

黄海近岸海域蓝点马鲛产卵场分布及其环境特征

万 荣^{1,2,3,4} 宋鹏波¹ 李增光^{2,3,4*} 龙翔宇¹

(¹中国海洋大学水产学院, 山东青岛 266003; ²上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; ³国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; ⁴大洋渔业资源可持续开发重点实验室, 上海 201306)

摘 要 蓝点马鲛是黄海最重要的经济鱼类之一,为及时掌握其产卵生境特征及早期资源动态,本文根据2015年和2017年5月下旬2个航次的黄海近岸海域产卵场调查数据,采用服从Tweedie分布的广义相加模型(GAM)对蓝点马鲛鱼卵数据进行了分析。结果表明:蓝点马鲛产卵场分布与经纬度、海水深度和海水表层温度均呈显著相关,与盐度无显著相关性;最适深度、温度分别为15~30 m、16~20℃。其产卵场主要分布在石岛渔场(36°30' N,121°48' E)附近和海州湾(33°30'—36° N,119°30'—121°30' E)。蓝点马鲛不同年份间的产卵场分布存在一定的差异,表温较高的年份其产卵场分布有向北偏移的趋势。有必要加强蓝点马鲛主要产卵区域的管理和保护力度,建立相应的生态养护和修复策略,实现黄海蓝点马鲛渔业资源的可持续开发利用。

关键词 蓝点马鲛; 产卵场; 黄海; 环境特征; 广义相加模型

Distribution and environmental characteristics of the spawning grounds of *Scomberomorus niphonius* in the coastal waters of Yellow Sea, China. WAN Rong^{1,2,3,4}, SONG Peng-bo¹, LI Zeng-guang^{2,3,4*}, LONG Xiang-yu¹ (¹Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; ²College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; ³National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; ⁴Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai 201306, China).

Abstract: Japanese Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) is one of the main economic fish species in the Yellow Sea. To understand its spawning habitat and population dynamics in the early stage, we examined the distribution and environmental characteristics of spawning ground of Japanese Spanish mackerel using their egg survey data collecting in 2015 (late May) and 2017 (late May) in the coastal waters of Yellow Sea. The generalized additive model (GAM) with the Tweedie distribution was used to analyze the distribution and environmental characteristics of its spawning ground. The results showed that egg distribution was significantly related to the location (*i.e.*, latitude and longitude), water depth, and sea surface temperature (SST), but not related to sea surface salinity (SSS). The optimal range of depth and SST were 15–30 m and 16–20℃, respectively. The mackerel spawning ground mainly distributed in the region Shidao fishing ground (area near 36°30' N, 121°48' E) and Haizhou Bay (33°30'–36° N, 119°30'–121°30' E). There were some clear inter-annual differences in the distribution of mackerel spawning ground, with the spawning ground tending to northward in the year with higher sea temperature. Therefore, it is necessary to manage and protect the above spawning ground (especially the Haizhou Bay), establishing the corresponding ecological protection and restoration strategy, to realize sustainable exploitation of mackerel fisheries resources in the Yellow Sea.

Key words: *Scomberomorus niphonius*; spawning ground; Yellow sea; environmental characteristics; generalized additive model.

本文由中央高校基本科研业务费项目(201562030, 201612002)和农业农村部专项(931453011)资助 This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (201562030, 201612002) and the Special Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (931453011). 2019-05-16 Received, 2019-11-06 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zgli@shou.edu.cn

蓝点马鲛 (*Scomberomorus niphonius*) 属暖温性中上层鱼类, 游泳迅捷, 是黄渤海重要经济鱼种之一^[1], 繁殖习性主要受水深、温度、盐度等环境因子的影响^[2]。1988—1994年黄渤海蓝点马鲛捕捞量在 6.2~12.6 万 t^[3], 2010—2017年在 17.7~20.2 万吨^[4]。随着捕捞强度的显著增加, 近年来, 蓝点马鲛生物学特性和群体组成不断改变, 表现为生长速度加快、性成熟提前、产卵期延长、群体组成低龄化、小型化等, 其资源状况不容乐观^[5]。因此, 了解蓝点马鲛产卵场生境特征, 及时掌握蓝点马鲛早期补充状态及其资源变动趋势, 对蓝点马鲛资源管理及养护措施的制定具有重要意义。

鱼类潜在产卵生境是指水文条件适宜产卵的区域, 其时空范围主要受气候和环境变化的影响^[6]。通过鱼类受精卵分布及相关环境数据调查, 结合多元统计模型进行分析, 是研究鱼类潜在产卵生境的主要手段。Börjesson 等^[7]用广义相加模型 (generalized additive models, GAM) 分析鱼卵调查数据研究了卡特加特海峡鳕 (*Gadus morhua*) 的产卵生境特征, Bachelier 等^[8]采用 GAM 分析鱼卵分布数据推断白令海东部狭鳕 (*Theragra chalcogramma*) 的产卵场时空分布特征。目前, 我国主要通过研究产卵群体动态特征, 揭示目标鱼种的潜在产卵生境特征, 如林龙山等^[9]采用小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*) 底拖网调查数据对其黄海南部和东海产卵场进行了界定。

蓝点马鲛作为我国重要的经济鱼种, 其群体形态学^[1]、资源分布^[3,5]、渔场海洋学特征^[10]、种群划分^[1,11]、单位捕捞努力量渔获量 (catch per unit effort, CPUE)^[12]等已有了较为深入的研究, 产卵场分布及其生境特征也较受关注^[2,13-14]。黄海为半封闭海区, 其近岸水域是蓝点马鲛产卵和育幼的重要海域, 黄海海域纬度跨度较大, 不同季节各渔场具有不同的水文、环境条件, 各个产卵场有各自的生态特征^[15-16], 随着过度捕捞、填海造陆等行为的日益加剧, 黄海近岸产卵生境也在发生着剧烈变化。针对大尺度的黄海近岸水域 (黄海中部和南部) 的蓝点马鲛产卵生境特征的研究至今未见报道。

本文根据 2015 和 2017 年 5 月下旬在黄海近岸海域 (32°—37° N, 119°—123° E) 进行的蓝点马鲛产卵场调查数据 (鱼卵数据), 采用服从于 Tweedie 分布的 GAM 模型探讨该水域蓝点马鲛潜在产卵场分布及其与环境因子的关系, 揭示蓝点马鲛产卵场变动情况, 为蓝点马鲛资源保护提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 调查时间和方法

分别于 2015 年和 2017 年 5 月下旬在黄海近岸水域开展了 2 个航次的鱼类浮游生物调查, 每个航次调查站位数分别为 90 和 68 个 (图 1)。采用大型浮游生物网 (网口直径 0.8 m, 网目 0.505 mm, 网衣 2.8 m) 表层水平拖网采样, 网口设置流量计 438-110 以校正每网滤水量, 每站位以拖速 2.5 节左右拖 10 min。使用 XR-420 型温盐深仪 (conductivity temperature depth, CTD) 进行现场温度、盐度、深度的测定。鱼类及浮游生物样品以 5% 的福尔马林海水溶液固定保存。

1.2 样品处理

室内分析处理均按照《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)^[17]中规定方法进行。实验室内以形态学方法, 参考《中国近海鱼卵与仔鱼》^[18]和《蓝点马鲛卵子和仔稚鱼形态特征的观察》^[19], 利用江南永新 JSZ5 型体视显微镜在 20×放大倍数下挑拣蓝点马鲛鱼卵并计数, 以 Thompson 等^[20]鱼卵 V 期发育标准对样品进行发育分期鉴定 (I 期鱼卵: 直至胚环出现; II 期鱼卵: 从胚环出现到胚孔关闭; III 期鱼卵: 鱼尾生长到卵直径的四分之三; IV 期鱼卵: 鱼尾触碰到头部; V 期鱼卵: 尾巴长过头部^[19-20]), 考虑到鱼卵受精以后会随海流移动, 尤其是孵化时间较长的鱼类 (如蓝点马鲛, 其孵化时间可达 57 h 以上^[16]), 本文仅使用 I 期和 II 期鱼卵数据研究蓝点马鲛产卵场分布及其环境特征。

1.3 数据处理

用滤水体积对鱼卵计数数量进行标准化, 即 $\rho = N/V$ (N 为鱼卵数量; V 为滤水体积), 以丰度

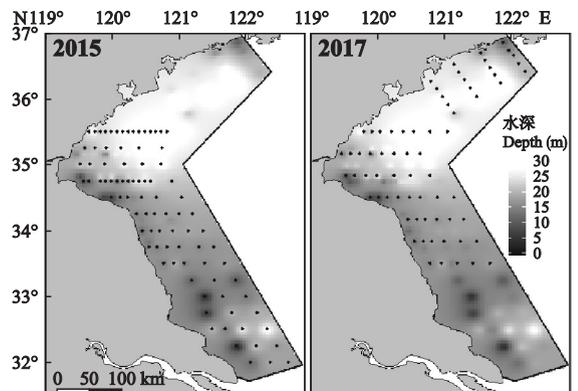


图 1 2015 和 2017 年黄海近岸海域调查站位

Fig.1 Survey stations in the coastal waters of Yellow Sea in 2015 and 2017.

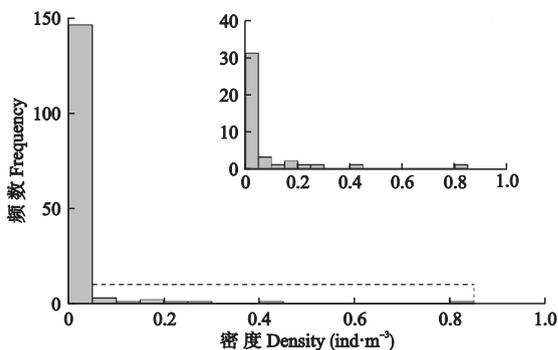


图2 鱼卵密度频率

Fig.2 Frequency of fish egg density.

右上子图表示去除零值后鱼卵密度频数分布图 The sub-figure in the upper right corner represented the frequency of egg density without zero value.

($\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$)表示。根据 GAM^[8],对蓝点马鲛鱼卵丰度数据和环境因子进行分析,其一般表达形式如下:

$$g(\mu) = \beta + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \varepsilon$$

式中: $g(\mu)$ 为连接函数(link function),文中采用对数函数; β 为截距项; $f_i(x_i)$ 表示第*i*个变量的非参数平滑函数; ε 为随机误差项,假设其服从均值为零的正态分布。

鱼卵数据的零值较多,约占总体数据的82%(图2),本文使用服从 Tweedie 分布的 GAM 模型对其进行分析^[21],Tweedie 分布模型能够统一处理包含零值的数据,其密度函数为:

$$f(y; \mu, \sigma^2, p) = a(y; \sigma^2, p) \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}d(y; \mu, p)\right\}$$

式中: μ 为位置参数; σ^2 为分散参数; p 为能效参数; $d(y; \mu, p)$ 为单位偏差。 p 可以定义为除 $0 < p < 1$ 外的任意实数,当 $p=0, 1, 2, 3$ 时分别对应正态、泊松、伽玛和逆正态分布;当 $1 < p < 2$ 时,Tweedie 模型为复合泊松分布,适合有很多零值的数据^[22]。

采用逐步回归分析,综合考虑赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)、偏差解释率(deviance explained)和确定系数(R^2)衡量统计模型拟合的优良性,即 AIC 最小、偏差解释率最大、确定系数最大的模型为最优模型;并在调查区域内对相关环境影响因子进行克里金插值,通过最优 GAM 模型对所得结果进行预测。GAM 模型的构建、检验、预测以及环境因子插值均通过 R 软件(版本 3.5.1)中 mgcv 和 gstat 等软件包完成。

2 结果与分析

2.1 水文条件

2015 年 5 月海水表层温度(SST)的变化范围为

13.2~18.9 °C,2017 年 5 月海水表层温度显著提高,其变化范围为 15.9~21.2 °C,平均增长 2 °C 左右。2015 年高温值出现在海州湾和黄海南部海域,2017 年高温值主要在黄海北部。2015 年黄海南部盐度较高,2017 年黄海南部盐度较低,相比 2015 年,2017 年黄海北部盐度较高(图 3)。

2.2 GAM 模型构建

综合考虑 AIC 最小准则、偏差解释率和确定系数,最终选择以 4 个因子为变量共同构建 GAM 模型,分别为经纬度(Lat, Lon)、海水深度(Depth)、SST 和海水表层盐度(sea surface salinity, SSS),得到最优模型:

$$\text{Density} \sim \text{year} + s(\text{Lat}, \text{lon}) + s(\text{Depth}) + s(\text{SST}) + s(\text{SSS})$$

其具体迭代过程如表 1 所示。最佳模型对鱼卵丰度的偏差解释率为 76.9%,Tweedie 中的 p 值为 1.43。

2.3 蓝点马鲛产卵场分布与响应变量的关系

GAM 模型回归显示,蓝点马鲛产卵场分布与经纬度呈显著相关关系,偏差解释率为 31.9%。经纬度对蓝点马鲛产卵场的影响最大的区域位于海州湾(33°30'—36° N,119°30'—121°30' E)内,在 36° N、121° E 以北区域内,经纬度也对蓝点马鲛产卵场具有影响。蓝点马鲛产卵场的分布与海水深度、海水表层温度均呈显著相关(表 2)。其中,深度对蓝点马鲛产卵场分布的偏差解释率为 24.2%,调查深度范围为 3.98~38.26 m,且在 5~15 m 之间影响随着深度的增加而增大,在 30 m 以深的区域影响随深度增大而减小,即蓝点马鲛产卵场分布的适宜水深为

表 1 模型因子的 GAM 检验

Table 1 Test of GAM on the model factors

模型因子 Model factor	AIC	偏差解释率 Deviance explained (%)	确定系数 R^2
Depth	44.30	24.2	0.065
SSS	41.62	21.3	0.058
SST	44.83	24.3	0.046
Lat, Lon	47.69	31.9	0.080
Lat, Lon +SST	40.30	49.7	0.301
Lat, Lon +SSS	45.06	38.1	0.130
Lat, Lon +Depth	33.99	60.3	0.589
Lat, Lon+Depth+SSS	32.89	61.9	0.611
Lat, Lon+Depth+SST	22.84	76.4	0.808
Lat, Lon+Depth +SST+SSS	22.71	76.9	0.806

Depth: 海水深度 Sea depth; SSS: 海水表层盐度 Sea surface salinity; SST: 海水表层温度 Sea surface temperature; Lat, Lon: 经纬度 Latitude and longitude. 下同 The same below.

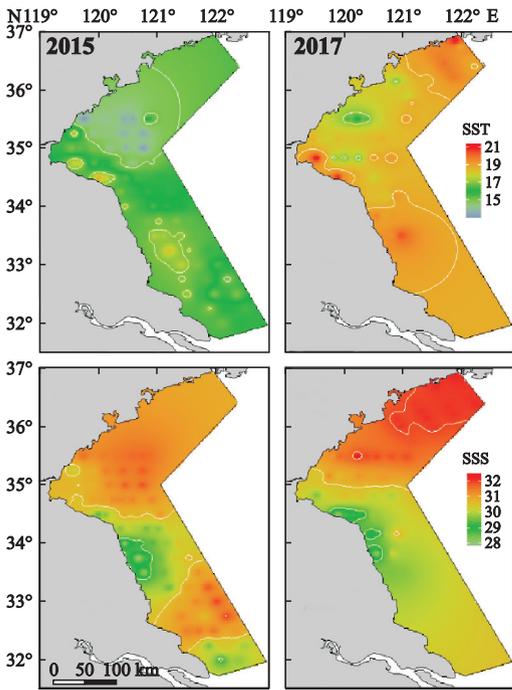


图3 黄海近岸海域环境因子分布
Fig.3 Distribution of environmental factors in the coastal waters of Yellow Sea.

SST: 海水表层温度 Sea surface temperature; SSS: 海水表层盐度 Sea surface salinity. 下同 The same below.

表2 响应变量分析
Table 2 Analysis on the response variables

响应变量 Response variable	P	偏差解释率 Deviance explained (%)
Lat, Lon	0.001 *	31.9
Depth	0.008 *	24.2
SST	0.019 *	24.3
SSS	0.152	21.3

* P<0.05.

15~30 m。蓝点马鲛产卵场的分布与海水表层盐度无显著相关性,调查区域的海水表层盐度范围为25.93~32.40。海水表层温度对蓝点马鲛产卵场分布的偏差解释率为24.3%,调查区域的海水表层温度范围为13.2~21.2℃,16~20℃为适宜蓝点马鲛鱼卵生存的温度(图4)。

2.4 蓝点马鲛鱼卵密度时空分布

调查期间,2个航次调查采集到蓝点马鲛I期和II期鱼卵共805个(表3)。蓝点马鲛鱼卵主要分布在海州湾区域。2015年调查海州湾及吕泗渔场附近,但吕泗渔场并未发现蓝点马鲛鱼卵。2017年调查海州湾渔场及石岛渔场附近,海州湾仍是蓝点马鲛鱼卵的集中分布区域,在石岛渔场附近也发现蓝点马鲛鱼卵,且北部较多(图5)。

2.5 蓝点马鲛潜在产卵场分布

如图5所示,模型预测结果与实际调查结果较

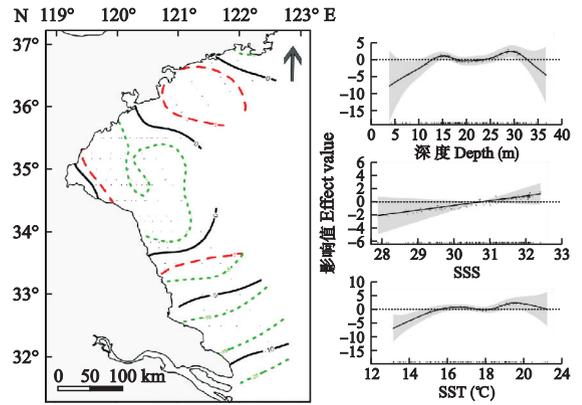


图4 响应变量对蓝点马鲛产卵场分布的影响
Fig.4 Effect of the response variables on the distribution of spawning ground of *Scomberomorus niphonius*.

左图红线代表区间下限,绿线代表区间上限 In the figure on the left, the red line represented the lower limit and the green line represented the upper limit.

表3 蓝点马鲛鱼卵数据
Table 3 Data of fish eggs of *Scomberomorus niphonius*

年份 Year	站位数 Station	鱼卵数量 Egg number (ind)
2015	90	483
2017	68	322
合计	158	805

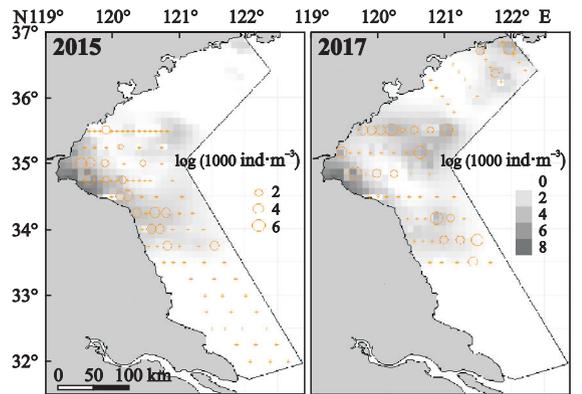


图5 蓝点马鲛潜在产卵场分布
Fig.5 Distribution of potential spawning ground of *Scomberomorus niphonius*.

圆圈表示调查值、灰色表示模型预测值 Circles represented the survey values, and grey colors represented the predicted values.

为相符。预测结果显示2015年蓝点马鲛潜在产卵场主要分布在黄海中部(即海州湾海域,越靠近海岸其分布密度越大)、北部的小部分区域;2017年蓝点马鲛潜在产卵场与2015年相比变化较大,黄海北部(石岛渔场)区域的产卵密度增大。

3 讨论

3.1 模型评价

本研究采用服从于Tweedie分布的GAM模型

分析时空因子和环境因子对黄海蓝点马鲛产卵场分布的影响,结果表明,各因子对蓝点马鲛产卵场分布的影响多呈非线性相关关系。GAM 模型可以定量描述物种分布及其与环境因子之间的相互关系,计算结果可以通过图表的形式直观形象地展现^[23-26]。鱼类的鱼卵和仔稚鱼数据往往含有大量的零值,常常呈现偏态或正偏态分布,其对应的概率密度函数常为伽马分布,所以要对含有大量零值的数据进行处理,基于 Tweedie 分布的 GAM 模型是处理这种数据的常用模型之一^[21]。本文采用服从于 Tweedie 分布的 GAM 模型,可以更好地分析蓝点马鲛鱼卵早期阶段分布特征,反映蓝点马鲛产卵场的分布及其环境特征。

3.2 蓝点马鲛产卵场与环境因子的关系

蓝点马鲛是暖温性鱼类,大部分时间栖息在海域水体中的中上层,对深度、水温等环境有较强的敏感性,直接影响蓝点马鲛的洄游路径及其产卵场选择。蓝点马鲛倾向于在较深水深产卵,产卵水深范围为 15~30 m^[2,14]。已有研究表明,日本鲭鱼卵从产卵场向育肥场输运过程中,产卵深度的变动带来细微的环境差异会降低鱼卵仔幼鱼的存活率^[27]。本研究表明蓝点马鲛产卵与海水表层盐度相关性不显著,水温是影响鱼类产卵的重要环境因子之一,影响成鱼性腺发育以及生殖洄游等,进而影响鱼类产卵场的分布。在象山港研究中蓝点马鲛产卵场的适宜水温是 14~19 ℃^[2],海州湾 20 m 浅水域蓝点马鲛产卵场温度主要在 13.0~20.2 ℃^[14],与本研究结果较为接近。黄海蓝点马鲛产卵场的适宜水深为 15~30 m,适宜温度范围为 16~20 ℃。

3.3 蓝点马鲛产卵场的时空特征

蓝点马鲛自 1—2 月越冬,3 月开始离开越冬地进行生殖洄游,进入产卵场后根据水温和饵料生物等条件,选择在适宜的时间进行产卵。蓝点马鲛产卵时间的早晚与表层水温的高低有着密切关系^[28]。蓝点马鲛在黄渤海各产卵场的产卵期主要在 4 月中下旬到 5 月中上旬^[10];黄海海域蓝点马鲛产卵盛期为 5 月上旬至 6 月下旬^[14,16,23]。东海区(如象山港)蓝点马鲛产卵盛期略早,为 4 月中旬到 5 月初^[2,29],这是由于南北海区水温梯度较大,蓝点马鲛产卵对水温敏感性较强,导致产卵期呈现出南早北晚的现象^[1]。蓝点马鲛在黄海的产卵场主要有海州湾、青岛至石岛近海和江苏吕泗沿海^[1,3]。本研究中蓝点马鲛产卵场主要分布在海州湾及石岛近岸海域,黄海南部吕泗沿海鱼卵丰度较小。吕泗沿海

附近填海造陆及油类污染等,对蓝点马鲛产卵繁殖产生了不利影响^[30]。海州湾和石岛近岸海域是鳀科等众多鱼类的产卵场和育幼场,为蓝点马鲛仔鱼提供了充足的饵料^[15-16]。随着海州湾海水产养殖业(如紫菜)的大规模发展,海水富营养化程度显著提高^[31],导致了海岸带的大型赤潮事件,最显著的发生在 2008 年^[32],对蓝点马鲛产卵生境产生一定的影响,其机制有待进一步探讨。黄海冷水团能够影响蓝点马鲛洄游路线^[33],石岛海域蓝点马鲛产卵场的分布也可能受到黄海冷水团的影响。近年来气候异常,如 2017 年是有观测记录以来最暖的非厄尔尼诺事件年份,渤海沿海海表温度为历史最高,东亚季风年代际的减弱引起黑潮暖水入侵东中国海陆架的增强可能是近海变暖的主要原因^[34]。而表温较高的年份(2017)蓝点马鲛产卵场分布有向北偏移的趋势,更为准确的结论有赖未来长时间序列的野外观测。

本文研究了黄海近岸蓝点马鲛产卵场的分布特征及其对环境因子的响应机制,结果表明,环境因子对蓝点马鲛产卵场有显著影响,尤其是海水表温,对其产卵期及产卵场空间分布均有重要影响。与历史研究相比,由于剧烈变化的海洋环境和频繁的人类活动等,黄海海域蓝点马鲛产卵场可能已发生了重大变化,吕泗沿海海域产卵场可能已经消退,需要对其产卵场区域(如海州湾区域)加强管理和保护,建立相应的生态保护机制,采取合理有效的海洋生态恢复措施。

致谢 感谢中国海洋大学任一平、田永军教授提供的宝贵意见,谨致谢忱!

参考文献

- [1] 水柏年,孙希福,韩志强,等. 黄海、东海蓝点马鲛群体的形态特征分析. 水产学报, 2009, 33(3): 445-451 [Shui B-N, Sun X-F, Han Z-Q, et al. Morphological variation analysis among populations of Japanese spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(3): 445-451]
- [2] 宋超,王宇坛,刘尊雷,等. 象山港蓝点马鲛鱼卵、仔稚鱼的时空分布特征及其与环境因子关系. 中国水产科学, 2016, 23(5): 1197-1204 [Song C, Wang Y-T, Liu Z-L, et al. Relationship between environmental factors and distribution of *Scomberomorus niphonius* eggs, larvae, and juveniles in Xiangshan Bay. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(5): 1197-1204]
- [3] 邱盛尧. 黄渤海蓝点马鲛资源数. 现代渔业信息, 1995(3): 16-19 [Qiu S-Y. Dynamics of Japanese

- spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* (Cuvier et Valenciennes) Stocks in the Yellow Sea and Bohai sea. *Modern Fisheries Information*, 1995(3): 16-19]
- [4] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2010-2017 [Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China fishery Statistics Yearbook. Beijing: China Agricultural Press, 2010-2017]
- [5] 孙本晓. 黄海海蓝点马鲛资源现状及其保护. 硕士论文. 北京: 中国农业科学院, 2009 [Sun B-X. The Current Situation and Conservation of *Scomberomorus niphonius* in Yellow Sea and Bohai Bay. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009]
- [6] Plank B, Bellier E, Lazure P. Modeling potential spawning habitat of sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. *Fisheries Oceanography*, 2010, **16**: 16-30
- [7] Börjesson P, Jonsson P, Pacariz S, et al. Spawning of Kattegat cod (*Gadus morhua*): Mapping spatial distribution by egg surveys. *Fisheries Research*, 2013, **147**: 63-71
- [8] Bacheler NM, Ciannelli L, Bailey KM, et al. Spatial and temporal patterns of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) spawning in the eastern Bering Sea inferred from egg and larval distributions. *Fisheries Oceanography*, 2010, **19**: 107-120
- [9] 林龙山, 程家骅, 姜亚洲, 等. 黄海南部和东海小黄鱼产卵场分布及其环境特征. 生态学报, 2008, **28**(8): 3485-3494 [Lin L-S, Cheng J-H, Jiang Y-Z, et al. Spatial distribution and environmental characteristics of the spawning grounds of small yellow croaker in the southern Yellow Sea and the East China Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3485-3494]
- [10] 袁杨洋, 叶振江, 刘群, 等. 黄海南部春季蓝点马鲛渔场海洋学特征与渔期渔场分布. 海洋与湖沼, 2009, **40**(4): 506-510 [Yuan Y-Y, Ye Z-J, Liu Q, et al. Fishery oceanography and spatial-temporal distribution of *Scomberomorus niphonius* in spring in southern Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, **40**(4): 506-510]
- [11] Zhang C, Ye Z, Li Z, et al. Population structure of Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea: Evidence from random forests based on otolith features. *Fisheries Science*, 2016, **82**: 251-256
- [12] Li Z, Ye Z, Wan R, et al. Model selection between traditional and popular methods for standardizing catch rates of target species: A case study of Japanese Spanish mackerel in the gillnet fishery. *Fisheries Research*, 2015, **161**: 312-319
- [13] 祖凯伟, 程家骅, 张弛, 等. 蓝点马鲛产卵场变动与环境的关系. 南昌: 中国水产学会学术年会, 2017 [Zu K-W, Cheng J-H, Zhang C, et al. The effect of environmental change on the spawning ground of *Scomberomorus niphonius*. Annual Conference of the China Society of Fisheries, Nanchang, 2017]
- [14] 刘文博, 刘鸿, 叶振江, 等. 黄海中部近岸小黄鱼与蓝点马鲛鱼卵时空分布的初步研究. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2015, **34**(6): 526-531 [Liu W-B, Liu H, Ye Z-J, et al. A preliminary study of spatial and temporal distribution of *Scomberomorus niphonius* and *Larimichthys polyactis* eggs in the central Yellow Sea. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2015, **34**(6): 526-531]
- [15] 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. 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. *Marine Fisheries Research*, 1998, **19**(1): 60-73]
- [16] 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. 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 eggs and larvae of osteichthyes in the Bohai Sea and Yellow Sea. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2000, **9**(4): 290-297]
- [17] 国家质量监督检验检疫局. 海洋调查规范 (GB/T 12763-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007 [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specifications for Oceanographic Survey (GB/T 12763-2007). Beijing: China Standards Press, 2007]
- [18] 张仁斋, 陆穗芬. 中国近海鱼卵与仔鱼. 上海: 上海科学技术出版社, 1985 [Zhang R-Z, Lu H-F. Eggs and larvae in the offshore of China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1985]
- [19] 沙学绅, 何桂芬, 张孝威. 蓝点马鲛卵子和仔、稚鱼形态特征的观察. 海洋与湖沼, 1966, **8**(1): 1-8 [Sha X-S, He G-F, Zhang X-W. A description of the morphological characters of the eggs and larvae of the Blue Spotted Mackerel, *Scomberomorus niphonius*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1966, **8**(1): 1-8]
- [20] Thompson BM, Riley JD. Egg and larval development studies in the North Sea cod (*Gadus morhua* L.). *Rapports et Proces-Verbaux des Reunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 1981, **178**: 553-559
- [21] Shono H. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis. *Fisheries Research*, 2008, **93**: 154-162
- [22] Tweedie MCK. An index which distinguishes between some important exponential families. Proceedings of the Indian Statistical Institute Golden Jubilee International Conference. Calcutta, India, 1984: 579-604
- [23] 李增光. 基于 GAM 模型的南黄海帆张网主要渔获物分布及海州湾鱼卵、仔稚鱼集群特征的初步研究. 硕士论文. 青岛: 中国海洋大学, 2013 [Li Z-G. Distribution of Main Species of Stow Net in the South Yellow Sea based on GAM and Preliminary Study on Characteristics of Ichthyoplankton Assemblages in Haizhou Bay. Master Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2013]
- [24] 朱国平, 朱小艳, 徐怡瑛, 等. 基于 GAM 模型分析夏秋季南奥克尼群岛南极磷虾渔场时空分布及与环

- 境因子之间的关系. 极地研究, 2012, **24**(3): 266-273 [Zhu G-P, Zhu X-Y, Xu Y-Y, *et al.* The Spatio-temporal distribution of fishing grounds for Antarctic Krill (*Euphausia superba*) around the south Orkney Islands in Austral summer-autumn and its relation to environmental factors based on a generalized additive model. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, **24**(3): 266-273]
- [25] 陈新军, 田思泉. 利用 GAM 模型分析表温和时空因子对西北太平洋海域柔鱼资源状况的影响. 海洋湖沼通报, 2007(2): 104-113 [Chen X-J, Tian S-Q. Effects of SST and temp-spatial factors on abundance of nylon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the north-western Pacific using generalized additive models. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(2): 104-113]
- [26] 储宇航. 南太平洋长鳍金枪鱼渔业资源时空分布及资源状况分析. 硕士学位论文. 上海: 上海海洋大学, 2016 [Chu Y-H. Analysis for Spatial-temporal Variation and Resources Status of Albacore (*Thunnus alalunga*) in the South Pacific Ocean. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016]
- [27] 李日嵩, 潘灵芝, 陈新军. 产卵深度变动对东海日本鲭鱼卵仔幼鱼输运和存活率的影响. 海洋渔业, 2013, **35**(2): 176-182 [Li R-S, Pan L-Z, Chen X-J. Effects of spawning water depth on transport and survival of chub mackerel (*Scomber japonicas*) eggs and larvae in the East China Sea. *Marine Fisheries*, 2013, **35**(2): 176-182]
- [28] 韦晟. 蓝点马鲛在黄、渤海的渔场、渔期与环境的关系. 海洋湖沼通报, 1980(2): 34-40 [Wei S. The fishing seasons and grounds of the blue spotted mackerel, *Scomberomorus niphonius* in the Yellow Sea and Bohai in relation to environmental factors. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1980(2): 34-40]
- [29] 楼丹, 刘又毓, 孙元, 等. 象山港春季浮性鱼卵数量分布和仔稚鱼种类组成. 水产科技情报, 2016, **43**(4): 203-206 [Lou D, Liu Y-Y, Sun Y, *et al.* The number distribution of floating fish eggs and the composition of larval and juvenile fish species in Spring in Xiangshan Bar. *Fisheries Science & Technology Information*, 2016, **43**(4): 203-206]
- [30] 刘绿叶, 孙国铭, 刘培廷, 等. 应用主成分法和聚类分析法分析吕四渔场近岸海水水质. 海洋渔业, 2006, **28**(3): 217-221 [Liu L-Y, Sun G-M, Liu P-T, *et al.* An analysis on the inshore water quality on the Lusi fishing grounds by principal component analysis (PCA) and cluster analysis. *Marine Fishery*, 2006, **28**(3): 217-221]
- [31] 周德山. 海州湾海域赤潮形成的环境因子研究. 硕士论文. 苏州: 苏州大学, 2008 [Zhou D-S. Study on Environment Factors Affecting Outbreaks of Red Tide in Haizhou Bay Coastal waters. Master Thesis. Suzhou: Soochow University, 2008]
- [32] Liu D, Keesing JK, Xing Q & Shi P. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in china. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58**: 888-895
- [33] 郑东, 张瑞安. 烟威及石岛近海春季水团分析. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 1989, **19**(1): 109-118 [Zheng D, Zhang R-A. Analysis of spring water masses in the sea area off Yantai, Weihai and Shidao. *Periodical of Ocean University of China*, 1989, **19**(1): 109-118]
- [34] 李琰, 范文静, 骆敬新, 等. 2017 年中国近海海温和气温气候特征分析. 海洋通报, 2018, **37**(3): 296-302 [Li Y, Fan W-J, Luo J-X, *et al.* Climatic characteristics of sea surface temperature and air temperature over the China Seas in 2017. *Marine Science Bulletin*, 2018, **37**(3): 296-302]

作者简介 万 荣, 男, 1963 年生, 博士, 教授。主要从事渔具理论与设计、离岸增殖设施水动力学、渔业资源评估与管理等研究。E-mail: rwan@shou.edu.cn

责任编辑 肖 红

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

