

文章编号: 1674-5566(2024)05-1260-12

DOI: 10.12024/jsou.20240104412

基于拉格朗日质点追踪的黄海日本鲈早期运输

王沛伟¹, 李曰嵩^{1,2,3}, 潘灵芝⁴

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200081)

摘要: 采用FVCOM模型生成三维物理场, 基于个体模型参数化黄海日本鲈早期生活史过程, 通过拉格朗日质点追踪的方法将模拟生成的4—8月物理场与生物模型耦合, 构建基于个体的黄海日本鲈的早期输运动力学模型。模拟结果表明: 所构建模型可以较准确地模拟出青岛石岛外海(青外)产卵场黄海日本鲈鱼卵和仔鱼的运输路径、密度分布及在黄海海域的滞留情况。研究发现, 在平均气候条件下, 青外产卵场的日本鲈在产卵之后总体向山东半岛南部运输, 日本鲈鱼卵和仔鱼最终分布于 $32^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 和 $121^{\circ}\text{E} \sim 124^{\circ}\text{E}$ 海域内, 并在中韩渔业协定暂定措施水域(以下简称协定水域)有大量分布。从4月产卵开始, 西部产卵场内部分日本鲈鱼卵和仔鱼就开始陆续进入协定水域中, 并在7—8月间已有50%的超级个体进入协定水域中的40~80 m等深线内并被滞留超过300 h, 说明该产卵场对协定水域的日本鲈资源补充贡献较大。日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块密度和滞留区主要集中在 $34.5^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 和 $121.3^{\circ}\text{E} \sim 124.3^{\circ}\text{E}$ 海域内, 并确定该海域为黄海日本鲈仔鱼的主要育肥场, 该育肥场有3/5的范围属于协定水域, 说明协定水域的物理环境对青外产卵场的日本鲈资源补充量影响很大。不同年份间日本鲈鱼卵和仔鱼的运输分布具有明显差异, 造成黄海日本鲈的运输分布产生年际差异的主要动力学原因是黄海冷水团的冷中心位置。

关键词: 日本鲈; 早期运输; 黄海冷水团; 拉格朗日质点追踪; 中韩渔业协定暂定措施水域

中图分类号: S 937.3 **文献标志码:** A

黄海不仅是多种鱼类产卵、索饵和越冬栖息的场所, 也是我国海洋生态系统动力学研究的重点海域之一^[1]。虽然2000年中韩两国签订了《中韩渔业协定》, 但双方对中韩渔业协定暂定措施水域(以下简称协定水域)内的渔业资源管理几乎未能实现^[2], 为了合理有效地管理和养护协定水域内的渔业资源, 弄清鱼类对协定水域的补充过程, 解决“鱼源国”问题, 在将来中韩渔业谈判中显得十分重要。

分布在黄海的日本鲈(*Scomber japonicus*)是我国主要的经济鱼种之一, 同时也在黄海的中韩渔业谈判中扮演着重要角色^[3]。以往对日本鲈的研究主要利用生产或调查资料, 集中于对其资源量(产量)与海洋环境等方面的统计研究, 涉及利用数值模拟的方法对其早期生活史

方面的生态动力学研究相对较少。为评估黄海日本鲈对协定水域的资源补充量状况, 而补充量状况在很大程度上取决于鱼类早期的生长、生存状态^[4]。因此, 研究黄海日本鲈鱼卵仔鱼的运输和滞留机制对于研究日本鲈补充量和资源管理至关重要。

从20世纪70年代起, 国内外鱼类学者陆续使用基于个体模型(Individual-based model, IBM)模拟鱼类种群的产卵、洄游、运输等对环境波动的适应性进而研究某海域种群的生长和时空分布。TIAN等^[5]、李曰嵩等^[6-7]和王玉衡^[8]利用IBM模型分别对海扇贝(*Placopecten magellanicus*)、冬春生群柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)、日本鲈和鳀鱼(*Engraulis japonicus*)的运输和分布开展研究, 发现了流场的强弱与其运输分布密切相关;

收稿日期: 2024-01-31 修回日期: 2024-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900906, 2016YFC1400903); 上海市科技委员会地方院校能力建设计划项目(15320502200)

作者简介: 王沛伟(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业生态动力学。E-mail: 2622583849@qq.com

通信作者: 李曰嵩, E-mail: liys@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

THANASSEKOS等^[9]、黄康康等^[10]和王鲁宁^[11]利用IBM模型分别对北极鳕鱼(*Boreogadus saida*)、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)和中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)的生长、产卵和资源补充等方面开展研究,发现在适温范围内,温度的升高有利于其生长、产卵和资源补充。这些研究均利用IBM模型模拟了鱼卵和仔鱼及浮游动物在海洋中的输运过程进而研究鱼类资源补充量,对揭示鱼类早期生活史过程与生态种群动态研究起到了重要作用。

本文基于IBM模型对分布在青岛石岛外海(以下简称青外)产卵场的黄海日本鲈鱼卵和仔鱼使用拉格朗日质点追踪方法进行研究,通过模拟日本鲈鱼卵和仔鱼在黄海海域的输运轨迹、密度分布和滞留时间等,分析黄海日本鲈的聚集区并找到其主要育肥场,探究日本鲈鱼卵和仔鱼的输运分布产生年际差异的动力学原因,并深入分析青外产卵场对于中韩渔业协定暂定措施水域(以下简称协定水域)的日本鲈补充情况,从而更好地为中韩两国在黄海共同管理水域中的日本鲈资源补充情况提供相关信息,有助于资源可持续利用的决策制定以及为该地区的渔业管理和资源保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象和研究区域概况

1.1.1 研究对象

日本鲈又称日本鲷,属硬骨鱼纲(Steichthyes)鲈属(*Scomber*),广泛分布于太平洋及其邻近海域的热带和亚热带大陆架上^[3]。黄海日本鲈是中上层鱼类,鱼卵和仔鱼通常在0~40 m处被发现^[12],日本鲈栖息水温一般为10~27℃,最适栖息水温为25℃左右^[13],产卵场水温一般为15~20℃^[14]。根据日本鲈早期的生长史,在模型中依据体长特征将日本鲈早期生长阶段分为鱼卵(卵径0.95~1.25 mm)、仔鱼(1.26~15.00 mm)和幼鱼(15.01~30.00 mm)等3个阶段^[15]。黄海日本鲈的产卵场较多,主要围绕山东半岛分布,青岛外海渔场是其主要的产卵场之一^[16](图1)。洄游至青外产卵场的日本鲈,主要来自钓鱼岛北部越冬场和日本九州西部外海越冬场(图1)。钓鱼岛北部越冬场中性腺早成熟的日本鲈在每年的3月末至4月初游离越冬场北上

进入黄海,性腺未成熟的日本鲈则在5—6月到达青岛石岛外海产卵^[16];日本九州西部外海越冬场的日本鲈一部分在4月末至5月初沿32.3°N~33.3°N海区进入黄海,5—6月主要在青岛石岛外海产卵,至7月中旬产卵完毕。因此,分布在青外产卵场的日本鲈的产卵期主要为4—7月,产卵高峰发生在5月中旬至6月中旬^[16]。9月以后随着黄海水温的不断降低,鱼群陆续沿124°E~125°E深海区南下。9—11月大、小黑山岛西部返回其越冬场,部分当年生幼鱼12月以后不返回其亲鱼越冬场,而停留在大、小黑山西部深海区越冬,至第二年春季继续游向黄海北部。

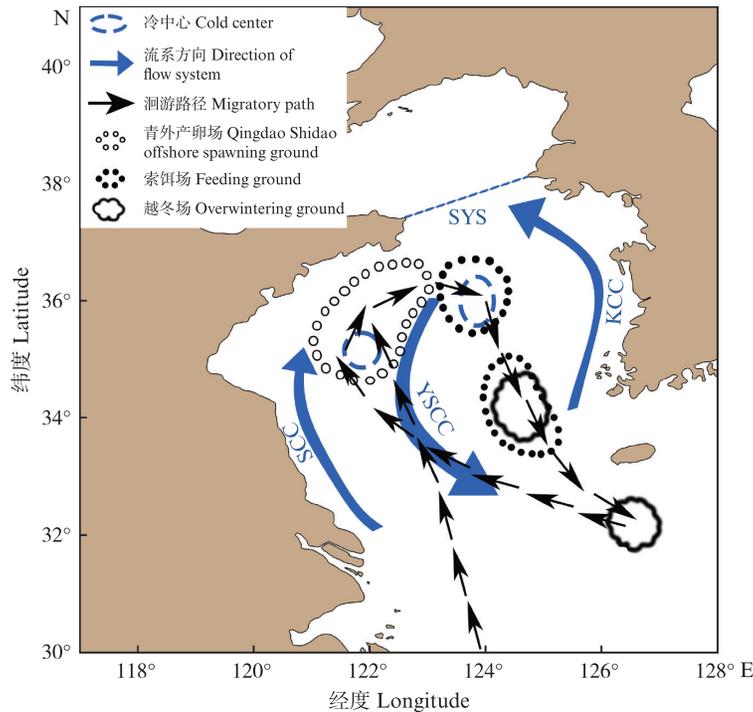
1.1.2 研究区域概况

黄海是西北太平洋的半封闭海域之一,平均深度约44 m,面积约 4.0×10^5 km²。图1是南黄海春夏季洋流示意图,夏季南黄海洋流主要有韩国沿岸流、苏北沿岸流和黄海冷水团^[17]。日本鲈洄游时期的黄海洋流主要以黄海冷水团为主,黄海冷水团是一种典型的季节性低温高盐水体,其主要特征是春季开始出现、夏季最盛、秋季衰退直至冬季消失,其温度通常为5~12℃,盐度通常为31.5~32.5,最低水温多年平均为5.81℃,盐度多年平均为32.20^[18]。南北黄海分别有不同的冷水团环流及冷中心,南黄海冷水团由冬季“黄-东海混合水团”的上层部分历经变性而来,夏季南黄海表层大致构成一个逆时针环流,南黄海有东西两个冷中心,位于青岛外海和仁川东南海域^[19]。青外产卵场接近南黄海冷水团西侧的冷中心,基本在黄海冷水团的控制区域内。

1.2 模型设定

1.2.1 物理模型的设定

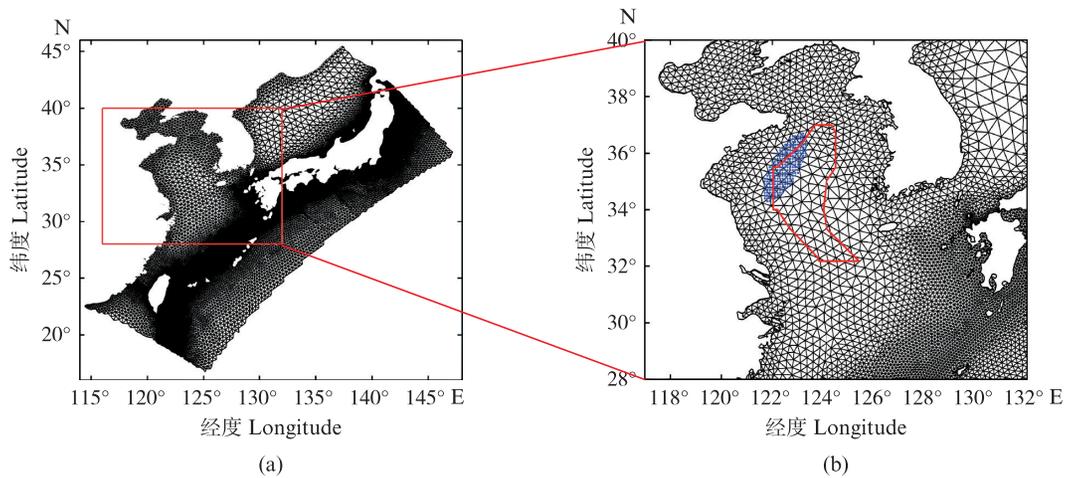
物理模型采用三维非结构有限体积的海洋模型(Finite-volume coastal ocean model, FVCOM)^[20]输出三维物理场。该模型采用球坐标系和真实的岸线与水深,由14 304个节点和27 211个三角网格点组成(图2),计算区域覆盖了日本鲈早期生活史洄游的整个黄海海域(图1)。在黄海的水平分辨率平均为6.5 km,垂直方向分45层,在水深小于80 m的海域采用sigma坐标进行分层,水深超过80 m的海域采用s坐标分层,该物理模型在空间上的分辨率完全能够保证生态模型模拟。



SYS. 南黄海; KCC. 韩国沿岸流; SCC. 苏北沿岸流; YSCC. 黄海冷流。
 SYS. Southern Yellow Sea; KCC. Korea coastal current; SCC. Subei coastal current; YSCC. Yellow Sea cold current.

图1 实际调查的产卵场分布图和黄海春夏季洋流示意图

Fig. 1 Distribution map of spawning field in actual investigation and schematics showing the spring and summer currents in the Yellow Sea



图a红色方形区域表示规定超级个体输运的范围;图b蓝色椭圆区域表示模型中设定的青外产卵场位置,红色框为协定水域。
 The red area in Fig. a indicates the range of prescribed particle transport;The blue elliptical area in Fig. b indicates location of spawning ground in Qingdao Shidao offshore set in the model, and the red box is the waters of the Agreement.

图2 海洋物理模型的计算域和三角网格

Fig. 2 Computational domain and triangular grid of the physical model

为了研究黄海日本鲈鱼卵和仔鱼基本的输运规律,驱动模型的风场和热力场均为多年的平均值,模拟时间为4—8月,每12 h输出平均气候态下的三维流场、温盐场以及湍流扩散系数的物理场,海洋物理模型的构建和验证详见文献[21]。

1.2.2 生物模型的设定

生物模型利用个体模型(IBM)参数化日本鲈早期产卵和生长过程。模型中设定的青外产卵场如图2蓝色椭圆区域所示,其中有一部分产卵场位于协定水域内,并设定鱼卵被产于10 m深水层^[22]的正态分布范围内,为了使鱼卵均匀分布,

设定 5.09×10^8 尾日本鲈产卵亲体在青外产卵场随机游动并于4月初开始产卵,至7月末产卵结束,模型中设定每个亲体约在36 d内分批产卵,每5.7 d产卵1次,即平均产卵6.3次^[23],共产卵约 6.56×10^{12} 枚,其产卵高峰期设定在5月中旬至6月中旬。

由于日本鲈鱼卵和仔幼鱼数量巨大,模型中采用了超级个体技术^[5],即每个超级个体代表一定数量的幼鱼,超级个体所代表的幼鱼数量的减少对应生物个体的死亡。模型中的超级个体数根据公式(1)进行计算,当网格中产卵总数超过 1×10^8 时,产生一个超级个体,本文分布在青外产卵场的日本鲈共产生61 455个超级个体,大量的超级个体能够避免由于随机产卵导致的初始位置分布不均的问题^[24]。

$$P_i(n, t) = N_m S_c \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (1)$$

式中: $P_i(n, t)$ 为时间 t 内个体 P_i 中卵的个数; N_m 为网格中产卵亲体的数量,为 5.09×10^8 ; S_c 为每个产卵亲体在一个产卵季节的产卵总数,为 6.56×10^{12} ; t 为个体释放时间; t_m 为最大产卵时间,为480 h; σ 为产卵间隔,为136 h; dt 为积分步长。

1.2.3 输运控制方程

生物模型与物理模型通过拉格朗日质点追踪方法进行耦合,物理模型输出的物理场驱动质点在流场中漂移,在漂移过程中超级个体依据生物模型参数化将生物属性赋予质点,转换成所研究的具有生命特性的日本鲈鱼卵^[25],这些超级个体再根据周围的物理环境进行生长繁殖。利用该耦合模型模拟黄海日本鲈鱼卵和仔鱼在4—8月的输运路径和分布,每12 h同时输出超级个体的特征变量以及所处的环境变量,基本的输运控制方程如公式(2):

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}(\vec{x}(t), t) \quad (2)$$

式中: $\frac{d\vec{x}}{dt}$ 为质点位置随时间的变化率; $\vec{v}(\vec{x}(t), t)$ 为质点在此刻此地的速度场大小; $\vec{x}(t)$ 为质点当前所处的位置。然后采用 ERK (Explicit Runge-Kutta) 方法求解质点下一阶段的位置,公式如下:

$$\begin{aligned} \vec{\xi}_1 &= \vec{x}_n \\ \vec{\xi}_2 &= \vec{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \vec{v}(\vec{\xi}_1) \\ \vec{\xi}_3 &= \vec{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \vec{v}(\vec{\xi}_2) \\ \vec{\xi}_4 &= \vec{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \vec{v}(\vec{\xi}_3) \\ \vec{x}_{n+1} &= \vec{x}_n + \Delta t \left[\frac{\vec{v}(\vec{\xi}_1)}{6} + \frac{\vec{v}(\vec{\xi}_2)}{3} + \frac{\vec{v}(\vec{\xi}_3)}{3} + \frac{\vec{v}(\vec{\xi}_4)}{6} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: Δt 为模型中模拟的时间步长; \vec{x}_n 为质点当前所在的位置; \vec{x}_{n+1} 为质点下一阶段所在的位置。

1.2.4 标准化幼鱼滞留指数

本文利用标准化幼鱼滞留指数^[17]计算黄海日本鲈的滞留区,该指数基于质点追踪方法,在检测潜在的幼鱼滞留区域时考虑了滞留时间和滞留率两个特征参数,根据公式(4)和公式(5)分别计算滞留时间和瞬时滞留率。

$$\begin{aligned} Ir(c, t) &= \frac{\sum_{i=1}^{N(c,t)} n(i, c, t) - \sum_{i=1}^{N_0(c,t)} n(i, c, t)}{\sum_{c=1}^Q \sum_{i=1}^{N(c,t)} n(i, c, t)} \quad (4) \\ f(c) &= \frac{\int_{t_1}^{t_2+T} Ir(c, t) dt}{t_2 + T - t_1} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $Ir(c, t)$ 为第 c 个三角网格在时间 t 的瞬时滞留率; t_1 和 t_2 分别为产卵的开始和结束时间; t 为中上层幼鱼阶段持续时间; $n(i, c, t)$ 为时间 t 时第 c 个三角网格中第 i 个超级个体所代表的个体数; $N(c, t)$ 为时间 t 时第 c 个三角网格中超级个体的总数; $N_0(c, t)$ 为时间 t 时从第 c 个三角网格中释放并停留在三角网格内的超级个体的数量; Q 为研究区域中三角网格的总数。幼鱼滞留区由 $f(c) > \delta$ 确定,其中 δ 是代表某一滞留水平的预定义阈值。

2 结果

2.1 黄海日本鲈鱼卵仔鱼输运的分布和路径

用平均气候场下产生的物理场驱动生物模型进行模拟,主要研究分布在青外产卵场的日本鲈鱼卵和仔鱼的输运和分布的一般规律。图3是平均气候场下日本鲈鱼卵和仔鱼在4—8月末的输运分布以及黄海夏季表层流场。从图3a中可以看出青外产卵场的日本鲈在4月才开始产卵,

仅产生 723 个超级个体,鱼卵主要分布在产卵场周围海域,即协定水域,南黄海北部东向洋流较强(图 3c),使得鱼卵有向东北方向运输的趋势,使东部不在协定水域内的日本鲈鱼卵运输进协定水域中;5月随着水温的升高,开始进入产卵高峰期,鱼卵与仔鱼的数量急剧增加,一部分鱼卵和仔鱼向东北方向快速运输,另一部分向东南方向快速运输(图 3b),此时有超过 2×10^3 个超级个体进入协定水域内;6月随着水温的进一步升高,产卵高峰期一直持续到中旬,从6月下旬开始,绝大部分日本鲈结束产卵,产卵数量增幅有所减缓,模型中超级个体数量不再增加,达到了 61 455 个,此时在运输路径的浅水区有很高的密度,如在6月末的连青石渔场北部、石岛渔场西部和青海渔场东部的 40 ~ 70 m 等深线内均有很高的分布(图 4),这与文献[26]的日本鲈仔幼鱼调查的数量分布基本吻合。初春季节,黄海上层的高盐暖水与下层的低温低盐水混合变性,至5—6月,黄海冷水团完全成型,表层洋流较5月有所增强(图 3f),大部分仔鱼在冷水团的裹挟下向南快速运输,小部分向东运输,此时有 3×10^3 个超级个体在 $34.7^\circ\text{N} \sim 35.7^\circ\text{N}$ 处进入协定水域中部海域,另一部分仔鱼在表层洋流的作用下,继续沿东北方向运移至山东半岛靠近成山角附近海域,在 $36.0^\circ\text{N} \sim 36.5^\circ\text{N}$ 处有超过 2.5×10^3 个超级个体进入协定水域内,在此期间仔鱼绝大多数分布在 40 ~ 70 m 等深线之间(图 3e);到7月末,黄海冷水团已逐步进入鼎盛时期,表层洋流依旧为东北流向(图 3h),此时受黄海冷水团的影响,向东北方向运输的仔鱼同其他仔鱼一起沿着 40 ~ 70 m 等深线转向山东半岛南部运输,并开始大量滞留在该海域,在此期间进入协定水域北部的仔鱼逐渐增多并在此滞留,对该海域的资源补充贡献极大,漂移在产卵场南部的仔鱼在冷水团的作用下继续向南运输,此时有 3×10^3 个超级个体进入协定水域的南部,另外,有日本鲈仔鱼运输至 $33.5^\circ\text{N} \sim 34.0^\circ\text{N}$ 海域,接近协定水域的韩方水域边界,并有从水域中出去的趋势。7月末大多数日本鲈仔鱼被运输到南黄海西侧海域,少数分布在黄海北部 20 ~ 70 m 等深线区域,还有极少数仔鱼穿过成山角进入北黄海(图 3g);至8月末,模拟临近结束,此时海水温度依旧升高,冷水团势力开始处于衰减状态,表层洋流较7月有所减弱(图 3j),在

冷水团的作用下,日本鲈仔鱼一部分向南运输靠近长江口海域,一部分沿东南方向运输并有持续进入中韩协定水域的趋势,甚至从 $33^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$ 的区域漂移至韩方一侧水域,一部分向西南方向运输至山东半岛南部的海阳、乳山等沿岸海域,并滞留在此区域(图 3i)。

综上所述,青外产卵场的日本鲈在产卵之后的运输主要受黄海冷水团的影响,总体向山东半岛南部运输,日本鲈鱼卵和仔鱼最终分布在 $32^\circ\text{N} \sim 37^\circ\text{N}$ 和 $121^\circ\text{E} \sim 124^\circ\text{E}$ 范围内,最北至海阳、乳山及成山角等沿岸海域,模拟结果与调查的鱼卵和仔鱼的运输路径和分布^[27-28]基本吻合;最南至长江口沿岸海域,最西至海州湾,最东至协定水域的韩方边界海域。从4月产卵开始,西部产卵场内部分日本鲈鱼卵和仔鱼就开始陆续进入协定水域中,并在7—8月已有 50% 的超级个体进入协定水域中的 40 ~ 80 m 等深线内并被滞留超过 300 h,说明该产卵场对协定水域的日本鲈资源补充贡献较大。

2.2 黄海日本鲈鱼卵和仔鱼运输的生物斑块密度

分析生物斑块密度对了解鱼卵和仔鱼在海域中的数量分布情况以及物理环境对其资源补充量的影响十分重要,因为生物斑块密度高的区域表征该海域内的鱼卵和仔鱼数量分布较多,同时该区域内的物理环境的要素对整个种群的生长、生存的影响也是巨大的。

图 4 为黄海日本鲈鱼卵和仔鱼在 5—8 月末的生物斑块密度,从图中可以看出,日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块密度随着运输的进行,其范围逐渐扩大且分布不均,但高密度集中分布的区域却在逐渐缩小,其中,高密度区域的超级个体数量最高达到 3×10^3 个,造成其生物斑块密度分布不一的主要原因是 6 月开始由于表层海水升温,温跃层出现,使得黄海冷水团环流逐渐占据主导地位,同时黄海的风向受南风或东南风的影响^[29],生物斑块密度随着冷水团环流向南及向东缩小,最终导致 7 月和 8 月的日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块高密度在洋流的作用下逐渐缩小并集中在 $33.7^\circ\text{N} \sim 36.0^\circ\text{N}$ 和 $121.3^\circ\text{E} \sim 123.5^\circ\text{E}$ 海域内。该海域正处在冷水团边缘的低温高盐的区域,有更多的饵料资源,是非常适合日本鲈仔鱼的生境,因此该区域日本鲈仔鱼生物斑块密度越高,对其资源补充量越有益。

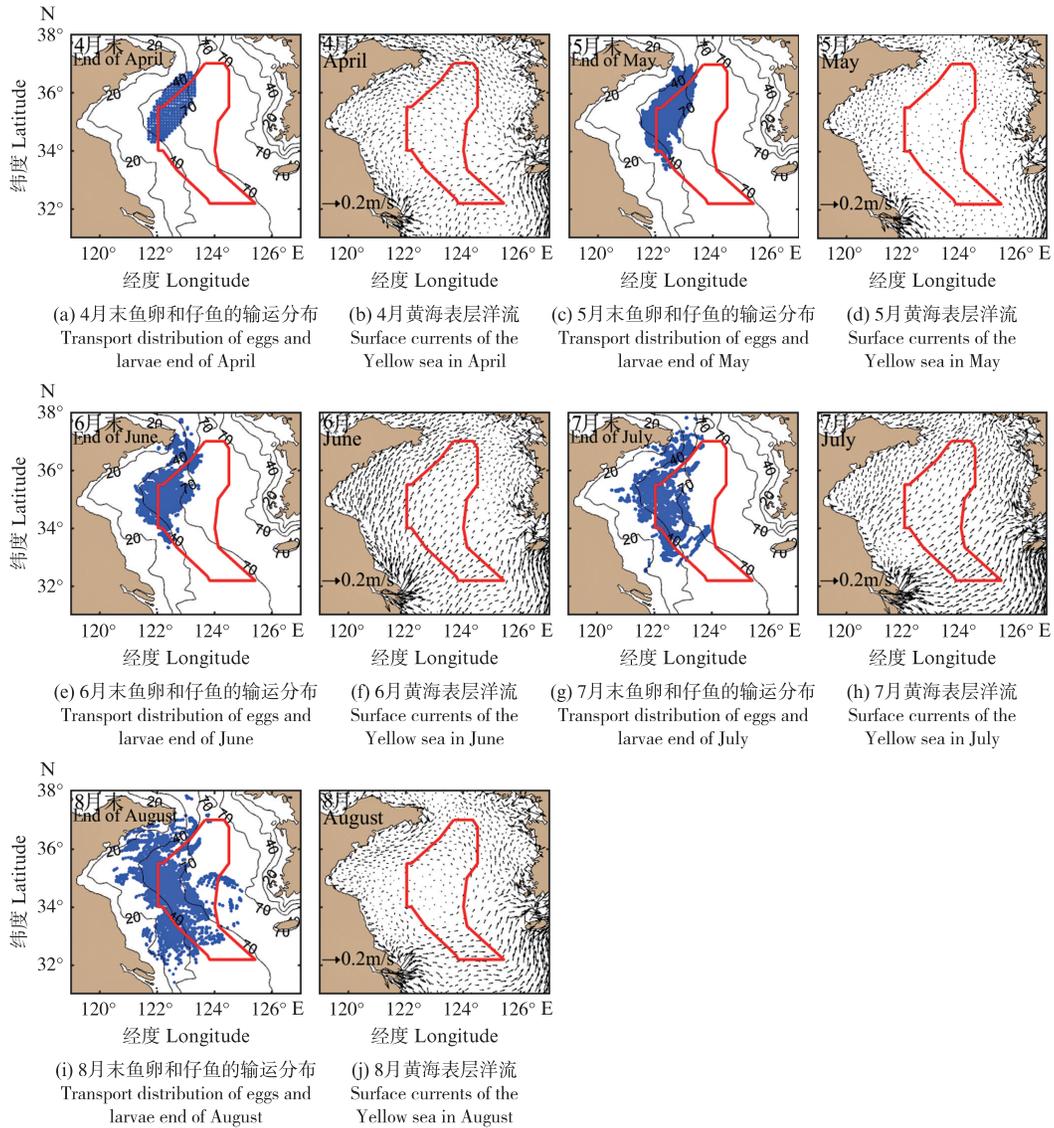


图3 平均气候条件下日本鲈卵和仔鱼的输运分布和黄海夏季表层流场(红色框为协定水域)
Fig. 3 Transport distribution of mackerel eggs and larvae under the average climate conditions and summer surface currents in Yellow Sea (red box is the waters of the Agreement)

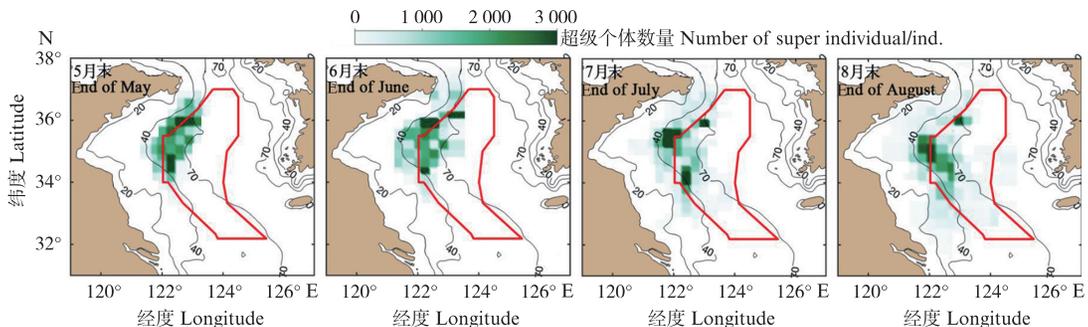


图4 平均气候条件下日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块密度
Fig. 4 Biological patch density of mackerel eggs and larvae under the average climate conditions

从图4还可以看出,日本鲈鱼卵和仔鱼生物斑块高密度区域(33.7°N~36.0°N和121.3°E~123.5°E)大部分位于协定水域内,由此,分布在青

外产卵场的日本鲈对协定水域资源补充明显,对关键的协定水域补充动态贡献较大,其生物斑块密度可以作为中方在渔业谈判中的依据之一,验

证中方的产卵场是黄海日本鲈的鱼源国。另一方面也说明协定水域是黄海日本鲈的重要水域,该海域的物理环境对影响其资源补充量至关重要。

2.3 黄海日本鲈鱼卵和仔鱼的输运滞留区

除生物斑块密度外,日本鲈的鱼卵和仔鱼的被动滞留也是影响其种群丰度波动及其分布模式的关键过程之一,检测仔鱼滞留区对于日本鲈的补充动态和渔业管理的研究至关重要,仔鱼滞留水平也是优化海洋保护区大小和间距的有用指标。

图5为黄海日本鲈鱼卵和仔鱼在输运过程中的滞留海域和滞留时间,从图中可以看出,分布在青外产卵场的日本鲈的滞留区域与输运分布和生物斑块密度基本保持一致,最终集中在 $34.5^{\circ}\text{N} \sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.2^{\circ}\text{E} \sim 123.7^{\circ}\text{E}$ 海域内,与生物斑块密度不同的是,日本鲈鱼卵和仔鱼的滞留范围随着输运的开始逐渐变化,其范围呈逐月扩大的趋势,平均滞留时间亦呈逐月递增的趋势。在4—6月开始输运的过程中,日本鲈鱼卵和仔鱼在产卵场附近逗留了数周,主要在40~70 m等深线区域滞留,并没有在黄海深水区域发现明显的滞留区,这表明在日本鲈的早期生活史阶段,大多数鱼卵或仔鱼被输送

到浅水区;7—8月时日本鲈仔鱼的滞留范围在仔鱼输运的过程中向成山角附近偏移,7月末在 $34.6^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 和 $122^{\circ}\text{E} \sim 123.7^{\circ}\text{E}$ 海域内被滞留500 h,基本与生物斑块高密度区域重合,8月的滞留区较为分散,在北黄海冷中心和南黄海东侧冷中心的滞留区内仔鱼被滞留时间超过400 h,在海州湾浅滩和石岛渔场被滞留时间超过300 h。由图5可知,5—8月的黄海日本鲈鱼卵和仔鱼的滞留区变化并不相同,滞留时间长短不一。魏皓等^[30]发现对于鱼卵一类颗粒物的聚集,夏季的黄海潮汐锋起了重要作用,因此推测,冷水团导致形成的潮汐锋^[30]应当是造成日本鲈鱼卵和仔鱼滞留深浅不同的原因之一。夏季的黄海冷水团温度受前冬气温控制,其边界位置与潮混合强度密切相关,强潮流引起的湍流混合对锋面的形成有重要影响,因此在黄海强潮流区的冷水团边界附近,下层冷水上涌形成表层低温水体,与外侧高温水体形成锋面,即为潮汐锋,日本鲈仔鱼在潮汐锋和黄海冷水团环流的双重影响下被输送到不同的渔场,如海州湾、石岛等地,在这些地方它们可能与其他产卵种群的幼鱼混合在一起,对渔场的资源补充量贡献极大。

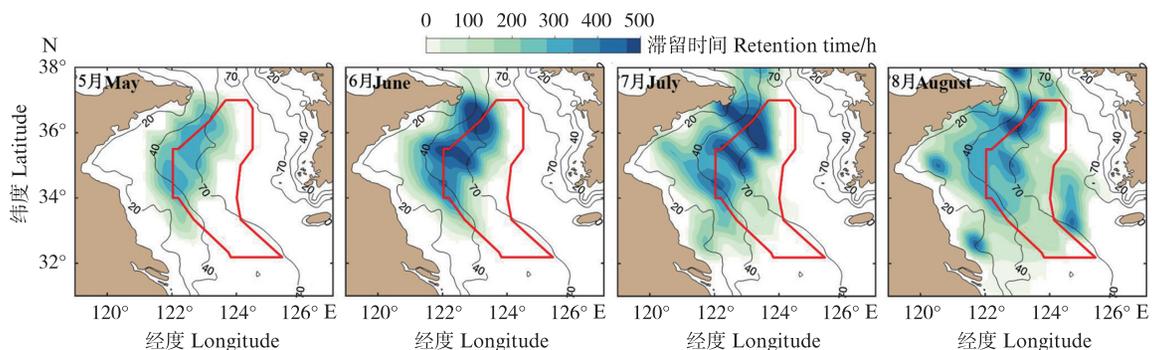


图5 平均气候条件下日本鲈鱼卵和仔鱼的滞留时间

Fig. 5 Retention time of mackerel eggs and larvae under the average climate conditions

因此,对于评估黄海日本鲈对关键的协定水域的补充动态及优化水域大小而言,日本鲈仔鱼的滞留区和滞留时间的研究显得尤为重要,在7月和8月的仔鱼滞留中,青外产卵场日本鲈仔鱼的滞留范围绝大部分在协定水域内,利用日本鲈仔鱼的滞留区域可以有助于进一步了解协定水域的补充动态,从而在渔业谈判中发挥作用。

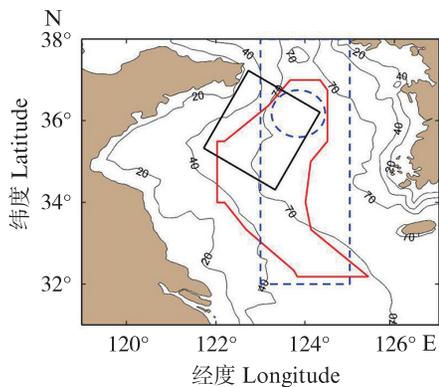
3 讨论

3.1 黄海日本鲈仔鱼的主要育肥场

根据日本鲈仔鱼的生物斑块密度和滞留情

况可以模拟出日本鲈仔鱼聚集区的范围,从图4和图5可知,5月的日本鲈鱼卵和仔鱼的高密度生物斑块主要分布在 $34.0^{\circ}\text{N} \sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.7^{\circ}\text{E} \sim 123.3^{\circ}\text{E}$ 海域,6月主要分布在 $34.3^{\circ}\text{N} \sim 36.7^{\circ}\text{N}$ 和 $121.3^{\circ}\text{E} \sim 123.7^{\circ}\text{E}$ 海域,7月主要分布在 $33.8^{\circ}\text{N} \sim 36.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.3^{\circ}\text{E} \sim 123.3^{\circ}\text{E}$ 海域,8月主要分布在 $33.5^{\circ}\text{N} \sim 36.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.2^{\circ}\text{E} \sim 123.2^{\circ}\text{E}$ 海域,而5月的仔鱼滞留区主要分布在 $33.8^{\circ}\text{N} \sim 36.5^{\circ}\text{N}$ 和 $121.5^{\circ}\text{E} \sim 123.6^{\circ}\text{E}$ 海域,6月主要分布在 $34.8^{\circ}\text{N} \sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.5^{\circ}\text{E} \sim 123.6^{\circ}\text{E}$ 海域,7月主要分布在 $34.8^{\circ}\text{N} \sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.7^{\circ}\text{E} \sim 123.7^{\circ}\text{E}$ 海域,8月主

要分布在 $34.5^{\circ}\text{N} \sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.4^{\circ}\text{E} \sim 124.0^{\circ}\text{E}$ 海域。由此看出,位于青外产卵场的日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块密度和滞留区域高度一致。因此,本次研究模拟的日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块密度和滞留区主要集中在 $34.5^{\circ}\text{N} \sim 37.0^{\circ}\text{N}$ 和 $121.3^{\circ}\text{E} \sim 124.3^{\circ}\text{E}$ 海域内(图6),并确定该海域为黄海日本鲈仔鱼的主要育肥场,该育肥场有 $3/5$ 的范围在协定水域,与朱德山等^[16]和崔科等^[31]的研究结果基本一致,该海域内是否具有适宜的物理及饵料等条件对日本鲈早期生长发育乃至资源补充影响巨大。



蓝色虚线椭圆区域为文献^[16]的日本鲈育肥场,蓝色虚线方框区域为文献^[31]的日本鲈渔场,红色框为协定水域。

The blue dotted ellipse is the mackerel fattening farm in the literature^[16], The blue dotted line area is the mackerel fishery in the literature^[31], and the red box is the area of the China-Korea Fisheries Agreement.

图6 预测黄海日本鲈仔鱼育肥场区域(黑色实线方框区域)

Fig. 6 Predicted mackerel larvae fishery area in the Yellow Sea (black solid line area)

进一步分析发现,根据日本鲈鱼卵和仔鱼的滞留区和高密度区域形成的育肥场同样受到潮汐锋的显著影响,潮汐锋对浮游动物^[32]、鱼类卵和仔鱼^[30]、蟹类幼体^[33]等的分布均存在聚集作用。在5月中旬和6月中旬的日本鲈产卵盛期,南黄海的海州湾和石岛渔场等浅滩地区的等深线发生剧烈弯曲,需形成涡旋才能重新达到平衡,这些涡旋导致日本鲈鱼卵和仔鱼进入其中并滞留,从而在潮汐锋区域内形成高密度的斑块并聚集在此区域^[30]。刘桂梅等^[32]在对黄海潮汐锋的研究中发现,中华哲水蚤丰度在潮汐锋区比其临近两侧的混合区与层化区高,强混合的潮汐锋区有利于中华哲水蚤的聚集。魏皓等^[30]在对黄海潮汐锋对鲈鱼卵的聚集区的研究

中发现,对于鱼卵一类颗粒物的聚集,潮汐锋起了重要作用。叶振江等^[33]在对黄海近岸潮汐锋海域内蟹类幼体的日间垂直迁移的研究中发现,白天大眼幼体在潮汐锋核心区沉底更彻底。以上研究皆说明潮汐锋在日本鲈鱼卵和仔鱼形成聚集区的过程中起显著影响,并且在潮汐锋区内有良好的觅食条件,有利于鱼卵的孵化和仔鱼的生长。

3.2 黄海冷水团对日本鲈鱼卵和仔鱼输运分布差异的影响

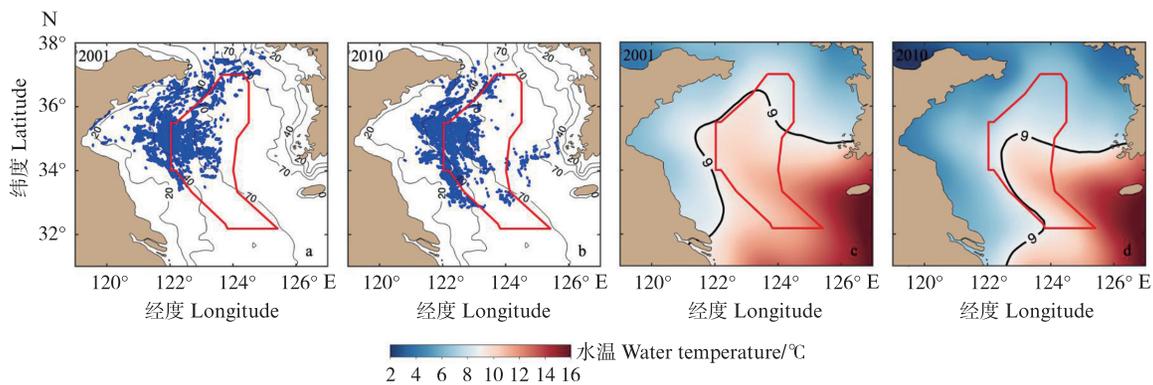
不同年份的日本鲈仔鱼的输运分布存在明显差异,选取分布差异较大的2001年和2010年进行分析。其模拟结果表明,2001年的日本鲈鱼卵和仔鱼总体沿东北方向输运到达北黄海的石岛渔场生长(图7a),2010年的日本鲈鱼卵和仔鱼总体沿东南方向输运进入连青石渔场和大沙渔场育肥(图7b)。

从春季到夏季期间,由于太阳辐射作用,黄海海区水温随深度增加递减,并在10~30 m间形成强温跃层,跃层之下形成低温高盐的黄海冷水团,在该水团的边缘区会形成较强的温度锋和盐度锋^[34],锋区所在区域的温、盐均适宜日本鲈的生存。日本鲈多在离岸较远且水深大于30 m的海区索饵、繁殖和生长^[35],其鱼卵和仔鱼的输运期间正是黄海冷水团由春季向夏季逐渐增强的阶段。因此,在日本鲈输运的过程中,不仅会受到黄海冷水团的力学方面的影响,还会通过控制流经海区的水温和盐度来影响日本鲈的输运分布。

根据以往黄海冷水团的研究^[18-19, 36]可知,南黄海冷水团主要存在东西侧两个冷中心,西侧冷中心位于 $35.25^{\circ}\text{N} 122^{\circ}\text{E}$,东侧冷中心位于 $36.0^{\circ}\text{N} 124^{\circ}\text{E}$ 。褚芹芹等^[37]在对黄海海表温度与冷水团年际变化关系的分析研究中发现黄海冷水团面积与前一年冬季黄海表层 9°C 等温线所到达纬度之间的相关关系最显著。本文中2001年的 9°C 等温线凸出的位置主要在 $35.2^{\circ}\text{N} 121.5^{\circ}\text{E}$ 和 $36.6^{\circ}\text{N} 123.6^{\circ}\text{E}$,2010年的 9°C 等温线凸出的位置主要在 $35^{\circ}\text{N} 122.5^{\circ}\text{E}$,由此确定 9°C 等温线凸出的位置即夏季黄海冷水团的冷中心位置(图7c和7d)。对比发现,2001年和2010年的日本鲈鱼卵和仔鱼的输运分布与黄海冷水团的冷中心位置基本一致,2001年的黄海冷水团的冷中心位置较2010年整体发生较明显的向北挺进,导致仔鱼输运的

总体方向沿东北,最终分布在北黄海的石岛渔场;而2010年的冷中心位置则被压缩向东南方偏移,并且势力范围较小,导致仔鱼运输的总体方向沿东南,最终分布在连青石渔场和大沙渔场。

进一步证实了黄海日本鲈仔鱼的运输分布受到黄海冷水团的影响,且黄海冷水团的冷中心位置是造成黄海日本鲈鱼卵和仔鱼的运输分布产生差异的主要动力学原因。



黑色曲线表示9℃等温线,红色框为协定水域。

Black curve represents the 9℃ isotherm and the red box is the waters of the Agreement.

图7 日本鲈鱼卵和仔鱼分别在2001年和2010年的运输及2001年和2010年黄海冷水团平均温度场

Fig. 7 Transport distribution of mackerel eggs and larvae in 2001 and 2010, Mean temperature field of the Yellow Sea cold water mass in 2001 and 2010

隋昊志等^[38]在分析海州湾鱼类生态类群时发现冷温性鱼类会在夏季黄海冷水团支流的作用下运输到海州湾并生长发育;黄康康等^[10]在分析黄海锋区环流与鲢鱼卵的聚集时发现伴随着黄海冷水团的形成产生的潮汐锋会对鲢鱼卵的运输有重要影响;武瑞等^[39]在分析黄海大头鳕幼鱼的生长和分布特征时发现黄海冷水团的季节变化对大头鳕的分布和生长均有显著影响。以上研究皆表明黄海冷水团环流对鱼类种群的动态运输具有重要作用,研究夏季黄海物理海洋性特征对日本鲈早期生活史的动态运输的影响不仅可以帮助人们了解黄海日本鲈资源的数量和变化趋势以及日本鲈分布规律,而且对黄海日本鲈渔业资源管理有着重要的指导意义。

4 结论

(1) 在平均气候条件下,青岛石岛外海产卵场的日本鲈在产卵之后总体向山东半岛南部运输,日本鲈鱼卵和仔鱼最终分布在32.0°N~37.0°N和121.0°E~124.0°E海域内,最北至海阳、乳山及成山角等沿岸海域,最南至长江口沿岸海域,最西至海州湾,最东至协定水域的韩方边界海域。从4月份产卵开始,西部产卵场内部分日本鲈鱼卵和仔鱼就开始陆续进入协定水域中,并在7—8月中已有50%的超级个体进入协定水域中的40~80 m

等深线内并被滞留超过300 h,说明该产卵场的日本鲈对协定水域日本鲈的资源补充贡献较大。

(2) 本次研究模拟的日本鲈鱼卵和仔鱼的生物斑块密度和滞留区主要集中在34.5°N~37.0°N和121.3°E~124.3°E海域内,并确定该海域为黄海日本鲈仔鱼的主要育肥场,该育肥场有3/5的范围在协定水域,说明协定水域的物理环境对青外产卵场的日本鲈资源补充量影响很大。

(3) 日本鲈鱼卵和仔鱼的运输分布存在明显的年际差异,日本鲈鱼卵和仔鱼的运输分布与黄海冷水团的冷中心位置变化基本保持一致,证实了黄海日本鲈仔鱼的运输分布受到黄海冷水团的影响,且黄海冷水团的冷中心位置是造成黄海日本鲈鱼卵和仔鱼的运输分布产生年际差异的主要动力学原因。

参考文献:

- [1] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究: I 关键科学问题与研究发展战略[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
TANG Q S, SU J L. Dynamics of marine ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 金祯弘. 《中韩渔业协定》实践情况评析[J]. 法制与社会, 2010(35): 26-27.
JIN Z H. Analysis on the practice of the China-Korea fisheries agreement [J]. Legal System and Society, 2010 (35): 26-27.

- [3] KIPARISSIS S, TSERPES G, TSIMENIDIS N. Aspects on the demography of Chub Mackerel (*Scomber japonicus* Houttuyn, 1782) in the Hellenic seas[J]. Belgian Journal of Zoology, 2000, 130(s1): 3-7.
- [4] YOSHIOKI O, AKINORI T, MORIO T. Fisheries and marine archives: spawning survey and resource change research: thoughts on continuation of the research Nakai Jinjiro (1901-1984)[J]. Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography, 2013, 77: 6-12.
- [5] TIAN R C, CHEN C S, STOKESBURY K D E, et al. Modeling the connectivity between sea scallop populations in the Middle Atlantic Bight and over Georges Bank [J]. Marine Ecology Progress Series, 2009, 380: 147-160.
- [6] 李曰嵩, 白松麟, 余为, 等. 基于个体的西北太平洋柔鱼冬春生群生活史早期生态模型构建[J]. 海洋学报, 2021, 43(9): 33-47.
- LI Y S, BAI S L, YU W, et al. Construction of individual-based ecological model of early life history of winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(9): 33-47.
- [7] 李曰嵩, 陈新军, 杨红. 基于个体的东海鲈鱼生长初期生态模型的构建[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1695-1703.
- LI Y S, CHEN X J, YANG H. Construction of individual-based ecological model for *Scomber japonicas* at its early growth stages in East China Sea [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1695-1703.
- [8] 王玉衡. 黄海物理环境对鲱鱼种群动态的影响——基于个体发育的生态动力模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- WANG Y H. Influence of physical environment on anchovy population dynamics in the Yellow Sea: a study using individual-based ecosystem model [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [9] THANASSEKOS S, FORTIER L. An Individual based model of Arctic cod (*Boreogadus saida*) early life in Arctic polynyas: I. Simulated growth in relation to hatch date in the Northeast Water (Greenland Sea) and the North Water (Baffin Bay)[J]. Journal of Marine Systems, 2012, 93: 25-38.
- [10] 黄康康, 叶振江, 于海庆, 等. 基于拉格朗日粒子追踪的南海中南部小黄鱼幼体早期输运初步研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2020, 39(6): 538-543.
- HUANG K K, YE Z J, YU H Q, et al. Preliminary study on early transport of larvae of *Larimichthys polyactis* in the Central and southern Yellow Sea based on lagrangian particle tracking[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2020, 39(6): 538-543.
- [11] 王鲁宁. 基于个体发育的中华哲水蚤种群动态模型的研究及其在黄海中的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- WANG L N. Development of Individual-based population dynamic model of *Calanus sinicus* and its application in the central Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [12] 邓景耀, 赵传网. 海洋渔业生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.
- DENG J Y, ZHAO C Y. Marine fishery biology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1991.
- [13] CHEUNG W W L, WATSON R, PAULY D. Signature of ocean warming in global fisheries catch[J]. Nature, 2013, 497(7449): 365-368.
- [14] 王良明, 李渊, 张然, 等. 西北太平洋日本鲭资源丰度分布与表温和水温垂直结构的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(11): 29-38.
- WANG L M, LI Y, ZHANG R, et al. Relationship between the resource distribution of *Scomber japonicus* and seawater temperature vertical structure of Northwestern Pacific Ocean [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(11): 29-38.
- [15] HUNTER J R, KIMBRELLI C A. Early life history of Pacific mackerel, *Scomber Japonicus* [J]. Fishery Bulletin, 1980, 78(1): 89-101.
- [16] 朱德山, 王为祥, 张国祥, 等. 黄海鲈鱼 (*Pneumatophorus japonicus* Houttuyn) 渔业生物学研究 I. 黄, 渤海鲈鱼洄游分布的研究[J]. 渔业科学进展, 1982(4): 17-31.
- ZHU D S, WANG W X, ZHANG G X, et al. Fishery biology study of yellow sea mackerel (*Pneumatophorus japonicus* Houttuyn) I. Study on migratory distribution of yellow and Bohai mackerel [J]. Advances in Fishery Science, 1982(4): 17-31.
- [17] 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.
- [18] 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(1): 11-15.
- HO C P, WANG Y X, LEI Z Y, et al. A preliminary study of the formation of Yellow Sea cold mass and its properties[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1959, 2(1): 11-15.
- [19] 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等. 南黄海环流的若干特征[J]. 海洋学报, 2000, 22(1): 1-16.
- TANG Y X, ZOU E M, LIEH J, et al. Some features of circulation in the southern Huanghai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(1): 1-16.
- [20] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.

- [21] 李曰嵩. 东海鲈鱼(*Scomber japonica*)早期生活史过程的生态动力学模拟研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
LI Y S. Simulation study of ecosystem dynamics of early life history of Chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China Sea [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [22] FABER D J, MCALLISTER D E. Development of Fishes of the Mid-Atlantic Bight. An Atlas of egg, larval and juvenile stages [J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1979, 36(6): 706-707.
- [23] YAMADA T, AOKI I, MITANI I. Spawning time, spawning frequency and fecundity of Japanese chub mackerel, *Scomber japonicus* in the waters around the Izu Islands, Japan[J]. Fisheries Research, 1998, 38(1): 83-89.
- [24] KASAI A, KOMATSU K, SASSA C, et al. Transport and survival processes of eggs and larvae of jack mackerel *Trachurus japonicus* in the East China Sea [J]. Fisheries Science, 2008, 74(1): 8-18.
- [25] MULLON C, FRÉON P, PARADA C, et al. From particles to individuals: modelling the early stages of anchovy (*Engraulis capensis/encrasicolus*) in the southern Benguela [J]. Fisheries Oceanography, 2003, 12(4/5): 396-406.
- [26] 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.
- [27] 顾侨侨, 王蕾, 侯朝伟, 等. 基于渔捞日志的海阳近海渔业资源种类组成及生物多样性分析[J]. 海洋渔业, 2015, 37(1): 17-23.
GU Q Q, WANG L, HOU C W, et al. On species composition and community diversity of fishery resources in the coastal waters of Haiyang: based on the data from logbook[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(1): 17-23.
- [28] 张玉钦, 邱盛尧. 山东近海渔业资源现状初步研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2019, 32(1): 61-67, 102.
ZHANG Y Q, QIU S Y. A preliminary study on current situation of fishery resources in Shandong Offshore [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2019, 32(1): 61-67, 102.
- [29] MOON J H, PANG I C, YANG J Y, et al. Behavior of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in the East China Sea and East/Japan Sea during the summer of 2005: a numerical model approach using a particle-tracking experiment [J]. Journal of Marine Systems, 2010, 80(1/2): 101-114.
- [30] 魏皓, 王玉衡, 万瑞景, 等. 黄海锋区环流与鲷鱼卵的聚集[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(3): 512-516.
WEI H, WANG Y H, WAN R J, et al. Tidal front and the convergence of anchovy (*Engraulis japonicus*) Eggs in the Yellow Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(3): 512-516.
- [31] 崔科, 陈新军. 东、黄海围网渔场鲈鱼产量的年际变动[J]. 海洋学研究, 2005, 23(2): 41-49.
CUI K, CHEN X J. Study on inter-annual change of the yields of *Pseudotolithus japonicus* and *Decapterus maruadsi* for purse seine fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea [J]. Journal of Marine Sciences, 2005, 23(2): 41-49.
- [32] 刘桂梅, 孙松, 王辉, 等. 春秋季节黄海海洋锋对中华哲水蚤分布的影响[J]. 自然科学进展, 2002, 12(11): 1150-1154.
LIU G M, SUN S, WANG H, et al. Effects of the Yellow Sea Ocean front on the distribution of *Daphnia sinensis* in Spring and Autumn [J]. Advances in Natural Science, 2002, 12(11): 1150-1154.
- [33] 叶振江, 彭玉强, 何天庆, 等. 黄海近岸潮汐锋海域蟹类幼体日间垂直迁移特征[J]. 中国海洋大学学报, 2022, 52(9): 35-42.
YE Z J, PENG Y Q, HE T Q, et al. Diel vertical migration characteristics of crab larvae in the tidal front waters of the coastal Yellow Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(9): 35-42.
- [34] 潘俊. 春夏季南黄海水文环境季节变化及其生态效应[D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2020.
PAN J. Seasonal variability of hydrological properties and ecological effect in the southern Yellow Sea [D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [35] 杨东莱, 吴光宗, 孙继仁. 长江口及其邻近海区的浮性鱼卵和仔稚鱼的生态研究[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(4): 346-355.
YANG D L, WU G Z, SUN J R. The investigation of Pelagic eggs, larvae and juveniles of fishes at the mouth of the Changjiang River and Adjacent areas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(4): 346-355.
- [36] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 26-34.
YU F, ZHANG Z X, DIAO X Y, et al. Analysis of evolution of the Huanghai Sea Cold Water Mass and its relationship with adjacent water masses [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(5): 26-34.
- [37] 褚芹芹, 于华明, 李松霖, 等. 黄海水表温度与冷水团年际变化关系的分析研究[J]. 海洋预报, 2021, 38(2): 21-30.
CHU Q Q, YU H M, LI S L, et al. Study of the correlation between SST and inter-annual variation of the cold water

- mass in the Yellow Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(2): 21-30.
- [38] 隋昊志, 薛莹, 任一平, 等. 海州湾鱼类生态类群的研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(12): 59-71.
- SUI H Z, XUE Y, REN Y P, et al. Studies on the ecological groups of Fish communities in Haizhou Bay, China[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(12): 59-71.
- [39] 武瑞, 李建超, 叶振江, 等. 黄海大头鳕幼鱼的生长和分布特征[J]. *中国海洋大学学报*, 2020, 50(7): 63-73.
- WU R, LI J C, YE Z J, et al. Growth and distribution of young Pacific cod in Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(7): 63-73.

Early transport of *Scomber japonicus* in the Yellow Sea based on lagrangian particle tracking

WANG Peiwei¹, LI Yuesong^{1,2,3}, PAN Lingzhi⁴

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 4. East China Sea Forecasting Center, State Oceanic Administration, Shanghai 200081, China)

Abstract: By adopting FVCOM-simulated 3-D physical field and based on the biological processes of chub mackerel (*Scomber japonicus*) in its early life history from the individual-based biological model, the individual-based ecological model for chub mackerel at its early transport dynamics in the Yellow Sea was constructed through coupling the physical field from April to August with the biological model by the method of Lagrange particle tracking. The results showed that the model can accurately simulate the transport path, density and retention distribution of eggs and larvae of chub mackerel in the spawning ground in Qingdao Shidao offshore in the Yellow Sea. The study found that under average climate conditions, chub mackerel in the spawning ground in Qingdao Shidao offshore was overall transported to the southern part of Shandong Peninsula after spawning, eggs and larvae of chub mackerel were finally distributed in the range of 32°N–37°N and 121°E–124°E, and had a large distribution in the waters of the provisional measures of the China-Korea Fisheries Agreement (hereinafter referred to as the waters of the Agreement). Since spawning in April, some eggs and larvae of chub mackerel have begun to enter the waters of the Agreement, and from July to August, 50% of the super-individuals have entered the 40–80 m isobath in the waters of the Agreement and have been stranded for more than 300 hours, illustrating the spawning ground in Qingdao Shidao offshore contributes significantly to the replenishment of chub mackerel resources in the waters of the Agreement. The biopatch density and retention area of eggs and larvae of chub mackerel were mainly concentrated in the sea area of 33.5°N–37.5°N and 121°E–124.5°E, and this sea area was determined to be the main fattening ground for larvae of chub mackerel in the Yellow Sea, and 3/5 of the fattening ground was in the waters of the Agreement, indicating that the physical environment of the waters of the Agreement had a great impact on the replenishment of chub mackerel resources in the spawning ground in Qingdao Shidao offshore. There were obvious differences in the transport distribution of eggs and larvae of chub mackerel in different years, and the main dynamic reason for the interannual difference in the transport distribution of chub mackerel in the Yellow Sea is the location of the cold center of the Yellow Sea Cold Water Mass.

Key words: chub mackerel (*Scomber japonicus*); early transport; the Yellow Sea Cold Water Mass; lagrangian particle tracking; the waters of the Provisional Measures of the China-Korea Fisheries Agreement