

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.026

减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用

金菊良,李蔓,周戎星,张诗懿,白夏,崔毅

(合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽合肥 230009)

摘要:为合理精准判别河流生态健康评价等级,应用集对分析原理和五元减法集对势进行河流生态健康评价,并用五元减法集对势判断北运河生态健康发展趋势,识别、诊断影响北运河生态健康的脆弱性指标。结果表明:北运河生态整体处于亚健康状态,为改善北运河生态健康,应优先关注水质指数,在上游河段及时采取措施改善水质,并重视提升和增强全河段的河流连通性和防洪功能;基于减法集对势的河流生态健康评价方法简便、通用性强,评价结果合理,可为河流生态健康评价提供新途径。

关键词:河流生态健康;评价方法;集对分析;减法集对势法;北运河

中图分类号:TV213.4;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0198-07

Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis // JIN Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, ZHANG Shiyi, BAI Xia, CUI Yi (*School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

Abstract: In order to judge the river ecological health grade reasonably and accurately, the set pair analysis principle and five-variable subtraction set pair potential were applied to river ecological health evaluation, and the five-variable subtraction set pair potential was used to judge the trend of ecological health development of the North Canal and identify and diagnose the vulnerability indicators of river ecological health. The results show that the ecology of the North Canal is in a sub-health state. To improve the ecological health of the North Canal, priority should be given to the water quality index, and the water quality in the upstream should be improved promptly. Meanwhile, it is also important to improve the river connectivity and enhance the flood control function of the whole river section. River ecological health evaluation method based on the subtraction set pair potential is simple and universal, and the evaluation and analysis results are reasonable, which can provide a new idea for river ecological health evaluation.

Key words: river ecological health; evaluation method; set pair analysis; subtraction set pair potential method; the North Canal

目前,我国水环境恶化、水资源匮乏、水土流失、湖泊萎缩、生态退化等问题日趋严重^[1-4],开展河流保护工作以保护河流生态系统的生态健康是亟须解决的问题,而河流生态健康评价是开展河流保护工作的基础和前提^[5]。近年来,国内学者对河流生态健康评价开展了许多研究,大多借鉴国外的指示物种评价法和多指标评价法^[6]。张晶等^[7]运用模糊数学评价方法,将柯西分布函数作为隶属函数计算指标值,判断其所处健康状况级别,从而对河流健康状况做出模糊评价。朱卫红等^[8]运用层次分析法和加权平均法对图们江流域河流进行健康评价,通

过计算河流健康综合指数与各项表征指标的相关系数,识别影响图们江流域河流健康的主要指标。刘娟等^[9]采用改进的灰色关联方法计算各采样点与健康标准等级间的灰色关联度值,依据最大隶属度原则,选择最大关联度值所属健康等级确定流域生态系统健康综合状况。李海霞等^[10]运用集对分析理论对辽河保护区沈阳段河流健康程度进行了定量计算,将五元联系数运用到综合评价中,根据最大联系数原理确定河段的健康等级,相比于三元联系数,评价等级范围进一步精细化,使得同异反项中“异”的部分更为细化。从现有河流生态健康评价研究成

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407206);国家自然科学基金(52109009);中央高校基本科研业务费专项(JZ2020HGQA0202)

作者简介:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事结构水资资源学研究。E-mail: JINJL66@126.com

通信作者:周戎星(1990—),女,讲师,硕士,主要从事结构水资资源学研究。E-mail: zhourx11@163.com

果来看,多数学者根据实际情况确定评价指标、建立评价体系后,采用模糊综合评判法、层次分析法、灰色关联度法等对河流健康进行评价^[6]。现有文献缺乏对河流生态健康评价系统中影响因素的有效诊断方法,评价样本指标值与评价等级之间的符合程度有待进一步精准度量。为此,本文应用集对分析方法评价复杂河流生态健康问题^[10-11],从同异反三方面深入探讨评价样本、评价指标值与评价标准等级之间的模糊不确定性^[12-15],提出将五元减法集对势^[15-16]应用于河流生态健康趋势分析中,识别、诊断河流生态健康系统中的脆弱性指标,形成基于减法集对势的河流生态健康评价方法。

1 基于减法集对势的河流生态健康评价与诊断

利用减法集对势法对河流生态健康进行评价与诊断的过程包括以下6个步骤:

步骤1 河流生态健康评价指标的确立。为了反映河流的自然功能,需要将河流的水质、水量及河流中动植物状况纳入评价指标体系中。此外,河流还具有满足人类用水等社会功能,应选择相应的指标来衡量河流生态健康。为此,选取水质指数、水量指数、生物指数、连通性指数、防洪标准指数作为河流生态健康评价指标^[11],分别对河流水质、水量、生物状况、河流的物理结构和河流的社会功能进行评价。具体评价指标见图1。

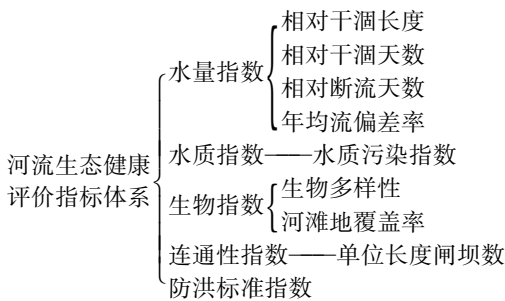


图1 河流生态健康评价指标体系

Fig. 1 River ecological health evaluation index system

步骤2 利用三标度层次分析法确定评价指标的权重^[11]。根据各元素之间重要性程度构建三标度比较矩阵,计算三标度比较矩阵的行元素之和的最大值及最小值,得出基点比较标度;将直接比较矩阵变换成间接判断矩阵,计算矩阵最大特征值和其对应的特征向量并进行一致性检验,通过检验后将此特征向量归一化,作为各指标的权重^[11]。

步骤3 构造评价样本指标值与评价标准等级的单指标系数。用集对分析构造河流生态健康评价样本*i*指标*j*的样本指标值 x_{ij} 与评价标准等级的

单指标系数 u_{ij} ($i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m$), n 为样本数, m 为指标数。取5个评价标准等级^[11],分别为健康($g=1$)、基本健康($g=2$)、亚健康($g=3$)、病态($g=4$)、濒于崩溃($g=5$),则评价样本指标值 x_{ij} 与评价标准等级 g 的系数 u_{ijg} 为^[12]

$$u_{ij1} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq s_{1j} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{1j}) / (s_{2j} - s_{1j}) & s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j} \\ -1 & x_{ij} < s_{2j} \end{cases} \quad (1)$$

$$u_{ij2} = \begin{cases} 1 - 2(s_{1j} - x_{ij}) / (s_{1j} - s_{0j}) & x_{ij} \geq s_{1j} \\ 1 & s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{2j}) / (s_{3j} - s_{2j}) & s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j} \\ -1 & x_{ij} < s_{3j} \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{ij3} = \begin{cases} -1 & x_{ij} \geq s_{1j} \\ 1 - 2(s_{2j} - x_{ij}) / (s_{2j} - s_{1j}) & s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j} \\ 1 & s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{3j}) / (s_{4j} - s_{3j}) & s_{3j} > x_{ij} \geq s_{4j} \\ -1 & x_{ij} < s_{4j} \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{ij4} = \begin{cases} -1 & x_{ij} \geq s_{2j} \\ 1 - 2(s_{3j} - x_{ij}) / (s_{3j} - s_{2j}) & s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j} \\ 1 & s_{3j} > x_{ij} \geq s_{4j} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{4j}) / (s_{5j} - s_{4j}) & s_{4j} > x_{ij} \geq s_{5j} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{ij5} = \begin{cases} -1 & x_{ij} \geq s_{3j} \\ 1 - 2(s_{4j} - x_{ij}) / (s_{4j} - s_{3j}) & s_{3j} > x_{ij} \geq s_{4j} \\ 1 & s_{4j} > x_{ij} \geq s_{5j} \end{cases} \quad (5)$$

式中: s_{gj} ($g=1,2,\dots,5$)为指标*j*的各评价标准等级的限值; s_{0j} 为指标*j*的1级评价标准等级的另一端点值^[12-13]。

样本指标值 x_{ij} 隶属于评价等级 g 的相对隶属度 v_{ijg}^* 可表示为^[11,14]

$$v_{ijg}^* = 0.5 + 0.5u_{ijg} \quad (6)$$

归一化后的单指标系数 u_{ij} 的联系分量 $v_{ijg}^{[13]}$ 为

$$v_{ijg} = \frac{v_{ijg}^*}{\sum_{g=1}^5 v_{ijg}^*} \quad (7)$$

单指标系数^[13,15]为

$$u_{ij} = v_{ij1} + v_{ij2}I_1 + v_{ij3}I_2 + v_{ij4}I_3 + v_{ij5}J \quad (8)$$

式中: v_{ij1} 、 v_{ij5} 分别为同一度分量和对立度分量; v_{ij2} 、

v_{ij3} 、 v_{ij4} 为差异度分量; I_1 、 I_2 、 I_3 分别为指标样本值与 2 级、3 级、4 级评价标准的差异度系数; J 为对立度系数^[15-17]。 $v_{ijg} \in [0, 1]$, 且满足 $\sum_{g=1}^5 v_{ijg} = 1$ 。

步骤 4 计算评价样本 i 与评价标准等级的样本联系数 u_i 。计算公式^[13, 15]为

$$u_i = v_{i1} + v_{i2}I_1 + v_{i3}I_2 + v_{i4}I_3 + v_{i5}J \quad (9)$$

其中 $v_{ig} = \sum_{j=1}^m (w_j v_{ijg})$

式中: w_j 为评价指标 j 的权重, $\sum_{j=1}^m w_j = 1$; v_{ig} 为样本联系数 u_i 的联系分量, $\sum_{g=1}^5 v_{ig} = 1$ 。

步骤 5 计算样本 i 的评价等级 h_i 。 h_i 值越小, 表示样本 i 越健康, 计算公式^[11, 14]为

$$h_i = \sum_{g=1}^5 g v_{ig} \quad (10)$$

步骤 6 根据五元减法集对势值诊断河流生态健康脆弱指标。河流生态健康在当前宏观期望层次上所处的相对确定性状态和发展趋势可用五元减法集对势来准确表述, 对于形如 $u = a + b_1 I_1 + b_2 I_2 + b_3 I_3 + cJ$ 的五元联系数, 其五元减法集对势^[15]为

$$s_f = (a - c)(1 + b_1 + b_2 + b_3) + 0.5(b_1 - b_3)(b_1 + b_2 + b_3) \quad (11)$$

式中: a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c 是联系数 u 的联系分量, 对应式 (8) (9) 中的 v_{ijg} 和 v_{ig} 。当 $a = b_1 = b_2 = b_3 = 0$ 、 $c = 1$ 时, s_f 取最小值 -1 ; 当 $b_1 = b_2 = b_3 = c = 0$ 、 $a = 1$ 时, s_f 取最大值 1 , 即 $s_f \in [-1, 1]$ 。故可根据 s_f 取值将其分为 5 个势级^[15, 18]: 反势 $s_f \in [-1, -0.6)$, 濒于崩溃; 偏反势 $s_f \in [-0.6, -0.2)$, 病态; 均势 $s_f \in [-0.2, 0.2]$, 亚健康; 偏同势 $s_f \in (0.2, 0.6]$, 基本健康; 同势 $s_f \in (0.6, 1]$, 健康。若指标的减法集对势值处于反势或偏反势, 可认为该指标导致评价对象等级较差, 其代表的方向是今后系统发展过程中应关注的调控方面^[18-22]。

2 实例分析

北运河发源于北京市昌平区燕山南麓, 属海河水系上游段, 流经北京市通州区、河北省香河县和天津市武清区至天津市大红桥入海河。20 世纪 50 年代以前, 北运河流域尚未开发, 流域基本处于自然状态; 60 年代以后, 北运河流域进行综合开发, 兴建了系列蓄水、引水、提水工程; 80 年代以后, 沿河修建了大型拦河闸和橡胶坝, 对河流系统功能产生了巨大影响, 且上游用水量大幅增加, 产生的大量工业、农业、生活废污水排入北运河流域, 使生态环境恶

化, 造成水质污染, 此外, 干旱、断流的出现, 使北运河流域的水生态问题更为突出^[23-24]。根据海河流域北运河的水系情况^[11], 采用基于减法集对势的河流生态健康评价模型, 对北运河的生态健康状况进行评价。

2.1 评价结果

以北运河 4 个河段为评价样本, 从上游到下游分别为北关闸—牛牧屯 (河段 1)、牛牧屯—土门楼 (河段 2)、土门楼—筐儿港 (河段 3) 和筐儿港—屈家店 (河段 4); 以水量指数、水质指数、生物指数、连通性指数和防洪标准指数为评价指标, 利用三标度法计算得到这 5 个评价指标的权重分别为 0.263、0.419、0.160、0.062 和 0.096^[11]。将文献[11]中北运河各河段生态健康评价样本指标值代入式 (1) ~ (5), 得到评价样本指标值与评价标准等级的联系数, 代入式 (6) ~ (8) 计算得到各单指标联系数分量, 由式 (9) 得到各样本联系数分量, 计算结果如表 1 所示。利用式 (10) 计算各河段综合评价等级值, 如表 2 所示。

表 1 北运河生态健康评价样本联系数分量

Table 1 Sample connection number components for ecological health assessment of the North Canal

河段	样本联系数分量				
	$g=1$	$g=2$	$g=3$	$g=4$	$g=5$
1	0.0533	0.1365	0.2484	0.3531	0.2087
2	0.0800	0.1365	0.3295	0.3531	0.1009
3	0.0962	0.1204	0.3326	0.3531	0.0977
4	0.0962	0.1707	0.3410	0.3028	0.0893

表 2 不同方法对北运河各河段生态健康评价结果对比

Table 2 Comparison of ecological health evaluation results of different methods in each section of the North Canal

评价方法	评价等级值				综合评价等级值
	河段 1	河段 2	河段 3	河段 4	
可变模糊集对分析 ^[11]	3.117	2.944	2.986	2.938	2.997
五元联系数方法	3.528	3.258	3.236	3.119	3.285

将文献[11]中利用可变模糊集对分析得到的北运河各河段的生态健康情况与各评价等级的联系数代入式 (6) (7) (10), 计算得到各河段的综合评价等级值, 与本文五元联系数方法计算结果进行对比, 如表 2 所示。

根据可变模糊集对分析结果, 北运河生态健康接近等级 3, 即亚健康状态。根据五元联系数方法的结果, 北运河整体生态健康比亚健康差, 偏向病态。据调查, 由于对北运河流域的综合开发, 河道上兴建了多种控制性建筑物, 闸坝拦蓄水量大; 上下游河道引水量不均, 上游过度引水, 下游引水不足。此外, 人类活动耗水量剧增, 这些因素对北运河水量、

生物、连通性、防洪能力产生很大影响^[24]。北运河水质监测数据显示,京津地区工业快速发展、大量排放污染物对河流造成了严重污染,北运河水面几乎全被浮萍覆盖,水质为重度污染^[25]。由此可知,本文方法评价结果与北运河实际情况一致。

由表 2 可知,北运河上游至下游河段河流生态健康状态逐渐向好。根据北运河各河段生态健康评价样本指标值^[11],河段 3 的生态健康状况优于河段 2,而可变模糊集对分析所得的两个河段的评价等级值与实际情况相反。本文结论与水质指数和生物指数变化趋势一致,所得河流生态健康评价结果更加合理可靠。

运用式(11)对 4 个河段 5 个指标的五元减法集对势进行计算,各指标联系数分量及减法集对势值见表 3,根据表 1 中各样本联系数分量由式(11)计算可得各河段的减法集对势值。

2.2 分析与讨论

a. 基于各样本联系数分量计算得到的各河段减法集对势结果为:河段 1 的减法集对势为 -0.3503,处于偏反势,为病态;河段 2 的减法集对势为 -0.1266,处于均势,为亚健康;河段 3 的减法集对势为 -0.0967,处于均势,为亚健康;河段 4 的减法集对势为 -0.0415,处于均势,为亚健康。

b. 由表 3 可知:①河段 1~4 的水质指数的态势变化趋势为反势—偏反势—均势,河流生态健康

评价等级也从病态变为亚健康,说明北运河上游至下游水质指数的整体趋势是向减法集对势增大的方向,也就是脆弱性减小的方向发展,说明北运河的水质从上游至下游不断改善。这是由于北运河缺少天然径流入河,河段 1 靠近北京,周边工厂众多,沿岸有机污染物的排入和污水厂出水较多,水质较差,下游河段水体自然净化,水质变好^[26]。②根据五元减法集对势计算结果,4 个河段的连通性指数和防洪标准指数均处于反势状态,因此,要改善北运河生态健康,应关注河流的连通性和防洪功能。③4 个河段中水质指数减法集对势最低的是河段 1,为 -0.6675;4 个河段连通性指数和防洪标准指数减法集对势均一致,分别为 -0.9444 和 -0.8750,都处于反势状态。仅从数值来看,连通性指数与防洪标准指数相较于水质指数,更偏向反势,但水质指数、连通性指数、防洪标准指数的权重分别为 0.419、0.062 和 0.096,水质指数对综合评价结果的影响远大于其他两项,所以影响北运河河流健康脆弱性最重要的指标为水质指数。

c. 将文献[11]中的 4 种评价方法所得结果与减法集对势方法所得结果进行对比,如表 4 所示。由表 4 可见:①运用可变模糊集对分析方法得出 4 个河段都为亚健康状态;运用集对分析方法得出河段 1 为亚健康状态,河段 4 为病态,河段 4 的健康状况相较于河段 1 更差。由文献[11]可知这两个河

表 3 北运河各河段生态健康评价单指标联系数分量及减法集对势值

Table 3 Single index connection number component and subtraction set pair potential value of each river section for ecological health evaluation of the North Canal

河段	指标	单指标联系数分量					s_f
		$g=1$	$g=2$	$g=3$	$g=4$	$g=5$	
1	水量指数	0.0000	0.2150	0.5000	0.2850	0.0000	-0.0350
	水质指数	0.0000	0.0000	0.2150	0.5000	0.2850	-0.6675
	生物指数	0.3325	0.5000	0.1675	0.0000	0.0000	0.7213
	连通性指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	-0.9444
	防洪标准指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.5000	-0.8750
2	水量指数	0.0000	0.2150	0.5000	0.2850	0.0000	-0.0350
	水质指数	0.0000	0.0000	0.4725	0.5000	0.0275	-0.2974
	生物指数	0.5000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8750
	连通性指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	-0.9444
	防洪标准指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.5000	-0.8750
3	水量指数	0.0000	0.2150	0.5000	0.2850	0.0000	-0.0350
	水质指数	0.0000	0.0000	0.4800	0.5000	0.0200	-0.2846
	生物指数	0.6006	0.3994	0.0000	0.0000	0.0000	0.9202
	连通性指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	-0.9444
	防洪标准指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.5000	-0.8750
4	水量指数	0.0000	0.2150	0.5000	0.2850	0.0000	-0.0350
	水质指数	0.0000	0.1200	0.5000	0.3800	0.0000	-0.1300
	生物指数	0.6006	0.3994	0.0000	0.0000	0.0000	0.9202
	连通性指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	-0.9444
	防洪标准指数	0.0000	0.0000	0.0000	0.5000	0.5000	-0.8750

表4 评价结果比较

Table 4 Comparison of evaluation results

评价方法	河段1	河段2	河段3	河段4
可变模糊集对分析 ^[11]	亚健康	亚健康	亚健康	亚健康
集对分析 ^[11]	亚健康	亚健康	亚健康	病态
模糊综合评判 ^[11]	病态	病态	亚健康	亚健康
灰色综合评判 ^[11]	病态	病态	亚健康	亚健康
减法集对势法	病态	亚健康	亚健康	亚健康

段的水量指数、连通性指数、防洪标准指数是相同的,但河段4的水质指数和生物指数均大于河段1,河段4的健康状况应优于河段1。集对分析方法得出的结论与实际不符。②从趋势来看,模糊综合评判法、灰色综合评判法与减法集对势方法得出的结果是一致的,即北运河从上游河段至下游河段,健康状况从病态发展至亚健康状态,只有河段2的结果存在差异。这是由于河段1~3的水量指数、连通性指数、防洪标准指数均无差异,而河段1~3的水质指数分别为28.6、38.9和39.2,生物指数分别为73.3、80.0和86.7,均呈逐渐增大的趋势。③从指标数值来看,河段2的水质指数与河段3更接近,且远高于河段1;考虑水质指数的指标权重为0.419,生物指数权重为0.160,因此本文方法评价河段2的健康状况与河段3一致是更合理的。

d. 利用减法集对势方法,不仅可以提高河段健康等级判别的准确性,在评价结果都处于同一级时,还可凭借减法集对势值的大小做出准确区分。河段2~4都处于亚健康状态,其对应的减法集对势分别为-0.1266、-0.0967和-0.0415,表明河段2~4生态健康状况逐渐向好。

e. 文献[16]中瓦埠湖水生态健康评估指标等级标准直接采用定量指标,如根据每升水中浮游植物的含量将生态子系统中浮游植物指标分为不同等级,由于湖水中不同物质含量不同,所以每个指标的等级标准都有差异。本文采用河流生态健康评价等级标准^[11],根据定性指标符合评价目标的程度进行量化,如水量处于“水量充沛,常年流动”的状态,则认为其处于健康等级,对应的评价标准是80~100,实现了评价指标从定性到定量的转变。本文标准相较文献[16],可更直观反映出河流健康状况,且各评价指标都采用百分制,评价标准相同,计算简便。用式(1)~(5)和式(11)计算评价样本指标值与评价标准等级的联系系数及集对势,进一步挖掘了符合评价等级标准的单指标评价信息、联系系数中符合各生态健康评价等级的关系结构信息。文献[16]采用五元减法集对势识别出瓦埠湖水生态健康系统中的病态因子,本文方法通过五元减法集对势识别出河流生态健康系统中的脆弱性因子,将减

法集对势的5个势级与河流生态健康5个等级一一对应,通过五元减法集对势值确定河流生态健康等级。文献[16]是从时间尺度上评价瓦埠湖1980—2015年的水生态健康发展趋势,而本文方法则主要是从空间尺度上研究北运河上游至下游河段生态健康的变化趋势,可直观体现出北运河在同一时期内的生态健康变化趋势。

3 结论

a. 采用联系系数方法可精准反映河流生态健康评价样本指标值与评价等级联系程度的不确定性,提高河流生态健康评价等级判别的准确性。

b. 将五元联系系数减法集对势应用于北运河生态健康状况评价中,诊断、识别出水质指数为河流生态健康系统的脆弱性因子。从上游至下游河段减法集对势呈增加的趋势,河流生态健康向脆弱性减小的方向发展,生态健康状况不断改善。

c. 基于减法集对势的河流生态健康评价方法合理可靠,适用性强,可为合理准确判别河流生态健康评价等级、判别河流生态系统发展趋势及识别系统中脆弱性因子提供方法参考,为河流生态健康评价提供新途径。

参考文献:

- [1] 杨文慧,严忠民,吴建华. 河流健康评价的研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(6):5-9. (YANG Wenhui, YAN Zhongmin, WU Jianhua. Advances in river health assessment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(6): 5-9. (in Chinese))
- [2] 何逢志,任泽,董笑语,等. 神农架林区河流生态系统健康评价[J]. 应用与环境生物学报,2014,20(1):35-39. (HE Fengzhi, REN Ze, DONG Xiaoyu, et al. River ecosystem health assessment of the Shennongjia Forest Region[J]. Chinese Journal of Applied and Environment Biology, 2014, 20(1): 35-39. (in Chinese))
- [3] 郝弟,张淑荣,丁爱中,等. 河流生态系统服务功能研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(1):106-111. (HAO Di, ZHANG Shurong, DING Aizhong, et al. Research Progress on service functions of river ecosystem [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 106-111. (in Chinese))
- [4] 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(4):602-608. (WU E'nuo, YANG Kai, CHE Yue, et al. Characterization of rivers health status and its assessment[J]. Advances in Water Science, 2005(4): 602-608. (in Chinese))
- [5] 欧阳莉莉,丁瑶,高平川,等. 成都市河流生态健康评价

- [J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 155-163. (OUYANG Lili, DING Yao, GAO Pingchuan, et al. Health assessment of river ecosystem in Chengdu, China [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(6): 155-163. (in Chinese))
- [6] 柴朝晖, 姚仕明. 河流生态研究热点与进展[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 68-74. (CHAI Zhaohui, YAO Shiming. Several hotspots and progress of river ecology research [J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 68-74. (in Chinese))
- [7] 张晶, 董哲仁, 孙东亚, 等. 河流健康全指标体系的模糊数学评价方法[J]. 水利水电技术, 2010, 41(12): 16-21. (ZHANG Jing, DONG Zheren, SUN Dongya, et al. Assessment method for a fuzzy theory based complete river health index system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(12): 16-21. (in Chinese))
- [8] 朱卫红, 曹光兰, 李莹, 等. 图们江流域河流生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977. (ZHU Weihong, CAO Guanglan, LI Ying, et al. Research on the health assessment of river ecosystem in the area of Tumen River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3969-3977. (in Chinese))
- [9] 刘娟, 王飞, 韩文辉, 等. 汾河上中游流域生态系统健康评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 91-98. (LIU Juan, WANG Fei, HAN Wenhui, et al. The ecosystem health evaluation in the upper and middle reaches of Fen River Basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(3): 91-98. (in Chinese))
- [10] 李海霞, 王育鹏, 徐笠, 等. 基于五元联系数法的辽河保护区沈阳段河流健康评价[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(4): 562-571. (LI Haixia, WANG Yupeng, XU Li, et al. River health evaluation in Shenyang section of Liaohe Conservation Area based on five-element relation number method [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 562-571. (in Chinese))
- [11] 李文君, 邱林, 陈晓楠, 等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan, et al. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 775-782. (in Chinese))
- [12] 李凡修, 辛焰, 陈武. 集对分析用于湖泊富营养化评价研究[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(6): 10-11. (LI Fanxiu, XIN Yan, CHEN Wu. Set pair analysis method of water quality eutrophication assessment of lakes [J]. Chongqing Environmental Science, 2000, 22(6): 10-11. (in Chinese))
- [13] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [14] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 水文水资源学家陈守煜先生学术研究的知识图谱分析[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1282-1290. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Knowledge map analysis of academic research of Mr. Chen Shouyu, hydrological and water resources specialist [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1282-1290. (in Chinese))
- [15] 金菊良, 陈鹏飞, 张浩宇, 等. 五元减法集对势及其在水资源承载力趋势分析中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 30-35. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, ZHANG Haoyu, et al. Five-variable subtraction set pair potential and its application in trend analysis of water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 30-35. (in Chinese))
- [16] 董涛, 金菊良, 王振龙, 等. 基于风险矩阵和五元减法集对势的湖泊水生态健康动态诊断评估[J]. 环境工程, 2020, 38(10): 90-96. (DONG Tao, JIN Juliang, WANG Zhenlong, et al. Dynamic diagnosis and evaluation method of lake water ecological health based on risk matrix and five element subtraction set pair potential [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(10): 90-96. (in Chinese))
- [17] 金菊良, 沈时兴, 郇建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [18] 金菊良, 周戎星, 崔毅, 等. 结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7-19. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 金菊良, 汤睿, 周戎星, 等. 基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4):1-6. (JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4):1-6. (in Chinese))
- [21] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3):1-6. (JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3):1-6. (in Chinese))
- [22] 胡启玲, 董增川, 杨雁飞, 等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5):425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(5):425-432. (in Chinese))
- [23] 宋刚福, 沈冰. 拉开档次法的改进及其在河流生态健康评价中的应用[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7):1891-1896. (SONG Gangfu, SHEN Bing. Improvement of scatter degree method and its application in evaluating river ecosystem health [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7):1891-1896. (in Chinese))
- [24] 谷红梅, 任影, 肖芳, 等. 北运河闸坝生态调度研究[J]. *华北水利水电学院学报*, 2012, 33(3):30-33. (GU Hongmei, REN Ying, XIAO Fang, et al. Ecological regulation of gate dam in North Canal [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2012, 33(3):30-33. (in Chinese))
- [25] 李佳, 李思悦, 谭香, 等. 南水北调中线工程总干渠沿线经过河流水质评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2008(5):693-698. (LI Jia, LI Siyue, TAN Xiang, et al. Water quality appraisal along the water conveyance system of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008(5):693-698. (in Chinese))
- [26] 于洋, 王晓燕, 张鹏飞. 北运河水体浮游细菌群落的空间分布特征及其与水质的关系[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(3):337-344. (YU Yang, WANG Xiaoyan, ZHANG Pengfei. Spatial distribution of planktonic bacterial community and its relationship to water quality in Beiyun River [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(3):337-344. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-25 编辑:施业)

(上接第 181 页)

- [15] 王家彪, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 基于耦合概率密度方法的河渠突发水污染溯源[J]. *水利学报*, 2015, 46(11):1280-1289. (WANG Jiabiao, LEI Xiaohui, LIAO Weihong, et al. Source identification for river sudden water contamination based on coupled probability density function method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11):1280-1289. (in Chinese))
- [16] 王新龙, 薛晓鹏, 孙如飞. 基于粒子群与知识图谱的突发水污染事件溯源方法[J]. *水力发电*, 2020, 46(2):17-21. (WANG Xinlong, XUE Xiaopeng, SUN Rufe. Source identification of sudden water pollution events based on particle swarm method and knowledge map [J]. *Water Power*, 2020, 46(2):17-21. (in Chinese))
- [17] 蓝志峰, 肖桂荣. 基于流域要素空间关系的水污染溯源研究[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1):56-62. (LAN Zhifeng, XIAO Guirong. Water pollution traceability based on spatial relationship of basin elements [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1):56-62. (in Chinese))
- [18] MOHAMED M M, JONATHAN L G, GINA L O, et al. A cloud-based flood warning system for forecasting impacts to transportation infrastructure systems [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2018, 107:231-244.
- [19] 张万顺, 王浩. 流域水环境水生态智慧化管理云平台及应用[J]. *水利学报*, 2021, 52(2):142-149. (ZHANG Wanshun, WANG Hao. Cloud platform and application of watershed water environment and aquatic ecology intelligent management [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(2):142-149. (in Chinese))
- [20] ZHANG W. Applying numerical models for water environments in watersheds: case studies of Tai Lake, middle and lower Han River and East Lake in China [M]. London: InTech, 2015.
- [21] WANG Y, ENGEL B A, HUANG P, et al. Accurately early warning to water quality pollutant risk by mobile model system with optimization technology [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 208:122-133.

(收稿日期:2021-04-10 编辑:王芳)

