

Study on Assessment Method of Water Ecology Environmental Health

Yuequn Huang^{1,2}, Qing Zhang^{1,2}, Jieyue Li^{1,2}, Shoukun Huang^{1,2}, Zhiqiang Wu^{1,2}, Shiqi Yang^{1,2}

¹Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi
Email: 66295574@qq.com

Received: Oct. 30th, 2019; accepted: Nov. 14th, 2019; published: Nov. 21st, 2019

Abstract

The indicators are selected commonly to assess the health of water ecology environment, which can reflect the actual situation during the study period. It is difficult to continuously reflect the changes in the water ecological environment. Water ecological restoration is a long dynamic process. It needs a theoretical technique and method that could reflect the health condition and restoration effect of water ecological environment in real time. Based on reviewing the current assessment methods of water ecological environmental health in recent years, the qualitative and quantitative movement behaviors of fish were proposed, and the indicators of movement behavior and sensitivity water quality of fish were used as water ecological restoration effects of eutrophic water. A set of effective and operability assessment system for water ecological restoration effects was developed. It was more in line with the actual conditions of water ecological environment. It can provide scientific reference for the evaluation of early warning and restoration effects of water ecological environment.

Keywords

Water Ecology Environmental Health, Response Indicators of Fish Behavior, Sensitivity Water Quality Indicators, Real-Time, Evaluation Methods

水生态环境健康评价方法研究

黄月群^{1,2}, 张庆^{1,2}, 李洁月^{1,2}, 黄寿琨^{1,2}, 吴志强^{1,2}, 杨诗琪^{1,2}

¹桂林理工大学, 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林

²桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林
Email: 66295574@qq.com

摘要

常用水生态环境健康评价方法选取的评价指标一般反映的是研究期间的实际情况，很难持续反映水生态环境的变化状况。水生态修复是一个漫长的动态过程，需要一种能够实时反映水生态环境健康状况及修复效果的理论技术和方法。本文在综述近几年水生态环境健康评价方法的基础上，提出对鱼类运动行为进行定性与量化，并以鱼类运动行为响应指标和鱼类敏感性水质指标作为富营养化水体的水生态修复效果评价指标，制定一套更加符合水生态环境实际情况的、有效的和可操作性强的水生态修复效果评价指标体系，为水生态环境的预警和修复效果评价提供科学参考依据。

关键词

水生态环境健康，鱼类运动行为响应指标，鱼类敏感性水质指标，实时，评价方法

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

水生态环境健康评价方法除了通过对水域的水质进行监测外，还可利用对水生生物的生理、行为响应的监测来对水环境污染状况进行监测和评价。水生态修复是一个漫长的动态过程，常用的水生态环境健康状况评价方法是根据水体水质指标情况进行的综合评价。一般情况下，研究所选取的评价指标反映的是研究期间的实际情况，很难持续反映水体生态环境的真实状况，因此能够实时反映水生态环境健康状况及修复效果的理论技术和方法研究成为水生态环境健康评价的研究焦点。

目前，国内用于水生态环境健康评价的方法主要有两种：指标体系法和指示物种法[1]。指标体系法是目前最常用、研究成果最多的一种方法。其所用到的指标多元化，主要有物理化学、生态学以及社会、经济等指标，评价指标一般结合研究水域当时的实际情况进行选取。指示物种法是根据生物或者植物结构群落的完整性来反映水生态环境健康状况的一种定量分析方法。

2. 指标体系法

指标体系法是根据水生态系统的特征和服务功能，综合物理、化学、生物甚至社会经济指标构建的指标体系，通过采用数学方法来评价水生态环境的健康状况。我国目前对水生态修复效果评价指标体系的应用研究主要集中在两个方面：一方面是采用水质指标评价体系对已实施的生态修复工程进行评价分析，另一方面是采用综合评价指标体系对受损水生态系统的修复效果进行评估[2]。

2.1. 水质指标评价体系法

水质指标评价体系法主要通过某种数学方法及技术手段，对区域水环境质量进行分析及定量描述。目前采用的评价方法主要有污染指数评价法、层次分析评价法、主要成份分析评价法、综合水质指数法、投影寻踪模型法、物元可拓评价法、模糊数学评价法、灰色系统评价法和人工神经网络法等[3]。方东(2001)

等人选取水质化学指标(透明度、总氮、总磷、高锰酸盐指数、悬浮物和叶绿素 Chl-a)、水生生物指标(生物优势种和生物量)、多样性指数等三类指标,对玄武湖水环境污染工程治理的效果进行评价[4]。朱浩(2010)等人选用总氮、总磷、硝氮、亚硝氮和叶绿素 Chl-a 等水质指标对大莲湖水生态修复工程在完工半年后的水质变化情况进行评价,结果表明水质得到明显改善[5];王敏(2012)等人选用 pH 值、溶解氧、电导率、溶解性总固体、盐度、COD、BOD₅、氨氮、总氮、总磷、氯化物、总悬浮固体等 12 项水质理化指标和 Cr、Cd、Zn、Pb 和 Cu 等 5 种重金属指标对天津市大沽排河河道生态修复示范工程的修复效果和生态效应进行综合评价[6]。

2.2. 综合评价指标体系法

综合评价指标法是指根据水生态系统的具体实际情况采取相应的评价指标对水生态修复效果进行的综合评价,是一种将人类健康、社会、经济等多种指标相结合构成的综合指标体系,目前已取得了许多的研究成果。郝利霞(2014)等人以海河流域 73 个采样点的水质、营养盐和底栖动物为评价指标,从化学完整性和生物完整性两方面综合评价了流域内河流生态系统健康[1]。朱晓博(2015)针对城市河流生态功能、修复措施和生产效益方面提出了城市河流生态修复效果的“环境效应-价值效益”综合评价体系与各评价指标的计算方法,二者结合可以更加准确的反映城市河流生态修复的效果[7]。张瑞(2017)等人结合再生水补给型城市河湖的特点,构建了 3 个系统、7 个准则和 19 个指标的再生水补给型城市河湖生态修复技术评价指标体系,并采用群组决策的层次分析法确定各指标的权重[8]。郭娜(2017)构建了基于物理因子、水质因子、生物因子、功能因子四个维度 44 个综合指标的模型假设,构建了基于河流生物与功能的河流健康评价模型,并对辽河保护区生态系统健康状况进行评价[9]。于鲁冀(2018)等人采用频率统计法和理论分析法,构建水生态修复效果评估指标层次结构模型并采用群组决策层次分析法来确定评价指标的权重,对评估指标的指数进行分级和标准化处理,制定了河流生态系统修复效果的评价标准[10]。

2.3. 两种评价体系的优缺点

1) 水质指标评价体系法的优缺点

水质指标评价体系法通过对水域的各水质指标进行监测分析,并根据水质指标对水生态健康进行评价,评价结果较准确。但由于监测的水质指标只代表当时的水质状况,而水环境是一个变化的动态系统,随着时间、气温以及气候等条件的变化而发生改变。因此,要想获得一个连续、实时且准确的评价结果,需要花费大量的人力、物力和时间才能实现。

2) 综合评价指标体系法的优缺点

综合指标体系法从多个角度和层面出发,选取具有代表性的评价指标对水生态健康进行综合评价,然后再通过数学方法来获得各个指标的权重值并将各个指标的得分进行综合评价,最终获得半定量或定性的生态系统健康评价结果。因此,获取各个指标的权重是综合评价指标体系法的研究重点。确定指标权重的数学方法包括层次分析法、灰色聚类法、综合指数法、模糊综合法和熵值法等,各种评价方法都具有优缺点。如常用的层次分析法是将评价指标逐层结合,充分考虑同层指标之间、上下层指标之间的相互关系,使得多种指标之间有序化。但需要对各个指标进行打分,且由于评价者的学识背景、观点和方法等主观因素,存在评分差异,不同的评价者评价的结果出现偏差较大。与层次分析法相反,灰色聚类法不存在主观因素成份,其通过计算来获得唯一的结果,结论明确[11]。但在评价指标较多的情况下,计算过程较为复杂,耗时长,需要编写计算程序才能计算完成。

上述两种体系法均具有各自的优缺点,因此一种具有两者优势且能够避免其缺点的理论及技术方法

的研究成为水生态健康评价的研究方向。近几年来,水生态环境健康评价方法逐渐从指标评价转向指示物种评价。

3. 指示物种法

指示物种法是通过监测水中某种指示物种对环境胁迫下的响应来实现间接评价水生态系统健康状况的一种方法。目前应用最广泛的是生物完整性指数法(Index of biological integrity, 简称 IBI),也是研究者最常用来评价水生态健康状况的一种重要方法。

3.1. 生物完整性指数法 IBI

该方法可采用的指示生物广泛,一般选择的指示物种主要有鱼类、底栖无脊椎动物、藻类、浮游生物、高等维管束植物和微生物等,可根据物种的种群情况进行选择。目前,国内外研究的指示物种主要以鱼类、底栖无脊椎动物和藻类为主,其中鱼类是最早被选做水生态环境健康评价的一种指示物种。鱼类完整性指数法(Fish-index of biological integrity, 简称 F-IBI)是国内外研究水生态环境健康最为常用的一种方法[12]。张豫(2014)等人通过对常用的 21 个鱼类完整性指标进行了筛选,构建了东江干流(惠州段)鱼类完整性指标体系,并采用该体系对 15 个取样点的健康状况进行了评价[13]。张赛赛(2015)等人应用鱼类完整性指数 F-IBI 体系评价浑河河流的生态健康状况,并从 23 个候选指标中筛选出适用于浑河流域包括总渔获量、雅罗鱼亚科种类所占比例、鳅科鱼类所占比例、经济鱼类所占比例、耐污物种所占比例和广布种所占比例共 6 个指标的 F-IBI 体系[14]。余景(2017)等人构建了以鱼类种类数量、石首鱼科鱼类种类数比例、鲷科鱼类种类数比例、浮游生物食性鱼类种类数比例、底栖生物食性鱼类种类数比例和底栖-游泳生物食性鱼类种类数比例 6 个指标的鹅公湾 F-IBI 评价体系,并对深圳鹅公湾渔业水域的生态环境健康状况进行了评价[15]。黄凯(2018)构建了以鱼类物种数、个体数、Shannon-Wiener 多样性指数、底栖食性鱼类个体百分比、耐受性鱼类个体百分比、产黏性卵鱼类个体百分比、产沉性卵鱼类个体百分比、上层鱼类个体百分比和广布种鱼类个体百分比等 9 个指标的 F-IBI 评价体系,并对滦河流域生态系统健康进行了评价[16]。刘明典(2018)等人采用 Karr 提出的、Fausch 等修订的 12 个指标体系水质健康评价方法,建立了适合长江中上游干流及附属湖泊的 F-IBI 指标体系,并对长江上游和中游的鱼类完整性进行了评价[17]。

鱼类完整性指数法是针对鱼类种类、个数所占比例进行的一种评价方法,该方法需要长期的采样分析和数据监测,研究周期长,需要大量数据材料才能完成。因此,能够快速且实时地对水生态环境做出评价是水生态环境健康评价研究工作的发展方向。

3.2. 鱼类生理行为响应在水生态环境健康评价中的应用

在很多水污染事件中,最早发现水体受污染的是生活在水域附近的渔民,这些水污染事件也说明了在监测条件和水平有限情况下,鱼类比环境监测能更快速有效、真实地反映水体当时的环境状况。通过对鱼类的生理、行为响应进行监测来对水生态健康状况进行评价和预警是目前国内外环境科学的一个研究热点,鱼类在不同环境因子发生变化时的行为响应也相继得到了广泛研究。胡占英(2014)等人以斑马鱼胚胎和幼鱼为指标生物,研究长春新碱对斑马鱼神经发育和行为的影响及其毒性的分子机制,发现长春新碱具有多巴胺能神经毒性并且会导致幼鱼间脑及下丘脑多巴胺能神经元细胞丢失[18]。孙欣欣(2014)以斑马鱼为指示生物,研究三种氯酚染毒物质对斑马鱼的毒性作用和对生理生化影响[19]。张晓婵(2016)等人对以食蚊鱼为研究对象,通过研究城市废水对食蚊鱼器官组织结构的影响来评价广州河涌污染现状及对食蚊鱼的毒性效应[20]。

此外, 通过鱼的游泳行为、正趋流性和选择行为来对水环境状况进行评价也相继得到应用。在洁净的流动水体环境中, 鱼类总会逆水而上, 喜好向水流清澈的地方游动, 鱼类的这种特性被称为正趋性或趋清性。而当水质遭遇破坏时, 鱼类的这种特性就会被打破。水体中污染物可以影响到鱼类的游泳能力, 鱼类如果表现出逃避行为, 且大多数都集中在洁净水的一端, 则表明水质遭受到污染。因此可通过连续测定鱼类的位置变化, 通过比较鱼类的当前运动轨迹与历史运动轨迹, 观察鱼类的行为是否发生变化, 从而达到监测水体污染的目的。

倪芳(2014)以斑马鱼、红鲤鱼和青鳉鱼为受试生物, 在突发性水污染事故中暴露的污染物五氯酚、苯酚和土霉素, 通过急性毒性实验和水质在线监测实验分析了不同污染物对鱼类运动行为的影响[21]。周斯芸(2014)以斑马鱼、红鲤鱼和青鳉鱼为受试生物研究了单一化学污染物 Cd^{2+} 、十二烷基苯磺酸钠、四溴双酚 A 对鱼类的毒性效应[22]。果佳良(2015)提出了一种基于鱼类三维运动轨迹的生物式水质异常监测方法, 通过计算机双目视觉获取可以反映水质状况的鱼类三维行为运动特征参数, 建立样本集并获得基于 BP 神经网络的水质异常监测模型, 利用模型对鱼类行为特征参数进行分析评价, 间接监测水质的异常状况[23]。程淑红(2015)等人利用鱼类运动行为对异常水质进行评价, 对水环境因子与鱼类运动特征参数之间主要相关性的因子进行了研究[24]。李汝(2015)通过采用水质生物毒性监测仪对斑马鱼在受试水环境中的运动行为指标进行实时监测, 将斑马鱼的运动行为转换为量化的试验数值, 进而利用斑马鱼的运动行为特征反应水质的健康状况[25]。杜娟娟(2016)以斑马鱼为指示生物, 研究在苯酚胁迫下斑马鱼的运动行为变化以及与毒理学指标之间的相关性, 结果说明斑马鱼的运动行为强度与体内酶活性之间存在明显剂量效应关系[26]。梁鸿(2016)等人采用生物行为传感器监测青鳉鱼在重金属铜暴露下的行为数据, 利用重金属作用下青鳉鱼的行为变化来研究重金属环境胁迫导致的生物行为响应机制, 得到重金属暴露下生物行为的实时变化过程和趋势[27]。李雷华(2017)对水质与鱼群运动行为特征之间的相关性进行了多方面的研究, 研究结果表明基于方差、分布面积和中心距指数三个特征参数作为水质评价因子建立的模型具有高效、稳健的识别效果[28]。蒋瑞卿(2018)以鱼类为试验对象, 通过改变水中氰化物的浓度来观察鱼类的异常行为及死亡现象[29]。

这些通过监测鱼类的形态、生理以及运动行为达到水质评价与预警的方法仍然存在一定的局限性。比如说指示鱼类的选择和驯化、指示鱼类灵敏性指标的筛选、指标的采集技术和分析方法等。因此, 除了需要结合现代信息技术与传统理化分析技术外, 还需要充分掌握鱼类运动行为学、毒理学和生理学, 从而才能对水质进行更全面、准确的监测及评估。

4. 鱼类运动行为响应指标在水生态健康评价中的应用

随着水生态修复技术的不断提高和逐步实施, 江河湖库的水生态系统状况、恢复程度及发展方向也在不断地发生改变, 因此需要一个科学、准确的评价体系来评价生态修复成果, 并根据实际情况进一步修正、优化和调整生态修复方案以保证生态修复工程的高效实施。水生态系统中存活有大型无脊椎动物、鱼类、游动物等水生生物, 所以要对河流湖泊的水生态系统功能质量进行有效评价, 水生生物应作为湖泊生态修复评价体系中的重要指标组成[30]。鱼类作为水生生物的高级类群, 位于食物链的上方, 比其它生物更能客观反映水体环境状况, 其在水体中的行为响应及栖息地的变化情况能够更好地反映出水生态修复效果, 具有很好的代表性。目前, 鱼类监测已成为评价水生态健康的重要手段, 通过监测鱼类的行为响应来对水生态环境的健康状况进行评价成为国内外的研究热点。利用鱼类由于受水体污染物的影响而产生的各种行为响应来评价水体的污染状况已成为水质进行监测和和水生态修复效果评价的重要手段和方法。

根据鱼类的行为响应变化可直接判断水中污染物对水生生物的潜在影响、实际毒性, 由此对水体环

境的质量做出评价与预测。因此,通过采用鱼类运动行为响应指标来评价水体的水质状况,能更真实、实时地反映水生态环境健康状况。目前,国内专门针对水生生态因子对鱼类运动行为影响的定量和实证性的研究成果相对较少。结合水生生态因子对鱼类运动行为产生影响的生物学和生态学资料来对水生态环境状况做出合理性评价是水生态环境健康评价的一项重要工作内容。以鱼类运动行为响应指标(如鱼类离污染源距离、鱼类离水面距离和鱼类游泳速度)和鱼类敏感性水质指标(如溶解氧 DO、铜绿微囊藻毒素 MC-LR 和非离子氨 NH_3 等指标)作为富营养化水体的水生生态修复效果评价指标,制定一套更加符合水生态环境实际情况的、有效的、可操作性强的水生生态修复效果评价指标体系,为水生生态修复相关研究工作提供借鉴,为水生态环境预警和修复效果评价提供参考依据。

基金项目

广西自然科学基金联合资助培育项目(鱼类在水质演变过程中的运动行为响应模式研究 2019JJA160149); 广西自然科学基金(2018GXNSFAA281022)。

参考文献

- [1] 郝利霞,孙然好,陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2014(10): 3692-3701.
- [2] 曹欠欠,王兴科. 河流生态修复效果评价指标体系研究[J]. 环保科技, 2014, 20(2): 24-30.
- [3] 刘宇麟. 水环境质量评价方法研究现状与前沿进展[J]. 资源节约与环保, 2016(11): 75-76.
- [4] 方东,许建华,徐实. 生态工程治理玄武湖水污染效果的监测与评价[J]. 环境监测管理与技术, 2001, 13(6): 36-38.
- [5] 朱浩,刘兴国,裴恩乐,等. 大莲湖生态修复工程对水质影响的研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(8): 1790-1794.
- [6] 王敏,唐景春,朱文英,等. 大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4535-4543.
- [7] 朱晓博. 城市河流生态修复效果评价——以北京市永定河为例[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [8] 张瑞,刘操,顾永钢,等. 基于层次分析法的再生水补给型城市河湖水生态修复技术评价指标体系及其应用[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3545-3554.
- [9] 郭娜. 河流生态系统健康指标体系与评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2017.
- [10] 于鲁冀,王莉,徐艳红,等. 一种河流生态修复效果评估方法[P]. 中国专利, ZL201510392662. 2018-05-01. <http://cpr.s.patentstar.com.cn/Search/Detail?ANE=9IAB9FHD5DBA9GCE9FEB3DAA9CHD9DBE9EGD9EABCHGA2AAA>
- [11] 李晴新. 天津及附近海域海岸带生态系统健康评价研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2010.
- [12] 武晶. 应用鱼类完整性指数(F-IBI)评价小清河健康状况[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.
- [13] 张豫,蔡德所,陆永求,等. 基于鱼类完整性指数的东江干流惠州段生态系统的健康评价[J]. 贵州农业科学, 2014(12): 183-190.
- [14] 张赛赛,高伟峰,孙诗萌,等. 基于鱼类生物完整性指数的浑河流域水生生态健康评价[J]. 环境科学研究, 2015, 28(10): 1570-1577.
- [15] 余景,赵漫,胡启伟,等. 基于鱼类生物完整性指数的深圳鹅公湾渔业水域健康评价[J]. 南方农业学报, 2017, 48(3): 524-531.
- [16] 黄凯,姚垚,王晓宁,等. 基于鱼类完整性指数的滦河流域生态系统健康评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 901-910.
- [17] 刘明典,陈大庆,段辛斌,等. 应用鱼类生物完整性指数评价长江中上游健康状况[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 1-6.
- [18] 胡占英,张靖溥. 长春新碱对斑马鱼神经发育和行为的影响[J]. 毒理学杂志, 2014, 28(2): 98-103.
- [19] 孙欣欣. 氯酚类物质对斑马鱼的毒性作用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- [20] 张晓婵,温茹淑,方展强. 广州河涌城市废水暴露对食蚊鱼器官组织结构的影响[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(2):

56-64.

- [21] 倪芳. 在线监测不同污染物对鱼类运动行为的影响[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [22] 周斯芸. 利用鱼类等水生生物进行毒性评价研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [23] 果佳良. 基于计算机视觉的鱼类三维行为监测研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [24] 程淑红, 刘洁, 李雷华. 基于鱼类运动行为的水质异常评价因子研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1759-1766.
- [25] 李汝. 基于斑马鱼行为学的水质监测预警技术试验研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2015.
- [26] 杜娟娟. 苯酚对斑马鱼行为学影响及毒理学效应研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [27] 梁鸿, 刘勇, 饶凯锋, 等. 水环境中重金属铜暴露下青鳉鱼的行为响应[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(6): 345-352.
- [28] 李雷华. 基于鱼群运动的异常水质监测[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [29] 蒋瑞卿. 生物监测在水质预警中的应用: 鱼类氰化物毒理试验[J]. 净水技术, 2018, 37(A1): 39-42.
- [30] Jeppsen, E., Noges, P., Davidson, T.A., *et al.* (2011) Zooplankton as Indicators in Lakes: A Scientific-Based Plea for Including Zooplankton in the Ecological Quality Assessment of Lakes According to the European Water Framework Directive (WFD). *Hydrobiologia*, **676**, 279-297. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0831-0>