

基于联系数与三角模糊数的黄柏河梯级水库富营养化评价^{*1}

彭涛^{1, 2} 舒章康¹ 吴迪¹ 陈敏^{1, 2} 刘冀^{1, 2} 李英海^{1, 2} 谭雪松³

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002;

2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430072;

3. 宜昌晟泰水电实业有限责任公司, 湖北宜昌 444200)

【摘要】:针对水体富营养化评价具有模糊性和不确定性的多属性决策问题, 提出联系数与三角模糊数耦合的富营养化综合评价方法。利用多元联系数描述评价因子与评价等级之间隶属关系的不确定性, 采用分段三角模糊数确定联系数差异度系数的连续变化过程和模糊性, 进而计算评价因子与评价等级之间的综合联系数, 并结合评价指标组合权重确定级别特征值。应用该方法对 2016 年 7 月黄柏河梯级水库的富营养化状况进行了评价。结果表明:玄庙观水库处于贫营养状态, 天福庙水库、西北口水库和尚家河水库均处于中营养状态。各水库富营养化程度排序为:尚家河水库>西北口水库>天福庙水库>玄庙观水库。该法所得结果与其它多种评价方法的结果对比表明, 该方法评价结果直观有效, 可以真实反映水库富营养化等级状况, 能够更加细微、准确的区分同一等级水体富营养化差异, 在湖库富营养化评价中具有良好的应用前景。

【关键词】:黄柏河梯级水库; 富营养化评价; 联系数; 三角模糊数

【中图分类号】:X824 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)12-2129-08

DOI:10.11870/cjlyzyhj201712022

随着我国经济的快速发展, 资源消耗的不断增长, 环境污染导致了水库氮、磷等营养物富集, 在适当光照及温度条件下, 水库水体极易发生水华等一系列水环境问题, 严重破坏了水生生态系统^[1]。因此, 对水体富营养化状态进行科学评价, 是水库富营养化防治的重要前提。

目前常用的水体富营养化评价方法有参数法^[2]、营养状态指数法^[3]、模糊综合评价法^[4]、神经网络模型^[5]、贝叶斯

¹ 收稿日期:2017-03-28; 修回日期:2017-05-11

基金项目:宜昌市大学科学研究与应用项目(A16-302-a05) [Project of Scientific Research and Application University of Yichang(A16-302-a05)]; 国家自然科学基金项目(51409152) [Project of the National Natural Science Foundation of China(51409152)]

作者简介:彭涛(1973~), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源及生态水文研究. E-mail:pengtao306@163.com

方法^[6]、云模型^[7]、集对分析法^[8]等。这些方法在水体富营养化评价应用中取得了较好的效果,但在应用过程中尚存在一些不足和局限性。营养状态指数法发展并修正了卡森指数法,形成了一套适合我国湖库富营养化评价体系,计算简便,但是在营养状态级别划分及指标权重分配方面存在较大的主观性;模糊综合评价法虽考虑了系统的确定性和不确定性等特征,但隶属函数的确定缺乏客观准确性;人工神经网络模型的参数需要动态确定,因而不能建立起普适模型,且计算过程比较复杂;贝叶斯方法体现了水质评价的推断决策性,但基于均匀分布的贝叶斯推理难以反映参数浓度的变化;云模型的参数确定具有一定的主观性,尚缺较为完备的理论。集对分析作为一种新的处理不确定性问题的系统分析方法,它从整体和局部上剖析系统内在的联系,在水资源与水环境分析领域具有较好的应用前景^[9, 10],但传统的集对分析在确定评价等级时忽略了差异度系数的部分信息,无法细致区分同一等级间的排序问题。水体富营养化是多方因素综合作用的结果,评价指标与评价标准之间存在着复杂的非线性特征,评价方法的构建需综合考虑系统内部多方面的特点。因此,本文通过组合赋权法为富营养化评价指标赋权,利用集对多元联系数定量描述评价样本与分级标准之间的隶属不确定性和模糊性,并采用分段三角模糊数表示联系数的差异度系数以改进集对分析方法,以体现差异度系数的连续变化过程,从而客观真实地反映水体富营养化状况,为控制水体富营养化提供科学依据。

1 研究区域概况

黄柏河流域位于湖北省宜昌市西北部,流域面积 2016km²,流域总人口 35 万人。黄柏河是长江左岸的一级支流,全长 162km,分为东西两支,在宜昌市夷陵区黄花镇两河口处汇合为干流,其中东支已建成玄庙观、天福庙、西北口和尚家河 4 座大中型水库(表 1)。东风渠干渠由尚家河水库引水,分别通过灌区内官庄水库和白河水库、泉水水库及善溪冲水库为宜昌城区百万居民和宜东地区百万亩农田灌溉提供生活和生产用水,是宜昌人民名副其实的“母亲河”。近 20a 来,随着宜昌市经济的快速发展和城市化进程的逐步加快,工业废水和生活污水排放量增大,特别是流域内磷矿资源的过度开发,导致黄柏河流域水环境质量明显下降^[11],4 座梯级水库的富营养化状况趋重,库底沉积物总磷含量较高。2013 年 5 月 20 日和 21 日天福庙水库和玄庙观水库相继发生不同程度的水华现象。因此,黄柏河流域水资源安全保障,对宜昌市的饮水安全和经济社会可持续发展具有十分重要的意义。2013 年 9 月,宜昌市启动黄柏河东支流域及官庄水库水源地综合整治工作,流域水环境状况明显改善。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

选取总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素 a(Chl a Chl a)、高锰酸盐指数(CODMn)、透明度(SD)5 项指标作为水库富营养化评价因子。采样时间为 2016 年 7 月 5 日~7 日,每个水样采集点均为 4 个水库的坝首(图 1),水样在水面以下 0.5m 处采集。水样预处理及分析测试,按照国家相关标准方法^[12]。其中,透明度利用塞氏盘现场测定,叶绿素 a 采用分光光度法测定,TP 采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法,TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,CODMn 采用酸性高锰酸钾法测定。同时,采用 Thermo 便携式水质多参数测定仪原位测定水温、pH 值、溶解氧(DO)等指标。采样点富营养化评价因子的实测数据见表 2。

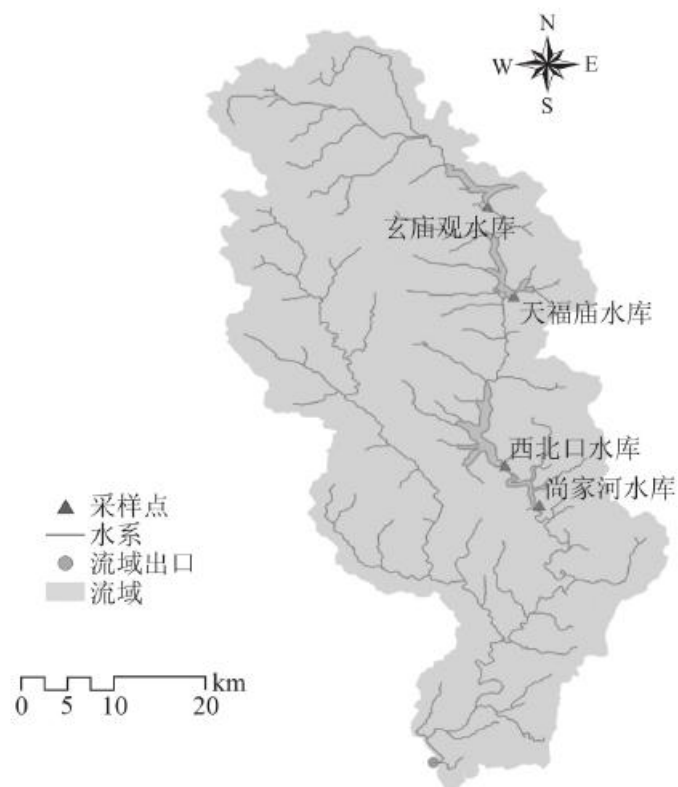


图 1 黄柏河流域梯级水库及采样点位置

Fig. 1 Location of Cascade Reservoirs and Sampling Site from Huangbaihe River Basin

表 1 黄柏河流域梯级水库概况

水库	距离河口 (km)	集水面积 (km ²)	总库容 (10 ⁴ m ³)
玄庙观水库	110	380	4 054
天福庙水库	80	554	6 180
西北口水库	54	862	21 000
尚家河水库	45	937	1 692

表 2 黄柏河流域梯级水库评价指标的实测值

采样点	Chl-a (mg/m ³)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	SD (m)	COD _{Mn} (mg/L)
玄庙观水库	2.13	0.009	0.48	8.36	1.58
天福庙水库	2.66	0.065	0.43	8.65	3.99
西北口水库	3.13	0.163	0.50	5.13	1.76
尚家河水库	3.26	0.383	0.58	7.10	1.70

2.2 建立评价指标体系

2.2.1 评价标准

选取适合的评价标准，对于评价结果的准确性和客观性十分关键。本文参照目前我国广泛使用的水利部提出的《地表水资源质量评价技术规程》(SL395-2007)，将水库富营养化程度分为5级:贫营养(I级)、中营养(II级)、轻度富营养(III级)、中度富营养(IV级)、重度富营养(V级)5个等级，具体分级标准如表3所示。

表3 湖库富营养化评价指标分级标准

营养状态级别	营养状态分值	Chl-a (mg/m ³)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	SD (m)	COD _{Mn} (mg/L)
I	<30	<2	<0.01	<0.1	>3	<1
II	30-50	2~10	0.01-0.05	0.1-0.5	3~1	1~4
III	50-60	10-26	0.05-0.1	0.5-1	1-0.5	4~8
IV	60-70	26-64	0.1-0.2	1~2	0.5-0.4	8~10
V	>70	>64	>0.2	>2	<0.4	>10

2.2.2 权重确定

指标权重反映了不同指标在评价体系中的地位和作用，它的合理与否直接影响评价结果的科学性和正确性。本文采用层次分析法与改进熵值法计算各指标的组权重，以避免主观赋权不够客观的弊端，并克服客观赋权无法反映指标实际重要程度的不足。层次分析法(AHP法)是一种能将定性分析和定量计算相结合的系统评价分析方法，具有系统性、简洁性和实用性等特点，其主要步骤包括构造判断矩阵、层次单排序和层次总排序及其一致性检验^[13]。熵值法则利用信息熵来表征各指标的差异程度，某项指标的变异程度越大，信息熵越小，该指标的权重也就越大；反之，该指标的权重也应越小。具体计算步骤参考文献^[14]。

为克服上述两种方法的不足，本文运用主客观综合赋权法^[15]确定指标综合权重 w_1 ，即将主观权重向量与客观权重向量进行综合，则令：

$$w_l = \bar{\alpha}^* w_{Al} + \bar{\beta}^* w_{Sl} \quad (1)$$

$$\bar{\alpha}^* = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^n b_{il} w_{Al}}{\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^n b_{il} (w_{Al} + w_{Sl})} \quad (2)$$

$$\bar{\beta}^* = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^n b_{il} w_{Sl}}{\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^n b_{il} (w_{Al} + w_{Sl})} \quad (3)$$

式中： w_{Al} 、 w_{Sl} 分别为主、客观权重，分别通过层次分析法和熵值法计算得到； α^* 和 β^* 分别为层次分析法和熵值法权重的重要程度。

2.3 构建联系数与三角模糊数耦合的评价方法

2.3.1 基本原理

首先将水库富营养化评价指标的实测值与评价标准等级作为两个集合构成一个集对，构建集对联系数描述富营养化评价的不确定性，然后利用分段三角模糊数刻画差异度系数的连续变化过程，并计算评价因子与评价等级之间的综合联系数，最后结合评价指标组合权重确定级别特征值，进而综合评价水库富营养化状况。

2.3.2 集对联系数

集对分析理论是我国学者赵克勤^[16]在1989年提出的一种新的处理不确定性系统的评价方法。集对分析的关键是确定联系数，其基本表达式为：

$$\mu = a + bi + cj \quad (4)$$

式中： μ 为联系数，又称为三元联系数； a 、 b 、 c 分别为集对的一度、差异度和对立度， a 、 b 、 $c \in [0, 1]$ ，且 $a+b+c=1$ ； i 为差异度系数，取值区间为 $[-1, 1]$ ； j 为对立度系数，通常情况下取定值 -1 。

本文主要利用其扩展式五元联系数进行计算，其数学表达式为：

$$\mu = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + b_3 i_3 + cj \quad (5)$$

式中： a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 $c \in [0, 1]$ ，且 $a+b_1+b_2+b_3+c=1$ ； b_1 、 b_2 、 b_3 为差异度； i_1 、 i_2 、 i_3 为差异度系数；其他符号同上。

按照联系数的定义可知，将评价指标值符合I级标准的定义为同一度 a ，相应的同一度系数看作是1，符合V级标准的定义为对立度 c ，相应的对立度系数取值为 -1 ，而将符合II、III、IV级标准定义为差异度。进一步细化，由五元联系数定义，设将符合II级标准定义为偏同差异性，符合III级标准定义为中差异性，符合IV级标准定义为偏反差异性，相应地 i_1 、 i_2 、 i_3 分别称为偏同差异度系数、中差异度系数、偏反差异度系数。

若指标类型为越小越优型指标，评价样本的指标值 x_{ij} 与水库富营养化评价等级 k 之间的单指标联系度 μ_{ijk} 为^[9]：

$$\mu_{ijk} = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & x \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x}{s_2 - s_1} + \frac{2x - 2s_1}{s_2 - s_1}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & s_1 < x \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x}{s_3 - s_1}i_1 + \frac{2x - s_1 - s_2}{s_3 - s_1}i_2 + 0i_3 + 0j & \frac{s_1 + s_2}{2} < x \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_3 + s_4 - 2x}{s_4 - s_2}i_2 + \frac{2x - s_2 - s_3}{s_4 - s_2}i_3 + 0j & \frac{s_2 + s_3}{2} < x \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2s_4 - 2x}{s_4 - s_3}i_3 + \frac{2x - s_3 - s_4}{s_4 - s_3}j & \frac{s_3 + s_4}{2} < x \leq s_4 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j & x > s_4 \end{cases} \quad (6)$$

式中： s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 为 I ~ V 级界限值。同理，可推得越大越优型指标的数学表达式类似式 (6)。

2.3.3 三角模糊数原理

在多变量综合决策过程中引入三角模糊数，能够很好的处理水环境系统的模糊性和不确定性问题，使评价结果更加可靠准确。在数据资料较少或数据精度不高时，仍具有很好的实用性^[17]。在实际应用中，各评价指标用单一三角模糊数难以表达清楚，通常利用分段三角数模糊数来描述。

设在实数域 R 上的一个模糊数 A ，定义一个隶属函数： $\mu_A(x): R \rightarrow [0, 1]$ ($x \in R$)，若隶属函数 $\mu_A(x)$ 表示为^[18, 19]：

$$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ (x - a_1) / (b_1 - a_1) & a_1 < x \leq b_1 \\ (c_1 - x) / (c_1 - b_1) & b_1 < x \leq c_1 \\ 0 & x > c_1 \\ (x - a_2) / (b_2 - a_2) & a_2 \leq x \leq b_2 \\ (c_2 - x) / (c_2 - b_2) & b_2 < x \leq c_2 \\ 0 & x > c_2 \end{cases} \quad (7)$$

则称 A 为分段三角模糊数，记作 $A=(a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2)$ ，其中 $a_1 \leq b_1 \leq c_1 \leq a_2 \leq b_2 \leq c_2$ 。显然，若 $a_1=b_1=c_1=a_2$ 或 $c_1=a_2=b_2=c_2$ ，则 A 为普通三角模糊数。

三角模糊数可以看作是定义了隶属函数的区间数，其值域在 $[0, 1]$ 之间，而集对分析中差异度系数的取值范围为 $[-1, 1]$ ，

1]，为了使两者在值域范围上具有一致性，将三角模糊数的隶属函数值域从 [0, 1] 拓展到 [-1, 1]。

2.3.4 基于三角模糊数的差异度系数计算

考虑到相邻等级之间的差异度系数存在很大的模糊性，利用分段三角模糊数来刻画差异度系数的模糊性，即采用分析取值法确定标准等级分割点处的差异度分量系数，即将评价等级界限值 s_2 、 s_3 、 s_4 处的差异度系数分别取为 $i_1=0.5$ ， $i_2=0$ ， $i_3=-0.5$ 。若指标类型为越小越优型指标，则相应的数学表达式为：

$$i_1 = \begin{cases} 0 & x \leq s_1 \\ \frac{x - s_1}{s_2 - s_1} & s_1 < x \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \frac{s_2 + s_3 - 2x}{2(s_3 - s_1)} & \frac{s_1 + s_2}{2} < x \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 & x > \frac{s_2 + s_3}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$i_2 = \begin{cases} 0 & x \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x}{2(s_3 - s_1)} & \frac{s_1 + s_2}{2} < x \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ \frac{s_2 + s_3 - 2x}{2(s_4 - s_2)} & \frac{s_2 + s_3}{2} < x \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 & x > \frac{s_3 + s_4}{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$i_3 = \begin{cases} 0 & x \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ \frac{s_2 + s_3 - 2x}{2(s_4 - s_2)} & \frac{s_2 + s_3}{2} < x \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ \frac{x - s_4}{s_4 - s_3} & \frac{s_3 + s_4}{2} < x \leq s_4 \\ 0 & x > s_4 \end{cases} \quad (10)$$

式中符号同前说明。同理，可推得越大越优型指标的数学表达式类似式(8)~(10)。若指标类型为越小越优型，由式(8)~(10)可得基于分段三角模糊数的联系数 μ_l 的表达式为：

$$\mu_l = \begin{cases} 1 & x \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x}{s_2 - s_1} + \frac{2(x - s_1)^2}{(s_2 - s_1)^2} & s_1 < x \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ \frac{(s_2 + s_3 - 2x)^2}{2(s_3 - s_1)^2} - \frac{(s_1 + s_2 - 2x)^2}{2(s_3 - s_1)^2} & \frac{s_1 + s_2}{2} < x \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ \frac{(s_3 + s_4 - 2x)(s_2 + s_3 - 2x)}{2(s_4 - s_2)^2} - \frac{(s_2 + s_3 - 2x)^2}{2(s_4 - s_2)^2} & \frac{s_2 + s_3}{2} < x \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ -\frac{2(x - s_4)^2}{(s_4 - s_3)^2} - \frac{2x - s_3 - s_4}{s_4 - s_3} & \frac{s_3 + s_4}{2} < x \leq s_4 \\ -1 & x > s_4 \end{cases} \quad (11)$$

式中符号同前说明。同理，也可推得越大越优型指标的数学表达式类似式(11)。

2.3.5 综合评价方法

根据评价指标对等级标准的联系数 μ_l ，结合指标权重向量 w_l ，计算相应的综合联系数 μ 和级别特征值 z ，其计算公式为^[20]

$$z = 3 - 2\mu \tag{12}$$

$$\mu = \sum_{l=1}^M w_l \mu_l \tag{13}$$

3 结果分析

3.1 权重计算结果

根据层次分析法 1~9 及其倒数的标度方法，对 5 个因子进行两两比较，并构造判断矩阵。根据相关研究成果^[21, 22]，对于水体富营养化而言，各因子重要性排序为:Chl-a>TP>TN>SD>COD_{mn}。根据层次分析法计算步骤得到 Chl-a、TP、TN、SD、COD_{mn} 的权重向量 $w_{A1}=(0.4162, 0.2618, 0.1611, 0.0986, 0.0624)$ ，经一致性检验，CR 全部小于 0.1，表明判断矩阵具有满意的一致性。采用改进熵值法计算得出 Chl-a、TP、TN、SD、COD_{mn} 的权重向量 $w_{S1}=(0.2355, 0.2587, 0.1685, 0.1857, 0.1516)$ 。由式(1)~(3)计算得到综合权重 $w_1=(0.3195, 0.2601, 0.1651, 0.1452, 0.1101)$ 。

3.2 综合评价结果

根据黄柏河梯级水库富营养化评价指标的实测值和分级标准，由式(11)计算得到基于三角模糊数的联系数值，并按照式(12)和(13)即可得到相应的级别特征值，见表 4 和表 5。结果表明，玄庙观水库的级别特征值 $z \in (1, 1.5)$ ，由此可判定该样本评价结果为 I 级；天福庙水库、西北口水库和尚家河水库的级别特征值 $z \in (2, 2.5)$ ，可确定它们的评价等级均属于 II 级。本文方法得出黄柏河梯级水库营养水平由大到小依次为:尚家河水库>西北口水库>天福庙水库>玄庙观水库。

表 4 基于三角模糊数的联系数值结果

采样点	Chl-a	TP	TN	SD	COD _{mn}
玄庙观水库	0.309 3	0.260 1	0.016 5	0.145 2	0.075 8
天福庙水库	0.271 1	-0.072 3	0.034 8	0.145 2	0.008 2
西北口水库	0.242 0	-0.138 9	0.009 2	0.145 2	0.068 5
尚家河水库	0.234 7	-0.260 1	-0.020 2	0.145 2	0.070 7

3.3 方法比较

为了验证本文方法可行性，选取国内外应用广泛且较为简便的集对分析法、模糊综合指数法和综合营养状态指数法进行对

比分析(表 5)，得到如下结论。

表 5 水库富营养化评价结果比较

采样点	本文方法		集对分析法		模糊综合指数法		综合营养状态指数法	
	级别特征值	评价结果	联系数主值	评价结果	模糊指数	评价结果	营养指数	评价结果
玄庙观水库	1.406 8	I	0.858 0	I	1.183 3	I	25.072	I
天福庙水库	2.112 9	II	0.557 5	II	1.610 5	II	36.494	II
西北口水库	2.205 5	II	0.383	II	2.114 7	II	40.428	II
尚家河水库	2.470 9	II	0.269 8	II	2.308 0	II	43.574	II

(1) 由表 5 可知，同样的评价因子及评价标准情况下，不同方法得到的评价等级结果完全一致。4 座梯级水库在 4 种方法下均得到相同的评价等级，即玄庙观水库的评价等级为 I 级，天福庙水库、西北口水库和尚家河水库的评价等级均为 II 级。还有，在 4 种方法下得到 4 座水库的营养状态排序结果也是一致的。这表明基于集对分析与三角模糊数耦合的水库富营养化综合评价方法是可行和有效的。

(2) 采用层次分析法(AHP)与改进熵值法确定指标组合权重，既避免了主观赋权不够客观的弊端，又克服了客观赋权难以反映指标重要性的不足，使评价指标权重更加合理。

(3) 基于联系数与三角模糊数耦合的富营养化综合评价方法能充分考虑分级标准限值的模糊性和不确定性，利用级别特征值的等级判定准则，可以直观地确定水库富营养化等级，并更加细微、准确的区分同一等级水体富营养化差异。以尚家河水库为例，评价因子 TN 和 TP 浓度较高，根据评价标准，分别处于 III 级和 V 级；而 SD 值较大，处于 I 级；Chl-a 和 COD_{mn} 的营养化级别则均为 II 级。5 种评价因子分别处在 4 个不同的级别上，无法主观直接判定采样点的富营养化等级。本文方法能够准确地将其确定为 II 级，可以有效地解决各指标处于不同营养化级别情况下的综合评判问题。还有，对于相同等级的天福庙水库、西北口水库、尚家河水库而言，其级别特征值分别为 2.1129、2.2055、2.4709，显然，尚家河水库的富营养化程度要明显高于天福庙水库和西北口水库，并逐渐接近 III 级水平。因此，本文方法不仅能够准确确定营养化级别，还能细致刻画评价结果向相邻等级转化的趋势。

(4) 除玄庙观水库的 TP 浓度在 I 类标准以下，黄柏河流域其余 3 座梯级水库的 TP 和 TN 浓度总体偏高，已超过国际上广泛认可的 发生水体富营养化的临界浓度:TP 为 0.02mg/L，TN 为 0.3mg/L，表明水库中的氮磷生源要素完全可以满足藻类生长的需要。一旦梯级水库的水温、光照、水动力条件等适宜，藻类就会旺盛生长迅速繁殖，从而导致水体不同程度的富营养化。分析其原因可能主要在于黄柏河东支流域大规模的磷矿开采过程中产生的废水，其次为流域内的农业面源污染和城镇生活污水。

4 结论

(1) 根据湖库富营养化程度评价标准，选取 Chl-a、TP、TN、SD、COD_{mn} 共 5 项水质指标作为评价因子，采用黄柏河流域 4 个

梯级水库 2016 年 7 月的监测数据,应用联系数与三角模糊数耦合方法综合评价了水库的富营养化状态。结果表明,玄庙观水库处于贫营养状态,天福庙水库、西北口水库和尚家河水库均处于中营养状态,各水库富营养化程度排序为:尚家河水库>西北口水库>天福庙水库>玄庙观水库。

(2)水库富营养化评价涉及各指标与分类等级的多变量综合决策过程,具有高度的非线性特征。本文引入集对分析与三角模糊数理论,结合层次分析法与改进熵值法确定指标综合权重,由级别特征值判定水库营养化等级。实例应用结果表明,评价结果与采用其他方法完全一致,且该方法原理清晰,算法简明有效,评价结果更具有直观性,为湖库富营养化评价工作提供一种新的途径。

(3)黄柏河流域的梯级水库 TP、TN 保持较高的浓度,发生藻类水华的潜在风险较高。因此,建议持续开展流域综合整治,建立流域长效管理机制,落实流域内磷矿开采总量控制机制,大力实施控源截污,减轻流域水体污染负荷,实现流域水质明显好转且持续向好。

参考文献:

- [1] 梁培瑜,王烜,马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响 [J]. 湖泊科学, 2013, 25(4) : 455—462.
- 【LIANG P Y, WANG X, MA F B. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication: A review [J]. Journal of Lake Sciences. 2013, 25(4) : 455—462. 】
- [2] FERREIRA J G, BRICKER S B, SIMAS T C. Application and sensitivity testing of a eutrophication assessment method on coastal systems in the United States and European Union [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 82 (4) : 433 —445.
- [3] 王明翠,刘学芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. 中国环境监测, 2002, 18(5) : 47—49.
- 【WANG M C, LIU X Q, ZHANG J H. Evaluation method and classification standard on lake eutrophication [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5) : 47—49. 】
- [4] 朱丽楠,官涤,王永军,等. 典型湖库富营养化的模糊综合评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21 (9) :1131—1136.
- 【ZHU L N, GUAN D, WANG Y J, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water eutrophication of typical lakes and reservoirs [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(9) : 1131—1136. 】
- [5] 任黎,董增川,李少华. 人工神经网络模型在太湖富营养化评价中的应用 [J]. 河海大学: 自然科学版, 2004, 32(2) : 147—150.
- 【REN L, DONG Z C, LI S H. Application of artificial neural network model to assessment of Taihu Lake eutrophication [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(2) :147—150. 】
- [6] 谢平,李德,陈广才,等. 基于贝叶斯公式的湖泊富营养化随机评价方法及其验证 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(2) : 224—228.

【XIE P, LI D, CHEN G C, et al. A lake eutrophication stochastic assessment method by using Bayesian formula and its verification [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(2) : 224—228. 】

[7] 刘登峰, 王栋, 丁昊, 等. 水体富营养化评价的熵—云耦合模型 [J]. 水利学报, 2014, 45(10) : 1214—1222.

【LIU D F, WANG D, D H, et al. Eutrophication assessment by Entropy-Cloud Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10) : 1214—1222. 】

[8] 陈丽燕, 付强, 魏丽丽. 五元联系数在湖泊水质综合评价中的应用 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(3) : 82—86.

【CHEN L Y, FU Q, WEI L L. Application of five-element connection number to the quality assessment of eutrophication in lakes [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(3) : 82—86. 】

[9] 王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法——集对评价法 [J]. 中国科学: E 辑, 2009, 39 (9) : 1529 —1534.

【WANG W S, JIN J L, DIN J, et al. A new approach to water resources system assessment——set pair analysis method [J]. Science in China (Series E: Technological Science) , 2009, 39(9) : 1529—1534. 】

[10] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用 [J]. 水利学报, 2009, 40(3) : 257—262.

【MENG X Y, HU H P. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3) : 257—262. 】

[11] 彭涛, 王珍, 赵乔, 等. 基于压力-状态-响应模型的黄柏河生态系统健康评价 [J]. 水资源保护, 2016, 32(5) : 29—34.

【PENG T, WANG Z, ZHAO Q, et al. Assessment of ecosystem health for Huangbai River base on PSR model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5) : 29—34. 】

[12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254—282.

【State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method [M]. China Environmental Science Press, 2002: 254—282. 】

[13] SAATY T L. Applications of analytical hierarchies [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1979, 21(1) : 1—20.

[14] 郭显光. 改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(12) : 98 ~ 102.

【GUO X G. Application of improved entropy method in evaluation of economic result [J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 1998, 18(12) : 98 ~ 102. 】

-
- [15] 樊治平, 赵萱. 多属性决策中权重确定的主客观赋权法 [J]. 决策与决策支持系统, 1997, 7(4) : 87—91.
- 【FAN Z P, ZHAO X. An objective and subjective synthetic approach to determine weights for multiple attribute decision making [J]. Journal of Decision Making and Decision Support Systems, 1997, 7(4) : 87—91. 】
- [16] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- 【ZHAO K Q. Set pair analysis its preliminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. 】
- [17] 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 等. 基于三角模糊数和重金属化学形态的土壤重金属污染综合评价模型 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(2) : 431—439.
- 【LI H, HUANG J H, ZENG G M, et al. An integrated assessment model for heavy metal pollution in soil based on triangular fuzzy numbers and chemical speciation of heavy metal [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(2) : 431—439. 】
- [18] RONALD E G, ROBERT E Y. Analysis of the error in the standard approximation used for multiplication of triangular and trapezoidal fuzzy numbers and the development of a new approximation [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 91(1) : 1—13.
- [19] 葛康, 汪明武, 陈光怡. 基于集对分析与三角模糊数耦合的土壤重金属污染评价模型 [J]. 土壤, 2011, 43(2) : 216—220.
- 【GE K, WANG M W, CHEN G Y. A coupling model of set pair analysis and triangular fuzzy numbers for evaluation of soil heavy metal pollution [J]. Soils, 2011, 43(2) : 216—220. 】
- [20] 汪明武, 陈光怡, 金菊良. 基于多元联系数-三角模糊数随机模拟的围岩稳定性风险评价 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4) : 643—647.
- 【WANG M W, CHEN G Y, JIN J L. Risk evaluation of surrounding rock stability based on stochastic simulation of multielement connection number and triangular fuzzy numbers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (4) : 643—647. 】
- [21] 金相灿. 中国湖泊环境(第1册) [M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 275—280.
- 【JIN X C. China Lake Environment(1st Edition) [M]. Beijing: China Ocean Press, 1995: 275—280.
- [22] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价方法 [J]. 湖泊科学, 1997, 9(1) : 89—94.
- 【CAI Q H. Comprehensive evaluation method of lake eutrophication [J]. Journal of Lake of Sciences, 1997, 9 (1) : 89 —94. 】