

湖泊生态系统健康评价综述

李传庆*, 范廷玉, 路啊康, 潘进宏, 陈迎香, 朱厚红

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2021年12月6日; 录用日期: 2022年1月12日; 发布日期: 2022年1月19日

摘要

当今世界的主要国际问题之一是水, 湖泊是地球上不可或缺的生态系统之一, 其健康程度牵动着各国学者们的思绪, 学者们为了修复因为人类活动而逐渐退化的湖泊生态系统, 对湖泊生态系统进行健康评价, 希望可以科学地找到湖泊结构功能退化的原因, 找到加快恢复湖泊水生态系统的方法。起初, 指标体系法和指示物种法被广泛运用于湖泊水生态系统, 随后, 一些学者根据自己的研究并结合数学模型提出了新方法。一般来说, 评价过程中采集的样品都只是当时的状态, 难以反映水生态环境一段时间的持续变化, 而且, 水生态的系统又极易受到扰动, 一旦系统受到扰动而出错, 其修复时间周期相当长, 有的破坏甚至导致无法恢复如初, 故亟需一种技术可以不断反映水生生态系统健康状况。文章在前人研究成果的基础上进行综述, 并提出了未来的发展前景。

关键词

湖泊生态系统, 水生态系统健康评价, 评价方法, 综述

The Review of Health Assessment of Lake Aquatic Ecosystem

Chuanqing Li*, Tingyu Fan, Akang Lu, Jinhong Pan, Yingxiang Chen, Houhong Zhu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Dec. 6th, 2021; accepted: Jan. 12th, 2022; published: Jan. 19th, 2022

Abstract

One of the major international problems in today's world is water. Lakes are one of the indispensable ecosystems on the earth. Their health affects the thoughts of scholars all over the world. In order to repair the lake ecosystem gradually degraded due to human activities, scholars conduct

*第一作者。

health evaluation on the lake ecosystem, hoping to scientifically find the reasons for the degradation of lake structure and function and find ways to accelerate the restoration of lake water ecosystem. At first, index system method and indicator species method were widely used in lake water ecosystem. Then, some scholars put forward new methods according to their own research and mathematical models. Generally speaking, the samples collected in the evaluation process are only the current state, which is difficult to reflect the continuous change of the water ecological environment for a period of time. Moreover, the water ecological system is very vulnerable to disturbance. Once the system is disturbed and makes mistakes, the repair time cycle is quite long, and some damage even leads to failure to recover. Therefore, there is an urgent need for a technology to continuously reflect the health status of aquatic ecosystem. This paper summarizes the previous research results, and puts forward the future development prospects.

Keywords

Lake Ecosystem, Water Ecosystem Health Assessment, Evaluation Method, Review

Copyright © 2022 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. 引言

水，是生命的最初，也是生命的最后，是人类社会的发展基石，也是人类社会的发展阶梯。近年来，工农业生产生活活动的需要，已经对有限的水资源产生了巨大冲击。在现代地质学中，湖泊指的是由陆地表面的洼地中形成的，这些洼地的水域面积大，反转速度慢。湖泊除了调节河川水量，还在电源、交通运输、污染净化场所等功能方面也发挥着重要作用，是人类生产生活的重要基础，也是社会持续发展的基本保障[1]。但如今人类不合理地开发利用水资源，致使包括湖泊生态系统在内的水环境系统在结构和功能上发生了重大变化[2]。湖泊环境严重恶化，出现了富营养化、有机污染、湖面萎缩、水面锐减、沼泽化等环境问题。

伴随着经济社会的飞速发展，人们对生态保护认知的加深，生态系统健康的重视度也得到了提高。但是，水生生态系统很容易破坏，保护的时候却显得力不从心，其修复是一个长期动态的过程，学者们倾其一生致力于找到合适的修复方法，水生态环境系统健康评价除了需要对水域的水质进行监测外，还通过水生生物的生理和行为反应来反映[3]，目前很多方法都是基于水质指标的综合评价，但是这些方法都有一个通病，就是选取的指标一般只能反映了研究期间的实时情况，评价的结果也不能完全反映水生态环境一段时间的具体状况。因此，研究找到一种可以实时反映水生态环境健康状况和恢复效果的理论、技术和方法成为水生态环境健康评价的研究热点。

2. 湖泊生态系统健康的概念及研究进展

生态系统因为涉及学科广[4]，很难给出一个完整的定义，在不同的时期，学者们综合了自己的研究对生态系统的概念提出了不同的定义。

18世纪80年代，苏格兰生态学家 James Hutton 系统阐述了“自然健康”的概念[5]。1988年，Schaeffer 等国外有关专家引入了生态系统健康“无病”的概念[6]。1989年，Rapport 教授深化了生态系统健康的含义，并认为它有能力维持自身组织结构稳定，可以自发的从压力中恢复出来[7]，后来，Rapport 加入了人的因素，认为在有自调节的能力的同时，人类的合理需求也要得到满足[8]。

目前, Costanza 的观点得到了学术界的认可[9], 他提出了稳定、无病、多样、可恢复性、有生命力和组成要素平衡也是生态系统健康的表现。后来, 肖风劲等人从生态、经济和人类健康三个方面提出了自己的观点, 认为应该增加不对邻近系统造成扰动、具有风险和可行性、系统内生物健康等多个方面的内容[10]。

湖泊生态系统是水生群落与水环境交互作用形成的动态平衡系统。湖泊生态系统研究是生态系统研究的重要分支, 随着看待事物的范围不同, 人们对湖泊生态系统的认识分为狭义认识和广义认识。狭义的湖泊生态系统健康关注的是湖泊本身和湖泊组织结构的完整性, 关注的是在受到人类或自然的干扰后, 其信息传递、物质循环和能量流动都能保持原状, 生态系统充满活力、多样性和复杂性[11]; 广义的湖泊生态系统在考虑湖泊本身的同时, 加入了人为因素, 包括湖泊对人类健康的服务功能和促进社会经济发展的功能, 是集环境科学、地球科学、经济学和社会科学于一体的综合性交叉学科[12]。

3. 湖泊生态系统健康评价方法

正处于发展阶段的湖泊生态系统健康评价, 虽然没能找到一套能得到学者们公认的方法和指标体系, 但常用的研究方法主要分两大类评价方法: 指示物种法和指标体系法。在生态系统健康评价中经常采用具体模型的方法则包括综合指标法和模糊综合评价法 2 类[13]。此外, 随着生态系统健康评价的进一步深入, 当前在宏观生态系统综合评价中应用较多的人工神经网络、物元分析等评价方法也必将被引入, 上述方法各有优缺点和适应范围, 在分析生态系统健康问题时宜根据实际情况确定采用何种方法。

3.1. 指示物种法

由于生态系统存在很大的复杂性, 学者们化繁为简, 选择一些有代表性的指示物种来监测生态系统的健康状况。指示物种法选取的指示种包括关键种、特有种、濒危种、长寿种、环境敏感种等, 湖泊生态系统中选取的指示物种有浮游生物、底栖无脊椎动物和营养级鱼类, 对各指示物种详细度量因子进行分析(表 1)。根据指示种的生物量、生产力、结构指标、功能指标以及某些生态生理特征来反应物种健康状况, 进一步表征生态系统的健康程度, 包括单物种指示物种法和多物种指示物种法[14]。

Table 1. Indicator species of lake ecosystem

表 1. 湖泊生态系统的指示物种

指示物种	度量因子
浮游生物	水表层的小生物群落(包括病毒、自养浮游生物), 纤毛原生生物, 微生物环等。
底栖无脊椎动物	底栖群落的结构和动态, 了解有机污染程度方法、多样性指标、生物指标, 确定一系列环境状态的参照群落, 生态系统健康的功能测定, 长期的毒理和胁迫效应。
营养顶级的鱼类	对化学污染比其它物种更加敏感, 综合反映了其它生物的变化, 更简便的方法是跟踪鱼类种群对环境退化的响应, 重要指标包括: 平均年龄、产卵能力和条件因素。如, 银大马哈鱼可以只是北美大湖区的生态系统健康; 采用鲑鱼为指示种来监测湖泊贫营养化。
生物的综合运用	亚细胞、细胞、生物个体、种群、群落和生态系统的相关信息, 生物个体对化学污染的初级和初级响应进行测定。底泥毒性化学分析、组织化学分析、病理分析和群落结构的综合研究。

1) 单物种指示物种法

单物种生态系统健康评价是指选择单一指示物种的评价方法, 该单一指示物种指对特定生态系统最敏感的物种, 一般可以在生态系统的环境因素发生微变时, 显著变化自身的生态特征, 该物种的数量等

还可以定性反映生态系统的受压程度。此方法在生态系统较简单的湖泊，例如在人工养殖湖的生态评价中可以简单快速的做出较为准确的评价。

2) 多物种指示物种法

多物种生态系统健康评价是指在研究的生态系统中选择多种指示物种的方法。其中，这些物种都具有不同的生态系统结构和功能，可以表示不同结构和功能的健康状况。此方法综合了多种指示物种反映系统的健康状况，在不同研究中已形成了对应的标准。例如，纽约市环境保护局采用的 EPT 指数评价标准，选取了 100 种昆虫作为指示物种，在经过专家经验和实际调查得出，能发现 10 种及以上昆虫的水体一般是无污染的水体，能发现 6~10 种指示昆虫的水体是轻度污染，2~5 种指示昆虫的是中度污染，对于只能发现 0~1 种指示昆虫的水体污染很严重[15]。又如，戴纪翠[16]等在对生态系统健康评价方法进行的研究分析后，认为底栖动物在生态系统健康评价中也能扮演很好的角色。因为需要评价的湖泊生态系统较复杂，而该方法选择了多种指示物种并有一定的标准，进而该方法已经成为目前比较常用的评价方法。

虽然指示物种法已是生态系统健康评价的基本方法，但是指标的选择标准由于学者们各自研究重点的不同而不尽相同，指标一旦选择不当，就会导致监测的参数出错，评价结果也很难服众。明确各种方法的优缺点，以及之间的联系可以使我们在做选择的时候有更好的参考依据。指示物种法在选择指示物种时，还应根据不同的关系选择不同规模、不同组织层次的种群；要想全面反映湖泊生态系统的健康状况，只考虑湖泊理化生性质是不够的，还要考虑到社会经济和人类健康参数。总的来说，指示物种法只适合一个粗略的评价湖泊生态系统[14] [17]，表达能力有限，不能全面反映生态系统的健康情况。可见，严谨全面、综合考虑选取指标才能让评价结果更加科学。

3.2. 指标体系法

由于利用物种指示法评价水生生态系统健康状况时，存在一定的局限性，因此，亟需找到一个可以从生态学角度反映具有累积性和内部联动效应的环境压力的较好的指标体系方法。指标体系法评价生态系统健康首先要建立生态系统健康评价的指标体系，选用能够表征生态系统主要特征的指标然后对这些特征进行归类区分，分析各个特征对生态系统健康的意义再对这些特征因子进行度量，确定每个特征因子在生态系统健康中的权重系数，即每类特征因子在生态系统健康中的影响程度大小最后确立生态系统健康评价的综合指数而进行评价。指标体系法相对于物种指示法而言，综合了生态系统的多项指标，可以反映生态系统受到胁迫后的生态系统变化过程，测度生态系统结构、功能、生态服务等方面的变化。重点反映外界胁迫与生态系统内部变化间的对应关系，同时也可以反映生态系统的承载力和恢复力。但生态系统在发展的不同阶段具有不同的特征，监测的指标也相应有所不同，并且评价过程中还涉及到评价尺度和生态系统的进化进程等，使一致性指标体系难以确定。

以下几种是受到国内外学者的欢迎并广泛使用的关于生态系统健康评价的指标体系方法。

3.2.1. 综合健康指数

综合健康指数是刘永等人在前贤的研究基础上[18] [19]提出的，在滇池生态系统健康评价中得到了很好的实践[20]。其公式为：

$$I_{CH} = \sum_{i=1}^n I_i \cdot W_i \quad (1)$$

式中， I_i 表示第 i 种指标的归一化值， $0 \leq I_i \leq 1$ ； W_i 为指标 i 的权重值，通过专家打分和层次分析法得到。

该方法综合多项指标根据权重计算方法得到健康指数，但是湖泊生态系统健康评价涉及到的指标很多，因此一般还需要根据评价的因子建立综合评价体系，多与其他评价方法相结合使用。如林艺双[21]

等选取水环境、土壤、生物等多个指标，利用粗糙集理论对指标约简，构建评价指标体系，运用层次分析法得到指标权重系数，以加权的方式计算综合健康指数进行评价。项颂[22]等对湖泊生态系统健康历史变化和现状进行评价分析，客观系统地评价星云湖水生态系统健康状况。

3.2.2. 生态系统健康指数法

生态系统健康指数是赵臻彦[23]等遵循可测性、可比性、灵敏性及综合性的指标选择原则，经过设置一个 0~100 的健康指数，然后计算健康分指数、权重和综合指数，一种定量评价湖泊生态系统健康的方法[24]。公式如下：

$$EHI = \sum_{i=1}^n EHI_i \cdot W_i \quad (2)$$

式中：EHI 为生态系统健康综合指数， EHI_i 表示第 i 个指标的生态系统健康分指数， W_i 为第 i 个指标的权重。

该方法能反映生态系统的结构和组织水平，能很好地概括生态系统健康的多个部分，可用于同一湖泊不同时空及不同湖泊之间的健康状态的定量评价与比较，张红叶[25]等在对洱海及其流域内 3 个小型湖泊生态系统健康状况研究中，运用生态系统健康指数和营养状态指数做了定量综合评价，取得了满意的结果。

3.2.3. 模糊综合评价法

模糊综合评价法源于模糊数学理论，将非量化的因素模糊量化，通过模糊变换原理得到模糊集，再根据最大隶属原则得到评价结果。该方法现已广泛运用在不能量化的水环境质量评价，如陈佳波[26]选择多种指数作为模糊评价法的依据，包括底栖大型无脊椎动物指数、生物指数、栖息地指数和水质指数，利用熵加权方法计算河流栖息地质量指数和改进的水污染指数，最后采用模糊的综合评价方法对水生生态系统健康进行评价。模糊评价方法能较好地解决不确定性问题，评价结果客观准确。然而，模糊综合评价集因为采用线性加权平均模型，评价结果极易出现失真、跳跃和均质化，导致湖泊生态系统健康评价结果出现不准确的现象。同时，此方法评价过程复杂，评价指标参数和隶属度函数的确定具有一定的主观性，容易产生误差，不同的人用同一种方法可能就会出现不同的结果，过分重视主要因素而忽视次要因素会导致评价结果不可信，过分增加评价指标，会出现多指标反映信息重复的问题。

3.2.4. 灰色评价法

20 世纪，邓聚龙教授创立了灰色系统理论[27]。灰色系统分析是指将各因素间相似性及差异程度的发展动态指数来衡量因素之间的相关性，构建一个函数，来找到系统中各种因素之间的数字关系，这是非常适合评估和分析动态的动态系统。因此，灰色评价法被广泛运用各界研究中去，其中灰色关联评价法在生态系统健康评价中运用较多。目前，已有大量相关研究，敖成欢[28]等对百花湖 8 个现场理化参数进行分析，为使水质评价结果更科学，综合了模糊综合评价法和灰色关联分析法两种方法，产生了不错的效果。邢广君[29]等人构建了源于“驱动力 - 压力 - 状态 - 影响 - 响应”模型的指标体系，采用专家打分法和熵值法计算综合权重，利用灰色关联分析方法计算千鹤湖生态安全的关联度，以评价千鹤湖的生态安全。

灰色评价法和模糊综合分析法很相似，都在解决分布规律不明显和计算量较大的问题上显得游刃有余，被认为是系统分析中一种简单易行的方法。而灰色关联分析法的基石是灰色关联度模型，已建立的灰色关联度模型都或多或少有各自的优缺点。随着各大领域对灰色关联分析法的应用，现有的模型已经很难完全解决现实问题。因此灰色分析法还不够完善，其应用有局限性。

3.2.5. 人工神经网络法

人工神经网络是一种模拟人脑的神经系统对复杂信息的处理机制，由大量处理单元组成的非线性自适应的系统。大致过程为“学习样本”经过自组织训练，使网络对“学习样本”形成记忆和联想能力，再将数据输入到网络系统中，网络即运用已掌握知识信息进行评价。在生态系统健康评价中，是将评价标准作为“学习样本”，网络训练好之后，把待测数据输入网络既可评价。该方法在处理具有模糊性和不确定性的问题时挥洒自如，其中一种结构简单，训练便捷，并得到广泛应用的方法是概率神经网络法。肖韬[30]等把水质和生物监测数据作为“学习样本”，训练概率神经网络，用其评价湖泊生态系统健康，得到不同时间的湖泊生态系统健康评价结果。Kim Jaeyoung [31]利用人工神经网络方法和数值模型的结合应用，提高大湖水水质预测的准确性。

人工神经网络法凭借着其能快速、客观的确定权重和稳定的输出结果，被广泛运用在模型构建中，但由于学习时间不固定、结构通用性低、不能准确分析性能指标，使用此方法的时候还需要认真考虑。

3.3. 指标体系研究

无论用何种方法进行生态系统健康评价，只有选择适宜的评价指标才能正确反映生态系统的健康状况，因而湖泊生态系统健康评价的关键环节就是构建指标体系，指标体系需要能全面的反映湖泊生态系统的健康程度。评价指标体系经历了由单因子评价指标向多因子综合评价指标的转变[32] [33]，同时也由最初的单一考虑生态系统自身特点的指标体系转到加上人类活动的指标体系。

单因子指标主要关注于生态水平，包括指示物种的生物完整性和多样性指数，以及通过能质和结构能质评价湖泊健康的理化机制。然而，单因素评价注定是不全面的，随后，综合考虑物理学、生物学、社会经济、人体健康等多方面因素[34] [35] [36] [37]，提出了多因素评价指标体系。纵观研究历程，国内外在湖泊生态系统健康评价方面开展的研究，如表 2：

Table 2. Research progress of lake ecosystem health assessment indicators

表 2. 湖泊生态系统健康评价指标研究进展

文献作者	评价方法与指标	指标类型
Karr [38] (1993)	生物完整性指标	生态指标
Cairns [39] (1993)	分类群：鱼类、浮游植物、浮游动物和底栖动物	生态指标
Soto-Galwera <i>et al.</i> [40] (1999)	鱼类分类群与变化的分析	生态指标
徐福留[41] (1999, 2000)	淡水生态系统的结构、功能和系统指标	生态指标
袁兴中[42] (2001)	水生生境类型和面积、水生动植物区系特征、水生动植物多样性的降低、生态系统再生过程的损害、调节功能下降、有意人类的生产功能的下降、生境退化或丧失	生态指标
孔红梅[1] (2002)	生态毒理学方法、流行病学方法、生态系统医学、自然、社会及经济指标结合、不同尺度信息的综合评价	综合指标
徐福留[23] (2004)	生态系统健康评价：压力指标、响应指标	生态指标
任黎[43] (2012)	湖泊生态特征、自然功能和社会环境	综合指标
张峰[44] (2014)	建立典型湖泊健康评价的水质 - 生态 - 社会经济综合评价指标体系	综合指标
徐红玲[45] (2019)	物理，化学，生物，社会服务	综合指标

可以看出，国内外开展的湖泊生态系统健康相关研究从单一的生态指标逐渐发展为综合多方面的指标体系，也就是说湖泊生态系统健康评价难点就在于构建评价指标体系。伴随着世界环境日趋恶化，国家政府也急切的想找到湖泊生态系统的修复方法，对很多湖泊都进行了健康评价，形成了自己规定的研究体系，欧盟和美国 EPA 以及国内湖泊水生态系统都有规定的指标体系[46]。具体见表 3~表 5。

Table 3. Evaluation index system of lake aquatic ecosystem health in EU water framework directive

表 3. 欧盟水框架指令中湖泊水生态系统健康评价指标体系

湖泊	质量要素	参数/指标
生物因素	浮游植物	总生物量
		浮游生物营养指数(TPI)
	大型水生植物	蓝藻比例
		种类数量
	底栖动物	叶绿素 a
		营养指数(TMI)
		ASPT
		MILA
		BQI
		EQR8
物理化学因素	营养物质	TP
	透明度	赛氏盘深度
	溶解氧	DO
	酸碱度	pH 值
	污染物质	主要排放物
水力形态因素	连续性	为洄游性鱼类设置的人工屏障数
	水文状况	允许的水位变幅
		水位起伏情况
	形态状况	附近土地利用情况
		流域土地利用情况
		枯木数量
	沿岸带变化	
	每公里堤坝数	

Table 4. EPA lake aquatic ecosystem health assessment index system

表 4. 美国 EPA 湖泊水生态系统健康评价指标体系

指标类别	详细指标
水质指标	溶解氧
	温度
	营养盐(TN、TP)
	pH 值

Continued

生物学指标	浮游植物
	浮游动物
	大型水生植物
	底栖无脊椎动物
	沉积物中硅藻数量
栖息地指标	湖滨带植物覆盖率
	沿岸带植物覆盖率
微生物指标	藻毒素
	肠球速

Table 5. The evaluation index system of lake water ecological health specially formulated for the eleventh five-year plan
表 5. 十一五水专项拟定的湖泊水生态健康评价指标体系

评价要素	指标类别	详细指标
水生生物	浮游生物	总生物量
		蓝藻比例
		物种数量
	大型植物	叶绿素 a
		浮游生物营养指数 TPI (trophic plankton index)
		大型植物营养指数 TMI (trophic macrophytes index)
底栖动物	底栖动物生物完整性指数 IBI	
	鱼类生物完整性指数 IBI	
水质	水质平均污染指数	pH、DO、COD _{Mn} 、BOD、氨氮、挥发酚、Hg、Pb、石油类
	综合营养状态指数	Chla、TP、TN、SD、COD _{Mn}
	底质平均污染指数	TP、TN、SS、氨氮
	入湖河流水质综合污染指数	pH、DO、COD _{Mn} 、BOD、氨氮、挥发酚、Hg、Pb、石油类
水文和 形态学因子	水文状况	人工障碍数
		水位波动
		水力停留时间
		补给系数
		水量
	形态学状态	开发利用率
		湖泊深度
		湖床大小、结构和底质
		附近土地利用
		流域土地利用
	湖滨带变化	
	每公里堤坝数	

从上述典型的指标体系的可以看出,生物、理化和水力形态元素是目前指标体系的主体。学者在研究的时候可以根据自身需要,依据指标的选取原则,按照评价要求、方法和目的,选取其中的一些指标,结合研究区域的实际情况,建立合适的评价指标体系。

4. 结论与展望

4.1. 结论

本文就国内外关于湖泊生态系统评价的研究现状进行了简述,并探讨了指标体系的研究,得出如下结论:

1) 尚未形成统一的定义

对于生态系统健康的概念至今未达成一致的认识,在是否可以用“健康”对湖泊生态系统进行描述这方面仍存在很大的争议。

2) 指标选取缺乏评判标准

目前,研究者一般是根据自身研究的需要选择指标建立指标体系,主观因素影响较大,只能得到相对评价,多个湖泊进行评价时缺乏可比性。另外,指标选取是否科学合理直接影响评价结果的正确性,但目前并没有一个科学的评判标准,致使指标选取过程中可能出现指标重复或不全面而导致评价结果不准确等现象。

3) 无统一的健康分级标准

湖泊生态系统具有较强的地域、时域特性,在评价的过程中,难以统一健康标准,通常是学者自己划分健康等级,这就限制了评价方法及标准的广泛使用,也就是说对不同的湖泊进行评价时,总是需要进行制定评价等级和分级标准,对不同湖泊生态系统健康状况进行比较时造成一定的难度。

4) 指标权重的确定缺乏科学性分析

大多数学者采用综合指数法进行生态系统健康评价,这就涉及到各指标对生态系统健康影响的重要程度问题,即权重,目前确定权重的方法有很多,但何种方法最为科学合理,最能体现各指标对湖泊生态健康状况的实际影响程度,还有待进一步深入研究。

4.2. 展望

当然,正因为发现了存在的问题,湖泊生态系统健康评价步入了新的发展阶段,未来的健康评价将具有针对性和可操作性。生态系统健康评价的发展方向是将生态系统健康的概念与相关领域理论相结合,现在遥感技术的兴起,学者们不但应用遥感影像获取面积大、人工获取时间长的湖泊透明度;还利用卫星遥感数据进行实时监测湖泊的关键元素,还有遥感和地理信息系统技术相结合收集很多人工不易收集的资料。现如今自动化正跨越性的发展,自动化与环境也有很多结合,自动装置的出现也解决了很多评价上实时、连续、长期的问题。计算机技术在健康评价中同样也有应用,在多方面技术的结合下,未来评价方法的发展方向应该是GIS评价模型的查询和可访问性,未来将有更多的指标供健康评价工作者选择和使用,形成一套成熟的指标体系,更严格的评价体系和标准。

基金项目

安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院研发专项基金资助项目(ALW2020YF03)。

参考文献

- [1] 马克明,孔红梅,关文彬,等. 生态系统健康评价:方法与方向[J]. 生态学报,2001(12): 2106-2116.

- [2] 毕温凯, 袁兴中, 唐清华, 等. 基于支持向量机的湖泊生态系统健康评价研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 1984-1990.
- [3] Vreys, N., Amé, M.V., Filippi, I., Cazenave, J., Valdés, M.E. and Bistoni, M.A. (2019) Effect of Landscape Changes on Water Quality and Health Status of *Heptapterus mustelinus* (Siluriformes, Heptapteridae). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **76**, 453-468. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-00593-7>
- [4] 贺方兵. 东部浅水湖泊生态系统健康状态评估研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [5] 刘建军, 王文杰, 李春来. 生态系统健康研究进展[J]. 环境科学研究, 2002, 15(1): 41-44.
- [6] Schaeffer, D.J., Herricks, E.E. and Kerster, H.W. (1988) Ecosystem Health: I. Measuring Ecosystem Health. *Environmental Management*, **12**, 445-455. <https://doi.org/10.1007/BF01873258>
- [7] Mageau, M.T., Costanza, R. and Ulanowicz, R.E. (1995) The Development and Initial Testing a Quantitative Assessment of Ecosystem Health. *Ecosystem Health*, **1**, 201-213.
- [8] Rapport, D.J., Costanza, R. and McMichael, A.J. (1998) Assessing Ecosystem Health. *Trends in Ecology & Evolution*, **13**, 397-402. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01449-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01449-9)
- [9] Costanza, R., Norton, B.G. and Haskell, B.D. (1992) Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Island Press, Washington DC.
- [10] 肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 203-209.
- [11] 李冰, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊生态系统健康评价方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 98-106.
- [12] 赵思琪, 代嫣然, 王飞华, 等. 湖泊生态系统健康综合评价研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 98-104.
- [13] 杨斌, 隋鹏, 陈源泉, 高旺盛. 生态系统健康评价研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 291-296.
- [14] 孔红梅, 赵景柱, 马克明, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 1(4): 486-490.
- [15] Bain, M.B., Harig, A.L., Loucks, D.P., et al. (2000) Aquatic Ecosystem Protection and Restoration: Advances in Methods for Assessment and Evaluation. *Environmental Science & Policy*, **3**, 89-98. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(00\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(00)00029-0)
- [16] 戴纪翠, 倪晋仁. 底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2107-2111.
- [17] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1191-1194.
- [18] Xu, F.-L., Tao, S., Dawson, R.W., Li, P.-G. and Cao, J. (2001) Lake Ecosystem Health Assessment: Indicators and Methods. *Water Research*, **35**, 3157-3167. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00040-9)
- [19] Xu, F.-L., Dawson, R. W., Tao, S., Cao, J. and Li, B.-G. (2001) A Method for Lake Ecosystem Health Assessment: An Ecological Modeling Method (EMM) and Its Application. *Hydrobiologia*, **443**, 159-175.
- [20] 刘永, 郭怀成, 戴永立, 陆轶峰. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 723-729.
- [21] 林艺双, 刘青, 王盼, 等. 基于粗糙集理论的淡水湖泊湿地生态系统健康评价研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 320-330.
- [22] 项颂, 庞燕, 侯泽英, 等. 基于熵值法的云南高原浅水湖泊水生生态健康评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2272-2282.
- [23] 赵臻彦, 徐福留, 等. 湖泊生态系统健康定量评价方法[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1466-1474.
- [24] Flint, N., Rolfe, J., Jones, C.E., Sellens, C., Johnston, N.D. and Ukkola, L. (2017) An Ecosystem Health Index for a Large and Variable River Basin: Methodology, Challenges and Continuous Improvement in Queensland's Fitzroy Basin. *Ecological Indicators*, **73**, 626-636. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.007>
- [25] 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[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 715-720.
- [26] Chen, J.B., Wang, Y.J., Li, F.Y. and Liu, Z.C. (2019) Aquatic Ecosystem Health Assessment of a Typical Sub-Basin of the Liao River Based on Entropy Weights and a Fuzzy Comprehensive Evaluation Method. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 14045. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50499-0>
- [27] 邓聚龙. 灰色控制系统[J]. 华中工学院学报, 1982, 10(3): 9-18.
- [28] 敖成欢, 钟九生, 赵梦, 等. 基于模糊综合法和灰色关联法的百花湖水水质评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 116-122+129.
- [29] 邢广君, 赵孟伟. 基于综合权重灰色关联分析法的千鹤湖生态安全评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 121-128.
- [30] 肖韬, 袁兴中, 唐清华, 等. 基于概率神经网络的城市湖泊生态系统健康评价研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3166-3172.

- [31] Kim, J., Seo, D., Jang, M. and Kim, J.Y. (2021) Augmentation of Limited Input Data Using an Artificial Neural Network Method to Improve the Accuracy of Water Quality Modeling in a Large Lake. *Journal of Hydrology*, **602**, Article ID: 126817. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126817>
- [32] Jorgensen, S.E., Nielsen, S.N. and Mejer, H. (1995) Emergy, Environ, Exergy and Ecological Modelling. *Ecological Modelling*, **77**, 99-109. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)E0080-M](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)E0080-M)
- [33] 祁泽慧. 大汶河流域水生态系统评价与水生态文明建设研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2017.
- [34] 张雷, 时瑶, 张佳磊, 等. 大宁河水生态系统健康评价[J]. 环境科学研究, 2017, 30(7): 1041-1049.
- [35] Lyons, J., Gutierrez-Hernandez, A., Diaz-Pardo, E., et al. (2000) Development of Preliminary Index of Biotic Integrity (IBI) Based on Fish Assemblages to Assess Ecosystem Condition in the Lakes of Central Mexico. *Hydrobiologia*, **418**, 57-72.
- [36] Kane, D.D., Gordon, S.I, Munawar, M., et al. (2009) The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): An Approach for Assessing Lake Ecosystem Health. *Ecological Indicators*, **9**, 1234-1247. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.03.014>
- [37] Reynoldson, T.B. and Metcalfe-Smith, J.L. (1992) An Overview of the Assessment of Aquatic Ecosystem Health Using Benthic Invertebrates. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, **1**, 295-308. <https://doi.org/10.1007/BF00044171>
- [38] Karr, J.R. (1993) Defining and Assessing Ecological Integrity: Beyond Water Quality. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **12**, 1521-1531. <https://doi.org/10.1002/etc.5620120902>
- [39] Cairns, J., McCormick, P.V. and Niederlehner, B.R. (1993) A Proposed Framework for Developing Indicators of Ecosystem Health. *Hydrobiologia*, **263**, 1-44. <https://doi.org/10.1007/BF00006084>
- [40] Soto-Galera, E., et al. (1999) Change in Fish Fauna as Indication of Aquatic Ecosystem Condition in Rio Grande de Morelia-Lago de Cuitzeo Basin, Mexico. *Environmental Management*, **24**, 133-140.
- [41] 徐福留, 曹军, 陶澍, 傅明先, 王维清. 区域生态系统可持续发展敏感因子及敏感区分析[J]. 中国环境科学, 2000, 20(4): 361-365.
- [42] 袁兴中, 刘红, 陆健健. 生态系统健康评价——概念构架与指标选择[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 627-629.
- [43] 任黎, 杨金艳, 相欣奕. 湖泊生态系统健康评价指标体系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 100-103.
- [44] 张峰, 杨俊, 席建超, 李雪铭, 陈鹏. 基于 DPSIRM 健康距离法的南四湖湖泊生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 831-839.
- [45] 徐红玲, 潘继征, 徐力刚, 路学军, 赵敏, 杨鸿山, 吴晓东. 太湖流域湖荡湿地生态系统健康评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1279-1288.
- [46] 郜志云, 陈晓娟, 文一, 等. 美国湖泊调查评价技术及对我国湖泊生态环境管理的启示[J]. 中国环境管理, 2020, 12(1): 18-23.