维普资讯 http://www.cqvip.com

第9卷 第1期
1997年3月

湖 泊 科 学
JOURNAL OF LAKE SCIENCES

Vol. 9, No. 1
Mar., 1997

湖泊富营养化综合评价方法

蔡 庆 华

(中国科学院水生生物研究所,武汉 430072)

提要 从对湖泊富营养化评价的一般方法入手,综述了国内外有关湖泊富营养化综合评价的一些方法.提出:营养状态指数法(TSI)由于可对湖泊营养状态进行连续的数值化的分级,从而为湖泊富营养化机理的定量研究提供了坚实的基础,应是今后湖泊富营养化评价中的主要方法.文中对综合评价指标的定权方法亦作了分析,认为层次分析法较理想,并给出了TSI及其修正方法中的权重分配.最后,文中讨论了综合评价与其他分析方法如聚类分析等的关系问题.

关键词 富营养化,营养状态指数,综合评价,层次分析,聚类分析

营养的概念,本世纪初作为鱼产基础的表征,即水体增加有机质的能力而引入湖沼学中,但很快就有了越来越广泛的意义.由于对物质和能量流转过程的深入研究,营养这一概念便成了湖泊生态系统的表征[1].而营养分类特别是富营养化评价便日益成为湖泊分类中的重要内容.六、七十年代以来,许多学者基于世界上数百个湖泊水质特性的详细调查,对湖泊富营养化评价的方法和标准进行了一系列的探讨,提出了多种形式的评价参数和方法[2].在我国,饶钦止等[3]最早在湖泊调查中提出了有关湖泊营养类型划分的标准.70年代后,随着我国湖泊富营养化研究工作的深入开展,国外评价方法在我国的一些湖泊研究中得到了尝试,在对国外评价方法和标准在我国的适用性进行深入探讨的基础上,逐步建立起了比较成熟的适用于我国湖泊的评价体系和方法.

1 富营养化评价的一般方法

尽管不同的学者,基于不同的着眼点,对湖泊富营养化有着许多不同的理解和定义[4],湖泊富营养化仍常被认为是水体的一种状态,即过量的藻类和高等水生植物在水体中富集的一种状态[5].这些藻类和水生植物的富集,导致了水质恶化、生物群体的破坏,因而大大妨碍了人类对水资源的利用.OECD把富营养化定义为水体营养盐增加引起的一系列征兆变化,其中藻类和大型植物生产力的增加、水质恶化和其他征兆变化破坏了水的利用[3].而有关湖泊富营养化的评价,多从水质、水生生物以及底质三个方面来进行,所采用的评价方法,可归纳为如下几种类型:

(1) 特征法:根据湖泊富营养化的生态环境因子的特征来评价湖泊营养状态的方法,最早由吉村于1937年提出.饶钦止等结合我国湖泊的特点,也提出了类似的方法和标准[3].早期的研究者和地理学工作者较常用此方法.

(2) 参数法:根据湖泊富营养化的主要代表参数来评价湖泊营养状态的方法.其中,参数多为湖水总磷、总氮等营养物浓度、透明度、藻类叶绿素a含量、初级生产量等,通过对这些参

收稿日期:1994-10-13;收到修改稿日期:1996-06-03.

维普资讯 http://www.cqvip.com

数数量的大小分级，把湖泊分为若干营养层次如贫、中、富、极富等. 各国学者针对具体湖泊或湖泊群的研究，所提出的参数和评价标准不尽相同[2,4,5].

(3) 生物指标评价法：根据湖水中水生生物的种类和数量来评价湖泊营养状态的方法，主要有优势种评价法和多样性指数评价法等. 依生物类群如浮游植物、浮游动物、底栖动物的不同，各国研究者提出的方法和标准均有不同[6-10].

(4) 磷收支模型法：根据湖泊平均深度、单位面积水量负荷、滞水时间以及入湖磷浓度来预测湖中磷浓度，并与湖中藻类叶绿素 a 结合起来对湖泊营养状态进行评价的方法. 最早由 Vollenweider 提出，Dillon 等则进行了大量的补充和完善[11-14]. 此方法由于操作和分析较为复杂，应用面有限.

(5) 营养状态指数法：综合多项富营养化指标，包括湖水透明度、藻类叶绿素 a 含量以及湖水总磷浓度并将其转换为营养状态指数(TSI)，从而对湖泊营养状态进行连续分级的方法. 最早由 Carlson 建立[15]，日本的 Aizaki 等进行了修正和完善[16,17]. 此方法由于可对湖泊营养状态进行连续的数值化的分级，从而为湖泊富营养化机理的定量研究提供了坚实的基础，应是今后湖泊富营养化评价中的主要方法之一[18,19].

(6) 数学分析法：将现代数理理论应用于湖泊环境评价的方法. 主要包括线性和非线性统计分析、模糊数学、灰色系统、模式识别等，近年来的研究相当活跃[18-22].

但是，采用这些方法评价某些水体的富营养化程度时，常会遇到这样的问题：选择不同的指标可能得到不同的结果. 这是由于湖泊富营养化的评价，即确定水体的状态属性，实际上是一个将定性问题定量化的多变量的综合决策过程[18,19]，因此，对水体包括湖泊的富营养化程度进行评价应以综合评价为主.

2 湖泊富营养化的综合评价

综合评价湖泊的富营养化程度，除了建立合理的指标体系外，确定各因子之间的权重分配非常关键. 因为各因子对湖泊富营养化的贡献并不一致，而在富营养化程度的评价过程中需要计算出评价指标的相对重要性，即确定每个因子的权值，从而保证评价的客观性与准确性.

2.1 综合评价中的定权方法

陆雍森等[20]总结了环境评价中的定权方法，并将其分为如下 6 种类型：

(1) 经验估计法：无任何定权的理由与依据的说明而直接给出权值；

(2) 意义推求法：定权时考虑问题的具体根据以及意义等，无具体定权过程和方法而直接给出权值；

(3) 公式计算法：有明确的定权公式和变量意义；

(4) 调查统计法：对调查征询的专家意见进行统计综合；

(5) 序列综合法：通过比较评价因子的某些性质后分别排序，根据顺序对应分数求权值；

(6) 因子分析法：通过主成分分析或因子分析的过程和方法求权.

有些学者[21]将研究自然和社会现象的方法分为统计分析和机理分析两类，其中机理分析用经典的数学工具分析现象的因果关系，如上述第 1—3 和第 5 种方法；而统计分析则以随机数学为工具，通过大量的观测数据寻求统计规律，如第 4、6 种方法. 近年来发展的另一类方法则是系统分析方法，其中，层次分析法在湖泊营养状态评价中得到了广泛的应用[18,19,22].

维普资讯 http://www.cqvip.com

层次分析法(Hierarchical analysis)由 Saaty 提出并广泛应用[23]，是系统分析中经常使用的一种数学方法，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[24]. 层次分析的一个基本步骤是要比较若干因素对同一目标的影响，从而确定它们在目标中所占的比重. 因此，在环境质量评价中应用层次分析法来确定各指标的权重是合适与可行的. 其基本原理如下：

设要比较 n 个因素 $y=\{y_1, y_2, \cdots\cdots, y_n\}$ 对目标 z 的影响，确定其在 z 中所占的比重. 令 a_{ij} 表示因素 y_i 与 y_j 对 z 的影响之比，全部结果可用矩阵 $A=(a_{ij})_{n\times n}$ 表示，称成对比较阵，满足

$$a_{ij}>0, a_{ji}=1/a_{ij} \quad (i,j=1,2,\cdots\cdots,n)$$

因此是正互反阵. 显然有 $a_{ii}=1$. 满足

$$a_{ik}\times a_{kj}=a_{ij} \quad (i,k,j=1,2,\cdots\cdots,n)$$

的正互反阵 A 叫做一致性矩阵(简称一致阵). 显然，成对比较阵是正互反阵，但不一定是一致阵. 数学上已经证明，$n\times n$ 的正互反阵是一致阵的充分必要条件是其最大特征值 $\lambda_{max}=n$. 此时，λ_{max} 所对应的特征向量经标准化(归一化)后即为权向量，它表示了因素 $y=\{y_i, i=1,2,\cdots\cdots,n\}$ 在 z 中所占的比重.

当 A 为非一致阵时，可证明 $\lambda_{max}>n$，其所对应的特征向量经标准化后亦为权向量. 不过，由于特征值连续地依赖于 a_{ij}，λ_{max} 比 n 大得越多，A 的不一致程度就越严重，用权向量表示各因子在 z 中所占比重时的偏差就越大. Saaty 定义

$$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$$

为最大特征值之外所有特征值的平均值为衡量不一致程度的数量指标，即一致性指标(CI, Consistency index). CI 值越大，不一致程度就越严重.

为找出衡量 CI 的标准，Saaty 提出了随机一致性指标(RI, Random consistency index)的概念. 对任一固定的 n，随机用 1－9 及其倒数的标度法构造正互反阵 B，可以认为这样的矩阵 B 是最不一致的. 用充分大的子样可得到 B 的最大特征值的平均值 λ_{max}'，定义

$$RI=(\lambda_{max}'-n)/(n-1)$$

为随机一致性指标. Saaty 用大小为 100－500 的子样对不同的 n 值得到了 RI 值：

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

并定义一致性比率(CR, Consistency ratio)为

$$CR=CI/RI$$

当 CR<0.1 时，认为具有满意的一致性，即非一致阵的不一致性仍可接受.

2.2　评价指标与标准

环境质量评价，即对环境质量优劣的定量描述和评定，其目的是准确反映环境的质量和污染的状况，指出将来的发展趋势. 在深入分析环境质量与影响环境质量的各因子(如人口增长、工农业生产的发展等)的相互关系时，仅将湖泊分为贫营养或富营养型等是不够的，而应将其确定为可连续分级的数量形式，从而便于进行定量的数学分析. 在前文所述的 6 类富营养化评价方法中，有一些可以对湖泊富营养化进行数值评价，尤其是营养状态指数(TSI, Trophic

State Index)法.该方法将湖泊营养状态的贫营养—富营养连续划分为0—100的连续数值,操作简单,可比性较强,可为进一步分析富营养化机理奠定基础.

TSI法主要以湖水透明度(Tr)、藻类叶绿素a浓度(Chla)和湖水总磷浓度(TP)为指标,有Carlson的TSI法和Aizaki修正的TSI_M法等,其计算公式分别为[15-17]:

$$TSI(Tr)=10\times(6-\ln(Tr)/\ln 2)$$

$$TSI(Chla)=10\times(6-(2.04-0.68\times\ln(Chla))/\ln 2)$$

$$TSI(TP)=10\times(6-\ln(48/TP)/\ln 2)$$

$$TSI_M(Tr)=10\times(2.46+(3.69-1.53\times\ln(Tr))/\ln 2.5)$$

$$TSI_M(Chla)=10\times(2.46+\ln(Chla)/\ln 2.5)$$

$$TSI_M(TP)=10\times(2.46+(6.71+1.15\times\ln(TP))/\ln 2.5)$$

其中,TSI法的基础是假定湖水中的悬浮物质全部为浮游植物,即湖水透明度主要受浮游植物丰度的影响,其TSI指数以透明度为基准.这一方法忽略了浮游植物以外的其它因子(水色、湖水中的溶解物质以及其它悬浮物质)对透明度的影响,因而具有一定的限制,而TSI_M则是以叶绿素a浓度为基准,较好地解决了这一问题.

此外,Aizaki等[16-17]还分析了叶绿素a分别与总氮(TN)、化学耗氧量(COD)以及悬浮物(SS)浓度等的相关关系,从而得出总氮、化学耗氧量以及悬浮物浓度等的TSI_M指数公式.

$$TSI_M(TN)=10\times(2.46+(3.93+1.35\times\ln(TN))/\ln 2.5)$$

$$TSI_M(COD)=10\times(2.46+(1.50+1.36\times\ln(COD))/\ln 2.5)$$

$$TSI_M(SS)=10\times(2.46+(1.12+1.04\times\ln(SS))/\ln 2.5)$$

李祚泳等[25]通过对我国一些湖泊水库营养状态的考察和比较,选择大理洱海和广州流花湖分别作为贫营养和富营养状态的标准湖泊,与TSI和TSI_M作比较,得出适用于我国若干湖泊的营养状态评价的TSI_C计算公式:

$$TSI_C(Chla)=10\times(2.46+1.09\times\ln(Chla))$$

$$TSI_C(Tr)=10\times(5.52-1.94\times\ln(Tr))$$

$$TSI_C(TP)=10\times(9.40+1.62\times\ln(TP))$$

$$TSI_C(TN)=10\times(5.24+1.86\times\ln(TN))$$

$$TSI_C(COD)=10\times(0.62+2.56\times\ln(COD))$$

$$TSI_C(BOD)=10\times(2.39+2.25\times\ln(BOD))$$

其不足之处在于,由于TSI_C系根据TSI和TSI_M计算而来,不是根据主要参数的相关公式,因此出现某些参数的TSI_C指数大于100的现象.

2.3 权重分配

对于Carlson指标中的三个因子,相对重要性为[4,5]:

叶绿素a>透明度>总磷

相应判断矩阵为:

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

相应权向量为$W=(0.540,0.297,0.163)$,其中

$\lambda_{max}=3.009$，CI=0.005，RI=0.580，CR=0.006

具有满意的一致性.

对于 Aixaki 等的修正 Carlson 指数中的 6 项指标，相对重要性有：

叶绿素 a＞透明度＞总磷＞总氮＞化学耗氧量＞悬浮物

相应判断矩阵为：

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

相应权向量为 $W=(0.440,0.242,0.149,0.083,0.052,0.034)$，其中

$\lambda_{max}=6.083$，CI=0.017，RI=1.240，CR=0.013

具有满意的一致性. 以上结果说明上述权重分配较好地反映了湖泊富营养化评价中各因子的相对重要性，从而具有广泛的可用性和可信性.

3　综合评价与其他分析方法如聚类分析等的关系

综合评价，实际上是通过某种映射，将由 n 个指标组成的 n 维状态空间的点投影到一维空间，从而得到人们易于比较大小的纯量. 但在投影过程中，或多或少会有信息损失. 而聚类分析则是直接研究 n 维空间中点与点之间的相似关系，将相似程度高（或距离小）的点归聚成类，它避免了投影过程中的信息损失问题，但无法定量地比较类与类间的大小. 因此，工作中应将此二种方法结合起来使用，才能得出更为客观和准确的结果[19,26].

参　考　文　献

1　张升翊. 湖泊人为富营养化. 海洋湖沼通报，1992，(1)：88－97

2　全国主要湖泊水库富营养化调查研究课题组. 湖泊富营养化调查规范. 北京：中国环境科学出版社，1987

3　饶钦止主编. 湖泊调查基础知识. 北京：科学出版社，1956

4　Wetzel R G. Limnology. 2nd ed. Philadephia: Saunders College Publ Co, 1983

5　OECD. Eutrophication of waters. OECD, 1982

6　黄祥飞. 从原生动物变化看武汉东湖富营养化的发展. 水生生物学报，1986，10(4)：340－352

7　刘建康主编. 东湖生态学研究(一). 北京：科学出版社，1990

8　饶钦止，章宗涉. 武汉东湖浮游植物的演变(1956－1975)和富营养化问题. 水生生物学集刊，1980，7(1)：1－17

9　Liu J K. Lakes of the middle and lower basins of Changjiang(China). In: Tanh F B, ed. Lakes and reservoirs. Berlin: Elsevier, 1984

10　Nogrady T. The littoral rotifer plankton of the Bay of Quinte(Lake Ontario) and its horizontal distribution as indicators of trophy. I: a full season study. *Arch Hydrobiol Suppl*, 1988, 79(2/3): 145－165

11　Dillon P J. The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario: the importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes. *Limnol Oceanogr*, 1975, 20(1): 28－39

12　Dillon P J & Rigler F H. A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water. J

维普资讯 http://www.cqvip.com

Fish Res Board Can, 1974,**31**(11):1771—1778

13 Dillon P J & Rigler F H. The phosphorus-chlorophll relationship in lakes. *Limnol Oceanogr*, 1974,**19**(5):767—773

14 Dillon P J & Rigler F H. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status. *J Fish Res Board Can*, 1975,**32**(9):1519—1531

15 Carlson R E. A trophic state index for lakes. *Limnol Oceanogr*, 1977,**22**(2):361—369

16 Aizaki M, *et al*. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state. *Res Rep Natl Inst Environ Stud*, 1981,(23):13—31

17 Goda T. Comprehensive studies on the eutrophication of freshwater areas. XI: summary of researches. *The National Institute for Environmental Studies*, 1981,(27):59—71

18 蔡庆华.武汉东湖富营养化的综合评价.海洋与湖沼,1993,**24**(4):335—339

19 蔡庆华,刘瑞秋,黎道丰等.黄淮海平原封丘试区水体营养状态的综合评价.湖泊科学,1992,**4**(2):48—51

20 陆雍森等.环境评价.北京:中国环境科学出版社,1990

21 姜启源.数学模型.北京:高等教育出版社,1987

22 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛等主编.中国湖泊富营养化.北京:中国环境科学出版社,1990

23 Saaty T L. The analytic hierarchy process. New York:McGraw-Hill Inc, 1980

24 赵焕臣,许树柏,和金生.层次分析法.北京:科学出版社,1986

25 李祚泳,张辉军.我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSIc 及其与各参数的关系.环境科学学报,1993,**13**(4):391—397

26 蔡庆华,刘建康.人口增长与渔业发展对武汉东湖水质的影响.水生生物学报,1994,**18**(1):87—89

ON THE COMPREHENSIVE EVALUATION METHODS FOR LAKE EUTROPHICATION

Cai Qinghua

(*Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430072)

Abstract

On the basis of general methods for evaluating lake eutrophication, the anthor summarized some comprehensive assessment methods for lake eutrophication reported at home and abroad. It is pointed out that the trophic state index should be the major method for evaluating lake eutrophication status, since it could provide a continuous numerical class of lake trophic state and a rigorous foundation of quantitative studies of eutrophication mechanism. After analyzing some determination methods of weight distribution in the comprehensive indices, the anthor insists that the hierarchical analysis be quite perfect to determine weights. This paper shows the weight distribution of TSI and its modifiers. Additionally, it is discussed in brief the relations between comprehensive evaluation and other statistical methods such as cluster analysis in the last part of this paper.

Key Words Eutrophication, trophic state index, comprehensive evaluation, hierarchical analysis, cluster analysis