

日喀则市河流生态流量阈值与计算方法研究

鲁程鹏,高齐泽,袁珍欢

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以日喀则市年楚河、多雄藏布和湘河为研究对象,构建河流-生物-社会耦合框架,以确定河流适宜生态流量阈值;采用水生态偏离指数对不同水文学法计算的河流生态流量结果进行评价,并基于河流健康指数对频率曲线法进行改进,最终得到维持日喀则市河流生态系统健康的生态流量计算结果。结果表明,年楚河、多雄藏布和湘河枯水期适宜生态流量下限分别为 3.06、12.91、1.16 m³/s,其中湘河在 4—5 月为保障鱼群繁殖产卵,需将生态流量最小值提升为 1.25 m³/s;汛期为确保河流输沙过程的正常运行,需水量阈值分别确定为 1.5 亿~1.8 亿 m³、4.3 亿~5.4 亿 m³ 和 0.5 亿~0.6 亿 m³;年楚河、多雄藏布及湘河基于频率曲线法的水生态偏离指数分别为 0.76、1.27、0.11,与当地生态环境特征的契合度较高;通过对频率曲线法所得每月生态流量的结果进行调整,改进后的频率曲线法可使每月的河流健康指数均达到 0.4 以上,符合当地河流生态流量的需求。

关键词:生态流量;适宜生态流量阈值;水文学方法;水生态偏离指数;河流健康指数;日喀则市

中图分类号:X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0308-11

Study on thresholds of ecological flow and calculation methods of rivers in Shigatse City//LU Chengpeng, GAO Qize, YUAN Zhenhuan(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Taking the Nianchu River, Duoxiong Zangbo and Xiang River in Shigatse City as the research objects, a river-biology-society coupling framework was constructed to determine thresholds of suitable ecological flow of the rivers. The water ecological deviation index was used to evaluate the river ecological flow results calculated by different hydrological methods, and the frequency curve method was improved based on the river health index. Finally, the ecological flow calculation results for maintaining the health of the river ecosystem in Shigatse City were obtained. The results show that the minimum values of appropriate ecological flow in the dry season are 3.06 m³/s, 12.91 m³/s and 1.16 m³/s respectively. Among them, to ensure the reproduction and spawning of fish schools in the Xiang River from April to May, the minimum ecological flow needs to be increased to 1.25 m³/s. During the flood season, to ensure the normal operation of the river sediment transport process, the water demand thresholds are determined as 150~180 million m³, 430~540 million m³ and 50~60 million m³ respectively. The analysis shows that the ecological flow deviation indices of the Nianchu River, Duoxiong Zangbo and Xiang River based on the frequency curve method are 0.76, 1.27 and 0.11 respectively, indicating that the calculation results of this method have a high degree of consistency with the local ecological environment characteristics. By adjusting the monthly ecological flow results obtained by the frequency curve method, the improved frequency curve method can make the monthly river health index reach more than 0.4, which meets the local river ecological flow requirements.

Key words: ecological flow; threshold of suitable ecological flow; hydrological methods; water ecological deviation index; the river health index; Shigatse City

随着人口规模的扩大和社会需求的日益增长,人类对自然资源的开发利用强度逐步提升,拦河闸坝、水库、渠道等水利工程的大量修建,不仅改变了河流形态及河床地貌的演变规律,还导致水文流量、水流流态发生显著变化,进而引发河流生态危机,具体表现为河流整体生态功能弱化,生物多样性降低

等^[1]。河流系统一直是陆地水循环的主要渠道,既影响着当地气候变化的诸多方面,又为人类经济社会发展提供了重要支撑^[2-3]。其中,河流的水文状况对于维护周边地区生物多样性、保障生态系统完整性至关重要^[4-5]。近年来,全球河流生态系统普遍出现不同程度的退化,受气候变化、水电工程建设等人

类活动加剧的影响,生态健康正面临严重威胁^[6-7]。

生态流量的提出,旨在实现人类与河流生态系统间的水量平衡,进而保护河流健康与生物多样性^[8-9]。到 20 世纪 80 年代,生态流量理念已得到广泛认可,研究者们逐渐意识到需从河流生态系统的整体性出发,综合分析多领域、多因素的共同影响^[10]。多年来,生态流量的概念已从最初仅关注河道内最小流量要求,拓展为涵盖河流水文系统变异性、水平与垂直连通性及生态系统需求的综合性概念^[11-12]。

生态流量的相关理论最早出现在 20 世纪 40 年代,目前生态流量主流计算方法主要分为 4 大类^[13]:①水文学方法。依靠历史流量数据计算生态流量,包括 Tennant 法、Texas 法和北部大平原资源计划(northern great plains resource program,NGPRP)法等^[14-15]。②水动力方法。以水动力基础参数(如渠道深度、宽度及其他衍生参数)为依据确定生态流量。③生境模拟方法。基于生物学原理,估算适宜水生生境及相关物种生存的生态流量。④整体分析法。以河流生态系统完整性理论为基础,综合考虑各种因素以确定生态流量。由于水文学方法计算过程简单,且对资料与计算处理资源的要求较低,因此广泛应用于国内外的生态流量计算。

当前可用于生态流量计算的水文学方法种类较多,如何筛选出体现当地生态流量的合适方法,已成为目前研究的热点。成波^[16]以渭河干流宝鸡段为研究对象,基于维持河流水沙平衡、保护水生生物多样性及净化水质 3 个生态保护目标进行耦合分析,确定生态流量并提出了相应的计算方法。在克里雅河中,周明通等^[17]从维持河道基本形态稳定、保障河道水生生物基本生存需求、反映径流年内丰枯变化特征三方面,确定生态流量阈值,并对不同方法的计算结果进行评估。此外,经济发展与生态环境保护之间存在较强的互斥性^[18],研究人员通过调整生态用水与社会经济用水之间的关系,构建生态-经济-水平衡系统,以保障生态环境及社会经济有序良性演化和高效均衡发展^[19-20]。

日喀则市人口增长和农业灌溉等用水量的增加,加之人类活动(如土地的过度开发和利用)及自然因素的共同影响,导致河流生态系统退化,对该地区的河流生态水文状况造成了不利影响,具体表现为生物多样性减少、生态系统服务功能下降等^[21]。由于日喀则市地理位置相对较偏僻,尚未开展系统的区域水资源评价工作,相关资料较为匮乏,且针对生态流量的分析评价内容较少、研究深度不足^[22]。因此,研究日喀则市重点河流的适宜生态流量不仅

能为维持河流生态系统平衡提供支撑,还可助力解决日益紧迫的水资源问题,保障区域社会经济的可持续发展^[23]。通过合理规划与调配水资源,能够有效缓解水资源短缺矛盾,确保河流生态系统功能完整,为农业生产与人类社会长远发展提供保障。

本文从分析河流丰枯变化特征、维持河道基本形态、保护生物多样性、保障人类活动与河流生态系统间水量平衡 4 个方面确定河流适宜生态流量阈值,筛选出最契合当地实际的生态流量计算方法,旨在为当地水资源管理及生产生活规划提供参考。

1 研究区概况

日喀则市位于西藏西南部,喜马拉雅山脉与冈底斯-念青唐古拉山脉之间,介于 27°13'N~31°49'N 和 82°08'E~90°20'E 之间;地形复杂多样,主要由高山、宽谷和湖盆构成,平均海拔超过 4 000 m。日喀则市分布着众多著名高峰,如珠穆朗玛峰、西夏邦马峰,还有丰富的冰川与湖泊资源;垂直气候带特征显著,南部受海洋性季风气候影响,降水丰沛;北部因大陆性气候形成半干旱灌丛与草原生态系统;降水量由南向北递减,南部喜马拉雅山南坡一带年降水量超过 2 000 mm,而北部地区则较少。此外,日喀则市可划分为南部河谷农业区、西部高寒农业区与喜马拉雅山南缘农业区,各区气候特征明显,如南部河谷农业区夏季月平均气温为 12.9~15.6℃,西部高寒农业区夏季月平均气温则为 10.5~14.8℃。

日喀则市河流纵横,主要有雅鲁藏布江及其多条一级支流,如年楚河、多雄藏布、湘河等。这些河流不仅为当地提供了水资源,也对当地的生态环境和经济发展具有重要意义。由于日喀则市地理位置特殊,人类活动影响较小,本文以市内年楚河、多雄藏布、湘河 3 条河流为研究对象(图 1),根据多种水文学方法计算其生态流量。

2 数据与方法

2.1 研究数据

日喀则市水文站数量较少,部分水文资料年代久远且缺失严重,因此,该市水文资料的收集与整理成为计算生态流量的关键之一。江孜水文站为年楚河流域的水文站,收集该站 1967 年、1968 年和 1972—1975 年的日径流数据(数据来源为中国水文年鉴);气象数据均来源于 ERA5 (<https://cds.climate.opernicus.eu/>);同时采用中国 0.25°×0.25°天然径流量格点数据集 CNRDv1.0(源自时空三极环境大数据平台(<https://poles.tpdc.ac.cn/zh->

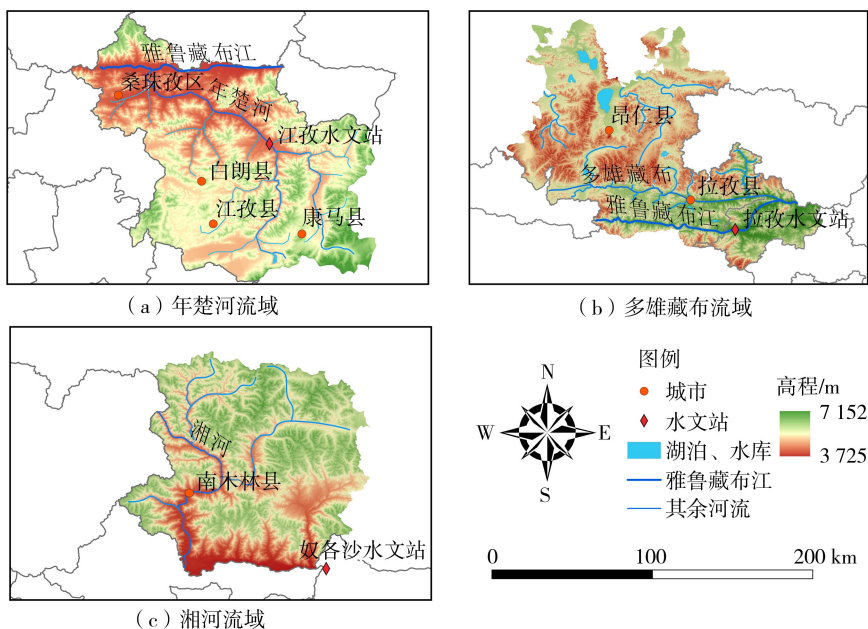


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

hans))提供的1967—1976年和1988—2018年长时间序列月径流量栅格数据,计算年楚河、多雄藏布河和湘河的生态流量;最后通过国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/main/>)提供的1988—2018年逐月NDVI(normalized difference vegetation index,归一化差分植被指数)数据、时空三极环境大数据平台提供的日喀则市2004—2016年用水量数据,以及日喀则市鱼类分布和输沙量信息,评估生态流量计算结果。

2.2 研究方法

日喀则市河流生态流量的计算流程如下:①采用基于Loess的季节-趋势分解(seasonal-trend decomposition procedure based on Loess, STL)方法,结合ERA5中温度、蒸发量、降水量和热通量4个气象因子,对江孜水文站缺失的3年数据进行校正与填补;②将气象因子作为影响因子,利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络模型预测未来1年的月径流数据,从而构建10年时间序列的月径流数据集;③将构建的月径流数据集与CNRDv1.0数据集进行对比,采用决定系数(R^2)、均方根误差(MRSE)和纳什效率系数(NSE)3个评价指标对CNRDv1.0数据集的精度进行评估。

利用水文学方法计算得到日喀则市内年楚河、多雄藏布和湘河的生态流量,并从分析河流丰枯变化特征、维持河道基本形态、保护河流生物多样性及保障人类活动与河流生态系统间水量平衡4方面确定适宜生态流量阈值,计算河流水生态偏离指数,筛选出最优生态流量计算方法,最后结合Tennant法、适

宜度指数与河流健康指数对3条河流的生态流量计算结果进行优化,并对河流生态环境状况进行评估。

2.2.1 河流流量的填补与预测

江孜水文站的实测流量数据年份较早,且时间序列连续性较差,一定程度上限制了对当地生态流量的准确分析与评估^[24]。CNRDv1.0数据集在反映中国复杂地形与气候分区下的水资源空间分布方面具有较优的长时序径流资料^[25-26],本文通过插补方法延长了江孜水文站的流量记录,并与CNRDv1.0数据集进行对比,从而提升了所用数据产品的可信度。

a. STL方法:是一种用于分解时间序列数据的过滤方法,能够快速计算和分析时间序列数据^[27],通过将流量时间序列分解为数据的趋势、季节和残差分量及填补后的流量值,从而填补观测数据中的缺失部分,使重建的流量序列更准确地反映江孜水文站的流量特征,同时,结合气候等变量进行线性回归矫正填补值,以更好地捕捉流量的变化趋势^[28]。

b. LSTM网络:作为时间序列预测领域的有效工具,被广泛应用于流量预测研究^[29-30]。LSTM网络具备捕捉流量数据长期依赖性与复杂非线性关系的能力,这一特性使其在刻画气象变量与流量间的动态关联时展现出独特的优势^[31]。与传统线性回归模型相比, LSTM网络通过多层神经网络结构,可有效学习流量时间序列的核心特征,包括长期趋势、季节性波动和短期变化规律^[32]。本文将LSTM网络模型用于预测第10年的流量数据;模型输入特征包括降水量、温度等多个气象变量,这些变量经过归

一化处理,以确保数据在训练过程中的稳定性。在模型训练完成后,利用模型对第 10 年的流量进行预测。预测结果通过反归一化处理,转化为可与实际观测数据直接对比的流量值。该基于 LSTM 网格的方法,不仅提升了缺失数据填补的精度,还能更精准地反映流量随时间演变的复杂性。

2.2.2 生态流量计算

水文学方法因计算过程简便且结果可靠,已成为我国生态流量计算的主要方法^[33-34]。常用的水文生态流量计算方法包括 Tennant 法、 Q_p 法、最枯月平均流量法、Texas 法、频率曲线法和自然流量保证率保护法 (natural flow guarantee rate protection method,NGPRP) 等。这些方法各自的适用条件存在差异,且相关的适用性研究主要集中于我国南方及东北部地区河流^[35-41],针对西藏地区河流生态流量的研究相对匮乏。

a. Tennant 法:计算结果具有较强的宏观指导意义,通常作为一种参考依据。为充分体现日喀则市河流的丰枯变化特征,并更精准地分析生态流量的计算结果,结合研究区概况及 Gao 等^[15]的研究,划定不同河道生态环境状况对应的天然流量百分比取值区间(表 1)。

表 1 河道内生态环境状况对应流量百分比和河流健康指数

Table 1 The in-river ecological environment status corresponding to flow percentage and the river health index				
不同流量占比对应	占多年平均天然流量的百分比/%		Z_i	
河道内生态环境状况	汛期 6—10 月	枯水期 11 月至次年 5 月	汛期 6—10 月	枯水期 11 月至次年 5 月
最佳	60~100	60~100	>0.69~1	>0.69~1
优秀	60	40	>0.55~0.69	>0.49~0.69
良好	40	20	>0.40~0.55	>0.28~0.49
一般	30	10	>0.24~0.40	>0.14~0.28
差	0~10	0~<10	>0~0.24	>0~0.14

b. 频率曲线法:以月为时间尺度,分析长系列水文资料中各月的月平均流量。利用威布尔 (Weibull) 经验公式,通过对 1988—2018 年逐月流量进行频率排序,并选用皮尔逊 III 型频率曲线进行拟合,以各月 95%保证率对应的天然月平均流量作为生态流量。

c. Q_p 法:其频率需结合河流水资源开发利用程度、规模及来水条件等实际情况确定。先对每年最枯月平均流量进行排频,再根据当地河流水资源开发利用程度选择频率,通常为 90%或 95%^[17]。日喀则市河流引水活动较少,多年平均用水量为 4.70 亿 m^3 ,约占多年平均径流量 (8.61 亿 m^3) 的 54.5%,开发利用程度较低,故选取 90%作为计算频率。

d. 最枯月平均流量法:以河流每年最枯月平均流量的多年平均值作为河流的生态流量。

e. Texas 法:通过计算各月流量频率曲线后,选择 50%保证率下天然月平均流量的 20%作为生态流量^[42-43]。

f. NGPRP 法:运用 NGPRP 法计算时,需将 1988—2018 年的逐月流量按距平百分率分为丰水年、平水年、偏枯水年和特枯水年,最终选取平水年组 90%保证率对应的天然月平均流量作为生态流量。

2.2.3 构建河流-生物-社会耦合框架

当前生态流量计算方法较多,但生态流量受多因素的影响,多数方法存在计算指标单一、缺乏对生态系统整体综合考量的问题。因此,在综合考虑当地生态系统基本用水需求的基础上,通过以下 4 个维度,确定适宜生态流量阈值。

a. 分析河流丰枯变化特征。天然径流的水文情势 (如径流的年内丰枯变化) 对维持河流生态多样性与生态系统完整性具有关键作用。生态系统随河流丰枯特征动态调整,呈现出显著的季节性,共同构成了生态水文季节^[44]。因此,在计算河流生态流量时,考虑其季节性变化是维持河流自然流量的必要环节。

b. 维持河道基本形态。西藏地区河流泥沙含量多是河流的重要特征之一。为保障日喀则市河道形态基本稳定,需要维持一定的水量以输运泥沙,避免河道泥沙淤积导致河道形态改变。根据开源地理空间基金会中文分会 (<https://www.osgeo.cn/>) 提供的雅鲁藏布江流域水文站地理位置及多年泥沙资料统计信息,分别选取拉孜水文站 1982—2000 年、奴各沙水文站 1956—2000 年、江孜水文站 1956—2000 年的泥沙信息,计算年楚河、多雄藏布和湘河的输沙需水量。此外,由于水文站最大月平均输沙量均在 8 月出现,汛期含沙量占比大、非汛期输沙量占比较小,因此只考虑河流汛期输沙需水量。研究表明,在输沙总量一定的条件下,输沙需水量直接取决于水流含沙量^[45]。

c. 保护河流生物多样性。保障河道内水生生物及周边生物基本生存需求,是生态流量研究的重要目标之一。鱼群是河道内水生生物的重要研究对象^[46-49],通过设定鱼类产卵适宜流速以保护其栖息地,可为日喀则市河流水生生物多样性保护提供关键依据。鱼类产卵时适宜流量公式见文献^[50]。

d. 保障人类活动与河流生态系统间的水量平衡。日喀则市是西藏地区重要的粮食生产基地。根据其 2004—2016 年用水数据,当地农业用水量占总用水量的比例超过 50%,2004 年、2005 年更是高达 98%;而农业与林牧渔畜用水的综合占比每年均超

过 90%, 因此, 通过综合考虑日喀则市枯水期 NDVI 值与流量的关系, 确定适宜生态流量阈值, 既保障了当地农业与畜牧业的正常生产, 也为区域水资源合理规划提供了依据。

2.2.4 生态流量计算适宜性评价

a. 水生态偏离指数 D 。水生态偏离指数用于表征不同方法计算的生态流量结果与当地生态环境契合程度, 其值越小, 计算得到的生态流量结果与当地生态环境的契合度越高。当 $D=0$ 时, 表明计算的生态流量与适宜生态流量阈值完全贴合, 即无偏离现象。基于多维度分析确定生态流量后, 计算各月生态流量结果与适宜生态流量阈值的水生态偏离指数:

$$D_{dk} = \begin{cases} 0 & Q_{ak} \leq Q_{ek} \leq Q_{bk} \\ \min(|Q_{ek} - Q_{ak}|, |Q_{ek} - Q_{bk}|) & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$D_f = \begin{cases} 0 & W_a \leq W_e \leq W_b \\ \min(|W_e - W_a|, |W_e - W_b|) & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\frac{1}{n}(\sum_{k=1}^n D_{dk}^2 + 5D_f^2)} \quad (3)$$

式中: D_{dk} 、 D_f 、 D 分别为枯水期第 k 月偏离指数、汛期偏离指数和总偏离指数, 枯水期月份 k 取 11 月至次年 5 月; Q_{ak} 、 Q_{bk} 分别为河流枯水期某月适宜生态流量的上下限; Q_{ek} 为枯水期第 k 月的生态流量, m^3/s ; W_a 、 W_b 分别为河流汛期适宜需水量上下限; W_e 为汛期生态水量; n 为月份。

b. 河流健康指数 Z_i 。为综合评价生态流量结果的适用性, 采用几何平均法对生态流量占比与适宜度指数进行综合量化; 通过计算河流健康指数既可反映生态流量对天然流量的满足程度, 又可验证生态流量设定的合理性。 Z_i 越接近 1, 生态流量对河流健康越有利。 Z_i 可以验证适宜生态流量的合理性, 其计算公式为

$$Z_i = \sqrt{R_i S_i} \quad (4)$$

式中: R_i 为生态流量占比 ($i=1, 2, \dots, 12$); S_i 为适宜度指数。 R_i 为生态流量 Q_{ei} 与天然流量 Q_i 的比值, 反映适宜生态流量与天然流量之间的距离; S_i 主要反映适宜生态流量与天然流量之间的离散程度, 当适宜生态流量与天然流量完全相等时, $S_i = 1$ 。 计算公式如下:

$$S_i = 1 - S_{li}/5 \quad (5)$$

其中 $S_{li} = [(Q_{ei} - Q_i)/Q_i]^2$ 式中 S_{li} 为第 i 月适宜生态流量离散度。 根据式(1)定义 5 个等级的河流健康水平, 如表 1 所示。

c. 优化生态流量步骤。判断每月生态流量是

否满足适宜生态流量阈值的要求, 并结合河流健康指数验证生态流量计算结果的合理性, 对不符合要求的生态流量进行优化。 具体优化步骤为: 先依据适宜生态流量阈值, 调整未达标月份的生态流量; 再结合生态流量计算结果与天然流量数据, 采用式(4)(5) 计算每月河流健康指数, 判断河流健康指数是否达到良好及以上标准(汛期 $Z_i > 0.40$, 枯水期 $Z_i > 0.28$)。 针对生态流量未达标的月份, 需基于各河流已确定的皮尔逊 III 型频率曲线, 在确保河流健康指数满足良好条件的前提下, 计算对应频率的生态流量。

3 结果与分析

3.1 河流流量获取与分析

图 2 为年楚河流量月尺度时间序列, R^2 、MRSE、NSE 为填补及预测后的江孜水文站水文数据与 CNRDv1.0 数据集评估指标。 可以看出, 经气象因子校正后, 分别采用 STL 方法填补 LSTM 网络模型预测得到的流量数据, 其总体趋势与实测值流量基本一致, 仅江孜水文站实测流量峰值的预测略微偏小。 将通过 CNRDv1.0 数据集获取的 1967—1976 年年楚河径流数据, 与填补及预测的江孜水文站数据对比发现, 1969 年、1972 年及 1975 年的模拟生态流量峰值偏小, 导致该年份生态流量整体趋势略低于实际值, 但其余年份的生态流量趋势及峰值拟合效果良好, 且 NSE 为 0.88。 综上, CNRDv1.0 数据集的准确性较好, 因此选用该数据集开展年楚河、多雄藏布及湘河的生态流量计算与分析。

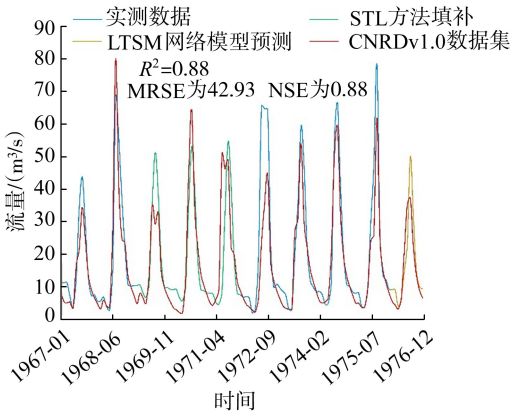


图 2 年楚河流量月尺度时间序列
Fig. 2 Monthly-scale time series of discharge in the Nianchu River

3.2 生态流量计算

年楚河、多雄藏布及湘河各水文学方法生态流量计算结果见图 3(黄色区域为汛期(6—8 月))。 可见, 由于不同生态流量计算方法的侧重点与考虑因素存在差异, 所选取的平均流量百分率或天然流

量频率曲线上的保证率也各不相同,导致各方法的计算结果存在差异。 Q_p 法与最枯月平均流量法所得结果不随时间动态变化,无法体现生态流量的季节性变化;而 Texas 法计算的生态流量虽能反映季节性变化,但其结果整体偏小,无法满足河流生态环境的基本需求;NGPRP 法计算的生态流量在汛期与枯水期差异显著,尤其 6—7 月生态流量呈急剧增长趋势,且占比过高,可能对当地发展产生阻碍;而频率曲线法计算的生态流量既体现了季节性变化,又反映了汛期与枯水期的差异,且各月生态流量计算结果均较为合理。

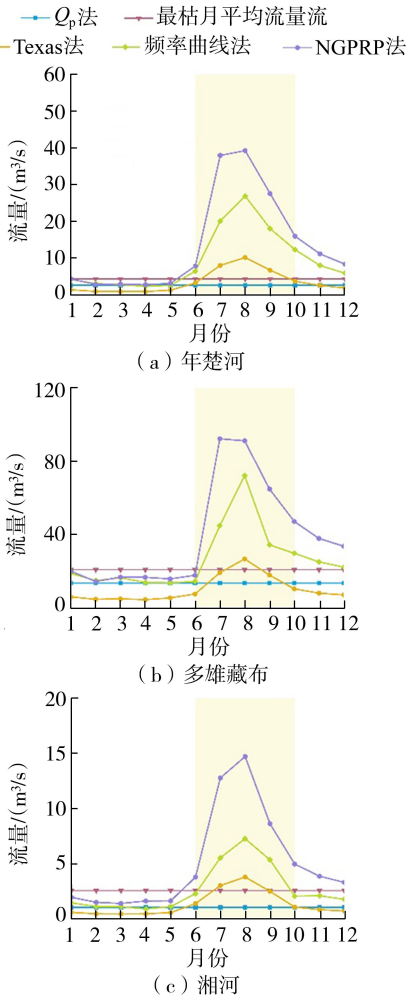


图3 生态流量计算结果

Fig.3 Ecological flow calculation results

3.3 基于耦合框架确定适宜生态流量阈值

3.3.1 河流丰枯变化特征分析

日喀则市汛期主要为 6—10 月(图 4,图中 IQR 为四分位距(intergurtil range)),年楚河、多雄藏布和湘河的河流流量跨度分别为 16.41~49.37、37.52~179.47、4.35~20.13 m³/s;在枯水期其流量分别为 5.05~12.14、19.26~42.58、1.16~5.21 m³/s。其中多雄藏布的流量最大,且流量跨度较大,最大值在

2000 年汛期,为 179.47 m³/s,汛期平均流量为 88.73 m³/s;湘河的流量最小,且流量跨度较小,最小值在 1995 年枯水期,为 1.16 m³/s,枯水期平均流量为 3.10 m³/s。

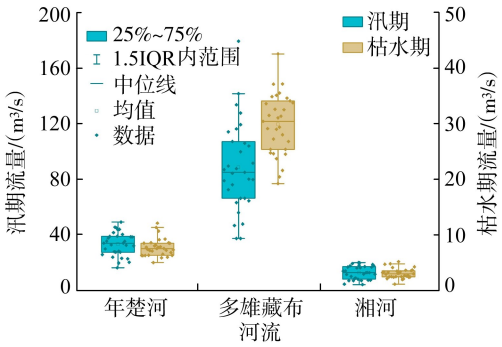


图4 河流流量丰枯变化分布

Fig.4 Distribution of wet-dry variation in river discharge

3.3.2 维持河道基本形态

由于搜集到的多年含沙量数据多为 20 年前数据,而青藏高原地区输沙量呈逐年增加趋势^[51-52],因此计算得出的输沙需水量低于实际需求。为此,在设定满足输沙要求的适宜水量标准时,需进行适当调整。结合西藏地区河流相关研究,可确定研究时段内输沙所需的适宜水量,其中多雄藏布因含沙量高,其输沙需水量最大,为 4.3 亿~5.4 亿 m³/a;而年楚河和湘河虽然平均含沙量高于多雄藏布,但受河岸植被覆盖、人类活动干扰(如水库建设、灌溉工程)及流量特征(河流径流量较小)等因素共同影响,其输沙需水量反而更低。

3.3.3 保护河流生物多样性

日喀则市位于青藏高原南部,结合当地生态调查资料可知,区域内河流鱼类资源主要由裂腹鱼亚科与条鳅属鱼类构成,且产卵期集中在 4—5 月。由于 4—5 月日喀则市河流处于枯水期,流量较小,而两类鱼类产卵需较低流速环境(0.3~1.5 m/s)^[53-54],因此计算的适宜流速偏大,需对其进行适当修正,结果见表 2。

表2 鱼类产卵适宜生态流量

Table 2 Suitable ecological flow for fish spawning

河流	多年平均 河宽/m	多年平均 水深/m	鱼类产卵适宜 流量/(m³/s)	调整后适宜 生态流量/(m³/s)
年楚河	10~40	6.73	8.07	2.69~4.04
多雄藏布	30~50	9.23	33.23	11.08~16.61
湘河	5~20	6.24	3.74	1.25~1.87

3.3.4 保障人类活动与河流生态系统间水量平衡

日喀则市人类活动影响相对较弱,加之其海拔较高,枯水期气温低、降水少,导致天然植物存活较少^[55],因此,枯水期当地植被以人类种植的作物为主。通过分析月平均 NDVI 与流量之间的关系,确

定该时期的适宜生态流量范围。对 1988—2018 年的月平均 NDVI 与流量数据进行回归分析,结果如图 5 所示。基于各 NDVI 均值计算求得年楚河、多雄藏布、湘河枯水期适宜生态流量范围分别为 3.06~5.71、12.91~20.94、1.16~2.03 m³/s。

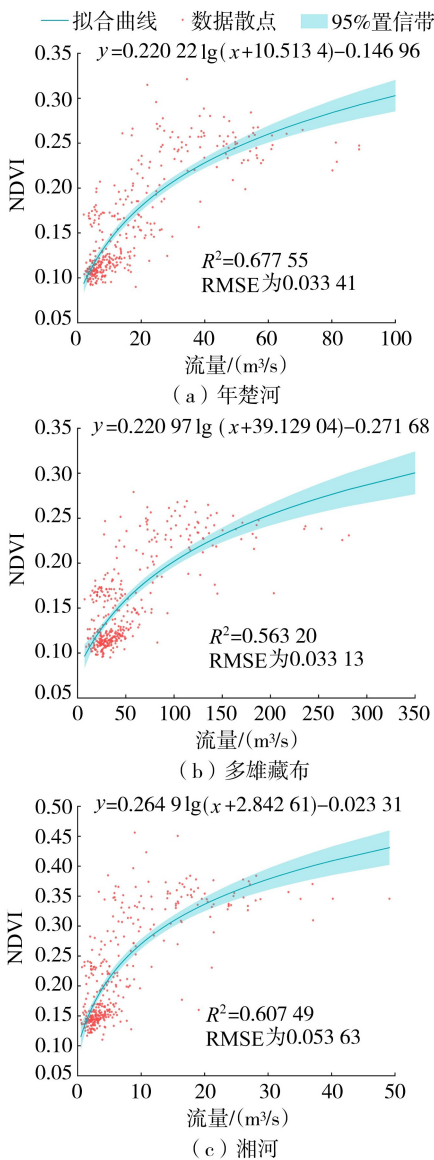


图 5 NDVI 与流量拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of NDVI and discharge

日喀则市河流枯水期流量较小,为保障当地人类活动用水需求(如农田灌溉、林牧渔畜业及工业用水等),同时保护河流健康与生物多样性,实现人类用水与河流生态系统的水量平衡,本文聚焦于河流枯水期适宜生态流量的计算。

结合上述适宜生态流量范围,年楚河枯水期适宜生态流量最小值为 3.06 m³/s;多雄藏布流量较大,枯水期流量最小值为 12.91 m³/s,且汛期需注意河流对岸边的冲刷淤积,保证年输沙需水量在 4.3 亿~5.4 亿 m³ 之间;湘河流量整体偏小,故所得适宜生态流量范围较小,枯水期流量最小值为

1.16 m³/s,而在枯水期的 4—5 月,既要保证作物存活又要保证鱼类的产卵不受影响,因此需将流量阈值提高为 1.25 m³/s。

由式(1)~(3)计算不同方法的生态流量结果,并绘制水生态偏离指数图(图 6)。可见,最枯月平均流量法与频率曲线法的结果相对更优。年楚河的水生态偏离指数以最枯月平均流量法最小,为 0.63;多雄藏布与湘河则以频率曲线法的水生态偏离指数最小,分别为 1.27、0.11。进一步分析发现,最枯月平均流量法没有考虑河流生物需求与水量的季节性变化,仅能维持低水平的栖息地功能,无法满足完整的生态流量需求;而频率曲线法不仅水生态偏离指数更小,且能合理体现河流的季节性变化,保障河流不同时段的生态环境,因此其计算日喀则市河流生态流量的结果更为准确。然而,尽管频率曲线法的水生态偏离指数较小,但结合适宜生态流量阈值可以发现该方法在实际应用某些方面仍存在一定的局限性。

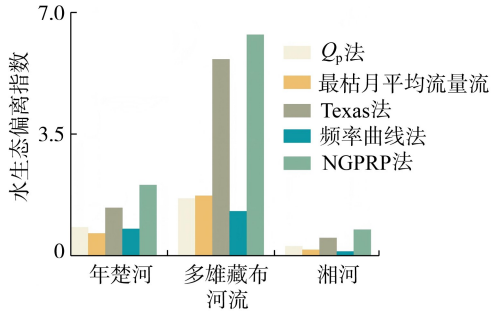


图 6 不同河流水生态偏离指数

Fig. 6 Water ecological deviation index of different rivers

3.4 改进频率曲线法优化生态流量计算

多雄藏布河流流量较大,汛期可达 100 m³/s 以上,基本保证了河流生态健康,但汛期中部分月份生态流量所占比例较小,输沙能力弱,可能会导致泥沙堆积。故将汛期 6 月、9 月所选取的频率优化为 85%、90%。通过优化生态流量计算步骤,对频率曲线法的结果进行改进。

a. 年楚河。其枯水期 3—5 月生态流量偏小,无法满足适宜生态流量阈值要求;6 月生态流量占比偏低,结合 Tennant 法及河流健康指数评定,认为该时段河道内生态环境状况较差。通过适当调整上述月份所选频率,确保每月河流健康指数均达到良好及以上标准(图 7(a)):将 3 月、6 月的频率优化为 90% 保证率,4 月、5 月优化为 80% 保证率,以对应保证率下的天然月平均流量作为生态流量。

b. 多雄藏布。河流整体流量较大,汛期流量可达 100 m³/s 以上,基本能保障河流生态健康;但汛期部分月份生态流量占比偏小,若输沙能力较弱,可

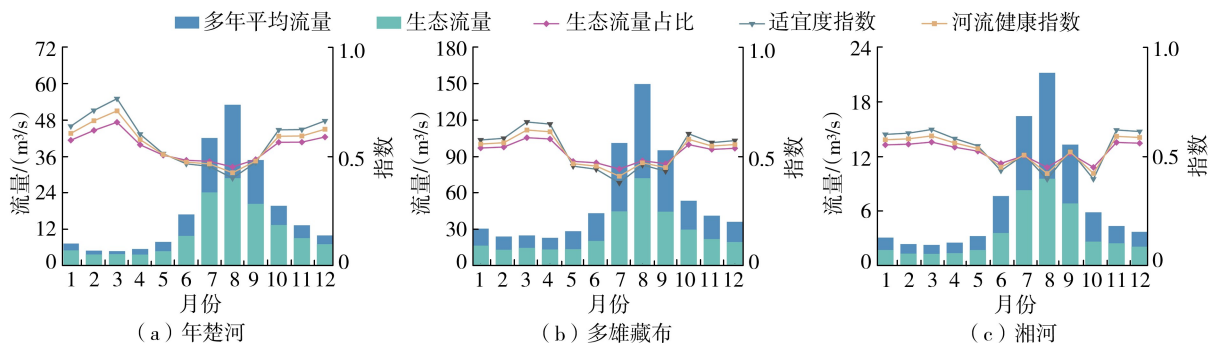


图7 改进频率曲线法生态流量计算结果

Fig.7 Ecological flow results by the improved frequency curve method

能导致泥沙堆积。因此,将汛期6月、9月的所选频率分别优化为85%、90%(图7(b))。

c. 湘河。整体生态流量占比偏低,其中2—5月均无法满足适宜生态流量阈值的要求;而4—10月结合 Tennant 法及河流健康指数评定,认为河道生态环境状况较差。根据表2及适宜生态流量阈值进行优化,将2—3月、4—5月、6—7月、8—10月的所选频率分别调整为90%、80%、85%、90%(图7(c))。

4 讨论

4.1 评价河流生态流量计算结果

由图3和图4比较多雄藏布、湘河、年楚河不同方法计算的生态流量,并综合分析5种水文学方法的适用性。由于年楚河与湘河河流流量较小,各方法水生态偏离指数总体偏小,差异性较小;而多雄藏布流量大、汛期与枯水期流量差异显著,导致部分方法水生态偏离指数偏大,各类方法差异性明显。① Q_p 法、最枯月平均流量法和频率曲线法在多雄藏布、湘河、年楚河计算所得的水生态偏离指数均较小,表现相对更优。但最枯月平均流量法与 Q_p 法均基于单一平均流量百分率或天然流量频率曲线上的固定保证率确定生态流量,呈现全年一个值的特征,无法体现日喀则市河流年内丰枯变化规律;其预测结果一般为最小生态流量,仅能维持低水平的生态环境,抵抗外部干扰的能力较弱。②Texas法与NGPRP法在3条河流中水生态偏离指数均偏大。Texas法虽能反映河流的季节变化特征,但计算得出的每月生态流量偏小,导致水生态偏离指数较高,无法准确描述当地实际生态流量需求,难以保障日喀则市河流健康。NGPRP法虽然考虑了丰水年、平水年与枯水年的差异,但计算时直接排除了枯水年流量样本,使得所选样本整体数值偏高,最终得出的生态流量结果偏大,导致当地可利用水资源减少,且6—7月生态流量波动幅度极大。③频率曲线法不

仅能较好体现天然流量的年内丰枯变化特征,清晰区分枯水期与汛期差异,且其计算的生态流量结果基本符合3条河流的适宜生态流量阈值范围,可有效保障河流健康与生物多样性。

4.2 河流生态流量适宜度分析

由图7可知,改进计算方法后,年楚河、多雄藏布和湘河生态流量计算结果的评价等级均达到良好及以上。

a. 年楚河作为日喀则市的重要河流,流域附近人口密集、人类活动较频繁,用水需求较大,因此该河的生态流量占比与河流健康指数均略高于多雄藏布与湘河。年楚河2—3月河流流量较小,河流生态系统易遭受破坏;为保障该河生态健康、生物多样性发展及人类基本用水需求,应重点加强该时段的流量监测与趋势分析。

b. 多雄藏布7月的河流健康指数在3条河流中最低,且流量最大,汛期与枯水期流量差异显著(图4)。尽管多雄藏布流域面积大、人口稀疏、人类活动较少,但通过频率曲线法计算得到的生态流量占比过高,可能对当地发展产生制约,因此需适当调低生态流量。此外,多雄藏布汛期流量可达 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 以上,高流量导致河流含沙量较大。为维持河道基本形态、保障河流生态健康,需加强汛期该河流量、含沙量及河流物理性质监测,防止汛期河道冲刷与淤积问题加剧。

c. 湘河整体流量偏小,在3条河流中其河流健康指数较平均,但流域内人类活动较多,需加强全时段流量的变化趋势分析。同时,湘河生态流量占比偏低,尤其是4—8月,易导致河流生态系统退化,不利于区域生态可持续发展,因此需适当提高生态流量占比以维持当地生态环境。此外,湘河鱼类种类丰富,为保护河流的生物多样性,需适当提高枯水期4—5月的流量预警阈值。

需要说明的是,本文因部分数据缺失或难以获取,在河流汛期淤积情况分析 & 当地植物详细需水

规律研究方面存在一定的局限性。

5 结 论

a. 频率曲线法不仅考虑河流生物的需求和水量的季节性变化,且计算所得的生态流量结果与适宜生态流量阈值契合度较高;同时,频率曲线法计算多雄藏布及湘河的水生态偏离指数均为最小,年楚河虽以最枯月平均流量法的水生态偏离指数最小,频率曲线法次之,但由于最枯月平均流量法无法体现河流生物和水量的季节性变化,故建议日喀则市优先采用频率曲线法作为计算当地河流生态流量的方法。为进一步优化结果,通过河流健康指数对生态流量进行调整,使每月河流健康水平均达到良好及以上,进而形成改进后的频率曲线法。该方法既兼顾了河流形态保护与生物生存需求,有效保障了日喀则市河流生态健康,又能保留充足的剩余流量促进当地水利及经济发展,最终实现河流生态保护与人类社会发展的平衡。

b. 为保障河流健康及日喀则市的生态环境,需结合年楚河、多雄藏布和湘河的特性,分重点开展工作:加强年楚河枯水期 2—3 月流量监测频率;加强多雄藏布汛期的流量、含沙量及河流物理性质监测,防范汛期河道冲刷淤积影响河流生态健康,同时为充分利用多雄藏布河流流量促进当地发展,需避免将枯水期河流适宜生态流量阈值设定过高;在枯水期 4—5 月,为保证湘河内鱼类产卵繁殖,需密切关注河流流量实时状况和整体趋势,并及时发出流量预警。

参考文献:

[1] BRITTAIN J E, LABEELUND J H. The environmental effects of dams and strategies for reducing their impact [R]. Norway: Reservoirs in River Basin Development, 1995: 129-138.

[2] BARQUÍN J, BENDA L E, VILLA F, et al. Coupling virtual watersheds with ecosystem services assessment: a 21st century platform to support river research and management[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2015, 2(6): 609-621.

[3] PEÑAS F J, BARQUÍN J. Assessment of large-scale patterns of hydrological alteration caused by dams [J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 706-718.

[4] DE CASTRO-CATALÀ N, DOLÉDEC S, KALOGIANNI E, et al. Unravelling the effects of multiple stressors on diatom and macroinvertebrate communities in European river basins using structural and functional approaches [J]. Science of the Total Environment, 2020, 742:

140543.

[5] WOODWARD G, GESSNER M O, GILLER P S, et al. Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning [J]. Science, 2012, 336: 1438-1440.

[6] EKKA A, KESHAV S, PANDE S, et al. Dam-induced hydrological alterations in the upper Cauvery River Basin, India[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 44: 101231.

[7] ELY P, FANTIN-CRUZ I, TRITICO H M, et al. Dam-induced hydrologic alterations in the rivers feeding the pantanal[J]. Frontiers in Environmental Science, 2020, 8: 579031.

[8] HAYES D S, BRÄNDLE J M, SELIGER C, et al. Advancing towards functional environmental flows for temperate floodplain rivers [J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1089-1104.

[9] POFF N L, MATTHEWS J H. Environmental flows in the anthropocene: past progress and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5 (6): 667-675.

[10] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 147-170.

[11] BHUIYAN C. Environmental flows: issues and gaps-a critical analysis[J]. Sustainability Science, 2022, 17(3): 1109-1128.

[12] GATES K K, VAUGHN C C, JULIAN J P. Developing environmental flow recommendations for freshwater mussels using the biological traits of species guilds[J]. Freshwater Biology, 2015, 60(4): 620-635.

[13] CHEN Hao, HUANG Saihua, XU Yueping, et al. River ecological flow early warning forecasting using baseflow separation and machine learning in the Jiaojiang River Basin, Southeast China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 882: 163571.

[14] WEI Na, XIE Jiancang, LU K, et al. Dynamic simulation of ecological flow based on the variable interval analysis method[J]. Sustainability, 2022, 14(13): 7988.

[15] GAO Chen, HAO Manqiu, SONG Lianghong, et al. Comparative study on the calculation methods of ecological base flow in a mountainous river [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 931844.

[16] 成波. 水资源短缺地区河道生态基流的计算方法及保障补偿机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[17] 周明通, 魏宣, 王宁, 等. 克里雅河生态基流水文学计算方法优选[J]. 中国农村水利水电, 2022 (11): 50-57. (ZHOU Mingtong, WEI Xuan, WANG Ning, et al. Optimization of calculation method for ecological base flow literature of Keriya River [J]. China Rural Water and

- Hydropower, 2022(11):50-57. (in Chinese))
- [18] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 377-387. (LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-hydrological threshold regulation in inland arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 377-387. (in Chinese))
- [19] AI Yadi, MA Zhenzhen, XIE Xinming, et al. Optimization of ecological reservoir operation rules for a northern river in China: balancing ecological and socio-economic water use[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108822.
- [20] FU Yicheng, LENG Jiwei, ZHAO Jinyong, et al. Quantitative calculation and optimized applications of ecological flow based on nature-based solutions [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126216.
- [21] 毛绍娟, 李红琴, 张懿铨. 日喀则河谷退耕还草(林)工程实施后生态功能效应的初步分析[J]. 草地学报, 2015, 23(6): 1278-1286. (MAO Shaojuan, LI Hongqin, ZHANG Yili. Preliminary analyzing the effect of returning farmland to grassland and forest project on the ecological function of Xigaz valley area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(6): 1278-1286. (in Chinese))
- [22] 张路, 林锦, 闵星, 等. 基于 GMS 的日喀则市区地下水数值模拟[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 76-79. (ZHANG Lu, LIN Jin, MIN Xing, et al. GMS-based numerical simulation of groundwater in Shigatse City[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(4): 76-79. (in Chinese))
- [23] MAKANDA K, NZAMA S, KANYERERE T. Assessing the role of water resources protection practice for sustainable water resources management: a review[J]. Water, 2022, 14(19): 3153.
- [24] MIAO Chiyuan, GOU Jiaojiao, FU Bojie, et al. High-quality reconstruction of China's natural streamflow[J]. Science Bulletin, 2022, 67(5): 547-556.
- [25] GUO Jiaojiao, MIAO Chiyuan, DUAN Qingyun, et al. Sensitivity analysis-based automatic parameter calibration of the VIC model for streamflow simulations over China [J]. Water Resources Research, 2020, 56: 1-19.
- [26] GUO Jiaojiao, MIAO Chiyuan, SAMANIEGO L, et al. CNRD v1. 0: a high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021 102(5): E929-E947.
- [27] CLEVELAND R B, CLEVELAND W S, MCRAE J E, et al. STL: a seasonal-trend decomposition [J]. Journal of Official Statistics. 1990, 6(1): 3-73.
- [28] ALI S, RAN Jiangjun, LUAN Yi, et al. The GWR model-based regional downscaling of GRACE/GRACE-FO derived groundwater storage to investigate local-scale variations in the North China Plain[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 908: 168239.
- [29] WU Chenchen, ZHANG Xiaoqin, WANG Wanjie, et al. Groundwater level modeling framework by combining the wavelet transform with a long short-term memory data-driven model[J]. Science of the Total Environment, 2021, 783: 146948.
- [30] LI Bu, LI Ruidong, SUN Ting, et al. Improving LSTM hydrological modeling with spatiotemporal deep learning and multi-task learning: a case study of three mountainous areas on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129401.
- [31] GERS F A, SCHMIDHUBER J, CUMMINS F. Learning to forget: continual prediction with LSTM [J]. Neural Computation, 2000, 12(10): 2451-2471.
- [32] KRATZER F, KLOTZ D, BRENNER C, et al. Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22: 6005-6022.
- [33] 何萍, 束龙仓, 邓铭江, 等. 西北干旱区内陆河生态环境需水量研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(10): 23-25. (HE Ping, SHU Longcang, DENG Mingjiang, et al. Research on eco-environmental water requirement of arid inland river in Northwest China[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(10): 23-25. (in Chinese))
- [34] FU Aihong, WANG Yi, YE Zhaoxia. Quantitative determination of some parameters in the Tennant method and its application to sustainability: a case study of the Yarkand River, Xinjiang, China[J]. Sustainability, 2020, 12: 3669
- [35] 郭文献, 夏自强. 长江中下游河道生态流量研究[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1): 619-623. (GUO Wenxian, XIA Ziqiang. Study on ecological flow in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1): 619-623. (in Chinese))
- [36] 于守兵, 凡姚申, 余欣, 等. 黄河河口生态需水研究进展与展望[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1101-1110. (YU Shoubing, FAN Yaoshen, YU Xin, et al. Advances and prospects of ecological water demands in the Yellow River Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1101-1110. (in Chinese))
- [37] 魏雯瑜, 刘志辉, 冯娟, 等. 天山北坡呼图壁河生态基流量估算研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(6): 92-96. (WEI Wenyu, LIU Zhihui, FENG Juan, et al. A study of the estimation of the Hutubi River ecological base flow in the north slope of the Tianshan Mountains [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(6): 92-96. (in Chinese))
- [38] 季小兵, 马玉其, 王新友, 等. 基于 1960—2018 年实测径流与水文学方法的开都河生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 17-23. (JI Xiaobing, MA

- Yuqi, WANG Xinyou, et al. Analysis of ecological instream flow of Kaidu River based on hydrological methods and measured runoff data from 1960 to 2018 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31 (6): 17-23. (in Chinese))
- [39] 李凯轩,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区三口水系生态基流研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 19-24. (LI Kaixuan, LI Zhiwei, HU Xuyue, et al. Ecological base flow of three major outlets rivers of the middle Yangtze River into the Dongting Lake area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38 (8): 19-24. (in Chinese))
- [40] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 430-434. (ZHONG Huaping, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of assessment methods for instream ecological flow requirement [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (3): 430-434. (in Chinese))
- [41] LI Changwen, KANG Ling. A new modified Tennant method with spatial-temporal variability [J]. Water Resources Management, 2014, 28(14): 4911-4926.
- [42] 李锐峰,赵超,李文戡,等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 25-30. (LI Kaifeng, ZHAO Chao, LI Wenyu, et al. Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 25-30. (in Chinese))
- [43] 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): 57-61. (YAO Hangbin, WAN Donghui, ZHANG Li, et al. Study on ecological flow determination of southwest mountain rivers [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(5): 57-61. (in Chinese))
- [44] 王鹏全,李润杰. 基于水文学法和 SWAT 模型的北川河流域生态需水量分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 118-127. (WANG Pengquan, LI Runjie. Ecological water demand analysis based on hydrological methods and SWAT model in the Beichuan River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 118-127. (in Chinese))
- [45] 李丽娟,郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500. (LI Lijuan, ZHENG Hongxing. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe Basins [J]. Journal of Geographical Sciences, 2000, 55(4): 495-500. (in Chinese))
- [46] 班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 47-55. (BAN Xuan. Ecological flow requirement for Chinese sturgeon spawning habitat [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 47-55. (in Chinese))
- [47] 杨泽凡,胡鹏,王玉莲,等. 鱼类产卵敏感期河流生态流速的分区分类阈值研究[J]. 水利学报, 2024, 55(2): 190-201. (YANG Zefan, HU Peng, WANG Yulian, et al. Zoning and classification of ecological flow velocity thresholds required by river fish during sensitivity spawning periods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(2): 190-201. (in Chinese))
- [48] ZHANG Jian, FU Yicheng, PENG Wenqi, et al. Calculation and evaluation of suitable ecological flows for eco-environmental recovery of cascade-developed rivers [J]. The Science of the Total Environment, 2023, 878: 162918.
- [49] ZHANG Yiming, KONG Lingchuan, WANG Wensheng, et al. Study on the ecological flow and its guarantee degree considering hydrological variation [J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111594.
- [50] 陈敏建,丰华丽,王立群,等. 适宜生态流量计算方法研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 745-750. (CHEN Minjian, FENG Huali, WANG Liqun, et al. Calculation methods for appropriate ecological flow [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 745-750. (in Chinese))
- [51] SHI Xiaonan, ZHANG Fan, LU Xixi, et al. The response of the suspended sediment load of the headwaters of the Brahmaputra River to climate change: quantitative attribution to the effects of hydrological, cryospheric and vegetation controls [J]. Global and Planetary Change, 2022, 210: 103753.
- [52] LI Jinglong, WANG Genxu, SONG Chunlin, et al. Recent intensified erosion and massive sediment deposition in Qinghai-Xizang Plateau rivers [J]. Nature communications, 2024, 15(1): 722.
- [53] 李永,卢红伟,李克锋,等. 考虑齐口裂腹鱼产卵需求的山区河流生态基流过程确定[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 809-815. (LI Yong, LU Hongwei, LI Kefeng, et al. Determination of ecological base flow process of mountainous rivers by taking into account the prenat's Schizothoracin's spawning requirements [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 809-815. (in Chinese))
- [54] 张连博,姚维志,宋一清. 黑水河 3 种鳅科鱼类感应流速的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 102-107. (ZHANG Lianbo, YAO Weizhi, SONG Yiqing. Preliminary study on the induction velocity of three cobitidae species in Heishui River [J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(2): 102-107. (in Chinese))
- [55] 李明森. 藏北高原草地资源合理利用[J]. 自然资源学报, 2000, 15(4): 335-339. (LI Mingsen. Rational exploitation of grassland resources in the Northern Xizang Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(4): 335-339. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-21 编辑:胡新宇)