

DOI: 10.12264/JFSC2021-0261

河口水域鱼类生境质量评价方法研究进展

杜楠^{1, 2}, 张婷婷^{1, 3, 4}, 赵峰^{1, 2, 3, 4}, 张涛^{1, 3, 4}, 庄平^{1, 2, 3, 4}

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海与长江口渔业资源环境科学观测实验站, 上海 200090;
2. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;
3. 上海长江口渔业资源增殖与生态修复工程技术研究中心, 上海 200090;
4. 中国水产科学研究院长江口渔业生态重点实验室, 上海 200090

摘要: 河口水域是鱼类重要的栖息生境, 在渔业资源的可持续发展中占据重要地位。开展河口水域生境质量的评价研究, 对了解河口水域的生境功能现状以及提供科学管理依据具有重要意义。本文对河口水域鱼类生境质量评价的研究方法及应用进展进行综述, 主要集中在 3 个方面: (1) 基于鱼类数量分布特征: 通过鱼类的数量分布特征与环境因子之间的相关关系, 探究鱼类物种的适宜生境分布格局; (2) 基于鱼类生存表现特征: 筛选鱼类生活史各阶段的生存表现特征指标, 对不同功能类型的生境进行质量评价; (3) 基于鱼类的群落结构特征: 通过构建鱼类群落评价指数, 对河口水域鱼类生境质量进行综合评价。对河口水域鱼类生境质量的评价研究有助于深入了解河口渔业生态功能的变化机制, 并可为合理管控河口沿岸的人类活动、研发河口水域生境质量监测预警技术、科学开展河口生境保护和修复工作提供理论依据。

关键词: 河口水域; 鱼类生境质量; 数量分布特征; 生存表现特征; 群落结构特征

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)12-1621-11

生境质量(habitat quality)是反映生态系统生境功能现状的重要指标^[1], 用于评价生态系统为个体、种群或群落提供适宜生存条件的能力^[2]。河口水域是许多鱼类的重要栖息生境, 发挥着育幼场、产卵场、索饵场和洄游通道等生态支持功能, 对保障渔业资源的可持续发展具有重要意义^[3-4]。然而, 河口沿岸地区经济发达、人口密度大, 这使河口水域的生态状况极易受到人类活动的影响。人类活动的不断加剧, 如水利工程建设、污染输入、过度捕捞等^[5-6], 使河口水域面临着诸多严峻的生态威胁(水环境恶化、污染加剧、生境萎缩、渔汛消失等), 导致河口水域的渔业资源衰退^[3]、生物多样性降低^[7]、物种生存性能下降^[8]。由于河口水域的生境质量水平在不断下降, 生境

功能逐渐退化^[9-10], 对渔业资源的健康发展产生了极大的负面影响。

本文从河口水域的环境特征及其为鱼类物种提供的生境功能角度出发, 梳理了国内外河口水域鱼类生境质量评价方法的研究进展, 主要集中在 3 个方面: (1) 基于鱼类数量分布特征: 通过鱼类的数量分布特征与环境因子之间的相关关系, 探究鱼类物种的适宜生境分布格局; (2) 基于鱼类生存表现特征: 筛选鱼类生活史各阶段的生存表现特征指标, 对不同功能类型的生境进行质量评价; (3) 基于鱼类的群落结构特征: 通过构建鱼类群落评价指数, 对河口水域鱼类生境质量进行综合评价。开展河口水域鱼类生境质量评价研究有助于了解河口水域的生境功能现状及其机制, 并

收稿日期: 2021-05-31; **修订日期:** 2021-06-05.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901201; 2018YFD0900802); 国家自然科学基金项目(32071584); 上海市自然科学基金项目(19ZR1470300); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2020TD13).

作者简介: 杜楠(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为河口生态学. E-mail: dn18751244520@126.com

通信作者: 庄平, 研究员. E-mail: pzhuang@ecsf.ac.cn

为河口渔业水域生态健康评估和管理提供科学依据。

1 河口水域的环境特征与生境功能

河口作为河流、海洋与近岸陆地之间的过渡水域,其环境受到三者之间相互影响^[11],构成独特的水域生境,支撑着河口丰富的渔业资源。河口水域具有较高的初级生产力,上游的淡水输入^[12]、河口附近城市的点源排放^[13]、河口近岸湿地生态系统(红树林^[14]、盐沼^[15])的横向交换为河口水域源源不断地输送营养物质。这使河口水域成为大量营养盐和有机碎屑的聚集地,是初级生产力产生和次级生产力转化的良好场所,使其具备较高的渔业生产力^[16]。河口水域受到河流输入和近海潮汐效应的双重影响,进一步塑造了其水体环境高度扰动性(浊度较高)和复杂性(盐度高异质性)的特点,这些环境特征为鱼类躲避天敌捕食提供了良好的藏匿条件^[17],以及为许多鱼类生活史关键阶段提供了重要的栖息条件。

河口水域独特的环境特征为许多重要鱼类物种提供了育幼场、产卵场、洄游通道等重要生境服务功能,具有极高的渔业经济和保护价值。已有研究表明河口水域是高质量的鱼类育幼场^[18],能够为许多鱼类的幼鱼阶段提供优质的生长发育和摄食条件。河口水域也是许多经济鱼类物种的进行繁殖产卵活动的重要场所,如棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)^[19]、松江鲈(*Trachidermus fasciatus*)^[20]、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)^[21]等。此外,河口水域还是许多重要渔业物种的洄游通道,它们需要通过河口水域往返于淡水和海水之间满足其生殖和索饵的需要,如中华鲟(*Acipenser sinensis*)^[22]、日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)^[23]、大西洋鲑(*Salmo salar*)等^[24]。

2 河口水域鱼类生境质量评价研究方法

河口水域鱼类生境质量评价研究方法主要以鱼类的数量分布特征、生存表现特征、群落结构特征作为评价依据,分别对鱼类适宜生境特征状况、鱼类不同功能类型生境质量、鱼类综合生境质量进行了评价研究探索。

2.1 鱼类的数量分布特征

鱼类的数量分布特征是评价生境质量水平的基础指标,常用的指标包括鱼类的丰度、密度、存在概率等^[25-26]。鱼类在自然水域中的分布具有一定“趋利避害”本能^[27-28],即鱼类会主动选择向适宜生存的水域环境中迁移。鱼类的生境选择导致在空间上呈现数量分布差异,能一定程度上反映不同区域的生境质量差异。许多学者以此作为河口水域鱼类生境质量评价研究的理论依据,运用广义可加模型(generalized additive model, GAM)^[29]、广义线性模型(generalized linear model, GLM)^[26]、增强回归树(boosted regression trees, BRT)^[30]、最大熵模型(maximum entropy model, MaxEnt)^[31]等统计模型以及构建栖息地适宜性指数(habitat suitability index, HIS)^[25],分析河口水域鱼类数量分布特征与环境因子之间的相关关系,以探究鱼类适宜生境的分布格局及其环境阈值范围。

O'Connor 等^[26]通过 GLM 研究了美洲鲈(*Alosa sapidissima*)、条纹鲈(*Morone saxatilis*)存在概率与溶解氧、盐度、时间、沿河距离等指标之间的相关关系,进而模拟预测两种幼鱼在美国哈德逊河河口的潜在的高密度聚集区。Stoner 等^[29]分析了美国纳威辛克河河口 6 年期间的美洲拟鲈(*Pseudopleuronectes americanus*)幼鱼捕捞数据,通过 GAM 确定了不同规格幼鱼存在概率与水温、盐度、底质有机质含量之间的关系,并揭示了不同规格幼鱼育幼场核心区域的动态变化规律。Vinagre 等^[25]和杨红等^[32]分别根据葡萄牙塔霍河河口的欧洲鳎(*Solea solea*)和塞内加尔鳎(*Solea senegalensis*)幼鱼密度、长江口的中华鲟幼鱼密度与水深、盐度、温度等指标之间的相关关系构建 HSI,确定了这些物种在河口水域育幼场的适宜分布范围。

通过鱼类的数量分布特征指标与环境因子之间的相关性,可以明确鱼类适宜生境的分布范围、潜在区域、时空变动格局等状况。但由于影响鱼类数量分布特征的环境因素较为复杂,加之摄食来源、捕食竞争、气候变化等难以量化的因素也会影响鱼类在水域中的数量分布,这使鱼类

在水域的数量分布特征呈现强烈的时空波动^[33], 无法进一步深入探究生境质量变化对鱼类数量分布的影响机制。

2.2 鱼类的生存表现特征

鱼类的生存表现特征是评价河口水域鱼类生境质量水平的功能指标, 常用指标包括幼鱼的生长发育指标^[34]和成鱼的繁殖性能指标^[35]。由于鱼类在生活史各阶段的能量分配策略不同, 导致其呈现不同的生存表现特征, 从而体现了其不同生活史阶段对生境功能的需求差异。在幼鱼阶段,

鱼类将获取的能量几乎全部用于体细胞的生长与蛋白质的合成^[36-37], 以获得快速的生长发育。在鱼类的繁殖期, 鱼类会将获取的能量以脂肪形式主要储存在肝脏中, 为性腺组织的发育和繁殖产卵活动提供营养物质和能量储备^[38-39]。鱼类的能量分配策略反映了不同生活史阶段的生存需求及其生境需求。因此, 许多研究以鱼类的生存表现特征作为河口水域鱼类生境质量评价依据, 主要在鱼类的育幼场(幼鱼的生长发育指标)和产卵场(成鱼的繁殖性能指标)应用较多(表 1)。

表 1 常用于评价河口水域鱼类生境质量的生理生化指标及其生物学意义
Tab. 1 Physiological and biochemical indexes commonly used to assess the quality of estuarine fish habitats and their biological significance

评价指标 evaluating index	生物学意义 biological significance	评价生境类型 evaluation of habitat type	参考文献 reference
RNA/DNA	鱼类体细胞中 DNA 含量较为稳定, RNA 含量的变化则反映了体内蛋白质的合成速度, RNA/DNA 比值能够反映鱼类体内蛋白质的合成速率, 主要用于评价鱼类的生长状况和营养水平。	育幼场	[40-41]
皮质醇浓度 cortisol concentration	当鱼类遭受外界环境胁迫时, 其中枢神经系统会促进皮质醇的合成与释放。因此, 鱼类体内皮质醇浓度常作为评估鱼类所处的环境压力指标。	育幼场	[42-43]
Fulton's K 条件指数 Fulton's K condition indices	Fulton's K 条件指数基于鱼类体长与体重之间的关系对鱼类健康形态进行评估, 表达式为 $K=1000(W/L^3)$ 。该指标假设基于给定长度的鱼类, 体重高的个体相较于体重轻的个体更为健康。	育幼场	[44-45]
耳石边缘增量宽度 marginal otolith increment width	耳石的增长与鱼类的生长密切相关, 其中基于耳石边缘增量宽度测量能够反映鱼类近期的生长速度, 是衡量鱼类生长状况、摄食状况、生境质量的有效指标。	育幼场	[8,46]
肝胰腺指数 HSI hepatosomatic index	表达式为 $HSI=100(HW/W)$, 反映鱼类肝胰腺发育状况。肝胰腺作为鱼类的供能组织, 为鱼类的生命活动提供能量来源。肝胰腺指数主要反映鱼类的健康水平和能量储存水平。	育幼场、产卵场	[47-48]
性腺指数 GSI gonadosomatic index	表达式为 $GSI=100(GW/W)$, 反映鱼类性腺组织的发育程度。性腺组织的发育程度决定了鱼类的产卵量。	产卵场	[35,48]
消化道指数 DSI digestivosomatic index	表达式为 $DSI=100(DW/W)$, 反映鱼类的摄食状况, 以评估生境的可捕食条件。	育幼场、产卵场	[18,35]
脂质含量 lipid content	脂质含量反映了鱼类的营养和能量储备水平。根据研究取样组织的不同, 分为肌肉脂质含量和肝脏脂质含量, 分别用于评价幼鱼的营养水平和成鱼的能量储备。	育幼场、产卵场	[49-50]

注: L 为鱼类体长, HW 为肝脏重量, GW 为性腺重量, DW 为消化道重量, W 为鱼类体重。
Note: L is fish body length; HW is liver weight; GW is gonad weight; DW is digestive tract weight; W is body weight.

2.2.1 鱼类育幼场生境质量评价研究 幼鱼阶段的能量分配策略侧重于生长发育, 但若幼鱼所处生境质量水平较差, 对幼鱼的生长发育造成了一定的环境压力, 幼鱼会在生长与生存之间进行权

衡选择。尤其在极端的环境压力条件下, 幼鱼会以牺牲生长为代价, 通过调节自身代谢和能量分配来应对外界环境的压力条件, 以优先满足自身生存^[36,51]。一般认为, 高质量的育幼场是更加有

利于幼鱼生长和存活的场所^[10]。因此, RNA/DNA 比值、耳石边缘增量宽度、Fulton's *K* 条件指数等反映幼鱼生长发育的特征指标可以用于区分育幼场生境质量差异, 幼鱼的皮质醇浓度可以用于评估生境的环境压力水平。

Amara 等^[52]通过对欧川鲱幼鱼的 RNA/DNA 比值、Fulton's *K* 条件指数、耳石边缘增量宽度进行比较, 对东英吉利海峡 3 个河口水域的鱼类育幼场生境质量进行评估, 并结合 Cd、Cr、Cu、Pb 等重金属浓度进行分析, 结果表明重金属污染是导致 3 个河口水域育幼场生境质量下降的主要原因, 从而对幼鱼的生长发育产生了负面影响, 导致了鱼类育幼场功能下降。Yamashita 等^[18]以石鲱(*Platichthys bicoloratus*)幼鱼 RNA/DNA 比值、消化道指数、皮质醇浓度作为育幼场生境质量的评价指标, 比较了日本仙台湾河口水域与邻近近岸水域石鲱幼鱼的生境质量差异状况, 研究结果表明, 河口水域石鲱幼鱼的这 3 个指标均显著高于近岸水域, 即河口水域虽然使幼鱼遭受一定的环境压力, 但仍能够为幼鱼提供良好的生长发育条件, 相较于近岸水域仍是鱼类优质的育幼场。De Raedemaeker 等^[56]研究发现, 黄盖鲱(*Pseudopleuronectes yokohamae*)和欧洲鲱(*Platichthys flesus*)幼鱼的 RNA/DNA 比值、Fulton's *K* 条件指数呈现显著的时空分布差异, 尤其强调了 RNA/DNA 比值是短期时间尺度上指示生境质量的高敏感性指标, 并通过 GAM 分析进一步分析了幼鱼生长发育差异表现与环境特征、摄食特征之间的功能关系, 其研究结果进一步证明高质量育幼场生境特征能够促进幼鱼的生长。

2.2.2 鱼类产卵场生境质量评价研究 鱼类在繁殖期的能量分配策略侧重于能量的积累与性腺组织的发育, 但鱼类的繁殖表现会受到环境因素所影响^[54], 从而影响成鱼的性腺组织发育^[55]、繁殖力水平^[56]以及后代的生存能力^[57]。一般认为, 高质量的产卵场能够为鱼类提供较高的能量储备, 使其在繁殖期具备更强的生存和生殖能力^[58-59]。因此, 性腺指数、肝胰腺指数等反映鱼类繁殖性能的特征指标可以用于评价产卵场生境质量水平。

Lloret 等^[35]为了确定水域保护等级、底质类型、水深对白鲷(*Diplodus sargus*)繁殖性能的影响, 以白鲷的肝胰腺指数、性腺指数、消化道指数、脂质含量作为其繁殖性能的评价指标。研究结果表明, 在保护区水域、岩石底质水域、深层水域相较于开放水域、沙质底质水域、浅层水域更有利于白鲷进行繁殖产卵活动, 是白鲷产卵场高质量的环境特征。Vitale 等^[48]根据 1996 年至 2004 年大西洋鳕(*Gadus morhua*)的捕捞数据, 以成熟雌鱼的比例以及个体的肝胰腺指数、性腺指数、Fulton's *K* 条件指数的表现作为区分大西洋鳕产卵场与非产卵场的判断指标, 并绘制了产卵场核心区域的时空变动趋势, 为开展渔业管理工作提供了参考。

2.3 鱼类的群落结构特征

鱼类的群落结构特征是评价河口水域鱼类生境质量水平的综合指标, 常用指标主要包括物种多样性、物种丰度、营养结构特征、生境利用类型等^[60]。首先, 鱼类作为水域生态系统中重要生物组成部分, 鱼类群落的物种多样性及物种丰度差异能够在一定程度上反映生境质量水平^[61]。其次, 鱼类群落的营养结构特征主要通过鱼类的摄食类型进行描述, 如滤食性鱼类、食鱼性鱼类、底栖动物食性鱼类等, 这一指标反映了水域生境的物质循环和能量流动状况^[62-63]。此外, 河口水域作为鱼类生活史关键阶段的重要栖息地, 鱼类对河口水域不同生境功能的利用现状^[64], 反映了河口水域生境功能及质量状况。

1981 年 Karr 等^[65]首次提出了鱼类生物完整性指数(fish-index of biological integrity, F-IBI), 根据鱼类群落的种类组成、营养结构、健康状况等 12 项指标, 通过评价指标的筛选、指标权重的确定、评分标准的建立等步骤, 开创了利用鱼类群落结构特征指标用于水域生态质量评价研究的先河。随后, 越来越多的研究者构建了鱼类群落指数工具用于河口水域鱼类生境质量评价, 如美国的河口生物完整性指数(estuarine biotic integrity, EBI)^[66-67]、南非的河口鱼类群落指数(estuarine fish community index, EFCI)^[68]、葡萄牙的河口鱼

类评价指数(estuarine fish assessment index, EFAI)^[69]、法国的河口和潟湖鱼类指数(estuarine and lagoon fish index, ELFI)^[70]等(表 2)。如 Breine 等^[71]建立了基于特定区域的河口生物完整性指数(zone-specific fish-based estuarine biotic index, Z-EBI), 对比利时塞舍尔德河口生境质量进行评估, 并结合对不同河口水域的人类活动压力指标分析, 结果表明 Z-EBI 的评价结果成功验证了不同河口水域鱼类生境质量差异状况。Ramos 等^[72]分别对幼鱼和成鱼构建 EBI、AFI、EFAI, 评估了 4 种不同污染程度河口水域的鱼类生境质量状况, 研究结果显示幼鱼在应对环境压力的表现较成鱼更为敏感, 表明以幼鱼构建鱼类群落指数具有更好的预警作用。Viana 等^[73]分别应用 EFCI、TFCI、EBI 对帕拉河口 3 个受不同水平工业活动影响的水域进行生境质量评估, 3 种鱼类群落评价指数

表 2 常用于河口水域鱼类生境质量评价的鱼类群落指数
Tab. 2 Fish community indices commonly used in estuarine habitat quality evaluation

鱼类群落指数 fish community index	应用国家 application country		评价指标 evaluating index	参考文献 reference
河口生物完整性指数 estuarine biotic integrity index	美国, 英国	物种丰度及组成	鱼类物种数量, 鱼类物种丰度, 丰度达到 90% 的鱼类物种数量, 底层栖息的鱼类数量百分比	[66-67]
		生境利用类型	河口定居性鱼类物种数量, 利用河口育幼场功能的鱼类数量, 在河口产卵的鱼类数量	
		健康状况	体型异常的鱼类数量百分比	
河口鱼类群落指数 estuarine fish community index	南非	物种丰度及组成	鱼类物种数量, 稀有或濒危鱼类物种数量, 外来鱼类物种数量, 相对于参考集合的鱼类物种丰度, 丰度达到 90% 的鱼类物种数量	[68]
		生境利用类型	河口定居性鱼类物种数量, 依赖河口栖息的海洋鱼类物种数量, 河口定居性鱼类的相对丰度, 依赖河口栖息的海洋鱼类的相对丰度	
		营养结构	底栖动物食性鱼类物种数量, 食鱼性鱼类物种数量, 底栖动物食性鱼类物种的相对丰度, 食鱼性鱼类物种的相对丰度	
AZTI 鱼类指数 AZTI's fish index	西班牙	物种丰度及组成	鱼类物种数量, 污染指示物种的数量百分比, 外来鱼类物种的数量百分比, 比目鱼数量的百分比	[74-75]
		生境利用类型	河口定居性鱼类物种数量	
		营养结构	杂食性鱼类数量百分比, 鱼食性鱼类数量百分比	
过渡性鱼类分类指数 transitional fish classification index	英国	健康状况	健康状况受影响的鱼类的数量百分比	[76]
		物种丰度及组成	物种数量, 相对于参考集合的物种组成, 指示物种的存在, 相对于参考集合的物种相对丰度, 丰度达到 90% 的物种数量	
		生境利用类型	河口定居性鱼类物种数量, 依赖河口栖息的海洋鱼类物种数量	
河口和潟湖鱼类指数 estuarine and lagoon fish index	法国	营养结构	摄食功能群的组成, 底栖动物食性鱼类物种数量, 食鱼性鱼类物种数量	[70]
		物种丰度及组成	鱼类总密度, 鱼类总丰度, 底层栖息鱼类密度	
		生境利用类型	河口定居性鱼类密度, 海洋迁徙幼鱼的密度; 淡水鱼类的密度, 海淡水洄游鱼类的密度	
河口鱼类评价指数 estuarine fish assessment index	葡萄牙	物种丰度及组成	鱼类物种丰度, 鱼类物种数量, 外来物种数量, 敏感性鱼类数量	[69]
		生境利用类型	海洋迁徙鱼类数量的百分比, 河口定居性鱼类数量的百分比	
		营养结构	食鱼性鱼类数量的百分比	

的评价结果均呈现高度相似的结果, 研究结果表明受工业活动影响最大的河口水域其生境质量水平最低。

3 讨论与展望

鱼类的数量分布特征是了解鱼类在河口水域的适宜生境分布格局的基础, 但仅通过与环境因子的统计学关系了解鱼类物种在河口水域的分布格局, 无法深入解释造成鱼类分布差异的原因与机制^[26]。鱼类的生存表现特征则考虑了鱼类生活史各阶段的生存需求以及对河口水域生境功能的利用, 相较于鱼类的数量分布特征, 更有利于从功能机制角度了解河口水域鱼类生境质量水平及现状。以各种鱼类群落结构特征指标开发的各种鱼类评价指数, 可从生态系统水平对河口水域鱼类生境质量状况进行综合评价^[77]。开展河口水域鱼类生境质量评价方法的研究有助于了解河口渔业生态功能的变化机制, 并可为开展河口水域生境管理保护工作提供科学指导意见。

3.1 为合理管控河口沿岸的人类活动提供理论依据

河口是全球生态价值最高的生态系统之一, 但同时也是最易受到人类活动威胁的沿海生态系统之一^[78]。许多关于河口水域鱼类生境质量评价研究证实, 污染输入^[55]、港口建设^[79]、滩涂围垦^[80]等人类活动是导致河口水域生境质量下降的主要原因。这些研究结果为规划河口沿岸的人类活动, 以避免其对河口生态环境造成负面影响提供了有效的借鉴。因此, 河口的沿岸城市在注重经济发展的同时, 要对各项人类活动进行合理管控, 尽可能在河口沿岸的经济发展与生态保护之间寻求平衡。

3.2 为研发河口水域生境质量监测预警技术提供理论基础

在许多关于河口水域生境质量评价的研究中, 一些学者强调了河口水域生境质量水平与环境因子之间的联系, 这为开展河口水域生境质量评价监测预警技术的研究提供了一定的理论基础。当前, 空间信息技术的发展广泛地应用于渔业水域的生态监测领域^[81], 这为建立适用于河口水域的

生境质量监测预警技术提供了必要的技术支持。根据河口水域生境质量水平与环境因子之间的关系, 借助空间信息技术有望实现对河口水域生境质量的变动趋势做出一定的监测预判, 以便及时开展科学的河口生境管理措施。

3.3 为科学开展河口生境保护和修复工作提供理论指导

河口水域生境质量评价方法的应用, 对了解河口水域生境质量水平的分布状况提供了极大的帮助, 能够为开展河口生境保护和修复工作提供了理论指导。针对在河口水域生境质量较高区域可以采取建立生境保护区的管理策略, 以减少人类活动对其产生的干扰。针对河口水域生境质量较低的区域可以开展生境修复措施。目前已经开展了多种适用于河口水域的生境修复工作, 如人工牡蛎礁的建立^[82]、海草床的修复^[83]、底栖动物的投放^[84]等。这些生境修复措施的实施为渔业物种在净化水质、创造良好的摄食条件、适宜栖息的物理条件等方面产生了显著的效果。因此, 在以后开展河口水域生境质量的评价研究, 要试图为开展河口水域生境保护及修复工作提供指导意见, 深度剖析影响生境质量的分布趋势以及造成生境质量下降的外来因素。

参考文献:

- [1] Le Pape O, Gilliers C, Riou P, et al. Convergent signs of degradation in both the capacity and the quality of an essential fish habitat: state of the Seine estuary (France) flatfish nurseries[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 588(1): 225-229.
- [2] Johnson, Matthew D. Measuring habitat quality: a review[J]. *Condor*, 2007, 109: 489-504.
- [3] Zhuang P. Habitat and aquatic fauna resources in the Yangtze River Estuary[J]. *Science*, 2012, 64(2): 19-24. [庄平. 长江口生境与水生动物资源[J]. *科学*, 2012, 64(2): 19-24.]
- [4] Lamberth S J, Turpie J K. The role of estuaries in south African fisheries: economic importance and management implications[J]. *South African Journal of Marine Science*, 2003, 25(1): 131-157.
- [5] Elliott M, Whitfield A K. Challenging paradigm in estuarine ecology and management[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2011, 94(4): 306-314.
- [6] Claassens L, Barnes R S K, Wasserman J, et al. Knysna

- estuary health: ecological status, threats and options for the future[J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2020, 45(1): 65-82.
- [7] James N C, Cowley P D, Whitfield A K. The marine fish assemblage of the east Kleinemonde estuary over 20 years: declining abundance and nursery function? [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 214: 64-71.
- [8] Burke J S, Peters D S, Hanson P J. Morphological indices and otolith microstructure of Atlantic croaker, *Micropogonias undulatus*, as indicators of habitat quality along an estuarine pollution gradient[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1993, 36(1): 25-33.
- [9] Dobson A, Lodge D, Alder J, et al. Habitat loss, trophic collapse, and the decline of ecosystem services[J]. *Ecology*, 2006, 87(8): 1915-1924.
- [10] Gibson R N. Impact of habitat quality and quantity on the recruitment of juvenile flatfishes[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1994, 32(2): 191-206.
- [11] Miró J M, Megina C, Donázar-Aramendía I, et al. Environmental factors affecting the nursery function for fish in the main estuaries of the Gulf of Cadiz (south-west Iberian Peninsula)[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139614.
- [12] Statham P J. Nutrients in estuaries-an overview and the potential impacts of climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 434: 213-227.
- [13] Buesseler C K O. Submarine groundwater discharge of nutrients and copper to an urban subestuary of Chesapeake Bay (Elizabeth River)[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(2): 376-385.
- [14] Souza M F L, Gomes V R, Freitas S S, et al. Net ecosystem metabolism and nonconservative fluxes of organic matter in a tropical mangrove estuary, Piauí River (NE of Brazil)[J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, 32(1): 111-122.
- [15] Zhou J, Wu Y, Zhang J, et al. Carbon and nitrogen composition and stable isotope as potential indicators of source and fate of organic matter in the salt marsh of the Changjiang estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(2): 310-317.
- [16] Meynecke J O, Lee S Y, Duke N C, et al. Relationships between estuarine habitats and coastal fisheries in Queensland, Australia[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2007, 80(3): 773-793.
- [17] Onabule O A, Mitchell S B, Couceiro F. The effects of freshwater flow and salinity on turbidity and dissolved oxygen in a shallow macrotidal estuary: a case study of Portsmouth Harbour[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2020, 191: 105179.
- [18] Yamashita Y, Tominaga O, Takami H, et al. Comparison of growth, feeding and cortisol level in *Platichthys bicoloratus* juveniles between estuarine and nearshore nursery grounds[J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, 63(3): 617-630.
- [19] Qu Y J, Liao R, Li J E, et al. Studies on the spawning period and growth of *Collichthys lucidus* in estuary of Pearl River based on otolith daily annulus[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(1): 85-88. [区又君, 廖锐, 李加儿, 等. 利用耳石日轮研究珠江口棘头梅童鱼的产卵期及生长[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(1): 85-88.]
- [20] Onikura N, Takeshita N, Matsui S, et al. Spawning grounds and nests of *Trachidermus fasciatus* (Cottidae) in the Kashima and Shiota estuaries system facing Ariake Bay, Japan[J]. *Ichthyological Research*, 2002, 49(2): 198-201.
- [21] Xu Z L, Cheng J J. Analysis on migratory routine of *Larimichthys polyactis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(06): 931-940. [徐兆礼, 陈佳杰. 小黄鱼洄游路线分析[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(6): 931-940.]
- [22] Zhao F, Zhuang P, Zhang T, et al. New timing record of juvenile *Acipenser sinensis* appearing in the Yangtze Estuary[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(3): 288-292. [赵峰, 庄平, 张涛, 等. 中华鲟幼鱼到达长江口时间新记录[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(3): 288-292.]
- [23] Zhi Y L, Hou J L, Zhang T, et al. Spatiotemporal distribution patterns of elver (*Anguilla japonica*) in the Yangtze River Estuary of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2750-2755. [智玉龙, 侯俊利, 张涛, 等. 长江口日本鳗鲡苗时空分布特征[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2750-2755.]
- [24] Chalifour L, Scott D C, MacDuffee M, et al. Habitat use by juvenile salmon, other migratory fish, and resident fish species underscores the importance of estuarine habitat mosaics[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2019, 625: 145-162.
- [25] Vinagre C, Fonseca V, Cabral H, et al. Habitat suitability index models for the juvenile soles, *Solea solea* and *Solea senegalensis*, in the Tagus estuary: defining variables for species management[J]. *Fisheries Research*, 2006, 82(1-3): 140-149.
- [26] Megan P, Juanes F, McGarigal K, et al. Describing juvenile American shad and striped bass habitat use in the Hudson River estuary using species distribution models[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 48: 101-108.
- [27] Lecchini D, Dixon D L, Lecellier G, et al. Habitat selection

- by marine larvae in changing chemical environments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 114(1): 210-217.
- [28] Komyakova V, Swearer S E. Contrasting patterns in habitat selection and recruitment of temperate reef fishes among natural and artificial reefs[J]. Marine Environmental Research, 2019, 143: 71-81.
- [29] Stoner A W, Manderson J P, Pessutti J P. Spatially explicit analysis of estuarine habitat for juvenile winter flounder: combining generalized additive models and geographic information systems[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 213: 253-271.
- [30] Amorim E, Ramos S, Elliott M, et al. Dynamic habitat use of an estuarine nursery seascape: ontogenetic shifts in habitat suitability of the European flounder (*Platichthys flesus*)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2018, 506: 49-60.
- [31] Linhoss A C, Camacho R, Ashby S. Oyster habitat suitability in the northern Gulf of Mexico[J]. Journal of Shellfish Research, 2007, 35(4): 841-849.
- [32] Yang H, Ding J, Wang C F. et al. Assessment on the habitat suitability of *Chinese sturgeon* juvenile in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(06): 675-679. [杨红, 丁骏, 王春峰, 等. 长江口中华鲟幼鲟栖息地适宜性评价[J]. 海洋通报, 2012, 31(6): 675-679.]
- [33] Rose K A. Why are quantitative relationships between environmental quality and fish populations so elusive? [J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 367-385.
- [34] Piazza B P, Peyre R K L. Using *Gambusia affinis* growth and condition to assess estuarine habitat quality: a comparison of indices[J]. Marine Ecology Progress, 2010, 412(12): 231-245.
- [35] Lloret J, Planes S. Condition, feeding and reproductive potential of white seabream *Diplodus sargus* as indicators of habitat quality and the effect of reserve protection in the northwestern Mediterranean[J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, 248: 197-208.
- [36] Biro P A, Post J R, Abrahams M V. Ontogeny of energy allocation reveals selective pressure promoting risk-taking behavior in young fish cohorts[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 272(1571): 1443-1448.
- [37] Post J R, Parkinson E A. Energy allocation strategy in young fish: allometry and survival[J]. Ecology, 2001, 82(4): 1040-1051.
- [38] Do Carmo Silva J P, Da Costa M R, Araújo F G. Energy acquisition and allocation to the gonadal development of *Cynoscion leiachus* (Perciformes, Sciaenidae) in a tropical Brazilian bay[J]. Marine Biology Research, 2019, 15(2): 170-180.
- [39] Grande M, Murua H, Zudaire I, et al. Energy allocation strategy of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* during their reproductive cycle[J]. Journal of Fish Biology, 2016, 89(5): 2434-2448.
- [40] Chen Q T, Hu B, Zhang J N. Application of RNA/DNA ratio in aquatic animal research[J]. Feed Industry, 2008, 29(2): 30-31. [陈庆堂, 胡兵, 张蕉南. RNA/DNA 比值在水产动物研究中的应用[J]. 饲料工业, 2008, 29(2): 30-31.]
- [41] Sivaraman G K, Barat A, Ali S, et al. Prediction of fish growth rate and food availability in the Himalayan waterbodies by estimation of RNA/DNA ratios[J]. The IUP Journal of Genetics and Evolution, 2011, 4(3): 15-19.
- [42] Wendelaar B S E. The stress response in fish[J]. Physiological Reviews, 1997, 77(3): 591-625.
- [43] Gesto M, Hernández J, López-Patiño M A, et al. Is gill cortisol concentration a good acute stress indicator in fish? a study in rainbow trout and zebrafish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology, 2015, 188: 65-69.
- [44] Sutton S G, Bult T P, Haedrich R L. Relationships among fat weight, body weight, water weight, and condition factors in wild Atlantic salmon parr[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2000, 129(2): 527-538.
- [45] Froese R. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(4): 241-253.
- [46] Gilliers C, Amara R, Bergeron J P. Comparison of growth and condition indices of juvenile flatfish in different coastal nursery grounds[J]. Environmental Biology of Fishes, 2004, 71(2): 189-198.
- [47] Cantafaro A, Ardizzone G, Enea M, et al. Assessing the importance of nursery areas of European hake (*Merluccius merluccius*) using a body condition index[J]. Ecological Indicators, 2017, 81: 383-389.
- [48] Vitale F, Börjesson P, Svedäng H, et al. The spatial distribution of cod (*Gadus morhua* L.) spawning grounds in the Kattegat, eastern North Sea[J]. Fisheries Research, 2008, 90(1-3): 36-44.
- [49] Amara R, Méziane T, Gilliers C, et al. Growth and condition indices in juvenile sole *Solea solea* measured to assess the quality of essential fish habitat[J]. Marine Ecology Progress

- Series, 2007, 351: 201-208.
- [50] Jones C L, Anderson T W, Edwards M S. Evaluating eel-grass site quality by the settlement, performance, and survival of a marine fish[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2013, 445: 61-68.
- [51] Mogensen S, Post J R. Energy allocation strategy modifies growth-survival trade-offs in juvenile fish across ecological and environmental gradients[J]. *Oecologia*, 2012, 168(4): 923-933.
- [52] Amara R, Selleslagh J, Billon G, et al. Growth and condition of 0-group European flounder, *Platichthys flesus* as indicator of estuarine habitat quality[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 627(1): 87-98.
- [53] De Raedemaeker F, Brophy D, O'Connor I, et al. Dependence of RNA: DNA ratios and Fulton's *K* condition indices on environmental characteristics of plaice and dab nursery grounds[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 98: 60-70.
- [54] Faria A M, Lopes A F, Silva C S E, et al. Reproductive trade-offs in a temperate reef fish under high pCO₂ levels[J]. *Marine Environmental Research*, 2018, 137: 8-15.
- [55] Marteinsdottir G, Begg G A. Essential relationships incorporating the influence of age, size and condition on variables required for estimation of reproductive potential in Atlantic cod *Gadus morhua*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 235: 235-256.
- [56] Morgan M J, Lilly G R. The impact of condition on reproduction in flemish cap cod[J]. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 2006, 37: 81-86.
- [57] Brooks S, Tyler C R, Sumpter J P. Egg quality in fish: what makes a good egg?[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1997, 7(4): 387-416.
- [58] Dutil J D, Lambert Y. Natural mortality from poor condition in Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(4): 826-836.
- [59] Baker R L. Condition and size of damselflies: a field study of food limitation[J]. *Oecologia*, 1989, 81(1): 111-119.
- [60] Pérez-Domínguez R, Maci, S, Courrat, A, et al. Current developments on fish-based indices to assess ecological-quality status of estuaries and lagoons[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 34-45.
- [61] Aguilar-Medrano R, Durand J R, Cruz-Escalona V H, et al. Fish functional groups in the San Francisco estuary: understanding new fish assemblages in a highly altered estuarine ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227: 106331.
- [62] Shen C, Li J, Kang B. Trophic Structure of Fish Community in the Minjiang River Estuary[J]. *Journal of Jimei University (Natural Science Edition)*, 2020, 25(1): 8-15. [沈忱, 李军, 康斌. 闽江口鱼类群落营养结构的探究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2020, 25(1): 8-15.]
- [63] Zhang B, Wu Q, Jin X S. Feeding ecology of fish assemblages and its variations in the Laizhou Bay[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(2): 1-9. [张波, 吴强, 金显仕. 莱州湾鱼类群落的营养结构及其变化[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(2): 1-9.]
- [64] Strydom N A, Kisten Y. Review of fish life history strategies associated with warm temperate South African estuaries and a call for effective integrated management[J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2020, 45(1-2): 217-227.
- [65] Karr J R. Ecological perspective on water quality goals[J]. *Environmental Management*, 1981, 5(1): 55-68.
- [66] Chun K, Weaver M J, Deegan L A. Assessment of fish communities in New England embayments: application of the estuarine biotic integrity index[J]. *The Biological Bulletin*, 1996, 191(2): 320-321.
- [67] Deegan L A, Finn J T, Ayvazian S G, et al. Development and validation of an estuarine biotic integrity index[J]. *Estuaries*, 1997, 20(3): 601-617.
- [68] Harrison T D, Whitfield A K. A multi - metric fish index to assess the environmental condition of estuaries[J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, 65(3): 683-710.
- [69] Cabral H N, Fonseca V F, Gamito R, et al. Ecological quality assessment of transitional waters based on fish assemblages in Portuguese estuaries: the Estuarine Fish Assessment Index (EFAI)[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 19: 144-153.
- [70] Delpech C, Courrat A, Pasquaud S, et al. Development of a fish-based index to assess the ecological quality of transitional waters: the case of French estuaries[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(6): 908-918.
- [71] Breine J, Quataert P, Stevens M, et al. A zone-specific fish-based biotic index as a management tool for the Zeeschelde estuary (Belgium)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(7): 1099-1112.
- [72] Ramos S, Cabral H, Elliott M. Do fish larvae have advantages over adults and other components for assessing estuarine ecological quality? [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 74-85.
- [73] Viana A P, Frédou F L, Frédou T. Measuring the ecological integrity of an industrial district in the Amazon estuary, Bra-

- zil[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(3): 489-499.
- [74] Borja A, Franco J, Valencia V, et al. Implementation of the European water framework directive from the Basque country (northern Spain): a methodological approach[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(3-4): 209-218.
- [75] Uriarte A, Borja A. Assessing fish quality status in transitional waters, within the European water framework directive: Setting boundary classes and responding to anthropogenic pressures[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2009, 82(2): 214-224.
- [76] Coates S, Waugh A, Anwar A, et al. Efficacy of a multi-metric fish index as an analysis tool for the transitional fish component of the water framework directive[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 55(1-6): 225-240.
- [77] 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.
- [78] Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J]. *Ecological Monographs*, 2011, 81(2): 169-193.
- [79] Able K W, Manderson J P, Studholme A L. Habitat quality for shallow water fishes in an urban estuary: the effects of man-made structures on growth[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 187: 227-235.
- [80] SuFeng X, Tao S, Heyue Z, Dongdong S. Suitable habitat mapping in the Yangtze River Estuary influenced by land reclamations[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 64-43.
- [81] Zhang T T, Zhang T, Hou J L, et al. Application of spatial information technologies in monitoring and assessment of fishery resources and ecological environment[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(3): 272-281. [张婷婷, 张涛, 侯俊利, 等. 空间信息技术在渔业资源及生态环境监测与评价中的应用[J]. *海洋渔业*, 2014, 36(3): 272-281.]
- [82] Anderson L, Sacks P, Donnelly M, et al. Oyster reef enhancement utilizing gardened oysters in a subtropical estuary[J]. *Restoration Ecology*, 2019, 27(5): 966-973.
- [83] Leschen A S, Ford K H, Evans N T. Successful eelgrass (*Zostera marina*) restoration in a formerly eutrophic estuary (Boston Harbor) supports the use of a multifaceted watershed approach to mitigating eelgrass loss[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(6): 1340-1354.
- [84] Shen X Q, Chen Y Z, Quan W M, et al. Restoration effect of benthos on the ecological environment of the Changjiang River estuary[J]. *Journal of Fisheries*, 2007, 31(2): 199-203. [沈新强, 陈亚瞿, 全为民, 等. 底栖动物对长江口水域生态环境的修复作用[J]. *水产学报*, 2007, 31(2): 199-203.]

Research progress on evaluation methods of fish habitat quality in estuaries

DU Nan^{1,2}, ZHANG Tingting^{1,3,4}, ZHAO Feng^{1,2,3,4}, ZHANG Tao^{1,3,4}, ZHUANG Ping^{1,2,3,4}

1. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment of the East China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;
3. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China;
4. Key Laboratory of Fisheries Ecology of the Yangtze Estuary, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Estuary is an essential habitat for fish, occupying an important position in the sustainable development of fishery resources. Carrying out evaluation research on estuary habitat quality is of great significance for understanding the status of estuary habitat functions and providing management bases. In this paper, the research methods and application progress of estuarine fish habitat quality assessment are reviewed, mainly focusing on three aspects: (1) based on the quantity distribution characteristics of fish, through the correlation between the quantity distribution characteristics of fish and environmental factors, exploring the suitable habitat distribution pattern of fish species; (2) based on the survival performance characteristics of fish, screening the survival performance characteristics indicators of each stage of fish life history and evaluating the quality of different types of habitats; and (3) based on the community structure characteristics of fish, comprehensive evaluating estuary fish habitat quality by constructing a fish community evaluation index. The evaluation of habitat quality of estuarine fish is helpful for understanding the change mechanism of estuarine fishery ecological function, providing a theoretical basis for the rational control of human activities along estuaries, the development of monitoring and early warning techniques for estuarine habitat quality, and the scientific implementation of estuarine habitat protection and restoration.

Key words: estuary; fish habitat quality; quantity distribution characteristics; survival performance characteristics; community structure characteristics

Corresponding author: ZHUANG Ping. E-mail: pzhuang@ecsf.ac.cn