，其余为深潭断面。

弗劳德数法计算结果如图 7 所示，19 个断面的弗劳德数平均值为 0.36，因此，弗劳德数大于 0.36

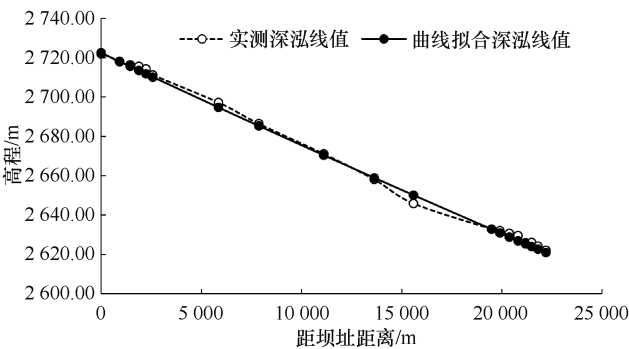


图 6 深泓线线性回归拟合结果

Fig. 6 Results of linear regression fitting for deep channel lines

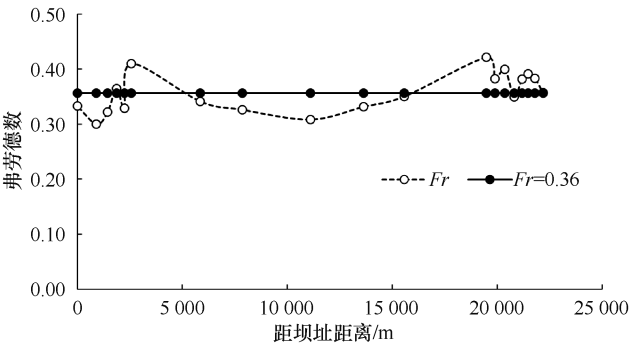


图 7 弗劳德数法计算结果

Fig. 7 Results of the Froude number calculation method

为浅滩断面，小于 0.36 为深潭断面，19 个断面中有 9 个为浅滩断面，其余为深潭断面。

深泓线线性回归法和弗劳德数法对断面深潭和浅滩的判定结果不完全一致，有冲突的 6 个断面需根据实际断面形状是否对称来进一步判定，水下部分对称为浅滩断面，不对称为深潭断面，经目测估计，有冲突的 6 个断面中 3 个为浅滩断面，3 个为

深潭断面。最终确定，该河段内选取的 19 个断面中 12 个为浅滩断面，湿周法将针对这 12 个断面进行分析计算。

(2)生态流量计算结果。湿周法中的湿周、流量采用相对多年平均值表示，即相对湿周和相对流量。米斯克尼水电站坝址以上控制流域面积为 23 490 km²，坝址多年平均流量为 143 m³/s。生态流量获取方法是：曲线拐点明显时直接在图中判定；曲线拐点不明显时用斜率为 1 的直线进行判定。采用斜率为 1 的直线判定时，需先对湿周-流量曲线进行曲线方程拟合，一般情况下，湿周-流量曲线方程可采用幂函数形式或对数函数形式。

根据各断面的相对湿周-相对流量关系曲线对应的拟合曲线方程，依据拐点判定生态流量取值，结果如表 5 所列。综合以上对比，选取各断面拐点对应流量最大值，确定 28.17 m³/s 作为湿周法推荐的生态流量。

3.2.4 生态水力学法

通过曼宁公式进行水力学计算，得到河段内 17 个断面在设定流量下的水深、水面宽、湿周、过水断面面积等参数。下泄流量分别取多年平均流量 (143.0 m³/s) 的 10%、15%、18%、20%、25%、30%，即 14.3 m³/s、21.5 m³/s、25.7 m³/s、28.6 m³/s、35.8 m³/s、42.9 m³/s。得到具体参数值后，再计算出各参数满足最低标准的河段累计长度占整个河段的百分比，超过 95% 达标。水力参数沿程变化如图 8 所示，不同流量时研究河段水力参数达标百分比如图 9 所示。

统计以上结果得出，坝址断面下泄生态流量为 28.6 m³/s (占坝址处多年平均流量的 20%) 时满足所

表 5 各断面湿周法估算结果

Table 5 Estimation results using the wetted perimeter method for each cross-section

断面编号	拐点处流量		相应流量下断面水力参数				
	占多年平均流量的比例/%	流量 /m ³ ·s ⁻¹	水面宽 /m	平均水深 /m	最大水深 /m	流速 /m·s ⁻¹	湿周率/%
16	15.39	22.01	34.50	0.62	0.92	1.03	53.86
15	19.80	28.31	45.81	0.61	1.23	1.013	54.81
14	10.53	15.06	29.08	0.55	0.75	0.95	64.77
12	16.72	23.91	28.11	0.79	1.36	1.209	43.09
8	8.52	12.18	26.33	0.51	0.65	0.90	64.97
7	14.66	20.97	38.95	0.56	0.96	0.96	67.70
6	11.28	16.13	58.17	0.38	0.63	0.74	78.93
5	16.44	23.51	57.01	0.48	0.82	0.86	59.02
4	14.19	20.29	39.57	0.54	1.02	0.94	73.70
3	9.75	13.94	56.19	0.35	0.56	0.71	72.12
2	15.99	22.86	57.90	0.47	0.89	0.85	79.48
1	15.29	21.86	52.14	0.48	1.11	0.87	46.32

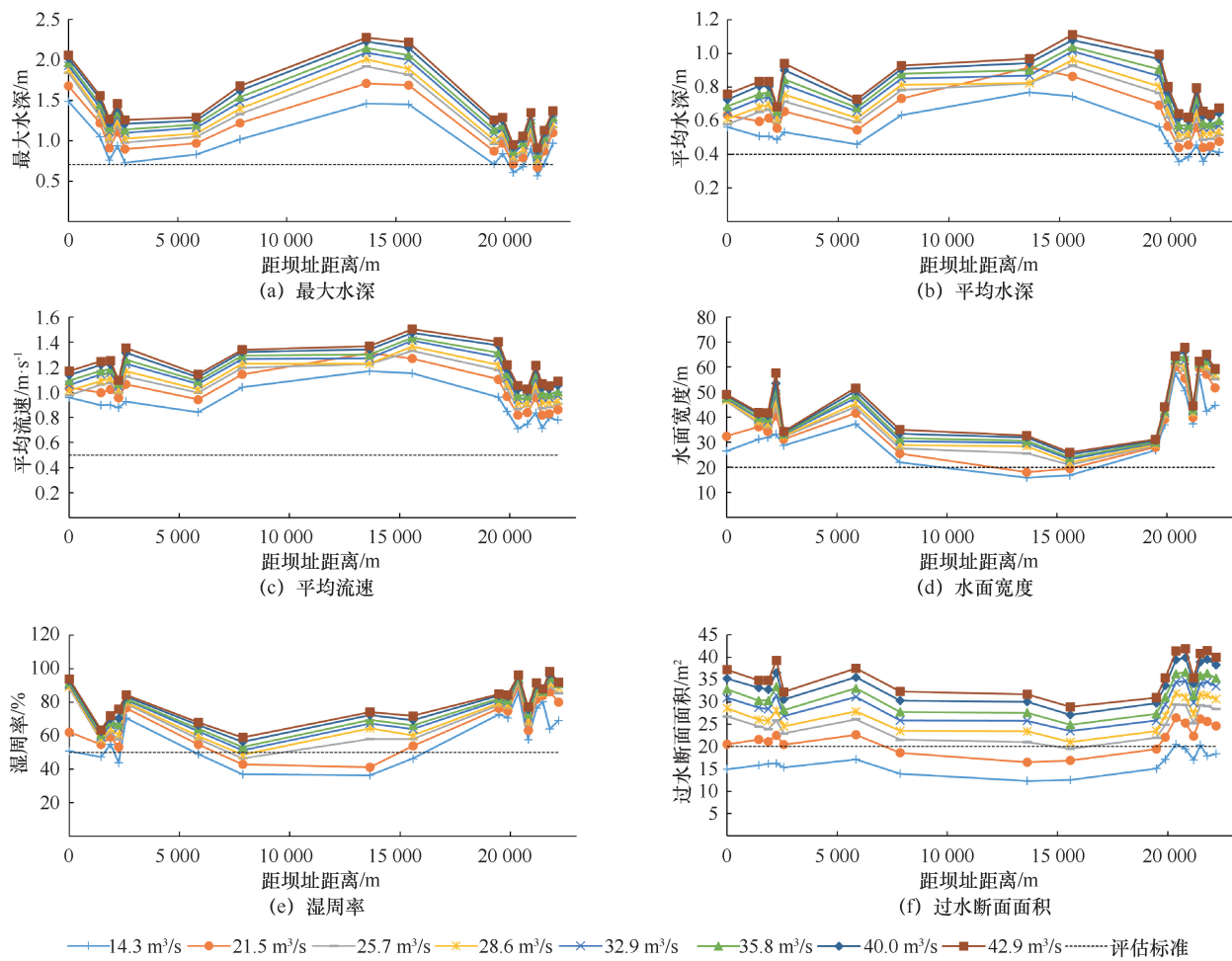


图8 水力参数沿程变化

Fig. 8 Variation of hydraulic parameters along the research

有参数达标率 95% 以上(见图 9), 此时, 28.6 m³/s 不是满足所有参数达标率 95% 以上的最小生态流量, 满足要求的最小生态流量介于 28.6 m³/s 和 25.7 m³/s 对应的最大水深、流速、水面宽、平均水深均达标 100%, 故选取过水面积和湿周率进行验算, 当流量为 27.94 m³/s (占坝址处多年平均流量的 19.54%)

时, 有 95% 的河段过水断面面积达标, 当流量为 27.34 m³/s (占坝址处多年平均流量的 19.11%) 时, 有超过 95% 的河段湿周率达标, 取两者中较大值为生态水力学法生态流量计算结果, 即 27.94 m³/s (占坝址处多年平均流量的 19.54%)。

3.3 生态流量综合分析

综合 Tennant 法、Q90 法、湿周法和生态水力学法, 坝址下游减水河段生态需水量计算结果如表 6 所列。由于鱼类繁殖期比丰水期范围更大, 二者合并, 将 4—9 月认定为丰水期及鱼类繁殖期, 余下月份(10 月至次年 3 月)认定为枯水期。综合以上四种方法, 最终确定为枯水期(10 月至次年 3 月)下泄生态流量为多年平均流量的 10%, 即 14.3 m³/s, 丰水期及鱼类繁殖期(4—9 月)下泄生态流量为多年平均流量的 30%, 即 42.9 m³/s。

3.4 下游断面水力参数变化

根据以上生态流量计算结果, 坝址下游枯水期以 14.3 m³/s、丰水期以 42.9 m³/s 进行生态流量下泄

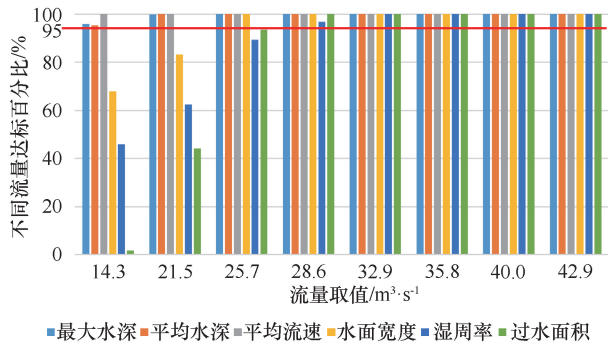


图9 不同流量时研究河段水力参数达标百分比

Fig. 9 Percentage of hydraulic parameters meeting standards in river sections at different flow rates

表 6 坝址处下泄生态基流量计算值

Table 6 The calculated ecological base flow at the dam site discharge point

计算方法	Tennant 法		Q90 法	湿周法	生态水力学法
	枯水期(10月—次年5月)	丰水期(6—9月)			鱼类繁殖期(4—9月)
计算流量值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	14.3	42.9	22.9	28.3	27.9
与多年平均流量之比/%	10.0	30.0	16.0	19.8	19.5

后,减水河段的水文、水力特征发生显著变化。选取坝址下游 1 km 处一断面进行分析,断面形状如图 10 所示。将坝址处多年年均流量排频(见图 11),选取 10%、50%、90%保证率下对应的逐月流量,分析天然来流与生态流量下泄两种情形下的流量、水深、水面宽和流速变化。

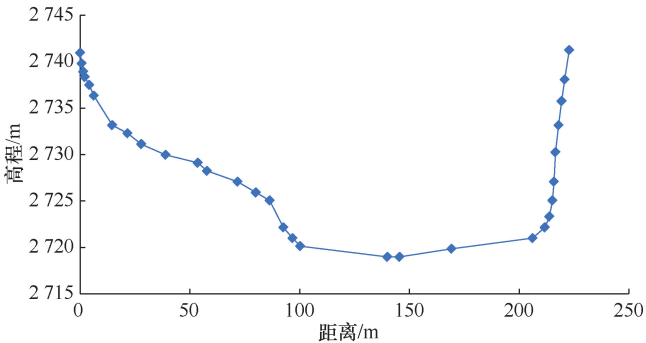


图 10 断面形状

Fig. 10 Sectional Shape Diagram

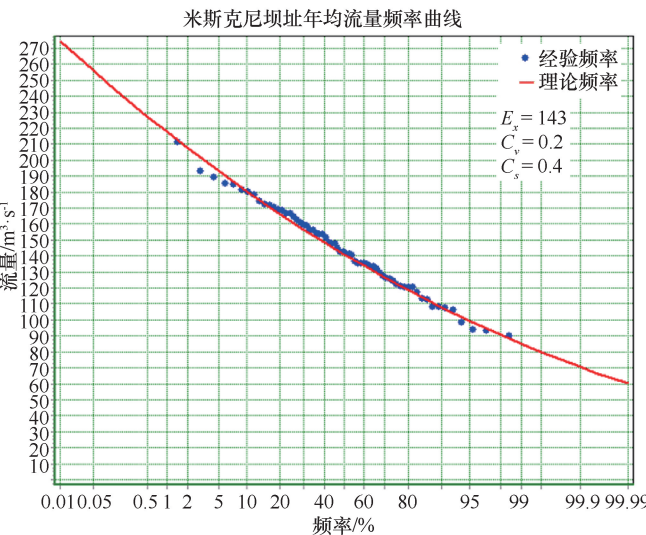


图 11 米斯克尼坝址年均流量频率曲线

Fig. 11 Mean annual flow frequency curve of Miskni dam site

以 50%保证率下的来水情况为例,生态流量下泄后全年月均流量小于天然来流月均流量,减少 13.6~638.1 m^3/s , 8 月变幅最大;受流量变化影响,水深减小 0.12 ~ 1.95 m;断面水面宽减小 15.60 ~ 45.65 m;流速减小 0.07 ~ 1.25 m/s 。计算结果如

图 12 所示。

3.5 结果讨论

本文提出了一种基于鱼类生境需求的生态流量计算方法,该方法以断面径流系列为基础,分析下游多断面的水力特性,根据河段内鱼类的生境需求计算生态流量,并与其他水文学、水力学方法进行对比分析,确定合理的生态流量。

本文提出的方法适用于有长系列水文资料及多个断面形状资料的情况,可综合多种方法进行生态流量计算。同时也具有一定局限性,比如张祖鹏等^[36]等构建了一维水动力-水环境耦合模型进行长兴港生态流量研究,与其相比,本文水力计算结果可能与真实情况存在差异,由于缺乏研究河段内的流量、水位等实测资料,无法构建水动力模型并进行率定验证。

从计算结果合理性来看,本文与类似案例有较好的一致性,比如黄冬菁等^[28]采用生境分析法的产卵育幼期生态流量计算结果(占多年平均流量 27.3%)落在 Tennant 法的计算区间值(10%~30%)中,而本文采用的生态水力学法计算得到的生态流量(占多年平均流量 20%)同样也在 Tennant 法的计算区间内,因此本文提出的河道生态流量计算方法较为合理,且能根据鱼类产卵时间划分出精确的生态流量。

4 结 论

本文选取米斯克尼水电站下游河段叶尔羌河特有鱼类为对象,结合下游河道水文、水力特征采用 Tennant 法、Q90 法、湿周法、生态水力学法进行生态流量研究,并进行生态流量下泄相比天然来流情况下对下游河道断面水力参数的影响分析,得到以下结论。

(1) Tennant 法生态流量计算结果为枯水期 14.3 m^3/s (10%),丰水期 42.9 m^3/s (20%),Q90 法计算结果为 22.86 m^3/s (16%),湿周法计算结果为 28.31 m^3/s (19.8%),生态水力学法计算结果为 3 月)下泄生态流量为多年平均流量的 10%,即 28.6 m^3/s (20%)。最终确定为枯水期(10 月至次年

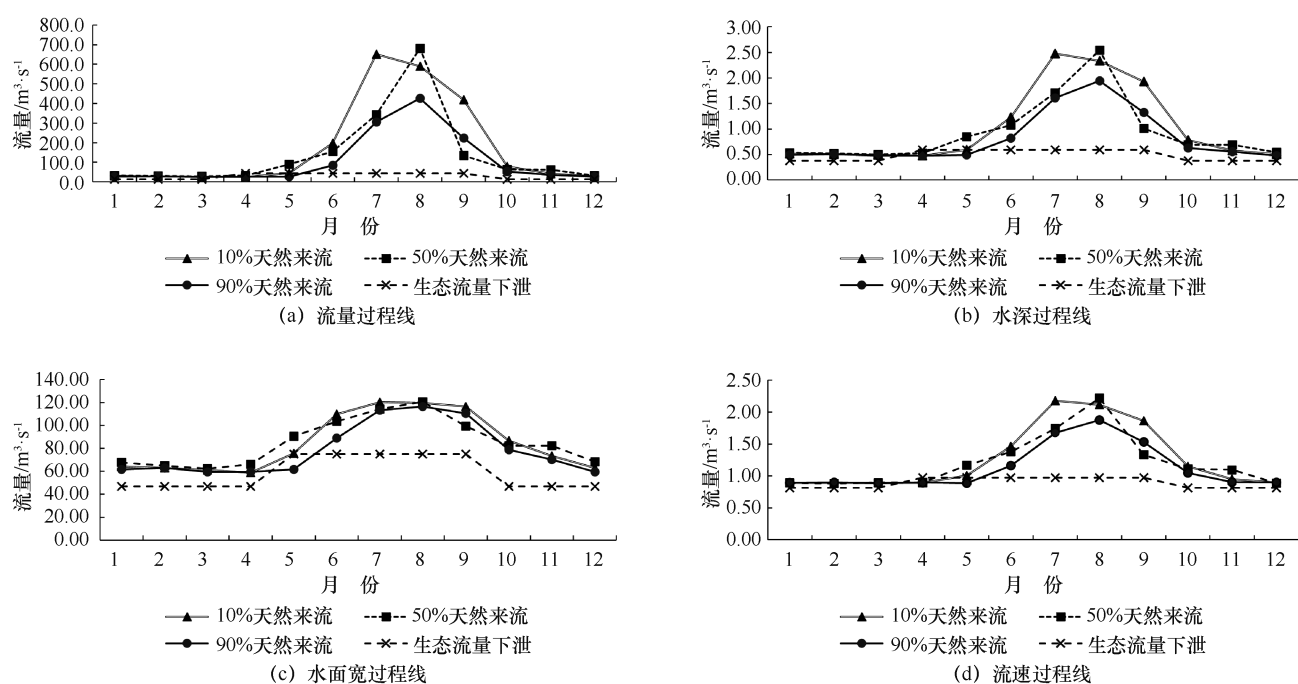


图 12 10%、50%、90%保证率下的天然来流和生态流量下泄后的水文、水力特征对比

Fig. 12 Comparison of hydrological and hydraulic characteristics of natural inflow and ecological flow discharge under 10%, 50%, and 90% guarantee rates

14.3 m^3/s , 丰水期及鱼类繁殖期(4—9月)下泄生态流量为多年平均流量的30%, 即42.9 m^3/s 。

(2)生态流量下泄后全年月均流量小于天然来流月均流量, 减少13.6~638.1 m^3/s , 水深减小0.12~1.95 m, 断面水面宽减小15.60~45.65 m, 流速减小0.07~1.25 m/s 。河道内仅下泄生态流量会导致断面水深、水面宽、流速等水力参数发生较大的改变, 在保证鱼类生态流量的同时还需考虑流量减少对其他动物或植被的影响。

本文提出的生态流量计算方法基于高海拔山区流域特征, 以鱼类为主要保护目标, 可为其他同类项目提供参考。本文侧重考虑鱼类生境对生态流量的需求, 然而可能存在其他生态流量需求, 如水质达标、其他动植物所需生境等, 还有进一步研究的空间。

参考文献 (References):

[1] HIRPA F A, DYER E, HOPE R, et al. Finding sustainable water futures in data-sparse regions under climate change: Insights from the Turkwel River basin, Kenya [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 19: 124-135.

[2] GAO Y, LIU G, CASAZZA M, et al. Economy-pollution nexus model of cities at river basin scale based on multi-agent simulation: A conceptual framework [J]. *Ecological Modelling*, 2018, 379: 22-38.

[3] 王浩, 王旭, 雷晓辉, 等. 梯级水库群联合调度关键技术发展

历程与展望 [J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 25-37.

WANG H, WANG X, LEI X H, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 25-37.

[4] MENG Y, XU W, YAN D. Ecology-habitat-flow modular simulation model for the recommendation of river ecological flow combination [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2023, 169(9): 1-15.

[5] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. *Wiley*, 1976, 1(4): 6-10.

[6] CHENG B, LI H. Agricultural economic losses caused by protection of the ecological basic flow of rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 68-75.

[7] IVORY S J, MCGLUE M M, SPERA S, et al. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world's largest tropical wetland [J]. *IOP Publishing*, 2019, 14(12): 124017.

[8] JUNK W J. The flood pulse concept of large rivers: Learning from the tropics [J]. *Informa Uk Limited*, 2001, 27(7): 3950-3953.

[9] THEODOROPOULOS C, KARAOUZAS I, STAMOU A. Environmental flows as a proactive tool to mitigate the impacts of Climate warming on freshwater macroinvertebrates [J]. *Mdpi Agriculture*, 2021, 13(18): 2586-2586.

[10] SMAKHTIN V U, ERIYAGAMA N. Developing a software package for global desktop assessment of environmental flows [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, 23(12): 1396-1406.

[11] AKTER A, TANIM A H. A modeling approach to establish environmental flow threshold in ungauged semidiurnal tidal river [J].

- Journal of Hydrology, 2018, 558: 442-459.
- [12] 李扬, 孙翀, 刘涵希. 福建省域河流生态流量监管与控制目标核定[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 92-96.
- LI Y, SUN C, LIU H X. Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 92-96.
- [13] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 面向河流生态完整性的黄河下游生态需水过程研究[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 367-377.
- SHANG W X, PENG S M, WANG Y, et al. Research on the ecological integrity-oriented environmental flow regime of the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 367-377.
- [14] ANDERSON E P, JACKSON S, THARME R E, et al. Understanding rivers and their social relations: A critical step to advance environmental water management[J]. Wiley, 2019, 6(6): 1-21.
- [15] NI X, DONG Z, XIE W, et al. A practical approach for environmental flow calculation to support ecosystem management in Wujiang River, China[J]. Mdpi Agriculture, 2022, 19(18): 11615.
- [16] 赵琪. 塔什萨依河生态基流量估算研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(12): 138-145.
- ZHAO Qi. Study on the estimation of ecological basedischarge in Tashisai River[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(12): 138-145.
- [17] 李计生, 于海超, 张扬, 等. 基于 Tennant 改进法的讨赖河生态流量分析与评价[J]. 节水灌溉, 2020 (8): 72-75.
- LI J S, YU H C, ZHANG Y, et al. Analysis and evaluation of ecological flow of Taolai River Based on improved tennant method [J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 72-75.
- [18] VERMA R K, PANDEY A, MISHRA S K, et al. A procedure for assessment of environmental flows incorporating inter-and intra-annual variability in dam-regulated watersheds [J]. Water Resources Management, 2023, 37(8): 3259-3297.
- [19] DAI L, FANG G, HUANG X, et al. Ecological flow process evaluation of a hydropower station's dehydration river [J]. Applied Ecology & Environmental Research, 2019, 17(3): 5707.
- [20] 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.
- JIN C, JIANG C L, WU W. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 8-14.
- [21] GIPPEL C J, STEWARDSON M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows [J]. Wiley, 1998, 14(1): 53-67.
- [22] 吴朱昊. R2CROSS 方法在南方中小型河道生态流量计算中的适用性和优化讨论[J]. 中国农村水利水电, 2021(4): 113-119.
- WU Z H. Applicability and optimization of R2CROSS method in ecological flow calculation of small-and-medium sized rivers in south china[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(4): 113-119.
- [23] LIU C, ZHAO C, XIA J, et al. An instream ecological flow method for data-scarce regulated rivers[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398 (1-2): 17-25.
- [24] 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.
- [25] 李紫妍, 刘登峰, 黄强, 等. 基于多种水文学方法的汉江子午河生态流量研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 8-12.
- LI Z Y, LIU D F, HUANG Q, et al. Study on the ecological flux of the Ziwu River in Hanjiang River based on several hydrological methods [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(1): 8-12.
- [26] 史方方, 黄薇. 用改进湿周法计算河道内最小生态流量[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(4): 9-12.
- SHI F F, HUANG W. Minimum instreaming ecological discharge by using improved wetted perimeter method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(4): 9-12.
- [27] 姚航斌, 万东辉, 张丽, 等. 适用于西南山区河流的生态流量确定方法研究[J]. 水文, 2023, 43(5): 57-62.
- YAO H B, WAN D H, ZHANG L, et al. Study on ecological flow determination of southwest mountain rivers [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(5): 57-62.
- [28] 黄冬菁, 李一平, 崔广柏, 等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 142-148.
- HUANG D J, LI Y P, CUI G B, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 142-148.
- [29] 侯俊, 黄喻威, 苗令占, 等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 8-12.
- HOU J, HUANG Y W, MIAO L Z, et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 8-12.
- [30] 吕翠美, 刘苗苗, 王民, 等. 基于四大家鱼生境需求的灌河生态需水过程研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(5): 149-157.
- LYU C M, LIU M M, WANG M, et al. Habitat demand of four major Chinese carps-based study on process of eco-water demand of Guanhe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(5): 149-157.
- [31] 王前进. 面积比指数法放大作用及控制方法研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 24-27.
- WANG Q J. Study on amplifying function and control method of area

ratio index method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 24-27.

[32] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Wiley, 1976, 1(4): 6-10.

[33] 王庆国,王超,李克锋,等. 二维水力模拟在河流生态需水湿润周法中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 16-19.

WANG Q G, WANG C, LI K F, et al. Application of 2D hydrodynamic simulation in river ecological flow requirement by wetted perimeter method[J]. Yangtze River, 2018, 49(7): 16-19.

[34] 张辉,危起伟,杜浩,等. 长江上游干流基于河床地形的深潭浅滩识别方法比较研究[J]. 淡水渔业, 2011, 41(1): 3-9.

ZHANG H, WEI Q W, DU H, et al. Comparison of pool and riffle identification methods based on riverbed topography in the upper Yangtze mainstem[J]. Freshwater Fisheries, 2011, 41(1): 3-9.

[35] 李嘉,王玉蓉,李克锋,等. 计算河段最小生态需水的生态水力学法[J]. 水利学报, 2006, (10): 1169-1174.

LI J, WANG Y R, LI K F, et al. Eco-hydraulics method of calculating the lowest ecological water demand in river channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006(10): 1169-1174.

[36] 张祖鹏,张泽贤,刘思远,等. 基于一维水动力-水环境耦合模型的长兴港生态流量研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10): 160-169.

ZHANG Z P, ZHANG Z X, LIU S Y, et al. Study on ecological flow of Changxinggang River based on one-dimensional hydrodynamic-water environment coupling model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10): 160-169.

(责任编辑 王璐)