

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.031

基于底栖动物响应特征的洮儿河生态流量目标适应性分析

阿膺兰¹, 胡 鹏¹, 曾庆慧¹, 侯佳明¹, 吴思萱¹, 李泽友²

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038

2. 松辽水利委员会察尔森水库管理局, 内蒙古 乌兰浩特 137499)

摘要:以洮儿河为研究对象,基于其底栖动物采样监测数据,构建流量因子与生物因子之间的响应关系,以评价生态流量保障成效和生态流量目标的适应性。结果表明:以当前生态流量目标(冰冻期、平水期、丰水期分别多年平均径流的5%、10%和15%)泄放后,生态流量达标率时间上逐渐提升,空间上自上游至下游递减,底栖动物多样性、生物量等指数递变趋势类似;底栖动物多样性指数与生态流量达标率相关性最显著并可据此建立线性回归关系;结合该回归关系和情景分析,发现冰冻期、平水期、丰水期目标分别为7%、14%和27%时线性拟合度最高($R^2=0.998$),表明该目标下底栖动物多样性的维持效果最好。建议逐步提高生态流量目标,促进已受损生态系统恢复。

关键词:生态流量;底栖动物;响应特征;适应性分析;洮儿河

中图分类号:P349

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2023)03-0253-08

Adaptability analysis of ecological flow based on response characteristics of benthos in the Taoer River // A Yinglan¹, HU Peng¹, ZENG Qinghui¹, HOU Jiaming¹, WU Sixuan¹, LI Zeyou² (1. National Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Control, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Chaersen Reservoir Administration, Songliao Water Resources Commission, Wulanhaote 137499, China)

Abstract: In order to evaluate the effectiveness of ecological flow support and the adaptability of ecological flow target, the response relationship between the flow factor and the biological factor was constructed based on the sampling data of benthos in Taoer River. The results show that under the current ecological flow target, which is settled as 5%, 10%, 15% of the annual average runoff for frozen, normal, and wet period, the compliance rate of ecological flow improved gradually in temporal. And the compliance rate of ecological flow decreased from upstream to downstream in spatial, which like the change trend of benthic diversity and biomass. Then, the Pearson analysis showed that the correlation between the benthic diversity index and the compliance rate of ecological discharge is the most significant and the linear regression relationship was established accordingly. Finally, combined with the regression relationship and scenario analysis, it was found that the linear fitting degree was the highest ($R^2=0.998$) when the targets of the frozen, normal, and wet periods were setting as 7%, 14%, and 27%, respectively, indicating that the target was most suitable with the best effect on maintaining benthic diversity. Thus, it is suggested to gradually increase the ecological flow target and promote the restoration of damaged ecosystem in Taoer River.

Key words: ecological flow; benthos; response characteristics; adaptability analysis; Taoer River

近年来,我国生态流量逐步从科学研究向管理实践转变^[1-3]。2020—2022年,水利部分4批公布了全国310个重点河湖控制断面的生态流量目标,

各地方管理部门也制定了辖区内大批控制断面生态流量目标。然而已定目标的科学性如何,是否能够有效保障和提升河湖生态质量与稳定性,目前从

基金项目:国家自然科学基金(52122902,52009146,52209041);中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(WR0145B022021);流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SK12022ZD01)

作者简介:阿膺兰(1988—),女,工程师,博士,主要从事生态水文学研究。E-mail: ayinglan_1988@163.com

通信作者:胡鹏(1985—),男,正高级工程师,博士,主要从事生态水文和生态水力学研究。E-mail: hp5426@126.com

生态健康角度对流量目标适应性进行评估的研究还较少^[4],难以对生态流量目标进行动态修正,使其适应区域特征,主要难点在于:目前国内生态流量管理实践处于起步阶段,生态系统对水文情势变化的响应通常滞后,生态流量保障之后的水生生态系统监测评价尚未全面开展,导致生态-水文响应关系难以准确建立。

生态流量管理起步较早的国家在这方面均投入了大量人力物力,取得了丰富的经验。密西西比河2000年开始径流适应性管理,提出将稳定的径流模式逐渐改变为季节性径流模式(即逼近自然状态下的径流模式),改善了密西西比河的生态系统健康程度^[5]。美国陆军工程兵师团(USACE)与大自然保护协会(TNC)于2002年在全美开展可持续河流计划(sustainable river plan, SRP),通过多项监测,建立生物栖息地与流量之间的相关关系,利用该关系间接推断目标鱼类出现的频率,据此确定和动态调整生态流量目标^[6]。澳大利亚墨累-达令河流域管理局(MDBA)于2009年制定了流域规划,对流量和生态要素开展了长期跟踪监测,发现虽然全流域尺度整体生态健康状况未得到显著改善,但河道内的鱼类种群结构、湿地主要鸟类繁殖活动状况得到了改善^[7-8]。

国内生态流量研究大多集中在生态流量目标确定^[9-13]以及调度保障^[14-17]方面,仅有少量的研究涉及生态流量目标适应性分析和动态优化^[18-21],如曹毛如^[19]依据日均径流曲线以及最低流量要求,建立了最小生态环保流量曲线,该曲线实现了年内生态流量的动态调整,但是并未通过生态系统响应验证。梁中华^[20]基于北方河流的季节性断流特征和生态功能分区等指标,重新设定了大连地区河流生态目标和逐月保障率,为生态调度提供参考,但其评价指标并非生物相关的动态指标,不能依据年度生态系统的健康状态进行响应和优化。Tang等^[21]通过考虑生态响应,对南方梯级水库的生态流量目标适应性进行了评估,定性描述了当前水库调控的流量过程对下游生物多样性减少产生了巨大影响。总体而言,当前我国生态流量目标适应性评价对于生态系统响应考虑不足,尤其是针对生态环境脆弱的北方河流,基于生态响应的生态流量目标适应性分析和优化还需深入研究。

洮儿河流域位于松嫩平原腹地,水资源相对匮乏,生态环境脆弱,受气候变化和人类活动影响,察尔森水库下游的洮南及黑帝庙河段经常断流^[22]。自2019年4月开始,察尔森水库开始实施生态流量泄放。经过3年试运行,亟须评估流域生态流量保障成效,明确目标设置的合理性并提出优化调整措

施。因此,本文基于水生生物采样监测数据,构建流量因子与生物因子之间的响应关系,评价生态流量保障成效,据此分析现行生态流量目标的适应性,并提出优化建议,旨在为流域生态流量科学管控提供技术支撑。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

洮儿河为嫩江下游右侧支流,发源于大兴安岭东麓高岳山,流经内蒙古自治区兴安盟和吉林省白城市,至月亮泡注入嫩江,河流全长563 km,流域面积约36 900 km²(图1)。流域多年平均水资源总量为32.63亿m³,其中地表水资源量21.50亿m³。察尔森水库是洮儿河干流上唯一的控制性水利工程,控制流域面积7 780 km²,总库容12.53亿m³,是一座以防洪、灌溉为主的综合大型水利枢纽工程。

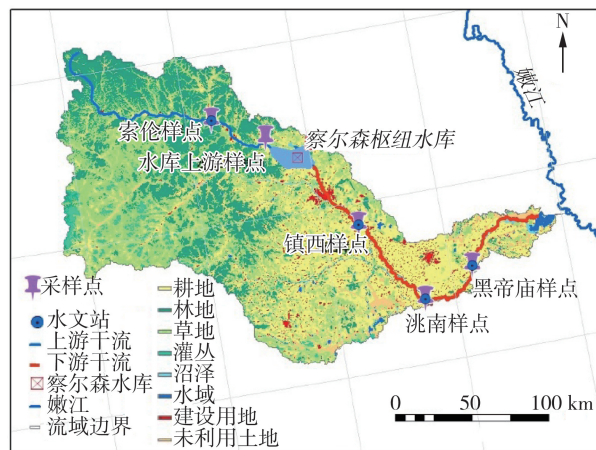


图1 研究区范围及采样位置示意图

Fig.1 Study area and location of sampling sites

1.2 生态流量目标及保障率计算方法

1.2.1 各断面生态流量目标计算方法

目前公布的洮儿河生态流量目标主要针对察尔森水库下泄断面以及镇西断面,察尔森水库下泄断面生态流量目标在非灌溉季节(10月至次年4月)和灌溉季节(5—9月)分别为2.53 m³/s和5.06 m³/s,分别约占多年平均流量的10%和20%。镇西断面在冰冻期(12月至次年3月)的生态流量为2.53 m³/s,与上游察尔森水库断面一致,约占多年平均径流量的5%;平水期(4—5月、10—11月)和丰水期(6—9月)分别为5 m³/s和7.5 m³/s,分别约占多年平均径流量的10%和15%。其他断面的生态流量目标值,以镇西断面为参照,依据不同断面的集水面积比例,确定不同断面的生态流量目标值,计算公式为

$$T_{i_eco} = \frac{A_i}{A_{eco}} t_{eco} \quad (1)$$

式中: T_{i_eco} 为 i 断面生态流量目标值; A_i 为 i 断面的集水面积; A_{eco} 为参考断面(镇西)的集水面积; t_{eco} 为参考断面(镇西)的生态流量目标值。

1.2.2 生态流量保障率等水文指标计算方法

本文涉及各断面生态流量达标率、平均流量、断流率等水文指标,是以各水文站的逐日实测流量数据为基础,计算公式分别为

$$R_{i_a} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{N_i} \quad (2)$$

$$S_{i_eco} = \frac{C_{达}}{N_i} \times 100\% \quad (3)$$

$$F_i = \frac{C_0}{N_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_{i_a} 为 i 断面平均流量; r_i 为 i 断面的逐日流量; N_i 为计算时段内的总天数; S_{i_eco} 为 i 断面生态流量达标率; $C_{达}$ 为 i 断面逐日流量大于等于生态流量目标的天数(即生态流量达标天数); N_i 为计算时段总天数; F_i 为 i 断面断流率; C_0 为 i 断面流量等于 0 的天数(即断流天数)。

1.3 底栖动物采样及评价方法

1.3.1 底栖动物采样与分析方法

采样时间为 2021 年的春(4 月)、夏(8 月)、秋(10 月)3 个季节,采样断面 5 个,水库上游 2 个,下游 3 个,均位于相关水文站附近(如图 1)。采样步骤如下:①采集。依据断面形态布设采样点,用索伯网采集器采集定量样品,每个采样点采泥样 2 个或 3 个。砾石底质无法用采泥器或索伯网采集的,捞取砾石用 40 目筛绢网筛洗或直接翻起石块在水流下方用筛绢网捞取。②处理。泥样倒入塑料盆中,对底泥中的砾石仔细刷下附着的底栖动物,经 40 目分样筛筛选后拣出大型动物,剩余杂物全部装入塑料袋中,加少许清水带回室内,在白色解剖盘中用细吸管、尖嘴镊、解剖针分拣。③保存。软体动物用 5% 甲醛或 75% 乙醇溶液;水生昆虫用 5% 甲醛固定数小时后再用 75% 乙醇保存;寡毛类先放入加清水的培养皿中,并缓滴数滴 75% 乙醇麻醉,待其身体完全舒展后再用 5% 甲醇固定,75% 乙醇保存。④计量。底栖动物密度按种类计数(损坏标本一般只统计头部),再换算成个/ m^2 。生物量计算中,软体动物用电子秤称重,水生昆虫和寡毛类用扭力天平称重,再换算成 g/ m^2 。

1.3.2 Margalef 多样性指数计算方法

多样性指数是表征群落物种丰富度的指标,计算方法众多,采用 Margalef 多样性指数表征,计

算公式为

$$M = \frac{s-1}{\ln n} \quad (5)$$

式中: M 为 Margalef 多样性指数; s 为底栖动物群落中物种数目; n 为观察到的底栖动物个体总数。

1.3.3 重复测量方差分析

由于样品来源于 5 个断面 3 次采样,为了鉴别采样是否存在显著性时空差异,本研究利用软件 SPSS 16.0,采用重复测量方差分析方法予以确定,当 $p < 0.05$ 时,表明采样次数或断面之间存在显著差异,否则无显著差异。

1.4 生态水文响应关系构建及生态流量目标适应性分析方法

底栖动物群落特征影响要素众多,其中流量是水资源短缺地区的最重要的影响要素,通过皮尔逊相关分析法量化流量指标与生态指标之间的相关关系(见公式(6)),识别关联关系最显著的生态和水文表征因子,并通过回归方法构建关键因子之间线性回归关系,表征生态水文代表性响应关系,用于分析生态流量目标适应性。在此基础上采用情景分析的方式,探讨不同生态流量目标设置下的生态水文响应关系拟合度(见公式(7))的变化,并与当前生态流量目标进行对比,从而提出优化建议。

$$r_{x,y} = \frac{m \sum xy - \frac{1}{m} \sum x \sum y}{\sqrt{[\sum x^2 - \frac{1}{m}(\sum x)^2][\sum y^2 - \frac{1}{m}(\sum y)^2]}} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum (y_{拟合} - \bar{y}^*)^2}{\sum (y_{观测} - \bar{y}^*)^2} \quad (7)$$

式中: $r_{x,y}$ 为 x 变量和 y 变量之间的相关系数; x 、 y 分别为 x 变量和 y 变量的观测值; m 为 x 变量和 y 变量的观测组数; R^2 为观测值组(X , $Y_{观测}$)与拟合值组(X , $Y_{拟合}$)之间的拟合度,表征拟合结果与实际情况的吻合程度; $y_{拟合}$ 为拟合值; $y_{观测}$ 为实际观测值; $\bar{y}^*$ 为拟合值的平均值。

此外,统计分析中生态指标选择了底栖动物生物量、密度和多样性指数,流量指标选择了平均流量、断流率和生态流量达标率,并从单年和多年平均两个维度进行分析,其中多年平均流量分别统计至 2020 年和 2021 年。此外,在相同样本量的前提下,通过对比不同指标之间的相关系数(r)和拟合度(R^2)的大小差异,即可揭示不同生态指标对不同流量指标的关联和响应差异特征。

2 结果与分析

2.1 生态流量目标及保障

推算的各个断面生态流量目标值见表 1,不同时期的生态流量目标占比为多年平均径流的 5% 至 15%。依据不同断面生态流量目标值,计算不同断面的生态流量达标率见表 2,2017—2021 年的生态流量达标率呈现递增趋势,2021 年达标率超过 90%。2019 年开始实施生态流量泄放,洮南断面生态流量达标率实现 0 的突破,2020 年黑帝庙断面达标率实现 0 的突破,2021 年生态流量达标率进一步提升,说明水库泄放对下游断面的水量补充有一定的滞后效应。空间上洮儿河自上游至下游生态流量达标率呈现递减趋势,达标率最高的位于洮儿河上游的索伦断面;镇西断面由于区间汇流的补充,生态流量达标率仅次于索伦,高于察尔森水库断面。达标率最低的是位于下游的洮南和黑帝庙断面,这是因为洮儿河中下游平原灌区众多,农业开发程度较高,水资源开发利用量较大,导致生态流量保障下的洮南和黑帝庙断面生态流量达标率较低。

表 1 洮儿河不同断面生态流量目标及其径流占比

断 面	冰冻期(12 月至次年 3 月)		平水期(4—5 月,10—11 月)		丰水期(6—9 月)	
	占天然流量比例/%	目标值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	占天然流量比例/%	目标值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	占天然流量比例/%	目标值/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
索 伦	5	0.8	10	1.6	15	2.4
洮 南	5	3.3	10	6.5	15	9.7
黑帝庙	5	3.4	10	6.8	15	10.2

表 2 洮儿河不同断面生态流量达标率

时间	索伦/%	水库/%	镇西/%	洮南/%	黑帝庙/%	年度平均/%
2017 年	94	8	64	0	0	33
2018 年	81	12	67	0	0	32
2019 年	91	62	88	4	0	49
2020 年	100	99	99	52	39	78
2021 年	100	100	100	89	67	91
断面平均	93	56	84	29	21	

2.2 底栖动物时空变化特征

3 次采样共收集到底栖动物 2 门 3 纲 16 种(属),其时间和空间分布特征如图 2 所示。季节上,底栖动物生物量、密度、多样性等指数最小值均出现在夏季 8 月,这是由于 8 月处于丰水期,雨洪事件频繁,破坏了河床和底质的稳定性,不利于底栖动物繁殖发展,这与其他研究结论相似^[23],表现为大流量对底栖动物密度、生物量、多样性有负向作用。但是,不同区域季节性流量变化对底栖动物的影响不同,如黄河干流(甘肃段)底栖动物多样性呈现夏季最高、秋季次之、春季最低的特征^[24],而集水面积类似的北运河河段的底栖动物多样性在季节上呈现出与本研究类似的结论^[25],因此后文中生态-水文响应关系将基于年度水平构建,避免瞬时流量带来的不稳定性影响。底栖动物密度和生物量最大值出现在春季 4 月,优势种为喜缓流耐污染的环节动物门(如环节动物门寡毛纲颤蚓科),其密度和生物量占比分别为 74% 和 91%。多样性指数最大值出现在 10 月秋季,优势种为喜急流不耐污的节肢动物门(如节肢动物门昆虫纲石蛾科),其密度和生物量

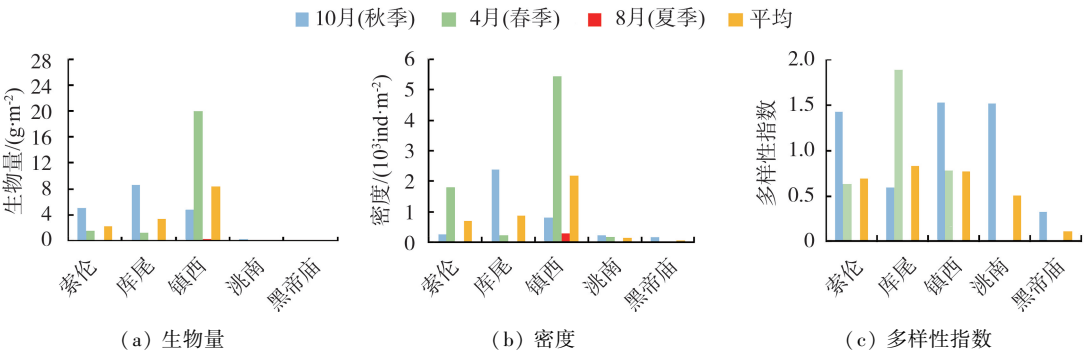


图 2 洮儿河底栖动物时空特征分布

Fig. 2 Spatial and temporal distribution feature of benthos in the Taoer River

占比分别为 95% 和 83%。秋季底栖动物多样性的增加,是由于雨洪事件后带来食源以及栖息地多样性的改善,底栖动物多样性得以迅速回升。整体上,重复测量方差分析表明,洮儿河干流底栖动物多样性在季节上没有显著差异(生物量, $p = 0.365$;密度, $p = 0.316$;多样性, $p = 0.079$)。

底栖动物生物量和密度沿上游至下游纵向梯度变化趋势类似,即从索伦至镇西递增、镇西以下递减,最大值出现在镇西断面,洮南和黑帝庙断面的底栖动物量仅为 0.1 g/m^2 ,相对索伦断面生物量的相对水平仅为 2%。洮南断面和黑帝庙断面在 2021 年的 8 月和 10 月的流量均超过镇西站的流量,但是生物量却很低,这可能是由于洮南断面和黑帝庙断面之前常年断流,即使在 2021 年恢复生态流量,但是生态系统难以在短期内恢复,导致底栖动物生物量较低。底栖动物多样性指数在空间上虽然与生物量变化趋势基本一致,即先增后减,但是最大值出现在库尾断面,而且相对于索伦断面,洮南和黑帝庙断面的多样性指数相对水平分别为 88% 和 15%,高于生物量和密度的相对水平。整体上,重复测量方差分析表明,洮儿河干流底栖动物生物量、密度和多样性在空间上没有显著差异(生物量, $p = 0.37$;密度, $p = 0.413$;多样性, $p = 0.502$)。

2.3 生态-水文响应关系分析

不同生态-水文指标皮尔逊相关分析结果如表 3 所示,与上文 8 月期间流量对底栖动物生态指标负作用不同,年际水平的流量与底栖动物生物量、密度和多样性均呈现正向关系,说明流量在年内和年际尺度对底栖动物的影响是不同的。有研究表明,瞬时高流量(2.5 ~ 3 倍)会将底栖动物冲刷至漂流中^[26],因此夏季汛期雨洪事件会导致底栖动物明显减少,与本研究 8 月采集到的底栖动物生物量、密

度均最低相吻合。但是在年际尺度上,Monkw 等^[27]深入研究 83 条河流长期(1980—2000 年)的生态水文作用关系,发现虽然不同区域的水文指标与生态指标的作用关系不同,但是年均流量全域范围均与底栖动物生命健康指数呈现正相关关系,与本文年际尺度的研究结论类似。为了减少瞬时流量不稳定性对底栖动物造成的影响,本文的研究基于年际和多年尺度。

生态指标(生物量、密度和多样性)与流量指标(平均流量、断流率、生态流量达标率)在多年尺度上的显著性相关更高,说明流量变化下生态系统响应的滞后效应明显。其中,生物量和密度仅在多年尺度有显著性关系,多样性在单年和多年尺度均有显著性关系,而且多样性在单年尺度的相关性系数更高(2021 年, $r = 0.993$),说明多样性指数对流量变化响应更显著,生物量和密度的响应相对滞后。有研究表明流量变化能快速改变物种的出现频率,但是形成一定规模的种群数量则需要较长时间,该结论与 Kennard 等^[28]的研究结果类似。此外,有研究表明,不同区域流量与底栖动物生物量和密度有可能是正向关系,也可能是负向关系,但是流量增加与多样性指数之间基本呈现出稳定的正向关系^[29]。正如上文分析所知,大流量一方面可能冲刷底栖动物生境,但同时也会带来丰富的食源,两者之间的正负关系由区域水文生态相互适应特征决定;而一般情况下,流量增加会提升生境多样性,从而支持更多的生物多样性。

此外,虽然生物量和密度与 2017—2020 年多年平均流量具有显著正相关关系,但是与 2017—2021 多年平均流量却没有显著相关关系,这是因为 2021 年流域降水丰沛,流量较大,黑帝庙和洮南断面的流量不仅远高于常年平均水平,而且与

表 3 不同生态指标及流量指标皮尔逊相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis of ecological and flow indexes

时间	平均流量			断流率			生态流量达标率		
	生物量	密度	多样性	生物量	密度	多样性	生物量	密度	多样性
2017 年	0.571	0.57	0.849	-0.731	-0.74	-0.859	0.533	0.543	0.826
2018 年	0.876	0.881	0.845	-0.731	-0.74	-0.859	0.644	0.654	0.848
2019 年	0.614	0.62	0.885 *	-0.719	-0.732	-0.932 *	0.715	0.725	0.871
2020 年	0.707	0.692	0.126	-0.699	-0.715	-0.963 **	0.723	0.735	0.922 *
2021 年	-0.088	-0.105	-0.677				0.616	0.636	0.993 **
2017—2020 年	0.898 *	0.897 *	0.862	-0.728	-0.739	-0.900 *	0.653	0.664	0.868
2018—2020 年	0.948 *	0.946 *	0.827	-0.725	-0.737	-0.915 *	0.697	0.707	0.880 *
2019—2020 年	0.962 **	0.957 *	0.791	-0.714	-0.728	-0.943 *	0.717	0.728	0.890 *
2017—2021 年	0.636	0.617	-0.009	-0.728	-0.739	-0.898 *	0.659	0.670	0.887 *
2018—2021 年	0.513	0.495	-0.153	-0.725	-0.737	-0.915 *	0.697	0.708	0.898 *
2019—2021 年	0.345	0.325	-0.310	-0.712	-0.726	-0.946 *	0.714	0.726	0.921 *
2020—2021 年	0.123	0.105	-0.497	-0.698	-0.713	-0.964 **	0.700	0.715	0.962 **

注: ** 表示 $p < 0.01$ 的极显著水平; * 表示 $p < 0.05$ 的显著水平;2021 年全年无断流

常年自上游至下游递减趋势完全不同,表现为流量递增关系。由于底栖动物生物量和密度对流量变化的响应具有滞后性,其对 2021 年流量变化的响应还未较好体现。

基于上述分析,多样性对流量变化响应更显著且更稳定,为了优化阶段性生态流量目标,本研究以生态流量达标率和底栖动物多样性为指标构建生态-水文线性响应关系(图 3)。若生态流量目标设置合理,则生态流量达标即可满足生物多样性维持的需求;在数学上表现为生态流量目标越合理,则回归拟合线的拟合度越高,因此,生态流量目标优化将基于该拟合线及其拟合度变化进行进一步探讨。

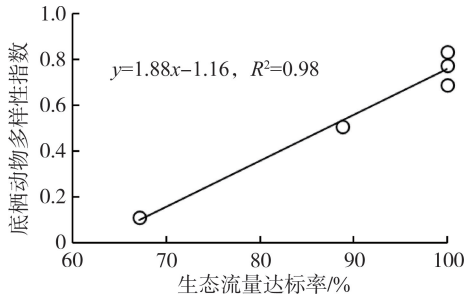


图 3 生态流量达标率-底栖动物多样性指数线性回归拟合线
Fig.3 Regression line between compliance rate of ecological flow and diversity index of benthos

2.4 生态流量目标适应性分析及优化建议

采用情景模拟的方式进一步探讨洮儿河生态流量目标的适应性和优化需求,以当前公布的生态流量目标为参照(冰冻期目标占天然流量的 5%,平水期目标占 10%,丰水期目标占 15%),情景设置方式为单期、两期、三期分别增加 5%(序号 1~7)以模拟识别生态流量改善效果最佳的时期。此外,由于当前冰冻期、平水期、丰水期的生态流量目标(分别占天然流量的 5%、10%和 15%)比例为1:2: 3,因此情景中也设置等比例变化,以评估全年生态流量目标适应性及优化潜力。不同目标情景设置如表 4 所示,计算不同目标情景下的断面生态流量达标率与底栖动物多样性回归关系的拟合度(R^2)变化。

由图 4 可知,当前生态流量目标下的达标率与多样性拟合度为 0.986,已达到极显著水平,说明当前的生态流量目标设置基本合理。当直接在不同时期的目标占比上提升 5%时(情景 1~7),情景 2、情景 3、情景 6 拟合度有微弱提升,其他情景均有不同程度的下降,这 3 组情景中冰冻期生态流量占比值均为 5%,其他情景的冰冻期生态流量占比为 10%,说明冰冻期生态流量目标占比不能提升至 10%,这与寒区冬季河流冰封、土壤冻结,冰封期生态流量目

表 4 不同情景设置下的生态流量占比

Table 4 Proportion setting of ecological flow to annual runoff under different scenarios

情景设置方式	序号	占天然流量比例/%		
		冰冻期	平水期	丰水期
对照		5	10	15
单期增加 5%	1	10	10	15
	2	5	15	15
	3	5	10	20
两期增加 5%	4	10	15	15
	5	10	10	20
	6	5	15	20
三期增加 5%	7	10	15	20
三期等比例递变 (冰冻期、平水期、丰水期之比为1:2:3)	8	2	4	6
	9	3	6	9
	10	4	8	12
	11	6	12	18
	12	7	14	21
	13	8	16	24
	14	9	18	27
	15	10	20	30
	16	11	22	33
	17	12	24	36

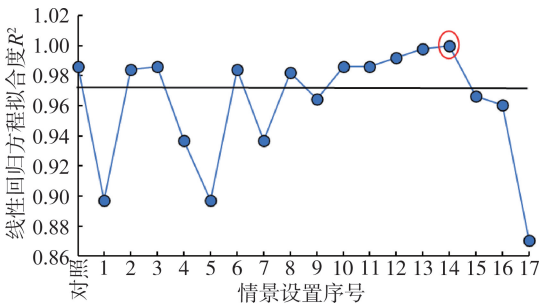


图 4 不同情景下生态流量达标率与多样性回归拟合度变化趋势

Fig.4 Change of regression fitness between compliance rate of ecological flow and diversity index under different scenarios

标不宜设置太高的认识一致。情景 8~17 对冰冻期的生态流量目标进一步细化,占比从 2%至 12%进行递增,其他时期等比例变化。发现从情景 10 开始(冰冻期生态流量目标占天然流量的 4%),随着流量目标值的提升,生态流量目标达标率与多样性指数之间的拟合度也逐渐提升,直至情景 14(冰冻期生态流量目标占天然流量的 9%)之后开始下降。由此表明,基于底栖动物多样性的洮儿河生态流量最佳控制目标为:冰冻期生态流量目标占多年天然平均径流量的 9%,平水期占 18%,丰水期占 27%,相关结果可为洮儿河生态流量目标的动态调整和优化提供参考。

情景模拟所得的最佳目标占比值符合相关研究中推荐的生态流量目标占比区间:枯水期 8%~

18%、非枯水期 15%~40%。此外,在该目标下,洮儿河 5 个代表性断面 2021 年冰冻期、平水期、丰水期的生态基流平均达标率分别为 79%、77% 和 100%,表明相关目标具备较好的实践可操作性。需要指出的是,由于相关结果是基于 2021 年 1 个年度的水生态系统响应分析,其严格的准确性和合理性尚有待进一步验证,但相关评价方法可为其他河流生态流量保障成效和目标适应性分析提供参考。

2.5 局限及不足

目前研究主要针对单年度生态系统响应进行分析,识别构建的生态水文关系可适于短期的生态流量目标优化。研究中发现底栖动物等生态响应对于径流变化的响应具有滞后性,后期可进一步延长水生生态监测采样周期,量化年际尺度流量变化对底栖动物生物量和多样性的综合影响,以期得到长期的生态流量目标适应性分析结果和动态调整建议。

3 结 论

本文通过对洮儿河生态流量保障后的底栖动物采样分析,开展洮儿河既定生态流量目标的适应性评估,以期为生态流量目标的动态优化提供依据。结果发现底栖动物生物量和密度与断面多年平均流量关系密切,而底栖动物多样性与年内径流过程中生态流量达标率关系密切,说明多样性指数对流量过程变化响应更加显著。在此基础上,分析了不同目标情景下生态流量达标率和多样性指数的相关关系,发现生态流量目标设置为,冰冻期占多年平均径流量比例为 9%,平水期占比 18%、丰水期占比 27% 时,能最大程度支撑底栖动物多样性的提升,相关结果和方法可为东北地区其他河流生态流量保障成效和目标适应性分析提供参考。

参考文献:

[1] 陈端,陈求稳,陈进. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J]. 水力发电学报, 2011, 30(5): 248-256. (CHEN duan, CHEN Qiuwen, CHEN Jin. Review on optimization models of reservoir operation with consideration of ecological flow [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 248-256. (in Chinese))

[2] 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 Yang, SUN Chong, LIU Hanxi. Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province [J]. Water Resources Protection, 2020,

36(2): 92-96. (in Chinese))

[3] 王浩,王建华,胡鹏. 水资源保护的新内涵:“量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))

[4] 葛怀凤. 基于生态-水文响应机制的大坝下游生态保护适应性管理研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013

[5] RIDDELL E, POLLARD S, MALLORY S, et al. A methodology for historical assessment of compliance with environmental water allocations: lessons from the Crocodile (East) River, South Africa[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(3-4): 831-843.

[6] WARNER A T, BACH L B, HICHEY J T. Restoring environmental flows through adaptive reservoir management: planning, science, and implementation through the Sustainable Rivers Project[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(3-4): 770-785.

[7] HART B T. The Australian Murray-Darling Basin Plan: challenges in its implementation (part 1) [J]. International Journal of Water Resources Development, 2016, 32(6): 819-834.

[8] HART B T. The Australian Murray-Darling Basin Plan: challenges in its implementation (Part 2) [J]. International Journal of Water Resources Development, 2016, 32(6): 835-852.

[9] 刘丹丹. 考虑提升量的河道生态流量确定及管控机制研究[D]. 西安:西安理工大学, 2021.

[10] 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, 2021, 52(5): 149-157. (LYU Cuimei, LIU Miaomiao, WANG Min, 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. (in Chinese))

[11] MA D, LUO W, YANG G, et al. A study on a river health assessment method based on ecological flow[J]. Ecological Modelling, 2019, 401: 144-154.

[12] 易雨君,徐嘉欣,宋劼,等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 133-140. (YI Yujun, XU Jiaxin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 133-140. (in Chinese))

[13] 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 Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. 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. (in Chinese))
- [14] 邓志民,李斐,邓瑞,等. 长江流域生态流量满足程度及其保障措施研究[J]. 人民长江, 2021, 52(7): 71-75. (DENG Zhimin, LI Wen, DENG Rui, et al. Study on satisfaction degree of ecological flow and its guarantee measures in Changjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2021, 52(7): 71-75. (in Chinese))
- [15] 严子奇,周祖昊,王浩,等. 基于精细化水资源配置模型的坪山河流域生态补水研究[J]. 中国水利, 2020, (22): 28-30. (YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Studies on ecological water supplement in Pingshan River Basin based on generalized water allocation simulation model [J]. China Water Resources, 2020 (22): 28-30 (in Chinese))
- [16] 胡安焱,张自英,王菊翠. 水利工程对汉江中下游水文生态的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 5-9. (HU Anyan, ZHANG Ziyang, WANG Jucui. Impact of hydraulic engineering on hydro-ecology in middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2): 5-9. (in Chinese))
- [17] 尚文绣,彭少明,王煜,等. 小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 160-166. (SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Influence of Xiaolangdi Reservoir on ecological condition of the Lower Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 160-166. (in Chinese))
- [18] 李泽君,黄本胜,邱静,等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 22-29. (LI Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 22-29. (in Chinese))
- [19] 曹毛如. 小水电最低生态流量泄放策略分析研究[J]. 地下水, 2021, 43(6): 310-313. (CAO Maoru. Study on discharge strategy of minimum ecological flow of small hydropower [J]. Ground Water, 2021, 43(6): 310-313. (in Chinese))
- [20] 梁中华. 大连地区季节性缺水河流逐月生态保障率的设定和应用[J]. 水利技术监督, 2022(1): 110-114. (LIANG Zhonghua. Setting and application of monthly ecological guarantee rate for seasonally water-deficient rivers in Dalian regions [J]. Technology and Supervision of Water Resources, 2022(1): 110-114. (in Chinese))
- [21] TANG Y, CHEN L, SHE Z. 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: 108104.
- [22] 李苗,严思睿,李姝臻,等. 洮儿河流域径流事件对降水的响应研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(4): 490-497. (LI Miao, YAN Sirui, LI Shuzhen, et al. Study on runoff event response to precipitation in the Taoer River Basin, China [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2021, 57(4): 490-497. (in Chinese))
- [23] 张宇航,张敏,彭文启,等. 永定河流域大型底栖动物群落分布格局及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3880-3888. (ZHANG Yuhang, ZHANG Min, PENG Wenqi, et al. Distribution pattern of macroinvertebrate community and its relationships with environmental factors in the Yongding River Basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11): 3880-3888. (in Chinese))
- [24] 胡朋成,苟金明,邱小琮,等. 黄河干流(宁夏段)大型底栖动物和鱼类群落结构特征[J]. 水产学杂志, 2022, 35(4): 38-45. (HU Pengcheng, GOU Jinming, QIU Xiaocong, et al. Community structure of macrozoobenthos and fishes in Ningxia Section of the Yellow River [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2022, 35(4): 38-45. (in Chinese))
- [25] 杨柏贺,马思琦,王汨,等. 北运河水系大型底栖动物摄食功能群多样性及时空分布特征[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 105-111. (YANG Baihe, MA Siqi, WANG Mi, et al. Diversity and temporal-spatial dynamics of macroinvertebrate functional feeding group in North Canal in Beijing [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 105-111. (in Chinese))
- [26] MONKW A, WOODP J, HANNAH D M, et al. Flow variability and macroinvertebrate community response within riverine systems [J]. River Research and Applications, 2006, 22: 595-615.
- [27] IMBERT J B, PERRY J A. Drift and benthic invertebrate responses to stepwise and abrupt increases in non-scouring flow[J]. Hydrobiologia, 2000, 436: 191-208.
- [28] KENNARD M J, OLDEN J D, ARTHINGTON A H, et al. Multiscale effects of flow regime and habitat and their interaction on fish assemblage structure in eastern Australia[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2007, 64(10): 1346-1359.
- [29] DEWSON Z S, JAMES A B W, DEATH R G. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2007(3): 401-415.

(收稿日期:2022-04-14 编辑:彭桃英)