第 39 卷 第 6 期 海 洋 学 报 Vol. 39, No. 6
2017 年 6 月 Haiyang Xuebao June 2017

高雪,陈新军,余为. 基于灰色系统的西北太平洋柔鱼冬春生群资源丰度预测模型[J]. 海洋学报,2017,39(6):55—61, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.06.006

Gao Xue, Chen Xinjun, Yu Wei. Forecasting model of the abundance index of winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean based on grey system theory[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(6): 55—61, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2017.06.006

基于灰色系统的西北太平洋柔鱼冬春生群资源丰度预测模型

高雪[1],陈新军[1,2,3*],余为[1,2,3]

(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 201306;3. 上海海洋大学 大洋渔业可持续开发教育部重点实验室,上海 201306)

摘要: 柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)是西北太平洋重要的经济头足类之一,科学预测柔鱼资源丰度有利于其合理的开发和利用。研究结合 1998—2008 年北太平洋柔鱼生产统计数据和产卵场环境及其气候因子,使用灰色关联分析和灰色预测建模的方法,对产卵期内(1—4 月)影响柔鱼冬春生群体资源丰度(CPUE)的产卵场环境以及气候指标进行分析,并建立柔鱼冬春生群体资源丰度的预报模型。结果表明,产卵期内影响柔鱼冬春生群体资源丰度的因子依次是:3 月份产卵场平均海表面温度 SST (average sea surface temperature)、1 月份太平洋年代际震荡指数 PDO(Pacific Decadal Oscillatio index),4 月份 Niño3.4 指标和 4 月份平均叶绿素浓度 Chl *a*(average chlorophyll *a* concentration)。灰色预报模型分析表明,基于 3 月份 SST、1 月份 PDO 和 4 月份 Chl *a* 的 GM(1,4)模型有着较好的预测效果,其预测准确率在 80%以上,可用于西北太平洋柔鱼冬春群体资源丰度的预测。

关键词: 柔鱼;西北太平洋;灰色绝对关联度; GM(1,*N*)模型

中图分类号: S931 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2017)06-0055-07

1 引言

柔鱼(*Ommastrephes bartramii*)是西北太平洋重要的经济头足类之一[1]。通常可以分成冬春生群体和秋生群体[2],其中冬春生群体是我国远洋渔业的主要捕捞对象[3]。目前学者对其时空分布与海洋环境因子的关系[4—6]、资源量评估[3,7—8]等方面都有广泛的研究,同时也利用实时的环境数据对中心渔场等进行预报[9—10]。已有研究表明,产卵场的环境指标 SST (海表面温度 sea surface temperature)、叶绿素浓度 Chl *a*(chlorophyll *a* concentration)和气候指标(厄尔尼诺指数;太平洋年代际震荡指数 Pacific Decadal Oscillatio, PDO)等都与柔鱼的资源丰度指数(CPUE)有着显著的关系,并基于此建立了柔鱼资源丰度的长期预报模型[11—13]。但是,这些研究通常对单一海洋环境或气候指标进行分析,这些因子中哪些因子起到了主导作用而哪些因子却是次要?

灰色系统理论是由我国科学家建立的一门新兴学科,与一般的概率统计及模糊数学方法的优点在于,它允许分析的样本数据较少且服从任意的分布,

收稿日期: 2016-08-10;**修订日期:** 2016-12-26。

基金项目: 海洋局公益性行业专项(20155014);上海市科技创新计划(15DZ1202200)资助。

作者简介: 高雪(1991—),男,山东省肥城市人,主要从事渔业资源研究。

* **通信作者:** 陈新军,男,教授,博士生导师,主要研究领域为渔业资源学。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

因此在数据一般较少的长期(年间)资源预报中会有较大的应用前景[14],目前该方法已在渔获量预测[15—16]、渔获丰欠年预测[17]、渔场与海洋环境关系分析[18]中取得很好的效果。因此,本研究拟采用多年的北太平洋柔鱼生产统计数据和产卵场环境数据,使用灰色系统理论中的灰色关联分析和灰色预测建模的方法,对产卵期影响柔鱼冬春生群体资源丰度的环境因子进行分析,并建立柔鱼冬春生群体资源丰度的灰色预报模型,为我国北太平洋鱿钓渔船的科学生产提供依据。

2 材料与方法

2.1 数据来源

西北太平洋柔鱼冬春生群资源丰度的数据来自于 Yu 等[19]的报告:其根据上海海洋大学中国鱿钓技术组的 1998—2008 年中国鱿钓船的捕捞渔获数据计算得到柔鱼冬春生群的单位捕捞努力量的渔获量(catch per unit effort, CPUE,t/d),以此作为柔鱼的资源丰度数据。气候指数包括了 Niño3.4 距平和 PDO 数据,来自于美国国家海洋大气局(NOAA)气候预报中心(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml),时间分辨率为月,其中 Niño3.4 距平的高低代表了厄尔尼诺现象的有无[11],PDO 的高低代表了太平洋年代际震荡现象的变化[13]。环境数据为 SST(℃)和 Chl a(mg/m^3),来自于 NOAA 的 Oceanwatch 网站(http://pifsc—oceanwatch.irc.noaa.gov/las/servlets/dataset),数据时间包括了 1997—2008 年的 1—12 月,时间分辨率为月,其空间范围包括了前人研究得到的柔鱼冬春生群的产卵场海域(20°~30°N,130°~170°E)[20],空间分辨率均为 0.1°×0.1°。

2.2 数据处理及分析

(1)数据预处理。将获得的产卵场 SST 和 Chl a 按月进行平均,得到各月的产卵场平均 SST 和平均 Chl a。

(2)模型因子的选择。利用灰色关联分析的方法获得每个类型因子中最重要的一个月份。灰色关联分析主要目的就是依据关联度的计算得到系统各因素的主次关系,找出影响系统的最主要的因素[14]。具体做法为:以当年的 CPUE 为母序列,以对应当年产卵时间内各月(1—4 月[12])的产卵场环境指标及气候指标为子序列,分别计算各个子序列与母序列的灰色绝对关联度,将各月指标中灰色关联度最大的一个为资源量预报模型的一个因子。如 1—4 月中 1 月份的 Niño3.4 距平比其他月份都大,那么就将 1 月份的 Niño3.4 距平作为预报模型的一个因子。灰色关联度的具体计算方法见文献[14]。

(3)模型的建立。利用离散 GM(1,N)模型对柔鱼资源量进行预测,式中数字 1 表示模型为一阶模型,$N=i+1$(i 为因子的个数)。模型的计算方法简要阐述如下[21]:

设 $X_1^{(0)}=[x_1^{(0)}(1),x_1^{(0)}(2),\cdots x_1^{(0)}(n)]$ 为系统的特征数据序列即 CPUE 序列,另设

$$X_2^{(0)}=[x_2^{(0)}(1),x_2^{(0)}(2),\cdots x_2^{(0)}(n)],$$
$$X_3^{(0)}=[x_3^{(0)}(1),x_3^{(0)}(2),\cdots x_3^{(0)}(n)],$$
$$\vdots$$
$$X_N^{(0)}=[x_N^{(0)}(1),x_N^{(0)}(2),\cdots x_N^{(0)}(n)]$$

为相关因素序列,即环境因子序列。$X_i^{(1)}$ 为 $X_i^{(0)}$ 的累加序列;$Z_1^{(1)}$ 为 $X_1^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列则称:$X_1^{(0)}(k)+aZ_1^{(1)}(k)=\sum_{i=2}^{n}b_i x_i^{(1)}(k)$ 为离散 GM(1,N)模型,该模型中的 a 和 b_i 即为需要拟合的模型参数。模型的参数拟合方法如下:

令

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-Z_1^{(1)}(2) & X_2^{(1)}(2) & X_3^{(1)}(2) & \cdots & X_N^{(1)}(2)\\ -Z_1^{(1)}(3) & X_2^{(1)}(3) & X_3^{(1)}(3) & \cdots & X_N^{(1)}(3)\\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots\\ -Z_1^{(1)}(n) & X_2^{(1)}(n) & X_2^{(1)}(n) & \cdots & X_N^{(1)}(n)\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}X_1^{(0)}(2)\\ X_1^{(0)}(3)\\ \vdots\\ X_1^{(0)}(n)\end{bmatrix}.$$

则参数列 $\hat{\boldsymbol{a}}=[a,b_2,b_3,\cdots,b_{n-1}]^{\mathrm{T}}$ 的最小二乘估计为:

$$\hat{\boldsymbol{a}}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}$$

对于第 $k+1$ 年的 $X_1^{(0)}(k+1)$ 预测其公式如下:

$$X_1^{(0)}(k+1)=\frac{-aX_1^{(1)}(k)+\sum_{i=2}^{n}b_i x_i^{(1)}(k+1)}{1+\frac{a}{2}}.$$

(4)因子重要性分析和模型的有效性分析:因子重要性分析包含 2 个方面,第一:根据前面灰色关联度分析得到的平均值进行评价;第二:在模型的建立过程中,考虑多种因子的组合模型,主要包括以下 5

个模型,即:

模型 1:包含所有因子的 GM(1,5)模型,因子包括 SST、Chl *a*、Niño3.4 距平、PDO。

模型 2:不包含 SST 的 GM(1,4)模型,因子包括 Chl *a*、Niño3.4 距平、PDO。

模型 3:不包含 Chl *a* 的 GM(1,4)模型,因子包括 SST、Niño3.4 距平、PDO。

模型 4:不包含 Niño3.4 距平的 GM(1,4)模型,因子包括 SST、Chl *a*、PDO。

模型 5:不包含 PDO 的 GM(1,4)模型,因子包括 SST、Chl *a*、Niño3.4 距平。

通过模型的有效性来进一步检验因子的重要性,模型有效性分析包含了相对误差和相关分析。(1)相对误差:首先利用因子数据计算出 CPUE 值,与真实的 CPUE 值进行比较,从而获得相对误差的绝对值大小,比较包含所有因子的 GM(1,5)模型和去除掉某个因子的 GM(1,4)模型的相对误差大小,如果去除了某个因子模型的相对误差减小了,可以间接说明该环境因子实际的重要性不高;其次,在模型的构建的过程中,1998－2007 年柔鱼资源丰度数据用作于模型构建,2008 年柔鱼资源丰度数据用于模型的验证,通过相对误差绝对值的大小判断模型的好坏。由于研究总共的样本数量只有 11 组,因此此次分析只拿出一组样本进行验证。(2)相关系数[22]:求得模拟 CPUE 值序列与实际 CPUE 值序列的相关系数,相关系数越大则模型越好。

3　结果

3.1　灰色绝对关联分析

各月产卵场环境因子和气候因子序列与 CPUE 母序列的灰色绝对关联分析结果如下:SST 的影响程度最大,其灰色关联度的平均值要大于另外 3 个环境因子。按照关联度的平均值排序,各因子重要性从大到小的排序为:平均 SST,PDO,Niño3.4 距平和平均 Chl *a*(表 1)。

在产卵场的平均 SST 中,3 月份平均 SST 的灰色关联系数最大,达到 0.80,因此选择 3 月的平均 SST 为后续预报模型的一个因子;同理,4 月份产卵场平均 Chl *a*、Niño3.4 距平,以及 1 月份的 PDO 也作为柔鱼资源丰度预报模型的重要因子。

表 1　产卵场各环境因子和气候因子子序列与当年 CPUE 母序列的灰色关联系数

Tab.1　Value of grey correlation indices between the environmental or climatic factors subsequence in the spawn area and the CPUE sequence

月份	平均海表面温度	平均叶绿素浓度	Niño3.4 距平	太平洋年代际震荡指数
1 月	0.70	0.57	0.58	0.94
2 月	0.77	0.57	0.59	0.66
3 月	0.80	0.56	0.63	0.63
4 月	0.72	0.58	0.72	0.71
平均值	0.75	0.57	0.63	0.74

3.2　模型的建立和验证

利用 1998－2007 年的 CPUE 数据和环境因子数据分别建立 5 种模型,根据模型预测的 CPUE 结果见图 1。模型效果分析表明(表 2),从平均相对误差绝对值来看,不包含 Niño3.4 距平的模型 4 要比包含所有因子的模型 1 精度要高;而其他去除了某些因子的模型,其精度将会降低,模型相对误差由高至低分别为模型 3、模型 2 和模型 5。从 2008 年的预测结果来看,包含所有因子的模型 1 预报精度是最低的,而不包含 SST 的模型 2 精度最高,其次分别是模型 5、模型 4 和模型 3。预测 CPUE 序列与 CPUE 真实值序列之间的相关系数高低排序为:模型 4(0.723)、模型 1(0.696)、模型 5(0.688)、模型 2(0.646)和模型 3(0.641)。因此从模型有效性的不同指标上分析,各因子的重要性不同;但不包含 Niño3.4 距平因子的模型 4,在总体相对误差、与真实 CPUE 序列的相关系数比较上分析,其模型精度是最高的,2008 年预测的 CPUE 误差也在 10%以内(表 2),可作为最适的柔鱼资源丰度预测模型。

表 2 柔鱼资源丰度预测模型运算得到的 CPUE 值与其真实值之间的相对误差(%)

Tab. 2 Relative errors(%) between the actual CPUE and the model calculated CPUE

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	相对误差绝对值的平均
模型 1	−4.9	−18.3	40.1	11.7	−24.0	−1.4	10.0	47.0	−20.6	27.3	20.5
模型 2	−47.8	−46.6	11.5	59.8	−19.5	−7.5	14.4	45.5	−18.4	3.4	27.4
模型 3	−46.2	−39.8	23.1	58.1	−18.6	−6.4	11.2	44.2	−19.9	10.6	27.8
模型 4	−2.2	−19.0	32.5	20.1	−25.6	−3.0	14.4	45.4	−20.4	9.3	19.2
模型 5	−9.7	−11.5	30.7	38.3	−31.9	−8.2	18.7	39.5	−18.5	5.9	21.3

注:模型 1:包含所有因子的 GM(1,5)模型;模型 2:不包含 SST 的 GM(1,4)模型;模型 3:不包含 Chl *a* 的 GM(1,4)模型;模型 4:不包含 Niño3.4距平的 GM(1,4)模型;模型 5:不包含 PDO 的 GM(1,4)模型。

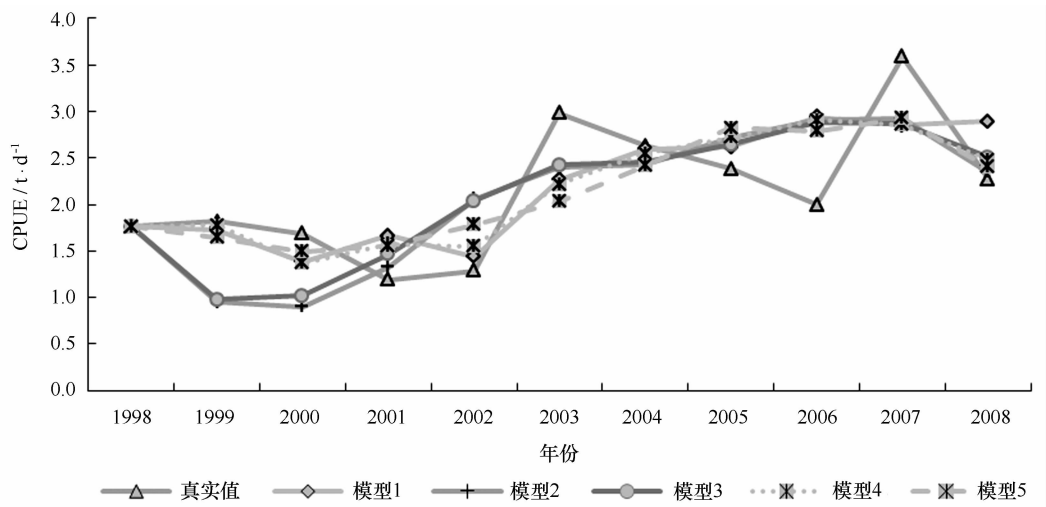

图 1 5 种柔鱼资源丰度预测模型结果

Fig. 1 Results of CPUE forecasting models for *Ommastrephes bartramii*

模型 1:包含所有因子的 GM(1,5)模型;模型 2:不包含 SST 的 GM(1,4)模型;模型 3:不包含 Chl *a* 的 GM(1,4)模型;模型 4:不包含 Niño3.4 距平的 GM(1,4)模型;模型 5:不包含 PDO 的 GM(1,4)模型

Model 1: the GM(1,5) model including all factors; Model 2: the GM(1,4) model not including SST; Model 3: the GM(1,4) model not including Chl *a*; Model 4: the GM(1,4) model not including nino3.4 anomaly; Model 5: the GM(1,4) model not including PDO

4 讨论与分析

本研究利用产卵场环境因子和气候因子为指标,采用灰色系统理论和方法预测了柔鱼冬春生群体的资源丰度。灰色模型结果表明,不包含 Niño3.4 距平的模型 4 对柔鱼资源丰度有着较好的预测效果(表 2)。但我们也看到(图 1),2003 年和 2006−2007 年预测数据与真实值之间还是存在着较大的差异,未能准确反映当年 CPUE 的过大(或过小)的变化趋势。这可能是由于索饵场及柔鱼洄游路径的环境差异所导致的。Cao 等[23]和汪金涛[12]都结合索饵场环境因子对 CPUE 进行预测,也取得了良好的效果,而本研究只是对产卵时间内产卵场环境变化进行建模拟合,有可能会产生一定的误差,因此今后的研究若将索饵时间的气候因子及索饵场的环境因子进行综合分析,或许能够获得更好的柔鱼资源丰度预报结果。此外本研究中,我们采用 CPUE 作为资源丰度的指标,其数据来自生产统计,作业渔场及其生产效率差异会影响到 CPUE 的大小,实际上,CPUE 只能间接地反映资源丰度的变化情况。因此为了能够准确为柔鱼的资源丰度预报提供服务,还需加强海域的资源调查及 CPUE 标准化的研究工作。

通过模型比较得到的环境因子重要性与灰色关联分析的结果有所出入。这有可能是因为模型本身不能排除因子间的交互作用导致的,例如厄尔尼诺事件本身就会使得海表面水温发生变化,因此认为灰色关联分析的结果可能更为可信,它得到的是单一因子与 CPUE 母序列的关联程度,通过计算各月的平均值,可以得知在柔鱼产卵期间某个因子的总体影响(表 2)。

环境因子上,由灰色关联分析可知:产卵场平均 SST 对年 CPUE 的影响最大。Cao 等[23]就曾经利用了产卵场适宜水温面积作为其资源预报模型中的一个变量;汪金涛[12]也曾利用产卵场区水温作为其预测模型的一个因子。这些都表明,在渔场的早期生活史中,SST 是决定柔鱼补充量的最重要的一个因素。Chl *a* 的大小代表着海域生产力的高低,决定了海域摄食条件的好坏,产卵场平均 Chl *a* 对年 CPUE 影响最小,但这并不能表明其摄食条件不是决定柔鱼补充量的一个重要的因素。已有的研究表明[23],柔鱼的秋生群的产卵位置大约在亚热带的锋区其位置接近于叶绿素锋区(0.2 mg/m^3),而冬春生群产卵场则一般在亚热带海域,生产力一般较低,夏秋季才开始向叶绿素较高的海域洄游;此外,有研究发现[24],产卵场位置随着叶绿素浓度的变化而变化,然而本研究中只是将整个产卵场海域的 Chl *a* 进行平均,可能会弱化 Chl *a* 对 CPUE 的影响。此外,很多研究都已经得到了柔鱼产卵场最适的温度和盐度范围[25],但对于最适的叶绿素浓度范围研究较少,今后的研究应加强这方面的研究工作。

气候因子上,Chen 等研究发现[26],厄尔尼诺事件的发生可促使柔鱼的资源丰度升高,而拉尼娜发生时则情况相反;Yu 等[27]对 PDO 冷暖时期与柔鱼渔场及资源作了相关的研究,研究认为,暖的 PDO 时期柔鱼渔场水温较低(低 SST 距平),使得渔场位置偏南,冷的 PDO 时期则相反。本研究中,不管是灰色关联分析还是灰色系统预测效果,PDO 都比厄尔尼诺事件更为重要,这可能是由于 PDO 为年代际的变化,相对于厄尔尼诺现象持续时间更长,因此可能在整个柔鱼生活史阶段都会对其造成影响。

总的来说,模型的良好效果表明,灰色系统的模型能够突破数据样本太少的限制,对时间序列较短的数据也能起到良好的预测和分析的效果,这对于数据过于缺乏的渔业科学是很有意义的,如根据气候因素预测较长时期内的资源量的变化趋势。但是也可以看到它的不足,例如无法具体分析因子的交互效应、滞后效应也需要靠人为的经验所设定,今后的分析中,该模型还是要依靠经验和其他模型分析作为辅助,才能发挥出它的最大作用。

综上所述,产卵期间的环境及气候条件共同作用了西北太平洋柔鱼资源丰度的年间变化。在今后的分析中,建议通过量化柔鱼整个生活史(洄游和索饵)的其他生物和非生物海洋环境和气候指标,结合物理海洋学建立基于鱼类个体的生态模型,为更精确地预测柔鱼资源丰度提供支撑。

参考文献:

[1] Chen Xinjun, Liu Bilin, Chen Yong. A review of the development of Chinese distant-water squid jigging fisheries[J]. Fisheries Research, 2008, 89(3): 211－221.

[2] 陈芃, 方舟, 陈新军. 基于角质颚外部形态学的柔鱼种群判别[J]. 海洋渔业, 2015, 37(1): 1－9.
Chen Peng, Fang Zhou, Chen Xinjun. Population identification of *Ommastrephes bartramii* based on beak's external morphological characters[J]. Marine Fisheries, 2015, 37(1): 1－9.

[3] 陈新军, 钱卫国, 刘必林, 等. 利用衰减模型评估柔鱼西部冬春生群体资源[J]. 海洋湖沼通报, 2008(2): 130－140.
Chen Xinjun, Qian Weiguo, Liu Bilin, et al. An assessment of western winter-spring stock of neon flying sqid, *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean using the depletion model[J]. Transations of Oceanology and Limnology, 2008(2): 130－140.

[4] 唐峰华, 靳少非, 张胜茂, 等. 北太平洋柔鱼渔场时空分布与海洋环境要素的研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2093－2100.
Tang Fenghua, Jin Shaofei, Zhang Shengmao, et al. Study for marine environmental elements on spatio-temporal distribution of fishing ground for neon flying squid in the north Pacific[J]. China Environmental Science, 2014, 34(8): 2093－2100.

[5] 范江涛, 陈新军, 曹杰, 等. 西北太平洋柔鱼渔场变化与黑潮的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(3): 378－384.
Fan Jiangtao, Chen Xinjun, Cao Jie, et al. The variation of fishing ground of *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific concerning with Kuroshio Current[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(3): 378－384.

[6] 田思泉, 陈新军, 冯波, 等. 西北太平洋柔鱼资源丰度与栖息环境的关系及其时空分布[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(5): 586－592.
Tian Siquan, Chen Xinjun, Feng Bo, et al. Spatio-temporal distribution of abundance index for *Ommastrephes bartramii* and its relationship with habitat environment in the Northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(5): 586－592.

[7] 陈新军，曹杰，刘必林，等. 基于贝叶斯 Schaefer 模型的西北太平洋柔鱼资源评估与管理[J]. 水产学报，2011，35(10)：1572－1581.
Chen Xinjun，Cao Jie，Liu Bilin，et al. Stock assessment and management of *Ommartrephes bartramii* by using a Bayesian Schaefer model in the northwestern Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China，2011，35(10)：1572－1581.

[8] 刘金立，陈新军，李纲，等. 西北太平洋柔鱼资源综合配置模型及管理策略探讨[J]. 海洋与湖沼，2014，45(5)：1016－1022.
Liu Jinli，Chen Xinjun，Li Gang，et al. Management strategy and comprehensive allocation model of *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，2014，45(5)：1016－1022.

[9] 徐洁，陈新军，杨铭霞. 基于神经网络的北太平洋柔鱼渔场预报[J]. 上海海洋大学学报，2013，22(3)：432－438.
Xu Jie，Chen Xinjun，Yang Mingxia. Forecasting on fishing ground of red flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the north Pacific Ocean based on artificial neural net[J]. Journal of Shanghai Ocean University，2013，22(3)：432－438.

[10] 陈新军，钱卫国，许柳雄，等. 北太平洋 150°～165°E 海域柔鱼鱿钓渔场及其预报模型研究[J]. 海洋水产研究，2003，24(4)：1－6.
Chen Xinjun，Qian Weiguo，Xu Liuxiong，et al. Study on *Ommastrephe bartrami* fishing ground and forecasting model from 150°to 165°E in the North Pacific Ocean[J]. Marine Fisheries Research，2003，24(4)：1－6.

[11] 曹杰. 西北太平洋柔鱼资源评估与管理[D]. 上海：上海海洋大学，2010.
Cao Jie. Stock assessment and risk analysis of management strayegies for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean[D]. Shanghai：Shanghai Ocean University，2010.

[12] 汪金涛. 大洋性经济柔鱼类渔情预报与资源量评估研究[D]. 上海：上海海洋大学，2015.
Wang Jintao. Fishery forecasting and stock assessment for commercial oceanic ommastrephid squid[D]. Shanghai：Shanghai Ocean University，2015.

[13] 余为，陈新军. 西北太平洋柔鱼栖息地环境因子分析及其对资源丰度的影响[J]. 生态学报，2015，35(15)：5032－5039.
Yu Wei，Chen Xinjun. Analysis of environmental conditions and their influence on the abundance of neon flying squid in the Northwest Pacific Ocean[J]. Acta Ecologica Sinica，2015，35(15)：5032－5039.

[14] 陈新军. 灰色系统理论在渔业科学中的应用[M]. 北京：中国农业出版社，2003：1－32.
Chen Xinjun. Grey System Theory in Fisheries Science[M]. Beijing：China Agriculture Press，2003：1－32.

[15] 潘澎. 灰色预测模型在山东渔业产量预测中的应用研究[J]. 齐鲁渔业，1997(3)：37－39.
Pan Peng. Studies on application of the Grey Prediction Model to fishery output in shandong[J]. Shandong Fisheries，1997(3)：37－39.

[16] 丁娟，汪易易. 基于灰色系统模型的山东省渔业产量增长预测分析[J]. 中国渔业经济，2010(6)：92－98.
Ding Juan，Wang Yiyi. Prediction analysis of fishery yield in Shandong based on Grey System Model[J]. Chinese Fisheries Economics，2010(6)：92－98.

[17] 谢骏，肖学铮，黄樟翰，等. 台湾鳗鲡苗种丰欠的灰色年灾变预测[J]. 水利渔业，1998(1)：21－22.
Xie Jun，Xiao Xuezheng，Huang Zhanghan，et al. Taiwan eel fry peak year owe Grey Disaster Prediction[J]. Reservoir Fisheries，1998(1)：21－22.

[18] 陈新军，许柳雄，田思泉. 北太平洋柔鱼资源与渔场的时空分析[J]. 水产学报，2003，27(4)：334－342.
Chen Xinjun，Xu Liuxiong，Tian Siquan. Spatial and temporal analysis of *Ommastrephes bartramii* resources and its fishing ground in North Pacific Ocean[J]. Journal of Fisheries of China，2003，27(4)：334－342.

[19] Yu Wei，Chen Xinjun，Yi Qian，et al. Spatio-temporal distributions and habitat hotspots of the winter-spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in relation to oceanographic conditions in the Northwest Pacific Ocean[J]. Fisheries Research，2016，175：103－115.

[20] 余为，陈新军，易倩. 西北太平洋海洋净初级生产力与柔鱼资源量变动关系的研究[J]. 海洋学报，2016，38(2)：64－72.
Yu Wei，Chen Xinjun，Yi Qian. Relationship between spatio-temporal dynamics of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* and net primary production in the northwest Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao，2016，38(2)：64－72.

[21] 刘思峰，杨英杰，吴利丰，等. 灰色系统理论及其应用[M]. 7 版. 北京：科学出版社，2014：198－205.
Liu Sifeng，Yang Yingjie，Wu Lifeng，et al. Grey System Theory and Its Application[M]. 7th ed. Beijing：Science Press，2014：198－205.

[22] 汤银才. R 语言与统计分析[M]. 北京：高等教育出版社，2008：260－264.
Tang Yincai. Statistics Analysis with R[M]. Beijing：Higher Education Press，2008：260－264.

[23] Cao Jie，Chen Xinjun，Chen Yong. Influence of surface oceanographic variability on abundance of the western winter－spring cohort of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the NW Pacific Ocean[J]. Marine Ecology Progress Series，2009，381：119－127.

[24] 余为，陈新军，易倩，等. 北太平洋柔鱼早期生活史研究进展[J]. 上海海洋大学学报，2013，22(5)：755－762.
Yu Wei，Chen Xinjun，Yi Qian，et al. Review on the early life history of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the North Pacific[J]. Journal of Shanghai Ocean University，2013，22(5)：755－762.

[25] Ichii T，Mahapatra K，Sakai M，et al. Life history of the neon flying squid：effect of the oceanographic regime in the North Pacific Ocean[J]. Marine Ecology Progress Series，2009，378：1－11.

[26] Chen Xinjun，Zhao Xiaohu，Chen Yong. Influence of El Niño/La Niña on the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwestern Pacific Ocean[J]. ICES Journal of Marine Science，2007，64(6)：1152－1160.

[27] Yu Wei，Chen Xinjun，Yi Qian，et al. Impacts of climatic and marine environmental variations on the spatial distribution of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. Acta Oceanologica Sinica，2016，35(3)：108－116.

Forecasting model of the abundance index of winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean based on grey system theory

Gao Xue[1], Chen Xinjun[1,2,3], Yu Wei[1,2,3]

(1. *College of Marine Science*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 2. *National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries*, *Shanghai* 201306; 3. *The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources*, *Ministry of Education*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: Neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) is one of the most important economic cephalopods in the Northwest Pacific Ocean. Building scientific forecast model of abundance index to this squid is beneficial for its exploitation and utilization. In this study, based on the fishing data of this squid in Northwest Pacific Ocena from 1998 to 2008, we analyzed the relationship between the environmental and climatic factors and the catch per unit effort (CPUE) of the winter-spring cohort in its spawning grounds. Therefore, a CPUE forecast model of winter-spring cohort of neon flying squid was built. The grey correlation analysis showed that the most important factors affecting this squid CPUE included average sea surface temperature (SST) in March, Pacific Decadal Oscillatio index (PDO) in January, Niño3.4 index in April and average chlorophyll *a* concentration (Chl *a*) in April. Results suggested that the GM (1,4) model which did not include the Niño3.4 anomaly had the best model effects. And its average absolute error was 19.2%. Therefore, we suggested that this model can be used to forecast the CPUE of winter-spring cohort of neon flying squid.

Key words: neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*); Northwest Pacific Ocean; grey absolute correlation index; GM(1,*N*) model