

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2024.02.009

中国海洋渔业生态系统健康评价及动态演进

高源, 于淼

(辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: 本文基于生态系统健康的基本逻辑与科学内涵构建评价指标体系, 评价 2008—2021 年中国沿海 11 个省、市和自治区的海洋渔业生态系统健康及各要素层水平, 借助传统与空间 Kernel 密度估计方法分析中国海洋渔业生态系统健康水平的分布动态演进和长期转移趋势。研究发现: 在动态演化特征方面, 中国海洋渔业生态系统健康水平随时间的推移提升效果显著, 其内部各地区海洋渔业生态健康水平的绝对差异呈上升趋势, 且极化现象存在加剧趋势。从各要素层分布曲线来看, 海洋渔业生态系统活力的下滑制约了海洋渔业生态系统健康水平的提升; 海洋渔业生态系统弹性的变化拉动了海洋渔业生态系统健康水平的不断攀升。在长期转移趋势方面, 不考虑空间因素条件下, 沿海各地区海洋渔业生态系统健康水平具有较强的稳定性与连续性, 在 3 年的时间跨度内实现跨越式等级跃迁的可能性较小, 且存在向低水平和高水平“俱乐部收敛”的可能性。考虑空间因素条件下, 中国海洋渔业生态系统健康水平在空间动态条件下的演进趋势呈现“断层”现象。处于 1.2~1.4 临界级与良好级的相邻地区间存在趋同性, 而处于 0.6 以下风险级与 1.4 以上良好级的地区不易与相邻地区发生空间关联作用。

关键词: 海洋渔业; 生态系统健康; 投影寻踪模型; Kernel 密度估计

中图分类号: F326.4; S937.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2024) 02-0078-10

健康的海洋提供了多种有价值的生态系统服务, 这些服务又通过资源供给、气候调节、碳封存、美学和文化价值产生社会效益。在“蓝色经济”“蓝色增长”框架下, 沿海和开放海域的传统和新兴人类活动大幅增加, 由此产生的长期累积压力, 包括海洋变暖、富营养化、生物多样性降低、生物栖息地破坏和污染等, 以协同或对抗的方式改变了海洋生态系统^[1-2]。此外, 人为压力的增加改变了对水生物种、群落和生态系统的破坏或影响的类型、频率、程度和持续时间^[3]。因此, 确保海洋渔业复杂适应系统的长期生态经济可持续性, 并支持保护海洋生物多样性和生态系统健康, 已成为中国海洋生态文明建设和海洋渔业稳定发展中亟待解决

的科学问题。

自 1972 年斯德哥尔摩人类环境会议召开以来, 生态学家一直关注自然生态系统如何应对人类活动带来的各种压力的研究。为了评估生态系统对扰动的反应, RAPPORT D J^[4]参照人类健康的定义类推出了生态系统健康这一概念, 并认为生态完整性和生态系统的可持续性衡量一个生态系统健康状况的两大基本判据。COSTANZA R 等^[5]从系统可持续性的角度, 提出了描述生态系统健康状态的 3 个关键指标, 生态系统健康可以通过系统弹性、组织和活力的综合、多尺度、动态标准衡量。随着对可持续发展理论的探索 and 不断深入, 生态系统健康概念外延也在进一步拓展, 并由单纯生态学定义演变成

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校人文社科类基本科研 (面上) 项目 (LJKR0310); 辽宁省教育科学“十四五”规划 2022 年度课题 (JG22DB421)

作者简介: 高源 (1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事区域与海洋经济地理、海洋经济可持续发展研究。E-mail: gyis1213@163.com

为“生态-社会经济-人类健康”复合定义^[6-7],如袁兴中等^[8]认为生态健康是生态系统的内部秩序和组织的良好,系统正常的能量流动和物质循环没有受到损伤、关键生态成分保留下来、系统对自然干扰的长期效应具有抵抗力和恢复力,系统能够维持自身的组织结构长期稳定,具有自我调控能力,并且能够提供合乎自然和人类需求的生态服务。如今越来越多的研究旨在评估和绘制沿海生态系统服务的价值和海洋渔业生态系统健康。在研究尺度上,涉及大型海洋生态系统的渔业状况与生态健康^[9]、湾区和河口水域渔业资源结构变动及生态系统健康^[10]、热带岛屿的海洋社会生态系统状况^[11]、小型手工渔业针对的沿海地区生态系统健康^[12]等。在研究内容上,涉及基于生态系统的渔业管理和渔业管理法规实施对可持续渔业及良好生态系统状况的影响^[13]、应用反映渔业生态系统功能和结构属性的指标来评估渔业生态环境健康现状^[14]、使用特定于环境的脆弱性标准来衡量沿海渔业社区与蓝碳生态系统健康的关系^[15]、使用海洋健康指数跟踪环境扰动下海洋生态系统的变化^[16]等。以往关于海洋渔业生态系统健康的研究取得了丰硕的成果,不仅更好地了解了不同尺度下的渔业生态系统健康状况,而且通过对海洋生态系统服务的生物物理和经济价值进行评估,以向管理者和决策者传达海洋资源的重要性,并支持实施旨在可持续开发海洋自然资本存量的政策和战略。然而,一方面,导致海洋渔业生态系统脆弱的根源在于人海地域系统交互强烈的地理属性及相互加剧的内生化链式反应,目前大多数研究仅关注海洋生态环境现状与人类活动胁迫,对人类的主动响应及海洋渔业生态系统自身的适应修复能力重视不够。另一方面,海洋渔业生态系统健康水平的提升或下滑并不是孤立的,忽略海洋渔业生态健康水平在一定空间范围内可能产生的空间异质性和空间依赖性,将难以揭示地理格局对海洋渔业生态系统健康的影响。

鉴于此,为了深入了解中国海洋渔业生态系统健康状况,本文基于生态系统健康的科学内涵,构建中国海洋渔业生态系统健康水平评价指标体系,分析中国海洋渔业生态健康水平发展的动态演进特征及长期转移趋势并考虑空间关联关系。本文旨在

通过以上综合探索性研究工作,从而为推进我国海洋强国建设,支持海洋生物多样性保护和生态系统健康提升,实现海洋渔业可持续发展提供依据。

1 研究方法数据来源

1.1 海洋渔业生态系统健康指标体系构建

海洋渔业是本地、区域和全球的人类(社会经济系统)与自然系统的耦合,作为复杂动态的人海地域关系系统,在开发初期阶段,海洋渔业生态系统以生长积累为主,整体发育较为迟缓,系统活力不足,随着系统内部各类要素的不断吸纳扩张并建立起要素间联系促进海洋渔业产业的发展,要素间组织结构和功能由无序走向有序,在一定阈值范围内暂时达到维持其自身稳定的动态均衡状态。但受前一阶段该系统与各要素紧密联系的惯性作用,抑制了系统的灵活性,导致海洋渔业生态系统僵化、过度连结和格式化增长,进而使海洋渔业生态系统的潜力与组织连结性不断下降,此时出现的短期冲击与长期“慢性燃烧”累积压力(如海洋自然灾害、渔业资源枯竭、突发公共安全事件等)在一定程度上扰动、制约海洋渔业生态系统内部各要素间作用的方式,致使原本紧密而有控制力的系统开始松散震荡,“活力”“组织”“弹性”三重属性显著变化,要素间组织结构失衡。随着管理政策与科技创新等多方面措施的落实,海洋渔业生态系统通过优化人海关系的方式打破固有联系,内部要素的不断创新和重组装配使系统弹性攀升,进而实现海洋渔业生态系统健康向更高水平发展。

本文基于对国内外学者关于生态健康定义的归纳与总结,将海洋渔业生态系统健康界定为:海洋渔业生态系统是有序且有活力的,能够维持其系统的组织结构和稳定自治及在内外部扰动下通过对生态系统结构组件和运转模式进行塑性改变,保持生态系统恢复力或弹性;可以生产渔业相关产品,提供自然和人类需求的生态服务,并满足海洋渔业产业可持续发展的要求。本文遵循综合性、科学性、可比性和数据可获得性等原则,选择生态系统健康及海洋渔业领域相关研究成果中高频使用的指标^[17-20],征求相关专家意见,构建海洋渔业生态系统健康评

价指标体系（表1）。该评价体系以生态系统健康水平为目标层，选择目前学界常用的活力、组织及弹性作为要素层，以海水加工产品产量/水产品加工产量等为指标层，共21个具体指标。其中，选取海水加工产品产量/水产品加工产量、海水产品产量/水产品产量，海洋渔业从业人员、渔民人均纯收入、海洋渔业经济年增加值/海洋渔业经济年生产总值，海洋货物货运量、海水产品生产效率分别表征生态系统的生产功能、社会经济效益及系统运转速率，以此衡量海洋渔业生态系统活力。选取确权海域面积/地区人口数量、滨海湿地面积/地区人口数量、近岸海域一、二类水质海域面积/总海域面积，现代海洋渔业资源生态位宽度、海洋生物多样性指数、海水养殖结构指数、海洋渔业产业结构熵指数

分别表征生态系统的结构稳定性、合理的海洋物种多样性与产业开发时空配置，以此衡量中国海洋渔业生态系统组织。采用水产技术人员中高级职称人数比例、海洋自然保护区面积、海洋渔业产业结构转换速率、水产技术推广经费投入金额、海滨观测台数量、海洋环境质量指数和水产技术推广机构密度来表征海洋渔业生态系统在受到扰动后，能够维持海洋渔业生态系统自身良性运转，恢复其结构和功能的能力，以此衡量中国海洋渔业生态系统弹性。

1.2 研究方法

1.2.1 基于人工鱼群算法优化的投影寻踪综合评价模型

作为数理统计中的一种聚类分析方法，投影寻踪模型可以同时用于探索性分析和确定性分析，实

表1 中国海洋渔业生态系统健康评价体系

目标层	要素层	指标含义	指标选取与阐释/单位
中国海洋渔业生态系统健康水平	海洋渔业生态系统活力	反映海洋渔业加工水平	海水加工产品产量/水产品加工产量/%
		反映海洋渔业生产水平	海水产品产量/水产品产量/%
		反映海洋渔业人力资源水平	海洋渔业从业人员/人
		反映海洋渔业从业者收入水平	渔民人均纯收入/元
		反映海洋渔业经济活力	海洋渔业经济年增加值/海洋渔业经济年生产总值/%
		反映海洋货运发展状况	海洋货物货运量/万吨
		反映海水产品资源生产效率	海水产品生产效率/无量纲
	海洋渔业生态系统组织	反映海域开发利用承载能力	确权海域面积/地区人口数量/(hm^2 /万人)
		反映海洋生态系统服务提供能力	滨海湿地面积/地区人口数量/(万 hm^2 /万人)
		反映海洋渔业产业对资源的开发利用的程度	^a 现代海洋渔业资源生态位宽度/无量纲
		反映海洋生物多样性水平	^b 海洋生物多样性指数/无量纲
		反映海水养殖结构多样化	^c 海水养殖结构指数/无量纲
		反映海洋渔业产业结构的发育程度	^d 海洋渔业产业结构熵指数/无量纲
		反映海洋渔业自然生态环境状态	近岸海域一、二类水质海域面积/总海域面积/%
海洋渔业生态系统弹性	海洋渔业生态系统弹性	反映海洋渔业技术人员素质	水产技术人员中、高级职称人数比例/%
		反映海洋生态环境保护水平	海洋自然保护区面积/ km^2
		反映海洋渔业产业系统对海洋环境变化的调整能力	^e 海洋渔业产业结构转换速率/无量纲
		反映海洋渔业产业科技支撑力度	水产技术推广经费投入金额/万元
		反映海洋基础设施发展状况	海滨观测台数量/个
		反映海洋渔业自然环境治理恢复水平	海洋环境质量指数/无量纲
		反映海洋渔业研究开发和技术推广能力	水产技术推广机构密度/%

注：^a 现代海洋渔业资源生态位宽度： $W = (S + AP) / (\sum (S_i + AP_i))$ ， S_i 为 i 类海洋渔业资源生态元数量态，即海洋捕捞和海水养殖的产量； S 为现代渔业资源生态元总数量态； P_i 为 i 类海洋渔业资源生态元数量势，即海洋捕捞和海水养殖产量的增长率； P 为现代海洋渔业资源生态元总数量势； A_i 为量纲转换系数。^b 海洋生物多样性指数：由浮游植物、浮游动物、底栖生物多样性指数加权求和而得。^c 海水养殖结构指数： $DIV_i = - \sum_{s=1}^n \left(\frac{e_{is}}{e_i} \right) \ln \left(\frac{e_{is}}{e_i} \right)$ ， e_{is} 是海水养殖类别 s 在区域 i 的养殖面积； e_i 是 i 地区所有海洋养殖类别的总养殖面积。^d 海洋渔业产业结构熵指数： $S_i = \sum_{j=1}^n \left[W_{ij} \ln \left(\frac{1}{W_{ij}} \right) \right]$ ， t 为时期； i 表征海洋渔业产业的类别， $i = 1, 2, 3, \dots$ ； W_{ij} 为各个海洋渔业产业类别占整个海洋渔业产值的比重。^e 海洋产业结构转换速率： $ISC = \sqrt{[\sum (C_i - C_j)^2] \cdot M_i / C_j}$ ， C_i 为 i 产业平均增长速率； C_j 为地区 GDP 年平均增长速率； M_i 为第 i 产业占地区 GDP 的比重。

现客观加权和评价的功能^[21]。本文采用使用基于人工鱼群算法优化的投影寻踪模型测度中国海洋渔业生态系统健康及其构成维度。模型构建过程如下^[22]。

(1) 原始数据的标准化处理

设样本集为 $\{x_{ij}^* | i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p\}$, 其中, x_{ij}^* 为第 i 个样本中的第 j 个评价指标原始数据; n 和 p 分别为样本个数与评价指标个数。通过标准化处理对评价指标原始值的变化范围进行统一。

正向性指标计算如下。

$$x_{ij} = [x_{ij}^* - x_{\min}(j)] / [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (1)$$

负向性指标计算如下。

$$x_{ij} = [x_{\max}(j) - x_{ij}^*] / [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (2)$$

式中, $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第 j 个评价指标原始数据的最大值、最小值; x_{ij} 为评价指标的标准化值。

(2) 投影目标函数构造

设 $a = (a_1, a_2, \dots, a_p)$ 为投影方向向量, p 维数据 $\{x_{ij} | j=1, 2, \dots, p\}$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$, 可以通过以下公式处理为一维投影值 Z_i 。

$$Z_i = \sum_{j=1}^p a_j x_{ij}, i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

构建投影目标函数表达式如下。

$$Q_a = S_z D_z \quad (4)$$

式中, S_z 、 D_z 分别为投影值 Z_i 的标准差和局部密度, 表示如下。

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - E(Z_i))^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (R - r_{ij}) \cdot u(R - r_{ij}) \quad (6)$$

式中, $E(Z_i)$ 为序列 $\{Z_i | i=1, 2, \dots, n\}$; R 为局部密度的窗口半径; r_{ij} 为样本间的距离, $r_{ij} = |Z_i - Z_j|$; 符号函数 $u(R - r_{ij})$ 为单位阶跃函数, 当 $R \geq r_{ij}$ 时, 函数值为 1; 当 $R < r_{ij}$ 时, 函数值为 0。

(3) 投影目标函数优化

最佳投影方向可以通过设定约束条件, 求解投影目标函数最大化问题来估计。

目标函数最大化见式(7)。

$$\text{Max} Q(a) = S_z D_z \quad (7)$$

约束条件见式(8)。

$$\sum_{j=1}^p a_j^2 = 1 \quad (8)$$

基于高维非线性系统的投影跟踪技术, 存在计算复杂度、优化精度过低和缺乏投影的最优解等问题。因此, 为了实现优化效果好、结果精度高、算法收敛速度快的目标, 引入人工鱼群算法搜索最优解。

(4) 计算投影值

以最佳投影方向向量为权重, 与相应评价指标标准化值相乘, 并将其积加和, 便可得到各样本点的综合投影值, 以投影值的大小作为评价的依据。

海洋渔业生态系统健康评价分级尚未形成统一标准, 本文并运用分位数的划分方法, 将投影寻踪模型测算的海洋渔业生态系统健康水平划分为风险级 (0.238 53, 0.742 6]、敏感级 (0.742 6, 1.068 15]、临界级 (1.068 15, 1.288 52] 和良好级 (1.288 52, 1.696 1] 4 个等级。

1.2.2 传统 Kernel 密度估计

传统 Kernel 密度估计作为一种非参数方法, 主要用于研究空间分布非均衡。该方法用连续密度曲线刻画随机变量的分布态势, 从而反映变量分布的位置、形态等信息^[23]。本文采用高斯核函数对投影寻踪模型测算的中国海洋渔业生态系统健康水平进行估计, 其计算公式如下。

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right) \quad (9)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (10)$$

式中, $f(x)$ 为随机变量的密度函数; N 为观测值个数; x_i 为独立同分布的观测值; $\bar{x}$ 为观测值均值; h 为带宽; $K(x)$ 为高斯核函数。

1.2.3 空间 Kernel 密度估计

空间 Kernel 密度估计方法在传统 Kernel 密度估计基础上加入空间因素, 可以估计样本期内随机变量发生变换的概率密度函数^[24], 以动态分布图像准确判断其变化规律, 从而揭示中国海洋渔业生态系统健康水平在一段时期后的长期转移趋势。在随机估计中, 本文仍选择高斯核函数进行计算, 具体公式如下。

$$g(y|x) = \frac{f(x, y)}{f(x)} \quad (11)$$

$$f(x, y) = \frac{1}{Nh_x h_y} \sum_{i=1}^N K_x\left(\frac{X_i - x}{h_x}\right) K_y\left(\frac{Y_i - y}{h_y}\right) \quad (12)$$

式中, $g(y|x)$ 表示在随机变量 x 的条件下随机

变量 y 的分布状态; $f(x)$ 是 x 的边际核密度函数; $f(x, y)$ 是 x 和 y 的联合核密度函数。

1.3 数据来源

本文涉及的指标数据主要来源于《近岸海域环境质量公报》《中国渔业统计年鉴》《中国海洋统计年鉴》《中国统计年鉴》《海域使用管理公报》《中国海洋生态环境状况公报》,以及沿海各地区统计年鉴,采用线性插值法或自回归滑动平均模型来补全矫正个别缺失和错误数据。因缺少相关数据,本文不涉及我国香港、澳门和台湾。

2 结果分析

2.1 中国海洋渔业生态系统健康水平的动态演进

将投影寻踪模型测算出的 2008—2021 年中国海洋渔业生态系统健康指数代入传统 Kernel 密度估计方法中,得到了中国海洋渔业生态系统健康水平及其各要素层评价结果的核密度估计结果,见图 1。其中, X 轴表示中国海洋渔业生态系统健康水平评

价值的分布区间, Y 轴表示研究年份, Z 轴表示概率分布。中国海洋渔业生态系统健康水平从分布位置看,在研究时间段内分布曲线中心持续右移,海洋渔业生态系统健康水平随时间的推移提升效果显著。2008 年海洋渔业生态系统健康水平处于风险级、敏感级、临界级、良好级的地区分别占比 18.2%、54.5%、18.2%、9%,中国海洋渔业生态系统健康水平等级主要集中在风险与敏感级别。2021 年海洋渔业生态系统健康水平处于风险级、敏感级、临界级、良好级的地区分别占比 18.2%、18.2%、18.2%、36.4%。海洋渔业生态系统健康水平敏感级与临界级等级地区逐步向更高水平转移。其各要素层中,海洋渔业生态系统活力分布曲线中心整体表现为较为明显的左移,海洋渔业生态系统组织分布曲线中心变化不明显,海洋渔业生态系统弹性水平分布曲线呈现较为明显的右移。

沿海地区开发和利用行为的不当引起了河道港湾的淤塞,降低了滩涂湿地的面积和传统渔业水域的数量。此外,全球气候变化、长期存在的过度捕

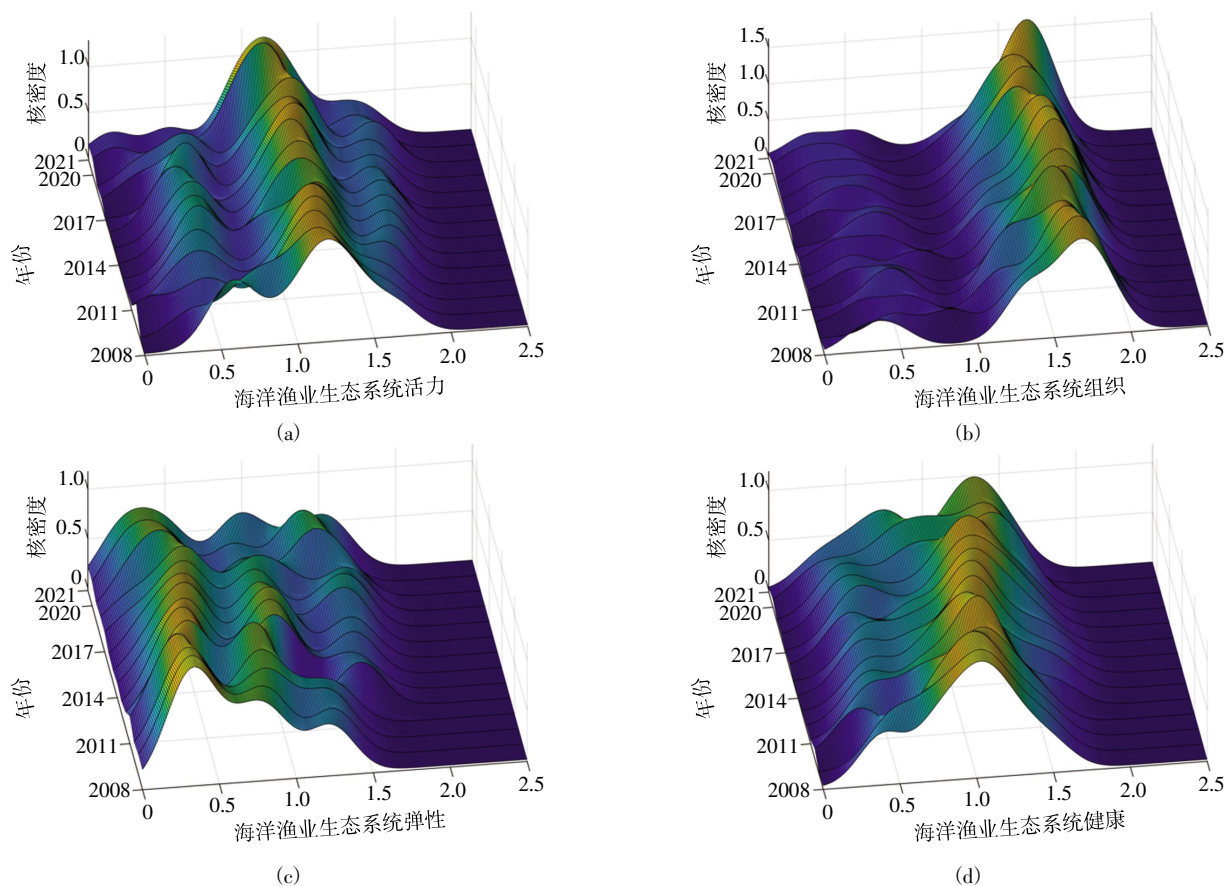


图 1 中国海洋渔业生态系统健康水平及各要素层评价水平三维核密度曲线

捞问题、非法捕猎与贸易及水域生态环境退化态势更是加重了这种压力,导致主要鱼类的产卵场遭受破坏,珍稀水生野生动物面临更大的生存威胁,进一步削弱了渔业资源的繁殖和恢复能力。由此,实现蓝色农业可持续发展的难度也随之增加。同时,由于渔业大宗品种的供应过剩和优质产品的供应不足,导致水产品出现了结构性问题。传统优质鱼种资源的急剧减少,使得鱼汛难以形成,供需矛盾愈加尖锐。部分水产品价格长期低迷或出现剧烈波动,海洋渔业生产成本持续攀升,而比较效益则在下降,这无疑加剧了渔民的生计困难。这种整体资源的枯竭和发展方式粗放,不平衡、不协调、不可持续问题对海洋渔业生态系统的活力产生了负面影响,从而制约了海洋渔业生态系统健康水平的提升。2011—2020年,海洋渔业在“十二五”和“十三五”这两个时期中取得了显著的发展,尤其是在渔业生态文明建设方面。持续加强对渔业重要生态区域的修复力度,不断推进人工鱼礁、国家级水产种质资源保护区、海洋牧场和国家级水生生物自然保护区建设。积极推动资源节约型和环境友好型渔业的发展,优化资源、环境和生产要素的配置,致力于构建渔业发展与资源环境之间的和谐关系,以实现渔业生态系统的健康和可持续发展。在海洋强国战略及“一带一路”倡议推动下,海洋渔业生产组织化和产业化水平不断提高,海洋渔业的国际竞争力逐步上升,同时也完善了海洋渔业科研创新、人才培养和水产技术推广体系,进一步强化了产学研的紧密结合,为海洋渔业的创新发展提供了强有力的支撑,使得海洋渔业生态系统更具弹性,在内外冲击下,能够吸收扰动“回弹”到生态系统的健康状态和路径,或通过对海洋渔业生态系统结构组件和运转模式进行塑性改变,以保持或恢复其核心性能或功能。海洋渔业生态系统弹性的变化拉动了海洋渔业生态系统健康水平的不断攀升。从分布形态与极化现象来看,各要素层中,海洋渔业生态系统活力和海洋渔业生态系统弹性分布曲线的形态变化导致了海洋渔业生态健康水平分布曲线的离散程度呈现一定程度扩大趋势,海洋渔业生态健康水平分布曲线主峰峰值整体在波动中降低,主峰宽度先缩小后扩大,总体有所扩大,其内部各地区海洋

渔业生态健康水平的绝对差异呈上升趋势,且极化现象存在加剧趋势。

2.2 中国海洋渔业生态系统健康水平的长期转移趋势

2.2.1 无条件 Kernel 密度估计

上述传统 Kernel 密度分析只能刻画海洋渔业生态系统健康水平的时序变化走势及地区间差异,并不能深刻反映其长期演化趋势。因此,运用无条件 Kernel 密度估计方法,在核密度图中, X 轴和 Y 轴表示海洋渔业生态系统健康水平, Z 轴表示 X - Y 平面内每个点的密度值(概率)。密度等高线图是核密度图的一种可视化方式,其中 X 轴和 Y 轴同样代表海洋渔业生态系统健康水平,而密度等高线则表示不同的密度值,通常情况下,位置越靠近中心的等高线密度值越高,等高线越密集,说明密度变化越大,对应的核密度图形也越陡峭。采用无条件 Kernel 密度估计方法能够反映区域中国海洋渔业生态系统健康水平分布从 t 年到 $t+3$ 年的内部动态性。当核密度图中的脊线与正对角线平行程度越吻合,说明从 t 到 $t+3$ 年海洋渔业生态健康水平分布的稳定性越强,海洋渔业生态健康水平整体上并无明显变动;反之,若概率主体集中在负 45° 对角线附近,则说明海洋渔业生态健康水平流动性越强,从 t 到 $t+3$ 年海洋渔业生态健康水平出现了较大转变。若概率主体集中在 Y 轴的某个刻度附近且平行于 X 轴,此时说明海洋渔业生态系统健康水平出现了收敛,无论在 t 年各地区的海洋渔业生态系统健康水平处于何种水平,在 $t+3$ 年都将处于同一生态健康水平。根据图2,中国海洋渔业生态系统健康水平的无条件 Kernel 密度估计概率主体沿正 45° 对角线分布,说明沿海各地区海洋渔业生态系统健康水平具有较强的稳定性与连续性,在3年的时间跨度内不易发生较大变动,海洋渔业生态系统健康水平实现跨越式等级跃迁的可能性较小。除此之外,概率主体存在4个波峰,包含两个主要波峰和两个次要波峰,分别分布于 X 轴0.3、1.5、0.7和1.1附近,海洋渔业生态系统健康水平存在向低水平和高水平“俱乐部收敛”的可能性。其中0.3位置的波峰略高于 45° 对角线,且大致平行于 $y=0.42$,1.5位置的波峰略低于 45° 对角线,说明在无条件假设下海洋渔业生态健康水平低于0.3的地区3年后生态健康

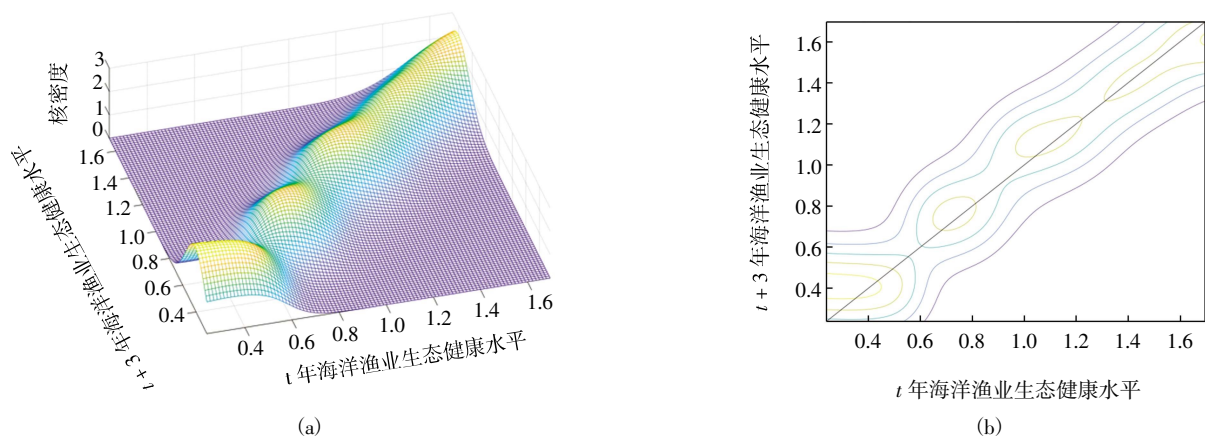


图2 中国海洋渔业生态系统健康水平无条件 Kernel 密度及密度等高线

水平倾向于集中在 0.4, 而高于 1.5 的地区则容易在 3 年后出现生态健康水平的下滑。

2.2.2 空间条件动态 Kernel 密度估计

海洋渔业生态系统健康水平的提升或下滑在空间上并不是孤立的, 而是与周围邻域相辅相成、切实关联的。空间条件下的动态 Kernel 密度估计具有同步分析空间和时间信息的优势, 考虑时间跨度情境下揭示相邻地区 t 年中国海洋渔业生态系统健康水平对本地区 $t+3$ 年中国海洋渔业生态系统健康水平的空间关联关系与动态影响。图 3 中, X 轴表示相邻地区 t 年的海洋渔业生态健康水平, Y 轴表示本地区 $t+3$ 年的海洋渔业生态系统健康水平, Z 轴表示 X 条件下 Y 的概率。若中国海洋渔业生态系统健康水平增长呈现地区收敛模式, 相邻近地区间海洋渔业生态系统健康水平存在正空间相关性, 即良好级地区与良好级地区集聚、风险级地区与风险级地区集聚, 则概率主体会分布在正 45° 对角线附近。从整体来看, 在 3 年滞后期条件下, 中国海

洋渔业生态系统健康水平在空间动态条件下的演进趋势呈现明显“断层”现象。当 X 轴小于 0.6, 处于低水平海洋渔业生态系统健康时, 概率密度主体较 45° 对角线明显向上偏离, 集中于 Y 轴 0.9~1.3, 说明与 0.6 以下风险级生态系统健康水平相邻的地区倾向于低水平, 但并不会显著影响本地区海洋渔业生态系统健康水平的提升; 当相邻地区的海洋渔业生态系统健康水平处于 1.2~1.4 时, 概率主体大致分布在正 45° 对角线附近, 此时海洋渔业生态系统健康水平呈现一定程度的正空间相关性, 相邻地区通过技术、劳动力和资本等要素的流动溢出, 不仅可以提高资源利用效率, 减少环境影响, 还可以加强合作, 共同应对海洋渔业所面临的挑战, 以及海洋渔业生态系统健康水平的协同提升。当相邻地区的海洋渔业生态系统健康水平达到 1.4 以上, 处于高海洋渔业生态系统健康水平时, 概率密度主体较 45° 对角线向下偏移, 这意味着与高水平的相邻地区倾向高水平, 但当海洋渔业生态系统健康水平

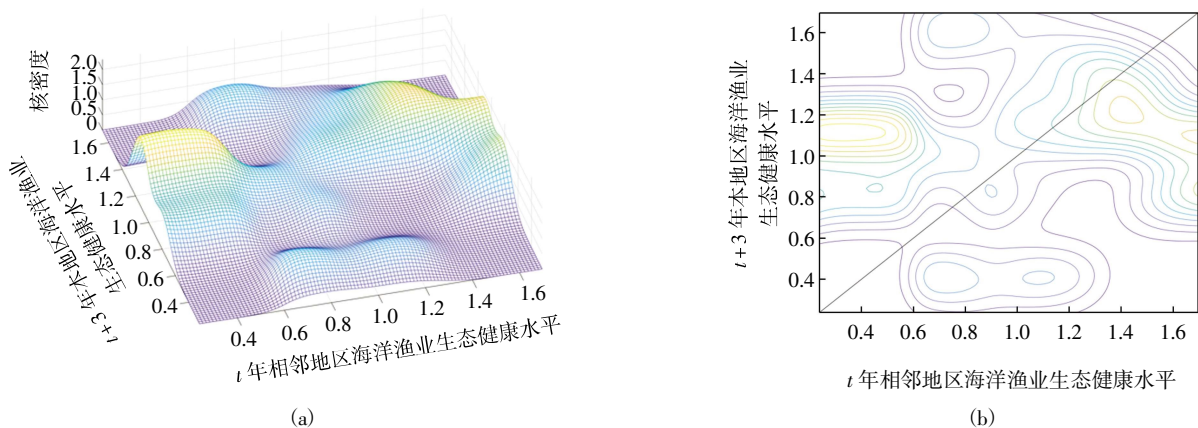


图3 中国海洋渔业生态系统健康水平空间条件动态 Kernel 密度及密度等高线

提高到一定程度后,即使与高水平地区相邻,其海洋渔业生态系统健康水平也不会进一步提高,反而有大概率向下转变的趋势。

3 结 论

本文基于中国海洋渔业生态系统健康评价指标体系,考察2008—2021年中国沿海11个省、市和自治区的海洋渔业生态系统健康及各子系统发展水平,借助传统与空间Kernel密度估计方法分析中国海洋渔业生态系统健康水平的分布动态演进和长期转移趋势。研究表明:①在研究时间段内,海洋渔业生态系统健康水平随时间的推移提升效果显著,各地区海洋渔业生态健康水平的绝对差异呈上升趋势,且极化现象存在加剧趋势。从各要素层分布曲线来看,海洋渔业生态系统活力的下滑制约了海洋渔业生态系统健康水平的提升。而在适应性循环下,海洋渔业生态系统弹性增强,在短期冲击与长期扰动下能够“回弹”到健康状态和路径,或通过海洋渔业生态系统结构组件和运转模式进行塑性改变,保持或恢复生态系统的某些核心性能与功能,以此拉动海洋渔业生态系统健康水平的不断攀升;②不考虑空间因素条件下,沿海各地区海洋渔业生态系统健康水平具有较强的稳定性与连续性,在3年的时间跨度内不易发生较大变动,海洋渔业生态系统健康水平实现跨越式等级跃迁的可能性较小,且存在向低水平和高水平“俱乐部收敛”的可能性。考虑空间因素条件下,地理背景在海洋渔业生态系统健康水平演变过程中发挥重要作用。处于1.2~1.4的临界级与良好级的相邻地区间存在趋同性,而处于0.6以下风险级与1.4以上的良好级的地区不易与相邻地区发生空间关联作用。

以上结论对协同推进中国海洋渔业生态系统健康水平提升具有重要的政策启示:第一,针对海洋渔业生态系统的活力不足制约海洋渔业生态系统健

康水平提升的问题,应夯实海洋渔业生产基础,坚持把保障水产品供给作为海洋渔业发展第一要务。科学拓展用海空间,合理确定和分配海域资源使用权,优化海域承载力与生产力布局,规范有序发展可持续捕捞业、养殖业及远洋渔业。深化供给侧结构性改革,利用国际国内两个市场,提升水产品供给体系适配性,满足对个性化、差异化、品质化的水产品消费需求。强化对海洋环境和沿海生态系统的管理,完善对水生生物资源及其栖息地的养护,支持渔业部门获得金融服务及投资,帮助渔民获取海洋资源、市场准入和技术推广,恢复关键沿海生境、生物多样性和生态系统服务。第二,海洋渔业生态系统健康水平的提升是存在于空间和时间尺度上的全局性、周期性、发展性的完善过程。根据无条件Kernel密度估计及空间条件动态Kernel密度估计的分析结果,中国海洋渔业生态系统健康水平存在流动性差、连续性强等问题,高低各自聚集的“俱乐部收敛”现象印证各地区海洋渔业生态系统健康状态的维护提升相对孤立,高水平地区辐射带动能力较差。应重视不同地理格局下海洋渔业生态系统健康提升的空间联动,构筑多核心、多辐射的海洋渔业生态系统治理扁平网络,打破现有的区域性壁垒和要素流动藩篱。海洋渔业生态系统健康高水平地区应与其他地区良好对接,如北部、东部海洋圈的辽宁省、河北省应当积极与其接壤的山东省建立沿海环境治理统筹合作机制与海洋生态环境安全屏障,搭乘其海洋渔业经济发展和产业创新转型的高速列车,探寻海洋渔业经济增长与环境友好、资源节约之间协调发展的均衡点。广东省作为南部海洋圈海洋渔业产业发展的领头羊,应积极带动广西省、海南省,并将其融入整体海洋绿色可持续发展战略。从而弱化海洋渔业生态系统健康水平发展极化趋势,促进区域间海洋渔业生态系统健康水平的协同提升。

参考文献:

- [1] BAN N C, ALIDINA H M, ARDRON J A. Cumulative impact mapping: Advances-relevance and limitations to marine management and conservation, using Canada's Pacific waters as a case study[J]. *Marine Policy*, 2010, 34(5): 876-886.
- [2] PIGGOTT J J, TOWNSEND C R, MATTHAEI C D. Reconceptualizing synergism and antagonism among multiple stressors[J]. *Ecology and evolution*, 2015, 5(7): 1538-1547.
- [3] NÖGES P, ARGILLIER C, BORJA Á, et al. Quantified biotic and abiotic responses to multiple stress in freshwater, marine and ground waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 43-52.
- [4] RAPPORT D J. What constitutes ecosystem health?[J]. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33(1): 120-132.
- [5] COSTANZA R, NORTON B G, HASKELL B D. Ecosystem health: New goals for environmental management[M]. Washington D C: Island Press, 1992.
- [6] 周彬, 钟林生, 陈田, 等. 舟山群岛旅游生态健康动态评价[J]. *地理研究*, 2015, 34(2): 306-318.
- [7] 酆天昶, 彭建, 刘焱序, 等. 基于集对分析的区域生态文化健康评价: 以云南省大理白族自治州为例[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(10): 1270-1280.
- [8] 袁兴中, 刘红, 陆健健. 生态系统健康评价: 概念构架与指标选择[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 627-629.
- [9] KAINGE P, KIRKMAN S P, ESTEVÃO V, et al. Fisheries yields, climate change, and ecosystem-based management of the benguela current large marine ecosystem[J]. *Environmental Development*, 2020, 36: 100567.
- [10] 孙鹏飞. 莱州湾及黄河口水域渔业资源结构特征与渔业生态系统健康评价的初步分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [11] CASTRO-CADENAS M D, LOISEAU C, REIMER J M, et al. Tracking changes in social-ecological systems along environmental disturbances with the ocean health index[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 841: 156423.
- [12] DE JUAN S, SUBIDA M D, GELCICH S, et al. Ecosystem health in coastal areas targeted by small-scale artisanal fisheries: Insights on monitoring and assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 361-371.
- [13] DE CARVALHO-SOUZA G F, TORRES M Á, FARIAS C, et al. International politics must be considered together with climate and fisheries regulation as a driver of marine ecosystems[J]. *Global Environmental Change*, 2021, 69: 102288.
- [14] 贾晓平, 李纯厚, 甘居利, 等. 南海北部海域渔业生态环境健康状况诊断与质量评价[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(6): 91-99.
- [15] QUIROS T E A L, SUDO K, RAMILO R V, et al. Blue carbon ecosystem services through a vulnerability lens: Opportunities to reduce social vulnerability in fishing communities[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8(3): 671753.
- [16] CASTRO-CADENAS M D, LOISEAU C, REIMER J M, et al. Tracking changes in social-ecological systems along environmental disturbances with the ocean health index[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 841: 156423.
- [17] 李博, 金校名, 杨俊, 等. 中国海洋渔业产业生态系统脆弱性时空演化及影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4273-4283.
- [18] HERNÁNDEZ-BLANCO M, COSTANZA R, CHEN H, et al. Ecosystem health, ecosystem services, and the well-being of humans and the rest of nature[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(17): 5027-5040.
- [19] RAPPORT D J, COSTANZA R, MCMICHAEL A J. Assessing ecosystem health[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397-402.
- [20] 刘芳锐, 张正栋, 王欣怡, 等. 粤港澳大湾区生态系统健康时空变化及其对城镇化的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2594-2604.
- [21] FRIEDMAN J H, STUETZLE W. Projection pursuit regression[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1981, 76(376): 817-823.
- [22] 邓楚雄, 谢炳庚, 李晓青, 等. 基于投影寻踪法的长株潭城市群地区耕地集约利用评价[J]. *地理研究*, 2013, 32(11): 2000-2008.
- [23] 陈明华, 王哲, 谢琳霄, 等. 中国中部地区高质量发展的时空演变及形成机理[J]. *地理学报*, 2023, 78(4): 859-876.
- [24] 李国平, 陈晓玲. 中国省区经济增长空间分布动态[J]. *地理学报*, 2007, 62(10): 1051-1062.

Health Assessment and Dynamic Evolution of Marine Fisheries Ecosystems in China

GAO Yuan, YU Miao

(School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: This article constructs an evaluation index system based on the basic logic and scientific connotation of ecosystem health, measures the health of marine fishery ecosystems and the levels of various element layers in 11 coastal provinces, cities, and autonomous regions of China from 2008 to 2021, and analyzes the distribution dynamic evolution and long-term transfer trends of China's marine fishery ecosystem health level using traditional and spatial Kernel density estimation methods. The study found that: in terms of the dynamic evolution characteristics, China's marine fishery ecosystem health level over time to improve the effect of significant, the absolute differences in the level of marine fishery ecosystem health of the various regions within the upward trend, and the polarisation phenomenon there is a tendency to aggravate. From the distribution curve of Element layer, the decline of marine fishery ecosystem vitality constrains the enhancement of marine fishery ecosystem health level; the change of marine fishery ecosystem resilience pulls the rising of marine fishery ecosystem health level. In terms of long-term transfer trend, without considering spatial factors, the health level of marine fishery ecosystems in coastal regions has strong stability and continuity, and it is less likely to achieve a leap in level within a three-year time span, and there is a possibility of "club convergence" to low and high levels. Considering the spatial factors, the evolution trend of the health level of China's marine fisheries ecosystem under the spatial dynamic conditions shows the phenomenon of "fault". Convergence exists between neighbouring areas at the critical level of 1.2–1.4 and the good level, while areas at the risk level of less than 0.6 and the good level of more than 1.4 are less likely to be spatially correlated with neighbouring areas.

Key words: marine fisheries; ecosystem health; projective tracer models; Kernel density estimation