

文章编号: 1000-0615(2018)05-0704-07

DOI: 10.11964/jfc.20170410811

基于海表温因子的太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度 预测模型比较

张 硕^{1,2,3,4}, 李 莉¹, 陈新军^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海海洋大学, 上海 201306;

3. 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;

4. 农业部大洋渔业开发重点实验室, 上海海洋大学, 上海 201306)

摘要: 太平洋褶柔鱼是世界上重要的大洋性经济柔鱼类资源, 其资源易受海洋环境因子的影响, 科学预测其资源丰度有利于科学生产和管理。本实验依据2000—2010年太平洋褶柔鱼冬生群单位捕捞努力量渔获量(CPUE), 以及产卵期间(1—3月)产卵场(28°~40°N、125°~140°E)的海表温(SST)数据, 进行SST与CPUE的相关性分析, 选取统计学有意义的SST作为影响资源丰度的因子, 分别建立多元线性和BP神经网络的资源丰度预报模型, 并利用2011和2012年的CPUE进行验证。结果显示, CPUE与产卵场1—3月SST相关系数较高的海域分别为1月的S1(30.5°N, 136.5°E)和S2(31.5°N, 136.5°E), 2月的S3(30.5°N, 137.5°E)和S4(30.5°N, 135.5°E), 3月的S5(37.5°N, 129.5°E)和S6(37.5°N, 130.5°E)。在多元线性及不同结构的BP神经网络等5种预报模型中, 结构为6-4-1的BP神经网络模型预测精度最高, 2011—2012年CPUE预测值精度平均为98%。研究表明, 30°~32°N、135°~138°E和37°~38°N、129°~131°E附近海域的6个环境因子代表着1—3月产卵场暖流(黑潮和对马海流)势力的强弱, 决定着当年太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度, 所建立的BP神经网络模型可作为其资源丰度的预测模型。

关键词: 太平洋褶柔鱼; 冬生群; 资源丰度; 预测模型; BP神经网络

中图分类号: S 934

文献标志码: A

太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)是世界上重要的大洋性经济柔鱼类, 主要分布在太平洋21°~50°N海域, 主要有冬生群、秋生群和夏生群等种群^[1-2]。冬生群分布最广, 在20世纪70年代以前, 该群体数量是最大的, 其产卵场位于日本九州西南东海大陆架外缘, 主要集中在东海的中部和北部, 产卵期为1—3月, 春夏季沿日本列岛两侧北上索饵, 秋冬季南下产卵^[1-2]。太平洋褶柔鱼生命周期约1年^[3-4], 产完卵即死亡, 因此其资源丰度由其补充量决定。已有研究表明^[5-7], 鱿鱼类的资源补充量与产卵场环境关系极其密

切, 并且可以用产卵场的环境来预测其资源丰度。唐峰华等^[8]、杨林林等^[9]、李建生等^[10]分析太平洋褶柔鱼渔场分布、性成熟指数、数量分布与环境因子的关系。胡飞飞等^[11]利用海表温等环境因子建立BP神经网络, 对太平洋褶柔鱼秋生群的资源补充量进行了研究。但目前对太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度预测还未见报道。为此, 本实验根据2000—2010年太平洋褶柔鱼冬生群产卵场环境因子与资源丰度等数据, 选择影响资源丰度最为显著的环境因子建立太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度预测模型, 为科学利用

收稿日期: 2017-04-24 修回日期: 2017-07-12

资助项目: 国家自然科学基金(41476129; 41276156); 海洋局公益性行业专项(20155014)

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

和管理太平洋褶柔鱼资源提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验数据

本研究采用的资源丰度(单位捕捞量渔获量, CPUE)数据来源于2013年太平洋褶柔鱼冬生群体的资源评估报告(<http://abchan.job.affrc.go.jp/digests26/index.html>), CPUE为1艘船1 d的产量, 可作为资源丰度的指标^[12], 时间为2000—2012年。产卵场(28°~40°N, 125°~140°E)^[1, 13]的海表温(SST)来源于(http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/IGOSS/data_products.html), 产卵期为1—3月。SST的时间分辨率为月, 空间分辨率为1°×1°。

1.2 实验方法

影响CPUE的指标选取 已有研究认为^[14], 产卵场环境因子可作为表征其资源丰度的预测指标。为此, 选择2000—2010年太平洋褶柔鱼冬生群产卵期间(1—3月)产卵场范围内每经纬度1°×1°的SST, 与其CPUE值做相关性分析, 选出在统计学上有意义海域的SST, 作为影响资源丰度的特征指标。

线性预报模型 根据“影响CPUE的指标选取”的分析结果, 以CPUE为因变量, 以影响资源丰度的特征指标为自变量, 建立资源丰度的预测模型。

BP神经网络 人工神经网络(artificial neural networks, ANN)是人工智能的重要组成^[15]。以BP(back propagation)模型在众多神经网络算法和模型中应用最为广泛, 是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络, 其网络结构由输入层、中间层(隐含层)和输出层, 每层由不同个数的神经元或节点组成。在BP网络中, 又以单隐层BP网的应用为最多^[16]。

BP神经网络的构建是在DPS数据处理系统(data processing system)软件中完成。研究以2000—2010年的数据作为训练样本, 2011、2012年的数据作为预测样本。网络设计参数: 输入层为影响资源丰度的特征指标, 隐含层为1层, 隐含层节点数一般设为输入层节点数的75%^[17]。输出层神经元为1个, 即实际的CPUE值。学习速率为0.1, 动态参数为0.6, 参数为

0.9, 允许误差为0.0001, 最大迭代次数为1000, 数据转换方法为标准化变换。以最小拟合残差作为判断最优模型的标准, 拟合残差是将输出层所输出的CPUE预报值与实测值进行比较所得的值, 其函数定义式^[18-19]:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2$$

式中, E 表示拟合残差值, y_k 为CPUE的实测值, \hat{y}_k 为CPUE的预测值, N 表示CPUE的个数, k 表示CPUE序号。

预报准确率的计算 将2011和2012年影响资源丰度的特征指标输入上述分别建立的预测模型, 得到CPUE预测值。计算预报准确率:

$$P = 1 - \frac{|y_k - \hat{y}_k|}{y_k}$$

式中, P 表示预测准确率, y_k 为CPUE的实测值, \hat{y}_k 为CPUE的预测值^[11]。

2 结果

2.1 年CPUE变化

2000—2012年太平洋褶柔鱼冬生群CPUE处于波动状态, 年CPUE在2.27~3.41 t/d, 平均CPUE为2.71 t/d。2006年CPEU出现最小值, 2007年为最大值(图1)。

2.2 影响资源丰度的特征指标选取

分别对2000—2010年1—3月28°N—40°N, 125°E—140°E产卵场的海表温与CPUE相关性分析发现(表1), 统计学上有意义的SST指标(图2)分别为1月的S1(30.5°N, 136.5°E)和S2(31.5°N, 136.5°E)($P < 0.01$); 2月的S3(30.5°N, 137.5°E)和S4(30.5°N, 135.5°E)($P < 0.01$); 3月的S5(37.5°N, 129.5°E)和S6(37.5°N, 130.5°E)($P < 0.01$)。因此, 影响资源丰度极为显著的海域主要集中在30°~32°N、135°~138°E和37°~38°N、129°~131°E附近海域, 上述海域为黑潮和对马暖流的前锋海域(图2)。

2.3 预报模型的构建

线性预报模型 根据“影响CPUE的指标选取”的结果, 选取S1、S2、S3、S4、S5、S6的SST的时间序列与当年CPUE的时间序列建立多元线性模型, 其方程:

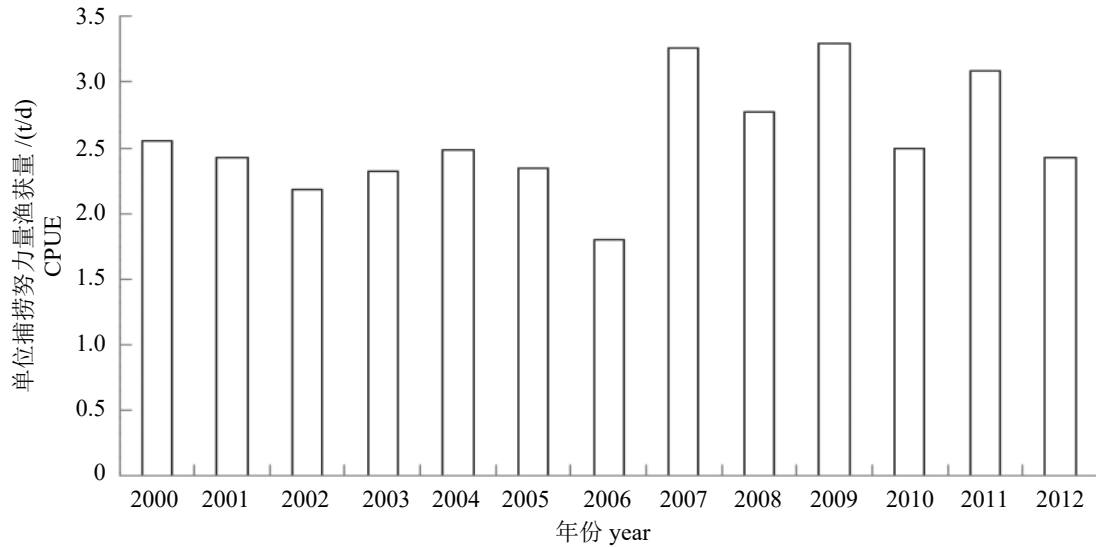


图 1 2000—2012年太平洋褶柔鱼冬生群体CPUE变化

Fig. 1 Variation in CPUE of winter-spawning group of *T. pacificus* from 2000 to 2012

表 1 关键海区海表温与太平洋褶柔鱼资源丰度的相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis between sea surface temperature at the key fishing area and the CPUE of *T. pacificus*

月份 month	2月 February	2月 February	3月 March	1月 January	3月 March	1月 January
位置 location	S3	S4	S5	S1	S6	S2
	30.5°N 137.5°E	30.5°N 135.5°E	37.5°N 129.5°E	30.5°N 136.5°E	37.5°N 130.5°E	31.5°N 136.5°E
相关系数 <i>r</i> correlation <i>r</i>	0.87*	0.84*	0.72*	0.71*	0.70*	0.70*

注: *表示显著相关
Notes: *means significant difference

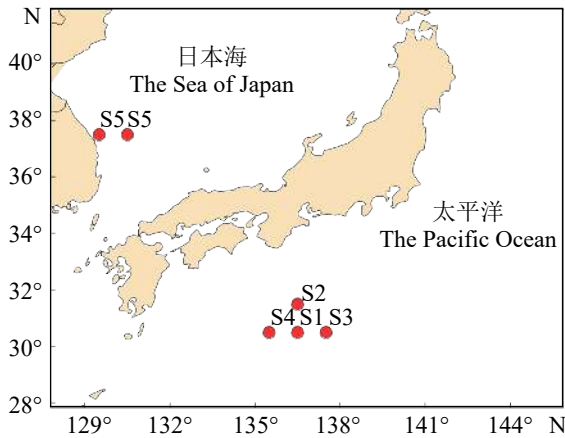


图 2 与太平洋褶柔鱼资源丰度显著相关的关键海区示意图

Fig. 2 The key fishing area significantly associated with CPUE of *T. pacificus*

$$Y = 0.931X_1 - 0.286X_2 - 0.647X_3 - 0.151X_4 + 0.728X_5 + 0.345X_6 - 26.567$$

其相关系数 *r* 为 0.94 ($P < 0.01$)。

BP神经网络预报模型 将S1、S2、S3、S4、S5、S6的SST作为输入因子，构建4种BP神经网络：①选取S3、S4、S5的SST时间序列共3个因子作为输入层，构建3-2-1的BP网络结构。②选取S3、S4、S5、S1的SST的时间序列共4个因子作为输入层，构建4-3-1的BP网络结构。③选取S3、S4、S5、S1、S6的SST时间序列共5个因子作为输入层，构建5-4-1的BP网络结构。④选取S3、S4、S5、S1、S6、S2的SST时间共6个因子作为输入层，构建6-4-1的BP结构。

将4种方案构建的模型重复拟合1000次得到最优结果。结构为3-2-1的BP神经网络模拟结构(图3-a)，在拟合次数达到1000次时，其拟合残差达到最小，为0.011 559。结构为4-3-1的BP神经网络模拟(图3-b)，在拟合次数达到966次时，其拟合残差达到最小，为0.000 544。结构为5-4-1的BP神经网络模拟结构(图3-c)，在拟合次数为825次时，其拟合残差达到最小，为0.000 190。结构为6-4-1的BP神经网络模拟结构(图3-d)所

示, 在拟合次数达到683次时, 其拟合残差达到最小, 为0.000 135。

2.4 模型预报精度比较

6-4-1的BP网络结构模型预测的2010—2012年太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度的结果平均精度最高, 达到98%; 多元线性回归模型认为网络结构为6-4-1的BP神经网络模型可以作为太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度的预测模型(表2)。

3 讨论

太平洋褶柔鱼资源补充量及其生长与海洋环境有着密切的关联^[13, 20], 本研究发现, 产卵场的SST对其资源丰度有着显著的影响, 尤其是

1—3月产卵场30°~32°N、135°~138°E和37°~38°N、129°~131°E附近海域, 上述海域为黑潮和对马暖流的前锋区。由表1可知, 6个相关性海域的SST与其CPUE呈现显著的正相关关系, 研究认为, 在较冷时期内CPUE会降低, 而SST上升时, CPUE会增加。以往学者的研究也表明^[13, 20], SST升高有利于太平洋褶柔鱼的生长以及CPUE的增加。这可能与太平洋褶柔鱼的产卵场SST适宜范围在较冷时期内减小, 而在温暖时期内SST适宜范围会增加^[21]有一定的关系。但是, 从多元线性模型分析, 如果6个海域的SST全部考虑在内, 则S1、S5、S6与其CPUE呈现显著的正相关, 累计系数为2.004, 而与S2、S3、S4呈现负相关, 累计系数为1.084, 若SST平

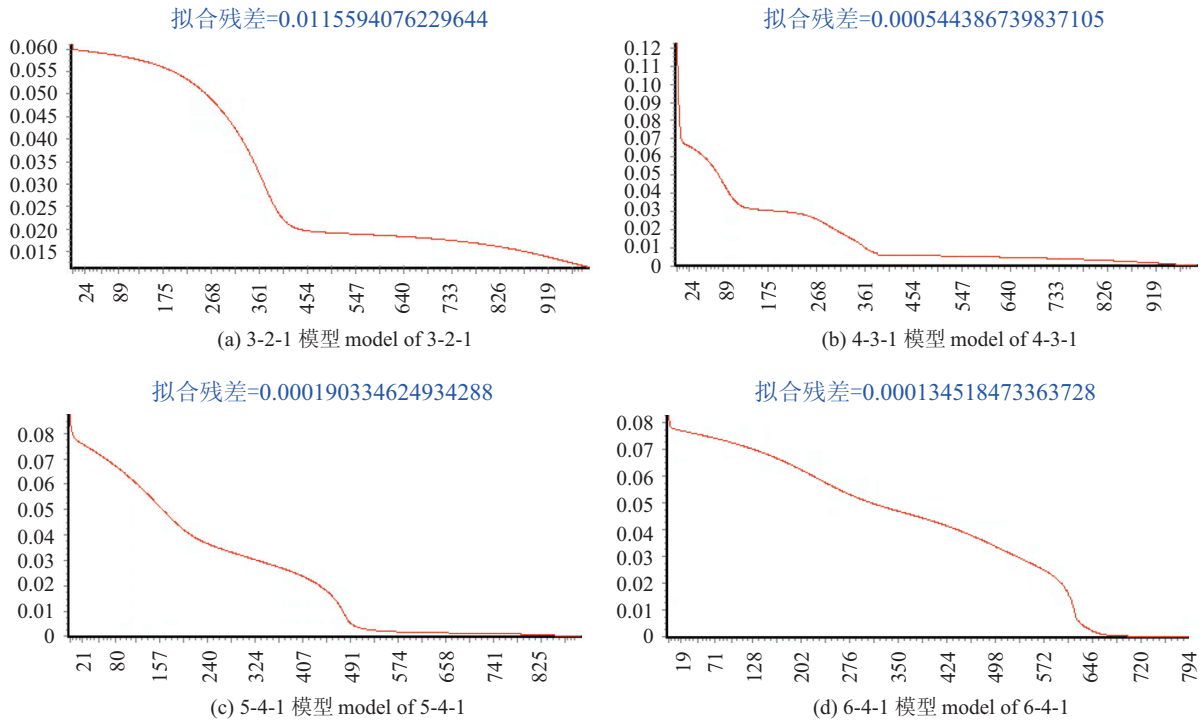


图3 4种BP神经网络预测模型的模拟结果

Fig. 3 The results obtained by four forecasting models based on BP neural networks

表2 4种BP神经网络模型的预测精度比较

Tab. 2 Comparison of prediction precision by four forecasting models based on BP neural networks

预测年份 forecast year	多元线性回归模型 multiple linear regression model	3-2-1网络结构模型 network structure model of 3-2-1	4-3-1网络结构模型 network structure model of 4-3-1	5-4-1网络结构模型 network structure model of 5-4-1	6-4-1网络结构模型 network structure model of 6-4-1
2011	0.548	0.775	0.959	0.757	0.968
2012	0.924	0.963	0.970	0.996	0.991
平均精度 mean accuracy	0.736	0.869	0.964	0.877	0.980

均升高1℃, CPUE则可以增加1 t/d, 因此总体上SST与CPUE还是呈现正相关关系, 也就是说在暖水事件情况下, 有利于太平洋褶柔鱼资源量的发生。此外, 从多元线性模型也可以看出, 太平洋褶柔鱼资源丰度与SST的关系极其复杂。

多种模型分析认为, BP神经网络的模型均优于线性模型, 且以6-4-1的BP神经网络模型为最优。一方面说明, BP神经网络模型比较适合于鱼类资源量波动的非线性复杂预测问题, 另一方面也说明, 产卵场30°~32°N、135°~138°E和37°~38°N、129°~131°E附近海域6个海区的表温均对太平洋褶柔鱼资源丰度产生影响, 结构为6-4-1的BP神经网络模型作为太平洋褶柔鱼冬生群资源丰度的预测模型更为可靠。

CPUE的变化是各种因素相互作用的结果, 产卵场SST是最主要的因素之一。气候变化^[20]、盐度、海流等环境因素^[1, 8, 10-11, 22]也会影响到其资源丰度。因此, 太平洋褶柔鱼资源丰度的预测是一项非常复杂的工作。在今后的研究中, 可以把更多的环境因子考虑加入到模型中, 结合物理海洋学等学科, 开展个体生态模型的研究, 为太平洋褶柔鱼资源科学管理和预测提供科学依据。

参考文献:

- [1] 王尧耕, 陈新军. 世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
Wang Y G, Chen X J. World oceans economies species of ommastrephidae resources and its fisheries[M]. Beijing: Ocean Press, 2005 (in Chinese).
- [2] 董正之. 世界大洋经济头足类生物学[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1991.
Dong Z Z. Biology of the economic species of cephalopods in the world oceans[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1991 (in Chinese).
- [3] Boyle P R. Cephalopod life cycles[M]. London: Academic Press, 1983.
- [4] 董正之. 中国动物志[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Dong Z Z. Chinese animal chronicles[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese).
- [5] Ackman R G, Tocher C S, McLachlan J. Marine phytoplankter fatty acids[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1968, 25(8): 1603-1620.
- [6] Leporati S C, Pecl G T, Semmens J M. Cephalopod hatchling growth: The effects of initial size and seasonal temperatures[J]. Marine Biology, 2007, 151(4): 1375-1383.
- [7] Forsythe J W. Accounting for the effect of temperature on squid growth in nature: From hypothesis to practice[J]. Marine & Freshwater Research, 2004, 55(4): 331-339.
- [8] 唐峰华, 史赞荣, 朱金鑫, 等. 海洋环境因子对日本海太平洋褶柔鱼渔场时空分布的影响[J]. 中国水产科学, 2015, 22(5): 1036-1043.
Tang F H, Shi Y R, Zhu J X, et al. Influence of marine environment factors on temporal and spatial distribution of Japanese common squid fishing grounds in the Sea of Japan[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(5): 1036-1043(in Chinese).
- [9] 杨林林, 姜亚洲, 程家骅. 东海太平洋褶柔鱼生殖群体的空间分布及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1825-1833.
Yang L L, Jiang Y Z, Cheng J H. Spatial distribution of mature stock of Pacific squid, *Todarodes pacificus* and its relation to environmental factors in the East China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1825-1833(in Chinese).
- [10] 李建生, 严利平. 东海太平洋褶柔鱼的数量分布及其与环境的关系[J]. 海洋渔业, 2004, 26(3): 193-198.
Li J S, Yan L P. Quantity distribution of *Todarodes pacificus* and its relation with environment in the East China Sea[J]. Marine Fisheries, 2004, 26(3): 193-198(in Chinese).
- [11] 胡飞飞, 陈新军. 太平洋褶柔鱼秋生群资源补充量预报模型研究[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(6): 64-69.
Hu F F, Chen X J. Study on forecasting model of recruitment for the autumn-spawning group of *Todarodes pacificus*[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2015, 35(6): 64-69(in Chinese).
- [12] 杨铭霞, 陈新军, 冯永玖, 等. 中小尺度下西北太平洋柔鱼资源丰度的空间变异[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6427-6435.
Yang M X, Chen X J, Feng Y J, et al. Spatial variability of small and medium scales' resource abundance of *Ommastrephes bartramii* in Northwest Pacific[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6427-6435(in Chinese).
- [13] Rosa A L, Yamamoto J, Sakurai Y. Effects of environmental variability on the spawning areas, catch, and re-

- cruitment of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae), from the 1970s to the 2000s[J]. ICES Journal of Marine Science, 2011, 68(6): 1114-1121.
- [14] 海金. 神经网络原理[M]. 叶世伟, 史忠植, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Haykin S. Neural networks: A comprehensive foundation[M]. Ye S W, Shi Z Z, Trans. Beijing: China Machine Press, 2004 (in Chinese).
- [15] Shabani M, Shabani N. Application of artificial neural networks in instantaneous peak flow estimation for Kharestan Watershed, Iran[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(4): 379-383.
- [16] 李荣丽, 陈志彪, 陈志强, 等. 基于BP神经网络的流域生态恢复度计算——以福建长汀朱溪小流域为例[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1973-1981.
Li R L, Chen Z B, Chen Z Q, *et al.* Calculation of ecological recovery based on BP neural network: a case study of Zhuxi Small Watershed in Changting County, Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1973-1981(in Chinese).
- [17] 唐启义. DPS数据处理系统第一卷: 基础统计及实验设计[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2013.
Tang Q Y. DPS data processing system first volume: basic statistics and experimental design[M]. 3rd Edition. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [18] 史忠植. 知识发现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
Shi Z Z. Knowledge discovery[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese).
- [19] 张青贵. 人工神经网络导论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
Zhang Q G. Introduction to artificial neural networks[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004 (in Chinese).
- [20] Sakurai Y, Kiyofuji H, Saitoh S I, *et al.* Stock fluctuations of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, related to recent climate changes[J]. Fisheries Science, 2002, 68(S1): 226-229.
- [21] Sakurai Y, Kiyofuji H, Saitoh S, *et al.* Changes in inferred spawning areas of *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) due to changing environmental conditions[J]. ICES Journal of Marine Science, 2000, 57(1): 24-30.
- [22] 张寒野, 胡芬. 冬季东海太平洋褶柔鱼的空间异质性特征[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1299-1302.
Zhang H Y, Hu F. Spatial heterogeneity of *Todarodes pacificus* in East China Sea in winter[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(11): 1299-1302(in Chinese).

A comparative study on forecasting model of the stock abundance index for the winter-spawning cohort of *Todarodes pacificus* in the Pacific Ocean based on the factor of SST

ZHANG Shuo^{1,2,3,4}, LI Li¹, CHEN Xinjun^{1,2,3,4*}

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

2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

4. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Shanghai Ocean University, Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China)

Abstract: *Todarodes pacificus* is one of important resources of the ocean economic Ommastrephidae in the world. In order to forecast the stock abundance of winter-spawning cohort, the catch per unit effort (CPUE) as abundance index from *T. pacificus* stock assessment report of Japan in 2013 is used to establish the forecasting model in this study. The correlation analysis between sea surface temperature (SST) in the spawning areas of 28°N–40°N and 125°E–140°E and CPUE from January to March during 2000–2010 was carried out respectively to select the significantly affecting factors in statistics. The multivariate linear model and BP neural network model forecasting abundance index of *T. pacificus* winter-spawning population were established and compared, and the actual CPUE in 2011 and 2012 was used for validation. The results showed that the spawning areas with high correlation coefficient between CPUE and SST in Jan. to Mar. are S1 (30.5° N, 136.5° E) and S2 (31.5° N, 136.5° E) in January, the correlation coefficient are 0.71 and 0.70 respectively; S3 (30.5° N, 137.5° E) and S4 (30.5° N, 135.5° E) in February, and the correlation coefficient are 0.87 and 0.84, respectively; S5 (37.5° N, 129.5° E) and S6 (37.5° N, 130.5° E) in March, and the correlation coefficient are 0.72 and 0.70, respectively. Total of five forecasting models including multivariate linear model and BP neural network model with different structure are established and compared. The BP 6-4-1 neural network model is the best, and the average prediction accuracy of the CPUE value during 2011–2012 attained 98%. This study suggests that the model can be used as the forecasting model of the stock abundance for *T. pacificus* winter-spawning cohort.

Key words: *Todarodes pacificus*; winter-spawning group; abundance index; prediction model; BP neural network

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41476129, 41276156); Public Science and Technology Research Funds Project of Ocean (20155014)