

## 调查数据不确定性对崇明岛临近水域鱼类生物完整性指数结果的影响

石子玉, 韩东燕, 高春霞, 陈锦辉, 吴建辉, 王学昉

## Effects of survey data uncertainty on the results of fish-index of biological integrity in waters near Chongming Island

SHI Ziyu, HAN Dongyan, GAO Chunxia, CHEN Jinhui, WU Jianhui, WANG Xuefang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20220303759>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 湛江湾海域夏季鱼类群落的完整性评价

Biotic integrity assessment of summer fish communities in Zhanjiang Bay waters

上海海洋大学学报. 2016, 25(6): 900 <https://doi.org/10.12024/jsou.20160401745>

#### 环境DNA技术与传统捕捞揭示崇明岛内河鱼类多样性

Integrating environmental DNA technology and traditional fish survey to reveal the diversity of fishes in the rivers on the Chongming Island

上海海洋大学学报. 2022, 31(6): 1434 <https://doi.org/10.12024/jsou.20220303794>

#### 千岛湖国家级水产种质资源保护区(梓桐核心区)鱼类群落结构

Fish community structure in Zitong Core Area in Qiandao Lake National Aquatic Genetic Resources Conservation Area

上海海洋大学学报. 2019, 28(4): 587 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180802383>

#### 淮河入海通道及其附近水系鱼类群落空间分布格局

Spatial distribution pattern of fish community in the passage from Huaihe River to sea and its adjacent river system

上海海洋大学学报. 2020, 35(6): 914 <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2019-305>

#### 白洋淀鱼类群落结构与环境因子关系分析

Fish community structure and its relationship with environmental factors in Baiyangdian Lake

上海海洋大学学报. 2022, 31(6): 1488 <https://doi.org/10.12024/jsou.20211003581>

文章编号: 1674-5566(2023)02-0357-12

DOI:10.12024/jsou.20220303759

## 调查数据不确定性对崇明岛临近水域鱼类生物完整性指数结果的影响

石子玉<sup>1,2,3,4</sup>, 韩东燕<sup>1,2,3,4</sup>, 高春霞<sup>1,2,3,4</sup>, 陈锦辉<sup>4,5</sup>, 吴建辉<sup>4,5</sup>, 王学昉<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 长江口水生生物监测与保护联合实验室, 上海 201306; 5. 上海市水生野生动植物保护研究中心, 上海 200092)

**摘要:** 为分析数据不确定性对鱼类生物完整性指数评价结果的影响, 基于崇明岛附近水域历史研究资料和生态系统特征, 初步构建鱼类生物完整性指数评价体系, 该评价体系涵盖种类组成、耐受性、营养结构、繁殖共位群及健康状况和生物量 5 类属性的 12 个指标, 并评估该水域 2020 年 8 月和 11 月鱼类生物完整性状况。在此基础上分别从 5 类属性的指标中各抽取 1 个作为评价指标(鱼类种类数、游泳动物食性、鱼类数量比例等), 通过计算机模拟分别估算单一指标和 5 个指标共同变异系数为 30% 时, 崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数变化情况。同时, 比较了不同的变异水平对鱼类生物完整性指数评价结果的影响程度。结果表明, 崇明岛附近水域 2020 年 8—11 月间的鱼类生物完整性处于“差”等级。数据不确定分析结果显示, 指标监测值存在 30% 变异时, 崇明岛附近水域鱼类生物完整性评价结论虽未发生改变, 但是鱼类生物完整性得分发生一定程度的变化。并且, 随着指标监测值不确定性的增加, 崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数评价结果的波动程度逐渐增加。分析结果表明, 指标监测值不确定性对评价结果的影响程度与监测值在鱼类生物完整性指数各赋分区段的具体位置有关。本研究结果强调了基于鱼类生物完整性指数评价崇明岛附近水域生态系统状况时, 考虑评价指标自然波动范围的重要性。

**关键词:** 数据不确定性; 鱼类生物完整性指数; 崇明岛; 鱼类调查

**中图分类号:** S 932.4

**文献标志码:** A

生物完整性指数 (Index of biotic integrity, IBI) 是评估生态系统健康的经典方法之一, 已经应用在国内多个地区<sup>[1-3]</sup>。我国学者<sup>[4-7]</sup>曾应用生物完整性指数对长江在内的多个河流、湖泊和河口等区域进行了完整性评价。2021 年 3 月 1 日正式实施的《中华人民共和国长江保护法》提出要建立长江流域生物完整性指数评价体系, 进一步彰显了生物完整性指数在我国水生生态系统健康评价中的重要性。根据研究水体类型和指示生物类群的不同, 生物完整性指数可分为鱼类生物完整性指数 (Fish-index of biological integrity, F-IBI)<sup>[7]</sup>、底栖无脊椎动物完整性指数 (Benthos-index of biological integrity, B-IBI)<sup>[8]</sup>、着

生藻类完整性指数 (Periphyton-index of biological integrity, Pe-IBI)<sup>[9]</sup>、浮游植物完整性指数 (Phytoplankton-index of biological integrity, Ph-IBI)<sup>[9]</sup>等。其中鱼类生物完整性指数是最早建立, 也是应用最为普遍的一种评价方法<sup>[10]</sup>。

鱼类生物完整性指数的主要计算方法为通过比较不同类型指标的现状监测值和历史参考值的差异, 赋予各指标相应分值, 综合反映生态系统健康状况<sup>[11]</sup>。根据总体评分, 可将完整性状况划分为 5~6 个等级<sup>[1-2, 12]</sup>。这种评价方法简单直观, 但是在计算过程中并未充分考虑到获得数据的不确定性。由于鱼类的天然游动性, 受到监测方法、监测站位设计和监测工具选择等因素的

收稿日期: 2022-03-08

修回日期: 2022-09-26

基金项目: 三峡集团项目 (202003229); 上海市科委高校地方能力建设项目 (21010502200); 上海市农委科技兴农技术创新项目“长江口水生生物资源监测评估技术研究” (沪农科创字 2022 第 2-1 号)

作者简介: 石子玉 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学。E-mail: 1487679930@qq.com

通信作者: 韩东燕, E-mail: dyhan@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

影响,鱼类监测数据往往存在一定的不确定性,在统计上表现为观测数据的偏差和误差<sup>[13-15]</sup>。例如,采样站点布设数量及站位设计会显著影响监测结果。LI 等<sup>[13]</sup>分析了不同采样设计方案对缅甸湾龙虾监测效果的影响,发现相比随机站位设计,定点采样会产生更多的偏差。XU 等<sup>[14]</sup>对海州湾的水生生物监测站位调查进行评估发现,当监测站位由 24 个降至 18 个时,平均网次渔获量等多个指标的相对估计误差(Relative estimate error, REE)明显增加,部分指标的 REE 甚至超过 30%。

水生生物监测数据的不确定性广泛存在于监测过程中,并且难以消除<sup>[16]</sup>。通过计算机模拟,可以分析不同因素导致的数据不确定性对各种分析结果的影响<sup>[17-19]</sup>。计算机模拟可以有效评估分析方法的稳健程度和结果的可信度,在国内外已经有了大量的应用。如 ZHANG 等<sup>[17]</sup>分析了数据波动对生物量谱模型输出结果的影响;陈宁等<sup>[18]</sup>应用计算机模拟分析了捕捞观测数据的误差和偏差对蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)资源评估结果的影响。然而,目前尚未见对鱼类生物完整性指数计算过程中数据不确定性影响方面的报道。

为探讨各指标监测值不确定性对鱼类生物完整性评价结果的影响,本研究以上海市崇明岛附近水域为例,基于在该水域进行的渔业资源调查,构建并计算了崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数,评估崇明岛附近水域生态系统状况。同时,通过计算机模拟,分析了鱼类种类数等指标监测值不确定性对该水域鱼类生物完整性指数评价结果的影响,以期对鱼类生物完整性指数的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据获取

数据来自 2020 年 8 月和 11 月在崇明岛附近水域进行的渔业资源调查,采样方式为定点采样,共设 14 个调查站位(图 1)。调查船只为单船底拖网渔船,网口长和网口高分别为 6 m 和 2 m,网纲长 6 m,囊网网目为 20 mm。每站位以平均 2 kn 拖速作业 30 min。渔获样品运回实验室后,对鱼类进行鉴定、计数和称量,获得鱼类种类组成信息,并记录外形异常和感染疾病个体信息。

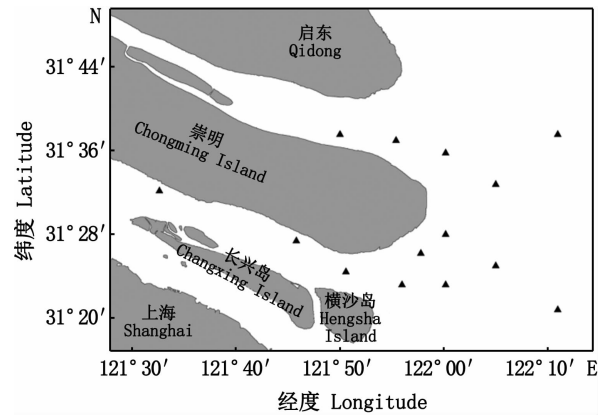


图 1 崇明岛附近水域调查站位图  
Fig. 1 Survey stations in waters near Chongming Island

调查水域的历史资料来自于相关文献<sup>[20-23]</sup>及本研究团队自 2004 年以来在该水域开展的多年调查,根据相关文献和 FishBase 数据库确定崇明岛附近水域鱼类的栖息水层、摄食习性、耐受性和产卵类型等生态习性<sup>[20,22,24]</sup>,将研究水域鱼类根据栖息水层划分为中上层鱼类、底层鱼类和底栖鱼类,根据摄食习性划分为杂食性鱼类、底栖动物食性鱼类、游泳动物食性鱼类、浮游动物食性鱼类,根据耐受性分为低耐受性鱼类和高耐受性鱼类,根据产卵类型分为产黏性卵鱼类、产浮性卵鱼类、产沉性卵鱼类和卵胎生鱼类。

### 1.2 鱼类生物完整性指数计算

综合参考有关鱼类生物完整性指数研究<sup>[2,4-7]</sup>,结合崇明岛附近水域生态系统特点、数据可获得性、鱼类区系组成特征等情况,选择了鱼类种类组成、耐受性、营养结构、繁殖共位群、健康状况和生物量共 5 类属性 12 个指标(表 1),评价崇明岛附近水域鱼类生物完整性。其中种类组成属性指标包括种类总数、虾虎鱼种类数百分比和中上层鱼类种类数百分比。种类数是鱼类生物完整性指数中最常用,也是最具代表性的指标<sup>[10]</sup>。虾虎鱼类为河口区优势定居鱼种,是评价河口鱼类生物完整性指数的常用指标<sup>[2]</sup>。同时崇明岛附近水域中上层和洄游性鱼类较多,可以反映水域作为洄游通道的功能程度。耐受性主要是指鱼类对所处环境变化发生改变的敏感程度,高耐受性鱼类的数量在一定程度上随环境的恶化而增加,低耐受性鱼类则相反,两者可以作为水体环境质量的指示生物<sup>[25]</sup>。营养结构类

指标主要用来分析各种食性的渔获物占总渔获物的百分比,可以反映鱼类营养结构的变化,进而衡量人类干扰对水环境的改变<sup>[1]</sup>。产黏性卵鱼类种类数比例用来反映该地区鱼类繁殖共位群的稳定性。健康状况和生物量属性包括平均单位网次渔获量及感染疾病和外形异常个体比例,分别用来反映研究水域鱼类种群的相对大小,及作为化学污染、生境破碎化等人为干扰的监测指标<sup>[26]</sup>。

崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数各指标参考点选择受干扰极小、鱼类组成相似的样点或选择历史数据<sup>[1,27]</sup>。由于研究海域附近海洋工程和人类活动干扰强烈<sup>[28]</sup>,本研究中,鱼类种类数参考点结合在该海域开展的相关研究<sup>[21]</sup>及历年调查资料,其余指标以本项目组 2004—2020 年在该海域开展的历年监测数据为基础,选

取最优值作为参考点。

本研究通过“1、3、5”赋值法<sup>[1,10]</sup>对崇明岛附近水域鱼类生物完整性指标进行赋值(表 1),根据崇明岛附近水域生态系统特征和历史状态,将各指标的监测值分为 3 个层次,最好的层次为 5 分,其次为 3 分,最差的为 1 分。目前各指标的赋分还不存在一个统一标准,本文参考生物完整性指数相关研究<sup>[4-5,7]</sup>,结合各指标生物学和生态学属性,划定了具体的赋分标准(表 1)。综合所选指标的分值得出调查区域的鱼类生物完整性分值<sup>[29]</sup>,根据生物完整性的各等级标准评价崇明岛附近水域鱼类生物完整性状况(表 2)。IBI 总分的计算公式如下:

$$I_{\text{IBI}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{12} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{IBI}}$ 为 IBI 总分值; $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  到  $I_{12}$  分别为第 1 个到第 12 个的指标分值。

表 1 崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数及其评分标准  
Tab. 1 Scoring criteria of F-IBI in waters near Chongming Island

属性 Attribute	指标 Index	分值 Score		
		5	3	1
种类组成 Species composition	1. 种类总数/种	>28	18~28	<18
	2. 虾虎鱼种类数百分比/%	<17	17~26	>26
	3. 中上层鱼类种类数百分比/%	>25	17~25	<17
	4. 洄游性种类数百分比/%	>54	36~54	<36
耐受性 Tolerance	5. 低耐受性鱼类种类数百分比/%	>19	19~13	<13
	6. 高耐受性鱼类种类数百分比/%	<24	24~35	>35
营养结构 Trophic structure	7. 杂食性鱼类数量比例/%	<15	15~24	>24
	8. 底栖动物食性鱼类数量比例/%	>49	33~49	<33
	9. 游泳动物食性鱼类数量比例/%	>38	25~38	<25
繁殖共位群 Reproductive guild	10. 产黏性卵鱼类种类数比例/%	<38	38~57	>57
健康状况和生物量 Health conditions and biomass	11. 感染疾病和外形异常个体比例/%	<2	2~5	>5
	12. 平均网次渔获量/(kg/网)	>6	4~6	<4

表 2 崇明岛附近水域鱼类生物完整性等级划分及特征  
Tab. 2 Classification of F-IBI in waters near Chongming Island

鱼类生物完整性指数 F-IBI	特征描述 Attribute	完整性等级 Integrity class
58~60	期望出现的种类,包括耐受性极差的种类都存在,鱼类丰度高,高耐受性鱼类比例较低,游泳动物食性和底栖动物食性鱼类比例较高,无感染疾病和外形异常个体。	极好
48~52	种类丰度低于期望值,耐受性极差的种类减少,某些种类的数量和大小分布低于期望值,杂食性鱼类比例高于期望值,存在感染疾病和外形异常个体。	好
40~44	种类丰度降低,耐受性差的种类消失,部分种类数量下降;杂食性鱼类和耐受力强的种类频率增加,感染疾病和外形异常个体数量增多。	一般
24~34	种类丰度较低,洄游性物种数量明显降低,杂食性种类、耐受性强的种类占据优势,感染疾病和外形异常个体数量增多。	差
12~22	种类丰度低,除耐受性极强的杂食性种类外,鱼类较少,感染疾病和外形异常个体数量明显。	极差
0	反复监测,没有发现鱼。	无鱼

### 1.3 数据不确定性分析

本研究以 2020 年实际调查数据作为崇明岛附近水域鱼类生物完整性“真实值”,通过计算机模拟分析部分指标的监测值波动对该水域鱼类生物完整性评价结果的影响。首先,在崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数评价体系的 5 类指标中各选取 1 个指标进行不确定性分析,选取的指标分别为鱼类种类数、低耐受性鱼类种类数百分比、游泳动物食性鱼类数量比例、产黏性卵鱼类种类数比例和平均网次渔获量。由于监测数据的不确定性来源复杂,难以准确估计,研究根据 XU 等<sup>[14]</sup>的分析结果,将 30% 作为评价基准,对各个评价指标的监测值赋予 30% 的变异系数

(Coefficient of variation, CV),每次随机从平均值为指标监测值,标准差为  $30\% \times$  监测值的正态分布中抽取模拟值(由于鱼类种类数的监测值不会大于水域内真实种类数,随机抽样时,仅从其正态分布右侧的模拟值中抽取),并计算崇明岛附近水域鱼类生物完整性得分,该过程重复 1 000 次,通过崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数变异系数评估监测值波动对评价结果产生影响。评价流程详见图 2。变异系数计算公式:

$$I_{CV} = 100 \times S/\bar{X} \quad (2)$$

式中: $I_{CV}$  为变异系数 CV,%; $S$  为鱼类生物完整性指数得分标准差; $\bar{X}$  为鱼类生物完整性指数平均得分。

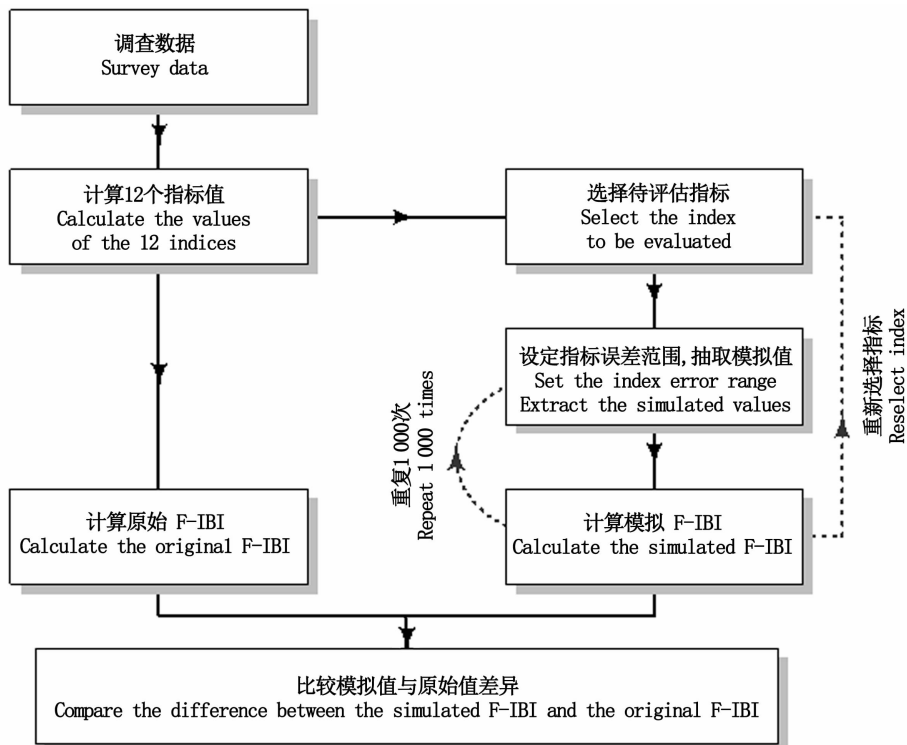


图 2 崇明岛附近水域鱼类生物完整性数据不确定性分析流程图

Fig. 2 Flowchart of the data uncertainty analysis for F-IBI in waters near Chongming Island

通过以上流程,分别估算单一指标和 5 个指标共同变异系数为 30% 时,崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数变化情况。

同时,为分析监测值不同波动范围对评价结果的影响,以 5% 为间隔,对抽取的各个指标依次

赋予 5% 至 100% 的变异系数,重复抽样和计算过程,分析指标波动范围与鱼类生物完整性得分变异程度的关系。崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数的计算、计算机模拟过程及相关图表绘制均通过 R 语言实现。

## 2 结果

### 2.1 鱼类组成及属性类型

2020年8月和11月在崇明岛附近水域共捕获20种鱼类,包括海洋性鱼类、河口性鱼类和洄游性鱼类。其中:鲈形目(Perciformes)9种,占总种类数的45%;鲇形目(Siluriformes)3种,占总种类的15%;鲱形目(Clupeiformes)和鲾形目(Pleuronectiformes)均为2种,分别占总种类数的10%;仙女鱼目(Aulopiformes)、鲤形目(Cypriniformes)、鲮形目(Mugiliformes)、鲃形目(Tetraodontiformes)等均1种,分别占总种类数的5%。从洄游习性来看,洄游性鱼类9种,占总种类数的45%。从栖息水层来看,中上层鱼类2种,底层鱼类11种,底栖鱼类7种,分别占10%、

55%和35%。从产卵类型来看,产黏性卵鱼类9种,产浮性卵鱼类11种,分别占45%和55%。调查水域中未发现疾病或外形异常个体,本次调查平均网次渔获量为0.45 kg/网。

### 2.2 崇明岛附近水域鱼类生物完整性状况

根据崇明岛附近水域鱼类生物完整性计算方法,研究水域2020年8—11月鱼类生物完整性得分为28分,鱼类生物完整性处于“差”的水平(表3)。其中以中上层鱼类种类数百分比、低耐受性鱼类种类数百分比、杂食性鱼类数量比例、底栖动物食性鱼类数量比例、游泳动物食性鱼类数量比例和平均网次渔获量等指标得分最低,均为1分。高耐受性鱼类种类数百分比、感染疾病和外形异常个体比例得分最高,为5分。

表3 崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数得分

Tab.3 Scores of F-IBI in waters near Chongming Island

属性 Attribute	指标 Index	监测值 Survey value	分值 Score
种类组成 Species composition	1. 种类数量/种	20	3
	2. 虾虎鱼种类数百分比/%	25	3
	3. 中上层鱼类种类数百分比/%	10	1
	4. 洄游性种类数百分比/%	45	3
耐受性 Tolerance	5. 低耐受性鱼类种类数百分比/%	10	1
	6. 高耐受性鱼类种类数百分比/%	20	5
营养结构 Trophic structure	7. 杂食性鱼类数量比例/%	25.81	1
	8. 底栖动物食性鱼类数量比例/%	17.42	1
	9. 游泳动物食性鱼类数量比例/%	12.47	1
繁殖共位群 Reproductive guild	10. 产黏性卵鱼类种类数比例/%	45	3
健康状况和生物量 Health conditions and biomass	11. 感染疾病和外形异常个体比例/%	0	5
	12. 平均网次渔获量/(kg/网)	0.45	1
总分 Total score			28

### 2.3 数据不确定性对评价结果的影响

分析结果表明,在30%的变异系数下,所选的不同指标监测值波动对崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数的影响程度不同(图3)。其中,鱼类种类数监测值的变异会导致鱼类生物完整性指数得分一定程度的增加,其结果维持在28分的概率为80.5%,增加至30分的概率为19.5%。低耐受性鱼类种类数百分比监测值30%的变异会导致鱼类生物完整性指数得分一定程度的增加,维持在28分的概率较高为84.7%,增加至30分的概率为15.2%,增加至32分的概率为0.1%。游泳动物食性鱼类数量比例30%的变异会导致0.2%的概率使鱼类生物完整性指数得

分增加至30分。产黏性卵鱼类种类数比例30%的变异会导致鱼类生物完整性指数得分维持在28分的概率为51.1%,降低至26分的概率为21.3%,增加至30分的概率为27.6%。平均网次渔获量监测值30%的变异不会影响鱼类生物完整性指数的评估结果。选择的5个指标监测值同时存在30%变异时,鱼类生物完整性得分波动范围比5个指标监测值单独存在变异时大,为26~34分,平均值为28.87分。从对评价结果等级的影响来看,所选的5个指标单独存在30%变异或共同存在30%变异时,崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数评价等级均为“差”。

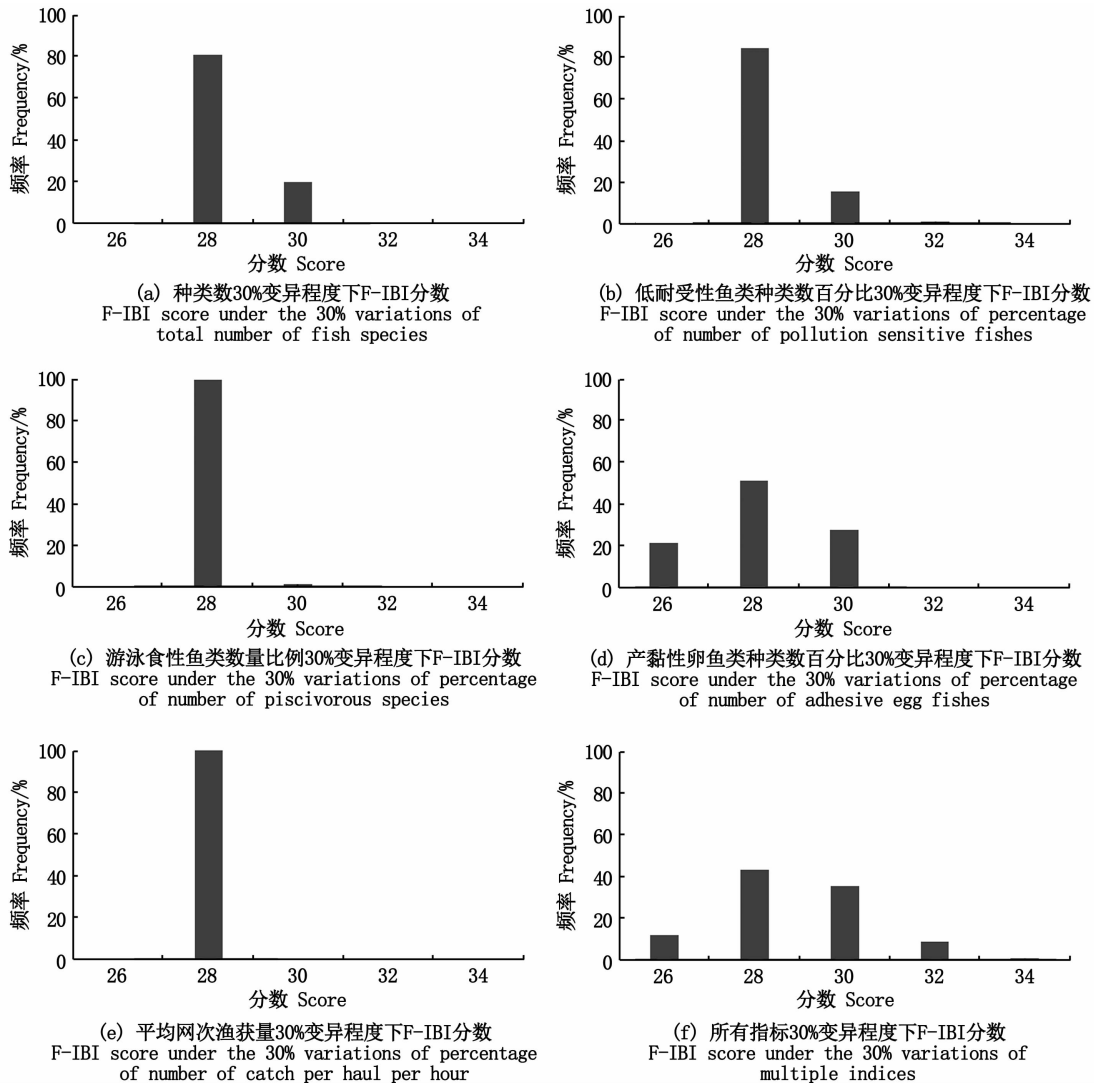


图3 不同评价指标30%变异程度下崇明岛附近水域鱼类完整性得分分布

Fig. 3 Frequency plot of F-IBI in waters near Chongming Island under the 30% variations of different indices

随着指标监测值变异程度的改变,其对崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数的影响程度也会发生变化(图4)。整体上看,平均网次渔获量监测值波动基本对评估结果无影响。其余各指标的变异幅度为5%时,不影响鱼类生物完整性评价结果。随着各指标监测值变异程度从5%增加至25%时,鱼类种类数、低耐受性鱼类种类数百分比和产黏性卵鱼类种类数比例对崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数的影响整体呈现增加趋势,其中产黏性卵鱼类种类数比例监测值波动对崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数评估

结果的影响高于鱼类种类数和低耐受性鱼类种类数百分比。当变异幅度超过25%以后,游泳动物食性鱼类数量比例监测值波动增加会对鱼类生物完整性指数结果产生影响。同时,多指标同时存在监测数据不确定性时的崇明岛附近水域鱼类生物完整性指数变异系数远高于单一指标存在不确定性。例如,当指标监测值变异系数为40%时,5个指标共同变异导致的鱼类生物完整性指数值变异系数达到6.86%,高于单指标导致的0~5.48%的变异。

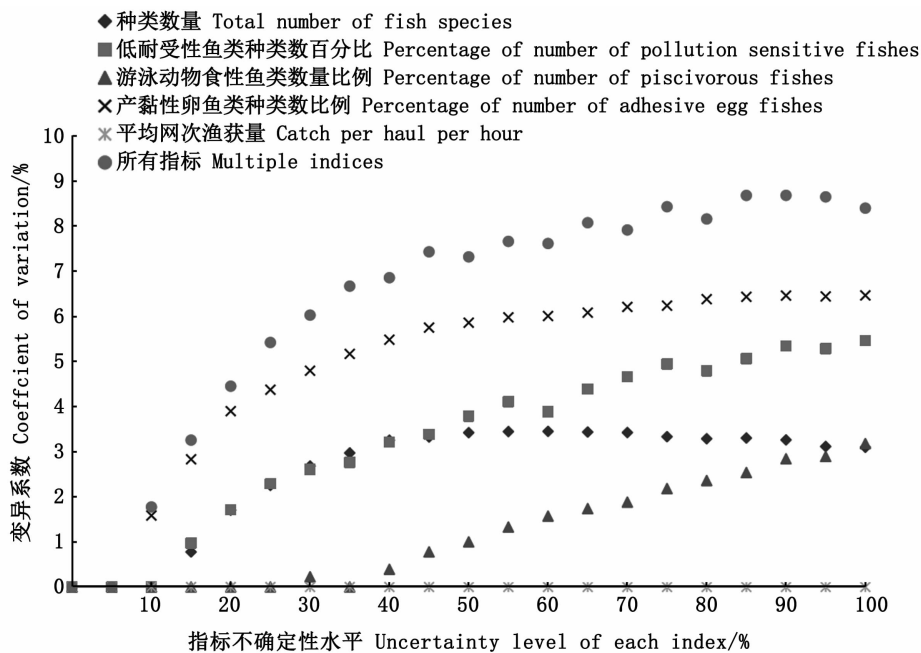


图4 崇明岛附近水域鱼类生物完整性得分变异系数与指标监测值不确定性关系

Fig. 4 Relationship between the uncertainty of index value and coefficients of variations of F-IBI in waters near Chongming Island

### 3 讨论

研究表明,崇明岛附近水域2020年8—11月的鱼类生物完整性程度为“差”。刘守海等<sup>[24]</sup>曾运用河口生物完整性指数对上海周边海域健康状况进行评价,发现长江口海域处于“差—极差”水平,本研究结果与其相似。叶属峰等<sup>[30]</sup>应用结构功能指标体系评估了长江河口海域的生态系统健康状态,发现其处于健康与不健康之间。这些研究从多个角度反映出近年来长江口水域生态系统受到了较高的环境和人为活动胁迫。受崇明岛附近水域长期以来的高强度捕捞、水质污染和航运工程等因素影响,水生生物生存环境恶化,鱼类资源量下降,原始鱼类种群结构改变<sup>[31-35]</sup>。从具体指标来看,鱼类种类数得分较低,2020年8月和11月调查水域内可监测到鱼类种类数为20种,比2004—2020年监测到的同期(8月、11月)最高种类数(28种,2013年)低28.6%。同时,中上层鱼类和洄游性鱼类种类数比例较低,凤鲚(*Coilia mystus*)、带鱼(*Trichiurus lepturus*)等往年常见的洄游性物种并未在该调查航次监测到,一方面反映了崇明岛附近水域作为鱼类洄游通道的功能性受到了一定阻碍,另一方

面本研究选用数据的调查时间8月和11月可能影响了洄游性鱼类种类监测数量。同时,流域内及河口大型水利工程等人类活动也会造成鱼类栖息地丧失,导致部分鱼类产卵场、育幼场等渔场生境破碎化<sup>[31,33]</sup>,这也是影响崇明岛附近水域鱼类种群结构的主要原因。目前崇明岛附近水域营养结构相关指标得分低,反映了该水域鱼类群落营养结构的恶化。游泳动物食性鱼类数量比例较历史监测的同期最高比例显著下降,同时杂食性鱼类数量比例增加。说明受捕捞压力等扰动的影响,崇明岛附近水域高营养级鱼类丰度降低,小型低营养级鱼类丰度增加并成为优势种,目前崇明岛附近水域优势鱼类多为窄体舌鳎(*Cynoglossus gracilis*)、棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)等小型鱼类<sup>[36]</sup>。底栖动物食性鱼类数量占比相对较低,反映其水体环境质量的恶化。底栖食性鱼类对栖息环境水体化学性质变化敏感<sup>[1]</sup>,其丰度随栖息地多样性和水环境整体质量的下降而下降。研究<sup>[28,34-35]</sup>表明,近年来,受污染物入海排放及水利工程建设影响,崇明岛附近水域营养盐和重金属污染严重,其中营养盐主要污染物为无机氮和活性磷酸盐,这导致了水域富营养化现象加重,赤潮发生频率增高。赤潮藻类大



量死亡产生的毒素不仅危害鱼类等水生生物的生存,也影响了水生生物群落结构特征<sup>[28]</sup>。

相比单一理化评价指标,鱼类生物完整性指数综合了群落结构、种类组成、营养结构等多维度的评价指标,可以对鱼类及生态系统状况进行客观描述<sup>[2-3]</sup>。目前已广泛用于河流生态系统健康评价<sup>[5,37-38]</sup>。2021年3月1日发布的《中华人民共和国长江保护法》第四十一条明确提出要建立长江流域生物完整性指数评价体系,作为评估长江流域生态系统总体状况的重要依据。生物完整性指数将成为我国水生生态保护的重要评价指标。确保生物完整性指数计算结果的科学和客观,是顺利实施完整性评价的关键。监测数据的准确性和代表性是生物完整性评价体系所得结果正确与否的基础<sup>[10]</sup>。然而,在监测过程中,受水生生物和环境因子的随机性、监测工具的选择性、站位设计方法和监测站位数量等因素影响,水生生物监测结果往往存在一定的不确定性<sup>[13-14,39]</sup>。这种不确定性会导致监测结果无法如实反映水生生物多样性的真实状况<sup>[18,40-41]</sup>,进而影响基于这些数据的分析和评估结果。

为分析监测数据不确定性对生物完整性指数评价结果的影响,本研究通过计算机模拟分析了指标监测值不确定性对崇明岛附近水域鱼类生物完整性的影响,结果表明,选取的指标存在30%变异时,崇明岛附近水域鱼类生物完整性评价结论虽未发生改变(均为“差”等级),但是鱼类生物完整性得分发生一定的改变,达到“差”等级的上限。同时,随着不确定性程度的增加,崇明岛附近水域鱼类生物完整性评价结果的波动程度也会提升。说明监测数据的不确定性会导致鱼类生物完整性指数得分发生改变,并有可能影响最终的评价结论。本研究中,不同指标的监测值不确定性对鱼类生物完整性指数值的影响程度不同,这主要是由各指标监测值在评价体系评分段的位置决定。随指标实际监测值与各指标赋分边界越近,其监测值不确定性对鱼类生物完整性评价结果的影响越大。崇明岛附近水域2020年8月和11月平均网次渔获量为0.45 kg/网,远低于其完整性最低赋分(1分)的下界线(4 kg/网),导致监测数据的波动无法影响最终的完整性赋分。当评价指标实际监测值靠近赋分边界时,其监测数据的波动范围涵盖了不同的完整

性得分赋分区间,则有可能导致最终的完整性赋分改变(如本研究中的产黏性卵鱼类种类数比例指标)。本研究中,未进行不确定性分析的虾虎鱼种类数百分比、杂食性鱼类数量比例的监测值分别靠近完整性得分赋分区间的上边界和下界线,这类指标的轻微波动可能导致其评价得分提升或降低。这说明在崇明岛鱼类生物完整性指数评价中,评价指标实际监测值在赋分区间的位置会直接影响指标不确定性在鱼类生物完整性指数最终评价结果中的表现。

因此,为科学开展水生生物完整性评价,合理评估水域生态系统状况应充分考虑监测数据不确定性的影响,通过提高监测数据精准程度,提升水生生物完整性评估的科学性和客观性。监测站位设计是影响监测数据代表性和稳健型的主要因素<sup>[42-44]</sup>。通过随机站位设计,提高水生生物监测的代表性,或对定点调查站位进行基于模型的水生生物分布模拟<sup>[45-46]</sup>,通过统计手段合理估算监测值的置信区间<sup>[46]</sup>等方式都可以降低水生生物监测结果的不确定性。同时,通过计算机模拟,可以发现鱼类生物完整性指数评价结果对哪些指标的不确定性反应最激烈,在考虑指标与生态系统结构和功能关联性的前提下通过适当减少影响程度较大的指标,增加稳定性较高的指标,也可以在一定程度上改善评价结果的稳健性。此外,本研究在构建鱼类生物完整性指数评级体系时,仅采用了应用最广泛的“1、3、5”评分法<sup>[10,47]</sup>,并在相应的监测指标选择中多借鉴了相似水域研究结论<sup>[2,4-7]</sup>。下一步,将分析不同监测站位设计下监测数据的不确定性变化程度及其对水生生物完整性评价结果的影响,并继续开展研究不同误差来源、鱼类生物完整性指数不同指标构成及不同赋分方式等情景下的数据不确定性分析,为崇明岛附近水域鱼类生物完整性评价提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] KARR J R, FAUSCH K D, ANGERMEIER P L, et al. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale[J]. Illinois Natural History Survey Special Publication, 1986, 5: 1-28.
- [2] 张芮, 徐宾铎, 薛莹, 等. 黄河口及其邻近水域鱼类生物完整性评价[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 946-952. ZHANG R, XU B D, XUE Y, et al. Evaluation of the biotic

- integrity of fish assemblages in the Yellow River estuary and its adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 946-952.
- [3] SOUZA G B G, VIANNA M. Fish-based indices for assessing ecological quality and biotic integrity in transitional waters: a systematic review [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105665.
- [4] 陈耀辉,刘守海,何彦龙,等. 近30年长江口海域生态系统健康状况及变化趋势研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(4): 55-65.
- CHEN Y H, LIU S H, HE Y L, et al. Study on ecosystem health and variation trend at the Changjiang River Estuary in the past 30years[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(4): 55-65.
- [5] 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, 10.
- LIU M D, CHEN D Q, DUAN X B, et al. Assessment of ecosystem health of upper and middle Yangtze River using fish-index of biotic integrity[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(2): 1-6, 10.
- [6] 林群,袁伟,单秀娟,等. 莱州湾水域鱼类生物完整性评价[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(2): 101-106.
- LIN Q, YUAN W, SHAN X J, et al. Evaluation on biological integrity of fish in Laizhou Bay [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(2): 101-106.
- [7] 张亚,余宏昌,毕宝帅,等. 基于鱼类生物完整性指数的上海苏州河水生态系统健康评价[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(6): 164-177.
- ZHANG Y, YU H C, BI B S, et al. Ecological health assessment of Suzhou River in Shanghai based on fish index of biotic integrity [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(6): 164-177.
- [8] 李斌,李先福,唐涛,等. 基于大型底栖动物完整性指数评价深圳茅洲河生态状况[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(5): 62-68.
- LIN B, LI X F, TANG T, et al. Ecological condition assessment of Maozhou River at Shenzhen City based on the benthic index of biological integrity [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(5): 62-68.
- [9] 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.
- LIU Y Y, AYI Q L, ZHANG S R, et al. Comparative study on the suitability of periphytic algae and phytoplankton in river health assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3833-3843.
- [10] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [11] 余梵冬,顾克恩,佟延南,等. 基于鱼类多样性与生物完整性的海南岛南渡江河流健康评价[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(9): 2717-2726.
- YU F D, GU D E, TONG Y N, et al. The ecological health assessment based on species diversity and biotic integrity of fish for Nanduijiang River, Hainan Island [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2717-2726.
- [12] 刘杨,陈凯,蔡永久,等. 应用鱼类完整性指数 F-IBI 评价巢湖流域的主要河流健康[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 73-83.
- LIU Y, CHEN K, CAI Y J, et al. The health assessment of the main rivers in the Chaohu Basin using fish-index of biotic integrity [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 73-83.
- [13] LI B, CAO J, CHANG J H, et al. Evaluation of effectiveness of fixed-station sampling for monitoring American lobster settlement [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2015, 35(5): 942-957.
- [14] XU B D, ZHANG C L, XUE Y, et al. Optimization of sampling effort for a fishery-independent survey with multiple goals [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(5): 252.
- [15] 陈锦辉,王学昉,田思泉,等. 长江口及邻近水域渔业资源监测现状分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(1): 122-136.
- CHEN J H, WANG X F, TIAN S Q, et al. A review of the development of fishery resources monitoring in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(1): 122-136.
- [16] 官文江,朱江峰,高峰. 印度洋长鳍金枪鱼资源评估的影响因素分析[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(5): 1102-1114.
- GUAN W J, ZHU J F, GAO F. Analysis of influencing factors on stock assessment of the Indian Ocean albacore tuna (*Thunnus alalunga*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(5): 1102-1114.
- [17] ZHANG C L, CHEN Y, REN Y P. Assessing uncertainty of a multispecies size-spectrum model resulting from process and observation errors [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, 72(8): 2223-2233.
- [18] 陈宁,徐宾铎,薛莹,等. 捕捞数据不确定下蓝点马鲛渔业管理策略评估[J]. *水产学报*, 2018, 42(7): 1154-1167.
- CHEN N, XU B D, XUE Y, et al. Management strategy evaluation of mackerel (*Scomberomorus niphonius*) fishery with uncertainty of catch data [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(7): 1154-1167.
- [19] HAN D Y, ZHANG C L, XUE Y, et al. Impacts of sample size for stomach content analysis on the estimation of ecosystem indices [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(8): 53-61.
- [20] 罗秉征,韦晟,窦硕增. 长江口鱼类食物网与营养结构的研究[J]. *海洋科学集刊*, 1997, 38(1): 143-153.
- LUO B Z, WEI S, DOU S Z. Study on food web and trophic structure of fish in the Changjiang River Estuary [J]. *Studia*

- Marina Sinica, 1997, 38(1): 143-153.
- [21] 李建生, 李圣法, 程家骅. 长江口渔场鱼类组成和多样性[J]. 海洋渔业, 2006, 28(1): 37-41.  
LI J S, LI S F, CHENG J H. The composition and diversity of fishes on fishing grounds of Changjiang estuary[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(1): 37-41.
- [22] 于海成. 长江口及邻近海域鱼类群落结构分析[D]. 青岛: 中国科学院研究生院, 2008.  
YU H C. Fish community structure in the Changjiang Estuary and adjacent waters [D]. Qingdao: Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [23] 马金, 黄金玲, 陈锦辉, 等. 基于 GAM 的长江口鱼类资源时空分布及影响因素[J]. 水产学报, 2020, 44(6): 936-946.  
MA J, HUANG J L, CHEN J H, et al. Analysis of spatiotemporal fish density distribution and its influential factors based on generalized additive model (GAM) in the Yangtze River estuary[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 936-946.
- [24] 刘守海, 张昊飞, 何彦龙, 等. 基于河口生物完整性指数评价上海周边海域健康状况的初步研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1494-1501.  
LIU S H, ZHANG H F, HE Y L, et al. The preliminary study of ecosystem health assessment in Shanghai adjacent waters, in China, based on estuarine biotic integrity index [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(8): 1494-1501.
- [25] GANASAN V, HUGHES R M. Application of an index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the rivers Khan and Kshipra (Madhya Pradesh), India [J]. Freshwater Biology, 1998, 40(2): 367-383.
- [26] 郑海涛. 怒江中上游鱼类生物完整性评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.  
ZHENG H T. Evaluating the biotic integrity of up and middle reaches of Nujiang River based on fish assemblages [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [27] MORLEY S A, KARR J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound basin[J]. Conservation Biology, 2002, 16(6): 1498-1509.
- [28] 王孝程, 解鹏飞, 李晴, 等. 长江口海域生态环境状况及保护对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1197-1205.  
WANG X C, XIE P F, LI Q, et al. Ecological environment of the Yangtze Estuary and protection countermeasures [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1197-1205.
- [29] MOYLE P B, RANDALL P J. Evaluating the biotic integrity of watersheds in the Sierra Nevada, California [J]. Conservation Biology, 1998, 12(6): 1318-1326.
- [30] 叶属峰, 刘星, 丁德文. 长江河口海域生态系统健康评价指标体系及其初步评价[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 128-136.  
YE S F, LIU X, DING D W, et al. Ecosystem health assessment of the Changjiang River Estuary: indicator system and its primarily assessment [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(4): 128-136.
- [31] 叶属峰. 大型工程对长江河口近岸海域生态系统的影响及机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.  
YE S F. Studies on the impacts and mechanism of the coastal marine ecosystem in the Yangtze River Estuary [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005.
- [32] LIU H, GUO C B, QU X, et al. Fish diversity, endemism, threats, and conservation in the Jinsha River Basin (upper Yangtze River), China [J]. North American Journal of Fisheries Management, 2021, 41(4): 967-984.
- [33] YANG Z, ZHU D, ZHU Q G, et al. Development of new fish-based indices of biotic integrity for estimating the effects of cascade reservoirs on fish assemblages in the upper Yangtze River, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 119: 106860.
- [34] 潘宇迪, 杨红, 吴建辉, 等. 长江口口门海域水体重金属时间变化趋势及预测[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 685-698.  
PAN Y D, YANG H, WU J H, et al. Research on the temporal variation trend and prediction of heavy metals in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 685-698.
- [35] 王淼娣, 王雪辉, 杜飞雁, 等. 基于 LBB 方法估算北部湾竹筴鱼种群参数[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 212-222.  
WANG M D, WANG X H, DU F Y, et al. Estimation of the population parameters of *Trachurus japonicus* in the Beibu Gulf based on the LBB method [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 212-222.
- [36] 吴建辉, 王家启, 戴小杰, 等. 基于概率模型的长江口鱼类空间共现模式分析[J]. 南方水产科学, 2019, 15(1): 1-9.  
WU J H, WANG J Q, DAI X J, et al. An analysis of spatial co-occurrence pattern of fish species of Yangtze River estuary based on probabilistic model [J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(1): 1-9.
- [37] APARICIO E, CARMONA-CATOT G, MOYLE P B, et al. Development and evaluation of a fish-based index to assess biological integrity of Mediterranean streams [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2011, 21(4): 324-337.
- [38] 边坤, 张建禄, 苟妮娜, 等. 应用鱼类生物完整性指数评价秦岭黑河流域健康状况[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 23-29.  
BIAN K, ZHANG J L, GOU N N, et al. Ecological health assessment of Heihe river, Qingling, using the fish-based index of biotic integrity [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(3): 23-29.
- [39] FALLON N G. Characterising uncertainty in fish survey data: the case of mackerel icefish (*Champscephalus gunnari*) at

- South Georgia [D]. Aberdeen; University of Aberdeen, 2016.
- [40] 李亚楠,戴小杰,朱江峰,等. 渔获量不确定性对印度洋大眼金枪鱼资源评估的影响[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 1-9.
- LI Y N, DAI X J, ZHU J F, et al. Impact of catch uncertainty on the stock assessment of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Indian Ocean [J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 1-9.
- [41] SUN C Y, WANG Y B. Impacts of sampling design on the abundance estimation of *Portunus rituberculatus* using crab pots[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2021, 39(2): 770-783.
- [42] FOLMER O, PENNINGTON M. A statistical evaluation of the design and precision of the shrimp trawl survey off West Greenland [J]. Fisheries Research, 2000, 49(2): 165-178.
- [43] CAO J, CHEN Y, CHANG J H, et al. An evaluation of an inshore bottom trawl survey design for American lobster (*Homarus americanus*) using computer simulations [J]. Journal of Northwest Atlantic Fishery Science, 2014, 46(27): 27-39.
- [44] 唐政,单秀娟,金显仕. 渔业资源调查采样设计优化研究进展[J]. 海洋科学, 2019, 43(4): 88-97.
- TANG Z, SHAN X J, JIN X S. A review of optimization of sampling design for fishery-independent surveys [J]. Marine Sciences, 2019, 43(4): 88-97.
- [45] 赵静,章守宇,林军,等. 不同采样设计评估鱼类群落效果比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1181-1187.
- ZHAO J, ZHANG S Y, LIN J, et al. A comparative study of different sampling designs in fish community estimation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1181-1187.
- [46] 潘邵媛,王学昉,田思泉,等. 不同采样设计对长江口海洋环境监测效果影响的评价[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(3): 435-441.
- PAN S Y, WANG X F, TIAN S Q, et al. Evaluation of the effect of different sampling designs on marine environmental monitoring in the Yangtze River Estuary [J]. Marine Environment Sciences, 2021, 40(3): 435-441.
- [47] 严大明,何佳洋,罗杰,等. 基于鱼类多样性及完整性指数评价南河上游流域健康状况[J]. 淡水渔业, 2021, 51(5): 3-12.
- YAN T M, HE J Y, LUO J, et al. Assessment of ecosystem health on the upper and middle reaches of Nanhe River with the fish-based biotic integrity index [J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(5): 3-12.

## Effects of survey data uncertainty on the results of fish-index of biological integrity in waters near Chongming Island

SHI Ziyu<sup>1,2,3,4</sup>, HAN Dongyan<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Chunxia<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Jinhui<sup>4,5</sup>, WU Jianhui<sup>4,5</sup>, WANG Xuefang<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. Joint Laboratory for Monitoring and Conservation of Aquatic Living Resources in the Yangtze Estuary, Shanghai 201306, China; 5. Shanghai Aquatic Wildlife Conservation Research Center, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to analyze the impact of data uncertainty on the results of fish-index of biological integrity (F-IBI), a F-IBI was constructed based on the historical information and ecosystem characteristics of the surrounding waters of Chongming Island, China. A total of 12 indices related to fish species composition, trophic structure, tolerance, reproductive character, health conditions and biomass were included in this F-IBI. Fish community information in waters near Chongming Island were collected from surveys in August and November 2020. The F-IBI was used to evaluate the state of ecosystem health of study area. Besides, the effects of survey data uncertainty on the projection of F-IBI for the surrounding waters of Chongming Island were evaluated by computer simulation. Five indices (total number of fish species, percentage of number of pollution sensitive fishes, percentage of number of piscivorous species, percentage of number of adhesive egg fishes and catch per haul per hour) from 12 indices were selected as simulation indices. The effect of single index uncertainty, multiple indices uncertainty and different levels of uncertainty on the final estimation result of F-IBI were evaluated. Results indicated that the F-IBI was in the "poor" grade of the surrounding waters of Chongming Island in August and November 2020. Uncertainty analysis showed that a set of 30% at the coefficient of variance of indices did not affect the evaluation grade of F-IBI, but the score changed to a certain extent. With the increase of index uncertainty, the fluctuation range of the evaluation results of F-IBI increased gradually. The influence strength of each index was related with the position of survey data in the range in the scoring section of F-IBI system. The results of this study emphasize the importance of considering the natural fluctuation range of the evaluation index in the evaluation of F-IBI in waters near Chongming Island.

**Key words:** data uncertainty; fish-index of biological integrity(F-IBI); Chongming Island; fish survey