

引用格式:胡东滨,蔡洪鹏,陈晓红,等.基于证据推理的流域水质综合评价法:以湘江水质评价为例[J].资源科学,2019,41(11):2020–2031. [Hu D B, Cai H P, Chen X H, et al. Comprehensive assessment of water quality based on evidential reasoning: Taking the Xiangjiang River as an example[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 2020–2031.] DOI: 10.18402/resci.2019.11.06

# 基于证据推理的流域水质综合评价法 ——以湘江水质评价为例

胡东滨<sup>1,3</sup>,蔡洪鹏<sup>1</sup>,陈晓红<sup>1,3</sup>,孟凡永<sup>1</sup>,罗岳平<sup>2,3</sup>,潘海婷<sup>2,3</sup>

(1. 中南大学商学院,长沙 410083;2. 湖南省环境监测中心站,长沙 410014;  
3. 湖南省两型社会与生态文明协同创新中心,长沙 410083)

**摘要:**水质综合评价是水环境综合整治的重要基础性工作,通过科学准确的评价,才能对水质治理做出科学的治理规划和有效的治理措施。本文基于证据推理理论,提出了一种水质综合评价方法。通过建立水质综合评估模型和信度分布函数,将水质指标的监测值转化为各评估等级的置信度;结合证据推理的合成规则和算法,将隶属于同一评估等级的指标进行证据递归合成,计算出各评估等级的概率分布;并引入效用理论,实现水质的相互比较。本文以湘江为例,对其2011—2017年水质进行综合评估。同时,将本方法与水质评价中应用较为广泛的模糊综合评价法、灰色聚类法进行比较,结果显示,基于证据推理的水质综合评价法更加科学准确,能有效地反映水质的实际情况。本文对流域内不同空间、时间点水质的多指标数据融合和不确定性数据处理具有参考价值,也为湘江流域的水质精准治理和环境管理决策提供支持。

**关键词:**水质综合评价;水环境不确定性;置信度评估;证据组合规则;证据推理;效用理论;湘江流域

DOI: 10.18402/resci.2019.11.06

## 1 引言

水对于社会和经济起着至关重要的作用。但伴随着人们生活水平的提高和国民经济的快速发展,水污染问题越来越多<sup>[1]</sup>。特别是像印度、尼泊尔、孟加拉和中国这样的发展中国家,为了提高城镇率和GDP,大量的城市活动对水资源造成了严重的污染<sup>[2-5]</sup>。2015年世界经济论坛中,水污染及水资源短缺问题已成为全球最受关注的10大问题之一,世界上每年有300~400万人死于和水污染相关的疾病<sup>[6]</sup>。水污染最终威胁着人类的健康,影响农业和工业的发展前景,并危及生态系统<sup>[7,8]</sup>。解决水污染问题,首要任务就是对水体进行科学的评估和分析,找出污染源头和主要污染因素,并对水质进行针对性治理<sup>[9]</sup>。

目前,相关环境部门多采用中国《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中的单因子评价法作为水质评价方法,选择水质最差的单项指标所在的水质类别作为所属水域的综合水质类别,该方法无法科学有效地评估水体的综合水质,同一水质类别之间也无法进行有效比较<sup>[10]</sup>。在学术界,关于水质评价方法的研究,多数学者关注水质指数法,并根据具体的问题对其进行了改进。①在水质评价方法方面,Li等<sup>[11]</sup>将功能数据分析(Functional Data Analysis)理论引入到模糊物元模型中,提出了一个动态模糊物元模型(Dynamic Fuzzy Matter-Element Model),并利用2011—2012年鄱阳湖水水质数据对该模型进行了验证。Wu等<sup>[12]</sup>提出了熵权水质指数(Entropy Weighted Water Quality Index)评价法,并用该方

收稿日期:2017-01-05;修订日期:2019-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(71431006;91846301)。

作者简介:胡东滨,男,湖南长沙人,教授,博士,主要从事环境大数据研究。E-mail: hdbin@163.com

通讯作者:蔡洪鹏,女,陕西安康人,硕士,主要从事环境大数据研究。E-mail: hongpeng\_carmen@163.com

法对中国西北沙湖进行了湖泊水质综合评价。Zhang等<sup>[13]</sup>为了衡量美国各州的水质标准,提出了一种多指标达标评价法来综合评估水质达标情况。Miao等<sup>[14]</sup>以临沂开发区内2条主要城市河流的水质为研究对象,选取了2014—2017年水质监测数据中的24个指标,提出了加拿大水质指数(Canadian Water Quality Index)评价法,该方法借助卫星遥感技术,通过高频率的采样数据,弥补评估的局限性,能较好地反映实际水质状况。②在指标体系构建方面,Zhang等<sup>[15]</sup>利用重金属污染指数和人类健康风险指数对流域水质进行评价,然后基于聚类分析和GIS可视化技术对流域污染和管理等级进行分类,提出了一种有效的流域管理方法。③在指标权重确定方面,Singh等<sup>[16]</sup>提出了一种广义综合水质指数(Composite Water Quality Index)评价法,根据社会 and 环境影响选取了25个水质指标,这些指标可以用相同的准则进行评估,然后利用层次分析法和多准则决策分析工具计算这些指标的权重,最终按照得分进行水质综合评价。Kunwar等<sup>[17]</sup>针对水质评价指标中参数较多且相互矛盾的问题,引入了多目标决策方法(Multi-Objective Decision-Making Method),最后证明了该方法在复杂情景下评价的有效性。除此之外,比较典型的水质评价方法还有水质标识指数法<sup>[18]</sup>、模糊综合评价法<sup>[19,20]</sup>等。

从现有研究文献发现,目前水质评价方法的不足综合起来表现在以下2个方面:①在数据处理方面,学者们利用卫星遥感技术替换原始的人工采样,虽然提高了采样时效性和数据丰富度,但在监测数据的融合和标准化处理方面研究不足,不同灵敏度的指标采用同一套评估标准进行归一化处理和融合,会弱化高灵敏度指标变化对水域功能的影响,使得最终的结果具有片面性、不够精确。②在水质评价时,只考虑了在可评价范围内的监测数据,且只适用于数据完备确定的情形,没有考虑不确定性数据和缺口数据的处理方法。

流域水质评价涉及到多种因素,并且存在信息缺失和信息不完备的现象,属于不确定性多属性决策问题。针对该类问题,Dempster<sup>[21]</sup>提出了一种不精确推理理论,即证据理论,用于处理不确定信息

或不完备信息。目前证据理论已广泛应用于信号识别<sup>[22]</sup>、声音识别<sup>[23]</sup>、系统可靠性设计<sup>[24]</sup>、故障诊断<sup>[25]</sup>、绩效评估<sup>[26]</sup>等许多具有不确定信息的领域。

鉴于证据理论在不确定信息处理和证据合成方面具备独特的优势,本文将其应用于水质评价领域,提出了基于证据推理的水质综合评价方法。通过建立识别框架,解决评价指标划分的不确定性问题;并引用Dempster组合规则,计算各个证据的基本概率,解决了多指标的组合处理问题;最后引入效用函数,给不同的等级分配对应的效用值,通过加权计算,实现同一水域多个断面的水质综合排序。本文考虑了流域内不同空间、时间点水质的多指标数据融合和不确定性数据处理,计算出的指标等级隶属度和水质等级隶属度更能直观反映水质状况,提高了对水质问题的理解。此外,湘江流域内重工业、农业和城镇化的快速发展,对湘江水质造成很大影响,近年来政府采取很多保护与治理措施,改善湘江流域环境质量。本文以湘江流域水质评价为例,水质评价结果将为湘江流域的水质精准治理和环境管理政策的决策提供支持。

## 2 基于证据推理的水质综合评价方法

### 2.1 证据组合规则及算法

在Dempster/Shافر证据理论(D-S理论)中,一个样本空间称之为辨识框架,定义为 $\Theta$ ,其中

$$\Theta = \{H_1, H_2, \dots, H_N\} \quad (1)$$

式(1)是关于某个决策问题所有可能结果(评估等级)的集合。 $\Theta$ 内的所有对象两两互斥,且穷尽完备。如果 $\Theta$ 内所有的子集用 $2^\Theta$ 表示,则有

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{H_1\}, \dots, \{H_N\}, \{H_1, H_2\}, \dots, \{H_1, H_N\}, \dots, \Theta\} \quad (2)$$

如果有集函数 $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ ,则称 $m$ 为 $\Theta$ 上的一个基本概率分配,简称mass函数,其满足 $m(\emptyset)=0$ 且 $m(\Theta)=1$ , $\emptyset$ 表示空集, $\Theta$ 表示全集。对于任一子集 $\Psi(\Psi \subseteq \Theta)$ , $m(\Psi)$ 表示证据支持命题 $\Psi$ 本身的程度。假设在 $\Theta$ 上有2份证据支持子集 $\Psi(\Psi \subseteq \Theta)$ ,其基本概率分布分别是 $m_1(\Psi)$ 和 $m_2(\Psi)$ ,2份证据的组合概率分布表示为 $m_{12}(\Psi)$ 。D-S理论的证据组合规则为:

$$[m_1 \oplus m_2](\Psi) = \begin{cases} 0, \Psi = \emptyset \\ \frac{\sum_{A \cap B = \Psi} m_1(A)m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)}, \Psi \neq \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A$ 、 $B$  表示  $\Theta$  上的 2 个子集。在证据组合规则中,  $m_{12}(\Psi)$  由  $m_1(\Psi)$  和  $m_2(\Psi)$  的正交和计算而来。 $\sum_{A \cap B = \Psi} m_1(A)m_2(B)$  表示 2 个子集  $A$ 、 $B$  的交集为  $\Psi(\Psi \neq \emptyset)$  的所有子集概率乘积之和; 而  $1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)$  为归一化因子, 其中  $\sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)$  表示 2 个子集的交集为空集的所有子集概率乘积之和, 用  $K$  表示, 反映 2 份证据之间的冲突度。

Dempster 的证据组合规则符合交换律和结合律, 即  $m_1 \oplus m_2 = m_2 \oplus m_1$  (交换律), 和  $(m_1 \oplus m_2) \oplus m_3 = m_1 \oplus (m_2 \oplus m_3)$  (结合律)。这些规律使得证据之间可以以任何顺序进行组合。

很显然, 从上面的组合规则中可以看出, 要计算组合概率, 我们需要列举出所有子集的交集为  $\Psi$  的集合, 其计算量大。因此, 在这里引入证据组合法简化计算的复杂性<sup>[27]</sup>。

## 2.2 水质综合评估模型

水质评估涉及多个水质指标, 且各指标的危害程度不尽相同, 属于不确定性多属性决策问题。对于水质划分的不确定性问题, 建立其评估模型, 如图 1 所示:

在水质评估过程中, 本文将一个断面或一条河流的水质综合评价称为评价方案。一个评价方案  $a_i$  有  $L$  个参与评价的水质指标, 则指标集合表示如下:

$$E = \{e_1, \dots, e_i, \dots, e_L\} \quad (4)$$

式中:  $e_i(i=1, 2, \dots, L)$  表示评价方案  $a_i$  (如“湘江”)

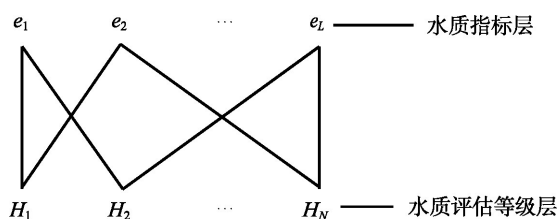


图 1 水质综合评估模型

Figure 1 Comprehensive assessment model of water quality

中第  $i$  个评价指标。假设  $a_i$  有  $N$  个评估等级, 则评估等级集合表示如下:

$$H = \{H_1, \dots, H_n, \dots, H_N\} \quad (5)$$

式中:  $H_n(n=1, 2, \dots, N)$  表示第  $n$  个评估等级, 其中  $H_{n+1}$  的级别优于  $H_n$ 。

## 2.3 水质评价指标关于水质评估等级的置信度评估

如果用  $S(e_i(a_i))$  表示方案  $a_i$  的评价指标  $e_i$  支持  $H_n$  的置信度为  $\beta_{n,i}(a_i)$  的集合, 则表示为:

$$S(e_i(a_i)) = \{(H_n, \beta_{n,i}(a_i)), n=1, 2, \dots, N, i=1, 2, \dots, L\} \quad (6)$$

式中:  $\beta_{n,i}(a_i) \geq 0$ ,  $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_i) \leq 1$ 。如果  $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_i) = 1$ ,

则说明  $S(e_i(a_i))$  是完全评估, 否则, 即为不完全评估。由于参与评价的水质指标是定量数据, 只可能隶属于一个评价标准区间, 即一个评价指标至多支持 2 个评估等级, 因此, 本文采用完全评估。

对于方案  $a_i$  关于  $e_i$  的监测值  $h_i(a_i)$ , 其支持  $H_n$  和  $H_{n+1}$  的置信度满足:

$$\beta_{n,i}(e_i(a_i)) = \frac{h_{n+1,i} - h_i(a_i)}{h_{n+1,i} - h_{n,i}}, h_{n,i} \leq h_i(a_i) \leq h_{n+1,i} \quad (7)$$

$$\beta_{n+1,i}(e_i(a_i)) = 1 - \beta_{n,i}(e_i(a_i)) \quad (8)$$

式中:  $h_{n,i}$  和  $h_{n+1,i}$  分别表示评价指标  $e_i$  在评估等级  $H_n$  和  $H_{n+1}$  的限值。

## 2.4 水质评价指标关于水质评估等级的基本概率分布

水质指标  $e_i$  同时支持水质评估等级  $H_n$  和  $H_{n+1}$ , 用  $e_{n,n+1}^i$  表示, 则评价指标  $e_{n,n+1}^i$  在评估等级  $H_n$  上的概率分布表示为  $m(H_n/e_{n,n+1}^i)$ , 简化为  $m_n^{n,i}$ ; 同理,  $H_{n+1}$  的概率分布为  $m(H_{n+1}/e_{n,n+1}^i)$ , 简化为  $m_{n+1}^{n,i}$ ; 未被估算到任何评估等级的  $\Theta$  的基本概率为  $m(\Theta/e_{n,n+1}^i)$ , 简化为  $m_\Theta^{n,i}$ 。

对于多指标水质综合评估, 不同评价指标对水质的影响程度不尽相同, 用  $w_i$  表示评价指标  $e_i$  的归一化权重, 则  $m(H_n/e_{n,n+1}^i)$  可以表示为:

$$m_n^{n,i} = w_i \beta_{n,i}(a_i) \quad (9)$$

$$m_{n+1}^{n,i} = w_i \beta_{n+1,i}(a_i) \quad (10)$$



2019年11月

$$m_{\theta}^{n,i} = 1 - (m_n^{n,i} + m_{n+1}^{n,i}) \quad (11)$$

本文借鉴文献[28]的思路,在权重的确定上采用等权法,为每一个评价指标赋值。 $L$ 个评价指标的权重集合用  $W = (w_1, w_2, \dots, w_L)$  表示,并且归一化的权重满足以下条件:

$$\sum_{i=1}^L w_i = 1, w_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, L \quad (12)$$

如果方案  $a_i$  的评价指标  $e_i$  同时支持  $H_n$  和(或)  $H_{n+1}$ ,则表示为  $e_{n,n+1}^i$ 。将评价指标集合  $E$  划分成  $N-1$  个子集  $S_n$ ,表示为:

$$S_n = \{e_{n,n+1}^1, e_{n,n+1}^2, \dots, e_{n,n+1}^{R_n}\}, \sum_{n=1}^{N-1} R_n = L, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (13)$$

$S_n$  表示支持  $H_n$  和(或)  $H_{n+1}$  的所有水质指标的集合,  $R_n$  表示  $S_n$  集合中的评价指标个数。则对于  $R_n$  个评价指标  $e_{n,n+1}^i$  支持  $H_n, H_{n+1}$  和  $\Theta$  的基本概率分布矩阵,表示如下:

$$M^n = \begin{bmatrix} m_n^{n,1} & m_{n+1}^{n,1} & m_{\theta}^{n,1} \\ m_n^{n,2} & m_{n+1}^{n,2} & m_{\theta}^{n,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_n^{n,R_n} & m_{n+1}^{n,R_n} & m_{\theta}^{n,R_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{e_{n,n+1}^1\} \\ \{e_{n,n+1}^2\} \\ \dots \\ \{e_{n,n+1}^{R_n}\} \end{Bmatrix} (n = 1, 2, \dots, N-1) \quad (14)$$

如果  $R_n = 0$ ,那么  $m_n^{n,i} = 0, m_{n+1}^{n,i} = 0, m_{\theta}^{n,i} = 1$ ; 如果  $R_n = 1$ ,那么  $m_n^{n,i} = \beta_{n,i}(a_i), m_{n+1}^{n,i} = \beta_{n+1,i}(a_i), m_{\theta}^{n,i} = \beta_{n+1,i}(a_i)$ ; 否则根据 D-S 证据组合规则和 Yang<sup>[28]</sup> 的证据合成算法,对同一等级的多份证据进行递归合成。如果用  $m_n^{(i)}$  和  $m_{n+1}^{(i)}$  表示前  $i$  个评价指标隶属于  $H_n$  和  $H_{n+1}$  的部分组合概率,则前  $N-1$  个指标的部分组合概率为:

$$\{H_n\}:m_n^{(i+1)} = K^{I(i+1)}(m_n^{(i)} m_{n,i+1} + m_n^{(i)} m_{\theta,i+1} + m_{\theta}^{(i)} m_{n,i+1}) \quad (15)$$

$$\{H_{n+1}\}:m_{n+1}^{(i+1)} = K^{I(i+1)}(m_{n+1}^{(i)} m_{n+1,i+1} + m_{n+1}^{(i)} m_{\theta,i+1} + m_{\theta}^{(i)} m_{n+1,i+1}) \quad (16)$$

$$\{\theta\}:m_{\theta}^{(i+1)} = K^{I(i+1)} m_{\theta}^{(i)} m_{\theta,i+1} \quad (17)$$

$$K^{I(i+1)} = [1 - (m_n^{(i)} m_{n+1,i+1} + m_{n+1}^{(i)} m_{n,i+1})]^{-1} \quad (18)$$

$n = 1, 2, \dots, N-1$

根据部分证据组合算法,求得子集  $S_n$  支持  $H_n$ ,

$H_{n+1}$  和  $\Theta$  的基本概率分布,分别表示为  $m_n^{I(R_n)}$ ,  $m_{n+1}^{I(R_n)}$  和  $m_{\theta}^{I(R_n)}$ ,这些概率分布称之为局部概率分布,则  $N-1$  个子集的局部概率分布矩阵如下:

$$M = \begin{bmatrix} m_1^{I(R_1)} & m_2^{I(R_1)} & m_{\theta}^{I(R_1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_n^{I(R_n)} & m_{n+1}^{I(R_n)} & m_{\theta}^{I(R_n)} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{N-1}^{I(R_{N-1})} & m_N^{I(R_{N-1})} & m_{\theta}^{I(R_{N-1})} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{e_{1,2}^{I(R_1)}\} \\ \dots \\ \{e_{n,n+1}^{I(R_n)}\} \\ \dots \\ \{e_{N-1,N}^{I(R_{N-1})}\} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$e_{n,n+1}^{I(R_n)}$  即为子集  $S_n$ ,满足

$$e_{n,n+1}^{I(R_n)} = \{e_{n,n+1}^1, \dots, e_{n,n+1}^i, \dots, e_{n,n+1}^{R_n}\} = S_n \quad (20)$$

## 2.5 评估等级的综合概率分布

评价方案的评价指标集合  $E$  关于水质评估等级  $H_n$  的综合概率分布,表示为  $b_n^{C(N-1)}$ ,则有  $b_n^{C(N-1)} = m(H_n/E)$ 。已知  $b_1^{C(1)} = m_1^{I(R_1)}, b_2^{C(1)} = m_1^{I(R_1)}, b_{\theta}^{C(1)} = m_{\theta}^{I(R_1)}$ ,则运用以下证据组合算法,对  $N-1$  组局部概率进行证据合成。

$$\{H_j\}:b_1^{C(j+1)} = K^{C(j+1)} b_1^{C(j)} m_{\theta}^{I(R_{j+1})} \quad (21)$$

$$\{H_j\}:b_j^{C(j+1)} = K^{C(j+1)} b_j^{C(j)} m_{\theta}^{I(R_{j+1})} \quad (22)$$

$$\{H_{j+1}\}:b_{j+1}^{C(j+1)} = K^{C(j+1)} (b_{j+1}^{C(j)} m_{j+1}^{I(R_{j+1})} + b_{j+1}^{C(j)} m_{\theta}^{I(R_{j+1})} + b_{\theta}^{C(j)} m_{j+1}^{I(R_{j+1})}) \quad (23)$$

$$\{H_{j+2}\}:b_{j+2}^{C(j+1)} = K^{C(j+1)} b_{\theta}^{C(j)} m_{j+2}^{I(R_{j+1})} \quad (24)$$

$$\{\theta\}:b_{\theta}^{C(j+1)} = K^{C(j+1)} b_{\theta}^{C(j)} m_{\theta}^{I(R_{j+1})} \quad (25)$$

$$K^{C(j+1)} = \left[ 1 - \left( \sum_{i=1}^j b_i^{C(i)} (m_{j+1}^{I(R_{j+1})} + m_{j+2}^{I(R_{j+1})}) + b_{j+1}^{C(i)} m_{j+2}^{I(R_{j+1})} \right) \right]^{-1} \quad (26)$$

$$j = 1, \dots, N-2$$

当  $j = N-2$  时,即可求得  $N$  个评估等级的综合概率分布向量:

$$G = [b_1^{C(N-1)}, \dots, b_n^{C(N-1)}, \dots, b_N^{C(N-1)}, b_{\theta}^{C(N-1)}] \quad (27)$$

式(27)满足  $\sum_{n=1}^N b_n^{C(N-1)} + b_{\theta}^{C(N-1)} = 1$

## 2.6 方案评估

证据推理得到的结果是分散的等级表述,难以用于方案的评估比较。因此,引入效用理论,将分布结果转换为精确的数值。假设评估等级  $H_n$  的效用为  $u(H_n)$ ,则方案  $a_i$  的综合水质评估结果  $u(a_i)$  表示为:

$$u(a_l) = \sum_{n=1}^N b_{u_l}^{C(N-1)} u(H_n) \text{ 且 } u(H_{n+1}) > u(H_n) \quad (28)$$

通过上述公式,即可计算评价方案的综合水质评估结果,并对方案进行排序。

### 3 案例分析

#### 3.1 研究对象与数据来源

湘江发源于湖南省永州市蓝山县,流经湖南的永州、衡阳、株洲、湘潭、长沙、岳阳6个市,自岳阳市的湘阴县注入长江水系的洞庭湖。湘江流域约占湖南省面积的40%,哺育了湖南60%的人民,支持了湖南省70%的经济<sup>[29]</sup>。随着湘江流域内重工业、农业和城镇化的快速发展,导致大量未经处理的工业废水、生活污水流入湘江,对湘江造成了严重的污染,破坏了水生态平衡。其中浏阳河、涟水、蒸水等流经大中城市的支流,不同程度地受到氨氮、磷、砷等因素的污染,造成水质恶化。湖南被誉为“有色金属之乡”,长期的有色金属开发造成湘江流域重金属污染严重。为此,2009年国家启动总投资595亿元的湘江流域重金属污染专项治理工程,2011年3月国务院批复《湘江流域重金属污染治理实施方案》,成为全国首个由国务院批复的区域性重金属污染治理试点方案;2013年,湖南省将湘江保护与治理确定为省政府“一号重点工程”,并开始实施“三年行动计划”,旨在改善湘江流域的环境质量。为了全面分析湘江的水质,本文选择湘江的18个监测断面作为研究对象,各断面的监测数据由湖南省环境监测中心站提供。参与研究的数据均为审核

后的数据,满足质量管理和数据有效性相关要求。

根据湘江流域的污染源,本文应用因素分析法,选择了由农业、生活污水污染引起水质指标变化的pH值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(PI)、氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、总磷(TP)和由工业污染带来的铅(Pb)、砷(As)、镉(Cd)这8类监测指标,作为水质的评价指标,即  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8\}$ 。根据中国《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》的水质评价标准(表1),本文将水质评估划分为5个等级: {Worst(W), Poor(P), Average(A), Good(G), Excellent(E)}, 简记为  $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\} = \{W, P, A, G, E\}$ 。

#### 3.2 湘江水质综合评价与结果分析

##### (1) 水质综合评价

这里以湘江2015年的年平均监测值为例,得出水质评估模型如图2所示,根据公式(7)–(8),计算出8个水质指标的等级置信度,见表2。根据公式(13),整理出各个等级的评价指标集合:

$$R_1 = 0;$$

$$R_2 = 0;$$

$$e_{3,4}^{I(R_3)} = \{e_{3,4}^1 = e_1\}, R_3 = 1;$$

$$e_{4,5}^{I(R_4)} = \{e_{4,5}^1 = e_2, e_{4,5}^2 = e_3, e_{4,5}^3 = e_4, e_{4,5}^4 = e_5,$$

$$e_{4,5}^5 = e_6, e_{4,5}^6 = e_7, e_{4,5}^7 = e_8\}, R_4 = 7$$

根据表2的置信度,利用公式(9)–(11)计算各个评估等级的基本概率分布,得到如下所示的概率分布矩阵:

表1 地表水水质类别的质量标准

Table 1 Quality standard for surface water quality classification

评价指标		标准值				
		I类水质	II类水质	III类水质	IV类水质	V类水质
pH(无量纲)		7	7.5或6.5	8或6	8.5或5.5	9或5
DO	≥	7.5	6.0	5.0	3.0	2.0
PI	≤	2	4	6	10	15
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	≤	0.15	0.50	1.00	1.50	2.00
Pb	≤	0.01	0.01	0.05	0.05	0.10
TP	≤	0.02	0.10	0.20	0.30	0.40
As	≤	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10
Cd	≤	0.001	0.005	0.005	0.005	0.010

2019年11月

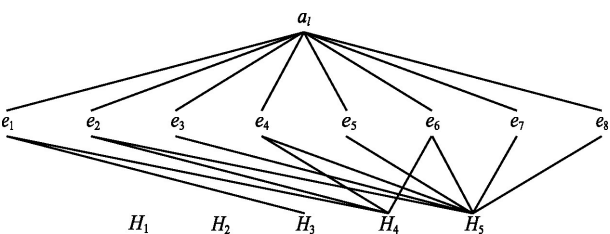


图2 2015年湘江水质评估模型

Figure 2 Water quality assessment model of the Xiangjiang River, 2015

表2 2015年湘江各指标等级置信度评估

Table 2 Confidence degree of each grade in the Xiangjiang River, 2015

置信度(β)		评估等级				
		H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>
水质评价指标	e <sub>1</sub>			0.41	0.59	
	e <sub>2</sub>				0.12	0.88
	e <sub>3</sub>					1.00
	e <sub>4</sub>				0.31	0.69
	e <sub>5</sub>					1.00
	e <sub>6</sub>				0.48	0.52
	e <sub>7</sub>					1.00
	e <sub>8</sub>					1.00

$$M^1 = [0 \ 0 \ 1]R_1 = 0;$$

$$M^2 = [0 \ 0 \ 1]R_2 = 0;$$

$$M^3 = [0.052 \ 0.073 \ 0.875]R_3 = 1;$$

$$M^4 = \begin{bmatrix} 0.015 & 0.110 & 0.875 \\ 0 & 0.125 & 0.875 \\ 0.039 & 0.086 & 0.875 \\ 0 & 0.125 & 0.875 \\ 0.060 & 0.065 & 0.875 \\ 0 & 0.125 & 0.875 \\ 0 & 0.125 & 0.875 \end{bmatrix} R_4 = 7$$

其中支持  $H_4$  和  $H_5$  的评价指标有 7 个, 根据公式(15)–(18)的证据合成算法, 得到下面的局部概率分布矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.052 & 0.073 & 0.875 \\ 0.056 & 0.528 & 0.416 \end{bmatrix}$$

根据公式(21)–(26), 得到 5 个评估等级的综合概率分布向量:

$$G = [b_1^{C(4)} \ b_2^{C(4)} \ b_3^{C(4)} \ b_4^{C(4)} \ b_5^{C(4)} \ b_\theta^{C(4)}]^T \\ = [0 \ 0 \ 0.023 \ 0.090 \ 0.496 \ 0.391]^T$$

从上面的概率分布中可以看出, 湘江水质主要分布在  $H_3$ 、 $H_4$ 、 $H_5$  这 3 个层级。但是, 位于评估等

级  $H_5$  的概率最高, 为 0.496, 即属于 I 类水的概率为 0.496。

根据地表水的功能描述, 这里给 5 个评估等级分配 5 个效用值[0,1], 分别为:

$$u(H_1) = 0, \ u(H_2) = 0.4, \ u(H_3) = 0.6, \ u(H_4) = 0.8, \\ u(H_5) = 1.0, \ u(\theta) = \sum_{n=1}^5 u(H_n)/5 = 0.56.$$

根据公式(28), 计算出 2015 年湘江的水质综合评估结果为:

$$u(a_1) = 0.023 \times 0.6 + 0.090 \times 0.8 + 0.496 \times 1.0 + \\ 0.391 \times 0.56 = 0.801$$

即表示 2015 年湘江的水质综合评估结果较好, 基本上处于评估等级  $H_4$ , 达到了 II 类水的标准。

### (2) 评价结果合理性分析

同理, 可以对 2011—2017 年湘江 18 个监测断面的水质进行综合分析, 如图 3 所示。从图中可以看出, 2011—2017 年湘江各断面水质变化趋势基本一致, 均表现出熬洲断面的水质最差, 朱亭镇水质最好。湘江干流 18 个监测断面分布在 5 个城市(表 3), 水质变化受断面地理位置、水域污染和水质治理 3 方面的影响, 下面将分别从这 3 方面综合分析水质的实际变化情况:

从各断面的地理位置分布分析, 湘江上游的水质好于下游水质。位于湘江上游的永州市多为绿地丛林, 水质整体较好, 境内水质呈现出先降后升的变化趋势, 水质波动较小; 湘江中游及下游流经衡阳、株洲、湘潭、长沙 4 个人口密集城市, 受到了工业、农业、生活污水污染导致水质较差, 但在断面集中治理影响下, 水质最终有好有差, 波动较大。根据本文的水质评价结果, 各断面的水质变化整体符合水质在上下游地理位置上的差异。

从水域污染方面分析, 有大量污染源的区域水质较差。其中水质恶化的松柏至熬洲断面, 松柏断面上下游 1000 km 被划分为 IV 类工业用水区, 大量的工业废污水以及周边的生活污水排放致使水质恶化; 松柏至黄茶岭断面间因有水量较大、水质较好的湘江支流春陵水(湘江 8 条支流水质优劣榜排名第 2)汇入湘江, 黄茶岭水质有所好转; 在黄茶岭至熬洲断面, 水质较差的蒸水(排名第 7)和洙水(排名第 4)注入湘江, 因此熬洲断面水质下降为境内最差水质。此外, 以重工业为主的株洲市将工业废水

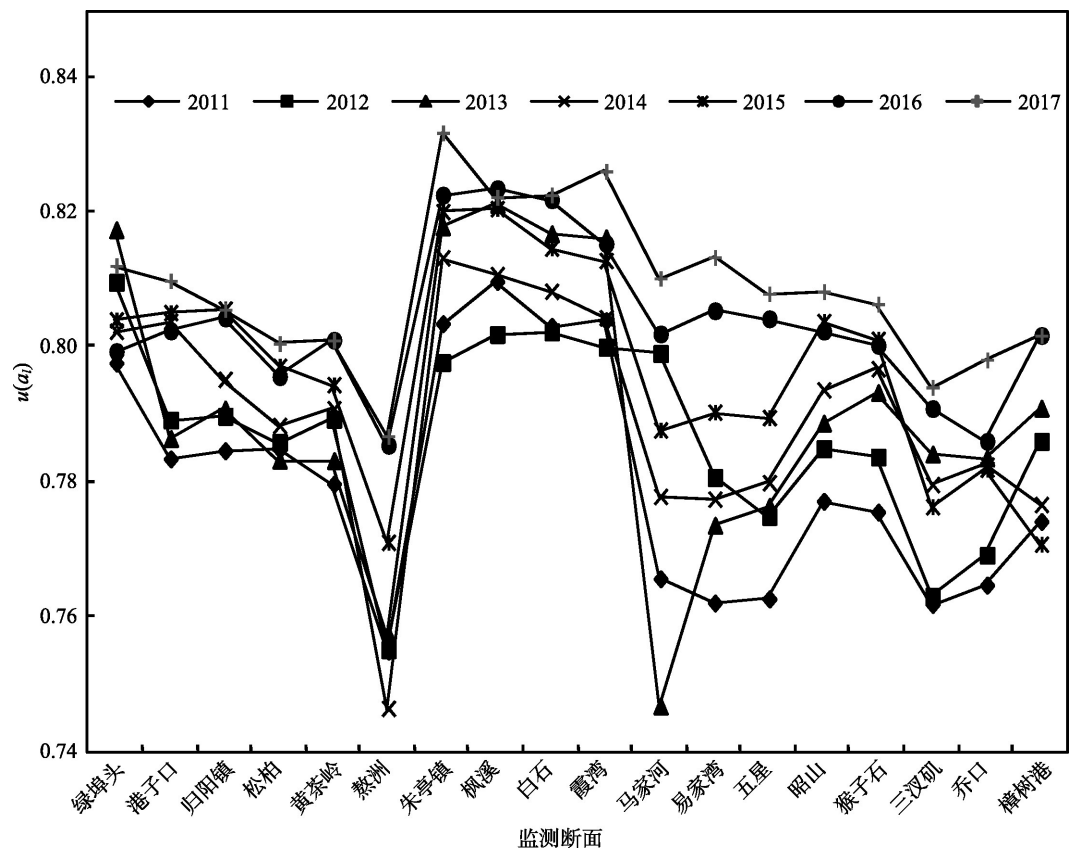


图3 2011—2017年湘江18个断面的水质综合评估结果

Figure 3 Comprehensive water quality assessment of 18 sections in the Xiangjiang River, 2011-2017

表3 湘江各断面的城市分布

Table 3 Distribution of the Xiangjiang River sections in different cities

市区	湘江断面
永州市	绿埠头、港子口、归阳镇
衡阳市	松柏、黄茶岭、熬洲、朱亭镇
株洲市	枫溪、白石、霞湾、马家河
湘潭市	易家湾、五星、昭山
长沙市	猴子石、三叉矶、乔口、樟树港

集中于下游排放,导致马家河断面水质很差。水质较差的三叉矶断面也因上游有水质最差的浏阳河(排名第8)汇入湘江所致。本文的水质评价方法综合考虑了以铅(Pb)、砷(As)、镉(Cd)为代表的工业污水监测指标,和以溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(PI)、氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、总磷(TP)为代表的农业、生活污水监测指标,对于有大量污染源注入的下游断面熬洲、马家河、三叉矶的水质评价结果,均符合断面实际情况。

从水质治理方面分析,水源保护区、国控断面、

综合治理等均会让水质变好。湘江治理文件中指出,绿埠头、枫溪、白石、猴子石为水源保护区,绿埠头、归阳镇、霞湾、昭山、樟树港为国控断面,从图3的水质评价结果可发现,以上断面均为所在城市内水质最优断面。湘江以城市为单位进行治理,从各市交界处断面的水质变化发现,湘江流出永州、衡阳、湘潭3市的监测断面水质均好于其相邻的上游断面,说明水质治理有效,其中以衡阳市的治理效果最为显著。在株洲市境内,枫溪至霞湾段水质最好,但是下游的马家河水质陡然恶化,致使进入湘潭市境内的水质整体较差,主要是因为以重工业为主的株洲市将工业废水集中于下游排放,体现了“以邻为壑”的现象。以上重点保护和治理断面,根据本文的水质评价方法得出的水质评价结果均是境内最好;且湘江的治理被列为政府的“一号重点工程”,从时间上看,2011—2017年间各断面水质呈现逐年上升的趋势,本文的水质评价结果与湘江治理结果相符。



2019年11月

综合以上3方面分析,应用本文基于证据推理的水质综合评价方法计算出的2011—2017年湘江18个断面水质评价结果,符合流域水质上游优于下游,大量污染源注入的下游断面水质恶化,水源保护区、国控断面、综合治理等断面水质较好的实际情况,说明本文的水质评价方法是合理的。

3.3 方法对比分析

为证明基于证据推理的水质综合评价方法的

有效性,本文选取了在流域水质评价中应用较为广泛的模糊综合评价方法、灰色聚类法<sup>[30]</sup>以及地表水评价标准中的单因子评价法,对评价结果进行验证。因2015年是十二五期间湘江治理成果的验收年,也是十三五规划的编制年,水质变化及影响分析具有阶段性意义。在此,选取2015年湘江上游的绿埠头断面月份监测数据作为样本(表4),4种方法的评价结果如图4所示。

表4 2015年湘江绿埠头断面月份监测数据

Table 4 Monthly monitoring data of Lubutou section in the Xiangjiang River, 2015

监测时间	水质指标浓度/(mg/L)								单因子评价结果
	pH	DO	PI	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Pb	TP	As	Cd	
2015/1/5	7.82	7.65	1.52	0.132	0.0005	0.076	0.00025	0.00005	Ⅱ类
2015/2/3	8.03	9.23	1.41	0.086	0.0005	0.046	0.00100	0.00005	Ⅱ类
2015/3/3	7.91	8.71	1.48	0.113	0.0005	0.010	0.00100	0.00005	Ⅰ类
2015/4/8	7.56	7.93	1.43	0.127	0.0005	0.008	0.00025	0.00005	Ⅰ类
2015/5/5	7.45	6.56	1.88	0.072	0.0005	0.065	0.00025	0.00005	Ⅱ类
2015/6/4	7.86	5.42	1.55	0.074	0.0005	0.085	0.00025	0.00005	Ⅲ类
2015/7/2	7.93	6.71	1.48	0.073	0.0005	0.020	0.00200	0.00005	Ⅱ类
2015/8/4	8.01	5.91	1.63	0.020	0.0005	0.025	0.00070	0.00005	Ⅲ类
2015/9/1	7.76	6.38	1.43	0.068	0.0005	0.030	0.00025	0.00005	Ⅱ类
2015/10/9	7.41	6.58	1.32	0.057	0.0005	0.130	0.00025	0.00005	Ⅲ类
2015/11/4	7.93	6.39	1.24	0.085	0.0005	0.090	0.00025	0.00005	Ⅱ类
2015/12/2	7.52	6.98	1.34	0.042	0.0005	0.035	0.00025	0.00005	Ⅱ类

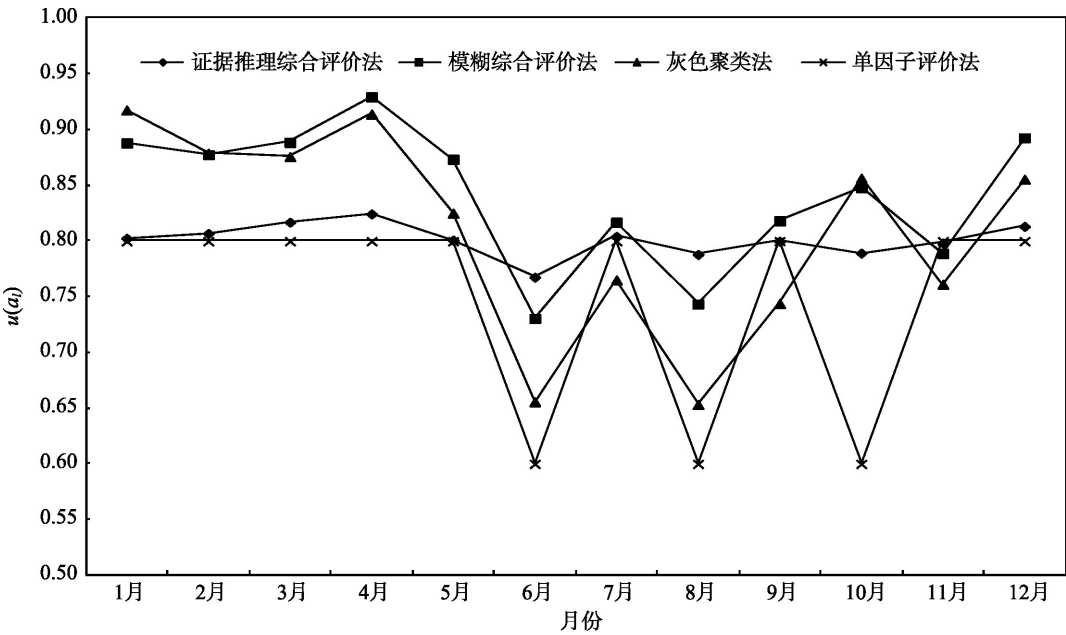


图4 2015年湘江绿埠头断面水质月份变化趋势

Figure 4 Trend of monthly change of water quality of Lubutou section in the Xiangjiang River, 2015



从图4中可以直观地看到,4种方法的评价结果变化趋势基本一致,说明基于证据推理的水质综合评价方法是有效的。其不同在于,模糊综合评价法和灰色聚类法的评价结果变化趋势明显,各月份水质波动较大,而基于证据推理法的水质变化趋势则相对比较平缓。从评价结果的准确性分析,单因子评价法结果表示了水质的下限,而6—9月份灰色聚类法水质评估结果逼近甚至低于下限,可见此方法会夸大数据,不够精确。从水质变化趋势分析,在水质类别发生变化的月份,本文的评价结果变化趋势与水质类别变化趋势一致,但模糊综合评价法与灰色聚类法的结果在9—11月份的变化趋势与之相反,可见本文的评价结果更加稳定,在4种方法中表现最优。从实际情况分析,湘江上游为常年少人居住的农村地区,污染源极少,河水流经之地多为山地丛林,水体自净能力较强,因此绿埠头断面的水质整体良好,各月份之间水质的变化幅度较小。从表4的单因子评价结果中也可以看出,2015年绿埠头断面的8项监测指标都在Ⅲ类标准以上,其中9个月的水质达到了Ⅱ类标准及以上。由以上3方面综合分析可以得出,考虑了数据不确定性的基于证据推理的水质综合评价方法更符合实际情况,更加有效。

同理,又选取了水质最差的熬洲断面2015年各月份的数据进行分析(图5),4种方法的水质评价结果基本一致,得出的结果与绿埠头断面的结论相符。结合实际情况,湘江每年的4—9月份为汛期,期间流域降水量丰富,径流量增大,会因此引发洪涝灾害,从而将流域附近的各种污染物卷入湘江。而在3.2章节中已提到,熬洲上游是Ⅳ类工业用水区,黄茶岭至熬洲断面间分别有蒸水、洙水2条支流汇入,因此熬洲断面在4—9月份受汛期影响,水质类别降为Ⅲ类水。从图5可以看出,证据推理法的水质评价结果在4—9月份较低,比模糊综合评价法、灰色聚类法更趋近实际情况。此外,在7—8月份水质类别由Ⅲ类水上升为Ⅱ类水时,证据推理法与水质变化趋势一致,但模糊综合评价法、灰色聚类法的评价结果却刚好相反。由此也可以得出,基于证据推理的水质评价方法表现得更加稳定,更能客观反映水质状况。

通过以上4种方法的对比分析发现,单因子评价法能很好指出水质变好或者变坏的趋势,但是同类水质却无法客观反映水质相对好坏。其余3种方法虽然都可以对同类水质进行比较,但是模糊综合评价法和灰色聚类法的评价结果偶尔会出现评价结果与水质实际变化趋势相反的情况。其原因是

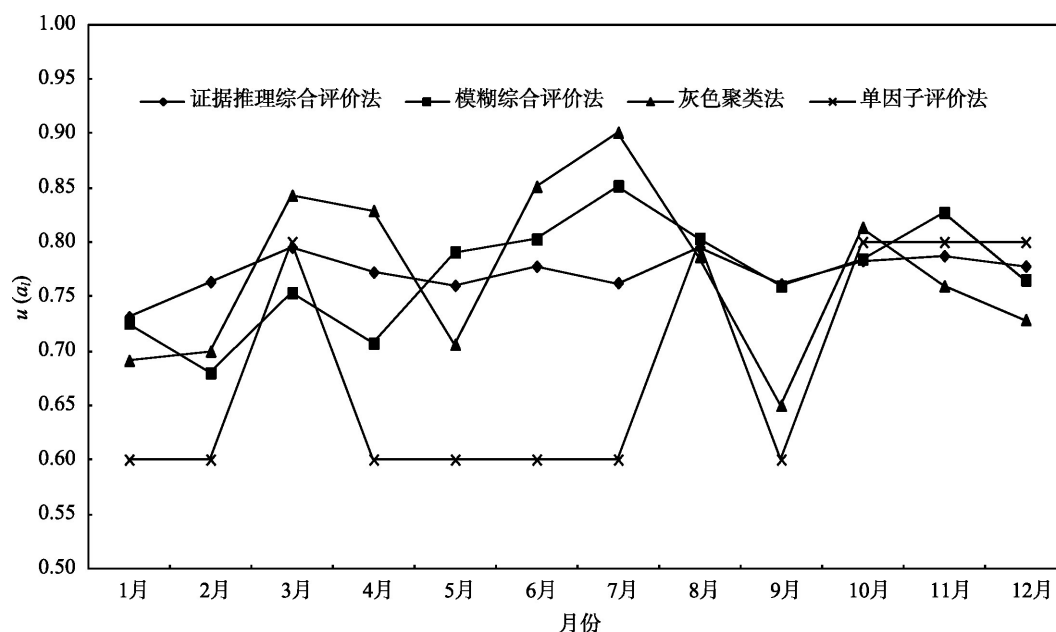


图5 2015年湘江熬洲断面水质月份变化趋势

Figure 5 Trend of monthly change of water quality of Aozhou section in the Xiangjiang River, 2015

灰色聚类法对数据的标准化处理是根据水域的功能类别作为灰类标准,用污染指数法进行白化处理,当某一指标监测值远远超过灰类标准,计算出的结果会夸大评价结果,不能准确反映水质所属灰类的情况;模糊综合评价法的各指标权重采用的是“超标倍数归一法”,这种方法会强化危害较小指标的权重,不能科学的反映各个指标对水体污染的危害水平。而本文的证据推理法,首先通过建立指标的置信度函数,将各监测值转化为各评估等级的置信度;然后运用证据组合规则和推理算法,计算出各个指标的综合概率,并且在等级中加入了等级不确定性的概率,综合考虑了未知信息对水质的影响,避免了简单加权平均对结果的夸张表示,该方法不仅能准确得反映水质变化趋势,还能使得计算结果更加精确。由此可见基于证据推理的水质综合评价方法优于其他3种评价方法,评价结果更加准确。

## 4 结论

针对现有水质评价方法评价指标单一、水质类别划分不确定等问题,结合证据理论在目标识别、绩效评估等不确定信息领域的成功应用,本文提出了基于证据推理的水质综合评价方法。该方法利用证据推理的多证据合成规则和对不确定性信息的处理能力,解决了水质评价的多指标合成问题和水质等级划分的不确定性问题,并引入效用理论,实现同类别水质的相互比较。具体如下:

(1)本文基于相关文献研究,分析了现有流域水质评价方法在数据处理方面的不足,建立了水质评估模型和置信度分布函数,将各监测指标的单因子水质描述转化为对评估等级的信度评估。该模型避免了打分法对源数据信息的损害,使得各指标监测值的处理更加科学精确,更能反映水质状况。

(2)本文采用证据理论的合成规则和证据推理算法,构建了流域水质综合评价方法。该方法通过对多个评价指标的证据合成,求得各评估等级的综合概率,解决了指数评价法中权重确立的主观性问题,并考虑了不确定信息的处理,使得评价结果更符合实际情况。

(3)本文引入效用理论,构建了水质期望效用

函数。根据不同类别水质的水域功能,分配相应的效用值,将由证据推理计算出的各水质评估等级的概率描述,转化为水质综合评估结果,该结果不仅能体现水环境功能,而且便于流域水质的相互比较。

(4)目前,相关环境部门对湘江的水质评价多采用指数评价法,以一段时间流域内水质的关键影响因子指数作为流域水质评估结果,忽略了流域内污染因子的流动性带来的二次污染,不能有效反映水质真实情况,不利于湘江的针对性治理工作。本文应用该方法,对湘江2011—2017年的水质进行综合评价,分别从断面地理位置、水域污染、水质治理3个维度分析了湘江的水质变化特点,这将为湘江的针对性治理提供指导。

(5)为了证明本方法的有效性,选取了水质评价领域应用较为广泛的模糊综合评价法、灰色聚类法、单因子评价法对绿埠头、熬洲的监测数据进行评估。对比分析发现,4种评价方法对水质的评价结果基本一致,且本研究方法的评估结果更加稳定,更符合水质的实际情况,说明基于证据推理的水质综合评价方法是合理有效的。

## 参考文献(References):

- [1] Grafton Q, Wyrwoll P, White C, et al. Global Water Issues and Insights[M]. Canberra: ANU Press, 2014.
- [2] Yadav S S, Kumar R. Monitoring water quality of Kosi River in Rampur District, Uttar Pradesh, India[J]. Advances in Applied Science Research, 2011, 2(2): 197-201.
- [3] Oyerinde G T, Oluwasemire K O, Oshunsanya S O. Effects of water pollution on soil physical and hydrological properties of a valley bottom in University of Ibadan, Nigeria[J]. International Journal of Science and Research, 2013, 2(2): 294-299.
- [4] Zinia N J, Kroeze C. Future trends in urbanization and coastal water pollution in the Bay of Bengal: The lived experience[J]. Environment, Development and Sustainability, 2015, 17(3): 531-546.
- [5] Miao X, Tang Y, Wong C W Y, et al. The latent causal chain of industrial water pollution in China[J]. Environmental Pollution, 2015, 196: 473-477.
- [6] McMillan S. Water Pollution: A Global Concern[M]. New York: Callisto Reference, 2015.
- [7] Li C C, Sun L, Jia J X, et al. Risk assessment of water pollution

- sources based on an integrated K-means clustering and set pair analysis method in the region of Shiyao, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 307-316.
- [8] Lu Y L, Song S, Wang R S, et al. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China[J]. *Environment International*, 2015, 77(1): 5-15.
- [9] Tan Q, Huang G H, Cai Y P. Multi-source multi-sector sustainable water supply under multiple uncertainties: An inexact fuzzy-stochastic quadratic programming approach[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(2): 451-473.
- [10] 尹海龙, 徐祖信. 我国单因子水质评价方法改进探讨[J]. *净水技术*, 2008, 27(2): 1-3. [Yin H L, Xu Z X. Discussion on China's single-factor water quality assessment method[J]. *Water Purification Technology*, 2008, 27(2): 1-3.]
- [11] Li B, Yang G S, Wan R R, et al. Dynamic water quality evaluation based on fuzzy matter-element model and functional data analysis: A case study in Poyang Lake[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(23): 19138-19148.
- [12] Wu J H, Xue C Y, Rui T, et al. Lake water quality assessment: A case study of Shahu Lake in the semiarid loess area of northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, DOI: 10.1007/s12665-017-6516-x.
- [13] Zhang Q, Murphy R R, Tian R, et al. Chesapeake Bay's water quality condition has been recovering: Insights from a multimetric indicator assessment of thirty years of tidal monitoring data[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 1617-1625.
- [14] Miao S, Liu C, Qian B J, et al. Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: A study in Linyi development area [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, (2): 1-10.
- [15] Zhang Y N, Chu C L, Li T, et al. A water quality management strategy for regionally protected water through health risk assessment and spatial distribution of heavy metal pollution in 3 marine reserves[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599-600: 721-731.
- [16] Singh S, Ghosh N C, Krishan G, et al. Development of indices for surface and ground water quality assessment and characterization for Indian conditions[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, DOI: 10.1007/s10661-019-7276-8.
- [17] Singh K R, Dutta R, Kalamdhad A S, et al. Risk characterization and surface water quality assessment of Manas River, Assam (India) with an emphasis on the TOPSIS method of multi-objective decision making[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, DOI: 10.1007/s12665-018-7970-9.
- [18] 周密, 马振. 改进的综合水质标识指数法及其应用[J]. *水力发电*, 2017, 43(3): 4-7. [Zhou M, Ma Z. Improved comprehensive water quality identification index method and its application[J]. *Water Power*, 2017, 43(3): 4-7.]
- [19] 李国华, 李畅游, 史小红, 等. 基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6): 316-320. [Li G H, Li C Y, Shi X H, et al. Evaluation of water quality of Tokto Section in Yellow River based on principal component analysis and water quality identification index[J]. *Bulletin Soil and Water Conservation*, 2018, 38(6): 316-320.]
- [20] Li B, Yang G S, Wan R R, et al. Using fuzzy theory and variable weights for water quality evaluation in Poyang Lake, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(1): 39-51.
- [21] Dempster A P. A generalization of Bayesian inference[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1968, 30(2): 205-247.
- [22] Hui W, Guo L L, Zheng D, et al. A new method of cognitive signal recognition based on hybrid information entropy and D-S Evidence theory[J]. *Mobile Networks & Applications*, 2018, 23(4): 677-685.
- [23] Chen N, Yin S W, Yu D J, et al. An efficient epistemic uncertainty analysis method for structural-acoustic problem based on evidence theory[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2018, 66(2): 117-130.
- [24] Huang Z L, Jiang C, Zhang Z, et al. A decoupling approach for evidence-theory-based reliability design optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 56(1): 647-661.
- [25] Zhang W, Zhao W, Jin T, et al. Fault diagnosis method of transformer based on multi-neural network and evidence theory[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(8): 207-211.
- [26] Titkanloo H N, Keramati A, Fekri R. Data aggregation in multi-source assessment model based on evidence theory[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 69: 443-452.
- [27] Yang J B, Singh M G. An evidential reasoning approach for multiple-attribute decision making with uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(1): 1-18.
- [28] Yang J B, Xu D L. Evidential reasoning rule for evidence combination[J]. *Artificial Intelligence*, 2013, 205: 1-29.
- [29] 潘爱民, 刘友金. 湘江流域人口城镇化与土地城镇化失调程度及特征研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(5):65-70. [Pan A M, Liu Y J. The degree of imbalance between population urbanization and land urbanization of Xiangjiang River Basin[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(5):65-70.]
- [30] 徐祖信, 尹海龙. 城市水环境管理中的综合水质分析与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. [Xu Z X, Yin H L. Comprehensive Analysis and Evaluation of Water Quality in Urban Water Environment Management[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.]

# Comprehensive assessment of water quality based on evidential reasoning : Taking the Xiangjiang River as an example

HU Dongbin<sup>1,3</sup>, CAI Hongpeng<sup>1</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,3</sup>, MENG Fanyong<sup>1</sup>,  
LUO Yueping<sup>2,3</sup>, PAN Haiting<sup>2,3</sup>

(1. Business school, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Hunan Environmental Monitoring Center, Changsha 410014, China; 3. Resource-Conserving & Environment-Friendly Society and Ecological Civilization Collaborative Innovation Center of Hunan Province, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Comprehensive evaluation of water quality is an important basic work in the integrated improvement of water environment. Reliable and accurate assessment facilitates the development of scientific management plan and effective control measures for water quality. This article proposes a comprehensive assessment method of water quality based on evidential reasoning. Through establishing a water quality comprehensive evaluation model and belief distribution function, the observed values of water quality indicators can be transformed into the confidence degree of each evaluation grade. Combining the synthesis rules and algorithms of evidential reasoning, the probability distribution of each evaluation grade is calculated by synthesizing recursively the indicators that belong to the same evaluation grade. Then the comparison of water quality is realized by introducing the utility theory. Finally, this article takes the Xiangjiang River as an example to comprehensively evaluate its water quality from 2011 to 2017, and compares this method with the fuzzy comprehensive evaluation method and grey clustering method, which have been widely used in water quality assessment. The results show that the comprehensive assessment method based on evidential reasoning is more accurate, and can effectively reflect the actual situation of water quality. This study is important in the multi-index data fusion and uncertainty data processing of water quality in different space and time, and also provides support for managing water quality precisely and for environmental management policy and decision making in the Xiangjiang River Basin.

**Key words:** comprehensive assessment of water quality; uncertainty of water environment; confidence degree assessment; combination rule of evidence; evidential reasoning; utility theory; Xiangjiang River Basin