

# 富营养化水体的评价方法研究

常会庆<sup>1</sup>, 车青梅<sup>2</sup> (1.河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003; 2.河南科技大学医学院, 河南洛阳 471003)

**摘要** 分别对特征评价法、参数法、生物指标参数法、营养状况指数法及数学评价法等富营养化水体的评价方法进行了详细阐述, 介绍了各种评价方法和分级标准, 以及它们相应的适用条件, 以便对不同的水生生态系统进行较为合理的评价, 为湖泊的管理和生态环境保护提供依据。

**关键词** 富营养化; 评价方法; 水生生态系统

**中图分类号** X52 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2007)32-10407-03

## Study on Methods of Evaluation for Water Eutrophication

CHANG Hui-qing et al (College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003)

**Abstract** The characteristic method, the parameter method, the biology index parameter method, the nutrition status index method, the mathematics evaluative method and so on were particularly expounded, respectively. The classification standards of all kinds of evaluative methods and their corresponding applicative conditions were introduced, in order to evaluate water ecosystem accurately, manage our lakes and protect the ecological environment properly

**Key words** Eutrophication; Evaluation methods; Water ecosystem

水体富营养化评价是对水体富营养化发展过程中某一阶段营养状况的定量描述, 其主要目的是通过对具有水体富营养化代表性指标的调查, 判断该水体的营养状态, 了解其富营养化进程及预测其发展趋势, 为水体水质管理及富营养化防治提供科学依据。然而, 由于所评价的生态系统可能较为复杂, 其中系统内部会涉及到相当多的状态变量, 而且各状态变量之间的关系也相当复杂, 难以描述。目前, 对富营养化的评价指标选取和评价方法等方面还存在诸多分歧。

只有从数量众多的指标中挑选能反映本系统中影响富营养化状态主要因子: 包括物理、化学、生物等环境要素进行综合的评价, 才能较为客观地反映出水体的富营养化状况。因此了解各种对富营养化评价的方法具有重要的意义。

### 1 特征法评价指标

特征法是根据湖泊富营养化的生态环境因子特征来评价湖泊营养状况的方法, 金相灿也用同样的方法来评价湖泊的营养状况(表 1)<sup>[1]</sup>。

表 1 富营养化程度的综合判定

类型	水质				生物			水的物理性质	
	pH 值	溶解氧	其他	生产力	叶绿素 // mg/m <sup>3</sup>	浮游植物	浮游动物	水色	透明度
贫营养湖	中性附近	全层饱和	N<0.20 mg/kg, P<0.02 mg/kg	小, 为 200 mg C/(m <sup>3</sup> ·d)以下	0.3~2.5	少, 以金藻为主	以甲壳类为主	蓝色或绿色	≥5m
富营养湖	中性-弱碱性, 夏季表层有时为强碱性	表层饱和或过饱和	N>0.20 mg/kg, P>0.02mg/kg	小, 为 200 mg C/(m <sup>3</sup> ·d)以上	5.0~140.0	丰富, 以蓝藻为主	轮虫增多	绿色或黄色	<5m

### 2 参数法

在富营养化湖泊的水生态系统中, 各种生物与非生物因子处于十分复杂、相互作用的网络中。一般采用水体中营养物质氮、磷的浓度(即总氮、总磷指标), 水体透明度, 藻类的种类、数量、指示种、优势种, 叶绿素 a, 生物多样性指数及水质综合污染指数等生物和生态学指标对湖泊、水库生态环境质量进行评价, 以判断水体是否处于富营养状态。部分常用评价指标参数见表 2。

表 2 富营养化的评价标准

类型	TP mg/L	TN mg/L	Chl-a mg/L	SD m	藻量 ×10 <sup>4</sup> 个/L	初级生产力 mg/(m <sup>3</sup> ·h)
极贫营养	0.001	<0.02	-	>37.00	<4	-
贫营养	0.004	0.06	<0.004	12.00	15	<0.3
中营养	0.023	0.31	0.004-0.010	2.40	50	-
富营养	0.110	1.20	0.010-0.150	0.55	100	>1.0
极富营养	>0.660	>4.60	>0.150	<0.17	>1 000	-

### 3 生物指标参数法

**3.1 藻类污染指示种及综合指数** 在水体富营养化的评价中, 氮、磷浓度, 藻类现存量 and 种类多样性指数均是重要

的评价指标。作为富营养指示种的蓝藻和绿球藻大量存在, 可以表明水体水质营养水平很高。藻类综合指数( $a$ )求取。

$a = (\text{蓝藻门} + \text{绿球藻目} + \text{中心纲硅藻} + \text{裸藻}) \text{种数} / \text{总藻目种数}$ 。当  $a > 3$  时, 表明水体已经处于富营养型<sup>[2]</sup>。

**3.2 多样性指数** 生物多样性是指一定空间范围内多样性有机体(动物、植物、微生物)有规律地结合在一起的总称。它是对自然界生态平衡基本规律简明的科学概括, 也是衡量生产发展是否符合客观规律的主要尺度。一个湖泊本身是一个完整的生态系统, 它是由浮游植物、浮游动物、底栖动物、水生昆虫、底生藻类、水生维管束植物、腐屑和细菌以及摄食各种生物的多种鱼类构成<sup>[3]</sup>。

**3.3 指示生物法** 把浮游植物作为评价水质污染的指示生物是由于藻类种群与水环境间存在天然的生态平衡和保持相对稳定性的关系。一旦水质污染使环境因子发生改变, 将直接影响原有生物种群的平衡, 改变种群的组成和数量。因此, 可用生物的指示种群来划分水质的污染级别和表示其污染程度, 还可以用轮虫的种类来判定水体的水质状况以确定污染等级。Georgiev 认为, 臂尾轮虫与富营养化水体关系密切, 而异尾轮虫类则多生活在贫寡营养型水体中<sup>[4]</sup>。

### 4 营养状况指数法

**4.1 TSI 指数法** 卡森是以透明度为基础, 分为 0~100 的连续值, 作为评价湖泊营养状况的分级标准。

**基金项目** 科技部中澳合作项目“退化土-水生态系统的生物修复技术新技术体系研究”。

**作者简介** 常会庆(1974-), 男, 山西太谷人, 博士, 讲师, 从事富营养化水体的生态修复机理研究。

**收稿日期** 2007-06-18

$$TSI(SD)=10(6-\frac{\ln SD}{\ln 2})$$

式中,SD 为透明度值。当 TSI 指数为零时,湖泊的营养状态最低,此时透明度最大。

修正的卡森指数:卡森指数是以透明度为基准的,没有考虑到除浮游植物以外的其他因子对透明度的影响,因此日本的相崎守弘等人,把以透明度为基准的 TSI 指数,改为以叶绿素 a 浓度(Chla)为基准的营养状况指数,称之为修正的营养状况指数(TSI<sub>M</sub>)。该指数同样采用 0~100 的连续值来描述湖泊的营养状况,并使 chla 每增加 2.5 倍,TSI<sub>M</sub> 指数值增加 10,其基本计算公式为:TSI<sub>M</sub>(chl)=10(2.46+ $\frac{\ln chl}{\ln 2.5}$ )

4.2 综合营养状态指数法 其计算公式为:

$$TLI(\Sigma)=\sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j)$$

式中,TLI(Σ)表示综合营养状态指数;TLI(j)代表第 j 种参数的营养状态指数;W<sub>j</sub> 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。

以 chla 作为基准参数,则第 j 种参数归一化的相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}$$

中国湖泊的 chla 与其他参数之间的相关关系 r<sub>ij</sub> 及 r<sub>ij</sub><sup>2</sup> 见表 3。

王明翠<sup>[9]</sup>对比了综合营养指数(TLI)、评分指数(M)和主

表 4

水域营养类型的划分标准

类型	NO <sub>3</sub> -N//mg/L	NO <sub>2</sub> -N//mg/L	NH <sub>4</sub> -N//mg/L	TN//mg/L	PO <sub>4</sub> -P//mg/L	TP//mg/L	Chla//μg/L	COD//mg/L	SD//m	评分
极贫营养	<0.05	<0.001	<0.05	<0.10	<0.001	<0.001	<0.5	<0.15	>10.00	≤10
贫营养	<0.10	<0.003	<0.10	<0.25	<0.005	<0.005	<1.0	<0.40	>5.00	≤20
贫-中营养	<0.20	<0.010	<0.30	<0.50	<0.010	<0.010	<5.0	<1.00	>3.00	≤30
中营养	<0.40	<0.030	<0.50	<0.60	<0.030	<0.030	<25.0	<2.00	>1.50	≤40
中-富营养	<0.50	<0.050	<0.70	<1.00	<0.050	<0.050	<50.0	<4.00	>1.00	≤50
富营养	<0.80	<0.200	<1.00	<1.50	<0.100	<0.100	500.0	<10.00	>0.40	≤60
极富营养	≥0.80	≥0.200	≥1.00	≥1.50	≥0.100	≥0.100	≥500.0	≥10.00	≤0.40	≤70

评分参数的评分值是根据表 4 所示的评分标准,在 0~70 分的范围内,分别赋予各评分参数相应的评分值。评分值愈高,表明水域的富营养化程度愈高<sup>[9]</sup>。

6 数学评价法

6.1 富营养化模糊评价模式 现有的模糊评价模式较多,如方正使用的模糊综合评判法、多级模糊模式识别方法<sup>[6]</sup>等。其基本原理如下。

(1)根据待评价的 n 个测站的海水样本组成一样本集,每个样本对应 m 项水质富营养化指标实测值,建立实测指标矩阵;然后根据 m 项指标的 c 级富营养化标准值构建标准指标矩阵。

(2)将上述矩阵转化为隶属度矩阵。因为 m 项指标对海水富营养化的影响程度不完全相同,评价时运用层次分析法确定这 m 个指标的权重。

(3)利用广义海明距离表示第 j(j=1,⋯,n)个海水样本与第 h(h=1,⋯, c)级富营养化标准之间的差异,从而建立差异矩阵。差异矩阵反映了各海水样本对各级富营养化标准的贴近程度。

(4)将隶属程度归一化,便得到样本 j 对于第 h 级标准

表 3 中国湖泊部分参数与 chla 的相关关系 r<sub>ij</sub> 及 r<sub>ij</sub><sup>2</sup> 值

参数	chla	TP	TN	SD	COD <sub>Mn</sub>
r <sub>ij</sub>	1	0.840 0	0.820 0	-0.830 0	0.830 0
r <sub>ij</sub> <sup>2</sup>	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9	0.688 9

成分分析营养度法(AHP-PCA)对太湖水质进行了评价,并且认为综合营养指数(TLI)法是一种可行的方法。

4.3 营养指数法(AHP-PCA 法) 通过分析国内外现有湖泊营养化评价模式,进行了反复的理论探索和实践验证,将层次分析法(AHP)和主成分分析法(PCA)相结合,提出湖泊富营养化状态综合评价方法,即层次分析-主成分分析营养指数法。综合营养度的计算公式为:

$$TLIC = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI_j = \sum_{j=1}^m W_j (a_j + b_j \ln C_{jx})$$

$$a_j = \frac{\ln C_{jmin}}{\ln C_{jmax} - \ln C_{jmin}} \times 100$$

$$b_j = \frac{1}{\ln C_{jmax} - \ln C_{jmin}} \times 100$$

式中,TLIC 为湖泊营养状态的综合营养度;TLI<sub>j</sub> 为第 j 个因子的分营养度;W<sub>j</sub> 为第 j 个因子的“综合权”。C<sub>jx</sub> 为第 j 个因子的监测值(平均值、丰季均值或最大值);C<sub>jmax</sub> 和 C<sub>jmin</sub> 分别是第 j 个因子相应于营养度为 0 和 100 时的浓度值。

5 营养评分模式

基本公式:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i$$

式中,M 为富营养化程度的评分值(各调查点);M<sub>i</sub> 为评价参数的评分值;n 为评分参数的个数。

的隶属度,其计算式为:

$$\mu_{hj} = \frac{u_{hj}}{\sum_{k=1}^c u_{kj}} \quad (\mu_{hj} \text{ 为样本 } j \text{ 对营养化级别 } k \text{ 的相对隶属度}; u_{kj} \text{ 为 } j \text{ 项指标的 } C \text{ 级富营养化标准值构建标准指标矩阵。})$$

依据隶属度最大原则可得出样本 j 应归属的富营养化级别。

由于在该评价系统中选择了不同的指标可能得到的结果误差较大,主要是因为确定水体的状态属性是一个将定性问题量化的多变量综合决策过程<sup>[7]</sup>,所以对其改进完善仍将是评价工作者未来的努力方向。

6.2 人工神经网络评价方法 人工神经网络理论是目前最活跃的前沿学科之一,尤其适合于处理非线性系统。它力图模拟人脑的一些基本特征,可进行并行计算、分布式信息存储,具有很强的自适应性、自组织性,特别是能处理任意类数据,这是其他传统方法所无法比拟的。国内,人工神经网络技术虽已在湖库的富营养化评价方面获得了应用<sup>[8]</sup>,如谢宏斌用 B-P 神经网络对南湖水质富营养化进行综合评价<sup>[9]</sup>,任黎利用神经网络模型评价了太湖的富营养化状态<sup>[10]</sup>,卢文喜

等应用神经网络方法对我国 17 个湖泊的富营养化程度进行了评价<sup>[1]</sup>,但并没有取得比其他方法更好的结果。经分析,主要原因是:①在确定人工神经网络评价模型时,没有使用检验样本和测试样本,多数文献使用了较少的训练样本;②使用了太多的隐层及其节点数;③部分文献输出层采用多个输出单元,富营养化等级的识别比较困难。这些缺陷造成网络评价模型泛化能力较差。虽然人工神经网络在求解这类不确定性问题方面具有很强的优越性,但由于现阶段我国积累的数据量极其有限,难以满足该方法对大量数据样本集的要求,这对人工神经网络方法的应用是一个挑战。

## 7 指标测定法

**7.1 光合作用强度与呼吸作用强度的比值** 这里所说的光合作用指水中藻类原质体的合成作用,呼吸作用主要是指藻类为动物性浮游生物和鱼所捕食,以及藻类和有机底物为微生物所降解的呼吸作用的总和。在贫营养水体中的真透光区,由异养生物生长利用藻类作基质的呼吸强度与初级生长率相平衡,即光合作用( $P$ ):呼吸作用( $R$ )=1,是正常水体的情况;在富营养化水体的真透光区内,光合作用超过分解藻类的强度,即  $P:R>1$ ;当营养与光均成为限制因素时,光合作用强度明显下降,异养生物降解有机物的作用加强,这时释放出的植物性营养物质,为在更严重的富营养化条件下进行更强烈的光合作用提供了物质基础,此时  $P:R<1$ ;当水体的光合强度与呼吸作用强度的比值不断波动,凡是大幅波动与  $P:R>1$  和  $P:R<1$  的水体,是典型富营养化的表现。

**7.2 藻类生产潜在能力的测定** 该法测定时在水样中接种特定藻类(一般接种蓝细菌、绿藻、硅藻),然后置于一定照度和温度条件下培养,使藻类生长达到稳定期,最后用测定藻类细胞数或干重的方法,来决定藻类在某种水体中的增殖量(algal growth potential, AGP)。由于营养物浓度与藻类生物量成正比关系,水体中氮磷含量决定着藻类生长的潜在能力。一般贫营养湖的 AGP 在 1 mg/L 以下,中营养湖为 1~10 mg/L,富营养湖为 5~50 mg/L。

**7.3 光合作用产氧能力的测定** 该法测定的是水样在自然光照条件下由于藻类光合作用而增加的氧量。在日出前取 3 瓶水样,盖紧瓶盖并使瓶内不留有气泡。立即测定一瓶

水样溶解氧的含量,作为本底值。另两瓶,其中一瓶需要用黑布包好,不透光,然后直接放在阳光下,经过一定时间光照后,分别测定各瓶里的溶解氧含量。将暴露在阳光下瓶子内的溶解氧含量扣除本底值,再加上用黑布遮光瓶内因呼吸作用而消耗的氧值,即为该水样中藻类在一定时间光照过程中所产生的氧量。产氧量越多,说明藻类活动越旺盛。

## 8 结语

鉴于我国农业和生活发展水平的发展,决定了向水体输入氮磷等营养物质的影响还将在很长一段时期内存在。因此建立适合我国的富营养化水体的评价标准,并确定相关的概念尤为重要,欧洲的湖泊都有非常完整的长期观测资料,记录了从开始富营养化演替为贫营养化的过程,值得借鉴。但是我国的富营养化标准不能简单地套用欧洲的标准。特别是浅水湖泊,不能简单地用透明度等来划分。目前富营养化的量化、定义尚不明了,沼泽化与富营养化的差异,以及用什么指标(N、P、C、Si、Ca)来指示湖泊富营养化的程度等问题也值得讨论。需要加强对重点湖泊的长期观察,获得基本数据以准确定义。

## 参考文献

- [1] 金相灿.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1987.
- [2] 况琪军.韩国南汉河的浮游植物及营养水平[J].长江流域资源与环境,1999,8(2):221-226.
- [3] 杜宝汉.用灰色关联度模型评价湖泊富营养化[J].四川环境,1999,18(4):48-52.
- [4] GGEORGIEV V B, ILIEV I P, BOGDANOVA S M. 水库的热分层动态特性及其对富营养化过程的影响[M].保加利亚科学院水问题研究所,1990:1-4.
- [5] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,2002,18(5):47-49.
- [6] 方正,孙迎霞,程晓如.多级模糊模式识别方法用于湖泊水质评价[J].重庆环境科学,2003,25(10):39-41.
- [7] 蔡庆华.武汉东湖富营养化的综合评价[J].海洋与湖泽,1993,24(4):335-339.
- [8] 熊德琪.一种新的海水富营养化模糊评价方法[J].海洋通报,1993,12(6):30-35.
- [9] 谢宏斌.南湖富营养化的人工神经网络评价[J].广西科学院学报,1999,15(1):29-32.
- [10] 任黎,董增川,李少华.人工神经网络模型在太湖富营养化评价中的应用[J].河海大学学报,2004,32(2):147-150.
- [11] 卢文喜,祝廷成.应用人工神经网络评价湖泊的富营养化[J].应用生态学报,1998,9(6):645-650.

(上接第 10406 页)

- [2] 姜志德.土地资源可持续利用概念的理性思考[J].西北农林科技大学学报,2001,1(4):57-61.
- [3] 陈志刚,黄贤金.经济发达地区土地资源可持续利用评价研究[J].资源科学,2001,23(3):33-38.
- [4] 陈百明,张凤荣.中国土地可持续利用指标体系的理论与方法[J].自然资源学报,2001,16(3):197-204.
- [5] 尹君.土地资源可持续利用评价指标体系研究[J].中国土地科学,2001,15(2):6-9.
- [6] 钟毅.广东省土地资源可持续利用综合评价[J].中国土地科学,2001,

15(5):43-48.

- [7] 刘彦琴,郝晋珉.区域可持续土地利用空间差异评价研究[J].资源科学,2003,25(2):56-62.
- [8] 王静,张凤荣,郭旭东,等.县级尺度土地资源可持续利用评价方法研究[J].地理与地理信息科学,2004,20(2):53-56.
- [9] 傅佰杰.土地可持续利用评价的指标体系与方法[J].自然资源学报,1997,12(2):112-118.
- [10] 余敦,赵小敏.县域土地持续利用评价的研究—以新建县为例[J].江西农业大学学报:社会科学版,2005,4(2):34-38.
- [11] 岳健,杨发相,罗格平,等.农用土地评价参评因子的权重问题[J].干旱区研究,2004,21(4):55-58.

本刊提示 《安徽农业科学》是全中国为数不多各大数据库同时收录的农业刊物之一。面向全国,融学术性、指导性于一体,既刊登作物育种与栽培、植物保护、土壤肥料、园艺、林业、蚕桑、烟草、茶叶、畜牧兽医、水产及其他农业相关科学的研究报告、综述、研究简报;也发表农业经济、农业科技管理、农业发展战略及农业产业化等方面的研究论文、调查报告和对策性文章等。