

DOI: 10.12264/JFSC2024-0330

## 基于长度指标评估海州湾鱼类群落的年际变化趋势

蒋圣琪<sup>1</sup>, 徐宾铎<sup>1, 2, 3</sup>, 张崇良<sup>1, 2, 3</sup>, 纪毓鹏<sup>1, 3</sup>, 任一平<sup>1, 2, 3</sup>, 薛莹<sup>1, 2, 3\*</sup>

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;
2. 青岛海洋科技中心, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 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:** 捕捞压力和环境因子不仅会影响鱼类的丰度和分布, 还会影响其年龄组成和体长结构, 基于长度的指标可作为评估鱼类群落生态状况的有效工具之一。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底拖网调查数据, 结合 7 个基于长度的指标, 包括长度中位数( $L_{50}$ )、平均长度(mean length, mL)、长度分布的第 10 和第 90 百分位数( $L_{10}$ ,  $L_{90}$ )、最大长度( $L_{\max}$ )、大型鱼类指数(large fish index, LFI)和长度多样性指数(size diversity, SD), 探讨海州湾鱼类群落结构动态及其对捕捞压力和环境因子的响应。研究表明,  $L_{10}$ 、mL 和  $L_{90}$  这 3 个指标的稳健性表现良好, 可用于评估海州湾鱼类群落生态状况。随机森林模型结果表明, 海州湾鱼类群落的体长结构受捕捞压力和环境因子的共同影响。从年际变化来看, 海州湾鱼类群落的  $L_{10}$ 、 $L_{50}$  和 mL 指数呈现上升趋势, 而  $L_{90}$ 、 $L_{\max}$  和 SD 指数处于波动中, LFI 指数则在波动中下降, 说明海州湾中小型鱼类资源有所恢复, 而大型鱼类仍不断受到捕捞压力的影响, 亟待加强保护和管理。本研究探讨了使用基于长度指标设定渔业管理目标的潜力, 有助于深入了解海州湾鱼类群落的变动趋势, 为海州湾渔业资源的可持续利用和管理提供科学支撑。

**关键词:** 基于长度的指标; 鱼类群落; 大型鱼类指数; 渔业管理; 海州湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)05-0647-12

渔业生物群落对环境变化和捕捞压力的响应是复杂且多变的, 基于生态系统的渔业管理(EBFM)可以帮助我们深入了解并预测渔业生物群落对外界压力的响应<sup>[1]</sup>。目前, 基于生态系统的渔业管理是全球范围内的发展目标, 许多国家的学者们通过使用多物种或生态系统模型评估生态系统状态, 同时考虑了范围更大的气候和环境因素<sup>[2]</sup>。然而, 提出既可量化又具有生态意义的生态系统和群落指标, 仍具有一定的挑战性<sup>[3]</sup>, 许多种群和物种的状态、生产力和开发水平在很大程度上是未知的<sup>[4]</sup>。基于长度的评估方法具有生态理论基础, 并且在评估捕捞压力对鱼类群落的影响方面应用较广, 例如: 粒径谱可用于分析鱼类群落丰度、生物量和粒径结构特征, 进而探究鱼

类群落动态变化及可持续利用状况<sup>[5]</sup>。

基于长度的指标对捕捞压力的变化常常表现出较为强烈的响应<sup>[6-7]</sup>, 但在沿海和过渡水域则应用较少, 这可能是由于渔业调查采用不同网具, 长度数据存在一定的选择性。2015 年, 国际海洋开发委员会(ICES)为数据贫乏的种群设置了一个框架, 包括基于长度的指标和生活史参数, 评估种群受保护和可持续状态<sup>[8]</sup>。目前, 国内外学者们也提出了多种基于长度的指标来评估鱼类种群状况, 例如: 基于长度的综合混合效应模型(LIME)可用于研究年龄结构的种群动态<sup>[9]</sup>; 基于长度的产卵潜力比经验估计模型(LB-SPR)可同时考虑随时间变化的捕捞死亡率和补充量<sup>[10]</sup>; 基于长度的贝叶斯生物量模型(LBB)适用于渔获量数据有限

收稿日期: 2024-10-22; 修订日期: 2024-11-21.

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2023MD096).

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

通信作者: 薛莹, 教授, 主要从事渔业资源生态学研究. E-mail: xueying@ouc.edu.cn

的种群<sup>[11]</sup>; 基于长度的指标(LBI)可应用于只有长度数据的数据有限的渔业<sup>[12]</sup>。

基于长度的指标具有一定的稳健性, 以便在不确定的情况下提供准确的结果, 通过分析样本量与指标精确度和准确度的关系可评估指标的稳健性。理想的指标应足够敏感, 以及时捕捉生态系统的变化<sup>[13]</sup>。此外, 为了使基于长度的指标在对近海鱼类群落的管理和评估过程中具有实际意义, 还应选择能够反映各方面压力的相关指标<sup>[14]</sup>, 不仅要反映人为压力的时空变化<sup>[14]</sup>, 同时也要反映环境因素的影响。在渔业研究领域, 机器学习方法的应用越来越广, 并逐渐显示出优势, 其中随机森林模型多应用于探究物种空间分布、丰度和群落多样性指数与环境因子的关系<sup>[15-17]</sup>, 表现出较强的处理数据能力和较好的预测效果。

海州湾是我国著名的渔场之一, 是众多渔业生物的产卵场、育幼场和索饵场<sup>[18]</sup>。然而自 20 世纪 90 年代起, 海州湾渔业资源日益衰退, 渔业生物群落结构和功能发生了较大变化, 物种多样性下降, 且呈现出明显的小型化趋势<sup>[19-20]</sup>。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底拖网调查数据,

分析 7 个长度指标的稳健性, 旨在选取适用于评估海州湾鱼类群落状况的长度指标, 并分析长度指标与捕捞压力和环境因子的关系, 为海州湾渔业资源的可持续利用和管理提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据

样品采自 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设计调查站位。调查海域范围为 119°25'E~121°05'E, 34°25'N~35°35'N, 将调查海域按经纬度 10'×10'划分为 76 个方格, 并按照不同的水深、纬度和底质等因素, 将调查范围分为 5 个区域(图 1), 每个航次随机选取 18 个站位进行调查。调查船是功率为 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, 每站位的拖曳时间为 1 h, 拖速为 2~3 n mile/h。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)进行。在数据分析前将渔获数据统一标准化为拖网时间 1 h 和拖速 2.0 n mile/h 的相对渔获量。

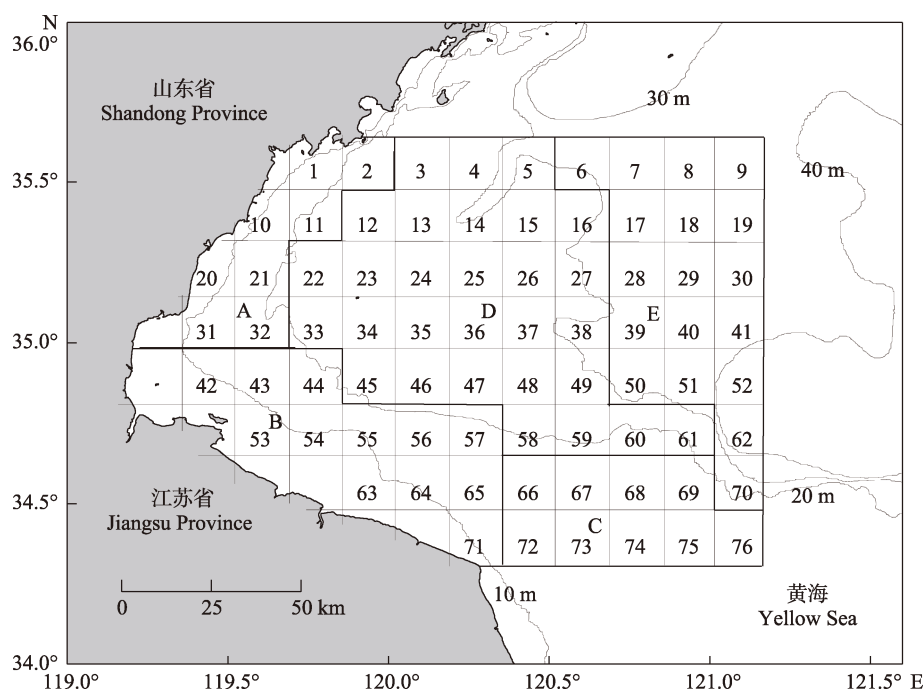


图 1 海州湾调查区域

Fig. 1 Sampling areas in the Haizhou Bay

渔获物样品鉴定到种, 并测定其体长、体质及其长度数据, 每种鱼类的样本量和长度范围见表 1。

表 1 海州湾各鱼种的样本量和长度范围  
Tab. 1 Sample size and length range of each fish species in the Haizhou Bay

| 鱼种 fish specie                            | 样本量 sample size | 长度范围/mm length range |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------------|
| 白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>         | 531             | 31–248               |
| 斑海马 <i>Hippocampus trimaculatus</i>       | 56              | 13–30                |
| 斑鲦 <i>Konosirus punctatus</i>             | 130             | 115–185              |
| 斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>     | 4               | 52–226               |
| 半滑舌鳎 <i>Cynoglossus semilaevis</i>        | 2               | 596–670              |
| 赤鼻棱鲉 <i>Thryssa kammalensis</i>           | 2369            | 14–141               |
| 大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>           | 2394            | 31–240               |
| 大头鳕 <i>Gadus macrocephalus</i>            | 2               | 492–530              |
| 带纹条鳎 <i>Zebrias zebra</i>                 | 3               | 144–178              |
| 带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>             | 113             | 65–396               |
| 单指虎鲂 <i>Minous monodactylus</i>           | 79              | 21–120               |
| 刀鲚 <i>Coilia ectenes</i>                  | 31              | 59–307               |
| 短鰐齿鱼 <i>Champsodon snyderi</i>            | 3               | 40–46                |
| 短鳍鲷 <i>Callionymus sagitta</i>            | 736             | 21–194               |
| 短吻红舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>          | 159             | 23–200               |
| 钝吻黄盖鲷 <i>Pseudopleuronectes yokohamae</i> | 1               | 119                  |
| 多鳞鱈 <i>Sillago sihama</i>                 | 139             | 48–181               |
| 二长棘鲷 <i>Parargyrops edita</i>             | 8               | 110–133              |
| 方氏云鲷 <i>Enedrias fangi</i>                | 5985            | 12–239               |
| 绯鲷 <i>Callionymus beniteguri</i>          | 284             | 11–170               |
| 凤鲚 <i>Coilia mystus</i>                   | 149             | 30–215               |
| 高眼鲷 <i>Cleisthenes herzensteini</i>       | 27              | 38–187               |
| 海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>             | 40              | 43–325               |
| 褐菖鲉 <i>Sebastes marmoratus</i>            | 86              | 41–135               |
| 褐牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>         | 4               | 62–328               |
| 黑鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>        | 5               | 160–195              |
| 黑鳃梅童鱼 <i>Collichthys niveatus</i>         | 454             | 20–110               |
| 红狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus rubicundus</i>   | 343             | 38–220               |
| 花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>           | 1               | 198                  |
| 黄鲛鲷 <i>Lophius litulon</i>                | 96              | 64–458               |
| 黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>                | 7               | 63–201               |
| 黄鲫 <i>Setipinna tenuifilis</i>            | 641             | 44–176               |
| 黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i>        | 17              | 72–190               |
| 吉氏绵鲷 <i>Enchelyopus gilli</i>             | 7               | 66–180               |
| 棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>          | 1289            | 23–149               |
| 尖海龙 <i>Syngnathus acus</i>                | 3382            | 30–414               |
| 角木叶鲷 <i>Pleuronichthys cornutus</i>       | 437             | 30–262               |
| 颈斑颈鰻 <i>Leiognathus nuchalis</i>          | 6               | 55–110               |
| 铠平鲉 <i>Sebastes hubbsi</i>                | 173             | 35–111               |
| 孔鲷 <i>Raja porosa</i>                     | 48              | 63–268               |
| 鲷 <i>Terapon theraps</i>                  | 1               | 103                  |
| 蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>       | 12              | 108–358              |
| 蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>            | 199             | 16–260               |
| 鰺 <i>Ilisha elongata</i>                  | 66              | 92–152               |

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

| 鱼种 fish specie                               | 样本量 sample size | 长度范围/mm length range |
|----------------------------------------------|-----------------|----------------------|
| 李氏鲷 <i>Callionymus richardsoni</i>           | 501             | 15–180               |
| 六丝钝尾虾虎鱼 <i>Amblychaeturichthys hexanema</i>  | 1395            | 18–132               |
| 龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>                 | 35              | 104–237              |
| 鹿斑鲷 <i>Leiognathus ruconius</i>              | 2               | 32–46                |
| 裸项蜂巢虾虎鱼 <i>Favonigobius gymnauchen</i>       | 34              | 36–57                |
| 绿鳍马面鲀 <i>Thamnaconus modestus</i>            | 176             | 30–294               |
| 矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>       | 1440            | 31–177               |
| 虹鲀 <i>Erisphex potti</i>                     | 227             | 20–100               |
| 长绵鲷 <i>Enchelyopus elongatus</i>             | 1               | 77                   |
| 鲹 <i>Miichthys miiuy</i>                     | 176             | 28–320               |
| 皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengeri</i>               | 1303            | 23–195               |
| 普氏栉虾虎鱼 <i>Amoya pflaumii</i>                 | 304             | 21–92                |
| 青鲢 <i>Gnathagnus elongatu</i>                | 5               | 36–97                |
| 青鳞小沙丁 <i>Sardinella zunasi</i>               | 48              | 70–142               |
| 日本绯鲤 <i>Upeneus bensasi</i>                  | 91              | 65–123               |
| 日本海马 <i>Hippocampus japonicus</i>            | 310             | 10–40                |
| 日本笠鲷 <i>Rhabdoblennius ellipse</i>           | 13              | 68–181               |
| 绒杜父鱼 <i>Hemitripterus villosus</i>           | 4               | 58–84                |
| 乳色刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius lactipes</i>         | 2               | 40                   |
| 石鲈 <i>Kareius bicoloratus</i>                | 1               | 168                  |
| 史氏鲷 <i>Raja pulchra</i>                      | 2               | 53–74                |
| 丝背细鳞鲀 <i>Stephanolepis cirrhifer</i>         | 37              | 32–115               |
| 四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i>      | 2               | 192–213              |
| 繸鲷 <i>Chirolophis japonicus</i>              | 17              | 41–210               |
| 鲈 <i>Scomber japonicus</i>                   | 7               | 129–196              |
| 鲷 <i>Engraulis japonicus</i>                 | 512             | 52–158               |
| 条石鲷 <i>Oplegnathus fasciatus</i>             | 9               | 72–147               |
| 瓦氏鲷 <i>Callionymus valenciennei</i>          | 891             | 24–181               |
| 网纹东方鲀 <i>Takifugu reticularis</i>            | 1               | 70                   |
| 鲷杜父鱼 <i>Pseudoblennius cottoides</i>         | 6               | 46–67                |
| 纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trionocephalus</i>      | 11              | 50–89                |
| 细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>                 | 1534            | 16–181               |
| 细纹狮子鱼 <i>Liparis maculatus</i>               | 2315            | 29–821               |
| 小带鱼 <i>Eupleurogrammus muticus</i>           | 13              | 65–174               |
| 小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>            | 1945            | 42–207               |
| 小头栉孔虾虎鱼 <i>Ctenotrypauchen microcephalus</i> | 355             | 40–186               |
| 小眼绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>            | 1955            | 99–270               |
| 星点东方鲀 <i>Takifugu niphobles</i>              | 2               | 76–124               |
| 星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i>                 | 938             | 25–210               |
| 许氏平鲀 <i>Sebastes schlegelii</i>              | 83              | 53–193               |
| 银鲷 <i>Pampus argenteus</i>                   | 829             | 53–192               |
| 鲷 <i>Platycephalus indicus</i>               | 7               | 185–405              |
| 油鲳 <i>Sphyraena pinguis</i>                  | 91              | 107–268              |
| 玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>              | 722             | 10–147               |
| 云鲷 <i>Enedrias nebulosus</i>                 | 40              | 90–160               |
| 长鲈 <i>Tanakius kitaharae</i>                 | 1               | 45                   |
| 长蛇鲷 <i>Saurida elongata</i>                  | 1516            | 14–226               |
| 长丝虾虎鱼 <i>Cryptocentrus filifer</i>           | 562             | 20–203               |
| 真鲷 <i>Pagrus major</i>                       | 11              | 99–175               |
| 中颌棱鲷 <i>Thryssa mystax</i>                   | 230             | 55–134               |
| 中华小公鱼 <i>Stolephorus chinensis</i>           | 1               | 62                   |
| 钟馗虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>            | 55              | 30–98                |
| 竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>               | 37              | 55–232               |
| 鲷 <i>Mugil cephalus</i>                      | 1               | 256                  |

## 1.2 研究方法

**1.2.1 基于长度的指标** 根据以往的研究<sup>[21-24]</sup>, 本研究选择 7 个基于长度的指标, 包括长度中位数( $L_{50}$ )、平均长度(mean length, mL)、长度分布的第 10 和第 90 百分位数( $L_{10}$ ,  $L_{90}$ )、最大长度( $L_{\max}$ )、大型鱼类指数(large fish index, LFI)和长度多样性指数(size diversity, SD), 分析海州湾鱼类群落的稳健性及其年际变化趋势, 其中平均长度和长度中位数用以评估海州湾鱼类群落长度的平均水平, 长度分布的第 10 和第 90 百分位数分别作为观测小型鱼类和体型较大鱼类的指标。此外, 为了量化由捕捞导致鱼类群落长度和生物量的变化, 我们使用大型鱼类指数(LFI)评估海州湾鱼类群落对捕捞压力的响应<sup>[25]</sup>。该指数是指种群或群落中长度超过阈值( $S_L$ )的鱼类生物量占有所有鱼类生物量的比例, 国外学者多选择 30~40 cm 作为阈值长度<sup>[7,23,25]</sup>, 但是由于海州湾大于 30 cm 的鱼类较少, 因此本研究使用 25 cm 作为阈值长度(LFI<sub>25</sub>), 计算公式如下, 其中  $B$  为鱼类的相对资源量:

$$\text{LFI}_{25} = \frac{B_{L>25}}{B}$$

本研究还使用长度多样性(SD)作为观测鱼类群落长度组成的多样性程度, 计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$\text{SD} = \sum -P_L * \ln(P_L)$$

其中  $P_L$  为某长度组的鱼类尾数所占比例, SD 值越大, 表明鱼类长度组成更多样, 同时各个长度组鱼类的数量分布更均匀。

**1.2.2 长度指标与捕捞压力和环境因子的关系** 随机森林模型(random forest, RF)是一种被证实具有高准确性和优越性的集成学习方法, 它基于分类回归树算法, 采用 bootstrap 重抽样法在原始数据集中随机抽取多个训练集, 然后利用这些训练集来构建多棵决策树, 综合每棵决策树的预测结果, 最终得到整体的预测结果<sup>[26]</sup>。

本研究选取《中国渔业统计年鉴》中山东省和江苏省的海洋鱼类捕捞量(catch)作为捕捞压力指数(假设其和海州湾区域的捕捞量变动趋势相似)。同时选取同步测量的海水底层水温(SBT)、底层盐度(SBS)、叶绿素浓度(Chl-a)作为环境因子进行分析。建模前将筛选出的长度指标值  $D$  转换

为  $\ln(D+1)$  后作为响应变量, 采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)<sup>[27]</sup>对影响因子进行多重共线性检验。为了避免影响因子间的共线性, 选择  $\sqrt{\text{VIF}} \leq 2$  的因子加入模型, 利用随机森林模型对海州湾鱼类群落长度指标与环境因子进行分析。

通过交叉验证的方法评估随机森林模型的拟合能力, 从原始数据集中随机选取 70% 作为训练集, 其余 30% 作为验证集, 此过程重复 100 次, 根据均方根误差(root mean square error, RMSE)和决定系数  $R^2$  评估模型性能, RMSE 越低, 表明模型的预测准确性越高,  $R^2$  越接近 1, 表明模型参考价值越高, 计算公式如下<sup>[28]</sup>:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SST}}$$

式中,  $O_i$  表示真实值,  $P_i$  表示预测值,  $n$  代表真实值个数; SSE 表示误差平方和, SST 表示总离差平方和。以上数据分析、模型构建和绘图均在 R 4.3.2 软件中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 长度指标的年际变化特征

海州湾鱼类群落长度指标的年际变化如图 2 所示, 春季和秋季的  $L_{10}$  指数均呈现上升趋势, 均在 2014 年最低, 且春季指标值高于秋季。 $L_{50}$  和 mL 指数也随着时间变化在波动中逐渐增加, 都在 2020 年达到峰值, 且两个指标的变化趋势极为相似。 $L_{90}$  和  $L_{\max}$  指标值在春、秋季一直处于波动中, 没有明显的变化趋势。LFI 则一直处于大幅度的波动中, 整体呈现下降趋势, 表明海州湾大型鱼类的出现频率不稳定, 生物量占比有所下降。SD 指标在春季呈现上升趋势, 但在秋季则先有所下降后缓慢上升, 表明近年来海州湾鱼类群落的长度更多样, 各个长度组的数量分布也更均匀(图 2)。

### 2.2 长度指标的稳健性分析

春、秋季海州湾 7 个鱼类长度指标的稳健性分析如图 3 所示, 从抽样分布的四分位数可以看出, 所有指标的精确度均随样本含量的增加而增加。从抽样分布的中位数可以看出, 除指标 SD 外,

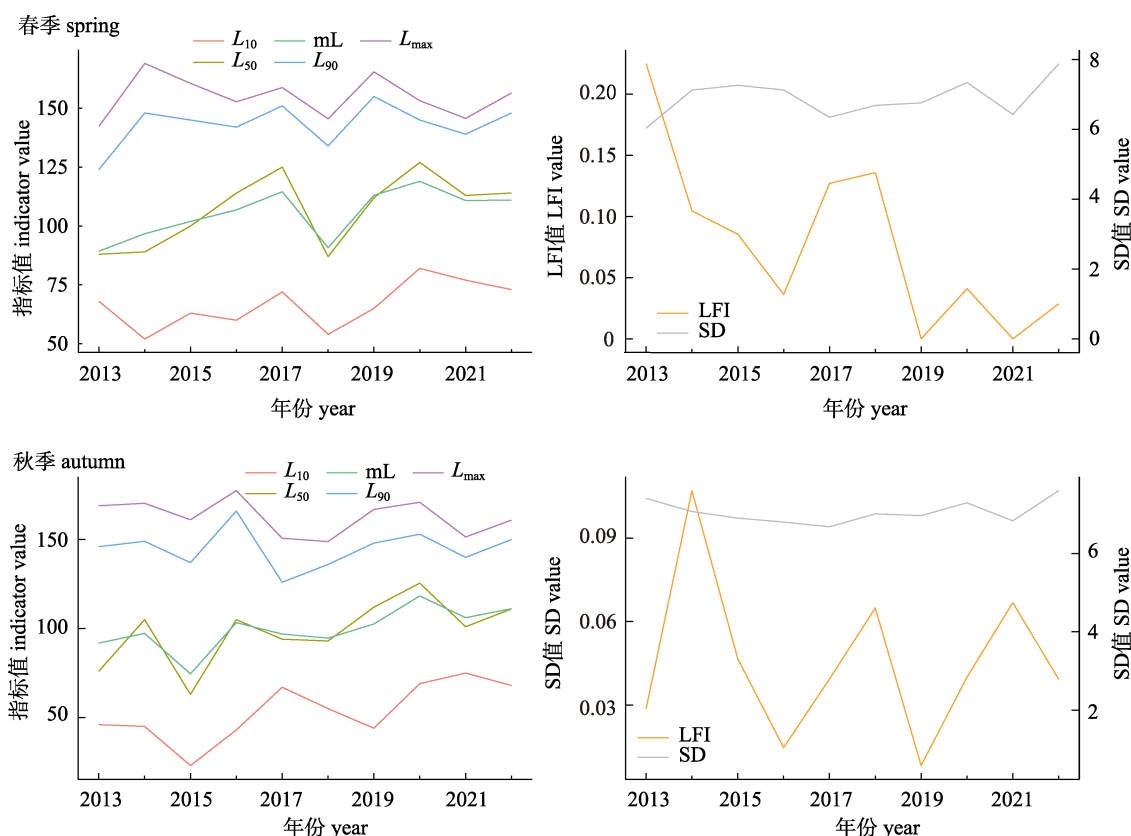


图 2 2013—2022 年春季和秋季海州湾鱼类群落长度指标的年际变化特征  
Fig. 2 Temporal variations in length-based indicators of fish communities in the Haizhou Bay during spring and autumn from 2013 to 2022

其余指标的准确度也随样本含量的增加而增加。 $L_{10}$ 、 $L_{50}$ 、 $mL$ 、 $L_{90}$  和  $L_{max}$  这 5 个指标值在样本含量为 500 时的准确度较好, 保持稳定, 前 4 个指标均达到精确度  $<5$  mm 的水平,  $L_{max}$  则达到精确度  $<10$  mm 的水平。但是当样本含量增加至 1300 时, 春季指标  $L_{10}$  出现了较多离群值。对于观测中等体型鱼类的指标  $L_{50}$  和  $mL$ ,  $L_{50}$  随样本量的增加, 更多位于比中位数大的部分, 而  $mL$  的分布更趋于稳定。对于观测较大鱼类的指标  $L_{90}$  和  $L_{max}$ ,  $L_{max}$  更容易出现偏大的离群值,  $L_{90}$  在样本量较大时偏向于比中位数小的部分, 但准确度和精确度更趋于稳定。

从季节对比来看, 春季海州湾的  $L_{10}$ 、 $L_{50}$  和  $mL$  这 3 个指标中位数均大于秋季, 而  $L_{max}$ 、 $LFI$  和  $SD$  均小于秋季,  $L_{90}$  的季节差异很小。并且无论季节和样本量的变化, 指标  $L_{10}$ 、 $mL$  和  $L_{90}$  的稳健性表现更好, 可用于评估海州湾鱼类群落状况。而两个季节中  $LFI$  指标值整体都明显偏小, 随

着样本量的增加指标值也逐渐趋于稳定, 会出现偏大的离群值; 指标  $SD$  的准确度和精确度随样本含量的增加呈现明显波动, 样本量越大,  $SD$  值整体分布越高, 且当样本含量低于 1100 时的准确度和精确度均较差, 因此这两个指标不适用于评估样本量较小的调查数据。

### 2.3 长度指标与捕捞压力和环境因子的关系

依据上文稳健性结果和前人研究结果<sup>[14]</sup>, 本研究选择稳健性表现较好的 3 个长度指标( $L_{10}$ 、 $mL$  和  $L_{90}$ ), 通过随机森林模型分析其与捕捞压力和环境因子的关系, 利用  $RMSE$  和  $R^2$  的平均值对模型性能进行评估。模型结果显示  $R^2$  均接近 1,  $RMSE$  均较小, 表明随机森林模型拟合效果较好(表 2)。利用  $VIF$  对 4 个影响因子(catch、SBT、SBS 和  $Chl-a$ )进行多重共线性检验, 春季  $\sqrt{VIF}$  结果分别为 1.67、1.73、1.22、1.13; 秋季  $\sqrt{VIF}$  结果分别为 1.63、1.63、1.22、1.81, 均小于 2, 各影响因子间均不存在多重共线性问题, 可加入模型中。

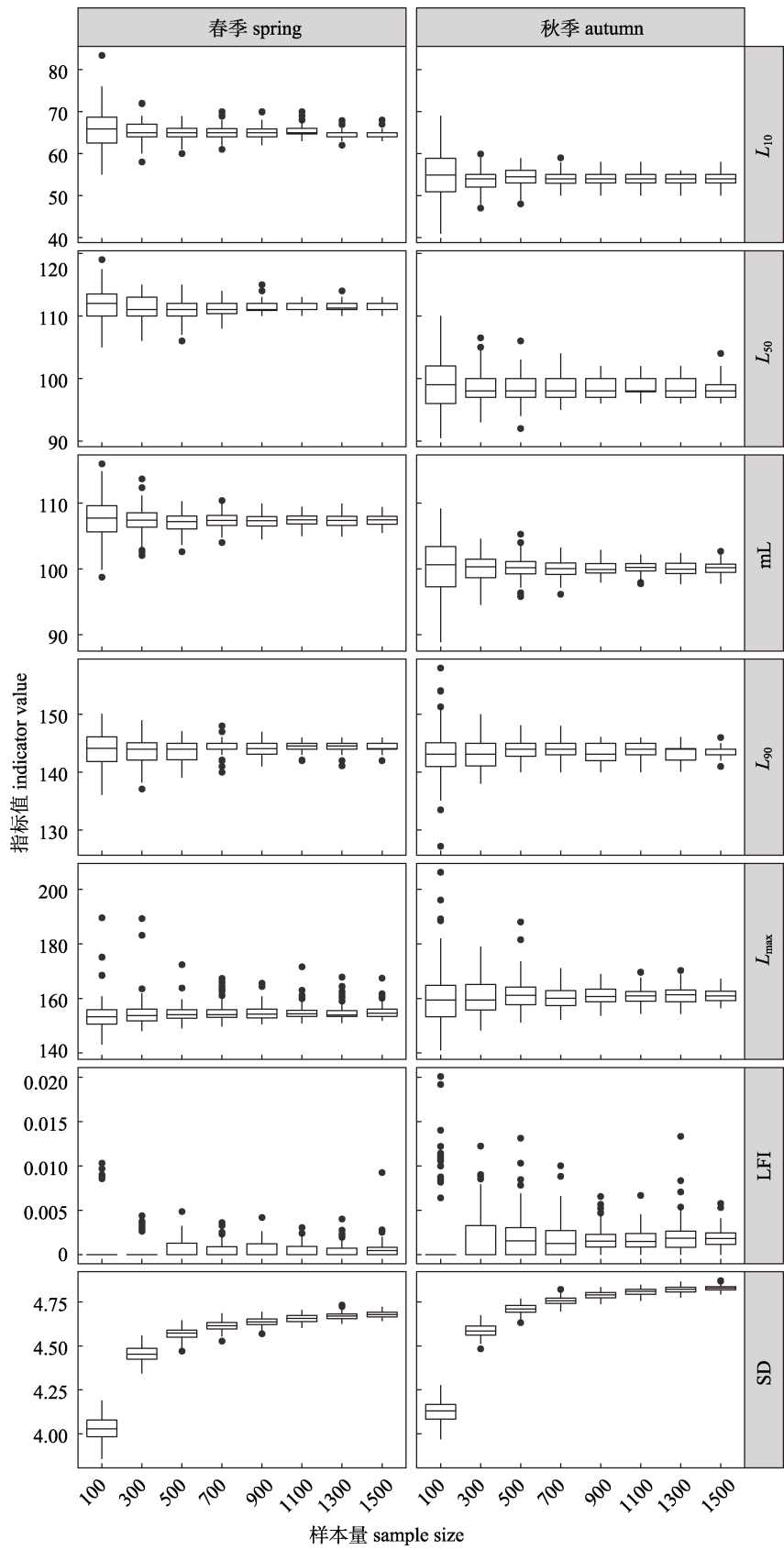


图 3 春、秋季海州湾 7 个鱼类群落长度指标的稳健性分析

Fig. 3 Robust analysis of seven length-based indicators for fish community in the Haizhou Bay in spring and autumn



表 2 各长度指标的随机森林模型的拟合结果  
Tab. 2 Random forest model fitting results for each length-based indicator

| 随机森林模型 RF  | 决定系数 $R^2$ | 均方根误差 RMSE |
|------------|------------|------------|
| 春 $L_{10}$ | 0.725      | 4.83       |
| 秋 $L_{10}$ | 0.827      | 6.83       |
| 春 mL       | 0.676      | 5.55       |
| 秋 mL       | 0.713      | 6.05       |
| 春 $L_{90}$ | 0.665      | 4.93       |
| 秋 $L_{90}$ | 0.803      | 4.63       |

通过去除影响因子后均方根误差的损失程度,对影响因子的重要性进行排序(图 4)。研究表明,春季对 3 个长度指标影响最大的因素都是捕捞量,其次是底层温度、叶绿素 a 和底层盐度。秋季对  $L_{10}$  指标影响最大的因子是底层温度,其次是底层盐度、捕捞量和叶绿素 a; 对 mL 指标影响最大的因子是捕捞量,其余因子重要性差异较小; 对  $L_{90}$  指标影响最大的因子是叶绿素 a, 其次是底层温度、底层盐度和捕捞量。

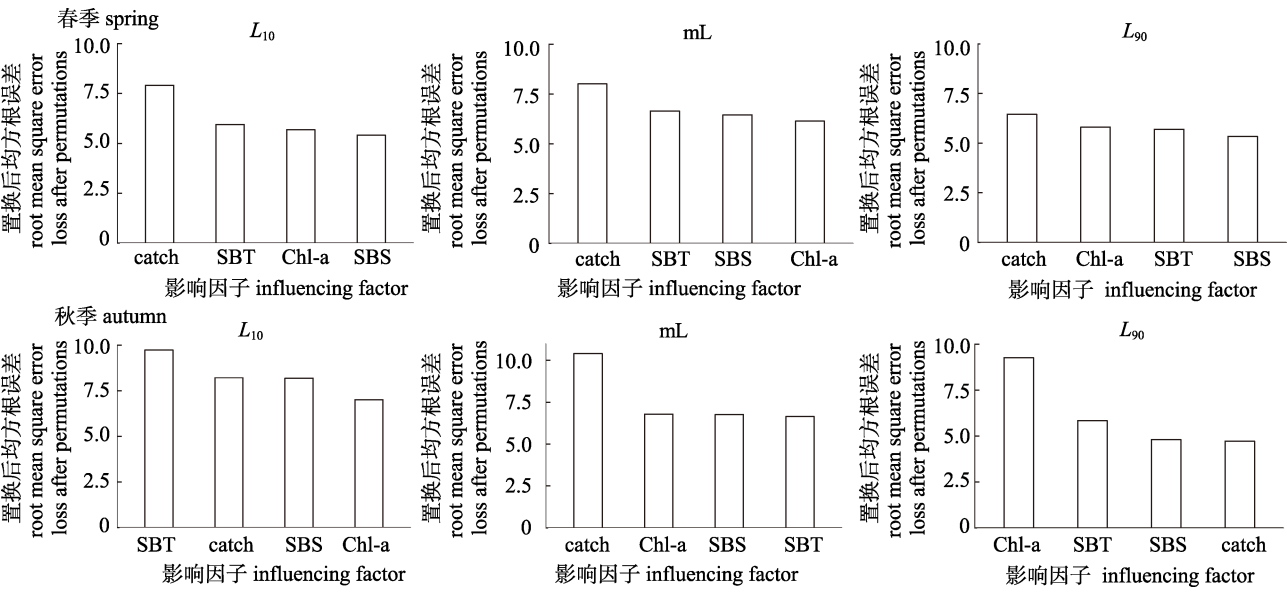


图 4 海州湾春季和秋季 3 个长度指标影响因子的重要性排序

Fig. 4 Importance ranking of influencing factors on three length-based indicators during spring and autumn in the Haizhou Bay

3 讨论

鱼类群落结构的复杂性和动态性给渔业管理带来了巨大挑战,实施基于生态系统的渔业管理需要一系列指标的支持,这些指标可以有效识别和准确反映生态系统的变化<sup>[29]</sup>。而鱼类群落对环境压力的响应较为敏感,采用基于鱼类群落的指标有较大的应用潜力<sup>[30-31]</sup>。基于长度的指标可作为丰度指标的补充,用以评估鱼类群落和生态系统的动态变化<sup>[14]</sup>。本文通过分析 7 个长度指标的动态变化及其对捕捞压力和环境因子的响应,甄选出  $L_{10}$ 、mL 和  $L_{90}$  这 3 个指标,可作为评估海州湾鱼类群落结构动态变化的最优指标,它们在描述鱼类群落状态方面具有一定的互补性。因此,

不能使用单一的最优指标来评价海州湾鱼类群落状态,本文将讨论各长度指标的适用鱼类对象和适用样本量。

$L_{10}$  指数最能代表样本中较小体长和低龄的鱼类,且该指标在样本量超过 300 时就显示出高精确度和准确度,其年际变化趋势是不断上升的,说明海州湾小型鱼类体长有所增加。而秋季该指标值低于春季,其原因可能是秋季当年生的幼鱼数量有所增加<sup>[32]</sup>,并且秋季调查时间是在伏季休渔开捕之后,较大个体的鱼类已被大量捕捞。同时,该指标能够较好地反映出捕捞压力和环境因子的变化,因为小型鱼类对捕捞压力和底温变化的响应更为敏感。底栖生物及浮游生物作为小型鱼类的重要食物来源,会受到环境因子的较大影响,



它们的数量波动会进一步影响小型鱼类的生长和种群结构,进而削弱其适应环境变化的能力<sup>[33]</sup>。

$L_{50}$  和  $mL$  指数最能代表中等体型鱼类的组成,能够反映这些鱼类在各种生态过程比如死亡、生长和补充等影响下长度分布中心趋势<sup>[34]</sup>,虽然二者的年际变化趋势极为类似,但  $mL$  指数的稳健性和敏感性更好,在样本量超过 300 时就显示出高精度和准确度,因此建议选择  $mL$  作为评估中型鱼类的指标,并且  $mL$  能较好反映中等体型鱼类群落受捕捞压力的影响。

指标  $L_{90}$ 、 $L_{max}$  和  $LFI$  与大型鱼类的动态变化息息相关,但  $L_{90}$  和  $L_{max}$  只能反映体长信息,而  $LFI$  可以补充生物量方面的信息。本研究发现,指标  $L_{90}$ 、 $L_{max}$  的稳健性较高, $LFI$  在较低样本量 ( $n < 1100$ ) 时显示出较差的精度或准确度,三者的敏感性均较差,并不适合作为鱼类群落状态的指标。捕捞压力往往最直接影响大型鱼类的体长和生物量,与小型鱼类相比,大型鱼类更容易受到捕捞开发的影响<sup>[35-36]</sup>。由于海州湾属于开放型海湾,同时受到一系列人类活动以及各种气候变化和环境因子的影响<sup>[37]</sup>,因此  $L_{90}$  的变化与环境因子和捕捞压力均密切相关。在年际变化方面, $L_{90}$  和  $L_{max}$  在年际间波动较大,且变化趋势基本一致,只有  $LFI$  呈现明显的下降趋势。虽然随机森林模型结果表明,海州湾鱼类群落主要受到捕捞压力的影响,但全球气候变化导致局部环境变化,以及种群随之进化,也可能导致鱼类体长结构的变化<sup>[38-40]</sup>。在季节变化方面,春季  $L_{90}$  和  $L_{max}$  的指标值总体低于秋季,但是  $LFI$  指标值却高于秋季,这可能与大型鱼类的季节性洄游有关。春季海州湾体型较大且处于优势地位的鱼类主要有黄鮟鱇 (*Lophius litulon*)、细纹狮子鱼 (*Liparis maculatus*)、鲾 (*Miichthys miiuy*) 等,秋季主要为长蛇鲻 (*Saurida elongata*)、短吻红舌鲷 (*Cynoglossus joyneri*)、小眼绿鳍鱼 (*Chelidonichthys kumu*) 等<sup>[41-44]</sup>,在相同长度情况下,春季鱼类的生物量会更高。

对于  $LFI$  指数,由于超过阈值长度的鱼类通常较少,所以  $LFI$  值往往很低,解决这一问题的方法之一是降低阈值长度,但是会导致  $LFI$  无法

真实反映体型较大的鱼类组成。有学者建议使用初次性成熟或首次捕获时的体长作为阈值长度<sup>[34]</sup>,这就需要根据研究海域鱼类种群的生物学特征设定阈值长度,虽然  $LFI$  能够反映捕捞压力的差异,但是这一指标通常适用于评估较大海域的更大渔获量数据。

综上所述,本文提到的基于长度的指标各有其优缺点,通过结合  $L_{10}$ 、 $mL$  和  $L_{90}$  等指标,可以全面而准确地反映海州湾鱼类群落的复杂性和动态性。部分指标能够反映沿海地区的捕捞行为变化,在评估不同体型鱼类群落动态方面具有广泛的适用性,可作为可持续渔业管理的指标,支持使用这些指标来评估沿海鱼类群落的生态状况,下一步可以探讨如何优化这些指标以提高对大型鱼类动态的敏感性。

渔业管理的目标之一是尽可能降低捕捞压力对渔业生物年龄结构和种群规模的影响<sup>[45]</sup>。目前渔民越来越多地开始使用具有选择性的网具进行捕捞<sup>[46]</sup>。近年来,海州湾渔业生物的丰富度逐渐下降,小型化趋势显著,需要加大对海州湾鱼类资源的保护与管理。本研究将基于长度的指标应用于海州湾鱼类群落的生态状况分析,结果显示海州湾鱼类资源体长结构有所恢复,研究也表明基于长度的指标可以用于评估海州湾鱼类群落的动态变化及其对捕捞压力和环境因子的响应。目前,鱼类生物学参数和种群补充量等相关数据的缺乏,阻碍了近海渔业管理目标的制定,未来基于长度的指标有望在近海渔业管理中得到广泛应用<sup>[47]</sup>。今后需要大量收集渔业生物体长结构以及渔获量等相关信息,以便于该指标应用于渔业管理。此外,长度指标的选择不仅要考虑指标本身的稳健性,同时也要考虑具体的管理目标和生态系统特征。未来,需进一步扩大研究范围,以深入探究不同长度指标对多种外界驱动因素的响应,例如全球气候变化、海洋变暖和海洋污染等。

#### 参考文献:

- [1] Pikitch E K, Santora C, Babcock E A, et al. Ecosystem-based fishery management[J]. Science, 2004, 305(5682): 346-347.
- [2] Fogarty M J. The art of ecosystem-based fishery manage-

- ment[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(3): 479-490.
- [3] Blanchard J L, Dulvy N K, Jennings S, et al. Do climate and fishing influence size-based indicators of Celtic Sea fish community structure?[J]. ICES Journal of Marine Science, 2005, 62(3): 405-411.
- [4] Kell L T, Minto C, Gerritsen H D. Evaluation of the skill of length-based indicators to identify stock status and trends[J]. ICES Journal of Marine Science, 2022, 79(4): 1202-1216.
- [5] Qu Y Q, Liu S D, Xue Y, et al. Seasonal variation of biomass size spectra of fish communities in the southern waters off Shandong Peninsula[J]. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(3): 51-59. [曲耀琦, 刘淑德, 薛莹, 等. 山东半岛南部海域鱼类群落生物量粒径谱季节变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 51-59.]
- [6] Blanchard J L, Heneghan R F, Everett J D, et al. From bacteria to whales: Using functional size spectra to model marine ecosystems[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2017, 32(3): 174-186.
- [7] Mindel B L, Neat F C, Webb T J, et al. Size-based indicators show depth-dependent change over time in the deep sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2018, 75: 113-121.
- [8] Stamoulis A, Torrelee E. The response of the North Sea demersal fish community to changing fishing pressure as seen through the prism of the large fish indicator[J]. Fisheries Research, 2016, 181: 222-233.
- [9] Rudd M B, Thorson J T. Accounting for variable recruitment and fishing mortality in length-based stock assessments for data-limited fisheries[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2018, 75(7): 1019-1035.
- [10] Hordyk A, Ono K, Valencia S, et al. A novel length-based empirical estimation method of spawning potential ratio (SPR), and tests of its performance, for small-scale, data-poor fisheries[J]. ICES Journal of Marine Science, 2015, 72(1): 217-231.
- [11] Froese R, Winker H, Coro G, et al. A new approach for estimating stock status from length frequency data[J]. ICES Journal of Marine Science, 2018, 75(6): 2004-2015.
- [12] Froese R. Keep it simple: Three indicators to deal with overfishing[J]. Fish and Fisheries, 2004, 5(1): 86-91.
- [13] Borrett S R, Osidele O O. Environ indicator sensitivity to flux uncertainty in a phosphorus model of Lake Sidney Lanier, USA[J]. Ecological Modelling, 2007, 200(3-4): 371-383.
- [14] Östman Ö, Hommik K, Bolund E, et al. Size-based indicators for assessments of ecological status of coastal fish communities[J]. ICES Journal of Marine Science, 2023, 80(10): 2478-2489.
- [15] Luan J, Zhang C L, Xu B D, et al. The predictive performances of random forest models with limited sample size and different species traits[J]. Fisheries Research, 2020, 227: 105534.
- [16] Cui Y H, Liu S D, Zhang Y L, et al. Habitat characteristics of *Octopus ocellatus* and their relationship with environmental factors during spring in Haizhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1686-1692. [崔晏华, 刘淑德, 张云雷, 等. 海州湾春季短蛸的栖息分布特征及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1686-1692.]
- [17] Xu M Z, Zhang C L, Xue Y, et al. Relationship between species diversity and environmental factors in the fishery community of Shandong coastal waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(6): 1008-1017. [徐茂真, 张崇良, 薛莹, 等. 山东近海渔业物种多样性与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2022, 46(6): 1008-1017.]
- [18] Wang W H, Xia D X, Gao X C, et al. Gulfs of China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 354-420. [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.]
- [19] 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. [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.]
- [20] Li X T, Xu B D, Xue Y, et al. Variation in the  $\beta$  diversity of fish species in Haizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(4): 451-459. [李雪童, 徐宾铎, 薛莹, 等. 海州湾鱼类  $\beta$  多样性变化[J]. 中国水产科学, 2021, 28(4): 451-459.]
- [21] Rochet M J, Trenkel V M. Which community indicators can measure the impact of fishing? A review and proposals[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, 60(1): 86-99.
- [22] Modica L, Velasco F, Preciado I, et al. Development of the large fish indicator and associated target for a Northeast Atlantic fish community[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(9): 2403-2415.
- [23] Queirós A M, Fernandes J, Genevier L, et al. Climate change alters fish community size-structure, requiring adaptive policy targets[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(4): 613-621.
- [24] Medeiros-Leal W, Santos R, Peixoto U I, et al. Performance of length-based assessment in predicting small-scale multispecies fishery sustainability[J]. Reviews in Fish Biology and

- Fisheries, 2023, 33(3): 819-852.
- [25] Shephard S, Reid D G, Greenstreet S P R. Interpreting the large fish indicator for the Celtic Sea[J]. ICES Journal of Marine Science, 2011, 68(9): 1963-1972.
- [26] Breiman L. Random forest[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [27] Kabacoff R I. R in action: Data analysis and graphics with R[M]. Greenwich: Manning Publications, 2015.
- [28] Hyndman R J, Koehler A B. Another look at measures of forecast accuracy[J]. International Journal of Forecasting, 2006, 22(4): 679-688.
- [29] Yin J, Xu J, Xue Y, et al. Evaluating the impacts of El Niño events on a marine bay ecosystem based on selected ecological network indicators[J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 144205.
- [30] Barnett L A K, Jacobsen N S, Thorson J T, et al. Realizing the potential of trait-based approaches to advance fisheries science[J]. Fish and Fisheries, 2019, 20(5): 1034-1050.
- [31] 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.
- [32] 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. [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.]
- [33] Olden J D, Hogan Z S, Vander Zanden M J. Small fish, big fish, red fish, blue fish: Size-biased extinction risk of the world's freshwater and marine fishes[J]. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16(6): 694-701.
- [34] Fitzgerald C J, Delanty K, Shephard S. Inland fish stock assessment: Applying data-poor methods from marine systems [J]. Fisheries Management and Ecology, 2018, 25(4): 240-252.
- [35] Greenstreet S P R, Rogers S I, Rice J C, et al. Development of the EcoQO for the North Sea fish community[J]. ICES Journal of Marine Science, 2011, 68(1): 1-11.
- [36] Engelhard G H, Lynam C P, García-Carreras B, et al. Effort reduction and the large fish indicator: Spatial trends reveal positive impacts of recent European fleet reduction schemes[J]. Environmental Conservation, 2015, 42(3): 227-236.
- [37] Wan Y H, Liu S D, Zhang C L, et al. Relationship between species diversity and biomass of demersal fish in Haizhou Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 82-90. [万勇慧, 刘淑德, 张崇良, 等. 海州湾底层鱼类物种多样性与生物量的关系[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 82-90.]
- [38] Audzijonyte A, Fulton E, Haddon M, et al. Trends and management implications of human-influenced life-history changes in marine ectotherms[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(4): 1005-1028.
- [39] Queirós A M, Huebert K B, Keyl F, et al. Solutions for ecosystem-level protection of ocean systems under climate change[J]. Global Change Biology, 2016, 22(12): 3927-3936.
- [40] Fernandes J A, Papatthanasopoulou E, Hattam C, et al. Estimating the ecological, economic and social impacts of ocean acidification and warming on UK fisheries[J]. Fish and Fisheries, 2017, 18(3): 389-411.
- [41] 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. [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(自然科学版), 2017, 47(12): 59-71.]
- [42] Gao Y X, Sui H Z, Ren X M, et al. Feeding habits of *Saurida elongata* in Haizhou Bay, Shandong, China, based on stomach contents and stable isotope[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4277-4283. [高元新, 隋昊志, 任晓明, 等. 基于胃含物和稳定同位素研究海州湾长蛇鲻的摄食习性[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4277-4283.]
- [43] Li Y M, Mu X X, Zhang C L, et al. Length-weight relationship and spatio-temporal heterogeneity of *Conger myriaster* in the coastal waters of Shandong Province[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(3): 729-738. [李雅敏, 牟秀霞, 张崇良, 等. 山东近海星康吉鳗体长-体质量关系及其时空异质性[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(3): 729-738.]
- [44] Zhao T Y, Liu Y W, Wang K, et al. Heterogeneity of growth parameters of *Cynoglossus joyneri* in Haizhou Bay and Laizhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(10): 167-174. [赵天亚, 刘逸文, 王琨, 等. 海州湾和莱州湾短吻红舌鲷生长参数的异质性[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(10): 167-174.]
- [45] Froese R, Winker H, Gascuel D, et al. Minimizing the impact of fishing[J]. Fish and Fisheries, 2016, 17(3): 785-802.
- [46] Song A M, Scholtens J, Barclay K, et al. Collateral damage? Small-scale fisheries in the global fight against IUU fishing[J]. Fish and Fisheries, 2020, 21(4): 831-843.
- [47] Östman Ö, Bergström L, Leonardsson K, et al. Analyses of structural changes in ecological time series (ASCETS)[J]. Ecological Indicators, 2020, 116: 106469.

## Length-based indicators for assessment of inter-annual trends of fish community in the Haizhou Bay

JIANG Shengqi<sup>1</sup>, XU Binduo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chongliang<sup>1,2,3</sup>, JI Yupeng<sup>1,2,3</sup>, REN Yiping<sup>1,2,3</sup>, XUE Ying<sup>1,2,3\*</sup>

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center Qingdao 266237, China;

3. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China

**Abstract:** Fishing pressure and environmental factors can not only affect the abundance and distribution of fish, but also affect the age- and length-distributions. Length-based indicators of fish community are useful tools for fishery management. Based on the fishery resource survey data collected in the Haizhou Bay and its adjacent waters in spring and autumn from 2013 to 2022, seven length-based indicators including median length ( $L_{50}$ ), mean length (mL), 10th and 90th-percentile of the length distribution ( $L_{10}$ ,  $L_{90}$ ), mean length of the 10% largest fish ( $L_{\max}$ ), large fish index (LFI) and size-diversity (SD) were analyzed to examine the dynamics of fish community structure in the Haizhou Bay as well as its response to the fishing pressure and environmental factors. The results showed that the robustness of  $L_{10}$ , mL and  $L_{90}$  was better, and they were suitable for assessing the status of fish community in the Haizhou Bay. Random forest model results suggested that length-distributions of fish community in the Haizhou Bay were affected by a combination of fishing pressure and environmental factors. In terms of interannual variation,  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  and mL showed a upward trend, while  $L_{90}$ ,  $L_{\max}$  and SD fluctuated, and LFI showed a declining trend, reflecting the recovery of small and medium-sized fish resources in the Haizhou Bay. However large-sized fish are still affected by fishing pressure, and more efforts should be made to protect and manage the fishery resources in Haizhou Bay. This study explored the potential of using body length-based indicators for setting fishery management objectives, which will help to gain a deeper understanding of the ecological status of fish community dynamics in the Haizhou Bay, and provide technical support for the protection and restoration of the Haizhou Bay fish community.

**Key words:** length-based indicators; fish community; large fish index; fishery management; Haizhou Bay

**Corresponding author:** XUE Ying. E-mail: xueying@ouc.edu.cn