

文章编号: 1674-5566(2024)02-0424-09

DOI: 10.12024/jsou.20230704278

基于鱼类生物完整性指数的海州湾生态健康评价

蒋圣琪^{1,2}, 徐宾铎^{1,2}, 张崇良^{1,2}, 纪毓鹏^{1,2}, 任一平^{1,2}, 薛莹^{1,2}

(1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003; 2. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003)

摘要: 基于2013—2022年春季和秋季在海州湾及其邻近海域进行的渔业资源调查数据, 综合考虑鱼类的种类组成、耐受程度、营养结构、繁殖习性等生态参数和属性, 采用鱼类生物完整性指数(Fish-index of biotic integrity, F-IBI), 评价了海州湾生态系统健康状况及其变化趋势。结果表明, 海州湾春季和秋季的鱼类生物完整性指数各保留8个评价指标。海州湾春季和秋季的F-IBI得分分别为18~51和24~54。从健康等级来看, 春季海州湾生态系统基本在“一般”及以上水平, 秋季海州湾则在“一般”上下波动。总体上, 春季海州湾生态系统的健康状况较好, 鱼类生物完整性指数在波动中呈逐渐下降的趋势。整体来看, 海州湾鱼类资源状况不佳, 高耐污鱼类和杂食性鱼类所占比例有所增加, 渔业资源承受过度捕捞、气候变化等多方面的压力, 亟须采取科学有效的措施保护和修复海州湾的渔业资源及生态系统。

关键词: 鱼类生物完整性指数(F-IBI); 生态系统健康; 鱼类群落; 海州湾

中图分类号: S 932; X 826 **文献标志码:** A

生物完整性指数(Index of biological integrity, IBI)最初由KARR^[1]提出, 主要用于评价水域生态系统维持生物群落结构平衡和适应环境的能力, 现已成为监测和评价水域生态系统健康状况的有效工具之一。KARR^[1]以鱼类为研究对象, 建立了由12个生物参数组成的鱼类生物完整性指数(Fish-index of biotic integrity, F-IBI), 后续又扩展到了浮游生物、藻类、底栖无脊椎动物等生物^[2]。相较于其他生物, 鱼类更易于处理和识别, 对环境压力的响应较为敏感, 而且位于食物链的较高位置^[3], 因此基于鱼类群落的指标有更大的应用潜力, 目前已被广泛应用于淡水生态系统^[4], 然而在过渡水域(如河口、海湾和沿海泻湖)和海洋中的应用较少^[5]。近年来, 国内学者开始在黄河口、长江口、北部湾和莱州湾等海域应用鱼类生物完整性分析评价渔业资源和生态系统的健康状况及其变化趋势^[6-9]。

海州湾是位于黄海中部的开放型海湾, 因临近海州而得名, 岸线长约87 km, 面积为876.39 km²。海州湾湾内水质肥沃, 生产力高, 曾盛产小黄鱼

(*Larimichthys polyactis*)、日本带鱼(*Trichiurus japonicus*)、真鲷(*Pagrus major*)等鱼类, 是我国著名的渔场之一, 是众多鱼类的产卵场、育幼场和索饵场^[10]。海州湾渔场在20世纪50—60年代栖息多种优质渔业种类^[11], 然而自20世纪90年代起, 随着过度捕捞、海岸带开发、富营养化以及全球气候变化等因素的加剧, 海州湾渔业资源的衰退日益严重^[12]。目前, 海州湾渔业生物群落的结构和功能发生了较大变化, 低营养级的小型低值鱼类逐渐成为优势种, 主要经济鱼类资源量明显下降, 物种多样性也逐渐降低^[13-16]。

为此, 本研究基于2013—2022年春季和秋季在海州湾及其邻近海域进行的渔业资源调查数据, 综合考虑鱼类的种类组成、耐受程度、营养结构、繁殖习性等生态参数和属性, 初步构建海州湾鱼类生物完整性评价指标体系, 对海州湾生态系统健康状况及其变化趋势开展分析和评价, 旨在为海州湾渔业资源的可持续利用和管理提供科学依据, 为海州湾生态系统的保护和修复提供技术支撑。

收稿日期: 2023-07-11 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(31772852); 山东省自然科学基金(ZR2023MD096)

作者简介: 蒋圣琪(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业生态学。E-mail: jsq402@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 薛莹, E-mail: xueying@ouc.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>

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据来源

样本采自 2013—2022 年春季(4—5 月)和秋季(9—10 月)在海州湾及邻近海域进行的渔业资源底拖网调查,采用分层随机取样法(Stratified random sampling)设计调查站位。调查海域范围为 $119^{\circ}25'E\sim 121^{\circ}05'E$ 和 $34^{\circ}25'N\sim 35^{\circ}35'N$,并按照不同的水深、纬度和底质等因素,将调查海域划分为 A~E 共 5 个区域(图 1),每个航次随机选取 18 个站位进行调查采样^[17]。

调查船为功率 220 kW 的单拖渔船,网口高

度和宽度分为 6 m 和 25 m,囊网网目尺寸约 17 mm,每站位的拖曳时间约为 1 h,拖速为 2~3 kn。渔获物样品的保存、处理和分析均按照《海洋调查规范》(GB/T12763.6—2007)和《海洋监测规范》(GB17378—2007)进行,样品鉴定到种,并测定其体长、体质量等生物学数据。由于各站位的实际拖网时间和速度存在一定差异,在数据分析前将渔获数据统一按照拖网时间 1 h 和拖速 2.0 kn 进行标准化处理。根据相关文献和 FishBase 数据库^[14, 18-22]确定鱼类的适温类型、鱼卵类型、耐受性、栖息水层和摄食类型。

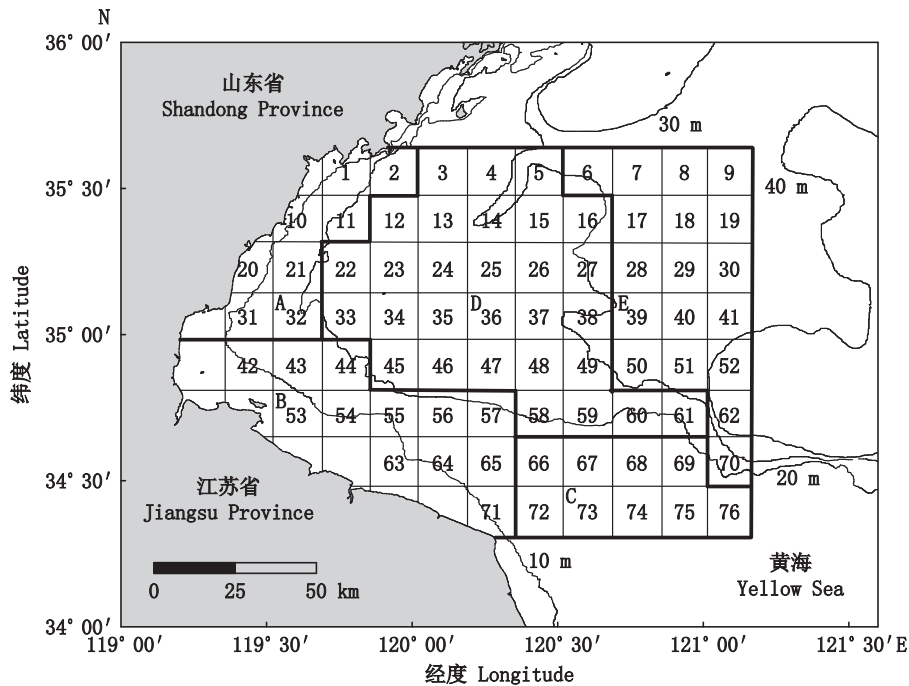


图 1 海州湾调查区域

Fig. 1 Sampling areas in Haizhou Bay

1.2 F-IBI 候选指标及筛选

生物完整性指数最早应用于淡水生态系统,由于不同水域生态系统的鱼类组成、生态系统特征和受到的环境压力等均存在一定差异,因此构成生物完整性指数的指标也应有所不同。淡水生态系统的生物完整性指数主要分为种类组成与丰度、营养结构、健康状态和繁殖共位群 4 类指标^[23-25]。本研究根据海州湾鱼类群落和生态系统的特征以及数据可获得性,参考 IBI 的相关研究^[7-9],从鱼类群落种类组成与丰度、营养结构、耐受性和繁殖共位群 4 大类指标中选取了 20 个指标作为候选指标(表 1)。

然后通过分布范围和相关性分析,对春季和秋季的候选指标分别进行筛选。分布范围的筛选包括种类指标和百分比指标,若采样值和参考值差距 < 5 ,则舍去^[26]。对候选指标进行 Pearson 相关性检验,若 $|R| < 0.7$ 则通过检验;若 $|R| \geq 0.7$ 则选取最优的一个指标,去除冗余指标,同时优先选用以前文献出现较多,且具有代表性的指标。

1.3 参考点设置

参考条件设置一般有 2 种方法^[27-29],一是将研究区域的历史数据作为参照点,二是选取受人类活动干扰较小或不受人类干扰的站位或年份

作为参照点。由于海州湾的历史资料不够充足,难以获取相应指标的历史参考值,因此本研究根据海州湾渔业资源调查期间各季节监测值的最高值和最低值来设置参考点^[7,30]。

表1 海州湾鱼类生物完整性候选指标
Tab. 1 F-IBI candidate metrics for Haizhou Bay

| 指标属性 Attribute | 候选指标 Candidate metrics | 指标缩写 Abbreviation |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| 种类组成 Composition | 鱼类总种数 | M1 |
| | 香农-威纳多样性指数 | M2 |
| | 冷温性鱼类种类数百分比 | M3 |
| | 暖温性鱼类种类数百分比 | M4 |
| | 暖水性鱼类种类数百分比 | M5 |
| | 中上层鱼类种类数百分比 | M6 |
| | 底层鱼类种类数百分比 | M7 |
| 耐受性 Tolerance | 低耐污鱼类种类数百分比 | M8 |
| | 高耐污鱼类种类数百分比 | M9 |
| 繁殖共位群 Reproductive guild | 产浮性卵鱼类种类数百分比 | M10 |
| | 产沉性卵鱼类种类数百分比 | M11 |
| | 卵胎生鱼类种类数百分比 | M12 |
| | 产附着性卵鱼类种类数百分比 | M13 |
| | 产黏着性卵鱼类种类数百分比 | M14 |
| 营养结构 Trophic guild | 底栖动物食性鱼类种类数百分比 | M15 |
| | 浮游动物食性鱼类种类数百分比 | M16 |
| | 游泳动物食性鱼类种类数百分比 | M17 |
| | 肉食性鱼类种类数百分比 | M18 |
| | 杂食性鱼类种类数百分比 | M19 |
| | 植食性鱼类种类数百分比 | M20 |

1.4 指标计算方法及健康评价等级

本研究采用传统的1、3、5赋值法对海州湾鱼类生物完整性的指标进行赋值,将每个指标的实际观测值分为三等分,最差的等级区域设为1分,中间的等级区域为3分,最好的等级区域为5分^[31]。为了消除指标个数导致的总分差异以及符合完整性等级分数,用以下公式换算F-IBI总分^[32]:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \times 12 \quad (1)$$

式中: P_i 为第*i*个指标的分数; n 为指标的个数, $i=1, 2, \dots, n$ 。

生物完整性评价等级可根据研究水域和调查对象的特点做出适当调整,本研究在前人研究^[31]基础上,将鱼类生物完整性的健康评价等级描述进行了相应的修改,确定了海州湾鱼类生物完整性等级划分及特征(表2)。

根据2013—2022年海州湾不同类型数据的

对比,分析其F-IBI总分和健康评价等级变化趋势及可能的影响因素。

1.5 数据分析

数据统计和Shannon-Wiener多样性指数(H')使用Excel 2016计算,Pearson相关性检验采用IBM SPSS Statistics 26。

2 结果与分析

2.1 海州湾鱼类种类组成和生态属性类型

在调查期间,海州湾海域春季共捕获鱼类82种,主要包括鲈形目、鲱形目、鲈形目、鲉形目等。按适温类型划分,包括暖温性鱼类37种、暖水性鱼类25种和冷温性鱼类20种,分别占鱼类总种数的45.12%、30.49%和24.39%;按栖息水层划分,包括中上层鱼类12种和底层鱼类70种,分别占14.63%和85.37%;按营养结构划分,包括底栖动物食性鱼类53种、浮游动物食性鱼类12种和游泳动物食性鱼类17种,分别占64.64%、14.63%和20.73%;杂食性鱼类12种、肉食性鱼类68种、植食性鱼类2种,分别占14.63%、82.93%、2.44%;按产卵类型划分,包括产沉性卵鱼类28种、产浮性卵鱼类44种、卵胎生鱼类10种、产附着性卵鱼类13种和产黏着性卵鱼类15种,分别占35.36%、52.44%、12.20%、15.85%和18.29%;按耐受性划分,包括低耐污鱼类12种和高耐污鱼类70种,分别占14.63%和85.37%。

秋季共捕获鱼类90种,按适温类型划分,包括暖温性鱼类45种、暖水性鱼类33种和冷温性鱼类12种,分别占鱼类总种数的50.00%、36.67%和13.33%;按栖息水层划分,包括中上层鱼类19种和底层鱼类71种,分别占21.11%和78.89%;按营养结构划分,包括底栖生物食性鱼类53种、浮游动物食性鱼类18种和游泳动物食性鱼类19种,分别占58.89%、20.00%和21.11%;杂食性鱼类13种、肉食性鱼类75种、植食性鱼类2种,分别占14.44%、83.34%、2.22%;按产卵类型划分,包括产沉性卵鱼类21种、产浮性卵鱼类60种、卵胎生鱼类9种、产附着性卵鱼类11种和产黏着性卵鱼类11种,分别占23.34%、66.66%、10.00%、12.22%和12.22%;按耐受性划分,包括低耐污鱼类13种和高耐污鱼类77种,分别占14.44%和85.56%。

2.2 海州湾 F-IBI 指标筛选和赋值

按照筛选原则对海州湾的 F-IBI 候选指标进行筛选,春季和秋季各保留 8 个评价指标(表 3)。然后,基于 1、3、5 赋值法确定春季和秋季海州湾鱼类生物完整性指标的赋值标准,赋值标准见表

3 和表 4。根据评分标准可以发现,秋季海州湾鱼类的种类数更多,而春季海州湾底层和冷温性鱼类种类数所占比例更高,耐受性强的鱼类数量更多,底栖动物食性鱼类占据优势(表 3 和表 4)。

表 2 海州湾鱼类生物完整性等级划分及特征

Tab. 2 F-IBI score classifications and attributes in Haizhou Bay

| F-IBI 值 F-IBI value | 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,鱼类种类丰富,底层鱼类和游泳动物食性鱼类比例较高。 | 极好 |
| 48~52 | 种类丰度低于期望值,耐受性极差的种类消失,某些种类数量和大小低于期望值,底层鱼类比例较高,耐受性差的种类减少。 | 好 |
| 40~44 | 种类丰度降低,耐受性强的鱼类比例增加,耐受性差的鱼类比例下降,底层鱼类数量减少,杂食性鱼类和浮游动物食性鱼类比例增加。 | 一般 |
| 28~34 | 种类丰度较低,中上层鱼类种类数量增加,肉食性鱼类减少,杂食性种类、耐受性强的种类占据优势。 | 差 |
| 12~22 | 种类丰度低,耐受性极强的杂食性种类占据优势,其他鱼类较少。 | 极差 |
| 0 | 重复采样,没有采集到鱼类。 | 没有鱼 |

表 3 春季海州湾鱼类生物完整性评分标准

Tab. 3 F-IBI metrics score criteria for Haizhou Bay in spring

| 属性 Attribute | 指标 Metrics | 评分标准 Score criteria | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------|--------|
| | | 5分 | 3分 | 1分 |
| 种类组成 Composition | M1 鱼类总种数/种 | >46 | 46~43 | <43 |
| | M3 冷温性鱼类种类数百分比/% | >20.09 | 20.09~17.74 | <17.74 |
| | M5 暖水性鱼类种类数百分比/% | >29.46 | 29.46~26.27 | <26.27 |
| | M6 中上层鱼类种类数百分比/% | <12.18 | 12.18~15.07 | >15.07 |
| 耐受性 Tolerance | M8 低耐污鱼类种类数百分比/% | >15.65 | 15.65~12.92 | <12.92 |
| 繁殖共位群 Reproductive guild | M10 产浮性卵鱼类种类数百分比/% | <48.72 | 48.72~51.28 | >51.28 |
| | M12 卵胎生鱼类种类数百分比/% | >16.67 | 16.67~14.75 | <14.75 |
| | M14 产黏着性卵鱼类种类数百分比/% | >18.12 | 18.12~15.72 | <15.72 |

表 4 秋季海州湾鱼类生物完整性评分标准

Tab. 4 F-IBI metrics score criteria for Haizhou Bay in autumn

| 属性 Attribute | 指标 Metrics | 评分标准 Score criteria | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------|-------------|--------|
| | | 5分 | 3分 | 1分 |
| 种类组成 Composition | M1 鱼类总种数/种 | >51 | 51~46 | <46 |
| | M3 冷温性鱼类种类数百分比/% | >11.08 | 11.08~8.42 | <8.42 |
| | M7 底层鱼类种类数百分比/% | >84.26 | 84.26~79.63 | <79.63 |
| 耐受性 Tolerance | M8 低耐污鱼类种类数百分比/% | >13.11 | 13.11~10.21 | <10.21 |
| 繁殖共位群 Reproductive guild | M10 产浮性卵鱼类种类数百分比/% | <64.51 | 64.51~69.75 | >69.75 |
| | M12 卵胎生鱼类种类数百分比/% | >12.66 | 12.66~10.50 | <10.50 |
| | M13 产附着性卵鱼类种类数百分比/% | >15.85 | 15.85~13.93 | <13.93 |
| 营养结构 Trophic guild | M16 浮游动物食性鱼类种类数百分比/% | <17.17 | 17.17~20.04 | >20.04 |

2.3 海州湾鱼类生物完整性评价

根据海州湾春季和秋季的鱼类生物完整性指标赋值标准和评分等级,得到 2013—2022 年海州湾海域春秋两季各指标值和各年份 F-IBI 总得

分(表 5 和表 6)。结果表明,春季海州湾水域的健康等级在大部分年份中处于“一般”到“好”的范围内,整体表现比较稳定:2014、2015 和 2017 年 F-IBI 得分分别为 48、45 和 51 分,鱼类生物完

完整性等级为“好”;2013、2016、2018、2020和2022年IBI得分为36~42分,等级为“一般”;2019和2021年F-IBI得分分别为33分和18分,等级分别为“差”和“极差”。秋季海州湾水域的健康等级则在“一般”上下波动;2016和2021年F-IBI得分

为54分和45分,等级为“极好”和“好”;2013—2015年和2018—2019年,F-IBI得分为36~42分,鱼类生物完整性等级为“一般”,其余年份F-IBI得分为24~33分,等级为“差”。

表5 2013—2022年春季海州湾各年份的F-IBI值和评价等级
Tab. 5 F-IBI scores for Haizhou Bay in spring of each year from 2013 to 2022

| 年份 Year | 指标得分 Metric score | | | | | | | | | F-IBI值 F-IBI value | 健康等级 Health class |
|---------|-------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|----------|-----------------------|----------------------|
| | M1 | M3 | M5 | M6 | M8 | M10 | M12 | M14 | 总分 Total | | |
| 2013 | 5 | 5 | 1 | 5 | 5 | 3 | 1 | 3 | 28 | 42 | 一般 |
| 2014 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 | 32 | 48 | 好 |
| 2015 | 3 | 1 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 | 30 | 45 | 好 |
| 2016 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 1 | 26 | 39 | 一般 |
| 2017 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 34 | 51 | 好 |
| 2018 | 1 | 3 | 5 | 1 | 5 | 5 | 3 | 5 | 28 | 42 | 一般 |
| 2019 | 1 | 1 | 5 | 3 | 1 | 5 | 5 | 1 | 22 | 33 | 差 |
| 2020 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 5 | 5 | 28 | 42 | 一般 |
| 2021 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 12 | 18 | 极差 |
| 2022 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 5 | 3 | 1 | 24 | 36 | 一般 |

表6 2013—2022年秋季海州湾各年份的F-IBI值和评价等级
Tab. 6 F-IBI scores for Haizhou Bay in autumn of each year from 2013 to 2022

| 年份 Year | 指标得分 Metric score | | | | | | | | | F-IBI值 F-IBI value | 健康等级 Health class |
|---------|-------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----------|-----------------------|----------------------|
| | M1 | M3 | M7 | M8 | M10 | M12 | M13 | M16 | 总分 Total | | |
| 2013 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 26 | 39 | 一般 |
| 2014 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 3 | 3 | 24 | 36 | 一般 |
| 2015 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 | 24 | 36 | 一般 |
| 2016 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 36 | 54 | 极好 |
| 2017 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | 22 | 33 | 差 |
| 2018 | 3 | 5 | 3 | 1 | 5 | 3 | 3 | 5 | 28 | 42 | 一般 |
| 2019 | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 26 | 39 | 一般 |
| 2020 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 5 | 5 | 22 | 33 | 差 |
| 2021 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 30 | 45 | 好 |
| 2022 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 16 | 24 | 差 |

总体来看,在调查初期,海州湾鱼类生物完整性状况整体较好,而在调查后期,鱼类生物完整性状况呈下降趋势(图2)。相较而言,秋季海州湾海域鱼类生物完整性等级较春季略低,而且波动幅度更小,春秋两季在2013—2018和2019—2022年间变化趋势相反,但都于2018—2019年间存在比较明显的下降趋势(图2)。海州湾春季和秋季的F-IBI值分别于2017年和2016年达到调查期间最高值,且分别于2021年和2022年达到调查期间的最低值(图2)。

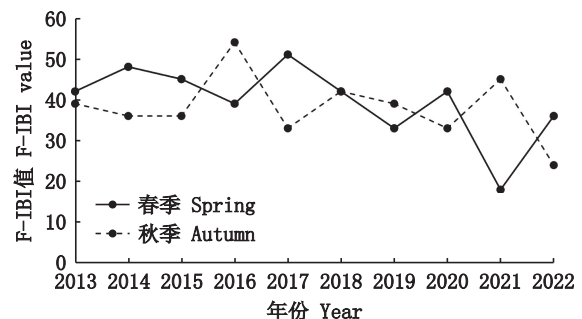


图2 2013—2022年春季和秋季海州湾F-IBI值的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of F-IBI scores for Haizhou Bay in spring and autumn from 2013 to 2022

3 讨论

本研究采用 F-IBI 方法对海州湾的鱼类资源状况及其变化趋势进行了评价,研究发现,2013—2022 年春季和秋季海州湾鱼类群落的健康状况等级整体上呈下降趋势。1998—2017 年北部湾渔业资源生物完整性评定为“一般”状态^[9],而 2013—2022 年的海州湾生物完整性等级也在“一般”水平上下波动,二者趋势相似;2016—2017 年莱州湾水域 F-IBI 得分为 30 分^[8],其生物完整性等级为“差”水平,与 2016—2017 年海州湾生物完整性等级相差较大。其他学者针对海州湾鱼类群落的研究,与本文研究结果类似,例如:李雪童等^[16]研究发现,近年来海州湾及邻近海域鱼类群落的 β 多样性指数出现下降的现象;隋昊志等^[14]和吴筱桐等^[15]的研究表明,海州湾海域鱼类群落结构趋向低营养级和小型化。在 20 世纪 80 年代初,海州湾海域曾经捕获 150 余种鱼类^[10],而本研究在调查期间仅捕获鱼类 102 种,虽然相关研究的调查海域、采样方法和频次存在一定差异,但鱼类物种数存在明显差距在一定程度上说明了生物多样性普遍下降,海州湾鱼类资源呈现明显的衰退趋势。气候变化、过度捕捞、海水富营养化程度加剧以及栖息地破坏等自然和人为因素的干扰,可能是导致海州湾鱼类资源状况下降的主要原因^[33]。过度捕捞破坏了生态系统的平衡,顶级捕食者和中上层鱼类种类的明显减少导致浮游生物等低营养级生物的丰度和动态发生变化,进而影响生态系统的物质循环和能量流动^[34],影响甚至破坏海州湾生态系统的健康,进而导致海州湾鱼类资源状况不断下降。

在季节变化方面,研究发现春季海州湾鱼类资源的总体状况较秋季好。张晓妆等^[21]也有类似的发现,生长速度快、抵抗外界干扰能力强和资源恢复力强的鱼类在春季占优势,这可能与鱼类的洄游分布、繁殖习性以及水温、营养盐的季节性变化有关。受黄海冷水团影响,春季海州湾海水温度较低,玉筋鱼(*Ammodytes personatus*)、方氏云鳎(*Pholis fangi*)等冷温性鱼类聚集在海州湾进行索饵洄游;秋季海州湾海水温度较高,冷温性鱼类进行产卵洄游,数量减少,暖温种比例增加。海洋中产浮性卵的鱼类多为暖温种^[35],因此秋季海州湾产浮性卵鱼类比例更高,中上层鱼类

数量多。秋季,海州湾低耐受性鱼类种类更少,可能是由于其海域秋季的污染水平和营养盐浓度较春季高,海水富营养化程度也更高,主要是因为春夏季节浮游植物生长和繁殖会消耗大量的营养物质,而秋冬季节大风天气偏多,水体扰动剧烈,悬浮沉积物的释放强度增大,无机氮磷浓度增加^[36]。此外,秋季海州湾渔业资源调查时间在每年的 9 月中旬至 10 月中旬,禁渔期刚刚结束一段时间,渔民开始捕捞,强大的捕捞压力也可能是导致秋季鱼类群落健康状况较差的原因之一。

在年际变化方面,海州湾春季鱼类资源在 2013—2018 年保持着较高的水平,反映出良好的生态环境状况,从 2019 年开始出现较大波动,并于 2021 年出现最低值。这可能与海州湾暖水性鱼类、低耐污鱼类种类占比较低,中上层鱼类种类占比较高有关,2020 年下半年发生拉尼娜现象,使太平洋中部和东部海域温度异常变冷,进而影响到中国近海,从而可能导致海州湾暖水性鱼类减少,这与北部湾鱼类结构变化相似^[37]。海州湾秋季鱼类资源状况较稳定,仅在 2016 年和 2021—2022 年出现较大波动,并且存在可能逐渐恶化的趋势。秋季 F-IBI 在 2016 年达到顶峰,2017 年迅速下降,与鱼类物种 β 多样性的变化趋势相同^[16],本研究表明,2016 年和 2021 年秋季捕获的鱼类总种数很高,表明海州湾鱼类群落有所恢复,鱼类资源状况很好,且各指标得分均很高,底层鱼类总种数较多以及浮游生物食性鱼类总种数较少,而海州湾底层鱼类多位于食物链较高营养级^[38],且多为肉食性鱼类,表明 2016 年和 2021 年秋季海州湾生态系统处于较为稳定的状态。此外,2021 年秋季捕获的鱼类种数最多,可能与我国实施控制过度捕捞的渔业管理政策有关,目前已经实施了渔船捕捞许可证制度^[39]、渔船数量和马力双重控制等政策^[40],并自 2017 年起延长了伏季休渔时间,同时黄海海域的年捕捞量逐年下降,鱼类资源状况逐渐好转。而 2022 年鱼类资源衰退的具体原因还有待进一步研究。海州湾春秋两季的鱼类资源状况的变化趋势大致相反,可能受到选取指标不同的影响,但是也与鱼类的洄游分布和水温的季节变化息息相关。

本研究开展海州湾鱼类生物完整性评价,综合鱼类的耐受性、营养结构、繁殖习性和种类组

成等多方面生态属性,形成了多指标评价体系,初步构建海州湾鱼类生物完整性评价指标体系,有助于对海州湾鱼类资源的健康状况及其变化趋势进行分析和评价。今后,除鱼类之外,还应结合浮游生物、底栖生物等生物完整性指数综合评价海州湾生态系统健康状况,形成更全面、更完整的生物完整性评价体系。近年来,海州湾海域捕捞业、养殖业和旅游业等发展迅速,海洋生态系统受到人类活动的影响不断增大,海洋生态系统健康面临严峻威胁。因此,建议今后应及时采取有效措施,加强对海州湾生态系统的保护,开展海州湾渔业资源和栖息环境的长期监测和评估,并深入探讨海州湾生态系统对外界压力的响应,旨在为海州湾渔业资源的可持续利用提供科学依据,为海州湾生态系统的保护和修复提供技术支撑。

参考文献:

- [1] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [2] RUARO R, GUBIANI É A. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 105-110.
- [3] KARR J R. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management[J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(1): 66-84.
- [4] COOPER M J, LAMBERTI G A, MOERKE A H, et al. An expanded fish-based index of biotic integrity for Great Lakes coastal wetlands[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(10): 580.
- [5] 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.
- [6] 毛成责, 钟俊生, 蒋日进, 等. 应用鱼类完整性指数 (FAII) 评价长江口沿岸碎波带健康状况[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4609-4619.
MAO C Z, ZHONG J S, JIANG R J, et al. Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4609-4619.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SU L, XU Y W, QIU Y S, et al. Long-term change of a fish-based index of biotic integrity for a semi-enclosed bay in the Beibu Gulf[J]. *Fishes*, 2022, 7(3): 124.
- [10] 王文海, 夏东兴, 高兴辰, 等. 中国海湾志(第四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 354-420.
WANG W H, XIA D X, GAO X C, et al. *Gulfs of China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 354-420.
- [11] 唐启升. 中国区域海洋学——渔业海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
TANG Q S. *Regional oceanography of China seas—fisheries oceanography*[M]. Beijing: Ocean Press, 2012.
- [12] 章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. *水产学报*, 2006, 30(4): 475-480.
ZHANG S Y, ZHANG H J, JIAO J P, et al. Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(4): 475-480.
- [13] 唐峰华, 沈新强, 王云龙. 海州湾附近海域渔业资源的动态分析[J]. *水产科学*, 2011, 30(6): 335-341.
TANG F H, SHEN X Q, WANG Y L. Dynamics of fisheries resources near Haizhou Bay waters[J]. *Fisheries Science*, 2011, 30(6): 335-341.
- [14] 隋昊志, 薛莹, 任一平, 等. 海州湾鱼类生态类群的研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(12): 59-71.
SUI H Z, XUE Y, REN Y P, et al. Studies on the ecological groups of fish communities in Haizhou Bay, China[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(12): 59-71.
- [15] 吴筱桐, 丁翔翔, 江旭, 等. 海州湾鱼类群落平均营养级和大型鱼类指数的变化特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2829-2836.
WU X T, DING X X, JIANG X, et al. Variations in the mean trophic level and large fish index of fish community in Haizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8): 2829-2836.
- [16] 李雪童, 徐宾铎, 薛莹, 等. 海州湾鱼类β多样性变化[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(4): 451-459.
LI X T, XU B D, XUE Y, et al. Variation in the β diversity of fish species in Haizhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(4): 451-459.
- [17] XU B D, REN Y P, CHEN Y, et al. Optimization of stratification scheme for a fishery-independent survey with multiple objectives[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(12): 154-169.
- [18] 陈大刚. 渔业资源生物学[M]. 北京: 中国农业出版社

- 社, 1997.
- CHEN D G. Fishery resources biology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997.
- [19] 万瑞景, 姜言伟. 渤、黄海硬骨鱼类鱼卵与仔稚鱼种类组成及其生物学特征[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9(4): 290-297.
- WAN R J, JIANG Y W. The species and biological characteristics of the eggs and larvae of osteichthyes in the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2000, 9(4): 290-297.
- [20] 陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2015.
- CHEN D G, ZHANG M Z. Marine fishes of China [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2015.
- [21] 张晓妆, 王晶, 徐宾铎, 等. 海州湾鱼类群落功能多样性的时空变化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3233-3244.
- ZHANG X Z, WANG J, XU B D, et al. Spatio-temporal variations of functional diversity of fish communities in Haizhou Bay [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3233-3244.
- [22] FROESE R, PAULY D. FishBase[M]. World Wide Web Electronic Publication, 2023. www.fishbase.org.
- [23] 石子玉, 韩东燕, 高春霞, 等. 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[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(2): 357-368.
- SHI Z Y, HAN D Y, GAO C X, et al. Effects of survey data uncertainty on the results of fish-index of biological integrity in waters near Chongming Island [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(2): 357-368.
- [24] AN K G, PARK S S, SHIN J Y. An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemical and habitat conditions [J]. Environment International, 2002, 28(5): 411-420.
- [25] 朱迪, 常剑波. 长江中游浅水湖泊生物完整性时空变化[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2761-2767.
- ZHU D, CHANG J B. Evaluation on temporal and spatial changes of biological integrity for shallow lakes in the middle reach of the Yangtze River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2761-2767.
- [26] 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, Qinling, using the fish-based index of biotic integrity [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(3): 23-29.
- [27] BARBOUR M T, GERRITSEN J, GRIFFITH G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996, 15(2): 185-211.
- [28] KLEYNHANS C J. The development of a fish index to assess the biological integrity of South African rivers [J]. WATER SA, 1999, 25(3): 265-278.
- [29] 裴雪姣, 牛翠娟, 高欣, 等. 应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康[J]. 生态学报, 2010, 30(21): 5736-5746.
- PEI X J, NIU C J, GAO X, et al. The ecological health assessment of Liao River Basin, China, based on biotic integrity index of fish [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(21): 5736-5746.
- [30] JIA Y T, SUI X, CHEN Y F. Development of a fish-based index of biotic integrity for Wadeable streams in Southern China [J]. Environmental Management, 2013, 52(4): 995-1008.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 苏巍, 薛莹, 任一平. 海州湾海域鱼类分类多样性的时空变化及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2013, 20(3): 624-634.
- SU W, XUE Y, REN Y P. Temporal and spatial variation in taxonomic diversity of fish in Haizhou Bay: The effect of environmental factors [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(3): 624-634.
- [34] DASKALOV G M, GRISHIN A N, RODIONOV S, et al. Trophic cascades triggered by overfishing reveal possible mechanisms of ecosystem regime shifts [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104(25): 10518-10523.
- [35] 解涵, 金广海, 解玉浩, 等. 鱼类产卵孵化方式及其适应意义[J]. 河北渔业, 2010(3): 53-57.
- XIE H, JIN G H, XIE Y H, et al. Aspects of spawning and hatching of fishes and its adaptability [J]. Hebei Fisheries, 2010(3): 53-57.
- [36] 郑江鹏, 袁广旺, 魏爱泓, 等. 海州湾北部海域营养盐时空分布及富营养化研究[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2021, 30(3): 25-32.
- ZHENG J P, YUAN G W, WEI A H, et al. Study on temporal and spatial distribution and eutrophication of nutrients in the northern area of Haizhou Bay [J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2021, 30(3): 25-32.
- [37] 袁兴伟, 刘尊雷, 姜亚洲, 等. 冬季东海外海鱼类群落特征及其对拉尼娜事件的响应[J]. 中国水产科学, 2014, 21(5): 1039-1047.
- YUAN X W, LIU Z L, JIANG Y Z, et al. Effects of La Niña on fish community structure in the offshore area of the

- northern East China Sea in winter[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(5): 1039-1047.
- [38] 任晓明, 刘阳, 徐宾铎, 等. 基于Ecopath模型的海州湾及邻近海域生态系统结构研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(6): 101-109.
- REN X M, LIU Y, XU B D, et al. Ecosystem structure in the Haizhou Bay and adjacent waters based on Ecopath model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(6): 101-109.
- [39] 闫经栋. 我国渔业捕捞许可证制度研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- YAN J D. Research on China's fisheries fishing license system[D]. Haikou: Hainan University, 2022.
- [40] 程亚峰. 我国渔船“双控”制度研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2013.
- CHENG Y F. Research on double control system of fishing vessel in China [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2013.

Assessment of ecosystem health of Haizhou Bay with fish index of biotic integrity

JIANG Shengqi^{1,2}, XU Binduo^{1,2}, ZHANG Chongliang^{1,2}, JI Yupeng^{1,2}, REN Yiping^{1,2}, XUE Ying^{1,2}

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; 2. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, Shandong, China)

Abstract: Based on the fishery resource survey data collected in Haizhou Bay and its adjacent waters in spring and autumn from 2013 to 2022, we evaluated the statement and change trend of the ecosystem health of Haizhou Bay using the fish-index of biotic integrity (F-IBI), considering many ecological parameters and attributes such as fish species composition, tolerance, trophic guild, and reproductive guild. The results showed that eight metrics were retained as F-IBI of Haizhou Bay in each season. The F-IBI scores of Haizhou Bay in spring and autumn ranged from 18 to 51 and from 24 to 54, respectively. The ecosystem of Haizhou Bay was basically at "fair" or above levels in spring, while fluctuating around "fair" level in autumn. Generally, the health statement of Haizhou Bay ecosystem in spring was better, and the F-IBI scores showed a gradually decreasing trend in fluctuation. The condition of fishery resources in Haizhou Bay were poor, with an increased proportion of tolerance and omnivorous fish species. Fishery resources in Haizhou Bay were under various pressures such as overfishing and climate change, and scientific and reasonable measures should be taken to protect and restore the ecosystem of Haizhou Bay.

Key words: fish-index of biotic integrity (F-IBI); ecosystem health; fish community; Haizhou Bay