

河口鱼类生态廊道研究进展

张婷婷^{1,2}, 赵峰^{1,2*}, 王思凯^{1,2}, 杨刚^{1,2}, 张涛^{1,2}, 袁瑞¹

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所、国家渔业资源环境杨浦观测实验站, 上海 200090;

2. 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)

摘要: 河口鱼类生态廊道是陆海联动生态廊道的重要组成部分, 在维护生物多样性、保障渔业资源和促进生态系统健康方面发挥着不可替代的作用, 为鱼类提供迁徙、繁殖、觅食和生存的必要通道, 对于保持河口水生生态系统“三场一通道”(繁殖场、育幼场、觅食场和迁徙通道)的完整性和功能性至关重要。然而河口鱼类生态廊道的研究面临着目标物种观测跟踪难、河口维度复杂、生境因子高度动态性等挑战。因此, 需要对河口鱼类迁徙行为、生态廊道主要生境类型有更深刻的理解和研究, 并且采取综合性、动态性和适应性的生态廊道识别评估、保护修复和规划构建方法, 以确保其连通性和生态功能的长期维持。本文对河口鱼类多样化的迁移行为和生态廊道内复杂的生境类型进行了梳理, 阐述了识别河口鱼类潜在的迁移路线和生活史周期中关键生境的技术进展, 从功能效益和经济成本两个方面总结了河口鱼类生态廊道的评估方法, 探讨了河口鱼类生态廊道保护措施和工程修复技术的最新进展, 并提出结合结构和功能连通性能进行更有效的河口鱼类生态廊道规划和构建的观点。展望未来, 本文强调了多尺度规划、生态网络集成、采用新型生境恢复技术以及整合生态系统服务功能的重要性, 并提出了开展跨学科合作、公众参与和政策支持的必要性, 以实现河口鱼类生态廊道的长期保护和生态系统的可持续发展。

关键词: 河口鱼类; 生态廊道; 通道路径识别; 生境保护修复

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240513002

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2025)-01-0037-08

河口生态系统作为陆地和海洋之间的过渡带, 承载着丰富的生态功能和经济价值。它们不仅是生物多样性的热土, 也是许多全球发达经济体重要的生态资产。然而, 河口生态系统正面临着来自城市化、工业化、污染和过度捕捞等人为活动的威胁。这些活动导致栖息地退化、破碎化、生物多样性下降, 甚至某些物种的局部灭绝^[1]。随着气候变化的加剧, 海平面上升和极端天气事件的增多, 河口生态系统的稳定性面临更大的挑战。这不仅威胁到生态系统的健康, 也间接影响到依赖这些资源的人类社区的福祉。河口生态廊道是连接河口复杂多样栖息地的关键结构, 能增强破碎化栖息地的连通性, 其保护和维护是保障河口生态系统和生物多样性健康的核心

要素, 对于保护生物多样性、促进物种迁移以适应气候变化、维持生态过程和服务、增强生态系统的韧性以及支持可持续资源管理至关重要。因此, 本文梳理了河口鱼类迁移行为以及鱼类生态廊道的主要生境类型, 综述了在河口鱼类生态廊道识别评估、保护修复和规划构建研究方面的相关进展。

1 河口鱼类生态廊道是陆海联动生态廊道的重要组成部分

河口鱼类生态廊道在河口生态廊道中占据着重要地位。河口鱼类生态廊道是指在河口区域及邻近水体为鱼类提供的栖息地、迁徙通道和生态连通的走廊。由于其范围涵盖横跨陆地和水生两类生态系

收稿日期: 2024-09-24

资助项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401903); 国家自然科学基金(32071584, 32072982, 32271658); 上海市优秀学术带头人计划(21XD1405000)

作者简介: 张婷婷(1985—), 女, 博士, 副研究员; E-mail: zhangtt@ecsf.ac.cn

* 通讯作者: 赵峰(1978—), 男, 博士, 研究员; E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn

统的不同栖息地类型(如河流、湿地、湖泊和海洋等),在陆地和海洋之间构成生态连接,是河口陆海联动的重要组成部分^[2]。河口鱼类生态廊道为陆海联动提供了重要的生态连通性功能。作为河口重要生态资源(鱼类及其他水生生物)的生态廊道,确保鱼类在不同生态系统之间进行物种迁移和基因流动^[3],这对于维持物种生命周期的完整性和种群的长期存续至关重要。另外,河口鱼类生态廊道具有生态整合性,能通过生境连接提供连续的栖息地和迁徙通道,将陆地、湿地、河流和海洋等生态系统进行整合,能更有效地调节物质和能量的交换,净化水质,维持食物链稳定,抵御外来物种入侵,增强物种对气候变化的适应性,以及保护濒危物种等^[4],这有助于提升陆海联动生态网络的稳定性和适应性^[5]。

1.1 河口鱼类迁移类型

鱼类迁移是河口鱼类生态廊道中的关键生态过程,对于维持鱼类生物多样性、促进物质循环和能量流动具有重要作用。研究河口鱼类的迁移行为是保护和构建河口鱼类生态廊道的重要基础,其迁徙行为复杂多样,主要包括以下几类(图 1)。

①与繁殖行为相关的洄游迁移:鱼类为了繁殖在海洋和河流之间进行的规律性长距离移动,主要包括溯河洄游和降海洄游。如鲑科(*Salmonidae*)、刀鲚(*Coilia nasus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)、中华鲟(*Acipenser sinensis*)等需要在河流进行繁殖,是典型的溯河洄游物种^[6-9];鳗鲡属(*Anguilla* spp.)、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)需要到海洋中进行繁殖,是典型的降海洄游物种^[10]。

②与生态资源利用相关的迁移:一些鱼类会根据生物资源的季节性变化在淡水和海水之间迁移。例如,鲱属(*Clupea* spp.)在温暖季节进入河口觅食,寒冷季节则迁往较深的海域避寒^[11]。大西洋鳕(*Gadus morhua*)、鲆形目(*Pleuronectiformes*)等则会根据河口区域食物资源的丰富度和栖息地的适宜性进行选择性的觅食迁移。在面临捕食压力时,一些鱼类会迁移到河口区域的复杂栖息地中进行避难迁移。

③环境适应性迁移:鱼类根据潮汐变化和环境梯度进行迁移。如鲑形目(*Tetraodontiformes*)随潮汐周期协同迁移。美洲狼鲈(*Morone americana*)根据温度和盐度梯度寻找适宜栖息地^[12],而鳟(*Salmo trutta*)可能因气候变化迁移至温度较低的河口区域^[13]。这些迁移类型反映了河口鱼类如何适应环境变化、寻找食物资源和完成繁殖活动。深入研究这些行为对于识别和保护河口鱼类的关键迁徙路径和栖息地至关重要,是设计和维护河口鱼类生态廊道的基础。



图 1 河口鱼类迁移类型及鱼类生态廊道生境类型示意图

Fig. 1 Diagram of fish migration types and fish ecological corridor habitat types in estuary

1.2 河口鱼类生态廊道生境类型

河口鱼类生态廊道包含多种相互联系的生境类型,从自然生境到人工通道,每种都对河口生态系统的健康和稳定起着独特作用。这些生境可以根据生态特征和地理位置分类(图 1),包括如下类型:

①水下生境,如潮下带、海草床、淡水-盐水混合区等;

②湿地,包括盐沼湿地、泥滩湿地、红树林湿地等;

③河岸带,河流与陆地交界的脆弱区域;

④岩石或礁体生境,如岩石或牡蛎礁构成的岸线或水下结构;

⑤河道;

⑥人工生境,如人工河道、水利工程、人工鱼礁等。这些生境的多样性为鱼类和其他生物提供了丰富的栖息地选择。每个类型都有其独特的生态功能和生物多样性价值,对维持生态廊道的健康和功能至关重要。河口湾的结构和水动力的差异性导致鱼类发生生态位分化,影响鱼类的迁移和繁殖行为^[14]。海草床和潮下带等生境为鱼类提供了丰富的食物资源,其退化对鱼类迁移和生态系统稳定性产生负面影响^[15]。淡水-盐水混合区为鱼类提供适应不同盐度的环境。湿地生境满足鱼类繁殖、觅食和避难的需求,如高营养底质、适宜幼鱼避难的复杂结构^[16]。

河岸带作为鱼类在不同生境间迁移的通道, 确保了鱼类在海水和淡水间顺利移动。岩石或礁体等生境结构复杂, 提供躲避捕食者和不利环境的场所。这些生境类型中的关键节点是鱼类在不同环境间移动的重要垫脚石, 保护这些生境有助于鱼类完成生命周期中的各种生态需求^[17]。因此, 在河口区构建和修复鱼类生态廊道时, 必须考虑不同生境类型的保护和恢复, 并进行综合管理和规划, 以确保生态廊道和河口生态系统的长期稳定和健康。

2 河口鱼类生态廊道研究方向及保护策略

河口生态系统中的湿地、河道和河岸带等关键生境对鱼类生态廊道至关重要, 但其正遭受水污染、生境破坏、过度捕捞等人为活动的威胁, 导致生境破碎化、水质恶化和岸线硬化, 影响生态廊道的连续性和功能^[18]。科学家们正通过研究鱼类的迁移规律和时空分布来识别和评估关键生境节点, 为生态廊道保护提供科学依据。湿地恢复、水体净化和生态栖息地重建等措施已改善了水质和栖息地的连通性^[19], 但河口鱼类生态廊道的生境识别、评估和保护修复技术仍需进一步发展, 以确保其连通性和稳定性。

2.1 河口鱼类生态廊道生境识别和评估研究

生境识别和评估研究对于制定生态廊道保护规划至关重要, 它们提供生境质量、分布和连通性的当前状况与未来需求的信息。关键步骤包括确定生态廊道的潜在位置和需要连接的栖息地节点或相似景观单元。在河口鱼类生态廊道的研究中, 需要明确河口鱼类潜在的迁移路线和生活史周期中的关键点生境时空分布。近年来, 随着生物标记、高分辨率遥感、无人机(UAV)等技术方法的不断发展^[20], 增强了我们对河口鱼类迁移行为、生活史时空分布及迁移规律的理解。这些技术帮助我们更精确地界定生境边界, 识别重要生境和迁徙路线。以长江口为例, 研究者通过标记回放、超声波遥测环境数据分析、物种分布模型和生态网络分析^[21-22]等技术手段, 结合常规监测和室内试验, 深入研究了中华绒螯蟹、刀鲚、中华鲟等洄游性物种的时空分布和洄游迁移规律, 包括产卵地点、洄游路线和迁徙季节及其关键环境因子需求等^[6, 8, 23-25]。例如, 研究显示长江口刀鲚育幼场主要集中在北支的启隆乡沿岸水域, 索饵场主要集中在北支的新河港和南支的九段沙沿岸水域, 其中超过 85% 以上的幼体分布在沿岸碎波带和植被区生境中; 对于中华绒螯蟹, 明确了其繁殖核心区位于 121°58'E—122°12'E, 31°05'N—31°22'N 的范围

内, 长江口沿岸滩涂湿地是其早期资源重要的育幼栖息地^[26]。He 等使用 MaxEnt 模型预测了刀鲚在长江口的关键栖息地, 支持其短距离迁移模式, 为维持种群或群落连通性提供重要作用, 在此基础上, 使用最小成本路径法划定连接最佳栖息地的迁移廊道^[4]。这些关键栖息地的精确识别为构建生态廊道、制定保护措施和管理河口生态系统提供了科学依据。

在河口鱼类生态廊道评估方面, 研究人员主要从功能效益和经济成本两个方面进行研究。例如, Cooke 等利用物种生存能力建模, 评估鱼类生态廊道对物种运动的促进作用^[27]。Li 等通过水文动力学模型, 评估水流速率、方向和持续时间等因素对生态系统整体连通性的贡献^[28]。Gomi 等应用气候变化模型, 评估生态廊道对气候变化的适应能力和潜在效益^[29]。Fausch 等通过使用空间模型和优化算法, 根据栖息地类型和物种需求设定适宜性值, 计算廊道的质量, 评估丧失连通区域的风险和经济成本, 从多个潜在廊道选项中选择最理想的维护区域, 以实现生态廊道成本效益的全面评估和管理^[30]。对河口生态廊道生境动态变化的全面理解和深入评估, 有助于保护区建立、禁捕政策制定、生态修复工程实施, 为退渔还湿、湿地重建、自然产卵场和洄游通道恢复等提供科学支撑。

2.2 河口鱼类生态廊道保护和修复研究

生态廊道的丧失和阻断对生物多样性承载力产生了严重影响, 包括生境碎片化、物种迁移障碍、种群遗传结构破坏、生境质量下降和生态位丧失, 以及生态系统功能和稳定性的丧失。河口鱼类生态廊道保护和修复的重要性日益凸显。在保护措施方面, 研究者们倡议实施河口海陆联动区域性保护规划, 以网络系统支持河口鱼类生态廊道的保护和管理。例如, 加勒比地区沿海海洋保护区生态网络计划^[31]和粤港澳大湾区海岸带生态系统保护修复规划^[32], 这些计划将河口生态廊道接入陆海生态保护区生态网络, 全面保护河口近岸关键栖息地和迁徙廊道, 从而增强生态系统的连通性, 并最大化保护效果。其他保护措施包括确定优先保护的廊道区段或栖息地节点, 监测和评估已保护的生态廊道, 引入新技术或设备(如下沉线、声威慑装置)和改进渔具减少非目标物种(尤其是河口迁徙鱼类)的兼捕损失^[33], 以及制定和实施有效的渔业管理法规, 如长江大保护背景下实施的长江流域禁渔措施等^[34]。这些措施有助于有效保护和管理河口鱼类生态廊道。

与此同时, 河口生态廊道的修复技术和实践不

断发展,取得了显著成效。通过生态护岸、湿地恢复、水生植物种植、水体净化和生物修复等技术,恢复了丧失或阻断的生态廊道,并连接了现有栖息地,为河口生物多样性和生态系统服务功能的提高提供了支持^[35]。①生态护岸技术:针对河口岸线的退化问题,采用模拟自然岸线的形态和功能,如人工湿地建设、岸线植被恢复和岸线防护工程,减少人工硬质结构的生态影响。这些措施增强了生态廊道的连通性,恢复了岸线生态系统的稳定性和抗风蚀能力,为鱼类提供了连续的通道栖息地。②湿地恢复与栖息地质量提升技术:通过模拟湿地的自然生态过程,构建人工湿地^[36],调控水文条件和改良土壤,改善栖息地质量,促进鱼类物种的迁徙和繁衍^[37]。水生植物种植技术利用土著植物恢复湿地植物多样性,改善水质,提供生物栖息地,重建河口湿地植被^[38]。针对河口水质污染问题,通过在人工湿地中设置微生物修复池,利用微生物降解能力降低水体污染物浓度,改善水质环境^[39]。③生态连通性提升技术:移除或修改阻碍自然生态过程的物理结构,如拆除不适当的堤坝,建设生态桥梁、沟渠或涵洞,这些结构有助于控制水位,改变水流和泥沙运输模式,增强生态功能,促进鱼类洄游和改善连通性功能^[37]。这些技术的实施需要考虑河口生态系统的复杂性和动态性,协调自然条件、生物多样性、水文连通性、水质状况和社会经济需求,并可与防浪林、护堤林建设等其他生态工程统筹实施。

2.3 河口鱼类生态廊道规划和构建研究

河口鱼类生态廊道规划和构建是主动管理和保护河口生态廊道及生态系统的重要手段,其核心是要有效识别和评估栖息地连通性这一关键指标。连通性指的是在景观中物种在不同栖息地斑块之间的移动能力,主要包括结构连通性和功能连通性。

结构连通性涉及栖息地斑块的物理特征及其布局。通过遥感和无人机技术,可以识别结构连通性,确定生态廊道的端点/节点栖息地斑块以及连接这些斑块的物理路径和边缘范围。这有助于规划河岸廊道、湿地潮沟廊道等鱼类生态廊道的设计,包括尺寸、端点/节点栖息地的数量和质量以及缓冲区范围。研究表明鱼类生态廊道的宽度和长度影响鱼类的多样性、数量和长期生存能力,一些物种需要更宽的廊道以减少边缘效应并维持适宜的栖息地条件^[40]。研究表明鱼类生态廊道栖息地斑块节点的位置、斑块间的距离和大小对沿海海洋鱼类栖息地的连通性有显著影响^[41]。如位于沿海水流、洋流和涡流集中

区的栖息地斑块是幼鱼关键栖息地,其大小和质量决定了斑块中成鱼产生幼鱼的数量,并且此类斑块间距离越远、斑块越小,连通性越低,幼鱼迁移和遇到适宜生境的可能性也越低。

功能连通性评估的是景观或水景对物种运动的促进或阻碍作用以及是否满足物种迁移的实际需求。它通常应用于目标物种的特定鱼类生态廊道的研究中,如关键物种(keystone species)、保护伞物种(umbrella species)、旗舰物种(flagship species)和脆弱物种(vulnerable species)等。研究者利用行为实验、栖息地适宜性模型和图论等方法来评估功能连通性,确定目标物种的栖息地偏好、扩散行为和其他迁徙模式,为设计特定鱼类的生态廊道提供科学依据。例如,Hamilton等通过易位行为实验和资源选择功能模型,量化鱼类在不同景观特征构成的阻力层之间的移动能力^[42]。研究发现,在潮间带、浅潮下带(0~30 m)、较深潮下带(>30~100 m)和更深的海底(大于100 m)之间存在明显的阻力层,鱼类难以在这些不同基质间迁移,只能在水温和深度相似的基质栖息地内生存和移动。这种对栖息地的偏好决定了特定鱼类生态廊道需要包含的栖息地类型和数量。Breckheimer等研究表明保护伞鱼类的生境需求与其他多数物种重叠,因此在设计生态廊道时,可以主要考虑这些物种的需求,包括廊道的宽度、缓冲区植被组成和巢穴及庇护所的配置^[43]。Radinger等研究表明游泳和扩散能力强的鱼类物种需要较宽的廊道,而扩散能力弱的物种则需要更连续的栖息地连接^[44]。河口洄游性鱼类物种有季节性迁徙需求,规划其生态廊道的尺寸和位置需要考虑季节性变动^[45]。

结合结构和功能连通性可以更全面地理解和构建河口鱼类生态廊道,以满足不同鱼类物种的需求。根据结构连通性作为粗过滤的方法规划生态廊道,以满足多数鱼类物种的需求,然后针对目标物种的功能连通性需求,设计更有效的特定鱼类生态廊道,促进物种的扩散、迁移和基因交流。

3 展望

随着对河口生态系统保护意识的增强和科学技术的进步,我们面临着新的机遇和挑战,以便更有效地规划、管理和恢复河口鱼类生态廊道。在这样的背景下,未来的研究方向和保护策略显得尤为重要。以下是对河口鱼类生态廊道未来发展趋势的几点展望:

(1)多尺度生态廊道规划与管理。河口鱼类生

态廊道的研究其挑战性在于鱼类及其他水生动物的迁移行为和习性难以观测和跟踪, 且其生活史周期的各个阶段对生境的需求复杂多变^[18]。河口的多维度连通性, 包括河口纵向(上游—下游)、横向(近岸潮沟/湿地潮滩区—近海)和垂直(表层水—底层水)连通性, 比陆地生态廊道的二维规划更复杂, 需要综合考虑水文动力学特征以及地形地貌特征等因素。这些条件的变化可能导致廊道连通性在不同时空尺度上显著变化。鉴于此, 鱼类生态廊道规划可能涉及从数十千米的迁徙路线到几千米的小型路径^[18], 且通常涉及陆地、淡水和海洋生态系统。这要求从局部到区域尺度的规划, 结合景观生态学和空间优化技术, 优化生态廊道的空间格局和连通性, 确保满足不同物种的需求并增强整体连通性^[46]。缺乏多尺度考量可能导致重复建设、连通性阻断和低效的生态过程转换, 影响保护区网络的效果和成本效益。

(2)生态廊道关键节点与生态网络的集成建设。生态廊道关键节点与生态网络的集成建设是当前趋势, 不仅增加了最大化物种迁移和基因流动的可能性, 还兼顾了成本效益和实施的可行性。这种集成建设促进了不同生态系统间的有机连接和协同管理, 提高了生态系统的稳定性和抗干扰能力, 并通过连接孤立的生态斑块增强了生物多样性的维持和恢复能力。构建以河口湿地、海草床、海岸带等鱼类生态廊道关键生境节点〔踏脚石 (stepping stone)〕和栖息地的生态网络体系, 有助于确保河口流域尺

度上及邻近海域“三场一通道”的畅通性和稳定性, 乃至生态系统的健康程度^[17]。这一体系的建立不仅有利于维持河口海洋生物多样性, 还能显著增强生态系统的抗逆性和活力, 促进沿海和河口生态系统的长期可持续发展, 有力推动“海景生态学”学科体系的发展。

(3)新型生境监测技术的应用。河口和海洋环境因子数据的获取和分析难度较大, 要求在规划和管理鱼类生态廊道时有更深刻的理解和研究, 并采取综合性、动态性和适应性的方法。这包括基于遥感、GIS、环境 DNA^[47]、生物传感器等生态监测及生物追踪技术, 以及基于生物信息学和人工智能的生态系统模拟与预测技术。这些生态监测与评估技术的创新与应用能更好地理解 and 预测物种在生态廊道中的动态行为, 将提高生态廊道规划和评估的准确性, 有助于设计出符合物种自然行为的生态廊道, 提高生态廊道的效率和实用性。

(4)生态系统服务功能的整合与优化。在河口区域, 生态廊道设计和融入能提升多种生态系统服务的整合功能。例如, 在水利工程建设中融入生态廊道的设计理念, 通过生态堤坝、过鱼设施及近自然鱼道工程等规划建设, 不仅能够改善鱼类的迁徙路径和栖息地, 提升水质, 增强生态系统的稳定性和适应性, 还可结合休闲、教育、文化价值以及应对气候变化需求实现生态、社会和经济效益的协同增益^[48]。

参考文献:

- [1] RIPPLE W J, WOLF C, NEWSOME T M, et al. World scientists' warning to humanity: a second notice[J]. *BioScience*, 2017, 67(12): 1026-1028.
- [2] COOKE S J, KILLEN S S, METCALFE J D, et al. Conservation physiology across scales: insights from the marine realm[J]. *Conservation Physiology*, 2014, 2: doi: 10.1093/conphys/cou024.
- [3] LENNOX R J, PAUKERT C P, AARESTRUP K, et al. One hundred pressing questions on the future of global fish migration science, conservation, and policy[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 286.
- [4] HE Y L, ZHAO L X, LIU S H, et al. Delineation of estuarine ecological corridors using the MaxEnt model to protect marine fishery biodiversity[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, DOI: 10.3389/fmars.2022.966621.
- [5] DU J G, CHEN B, CAI F, et al. Build global collaborations to protect marine migration routes[J]. *Nature*, 2024, 626(7999): 480.
- [6] 耿智, 冯广朋, 赵峰, 等. 超声波遥测在中华绒螯蟹产卵场研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(12): 3795-3801.
- [6] GENG Z, FENG G P, ZHAO F, et al. The application of ultrasonic telemetry in the study of spawning ground of *Eriocheir sinensis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12): 3795-3801.
- [7] 胡丽娟, 宋超, 耿智, 等. 长江口凤鲚仔稚鱼主要繁殖季节的时空分布特征[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(9): 1152-1161.
- [7] HU L J, SONG C, GENG Z, et al. Temporal and spatial distribution of *Coilia mystus* larvae and juveniles in the Yangtze Estuary during primary breeding season[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(9): 1152-1161.
- [8] 李宇, 冯广朋, 张涛, 等. 6个不同水域刀鲚的形态特征与聚类分析[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(6): 116-123.
- [8] LI Y, FENG G P, ZHANG T, et al. Morphological characteristics and cluster analysis of *Coilia nasus* populations from six different waters[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(6): 116-123.
- [9] WANG S K, ZHANG T, YANG G, et al. Migration and feeding habits of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray 1835) in the Yangtze Estuary: implications for conservation[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2018, 28(6): 1329-1336.

- [10] 王思凯, 宋超, 张婷婷, 等. 长江口日本鳗鲡苗的时空分布与捕捞生产现状[J]. 水产学报, 2023, 47(2): 171-182.
WANG S K, SONG C, ZHANG T T, et al. Spatiotemporal distribution and catching status of elver (*Anguilla japonica*) in the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(2): 171-182.
- [11] MAATHUIS M A M, COUPERUS B, VAN DER MOLEN J, et al. Resolving the variability in habitat use by juvenile small pelagic fish in a major tidal system by continuous echosounder measurements[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2024, 741: 169-187.
- [12] KERR L A, SECOR D H, PICCOLI P M. Partial migration of fishes as exemplified by the estuarine-dependent white perch[J]. *Fisheries*, 2009, 34(3): 114-123.
- [13] ROY M L, LE PICHON C. Modelling functional fish habitat connectivity in rivers: a case study for prioritizing restoration actions targeting brown trout[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2017, 27: 927-937.
- [14] WANG X, ZHANG Z X, MAMMOLA S, et al. Exploring ecological specialization in pipefish using genomic, morphometric and ecological evidence[J]. *Diversity and Distributions*, 2021, 27(8): 1393-1406.
- [15] VERHELST P, BRYNS R, COOKE S J, et al. Enhancing our understanding of fish movement ecology through interdisciplinary and cross-boundary research[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2023, 33(1): 111-135.
- [16] 孙乾照, 林海英, 张美琦, 等. 滨海盐沼湿地生态修复研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 151-158.
SUN Q Z, LIN H Y, ZHANG M Q, et al. Ecological restoration of coastal salt marsh[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(1): 151-158.
- [17] WHITFIELD A K. Estuaries: how challenging are these constantly changing aquatic environments for associated fish species?[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2021, 104: 517-528.
- [18] HILTY J A, KEELEY A T H, LIDICKER JR W Z, et al. Corridor ecology: linking landscapes for biodiversity conservation and climate adaptation[M]. 2nd. Washington D C: Island Press, 2019.
- [19] ZHANG Z, CAI Z C, YANG J H, et al. Ecological environmental quality assessment of Chinese estuarine wetlands during 2000–2020 based on a remote sensing ecological index[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 981139.
- [20] 马巧珍, 张婷婷, 赵峰, 等. 长江口湿地潮沟连通程度对鱼类群落的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(4): 913-921.
MA Q Z, ZHANG T T, ZHAO F, et al. Effects of tidal creek connectivity on fish communities in the Yangtze River estuary wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(4): 913-921.
- [21] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009.
WEI B J, SU J, HU X J, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2995-3009.
- [22] 张启舜, 李飞雪, 王帝文, 等. 基于生态网络的江苏省生态空间连通性变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3007-3020.
ZHANG Q S, LI F X, WANG D W, et al. Analysis on changes of ecological spatial connectivity in Jiangsu Province based on ecological network[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3007-3020.
- [23] 吴晓峰, 耿智, 冯广朋, 等. 长江口中华绒螯蟹成蟹资源现状及其繁殖特征[J]. 海洋渔业, 2020, 42(2): 205-213.
WU X F, GENG Z, FENG G P, et al. Resource status and reproductive characteristics of *Eriocheir sinensis* in the Yangtze Estuary[J]. Marine Fisheries, 2020, 42(2): 205-213.
- [24] HUANG X R, HE L L, TAN R, et al. Effects of salinity on reproductive characteristics and embryo quality of *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture Research, 2022, 53(14): 4970-4979.
- [25] LI Y, CHEN J H, FENG G P. Otolith microchemistry assessment: evidence of migratory *Coilia nasus* of Yangtze River living in the Shengsi Sea area[J]. *Fishes*, 2022, 7(4): 172.
- [26] ZHANG T T, GENG Z, HUANG X R, et al. Mapping essential habitat of estuarine fishery species with a mechanistic SDM and Landsat data[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109196.
- [27] COOKE S J, MARTINS E G, STRUTHERS D P, et al. A moving target: incorporating knowledge of the spatial ecology of fish into the assessment and management of freshwater fish populations[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(4): 239.
- [28] LI F W, ZHAO Y Y, ZHAO Y. Construction and optimization of ecological network based on morphological spatial pattern analysis and minimum cumulative resistance models in Haihe River basin[J]. *Ecohydrology*, 2024, 17: e2620.
- [29] GOMI T, SIDLE R C, RICHARDSON J S. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems[J]. *BioScience*, 2002, 52(10): 905-916.
- [30] FAUSCH K D, TORGERSEN C E, BAXTER C V, et al. Landscapes to riverscapes: bridging the gap between research and conservation of stream fishes[J]. *BioScience*, 2002, 52(6): 483-498.
- [31] LAGABRIELLE E, CROCHELET E, ANDRELLO M, et al. Connecting MPAs: eight challenges for science and management[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2014, 24(S2): 94-110.
- [32] 王金华, 黄华梅, 贾后磊, 等. 粤港澳大湾区海岸带生态系统保护和修复策略[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8430-8439.
WANG J H, HUANG H M, JIA H L, et al. Discussion on the strategies of coastal ecosystem protection and restoration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8430-8439.
- [33] LEWISON R L, CROWDER L B, READ A J, et al. Understanding impacts of fisheries bycatch on marine megafauna[J]. Trends in Ecology &

Evolution, 2004, 19(11): 598-604.

[34] 李立辉, 刘依阳. 长江大保护背景下长江流域禁渔措施与研究概述[J]. 中国水产, 2022(1): 63-67.

[35] LI P S, LI D, SUN X Q, et al. Application of ecological restoration technologies for the improvement of biodiversity and ecosystem in the river[J]. Water, 2022, 14(9): 1402.

[36] 赵峰, 黄孝锋, 宋超, 等. 长江口中华绒螯蟹幼蟹对人工漂浮湿地生境的选择利用[J]. 中国水产科学, 2020, 27(9): 1003-1009.

ZHAO F, HUANG X F, SONG C, et al. Selection and use of artificial floating wetland habitats for larval Chinese mitten crab in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(9): 1003-1009.

[37] WHITEROD N S, BROWN L, BACHMANN M, et al. Long and lasting: spatial patterns and temporal trends in a fish community responding to landscape-scale hydrological restoration of a coastal freshwater wetland complex[J]. Landscape Ecology, 2021, 36: 1511-1532.

[38] 谢雯, 王思凯, 秦泽, 等. 长江口潮滩湿地生境修复对鱼类群落结构的影响[J]. 中国水产科学, 2023, 30(5): 573-583.

XIE W, WANG S K, QIN Z, et al. Effects of wetland habitat restoration on fish community structure in the tidal flats of the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(5): 573-583.

[39] O'HARE M T, AGUIAR F C, ASAEDA T, et al. Plants in aquatic ecosystems: current trends and future directions[J]. Hydrobiologia, 2018, 812: 1-11.

[40] PANDER J, MUELLER M, GEIST J. Ecological functions of fish bypass channels in streams: migration corridor and habitat for rheophilic species[J]. River Research and Applications, 2013, 29(4): 441-450.

[41] SHANKS A L, GRANTHAM B A, CARR M H. Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves[J]. Ecological Applications, 2003, 13(S1): 159-169.

[42] HAMILTON S L, CASELLE J E, MALONE D P, et al. Incorporating biogeography into evaluations of the Channel Islands marine reserve network[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(43): 18272-18277.

[43] BRECKHEIMER I, HADDAD N M, MORRIS W F, et al. Defining and evaluating the umbrella species concept for conserving and restoring landscape connectivity[J]. Conservation Biology, 2014, 28(6): 1584-1593.

[44] RADINGER J, ESSL F, HÖLKER F, et al. The future distribution of river fish: the complex interplay of climate and land use changes, species dispersal and movement barriers[J]. Global Change Biology, 2017, 23(11): 4970-4986.

[45] LOWERRE-BARBIERI S K, FRIESS C, GRIFFIN L P, et al. Movescapes and eco-evolutionary movement strategies in marine fish: assessing a connectivity hotspot[J]. Fish and Fisheries, 2021, 22(6): 1321-1344.

[46] TURK-BOYER P J, MORZARIA-LUNA H N, MARTINEZ-TOVAR I, et al. Ecosystem-based fisheries management of a biological corridor along the Northern Sonora coastline (NE Gulf of California)[M]//AMEZCUA F, BELLGRAPH B. Fisheries management of Mexican and central American estuaries. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014: 125-154.

[47] 王汝贤, 杨刚, 耿智, 等. 环境 DNA 技术在长江口鱼类多样性分析中的应用[J]. 水生生物学报, 2023, 47(3): 365-375.

WANG R X, YANG G, GENG Z, et al. Application of environmental DNA technology in fish diversity analysis in the Yangtze River Estuary[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(3): 365-375.

[48] ZHANG Y L, CAO Y R, HUANG Y T. Integrating ecosystem services and complex network theory to construct and optimize ecological security patterns: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(31): 76891-76910.

Research progresses on estuarine fish ecological corridors

ZHANG Tingting^{1,2}, ZHAO Feng^{1,2*}, WANG Sikai^{1,2}, YANG Gang^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, YUAN Rui¹

(1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment of Yangpu, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China)

Abstract: As an important part of the land-sea linkage ecological corridor, the estuarine fish ecological corridors play an irreplaceable role in maintaining biodiversity, safeguarding fishery resources and promoting ecosystem health. They also provide essential passages for fish to migrate, reproduce, feed, and survive, and are crucial for preserving the integrity and functionality of the “three fields and one corridor” (spawning grounds, nursery grounds, foraging grounds, and migration corridors) in estuarine aquatic ecosystems. However, research on estuarine fish ecological corridors faces challenges such as the difficulty in observing and tracking target species, the complexity of estuarine dimensions, and the high dynamics of habitat factors. Therefore, It is necessary to

have a deeper understanding and study of the migratory behavior of estuarine fish and the main habitat types of ecological corridors. It is also necessary to adopt comprehensive, dynamic and adaptive methods for ecological corridor identification, assessment, protection, restoration and planning to ensure the long-term maintenance of its connectivity and ecological functions. In this paper, we summarize the diverse migration behaviors of estuarine fish and the complex habitat types in the ecological corridors and discuss technological advancements in identifying potential migration routes and key habitats in the life history cycle of estuarine fish. We also summarize assessment methods for estuarine fish ecological corridors both from the aspects of functional benefits and economic costs. Based on reviewing the recent progress in conservation measures and engineering restoration techniques for these corridors we propose a perspective on more effective planning and construction of estuarine fish ecological corridors by combining structural and functional connectivity. Looking forward, this article highlights the importance of multi-scale planning, ecological network integration, the adoption of novel habitat restoration technologies and the integration of ecosystem service functions. It also emphasizes the necessity of interdisciplinary cooperation, public participation and policy support to achieve long-term protection of estuarine fish ecological corridors and sustainable development of ecosystems.

Key words: estuarine fish; ecological corridor; corridor path recognition; habitat protection and restoration

DOI: [10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240513002](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240513002)

* Corresponding author (E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn)

(责任编辑: 方建勇)