

韩雪梅,富国,刘庆庆,等.变权综合营养状态指数(TLI<sub>CW</sub>)评价方法及其在三峡库区支流龙河的应用[J].环境工程技术学报,2018,8(6):627-634.

HAN X M, FU G, LIU Q Q, et al. Changed weight trophic level index method and its application to Longhe tributary of the Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, 8(6): 627-634.

# 变权综合营养状态指数(TLI<sub>CW</sub>)评价方法及其在三峡库区支流龙河的应用

韩雪梅<sup>1</sup>,富国<sup>1</sup>,刘庆庆<sup>1</sup>,张深<sup>2</sup>,赵健<sup>1\*</sup>

1. 中国环境科学研究院,北京 100012

2. 煤炭科学技术研究院有限公司煤化工分院,北京 100013

**摘要** 针对加权平均综合营养状态指数(TLI(Σ))评价方法对叶绿素 a(Chla)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)5项评价指标取平均值导致评价结果存在偏差的问题,分析了不同评价指标在不同湖泊状况(氮限制、磷限制、氮磷协同效应)时表达营养水平的效力,提出了选择Chla、TP和TN作为评价指标,通过比较显势和潜势营养状态指数得到综合营养状态指数的变权综合营养状态指数(TLI<sub>CW</sub>)评价方法,并在三峡库区支流龙河库湾进行评价应用。结果表明,TLI<sub>CW</sub>方法(多湖响应关系)评价的多年平均营养状态为轻度富营养,TLI(Σ)方法为中营养,TLI<sub>CW</sub>评价结果更能突出富营养化状态风险特征;采用多湖响应关系确定的TLI<sub>CW</sub>评价结果较采用龙河响应关系确定的TLI<sub>CW</sub>高1个营养等级,且龙河响应关系确定的TP和TN营养物浓度临界阈值分别是多湖响应关系的2.75和3.00倍,说明多湖响应关系用于龙河富营养化评价存在明显的过保护问题。

**关键词** 富营养化;营养状态;潜势指标;显势指标;三峡库区

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2018)06-0627-08 doi:10.3969/j.issn.1674-991X.2018.06.083

## Changed weight trophic level index method and its application to Longhe tributary of the Three Gorges reservoir area

HAN Xuemei<sup>1</sup>, FU Guo<sup>1</sup>, LIU Qingqing<sup>1</sup>, ZHANG Shen<sup>2</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. Research Institute of Coal Chemistry, CCTEG Coal Research Institute, Beijing 100013, China

**Abstract** Aiming at the deviation problem existing in the evaluation method of weighted average comprehensive nutritional status index TLI(Σ), when making by averaging the values of five evaluation indexes, including Chla, TP, TN, SD and COD<sub>Mn</sub>. The expressing efficacy of nutrient levels of different evaluation indicators under different lake conditions (nitrogen limitation, phosphorus limitation, nitrogen-phosphorus synergistic effect) was analyzed. The three indicators of Chla, TP and TN were selected as evaluation indicators, and the changed weight trophic level index (TLI<sub>CW</sub>) evaluation method for comprehensive nutritional status index was obtained by comparing the apparent and potential nutritional status indexes. The method was applied in the Longhe River, a tributary of the Three Gorges Reservoir area. It showed that the TLI<sub>CW</sub> method with variable weights was more prominent in describing the characteristics of nutritional status than the TLI(Σ) method. It was in the status of light eutrophication evaluated by TLI<sub>CW</sub> method while in the status of mesotrophication by TLI(Σ) method. The TLI<sub>CW</sub> mean value determined by the multi-lake response relationship reveals that Longhe River was one trophic level higher than determined by the Longhe River response relationship. The eutrophication thresholds of the TP and TN

收稿日期:2018-07-21

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301003,2012ZX07506008)

作者简介:韩雪梅(1985—),女,工程师,硕士,主要从事流域水环境综合管理技术研究,hanxuemei7414@163.com

\* 责任作者:赵健(1979—),男,副研究员,博士,主要从事流域水环境综合管理技术研究,zhaojian@craes.org.cn

determined by the Longhe River response relationship was of 2.75 and 3.00 times respectively of multi-lake response relationship, indicating that there was a clear over-protection problem when the multi-lake response relationship was used in the eutrophication evaluation of Longhe River.

**Keywords** eutrophication; nutritional status; potential factors; apparent factors; Three Gorge reservoir area

富营养化是指在自然因素和人类活动的影响下, 水体逐渐由贫营养向富营养状态演变的现象。当前, 我国较多湖库水体的富营养化问题日趋严重, 对区域生态环境及水体安全构成严重威胁, 并制约着社会、经济的可持续发展。湖库水体富营养化的防治, 需在对水体营养状态指标监测的基础上, 进行水体营养状态的评价。因此湖库水体营养状态的准确评价, 将为其富营养化防治措施的科学性提供依据。

近 40 年来, 国内外学者在对湖库水体的富营养化机理、表现特征以及营养状态的主要控制因子等进行详细调查的基础上, 提出了多种水体富营养化的评价方法, 主要包括特征法<sup>[1]</sup>、入湖磷浓度-湖泊营养状态响应关系评价法 (Vollenwelder 模型法)<sup>[2-3]</sup>、营养状态指数法<sup>[4-12]</sup>、评分法<sup>[13-14]</sup>、主成分分析营养度评价法 (AHP-PCA)<sup>[6]</sup>、集对分析评价法<sup>[15-18]</sup>、模糊综合评价法<sup>[19-25]</sup>、层次分析评价法<sup>[26]</sup>、神经网络评价法<sup>[27]</sup> 以及上述某些方法相耦合的评价法<sup>[28]</sup> 等。目前在湖泊管理上, 主要采用数据获取和计算比较方便的加权平均综合营养状态指数 [TLI ( $\Sigma$ )]<sup>[29]</sup> 和等权平均的营养状态指数 (EI)<sup>[30]</sup>, 涉及的指标包括 Chla、TP、TN、SD 和 COD<sub>Mn</sub>。TLI( $\Sigma$ ) 方法以 Chla 为基准参数, 按照各参数与 Chla 的相关性程度对不同参数的营养状态指数进行适当加权, 用加权后的 TLI( $\Sigma$ ) 来判断湖泊所处的营养状态。由于氮、磷是藻类繁殖的营养物, Chla 是湖泊发生富营养化的直接指示指标, 采用相关综合加权, 会弱化 Chla 在湖泊营养状态评价中的效力。如对 TLI(Chla)、TLI(COD<sub>Mn</sub>) 和 TLI(SD) 3 项指标取平均值, 其值远低于 TLI(Chla), 造成对实际营养水平的低估。此外, TN 和 TP 2 项指标可反映污染源治理水平, 是水体 Chla 浓度升高的潜在来源, 但水体 Chla 浓度除与 TN 和 TP 浓度相关外, 还与气象、水文等自然背景条件密切相关, 即高浓度 TN 和 TP 并不一定导致高浓度 Chla。磷限制条件下, 若 TLI(TP) < TLI(Chla), TLI(Chla) 表达了该年实际的营养水平, 则 TLI(Chla) 作为显势指数可直接作为营养状态的评价结果, 用二者的平均值进行评价则低估了实际的营养水平; 若 TLI(TP) > TLI(Chla), TLI(TP) 表达了潜在的营养水平, 则

TLI(TP) 作为潜势指数可间接表达营养状态的评价结果, 若用二者平均值进行评价则低估了潜在的灾害风险。

由于我国湖泊类型众多, 湖泊之间差异较大, 许多湖泊缺乏长系列、完整的富营养化评价所需的水质指标数据, 为较准确地评价湖泊的富营养化状况, 笔者提出了变权综合营养状态指数 (TLI<sub>CW</sub>) 评价方法, 并以三峡库区支流龙河为例进行 TLI<sub>CW</sub> 方法的评价应用, 以期数据系列较长但又缺少某些监测指标数据的区域湖群的营养状态评价提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 变权综合营养状态指数评价方法构建

#### 1.1.1 评价指标的选择

针对 TLI( $\Sigma$ ) 和 EI 指数方法采用的 Chla、COD<sub>Mn</sub>、SD、TP 和 TN 5 项指标做出如下调整:

##### (1) 指标分类及取舍

将后果指标 (Chla、COD<sub>Mn</sub>、SD) 列为显势指标, 将原因指标 (TP、TN) 列为潜势指标。对于外源负荷影响大及营养盐累积率高的湖泊, 藻源 COD 贡献往往不足 10%, 用 COD<sub>Mn</sub> 作为富营养化指标会导致评价结果出现偏差, 故不再作为评价指标; 对某些湖泊, 由于非藻颗粒密度较高, SD 与 Chla 相关性不高, SD 用作营养水平评价不太适用, 应剔除。综上, TLI<sub>CW</sub> 方法剔除 SD 和 COD<sub>Mn</sub>, 只选用 Chla、TP 和 TN 3 项指标。

##### (2) 分类指标均衡及赋权

营养状态指数的实际指标要保持显势指标和潜势指标影响的均衡, 如 SD 数据受限剔除, 其权重归显势指标 (Chla), 如 TN 数据受限剔除, 其权重归潜势指标 (TP); 避免指标去除导致因果贡献的比例变化, 使显势指标的权重不应低于 50%。在 TN 与 TP 浓度年均值处于明显负相关时, 一般情况, Chla-TN 与 Chla-TP 总有处于非协调状态的时段: 如磷限制、氮处于非协调状态, 则 TN 指标应剔除; 如磷限制、氮处于协调状态, 则 TN 指标不一定剔除但可弱化其权重。

##### (3) 分类营养状态指数权重的变权设计

改变因果均衡的赋权方式,当显势指标营养状态指数高,所有权重赋予显势指标,强调实际灾害以及背景条件的不利;当潜势指标营养状态指数高,所有权重赋予潜势指标,强调成灾潜力。

1.1.2 TLI<sub>CW</sub>的计算

TLI<sub>CW</sub>是通过比较显势和潜势营养状态指数得到的综合营养状态指数,2个指标的权重为0~1可変配置,指数高者权重为1。TLI<sub>CW</sub>计算公式为:

$$TLI_{CW} = \max(TLI_{EX}, TLI_{IM}) \quad (1)$$

$$TLI_{EX} = TLI(Chla) \quad (2)$$

$$TLI_{IM} = \alpha TLI(TP) + \beta TLI(TN) \quad (3)$$

式中:TLI<sub>EX</sub>为显势营养状态指数,用Chla表达为TLI(Chla);TLI<sub>IM</sub>为潜势营养状态指数,用TP表达为TLI(TP),用TN表达为TLI(TN); $\alpha, \beta$ 为权重系数, $\alpha + \beta = 1$ 。当氮、磷不存在协同效应时:磷限制时,取 $\alpha = 1, \beta = 0$ (Chla-TN正相关性差);氮限制时,取 $\alpha = 0, \beta = 1$ (Chla-TP正相关性差)。即:  $TLI_{IM} = \min[TLI(TP), TLI(TN)]$

当磷、氮存在协同效应时(如同等磷条件下,氮增加、Chla增加),则:

$$\alpha = r_{TP}^2 / (r_{TP}^2 + r_{TN}^2) \quad (4)$$

$$\beta = r_{TN}^2 / (r_{TP}^2 + r_{TN}^2) \quad (5)$$

式中 $r_{TP}$ 和 $r_{TN}$ 分别为Chla与TP、TN的相关系数。

营养状态指数计算公式为:

$$TLI(Chla) = 50 + 25 \lg(Chla/10) \quad (6)$$

$$TLI(TP) = 50 + 25 \lg[f(TP)/10] \quad (7)$$

$$TLI(TN) = 50 + 25 \lg[f(TN)/10] \quad (8)$$

式中: $f(TP)$ 为湖泊水体Chla与TP响应回归关系; $f(TN)$ 为湖泊Chla与TN响应回归关系。

1.1.3 富营养化评价分级

采用0~100连续数值对湖泊营养状态进行分级<sup>[31]</sup>(表1)。在同一营养状态下,TLI<sub>CW</sub>越高,富营养化程度越重。

表1 TLI<sub>CW</sub>富营养化分级标准

Table 1 Change weight comprehensive nutritional status index (TLI<sub>CW</sub>) eutrophication grading standard

TLI <sub>CW</sub>	分级标准
<30	贫营养
30~50	中营养
50~60	轻度富营养
60~70	中度富营养
>70	重度富营养

1.2 TLI<sub>CW</sub>评价方法在三峡库区龙河库湾的应用

龙河为三峡水库入库的一级支流,由于离大坝较远,建库后支流滞留时间增加不多,建库对其富营养化敏感程度影响较小。2004—2009年龙河水质为GB 3838—2002《地表水环境质量标准》II~III类,2010年水质略有下降,2010—2016年为III类。根据龙河库湾2004—2016年丰都县金竹滩断面的水质监测数据(由重庆市环境监测站提供),对比分析TLI( $\Sigma$ )与TLI<sub>CW</sub>这2种评价方法由于评价指标数量和权重设计变化对其营养状态评价结果的影响。

2 结果

2.1 主要评价指标与Chla相关性

三峡水库建库后(2004—2016年)龙河支流库湾的TN、TP与Chla浓度的年均值相关性结果见图1。由图1可知,龙河支流库湾TN、TP与Chla的相关性较高,而COD<sub>Mn</sub>与Chla相关性较低,在龙河富营养化评价中采用COD<sub>Mn</sub>表达营养水平将低估实际的藻灾危害,因此COD<sub>Mn</sub>可以剔除。SD与Chla呈正相关(非协调状态),SD不能作为Chla的代理变量。分析其原因,可能是水库运行初期水位较低,含沙量偏高使SD较低;水库高水位运行后,含沙量偏低使SD较高,有利于藻类生长。SD上升与水位增加对沉水植物的影响及滞留时间延长的作用相互抵消,或由于库滨区岸陡沉水植物面积并未明显增加,导致SD与Chla呈不协调状态。因此,若严格按照TLI( $\Sigma$ )的5项指标进行计算,会使评价结果产生较大的偏差。

2.2 不同指标取舍时计算的TLI( $\Sigma$ )差异

金相灿等<sup>[32]</sup>根据全国26个湖泊的数据建立的TLI单项公式如下:

$$TLI(Chla) = 10[2.46 + 1.091 \ln(Chla)] \quad (9)$$

$$TLI(TN) = 10[5.453 + 1.694 \ln(TN)] \quad (10)$$

$$TLI(TP) = 10[9.436 + 1.624 \ln(TP)] \quad (11)$$

$$TLI(SD) = 10[5.118 - 1.94 \ln(SD)] \quad (12)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10[0.109 + 2.661 \ln(COD_{Mn})] \quad (13)$$

龙河监测数据显示,SD-Chla呈正相关非协调关系,COD<sub>Mn</sub>-Chla正相关性不显著。为对比不同指标对评价结果的影响,根据2004—2016年龙河库湾监测数据,分别采用2种方法计算TLI( $\Sigma$ ):1)根据式(9)~式(13)由5项指标计算TLI( $\Sigma$ )〔简称TLI( $\Sigma$ 5)〕;2)剔除SD、COD<sub>Mn</sub>指标,根据式(9)~式

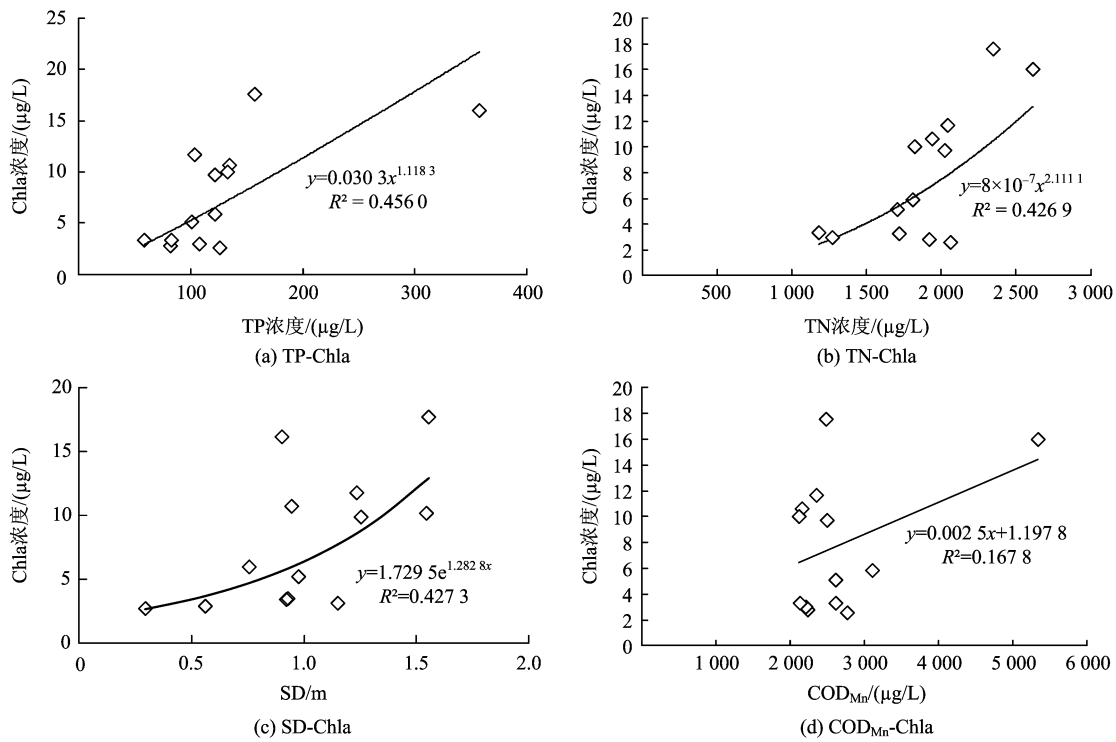


图 1 Chla 与 TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub>相关性

Fig. 1 Correlation between Chla and TP, TN, SD and COD<sub>Mn</sub>

(11)由 3 项指标计算 TLI(Σ)[简称 TLI(Σ3)]。计算结果见表 2。

表 2 TLI(Σ5)和 TLI(Σ3)计算结果

Table 2 TLI(Σ5) indicators and TLI(Σ3) indicators calculation results

年份	TLI(Σ5)		TLI(Σ3)	
	数值	分级	数值	分级
2004	51.6	轻度富营养	51.7	轻度富营养
2005	47.0	中营养	49.7	中营养
2006	44.2	中营养	49.4	中营养
2007	44.0	中营养	46.6	中营养
2008	50.7	轻度富营养	54.7	轻度富营养
2009	45.2	中营养	50.0	中营养
2010	60.0	轻度富营养	66.2	中度富营养
2011	47.8	中营养	52.9	轻度富营养
2012	50.4	轻度富营养	58.2	轻度富营养
2013	48.2	中营养	57.6	轻度富营养
2014	51.8	轻度富营养	62.2	中度富营养
2015	49.7	中营养	57.6	轻度富营养
2016	49.5	中营养	57.7	轻度富营养
均值	49.3	中营养	55.0	轻度富营养

由表 2 可知,TLI(Σ3)多年均值[55.0(轻度富

营养)]高于 TLI(Σ5)[49.3(中营养)]。可见,采用 TLI(Σ5)计算时低估了水体的营养水平,使营养级别降低了 1 个等级。

### 2.3 由多湖关系与龙河关系计算的 TLI<sub>CW</sub> 比较

由龙河库湾监测数据建模,可得到其综合营养状态指数单项公式:

$$TLI(Chla) = 50 + 25lg(Chla/10) \quad (14)$$

$$TLI(TP) = 50 + 27.957 5lg(TP/179) \quad (15)$$

$$TLI(TN) = 50 + 52.777 5lg(TN/2 296) \quad (16)$$

根据 2004—2016 年龙河库湾监测数据,用式(9)~式(11)计算得到多湖关系 TLI<sub>CW</sub>,即 M-TLI<sub>CW</sub>;用式(14)~式(16)计算得到龙河关系 TLI<sub>CW</sub>,即 L-TLI<sub>CW</sub>,结果见表 3。由表 3 可见,M-TLI<sub>CW</sub>比 L-TLI<sub>CW</sub>大。M-TLI<sub>CW</sub>计算结果为潜势指标主控,不符合实际背景条件波动变化导致潜势指标与显势指标交错主控大致均等的关系,因此 M-TLI<sub>CW</sub>用于龙河评价与实际情况不符,使评价结果过保护明显,需大幅度削减磷(TLI < 50 保证率仅 8%)。L-TLI<sub>CW</sub>计算结果为潜势指标主控及显势指标主控交替占优,较为合理,评价结果显示龙河“由中向富”的富营养化趋势较为明显,其减磷要求比 M-TLI<sub>CW</sub>计算结果低得多(TLI < 50 保证率 62%),更符合龙河的实际情况。2 种方法计算结果出现较大差异,可能是由于将多湖响应关系应用于具体湖泊时,出现系统误差造成的。

表3 变权综合营养状态指数 M-TLI<sub>CW</sub>与 L-TLI<sub>CW</sub>计算结果对比Table 3 Comparison of the results of variable weight comprehensive nutritional status index M-TLI<sub>CW</sub> and L-TLI<sub>CW</sub>

年份	多湖关系			龙河关系		
	M-TLI <sub>CW</sub>	分级	主控类型	L-TLI <sub>CW</sub>	分级	主控类型
2004	61	中度富营养	TP 潜势	46	中营养	TP 潜势
2005	54	轻度富营养	TP 潜势	41	中营养	TP 潜势
2006	58	轻度富营养	TP 潜势	37	中营养	Chla 显势
2007	48	中营养	TP 潜势	38	中营养	Chla 显势
2008	60	中度富营养	TP 潜势	45	中营养	TN 潜势
2009	54	轻度富营养	TP 潜势	41	中营养	TP 潜势
2010	71	重度富营养	TN 潜势	55	轻度富营养	Chla 显势
2011	57	轻度富营养	TP 潜势	43	中营养	TP 潜势
2012	62	中度富营养	TP 潜势	51	轻度富营养	Chla 显势
2013	62	中度富营养	TP 潜势	50	轻度富营养	Chla 显势
2014	64	中度富营养	TP 潜势	56	轻度富营养	Chla 显势
2015	60	中度富营养	TP 潜势	50	中营养	Chla 显势
2016	58	轻度富营养	TP 潜势	52	轻度富营养	Chla 显势
均值	59	轻度富营养		46	中营养	
显势比例/%			0			62
TLI < 50 保证率/%	8			62		

### 3 讨论

#### 3.1 评价指标数量对评价结果的影响

TLI( $\Sigma$ )方法采用 Chla、COD<sub>Mn</sub>、SD、TP 和 TN 5 项指标,对分项的营养指数进行平均(等权或加权)得到 TLI( $\Sigma$ ),用以唯一表达水体的营养状态。但当一些指标缺失或指标处在非协调状态而被剔除时,等权或加权平均会影响到权重的分布及结果合理性。如假设 Chla、SD、TP 和 TN 等权均为 25%,因果变量各占 50% 的权重,若 SD 数据不可用需剔除,再用等权分配则后果变量权重降至 33.3%,丧失了与采用 4 项指标评价湖泊营养状态的可比性。因此 TLI( $\Sigma$ 5)计算值普遍低于 TLI( $\Sigma$ 3),其表达的营养水平偏低。

在富营养化评价中,当分项指数相差过大,已失去代理变量作用时,或因背景条件趋势变化使其原有响应关系错位时,某些指标不再具有指示作用,应在评价指标中排除。但目前的 TLI( $\Sigma$ )方法没有明确的指标排除方式(最少可取 Chla 一项,则丧失了评估潜在风险的能力)。而 TLI<sub>CW</sub>方法剔除了 SD 和 COD<sub>Mn</sub>,减少了不确定性来源。TLI<sub>CW</sub>以 Chla 作为富营养化程度评价的显势指标,反映实际的浮游植物密度水平;以 TP、TN 作为潜势指标,反映可能出现

的浮游植物密度水平;而是否出现相应水平的浮游植物密度,取决于当时的气象、水文等背景条件。因此,TLI<sub>CW</sub>更符合评价富营养化灾害水平的要求,具有推广价值。

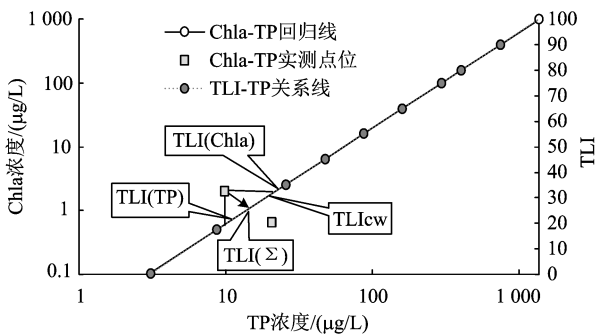
由表 2、表 3 可知,在对龙湖库湾多年平均营养状态进行评价时,采用 TLI<sub>CW</sub>方法(多湖响应关系)的评价结果(59,轻度富营养)高于 TLI( $\Sigma$ 5)(49.5,中营养),可见,TLI<sub>CW</sub>方法的评价结果较 TLI( $\Sigma$ )方法更能突出富营养化状态风险特征。

#### 3.2 指数权重变权设计对评价结果的影响

TLI( $\Sigma$ )方法中权重设计的不足表现在:1)低估实际风险。实测的 Chla 灾害性高值可反映真实的富营养化水平,但多指标平均可能低估实际的富营养化水平。2)忽视分项指标差异的指示意义,进而影响决策分析。3)指标之间干扰导致误判。TLI( $\Sigma$ )限制因子的倾向取决于代表性磷及氮限制湖泊的比例,容易产生对单一湖库富营养化状态的误判。如 TP 和 Chla 浓度很低的贫营养湖泊,由于 TN 浓度过高可能被评价为中营养或富营养;对氮限制湖泊则容易低估其富营养化程度。

TLI<sub>CW</sub>反映目前背景条件下营养物水平可以导致的浮游植物密度水平,从而与氮磷负荷的削减产生明确的关联。该评价取二者中最大值,相当于分

项 TLI 的权重系数不固定且仅有 0 和 1 两个取值,权重系数全部赋予大者。其含义为实测 Chla 浓度高于 Chla 与营养物回归线,取实测 Chla 浓度;实测 Chla 浓度低于 Chla 与营养物回归线,取回归线 Chla 浓度。这较 TLI( $\Sigma$ ) 接近回归线的方法保证率更高,采用 TLI( $\Sigma$ ) 的方法保证率约 50%,即约有 50% 的年份实际发生水平高于评价水平,而 TLI<sub>cw</sub> 的保证率大于 50%。TLI( $\Sigma$ ) 与 TLI<sub>cw</sub> 选点的位置示意图 2。由图 2 可知,TLI( $\Sigma$ ) 取各指标的中间值,TLI<sub>cw</sub> 取各指标的限制性指标中的最大值;综合评价多采用 0~1 的集中赋权方式,而尽量避免多指标分散导致的评价偏差。



注:实测点与关系线的水平交叉点指示为 TLI(Chla),垂直交叉指示为 TLI(TP)。

图 2 采用 2 个指标的 TLI( $\Sigma$ ) 与 TLI<sub>cw</sub> 选点示意

Fig. 2 Schematic diagram of TLI( $\Sigma$ ) and TLI<sub>cw</sub> selection using two indicators

### 3.3 多湖定标方法带来的不确定性

不同湖泊浮游植物群落对营养物的敏感性不同,因此将多湖数据定标方法确定的营养物浓度阈值用于某一个具体湖泊时,会产生一定的系统误差及准确度损失;多湖关系建模数据较多,在精度上有一定保证,因此,多湖定标影响营养物浓度阈值的精准度主要来源于湖间的异质性。龙河关系与多湖关系建模的营养物浓度临界阈值见表 4。

表 4 龙河关系与多湖关系建模的营养物浓度临界阈值对比

Table 4 Comparison table of eutrophication thresholds

in Longhe Reservoir Bay		
µg/L		
指标	单项营养物浓度临界阈值	
	龙河关系建模	多湖关系建模
Chla	10	10
TP	179	65
TN	2 296	765

由表 4 可见,龙河关系建模的 TP 浓度临界阈值、TN 浓度临界阈值是多湖关系建模的 2.75 和 3.00 倍。可见,在单湖历史数据较长的情况下,应尽量利用自身数据建模定标,而多湖定标也要尽量选择同区、同类、同期的湖泊群数据建模。

## 4 结论与展望

(1) TLI( $\Sigma$ ) 评价方法在我国富营养化评价和支撑湖库科学管理方面起到了积极作用,但该方法对 5 项评价指标取平均值、其建模数据源于 1988—1989 年全国 26 个湖泊数据,在 30 年后我国湖库背景条件发生变化的情况下,该方法对富营养化评价结果存在偏差。TLI<sub>cw</sub> 方法将富营养状态评价结果与湖泊治理需达到的目标相结合,从显势和潜势指标分别进行分析,剔除干扰评价指标,比较实际灾害水平与可能灾害潜能,计算得到综合营养状态指数,可较准确地对湖库富营养化状态作出评价,有效支撑湖库水质目标管理。

(2) 采用 TLI( $\Sigma$ )、TLI<sub>cw</sub> 方法分别对龙河库湾水体进行富营养化状态评价,结果表明,TLI<sub>cw</sub> 方法(多湖响应关系)评价的多年平均营养状态为轻度富营养,TLI( $\Sigma$ ) 方法为中营养,TLI<sub>cw</sub> 评价结果更能突出富营养化状态风险特征;采用多湖响应关系确定的 TLI<sub>cw</sub> 均值为 59(轻度富营养),较采用龙河响应关系确定 TLI<sub>cw</sub> 高 1 个营养等级,龙河响应关系确定的 TP 和 TN 的营养物浓度临界阈值是多湖响应关系的 2.75 和 3.00 倍,说明多湖响应关系用于龙河富营养化评价存在明显的过保护问题。

(3) TLI<sub>cw</sub> 方法可作为利用湖库年均值进行富营养化评价的通用方法,不建议应用于分月、分季的年内波动分析;其评价指标的浓度数据采用年均值或生长季节均值比较符合建模要求;作为单湖建模方法,适用于具有 10 年以上历史数据的湖泊富营养化评价。

## 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[J]. 环境污染与防治, 1990, 12(5): 2-7.  
SHU J H. Discussion on the evaluation method of eutrophication degree flakes in China [J]. Environmental Pollution Control, 1990, 12(5): 2-7.

[2] 吴德玲. 滇池化学需氧量及营养盐负荷量的预测[J]. 湖泊科学, 1993, 5(4): 358-366.  
WU D L. Prediction of chemical oxygen demand and nutrient loading in Dianchi Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1993, 5

- (4):358-366.
- [ 3 ] VOLLENWEIDER R A. Input output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology [ J ]. Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie, 1975, 37: 53-83.
- [ 4 ] CARLSON R E. A trophic state index for lakes [ J ]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2): 361-369.
- [ 5 ] AIZAKI M, OTSUKI A. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lake and its relationship to other parameters related to trophic state [ R ] // Research report from the National Institute for Environmental Studies. Tsukuba: National Institute for Environmental Studies, 1981: 13-31.
- [ 6 ] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化 [ M ]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [ 7 ] 李祚泳, 张辉军. 我国若干湖泊水库的营养状态指数 TSI<sub>c</sub> 及其与各类参数的关系 [ J ]. 环境科学学报, 1993, 13(4): 391-397.
- LI Z Y, ZHANG H J. Nutritional status index (TSI<sub>c</sub>) of several lakes and reservoirs in China and their relationship with various parameters [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1993, 13(4): 391-397.
- [ 8 ] 李祚泳, 邓新民, 赵晓宏, 等. 湖泊营养状态评价的普适指数公式及效果检验 [ J ]. 环境工程, 2002, 20(1): 70-72.
- LI Z Y, DENG X M, ZHAO X H, et al. Universal index formula and effect test for evaluation of lake nutrient status [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2002, 20(1): 70-72.
- [ 9 ] 陈旭华. 用尼梅洛 (Nemerow) 污染指数评价地表水营养状况的探讨 [ J ]. 安全与环境学报, 2003, 3(2): 24-26.
- CHEN X H. Discussion on the evaluation of surface water nutrition status by Nemerow pollution index [ J ]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(2): 24-26.
- [ 10 ] 张蕊, 高良敏, 席北斗, 等. 改进的 TLI 指数法及其在巢湖营养状态评价中的应用 [ J ]. 环境工程学报, 2013, 7(6): 2127-2133.
- ZHANG R, GAO L M, XI B D, et al. Improved TLI index method and its application in evaluation of nutritional status in Chaohu Lake [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(6): 2127-2133.
- [ 11 ] 李精精, 张玉珍. 综合营养状态指数法在东牙溪富营养化评价中的应用 [ J ]. 海峡科学, 2017(7): 3-5.
- LI J J, ZHANG Y Z. Application of comprehensive nutritional status index method in eutrophication evaluation of Dongyaxi [ J ]. Straits Science, 2017(7): 3-5.
- [ 12 ] 鲍广强, 尹亮, 余金龙, 等. 基于综合营养状态指数和 BP 神经网络的黑河富营养化评价 [ J ]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 264-269.
- BAO G Q, YIN L, YU J L, et al. Eutrophication evaluation of Heihe River based on comprehensive trophic state index method and BP neural network [ J ]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 264-269.
- [ 13 ] HOYER V, JONES J R. Factors affecting the relation between phosphorus and chlorophylla in Midwestern reservoirs [ J ]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 1983, 40(2): 192-199.
- [ 14 ] 邓大鹏, 刘刚, 李学德, 等. 湖泊富营养化综合评价的坡度加权评分法 [ J ]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1386-1392.
- DENG D P, LIU G, LI X D, et al. Slope weighted scoring method for comprehensive evaluation of lake eutrophication [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(8): 1386-1392.
- [ 15 ] 李凡修, 辛焰, 陈武. 集对分析用于湖泊富营养化评价研究 [ J ]. 重庆环境科学, 2000, 22(6): 10-11, 16.
- LI F X, XIN Y, CHEN W. Set pair analysis for lake eutrophication evaluation study [ J ]. Chongqing Environmental Science, 2000, 22(6): 10-11, 16.
- [ 16 ] 王栋, 朱元胜, 赵克勤. 基于集对分析和模糊集合论的水体富营养化评价模型的应用研究 [ J ]. 水文, 2004, 24(3): 9-13, 41.
- WANG D, ZHU Y S, ZHAO K Q. Application and research of water eutrophication evaluation model based on set pair analysis and fuzzy set theory [ J ]. Hydrology, 2004, 24(3): 9-13, 41.
- [ 17 ] 邹敏, 李祚泳, 刘智勇, 等. 一种改进的集对分析法在湖泊富营养化评价中的应用 [ J ]. 水资源保护, 2009, 25(2): 5-9.
- WU M, LI Z Y, LIU Z Y, et al. Application of an improved set pair analysis method in lake eutrophication evaluation [ J ]. Water Resources Protection, 2009, 25(2): 5-9.
- [ 18 ] 林同云. 熵权集对分析模型在湖泊富营养化评价中的应用研究 [ D ]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [ 19 ] YAGER R R. Fuzzy sets, probabilities and decision [ J ]. Journal of Cybernetics, 1980(10): 1-18.
- [ 20 ] 曹斌, 宋建社. 湖泊水质富营养化评价的模糊决策方法 [ J ]. 环境科学, 1991, 12(5): 88-91.
- CAO B, SONG J S. Fuzzy decision-making method for eutrophication assessment of lake water [ J ]. Environmental Science, 1991, 12(5): 88-91.
- [ 21 ] 胡著邦, 徐建民, 全为民. 模糊评价法在湖泊富营养化评价中的应用 [ J ]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 535-536, 539.
- HU Z B, XU J M, QUAN W M. Application of fuzzy evaluation method in evaluation of lake eutrophication [ J ]. Journal of Agro-Environment Science, 2002, 21(6): 535-536, 539.
- [ 22 ] 龚绍琦, 黄家柱. 基于 GIS 下的太湖水质富营养化模糊综合评价 [ J ]. 环境科学, 2005, 26(5): 34-37.
- GONG S Q, HUANG J Z. Fuzzy comprehensive evaluation of water eutrophication in Taihu Lake based on GIS [ J ]. Environmental Science, 2005, 26(5): 34-37.
- [ 23 ] 刘华祥, 李永华. 东湖富营养化的模糊评价研究 [ J ]. 水资源保护, 2006, 22(3): 28-29, 46.
- LIU H X, LI Y H. Fuzzy assessment of eutrophication in East Lake [ J ]. Water Resources Protection, 2006, 22(3): 28-29, 46.
- [ 24 ] 钟文武, 王文玉, 孙朕, 等. 模糊综合评价法在抚仙湖种质资源保护区水质评价中的应用 [ J ]. 水产科学, 2015, 34(3): 182-187.
- ZHONG W W, WANG W Y, SUN Y, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation of Fuxian Lake germplasm resources protection area [ J ]. Aquatic Science, 2015, 34(3): 182-187.

- [25] 闫滨,杨骁.基于模糊综合评价法的大伙房水库上游水质评价及预测[J].南水北调与水利科技,2015(2):284-288,381.  
YAN B, YANG X. Evaluation and prediction of water quality in the upper reaches of Dahuofang Reservoir based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015 (2): 284-288, 381.
- [26] CAI Q H, LIU J K, LORENZ K. A comprehensive model for assessing lake eutrophication [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(12): 1674-1678.
- [27] DEMIRDAG O, YURDUSEV M A, SOLMAZ B. Application of artificial neural networks to the estimation of water quality parameters of River Gediz [C]. Minnesota; Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management, 2000.
- [28] 武斌.基于模糊物元的湖泊水质评价模型研究[J].水利水电技术, 2007, 38(4): 12-15.  
WU B. Research on lake water quality evaluation model based on fuzzy matter element method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(4): 12-15.
- [29] 环境保护部.地表水环境质量评价办法(试行)[A/OL]. (2011-03-09) [2017-01-18]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201104/t20110401\\_208364.html](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201104/t20110401_208364.html).
- [30] 水利部水文局.地表水资源质量评价技术规程:SL 395—2007[S].北京:水利电力出版社,2007.
- [31] 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.  
WANG M C, LIU X Q, ZHANG J H. Eutrophication evaluation methods and grading standards for lakes [J]. Environmental Monitoring in China, 2002, 18(5): 47-49.
- [32] 金相灿,屠清瑛.中国湖泊环境(第一册)[M].北京:海洋出版社,1995. ◇

## 《环境工程技术学报》征稿启事

《环境工程技术学报》是中华人民共和国生态环境部主管、中国环境科学研究院主办,面向国内外公开发行的环境工程技术领域综合性科技期刊,中国科技核心期刊。

本刊的主要栏目有:水污染治理技术,大气污染治理技术,土壤污染治理技术,固体废物污染治理技术,生物、生态工程与恢复技术,基于循环经济的污染综合防治技术,辐射与振动污染防治技术,其他环境系统工程与管理技术(包括环境信息集成技术、监测与监控技术、区域环境整治及城市污染综合治理示范性工程技术等)方面的研究新成果论文、环境工程新技术推广应用案例;环保产业政策与管理,行业动态,热点论坛,研究简报,学术活动信息等。

为了将《环境工程技术学报》办成汇集环保工程技术创新、环保工程技术新成果及推广应用、环保产业政策、行业动态、专家言论于一体的我国环保工程技术领域的高端精品刊物,《环境工程技术学报》坚持全心全意依靠本学科专家办刊,聘请来自国内外著名研究机构 and 高等院校的知名专家学者组成编委会。在编委会的领导下,形成以编委、学科带头人和著名专家教授为核心的约稿、初筛选、评审、定稿、审读的“专家系统”及规范化的稿件深加工系统,形成高效规范化运作机制。

《环境工程技术学报》期待您的合作和关注,并与我们一起分享您在该领域的独到见解、研究成果和成功经验,促进该领域的学术交流和进步,共同努力将本刊办成能代表国内外一流学术水平的著名期刊。

欢迎使用本刊网站([www.hjgcjsxb.org.cn](http://www.hjgcjsxb.org.cn))的在线投稿系统投递您的文章。