

DOI: 10.12264/JFSC2024-0326

大连海域大泷六线鱼栖息地适宜性

冯超, 董婧, 刘修泽, 曲德重, 吉光, 王爱勇, 王小林, 王彬, 胥延钊, 张德普

辽宁省海洋水产科学研究院, 农业农村部水产种质资源保护与发掘利用重点实验室, 辽宁省海洋生物资源与生态学重点实验室, 大连市渔业资源养护重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要: 为分析大连海域大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)的栖息地适宜性和时空变化, 识别其资源与环境因子的关系, 为该物种的栖息地保护和放流区域选址提供依据, 本研究基于 2015—2023 年 5—10 月的渔业调查资料, 利用同步获得的底层环境因子(水深、温度、盐度、溶解氧和叶绿素 a)作为自变量, 结合增强回归树模型(BRT)构建了各月的栖息地适宜性指数(HSI)。研究显示, 水深是影响大泷六线鱼栖息地适宜性最重要的环境因子, 其他因子如水温、溶解氧和叶绿素 a 的影响因月份而异。适宜栖息地的时空分布表明, 大泷六线鱼适宜栖息地随月份呈现一定的变化, 其大连渤海海域的适宜栖息地在 5—10 月呈现由北向南的迁移趋势; 大连黄海海域的适宜栖息地在 5—7 月由近岸向近海、由西向东迁移至大长山岛和海洋岛周边海域, 8—10 月则反向迁移至大连市及旅顺南部近岸海域。总体而言, 大泷六线鱼在大连黄海海域的适宜栖息地面积及其在研究海域中的占比均高于大连渤海海域。研究结果可为大泷六线鱼的资源养护及增殖放流策略优化提供参考依据。

关键词: 大泷六线鱼; 栖息地适宜性指数; 时空分布; 大连海域; 增殖放流

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)04-0538-13

大泷六线鱼(*Hexagrammos otakii*)隶属于鲉形目(Scorpaeniformes)、六线鱼科(Hexagrammidae)、六线鱼属(*Hexagrammos*), 为典型的冷温性海洋鱼类^[1], 主要栖息地为沿岸及岛屿周围的礁石区域, 其活动区域与水温、底质类型等非生物因子有较强相关性^[2], 在我国, 该鱼种主要分布在黄渤海和东海海域^[2]。研究表明, 大泷六线鱼近年为大连及周边海域的季节性优势种^[3-4]。作为地方性的、具有较高经济价值和特殊生态习性的物种, 大泷六线鱼受到较多关注, 农业农村部设立的国家级大连圆岛海域水产种质资源保护区将大泷六线鱼作为重要保护对象^[5]。为补充和恢复大泷六线鱼资源群体, 山东省于 2017 年起将该种的增殖设为省级放流项目^[6], 辽宁省大连市亦开展了放

流试点^[7]。目前, 关于大泷六线鱼增殖放流相关的研究主要集中在放流效果评估方面^[6,8-9], 有关增殖放流区域选划的研究较少, 仅见基于大泷六线鱼资源时空分布及其与环境因子的关系对辽宁海域最适放流区域的选划^[2]。

国内外学者对于渔业生物放流地点及水域的选划做了较多研究, 如挪威学者^[10]通过对大西洋鳕(*Gadus morhua*)饵料生物的丰度及组成研究发现, 在食物充足的海湾放流鳕幼体的效果明显好于一些食物匮乏的小海湾; 董婧等^[11]通过对辽东湾海蜇水母体生活史的常年观测调查, 建议辽东湾海蜇(*Rhopilema esculentum*)的增殖放流水域选择在辽东湾北部近海海蜇原分布区进行, 选择滩涂短、靠近河口、三面背山水流较为平稳的海湾

收稿日期: 2024-11-26; 修订日期: 2024-12-21.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3108202); 大连市科技创新基金项目(2023JJ13SN066; 2021JJ11CG001); 国家农业科学渔业资源环境沙河口水观测实验站项目(NAES063FS09).

作者简介: 冯超(1997-), 男, 研究实习员, 从事渔业资源研究. E-mail: 826777850@qq.com

通信作者: 刘修泽, 研究员, 从事渔业资源研究. E-mail: 303588859@qq.com

作为放流位置;张秀梅等^[12]通过对青岛近岸海域金乌贼(*Sepia esculenta*)繁殖群体及补充群体的连续监测,建议金乌贼放流海域宜选择饵料丰度较高的水域,且建议开展分批放流以减小同一放流水域的摄食压力。上述关于渔业生物适宜放流地点的确定是基于科学调查研究,对渔业生物适宜栖息地如产卵场、索饵场等进行选划,作为增殖放流的最适宜水域。但相关研究主要为定性分析,选划的放流水域相对宏观,尚需进一步开展研究对放流水域的选划进行细化和量化。

生境适宜性指数(HSI)模型是渔业领域应用的较多的物种分布模型。HSI 模型可用于渔场鉴定预报^[13-14]、描述渔业栖息地质量及可视化表达^[15-16]、探析栖息地分布的限制因子^[17]等,其能够量化关键环境因子对栖息地适宜性的影响,并实现渔业生物潜在适宜栖息地的可视化^[18]。目前 HSI 指数模型在渔业领域已经得到了较为广泛的应用,孙涛^[19]通过建立大亚湾海域多齿蛇鲭(*Saurida tumbil*)的生境适宜性指数(HSI)模型,显示杨梅坑海域及附近海域是该物种的首选放流生境;张孝民等^[20]基于广义可加模型 GAM 和提升回归树模型 BRT 优化的物种分布模型显示莱州湾南部、东南部和东北部海域是夏季三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)的适宜栖息海域,以上研究展现了 HSI 指数模型在预测栖息地方面的优势。本研究拟采用 HSI 模型,对大连海域大泷六线鱼的栖息地适宜性进行研究,以期探明其资源分布与环境因子的关系,明确适宜栖息地的时空分布,为该物种在大连海域的栖息地保护、放流水域选划等增殖放流策略建立及优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

大连海域地处辽东半岛最南端,以老铁山为界,包括东侧的黄海北部海域和西侧的渤海海域。大连海域的底质结构以细粒物质为主,并夹杂着粗砂、中砂及泥质^[21],该底质类型与大泷六线鱼的恋礁习性契合度较高。同时该海域水系构

成复杂,包括了由辽南沿岸流形成的沿岸低盐水系、对马暖流西分支所代表的外海高温高盐水系,以及黄海冷水团构成的外海高盐低温水系^[21],这些冷暖水团的交汇带来了丰富的营养盐和水温的波动,初级生产力较大,从而为包括大泷六线鱼在内的鱼类的生长发育和繁殖活动提供了得天独厚的海域条件。

数据源自 2015—2023 年 5—10 月在大连海域开展的渔业资源定点调查,共 24 个月航次(表 1),各航次调查站位设置相同,调查范围基本覆盖大连海域(图 1),大泷六线鱼渔获样品的采集和分析依据《海洋调查规范》^[22]进行,调查船为 257 kW 的渔船,调查网具为有翼单囊拖网,网口宽度为 10 m,调查船拖速保持在 3 kn,拖网时间 0.5 h,每个站位的拖速标准化为 3 kn,时间标准化为 1 h,将标准化后的单位时间内的渔获尾数(ind/h)作为该鱼种相对资源密度指数。用多参数水质仪获取每个站位同步的水深(Dep)、水温(Tem)、盐度(Sal)、溶解氧(Do)和叶绿素 a (Chl a)等环境数据。本研究旨在分析大泷六线鱼栖息地分布的月际变化,因此将渔获数据以月航次为单位进行统计,不同年度相同月份相同站点的渔获尾数和环境变量进行均值计算,以进行后续的数据分析。

表 1 大泷六线鱼不同年份 5—10 月调查航次明细
Tab. 1 Survey voyage of *Hexagrammos otakii* from May to October in different years

月份 month	年份 year
5 月 May	2015, 2020, 2023
6 月 June	2015, 2016, 2017, 2019, 2021
7 月 July	2016, 2019, 2022
8 月 August	2015, 2016, 2017, 2020, 2021, 2023
9 月 September	2016, 2017, 2019
10 月 October	2015, 2020, 2022, 2023

1.2 数据分析预处理

本研究首先将底层环境因子包括水深、温度、盐度、溶解氧和叶绿素 a 和底质类型均作为自变量纳入增强回归树(BRT)模型,计算各自变量的权重系数。结果表明底质类型对大泷六线鱼资源分布的贡献相对较小,各月相对贡献率在

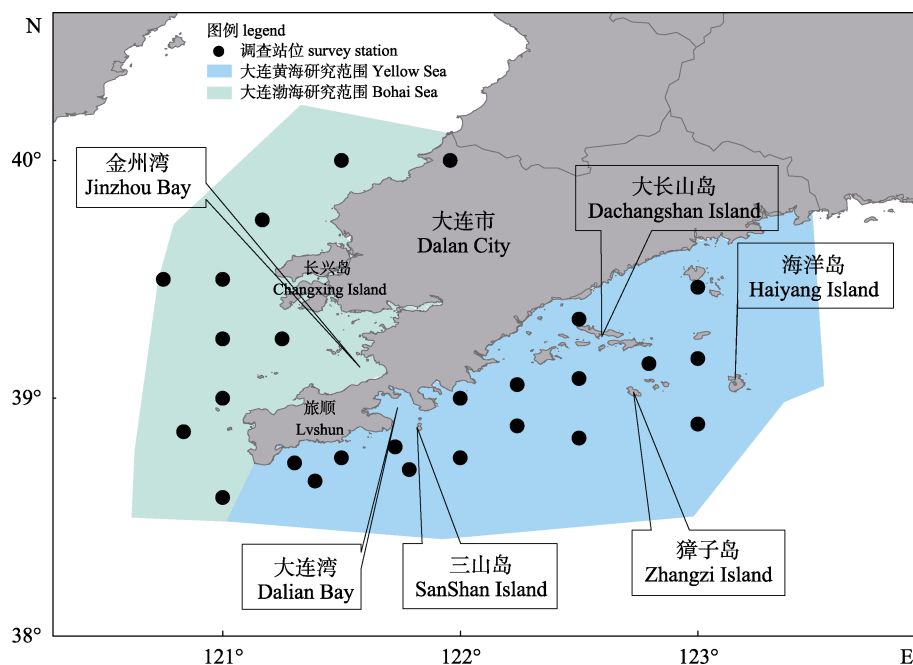


图 1 大连海域大泷六线鱼调查站位图

Fig.1 Sampling stations of *Hexagrammos Otakii* in the coastal waters of Dalian

1.6%~5.7%。结合底质类型,发现调查站位所处底质类型基本为岩礁底和砂底^[21],均为大泷六线鱼喜栖息的底质类型,因此底质类型作为自变量对大泷六线鱼资源分布的影响相对较小,故后续的数据分析中将自变量调整为水深、温度、盐度、溶解氧和叶绿素 a,未包括底质类型。

增殖放流的对象主要是海洋生物的幼体,因此放流区域选划时需侧重于放流期间大泷六线鱼幼体的栖息地适宜性分析。前期研究表明大泷六线鱼雄鱼 1 龄性成熟、雌鱼 2 龄性成熟^[23],根据大连海域大泷六线鱼的生长方程^[24],计算得出大泷六线鱼雄鱼幼体体长 ≤ 171 mm,雌鱼幼体体长 ≤ 230 mm,本研究所获体长 ≤ 171 mm 的大泷六线鱼个体占总数量的 90.9%,体长 ≤ 230 mm 的个体占总数量的 95.8%,表明研究群体基本均为大泷六线鱼幼体。综合考虑,本研究数据分析未再进一步区分成体及幼体。同时,因放流个体较小,拖网调查方式难以捕获与放流群体相同规格的样本,本研究假设未成熟群体与放流群体具有相同的分布模式,以此推断放流期间大泷六线鱼的适宜栖息地。

1.3 栖息地模型构建

1.3.1 单位渔获尾数 根据渔业调查数据计算每月各站位的单位渔获尾数,使用大泷六线鱼单位渔获尾数作为该鱼种相对资源量的指数,单位渔获尾数计算公式如下:

$$CPUE = \frac{\text{Catch}}{\text{Effort}} \quad (1)$$

式中,CPUE 为单位时间内渔获尾数,单位为 ind/h; Catch 为一个站位的渔获尾数,单位为 ind; Effort 为一个站位的捕捞努力量,单位为 h。

1.3.2 单因子适宜性指数构建 首先计算观测到的单因子适宜性指数 SI, 计算公式^[25]如下

$$SI = \frac{CPUE}{CPUE_{\max}} \quad (2)$$

式中, $CPUE_{\max}$ 为各月单位时间内最大渔获尾数; 观测单因子适宜指数 SI 作为因变量, $SI > 0.7$ 时, 对应的环境因子作为适宜栖息环境范围, 各环境因子作为自变量, 其中 SI 与溶解氧和叶绿素 a 的关系采用平滑函数拟合^[26], SI 与水深、水温 and 盐度使用经验公式进行拟合^[25], 经验公式如下:

$$SI_x = e^{[a(x-b)^2]} \quad (3)$$

式中, a 、 b 为待估参数, SI_x 为各环境因子 x 对应的 SI 值, x 为各环境因子值。

1.3.3 栖息地指数模型构建 通过增强回归树(BRT)模型确定各环境因子对 CPUE 的相对贡献率, 将各环境因子的相对贡献率作为构建栖息地指数模型的权重系数。增强回归树模型适用于生态学统计模型中的解释和预测, 对于非线性变量有很好的解释和预测^[27]。将权重系数和单因子适宜性指数结合, 分别采用算术平均法(AMM)^[28]和几何平均法(GMM)^[29]计算 HSI, 计算公式如下:

$$HSI_{AMM} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \cdot \sum_{i=1}^n SI_i \omega_i \quad (4)$$

$$HSI_{GMM} = \left(\prod_{i=1}^n SI_i^{\omega_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \omega_i}} \quad (5)$$

式中, HSI 为栖息地适宜性指数, SI_i 为环境变量 i 的 SI 值, ω_i 为环境变量 i 通过增强回归树模型被赋予的权重。

HSI 的数值范围在 0~1, 将 $HSI \geq 0.7$ 视为适宜栖息地, $0.3 \leq HSI < 0.7$ 视为次适宜栖息地, $HSI < 0.3$ 视为不适宜栖息地^[30]。采用交叉验证的方法评估 HSI 模型的预测性能。随机选取 80% 的数据进行建模, 用剩余 20% 的数据进行交叉检验, 并评估该模型的预测性能, 重复进行 100 次^[31]。对基于 AMM 和 GMM 算法的 HSI 模型, 使用赤池信息准则(AIC)和 R^2 评估预测性能, 从而选取适合的最优模型。根据选取的模型利用反距离权重法分别绘制渤海和黄海 HSI 分布图, HSI 模型的建立采用 R 4.3.2^[32]软件完成, HSI 分布图绘制采用 ArcGIS 10.2 软件完成。

2 结果与分析

2.1 环境因子适宜性

5—10 月水深、水温、盐度、溶解氧和叶绿素 a 的单因子适宜性曲线存在明显的月间变化(图 2)。水深和水温的适宜范围先增加后降低, 最高适宜范围均出现在 8 月, 分别达 55~60 m 和 15~23 °C, 盐度适宜范围变化较小, 基本保持在 31.5~32.5, 溶解氧适宜范围均大于 6 mg/L, 叶绿素 a 除 5 月

和 6 月适宜范围大于 2 μg/L, 7—10 月适宜范围均小于 2 μg/L。

2.2 环境因子贡献率

增强回归树模型(BRT)分析表明(表 2), 各个环境因子对 6 个月份所建模型的方差贡献率有所不同, 但总体上水深对各月模型方差贡献率最大, 6 个月份平均为(32.3±5.7)%, 其次为叶绿素 a (19.9±3.6)%, 随后是溶解氧(16.2±7.3)%和温度(17.8±5.4)%, 盐度的相对贡献率最小, 为(13.7±5.4)%。由各个月份环境变量的相对贡献率来看, 水深在 6 个月份的相对贡献率均为最大, 10 月最高达到 41.1%, 7 月最低为 26.9%。叶绿素 a 在 5 月和 9 月的相对贡献率仅次于水深, 而温度在 6 月、7 月和 10 月, 以及溶解氧在 8 月成为相对贡献率仅次于水深的环境因子。

2.3 HSI 模型验证

对 AMM 和 GMM 两种不同方法在 HSI 模型预测性能进行评估。结果显示, 各月采用 AMM 算法建立的 HSI 模型均具有较低的 AIC 值和较高的 R^2 (表 3), 表明 AMM 预测效果优于 GMM, 因此选用 AMM 建立 HSI 模型。

2.4 适宜栖息地时空变化

由 HSI 分布(图 3)可见, 大连海域大泷六线鱼的适宜栖息地分布随月份变化差异较大。大连渤海海域从 5 月到 10 月表现出由北向南迁移的趋势。5 月适宜栖息地主要分布在两个区域, 分别是长兴岛西北侧海域和旅顺西侧海域, 占大连渤海研究面积的 7.3%, 不适宜栖息地分布在金州湾海域; 6 月适宜栖息地总体南移, 且面积有所减小, 仅占大连渤海研究面积的 4.2%, 分布在金州湾外海至旅顺西侧的蛇岛周边海域; 7 月适宜栖息地占大连渤海研究面积的 4.5%; 8 月适宜栖息地进一步南移, 占大连渤海研究面积的 23.5%, 集中在旅顺近海海域; 9 月无适宜栖息地, 次适宜栖息地与不适宜栖息地面积占比相近; 10 月无适宜、次适宜栖息地, 均为不适宜栖息地(图 3)。

大连黄海海域大泷六线鱼的适宜栖息地表现出 5—7 月由近岸向近海、由西向东迁移, 8—10 月由近海向近岸、由东向西迁移的趋势。5 月适宜栖息地集中在金州近岸海域及长海县海域, 适

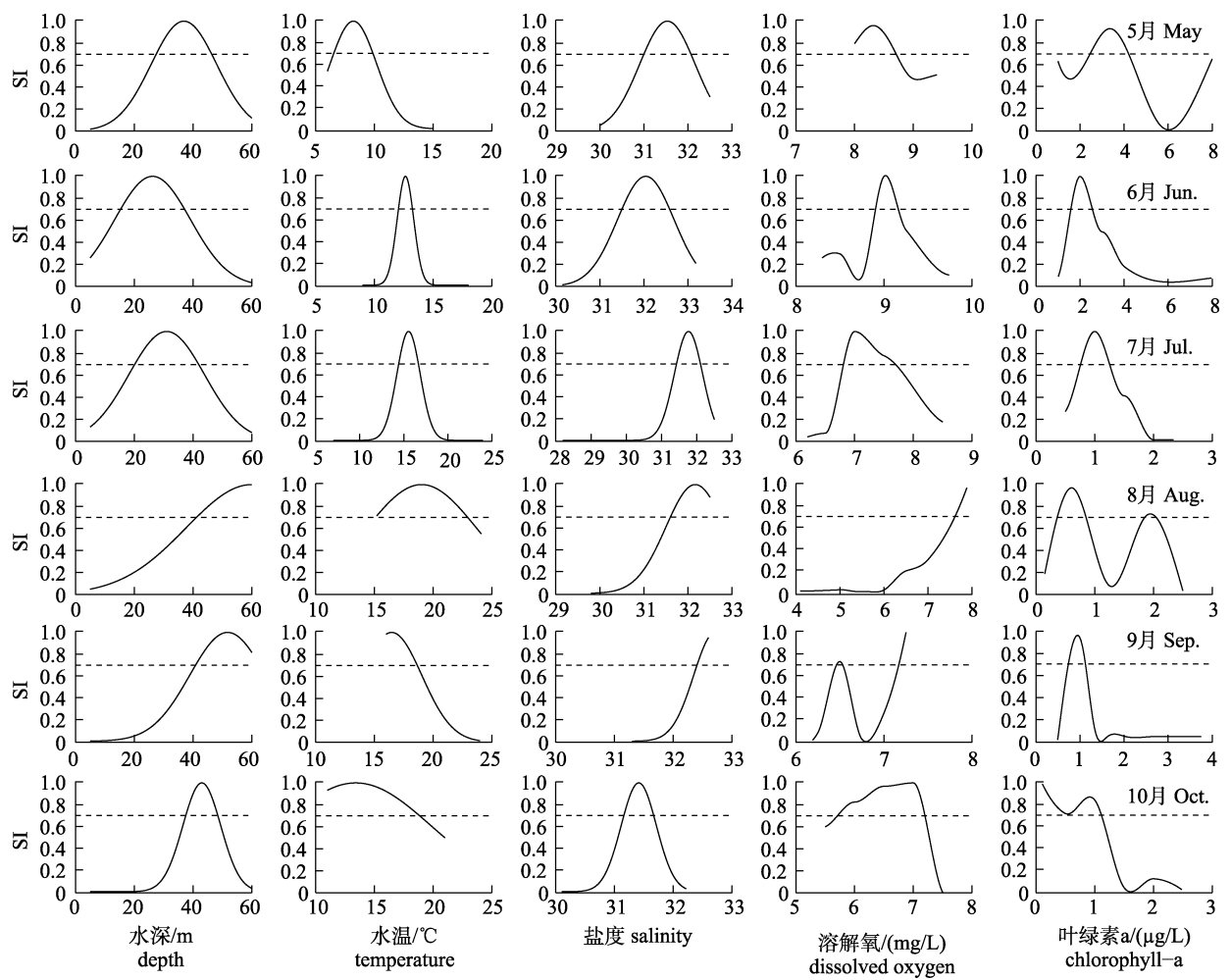


图 2 大连海域大泷六线鱼资源环境因子拟合 SI 曲线图

Fig. 2 Fitting SI curves of environment variables for *Hexagrammos otakii* resource in Dalian offshore

表 2 环境变量对大泷六线鱼资源增强回归树模型的相对贡献率						
Tab. 2 Relative contribution of environmental variables to the BRT model for <i>Hexagrammos otakii</i> resource						
环境变量 environment variable	相对贡献率/% relative contribution					
	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep	10 月 Oct
水深 Dep	36.2	32.5	26.9	31.4	25.9	41.1
温度 Tem	13.5	25.4	20.7	10.4	16.9	20.1
盐度 Sal	13.9	9.0	12.9	11.4	24.2	10.9
溶解氧 Do	17.8	18.6	19.7	26.0	7.3	7.9
叶绿素 a Chl-a	18.6	14.5	19.7	20.9	25.7	19.9

宜栖息地占大连黄海研究面积的 30.1%; 6 月栖息地依然集中在金州近岸海域及长海县海域, 适宜栖息地面积减少, 占大连黄海研究面积的 6.2%; 7 月适宜栖息地集中在海洋岛海域, 占大连黄海研

表 3 基于算术平均法和几何平均法的大泷六线鱼资源 HSI 模型验证				
Tab. 3 HSI model verification for <i>Hexagrammos otakii</i> resource based on arithmetic mean model and geometric mean model				
月份 month	算术平均法 AMM		几何平均法 GMM	
	AIC	R ²	AIC	R ²
5 月 May	-25.57	0.37	-6.63	0.24
6 月 Jun.	-9.62	0.29	2.47	0.13
7 月 Jul.	-22.15	0.20	8.46	0.18
8 月 Aug.	-16.65	0.13	15.86	0.12
9 月 Sep.	-17.21	0.74	-16.97	0.63
10 月 Oct.	-3.03	0.44	-0.69	0.38

究面积的 8.2%; 8 月适宜栖息地向西移动至大连市区和旅顺南部海域, 獐子岛和海洋岛周边海域仍有较小范围的适宜栖息地, 占大连黄海研究面

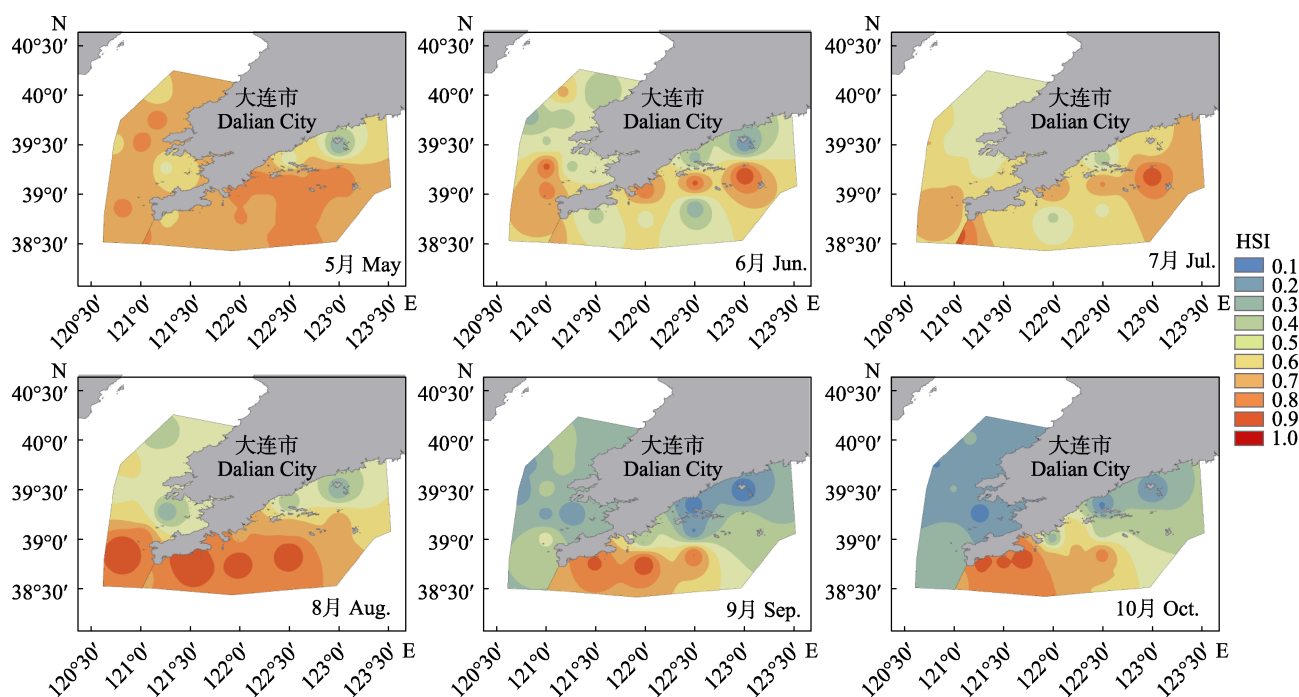


图 3 大连海域大泷六线鱼栖息地适宜性指数分布

Fig. 3 Spatial distribution of HSI of *Hexagrammos otakii* habitat in Dalian offshore

积的 45.5%; 9 月适宜栖息地进一步向西移动, 集中在大连市区和旅顺南部海域, 占大连黄海研究面积的 16.3%; 10 月适宜栖息地向近岸收缩, 占大连黄海研究面积的 19.4% (图 3)。

总体上, 大泷六线鱼在大连黄海海域的适宜栖息地面积占比高于大连渤海海域。适宜栖息地面积上同样如此, 5 月大连渤海与大连黄海适宜栖息地面积比为 1 : 5.74, 6 月占比为 1 : 1.99, 7 月为 1 : 2.47, 8 月为 1 : 2.64, 9 和 10 月大泷六线鱼的适宜栖息地均在大连黄海海域。

3 讨论

3.1 环境因子对大泷六线鱼分布的影响

大泷六线鱼为冷温性底栖鱼类^[21], 对较低水温有偏好性^[2]。本研究通过对 6 个月份的环境因子适宜性分析表明, 大泷六线鱼的最适水温范围为 9.8~22.9 °C, 与相关研究基本一致。例如, 刘修泽等^[2]对辽宁海域大泷六线鱼资源与环境因子适宜性分析表明大泷六线鱼的最适水温为 12~22.5 °C, 张弼等^[33]表明大泷六线鱼生长适宜水温为 14~23 °C, 有研究则认为大泷六线鱼的栖息底层水温在 8~23 °C^[21]。不同研究得到的适宜水温基本一致, 特

别是适宜水温范围的最高水温相差较小。大泷六线鱼为冷温性鱼类, 对较高水温相对敏感, 不同研究均显示 23 °C 左右为大泷六线鱼的适宜生存的最高水温, 这也符合该种作为冷温性鱼类的适温特征。

本研究基于增强回归树(BRT)模型确定的各环境因子对大泷六线鱼资源分布的影响权重表明, 水深在 6 个月份均对该种资源分布的影响最大。水深会间接影响温度、溶氧及其他环境因子, 共同改变物种的空间分布^[34], 有研究亦指出, 水深可作为水温、溶解氧等环境因子的替代性指标^[35]。本研究中, 底层水温在 6 月、7 月和 10 月成为除了水深外影响该种资源分布的第二大环境因子。虽然本研究及其他学者^[2,36]的研究结果显示, 水深对大泷六线鱼分布的解释率相较于温度更高, 但也有学者^[37]认为温度对大泷六线鱼分布影响更高。基于不同的研究模型和研究区域对环境因子权重的确定均会有差异。水温是影响海洋生物生存、发育、繁殖和洄游分布的主要环境因子之一^[38]。本研究范围位于大连海域, 受调查船的限制, 调查水深均超过 5 m, 同时大部分调查海域受到黄海冷水团的影响, 使得一定深度的海水保持相对

低温^[39-40], 5—10 月的调查时间内底层水温(6~24 °C)相较水深(10~62 m)的变化幅度小, 使得本研究中水深成为影响大泷六线鱼分布的主要因素。

溶解氧是海洋生态系统中异养生物唯一的氧气来源, 是调节海洋生物身体代谢活动的重要因素, 溶解氧浓度的高低会直接影响水体生物的丰度^[41]。溶解氧对资源分布的贡献率在 8 月为 26.0%, 成为仅次于水深的环境因子。溶解氧是影响鱼类分布的重要环境因子, Maes 等^[42]指出鱼类会主动逃离低氧环境, 趋向于聚集在溶解氧含量较高的区域。根据《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T 087-2005)^[43], 溶解氧浓度 ≥ 6 mg/L 即为一级水域, 适宜鱼类生长。夏季 8 月底层水温最高, 水体溶解氧含量下降较大, 5—10 月, 仅 8 月溶解氧(范围为 4.12~7.94 mg/L, 图 2)最小值低于 6 mg/L, 使得溶解氧成为影响大泷六线鱼空间分布的重要因子, 而其他月份溶解氧浓度均高于 6 mg/L, 其作为环境因子不制约大泷六线鱼的空间分布。

叶绿素 a 浓度受到盐度、硅酸盐、磷酸盐、溶解无机氮等多种参数影响, 总体上黄渤海的叶绿素 a 浓度在春、夏季略高, 秋季含量低且变化范围小^[44]。本文叶绿素 a 浓度的月际变化趋势表现为 5 月和 6 月较高, 其他月份较低(图 2), 其变化趋势与上述研究基本一致。同时有研究指出, 浮游植物种类和细胞大小的显著差异, 以及每个细胞叶绿素 a 含量的不同, 会导致浮游植物细胞密度与叶绿素 a 浓度变化不一致^[45-46]。因此用叶绿素 a 仅能在一定程度上表征海水中浮游植物的生物量, 其空间分布趋势与浮游植物丰度并不必然一致^[46]。本研究在外业调查时未同步采集浮游生物数据, 现有结果显示的叶绿素 a 适宜范围位于调查海域叶绿素 a 浓度范围的低值区, 可能与上述研究类似, 即叶绿素 a 浓度变化与浮游植物丰度分布趋势不一致。春季 5 月与秋季 9 月水温相对较低, 饵料丰度也相应较少, 大泷六线鱼为保证能量需求进行的摄食移动, 可能导致表征饵料生物丰度的叶绿素 a 成为影响其空间分布的重要因子。而 10 月虽然水温较低, 饵料丰度同样相对较少, 但 10 月为大泷六线鱼的产卵盛期^[21], 大泷

六线鱼在繁殖期摄食强度降低, 加之前期身体积累了能量储备^[47], 因此其空间分布受叶绿素 a 浓度的影响相对较小。

有研究表明大泷六线鱼的生存盐度范围为 16~32^[21], 张弼等^[33]认为大泷六线鱼的最适盐度为 25~35。上述研究对大泷六线鱼盐度范围的表述虽有差异, 但均表明大泷六线鱼为广盐性鱼类, 在一定范围内盐度对大泷六线鱼资源分布的影响相对较小。本研究中底层海水盐度范围为 28~33, BRT 分析表明盐度是大泷六线鱼资源分布影响最小的环境因子, 该结果与其他学者研究一致^[2,36-37], 这也从统计学角度印证了大泷六线鱼的最适盐度范围相对较广。

3.2 大泷六线鱼栖息地的时空分布

本研究发现, 大连黄海海域大泷六线鱼的栖息地适宜性指数普遍高于大连渤海海域, 说明黄海海域的环境条件更适宜大泷六线鱼的栖息生长。相比于大连渤海海域, 大连黄海海域因具有较大的水深条件及更多的岩礁、砂底质^[21], 同时受黄海冷水团的影响^[48], 使得冷温性、岩礁性的大泷六线鱼更适宜在大连黄海海域生存。以往研究表明, 大泷六线鱼在黄海北部为季节性优势种(IRI>1000)^[3-4], 而大连海域高值站位出现频率较高^[2]。这与本研究 HSI 预测结果较为一致。

大泷六线鱼的 HSI 在春季 5 月至夏季 8 月期间表现出明显的向深水区移动的趋势, 表明了水温等环境因子变动对大泷六线鱼栖息范围的影响, 这与该种资源丰度的季节分布趋势^[2]基本一致, 也表明了大泷六线鱼深浅水洄游的习性^[49]。夏季水温升高, 饵料丰富, 大泷六线鱼为寻求更多的能量和更适宜的水文条件, 逐渐向深水区移动, 同时索饵场也相对分散, 表现为适宜栖息地在大连海域相对分散的状态。9—11 月为大泷六线鱼的产卵期^[50], 盛期在 10 月中旬至 11 月上旬^[21]。进入 9 月后, 大泷六线鱼受生殖洄游的影响, 同时因休渔期结束捕捞活动的开展, 压缩了大泷六线鱼的生存空间, 大泷六线鱼的适宜栖息地集中在较多岩礁、砂底质的大连市区及旅顺海域。因大泷六线鱼的产卵场多分布于近岸岩礁区^[51-52],

推测处于产卵盛期的10月,其资源群体进一步靠近近岸,适宜栖息地也表现出进一步向近岸收缩。

本研究5月—10月适宜栖息地的分布,除了生殖期和捕捞期的9月、10月,以及水温相对较高的8月,黄海海域中具有较大水深以及较多岩礁底质的大连市区海域和旅顺海域为适宜栖息地,其他月份(5月至7月)的HSI均相对较低。其原因可能为在岩礁底质水域开展底拖网调查相对困难,网具常有破损,对调查数据影响相对较大,以往也有学者表明底拖网难以捕获岩礁区的大泷六线鱼^[37],导致岩礁底质水域调查站位大泷六线鱼资源丰度较低,从而对该处水域HSI预测结果产生了一定程度的低估。但从大泷六线鱼的生态习性,以及在该处海域设置国家级大连圆岛海域水产种质资源保护区(大泷六线鱼为主要保护对象之一)^[5]综合分析判断,黄海海域的大连市区及旅顺海域亦为大泷六线鱼的适宜栖息地。

3.3 基于物种分布模型的大泷六线鱼放流建议

物种分布模型(species distribution models, SDMs)又称为生态位模型或者物种栖息地模型^[53],其将目标物种的分布情况和该物种所处的相关地理、环境因子通过算法关联起来推算物种生态要求,并将结果投射到特定时空条件下预测某地区物种潜在的分布情况^[54]。物种分布模型被广泛应用于推断物种与环境的关系^[55]、栖息地质量评价^[56]、预测空间分布^[57]和生物入侵^[58]等研究。目前针对海洋动植物的物种分布模型可分为经典的生境适宜性指数(HSI)模型、机理模型和统计模型3类^[59],其中生境适宜性指数(HSI)模型是在渔业领域用的较多的模型。

开展增殖放流以增加优质渔业资源、改善种群结构是渔业资源养护的重要手段,如何进行放流区域、时间的科学规划是进行增殖放流需要解决的主要问题,是保证增殖放流取得良好效果的重要因素。刘修泽等^[2]通过研究认为大泷六线鱼在辽宁海域的适宜放流时间为5—6月,适宜放流地点为具有较多岩礁、砂底质和较低底层水温的黄海北部海域。上述研究对辽宁海域放流区域的确定是基于大泷六线鱼环境因子适宜范围与其资

源时空分布的推断,确定的放流区域相对宏观,在进行实际的增殖放流中还需进一步的细化和量化。《水生生物增殖放流技术规程》(SC/T 9401-2010)^[60]表明,放流水域“系增殖放流对象的产卵场、索饵场或洄游通道”,即放流地点及区域为增殖放流对象最适宜的栖息地。本研究基于栖息地适宜性指数(HSI)模型建立的大连海域大泷六线鱼5—10月共计6个月份HSI分布图,可直观显示该种在大连海域的适宜栖息地及时空变动。根据适宜栖息地HSI的分布,以5—6月^[2]作为大泷六线鱼的放流时间,大连海域5月适宜的放流区域为黄海海域的大连湾三山岛至金普新区沿岸及长海县岛礁周边水域,和渤海海域的长兴岛以北近岸水域;6月适宜的放流区域在大连黄海海域基本保持不变,大连渤海海域调整为旅顺老铁山岛礁海域及金州湾以西海域。进一步,假设其他条件相同、适宜栖息地面积大小与大泷六线鱼资源丰度正相关的情况下,仅以适宜栖息地面积作为大泷六线鱼放流数量确定的指标,大连黄海海域大泷六线鱼的放流数量要高于大连渤海海域。

综上可见,包括HSI模型在内的物种分布模型可对渔业生物的适宜栖息地进行可视化,通过数值建模将生物与环境因子的响应关系转化为可测量的空间概率分布,为放流区域的选划提供参考依据。这在其他学者^[19-20]的研究中也有体现。当然,本研究仅为基于HSI建立的物种分布模型对大泷六线鱼放流区域选划的初步实践和探讨,所建立的模型尚显不足,如所选取的自变量仅为环境因子,未包括饵料生物等生物因子^[55];也有研究指出未将鱼类按生活史划分为成幼体,会将鱼类不同生活阶段对栖息环境要求不同这一信息掩盖^[61],本研究所获的大泷六线鱼多数(>90.9%)为幼体,2019—2020年辽宁海域大泷六线鱼的调查也显示该种大部分(>85.0%)个体体长<150 mm、体重<60 g,幼鱼比例较大^[2],因此本研究结果能在一定程度上推断该物种幼体的栖息地适宜性,有助于其幼体增殖放流区域的选划。物种分布模型通过栖息地质量评价^[16-17]和空间分布预测^[14-15]的双重功能,为渔业生物放流区域选划提供了方

法论基础,且随着物种分布模型的优化迭代,如可整合种间作用矩阵的联合物种分布模型^[62],在建模时将群落结构考虑在内可进一步提升物种分布模型应用于放流区域选划的可靠性。值得注意的是部分调查站点位于岩礁底质类型的水域,底拖网难以捕获该水域的大泷六线鱼,因此本研究对岩礁底质类型水域的 HSI 值预测存在低估,如 5—7 月黄海水域的大连市区海域和旅顺海域。在进行渔业资源养护如放流区域选划时,建议将该水域也纳入选划范围。

参考文献:

- [1] Liu R Y. Checklist of marine biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008: 952-961. [刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 952-961.]
- [2] Liu X Z, Ji G, Wang X L, et al. Biological characteristics and spatio-temporal distribution of relative biomass of *Hexagrammos otakii* and relationships with the impact factors in Liaoning offshore[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(12): 1704-1713. [刘修泽, 吉光, 王小林, 等. 辽宁海域大泷六线鱼的生物学特征、资源丰度时空分布及与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2022, 29(12): 1704-1713.]
- [3] Dong J, Liu X Z, Wang A Y. Fishery resources of Liaoning Coastal and estuarine areas[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 185-191. [董婧, 刘修泽, 王爱勇. 辽宁近海与河口区渔业资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 185-191.]
- [4] Cui P D, Bian X D, Zhang Y X, et al. Community structure of fishery organisms in offshore waters of the North Yellow Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(4): 110-129. [崔培东, 卞晓东, 张雨轩, 等. 黄海北部近岸海域渔业生物群落结构[J]. 水产学报, 2024, 48(4): 110-129.]
- [5] Gao X G, Bao X B, Yu Z, et al. Current status of conservation and utilization of germplasm resources of *Hexagrammos otakii*[J]. China Fisheries, 2022(11): 62-63. [高祥刚, 鲍相渤, 于喆, 等. 大泷六线鱼种质资源保护与利用现状[J]. 中国水产, 2022(11): 62-63.]
- [6] Guo T, Song N, Liu S D, et al. Comparison of genetic diversity between the released population and the wild population of *Hexagrammos otakii*[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(12): 1976-1986. [郭婷, 宋娜, 刘淑德, 等. 大泷六线鱼放流群体与野生群体遗传多样性比较[J]. 水产学报, 2020, 44(12): 1976-1986.]
- [7] Daguan News. Dalian carry out stock enhancement and conserve aquatic living resources[EB/OL]. (2022-06-09). <https://mp.weixin.qq.com/s/VxFemWlobmSyqjMyfDJEzQ>. [大观新闻. 大连开展增殖放流, 养护水生生物资源[EB/OL]. (2022-06-09). <https://mp.weixin.qq.com/s/VxFemWlobmSyqjMyfDJEzQ>.]
- [8] Guo T, Song N, Gao T X, et al. Comparison of genetic diversity between the breeders, hatchery-released population and recaptured population of *Hexagrammos otakii*[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(5): 103-109. [郭婷, 宋娜, 高天翔, 等. 威海近海大泷六线鱼亲鱼、放流苗种和回捕群体遗传多样性比较研究[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(5): 103-109.]
- [9] Li L, Liu Y L, Zhang S D, et al. Study on tagging of the fat greenling using T-bar tags[J]. Journal of Fisheries Research, 2021, 43(2): 193-199. [李莉, 刘云凌, 张树东, 等. 大泷六线鱼 T 型标志牌标志技术研究[J]. 渔业研究, 2021, 43(2): 193-199.]
- [10] Svåsand T, Kristiansen T S, Pedersen T, et al. The enhancement of cod stocks[J]. Fish and Fisheries, 2000, 1(2): 173-205.
- [11] Dong J, Jiang L X, Sun M, et al. Biological of giant jellyfish in the Bohai Sea and northern Yellow Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2013: 1-265. [董婧, 姜连新, 孙明, 等. 渤海与黄海北部大型水母生物学研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 1-265.]
- [12] Zhang X M, Wang L L, Zhang Y Y, et al. Strategy optimization of stock enhancement of golden cuttlefish, (*Sepia esculenta*) based on structural characteristics of reproductive and recruitment populations[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1890-1899. [张秀梅, 王林龙, 张宇洋, 等. 基于繁殖群体与补充群体结构特征的金乌贼资源增殖策略优化[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1890-1899.]
- [13] Vinagre C, Fonseca V, Cabral H, et al. Habitat suitability index models for the juvenile soles, *Solea solea* and *Solea senegalensis*, in the Tagus estuary: Defining variables for species management[J]. Fisheries Research, 2006, 82(1-3): 140-149.
- [14] Chen X J, Liu B L, Tian S Q, et al. Forecasting the fishing ground of *Ommastrephes bartramii* with SST-based habitat suitability modelling in northwestern Pacific[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2009, 40(6): 707-713. [陈新军, 刘必林, 田思泉, 等. 利用基于表温因子的栖息地模型预测西北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)渔场[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(6): 707-713.]
- [15] Liu X X, Gao C X, Tian S Q, et al. Distribution of *Setipinna taty* optimal habitats in the South inshore area of Zhejiang Province based on the habitat suitability index[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(12): 1485-1495. [柳晓雪, 高春霞, 田思泉, 等. 基于栖息地适宜指数的浙江南

- 部近海黄鲫最适栖息地分布[J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1485-1495.]
- [16] Jin Y, Jin X S, Gorfine H, et al. Modeling the oceanographic impacts on the spatial distribution of common cephalopods during autumn in the Yellow Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 432.
- [17] Yang G, Zhang T, Zhuang P, et al. Preliminary assessment of habitat of juvenile *Collichthys lucidus* in the Yangtze estuary [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2418-2424. [杨刚, 张涛, 庄平, 等. 长江口棘头梅童鱼幼鱼栖息地的初步评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2418-2424.]
- [18] Liu S Y, Zhang H, Yang C, et al. Exhibit covariation characteristics in the habitat changes of *Sardinops melanostictus* and *Scomber japonicus* in the northwestern Pacific Ocean under ENSO event[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(1): 39-52. [刘思源, 张衡, 杨超, 等. ENSO 事件下西北太平洋远东拟沙丁鱼和日本鲭栖息地协同变化特征[J]. 海洋学报, 2024, 46(1): 39-52.]
- [19] Sun T. Selection and assessment of the fish release habitat of Daya Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018. [孙涛. 大亚湾鱼类放流生境的筛选与评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.]
- [20] Zhang X M, Wang X X, Li S W, et al. Optimization of habitat suitability model for *Portunus trituberculatus* in Laizhou Bay[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2022, 53(3): 726-734. [张孝民, 王秀霞, 李少文, 等. 基于优化模型的莱州湾三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)栖息地适宜性研究[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(3): 726-734.]
- [21] Liu X S, Wu J N, Han G Z, et al. Investigation and division of fishery resource in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1990: 1-247. [刘效舜, 吴敬南, 韩光祖, 等. 黄渤海区渔业资源调查和区划[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 1-247.]
- [22] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey-Part6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [23] Feng Z X, Han H. Rational utilization of *Hexagrammos otakii* resources[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 1998, 13(2): 24-28. [冯昭信, 韩华. 大泷六线鱼资源合理利用的研究[J]. 大连水产学院学报, 1998, 13(2): 24-28.]
- [24] Liu X Z, Ji G, Wang B, et al. Growth, mortality and rational utilization of 5 economic fish species in coastal Dalian[J]. *Fisheries Science*, 2023, 42(1): 73-80. [刘修泽, 吉光, 王彬, 等. 大连海域5种经济鱼类的生长、死亡及资源合理利用研究[J]. 水产科学, 2023, 42(1): 73-80.]
- [25] Chen X J, Li G, Feng B, et al. Habitat suitability index of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(1): 93-102.
- [26] Chang Y J, Sun C L, Chen Y, et al. Habitat suitability analysis and identification of potential fishing grounds for swordfish, *Xiphias gladius*, in the South Atlantic Ocean[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(23): 7523-7541.
- [27] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [28] Li F Q, Cai Q H, Fu X C, et al. Construction of habitat suitability models (HSMs) for benthic macroinvertebrate and their applications to instream environmental flows: A case study in Xiangxi River of Three Gorges Reservoir region, China[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(3): 359-367.
- [29] Vincenzi S, Caramori G, Rossi R, et al. A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy)[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 193(1-2): 90-104.
- [30] Gong C X, Chen X J, Gao F, et al. Review on habitat suitability index in fishery science[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(2): 260-269. [龚彩霞, 陈新军, 高峰, 等. 栖息地适宜性指数在渔业科学中的应用进展[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(2): 260-269.]
- [31] Tanaka K, Chen Y. Spatiotemporal variability of suitable habitat for American lobster (*Homarus americanus*) in Long Island Sound[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2015, 34(2): 531-543.
- [32] R Core Team. The R project for statistical computing[OL]. <https://www.r-project.org/>.
- [33] Zhang B, Pu H Y. Analysis of the current situation and development suggestions for the aquaculture of *Hexagrammos otakii* in Otaki, China[J]. *China Fisheries*, 2024, 58(3): 53-54. [张弼, 蒲红宇. 我国大泷六线鱼增养殖现状分析及发展建议[J]. 中国水产, 2024, 58(3): 53-54.]
- [34] Embarek R, Amara R, Kara M H. Fish assemblage structure in shallow waters of the Mellah Lagoon (Algeria): Seasonal and spatial distribution patterns and relation to environmental parameters[J]. *Acta Ichthyologica Et Piscatoria*, 2017, 47(2): 133-144.
- [35] Xue Y, Guan L S, Tanaka K, et al. Evaluating effects of

- rescaling and weighting data on habitat suitability modeling [J]. *Fisheries Research*, 2017, 188: 84-94.
- [36] Zhao W, Ren Y P, Xu B D, et al. Modeling distribution of *Hexagrammos otakii* in Haizhou Bay based on spatio-temporal species distribution models[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(5): 119-130. [赵伟, 任一平, 徐宾铎, 等. 利用时空物种分布模型研究海州湾大泷六线鱼的时空分布[J]. *水产学报*, 2023, 47(5): 119-130.]
- [37] Xing L, Xu B D, Zhang C L, et al. Environmental influence on the distribution of *Hexagrammos otakii* inhabiting Haizhou Bay and its adjacent waters[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(6): 45-50. [邢磊, 徐宾铎, 张崇良, 等. 环境因子对海州湾及邻近海域大泷六线鱼分布影响的分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(6): 45-50.]
- [38] Yin M C. *Fish ecology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 40-42. [殷名称. *鱼类生态学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 40-42.]
- [39] Yao Z G, Bao X W, Li N, et al. Seasonal evolution of the northern Yellow Sea cold water mass[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(6): 9-15. [姚志刚, 鲍献文, 李娜, 等. 北黄海冷水团季节变化特征分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(6): 9-15.]
- [40] Diao X Y. The study of Yellow Sea warm current, Yellow Sea cold water mass and their evolution process in spring[D]. Qingdao: Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2015. [刁新源. 黄海暖流、黄海冷水团及其春季演变过程研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.]
- [41] Banerjee A, Chakrabarty M, Rakshit N, et al. Environmental factors as indicators of dissolved oxygen concentration and zooplankton abundance: Deep learning versus traditional regression approach[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 100: 99-117.
- [42] Maes J, Stevens M, Breine J. Modelling the migration opportunities of diadromous fish species along a gradient of dissolved oxygen concentration in a European tidal watershed[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 75(1-2): 151-162.
- [43] State Oceanic Administration. HY/T 087-2005 The guidance for the assessment of coastal marine ecosystem health[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. [国家海洋局. HY/T 087-2005 近岸海洋生态健康评价指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.]
- [44] Zhou Y L, Zhang C S, Shi X Y, et al. Distribution characteristics of chlorophyll a and its influencing environmental factors in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(11): 4259-4265. [周艳蕾, 张传松, 石晓勇, 等. 黄渤海海水中叶绿素 a 的分布特征及其环境影响因素[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(11): 4259-4265.]
- [45] Zhang J M, He Z H. *Handbook of investigation of fishery natural resources in inland waters*[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1991: 40-45. [张觉民, 何志辉. *内陆水域渔业自然资源调查手册*[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 40-45.]
- [46] Luo Q Q, Chen L, Zhang Y P, et al. Analysis of net-collected phytoplankton community characteristics and environmental factors in the south-western waters of Xiamen in the summer of 2022[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2024, 43(4): 616-629. [骆巧琦, 陈岚, 张跃平, 等. 2022 年夏季厦门西南部海域网采浮游植物群落特征与环境因子分析[J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(4): 616-629.]
- [47] Wang S L, Jiang Z Q, Miao Z O. The biology of fat greenling *Hexagrammos otakii* Jordan et starks at various seasons in Dalian[J]. *Fisheries Science*, 2005, 24(5): 1-3. [王书磊, 姜志强, 苗治欧. 大连海区大泷六线鱼生物学指标的季节变化[J]. *水产科学*, 2005, 24(5): 1-3.]
- [48] Bao X W, Li N, Yao Z G, et al. Seasonal variation characteristics of temperature and salinity of the north Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 553-562. [鲍献文, 李娜, 姚志刚, 等. 北黄海温盐分布季节变化特征分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(4): 553-562.]
- [49] Ryu J H, Kim J B, Kim J K, et al. Temporal and spatial variation in fish larvae in Gamak Bay and Yeoja Bay, South Sea of Korea[J]. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 2011, 14(1): 55-61.
- [50] 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. [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.]
- [51] Tang Q S, Ye M Z. *Development and protection of offshore fishery resources in Shandong*[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1990: 145-155. [唐启升, 叶懋中. *山东近海渔业资源开发与保护*[M]. 北京: 农业出版社, 1990: 145-155.]
- [52] Tong Y H, Guo X W. Feeding competition between two rockfish *Sebastes schlegeli* and *Hexagrammos otakii*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(4): 541-549. [童玉和, 郭学武. 两种岩礁鱼类的食物竞争实验[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(4): 541-549.]
- [53] Elith J, Leathwick J R. *Species distribution models: Ecological*

- explanation and prediction across space and time[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40(1): 677-697.
- [54] Dyderski M K, Paż S, Frelich L E, et al. How much does climate change threaten European forest tree species distributions?[J]. Global Change Biology, 2018, 24(3): 1150-1163.
- [55] Chen X L, Ji Y L, Li P C, et al. Spatial distribution of *Chaeturichthys stigmatias* and influence factors in Haizhou Bay based on ensemble species distribution model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(3): 343-355. [陈晓琳, 纪云龙, 李鹏程, 等. 基于组合物种分布模型的海州湾矛尾虾虎鱼空间分布特征及其影响因素研究[J]. 中国水产科学, 2024, 31(3): 343-355.]
- [56] Yu W, Jin P C, Zhu G Z. Habitat distribution of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peru in spring and autumn based on vertical water temperature[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(10): 1246-1258. [余为, 金鹏超, 朱桂忠. 基于垂直水温因子的秘鲁外海茎柔鱼春、夏季栖息地分布[J]. 中国水产科学, 2023, 30(10): 1246-1258.]
- [57] Hu W J, Du J G, Su S K, et al. Effects of climate change in the seas of China: Predicted changes in the distribution of fish species and diversity[J]. Ecological Indicators, 2022, 134: 108489.
- [58] Liu C L, Comte L, Xian W W, et al. Current and projected future risks of freshwater fish invasions in China[J]. Ecography, 2019, 42(12): 2074-2083.
- [59] Yang X L, Yang C J, Hu C Y, et al. Application of species distribution models in the prediction of marine potential habitat: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 2063-2072. [杨晓龙, 杨超杰, 胡成业, 等. 物种分布模型在海洋潜在生境预测的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 2063-2072.]
- [60] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9401-2010 Technical specification for the stock enhancement of hydrobios[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. [中华人民共和国农业部. SC/T 9401-2010 水生生物增殖放流技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.]
- [61] Zhang Y L, Yu H M, Zhang C L, et al. Impact of life history stages on fish species interactions and spatio-temporal distribution[J]. Fisheries Research, 2023, 266: 106792.
- [62] Clark J S, Gelfand A E, Woodall C W, et al. More than the sum of the parts: Forest climate response from joint species distribution models[J]. Ecological Applications, 2014, 24(5): 990-999.

Habitat suitability of *Hexagrammos otakii* in the coastal waters of Dalian

FENG Chao, DONG Jing, LIU Xiuze, QU Dezhong, JI Guang, WANG Aiyong, WANG Xiaolin, WANG Bin, XU Yanzhao, ZHANG Depu

Liaoning Ocean and Fishery Science Research Institute; Key Laboratory of Protection and Utilization of Aquatic Germplasm Resources Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Liaoning Key Laboratory of Marine Biological Resources and Ecology; Dalian Key Laboratory of Conservation of Fishery Resources, Dalian 116023, China

Abstract: The aims of this study were to investigate the habitat suitability and spatiotemporal variations of *Hexagrammos otakii* in the coastal waters of Dalian, identify the relationship between its resources and environmental factors, and provide a basis for habitat conservation and the selection of its release areas. Based on fishery survey data collected from May to October during 2015–2023, this study investigated the habitat suitability using synchronously-obtained sea-bottom environmental factors, including depth, temperature, salinity, dissolved oxygen, and chlorophyll-a concentration. A single-factor suitability index was established by combining the catch abundance of *H. otakii* (as a dependent variable) and five environmental factors (as independent variables) to analyze the relationship between the distribution of suitable habitats and environmental factors. A habitat suitability index model was built for each month based on the weights of the environmental factors derived from a boosted regression tree model to explore the spatiotemporal variation in habitat suitability for *H. otakii*. The distribution of suitable habitats for *H. otakii* varied by month. In the Bohai Sea area near Dalian, suitable habitats induced a north-to-south migration from May to October. In the Yellow Sea area near Dalian, suitable habitats induced *H. otakii* migration from nearshore to offshore and from west to east toward the waters around the Dachangshan and Haiyang islands from May to July, and then they reversed their migration back to the nearshore areas of southern Dalian City and Lvshun from August to October. Overall, the area of suitable habitats for *H. otakii* in the Yellow Sea near Dalian and its proportion within the studied sea area were higher than those in the Bohai Sea. This study explored the distribution and changes in the habitats of *H. otakii*, the optimal release times, and suitable waters for their release. These findings provide a scientific basis for the conservation and enhancement of *H. otakii* resources and to optimize stock enhancement strategies.

Key words: *Hexagrammos otakii*; habitat suitability index; spatio-temporal distribution; offshore Dalian; stock enhancement

Corresponding author: LIU Xiuze. E-mail: 303588859@qq.com