

## 基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价\*

吴易雯<sup>1,4</sup>, 李莹杰<sup>1,3</sup>, 张列宇<sup>1\*\*</sup>, 过龙根<sup>2</sup>, 李 华<sup>2</sup>, 席北斗<sup>1</sup>, 王 雷<sup>1</sup>, 李曹乐<sup>1</sup>

(1: 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012)

(2: 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(3: 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

(4: 广东省浩蓝环保水污染治理院士工作站, 广州 510000)

**摘 要:** 运用湖泊营养状态指数判断湖泊的富营养化状态, 并根据湖泊的水质、沉积物和水生生物群落的现状和特点, 运用主观赋权法中的层次分析法和客观赋权法中的熵权法结合模糊综合评价法, 对长江中游地区江汉湖群 37 个湖泊的水生态系统进行健康状态评价。对湖泊富营养化的调查结果表明, 海口湖处于中营养状态, 18 个湖泊处于富营养化状态, 18 个湖泊处于超富营养化状态。湖泊生态系统健康评价的研究结果表明, 37 个湖泊中, 处于健康状况“优”的湖泊只有海口湖, 处于健康状况“良”的湖泊有 5 个, 分别为东西汉湖、花马湖、梁子湖、童家湖和涨渡湖, 其余 31 个湖泊均处于健康状况“差”的状态。经过与湖泊营养状态指数的对照, 本研究结果表明, 由主观赋权的专家评分的层次分析法结合模糊综合评价法对江汉湖群湖泊水生态健康状态的评价效果相比客观赋权的熵权模糊综合评价法更贴合实际。

**关键词:** 营养状态指数; 熵权法; 层次分析法; 模糊综合评价; 健康评价; 江汉湖群

## Assessment of lakes ecosystem health based on objective and subjective weighting combined with fuzzy comprehensive evaluation

WU Yiwen<sup>1,4</sup>, LI Yingjie<sup>1,3</sup>, ZHANG Lieyu<sup>1\*\*</sup>, GUO Longgen<sup>2</sup>, LI Hua<sup>2</sup>, XI Beidou<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup> & LI Caole<sup>1</sup>

(1: State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China)

(2: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(3: College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P.R.China)

(4: Cnhomeland Environmental Protection Water Pollution Governance Academician Workstation, Guangzhou 510000, P.R.China)

**Abstract:** This study investigated 37 lakes of the Jiangnan lake group in the middle reach of the Yangtze River. Trophic state index (TSI) was applied to define the trophic status of the lakes. According to water quality, sediment quality and aquatic biological communities, the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method combined with fuzzy comprehensive evaluation based on fuzzy mathematics methods were applied to evaluate the aquatic ecosystem health. The lakes trophic evaluation showed that Lake Haikou was in the mesotrophic status, 18 lakes were in eutrophic status, and 18 lakes were in hyper-eutrophic status. The assessment of lake ecosystem health turned out that only Lake Haikou was in the “high” health status. Five lakes were in “good” health status: Lakes Dongxicha, Huama, Liangzi, Tongjia and Zhangdu. The rest 31 lakes were all in “poor” health status. According to the TSI, for the ecosystem health assessment of the Jiangnan lake group, AHP combined with fuzzy comprehensive evaluation was proved to be a better method than the entropy weighting method.

**Keywords:** Trophic state index; entropy weight method; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; health assessment; Jiangnan lake group

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-002)资助。2016-03-30 收稿;2016-11-21 收修改稿。吴易雯(1985 ~), 女, 博士; E-mail: wu\_yiwen@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: zhanglieyu@163.com.

湖泊为人类提供水资源、生物资源和环境资源,在供给水源、调节径流、渔业生产等方面起着不可替代的作用,是人类生产生活的重要基础之一<sup>[1-2]</sup>. 我国长江中下游地区湖泊分布密集,其中面积大于 1 km<sup>2</sup> 的湖泊总面积占相同级别中国湖泊总面积的 24.2%<sup>[3]</sup>. 该地区社会经济的飞速发展以及人类活动导致湖泊水体富营养化的现象日益严重,湖泊水生态系统遭到破坏,这最终将反馈给人类并制约社会经济的可持续发展<sup>[4]</sup>. 因此,对湖泊进行水生态系统健康评价,将有助于我们掌握湖泊的生态系统结构和功能现状,为湖泊水体修复和保护以及湖泊生态安全管理提供理论依据和支持.

“生态系统健康”这个概念自 Schaeffer 等于 1988 年提出后,已经逐渐成为当前环境与生态系统管理研究的一个热点问题<sup>[5]</sup>. 目前关于生态系统健康的定义,广为接受的是 Costanza 等的理论,即如果一个生态系统是稳定和持续的,并且能够维持其组织结构,在一段时间后能够自动从胁迫状态恢复过来,那么这个生态系统就是健康的<sup>[6]</sup>. 在众多生态系统健康评价的方法中,多指标综合评价法能够通过各指标的权重确定多个指标的排序<sup>[7]</sup>,进而对事物有一个全面而客观的评价. 权重的计算方法主要包括主观赋权法和客观赋权法,其中主观赋权法有层次分析法、直接构权法和极值迭代法等;客观赋权法有熵权法、均方差法和极差法等<sup>[8]</sup>. 主观赋权法根据决策者的主观意向确定权重,受决策者的主观经验影响较大,因此主观性较强. 在构造判断矩阵时,标度值的确定易受评价者的经验等个人因素的影响<sup>[9]</sup>. 客观赋权法是根据实际数据经过数学理论和算法确定权重,不受决策者主观因素的影响<sup>[10]</sup>. 但是客观赋权法评价时没有考虑到评价指标间的差异性,与人们比较认可的评价结果常存在较大差异<sup>[11]</sup>. 为了观察主观赋权法和客观赋权法对于浅水湖泊生态系统健康评价过程中的适用性,本研究以长江中游地区江汉湖群为例,调查现阶段江汉湖群 37 个湖泊的水质及水生态现状,运用富营养化指数法(trophic state index, TSI)判断湖泊的富营养化状态,然后使用主观赋权法中的层次分析法和客观赋权法中改进的熵权法分别结合模糊综合评价法对湖泊水生态系统进行健康状态评价. 希望通过本研究和评价结果对主观赋权的层次分析赋权法和客观赋权的熵权法进行比较,得出适合富营养化浅水湖泊的水生态系统健康评价的方法,并为湖泊的生态系统健康管理和修复提供一定的理论依据.

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况和样点设置

所调查的湖泊主要位于长江中游地区的江汉平原(29°05′~33°20′N, 108°21′~116°07′E),年平均气温为 16~16.8℃. 汉江和长江在此地区交汇,调查的湖泊主要分布于两江沿岸处. 这些湖泊主要是受河流的冲击作用(如洪湖)和地壳运动(如梁子湖和斧头湖等)<sup>[12]</sup>影响而形成的. 棕红壤,黄棕壤和水稻土是该区域的主要土壤类型<sup>[13]</sup>. 本研究于 2014 年 8 月至 9 月初(夏末秋初)调查了 37 个面积大于 10 km<sup>2</sup> 的湖泊(图 1). 每个湖泊采集 3 个水样和 2 个沉积物样本,共采集到 111 个水样和 74 个沉积物样品.

### 1.2 样品采集及处理

采样位点使用 GPS 定位,用 1.0 L 的柱状采水器采集水体表面以下 0.5 m 处水样,用 1/16 m<sup>2</sup> 彼得森采泥器采集表层沉积物样品. 用于浮游植物鉴定的水样使用鲁哥试剂现场固定,用于浮游动物鉴定的水样使用甲醛固定,带回实验室静置于后续分析. 底栖动物的调查采用彼德森采泥器采样后,现场用 60 目钢筛淘洗泥样后挑出底栖动物,装入 100 ml 聚乙烯瓶,加入 8% 福尔马林液固定样品后带回实验室鉴定<sup>[15]</sup>. 水生植被覆盖度和生物量的调查采用目测法<sup>[16]</sup>. 用于水体化学指标检测的水样,现场添加浓硫酸并调整到 pH<2 后带回实验室分析. 用于理化分析的湖泊沉积物样品经过真空干燥机干燥后,储存在 4℃ 的冰箱内备用.

反映系统结构(如浮游植物、浮游动物和底栖动物生物量)指标的计数和鉴定方法参照文献[17-19],反映系统多样性的 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (1)$$

式中, $S$  为物种总数, $p_i$  为物种  $i$  的重要值.

反映水质状况的指标如酸碱度(pH 值)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、生化需氧量(BOD)、叶绿素 a(Chl.a)、透明度(SD)、总磷(TP)、可溶性正磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、总氮(TN)、铵

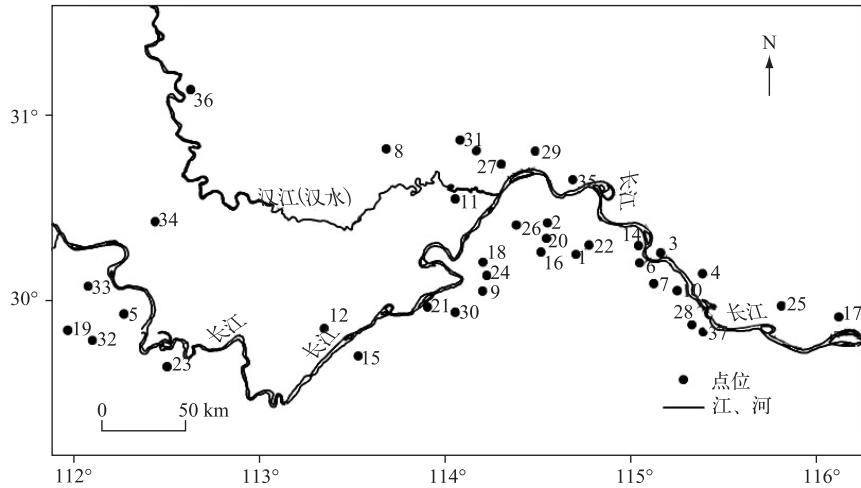


图1 本研究调查湖泊的分布

(1-保安湖,2-豹邂湖,3-策湖,4-赤东湖,5-崇湖,6-磁湖,7-大冶湖,8-东西汉湖,9-斧头湖,10-海口湖,11-汉阳东湖,12-洪湖,13-后湖,14-花马湖,15-黄盖湖,16-梁子湖,17-龙感湖,18-鲁湖,19-牛浪湖,20-牛山湖,21-三湖,22-三山湖,23-上津湖,24-上涉湖,25-太白湖,26-汤逊湖,27-童家湖,28-网湖,29-武湖,30-西凉湖,31-野潴湖,32-淤泥湖,33-玉湖,34-长湖,35-涨渡湖,36-钟祥南湖,37-朱婆湖;图中除6-磁湖、10-海口湖、15-黄盖湖、28-网湖、32-淤泥湖、33-玉湖、34-长湖和36-钟祥南湖外,其余湖泊位点与文献[14]相同)

Fig.1 Distribution of the investigated lakes

态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )浓度等量化指标参照《水和废水监测分析方法》(第四版)<sup>[21]</sup>进行测定.反映沉积物状况的指标pH值、电导率、TP、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等量化指标的测定参考文献[22].沉积物有机质(organic matter, OM)采用烧失量(loss on ignition, LOI)法表征<sup>[23]</sup>.沉积物磷的分级主要参考欧洲标准测试计划框架的SMT的分级方法<sup>[24]</sup>,可将沉积物P分为有机磷(organic phosphorus, OP)和无机磷(inorganic phosphorus, IP)两大类,其中IP包括氢氧化钠浸提态磷(NaOH-P)和盐酸浸提态磷(HCl-P).NaOH-P主要为生物可利用的磷酸铁盐和磷酸铝盐,HCl-P主要为生物不可利用的磷酸钙盐<sup>[25]</sup>.

### 1.3 评价方法

1.3.1 湖泊的富营养化状态评价 湖泊的富营养化状态评价,采用相崎守弘等的修正的营养状态指数( $TSI_M$ )法<sup>[26]</sup>.该方法采用指数0~100对湖泊的营养状态进行分级, $TSI(\Sigma) < 40$ 为贫营养, $40 \leq TSI(\Sigma) < 50$ 为中营养, $50 \leq TSI(\Sigma) < 70$ 为富营养, $TSI(\Sigma) \geq 70$ 为超富营养<sup>[27]</sup>.修正的营养状态指数( $TSI_M$ )法评价湖泊营养状态指数的计算公式为:

$$TSI_M(\text{Chl.a}) = 10(2.46 + \frac{\ln \text{Chl.a}}{\ln 2.5}) \quad (2)$$

$$TSI_M(\text{SD}) = 10(2.46 + \frac{3.69 - 1.52 \ln \text{SD}}{\ln 2.5}) \quad (3)$$

$$TSI_M(\text{TP}) = 10(2.46 + \frac{6.71 + 1.5 \ln \text{TP}}{\ln 2.5}) \quad (4)$$

$$TSI(\Sigma) = 0.54 TSI_M(\text{Chl.a}) + 0.297 TSI_M(\text{SD}) + 0.163 TSI_M(\text{TP}) \quad (5)$$

式中,Chl.a为水体叶绿素a浓度( $\mu\text{g/L}$ ),SD为湖泊水体透明度(m),TP为水体总磷浓度( $\text{mg/L}$ ).

#### 1.3.2 湖泊水生态系统健康状态评价

##### 1) 评价指标体系的建立

欧盟水框架指令(EU Water Framework Directive,简称WFD)<sup>[28]</sup>的水生态系统健康评价体系主要包括3

大类因素, 12 类质量要素和 23 项参数, 涵盖水生态系统中的生物因素、物理化学因素和水利形态因素. 该指标体系涵盖指标数量众多, 在湖泊调查过程中指标全部获取过程较为繁琐. 美国国家环境保护局 (U. S. Environmental Protection Agency, 简称 EPA) [29] 关于水生态的健康评价体系包括水质、生物学、栖息地和微生物 4 大类指标, 13 个详细指标. 该指标体系对水体的水文状况以及水力形态因素没有过多涉及, 但加入了微生物的生态毒理学指标. 本研究主要参照欧盟 WFD 和美国 EPA 水生态的健康评价指标体系, 结合江汉湖群浅水湖泊现状, 建立了一套水生态系统健康评价的候选指标体系 (表 1).

表 1 健康评价候选指标体系  
Tab.1 Candidate index system of health assessment

评价要素	指标类别	详细指标
生物指标	浮游植物	总生物量、密度、蓝藻比例、多样性指数、Chl.a
	大型水生植物	覆盖度、生物量
	浮游动物	总生物量、多样性指数
水质指标	水质常规指标	pH、ORP、DO、SD、TP、TN、COD <sub>Mn</sub> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N、PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P
沉积物指标	沉积物常规指标	电导率、pH、TN、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N、TP、NaOH-P、HCl-P、IP、OP、LOI

基于上述湖泊水生态系统评价的候选指标体系 (表 1), 将湖泊调查所得的各项指标值进行主成分分析. 在 31 个主成分中, 第 1、第 2 和第 3 主成分的方差贡献率分别为 29.289%、21.777% 和 13.126%, 前 8 个主成分的累积方差贡献率达到了 80.363%, 而其余 21 个主成分只有 19.637%. 然后利用方差最大正交旋转法对因子载荷矩阵进行旋转, 提取出 8 个主成分, 然后再将旋转后载荷值小于 0.6 的浮游植物密度、大型水生植物生物量、SD、ORP、COD<sub>Mn</sub>、水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度、沉积物 pH、沉积物 OP 含量 8 个指标去除, 剩余指标进行相关性分析. 将上述 23 个指标进行相关性分析, 结果表明, 水体 TP 浓度与水体 TN 浓度、水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度、水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度、水体 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度、沉积物 IP 含量、沉积物 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量、沉水植物覆盖度存在显著的相关性 ( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为 0.298、0.480、0.432、0.745、0.321、-0.362 和 -0.377. 水体 TN 浓度与水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度和浮游动物生物量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.558、0.456 和 0.433. 沉水植物覆盖度与水体 TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度和底栖动物多样性指数呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 -0.377、0.482 和 0.344. 浮游植物 Chl.a 浓度与水体 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度、轮虫生物量、轮虫多样性指数、浮游植物蓝藻比例呈显著相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为 -0.280、0.293、0.442 和 0.274.

根据相关性分析结果, 最终筛选出 9 个具有代表性的独立指标, 即水体 TN 浓度、水体 TP 浓度、浮游植物蓝藻比例、底栖动物多样性指数、桡足类平均生物量、水生植被覆盖度、沉积物 TN 含量、沉积物 NaOH-P/TP 百分比和 LOI 含量. 由于我国现阶段尚没有一个系统的湖泊健康评价指标体系的分型标准, 因此本研究的水质理化指标 TN、TP 浓度和生物生物学指标 Chl.a 浓度的指标分型采用欧盟水框架指令中对湖泊分型的结果. 沉积物的 3 个理化指标是根据调查长江中下游位于湖北、湖南、安徽、江西和江苏 5 个省份的 100 个面积大于 10 km<sup>2</sup> 湖泊后采用聚类分析后的结果, 计算其 95% 的置信区间来确定各健康状态分型的临界值. 水生生物指标中的桡足类浮游动物平均生物量、水生植物覆盖度、底栖动物多样性指数主要是调查了上述 100 个湖泊的现状后根据其生态学意义进行划分来确定各健康状态分型的临界值. 本研究将湖泊健康状况分为“优”、“良”、“中”和“差”4 级, 对应的评价标准分别为 I 类、II 类、III 类和 IV 类, 各分项指标如表 2 所示.

## 2) 指标权重的确定方法

A) 层次分析法: 层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种把复杂问题划分为相互联系的层次的分析法, 它可以降低很多因素的不确定程度, 使复杂问题条理化, 使决策者保持思维过程和决策过程原则的一致性 [30]. 基于湖泊水生态系统健康的评价要求, 本研究建立起一套关于水生态系统的各因子递进层次结构模型 (图 2), 由专家根据经验对每一层次上的因素进行逐对比较, 得到其关于上一层次因子重要性比较的标度.

表 2 湖泊生态系统的健康评价体系  
Tab.2 Index system of health assessment

指标类别	详细指标	等级			
		I 类	II 类	III 类	IV 类
水生生物	蓝藻比例/%	≤ 10	10~20	20~40	≥ 40
	桡足类平均生物量/(g/m <sup>2</sup> )	≥ 0.450	0.190~0.450	0.063~0.190	≤ 0.063
	水生植物覆盖度/%	≥ 70.00	27.78~70.00	5.74~27.78	≤ 5.74
	底栖动物多样性指数	≥ 1.36	0.99~1.36	0.45~0.99	≤ 0.45
水质理化指标	TP/(mg/L)	≤ 0.030	0.030~0.060	0.060~0.080	≥ 0.080
	TN/(mg/L)	≤ 0.50	0.50~0.70	0.70~1.00	≥ 1.00
沉积物理化指标	TN/(mg/kg)	≤ 725	725~2350	2350~3833	≥ 3833
	NaOH-P/TP/%	≤ 9.62	9.62~26.33	26.33~42.96	≥ 42.96
	有机质/%	≤ 4.8	4.8~6.5	6.5~11.4	≥ 11.4

根据指标优选的结果,按照 AHP 法的思想建立起一个 3 层次的湖泊水生态系统健康评价指标体系(图 2)。第 1 层是目标层,即湖泊生态系统健康程度;第 2 层是要素层,包括水环境质量、沉积物环境质量、水生生态系统结构与功能等;第 3 层是标准层,即每一个评价要素由哪些具体指标来表达。其中目标层由要素层和标准层共同决定。在 AHP 法的评估应用中,要素层是在目标与指标之间建立联系的中间层,主要用于将目标分解到指标并确定指标权重。根据层次模型(图 2),分别邀请中国科学院水生生物研究所和中国环境科学研究院浮游植物、浮游动物、底栖动物领域的专家对各要素层逐层逐项进行比较和评分。矩阵中各元素的重要性由相应的因素  $i$  和  $j$  进行比较来确定(即采用 1~9 分的重要性比较标度)。重要性比较标准根据专家意见评分确定。使用层次分析软件 Yaahp 6.0 确定权重,最后综合各专家针对各指标的权重值后,汇总计算出各个指标的平均权重。

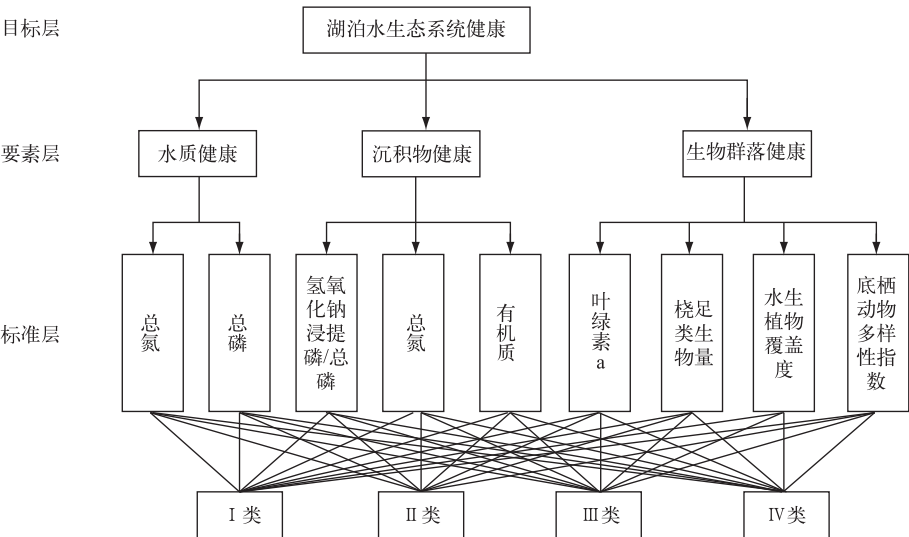


图 2 层次分析法模型

Fig.2 Analytic hierarchy process model

B)改进的熵权法:在信息论中,熵是系统无序程度的一种度量,系统的无序程度越小,其信息熵越大,信息的效用值越大<sup>[30]</sup>。熵权法即是一种客观的、利用信息熵法计算权重的方法,它能尽量消除各因素权重的主观性,使评价结果符合实际。运用改进的熵权法确定指标权重的主要步骤参见余波等<sup>[31]</sup>的方法。

3) 评价模型

模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation method)是模糊数学中最基本的数学方法之一,是以隶属度来描述模糊界限的.该方法最早是由我国学者汪培庄<sup>[32]</sup>提出的,其优点是:数学模型简单,容易掌握,对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好.湖泊生态系统健康是一个动态性的综合概念,采用模糊综合评价具有明显的优势.具体的评价程序参见潘峰等<sup>[30]</sup>的方法,其中隶属度用隶属函数 $f(x)$ 表示,且 $0 \leq f(x) \leq 1$ .根据各指标评价等级选取降半梯形分布法来计算隶属分布函数<sup>[33]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 江汉湖群富营养化状态评价

调查的 37 个湖泊的富营养化评价结果(表 3)表明,仅海口湖的  $TSI(\Sigma) < 50$ ,属于中营养状态湖泊.其余 36 个湖泊均为不同程度的富营养化状态湖泊,其中 18 个湖泊的  $TSI(\Sigma)$  在 50~70 范围之间,属于富营养状态湖泊,分别为豹澥湖、东西汉湖、梁子湖、三湖、童家湖、西凉湖、涨渡湖、保安湖、崇湖、大冶湖、斧头湖、花马湖、黄盖湖、龙感湖、鲁湖、牛山湖、三山湖和武湖.其余 18 个湖泊的  $TSI(\Sigma) \geq 70$ ,属于超富营养化湖泊,分别为赤东湖、玉湖、野漭湖、磁湖、策湖、太白湖、淤泥湖、上涉湖、牛浪湖、汤逊湖、洪湖、长湖、朱婆湖、网湖、上津湖、后湖、汉阳东湖和钟祥南湖.

表 3 湖泊营养状态评价  
Tab.3 Assessment of the lake trophic status

湖泊名称	SD/ m	Chl.a/ ( $\mu\text{g/L}$ )	TP/ ( $\text{mg/L}$ )	$TSI(\Sigma)$	湖泊名称	SD/ m	Chl.a/ ( $\mu\text{g/L}$ )	TP/ ( $\text{mg/L}$ )	$TSI(\Sigma)$
保安湖*	0.45	52.993	0.050	67.83	牛山湖*	0.84	31.112	0.089	63.18
豹澥湖*	0.46	4.480	0.035	52.28	三湖*	0.95	20.066	0.043	58.00
策湖*	0.38	112.122	0.065	73.78	三山湖*	0.72	24.226	0.047	60.75
赤东湖*	0.46	75.453	0.076	70.93	上津湖*	0.28	130.713	0.139	78.23
崇湖*	0.73	30.078	0.090	63.69	上涉湖*	0.42	99.214	0.157	74.93
磁湖	0.50	96.056	0.141	73.58	太白湖*	0.35	100.071	0.095	74.53
大冶湖*	0.50	35.207	0.069	65.76	汤逊湖*	0.47	153.654	0.093	75.54
东西汉湖*	1.27	8.518	0.066	52.71	童家湖*	1.22	18.467	0.035	55.76
斧头湖*	0.38	23.466	0.041	63.39	网湖	0.35	138.819	0.124	77.16
海口湖	0.78	4.574	0.036	49.81	武湖*	1.23	34.378	0.088	61.82
汉阳东湖*	0.31	228.644	0.254	82.63	西凉湖*	1.37	33.607	0.049	59.61
洪湖*	0.43	145.907	0.106	76.03	野漭湖*	0.30	68.065	0.114	73.49
后湖*	0.27	140.138	0.155	79.10	淤泥湖	0.32	96.974	0.099	74.91
花马湖*	0.70	29.190	0.053	62.30	玉湖	0.40	63.657	0.118	71.79
黄盖湖	0.67	59.432	0.059	67.03	长湖*	0.32	113.936	0.113	76.21
梁子湖*	0.51	12.610	0.042	58.28	涨渡湖*	0.62	9.170	0.065	56.63
龙感湖*	0.39	41.543	0.065	67.79	钟祥南湖	0.23	214.139	0.198	83.04
鲁湖*	0.60	47.564	0.069	66.67	朱婆湖*	0.30	107.829	0.129	76.55
牛浪湖*	0.32	99.223	0.113	75.38					

\* 表示 SD、Chl.a 浓度和 TP 浓度数据来源于文献[14].

2.2 基于熵权-模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康状态评价

信息熵确定权重的计算,参照文献[31],结合取得的 9 个评价指标的数据以及信息熵的计算模型,经过计算得到 NaOH-P/TP、沉积物 TN 含量、有机质含量、水体 TP 浓度、水体 TN 浓度、桡足类平均生物量、浮游植物 Chl.a 浓度、底栖动物多样性指数和沉水植物覆盖度 9 个指标的权重分别为 0.0906、0.0766、0.0729、0.1044、0.0484、0.1969、0.0999、0.0396 和 0.2706.

评价结果举例:保安湖的隶属函数计算结果  $B = [0.09467 \quad 0.45384 \quad 0.22650 \quad 0.22497]$ .



根据最大隶属度原则,保安湖在第Ⅱ类湖泊即健康状态为“良”的隶属度为 0.45384,在 4 个隶属度中最大,故保安湖的健康状况确定为“良”. 其余 36 个湖泊,均按照此方法计算和判断得到.

由改进的熵权法结合模糊综合评价法评价得到,37 个湖泊中,处于健康状况“优”的湖泊有 1 个,即太白湖. 处于健康状况“良”的湖泊有 7 个,分别为保安湖、花马湖、梁子湖、龙感湖、三山湖、武湖和野潯湖. 处于健康状况“中”的湖泊有 5 个,分别为东西汉湖、海口湖、黄盖湖、童家湖和玉湖. 其余 24 个湖泊均处于健康状况“差”的状态,分别为豹澥湖、策湖、赤东湖、崇湖、磁湖、大冶湖、斧头湖、汉阳东湖、洪湖、后湖、鲁湖、牛浪湖、牛山湖、三湖、上津湖、上涉湖、汤逊湖、网湖、西凉湖、淤泥湖、长湖、涨渡湖、钟祥南湖、朱婆湖(图 3).

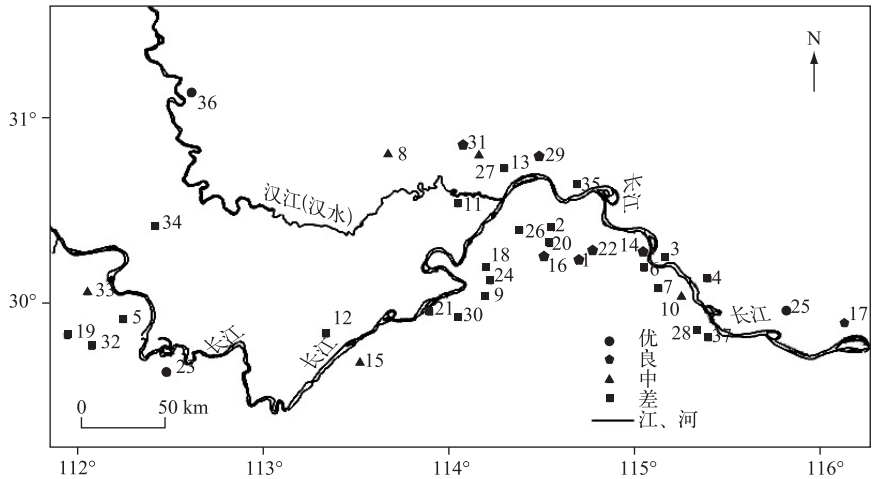


图 3 熵权模糊综合评价结果  
Fig.3 The results of entropy weight combined with fuzzy comprehensive evaluation

2.3 基于层次分析-模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康状态评价

根据各指标的重要性进行专家评分后,利用层次分析软件 Yaahp 6.0 来确定各项指标的权重. 计算结果如表 4 所示.

表 4 层次分析法确定的项指标权重  
Tab.4 The index weight determined by analytic hierarchy process method

准则层	水质 B1	水生生物 B2	沉积物 B3	各指标相对于湖泊健康评估总目标的权重
	0.4540	0.3206	0.2254	
水体 TN C1	0.5			0.2270
水体 TP C2	0.5			0.2270
蓝藻比例 C3		0.5134		0.1646
桡足类平均生物量 C4		0.1009		0.0323
底栖动物多样性指数 C5		0.1188		0.0381
水生植物覆盖度 C6		0.2670		0.0856
沉积物 TN C7			0.4905	0.1106
沉积物 NaOH-P/TP 百分比 C8			0.3119	0.0703
LOI C9			0.1976	0.0445

由层次分析法结合模糊综合评价法评价结果可知,处于健康状况“优”的湖泊仅 1 个,即海口湖. 处于健康状况“良”的湖泊有 5 个,分别为东西汉湖、花马湖、梁子湖、童家湖和涨渡湖. 没有处于健康状况“中”的湖泊. 其余 31 个湖泊均处于健康状况“差”的状态,分别为保安湖、豹澥湖、策湖、赤东湖、崇湖、磁湖、大冶湖、斧头湖、汉阳东湖、洪湖、后湖、黄盖湖、龙感湖、鲁湖、牛浪湖、牛山湖、三湖、三山湖、上津湖、上涉湖、太

白湖、汤逊湖、网湖、武湖、西凉湖、野猪湖、淤泥湖、玉湖、长湖、钟祥南湖、朱婆湖(图4)。

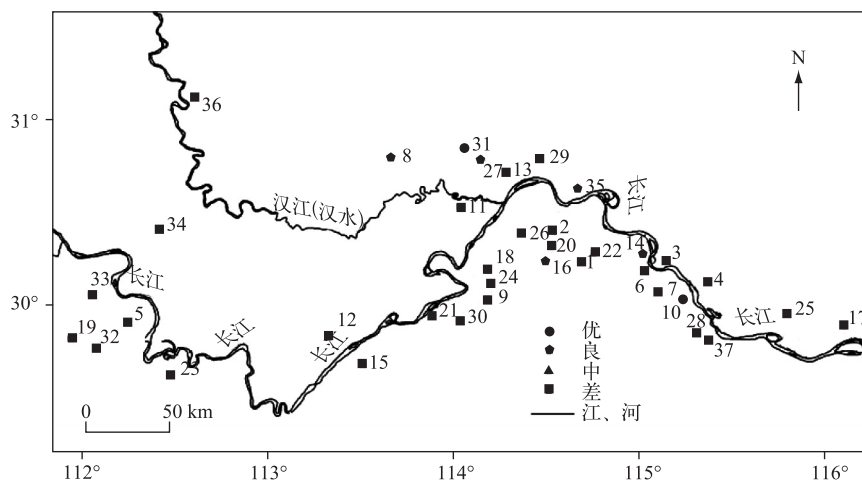


图4 层次分析模糊综合评价结果

Fig.4 The results of analytic hierarchy process with fuzzy comprehensive evaluation

## 2.4 两种赋权评价方法的比较

两种权重赋值法结合模糊综合评价法对湖泊健康程度的评价结果比较得知,在两种算法下,湖泊状况一致的湖泊共计25个。没有处于健康状况“优”和“中”的湖泊。处于健康状况“良”的湖泊有2个,分别为梁子湖和花马湖。处于健康状况“差”的湖泊有23个。

张红叶等对洱海流域湖泊生态系统健康评价的研究结果表明,在响应型生态系统中,生态系统健康指数  $EHI$  评价的结果与营养状态指数评价结果一致<sup>[34]</sup>。这也为本研究中以湖泊营养状态指数为参照提供了参考依据。以  $TSI(\Sigma)$  标准值分类,对评价结果不同的湖泊进行判断选择。调查的37个湖泊中,处于超富营养化状态的湖泊有18个。用对于层次分析模糊综合评价为“优”的海口湖来说,其综合营养指数为49.81,属于中营养化状态,水质指标较为良好,信息熵模糊综合评价中是状态“中”。对用改进的熵权模糊综合评价为“优”状态的湖泊,例如太白湖来说,其综合营养指数为74.53,属于超富营养化状态,水质指标较差,而层次分析模糊综合评价中是状态“差”。而对于层次分析模糊综合评价为“差”,而信息熵模糊综合评价中状态为“良”的湖泊,龙感湖、三山湖、武湖和野猪湖来说,其  $TSI(\Sigma)$  分别为67.79、60.75、61.82和73.49,由此可以看出,前3个湖泊处于富营养化中期阶段,野猪湖已经处于超富营养化阶段。显然,层次分析法确定指标权重更适合江汉湖群湖泊的健康评价。同时,针对层次分析模糊综合评价为“良”的湖泊,东西汉湖、花马湖、梁子湖、童家湖和涨渡湖来说,其  $TSI(\Sigma)$  分别为52.71、62.30、56.28、55.76和56.63,均在63以下。而信息熵模糊综合评价中状态为“良”的湖泊,保安湖、花马湖、梁子湖、龙感湖、三山湖、武湖和野猪湖,其  $TSI(\Sigma)$  分别为67.83、62.30、58.28、67.79、60.75、61.82和73.49,其  $TSI(\Sigma)$  的范围在58~74之间,相比层次分析法的范围要宽泛许多。通过比较,本研究结果表明对于江汉湖群来说,由专家评分的层次分析模糊综合评价法对于湖泊健康状态评价的效果好于客观赋权的熵权模糊综合评价法。

## 3 讨论

长江中下游地区分布着众多浅水湖泊,湖泊的富营养化问题是该区域湖泊水环境面临的主要问题。湖泊富营养化导致湖泊生态系统结构改变和功能退化,进而影响到人类的生产生活环境。因此,对该地区处于不同富营养化阶段湖泊的生态系统进行健康评价非常有必要。依照 Costanza 生态系统健康理论的6个方面,即自我平衡、没有疾病、多样性和复杂性、稳定性、活力和系统组成成分平衡<sup>[34]</sup>,本研究构建了包含表征湖泊水质、沉积物和生物群落的9个指标的健康评价指标体系。由于所调查的湖泊均为浅水湖泊,水深不超过6 m,且湖泊面积不大,渔业养殖在湖泊中较为普遍。作为湖泊水生态系统中重要的生物指标,鱼类种类及



其生物量受人为影响较大,因此本研究中未将该指标纳入指标体系内。鱼类作为淡水生态系统的重要组成部分,在河流健康评价中作为指示生物被应用得较多。但是在浅水湖泊中,渔业养殖作业,由于养殖网格导致的风浪阻滞使得污染物不易扩散和饵料不易投加,导致水质恶化,浮游动植物群落以及水生植被组成发生改变,进而影响到湖泊的经济价值。因此,在湖泊管理的过程中,可以在分析湖泊健康状态“中”和“差”成因的过程中,考虑将鱼类指标纳入管理范围内。

在多指标综合评价体系中,指标体系的筛选会根据评价对象和背景数据所指示的时空状态的不同而改变,指标权重的确定也对健康评价有重要的影响<sup>[2]</sup>。本研究使用了主观赋权法中的专家评分层次分析法和客观赋权法中的改进的熵权法确定权重,然后结合模糊综合评价法对富营养化湖泊进行健康评价。由于信息熵法确定权重是在客观条件下,由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重,它能尽量消除各因素赋权的主观性。对于某项指标,指标值间的差异越大,该指标信息熵就越小,被赋予的权重值就越高,表明该指标在综合评价中所起的作用越大<sup>[36]</sup>,如果差异为零,则该指标在综合评价中不起作用。在本研究中,由于水生植物覆盖度这个指标数值之间差异过大,使得该指标用熵权法计算所得的权重为 0.2706,在所有指标中权重最大,进而对湖泊的健康评价计算的结果影响也比较大。但是,此时的熵权并不表示该指标在生态系统中的实际重要性系数,而是各指标在竞争意义上的相对激烈程度<sup>[37]</sup>,显然与实际生态系统中水生植物对生态系统健康的影响作用不符。如太白湖和野湖的沉水植物覆盖度分别为 76.17% 和 72.1%,熵权法的评价结果分别为“优”和“良”,然而这两个湖泊的其他 8 个参评指标的数值均处于评价体系(表 2)的Ⅲ类和Ⅳ类。湖泊的营养状态指数也分别达到了 74.53 和 73.49,处于超富营养化状态。相比之下,专家评分的层次分析法确定的各个指标的权重结合了专家的深厚经验,虽然会带有个人主观性<sup>[38]</sup>,但是可以通过增加不同领域的专家的数量统计专家对生态系统的共同认知,进而使得指标之间的重要性更贴近于客观情况。本研究中,层次分析法目标层的 3 个要素和标准层次的 9 个指标的条理清晰,所得指标权重层层相扣。层次分析法结合模糊综合评价法对 37 个湖泊的评价结果表明,31 个健康状态为“差”的湖泊囊括了调查的所有处于超富营养化状态的湖泊,评价结果更贴近客观实际。而营养状态指数主要是基于水体 SD、Chl.a 浓度和 TP 浓度 3 个指标综合计算得出,主要反映湖泊水体的营养状态和生产力水平<sup>[26]</sup>。对于湖泊水生态系统来说,虽然水体的营养状态只表征了生态系统的一部分,但是水体营养盐的改变能够诱导引起一系列生态系统结构组成和功能变化。因此,本研究尝试通过湖泊营养状态指数的评价作为湖泊的水生态系统的健康状况评价的参照和初步判断。

从评价结果来看,所评价的 37 个湖泊中,84% 的湖泊生态系统健康状况都令人堪忧。分析其原因有三:一是生物群落构成的时间差异性。湖泊水生态系统的生物组分与非生物组分的组成和结构特征在不同时间尺度上具有较大差异。本研究采样时间为 2014 年夏末秋初,温度较高,湖泊初级生产力也较高,而水生植物也具有一定的生长周期,其分布和生物量还受水深、基质、水动力和水体透明度等多种自然因素的控制<sup>[39]</sup>,这些都影响着健康评价的结果。二是评价指标权重的影响。本研究的层次分析法评价指标体系中,水质的指标权重为 0.4540,在目标层的 3 个要素中所占权重最大。这其中,TN 和 TP 的权重均为 0.2270。由此可见,湖泊外源污染物的输入,包括渔业养殖<sup>[40]</sup>的饵料和营养盐的投放,通过影响湖泊水体 N 和 P 对湖泊生态系统健康的影响也是最为严重的。第三,从评价方法上来说,健康评价的指标体系主要是根据生态系统的活力、生产力、组织和恢复力 3 个方面建立的<sup>[6]</sup>,其中反映生态系统结构恢复力的生态学指标如种群恢复时间、抗干扰能力和生长范围等是较不容易获取的<sup>[41]</sup>,本研究也没有将其纳入考虑范围,从一定程度上来说评价还是受到了限制。在后续指标体系的建立过程中,还可以考虑加入反映生态系统健康的综合指标(如优势度和生物完整性指数)<sup>[34]</sup>,作为生态系统中生物群落健康状态的表征。同时,对于指标权重的确定,在后续研究过程中,可以考虑将主观的专家经验同客观的数学分析方法进一步结合,例如使用主观的层次分析法,将人类的思维加工整理融入其中,根据客观实际建立一个较为贴切的层次结构,然后将主观的专家评分法和客观的熵权法或主成分分析法等结合起来确定各个层次指标的权重。也可以考虑将主、客观方法确定的权重结合起来计算出一个组合权重<sup>[37]</sup>,以减少和克服两种权重各自的局限性。

致谢:本研究实验样品采集及处理得到了中国科学院水生生物研究所多位老师和同学以及中国科学院武汉植物园的常锋毅师兄的大力帮助,在此表示感谢。

#### 4 参考文献

- [1] Ma Keming, Kong Hongmei, Guan Wenbin *et al.* Ecosystem health assessment: methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(12): 2106-2116. [马克明, 孔红梅, 关文彬等. 生态系统健康评价: 方法与方向. 生态学报, 2001, **21**(12): 2106-2116.]
- [2] Li Bing, Yang Guishan, Wan Rongrong. Progress on evaluation methods of lake ecosystem health. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, **34**(6): 98-106. [李冰, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊生态系统健康评价方法研究进展. 水利水电科技进展, 2014, **34**(6): 98-106.]
- [3] Ma Ronghua, Yang Guishan, Duan Hongtao *et al.* China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, **41**(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(3): 394-401.]
- [4] Qin Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 193-202. DOI: 10.18307/2002.0301. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.]
- [5] Schaeffer DJ, Herricks EE, Kerster HW. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health. *Environmental Management*, 1988, **12**(4): 445-455.
- [6] Costanza R, Norton BG, Haskell BD eds. Ecosystem health: new goals for environmental management. Washington D. C.: Island Press, 1992: 239-256.
- [7] Rong YP, Zhao M, Zhu LL *et al.* The impact of grassland management practices on soil organic carbon: An analysis with three objective weighting methods. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 987-993. [戎郁萍, 赵敏, 朱玲玲等. 三种客观赋权法分析草地管理措施对土壤有机碳含量的影响. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 987-993.]
- [8] Zhang Yanju. The comparative research on system assessment method [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2005. [张彦举. 系统评价方法的比较研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.]
- [9] Wang Daoping, Wang Xu. Research on the green vendor selection index weight of iron & steel enterprises based on AHP and entropy method. *Soft Science*, 2010, **24**(8): 117-122. [王道平, 王煦. 基于 AHP/熵值法的钢铁企业绿色供应商选择指标权重研究. 软科学, 2010, **24**(8): 117-122.]
- [10] Shan Chengju, Dong Zengchuan, Fan Kongming *et al.* Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, (6): 622-628. [山成菊, 董增川, 樊孔明等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, (6): 622-628.]
- [11] Yu Liping, Pan Yuntao, Wu Yishan. Comparing objective weighting with subjective weighting in Sci-tech education in statute assessment. *Science Research Management*, 2009, **30**(4): 154-161. [俞立平, 潘云涛, 武夷山. 科技教育评价中主客观赋权方法比较研究. 科研管理, 2009, **30**(4): 154-161.]
- [12] Cai Shuming, Zhao Yan, Du Yun *et al.* The environmental evolution and future development trend of Jiangnan lakes groups in Holocene. *Journal of Wuhan University (Philos & Soc Sci Edi)*, 1998, **6**: 96-100. [蔡述明, 赵艳, 杜耘等. 全新世江汉湖群的环境演变与未来发展趋势. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 1998, **6**: 96-100.]
- [13] Wang Sumin, Dou Hongshen eds. Chinese lakes. Beijing: Science Press, 1988: 191-271. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1988: 191-271.]
- [14] Wu YW, Li YJ, Lü JJ *et al.* Influence of sediment DOM on environmental factors in shallow eutrophic lakes in the middle reaches of the Yangtze River in China. *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(4): 142.
- [15] Lan Cejie, Shen Yuan, Wang Beixin *et al.* Investigation of aquatic plants and benthic macroinvertebrates of lakes in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 888-893. DOI: 10.18307/2010.0611. [兰策介, 沈元, 王备新等. 蒙新高原湖泊高等水生植物和大型底栖无脊椎动物调查. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 888-893.]
- [16] Wei Hua, Cheng Shuiping, Chai Peihong *et al.* Investigation of aquatic macrophytes in Lake of Beihu Watershed of East Lake area in Wuhan, in the autumn of 2009. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 401-408. DOI: 10.18307/2011.0313. [魏华, 成水平, 柴培宏等. 2009 年秋季武汉大东湖北湖水系水生植物调查. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 401-408.]
- [17] Hu Hongjun, Wei Yinxin eds. The fresh water algae of China—Systematics, taxonomy and ecology. Beijing: Science Press, 2005. [胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2005.]

- [18] Wu Li, Feng Weisong, Zhang Tanglin *et al.* The annual fluctuation of zooplankton community and its relation with environmental factors in Lake Xiliang, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 619-625. DOI: 10.18307/2011.0419. [吴利, 冯伟松, 张堂林等. 湖北省西凉湖浮游动物群落周年动态变化及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 619-625.]
- [19] Cai Yongjiu, Jiang Jiahu, Zhang Lu *et al.* Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(16): 4985-4999. [蔡永久, 姜加虎, 张路等. 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素. 生态学报, 2013, **33**(16): 4985-4999.]
- [20] Zhou Junpu, Zheng Xiaoxian. Study on species composition and species diversity of *Castanopsis* secondary forest in Jiangle forest farm. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, **34**(10): 70-75. [周君璞, 郑小贤. 将乐林场栲类次生林物种组成与多样性研究. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(10): 70-75.]
- [21] "Water and wastewater monitoring and analysis method" editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater; fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [22] Bao Shidan ed. Soil agro-chemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [23] Łukawska-Matuszewska K, Kielczewska J, Bolałek J. Factors controlling spatial distributions and relationships of carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur in sediments of the stratified and eutrophic Gulf of Gdansk. *Continental Shelf Research*, 2014, **85**: 168-180.
- [24] Ruban V, Lopez-Sanchez JF, Pardo P *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent work. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**: 224-228.
- [25] Xu Chunxue, Yuan Jian, Wang Yaping *et al.* Speciation and release mechanism of phosphorus in sediment and analysis method for sequential extraction. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, **30**(6): 785-794. [许春雪, 袁建, 王亚平等. 沉积物中磷的赋存形态及磷形态顺序提取分析方法. 岩矿测试, 2011, **30**(6): 785-794.]
- [26] Wang Mingui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui *et al.* Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉等. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [27] Kratzar CR, Brezonik PL. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin*, 1981, **17**(4): 713-715.
- [28] Directives 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the field of Water Policy, OJL 327, 22. 12. 2000.
- [29] <https://www.epa.gov/aboutepa/about-national-exposure-research-laboratory-nerl>.
- [30] Pan Feng, Fu Qiang, Liang Chuan. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP in quality evaluation of water environment. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 2003, **28**(8): 22-24. [潘峰, 付强, 梁川. 基于层次分析法的模糊综合评价在水环境质量评价中的应用. 东北水利水电, 2003, **28**(8): 22-24.]
- [31] Yu Bo, Huang Chengmin, Chen Lin *et al.* Fuzzy synthetic assessment on ecosystem health of Chaohu Lake water based on entropy weight. *Sichuan Environment*, 2010, **29**(6): 85-91. [余波, 黄成敏, 陈林等. 基于熵权的巢湖水生态健康模糊综合评价. 四川环境, 2010, **29**(6): 85-91.]
- [32] Wang Peizhuang. Abstract about fuzzy mathematics ( I ). *Mathematics in Practice and Theory*, 1980, **2**: 45-59. [汪培庄. 模糊数学简介( I ). 数学的实践与认识, 1980, **2**: 45-59.]
- [33] Chi Yuan, Li Shengfeng. Analysis on the quality of urban lake water environment based on the improved fuzzy comprehensive evaluation method—a case of Xuanwu Lake in Nanjing. *Journal of Huazhong Normal University: Nat. Sci*, 2013, **47**(1): 124-128. [池源, 李升峰. 基于改良模糊综合评价法的城市湖泊水环境质量分析——以南京玄武湖为例. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2013, **47**(1): 124-128.]
- [34] Zhang Hongye, Cai Qinghua, Tang Tao *et al.* Comprehensive assessment and comparison of lakes' ecosystem health in Erhai watershed. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 715-720. [张红叶, 蔡庆华, 唐涛等. 洱海流域湖泊生态系统健康综合评价与比较. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 715-720.]

- [35] Costanza R, Mageau M. What is a healthy ecosystem? *Aquatic Ecology*, 1999, **33**(1): 105-115.
- [36] Zhao Deyong, Song Hui. A method of ameliorative multi-objective synthetic evaluation based on entropy weight and its application. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2001, **13**(3): 47-51. [赵德勇, 宋辉. 基于熵权的改进型多指标综合评估方法及应用. 军械工程学院学报, 2001, **13**(3): 47-51.]
- [37] Xue Liming, Gong Shuang, Cui Chaoqun *et al.* Sustainable power comprehensive evaluation of human mineral resources combining subjective weight with objective weight. *China Mining Magazine*, 2015, **24**(9): 44-49. [薛黎明, 龚爽, 崔超群等. 主客观权重相结合的湖南省矿产资源可持续力综合评价. 中国矿业, 2015, **24**(9): 44-49.]
- [38] Tian Yilin, Yang Qing. Urban disaster response capacity evaluation index system model design based on AHP-DELPHI method. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2008, **32**(1): 168-171. [田依林, 杨青. 基于 AHP-DELPHI 法的城市灾害应急能力评价指标体系模型设计. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, **32**(1): 168-171.]
- [39] Huang Qi, Gao Junfeng, Zhang Yanhui *et al.* Aquatic ecological integrity assessment of four large lakes in the middle-to-lower reaches of the Yangtze River, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 118-126. DOI: 10.5846/stxb201410101992. [黄琪, 高俊峰, 张艳会等. 长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价. 生态学报, 2016, **36**(1): 118-126.]
- [40] Zhang Tanglin, Li Zhongjie, Guo Qingsong. Investigations on fish and fishery of four lakes along the middle and lower basins of the Changjiang River. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(2): 167-177. [张堂林, 李钟杰, 郭青松. 长江中下游四个湖泊鱼类与渔业研究. 水生生物学报, 2008, **32**(2): 167-177.]
- [41] Sun Yan, Zhou Yangming, Zhang Qiuwen *et al.* Ecosystem health: Theory, concept and assessment methods. *Advances in Earth Science*, 2011, **26**(8): 887-896. [孙燕, 周杨明, 张秋文等. 生态系统健康: 理论/概念与评价方法. 地球科学进展, 2011, **26**(8): 887-896.]