

DOI: 10.5846/stxb202107021767

苏尚柯, 杜建国, 陈彬, 谭红建, 杨雯, 丁丽可, 董鹏, 俞炜炜, 胡文佳. 气候变化对中国近海 8 种中上层鱼类潜在生境分布的影响. 生态学报, 2022, 42(12): 4834-4846.

Su S K, Du J G, Chen B, Tan H J, Yang W, Ding L K, Dong P, Yu W W, Hu W J. Impact of climate change on the potential habitat distributions of eight pelagic fishes in the coastal waters of China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4834-4846.

气候变化对中国近海 8 种中上层鱼类潜在生境分布的影响

苏尚柯¹, 杜建国^{1,3,4}, 陈彬^{1,3,4}, 谭红建¹, 杨雯^{1,5}, 丁丽可^{1,5}, 董鹏², 俞炜炜^{1,3,4}, 胡文佳^{1,3,4,*}

1 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005

2 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

3 福建省海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

4 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

5 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306

摘要:随着底层和近底层渔业资源的衰退, 海洋中上层鱼类在我国海洋捕捞业中逐渐占据重要的地位。预测气候变化情景下中上层经济鱼类的潜在生境分布及其变化规律, 可为应对气候变化的鱼类栖息地保护和渔业生态系统管理提供重要科学依据。采用物种分布模型模拟并预测现状及 2050 年两种气候变化情景下 8 种中上层经济鱼类在中国近海的潜在分布, 通过分布区的收缩-扩张情形和质心迁移距离定量分析气候变化对鱼类空间分布格局的影响。结果表明: (1) 模型预测结果良好, 各组模型的 AUC 值均高于 0.85, 影响目标鱼类潜在分布的主要驱动因子为海水表层温度和溶解氧; (2) 8 种中上层经济鱼类中, 羽鳃鲷 (*Rastrelliger kanagurta*)、鳙鱼 (*Ilisha elongata*) 等种类生境分布偏南, 气候变化情景下分布北界可扩展至长江口, 而鳊鱼 (*Engraulis japonicus*)、青鳞小沙丁鱼 (*Sardinella zunasi*) 等种类主要分布在我国北方海域, 气候变化情景下生境南缘边界退缩明显; (3) 整体来看 RCP8.5 情景下的空间分布变化率大于 RCP2.6 情景, 其中蓝圆鲹 (*Decapterus maruadsi*)、青鳞小沙丁鱼等分布面积扩张, 可能是潜在的受益者, 而羽鳃鲷、鳊鱼等可能是潜在的受损者, 鳊鱼的潜在分布面积缩减最多; (4) 大部分鱼类的潜在生境呈现向北迁移的情形, 仅有青鳞小沙丁鱼略微南移, RCP2.6 情景下目标种类的分布质心平均北移距离为 89.43km, RCP8.5 情景下北移距离为 182.95km。

关键词: 气候变化; MaxEnt 模型; 海洋中上层鱼类; 空间格局

Impact of climate change on the potential habitat distributions of eight pelagic fishes in the coastal waters of China

SU Shangke¹, DU Jianguo^{1,3,4}, CHEN Bin^{1,3,4}, TAN Hongjian¹, YANG Wen^{1,5}, DING Like^{1,5}, DONG Peng², YU Weiwei^{1,3,4}, HU Wenjia^{1,3,4,*}

1 Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

2 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

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

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

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

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFE0124700); 福建省自然科学基金项目 (2020J05078); 国家自然科学基金项目 (41906127, 42176153)

收稿日期: 2021-07-02; **采用日期:** 2022-02-07

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

Abstract: Pelagic fishes are becoming more and more important in marine fisheries, with the decline of demersal fishes. The significantly scientific basis can be provided for fish habitat protection and fishery ecosystem management in response to climate change, through prediction of potential habitat distribution and variation of species of pelagic fishes under climate change scenarios. In this study, the potential distribution and habitat suitability for 8 commercially pelagic fish under different climate change scenarios were simulated using species distribution model. The effects of climate change on the spatial distribution framework of pelagic fish were analyzed by constriction-expansion and centroid migration distance in the distribution area. The results showed that: (1) the AUC (Area Under the Curve) values of each model were higher than 0.85, suggested that the accuracy of the model was satisfactory. The sea surface temperature and dissolved oxygen were the main driving factors affecting the potential distribution of target fishes. (2) Among the 8 target pelagic fishes, *Rastrelliger kanagurta*, *Ilisha elongata*, etc were distributed in south, which could move northward to the Yangtze River Estuary under climate change scenarios. *Engraulis japonicus*, *Sardinella zunasi*, etc were mainly distributed in the northern China seas, and the southern edge of their potential habitats obviously shrunk when climate changed. (3) Overall, the distribution pattern changes were greater under RCP8.5 scenario than RCP2.6 scenario. Species like *D. maruadsi* and *S. zunasi* may have expansion habitats as potential winners, while *R. kanagurta*, *E. japonicus*, etc. may be potential losers. The potential habitat of *E. japonicus* may have the most reduction. (4) The potential habitats of most pelagic fish may move northwards, however *S. zunasi* tends to move southward. The average northward distance of habitat centroids under RCP2.6 is predicted to be 89.43 kilometers, and the distance under RCP8.5 is 182.95 kilometers.

Key Words: climate change; MaxEnt model; pelagic fishes; spatial pattern

海洋中上层鱼类是指生命周期内栖息于水域中层或上层的鱼类,随着底层和近底层渔业资源的衰退,中上层鱼类渔业在我国海洋捕捞业中逐渐占据重要的地位^[1]。根据中国渔业相关统计资料,近年来中上层鱼类捕捞量约占全国海洋捕捞量的 40%^[2],其中具有较高经济价值的中上层鱼类有蓝圆鲹(*Decapterus maruadsi*)、蓝点马鲛鱼(*Scomberomorus niphonius*)、鲷鱼(*Engraulis japonicus*)等^[3]。此外,中上层鱼类如鲷鲱鱼类和鲆鲽鱼类等在中国海域种类丰富且数量较多,在海洋生态系统的物质流动和能量循环过程中具有重要作用^[4-5]。

随着气候变化进程的持续,已有大量研究观测到海洋生物的分布随气候变化迁移,而中上层物种的迁徙变化更为明显^[6]。海洋生物的分布与生物对温度等环境因子的生理耐受性有密切的联系^[7],因此,以变暖为主特征的气候变化将导致海洋生物的分布和群落结构发生变化。有研究发现气候变化导致全球海洋物种的丰度呈现向极地方向增加且向赤道方向减少的趋势^[8],由此可能会导致热带和半封闭海域的局部物种灭绝以及极地地区的物种入侵^[9]。现有研究表明,气候变暖导致白令海的部分中上层鱼类及其幼鱼的分布更加往北^[10],而深海鱼类的适宜生境也会向更高纬度移动^[11]。小型中上层鱼类在海洋生态系统中发挥着重要作用,且作为 r 对策生物和低营养级物种,其更容易受到环境变化的影响^[4]。研究显示,气候变化带来的环境波动会严重影响鲷鱼、沙丁鱼等小型中上层鱼类的繁殖与补充量^[12],以沙丁鱼、鲱鱼、竹荚鱼、鲭鱼等为主的欧洲小型中上层鱼类随着气候变化可能会出现部分种类的区域性灭绝^[13]。然而,关于栖息在中国海域的小型中上层鱼类如何受到气候变化影响的研究仍然很少^[14-15]。

物种分布模型(Species Distribution models, SDMs)是研究气候变化下物种空间分布格局变化和生物多样性响应的重要工具,被广泛运用于陆地、淡水和海洋研究领域^[16-19]。模型利用物种出现的观测值与环境参数,预测物种在特定时空下的地理分布情况并以存在的概率表征,在保护生物多样性、入侵物种防护、生态连通性等方面的研究中发挥着重要的作用。常见的物种分布模型有 BIOCLIM 模型、马氏距离(Mahalanobis Distance, MD)、随机森林模型(Random Forest Model, RFM)、最大熵模型(Maximum Entropy Model, MaxEnt)等^[20-21]。

近十多年来,在国际上采用物种分布模型研究海洋鱼类的分布变化已成为研究热点,除了一些高影响力的全球性研究外,区域性的研究热点主要集中在北大西洋^[18]。在这些研究中,单一 MaxEnt 或多种 SDMs 的集合模型被用于预测气候变化情景下鱼类适宜栖息地的转移方向和转移程度^[11,22]。亦有研究案例采用改进自物种分布模型的动态生物气候分室模型(Dynamic Bioclimate Envelope Model, DBEM)研究全球海洋生物对气候变化的响应情况,并分析太平洋陆架海域中上层鱼类未来的分布趋势,发现生物向极地迁移的规律^[11,16]。但在国内,应用物种分布模型预测气候变化对鱼类栖息地分布的影响研究多以淡水鱼类为主^[23-24],在海洋领域的研究则多以鱼类栖息地的现状分布模拟为主^[25-27],很少有研究系统开展气候变化情景下不同鱼类栖息地分布变化的预测和比较^[14,28]。

本研究拟选取 SDMs 模型中公认性能较好的最大熵模型(MaxEnt)^[29],探究气候变化对 8 种中上层经济鱼类蓝圆鲹、羽鳃鲈(*Rastrelliger kanagurta*)、鳙(*Ilisha elongata*)、鲱、青鳞小沙丁鱼(*Sardinella zunasi*)、蓝点马鲛、斑点马鲛(*Scomberomorus guttatus*)和康氏马鲛(*Scomberomorus commerson*)潜在生境分布的影响及其驱动作用。上述鱼类中,蓝圆鲹、鳙等属暖水性鱼类,鲱、蓝点马鲛等属暖温性鱼类^[1,3],这 8 种鱼类是鲱鲈科、鲈鲷科和鲭科鱼类的代表性鱼类,其所属类群的产量约占全国海洋捕捞主要鱼类产量的 36.8%^[30]。通过本研究可预测其适生区空间分布格局的变化及主导驱动因子,并定量分析不同气候情景下 8 种鱼类的生境迁移趋势、比较不同种间的变化特征,研究结果可为应对气候变化的鱼类栖息地保护和渔业生态系统管理提供重要科学依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

中国是世界上最大的沿海国之一,位于欧亚大陆东南部,东临太平洋,南接印度洋。中国海域属于西太平洋边缘海自北向南由渤海、黄海、东海和南海组成,横跨 42 个纬度^[31]。中国近海是众多渔业生物的关键栖息地和优良渔场,支撑着近海渔业资源的补充和可持续生产^[32]。本研究的区域范围基本涵盖中国近岸海域,研究区北缘至渤海湾,南缘至海南岛南部海域,约为北纬 17.56°—41.07°,东经 107.62°—124.40°,研究区内海域总面积约 161.54 万 km²(图 1)。

1.2 物种分布及环境数据来源

模型建立所需的物种分布数据来源于中国近海海洋综合调查与评价专项及全球物种数据库。中国近海海洋综合调查与评价专项调查范围为 16°—45.5°E, 107°—127°N,涵盖我国渤海、黄海、东海以及南海近海海域。调查时间为春(2007 年 4—5 月)、夏(2006 年 7—8 月)、秋(2007 年 10—12 月)、冬季(2006 年 12 月至 2007 年 1 月),共 4 个航次。每航次采用定点拖网调查,选取选择性能小的网具作为调查网具。每站拖网时间为 1 h,航速控制在 3 kn 左右;在距离标准站位位置 2n mile 时放网,经 1 h 拖网后达到标准站位附近^[33-34]。全球物种数据库包括 Global Biodiversity Information Faculty (GBIF, www.gbif.org)、Ocean Biodiversity Information System (OBIS, www.iobis.org)、FishNet2 (www.fishnet2.net)、FishBase (www.fishbase.org) 等。在

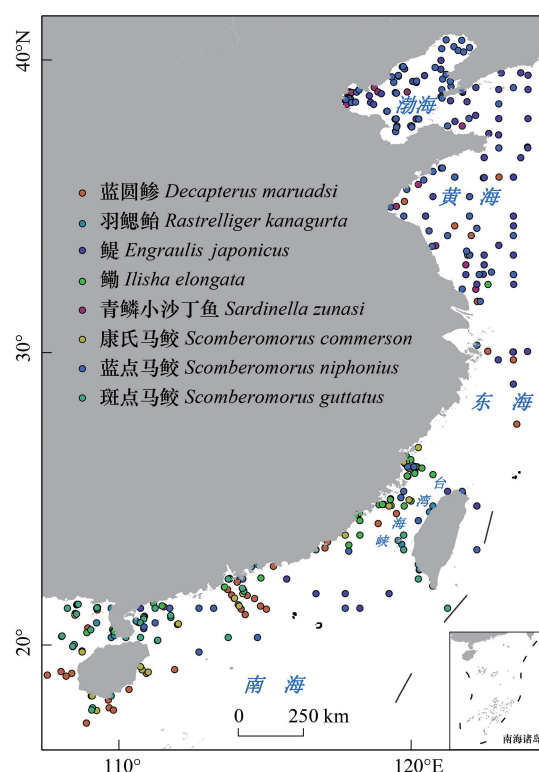


图 1 研究区范围及物种分布点站位图

Fig.1 Study region and species distribution sites

研究区内共获取 413 个调查分布数据和 120 个全球物种数据库分布数据,融合上述 533 个物种分布点数据并提取其空间经纬度信息(图 1),最终获得了可用于模型输入的 8 种中上层鱼类分布点数据集(表 1)。

表 1 目标物种分布数据及基本生态特征^[35—40]
Table 1 Ecological characteristics and distribution data for target species

物种名 Species name	热偏好 Thermal preference	已知分布范围 Known distribution range	有效分布数据 Available data
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	暖水性	黄海至南海,以东南海部至南海北部数量较多	75
羽鳃鲐 <i>Rastrelliger kanagurta</i>	暖水性	中国台湾海峡和南海有一定数量的分布	44
鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	暖温性	中国沿海均有分布,其中黄海数量较多	98
鲷 <i>Ilisha elongata</i>	暖水性	中国沿海均有分布,其中东海数量最多	69
青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	暖温性	渤海至南海近海	80
康氏马鲛 <i>Scomberomorus commerson</i>	暖水性	黄海至南海,以南海数量较多	35
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	暖温性	中国沿海均有分布	90
斑点马鲛 <i>Scomberomorus guttatus</i>	暖水性	东海南部至南海,以南海数量较多	42

通常,物种分布模型预测的环境参数主要由大气因子、海水物理化学因子、生态因子、地理地形因子、水文因子等构成,各组分中广泛使用的变量为:气温、水温、盐度、生境类型、离岸距离、水深、海水流速等^[18]。本研究选取海水表层温度(SST)、盐度、溶解氧、海水流速、水深、离岸距离 6 个变量,其中前 4 个作为变化变量,后 2 个作为稳定变量。现状环境数据提取自不同的全球数据库或遥感数据产品,其中 SST 数据提取自 NASA MODIS-Aqua L3 年度产品,水深提取自 NOAA 的 ETOPO1 高程数据,离岸距离提取自 globalfishingwatch 数据库,其他数据提取自 Bio-ORACLE 数据集^[41—42]。未来情景预测选取 CMIP5 四个代表性浓度路径中的最低排放(RCP2.6)和最高排放(RCP8.5)情景,模拟不同浓度路径下 2050s 的环境条件并进行对比。融合两个主流的全球环流模型 IPSL-CM5A-MR 和 GFDL-ESM2M 以制备情景参数,取两个环流模型 2041—2060 年的平均值作为 2050s 的环境情景,并应用 change-factor 方法将原始低分辨率的全球环流模型数据降尺度融合至研究区域^[43]。所有现状和未来环境数据集均标准化至 1 km 分辨率,以便开展模型预测。

1.3 模型设置与评估

本研究采用 MaxEnt 3.4.1^[44]对 8 种中上层鱼类的现状及未来分布进行模拟和预测。模型先通过现状训练数据获得物种分布与环境变量之间的关系,再将此关系投影至现状和未来情景,即每次可同时模拟一对现状和未来情景组合。由于本研究对 2050s 未来情景设置了两种浓度路径,因此需分别对两种未来情景组合进行模拟,即 8 种鱼类共运行 16 轮模型。将各物种分布数据和环境变量导入 MaxEnt 模型,以 75%的物种样本数据为训练数据集,并设置随机测试百分比为 25%,每一轮模型取迭代 10 次的平均值作为模型结果^[45—46]。模型输出为栅格数据集,以像元值表示各物种的存在概率,值域在 0—1 之间,像元值越高表征该物种的存在概率越高。以受试者工作特征曲线(Receive Operating Characteristic curve, ROC)下的面积(Area Under the Curve, AUC)评价模型结果的精度^[47—48],AUC 取值范围 0—1 之间,数值的大小与精度呈正相关,通常认为 0.8—0.9 表示模型精度较好;0.9—1.0 表示模型精度非常好^[49—50]。采用排列重要性分析各环境变量对鱼类生境分布的重要性^[51—52],排列重要性值越高表征模型结果受该环境变量影响越大。

1.4 物种潜在生境空间格局变化分析

空间格局是生态系统或系统属性空间变异程度的具体表现^[53],空间格局变化可以反映生态系统的生态过程、生物多样性等的变化,对物种的管理、保护有着重要的意义。本研究采用 SDMtoolbox 工具包进行物种分布模型构建的数据后处理过程^[54],结合等间距法^[55]选取阈值后划分二值图,选用其中的分布变化工具分析潜在生境/适生区面积在时间尺度上的变化情况,可识别物种分布的扩展、稳定或收缩区域。选用质心变化工具统计现状和未来不同情景下适生区质心的变化情况,可识别质心迁移方向、迁移距离等信息。上述分析过程在 ArcGIS 10.5 软件内进行,并开展后续分析和可视化等操作。

2 结果分析

2.1 MaxEnt 模型性能和环境变量的影响

针对 8 种中上层鱼类的两个现状-未来情景组合分别运行 MaxEnt 模型,模型精度评估结果显示 AUC 平均值为 0.91,所有模型的 AUC 值均高于 0.85,提示 8 组模型都具有较好的预测精度和可信度(表 2)。所有模型 10 次迭代后的标准差均低于 0.02,表明模型运行稳定,模型结果波动性较小。整体来看 8 组模型性能良好,可支持后续分析。

表 2 模型 AUC 值
Table 2 AUC Value of the model

物种名 Species name	AUC 值 Area under the curve value	标准差 Standard deviation	物种名 Species name	AUC 值 Area under the curve value	标准差 Standard deviation
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	0.888	0.008	青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	0.950	0.011
羽鳃鲐 <i>Rastrelliger kanagurta</i>	0.952	0.018	康氏马鲛 <i>Scomberomorus commerson</i>	0.924	0.011
鲷 <i>Engraulis japonicus</i>	0.834	0.013	蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	0.874	0.016
鳓 <i>Ilisha elongata</i>	0.944	0.006	斑点马鲛 <i>Scomberomorus guttatus</i>	0.922	0.018

排列重要性的分析结果显示,不同物种间环境变量的作用有所差异(图 2)。例如,溶解氧对蓝圆鲹、羽鳃

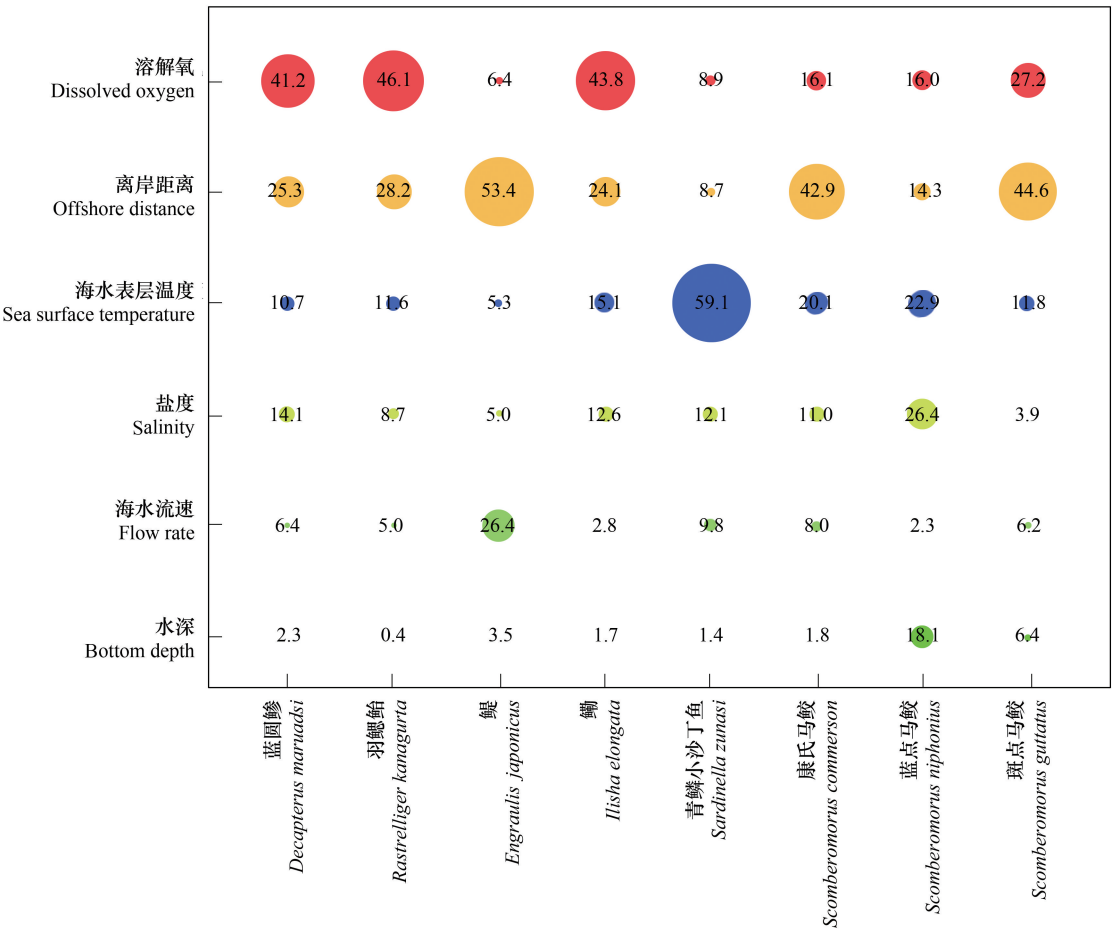


图 2 环境变量排列重要性
Fig.2 Permutation importance of Environment variables

鲈、鳙的适生区预测可能有较为重要的影响,而离岸距离对鳗、康氏马鲛、斑点马鲛的影响较大。青鳞小沙丁鱼的分布则更受 SST 影响,蓝点马鲛的分布对盐度和 SST 均有一定的敏感性。由于在本研究的情景设置中溶解氧、SST、盐度和海水流速是气候变化情景下的变动参数,而离岸距离、水深被认为是相对稳定的参数,因此整体结果提示影响气候变化情景下中上层鱼类分布的主要环境变量可能为 SST 和溶解氧。

根据模型拟合的环境变量与物种分布概率之间的响应关系可分析不同物种的环境变量限制域,本研究以二值图划分阈值的环境变量范围作为物种适生的限制域,比较 SST 和溶解氧对不同物种分布的限制作用(图 3)。结果表明,羽鳃鲈、斑点马鲛和康氏马鲛作为分布偏南的暖水性鱼类,相较其他物种的适温范围更窄,在模型中体现为受 SST 和溶解氧的限制较为严格,适应更温暖的水温和偏低的溶解氧。而鳗鱼、蓝点马鲛等广布性种类受这两类环境变量的限制较小,表现出比其他物种更大的环境适应范围。

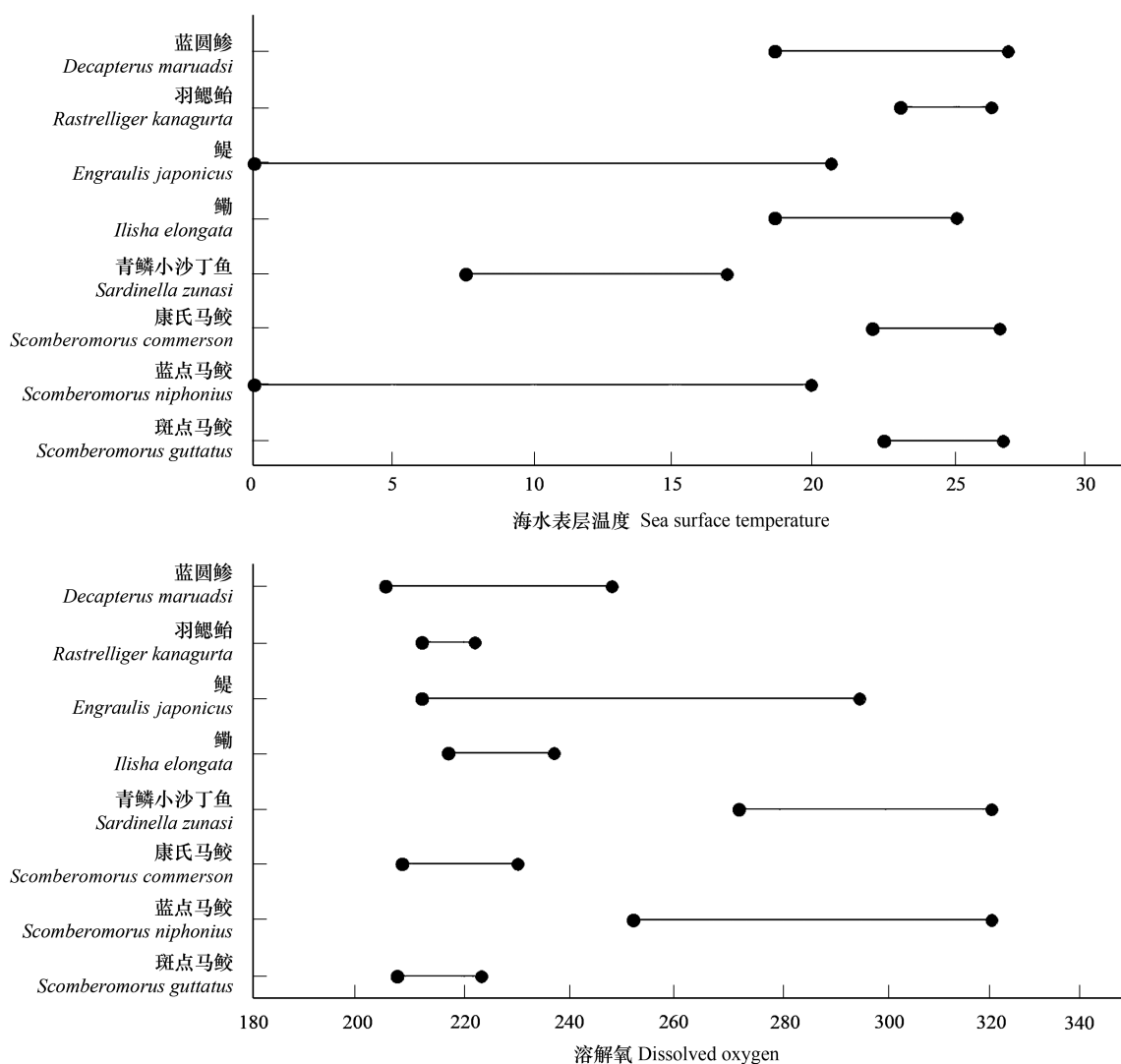


图 3 环境变量限制域

Fig.3 Environmental limitations of major factors

2.2 现状和气候变化情景下鱼类潜在适生区分布

以等间距法将现状以及 2050s 两种温室气体排放情景下的 8 种中上层经济鱼类的潜在适生区划分为四个等级,分别为 0.75—1.0(高适生区)、0.5—0.75(中适生区)、0.25—0.5(低适生区)和<0.25(非适生区)(图 4)。可见 8 种中上层经济鱼类中,蓝圆鲈的分布及扩散最广,在 RCP8.5 情景下甚至可从南海北部一直分布

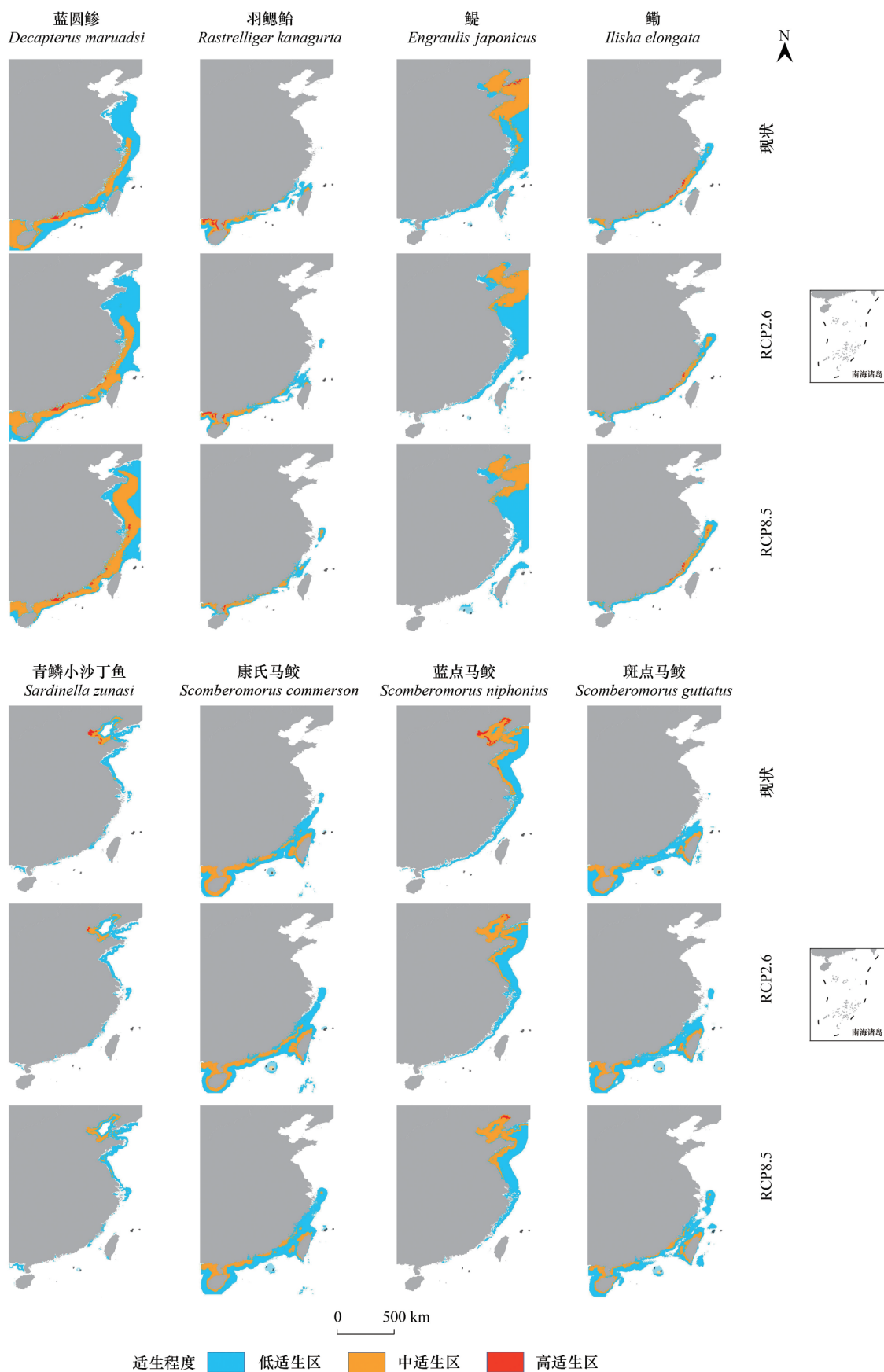


图4 各物种在不同排放情景下的适生区分布

Fig.4 The suitable zone distribution of each species under different emission scenarios

至黄海。羽鳃鲈、鳙、康氏马鲛、斑点马鲛的适生区主体分布偏南,包括南海北部、东海陆架等海域,其现状和未来情景下的分布北界约至长江口附近。而鳀鱼、青鳞小沙丁鱼和蓝点马鲛在现状和未来情景下均主要分布于我国北方海域,从长江口以北分布至渤海湾内,在气候变化情景下适生程度高值区的面积显著缩小或消失。整体来看,北方种类向海侧分布更广,南方种类更集中分布于沿岸海域。

对比现状和 2050s 两种气候情景下物种适生区的空间格局,可见 8 种中上层经济鱼类适生区的地理分布边界产生了变化。蓝圆鲹的适生程度高值区和中值区的分布北界从现状的长江口附近扩张至渤海湾外,羽鳃鲈、鳙鱼、斑点马鲛的分布区可从华南沿岸向北扩展至长江口附近。而鳀鱼、蓝点马鲛等北方种类的分布南缘明显向北退缩,尤其是适生程度高值区在气候变化情景下可能显著缩小或消失。

2.3 生境空间格局变化趋势分析

采用分布变化工具对 8 种中上层经济鱼类的潜在生境空间格局变化进行分析,结果表明收缩区多位于物种分布区的南缘,而扩张区多位于物种分布区的北缘,提示在两种温室气体排放情景下各物种的适生区总体发生向北迁移(图 5)。统计结果显示,RCP8.5 情景下的空间格局变化率相较于 RCP2.6 情景更为显著(表 3)。在本研究区范围内,潜在生境增加的物种为蓝圆鲹、青鳞小沙丁鱼、康氏马鲛,其中在 RCP2.6 情景下扩张率最大的为物种蓝圆鲹,而在 RCP8.5 情景下扩张率最大的为物种青鳞小沙丁鱼。潜在生境减少的物种为羽鳃鲈、鳀鱼、鳙鱼、蓝点马鲛、斑点马鲛,其中收缩率最大的物种是鳀鱼。这表明,蓝圆鲹、青鳞小沙丁鱼、康氏马鲛等在气候变化的情景下可能成为潜在受益者,而羽鳃鲈、鳀鱼、鳙鱼、蓝点马鲛和斑点马鲛等在气候变化下可能成为潜在的受损者,它们的适生区在两种气候变化情景下均出现减少。

表 3 各物种在不同情景下适生区变化
Table 3 Variation of suitable zones of each species under different scenarios

物种名 Species name	现状面积 Present area/km ²	RCP2.6 面积 Scenario RCP2.6 area/km ²	RCP2.6 面积变化率 Scenario RCP2.6 area change rate	RCP8.5 面积 Scenario RCP8.5 area/km ²	RCP8.5 面积变化率 Scenario RCP8.5 area change rate
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i> *	343127	405488	+18%	477447	+39%
羽鳃鲈 <i>Rastrelliger kanagurta</i> **	112845	99516	-12%	85495	-24%
鳀 <i>Engraulis japonicus</i> **	326829	258933	-21%	229129	-30%
鳙 <i>Ilisha elongata</i> **	85086	72350	-15%	68613	-19%
青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i> *	49850	50178	+1%	85004	+71%
康氏马鲛 <i>Scomberomorus commerson</i> *	262475	279225	+6%	297948	+14%
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i> **	211308	195595	-7%	197215	-7%
斑点马鲛 <i>Scomberomorus guttatus</i> **	168963	167717	-1%	160802	-5%

* 为潜在受益者, ** 为潜在受损者

以 8 种中上层经济鱼类适生区的质心偏移程度来表征其空间格局在纬度上的变化情况(表 4),在两种气候变化情景下,有 7 种鱼类的分布质心都向北偏移,且 RCP2.6 情景下的偏移距离明显少于 RCP8.5 的偏移距离。在 RCP2.6 情景下向北迁移的平均距离为 89.43km,在 RCP8.5 情景下的平均迁移距离为 182.95km。在各物种之中,蓝圆鲹迁移速度最快,在 RCP2.6 情景下质心可偏移 341.36km,在 RCP8.5 情景下质心偏移达到 675.60km。相反的,斑点马鲛和蓝点马鲛的迁移情况较不明显,具备气候变化情景下更稳定的分布。

总体来看,适生区主体位于南方的物种在两种情景下的平均迁移公里数分别为 100.44km 和 214.14km,而适生区主体位于北方的物种的迁移公里数分别为 37.59km 和 59.60km。上述数据提示北方物种的迁移速度可能稍慢于南方物种,此外青鳞小沙丁鱼的分布质心呈现轻微往南偏移的情况,这可能与研究区范围的限制有关。

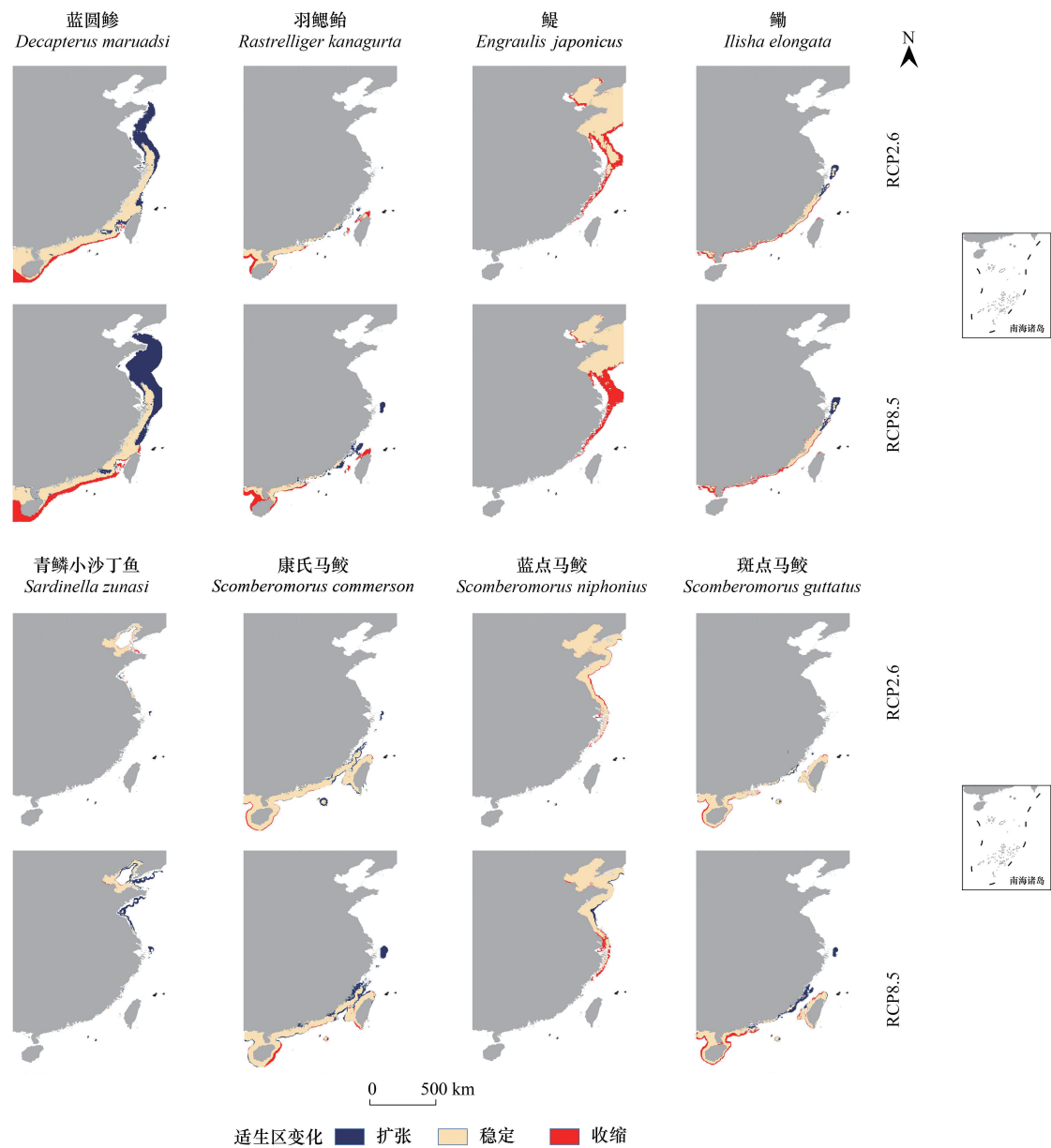


图 5 不同排放情景下各物种适生区变化情况

Fig.5 Changes of suitable areas of each species under different emission scenarios

表 4 不同排放情景下各物种质心偏移量

物种名 Species name	质心纬度 Centroid latitude/(°)			偏移度数 Degree of offset/(°)		偏移距离 Distance of offset/km	
	现状 Present	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	23.32	26.16	28.95	2.84	5.63	341.36	675.60
羽鳃鲐 <i>Rastrelliger kanagurta</i>	21.62	21.88	23.02	0.26	1.40	31.20	168.16
鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	35.83	36.64	37.36	0.81	1.53	97.23	183.53
鲷 <i>Ilisha elongata</i>	24.44	25.93	26.45	1.49	2.01	178.73	241.48
青鳞小沙丁鱼 <i>Sardinella zunasi</i>	38.02	37.92	37.54	-0.10	-0.48	-11.94	-57.46
康氏马鲛 <i>Scomberomorus commerson</i>	21.92	22.20	22.65	0.28	0.73	33.66	88.18
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	36.88	37.11	37.32	0.23	0.44	27.48	52.74
斑点马鲛 <i>Scomberomorus guttatus</i>	21.61	21.75	22.54	0.15	0.93	17.71	111.39

3 讨论

3.1 环境因子对鱼类分布的驱动作用

本研究通过有限分布点和物种分布模型模拟得到蓝圆鲹、羽鳃鲈等中上层鱼类的适生区主要分布在我国东南部海域,而鳀鱼、青鳞小沙丁鱼等主要分布在我国北部海域,传统渔业资源调查和渔业生物学研究显示蓝圆鲹在中国沿海均有分布,主要产区为我国东海和南海^[56],羽鳃鲈在中国台湾海峡和南海有一定数量的分布^[57],鳀鱼广泛分布于我国北部海域^[58],这些分布记录可作为调查和经验验证,表明 MaxEnt 模型在预测中上层鱼类适生区分布空间格局方面具有良好的准确性,可作为国内渔业资源调查、保护和管理的辅助手段。

本研究在建模过程中发现对适生区预测较重要的环境变量为 SST 与溶解氧。有研究显示海温对中上层鱼类的水平和垂直移动有着重要的影响^[51],在西北大西洋区域, SST 和叶绿素浓度影响了大西洋鲱(*Clupea harengus*)、大西洋鲭(*Scomber Scombrus*)和三刺低鳍鲳(*Peprilus triacanthus*)等中上层鱼类的历史分布^[59],而对气候变化的影响研究表明,海温、叶绿素、上升流是影响气候变化下南美鳀鱼栖息地的主要驱动因素^[60]。此外,部分鱼类的分布可能与特定生境的距离密切相关^[61]。这表明多样化的环境因子影响了鱼类栖息地的分布,但虽然不同对象、不同研究区域和不同的尺度可能存在不同的环境驱动机制,综合来看 SST 可能是最主要和最普遍的鱼类分布驱动因子。

模型模拟的环境变量限制域显示不同物种的环境适应范围差异较大。渔业调查及生理生态学的研究表明,南海北部的蓝圆鲹在春秋两季主要出现在温度 24—29℃ 的海域^[62],而鳀鱼的生长发育与温度的增加呈现负相关的趋势,高于 27℃ 时鳀鱼的生长将会受到限制^[63],蓝点马鲛的产卵场的水温在 10—19℃^[64],这与本研究模型模拟的环境变量限制域可互相参照。一项关于气候变化对我国长江口鱼类影响的研究表明,鱼类可通过分布北移、分布收缩或扩张来应对气候变化,产生不同应对方式的原因或由于不同的温度敏感性导致^[14]。我们发现,热适应性较差(对温度变化更敏感)的物种分布受到气候变化负面影响的可能性相对更大,在 8 种中上层鱼类里,相对环境适应范围偏窄的四种(羽鳃鲈、鳀鱼、康氏马鲛、斑点马鲛)中有三种被预测为气候变化情景下的潜在受损者,其中羽鳃鲈在 RCP8.5 情景下的生境退缩程度达到 24%。这提示当开展应对气候变化的生物资源管理时,可能应更关注这类物种的变化状况,并及时采取管护措施。

3.2 气候变化情景下鱼类适生区的迁移规律及研究展望

本研究发现不同气候情景下的中上层鱼类栖息地空间格局变化和质心偏移情况大体都呈现极向偏移,即为从低纬度到高纬度迁移。同时,高排放情景下的迁移情况相较于低排放情景更加剧烈。估算至 2050 年,8 个物种在低、高两种排放情景下每十年的平均迁移距离分别为 29.81、60.99 km。据一项全球 1066 种海洋物种对气候变化的响应研究预测估算^[9],各物种分布质心每 10 年变化速率约为 45—59 km。在区域尺度,太平洋陆架海洋鱼类的适生区分布质心将以平均 (30.1 ± 2.34) km 的速度向极地方向移动^[16]。本研究通过我国近海 8 种中上层鱼类估算得到的迁移速率可与上述研究相互对照,具有一定的一致性。与此同时,本次研究中发现青鳞小沙丁鱼适生区的迁移方向与其他物种相反,呈现略微南移,每十年偏移速率分别为 3.98 km 和 19.15 km。这一发现也与此前对中国黄海区域的鱼类分布的预测研究一致,该研究发现在 RCP2.6 和 RCP8.5 的情景下黄渤海鱼类迁移趋势与全球平均趋势相反,每十年向东南偏移 (2.96 ± 1.29) km 和 (3.20 ± 1.94) km^[15]。青鳞小沙丁鱼属大陆架浅水中上层鱼类^[65],其适生区南移的原因可能是多方面的。从地形地貌来看,其在研究区内的分布北界为渤海,渤海为半封闭内海且开口朝向东南,这限制了物种继续向北迁移,这可能也是北方物种迁移幅度小于南方物种的因素之一。从海洋水文特征方面,由于黄海中央深水区的特殊地理环境,形成了黄海冷水团^[15,65]。尽管黄海冷水团受气候变化影响长期平均温度呈变暖趋势,但黄海沿岸和北部海域的升温速度比中部冷水区更加迅速^[65]。因此鱼类或被迫转移到温度变化相对更小的地区,即向南迁移至中部冷水区。此外,黄渤海沿岸各省的近岸养殖、废水排放等人类活动导致近海环境恶化,威胁到鱼类的产卵场与栖息地,进而导致近岸鱼类资源的衰退^[66],或也是导致鱼类栖息地空间格局发生变化的原因之一。

本研究成功应用物种分布模型模拟了气候变化对我国中上层鱼类分布影响,但由于研究区范围和数据可获得性的限制仍存在一定的局限,未来可从以下方面继续深入研究 and 探索完善:一、目前全球范围内尚未有高时空分辨率的海洋环境数据和全球环流模式数据,因此可能导致研究结果存在一定的偏差。如未来可以通过调查数据积累、高分辨率遥感反演等补充环境变量数据,并随着科技手段的进步实现更准确的全球环流模拟预测,则能够进一步提升模型的精度和准确性,完善更小地理空间尺度上的预测细节;二、本研究仅考虑气候变化因素,未能将捕捞压力、生物补充量等因素纳入研究预测范畴,如未来能改进模型方法,在分布模型预测的基础上结合上述影响要素进行生物量的估算,则可能实现信息内涵更完善的预测。

4 结论

本研究基于最大熵模型研究气候变化情景下 8 种近海中上层鱼类的分布变化,研究发现海温和溶解氧可能是驱动鱼类分布的主要环境因子。在未来气候变化情景下,目标鱼类物种的潜在生境地理分布可能发生变化,分布区的南缘呈现收缩,而扩张区多位于物种分布区的北缘,RCP8.5 情景下的变化对比 RCP2.6 情景更为显著。气候变化给不同物种带来的影响可能是正面的或者负面的,一些物种分布扩张而另一些则可能收缩,蓝圆鲹、青鳞小沙丁鱼等是气候变化的潜在受益者,而羽鳃鲈、鳀鱼等可能是潜在受损者。估算至 2050s,在低、高两种排放情景下目标物种每十年的平均北移距离分别为 29.81、60.99km,但青鳞小沙丁鱼适生区的迁移方向可能与其他物种相反,提示由于独特的地理位置和海流特征可能导致黄渤海区域内的鱼类栖息地空间分布变化存在特殊性。研究结果可为中上层鱼类的栖息地保护和渔业生态系统管理提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 李建生, 张其永, 郑元甲, 洪万树. 中国海洋一般中上层经济鱼类生物学研究的回顾与前瞻. 海洋渔业, 2014, 36(6): 565-575.
- [2] 石永闯, 陈新军. 小型中上层海洋鱼类资源评估研究进展. 海洋渔业, 2019, 41(1): 118-128.
- [3] 郑元甲, 李建生, 张其永, 洪万树. 中国重要海洋中上层经济鱼类生物学研究进展. 水产学报, 2014, 38(1): 149-160.
- [4] Ma S Y, Cheng J H, Li J C, Liu Y, Wan R, Tian Y J. Interannual to decadal variability in the catches of small pelagic fishes from China Seas and its responses to climatic regime shifts. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2019, 159: 112-129.
- [5] 杜建国, Cheung W W L, 陈彬, 周秋麟, 杨圣云, Ye G Q. 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(6): 745-754.
- [6] Rijnsdorp A D, Peck M A, Engelhard G H, Möllmann C, Pinnegar J K. Resolving the effect of climate change on fish populations. ICES Journal of Marine Science, 2009, 66(7): 1570-1583.
- [7] Sunday J M, Bates A E, Dulvy N K. Thermal tolerance and the global redistribution of animals. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 686-690.
- [8] Hastings R A, Rutterford L A, Freer J J, Collins R A, Simpson S D, Genner M J. Climate change drives poleward increases and equatorward declines in marine species. Current Biology, 2020, 30(8): 1572-1577.e2.
- [9] Cheung W W L, Lam V W Y, Sarmiento J L, Kearney K, Watson R, Pauly D. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. Fish and Fisheries, 2009, 10(3): 235-251.
- [10] Yasumiishi E M, Ciciel K, Andrews A G, Murphy J, Dimond J A. Climate-related changes in the biomass and distribution of small pelagic fishes in the eastern Bering Sea during late summer, 2002-2018. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2020, 181-182: 104907.
- [11] Morato T, González-Irusta J M, Domínguez-Carrió C, Wei C L, Davies A, Sweetman A K, Taranto G H, Beazley L, García-Alegre A, Grehan A, Laffargue P, Murillo F J, Sacau M, Vaz S, Kenchington E, Arnaud-Haond S, Callery O, Chimienti G, Cordes E, Egilsdottir H, Freiwald A, Gasbarro R, Gutiérrez-Zúrate C, Gianni M, Gilkinson K, Hayes V E W, Hebbeln D, Hedges K, Henry L A, Johnson D, Koen-Alonso M, Lirette C, Mastrototaro F, Menot L, Molodtsova T, Muñoz P D, Orejas C, Pennino M G, Puerta P, Ragnarsson S Á, Ramiro-Sánchez B, Rice J, Rivera J, Roberts J M, Ross S W, Rueda J L, Sampaio Í, Snelgrove P, Stirling D, Treble M A, Urra J, Vad J, van Oevelen D, Watling L, Walkusz W, Wienberg C, Woillez M, Levin L A, Carreiro-Silva M. Climate-induced changes in the suitable habitat of cold-water corals and commercially important deep-sea fishes in the North Atlantic. Global Change Biology, 2020, 26(4): 2181-2202.
- [12] Brochier T, Echevin V, Tam J, Chaigneau A, Goubanova K, Bertrand A. Climate change scenarios experiments predict a future reduction in small pelagic fish recruitment in the Humboldt Current system. Global Change Biology, 2013, 19(6): 1841-1853.
- [13] Schickele A, Goberville E, Leroy B, Beaugrand G, Hattab T, Francour P, Raybaud V. European small pelagic fish distribution under global

- change scenarios. *Fish and Fisheries*, 2021, 22(1): 212-225.
- [14] Zhang Z X, Mammola S, Xian W W, Zhang H. Modelling the potential impacts of climate change on the distribution of ichthyoplankton in the Yangtze Estuary, China. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(1): 126-137.
- [15] Zhu Y G, Zhang Z X, Reygondeau G, Chu J S, Hong X G, Wang Y F, Cheung W W L. Projecting changes in the distribution and maximum catch potential of warm water fishes under climate change scenarios in the Yellow Sea. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(7): 806-817.
- [16] Jones M C, Cheung W W L. Multi-model ensemble projections of climate change effects on global marine biodiversity. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, 72(3): 741-752.
- [17] 郭彦龙, 赵泽芳, 乔慧捷, 王然, 卫海燕, 王璐坤, 顾蔚, 李新. 物种分布模型面临的挑战与发展趋势. *地球科学进展*, 2020, 35(12): 1292-1305.
- [18] 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.
- [19] 颜明艳, 李琼珍, 宋洁, 王振华, 王有基, 胡梦红. 基于 MAXENT 模型评估北部湾潮间带中国鲎和圆尾鲎稚鲎的潜在地理分布及种群保育对策. *生态学报*, 2019, 39(9): 3100-3109.
- [20] Norberg A, Abrego N, Blanchet F G, Adler F R, Anderson B J, Anttila J, Araújo M B, Dallas T, Dunson D, Elith J, Foster S D, Fox R, Franklin J, Godsoe W, Guisan A, O'Hara B, Hill N A, Holt R D, Hui F K C, Husby M, Kålås J A, Lehtikoinen A, Luoto M, Mod H K, Newell G, Renner I, Roslin T, Soiminen J, Thuiller W, Vanhatalo J, Warton D, White M, Zimmermann N E, Gravel D, Ovaskainen O. A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels. *Ecological Monographs*, 2019, 89(3): e01370.
- [21] 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.
- [22] Salvadeo C, Auliz-Ortiz D M, Petatún-Ramírez D, Reyes-Bonilla H, Ivanova-Bonchera A, Juárez-León E. Potential poleward distribution shift of dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) along the southern California current system. *Environmental Biology of Fishes*, 2020, 103(8): 973-984.
- [23] 张熙鹭, 隋晓云, 吕植, 陈毅峰. 基于 Maxent 的两种入侵性鱼类(麦穗鱼和鲫)的全球适生区预测. *生物多样性*, 2014, 22(2): 182-188.
- [24] 项涛, 董响红, 郭超, 李钟杰. 基于随机森林模型预测气候变化对黄颡鱼适生区的影响. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1262-1270.
- [25] 陈芑, 陈新军. 基于最大熵模型分析西南大西洋阿根廷滑柔鱼栖息地分布. *水产学报*, 2016, 40(6): 893-902.
- [26] 刘尊雷, 杨林林, 袁兴伟, 金艳, 严利平, 程家骅. 基于集成模型的小黄鱼越冬群体适宜生境及其环境影响因素. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2076-2086.
- [27] 张孝民, 石永闯, 李凡, 朱明明, 魏振华. 基于 MAXENT 模型预测西北太平洋秋刀鱼潜在渔场. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(2): 280-286.
- [28] 单秀娟, 陈云龙, 金显仕. 气候变化对长江口和黄河口渔业生态系统健康的潜在影响. *渔业科学进展*, 2017, 38(2): 1-7.
- [29] Pearson R G, Raxworthy C J, Nakamura M, Peterson A T. Original Article: predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(1): 102-117.
- [30] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [31] 刘光鼎, 陈洁. 坚持科学发展观建设中国海. *地球物理学进展*, 2007, 22(3): 661-666.
- [32] 金显仕, 窦硕增, 单秀娟, 王震宇, 万瑞景, 卞晓东. 我国近海渔业资源可持续产出基础研究的热点问题. *渔业科学进展*, 2015, 36(1): 124-131.
- [33] 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.
- [34] 国家海洋局 908 专项办公室. 我国近海海洋综合调查与评价专项-海洋生物生态调查技术规程. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [35] 任一平, 刘群, 李庆怀, 程远. 青岛近海小型鳀鲱鱼类渔业生物学特性的研究. *海洋湖沼通报*, 2002, (1): 69-74.
- [36] 窦存银, 叶振江, 高天翔, 张秀梅, 任一平, 楼东. 青岛近海寿南小沙丁鱼 *Sardinella zunasi* Bleeker 繁殖生物学研究. *海洋湖沼通报*, 2002, (2): 24-32.
- [37] 卢振彬, 洪港船, 戴泉水, 颜尤明. 闽南—台湾浅滩渔场羽鳃鲷生长和死亡的研究. *动物学杂志*, 1993, 28(4): 6-10.
- [38] 曹艳, 章群, 宫亚运, 吕金磊, 杨喜书. 中国南海康氏马鲛线粒体 COI 序列遗传变异分析. *南方水产科学*, 2016, 12(5): 53-60.
- [39] 瞿俊跃, 杨光明媚, 方舟, 陈新军. 蓝点马鲛渔业生物学研究进展. *水产科学*, 2021, 40(4): 643-650.
- [40] 张仁斋. 斑点马鲛仔稚鱼的形态特征. *动物学研究*, 1985, 6(2): 123-130.
- [41] Tyberghein L, Verbruggen H, Pauly K, Troupin C, Mineur F, De Clerck O. Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(2): 272-281.
- [42] 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.
- [43] Tabor K, Williams J W. Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications*,

- 2010, 20(2): 554-565.
- [44] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [45] Pearce J, Ferrier S. An evaluation of alternative algorithms for fitting species distribution models using logistic regression. *Ecological Modelling*, 2000, 128(2/3): 127-147.
- [46] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 2008, 31(2): 161-175.
- [47] Pearce J L, Boyce M S. Modelling distribution and abundance with presence-only data. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(3): 405-412.
- [48] 杨楠, 马东源, 钟雪, 杨孔, 周志强, 周华龙, 周材权, 王彬. 基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价. *生态学报*, 2020, 40(19): 7064-7072.
- [49] Manel S, Williams H C, Ormerod S J. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(5): 921-931.
- [50] van Proosdij A S J, Sosef M S M, Wieringa J J, Raes N. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*, 2016, 39(6): 542-552.
- [51] Andrews S, Leroux S J, Fortin M J. Modelling the spatial-temporal distributions and associated determining factors of a keystone pelagic fish. *ICES Journal of Marine Science*, 2020, 77(7/8): 2776-2789.
- [52] 张华, 赵浩翔, 王浩. 基于 Maxent 模型的未来气候变化情景下胡杨在中国的潜在地理分布. *生态学报*, 2020, 40(18): 6552-6563.
- [53] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, 17(5): 453-461.
- [54] Brown J L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(7): 694-700.
- [55] 周婧. 基于 Landsat-8 的遥感蚀变分级方法分析. *科技创新与应用*, 2017, (24): 15-15, 17-17.
- [56] 蒋日进, 徐汉祥, 金海卫, 周永东, 贺舟挺. 东海蓝圆鲹的摄食习性. *水产学报*, 2012, 36(2): 216-227.
- [57] 吕健, 王自灵, 冯波. 南海北部羽鳃鲷资源利用状况研究. *渔业信息与战略*, 2020, 35(3): 184-189.
- [58] 蒋日进, 李鹏飞, 刘志坚, 王好学, 隋有珍, 郭安托. 鳀鱼摄食习性的季节变化. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2015, 34(5): 439-443.
- [59] Wang L F, Kerr L A, Record N R, Bridger E, Tupper B, Mills K E, Armstrong E M, Pershing A J. Modeling marine pelagic fish species spatiotemporal distributions utilizing a maximum entropy approach. *Fisheries Oceanography*, 2018, 27(6): 571-586.
- [60] Silva C, Leiva F, Lastra J. Predicting the current and future suitable habitat distributions of the anchovy (*Engraulis ringens*) using the Maxent model in the coastal areas off central-northern Chile. *Fisheries Oceanography*, 2019, 28(2): 171-182.
- [61] Urcádiz-Cázares F J, Cruz-Escalona V H, Peterson M S, Marín-Enríquez E, González-Acosta A F, Martínez-Flores G, Hernández-Carmona G H, Aguilar-Medrano R, Del Pino-Machado A, Ortega-Rubio A. Ecological niche modelling of endemic fish within La Paz Bay: implications for conservation. *Journal for Nature Conservation*, 2021, 60: 125981.
- [62] Zhao Hui, Feng Y T, Dong C M, Li Z L. Spatiotemporal distribution of *Decapterus maruadsi* in spring and autumn in response to environmental variation in the northern South China Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 45: 101811.
- [63] Xing Q W, Yu H Q, Ito S I, Ma S Y, Yu H M, Wang H, Tian Y J, Sun P, Liu Y, Li J C, Ye Z J. Using a larval growth index to detect the environment-recruitment relationships and its linkage with basin-scale climate variability: a case study for Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in the Yellow Sea. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107301.
- [64] 隋芯, 汪金涛, 陈新军. 基于环境因子的东海马鲛鱼(*Scomberomorus Nipponius*)资源量评估. *海洋科学*, 2021, 45(4): 136-146.
- [65] 刘静, 宁平. 黄海鱼类组成、区系特征及历史变迁. *生物多样性*, 2011, 19(6): 764-769.
- [66] 刘瑞玉. 关于我国海洋生物资源的可持续利用. *科技导报*, 2004, (11): 28-31.