

DOI: 10.20152/j.np.202401130015

孙润隆, 赵林林, 庄鸿飞, 曲方圆, 王宗灵, 张朝晖. 海洋保护地规划中生态系统模型的应用探究. 国家公园(中英文), 2024, 2(3): - .
Sun R L, Zhao L L, Zhuang H F, Qu F Y, Wang Z L, Zhang Z H. Exploring the application of ecosystem modeling in marine protected areas planning. National Park, 2024, 2(3): - .

海洋保护地规划中生态系统模型的应用探究

孙润隆, 赵林林, 庄鸿飞, 曲方圆, 王宗灵, 张朝晖*

自然资源部第一海洋研究所, 渤海海峡生态通道野外科学观测研究站, 青岛 266061

摘要: 海洋保护地是海洋生态环境管理的重要措施, 科学有效的海洋保护地空间规划能够加强对海洋生物多样性和生态系统健康的保护。探讨面向对象的海洋生态系统评估模型(Object-oriented simulator of marine ecosystem exploitation, 简称 OSMOSE 模型)在海洋保护地空间规划中的应用前景, 通过深入分析模型原理、关键过程和研究进展, 以及结合模型特征及其功能实现, 对模型在海洋保护地空间规划中能够发挥的多方面优势进行了重点探究; 同时与现有海洋保护地空间规划方法的对比以及与实际海洋保护地案例结合, 探讨了 OSMOSE 模型与现有的海洋保护地空间规划技术方法的异同及有机结合的潜在可能。结果表明, OSMOSE 模型在模拟海洋生态系统动态、预测管理策略效果方面展现出的显著优势, 模型对多物种相互作用以及时空分布的精准模拟, 可以为海洋保护地空间规划提供丰富的数据支撑和决策依据。模型的合理应用不仅为我国海洋保护地建设提供了新视角, 还有助于提升海洋保护地的空间规划合理性与管理措施有效性, 对促进我国海洋生态保护具有重要作用和应用前景。

关键词: 海洋保护地; 空间规划; 生态系统模型; 面向对象的海洋生态系统评估模型

Exploring the application of ecosystem modeling in marine protected areas planning

SUN Runlong, ZHAO Linlin, ZHUANG Hongfei, QU Fangyuan, WANG Zongling, ZHANG Zhaohui*

Observation and Research Station of Bohai Strait Eco-Corridor, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract: As an essential measure for managing the marine ecosystem, scientifically effective spatial planning of marine protected areas can enhance the protection of marine biodiversity and ecosystem health. The application prospects of the Object-oriented simulator of marine ecosystem exploitation (OSMOSE) in marine protected areas spatial planning are discussed. An in-depth analysis of the model principle, key processes, and research progress, along with its features and functional realization, highlights the various advantages the OSMOSE model can offer in marine protected areas spatial planning and through practical case analysis, the similarities, differences, and potential integrative possibilities between the OSMOSE model and established spatial planning techniques are proposed. The results indicate that the OSMOSE model demonstrates significant advantages in simulating marine ecosystems dynamics and predicting the effectiveness of management strategies. The proposed model can precisely simulate multi-species interactions and spatio-temporal distributions, thus providing rich data support and a decision basis for marine protected areas spatial planning. The rational application of the model not only provides a new perspective for constructing marine protected areas in China but also enhances the rationality of spatial planning and the effectiveness of management measures in marine protected areas, playing a crucial role in promoting, China's marine ecological conservation.

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0802204)

收稿日期: 2024-01-13; 采用日期: 2024-01-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhang@fio.org.cn

Key Words: marine protected areas; spatial planning; individual-based multi-species ecosystem model; object-oriented simulator of marine ecosystem exploitation

海洋保护地作为海洋生态管理的一种有效手段,在全球海洋生态系统维持、生物多样性保护及海洋资源合理利用等方面已取得显著成效^[1-4]。在过去五十多年间,我国海洋保护地建设持续发展,自1963年建立首个海洋保护区——辽宁蛇岛老铁山国家级自然保护区以来,已初步建成了以海洋自然保护区、海洋特别保护区(含海洋公园)为代表的海洋保护地网络,包括各级各类海洋自然保护区271处(截至2018年底),涵盖了11个沿海省(区、市),总面积达12.4万平方公里,建立起的海洋保护地网络不仅保护了珊瑚礁、红树林、滨海湿地、海湾、海岛等重要海洋生态系统,还涵盖了诸如中华白海豚、斑海豹、海龟等珍稀濒危海洋生物物种^[4]。海洋自然保护区是建立以国家公园为主体的自然保护区体系的重要组成部分,我国在未来也进一步将加强全国海洋保护地统筹规划,推动发挥综合效能,发挥海洋保护地在保护海洋生态环境和生物多样性、推动陆海统筹、维护国家海洋权益等方面的重要作用^[5]。2022年,联合国《生物多样性公约》第十五次缔约方大会第二阶段会议(COP15-2)通过的“昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架”确定了“到2030年,使全球至少30%的陆地和海洋得到保护”的行动目标(简称“30×30目标”),以确保扭转全球生物多样性丧失和生态系统退化的趋势^[6]。“30×30目标”的设立为全球海洋保护地建设提出了比例要求和质量方向,以恢复海洋生物多样性、生态完整性和连通性^[7]。我国海洋保护地建设发展,也为我国海洋生物多样性保护和“30×30目标”的实现奠定了基础,体现了我国在海洋保护和生态文明建设方面的行动与远见。

目前,我国海洋保护地建设和管理仍面临诸多挑战,包括在保护地总体规划、顶层设计、管理能力、融资机制等多个方面,其中进一步完善海洋保护地空间布局和选划体系建设是亟需开展的工作重点之一,包括对海洋保护地的规模和布局等重要内容进行统筹规划,进而加强对海洋生态功能重要和生态系统脆弱区域的保护^[4,8]。作为海洋保护地研究的重要技术手段之一,利用计算机数值模拟的模型分析方法目前已广泛应用于海洋保护地空间规划设计、生态效益和经济效益评估等多个方面^[9]。区别于传统的基于专家决策、人为定性、经验知识等保护地规划和评估方法,模型分析方法具有定量分析海洋保护地空间规划效益的能力,通过对海洋保护地规模、范围、保护目标以及保护成本等关键信息的量化,以及预测和评估海洋保护地潜在效益以及海洋生态系统整体对不同管理决策的响应,为海洋保护地的科学建设和合理规划提供重要理论依据^[10-11]。其中,区别于传统的单一物种模型方法在海洋生态系统研究中可能由于忽略了海洋生态系统动态的复杂性而存在局限性,生态系统模型能够通过考虑海洋生态系统不同组成部分之间的相互作用,模拟包括从浮游生物到顶级消费者的整个食物网营养结构、空间结构、生物和非生物因素及其相互作用在内的整个生态系统动态,以及人类活动和环境变化的直接和间接影响,进而可作为研究海洋保护地空间规划的重要手段^[12-15]。例如,面向对象的海洋生态系统评估模型(Object-oriented Simulator of Marine ecoSystem Exploitation,以下简称OSMOSE模型),作为一种基于个体的多物种生态系统模型,在个体过程能够影响种群动态的假设前提下,通过对个体生活史周期过程模拟,并进一步整合了种群、群落和生态层面的动态过程,通过模拟海洋生态系统中个体之间的相互作用及其对环境变化的响应,实现模拟物种动态及其相互作用、预测多种驱动因素对生态系统动态影响,因此能够作为评估海洋保护地空间规划效益的有效建模工具^[16-17]。OSMOSE模型作为计算机数值模拟的一种应用实例,其重点在于模拟海洋生态系统的生活史过程和多物种种间互作,与传统海洋动力环境数值模拟侧重点有所不同,海洋领域中的计算机数值模拟通常关注于海洋动力环境的时空分布,特别是通过求解非线性微分方程来精确模拟海洋环境的物理特性,如水流、温度、盐度等,通过聚焦环境因子的物理和化学特性为海洋科学提供关键的环境背景信息^[18],相比之下,OSMOSE模型侧重于通过模拟生物个体的生长、繁殖、捕食和死亡等生物学过程,以及不同物种间的相互作用,来分析和预测生态系统的动态,进而为海洋保护地空间规划和管理提供不同的科学视角和方法^[16]。

因此,在我国海洋保护地建设不断发展的背景下,结合全球“30×30目标”的提出,科学和有效的海洋保

护地空间规划显得尤为迫切和重要,本研究着眼于探讨如何运用 OSMOSE 模型,这一基于个体的多物种生态模型,进一步优化海洋保护地的空间规划。本研究的核心科学问题集中在如何有效地利用 OSMOSE 模型来提升海洋保护地空间规划的科学性和有效性,进而更好地保护海洋生物多样性和维护生态系统的健康,这不仅是对国内外海洋保护地规划方法的重要补充,也是对应对全球海洋生态挑战的积极回应。为聚焦这一问题,本研究将从三个主要部分进行深入探讨:首先,介绍 OSMOSE 模型的基本原理和关键特征,为理解其在海洋保护地规划中的应用奠定理论基础;其次,结合 OSMOSE 模型特征,重点探讨 OSMOSE 模型在海洋保护地规划中的应用前景;最后,探讨 OSMOSE 模型与现有规划方法的结合和优势互补,以更全面应对规划挑战。通过综合三部分的系统分析,本文旨在展现 OSMOSE 模型在海洋保护地规划领域的应用潜力和价值,提供关于海洋保护地空间规划的新视角和科学依据,助力我国海洋生物多样性保护工作,同时为实现全球“30×30 目标”和维护海洋生态系统的健康和完整性提供重要的技术支持。

1 基于个体的多物种生态系统方法——OSMOSE 模型

1.1 OSMOSE 模型

OSMOSE 模型是一个空间明确的、基于个体的多物种生态模型,通过综合考虑以个体大小为基础的营养级间相互作用以及模拟物种整个生活史周期实现对生态系统动态的模拟^[16-17]。该模型的核心特征是以体型为基础的机会性捕食行为以及捕食者与猎物之间的空间共存关系。它着重于模拟海洋生态系统多物种相互作用的模拟,特别是在人类活动或气候变化等外部干扰条件下的动态响应。OSMOSE 模型的主要目的是深入理解海洋生态系统的功能机制,评估捕捞活动和气候变化对海洋生态系统的综合影响,以及分析各种管理措施(如调整捕捞压力、改变捕捞策略、实施海洋保护区)对海洋生物群落的潜在效果。该模型为科研人员和管理者提供了一个强大的分析工具,用于研究和预测海洋生态系统对人类活动和自然变化的响应^[16-17]。通过对鱼类群落动态的精确模拟,OSMOSE 模型促进了对海洋生态系统复杂性的深入理解,为制定有效的海洋资源管理和保护策略提供了关键的科学依据^[19]。

OSMOSE 模型通过模拟海洋生态系统中以鱼类为主的多物种生活史过程,如生长、繁殖、迁移、以及由饥饿、捕食和捕捞等多种因素导致的死亡,来模拟海洋生态系统中的动态变化^[17,2]。OSMOSE 模型的重要原则之一是考虑鱼类捕食模式的时间和空间变异性,包括捕食对象转换、同类相食和杂食性,因此模型中的捕食关系基于个体大小,考虑到捕食者与饵料生物之间的体型比例,并依赖于个体在空间和时间上的共存,这意味着不同物种在不同生活史阶段可能相互成为捕食者和饵料生物^[21]。模型中的基本模拟单位被定义为“超个体群”(super-individuals, school),它代表了具有相同生活史特征的同一种物种中的生物群体。每个超个体群包含了关于体长、体重、年龄、食性和特定空间分布的信息。这种方法允许模型从个体层面出发,在种群或群落水平上跟踪物种的生物量、丰度、年龄体长结构以及空间分布等关键指标。通过将物种个体归类为超个体群,不仅降低了模型构建和计算所需的时间和内存分配,还提高了模型可处理的物种数量和空间范围。OSMOSE 模型的这一设计理念和实施策略,体现了对海洋生态系统模拟的创新性思维,通过集中处理具有类似特征的个体群体,模型能够更有效地模拟复杂的海洋生态系统动态,这种基于个体的假设方法不仅提高了计算效率,还保持了模型在模拟多物种相互作用和响应环境变化方面的精确性和复杂性。模型中所有关键物种的卵总数被分成若干个超个体群,每个模拟物种的生命周期均为从卵到极限年龄。在整个模拟期间,模型模拟生活史过程和生态过程,因此模型运行需要综合多种数据类型,包括生活史参数(如生长、繁殖、自然死亡等生活史过程)、营养关系参数(描述捕食者与饵料生物之间潜在关系及食物网结构,例如捕食者/饵料生物体长比等)、物种分布和丰度数据(描述不同物种在特定区域的空间分布概率及初始生物量)以及低营养级物种生物量数据(在模型中作为饵料生物输入,例如浮游动物和浮游植物,通常来自水动力和生物地球化学耦合模型或观测数据)^[16-17,19-22]。

模型的校准的主要工具之一为基于进化算法(Evolutionary algorithm, EA)的优化校准方法,旨在将模型输

出结果(生物量、渔获量等)约束在基于实际观测数据的参考范围之内,该方法目前已广泛应用于复杂的生态系统模型校准研究^[23-24]。该方法在已知参数的基础上,通过模型校准来优化目标函数,校准过程使用最大似然目标函数,将模拟渔获量和生物量与观测数据进行拟合,以估算出模型关键物种的未知参数^[25]。OSMOSE 模型的校准是一个迭代过程,每个迭代中都会计算出一个“最优父本”,该父本源自于对每个目标(即物种渔获量和生物量的部分可能性)提供最佳解决方案参数集的重新组合^[24]。然后,使用最优父本来构建下一代,生成新的参数组合,EA 将持续迭代,直到目标函数达到收敛或达到一定代数,完成模型的校准过程^[23-25]。这一校准方法的优势在于,OSMOSE 模型的校准过程能够逐步调整其参数,以更好地拟合实际观测数据。

OSMOSE 模型作为一个多物种、基于个体的海洋生态系统模拟工具,其运行环境基于 Java 编程语言(OSMOSE-Java)和相应的 R 包(OSMOSE-R),提供跨平台兼容性和高效运算。模型源代码储存在软件托管平台 GitHub 上,包括一个公开目录(<https://github.com/osmose-model/osmose>)和一个仅供开发者使用的私有目录(<https://github.com/osmose-model/osmose-private>)。OSMOSE 提供了多种安装方式,以适应不同用户需求和设置,并且自 4.3 版本起,针对特定的研究目的,引入了生物能量、进化和经济等模块,使其功能更加丰富多样,各模块都有其独特的原理和假设,为特定案例研究和模拟提供详细指导,详见 OSMOSE 模型官网(<https://github.com/osmose-model/osmose-private>)。OSMOSE 模型通过考虑空间共存和大小适宜性之间的机会性捕食,能够模拟不同物种间的相互作用,但主要应用于鱼类,针对其他海洋生物的模拟,如无脊椎动物或海洋哺乳动物,模型的适用性主要取决于是否可以获取这些非鱼类物种准确的生活史参数和生态数据,例如,在多个已开发的 OSMOSE 模型中,实现了对多种生活史参数较为丰富的甲壳类、头足类物种的模拟,同时,模型中背景物种概念的引入,使模型能够考虑海洋哺乳动物在生态系统多物种互作中的关键作用^[20,26-28]。

1.2 全球范围内的应用案例和效果

OSMOSE 模型作为一个基于个体的、多物种生态系统模型,已被广泛应用于全球多种海洋生态系统的研究,包括上升流水域、温带和亚热带生态系统。这些应用涵盖了海洋生态系统动态的模拟、生态系统营养结构和关键生态指标的评估、物种间相互作用及其与种群空间结构的关系分析、以及气候变化和渔业捕捞等多重因素对海洋食物网功能和物种恢复力的综合影响研究^[17,20,26-30]。具体实例包括:在西佛罗里达大陆架上构建的 OSMOSE-WFS 模型,该模型通过对特定体长组的小鳞喙鲈(*Mycteroperca microlepis*)自然死亡率的评估,深入探讨了区域生态系统营养相互作用的复杂性以及生活史阶段生态位的变动^[28]。OSMOSE-MED 模型针对地中海生态系统的应用,实现了该区域在大空间尺度、高空间分辨率以及多物种水平上的海洋生态系统动态模拟。该模型有效评估了地中海生态系统中的生物量、渔获量和营养级水平等关键指标^[29]。加拿大西部太平洋沿岸应用的 OSMOSE 模型,聚焦于关键物种(如太平洋鲑、太平洋鲱鱼)的多个渔业群体,研究了物种相互作用及其种群动态的时空变化,此外,该模型还被用于研究气候变化和人类活动等多种压力的交互和累积效应对加拿大不列颠哥伦比亚省外海生态系统的综合影响^[26,30-]。这些研究表明,OSMOSE 模型在全球变化背景下对海洋生态系统动态的呈现和多种胁迫因素的情景模拟方面,发挥着重要的作用,为理解海洋生态系统对不同海洋管理策略的响应提供了关键的科学支持。

同时,OSMOSE 模型在我国的多个海洋生态系统中已有多项研究,主要应用于多物种生态系统动态模拟、渔业管理策略评估和生态系统响应和恢复力分析等方面,研究区域包括东海海域、黄海海域以及胶州湾等海洋生态系统^[19,33-34]。研究表明,OSMOSE 模型能够有效模拟我国海域中多物种的生态动态,包括渔业资源的生物量和种群结构,这为理解和预测人类活动(如捕捞)对海洋生态系统的长期影响提供了宝贵的工具^[19,33]。同时,OSMOSE 模型也被用于探索和评估不同的渔业管理策略,如平衡捕捞(Balanced Harvest)策略,通过模拟不同的捕捞压力和管理措施,模型结果能够评估渔业管理策略对海洋生物多样性和生态系统健康的长期影响,以及分析海洋生态系统对过度捕捞和环境变化的响应及其恢复力^[35]。这些研究不仅强调了 OSMOSE 模型在理解我国海洋生态系统中复杂的海洋食物网关系和评估渔业管理策略方面的重要性,而且为保护海洋生物多样性、制定有效的海洋保护和管理措施提供了科学依据。

2 OSMOSE 模型在海洋保护地空间规划中的应用前景

2.1 多物种和空间显性模型特性

OSMOSE 是一个多物种和空间显性的模型,即模型能够模拟不同物种在空间上的分布和相互作用,通过对特定物种或生态群落在特定区域分布模式的识别,模拟结果可用以指导海洋保护地位置及范围的确定,这在海洋保护地的空间规划中具有重要意义。具体而言,多物种模型能够同时考虑多种海洋生物的生态需求和相互作用,从而更全面地评估和理解生物多样性的保护需求。这种方法有助于确保海洋保护地规划能够覆盖并保护多样的物种群体,包括那些具有关键生态功能的物种,从而有效提高生物多样性水平和生态系统生产力^[36-38]。而模型的空间显性特性考虑了物种在空间上的分布和动态,这对于识别和保护关键生态区域至关重要。利用模型空间显性特性可以帮助识别哪些区域对维持生态系统健康和物种多样性最为关键,从而确保海洋保护地的位置和范围能够最大化地保护生态系统的完整性和连通性^[39],例如,有研究表明指出,考虑气候变化下物种分布的变化对于海洋保护地的有效性至关重要^[40]。综上所述,OSMOSE 模型考虑多物种和空间显性的模型特性不仅有助于确保生物多样性的有效保护,还有助于促进生态系统服务的可持续利用,同时应对气候变化和其他环境变化的挑战,对于海洋保护地规划是至关重要的。

2.2 物种相互作用的动态模拟

OSMOSE 模型基于体型和时空共存的机会性捕食,以实现海洋生态系统物种相互作用的模拟。物种相互作用,包括捕食、竞争和共生等,对海洋生态系统的结构和功能产生深远影响。在海洋保护地规划中,由于人为干预和保护措施,这种生态相互作用可能发生改变,例如,保护区内捕食者数量的增加可能会对食物网的其他部分产生影响,这反过来又影响整个生态系统的健康和稳定性^[41]。此外,物种相互作用还能影响海洋保护地的边缘效应,即保护区边界附近生物多样性和生态系统服务的变化情况,在保护区的边界区域,可能会观察到某些物种的聚集,而其他物种则可能因此被排斥,这直接影响了物种组成和分布模式^[42]。因此,在海洋保护地规划和管理中考虑物种相互作用是至关重要的。这不仅关乎生物多样性和生态系统功能的维持,也是实现有效的保护和管理策略的关键。通过深入理解关键物种相互作用,可以更好地设计和实施保护措施,以保障海洋生态系统的长期健康和绿色发展。

2.3 长期模拟和影响评估

OSMOSE 模型在时间尺度的模拟能够进行长达 100 年或更长时间,这有助于更好地理解 and 预测海洋保护地对海洋生态系统的长期影响,包括长时间尺度下人类活动和气候变化等因素对保护区生态系统的影响。在海洋保护地规划中,长时间序列的模拟和影响评估是一项关键因素,能够提供深入了解海洋保护地效果的视角,为制定有效的保护措施和管理策略提供指导,通过长期模拟,可以揭示海洋保护地对生物多样性、生态系统服务和人类福祉的长期影响,识别和量化海洋保护和管理相关的不确定性和风险,包括气候变化、人类活动和生态系统内部变化等因素的影响^[43]。长期模拟结果为管理策略的制定和实施提供科学依据,支持制定更有效的海洋保护策略和规划。同时,这些模拟还能评估海洋保护地对当地社区和经济的长期影响,进一步指导社会经济可持续发展的可持续路径。此外,针对海洋保护地长时间尺度的研究也强调了科研人员、管理部门和其他利益相关方之间合作的重要性,通过跨学科合作和数据共享,可以更有效地收集和分析关于海洋保护地的长期数据,从而提高海洋保护地规划和管理的科学性和实用性^[44]。因此,长期模拟和影响评估能够为海洋生态系统的保护提供了关键信息,为海洋保护地建设提供科学参考。

2.4 多种影响因素的情景模拟

OSMOSE 模型能够在整个生态系统层面进行模拟,设定多种影响因素驱动的情景,包括渔业管理措施、气候变化、海洋保护地的设立等,从而预测这些情景下海洋生态系统结构和功能的变动。在海洋保护地规划中,不同情景的模拟是一种重要的工具,它可以帮助评估海洋保护地对生物多样性、渔业产量和气候变化的影响,有研究表明在考虑气候变化情景下,不同的海洋保护地设计对于生物群落的生物量和捕捞产量有不同的影

响,海洋保护地的设计对于实现生物多样性保护和渔业产量的目标至关重要,此外,海洋保护地设计也对不同渔业船队收入的影响,这有助于了解海洋保护地在经济层面的效果^[45]。同时,在南大洋海洋保护地规划研究中,强调了在不同环境和人为压力下,特别是气候变化的影响下,对移动物种进行研究的复杂性,在海洋保护地规划时考虑不同环境和人类活动影响的重要性,以及如何利用模拟来理解这些因素对海洋生态系统的潜在影响^[46-47]。这些研究都强调了通过不同情景的模拟,有效规划和管理海洋保护地的重要性,而本研究聚焦的 OSMOSE 模型可以预测各种管理措施对生物多样性、渔业和生态系统服务的影响,包括通过模拟不同保护区设立方案对物种和生态系统的影响,指导确定保护区的位置、大小和管理规则等,从而为制定更有效的海洋保护地规划策略和管理提供科学依据。

2.5 年龄、体长结构等生物学特征

OSMOSE 模型作为基于个体的模型,能够实现对关键物种的年龄结构、体长结构等生物学特征的模拟,这一模拟结果对于理解物种群体的动态和健康状况至关重要。在海洋保护区中,关键物种的生物学特征有助于监测和评估保护措施的有效性,例如,保护区内的物种可能展示出更健康的年龄和体长分布,这反映了较低的捕捞压力和更好的生态条件^[48]。同时,物种的年龄和体长结构对生物多样性有着直接影响,目前已有研究发现,在海洋保护区内,物种的丰富度和多样性通常比未受保护的区域要高,因此海洋保护区的规划和管理需要考虑这些因素,能够确保生态系统的长期可持续性和物种的健康生存^[41]。此外,物种年龄和体长结构还可以用于评估海洋保护区内的生态过程,如捕食、繁殖和竞争,这些信息有助于理解物种如何与其环境相互作用,以及保护区如何影响这些动态过程^[49]。尽管目前关于物种年龄和体长结构在海洋保护区规划中作用的研究有待进一步开展,但针对生物学特征的分析对于实现有效的海洋管理和保护不可或缺。

综上所述,作为基于个体的多物种生态模型,OSMOSE 模型在海洋保护区规划和管理中的应用潜力巨大,它为海洋保护地的空间合理规划提供了一个理解和预测海洋生态系统动态的重要工具。

3 OSMOSE 模型与现有海洋保护地空间规划方法的结合

目前,现有的海洋保护地空间规划方法包括多种具体技术方法和策略,在国内外的海洋保护地空间规划和管理中均有应用,包括生物地理分类和空缺分析、系统保护规划方法(Systematic Conservation Planning, SCP)、海洋空间规划(Marine Spatial Planning, MSP)等多种方法,这些方法的应用反映了海洋保护地规划的复杂性,不仅需要科学的生态数据支持,还需要考虑社会经济和政治等多方面因素,以确保规划的有效性和可持续性^[11,50-52]。

具体而言,生物地理分类和空缺分析的传统技术用于映射海洋系统中的保护优先级和管理行动,生物地理分类是根据生物和地理特征将区域分为不同的生态区,方法依赖于生态学知识,将海洋区域划分为生物地理区,每个区域都具有特定的生态系统和物种组成,而空缺分析则用于确定哪些重要的生物区域尚未受到保护,这种分析通过比较已有的保护区域和生物地理分类确定的生态区,识别出尚未受到足够保护的区域^[53]。OSMOSE 模型作为基于个体的多物种生态模型,在数据需求、预测能力和实施难度等方面都和生物地理分类和空缺分析方法存在异同:首先,生物地理分类和空缺分析需要实际野外数据,而 OSMOSE 模型可以在计算机虚拟环境中进行模拟,不过两种方法的实施都需要掌握特定生态系统信息和相应的生态学知识;其次,OSMOSE 模型可以提供更精细的预测,包括不同管理决策的影响预测,而传统方法更侧重于描述已知生态系统和区域的特征;在实施难度方面,生物地理分类和空缺分析需要大量的数据收集和分析工作,而 OSMOSE 模型更容易在计算机环境中实施,但也需要实际数据作为参考以校准模型结果。因此,OSMOSE 模型方法可以与生物地理分类和空缺分析相结合,通过模拟不同生态区的管理干预措施,以提供哪些区域需要优先保护的信息,并模拟出最佳的保护策略,进而作为管理策略支持工具的一部分,为更有效的海洋保护政策和管理计划制定提供参考。OSMOSE 模型也可以用于填补数据不足的地区,通过模拟数据来补充生物地理分类和空缺分析所需的关键信息。

系统保护规划方法在我国海洋保护地空间规划中也正得到重视和应用,系统保护规划方法是一种用于海洋保护地选划和管理的科学方法,侧重于使用量化目标和保护成本来平衡生态保护和开发利用之间的关系^[11,50]。该方法通过数据收集、目标量化、现有海洋保护地评估、新保护地选址优化、规划实施,以及管理和监测等步骤实施。结合 OSMOSE 模型,系统保护规划方法可以有效提高海洋保护地规划的科学性和效率。OSMOSE 模型强调生物间的相互作用和生态系统动态,而系统保护规划方法提供了一个全面的规划框架和工具,两者结合可以更好地理解和管理海洋生态系统,确保生态保护和资源可持续利用之间的平衡。总的来说,系统保护规划方法和 OSMOSE 模型的结合可以提供一个更加全面和动态的海洋保护地规划方法,有助于提高保护效果,同时考虑到社会经济因素和生态系统的复杂性。

海洋空间规划方法是一种综合性方法,通过综合考虑生态、社会和经济因素来全面规划和管理海洋空间,旨在制定有效的管理计划和分区策略,以促进可持续利用和保护。它强调整合不同利益相关方的需求和利益,以实现海洋空间的多功能管理^[52]。海洋空间规划方法通常依赖于地理信息系统、决策支持工具和参与式过程,以帮助利益相关方共同规划和管理海洋空间,相比之下,OSMOSE 模型作为一个数学模型,主要利用数学方程和计算来模拟生态系统的动态变化。在数据需求方面,海洋空间规划方法需要大量实际数据,包括地理数据、生态数据、社会经济数据等,以支持空间规划和决策制定,而 OSMOSE 模型的运行对实际数据依赖性相对较低,但需要生态系统参数和假设,实际数据主要作为模型校准的参考使模型更能反映特定生态系统动态^[54]。因此,OSMOSE 模型和海洋空间规划方法具有结合的潜在可能,例如,OSMOSE 模型可以帮助海洋空间规划方法应对管理中的不确定性,通过模拟不同情景和管理策略的结果,为管理策略的制定提供关于可能的生态系统响应的信息。海洋空间规划方法和 OSMOSE 模型在海洋空间保护和管理方面具有潜在的互补性,二者的有机结合可以提供更科学和综合的方法来平衡生态保护和人类利用海洋资源的需求,进而有助于更好地保护海洋生态系统。

目前我国海洋保护地的科学规划研究有待进一步发展,论证方法主要集中在整理调查资料和定性分析方面,OSMOSE 模型和传统定性分析方法的有机结合能够弥补传统方法在与生境、栖息地和物种分布等信息相结合以及保护效果模拟、预测等方面的不足。以长三角区域的海洋保护地建设为案例分析,目前有研究表明该区域的海洋保护地面临着多重挑战,包括保护目标物种或栖息地的困难、多种海洋生态灾害威胁以及一些濒危海洋物种的生存状态和栖息地条件不乐观,为应对这些挑战,研究建议构建一个科学的海洋保护地系统,改善保护区网络的连通性,并建立一个综合的管理体系^[55]。针对这一现状和挑战,OSMOSE 模型方法可以作为有效的模型工具应用于长三角海洋保护地的建设与评估,具体结合的潜在可能体现在数据与模型的互补、管理策略的优化以及长期趋势分析等方面,具体而言,长三角海洋保护地的实地监测数据可以用于校准和验证 OSMOSE 模型,提高模型的准确性和适用性,使用 OSMOSE 模型预测不同管理策略对生态系统的潜在影响,可以为长三角海洋保护地制定更有效的保护策略,同时,结合 OSMOSE 模型的长期生态系统模拟与实地监测数据,可以更好地理解和预测长三角海洋保护地的生态变化趋势。因此,OSMOSE 模型提供了一个强大的工具来理解和预测海洋生态系统的复杂性,而长三角海洋保护地的实地监测和评估为模型提供了基础数据和现实情景的应用背景,二者的有机结合能够致力于优化现有保护网络体系、有效保护海洋生态系统、确保生物多样性和生态安全。

4 结语

作为一种基于个体的多物种海洋生态系统模型,OSMOSE 模型在海洋保护地空间规划中具有显著的应用潜力。本文通过对模型原理、模型结构、功能输出等方面的深入探究和实际案例的分析,展现了该模型在模拟海洋生物群落动态和预测管理策略效果方面的优势,重点分析了模型各方面特征在海洋保护地空间规划中的潜在价值和应用前景,模型能够实现多物种相互作用以及时空分布、多因素情景构建、聚焦物种生活史特征等特点,为海洋生态系统保护和管理提供了丰富的数据支持和创新展望,对进一步加强海洋保护地空间规划的

科学性和合理性具有重要价值。本文强调,将 OSMOSE 模型与现有的海洋保护地空间规划技术方法相结合,能够为海洋保护地的科学规划和有效管理提供新的视角和方法。模型方法的合理应用不仅能够促进海洋保护地的合理布局和管理,有助于促进生态文明建设和绿色发展,也对全球海洋生态保护具有重要影响。综上,在当前全球海洋生态系统面临的挑战和我国海洋保护地建设的背景下,本文通过深入探讨 OSMOSE 模型在海洋保护地规划中的应用前景,不仅回应了海洋生物多样性保护这一全球性的迫切问题,也为促进生态文明建设和绿色发展提供了新的思路。通过深入分析和案例探讨,本文展示了 OSMOSE 模型在科学化、精准化管理海洋保护地方面的潜力,为未来海洋生态系统保护和管理工作提供了重要的科学依据和技术支持,也为全球海洋生态保护展望了新的技术支撑和应用前景。

参考文献(References):

- [1] Knowlton N. Multiple “stable” states and the conservation of marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 2004, 60(2/3/4): 387-396.
- [2] 蔡燕红, 张海波, 项有堂. 海洋特别保护区的建设与管理问题探讨. *海洋开发与管理*, 2005, 22(3): 55-57.
- [3] 王钰. 海洋保护区管理有效性评估方法的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2018.
- [4] 赵林林, 程梦旋, 应佩璇, 曲方圆, 张朝晖. 我国海洋保护地现状、问题及发展对策. *海洋开发与管理*, 2019, 36(5): 3-7.
- [5] "关于完善我国海洋保护地建设,推进海洋强国战略的提案"复文(2022年第03438号(资源环境类275号)), 2023-01-30 [2024-01-13]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/gktafw/33099.jhtml>
- [6] Joly C A. The kunming-montreal global biodiversity framework. Montreal: CBD, 2022.
- [7] 徐靖, 王金洲. 《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》主要内容及其影响. *生物多样性*, 2023, 31(4): 3-11.
- [8] 赵畅. 我国海洋保护地发展历程与展望. *绿色科技*, 2022, 24(12): 207-211.
- [9] 李娜, 程和琴, 江红. Ecospace 模型及其在海洋保护区评估中的应用. *世界科技研究与发展*, 2008, 30(6): 723-727.
- [10] 曲方圆, 张朝晖, 赵林林, 屈佩, 王守强. 基于万方数据库的 1990—2020 年我国海洋保护地研究动态科学计量分析. *海洋开发与管理*, 2020, 37(12): 63-66.
- [11] 李韵洲, 孙铭, 任一平, 陈勇. 系统保护规划方法对我国构建海洋保护地选划布局体系的启示. *海洋开发与管理*, 2020, 37(2): 41-47.
- [12] Garcia S M. The ecosystem approach to fisheries: issues, terminology, principles, institutional foundations, implementation and outlook. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003.
- [13] Plagányi É. Models for an ecosystem approach to fisheries. FAO Fisheries Technical Paper, 2007, 477. FAO, Rome, 108.
- [14] Fulton E A. Approaches to end-to-end ecosystem models. *Journal of Marine Systems*, 2010, 81(1/2): 171-183.
- [15] Szuwalski C S, Burgess M G, Costello C, Gaines S D. High fishery catches through trophic cascades in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(4): 717-721.
- [16] Shin Y J, Cury P. Exploring fish community dynamics through size-dependent trophic interactions using a spatialized individual-based model. *Aquatic Living Resources*, 2001, 14(2): 65-80.
- [17] Shin Y J, Cury P. Using an individual-based model of fish assemblages to study the response of size spectra to changes in fishing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61(3): 414-431.
- [18] Constantin A, Johnson R S. A nonlinear, three-dimensional model for ocean flows, motivated by some observations of the Pacific Equatorial Undercurrent and thermocline. *Physics of Fluids*, 2017, 29(5): 056604.
- [19] Sun R L, Sun P, Yu H Q, Ju P L, Ma S Y, Liang Z L, Heino M, Shin Y J, Barrier N, Tian Y J. Exploring fishing impacts on the structure and functioning of the Yellow Sea ecosystem using an individual-based modeling approach. *Journal of Marine Systems*, 2024, 242: 103946.
- [20] Fu C H, Olsen N, Taylor N, Grüss A, Batten S, Liu H Z, Verley P, Shin Y J. Spatial and temporal dynamics of predator-prey species interactions off western Canada. *ICES Journal of Marine Science*, 2017, 74(8): 2107-2119.
- [21] Shannon L J, Moloney C L, Jarre A, Field J G. Trophic flows in the southern Benguela during the 1980s and 1990s. *Journal of Marine Systems*, 2003, 39(1/2): 83-116.
- [22] Halouani G, Ben R L, Shin Y J, Velez L, Verley P, Hattab T, Oliveros-Ramos R, Diaz F, Ménard F, Baklouti M, Guyennon A, Romdhane M S., Modelling food web structure using an end-to-end approach in the coastal ecosystem of the Gulf of Gabes (Tunisia). *Ecological Modelling*, 2016, 339: 45-57.
- [23] Duboz R, Versmis D, Travers M, Ramat E, Shin Y J. Application of an evolutionary algorithm to the inverse parameter estimation of an individual-based model. *Ecological Modelling*, 2010, 221(5): 840-849.
- [24] Oliveros-Ramos R, Shin Y J. Calibrar: an R package for fitting complex ecological models. 2016; arXiv: 1603.03141. <http://arxiv.org/abs/1603.03141.pdf>
- [25] Oliveros-Ramos R, Verley P, Echevin V, Shin Y J. A sequential approach to calibrate ecosystem models with multiple time series data. *Progress in Oceanography*, 2017, 151: 227-244.
- [26] Fu C H, Perry R I, Shin Y J, Schweigert J, Liu H Z. An ecosystem modelling framework for incorporating climate regime shifts into fisheries management. *Progress in Oceanography*, 2013, 115: 53-64.
- [27] Travers-Trolet M, Shin Y J, Field J G. An end-to-end coupled model ROMS-N₂ P₂ Z₂ D₂-OSMOSE of the southern Benguela foodweb: parameterisation, calibration and pattern-oriented validation. *African Journal of Marine Science*, 2014, 36(1): 11-29.

- [28] Grüss A, Schirripa M J, Chagaris D, Drexler M, Simons J, Verley P, Shin Y J, Karnauskas M, Oliveros-Ramos R, Ainsworth C H. Evaluation of the trophic structure of the West *Florida* Shelf in the 2000s using the ecosystem model OSMOSE. *Journal of Marine Systems*, 2015, 144: 30-47.
- [29] Moullec F, Velez L, Verley P, Barrier N, Ulses C, Carbonara P, Esteban A, Follsea C, Gristina M, Jadaud A, Ligas A, Díaz E L, Maiorano P, Peristeraki P, Spedicato M T, Thasitis I, Valls M, Guilhaumon F, Shin Y J. Capturing the big picture of Mediterranean marine biodiversity with an end-to-end model of climate and fishing impacts. *Progress in Oceanography*, 2019, 178: 102179.
- [30] Guo C B, Fu C H, Olsen N, Xu Y, Grüss A, Liu H Z, Verley P, Shin Y J. Incorporating environmental forcing in developing ecosystem-based fisheries management strategies. *ICES Journal of Marine Science*, 2020, 77(2): 500-514.
- [31] Guo C B, Fu C H, Forrest R E, Olsen N, Liu H Z, Verley P, Shin Y J. Ecosystem-based reference points under varying plankton productivity states and fisheries management strategies. *ICES Journal of Marine Science*, 2019, 76(7): 2045-2059.
- [32] Fu C H, Xu Y, Guo C B, Olsen N, Grüss A, Liu H Z, Barrier N, Verley P, Shin Y J. The cumulative effects of fishing, plankton productivity, and marine mammal consumption in a marine ecosystem. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 565699.
- [33] Xing L, Zhang C L, Chen Y, Shin Y J, Verley P, Yu H Q, Ren Y P. An individual-based model for simulating the ecosystem dynamics of Jiaozhou Bay, China. *Ecological Modelling*, 2017, 360: 120-131.
- [34] 黄猛, 李曰嵩. 面向东海生态系统的 OSMOSE-ECS 模型构建与应用. *大连海洋大学学报*, 2022, 37(6): 993-1003.
- [35] Sun R L, Sun P, Fu C H, Liu G K, Liang Z L, Shin Y J, Barrier N, Tian Y J. Exploring balanced harvest as a potential strategy for highly exploited multispecies fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 2023, 80(4): 897-910.
- [36] Claudet J, Osenberg C W, Benedetti-Cecchi L, Domenici P, García-Charton J A, Pérez-Ruzafa A, Badalamenti F, Bayle-Sempere J, Brito A, Bulleri F, Culioli J M, Dimech M, Falcón J M, Guala I, Milazzo M, Sánchez-Meca J, Somerfield P J, Stobart B, Vandeperre F, Valle C, Planes S. Marine reserves: size and age do matter. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 481-489.
- [37] Lester S E, Halpern B S, Grorud-Colvert K, Lubchenco J, Ruttnerberg B I, Gaines S D, Airamé S, Warner R R. Biological effects within no-take marine reserves: a global synthesis. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 384: 33-46.
- [38] Sullivan-Stack J, Aburto-Oropeza O, Brooks C, Cabral R, Caselle J, Chan F, Duffy J, Dunn D, Friedlander A, Fulton-Bennett H, Gaines S, Gerber L, Hines E, Leslie H, Lester S, MacCarthy J, Maxwell S, Mayorga J, McCauley D, Grorud-Colvert K. A scientific synthesis of marine protected areas in the United States: status and recommendations. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 849927.
- [39] Boothroyd A, Adams V, Alexander K, Hill N. Benefits and risks of incremental protected area planning in the Southern Ocean. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 696-705.
- [40] Melbourne-Thomas J, Audzijonyte A, Brasier M J, Cresswell K A, Fogarty H E, Haward M, Hobday A J, Hunt H L, Ling S D, McCormack P C, Mustonen T, Mustonen K, Nye J A, Oellermann M, Trebilco R, van Putten I, Villanueva C, Watson R A, Pecl G T. Poleward bound: adapting to climate-driven species redistribution. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2022, 32(1): 231-251.
- [41] Giakoumi S, Pey A. Assessing the effects of marine protected areas on biological invasions: a global review. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 49.
- [42] Ohayon S, Granot I, Belmaker J. A meta-analysis reveals edge effects within marine protected areas. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5: 1301-1308.
- [43] Hilborn R, Kaiser M J. A path forward for analysing the impacts of marine protected areas. *Nature*, 2022, 607: E1-E2.
- [44] Dominique P. Assessing the effectiveness of coastal marine protected area management: four learned lessons for science uptake and upscaling. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 545930.
- [45] Cashion T, Nguyen T, Ten Brink T, Mook A, Palacios-Abrantes J, Roberts S M. Shifting seas, shifting boundaries: dynamic marine protected area designs for a changing climate. *PLoS One*, 2020, 15(11): e0241771.
- [46] Brooks C M, Chown S L, Douglass L L, Raymond B P, Shaw J D, Sylvester Z T, Torrens C L. Progress towards a representative network of Southern Ocean protected areas. *PLoS One*, 2020, 15(4): e0231361.
- [47] Reisinger R R, Brooks C M, Raymond B, Freer J J, Cotté C, Xavier J C, Trathan P N, Bornemann H, Charrassin J B, Costa D P, Danis B, Hückstädt L, Jonsen I D, Lea M A, Torres L, Van de Putte A, Wotherspoon S, Friedlaender A S, Ropert-Coudert Y, Hindell M. Predator-derived bioregions in the Southern Ocean: characteristics, drivers and representation in marine protected areas. *Biological Conservation*, 2022, 272: 109630.
- [48] Kriegel M, Elías Ilosvay X E, von Dorrien C, Oesterwind D. Marine protected areas: At the crossroads of nature conservation and fisheries management. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 676264.
- [49] Hollitzer H A L, May F, Blowes S A. A meta-analysis examining how fish biodiversity varies with marine protected area size and age. *Ecosphere*, 2023, 14(12): e4733.
- [50] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405: 243-253.
- [51] Pressey R L, Cowling R M, Rouget M. Formulating conservation targets for biodiversity pattern and process in the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*, 2003, 112(1/2): 99-127.
- [52] Ehler C, Douvère F. Marine spatial planning, A step-by-step approach toward ecosystem-based management. Intergovernmental Oceanographic Commission and Man and the Biosphere Programme. Paris, France, Unesco, Intergovernmental Oceanographic Commission, 2009.
- [53] Virtanen E A, Viitasalo M, Lappalainen J, Moilanen A. Evaluation, gap analysis, and potential expansion of the Finnish marine protected area network. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 402.
- [54] Reimer J M, Devillers R, Zuercher R, Groulx P, Ban N C, Claudet J. The Marine Spatial Planning Index: a tool to guide and assess marine spatial planning. *NPJ Ocean Sustainability*, 2023, 2: 15.
- [55] 曾江宁, 曾旭, 叶观琼, 邓邦平. 基于一体化战略的长三角海洋保护地建设历程与未来趋势. *自然保护地*, 2021, 1(1): 60-71.