

海洋生态廊道研究进展: 概念、方法与展望

杜建国^{1,2,3}, 陈琳^{1,4}, 胡文佳^{1,3}, 蔡锋^{1,2,3}, 周秋麟¹, 丁丽可¹, 郑新庆^{1,3}, 陈彬^{1,3*}

(1. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. APEC 海洋可持续发展中心, 福建 厦门 361005; 3. 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室, 福建 厦门 361005; 4. 汕头大学, 广东 汕头 515063)

摘要:作为一种有效的生物多样性保护模式,生态廊道已经成为全球生态研究的热点之一。然而,目前大部分研究侧重于陆地生态廊道,有关海洋生态廊道的理论和实践均较少。我国对海洋生态廊道的研究才进入起步阶段,是海洋生态保护修复和管理必须加强的领域。本文对生态廊道的国内外研究进展进行了综述,介绍了生态廊道的概念与演变,阐述了海洋生态廊道的定义和内涵。结合VOSviewer知识图谱可视化软件,系统分析了1995—2023年国内外海洋生态廊道领域发表的文献,梳理了近30年该领域研究的热点和趋势。收集了代表性的海洋生态廊道研究案例,凝练归纳出了通用的研究思路 and 具体技术方法,即首先选择目标物种并分析生活史等数据,其次编制并论证海洋生态廊道识别具体方案,然后进行相关补充调查与调研,最后对海洋生态廊道进行空间边界识别和绘制。在此过程中采用的具体技术方法包括包络边界法、最低成本路径法与水文-生态耦合模型法等。本文还进一步从四个方面提出研究建议:一是加强全球变化背景下不同尺度不同生物类群连通性维持机制研究,为生态廊道的识别与构建打下坚实的科学基础;二是基于多学科交叉建立可覆盖多种海洋物种应对全球变化的生态廊道时空识别技术;三是探索适用的管理模式与管控方法,强化对生态廊道的保护修复与监测预警;四是建立有效的国际合作框架,研发国际通用的技术指南,以期海洋生物多样性和生态系统的整体保护、系统修复和综合治理提供科学参考。

关键词: 海洋生态廊道; 连通性; 生态系统完整性; 海洋生态保护; 海洋生态修复

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240424001

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2025)-01-0003-12

生物多样性是人类赖以生存的基础,保护地是保护和恢复生物多样性与生态系统服务的有效工具^[1]。尽管全球保护地的覆盖范围在持续增加,但地球生命力指数和全球红色名录指数依然在下降^[2]。在全球范围内,生境丧失和破碎化是全球生物多样性下降的主要原因^[3]。生态保护的目标必须是保留完整的生态系统及其功能,从而为在瞬息万变的世界中保护生物多样性提供最佳机会。保护生态研究和实践已经证明,只有在保护地功能相互连接时,才能实现物种、生态系统和栖息地保护的目标^[4]。因此,必须采取积极措施来维护、增强或恢复保护地与其他有效的区域保护措施 (other effective area-based

conservation measures, OECMs) 之内以及之间的生态联系,其中关键在于建立跨陆地、淡水和海洋区域以及站点之内和站点相互间的生态连通性^[5]。除非解决生态连通性保护的问题,否则大多数全球、区域和国家的生物多样性保护、气候变化和环境可持续性目标都无法实现^[3,6]。然而,对全球746个海洋保护区的评估显示,仅有11%的国家将连通性纳入管理方面的考虑因素^[7],大多数国家在执行连通性保护方面明显落后^[2]。

构建生态廊道和生态网络是保护生态连通的重要手段,是保护生物多样性和生态系统必不可少的组成部分。作为一种新的生物多样性保护模式,

收稿日期: 2024-05-22

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0802204); 国家自然科学基金 (42176153, 41676096); 海洋生态预警监测项目“海洋生态廊道研究” (HR04-210705)

作者简介: 杜建国 (1981—), 男, 博士, 研究员; E-mail: dujianguo@tio.org.cn

* 通讯作者: 陈彬 (1970—), 男, 博士, 研究员; E-mail: chenbin@tio.org.cn

生态廊道目前已经成为全球生态研究的热点之一。2020 年 7 月,世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 等发布了首个有关通过生态廊道和保护网络来保护生态连通性的指南,提供了规划和实施生态廊道的原则和步骤,包括划定边界以及实现达到廊道目标的管理和监督计划等^[3]。2021 年 4 月,联合国大会首次通过关于跨界保护的决议,首次将“连通性”和“生态廊道”这两个术语列入代表联合国 193 个成员国的高级别决策,鼓励成员国根据可获得的最佳科学数据建立生态廊道,并加强现有生态廊道的有效管理 (第 75/271 号决议, <https://undocs.org/A/RES/75/271>)。2022 年 12 月,我国主办的《生物多样性公约》第十五届缔约方大会通过了《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》,将维持、增强或恢复生态连通性列为重要目标之一,保护海洋生态廊道是实现该目标的重要举措。2023 年 1 月,联合国环境规划署世界保护监测中心 (UNEP-WCMC) 发布连通性保护重点倡议,支持各国构建和监测生态廊道。2024 年 2 月《保护野生动物迁徙物种公约》(CMS) 缔约方第十四次会议 (COP14) 启动一个新的全球生态连通性伙伴关系 (GPEC),旨在确保在迁徙物种生存的关键地区维持、加强和恢复生态连通性。但目前来看,国际上大部分研究侧重于陆地上的生态廊道,有关海洋生态廊道的理论和实践均比较少,大大制约了海洋生态保护与修复工作的开展。

我国也极为重视生态廊道建设,把生态廊道和生物多样性保护网络构建工作提到了前所未有的高度^[8],近年来国家层面发布了多份文件和法律,致力于推动生态廊道保护的主流化。例如,2017 年 10 月,党的十九大报告中明确提出要构建生态廊道和生物多样性保护网络。2021 年 10 月中共中央办公厅和国务院办公厅联合发布的《关于进一步加强生物多样性保护的意见》提出因地制宜科学构建促进物种迁徙和基因交流的生态廊道,着力解决自然景观破碎化、保护区域孤岛化、生态连通性降低等突出问题。2024 年 1 月新修订的《中华人民共和国海洋环境保护法》第三十六条明确要求“维护和修复重要海洋生态廊道”。然而,我国有关生态廊道的研究大多集中在陆地^[9-14],有关海洋生态廊道的研究报道则较少^[15-21],因此急需开展系统研究。本文首先解析海洋生态廊道的定义和内涵,然后综述国内外研究进展,其次在案例分析的基础上总结海洋生态廊道研究的思路和方法,最后提出研究展望,以期海洋生态廊道的系统研究以及海洋生态系统的整体保护和

系统修复提供科学基础和理论依据。

1 生态廊道概念

廊道的概念起源于岛屿生物地理学说,可以定义为“连接栖息地生境斑块之间的线性元素”^[22]。复合种群理论明确了廊道的功能,并将廊道定义为“为生境破碎化而隔离的物种提供寻找最适宜生境的通道”^[23]。景观生态学将廊道纳入了斑块-廊道-基质模型,构成了景观空间结构的基本模式^[24]。廊道的同义词或近义词多达 30 余种,如生物廊道 (biological corridor)、保护廊道 (conservation corridor)、生态廊道 (ecological corridor) 等^[25]。我国林业行业标准将生物廊道和生境廊道 (habitat corridor) 定义为“连接破碎化生境并适宜生物生活、移动或扩散的通道”^[26]。为了统一学术用语,IUCN 提出了连通性保护区 (Areas of Connectivity Conservation, ACC) 的概念^[27],并将生态廊道定义为“一个明确界定的地理空间,可以长期治理和管理以保持或恢复有效的生态连通性”^[3],目前这一定义被采纳的范围较广。“明确界定的地理空间”包括陆地、内陆水域、海洋和海岸带水域或其中两个或两个以上区域的组合。“空间”可包括地下、地表或海底、水体和/或空域等三维结构^[28]。“明确界定”是指具有商定和划定边界的空间区域。生态廊道是保护网络的“粘合剂”,生态廊道必须维持连通性 (图 1)。生态廊道也可以保护原位生物多样性,但这不是一项要求。生态廊道有时并非连贯的栖息地,而是称为“踏脚石” (stepping stones) 的不连续点,例如支持海洋哺乳动物、海龟和候鸟等野生动物的长距离洄游或迁徙的趋避区或能量补充区。例如,对于候鸟而言可能不需要考虑栖息地之间的最短距离,除非它们相距很远或目标物种存在代谢限制^[29-30]。相反,这些“踏脚石”需要满足特定物种在不同迁徙阶段的生活史需求 (例如食物的可获得性、低干扰强度、安全栖息地的存在),尤其是在廊道内的分段和中途停留地点。

然而,海洋和陆地生态系统具有明显差异^[31],最根本的区别是除了海鸟所有海洋生物均生活在海水中 (表 1)^[32]。海水的性质对海洋生态系统的物理和生物特性有着深远影响,例如波浪和海流对生物和物质的运输作用扩大了许多过程的空间尺度,海洋比陆地更具有“开放度”^[33];海洋生物幼体生产和成体繁殖后的补充并不在同一水域,这与许多陆地脊椎动物幼体扩散距离有限形成极大反差^[34]。由于潮汐和洋流的时空变化,相比陆地生态系统,海洋生态系统具有更高的动态性和更低的空间异质性,对

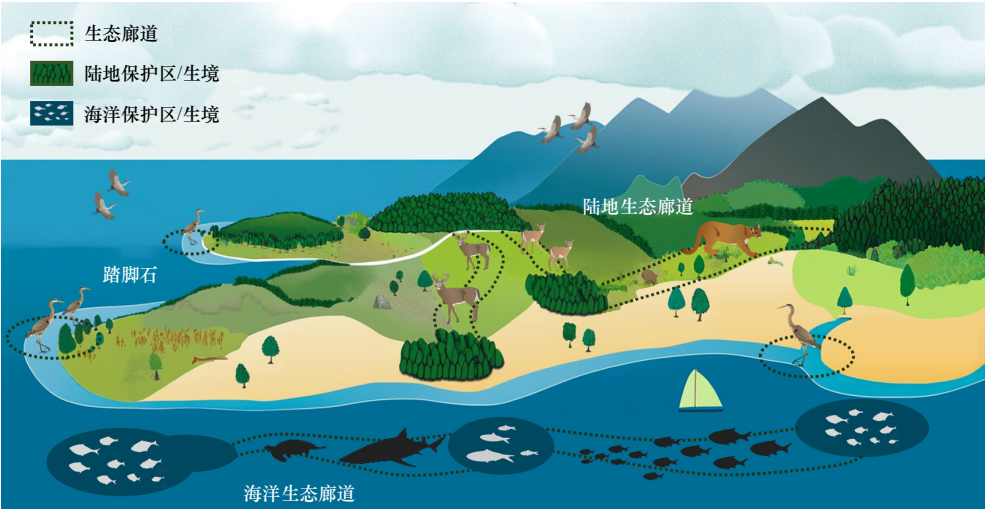


图 1 生态廊道和生态保护网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ecological corridors and ecological protection networks

表 1 陆地和海洋生态系统在生态环境特征以及人类影响的形式与后果方面的差异

Tab. 1 Differences between terrestrial and marine ecosystems in terms of ecosystem characteristics and the forms and consequences of human impacts

特征		陆地	海洋
环境	水介质的普遍性	较低	较高
	物种分布维度	二维	三维
	化学物质及其他物质的运输尺度	较小	较大
	局部环境的“开放度”(即输出/输入的速率)	较小	较大
种群结构	繁殖体运输空间尺度	较小	较大
	种群的空间结构	较不开放	较为开放
	对外源补充量的依赖度	较低	较高
	局部自我补充的可能性	较高	较低
基因	有效种群大小	较小	较大
	基因流的空间尺度	较小	较大
	种群间基因多样性	较高	较低
生态	生活史阶段扩散的差异	较小	较大
	生态连通性强度	较弱	较强
	生态廊道的普遍性	较低	较高
威胁类型和相对重要性	生境破坏	普遍	空间集中(河口、珊瑚礁等)
	生境结构的丧失	普遍	空间集中(河口、珊瑚礁等)

斑块和廊道等地理空间难以进行明确的界定。因此,考虑到海洋生态系统的特殊性,海洋生态廊道不能照搬生态廊道的概念。本文认为海洋生态廊道可以定义为“连通不同海洋生态系统或生境,并且维持海洋物种洄游、迁徙或扩散过程的生态空间”。在空

间上,强调生态系统或生境间存在连通性的区域,可以是保护区与保护区之间存在连通性的区域,也可以是河口和珊瑚礁等典型生态系统或生境之间的区域,还可以是滨海湿地和海岛等“踏脚石”。在内涵上,强调通过物种在不同生态系统或生境间的主动洄

游或迁徙以及被动扩散以维持生态连通性,包括鳗鲡 (*Anguilla japonica*) 等洄游性鱼类、海龟等迁徙物种、鸕鹚等沿海迁徙水鸟和造礁珊瑚浮游幼体等被动扩散物种^[35-36]。

2 海洋生态廊道研究趋势分析

2.1 研究数量趋势

本文基于文献计量手段对生态廊道和海洋生态廊道的研究发展趋势进行了总结。利用美国科学信息研究所 (Institute for Scientific Information, ISI) 的 Web of Science 核心合集的 SCIE 数据库,以及中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, CNKI) 数据库为检索源,选择已发表的国内外期刊论文作为研究对象。对于生态廊道,英文以“ecological corridor”为检索关键词;中文以“生态廊道”、“绿道”等为检索主题词,运用计算机检索语言“或”将各个检索词进行联结,来源类别以 SCI 来源期刊、EI 来源期刊、中文核心期刊、硕博论文为来源库。检索近 30 年 (1995—2023 年) 生态廊道的期刊

论文,共检索出相关文献 4 602 篇,其中英文 2 985 篇,中文 1 617 篇 [图 2(a)]。对于海洋生态廊道,英文以“marine ecological corridor”或“coastal ecological corridor”为检索关键词;中文以“海洋生态廊道”为检索主题词,共检索出相关文献 219 篇,其中英文 213 篇,中文 6 篇 [图 2(b)]。从文献逐年发表的数量上看,近 30 年国内外生态廊道和海洋生态廊道的相关文献整体都呈快速增长趋势,但海洋生态廊道文章发表数量只占陆地约 5%,说明了其研究难度较大,但同时也说明了具有较大的研究潜力。

2.2 研究热点识别

高频关键词可以反映研究领域的热点主题和发展方向。利用 VOSviewer (Version 1.6.20) 中的聚类算法对高频关键词进行统计和共现分析,并构建共现网络。研究发现 1995—2023 年生态廊道研究的高频关键词依次包括廊道、连通性、建设、生态源地、生态安全格局、研究案例、景观、物种、栖息地、保护区、碎片化、生态系统服务、影响、生物多样性、优化、规模、生态节点、生态保护、电路理论、森

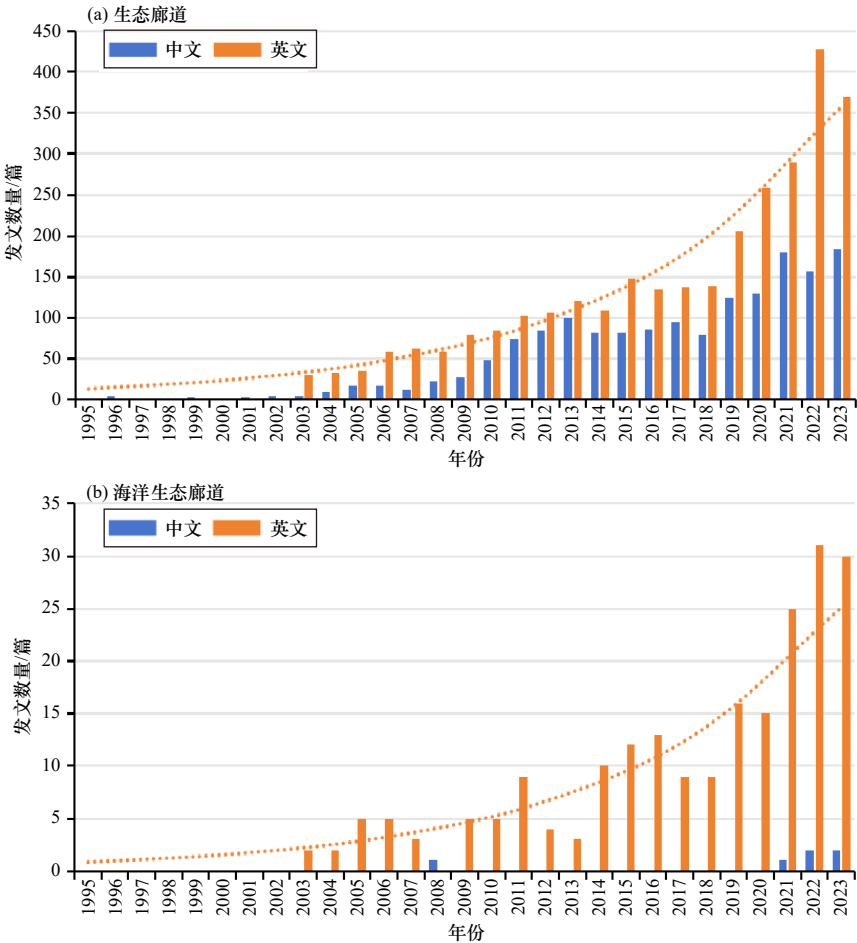
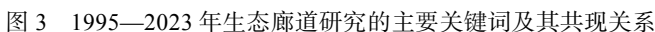


图 2 1995—2023 年生态廊道和海洋生态廊道领域文献年发文数量

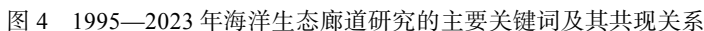
Fig. 2 Annual number of publications in the field of ecological corridors and marine ecological corridors, 1995–2023

本文对海洋生态廊道的研究热点进行进一步的筛选。1995—2023 年海洋生态廊道研究的高频关键词依次包括物种、分布、生物多样性、环境、保护、海岸、生态廊道、方法、景观、功能、迁徙、海洋、气候变化、扩散、恢复、影响、个体、距离、鱼类、温度等。对出现频率>10 的关键词 (共有 112 个) 进

通过对生态廊道研究热点进行识别发现,近年来生态廊道的研究热度稳步上升,研究广度逐渐扩大,研究主题的关注热度逐渐向生态安全格局和网络构建集中,最小累计阻力模型是廊道研究的传统方法,电路理论在生态廊道中的技术应用成为近两年的新热点。目前关于生态廊道的研究已有成熟的理论,廊道识别方法和模型发展迅速,其研究大部分围绕具体生物及研究区展开。海洋生态廊道的研究相较于陆地生态廊道发展较晚,但是近年来发展速



红色为廊道管理, 绿色为廊道生态保护研究, 蓝色为生态廊道构建研究; 字号和圆圈大小表示关键词的共现强度。



红色为海洋生态廊道建设研究, 绿色为海洋生态廊道影响因素研究, 蓝色为海洋保护区网络研究; 字号和圆圈大小表示关键词的共现强度。

用的关键栖息地斑块,发现裂尾鲈 (*Sacramento splittail*) 和条纹鲈鱼 (*Morone saxatilis*) 大多通过河口生态廊道迁徙到湿地中^[63]。韩国海洋水产部依据海洋生态系统特征及水深和离岸距离等科学调查结果颁布了 5 条海洋生态廊道,包括西海岸滩涂湿地保护廊道、南部岛屿生态保护廊道、东海岸生态保护廊道、洄游性海洋保护生物(海豹-江豚)保护廊道、气候变化观察廊道,并根据廊道类型制定了详细行动计划和管理方案(<https://www.newspenguin.com/news/articleView.html?idxno=2291>)。该方法能够快速识别生态廊道,但对一手调查资料和数据的要求比较高。

也有研究基于水流动力模型和生物输运扩散模型进行生态廊道识别,如 Watson 等通过使用拉格朗日粒子海洋环流模拟方法来模拟副鲈 (*Paralabrax clathratus*) 和墨绿平鲈 (*Sebastes atrovirens*) 等幼鱼在南加州海域的移动,结合物种偏好识别海洋生态廊道^[64]。Hock 等为了获得澳大利亚整个大堡礁地区的种群连通性模式,使用 Connie2 流体动力扩散模型进行模拟,通过海洋保护区再设计和对缓冲区活动的管理,提供“踏脚石”以维持幼体运动、个体从近海向远海生境的迁徙以及底栖和远洋生物成体的运动^[65]。这种方法适用于气候变化中的物种运动过程的模拟预测。

还有研究基于生态安全研究方法中景观斑块距

有研究基于目标物种的野外调查观测数据和生态环境数据形成包络边界来识别生态廊道。例如, Pendoley 等通过电子标签和卫星定位追踪法追踪了 73 只平背海龟 (*Natator depressus*) 的活动路径, 用地理空间方法绘制出它们在澳大利亚西北海岸的洄游通道^[62]。Colombano 等通过分析美国加利福尼亚州旧金山河口绥孙沼泽的长期鱼类监测数据, 结合平视数字化和航拍照片确定具有育幼作

表 2 海洋生态廊道研究案例

Tab. 2 Examples of marine ecological corridor studies

研究区域	研究内容	研究方法	参考文献/网址
厦门湾	识别中华白海豚(<i>Sousa chinensis</i>)海洋生态廊道, 九龙江口-鼓浪屿南侧-黄厝-大小嶼岛沿线可能是厦门湾中华白海豚的主要迁移路线	基于最小成本路径法的SDMtoolbox工具包	[15]
全球海域	揭示路氏双髻鲨(<i>Sphyrna lewini</i>)的主要分布区域和分布季节性变化, 研究还确定了种群迁徙的路径, 发现其受到海洋环境和气候因素的影响	基于电路理论的Circuitscape软件和'gdistance'r包中的最低成本路径分析	[16]
长江口	绘制了长江口凤鲚(<i>Coilia mystus</i>)生态廊道, 确定了生物多样性丰富的区域, 建立了生态连接路径	最小成本路径法和图论	[17]
西波罗的海基尔峡湾	通过设计海底野生动物廊道和海底生物区网络, 以加强研究区域内的生态连通性	参照Beier等 ^[66] 关于廊道设计和评估的六步清单	[55]
澳大利亚西北海岸	追踪了73只平背海龟(<i>Natator depressus</i>)在澳大利亚西北海岸的洄游通道, 该通道的52%位于现有的11个海洋保护区内, 而另48%则在保护区之外	电子标签和卫星定位追踪法、包络边界法	[62]
美国加利福尼亚州旧金山河口	裂尾鲈(<i>Sacramento splittail</i>)和条纹鲈鱼(<i>Morone saxatilis</i>)大多通过河口生态廊道迁徙到湿地中	渔业数据监测与模型测试、包络边界法	[63]
美国南加州海岸北部海峡群岛	不同物种利用不同的生态廊道。在该研究中, 副鲈(<i>Paralabrax clathratus</i>)和墨绿平鲉(<i>Sebastes atrovirens</i>)分别喜欢群岛东部的温暖水域和西部的较冷水域	拉格朗日粒子海洋环流模拟方法、水文-生态耦合模型法	[64]
澳大利亚大堡礁	提供“踏脚石”以维持幼体扩散、个体从近海向远海生境的迁徙, 保护海洋生态连通性	拉格朗日扩散模拟、Connie2流体动力扩散模型	[65]
北极楚科奇海	在楚科奇海东北部, 一条近岸的开阔水域廊道是50万只鸭类春季迁徙的主要通道	卫星观测与地理信息系统制图、包络边界法	[67]
黄海生态区	斑海豹(<i>Phoca largha</i>)生态廊道识别和保护空缺分析	卫星信标跟踪调查、生态位模型和阻力模型	[68]
韩国	颁布了5条海洋生态廊道, 并根据廊道类型制定了详细行动计划和管理方案	基于水深和离岸距离采用包络边界法	https://www.newspenguin.com/news/articleView.html?idxno=2291
东热带太平洋海洋廊道	提出东热带太平洋海洋廊道(CMAR)倡议, 建立海洋廊道将该地区几个现有的海洋保护区连接起来, 以保护和可持续利用东热带太平洋海洋生物多样性	基于海洋学海底地形和生态连通性特征采用包络边界法	[69]

离及基质特征, 利用最小累积阻力模型和地理信息系统中的成本距离来建立阻力面, 进而识别生态廊道。如 Zhang 等基于电路理论的 Circuitscape 软件和'gdistance'r 包中的最低成本路径分析预测了濒临灭绝的路氏双髻鲨 (*Sphyrna lewini*) 在全球范围内的季节性分布和种群迁徙路径^[16]。He 等利用 MaxEnt 模型及最小成本路径法和图论算法绘制河口长江口凤鲚 (*Coilia mystus*) 生态廊道, 以保护海洋渔业的生物多样性^[17]。何思璇等以中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 为保护对象, 基于物种分布模型和最小成本路径分析方法识别海洋生态廊道, 并评估旅游、航运、桥梁建设等人类活动对其的干扰^[15]。此方法可

以对难以实现的廊道构建可能性进行计算机模拟, 适用不同尺度的廊道提取与模拟, 大大降低了生态廊道的识别成本。

耦合两种或两种以上的理论方法构建生态廊道的场景近年来有所增加, 如 Lovvorn 等根据 2010—2012 年的底栖取样、觅食能量学模型以及 1997—2011 年 4 月和 5 月冰层形态的卫星数据, 绘制了陆基冰缘相对于适合鸭类觅食的栖息地特定分布的位置范围图, 在楚科奇海东北部一条近岸的开阔水域廊道是 50 万只鸭类春季迁徙的主要通道^[67]。庄鸿飞等基于卫星信标跟踪、参与式地理信息调查, 运用生态位模型和阻力模型识别了斑海豹 (*Phoca largha*)

在渤海海尺度的生态廊道,并基于水文分析进一步细化了斑海豹在渤海海峡的生态廊道^[68]。此方法有利于综合多种模型和方法的优点,有效提高生态廊道识别的效率及准确性。

总体而言,针对生态廊道空间分布较明确的对象,根据数据收集和调查结果,可采用包络边界法划定海洋生态廊道的空间边界;对于主动运动能力较强、难以直接通过调查数据记录确定其生态廊道空间边界的物种,可采用基于最小累计阻力模型的各种工具及插件、基于物种迁徙的环境阻力的电路理论、图论模拟并识别海洋生态廊道^[15-16];针对没有或较弱运动能力的目标物种,构建研究海域的水动力模型和生物输运扩散模型,模拟目标物种的扩散路径^[18, 50, 70]。海洋生态廊道识别步骤包括资料分析、方案制定、补充调查、生态廊道识别、成果编制等(图 5)。

4 研究展望

综上所述,相比陆地生态廊道,目前国内外有关海洋生态廊道理论和实践的研究均较少,亟待从概念、方法、案例等多方面开展系统研究。世界上已知最大规模的物种迁徙发生在海洋中,加强海洋生态连通性和生态廊道研究,对保护全球海洋生物多样性具有重要科学和实践意义^[18]。基于国内外目前的研究进展,笔者认为,今后开展海洋生态廊道性的研究可以集中在以下几个方面:

- (1) 加强海洋生态连通性机制研究。目前有关生态连通性的研究多集中在热带的红树林-海草床-珊瑚礁连续生境^[71],建议加强对造礁珊瑚、海洋鱼类、沿海迁徙水鸟、海洋哺乳类、海洋爬行类等种群连通性的研究,系统揭示全球变化背景下不同尺度不同类群连通性维持的关键机制,为生态廊道的识别与构建打下良好的科学基础。
- (2) 研发海洋生态廊道识别技术。基于多学科交叉,结合生态模型和水文模型等建立一套面向多种对象的海洋生态廊道时空识别技术方法,能有效覆盖并应用于具有不同运动迁徙特征的海洋物种,同时引入人类活动和气候变化情景以实现廊道关键受损节点或路径的识别和预测,为海洋生物多样性和生态系统的整体保护和系统修复提供科学

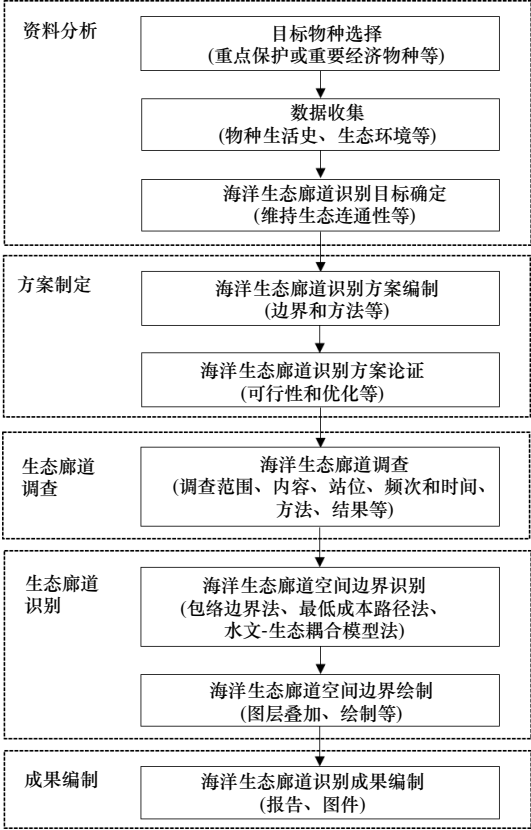


图 5 海洋生态廊道识别步骤
Fig. 5 Steps in identifying marine ecological corridors

- 依据。
- (3) 开展海洋生态廊道管理应用。探索识别、维护和修复重要海洋生态廊道的法律法规保障措施,研究适用的海洋生态廊道管理模式和管控方法,可在国家公园选划、海洋保护地网络构建、海洋生态保护修复等研究和实践中积极考虑海洋生态廊道,并加强对海洋生态廊道的监测、预警和管理。
- (4) 加强海洋生态廊道识别国际合作。由于海洋物种迁徙跨越了漫长的距离,单一国家的努力尚不足以实现对海洋生态廊道的完全保护,跨国界的全球合作至关重要。2024 年 2 月 12 日至 17 日召开的《保护野生动物迁徙物种公约》第十四届缔约方大会(CMS COP14)将“自然无国界”作为口号。因此,建议各国建立有效的合作框架,研发国际通用的技术指南,如与 IUCN 等国际组织合作制定海洋生态廊道识别国际标准,为全球共同保护海洋生态廊道提供技术支撑。

参考文献:

[1] SALA E, MAYORGA J, BRADLEY D, et al. Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate[J]. *Nature*, 2021, 592(7854): 397-402.

[2] Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Global biodiversity outlook 5: summary for policy makers[R]. Montréal: Secretariat of

the Convention on Biological Diversity, 2020.

[3] HILTY J, WORBOYS G L, KEELEY A, et al. Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors[M]. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2020.

[4] RESASCO J. Meta-analysis on a decade of testing corridor efficacy: what new have we learned?[J]. [Current Landscape Ecology Reports](#), 2019, 4(3): 61-69.

[5] 杜建国, 叶观琼, 周秋麟, 等. 近海海洋生态连通性研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 6923-6933.

DU J G, YE G Q, ZHOU Q L, et al. Progress and prospects of coastal ecological connectivity studies[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 6923-6933.

[6] GROSS J E, WOODLEY S J, WELLING L A, et al. Adapting to climate change: guidance for protected area managers and planners[M]. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2016.

[7] BALBAR A C, METAXAS A. The current application of ecological connectivity in the design of marine protected areas[J]. [Global Ecology and Conservation](#), 2019, 17: e00569.

[8] 林听, 李艺, 王磊, 等. 中国深度参与全球海洋生物多样性保护的研究与展望[J]. 科学通报, 2024, 69(12): 1598-1612.

LIN X, LI Y, WANG L, et al. Research and prospects for China's deep participation in global marine biodiversity conservation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(12): 1598-1612.

[9] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. [生态学报](#), 2005, 25(9): 2406-2412.

ZHU Q, YU K J, LI D H. The width of ecological corridor in landscape planning[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2406-2412.

[10] 李正玲, 陈明勇, 吴兆录. 生物保护廊道研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 523-528.

LI Z L, CHEN M Y, WU Z L. Research advances in biological conservation corridor[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 523-528.

[11] 穆少杰, 周可新, 颖颖, 等. 构建大尺度绿色廊道, 保护区域生物多样性[J]. [生物多样性](#), 2014, 22(2): 242-249.

MU S J, ZHOU K X, FANG Y, et al. The need and the prospects for developing large-scale green corridors to protect biodiversity[J]. [Biodiversity Science](#), 2014, 22(2): 242-249.

[12] 单楠, 周可新, 潘扬, 等. 生物多样性保护廊道构建方法研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 411-420.

SHAN N, ZHOU K X, PAN Y, et al. Research advances in design methods of biodiversity conservation corridors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 411-420.

[13] 王雨晨. 生态廊道建设综述: 以廊道尺度与功能的视角[J]. 建筑与文化, 2023(12): 255-257.

WANG Y C. A review of ecological corridor construction: from the perspective of corridor scale and function[J]. *Architecture & Culture*, 2023(12): 255-257.

[14] 陈春娣, 贾振毅, 吴胜军, 等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3243-3255.

CHEN C D, JIA Z Y, WU S J, et al. A bibliometric review of Chinese studies on the application of landscape connectivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3243-3255.

[15] 何思璇, 张典, 吴福星, 等. 厦门湾中华白海豚潜在生态廊道识别及人类活动干扰评估[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8555-8567.

HE S X, ZHANG D, WU F X, et al. Identification of potential ecological corridors for *Sousa chinensis* in Xiamen Bay and assessment of anthropogenic disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8555-8567.

[16] ZHANG X. Predicting global seasonal distributions and population exchange routes of a Critically Endangered shark[J]. [Biological Conservation](#), 2022, 275: 109771.

[17] 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, 9: 966621.

[18] DU J G, CHEN B, CAI F, et al. Build global collaborations to protect marine migration routes[J]. *Nature*, 2024, 626(7999): 480.

[19] 徐兆礼, 陈佳杰. 东黄海大黄鱼洄游路线的研究[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 429-437.

XU Z L, CHEN J J. Analysis of migratory route of *Larimichthys crocea* in the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(3): 429-437.

[20] 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.

XU Z L, CHEN J J. Analysis on migratory routine of *Larimichthy polyactis*[J]. [Journal of Fishery Sciences of China](#), 2009, 16(6): 931-940.

[21] 徐兆礼, 陈佳杰. 依据大规模捕捞统计资料分析东黄渤海白姑鱼种群划分和洄游路线[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6442-6450.

XU Z L, CHEN J J. Analysis to population division and migratory routine of populations and migratory routines of *Argyrosomus argentatus* in the North China waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6442-6450.

[22] MACARTHUR R H, WILSON E O. The theory of island biogeography[M]. Princeton: Princeton University Press, 2001.

[23] HANSKI I, GILPIN M. Metapopulation dynamics: brief history and conceptual domain[J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1991, 42(1/2): 3-16.

[24] TURNER M G. Landscape ecology: what is the state of the science?[J]. [Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics](#), 2005, 36: 319-344.

[25] SMITH D, HELLMUND P C. Designing greenways[M]. Washington, D C: Island Press, 2006.

[26] 国家林业局. 自然保护区名词术语: LY/T 1685—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

- [27] WORBOYS G, AMENT R, DAY J, et al. Advanced draft, area of connectivity conservation guidelines[R]. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2016.
- [28] LAUSCHE B, FARRIER D, VERSCHUUREN J, et al. The legal aspects of connectivity conservation: a concept paper[M]. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2013.
- [29] KLAASSEN M. Metabolic constraints on long-distance migration in birds[J]. The Journal of Experimental Biology, 1996, 199(1): 57-64.
- [30] 崔健明, 徐瑾, 刘玮, 等. 水鸟友好视角下的东莞市生态廊道与关键节点识别[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 229-237.
- [30] CUI J M, XU J, LIU W, et al. Identification of urban ecological corridors and key nodes in Dongguan City from waterfowls-friendly perspective[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 229-237.
- [31] NAGELKERKEN I. Ecological connectivity among tropical coastal ecosystems[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- [32] CARR M H, NEIGEL J E, ESTES J A, et al. Comparing marine and terrestrial ecosystems: implications for the design of coastal marine reserves[J]. [Ecological Applications](#), 2003, 13(s1): 90-107.
- [33] DENNY M W. Air and water: the biology and physics of life's media[M]. Princeton: Princeton University Press, 1993.
- [34] LÉNA J P, DE FRAIPONT M, CLOBERT J. Affinity towards maternal odour and offspring dispersal in the common lizard[J]. [Ecology Letters](#), 2000, 3(4): 300-308.
- [35] 范冰雄, 李杨帆, 张雪婷, 等. 海岸带区域陆海统筹生态安全研究[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 962-972.
- [35] FAN B X, LI Y F, ZHANG X T, et al. "One map" of coastal ecological security by integrating land-sea ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 962-972.
- [36] 王道儒, 王华接, 李元超, 等. 雷州半岛珊瑚幼虫补充来源初步研究[J]. [热带海洋学报](#), 2011, 30(2): 26-32.
- [36] WANG D R, WANG H J, LI Y C, et al. Preliminary study of coral larvae supplementary source around Leizhou Peninsula[J]. [Journal of Tropical Oceanography](#), 2011, 30(2): 26-32.
- [37] MODICA G, PRATICÒ S, LAUDARI L, et al. Implementation of multispecies ecological networks at the regional scale: analysis and multi-temporal assessment[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2021, 289: 112494.
- [38] CISNEROS-ARAUJO P, RAMIREZ-LOPEZ M, JUFFE-BIGNOLI D, et al. Remote sensing of wildlife connectivity networks and priority locations for conservation in the Southern Agricultural Growth Corridor (SAGCOT) in Tanzania[J]. [Remote Sensing in Ecology and Conservation](#), 2021, 7(3): 430-444.
- [39] LAMOUNIER W L, DOS SANTOS J S, RODRIGUES E L, et al. Defining priority areas for conservation based on multispecies functional connectivity[J]. [Biological Conservation](#), 2024, 290: 110438.
- [40] 付成冲, 李福宇, 陈丹丹, 等. 海南岛岸礁澄黄滨珊瑚 (*Porites lutea*) 集合种群的遗传结构和连通性[J]. [热带海洋学报](#), 2023, 42(2): 64-77.
- [40] FU C C, LI F Y, CHEN D D, et al. The genetic structure and connectivity of *Porites lutea* metapopulation of the fringing reefs around the Hainan Island[J]. [Journal of Tropical Oceanography](#), 2023, 42(2): 64-77.
- [41] HUANG W, LI M, YU K F, et al. Genetic diversity and large-scale connectivity of the scleractinian coral *Porites lutea* in the South China Sea[J]. [Coral Reefs](#), 2018, 37(4): 1259-1271.
- [42] KARISA J F, OBURA D O, CHEN C A. Spatial heterogeneity of coral reef benthic communities in Kenya[J]. [PLoS ONE](#), 2020, 15(8): e0237397.
- [43] YANG H Y, CHEN B, BARTER M, et al. Impacts of tidal land reclamation in Bohai Bay, China: ongoing losses of critical Yellow Sea waterbird staging and wintering sites[J]. [Bird Conservation International](#), 2011, 21(3): 241-259.
- [44] SHRESTHA S, THAPA A, BISTA D, et al. Distribution and habitat attributes associated with the Himalayan red panda in the westernmost distribution range[J]. [Ecology and Evolution](#), 2021, 11(9): 4023-4034.
- [45] SALOM-PÉREZ R, CORRALES-GUTIÉRREZ D, ARAYA-GAMBOA D, et al. Forest cover mediates large and medium-sized mammal occurrence in a critical link of the Mesoamerican Biological Corridor[J]. [PLoS ONE](#), 2021, 16(3): e0249072.
- [46] ZHANG W, CHANG W J, ZHU Z C, et al. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change[J]. [Applied Geography](#), 2020, 117: 102174.
- [47] DING G Q, GUO J, OU M H, et al. Understanding habitat isolation in the context of construction land expansion using an ecological network approach[J]. [Landscape Ecology](#), 2024, 39(3): 56.
- [48] ZAJĄC Z, SĘDZIKOWSKA A, MAŚLANKO W, et al. Occurrence and abundance of *Dermacentor reticulatus* in the habitats of the ecological corridor of the wieprz river, eastern Poland[J]. [Insects](#), 2021, 12(2): 96.
- [49] BRISCOE D K, HOBDAI A J, CARLISLE A, et al. Ecological bridges and barriers in pelagic ecosystems[J]. [Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography](#), 2017, 140: 182-192.
- [50] ZHUANG H F, SHAO F, ZHANG C, et al. Spatial-temporal shifting patterns and *in situ* conservation of spotted seal (*Phoca largha*) populations in the Yellow Sea ecoregion[J]. [Integrative Zoology](#), 2024, 19(2): 307-318.
- [51] BOWER S, LENNOX R, COOKE S. Is there a role for freshwater protected areas in the conservation of migratory fish?[J]. [Inland Waters](#), 2015, 5(1): 1-6.
- [52] ASSIS J, FRAGKOPOULOU E, SERRÃO E A, et al. Weak biodiversity connectivity in the European network of no-take marine protected

areas[J]. [Science of the Total Environment](#), 2021, 773: 145664.

[53] SRINIVAS Y, PANDE A, GOLE S, et al. Mitochondrial phylogeography reveals high haplotype diversity and unique genetic lineage in Indian dugongs (*Dugong dugon*)[J]. [Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems](#), 2021, 31(4): 818-829.

[54] BEAZLEY K F, HUM J D, LEMIEUX C J. Enabling a National Program for Ecological Corridors in Canada in support of biodiversity conservation, climate change adaptation, and Indigenous leadership[J]. [Biological Conservation](#), 2023, 286: 110286.

[55] KROST P, GOERRES M, SANDOW V. Wildlife corridors under water: an approach to preserve marine biodiversity in heavily modified water bodies[J]. [Journal of Coastal Conservation](#), 2018, 22(1): 87-104.

[56] MCLEAN D L, VAUGHAN B I, MALSEED B E, et al. Fish-habitat associations on a subsea pipeline within an Australian Marine Park[J]. [Marine Environmental Research](#), 2020, 153: 104813.

[57] LI C, HUANG L L, XU Q M, et al. Synergistic ecological network approach for sustainable development of highly urbanized area in the Bay Bottom region: a study in Chengyang District, Qingdao[J]. [Ecological Indicators](#), 2024, 158: 111443.

[58] 李晓炜, 赵建民, 刘辉, 等. 渤海渔业资源三场一通道现状、问题及优化管理政策[J]. 海洋湖沼通报, 2018(5): 147-157.

LI X W, ZHAO J M, LIU H, et al. Status, problems and optimized management of spawning, feeding, overwintering grounds and migration route of marine fishery resources in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(5): 147-157.

[59] SAURA S, TORNÉ J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(1): 135-139.

[60] LEONARD P B, DUFFY E B, BALDWIN R F, et al. Gflow: software for modelling circuit theory-based connectivity at any scale[J]. [Methods in Ecology and Evolution](#), 2017, 8(4): 519-526.

[61] FOLTÊTE J C, VUIDEL G, SAVARY P, et al. Graphab: an application for modeling and managing ecological habitat networks[J]. [Software Impacts](#), 2021, 8: 100065.

[62] PENDOLEY K L, SCHOFIELD G, WHITTOCK P A, et al. Protected species use of a coastal marine migratory corridor connecting marine protected areas[J]. [Marine Biology](#), 2014, 161(6): 1455-1466.

[63] COLOMBANO D D, MANFREE A D, O'REAR T A, et al. Estuarine-terrestrial habitat gradients enhance nursery function for resident and transient fishes in the San Francisco Estuary[J]. [Marine Ecology Progress Series](#), 2020, 637: 141-157.

[64] WATSON J R, MITARAI S, SIEGEL D A, et al. Realized and potential larval connectivity in the Southern California Bight[J]. [Marine Ecology Progress Series](#), 2010, 401: 31-48.

[65] HOCK K, WOLFF N H, ORTIZ J C, et al. Connectivity and systemic resilience of the great barrier reef[J]. [PLoS Biology](#), 2017, 15(11): e2003355.

[66] BEIER P, LOE S. A checklist for evaluating impacts to wildlife movement corridors[J]. *Wildl Soc Bull*, 1992, 20(4): 434-440.

[67] LOVVORN J R, ROCHA A R, MAHONEY A H, et al. Sustaining ecological and subsistence functions in conservation areas: eider habitat and access by native hunters along landfast ice[J]. [Environmental Conservation](#), 2018, 45(4): 361-369.

[68] 庄鸿飞, 鹿志创, 刘增力, 等. 斑海豹渤海黄海生态廊道[J]. 国家公园, 2024, 2(2): 81-90.

ZHUANG H F, LU Z C, LIU Z L, et al. Study on the ecological corridor of spotted seals in the Bohai and Yellow Seas[J]. *National Park*, 2024, 2(2): 81-90.

[69] ENRIGHT S R, MENESES-ORELLANA R, KEITH I, et al. The Eastern Tropical Pacific Marine Corridor (CMAR): the emergence of a voluntary regional cooperation mechanism for the conservation and sustainable use of marine biodiversity within a fragmented regional ocean governance landscape[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 674825.

[70] 黄康康, 叶振江, 于海庆, 等. 基于拉格朗日粒子追踪的黄海中南部小黄鱼幼体早期输运初步研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 538-543.

HUANG K K, YE Z J, YU H Q, et al. Preliminary study on early transport of larvae of *Larimichthys polyactis* in the central and southern Yellow Sea based on Lagrangian particle tracking[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2020, 39(6): 538-543.

[71] 谢美玲. 红树林-海草床-珊瑚礁连续生境鱼类连通性研究: 以海南文昌为例[D]. 汕头: 汕头大学, 2019.

XIE M L. Study on fish connectivity in mangrove-seagrass bed-coral reef continuous habitat: a case study of Wenchang, Hainan[D]. Shantou: Shantou University, 2019.

Research progress on marine ecological corridors: concepts, methods and prospects

DU Jianguo^{1,2,3}, CHEN Lin^{1,4}, HU Wenjia^{1,3}, CAI Feng^{1,2,3}, ZHOU Qiulin¹,
DING Like¹, ZHENG Xinqing^{1,3}, CHEN Bin^{1,3*}

(1. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China; 2. APEC Marine Sustainable Development Center, Xiamen 361005, China; 3. Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, MNR, Xiamen 361005, China; 4. Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: As an effective method of biodiversity conservation, ecological corridors have become one of the hotspots of global ecological research. However, at present, most of the research focuses on terrestrial ecological corridors, and there is relatively little theoretical and practical research on marine ecological corridors. The study of marine ecological corridors in China is still at the infant stage, and it is an area that needs to be strengthened for marine ecological protection, restoration, and management. This paper reviews the progress of research on ecological corridors globally, introduces the concept and development of ecological corridors, and elaborates on the definition and connotation of marine ecological corridors. Using the knowledge graph visualization software VOS viewer, a systematic analysis of literature published in the field of marine ecological corridors from 1995 to 2023 was conducted, and the hot topics and trends of research in this field over the past 30 years were summarized. A comprehensive review of representative case studies on marine ecological corridors were conducted, and general research process and specific technical methods were systematically summarized. Firstly, selecting the target species and analyzing the life history and other data, secondly, compiling and demonstrating the specific plan for identifying the marine ecological corridors, then carrying out the relevant supplementary surveys and research, and finally, identifying and drawing the spatial boundaries of the marine ecological corridors. The specific technical methods used in this process include the envelope boundary method, the least-cost path method and the hydro-ecological coupling model method, *etc.* This paper further proposes research in four aspects: first, to strengthen research on the connectivity maintenance mechanism of different biological groups at different scales under the background of global change, so as to lay a solid scientific foundation for the identification and construction of ecological corridors; second, to establish a spatial and temporal identification technology of ecological corridors based on the interdisciplinary establishment of ecological corridors covering a variety of marine species to cope with global change; third, to explore the applicable management mode and control methods, and strengthen the protection, restoration, monitoring and early warning of ecological corridors; fourth, to establish an effective international cooperation framework and develop internationally applicable technical guidelines to provide scientific reference for the overall protection and systematic restoration of marine biodiversity and ecosystems.

Key words: marine ecological corridors; ecological connectivity; ecosystem integrity; marine ecological conservation; marine ecological restoration

DOI: [10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240424001](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.2095-4972.20240424001)

* Corresponding author (E-mail: chenbin@tio.org.cn)

(责任编辑: 肖 静)