DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.01.009　　**Open Access**
文献引用：张韦，柳文爽，张德怀，等．基于着生藻类和浮游藻类生物完整性指数的威海市国控河流健康评价［J］．首都师范大学学报（自然科学版），2026，47（1）：71-82. ZHANG W，LIU W S，ZHANG D H，et al. Weihai nationally controlled rivers health assessment based on Periphytic algae and Phytoplankton index of biotic integrity［J］. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47（1）：71-82.

基于着生藻类和浮游藻类生物完整性指数的威海市国控河流健康评价*

张　韦[1]，柳文爽[1]，张德怀[1]，刘海燕[1**]，陈　衍[2]

（1. 山东省威海生态环境监测中心，山东 威海　264200；
2. 自然资源部第一海洋研究所，山东 青岛　266061）

摘要：河流健康评估不仅是生态保护的“诊断工具”，更是实现水资源可持续利用、应对气候变化挑战的核心手段，但是当前缺乏统一的健康评价指标体系。本研究以着生藻类和浮游藻类为指示生物，对威海市母猪河、乳山河、黄垒河和沽河共4条国控地表水河流，采用生物完整性指数（IBI）和综合污染指数（CPI）监测评价方法，并与pH、溶解氧（DO）、总氮（TN）、总磷（TP）、氨氮（NH_3-N）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、化学需氧量（COD）、五日生化需氧量（BOD_5）、Cd和Pb共10项水质指标进行相关性分析，以期建立河流健康评估体系。结果表明：4条河流的藻类群落结构特征为着生藻类硅藻门种类最多，浮游藻类绿藻门种类最多；CPI值为0.63~0.90，对应评价等级均为中；所有断面的着生藻类生物完整性指数（Pe-IBI）值为40~43，评价等级均为良，着生藻类生物完整性优劣排序为乳山河、黄垒河、沽河、母猪河；所有断面的浮游藻类生物完整性指数（Ph-IBI）值为39~43，评价等级均为良，浮游藻类生物完整性优劣排序为母猪河、黄垒河、乳山河、沽河；Pe-IBI值与CPI值、水体的pH、TN和Pb显著正相关（r=0.848、0.843、0.868、0.590，P<0.05），与水体的TP显著负相关（r=−0.515，P<0.05）；Ph-IBI值与NH_3-N和BOD_5显著正相关（r=0.600、0.513，P<0.05），与pH和DO显著负相关（r=−0.542、−0.733，P<0.05），与CPI值无明显相关性（P>0.05）。本研究结果表明在威海市国控河流中，着生藻类比浮游藻类更能准确反映水体环境状况。本研究对准确掌握威海市国控河流水生态系统的健康状况，为水生态监测与考核提供基础数据和技术支撑。

关键词：国控河流；着生藻类；浮游藻类；河流健康评价
中图分类号：X826　　**文献标志码**：A

Weihai nationally controlled rivers health assessment based on Periphytic algae and Phytoplankton index of biotic integrity *

ZHANG Wei[1]，LIU Wenshuang[1]，ZHANG Dehuai[1]，LIU Haiyan[1**]，CHEN Kan[2]

（1. Shandong Weihai Eco-Environment Monitoring Center，Weihai Shandong　264200；2. First Institute of Oceanography，Ministry of Natural Resources，Qindao Shandong　266061）

Abstract：River health assessment is not only a “diagnostic tool” for ecological conservation，but also a core approach to achieving sustainable water resource utilization and addressing climate change

收稿日期：2025-01-09
*国家自然科学基金青年科学基金项目（42406149）
**通信作者：whzhs@wh.shandong.cn

challenges. However, there is currently a lack of a unified health assessment index system. This study selected Periphytic algae and Phytoplankton as indicator organisms to assess four nationally controlled rivers in Weihai City which including Muzhu River, Rushan River, Huanglei River, and Gu River. The index of biological integrity (IBI) and comprehensive pollution index (CPI) were employed for monitoring and evaluation. Additionally, correlation analyses were conducted with 10 water quality parameters: pH, dissolved oxygen (DO), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH_3-N), potassium permanganate index (COD_{Mn}), chemical oxygen demand (COD), five-day biochemical oxygen demand (BOD_5), Cd and Pb. The aim was to establish a robust river health assessment methodology. The results showed that the algal community structures in the four rivers exhibited the following characteristics: Bacillariophyta were the most abundant taxa among periphytic algae, while Chlorophyta dominated the Phytoplankton communities. The CPI values ranged from 0.63 to 0.90, all corresponding to a "moderate" water quality rating. Across all sampling sites, Periphytic algae IBI (Pe-IBI) scores fell between 40 and 43, also indicating a "good" ecological status. The ranking of rivers based on Periphytic algae integrity was: Rushan River, Huanglei River, Gu River, Muzhu River. Phytoplankton IBI (Ph-IBI) values across all sampling sites ranged from 39 to 43, consistently corresponding to a "good" ecological status rating. The integrity ranking based on Phytoplankton communities was: Muzhu River, Huanglei River, Rushan River, Gu River. The Pe-IBI index showed significant positive correlations with CPI values, pH, TN and Pb (r=0.848, 0.843, 0.868 and 0.590, P<0.05), while exhibiting a significant negative correlation with TP (r=−0.515, P<0.05). The Ph-IBI index demonstrated significant positive correlations with NH_3-N and BOD_5 (r=0.600 and 0.513, P<0.05), but significant negative correlations with pH and DO (r=−0.542 and −0.733, P < 0.05). No significant correlation was observed between Ph-IBI and CPI values (P>0.05). The results of this study demonstrate that Periphytic algae serve as more reliable bioindicators of aquatic environmental conditions than Phytoplankton in the nationally controlled rivers of Weihai City. This research provides fundamental data and technical support for accurately assessing the health status of aquatic ecosystems in Weihai's nationally controlled rivers, thereby facilitating water ecological monitoring and evaluation.

Keywords: nationally controlled river; Periphytic algae; Phytoplankton; river health assessment

CLC: X826 **DC**: A

0 引 言

河流健康评估是基于生态完整性理论,通过综合分析河流的生物多样性、水质、水文特征和地貌状况,评估其生态系统的健康状况。随着人类活动对河流生态系统的不断干扰和破坏,如何科学地评估、修复并维持一个健康的河流生态系统,已成为近年来流域管理中的核心目标之一。为促进水生态保护修复和提升水生生物多样性,国家相继发布了多项水生态监测技术指南,更是计划将水生态指标纳入优良水体比例开展考核,因而如何对水生态开展科学准确地评价尤为关键。在河流中基于生物完整性指数(index of biological integrity, IBI)的水生态健康评价是目前应用较广的评价方法[1-6]。相较以往所采用的单因子评价法,IBI是将河流生境指标与水体指示生物相结合,经多个候选参数筛选后整合而成的评价方法,更能客观全面地反映河流的健康状况[7-9]。

威海市有4条国控地表水河流,同时也是入海河流,分别为母猪河、乳山河、黄垒河、沽河,总流域面积2 973 km^2,占全市土地总面积的51.00%[10]。近年来,虽然威海市国控河流水质整体呈较好趋势[11],水质优良比例稳定在75.00%,但是由于河流沿程人口产业密集,农业、养殖业面源污染,河道生态水量不足等原因导致河流水质提升不明显,总氮(total nitrogen, TN)削减尤其困难。近5年来,威海

市国控河流TN质量浓度最大值为10.22 mg/L,最小值为2.13 mg/L,波动较大。全市废水TN排放量为2 441.6~2 798.5 t,量大且难以控制的输入氮源导致全市国控河流富营养化问题日益凸显,威胁着全市河流生态环境健康和供水安全。

浮游藻类(Phytoplankton)和着生藻类(Periphytic algae)作为河流生态系统食物链的底端生物,营自养生活,对水中污染物响应迅速,可作为生物评价区域水质健康状况指示。评价河流生态健康时,IBI比常用的硅藻-甲藻生物量比值法更具优势。硅藻-甲藻生物量比值法是一种单指标的比值评价方法,优先适用于识别湖库富营养化,IBI则是整合多指标的综合评价方法,适用于评估河流生态系统的整体健康。当使用IBI评价河流水质健康状况时,不同研究者选用的指示生物不同。田盼盼等[12]以构建周丛藻类(Periphytic algae)的IBI对新疆额尔齐斯河开展了生态健康评价,为额尔齐斯河流域的保护与管理提供生态学数据;盛祥锐[13]利用浮游植物的IBI对北京市河流健康评价,揭示了北京市河流生态系统存在的主要问题,为北京市河流生态系统保护和管理提供科学依据;Poikane等[14]认为着生藻类(如硅藻指数)更适用于河流生态评估,而浮游藻类更多用于湖泊管理。以上学者仅使用一类指示生物构建IBI评价河流生态,目前并没有研究利用2类IBI评价威海市的河流水质状况。因此,为了全面掌握全市国控河流的生态健康状况,探究这些河流中着生藻类是否比浮游藻类更适宜反映水质健康状况,以及与环境因子的相关性,在威海市国控河流健康评价中,本文首次以浮游藻类和着生藻类分别作为指示生物构建着生藻类生物完整性指数(Periphytic algal IBI,Pe-IBI)和浮游藻类生物完整性指数(Phytoplankton IBI,Ph-IBI)评价方法,比较2类IBI在河流健康状况评价中的适宜性,从而为流域水环境管理从单一的水质管理向水生态管理提供新思路。

1　实验方法

1.1　研究区域概况

威海市位于山东半岛东端,地处36°41′~37°35′N、121°11′~122°42′E。市内河流属半岛边沿水系,大小河流有1 000多条,其中较大的河流有4条,分别为母猪河、乳山河、黄垒河和沽河,均为国控地表水河流[10]。母猪河位于文登区境内,干流长达64 km,流域面积达1 092 km^2,是威海市流域面积最广的河流;乳山河贯穿于乳山境内,全长78 km,流域面积为1 039 km^2;黄垒河发源地为烟台市牟平区,由牟平流入乳山市,干流长71 km,贯穿于乳山境内,总流域面积为635 km^2;沽河位于荣成市内,干流长32 km,流域面积为207 km^2。为保证研究断面的典型性、可达性和安全性,在4条河流共设置5个断面(图1),其中黄垒河流经烟台、威海2个地级以上城市,为兼顾城市上下游设黄垒河浪暖口(H1)和黄垒河巫山(H2)2个断面,其余河流各设1个断面分别为沽河泰祥桥(G1)、母猪河南桥(M1)和乳山河二水厂(R1)[15]。

1.2　实验试剂

5%鲁哥氏碘液购自厦门海标科技有限公司;实验用水为去离子水。

1.3　实验仪器

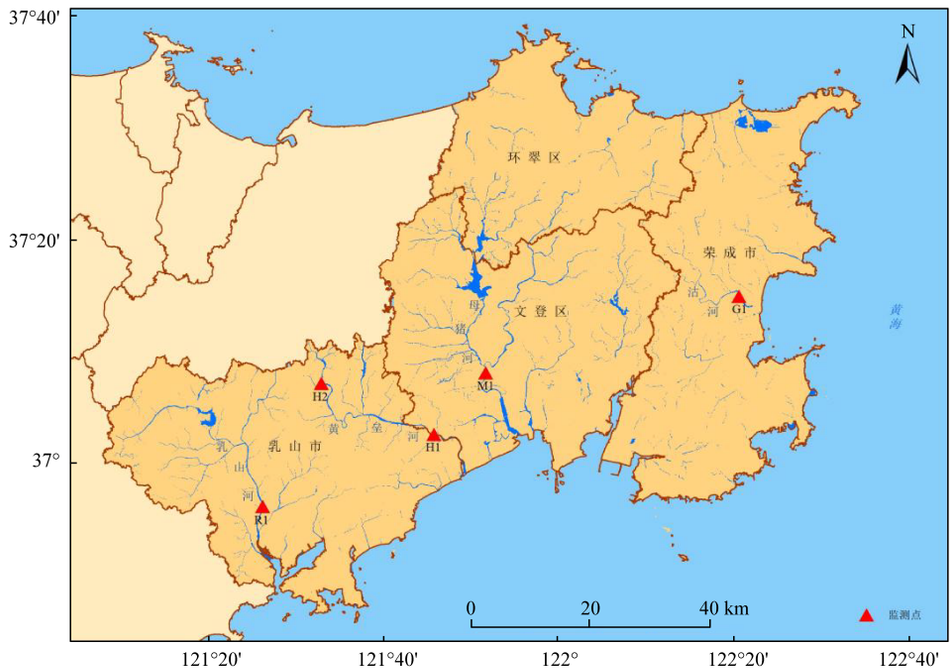
使用哈希中国公司生产的HQ40d型便携式水质多参数分析仪在现场检测样品的pH、水温和溶解氧(dissolved oxygen,DO);使用日本奥林巴斯公司生产的CX41RF型生物显微镜镜检,配备厦门登迅仪器设备有限公司的0.1 mL浮游生物计数框和方形边长18~22 mm盖玻片。

1.4　实际样品采集

参考HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》[15]采集水样,并按要求现场分装、保存和运输。采用天然基质法采集着生藻类样品,在河流采样点位上下游50 m的河段范围内选取容易刮取和测量的硬质天然基质,将其放置于漏斗中,从其表面选取面积≥100 cm^2,用硬质毛刷刷取基质表面的着生藻类,以实验用水冲洗硬质毛刷、漏斗及基质表面,收集冲洗混合物于采样瓶中,随即以1.00%~1.50%的体积比加入鲁哥氏碘液固定样品[16]。浮游藻类使用采水器采集≥500 mL样品于定量采样瓶中,采集后立即加入体积比为1.00%~1.50%的鲁哥氏碘液固定[17]。

1.5　实际样品检测

参考GB 3838—2002《地表水环境质量标准》[18]和文献[3,19],采取参照点位法[20]选取pH、DO、TN、总磷(total phosphorus,TP)、氨氮(ammonia nitrogen,NH_3-N)、高锰酸盐指数(potassium permanganate index,COD_{Mn})、化学需氧量(chemical oxygen



注:行政区边界数据来源于山东省地理信息公共服务平台,审图号为鲁SG(2024)035号,水系数据来源于山东省生态环境监测中心生态类型遥感解译数据;G1为沽河泰祥桥;M1为母猪河南桥;H1为黄垒河浪暖口;H2为黄垒河巫山;R1为乳山河二水厂。

图1　各研究断面布设位置

Figure 1　locations of research section



图2　样品采集现场照片

(a)浮游藻类;(b)着生藻类

Figure 2　field sampling photos

(a)Phytoplankton;(b)Periphytic algae

demand,COD)、五日生化需氧量(five-day biochemical oxygen demand,BOD_5)、Cd和Pb共10项水质指标,计算各断面的综合污染指数(comprehensive pollution index,CPI),确定参照点位。

10项水质指标分别在采集地和实验室检测。采集地检测:将便携式水质多参数分析仪浸入水样中,避免产生气泡,待探头温度与水温达到平衡后记下pH和DO。实验室检测:按照国标或环境标准测定水体TN、TP、NH_3-N、COD_{Mn}、COD、BOD_5、Cd和Pb共8项指标[21-27]。浮游藻类与着生藻类参考相关文献[17,28-32]在实验室使用显微镜鉴定其形态并统计种类和密度,根据样品中藻类的密度,选取适当的计数方式,每一样品装片计数2次,2次细胞计数结果相对偏差应<|15.00%|,测定结果为2次计数结果的平均值。

1.6　水质评价及数据分析方法

1.6.1　CPI评价

采用单因子法依据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》[18]评价河流断面水质类别,TN不参与

评价。以上述国标III类水质标准限值[18]为基准,计算水体的CPI值[19,33-34],计算公式为

$$I_{CP}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}I_{CP,i}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{S_i},\qquad(1)$$

式中:I_{CP}为CPI值,$I_{CP,i}$为第i项指标的I_{CP};C_i为第i项指标的实测值;S_i为国标中III类水质标准限值[18];n为检测指标的个数。CPI值分级评价标准:0~0.30时,水质为优;>0.30~0.54时,水质为良;>0.54~0.90时,水质为中;>0.90~1.32时,水质为差;>1.32~2.00时,水质为很差。

1.6.2　IBI评价

依据各断面的CPI值,选取水质评价最好的断面为IBI评价的参照点,其余断面则为受损点[19,35]。基于目前掌握的数据量并结合文献[19,36-39],选取了16个对环境变化响应较为敏感的藻类生物参数为候选生物参数构建河流Pe-IBI和Ph-IBI评价体系(表1)。采用箱形图分析16个候生物参数的四分位距(interquartile ranges,IQ),当箱体无任何重叠或箱体有小部分重叠但中位数都在对方箱体之外时认定为IQ≥2,对符合此条件的参数做相关性分析筛选出核心生物参数[40-41],再以赋分法标准化处理并计算断面核心生物参数值与标准值的偏离度,累加得到该研究断面的IBI值[42]。参考文献[19,43]制定的评价标准确定"优、良、中、差、很差"5个等级划分标准。

IBI评价分级标准:>45.00时,水质为优;>33.75~45.00时,水质为良;>22.5~33.75时,水质为中;>11.25~22.5时,水质为差;0~11.25时,水质为很差。

1.6.3　水质污染贡献率

水质污染贡献率的计算公式[19]为

$$K_i=\frac{I_{CP,i}}{\sum_{i=1}^{n}I_{CP,i}}\times 100\%,\qquad(2)$$

式中:K_i为第i项指标的污染贡献率。

1.7　统计学处理

数据以$\bar{x}\pm S$表示。使用Excel对各断面水质监测数据及藻类物种数量统计分析,计算各指标污染贡献率,绘制藻类群落结构特征图。使用Origin Pro 2024软件绘制箱体图筛选16个候选生物参数,对IQ≥2的参数再做相关性分析筛选出核心生物参数,当2个参数显著相关(P<0.05)且$|r|$>0.90时,保留信息量较大或重要性较强的参数为核心参数;使用Excel计算核心生物参数值与标准值的偏离度,累加得到IBI值;使用ArcMap 10.8软件绘制点位图。P<0.05为差异有统计学意义;P<0.01为差异极显著有统计学意义。

表1　藻类生物完整性评价的候选生物参数

Table 1　candidate metrics for algal biological integrity assessment

指标类别	序号	候选参数
物种组成	A1	藻类总分类单元数
	A2	蓝藻总分类单元数
	A3	绿藻总分类单元数
	A4	硅藻总分类单元数
	A5	藻类密度
	A6	蓝藻密度
	A7	绿藻密度
	A8	硅藻密度
	A9	蓝藻属的总数
相对丰富度	A10	蓝藻比例
	A11	绿藻比例
	A12	硅藻比例
	A13	舟形藻比例
群落多样性	A14	香农多样性指数
	A15	均匀度指数
营养水平	A16	富营养化指数

2　实验结果

2.1　藻类群落结构特征

4条河流共采集着生藻类8门148种(表2),其中:硅藻门种类最多,为53种,百分比为35.81%;绿藻门次之,为43种;蓝藻门再次之,为35种。厚壁细鞘丝藻(*Leptolyngbya lagerheimii*)的细胞密度最大,为3.36×10^5个/cm^2。4条河流共采集浮游藻类8门154种,其中:绿藻门种类最多,为58种,百分比为37.66%;硅藻门次之,为41种;蓝藻门再次之,为24种。鱼腥藻

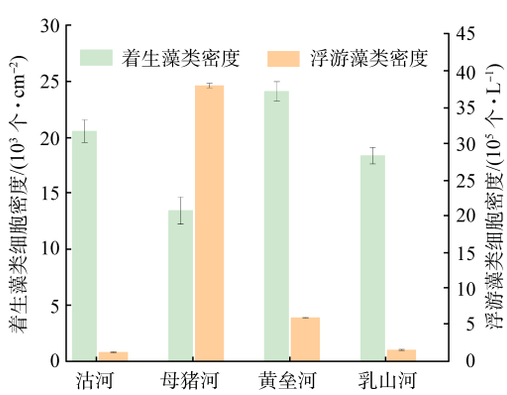


图3　4条河流的着生藻类和浮游藻类的物种密度

Figure 3　the species density of Periphytic algae and Phytoplankton in four rivers

表2　8门藻类在4条河流的群落结构特征

Table 2　community structure of eight algal phyla in four rivers　　单位:个

分类	沽河		母猪河		黄垒河		乳山河		合计[a]	
	着生藻类	浮游藻类	着生藻类	浮游藻类	着生藻类	浮游藻类	着生藻类	浮游藻类	着生藻类	浮游藻类
蓝藻门	17	10	11	8	22	15	16	10	35	24
绿藻门	21	23	16	22	24	29	16	25	43	58
硅藻门	24	15	22	13	39	32	15	14	53	41
裸藻门	1	5	2	10	4	3	2	1	5	12
金藻门	3	2	1	1	1	1	1	1	3	3
隐藻门	—	4	1	5	1	2	4	3	4	6
黄藻门	3	2	—	3	2	3	—	2	3	5
甲藻门	1	1	—	2	2	3	2	2	2	5

注:—为无数据;[a]为剔除重复藻类后的数量。

(*Anabaena* sp.)的细胞密度最大,为6.93×10^7个/L。

沽河、母猪河、黄垒河和乳山河的着生藻类分别为7门70种、6门53种、8门95种和7门56种,对应浮游藻类分别为8门62种、8门64种、8门88种和8门58种。黄垒河着生藻类细胞密度最大,为2.41×10^4个/cm^2,母猪河浮游藻类细胞密度最大,为3.81×10^6个/L。

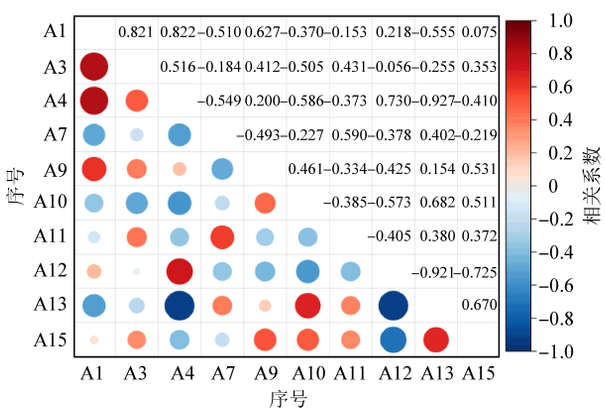
2.2　CPI评价

G1、H1和H2断面均为III类,M1断面为IV类,R1断面为II类。TN的质量浓度在R1断面最高,为5.41 mg/L;在H1断面最低,为2.78 mg/L。4条河流的CPI值为0.63~0.90,评价等级均为中。基于CPI值,各断面水质由优到劣的排序为H1、G1、M1、R1和H2,对应CPI值分别为0.63、0.69、0.77、0.86和0.90;H1的水质最优,故确定为IBI评价的参照点,其余断面设为受损点。

2.3　着生藻类生物完整性评价

对16个候选生物参数采用IQ值评定方法和原则筛选,初步确定10个区分能力较强的候选生物参数,依次为A1、A3、A4、A7、A9、A10、A11、A12、A13和A15。10个候选参数间的相关性结果如图4所示,A13与A4、A12呈显著负相关(r=−0.927、−0.921,P<0.05),因此将A13剔除,最终共筛选出9个参数作为核心生物参数用于Pe-IBI评价以反映河流的健康状况。

沽河、母猪河、黄垒河和乳山河共5个断面的Pe-IBI指数值分别为41、40、40、43和43,评价等级均为良。总体上,4条河流Pe-IBI由优到劣排序为乳山河、黄垒河、沽河、母猪河。



注:红色表示正相关;蓝色表示负相关;符号面积越大相关性越强。

图4　着生藻类10个候选参数间的Pearson相关性分析

Figure 4　inter-metric Pearson correlations of ten Periphytic algae-based candidate bioassessment indicators

2.4　浮游藻类生物完整性评价

依据IBI评价,11个候选参数间的Pearson相关性结果如图5所示,A4与A12显著正相关(r=0.954,P<0.05);A11与A15显著正相关(r=0.922,P<0.05),与A13显著负相关(r=−0.951,P<0.05);A14与A15显著正相关(r=0.925,P<0.05),为保证尽可能多的参数进入评价体系且能反映藻类群落变化结构,故剔除A4、A13和A15,最终9个核心参数用于Ph-IBI评价以反映河流的健康状况。

沽河、母猪河、黄垒河和乳山河共5个断面的Ph-IBI指数值分别为39、43、40、41和40,评价等级均为良。总体上,4条河流Ph-IBI优劣排序为母猪河、黄垒河、乳山河、沽河。

2.5　IBI与水体环境因子的相关性分析

为比较着生藻类与浮游藻类对水体环境变化的敏感性,将各断面的Pe-IBI、Ph-IBI和CPI值以及

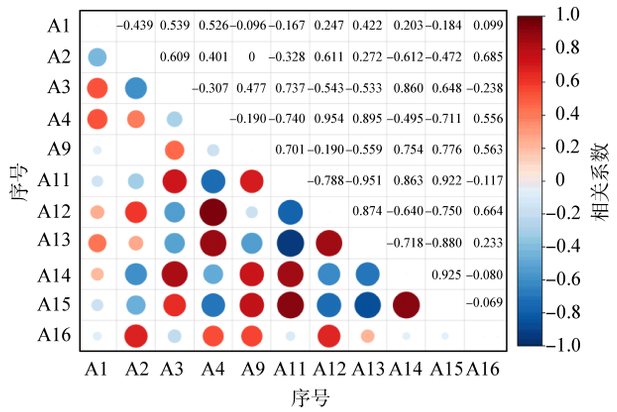


图5　浮游藻类11个候选参数间的Pearson相关性分析

Figure 5　inter-metric Pearson correlations for eleven candidate Phytoplankton-based bioindicators

各水体理化指标做相关性检验,结果列于表3,Pe-IBI值与CPI值、水体的pH、TN和Pb呈显著正相关(r=0.848、0.843和0.868,P<0.01;r=0.590,P<0.05),与水体的TP显著负相关(r=−0.515,P<0.05);Ph-IBI值与与水体的NH_3-N和BOD_5显著正相关(r=0.600、0.513,P<0.05),与pH和DO显著负相关(r=−0.542、−0.733,P<0.05),与CPI值无明显相关性(P>0.05)。相较而言,着生藻类受水体环境的影响更为明显。因而在河流健康评价中,使用着生藻类比使用浮游藻类更为科学,基于Ph-IBI值评价的威海市国控河流生态系统健康状况对河流水质也具有一定指示作用。

2.6　水质指标污染贡献率

各断面每项水质指标的污染贡献率详细结果列于表4。各断面TN的污染贡献率为42.53%~62.96%;TP的污染贡献率为5.48%~14.38%;COD_{Mn}的污染贡献率为7.95%~13.69%;COD的污染贡献率为7.57%~18.88%;BOD_5的污染贡献率为4.36%~8.22%,5项指标的污染贡献率之和为84.67%~92.15%,其中TN污染贡献率远超其他指标,在乳山河R1断面TN污染贡献率高达62.96%。说明TN是显著影响藻类分布的环境因子。

表3　藻类生物完整性与水体环境因子的相关性结果

Table 3　relationship between algal biological integrity and aquatic environmental factors

环境因子	Pe-IBI	Ph-IBI	环境因子	Pe-IBI	Ph-IBI
CPI	0.848^c	0.305	COD_{Mn}	0.053	0.321
pH	0.843^c	−0.542^b	COD	0.268	−0.110
DO	0.295	−0.733^b	BOD_5	0.220	0.513^b
TN	0.868^c	0.090	Cd	0.001	0.001
TP	−0.515^b	0.082	Pb	0.590^b	0.221
NH_3-N	0.278	0.600^b	—	—	—

注:Pe-IBI为着生藻类生物完整性指数;Ph-IBI为浮游藻类生物完整性指数;CPI为综合污染指数;DO为溶解氧;TN为总氮;TP为总磷;NH_3-N为氨氮;COD_{Mn}为高锰酸盐指数;COD为化学需氧量;^{b}为P<0.05;^{c}为P<0.01。

3　讨　论

3.1　参照点选取依据

参照点的选取是构建IBI的关键环节,直接影响评价结果的准确性和科学性。目前参照点的选取虽未有统一方法,但根据已有研究可大致分为参照点位法、历史数据法、模型推算法和专家判断法4类[20,35]。其中参照点位法应用最为广泛,通常是基于问卷或人类活动干扰的评价标准,对评价区域的物理、化学和生物状态进行统计学分析,选取受人类活动干扰最小的点位作参照点。黄凯等[44]以栖息地质量评分和水质等级选定参照点;郜星晨等[45]以遴选出的多样性指数较高且航道、养殖和娱乐等人为干扰较少的点位为参照点评价金沙江下游河流生态健康;刘园园等[43]依据CPI选取水质最优的水体为参照点构建IBI对嘉陵江、乌江的健康状况评价。本研究所设置的5个采样断面CPI值为0.63~0.90,评价等级均为中。选取水质最好的H1为参照点,构建IBI指标体系得出的各水体Pe-IBI值、Ph-IBI值优劣状况与CPI值基本一致,证明了参照点选取的有效性。除参照点的状态会影响评价结果的准确性外,参照点的数量也是影响评价结果

表4　各断面每项水质指标的污染贡献率　单位:%

Table 4　contribution of water quality indicators to pollution by section　unit:%

断面名称	pH	DO	TN	TP	NH_3-N	COD_{Mn}	COD	BOD_5	Cd	Pb
G1	7.21	0.83	42.53	8.65	0.58	13.69	18.88	7.57	0.06	0
M1	0	8.94	45.48	10.01	2.45	12.06	12.92	8.08	0.05	0.01
H1	0	10.70	44.43	14.38	1.12	10.92	12.79	5.59	0.06	0.01
H2	5.48	6.19	49.07	5.48	3.61	10.95	10.95	8.22	0.04	0.01
R1	5.82	1.49	62.96	9.31	0.47	7.95	7.57	4.36	0.05	0.02

准确性的重要因素[40,46]。本研究数据基于单次采样获得,样品量局限,可供选择的参照点偏少,在今后的研究中需增设研究断面数量和考虑季节变化影响,以提升评价结果的准确性。

3.2 IBI指数评价的适用性

河流健康评价主要评价结果的适宜性和准确性。本研究中基于着生藻类和浮游藻类分别构建了Pe-IBI、Ph-IBI评价体系,Pe-IBI值与CPI值、pH、TN呈极显著正相关,与水体的Pb也显著相关,与TP呈显著负相关,说明水质差相应着生藻类的生物完整性也差;Ph-IBI值与CPI值无明显相关性,与水质理化指标也无极显著的相关性。Pe-IBI得出的结论可信度更高,能更好地反映水体的健康状况。其结论与国内外学者倾向采用着生藻类进行河流健康评价的情况基本一致[14,40,43,47]。这一结论与2种藻类的生活习性和对营养盐的响应相关。浮游藻类可通过风浪、水流等因素远离环境胁迫,因此认定采集的浮游藻类样品可能无法真实反映区域的藻类群落结构特征[38]。

与浮游藻类不同,着生藻类栖息生境相对稳定,生长周期较长,必须长期忍受环境胁迫,进而其群落结构变化能较好地反映该点位的水环境健康状况[48]。浮游藻类因其生活习性特征对水温、DO更有竞争优势,水温与浮游藻类的光合作用、呼吸率和生长率都显著相关[49],还会影响营养盐的扩散和分布进而影响浮游藻类增殖活动,氮、磷元素的缺乏会限制浮游藻类的生长繁殖[50]。浮游藻类的光合作用能增加水中DO含量,而DO不足时又会限制其生长[49]。而着生藻类因其生境较为固定,不同着生藻类对不同水环境的耐受性及偏好差异较为明显,能快速响应水中氮、磷元素导致的无机盐富营养化和有机物污染,对水体持续性变化有更好地响应,相较于其他指示物种,河流生态评价更宜使用着生藻类[39-40,51]。综上所述,建议采用着生藻类对河流进行健康评价。

3.3 河流生态健康状况影响因素分析

水温、DO和营养盐是影响着生藻类群落变化的主要因素[12]。其中氮、磷等营养盐不仅与人类活动密切相关且对藻类的生长繁殖有重要影响[52]。王倩[53]对贵州珠江水系的研究表明TN是影响硅藻群落变化的关键因子;于潘[54]对长江下游的研究则显示TP是影响着生硅藻的主要环境因子。本研究中影响CPI值的关键因子是TN,TN与Pe-IBI值呈极显著正相关,其对水质污染的贡献率为42.53%~62.96%,远超其他因子。已有研究表明TN是影响着生藻类群落结构的主要因素[55]。硝态氮是TN的主要来源,也是衡量水体受营养物质污染程度的指标,其含量影响着生藻类的群落结构特征,同时NH_3-N质量浓度也与着生藻类密度呈显著相关性[50]。在国标中[18],TN质量浓度的III类标准限值为1.0 mg/L,但在常规河流水质评价中,根据环办〔2011〕22号《地表水环境质量评价办法(试行)》[56],TN不参与评价,因而,TN指标对水质的影响容易被低估。本研究显示TN的污染贡献率远高于其他因子,尤其乳山河R1断面TN污染贡献率>60.00%。这说明TN对河流水质影响较大。TN是监测水体营养盐的指标之一,农业面源、生活污水进入河流均会导致水中氮营养元素过量,为藻类大量繁殖提供有利条件,进而影响水体健康。因此,加强河流TN管控与治理尤为重要。

4 结束语

本研究聚焦河流生态系统健康评价领域,以威海市国控地表水河流为例,鉴定分析4条河流的着生藻类和浮游藻类群落结构特征,并结合水质监测指标构建了Pe-IBI和Ph-IBI评价体系。2类IBI评价体系相比,Pe-IBI评价结果与水质多项监测指标相关性较强,说明Pe-IBI更适宜反映威海市国控地表水河流健康状况,且TN是影响着生藻类群落结构的主要因子,限制水体氮源输入将会是今后改善河流健康状况的主要任务。后续研究中,将设置更多采样点位并考虑季节变化,以消除自然条件差异对评价结果的影响。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] 鲍艳磊,田冰,张瑜,等.雄安新区河流健康评价[J].生态学报,2021,41(15):5988-5997. DOI:10.5846/stxb202004070817.
BAO Y L, TIAN B, ZHANG Y, et al. River health assessment in Xiong'an New Area[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(15):5988-5997.

[2] 欧阳莉莉,何鑫,孟旭,等.沱江成都段河流生态健康评估研究[J].环境科学与技术,2024,47(5):200-207. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.0107.24.338.
OUYANG L L, HE X, MENG X, et al. Health assessment of the Tuojiang River in Chengdu municipality[J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(5):200-207.

[3] 廖瑞雪,鲍林林,陈杰,等.釜溪河浮游植物生物完整性指数构建与生态系统健康评价[J].水生态学杂志,2025, 46(2): 204-213. DOI: 10.15928/j. 1674-3075. 202301290018.
LIAO R X, BAO L L, CHEN J, et al. Construction of a Phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI) and ecosystem health assessment for Fuxi River[J]. Journal of Hydroecology, 2025, 46(2): 204-213.

[4] 宋蒙蒙,田爽,卢奥然,等.渭河河流生态系统完整性评价体系的构建[J].大连海洋大学学报,2020,35(2):288-295. DOI:10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-232.
SONG M M, TIAN S, LU A R, et al. Establishment of evaluation system of an ecosystem integrity in Weihe River[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(2):288-295.

[5] LORENA G, DELGADO C, PARDO I. How good is good ecological status? A test across river typologies, diatom indices and biological elements[J]. Science of the Total Environment, 2022, 815: 152901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152901.

[6] 殷旭旺,渠晓东,李庆南,等.基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价[J].生态学报,2012,32(6):1677-1691. DOI:10.5846/stxb2011020.
YIN X W, QU X D, LI Q N, et al. Using Periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China[J]. ACTA Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1677-1691.

[7] 廖静秋,黄艺.应用生物完整性指数评价水生态系统健康的研究进展[J].应用生态学报,2013,24(1):295-302. DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0151.
LIAO J Q, HUANG Y. Research progress on using index of biological integrity to assess aquatic ecosystem health [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 295-302.

[8] 杨柳,李泳慧,王俊才,等.基于B-IBI指数的温榆河生态健康评价[J].生态学报,2012,32(11):3313-3322. DOI:10.5846/stxb201105160.
YANG L, LI Y H, WANG J C, et al. The assessment of river health using Benthic-Index of biotic integrity for Wenyu River[J]. ACTA Ecologica Sinica, 2012, 32(11):3313-3322.

[9] 李琦.基于浮游藻类生物完整性指数的伊洛河生态健康评价[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
LI Q. Ecological health assessment of the Yiluo River based on the biological integrity index of Planktonic algae[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2023.

[10] 山东省威海生态环境监测中心.威海市环境质量报告书(2023)[R].威海:山东省威海生态环境监测中心,2023.
Shandong Weihai Ecological Environment Monitoring Center. Weihai ECO-environmental quality report (2023) [R]. Weihai: Shandong Weihai Ecological Environment Monitoring Center, 2023.

[11] 余金玲,田丽蓉,吴海涛,等.基于不同评价方法的威海市河流水质研究[J].青海大学学报,2022,40(1):99-106. DOI:10.13901/j.cnki.qhwxxbzk.2022.01.014.
YU J L, TIAN L R, WU H T, et al. Study on the river water quality of Weihai based on different evaluation methods[J]. Journal of Qinghai University, 2022, 40(1):99-106.

[12] 田盼盼,桑翀,马徐发,等.基于周丛藻类群落结构的新疆额尔齐斯河生态健康评价[J].生态学报,2022,42(2):778-790. DOI:10.5846 / stxb2021010.
TIAN P P, SANG C, MA X F, et al. Ecological health assessment of Irtysh River in Xinjiang Uygur Autonomous Region based on the community structure of Periphytic algae[J]. ACTA Ecologica Sinica, 2022, 42(2):778-790.

[13] 盛祥锐.基于浮游植物的北京市河流健康状况及其影响因素研究[D].北京:中国环境科学研究院,2024.
SHENG X R. River health assessment and its influencing factors in Beijing based on Phytoplankton [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2024.

[14] POIKANE S, KELLY M, CANTONATI M. Benthic algal assessment of ecological status in European lakes and rivers: challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2016, 568: 603-613. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.027.

[15] 生态环境部.地表水和污水监测技术规范:HJ/T 91—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specifications requirements for monitoring of surface water and waste water: HJ/T 91-2002 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[16] 生态环境部.水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价(试行):HJ 1295—2023[S].北京:中国环境科

学出版社,2023.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for water ecological monitoring aquatic organism monitoring and evaluation of rivers(trial):HJ 1295-2023[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2023.

[17] 生态环境部.水质 浮游植物的测定 0.1 mL计数框-显微镜计数法:HJ 1216—2021[S].北京:中国环境科学出版社,2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of Phytoplankton 0.1 mL chamber microscope counting method:HJ 1216-2021[S]. Beijing:China Environmental Science Press,2021.

[18] 生态环境部,国家市场监督管理总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Environmental quality standards for surface water:GB 3838-2002[S]. Beijing:China Environmental Science Press,2002.

[19] 刘园园.着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[D].重庆:西南大学,2018.
LIU Y Y. Comparative study on the suitability of Benthic algae and Phytoplankton applied in river health assessment[D]. Chongqing:Southwest University,2018.

[20] 李欣桐,王远铭,梁瑞峰,等.河流系统生态完整性评估的回顾与展望[J].中国环境科学,2024,44(4):2256-2272. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231218.003.
LI X T, WANG Y M, LIANG R F, et al. A review and prospect for ecological integrity assessment of river[J]. China Environmental Science,2024,44(4):2256-2272.

[21] 生态环境部.水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法:HJ 636—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of total nitrogen-alkaline potassium persulfate digestion UV spectrophotometric method:HJ 636-2012[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2012.

[22] 生态环境部.水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法:GB 11893—1989[S].北京:中国环境科学出版社,1989.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of total phosphorus-ammonium molybdate spectrophotometric method: GB 11893-1989 [S]. Beijing: China Environmental Science Press,1989.

[23] 生态环境部.水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法法:HJ 535—2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of ammonia nitrogen-Nessler's reagent spectrophotometry: HJ 535-2009[S]. Beijing:China Environmental Science Press,2009.

[24] 生态环境部.水质 高锰酸盐指数的测定:GB 11892—1989[S].北京:中国环境科学出版社,1989.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of permanganate index: GB 11892-1989 [S]. Beijing: China Environmental Science Press,1989.

[25] 生态环境部.水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法:HJ 828—2017[S].北京:中国环境科学出版社,2017.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of the chemical oxygen demand-dichromate method: HJ 828-2017[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.

[26] 生态环境部.水质 五日生化需氧量(BOD_5)的测定 稀释与接种法:HJ 505—2009[S].北京:中国环境科学出版社,2009.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of biochemical oxygen demand after 5 days (BOD_5) for dilution and seeding method: HJ 505-2009[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2009.

[27] 生态环境部.水质 32种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法:HJ 776—2015[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality determination of 32 elements-inductively coupled plasma optical emission spectrometry: HJ 776-2015 [S]. Beijing: China Environmental Science Press,2015.

[28] 胡鸿钧,李尧英,魏印心.中国淡水藻类[M].上海:上海科学技术出版社,1980.
HU H J, LI Y Y, WEI Y X. Freshwater Algae of China [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers,1980.

[29] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学技术出版社,2006.
HU H J, WEI Y X. Freshwater Algae of China: systematics, classification and ecology [M]. Beijing: Science Press,2006.

[30] 翁建中，徐恒省.中国常见浮游藻类图谱[M].上海：上海科技出版社，2010.
WENG J Z，XU H S. Atlas of common Phytoplankton in China[M]. Shanghai：Shanghai Scientific and Technical Publishers，2010.

[31] 王业耀.中国流域常见水生生物图集[M].北京：科学技术出版社，2020.
WANG Y Y. Atlas of common aquatic organisms in China's River basins[M]. Beijing：Science Press，2020.

[32] 王全喜，庞婉婷.长江下游地区常见浮游植物图集[M].北京：科学技术出版社，2023.
WANG Q X，PANG W T. Atlas of common Phytoplankton in the lower reaches of the Yangtze River，China[M]. Beijing：Science Press，2023.

[33] 图们江水系领导小组办公室，吉林师大环境科学研究所，吉林师大地理系.图们江水系污染与水资源保护的研究：(1971—1977)科研总结[M].延吉：延边印刷厂印刷，1978.
Office of Leading Group for Tumen River System，Institute of Environmental Science of Jilin Normal University，Department of Geography of Jilin Normal University. Study on pollution and water resources protection in Tumen River system：(1971-1977) scientific research summary [M]. Yanji：Yanbian Printing House，1978.

[34] 环境保护部环境工程评估中心.环境影响评价技术导则与标准[M].2011年版.北京：中国环境科学出版社，2011.
Environmental Engineering Assessment Center of Ministry of Environmental Protection. Technical guidelines and standards for environmental impact assessment[M].2011 ed. Beijing：China Environmental Science Press，2011.

[35] STODDARD J L，LARSEN D P，HAWKINS C P，et al. Setting expectations for the ecological condition of streams：the concept of reference condition [J]. Ecological Applications，2006，16(4)：1267-1276. DOI：10.1890/1051-0761 (2006) 016 [1267：SEFTEC] 2.0.CO；2.

[36] RGENSEN S E，XU F L，COSTANZA R. Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health [S].2nd ed. Boca Raton：CRC Press，2016.

[37] 韩佳民.雅砻江大河湾着生藻类群落研究与河流健康度评价[D].重庆：西南大学，2022.
HAN J M. Study on the Periphytic algae communitystructure and river health assessment in Dahewan River[D]. Chongqing：Southwest University，2022.

[38] 杜欣.贵州草海浮游藻类与附植藻类群落结构及生态评价研究[D].贵阳：贵州师范大学，2021.
DU X. Research on community structure and ecological evaluation of Planktonic algae and Epiphytic algae in Caohai，Guizhou [D]. Guiyang：Guizhou Normal University，2021.

[39] 胡建成，宋志斌，周佳诚，等.金沙江上段浮游藻类和着生藻类群落格局及其与环境因子的关系比较研究[J].生态学报，2022，42(2)：590-599. DOI：10.5846/stxb2021020.
HU J C，SONG Z B，ZHOU J C，et al. Comparative study on Planktonic and Periphytic algal community patterns and their relationships with environmental variables in the upper reaches of the Jinsha River[J]. ACTA Ecologica Sinica，2022，42(2)：590-599.

[40] 冯颖萦，丁惠君，彭宁彦，等.基于着生藻类生物完整性指数的章江健康状态评价[J].水生态学杂志，2024，45(4)：165-174. DOI：10.15928/j.1674-3075.202208310356.
FENG Y Y，DING H J，PENG N Y，et al. River health assessment of Zhangjiang river based on the Periphyton integrated biotic index [J]. Journal of Hydroecology，2024，45(4)：165-174.

[41] WU Z，KONG M，CAI Y，et al. Index of biotic integrity based on Phytoplankton and water quality index：do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin，China [J]. The Science of the Total Environment，2019，658：395-404. DOI：10.1016/j.scitotenv.2018.12.216.

[42] RAWER-JOSTT C，ZENKER A，BOHMER J. Reference conditions of German stream types analysed and revised with macroinvertebrate fauna [J]. Limnologica，2004，34：390-397. DOI：10.1016/S0075-9511(04)80008-2.

[43] 刘园园，阿依巧丽，张森瑞，等.着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[J].生态学报，2020，40(11)：3833-3843. DOI：10.5846/stxb2018120.
LIU Y Y，AYI Q L，ZHANG S R，et al. Comparative study on the suitability of Periphytic algae and Phytoplankton in river health assessmen [J]. ACTA Ecologica Sinica，2020，40(11)：3833-3843.

[44] 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. DOI：10.13198/j.issn.1001-6929.2018.01.02.
HUANG K，YAO Y，WANG X N，et al. The ecosystem health assessment based on the fish index of biological integrity in the Luanhe River Basin [J]. Research of Environmental Sciences，2018，31(5)：901-910.

[45] 郜星晨，张琪，苏巍，等.基于浮游植物生物完整性指数

的金沙江下游河流生态健康评价[J].水生态学杂志，2025，46（1）：11-19. DOI：10.15928/j. 1674-3075. 202204130113.
GAO X C, ZHANG Q, SU W, et al. Ecosystem health assessment of lower Jinsha river basedon the Phytoplanktonic index of biotic integrity（P-IBI）[J]. Journal of Hydroecology, 2025, 46(1): 11-19.

[46] 张方方，张萌，刘足根，等.基于底栖生物完整性指数的赣江流域河流健康评价[J].水生生物学报，2011，35(6)：963-971. DOI：10.3724/SP. J.1035.2011.00963.
ZHANG F F, ZHANG M, LIU Z G, et al. A health assessment using a benthic-index of biotic integrity in Ganjiang River Basin[J]. ACTA Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(6): 963-971.

[47] 汪星，郑丙辉，刘录三，等.基于藻类完整性指数的洞庭湖水质评价[C]//中国环境科学学会.2015年中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷).北京：中国环境科学研究院，2015：8.
WANG X, ZHENG B H, LIU L S, et al. Evaluation of water quality in Dongting Lake based on algal integrity index[C]//Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2015 Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences（Volume 1). Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2015: 8.

[48] WORF B. Biological monitoring for environmental effects [M]. Lexington Massachusetts: Lexingtonbooks, 1980.

[49] 白海锋.渭河流域水生生物群落时空分布特征、驱动机制及水生态系统健康评价[D].西安：西北大学，2022.
BAI H F. Spatio-temporal distribution characteristics and driving mechanism of aquatic communities and water ecosystem health assessment in the Weihe River basin, Northwestern, China [D]. Xi'an: Northwest University, 2022.

[50] 贾景涛.黄河白银段水生生物群落结构特征及水生态系统健康评价[D].兰州：西北师范大学，2024.
JIA J T. Study on the structure characteristics of aquatic communities and assessment on the aquatic ecosystem health in Baiyin section of the Yellow River [D]. LanZhou: Northwest Normal University, 2024.

[51] WINTER J G, DUTHIE H C. Epilithic diatoms as indicators of stream total N and total P concentration[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(1): 32-49. DOI: 10.2307/1468280.

[52] 杨宋琪，祖廷勋，王怀斌，等.黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J].湖泊科学，2019，31(1)：159-170. DOI：10.18307 /2019.0115.
YANG S Q, ZU T X, WANG H B, et al. Relationship between the structure of Phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 159-170.

[53] 王倩.黔、桂珠江水系底栖硅藻群落分布特征及其与环境变量间的相关性研究[D].贵阳：贵州师范大学，2009.
WANG Q. Study on distribution characteristics of benthic diatom communities and correlation between benthic diatom communities and environmental variables in Rivers of QianGui ZhuJiang watershed[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2009.

[54] 于潘.综合硅藻指数(CDI)的建立及在湖泊富营养化评价中的应用[D].上海：上海师范大学，2019.
YU P. Establishment of comprehensive diatom index and application in lake eutrophication evaluation [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.

[55] SONG J X, YANG Z Y, XIA J, et al. The impact of mining-related human activities on runoff in northern Shaanxi, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598(6): 1-13. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126235.

[56] 生态环境部.地表水环境质量评价办法(试行)：环办〔2011〕22号[EB/OL].(2011-03-09)[2024-11-25]. https://www. mee. gov. cn/xxgk2018/xxgk/xzgfxwj/202301/t20230113_1012890.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specifications for surface water environmental quality assessment (trial): Huanban〔2011〕No. 22 [EB/OL]. (2011-03-09) [2024-11-25]. https://www. mee. gov. cn/xxgk2018/xxgk/xzgfxwj/202301/t20230113_1012890.html.

（责任编辑：王 媛）