

文章编号: 1674-5566(2024)04-0960-14

DOI: 10.12024/jsou.20240404484

黑潮-亲潮交汇区柔鱼渔场温盐垂直结构反演实验

傅利福, 胡婉盈, 张春玲, 崔满满

(上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

摘要: 为弥补渔场区次表层实时环境数据的不足, 实验基于 Argo 剖面观测资料, 采用梯度依赖最优插值方法, 通过点对点的方式, 反演了黑潮-亲潮交汇区柔鱼渔场点上温盐垂直结构, 并利用理论检验、与实测数据对比等方法验证了反演结果的可靠性。结果显示, 反演剖面相对于 Argo 原始观测数据, 最大温度均方根误差 $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最大盐度均方根误差 ≤ 0.4 ; 而与其“淞航”号现场观测的温度、盐度绝对偏差分别小于 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 0.27 。同时, 通过反演剖面分析了渔场区的温盐垂直结构及其与柔鱼单位捕捞努力量渔获量 (Catch per unit effort, CPUE) 的关系, 结果表明, 2018年8月和10月柔鱼在5 m水层的适宜温度分别为 16 和 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 m水层降低至 $9\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 各水层的温度与CPUE的统计关系均符合一定曲率下的指数函数分布, 且渔获点存在明显跃层, 跃层强度变化越大, CPUE随机性也越大, 渔获点跃层强度在 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 左右时CPUE相对稳定。而无论是哪个月份, 较大CPUE都位于相对低盐区, 即柔鱼偏向于在低盐海域活动。本研究可为构建长时间序列、准实时的渔场环境数据提供新思路, 进而为深入研究渔场变迁动力机制提供必要的支撑。

关键词: 柔鱼; 垂直结构; Argo剖面; 梯度依赖最优插值; 黑潮-亲潮交汇区

中图分类号: P 745

文献标志码: A

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 为当今世界海洋中最具开发潜力的头足类种类之一^[1], 其属于大洋暖水性物种, 广泛分布于亚热带和温带海域。西北太平洋海域的亲潮寒流和黑潮暖流两大流系交汇形成渔场, 中国鱿钓船在该海域的柔鱼产量占据了北太平洋柔鱼总产量的80%以上^[2], 该海域柔鱼渔业已成为我国远洋渔业的重要组成部分。

柔鱼生命周期短 (约为1年), 并具有季节性南北洄游和昼夜垂直洄游的习性, 对生存环境的变化极为敏感^[3]。黑潮暖流和亲潮寒流在 $35^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 间交互作用形成锋面和涡流, 这为柔鱼创造了良好的生存环境, 是全球大洋中渔业产量最高的水域之一^[4-5]。温盐垂直结构、温跃层、叶绿素质量浓度等环境要素的影响几乎贯穿柔鱼整个生命周期^[6-7]。海洋环境因子成为驱动柔鱼群体空间活动和分布的重要外在因素, 在众多环境因子中, 温度的影响最为显著^[8], 被认为是寻找和开

发柔鱼渔场最适宜的指示因子^[9]。研究^[10-11]表明, 在黑潮-亲潮交汇区的渔场区, 柔鱼最适宜的海表温度: 8月为 $18\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, 9月为 $15\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10月为 $13\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$; 100 m、200 m、300 m水深处的适宜温度则分别为 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $9\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $8\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 柔鱼渔场重心一般在表层等温线密集处, 或者冷暖水团汇合处和有温跃层的海域^[12]。盐度也是寻找柔鱼渔场的潜在指标因子, 但是单纯利用盐度确定中心渔场存在困难, 需要结合其他环境因子综合考量才能有效判断渔场位置, 通常认为, 柔鱼的渔场常分布在表层低盐锋区, 较大个体的雌性柔鱼常会出现在200 m深处^[13]。此外, 柔鱼渔场的形成与叶绿素质量浓度的大小有密切联系, 有研究^[6]指出, 柔鱼渔场主要分布在叶绿素质量浓度为 $0.1\sim 0.6\text{ mg}/\text{m}^3$ 的海域内。

研究^[14-16]表明, 柔鱼活动与次表层海洋环境有着密不可分的关系。然而, 受限于长时间序

收稿日期: 2024-04-08

修回日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42106090); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估(公海渔业资源综合科学调查)项目(D-8025-23-1002)

作者简介: 傅利福(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为物理海洋学。E-mail: 2729928093@qq.com

通信作者: 张春玲, E-mail: clzhang@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>

列、高时空分辨率的实时观测剖面的缺失,目前的研究^[14-16]多采用月平均和网格平均的方式进行环境数据与生产数据的匹配分析,针对渔获点上长时间序列的环境因子垂直结构的实时变化分析尚不够系统。而 Argo 剖面浮标观测作为全球海洋观测系统的重要组成部分,可以监测从表面到约 2 000 m 的上层海洋的变化^[17],且核心 Argo 剖面(温度和盐度)观测数量正在以每天数百条的速度增长,这一海量数据为构建渔场区的实时温盐垂直结构提供了可能。同时,最优插值作为一种客观分析方法,不但可以进行点到面的温盐场的构建,根据其基本原理^[18],也可以实现点对点的温盐剖面构建。ZHANG 等^[19]提出的梯度依赖最优插值(Gradient-dependent optimal interpolation)方法(简称梯度依赖 OI),能够根据环境要素的水平梯度变化,自动调整目标位置的相关尺度,从而能够利用周边实时观测数据反演目标位置垂直结构的同时,有效保留观测资料中的中小尺度信息。

因此,本文基于 Argo 观测剖面数据,借助梯度依赖 OI 方法,以黑潮-亲潮交汇区 2018 年 8 月和 10 月的柔鱼渔获点为例,通过点对点的方式构建与柔鱼渔场时空匹配的温、盐垂直结构,并通过理论误差检验,与“淞航号”西北太航次实测数据对比,验证该方法在该海域的适用性,进而初步分析黑潮-亲潮交汇区渔场温盐实时变化,及其与柔鱼渔获量的响应关系,旨在为深入研究渔场变迁,为建立更精确的渔场预报模型提供必不可少的数据支撑和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 数据介绍

本文采用的数据主要包括黑潮-亲潮交汇区的柔鱼生产数据、航次调查数据、Argo 剖面浮标观测资料以及气候态数据等。其中,柔鱼生产数据由上海海洋大学中国远洋渔业数据中心提供,原始数据的时间覆盖范围为 2009—2018 年的 7—11 月,空间覆盖范围为 30°N~55°N、145°E~165°E 海域的传统作业渔场区。考虑到 Argo 剖面数量(逐年增长),文中选取了 2018 年 8 月和 10 月,集中在黑潮-亲潮交汇区(35°N~50°N、145°E~165°E)的柔鱼捕捞数据,站点点数分别为 1 186 和 927(图 1a)。该数据中包括渔船名、捕捞日期

(年、月、日)、捕捞位置(经度和纬度)及单位捕捞努力量渔获量(Catch Per unit effort, CpuE, t/d)等信息。

用于方法验证的航次调查数据为 2022 年 6 月 8 日至 8 月 9 日“淞航”号在西北太平洋海域进行渔业资源与海洋环境调查期间获取的柔鱼鱿钓数据,以及渔获点上由船载 SBE911 CTD 观测得到且经统一质量控制^[20]的温度、盐度实时观测数据。其中,鱿钓作业站点共计 11 个,作业时间为 2022 年 7 月 5 日至 7 月 22 日,有渔获物的站点有 9 个(图 1 中 R1~R9)。以下利用 Argo 观测剖面反演 9 个鱿钓点对应的温、盐度垂直结构,进而与 CTD 实测的剖面数据进行对比验证。

Argo 剖面数据来源于杭州全球海洋 Argo 系统野外科学观测研究站(<ftp://ftp.argo.org.cn/pub/ARGO/global/>),时间分辨率为天,这里选用了与渔业生产数据、柔鱼鱿钓数据同期的 5~2 000 m 深度范围的温度和盐度观测剖面资料,这些观测剖面已经经过实时和延时质量控制^[21],我们进一步进行单调性、密度逆转检验后,统一插值到标准层。研究海域及 3 种数据的站位分布如图 1 所示。用于计算温盐梯度算子的气候态数据采用 WOA18 网格数据集(<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa18/>),本文截取黑潮-亲潮交汇区 7 月、8 月和 10 月、空间分辨率为 0.25°的温、盐气候态数据,计算得到渔获点上温盐水平梯度变化参数。

1.2 构建方法

本文采用的梯度依赖 OI 方法,原型为一种数据同化方案,其基于一种各向异性梯度依赖相关尺度模型,自动调整有效半径内观测数据的背景误差协方差,以赋予可用观测的最优权重^[19]。该方法经过多次改进^[22-24],目前已成为一种成熟有效的客观分析方法,且成功应用到渔业海洋学研究中^[19]。这里,通过计算渔场区温度和盐度的水平梯度,点对点构建渔获点上的温度和盐度垂直结构。即,若第 i 个柔鱼捕捞点的有效半径 R 内有 M 个 Argo 观测(y_j^o),其环境要素的分析值(ν_i^a),由背景场(ν_i^b)与以最优权重(w_{ij})进行加权平均的 M 个观测增量 $\delta y_j^o = y_j^o - H(\nu_j^b)$ 叠加而成,最优权重(w_{ij})可以通过公式(1)和(2)线性方程组来确定^[18-19]:

$$v_i^a = v_i^b + \sum_j^M w_{ij} \delta y_j^o \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^M w_{ij} \mu_{jk} + \eta_k w_{jk} = \mu_{ik}, k = 1, \dots, M \quad (2)$$

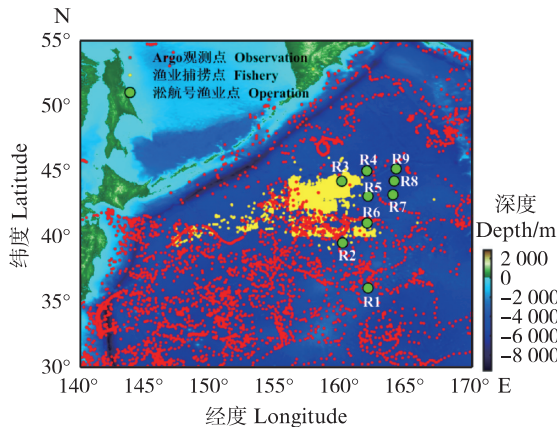
有效半径 R 设为 50 km, 以确保大部分渔获点周围可用的观测剖面数在 3 条以上(图 1b); H 为双线性插值算子; 下标 i 为渔获点的个数; j/k 为第 i 个渔获点周围可利用的第 j/k 个 Argo 观测; η_k 为观测值相对于背景场的误差平方, 通常设为常数, 太平洋海域最优取值为 0.25^[22]。确定最优权重 (w_{ij}) 的核心, 是计算两个 Argo 观测点、渔业捕

捞点与 Argo 观测点之间背景误差的相关系数 (μ_{jk}, μ_{ik}), 其满足高斯指数函数分布^[19, 25]:

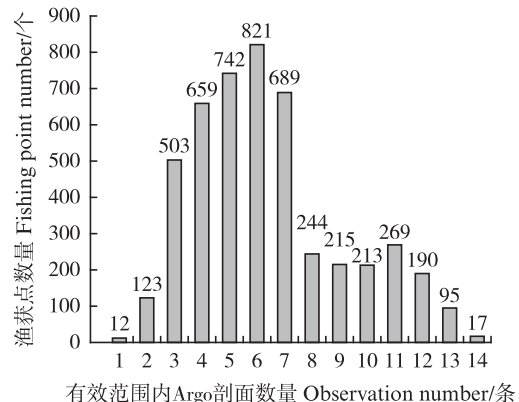
$$\mu_{ik} = \exp \left[- \frac{(x_i - x_k)^2}{(L_\phi / G_x)^2} - \frac{(y_i - y_k)^2}{(L_\phi / G_y)^2} \right] \quad (3)$$

$$G_x = 1 + \frac{|\partial v / \partial x|}{E(|\partial v / \partial x|)}, G_y = 1 + \frac{|\partial v / \partial y|}{E(|\partial v / \partial y|)} \quad (4)$$

式中: x 和 y 分别为经度和纬度; G_x 和 G_y 分别为由 WOA18 气候态数据计算得到梯度依赖相关尺度的经向分量和纬向分量; L_ϕ 为相关尺度常数与渔业捕捞点 i 对应纬度 ϕ 的余弦函数的乘积。



(a) 数据站位 Distribution of data stations



(b) 有效半径内不同 Argo 剖面数量的渔获点数量统计 Statistics of fishing point within effective radius

图 1 数据站位分布及有效半径内不同 Argo 剖面数量的渔获点数量统计

Fig. 1 Distribution of data stations and statistics of fishing point number within effective radius

2 结果

2.1 构建结果验证

图 2 展示了基于梯度依赖 OI 方法构建的 2018 年 8 月和 10 月, 2 113 条温、盐剖面的均方根误差。同时, 构建了 2022 年 7 月西北太平洋 9 个柔鱼渔业捕捞点上的温度和盐度剖面, 每个剖面取垂向 (5~300 m) 不等间隔的 28 个水层, 然后与“崧航”号 CTD 现场观测剖面进行对比, 以验证该方法的可行性。图 3 给出了 9 条温度和盐度剖面的绝对误差。

由图 2 可见, 温度的均方根误差基本在 0.5~1.0 °C 之间, 且随着深度的增大先增大后急剧减小, 在 70 m 水深出现温度均方根误差最大值为 0.959 4 °C, 100 m 以下急剧下降, 至 300 m 深度处, 温度均方根误差减小到 0.532 2 °C。盐度均方根误差处于 0.07~0.40 之间, 随深度的增加整体呈下降

趋势, 且变化幅度较小。由图 2 可知, 温度、盐度垂直结构上的均方根误差分布趋势与实际 0~300 m 的温度、盐度随深度的变化趋势基本一致, 在跃层区温度变化剧烈的深度内, 相应的均方根误差也随之增大, 而近表层盐度受混合、降水及蒸发等影响, 盐度误差也相对较大。

构建结果与实测数据温度和盐度的绝对误差分别为 0~0.25 °C 和 0.05~0.27 (图 3)。与下层相比, 100 m 以浅的温度、盐度绝对误差随深度的变化相对更明显, 100 m 以浅, 随着深度的增加, 温度、盐度绝对误差均呈现先减小后增加、再减小又增加的双峰结构, 每个剖面的绝对误差均在 100 m 附近达到最大值; 100 m 以深, 温度、盐度绝对误差大多随着深度的增加逐渐减小, 但相对上层, 误差垂向变化不大。值得注意的是, 9 条观测剖面与构建结果的绝对误差相互之间稍有差异, 位于 35°N~40°N、160°E~165°E 海域的 R1、R2、R3

站点上,两种温度结果之间的差异较小,R4、R5、R6次之,R7、R8、R9这三个站点的绝对误差相对最大,这与站点周围可利用的Argo剖面数量直接相关。

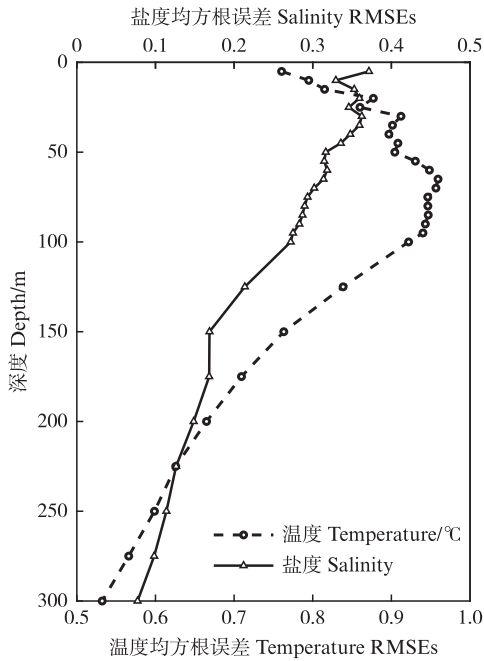


图2 构建结果与实测数据的温盐均方根误差
Fig. 2 Root mean square error of temperature and salinity between the analysis and the observation

图4和图5清晰地展现了5~300 m深度内,重构后的温度、盐度剖面(黑色实线)与CTD观测(黑色虚线)的对应分布。显然,无论温度还是盐度,两者的整体变化趋势基本吻合,温度最大偏差在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 内,盐度最大偏差不超过 ± 0.1 。除此之外,现场观测的剖面,垂向有不同程度的波动,而利用梯度依赖OI构建的剖面相对较为平滑。

对于温度(图4),除了R1和R7,其他7个站点点,两种剖面在5~100 m以浅更为接近,R1站点在100 m左右的深度上,两者差别稍大,R7自100 m以深,两者的变化趋势极为相似,这些差异或许和仪器的测量误差、局地的水体变化以及Argo剖面数量等有关。除此之外,重构以及观测的温度剖面在100 m以浅都存在明显的温跃层,但在100 m以深温度误差变大且大部分点上重构后的剖面温度都大于观测,这或许与客观分析方法有关。而对于盐度(图5),9个剖面上均有类似的分布特征:在100~200 m深度范围内,两者差异稍大,近表层和200 m以深两者几乎重合;且在100~200 m,观测剖面波动较大,重构剖面相对更加平滑。结合图3可知,在观测较为稀疏的站点上(如R7~R9),理论误差稍大,但重构结果受观测数据质量影响更明显,实际误差可能更小。

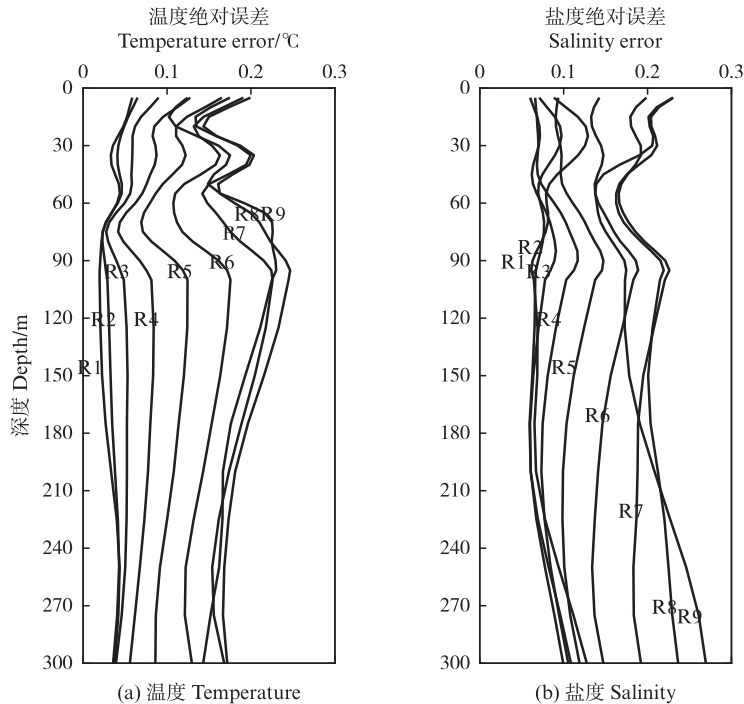


图3 鱿钓点上温(a)、盐(b)度绝对误差
Fig. 3 Absolute error of temperature (a) and salinity (b) on the squid fishing point

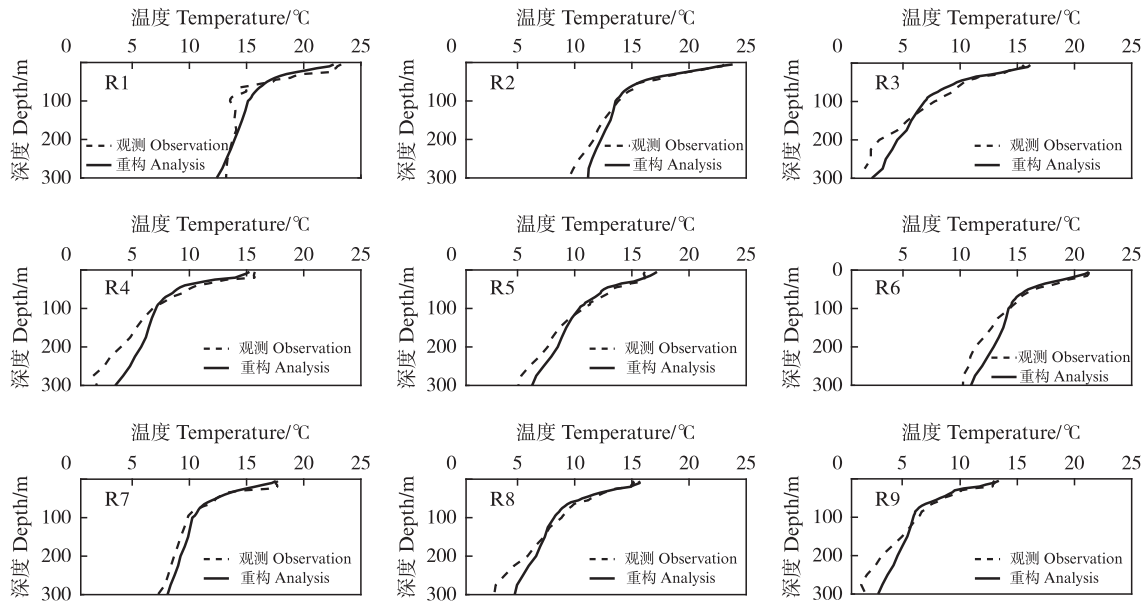


图4 构建结果与实测数据的温度剖面对比

Fig. 4 Comparison of the temperature profiles between the analysis and the observation

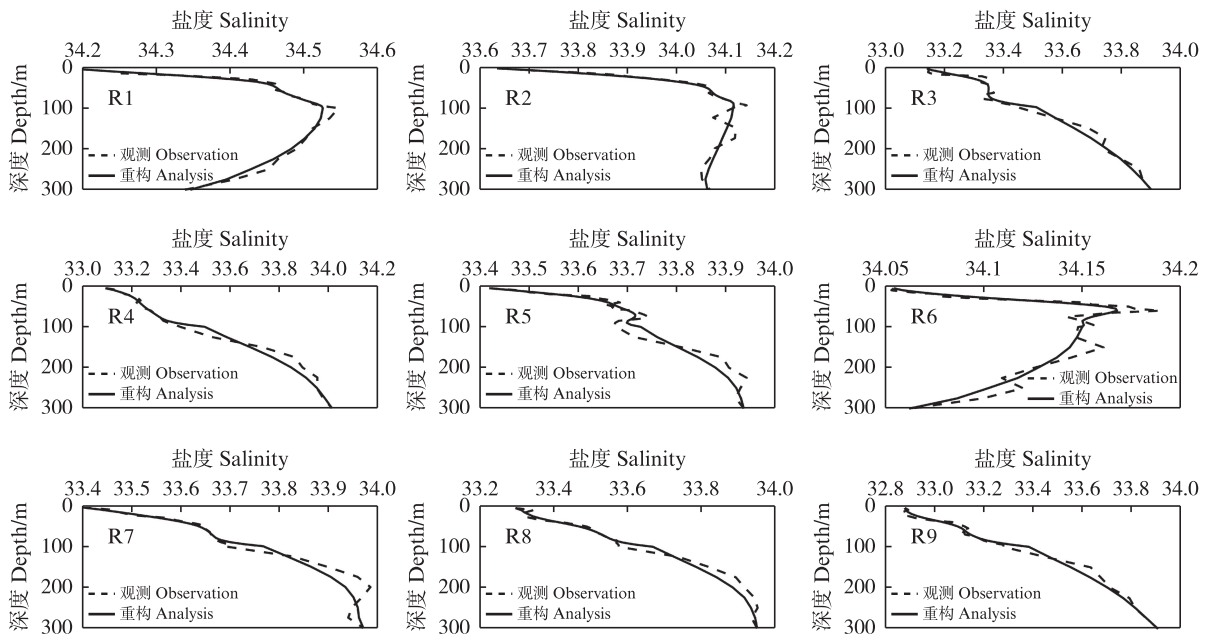


图5 构建结果与实测数据的盐度剖面对比

Fig. 5 Comparison of the salinity profiles between the analysis and the observation

2.2 渔场区的温盐垂直结构

将重构的2018年8月和10月温度、盐度剖面在渔场区(40°N~44°N, 154°E~161°E)进行1°×1°网格内的空间平均,同时将柔鱼CPUE分为(0, 2)、[2,4)、[4,6)和≥6 t/d等4个量级,在1°×1°网格内空间平均后与不同水层的温度进行时空匹配。图6为8月和10月不同水层的温度与CPUE的对应分布。

8月黑潮-亲潮交汇区的CPUE普遍较高(>4 t/

d),整个渔场区5 m水层的温度基本为14~20 °C,高CPUE点对应近表层温度约为16 °C;随着深度的增加,渔场温度逐渐降低,至50 m层,多数CPUE点的温度为10~12 °C,渔场西南部,黑潮流经区域的温度仍可达16 °C;100 m层,渔场温度整体降低至8 °C以下,100~150 m水层间,温度变化并不明显(图6a)。10月的CPUE普遍小于4 t/d,且渔场位置北移至160°E~161°E、42°N~44°N海域(图6b)。该月份表层混合增强,跃层深度下沉,5 m层水温基本为

13.5~16 °C,渔获点约为 14 °C,50 m层水温约为 9~12 °C(渔获点约为 9 °C),比 8 月稍高,且高温区范围

(>12 °C)也比 8 月大。与 8 月类似,100 m 以深的温度水平和垂向分布都相对均匀,基本为 6~7 °C。

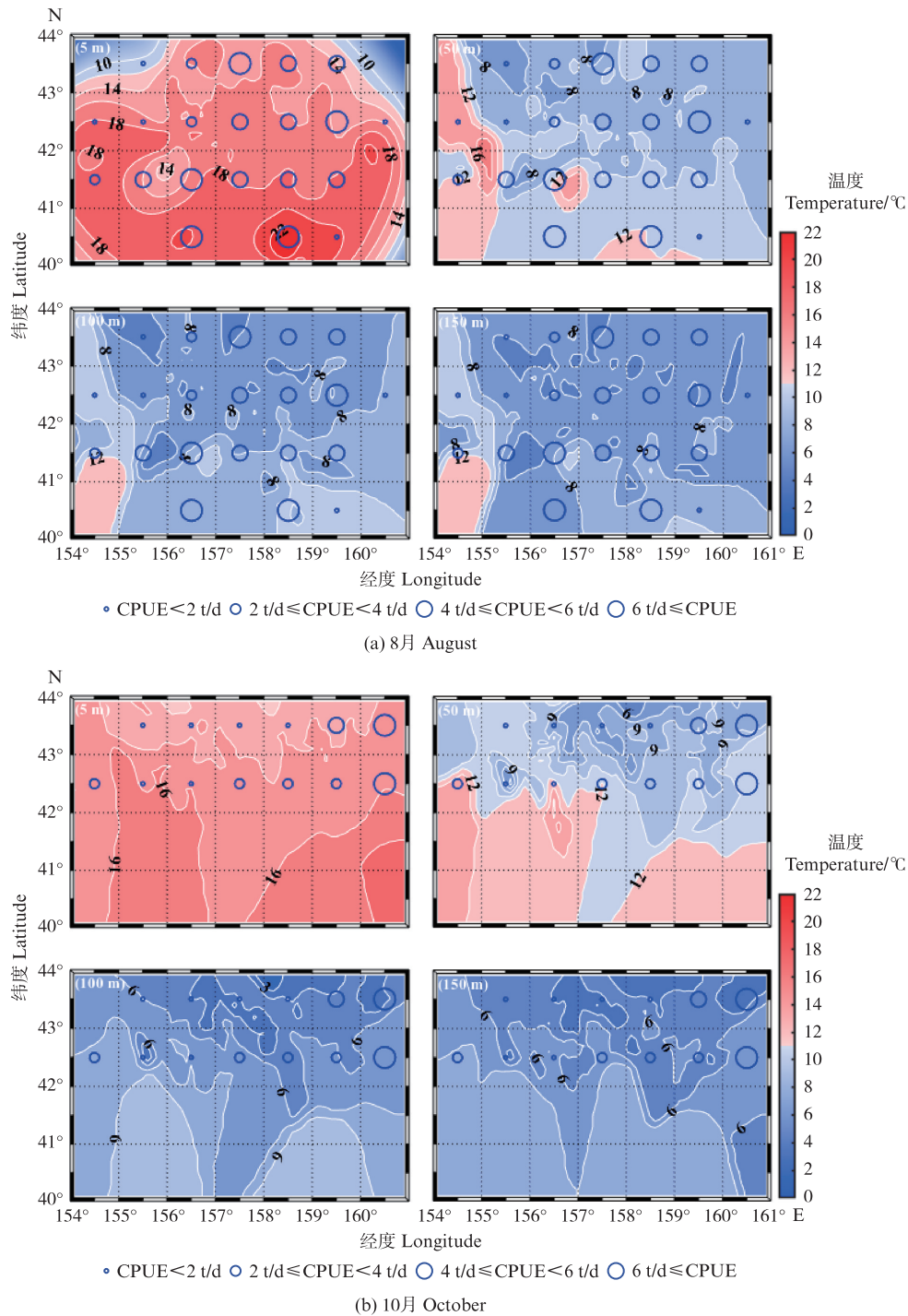


图 6 柔鱼平均 CPUE 与各水层温度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of mean CPUE and water temperature of squid at the depth of 5 m, 50 m, 100 m and 150 m

5~150 m 深度内,盐度随深度的增加大致呈逐渐增加的趋势(图 7)。近表层盐度较低,约为 33.0~33.4,多数高 CPUE 点对应的 5 m 水层盐度值约为 33.1,8 月和 10 月差别不大。50~100 m,渔场盐度

仍保持南高北低的分布特征,盐度值逐渐升高到 33.4~34.0 和 33.7~34.2,渔获点对应的盐度分别为 33.7 和 34.0。而至 150 m 水层,整个渔场区盐度相对均匀,渔获点对应的盐度值均约为 34.0。

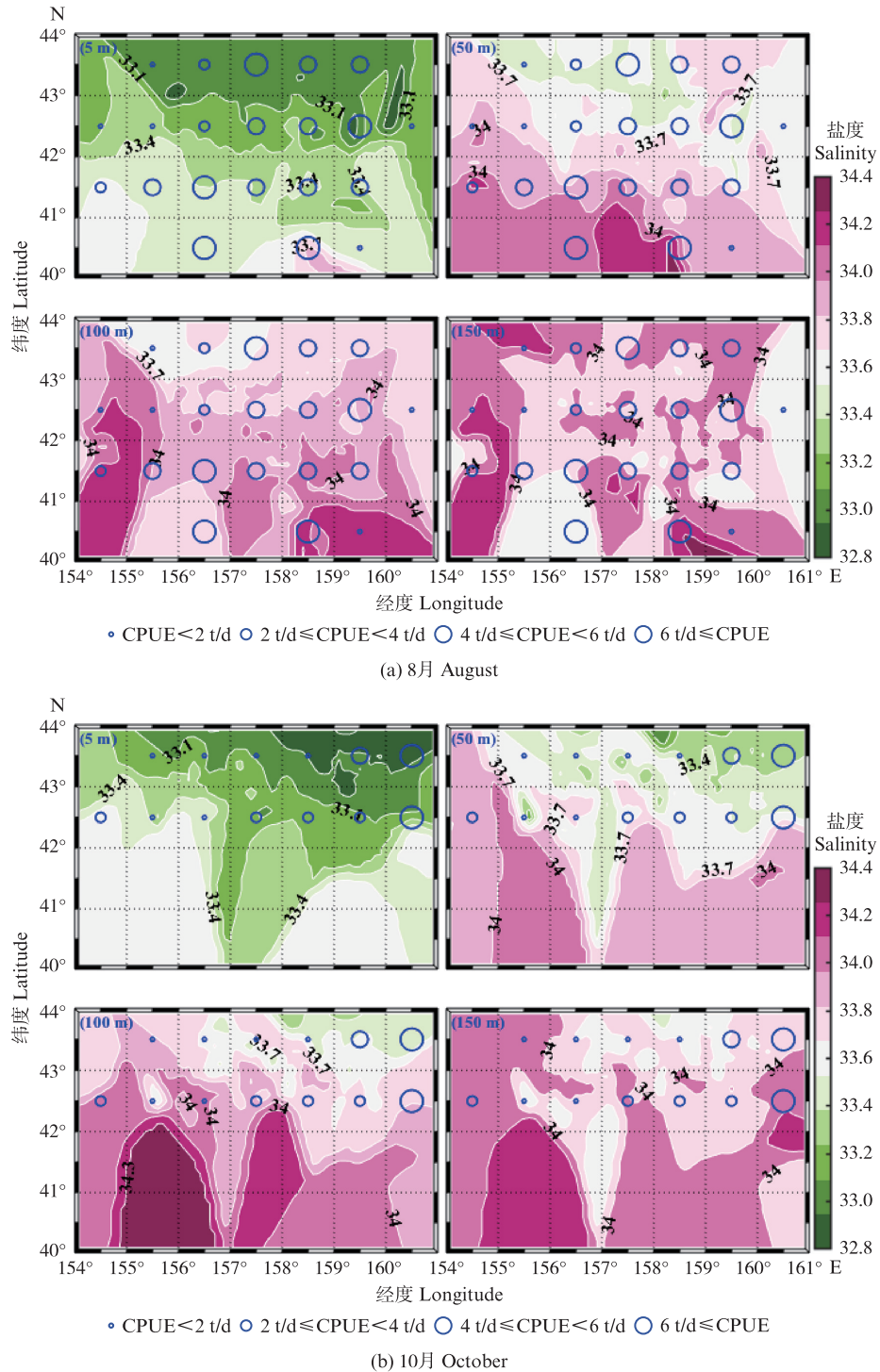


图7 柔鱼平均CPUE与各水层盐度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of mean CPUE and water salinity of squid at the depth of 5 m, 50 m, 100 m and 150 m

图8和图9呈现了两个月份不同CPUE对应的温度和盐度垂向断面分布。显然,渔场区上混合层(8月约为20 m以浅,10月约为40 m以浅)的温度分别在16和14 °C左右;混合层以下,温度存在明显的温度梯度,8月的温跃层位置大致与15 °C等温线重合,而10月大致与12 °C等温线重

合;跃层以下,温度随深度逐渐降低,温度梯度也显著变小,100 m以下,8月渔场温度为6~10 °C,而10月为4~8 °C。当CPUE小于2 t/d时,温度等值线上下波动明显,随着CPUE的增加,各个水层的温度变化均趋于平稳,当CPUE大于4 t/d时,温度等值线逐渐平滑。即,渔场区温度的垂直结构

越稳定,CPUE越大。并且,值得注意的是,在跃层现象比较显著的8月,高渔获点的温跃层厚度

也相对较大。

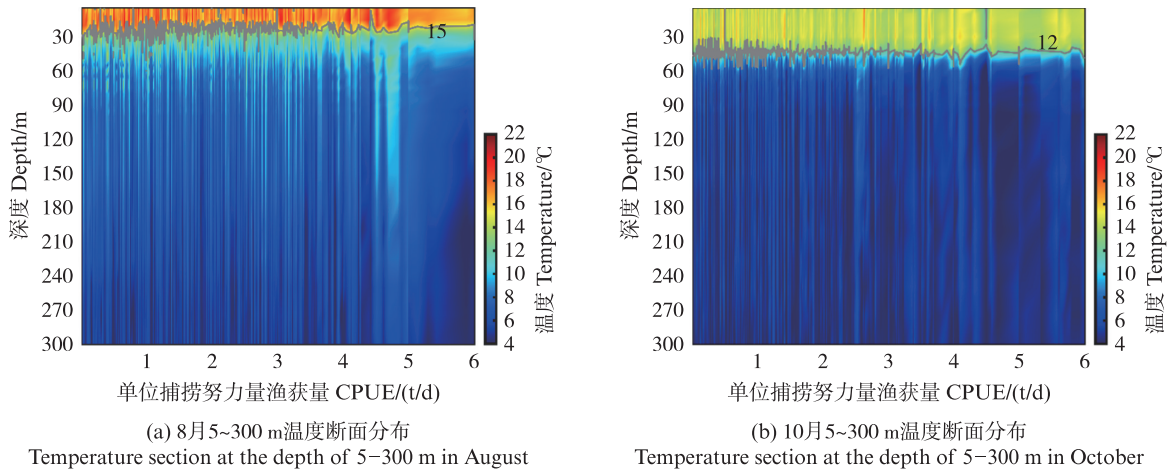


图8 不同CPUE对应的温度垂向断面
Fig. 8 Temperature section at each CPUE

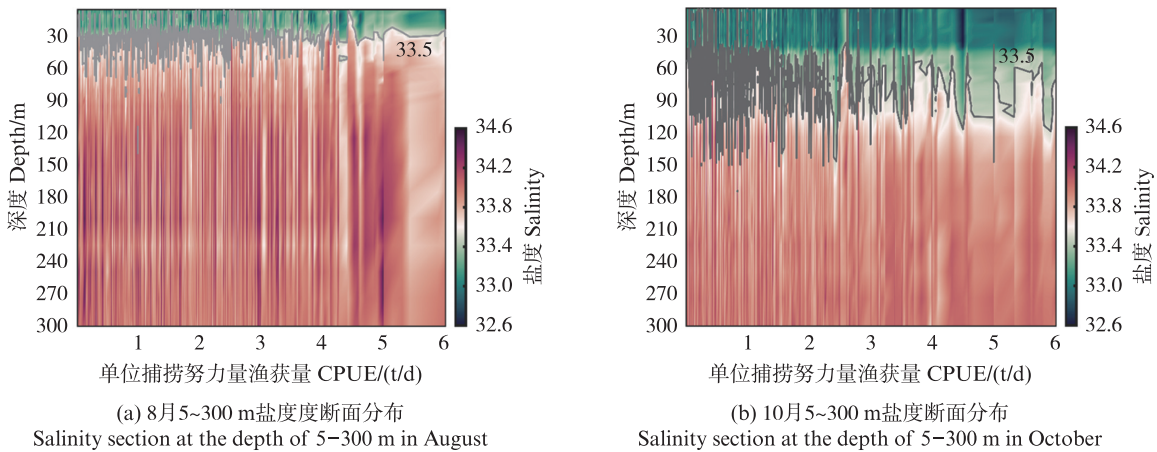


图9 不同CPUE对应的盐度垂向断面
Fig. 9 Salinity section at each CPUE

渔场区300 m以浅的盐度随深度大体呈逐渐升高的变化趋势,垂向结构也呈明显的层化特征:上混合层的盐度相对均匀,8月20 m以浅盐度约为33.2,10月40 m以浅盐度约为33.0;在80 m深度附近也存在盐度跃层,最大盐度梯度可达0.02 每米;盐跃层(8月约为60 m,10月约为100 m)以下,盐度分别逐渐增大至33.8~34.6和33.6~34.2。两个月份相比,10月各个水层的盐度都相对较低。从CPUE来看,与温度类似,渔场盐度的随机性越大,CPUE就越小,盐度越趋于稳定,CPUE就越大。

5.213 °C~17.056 °C和4.492 °C~14.488 °C,温度大致随深度的增加逐渐降低。8月,20 m以浅渔场区的温度均大于16 °C,至50 m处降至10 °C以下,20~40 m水层的温度梯度约为0.262 °C/m。而10月,40 m以浅渔场区的温度均大于14 °C,40~70 m水层的温度梯度约为0.239 °C/m。渔场区盐度变化较小,300 m以浅的最大盐度约为34.0,最小盐度为33.0,总体盐度变化不超过1.0。盐度随深度的增加大致呈递增趋势,近表层由于混合、降水等影响,盐度较低,8月的5~30 m,10月的5~50 m,平均盐度基本稳定在33.2和33.0左右,100 m以深,两个月份的平均盐度均高于33.5,但垂向盐度梯度不大。

表1为定量统计得到的捕捞点(用以代表渔场分布)上各个水层的平均温度和盐度。由表可见,渔场区300 m以浅,8月和10月的温度分别为

表1 不同深度的平均温度和盐度统计
Tab. 1 Statistic of mean temperature and salinity at each depth

深度 Depth/m	温度 Temperature/°C		盐度 Salinity	
	8月 August	10月 October	8月 August	10月 October
	5	17.056	14.488	33.217
10	17.342	14.550	33.239	33.033
15	17.182	14.682	33.219	33.026
20	16.126	14.686	33.284	33.053
25	14.367	14.688	33.420	33.044
30	12.533	14.648	33.515	33.047
35	11.671	14.005	33.614	33.054
40	10.888	13.278	33.670	33.117
45	10.274	11.310	33.695	33.347
50	9.723	9.183	33.710	33.448
55	9.214	8.270	33.741	33.458
60	8.915	6.932	33.781	33.514
65	8.520	6.546	33.802	33.520
70	8.404	6.121	33.820	33.532
75	8.330	5.916	33.840	33.575
80	7.992	5.735	33.863	33.605
85	7.855	5.601	33.883	33.619
90	7.739	5.517	33.901	33.618
95	7.679	5.350	33.927	33.637
100	7.520	5.219	33.928	33.637
125	7.299	5.111	33.991	33.834
150	7.046	5.173	33.994	33.870
175	6.670	4.866	33.997	33.889
200	6.225	4.835	34.036	33.916
225	6.017	4.859	33.932	33.959
250	5.559	4.826	34.011	33.954
275	5.323	4.633	34.003	33.984
300	5.213	4.492	33.986	33.974

3 讨论

3.1 CPUE与温度垂直结构的关系

分别将8月和10月的5、50、100、150 m水深对应的温度数据和CPUE进行e指数函数拟合,探讨两者之间的相关性,拟合函数通式为

$$y = ae^{bt} + c \quad (5)$$

式中: y 为单位捕捞努力量渔获量(CPUE), t/d ; t 为温度, $^{\circ}C$; c 为常数项。不同温度数组和CPUE的相关性拟合对应的 a 、 b 、 c 数值整理如表2所示。

图10给出了2个月份,不同水层CPUE与对应温度的散点分布及拟合函数曲线。

无论是8月还是10月,CPUE与温度都存在一定的正相关,即随着温度的增加,CPUE会在一定程度上有所增加,且增长趋势均满足某种指数函数。4个水层相比,50 m水层的拟合函数曲率最大,CPUE与温度的指数相关性也最稳定,而5 m水层的拟合函数曲率最小,其更接近线性关系;两个月份相比,50、100和150 m水层8月的CPUE对温度的变化更敏感,即温度变化量相同,8月变化的CPUE相对10月更多,5 m水层则与之相反。

3.2 CPUE与温跃层参数的关系

温跃层是垂向温度梯度较大的温度结构,是海洋水体中一种较特殊的水层。柔鱼对环境变化极其敏感,跃层处的温度波动会使一定层次的水体变得不安定,势必会影响柔鱼的生长、生存。从柔鱼渔场区的平均温度曲线来看(图11),8月和10月均存在显著的跃层现象,跃层区对应的平均温度梯度分别高达 $0.37^{\circ}C/m$ 和 $0.41^{\circ}C/m$,跃层内的温度分别约为 $12.53\sim 16.13^{\circ}C$ 和 $8.27\sim 13.28^{\circ}C$ 。

通过梯度法^[26]计算了温跃层上界深度、温跃层上界温度、温跃层厚度、温跃层强度等主要参数,由图12可知,两个月份,所有跃层参数越稳定,CPUE则越大。8月跃层上界深度随着CPUE的增加先下降后略微上升,最后较大渔获深度处在20 m左右,而10月变化相对8月会小一些,较大渔获上界深度则在40 m左右,这与2.2节的等温线变化趋势基本一致;8月较大CPUE处的温度稳定在 $16^{\circ}C$ 左右,10月则是在 $14^{\circ}C$ 左右,适宜柔鱼生长;跃层厚度随着CPUE的增加,大致呈递减趋势,高CPUE对应的跃层厚度稳定在15 m左右;而跃层强度在低渔获点($<2 t/d$)和高渔获点($>4 t/d$)时,都有较大波动,当CPUE在 $2\sim 4 t/d$ 时,跃层强度相对稳定,约为 $0.4^{\circ}C/m$ 。即温度垂向变化过大时,CPUE随机性较高。总而言之,温跃层在渔场形成过程中起着重要的作用,温跃层的季节变化也会影响柔鱼渔场的变迁,因此,渔场预测时需要注重温跃层的时空变化。

表2 不同水层温度和 CPUE 的 e 指数函数拟合参数表
Tab. 2 E-exponential function fitting table of unknown values at the depth of 5 m, 50 m, 100 m and 150 m

参数 Parameters	8月 August				10月 October			
	5 m	50 m	100 m	150 m	5 m	50 m	100 m	150 m
a	1.235	1.343	1.568	1.623	1.245	1.428	1.699	1.867
b	0.120	0.149	0.164	0.184	0.138	0.150	0.177	0.198
c	-7.8	-4.0	-3.5	-4.0	-7.3	-3.0	-3.0	-3.2

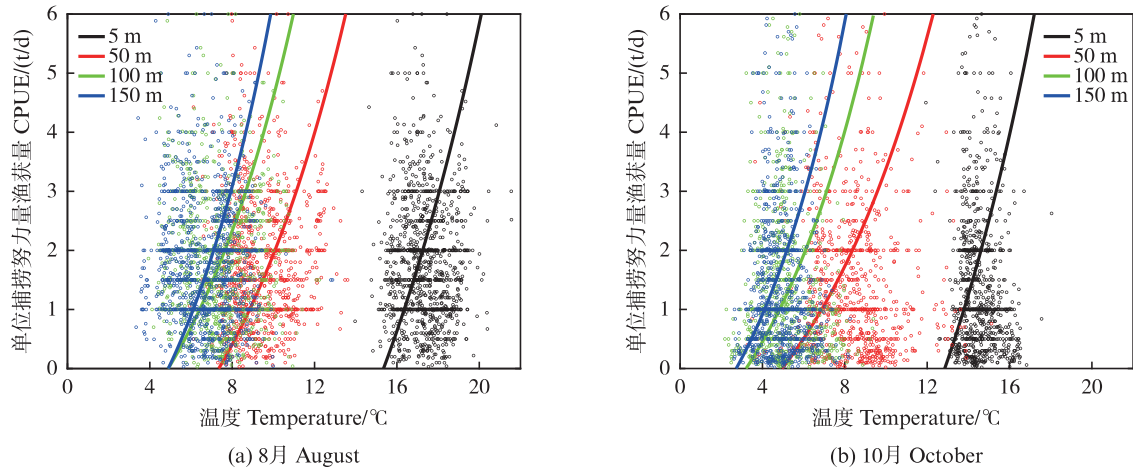
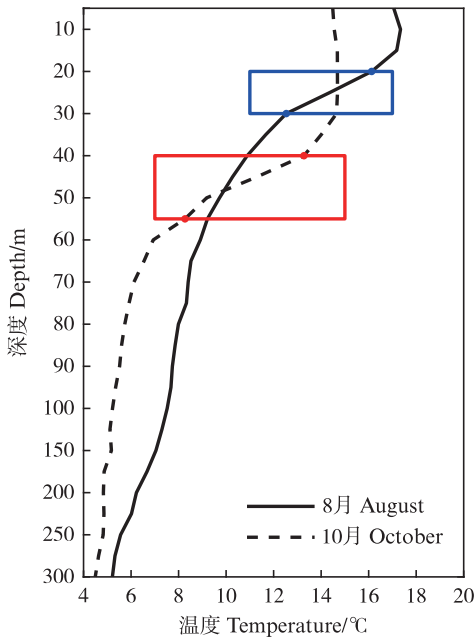


图10 温度与 CPUE 相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis between temperature and CPUE

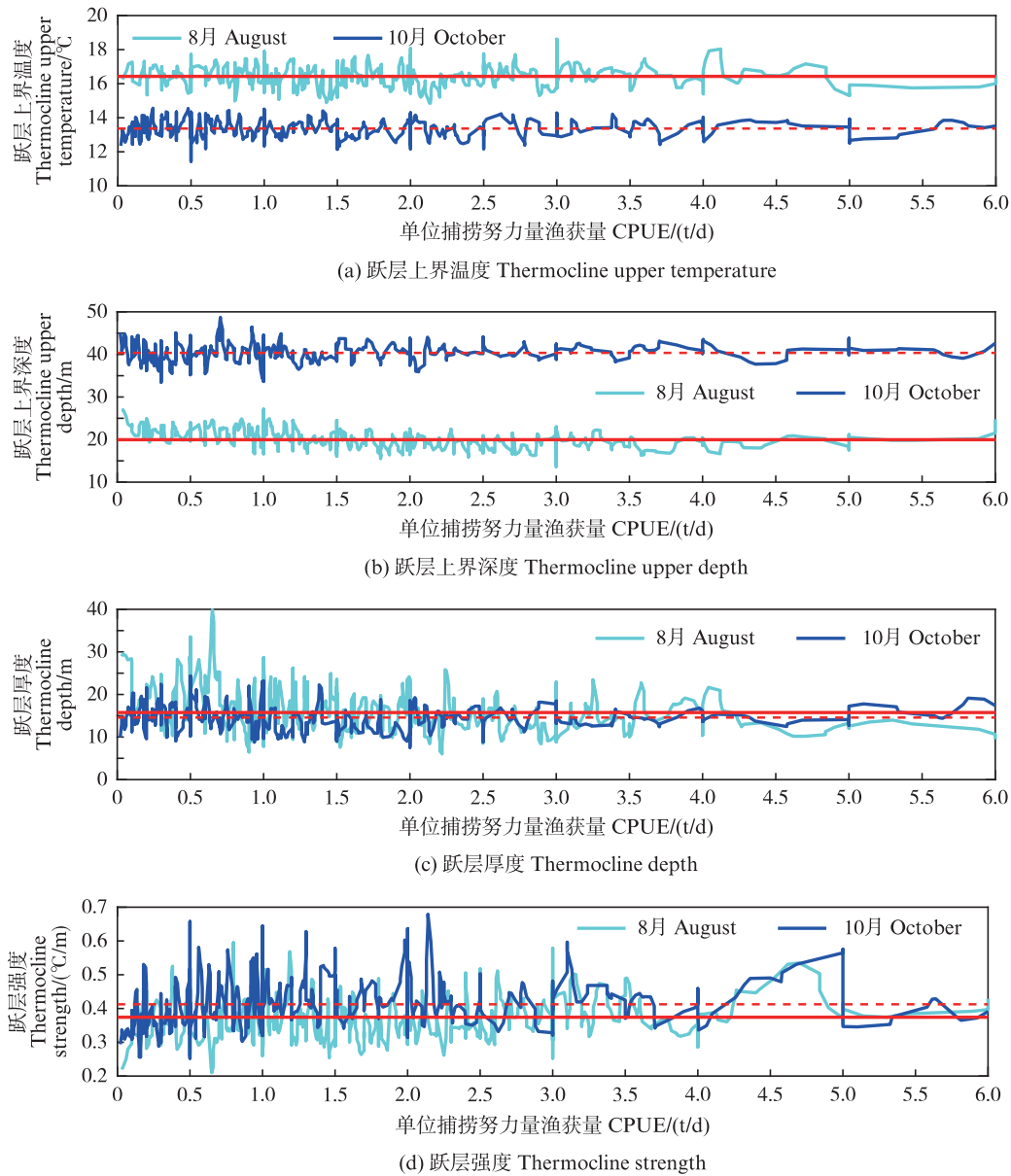


蓝框为8月的跃层深度,红框为10月的跃层深度。

The blue frame is the depth of the thermocline in August, and the red frame is the depth of the thermocline in October.

图11 8月和10月平均温度曲线对应的跃层分布

Fig. 11 Thermocline distribution corresponding to the average temperature curves in August and October



红色实线和虚线分别为8月和10月对应参数的平均值。

The red solid line and the dotted line are the average values of the corresponding parameters in August and October, respectively.

图12 不同CPUE对应的温跃层参数变化曲线

Fig. 12 Variation curves of thermocline parameters corresponding to different CPUE

4 结论

本文以2018年8月和10月西北太平洋柔鱼渔场区的4796个渔业捕捞点为例,基于Argo剖面观测和梯度依赖最优插值方法,进行了渔获点温盐垂直结构重构实验,在以“淞航”号船测数据比测检验的基础上,初步分析了柔鱼活动区的温度和盐度垂直结构特征及其与CPUE的关系。

结果显示,基于梯度依赖OI方法重构的结果,温度均方根误差为0.5~1.0℃,盐度均方根误差为0.07~0.4,与“淞航”号实测站点温盐绝对误

差分别为0~0.25℃和0.05~0.27。重构结果能较细致地反映渔场区的温盐垂直结构:8月较大平均渔获位置表层温度为14~20℃,16℃时柔鱼渔获最大,10月表层温度在14℃左右时CPUE最大;50m处都在9~12℃温度区间CPUE较大;100m以及150m处温度变化较小。除此之外,8月50m深度在156.5°E、41.5°N处冷暖水团交汇,存在较大平均CPUE。且相关性分析显示,该水层10月的温度变化对柔鱼CPUE的影响小于8月,这或许与季节跃层的分布有关。10月无论在哪个深度,较大渔获都处在相对低盐区域,8月则在157°E、

43.5°N 以及 159.5°E、42.5°N 位置有着较高 CPUE, 并且该位置盐度相对周围也会更低, 因此可认为在一定程度上, 柔鱼会更加趋于在盐度较低区域生长。

跃层是柔鱼渔场变迁的重要影响因素之一, 本文结果显示, 8 月和 10 月高 CPUE 跃层上界温度分别为 16 和 14 °C, 跃层上界深度分别为 20 和 40 m, 跃层厚度均为 15 m, 并且跃层强度变化越大, CPUE 随机性也越大, 跃层强度稳定在 0.4 °C/m 左右时 CPUE 相对稳定。由此可见, 梯度依赖最优插值方法能够提供与实测数据精度相近的环境要素构建结果, 可为获取渔获点上更多环境要素(叶绿素、溶解氧等)的垂直结构提供必要的技术手段。

参考文献:

- [1] 陈新军. 世界头足类资源开发现状及我国远洋鱿钓渔业发展对策[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 321-330.
CHEN X J. Development status of world cephalopod fisheries and suggestions for squid jigging fishery in China [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 321-330.
- [2] YU W, WEN J, CHEN X J, et al. Trans-Pacific multidecadal changes of habitat patterns of two squid species[J]. Fisheries Research, 2021, 233: 105762.
- [3] 余为. 西北太平洋柔鱼冬春生群对气候与环境变化的响应机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
YU W. Response mechanism of winter-spring cohort of neon flying squid to the climatic and environmental variability in the Northwest Pacific Ocean [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [4] 陈新军. 关于西北太平洋的柔鱼渔场形成的海洋环境因子的分析[J]. 上海水产大学学报, 1997, 6(4): 263-267.
CHEN X J. An analysis on marine environment factors of fishing ground of *Ommastrephes bartrami* in Northwestern Pacific [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1997, 6(4): 263-267.
- [5] 魏广恩, 陈新军. 北太平洋柔鱼(*Ommastrephes bartrami*)资源渔场研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2016, 36(6): 114-122.
WEI G E, CHEN X J. Review on neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) resources and fishing ground in the North Pacific Ocean [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2016, 36(6): 114-122.
- [6] YU W, CHEN X J, YI Q, et al. Spatio-temporal distributions and habitat hotspots of the winter - spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartrami* in relation to oceanographic conditions in the Northwest Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2016, 175: 103-115.
- [7] ALABIA I D, SAITOH S I, IGARASHI H, et al. Spatial habitat shifts of oceanic cephalopod (*Ommastrephes bartrami*) in oscillating climate [J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 521.
- [8] ALABIA I D, SAITOH S I, MUGO R, et al. Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the western and central North Pacific [J]. Fisheries Oceanography, 2015, 24(2): 190-203.
- [9] CHEN X J, CHEN Y, TIAN S Q, et al. An assessment of the west winter - spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*) in the Northwest Pacific Ocean [J]. Fisheries Research, 2008, 92(2/3): 221-230.
- [10] 王蕴沛, 陈新军, 余为. 西北太平洋柔鱼渔场重心变化及其与环境的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(6): 899-909.
WANG Y P, CHEN X J, YU W. Variations of gravity centers of fishing ground for neon flying squid *Ommastrephes bartrami* in the northwest Pacific Ocean and its relation with marine environment [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(6): 899-909.
- [11] 刘洪生, 陈新军. 2000 年 5—7 月北太平洋海域水温分布及柔鱼渔场研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, 22(1): 34-39.
LIU H S, CHEN X J. Study on water temperature distributions and fishing grounds of squid in the North Pacific during May-July in 2000 [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2002, 22(1): 34-39.
- [12] 陈新军. 西北太平洋柔鱼渔场与水温因子的关系[J]. 上海水产大学学报, 1995, 4(3): 181-185.
CHEN X J. An approach to the relationship between the squid fishing ground and water temperature in the Northwestern Pacific [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1995, 4(3): 181-185.
- [13] 刘洪生, 杨红, 章守宇. 北太平洋西经海域(175°W-170°W)温盐分布及其与柔鱼渔场关系的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(3): 229-233.
LIU H S, YANG H, ZHANG S Y. Preliminary study on seawater salinity and temperature distributions and their relationship with the squid fishing grounds in 175°W-170°W area of North Pacific [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(3): 229-233.
- [14] YATSU A, WATANABE T. Interannual variability in neon flying squid abundance and oceanographic conditions in the central North Pacific, 1982-1992 [J]. Bull Nat Res Inst Far Seas Fish, 1996, 33: 123-138.
- [15] 陈新军, 陈峰, 高峰, 等. 基于水温垂直结构的西北太

- 平洋柔鱼栖息地模型构建[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 52-60.
- CHEN X J, CHEN F, GAO F, et al. Modeling of habitat suitability of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) based on vertical temperature structure in the Northwestern Pacific Ocean [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(6): 52-60.
- [16] 崔雪森, 周灿, 唐峰华, 等. 西北太平洋柔鱼渔场非参数栖息地适宜性指数模型[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 53-62.
- CUI X S, ZHOU C, TANG F H, et al. Nonparametric habitat suitability index model for *Ommastrephes bartramii* fishing ground in the Northwest Pacific Ocean [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(6): 53-62.
- [17] 王辉赞, 张韧, 王桂华, 等. Argo 浮标温盐剖面观测资料的质量控制技术[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 577-588.
- WANG H Z, ZHANG R, WANG G H, et al. Quality control of Argo temperature and salinity observation profiles [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 577-588.
- [18] KALNAY E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- [19] ZHANG C L, WANG Z F, LIU Y. An argo-based experiment providing near-real-time subsurface oceanic environmental information for fishery data [J]. Fisheries Oceanography, 2021, 30(1): 85-98.
- [20] LI Z Q, LIU Z H, LU S L. Global Argo data fast receiving and post-quality-control system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 502(1): 012012.
- [21] 刘增宏, 李兆钦, 卢少磊, 等. 全球海洋 Argo 温盐剖面散点数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2021, 5(3): 312-321.
- LIU Z H, LI Z Q, LU S L, et al. Scattered dataset of global ocean temperature and salinity profiles from the International Argo Program [J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2021, 5(3): 312-321.
- [22] 张春玲, 许建平, 鲍献文. 基于 Argo 资料的梯度依赖相关尺度方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(5): 476-483.
- ZHANG C L, XU J P, BAO X W. Gradient-dependent correlation scale method based on Argo [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 16(5): 476-483.
- [23] 谢春虎, 徐苗苗, 曹莎莎, 等. 基于梯度依赖客观分析技术的全球 Argo 网格化数据集: 构建及初步应用[J]. 海洋学研究, 2019, 37(4): 24-35.
- XIE C H, XU M M, CAO S S, et al. Gridded Argo data set based on GDCSM analysis technique: establishment and preliminary applications [J]. Journal of Marine Sciences, 2019, 37(4): 24-35.
- [24] ZHANG C L, WANG D Y, LIU Z H, et al. Global gridded Argo dataset based on gradient-dependent optimal interpolation [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(5): 650.
- [25] ZHANG C L, XU J P, BAO X W, et al. An effective method for improving the accuracy of Argo objective analysis [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(7): 66-77.
- [26] 张学宏, 张绪东, 李颜. 海洋温跃层特征值的分析与计算[J]. 海洋预报, 2011, 28(5): 69-76.
- ZHANG X H, ZHANG X D, LI Y. Characteristic analysis and calculation of the ocean thermocline [J]. Marine Forecasts, 2011, 28(5): 69-76.

Reconstruction experiment of temperature and salinity vertical structure of *Ommastrephes bartramii* fishing ground in Kuroshio-Oyashio confluence region

FU Lifu, HU Wanying, ZHANG Chunling, CUI Manman

(College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To compensate for the lack of sub-surface environmental data of the fishing ground, this experiment analyzed the vertical temperature and salinity structure at the fishing points using the gradient-dependent optimal interpolation and Argo profiles in the Kuroshio-Oyashio Confluence region. The reliability of the constructed results was verified by theoretical testing and comparison with in-situ observation. The results showed that the maximum root mean square errors of the temperature and salinity were less than 1 °C and 0.4 compared to Argo profiles. Furthermore, the absolute deviation of temperature and salinity from the "Songhang" survey data is less than 0.25 °C and 0.27, respectively. Analysis discussed the vertical temperature and salinity structure and the relationship with the squid CPUE. The results indicated the suitable temperatures for squid at the 5m were 16 °C and 14 °C in August and October 2018. And the suitable temperatures decreased to 9-12 °C at the depth of 50m. The statistical relationship between temperature and squid CPUE conforms to an exponential function under a certain curvature. Additionally, it was observed that there are significant thermoclines at the fishing points. The greater the variation in thermocline intensity, the greater the randomness of the squid CPUE. When the thermocline intensity at the fishing points is around 0.4 °C/m, the squid CPUE is relatively stable. Regardless of the month, higher CPUEs are located in low-salinity areas. This study provides a new approach for establishing long-time-series and quasi-real-time environmental data of fishing ground. That will offer the necessary data support for deep research on fishery dynamic mechanisms.

Key words: *Ommastrephes bartramii*; vertical structure; Argo profiles; gradient-dependent optimal interpolation; Kuroshio-Oyashio confluence region