

Application of Fuzzy Matter-Element Model Based on Entropy Weight in River Health Assessment

Marvin C. Thompson^{1,2}, Xiang Zhang^{1,2*}, Liangkun Deng^{1,2}, Jing Xu^{1,2}, Yi Xiao^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

²Hubei Key Lab of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan Hubei

Email: *zhangxiang@whu.edu.cn

Received: Aug. 3rd, 2020; accepted: Aug. 18th, 2020; published: Aug. 25th, 2020

Abstract

In recent years, the health status of rivers has been deteriorating under the influence of human development, and reasonable river health assessment has gradually become the most important part of river management. However, the health assessment of highly regulated rivers considering both natural and social attributes is rarely carried out. In this paper, a new river health evaluation indicator system is constructed, which integrated four aspects of hydrology, water quality, water ecology and social services. The evaluation grades are divided into five grades, including I (ideal condition), II (health), III (sub-health), IV (unhealth), V (serious illness). The Zhoukou, Jieshou and Yingshang sections at Shaying River are selected to be evaluated using the fuzzy matter-element model based on entropy weight. According to the evaluation results, the three sections are all in sub-health condition. Although they are in better health conditions compared to the rivers in grade IV and V, the river management of Shaying River still needs to be carried out continuously. In addition, it also compares the importance of each selected indicator and discusses the necessity of incorporating the river social attribute into the indicator system by setting different scenarios. It is concluded that it is very necessary to consider the social service indicator. The research results of this paper have important reference values for more comprehensive evaluation of river health status and decision making of river health protection measures.

Keywords

Fuzzy Matter-Element Model, River Health Assessment, Shaying River

基于熵权的模糊物元模型在河流健康评价中的应用研究

Marvin C. Thompson^{1,2}, 张翔^{1,2*}, 邓梁堃^{1,2}, 徐晶^{1,2}, 肖宜^{1,2}

作者简介: Marvin C. Thompson, 男, 塞拉利昂人, 硕士研究生, 主要从事河流健康评价研究。

*通讯作者。

文章引用: Marvin C. Thompson, 张翔, 邓梁堃, 徐晶, 肖宜. 基于熵权的模糊物元模型在河流健康评价中的应用研究[J]. 水资源研究, 2020, 9(4): 394-402. DOI: 10.12677/jwrr.2020.94041

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉

Email: *zhangxiang@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月3日; 录用日期: 2020年8月18日; 发布日期: 2020年8月25日

摘要

近年来, 河流健康状况受人类发展影响而不断恶化, 合理地进行河流健康评价渐渐成为河流管理最重要的部分, 但是同时考虑受闸坝高度调控河流的自然和社会两种属性的健康评价工作开展较少。本文从水文、水质、水生态和社会服务四个方面构建了一套新的河流健康综合评价指标体系, 并将评价等级分为5个等级, 包括I (理想状况)、II (健康)、III (亚健康)、IV (不健康)、V (病态)。选取沙颍河代表性的周口、界首和颍上断面, 运用基于熵权的模糊物元模型对这三个断面进行了应用研究。从研究结果可知, 三个断面均处于亚健康状况, 尽管其健康状况优于IV和V等级, 但是仍需持续开展沙颍河的河流管理工作。此外, 本文还比较了各个选取指标的重要性并通过设置不同的情景对将河流社会属性纳入指标体系的必要性进行讨论, 论证了在河流健康评价中考虑社会服务指标是十分必要的。本文研究成果对于更全面地评价河流健康状态、制订河流健康保护措施具有重要的参考价值。

关键词

模糊物元法, 河流健康评价, 沙颍河

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的快速发展, 人类活动对河流的干扰日益增大, 河流的各方面功能正逐渐丧失。这不仅关系到河流自身的健康, 还会严重阻碍到人类社会的可持续发展[1]。近年来, 人们已经充分认识到保护河流健康的重要性, 河流健康评价渐渐成为河流管理工作中最重要的一环。

根据评价对象的不同, 河流健康评价的方法可分为两大类: 指示物种生物监测法和涵盖多因素的综合评价方法[2]。指示物种生物监测方法在 20 世纪 80 年代开始流行, 它由河流无脊椎动物预测与分类系统(RIVPACS)和生物完整性指数法(IBM)两种方法组成。但是由于水生生物只是整个河流水生态系统的一部分, 上述方法的评价并不全面。因此, 综合考虑河流健康多方面因素的评价方法被提出。这类方法的关键是建立一个完善的评价体系, 体系中尽可能多地包含影响河流健康的因素, 常用的方法包括主观评价模型中的可变模糊集[3]、神经网络[4]等, 以及客观评价方法中的熵权模型[5] [6]、模糊物元模型[7]等。

整个河流系统是一个比较复杂的体系, 影响河流健康的因素涵盖了自然和人为两个方面, 它们的规律各不相同并且难以量化, 各自之间具有不相容性, 这给河流健康评价带来了模糊性和不确定性[8] [9]。由于模糊物元法能够较好地解决评价过程中所带来的随机和模糊等不确定性, 并能将所有单个的指标转换为一个整体进行评价, 相较于其他方法更为简便通用, 因而它越来越多地被运用在河流健康评价当中[10]。周振民等将熵值法与模

糊物元法相结合,建立了地下水水质评价模型,模型简便、通用,计算结果较为客观和稳定[11]。Zhao 等将模糊评价方法与层次分析法相结合,建立了综合模糊层次评价模型,并对永河进行了健康评价,验证了模型的有效性[2]。刘倩等基于可拓物元法的递阶层次架构和改进模糊优选理论中的隶属度建立了模糊物元河流健康评价模型,并将其应用于滦河河流健康评价中,模型评价结果与实际情况相符[12]。

但是以往的研究存在以下三个局限性:①较少对受多闸坝调控的河流开展健康评价,②指标体系建立时水生生态部分往往只关注了水生动物,③对河流的社会属性指标的评价考虑不足。基于此,本文从水文、水质、水生态和社会服务四个方面构建了一套新的河流健康综合评价指标体系,将模糊物元法与熵权法有机地结合,以淮河最大的支流沙颍河为例进行了河流健康评价,以期为流域的保护和管理提供决策依据。同时,本文通过设置两个情景,论证了考虑河流社会服务功能的必要性。

2. 研究方法

2.1. 评价体系

2.1.1. 评价体系指标

建立河流健康评价指标体系的基础是科学地通过选择适当指标,反映和衡量河流所处的状态,从而为寻求河流的可持续发展提供方向。考虑到评价指标的跨学科跨领域和种类、项目繁多的特点[13],本文筛选了4类代表性的指标,分别反映河流的水文水资源、水质、水生态和社会服务方面,旨在尽可能涵盖河流完整的功能。

1) 水文水资源

为了维持河流生态系统的生态环境功能,河流必须要能够提供足够的水量。本文选取水文学中生态流量的指标,计算其满足程度来表征河流径流量满足其生态系统需求的程度。生态流量满足度是河流流量能够满足生态流量的天数与总天数的比值,计算公式如下:

$$\alpha_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} = \frac{\sum \text{sgn}(Q_{ijk} - Q_{ij})}{D} \quad (1)$$

$$\text{sgn}(Q_{ijk} - Q_{ij}) = \begin{cases} 1 & Q_{ijk} > Q_{ij} \\ 0 & Q_{ijk} < Q_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_{ij} 表示第*i*年第*j*月的生态流量满足度; D_{ij} 表示第*i*年第*j*月生态流量的满足天数(d); D 表示第*i*年第*j*月的总天数(d); Q_{ijk} 表示第*i*年第*j*月第*k*日的河道流量(m^3/s); Q_{ij} 表示第*i*年第*j*月的生态流量(m^3/s)。

2) 水质

保障河流健康不仅需要提供足够的水量,也需要保证合格的水质。本文根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),选取了以下四个评价项目:DO 水质状况、有机污染水质状况、无机污染水质状况和重金属污染状况。其中有机污染水质状况包含高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮4个水质指标,无机污染水质状况主要考虑总磷指标,重金属污染状况包含铜、锌、硒、砷、汞、镉、六价铬、铅8个水质指标。

对于只包含一个指标的DO水质状况和无机污染水质状况,其项目值采用相应水质指标评估年的平均浓度。对于包含多个指标的有机污染水质状况和重金属污染状况,将它们各自包含的水质指标分别进行赋分,见表1和表2。根据监测数据,每个水质指标将其全年12个月的月均浓度按照汛期和非汛期分别进行平均,再分别确定汛期与非汛期的赋分,取其最低赋分作为此水质指标的赋分,最后取所包含的各个指标的赋分平均值作为该项目的赋分[13]。

Table 1. The score distribution of organic pollution
表 1. 有机污染水质状况水质指标赋分

| 水质指标 | 指标浓度(mg/L) | | | | |
|---------|------------|------|-----|------|-----|
| 高锰酸盐指数 | ≤2 | ≤4 | ≤6 | ≤10 | ≤15 |
| 化学需氧量 | ≤10 | ≤15 | ≤20 | ≤30 | ≤40 |
| 五日生化需氧量 | ≤2 | ≤3 | ≤4 | ≤6 | ≤10 |
| 氨氮 | ≤0.15 | ≤0.5 | ≤1 | ≤1.5 | ≤2 |
| 赋分 | 100 | 75 | 50 | 25 | 0 |

Table 2. The score distribution of heavy metal pollution
表 2. 重金属污染状况水质指标赋分

| 水质指标 | 指标浓度(mg/L) | | | | |
|-------|------------|-----------|----------|-----------|--------|
| 铜 | ≤0.01 | ≤0.2575 | ≤0.505 | ≤0.7525 | ≤1 |
| 锌 | ≤0.05 | ≤0.5375 | ≤1.025 | ≤1.5125 | ≤2 |
| 硒 | ≤0.01 | ≤0.0125 | ≤0.015 | ≤0.0175 | ≤0.02 |
| 砷 | ≤0.05 | ≤0.0625 | ≤0.075 | ≤0.0875 | ≤0.1 |
| 汞 | ≤0.0005 | ≤0.000625 | ≤0.00075 | ≤0.000875 | ≤0.001 |
| 镉 | ≤0.001 | ≤0.00325 | ≤0.0055 | ≤0.00775 | ≤0.01 |
| 铬(六价) | ≤0.01 | ≤0.0325 | ≤0.055 | ≤0.0775 | ≤0.1 |
| 铅 | ≤0.01 | ≤0.0325 | ≤0.055 | ≤0.0775 | ≤0.1 |
| 赋分 | 100 | 75 | 50 | 25 | 0 |

3) 水生态

水生态健康调查评价中，大多数指标体系只考虑了水生动物，而评价一条河流时，这样的考虑过于笼统和片面。因此本文将水生动物分为底栖动物和浮游动物，另外将浮游植物也考虑其中，采用 Shannon Wiener 指数来评价它们的多样性[14]，计算公式如下：

$$H = -\sum_{i=1}^S (pi)(\ln pi) \tag{3}$$

式中，S 表示总种数； p_i 表示第 i 种类的个体数占总个体数的比例。

4) 社会服务

河流健康是自然价值与人类社会服务价值的统一体，健康不仅意味着自然功能的完整性，还要确保其社会功能的正常发挥[12]。以往的研究往往只从水文、水质和水生态的角度去分析河流健康，忽略了水的“社会 - 自然”二元特性。人类活动对河流健康的影响越来越大，经济需水和生态需水的矛盾越来越突出[15]。本文充分考虑河流完整的功能，在评价指标中加入体现社会服务功能的通航水位保证率和水资源开发利用两个指标。

河道航运功能的保证能促进货物的顺利流通，有利于社会经济的发展。河道航运功能的保证采用通航水位保证率来衡量，计算公式如下：

$$\beta_{ij} = \frac{D_{ij}}{D} = \frac{\sum \text{sgn}(Z_{ijk} - Z_{ij})}{D} \tag{4}$$

$$\text{sgn}(Z_{ijk} - Z_{ij}) = \begin{cases} 1 & Z_{ijk} > Z_{ij} \\ 0 & Z_{ijk} < Z_{ij} \end{cases} \tag{5}$$

式中, β_{ij} 表示第 i 年第 j 月的通航水位保证率; D_{ij} 表示第 i 年第 j 月通航水位得到满足的天数(d); D 表示第 i 年第 j 月的总天数(d); Z_{ijk} 表示第 i 年第 j 月第 k 日的河道水位(m); Z_{ij} 表示第 i 年第 j 月的通航水位(m)。

水资源的开发利用是改造和利用自然的一个方面, 其目的是发展社会经济, 产生社会效益。水资源开发利用的内容很广, 包括农业灌溉、工业用水和生活用水等等。本文用水资源开发利用效率来衡量水资源开发利用程度, 计算公式如下:

$$R_u = \frac{W_u}{W_t} \tag{6}$$

式中, R_u 为水资源开发利用效率; W_u 为已开发利用的水资源总量; W_t 为流域的水资源总量。

2.1.2. 评价体系建立

结合上述河流四个方面的特性, 选取的河流健康综合评价体系见表 3。

Table 3. River health comprehensive evaluation system

表 3. 河流健康评价指标体系

| 准则层 | 指标层 | 计算说明 |
|-------|-----------|--|
| 水文水资源 | 生态流量满足度 | 计算评估年的日径流能够满足选取断面生态流量的程度。 |
| 水质 | DO 水质状况 | 根据评估年的监测数据, 对 12 个月的溶解氧浓度取平均。 计算方法详见 2.1.1。 |
| | 有机污染水质状况 | 计算方法详见 2.1.1。 |
| | 无机污染水质状况 | 根据评估年的监测数据, 对 12 个月的总磷浓度取平均。 |
| | 重金属污染状况 | 计算方法详见 2.1.1。 |
| 水生态 | 底栖动物生物多样性 | 采用底栖动物 Shannon Wiener 指数。 |
| | 浮游动物生物多样性 | 采用浮游动物 Shannon Wiener 指数。 |
| | 浮游植物生物多样性 | 采用浮游植物 Shannon Wiener 指数。 |
| 社会服务 | 通航水位保证率 | 统计评估年日水位大于等于通航水位的天数百分比。 |
| | 水资源开发利用效率 | 评估年水资源开发利用率 / 多年平均水资源量 × 100%。 |

2.1.3. 评价标准

评价指标的标准参照国际及国家已经正式发布的标准和通过实际调查与理论分析综合确定的指标评价标准值[13]。结合各指标特点, 对每项指标划定 5 级, 分别为 I (理想状况)、II (健康)、III (亚健康)、IV (不健康)、V (病态)。指标层各项指标评价标准见表 4。

Table 4. The criterion of each selected indicator

表 4. 指标层各项指标评价标准

| 准则层 | 指标层 | I | II | III | IV | V |
|-------|-----------|------|-----|-----|-----|-----|
| 水文水资源 | 生态流量满足度 | 80 | 60 | 40 | 20 | 0 |
| | DO 水质状况 | 7.5 | 6 | 5 | 3 | 2 |
| 水质 | 有机污染水质状况 | 100 | 75 | 50 | 25 | 0 |
| | 无机污染水质状况 | 0.02 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
| | 重金属污染状况 | 100 | 75 | 50 | 25 | 0 |
| | 底栖动物生物多样性 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 水生态 | 浮游动物生物多样性 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| | 浮游植物生物多样性 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| 社会服务 | 通航水位保证率 | 95 | 85 | 70 | 60 | 0 |
| | 水资源开发利用效率 | 10 | 30 | 40 | 50 | 60 |

2.2. 模糊物元模型

2.2.1. 模糊物元

给定事物的名称 N ，它关于特征 C 有量值为 V ，以有序三元 $R(N,C,V)$ 组作为描述事物的基本元，简称物元。如果物元模型中量值 V 具有模糊性，便称它为模糊物元。如果 m 个事物的 n 维物元组合在一起，使构成 m 个事物 n 维复合物元 R_{nm} 。若将 R_{nm} 的量值改写为模糊物元量值，称为 m 个事物 n 维复合模糊物元，记作

$$R_{nm} = \begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & v_{11} & \cdots & v_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & v_{n1} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中， M_j 为第 j 个事物 ($j=1,2,\dots,m$)； C_i 为第 i 个特征 ($i=1,2,\dots,n$)； v_{ij} 为第 j 个事物第 i 个特征对应的模糊量值。

2.2.2. 从优隶属度模糊物元

各单项评价指标相应的模糊量值从属于标准方案中各对应评价指标相应的模糊量值的隶属程度，称为从优隶属度。根据从优隶属度计算公式对所有指标的原始值标准化，以消除量纲的影响。

由此可得到从优隶属度模糊物元 \tilde{R}_{nm} ：

$$\tilde{R}_{nm} = \begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_n & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.3. 熵权法确定指标权重

本文采用熵权法来确定河流健康评价中各个评价指标的权重。熵权法源于信息科学中的信息熵，其值用于反映信息的无序化程度，进而可以度量信息量的大小。若某项指标所含有的信息量越大，则表示该指标在评价体系中的作用也就越大。此方法可以避免权重赋值过程中主观性的影响。

3. 实例研究

3.1. 研究区域概况

淮河流域的地理位置处于长江和黄河之间，位于我国东部，东经范围 $111^{\circ}55' \sim 121^{\circ}25'$ ，北纬范围 $30^{\circ}55' \sim 36^{\circ}36'$ ，面积为 27 万 km^2 ，横跨山东省、河南省、安徽省、江苏省和湖北省[16]。沙颍河作为淮河最大的支流，其位于南北气候的过渡带，冷暖气流频繁交汇，降雨分配不均，夏秋多，春冬少，洪涝干旱灾害易发生。经过近 50 年的建设，全流域兴建了大量的包括白龟山水库、周口闸等闸坝工程，显著地改变了流域的自然状况。

选取沙颍河上具有代表性的周口、界首和颍上断面来进行评价。研究区域概况见图 1。

3.2. 评价模型建立

3.2.1. 指标数据计算

本文将选取沙颍河上具有代表性的周口、界首和颍上断面作为河流健康评价的评价对象，选取 2017 年为评估年。指标数据主要通过收集 2017 年的水文资料、相关报告和监测资料等获得。

3.2.2. 熵值法确定指标权重

计算得到各评价指标的权重见表 5。

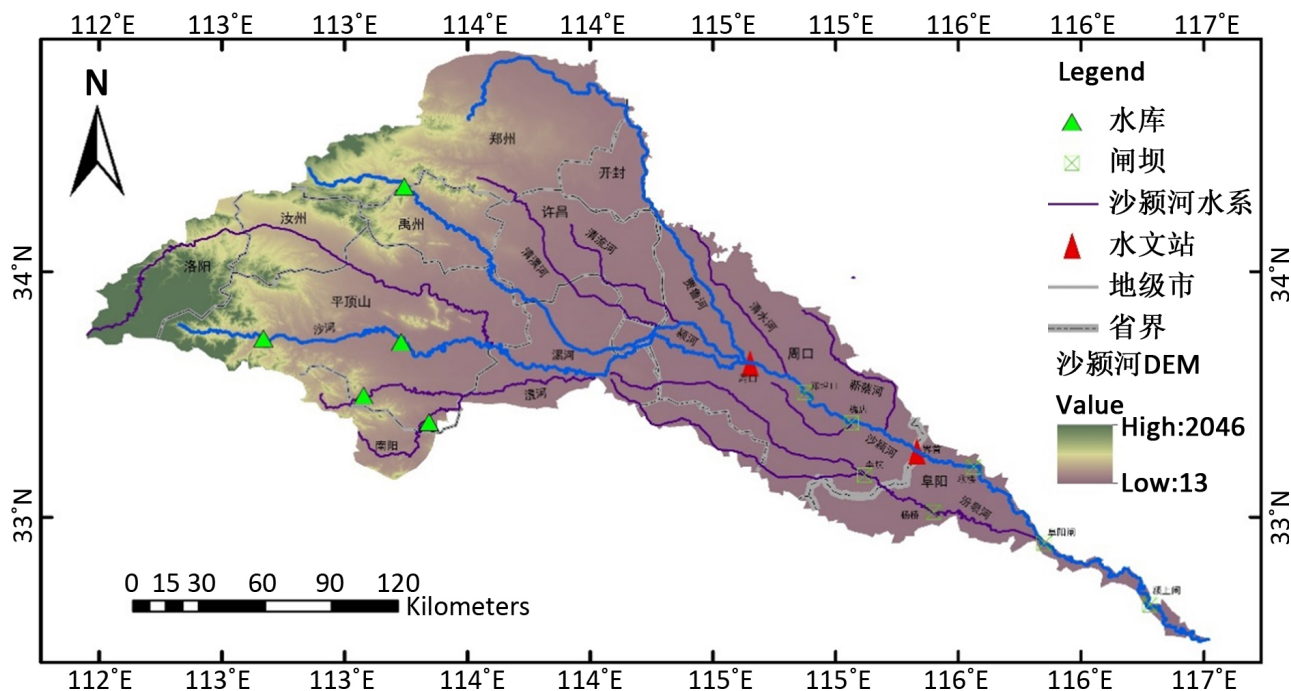


Figure 1. Sketch map of the Shaying River basin
图 1. 沙颍河流域概况图

Table 5. Weight values of each evaluation indicator
表 5. 各评价指标的权重值

| 评价指标 | 生态流量 满足度 | DO 水质 状况 | 有机污染 水质状况 | 无机污染 水质状况 | 重金属 污染状况 | 底栖动物 生物多样性 | 浮游动物 生物多样性 | 浮游植物 生物多样性 | 通航水位 保证率 | 水资源 开发利用 |
|------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 权重 | 0.125 | 0.127 | 0.149 | 0.096 | 0 | 0.097 | 0.100 | 0.095 | 0.111 | 0.101 |

3.2.3. 计算关联度

计算得到沙颍河代表断面的关联度 R_k 如下:

$$R_g = \begin{pmatrix} \text{周口} & \text{界首} & \text{颍上} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} \\ 0.6779 & 0.6603 & 0.6587 & 0.9685 & 0.7275 & 0.5070 & 0.2703 & 0.0000 \end{pmatrix} \quad (9)$$

3.3. 结果和讨论

根据计算的关联度结果, 本文将周口、界首和颍上断面的关联度值与分类标准 I~V 的关联度值相比较, 可得到周口、界首和颍上三个断面的评价等级均为 III 级(亚健康), 说明沙颍河干流的河流健康程度为良好, 但是还有可以提高的空间。

3.3.1. 指标的建立

河流健康评价一个重要的步骤就是建立一个合理的评价指标体系。这个体系既能考虑研究区域的实际情况和现有的资料, 又能尽可能地覆盖到河流的主要功能。本次指标建立首先依据河流的自然和社会属性, 将指标分为两大类, 第一类涵盖河流的主要自然属性, 分别为反应径流和水量的水文水资源指标, 反应河流受污染状况的水质指标和反应河流生态系统的水生态指标。其中水生态的指标内容较之前的研究更加丰富, 综合考虑了底栖动物、浮游动物和浮游植物的多样性。河流的社会属性主要考虑其对社会经济发展的贡献和人为活动对河

流的干扰,因此结合已有的资料,共选取了通航水位保证率以及水资源开发利用两个指标。

沙颍河流域从上游至下游修建了众多的闸坝,天然河川径流被破坏,河流受到人为高度调控[17]。维持河流健康并不意味着河流要完全恢复至天然状态,新时期的河流健康应该是同时兼顾河流的自然属性和社会属性,在维持河流自然状况不被恶化的前提下,合理地发展社会经济。因此指标体系中纳入对河流社会服务的考虑是必要的。

3.3.2. 各指标的重要程度

针对表 3 的评价指标体系,利用熵权法得到了各指标的权重,如表 5。从表中可以看出有机污染水质状况指标所占的权重最高,重金属污染状况所占权重最低,近乎为 0,因为三个断面的重金属污染状况均为评价等级中 I 类的理想状态,所以这个指标在此研究中意义不大。

此外,结合 3.1 中对纳入河流社会服务功能的重要性分析的讨论,为了验证此必要性,本研究在剔除了社会属性的指标后,重新利用基于熵权法的模糊物元法对同样三个断面进行评价。得到其关联度值如下:

$$R_{\xi} = \begin{pmatrix} \text{周口} & \text{界首} & \text{颍上} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} \\ 0.6327 & 0.5408 & 0.4891 & 0.9670 & 0.7266 & 0.4936 & 0.2330 & 0.0000 \end{pmatrix} \quad (10)$$

本文定义纳入社会服务功能的河流健康评价为情景一,不纳入时为情景二。由上述计算结果可得,情景二中颍上断面的健康状况评价等级有变化,被评价为 IV 类。情景一中颍上断面的高通航水位满足度和相对合理的水资源开发利用率体现了其对社会经济发展的正向贡献,因而评价等级较情景二中的高。同时,对于周口和界首断面来说,虽然情景一和情景二中的评价结果同样为 III 类,但是情景一的关联度值比情景二的更加贴近 II 类,即距离评价标准的“健康”更加接近。这说明纳入河流的社会服务功能,考虑河流对社会经济做出的贡献是非常必要的。

4. 结论

本文结合多闸坝河流的特点与实际,从反映河流功能的水文水资源、水质、水生态和社会服务功能 4 个方面入手,选取了共 10 项指标表征河流健康状况。评价指标加入了反映河流社会服务功能的相关指标,使得河流健康评价更加合理。论文结合沙颍河流域开展的实例应用研究表明,基于熵权法的模糊物元模型能够应用于多指标的河流健康综合评价。

在实例研究中,沙颍河流域选取断面的评价结果均处于“亚健康”水平,尽管相比评价标准 IV (不健康)和 V (病态)级的河流,沙颍河的河流健康状况较为良好,但“亚健康”状态属于“健康”和“不健康”之间的过渡状态,此状况下的河流健康状态不稳定且转变敏感,故河流健康管理工作仍不容忽视。研究结果对深入认识沙颍河流域的河流健康状态和制订合理的河流健康保护措施具有重要的参考价值。

基金项目

本研究得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项(批准号: 2017ZX07602-003)的资助。

参考文献

- [1] SUNDARAY, S. K., PANDA, U. C., NAYAK, B. B., et al. Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of the Mahanadi River estuarine system (India): A case study. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, 28(4): 317-330. <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9001-5>
- [2] ZHAO, Y. W., YANG, Z. F. Integrative fuzzy hierarchical model for river health assessment: A case study of Yong River in Ningbo City, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(4): 1729-1736. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.09.019>
- [3] 秦鹏, 王英华, 王维汉, 等. 河流健康评价的模糊层次与可变模糊集耦合模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(12):

- 2169-2175.
QIN Peng, WANG Yinghua, WANG Weihai, et al. Integrated model of fuzzy analytical hierarchy process and variable fuzzy set model on evaluating river health system. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(12): 2169-2175. (in Chinese)
- [4] 崔东文. RBF 与 GRNN 神经网络模型在河流健康评价中的应用——以文山州区域中小河流健康评价为例[J]. *中国农村水利水电*, 2012(3): 61-66.
CUI Dongwen. RBF and GRNN neural network model in the evaluation of river health. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(3): 61-66. (in Chinese)
- [5] 邓晓军, 翟禄新, 李艺. 基于熵权模糊综合评价模型的桂林市桃花江河流健康评价[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(11): 35-38.
DENG Xiaojun, ZHAI Luxin and LI Yi. Taohuajiang river health evaluation in Guilin city based on entropy weight and fuzzy comprehensive evaluation model. *Water Resources and Power*, 2013, 31(11): 35-38. (in Chinese)
- [6] DENG, X., XU, Y., HAN, L., et al. Assessment of river health based on an improved entropy-based fuzzy matter-element model in the Taihu Plain, China. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.020>
- [7] PAN, G., XU, Y., YU, Z., et al. Analysis of river health variation under the background of urbanization based on entropy weight and matter-element model: A case study in Huzhou City in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Research*, 2015, 139: 31-35. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.013>
- [8] KARR, J. R. Defining and measuring river health. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 221-234.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00427.x>
- [9] NORRIS, R. H., THOMAS, M. C. What is river health? *Freshwater Biology*, 1999, 41: 197-209.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00425.x>
- [10] ZHANG, J., WANG, K., CHEN, X., et al. Combining a fuzzy matter-element model with a geographic information system in eco-environmental sensitivity and distribution of land use planning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(4): 1206-1221. <https://doi.org/10.3390/ijerph8041206>
- [11] 周振民, 常慧. 基于熵权的模糊物元地下水水质评价模型[J]. *中国农村水利水电*, 2008(12): 45-47.
ZHOU Zhenmin, CHANG Hui. Fuzzy matter-element groundwater quality evaluation model based on entropy weight. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(12): 45-47. (in Chinese)
- [12] 刘倩, 董增川, 徐伟, 等. 基于模糊物元模型的滦河河流健康评价[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(9): 47-50.
LIU Qian, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Health assessment of Luanhe River based on fuzzy matter-element model. *Water Resources and Power*, 2014, 32(9): 47-50. (in Chinese)
- [13] 孙博. 基于熵权模糊物元模型的河流生态健康综合评价[J]. *人民珠江*, 2015, 36(6): 95-100.
SUN Bo. River ecosystem health evaluation of fuzzy matter element model based on entropy weight. *Pearl River*, 2015, 36(6): 95-100. (in Chinese)
- [14] STRONG, W. L. Biased richness and evenness relationships within Shannon-Wiener index values. *Ecological Indicators*, 2016(67): 703-713. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.043>
- [15] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 292-301.
XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 292-301. (in Chinese)
- [16] 葛金金, 彭文启, 张汶海, 等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法——以沙颍河周口段为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 75-80.
GE Jinjin, PENG Wenqi, ZHANG Wenhai, et al. Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river: A case study of Zhoukou hydrological station in Shaying River. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(2): 75-80. (in Chinese)
- [17] ZUO, Q. T., JIN, R. F., MA, J. X., et al. Description and application of a mathematical method for the analysis of harmony. *The Scientific World Journal*, 2015, 2015: Article ID: 831396. <https://doi.org/10.1155/2015/831396>