

· 专题:双清论坛“全球海洋治理与合作的关键科学问题” ·

## 海洋渔业资源—生态—社会复合系统研究进展与展望\*

姜子禹<sup>1,2,3</sup> 曹玲<sup>1,2\*\*</sup>

1. 厦门大学海洋与地球学院,厦门 361102
2. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学),厦门 361102
3. 上海交通大学海洋学院,上海 200030

**[摘要]** 渔业资源是海洋生态系统为人类社会提供的最主要服务之一,关乎全球粮食和营养安全保障与数亿人口的生计维持。近大半个世纪以来,高强度的工业化捕捞叠加近海养殖、海岸工程等开发过程深刻改变了海洋生态系统的结构和功能,并引发渔业资源及其关键栖息地显著衰退。在气候变化与海岸带人类活动持续加剧、海洋资源消费需求不断上升的背景下,以往侧重单一学科、单一维度研究的调控成效受到严重局限,需要基于海洋渔业资源、生态环境、社会经济发展的综合过程,在海洋渔业资源—生态—社会复合系统的水平上解决可持续路径探究的根本挑战。当前亟须部署多学科交叉融合研究,聚焦这一系统的耦合机制、临界点与临界过程、未来趋势与可持续性关键科学问题开展突破,助力推动生态文明建设、海洋强国与碳中和等国家战略目标的协同实现。

**[关键词]** 海洋渔业资源;可持续利用;生态保护;气候变化;人类活动;临界点

海洋是地球上最大的生态系统,占地表面积的70.8%,长期以来为人类社会的发展提供了气候调节、食物营养、灾害抵御、文化景观等多样且巨量的生态系统服务功能。海洋渔业资源的开发是人类社会对海洋最广泛、最久远的利用形式。考古研究发现,早在旧石器时代晚期就有人类族群定居在滨海区域,以捕捞和采集海洋生物为主要食物来源。当今,世界各国直接从事海洋渔业的有数千万人,海洋渔业资源更是通过高度繁荣的加工和贸易体系进入全球人口的日常饮食结构中,成为优质动物蛋白和微量营养素的重要来源。海洋渔业资源开发利用不可避免地会对海洋生态系统产生干扰,包括直接改变种群生物量与生态系统结构,以及驱动栖息地退化等。即使是近代工业化以前低强度的开发,也会因为集中捕捞高营养级、大体型、生长慢、补充困难的生物,从而改变当地的海洋生态系统功能。

近年来,随着海岸带区域的人类活动足迹愈加



**曹玲** 厦门大学南强特聘教授。主要研究领域为渔业复合系统与全球变化、可持续性评估、海洋保护区等。应用自然科学和社会科学综合交叉的前沿分析方法,针对海洋生物资源区域性开发与全球海洋生态、经济社会系统的相互影响,以第一或通讯作者身份在 *Nature* 及其子刊、*Science*、*PNAS* 等刊物发表多项成果,多篇文章入选 ESI 高被引论文和热点论文。主持国家杰出青年科学基金项目、重点研发项目课题、联合国粮农组织国际合作项目等。担任国际海洋高级别小组专家及一区期刊 *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 主编。当选 Pew Marine Fellow,获中国生态学学会青年科技奖。



**姜子禹** 上海交通大学与厦门大学联合培养博士研究生。主要研究领域为海洋渔业可持续性评估与管理,以共同第一作者身份在 *Nature Sustainability* 期刊上发表成果。

收稿日期:2024-12-12;修回日期:2024-12-20

\* 本文根据国家自然科学基金委员会第 366 期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: caoling@xmu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42425603)的资助。

增多,以及气候变化的加速,一些海洋生态系统已经发生强烈而难以逆转的衰退,产出渔业资源的能力大幅下降。与此同时,全球主要强国也开始将海洋视作解决一系列全球性紧迫挑战的有力方案,包括应对气候变化、提供高营养质量和低环境足迹的食物等。一方面对海洋生态系统进行严格的保护,使其恢复到更为健康的状态,另一方面以低扰动的方式可持续地开发海洋中的渔业资源,应对人类社会的高质量食物需求,是这个时代面临的紧迫挑战,也构成了海洋渔业资源—生态—社会复合系统高度复杂的互馈关系。海洋渔业资源—生态—社会复合系统由渔业资源、资源使用者、支撑资源的生态系统、治理体系及外部关联的社会、经济、政治背景等子系统组成,具有明显的动态变化和非线性耦合特征,受到自然过程和人类活动的双重营力作用。海洋科学界应精准辨析并聚焦突破其中关键科学问题,探究这一复合系统的协同可持续路径。

## 1 研究背景

### 1.1 高强度的海洋渔业资源捕捞

20 世纪 50 年代至 90 年代是公认的全球海洋渔业资源开发强度急剧上升的时期,主要原因是工业化渔业捕捞技术突飞猛进,且当时对于海洋的科学认知并不充分,没有能力协调资源开发与保护的相对平衡。自 20 世纪 90 年代开始,海洋渔业资源衰退的迹象逐渐突出,即使渔业开发的产能规模仍在扩大,然而全球海洋捕捞总量已至增长极限,至今仍在 8 000 万吨左右小幅波动<sup>[1]</sup>。全球海洋生态系统虽然支撑了相对稳定的捕捞总产量,但整体已经处在过度开发状态下,主要体现在渔获物的平均营养级下降,以及食物网的简化和功能的丧失<sup>[2]</sup>。此外,随着部分海域资源枯竭而社会需求继续增长,人类对海洋渔业资源的开发足迹在海域面积(横向)和水层范围(纵向)上也在持续扩张,导致越来越多的生态系统从自然状态中受到扰动<sup>[2,3]</sup>。

我国在 20 世纪 60 年代之前,由于海洋捕捞渔业的机动化程度不高,近海渔业资源状况良好,但此后随着捕捞努力量的上升,渔业资源结构发生大幅改变,渔获物当中传统经济鱼类逐渐被虾蟹类和小型中上层鱼类取代<sup>[4]</sup>。为应对产量急速扩张导致的资源衰退,国家主管部门制定了相应的伏季休渔、船队控制、增殖放流等系列政策措施。20 世纪 90 年代,我国国内海洋捕捞产量跃居世界第一并达到增长极限,随后逐渐由顶峰的 1 400 万吨下降到 1 000

万吨左右<sup>[1]</sup>。当前我国的海洋渔业资源衰退速度有所放缓,但其下降趋势仍未得到根本扭转<sup>[5]</sup>。为提升资源养护成效,近海海洋捕捞须继续消化过剩产能、优化生产结构。

### 1.2 海洋渔业资源开发管理与保护

早在 20 世纪初期,已有个别海域的渔业出现衰退,使人类明确认识了海洋渔业资源的有限性。欧洲的北海海域在两次世界大战之间即发生了过度捕捞,驱动当地渔业的盈利能力下降,二战结束后沿岸国家开始着手控制捕捞投入,可以视为现代海洋渔业管理起步阶段的一个例证<sup>[6]</sup>。1982 年通过的《联合国海洋法公约》所规定的专属经济区制度明确赋予了沿海各国对该区域内海洋渔业资源进行可持续管理的正式权利。经过数十年的发展,当前全球对海洋渔业资源直接开发采取的主要管控举措包括:捕捞配额的设定、捕捞产能的投入控制、禁渔区域和休渔季节的划定、渔具渔法的准用规定等。我国自 1955 年就规定了机轮拖网渔业禁渔区,这是我国对海洋渔业资源开发实施现代化管理的开端,此后相继涌现了渔船数量和总功率“双控”、伏季休渔、渔具准用目录和网目限制等代表性的管理制度。

海洋保护地制度也是现代社会保护海洋极为重要的手段,其创立的主要初衷是保护生物多样性,特别是珍稀濒危物种。至 20 世纪 90 年代,主流学术界已经认知到海洋保护地对海洋渔业资源的恢复和可持续开发也有显著的积极意义,且生态系统遭受过度捕捞的程度越大,资源恢复效果越佳<sup>[7]</sup>。截至目前,全球共有 8.4% 的海洋和海岸带区域被划入海洋保护地,但这与《昆明—蒙特利尔全球生物多样性框架》所瞄准的 30% 保护目标仍然相距甚远,且保护地的管理执行力度也参差不齐<sup>[8]</sup>。我国在 1990 年设立了首批海洋保护地,经过三十余年的建设和整合优化之后,目前共建成海洋保护地 352 个,保护海域约 9.33 万平方千米;此外我国还建立了生态保护红线制度以实行划区管控,目前划定了海洋生态保护红线约 15 万平方千米<sup>[9]</sup>。

除了基于种群和栖息地的自然保护之外,也有一些措施通过主动人工干预来恢复海洋渔业资源状况,增殖放流是其中的主要代表。增殖放流技术早在 19 世纪末就已经在个别海水经济鱼种当中得到应用,但粗放的放流并未达到良好成效;近年来随着种苗标志和放流效益评估技术的进步,已经形成了稳定、科学的工作模式<sup>[10]</sup>。我国的海洋增殖放流始于 20 世纪 70 年代黄渤海区域的中国对虾资源恢

复,目前放流对象已扩展至各种鱼类、甲壳类、贝类、头足类等,每年放流苗种规模约300亿尾<sup>[9]</sup>。此外,以红树林、海草床、滨海盐沼等生境修复为代表的海洋生态系统修复工作也为海洋渔业资源的恢复做出了积极贡献。

### 1.3 海洋渔业资源面临的人类活动复合压力

除了直接的捕捞活动,海洋渔业资源还受到由多种人类活动引起的复合性压力。自20世纪80年代起,全球水产养殖迅速扩张并延续至今,对海洋资源管理产生了深远影响。水产养殖业的飞速发展很大程度上缓解了人类对海洋野生渔业资源的依赖,已成为全球动物蛋白供给增长的关键领域。同时,与多数陆地畜牧业形式相比,水产养殖在空间利用效率和碳排放等环境表现方面上显示出一定的优势<sup>[11]</sup>。然而,水产养殖仍面临诸多可持续挑战,包括但不限于饲料资源的可持续性、生物多样性保护、生态影响及病害管理等。随着水生动物营养和替代性饲料原料等行业技术的进步,水产养殖对海洋饵料鱼资源的依赖程度和利用效率得到显著改善,但养殖产业整体规模的持续扩张给这些野生种群造成的压力仍未得到完全释放<sup>[12]</sup>。此外,部分无序的集约化海水养殖对海洋生态系统造成不同程度的干扰,例如栖息地侵占、海水富营养化和其他污染、病害传播等<sup>[12]</sup>。但与此同时,贝藻类养殖在适宜的海域空间和环境容纳量范围内也可以起到净化水质、吸收超量营养盐、为海洋生物提供生境等正向的生态服务功能<sup>[13,14]</sup>。我国近岸拥有全球规模最大、强度最高的海水养殖,生产结构中以不需要投饲的藻类和滤食性贝类为主,目前已开展了系统的空间规划和污染防治工作并取得可观成效,将继续优化探索食物供给和生态健康的双赢路径。

近代以来,全球人口快速向海集聚,海岸带城镇化、工业化带来的密集人类活动也深刻改变了海洋生态系统。近几十年内,我国和全球各国开展了广泛的围海造陆、堤坝筑造等海岸工程,自然岸线被人工岸线取代,由此丧失了大量的滨海湿地,破坏了海洋渔业资源(特别是其早期生活史当中)所依赖的栖息地<sup>[15]</sup>。工农业产生的尾水则通过河流向近海输入了超量的营养盐,使得河口和近海区域出现富营养化—有害藻华爆发—缺氧的链式反应,进而导致海洋渔业资源发生衰退<sup>[16]</sup>。这些活动尽管不属于直接利用渔业资源的过程,但同样通过海洋渔业资源—生态—社会复合系统的耦合协同过程,对系统本身的可持续性构成严峻威胁。

## 2 研究脉络与现状

海洋渔业资源—生态—社会复合系统的核心纽带是海洋渔业资源开发与保护的相对关系。开发与保护之间的平衡将维持复合系统的稳定,持续向其中一方的过度偏重则将驱动复合系统的稳态转变(regime shift)乃至崩溃。长期以来,为了推动这一平衡的实现,海洋科学、生态学、水产学等学科根据自身的研究范式和关注重点,分别形成了一定的研究脉络。随着学科交叉研究的推进和系统科学的发展,海洋渔业资源—生态—社会复合系统这一研究方向逐渐在学术界涌现。

### 2.1 可持续海洋捕捞渔业研究

海洋捕捞是海洋渔业资源利用最主要、最直接的形式,其可持续性早在20世纪末就成为了全球关注的焦点议题。可持续海洋捕捞的本质是防止过度捕捞的发生,即控制人类利用的生物量低于种群能够补充生产的生物量。早年间渔业科学通过对单一物种的种群资源调查,构建了最大可持续产量(Maximum Sustainable Yield, MSY)的评估方法,并作为渔业管理的准绳,但后续研究揭示了MSY因未能充分考虑食物网相互作用而仍然会使生态系统走向衰退<sup>[17,18]</sup>。此外,历史上相对低水平的捕捞已经驱动了营养级高、生长和补充缓慢的种群在生态系统中的占比下降,进而使生态系统结构简化,海洋捕捞渔业也愈加依赖营养级低但补充迅速的种群<sup>[2]</sup>。尽管低营养级种群也有能力支撑起繁荣的渔业,但简化的海洋生态系统缺乏韧性,在气候变化及病害、生物入侵、富营养化等外界作用下更容易崩溃,仅仅改善这些目标种群的资源状况并不能完整恢复生态系统健康<sup>[19]</sup>。因此,可持续海洋捕捞渔业的前沿研究目标是探究适宜的渔具控制、捕捞努力量控制、渔场选择等管理手段,兼顾提升目标物种和非目标物种的种群状况,瞄准更完整的功能和更强的韧性,对海洋生态系统开展重建<sup>[20]</sup>。

进入21世纪后,气候变化是全球性挑战的核心议题之一,气候变化对海洋渔业资源分布的影响也由此成为了海洋捕捞渔业研究的热点。气候变化通过改变海洋初级生产力和海洋渔业资源的分布模式,进而影响捕捞渔业的潜在产量,这对渔业管理的首要意义是应当维持更丰富的渔业资源种群,以提高生态系统的适应能力<sup>[21]</sup>。特别是对于经历了过度捕捞、需要重建的渔业资源种群,在气候变化影响下更需要严格控制人类的开发压力<sup>[22]</sup>。在全球尺

度上,气候变化将导致未来热带的渔获量减少而极地增幅明显,与此同时极地将面临大量的物种入侵和更替,进而潜在改变原有的生态系统功能<sup>[23,24]</sup>。对遭受显著影响的区域进行细化的模型预测将是进一步研究的重点。此外,维持更丰富的海洋渔业资源存量还能够促进深海碳封存过程,可以在经济和社会效益较差的渔区有序减少捕捞量,为海洋捕捞渔业主动减缓气候变化提供有力手段<sup>[25]</sup>。

## 2.2 可持续海水养殖研究

在全球海洋野生渔业资源过度开发的背景下,海水养殖逐渐成为了海洋渔业资源利用的另一主要形式,其与淡水养殖一同构成了过去数十年内全球增长最快的食物生产行业。海水和淡水养殖大量补充了水产品供给以满足日益增长的人类消费,纾解了海洋渔业资源的开发需求。但与此同时,多项研究也强调了水产养殖饲料对于海洋野生饵料鱼资源的依赖,驱动了饵料鱼种群的过度捕捞和面向幼杂鱼的低选择性捕捞,且部分无序的海水养殖还导致了栖息地退化、环境污染等问题,对海洋渔业资源状况造成了负面影响<sup>[14,26,27]</sup>。进入 21 世纪以来,通过低营养级物种养殖规模的扩张、饲料转化效率的提升、饲料中鱼粉和鱼油替代成分的推广、来自水产品加工副产物的鱼粉和鱼油使用的增加,水产养殖业对海洋饵料鱼资源的依赖已显著下降,从而在直接利用更少海洋渔业资源的条件下,实现更多的食物产出<sup>[12]</sup>。尽管如此,在水产养殖规模继续扩张、低选择性海洋捕捞渔业仍然存续的现实条件下,仍需加强新兴水产饲料成分开发和饵料鱼渔业管理研究,以进一步缓解海洋渔业资源的压力<sup>[12,28,29]</sup>。

除了对海洋野生饵料鱼资源的利用以外,海水养殖对海洋生态系统的负面影响方式包括养殖尾水造成富营养化、滩涂或海上养殖侵占生态重要区域、病害从养殖种群向野生种群传播、养殖生物逃逸改变当地的生态系统结构等<sup>[27,30]</sup>。循环水养殖及深远海养殖这两类相对新兴的形式能够更好地控制养殖活动对周边海洋生态系统的压力,驱动了一批前沿研究为它们的推广应用提供科技基础<sup>[11,12]</sup>。滤食性贝类和藻类的海水养殖不依靠饲料投入即可实现食物生产,同时能够吸收海水中超量营养盐,并且藻类养殖还可为其他海洋生物提供栖息地及固碳增汇,前沿研究正致力于以上多种生态系统服务功能的协同实现<sup>[31,32]</sup>。综合而言,当前需要强化解析海水养殖对海洋生态系统的影响机制和效应,并形成科学审慎的养殖空间规划,以尽可能规避负面效应

并充分发挥正面价值。

## 2.3 海洋保护地及海洋渔业资源养护研究

20 世纪末,随着《生物多样性公约》的签署和生效,海洋保护地迅速发展成为维持海洋生态系统健康的主要管理工具。从学术界公认的定义来看,海洋保护地通过限制人类活动的进入来实现特定区域的自然保护,并以生物多样性保护为主要目标<sup>[33]</sup>。尽管海洋保护地限制了相应区域内海洋渔业资源的直接利用,且不以渔业资源恢复为核心初衷,但即使是在单一物种层面上,合理设置的海洋保护地也能够增强种群在人类开发下的韧性,并通过种群向渔场的转移来支撑捕捞渔业的生产<sup>[34]</sup>。并且,海洋保护地可以抑制捕捞生产造成的栖息地破坏、兼捕等生态影响,且能维持目标种群内健康的年龄结构,在海洋渔业资源养护方面相较于传统渔业管理工具有着无可替代的作用<sup>[35,36]</sup>。

当前的海洋保护地研究普遍指出,保护地内渔业资源物种的繁殖能力大幅增加,并通过幼体和成体向保护地边界外的溢出,改善渔业资源可持续利用的状况<sup>[33,37,38]</sup>。当渔业资源物种拥有更大的栖息地范围时,海洋保护地对资源养护的作用更易受到限制,因此前沿研究正致力于探索设立更大范围且边界能够动态调整的保护地,以及加强对资源生物的产卵场、育幼场、索饵场、洄游通道等关键生活史阶段栖息地的保护<sup>[33,39,40]</sup>。现阶段需要充分运用先进的标记监测技术,对海洋保护地向邻近区域输出的资源生物进行更充分的实证评估,包括总体生物量和适合直接开发利用的生物量<sup>[38]</sup>。此外,还需要加强一部分资源生物的生活史研究,尤其是经历了过度开发和气候变化下脆弱性突出的生物,以支撑关键保护区域的精确选划。

## 2.4 基于生态系统的海洋管理与海洋渔业资源—生态—社会复合系统研究

海洋捕捞渔业、海水养殖、海洋生物多样性保护领域的研究各自有着相对独立的起源,随后学术界和决策者均认识到海洋渔业资源的形成依赖于复杂的生态系统过程,后者又受到多重自然与人为因素的调控,不可能通过单一维度的管理来促成资源开发与保护的平衡。基于生态系统的渔业管理(Ecosystem-Based Fishery Management, EBFM)理念由此诞生,其重视对渔业捕捞造成的栖息地退化、兼捕、种群年龄结构变化、生态系统功能改变等多重影响进行管控<sup>[41]</sup>。但 EBFM 的管理对象依然停留在渔业捕捞上,未能有效纳入近海养殖、围海造

陆、陆源排污等其他同样影响生态系统的过程,导致无法解决海洋生态系统健康的根本问题<sup>[42]</sup>。在此基础上,基于生态系统的海洋管理(Marine Ecosystem-Based Management, MEBM)理念填补了EBFM的短板,将管理范围扩大至包括海洋捕捞、海水养殖、海洋能源和矿产开发、海洋划区保护等各种人类活动<sup>[42,43]</sup>。

MEBM充分引入了系统科学理论,提出将海洋生态系统视为复杂自适应系统,个体要素层面的活动通过非线性的相互作用,可以驱动系统层面的变化,进而导致系统的稳态转变乃至崩溃<sup>[44-46]</sup>。海岸带和流域各种形式的人类工农业生产和社会生活都是复杂自适应系统的组成部分,因此MEBM需要对这些活动进行综合调控,以提升生态系统的稳定性和韧性,使其可持续实现多重服务功能<sup>[44,45]</sup>。事实上,上述复杂自适应系统已经超越了海洋生态系统的传统范畴,融通了自然系统和社会系统的边界。在系统观念的推动下,一批前沿研究突破单一学科主导的范式开展了交叉学科探索,也丰富了海洋科学的内涵<sup>[47]</sup>。主要关注领域包括人类活动通过改变生物地球化学过程、海洋初级生产、海洋生态系统食物网等线索对海洋渔业资源的复合影响路径<sup>[48-50]</sup>,以及合理开发的海洋渔业资源通过粮食安全、营养健康、经济增长、生计支持等对社会发展的多重贡献维度<sup>[51,52]</sup>。这批交叉研究致力于解析的共同内核即为海洋渔业资源—生态—社会复合系统的耦合协同过程。

### 3 亟待解决的关键科学问题

纵观全球为海洋渔业资源开发与保护平衡做出的治理努力,近年来已经取得了可观的成就。在海洋捕捞规模增长停滞的背景下,海水养殖持续扩张,其中贝藻类养殖贡献了主要增量<sup>[1]</sup>;各类生态环境效益表现更佳的捕捞和养殖方式正在对粗放型生产进行快速取代<sup>[53]</sup>;全球海洋保护地的面积从2010年至今翻了三倍多,且越来越多资源生物的重要栖息地通过科学的选划手段被纳入保护优先区域<sup>[8]</sup>。但是在全球海洋被开发的主要野生生物种群当中,过度捕捞的种群比例仍在上升,海洋渔业资源状况至今未见全面向好的趋势<sup>[53]</sup>。全球人口增长带来的优质动物蛋白需求和气候变化加剧带来的固碳增汇需求,使当今的人类社会前所未有地依赖健康的海洋生态系统来提供相应服务,因而海洋渔业资源—生态—社会复合系统正面临迫在眉睫的可持

续挑战,亟须把握其中的关键科学问题并力求突破。

(1) 气候变化压力下海洋渔业资源—生态—社会复合系统的耦合及协同机制。20世纪50年代至今的大半个世纪里,渔业捕捞和其他海岸带人类活动已经成为驱动海洋渔业资源变化的最主要因素,而气候变化又放大了资源状况的震荡幅度。这些因素影响了海洋生态系统的物质和能量流动,进而改变了生态系统的结构与功能。同时,海洋渔业资源是上亿从业者的世代生计所系,且在全球粮食和营养安全战略中的作用日益突显。因此海洋渔业资源开发与保护具有自然过程与社会过程密切交互的属性,是人海互馈关系最集中的反映。然而,即使是在研究数据最为充分的关键海区,对这一复合系统演变机制的认知仍然非常有限。当前需要利用新兴技术实现多源异构数据的同化,重建过去数十年关键时期内海洋渔业资源的状态演化,解析生物地球化学基本要素的水平变动及其如何通过生态系统动力学机制映射至渔业资源,并评估不同类别人类活动和气候变化因素的驱动贡献,这是揭示海洋渔业资源—生态—社会复合系统在气候变化下的耦合协同机制所面临的主要科学挑战。这些工作也将为探索复合系统的可持续路径提供关键前置基础。

(2) 海洋渔业资源—生态—社会复合系统的临界点与临界过程。伴随着工业化海洋捕捞的大规模作业,海洋渔业资源所承受的开发强度已经普遍超过了其所在生态系统的自然承载力。尽管全球海洋捕捞产量尚未出现全局性下降,但高营养级、大体型、生长慢、补充困难的生物个体的移除驱使海洋生态系统结构、功能及提供服务的能力已出现广泛的衰退,丧失了应对人类活动和气候变化双重胁迫的韧性。这使得海洋渔业资源状况已经或即将频繁越过临界点,发生稳态转变,进而使资源评估工作将事实上已经历震荡后的平衡状态视为初始的“健康状态”,后者即为传统渔业科学提出的“基线转移”困境。但由于海洋渔业资源、生态系统和人类活动之间复杂的非线性互馈,单一学科主导的研究方法在探究系统临界状态方面存在很大挑战,对这一复合系统的临界点和临界动力过程的已有认知相当局限。当前需要引入系统科学等其他学科的理论和方法,甄别该系统发生稳态转变前的预警信号,明晰各子系统的临界要素及其之间的级联效应,解析临界动力过程及调控手段,从而量化复合系统可持续的安全阈值。

(3) 海洋渔业资源—生态—社会复合系统的未来发展趋势与可持续性。海洋渔业资源在未经人类干扰的条件下自身就有强烈的动态特征,其与生态系统、人类社会经济构成的复合系统更加具有不确定性。全球气候模式和物种分布模型的发展促进了气候变化下海洋渔业资源状况的未来演变趋势研究,但现有预测手段对人类活动因素的纳入有限,导致得出的结果很难对治理调控实现精准指导,也未能形成对这一复合系统关键风险识别和韧性提升路径的完善认知。当前需要在引入系统科学研究范式的基础上应用数字孪生技术,以关键海区为示范,对人类活动和气候变化双重胁迫下海洋渔业资源—生态—社会复合系统的未来演化,特别是其中的临界动力过程进行高精度模拟,识别关键风险因素和高效调控的切入点,并结合渔业资源养护、粮食安全保障、固碳增汇等多维治理目标探究协同优化路径。这既是实现海洋渔业资源开发与保护相平衡的重大科学挑战,也是通过基于科学的决策实现蓝色经济高质量发展的紧迫需求。

#### 4 未来展望

可持续的海洋渔业资源—生态—社会复合系统是人海和谐经略海洋的重要组成部分,同时也是长效提升海洋生态系统健康、促进多重生态系统服务功能实现的一块基石。我国是世界上海洋捕捞和海水养殖规模最大的国家,同时我国的近海—海岸带区域支撑了极高强度的人类社会经济活动,但我国的海洋渔业资源—生态—社会复合系统研究尚未达到国际领跑水平,相应的治理理念与方法也未能完全匹配最新的国家发展需求。在科学层面上,未来应根据我国海洋生态保护和“向海洋要食物”的双重战略需求,探索建设以人—海复合系统为主要研究对象的学科,逐渐形成完善的理论和技术体系。聚焦领域内的关键科学问题,推动海洋科学、系统科学、生态学、水产学等多个一级学科的交叉融合和创新研究范式的突破。借助国家自然科学基金带动“有组织的科研”和塑造国家自主创新体系的体制优势,在海洋科学类别下新设学科代码或调整既有学科代码的内涵,加强对人—海多系统复杂耦合、复合系统临界过程、复合系统韧性提升等难点领域的原创性研究。此外,通过国家重大科研仪器研制项目,进一步支持复合系统的海—陆—空—天一体化观测监测技术的研发,通过共享航次计划提升对关键海区的调查质量,为上述科学问题的突破提供坚实的

数据积累。在治理应用层面上,未来应根据海洋渔业资源—生态—社会复合系统的趋势预测研究,构建基于数字孪生技术的海洋综合治理智能决策支持系统,并为其产出的动态适应性管理路径创造便捷的政策环境,从而高效服务于生态文明建设、海洋强国与碳中和等国家战略目标。

#### 参 考 文 献

- [1] FAO. FishStatJ-Software for Fishery and Aquaculture Statistical Time Series. (2024-03-31)/[2024-11-25]. <https://www.fao.org/fishery/en/statistics/software/fishstatj>.
- [2] Pauly D, Christensen V, Guénette S, et al. Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 2002, 418(6898): 689—695.
- [3] Pauly D, Alder J, Bennett E, et al. The future for fisheries. *Science*, 2003, 302(5649): 1359—1361.
- [4] 金显仕, 田洪林, 单秀娟. 我国近海渔业资源研究历程及展望. *水产学报*, 2023, 47(11): 120—129.
- [5] 我国海洋渔业资源衰退速度大幅减慢 水产品总产量连续34年居世界第一. *人民日报*, 2024-12-05(06).
- [6] International conference on the problem of overfishing. *Nature*, 1946, 157: 403.
- [7] Holland DS, Brazee RJ. Marine reserves for fisheries management. *Marine Resource Economics*, 1996, 11(3): 157—171.
- [8] UNEP-WCMC, IUCN. Protected Planet Report 2024. (2024-10-29)/[2024-11-25]. <https://digitalreport.protectedplanet.net>.
- [9] 国务院新闻办公室. 中国的海洋生态环境保护. (2024-07-11)/[2024-11-25]. [https://www.gov.cn/zhengce/202407/content\\_6962503.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6962503.htm).
- [10] 程家骅, 姜亚洲. 海洋生物资源增殖放流回顾与展望. *中国水产科学*, 2010, 17(3): 610—617.
- [11] Gephart JA, Henriksson PJG, Parker RWR, et al. Environmental performance of blue foods. *Nature*, 2021, 597(7876): 360—365.
- [12] Naylor RL, Hardy RW, Buschmann AH, et al. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 2021, 591(7851): 551—563.
- [13] Alleway HK, Waters TJ, Brummett R, et al. Global principles for restorative aquaculture to foster aquaculture practices that benefit the environment. *Conservation Science and Practice*, 2023, 5(8): e12982.
- [14] Clavelle T, Lester SE, Gentry R, et al. Interactions and management for the future of marine aquaculture and capture fisheries. *Fish and Fisheries*, 2019, 20(2): 368—388.

- [15] Li XZ, Bellerby R, Craft C, et al. Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration. *Anthropocene Coasts*, 2018, 1(1): 1—15.
- [16] Wang BD, Xin M, Wei QS, et al. A historical overview of coastal eutrophication in the China Seas. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136: 394—400.
- [17] Walters CJ, Christensen V, Martell SJ, et al. Possible ecosystem impacts of applying MSY policies from single-species assessment. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, 62(3): 558—568.
- [18] Legović T, Klanjšček J, Geček S. Maximum sustainable yield and species extinction in ecosystems. *Ecological Modelling*, 2010, 221(12): 1569—1574.
- [19] Howarth LM, Roberts CM, Thurstan RH, et al. The unintended consequences of simplifying the sea: Making the case for complexity. *Fish and Fisheries*, 2014, 15(4): 690—711.
- [20] Roberts C, Béné C, Bennett N, et al. Rethinking sustainability of marine fisheries for a fast-changing planet. *NPJ Ocean Sustainability*, 2024, 3: 41.
- [21] Sumaila UR, Cheung WWL, Lam VWY, et al. Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries. *Nature Climate Change*, 2011, 1: 449—456.
- [22] Cheung WWL, Palacios-Abrantes J, Frölicher TL, et al. Rebuilding fish biomass for the world's marine ecoregions under climate change. *Global Change Biology*, 2022, 28(21): 6254—6267.
- [23] Cheung WWL, Lam VWY, Sarmiento JL, et al. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 2009, 10(3): 235—251.
- [24] Cheung WWL, Lam VWY, Sarmiento JL, et al. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 24—35.
- [25] Mariani G, Cheung WWL, Lyet A, et al. Let more big fish sink: Fisheries prevent blue carbon sequestration-half in unprofitable areas. *Science Advances*, 2020, 6(44): eabb4848.
- [26] Naylor RL, Goldburg RJ, Primavera JH, et al. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 2000, 405(6790): 1017—1024.
- [27] Diana JS. Aquaculture production and biodiversity conservation. *BioScience*, 2009, 59(1): 27—38.
- [28] Froehlich HE, Jacobsen NS, Essington TE, et al. Avoiding the ecological limits of forage fish for fed aquaculture. *Nature Sustainability*, 2018, 1: 298—303.
- [29] Zhang WB, Liu M, Sadovy de Mitcheson Y, et al. Fishing for feed in China: Facts, impacts and implications. *Fish and Fisheries*, 2020, 21(1): 47—62.
- [30] Cao L, Wang WM, Yang Y, et al. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2007, 14(7): 452—462.
- [31] Duarte CM, Bruhn A, Krause-Jensen D. A seaweed aquaculture imperative to meet global sustainability targets. *Nature Sustainability*, 2022, 5: 185—193.
- [32] Gentry RR, Alleway HK, Bishop MJ, et al. Exploring the potential for marine aquaculture to contribute to ecosystem services. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(2): 499—512.
- [33] Grorud-Colvert K, Sullivan-Stack J, Roberts C, et al. The MPA Guide: A framework to achieve global goals for the ocean. *Science*, 2021, 373(6560): eabf0861.
- [34] Sumaila UR. Protected marine reserves as fisheries management tools: A bioeconomic analysis. *Fisheries Research*, 1998, 37(1/2/3): 287—296.
- [35] Hilborn R, Stokes K, Maguire JJ, et al. When can marine reserves improve fisheries management? *Ocean & Coastal Management*, 2004, 47(3/4): 197—205.
- [36] Roberts CM, Hawkins JP, Gell FR. The role of marine reserves in achieving sustainable fisheries. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2005, 360(1453): 123—132.
- [37] Harrison HB, Williamson DH, Evans RD, et al. Larval export from marine reserves and the recruitment benefit for fish and fisheries. *Current Biology: CB*, 2012, 22(11): 1023—1028.
- [38] Di Lorenzo M, Claudet J, Guidetti P. Spillover from marine protected areas to adjacent fisheries has an ecological and a fishery component. *Journal for Nature Conservation*, 2016, 32: 62—66.
- [39] Maxwell SM, Gjerde KM, Connors MG, et al. Mobile protected areas for biodiversity on the high seas. *Science*, 2020, 367(6475): 252—254.
- [40] Erisman B, Heyman W, Kobara S, et al. Fish spawning aggregations: Where well-placed management actions can yield big benefits for fisheries and conservation. *Fish and Fisheries*, 2017, 18(1): 128—144.
- [41] Pikitch EK, Santora C, Babcock EA, et al. Ecosystem-based fishery management. *Science*, 2004, 305(5682): 346—347.
- [42] 刘慧, 苏纪兰. 基于生态系统的海洋管理理论与实践. *地球科学进展*, 2014, 29(2): 275—284.

- [43] Winther JG, Dai MH, Rist T, et al. Integrated ocean management for a sustainable ocean economy. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(11): 1451–1458.
- [44] Levin SA, Lubchenco J. Resilience, robustness, and marine ecosystem-based management. *BioScience*, 2008, 58(1): 27–32.
- [45] Curtin R, Prelezo R. Understanding marine ecosystem based management: A literature review. *Marine Policy*, 2010, 34(5): 821–830.
- [46] Hagstrom GI, Levin SA. Marine ecosystems as complex adaptive systems: Emergent patterns, critical transitions, and public goods. *Ecosystems*, 2017, 20(3): 458–476.
- [47] 冷疏影, 朱晟君, 李薇, 等. 从“空间”视角看海洋科学综合发展新趋势. *科学通报*, 2018, 63(31): 3167–3183.
- [48] Costello C, Cao L, Gelcich S, et al. The future of food from the sea. *Nature*, 2020, 588(7836): 95–100.
- [49] Cao L, Halpern BS, Troell M, et al. Vulnerability of blue foods to human-induced environmental change. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 1186–1198.
- [50] Butt N, Halpern BS, O'Hara CC, et al. A trait-based framework for assessing the vulnerability of marine species to human impacts. *Ecosphere*, 2022, 13(2).
- [51] Crona BI, Wassénius E, Jonell M, et al. Four ways blue foods can help achieve food system ambitions across nations. *Nature*, 2023, 616(7955): 104–112.
- [52] Tigchelaar M, Leape J, Micheli F, et al. The vital roles of blue foods in the global food system. *Global Food Security*, 2022, 33: 100637.
- [53] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024-Blue Transformation in action. (2024-06-07)/[2024-11-25]. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd0683en>.

## Research Progress and Prospects on the Coupled System of Marine Fishery Resources, Ecosystems, and Society

Ziyu Jiang<sup>1, 2, 3</sup> Ling Cao<sup>1, 2\*</sup>

1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102

2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), Xiamen 361102

3. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030

**Abstract** Marine fishery resources represent one of the most vital services provided by marine ecosystems to human society, directly influencing global food and nutritional security and the livelihoods of hundreds of millions of people. Over the past half-century, the combined impact of intensive industrial fishing, nearshore aquaculture, and coastal engineering has profoundly altered the structure and function of marine ecosystems, leading to significant degradation in fishery resources and key habitats. Against the backdrop of escalating climate change, intensifying human activities in coastal zones, and growing demand for marine resource consumption, the traditional approaches focusing on single disciplines or isolated dimensions have shown severe limitations. Addressing the fundamental challenge of sustainable pathways now requires an integrated approach that considers the interplay of marine fishery resources, ecological environments, and socio-economic development at the level of the coupled system of marine fishery resources, ecosystems, and society. There is an urgent need to advance interdisciplinary research that explores the coupling mechanisms, tipping points and processes, future trends, and sustainability of this complex system. Such breakthroughs are essential to support the coordinated realization of national strategic goals, including ecological civilization, the development of a maritime power, and carbon neutrality.

**Keywords** marine fishery resources; sustainable utilization; ecological conservation; climate change; human activities; tipping points

(责任编辑 贾祖冰 张强)

\* Corresponding Author, Email: caoling@xmu.edu.cn