

水体富营养化评价方法研究

郭倩君, 黄月群*, 董 堃, 李文菁, 代丽娜, 黄寿琨

桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林
Email: 2687632666@qq.com, *66295574@qq.com

收稿日期: 2021年3月1日; 录用日期: 2021年3月30日; 发布日期: 2021年4月6日

摘 要

本文对水体富营养化常用的评价水质指标、评价方法和等级划分方法进行了综述。根据鱼类行为响应特征提出了一种基于鱼类行为响应在水体富营养化评价中的应用方法。该方法与其它理化分析手段相比, 具有更直观、客观、综合和历史可溯源性的特点, 可更真实、直接地反映环境污染的客观状况, 这种综合性和真实性是任何化学监测方法所无可比拟的。

关键词

水质指标, 评价方法, 等级划分, 鱼类行为响应, 水体富营养化

Research on Evaluation Method of Water Eutrophication

Qianjun Guo, Yuequn Huang*, Kun Dong, Wenjing Li, Lina Dai, Shoukun Huang

Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi
Email: 2687632666@qq.com, *66295574@qq.com

Received: Mar. 1st, 2021; accepted: Mar. 30th, 2021; published: Apr. 6th, 2021

Abstract

The commonly used water quality indicators, evaluation methods and classification methods for water eutrophication were reviewed in the article. According to the characteristics of fish behavior response, an application method based on fish behavior response in water eutrophication evaluation was proposed. Compared with other physical and chemical analysis methods, this method has the characteristics of more intuitive, objective, comprehensive and historical traceability,

*通讯作者。

and can more truly and directly reflect the objective conditions of environmental pollution. The comprehensiveness and authenticity of this evaluation method are unmatched by any chemical monitoring method.

Keywords

Water Quality Index, Evaluation Method, Grade Division, Fish Behavior Response, Water Body Eutrophication

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着工农业、城镇化的快速发展以及人民生活水平的提高,含有氮、磷污染物的大量排放,引起水体中藻类及其他浮游生物的迅速繁殖、死亡并释放毒素,消耗水体中大量氧气而导致溶解氧含量快速下降,导致水质恶化、鱼类死亡现象,这种水体富营养现象被人们形象地称为“生态癌”[1]。富营养化现象改变了水体的物理化学性质,不仅增加了净化水质的成本,还会对人类正常的饮水、娱乐、旅游和工业生产产生重要影响。它的存在严重妨碍水资源可持续利用,造成了环境和经济的重大损失。河流、湖泊及水库等水体富营养化问题已成为世界性的环境难题。目前,亚洲、欧洲、北美洲和非洲现阶段富营养化水体比例分别达到54%、53%、46%和28% [2]。自1980年以来,我国富营养化湖泊面积增加了近60倍,而25%的湖泊正面临富营养化的威胁[3]。根据2014年水利部发布的水资源公报,在对全国121个开发利用程度较高和面积较大的主要湖泊进行营养状态评价中,这些湖泊大部分都处于水体富营养状态。其中湖泊水体达到中营养状态的有28个,占据评价湖泊的23.1%;达到富营养状态的有93个,占据评价湖泊的76.9% [4]。据统计,中国湖泊富营养化程度贫营养、中营养、富营养的比例分别为44%,24%和32%,其中有22%的湖泊出现重富营养和超富营养现象[5],成为全球湖泊富营养化最为严重的国家之一[6]。

水体富营养化问题严重制约了我国水生态环境安全和经济社会可持续发展,也成为我国急需解决的重大环境问题之一,水体富营养化监测、预警以及评价等研究工作也相继得到开展。

2. 水体富营养化常用评价水质指标

水体富营养化过评价水质指标包括总磷TP、总氮TN、高锰酸钾 KMnO_4 、叶绿素Chl-a浓度和透明度SD等指标。

2.1. 总磷TP、总氮TN

总磷是正磷酸盐、聚合磷酸盐、可水角磷酸盐以及有机磷的总浓度。总氮是水体中氨氮、亚硝酸氮、硝酸氮和有机氮的总浓度。水体富营养化是由含氮磷污染物的过多排入引起的污染,使水体中氮磷含量增加,促进浮游植物和生物的大量生长繁殖,快速消耗水中的溶解氧,使水体质量恶化。氮磷营养盐又是浮游生物赖以生存的物质基础,也是水体富营养化是引起“水华”的原因。氮、磷的浓度是判断水体中营养程度是否达到富营养化级别的一项主要评价指标。

氮与磷都是藻类生长的必要营养盐,通过测定总磷、总氮的含量可以有效的评价水体的富营养程度。

总磷、总氮在水体中一般呈现正相关性[7]，若按照国际上总氮浓度 0.2 mg/L 和总磷浓度 0.02 mg/L 作为湖泊富营养化的判定标准，多数湖泊总氮浓度一般高出 5~12.5 倍，少数湖泊总磷浓度高出 10~50 倍[8]，当总氮与总磷的比值大于 7 时，则总氮和总磷会与叶绿素的含量呈现负相关。

2.2. 高锰酸钾指数 $KMnO_4$

高锰酸盐指数又称为耗氧量，是在一定条件下以高锰酸钾($KMnO_4$)为氧化剂氧化水样中某些有机物及无机还原性物质所消耗的高锰酸钾的量，并由消耗的高锰酸钾量计算相当的氧量(O_2 , mg/l)，水中悬浮和溶解的可被高锰酸钾氧化的那一部分无机物和有机物的量。高锰酸钾指数数值愈大，说明水中的有机物含量愈高，水质也就愈差。

2.3. 叶绿素 Chl-a

叶绿素 Chl-a 含量是指水体中绿色物质的含量，是反映水体中浮游植物生物量的综合指标，是表征水体富营养化现象及其程度的重要指标之一。叶绿素 Chl-a 是水体富营养的风向标，所以在进行水质富营养状态评价时，叶绿素 Chl-a 是水质评价中的最主要指标。水体富营养化过程中由于浮游植物和生物的大量繁殖导致水体呈现蓝色、红色、棕色甚至出现乳白色的这种现象叫做“水华”。因此水体富营养程度直接影响水体中藻类的数目和总类，所测得的叶绿素 Chl-a 浓度含量也会增高，叶绿素 Chl-a 与水体中藻类的数目和总类有着密切的联系。

藻类的各种生理活动及生化反应都必须要在一定温度条件下才能进行，水温的变化影响藻类的生长发育，因此水温对藻类生长具有重要影响作用。叶绿素 a 浓度随着水温的上升而升高，水温与叶绿素 a 浓度呈显著的正相关关系，说明水温对藻类的生长具有明显的促进作用[9]。

根据《水质叶绿素 Chl-a 的测定分光光度法》(HJ 897-2017)，采集水面下 0.5 m 处水样用于测定叶绿素 Chl-a 浓度。叶绿素 Chl-a 含量也可以简单判断该水体的富营养状况。根据中国环境监测总站制定的我国湖泊(水库)富营养化评价方法和分级技术规定，叶绿素 a 作为评价指标时，对水湖泊(水库)营养状态进行分级(叶绿素)如表 1 所示[10]。

Table 1. Classification criteria for nutrient status assessment of lakes (reservoirs) (unit: $\mu\text{g/L}$)

表 1. 湖泊(水库)营养状态评价分级标准(单位: $\mu\text{g/L}$)

营养分级	营养状态定性评价	叶绿素 a
贫营养	优	1.6
中营养	良好	10
轻富营养	轻度污染	26
中富营养	中度污染	64
重富营养	重度污染	160

2.4. 透明度 SD

透明度 SD 是指水样的透明程度，它反映水体在太阳光的照射下产生的一种漫射，这种漫射存在一定的衰减。透明度、光以及其所产生的反射现象是存在很直接的联系的，因此透明度是水体富营养化等级评价的另外一个不可缺少的因子。水体的透明度对藻类的生长繁殖有直接的影响作用，透明度高的水体有利于藻类的生长，但是水体中藻类数量增加反而会降低水体透明度，因此透明度也是判定水体富营养化程度的主要参数之一。透明度越大，说明水体的可见范围越远，水体的富营养程度越低，反之，则

说明水体富营养程度越高。

3. 水体富营养化常用评价方法

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的营养状况进行定量描述,其主要目的是通过对具有水体富营养化代表性指标的监测与调查,判定该水体的营养状态,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。近半个世纪以来,各国学者对湖泊的富营养化评价进行过深入的探讨,形成了多种形式的湖泊富营养化评价方法,主要包括有:参数法、营养状态指数法、评分法、生物指标评价法、特征法、灰色评价法、遥感技术评价法、模糊评价法和神经网络评价法等[11]。

3.1. 参数法

参数法是采用水体中营养物质氮、磷的浓度(即总氮和总磷)、水体透明度 SD、藻类(如藻类的种类、数量、指示种和优势种)、化学耗氧量 COD_{Mn} 、叶绿素 Chl-a。参数法是在评价水体富营养化时选择影响富营养化的关键参数,将参数进行数量分级后,将水体设定为不同的营养等级。在早期的调查及研究中,世界各地的学者使用不同的参数和标准对湖库营养状态进行评价。美国的 Carlson 等以总磷和透明度为参数将湖库水体的营养状态分为三种:贫营养、中营养和富营养[12]。多数学者基于生态学原理,制定以水体中的总氮和总磷浓度为标准划分湖库的营养等级。由于富营养化的最主要特征之一是藻类的大量繁殖,许多研究生态学的学者提出用藻类现存量评价水体营养状态[13]。参数法在使用时可以用单一参数,也可以用多参数综合评价,不同的地区和不同的研究人员可以根据实际情况提出不同的参数和评价方法。该方法具有指标明确,容易获得且评价简单、直观,但无法体现各污染物之间的联系,评价指标和评价标准的选择不够完善,很难真实得到水体的富营养化程度。

3.2. 营养度指数法

营养度指数法是结合了层次分析法与主成分分析法的一种综合富营养化状态评价法,即层次分析~主成分分析营养度指数法,是一种湖泊富营养化多因子综合评价方法,与其他的评价方法相比,这种方法在指标的选择、各因子权重的确定方面更加科学合理[14],评分值愈高,表明水域的富营养化程度也就愈高[15]。该方法根据几种污染物含量进行分析,可以进行定性和定量评价,但在选择评价指标时需要综合考虑水中各类污染物的主次及来源,指标选取难以全面。

3.3. 评分法

评分法是利用湖泊藻类生长旺季前后三个月的叶绿素 Chl-a 与该期间的总磷 TP、总氮 TN、高锰酸钾指数 COD_{Mn} 、透明度 SD 的相关关系,确定评分值并进行分级,根据分值大小判断湖泊富营养化程度。该方法操作比较简单,可比性强,是目前水体富营养化评价常用的主要方法之一。但如果某一参数的评分值明显低于或高于其他参数的评分值时,说明该参数受其他因子的影响较大,需要将该参数删除。因此,评分法由于受到人为因素的干扰而影响评价结果的准确性。

3.4. 生物指标参数法

水中浮游藻类的变化在一定程度上可以映水体的富营养状态,可用藻类的现存量、多样性、指示种等评价指标来评价水体富营养化程度,具体可细分为藻类污染指示种及综合指数法、多样性指数法和指示生物法。由于受到气候以及水体营养条件等环境的影响,水中浮游植物的种群变化比较复杂,优势种与水中营养类型有时表现一致,有时不一致,因此这类方法适用于监测资料比较齐全的条件下使用。

3.5. 特征法

特征法根据水体富营养化的生态环境因子特征来对水体的富营养状况进行评价。该方法常通过人为感官来判断湖泊的富营养化程度，无具体的定量描述，受人为影响因素较大。

3.6. 灰色评价法

在对水体富营养化程进行评价时，虽然多数数据是通过监测得到，但由于存在很多不确定因素，因此仍存在一些很不明确的灰色信息。因此在对水体富营养化作综合评价时，灰色因素起着很重要的作用，可以说富营养化评价是对灰色系统的评价和决策。灰色评价法具有化复杂为简单，考虑到很多的不确定性，但其计算过程复杂，不同营养状态的指标计算权重值不同[16]，因此计算结果较为模糊。

3.7. 遥感技术评价法

遥感技术评价法是通过分析水体反射、吸收和散射太阳辐射能形成的光谱特征与富营养化水质参数浓度之间的关系来建立水体富营养化水质参数的定量遥感反演模型，并通过分析各水质参数之间的相关性，建立适当的富营养化评价模型。利用卫星遥感信息技术可以进行大范围的水体富营养化空间分布及动态评价，具有监测范围广、速度快、成本低和便于长期动态监测的优势，还能发现一些常规方法难以揭示的污染物排放源、迁移扩散方向以及影响范围。因此，该评价方法只能对湖泊的富营养化状况进行定性评价。此外，还受天气的状况、泥沙悬浮物、水生植物以及湖泊水深等因素的而影响遥感图片的分辨率，从而影响评价结果的精度。

3.8. 模糊评价法

模糊评价法是根据给出的评价标准和实测值，经过模糊变换对事物做出评价的一种方法。评价事物有时间需要考虑各种因素，很多问题往往难以用一个简单的数值表示，此时可采用模糊评价法进行评价。模糊综合评价法较好反映出水质的模糊性、连续性，评价结果更加准确和可靠[17]。

3.9. 神经网络评价法

基于神经网络评价法通过人工神经网络理论试图模拟人脑的一些基本特征，从而进行并行计算、分布式信息存储。该方法具有很强的适应性和自组织性，尤其是能处理任意类型的数据，这是其他传统方法所无法比拟的。因此，人工神经网络理论是目前最活跃的前沿学科之一，尤其适用于非线性系统的处理。该方法建模和数据拟合能力较强，能够快速处理复杂问题，可用于构建水华变化预测模型[18]，但其收敛速度较慢，很难确定中间层单元的数量，且很难实现全局最优化。

每个评价方法都有自己的优缺点，不同的评价方法适合不同类型的水体，各个评价方法在实际工程中的应用也取得了很多的研究成果。能够反映水体营养状态的变量很多，但只有部分指标可被用于水体营养状态的评价，而且不同国家和地区所选取的评价指标也不同，其中总磷 TP、总氮 TN 和叶绿素 Chl-a 均为必选的评价指标。在各水质的监测指标中，Chl-a 是最能够直接反映水体藻类数量的指标，而总磷 TP、总氮 TN 是直接影响藻类生成、繁殖的主要因素。因此在对水体进行富营养化综合评价时，Chl-a、总磷 TP、总氮 TN 是必选的评价指标。

4. 水体富营养化等级划分方法

目前水体富营养化程度等级划分方法主要有三个：《地表水资源质量评价技术规程》(SL395-2007)方法、中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》和美国环保局(USEPA)指数评价方法：

1) 《地表水资源质量评价技术规程》(SL395-2007)方法

《地表水资源质量评价技术规程》根据《水利技术标准编写规定》相关要求编写而成,该规程可以科学、全面、客观地评价水资源的质量状况和特征,此外还可对水质的变化趋势进行分析评价。该规程根据水体中总磷、总氮、叶绿素-a、高锰酸盐指数和透明度 5 个指标从表 1 中查得水体的营养状态指数 E_i (见表 2),并按下式计算出综合的营养状态指数 EI 值[19],再按 EI 值即可确定水体的营养状。

$$EI = \sum_{i=1}^N E_i / N \quad (1)$$

式中, E_i 为某参数的营养状态指数; N 为评价参数的个数。

Table 2. Evaluation criteria and classification for nutrient status of lakes and reservoirs

表 2. 湖泊、水库营养状态评价标准及分级

营养状态分级	营养状态指数 E_i 、 EI	总磷 (mg/L)	总氮 (mg/L)	叶绿素-a (mg/L)	高锰酸盐指数 (mg/L)	透明度(m)
贫营养	10	0.001	0.02	0.0005	0.15	10
	20	0.004	0.05	0.001	0.4	5.0
中营养	30	0.010	0.10	0.002	1.0	3.0
	40	0.025	0.30	0.004	2.0	1.5
	50	0.050	0.50	0.010	4.0	1.0
轻度富营养	60	0.100	1.00	0.026	8.0	0.5
富营养	70	0.200	2.00	0.064	10	0.4
	80	0.600	6.00	0.160	25	0.3
	90	0.900	9.00	0.400	40	0.2
重度富营养	100	1.300	16.00	1.000	60	0.12

2) 《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》方法

中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》,选取总磷 TP、总氮 TN、高锰酸钾指数 COD_{Mn} 、叶绿素 Chl-a 和透明度 SD 等 5 个参数,采用综合营养状态指数法对水体营养状况进行评价[18]。根据式(2)中的综合营养状态指数 TLI [9],将水库营养状态划分为贫营养(TLI < 30)、中营养($30 \leq TLI \leq 50$)、富营养(TLI > 50)。

$$TLI(\Sigma) = \sum_{i=1}^N W_j \cdot TLI(j) \quad (2)$$

其中 TLI 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数。

3) 美国环保局(USEPA)指数评价方法

美国环保局(USEPA)根据水体总磷浓度、叶绿素-a 浓度、透明度和溶解氧饱和度等指标来划分水体的营养状态(见表 3),水体总磷浓度 > 0.02 mg/L,叶绿素 Chl-a 浓度 > 10 g/L,透明度 < 2.0 m,溶解氧饱和度 < 10%的湖泊可判断为富营养化水体[19]。

Table 3. Classification of water nutrition status

表 3. 水体营养状态划分

名称	贫营养	中营养	富营养
总磷浓度(mg/L)	<0.01	0.01~0.02	>0.02
叶绿素-a 浓度(μ g/L)	<4	4~10	>10
塞克板透明度(m)	>3.7	2.0~3.7	<2.0
溶解氧饱和度(%)	>80	10~80	<10

5. 鱼类行为响应在水体富营养化评价中的应用展望

鱼类具有正趋性、趋清性，喜欢逆水而上，向水流清澈的地方游动。当水环境遭受破坏时，鱼类的这种特性就会被打破。因此根据鱼类的游泳行为、正趋流性以及选择行为可对水体环境质量进行评价。水中污染物浓度会影响鱼类的游泳能力，通过连续测定鱼类的位置变化，通过比较鱼类的当前运动轨迹与历史运动轨迹，分析鱼类的行为响应变化情况，从而达到对水体富营养化情况进行监测和评价的目的。通过监测鱼类在不同水体富营养化阶段的停留情况，如果表现出逃避行为，且大多数都集中在洁净水的一端，则表明水质遭受到污染。

水体富营养化过程中会导致水中溶解氧含量下降、藻类死亡并分解、释放出有毒物质，导致鱼类死亡，反映了鱼类与其生存的水环境是统一的整体，两者相互依存、相互补偿、协同进化。在水体富营养化过程中，鱼类行为随着水环境因子的改变而发生响应。根据水环境因子对鱼类生理、行为的潜在影响以及实际毒性来对水体富营养化做出相应的评价。通过监测鱼类对不同水体环境的行为响应情况，确定鱼类行为响应指标并对水体富营养化程度进行评价。其与其它理化分析手段相比，具有更直观、客观、综合和历史可溯源性的特点，可更真实、直接地反映环境污染的客观状况，这种综合性和真实性是任何物理、化学监测方法所无可比拟的。在积累大量数据的基础上，为各种水体污染物或有毒物质的排放标准选择合适的污水处理方法及工艺流程，为区域的环境容量和环境标准的制订提供参数依据。

6. 结束语

现有的水体富营养化评价方法种类繁多且各有优劣势，适用的方向和范围也各不相同。现有方法难以顾全各方面因素，因此评价结果存在一定的偏差。随着水体富营养化评价方法研究日渐完善，在选择评价方法时应根据研究区域的实际情况进行综合及客观的分析和评价，采用两三种较为合适的评价方法并进行对比分析，最终选择最适合区域实际情况的评价方法。

基金项目

广西自然科学基金“鱼类在水质演变过程中的运动行为响应模式研究”(2019GXNSFAA245058)。

参考文献

- [1] 龚玲. 三峡库区富营养化水体中悬浮泥沙对藻类生长影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [2] Nyenje, P.M., Foppen, J.W., Uhlenbrook, S., Kulabako, R. and Muwanga, A. (2010) Eutrophication and Nutrient Release in Urban Areas of Sub-Saharan Africa—A Review. *Science of the Total Environment*, **408**, 447-455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.020>
- [3] Ni, Z.K. and Wang, S.R. (2015) Economic Development Influences on Sediment-Bound Nitrogen and Phosphorus Accumulation of Lakes in China. *Environmental Science and Pollution Research*, **22**, 18561-18573. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5171-6>
- [4] 水利部. 我国水资源状况公报[R]. 北京: 水利部, 2013.
- [5] Huang, Y.P. (2001) Contamination and Control of Aquatic Environment in Lake Taihu. Science Press, Beijing.
- [6] 王圣瑞. 中国湖泊生态演变与保护管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [7] 王俊, 韦肖杭, 姚伟忠, 等. 南太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 190-193.
- [8] 白峰青. 湖泊生态系统退化机理及修复理论与技术研究——以太湖生态系统为例[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2004.
- [9] 罗固源, 郑剑锋, 许晓毅, 等. 次级河流回水区叶绿素 a 与影响因子的多元分析——以临江河为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 964-948.
- [10] 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.

-
- [11] 夏婷婷, 尚广萍. 基于地表水环境质量的富营养化评价方法[J]. 皖西学院学报, 2010, 26(5): 98-101.
- [12] Carlson, R.E. (1977) A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, **22**, 361-369.
<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- [13] Likens, G.E. (1975) Primary Production of Inland Aquatic Ecosystems. *Ecological Studies*, **14**, 185-202.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-80913-2_9
- [14] 张思冲, 张雪萍, 廖永丰. 营养度指数法在寒地湖泊富营养化评价中的应用[J]. 安徽农业科学, 2003, 35(4): 416-419.
- [15] 李林衡, 郑飞, 何春花, 周国强, 刘文生, 王腾飞, 吴丹丹. 综合营养状态指数法评价鄞州区水库富营养化程度[J]. 中国给水排水, 2016, 32(13): 75-78.
- [16] 李干蓉, 张友, 方小宁, 龙松勇, 金宁通. 灰色聚类分析法在锦江河水质富营养化评价中的应用[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(6): 143-146.
- [17] 张煦, 熊晶, 程继雄, 姚志鹏, 陈亚男. 模糊数学在丹江口水库富营养化评价中的应用[J]. 中国环境监测, 2017, 33(3): 99-105.
- [18] 殷高方, 张玉钧, 胡丽, 于绍惠, 肖雪, 王欢博, 石朝毅, 段静波, 刘文清. BP神经网络水华预测模型的敏感性分析[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(12): 1288-1293.
- [19] 雒文生, 李怀恩. 水环境保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 139.