

东太平洋延绳钓渔业兼捕鲨鱼物种的生态风险评估

李 娜¹, 林琴琴¹, 朱江峰^{1,2,3}

1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306

3. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306

摘要: 东太平洋是全球金枪鱼渔业的主要作业海域, 其延绳钓渔业对兼捕鲨鱼种群的影响一直受到国际社会的高度关注。基于生产力-易损性分析 (Productivity-susceptibility analysis, PSA) 方法, 对东太平洋延绳钓渔业兼捕的 8 种鲨鱼进行生态风险评估, 并对 PSA 所采用的属性进行敏感性分析。结果显示: 鲨鱼种群的生产力指数介于 1.40~2.20, 最高为黑边鳍真鲨 (*Carcharhinus limbatus*); 易损性指数介于 2.17~2.83, 最高为尖吻鲭鲨 (*Isurus oxyrinchus*); 脆弱性分数介于 1.55~2.31, 最高为大眼长尾鲨 (*Alopias superciliosus*)。生态风险评估表明, 长鳍真鲨 (*C. longimanus*)、尖吻鲭鲨和大眼长尾鲨处于高风险状态, 黑边鳍真鲨、镰状真鲨 (*C. falciformis*)、大青鲨 (*Prionace glauca*)、长鳍鲭鲨 (*I. paucus*) 和路氏双髻鲨 (*Sphyrna lewini*) 处于中风险状态。此外, 敏感性分析结果显示, 繁殖策略、种群水平重叠度和集群行为这 3 个属性对种群脆弱性评价结果影响最大, 其移除后的均方根误差值 (Root mean squared error, RMSE) 分别为 0.210 1、0.128 8 和 0.090 1。综上, 长鳍真鲨、尖吻鲭鲨和大眼长尾鲨为东太平洋海域需优先关注的物种, 建议加强数据收集、种群评估及管理措施, 以降低渔业活动对其种群的影响。

关键词: 鲨鱼; 脆弱性; 生态风险; 延绳钓; 东太平洋

中图分类号: S 937

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Ecological risk assessment of shark bycatch in longline fisheries in Eastern Pacific Ocean

LI Na¹, LIN Qinqin¹, ZHU Jiangfeng^{1,2,3}

1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China

Abstract: The Eastern Pacific Ocean (EPO) is the main operating area for global tuna fisheries, and the impact of tuna fishing in EPO on bycatch shark populations has always been highly concerned by the international community. Based on the productivity vulnerability analysis (PSA), we conducted an ecological risk assessment on eight shark species caught in the East Pacific longline fishing industry, and performed a sensitivity analysis on the attributes used in PSA. The results show that the productivity index ranged from 1.40 to 2.20, the highest being blacktip shark (*Carcharhinus limbatus*). The susceptibility index ranged from 2.17 to 2.83, the highest being shortfin mako shark (*Isurus oxyrinchus*). The vulnerability score ranged from 1.55 to 2.31, the highest being bigeye thresher shark (*Alopias superciliosus*). Ecological risk assessments indicate that oceanic whitetip

收稿日期: 2025-03-06; 修回日期: 2025-04-15

基金项目: 国家重点研发计划大洋性重要渔业物种的资源养护技术研发 (2024YFD2400604)

作者简介: 李 娜 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为大洋渔业生态学。E-mail: 2413264197@qq.com

通信作者: 林琴琴 (1992—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为大洋渔业生态学。E-mail: qqlin@shou.edu.cn

朱江峰 (1978—), 男, 教授, 博士, 研究方向为渔业资源评估与管理。E-mail: jfzhu@shou.edu.cn

shark (*C. longimanus*), shortfin mako shark and bigeye thresher shark were at a high risk, while blacktip shark, silky shark (*C. falciformis*), blue shark (*Prionace glauca*), longfin mako (*I. paucus*) and scalloped hammerhead (*Sphyrna lewini*) were at a medium risk. The results of sensitivity analysis indicate that reproductive strategy, areal overlap and aggregation behavior had the greatest influences on the species vulnerability scores, with Root Mean Squared Error (RMSE) values being 0.210 1, 0.128 8 and 0.090 1, respectively. To sum up, *C. longimanus*, *I. oxyrinchus* and *A. superciliosus* are the priority species in the EPO for further data collection, assessment and management, so as to reduce the impact of fishing activities on their population.

Keywords: Shark; Vulnerability; Ecological risk; Longline; Eastern Pacific Ocean

东太平洋 (Eastern Pacific Ocean, EPO) 海域渔业资源丰富, 是世界上最重要的金枪鱼渔场之一。金枪鱼渔业的大规模捕捞活动不仅捕获目标物种, 还兼捕许多其他物种, 这对大洋生态系统结构和生产力造成了显著影响^[1-2]。鲨鱼是金枪鱼渔业中常见的兼捕物种, 也是海洋生态系统的重要组成部分。在金枪鱼延绳钓渔业中, 由于捕捞方法、渔具设计、鲨鱼的觅食行为与目标鱼种的栖息区域重叠等因素的相互作用, 鲨鱼兼捕现象难以避免。近年来, 金枪鱼渔业对鲨鱼种群的影响已引起国际社会的高度重视^[3]。因此, 评估不同鲨鱼种类受延绳钓渔业的影响程度, 对于制定有效的鲨鱼种群保护和管理措施至关重要。

在过去几十年里, 全球各大渔业组织逐步扩大了管理范围, 将渔业对非目标物种和更广泛的生态系统影响纳入管理中^[4-5]。生态风险评估 (Ecological risk assessment, ERA) 是一种可以有效利用现有数据来评估渔业可持续性的方法, 特别是对于数据缺乏的渔业。ERA 的理论框架基于生态系统的渔业管理 (Ecosystem-based fisheries management, EBFM) 理念, 它涵盖了 3 种不同复杂程度的方法: 定性方法、半定量的生产力-易损性分析 (Productivity-susceptibility analysis, PSA) 方法和定量的空间评估模型 (Sustainability assessment for fishing effects, SAFE)^[6-8]。其中, PSA 因其能够灵活利用各类数据, 快速生成物种脆弱性分数, 且操作难度较低等优势, 在全球各区域渔业管理组织和学者中得到了广泛应用^[9-11]。Kirby^[12] 采用 PSA 评估了中西太平洋金枪鱼渔业中海龟、海鸟和海洋哺乳动物的脆弱性; 美洲热带金枪鱼委员会 (Inter-American Tropical Tuna Commission, IATTC) 秘书处利用 PSA 初步评估了东太平洋海域延绳钓渔业对兼捕物种的影响^[13], 并指出该区域数据收集方面存在不足。类似的研究在大西洋^[14]和印度洋海域^[15]亦有开展, PSA 被用于分析不同渔具类型对金枪鱼渔业中兼获

物种的影响。朱江峰等^[16]应用 PSA 对热带太平洋 10 种大洋性鲨鱼进行风险评估, 但未对物种风险等级进行划分。目前, 尚未见 PSA 应用于东太平洋鲨鱼物种的进一步评估研究。

近年来, 远洋渔业中主要兼捕鲨鱼种类不断被列入濒危野生动植物种国际贸易公约 (Convention on International Trade in Endangered Species, CITES) 附录, 且科学充分利用兼捕鲨鱼是国际通用做法, 也是区域渔业管理组织 (Regional Fisheries Management Organization, RFMO) 鲨鱼养护管理措施的要求。但由于兼捕鲨鱼缺乏长期详细的渔业统计数据, 难以运用标准的资源评估方法进行种群动态监测^[17-18]。因此, 本研究基于 PSA 对东太平洋近 10 年延绳钓渔业兼捕的 8 种鲨鱼进行风险评估, 旨在分析延绳钓渔业对不同鲨鱼物种的捕捞影响, 确定需优先加强数据收集和评估的物种及其风险等级, 为远洋渔业管理及减少鲨鱼兼捕提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究区域为东太平洋延绳钓渔业渔船作业区域 (150°W—70°W、40°N—40°S, 图 1), 研究对象为 8 种常见的鲨鱼物种, 按分类排序依次为尖吻鲭鲨 (*Isurus oxyrinchus*)、长鳍鲭鲨 (*I. paucus*)、大眼长尾鲨 (*Alopias superciliosus*)、镰状真鲨 (*Carcharhinus falciformis*)、长鳍真鲨 (*C. longimanus*)、黑边鳍真鲨 (*C. limbatus*)、大青鲨 (*Prionace glauca*)、路氏双髻鲨 (*Sphyrna lewini*)。延绳钓渔业数据和兼捕鲨鱼的数据均来源于 IATTC 公开数据库, 其中总捕捞努力量用钩数表示, 时间跨度为 2014—2023 年, 空间分辨率为 5°×5°。

1.2 生产力和易损性指数

PSA 评估物种需要设定生产力和易损性指数来计算脆弱性分数。其中, 脆弱性为种群生产力因直接和间接捕捞压力而减少的可能性; 种群生产力是

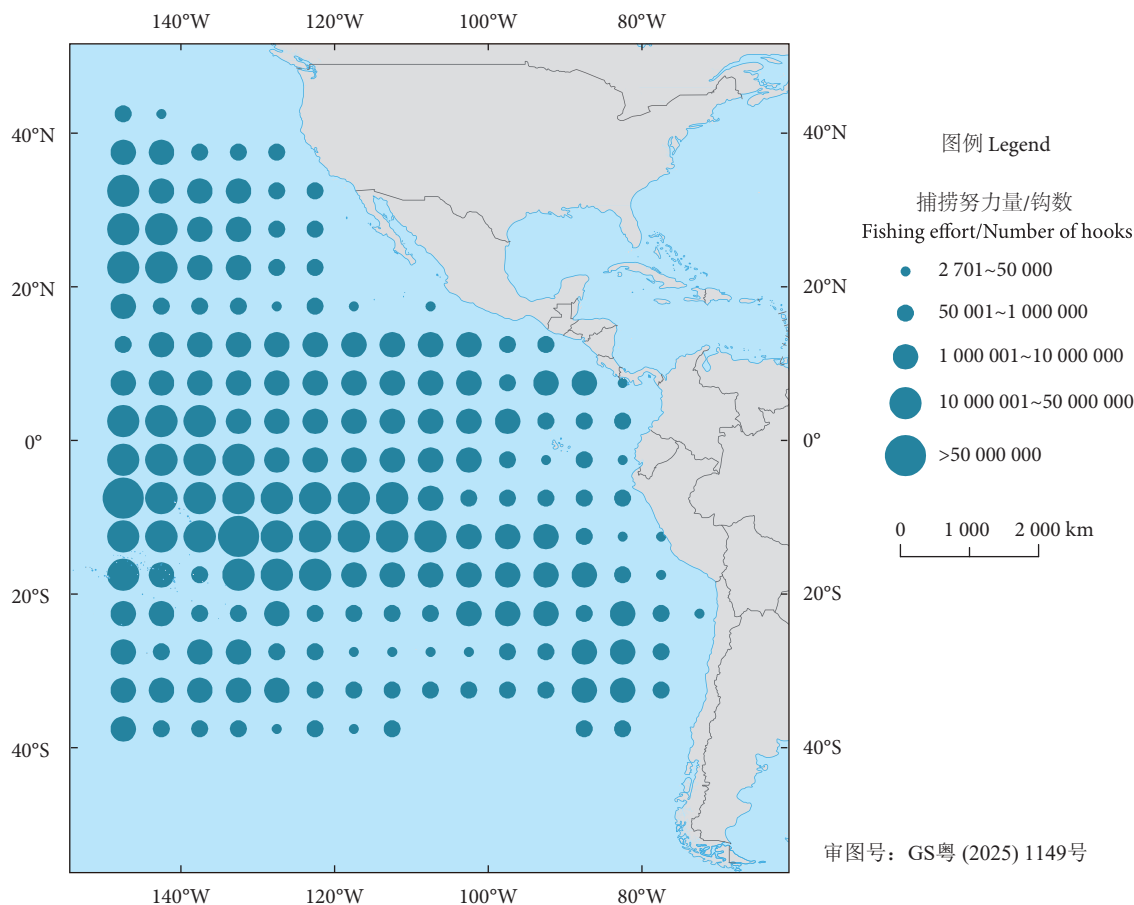


图1 2014—2023 年东太平洋金枪鱼延绳钓渔业总捕捞努力量分布

Fig. 1 Distribution of total fishing effort in tuna longline fishery in Eastern Pacific Ocean during 2014–2023

指种群在受渔业影响后的恢复能力，与物种生活史相关；种群易损性是指渔业受捕捞影响的程度，即物种由渔业捕获并导致死亡的倾向^[19-20]。

生产力指数通过最大体长、生长系数、繁殖力、繁殖策略和成熟年龄 5 个属性进行评分(表 1)，这些基本生物学信息来自全球海洋生物信息网(www.sealifebase.org)。最大体长可以作为相对恢复率的指数，较大的物种通常寿命长，生长缓慢，种群数量减少时恢复率比寿命短的物种低^[21]。生长系数为物种趋近极限体长或体质量的平均速率。一个物种的生长系数值越高(>0.3)，通常表明

该物种的种群生产力高，在受捕捞影响后可以更快地恢复。繁殖力是指物种每年产生的可存活的后代或卵母细胞的总数，每年产生数千个卵母细胞的物种比产生少量后代的物种具有更大的潜力，新生后代可以持续补充到种群中，使种群数量能迅速从捕捞影响中恢复过来。繁殖策略表示物种产生和投入哺育后代早期生活阶段所需要的时间，高频繁殖并将大量时间用于哺育后代的物种比低频产卵的物种具有更高的恢复能力。物种达到成熟年龄的时间长短，可以很好地体现其从捕捞造成的资源衰退中恢复的能力。一般来说，需要多年繁殖的物种生长缓

表1 东太平洋延绳钓渔业计算生产力指数使用的属性和评分标准

Table 1 Attributes and scoring criteria for productivity indexes of longline fishery in Eastern Pacific Ocean

生产力 Productivity	低 (1 分) Low (1 point)	中 (2 分) Moderate (2 points)	高 (3 分) High (3 points)
最大体长 Maximum size/cm	>350	>200, ≤350	≤200
生长系数 VB growth coefficient	<0.1	0.1~0.3	>0.3
繁殖力 Fecundity	<10	10~200 000	>200 000
繁殖策略 Reproductive strategy	≥4	1~3	0
成熟年龄 Age at first maturity	≥7.0	≥2.7, <7.0	<2.7

慢,寿命长,这意味着即使是适度的捕捞死亡率也可能对种群数量产生较大影响。

易损性指数通过种群水平重叠度、物种的季节性分布、集群行为、物种分布深度与渔具重叠程度、渔具选择性和物种释放后成活率 6 个属性进行评分(表 2)。种群水平折叠度是物种分布与该区域捕捞努力量在地理上的重叠程度,若捕捞努力量仅与该物种分布的一小部分重叠,则不管渔具对该物种的捕获效率如何,该物种的易损性都很低。捕捞努力量用钩数来表示,重叠程度由物种在高捕捞努力量区域的出现次数来决定。部分物种可能存在季节性洄游,但由于东太平洋区域广泛,本研究中的物种在一年中均可以被捕获,因此均赋予 3 分。集群行为分反应物种聚集程度,鲨鱼在大多数时间内

单独活动,但在觅食、繁殖或季节性迁徙等特定生态条件下,会表现出临时性的群体聚集行为,这增大了被渔具捕获的概率。物种分布深度与渔具重叠程度是指物种在垂直水平上与渔具范围之间的重叠率,对物种被捕获概率有较大影响。渔具选择性表示物种与渔具相遇时被捕获的可能性,饵料对鲨鱼的吸引程度以及鲨鱼吻部的大小均影响鲨鱼上钩的可能性,较小的物种和较大物种的幼鱼被钩住的可能性较低。物种释放后成活率取决于物种经济价值、钩住时压力、释放过程中压力和器官损伤等因素,成活率较高则证明该渔业对种群影响较小。由于物种成活率存在较多不确定因素,且相关研究较缺乏,因此,本研究采用 IATTC 报告中已有的研究数据^[22]。

表2 东太平洋延绳钓渔业计算易损性指数使用的属性和评分标准
Table 2 Attributes and scoring criteria for susceptibility indexes of longline fishery in Eastern Pacific Ocean

易损性 Susceptibility	低 (1 分) Low (1 point)	中 (2 分) Moderate (2 points)	高 (3 分) High (3 points)
种群水平重叠度 Areal overlap	重叠数<2	重叠数 2~3	重叠数>3
物种的季节性分布 Seasonal availability	<3 个月	3~6 个月	>6 个月
集群行为 Aggregation behavior	独居物种	部分集群	喜集群物种
物种分布深度与渔具重叠程度 Encounterability/%	<25	25~50	>50
渔具选择性 Gear selectivity/%	<25	25~50	>50
物种释放后成活率 Post-capture survival/%	>67	33~67	<33

每个属性的评分标准为 1~3,获得低生产力分数(1 分)和高易损性分数(3 分)的种群被认为是处于高风险,反之则是处于低风险。11 个属性被赋予相同的权重,分别平均加权得到每个鲨鱼物种的生产力和易损性指数,然后通过下式得出各物种整体脆弱性^[23]:

$$v=\sqrt{(p-3)^2+(s-1)^2}$$
 (1)

式中: p 为生产力指数; s 为易损性指数; v 为脆弱性分数。脆弱性分数为 <1、1~2 和 >2 的物种分别被归类为低风险、中风险和高风险物种^[13]。

1.3 敏感性分析

确定 8 种鲨鱼的脆弱性分数后,对其所用属性进行敏感性分析,以确定生产力和易损性指数中各属性对物种脆弱性的相对影响,通过下式计算每个属性移除后的均方根误差公式(Root mean squared error, RMSE)^[24]:

$$RMSE_j=\sqrt{\frac{\sum (v_{ij}-v_i)^2}{n_j}}$$
 (2)

式中: i 表示物种; j 表示不同属性; n_j 为属性 j 的数量; v_{ij} 为排除属性 j 时物种 i 的脆弱性分数; v_i 为包括所有属性时物种 i 的脆弱性分数; $v_{ij}-v_i$ 表示移除某一属性后的相对误差^[25]。RMSE 值越高的属性表明其对物种脆弱性分数的影响越大。分析每个属性的影响程度,有助于确定导致风险值差异的主要因素。

此外,在均方根误差公式计算中,可以得出每个鲨鱼物种在分别排除某一属性时的脆弱性分数,将脆弱性分数的上限值和下限值与全属性下的脆弱性分数进行对比,分析每个物种风险等级的差异,来判断 PSA 的准确性。以上敏感性分析可为确定有效减轻渔业影响的管理措施提供有益参考。

以上分析均在 Rstudio 4.3.1 和 Excel 2019 软件中进行。

2 结果

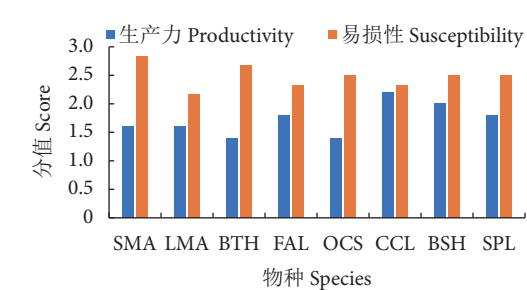
2.1 物种生产力和易损性指数得分

东太平洋 8 种鲨鱼的生产力和易损性各属性得

分见表 3, 生产力和易损性指数计算所得分值见图 2。8 种鲨鱼的生产力指数得分介于 1.40~2.20, 平均为 1.73, 由低到高依次为大眼长尾鲨、长鳍真鲨、尖吻鲭鲨、长鳍鲭鲨、镰状真鲨、路氏双髻鲨、大青鲨、黑边鳍真鲨。易损性指数得分介于 2.17~2.83, 平均为 2.48, 由低到高依次为长鳍鲭鲨、镰状真鲨、黑边鳍真鲨、大青鲨、路氏双髻鲨、长鳍真鲨、大眼长尾鲨、尖吻鲭鲨。

表3 东太平洋兼捕鲨鱼物种的生产力和易损性指数各属性得分
Table 3 Scores of attributes of productivity and susceptibility indexes of bycatch shark species in Eastern Pacific Ocean

生产力 Productivity	尖吻鲭鲨 <i>I. oxyrinchus</i>	长鳍鲭鲨 <i>I. paucus</i>	大眼长尾鲨 <i>A. superciliosus</i>	镰状真鲨 <i>C. falciformis</i>	长鳍真鲨 <i>C. longimanus</i>	黑边鳍真鲨 <i>C. limbatus</i>	大青鲨 <i>P. glauca</i>	路氏双髻鲨 <i>S. lewini</i>
最大体长 Maximum size	1	1	1	2	1	2	1	1
生长系数 VB growth coefficient	1	1	1	1	1	2	2	1
繁殖力 Fecundity	1	1	1	1	1	1	2	2
繁殖策略 Reproductive strategy	3	3	3	3	3	3	3	3
成熟年龄 Age at first maturity	2	2	1	2	1	3	2	2
易损性 Susceptibility								
种群水平重叠度 Areal overlap	3	2	3	1	1	1	2	2
物种的季节性分布 Seasonal availability	3	3	3	3	3	3	3	3
集群行为 Aggregation behavior	2	1	2	2	2	2	2	2
物种分布深度与渔具重叠程度 Encounterability	3	2	2	3	3	3	3	3
渔具选择性 Gear selectivity	3	2	3	2	3	2	3	3
物种释放后成活率 Post-capture mortality	3	3	3	3	3	3	2	2



SMA. 尖吻鲭鲨; LMA. 长鳍鲭鲨; BTH. 大眼长尾鲨; FAL. 镰状真鲨; OCS. 长鳍真鲨; CCL. 黑边鳍真鲨; BSH. 大青鲨; SPL. 路氏双髻鲨。
SMA. Shortfin mako shark (*I. oxyrinchus*); LMA. Longfin mako (*I. paucus*); BTH. Bigeye thresher shark (*A. superciliosus*); FAL. Silky shark (*C. falciformis*); OCS. Oceanic whitetip shark (*C. longimanus*); CCL. Blacktip shark (*C. limbatus*); BSH. Blue shark (*P. glauca*); SPL. Scalloped hammerhead (*S. lewini*).

图2 各鲨鱼物种生产力和易损性得分

Fig. 2 Productivity and susceptibility scores for shark species

2.2 物种脆弱性比较

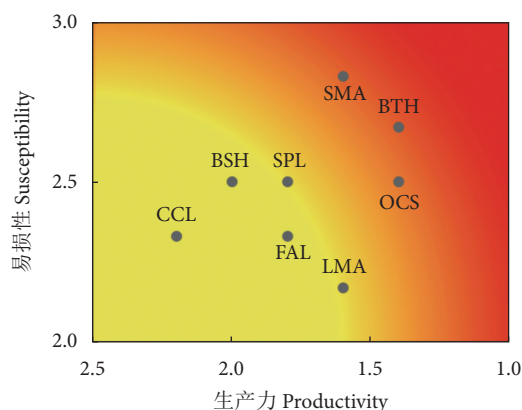
脆弱性分数和风险级别见表 4, PSA 风险指数分布见图 3。根据脆弱性分数为 <1、1~2 和 >2 的物种分别被归类为低风险、中风险和高风险物种原则, 在本研究的 8 种鲨鱼中, 5 个物种被归类为中风险, 3 个物种被归类为高风险。生产力指数低而

易损性指数高的鲨鱼, 受到渔业捕捞影响较大; 反之, 则被认定受到渔业捕捞影响较小。因此, 图 3 中离原点越远的物种, 具有更大的过度捕捞风险。脆弱性分数更直接地展示各鲨鱼物种受延绳钓渔业影响的程度。大眼长尾鲨的脆弱性分数最高 (2.31), 表示东太平洋大眼长尾鲨种群最易受延绳钓渔业的影响而发生种群衰退。尖吻鲭鲨和长鳍真

表4 东太平洋兼捕鲨鱼物种脆弱性分数和风险级别
Table 4 Species vulnerability scores and risk category of bycatch sharks in Eastern Pacific Ocean

物种名 Species name	脆弱性分数 Vulnerability	风险级别 Risk category
尖吻鲭鲨 <i>I. oxyrinchus</i>	2.30	高
长鳍鲭鲨 <i>I. paucus</i>	1.82	中
大眼长尾鲨 <i>A. superciliosus</i>	2.31	高
镰状真鲨 <i>C. falciformis</i>	1.79	中
长鳍真鲨 <i>C. longimanus</i>	2.19	高
黑边鳍真鲨 <i>C. limbatus</i>	1.55	中
大青鲨 <i>P. glauca</i>	1.80	中
路氏双髻鲨 <i>S. lewini</i>	1.92	中

鲨脆弱性分数均大于 2，风险级别较高。



SMA. 尖吻鲛鲨; LMA. 长鳍鲛鲨; BTH. 大眼长尾鲨; FAL. 镰状真鲨; OCS. 长鳍真鲨; CCL. 黑边鳍真鲨; BSH. 大青鲨; SPL. 路氏双髻鲨。
SMA. Shortfin mako shark (*I. oxyrinchus*); LMA. Longfin mako (*I. paucus*); BTH. Bigeye thresher shark (*A. superciliosus*); FAL. Silky shark (*C. falciformis*); OCS. Oceanic whitetip shark (*C. longimanus*); CCL. Blacktip shark (*C. limbatus*); BSH. Blue shark (*P. glauca*); SPL. Scalloped hammerhead (*S. lewini*).

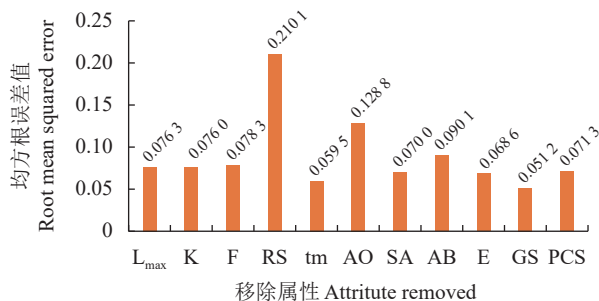
图3 东太平洋 8 种鲨鱼物种的 PSA 风险指数分布

Fig. 3 Risk index distribution for productivity-susceptibility analysis of eight shark species in Eastern Pacific Ocean

2.3 敏感性分析结果

敏感性分析结果见图 4。在敏感性分析中，分别移除 11 个属性以分析物种各属性对脆弱性分数的影响程度，RMSE 值越高的属性表明其对物种脆弱性分数的影响越大。结果表明，繁殖策略、种群水平折叠度和集群行为对物种脆弱性分数影响最大，RMSE 值分别为 0.210 1、0.128 8 和 0.090 1。移除渔具选择性属性时 RMSE 值最小 (0.051 2)，表明渔具选择性对物种脆弱性分数影响最小。

此外，分别移除 11 个属性时得出脆弱性分数的上限值和下限值 (图 5)，各鲨鱼物种差值介于 0.243 1~0.393 0，其中差值最大的为长鳍鲛鲨，最小的为黑边鳍真鲨。在全属性下，长鳍鲛鲨、镰状真鲨和路氏双髻鲨的 PSA 风险等级判定为中风险，分别去除单个属性后，其脆弱性分数的上限值属于高风险 (分别为 2.105 1、2.002 7 和 2.121 3)。而在全属性下判断为中风险的黑边鳍真鲨，其 PSA 风险指数的下限值属于低风险 (1.420 9)。尖吻鲛鲨、大眼长尾鲨、长鳍真鲨和大青鲨的风险等级在去除单个属性值后与全属性下的风险等级相同，表明这些种群的脆弱性分数受单个属性的影响较小。



$L_{\max}$. 最大体长; K. 生长系数; F. 繁殖力; RS. 繁殖策略; tm. 成熟年龄; AO. 种群水平重叠度; SA. 物种的季节性分布; AB. 集群行为; E. 物种分布深度与渔具重叠程度; GS. 渔具选择性; PCS. 物种释放后成活率。

$L_{\max}$. Maximum size; K. VB growth coefficient; F. Fecundity; RS. Reproductive strategy; tm. Age at first maturity; AO. Areal overlap; SA. Seasonal availability; AB. Aggregation behavior; E. Encounterability; GS. Gear selectivity; PCS. Post-capture mortality.

图4 11 个属性依次从东太平洋延绳钓渔业 PSA 中移除时的 RMSE 值

Fig. 4 RMSE values after sequentially removing 11 attributes from productivity susceptibility analysis of Eastern Pacific Ocean longline fishing industry

3 讨论

3.1 东太平洋 8 种鲨鱼生态风险

本研究基于 PSA 对 2014—2023 年东太平洋延绳钓渔船兼捕的 8 种鲨鱼进行生态风险评估，旨在揭示该海域主要兼捕鲨鱼物种的脆弱性状态变化。Griffiths 等^[13] 分析了 1954—2015 年包括金枪鱼类、旗鱼类和鲨鱼类在内的所有捕获物种的脆弱性。尽管两项研究使用的数据均来源于 IATTC 公开数据库，但与本研究不同的是，Griffiths 等^[13] 在其研究中还根据延绳钓渔业观察员记录的数据进行了补充。为确保研究结果的可比性，本研究采用与其相同的生产力和易损性指数来定义物种脆弱性。结果显示，尖吻鲛鲨和大眼长尾鲨处于高风险状态，且大眼长尾鲨的风险程度最高，这与 Griffiths 等^[13] 和朱江峰等^[16] 的研究结果一致。造成这一现象的主要原因是其性成熟晚、生长速率缓慢，从而导致种群补充量有限。尖吻鲛鲨和大眼长尾鲨的性成熟年龄分别约为 7 龄^[26] 和 8 龄^[27]，且每胎仅可产 10~12 尾^[28] 和 1~2 尾^[29] 幼鲨。资源调查结果显示，受过度捕捞影响，尖吻鲛鲨和大眼长尾鲨在部分区域的资源量已分别下降了 70% 和 96%^[30]，因此被世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 分别列为“濒危”和“易危”物种。然而，本研究还发现长鳍真鲨也处于高风险状态，其风险等级高于 Griffiths 等^[13] 的

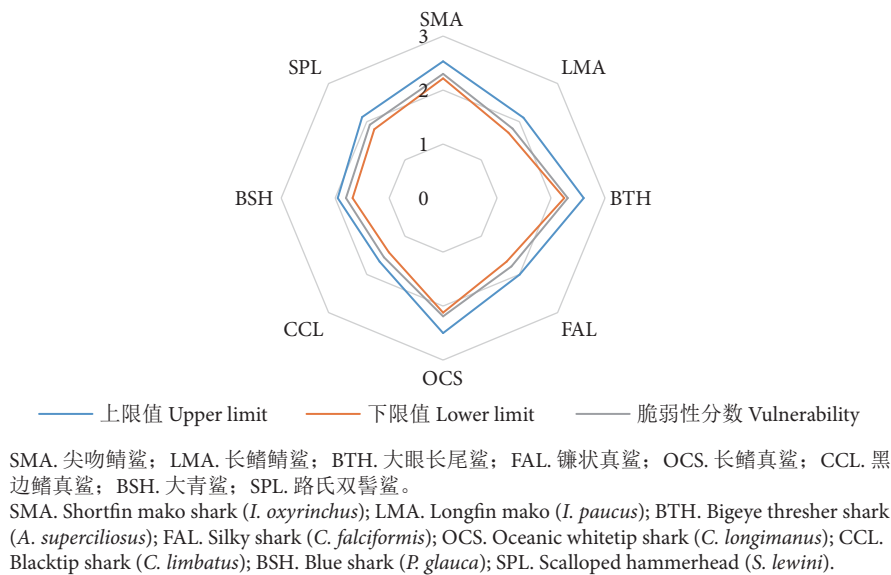


图5 基于全部属性和去除单个属性后的 PSA 得分值雷达图

Fig. 5 Radar map of productivity susceptibility analysis score estimated with full attributes and with one attribute removed

研究结果(中风险)。Hall 和 Román^[31]的研究结果显示,东太平洋长鳍真鲨资源量已下降 80%~95%,且该物种 2018 年被 IUCN 列为“极度濒危”状态。这些证据表明,长鳍真鲨的风险状态可能被低估,因此亟需高度关注其种群变动状况。

此外,镰状真鲨处于中风险状态,这与 Gallagher 等^[32]和 Griffiths 等^[13]的研究结论一致。镰状真鲨通常成群聚集于人工鱼礁、珊瑚礁等海域,且常被观察到与黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)、鲹(*Katsuwonus pelamis*)等大洋性经济鱼类共同迁徙^[33-34]。有研究表明,近年来东太平洋海域镰状真鲨的平均捕获率已下降 60%,其资源状态呈逐渐恢复的趋势^[35]。相比之下,黑边鳍真鲨的风险程度最低,这可能由于其性成熟年龄较小(2.1 龄)且生长系数较高($K=0.28$),使其可以较快补充资源量,并快速恢复种群状态,因此当前的渔业捕捞压力对其影响相对较小。本研究中长鳍鲭鲨、大青鲨和路氏双髻鲨风险程度为中风险,这与 Griffiths 等^[13]的评估结果存在差异,后者研究表明这 3 种鲨鱼均处于高风险状态。除了少量数据差异外,研究结果出现差异的主要原因是所采用的时间序列不同。本研究使用了最新的渔业数据来更新鲨鱼的脆弱性状态,反映出近 10 年来东太平洋主要兼捕鲨鱼物种的资源状态已发生了明显变化。尽管这 3 种鲨鱼均已被 CITES 列入附录,其贸易受到严格管制,但根据中西太平洋渔业委员会(The Western and Central Pacific Fisheries Commission, WCP-

FC)的调查数据,赤道以北太平洋海域的大青鲨资源状况良好,未受到过度捕捞;马晔阳等^[36]研究表明,自 2013 年加入 CITES 后,长鳍鲭鲨和路氏双髻鲨的捕捞量持续下降,这对种群资源恢复产生了积极影响。此外,物种释放后成活率的提高也可能是造成这一差异的重要因素。随着渔业最佳处理措施的颁布,兼捕鲨鱼的处理和释放流程得到改善,明显提高了鲨鱼释放后的成活率,降低了其风险等级。

需要特别指出的是,部分大洋性鲨鱼(如长鳍真鲨、路氏双髻鲨等)存在明显的“近岸-远洋”的定期洄游模式^[37],若缺乏近海的捕捞数据可能会对评估结果造成影响;且不同目标鱼种的作业方式及其渔具深度各不相同,而不同深度的兼捕物种和兼捕率也会存在较大差异^[38]。由于本研究仅根据 IATTC 公开的延绳钓数据进行评估,研究结果可能存在一定局限性。未来还需进一步加强鲨鱼数据收集的准确度,以促进鲨鱼资源评估工作的开展。

3.2 PSA 的优点与局限性

PSA 是一种半定量方法,可以快速评估某种渔业对物种的影响程度,分析结果能够揭示不同物种遭受同种渔业影响的相对风险差异,并可在一定时空内对种群风险等级进行排序,筛选出受渔业影响显著的高风险物种,为优先保护决策和管理提供科学依据,降低研究和管理成本。

PSA 已被应用于全球不同水域超过 1 000 种目标物种和副渔获物种的评估,但该方法的基本假设

及其结果的可靠性仍需要进一步验证。在计算脆弱性评分时, PSA 假设所有属性的权重均相等^[39], 这可能导致结果产生偏差。本研究发现对脆弱性影响较大的属性是繁殖策略和种群水平折叠度。这一结果与 Hordyk 和 Carruthers^[40] 的研究结果存在差异, 后者指出渔具选择性对物种脆弱性得分的影响最大。Patrick 等^[41] 曾尝试采用加权系统来计算不同属性对物种整体脆弱性的影响, 这仍是 PSA 实施中应该进一步考虑的问题。

由于 PSA 假设每个生产力和易损性属性之间仅存在简单的线性加和关系, 因此其无法有效评估多种渔业对潜在受影响物种的累积影响效应。已有研究者尝试采用新方法来评估同一区域多个渔场作业的综合影响。例如, Duffy 等^[42] 根据每个渔场的比例对 3 种围网渔场的易损性指数进行加权; Micheli 等^[43] 开发了与渔场相关的总敏感性指数。然而, 这些方法的评估结果能否真实反映多种渔业的综合影响仍存在不确定性。就东太平洋延绳钓渔业而言, 在渔具选择性、渔具重叠程度和物种释放后成活率数据等方面仍存在很大的不确定性, 需要改进鲨鱼物种分布和生物信息。此外, 鲨鱼种群属性同样受到气候变化的影响^[44], 而本研究并未考虑该因素。未来研究应改进收集数据的准确度, 以增强评估结果的可靠性, 并为后续定量评估奠定基础。

4 小结

鲨鱼是海洋生态系统中的重要物种, 在维持生态平衡和维系生物多样性方面发挥着重要作用。本研究发现评估的鲨鱼物种均处于中高风险状态, 该结论和 IATTC 的评估结果高度一致, 凸显了建立更科学鲨鱼资源可持续利用体系的紧迫性。目前, IATTC 已通过了多项鲨鱼养护决议。例如, C-11-10 号决议, 禁止在渔船上留存长鳍真鲨, 但由于该物种是兼捕渔获物, 自 2012 年决议生效以来, 假设渔具配置没有实质性变化, 则该物种的捕捞死亡率也不可能有较大变化; C-16-06 号决议, 将在延绳钓渔船捕获的镰状真鲨的渔获量比例限制在 20% 以下。针对太平洋海域长尾鲨的评估结果表明, 虽然不足 5% 的种群受捕捞影响, 但部分年份大眼长尾鲨的捕捞量已超过最大可持续产量^[45]。这些证据表明, 在延绳钓中捕获的鲨鱼物种, 尽管

实施了针对性的养护管理措施, 兼捕的鲨鱼物种仍然面临种群衰退风险。因此, 建议优化作业渔船渔具配置, 结合鲨鱼生长和繁殖特性开发有效的鲨鱼兼捕减缓措施; 建立国际鲨鱼研究交流和数据共享机制, 加强鲨鱼资源监测与评估。

参考文献:

- [1] 李秀超, 林琴琴, 陈作志, 等. 基于 LeMaRns 模型评估印度洋金枪鱼渔业对大洋生态系统的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(1): 203-216.
- [2] REIS-SANTOS P, GILLANDERS B M, STURROCK A M, et al. Reading the biomineralized book of life: expanding otolith biogeochemical research and applications for fisheries and ecosystem-based management[J]. *Rev Fish Bio Fish*, 2023, 33(2): 411-449.
- [3] SANTOS C C, ROSA D, GONÇALVES S M J, et al. A review of reported effects of pelagic longline fishing gear configurations on target, bycatch and vulnerable species[J]. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst*, 2023, 34(1): 1-17.
- [4] LINK J S, HUSE G, GAICHAS S, et al. Changing how we approach fisheries: a first attempt at an operational framework for ecosystem approaches to fisheries management[J]. *Fish Fish*, 2020, 21(2): 393-434.
- [5] CRAIG J K, LINK J S. It is past time to use ecosystem models tactically to support ecosystem-based fisheries management: case studies using Ecopath with Ecosim in an operational management context[J]. *Fish Fish*, 2023, 24(3): 381-406.
- [6] WALKER T I, DAY R W, AWRUCH C A, et al. Ecological vulnerability of the chondrichthyan fauna of southern Australia to the stressors of climate change, fishing and other anthropogenic hazards[J]. *Fish Fish*, 2021, 22(5): 1105-1135.
- [7] LIU K M, HUANG L H, SU K Y, et al. Vulnerability assessment of pelagic sharks in the western north pacific by using an integrated ecological risk assessment[J]. *Animals*, 2021, 11(8): 2161.
- [8] LIN Q Q, CHEN Y, ZHU J F. A comparative analysis of the ecological impacts of Chinese tuna longline fishery on the Eastern Pacific Ocean[J]. *Ecol Indic*, 2022, 143: 109284.
- [9] 石一茜. 中西太平洋金枪鱼渔业对鲸豚类兼捕问题的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023: 15-30.
- [10] PEREIRA D V, MERELES M A, DE MATOS O F, et al. Vulnerability to overfishing of fish stocks in the Amazon Basin[J]. *Fish Res*, 2023, 265: 106740.
- [11] FARUQUE H, MATSUDA H. Assessing the vulnerability of bycatch species from Hilsa gillnet fishing using productivity susceptibility analysis: insights from Bangladesh[J]. *Fish Res*, 2021, 234: 105808.
- [12] KIRBY D S. Ecological risk assessment for species caught in WCPO tuna fisheries: inherent risk as determined by productivity-susceptibility analysis[R]. 2nd Meeting of the Scientific Committee of the Western and Central Pacific Fisheries Commission, Manila, Philippines, 2006: 7-18.
- [13] GRIFFITHS S, DUFFY L, AIRES-da-SILVA A. A preliminary ecological risk assessment of the large-scale tuna longline fishery in the eastern Pacific Ocean using productivity-susceptibility analysis

- [C]//8th Meeting of the Scientific Advisory Committee of the IATTC, 8-12 May 2017, La Jolla, California, USA. Document SAC-08-07d. 2017: 1-21.
- [14] ARRIZABALAGA H, BRUYN D P, DIAZ A G, et al. Productivity and susceptibility analysis for species caught in Atlantic tuna fisheries[J]. *Aquat Living Resour*, 2011, 24(1): 1-12.
- [15] MURUA H, COELHO R, SANTOS M N, et al. Preliminary Ecological Risk Assessment (ERA) for shark species caught in fisheries managed by the Indian Ocean Tuna Commission (IOTC): Eighth Session of the IOTC Working Party on Ecosystems and Bycatch[C/OL]. [2025-03-06]. <https://iotc.org/documents/preliminary-ecological-risk-assessment-era-shark-species-caught-fisheries-managed-indian>.
- [16] 朱江峰, 戴小杰, 陈彦. 运用生产力-易捕率指数对 10 种热带太平洋鲨鱼种群的研究[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(6): 8-13.
- [17] JOHRI S, LIVINGSTON I, TIWARI A, et al. Reducing data deficiencies: preliminary elasmobranch fisheries surveys in India, identify range extensions and large proportions of female and juvenile landings[J]. *Front Mar Sci*, 2021, 8: 619695.
- [18] WILLIAMS A, DOWDNEY J, SMITH A D M, et al. Evaluating impacts of fishing on benthic habitats: a risk assessment framework applied to Australian fisheries[J]. *Fish Res*, 2011, 112(3): 154-167.
- [19] de FREITAS A J R, PASSARONE R, LIRA A S, et al. Vulnerability assessment of species caught by the shrimp trawl fishery in north-eastern Brazil[J]. *Reg Stud Mar Sci*, 2023, 61: 102949.
- [20] KIM M J, HAN I S, LEE J S, et al. Determination of the vulnerability of Korean fish stocks using productivity and susceptibility indices[J]. *Ocean Coast Manag*, 2022, 227: 106287.
- [21] FROESE R, BINOHLAN C. Empirical relationships to estimate asymptotic length, length at first maturity and length at maximum yield per recruit in fishes, with a simple method to evaluate length frequency data[J]. *J Fish Biol*, 2000, 56(4): 758-773.
- [22] GRIFFITHS S P, FULLER L M, POTTS J, et al. Vulnerability assessment of sharks caught in eastern Pacific Ocean pelagic fisheries using the EASI-Fish approach[C]//13th Meeting of the Scientific Advisory Committee of the IATTC, 16-20 May 2022, La Jolla, California, USA. Document SAC-13. 2022: 11-80.
- [23] FATEMA U K, FARUQUE H, SALAM M A, et al. Vulnerability assessment of target shrimps and bycatch species from industrial shrimp trawl fishery in the Bay of Bengal, Bangladesh[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1691.
- [24] CHAI T, DRAXLER R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? : arguments against avoiding RMSE in the literature[J]. *Geosci Model Dev Discuss*, 2014, 7(3): 1247-1250.
- [25] LIN C Y, WANG S P, CHIANG W C, et al. Ecological risk assessment of species impacted by fisheries in waters off eastern Taiwan[J]. *Fish Manag Ecol*, 2020, 27(4): 345-356.
- [26] RIBOT-CARBALLAL M C, GALVAN-MAGANA F, QUINONEZ-VELAZQUEZ C. Age and growth of the shortfin mako shark, *Isurus oxyrinchus*, from the western coast of Baja California Sur, Mexico[J]. *Fish Res*, 2005, 76(1): 14-21.
- [27] PARSONS G R, PETERS K M. Age determination in larval and juvenile sheepshead, *Archosargus probatocephalus*[J]. *Fish Bull NOAA*, 1989, 87: 985-988.
- [28] STEVENS J D. The biology and ecology of the shortfin mako shark, *Isurus oxyrinchus*[M]. Oxford: Fish Aquat Resour Ser, 2008, 13: 87-94.
- [29] FRISK M G, MILLER T J, DULVY N K. Life histories and vulnerability to exploitation of elasmobranchs: inferences from elasticity, perturbation and phylogenetic analyses[J]. *J Northwest Atl Fish Sci*, 2005, 37: 27-45.
- [30] FERRETTI F, MYERS R A, SERENA F et al. Loss of large predatory sharks from the Mediterranean Sea[J]. *Conserv Biol*, 2010, 22(4): 952-964.
- [31] HALL M, ROMÁN M. Bycatch and non-tuna catch in the tropical tuna purse seine fisheries of the world[J]. *FAO Fish Aquac Tech Pap*, 2013(568): I.
- [32] GALLAGHER A, ORBESÉN E, HAMMERSCHLAG N, et al. Vulnerability of oceanic sharks as pelagic longline bycatch[J]. *Glob Ecol Conserv*, 2014, 1: 50-59.
- [33] 沈永富, 臧东升, 吴峰, 等. 东太平洋镰状真鲨年龄与生长[J]. *水产学报*, 2023, 47(8): 97-108.
- [34] 孙康, 戴小杰, 高春霞, 等. 中西太平洋围网不同作业方式兼捕镰状真鲨渔获率和死亡率分析[J]. *海洋通报*, 2021, 40(4): 434-440.
- [35] MINAMI M, LENNERT-CODY C E, GAO W, et al. Modeling shark bycatch: the zero-inflated negative binomial regression model with smoothing[J]. *Fish Res*, 2007, 84(2): 210-221.
- [36] 马晔阳, 戴小杰, 吴峰. 全球鲨鱼捕捞现状及其制品贸易初步分析[J]. *中国渔业经济*, 2023, 41(3): 101-112.
- [37] COIRATON C, AMEZCUA F, KETCHUM J T. New insights into the migration patterns of the scalloped hammerhead shark *Sphyrna lewini* based on vertebral microchemistry[J]. *Mar Biol*, 2020, 167(5): 58.
- [38] WARD P, MYERS R A. Inferring the depth distribution of catchability for pelagic fishes and correcting for variations in the depth of longline fishing gear[J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 2005, 62(5): 1130-1142.
- [39] HOBDAI A J, SMITH A D M, STOBUTZKI IC, et al. Ecological risk assessment for the effects of fishing[J]. *Fish Res*, 2011, 108(2/3): 372-384.
- [40] HORDYK A R, CARRUTHERS T R. A quantitative evaluation of a qualitative risk assessment framework: examining the assumptions and predictions of the Productivity Susceptibility Analysis (PSA)[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0198298.
- [41] PATRICK W S, SPENCER P, LINK J, et al. Using productivity and susceptibility indices to assess the vulnerability of United States fish stocks to overfishing[J]. *Fish Bull*, 2010, 108(3): 305-322.
- [42] DUFFY L M, LENNERT-CODY C E, OLSON R J, et al. Assessing vulnerability of bycatch species in the tuna purse-seine fisheries of the eastern Pacific Ocean[J]. *Fish Res*, 2019, 219: 105316.
- [43] MICHELI F, LEO G D, BUTNER C, et al. A risk-based framework for assessing the cumulative impact of multiple fisheries[J]. *Bio Conserv*, 2014, 176(4): 224-235.
- [44] OSGOOD G J, WHITE E R, BAUM J K. Effects of climate-change-driven gradual and acute temperature changes on shark and ray species[J]. *J Anim Ecol*, 2021, 90(11): 2547-2559.
- [45] FU D, ROUX M J, CLARKE S, et al. Pacific-wide sustainability risk assessment of bigeye thresher shark (*Alopias superciliosus*)[R]. National Institute of Water and Atmospheric Research, Wellington, New Zealand, 2016: 1-70.