

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.022

基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价

杜现增¹,袁榆梁²,孟 钰¹,管新建¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院,河南 郑州 450001; 2. 河南省水利勘测设计研究有限公司,河南 郑州 450016)

摘要:选取河流的物理特征、水文情势、水环境质量、生物多样性 4 个方面建立河流健康综合评价指标体系,构建基于复合模糊物元与熵权法的河流健康综合评估数学模型,对淮河干流关键断面进行实例应用研究。结果表明,淮河干流淮滨、王家坝、鲁台子与蚌埠 4 个关键河段的河流健康指数分别为 0.470、0.435、0.462 和 0.432,河流综合健康水平整体不高,自上游到下游呈下降趋势,由于国家政策和人类活动影响,鲁台子河段的河流健康状况明显升高。

关键词:评价指标体系;复合模糊物元;熵权法;淮河干流;河流健康

中图分类号:TV211.1;X82 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0145-07

Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model // DU Xianzeng¹, YUAN Yuliang², MENG Yu¹, GUAN Xinjian¹ (1. College of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Water Conservancy Survey and Design Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: A comprehensive evaluation index system of river health was established from four aspects, including physical characteristics, hydrological regime, water environment quality and biodiversity. A mathematical model for comprehensive evaluation of river health was established based on composite fuzzy matter element and entropy weight method. A case study on the key sections of Huaihe River mainstream was carried out. The results show that the river health indexes of the four key sections of Huaihe River mainstream are 0.470, 0.435, 0.462, and 0.432, respectively. The comprehensive health level of the river is not high as a whole, showing a downward trend from upstream to downstream. Due to the influence of national policies and human activities, the health of the river of Lutaizi section has increased significantly.

Key words: evaluation index system; compound fuzzy matter element; entropy weight method; Huaihe River mainstream; river health

河流健康评价是对河流现状做出的描述和评估,提出有效的河流保护措施、科学的水资源配置方案,对于河流的可持续发展、流域生态环境建设以及水资源合理利用都具重要的意义。20 世纪 80 年代欧洲与北美一些发达国家从河流生态系统健康的概念中提出了河流健康的概念^[1],后来衍生出多种河流健康的研究方法,主要有预测模型法和综合指标法^[2]。预测模型法是将假设河流在无人干扰条件下理论上应该存在的物种组成与河流实际的物种组成进行比较,从而评价河流的健康状况,常见的预

测模型法包括 RIVPACS^[3]、IBI 和 AUSRIVAS^[4-5]等。综合指标法的基本原理是建立一套物理、化学和生物变量指标,利用数学综合评估模型获得河流健康的综合状况^[6],常见方法包括快速生物监测协议(RBPs)^[7]、河岸带与河道环境评估法(RCE)和澳大利亚溪流状况指数(ISC)^[8]等。随着监测技术的发展,可以测量河流水量和水质、河流结构、生物特性等各种参数,综合指标法的应用也越来越广泛,常用的数学评估模型包括层次分析模型、熵权模型、模糊物元模型与模糊集^[9-14]等。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51879241);国家自然科学基金青年科学基金(51809239)

作者简介:杜现增(1996—),男,硕士研究生,研究方向为水文与水资源。E-mail: 1512167461@qq.com

通信作者:管新建(1973—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: gxj1016@zzu.edu.cn

已有较多学者对淮河的健康做出评价,孟钰等^[15]研究了河道内生态用水保障率对淮河生态系统健康的影响;殷守敬等^[16]通过遥感分析了淮河岸边带的生态健康;李瑶瑶等^[17]评价了淮河流域河南段的生态系统健康;张颖等^[18]通过计算底栖动物完整性指数来评价淮河的水系生态健康;宋大平等^[19]通过氮的排放来对淮河做出健康风险评价。对淮河河流健康评价的过程中,多数学者针对河流中水生生物多样性来评价河流健康,也有学者通过调查化学污染物对水质的影响状况来做出评价,但大部分学者选取的评价指标较单一,对淮河的综合健康评价不全面。本文从河流的物理、水质、生态与水文4个方面对淮河干流关键河段的健康状况做出评价,根据河流的物理特征、生物多样性、水环境质量和水文情势,选取若干代表性指标构建河流健康评价指标体系,建立基于复合模糊物元与熵权组合的综合评估模型,对淮河干流关键河段的健康状况进行全面的,以期准确反映河流内水体多变性、生物多样性和物理复杂性。

1 研究区概况与研究方法

1.1 淮河流域概况

淮河流域发源于河南省南阳市桐柏县桐柏山,流经河南、安徽、江苏、山东、湖北5个省,全长约1000 km,支流众多,主要有白露河、池河、沙颍河、洪汝河、涡河等。淮河流域降雨时空分布不均匀,容易发生洪旱灾害;水资源丰富,2006—2015年平均地表水资源量约为594.9亿 m^3 ,其中Ⅲ类水质及以下占淮河水资源量的63%;化学需氧量与氨氮排放量有显著的降低趋势,2015年化学需氧量为40.2万t,氨氮排放量为3.5万t;水生生物随季节变化明显,夏季物种丰度与生物量明显高于其他季节。另外淮河流域已建大型水库38座,总库容达110亿 m^3 ,1万多座大小型水利工程已改变了淮河流域水平与垂直生态结构。

1.2 河流健康综合评价指标体系的构建

1.2.1 河流健康综合评价指标体系

构建河流健康综合评价指标体系时,把河流健康指标体系分为3个层次:目标层、准则层、指标层^[20],根据科学性与实用性原则及专家建议,选取8个代表性指标^[21],选取的指标能反映淮河干流的地貌、洪峰和洪量变化及水生生物的变化状况,具体指标体系见图1。

1.2.2 指标计算方法

a. 河道蜿蜒度。河道蜿蜒度^[22]是反映河流物理健康的典型指标,在河流健康评价中被广泛使用。

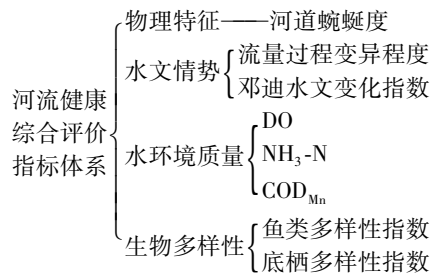


图1 河流健康综合评价指标体系

Fig.1 Comprehensive assessment index system of river health

计算公式为

$$P_1 = \frac{L_{ai}}{L_{si}} \quad (1)$$

式中: P_1 为河道蜿蜒度; L_{ai} 为*i*河段的河道曲线长度; L_{si} 为*i*河段的河道直线长度。

b. DO 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 。 DO (c_1)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (c_2)、 COD_{Mn} (c_3)受河流物理、化学和生物特征的综合影响,是典型的水环境变量,也是政府推荐的主要水质评价指标^[23],计算公式为

$$c_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (t = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: c_i 为指标浓度值; n 为实测年周数; c_i 为第*i*周指标浓度值。

c. 鱼类与底栖动物多样性指数。鱼类与底栖动物多样性指数能反映河流的物理、水质特性,也间接反映人类对河流健康的影响^[24-25]。Grubb等^[26]用香农-威纳指数来反映鱼类(H_1)和底栖动物(H_2)的多样性,计算公式为

$$H_t = - \sum_{i=1}^s \left[\frac{N_i}{N} \ln \left(\frac{N_i}{N} \right) \right] \quad (t = 1, 2) \quad (3)$$

式中: N 为总的数量; N_i 为第*i*个物种的数量; s 为种类的数量。

d. 流量过程变异程度(V_1)。通过计算得到河流各河段实测径流量与天然径流量的差异^[27],进而反映出河流的水资源开发利用后对河流的影响程度。计算公式为

$$V_1 = \sqrt{\sum_{m=1}^{12} \left(\frac{q_m - Q_m}{\bar{Q}_m} \right)^2} \quad (4)$$

其中

$$\bar{Q}_m = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} Q_m \quad (5)$$

式中: q_m 为第*m*月实测径流量; Q_m 为第*m*月天然径流量; $\bar{Q}_m$ 为第*m*月天然径流量的均值。

e. 邓迪水文变化指数(V_2)。该指数由Black等^[28]提出,用来表示水文条件改变下河流生态系统遭到破坏的风险程度。利用水文分析技术(IHA)^[29]中33个反映河流流态年内及年际变化特征的水文

改变指标赋值而得,根据 IHA 建立的 5 组 33 个指标改变前后变化的百分比,求每组各指标变化百分比的均值,对均值百分比以及 IHA 中的离散系数 C_V 赋值,赋值过程见表 1,各组赋值总和为最后邓迪水文变化指数值。

表 1 邓迪水文变化指数赋值

Table 1 Dundee hydrological change index value assignment

IHA 中各组均值与 C_V	各阶段赋值百分比/%		
	1 阶段	2 阶段	3 阶段
1a(第 1 组均值)	19.9	43.7	67.5
1b(第 1 组 C_V 值)	29.4	97.6	165.7
2a(第 2 组均值)	42.9	88.2	133.4
2b(第 2 组 C_V 值)	84.5	122.7	160.8
3a(第 3 组均值)	7.0	21.2	35.5
3b(第 3 组 C_V 值)	33.4	50.3	67.3
4a(第 4 组均值)	36.4	65.1	93.8
4b(第 4 组 C_V 值)	30.5	76.1	121.6
5a(第 5 组均值)	46.0	82.7	119.4
5b(第 5 组 C_V 值)	49.1	79.9	110.6

注:小于或等于 1 阶段值赋值 0;1 阶段和 2 阶段之间及 2 阶段的值赋值 1;2 阶段和 3 阶段之间的值赋值 2;大于或等于 3 阶段值赋值 3。

1.2.3 指标的评价标准

评估标准由相关研究成果和研究区域的实际情况确定。河道蜿蜒度评价等级参考 Albert 等^[22]的研究成果;根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》确定 DO、NH₃-N、COD_{Mn} 3 个指标的评价等级;参考 Grubb 等^[26]用香农-威纳指数来评价鱼类与底栖动物多样性,并将其划分健康等级;流量过程变异程度是基于金双彦等^[27]对黄河的研究而确定;根据 Black 等^[28]的研究确定了邓迪水文变化指数的健康等级。将 8 个指标分为健康(L₁)、亚健康(L₂)、普通(L₃)、轻度恶化(L₄)和恶化(L₅)5 个等级,具体见表 2。

1.3 复合模糊物元-熵权组合模型

1.3.1 复合模糊物元

a. 用 n 个事物的 m 个特征量值构造 n 个事物的 m 维复合模糊物元 Q_{mn} :

$$Q_{mn} = \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{m1} & \cdots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

表 2 各指标值评价标准

Table 2 Evaluation criteria of each index value

等级	P_1	V_1	V_2	$c_1/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_2/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_3/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	H_1	H_2
L ₁	≥ 2	≤ 0.1	≤ 1	≥ 7.5	≤ 0.15	≤ 2	≥ 2	≥ 2
L ₂	[1.5, 2)	(0.1, 0.3]	(1, 5]	[6, 7.5)	(0.15, 0.5]	(2, 4]	[1.5, 2)	[1.5, 2)
L ₃	[1.3, 1.5)	(0.3, 1.5]	(5, 10]	[5, 6)	(0.5, 1]	(4, 6]	[1, 1.5)	[1, 1.5)
L ₄	[1, 1.3)	(1.5, 3.5]	(10, 20]	[3, 5)	(1, 1.5]	(6, 10]	[0.5, 1)	[0.5, 1)
L ₅	< 1	> 3.5	> 20	< 3	> 1.5	> 10	< 0.5	< 0.5

式中 q_{mn} 为对应的指标值。

b. 模糊物元模型中模糊量值通常是各特征量值的相对隶属度 $u(q)$,根据指标特性及作用,将其分为越大越优型和越小越优型,其计算公式分别为

$$u_{mn} = \frac{q_{mn}}{q_{\max}} \quad (7)$$

$$u_{mn} = \frac{q_{\min}}{q_{mn}} \quad (8)$$

式中: u_{mn} 为指标 q_{mn} 归一化后的值; $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$ 为各指标的最大、最小值。

c. 利用各特征量值的相对隶属度构建从优隶属度模糊物元 Q'_{mn} :

$$Q'_{mn} = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

d. 用构造的标准模糊物元 Q_{0n} 与 Q'_{mn} 计算得到差平方模糊物元 Q_{Δ} :

$$Q_{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \cdots & \Delta_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \Delta_{m1} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $\Delta_{ij} = (u_{0i} - u_{ij})^2 (i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n)$

标准模糊物元中的 u_{0i} 取各评价指标从优隶属度的最大值,一般为 1。

模糊物元模型能处理多指标和量纲不统一的问题,用相对隶属度矩阵来转化和统一各定性和定量指标,模糊物元分析法将各种指标统一化,结果更有参考价值。

1.3.2 熵权法

a. 用评估对象和指标构造判断矩阵, m 个对象, n 个指标,则构造 $m \times n$ 型判断矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, x_{ij} 为第 j 个对象第 i 个指标值。

b. 对 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 矩阵中的每个 x_{ij} 值进行归一化处理,得到归一化矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$,对于越大越优型和越小越优型指标计算公式分别为

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (12)$$

c. 计算指标体系的熵值:

$$H'_i = \frac{\sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln n} \quad (13)$$

其中

$$f_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + r_{ij})}$$

式中: H'_i 为指标 i 的熵值; f_{ij} 为指标 i 在第 j 个对象中占的比例; n 为方案的总个数。

d. 计算指标体系的权重:

$$w_i = \frac{1 - H'_i}{m - \sum_{i=1}^m H'_i} \quad (14)$$

式中: m 为指标的个数; w_i 为第 i 个指标的权重, 且要

满足 $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

1.3.3 欧式贴近度

贴近度 ρ_{Hi} 表示样本与标准样本的相互接近程度, 值越大表示越接近最优值, 用欧式贴近度表示河流健康综合指数, 根据贴近度的大小对河流健康状况进行分类并给出评价等级。 ρ_{Hi} 计算公式为

$$\rho_{Hi} = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i \Delta_{ij}} \quad (15)$$

2 结果与分析

2.1 指标权重计算结果及分析

将淮河干流根据淮滨、王家坝、鲁台子、蚌埠 4 个关键断面划分为 4 个河段, 输入 4 个河段 8 个指标的数据, 构造判断矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ($m = 8, n = 4$), 根据熵权法利用式 (11) ~ (15) 计算各指标权重。河道蜿蜒度 (P_1)、流量过程变异程度 (V_1)、邓迪水文变化指数 (V_2)、DO (c_1)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (c_2)、COD_{Mn} (c_3)、鱼类多样性指数 (H_1)、底栖多样性指数 (H_2) 权重计算结果分别为 0.146、0.123、0.122、0.103、0.123、0.123、0.134、0.126。

权重能反映指标在评价过程中的影响程度, 权重越大, 说明对应的指标波动状况越大, 评价时容易影响整体结果。从计算结果可以看出河道蜿蜒度、鱼类与底栖动物多样性指数的权重较大, 溶解氧的权重最小。淮河干流从上游到下游河道蜿蜒度变化明显, 鱼类、底栖动物的多样性指数受季节与河流物理特征影响严重, 这 3 个指标对评价结果影响较大; 淮河干流溶解氧含量较丰富, 4 个河段都处于良好的状态, 变化不明显。

2.2 淮河干流关键河段河流健康综合指数

根据 4 个河段的指标值、平均值及表 2 中指标评价等级, 构造 8 个指标 10 个对象的模糊物元

$Q_{8 \times 10}$, 先根据式 (6) ~ (9) 对各指标及评价标准归一化处理后构造从优隶属度模糊物元 $Q'_{8 \times 10}$, 再用式 (10) 计算得各指标及加入边界条件的差平方模糊物元 Q_{Δ} , 最后根据计算出的权重和差平方模糊物元用式 (15) 计算淮河干流关键河段的健康综合指数以及河流健康的边界指数。得到淮河干流淮滨、王家坝、鲁台子与蚌埠 4 个关键断面的河流健康综合指数分别为 0.470、0.435、0.462、0.432, 4 个断面健康综合指数的平均值为 0.450。同时利用差平方模糊物元 Q_{Δ} 计算得到河流健康边界指数, 根据计算结果将河流健康分为 ($\rho_H \geq 0.931$)、亚健康 ($0.483 \leq \rho_H < 0.931$)、普通 ($0.321 \leq \rho_H < 0.483$)、轻度恶化 ($0.200 \leq \rho_H < 0.321$)、恶化 ($\rho_H < 0.200$) 5 个健康等级, 结合河流健康边界指数辨识淮河干流关键河段的河流健康状态。

从计算出的淮河干流 4 个河段健康综合指数得出, 淮河干流上 4 个河段都处于普通健康的状态, 但是每个河段有一定的差别。健康指数最大的为淮滨河段 ($\rho_H = 0.470$), 最小的为蚌埠河段 ($\rho_H = 0.432$), 在 4 个关键河段中只有淮滨和鲁台子两个河段健康指数达到了淮河干流的平均水平 ($\rho_H = 0.450$), 淮河干流从上游到下游健康指数有减弱的趋势, 健康程度逐渐减弱, 但鲁台子河段健康指数明显变大。

3 讨论

3.1 关键指标识别与趋势分析

3.1.1 河道蜿蜒度

河道蜿蜒度的权重最大, 达到了 0.146, 淮河干流的河道蜿蜒度先呈上升趋势, 然后逐渐下降, 变化明显, 整体健康状况良好 (图 2)。淮河干流鲁台子河段河流弯曲度最大, 河道蜿蜒度为 1.62, 该河段为水生生物提供了更加多样化的生境空间, 水生态受洪水与干旱影响相对较少, 水生生物种类与数量

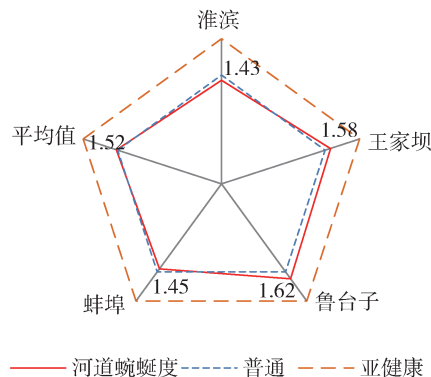


图 2 关键河段河道蜿蜒度

Fig. 2 Meandering degree of key river sections

丰富,其次该河段蓄水能力好,水文情势不易发生改变,有利于取水工程布置。

3.1.2 水文情势

淮河各河段中蚌埠的流量过程变异程度最小,但是也达到了病变的状态,其他 3 个河段都处于严重病变状态。淮河干流取用水过度,特别是中上游,已严重影响了淮河的生态健康。淮河干流流量随季节变化明显,月平均流量差异较大,每月的平均流量对计算邓迪水文变化指数指标影响严重,如图 3。邓迪水文变化指数最大的为蚌埠河段,蚌埠河段月平均流量差异最大,水位起伏也很大,年最大最小水位出现的时间变化明显,说明该河段水文情势最不稳定,容易发生一系列水情灾害。由于淮滨河段处于淮河干流上游,受人类活动影响很小,天然流量均匀,因此邓迪水文变化指数不易发生改变。

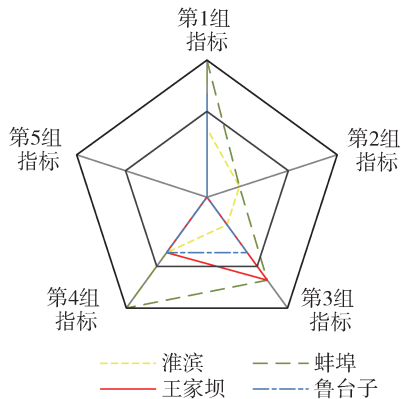


图 3 关键河段 IHA 中各组指标赋值变化情况
Fig. 3 Changes of each index assignment in IHA of key river sections

3.1.3 生物多样性

鱼类与底栖动物的多样性指数权重所占比例较大,分别为 0.134 和 0.126。对淮河干流生物多样性评价时采集了 4 个河段 4 门、20 目、41 科 66 种底栖动物和 5 目、10 科、18 属 19 种鱼类,通过整年的观察和分析,结果(图 4)显示水生生物多样性最高的是夏季(6—8 月),最低的是冬季(12 月至次年 2 月),这符合了我国水生生物的生活习性和增长模式。淮河干流底栖动物多样性处于较好的水平,鱼类受季节影响显著,春季和冬季鱼类种类和数量都大量减少,生态系统也受河流物理性质与水文情势影响较大。鲁台子河段河道蜿蜒度最大、邓迪水文变化指数小,水流较缓,为水生生物提供更多的栖息空间,导致鱼类与底栖动物的种类与数量较大;而蚌埠河段物理特征与水文情势比较恶劣,不适合水生生物的生长,所以水生生物多样性差。

3.2 河流健康综合状况及成因分析

淮河干流从上游到下游各河段的健康程度有明

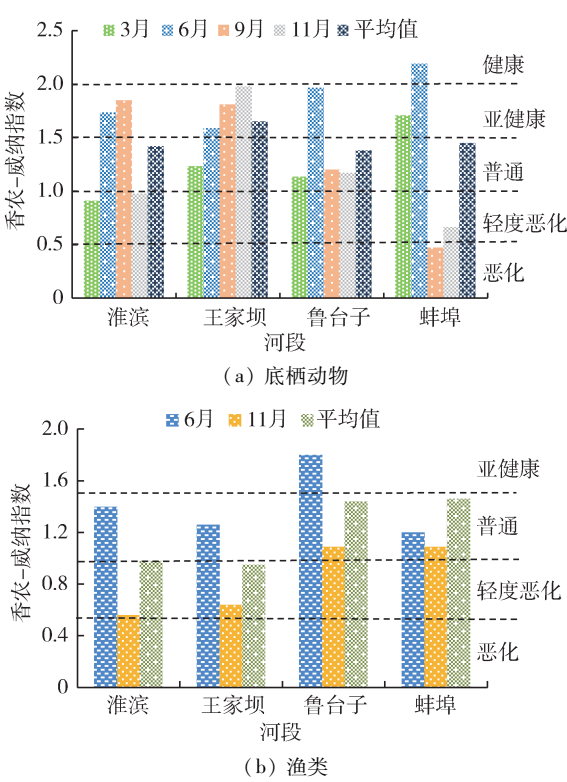


图 4 香农-威纳指数

Fig. 4 Shannon-Weiner index

显的变差趋势,健康状况受支流与外界因素影响较严重。淮河流经人口密集的农业集中区,淮河流域的土地利用类型主要为耕地,耕地约占土地面积的 70%,城乡居民用地占 10% 以上,这对淮河的健康产生了一定负面影响。在上游,流域的土地开发程度不高,对河流产生的负面影响较小,而淮河流域下游人口相对集中,城市化严重,对河流的各项功能要求高,同时人类活动向河流内排放大量污水,水污染严重,导致淮河水生生物的种类和数量严重下降,淮河干流的综合健康随之下降。

在鲁台子上游大约 15 km 处沙颍河汇入淮河干流,国家、地方政府和科技部门投入了大量的人力与财力对沙颍河进行监测与保护,沙颍河中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD 等污染物得到了有效的控制,沙颍河的水质优良、水生态丰富、水资源配置科学,汇入淮河干流后,积极地改变着淮河干流中游的水质与水生态。其次,2011 年国家在淮河干流中游建立国家自然保护区保护长吻鮠的生存,间接地提高了淮河干流鲁台子河段的水质状况和水生生物多样性,保护了鲁台子河段河流的健康。鲁台子河段为河流保护的典范,为淮河干流及支流其他河段的保护提供了有益的指导和借鉴。洪汝河整体呈上宽下窄的形态,上游河水汇入而下游排水不通畅,加之人为调水不充分,洪汝河很容易发生洪涝灾害,河水流动性不足,污染物累积,不易清除,在王家坝上游汇入淮河

干流后造成王家坝河段健康程度降低。涡河在蚌埠上游汇入淮河干流,涡河由于“引黄淤灌”引入大量泥沙,且流经城市携带大量污染物,政府部门也没有制定全面的管理政策,导致涡河的水质恶化严重,水生态稳定性减弱,因此受涡河的影响淮河干流蚌埠段的河流综合健康急剧下降。

4 结 语

本文以河流的物理、水质、水文和生态4个方面为基础,运用复合模糊物元-熵权组合模型计算关键河段的河流综合健康指数进而对河流做出健康综合评价。结果表明,淮河干流的健康状态受河道蜿蜒度、水文情势与水生态特性的影响比较重,在外界环境的干扰下其健康状态从上游到下游有逐渐减弱的趋势,而且淮河干流整体健康状况处于普通等级。淮河干流的健康状况受流域中汇入的支流和外界因素影响较大。

参考文献:

- [1] 刘昌明,刘晓燕. 河流健康理论初探[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 683-685. (LIU Changming, LIU Xiaoyan. Healthy river: essence and indicators [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(7): 683-685. (in Chinese))
- [2] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 602-608. (WU Ena, YANG Kai, CHE Yue, et al. Characterization of rivers health status and its assessment[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 602-608. (in Chinese))
- [3] 唐涛,蔡庆华,刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1191-1194. (TANG Tao, CAI Qinghua, LIU Jiankang. River ecosystem health and its assessment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1191-1194. (in Chinese))
- [4] KARR, J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [5] 刘勇丽,刘录三,汪星,等. 水生植物在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 生态科学, 2017, 36(3): 207-215. (LIU Yongli, LIU Lusan, WANG Xing, et al. Application of aquatic macrophytes in river health assessment; a review [J]. Ecological Science, 2017, 36(3): 207-215. (in Chinese))
- [6] ZHANG X, MENG Y, XIA J, et al. A combined model for river health evaluation based upon the physical, chemical, and biological elements[J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 416-424.
- [7] 高凡,蓝利,黄强. 变化环境下河流健康评价研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 85-91. (GAO Fan, LAN Li, HUANG Qiang. Advances on evaluation of river health in changing environments [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 85-91. (in Chinese))
- [8] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia [J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 453-468.
- [9] 张娟,郝达平,鞠伟. 基于层次分析法的城市河流健康评价研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(增刊1): 154-157. (ZHANG Juan, HAO Daping, JU Wei. Research on urban river health evaluation based on AHP [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(Sup1): 154-157. (in Chinese))
- [10] 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 [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9): 47-50. (in Chinese))
- [11] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [12] 于志慧,许有鹏,张媛,等. 基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析:以湖州市区不同城市化水平下的河流为例[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3188-3193. (YU Zhihui, XU Youpeng, ZHANG Yuan, et al. Assessment of river health in urbanized area based on entropy weight and matter element model: a case study in Huzhou City at different stages of urbanization [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3188-3193. (in Chinese))
- [13] 王静,刘淑静,陈爱慧,等. 基于层次分析法的我国海水淡化开发利用潜力评价方法研究[J]. 水利经济, 2020, 38(6): 12-14. (WANG Jing, LIU Shujing, CHEN Aihui, et al. Evaluation method for development and utilization potential of seawater desalination in China based on AHP [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(6): 12-14. (in Chinese))
- [14] 王雪,方国华,李鑫. 基于序关系分析-模糊物元法的昆山市节水型社会建设综合评价[J]. 水利经济, 2020, 38(5): 30-35. (WANG Xue, FANG Guohua, LI Xin. Comprehensive evaluation of construction of water-saving society in Kunshan City based on sequence relation analysis-fuzzy matter-element method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(5): 30-35. (in Chinese))

- Chinese))
- [15] 孟钰,张翔,夏军,等. 河道内生态用水保证率的概念、内涵与计算分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(2):229-238. (MENG Yu,ZHANG Xiang,XIA Jun,et al. Concept, connotation and calculation of guarantee rate of instream ecological water[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2018,26(2):229-238. (in Chinese))
- [16] 殷守敬,吴传庆,王晨,等. 淮干流岸边带生态健康遥感评估[J]. 中国环境科学,2016,36(1):299-306. (YIN Shoujing, WU Chuanqing, WANG Chen, et al. Remote sensing assessment of ecological health of the riparian buffer along Huaihe River [J]. China Environmental Science, 2016, 36 (1): 299-306. (in Chinese))
- [17] 李瑶瑶,于鲁冀,吕晓燕,等. 淮河流域(河南段)河流生态系统健康评价及分类修复模式[J]. 环境科学与技术,2016,39(7):185-192. (LI Yaoyao, YU Lujie, LYU Xiaoyan, et al. Health evaluation and repairing mode on river ecosystem of Huaihe River Basin (Henan Section) [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39 (7): 185-192. (in Chinese))
- [18] 张颖,胡金,万云,等. 基于底栖动物完整性指数 B-IBI 的淮河流域水系生态健康评价[J]. 生态与农村环境学报,2014,30(3):300-305. (ZHANG Yin, HU Jin, WAN Yun, et al. Eco-health assessment of Huaihe River system based on benthic index of biotic integrity [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30 (3): 300-305. (in Chinese))
- [19] 宋太平,左强,刘本生,等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究:以淮河流域为例[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1219-1231. (SONG Daping, ZUO Qiang, LIU Bensheng, et al. Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: a case study of the Huaihe River Basin, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (6): 1219-1231. (in Chinese))
- [20] 冯文娟,李海英,徐力刚,等. 河流健康评价:内涵、指标、方法与尺度问题探讨[J]. 灌溉排水学报,2015,34(3):34-39. (FENG Wenjuan, LI Haiyin, XU Ligang, et al. River health assessment: intension, indexes, methodes and scales [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34 (3): 34-39. (in Chinese))
- [21] 苏辉东,贾仰文,牛存稳,等. 河流健康评价指标与权重分配的统计分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):138-144. (SU Huidong, JIA Yangwen, NIU Cunwen, et al. Statistical analysis of river health assessment indicators and weight distribution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 138-144. (in Chinese))
- [22] ALBERT J S, CARVALHO T P, PETRY P, et al. Aquatic biodiversity in the Amazon: habitat specialization and geographic isolation promote species richness [J]. Animals, 2011, 1 (2): 205-241.
- [23] ZHAI X, XIA J, ZHANG Y. Water quality variation in the highly disturbed Huai River Basin, China from 1994 to 2005 by multi-statistical analyses [J]. Science of the Total Environment, 2014, 496: 594-606.
- [24] 徐宗学,顾晓昀,刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):1-7. (XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 1-7. (in Chinese))
- [25] 高凡,蓝利,黄强. 变化环境下河流健康评价研究进展[J]. 水利水电科技进展,2017,37(6):81-87. (GAO Fan, LAN Li, HUANG Qiang. Advances on evaluation of river health in changing environments [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (6): 81-87. (in Chinese))
- [26] GRUBB M, BUTLER L, TWOMEY P. Diversity and security in UK electricity generation: the influence of low-carbon objectives [J]. Energy Policy, 2006, 34 (18): 4050-4062.
- [27] 金双彦,张萍,蒋昕晖,等. 黄河内蒙古段流量过程变异程度及影响因素[J]. 人民黄河,2017,39(1):10-13. (JIN Shuangyan, ZHANG Ping, JIANG Xinhui, et al. Analysis of flow process variation degree and influencing factors in Inner Mongolia Reach of the Yellow River [J]. Yellow River, 2017, 39 (1): 10-13. (in Chinese))
- [28] BLACK A R, ROWAN J S, DUCK R W, et al. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC water framework directive [J]. Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems, 2010, 15 (5): 427-446.
- [29] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. River Research & Applications, 1998 14 (4): 329-340.

(收稿日期:2020-04-13 编辑:王 芳)

