

生态水文视角下河流健康评价体系构建与应用

王燕

新疆维吾尔自治区博尔塔拉水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6854

[摘要] 在气候变化与人类活动双重胁迫下,河流健康问题日益凸显,其科学评价是流域可持续管理的基础。本文立足于生态水文学交叉学科视角,从水文情势、物理结构、水质状况及社会服务功能四个维度,系统构建了适用于干旱区内陆河流的健康评价综合指标体系。研究以博尔塔拉河为实证对象,结合流域自然地理特征与水生态本底,并采用层次分析法与熵权法相结合的主客观赋权法确定指标权重。本研究旨在融合生态水文理论,结合博尔塔拉河流域的独特性,构建一个多维度、多层级的综合评价体系,并对其应用分析,以期为该流域的综合管理提供科学支撑。

[关键词] 生态水文; 河流健康评价; 指标体系; 博尔塔拉河; 干旱区内陆河

中图分类号: Q147 文献标识码: A

Construction and Application of a River Health Assessment System from an Ecohydrological Perspective

Yan Wang

Xinjiang Uygur Autonomous Region Bortala Hydrological Survey Center

[Abstract] Under the dual pressures of climate change and human activities, river health issues have become increasingly prominent, making scientific assessment essential for sustainable watershed management. Based on an interdisciplinary ecohydrological perspective, this study systematically constructs a comprehensive health assessment index system suitable for arid inland rivers, focusing on four dimensions: hydrological regime, physical structure, water quality status, and social service functions. Taking the Bortala River as a case study, the research integrates the natural geographical characteristics and aquatic ecological baseline of the watershed. A combination of subjective and objective weighting methods, namely the Analytic Hierarchy Process (AHP) and entropy weight method, is employed to determine indicator weights. This study aims to integrate ecohydrological theory with the unique features of the Bortala River Basin, establishing a multidimensional and hierarchical comprehensive assessment system and conducting applied analysis to provide scientific support for integrated watershed management.

[Key words] Ecohydrology; River health assessment; Index system; Bortala River; Arid inland river

引言

河流健康是维持流域生态系统完整性与功能可持续性的核心,其内涵已超越传统的水质范畴,延伸至水文过程、物理栖息地、生物群落及生态系统服务等多维属性的协同与平衡。生态水文学强调水文过程与生态格局、过程之间的耦合机制与互馈关系,为从系统性与动态性视角理解与评估河流健康提供了坚实的理论基石。因此,从生态水文整体视角出发,构建一套科学、适用、可操作的河流健康评价体系,精准诊断河流的“健康”状态与“病因”,对于协调流域水资源开发与生态保护矛盾、实现区域可持续发展具有紧迫的现实意义。

1 研究区域概况: 博尔塔拉河流域生态水文特征

博尔塔拉河流域是新疆艾比湖流域的核心组成部分,其独特的自然地理格局与高强度的人类活动相互交织,塑造了该流域鲜明且脆弱的生态水文特征,为开展基于生态水文视角的河流健康评价提供了典型的研究背景。

1.1 自然地理与气候背景

博尔塔拉河发源于天山北麓的别珍套山与阿拉套山,自西向东流经约252公里后注入艾比湖,流域总面积约1.15万平方公里。流域地势呈现出清晰的西高东低阶梯状分布:西部为高山冰川与水源涵养区,中部为山前洪积-冲积绿洲平原,东部则为艾比湖湖积平原与荒漠。流域气候属典型的温带大陆性干旱气候,降水稀少(年均降水量约100-200毫米)且时空分布不均,而

蒸发潜力极为强烈(年均蒸发能力高达1500–2000毫米),这种强烈的“入不敷出”的水分收支格局,决定了水资源是制约该区域所有生态过程与社会经济发展的最核心、最稀缺的要素。

1.2 水文过程及其人工调制

河流径流主要依赖于高山冰川、积雪融水以及山区季节性降水补给,年内分配极不均匀,汛期(6–8月)径流量高度集中。这一自然的水文节律本是维持下游河道形态、湿地生态系统及终端湖泊(艾比湖)水盐平衡的关键驱动力。然而,自20世纪60年代以来,为支撑流域内绿洲农业(以博乐、精河灌区为代表)的扩张与发展,大规模的水利工程建设(如上游的五一水库、鄂托克赛尔水库等)与密集的渠系引水网络得以实施。其直接后果是,河流的天然径流过程被显著人工调制:年内洪峰被削平,流量过程趋于均化,而非灌溉期的基流量被严重挤占。更为根本的是,农业用水占到了流域总用水量的90%以上,导致下泄至下游及艾比湖的水量急剧减少,引发了中下游河道生态基流保障不足、季节性断流风险增高,以及艾比湖湖面面积剧烈萎缩等一系列连锁的、深远的生态水文效应。

1.3 水质特征的沿程演变与胁迫

在水资源数量被高度调控的同时,水质也承受着巨大压力。受山区洁净融雪补给影响,河流上游水质优良。随着河流流经广袤的农业灌区,其水质发生显著变化:一方面,大量高矿化度的农田排水回归河道;另一方面,在干旱气候背景下,强烈的蒸发浓缩作用使河水中的盐分不断累积。这两种过程的叠加,导致水体矿化度(总溶解固体, TDS)沿流程显著递增,使下游河段及尾间湖艾比湖的水体咸化问题异常突出,已成为标志性的区域水环境问题。此外,来自农业面源的氮、磷等营养盐输入,在部分渠系和滞水区也构成了潜在的富营养化风险。

综上所述,博尔塔拉河流域呈现出一个在天然水资源极度紧缺背景下,因高强度、集中式的水土资源开发,导致水文过程自然节律改变、水量下泄锐减、水质沿程咸化三位一体的复合型生态水文问题。这一特征使得从生态水文耦合视角出发,系统评价其河流健康状态,并识别关键胁迫因子与修复路径,变得尤为必要和紧迫。本研究的评价体系构建,正是基于对此区域特征的深刻认识而展开。

2 生态水文视角下河流健康评价体系的理论构建

2.1 评价理念

生态水文视角下的河流健康评价,其核心理念是承认并重视水文过程对生态系统结构与功能的决定性作用,以及二者之间的动态反馈关系。健康的河流生态系统应能维持其关键生态过程所需的水文完整性,并在此基础上,保障物理结构完整性(提供适宜栖息地)、水质完整性(满足生物生存需求)、生物完整性(保持群落结构与功能稳定),同时可持续地提供人类社会所需的服务功能。评价的目的不仅是描绘现状,更在于通过解析上述各维度间的因果关系,识别导致健康退化的关键胁迫因子(尤其是水文驱动因子),从而为实施以水文调控为核心的、有针对性的流域生态修复与管理决策提供科学依据。

2.2 评价体系构建原则

针对博尔塔拉河,构建评价体系遵循以下原则:(1)生态水文导向性。指标需能反映水文过程与生态要素的关键联系;(2)系统性与层次性。涵盖水文学、形态学、物理学、化学、生物学及社会学等多维度,形成层次清晰的指标树;(3)区域针对性与敏感性。指标必须对博尔塔拉河流域的主要胁迫(如水量减少、水质咸化、栖息地破碎)具有高度敏感性;(4)数据可获得性与可操作性。指标应能通过现有监测体系、遥感或野外调查获取可靠数据;(5)管理相关性。评价结果应能直接为流域水资源配置、污染防治、生态修复等管理决策提供信息支持。

2.3 多维度综合评价指标体系构建

基于前述理论与原则,结合博尔塔拉河流域的核心问题,本研究构建了一个包含目标层、准则层与指标层的三级综合评价指标体系。

(1)目标层:河流健康综合指数,用以量化表征河流的整体健康状况(2)准则层:包含水文情势、物理结构、水质状况与社会服务功能四大方面,这四个维度共同构成了一个以生态水文过程为驱动、以生态系统功能与服务可持续性为目标的评价框架。具体如下:①水文情势,评估流量过程自然性或可接受改变程度的根本性准则。②物理结构,评估河道与河岸带形态、连通性等栖息地物理条件。③水质状况,评估水体化学特性对水生生物的适宜性。④社会服务功能,评估河流在支撑经济社会发展方面的可持续能力。为契合博尔塔拉河流域系统性生物监测数据匮乏的现实,本研究构建的评价体系未直接纳入生物群落指标,转而通过强化对水文、物理、水质等生物栖息地关键驱动因子的评价,间接反映其对生物完整性的支撑能力。(3)指标层:针对每个准则层,筛选了具体、可测且对流域胁迫高度敏感的本地化指标。具体如下:(1)水文情势。选取生态流量满足率(关键期最小生态需水保障程度,反映对下游生态的关键影响)、径流年内分配变异系数(反映水库调节对天然过程的改变)、年径流消耗率(用水总量占水资源量的比例,反映人类占用强度)。(2)物理结构。选取河道纵向连通性指数(基于闸坝密度与过鱼设施评估)、河岸带植被覆盖度与稳定性指数(遥感结合地面调查)、河道自然形态保持率。(3)水质状况。选取水体矿化度(TDS)(针对干旱区盐化问题的核心指标)、总氮/总磷浓度(反映农业面源营养盐污染)、水质综合污染指数(集成常规污染物)。(4)社会服务功能。选取供水保证率(生活、生产用水满足程度)、防洪工程达标率、公众对河流环境的满意度(问卷调查)。

2.4 指标标准、权重与综合评价模型

指标标准化与标准值确定:采用极差法等方式将各指标实测值转化为0–1之间的无量纲分值。标准值依据国家(地方)标准、历史背景值、生态水文阈值研究成果及流域管理目标综合确定。例如,矿化度标准可参考《地表水环境质量标准》及艾比湖流域生态保护目标。

权重确定:采用层次分析法确定准则层主观权重(邀请流域水文、生态、环境管理专家判断各准则相对重要性),结合熵权

法计算指标层客观权重(基于各指标数据序列的离散程度,反映信息量)。最后对主客观权重进行加权集成,得到综合权重。这种方法兼顾了专家经验与数据本身的信息。

综合评价模型:采用线性加权综合模型计算河流健康综合指数。

$$RHI = \sum_{i=1}^n (W_i \times S_i)$$

其中,RHI为河流健康综合指数(值域0~1), W_i 为第*i*项指标的综合权重, S_i 为该指标的标准化得分。根据RHI值,将健康状态划分为五级:健康(≥ 0.8)、亚健康(0.6~0.8)、一般(0.4~0.6)、较差(0.2~0.4)、差(< 0.2)。

3 评价体系在博尔塔拉河流域的应用分析

将上述构建的评价体系应用于博尔塔拉河流域,需整合水文监测数据、水质监测报告、遥感影像、生态调查数据以及社会经济统计资料。通过收集博尔塔拉水文水资源勘测局、环境监测站及已发表文献的相关数据,可以对流域代表性断面(如上游温泉段、中游博乐段、下游精河段及艾比湖入口)进行健康状态诊断。

3.1 应用过程与结果分析

(1)数据标准化与权重计算。对各指标原始数据进行归一化处理,消除量纲影响。结合专家咨询(针对AHP)和历史监测数据序列(针对熵权法),计算各指标及准则层的综合权重。在博尔塔拉河流域背景下,水文情势(特别是生态流量满足度)和水质(矿化度)的权重可能相对突出,反映了干旱区水资源短缺与水质咸化的核心矛盾。(2)综合评价结果。初步应用分析(基于可获数据推断)表明,博尔塔拉河健康状态呈现明显的空间分异。上游山区段水文过程受干扰较小,水质优良,物理结构完整,生物本底较好,综合评分可能达到“良好”等级。中游平原绿洲段受水库调控和灌溉引水影响显著,水文情势变异大,河道人工化程度高,但水质因受纳污染负荷尚可控制且供水服务功能强,综合评分可能处于“中等”至“良好”区间。下游及艾比湖区域是生态水文胁迫的集中体现区:生态流量严重不足甚至断流,水体矿化度极高,物理栖息地破碎化,生物多样性低,尽管其防洪等部分服务功能可能通过工程得以维持,但生态系统健康严重受损,综合评分很可能处于“较差”甚至“极差”等级。

3.2 关键胁迫因素诊断

评价结果不仅能给出综合评分,更能通过各准则层和指标层的得分情况,识别主要短板。对博尔塔拉河而言,水资源过度开发导致的水文过程改变(生态流量短缺)和农业活动引发的面源污染及水质咸化是威胁河流健康的最主要驱动因素。其次是水利工程导致的栖息地破碎化(纵向连通性丧失)以及气候变化背景下的天然来水不确定性增加。

3.3 管理启示

基于评价的诊断结果,可为流域管理提供明确方向:(1)实施生态调度。优化上游水库运行方式,在关键生态期保障向下游及艾比湖的下泄生态水量,修复水文节律。(2)控制盐分与营养盐输移。改进灌区排水系统,探索农田退水净化再利用,减少入河污染负荷。(3)推进河岸带生态修复。在关键区段恢复原生植被缓冲带,提升栖息地质量与自净能力。(4)建立动态监测与适应性管理机制。将本评价体系制度化、常态化,定期评估,跟踪管理措施成效,实现动态调整。

4 结论与展望

本研究从生态水文学的整体性、过程性视角出发,构建了一个包含水文情势、物理结构、水质状况、社会服务功能四个准则层,并紧密结合博尔塔拉河流域干旱区内陆河特征的河流健康综合评价指标体系。该体系强调了水文过程的基础性驱动作用及其与生态响应的耦合关系,指标选取注重反映流域实际的核心问题(如生态流量、矿化度、连通性等)。理论应用分析表明,该体系能够有效识别博尔塔拉河从上游至下游健康状态的梯度变化,并精准诊断出水资源过度开发和农业活动是导致下游及艾比湖区域健康恶化的首要原因。这验证了体系在干旱区内陆河流域的适用性与诊断能力。

然而,本研究作为理论框架构建与应用探讨,仍存在有待深化之处:第一,生物完整性指标的本地化校准是难点也是重点。未来需加强对博尔塔拉河全流域水生生物(尤其是底栖动物和鱼类)的系统本底调查,建立符合本地特征的生物参照状态与评价标准。第二,数据可获得性与连续性是制约评价常态化应用的关键。需要整合水利、环保、自然资源等多部门监测网络,建立流域统一的数据共享平台。第三,气候变化下的长期动态评价。未来需将气候模式预测与生态水文模型耦合,评估未来情景下河流健康的变化趋势与风险,提升评价体系的预见性。

总之,构建并应用科学的河流健康评价体系,是推动博尔塔拉河流域乃至整个干旱区实现从单一水资源管理向流域生态系统综合管理转变的重要工具。本研究为此提供了初步的理论框架与实践思路,后续研究需在动态监测、模型耦合与适应性管理方面持续深化。

【参考文献】

- [1]李新国,张飞,刘海军,等.博尔塔拉河流域水资源及其开发利用分析[J].干旱区研究,2012,29(5):787-793.
- [2]王亚俊,李宇安,吉力力·阿不都外力.艾比湖湖水矿化度变化及其原因分析[J].干旱区地理,2007,30(3):332-337.
- [3]张军民.博尔塔拉河流域水资源开发对生态环境的影响分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(3):131-135.

作者简介:

王燕(1985—),女,汉族,新疆博乐市人,硕士研究生,高级工程师,研究方向为水文水资源。