

城镇水系统研究与应用

蒋涛, 孔令为, 许旭杨, 等. 浙北平原河网地区典型湖漾水生态健康评价体系构建[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 149–156.

JIANG T, KONG L W, XU X Y, et al. Construction of health evaluation system for aquatic ecosystem of typical lakes in the plain river network area of northern Zhejiang[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 149–156.

浙北平原河网地区典型湖漾水生态健康评价体系构建

蒋涛¹, 孔令为², 许旭杨¹, 张亚¹, 钱燕君^{3,*}, 丁琪琪¹, 王晓敏¹, 李欲如¹

(1. 浙江省环境科技有限公司, 浙江杭州 310000; 2. 西湖大学工学院, 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 浙江杭州 310024; 3. 衢州市生态环境局龙游分局, 浙江衢州 324400)

摘要 文章针对不同现状生境特征水生态系统缺乏差异性评价标准的需求, 选取浙江北部平原河网地区作为研究区域, 基于平原河网中的典型湖漾水生态系统功能结构、区域特征, 提出其水生态健康评价理论框架, 涵盖物理生境健康、水质健康、沉积物健康和水生生物群落健康 4 大要素, 涉及 13 项评价指标。遵循“以现行标准规范为先、以现有研究成果为鉴”的原则, 明确每项指标的评分标准, 采用综合评价法确定湖漾水生态健康评价等级, 构建了一套科学适用的典型湖漾水生态健康评价体系, 以期为浙北地区平原河网中典型湖漾的水生态系统健康评价与管理提供理论支撑。

关键词 典型湖漾 水生态系统 健康评价 指标体系 平原河网

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)07-0149-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.018

Construction of Health Evaluation System for Aquatic Ecosystem of Typical Lakes in the Plain River Network Area of Northern Zhejiang

JIANG Tao¹, KONG Lingwei², XU Xuyang¹, ZHANG Ya¹, QIAN Yanjun^{3,*}, DING Qiqi¹, WANG Xiaomin¹, LI Yuru¹

(1. Zhejiang Environment Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. Key Laboratory of Coastal Environmental and Resources of Zhejiang Province, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310024, China;

3. Quzhou Municipal Ecology and Environment Bureau Longyou Branch, Quzhou 324400, China)

Abstract In response to the lack of different evaluation standards for aquatic ecosystems characterized by different current habitats, this paper selected the plains river network area in northern Zhejiang as the study area. Based on the functional structure and regional characteristics of typical lake aquatic ecosystems in the plains river network, a theoretical framework for evaluating the health of aquatic ecosystems was proposed, which covered four major elements, namely, the health of physical habitats, water quality, sediments, and aquatic biomes, and involved 13 evaluation indices. Following the principle of "taking the current standards and norms as the first, taking the existing research results as the reference", the scoring standard of each index was clarified. The comprehensive evaluation method was used to determine the aquatic ecological health evaluation level of lakes, and a set of scientific and applicable aquatic ecological health evaluation system of typical lakes was constructed, in order to provide theoretical support for the evaluation and management of the aquatic ecosystem health of typical lakes in the plains river network in northern part of Zhejiang Province.

Keywords typical lake aquatic ecosystem health evaluation index system plain river network area

[收稿日期] 2023-07-27

[基金项目] 浙江省生态环境科研和成果推广项目(2021HT0052); 浙江省“领雁”研发攻关计划资助(2023C03132)

[作者简介] 蒋涛(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为水环境治理与水生生态修复及保护, E-mail: jiangtao1@zjshjkj.com。

[通信作者] 钱燕君(1983—), 女, 工程师, 研究方向为水环境治理, E-mail: 181925059@qq.com。

现阶段我国水生态环境保护面临的结构性、根源性、趋势性压力尚未得到根本缓解,水生态破坏现象仍十分普遍。部分河湖水生态系统失衡、蓝藻水华频发、生物多样性显著下降,水生态环境保护不平衡、不协调问题仍较为突出。国际上近几十年来在水生态环境保护 and 治理的实践表明,水生态健康评价是开展水生态系统健康管理的重要基础,评价结果可诊断水生态系统是否存在及存在何种问题,进而促使相关部门制订合理的解决方案。我国大量河流、湖泊等水生态系统面临不同程度的退化,开展水生态健康评价研究,对于发展完善我国水生态环境保护目标管理技术体系具有重要意义。

水生态健康评价的基础是确定评价指标体系。我国流域水生态健康评价研究相对滞后,大多方法沿用国外已有的评价体系,但直接套用国外评价体系存在难以匹配我国特有的水生态现状问题。2019年,张远^[1]在借鉴国内外水生态系统健康评价方法基础上,以松花江、辽河、海河、淮河、黑河、东江、太湖等重要流域以及巢湖、滇池、洱海等重要水体为例,提出了我国重要水域水生态系统健康综合评价体系,为我国流域水生态系统健康评价工作的开展提供了一定的基础依据与技术参考。此次全国重点流域水体水生态系统健康评价结果显示,水生生物退化严重、基本水体理化条件相对较好、营养盐污染较为普遍。该项评价体系中未涉及物理生境条件评价,而物理生境条件的变化可能是潜在影响水生生物群落退化的重要原因^[1]。

目前国内已开展的水生态健康评价研究对象主要分成河流、水库、湖泊3种不同水体类型,对于平原河网、山溪河流、大型湖泊、小型湖漾等不同生境特征的水生态系统尚缺乏差异性的评价标准。近年来,浙江北部地区河流及湖漾水质下降、富营养化加剧、生物多样性减少、生境退化等一系列环境问题不断出现^[2-3]。本文以浙江北部平原河网地区为研究区域,针对平原河网中的典型湖漾水生态系统,提出基于其功能结构、区域特征的水生态健康评价理论,构建一套科学适用的典型湖漾水生态健康评价体系,以期对浙江北部平原河网中的典型湖漾水生态系统健康管理提供理论支撑。

1 研究区域特征

浙江省地理特征明显(图1),浙南为山区,浙东

沿海为丘陵,浙北地区则为水系密布的冲击平原——杭嘉湖平原及宁绍平原。浙北地区淡水资源丰富,地势平坦,河网密布,航运发达,湖漾众多,水流流向、流态不定,是我国经济发展较为迅速的地区。区域人口密集,是典型的平原河网区与水产养殖基地,工农业和渔业发达,湖漾多用于围圩开发,盛产鱼、虾、蟹、莲、菱、芡等,素有“鱼米之乡”之称。湖漾是重要的自然水生态系统,在蓄水、排水、保水、净水等功能方面均发挥着重要作用^[2]。浙北地区平原河网中的湖漾水生态系统与山溪河流、峡谷河流等有着显著的不同。



注:地图数据来源于国家地理信息公共服务平台。

图1 浙江省地形概况图

Fig. 1 Topographic Profile Map of Zhejiang Province

浙北地区平原河网中的典型湖漾具有以下特征:(1)受城市发展影响,大部分湖漾多有岸线改造成硬质护岸的现象;(2)受串连河流影响,自然湖岸易受水流、雨水等冲刷;(3)受潮汐、降雨等因素影响,水位波动较大;(4)受农业和渔业围圩开发影响,水体易受养殖废水污染,富营养化现象普遍;(5)受垂向混合和其他水动力扰动影响,浅水湖漾水土界面常处于不稳定状态,物质交换强烈,底部沉积物内源物质的释放易导致上覆水污染;(6)受气候条件影响,藻类等浮游生物极易生长,存在“水华”暴发风险。

2 典型湖漾水生态健康评价体系构建

2.1 评价体系构建方法

水生态系统健康评价常用方法包括指示物种法和

指标体系法。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。指示物种法在选择指示物种时,根据不同的关系选择不同规模、不同组织层次的种群,能够粗略得评价湖漾生态系统,但不能全面反映生态系统的健康情况。指标体系法是通过选取具有完整性、代表性、可操作性的评价指标,采用适当的方法确定各指标权重后构建综合的评价体系。指标体系法能够综合反映水生态系统存在的问题,具有全面性、易量化的优势,在当前水生态系统健康评价研究中被广泛应用^[4-8]。本研究按照要素层和指标层等不同层次构建典型湖漾水生态健康评价的指标体系。

2.2 评价要素层确立

从组成要素角度出发,湖漾是一个以湖岸为边

界、以水体为载体、以沉积物为主要储存库、以水生生物为核心的自然生态综合体,如图2所示。在湖漾水生态系统中,岸线为水生生物提供物理生境,拦截来自陆地的部分污染物。湖水、沉积物及其所包含的各类物质为水生生物提供了生存必需的栖息地和营养。水生生物具有综合反映时间尺度上化学、生物和物理影响的能力,生物群落结构和功能能够反映各因素对水生态系统健康的干扰^[1]。因此,从系统要素完整性角度考虑,选择物理生境健康、水质健康、沉积物健康和水生生物健康为湖漾水生态健康评价的四大要素层,形成以水生态系统健康为核心,以水生生境保护、水环境质量保护、水资源保障为支撑的评价体系。

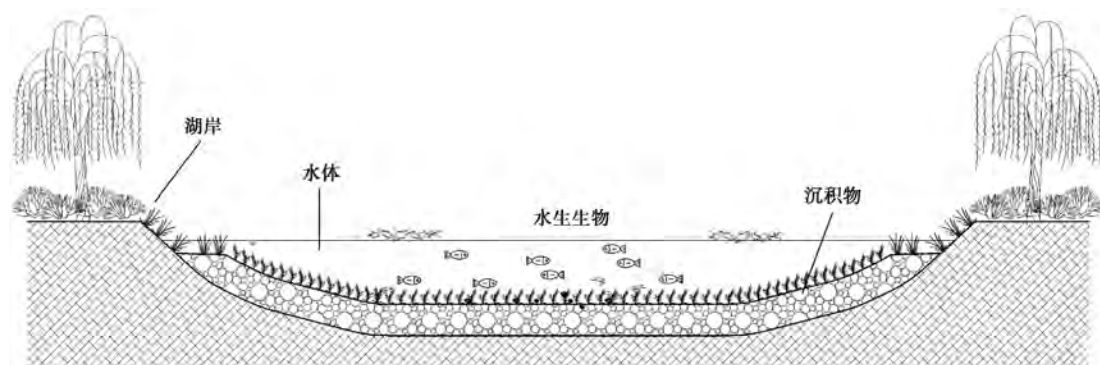


图2 湖漾水生态系统组成要素

Fig. 2 Components of the Lakes Water Ecosystem

2.3 评价指标层确立

2.3.1 物理生境健康评价指标

湖漾岸线生态状况是水生生态系统和水陆过渡带完整性程度的综合表征,其生态性、稳定性及水位的变化可直观反映湖漾水生生物栖息地的物理生境变化。自然状态下的湖岸线具有较好的边缘效应,为保护生物多样性创造良好的条件,具有减少水土流失、缓冲地表径流、拦截面源污染、提供生物栖息地等多重作用。

近年来,浙北地区为防洪防汛,对多条湖漾岸线进行了硬质护岸改造,在一定程度上改变了湖漾水文条件及水生生物的生存环境,造成岸线生态性破坏。同时,部分岸线由于植被覆盖缺乏、岸坡树根及土壤暴露、湖岸水力冲刷、湖岸坍塌等因素的综合影响^[9],造成岸线稳定性失衡。湖漾中适宜的水位能够保障初级生产力,有利于维持水生生物多样性和

生态系统稳定性。生态水位不足时,将会导致近岸基底暴露,水生生物生存空间锐减。

因此,将生态岸线指数、岸岸稳定性指数、基本生态水位满足程度等指标作为湖漾水生态物理生境健康的评价指标。

2.3.2 水质健康评价指标

水作为水生生物生活的载体,一方面为其提供生存所必需的氧气及营养物质,另一方面也会因纳入的各类污染物对其造成一定的毒害。特别是在人口稠密、小型工业企业集聚、农业种植和水产养殖发达的浙北平原河网地区,除了长期存在溶解氧不足、氮磷污染、富营养化等问题外,近年来逐渐暴露的抗生素污染物问题也亟需引起关注。例如,孙秋根^[10]在太湖苕溪流域底泥中发现典型抗生素的检出率均大于70%,四环素类抗生素(TCs)是该流域主要的抗生素污染种类,其中土霉素(OTC)(0.7~276.6

ng/g)是主要污染物。盛鹏程等^[11]对苕溪中的抗生素评估发现诺氟沙星(NOR)、盐酸环丙沙星(CIP)和氧氟沙星(OFLX)属于高风险,其中东苕溪抗生素总量平均值略高于西苕溪,这可能与河流周围的养殖存在一定联系。养殖废水中未经有效处理的抗生素排入湖漾后,会在水体中长期残留,并在生物体中富集,对湖漾水生态健康造成长远影响。

因此,针对浙北平原河网地区水环境特征,将溶解氧、富营养化指数、抗生素风险指数作为湖漾水质健康评价的3个指向性指标。

2.3.3 沉积物健康评价指标

沉积物是湖漾生态环境不可或缺的组成部分,氮、磷、有机质(OM)等物质会随颗粒物在沉积物中积累,同时又会在水体流动、温度波动等环境因素作用下被再次释放至水体中。对于水流波动大、垂向扰动明显、水土界面不稳定的浙北平原河网,沉积物是氮、磷及OM的“汇”和“源”,已成为湖漾水体富营养化的重要驱动因素^[12]。

因此,将总氮(TN)、总磷(TP)和OM作为沉积物健康的主要评价指标。

2.3.4 水生生物健康评价指标

大型水生植物、浮游植物、浮游动物、大型底栖无脊椎动物、鱼类等不同水生生物群落对环境变化具有不同的响应机制。例如,介于水-泥、水-气及水-陆界面的大型水生植物对生态系统循环起着重要的调节作用,具有良好的净化效果,是湖漾水生态健康的基础。浮游植物中的浮游藻类启动了湖漾水生态系统中的食物网,在湖漾水生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中有着重要的作用。浮游动物的丰度、数量及群落结构能够反映湖漾生境的适宜程度。大型底栖无脊椎动物中的耐污物种常作为水体污染监测及其受人类活动干扰的重要指示类群。同时以植物性饵料和动物性饵料为食的杂食性鱼类,可至少从两个营养级中获取食物来源,通过多个营养级影响水生态系统的结构与功能^[13]。考虑到目前大型水生植物监测方案及监测手段的复杂性,在人力、时间及经费等方面都有较高的要求,可能给后续长期监测跟踪评价带来一定的难度。同时,考虑到现阶段在大型水生植物指标的健康等级划分上,国内外尚缺乏成熟、可靠的理论依据,因而本文暂不将大型水生植物指标纳入本评价指标体系。

因此,将浮游植物多样性指数、浮游动物多样性

指数、大型底栖无脊椎动物耐污能力及杂食性鱼类个体数百分比4个指标作为湖漾水生生物健康的评价指标。

2.3.5 各指标计算方法

(1)生态岸线指数(C1)

生态岸线指数指没有经过人为干扰的自然岸线和经治理修复后具有自然岸线形态和生态功能的生态堤岸长度之和占评价岸线总长度的比例。此指标参照《浙江省河湖健康及水生态健康评价指南(试行)》,根据护岸结构、建造材料和植被覆盖率等状况对岸线类型进行赋分(表1),并基于式(1)计算岸线生态型指数。

表1 岸线类型赋分标准

Tab. 1 Shoreline Ecological Index Assignment Criteria

岸线类型	赋分
自然岸线	100
人工植被护坡,抛石、干砌石等天然材料护脚	80
抛石、堆石、干砌石等天然材料护坡	60
人工植被护坡,沿岸水域挺水植被带,浆砌石、混凝土等硬化材料护脚	60
人工植被护坡,浆砌石、混凝土等硬化材料护脚	40
浆砌石、混凝土等硬化材料护坡	0

根据各类型岸线长度占比,按式(1)计算指标得分。

$$I_{be} = \sum P_{bi} \times L_{bi}/L \quad (1)$$

其中: I_{be} ——生态岸线指数;

P_{bi} —— i 类型岸线分值;

L_{bi} —— i 类型岸线长度,km;

L ——评估岸线总长度,km。

(2)湖岸稳定性指数(C2)

湖岸稳定性评估的赋分标准参照胡国安^[14]的BKS赋分方法,如表2所示。

表2 湖岸稳定性评估赋分标准

Tab. 2 Lakeshore Stability Assessment Assignment Criteria

岸坡特征	稳定	基本稳定	次不稳定	不稳定
分值	[80,100]	[50,80)	[20,50)	[0,20)
斜坡倾角/(°)	<15	<30	<45	<60
植被覆盖率	>75%	>50%	>25%	>0
斜坡高度/m	<1	<2	<3	<5
基质(类别)	基岩	岩土河岸	黏土河岸	非黏土河岸
湖岸冲刷状况	无冲刷	轻度	中度	重度

湖岸稳定性指标表达式如式(2)。

$$B_{Ksr} = \frac{S_{Ar} + S_{Cr} + S_{Hr} + S_{Mr} + S_{Tr}}{5} \quad (2)$$

其中: B_{Ksr} ——岸坡稳定性指标赋分;

S_{Ar} ——倾角分值;

S_{Cr} ——植被覆盖率分值;

S_{Hr} ——斜坡高度分值;

S_{Mr} ——基质分值;

S_{Tr} ——湖岸冲刷状况分值。

(3) 基本生态水位满足程度(C3)

基本生态水位满足程度的计算方法如式(3)。

$$Q_r = \frac{D_m}{D} \times 100\% \quad (3)$$

其中: Q_r ——基本生态水位满足程度;

D_m ——评价年生态水位满足天数,d;

D ——评价总天数,d,周期为完整的日历年。

(4) 溶解氧(C4)

溶解氧指标采用湖漾每月溶解氧的月平均值,分别求出汛期及非汛期的溶解氧均值并赋分,取最低赋分作为该指标的分值^[15]。《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002)中指出等于及优于Ⅲ类的水质能够满足鱼类生物的基本生存要求,因此选择溶解氧的Ⅲ类限值(5 mg/L)为基点。

(5) 富营养化指数(C5)

中国环境监测总站《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中的综合营养状态指数(TLI),它是一个综合指标,包含多个营养物参数,能够较好反映湖漾富营养化状况。

(6) 抗生素风险指数(C6)

抗生素风险指数指标参照风险熵值法(R_Q)评估^[16]。 R_Q 计算公式如式(4)~式(5)。

$$R_Q = \frac{\sum M_{ECi} / P_{NECi}}{n} \quad (4)$$

$$P_{NECi} = \frac{E_{CS0}^i (L_{CS0}^i)}{A_{Fi}} \quad (5)$$

其中: M_{ECi} ——第 i 种抗生素实测质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

P_{NECi} ——第 i 中抗生素无效应质量浓度,

$\mu\text{g/L}$;

E_{CS0}^i, L_{CS0}^i ——第 i 种抗生素半数最大效应浓度、半数致死质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

A_{Fi} ——第 i 种抗生素的评估因子。

E_{CS0}^i, L_{CS0}^i 与 A_{Fi} 等毒理数据参照美国 ECOSAR (<https://cfpub.epa.gov/ecotox/>) 和其他相关文献^[16]。

(7) TN、TP、OM(C7~C9)

参照迟明慧等^[3]的沉积物含量赋值方法,将 C7~C9 按照沉积物中 TN、TP、OM 含量进行赋分。

(8) 浮游植物多样性指数(C10)

浮游植物多样性指数采用香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener)进行计算,利用浮游植物定量监测数据,从物种多样性角度对湖泊水环境质量进行评价。

(9) 浮游动物多样性指数(C11)

浮游动物多样性指数采用 Shannon-Wiener 进行计算,利用浮游动物定量监测数据,从物种多样性角度对湖泊水环境质量进行评价。

(10) 大型底栖无脊椎动物耐污能力(C12)

大型底栖无脊椎动物耐污能力采用 Goodnight-Whitley 修正指数(GBI 指数)。GBI 指数表示除寡毛类外的底栖动物在总样品中所占的比例,能够较好反映大型底栖无脊椎动物的结构组成变化,对磷污染的水体有较好的指示作用^[17]。

(11) 杂食性鱼类个体数百分比(C13)

杂食性鱼类个体数百分比按照杂食性鱼类在鱼类样品中的个体百分比进行计算,对湖漾的富营养化程度有重要的指示作用^[13]。

2.4 评价指标体系建立

综上所述,针对浙北地区平原河网中典型湖漾水生态系统结构和功能特征,基于物理生境、水质、沉积物和水生生物 4 个方面,选取引导性强、易获取且易于推广的评价指标,构建典型湖漾水生态健康评价指标体系,体系构建具体步骤如下。

(1) 层次划分

对评价系统进行层次划分,确立目标层、要素层和指标层。将目标层 A 划分为若干个要素 $B_i, i=1, 2, 3, 4$, 即式(6)。要素 B_i 包含 m 个指标, m 的具体数值由 i 要素层下的指标数决定,如式(7)。

$$A = \{B_1, B_2, B_3, B_4\} \quad (6)$$

$$B_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{im}\} \quad (7)$$

其中: C_{im} ——第 i 要素层下的第 m 个指标。

(2) 权重确定

各要素层指标权重参考《河湖健康评价指南(试行)》《浙江省河湖健康及水生态健康评价指南(试行)》等文件确定。

(3) 结果计算

首先根据调查统计或实地观测结果,对照各指标赋分标准计算获得各指标的评价分值,再通过加权计算,将不同要素层、指标层对湖漾水生态健康状况的影响效果进行综合评价,综合得分越高,表征水

生态健康状况越好。

湖漾水生态健康状况的最终评价结果计算如式(8)。

$$R_{\text{H}} = \sum C_{im} \times F_{\text{Bim}} \quad (8)$$

其中: R_{H} ——湖漾水生态健康评价的最终评分结果;

F_{Bim} ——第 i 要素层下的第 m 个具体指标的权重。

浙北平原河网地区典型湖漾水生态健康评价指标体系如表 3 所示。

表 3 浙北地区典型湖漾水生态健康评价指标体系

Tab. 3 Evaluation Index System of Water Ecological Health for Typical Lake Slopes in Northern Zhejiang

目标层(A)	要素层(B)	指标层(C)	指标说明及计算方法	权重
浙北地区典型湖漾水生态健康状况	B1 物理生境	C1 生态岸线指数	生物栖息地质量优劣,由现场调查方法监测获得	0.06
		C2 湖岸稳定性指数	生物栖息地环境质量,由现场调查方法监测获得	0.06
		C3 基本生态水位满足程度	生物栖息条件,数据来自水文监测站日常监测	0.08
	B2 水质	C4 溶解氧	水体自净能力恢复的重要指标,由湖漾内点位监测获得	0.06
		C5 富营养化指数	富营养化状况,采用水体综合营养状态指数法	0.06
		C6 抗生素风险指数	水体抗生素污染状况,由湖漾内点位监测获得	0.08
	B3 沉积物	C7 TN	水体污染状况,由湖漾内点位监测获得	0.07
		C8 TP	水体污染状况,由湖漾内点位监测获得	0.07
		C9 OM	水体污染状况,由湖漾内点位监测获得	0.06
	B4 水生生物	C10 浮游植物多样性指数	浮游植物群落特征,采用 Shannon-Wiener 指数公式	0.1
		C11 浮游动物多样性指数	浮游动物群落特征,采用 Shannon-Wiener 指数公式	0.1
		C12 大型底栖无脊椎动物耐污能力	大型底栖无脊椎动物群落特征,采用 Goodnight-Whitley 修正指数公式	0.1
		C13 杂食性鱼类个体数百分比	群落中杂食性鱼类个体数的多少,由湖漾内点位监测获得	0.1

3 典型湖漾水生态健康评价标准设定

根据综合评估方法,将湖漾水生态健康评价标准分为 5 个等级,即:非常健康、健康、亚健康、不健康、疾病,其评分值分别为[100, 80)、[80, 60)、[60, 40)、[40, 20)、[20, 0)。

各项评价指标的赋分标准通过国内外研究成果调研、现状分析、参照对比、标准对照、专家咨询等方法确定,并遵循以下原则:首先,优先采用现行国家标准、相关地方标准、技术规范等;其次,借鉴国内外相关研究成果;最后,若均无明确数据,则采取查阅历史资料的方法、参考地区的发展规划值、典型河湖现状特征值、专家咨询等方法来确定。本研究最终提出的浙北地区平原河网中典型湖漾水生态健康评

价体系各指标赋分标准如表 4 所示,生态岸线指数按类型得分,其余指标采用线性插值法赋分。

4 结论

(1) 本文基于浙北地区平原河网中湖漾的特征,构建了一套适用于典型湖漾水生态健康状况评价的指标体系。该指标体系涵盖了物理生境健康、水质健康、沉积物健康和水生生物健康四大要素(一级指标),包含了从生态岸线指数到杂食性鱼类个体数百分比等 13 项具体指标(二级指标),形成了以水生态系统健康为核心,以水生生境保护、水环境质量保护、水资源保障为支撑的评价考核体系。

(2) 遵循“以现行标准规范为先、以现有研究成果为鉴”的原则,确定了 13 项评价指标的具体赋分

表 4 浙北地区典型湖漾水生态健康评价标准
Tab. 4 Evaluation Criteria for Water Ecological Health of Typical Lake Slopes in Northern Zhejiang

序号	指标	单位	指标得分					参考依据
			100 分	80 分	60 分	20 分	0 分	
1	生态岸线指数	/	100	80	60	20	0	a
2	湖岸稳定性指数	/	100	80	60	40	0	[14]
3	基本生态水位满足程度	/	≥95%	80%	75%	60%	<50%	a
4	溶解氧	mg/L	饱和率 90% (或≥7.5)	≥6	≥5	≥3	≥2	b
5	富营养化指数	/	<30	30~50	50~60	60~70	>70	c
6	抗生素风险指	/	≤0.1	0.1~0.2	0.2~0.6	0.6~0.8	≥1	[16]
7	TN	g/kg	<0.56	0.56~0.69	0.69~0.82	0.82~0.95	>0.95	[3]
8	TP	g/kg	<0.65	0.65~0.69	0.69~0.73	0.73~0.78	>0.78	[3]
9	OM	/	<1.86%	1.86%~2.90%	2.90%~3.94%	3.94%~4.97%	>4.97%	[3]
10	浮游植物多样性指数	/	>4.0	3.0~4.0	2.0~3.0	1.0~2.0	<1.0	[3]
11	浮游动物多样性指数	/	>3.0	2.5~3.0	1.5~2.5	1.0~1.5	<1.0	[18]
12	大型底栖无脊椎动物耐污能力	/	0.8~1	0.4~0.8	0.2~0.4	0.1~0.2	<0.1	[17]
13	杂食性鱼类个体数百分比	/	<35%	35%~40%	45%~50%	50%~65%	>65%	[13]

注:a 依据《浙江省河湖健康及水生态健康评价指南(试行)》;b 依据《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002);c 依据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》。

标准,并提出了典型湖漾水生态健康状况的 5 个等级划分标准,即:非常健康、健康、亚健康、不健康、疾病。

(3)本研究提出的典型湖漾水生态健康评价体系指标引导性强、易获取且便于推广,可为浙北平原河网地区湖漾水生态健康状况的长期监控与管理提供理论支撑和评价方法。

参考文献

[1] 张远. 中国重点流域水生态系统健康评价[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
ZHANG Y. Health assessment of water ecosystems in key river basins in China [M]. Beijing: Science Press, 2019.

[2] 华祖林, 阚丽景, 刘晓东, 等. 平原河网地区湖泊水生态系统评价指标体系的构建及应用[J]. 四川环境, 2013, 32(3): 85-90.
HUA Z L, KAN L J, LIU X D, et al. The establishment and application of the evaluation index system for the lake-water ecosystem in the plain network regions [J]. Sichuan Environment, 2013, 32(3): 85-90.

[3] 迟明慧, 马迎群, 赵艳民, 等. 嘉兴市北部湖荡区水生态系统健康评价[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(8): 177-184.
CHI M H, MA Y Q, ZHAO Y M, et al. Health status assessment of aquatic ecosystem in northern lake area of Jiaxing City [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43

(8):177-184.

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

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

[6] 张淑倩, 孔令阳, 邓绪伟, 等. 江汉湖群典型湖泊生态系统健康评价——以梁子湖、洪湖、长湖、斧头湖、武湖为例[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3613-3620.
ZHANG S Q, KONG L Y, DENG X W, et al. Assessment of ecosystem health of typical lake wetland in the Jiangnan lake group: A case study of Liangzi Lake, Honghu Lake, Changhu Lake, Futou Lake and Wuhu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9): 3613-3620.

[7] 毛旭锋, 崔丽娟, 张曼胤. 基于 PSR 模型的乌梁素海生态系统健康分区评价[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 950-958.
MAO X F, CUI L J, ZHANG M Y. A PSR-model-based regional health assessment of the Lake Wuliangsuhai [J]. Journal of Lake Science, 2013, 25(6): 950-958.

[8] 项颂, 庞燕, 侯泽英, 等. 基于熵值法的云南高原浅水湖泊水生态健康评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10): 2272-2282.
XIANG S, PANG Y, HOU Z Y, et al. Health evaluation of shallow lake aquatic ecosystem in Yunnan plateau based on entropy method [J]. Research of Environmental Sciences,

- 2020, 33(10): 2272–2282.
- [9] 霍荣荣. 河湖健康评价的理论与应用研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
- HUO R R. Theoretical and applied research on river and lake health assessment [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011.
- [10] 孙秋根. 太湖平原河网典型抗生素的时空分布和风险评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- SUN Q G. Spatial and temporal distribution and risk evaluation of typical antibiotics in the river network of Taihu Lake Plain [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [11] 盛鹏程, 徐磊, 林锋, 等. 浙江湖州苕溪底泥中抗生素残留分析研究[J]. 中国水产, 2021(1): 96–100.
- SHENG P C, XU L, LIN F, et al. Analysis of antibiotic residues in the sediment of Campsis Creek, Huzhou, Zhejiang[J]. China Aquaculture, 2021(1): 96–100.
- [12] 陈雷, 远野, 卢少勇, 等. 环太湖主要河流入出湖口表层沉积物污染特征研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 294–299.
- CHEN L, YUAN Y, LU S Y, et al. The analysis of pollutant characteristics in surface sediments of the stream inlets and outlets of the main rivers around Taihu Lake[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 294–299.
- [13] 蔡杏伟, 李为, 樊厚瑞, 等. 鱼类群落调控在浅水湖泊生态修复中的作用: 以傀儡湖为例[J]. 中国水产科学, 2021, 28(6): 737–742.
- CAI X W, LI W, FAN H R, et al. Role of fish community regulation in ecological restoration of shallow lakes: A case study of Puppet Lake[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(6): 737–742.
- [14] 胡国安. 平原河网区河流健康评估方法及应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- HU G A. River health assessment method and application in plains river network area [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [15] 闫永辉. 大凌河健康评估与问题诊断分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2013.
- YAN Y H. Health assessment and problem diagnosis analysis of Daling River [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2013.
- [16] 杨俊, 王汉欣, 吴韵斐, 等. 苏州市水环境中典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 359–368.
- YANG J, WANG H X, WU Y F, et al. Occurrence, distribution and risk assessment of typical antibiotics in the aquatic environment of Suzhou City [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 359–368.
- [17] 盛萧, 毛建忠, 曹然, 等. 基于5种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 75–82.
- SHENG X, MAO J Z, CAO R, et al. River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 75–82.
- [18] 褚克坚, 阚丽景, 华祖林, 等. 平原河网地区河流水生态评价指标体系构建及应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 138–144.
- CHU K J, KAN L J, HUA Z L, et al. Construction and application of an indicator system for assessment of river ecosystem in plain tributary networks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 138–144.

(上接第21页)

- [105] NOUHA K, KUMAR R S, BALASUBRAMANIAN S, et al. Critical review of EPS production, synthesis and composition for sludge flocculation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 66: 225–245. DOI: 10.1016/j.jes.2017.05.020.
- [106] ROMERO M, CARABELLI A, SWIFT M R, et al. Fluid dynamics and cell-bound Psl polysaccharide allows microplastic capture, aggregation and subsequent sedimentation by *Pseudomonas aeruginosa* in water [J]. Environmental Microbiology, 2022, 24(3): 1560–1572.
- [107] CUNHA C, SILVA L, PAULO J, et al. Microalgal-based biopolymer for nano- and microplastic removal: A possible biosolution for wastewater treatment [J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 10. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114385.
- [108] LIU S Y, LEUNG M M L, FANG J K H, et al. Engineering a microbial ‘trap and release’ mechanism for microplastics removal [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 404: 127079. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127079.