

DOI: 10.20103/j.stxb.202211103233

苏尚柯, 杜建国, 丁丽可, 谭红建, 陈彬, 胡文佳. 气候速度影响下中国周边海域鲨鱼保护优先区识别. 生态学报, 2023, 43(22): 9218-9231.

Su S K, Du J G, Ding L K, Tan H J, Chen B, Hu W J. Setting conservation priorities for sharks in China's surrounding seas under the impact of climate velocity. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9218-9231.

气候速度影响下中国周边海域鲨鱼保护优先区识别

苏尚柯¹, 杜建国^{1,2,3}, 丁丽可^{1,4}, 谭红建¹, 陈彬^{1,2,3}, 胡文佳^{1,2,3,*}

1 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361000

2 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

3 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

4 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

摘要: 鲨鱼在气候变化和人类活动等因素的影响下面临着种群衰退的风险, 开展鲨鱼保护优先区研究是鲨鱼保护行动的重要工作. 将气候速度引入鲨鱼保护优先区的识别过程, 旨在阐明中国周边海域鲨鱼现状保护成效和保护空缺, 并预测气候速度影响下的鲨鱼保护优先区空间格局及其变化趋势. 以集成物种分布模型模拟的 146 种鲨鱼栖息地作为保护对象, 以 2015 年至 2100 年两种气候变化情景下的气候速度作为保护的机会成本, 基于系统保护规划理论模拟现状和未来情景下的鲨鱼保护优先区选址方案. 研究结果表明: (1) 长江口以南至台湾海峡和北部湾近岸海域为鲨鱼多样性分布的主要区域, 台湾海峡区域亦为珍稀濒危物种的重要分布区; (2) 在两种气候情景下, 南海中南部将面临较高的气候变化风险, 而长江口以南至珠江口的近岸海域气候速度均相对较低, 提示了这些区域或能成为气候变化影响下的生物避难所; (3) 现有保护区仅保护了 1.33% 的海域和不到 4% 的鲨鱼物种, 尚存在较大的保护空缺. 当保护海域比例提升至 10% 时, 可覆盖绝大多数鲨鱼物种. 而当比例提升至 30% 时, 珍稀濒危物种的栖息地将得到有效保护; (4) 气候变化影响下保护优先区选址将发生不同程度的变化, 尤其是在中国南海区域, 如在保护规划时兼顾气候速度, 可在满足相似保护目标的前提下减少保护优先区内 25% 以上的气候压力, 以使其具有较强的应对气候变化潜力.

关键词: 气候变化; Marxan 模型; 气候速度; 保护优先区; 物种分布模型

Setting conservation priorities for sharks in China's surrounding seas under the impact of climate velocity

SU Shangke¹, DU Jianguo^{1,2,3}, DING Like^{1,4}, TAN Hongjian¹, CHEN Bin^{1,2,3}, HU Wenjia^{1,2,3,*}

1 Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361000, China

2 Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China

3 Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

4 College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Because shark populations are at risk of decline due to climate change and human activities, conducting shark conservation priority studies is an important part of shark conservation efforts. We integrate climate velocity into the identification of conservation priorities for sharks, aiming to elucidate the shark conservation effectiveness and gaps in conservation efforts within China's surrounding waters. Furthermore, the study endeavors to predict the spatial distribution and changes of these conservation priorities for sharks under the influence of climate velocity. The shark habitats of 146 species simulated by the ensembled species distribution models were adopted as conservation targets. The opportunity costs

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0802204, 2019YFE0124700); 国家自然科学基金(42076163, 42176153)

收稿日期: 2022-11-10; **采用日期:** 2023-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huwenjia@tio.org.cn

of protection are associated with climate velocity under two climate change scenarios from 2015 to 2100. Based on the principles of systematic conservation planning, this study simulates the current and future conservation priorities for sharks. The findings revealed that: (1) the hotspots of shark diversity could be found from the southern region of the Yangtze Estuary reaching to the Taiwan Strait, together with the coastal waters of the Beibu Gulf. Moreover, the Taiwan Strait was identified as an important area for the distribution of rare and endangered species. In comparison to endangered and vulnerable species, critically endangered species are less common and more concentrated in the South China Sea. (2) When the two climate scenarios are compared, it is discovered that the climate velocity under SSP585 is significantly higher than that under SSP126, the central and southern South China Sea would face a high climate change risk under both scenarios. However, the climate velocity in the coastal waters from the Yangtze Estuary to the Pearl River Estuary was relatively low, suggesting that the area could become a climate refuge. (3) Existing protected areas protected only 1.33% of the sea and less than 4% of shark species, indicating a significant protection gap. Most shark species could be protected if marine protection was increased to 10%. Furthermore, with a 30% protection rate, the habitat of rare and endangered species would be effectively protected. That is, if only the broad compatibility of species conservation is considered, low conservation ratios already have a good conservation effectiveness. However, when focusing on the conservation of rare and endangered species, a high conservation ratio is necessary. (4) The protection priorities would shift as a result of climate change, particularly in the South China Sea. If climate velocity is considered a cost in conservation planning, climate pressure in conservation priorities can be reduced by 25% while maintaining similar protection targets. In that case, the identified conservation priorities would have a high potential of climate change adaptation.

Key Words: climate change; Marxan model; velocity of climate change; conservation priority; species distribution models

鲨鱼是最古老的脊椎动物之一,作为水生食物网中的顶级捕食者,在海洋生态系统结构和功能的维持中发挥了重要的作用^[1-3]。但鲨鱼繁殖力低、生长速度缓慢、成熟时间晚,导致种群恢复力较低,在人类开发活动、捕捞压力和气候变化等因素的影响下更容易受到灭绝的风险^[4-6]。近半个世纪以来,全球大洋性鲨鲛类的物种丰富度下降了 71%,有研究表明在曾有鲨鱼出现的 20% 珊瑚礁海域鲨鱼已几乎消失^[7-8]。根据国际自然保护联盟(IUCN)公布的物种红色名录,有近 37% 的鲨鱼和鲛鱼被列为受威胁物种^[9]。尽管在 2002 年已启动鲨鲛类的国际保护行动,但是保护强度远未能遏止其种群衰退的速度^[6,10]。

全球鲨鱼约有 548 种^[11],分布主要集中在大陆架和中纬度地区。中国海域处在鲨鱼物种分布的热点区域^[5],记录有 8 目 21 科 146 种鲨鱼^[12-13]。目前全球已建立的鲨鱼保护区约占世界海洋面积的 3%,但大多数保护区位于鲨鱼分布的热点区域之外^[14]。尽管在过去几十年中过度捕捞是对鲨鱼威胁最大的因素^[15-16],但气候变化亦会对鲨鱼造成较大影响^[17-18]。鲨鱼在整个生命周期中都会受到因气候变化带来的多重环境因素改变的影响,如海水升温、海洋酸化等因素会影响其幼体的状况和生存能力,同时改变其摄食行为、游泳能力、地理分布等^[19-20]。应在何处开展鲨鱼保护行动才能取得最好的成效,气候变化将对鲨鱼的保护带来什么影响,这些仍然是未解决的问题。而在中国及周边海域,以往对鲨鱼的研究主要关注在分类学、渔业等方面^[2,4,12,21-22],针对鲨鱼保护的研究相对较少,多停留在定性分析和对策综述层面^[2],难以对鲨鱼的保护管理行动提供有效支撑。

保护区是物种保护的重要工具^[23-24],在保护优先区识别中,目前多采用系统保护规划模型方法如 Marxan、Zonation 等^[25-26],这类方法既考虑保护对象亦考虑保护成本。以往通常将人类活动等因素作为保护成本^[27-28],而近年来以气候速度作为机会成本的保护优先区识别已逐渐成为研究热点^[29-30]。气候速度(climate velocity)是对气候变化具有普适度的度量标准,它可以反映生物为了维持其在气候变化下的环境条件所需要移动的速度和方向^[31],气候速度高的区域生物更容易暴露于气候变化影响。有研究发现,未来可能有 47% 的全球陆域保护区暴露于高气候速度下^[32],60%—87% 的海洋和 76%—97% 的大型海洋保护区的环

境条件发生极大改变,这可能导致物种的生物地理分布追随气候变化轨迹跨越原有的保护边界,从而造成现有保护区的保护成效下降^[33–34]。因此,在识别保护优先区时对未来气候变化速度进行前瞻性的考虑,将有助于应对气候变化、维持保护区内生物多样性的稳定^[35]。但目前的研究案例多集中在陆地,在海洋方面,除了部分高影响力的全球性研究外,区域研究热点主要集中在地中海^[25,29],中国尚未有开展相关研究的先例。

本研究拟探索气候变化背景下的保护优先区识别新途径,以鲨鱼为保护对象,以气候速度为保护成本,首次在中国周边海域开展气候速度对海洋保护优先区的影响研究。本研究拟阐明中国周边海域鲨鱼物种多样性的分布,识别现状保护成效和保护空缺,并根据全球生物多样性保护目标设置不同的保护优先区情景方案,预测气候速度影响下保护优先区的空间格局变化。研究结果可为鲨鱼栖息地的空间保护、应对气候变化的海洋保护地选址等保护管理实践提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究范围聚焦于中国周边海域,以与中国邻接的共计 11 个世界海洋生态区作为研究区^[36](图 1)。研究区四至范围约为 105°E—130°E 和 3°N—40°N,总面积约为 $443 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区横跨温带、亚热带和热带三个温度带,北部海域受到对马暖流、黄海暖流及黄海冷水团等的影响,中、南部则受到黑潮暖流、台湾暖流和南海暖流影响^[37–38]。中国周边海域在受到气候变化等多重因素影响的同时^[39–40],也是全球海洋生物多样性的集中分布区,其中鲨鱼的物种数量为 146 种,约占全球鲨鱼物种数的 26.6%^[4,11]。

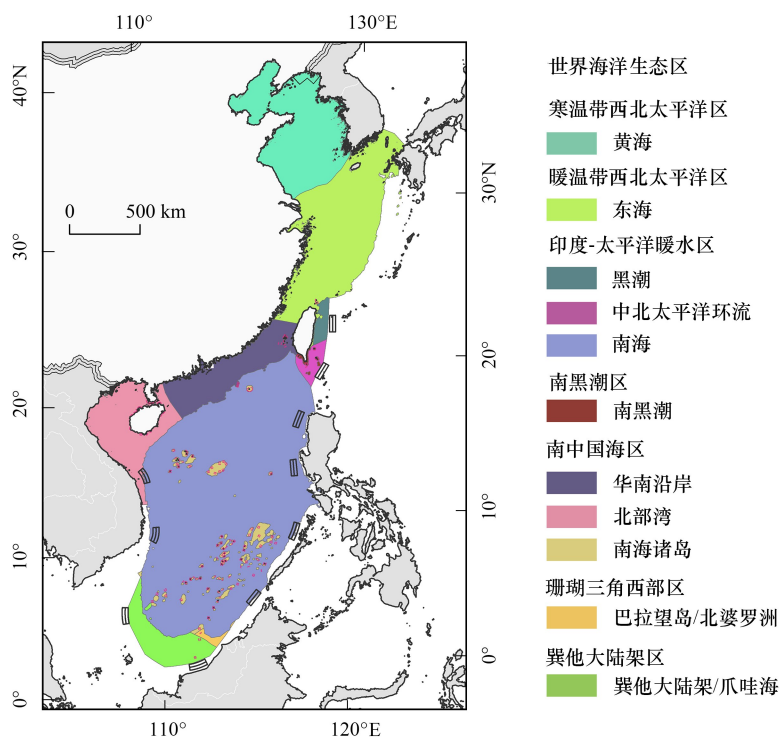


图 1 研究区范围及世界海洋生态区概况

Fig.1 Study region and overview of the world marine ecological region

本文所有地图基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2020)4618 号标准底图制作,底图边界无修改

1.2 鲨鱼栖息地分布模拟

本研究拟采用集成物种分布模型对鲨鱼的栖息地分布进行模拟,模型可利用物种出现的观测值与环境参数,预测其在特定时空下的地理分布^[41]。用于模拟 146 种鲨鱼栖息地的物种出现数据来源于全球数据库

(GBIF、OBIS 和 FishBase)、文献数据^[12,21]以及中国近海海洋综合调查与评价专项调查数据^[42],其中 GBIF 和 OBIS 的数据采用“Spocc”R 程序包进行提取^[43]。应用“Scrubr”R 程序包对重复数据、可疑数据进行清洗^[44],最终筛选出共计 59434 个鲨鱼分布点数据。

国内外相关研究表明,温度是影响鲨鱼分布的环境因素之一^[2,45];此外,鲨鱼作为食物链中的高级消费者,食物来源也影响其分布,但因食物来源种类繁多,常以初级生产力作为替代参数^[46-47]。国际上用于模拟鲨鱼潜在分布的环境变量通常还包括深度、盐度、离岸距离等^[48-50]。综上所述,本研究以温度、盐度、深度、离岸距离、海水流速、初级生产力、溶解氧和 PH 值作为环境变量进行鲨鱼栖息地的模拟。环境变量来源于公共数据集(www.ngdc.noaa.gov、globalfishingwatch.org)和 Bio-ORACLE 海洋环境数据产品^[51]。在 ArcGIS 10.5 中进行提取分析、重采样等预处理,统一数据范围并将空间分辨率设置为 5 弧分。

物种分布模型具有多种算法^[52],本研究应用 5 种算法的集成模型(Ensemble Species distribution models)开展鲨鱼栖息地的模拟。集成模型能够降低单一算法带来的不确定性,选择的 5 种算法包括广义线性模型(Generalized linear model)、随机森林模型(Random forest)、广义推进模型(Generalized boosting model)、人工神经网络模型(Artificial neural network)、最大熵模型(Maxent)。对于每一个鲨鱼物种,每种算法迭代十次,并通过 TSS、Kappa 以及 AUC 统计检验值对模型性能进行评估,选取 TSS 值大于 0.75 的模型结果进行集成,以确保模型预测的准确性^[53-54]。所有模拟过程在“Biomod 2”R 程序包 3.5.1 版本中进行^[55]。

1.3 气候速度计算

气候速度反映了生物为适应气候变化所需迁移的方向和速度^[31],其单位为 km/10a。本研究拟采用基于空间梯度的气候速度(Spatial gradient Velocity of climate change)计算方法,其公式如下:

$$\text{VoCC} = \frac{\text{Slope}}{\text{Spatial gradient}}$$

式中,VoCC 为气候速度,Slope 为指定像元的年均温度变化斜率,单位为:℃/a,Spatial gradient 为指定像元周边一定空间范围内邻域像元的温度变化梯度,单位为:℃/km,计算过程通过“VoCC”R 程序包完成^[56-57]。

气候速度计算的数据来源为国际耦合模式比较计划第六阶段 GFDL-ESM4 环流模式预测的未来海水表面温度(SST),考虑 SSP(Shared Socioeconomic Pathway,共享社会经济路径)126 情景和 SSP585 情景^[58]。其中 SSP126 代表低辐射强迫情景,该情景下辐射强迫在 2100 年将稳定在约 2.6 W/m²,该情景也对应全球在 2060—2080 年间实现碳中和目标,加强全球应对气候变化的能力,实现可持续发展^[59-60];SSP585 代表高辐射强迫情景,该情景下辐射强迫将高达约 8.5 W/m²。原始数据空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为逐月,通过“VoCC”R 程序包中的 sumSeries 函数将 2015 年至 2100 年共计 1032 层的月均温度数据转换成 86 层年均温的时间序列,计算得到气候速度后以双线性内插法将数据重采样至 5 弧分^[61]。

1.4 保护优先区规划方案设置与模拟

针对现状、SSP126 和 SSP585 三种情景设置保护优先区规划方案,其中现状情景不考虑气候速度,SSP126 和 SSP585 情景以各自情景下的气候速度作为成本。保护目标的设计从海洋保护比例、多样性、稀缺性和代表性四个方面来考虑,设置高低两套目标。其中保护比例基于生物多样性公约“爱知目标”和昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架议定的“3030”保护目标,多样性考虑鲨鱼物种集中分布区,稀缺性考虑珍稀濒危物种维持的最低栖息地比例,代表性考虑海洋生物地理分布中不同海洋生态区的代表意义^[26,62-63]。综合上述气候变化情景和保护目标,共设置得到 6 套规划方案(表 1)。

本研究使用系统保护规划模型 Marxan 识别海洋保护优先区,该工具基于互补性原则与模拟退火算法(SAA, Simulate Anneal Arithmetic)开展保护优先区的空间模拟。在模拟过程中需设置规划单元,规划单元大小设置需兼顾模拟结果的合理性及可用性^[64]。本研究根据研究区尺度将规划单元设置为 10 弧分 * 10 弧分大小的网格,共划分 11095 个规划单元。为保证模拟结果的可靠性,需合理设置物种惩罚因子(SPF)与边界长度修正器(BLM)^[26,65]。本研究设置 SPF 为 20,以保证每个目标都得到保护,再通过敏感性分析确定不

同情景下的边界修正器取值。每套规划方案经过 100 次迭代,以模拟得到的最优解作为最终的优先区识别结果^[66],最后在 ArcGIS 10.5 中通过分区统计工具计算每套方案的实际保护成效。

表 1 保护规划方案
Table 1 Scheme for Conservation Planning

方案 Schemes	保护目标 Conservation Targets			
	海洋保护比例/% Ratio of marine conservation	多样性 Diversity	稀缺性 Scarcity	代表性 Representation
现状-低目标 Status quo-Low target	10	保护前 15% 的生物多样性集中分布区	珍稀濒危物种 10% 栖息地范围	各生态区均有 10% 得到保护
现状-高目标 Status quo-High target	30	保护前 15% 的生物多样性集中分布区	珍稀濒危物种 30% 栖息地范围	各生态区均有 10% 得到保护
SSP126-低目标 SSP126-Low target	10	保护前 15% 的生物多样性集中分布区	珍稀濒危物种 10% 栖息地范围	各生态区均有 10% 得到保护
SSP126-高目标 SSP126-High target	30	保护前 15% 的生物多样性集中分布区	珍稀濒危物种 30% 栖息地范围	各生态区均有 10% 得到保护
SSP585-低目标 SSP585-Low target	10	保护前 15% 的生物多样性集中分布区	珍稀濒危物种 10% 栖息地范围	各生态区均有 10% 得到保护
SSP585-高目标 SSP585-High target	30	保护前 15% 的生物多样性集中分布区	珍稀濒危物种 30% 栖息地范围	各生态区均有 10% 得到保护

SSP: 共享社会经济路径 Shared socioeconomic pathway

2 结果

2.1 鲨鱼物种多样性分布格局

鲨鱼物种多样性的空间分布格局在纬度 21—28°N 区间出现峰值,且在经度 105—110°E 与 118—124°E 之间也呈现峰值(图 2),表明长江口以南至台湾海峡和北部湾近岸海域为鲨鱼分布的热点区域。这些区域内鲨鱼丰富度高达 90—131 种。而在纬度高于 36°N 和低于 13°N 区间内,鲨鱼丰富度相对较低。考虑到鲨鱼具有不同的保护等级,根据珍稀濒危程度将其分为易危(VU)、濒危(EN)、极危(CR)三组。发现在台湾海峡区域内,易危(VU)组的丰富度达到 22—30 种,濒危(EN)组为 21—26 种,极危(CR)组则为 8—9 种,几乎包括各组内的所有物种,提示台湾海峡区域不仅是多样性的分布热点,亦是珍稀濒危物种的分布热点。对比三个组别,发现极危(CR)组相较于另两组,其分布更加集中,且在南海分布较少。

2.2 气候速度分布及其与物种多样性的空间关系

研究结果显示(图 3),SSP585 情景下的气候速度显著高于 SSP126 情景,且气候速度的高值区分布广于 SSP126 情景。其中,在 SSP126 情景下,气候速度在纬度高于 37°N 的区域出现了峰值,同时渤海与北部湾区域的气候速度亦较高,其他区域则较为稳定。在 SSP585 情景下,研究区北部的气候速度空间格局与 SSP126 情景较为相似,但在 16°N 以南的南海中南部区域出现了气候速度陡增的情况。

将鲨鱼物种多样性的分布格局与气候速度叠加绘制二元映射地图(图 4),发现在 SSP126 情景下,气候速度与生物多样性高值区重叠的双重热点区位于北部湾、海南岛周边和西沙海域。而在 SSP585 情景下,南海南部海域气候速度的整体上升导致南沙群岛成为了该情景下的双重热点区域,此外北部湾西部近岸也存在双重热点区域。在两种情景下,长江口以南至珠江口的近岸海域始终为低气候速度的生物多样性热点区,提示上述区域或能成为气候变化影响下的生物避难所。

2.3 现状情景下的保护优先区格局

在现状情景下,保护优先区主要分布于朝鲜半岛南部、台湾海峡周边、北部湾、西沙群岛、南沙群岛等海域,其中高保护目标方案的优先区斑块呈现更聚集的空间格局(图 5)。对比不同方案的保护成效(表 2),可见不论是从面积保护比例还是从多样性、稀缺性和代表性方面,现有保护区均存在较大的保护空缺。而低目标方案下,多样性、稀缺性和代表性的保护比例都得到了大幅度提升,尤其是在多样性方面,有效保护的物种

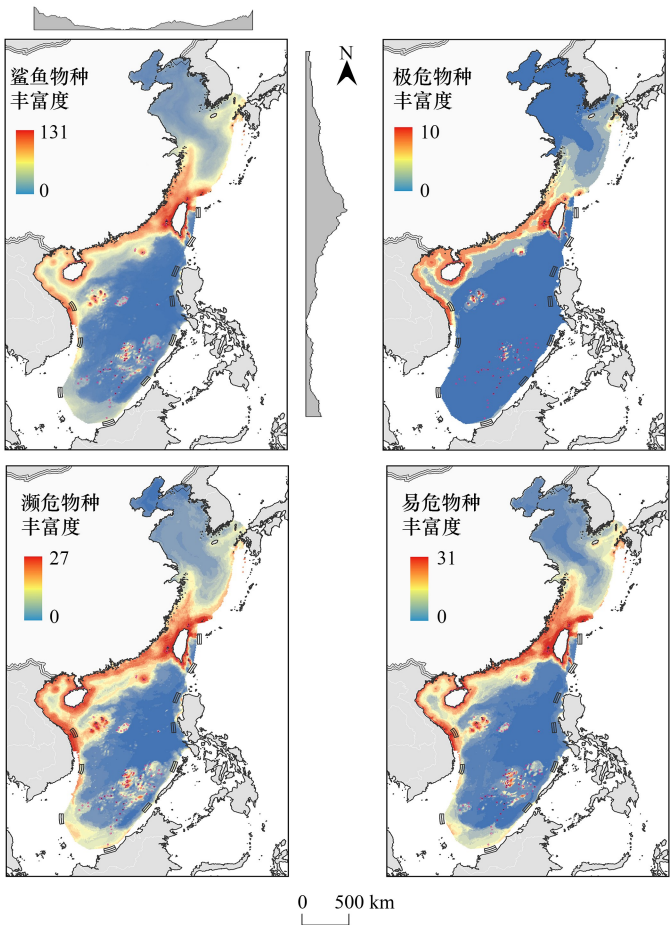


图2 鲨鱼物种多样性空间分布
Fig.2 Spatial distribution of shark biodiversity

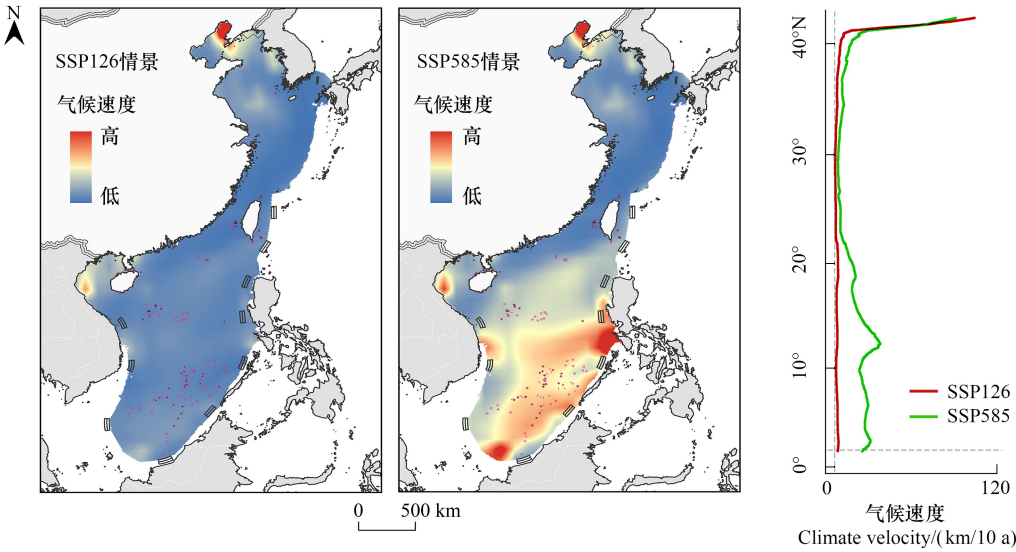


图3 不同情景下的气候速度
Fig.3 Climate velocity under different scenarios

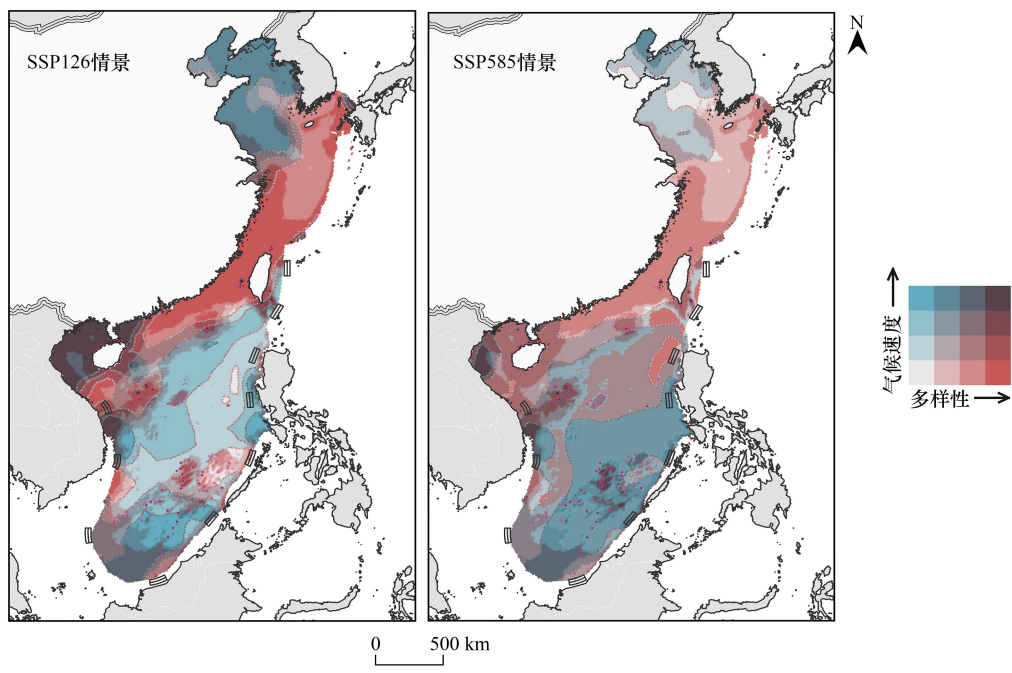


图 4 鲨鱼物种多样性与气候速度二元空间映射图

Fig.4 Superimposed Shark Species Diversity and Climate Velocity

数量可从 4% 提升至 96.6%, 其中珍稀濒危物种的保护数量可从 3.84% 提升至 100%。而在高目标方案下, 多样性的保护成效与低目标方案近似, 但稀缺性和代表性的保护成效得到了较大提升。因此, 仅考虑鲨鱼物种保护的广泛兼容性, 低目标的保护策略已具备较好的成效, 而当需要重点针对珍稀濒危物种时, 高目标的保护策略将凸显其必要性。

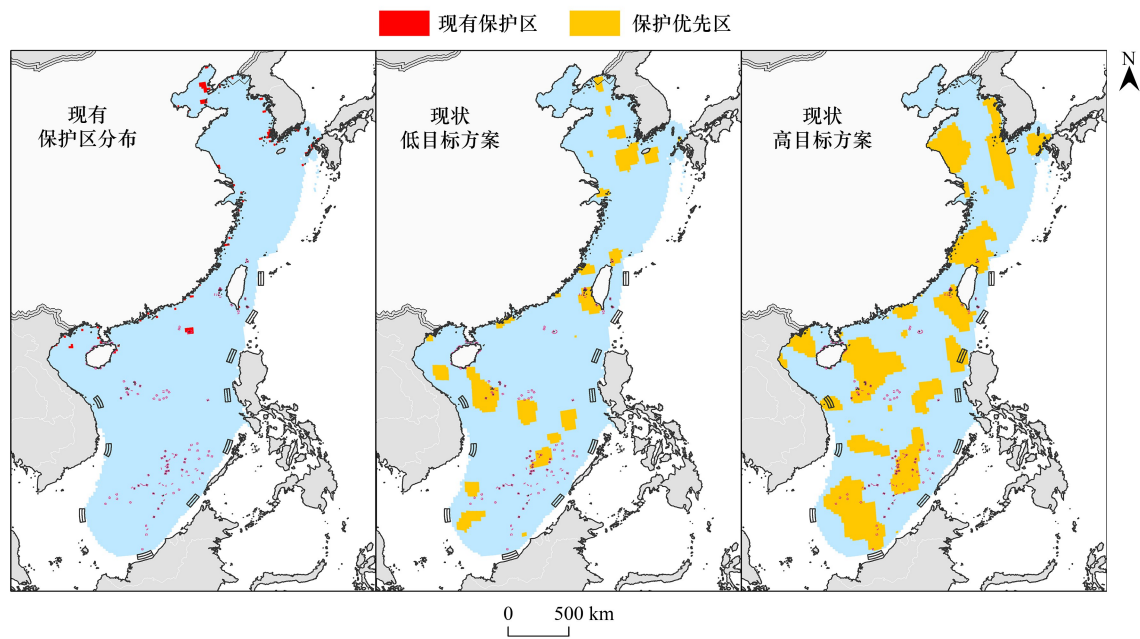


图 5 现状情景下保护优先区分布

Fig.5 Distribution of conservation Priorities under Current scenarios

表 2 不同目标方案下的保护成效
Table 2 Protection effectiveness under different target schemes

方案 Schemes	海域面积 保护成效/% Effectiveness of marine area protection	多样性保护成效 Effectiveness of diversity protection		稀缺性保护成效 Effectiveness of scarcity protection			区域代表性 保护成效 Effectiveness of representation protection
		物种保 护数量	珍稀濒危物 种保护数量	CR 物种 栖息地平均 保护比例/%	EN 物种 栖息地平均 保护比例/%	VU 物种 栖息地平均 保护比例/%	面积平均 保护比例/%
现状 Status quo	1.33	6	3	3.06	2.49	4.01	1.35
低目标 Low target	10.04	143	72	13.89	16.30	14.41	10.35
高目标 High target	30.08	146	72	35.04	37.28	35.84	30.98

注: CR: 极危 Critically Endangered; EN: 濒危 Endangered; VU: 易危 Vulnerable

2.4 气候速度影响下的保护优先区格局

当引入气候速度作为成本时,保护优先区的选址方案可满足与现状情景近似的保护目标,但优先区的空间分布格局出现了变化(图 6)。在低目标方案下,现状和 SSP126 情景下的保护优先区分布格局相似,而 SSP585 情景下海南岛南部和台湾岛南部出现了较大的保护优先区斑块。在高目标方案下,SSP585 情景下南

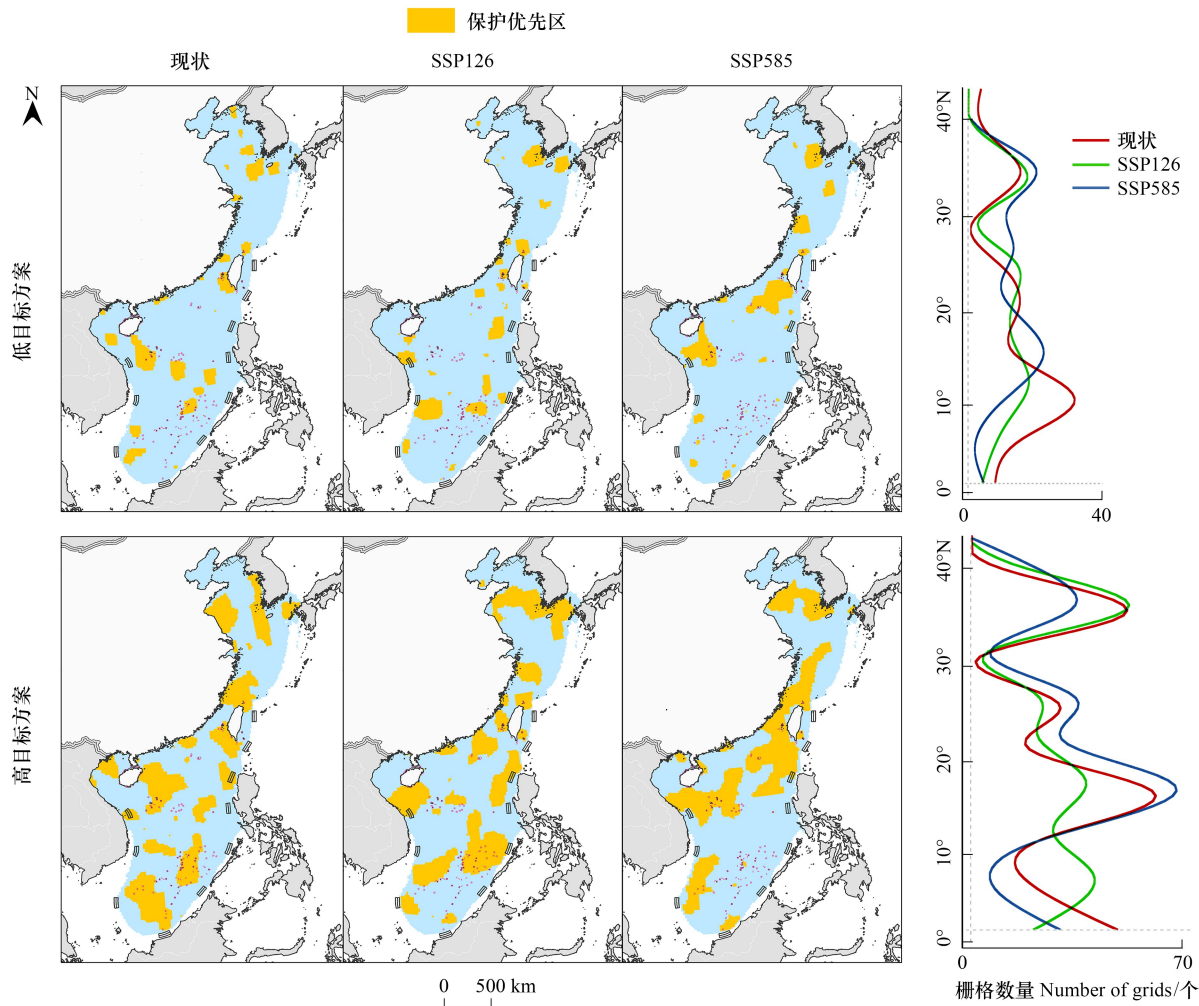


图 6 气候速度影响下的保护优先区空间分布
Fig.6 Spatial distribution of conservation priorities under the impact of climate velocity

海中南部的保护优先区几乎消失,在台湾海峡周边出现大面积连片的保护优先区斑块。保护优先区分布沿纬度梯度呈现多峰分布,在所有情景方案下研究区北部和南部各有一个较明显的分布峰。其中北部的分布峰均位于 31—35°N,而南部的分布峰将随规划方案不同发生变化,低目标方案下该分布峰位于 11°N 且会受气候速度的影响北移,而高目标方案下该分布峰位于 15—17°N。

为分析模拟的保护优先区对气候变化的适应性,分别统计各方案在 SSP126 和 SSP585 情景下的气候速度,以此判断保护优先区方案受气候变化影响的强度(图 7)。发现在达到相似保护目标的前提下,SSP126 情景下的保护优先区承受的气候变化影响强度将比现状情景减少 25%—26%,而 SSP585 情景下的保护优先区承受的气候变化影响强度将比现状情景减少 26%—33%。这提示以气候速度作为机会成本所选划的保护优先区可能具有较强的应对气候变化潜力。

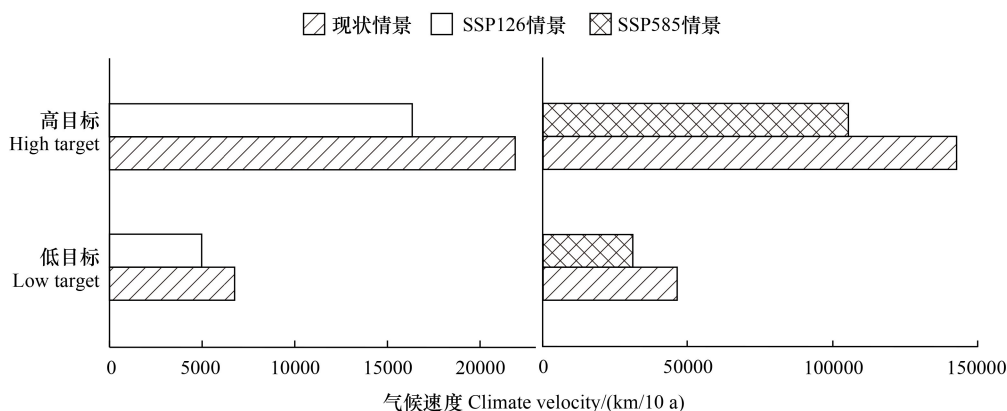


图 7 不同保护优先区方案的气候速度对比

Fig.7 Climate velocity comparisons of different conservation priorities planning schemes

3 讨论

3.1 气候速度空间格局及其成因分析

传统上仅以升温幅度等环境条件变化率判断气候变化对生物栖息地的影响,但生物能够通过主动迁移来应对气候变化,气候速度理论可通过预判未来气候条件下物种的动向来弥补这一不足。该理论自 2009 年在 Nature 上正式发表以来仅经历十余年发展^[57],其计算方法尚未有统一的定论。不同学者提出了不同的算法,目前较常用的包括基于空间梯度的气候速度 (gradient-based climate velocity) 和基于距离的气候速度 (distance-based climate velocity)^[67—68]。前者通常考虑生物群体对单变量的响应,如温度、降水等,适用于空间梯度平滑且该环境内某一变量为主要驱动因子^[69—70]。而后者常用于需考虑多因素综合影响下的复杂环境区域,如带有海拔变化的山地等^[71—72]。本次研究区域为开阔水域,且鲨鱼作为变温动物易受温度变化的影响,故本次研究尝试采用了基于空间梯度的气候速度计算方法^[73—74]。

研究发现在中国周边海域,东海的气候速度较低,南海中部在 SSP585 情景下气候速度较高,渤海则在不同气候情景下均出现了气候速度高值区。其成因或是南海海域较东海存在更低的气候空间梯度^[67],在相同升温幅度条件下,低气候空间梯度会导致高气候速度^[57]。对全球水域长时间序列气候速度的研究发现,南海气候速度显著高于东海^[75],这与本研究的结论相似。而渤海的高气候速度可能归因于其特殊地貌,渤海是位于较高纬度的半封闭海,海湾开口朝向东南,而北侧毗邻陆地。随着海温升高,海洋物种在气候暴露下无法直接向北迁移,这意味着该区域的生物或需绕过朝鲜半岛迁移更远的距离才能维持生存条件,这可能是渤海气候速度高的重要原因。此外,渤海的海区面积相对较小,这意味着海区内的环境条件范围较窄,生物的适温性也相对较窄,可能对环境条件的变化更敏感。

3.2 气候速度对保护优先区选划的影响

当以气候速度作为机会成本时,我们发现保护优先区的空间格局出现了变化,SSP585 情景下的变化比 SSP126 情景更明显,这提示在保护优先区规划时需充分考虑气候速度。欧洲科学家发现气候变化情景下现状保护区中的气候速度呈上升趋势,表明未来保护区将面临不断增加的气候变化压力^[76]。有研究发现如在保护优先区规划时引入气候速度,美国南洛基山脉的保护区将能够减少 27% 气候速度压力^[77]。本研究结果亦显示,在实现相似保护目标的前提下,考虑气候速度比不考虑气候速度能为保护优先区减缓至少 25% 的气候速度压力。这说明在陆地和海洋的规划场景中对气候速度的考虑具有通用性,为了应对气候变化,保护优先区均需要选划在气候速度相对较低的区域^[68,77]。

尽管引入气候速度的保护区网络构建方法能够统筹气候变化与保护目标,可为生物多样性保护和应对气候变化协同增效提供有效的工具或方案^[32],但本研究作为气候速度影响下中国周边海域鲨鱼保护优先区的首次探索,方法上可能仍存在一定的局限性,包括但不限于:一、本研究中保护对象的栖息地分布基于生态模型大数据模拟,未来如能补充足够的调查数据,可进一步验证或修正模拟结果,以提升研究的准确性;二、本研究仅考虑气候变化影响,未考虑人类活动、过度捕捞等对鲨鱼具有重要影响的因素,在将来的研究中可考虑耦合人类活动与气候变化,识别多重压力影响下的保护优先区空间格局;三、气候速度法在保护对象上具有中立性,即将鲨鱼种群看作一个整体,但不同种类的鲨鱼适温性是不同的^[78],未来可以结合物种的适温特性将其划分为不同的组别,进行分析研究,以增强结果的真实性与可靠性。

3.3 鲨鱼的保护现状和建议

本研究发现,中国周边海域鲨鱼的分布热点主要集中在长江口以南至台湾海峡和北部湾近岸海域,这一发现与全球鲨鳐类生物多样性热点分析研究的分析结果保持一致^[74,79],即台湾海峡不仅是世界鲨鳐类物种多样性的热点区域,亦是珍稀濒危物种的分布热点区域^[80-81]。这表明本研究的栖息地模拟结果具有较高准确性,以此为基础的保护空间选划也具有相当程度的可信度。全球性的研究显示,尽管全球约有 3% 的海域设立了鲨鱼保护区^[74,82],但其所属的国家/区域在全球鲨鱼捕捞总量中的贡献度却不足 1%^[14]。而在中国周边海域,尽管分布有全球近 27% 的鲨鱼物种,有效保护的物种数量不足 4%,珍稀濒危物种的保护比例甚至更低。这提示不论是在中国周边海域还是全球尺度,尚存在巨大的鲨鱼保护空缺,亟待实施有针对性的保护对策和举措。

国际上已有一些研究对现状情景下的鲨鱼保护优先区分析研究,中国管辖海域中的长江口、台湾海峡、西沙群岛等地点被识别为保护优先区^[83],与本研究所识别的现状保护优先区相似。此外,有研究表明鲨鱼或将在气候变化的影响下改变其育幼场和栖息地分布,未来这些分布区域可能出现在现状保护未涉及的区域,但这方面在现有的保护规划或保护策略中很少被提及^[84-86]。本研究不仅对现状保护优先区进行了有效识别,还探索了未来情景下的鲨鱼保护优先区。建议在未来的相关保护行动中可对台湾海峡、北部湾、西沙海域等区域进行重点关注,不但保护现有的鲨鱼栖息地,也需重视潜在的气候避难所。

4 结论

本研究以 146 种鲨鱼为保护对象,基于系统保护规划方法,将气候速度作为保护的机会成本,首次识别了不同气候变化情景下中国周边海域的鲨鱼保护优先区。研究发现,中国周边海域鲨鱼物种多样性的热点分布区位于长江口以南至台湾海峡和北部湾近岸。在该研究区域内,渤海的气候速度最高,东海的气候速度较低,南海在 SSP585 情景下出现气候速度的陡增。现有保护区仅保护了不到 4% 的鲨鱼物种,保护空缺较大。现状情景下保护优先区主要集中在朝鲜半岛南部、台湾海峡周边、北部湾、西沙群岛、南沙群岛等海域,而在气候速度影响下保护优先区空间格局将发生不同程度的变化,尤其是在南海。在不同的保护方案中,低目标方案可有效提升多样性的保护成效,而高目标方案则更有利于珍稀濒危物种的栖息地保护。整体来看,如在保护规划时兼顾气候速度,可在满足相似保护目标的前提下减少保护优先区 25% 以上的气候压力。本研究可为

鲨鱼栖息地的空间保护、应对气候变化的海洋保护地选划等具体的保护管理工作提供有效的科学工具和重要科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Kriwet J, Witzmann F, Klug S, Heidtke U H J. First direct evidence of a vertebrate three-level trophic chain in the fossil record. *Proceedings Biological Sciences*, 2008, 275(1631): 181-186.
- [2] 朱江峰, 戴小杰. 中国鲨鱼资源生物学研究现状与保护对策. *生物学通报*, 2007, 42(5): 19-20.
- [3] Ferretti F, Worm B, Britten G L, Heithaus M R, Lotze H K. Patterns and ecosystem consequences of shark declines in the ocean. *Ecology Letters*, 2010, 13(8): 1055-1071.
- [4] 张清榕, 杨圣云. 中国软骨鱼类种类、地理分布及资源. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(S1): 207-211.
- [5] Dulvy N K, Fowler S L, Musick J A, Cavanagh R D, Kyne P M, Harrison L R, Carlson J K, Davidson L N, Fordham S V, Francis M P, Pollock C M, Simpfendorfer C A, Burgess G H, Carpenter K E, Compagno L J, Ebert D A, Gibson C, Heupel M R, Livingstone S R, Sanciangco J C, Stevens J D, Valenti S, White W T. Extinction risk and conservation of the world's sharks and rays. *eLife*, 2014, 3: e00590.
- [6] Jorgensen S J, Micheli F, White T D, Van Houtan K S, Alfaro-Shigueto J, Andrzejczek S, Arnoldi N S, Baum J K, Block B, Britten G L, Butner C, Caballero S, Cardeñoso D, Chapple T K, Clarke S, Cortés E, Dulvy N K, Fowler S, Gallagher A J, Gilman E, Godley B J, Graham R T, Hammerschlag N, Harry A V, Heithaus M R, Hutchinson M, Huveneers C, Lowe C G, Lucifora L O, MacKeracher T, Mangel J C, Barbosa Martins A P, McCauley D J, McClenachan L, Mull C, Natanson L J, Pauly D, Pazmiño D A, Pistevo J, Queiroz N, Roff G, Shea B D, Simpfendorfer C A, Sims D W, Ward-Paige C, Worm B, Ferretti F. Emergent research and priorities for shark and ray conservation. *Endangered Species Research*, 2022, 47: 171-203.
- [7] Pacoureau N, Rigby C L, Kyne P M, Sherley R B, Winker H, Carlson J K, Fordham S V, Barreto R, Fernando D, Francis M P, Jabado R W, Herman K B, Liu K M, Marshall A D, Pollom R A, Romanov E V, Simpfendorfer C A, Yin J S, Kindsater H K, Dulvy N K. Half a century of global decline in oceanic sharks and rays. *Nature*, 2021, 589(7843): 567-571.
- [8] MacNeil M A, Chapman D D, Heupel M, Simpfendorfer C A, Heithaus M, Meekan M, Harvey E, Goetze J, Kiszka J, Bond M E, Currey-Randall L M, Speed C W, Sherman C S, Rees M J, Udyawer V, Flowers K I, Clementi G, Valentin-Albanese J, Gorham T, Adam M S, Ali K, Pina-Amargós F, Angulo-Valdés J A, Asher J, Barcia L G, Beaufort O, Benjamin C, Bernard A T F, Berumen M L, Bierwagen S, Bonnema E, Bown R M K, Bradley D, Brooks E, Brown J J, Buddo D, Burke P, Cáceres C, Cardeñoso D, Carrier J C, Caselle J E, Charloo V, Claverie T, Clua E, Cochran J E M, Cook N, Cramp J, D'Alberto B, de Graaf M, Dornhege M, Estep A, Fanovich L, Farabaugh N F, Fernando D, Flam A L, Floros C, Fourqurean V, Garla R, Gastrich K, George L, Graham R, Guttridge T, Hardenstine R S, Heck S, Henderson A C, Hertler H, Hueter R, Johnson M, Jupiter S, Kasana D, Kessel S T, Kiilu B, Kirata T, Kuguru B, Kyne F, Langlois T, Lédée E J I, Lindfield S, Luna-Acosta A, Maggs J, Manjaji-Matsumoto B M, Marshall A, Matich P, McCombs E, McLean D, Meggs L, Moore S, Mukherji S, Murray R, Kaimuddin M, Newman S J, Nogués J, Obota C, O'Shea O, Osuka K, Papastamatiou Y P, Perera N, Peterson B, Ponzo A, Prasetyo A, Sjamsul Quamar L M, Quinlan J, Ruiz-Abierno A, Sala E, Samoilys M, Schärer-Umpierre M, Schlaff A, Simpson N, Smith A N H, Sparks L, Tanna A, Torres R, Travers M J, van Zinnicq Bergmann M, Vigliola L, Ward J, Watts A M, Wen C, Whitman E, Wirsing A J, Wothke A, Zarza-González E, Cinner J E. Global status and conservation potential of reef sharks. *Nature*, 2020, 583(7818): 801-806.
- [9] IUCN (2022) The IUCN Red List of Threatened Species. Available at: <https://www.iucnredlist.org>.
- [10] Porcher I F, Darvell B W. Shark fishing vs. conservation: analysis and synthesis. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9548.
- [11] Pollerspöck J. & Straube, N. (2021), Bibliography database of living/fossil sharks, rays and chimaeras (Chondrichthyes: Elasmobranchii, Holocephali)-List of Valid Extant Species; List of Described Extant Species; Statistic -, www.shark-references.com, World Wide Web electronic publication, Version 10/2021; ISSN: 2195-6499.
- [12] 张然, 林龙山, 李渊, 宋普庆, 陈永俊, 张静. 南沙群岛西南部和北部湾口海域鲨鱼的种类组成和数量分布. *海洋渔业*, 2018, 40(1): 27-37.
- [13] 伍汉霖, 钟俊生. 中国海洋及河口鱼类系统检索. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [14] Ward-Paige C A. A global overview of shark sanctuary regulations and their impact on shark fisheries. *Marine Policy*, 2017, 82: 87-97.
- [15] Dulvy N K, Pacoureau N, Rigby C L, Pollom R A, Jabado R W, Ebert D A, Finucci B, Pollock C M, Cheok J, Derrick D H, Herman K B, Sherman C S, VanderWright W J, Lawson J M, Walls R H L, Carlson J K, Charvet P, Bineesh K K, Fernando D, Ralph G M, Simpfendorfer C A. Overfishing drives over one-third of all sharks and rays toward a global extinction crisis. *Current Biology*, 2021, 31(21): 4773-4787.e8.
- [16] Cardeñoso D, Shea S K, Zhang H R, Fischer G A, Simpfendorfer C A, Chapman D D. Two thirds of species in a global shark fin trade hub are threatened with extinction: conservation potential of international trade regulations for coastal sharks. *Conservation Letters*, 2022, 15(5): e12910.

- [17] 杜建国, William W. L. Cheung, 陈彬, 周秋麟, 杨圣云, Guanqiong Ye. 气候变化与海洋生物多样性关系研究进展. 生物多样性, 2012, 20(06): 745-754.
- [18] Poloczanska E S, Brown C J, Sydeman W J, Kiessling W, Schoeman D S, Moore P J, Brander K, Bruno J F, Buckley L B, Burrows M T, Duarte C M, Halpern B S, Holding J, Kappel C V, O'Connor M I, Pandolfi J M, Parmesan C, Schwing F, Thompson S A, Richardson A J. Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 919-925.
- [19] Vilmar M, Di Santo V. Swimming performance of sharks and rays under climate change. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2022, 32(3): 765-781.
- [20] Rosa R, Baptista M, Lopes V M, Pegado M R, Paula J R, Trübenbach K, Leal M C, Calado R, Repolho T. Early-life exposure to climate change impairs tropical shark survival. *Proceedings Biological Sciences*, 2014, 281(1793): 20141738.
- [21] 舒黎明, 李永振, 陈国宝. 南海主要珊瑚礁水域软骨鱼类的组成与分布. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(2): 277-280.
- [22] Du J G, Ding L K, Su S K, Hu W J, Wang Y Y, Loh K H, Yang S Y, Chen M R, Roeroe K A, Songpoy S, Liu Z H, Chen B. Setting conservation priorities for marine sharks in China and the association of Southeast Asian nations (ASEAN) seas: what are the benefits of a 30% conservation target? *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 933291.
- [23] Edgar G J, Stuart-Smith R D, Willis T J, Kininmonth S, Baker S C, Banks S, Barrett N S, Becerro M A, Bernard A T F, Berkhout J, Buxton C D, Campbell S J, Cooper A T, Davey M, Edgar S C, Försterra G, Galván D E, Irigoyen A J, Kushner D J, Moura R, Parnell P E, Shears N T, Soler G, Strain E M A, Thomson R J. Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature*, 2014, 506(7487): 216-220.
- [24] Duarte C M, Agusti S, Barbier E, Britten G L, Castilla J C, Gattuso J P, Fulweiler R W, Hughes T P, Knowlton N, Lovelock C E, Lotze H K, Predragovic M, Poloczanska E, Roberts C, Worm B. Rebuilding marine life. *Nature*, 2020, 580(7801): 39-51.
- [25] Kyprioti A, Almpantidou V, Chatzimentor A, Katsanevakis S, Mazaris A D. Is the Current Mediterranean network of marine protected areas resilient to climate change? *Science of the Total Environment*, 2021, 792: 148397.
- [26] Zhang X, Vincent A C J. Conservation prioritization for seahorses (*Hippocampus* spp.) at broad spatial scales considering socioeconomic costs. *Biological Conservation*, 2019, 235: 79-88.
- [27] Puri M, Marx A J, Possingham H P, Wilson K A, Karanth K K, Loiselle B A. An integrated approach to prioritize restoration for carnivore conservation in shared landscapes. *Biological Conservation*, 2022, 273: 109697.
- [28] Zhu Z Q, Wang K, Lei M Q, Li X, Li X D, Jiang L B, Gao X, Li S, Liang J. Identification of priority areas for water ecosystem services by a techno-economic, social and climate change modeling framework. *Water Research*, 2022, 221: 118766.
- [29] Arafeh-Dalmau N, Brito-Morales I, Schoeman D S, Possingham H P, Klein C J, Richardson A J. Incorporating climate velocity into the design of climate-smart networks of marine protected areas. *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(10): 1969-1983.
- [30] Brito-Morales I, Schoeman D S, Molinos J G, Burrows M T, Klein C J, Arafeh-Dalmau N, Kaschner K, Garilao C, Kesner-Reyes K, Richardson A J. Climate velocity reveals increasing exposure of deep-ocean biodiversity to future warming. *Nature Climate Change*, 2020, 10(6): 576-581.
- [31] Brito-Morales I, García Molinos J, Schoeman D S, Burrows M T, Poloczanska E S, Brown C J, Ferrier S, Harwood T D, Klein C J, McDonald-Madden E, Moore P J, Pandolfi J M, Watson J E M, Wenger A S, Richardson A J. Climate velocity can inform conservation in a warming world. *Trends in Ecology & Evolution*, 2018, 33(6): 441-457.
- [32] Asamoah E F, Beaumont L J, Maina J M. Climate and land-use changes reduce the benefits of terrestrial protected areas. *Nature Climate Change*, 2021, 11(12): 1105-1110.
- [33] Johnson S M, Watson J R. Novel environmental conditions due to climate change in the world's largest marine protected areas. *One Earth*, 2021, 4(11): 1625-1634.
- [34] Bates A E, Cooke R S C, Duncan M I, Edgar G J, Bruno J F, Benedetti-Cecchi L, Côté I M, Lefcheck J S, Costello M J, Barrett N, Bird T J, Fenberg P B, Stuart-Smith R D. Climate resilience in marine protected areas and the 'Protection Paradox'. *Biological Conservation*, 2019, 236: 305-314.
- [35] Fredston-Hermann A, Gaines S D, Halpern B S. Biogeographic constraints to marine conservation in a changing climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2018, 1429(1): 5-17.
- [36] Spalding M D, Fox H E, Allen G R, Davidson N, Ferdaña Z A, Finlayson M, Halpern B S, Jorge M A, Lombana A, Lourie S A, Martin K D, McManus E, Molnar J, Recchia C A, Robertson J. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 2007, 57(7): 573-583.
- [37] 刘瑞玉. 中国海物种多样性研究进展. 生物多样性, 2011, 19(6): 614-626.
- [38] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究. 海洋学报, 2001, 23(4): 1-16.
- [39] 周秋麟, 杨圣云, 陈宝红. 我国海洋生物物种多样性研究. 科技导报, 2005, 23(2): 12-16.

- [40] Cai R S, Tan H J, Qi Q H. Impacts of and adaptation to inter-decadal marine climate change in coastal China Seas. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(11): 3770-3780.
- [41] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- [42] 国家海洋局. 中国近海海洋图集-海洋生物与生态. 北京: 海洋出版社, 2016.
- [43] Owens H, Barve V, Chamberlain S. spocc: Interface to Species Occurrence Data Sources. <https://github.com/ropensci/spocc> (devel), <https://docs.ropensci.org/spocc/>.
- [44] Thuiller W, Guéguen M, Renaud J, Karger D N, Zimmermann N E. Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-9.
- [45] Diaz-Carballido P L, Mendoza-González G, Yañez-Arenas C A, Chiappa-Carrara X. Evaluation of shifts in the potential future distributions of carcharhinid sharks under different climate change scenarios. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8: 745501.
- [46] Watson R, Zeller D, Pauly D. Primary productivity demands of global fishing fleets. *Fish and Fisheries*, 2014, 15(2): 231-241.
- [47] MacKenzie K M, Robertson D R, Adams J N, Altieri A H, Turner B L. Structure and nutrient transfer in a tropical pelagic upwelling food web: from isoscapes to the whole ecosystem. *Progress in Oceanography*, 2019, 178: 102145.
- [48] Gonzalez-Pestana A, Maguiño R, Mendoza A, Kelez S, Ramírez-Macías D. Distribution of whale shark (*Rhincodon typus*) off northern Peru based on habitat suitability. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2020, 30(7): 1325-1336.
- [49] Chi Chan M Y, Sosa-Nishizaki O, Pérez-Jiménez J C. Potential distribution of critically endangered hammerhead sharks and overlap with the small-scale fishing fleet in the southern Gulf of Mexico. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 46: 101900.
- [50] Pottie S, Flam A L, Keeping J A, Chivindze C, Bull J C. Quantifying the distribution and site fidelity of a rare, non-commercial elasmobranch using local ecological knowledge. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 212: 105796.
- [51] Assis J, Tyberghein L, Bosch S, Verbruggen H, Serrão E A, De Clerck O. Bio-ORACLE v2.0: extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(3): 277-284.
- [52] Melo-Merino S M, Reyes-Bonilla H, Lira-Noriega A. Ecological niche models and species distribution models in marine environments: a literature review and spatial analysis of evidence. *Ecological Modelling*, 2020, 415: 108837.
- [53] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223-1232.
- [54] Fourcade Y, Besnard A G, Secondi J. Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(2): 245-256.
- [55] Thuiller, W., Georges, D., Gueguen, M., Engler, R., and Breiner, F. Biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R Package Version 3.5.1. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=biomod2>.
- [56] Molinos J G, Schoeman D S, Brown C J, Burrows M T. VoCC: an r package for calculating the velocity of climate change and related climatic metrics. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10(12): 2195-2202.
- [57] Loarie S R, Duffy P B, Hamilton H, Asner G P, Field C B, Ackerly D D. The velocity of climate change. *Nature*, 2009, 462(7276): 1052-1055.
- [58] O'Neill B C, Kriegler E, Ebi K L, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman D S, van Ruijven B J, van Vuuren D P, Birkmann J, Kok K, Levy M, Solecki W. The Roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 169-180.
- [59] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J F, Lowe J, Meehl G A, Moss R, Riahi K, Sanderson B M. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [60] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [61] 艾梦池, 程效军. 数字影像重采样方法实现及对比分析. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2015, 34(12): 1382-1387.
- [62] Ardrón, J.A., Possingham, H.P., and Klein, C.J. (eds). *Marxan Good Practices Handbook*, Version 2. Pacific Marine Analysis and Research Association, Victoria, BC, Canada. 165 pages. www.pacmara.org.
- [63] Fuentes M M P B, Gillis A J, Ceriani S A, Guttridge T L, Van Zinnicq Bergmann M P M, Smukall M, Gruber S H, Wildermann N. Informing marine protected areas in Bimini, Bahamas by considering hotspots for green turtles (*Chelonia mydas*). *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(1): 197-211.
- [64] van Zinnicq Bergmann M P M, Guttridge T L, Smukall M J, Adams V M, Bond M E, Burke P J, Fuentes M M P B, Heinrich D D U, Huveneers C, Gruber S H, Papastamatiou Y P. Using movement models and systematic conservation planning to inform marine protected area design for a multi-species predator community. *Biological Conservation*, 2022, 266: 109469.

- [65] Stewart R R, Possingham H P. Efficiency, costs and trade-offs in marine reserve system design. *Environmental Modeling & Assessment*, 2005, 10 (3): 203-213.
- [66] Ball I, Possingham H. MARXAN(V1.8.2): Marine Reserve Design Using Spatially Explicit Annealing, a Manual. 2000.
- [67] Burrows M T, Schoeman D S, Buckley L B, Moore P, Poloczanska E S, Brander K M, Brown C, Bruno J F, Duarte C M, Halpern B S, Holding J, Kappel C V, Kiessling W, O'Connor M I, Pandolfi J M, Parmesan C, Schwing F B, Sydeman W J, Richardson A J. The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science*, 2011, 334(6056): 652-655.
- [68] Hamann A, Roberts D R, Barber Q E, Carroll C, Nielsen S E. Velocity of climate change algorithms for guiding conservation and management. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 997-1004.
- [69] Huang M T, Piao S L, Janssens I A, Zhu Z C, Wang T, Wu D H, Ciais P, Myneni R B, Peaucelle M, Peng S S, Yang H, Peñuelas J. Velocity of change in vegetation productivity over northern high latitudes. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(11): 1649-1654.
- [70] Dobrowski S Z, Abatzoglou J, Swanson A K, Greenberg J A, Mynsberge A R, Holden Z A, Schwartz M K. The climate velocity of the contiguous United States during the 20th century. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 241-251.
- [71] Barber Q E, Nielsen S E, Hamann A. Assessing the vulnerability of rare plants using climate change velocity, habitat connectivity, and dispersal ability: a case study in Alberta, Canada. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(5): 1433-1441.
- [72] Tournebise R, Borner L, Manel S, Meynard C N, Vigouroux Y, Crouzillat D, Fournier C, Kassam M, Descombes P, Tranchant-Dubreuil C, Parrinello H, Kiwuka C, Sumirat U, Legnate H, Kambale J L, Sonké B, Mahinga J C, Musoli P, Janssens S B, Stoffelen P, de Kochko A, Poncet V. Ecological and genomic vulnerability to climate change across native populations of Robusta coffee (*Coffea canephora*). *Global Change Biology*, 2022, 28(13): 4124-4142.
- [73] Osgood G J, White E R, Baum J K. Effects of climate-change-driven gradual and acute temperature changes on shark and ray species. *Journal of Animal Ecology*, 2021, 90(11): 2547-2559.
- [74] Tittensor D P, Mora C, Jetz W, Lotze H K, Ricard D, Vanden Berghe E, Worm B. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature*, 2010, 466(7310): 1098-1101.
- [75] Woolway R I, Maberly S C. Climate velocity in inland standing waters. *Nature Climate Change*, 2020, 10(12): 1124-1129.
- [76] Lai Q, Hoffmann S, Jaeschke A, Beierkuhnlein C. Emerging spatial prioritization for biodiversity conservation indicated by climate change velocity. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108829.
- [77] Haight J, Hammill E. Protected areas as potential refugia for biodiversity under climatic change. *Biological Conservation*, 2020, 241: 108258.
- [78] Birkmanis C A, Freer J J, Simmons L W, Partridge J C, Sequeira A M M. Future distribution of suitable habitat for pelagic sharks in Australia under climate change models. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 570.
- [79] Lucifora L O, García V B, Worm B. Global diversity hotspots and conservation priorities for sharks. *PLoS One*, 2011, 6(5): e19356.
- [80] Derrick D H, Cheok J, Dulvy N K. Spatially congruent sites of importance for global shark and ray biodiversity. *PLoS One*, 2020, 15 (7): e0235559.
- [81] Stein R W, Mull C G, Kuhn T S, Aschliman N C, Davidson L N K, Joy J B, Smith G J, Dulvy N K, Mooers A O. Global priorities for conserving the evolutionary history of sharks, rays and chimaeras. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(2): 288-298.
- [82] Ward-Paige C A, Worm B. Global evaluation of shark sanctuaries. *Global Environmental Change*, 2017, 47: 174-189.
- [83] Davidson L N K, Dulvy N K. Global marine protected areas to prevent extinctions. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(2): 1-6.
- [84] Hammerschlag N, McDonnell L H, Rider M J, Street G M, Hazen E L, Natanson L J, McCandless C T, Boudreau M R, Gallagher A J, Pinsky M L, Kirtman B. Ocean warming alters the distributional range, migratory timing, and spatial protections of an apex predator, the tiger shark (*Galeocerdo cuvier*). *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 1990-2005.
- [85] Oh B Z L, Sequeira A M M, Meekan M G, Ruppert J L W, Meeuwij J J. Predicting occurrence of juvenile shark habitat to improve conservation planning. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2017, 31(3): 635-645.
- [86] Niella Y, Raoult V, Gaston T, Goodman K, Harcourt R, Peddemors V, Smoothey A F. Reliance of young sharks on threatened estuarine habitats for nutrition implies susceptibility to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 268: 107790.