



气候变化对黄海中南部斑鲈产卵场适宜性的影响

张云雷^{1,2}, 孙 霄^{1,2}, 刘晓慧³, 崔晏华^{1,2}, 简 盈^{1,2}, 薛 莹^{1,2,4*}

(1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 海州湾渔业生态系统教育部野外科学观测研究站, 山东 青岛 266003;

3. 山东省海洋生物研究院, 山东 青岛 266104;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 为全面了解气候变化下黄海中南部近海海域斑鲈的产卵场适宜性变动规律, 为黄海中南部产卵场的保护提供科学依据, 实验根据 2014—2018 年 5—7 月黄海中南部产卵场调查数据, 并结合 FVCOM (Finite-Volume Community Ocean Model) 模型提取的表层水温、表层盐度、水深、离岸距离、海表流速以及 NOAA 数据中心的叶绿素 a 浓度等 6 种环境因子, 基于随机森林 (Random Forest, RF) 模型构建黄海中南部斑鲈产卵场适宜性的分布模型, 根据未来气候变化的情景, 预测该鱼种产卵场在未来的潜在分布。结果显示, 不同月份中影响斑鲈鱼卵分布的主要环境因素不同, 主要因子在 5—7 月分别为水深、叶绿素 a 和表层水温, 其偏差贡献率分别为 24.49%、28.08%、26.26%。研究表明, 在未来气候变化的情景下, 斑鲈的适宜产卵场将向北迁移。此外, 黄海中南部北部沿岸海域及南部远岸深水区的栖息地适宜性明显增加。因此, 未来在产卵场保护以及资源开发利用等方面, 应当充分考虑这一变动趋势。

关键词: 斑鲈; 气候变化; 产卵场; 随机森林; 黄海

中图分类号: S 931

文献标志码: A

斑鲈 (*Konosirus punctatus*), 隶属于鲱形目 (Clupeiformes) 鲱科 (Clupeidae) 斑鲈属 (*Konosirus*), 体型呈侧扁、长椭圆形, 为近岸暖水性中上层小型鱼类^[1]。该物种主要以浮游生物和底栖生物为食^[1-2], 其生长迅速、性成熟较快^[3], 于每年春末夏初时期在近岸浅水区产卵^[4]。斑鲈广泛分布于我国沿海、朝鲜半岛及日本沿海^[3], 随着其他经济鱼种的资源衰退, 斑鲈逐渐成为优势种^[3, 5-6]。目前, 有关斑鲈的研究受到越来越多学者的关注, 主要集中在生物学特性、资源量、分子遗传学等方面^[1-3, 5-6]。

鱼类早期生活史阶段易受到外界环境变化的影响, 早期补充群体的生长及其存活率决定了资源数量和群体结构特征^[7]。在气候变化的背景下, 海洋中的环境因子随之改变, 渔业资源也会直接或间接地受到影响。气候变化引起的海洋变暖使得海洋生物的时空分布发生了转变^[8-10]。相关研究表明, 珊瑚礁和大型海洋生物对海水温度变化的反应较为敏感, 水温的变动可改变它们的地理分布和种群数量^[11-12]。根据气候变化情景预测, 到 2100 年, 全球平均海表水温将升高 1.08~4.08 °C^[13-16]。

随机森林 (Random Forest, RF) 模型是一种基

收稿日期: 2020-10-28 修回日期: 2021-04-07

资助项目: 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项 (2018SDKJ0501-2); 国家重点研发计划 (2018YFD0900904); 国家自然科学基金 (31772852)

第一作者: 张云雷 (照片), 从事渔业生态学研究, E-mail: 583578675@qq.com

通信作者: 薛莹, 从事渔业生态学研究, E-mail: xueying@ouc.edu.cn



于分类回归树的集成机器学习算法^[17], 在处理大数据时表现优异, 能够处理非线性和交互作用等问题, 可较好地评估变量重要性。此外, 该模型不容易发生过拟合^[18], 是当前最好的机器学习算法之一^[19], 被广泛应用于物种分布的研究^[20]。

黄海为半封闭海区, 其近岸水域是斑鲈等经济性渔业生物的产卵场和育幼场^[4, 21]。在全球气候变化的影响下, 黄海近岸产卵生境也在发生着剧烈变化。然而, 有关黄海近岸水域斑鲈产卵场的生境特征及其在气候变化背景下的动态变化尚未见报道。

本实验根据 2014—2018 年 5—7 月在黄海西南部水域进行的产卵场调查数据, 并结合环境数据, 应用随机森林模型研究斑鲈产卵场适宜性及其受气候变化的影响, 以期合理预测黄海西南部斑鲈鱼卵栖息地的时空变动以及产卵场的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

样品采自 2014—2018 年 5—7 月在黄海西南部进行的产卵场调查, 调查范围为 32.0°N~37.0°N, 119.0°E~122.7°E (图 1)。各月份调查时间及站位数如表 1 所示。调查网具为带流量计的大型浮游生物网, 网口直径 0.8 m, 网目 0.505 mm, 网衣 2.8 m, 采样方式为水平拖网, 拖曳时长 10 min, 拖速 2.0 kn。采集的样品用 5% 的甲醛溶液保存。

环境数据来源于 FVCOM (Finite-Volume Community Ocean Model) 和 NOAA 的网站 (<https://coast-watch.pfeg.noaa.gov/>)。FVCOM 是由马萨诸塞州达特茅斯大学和伍兹霍尔海洋研究所联合开发的沿海海洋环流模型, 是无结构网格、有限体积、自由表面、三维原始模型 (<http://fvcom.smast.umassd.edu/>)。该模型已广泛应用于海岸带环境预测和管理^[22]。表层水温、表层盐度、水深、流速数据提取自 FVCOM, 空间分辨率为 0.5'×0.5', 时间分辨率为 1 h。经验证, FVCOM 数据与实际调查的环境数据吻合程度较高^[23]。表层叶绿素 a 数据来自 NOAA 网站, 空间分辨率为 0.75'×0.75', 时间分辨率为 d。通过克里金插值法合并表层叶绿素 a 数据至 FVCOM, 使二者具有相同的时空分辨率。建模前, 通过 Person 相关分析将高度相关 ($R^2 > 0.8$) 的解释变量从模型中剔除。

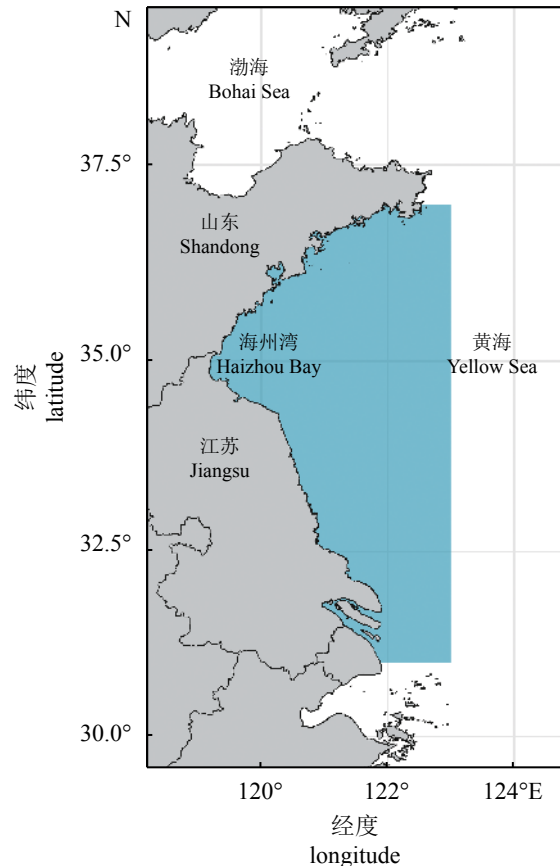


图 1 黄海西南部产卵场调查海域示意图

Fig. 1 Sampling areas of spawning ground in the central and southern Yellow Sea

表 1 2014—2018 年 5—7 月黄海西南部产卵场调查时间及站位数

Tab. 1 Survey time and station number of spawning ground in the central and southern Yellow Sea from May to July in 2014—2018

月份 month	时间 time	站位数/个 station numbers
5月 May	2014-05	30
	2015-05	106
	2017-05 上半	37
	2017-05 下半	48
	2018-05	49
6月 June	2014-06	30
	2015-06	28
	2017-06	64
	2018-06 上半	49
	2018-06 下半	49
7月 July	2014-07	30
	2015-07	28
	2016-07	102
	2018-07	49

1.2 模型建立及评价

RF 模型在预测性能方面表现较好, 在不同研究领域引起了广泛的关注^[20]。RF 模型具有处理非线性、缺失值、解释变量间高度相关的能力。此外, 该模型不容易发生过拟合^[18]。RF 模型的建立通常通过以下步骤实现^[19-20]: ①从原始数据中提取训练数据集的 ntree bootstrap 样本; ②利用 bootstrap 样本构建多个分类或回归树, 通过随机抽样 mtry 变量对未修剪树的每个节点进行拆分, 以最大总体精度 (overall accuracy) 值为选择依据并自动选择最优拆分^[20]; ③汇总上述树信息单元, 得到输出。在本研究中, 树的数量 (ntree) 设置为 1000, mtry = 2。

以斑鲈鱼卵出现数据为响应变量, 以环境变量为自变量, 建立 RF 回归模型。通过交叉验证的方法评估建模效果, 将数据集随机分为 70% 的建模数据和 30% 的测试数据, 模型运行 100 次, 根据受试曲线面积 (area under the receiver operator characteristics curve, AUC) 的平均值评价模型的预测效果, 当 AUC 大于 0.75 时认为模型具有较好的预测效果^[20]。

1.3 未来气候变化情景

2014 年, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第五次评估报告使用了 4 种途径进行气候建模和研究^[24]。这些途径描述了不同的未来气候情景, 根据未来温室气体的排放量, 情景分为 RCP26、RCP45、RCP60 和 RCP85 (Representative Concentration Pathway, RCP), 代表了在 2100 年可能的辐射值范围分别为 2.6、4.5、6.0 和 8.5 W/m² (<https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change>)。实验采用 RCP26 和 RCP45 作为未来气候情景。

根据 NOAA 物理科学实验室的数据显示, 到 2050 年, 在 RCP26 和 RCP45 的情景下, 黄海水域海洋表层水温将分别升高 0.9131 °C 和 1.1268 °C, 表层盐度将分别下降 0.0580 和 0.1714; 到 2099 年, 在 RCP26 和 RCP45 的情景下, 黄海水域表层水温将分别升高 1.3218 °C 和 1.8560 °C, 表层盐度将分别下降 0.0151 和 0.6608 (<https://psl.noaa.gov/>)。

2 结果

2.1 主要环境因子及模型效果评价

通过 Person 相关性分析, 离岸距离与水深、

表层水温、表层盐度、叶绿素 a 有较强的相关性 ($R^2 > 0.8$), 因此剔除离岸距离, 保留其他变量作为解释变量。交叉验证结果表明, 5—7 月 RF 模型的 AUC 值分别为 0.874、0.825、0.874, 均大于设置的阈值 0.75, 因此模型效果较好。

根据 RF 模型, 确定不同月份表层水温、表层盐度、水深、叶绿素 a 及流速对斑鲈产卵场栖息地适宜性的贡献率 (图 2), 发现不同月份影响斑鲈产卵场适宜性的主要环境因素有所不同。其中, 5 月总偏差贡献率最大的变量是水深 (24.49%), 其次是流速 (22.45%)、表层盐度 (21.49%)、叶绿素 a 浓度 (16.74%) 和表层水温 (14.83%); 6 月对斑鲈产卵场影响最大的环境因子是叶绿素 a (28.08%), 其次为表层水温 (23.76%)、水深 (20.45%)、表层盐度 (16.83%) 和流速 (10.88%); 7 月总偏差贡献率最大的环境因子是表层水温 (26.26%), 其次是表层盐度 (21.18%)、叶绿素 a (19.75%)、水深 (19.60%) 和流速 (13.21%)。

2.2 气候变化情景下斑鲈产卵场的潜在分布

根据 RCP26 和 RCP45 未来气候变化情景预测, 5—7 月黄海南部 (35°N 以南) 沿岸海域是斑鲈最适宜的产卵场分布区域 (图 3)。在未来气候变化的情景下, 斑鲈产卵场的适宜性将在空间范围内发生较大的变动, 而且与 2050 年相比, 2099 年适宜产卵场的分布将会有更为明显的变化 (图 4)。在

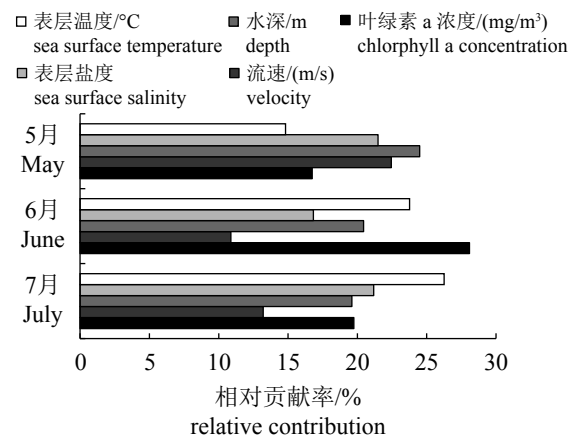


图 2 基于随机森林模型的 5—7 月各环境因子对黄海中南部斑鲈产卵场适宜性的相对贡献率

Fig. 2 Relative contribution of different environmental variables to the total deviance explained by the RF models of distribution of spawning grounds of *K. punctatus* in the central and southern Yellow Sea from May to July

不同的 RCP 情景下, 斑鳊产卵场适宜性的分布表现出相似的变动趋势, 5—7 月的产卵场适宜区均向北移动, 黄海南部沿海岸域的栖息地适宜性降

低, 黄海中部 (35°N 以北) 沿岸海域及远岸深水区的栖息地适宜性明显增加, 而且随着月份的增长, 栖息地的变动趋势愈加明显 (图 4)。

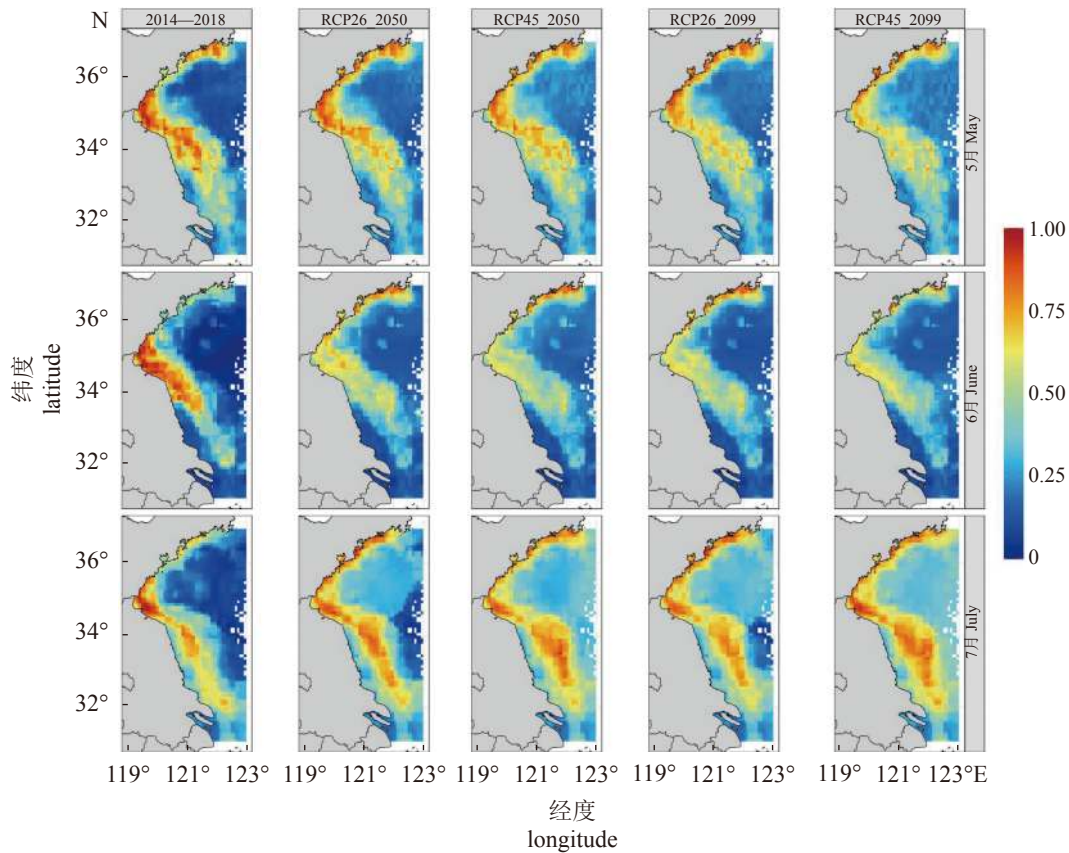


图 3 气候变化情景下 (RCP26 和 RCP45) 黄海中南部 5—7 月斑鳊产卵场栖息地适宜性分布

Fig. 3 Spawning habitat suitability distribution of *K. punctatus* in central and southern Yellow Sea from May to July under different scenarios

3 讨论

掌握渔业生物的时空分布信息对于渔业生产、制定渔业管理方案以及海洋保护区的规划都十分重要。海洋保护区建立和基于生态系统的渔业管理, 都需要评估目标鱼种的时空分布及其与环境因素的关系, 特别是在气候变化的背景下。然而, 由于缺乏重要物种的栖息地和分布信息, 基于生态系统的渔业管理常常受到阻碍^[21]。因此, 了解物种分布的时空动态对于实施基于生态系统的渔业管理和关键栖息地评估都至关重要。

以往的研究表明, 影响鱼类产卵场分布的主要环境因素有水温、盐度、水深、叶绿素 a 以及流速等^[25]。黄海中南部水域丰富的营养盐、充足的饵料生物以及适宜的水温等环境条件为鱼类产卵场提供了良好的保障^[26-27]。本研究发现, 不同

月份影响黄海中南部斑鳊产卵场适宜性的主要环境因子有所不同, 其中 5 月的主要环境因子为水深, 6 月为叶绿素 a, 7 月为表层水温。

水深可直接影响海水的水色、透明度、含氧量、水温、盐度等, 从而间接影响鱼卵的时空分布^[7]。水温是海洋中最重要的环境因子之一^[28], 它能够调控鱼类的生长和繁殖, 影响渔汛的时间、渔场分布中心, 以及鱼类洄游的路径及时间^[27, 29-30]。鱼卵作为鱼类重要的早期生活史阶段, 其孵化需要适宜的温度条件^[31]。斑鳊为暖温性中上层鱼类, 根据相关研究, 20.7~22.7 °C 为斑鳊鱼卵孵化的适宜水温^[4, 17]。本研究同步采集的环境数据显示, 调查海域 5 月的表层水温为 15.2~20.9 °C、6 月为 19.1~23.5 °C、7 月为 21.9~26.2 °C。5—7 月表层水温达到斑鳊鱼卵的孵化温度, 为斑鳊鱼卵的孵化及发育提供了适宜的环境条件。盐度能够影响

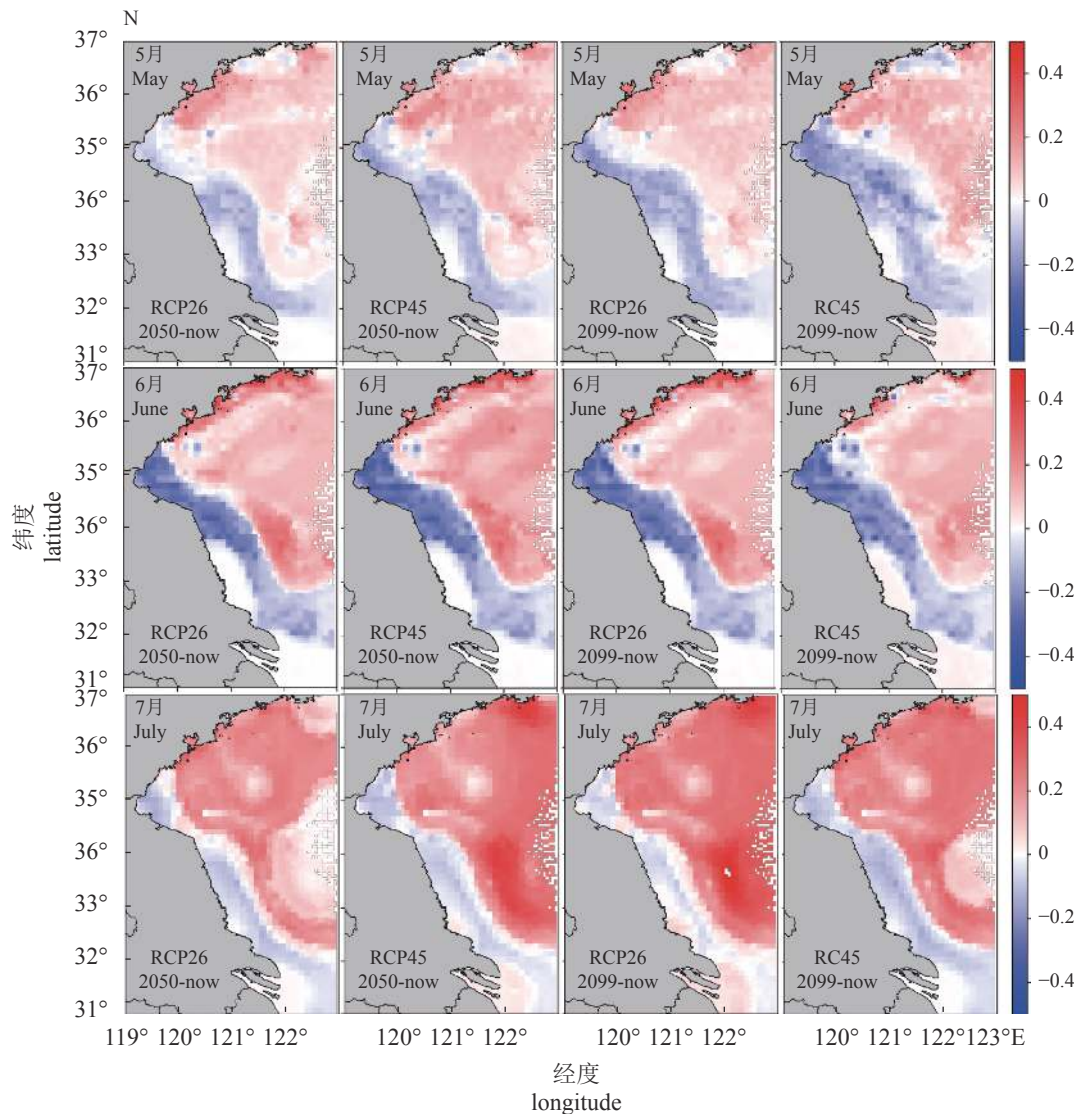


图 4 气候变化情景下 (RCP26 和 RCP45) 黄海西南部 5—7 月斑鲈产卵场栖息地适宜性的变化幅度

Fig. 4 Change of *K. punctatus* spawning habitat suitability in central and southern Yellow Sea from May to July under different scenarios.

成鱼的生长代谢等生理活动, 维持鱼体渗透压平衡^[29], 另外, 适宜的盐度也有利于鱼卵的孵化。叶绿素 a 浓度可以作为营养条件的指标^[32], 孵化后的鱼卵主要以浮游生物为食。通常, 海表温度和叶绿素 a 常被用作预测海洋生物栖息地适宜性的重要环境变量^[33]。相关研究表明, 流速通过影响鱼卵的分散与聚集间接影响亲体对产卵场的选择^[34], 此外, 未孵化的鱼卵要经历水流的被动扩散输运过程, 其时空分布与水动力学过程密切相关^[35]。

气候变化会影响渔业生物的时空分布。本研究发现, 斑鲈适宜产卵场的分布会随气候变动进一步向北移动。以往的研究表明, 陆地上和海洋

中的生物都会对气候变化做出一定的响应^[36]。例如, Sorte 等^[37]研究了 129 种海洋物种的栖息地范围变化, 发现其中 75% 的栖息地范围变化是向极地方向移动的。此外, 海洋生物的栖息地除了向北偏移, 还可能迁移到更深的水域以应对气候变化^[33, 38]。本研究发现, 在未来气候变化的情景下, 海州湾北部的沿岸水域将有可能取代现有的海州湾南部水域成为新的斑鲈产卵场, 另外, 黄海西南部深水区域也会更利于斑鲈产卵场的分布。因此, 未来在产卵场保护以及资源开发利用等方面, 应当充分考虑这一变动趋势。

本研究建立的随机森林模型表现出良好的预测性能, 能够较为准确地预测斑鲈适宜产卵场的

分布。由于鱼类的栖息分布常表现出季节和生活史差异,因此为了进一步解析目标鱼种的栖息分布,除了研究早期生活史阶段的时空分布,还应该对整个生活史阶段的分布特征进行全面综合的分析,以获得更加完善的栖息地信息,从而为全球气候变化背景下渔业资源的保护提供科学依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 孟庆闻, 缪学祖, 俞泰济, 等. 鱼类学 (形态. 分类)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- Meng Q W, Miao X Z, Yu T J, *et al.* Ichthyology (morphological classification)[M]. Shanghai: Shanghai Science and technology Press, 1989 (in Chinese).
- [2] 高文斌, 李怡群, 张海鹏, 等. 河北沿海夏季斑鲈资源变动与分析[J]. *河北渔业*, 2019(6): 16-21.
- Gao W B, Li Y Q, Zhang H P, *et al.* Changes and analysis of *Konosirus punctatus* resources in Hebei offshore waters in summer[J]. *Hebei Yuye*, 2019(6): 16-21 (in Chinese).
- [3] 李渊, 张丽艳, 王良明, 等. 台湾海峡斑鲈群体遗传学研究[J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(4): 522-528.
- Li Y, Zhang L Y, Wang L M, *et al.* Population genetics of *Konosirus punctatus* in Taiwan Strait[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(4): 522-528 (in Chinese).
- [4] 万瑞景, 姜言伟. 渤、黄海硬骨鱼类鱼卵与仔稚鱼种类组成及其生物学特征[J]. *上海水产大学学报*, 2000, 9(4): 290-297.
- Wan R J, Jiang Y W. The species and biological characteristics of the eggs and larvae of osteichthyes in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2000, 9(4): 290-297 (in Chinese).
- [5] 金显仕, 程济生, 邱盛尧, 等. 黄渤海渔业资源综合研究与评价 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006
- Jin X S, Cheng J S, Qiu S Y, *et al.* Integrated research and evaluation on fisheries resources in Yellow Sea and Bohai Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 2006 (in Chinese).
- [6] Yamada U, Tokimura M, Horikawa H, *et al.* Fishes and fisheries of the East China and Yellow Seas[M]. Kanagawa: Tokai University Press, 2007.
- [7] 任一平. 渔业资源生物学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2020
- Ren Y P. Fishery resources biology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [8] 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[J]. *渔业科学进展*, 2017, 38(2): 1-7.
- Shan X J, Chen Y L, Jin X S. Projecting fishery ecosystem health under climate change scenarios: Yangtze River estuary and Yellow River estuary[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(2): 1-7 (in Chinese).
- [9] 刘尊雷, 袁兴伟, 杨林林, 等. 气候变化对东海北部外海越冬场渔业群落格局的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 901-911.
- Liu Z L, Yuan X W, Yang L L, *et al.* Effect of climate change on the fisheries community pattern in the overwintering ground of open waters of northern East China Sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 901-911 (in Chinese).
- [10] 刘红红, 朱玉贵. 气候变化对海洋渔业的影响与对策研究[J]. *现代农业科技*, 2019(10): 244-247.
- Liu H H, Zhu Y G. Impacts of climate change on marine fisheries and its countermeasures[J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2019(10): 244-247 (in Chinese).
- [11] Hazen E L, Jorgensen S, Rykaczewski R R, *et al.* Predicted habitat shifts of Pacific top predators in a changing climate[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 234-238.
- [12] Yu W, Chen X J. Ocean warming-induced range-shifting of potential habitat for jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the Southeast Pacific Ocean off Peru[J]. *Fisheries Research*, 2018, 204: 137-146.
- [13] Cai R S, Tan H J, Qi Q H. Impacts of and adaptation to inter-decadal marine climate change in coastal China seas[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(11): 3770-3780.
- [14] 宋春阳, 张守文, 姜华, 等. CMIP5模式对中国近海海表温度的模拟及预估[J]. *海洋学报*, 2016, 38(10): 1-11.
- Song C Y, Zhang S W, Jiang H, *et al.* Evaluation and projection of SST in the China seas from CMIP5[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(10): 1-11 (in Chinese).

- [15] 谭红建, 蔡榕硕, 颜秀花. 基于IPCC-CMIP5预估21世纪中国近海海表温度变化[J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(4): 451-458.
Tan H J, Cai R S, Yan X H. Projected 21 st century sea surface temperature over offshore China based on IPCC-CMIP5 models[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(4): 451-458 (in Chinese).
- [16] 谭红建, 蔡榕硕, 颜秀花. 基于CMIP5预估21世纪中国近海海洋环境变化[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(2): 151-160.
Tan H J, Cai R S, Yan X H. Projecting changes of marine environment in coastal China Seas over 21st century based on CMIP5 models[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(2): 151-160 (in Chinese).
- [17] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [18] Chen X, Ishwaran H. Random forests for genomic data analysis[J]. *Genomics*, 2012, 99(6): 323-329.
- [19] Bradter U, Kunin W E, Altringham J D, *et al.* Identifying appropriate spatial scales of predictors in species distribution models with the random forest algorithm[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2013, 4(2): 167-174.
- [20] Li M, Zhang C L, Xu B D, *et al.* Evaluating the approaches of habitat suitability modelling for whitespotted conger (*Conger myriaster*) [J]. *Fisheries Research*, 2017, 195: 230-237.
- [21] 万瑞景, 姜言伟. 黄海硬骨鱼类鱼卵、仔稚鱼及其生态调查研究[J]. *海洋水产研究*, 1998, 19(1): 60-73.
Wan R J, Jiang Y W. Studies on the ecology of eggs and larvae of osteichthyes in the Yellow Sea[J]. *Marine Fisheries Research*, 1998, 19(1): 60-73 (in Chinese).
- [22] Li B, Tanaka K R, Chen Y, *et al.* Assessing the quality of bottom water temperatures from the Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) in the Northwest Atlantic Shelf region[J]. *Journal of Marine Systems*, 2017, 173: 21-30.
- [23] Xing Q W, Yu H M, Yu H Q, *et al.* A comprehensive model-based index for identification of larval retention areas: a case study for Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Yellow Sea[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106479.
- [24] Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, *et al.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(1-2): 213-241.
- [25] 万荣, 张同征, 李增光, 等. 黄海近岸海域短吻红舌鳎夏季产卵场的空间分布及其年际变化[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 1023-1032.
Wan R, Zhang T Z, Li Z G, *et al.* Spatial distribution and inter-annual variability of spawning grounds of *Cynoglossus joyneri* in the Yellow Sea coastal waters in summer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 1023-1032 (in Chinese).
- [26] 李晓, 赵宪勇, 张涛, 等. 黄海鳀鱼越冬洄游分布及其与物理环境的关系[J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(2): 104-112.
Li Y, Zhao X Y, Zhang T, *et al.* Wintering migration and distribution of anchovy in the Yellow Sea and its relation to physical environment[J]. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(2): 104-112 (in Chinese).
- [27] 张云雷, 徐宾铎, 张崇良, 等. 基于Tweedie-GAM模型研究海州湾小黄鱼资源丰度与栖息环境的关系[J]. *海洋学报*, 2019, 41(12): 78-89.
Zhang Y L, Xu B D, Zhang C L, *et al.* Relationship between the habitat factors and the abundance of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in Haizhou Bay based on the Tweedie-GAM model[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(12): 78-89 (in Chinese).
- [28] Solanki H U, Dwivedi R M, Nayak S R, *et al.* Cover: application of remotely sensed closely coupled biological and physical processes for marine fishery resources exploration[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(10): 2029-2034.
- [29] 邹易阳, 薛莹, 麻秋云, 等. 应用栖息地适宜性指数研究海州湾小黄鱼的空间分布特征[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(8): 54-63.
Zou Y Y, Xue Y, Ma Q Y, *et al.* Spatial distribution of *Larimichthys polyactis* in Haizhou Bay based on habitat suitability index[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(8): 54-63 (in Chinese).
- [30] 刘勇, 程家骅, 贾世广. 东海及黄海南部带鱼的海底水温分布特征及分析方法的优化[J]. *水产学报*, 2021, 45(6): 871-886.
Liu Y, Cheng J H, Jia S G. Characteristics of submarine

- water temperature distribution of *Trichiurus haumela* in the East China Sea and Southern Yellow Sea with the improvement of the analysis methods[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 871-886 (in Chinese).
- [31] 李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系[J]. *海洋学报*, 1982, 4(1): 103-113.
- Li X D. Studies on the correlation between the temperature of sea water and fishing grounds[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 4(1): 103-113 (in Chinese).
- [32] Shen S H, Leptoukh G G, Acker J G, *et al.* Seasonal variations of chlorophyll *a* concentration in the northern South China Sea[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 315-319.
- [33] Zhang Z X, Xu S Y, Capinha C, *et al.* Using species distribution model to predict the impact of climate change on the potential distribution of Japanese whiting *Sillago japonica*[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 333-340.
- [34] 刘志亮, 胡敦欣. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 1-7.
- Liu Z L, Hu D X. Preliminary study on the Huanghai Sea coastal current and its relationship with local wind in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 1-7 (in Chinese).
- [35] 曹文宣, 常剑波, 乔晔, 等. 长江鱼类早期资源 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007
- Cao W X, Chang J B, Qiao Y, *et al.* Fish resources of early life history stages in Yangtze River[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007 (in Chinese).
- [36] Poloczanska E S, Brown C J, Sydeman W J, *et al.* Global imprint of climate change on marine life[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 919-925.
- [37] Sorte C J, Williams S L, Carlton J T. Marine range shifts and species introductions: comparative spread rates and community impacts[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(3): 303-316.
- [38] Perry A L, Low P J, Ellis J R, *et al.* Climate change and distribution shifts in marine fishes[J]. *Science*, 2005, 308(5730): 1912-1915.

Impacts of climate changes on the habitat suitability of spawning ground for *Konosirus punctatus* in the central and southern Yellow Sea

ZHANG Yunlei^{1,2}, SUN Xiao^{1,2}, LIU Xiaohui³, CUI Yanhua^{1,2}, JIAN Ying^{1,2}, XUE Ying^{1,2,4*}

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Field Observation and Research Station of Haizhou Bay Fishery Ecosystem, Ministry of Education, Qingdao 266003, China;

3. Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China;

4. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: Global warming will lead to great variations in ocean environmental variables, and the spawning grounds of fishes will be changed correspondingly. To comprehensively understand the changing patterns of spawning ground suitability of *Konosirus punctatus* under climate change and provide a scientific basis for the conservation of spawning grounds, fishery surveys were conducted in the spawning grounds in the central and southern Yellow Sea from May to July in 2014—2018 using ring net. Spawning grounds distribution of *K. punctatus* was analyzed by Random Forest model. Six environmental variables were selected in the model, including sea surface temperature, sea surface salinity, depth, offshore distance, sea surface velocity from FVCOM (Finite-Volume Community Ocean Model) and chlorophyll-a concentration from NOAA. In addition, the potential distribution of the spawning grounds of *K. punctatus* under future climate change scenarios was also predicted. Results showed that the main environmental factors affecting the spawning grounds were different by months, and the main factors were water depth, chlorophyll a and sea surface temperature from May to July, with relative contribution of 24.49%, 28.08% and 26.26%, respectively. The suitable spawning grounds of this species will migrate northward under climate changes. Moreover, the suitability of spawning grounds in the northern coastal waters of Haizhou Bay and the deep-water areas of the southern Haizhou Bay will increase significantly. Therefore, this trend should be fully considered in the future in terms of spawning ground protection and resource development and utilization.

Key words: *Konosirus punctatus*; climate change; spawning grounds; random forest model; Yellow Sea

Corresponding author: XUE Ying. E-mail: xueying@ouc.edu.cn

Funding projects: Marine S&T Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0501-2); National Key R&D Program of China (2018YFD0900904); National Natural Science Foundation of China (31772852)