

基于多判据决策的水体营养状态评价

周晓蔚, 王丽萍, 李继清

(华北电力大学 可再生能源学院 水资源与水利水电工程研究所, 北京 102206)

摘要:为了准确地评价水生态系统营养状态和综合决策,通过最大熵原理耦合模糊性与随机性,建立了最大熵模糊评价模型(FAME);利用逼近理想解排序法(TOPSIS),以待决策水体样本的实测值为理想解,以评价结果中与实测值相差最大的为负理想解,建立了多判据决策模型(MCDM)。经 12 个湖泊实测数据验证,最大熵模糊评价与随机评价、模糊评价和灰色评价的结果较为一致,但提高了评价水体营养状态问题各层次的分辨力。多判据决策模型可解决多种方法评价结果不相容问题,使评价结果更接近水体实际情况。FAME 和 MCDM 适用于各种水质的综合评价及决策。

关键词:营养状态;评价;不确定性;最大熵原理;逼近理想解排序法;多判据决策

文章编号:1000-0933(2008)01-0345-08 中图分类号:Q178,X171 文献标识码:A

Assessment of nutritional status in water-body based on multi-criteria decision-making

ZHOU Xiao-Wei, WANG Li-Ping, LI Ji-Qing

Research Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0345 ~ 0352.

Abstract: In order to assessment the nutritional status of the water ecosystem accurately and make integrated decision, a Fuzzy Assessment based on Maximum Entropy (FAME) is developed through the maximum entropy principle coupled with the randomness and fuzzy. Using TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), set the decision-making water bodies measure number as ideal solution, the max-difference number between the evaluation result and the measure result as the negative ideal solution, then Multiple Criteria Decision Making (MCDM) is established. According to the measured data validation of 12 lakes, the results of FAME basically consistent to the other results of the three methods (stochastic assessment method, fuzzy assessment method and grey evaluation method) is separately 83.3%、91.7%、91.7%. It is concluded that all these four methods are comparable computation precision, but FAME improves the resolution of evaluation nutritional status of water body at all levels. MCDM can solve the incompatibility of evaluation indexes of water nutritional status, making the results more close to the actual situation. FAME and MCDM can be applied to the comprehensive evaluation of water quality and decision-making.

Key Words: nutritional status; assessment; uncertainty; maximum entropy principle; TOPSIS; MCDM

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579019);武汉大学国家重点实验室开放基金资助项目(whu2005B018)

收稿日期:2007-09-26; **修订日期:**2007-11-07

作者简介:周晓蔚(1964~),女,河南南阳人,博士,副教授,主要从事区域生态风险管理与决策研究, E-mail: zwx@ncepu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50579019), and Open Funds of national Key Laboratory for Water Resources and Hydropower Engineering Science in Wuhan University (No. whu2005B018)

Received date: 2007-09-26; **Accepted date:** 2007-11-07

Biography: ZHOU Xiao-Wei, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in regional ecological risk assessment and management decision. E-mail: zwx@ncepu.edu.cn

我国湖泊(含水库)水资源总量为 6380 亿 m^3 , 占我国城镇饮用水源的 50% 以上, 是我国城乡最主要的水源地^[1]。近 20a 来, 我国湖泊环境问题, 尤其是富营养化问题越来越严重。随着湖泊富营养化的加剧, 藻类水华爆发的频率越来越高, 规模也越来越大, 有可能造成全国范围的湖泊富营养化灾害, 成为制约我国社会和国民经济持续发展的重大环境问题^[2]。正确识别和评价湖泊富营养化状态, 是从根本上解决我国湖泊富营养化问题的基础之一^[1]。

第一代水体富营养化状态评价是通过测定透明度、营养盐和叶绿素含量建立以营养盐为基础的评价体系^[3], 有单项指标法、综合指数法和潜在性富营养化评价法等。第二代是比较全面地评估富营养化的致害因素及其引起的各种可能的富营养化症状的多参数富营养化评价体系, 如适用于河口及沿岸海域富营养化评价的美国“国家河口富营养化评价”^[4]和欧盟的“综合评价法”^[5], 反映了当前对水体生态系统富营养化问题的认识水平和科学研究水平。

20 世纪 80 年代以来, 一些不确定性、非线性理论方法的出现和计算机技术的推广应用, 为水体富营养化评价新模式的产生提供了理论依据和技术支持。水体生态系统具有开放性、复杂性和不确定性, 应用不确定性手段评价营养状态是当前研究的热点^[6~9]。水体生态系统的不确定性表现为随机、模糊、灰色和未确知等, 因此可采用随机评价、模糊评价、灰色关联评价、未确知测度评价等研究水体富营养化状态。但同时考虑两种或两种以上不确定性的研究较少, 本文通过最大熵原理耦合模糊性和随机性两种类型的不确定性, 建立了水体营养状态评价的模型。用多种不确定性方法进行湖泊富营养化评价可以取长补短, 使评价结果更趋合理, 更加符合实际要求, 本文尝试利用逼近理想解排序法, 建立多判据决策模型, 解决多种评价方法结果不相容问题。

1 水体营养状态评价

由于影响湖泊富营养化的环境因子众多, 确定湖泊富营养化评价的水质指标个数和种类的选择具有不确定性, 确定湖泊富营养化的评价级别和各个级别对应的水质标准浓度也具有不确定性等, 因此湖泊富营养化的评价方法具有不确定性。

到目前为止, 人们已经认识到随机信息、模糊信息、未确知信息、灰色信息等多种不确定性信息^[10]。随机信息是指由于客观条件的不充分或偶然因素的干扰, 使得几种确定性结果的出现呈现偶然性, 在某次试验中不能预知哪一个结果发生。模糊信息是指由于事物的复杂性, 其元素特征界限不分明, 使得多个事物的边界不清晰, 造成其概念不能给出确定性的描述, 不能给出确定的评定标准。未确知信息是指在进行某种决策时, 所研究和处理的某些因素和信息可能既无随机性又无模糊性, 但决策者由于条件的限制而对它们认识不清, 即所掌握的信息不足以确定事物的真实状态和数量关系。灰色信息是指由于事物的复杂性, 使得人类只能获得事物的部分信息或信息量的大致范围, 而不能获得全部信息或确切信息。湖泊富营养化的评价, 实质上是根据实测的各项水质指标浓度等多个不确定性信息, 采用适宜的不确定性方法, 对湖泊富营养化程度做出判断。

1.1 评价模型^[11,12]

设有待分级评价的 n 个水体样本, 每个样本有 m 项指标的实测值。由于水体营养状态分级标准的模糊性, 水体样本以不同的隶属度 u 分属于不同级别的营养状态。构造隶属度模糊矩阵为:

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & & & \\ u_{k1} & u_{k2} & \cdots & u_{kn} \end{bmatrix} = [u_{hj}]_{k \times n} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{h=1}^k u_{hj} = 1, u_{hj} \geq 0, \quad (j = 1, 2, \cdots, n \quad h = 1, 2, \cdots, k)$$

式中, u_{hj} 表示第 j 个样本隶属于第 h 级水体营养状态的隶属度。

显然,满足约束式的模糊分级矩阵有无穷多个。对水体营养状态进行评价的目的,是确定出最优分级矩阵。根据水质指标监测过程中测量误差的随机性所带来的不确定性, $[u_{hj}]_{k \times m}$ 的确定也具有不确定性,这样的不确定性可用 Shannon 信息熵表示:

$$H_j = - \sum_{h=1}^k u_{hj} \ln u_{hj} \quad (2)$$

第 j 个样本状态与第 h 级水体营养状态的差异可用加权广义距离表示:

$$d[e_h, f_j] = u_{hj} \left[\sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |) \right] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中, $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_m]$ 为指标权重向量。可以通过层次分析法或参考文献^[13]的方法获得。 f_j 表示第 j 个水体样本各水质指标的状态, 即 $f_j = [f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{mj}]^T$; e_h 表示第 h 级各水质指标水体营养状态标准, 即 $e_h = [e_{1h}, e_{2h}, \dots, e_{mh}]^T$ 。

为获得最优分级矩阵, 可通过一方面使全体样本与各级营养状态的标准值之间的加权广义距离之和最小, 即极小化; 另一方面使不确定性最小, 根据 Jaynes 最大熵原理, 应使 Shannon 熵极大化。

求最优分级问题实际上是一个多目标优化问题。为解决此问题, 可以构造如下复合目标优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{u_{hj}} & \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k u_{hj} \left[\sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |) \right] + \frac{1}{B} \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k u_{hj} \ln u_{hj} \right\} \\ \text{s. t.} & \sum_{h=1}^k u_{hj} = 1, u_{hj} \geq 0, (j = 1, 2, \dots, n \quad h = 1, 2, \dots, k) \end{aligned}$$

其中正参数 B 是用来对两个目标进行平衡, 根据实际问题设定。

构造问题的拉格朗日函数:

$$L(u_{hj}, \lambda) = \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^k \left\{ u_{hj} \left[\sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |) \right] + \frac{1}{B} u_{hj} \ln u_{hj} \right\} + \lambda \left[\sum_{h=1}^k u_{hj} - 1 \right] \quad (5)$$

式中, λ 为拉格朗日函数。求解拉格朗日函数得到水体样本 j 对 h 级营养状态的最大熵模糊评价模型为 (Fuzzy Assessment Based on Maximum Entropy, FAME):

$$u_{hj} = \frac{\exp \left[-B \sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |) \right]}{\sum_{h=1}^k \exp \left[-B \sum_{i=1}^m (w_i | e_{ih} - f_{ij} |) \right]} \quad (6)$$

1.2 模型验证

当水体中氮和磷等营养物过量时, 就会导致大型植物或浮游植物和潜在有害的藻类过度增殖, 造成水体缺氧、透明度下降, 水生生物物种失衡、对公众健康的威胁以及水资源质量整体下降等问题产生^[14]; 营养物是导致湖泊与沿海水质恶化的首要因素, 并且是导致河流与溪流水质恶化的第二位主要因素^[15]。所以, 目前国内第一代富营养化的评价体系中, 大多选择与上述富营养化过程关系密切的因子作为评价参数, 如表征初级生产力的叶绿素 (Chla), 与藻类有关的透明度 (SD), 与营养物有关的总磷 (TP) 和总氮 (TN) 及化学耗氧量 (COD)。美国的 Carlson 等^[16]发表了至今引用率极高的 TSI 方法以 Chla、TP、SD 为评价指标; 中国环境监测总站于 2001 年底推荐以 Chla、TP、TN、COD_{Mn} 和 SD 为评价指标, 以综合营养状态指数法评价, 该方法中各评价指标的权重是根据历史数据计算得到的^[17]。本文采用文献^[6]的评价标准 (表 1), 对我国部分湖泊的营养状态进行评价研究。

利用文献^[6]提供的 12 个不同湖泊藻类繁殖高峰期的实测水质资料, 按照表 1 中的评价指标和标准, 将 FAME 方法与随机评价 (Stochastic Assessment Method, SAM)、模糊评价 (Fuzzy Assessment Method, FAM)、灰色评价 (Grey Evaluation Model, GEM) 等方法进行比较。考虑到水体样本来自不同湖泊, 采取适用于任何类型的湖泊等权重方法^[6], 并取 $B = 10$, 评价结果见表 2。

表 1 湖泊水体营养状态评价指标^[6]

Table 1 Assessment indexes of nutritional status in lake

营养状态 Nutritional status	Chla ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	TP ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	TN ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SD (m)
I 贫营养 Oligotropher	1	2.5	30	0.3	10
II 贫中营养 Oligo-mesotropher	2	5	50	0.4	5
III 中营养 Mesotropher	4	25	300	2	1.5
IV 中富营养 Meso-eutropher	10	50	500	4	1
V 富营养 Eutropher	65	200	2000	10	0.4
VI 重富营养 Extra-eutropher	160	600	6000	25	0.3

表 2 湖泊水体营养状态评价结果

Table 2 Assessment result of nutritional status in lake

序号 No.	湖泊名称 Lake name	Chla	TP	TN	COD	SD	SAM	FAM	GEM	FAME	是否一致 Unanimous
1	邛海 Manghai	0.88	130	410	1.43	2.98	III	III	III	III	√
2	洱海 Erhai	4.33	21	180	3.38	2.4	III	III	III	III	√
3	慈湖 Cihu	15.38	87	1540	4.4	0.65	IV	IV	IV	IV	√
4	滇池 Dianchi	189.3	20	230	10.13	0.5	IV	V	III	V	× ×
5	洪泽湖 Hongzehu	11.5	100	460	5.5	0.3	IV	IV	IV	IV	√
6	巢湖 Chaohu	14.56	140	2270	4.34	0.27	V	V	IV	IV	×
7	甘棠湖 Gantanghu	77.7	135	2140	6.96	0.36	V	V	V	V	√
8	蘑菇湖 Muoguhu	82.4	332	2660	14.6	0.49	V	V	V	V	√
9	西湖 Xihu	95.94	136	2230	10.18	0.37	V	V	V	V	√
10	玄武湖 Xuanwuhu	202.1	708	6790	8.86	0.31	VI	VI	VI	VI	√
11	墨水湖 Muoshuihu	262.4	500	16050	13.6	0.15	VI	VI	VI	VI	√
12	东山湖 Dongshanhu	185.1	670	7200	14.8	0.26	VI	VI	VI	VI	√

“√”表示评价结果一致,“×”表示评价结果相差一个级别,“××”表示评价结果相差两个级别 “√” means assessment results are unanimous; “×” means that there is one step between assessment results; “××” means there are two steps between assessment results

从表 2 可以看出,在 12 个湖泊中有 10 个湖泊的评价结果是完全一致的,其比例是 83.3%;有 1 个湖泊的评价结果相差一个级别,其比例是 8.3%;有一个湖泊的评价结果相差两个级别,其比例是 8.3%。FAME 与随机评价结果是完全一致比例是 83.3%;FAME 与模糊评价结果是完全一致比例是 91.7%;FAME 与灰色评价结果是完全一致比例是 91.7%,说明这四种水体营养状态评价方法的计算精度基本相当。

FAME 的评价结果分级间隶属度差别大,较好地克服了单一考虑模糊性的模糊评价结果均值化倾向,提高了分辨效果,如 10 号水样,模糊评价的隶属度为(0.0151,0.0203,0.0213,0.0947,0.1861,0.6625),FAME 评价的隶属度为(0.0001,0.0004,0.0013,0.0024,0.0339,0.9619),按 FAME 方法评价为 VI 级更明确。同时 FAME 的评价结果还可对具有相同营养状态的各水体样本富营养化程度进行细致评价,如甘棠湖、蘑菇湖营养状态均为 V 级,而最大隶属度分别为 0.7623、0.8770,说明一方面从整体上它们的富营养化程度较强;另一方面与甘棠湖相比蘑菇湖富营养化程度更强一些。

由于水生态系统存在多种不确定性,用多种方法进行湖泊富营养化评价可以取长补短,使评价结果更趋合理。但如何对多种方法的富营养化评价结果进行综合是一个值得研究的课题^[6]。

2 多判据决策

当多种方法评价结果出现不一致时,在实际应用中需要对评价结果进行综合,即决策。假若把每一种评价方法看作为一种判据,这实际上构成了一个多判据决策(Multiple Criteria Decision Making, MCDM)问题。在多判据决策问题的解法中,逼近理想解排序法^[18]具有概念清楚、计算简捷的特点,其形式也与多判据的水体营养状态评价决策问题相适宜。

2.1 决策模型

逼近理想解排序法中的理想解 X^* 是一设想的最好解,而负理想解 X^- 是另一设想的最差的解。在水体营养状态评价结果的多判据决策中,以待决策水体样本的实测值为最好解,而以评价结果中与实测值相差最大的为最差解。

设有 n 个判据和 m 项监测指标的决策问题,当采用欧几里得范数作为距离的测度时,解 X_i 到理想解 X^* 的距离是:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_j^*)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式(7)中, X_{ij} 是 X_i 的 j 个分量,即第 j 个水质指标的值; X_j^* 是理想解 X^* 第 j 个分量。类似,解 X_i 对负理想解 X^- 的距离是:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

定义一个对理想解的相对接近度的测度去判断解的优劣:

$$C_i^* = S_i^- / (S_i^* + S_i^-) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$0 \leq C_i^* \leq 1 \quad (10)$$

如果 X_i 为理想解 X^* ,则 C_i^* 为 1,如 X_i 为负理想解 X^- ,则 $C_i^* = 0$,一般的解的 C_i^* 值在 0 与 1 之间, C_i^* 值愈接近 1,则相应的判据愈应排在前面。

2.2 算例分析

以 4 号水体样本为例进行计算说明。设随机评价、模糊评价、灰色评价、FAME 评价结果分别用 B 、 C 、 D 、 E 表示,实测水质数据用 F 表示。由表 1 和表 2 可以得到决策矩阵 A :

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Chla} & \text{TP} & \text{TN} & \text{COD} & \text{SD} \end{matrix} \\ \begin{matrix} B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{matrix} & \begin{bmatrix} 10 & 50 & 500 & 4 & 1 \\ 65 & 200 & 2000 & 10 & 10 \\ 4 & 25 & 300 & 2 & 1.5 \\ 65 & 200 & 2000 & 10 & 0.4 \\ 189.3 & 20 & 230 & 10.13 & 0.5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

由于各水质指标采用的单位不同,数值的数量级也不同,为便于比较,需要将决策矩阵 A 进行归一化处理,把各水质指标的数值变换到(0,1)区间。令:

$$Z_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 A_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad j = 1, 2, 3, 4, 5$$

得到归一化的决策矩阵 Z :

$$Z = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Chla} & \text{TP} & \text{TN} & \text{COD} & \text{SD} \end{matrix} \\ \begin{matrix} B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.0474 & 0.1730 & 0.1726 & 0.2227 & 0.5116 \\ 0.3085 & 0.6920 & 0.6903 & 0.5567 & 0.2046 \\ 0.0190 & 0.0865 & 0.1035 & 0.1113 & 0.7675 \\ 0.3085 & 0.6920 & 0.6903 & 0.5567 & 0.2046 \\ 0.8984 & 0.0692 & 0.0794 & 0.05640 & 0.2558 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

由此可以确定理想解 X^* 和负理想解 X^- 为:

$$X^* = \{0.8983, 0.0692, 0.0794, 0.5640, 0.2558\}$$

$$X^- = \{0.0190, 0.06920, 0.06903, 0.01113, 0.7675\}$$

由式(7)~(9)计算出各解距理想解、负理想解的距离 S_i^* 、 S_i^- 和对理想解的相对接近度 C_i^* :

$$S_B^* = 0.9620, S_B^- = 0.7485, C_B^* = 0.4493$$

$$S_C^* = 1.0544, S_C^- = 0.7739, C_C^* = 0.4232$$

$$S_D^* = 1.1139, S_D^- = 0.8431, C_D^* = 0.4038$$

$$S_E^* = 1.0544, S_E^- = 0.7739, C_E^* = 0.4232$$

因此,各判据的排序为 $B > D > C = E$ 。即对 4 号水体样本,在几种评价方法结果不一致的情况下,根据以上综合分析,确定水体营养状态为Ⅳ级,中富营养。同理,对 6 号水体样本综合分析结果为Ⅴ级,富营养。将 12 个湖泊的最终评价结果与实际调查结果列于表 3。

表 3 评价结果与调查实况比较

Table 3 Comparison of assessment result with investigation result

序号 No.	评价结果 Result	用水障碍情况 Situation of water utilization hindrance	序号 No.	评价结果 Result	用水障碍情况 Situation of water utilization hindrance
1	Ⅲ	无 None	7	Ⅴ	出现水华,影响观瞻 Algal bloomed, scenery is impacted
2	Ⅲ	无 None	8	Ⅴ	出现水华,有大量死鱼现象 Algal bloomed, a large number of fish are dead
3	Ⅳ	局部出现水华,影响观瞻 Partly algal bloomed, scenery was impacted	9	Ⅴ	出现水华,严重影响观瞻 Algal bloomed, scenery was severely impacted
4	Ⅳ	局部出现水华,对供水有影响 Algal bloomed, water supply was affected	10	Ⅵ	全湖出现水华,大量死鱼 Algal bloomed in whole lake, A large number of fish was dead
5	Ⅳ	局部出现水华,影响观瞻 Partly algal bloomed, scenery was impacted	11	Ⅵ	全湖出现水华,严重影响养殖 Algal bloomed in whole lake, aquaculture was severely impacted
6	Ⅴ	大面积水华,夏季出现供水障碍 Large areas of algal bloomed, water supply was affected in summer	12	Ⅵ	全湖出现水华,严重影响观瞻 Algal bloomed in whole lake, scenery was severely impacted

表 3 显示的我国部分湖泊富营养化引起用水障碍调查资料表明,一些无用水障碍的湖泊如洱海,洱海等大都处于贫中营养或中营养的阶段;有轻度用水障碍的湖泊如慈湖、滇池等局部出现水花,水色发绿,影响观瞻和饮用,大致相当于中富或富营养水平;出现严重用水障碍的湖泊如墨水湖、玄武湖等湖水发暗,出现死鱼现象,严重影响观光游览和水产事业的发展,属于富营养或重富营养水平。

3 讨论

(1) 水生生态系统是一个充满不确定性因素、变化复杂的大系统。由于随机不确定性因素的影响,客观上评价指标的属性值可能存在着多种状态。而现有评价方法,实际上都是针对给定水质指标属性值下(即某一状态下)的水质状况进行评价,这与水生生态系统的不确定性特征存在较大差距。所以采用随机信息、模糊信息、未确知信息、灰色信息等多种不确定性方法对水体营养状态进行评价研究,从不同角度对同一问题阐述,互为补充,可以更为真实、准确地反映水体营养状态。

(2) 基于最大熵的湖泊富营养化模糊评价方法,具有建模思路明确,计算方法简便,容易进行计算机编程的特点,经 12 个不同湖泊实测水质资料的验证,并与随机评价方法、模糊评价方法和灰色评价方法的结果进行比较,发现这 4 种方法的计算精度相当。FAME 评价结果既可以直接给出各水体的富营养化状态又可以利用隶属度值对具有相同营养状态的水体进行细致评价,从而提高了水体营养状态综合评价问题各层次的分辨力。FAME 模型依据的水体营养状态评价指标是目前我国广泛使用的,符合实际工作的要求。

(3) 不同湖泊所处的地理位置、环境条件和受人类活动影响程度各不相同,湖泊富营养化的类型也有所差异,如浮游植物型、大型水生植物型等。因此不同类型的湖泊的评价方法也不完全一致,尤其是权重获得方法。目前求权重的方法较多,如层次分析法、特征向量法、信息熵方法、污染因子贡献率权重、投影搜索法、区

间坡度权重等,如何从现有的众多方法中选择出最适合待评价对象的方法,是一个值得研究的问题。

(4) 尽管水体营养状态评价理论模式已有很多种,但在水质管理的实践工作中,真正能够得以广泛采用的还极少。究其原因,是现有的很多评价方法评价结果不够稳定,经常出现同一水质样本,当采用不同评价模式进行评价时,所得结论不一致的现象,所以在实际工作中人们往往还是简单地以单项水质指标最差所属级别来确定水体的综合水质级别。因此,需要一个评价结果稳定、可靠,计算过程简单、实用的评价方法。本文利用多属性决策理论中的逼近理想解排序法对多种评价结果进行决策,该方法具有概念清楚、计算简捷的特点,实例显示评价结果与调查实况相符。

(5) 水体营养状态评价只有与环境管理部门决策相结合才有意义,采用适宜的管理政策和营养物削减集成技术,从根本上解决我国湖泊富营养化问题,已成为我国建设和谐、可持续发展社会的一个亟待解决的重大任务。

4 结论

本文提出了适合于对水体营养状态进行评价和综合决策的新方法——最大熵模糊评价方法和多判据决策模型,给出了 FAME 和 MCDM 的详细步骤,并对 12 个湖泊的营养状态进行了综合评价,得出的主要结论有:

(1) 利用 FAME 可把水体营养状态多维指标综合成一维隶属度指标,根据最大隶属度原则对各个湖泊进行统一评价,解决了各单项水体营养状态评价指标评价结果的不一致问题。FAME 较单一考虑模糊性的模糊评价,提高了水体营养状态评价问题各层次的分辨力。通过对比随机评价、模糊评价、灰色评价的结果,一致率达 80% 以上,评价结果可靠。

(2) 利用 MCDM 可把多种评价方法的结果分解为最好解、最差解,通过逼近理想解排序,解决多种方法评价结果不相容问题,能真实、准确地反映水体营养状态。

(3) FAME 和 MCDM 适用于湖泊水体营养状态评价,也可以应用于河口及沿海水域、水库、河流及溪流等水体营养状态评价。

References:

- [1] Liu H L, Li X P. National strategic for control nutrients of lakes. *Environmental Protection*, 2007, 14: 16 — 19.
- [2] Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z. Mechanisms and control techniques of lake eutrophication in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1857 — 1866.
- [3] Cloern J E. Our evolving conceptual model for the coastal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2001, 210: 223 — 253.
- [4] Bricker S B, Ferreira J G and Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. *Ecol. Modell.*, 2003, 169: 39 — 60.
- [5] OSPAR. Draft common assessment criteria and their application within the comprehensive procedure of the common procedure. *Proceedings of the Meeting of the Eutrophication Task Group (ETG)*. London: OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic, 2001.
- [6] Xie P, Li D, Chen G C. A Lake eutrophication stochastic assessment method by using Bayesian formula and its verification. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 224 — 228.
- [7] Deng D P, Liu G, Li X D. A model based on simple ensemble of neural networks for comprehensive eutrophication assessment of lake and reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 725 — 731.
- [8] Liou Y T, Lo S L. A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters. *Water Research*, 2005, 39(7): 1415 — 1423.
- [9] George B. Arhonditsis, Song S. Qian, Craig A. Stow, *et al.* Eutrophication risk assessment using Bayesian calibration of process-based models: Application to a mesotrophic lake. *Ecological Modelling*, 2007, 207(1): 46 — 60.
- [10] Wang Q Y, Liu Z Y. The Conception, Sort and Mathematical Expression of Uncertainty Information. *Operations Research and Management Science*, 2001, 10(4): 9 — 15.
- [11] Zhang C K. Model and Application of the Water Quality Fuzzy Assessment Based on Entropy. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 1998, 6: 80 — 85.
- [12] Zhou X W, Wang L P, Li A Q, *et al.* Model of the water-eroded desertification Quality Fuzzy Assessment Based on Maximum Entropy. *Research of*

Soil and Water Conservation, 2007, 14(4): 296—301.

- [13] Xu J P, Wu W. Multiple Attribute Decision Making Theory and Methods. Beijing: Qinghua University Press, 2006. 42—47.
- [14] U. S. EPA. Nutrient criteria technical guidance manual, lakes and reservoirs. 822-B00-001. April, 2000.
- [15] U. S. EPA. National strategy for the development of regional nutrient criteria. 822-R-98-002. June, 1998.
- [16] Li Z Y, Den X M, Zhao X H, *et al.* An universal index formula of eutrophic state evaluation of lakes and its effect verification. Environmental Engineering, 2002, 20(1): 70—72.
- [17] Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluation method and classification standard on lake eutrophication. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5): 47—49.
- [18] Feng S Y. Method and application of multi-objective decision theory. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990. 136—155.

参考文献:

- [1] 刘鸿亮, 李小平. 湖泊营养物控制的国家战略. 环境保护, 2007, 14: 16~19.
- [2] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, 51(16): 1857~1866.
- [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. 长江流域资源与环境, 2005, 14(2): 224~228.
- [7] 邓大鹏, 刘刚, 李学德. 基于神经网络简单集成的湖库富营养化综合评价模型. 生态学报, 2007, 27(2): 725~731.
- [10] 王清印, 刘志勇. 不确定性信息的概念、类别及其数学表述. 运筹与管理, 2001, 10(4): 9~15.
- [11] 张成科. 基于熵的水质模糊评价模型及应用. 系统工程理论与实践, 1998, 6: 80~85.
- [12] 周晓蔚, 王丽萍, 李安强, 等. 水蚀荒漠化的最大熵模糊优化评价模型. 水土保持研究, 2007, 14(4): 296~301.
- [13] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法. 北京: 清华大学出版社, 2006. 42~47.
- [16] 李祚泳, 邓新民, 赵晓宏, 等. 湖泊营养状态评价的普适指数公式及效果检验. 环境工程, 2002, 20(1): 70~72.
- [17] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47~49.
- [18] 冯尚友. 多目标决策理论方法与应用. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. 136~155.