

# 熵权属性识别模型在水库富营养化评价中的应用

吴都, 唐德善

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:** 水库富营养化评价中对各个指标进行权重分配时会遇到一定的人为主观因素的影响, 因此本算例对各指标权重分配采用熵权法。选取广东省内的十座大型水库, 针对水库富营养化的问题选取六个指标并结合属性识别法建立熵权属性识别模型。通过将计算得出的结果与这十座水库实际富营养化的情况进行比较, 发现计算结果与实际情况基本一致, 由此可知熵权属性识别模型适用于水库富营养化程度的评价, 同时该模型简单, 具有一定的推广性。

**关键词:** 水库富营养化; 权重分配; 熵权法; 属性识别模型

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0249-03

## Application of entropy attribute recognition model in reservoir eutrophication evaluation

WU Du, TANG De shan

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Subjective factors can affect the weight distribution for each index in the evaluation of reservoir eutrophication, therefore entropy method was used to distribute the weight of each index. In this paper, six indexes in the evaluation of reservoir eutrophication in ten large reservoirs of Guangdong Province were selected, and the attribute recognition method was used to develop the entropy attribute recognition model. The model results agreed with the actual eutrophication conditions in the ten reservoirs, which suggested that the entropy attribute recognition model is applicable in the evaluation of reservoir eutrophication.

**Key words:** reservoir eutrophication; weight distribution; entropy method; attribute recognition model

水库作为城市供水的水源之一, 其水体的好坏直接关系到人民群众的饮用水安全, 客观公正的评价水库富营养化程度是确保城市供水安全的一个重要环节, 同时水库富营养化程度直接影响水库周边的生态环境。目前, 水库富营养化的评价方法主要包括模糊物元法<sup>[1-4]</sup>、层次分析法<sup>[5-7]</sup>和综合营养指数法。在水库富营养化评价<sup>[8]</sup>的过程中, 最重要的一个环节便是对各个评价指标权重的分配, 现有方法在权重的分配上或多或少都受一些主观因素的影响。为此, 本文基于熵权法构建水库富营养化程度评价的属性识别模型, 为水库富营养化评价提供了一种行之有效的方法。

## 1 属性识别模型的建立

### 1.1 属性空间矩阵和分类标准矩阵的建立

某一对象空间为  $X^{(q)}$ , 在对象空间  $X$  上取  $n$  个研究样本, 即  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 对于每个研究样本选取  $m$  个评价指标, 即  $I_1, I_2, \dots, I_m$ 。若第  $i$  个样本共有  $j$  个评价指标, 则令第  $i$

个样本第  $j$  个指标的观测值为  $x_{ij}$ , 可计为  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ , 其中  $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ 。设  $F$  为对象空间  $X$  上的一个属性空间,  $(C_1, C_2, \dots, C_k)$  为属性空间的一个有序分割类<sup>[10-11]</sup>, 并且满足  $C_1 > C_2 > \dots > C_k$ , 则属性分类标准矩阵为:

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_k \\ \begin{matrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mk} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

式中:  $a_{mk}$  为第  $m$  个指标在属性空间  $F$  上的第  $k$  个分割值, 同时  $a_{jk}$  满足  $a_{j1} < a_{j2} < \dots < a_{jk}$  或  $a_{j1} > a_{j2} > \dots > a_{jk}$ 。

### 1.2 样本属性测度的计算

先假设  $a_{j1} < a_{j2} < \dots < a_{jk}$ , 第  $i$  个评价方案的第  $j$  个指标实际测量值  $x_{ij}$  属于  $C_l$  类的单指标属性测度  $u_{ijl}$  的计算方法如下<sup>[12]</sup>:

$$\text{当 } x_{ij} \leq a_{j1} \text{ 时, } u_{ij1} = 1, u_{ij2} = u_{ij3} = \dots = u_{ijk} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2014-07-18 修回日期: 2015-02-05 网络出版时间: 2014-03-20  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150320.1631.006.html>  
基金项目: 水利部公益性基金资助项目(200901084)  
作者简介: 吴都(1989-)男, 辽宁沈阳人, 主要从事水资源规划与管理方面的研究。E-mail: wudu024@163.com  
通讯作者: 唐德善(1955-)男, 江苏泰州人, 教授, 从事水资源规划与管理方面的研究。E-mail: tds808@126.com

$$\text{当 } x_{ij} \geq a_{jk} \text{ 时, } u_{ijk} = 1, u_{ij1} = u_{ij2} = \dots = u_{ijk-1} = 0 \quad (2)$$

$$\text{当 } a_{jl} \leq x_{ij} \leq a_{j(l-1)},$$

$$\begin{cases} u_{ijl} = |a_{j(l+1)} - x_{ij}| / |a_{j(l+1)} - a_{jl}| \\ u_{ij(l+1)} = |x_{ij} - a_{jl}| / |a_{j(l+1)} - a_{jl}| \end{cases} \text{ 其中 } 1 \leq l \leq k-1 \quad (3)$$

$$u_{ijk} = 0, \text{ 其中 } k < l \text{ 或者 } k > l+1 \quad (4)$$

其中:  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价方案的第  $j$  个指标实际测量值。

令第  $i$  个样本  $x_i$  的属性测度为  $u_{ik}$ , 设各个指标的权重分别为  $w_1, w_2, \dots, w_m$  那么

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j u_{ijk} \quad 1 \leq i \leq n; 1 \leq k \leq K \quad (5)$$

依照置信度准则计算  $k_i$ , 一般 0.6 到 0.75 为置信度  $\lambda$  常用取值区间, 那么

$$k_i = \min\{k: \sum_{l=1}^k u_{il} \geq \lambda, 1 \leq k \leq K\} \quad (6)$$

则认为  $x_i$  为  $C_{k0}$  类。

### 1.3 权重的确定

设有  $n$  个待评价样本, 每个样本有  $m$  个评价指标, 则所有样本的指标特征值矩阵为  $(X_{ij})_{m \times n} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ , 对特征值矩阵进行归一化处理<sup>[13]</sup> 如下:

$r_{ij} = |X_{ij} - \inf(X_{ij})| / |\sup(X_{ij}) - \inf(X_{ij})|$ ; 效益型(越大越好)

$r_{ij} = |\sup(X_{ij}) - X_{ij}| / |\sup(X_{ij}) - \inf(X_{ij})|$ ; 成本性(越小越好)

式中:  $\sup(X_{ij})$ 、 $\inf(X_{ij})$  分别为指同一个评价指标下不同组方案中的最大值和最小值。根据熵的定义,  $n$  个待评价样本的  $m$  个评价指标, 可以定义指标熵为

$$H_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

为了避免  $r_{ij} = 0$  时  $\ln f_{ij}$  变得没有意义, 为了不违反熵的定义, 将  $f_{ij}$  定义为

$$f_{ij} = (1 + r_{ij}) / \sum_{j=1}^m (1 + r_{ij}) \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

第  $i$  个评价指标的熵权  $X_i$  为

$$X_i = (1 - H_i) / \sum_{i=1}^m (1 - H_i) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

## 2 实例分析

### 2.1 基本资料

广东省共有大型水库 33 座, 本实例选取其中的 10 座水库进行研究分析。分析的指标为叶绿素(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、透明度(SD), 各水库监测值见表 1。

表 1 水库各指标监测值<sup>[14]</sup>

Tab. 1 Monitoring value of each index in the reservoir

项目	SD /m	COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	TN /(mg·L <sup>-1</sup> )	Chal /(mg·L <sup>-1</sup> )	TP /(mg·L <sup>-1</sup> )
新丰江水库	2.1	1.7	0.5	0.0016	0.01
枫树坝水库	3.4	1.4	0.64	0.0016	0.04
飞来峡水库	2.6	1.8	0.7	0.0028	0.04
南水水库	3.4	1.9	1.95	0.0027	0.06
白盆珠水库	1.7	3.7	0.72	0.0123	0.02
高州水库	3.4	1.4	0.5	0.028	0.02
鹤地水库	2.8	1.6	0.352	0.001	0.0028
白石窑水库	3.2	1.7	1.42	0.031	0.06
锦江水库	1.2	3.2	1.25	0.012	0.02
流溪河水库	0.6	6.3	1.26	0.0206	0.04

根据《我国湖泊富营养化评价标准》, 将湖泊水质分为 6

个等级, 见表 2。

表 2 我国湖泊富营养化评价标准<sup>[15]</sup>

Tab. 2 Eutrophication evaluation standard in China

项目	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	重富营养
Chal /(mg·m <sup>-3</sup> )	≤1.0	≤2.0	≤4.0	≤10	≤65	≤160
TP /(mg·m <sup>-3</sup> )	≤2.5	≤5.0	≤25	≤50	≤200	≤600
TN /(mg·m <sup>-3</sup> )	≤3.0	≤5.0	≤300	≤500	≤2 000	≤6 000
COD <sub>Mn</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	≤0.3	≤0.4	≤2.0	≤4.0	≤10	≤25
SD/m	≥10.0	≥5.0	≥1.5	≥1.0	≥0.4	≥0.3

### 2.2 水库富营养化评价

#### 2.2.1 构建分类标准矩阵

根据属性分类标准矩阵的定义和表 2 的我国湖泊富营养化评价标准可以构建分类标准矩阵如下:

	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	重富营养
Chal	1.0	2.0	4.0	10	65	160
TP	2.5	5.0	25	50	200	600
TN	3.0	5.0	300	500	2000	6000
COD <sub>Mn</sub>	0.3	0.4	2.0	4.0	10	25
SD	10.0	5.0	1.5	1.0	0.4	0.3

#### 2.2.2 计算样本的属性测度矩阵

以新丰江水库为例, 其属性测度矩阵为

	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	重富营养
Chal	0	0.17	0.83	0	0	0
TP	0	0.19	0.81	0	0	0
TN	0	0	0	1.0	0	0
COD <sub>Mn</sub>	0.4	0.6	0	0	0	0
SD	0	0.75	0.25	0	0	0

矩阵中各数字表示各指标分别属于每个等级的概率。其他 9 座水库的监测值可以按照上述方法依次进行计算。

根据熵权理论确定各指标的权重。计算得到的权重系数依次为  $\omega = (0.183, 0.207, 0.207, 0.199, 0.204)$ 。

因此综合属性测度矩阵为

	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	重富营养
新丰江	0.080	0.390	0.347	0.166	0	0
枫树坝	0.080	0.311	0.280	0.296	0.015	0
飞来峡	0	0.229	0.460	0.290	0.022	0
南水	0	0.280	0.311	0.232	0.177	0
白盆珠	0	0.073	0.399	0.493	0.035	0
高州	0	0.372	0.462	0.166	0	0
鹤地	0.379	0.141	0.359	0.043	0	0
白石窑	0	0.341	0.415	0.227	0.016	0
锦江	0	0.061	0.321	0.526	0.092	0
流溪河	0	0	0.097	0.579	0.323	0

#### 2.2.3 结果分析

为了对结果进行分析, 分别取置信度  $\lambda$  的两个边界 0.6 和 0.75 作为评判准则, 之后利用公式(3) 计算  $k_i$  及水库富营

养化的分类, 结果表 3。

表 3 水库富营养化评价结果

Tab. 3 Evaluation results of reservoir eutrophication

监测点	$\lambda=0.6$			$\lambda=0.75$			各水库实际富营养化情况 <sup>[4]</sup>
	$K_i$	$K$	级别	$K_i$	$K$	级别	
新丰江水库	0.82	3	中	0.82	3	中	中
枫树坝水库	0.67	3	中	0.97	4	中富	中
飞来峡水库	0.69	3	中	0.98	4	中富	中
南水水库	0.60	3	中	0.83	4	中富	中
白盆珠水库	0.97	4	中富	0.97	4	中富	中富
高州水库	0.83	3	中	0.83	3	中	中
鹤地水库	0.88	3	中	0.88	3	中	中
白石窑水库	0.76	3	中	0.98	3	中	中
锦江水库	0.91	4	中富	0.91	4	中富	中富
流溪河水库	0.68	4	中富	1.00	5	富	富

利用熵权属性识别模型可评估水库富营养化等级, 还可以对同等级的水库进行富营养化程度的排序。水库富营养化程度排序的计算公式如下:

$$H = \sum_{i=1}^8 u_{ik} \times n_l, \text{ 其中 } n_l = 8 + 1 - l \quad (1 \leq l \leq 8) \quad (10)$$

### 2.2.4 计算结果分析

(1) 当置信度  $\lambda$  取 0.6 时, 将熵权属性识别模型的计算结果与水库实际富营养化情况进行比较, 可以看出仅有流溪河水库富营养化的评价等级不同, 二者相差一个等级, 相同率达到 90%; 当置信度取 0.75 时, 将熵权属性识别模型的计算结果与水库实际富营养化情况进行比较, 可以看出枫树坝水库、飞来峡水库、南水水库的富营养化评价等级不同, 分别相差一个等级, 相同率达到 70%。

(2) 当置信度  $\lambda$  由 0.6 向 0.75 变化时, 根据公式(5)可知富营养化等级会由前一等级向相邻后一等级变化, 即枫树坝水库、飞来峡水库、南水水库的富营养化级别由“中营养”向“中富营养”改变, 而三座水库的实际情况为“中营养”; 流溪河水库的富营养化级别由“中富营养”向“富营养”改变, 水库的实际情况为“富营养”; 其余水库富营养化的评价等级均不改变, 并且与相应的六座水库实际富营养化情况相一致。

(3) 根据公式(10), 十座水库富营养化程度的计算结果如下:  $H = (4.31, 4.07, 3.81, 3.73, 3.51, 4.21, 4.54, 4.08, 3.35, 2.77)$ , 即各个水库富营养化程度由低到高的排序是: 鹤地水库 > 新丰江水库 > 高州水库 > 白石窑水库 > 枫树坝水库 > 飞来峡水库 > 南水水库 > 白盆珠水库 > 锦江水库 > 流溪河水库。

## 3 结论

(1) 采用熵权属性识别法进行水库富营养化的计算避免了用 AHP 对各指标进行赋权时的受主观因素的影响, 使得评价结果客观公正。

(2) 通过将计算结果与水库实际富营养化的情况进行对比, 发现在置信度取 0.6 和 0.75 时(这两个值分别是置信度常用区间的最小值和最大值)熵权属性识别法的计算结果与十座水库的实际富营养化情况基本一致, 因此熵权属性识别法适用于对水库富营养化程度进行评价, 并且模型结构简

单, 易于推广。

(3) 熵权属性识别法不仅可以评价水库富营养化的程度, 还可以对同等级水体的富营养化程度进行高低排序。

### 参考文献(References):

[1] 齐玉梅, 黄光明. 湖泊富营养化物元模型及复合应用初探[J]. 重庆环境科学, 1999, 2(15): 9-11. (QI Yu mei, HUANG Guang ming. Matter element model and preliminary application of composite about eutrophication[J]. Chongqing Environmental Science, 1999, 2(15): 9-11. (in Chinese))

[2] 陈海涛, 陈晓楠, 邱林. 基于三标度法的可变模糊集模型在湖泊水质评价中应用[J]. 节水灌溉, 2010(1): 7-10. (CHEN Haitao, CHEN Xiaonan, QIU Lin. Application of fuzzy matter element model based on three mark method in the evaluation of water quality of lake[J]. Water saving and Irrigation, 2010(1): 7-10. (in Chinese))

[3] 武斌. 基于模糊物元的湖泊水质评价模型研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(7): 12-15. (WU Bin. Study on fuzzy matter element based model for lake water quality evaluation[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology 2007, 38(7): 12-15. (in Chinese))

[4] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. (CAI Wen. Matter element Model and Application[M]. Beijing: Scientific and technical Documentation Press, 1994. (in Chinese))

[5] 庞振凌, 常红军. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1810-1819. (PANG Zhen Ling, CHANG Hong Jun. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in danjiangkou reservoir source of the middle line Project to Transfer Water From South to North, China[J]. Acta Ecologica Sinica. 2008, 28(4): 1810-1819. (in Chinese))

[6] 王肖肖, 张妙仙, 徐兵兵. 模糊标识指数与对应分析法在水质评价中的联合应用[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1227-1235. (WANG Xiaoxiao, ZHANG Miaoxian, XU Bingbing. Combination and application of fuzzy identification index and correspondence analysis method in water quality evaluation[J]. Environmental Science. 2012, 32(5): 1227-1235. (in Chinese))

[7] 洪继华, 宋依兰. 层次分析法在水环境规划中的应用[J]. 环境科学与技术, 2000(1): 32-39. (HONG Jihua, SONG Yilan. Application research of analytic hierarchy process in water environmental planning[J]. Environment Science and Technology. 2000, 1: 32-39. (in Chinese))

[8] 张永良, 刘培哲. 水环境容量综合手册[K]. 北京: 清华大学出版社, 1991. (ZHANG Yongliang, LIU Peizhe. Composite notebook of water environmental capacity[K]. Beijing: Tsing University Press, 1991. (in Chinese))

[9] 卞建民, 汤洁, 李立军. 辽河油田地区地下水水质的熵权属性识别评价. 水文, 2007, 27(3): 46-49. (BIAN Jianmin, TANG Jie, LI Lijun. Application of attribute recognition model based on coefficient of entropy in groundwater quality assessment for the Liaohe oilfield area[J]. Hydrology. 2007, 27(3): 46-49. (in Chinese))

(下转第 273 页)

- 综合评价中的应用[J]. 中国公共卫生管理, 2006, 22(2): 114-115. (CHI Xiong, SHAN Lirmin, YAO Mirli, et al. Application of evaluate synthetically the work quality of food sanitation supervison[J]. China. J of PHM, APR, 2006, 22(2): 114-115. (in Chinese))
- [16] 周荣喜, 单欣涛, 杨杰, 等. 基于熵权的区间型多属性决策方法在湖泊水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 910-917. (ZHOU Rong-xi, SHAN Xin tao, YANG Jie, et al. Lake water quality assessment using entropy-based interval number multi attribute decision making method[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 910-917. (in Chinese))
- [17] Sun Yi. Algorithm of adjusting weights of decision makers and attribute in multi attribute group decision making[M]. 2013.
- [18] 李文杰, 王冰. 地表水中氨氮和总氮的相关性分析[J]. 环境保护科学, 2012, 5(3): 79-81. (LI Wenjie, WANG Bing. Correlation analysis on ammonia nitrogen and total nitrogen in surface water[J]. Environmental Protection Science, 2012, 5(3): 79-81. (in Chinese))
- [19] 周宇峰, 魏法杰. 基于相对熵的多属性决策组合赋权方法[J]. 运筹与管理, 2006, 15(5): 48-53. (ZHOU Yufeng, WEI Farjie. Combination weighting approach in multiple attribute decision making based on relative entropy[J]. Operations Research and Management Science, 2006, 15(5): 48-53. (in Chinese))
- [20] 代雪静, 田卫. 水质模糊评价模型中的赋权方法的选择[J]. 中国科学院研究生学报, 2011, 28(2): 169-176. (DAI Xuejing, TIAN Wei. Choice of determining weights method in fuzzy synthetic evaluating model for water quality[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28(2): 169-176. (in Chinese))
- [21] 毛红保, 张凤鸣, 冯卉, 等. 一种基于区间估计的多属性决策组合赋权方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 6(6): 86-92. (MAO Hongbao, ZHANG Fengming, FENG Hui, et al. A New Combination Determining Weights Method for Interval Multiattribute Decision making[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2007, 6(6): 86-92. (in Chinese))
- [10] 宫博, 许开立, 李德顺. 基于熵权-属性识别模型的地表水水质评价[J]. 环境科学导报. 2011, 30(6): 74-77. (GONG Bo, XU Karli, LI Deshun. Assessment of the surface water quality based on entropy weight of attribute recognition model[J]. Environment Science Herald. 2011, 30(6): 74-77. (in Chinese))
- [11] 刘燕, 吴文玲, 胡安焱. 基于熵权的属性识别水质评价模型[J]. 人民黄河, 2005, 27(7): 18-19. (LIU Yan, WU Wenling, HU Anyan. Attribute distinction water quality evaluation model based on the entropy weigh[J]. Yellow River, 2005, 27(7): 18-19. (in Chinese))
- [12] 张龙云, 李术才, 杨尚阳. 隧道围岩稳定性评价的改进熵权-属性识别模型[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 67-69. (ZHANG Longyun, LI Shucai, YANG Shangyang. Improve entropy attribute recognition model of surrounding rock stability in tunnel[J]. Water Resources and Power. 2012, 30(4): 67-69. (in Chinese))
- [13] 郭奇, 曹洪洋. 大气环境质量评价的属性识别法[J]. 环境监测管理与技术, 2004, 16(3): 41-42, 44. (GUO Qi, CAO Hongyang. Attribute recognition method in atmospheric environmental quality assessment[J]. Administration and Technique of Environmental Monitoring. 2004, 16(3): 41-42, 44(in Chinese))
- [14] 广东省水利厅. 广东省水库污染防治综合规划[R]. 广东: 广东省水利厅, 2005-2010. (Guangdong Provincial Water Resources Department. Guangdong Province reservoir pollution control program[R]. Guangdong: Water Conservancy Department of Guangdong Province, 2005-2010. (in Chinese))
- [15] 舒金华. 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨[J]. 环境污染与防治, 1990, 12(5): 2-7. (SHU Jinhua. The assessment methodology for eutrophication level of lakes in China[J]. Environmental Pollution & Control, 1990, 12(5): 2-7. (in Chinese))

(上接第 251 页)