

基于经验频率曲线的湖泊富营养化 随机评价方法及其验证*

谢 平¹ 黎红秋² 叶爱中¹

(1:水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉大学,武汉 430072; 2:广东省水文局湛江分局,湛江 524037)

提 要 本文提出了基于经验频率曲线的湖泊富营养化随机评价方法. 该法通过建立水体富营养化评价标准中各项水质指标和评价级别的经验频率曲线, 推求实际水体各项水质指标的经验频率, 并采用加权平均法推求湖泊富营养化评价级别的经验频率, 从而得出湖泊富营养化的评价级别, 具有方法简单、图形直观、计算工作量小的特点. 经全国 30 个湖库湖泊实测水质资料的验证, 随机评价方法与模糊评价方法和灰色评价方法的计算精度相当.

关键词 湖泊富营养化 经验频率曲线 随机评价方法 模糊评价方法 灰色评价方法
分类号 P343.3

富营养化^[1]是指湖泊、水库、缓慢流动的河流以及某些近海湖泊中营养物质(一般指氮和磷的化合物)过量而引起水生植物(如藻类及大型植物)的大量生长的现象. 其结果是引起水质恶化、味觉和嗅觉变坏、溶解氧耗竭、透明度降低、渔业减产、死鱼、阻塞航道, 对人和动物产生毒性. 富营养化是湖泊由生产力较低的贫营养状态向生产力较高的富营养状态变化的一种自然现象, 为了准确评定湖泊所处的营养状态, 进而为湖泊富营养化的防治提供科学依据, 国内一些研究者先后提出了模糊数学评价、灰色关联评价、神经网络评价等多种评价方法, 在湖泊富营养化评价的应用中均取得了较好的效果. 但由于影响湖泊富营养化的环境因子众多, 难以根据环境因子的监测数据建立确定性的富营养化评价模型, 而且相邻两个评价等级之间的界限是不明确的, 评价因子在综合评价中应占多大权重也是不明确的, 导致富营养化评价方法具有很强的不确定性.

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^[2]. 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. 水

* 中国科学院知识创新工程项目(CX10G-E01-08/KZCX2-SW-317)资助.

2004-02-08 收稿; 2004-05-10 收修改稿. 谢平, 男, 1963年生, 博士, 教授.

体富营养化的评价,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研究模型或方法,对湖泊富营养化程度作出判断.在湖泊富营养化评价的研究中,模糊评价和灰色评价研究较多^[3,4],而研究不确定性的主要方法—随机性方法却很少得到应用.

本文将根据随机水文学中的经验频率曲线法,建立湖泊富营养化评价标准中各项水质指标和评价级别的经验频率曲线,据此推求实际湖泊各项水质指标的经验频率,并采用加权平均法推求湖泊富营养化评价级别的经验频率,从而得出湖泊富营养化的评价级别.最后采用国内30个湖泊的实测水质资料,将基于经验频率曲线的随机评价方法与模糊评价方法、灰色评价方法进行比较验证,为湖泊富营养化的防治提供科学依据.

1 基于经验频率曲线的随机评价方法

当随机变量的总体分布(理论分布)未知时,可由样本的经验分布近似估计总体的理论分布.因此,经验频率曲线法在水文频率计算中具有一定的实用性.经验频率曲线法^[5]的具体步骤为:

- (1) 设随机变量 X 具有容量为 n 的样本资料,按从大到小或从小到大的顺序排列为, x_1, x_2, \dots, x_n 排列的序号不仅表示大小的次序,而且表示 $x \geq x_i$ 或 $x \leq x_i$ 的累积次数;
- (2) 由于数学期望公式是建立在期望样本中某一项的频率,该公式是在许多样本中同序号概率的均值条件下推导出来的,公式形式简单,计算结果也比较符合实际,且偏于安全,因此在我国水文计算上广泛采用.用数学期望公式

$$p = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (1)$$

计算各项 $x \geq x_i$ 或 $x \leq x_i$ 的经验频率 p_i ,式中 m 表示排序后的样本序号;

- (3) 以随机变量 x_i 为纵坐标,以经验频率 p_i 为横坐标,在频率各纸上点绘经验频率点据,根据点群趋势绘出一条平滑的曲线或直接将经验点据连成折线,称其为经验频率曲线;
- (4) 根据经验频率曲线,即可在曲线上求得指定频率 p 的水文变量值 x_p 或推求 $x \geq x$ 或 $x \leq x$ 出现的频率 p .

对于富营养化评价标准中的各项水质指标(表1),如叶绿素 a(Chl. a)、TP、TN、COD、SD 等以及水质评价级别均可以看作是随机变量.评价级别可以看作是样本从大到小或从小到大的序号,每个评价级别对应的各项水质指标的标准取值可以看作是从大到小或从小到大的样本,这样出现大于或等于某个水质指标浓度以及评价级别的经验频率 p_i 均可以由式(1)来计算.以各项水质指标或评价级别为纵坐标,以经验频率 p_i 为横坐标,在频率格纸上点绘经验频率点据,直接将经验点据连成折线,即可绘出各项水质指标或评价级别的经验频率曲线(图1).

根据经验频率曲线评价湖泊富营养化的具体步骤为:

- (1) 对于进行富营养化评价的实际湖泊,由各项水质指标的实测值查对应的经验频率曲线,求出大于等于(或小于等于)该项水质指标的经验频率 $P = (P_{\text{Chl-a}}, P_{\text{TP}}, P_{\text{TN}}, P_{\text{COD}}, P_{\text{SD}})$;
- (2) 根据叶绿素 a、TP、TN、COD、SD 共5项评价指标与叶绿素 a 的相关系数^[1] $R = (R_{\text{Chl-a}}, R_{\text{TP}}, R_{\text{TN}}, R_{\text{COD}}, R_{\text{SD}}) = (1, 0.93, 0.81, 0.90, -0.65)$,求得各项水质指标在富营养化评价中所

表 1 富营养化评价标准及水质指标的经验频率

Tab. 1 Eutrophication Assessment Criteria and Empirical Frequency Of Water Quality Index

评价标准	Chl. a (mg/m ³)	TP (mg/m ³)	TN (mg/m ³)	COD (mg/L)	SD (m)	评价级别 i	经验频率 i/(n+1)(%)
贫营养	1	2.5	30	0.3	10	1	14.3
贫中营养	2	5	50	0.4	5	2	28.6
中营养	4	25	300	2	1.5	3	42.9
中富营养	10	50	500	4	1	4	57.1
富营养	65	200	2000	10	0.4	5	71.4
重富营养	160	600	6000	25	0.3	6	85.7

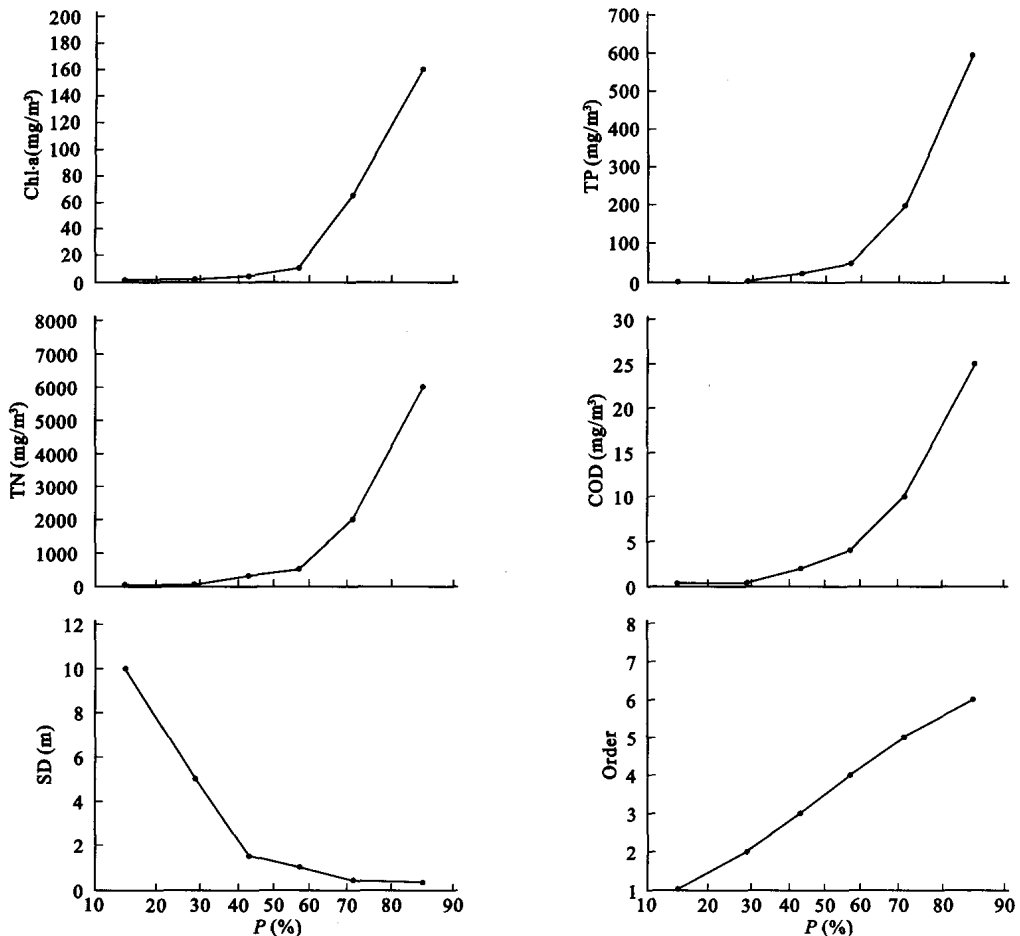


图 1 水质指标及评价级别的经验频率曲线

Fig. 1 The empirical frequency curves of water quality indexes and assessment order

占的权重 $W = (W_{\text{Chl-a}}, W_{\text{TP}}, W_{\text{TN}}, W_{\text{COD}}, W_{\text{SD}}) = (0.233, 0.217, 0.189, 0.210, 0.151)$.

(3) 根据加权平均公式求出各项水质指标的综合经验频率,即湖泊富营养化评价级别的经验频率

$$P_W = W_{\text{Chl-a}} \times P_{\text{Chl-a}} + W_{\text{TP}} \times P_{\text{TP}} + W_{\text{TN}} \times P_{\text{TN}} + W_{\text{COD}} \times P_{\text{COD}} + W_{\text{SD}} \times P_{\text{SD}} \quad (2)$$

(4) 由综合经验频率 P_W 查评价级别的经验频率曲线, 求得湖泊富营养化的评价级别, 进一步采取四舍五入的原则, 可以求得湖泊富营养化的评价标准。

2 方法验证

采用国内 30 个湖泊的实测水质资料, 按照 6 个评价标准(表 1), 将基于经验频率曲线的随机评价方法与模糊评价方法^[3]、灰色评价方法^[4]进行比较验证, 其评价结果见表 2。

从表 2 可以看出, 在 30 个湖库湖泊中有 19 个湖泊的评价结果是完全一致的, 其比例为 63.3%; 有 10 个湖泊的评价结果相差一个级别, 其比例为 33.3%; 只有一个湖泊的评价结果相差两个级别, 其比例为 3.4%, 说明用这三种方法进行富营养化评价都是可行的。比较而言, 随机评价方法与灰色评价方法的结果比较一致, 两者精度相当, 而与模糊评价方法的结果差异略大一些。但由于湖泊富营养化评价的不确定性, 特别是当湖泊评价级别的计算值介于两个标准评价级别之间时, 其结果可能取上限值, 也可能取下限值, 如评价级别为 2.4、2.5、2.6 的湖泊, 其水质差异很小, 而其评价结果必然相差一个级别, 从这个意义上来说, 在 30 个湖泊中有 29 个湖泊评价结果的差异小于等于一个级别, 其比例为 96.6%, 说明这三种富营养化评价方法的计算精度基本相当。

3 结语

(1) 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, 因此湖泊富营养化的评价方法具有不确定性。

(2) 湖泊富营养化评价的实质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研究方法或模型, 对湖泊富营养化程度作出判断。

(3) 不确定性研究可以采用随机信息、模糊信息、未确知信息、灰色信息等多种不确定性研究方法, 应采用多种途径对湖泊富营养化的评价方法进行研究。

(4) 基于经验频率曲线的湖泊富营养化随机评价方法, 具有方法简单、图形直观、计算工作量小的特点, 经全国 30 个湖泊实测水质资料的验证, 并与模糊评价方法和灰色评价方法的结果进行比较, 发现这三种方法的计算精度相当。

(5) 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, 更加符合实际要求。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) 经验频率曲线法是推求随机变量理论分布的一种近似方法, 如何推求水质指标和评价级别的理论频率曲线, 有待进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 舒金华. 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨. 环境污染与防治, 1990, 12(5): 2-7.
- 2 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.
- 3 陈守煜. 湖库湖泊富营养化评价级别特征值与识别模型. 黑龙江水专学报, 1999, 26(1): 1-8.
- 4 冯玉国. 湖泊富营养化灰色评价模型及其应用. 系统工程理论与实践, 1996, 8: 43-47.

表2 湖泊富营养化评价结果

Tab. 2 The Results of Water-body Eutrophication Assessment

序号	湖泊名称	Chla (mg/m ³)	TP (mg/m ³)	TN (mg/m ³)	COD (mg/L)	SD (m)	评价结果(评价级别)			是否一致 √
							随机评价	模糊评价	灰色评价	
1	邛海	0.88	130	410	1.43	2.98	中营养级(2.83)	中营养级(3.28)	中营养级(3.00)	√
2	洱海	4.33	21	180	3.38	2.4	中营养级(2.98)	中营养级(3.20)	中营养级(3.00)	√
3	博斯腾湖	4.91	50	969	5.42	1.46	中富营养(3.77)	中富营养(3.75)	中富营养(4.00)	√
4	于桥水库	16.2	26	1020	5.16	1.16	中富营养(3.88)	中富营养(3.84)	中富营养(4.00)	√
5	磁湖	15.38	87	1540	4.4	0.65	中富营养(4.31)	中富营养(4.25)	中富营养(4.00)	√
6	巢湖	14.56	140	2270	4.34	0.27	富营养级(4.67)	富营养级(4.69)	中富营养(4.00)	×
7	甘棠湖	77.7	135	2140	6.96	0.36	富营养级(4.90)	富营养级(4.95)	富营养级(5.00)	√
8	蘑菇湖	82.4	332	2660	14.6	0.49	富营养级(5.19)	富营养级(4.98)	富营养级(5.00)	√
9	杭州西湖	95.94	136	2230	10.18	0.37	富营养级(5.04)	富营养级(4.95)	富营养级(5.00)	√
10	玄武湖	202.1	708	6790	8.86	0.31	重富营养(5.74)	重富营养(5.80)	重富营养(6.00)	√
11	墨水湖	262.4	500	16050	13.6	0.15	重富营养(5.79)	重富营养(5.88)	重富营养(6.00)	√
12	东山湖	185.1	670	7200	14.8	0.26	重富营养(5.86)	重富营养(5.93)	重富营养(6.00)	√
13	青海湖	14.6	20	220	1.4	4.5	中营养级(2.93)	贫中营养(2.15)	贫中营养(2.00)	×
14	太湖	100	20	900	2.83	0.5	中富营养(4.10)	富营养级(4.53)	中富营养(4.00)	×
15	呼伦湖	11.6	80	130	8.29	0.5	中富营养(4.01)	中富营养(4.08)	中富营养(4.00)	√
16	洪泽湖	11.5	100	460	5.5	0.3	中富营养(4.40)	中富营养(3.97)	中富营养(4.00)	√
17	巢湖	25.3	30	1670	6.26	0.25	中富营养(4.42)	中富营养(4.17)	中富营养(4.00)	√
18	滇池	189.3	20	230	10.13	0.5	中富营养(4.29)	富营养级(4.99)	中营养级(3.00)	×
19	抚仙湖	19	20	210	1.61	7.03	中营养级(2.88)	贫中营养(2.10)	贫中营养(2.00)	×
20	武汉东湖	1913.7	105	2000	10.7	0.4	富营养级(5.11)	富营养级(5.26)	富营养级(5.00)	√
21	西湖(1)	6920	130	2760	10.3	0.35	富营养级(5.25)	富营养级(5.27)	富营养级(5.00)	√
22	莘湖	7060	177	2860	51	0.41	富营养级(5.45)	重富营养(5.57)	富营养级(5.00)	×
23	外海北	945	56	1080	3.37	0.87	富营养级(4.51)	富营养级(5.09)	中富营养(4.00)	×
24	外海中	916	40	870	3.53	0.92	中富营养(4.40)	富营养级(5.13)	中富营养(4.00)	×
25	外海南	1011	42	960	3.68	0.9	中富营养(4.45)	富营养级(5.11)	中富营养(4.00)	×
26	洱海(1)	22.36	34	490	2.11	0.3	中富营养(4.01)	中富营养(3.90)	中富营养(4.00)	√
27	藏碧湖	8.9	49	520	2.05	1.5	中富营养(3.60)	中营养级(3.13)	中富营养(4.00)	×
28	西湖(2)	8.01	33	503	3.7	1.6	中富营养(3.59)	中营养级(3.28)	中富营养(4.00)	×
29	海西海	7.32	45	318	1.28	3.5	中营养级(3.14)	中营养级(2.68)	中营养级(3.00)	√
30	云南天池	51.63	23	620	4.05	1.2	中营养级(3.89)	中营养级(3.99)	中营养级(4.00)	√

* “√”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。

表中序号1-12资料来源于文献[3],13-30资料来源于文献[4]。

A Lake Eutrophication Stochastic Assessment Method by Using Empirical Frequency Curve and Its Verification

XIE Ping¹, LI Hongqiu² & YE Aizhong¹

(1: State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China;

2: Institute of Zhanjiang Hydrology Substation in Guangdong Province, Zhanjiang 524037, P. R. China)

Abstract

In order to correctly evaluate the trophic state of a lake and then to establish a scientific basis for the prevention of lake eutrophication, a lake eutrophication stochastic assessment method (LESAM) by using empirical frequency curve (EFC) is proposed. In this method, the EFC of each water quality index of an actual lake is firstly derived through establishing the EFCs of each of those water quality indices and assessment orders used in the lake eutrophication assessment criteria. Secondly, the assessment order of lake eutrophication is derived by using the weighting average method to calculate the EFC of assessment order of lake eutrophication. The characteristics of LESAM are that the method is simple, the visual graphs are informative, and the computation work is moderate. LESAM, together with other two methods, i. e. the lake eutrophication (LEGAM), has been tested against the measured data of 30 lakes all over the country, it is found that the difference of assessment results between those three methods is not greater than 1 order in 29 lakes, i. e. 96.6% of the total lakes. It is concluded that all these three methods (LESAM, LEFAM, and LEGAM) have comparable computation precision. For there is a lot of uncertainty involved both in determining the number and type of water quality index in lake eutrophication assessment and in determining the assessment order and its corresponding standard water quality concentration, the lake eutrophication assessment methods also have uncertainty. It is suggested that the lake eutrophication assessment should be studied with various approaches in order to overcome the weakness of one particular method and to make assessment results more reasonable.

Keywords: Lake eutrophication; empirical frequency curve; stochastic assessment method; fuzzy assessment method; grey assessment method