

武汉东湖富营养化的综合评价*

蔡庆华

(中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要 兼顾富营养化评价和水生态系统常规监测, 提出了以7种常见营养物($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, TN , $\text{PO}_4\text{-P}$, TP , SiO_2)和浮游植物3个常用参数(日平均初级生产量 P_G , 生物量 B , $\text{chl}a$)为指标体系的湖泊营养类型评价标准; 使用层次分析法, 对上述10个因子作出权重分配, 从而建立起评价湖泊富营养化程度的一种新方法。评价结果表明: 尽管近年来东湖浮游植物的几项指标有所下降, 但东湖富营养化程度未有明显改变。

关键词 富营养化 综合评价 权重分配 层次分析

国内外已有许多评价湖泊富营养化的方法(刘建康, 1990; 何志辉, 1982, 1987; 饶钦止等, 1980; 蔡庆华, 1988; Likens, 1975; Miura et al., 1990; Wetzel, 1983), 可归纳为特征法、参数法、生物指标评价法、Vollenweider 模型法和营养状态指数(TSI)法等5种类型(全国主要湖泊水库富营养化调查研究课题组, 1987), 但皆未考虑评价指标对富营养化贡献的不一致性, 因而以不同的指标常会得出不同的评价结果。本文应用层次分析法, 确定各因子之间的权重分配, 从而保证了评价过程的客观性与准确性。

1 数学方法与步骤

层次分析法(Hierarchical analysis)由Saaty(1980)提出, 是系统工程中经常使用的一种方法。它特别适用于处理那些多目标的、多层次的复杂大系统问题和难于完全用定量方法来分析与决策的社会系统工程中的复杂问题, 它可以将人们的主观判断用数量形式来表达和处理, 是一种定量与定性相结合的分析方法(赵焕臣等, 1986; 朱世立, 1988)。层次分析法大体上可分为如下步骤:

1.1 建立层次结构分析模型 在深入分析所涉及的问题之后, 应将问题中所包含的因素划分为不同的层次, 用框图形式说明层次的递阶结构和因素的从属关系。当某个层次包含的因素较多时, 可将该层次进一步划分为若干子层次。

1.2 构造判断矩阵 判断矩阵是层次分析法的计算基础。判断矩阵的值, 反映了人们对各因素相对重要性的认识, 也直接影响决策的效果。判断矩阵的元素一般采用1—9及其倒数的标度方法(表1), 当相互比较的因素的重要性能够用具有实际意义的比值说明时, 判断矩阵相应元素的值则可取这个比值。

1.3 层次单排序及其一致性检验 判断矩阵 A 的特征值问题 $AW = \lambda_{\max} W$ 的解 W ,

* 国家自然科学基金资助, 3860600号, 中国科学院择优基金资助项目, 900404号。本文在导师刘建康学部委员指导下完成, 承梁彦龄研究员审阅修正, 谨志谢忱。

收稿日期: 1991年5月24日; 接受日期: 1993年4月5日。

表 1 判断矩阵标度及其含义

Tab. 1 Scoring and meaning of judgment matrix

标 度	含 义
1	两个因素相比, 具有 <u>同样</u> 重要性
3	两个因素相比, 一个因素比另一个因素 <u>稍微</u> 重要
5	两个因素相比, 一个因素比另一个因素 <u>明显</u> 重要
7	两个因素相比, 一个因素比另一个因素 <u>强烈</u> 重要
9	两个因素相比, 一个因素比另一个因素 <u>极端</u> 重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻评判的中值
倒数	因素 i 与 j 比较得判断 b_{ij} , 则 j 与 i 比较得 $b_{ji} = 1/b_{ij}$

经归一化后即为一层次相应因素对于上一层次某因素的相对重要性的排序权值, 这个过程称为层次单排序。为保证层次单排序的可信性, 需要对判断矩阵一致性进行检验, 即计算一致性指标 (consistency index): $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, 其中, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; n 是判断矩阵的元素个数。查平均随机一致性指标 (random consistency index) RI 的值, 当随机一致性比率 (consistency ratio) $CR = CI/RI < 0.10$ 时, 认为层次单排序的结果有满意的一致性, 否则, 需要调整判断矩阵的元素取值。

1.4 层次总排序 计算同一层次所有因素对于整个上层相对重要性的排序权值的过程称为层次总排序, 这一过程是最高层次到最低层次逐层进行的。若上一层次 A 包含 m 个因素 A_j , 其层次总排序权值分别为 a_j ($j = 1, 2, \dots, m$); 下一层次 B 包含 n 个因素 B_i , 它们对于因素 A_j 的层次单排序权值分别为 b_{ij} (当 B_i 与 A_j 无联系时 $b_{ij} = 0$), 则 B 层次总排序权值为: $B_i = \sum a_j b_{ji}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

1.5 层次总排序的一致性检验 与层次单排序的一致性检验一样, 为了确信层次总排序权值的可靠性, 也需要对其进行一致性检验, 这一步骤也是从高到低逐层进行的。如果 B 层次某些因素对于 A_j 单排序的一致性指标为 CI_j , 相应的平均随机一致性指标为 RI_j , 而 A 层的总排序权值为 a_j , 则

$$B \text{ 层次总排序一致性指标为 } CI = \sum a_j CI_j$$

$$B \text{ 层次总随机一致性指标为 } RI = \sum a_j RI_j$$

$$B \text{ 层次总随机一致性比率为 } CR = CI/RI$$

类似地, 当 $CR < 0.10$ 时, 认为层次总排序结果具有满意的一致性, 否则, 需要重新调整判断矩阵的元素取值。

上述过程以 Turbo BASIC 语言编写程序, 在 Copam-PC486B/25 微型计算机上实现。

2 评价指标与标准

湖泊富营养化的评价指标通常可分为营养物指标和浮游植物指标, 为了兼顾富营养化评价和湖泊生态系统的常规监测, 并于国内外相应研究相比较, 本文在营养物指标中选择 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, TN , $\text{PO}_4\text{-P}$, TP 和 SiO_2 等 7 种主要的营养物 (单位均为 mg/L), 在浮游植物指标中选择日平均初级生产量 P_G 、生物量 B 和 $\text{chl}a$ (单位分别为 $\text{Cg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, mg/L 和 $\mu\text{g/L}$), 由此可画出层次分析的结构模型 (略)。

有关划分湖泊营养类型的标准, 不同的作者虽有差异, 但总的趋势还是一致的。本文

综合了 Rodhe (1969), Gekstatter (1974), Likens (1975), Carlson (1977) 和 Jørgenson (1980), OECD (1982) 等标准, 尝试提出适应我国的湖泊营养类型划分标准(表 2)。为避免各单项指标对湖泊营养划分的多一对应, 本文严格定义了各单项指标与营养类型相应的区间范围, 以确立它们之间的一一对应关系。

表 2 湖泊营养类型的划分标准

Tab. 2 Trophic classification of lakes

营养类型 Type	极贫营养 U-O	贫营养 O	贫-中营养 O-M	中营养 M	中-富营养 M-E	富营养 E	极富营养 H
NO ₃ -N	<0.05	<0.1	<0.2	<0.4	<0.5	<0.8	≥0.8
NO ₂ -N	<0.001	<0.003	<0.1	<0.03	<0.05	<0.2	≥0.2
NH ₄ -N	<0.05	<0.1	<0.3	<0.5	<0.7	<1.0	≥1.0
T-N	<0.1	<0.25	<0.5	<0.6	<1.0	<1.5	≥1.5
PO ₄ -P	<0.001	<0.005	<0.01	<0.03	<0.05	<0.1	≥0.1
T-P	<0.001	<0.005	<0.01	<0.03	<0.05	<0.1	≥0.1
SiO ₂	<1	<5	<10	<25	<40	<50	≥50
P _G	<50	<100	<300	<500	<800	<1000	≥1000
B	<0.1	<1	<3	<5	<7	<10	≥10
chl _a	<0.5	<1	<5	<25	<50	<500	≥500
得分 Score	≤10	≤20	≤30	≤40	≤50	≤60	≤70

3 结果与讨论

第二层次两个因子营养物(C₁)和浮游植物(C₂)对总目标(第一层次)富营养化评价(C)的相对重要性可构成判断矩阵

$$\begin{pmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$$

这是因为浮游植物指标是富营养化程度的直接反映, 所以, 对浮游植物指标赋予比营养物指标略高的权重是合理的。由此得到 C₁, C₂ 对 C 的权重分配为 $W_1 = 0.333$, $W_2 = 0.667$, $\lambda_{\max} = 2$, $CI = 0$, $RI = 0$, $CR = 0 < 0.10$, 具有满意的一致性。

同样, 第三层次中 7 种营养物(分别记为 C_{1i}, $i = 1, 2, \dots, 7$) 在 C₁ 中的判断矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 7 & 3 & 1/4 & 1/3 & 1/5 & 2 \\ 1/7 & 1 & 1/5 & 1/8 & 1/7 & 1/9 & 1/4 \\ 1/3 & 5 & 1 & 1/6 & 1/5 & 1/7 & 2 \\ 4 & 8 & 6 & 1 & 2 & 1/2 & 8 \\ 3 & 7 & 5 & 1/2 & 1 & 1/5 & 5 \\ 5 & 9 & 7 & 2 & 5 & 1 & 9 \\ 1/2 & 4 & 1/2 & 1/8 & 1/5 & 1/9 & 1 \end{pmatrix}$$

权重(记为 W_{1i} , $i = 1, 2, \dots, 7$) 分配为 0.086, 0.020, 0.051, 0.249, 0.159, 0.397, 0.039, $\lambda_{\max} = 7.572$, $CI = 0.095$, $RI = 1.32$, $CR = 0.072 < 0.10$, 具有满意的一致性; 而第三层次中浮游植物 3 因子(分别记为 C_{2i}, $i = 1, 2, 3$) 在 C₂ 中的判断矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

权重(记为 W_{2j} , $j = 1, 2, 3$) 分配为 0.249, 0.157, 0.594, $\lambda_{\max} = 3.054$, $CI = 0.027$, $RI = 0.58$, $CR = 0.046 < 0.10$, 具有满意的一致性。将 W_{1j} ($j = 1, 2, \dots, 7$) 乘上 W_1 , W_{2j} ($j = 1, 2, 3$) 乘 W_2 可得到上述 10 个参数在湖泊富营养化评价指标中的权重分配: $\text{NO}_3\text{-N}$, 2.9%; $\text{NO}_2\text{-N}$, 0.7%; $\text{NH}_4\text{-N}$, 1.7%; TN , 8.3%; $\text{PO}_4\text{-P}$, 5.3%; TP , 13.2%; SiO_2 , 1.3%; P_G , 16.6%; B , 10.5%; $\text{chl}a$, 39.6%; 总 $CI = 0.05$, 总 $RI = 0.827$, 总 $CR = 0.060 < 0.10$, 具有满意的一致性, 说明上述权重分配较好地反映了水质评价中各因子相对重要性的客观规律, 从而具有广泛的可用性和可信性。

根据东湖 1980 和 1984 两年间 I, II 站的观测数据(刘建康, 1990; 阮景荣等, 1988), 可知东湖富营养化程度比较严重(表 3)。尽管这两年中个别因子变化很大, 但总的说来富营养化程度没有显著变化。

表 3 东湖 I, II 两站的营养类型

Tab. 3 Trophic type of Donghu Lake (station I and II)

因 子	I 1980		I 1984		II 1980		II 1984	
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.183	U-M 30	0.123	U-M 30	0.171	U-M 30	0.133	U-M 30
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.007	U-M 30	0.018	M 30	0.006	U-M 30	0.010	M 40
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.720	E 60	1.648	H 70	0.4	M 40	0.226	U-M 30
T-N	2.5	H 70	3.4	H 70	2.2	H 70	2.2	H 70
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.095	E 60	0.325	H 70	0.03	M-E 50	0.044	M-E 50
T-P	0.3	H 70	0.69	H 70	0.17	H 70	0.20	H 70
SiO_2	10.2	M 40	4	O 20	8.8	U-M 30	3	O 20
P_G	1.78	H 70	1.75	H 70	1.11	H 70	1.34	H 70
B	14.49	H 70	4.31	M 40	14.12	H 70	9.48	E 60
$\text{chl}a$	41.59	M 40	29.39	M 40	22.28	M 40	17.85	M 40
加权	55.62		55.93		54.62		53.34	

参 考 文 献

- 全国主要湖泊水库富营养化调查研究课题组, 1987, 湖泊富营养化调查规范, 中国环境科学出版社(北京), 265—281。
- 刘建康, 1990, 东湖生态学研究, 科学出版社(北京), 1—407。
- 朱世立, 1988, 汉字 TRUE BASIC 语言和系统工程常用方法, 电子工业出版社(北京), 251—281。
- 何志辉, 1982, 湖泊的营养分类, 水库渔业, 4: 46—51。
- 何志辉, 1987, 中国湖泊和水库的营养分类, 大连水产学院学报, 1: 1—10。
- 阮景荣、蔡庆华、刘建康, 1988, 武汉东湖的磷-浮游植物动态模型, 水生生物学报, 12(4): 289—307。
- 饶钦止、章宗涉, 1980, 武汉东湖浮游植物的演变(1956—1975)和富营养化问题, 水生生物学报, 7(1): 1—17。
- 赵焕臣、许树柏、和金生, 1986, 层次分析法, 科学出版社(北京), 1—116。
- 蔡庆华, 1988, 东湖生态系统污染状况的 Fuzzy 聚类分析, 水生生物学报, 12(3): 193—198。
- Likens, G. E., 1975, Primary productivity of inland aquatic ecosystem. in "Primary productivity of the biosphere", ed. Lieth, H. & Whittaker, R. H., Springer Verlage (New York), pp. 185—202.
- Miura, T. & Cai, Q., 1990, Annual and seasonal occurrences of the zooplankton observed in the

Saaty, T. L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill Inc. (New York), pp. 1—88.

north basin of Lake Biwa from 1965 to 1979, *Lake Biwa Study Monographs*, 5: 1—35.

Wetzel, R. G., 1983, *Limnology*, 2nd ed., Saunders College Publishing Company (Philadelphia), pp. 255—297.

COMPREHENSIVE EVALUATION OF EUTROPHICATION IN DONGHU, LAKE WUHAN

Cai Qinghua

(*Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan 430072*)

ABSTRACT

Evaluation of the eutrophication in a (or trophic state of) lake is a multivariate comprehensive decision-making process quantifying the qualitative problem. Besides establishment of a rational evaluation index system for the trophic state of a lake, a key problem in this process is to determine the weight attributions of the observed indices. Using indices commonly used to monitor aquatic ecosystem, this work included seven nutrient (nitrate-N, nitrite-N, ammonium-N, total-N, phosphate-P, total-P and silicates) and three phytoplanktonic (mean gross primary productivity, biomass and chlorophyll *a*) parameters in the index system. By using hierarchical analysis, the weight contributions of the ten parameters to eutrophication were determined in % as 2.9, 0.7, 1.7, 8.3, 5.3, 13.2, 1.3 and 16.6, 10.5, 39.6 respectively for nitrate-N, nitrite-N, ammonium-N, total-N, phosphate-P, total-P, silicates and mean gross primary productivity, biomass, chlorophyll *a* (consistency ratio $CR=0.06<0.10$). This work established new method for evaluating lake eutrophication was established. The application of this evaluation system to Donghu, Lake Wuhan, demonstrated that the eutrophication in this lake was quite serious. Data from 1980 to 1984 at the two sampling stations in the lake showed that this lake was changing from an eutrophic to a hypereutrophic one. It is pointed out that the trophic state of Donghu Lake did not undergo significant changes in recent years, although values of several parameters, especially phytoplanktonic indices, obviously declined. The ecological application of the analytic hierarchy process is discussed in this paper.

Key words Eutrophication Comprehensive evaluation Weight attribution Hierarchical analysis