

文章编号: 1674-5566(2024)05-1248-12

DOI: 10.12024/jsou.20240404491

黄海南部近岸带鱼鱼卵分布及仔鱼输运模式

蒋慧东, 叶振江, 李建超, 张文超, 李宇, 张艺笑, 张新贵

(中国海洋大学 深远海与极地渔业研究中心, 山东 青岛 266003)

摘要: 基于2018—2022年对黄海南部近岸海域(119°E~124°E, 33°N~37°N)的鱼类浮游生物综合调查获得的带鱼鱼卵的丰度数据确定粒子释放区, 利用有限体积海岸模型(Finite-volume coastal ocean model, FVCOM), 结合拉格朗日粒子追踪算法, 模拟了带鱼仔鱼阶段的个体输运过程, 以了解黄海南部带鱼的繁殖期、产卵场和育幼场分布, 及海洋环境对卵、仔鱼分布和扩散的影响。结果表明, 研究海域带鱼春夏季产卵, 5、7、8月均有带鱼鱼卵出现, 8月为繁殖盛期; 带鱼鱼卵5月主要分布在近岸19~30 m水域, 而8月则广布于11~70 m水域; 带鱼鱼卵出现海域的海表温度(Sea surface temperature, SST)、海底温度(Sea bottom temperature, SBT)分别为13.9~29.7、8.4~28.3 °C。随机森林(Random forest)算法分析结果表明, 温度和水深是影响带鱼鱼卵丰度的主要环境因子。粒子追踪模拟实验结果显示, 5月释放的粒子, 在1~15 d(鳔未形成、仔鱼无垂直迁移行为)个体主要表现为向粒子释放区西北近岸一带扩散, 在16~40 d个体出现昼夜垂直迁移行为后, 粒子离开近岸向东扩散至50 m水深附近。7月和8月, 在发生垂直迁移行为前, 个体在近底层主要从释放区向近岸扩散, 发生昼夜垂直迁移行为后, 个体从近岸聚集区稍向离岸方向移动; 部分释放于外侧水域的粒子则产生向北和东北方向的短距离扩散, 扩散模式在整个仔鱼阶段未有显著改变。8月调查获得的带鱼仔鱼聚集区特征与粒子输运模拟实验结果较为一致。我们认为产卵的季节、空间位置, 仔鱼垂直迁移特性及区域上升流和锋区结构等是影响带鱼仔鱼输运模式的主要因素。研究结果可为理解黄海南部带鱼鱼卵、仔鱼阶段的栖息地选择机制与早期补充动态及带鱼资源的管理和保护提供科学依据。

关键词: 黄海南部; 带鱼; 鱼卵分布; 幼体输运; 粒子追踪

中图分类号: S 931.1 **文献标志码:** A

鱼类在早期生活史阶段一般会经历复杂的环境动态变化, 早期生活史阶段所经历的温度、盐度、饵料提供和捕食等生境状况影响着种群补充成功率及连通性^[1-2]。海洋鱼类在仔鱼阶段个体的游泳能力一般较弱, 从出生地至育幼场的输运过程受海流影响, 海流的季节性和精细尺度的时空变化都会导致幼体分布的改变, 从而使得鱼类早期阶段空间补充模式变动显著^[3-4]。许多物种选择特定时间和地点产卵, 利用繁殖策略和海洋条件提高早期的存活率^[5-6]。研究^[7]表明, 许多海洋底栖无脊椎动物在幼体阶段会有显著的昼夜垂直迁移行为, 幼体通过昼夜不同时段对栖息水层的主动选择, 来实现摄食、借助洋流进行水

平输运和扩散, 前往适宜的育幼场。与海洋底栖无脊椎动物类似, 海洋鱼类仔鱼随游泳能力逐渐增强, 亦表现出显著的昼夜垂直迁移行为。在个体被动洄游过程中, 仔鱼通过昼夜垂直迁移来选择不同水层的海流前往目标育幼场^[8]。阐明海洋鱼类产卵区域的时空变化、仔鱼的垂直迁移特征以及卵和仔鱼输运方向和路线, 是探索鱼类资源补充机制、保护和科学管理渔业资源的科学基础。

带鱼(*Trichiurus japonicus*)是我国渔业中最具商业捕捞价值的捕捞对象之一, 我国渤海、黄海、东海至南海均有分布^[9]。1981—2020年, 我国的带鱼捕捞量从约50万t增长至2006年的最高值

收稿日期: 2024-04-11 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(41876177); 国家重点研发计划(2018YFD0900903); 农业农村部财政项目(125C0505)

作者简介: 蒋慧东(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源生物学。E-mail: 1324801289@qq.com

通信作者: 叶振江, E-mail: yechen@ouc.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>

约 130 万 t,之后开始下降,在 2020 年约为 90 万 t^[10]。近些年来由于过度捕捞,带鱼群体结构趋于简单化、体型趋于小型化、年龄结构趋于低龄化且性成熟加快等问题使得种群结构变得脆弱^[11-13]。我国对中国近海带鱼的基础生物学特征,如资源量^[14]、生长^[15]、摄食^[16]、早期发育^[17]等有过一些研究,近年来徐汉祥等^[18]、SUN 等^[19]亦报道了东、黄、渤海带鱼繁殖生物学和仔稚鱼的早期生长特征,但对于带鱼在中国近海的产卵场分布,仅有吴家骅^[20]、万瑞景等^[21]、徐兆礼等^[22]、周永东等^[23]针对东海海域的零星报道,且都在 2013 年以前。早在 20 世纪 60 年代,黄海南部海州湾及近岸 20 m 以浅水域曾是带鱼春季 5—6 月期间主要产卵场^[24],但多年以来,对该水域带鱼产卵场变动情况,特别是仔鱼扩散及育幼场分布状况罕有报道。

自 20 世纪 80 年代起,生物-物理模型开始应用在鱼类、海洋无脊椎底栖动物等不同类群早期生活史过程中个体扩散模式的研究,至今一直是国内外该领域的重要研究手段^[25-27]。本研究基于 2018—2022 年在黄海南部水域鱼类浮游生物综合调查获得的带鱼鱼卵时空分布数据,使用 FVCOM 水动力学模型,结合拉格朗日粒子跟踪算法,模拟了黄海南部海州湾及邻近区域带鱼仔鱼运输过程,以查明当前黄海南部带鱼鱼卵的时空分布特征,初步探究带鱼育幼场分布及形成机制。

1 材料与方法

1.1 调查航次与站位设置

研究基于中国海洋大学课题组承担的“黄渤海产卵场调查”等项目在黄海南部海州湾水域(119°E~124°E 和 33°N~37°N)进行外业调查,包括春夏季 2018 年每半月 1 次共 6 个航次、2019 年 7、8 月 2 个航次、2020 年 7、8、11 月 3 个航次、2021 年 5、8 月 2 个航次、2022 年 5、8 月 2 个航次,共计 15 个调查航次、725 个站次。其中,2018 年 5—8 月为大面积调查航次,站位和航次间隔密集,旨在确定带鱼鱼卵在黄海南部的时空分布现状。由于初步调查结果仅于 7 月上旬在 34.17°N 以南发现少量带鱼鱼卵,海州湾水域传统的带鱼近岸产卵场^[24]并未发现带鱼鱼卵和仔鱼,故 2019 年 7—8 月航次将调查范围向北、向黄海冷水团核心

区域进行了调整,以探寻带鱼产卵场分布。2020 年以后,在春、夏、秋等大面积调查航次,根据研究需求进一步优化了调查站位分布、增加了近岸区域的高强度调查。详见图 1、表 1。

1.2 样品采集与数据分析

依据调查采样方式,调查分为 2 个阶段。调查第 1 阶段(2021 年 5 月及以前的 12 个航次),使用传统的鱼类浮游生物网(网口直径 80 cm,网目孔径 0.505 mm,网衣长 2.8 m),以表层水平拖网方式采集鱼类浮游生物,每站位以 3.0 kn 左右拖速,拖网约 10 min;调查第 2 阶段(2021 年 8 月及以后的 3 个航次),考虑到带鱼鱼卵分布于整个水体并多处于水体中下层^[28],以及带鱼仔鱼在未出现垂直迁移行为时主要栖息于水体中下层,出现垂直迁移行为后白天栖息于水体中下层夜晚上浮的特点^[29],国内传统的鱼类浮游生物网水平和垂直拖网对其卵、仔鱼的采样效果具有局限性,我们调整了调查方式,采用国际通用的 Bongo 鱼类浮游生物网(网口直径 60 cm,网目尺寸 0.505 mm,网衣长 2.5 m)进行鱼类浮游生物调查,网具以双斜拖方式穿越整个水层。在调查过程中网具先匀速放到底层,再从底层斜拖至表层,其间船速保持在 3.0 kn 左右,网具在水体中行进轨迹呈“V”形,各站位的采样时间随水深而变化,网口处放置微型 TD 温、深探头测量网具在水下的深度和水温轨迹(表 1)。利用 CTD(型号:德国 Sea & Sun Technology 公司 CTD-75M 型)进行海洋环境观测,获取温度、盐度的垂直剖面数据。所有生物样品采集时在网口使用流量计(型号:德国 HYDRO-BIOS 公司 438 110/438 115 型)记录滤水量。鱼类浮游生物样品于海上采集后立即用 5% 甲醛水溶液(传统的鱼类浮游生物网)或分别用 5% 甲醛水溶液和 95% 乙醇溶液(Bongo 鱼类浮游生物网)进行固定。调查结束后带回实验室进行分析。在 Nikon E-200 型体视显微镜下,利用形态学方法对带鱼鱼卵和仔鱼进行物种鉴定和计数。

通过流量计记录的滤水量将采集的带鱼鱼卵数量转化为丰度(ind./100 m³)。已有研究^[30]表明,带鱼鱼卵并不完全分布于表层,其可能在水体中下层孵化,因此 Bongo 鱼类浮游生物网对带鱼鱼卵和仔鱼的采集效果较表层拖网的代表性可能更佳。本文通过随机森林算法,分别利用传

统的鱼类浮游生物网和Bongo鱼类浮游生物网采集的带鱼鱼卵丰度数据,分析经度(Longitude, Lon)、纬度(Latitude, Lat)、海表温度(Sea surface temperature, SST)、海底温度(Sea bottom temperature, SBT)、海表盐度(Sea surface salinity, SSS)、海底盐度(Sea bottom salinity,

SBS)、深度(Depth)等环境因子对带鱼鱼卵分布的影响,相关分析在R软件中完成。其中,由于Bongo鱼类浮游生物网调查期间有2个航次(SYS202108和SYS202205)盐度数据缺失,故在基于该批次数据分析环境因子对带鱼鱼卵分布的影响中未考虑盐度。

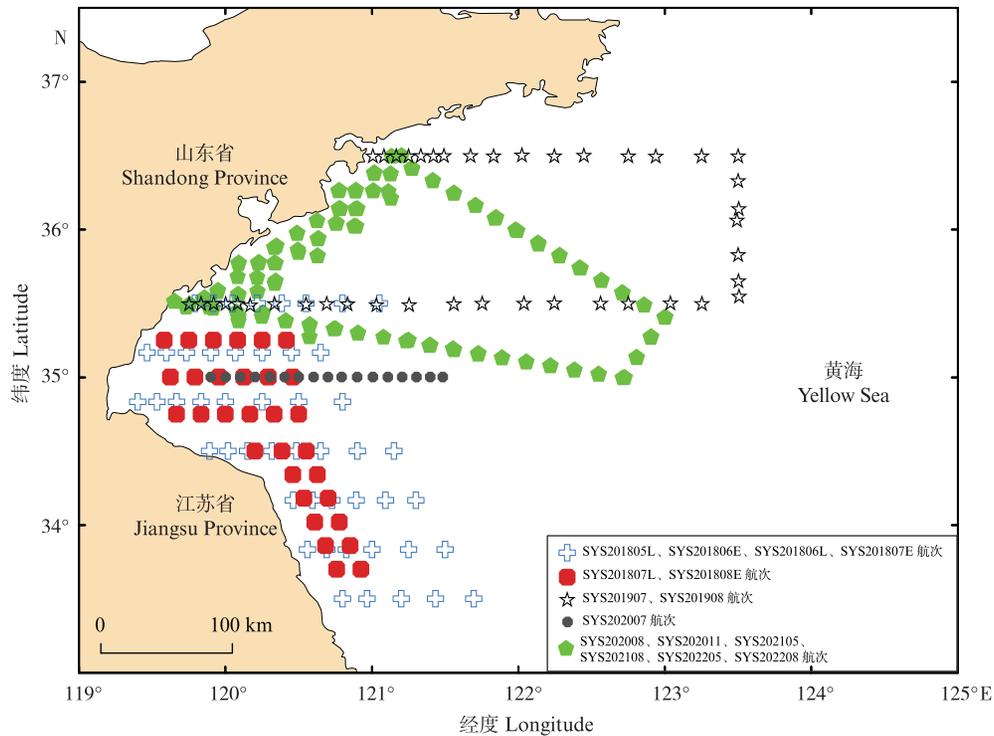


图1 调查航次与站位

Fig. 1 Survey cruises and stations

表1 调查航次信息

Tab. 1 Survey cruises information

航次 Cruises	时间 Time	区域 Areas	站位数 Number of stations
SYS201805L	5.25—5.30	119.32°E ~121.73°E, 33.45°N ~35.58°N	49
SYS201806E	6.7—6.12	119.32°E ~121.73°E, 33.45°N ~35.58°N	49
SYS201806L	6.22—6.28	119.32°E ~121.73°E, 33.45°N ~35.58°N	49
SYS201807E	7.6—7.10	119.32°E ~121.73°E, 33.45°N ~35.58°N	49
SYS201807L	7.19—7.20	119.52°E ~120.95°E, 33.64°N ~35.34°N	31
SYS201808E	8.6—8.8	119.52°E ~120.95°E, 33.64°N ~35.34°N	31
SYS201907	7.9—7.16	119.65°E ~123.51°E, 35.45°N ~36.52°N	42
SYS201908	8.14—8.21	119.65°E ~123.51°E, 35.45°N ~36.52°N	42
SYS202007	7.24—7.30	119.91°E ~121.50°E, 35°N	17
SYS202008	7.26—8.11	119.61°E ~123.05°E, 34.95°N ~36.56°N	61
SYS202011	11.08—11.19	119.61°E ~123.05°E, 34.95°N ~36.56°N	61
SYS202105	5.12—5.23	119.61°E ~123.05°E, 34.95°N ~36.56°N	61
SYS202108	8.7—8.19	119.61°E ~123.05°E, 34.95°N ~36.56°N	61
SYS202205	5.8—5.17	119.61°E ~123.05°E, 34.95°N ~36.56°N	61
SYS202208	8.9—8.21	119.61°E ~123.05°E, 34.95°N ~36.56°N	61

1.3 模型配置及粒子追踪

本研究采用 FVCOM^[31] 提供水动力场,用于模拟带鱼仔鱼阶段的扩散过程。模型由 42 974 个节点和 82 702 个网格组成,其中垂直方向有 20 个 sigma 层,水平方向分辨率为 6.5 km。将气候二期项目^[32]的温盐数据集和 NASA JPL 估算海洋环流插值到模型网格中,获得初始三维温度和盐度场。潮汐模型驱动程序^[33]的潮汐波动和 ECCO2 数据集共同作为开放边界强迫。来源于河流泥沙公报 (<http://www.mwr.gov.CB/sj/#tjgb>) 的几条重要河流(鸭绿江、辽河、黄河、淮河、长江和钱塘江)的河流径流量数据也被纳入模型中,模型配置详见 XING 等^[27]。

带鱼仔鱼在水体中的被动运输采用拉格朗日粒子追踪算法进行模拟。粒子位置计算中的截断误差通过四阶龙格库塔(Runge~Kutta)方案来减小,并采用随机游走来解决子网格尺度问题,包括水平湍流流动和个体游动^[34-35]。模型基础数据的准确性已通过 ADCP (Acoustic doppler current profiler) 观测和横截面 CTD 观测进行了较为全面的验证,并被应用于识别黄海日本鳀幼体的主要滞留区,详见 XING 等^[27]。

1.4 模拟实验生物学设置

粒子释放时间和地点根据带鱼繁殖生物学相关报道及本研究外业调查所获带鱼鱼卵时空分布数据进行设置。对调查采集到带鱼鱼卵的 5、7、8 月均进行了粒子释放(具体释放日期:2018.5.15、2018.7.13、2018.8.11),粒子释放空间位置参考本研究中带鱼鱼卵分布数据确定。鱼类产卵通常与月相相关,大潮期间潮汐力增加刺激了鱼类的激素分泌并促进性腺发育^[36],使得鱼类更多地趋向于大潮期间产卵^[37]。因此本文实验中粒子释放日期选择在大潮期间。有研究表明,带鱼鱼卵孵化的主要位置在水体的中下层^[28],黄海南部带鱼鱼卵出现的高峰期为夜间 19:00~21:00 点和凌晨 5:00~9:00 点^[30]。因此,本实验中代表带鱼仔鱼的粒子于大潮期间凌晨 6:00 点在近底层释放。为了保证结果稳定性,同时平衡粒子追踪实验的计算需求,模拟实验分别于 5 月、7 月和 8 月在释放区域内各随机释放 5 000 个粒子。使用 ArcMap 10.7 中核密度分析

工具可视化运输结束时的粒子分布情况。

带鱼仔鱼在鳔形成之前主要在水体的中下层生长发育,仔鱼鳔形成之后个体出现显著的昼夜垂直迁移行为,仔鱼夜晚迁移至水体中上层,白天迁移至水体近底层^[29]。根据带鱼发育过程的报道,本研究设定带鱼仔鱼在第 15 天左右鳔发育完成,个体出现垂直迁移行为;在第 40 天仔鱼发育结束^[17,19]。因此粒子追踪模拟实验过程分为 2 个阶段进行,前 15 天为第一阶段,粒子一直位于水体中下层(第 18 sigma 层);第 16~40 天为第二阶段,设置为粒子白天(5:00~19:00 点)位于水体中下层(第 18 sigma 层),夜间(19:00~5:00 点)迁移至水体中上层(第 3 sigma 层)。

2 结果

2.1 带鱼鱼卵时空分布及环境因子的影响

2018—2022 年调查期间 5、7、8 月分别采集到带鱼鱼卵 13、74、1 419 粒,6 月、11 月调查未采集到带鱼鱼卵,8 月是研究水域带鱼的繁殖高峰。其中,5 月少量带鱼鱼卵主要出现于 19~30 m 近岸水域,50 m 以外的深水区亦有零星出现;7 月仅一个调查断面,在 29~38 m 水深附近有带鱼鱼卵出现;8 月则在 2019—2022 年 4 年期间的 4 次大面积调查中,使用传统的鱼类浮游生物网(2019、2020 年)和 Bong 鱼类浮游生物网(2021、2022 年)均采集到较多带鱼鱼卵,鱼卵广泛分布于 11~70 m 一带水域(图 2)。调查期间带鱼鱼卵出现于表层温度 13.9~29.7 °C、底层温度 8.4~28.3 °C、表层盐度 29.5~32.6、底层盐度 29.7~33.2(表 2)的海域。

随机森林模型分析结果显示,影响带鱼鱼卵丰度的环境因子相对重要性依次为深度、海表温度、海底温度、海表盐度、海底盐度、经度、纬度(传统的鱼类浮游生物网数据),和海底温度、海表温度、深度、纬度、经度(Bongo 鱼类浮游生物网数据)。考虑带鱼鱼卵的垂直分布特性,Bongo 鱼类浮游生物网数据的分析结果可能更具代表性,但是由于 Bongo 鱼类浮游生物网数据中配套的盐度数据的不足,相关结果尚需后期进一步调查、研究和分析。综合上述分析结果,温度和水深是影响带鱼鱼卵分布较为重要的因素(图 3)。

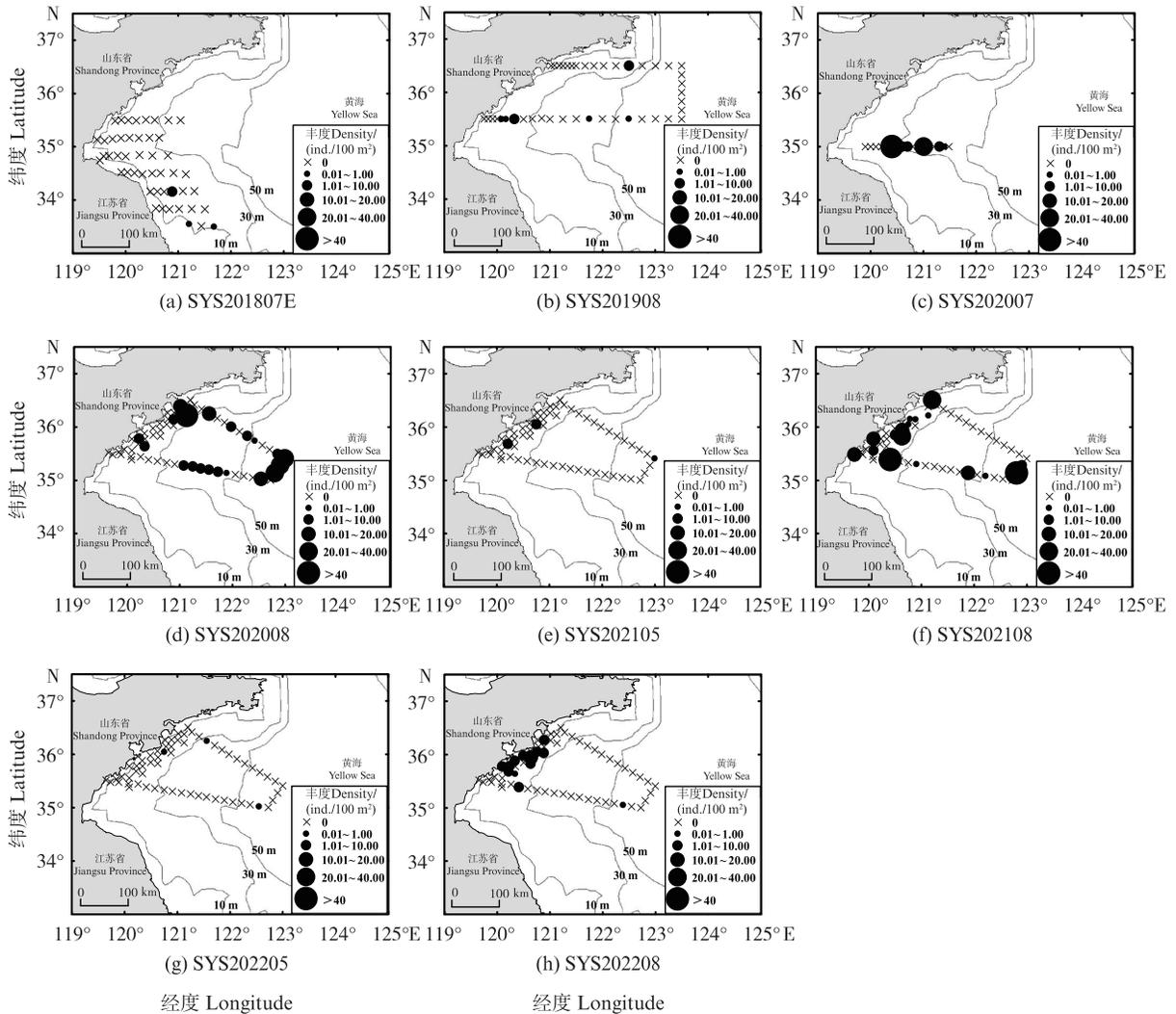


图2 带鱼鱼卵时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of *T. japonicus* eggs

表2 各航次带鱼鱼卵出现的数量及温度、盐度和水深特征

Tab. 2 Number of *T. japonicus* eggs and the temperature, salinity, and depth characteristics of cruises

航次 Cruises	鱼卵数量 Number of eggs/ind.	表层温度 Surface temperature/°C	底层温度 Bottom temperature/°C	表层盐度 Surface salinity	底层盐度 Bottom salinity	深度 Depth/m
SYS201807E	22	23.0~25.1	23.0~25.1	29.7~30.8	29.7~30.8	12~18
SYS201908	43	26.2~27.5	8.4~23.7	31.1~31.8	31.8~32.5	22~59
SYS202007	52	22.3~24.8	17.3~21.2	30.8~31.5	31.2~32.1	29~38
SYS202008	956	26.3~27.4	10.6~24.1	29.5~32.6	31.1~33.2	11~70
SYS202105	9	13.9~15.1	10.1~14.2	30.6~31.8	30.7~32.2	25~59
SYS202108	358	28.0~29.7	8.4~28.3	-	-	18~62
SYS202205	4	15.0~16.5	9.1~12.3	-	-	19~61
SYS202208	62	26.7~28.4	9.1~26.8	29.5~30.8	29.9~32.6	14~61

注: -表示盐度数据缺失。

Notes: - means no salinity data collected.

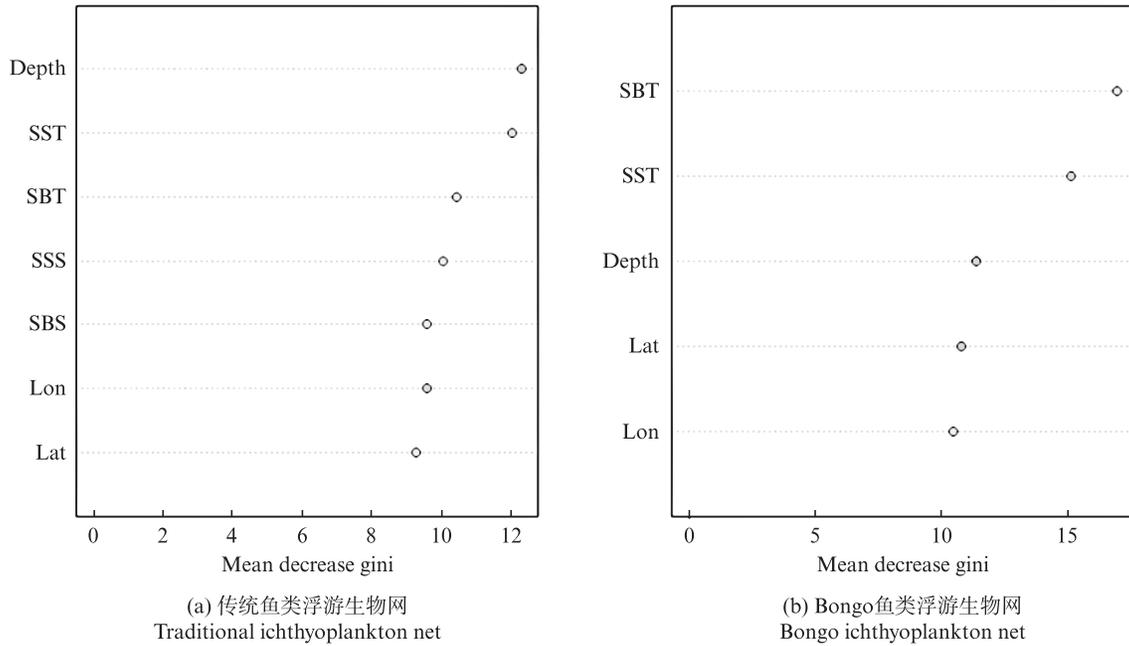


图3 影响带鱼鱼卵丰度的环境因子相对重要性

Fig. 3 Relative importance of environmental factors affecting the abundances of *T. japonicus* eggs

2.2 仔鱼运输模式

模拟实验结果显示带鱼仔鱼的运输过程存在季节变化。在5月释放的粒子中,前15天粒子主体向粒子释放区西北近岸一带扩散,16~40 d 粒子离开近岸向东扩散至50 m水深附近。7月,前15天粒子主体向西北、西及西南扩散到青岛、海州湾以及江苏浅滩近岸,同时一部分粒子向东北方向扩散;16~40 d,原本趋向于沿岸的粒子集群稍向离岸方向移动,但仍主要聚集于30 m以浅,而第一阶段向东北扩散的粒子主要滞留在原地,在30~70 m一带深水区呈现较为离散分布。8月粒子的扩散模拟结果与7月基本相同(图4)。

在研究开展的2018—2022年15个航次的调查中,仅在使用Bongo网采样的SYS202108和SYS202208航次分别采集到24、30尾带鱼仔鱼。采集到的带鱼仔鱼主要分布于30 m以浅区域,个别站点出现于调查区东北方向35 m处,仔鱼的近岸聚集区与粒子追踪模拟实验结果基本吻合(图5)。

3 讨论

3.1 带鱼繁殖季节与空间的变动

本研究结果表明,研究水域带鱼鱼卵5月主要分布于青岛近海19~30 m以浅沿岸水域,6月未发现带鱼鱼卵,这一结果与以往姜言伟^[24]、刘效舜^[38]、金显仕等^[39]以及徐兆礼等^[22]早年对带鱼

主要产卵区域的报道相比已出现变化。姜言伟^[24]1962年对海州湾及邻近水域的调查结果显示,5—7月带鱼鱼卵主要出现于海州湾近岸120°E以西,包括99/9、100/2、3、7和110/1、4渔区一带两个核心区,产卵盛期为6月上旬,6月20日以后进入带鱼产卵末期,大部分个体已产卵完毕,调查期间水域表层水温为13~21 °C;120.5°E~122.5°E海域一带没有发现带鱼鱼卵分布(图6)。刘效舜^[38]、金显仕等^[39]及徐兆礼等^[22]认为黄海中南部带鱼产卵场主要集中在海州湾东部120.5°E附近水域和威海南部部分沿岸区域,而青岛沿岸及其外部水域可能并不是主要产卵场。课题组自2013年开始即在海州湾及邻近水域开展多年的春夏季鱼类浮游生物调查,包括2018—2022年在内,春夏季在110/1、4渔区一带已采不到大量带鱼鱼卵。带鱼在研究水域的繁殖盛期目前可能位于夏季8月,鱼卵分布于11~70 m水深范围。与上世纪60年代相比,海州湾及邻近水域带鱼的主要产卵区域似出现了向深水区 and 向北的移动趋势,产卵盛期可能后移至8月。这种变动可能与带鱼对海洋升温的一种应对策略有关^[40-41],其具体机制及其对资源补充和种群动态的影响需要进一步深入探索。

带鱼鱼卵分布在整个水体中,并多集中于水体中下层^[28],基于传统的鱼类浮游生物网和

Bongo 鱼类浮游生物网数据的随机森林模型分析结果皆显示, 温度和水深是影响带鱼鱼卵丰度较为重要的环境因素, 但温度和水深的重要性排序有所不同。考虑到带鱼鱼卵垂直分布的特点, 笔者谨慎认为 Bongo 鱼类浮游生物网的调查结果可能更具代表性, 温度对鱼卵分布的影响可能高于水深, 但这有待于进一步的研究来验证。仔鱼早期鳔未形成时主要栖息于水体中下层, 当鳔形成后出现垂直迁移行为, 仔鱼白天栖息于水体中下层、夜晚上浮^[29], 这可能造成白天传统的表层鱼

类浮游生物拖网对仔鱼的采集效果较差。我们近年使用 Bongo 鱼类浮游生物网的调查表明, 其各类仔鱼的采集效率较常规方法有显著提高, 在 2021 和 2022 年 8 月的 Bongo 鱼类浮游生物网大面积调查中皆采集到较多带鱼仔鱼, 为带鱼仔鱼运输模拟实验提供了可靠的实地验证。同时, 本文外业调查对研究海域带鱼产卵场的时空覆盖度存在一定局限性, 对该海域带鱼产卵生境仍需持续开展专项调查, 以进一步阐明带鱼繁殖策略、动态及环境的影响机制。

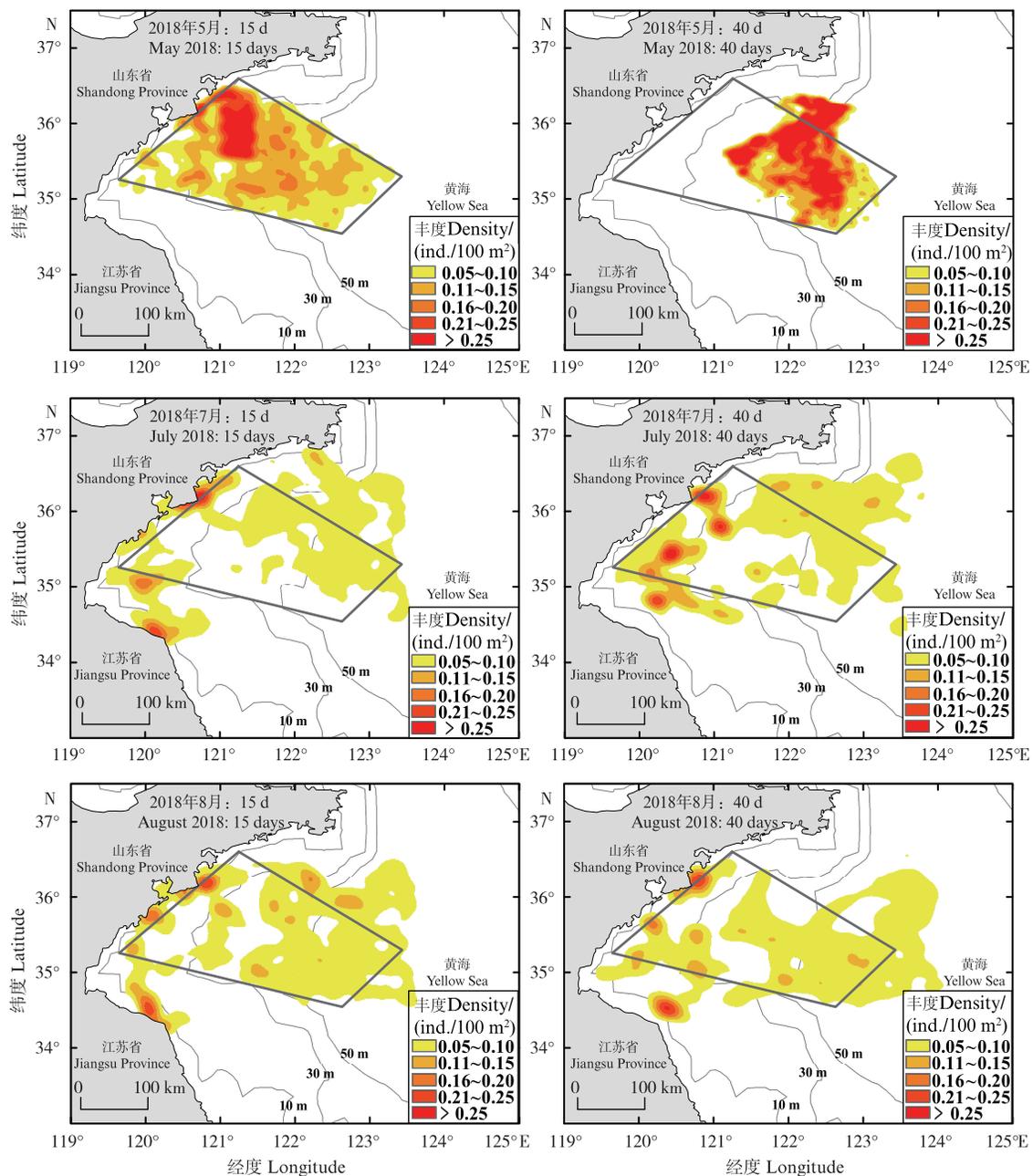


图4 粒子释放区域(梯形框线内)及运输模拟结果

Fig. 4 Particle release region (inside the trapezoid) and transport simulation results

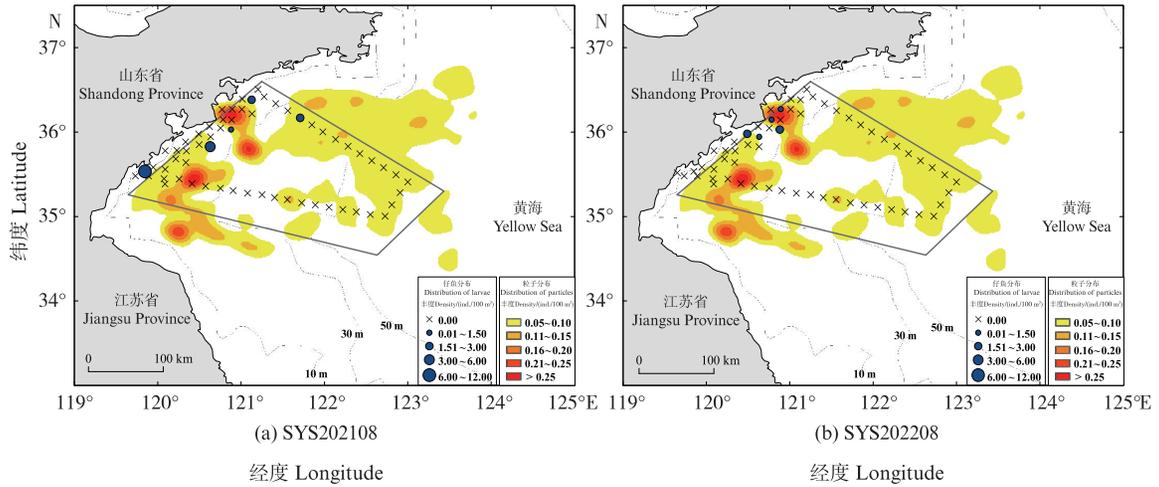


图5 运输模拟实验结果(2018.07)与带鱼仔鱼实际分布(SYS202108,SYS202208)
 Fig. 5 Results of transport simulation experiment (2018. 07) and actual distribution of *T. japonicus* larvae (SYS202108,SYS202208)

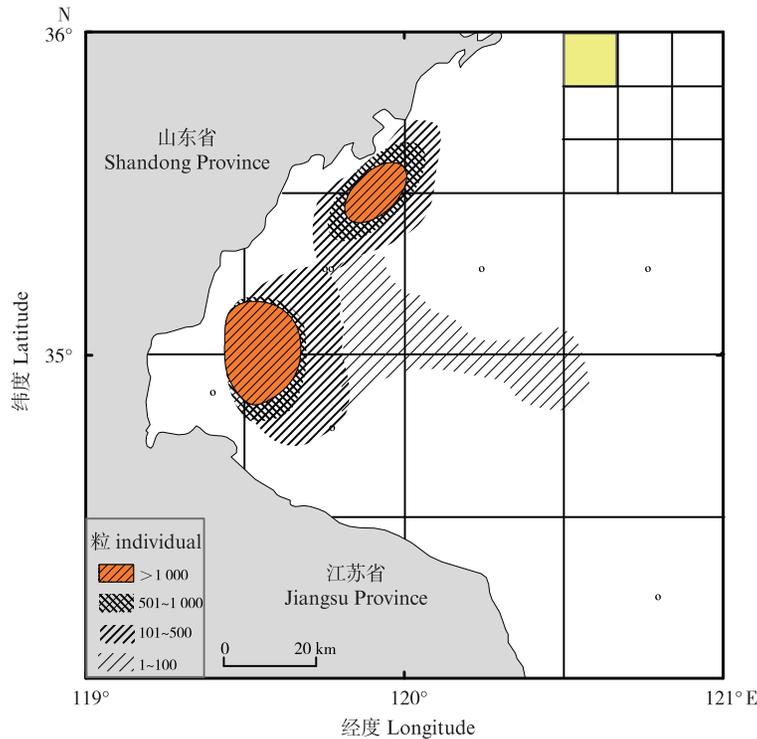


图6 1962年春夏季带鱼鱼卵在海州湾及邻近水域的分布(改编自HORIKI [28])
 Fig. 6 Distribution of *T. japonicus* eggs in Haizhou Bay and adjacent waters in the spring and summer of 1962 (Adapted from HORIKI [28])

3.2 带鱼仔鱼扩散的环境机制

一般认为,潮汐、风和受密度差异驱动的浮力流是沿岸区域动物幼体沿陆架、跨陆架运输的主要驱动机制^[7,42]。研究表明,在黄海西南部沿岸区域,相比于春季,夏季是上升流发生的主要季节,且相对更强^[43-45]。在苏北沿岸流的影响下,黄海西南部春、夏季表层海流方向均主要表现为沿岸北上,而底层海流则受季节转变引起的海水

表、底层温差变化和上升流发生及强弱的影响有所差异^[44]。数值模拟实验结果显示,春季释放的粒子运输实验结束时,最终聚集于水深50 m左右的离岸区域,这与夏季释放的粒子运输后主要聚集于近岸30 m以浅的结果存在差异。上升流的强弱,以及区域表、底层流场在不同季节的动态变化可能是粒子于春季和夏季释放后运输模式有所不同的环境原因。水动力模拟结果显示,海

域流场在粒子的释放季节、运输阶段及不同水层之间存在显著的流向变化(图7)。春季5月释放的粒子,在第一阶段1~15 d粒子位于底层,大部分粒子暴露于西偏北方向海流向西北近岸方向短距离运输,在近岸形成聚集热区;在16~40 d,个体出现昼夜垂直迁移行为,粒子夜间主要暴露于近表层东向流、白天栖息于底层东偏北向海流,而最终使得所有粒子向东偏北运输离开了近岸水域。夏季7、8月,海域上升流强盛,水体流速和流向在垂直结构上存在差异,主要表现为上层水流方向为离岸,下层水流向近岸补充。夏季粒子运输第1~15 d,受底层强劲向岸流的影响,主

体移动向西北、正西及西南等方向,在近岸形成多个聚集区;在16~40 d,个体夜间时段向上迁移、受到上层离岸海流的影响,而稍稍离开沿岸。与春季5月不同的是,夏季底层向岸流的存在使得粒子在运输后期16~40 d并不易远离沿岸,另外,夏季上升流在30 m等深线一带产生的锋面结构^[46],对仔鱼离岸运输可能产生阻碍,亦可能是夏季粒子滞留在近岸育幼场的原因之一。在夏季,部分释放于外侧区域的粒子向北和东北方向扩散,可能与外侧离岸水域粒子受上升流影响较小,而更多受到外部黄海暖流残余流等^[47]的影响有关。

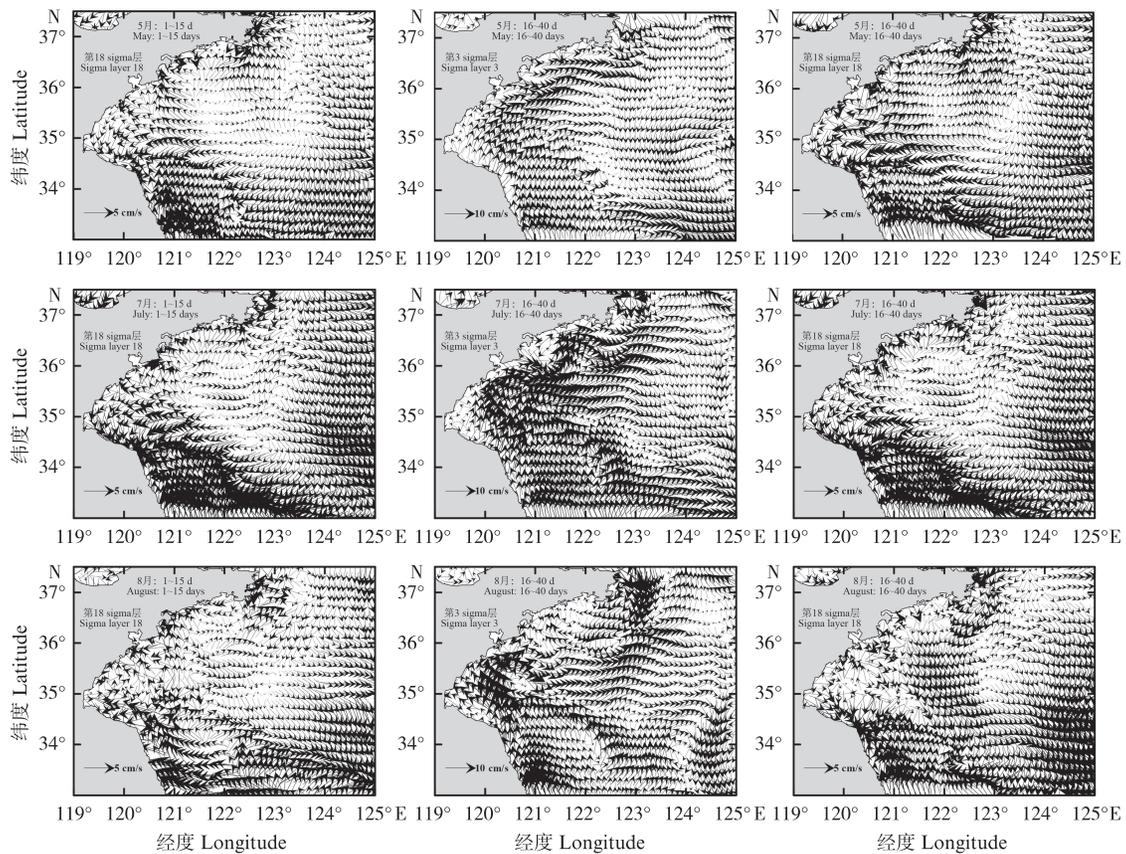


图7 与粒子运输各阶段时间、所处水层对应的平均流场示意图

Fig. 7 Schematic of the mean flow field corresponding to the time and water layer of each stage of particle transport

3.3 带鱼仔鱼聚集区及对资源补充的影响

夏季是带鱼繁殖盛期,粒子运输实验结束时主要聚集于近岸30 m以浅海域,同时粒子释放区外侧部分粒子向东北方向移动,部分滞留在黄海冷水团边缘区域。夏季7、8月是黄海冷水团较为强盛的时期^[45],在黄海冷水团内及其周边的带鱼仔鱼,位于水体下层时会经历高盐低温的环境。同时,黄海南部近岸区域在上升流和潮汐混合的

作用下,具有更高的初级生产力,温盐环境在水体垂直结构上的差异相对较小^[47]。研究水域春、夏季的带鱼仔鱼由于产卵时间、水域与离岸远近的差异,将经历不同的运输过程及海洋环境履历,并对仔鱼生长和存活产生影响,后续有待对其开展进一步研究。

带鱼繁殖期、产卵场及仔鱼扩散模式的变动可能是数十年以来在全球变暖背景下,带鱼资源发生

显著变动的重要驱动机制。未来通过进一步实地调查与模拟实验,深入研究和验证带鱼早期资源的分布和扩散模式,及其对早期补充成功率的影响,对揭示黄海带鱼群体资源动态,加强资源的科学管理与保护,保障渔业持续健康发展尤为重要。

参考文献:

- [1] COWEN R K, SPONAUGLE S. Larval dispersal and marine population connectivity [J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 443-466.
- [2] PECK M A, HUFNAGL M. Can IBMs tell us why most larvae die in the sea? Model sensitivities and scenarios reveal research needs [J]. Journal of Marine Systems, 2012, 93: 77-93.
- [3] HOUDE E D. Subtleties and episodes in the early life of fishes[J]. Journal of Fish Biology, 1989, 35(SA): 29-38.
- [4] SIEGEL D A, MITARAI S, COSTELLO C J, et al. The stochastic nature of larval connectivity among nearshore marine populations [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(26): 8974-8979.
- [5] FOO S A, BYRNE M. Acclimatization and adaptive capacity of marine species in a changing ocean [J]. Advances in Marine Biology, 2016, 74: 69-116.
- [6] HUTCHINGS L, BECKLEY L E, GRIFFITHS M H, et al. Spawning on the edge: spawning grounds and nursery areas around the southern African coastline [J]. Marine and Freshwater Research, 2002, 53(2): 307-318.
- [7] OSPINA-ALVAREZ A, WEIDBERG N, AIKEN C M, et al. Larval transport in the upwelling ecosystem of central Chile: The effects of vertical migration, developmental time and coastal topography on recruitment[J]. Progress in Oceanography, 2018, 168: 82-99.
- [8] TIEDEMANN M, BREHMER P. Larval fish assemblages across an upwelling front: Indication for active and passive retention[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 187: 118-133.
- [9] 于秀娟, 徐乐俊, 吴反修. 2020 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- YU X J, XU L J, WU F X. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020.
- [10] FAO. Fisheries and Aquaculture Topics. Fisheries Statistics and Information, 1981 - 2020 [EB/OL]. https://www.fao.org/fishery/statistics-query/en/capture/capture_quantity
- [11] LI G X, HAN X B, YUE S H, et al. Monthly variations of water masses in the East China Seas [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(16): 1954-1970.
- [12] LIN H C, TSAI C J, WANG H Y. Variation in global distribution, population structures, and demographic history for four *Trichiurus* cutlassfishes [J]. PeerJ, 2021, 9: e12639.
- [13] 周永东, 徐汉祥, 刘子藩, 等. 东海带鱼群体结构变动的研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2002, 21(4): 314-320.
- ZHOU Y D, XU H X, LIU Z F, et al. A study on variation of stock structure of hairtail, *Trichiurus haumela* in the East China Sea [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2002, 21(4): 314-320.
- [14] 宓崇道. 东海带鱼资源状况、群体结构及繁殖特性变化的研究[J]. 中国水产科学, 1997, 4(1): 7-14.
- MI C D. A study on resources, stock structure and variation of reproductive habit of hairtail, *Trichiurus haumela* in East China Sea [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1997, 4(1): 7-14.
- [15] 时政通, 陈琪, 李建超, 等. 基于耳石微结构的渤海带鱼早期生长与环境的关系分析[J]. 中国海洋大学学报, 2023, 53(6): 65-73.
- SHI Z T, CHEN Q, LI J C, et al. Early growth of largehead hairtail (*Trichiurus japonicus*) in relation to environmental variables in Bohai Sea based on otolith microstructure [J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(6): 65-73.
- [16] 张波. 东、黄海带鱼的摄食习性及随发育的变化[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(2): 6-12.
- ZHANG B. Feeding habits and ontogenetic diet shift of hairtail fish (*Trichiurus lepturus*) in East China Sea and Yellow Sea [J]. Marine Fisheries Research, 2004, 25(2): 6-12.
- [17] 沙学绅, 阮洪超, 何桂芬. 带鱼卵子和仔、稚鱼的形态特征[J]. 水产学报, 1981, 5(2): 155-160.
- SHA X S, RUAN H C, HE G F. A description of the morphological characteristics of the eggs and larvae of the hairtails, *Trichiurus Haumela* (forsk.) [J]. Journal of Fisheries of China, 1981, 5(2): 155-160.
- [18] 徐汉祥, 刘子藩, 周永东. 东海带鱼生殖和补充特征的变动[J]. 水产学报, 2003, 27(4): 322-327.
- XU H X, LIU Z F, ZHOU Y D. Variation of *Trichiurus haumela* productivity and recruitment in the East China Sea [J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(4): 322-327.
- [19] SUN P, CHEN Q, FU C H, et al. Latitudinal differences in early growth of largehead hairtail (*Trichiurus japonicus*) in relation to environmental variables [J]. Fisheries Oceanography, 2020, 29(6): 470-483.
- [20] 吴家骅. 浙江近海渔场带鱼的生殖特性[J]. 浙江水产学院学报, 1984, 3(2): 109-120.
- WU J Z. Spawning characters of *Trichiurus Haumela* (forsk.) in off-shore waters of Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1984, 3(2): 109-120.
- [21] 万瑞景, 孙珊. 黄、东海生态系统中鱼卵、仔稚幼鱼种类组成与数量分布[J]. 动物学报, 2006, 52(1): 28-44.
- WAN R J, SUN S. The category composition and abundance of ichthyoplankton in the ecosystem of the

- Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2006, 52(1): 28-44.
- [22] 徐兆礼, 陈佳杰. 东、黄渤海带鱼的洄游路线[J]. *水产学报*, 2015, 39(6): 824-835.
- XU Z L, CHEN J J. Migratory routes of *Trichiurus lepturus* in the East China Sea, Yellow Sea and Bohai Sea [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(6): 824-835.
- [23] 周永东, 金海卫, 张洪亮, 等. 浙江南部沿岸产卵场春、夏季鱼卵、仔稚鱼种类组成与分布[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(3): 590-598.
- ZHOU Y D, JIN H W, ZHANG H L, et al. Species composition and abundance distributions of ichthyoplankton along the south coast of Zhejiang Province in spring and summer [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(3): 590-598.
- [24] 姜言伟. 海州湾经济鱼类产卵场鱼卵的数量分布[R]. *海洋水产研究*, 1964, 18: 100-111.
- JIANG Y W. Quantitative distribution of eggs in economic fish spawning grounds in Haizhou Bay [R]. *Marine Fisheries Research*, 1964, 18: 100-111.
- [25] PIRES R F T, PELIZ Á, PAN M, et al. “There and back again” – How decapod megalopae find the way home: A modelling exercise for *Pachygrapsus marmoratus* [J]. *Progress in Oceanography*, 2020, 184: 102331.
- [26] HUANG S, DENG Z G, TANG G Q, et al. Numerical study on blue mackerel larval transport in East China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2021, 217: 103515.
- [27] 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.
- [28] HORIKI N. Vertical distribution of fish eggs and larvae in the Kii Channel[J]. *Aquiculture (Japan)*, 1981, 29: 117-124.
- [29] UEHARA D, SHOJI J, OCHI Y, et al. Diel changes in the vertical distribution of larval cutlassfish *Trichiurus japonicus* [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2019, 99(2): 517-523.
- [30] 熊文清. 黄海南部夏季几种鱼类产卵时刻与水层的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2023.
- XIONG W Q. Study on natural mortality of fish eggs in the southern Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2023.
- [31] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [32] MENEMENLIS D, CAMPIN J M, HEIMBACH P, et al. ECCO2: High resolution global ocean and sea ice data synthesis [C]//Mercator Ocean Quarterly Newsletter. American Geophysical Union, 2008.
- [33] PADMAN L, EROFEEVA S. Tide model driver (TMD) manual[R]. *Earth and Space Research*, 2005.
- [34] CHOI J G, JO Y H, MOON I J, et al. Physical forces determine the annual bloom intensity of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* off the coast of Korea [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2018, 24: 55-65.
- [35] WILLIS J. Modelling swimming aquatic animals in hydrodynamic models [J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(23/24): 3869-3887.
- [36] TAKEMURA A, RAHMAN M S, PARK Y J. External and internal controls of lunar-related reproductive rhythms in fishes[J]. *Journal of Fish Biology*, 2010, 76(1): 7-26.
- [37] ZHANG W C, YU H Q, YE Z J, et al. Spawning strategy of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the coastal Yellow Sea: Choice and dynamics [J]. *Fisheries Oceanography*, 2021, 30(4): 366-381.
- [38] 刘舜效, 吴敬南, 韩光祖, 等. 黄渤海区渔业资源调查与区划[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 201-203.
- LIU X S, WU J N, HAN G Z, et al. Investigation and regionalization of fisheries resource of the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1990: 201-203.
- [39] 金显仕, 赵宪勇, 孟田湘, 等. 黄、渤海生物资源与栖息环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 299-302.
- JIN X S, ZHAO X Y, MENG T X, et al. Biological resource and habitation environment of the Bohai and Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 2005: 299-302.
- [40] WANG F, LI X G, TANG X H, et al. The seas around China in a warming climate [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(8): 535-551.
- [41] JIN Y, GAO X D, YAN L P, et al. Integrating fish nursery ground conservation with sustainable resource use: The case of *Trichiurus japonicus* in the East China Sea [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2024, 34(1): e4060.
- [42] MASSEL S R. Hydrodynamics of coastal zones [M]. Amsterdam: Elsevier, 1989: 249-299.
- [43] LÜ X G, QIAO F L, XIA C S, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(6): 620-632.
- [44] WANG J J, YU Z G, WEI Q S, et al. Intra- and inter-seasonal variations in the hydrological characteristics and nutrient conditions in the southwestern Yellow Sea during spring to summer [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111139.
- [45] 魏传杰. 南黄海水文环境季节变化与湍流混合研究[D]. 青岛: 中国科学院大学, 2018.
- WEI C J. Seasonal variability of hydrological properties and turbulent mixing in Southern Yellow Sea [D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.

- [46] XING Q W, YU H Q, WANG H, et al. An improved algorithm for detecting mesoscale ocean fronts from satellite observations: Detailed mapping of persistent fronts around the China Seas and their long-term trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 294: 113627.
- [47] WEI Q S, YU Z G, WANG B D, et al. Coupling of the spatial - temporal distributions of nutrients and physical conditions in the southern Yellow Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 156: 30-45.

Study on the distribution of eggs and larval transport of largehead hairtail, *Trichiurus japonicus* in the coastal southern Yellow Sea

JIANG Huidong, YE Zhenjiang, LI Jianchao, ZHANG Wenchao, LI Yu, ZHANG Yixiao, ZHANG Xingui
(Deep Sea and Polar Fisheries Research Center, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China)

Abstract: This study determined the particle release area based on the abundance data of largehead hairtail eggs obtained from the ichthyoplankton surveys in the coastal waters of the southern Yellow Sea (119°E–124°E, 33°N–37°N) conducted from 2018 to 2022. Subsequently, the Finite-volume Coastal Ocean Model (FVCOM) coupled with the Lagrangian particle tracking algorithm was employed to simulate the transport process of largehead hairtail larvae. The primary objectives were to investigate the spawning periods, spawning grounds, and nursery habitats of largehead hairtail in the southern Yellow Sea, and to assess the influence of oceanic conditions on the egg distribution and larval dispersion. The results indicated that largehead hairtail spawned in spring and summer in the southern Yellow Sea with the eggs appeared in May, July and August, and August was the peak spawning month. Largehead hairtail eggs were mainly distributed in 19–30 m waters in May, and 11–70 m waters in August. The sea surface temperature and sea bottom temperature for the presence of largehead hairtail eggs was 13.9–29.7 and 8.4–28.3 °C respectively. The Random Forest model analysis revealed that water temperature and depth were the main environmental factors affecting the abundance of largehead hairtail eggs. Particle tracking simulation experiments showed that the particles released in May mainly spread towards the northwest coastal area of the particle release area after 1–15 days (when the swim bladder has not formed and the larvae have no vertical migration behavior), and after 16–40 days (when the swim bladder has formed and the larvae have vertical migration behavior), the particles left the coastal area and spread eastward to the waters near a 50 m water depth. In July and August, before the occurrence of vertical migration behavior, larvae stayed in the near-bottom layer and most of them were transported from the release area to the nearshore waters; After that, larvae moved slightly from the near-shore aggregation area to the off-shore direction. Some of the individuals released in the offshore deep-water areas spread to the north and northeast in a short-distance, and the dispersal pattern did not change significantly in their whole larval stages. Aggregation areas of largehead hairtail larvae derived from field surveys in August were consistent with the results of particle transport simulation experiments. We thought that the season and spatial location of spawning, the diel vertical migration characteristics of larval fish, and the regional upwelling and frontal structure were the dominant factors that shape the transport pattern of largehead hairtail larvae. The results of the study provide a scientific basis for understanding the habitat selection mechanism of egg and larvae stages and early replenishment dynamics of this fish in the southern Yellow Sea, and help for the management and protection of largehead hairtail resources.

Key words: Southern Yellow Sea; *Trichiurus japonicus*; eggs distribution; larval transport; particle-tracking