

## 中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群区域温度垂直结构的构建与初步分析

张春玲, 蒋逸, 王冰洋, 王丹阳, 胡松

### Construction and analysis of vertical temperature structure for FAD yellowfin tuna in the central and western Pacific Ocean

ZHANG Chunling, JIANG Yi, WANG Bingyang, WANG Danyang, HU Song

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210403401>

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

##### 中西太平洋鲣栖息地指数预报模型比较研究

Comparisons of habitat suitability index models of skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean

上海海洋大学学报. 2017, 26(5): 743 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161201933>

##### 基于Argo的西北太平洋公海柔鱼渔场垂直水温结构的变化特征

Variation characteristics of vertical water temperature structure of neon flying squid fishery in northwestern Pacific Ocean based on Argo

上海海洋大学学报. 2019, 28(3): 427 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190102503>

##### 厄尔尼诺/拉尼娜现象对中西太平洋鲣资源丰度的影响

Influence of El Nino/La Nina on the abundance index of skipjack in the Western and Central Pacific Ocean

上海海洋大学学报. 2017, 26(1): 113 <https://doi.org/10.12024/jsou.20160601795>

##### 东太平洋大眼金枪鱼自由鱼群栖息地偏好的时空分布特征

Spatio-temporal distribution pattern of habitat preference of bigeye tuna free-swimming schools in the eastern Pacific Ocean

上海海洋大学学报. 2020, 29(6): 889 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191202874>

##### 基于不同气候条件的中西太平洋鲣鱼渔场预报

Fishing ground forecasting on *Katsuwonus pelamis* based on different climatic conditions in western and central Pacific Ocean

上海海洋大学学报. 2019, 28(1): 145 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170802118>

文章编号: 1674-5566(2022)01-0233-09

DOI:10.12024/jsou.20210403401

## 中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群区域温度垂直结构的构建与初步分析

张春玲, 蒋逸, 王冰洋, 王丹阳, 胡松

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 利用梯度依赖相关尺度方法, 基于 Argo 实时观测剖面, 以点对点的形式进行中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群区域温度垂直结构的构建实验, 并在验证该方法有效性的基础上初步分析了捕捞点的温度垂直结构特征。结果表明, 与传统方法相比, 构建的温度垂直剖面的均方根误差明显减小, 在跃层深度处两者相差最大达 0.45 °C, 且构建的温度剖面与实际观测值的温度偏差除跃层处较大(约为 ±0.5 °C)外, 其余水层基本接近为零。2017 年 8 月的统计分析结果表明, 中西太平洋黄鳍金枪鱼在近表层(5 m)的适宜温度范围为 28.5 ~ 29.5 °C, 且随着深度的增加, 温度逐渐降低, 至 300 m 处, 适宜温度范围约为 11.0 ~ 12.0 °C。各个捕捞点均存在明显的温跃层, 对应的平均温跃层上、下界深度和跃层强度分别约为 80 m、270 m、0.08 °C/m, 跃层强度与渔获量近似呈正比关系。这些结论进一步验证了该方法的可靠性, 同时表明本文方法可以为构建渔业捕捞点上的次表层信息提供技术支持。

**关键词:** 梯度依赖相关尺度方法; Argo 剖面观测; 黄鳍金枪鱼; 温度垂直结构; 中西太平洋

**中图分类号:** P 745

**文献标志码:** A

黄鳍金枪鱼 (*Thunnus alunga*) 具有很高的商业价值, 是中西太平洋渔业的重要组成部分<sup>[1]</sup>。其具有高速游动的能力, 并可进行长距离高度洄游, 经常快速向下游到温跃层(20 °C 等温线)以下冷水低氧区域觅食, 昼夜垂直分布特征明显<sup>[2-4]</sup>, 因此, 海温垂直结构在影响其资源丰度及渔场分布中起着至关重要的作用。

海洋环境因子是驱动黄鳍金枪鱼群体三维空间活动和分布的重要外在因素, 其中, 水温又是判别其渔场的重要指标<sup>[5]</sup>。遥感卫星能提供大面积、高精度、实时的海洋表层环境资料, 目前国内外研究利用遥感卫星数据, 针对黄鳍金枪鱼渔场分布和海表环境因子的关系开展了大量研究<sup>[6-9]</sup>。然而, LAN 等<sup>[10]</sup>的研究指出, 自 20 世纪后期开始, 已有国内外学者采用声学调查和标志放流方法, 获取包括黄鳍金枪鱼在内的金枪鱼垂直-水平游动的实时深度-温度信息。研究<sup>[9-14]</sup>发现, 相比于海表面温度, 黄鳍金枪鱼的延绳钓渔获量与次表层水温的关系更密切。WENG 等<sup>[15]</sup>

通过标志放流数据研究表明, 黄鳍金枪鱼 95% 的时间分布在低于表层水温 8 °C 水层内, 并推断制约黄鳍金枪鱼垂直深度分布的主要因素不是某一水层温度, 而是垂直温差。

现有研究<sup>[16-18]</sup>通过声学调查、标志放流、延绳钓调查等方法获取黄鳍金枪鱼生境信息, 初步探讨了其与次表层海洋环境的关系。然而, 受限于长时间序列的次表层实时温度垂直结构观测资料或技术手段, 目前对于海洋内部温度特征与黄鳍金枪鱼渔场关系的系统研究并不多见。全球 Argo 剖面浮标观测作为海洋观测系统的主要组成部分, 首次实现了以较小的误差, 广泛收集全球无冰覆盖的深海大洋, 从海面到 2 000 m 深的海水温度和盐度剖面观测资料<sup>[19]</sup>。而且, 由核心 Argo 计划观测到的剖面数量正以每天数千条的速度增长, 每月的观测剖面达 1.5 万条以上, 这为构建中西太平洋渔场区的实时水温垂直结构提供了可能。然而, 要系统研究黄鳍金枪鱼与环境垂直结构的关系, 需要进行 Argo 剖面观测与

收稿日期: 2021-04-20 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406801); 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室开放基金项目(A1-0203-00-2017-1)

作者简介: 张春玲(1981—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为生态动力学分析与应用。E-mail: clzhang@shou.edu.cn

通信作者: 胡松, E-mail: shu@shou.edu.cn

渔业捕捞点的高分辨率时空匹配。其中,能够有效提高 Argo 资料分析精度的梯度依赖最优插值方法不失为一种有效技术手段<sup>[20-21]</sup>。

为弥补与渔获量时空匹配的海洋次表层环境观测的不足,本文以 2017 年 8 月中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群为例,采用基于梯度依赖相关尺度的数据同化方法,以点对点的形式,通过 Argo 剖面观测资料,构建与捕捞点实时的温度垂直结构,并在对比验证该方法可靠性的基础上,初步分析黄鳍金枪鱼垂直洄游的各水层适宜水温及其与跃层参数的关系,以期获取渔场区实时的次表层观测信息提供一种新思路和新方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

中西太平洋黄鳍金枪鱼生产数据由上海开创远洋渔业有限公司 14 艘中西太平洋金枪鱼围网船(金汇 1 号、2 号、3 号、6 号、7 号、8 号、9 号、18 号、58 号, POHNPEII、LOJET、LOMETO、LOMALO、MAJUROI)提供,原始数据时间覆盖范围为 2008 年 1 月 1 日至 2017 年 8 月 31 日。渔获数据包括自由浮水和集鱼器集群(fish aggregating device, FAD)2 种类型,由于自由浮水数据很少,同时考虑到 Argo 剖面的数量,选取中西太平洋 2017 年 8 月(31 d)由 FAD 集群方式得到的 81 个黄鳍金枪鱼随附鱼群捕捞点的数据进行构建方法实验。这些数据包括日期、经度、纬度、船名、每艘船的日产量和其他生产信息。本文以单船单网次产量表征资源丰度,下文中用单位捕捞努力量渔获量(CPUE)表示,单位为 t/网,并忽略船舶对渔获量的影响。

温度剖面观测资料由中国 Argo 实时资料中心提供(<ftp://ftp.argo.org.cn/pub/argo/global/>),这些剖面已通过实时和延迟模式质量控制进行处理<sup>[22-23]</sup>。2017 年 8 月的 Argo 剖面中,仅收集每个黄鳍金枪鱼捕捞点周围有效半径范围内的温度数据,这将提供深度 5~1 500 m 的次表层温度垂直剖面观测信息。有效半径设为 500 km,以确保在每一捕捞点周围每天的观测剖面数均在 10 个以上,而不同有效半径的选择对构建结果的影响,将在方法部分加以详述。在 2017 年 8 月的 81 个捕捞点上,大多数捕捞点周围有效半径内的温度剖面数据都超过 20 个,最多的有 35 个。用

于计算温度水平梯度的气候态数据采用 WOA18 网格数据集(<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa18/>),并选取 120°E~140°W, 10°S~10°N,空间分辨率为 0.25°的温度数据,通过双线性插值得到渔业捕捞点上温度的水平梯度变化。

### 1.2 构建方法

本文采用的构建方法称为梯度依赖相关尺度方法(gradient-dependent correlation scale method, GDCSM),该方法是一种被广泛应用的数据同化技术<sup>[20-21]</sup>。研究基于此方法的基本原理,采用点对点的方式,利用 Argo 观测资料构建黄鳍金枪鱼捕捞点的温度垂直结构信息。GDCSM 的基本公式<sup>[24]</sup>如下:

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

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

其基本原理是第  $i$  个捕捞点的分析值  $v_i^a$ , 由其背景场  $v_i^b$  与  $M$  个以最优权重  $w_{ij}$  加权的观测增量  $\delta y_j^o$  叠加而成,而最优权重  $w_{ij}$  可以通过一个线性方程组来确定。变量  $v$  可以表征任何环境要素,如温度、盐度、叶绿素、溶解氧等,文中用于表示温度;下标  $i, j$  分别表示捕捞点及 Argo 观测剖面个数;上标  $a, b$  则分别表示分析结果和背景场; $y$  为观测增量,上标  $o$  表示观测; $w$  为最小二乘意义下的最优权重系数; $\eta$  为观测值相对于背景误差的相对误差的均方,该参数沿用张春玲等<sup>[18]</sup>的验证结果 0.25; $\mu_{jk}$  和  $\mu_{ik}$  分别为 2 个 Argo 观测点  $j, k$  和渔业捕捞点与 Argo 观测点的背景误差的相关性,通常假设为高斯指数函数<sup>[19]</sup>。其中,在计算背景误差相关系数时,需要确定相关尺度。这里根据温度水平梯度变化规律给出了各项异性的背景误差相关尺度,并通过 WOA18 气候态数据计算得到梯度依赖相关尺度参数。在中西太平洋黄鳍金枪鱼渔场区,经向和纬向相关尺度与温度梯度基本呈反比关系。并且,相关系数  $\mu_{ik}$  和最优权重  $w_{ik}$  都随有效半径的增大而呈指数衰减,当有效半径大于 500 km 时,最优权重接近为零,相关系数也基本小于 0.1,两者的高值对应的有效半径范围是 300 km 以内,但同时考虑到有效半径内 Argo 观测剖面数量,本文取有效半径为 500 km。

另外,温跃层上界深度及其对应的温度、温跃层下界深度及其对应的温度、跃层厚度、跃层强度等参数的计算,采用最大角度法<sup>[25-27]</sup>,该方

法基于混合层温度垂向一致和跃层温度梯度巨变的主要特征,具有较强的理论基础。

### 1.3 检验与分析方法

为了验证 GDCSM 方法在构建渔场区次表层信息中的有效性,以 2017 年 8 月中西太平洋 81 个黄鳍金枪鱼随附鱼群捕捞点为例,在构建与捕捞点时间(日)、位置匹配的温度剖面的基础上,将温度剖面分为垂向(5~1 500 m)不等间隔的 24 个水层。在每个渔业捕捞点周围随机选定一个 Argo 观测剖面位置,然后以选定的观测点的实际 Argo 观测数据为“真值”,同时利用 GDCSM 方法构建了“真值”位置的温度分析值,进而将分析结果和传统方法(就近取值)与“真值”进行对比分析,从而验证本文方法的可靠性。

本文采用的 CPUE 是每天在每个捕捞位置上的单船总产量除以每天的下网次数,以此来表征渔业资源丰度,而 CPUE 范围为 0.5~110 t/网,且 CPUE 的跨度较大。比如,小于 10 t/网的约占 60%,10~30 t/网、大于 30 t/网的各约占 20%,而大于 30 t/网的 CPUE 大部分小于 60 t/网,仅有 1 个捕捞点为 110 t/网,数据分布不均匀。因此,在进行温度特征分析时,将 CPUE 分为 <10 t/网、10~30 t/网、>30 t/网 3 个量级。

## 2 结果

### 2.1 水温垂直结构结果验证

图 1 给出了基于 GDCSM 方法构建的随附鱼群捕捞点上 81 条温度剖面的均方根误差分布,并与目前常用方法——就近取值(Nearest)的结果进行对比。由图 1 可见,与传统方法相比,自表层至 1 500 m,GDCSM 的温度均方根误差明显偏小。100~300 m 时,两者的差别较大,在温度变化剧烈的水层(约 150 m),GDCSM 和 Nearest 的温度均方根误差分别约为 0.40 °C 和 0.85 °C,相差 0.45 °C,随着深度的增加,2 种方法的结果差距逐渐减小,深度大于 300 m 后,GDCSM 的温度均方根误差均小于 0.1 °C。

基于 GDCSM 方法的分析结果与“真值”的温度偏差随深度的分布如图 2 所示。在各个水层,由梯度依赖相关尺度法得到的温度剖面与实际观测值的偏差明显小于传统的就近取值法结果。由图 2 可知,50 m 以浅及 400 m 以深分析值与实测“真值”的温度偏差都接近为零,与图 1 类似,

跃层深度处的温度偏差相对稍大,但即使在 100~150 m 偏差较大的水层,50% 的温度偏差小于 ±1 °C,并且除了 150 m 的平均偏差约为 0.5 °C 外,其他深度处的平均偏差均接近零。而传统方法与实际观测的温度偏差(图 2),在 300 m 以浅的每个水层,平均偏差均大于 ±0.5 °C,125~200 m 时跃层存在的深度上,温度偏差高达 ±3 °C,并且温度偏差极值最大约为 5 °C(150 m)。

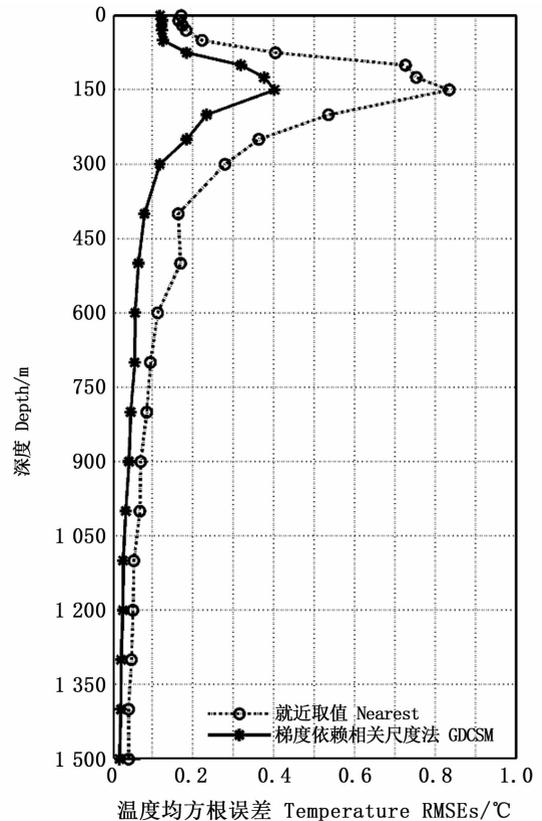


图 1 渔业捕捞点温度垂直结构信息的均方根误差  
Fig 1 Vertical distribution of temperature Root Mean Errors (RMEs) of different results

由此可见,GDCSM 以最优权重加权的方式,起到了多次测量取平均值,进而可以有效提高分析精度,与以最近的观测值替代真值的方法相比,时空匹配精度更高,温度垂直结构更接近真实观测。

### 2.2 渔场区温度垂直结构初步分析

为进一步验证本文方法构建结果的可靠性,以 2017 年 8 月中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群的 81 个捕捞点为例,分析黄鳍金枪鱼活动区温度的垂直结构特征,初步探讨渔获量与温度垂直结构参数的相关性。图 3 分别给出了 5、50、150、

300 m 处,每个渔业捕捞点上个的温度空间分布。由图 3 可见,CPUE 较高的点大部分集中在 180° W 以西、南北纬 3° 以内的赤道附近海域。特别地,在 175° E ~ 180° W, 0 ~ 3° S 范围内的捕捞点上,渔获量普遍较高,在该海域,对应的 5、50、150、300 m 各个水层的温度值分别约为 28.5 ~

29.5 °C、28.0 ~ 29.0 °C、20.0 ~ 24.0 °C、11.0 ~ 12.0 °C。当 5 ~ 50 m 处温度高于 30 °C 或低于 28 °C 时,多数捕捞点的 CPUE 较低 (< 10 t/网),而至 300 m 深度处,温度低于 10 °C 时,CPUE 也较低。

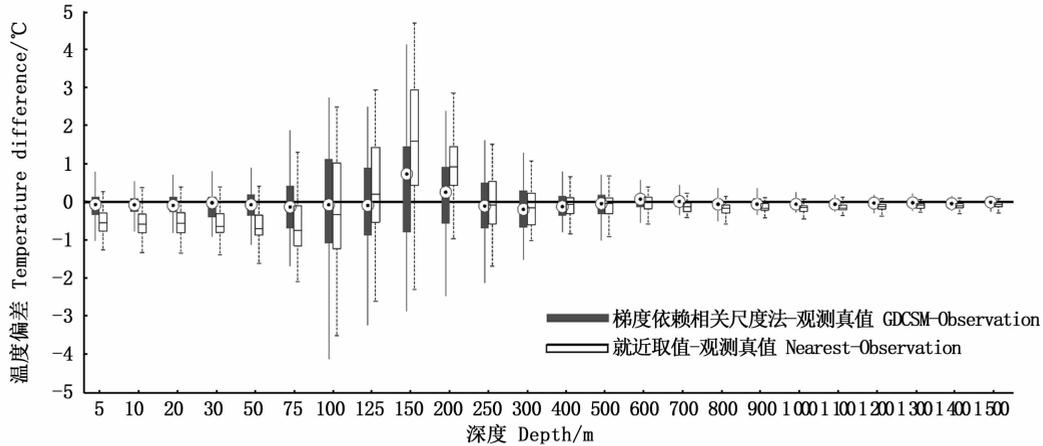


图 2 梯度依赖相关尺度法构建的温度剖面、就近取值法得到的剖面与实际观测真值的温度偏差  
Fig. 2 Statistic of temperature difference of GDCSM and nearest minus the observation

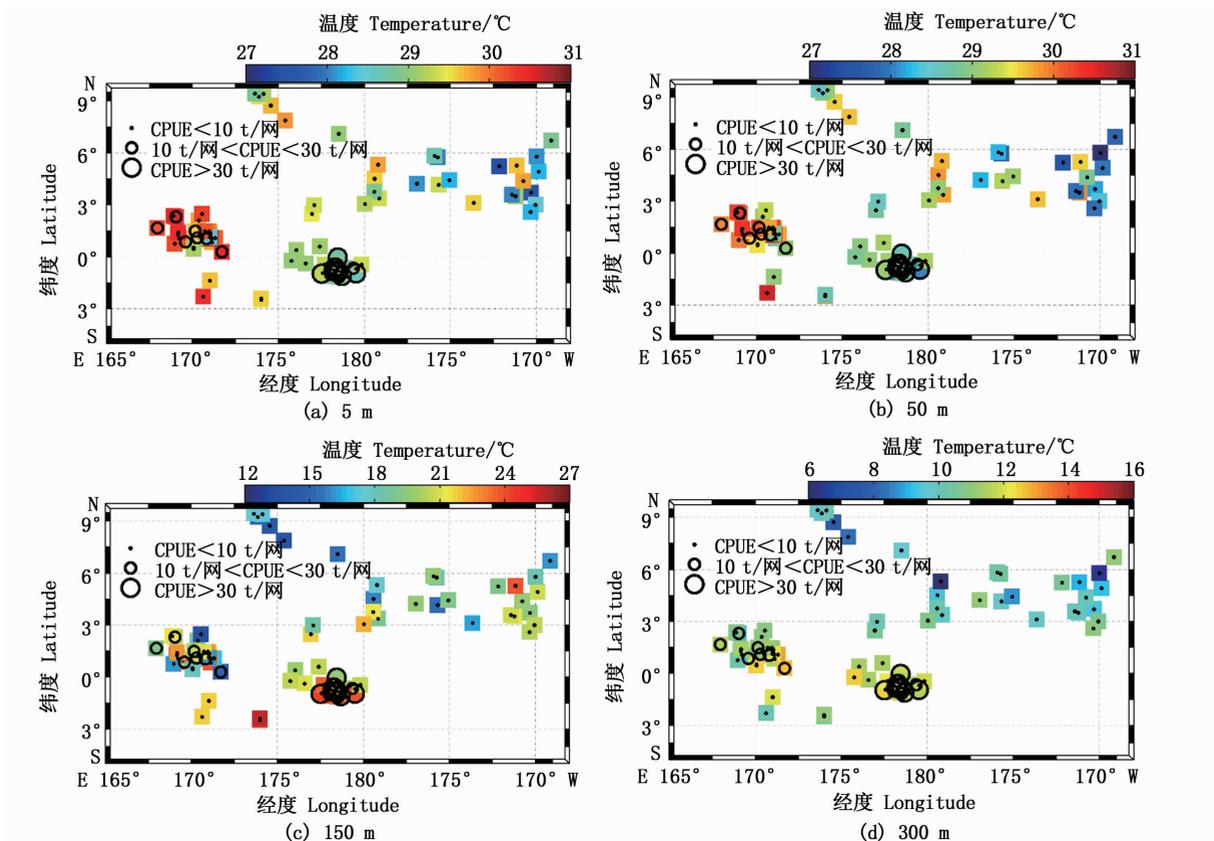


图 3 黄鳍金枪鱼 CPUE 与各水层温度的空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of CPUE and water temperature of yellowfin tuna at the depths of 5 m, 50 m, 150 m, and 300 m

图 4 给出了每个渔业捕捞点上对应的温度垂直断面结构、CPUE 分布,以及每个捕捞点周围可利用的 Argo 温度观测剖面数量。8 月份中西太平洋近表层 (<100 m) 温度普遍较高,均大于 25 °C (图 4a),且由图 3 可见,多数捕捞点位于北半球,其对应的 50 m 以浅温度大部分在 27 °C 以上。100 ~ 150 m,存在明显的温度跃层,垂向温度梯度较大,150 m 以深,温度显著降低;至 300 m 深度处,大部分渔业捕捞点的温度降至 10 °C 以下。结合图 4b 可以看出,在 CPUE 较大且可利用

的 Argo 观测剖面较多时,如第 2、5、23、25、27、29、32 个捕捞点,5 ~ 300 m 的温度垂直变化相对较缓慢,而在 CPUE 较小且可利用的观测剖面较少时,温度值由 5 m 层的约 30 °C 降低至 300 m 的近 5 °C (第 14、35、47、64、78 个捕捞点),垂向变化相对较剧烈,这与图 3 显示的规律相呼应。然而,在温跃层深度(75 ~ 175 m)处,温度垂向梯度越大,对应的 CPUE 也越大,如第 2、5、23、25、77 个捕捞点的温度垂直结构所示。

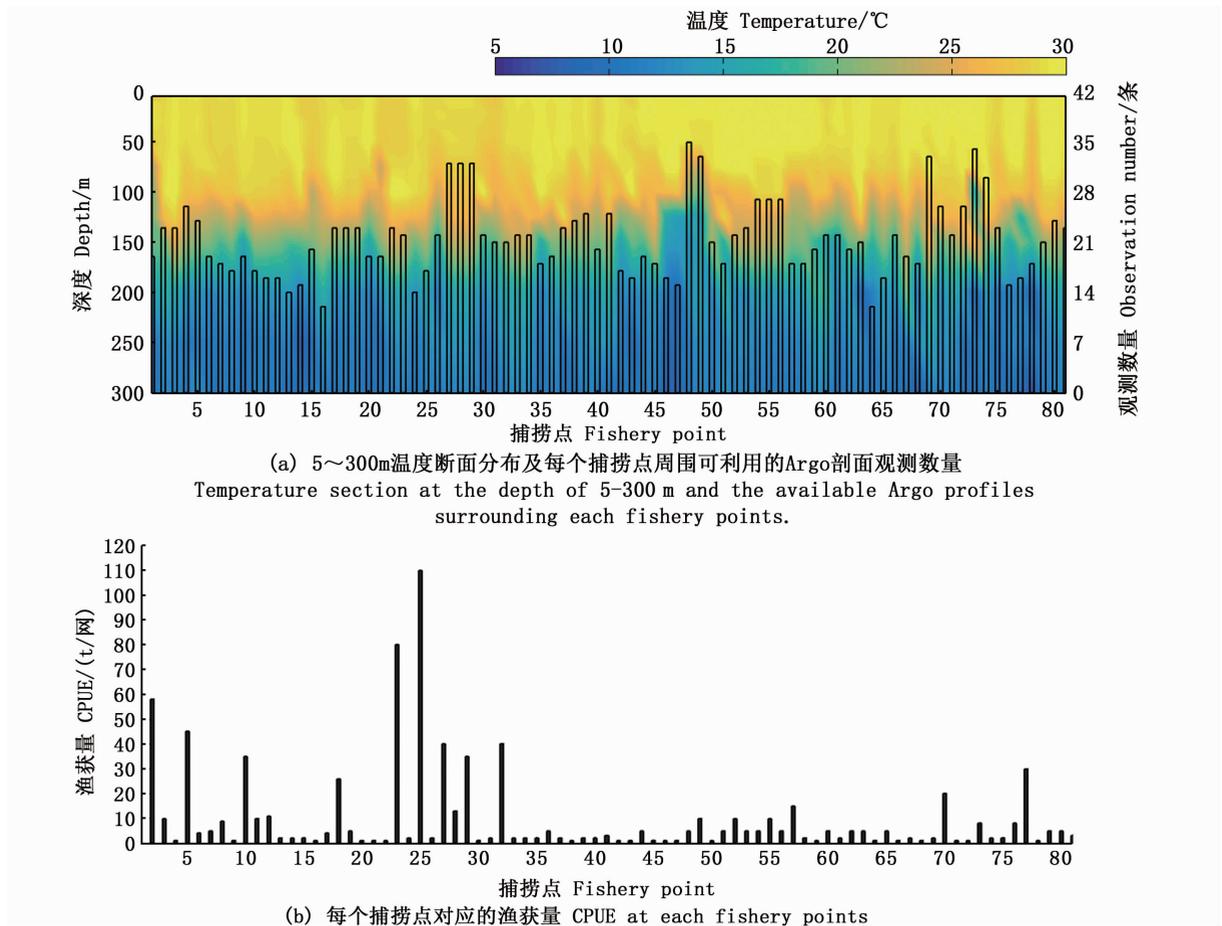


图 4 黄鳍金枪鱼捕捞点对应的温度断面分布及 CPUE  
Fig. 4 Temperature section and CPUE at each YFT fishery point

黄鳍金枪鱼的洄游活动与温跃层参数密切相关,图 4 也初步显示,渔场区存在明显的跃层现象。渔场区的温跃层上界深度、下界深度、强度(温度梯度)等参数及跃层强度与渔获量的相关性如图 5 所示:所有捕捞点的温跃层上界深度均介于 50 ~ 100 m,其平均上界深度约为 80 m;而温跃层下界则在 200 ~ 400 m,平均下界深度约为

270 m (图 5a)。渔场区温跃层强度均超过了 0.065 °C/m,且跃层强度介于 0.075 ~ 0.08 °C/m 的频数最高,最大强度高达 0.106 °C/m (图 5b)。尽管只以 2017 年 8 月份 1 个月的数据进行统计,跃层强度与 CPUE 的相关性也高达 0.763,属于高度相关(图 5c),且两者的线性回归结果显示,CPUE 与温跃层强度近似成正相关关系,其回归

直线斜率为 903.5, 即, 渔场区的跃层现象越显著, CPUE 也越大。

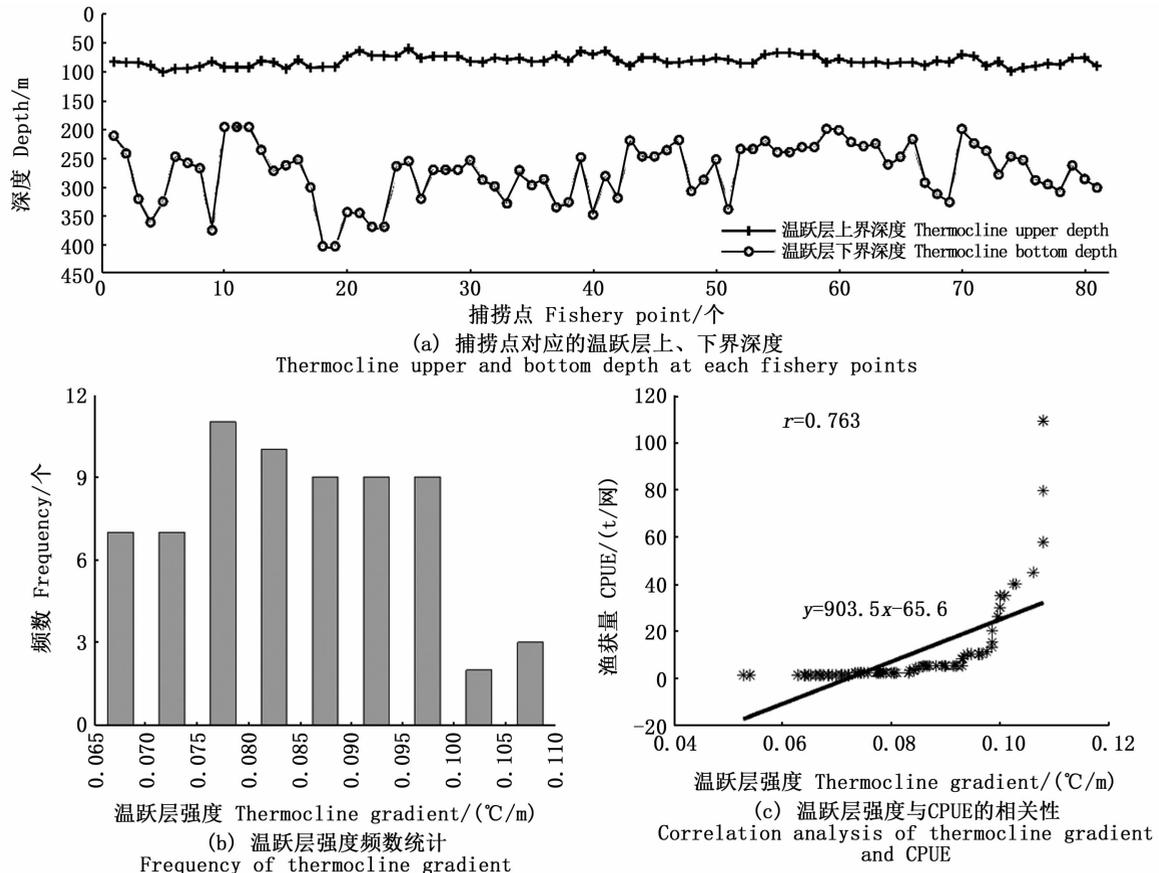


图5 捕捞点对应的温跃层深度、跃层强度及其与 CPUE 的相关分析

Fig. 5 Thermocline depths, thermocline gradient and correlation with CPUE at each fishery point

### 3 讨论

渔场区实时的环境要素垂直结构观测的缺乏,一直是深入研究鱼类生存环境的制约因素之一。本文基于一种梯度依赖相关尺度方法,借助于 Argo 剖面观测资料,以 2017 年 8 月份中西太平洋的黄鳍金枪鱼为例,点对点地构建了与每天的捕捞位置时空匹配的温度垂直结构信息,并在验证其可靠性的基础上,初步分析了该海域黄鳍金枪鱼的适温性和跃层等相关参数与 CPUE 的关系。

#### 3.1 梯度依赖相关尺度方法在渔场分析中的应用

均方根误差统计显示,与传统方法(就近取观测值)相比,本文结果中 5~1 500 m 的温度均方根误差明显较小,即使在跃层附近,温度变化剧烈而导致均方根误差稍大,约为 0.4 °C,比传统方法低 0.45 °C。同时,与实际观测的温度偏差除了跃层深度处约为 ±0.5 °C 以外,其他水层

温度偏差均接近为零。这表明本文方法构建的温度垂直结构能够起到多次测量进而加权平均提高精度的效果,能够得到更接近真实观测的高时空分辨率的环境垂直结构信息。

通过对 2017 年 8 月中西太平洋黄鳍金枪鱼随附鱼群区域捕捞点上的温度剖面分析,可以得到如下结论:在 5、50、150、300 m 处,黄鳍金枪鱼的适宜水温范围分别约为 28.5~29.5 °C、28.0~29.0 °C、20.0~24.0 °C、11.0~12.0 °C;当近表层温度高于 30 °C 或低于 28 °C 时,多数捕捞点的渔获量较低;多数捕捞点在 50 m 以浅对应的温度值大于 27 °C,且可利用的观测剖面越多,对应的构建结果自 5 m 至 300 m 的温度垂向变化越缓慢。这些结论与前人研究成果十分相近,由此也进一步验证了本文构建结果的可靠性,这可为构建渔场区高时空分辨率环境要素垂直信息提供新思路,并可为深入了解鱼类生存环境提供数据基础。

### 3.2 黄鳍金枪鱼与温度垂直结构的关系

黄鳍金枪鱼是一种温水鱼类,需要特定的水温才能栖息和产卵,其 CPUE 高产区域通常为海面温度约为 29 °C 的海域<sup>[28]</sup>。由本文方法构建的温度剖面统计结果表明,黄鳍金枪鱼在 5 m 处最适宜的温度为 28 ~ 29 °C。大多数高 CPUE 的捕捞点对应 5 m 温度值约为 29 ~ 29.5 °C。当近表层温度超过 30 °C 或低于 28 °C 时,渔获量几乎为零。每个渔获点的温度均随深度的增加而降低,至 150 m 处,温度值降到 22 ~ 23 °C,近表层与 150 m 之间的温差约为 8 °C,这与前人的研究<sup>[2,12]</sup>结果相一致。

黄鳍金枪鱼可以突破温度跃层,进入深水层,深度甚至超过 1 000 m<sup>[4,29]</sup>。研究<sup>[10]</sup>指出,黄鳍金枪鱼频繁进入深水的目的是觅食。温跃层可能通过影响其捕获食物的垂直分布进而影响黄鳍金枪鱼的垂直分布,与海面环境信息相比,温跃层对黄鳍金枪鱼活动的影响更为显著。然而,当温跃层的厚度和梯度过大时,黄鳍金枪鱼的 CPUE 量较小。究其原因,在温跃层形成的瞬间,温度在垂直方向上发生剧烈的变化,这将不利于形成良好的渔场。此外,金枪鱼是视觉和机会主义的捕食者,深水中光线较弱,这降低了其捕猎能力,温跃层的下界深度较深的海域,也很难形成渔场。

#### 参考文献:

- [1] LANGLEY A L, BRIAND K B, KIRBY D S, et al. Influence of oceanographic variability on recruitment of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western and central Pacific Ocean [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2009, 66(9): 1462-1477.
- [2] SCHAEFER K M, FULLER D W, BLOCK B A. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data [J]. Marine Biology, 2007, 152(3): 503-525.
- [3] SCHAEFER K M, FULLER D W, BLOCK B A. Vertical movements and habitat utilization of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), yellowfin (*Thunnus albacares*), and bigeye (*Thunnus obesus*) tunas in the equatorial eastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data [M]// NIELSEN J L, ARRIZABALAGA H, FRAGOSO N, et al. Tagging and Tracking of Marine Animals with Electronic Devices. Dordrecht: Springer, 2009: 121-144.
- [4] SCHAEFER K M, FULLER D W, BLOCK B A. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the Pacific Ocean off Baja California, Mexico, determined from archival tag data analyses, including unscented Kalman filtering [J]. Fisheries Research, 2011, 112(1/2): 22-37.
- [5] 陈新军. 渔业资源与渔场学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2014:155-160.
- CHEN X J. Fishery resources and fisheries [M]. Beijing: China Ocean Press, 2014:155-160.
- [6] TSENG C T, SUN C L, YEH S Z, et al. Spatio-temporal distributions of tuna species and potential habitats in the Western and Central Pacific Ocean derived from multi-satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(17-18): 4543-4558.
- [7] SCHAEFER K M, FULLER D W, ALDANA G. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in waters surrounding the Revillagigedo Islands Archipelago Biosphere Reserve, Mexico [J]. Fisheries Oceanography, 2014, 23(1): 65-82.
- [8] LANK W, SHIMADA T, LEE M A, et al. Using remote-sensing environmental and fishery data to map potential yellowfin tuna habitats in the tropical Pacific Ocean [J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 444.
- [9] KLUGER L C, TAYLOR M H, MENDO J, et al. Carrying capacity simulations as a tool for ecosystem-based management of a scallop aquaculture system [J]. Ecological Modelling, 2016, 331: 44-55.
- [10] LAN K W, LEE M A, LU H J, et al. Ocean variations associated with fishing conditions for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic Ocean [J]. ICES Journal of Marine Science, 2011, 68(6): 1063-1071.
- [11] HOLLAND K N, BRILL R W, CHANG R K C. Horizontal and vertical movements of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices [J]. Fishery Bulletin, 1990, 88(3): 493-507.
- [12] EVANS K, LANGLEY A, CLEAR N P, et al. Behaviour and habitat preferences of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and their influence on longline fishery catches in the western Coral Sea [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, 65(11): 2427-2443.
- [13] LEROY B, ITANO D G, NICOL S. Preliminary analysis and observations on the vertical behaviour of WCPO Skipjack, Yellowfin and Bigeye Tuna in association with anchored FADs, as indicated by acoustic and archival tagging data [C]//3rd Regular Session of the Scientific Committee. WCPFC, 2007.
- [14] 张衡, 戴阳, 杨胜龙, 等. 基于分离式卫星标志信息的金枪鱼垂直移动特性 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 196-203.
- ZHANG H, DAI Y, YANG S L, et al. Vertical movement characteristics of tuna (*Thunnus albacares*) in Pacific Ocean determined using pop-up satellite archival tags [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 196-203.
- [15] WENG K C, STOKESBURY M J W, BOUSTANY A M, et al. Habitat and behaviour of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the Gulf of Mexico determined using pop-up satellite archival tags [J]. Journal of Fish Biology, 2009, 74(7): 1434-1449.
- [16] 宋利明, 陈新军, 许柳雄. 大西洋中部黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 的垂直分布与有关环境因子的关系 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 64-68.  
SONG L M, CHEN X J, XU L X. Relationship between vertical distribution of yellowfin tunas' (*Thunnus albacares*) and the concerned environmental factors in the central Atlantic Ocean [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(1): 64-68
- [17] 宋利明, 武亚苹. 基于 GAM 的吉尔伯特群岛海域黄鳍金枪鱼栖息地综合指数 [J]. 水产学报, 2013, 37(8): 1250-1261.  
SONG L M, WU Y P. An integrated habitat index for yellowfin tuna in waters near Gilbert Islands based on GAM [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(8): 1250-1261.
- [18] 宋利明, 张禹, 周应祺. 印度洋公海温跃层与黄鳍金枪鱼和大眼金枪鱼渔获率的关系 [J]. 水产学报, 2008, 32(3): 369-378.  
SONG L M, ZHANG Y, ZHOU Y Q. The relationships between the thermocline and the catch rate of *Thunnus albacares* and *Thunnus obesus* in the high seas of the Indian Ocean [J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(3): 369-378.
- [19] RISER S C, FREELAND H J, ROEMMICH D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 145-153.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 童明荣, 刘增宏, 孙朝辉, 等. ARGO 剖面浮标数据质量控制过程剖析 [J]. 海洋技术, 2003, 22(4): 79-84.  
TONG M R, LIU Z H, SUN C H, et al. Analysis of data quality control process of the ARGO profiling buoy [J]. Ocean Technology, 2003, 22(4): 79-84.
- [23] LIU Z H, XU J P, ZHU B, et al. June. Calibration of Argo profiling float salinity data using historical hydrographic data [C]//Proceedings of "China Argo Science Workshop" Conference, 2006:14-17.
- [24] KALNAY E. Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003:129.
- [25] 张春玲, 许建平, 鲍献文, 等. 基于海温参数模型推算 Argo 表层温度 [J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 16-26.  
ZHANG C L, XU J P, BAO X W, et al. Estimation of Argo sea subsurface temperature based on a thermal parametric model [J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(1): 16-26.
- [26] 张春玲, 许建平, 鲍献文, 等. 利用遥感 SST 反演上层海洋三维温度场 [J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 115-125.  
ZHANG C L, XU J P, BAO X W, et al. Inversion of subsurface three-dimensional temperature from remote satellite sea surface temperature [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 115-125.
- [27] CHU P C, FAN C W. Maximum angle method for determining mixed layer depth from sea glider data [J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(2): 219-230.
- [28] 王少琴, 许柳雄, 朱国平, 等. 中西太平洋金枪鱼围网的黄鳍金枪鱼 CPUE 时空分布及其与环境因子的关系 [J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(3): 303-308.  
WANG S Q, XU L X, ZHU G P, et al. Spatial-temporal profiles of CPUE and relations to environmental factors for yellowfin tuna *Thunnus albacares* from purse-seinefishery in Western and Central Pacific Ocean [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(3): 303-308.
- [29] SONG L M, ZHANG Y, XU L X, et al. Environmental preferences of longlining for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the tropical high seas of the Indian Ocean [J]. Fisheries Oceanography, 2008, 17(4): 239-253.

## Construction and analysis of vertical temperature structure for FAD yellowfin tuna in the central and western Pacific Ocean

ZHANG Chunling, JIANG Yi, WANG Bingyang, WANG Danyang, HU Song

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The gradient-dependent correlation scale method was used to construct the temperature vertical structure of yellowfin tuna fishing ground based on Argo real-time observation profile. The results showed that, compared with the traditional method, the root mean square error of the vertical temperature profile constructed is significantly reduced. At the depth of the thermocline, the maximum difference between the two was 0.45 °C. Besides the thermocline, the temperature deviation between the constructed temperature profile and the actual observed true value was great (about  $\pm 0.5$  °C), the other water layers were almost zero. The results of statistical analysis in August 2017 showed that the suitable temperature range of yellowfin tuna in the near surface layer (5 m) of the western and central Pacific Ocean is 28.5 – 29.5 °C, and with the increase of depth, the temperature gradually decreases, and the suitable temperature range is about 11.0 – 12.0 °C at 300 m. There was obvious thermocline in each fishing point, the corresponding average thermocline upper and lower boundary depth and thermocline strength are about 80 m, 270 m and 0.08 °C/m respectively, and the thermocline strength is approximately proportional to the catch. These conclusions further verify the reliability of the method.

**Key words:** gradient-dependent correlation scale; Argo profile; yellowfin tuna; temperature vertical structure; western and central Pacific Ocean