

非病原外来物种的传播途径以及对海洋抑制赤潮和生态影响的研究综述

2022 级生物工程 1 班 202200810271 郑嘉诚^{1*}



(1. 山东大学海洋学院, 山东, 264209)

摘要: 本文研究了非病原外来物种 (Non-Pathogenic Alien Species) 及其在全球范围内的传播途径与生态影响。在人类活动日益频繁的“人类世”背景下, 这类物种通过压载水和水产养殖等途径被引入新环境, 但中文参考资料几乎没有。为填补这一领域的空白, 我利用 Web of Science 数据库, 结合课堂内容, 以非病原外来物种含义搜索相关关键词, 使用自然语言处理方法, 通过 spaCy 和 Sentence-Transformers (SBERT) 模型对 Web of Science 上相关的所有文献进行了系统筛选, 最终入组 16 篇研究文献, 并根据文献内容, 围绕以下三大主题展开讨论: (1) 非病原外来种与传播途径; (2) 海洋外来种对赤潮发生的影响; (3) 养殖外来种对生态系统的影响。

研究表明, 压载水和水产养殖是非病原外来物种的重要传播途径, 不仅威胁生物多样性, 还可能影响海洋生态平衡。此外, 部分海洋外来种可通过竞争或天敌缺失等机制推动赤潮的发生, 但也有外来滤食性生物和微生物可能对赤潮起到抑制作用。研究还发现赤潮对外来物种的影响具有双重性: 既可能为其扩散提供有利条件, 也可能通过水质恶化和毒素释放对其生存构成威胁。

通过综述非病原外来物种的传播途径、生态影响及与赤潮之间的相互作用, 本文对该领域研究现状进行了系统梳理, 为深入了解非病原外来物种的生态影响及其管理提供了理论参考。最后, 本文对当前研究方法的不足进行了总结, 对未来研究方法进行了展望, 希望能更有效地应对相关生态环境挑战。

关键词: 非病原外来物种; 传播途径; 赤潮; 生态影响; 海洋环境

¹ 通信作者 E-mail: karcenzheng@yeah.net

一、引言

非病原外来物种（Non-Pathogenic Alien Species 或 Non-Pathogenic Invasive Species）是指那些自然分布范围之外通过人类活动（有意或无意）被引入到新的环境的物种，并且它们不会对新环境中的人类健康、农业、或生态系统造成直接或间接的病原性威胁。在“人类世”（Anthropocene）中，由人为活动导致的物种跨越原生分布区现象日益显著，这深刻改变了全球生态系统。但绝大多数的研究集中在“入侵种”（Invasive），非病原外来物种的资料几乎没有。比如，在知网以主题搜索关键词“非病原外来物种”并未找到相关文献。



图 1 知网搜索“非病原外来种”无结果
Figure 1: No results found on CNKI for the search term "Non-Pathogenic Invasive Species."

因此，根据课堂内容，结合所查询的资料，本文从 Web of Science 上分别以

- 非病原外来种（*non-pathogenic invasive species*）+ 传播途径（*ballast water OR aquaculture*）
- 海洋外来种（*marine alien species*）+ 赤潮（*harmful algal blooms*）
- 养殖外来种（*aquaculture species introductions*）+ 生态影响（*ecological impact*）

为关键词搜索文献，分别导出 Excel，其中导出的 Excel 数据包含作者（Author）、文章标题（Title）和摘要（Abstract）。后复制导出 Excel 数据中所有文献标题，使用 Citation Finder²选择正确的参考文献并导出为.ris 格式文件，使用 Zotero 打开该文件，导出所有文章的 DOI 号，

² <https://citation-finder.vercel.app/>

使用 Sci-Hub EVA³下载所有的文献，共 243 篇（具体见表格 1）。最后，我使用了 spaCy 和 Sentence-Transformers（SBERT）作为主要的自然语言处理工具，以 "Non-Pathogenic Alien Species" 和 "Non-Pathogenic Invasive Species" 为目标短语，捕捉每篇论文关于这两个短语的细微语义特征，并将其转化为向量表示。对每篇文献的文本进行嵌入生成后，通过计算目标短语与文本段落之间的余弦相似度，评估它们的语义相关性并对结果进行排序 [17][18][19][20]，经过自然语言处理筛选（二次筛选），筛选结果如下表：

表格 1 自然语言处理筛选后（二次筛选后）各关键词入组文献数

Table 1: Number of studies included for each keyword after the second screening in natural language processing.

搜索关键词	Web of Science 上 导出总文献数	二次筛 选后文 献数
非病原外来种 （non-pathogenic invasive species）+ 传播途径（ballast water OR aquaculture）	2	2
海洋外来种 （marine alien species）+ 赤潮 （harmful algal blooms）	24	4
养殖外来种 （aquaculture species introductions）+ 生态 影响（ecological impact）	217	20

³ <https://github.com/leovan/SciHubEVA>

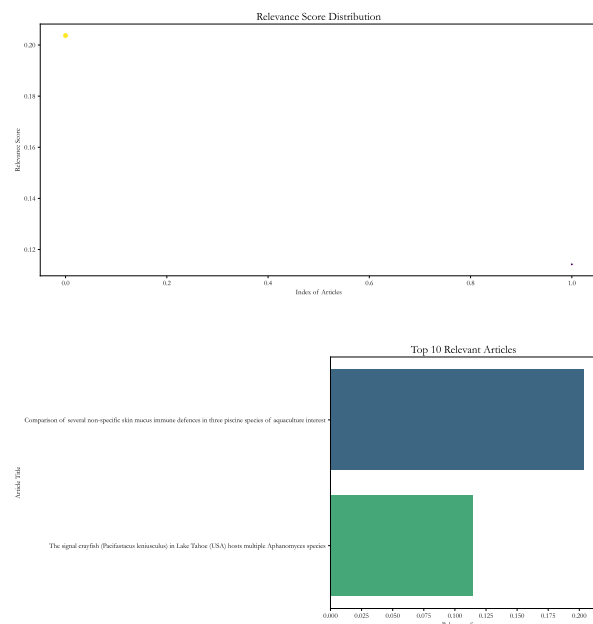


图 2 非病原外来种（non-pathogenic invasive species）+ 传播途径（ballast water OR aquaculture）文献排序和关键词关联度

Figure 2: Ranking of studies and keyword association for "Non-Pathogenic Invasive Species" + "Transmission Pathways"（ballast water OR aquaculture）.

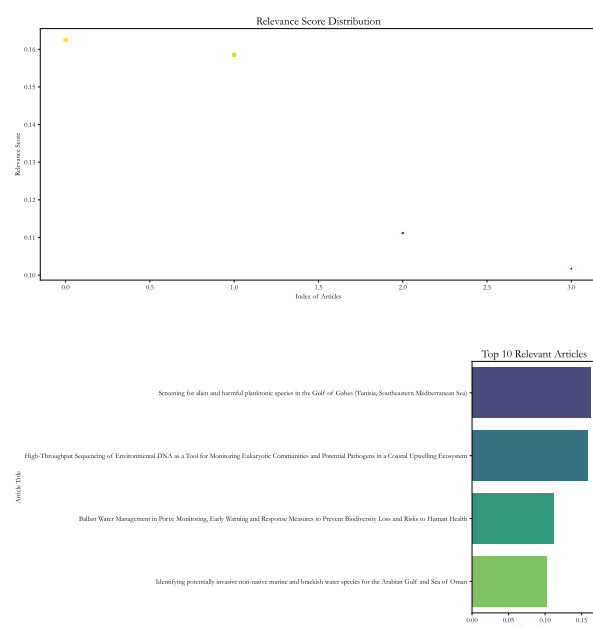


图 3 海洋外来种（marine alien species）+ 赤潮

（harmful algal blooms）文献排序和关键词关联度

Figure 3: Ranking of studies and keyword association for "Marine Alien Species" + "Harmful Algal Blooms."

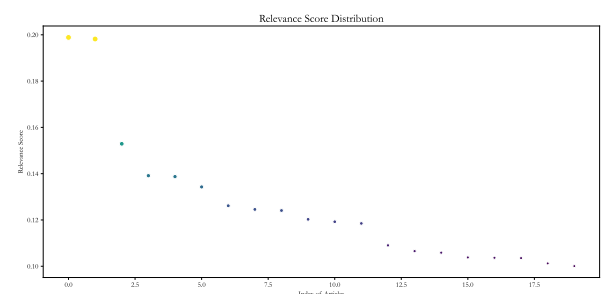


图 4 养殖外来种（aquaculture species introductions）+ 生态影响（ecological impact）文献排序和关键词关联度

Figure 4: Ranking of studies and keyword association for "Aquaculture Species Introductions" + "Ecological Impact."

根据关联度结果，将关联指数（Relevance Score）大于等于 0.12 的文献纳入综述组，纳入结果如下表所示：

表格 2 三次筛选后各关键词文献入组数

Table 2: Number of studies included for each keyword after the third screening.

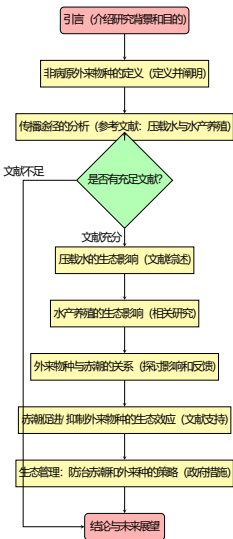
搜索关键词	二次筛选后文献数	三次筛选后文献数
非病原外来种（non-pathogenic invasive species）+ 传播途径（ballast water OR aquaculture）	2	1
海洋外来种（marine	4	3

alien species) + 赤潮 (harmful algal blooms)		
养殖外来种 (aquaculture species introductions) + 生态 影响 (ecological impact)	20	12

根据入组的 16 篇文献 ([1]-[16]) 的内容，本综述分三大主题进行论述：

- (1). 非病原外来种与传播途径
- (2). 海洋外来种对赤潮发生的影响
- (3). 养殖外来种与生态影响

行文逻辑如下图所示：



二、非病原外来种与传播途径（压载水或水产养殖）

2.1 压载水传播

海洋运输是全球贸易的重要组成部分，而压载水在船舶航行中起着维持稳定性的关键作用 [1]。然而，压载水也成为了非病原外来物种传播的主要载体之一。据估计，每年全球船舶通过压载水运输的水量高达数十亿立方米，这为众多海洋生物提供了在全球范围内扩散的机会 [2]。



图 5 压载水传播示意图

Figure 5: Schematic of Ballast Water Spread

多项研究显示，有多种非病原的外来物种携带在水中。例如，Stulpinaite 等人在研究地中海时发现，压载水排放导致包括一些外来和隐源性物种在内的多种孔虫类生物被引入到地中海[1]。TG Loureiro 等人在南非沿海的四个码头安装了开口（不阻挡捕食者）和笼式（阻挡捕食者）的 PVC 沉降板，用以监测不同类型的附着物种，他们发现记录的 24 种物种中 58%为入侵物种[15]。进入新海域后，这些外来物种或将使当地生态群落结构发生变化。它们可能在食物资源、生存空间上与当地物种展开竞争，甚至在能量流动和物质循环的生态系统格局上发生变化。部分外来浮游生物可能会因占据当地物种的生态位置而在新环境中快速繁殖，进而对整个海洋食物网的稳定性造成影响。

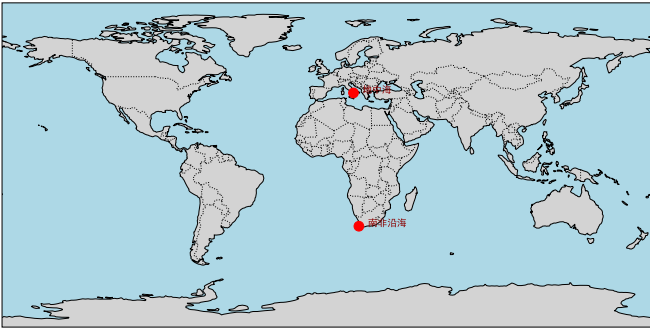


图 6TG Loureiro 等人实验地点图示

Figure 6: Map of TG Loureiro et al.'s Experimental Site

2.2 水产养殖传播

水产养殖为满足全球对水产品的需求不断发展，在此过程中引进了大量外来物种 [3]。在中国，Luo 等的研究指出，已经有超过 500 种鱼类被引入，其中部分成为了外来种 [3]。虽然这些引进的外来种在水产养殖中具有一定的经济价值，但也带来了潜在风险。

外来种在水产养殖中的传播可能导致其逃逸到自然环境中，从而对当地生态系统造成影响。例如，在巴西的水产养殖中，一些外来鱼类通过逃逸进入自然水域，改变了当地的鱼类

群落组成 [4]。这些逃逸的鱼类可能与本地鱼类杂交，影响本地物种的遗传纯度；或者竞争食物和栖息地，导致本地鱼类数量减少。此外，外来种还可能携带一些未知的共生生物或微生物，这些生物在新环境中的释放也可能对生态系统产生潜在影响。

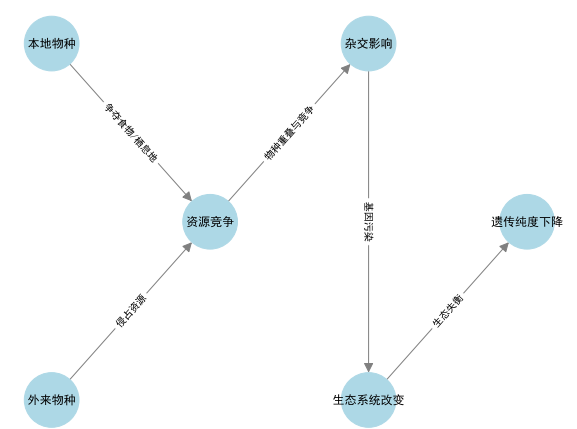


图 7 生态竞争与影响关系图
Figure 7: Ecological Competition and Impact Relationship Diagram

2.3 传播途径的综合影响

压载水和水产养殖传播途径共同作用，加剧了对海洋生物多样性的威胁。外来物种的引入可能导致本地物种的灭绝或濒危，破坏原有的生态平衡。例如，非本土鱼类可能对本土水生系统产生负面影响，如与本地物种竞争食物和空间、捕食本地物种的幼鱼和卵、破坏栖息地、导致本地物种数量减少和生物多样性受威胁，甚至一些珍稀物种可能因此灭绝[16]。

非病原外来种的引入还可能改变海洋生态系统的功能。它们可能影响海洋的初级生产力、营养物质循环以及生态系统的稳定性。例如，一些外来的藻类可能改变水体中的营养物质比例，影响浮游植物群落的结构和功能，进而影响整个海洋生态系统的能量传递和物质循环过程。

三、海洋外来种对赤潮发生的影响

3.1 部分外来种促进赤潮

一些外来种可能通过各种各样的机制推动

赤潮的发生。部分外来藻种缺乏天敌或竞争压力，能在新环境下快速繁殖并形成优势种群，因而造成赤潮。如 Jenhania 等人在研究突尼斯加贝斯湾时发现，在适宜的环境条件下，一些外来浮游植物物种的生长速度明显高于当地物种，并能迅速占据生态位，大量消耗水体中的营养物质，使水体营养结构发生改变，并创造赤潮发生的条件[12]。一些外来的赤潮藻种，如来自其他海域的亚历山大藻（*Alexandrium* sp.），在特定的环境条件下（如水温、光照、营养盐浓度等适宜时），可能携带特殊的基因或生理特性，使其在新的海域中更具竞争力并迅速增殖，从而形成赤潮。当这些外来物种大量繁殖时，会消耗水中的溶解氧，释放毒素，导致鱼类死亡、贝类中毒等情况，同时也会影响海洋生态系统的正常功能，破坏生态平衡。

3.2 部分外来种抑制赤潮

然而，也有部分外来种可能对赤潮产生抑制作用。某些外来的滤食性生物，如一些贝类或小型甲壳类动物，它们如果在新环境中能够大量繁殖，可能会通过滤食作用大量摄取浮游藻类，包括那些可能引发赤潮的藻类，从而减少赤潮发生的可能性。例如，引进的某些牡蛎品种，在适宜的海域环境中生长繁殖，能够有效地过滤海水中的浮游植物，控制藻类的生物量，降低赤潮发生的风险。一些外来的微生物，如某些具有特殊代谢功能的细菌或真菌，可能会分泌抑制藻类生长的物质，或者通过竞争营养物质等方式，抑制赤潮藻类的生长和繁殖，从而在一定程度上对赤潮的发生起到抑制作用。

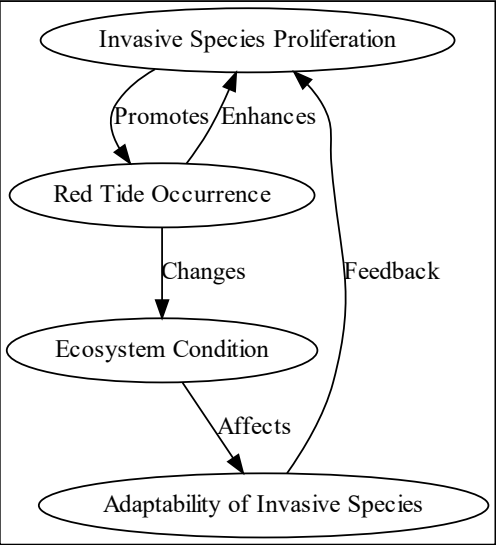


图 8 外来物种与赤潮的因果循环关系
Figure 8: Causal Loop Relationship Between Invasive Species and Red Tide

3.3 赤潮对海洋外来种的影响

3.3.1 提供适宜环境与促进扩散

在赤潮发生时，水体环境会因此而发生一系列的变化，这些都可能为某些海洋外来种提供合适的生存和扩散条件。因此，一些原来限制外来种生长的营养因子变得充足，其生长和繁殖活动可能会变得充分起来。赤潮藻类的大量繁殖，会使水体的物理化学性质发生改变，如酸碱度、溶解氧含量等，而一些外来种在进入新环境后，由于适应这种变化后的环境，进

而获得竞争优势，从而使其扩散速度加快。因此，在赤潮发生时，某些外来种反而可能会适应这种环境。比如，在一些能够耐受低氧环境或适应特定酸碱度变化的外来种，在赤潮导致水体缺氧或 pH 值异常的情况下，要比当地物种的生存能力更强。这一现象虽然在具体的详细机制上可能因不同海域、物种组合而有所差异，但在长期监测和研究某些受赤潮影响的海域中已经有所体现[12]。

3.3.2 带来生存压力与限制扩散

相反，赤潮还可能对限制其扩散的海洋外种造成生存压力。有些赤潮藻类会释放毒素，这些毒素可能会毒害海洋中的外来物种，使其生长、繁殖受到抑制，甚至死亡。部分外来物种可能对赤潮时无法适应这种恶劣环境的水质变化更为敏感（如藻毒素浓度过高、营养盐分比例异常等），从而使其生存和在赤潮发生区扩散受到限制。当赤潮导致水体中溶解氧急剧下降时，部分需氧量较大的外来种，生长繁殖受到严重影响，甚至在这一地区无法生存。此外，可能导致外来种食物资源减少或竞争加剧的赤潮导致的食物网结构改变等生态系统变化，也会对其生存和扩散带来不利影响。如一些赤潮爆发后，由于食物短缺、水质变差，导致原本生存在这一地区的外来鱼类品种数量减少，甚至绝迹[5]。

表格 3 传播途径描述与生态影响

Table 3 describes the transmission routes and ecological impacts.

传播途径	具体描述	生态影响
压载水传播	压载水携带多种非病原外来物种，例如地中海的有孔虫类生物，导致外来种入侵改变生态系统结构。	外来种与本地物种竞争食物、栖息空间，改变能量流动、物质循环，导致海洋食物网不稳定。
水产养殖传播	水产养殖中引入外来种，如巴西水产养殖逃逸的鱼类会改变当地鱼类群落组成；引入的鱼类可能与本地种杂交，影响遗传纯度或携带微生物引发其他风险。	本地物种数量减少、生物多样性下降、遗传纯度丧失；携带的共生生物或微生物可能引发新的生态风险。
促进赤潮的外来种传播	外来藻类因缺乏竞争压力迅速繁殖，如亚历山大藻占据生态位并形成赤潮，消耗氧气，释放毒素，对海洋生物造成危害。	赤潮使鱼类死亡、贝类中毒，破坏生态平衡，影响整个海洋食物网的稳定性。

抑制赤潮的外来种传播	引入的滤食性生物（如贝类）可能通过滤食减少浮游藻类数量；外来微生物通过竞争营养或分泌抑制物质限制赤潮藻类繁殖。	降低赤潮发生频率，控制藻类生物量，间接保护海洋生态系统平衡。
赤潮对外来种的影响	赤潮期间营养物质充足为某些外来种提供生长条件；但赤潮释放毒素及水体缺氧可能限制部分外来种扩散或导致死亡。	某些外来种适应恶劣条件生存能力增强，加速扩散；另一些种类因毒素影响及资源竞争消失。

3.4 海洋外来种与赤潮相互作用的研究方法

为了深入研究海洋外来种与赤潮之间的相互作用，目前采用了多种研究方法。在实验室模拟研究方面，研究者可对温度、光照、营养盐浓度等环境条件进行精确的控制，模拟赤潮发生过程，并将它们引入海洋外来物种中，对其生长、繁殖及相互作用进行观察，从而达到模拟赤潮发生的目的。如：通过对赤潮藻不同生长阶段外来种的响应，以及其对赤潮藻生长的影响，通过设置不同的营养盐梯度进行研究。现场调查监测也是通过不同海域长期设置监测站点、定期收集水样、生物样本、海洋外来物种及赤潮发生的动态以及它们在自然环境中的相互关系等，也是研究手段的重要研究手段之一。这些技术都能更进一步地研究海洋外来种对赤潮的相互作用。尤其是近年来通过分析外来种和赤潮藻的基因表达谱，了解它们在相互作用过程中的生理和生态反应机理，如利用荧光的实时定量（Quantitative Real-time polymerase chain reaction，PCR）等分子生物学技术，将研究从物种层面提高到了分子层面。

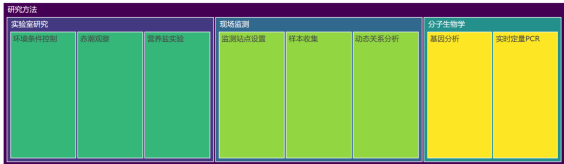


图 9 研究方法
Figure 9: Research Methodology

四、养殖外来种与生态影响

4.1 对本地物种的影响

养殖的外来种在海洋环境中可能与本地物种竞争有限的资源，如食物、空间和栖息地。Luo 等研究发现，在中国引入的多种外来鱼类

中，部分具有较强的适应性和竞争力，它们可能会改变食物网结构，抢夺本地物种的食物资源，导致本地物种生长受限或数量减少 [3]。例如，某些外来的滤食性贝类在养殖过程中大量摄取浮游生物，使得本地依赖这些浮游生物为食的小型鱼类和无脊椎动物面临食物短缺的困境。外来鱼类可能占据本地鱼类的栖息地，挤压它们的生存空间，迫使本地物种迁移或改变其生态习性，进而影响整个生态系统的平衡。如在一些沿海养殖区域，外来养殖鱼类的大量繁殖导致本地鱼类的活动范围缩小，部分本地鱼类不得不向更深或更偏远的海域迁移，这不仅影响了本地鱼类的生存和繁殖，还可能改变了整个海域的生态格局。

外来种与本地种之间的杂交可能导致基因渗透，对本地物种的遗传完整性构成威胁。当养殖的外来鱼类逃逸到自然环境中并与本地近缘种杂交时，可能产生杂交后代，这些后代可能具有不同于亲本的特征和适应性。例如，在巴西的水产养殖中，一些外来鱼类的逃逸与本地鱼类杂交，影响了本地物种的遗传纯度 [4]。在某些情况下，杂交后代可能比本地物种更具竞争力，从而逐渐取代本地物种，导致本地物种的基因库被稀释，独特的遗传特征可能消失，影响物种的进化轨迹和长期生存能力。这种基因污染在一些水产养殖发达地区已成为关注的焦点。

4.2 对生态系统功能的影响

养殖外来种的引入可能改变生态系统内的物质循环和能量流动过程。它们的摄食、排泄和生长代谢活动会影响营养物质的循环速率和分布格局。一些外来养殖物种可能具有较高的生长速率和代谢率，会加速对营养物质的摄取和转化，改变水体中营养盐的浓度和比例，进而影响浮游植物的生长和群落结构，通过食物

链的传递，最终影响整个生态系统的能量流动和物质循环效率。例如，某些外来的肉食性养殖鱼类的引入，可能增加了营养级之间的能量传递效率，但也可能导致被捕食者种群数量的波动，对生态系统的稳定性产生影响。如在某些海域引入的外来养殖鲑鱼，其大量捕食本地小型鱼类，改变了该海域的食物网结构，使得浮游生物数量因捕食压力减小而增加，进而影响了整个生态系统的物质循环和能量流动。

养殖种的外来性会降低生态系统的稳定性及回升性。生态系统的稳定取决于物种间的相互作用及多样性，当外来物种大量引入并占据主导时，生态系统的结构可能简化，物种多样性下降，生态系统变得脆弱起来，受外界干扰的可能性也比较大（如气候变化、污染事件等），生态系统变得更加脆弱。一旦发生干扰，就有可能很难从原来的状态下恢复出来，因为生态系统恢复力的减弱。例如，在一些地区，当面临海洋温度异常升高或水质恶化等情况下，大规模的外来养殖藻类引入后，原有生态系统的物种组成发生了变化，该生态系统恢复的速度比没有受外来种干扰的同类生态系统要明显慢，生态系统的恢复速度要慢于未受外来物种干扰的生态系统。

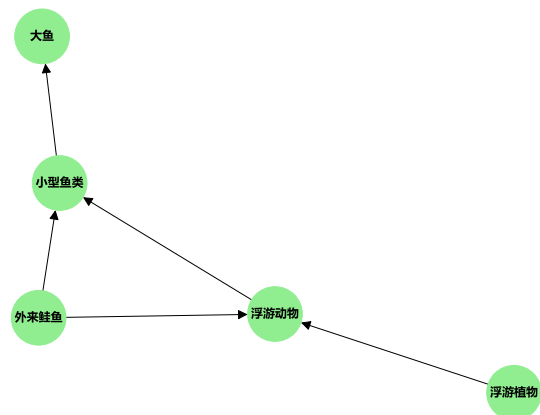


图 10 外来种对生态系统食物链结构的影响
Figure 10: Impact of Invasive Species on Ecosystem Food Chain Structure

五、结论
5.1 研究总结

非病原外来物种在海洋环境中的传播途径主要包括压载水排放和水产养殖活动，这两种途径在全球范围内广泛存在，且相互关联，共同促进了非病原外来物种的扩散。压载水作为船舶航行的必备介质，其全球大规模的运输为海洋外来生物提供了便捷的扩散通道，使得众多非病原外来物种得以突破地理隔离，进入新的海洋生态系统。水产养殖则因经济利益驱动，大量引进外来物种，其中部分逃逸或被释放到自然环境中，成为入侵物种的潜在来源。

从海洋外种和赤潮的关系来说，二者之间的互动关系错综复杂。有些外来种可以促进赤潮的发生，比如改变水体的营养结构，自身繁殖速度快；而有些外来种可能会产生抑制赤潮的效果，如滤食藻类，分泌抑制物质等。当赤潮发生时，既可以释放毒素、导致水质恶化等对海洋外种造成生存压力而限制其扩散，也可能为某些海洋外种创造适宜的生存和扩散条件，如提供丰富的营养，改变水的物理和化学性质等。

海洋生态系统受养殖外来种影响明显。在与当地物种的关系上，他们会通过杂交导致基因渗透，以食物、空间等资源与当地物种竞争，甚至对当地物种的生存和基因完整性造成威胁。从生态系统的功能来看，养殖外来种会对物质循环和能量流动过程造成干扰，使生态系统稳定性和恢复力下降，从而使生态系统更易受到外界干扰而出现脆弱性、复原性等问题。

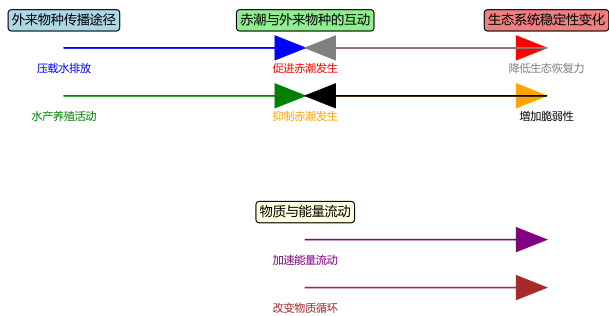


图 11 海洋外来物种的生态影响模型
Figure 11: Ecological Impact Model of Marine Invasive Species
5.2 研究不足与展望

当前研究存在一些局限性。对于部分非病原外来物种的鉴定和分类仍不够精确，尤其是一些形态相似或处于早期入侵阶段的物种，这给准确评估其生态影响和制定针对性管理策略带来困难。在研究方法上，虽然有实验室模拟、现场调查监测和分子生物学技术等多种手段，但各方法均有其局限性，且缺乏综合运用多种方法进行长期、全面研究的案例。例如，实验室模拟难以完全还原复杂的海洋环境，现场调查监测可能受到时空限制，分子生物学技术在解释宏观生态现象时可能存在一定的局限性。

针对这些不足，未来的研究要利用现代生物技术如基因测序等提高鉴定精度，以加强对外来物种的鉴别。为了更全面地揭示非病原外来物种在海洋环境中的生态过程及影响机理，进一步整合多种研究方法，开展长期、大尺度的综合研究非常重要。如利用分子生物学技术对物种间的相互作用机制进行深入剖析，将实验室模拟与现场监测相结合，通过长期定位监测获得更准确的数据。

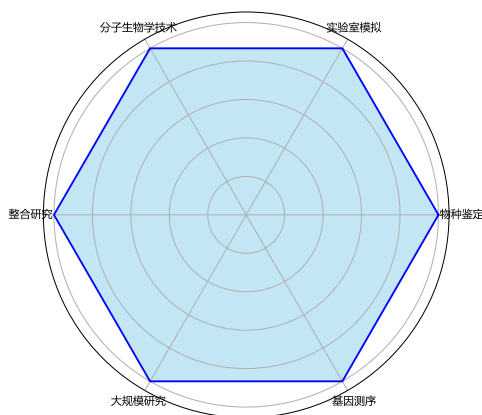


图 12 未来展望：加强多方面的研究

Figure 12: Future Outlook: Strengthening Multi-dimensional Research

5.3 对海洋环境保护的意义

这些研究对非致病外来物种在海洋环境中的传播、与赤潮的相互作用的传播、对养殖生态系统的影响能进行深入的认识。通过准确评价不同传播途径的危险性，提高压载水处理技术，加强外来种引进和管理水产养殖的规范，

制定更加有效的防治措施，减少非致病外来物种的传入。

研究海洋外来种与赤潮的关系有助于对赤潮的发生、发展进行预测进而对海洋生物的多样性和生态系统功能采取相应的预防和治理措施加以保护。如若能对某些外来种对赤潮的促进或抑制作用有明确的认识，就可在赤潮防治中对这些物种进行针对性的利用或控制。

养殖外来物种的合理管理，对海洋生态系统的渔业资源的供给、气候调节、水质净化等各种服务职能的发挥具有十分重要的意义，对维持海洋生态平衡具有十分重要的作用。通过科学的生态风险评估可以及时识别潜在的生态威胁，采取合理的养殖区域规划、加强养殖设施管理、渔业资源供给、气候调节和水质净化等措施，减少外来种对当地物种及生态系统的消极影响，促进海洋生态系统的健康及可持续发展，保障海洋生态系统所提供的各种服务职能。

参考文献

- [1] STULPINAITE R, HYAMS-KAPHZAN O, LANGER MR. Alien and cryptogenic Foraminifera in the Mediterranean Sea: A revision of taxa as part of the EU 2020 Marine Strategy Framework Directive. *Mediterranean Marine Science*. Published online October 20, 2020. doi:[10.12681/mms.24673](https://doi.org/10.12681/mms.24673)
- [2] Bueno ML, Magalhães ALB, Andrade Neto FR, et al. Alien fish fauna of southeastern Brazil: species status, introduction pathways, distribution and impacts. *Biological Invasions*. 2021;23(10):3021-3034. doi:[10.1007/s10530-021-02564-x](https://doi.org/10.1007/s10530-021-02564-x)
- [3] Kraus R. Ballast Water Management in Ports: Monitoring, Early Warning and Response Measures to Prevent Biodiversity Loss and Risks to Human Health. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(11):2144. doi:[10.3390/jmse11112144](https://doi.org/10.3390/jmse11112144)

- [4] Sanahuja I, Fernández-Alacid L, Ordóñez-Grande B, et al. Comparison of several non-specific skin mucus immune defences in three piscine species of aquaculture interest. *Fish & Shellfish Immunology*. 2019;89:428-436. doi:[10.1016/j.fsi.2019.04.008](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.04.008)
- [5] Luo D, Wei H, Chaichana R, et al. Current status and potential risks of established alien fish species in China. *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 2019;22(4):371-384. doi:[10.1080/14634988.2019.1693226](https://doi.org/10.1080/14634988.2019.1693226)
- [6] Atalah J, Sanchez-Jerez P. Global assessment of ecological risks associated with farmed fish escapes. *Global Ecology and Conservation*. 2020;21:e00842. doi:[10.1016/j.gecco.2019.e00842](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00842)
- [7] Wu H, Ding J. Global Change Sharpens the Double-Edged Sword Effect of Aquatic Alien Plants in China and Beyond. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. doi:[10.3389/fpls.2019.00787](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00787)
- [8] Ríos-Castro R, Romero A, Aranguren R, et al. High-Throughput Sequencing of Environmental DNA as a Tool for Monitoring Eukaryotic Communities and Potential Pathogens in a Coastal Upwelling Ecosystem. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021;8. doi:[10.3389/fvets.2021.765606](https://doi.org/10.3389/fvets.2021.765606)
- [9] Kang B, Vitule JRS, Li S, et al. Introduction of non-native fish for aquaculture in China: A systematic review. *Reviews in Aquaculture*. 2022;15(2):676-703. doi:[10.1111/raq.12751](https://doi.org/10.1111/raq.12751)
- [10] Xiong W, Xie D, Wang Q, et al. Non-native species in Poyang Lake Basin: status, threats and management. *Aquatic Invasions*. 2023;18(1):119-134. doi:[10.3391/ai.2023.18.1.103610](https://doi.org/10.3391/ai.2023.18.1.103610)
- [11] Zhang X, Du H, Zhao Z, et al. Risk Assessment Model System for Aquatic Animal Introduction Based on Analytic Hierarchy Process (AHP). *Animals*. 2023;13(12):2035. doi:[10.3390/ani13122035](https://doi.org/10.3390/ani13122035)
- [12] Jenhani ABR, Fathalli A, Naceur HB, Hayouni D, Aouani J, Romdhane MS. Screening for alien and harmful planktonic species in the Gulf of Gabes (Tunisia, Southeastern Mediterranean Sea). *Regional Studies in Marine Science*. 2019;27:100526. doi:[10.1016/j.rsma.2019.100526](https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100526)
- [13] Tiberti R, Cardarelli E. Some like it fishless: the reasons and potential for eradicating alien fish from European mountain lakes. *Biodiversity*. 2021;22(1-2):95-99. doi:[10.1080/14888386.2021.1929483](https://doi.org/10.1080/14888386.2021.1929483)
- [14] O'Hea Miller SB, Davis AR, Wong MYL. The Impacts of Invasive Crayfish and Other Non-Native Species on Native Freshwater Crayfish: A Review. *Biology*. 2024;13(8):610. doi:[10.3390/biology13080610](https://doi.org/10.3390/biology13080610)
- [15] Loureiro, T. G., Peters, K., & Robinson, T. B. (2021). Dropping plates to pick up aliens: towards a standardised approach for monitoring alien fouling species. *African Journal of Marine Science*, 43(4), 483-497.
- [16] Saba, A. O., Ismail, A., Zulkifli, S. Z., Shohaimi, S., Jamil, N. R., Nawi, N. M., ... & Amal, M. N. A. (2020). Checklists, production trends, and potential ecological and socioeconomic impacts of non-native freshwater fishes in Malaysia: a review. *Aquatic Invasions*, 15(4), 646-670.
- [17] Sparck Jones, K. (1972). A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval. *Journal of documentation*, 28(1), 11-21.
- [18] Chowdhury, G. G. (2010). *Introduction to modern information retrieval*. Facet publishing.
- [19] Lewis, D. D. (1992). *Representation and learning in information retrieval*. University of Massachusetts Amherst.
- [20] Reimers, N., & Gurevych, I. (2019).

Sentence-BERT: Sentence Embeddings using
Siamese BERT-Networks. *Conference on
Empirical Methods in Natural Language
Processing*.

作者简介：郑嘉诚，男，山东大学海洋学院
2022 级本科生，山东大学国际问题研究院区域
国别大数据分析中心科研助理，伦敦大学学院
(UCL)气候变化经济学团队科研助理实习生。

本论文格式参考期刊《生态学杂志杂志社》，主
办单位：中国生态学学会；中国科学院沈阳应
用生态，国内刊号：CN：21-1148/Q，国际刊
号：ISSN：1000-4890