

湖泊生态系统健康评价方法研究进展

李冰^{1,2}, 杨桂山¹, 万荣荣¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在介绍湖泊生态系统健康的产生、发展、内涵,梳理湖泊生态系统健康研究进展的基础上,归纳总结了近年来几种常用的生态系统健康评价方法,包括生物监测法和多指标综合评价法,剖析了不同评价方法的优缺点。借鉴环境质量评价、可持续发展评价等领域的评价方法,探讨不同时空尺度更为完善的湖泊生态系统健康评价方法,并总结了目前湖泊生态系统健康评价过程中存在的关键问题,包括健康内涵和标准的确定、评价方法的时空尺度结合、关键性指标的阈值和数据精炼等,认为结合遥感、GIS以及生态系统研究网络等定量技术,建立多尺度互为耦合的模型,是湖泊生态系统健康评价方法的未来发展方向。

关键词:湖泊生态系统;生态系统健康评价;评价方法;综述

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)06-0098-09

Progress on evaluation methods of lake ecosystem health//LI Bing^{1,2}, YANG Guishan¹, WAN Rongrong¹ (1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The progress of the research on lake ecosystem health is systematically reviewed from the view of generation, development as well as conception. Thus, this paper introduces and discusses the latest methodologies of evaluation to lake ecosystem health, including biological indicating and multi-index evaluation methods, and analyzes the adaptability together with their limitations. Furthermore, using the experience in evaluation of environmental quality and sustainable development for reference, more adaptive methodologies for evaluating the health of lake ecosystem within different spatial-temporal scale are explored. In addition, it is summarized some key problems existing in the process of lake ecosystem health assessment, including the determination of connotation and standards of lake ecosystem health, the combination of spatial and temporal scale, the consideration of threshold value of key indicators, and the promotion of data refinement and data availability. Finally, it is proposed several prioritize directions for further study based on problems in the current state-of-the-art.

Key words: lake ecosystem; ecosystem health evaluation; evaluation method; review

湖泊生态系统具有为人类提供自然资源和生存环境两个方面的多种服务功能,在水资源供给、径流调节、生态保护等方面起着不可替代的作用,是人类生存和发展的重要基础之一,也是人类社会可持续发展的基本保证^[1]。近年来,随着经济的发展和人们对生态保护理解的不断深入,对生态系统健康的研究已经成为一个热点问题^[2-8],它不仅丰富了现代生态学的研究内容,也将为环境管理和决策提供借鉴。目前,水资源危机和水生态问题,如水体污染和富营养化、洪涝干旱、围湖造田、过度捕捞、大型水利工程建设等,已经导致湖泊生态系统结构和功能严重退化。随着全球气候变化和人类活动的加剧,湖泊生态系统的健康将进一步受到威胁,这迫使人们

重新审视现存的湖泊生态系统的管理策略和模式,重视湖泊生态系统的生态保护和修复工作。对湖泊生态系统健康进行评价,有助于了解不同时空尺度湖泊生态系统的健康程度及其变化趋势,这一方面可为湖泊生态系统科学管理和生态修复提供理论基础^[9],另一方面也有利于比较不同环境管理措施对湖泊健康的影响。然而目前湖泊生态系统健康评价方法还不成熟,评价过程过于简单,对许多关键性问题,如时空尺度的结合、指标阈值和数据精炼等,考虑不足。本文在介绍和评价几种常用的湖泊生态系统健康评价方法的基础上,借鉴环境质量评价、可持续发展评价等领域的评价方法,探讨更为完善的湖泊生态系统健康评价方法。

1 湖泊生态系统健康的概念及发展

20 世纪 80 年代, Schaeffer 等^[2] 国外专家在与人类健康类比的前提下, 首次探讨了生态系统健康的度量; Constanza 等^[3-4] 认为健康的生态系统应能够维持自身的组织结构长期稳定, 并具有自我运作能力, 同时对外界压力有一定的承受弹性, 生态系统健康可归结为 6 个方面: 自我平衡、无疾病、多样性或复杂性、活力或成长性、稳定性或恢复力、系统内组分平衡; 胡志新等^[10] 认为湖泊生态系统健康包含满足人类社会的合理要求和湖泊生态系统自我维持和更新的能力两方面内涵。经过 30 多年的发展, 生态系统健康评价得到了飞速的发展, 国内外学者由研究其概念、指标体系、研究尺度等方面开始, 逐渐完善了湖泊、湿地、河流等生态系统评价的方法和理论。Karr^[6] 提出用生态完整性指数 (IBI) 来表征水体生态系统健康程度。目前该指数已发展为用鱼类群的组成、分布、种多度以及敏感种、耐受种、固有种和外来种变化的分析来评价水生态系统^[11]。Jorgensen^[5,12] 从生态热力学角度, 提出使用能质、结构能质、生态缓冲量来评价生态系统健康。Xu 等^[13-16] 在 Jorgensen 研究的基础上提出了以活化能、结构活化能、生态缓冲量为核心指标的多指标体系, 并成功应用于巢湖、青海湖、白洋淀的健康评价。Xu 等^[17-18] 利用以生态系统食物网中营养物质循环为核心的系统动力学模型, 模拟和预测了不同环境管理措施对湖泊生态系统健康的影响, 从而为环境决策提供了重要依据。Suo 等^[19] 改进了 Constanza 等^[4] 的活力、组织、恢复力指数模型, 并用来评价泾河流域的生态系统健康; Mo 等^[20] 将 BP 人工神经网络法用于洪湖湿地健康的评价中, 取得了良好的结果。然而, 目前国内外现存的评价理论和方法还有许多不足, 对不同类型和环境背景的湖泊尚未形成统一的健康评价标准, 也少有人对不同时空尺度的湖泊生态系统进行长序列动态评价。

2 湖泊生态系统健康评价方法

将人类健康的概念扩展到生态系统, 有助于提醒人们在关注无机领域环境破坏的基础上, 更应关注包括无机成分和生物成分的生态系统整体状况^[21]。对湖泊生态系统进行健康评价是湖泊生态系统健康研究的前提, 可为人类管理湖泊和进行生态修复提供理论依据。湖泊生态系统健康评价方法主要可分为两类: 生物监测法和多指标体系评价法。

2.1 生物监测法

2.1.1 群落学指标法

当生态系统因受到外来干扰和压力而发生改变甚至退化时, 通常会在群落结构上有所表现^[22]。常用的群落结构指标有分类群组成、种多样性、生物量和物种丰度等。由于多样性问题在生态学界和社会公众中引起广泛关注, 种多样性已成为环境评价中被广泛使用的一个指标^[23]。一些学者提出将多样性-丰度关系作为客观评价生态系统健康的度量指标, 认为在健康的生态系统中多样性-丰度关系可以用对数正态分布来表征^[21]。也有学者认为群落结构在无人为干扰的前提下是最健康的, 通过比较研究区域物种组成情况的实测值与无人为干扰下该地点的理论值, 来评价湖泊生态系统的健康状况^[24]。

2.1.2 指示物种法

采用指示物种法评价湖泊生态系统健康, 主要依据该生态系统关键物种、特有物种、环境敏感物种、濒危物种等的生产力、生物量、数量及其他生理生态指标来进行^[25]。Karr^[6] 和 Brousseau 等^[11] 应用生态完整性指数, 用鱼类群的组成、分布、种多度以及关键种、敏感种、固有种和外来种的变化来评价水生态系统; 当生态系统受到外界胁迫, 如水体污染和富营养化、围湖造田等, 湖泊生态系统的结构和功能将受到影响, 指示物种的适宜生境也将受到胁迫, 其结构功能和数量的变化可以用来表征湖泊生态系统的健康程度^[26]。同时, 也可以通过关键指示物种的恢复能力来表征生态系统的恢复能力。人为或自然地引入大量的外来物种, 这些外来物种与原有物种发生竞争, 引起原有物种栖息地丧失, 湖泊生态系统健康遭到破坏, 因此可以用外来物种在湖泊生态系统中的比例和数量来定性和定量地描述湖泊生态系统的健康程度^[27]。目前, 将鱼类、硅藻、底栖无脊椎动物作为水体指示指标的应用尤为广泛^[28]。

生物监测法是研究湖泊生态系统健康的常见方法, 但是该方法存在一些明显的缺点: ①仅依靠单一指标对生态系统健康进行评价有一定的片面性; ②指示物种的筛选标准不明确, 而且指示物种的减少是否会对系统产生重要影响及其在生态系统中的作用均难以确定^[29]; ③未考虑社会经济与人类健康因素, 难以全面反映生态系统的健康状况^[30]。

2.2 多指标综合评价法

多指标综合评价法是在选择不同组织水平的类群和考虑不同尺度的前提下, 对生态系统各个组织水平进行综合评价的方法^[31]。相比生物监测法, 多指标综合评价法结合了生态学、生理毒理学、物理化学, 以及计算机辅助手段, 以其综合性、全面性、易量

化的特点,成为当前比较常用的方法。但是目前该方法的缺点是指标体系的选取因环境背景和评价目的的不同而不同,权重的确定也不能充分体现指标对健康程度的影响。

2.2.1 指标的选取

在多指标评价方法研究中,针对不同的环境背景和研究目的建立评价指标体系,是健康评价的重要基础。不同的指标体系侧重点不同,主要从生态系统结构、功能和环境驱动因子等角度选取指标。有些学者关注生态系统本身结构,如 Rapport 等^[32]提出以“生态系统危险症状(EDS)”作为系统非健康状态的指标,主要有 5 个状态指标:初级生产力、物种多样性、营养库、生物体型分布和系统恢复力;Constanza 等^[4]从系统可持续发展的角度指出描述健康状态的 3 个指标:活力、组织、恢复力;Jorgensen^[5]从生态热力学角度,提出使用能质、结构能质、生态缓冲量等生态系统结构指标来评价生态系统健康,目前这几个指标已成为生态系统健康评价的代表性指标;有些学者从生态系统功能的角度选取评价指标,如孔红梅等^[33]提出的结构功能指标法,考虑了生态毒理学、流行病学、生态系统医学、自然与社会经济指标的结合等,建立了目前最为综合全面的指标体系,但并没有给出具体的指标。还有学者充分考虑环境因子对生态健康的驱动作用,如刘永等^[34]以生态系统健康、生态系统完整性和湖泊内物质循环为基础,针对富营养化对湖泊健康的影响,提出了包含外部指标、环境要素状态指标和生态指标在内的指标体系;任黎等^[35]在考虑湖泊生态系统实际情况的基础上,从社会环境、湖泊生态特征、自然功能 3 个方面,建立了评价指标体系;由 OECD 提出的 PSR 模型^[36-39],是以环境压力、系统状态、人类响应为核心来建立指标体系,能够突出反映人类活动与生态系统健康的关系。

湖泊生态系统环境的复杂性,以及不同学者研究的侧重点不同,使很难建立统一的指标体系来评价所有的生态系统。不同的生态系统所处的自然条件、经济条件和社会环境不同,且同一生态系统在不同发育阶段也有不同的特点,因此需要不同的指标来评价。湖泊生态系统健康指标的设计一般应包含以下几个方面的内容:①生态指标,即反映生态系统特征和状态的生物指标,不仅包括水生态指标,还包括湖泊湿地生态指标;②物理化学指标;③人类健康与社会经济指标,主要着眼于湖泊生态系统对人类生存和社会发展的支持作用。目前国内外开展的生态系统健康研究主要是选用生态指标来进行的^[10,12,34,40]。

2.2.2 权重的确定

目前,多指标综合评价中确定指标权重的方法有多种,如层次分析法(AHP)、Delphi 法、相关指数加权法、熵权法、隶属频度法、主成分分析法等。这些方法各有利弊,适用条件也有所不同。

a. 层次分析法。通常采取专家打分的方法来比较指标两两的相对重要程度,并构造判断矩阵,由判断矩阵计算满足一致性检验的特征向量,该特征向量即为权重向量。层次分析法是一种目前广泛应用的确定权重的方法^[39,41],主观性较强,需要寻求一定数量的有深厚经验的专家给予打分,受人为干扰较大,但是其原理简单,实用性很强。为了改进层次分析法主观性强的不足,层次分析法常常与熵权法相结合,充分利用指标信息的效用值^[36,42],也可与模糊数学相结合,即采用模糊层次分析法^[43-45],由指标数据构造模糊隶属度矩阵作为判断矩阵,进而计算权重矩阵,以有效处理权重确定过程中的主观性、模糊性、随机性等不确定问题。

b. Delphi 法。又称专家意见法,是依据专家的知识、经验、信息,采用背对背的通信方式征询专家小组的意见,并对意见进行数据处理,检验专家意见的集中程度、离散程度和协调程度,达到要求之后,得到各评价指标的初始权重向量,再对该权重向量进行归一化处理,获得各指标的权重向量。

c. 相关加权指数法。先选出能够大致表征湖泊生态系统健康状况的代表性指标作为基准指标,然后根据其余附加指标与该基准指标的相关程度计算各个指标所占的权重。计算公式为

$$W_i = \frac{r_{i1}^2}{\sum_{i=1}^m r_{i1}^2} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 个指标所占的权重; r_{i1} 为第 i 个指标与基准指标的相关系数; m 为评价指标的个数。相关加权指数法意义明确,计算简单,应用较多^[15,46-47]。

d. 熵权法。在信息论中,熵值反映了信息的无序化程度,可以用来度量信息量的大小。熵值越小,系统的无序度越小,可以用熵值来获取信息的有序度,充分体现指标数据的信息。熵权法是在客观条件下用评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的一种方法。该方法能尽量消除各因素权重的主观性,使评价结果更符合实际。熵权法由于其客观合理性,已在工程技术、社会经济、环境科学等领域得到广泛的应用^[48-50]。

值得指出的是,上述常权重法在各指标的综合评价结果值相差很小时,常常会给决策带来困难,而

且生态系统健康评价指标往往具有短板效应,在某一评价指标十分差的情况下,即使其余指标值很理想,评价结果也认为很差,常权重法很难反映出这一特征。因此,有必要在生态系统健康评价中探索变权重法,即通过对较低的指标进行“惩罚”,来充分考虑评价指标的短板效应^[51]。此外,基于机器学习的人工神经网络和支持向量机评价方法可以不需要确定权重,在特定的规则下,通过机器学习训练,达到对已知指标数据进行评价的目的^[20,52]。

2.2.3 综合评价方法

随着生态系统健康评价研究的发展,评价方法也在逐渐完善。下面是几种近年来常用的综合评价方法。

a. 模糊综合评价法。这是一种以模糊推理为主,定性与定量相结合、精确与不确定性相统一的分析方法,通过构造隶属度函数,将不易定量的因素定量化,运用模糊变换原理分析和评价模糊系统。该方法的优势在于湖泊生态系统本身是一个动态的相对概念,具有模糊性,难以界定湖泊生态系统健康的标准值,模糊理论将评价指标的不确定性与主观信息相结合,采用模糊语言确定不同等级,可最大限度地利用信息做出客观评价^[53]。但是模糊算法的隶属度和合成算子的确定都带有一定的主观性,模型无法进行自我验证,且最大隶属度有一定的不适用性^[54]。模糊数学法作为一种处理现实问题的有效方法,已经得到了广泛的应用^[28,55-56]。随着模糊理论不断发展,模糊数学已开始与人工神经网络相结合构建模糊神经网络模型,采用标准指标相对隶属度矩阵和预生成的类别相对隶属度矩阵进行训练,构造标准指标隶属度训练样本及期望隶属度训练样本。该方法已经较好地运用到了水质评价^[57]、大气质量评价^[58]等领域。

b. 系统动力模型法。湖泊生态系统动力学主要研究湖泊生态系统的结构、功能及时空演变规律和物理、化学以及生物过程对水生态系统的影响及其反馈机制,并通过建立系统动力学模型模拟和预测系统的动态变化^[59]。典型的系统动力模型以质量平衡方程为基础,主要考虑物理迁移扩散、生化反应以及源、汇等因素^[59]。Jorgensen^[60]总结了近几年来湖泊生态模拟的动力模型,提出结构动力学、水动力学、生态学等的结合将成为未来湖泊生态模拟的发展方向。Xu 等^[61]围绕湖泊营养物质随食物网的循环,建立生态模拟模型(EMM),实现对湖泊健康状态的评价和预测;也有学者^[17-18]探讨利用结构动力学模型(STDm)模拟不同湖泊管理方案对湖泊健康的影响,为湖泊治理和生态修复提供了依据。近

年来国际上比较常用的湖泊生态系统动力学模型有 LakeWeb、CAEDYM、PCLake 和 MyLake 等^[62]。我国湖泊生态系统动力学模型研究主要集中在滇池、太湖、巢湖、东湖等富营养化程度较严重的湖泊和水体。目前国内外的生态模型主要针对湖泊富营养化现象,未能涵盖湖泊生态系统的服务功能、水安全等,综合全面的模拟湖泊生态系统健康的模型还比较欠缺。

c. 机器学习方法。随着人工智能计算方法的发展,机器学习法,如人工神经网络法、支持向量机法,日益在各领域得到广泛应用。人工神经网络法是一种非线性模拟技术方法,具有良好的自组织、自适应、自学习与自推理能力,适合处理模糊信息或非线性关系^[53],通过改变连接点的权重来训练神经网络完成特定的功能。Mo 等^[20]采用该方法评价洪湖湿地的健康状况,获得了较好的结果。支持向量机是基于结构风险最小化的仿真模拟方法,具有很强的泛化能力。该方法采用核函数方法,通过非线性变换映射到高维空间,然后在特征空间中求取把样本线性分开的最优分类面,比较适合解决高维、非线性复杂系统的建模与仿真问题,已经成功运用于湖泊健康评价和水资源风险评价^[52,63,64]。与人工神经网络相比,支持向量机具有理论完善和算法科学的优点,此外,在样本量较小的情况下,支持向量机模型比神经网络模型的预测能力更强^[65]。目前,人工神经网络法和支持向量机都可以用 Matlab 简便地实现^[66]。

d. 投影寻踪法。投影寻踪法是一种处理非正态高维数据的降维分析方法,其基本思想是利用计算机技术,将高维数据投影到低维子空间,并通过优化投影函数,寻找投影的特征向量,在低维空间对数据进行分析,达到研究高维数据的目的^[67]。该方法的实质就是求出最优向量,使多维评价指标投影到一维线性空间的投影值满足内部尽可能密集、类间尽可能分开的散布特征。目前该方法在环境质量评价的应用表明,它具有人为干扰小、结果稳定的优点^[67-68],可尝试将其应用于湖泊健康评价。

e. 现代统计学法。Li 等^[69]借助现代统计学中的因子分析和正态分布理论,提出了从统计学角度评价生态系统健康的方法。步骤如下:①建立相同生态等级评价对象的评价指标矩阵;②为避免评价对象指标的相关性和耦合性,用因子分析法对大量的指标数据进行降维处理,使得整合之后的指标相互独立;③根据正态分布理论,当评价对象个数足够多时,评价指标矩阵应服从正态分布,根据正态分布多数即健康的特点,可得出结论:大多数(如占总数

的95%)的生态系统是适应环境的,也是健康的;④对某一指标,根据一维正态分布临界值表得出 t 值,因为95%生态系统的该指标的值应该在 $(-t, t)$,所以不在该范围内的指标所代表的生态系统就是不健康的。限于多维正态分布求解困难,该方法需与因子分析法、主成分分析法等降维处理方法结合使用,而且该方法对评价对象的数量也有一定的要求。目前该方法还处于理论研究阶段,有待进一步验证。

此外,灰色系统理论^[54]、突变理论^[70]等在环境质量评价中也有广泛的应用。针对不同环境背景的湖泊生态系统以及指标数据的可得性,以上综合评价方法各有不同的适用性,如模糊综合评判法是主因素突出型的评价方法,而综合评价法、灰色理论方法则充分反映了各评价因子的综合效应^[71]。尹海龙等^[72]在水质评价方法的比较研究中,发现模糊评判法、层次分析法、灰色系统评价法、人工神经网络法在指标值远超等级标准值的情况下,评价结论偏保守。不同的评价模型方法在不同的时空尺度,其评价优度有一定的差异,因此在评价湖泊健康时,要在充分了解湖泊生态系统过程的基础上,考虑多模型方法的综合集成。

3 存在的问题与展望

3.1 健康的内涵和标准问题

目前,对湖泊生态系统健康的内涵,国内外仍没有统一的认识;对湖泊生态系统健康的标准,不同的学者也没有统一的理解。一些研究者把未经人类干扰的生态系统的原始状态作为健康的参考状态,而一些研究者则认为可以用生态系统的演替顶级状态作为生态系统健康的参考状态^[73]。不同的湖泊类型、不同环境背景的湖泊,其生态系统健康的标准都不尽相同,如通江湖泊鄱阳湖和洞庭湖,要充分考虑江湖之间的连通性对湖泊生态系统健康的影响。因此,要在充分理解湖泊生态系统健康的基础上,综合考虑水资源、水安全、水环境、湿地生态等,提出综合性的湖泊生态系统健康概念,以便建立全面的湖泊生态系统评价指标体系和健康标准。

3.2 时空尺度问题

湖泊生态系统的结构和功能会随着时空的变化而发生相应的改变,那么其健康指标体系和评价方法就要做出相应的调整。就空间尺度而言,人类活动强弱不同,湖泊健康程度差异明显。Xu等^[16]研究发现,在白洋淀,越接近村庄和污染河流入湖口的湖区,其健康状态往往比远离入湖口的湖区差。此外,不同空间尺度的生态过程之间往往存在着复杂

的相互作用,如全球尺度的气候变化会对小尺度的环境问题产生影响,而小尺度的环境问题则是全球尺度变化的根本原因^[74]。就时间尺度而言,主要可以分为时间点尺度和时间段尺度。时间点尺度主要研究湖泊生态系统瞬时变化特征,能够快速地评价湖泊的现状和特征,及时提供必要的信息;时间段尺度主要侧重于研究湖泊生态系统变化趋势特征,能够系统地分析湖泊的变化特征及其趋势^[75]。因此,在实际评价工作中,应尽量将时间点尺度和时间段尺度结合,充分考虑不同尺度选择对评价结果带来的影响。

3.3 关键性指标的阈值

生态阈值被定义为一种条件,一旦超过该条件,生态系统就会发生量、质或现象的突然急剧变化^[76]。在湖泊健康评价过程中,有些关键性指标对生态系统健康评价结果是决定性的,必须着重考虑。此外,湖泊生态系统是一个动态变化的复杂系统,影响湖泊健康的各指标也始终在变化,且变化的速率也在改变,同时,在某一指标值过低时,基于常权重法的综合评价法无法体现指标的短板效应,因此,有必要探索采取权重值随评价指标值的不同取值状态而变化的变权重法,来评价湖泊生态系统健康的时空动态变化,同时建立一个以关键性指标为基础的健康指标体系。该关键性指标可以是综合性复合指标,也可以是指示性指标,其特点是可单独用来粗略评价湖泊生态系统。当该指标超过一定阈值时,其对生态系统健康评价结果是一票否决性的。

3.4 数据问题

由于完善湖泊生态系统健康的评价需要多方面、长序列的数据,如水文水资源、水生态、水环境、防洪以及湖泊湿地生态数据等,所需数据量大、繁杂,难以实现,因此,有必要对所选指标体系进行精炼,提取有代表性的关键指标,以减少数据获取方面的压力;同时,可建立一个湖泊数据共享平台,使各方面数据得以汇总,为湖泊生态系统其他领域的研究提供有力的保证。

3.5 未来发展方向

目前国内外湖泊生态系统健康评价大多是针对湖泊富营养化,但湖泊健康还应包含服务功能、水安全等,因此需要探索更为综合全面的湖泊健康评价模型。随着生态模型、机器学习方法、统计学方法的日渐成熟,以及卫星遥感应应用、全球定位系统、地理信息系统、生态系统研究网络等定量化研究技术的日益完善和推广应用,湖泊生态系统健康的研究将进一步得到深化,大尺度生态系统健康的分析、评价和预测能力也将大大提高。伴随着水资源、水环境、大型

水利工程建设等方面的严峻挑战,今后有必要在持续进行长期生态监测的基础上,探索互为验证、相互耦合的集成性评价模型,来评价湖泊生态系统健康,从而为湖泊生态修复和湖泊资源利用提供借鉴。

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,2001,21(12): 2106-2116. (MA Keming,KONG Hongmei,GUAN Wenbin,et al. Ecosystem health assessment: methods and directions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (12): 2106-2116. (in Chinese))

[2] SCHAEFFER D J, HERRICKS E E, KERSTER H W. Ecosystem health: measuring ecosystem health [J]. Environmental Management,1988,12(4): 445-455.

[3] COSTANZA R,MAGEAU M. What is a healthy ecosystem? [J]. Aquatic Ecology,1999,33(1): 105-115.

[4] COSTANZA R,NORTON B G,HASKELL B D. Ecosystem health: new goals for environmental management [M]. Washington D C:Island Press,1992.

[5] JORGENSEN S. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health [J]. Ecosystem Health, 1995,1(3): 150-160.

[6] KARR J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality [J]. Environmental Toxicology and Chemistry,1993,12(9): 1521-1531.

[7] LEHMAN H. Ecosystem health as a moral requirement [J]. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 2000,12(3): 305-317.

[8] XU F L,TAO S,DAWSON R W,et al. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods [J]. Water Research,2001,35(13): 3157-3167.

[9] 许文杰,许士国. 湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法[J]. 水土保持研究,2008,15(1): 125-127. (XU Wenjie, XU Shiguo. Entropy weight comprehensive health index method of assessment of lake ecosystem health [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(1): 125-127. (in Chinese))

[10] 胡志新,胡维平,张发兵,等. 太湖梅梁湾生态系统健康状况周年变化的评价研究[J]. 生态学杂志,2005,24(7): 763-767. (HU Zhixin, HU Weiping, ZHANG Fabing,et al. Assessment of annual variation for ecosystem health at Meiliang Bay,Lake Taihu[J]. Chinese Journal of Ecology,2005,24(7): 763-767. (in Chinese))

[11] BROUSSEAU C, RANDALL R, HOYLE J, et al. Fish community indices of ecosystem health: how does the Bay of Quinte compare to other coastal sites in Lake Ontario? [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management,2011,14(1): 75-84.

[12] JORGENSEN S E. Application of holistic thermodynamic

indicators [J]. Ecological Indicators,2006,6(1): 24-29.

[13] XU F L. Exergy and structural exergy as ecological indicators for the development state of the Lake Chaohu ecosystem [J]. Ecological Modelling,1997,99(1): 41-49.

[14] 胡会峰,徐福留,赵臻彦,等. 青海湖生态系统健康评价 [J]. 城市环境与城市生态,2003,16(3): 71-72,75. (HU Huifeng, XU Fuli, ZHAO Zhenyan, et al. An assessment of ecosystem health for Qinghai Lake [J]. Urban Environment & Urban Ecology,2003,16(3): 71-72,75. (in Chinese))

[15] XU F L,ZHAO Z Y,ZHAN W,et al. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment [J]. Ecological Modelling, 2005, 188 (2): 327-339.

[16] XU F, YANG Z, CHEN B, et al. Ecosystem health assessment of Baiyangdian Lake based on thermodynamic indicators [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2402-2413.

[17] XU F, YANG Z, CHEN B, et al. Impact of submerged plants on ecosystem health of the plant-dominated Baiyangdian Lake, China [J]. Ecological Modelling,2012.

[18] XU F, YANG Z, CHEN B, et al. Development of a structurally dynamic model for ecosystem health prognosis of Baiyangdian Lake, China [J]. Ecological Indicators, 2013,29: 398-410.

[19] SUO A N,XIONG Y C,WANG T M,et al. Ecosystem health assessment of the Jinghe River watershed on the Huangtu Plateau [J]. EcoHealth,2008,5(2): 127-136.

[20] MO M H,WANG X L,WU H J,et al. Ecosystem health assessment of Honghu Lake Wetland of China using artificial neural network approach [J]. Chinese Geographical Science,2009,19(4): 349-356.

[21] 袁兴中,叶林奇. 生态系统健康评价的群落学指标 [J]. 环境导报,2001(1): 45-47. (YUAN Xingzhong, YE Linqi. The community index of assessing ecosystem health [J]. Environment Herald, 2001 (1): 45-47. (in Chinese))

[22] 李瑾,安树青,程小莉,等. 生态系统健康评价的研究进展 [J]. 植物生态学报,2001,25(6): 641-647. (LI Jin, AN Shuqing, CHENG Xiaoli, et al. Advances in assessment of ecosystem health [J]. Acta Phytocologica Sinica,2001,25(6):641-647. (in Chinese))

[23] CAIRNS J,Jr,MCCORMICK P V,NIEDERLEHNER B. A proposed framework for developing indicators of ecosystem health [J]. Hydrobiologia,1993,263(1): 1-44.

[24] 魏金梅,何彤慧,程志,等. 地表水生态系统健康评价研究进展 [J]. 水资源与水工程学报,2010,21(4): 96-100. (WEI Jinmei, HE Tonghui, CHENG Zhi, et al. Reasearch progress on health assessment of surface water ecosystem [J]. Journal of water resources and water engineering,2010,21(4): 96-100. (in Chinese))

- [25] 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(6):2107-2111. (DAI Jicui, NI Jinren. Roles of benthos in the aquatic ecosystem health assessment [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2107-2111. (in Chinese))
- [26] EDSALL T A, GORMAN O T, EVRARD L M. Burrowing mayflies as indicators of ecosystem health: status of populations in two Western Lake superior embayments [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2004, 7(4): 507-513.
- [27] 崔保山,杨志峰.湿地生态系统健康评价指标体系 I: 理论[J].生态学报,2002,22(7): 1005-1011. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Establishing an indicator system for ecosystem health evaluation on wetlands I: a theoretical framework [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1005-1011. (in Chinese))
- [28] 赵彦伟,杨志峰.城市河流生态系统健康评价初探[J].水科学进展,2005,16(3): 349-355. (ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 349-355. (in Chinese))
- [29] 彭建,王仰麟,吴健生,等.区域生态系统健康评价: 研究方法进展[J].生态学报,2007,27(11): 4877-4885. (PENG Jian, WANG Yanglin, WU Jiansheng, et al. Evaluation for regional ecosystem health: methodology and research progress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4877-4885. (in Chinese))
- [30] 戴全厚,刘国彬,田均良,等.侵蚀环境小流域生态经济系统健康定量评价[J].生态学报,2006,26(7): 2219-2228. (DAI Quanhong, LIU Guobin, TIAN Junliang, et al. Health diagnoses of eco-economy system in small watershed on typical erosion environment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2219-2228. (in Chinese))
- [31] 祁帆,李晴新,朱琳.海洋生态系统健康评价研究进展[J].海洋通报,2007,26(3): 97-104. (QI Fan, LI Qingxin, ZHU Lin. Assessment method of marine ecosystem health [J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(3): 97-104. (in Chinese))
- [32] RAPPORT D J, REGIER H, HUTCHINSON T. Ecosystem behavior under stress [J]. American Naturalist, 1985: 617-640.
- [33] 孔红梅,赵景柱,姬兰柱,等.生态系统健康评价方法初探[J].应用生态学报,2002,13(4): 486-490. (KONG Hongmei, ZHAO Jingzhu, JI Lanzhu, et al. Assessment method of ecosystem health [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(4): 486-490. (in Chinese))
- [34] 刘永,郭怀成,戴永立,等.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. (LIU Yong, GUO Huaicheng, DAI Yongli, et al. An assessing approach for lake ecosystem health [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(4): 723-729. (in Chinese))
- [35] 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. (REN Li, YANG Jinyan, XIANG Xinyi. Evaluation index system for lake ecosystem health [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(1): 100-103. (in Chinese))
- [36] 许妍,高俊峰,高永年,等.太湖流域生态系统健康的空间分异及其动态转移[J].资源科学,2011,33(2): 201-209. (XU Yan, GAO Junfeng, GAO Yongnian, et al. Spatial variation and dynamics of ecosystem health in the Taihu Lake watershed [J]. Resources Science, 2011, 33(2): 201-209. (in Chinese))
- [37] 蒋卫国,李京,李加洪,等.辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J].生态学报,2005,25(3): 408-414. (JIANG Weiguo, LI Jing, LI Jiahong, et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaohe River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 408-414. (in Chinese))
- [38] 周云凯,白秀玲,姜加虎.近 17 年鄱阳湖区生态系统健康时空变化研究[J].环境科学学报,2012,32(4): 1008-1017. (ZHOU Yunkai, BAI Xiuling, JIANG Jiahu. Study on the temporal and spatial variation of ecosystem health in Poyang Lake region over 17 years [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 1008-1017. (in Chinese))
- [39] 蒋卫国,潘英姿,侯鹏,等.洞庭湖区湿地生态系统健康综合评价[J].地理研究,2009,28(6): 1665-1672. (JIANG Weiguo, PAN Yingzi, HOU Peng, et al. Assessment and analysis of wetland ecosystem health in Dongting Lake [J]. Geographical Research, 2009, 28(6): 1665-1672. (in Chinese))
- [40] XU F L, JORGENSEN S E, TAO S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health [J]. Ecological Modelling, 1999, 116(1): 77-106.
- [41] 李灿,李永,李嘉.湖泊健康评价指标体系及评价方法初探[J].四川环境,2011,30(2): 71-75. (LI Can, LI Yong, LI Jia. Index system and methodology for health assessment of Lakes [J]. Sichuan Environment, 2011, 30(2): 71-75. (in Chinese))
- [42] 李春华,叶春,赵晓峰,等.太湖湖滨带生态系统健康评价[J].生态学报,2012,32(12): 3806-3815. (LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al. The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3806-3815. (in Chinese))
- [43] 金菊良,魏一鸣,丁晶.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J].水利学报,2004(3): 65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 65-70. (in Chinese))

- [44] 张祖陆,梁春玲,管延波. 南四湖湖泊湿地生态健康评价[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(1): 180-184. (ZHANG Zulu, LIANG Chunling, GUAN Yanbo. Assessment of wetland ecosystem health in the Nansihu Lake[J]. China Population Resources and Environment, 2008,18(1): 180-184. (in Chinese))
- [45] 金菊良,洪天求,王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报,2007,26(4): 22-28. (JIN Juliang, HONG Tianqiu, WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(4): 22-28. (in Chinese))
- [46] 卢志娟,裴洪平,汪勇. 西湖生态系统健康评价初探[J]. 湖泊科学,2008,20(6): 802-805. (LU Zhijuan, PEI Hongping, WANG Yong. Preliminary exploration of ecosystem health assessment for Lake West[J]. Journal of Lake Sciences,2008,20(6): 802-805. (in Chinese))
- [47] 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. (ZHANG Hongye, CAI Qinghua, TANG Tao, et al. Comprehensive assessment and comparison of lakes' ecosystem health in Erhai watershed [J]. China Environmental Science, 2012, 32(4): 715-720. (in Chinese))
- [48] 罗军刚,解建仓,阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报,2008,39(9): 1092-1097. (LUO Jungang, XIE Jiancang, RUAN Benqing. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1092-1097. (in Chinese))
- [49] 邹志红,孙靖南,任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报,2005,25(4): 552-556. (ZOU Zhihong, SUN Jingnan, REN Guangping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 552-556. (in Chinese))
- [50] 周梅华. 可持续消费测度中的熵权法及其实证研究[J]. 系统工程理论与实践,2003,23(12): 25-31. (ZHOU Meihua. The research about method of sustainable consumption system measure [J]. Systems Engineering-theory & Practice,2003,23(12): 25-31. (in Chinese))
- [51] 胡月明,万洪富,吴志峰,等. 基于 GIS 的土壤质量模糊变权评价[J]. 土壤学报,2001,38(3): 266-274. (HU Yueming, WAN Hongfu, WU Zhifeng, et al. GIS-based soil quality evaluation with fuzzy variable weight [J]. Acta Pedologica Sinica,2001,38(3): 266-274. (in Chinese))
- [52] 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. (BI Wenkai, YUAN Xingzhong, TANG Qinghua, et al. Investigation of health assessment for lake ecosystem based on support vector machine (SVM) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8): 1984-1990. (in Chinese))
- [53] 刁美娜,温小虎,刘有刚,等. 基于模糊神经网络的海水水质综合评价[J]. 海洋通报,2012,31(2): 228-232. (DIAO Meina, WEN Xiaohu, LIU Yougang, et al. Integrated assessment on sea water quality based on fuzzy neural network [J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(2): 228-232. (in Chinese))
- [54] 阎伍玖. 区域农业生态环境质量综合评价方法与模型研究[J]. 环境科学研究,1999,12(3): 49-52. (YAN Wujiu. Study of the models of regional agriculture eco-environmental quality assessmen [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(3): 49-52. (in Chinese))
- [55] 张凤玲,刘静玲,杨志峰. 城市河湖生态系统健康评价: 以北京市“六海”为例[J]. 生态学报,2005,25(11): 3019-3027. (ZHANG Fengling, LIU Jingling, YANG Zhifeng. Ecosystem health assessment of urban rivers and lakes for six lakes in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(11): 3019-3027. (in Chinese))
- [56] 周文华,王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价[J]. 生态学报,2005,25(12): 3244-3251. (ZHOU Wenhua, WANG Rusong. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(12): 3244-3251. (in Chinese))
- [57] 陈守煜,李亚伟. 基于模糊人工神经网络识别的水质评价模型[J]. 水科学进展,2005,16(1): 88-91. (CHEN Shouyu, LI Yawei. Water quality evaluation based on fuzzy artificial neural network[J]. Advances in Water Science, 2005,16(1): 88-91. (in Chinese))
- [58] 王俭,胡筱敏,冯永新,等. 一种基于模糊神经网络的大气质量评价模型[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(5): 92-94. (WANG Jian, HU Xiaomin, FENG Yongxin, et al. A model for air quality assessment based on fuzzy neural network[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003,16(5): 92-94. (in Chinese))
- [59] 刘永,郭怀成,范英英等. 湖泊生态系统动力学模型研究进展[J]. 应用生态学报,2005,16(6): 1169-1175. (LIU Yong, GUO Huaicheng, FAN Yingying, et al. Research advance on lake ecosystem dynamic models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005,16(6): 1169-1175. (in Chinese))
- [60] JORGENSEN E. A review of recent developments in lake modelling[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(4): 689-692.
- [61] XU F L, DAWSON R W, TAO S, et al. A method for lake

- p>ecosystem health assessment: an ecological modeling method (EMM) and its application[J].
- Hydrobiologia*
- , 2001,443(1-3):159-175.
- [62] MOOIJ W M,TROLLE D,JEPPESEN E,et al. Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches[J]. *Aquatic Ecology*,2010,44(3):633-667.
- [63] 李正最,谢悦波. 洞庭湖富营养化支持向量机评价模型研究[J]. *人民长江*, 2010, 41(10): 75-78. (LI Zhengzui, XIE Yuebo. Study on eutrophication evaluation model of Dongting Lake based on SVM[J]. *Yangtze River*,2010,41(10): 75-78. (in Chinese))
- [64] 黄明聪,解建仓,阮本清,等. 基于支持向量机的水资源短缺风险评价模型及应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 255-259. (HUANG Mingcong, XIE Jiancang, RUAN Benqing, et al. Model for assessing water shortage risk based on support vector machine[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2007,38(3): 255-259. (in Chinese))
- [65] 张玉超,钱新,钱瑜,等. 支持向量机在太湖叶绿素 a 非线性反演中的应用[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(1): 78-83. (ZHANG Yuchao, QIAN Xin, QIAN Yu, et al. Application of SVM on Chl-a concentration retrievals in Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1): 78-83. (in Chinese))
- [66] 王劲峰,廖一兰,刘鑫. 空间数据分析教程[M]. 北京: 科学出版社,2010.
- [67] 李彦苍,周书敬. 基于改进投影寻踪的海洋生态环境综合评价[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5736-5740. (LI Yancang, ZHOU Shujing. Comprehensive assessment of marine ecological indexes based on improved projection pursuit method[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5736-5740. (in Chinese))
- [68] 王顺久,杨志峰. 区域农业生态环境质量综合评价投影寻踪模型研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 173-175. (WANG Shunjiu, YANG Zhifeng. A projection pursuit model for comprehensive assessment on eco-environmental quality of regional agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 173-175. (in Chinese))
- [69] LI H T, GU C J, LIANG T, et al. A new perspective of ecosystem health[J]. *Journal of Forestry Research*, 2011, 21(1):127-132.
- [70] YANG F, SHAO D, XIAO C, et al. Assessment of urban water security based on catastrophe theory[J]. *Water Science & Technology*, 2012, 66(3): 487-493.
- [71] 张戈,于大涛,袁仲杰,等. 海水水质评价方法比较分析[J]. *海洋开发与管理*, 2009, 26(10): 102-105. (ZHANG Ge, YU Datao, YUAN Zhongjie, et al. Comparison of methods on assessment of sea water quality[J]. *Ocean Development and Management*, 2009, 26(10): 102-105. (in Chinese))
- [72] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(5): 729-733. (YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(5): 729-733. (in Chinese))
- [73] 孙燕,周杨明,张秋文等. 生态系统健康: 理论、概念与评价方法[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 887-896. (SUN Yan, ZHOU Yangming, ZHANG Qiuwen, et al. Ecosystem health: theory, concept and assessment methods[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 887-896. (in Chinese))
- [74] 张宏锋,欧阳志云,郑华. 生态系统服务功能的时空尺度特征[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1432-1437. (ZHANG Hongfeng, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua. Spatial scale characteristics of ecosystem services[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1432-1437. (in Chinese))
- [75] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 121-125. (CUI Baoshan, YANG Zhifeng. Temporal spatial scale characteristic of wetland ecosystem health[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 121-125. (in Chinese))
- [76] 赵慧霞,吴绍洪,姜鲁光. 生态阈值研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 338-345. (ZHAO Huixia, WU Shaohong, JIANG Luguang. Review on recent advances in ecological threshold research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 338-345. (in Chinese))
- (收稿日期:2014-01-19 编辑:彭桃英)
- +++++
- (上接第 55 页)
- [20] 徐贵泉,陈庆江,陈长太. 苏州河沿线设计高水位[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(6): 38-42. (XU Guiquan, CHEN Qingjiang, CHEN Changtai. Design high water level of Suzhou River[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(6): 38-42. (in Chinese))
- [21] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2007.
- [22] 何金林,韩昌来. 上海市水文环境变化及对策探讨[J]. *中国水利*, 2005(7): 35-37. (HE Jinlin, HAN Changlai. Hydrological environment changes in Shanghai and countermeasures[J]. *China Water Resources*, 2005(7): 35-37. (in Chinese))
- [23] 中国国际工程咨询公司. 关于黄浦江干流新增防洪工程可行性研究报告的评估报告[R]. 北京:中国国际工程咨询公司,2003.
- [24] 上海市水利工程设计研究院,上海市水务业务受理中心. 穿河工程行政许可技术控制标准研究[R]. 上海:上海市水务局,2011.
- (收稿日期:2013-09-09 编辑:徐娟)