

## 1988—2021 年洞庭湖大型底栖动物完整性评价及环境压力影响分析\*

王丑明<sup>1</sup>, 黄代中<sup>1</sup>, 张屹<sup>1</sup>, 田琪<sup>1</sup>, 阴琨<sup>2\*\*</sup>, 熊莉<sup>3</sup>, 陈勇<sup>4</sup>

(1: 湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 岳阳 414000)

(2: 中国环境监测总站, 北京 100020)

(3: 四川省宜宾生态环境监测中心站, 宜宾 644000)

(4: 四川省生态环境监测总站, 成都 610091)

**摘要:** 为客观跟踪洞庭湖水生态环境质量, 掌握洞庭湖水生生物完整性状况和变化趋势, 支撑长江流域水生态考核工作的开展, 基于洞庭湖 30 多年 (1988—2021) 的大型底栖动物群落特征数据, 构建洞庭湖大型底栖动物完整性指数 (*B-IBI*)。基于完整性评价结果, 采用多元逐步回归分析识别 30 多年间影响洞庭湖 *B-IBI* 的主要环境因素和贡献率。以低压时期 (1988—1994 年) 底栖动物特征确定参照状态, 构建的 *B-IBI* 由总分类单元数、甲壳类和软体类分类单元数、*H* 指数、总密度和 *BI* 指数 5 项核心参数构成; 同时确定出 5 项参数的期望值, 并建立起 *B-IBI* 评价的标准:  $B-IBI \geq 6.34$ , 优秀;  $4.75 \leq B-IBI < 6.34$ , 良好;  $3.17 \leq B-IBI < 4.75$ , 中等;  $1.58 \leq B-IBI < 3.17$ , 较差;  $B-IBI < 1.58$ , 很差。经 *B-IBI* 在低、高压力组的箱线图分析, 进一步验证了该指数的辨别力和适用性。根据研制的 *B-IBI* 评价标准, 得到洞庭湖 *B-IBI* 从 1988 年的 6.99 (优) 下降到 2021 年的 2.97 (较差), 表明洞庭湖底栖动物完整性呈现显著的下降趋势。相关环境因素的分析显示, 同期洞庭湖的综合营养状态指数、总氮和叶绿素 *a* 均呈现显著上升态势。对 *B-IBI* 和环境因子的响应关系分析表明, *B-IBI* 与总氮和叶绿素 *a* 呈显著负相关, 多元逐步回归分析表明总氮解释了大型底栖动物完整性变异的 56.1%, 和叶绿素 *a* 共同解释了变异的 61.3%。营养盐增加对洞庭湖大型底栖动物完整性的变化起到较大程度的驱动作用。构建的 *B-IBI* 评价标准在洞庭湖具有较好的适用性, 可为长期跟踪湖体完整性变化及分析水生态状况变化提供有价值的科学依据。建议在长江流域重要水体的保护中, 在持续控磷的同时, 加大对氮污染影响的关注, 增加对总氮的管控力度, 并将总氮纳入国家和地方水生态环境监管体系。

**关键词:** 洞庭湖; 大型底栖动物; 完整性指数; 环境压力

## Assessment of integrity of macrobenthos in Lake Dongting (1988–2021) and impacts from environmental stress\*

Wang Chouming<sup>1</sup>, Huang Daizhong<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>1</sup>, Tian Qi<sup>1</sup>, Yin Kun<sup>2\*\*</sup>, Xiong Li<sup>3</sup> & Chen Yong<sup>4</sup>

(1: Dongting Lake Eco-Environment Monitoring Centre, Yueyang 414000, P.R.China)

(2: China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100020, P.R.China)

(3: Yibin Ecological Environment Monitoring Center of Sichuan Province, Yibin 644000, P.R.China)

(4: Sichuan Environmental Monitoring Center, Chengdu 610091, P.R.China)

**Abstract:** The Macrobenthic Integrity Index (*B-IBI*) was constructed based on the macrobenthic community data in Lake Dongting for more than 30 years (1988–2021) in order to assess the ecological quality of Lake Dongting, capture the status and change trend of aquatic biological integrity in Lake Dongting, and support the assessment of ecological condition in the Yangtze River Basin. Based on the integrity assessment results, the main environmental factors and contribution rates of the *B-IBI* in Lake Dongting over the past 30

\* 2022-11-16 收稿; 2023-02-22 收修改稿。

国家重点研发计划 (2021YFC3200104) 和湖南省岳阳市市长江水生态环境保护研究项目 (2022-LHYJ-02-0507-02) 联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: yinkun@cnemc.cn。

years were analysed using the multiple stepwise regression method. The reference state of the benthic characteristics was set by the data during the low-pressure period (1988–1994). The *B-IBI* consisted of five core parameters: total taxon number, crustacean and mollusk taxon number, Shannon diversity index, total density and BI. At the same time, the expected values of the five parameters were determined and the criteria for *B-IBI* scoring were established:  $B-IBI \geq 6.34$ , excellent;  $4.75 \leq B-IBI < 6.34$ , good;  $3.17 \leq B-IBI < 4.75$ , average;  $1.58 \leq B-IBI < 3.17$ , poor;  $B-IBI < 1.58$ , very poor. Box plot analysis of the *B-IBI* in the low- and high-pressure groups further verified the discriminatory power and applicability of the *B-IBI*. According to the *B-IBI* scoring criteria, the *B-IBI* decreased from 6.99 (excellent) in 1988 to 2.97 (poor) in 2021, indicating that the integrity of the benthic fauna in Lake Dongting showed a significant decline. The analysis of related environmental factors showed that the comprehensive nutritional status index, total nitrogen and chlorophyll-*a* in Lake Dongting showed a significant upward trend. The analysis showed that *B-IBI* was negatively correlated with total nitrogen and chlorophyll-*a* significantly. Multiple stepwise regression analysis showed that total nitrogen explained 56.1% of the variation in macrobenthic integrity, and 61.3% when combined with chlorophyll-*a*, indicating that the change in macrobenthic integrity was mainly driven by the increase in nutrients. The *B-IBI* assessment standard showed good applicability in Lake Dongting, which could provide a valuable scientific basis for long-term monitoring of changes in lake integrity and analysis of changes in ecological status. In the context of the ecological protection of important water bodies in the Yangtze River basin, it is suggested to pay more attention to the influence of nitrogen pollution in the continuous control of phosphorus, to strengthen the control of total nitrogen, and to include total nitrogen in the national and local water ecological environment control systems.

**Keywords:** Lake Dongting; macrobenthos; index of integrity; environmental stress

洞庭湖是我国第二大淡水湖,湖泊面积 2625 km<sup>2</sup>,北纳长江的松滋、太平、藕池三口来水,南和西接湘、资、沅、澧四水,由岳阳市城陵矶注入长江,是长江流域重要的调蓄湖泊,被誉为“长江之肾”<sup>[1]</sup>。洞庭湖不仅在维护长江中下游防洪和供水安全方面具有重要意义,而且在维系湿地水生态系统健康,保护湿地生物多样性等方面发挥着举足轻重的作用<sup>[2]</sup>。近几十年来,洞庭湖富营养化有加剧的趋势,每年入湖总氮和总磷非常高<sup>[3]</sup>,是洞庭湖的主要污染因子<sup>[4-6]</sup>。受长江三口和湘、资、沅、澧四水输入以及湖区生产生活污染影响,目前湖体水质总体仍为Ⅳ类<sup>[7]</sup>。洞庭湖历史上受挖沙、非法矮围、围网养殖、杨树种植等干扰影响,湿地退化,导致洞庭湖湿生植物消失严重,目前洞庭湖湖岸带优势挺水植物为芦苇和南荻。

底栖动物是湖泊生态系统的重要组成生物,它们对外界胁迫的响应比较敏感,其在湖泊、河流等水体中的丰富度、群落结构、耐污类群和敏感类群的比例以及不同功能摄食类群的结构特征等都可以从不同角度反映水质的好坏,从而有效地指示水生态系统的健康状况。生物完整性指数(index of biotic integrity, *IBI*)作为生物评价中使用最为广泛的多度量生物指数,可针对大型底栖动物、浮游植物、浮游动物、水生植物和鱼类等生物类群构建完整性指数并开展评价<sup>[8]</sup>。区别于单指数,生物完整性指数既能深刻揭示水生态系统的健康状况、水生态系统结构,反映生态系统功能,又能评估人类活动的影响程度,是评价水生态系统健康状况的重要手段。然而目前国内有关洞庭湖这类通江湖泊大型底栖动物完整性的研究近乎空白,仅有汪星等在 2010 年对洞庭湖 7 个典型断面进行了大型底栖无脊椎动物完整性指数的评价<sup>[9]</sup>。本文基于 1988–2021 年洞庭湖大型底栖动物监测数据及环境数据,构建洞庭湖大型底栖动物完整性指数(*B-IBI*),确定各参数的期望值,建立起完整性状态的分级评价标准。同时,基于洞庭湖生物完整性的评价结果,采用相关性分析和多元逐步回归分析识别 30 多年影响洞庭湖底栖动物完整性变化的重要环境因素。研究成果可为客观评估洞庭湖底栖动物完整性状态及分析环境压力影响提供科学依据,为支撑长江流域特别是重点水体水生态保护和生态考核工作的实施提供参考和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

洞庭湖底栖动物监测始于 1988 年,监测断面由于水位变化、国控断面改变和监测工作任务分配等客观原因几经调整,2002 年以后监测断面基本固定,目前共设置监测断面 16 个,代表性点位覆盖了东洞庭湖(东洞庭湖、岳阳楼、鹿角、扁山、大小西湖)、西洞庭湖(小河嘴、蒋家嘴、南嘴)、南洞庭湖(横岭湖、万子湖、虞公庙)、主要河流汇入口(万家嘴、樟树港、坡头、沙河口)和洞庭湖出口等整个湖体内典型水文、水环境、生物及

生境特征区域(图1)。

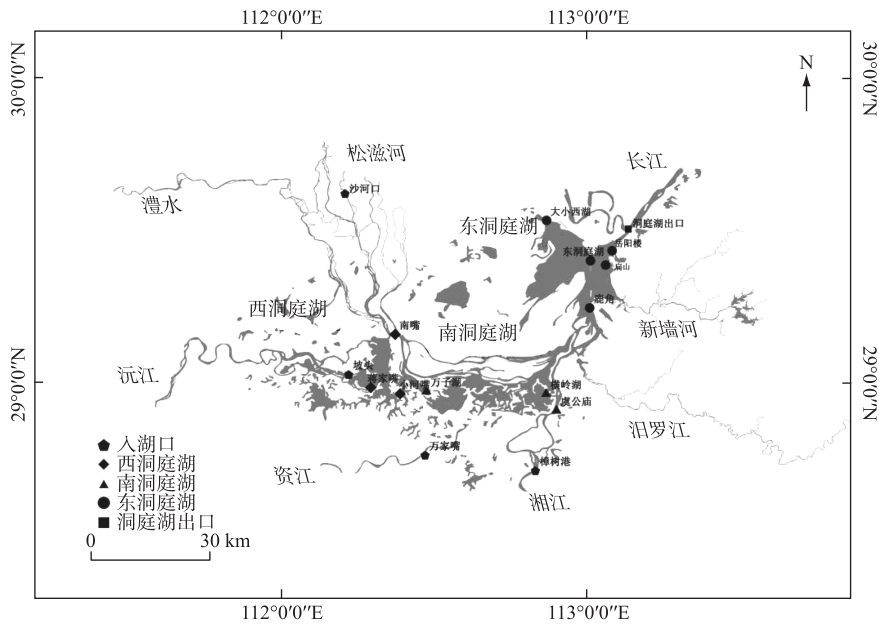


图1 洞庭湖大型底栖动物采样点分布

Fig.1 Geographical location of macrobenthos survey in Lake Dongting

## 1.2 采样方法

大型底栖动物样本主要采用  $1/16 \text{ m}^2$  的改良彼得森 (Peterson) 采泥器完成。每个样点采集 2 个重复样品,带有动物标本的泥样经 40 目铜筛筛洗后,置入封口袋内保存。当天将筛洗后的泥样放入白瓷解剖盘中在冷光灯下分拣,随后将挑出的动物样品放入 50 mL 样品瓶,并使用 75% 的酒精固定保存。最后在实验室室内对固定动物样品进行种类鉴定和计数,标本鉴定主要参考文献[10-13]。

测定水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、透明度(SD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )和叶绿素  $a$  (Chl.  $a$ ) 共 11 项环境参数。其中, Chl.  $a$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TN、TP、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  以及  $\text{NH}_3\text{-N}$  的测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[14]</sup>,水温、pH 和溶解氧采用美国 YSI 多参数水质分析仪 (Professional Plus) 直接测定,透明度采用透明度盘测定。

## 1.3 数据处理

将优势度指数  $Y > 0.02$  的底栖动物定为优势种。采用箱线图法分析候选参数在参照状态和受损状态之间的分布情况。环境压力和营养水平在参照状态与受损状态上的识别采用方差分析,底栖动物种类数、密度、 $B\text{-IBI}$ 、Chl.  $a$ 、TN 和  $TLI$  在 1988—2021 年的变化趋势采用线性回归分析, $B\text{-IBI}$  备选指标的相关性分析和环境压力的识别采用 Pearson 相关性分析,对影响  $B\text{-IBI}$  的关键环境因子的解析采用多元逐步回归分析。方差分析、多元逐步回归分析和 Pearson 相关性分析采用 SPSS 20.0 软件,箱线图法分析采用 Origin 9.0 软件。湖泊营养状态评价以《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评价方法进行计算<sup>[15]</sup>。

Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H$ )、 $BI$  生物指数、 $BMWP$  (biological monitoring working party) 指数、Goodnight-Whitley 生物指数 ( $GW$ ) 计算公式分别为:

$$H = - \sum_{i=1}^s \left( \frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right) \quad (1)$$

$$BI = \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \times t_i \quad (2)$$

$$BMWP = \sum F_i \quad (3)$$

$$GW = (T/N) \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $n_i$  为种  $i$  的个体数,  $N$  为生物总体个数,  $T$  为颤蚓类个体数,  $S$  为物种数,  $t_i$  为种  $i$  耐污值,  $F_i$  为科  $i$  的敏感值。BMWP 和 BI 指数计算过程中的敏感值和耐污值参考相关资料<sup>[16-17]</sup>。此外, Wright 指数为寡毛类密度。

选择国内外常用生物指数并结合研究区域实际情况, 建立候选参数清单, 并设定这些参数的预期胁迫响应趋势, 即随着环境胁迫的升高, 参数值是正响应(上升)或负响应(下降)。候选参数包括物种丰富度、个体组成、耐污能力、摄食类群和多样性等生物指数。将候选参数依次开展分布范围分析、判别能力分析和冗余度分析, 筛选核心参数。大型底栖动物核心参数先进行归一化处理, 采用比值法计算各候选参数的分值。对与环境胁迫呈反比的参数, 以参照状态 95th 为期望值, 按“指数值/期望值”计算参数分值; 对与环境胁迫呈正比的参数, 以参照状态 5th 为期望值, 以“(最大值-指数值)/(最大值-期望值)”计算参数分值。若分值大于 1, 则按 1 计。然后依据以下公式计算每个点位的 B-IBI 数值:

$$B-IBI = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} \quad (5)$$

式中, B-IBI 为大型底栖动物完整性指数,  $n$  为核心参数数量,  $i$  为第  $i$  个核心参数,  $S_i$  为第  $i$  个核心参数归一化后的数值。

## 2 结果

### 2.1 大型底栖动物物种组成特征

1988—2021 年, 洞庭湖共记录大型底栖动物 229 种, 隶属 4 门 7 纲, 主要为水生昆虫和软体动物, 分别占全湖种类的 45.9% 和 36.7%, 寡毛类只占 12.2%。30 多年间洞庭湖大型底栖动物物种数和密度均呈显著下降趋势, 物种数从 1980s 末的 69 种下降到 2021 年的 53 种, 密度从 1980s 末的 410 个/m<sup>2</sup> 锐减到 2021 年的 103 个/m<sup>2</sup> (图 2)。进一步分析发现种类和数量减少的主要是水生昆虫和软体动物。其中, 水生昆虫种类从 1988 年的 34 种下降到 2021 年的 21 种, 密度从 1988 年的 163 个/m<sup>2</sup> 锐减到 2021 年的 18 个/m<sup>2</sup>; 软体动物密度也从 1988 年的 105 个/m<sup>2</sup> 显著下降到 2021 年的 20 个/m<sup>2</sup>, 减少的种类大部分为清洁指示生物, 如低头石蚕 (*Neureclipsis* sp.) 在 1988—1993 年是优势种类, 1994 年以后则不再是优势种, 钩虾 (*Gammarus* sp.) 在 1988—2005 年是优势种, 2006 年以后则很少成为优势种。较为耐污的霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 和苏氏尾鳃蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 的丰度一直在增加。

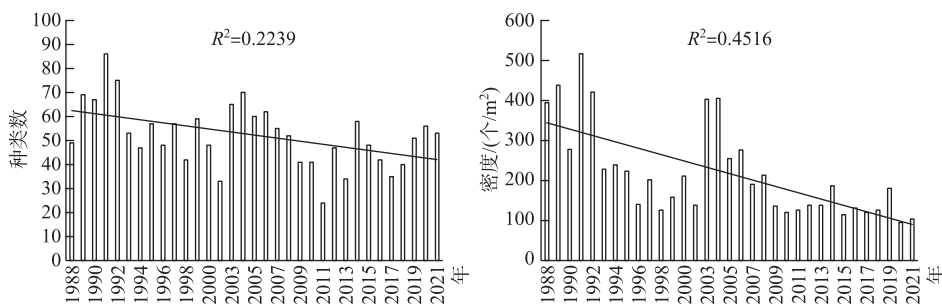


图 2 1988—2021 年洞庭湖大型底栖动物种类数和密度变化情况

Fig.2 Changes in species number and density of macrobenthos in Lake Dongting from 1988 to 2021

### 2.2 洞庭湖 B-IBI 核心参数的构建

2.2.1 参照状态与受损状态 根据环境压力和营养水平在时间尺度上的方差分析结果(表 1), 选择 TN、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和叶绿素  $a$  作为参照状态和受损状态的划分标准, 同时参考相关文献在洞庭湖环境压力在时间尺度上的变化特征的分析<sup>[2,18]</sup>, 将 1988—1994 年划分为低压力组(参照状态), 2017—2021 年划分为高压力组(受损状态), 处于过渡期的 1995—2016 年划分为中压力组。

2.2.2 候选参数 从物种丰度、个体组成、现存量、敏感耐受性、功能性和多样性等参数类型中选取了13个候选参数(表2)。

2.2.3 核心参数的确定 用箱线图分析候选参数指标值的分布范围,发现第一优势种占比、Goodnight-Whitley(*GW*)生物指数、甲壳类+软体类分类单元占比、EPT百分比、Wright指数、敏感类群个体百分比、刮食者个体百分比和滤食者个体百分比在低压力组和高压力组之间没有显著差异,因此去除这些候选参数,得到总分类单元数、甲壳类和软体类分类单元数、香浓威纳多样性指数、总密度、*BI*指数、*BMWP*指数6个在低压力组和高压力组之间有显著差异的参数(图3)。再经Pearson相关性检验,结果显示*BMWP*指数和总分类单元数、甲壳类和软体类分类单元数相关系数均大于0.75(表3),因敏感性指标已有*BI*指数,故保留总分类单元数、甲壳类和软体类分类单元数,因此构成*B-IBI*的核心参数有总分类单元数、甲壳类和软体类分类单元数、Shannon-Wiener多样性*H*指数、总密度和*BI*指数。

表1 洞庭湖3个时期关键水环境因子的波动\*

Tab.1 Dynamics of key water quality variables during 1988–2021 in Lake Dongting

参数	1988—1994年	1995—2016年	2017—2021年
TN/(mg/L)	1.15±0.12 <sup>a</sup>	1.52±0.32 <sup>b</sup>	1.69±0.08 <sup>b</sup>
叶绿素 <i>a</i> /(μg/L)	2.26±0.90 <sup>a</sup>	2.60±1.38 <sup>a</sup>	5.23±0.97 <sup>b</sup>
COD <sub>Cr</sub> /(mg/L)	1.72±0.80 <sup>a</sup>	7.28±3.79 <sup>b</sup>	9.08±3.05 <sup>b</sup>
BOD <sub>5</sub> /(mg/L)	0.35±0.42 <sup>a</sup>	1.43±0.39 <sup>b</sup>	1.40±0.38 <sup>b</sup>

\* 不同字母代表组间存在显著差异( $P<0.05$ )。

表2 洞庭湖*B-IBI*候选参数

Tab.2 Candidate parameters of *B-IBI* in Lake Dongting

生物类群	参数类型	候选参数及对干扰的反应
大型底栖动物	物种丰度	总分类单元数(下降)、甲壳类+软体类分类单元数(下降)
	个体组成	第一优势种占比(上升)、Goodnight-Whitley( <i>GW</i> )生物指数(上升)、甲壳类+软体类分类单元占比(下降)、清洁指示物种百分比(EPT%)(下降)
	现存量	总密度(下降)、Wright指数(上升)
	敏感耐受性	<i>BMWP</i> 指数(下降)、 <i>BI</i> 指数(上升)、敏感类群个体%(下降)
	功能性	刮食者个体%(下降)、滤食者个体%(下降)
	多样性	<i>H</i> 指数(下降)

表3 *B-IBI*备选指标的Pearson相关性分析

Tab.3 Pearson correlation analysis of alternative *B-IBI* indicators

指数	总密度	<i>H</i> 指数	种类数	<i>BI</i> 指数	<i>BMWP</i> 指数	甲壳类和软体类种类数
总密度	1					
<i>H</i> 指数	0.116	1				
种类数	0.496 **	0.775 **	1			
<i>BI</i> 指数	-0.179 *	-0.087	-0.228 *	1		
<i>BMWP</i> 指数	0.517 **	0.720 **	0.960 **	-0.349 **	1	
甲壳类和软体类种类数	0.454 **	0.519 **	0.713 **	-0.303 **	0.802 **	1

\*\* 在0.01水平(双尾)上显著相关, \* 在0.05水平(双尾)上显著相关。

### 2.3 洞庭湖*B-IBI*的构建及评价标准

首先对核心参数进行归一化处理,归一化取值见表4。若归一化计算结果处于0~10之间,则该结果即为该参数归一化值;若该参数计算结果小于0,记为0;大于10,记为10,各参数归一化值统一到0~10之间,然后再对参数进行相加,从而计算每个点位的大型底栖动物完整性指数数值。

建立低压力组和高压力组的*B-IBI*分值的箱线图,发现*IQ*值 $\geq 2$ ,证明评价方法可对两组进行有效区分,可认为该生物完整性指数有效。对建立的*B-IBI*进行验证,验证结果显示从低压力组、中压力组到高压力组的优、良点位占比明显下降,分别为68.5%、29.2%和18.1%,较差和很差点位占比明显上升,分别为14.8%、30.7%和52.8%。可以看出*B-IBI*指数在不同压力组有明显的区分。以所有点位的95th分位数法对*B-IBI*进行四等

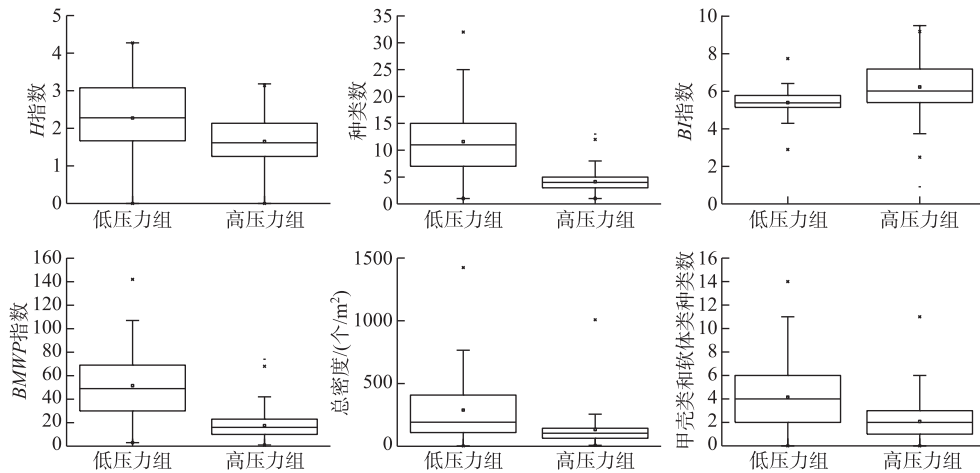


图 3 *B-IBI* 备选指标在低压力组和高压力组的箱线图

Fig.3 Boxplots of alternative *B-IBI* indicators in the low pressure group and the high pressure group

表 4 *B-IBI* 核心参数归一化取值\*

Tab.4 Normalized values of core parameters of *B-IBI*

<i>B-IBI</i> 核心参数	归一化参数的取值		参数类型
	期望值 ( $E_b$ )	临界值 ( $T_b$ )	
总密度/(ind./m <sup>2</sup> )	460.8	24	反向参数
总分类单元数/个	16	2	反向参数
<i>H</i> 指数	3.2	0.54	反向参数
<i>BI</i> 生物指数	4.2	8.6	正向参数
甲壳类+软体类分类单元数	9	0	反向参数

\* 正向参数指随压力增大而增加的参数,反向参数指随压力增大而减小的参数。

分,建立生物完整性的不同等级。将建立的 5 个等级由低到高定义为“很差”( $B-IBI \leq 1.58$ )、“较差”( $1.58 \leq B-IBI < 3.17$ )、“中等”( $3.17 \leq B-IBI < 4.75$ )、“良好”( $4.75 \leq B-IBI < 6.34$ )和“优秀”( $B-IBI > 6.34$ )。

### 2.4 洞庭湖 *B-IBI* 和富营养化变化趋势

洞庭湖 *B-IBI* 从 1988 年的 6.99 下降到 2021 年的 2.97,对应完整性状态由优秀降为较差,总体呈显著下降趋势。与之相反,同期指示洞庭湖营养水平的参数综合营养状态指数和总氮均呈现显著上升趋势,在 1998、2010、2017 和 2019 年均达到轻度富营养状态(图 4)。

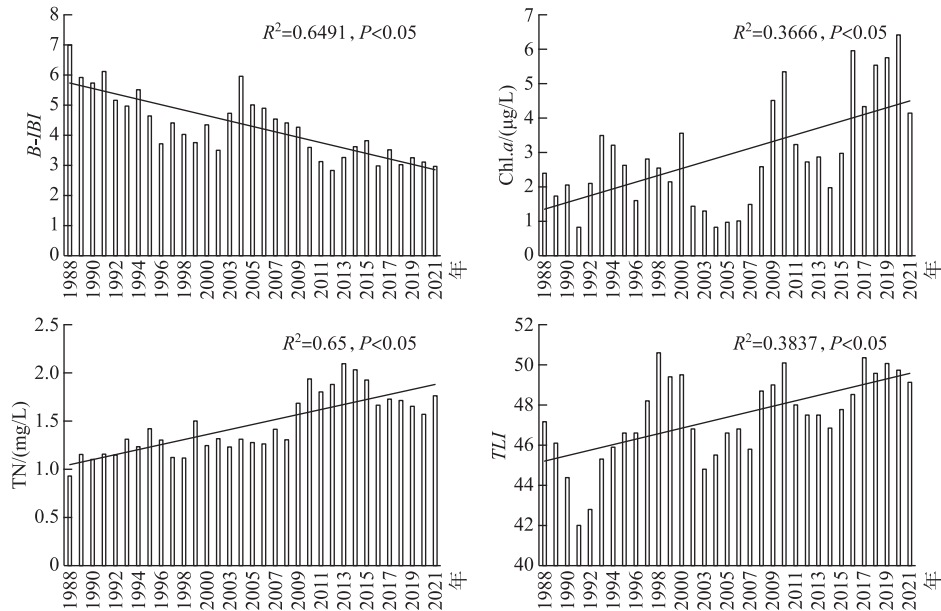
### 2.5 环境压力对底栖动物完整性的影响分析

结合历史数据,分析表明洞庭湖 *B-IBI* 与总氮、叶绿素 *a* 和综合营养状态指数显著负相关,与总磷相关性不强(图 5)。多元逐步回归分析表明总氮解释了大型底栖动物完整性变异的 56.1%,和叶绿素 *a* 共同解释了变异的 61.3%,总氮是影响洞庭湖大型底栖动物完整性的主要因素。

## 3 讨论

### 3.1 候选参数的选择和评价体系的适用性

本文基于洞庭湖 30 多年的大型底栖动物群落特征数据,首次构建了洞庭湖大型底栖动物完整性指数及评价标准,虽然选择的候选参数较少,但是包括了物种丰富度、个体组成、现存量、耐污能力、摄食类群和多样性等生物指数,这些指数可以代表大部分候选指数,而且比较适用洞庭湖这种大型通江湖泊,在筛选指标体系时,亦根据各自指标代表的生态学意义进行筛选。如敏感类群个体%可以代表洞庭湖的主要敏感类群,Wright 指数可以代表湖泊中的主要耐污种类群,本文选择的 *H* 指数是目前用的最广泛的多样性指数,最终也被纳入了核心参数。洞庭湖中的清洁水体指示物种(EPT)较少,主要是蜉蝣和低头石蚕,而且低头石蚕目前已经很少发现,因此 EPT%并未进入最终核心参数。汪星等最终选取了甲壳类和软体类分类单元数、*H* 指数和 *GW* 指数 3 个核心参数<sup>[9]</sup>,而本文最终核心参数由总分类单元数、甲壳类和软体类分类单元数、香浓威纳多样性指数、总

图4 洞庭湖  $B-IBI$ 、 $Chl.a$ 、 $TN$  和  $TLI$  在 1988—2021 年的变化趋势Fig.4 Variation trend of  $B-IBI$ ,  $Chl.a$ ,  $TN$  and  $TLI$  in Lake Dongting from 1988 to 2021

密度和  $BI$  指数 5 个指标构成,反应了物种丰富度、多样性、现存量 and 敏感性,比汪星等<sup>[9]</sup>选取的 3 个指标更具全面性和代表性。本文构建的  $B-IBI$  评价标准在洞庭湖具有较好的适用性,可为长期跟踪湖体完整性变化及分析水生态状况变化提供有价值的科学依据。此外,由于功能多样性对环境变化及干扰也比较敏感,建议今后将功能多样性参数纳入评估体系,以优化和准确评估洞庭湖底栖动物的时空变化。

### 3.2 洞庭湖底栖动物完整性的压力影响分析

本研究表明总氮等营养盐增加对洞庭湖大型底栖动物完整性的变化起到较程度的驱动作用。洞庭湖水体主要污染物为总氮和总磷,它们是引起湖泊富营养化的因素之一,并且能够明显影响大型底栖动物群落结构<sup>[19]</sup>。有研究表明,近 30 年洞庭湖总氮浓度是影响底栖动物群落结构的主要因素<sup>[18]</sup>,三峡工程蓄水后,洞庭湖入湖水量减少,总氮的污染负荷有所增加,进一步加剧了洞庭湖大型底栖动物完整性的下降。叶绿素  $a$  是生态响应指标,表征了水体中浮游植物的生物量,是营养水平的最直接的表现。30 多年来洞庭湖叶绿素  $a$  显著增加,有研究表明叶绿素  $a$  对洞庭湖底栖动物的功能群落结构有明显的影<sup>[1]</sup>,本研究结果同样表明叶绿素  $a$  对洞庭湖底栖动物的完整性有显著影响 ( $P<0.05$ )。综合营养状态指数是一个综合指标,它表征着水体的富营养化程度,洞庭湖 30 多年来综合营养状态指数明显上升,富营养化程度加剧,而富营养化明显影响底栖动物群落结构和多样性<sup>[19-20]</sup>。张屹等分析了洞庭湖近 30 年大型底栖动物的群落演变,结果表明底栖动物的种类和密度与营养状态指数呈显著负相关<sup>[18]</sup>,洞庭湖流域人口密集,工农业较为发达,大量面源污染进入水体,带入大量的营养物质,极大地加速水体富营养化进程。富营养化对洞庭湖底栖动物的影响主要表现为群落结构的单一化,主要表现在种类数、密度和多样性的衰退和耐污种类(如霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓)的增加,而这些指标是构成洞庭湖生物完整性核心参数的重要组成部分。因此随着富营养化的加剧,洞庭湖大型底栖动物完整性显著下降 ( $P<0.05$ )。此外,随着秋季三峡大坝蓄水,洞庭湖枯水期提前到来,形成大量裸露的滩涂,在野外调查中,因水位下降而死亡的底栖动物在洲滩上随处可见,尤其是一些软体动物的死亡个体非常明显。

### 3.3 氮磷管控分析

本研究分析结果表明总氮是影响洞庭湖大型底栖动物完整性的主要因素,同时叶绿素  $a$ 、富营养化对底栖动物也有显著影响。降低水体中营养盐水平和控制水体富营养化是恢复洞庭湖底栖动物完整性的关键

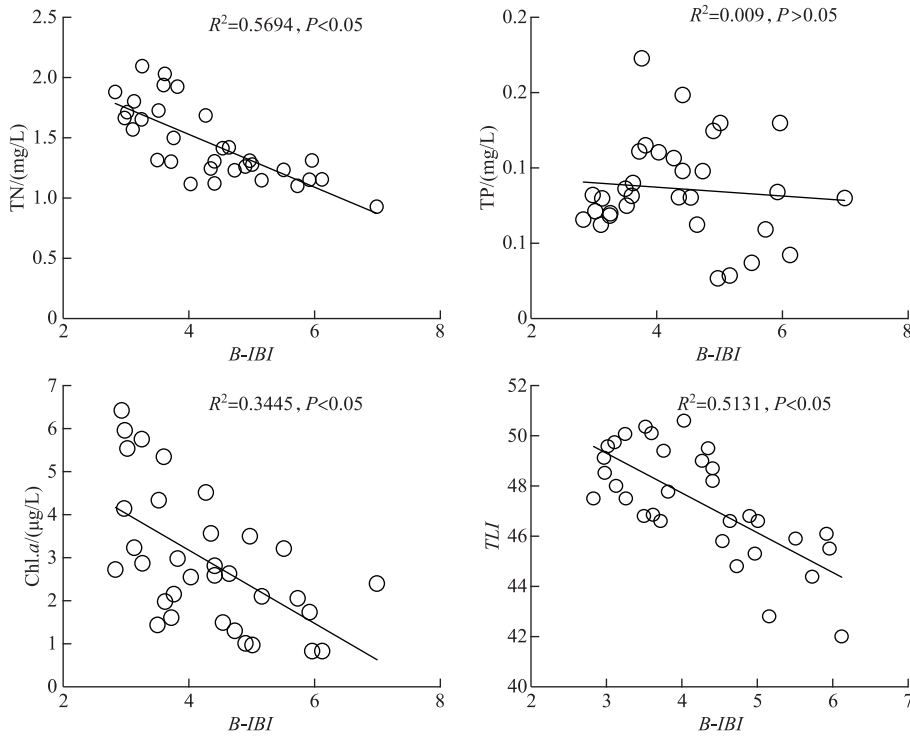


图5 洞庭湖 B-IBI 与 TN、Chl.a 和 TLI 的关系

Fig.5 Relationship between B-IBI and TN, Chl.a and TLI in Lake Dongting

所在。然而,因为目前总氮不参与对水环境的考核评价,洞庭湖的营养削减目标主要是总磷,没有对总氮进行管控,造成了总氮 30 多年来的显著上升。湖泊富营养化磷控制模式的提出是基于加拿大实验湖区的 37 年全湖实验结果,他们提出湖泊富营养化治理只需控磷,无需控氮<sup>[21]</sup>。然而加拿大实验湖区没有人为外源污染物输入,污染背景低,控制磷的输入就可以严格控制湖泊的营养程度,在这种背景下获得的湖泊治理经验不具有普适性。而对很多大型浅水富营养化湖泊,采取的控制措施主要是削减外源,然而单独控磷措施在很多浅水富营养化湖泊都没有成功<sup>[22]</sup>。在美国、加拿大、瑞典等国家开展的 20 个全湖实验结果证明富营养化治理采取氮磷同时控制的效果最好<sup>[23]</sup>,而且可以有效减少浮游植物的生物量<sup>[24-25]</sup>。霍守亮等建议全面系统修订《地表水环境质量标准》,科学评估我国湖泊氮磷营养物的时空差异,实施差异化营养标准<sup>[26]</sup>。因此,氮磷协同管控对于富营养化程度相对较高的浅水湖泊具有很好的适用性。洞庭湖是一个地处长江中游的大型浅水湖泊,湖泊富营养化控制面临极大的挑战。30 多年来洞庭湖的富营养化程度和总氮浓度明显上升,对底栖动物的完整性造成了显著的影响,因此在控磷的同时要对氮进行协同管控。建议进一步加强农业面源污染控制,加快补齐生活污水处理设施短板,全面查清湖区生活污水入河湖排污口底数,加强重点入河湖排污口系统整治,因地制宜建设入河湖口人工湿地,净化入河湖水体水质;其次要开展生态修复,通过实施湖体清淤整治及堤防加固、河湖连通建设等工程措施,增强河湖水体流动性,恢复河湖生态功能,改善水生态环境。

洞庭湖 30 多年监测表明底栖动物完整性变化有较好的适用性,具有长期性和综合性,可为正确判断水生态状况提供支撑。针对国家长江流域水生态考核等工作,建议将该完整性指数评价方法用于支撑《中华人民共和国长江保护法》、《重点流域水生态环境保护规划(2021—2025)》等国家重要法规所规定的长江流域重点湖泊的底栖动物完整性评价中。同时,水体富营养化对底栖动物完整性有明显影响,继续控制总磷的同时要关注总氮的影响,加大对总氮的管控力度,建议把总氮逐步纳入水生态的考核评价,强化关键压力

管控在长江大保护中的作用。

#### 4 参考文献

- [1] Wang CM, Zhang Y, Tian Q *et al.* Dynamics of taxonomic and functional community structure in macrozoobenthos and the underlying driving factors in the Lake Dongting in 1988–2016. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 218-231. DOI: 10.18307/2021.0112. [王丑明, 张屹, 田琪, 等. 1988—2016年洞庭湖大型大型底栖动物群落变化及驱动因素分析. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 218-231.]
- [2] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] Qin DL, Huang Z, Luo YP *et al.* Pollution control regionalization and countermeasures in Dongting Lake area. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(7): 748-755. [秦迪岚, 黄哲, 罗岳平等. 洞庭湖区污染控制区划与控制对策. 环境科学研究, 2011, **24**(7): 748-755.]
- [4] Wang CM, Wu KF, Zhang Y *et al.* The analysis of spatial and temporal variations characteristics and driving factors of phytoplankton in Dongting Lake. *Freshw Fisheries*, 2018, **48**(4): 52-57. [王丑明, 吴可方, 张屹等. 洞庭湖浮游植物时空变化特征及影响因素分析. 淡水渔业, 2018, **48**(4): 52-57.]
- [5] Lai HZ, Mo DW, Su C. Discussion on the evolutionary trend of Lake Dongting. *Geographical Research*, 2004, **23**(1): 78-86. [来红州, 莫多闻, 苏成. 洞庭湖演变趋势探讨. 地理研究, 2004, **23**(1): 78-86.]
- [6] Huang DZ, Wan Q, Li LQ *et al.* Changes of water quality and eutrophic state in recent 20 years of Dongting Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(1): 27-33. [黄代中, 万群, 李利强等. 洞庭湖近20年水质与富营养化状态变化. 环境科学研究, 2013, **26**(1): 27-33.]
- [7] Fu Z, Guo J, Huang DZ *et al.* The evolution and influencing factors of eutrophication in Dongting Lake. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(8): 2636-2645. [符哲, 郭晶, 黄代中等. 洞庭湖的富营养演变特征及影响因素. 环境化学, 2022, **41**(8): 2636-2645.]
- [8] Wang BX, Yang LF, Liu ZW. Index of biological integrity and its application in health assessment of aquatic ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(6): 707-710. [王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价. 生态学杂志, 2006, **25**(6): 707-710.]
- [9] Wang X, Zheng BH, Li L *et al.* Bioassessment on water quality based on biotic integrity index of macroinvertebrate in representative sections of Dongting Lake, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(9): 1799-1807. [汪星, 郑丙辉, 李黎等. 基于大型底栖动物完整性指数的洞庭湖典型断面的水质评价. 农业环境科学学报, 2012, **31**(9): 1799-1807.]
- [10] Epler JH. Identification manual for the larval Chironomidae of North and south Carolina. America: North Carolina Department of Environment and Natural Resources Division of Water Quality, 2001.
- [11] Brinkhurst RO. Guide to the freshwater aquatic microdrile Oligochaetes of North America. Canada: Department of Fisheries and Oceans, 1986.
- [12] 刘月英, 张文珍, 王跃先等. 淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.
- [13] Morse JC, Yang LF, Tian LX. Aquatic insects of china useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 670-671.
- [15] 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. 北京: 中国环境监测总站, 2001.
- [16] Zhang JW, Cai K, Yu HY *et al.* Establishment of Chinese macroinvertebrate score index and water quality boundary. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(6): 10-18. [张汲伟, 蔡琨, 于海燕等. 中国底栖动物水质生物监测指数和水质等级构建. 中国环境监测, 2018, **34**(6): 10-18.]
- [17] Wang BX, Yang LF. A study on tolerance values of benthic macroinvertebrate taxa in eastern China. *Acta Ecol Sin*, 2014, **24**(12): 2768-2775. [王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, **24**(12): 2768-2775.]
- [18] Zhang Y, Wang CM, Shi HH *et al.* Macrobenthic community succession during last thirty years in Dongting Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(8): 1348-1353. [张屹, 王丑明, 石慧华等. 洞庭湖近30年大型底栖动物的群落演变. 生态环境学报, 2015, **24**(8): 1348-1353.]
- [19] Lair N, Reyes-Marchant P, Jacquet V. Phytoplankton, ciliate and rotifer development at two stations in the Middle Loire River (France), during a period of low water flow. *Int J Limnol*, 1998, **34**(1): 35-48.
- [20] Gong ZJ, Xie P. Impact of eutrophication on biodiversity of the macrozoobenthos community in a Chinese shallow lake. *J Freshw Ecol*, 2001, **16**: 171-178.
- [21] Schindler DW, Hecky RE, Findlay DL *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole ecosystem experiment. *PNAS*, 2008, **105**: 11254-11258.
- [22] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW *et al.* Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **322**: 1014-1015.
- [23] Paerl HW, Scott JT, McCarthy MJ *et al.* It takes two to tango: When and where dual nutrient (N & P) reductions are needed to protect lakes and downstream ecosystems. *Environ Sci Technol*, 2016, **50**(20): 10805-10813.
- [24] Scott JT, McCarthy MJ. Nitrogen fixation may not balance the nitrogen pool in lakes over timescales relevant to eutrophication management. *Limnol Oceanogr*, 2010, **55**(3): 1265-1270.
- [25] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnol Oceanogr*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [26] Huo SL, Zhang HX, Jin XW *et al.* Countermeasures for assuring water ecological environment security in China. *Engineering*, 2022, **24**(5): 1-7. [霍守亮, 张含笑, 金小伟等. 我国水生态环境安全保障对策研究. 中国工程科学, 2022, **24**(5): 1-7.]