

基于环境因子的东南太平洋茎柔鱼资源 补充量预报模型研究*

汪金涛^{1,4} 陈新军^{1,2,3,4}① 高峰^{1,2,3,4} 雷林^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;
3. 国家远洋渔业工程技术研究中心 上海 201306; 4. 远洋渔业协同创新中心 上海 201306)

提要 东南太平洋茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是短生命周期种类, 其资源量极易受到海洋环境变化的影响。根据 2003—2012 年我国鱿钓船在东南太平洋的生产统计数据, 以及茎柔鱼栖息地的海表温度(SST)、海面高度(SSH)、叶绿素 *a* 浓度(chl *a*)数据, 利用相关性分析法分析茎柔鱼资源丰度和补充量(以单位捕捞努力量渔获量为指标, t/d)与栖息海域 20°S—20°N、110°W—70°W 的 SST、SSH、chl *a* 浓度的相关性, 获取相关系数大的关键海区位置, 同时加入茎柔鱼产卵场、索饵场最适表层水温范围占总面积的比例(分别用 P_S 、 P_F 表示)两个参数, 建立三种基于主要环境因子的误差反向传播(EBP)神经网络资源补充量预报模型, 进行了比较。结果表明: 茎柔鱼资源丰度与 SST、SSH、chl *a* 浓度的相关系数最大值海域为 7 月份的 Point1(13°N, 102°W)海区、9 月份的 Point3(11°N, 102°W)海区和 3 月份的 Point5(8°S, 107°W)海区; 资源补充量与 SST、SSH、chl *a* 浓度的相关系数最大值海域为 6 月份的 Point2(8°N, 103.5°W)海区、2 月份的 Point4(12°N, 97.5°W)海区和 10 月份的 Point6(10°S, 93.5°W)海区。EBP 神经网络预报模型结果认为: 基于产卵环境关键影响因子的方案 2(以 Point2 的 SST、Point4 的 SSH、Point6 的 chl *a* 浓度、 P_S 作为模型输入因子)和基于全部环境关键影响因子的方案 3(以 Point1 与 Point2 的 SST、Point3 与 Point4 的 SSH、Point5 与 Point6 的 chl *a* 浓度、 P_S 、 P_F 作为模型输入因子)的两种神经网络预报模型均方误差较小, 其准确率可达 90%左右。

关键词 东南太平洋; 茎柔鱼; 资源补充量预报; 神经网络

中图分类号 S937 doi: 10.11693/hyhz20140300088

茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)是一种大洋性头足类, 广泛分布于东太平洋海域(王尧耕等, 2005)。目前世界上多个国家和地区已对茎柔鱼资源进行了开发和利用, 年产量超过 80 万吨(Nigmatullin *et al.*, 2001; Waluda *et al.*, 2004)。资源量预报属于中长期渔情预报的一种, 对资源补充量进行精确的预报是确保渔业资源科学管理、合理开发的关键(陈新军, 2004)。目前, 已有一些关于茎柔鱼资源补充量的研究。如 Anderson 等(2001)和 Waluda 等(2006)研究认为, 厄尔

尼诺和拉尼娜事件会影响茎柔鱼幼体和成熟体的生长、栖息等生活史过程。陈新军等(2006)指出, 茎柔鱼资源状况与海洋环境关系密切, 特别是厄尔尼诺和拉尼娜事件。徐冰(2012)等利用典型相关性分析, 分析了表温(SST)、表温距平均值(SSTA)、茎柔鱼产卵场、索饵场最适表层水温范围占总面积的比例(分别用 P_S 、 P_F 表示)与资源丰度、补充量相关性, 并建立了基于 SST 因子的资源丰度线性预报模型。也有研究(Ichii *et al.*, 2002)指出, 水温并非影响茎柔鱼资

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 项目), 2012AA092303 号; 国家发改委产业化专项项目, 2159999 号; 上海市科技创新行动计划项目, 12231203900 号; 国家科技支撑计划项目, 2013BAD13B01 号。汪金涛, 博士生, E-mail: wangjintao0510@163.com

通讯作者: 陈新军, 教授, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

收稿日期: 2014-03-27, 收修改稿日期: 2014-05-23

源丰度和补充量的主要限制因子。以上前人的研究基本上是围绕水温因子展开的。因此,本文在前人研究的基础上增加更多的海洋环境因子,尝试找出更为合适的影响茎柔鱼资源补充量的海洋环境指标,并利用误差反向传播神经网络(Error Backpropagation Network, EBP)建立更为准确的资源补充量预报模型,为东南太平洋海域茎柔鱼的科学管理和生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

东南太平洋茎柔鱼的生产数据来自上海海洋大学鱿钓技术组,时间为2003年1月—2012年12月。内容包括日期、经度、纬度、日产量、渔船数。

SST、SSH、chl *a* 浓度数据均来自 <http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>, 时间分辨率为月; SST 空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, SSH、chl *a* 浓度空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; 经纬度范围是 $20^\circ\text{S}—20^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{W}—70^\circ\text{W}$ 。

本文环境数据空间分辨率统一为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 不同空间尺度的环境数据都是由原始空间尺度转换而成,如每一个空间尺度为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 SST 数据是计算 25 个原始数据的平均值而得到,空间分辨率转换工作由作者自主开发软件 FisheryDataProcess 完成。

1.2 研究方法

1.2.1 研究海域范围 前人研究表明,茎柔鱼广泛分布于东太平洋的加利福尼亚(37°N)到智利(47°S)的海域中,在赤道附近海域可达到 140°W (Nigmatullin *et al.*, 2001; Waluda *et al.*, 2004)。根据我国鱿钓船的实际作业情况,选定本研究的海域范围为 $20^\circ\text{S}—20^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{W}—70^\circ\text{W}$ 。

1.2.2 CPUE 计算 CPUE(Catch per unit effort)定义如下:

$$\text{CPUE}_Y = \frac{\text{Catch}_Y}{\text{Ves}_Y} \quad (1)$$

其中 Catch_Y 、 Ves_Y 分别表示 *Y* 年的捕捞产量和作业渔船数。计算每年的单船平均日产量 CPUE(t/d)作为茎柔鱼资源丰度指标。由于茎柔鱼是短生命周期,产卵后即死,没有剩余群体的生物学特性,因此 CPUE 也可作为反映其资源补充量的指标。

1.2.3 影响因子选取 茎柔鱼资源补充量与其产卵场和索饵场的栖息环境密切相关(Nigmatullin *et al.*,

2001; Waluda *et al.*, 2004; 陈新军等, 2006; 徐冰等, 2012)。因此,根据公式(2)分别计算分析 1—12 月份研究海域每点($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) SST、SSH、chl *a* 浓度组成的时间序列值与本年和次年 CPUE 组成的时间序列值的相关性,选取相关性高海域的 SST、SSH、chl *a* 浓度作为茎柔鱼资源补充量的影响因子。其中, SST、SSH、chl *a* 浓度与本年 CPUE 相关性高的海域表示索饵栖息环境对资源补充量的影响; SST、SSH、chl *a* 浓度与次年 CPUE 相关性高的海域表示产卵栖息环境对资源补充量的影响。

$$r = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

其中 x 、 y 分别表示环境、CPUE 组成的系列值, \bar{x} 、 \bar{y} 为 x 、 y 的平均值, r 表示相关系数。

产卵场、索饵场最适表层水温范围占总面积的比例是衡量栖息地环境优劣的参量(Nigmatullin *et al.*, 2001; Waluda *et al.*, 2004)。有文献表明(Nigmatullin *et al.*, 2001; Taibe *et al.*, 2001; Ichii *et al.*, 2002), 9 月份茎柔鱼产卵时适宜 SST 为 $24—28^\circ\text{C}$; 7 月份茎柔鱼的索饵时适宜 SST 为 $17—22^\circ\text{C}$ 。因此分别计算 9 月份产卵时、7 月份索饵时最适表层水温范围占总面积的比例(分别用 P_S 、 P_F 表示),用 P_S 、 P_F 表达产卵场索饵场栖息环境的适宜程度。

1.2.4 建立预报模型 EBP 属于多层前向神经网络,采用误差反向传播的监督算法,能够学习和存储大量的模式映射关系,已被广泛应用于各个领域(Benediktsson *et al.*, 1990; Hush *et al.*, 1993)。

EBP 神经网络有输入层、隐含层和输出层,每层由不同个数的神经元或节点组成(图 1),其学习的过程分为信号的正向传播与误差的反向传播两个阶段。在正向传播阶段,输入信息从输入层经隐含层传向输出层,在输出层产生输出信号。在信号的向前传递过程中网络的权值固定不变,每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出,则转入误差反向传播。在反向传播阶段,未能满足精度要求的误差信号由输出端开始,以某种方式逐层向前传播,并将误差分摊给各层的所有单元,依据误差信号动态的调整各单元的连接权值。通过周而复始的正向传播和反向调节,神经元间的权值得到不断的修正。当误差满足设定的精度后,将停止学习。

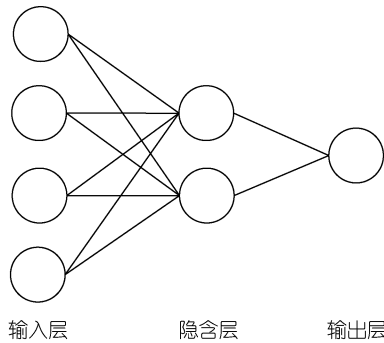


图1 EBP神经网络结构

Fig.1 The structure of EBP(error backpropagation network)

EBP神经网络的建立在 Matlab 软件中完成, 首先对样本进行归一化处理, 使样本处在 0—1 间。使用神经网络工具箱的拟合工具, 将 2003—2011 年的样本作为训练样本, 2012 年的样本作为验证样本。网络设计的参数为: 输入层神经元个数根据 1.2.3 选定的显著相关因子、 P_F 以及 P_S 的组合而决定, 输出层神经元 1 个为 CPUE, 隐含层神经元个数根据经验公式(公式(3))得到。学习速率为 0.1, 动量参数为 0.5。网络训练的终止参数为: 最大训练批次 100 次, 最大误差给定 0.001。模型训练 10 次, 取最优结果, 同时防止过拟合状态的出现。

$$l = \sqrt{n+m} + d \quad (3)$$

其中 l 、 n 、 m 分别表示输入层、隐藏层、输出层神经元个数, d 为 0 到 10 之间的常数。

EBP 模型均以均方误差(MSE)作为判断最优模型的标准。拟合残差是将预报值与实际值进行比较所得, 其函数定义为 $MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2$, y_k 为 CPUE 的实际值, \hat{y}_k 为 CPUE 的预报值, N 表示 CPUE 的个数, k 表示 CPUE 序号。

2 结果

2.1 年 CPUE 变化

图 2 显示, 2003—2012 年茎柔鱼 CPUE 年间波动较大, CPUE 较低年份出现在 2005 年、2008 年、2009 年和 2012 年, 最低年份 CPUE 出现在 2007 年为 4.03t/d, CPUE 最高年份出现在 2004 年为 7.07t/d。

2.2 特征环境因子分析

在 1—12 月份 20°S—20°N、110°W—70°W 海域范围内, 各月每一个 0.5°×0.5°的 SST 与本年和次年 CPUE 作相关性分析, 发现 SST 与本年 CPUE 相关性最大值出现在 7 月份的 13°N, 102°W(Point1)(表 1, 图 3,

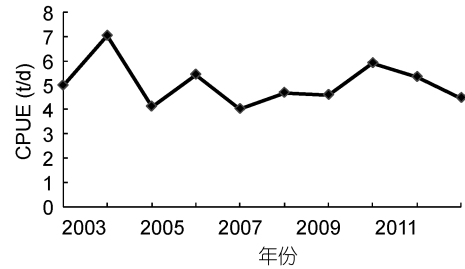


图2 2003—2012 年东南太平洋茎柔鱼 CPUE 变化

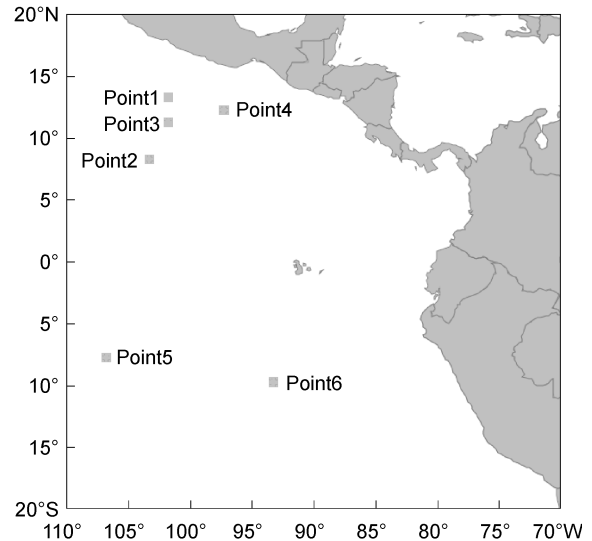
Fig.2 Variation in CPUE of *Dosidicus gigas* during 2003 to 2012

图3 与茎柔鱼资源补充量显著相关的关键海区

Fig.3 The key points significantly associated with CPUE and its environmental factors

图 4a), SST 与次年 CPUE 相关性最大值出现在 6 月份的 8°N, 103.5°W(Point2)(表 1, 图 3, 图 4c)处。

在 1—12 月份 20°S—20°N、110°W—70°W 海域范围内, 各月每一个 0.5°×0.5°的 SSH 与本年和次年 CPUE 作相关性分析, 发现 SSH 与本年 CPUE 相关性最大值出现在 9 月份的 11°N, 102°W(Point3)(表 1, 图 3, 图 4b)处, SSH 与次年 CPUE 相关性最大值出现在 2 月份的 12°N, 97.5°W(Point4)(表 1, 图 3, 图 4d)处。

在 1—12 月份 20°S—20°N、110°W—70°W 海域范围内, 各月每一个 0.5°×0.5°的 chl *a* 浓度与本年和次年 CPUE 作相关性分析, 发现 chl *a* 浓度与本年 CPUE 相关性最大值出现在 3 月份的 8°S, 107°W(Point5)(表 1, 图 3, 图 4e)处, chl *a* 浓度与次年 CPUE 相关性最大值出现在 10 月份的 10°S, 93.5°W(Point4)(表 1, 图 3, 图 4f)处。

2.3 预报模型实现及结果比较

利用选定的关键海区环境因子以及 P_S 、 P_F 的不同组合作为 EBP 预报模型的输入因子, 构造多种 EBP 预报模型, 分别为:

表 1 关键海区环境因子与资源丰度、补充量的相关性分析参数

Tab.1 Correlation of parameters between environmental factors at the key points and the CPUE

参数	7月 Point1 的 SST	6月 Point2 的 SST	9月 Point3 的 SSH	2月 Point4 的 SSH	3月 Point5 的 chl a 浓度	10月 Point6 的 chl a 浓度
位置	13°N, 102°W	8°N, 103.5°W	11°N, 102°W	12°N, 97.5°W	8°S, 107°W	10°S, 93.5°W
相关系数 R	0.86	0.91	0.91	0.92	0.94	0.92
可信度 P	0.001	0.0002	0.0002	0.0002	0.00003	0.0001

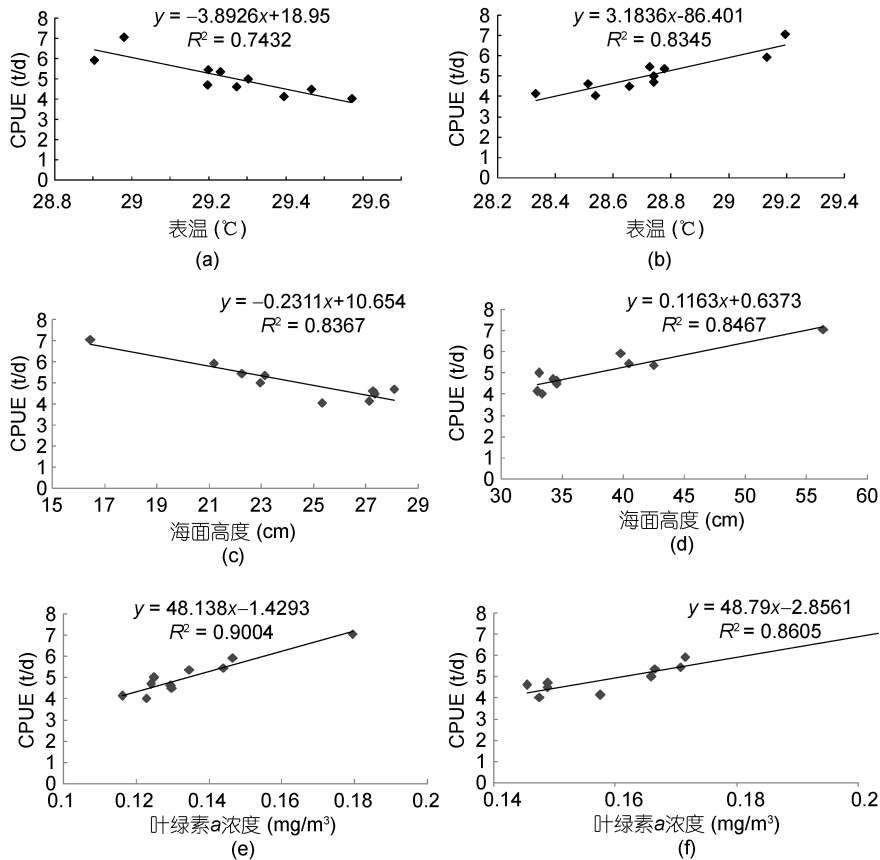


图 4 特征环境因子与茎柔鱼资源补充量的线性关系式

Fig.4 The linear regression of CPUE and environmental factors at the key points

方案 1: 选取 Point1 的 SST、Point3 的 SSH、Point5 的 chl a 浓度、 P_F 共 4 个因子作为输入层, 构造 4: 5: 1 的 EBP 网络结构, 表示利用索饵环境关键影响因子建立的预报模型。

方案 2: 选取 Point2 的 SST、Point4 的 SSH、Point6 的 chl a 浓度、 P_S 共 4 个因子作为输入因子, 构造 4: 5: 1 的网络结构, 表示利用产卵环境关键影响因子建立的预报模型。

方案 3: 选择 Point1 与 Point2 的 SST、Point3 与 Point4 的 SSH、Point5 与 Point6 的 chl a 浓度、 P_S 、 P_F 共 8 个因子作为输入因子, 构造 8: 9: 1 的网络结构, 表示利用综合环境关键因子建立的预报模型。

利用 Matlab 进行建模, 计算三种方案下的均方误差(图 5), 方案 2 和方案 3 的均方误差相近且优于

方案 1, 其准确率在 90%左右。

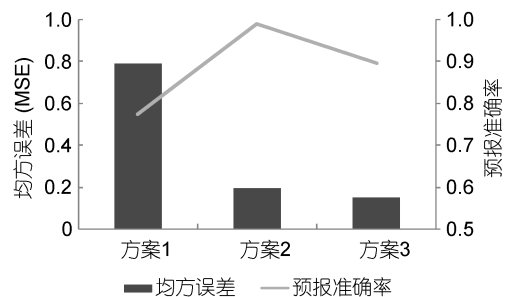


图 5 不同神经网络模型的模拟结果和准确率

Fig.5 The simulation result of different neural network models

3 讨论

茎柔鱼属于短生命周期种类。通常认为, 东太平

洋海域受两个低速东部边界流(秘鲁海流和加利福尼亚海流)影响,并在信风作用下产生上升流。上升流区域环境对茎柔鱼幼体和成熟体的生长、栖息等生活史过程具有十分重要的影响。两海流的相对强弱影响上升流区域的栖息环境,进而影响茎柔鱼的产卵、索饵等过程,最终影响年度资源丰度的变化。如 2003 年 Point2 的 SST 为 29.2°C, 温度较高, 形成产卵场 P_S 比例大, 产卵环境好, 同时 2004 年 Point1 的 SST 为 28.98°C 温度偏低, 说明秘鲁海流强劲, 形成的上升流中海水的营养盐更为丰富, 索饵环境较好, 形成 2004 年 CPUE 较高的原因。相反地, 2006 年 Point2 的 SST 为 28.5°C, 温度偏低, 形成产卵场 P_S 比例小,

产卵环境较差, 加上 2007 年 Point1 的 SST 为 29.6°C 温度偏高, 秘鲁海流势力弱, 索饵环境较差, 导致 2007 年的 CPUE 很低。

已有的研究表明, 利用茎柔鱼栖息地环境因子来预报茎柔鱼资源补充量是可行的(Taipe *et al*, 2001; 陈新军等, 2006; 徐冰等, 2012)。本文利用 SST、SSH、chl *a* 浓度三种环境因子与 CPUE 进行相关性分析, 选取的相关系数最大值点与随机选取的 2010 年相同月份的环境因子叠加发现(图 6), 关键海区均在环境因子等值线之上或附近, 这些位置环境因子的变化可以作为资源丰度或资源补充量的一个“指示器”, 其中 SST 位置与徐冰(2012)的研究结果基本相似。

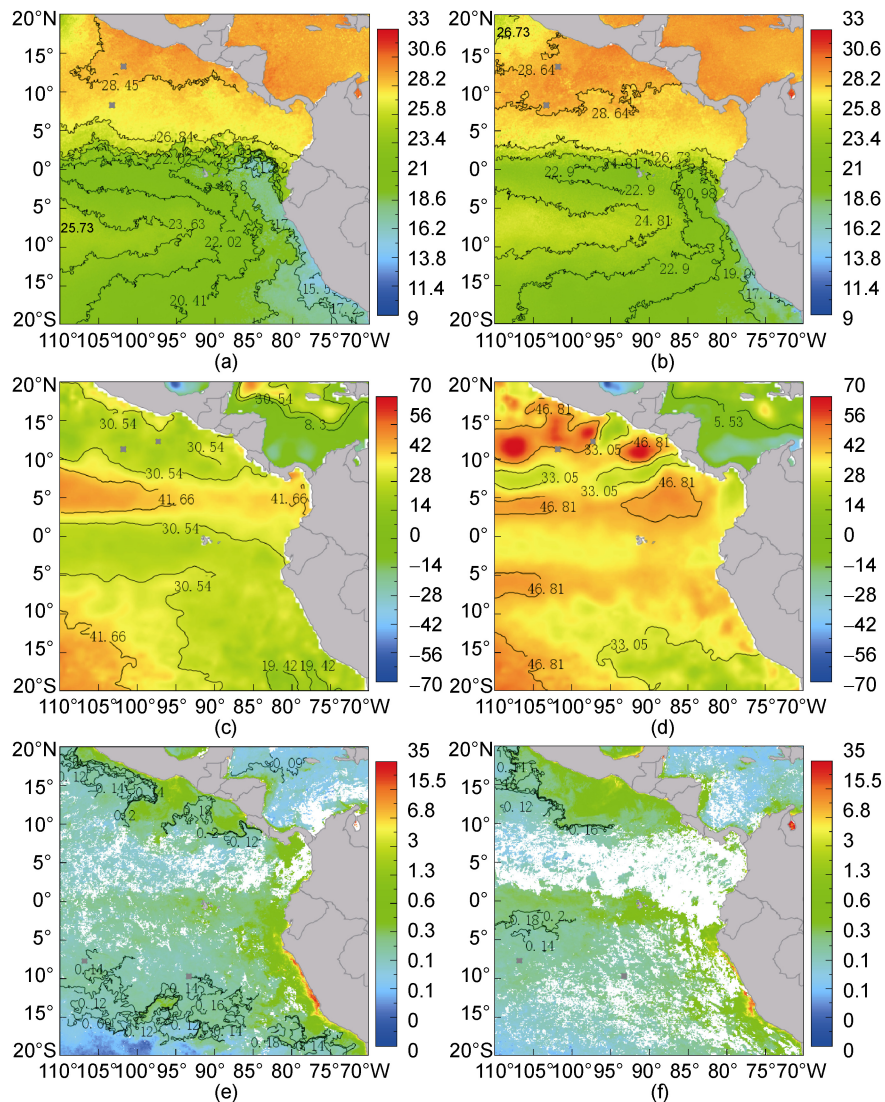


图 6 关键区域与其 2010 年环境因子, (a)(b)为 7 月份和 6 月份 SST, (c)(d)为 9 月份和 2 月份 SSH, (e)(f)为 3 月份和 10 月份 chl *a* 浓度

Fig.6 The key points and its environmental data in 2010

a: SST in July; b: SST in June; c: SSH in September; d: SSH in February; e: chl-*a* concentration in March; f: chl-*a* concentration in October

比较三种方案下的 EBP 神经网络模型发现(图 5) 方案 2 和方案 3 结果相近且优于方案 1, 表明产卵栖息环境对资源补充量的影响要大于索饵栖息环境对资源补充量的影响, 比较符合短生命周期种类的特征。

茎柔鱼资源补充量预报是一件极其复杂的系统工作。茎柔鱼在其早期生活阶段不仅仅受到海域环境因素的影响, 还受到来自外部和内部的捕食者的影响, 利用其产卵、索饵等生活阶段海域环境因素进行资源量评估只是其中一种重要方法。今后需要结合物理海洋学、生态系统动力学等, 综合其个体的生长、死亡等因素以及海流、初级生产力等因子, 建立更全面、科学的茎柔鱼资源补充量预报模型, 为茎柔鱼资源合理利用和科学管理提供依据。

参 考 文 献

- 王尧耕, 陈新军, 2005. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业. 北京: 海洋出版社, 240—264
- 陈新军, 2004. 渔业资源与渔场学. 北京: 海洋出版社, 169—192
- 陈新军, 赵小虎, 2006. 秘鲁外海茎柔鱼产量分布及其与表温关系的初步研究. 上海水产大学学报, 15(1): 65—70
- 徐 冰, 2012. 秘鲁外海茎柔鱼渔场时空分布及资源补充量与环境的关系. 上海: 上海海洋大学硕士学位论文, 45—50
- 徐 冰, 陈新军, 李建华, 2012. 海洋水温对茎柔鱼资源补充量影响的初探. 上海海洋大学学报, 21(5): 878—883
- 徐 冰, 陈新军, 陆化杰等, 2013. 秘鲁外海茎柔鱼资源丰度和补充量与海表温度的相关关系. 海洋渔业, 35(3): 296—302
- Anderson C I H, Rodhouse P G, 2001. Life cycles, oceanography and variability: ommastrephid squid in variable oceanography environments. *Fisheries Research*, 54(1): 133—143
- Benediktsson J, Swain P H, Ersoy O K, 1990. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4): 540—552
- Cairistiona I, Anderson H, Rodhouse P, 2001. Life cycles, oceanography and variability: Ommastrephid squid in variable oceanographic environments. *Fisheries Research (Amsterdam)*, 54(1): 133—143
- Hush D R, Horne B G, 1993. Progress in supervised neural networks. *Signal Processing Magazine*, 10(1): 8—39
- Ichii T, Mahapatra K, Watanabe T *et al*, 2002. Occurrence of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* aggregations associated with the countercurrent ridge off the Costa Rica Dome during 1997 El Niño and 1999 La Niña. *Marine Ecology*, 231: 151—166
- Nigmatullin C M, Nesis K N, Arkhipkin A, 2001. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (*Cephalopoda: Ommastrephidae*). *Fisheries Research*, 54(1): 9—19
- Taípe A, Yamashiro C, Mariategui L *et al*, 2001. Distribution and concentrations of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off the Peruvian coast between 1991 and 1999. *Fisheries Research (Amsterdam)*, 54(1): 21—32
- Waluda C, Yamashiro C, Elvidge C *et al*, 2004. Quantifying light-fishing for *Dosidicus gigas* in the eastern Pacific using satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 129—133
- Waluda C, Yamashiro C, Rodhouse P, 2006. Influence of the ENSO cycle on the light-fishery for *Dosidicus gigas* in the Peru Current: An analysis of remotely sensed data. *Fisheries Research*, 79(1—2): 56—63

FISH RECRUITMENT FORECASTING FOR *DOSIDICUS GIGAS* BASED ON MULTI-ENVIRONMENTAL FACTORS IN THE SOUTHEASTERN PACIFIC

WANG Jin-Tao^{1,4}, CHEN Xin-Jun^{1,2,3,4}, GAO Feng^{1,2,3,4}, LEI Lin^{1,2,3,4}

(1. College of Marine Sciences of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract *Dosidicus gigas* is a short-lived squid and is sensitive to environmental changes with great abundance fluctuations. Based on the fishing production data from Chinese squid jigging fleets during 2003 to 2012 in the southeastern Pacific, combined with sea surface temperature (SST), sea surface height (SSH), chlorophyll-*a* (chl-*a*) concentration in the habitat ground, relationships between the SST, SSH, chl-*a* concentration and the area occupied by favorable SST in spawning ground (defined as those with temperatures in the range 24—28°C, expressed as P_S), the area occupied by favorable SST in feeding ground (defined as those with temperatures in the range of 17—22°C, expressed as P_F) were calculated and analyzed by different methods, and then recruitment forecasting models were established based on the above environmental factors. The result shows that the correlations between CPUE (catch per unit effort) and environmental factors are significant at six key points, i.e., Point1(13°N, 102°W) in July, Point 3(11°N, 102°W) in September, Point 5(8°S, 107°W) in March, Point 2(8°N, 103.5°W) in June, Point 4(12°N, 97.5°W) in February, and Point 6(10°S, 93.5°W) in October. The models were developed by using Error Backpropagation Network (EBP), in which the key points, P_S , and P_F are involved. It is found that the model with SST at Point 2, SSH at Point 4, concentration of chl-*a* concentration at Point 6, and P_S ; and the model with SST at Point 1 and Point 2, SSH at Point 3 and Point 4, chl-*a* concentration at Point 5 and Point 6, P_S , and P_F are equally good, with which the forecasting accuracy rate could reach at least 90%.

Key words southeastern Pacific; *Dosidicus gigas*; forecasting model of resources recruitment; neural network