

基于组合赋权与有序度熵模型的 干旱内陆河流健康评价

蓝利, 雷晓云, 高凡, 黄霄

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 确定有效指示河流健康状态及其变化的关键因子并进行评价, 对于干旱内陆河流生态水环境保护与河流适应性管理至关重要。以叶尔羌河干流卡群-艾里克塔木河段为对象, 采用“压力-状态-响应”模型(以下简称PSR模型)和“可达最佳状态”参照标准选择23项指标构建河流健康评价指标体系和评价标准, 运用组合赋权和有序度熵模型对现状水平年叶尔羌河河流健康状况进行评价。结果表明: 叶尔羌河干流卡群-艾里克塔木河段综合健康指数0.529, 评价等级为亚健康状态(III级), 分河段卡群-依干其(S1)综合健康指数(0.546)略优于河段依干其-艾里克塔木(S2)。评价结果与实际情况基本相符, 河流健康受到威胁, 需引起有关部门注意。

关键词: 组合赋权; 有序度熵; 可达最佳标准; PSR模型; 河流健康评价; 干旱内陆河; 叶尔羌河

中图分类号: X171.1; TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0057-06

Arid inland river health assessment based on combination weighting and ordered entropy models

LAN Li, LEI Xiaoyun, GAO Fan, HUANG Xiao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Determining and evaluating the key factors that effectively indicate river health status and its changes are critical for the eco-hydrological conservation of arid inland rivers and adaptive river management. Taking the Yarkant River mainstream as the research object, from the system theory point of view, 23 specific indicators were selected based on the conceptual model of "pressure-state-response" and the "achievable best state" reference standard to construct river health evaluation indicators and standards. The model of river health assessment based on the entropy of order is established to evaluate the river health of the Yarkant River in the arid region. The results showed that the current status of assessment of the target layer health level was 0.529, which was in the sub-health state (level III). The carded group of the river segment-Iganqi (S1) comprehensive health index (0.546) was better than the river section Yiqin-Erik Tamu (S2). The evaluation results are basically in line with the actual situation, and the health of the river is threatened, and it needs to arouse the attention of relevant departments.

Key words: combination weighting; order degree entropy; achievable best standard; PSR model; river health assessment; arid inland river; Yarkant River

1 研究背景

人水关系一直是人类发展的核心命题, 在经历了人类对水的被动依存、主动对抗、积极利用以及由于人类对水循环认识不足及自身用水行为管理不当

而导致一系列人水危机后, 人水和谐成为当前及今后流域发展的关键主题^[1]。河流是各类水体中较易被开发利用的淡水资源, 同时也是地球上多样化生态系统中最重要生态系统之一。整个20世纪发生在地球上的种种生态危机事实促使人们不得不

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409226、51769036)

作者简介: 蓝利(1991-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生。研究方向为内陆干旱区水文过程及水资源利用。

通讯作者: 雷晓云(1961-), 女, 湖南衡阳人, 硕士, 教授, 博士生导师, 从事水文水资源教学科研工作。

重新看待河流,思考河流价值,重新定位人与河流之间的关系,并采取措施修复或恢复河流生态系统,持续稳定发挥河流服务功能,河流健康理念即基于此背景提出^[2]。作为一种适应性的河流管理工具,如何界定概念与内涵、尺度与范围、指标与标准、模型与方法,是河流健康研究技术方法体系的关键环节。自 20 世纪 80 年代以来,许多学者在河流健康评价方面做了大量工作,并形成了多种如河流健康计划(RHP)^[3]、鱼类评估指数(FAI)^[4]、倒位寄生虫指数(PI)^[5]、生物完整性指数(IBM)^[6]、定量微生物风险评估法(QMRA)^[7]、多元标准决策法(MCDM)^[8]等经实践推行的评价方法。我国从 20 世纪 90 年代开始关注国内河流健康问题,并在长江、珠江、黄河、海河、辽河等大江大河进行河流健康评价试点研究^[9],已于 2010 年启动了全国重要河湖健康试点评估工作,制定了《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》。

由于在流域范围内对所有干扰都敏感的单一河流健康指标是不可能存在的^[10],且考虑到我国幅员辽阔、类型多样、河流开发与人类干扰程度不一,河流健康评价涉及的关键指标应因地制宜。干旱区内陆河流域是水资源系统与生态系统最脆弱的地区之一^[11],确定有效指示干旱内陆河流健康状态及变化的关键因子,对于干旱内陆河流生态水文保育与河流适应性管理至关重要。据统计,2000 年以来我国公开发表的以“河流健康”为主题的论文 4 000 余篇,多集中在湿润、半湿润、半干旱地区的河流、湖泊、三角洲等区域^[12],针对干旱区内陆河流的河流健康评价成果较少,主要集中在塔里木河、黑河、石羊河流域^[11],且从河流复合生态系统角度出发,综合考虑河流自然与人类价值的河流健康评价成果较少,缺乏一套有效指导该类型河流健康评价与适应性管理的理论方法体系。因此,本文结合干旱内陆河流生态水文特性,以叶尔羌河干流段为评价对象,参考水利部《河流健康评估指标、标准与方法(试点工作用)》,采用“压力-状态-响应”(PSR)模型选择关键指标构建评价指标体系,建立“基于可达最佳标准的”评价标准,并运用组合赋权和有序度熵模型对叶尔羌河河流健康状况进行综合评估,以期指导该类型河流适应性管理。

2 数据与方法

2.1 研究区概况、尺度界定与数据来源

叶尔羌河流域是塔里木河流域“四源一干”水

系格局的重要组成部分,干流全长 1 078 km,多年平均河川径流量 $65.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前该流域突出的水资源开发利用与生态环境问题表现为春灌缺水、夏洪突出、盐渍化及沙漠化趋势增加、向塔里木河生态输水严重不足、水资源供需矛盾突出、生产生活挤占生态用水现象显著等问题。

针对河流健康概念界定的三要素:定义主体、研究对象、参照标准^[2],根据干旱区内陆河流生态水文特征^[13],将叶尔羌河河流健康概念定义为,可为人类健康工作的河流复合生态系统健康^[12]。同时,借鉴地理学空间尺度概念中河流健康评价的点尺度(点位、断面)、线尺度(河流、河段)、面尺度(流域、水系)划分,本文采用点尺度与线尺度嵌套的空间尺度界定方法,评价范围为叶尔羌河干流卡群渠首断面至艾里克塔木渠首断面(见图 1),河段长 333 km,分为两个分河段,分别为:卡群渠首至依干其渠首断面(长 60 km)、依干其渠首至艾里克塔木渠首断面(长 273 km)。评价的现状年为 2015 年。评价所需数据资料来自叶尔羌河流域管理局 1962 - 2015 年水文站降水、蒸发、泥沙、水位、实测流量等数据,并参考相关文献、流域规划报告、统计年鉴以及相关专业报告等。

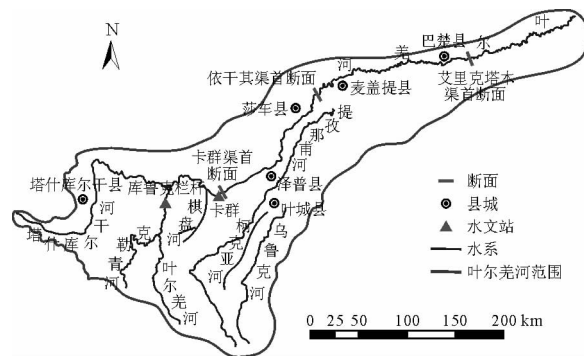


图 1 叶尔羌河流域范围及水系站点分布示意图

2.2 基于 PSR 模型的河流健康评价指标体系构建

“压力-状态-响应”(PSR)模型广泛应用于生态安全评价、土地资源质量评价、土地利用可持续评价以及生态系统健康评价等领域^[2],用于回答“发生了什么、为什么发生、将如何做”的问题,应用于河流健康评价成果较少。本文依据指标体系构建的科学性、系统性、层次性、独立性和指标定量性与可操作性等原则,分别从压力、状态、响应因子选择指标初步构建河流健康评价指标体系框架,并采用设计问卷调查表等方式通过被调查人员(相关领域专家、流域管理局人员、公众等)分析各评价指标对于河流健康影响

程度的评分^[14],考虑干旱区内陆河流关键生态环境机理,选择关键评价指标,构建了压力指数、状态指数和响应指数涵盖的 23 项指标的河流健康评价指标体系,见表 1。

表 1 叶尔羌河卡群-艾里克塔木段河流健康评价指标体系及权重系数

目标层	准则层 (综合)	指标层 (综合)	变量层	内置、用户、综合	变量层物理含义
河流健康综合指数 A_1	压力指数 B_1 0.356	自然压力 指标 C_1 0.259	年平均降水量 D_1	0.250、0.453、0.306	评价河段多年平均降水量
			年径流量 D_2	0.500、0.483、0.651	评价河段多年平均径流量
			年平均蒸发量 D_3	0.250、0.064、0.043	评价河段多年平均增蒸发量
			人口密度 D_4	0.125、0.751、0.717	流域范围内人口数量与流域面积的比值
		人为压力 指标 C_2 0.741	水资源开发率 D_5	0.250、0.030、0.057	评价时段水资源开发量占水资源总量比
			地下水开采率 D_6	0.250、0.012、0.023	评价时段地下水开发量占地下水可开采量比
			城镇化率 D_7	0.125、0.203、0.194	评价时段非农业人口数与农业人口数的比值
			灌溉水利用系数 D_8	0.250、0.004、0.009	指在一次灌水期间被农作物利用的净水量与水源渠首处总引水量的比值
	状态指数 B_2 0.366	河流形态 指标 C_3 0.081	河流综合稳定系数 D_9	0.261、0.621、0.566	评价时段内冲刷、崩塌的河岸总长度占河流总长度的比值
			纵向连通性 D_{10}	0.328、0.378、0.433	在河流系统内生态元素在空间结构上的纵向联系
			河道蜿蜒性 D_{11}	0.411、0.001、0.001	河道蜿蜒性即流量变幅,一条健康的河流应当具有波动的水流和周期性的丰枯变化
		河流水文 指标 C_4 0.356	流量变化率 D_{12}	0.333、0.004、0.004	评价时段年径流量与多年径流量之差与多年径流量的比值
			水沙平衡程度 D_{13}	0.333、0.418、0.418	年均含沙量和年均流量之比
			地下水埋深 D_{14}	0.334、0.578、0.578	评价时段河岸带一定范围内地下水平均埋深
		河流水质 指标 C_5 0.413	水质综合污染指数 D_{15}	1.000、1.000、1.000	是评价水环境质量的一种重要方法,是在单项污染指数评价的基础上计算得到的
			特色生物存活状况 D_{16}	0.143、0.336、0.217	评价时段流域特色及濒危动植物生存状况调查的定性指标
	响应指数 B_3 0.278	河流生态 指标 C_6 0.150	天然植被覆盖率 D_{17}	0.285、0.586、0.704	评价时段河段一定范围内天然植被 NDVI 值
			盐渍化面积比率 D_{18}	0.286、0.069、0.010	评价时段河段盐渍化面积占流域面积比
			荒漠化面积比率 D_{19}	0.286、0.009、0.069	评价时段河段盐渍化面积占流域面积比
			灌溉供水保证率 D_{20}	0.289、0.071、0.074	评价时段有效灌溉面积与实际灌水面积的比值
		社会功能 指标 C_7 1.000	防洪工程状况 D_{21}	0.289、0.800、0.840	河流达标堤防长度占河流堤防总长度的比例
			塔河生态输水满足率 D_{22}	0.246、0.018、0.016	向塔河实际生态输水与目标生态输水的比值
			河流景观效应 D_{23}	0.176、0.111、0.070	反映出人类对于河流亲和度的定性指标

2.3 基于“可达最佳状态”的河流健康评价标准

河流健康是一个相对的概念,需要选择参照状态,即河流健康标准^[12],参照状态(Reference Condition, RC)旨在定义和表征河流在自然条件下应有的状态,被越来越多地作为基准应用于评估人类活动干扰程度^[15]。根据当前对参考状态的几种理解,包括最小干扰状态(MDC)、历史参考状态(HC)、最低干扰状态(LDC)、最佳可达状态(BAC)^[15],本文以“近自然准则”为原则,依据国家相关标准,借鉴国内外有关河流健康标准成果,并聘请行业专家、流域管理人员及沿岸居民公众,人为规定一种通过有效调控与管理可达的期望状态作为河流健康评价标

准,构建基于“可达最佳状态”的叶尔羌河河流健康评价标准,以避免以河流天然状态为基准而可能导致的忽略河流保护目标实现的可能性与可操作性弊端,见表 2。该标准以“很健康、健康、亚健康、不健康、病危”为河流健康评价等级^[2],评价标准中指标阈值范围确定依据指标类型(定量指标和定性指标)分别率定,对于定性指标(特色生物存活状况、河流景观效应),聘请专家采用赋分法用分值<20、20~40、40~60、60~80、>80 分别对应 5 个级别^[12];对于定量指标,借鉴历史资料、流域实际及国家标准^[11-15],并充分听取社会各方利益者的意见后,通过对比分析确定。

表2 河流健康等级表

总体健康指数值	健康等级	含义
[0.8,1.0]	很健康 I	河流形态结构完整,各项功能均衡发挥,并满足人类经济发展对河流资源的合理需求
[0.6,0.8)	健康 II	河流形态结构相对完整,基本满足人类经济发展对河流资源的合理需求
[0.4,0.6)	亚健康 III	处于健康和病态之间的过渡状态,河流的某些功能下降,存在病态征兆
[0.2,0.4)	不健康 IV	河流的较多功能受到严重破坏,但一些功能勉强维持,河流生命状态受到威胁
[0,0.2)	病危 V	除极个别功能,河流基本丧失功能

2.4 基于内置权重与用户权重的综合权重确定

内置权重系数采用层次分析法获得^[16]。用户权重系数采用客观赋权法——熵权法计算。依据信息论基本原理,信息量越大,不确定性越小,熵越小;反之,信息量越小,不确定性越大,熵越大^[16]。

设有 m 个河段, n 项指标, 构成原始数据矩阵 $(x_{ij})_{m \times n}$ 。

(1) 归一化处理。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) 计算第 j 项指标的信息熵。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (2)$$

(3) 计算第 j 项指标的权重, 令

$$u_j = 1 - e_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

对 u_j 进行归一化处理, 得 $\sum w_j = 1$, 第 j 项的指标权重 w_j 为:

$$w_j = \frac{u_j}{\sum_{j=1}^n u_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

在综合考虑主客观因素基础上, 将内置权重与用户权重综合, 计算各指标综合权重, 公式为:

$$Q_j = \frac{v_i \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n (v_i \cdot w_j)} \quad (5)$$

式中: Q_j 为综合权重系数; v_i 为内置权重系数; w_j 为用户权重系数。

2.5 基于有序度熵的河流健康评价模型

基于河流耗散结构理论, 从系统角度出发, 引入有序度概念衡量河流健康评价的压力、状态、响应因子之间的协同性, 构建基于有序度熵的河流健康评价模型。设第 j 个子系统的第 i 个序参量 x_{ij} , 其值应在临界阈值区间, 若在阈值区间的取值越大, 子系统的有序程度越高; 取值越小, 则相反^[17]。

对于递增型序参量, 设最小临界值为 $R_{\min}$, 最大临界值为 $R_{\max}$, 序参量值为 R_{ij} , 则序参量的有序度 ε 为^[18]:

$$\varepsilon = \frac{R_{ij} - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (6)$$

对于递减型序参量, 序参量的有序度 ε 为^[3]:

$$\varepsilon = \frac{R_{\max} - R_{ij}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (7)$$

对于趋中型序参量, 设序参量的临界固定值为 R_{fix} , 序参量有序度 ε 为^[18]:

$$\varepsilon = 1 - \left| \frac{R_{ij} - R_{fix}}{R_{fix}} \right| \quad (8)$$

采用系统熵衡量系统有序性程度, 计算评价河流综合健康指数。设河流系统分为 m 段, 各河段指标数为 n , 则各河段子系统健康指数可采用公式(9)进行计算, 各河段各因子的健康指数可由公式(10)计算可得, 各河段的总体健康指数可由公式(11)进行计算, 河流总体健康指数在河段健康指数计算的基础上, 采用算术平均的计算方法, 由公式(12)可计算得出^[18-19]:

$$I_{pj} = - \sum_{i=1}^n ((\omega_{pij} \varepsilon_{pij}) \cdot \ln(\omega_{pij} \varepsilon_{pij})) \quad (9)$$

$$I_{pk} = \sum_{j=1}^q (\omega_{pj} I_{pj}) \quad (10)$$

$$I_p = \sum_{k=1}^3 (\omega_{pk} I_{pk}) \quad (11)$$

$$HI = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m I_p \quad (12)$$

式中: I_{pj} 为第 p 河段第 j 个子系统的健康指数; ω_{pij} 为第 p 河段第 j 个子系统中第 i 个序参量的权重系数; ε_{pij} 为第 p 河段第 j 子系统第 i 个序参量的有序度; n 为第 j 子系统中序参量的个数; I_{pk} 为第 p 河段第 k 个因子的健康指数; ω_{pj} 为第 p 河段第 j 个子系统中第 j 个因子的权重系数; q 为第 p 河段第 k 个因子中子系统的个数; I_p 为第 p 河段的总体健康指数; ω_{pk} 为第 p 河段第 k 个因子的权重系数; HI 为河流系

统总体健康指数; m 为河段数;其中, $i = 1, 2, \cdots n$; $j = 1, 2, \cdots q$; $k = 1, 2, 3$; $p = 1, 2, \cdots m$ 。

3 叶尔羌河现状年河段河流健康评价结果与分析

3.1 序参量权重

本文内置权重系数采用层次分析法确定,经计算判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 6.08$, 一致性比率 $CR = 0.013 < 0.1$, 满足要求。用户权重系数采用熵权法确定,并计算各指标综合权重系数(见表 1)。

3.2 序参量有序度值

各序参量有序度值成果见图 2。其中,S1、S2 分别表示卡群渠首至依干其渡口渠首河段、依干其渡口渠首至艾里克塔木渠首河段(以下简称 S1 河段、S2 河段)。由图 2 可知,S1 河段与 S2 河段各序参量有序度值变化趋势基本一致,人口密度(D_4)、纵向连通性(D_{10})、河道蜿蜒性(D_{11})、流量变化率(D_{12})以及水质综合污染指数(D_{15}) 有序度值较高,均大于 0.8,对河流系统健康的贡献度较高,地下水开采率(D_6)、水沙平衡程度(D_{13})、天然植被盖度(D_{17})以及荒漠化面积(D_{19}) 有序度值较低,均小于 0.2,对系统健康的贡献较小,其余序参量有序度值则在 0.2~0.8 之间上下波动。

3.3 河流健康综合指数

叶尔羌河分河段的河流健康综合指数与健康等级划分见表 3。可以得出,叶尔羌河干流卡群渠首断面至艾里克塔木渠首断面河流健康综合指数 0.529,且响应健康指数(0.537) > 状态健康指数(0.530) > 压力健康指数(0.521),河流健康等级为

III 级,处于亚健康状态。其中,S1 河段河流健康综合指数为 0.546, S2 河段河流健康综合指数为 0.511,均为亚健康状态,S1 河段河流健康综合指数略高于 S2 河段。各河段指标层河流健康分指数分析结果见图 3,压力指数中,S1 河段与 S2 河段的自然压力(C_1) 健康指数均高于人为压力(C_2) 健康指数,属亚健康等级,且 S1 河段优于 S2 河段;状态指数中,S1 河段与 S2 河段河流形态指标(C_3) 健康指数在 0.7~0.8 之间,属健康状态,说明河流形态指标对状态指数的健康贡献度较大。两河段水文指标(C_4) 健康值均在 0.4~0.6 之间,为亚健康状态。S1 河段水质指标(C_5) 健康指数为健康状态,而 S2 河段水质指标(C_5) 健康指数为亚健康状态,值得引起注意。S2 河段的生态指标(C_6) 健康指数为 0.3~0.4,属不健康状态,说明河流生态指标对状态因子的健康贡献度较小;响应指数中,S2 河段的社会功能指标(C_7) 健康指数略微高于 S1 河段,均属于亚健康等级。

综合评价结果显示现状年 2015 年,叶尔羌河干流河段(卡群-艾里克塔木)河流健康状态由健康向不健康临界状态过渡。导致该河段河流健康受损的原因主要是,水资源开发利用率高而有效使用率低(地表水引水率达 92%,地下水开采率达 61%,灌溉水利用系数仅 0.47^[20])、水沙关系不平衡、水环境出现河段敏感性转折性变化(由 S1 至 S2)、流域天然植被覆盖率下降、土壤盐渍化沙漠化加剧等,河道内几乎未见以土著生物存活为表征的水生态沿程本底脆弱并趋于急剧恶化趋势,下坂地水库投入运行与平原水库的联合水资源调配虽在一定程度上有效缓解了

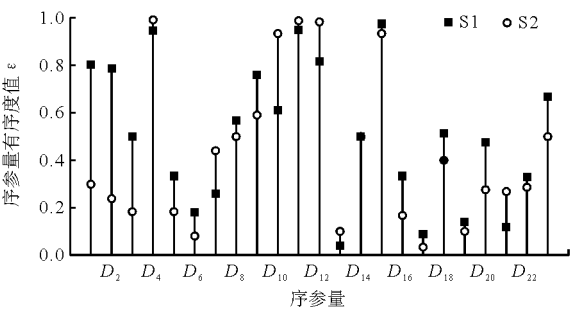


图 2 序参量有序度分布柱状图

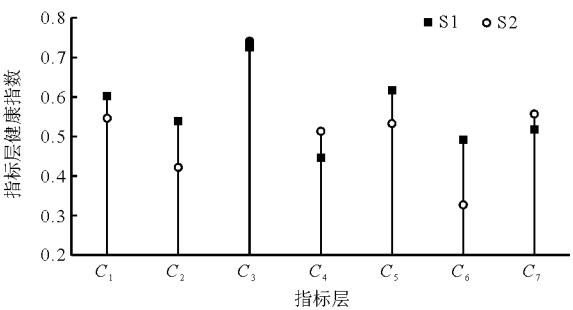


图 3 指标层健康指数分布柱状图

流域春旱缺水程度,农田灌溉用水保证率和防洪能力相应提高,但向塔河 7~9 月生态输水($3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$)的规划目标仍未有效实现。评价结果与实际情况基本符合^[12],河流健康生命受到威胁,需引起有关管理部门重视,河流健康维护工作势在必行。

表 3 叶尔羌河分河段的河流健康综合指数与健康等级划分

河段	压力健康 指数 B_1	状态健康 指数 B_2	响应健康 指数 B_3	总体健康 指数	健康 等级
S1	0.568	0.547	0.517	0.546	亚健康
S2	0.474	0.512	0.557	0.511	亚健康
全河道	0.521	0.530	0.537	0.529	亚健康

4 结论及建议

(1) 基于 PSR 模型和“可达最佳状态”参照标准构建了叶尔羌河流健康评价指标体系和评价标准,运用组合权重和有序度熵模型构建河流健康评价模型。

(2) 评价结果显示,叶尔羌河干流卡群-艾里克塔木河段综合健康指数为 0.529,河流健康综合评价等级 III 级,处于亚健康状态,即河流健康由健康向不健康过渡的临界状态,与实际情况基本符合。

(3) 叶尔羌河河流健康生命已受到威胁,河流健康保护工作势在必行。恢复河道水沙冲淤平衡、施行最严格的水资源管理制度及水质管理制度,提高河道外用水特别是农田灌溉水利用效率,重视上游山区水库下坝地水库与平原水库的联合调度并考虑河流生态需水调度,以保护并恢复河流健康。

参考文献:

- [1] 郑航, JOHN LANGFORD, 程国栋. 论变化环境下流域管理的知识创新[J]. 地球科学进展, 2012, 27(1): 52-59.
- [2] 高凡. 高强度人类活动区河流健康评价与调控研究——以渭河关中段河流系统为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [3] United States Environmental Protection Agency. Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable Rivers; periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish: Second edition[M]. Office of Water, Washington D C: 1999.
- [4] NOH S Y, CHOI H L, PARK J Y, et al. Ecological health assessment using fish for the Han River and Nakdong River in Korea[J]. Journal of Korean Society on Water Environment. 2015, 31(3): 319-327.
- [5] SARA J R, SMIT W J, ERASMUS L J C, et al. Ecological status of Hout River Dam, Limpopo province, South Africa, using fish condition and health assessment index protocols: a preliminary investigation[J]. African Journal of Aquatic Science, 2014, 39(1): 54-63.
- [6] JI K, AN K G. Integrated ecological river health assessments, based on water chemistry, physical habitat quality and biological integrity[J]. Water, 2015, 7(11): 6378-6403.
- [7] TIMM C, LUTHER S, JURZIK L, et al. Applying QMRA and DALY to assess health risks from river bathing[J]. Int J Hyg Environ Health, 2016, 219(7): 681-692.
- [8] AZARNIVAND A, CHITSAZ N, MALEKIAN A. Designing a risk-based multi criteria framework for river health assessment: a case study of Taleghan basin, Iran[J]. International Journal of Hydrology Science & Technology, 2017, 7(1): 63-76.
- [9] 颜涛. 基于环境管理的河流生态健康评价探讨[C]//2014 中国环境科学学会学术年会, 成都: 2014.
- [10] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展, 2005(3): 349-355.
- [11] 王勤花, 尉永平, 张志强, 等. 干旱半干旱地区河流健康评价指标研究分析[J]. 生态科学, 2015, 34(6): 56-63.
- [12] 高凡, 孙晓懿, 蓝利, 等. 基于可达最佳状态标准的叶尔羌河健康评价[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 103-108+156.
- [13] 马莲净. 干旱区水文生态与生态需水量研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 李晓峰, 刘宗鑫, 彭清娥. TOPSIS 模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(2): 14-21.
- [15] 车越, 吴阿娜, 曹敏, 等. 河流健康评价的时空特征与参照基线探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 761-767.
- [16] 李自明. 基于多层次灰色聚类模型的河流健康综合评价研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [17] 王煜. 河流健康因子选择和综合评判研究[J]. 人民黄河, 2006, 28(11): 7-8+23.
- [18] 韩玉玲, 夏继红, 陈永明, 等. 河道生态建设——河流健康诊断技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [19] 王煜, 黄强, 刘昌明. 基于系统有序度熵的河流健康评判方法研究[J]. 水文, 2007, 27(1): 1-3+29.
- [20] 李平. 新疆喀什地区叶尔羌河中下游泥沙特性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(7): 44-46.