

## 模糊数学在洪湖富营养化评价中的应用

方统中<sup>1,2,3</sup>, 杜耘<sup>1,2</sup>, 蔡述明<sup>1,2</sup>, 陈斌<sup>4</sup>, 江炎生<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077; 2. 湖北省环境与灾害监测评估重点实验室, 湖北 武汉 430077; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4. 湖北省水利厅, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为了更准确地反映洪湖营养化状态, 为更有效地管理湖泊提供决策依据, 选取模糊数学方法对洪湖的河流入湖区、养殖区、开阔水体、湿地保护区及全湖的营养化状态作了评价, 并用该方法评价结果与综合营养状态指数法评价结果作了比较。洪湖入湖区的总磷、总氮、高锰酸盐指数、叶绿素和透明度的监测结果分别是 0.126 mg·L<sup>-1</sup>, 1.86 mg·L<sup>-1</sup>, 5.16 mg·L<sup>-1</sup>, 3.70 μg·L<sup>-1</sup> 和 0.95 m; 养殖区为 0.079 mg·L<sup>-1</sup>, 1.77 mg·L<sup>-1</sup>, 5.41 mg·L<sup>-1</sup>, 3.00 μg·L<sup>-1</sup> 和 0.81 m; 开阔区为 0.056 mg·L<sup>-1</sup>, 1.32 mg·L<sup>-1</sup>, 5.06 mg·L<sup>-1</sup>, 2.60 μg·L<sup>-1</sup> 和 0.61 m; 保护区为 0.050 mg·L<sup>-1</sup>, 1.04 mg·L<sup>-1</sup>, 4.91 mg·L<sup>-1</sup>, 3.23 μg·L<sup>-1</sup> 和 0.92 m; 全湖为 0.065 mg·L<sup>-1</sup>, 1.41 mg·L<sup>-1</sup>, 5.20 mg·L<sup>-1</sup>, 3.30 μg·L<sup>-1</sup> 和 0.73 m。模糊数学方法评价的结果是: 河流入湖区与养殖区轻度富营养化, 开阔水体、湿地保护区和全湖中营养。综合营养状态指数法的评价结果是: 河流入湖区轻度富营养化, 养殖区、开阔水体、湿地保护区和全湖中营养。结合监测结果可判断: 模糊数学评价法的评价结果比综合营养状态指数法的结果与实际情况更吻合, 洪湖全湖有富营养化趋势。图 1 表 3 参 19

关键词: 水环境学; 富营养化评价; 模糊数学方法; 模糊评价; 洪湖

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2008)04-0517-05

## Fuzzy mathematics for evaluation of eutrophic levels in Honghu Lake of Hubei Province

FANG Tong-zhong<sup>1,2,3</sup>, DU Yun<sup>1,2</sup>, CAI Shu-ming<sup>1,2</sup>, CHEN Bin<sup>4</sup>, JIANG Yan-sheng<sup>4</sup>

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, Hubei, China;  
2. Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation, Wuhan 430077, Hubei, China;  
3. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. Irrigation Works Bureau of Hubei Province, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Trophic levels of Honghu Lake in Hubei Province were determined for more effective referencing and decision-making with lake management. Total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chemical oxygen demand for manganese, secchi disk depth (SD), and chlorophyll-a (chl-a) for the inlet, breeding, open water, and wetland protection regions as well as the whole of Honghu Lake were measured. Then results of the fuzzy mathematics method were compared to the comprehensive trophic level index method, and these were evaluated against the data. Results of the fuzzy mathematics method showed that the inlet and breeding regions were slightly eutrophic, whereas the other three locations were mesotrophic. However, the comprehensive trophic level index method revealed that the inlet region was slightly eutrophic, while the other four locations were mesotrophic. Data collected showed that the fuzzy mathematics method was closer to the actual levels than the comprehensive trophic level index method, and that the entire lake was becoming eutrophic. [Ch, 1 fig. 3 tab. 19 ref.]

收稿日期: 2007-08-25; 修回日期: 2007-11-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2003CB415201); 湖北省科学技术重点项目(2005AA401C44)

作者简介: 方统中, 硕士研究生, 从事湿地恢复与保护研究。E-mail: tfang0714@yahoo.com.cn。通信作者: 杜耘, 研究员, 博士, 从事湖泊环境演变、环境与灾害监测与评估。E-mail: duyun@asch.whigg.ac.cn

Key words: water environment science; eutrophication evaluation; fuzzy mathematics method; fuzzy evaluation; Honghu Lake

自20世纪60年代以来,随着全球范围水体富营养化不断加剧,联合国环境规划署、世界卫生组织、国际经济合作与开发组织等众多国际组织及世界各国都相继开始了富营养化方面的研究工作,并开发多种富营养化评价方法<sup>[1-5]</sup>。我国主要采用营养状态指数法(卡尔森营养状态指数、修正的营养状态指数法和综合营养状态指数法)、营养度指数法、层次分析-主成分分析营养度法和评分法<sup>[6]</sup>。模糊数学评价法是在富营养化评价过程中引入模糊性概念,运用模糊数学方法来处理水体营养等级和营养状态分级界限模糊性与不确定性问题<sup>[7]</sup>。模糊数学方法自美国1965年提出以来,已经有许多人将其成功地应用在水质评价中<sup>[8-13]</sup>,但将该方法用于富营养化评价的研究在国内很少。洪湖是长江中游重要湖泊之一,是重要的湿地保护区。由于湖面围网养殖大规模发展,导致水质恶化,呈富营养化趋势。作者应用模糊数学评价方法对洪湖营养化状态进行了综合评价,评价结果与实际情况相符合。

## 1 模糊数学评价方法模型

### 1.1 确定评价因素集和备择集

设影响富营养化状态的因素为  $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ , 由这  $n$  个因素构成评判集合为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。根据文献[14]富营养化状态指标与水质参数的关系,参照国内部分湖泊水库评价标准,将洪湖水体富营养化评价标准分为5个等级,即极贫营养、贫营养、中营养、轻富营养、重富营养,评价因子及分级标准见表1。设最终可能得出的评价结果为  $y_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ ,  $y_i$  表示第  $i$  级水体对于极贫营养状态水体的隶属程度,它构成评价备择集  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_5]$ 。评价目标是在综合考虑所有富营养化影响因素  $x_i$  对水体作用的条件下,在备择集中寻求合理的评价结果,以确定水体营养状态。

表1 湖泊富营养化评价参数及分级标准<sup>[14]</sup>

Table 1 Parameter and classification standard for eutrophication evaluation of lake

营养等级	叶绿素 $a$ / ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总磷 / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	总氮 / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	高锰酸盐指数 / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	透明度 / m
极贫营养	[0, 0.25]	(0, 0.005]	(0, 0.07]	(0, 1.40]	[8.25, )
贫营养	(0.25, 1.59]	(0.005, 0.019]	(0.07, 0.24]	(1.40, 2.96]	[2.94, 8.25)
中营养	(1.59, 10.0]	(0.019, 0.065]	(0.24, 0.77]	(2.96, 6.29]	[1.05, 2.94)
轻富营养	(10.0, 158.5]	(0.065, 0.413]	(0.77, 4.50]	(6.29, 19.40]	[0.22, 1.05)
重富营养	(158.5, 1 000.0]	(0.413, 1.415]	(4.50, 14.64]	(19.40, 41.14]	[0.08, 0.22)

### 1.2 建立隶属度函数

模糊数学的隶属度函数有2种形式。对于影响因子如叶绿素  $a$ 、总磷、总氮、高锰酸盐指数,越小越优型评价指标的隶属度函数:

$$u(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i \leq \inf(x_i) \\ \frac{\sup(x_i) - x_i}{\sup(x_i) - \inf(x_i)} & \inf(x_i) < x_i < \sup(x_i) \\ 0 & x_i \geq \sup(x_i) \end{cases} \quad (1)$$

对于影响因子如透明度、溶解氧,越大越优型评价指标的隶属度函数:

$$u(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i \leq \sup(x_i) \\ \frac{x_i - \inf(x_i)}{\sup(x_i) - \inf(x_i)} & \inf(x_i) < x_i < \sup(x_i) \\ 0 & x_i \geq \inf(x_i) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)(2)中:  $\sup(x_i)$  为评价因子  $x_i$  的上界;  $\inf(x_i)$  为评价因子  $x_i$  的下界。

### 1.3 构建多样本多因素评价矩阵

设有  $m$  水体样本，由隶属度函数  $u(x_i)$  求得在第  $i$  个影响因子的作用下，第  $j$  个水体样本对于极贫营养状态的隶属度  $r_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ ，则全体  $r_{ij}$  构成多因素评价矩阵  $R$ ：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 1.4 确定评价因子的权重向量

由于各影响因子对水体富营养化的贡献程度不一样，所以它们的权重不一样。设置权重的方法有多种。本文采用最常用的方法，即直接根据评价因子的实测质量浓度和各级标准质量浓度进行计算。设评判因素  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  的权重向量为  $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ ，则：

$$a_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}; \quad (4)$$

$$w_i = \frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C_{ij}}{\frac{1}{k} \sum_{k=1}^k S_{ik}} \quad (5)$$

式(4)(5)中： $a_i$  为影响因子  $x_i$  的权重； $C_{ij}$  为  $x_i$  的实测质量浓度； $S_{ik}$  为  $x_i$  的第  $k$  级上限或下限值； $w_i$  为  $m$  个水体样本的评价因子  $i$  的平均实测质量浓度值与该评价因子  $S_{ik}$  值之和的平均值之比； $n$  为评价因子个数； $m$  为水体样本数。

### 1.5 综合评价

水体富营养化程度的评价通过权重向量  $A$  与多因素多因子评价矩阵  $R$  的运算来完成，即：

$$B = A \cdot R = [b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1m}] \quad (6)$$

式(6)中： $\cdot$  为模糊数学的运算符号。

评判结果  $B$  是备择集  $Y$  上的模糊子集， $b_{1m}$  是第  $m$  个水体在  $n$  个因子综合作用下对于极贫营养的隶属度。参照备择集  $Y$  可对每个水体的富营养化程度作出评价，确定相应的营养等级。

## 2 应用实例

洪湖位于长江中游江汉平原，面积约为  $344.4 \text{ km}^2$ ，平均水深  $1.91 \text{ m}$ ，是我国第七大淡水湖泊，是长江中下游最具代表性的湖泊湿地之一<sup>[15,16]</sup>。由于人类活动的影响，例如 20 世纪 50 年代大规模水利建设和围湖造田、20 世纪 80 年代末开始的围网养殖<sup>[17]</sup>，洪湖的营养水平从上世纪 60 年代至 90 年代从贫营养转变到中营养<sup>[18]</sup>。选取洪湖 2005 年 8 月至 2006 年 7 月的监测资料(在此期间每月监测 1 次，资料由湖北省环境监测中心站提供)，根据洪湖的现状和监测点的分布，将洪湖分为河流入湖区、养殖区、开阔(水体)区、湿地保护区进行分析。湖面监测分布示意图见图 1，部分监测数据见表 2。

### 2.1 构建标准矩阵

将表 1 中叶绿素、高锰酸盐指数、总氮、总磷的各级上限值相应代入公式 (1)，透明度评价因子的各级下限值相应代入公式(2)，求各因子对应的每一级的界限隶属度值。它们构成标准矩阵  $R_0$ ：

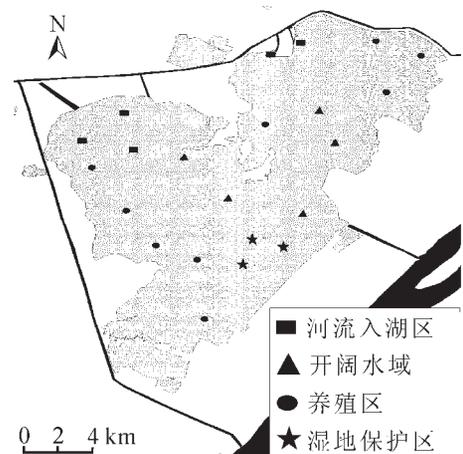


图 1 洪湖监测分区示意图

Figure 1 Monitoring region sketch map of Honghu Lake

$$R_0 = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.999 & 0.990 & 0.842 & 0.000 \\ 1.000 & 0.990 & 0.957 & 0.711 & 0.000 \\ 1.000 & 0.998 & 0.952 & 0.696 & 0.000 \\ 1.000 & 0.961 & 0.877 & 0.547 & 0.000 \\ 1.000 & 0.350 & 0.119 & 0.017 & 0.000 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中:  $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{15}$  代表评价因子、总磷、总氮、高锰酸盐指数和透明度隶属于极贫营养、贫营养、中营养、轻富营养、重富营养状态对应值。

## 2.2 计算评价因子的权重

将表2各个评价因子的实测值代入(4)式和(5)式得到的计算结果:

$$A = [0.011 \quad 0.156 \quad 0.295 \quad 0.297 \quad 0.241] \quad (8)$$

式(8)中:  $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}$  分别代表叶绿素 a、总磷、总氮、高锰酸盐指数、透明度的归一化权重。

## 2.3 建立单样本多因子评价矩阵

将表2各因子实测值代入相应(1)式和(2)式, 得到多因子评价矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 0.997 & 0.997 & 0.998 & 0.997 & 0.997 \\ 0.914 & 0.948 & 0.964 & 0.968 & 0.957 \\ 0.877 & 0.883 & 0.914 & 0.933 & 0.908 \\ 0.905 & 0.899 & 0.908 & 0.912 & 0.904 \\ 0.062 & 0.089 & 0.065 & 0.103 & 0.080 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)中:  $r_{1j}, r_{2j}, r_{3j}, r_{4j}, r_{5j}$  表示第  $j$  个水体样本叶绿素 a、总磷、总氮、高锰酸盐指数、透明度因子对极贫营养状态的隶属度。

## 2.4 建立评判备择集

备择集  $Y = A \cdot R_0$ , 即:

$$Y = [1.000 \quad 0.813 \quad 0.712 \quad 0.476 \quad 0.000] \quad (10)$$

## 2.5 综合评判

根据(6)式, 有:  $B = [0.696 \quad 0.708 \quad 0.716 \quad 0.733 \quad 0.716]$ 。 (11)

参照备择集  $Y$  可知, 入湖区和养殖区的隶属度值位于轻度富营养化隶属度区间值, 其余隶属度值位于中营养状态间。为了评价模糊数学评价方法应用在水体富营养评价的适用性, 笔者运用综合营养状态指数法对上述5个区域重新进行评价。评价结果见表3。

表3 综合营养状态指数法与模糊数学评价法结果

Table 3 Outcome of comprehensive trophic level index method and fuzzy mathematic evaluation method

区域	综合营养状态指数法				模糊数学评价法			
	中营养指数	轻度富营养指数	评价结果	营养等级	中营养隶属度	轻度富营养隶属度	评价结果	营养等级
入湖区	30 ~ 50	50 ~ 80	52.9	轻度	0.813 ~ 0.712	0.712 ~ 0.476	0.696	轻度
养殖区	30 ~ 50	50 ~ 80	49.9	中	0.813 ~ 0.712	0.712 ~ 0.476	0.708	轻度
开阔区	30 ~ 50	50 ~ 80	48.2	中	0.813 ~ 0.712	0.712 ~ 0.476	0.716	中
保护区	30 ~ 50	50 ~ 80	46.2	中	0.813 ~ 0.712	0.712 ~ 0.476	0.733	中
全湖	30 ~ 50	50 ~ 80	49.0	中	0.813 ~ 0.712	0.712 ~ 0.476	0.716	中

表2 洪湖全湖及各区2005年8月至2006年7月监测数据全年平均值

Table 2 Average monitoring data of Honghu Lake from August, 2005 to July, 2006

区域	总磷 / (mg·L <sup>-1</sup> )	总氮 / (mg·L <sup>-1</sup> )	高锰酸盐指数 / (mg·L <sup>-1</sup> )	透明度 / m	叶绿素 / (μg·L <sup>-1</sup> )
入湖区	0.126	1.86	5.16	0.95	3.70
养殖区	0.079	1.77	5.41	0.81	3.00
开阔区	0.056	1.32	5.06	0.61	2.60
保护区	0.050	1.04	4.91	0.92	3.23
全湖	0.065	1.41	5.20	0.73	3.30

### 3 结论

从表 3 可知, 这 2 种评价方法得到的结果除了在养殖区不一致外, 其余 4 个区域的评价结果完全相同; 从表 2 可看出, 养殖区各项指标明显的高于全湖、开阔区和保护区, 且它的高锰酸盐指数指标超过了入湖区, 其他几项也接近于入湖区。根据洪湖 2005 年 8 月至 2006 年 7 月期间实际水质状况 (湖北省环境监测中心站《洪湖水环境质量及监测点位优化研究》), 可以看出模糊数学评价法的评价结果比综合营养状态指数法的结果与实际情况更吻合, 因此模糊数学评价法可以用于湖泊水体富营养化评价。值得注意的是, 由于不同水体存在个体差别, 在应用该方法对不同的水体进行评价时不宜用同一个权重矩阵进行计算, 应根据前文给出的式(4)和式(5)分别求出各个水体参评因子的权重。这样的评价结果更能反映实际情况。其次, 从表 3 的评价结果可以看出, 河流入湖区和养殖区的水体已经达到轻度富营养化。对于河流入湖区轻度富营养化, 可能是河流来水污染物与周边非点源污染两方面共同作用的结果。监测结果显示, 入湖河流的年均高锰酸盐指数、总磷、总氮和氨态氮的质量浓度分别为 5.19, 0.208, 1.81 和 0.68  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 而养殖区的轻度富营养化, 主要是因为水体接纳了过多的未被鱼类利用的饵料类有机物。一般精饲料的粗蛋白折合氮平均为  $37.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 折合磷平均为  $4.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 青饲料的粗蛋白折合氮平均为  $4.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 折合磷平均为  $0.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。第三, 虽然在全湖及 4 个区域中, 只有河流入湖区与养殖区呈轻度富营养化, 但是开阔水体区和全湖的整体状况不容乐观。评价结果显示, 它们已经接近轻度富营养。

致谢: 感谢湖北省环境监测中心站提供数据。

#### 参考文献:

- [1] OECD. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment Control[R]. Paris: OECD, 1982.
- [2] CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. Limnol Oceanogr, 1977, 22 (2): 361 - 369.
- [3] SOMLYODY L. Eutrophication modeling, management and decision making: the Kis-Balaton case[J]. Water Sci Technol, 1998, 37 (3): 165 - 175.
- [4] IGNATIADIS L, KARYDIS M, VOUNATSOU P. A possible method for evaluating oligotrophy and eutrophication based on nutrient concentration scales[J]. Mar Pollut Bull, 1992, 24 (5): 238 - 243.
- [5] JORGENSEN S E. A eutrophication model for lake [J]. Ecol Model, 1976, 2: 147 - 165.
- [6] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版, 1990: 286 - 300.
- [7] 杨伦标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995.
- [8] 刘春风, 瞿瑞彩. 基于模糊数学的水质分析[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2002, 36 (1): 72 - 73.
- [9] 刘华祥, 李永华. 东湖富营养化的模糊评价研究[J]. 水资源保护, 2006, 22 (3): 28 - 46.
- [10] 张炳文, 韩晓滨, 杨茂, 等. 模糊综合指数法在呼和浩特市地面水环境质量综合评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10 (3): 87 - 92.
- [11] 付雁鹏. 模糊数学在水质评价中的应用[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1986: 65 - 773.
- [12] 劳期团. 模糊数学方法在水库水质综合判别中的应用[J]. 环境科学学报, 1989, 9 (3): 55 - 66.
- [13] 杜耘, 陈萍, KIEKO S, 等. 洪湖水环境现状及主导因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14 (4): 87 - 91.
- [14] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995: 277 - 278.
- [15] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 191 - 192.
- [16] 王学雷, 杜耘. 洪湖湿地价值评价与生物多样性保护[J]. 中国科学院院刊, 2002(3): 177 - 181.
- [17] 肖飞, 蔡述明. 洪湖湿地变化研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2003, 37 (2): 266 - 272.
- [18] 成小英, 李世杰. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析[J]. 科学通报, 2006, 51 (7): 852 - 854.
- [19] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 226 - 240.