

文章编号: 1000-0615(2018)09-1367-11

DOI: 10.11964/jfc.20170410806

## 秘鲁上升流对秘鲁鳀渔场的影响

陈 芃<sup>1,2</sup>, 陈新军<sup>1,2,3,4\*</sup>, 雷 林<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
2. 农业部大洋渔业开发重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306;
4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306)

**摘要:** 秘鲁鳀作为世界上产量最大的单鱼种渔业的目标种, 研究秘鲁上升流对渔场的作用机制有利于人们加深秘鲁鳀渔场形成机制的理解, 把握渔场状况。研究利用风场数据反演的秘鲁鳀渔场的上升流流速(upwelling velocity, UV)作为上升流的指标, 同时结合港口实测渔场温度(temperature, T)和温度距平(temperature anomaly, TA)数据及秘鲁鳀的渔获数据(2005—2009年), 以名义单位捕捞努力量渔获量(catch per unit effort, CPUE)作为渔场的表征, 对2005—2009年秘鲁鳀渔场状况与海域上升流和水温状况的规律进行研究。结果显示, 渔讯期间, 渔场上升流流速(UV)在 $1.42 \times 10^{-5} \sim 7.44 \times 10^{-5}$  m/s之间, 温度(T)范围在 $16.61 \sim 19.42$  °C之间, 渔场的温度距平(TA)范围在 $-1.87 \sim 1.69$  °C之间。利用广义可加模型(generalized additive model, GAM)分析环境因子对渔场的影响发现, 模型对渔场CPUE的解释率为67%, 能够较好地拟合2005—2009年渔讯期间渔场CPUE的变动趋势, 各个环境因子的适宜范围分别为UV小于 $4.5 \times 10^{-5}$  m/s; T为 $18.4 \sim 19.5$  °C; TA小于 $0.2$  °C。上升流的流速小于 $4.5 \times 10^{-5}$  m/s时, 渔场CPUE随着UV的升高而基本不变, 但是上升流的流速高于 $4.5 \times 10^{-5}$  m/s之后, 渔场CPUE随着UV的升高呈现下降趋势。研究表明, 秘鲁鳀渔场由适宜的海表风速、上升流流速以及上升流海域适宜水温等环境条件的共同作用而形成。

**关键词:** 秘鲁鳀; 秘鲁上升流; 渔场; 温度; 温度距平

中图分类号: S 931

文献标志码: A

秘鲁鳀(*Engraulis ringens*)是一种栖息于东南太平洋沿岸的小型中上层鱼类<sup>[1]</sup>, 对该鱼种的捕捞形成了世界上产量最大的单鱼种渔业<sup>[1]</sup>。因此其资源变动与海洋环境的关系受到了国内外学者的关注。国内外学者对秘鲁鳀资源动态与海洋环境的关系做了很多的研究。其中诸多研究都阐述了秘鲁鳀的栖息环境—秘鲁上升流对秘鲁鳀资源变动的的作用机制, 普遍认为, 秘鲁上升流海域生产力较高, 因此形成了良好的渔场<sup>[1-4]</sup>。同时, 也有分析表明, 秘鲁上升流造成的海域

适宜水温环境对秘鲁鳀资源有着促进作用<sup>[5]</sup>。然而这些秘鲁鳀与环境的研究都是基于利用调查得到的秘鲁鳀资源量数据上, 而对于秘鲁鳀渔场, 其与海域上升流和水温状况[温度(temperature, T)及温度距平(temperature anomaly, TA)]存在着怎样的关系, 这种关系能够解释多少的渔场变化, 以及是否能得到他们的具体数值(如适宜范围)来作为旺汛时的指标? 对于这些问题, 本研究首先利用风场数据对秘鲁鳀渔场的上升流流速(upwelling velocity, UV)进行计算, 并结合港口

收稿日期: 2017-04-19 修回日期: 2017-11-06

资助项目: 海洋局公益性行业专项(20155014); 上海市科技创新行动计划(14DZ1205000); 国家科技支撑计划(2013BAD13B01)资助

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

实测渔场温度和温度距平(temperature anomaly, TA)数据与秘鲁鳀的渔场数据进行分析,利用广义可加模型(generalized additive model, GAM)对2005—2009年秘鲁鳀渔场状况与海域上升流和水温状况的规律进行总结,旨在加深对秘鲁鳀渔场形成机制的理解。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

秘鲁鳀的生产数据来源于秘鲁国家海洋局IMARPE网站([http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/detallereport.php?id\\_seccion=I0131020101000000000000](http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/detallereport.php?id_seccion=I0131020101000000000000)),为2005—2009年秘鲁各港口(8°~15°S, 图1)第一渔汛季度渔汛期间(4—8月)每日出港的捕捞秘鲁鳀的大型工业围网渔船的总船数及所获得的秘鲁鳀渔获量(数据未包含每条渔船作业的具体位置)。由于捕捞管理制度(总可捕量限制制度和禁渔制度)的限制<sup>[6]</sup>,每年的捕捞渔汛起止时间不同,同时渔汛期间也存在着未出港捕捞的时期(表1)。一般来说,4月份是捕捞的开始时间。因此,以4月1日所在当周为当年捕捞的第1周,对每周总捕捞努力量(effort)和总渔获量(catch)进行整理。

表1 2005—2009年渔汛时期秘鲁沿岸大型工业围网渔船出港作业时间

Tab. 1 Fishing time of the large industrial seine vessels in Peruvian coastal waters from 2005 to 2009

年份 year	作业时间/周 fishing time
2005	2~10、13~15
2006	5~7、10~11
2007	2~3、5~7、10~11
2008	4~6
2009	4~18

注:以每年4月1日所在当周为当年捕捞的第1周,表中数字为捕捞的具体时间

Notes: The numbers in the table represent the fishing time (week) taking the April 1th as the first fishing week in one year

2005—2009年海表面风场数据来自来源于美国国家海洋大气局NOAA的OceanWatch网站(<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>),为QuikSCAT卫星监测的海表面风应力(wind stress,  $\tau$ )数据,包括风应力的大小和方向,时间分辨率均为周,空间分辨率分别为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。由于秘鲁鳀主要栖息于沿岸30 n mile 50 m水深内的

海域<sup>[4]</sup>,同时渔船都为当日出海捕捞当日回港<sup>[7]</sup>,捕捞位置离港口不远,渔场为近岸渔场。因此只计算沿岸13个 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格内的上升流流速(图1)

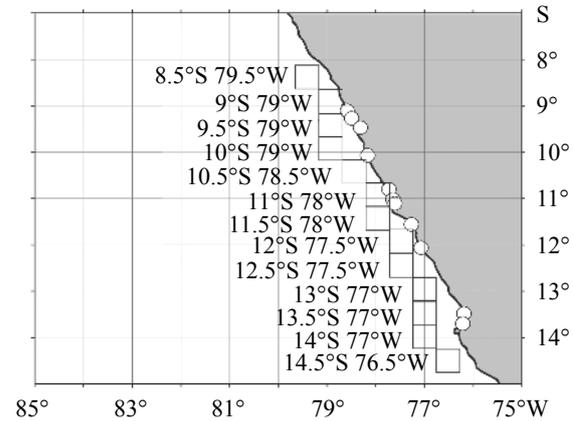


图1 秘鲁港口分布及海表面风场数据分布

图中 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 矩形网格为海表面风场数据所在位置;白色圆点代表港口的位置,从上至下分别是:钦博特(Chimbote)、萨曼库(Samanco)、卡斯马(Casma)、瓦尔梅(Huarney)、苏普(Supe)、维格塔(Vegueta)、瓦乔(Huacho)、昌凯(Chancay)、卡亚俄(Callao)、坦博德莫拉(Tambo de Mora)和皮斯科(Pisco)

Fig. 1 Distributions of Peruvian ports and the sea surface wind stress data points

The rectangular grids of  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  in the picture represent the locations of sea surface wind stress data points. White dots represent the position of port. From up to down: Chimbote, Samanco, Casma, Huarney, Supe, Vegueta, Huacho, Chancay, Callao, Tambo de Mora and Pisco

渔场温度和温度距平数据来源于IMARPE网站(<http://www.imarpe.pe/imarpe>),为秘鲁沿岸港口钦博特(Chimbote,  $9^\circ 06'S$ ,  $78^\circ 35'W$ )、瓦乔(Huacho,  $11^\circ 06'S$ ,  $77^\circ 37'W$ )、卡亚俄(Callao,  $12^\circ 04'S$ ,  $77^\circ 04'W$ )和皮斯科(Pisco,  $13^\circ 42'S$ ,  $76^\circ 13'W$ )的测量数据(图1),这4个港口的南北纬度跨度基本跨越了渔场的跨度( $8^\circ \sim 15^\circ S$ )。该数据每月发布4次,为每月1—7日、8—14日15—21日和22—28日内的平均温度和温度距平,由于周间的温度和温度距平变化较小,将它们看作每月4、11、18和25日当日的的数据,其他每天的数据通过线性插值的方式获得,再按实际周进行平均(图2),最后计算每周4个港口总的平均温度和温度距平作为渔场的水温数据。

### 1.2 数据处理

渔业数据处理 利用总渔获量和总捕捞努力量的数据计算当周的名义单位捕捞努力量渔

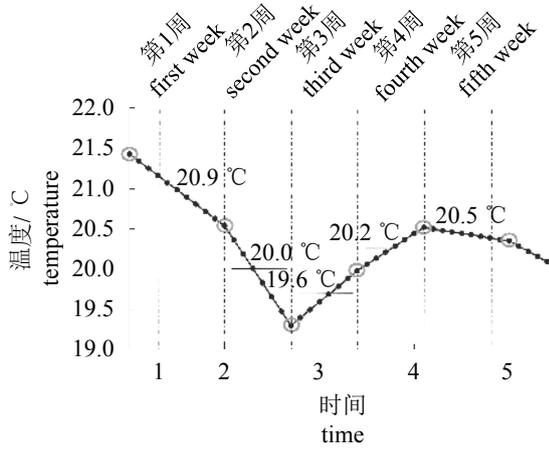


图 2 渔场水温计算示意图  
(以2005年前5周钦博特监测水温为例)

图中灰色圆圈为实际监测温度, 数值为估计水温, 横线为周温度平均值即渔场水温, 横坐标数字1~5依次表示3月25日、4月4日, 4月14日, 4月24日和5月4日

Fig. 2 The scheme of temperature calculation in the fishing ground (using the first five weeks' observed temperature at Chimbote in 2005 as example)

The grey circles in the pictures represent the actual observed temperature. The numbers represent the estimated temperature. The horizon lines represent the mean weekly temperatures which can be seen as the temperature in the fishing ground. The number 1-5 below the abscissa indicate March 25th, April 4th, April 14th, April 24th, and May 4th respectively

获量(catch per unit effort, CPUE), 以名义CPUE作为渔场的指标。公式如下:

$$CPUE = \frac{\text{Catch}}{\text{Effort}}$$

式中, Effort为一周内所有港口出港的渔船的数量, Catch为当周这些渔船所捞到的总渔获量, CPUE单位为t/船。

上升流流速计算 研究以渔场的上升流流速(upwelling velocity, UV)作为海域上升流强度的表征指标。计算方法如下: 根据上升流产生的理论<sup>[8]</sup>, 上升流可以分为由风场和岸界共同作用造成埃克曼输送产生的沿岸上升流以及由风应力旋转(wind stress curl)造成埃克曼抽吸产生的上升流, 前者主要发生在沿岸地带, 如秘鲁上升流, 而后者主要发生在开阔的大洋。因此研究主要计算沿岸上升流的大小, 首先根据风应力 $\tau$ 计算出单个网格内埃克曼输送的大小, 根据对风应力数据的观察, 渔汛期间所有风应力数据的走向都为与沿岸近似平行的西北走向, 因此

认为风应力全部作用于埃克曼离岸输送, 埃克曼输送的公式如下<sup>[9]</sup>:

$$E = \frac{\tau}{\rho_w f}$$

式中,  $\rho_w$ 为海水的密度( $1024 \text{ kg/m}^3$ ),  $f$ 为科氏参数, 计算公式为:

$$f = 2\Omega \sin \phi$$

式中,  $\Omega$ 为地球自转角速度, 为 $7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ ,  $\phi$ 为纬度, 北纬为正, 南纬为负。由埃克曼输送得到的上升流向海表面方向的垂直流速 $\omega$ 表达式如下<sup>[9]</sup>:

$$\omega = \frac{E}{R_d}$$

式中,  $R_d$ 为罗思贝半径变形(Rossby radius of deformation), 根据以下经验公式计算<sup>[10]</sup>:

$$R_d = 6.89 + 1396.94 \times (8 + 0.5 \times 191)^{-1} - 2587.56 \times (8 + 0.5 \times 141)^{-2}$$

需要指出的是, 文献指出<sup>[10]</sup>该公式的适用范围是 $10^\circ \sim 60^\circ \text{S}$ , 研究中 $8.5^\circ \sim 10^\circ \text{S}$ 内的三个网格离 $10^\circ \text{S}$ 不远(图1), 因此这三个网格的 $R_d$ 也近似的使用该公式进行计算。

将各周计算得到的13个网格的上升流垂直流速 $\omega$ 进行平均, 得到当周渔场的上升流流速。

广义可加模型 广义可加模型可以用来处理自变量和因变量之间的非线性关系<sup>[11]</sup>, 它不仅能够分析较高资源丰度的环境偏好范围<sup>[12]</sup>, 在渔情预报中也同样得到广泛应用<sup>[13]</sup>。因此研究拟采用该模型分析环境对渔场的影响。

与以往的分析<sup>[12-13]</sup>不同, 本研究利用的是整个区域港口记录的捕捞努力量和渔获量的数据, 在整个区域都没有捕捞的那些周, 不存在数据(表1), 也不会用到模型中进行分析。因此不存在CPUE为0 t/船的数据, 因此在模型的建立中也就没有在因变量CPUE上加上某些常数以防止0值的存在。研究假设CPUE服从正态分布, 以CPUE作为响应变量, 渔场上升流流速(UV)、温度(T)和温度距平(TA)作为解释变量建立GAM模型, 公式如下:

$$CPUE \sim \text{gam} [s(UV) + s(T) + s(TA) + \epsilon]$$

式中,  $s$ 为薄板样条平滑(plate regression spline)。 $\epsilon$ 为误差项,  $\epsilon \sim \sigma^2$ 且 $E(\epsilon)=0$ 。模型的误差分布假设为高斯分布(Gaussian distribution)。

### 1.3 模型的验证和应用

根据模型拟合出的公式,利用原始环境数据得到估算的CPUE值,并与真实值进行对比,以此来检验模型的好坏。

假设各年的1~18周均有捕捞作业,计算每周CPUE值,通过相关分析的方法得到2005—2009年的第一季度周间CPUE变动最大的两年,以这两年为代表,具体分析渔场上升流和渔场水温状况的变化对渔场的影响。以此验证上升流和水温的强弱变化对渔场的调控作用。

## 2 结果

### 2.1 捕捞努力量与上升流和水温的关系

统计捕捞努力量在各环境因子上的频率(捕捞努力量频率)分布以此得到渔场与上升流和水温的大体分布规律,结果发现:2005—2009年渔汛期间,渔场上升流流速(UV)在 $1.42 \times 10^{-5} \sim 7.44 \times 10^{-5}$  m/s之间,其中 $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$  m/s之间所占比例较高,共占总体的93.64%,低于或者高于这个范围的捕捞努力量频率较小,分别占总体的1.77%和4.59%(图3-a)。渔场的温度(T)范围在16.61~19.42 °C之间,其中17.5~19 °C之间所占比例较高,共占总体的74.95%,低于17.5 °C和高于19 °C的捕捞努力量频率分别占总体的19.55%和5.50%(图3-b)。渔场的温度距平范围(TA)在-1.87~1.69 °C之间,其中-1.5~0.5 °C之间所占比例较高,共占总体的93.42%,低于-1 °C和高于0 °C的捕捞努力量频率分别占总体的4.18%和2.40%(图3-c)。

### 2.2 GAM模型分析结果

从CPUE的频率分布直方图上看,接近于正态分布,对其服从正态分布的假设进行验证,检验方法为Kolmogorov-Smirnov<sup>[14]</sup>,假设CPUE服从正态分布,得到的P值为0.44,因此假设成立,CPUE服从正态分布( $\mu=181.24$ ,  $\sigma=38.368$ )(图4)。因此研究利用GAM模型分析数据是合理的。

整体GAM模型的决定系数 $R^2$ 为0.60,对CPUE偏差的总解释率为67%。所有3个环境因子对CPUE的影响都是显著的( $P < 0.05$ )。GAM模型表明,在 $0 \sim 4.5 \times 10^{-5}$  m/s的范围内,CPUE随着UV的上升而基本不变,但是在UV超过约 $4.5 \times 10^{-5}$  m/s后,CPUE随着UV的上升而下降(图5-a);

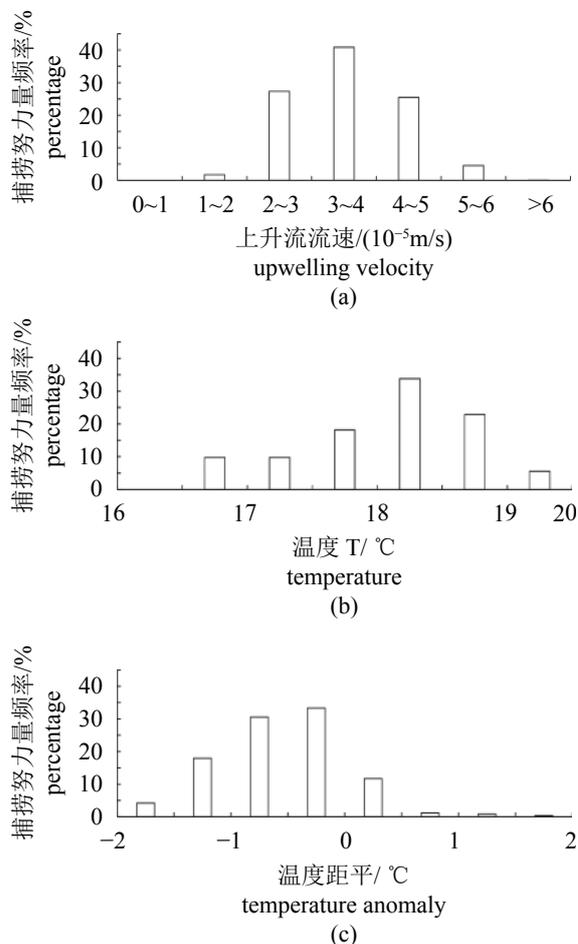


图3 捕捞努力量与上升流流速和渔场水温状况的关系

Fig. 3 Relationship between fishing effort and upwelling velocity, temperature or temperature anomaly in the fishing ground.

在18.5 °C之前,CPUE随着T的升高而升高,其中16.5~17.5 °C范围内CPUE上升缓慢,17.5~18.5 °C内CPUE上升较快,而18.5 °C之后,CPUE随着T的升高而下降(图5-b);CPUE随着TA的上升呈现下降的趋势:0.2 °C之前CPUE下降缓慢,0.2~

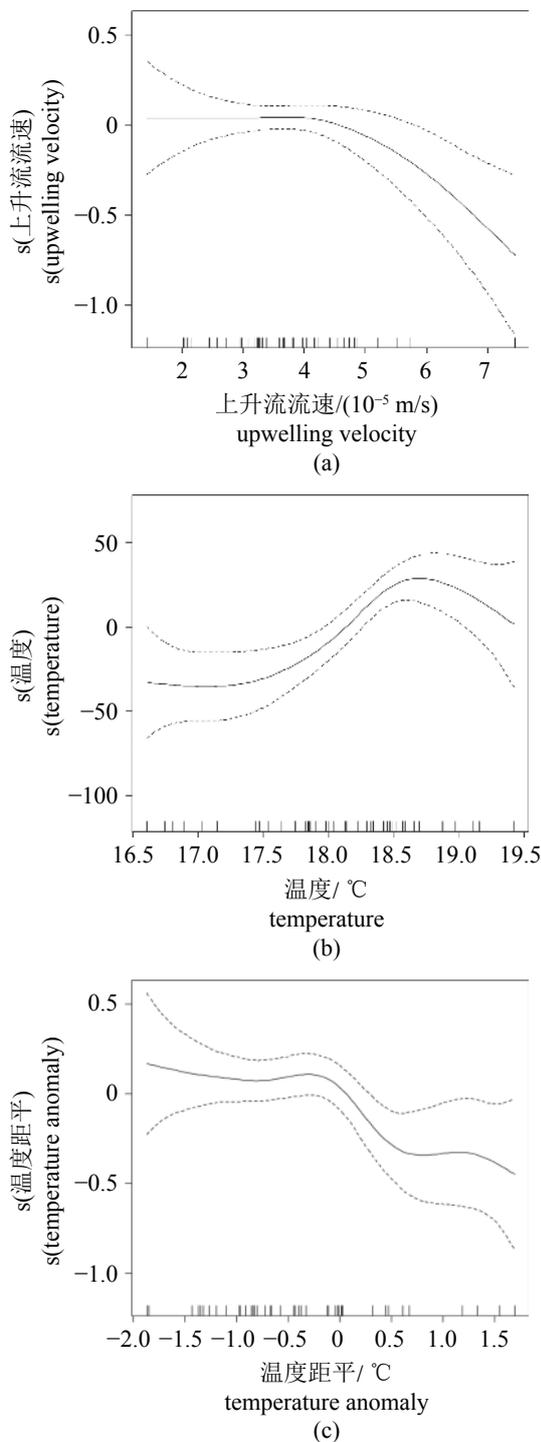


图5 GAM模型估算各环境因子对CPUE的效应  
s(因子)为样条函数的拟合值, 表示其对CPUE的影响。实线表示CPUE的期望值, 上下两侧虚线表示方程的95%置信区间

Fig. 5 The effect of each environmental factor on the CPUE based on the GAM estimation

s( factor) is the fitted value of smoothing spline functions, which represent their impacts on CPUE. The solid lines represent the expected values of CPUE; the dotted lines represent the 95% confidence intervals of estimations

0.5 °C内CPUE下降较快, 0.5 °C下降的趋势又重新变缓(图5-c)。以图5中环境因子正效应所在范围作为高值CPUE的适宜范围, 可知各个环境因子的适应范围分别为UV小于 $4.5 \times 10^{-5}$  m/s; T为18.4~19.5 °C; TA小于0.2 °C。

### 2.3 CPUE预测模型的评价

将2005—2009年的环境数据带入模型得到模拟CPUE值与实际值进行比较, 发现除了2008年的三周, 模型能够较好地模拟渔场的变动趋势。相关分析得到的各年实际值与模拟值序列的相关系数分别为0.79、0.74、0.87、-0.41和0.93, 除了2008年, 其他年份的相关系数接近1也证实了前面的结论(图6)。模拟序列与实际序列的平均相对误差为9.17%。

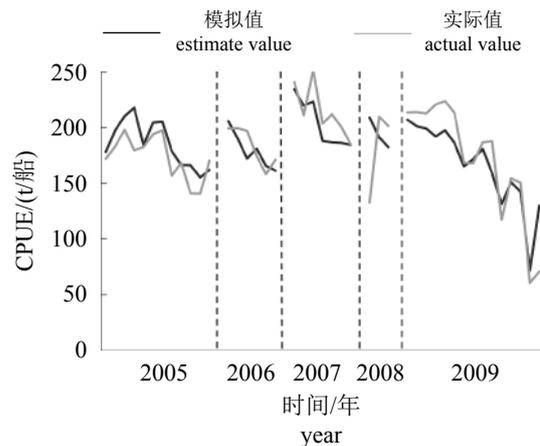


图6 2005—2009年GAM模型模拟渔场CPUE与实际值的比较

Fig. 6 The comparison between the observed CPUE and simulation CPUE based on GAM from 2005 to 2009

### 2.4 差异年份的比较分析

假设第一季度未开捕周内渔场CPUE和环境同样遵循模型所描述的关系。同时假设第一季度的18周内都有捕捞作业, 对2005—2009年的第一季度各周的渔场CPUE进行模拟, 结果显示, 在渔汛1~3周, CPUE随着周数的增加而增加, 之后CPUE随着周数呈下降的趋势(图7)。相关分析表明, 2005年和2007年的CPUE序列相关系数最小(表2), 因此以这两年的数据为代表, 验证环境变化对渔场CPUE的影响。

分析表明, 上升流过高会导致渔场较低的CPUE, 温和的上升流对渔场有利, 例如: 2007年的第6、13周、16周和2005年的第17周, 上升

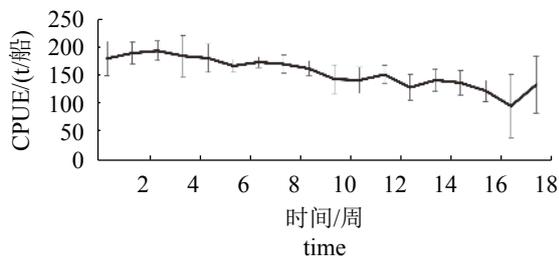


图7 GAM模拟得到的2005—2009年CPUE随时间变动情况

图中误差线表示标准差

Fig. 7 The simulation of the fluctuation of weekly CPUE in 2005—2009 based on the GAM

The error bars in the Figure represent the standard deviation

表2 2005—2009年估计CPUE序列两两相关分析结果

Tab. 2 Pairwise correlation analysis of the predicted CPUE sequence from 2005 to 2009

	2005	2006	2007	2008	2009
2005	1.00				
2006	0.68	1.00			
2007	0.32	0.69	1.00		
2008	0.46	0.81	0.47	1.00	
2009	0.82	0.85	0.46	0.67	1.00

流流速大于 $5 \times 10^{-5}$  m/s, 导致了CPUE也下降(图8, 图9-a); 温和的上升流流速使得渔场有着较高的CPUE, 如2005年和2007年的前12周渔场上升流流速较低, 而后面几周上升流流速升高, 由此可以看到明显的CPUE下降趋势, 同时, 在2007年16周以后, 渔场上升流流速变低, CPUE也随之升高(图8, 图9-a)。

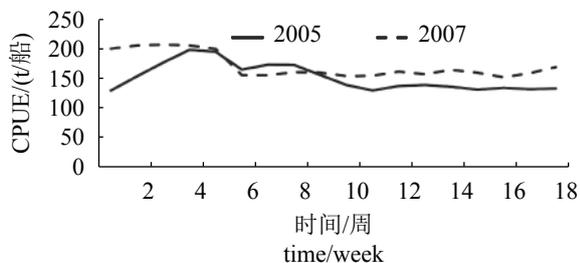


图8 GAM模拟2005和2007年CPUE序列

Fig. 8 The simulation of the CPUE sequence in 2005 and 2007 based on the GAM

水温状况的变动同样导致渔场CPUE的变化(图8, 图9-b), 2005年的第5周以后和2007年, 随着周数推移CPUE总体呈现下降的趋势, 这与水

温的下降趋势一致; 同时, 2005年第5周之前的温度要大于 $18^\circ\text{C}$ , 处于GAM得到的最适温度范围( $18.4\sim 19.5^\circ\text{C}$ )内, 因此渔场CPUE增加, 而2007年的前五周水温同样大于 $18^\circ\text{C}$ , 这也是前几周维持着较高CPUE的原因。对于渔场温度距平, 这两年的范围基本在GAM得到的温度距平的范围( $-2\sim 0.2^\circ\text{C}$ )内, 但是2007年的温度距平总体要小于2005年(图9-c), 这可能也是导致2007年总体平均CPUE要大于2005年的原因之一(图8)。综上所述, 渔场上升流和水温状况的变动共同影响了渔场CPUE的变动。上升流流速过高会使得渔场CPUE偏低。

### 3 讨论

在以往的渔场与海洋环境因子的分析中, 使用海表面温度、海面高度等卫星遥感产品<sup>[15-18]</sup>作为海洋环境的表征以此来分析渔场的例子很多。对于上升流对渔场的作用机制, 研究者通常利用海面叶绿素浓度值的高低、海面高度的分布以及海水垂直方向上的理化状况来推测海域上升流的存在<sup>[19-20]</sup>, 对于实际上升流的动力过程是如何影响渔场的变化的研究还很缺乏。因此研究根据前人对秘鲁鳀资源变动与上升流关系的研究结果, 即上升流海域能够产生丰富的饵料、形成适宜的水温条件<sup>[1-5]</sup>, 假设海域内上升流的这些变化以及水温状况的不同能够带来渔场的变化, 尝试以上升流流速为上升流的指标, 定量地分析上升流强度及水温状况的变化对渔场的影响。

通过对风场资料的分析可以发现, 在渔汛发生的阶段里, 海域内的风压场全部都是与海岸平行的西北方向, 由此造成海水的埃克曼离岸输送继而形成沿岸风生上升流。在2005—2009年的捕捞渔汛阶段, 海域内的上升流的流速范围为 $1.42 \times 10^{-5} \sim 7.44 \times 10^{-5}$  m/s, 即渔汛期间, 海域都有上升流的存在; 而根据GAM模型的结果, 上升流的流速小于 $4.5 \times 10^{-5}$  m/s的时候, 渔场的CPUE随着上升流流速的增加而基本保持不变, 但是显示为正效应。这可以通过传统的上升流对渔场形成的机制进行解释<sup>[19-21]</sup>, 即: 上升流带动深海底层的营养盐来到表层, 再结合海水表层透明度高的特性, 导致浮游植物光合作用强, 浮游动物也增加, 因此鱼类饵料丰富, 由此形成了秘鲁鳀渔场。

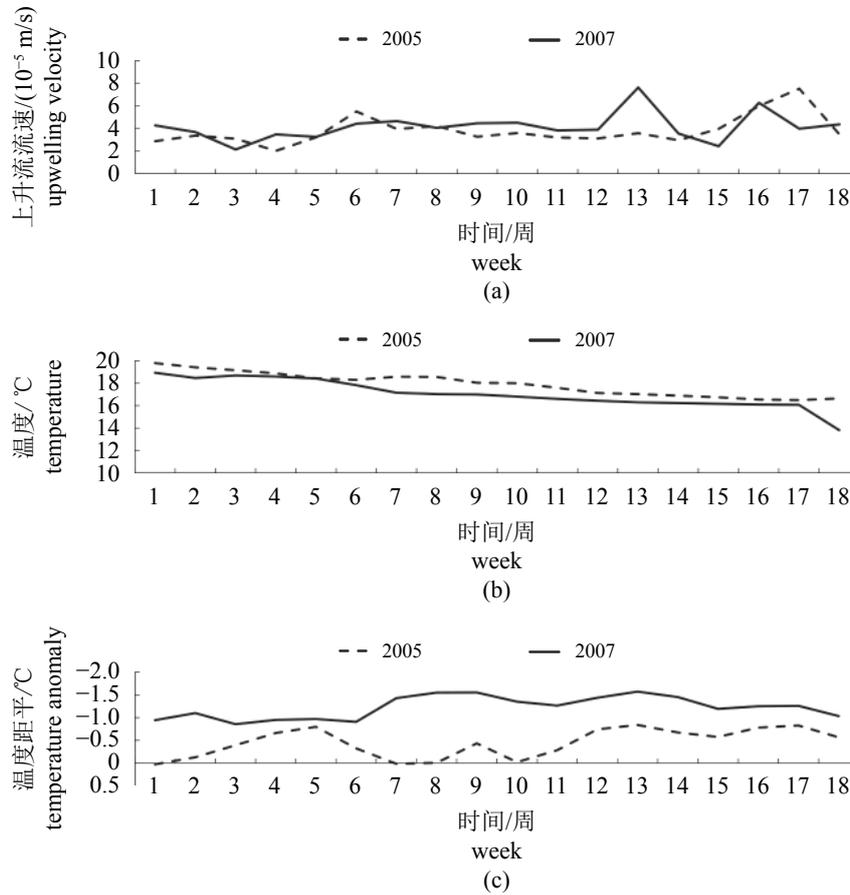


图 9 2005和2007年第一季度渔汛期间秘鲁沿岸上升流流速和水温状况随周变化

Fig. 9 The weekly fluctuation of upwelling velocity and temperature status (temperature and temperature anomaly) at Peru coastal waters in the first fishing season of the year 2005 and 2007

但是, GAM模型也表明, 在上升流流速比  $4.5 \times 10^{-5}$  m/s 更高时, 渔场的 CPUE 开始下降; 2005 年和 2007 年模拟的 CPUE 序列与渔场上升流速度的对比也发现, 上升流流速过高会使得渔场 CPUE 偏低。研究中利用的渔场指标为名义 CPUE, 它的变化受到了渔汛期间鱼类本身的资源丰度大小、捕捞因素以及这两点与环境的共同作用<sup>[22]</sup>。从资源与环境的关系的角度上讲, 国内外研究对强劲的秘鲁上升流对秘鲁鳀资源丰度的减少作用提出了两种机制, 这两种机制或许可以部分解释渔场变化与上升流的关系。

第一种机制为对流输送(advection)。沿岸上升流伴随着埃克曼离岸输送<sup>[23]</sup>。而作为秘鲁鳀饵料的小型浮游动植物游也会随着这种输送传送到上升流和外海暖水交界的离岸锋区<sup>[24]</sup>。但是, 秘鲁鳀为生活在近岸的鱼类, 近岸水域是其适宜的栖息地<sup>[4, 24]</sup>, 有研究发现<sup>[25]</sup>, 鳀属的鱼类其洄游和游泳的能力都较弱, 即秘鲁鳀较不易迁

徙至外海寻找食物。此外, 根据 Chavez 等<sup>[26]</sup>研究, 秘鲁外海一般为大于 20 °C 的暖水, 然而, Muck 等<sup>[27]</sup>报道的秘鲁鳀适宜的栖息温度为 15~20 °C, 本研究得到的渔场适宜温度也能够佐证这一点。那么即使秘鲁鳀能够移动至锋区, 海水中 20 °C 以上暖水的出现同样也会对秘鲁鳀的资源丰度不利。

第二种机制为适宜窗口理论(optimum environmental window)。Cury 等<sup>[2]</sup>曾经对秘鲁鳀等多种上升流区域的鱼类的补充成功率(recruitment success)进行分析, 发现上升流强度与补充成功率关系成倒抛物线形的结构, 即上升流强度小, 鱼类的食物条件受到限制, 但是上升流强度高的时候, 同样会对补充成功率限制。对于秘鲁鳀, Cury 等<sup>[2]</sup>检验了海水湍流强度与秘鲁鳀补充成功率的关系, 发现, 补充成功率在湍流(turbulence)为 200 m<sup>3</sup>/s (换算到风速为 5~6 m/s 之间, 根据文献<sup>[28]</sup>的公式计算风应力得到图 1 中 13 个点的

平均上升流流速为 $2.22 \times 10^{-5} \sim 3.20 \times 10^{-5}$  m/s)的时候最大,在这之后补充成功率减少。类比于成鱼补充成功率代表了幼鱼,得到的这个结论可能也暗示了成鱼的生存也存在其一定的适宜上升流环境范围。

另外,风是造成沿岸上升流的主要原因之一<sup>[8]</sup>,早前Peterman等<sup>[29]</sup>曾经检验过北方鳀(*Engraulis mordax*)的幼鱼死亡率与风速的关系,发现风速越高幼鱼的死亡率也高。因此撇开上升流的因素,Bakun等<sup>[24]</sup>对影响上升流的海表面风场对表层海洋生态系统的作用做出了解释,认为海表面风速过高会造成海水的湍流混合加大、水柱混合的加深以及海水浑浊度增加(光的限制),使得海水表层区域虽然有很多营养盐,但是浮游植物不能够较好的利用,这实际上减少了浮游植物的生物量,最终通过食物链传递必然导致了秘鲁鳀补充量的减少。将这些类比于本研究对象——秘鲁鳀成鱼,上升流流速过高代表了高的风速同样也会限制海域的食物条件最终减少秘鲁鳀成鱼的资源丰度。

但是,对比发现,补充成功率适宜的平均上升流流速要比渔场适宜的上升流流速要小,这可以通过以下两点来解释:①从摄食生态的角度来看,秘鲁鳀成鱼比幼鱼有着更多的接触食物的机会、食物的种类也多<sup>[30-31]</sup>;②将秘鲁鳀成鱼和幼鱼进行对比存在着一个错误假设:湍流对成鱼的影响完全和幼鱼一样作用在它的资源丰度上,同时以名义CPUE当作成鱼的资源丰度的指标。然而,湍流还有可能造成捕捞效率的变化。例如,光的限制导致浮游植物需要在更浅的水层进行光合作用,此外上升流强度的加大还会造成海水溶解氧最小层的上升,这些都能够使得秘鲁鳀栖息于更浅的水层<sup>[32-33]</sup>,造成渔具接触秘鲁鳀的机会增大,因此导致适宜渔场的上升流流速比实际鱼类适宜的上升流流速大。

水温状况对渔场的影响同样不可以忽视。从渔场温度距平来看,随着TA的上升,渔场的CPUE呈现下降趋势,这与秘鲁鳀作为一种冷水性鱼类的生物学特性一致<sup>[34]</sup>,水温偏低对其的生存有利。具体上,Gutiérrez等<sup>[5]</sup>通过调查发现,尤其是在拉尼娜条件下,低TA对应了海域内秘鲁鳀较广的分布,而在高TA时,海域内的秘鲁鳀分布聚集且极靠近岸,这样由于食物空间的压力,同样会造成秘鲁鳀资源的减少。对应于

渔场,确实这样有可能会造成秘鲁鳀捕捞效率的增加,但是实际上,在秘鲁渔场,IMARPE在沿岸设立了5 n mile的禁渔区<sup>[6]</sup>,因此从总体上看,温度的升高还是对渔场的CPUE有着负影响。但是,GAM模型表明,渔场温度有一定范围,而温度距平没有,有可能来源于渔场温度是与上升流强弱有一定的相关性,而温度距平则为渔场温度相对于常年的温度情况的表现;另外,低的渔场温度对秘鲁鳀渔场CPUE存在负效应,这种温度的降低有可能来源于渔场上升流的季节性变换。

本研究通过对秘鲁鳀上升流流速的反演结合水温因素探究了上升流对渔场的影响,研究表明,秘鲁鳀渔场的形成需要适宜的海表风速、上升流流速以及上升流造成的海域适宜渔场水温环境的共同作用。本研究同时建立了秘鲁鳀渔场的CPUE估算公式,但是由于使用的CPUE是名义CPUE,因此这个公式只能反映2005—2009年秘鲁鳀渔场中CPUE变化,并不能对未来的CPUE进行预报。

有关厄尔尼诺和拉尼娜现象,以及海表面风场、上升流及它们带来的一系列海洋生态动力学的变化对渔汛阶段秘鲁鳀的资源丰度变动的的影响,及对渔场中渔船捕捞效率的变化的影响,都有待于今后研究。

#### 参考文献:

- [1] Pauly D, Tsukayama I. The Peruvian Anchoveta and its Upwelling Ecosystem: Three Decades of Change[M]. Manila, Philippines: ICLARM, 1987.
- [2] Cury P, Roy C. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 46(4): 670-680.
- [3] Bakun A, Weeks S J. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold?[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2-4): 290-299.
- [4] Yáñez E, Barbieri M A, Silva C, et al. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile[J]. Progress in Oceanography, 2001, 49(1-4): 581-596.
- [5] Gutiérrez M, Swartzman G, Bertrand A, et al. Anchovy (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*) spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt

- Current ecosystem, Peru, from 1983-2003[J]. *Fisheries Oceanography*, 2007, 16(2): 155-168.
- [6] Majluf P, De La Puente S, Christensen V. The little fish that can feed the world[J]. *Fish and Fisheries*, 2017, 18(4): 772-777.
- [7] Arellano C E, Swartzman G. The Peruvian artisanal fishery: Changes in patterns and distribution over time[J]. *Fisheries Research*, 2010, 101(3): 133-145.
- [8] Pickett M H, Schwing F B. Evaluating upwelling estimates off the west coasts of North and South America[J]. *Fisheries Oceanography*, 2006, 15(3): 256-269.
- [9] Rykaczewski R R, Checkley Jr D M. Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(6): 1965-1970.
- [10] Chelton D B, Deszoeke R A, Schlax M G, *et al.* Geographical variability of the first Baroclinic Rossby radius of deformation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(3): 433-460.
- [11] Guisan A, Edwards Jr T C, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2-3): 89-100.
- [12] 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 (in Chinese).
- [13] 陈新军, 高峰, 官文江, 等. 渔情预报技术及模型研究进展[J]. *水产学报*, 2013, 37(8): 1270-1280.
- Chen X J, Gao F, Guan W J, *et al.* Review of fishery forecasting technology and its models[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(8): 1270-1280(in Chinese).
- [14] Conover W J. 实用非参数统计[M]. 崔恒建, 译. 第3版. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 195-343.
- Conover W J. *Practical Nonparametric Statistics*[M]. Cui J H, trans. 3rd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006: 195-343 (in Chinese).
- [15] 徐冰, 陈新军, 李建华. 海洋水温对茎柔鱼资源补充量影响的初探[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(5): 878-883.
- Xu B, Chen X J, Li J H. Preliminary study on the influence of water temperature on the recruitment of *Dosidicus gigas*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(5): 878-883(in Chinese).
- [16] 李纲, 陈新军. 夏季东海渔场鲈鱼产量与海洋环境因子的关系[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(1): 1-8.
- Li G, Chen X J. Study on the relationship between catch of mackerel and environmental factors in the East China Sea in summer[J]. *Journal of Marine Science*, 2009, 27(1): 1-8(in Chinese).
- [17] 方学燕. 基于地统计学的秘鲁外海茎柔鱼资源分布的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- Fang X Y. The preliminary study of abundance distribution for *Dosidicus gigas* in the high sea off Peru based on Geostatistics[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016 (in Chinese).
- [18] 胡贯宇, 陈新军, 汪金涛. 基于不同权重的栖息地指数模型预报阿根廷滑柔鱼中心渔场[J]. *海洋学报*, 2015, 37(8): 88-95.
- Hu G Y, Chen X J, Wang J T. Forecasting fishing ground of *Illex argentinus* based on different weight habitat suitability index in the southwestern Atlantic[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(8): 88-95.
- [19] 于杰, 王新星, 李永振, 等. 南海中西部渔场上升流时空变化特征分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(6): 104-113.
- Yu J, Wang X X, Li Y Z, *et al.* Analysis of the upwelling in the fishing ground in Midwestern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(6): 104-113(in Chinese).
- [20] 何发祥. 闽南—台湾浅滩渔场的上升流演变及其与渔业的关系研究[J]. *海洋学报*, 1988, 10(3): 346-354.
- He F X. The changes of the upwelling in Minnan-Taiwan shallow shoal fishing ground and their relationship to the fishery[J]. *Haiyang Xuebao*, 1988, 10(3): 346-354(in Chinese).
- [21] 陈新军. 渔业资源与渔场学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 116-141.
- Chen X J. *Fishery Biology and Oceanography*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 116-141 (in Chinese).
- [22] 官文江, 田思泉, 王学昉, 等. CPUE标准化方法与模型选择的回顾与展望[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(4): 852-862.
- Guan W J, Tian S Q, Wang X F, *et al.* A review of methods and model selection for standardizing CPUE[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(4): 852-862(in Chinese).

- [23] 陈芑, 汪金涛, 陈新军. 秘鲁鳀资源变动及与海洋环境要素的关系研究进展[J]. 海洋渔业, 2016, 38(2): 206-216.  
Chen P, Wang J T, Chen X J. Review on relationship between oceanic environment factors and population dynamics of anchoveta *Engraulis ringens*[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(2): 206-216(in Chinese).
- [24] Bakun A, Black B A, Bograd S J, *et al.* Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems[J]. Current Climate Change Reports, 2015, 1(2): 85-93.
- [25] Bakun A. Active opportunist species as potential diagnostic markers for comparative tracking of complex marine ecosystem responses to global trends[J]. ICES Journal of Marine Science, 2014, 71(8): 2281-2292.
- [26] Chavez F P, Messié M. A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems[J]. Progress in Oceanography, 2009, 83(1-4): 80-96.
- [27] Muck P, Sanchez G. The importance of mackerel and horse mackerel predation for the Peruvian anchoveta stock (a population and feeding model)[M]//Pauly D, Tsukayama I. The Peruvian Anchoveta and its Upwelling Ecosystem: Three Decades of Change. Callao: ICLARM Studies and Reviews, 1987: 276-293.
- [28] 何青青. 舟山近海海域夏季上升流时空特征及其与风场的关系[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.  
He Q Q. Study on the temporal and spatial characteristics of summer upwelling along Zhoushan coastal and relationship to wind[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [29] Peterman R M, Bradford M J. Wind speed and mortality rate of a marine fish, the northern anchovy (*Engraulis mordax*)[J]. Science, 1987, 235(4786): 354-356.
- [30] Muck P, Rojas D M B, Antoniotti E. Comparative studies on feeding in larval Anchoveta (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*)[C]//Pauly D, Muck P, Mendo J, *et al.* The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions. Callao, Perú: ICLARM, 1989, 18: 86-96.
- [31] Espinoza P, Bertrand A. Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt current system[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2-4): 215-227.
- [32] Morales C E, Braun M, Reyes H, *et al.* Anchovy larval distribution in the coastal zone off northern Chile: the effect of low dissolved oxygen concentrations and of a cold-warm sequence (1990-95)[J]. Investigaciones Marinas, 1996, 24: 77-96.
- [33] Bertrand A, Chaigneau A, Peraltilla S, *et al.* Oxygen: A fundamental property regulating pelagic ecosystem structure in the coastal southeastern tropical Pacific[J]. PLoS One, 2011, 6(12): e29558.
- [34] Swartzman G, Bertrand A, Gutiérrez M, *et al.* The relationship of anchovy and sardine to water masses in the Peruvian Humboldt Current System from 1983 to 2005[J]. Progress in Oceanography, 2008, 79(2-4): 228-237.

## Influence of Peruvian upwelling on the anchoveta (*Engraulis ringens*) fishing ground

CHEN Peng<sup>1,2</sup>, CHEN Xinjun<sup>1,2,3,4\*</sup>, LEI Lin<sup>1,2,3,4</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Anchoveta (*Engraulis ringens*) forms the largest production in the world's single species fishery. Therefore, study of the relationship between the Peruvian upwelling and *E. ringens* fishing ground could help understand the mechanisms about the formation of this fish's fishing ground. Therefore, Our study aims to summarize the regularity of the upwelling and temperature to the *E. ringens* fishing ground formation. In this study, we used the upwelling velocity (UV) as the index of Peruvian upwelling, and combined the temperature (T) and temperature anomaly (TA) data in the fishing ground from 2005 to 2009 to analyze their effects on the fishing ground which was indicated by the nominal catch per unit effort (CPUE). The results showed that UV, T and TA in the fishing ground was  $1.42 \times 10^{-5}$ — $7.44 \times 10^{-5}$  m/s, 16.61~19.42 °C and 1.87—1.69 °C, respectively. In addition, we used the generalized additive model (GAM) to analyze the influence of environmental factors on CPUE. The GAM could explain the changing trend of nominal CPUE as 67%. The optimum range for each environmental factor based on GAM was UV: less than  $4.5 \times 10^{-5}$  m/s; T: 18.4—19.5 °C and TA: -2—0.2 °C. When UV was lower than  $4.5 \times 10^{-5}$  m/s, the CPUE nearly remained the same with UV. However, when UV was higher than this value, the GAM showed the decreasing trend of CPUE. The studies suggested that the upwelling's impact to the *E. ringens* fishing ground was not following the pattern "the higher, the better". There was also optimum range of upwelling velocity for the fishing ground. the results indicated that the optimum sea surface wind, moderate upwelling and appropriate temperature condition were beneficial to the fishing ground formation.

**Key words:** *Engraulis ringens*; Peruvian upwelling; fishing ground; sea water temperature; sea water temperature anomaly

**Corresponding author:** CHEN Xinjun. E-mail: xjchen@shou.edu.cn

**Funding projects:** Public Science and Technology Research Funds Project of Ocean (20155014); Shanghai Scientific and Technological Innovative Action Plan (14DZ1205000); National Key Technology R&D Program the Ministry of Science and Technology of China (2013BAD13B01)