

解明阳, 陈新军. 西北太平洋柔鱼丰度的灰色灾变预测[J]. 海洋学报, 2020, 42(4): 40–46, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2020.04.005

Xie Mingyang, Chen Xinjun. Grey catastrophe year prediction for the abundance of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(4): 40–46, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2020.04.005

# 西北太平洋柔鱼丰度的灰色灾变预测

解明阳<sup>1</sup>, 陈新军<sup>1,2,3,4,5\*</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

**摘要:** 柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 为短生命周期的头足类, 其资源丰度极易受海洋环境变化影响, 年间波动较大。根据 1995–2017 年西北太平洋柔鱼渔业生产统计数据, 以单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 作为资源丰度指数, 运用灰色灾变预测方法对上、下限灾变年份建立 GM(1, 1) 模型, 预测未来灾变年份。结果显示, 以 GLM 模型标准化 CPUE 建立的下限灾变预测模型的平均相对误差为 15.32%, 上限灾变预测模型的平均相对误差为 8.19%, 模型精度检验等级均为 I 级。研究认为, 下一个资源丰年 (CPUE 大于 2.39 t/(船·a)) 将出现在 2021 年, 资源歉年 (CPUE 小于 2.13 t/(船·a)) 将出现在 2027 年; 太平洋年代际涛动与 El Niño-La Niña 事件是驱使柔鱼丰度大幅度波动的重要因素。该预测结果可为西北太平洋鱿钓生产企业和管理部门提供参考。

**关键词:** 柔鱼; 资源丰度; 灰色灾变预测; GM(1, 1) 模型; 气候变化

中图分类号: P714+.5; S931

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2020)04–0040–07

## 1 引言

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 是大洋经济头足类, 广泛分布于西北太平洋, 是我国鱿钓渔船的重要捕捞对象<sup>[1]</sup>。自 1993 年我国开始开发柔鱼资源以来, 捕捞规模与作业海域不断扩大, 年产量基本稳定在 6 万~10 万 t<sup>[2]</sup>。由于柔鱼是一种“生态机会主义”物种, 其中心渔场与资源丰度极易受海洋环境与气候变化的影响<sup>[3]</sup>, 因此柔鱼资源量会出现剧烈的年间变化。已有研究表明, 柔鱼资源量变化与环境因子变化, 例如海表温度 (Sea Surface Temperature, SST)<sup>[4]</sup>、黑潮<sup>[5]</sup> 有密切的关系; 资源量的骤增骤减现象也受气候变化的影响, 例如 El Niño-La Niña 现象<sup>[6]</sup>、太平洋年代际涛动 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 现象<sup>[7]</sup> 等

影响。目前国内外学者已经对北太平洋柔鱼渔场时空分布<sup>[8]</sup>、资源评估与管理<sup>[9]</sup>、资源量预报模型<sup>[10]</sup> 等做了较为全面的研究。对柔鱼资源量进行年度的灾变预测, 将有利于掌握西北太平洋柔鱼资源状况, 为资源合理利用提供依据。

灰色系统理论是一门有关不确定系统的理论, 其优点在于允许样本数量较少且服从任意分布, 这对于缺乏数据的渔业科学领域来说有很好的应用前景<sup>[11]</sup>。目前, 灰色系统理论在资源量预测<sup>[12]</sup>、渔场空间分布<sup>[13]</sup>、渔业水质评价<sup>[14]</sup> 等方面已取得较好的成果。为此, 本研究采用灰色系统研究方法中的灰色灾变预测模型, 对西北太平洋柔鱼资源丰度的丰歉年进行预测, 以达到预警目的, 为北太平洋渔业生产企业和管理部门及时进行有效管理提供技术支撑。

收稿日期: 2019–05–25; 修订日期: 2019–06–28。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (NSFC41876141); 上海市科技创新行动计划 (19DZ1207502)。

作者简介: 解明阳 (1994—), 男, 吉林省吉林市人, 主要研究方向为渔情预报。E-mail: 772966694@qq.com

\* 通信作者: 陈新军, 教授, 主要从事渔业资源渔场学、远洋鱿钓渔业等方向研究。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

## 2 材料与方方法

### 2.1 渔业生产数据

渔业生产统计数据来自上海海洋大学中国鱿钓技术组,时间为1995–2017年,空间范围为 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\sim 179^{\circ}\text{E}$ ,统计内容包括日期、经度、纬度、日产量和作业渔船,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。以单位捕捞努力量渔获量(Catch Per Unit Effort, CPUE)表征柔鱼资源丰度,以 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 为一个渔区,计算各年每个渔区的CPUE值。

SST数据来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的网站(<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/erddap/index.html>),时间范围为1995–2017年的1–12月,时间分辨率为月,利用平均法计算各年作业渔场平均SST。

### 2.2 CPUE 标准化

统计每年所得到的总渔获量(Catch),以每年捕捞的船数作为捕捞努力量(Effort),计算名义CPUE,其公式为

$$\text{CPUE} = \frac{\text{Catch}}{\text{Effort}}, \quad (1)$$

式中,CPUE为每年的单位捕捞努力量,单位为 $t/(\text{船}\cdot\text{a})$ ;Catch的单位为 $t/a$ 。

利用广义线性回归模型(Generalized Linear Model, GLM)对名义CPUE进行标准化。由于CPUE受环境因子(SST)、渔场空间位置(渔场重心的经度、纬度)等因素影响,所以将其作为解释变量,CPUE作为响应变量,去除空间和环境因子对CPUE的影响,以名义CPUE和标准化的CPUE作为柔鱼资源丰度的指标。

渔场重心计算公式为

$$\text{Lon} = \frac{\sum_{i=1}^K (C_i \times \text{Lon}_i)}{\sum_{i=1}^K C_i}, \quad (2)$$

$$\text{Lat} = \frac{\sum_{i=1}^K (C_i \times \text{Lat}_i)}{\sum_{i=1}^K C_i}, \quad (3)$$

式中,Lon、Lat分别为渔场重心位置的经度和纬度; $C_i$ 为 $i$ 渔区的产量; $\text{Lon}_i$ 、 $\text{Lat}_i$ 分别为渔区 $i$ 的中心经纬度位置; $K$ 为渔区的总个数。

GLM的表达形式为: $\text{glm}[\text{CPUE}] \sim \text{SST} + \text{Lon} + \text{Lat} + \varepsilon$ 。其中,SST为年平均海面温度, $\varepsilon$ 为误差项。

### 2.3 模型的构建

利用GM(1,1)模型对北太平洋柔鱼资源丰度进

行灾变预测<sup>[15]</sup>。具体方法如下:

设原始序列 $X=(x(1), x(2), \dots, x(n))$ ,取序列的第3分位数 $Q_3$ (大于75%的值)为上限灾变值 $\xi_1$ ,取序列第1分位数 $Q_1$ (小于25%的值)为下限灾变值 $\xi_2$ ,将序列 $X$ 中大于或小于 $\xi$ 的点认为是异常值的点<sup>[16]</sup>,将其组成上限或下限灾变序列 $X_\xi=(x[q(1)], x[q(2)], \dots, x[q(m)])$ ,设灾变日期序列 $Q^{(0)}=(q(1), q(2), \dots, q(m))$ ,对其建立GM(1,1)模型进行灾变预测。GM(1,1)模型计算方法如下<sup>[17]</sup>:

令 $Q^{(1)}=(x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ 为灾变日期序列 $Q^{(0)}$ 的一次累加生成序列。其中, $Q^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ , $k=1, 2, \dots, n$ ,令 $Z^{(1)}=(Z^{(1)}(2), Z^{(1)}(3), \dots, Z^{(1)}(n))$ 为 $Q^{(1)}$ 的紧邻均值生成数列,其中 $Z^{(1)}(k)=\frac{1}{2}[Q^{(1)}(k)+Q^{(1)}(k-1)]$ , $k=2, 3, \dots, n$ ,得到GM(1,1)模型的基本形式为: $Q^{(0)}(k)+aZ^{(1)}(k)=b$ , $a$ 为发展系数。

设参数向量 $\hat{a}=[a, b]^T$ ,用最小二乘法估计参数列: $\hat{a}=(B^T B)^{-1} B^T Y$ ,其中,

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

求解微分方程,得到预测模型: $\hat{x}^{(1)}(k+1)=[x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a}$ 。

### 2.4 模型的检验

灰色灾变GM(1,1)模型的验证主要包括残差检验与后验差检验<sup>[18]</sup>。残差为原始值与预测值之间的绝对误差与相对误差;后验差检验是按照残差的概率

分布进行检验,记原始序列标准差 $S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}]^2}{n-1}}$ ,

绝对误差序列标准差 $S_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2}{n-1}}$ ,方差比

$C = \frac{S_2}{S_1}$ ,小误差概率 $P = p\{|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745 S_1\}$ , $k=1, 2, \dots, n$ 。

残差越小,模型精度越好。方差比 $C$ 越小,说明 $S_2$ 小, $S_1$ 大,即残差方差小,原始数据方差大,残差比较集中,摆动幅度小,原始数据比较分散,摆动幅度大,所以模型模拟效果更好。模型精度检验等级见表1。

发展系数 $a$ 反映主因素与各子因素之间的协调程度,当 $-a \leq 0.3$ 时,模型可用于中长期预测;当 $0.3 < -a \leq 0.5$ 时可用于短期预测<sup>[19]</sup>。

表1 灰色系统理论模型精度检验<sup>[18]</sup>Table 1 Precision test accuracy of grey model<sup>[18]</sup>

精度等级	I级	II级	III级	IV级
方差比 $C$	0.35	0.50	0.65	0.80
小误差概率 $P$	0.95	0.80	0.70	0.60

### 3 研究结果

#### 3.1 CPUE 情况与灾变点

1995–2017年各年的名义平均CPUE与标准化CPUE见图1。经过GLM模型标准化的CPUE与名义CPUE的变化趋势基本一致但波动较小。2007年名义CPUE值最大,为4.197 t/(船·a),2009年名义CPUE最小,为1.319 t/(船·a);2017年标准化的CPUE值最大,为2.928 t/(船·a),2002年标准化的CPUE最小,为1.446 t/(船·a)。

根据灾变值的划分(下限灾变值为2.13 t/(船·a),上限灾变值为2.39 t/(船·a)),以GLM模型标准化CPUE建立的灾变模型的上限灾变点为2005年、2006年、2007年、2008年、2010年、2017年,灾变序列为11、12、13、14、16、23;下限灾变点为1996年、1999年、2001年、2002年、2015年、2016年,灾变序列为2、5、7、8、21、22。

#### 3.2 模型的建立与检验

从模型精度来看,以GLM模型标准化CPUE建立的下限灾变预测模型的平均相对误差为15.32%,上限灾变预测模型的平均相对误差为8.19%(表2)。

从发展系数 $a$ 来看,下限灾变预测模型( $a=-0.064$ )和上限灾变预测模型( $a=0.117$ )均可用于中长期预测(表3)。从后验差检验结果(表3)来看,下限灾变预测模型( $C=-0.342, P=1$ )和上限灾变预测模型( $C=-0.341, P=1$ )的方差比 $C$ 小于0.35,小误差概率 $P$ 大于0.95,模型精度等级为I级。

根据表3的响应函数来看,下一次的下限灾变和上限灾变发生序号分别为34.86和25.20,在2016年以后的11.14 a(由34.86 a减去23.72 a得出),即2027年会发生资源丰度歉年;在2017年以后的4.0 a(由25.20 a减去21.20 a得出),即2021年会发生资源丰度丰年(表3)。

### 4 讨论与分析

#### 4.1 气候和环境变化对西北太平洋柔鱼丰度的影响

柔鱼作为短生命周期的种类,一生产卵一次,因此其渔获量的多少取决于当年的柔鱼补充量<sup>[20]</sup>。造成柔鱼资源丰度下降的原因是多方面的,如沈建华等<sup>[21]</sup>认为2001年低产的原因主要为:黑潮大蛇行、黑潮势力偏弱、北部水温过低、渔汛期流隔不明显和饵料不充足。陈峰等<sup>[22]</sup>认为2009年低产的原因主要为产卵场发生黑潮大弯曲,传统作业渔场有一个明显的冷水南下。唐峰华等<sup>[23]</sup>认为SST偏低导致的补充量减少,叶绿素 $a$ 浓度分布与海流波动较大导致的饵料分布不稳定等现象也是2001年低产的原因之一。从大尺度气候变化来看,PDO是一种以10 a周期变化的太平洋气候变化,PDO指数定义为20°N以北北

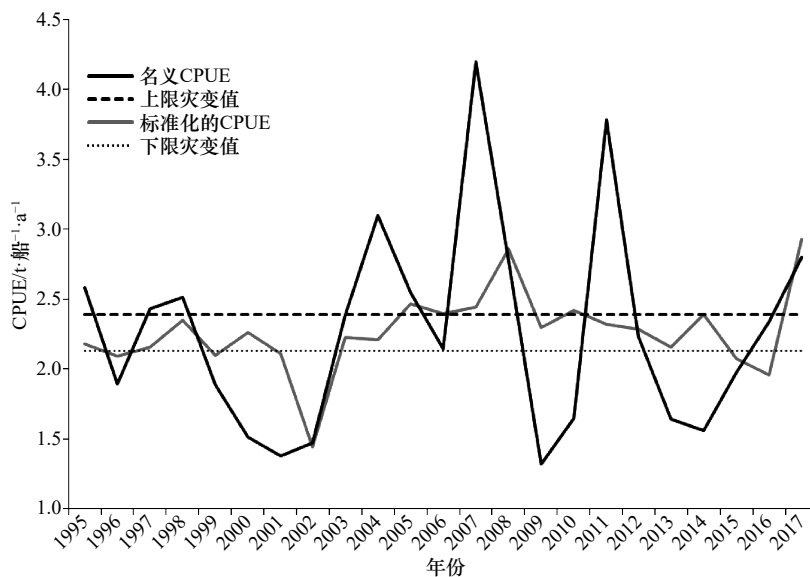


图1 1995–2017年西北太平洋柔鱼资源丰度变化

Fig. 1 CPUE of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific from 1995 to 2017

表2 灰色灾变GM(1,1)模型预测值与真实值之间的相对误差

Table 2 Relative error between the predicted value and the true value of the GM(1,1) model

下限灾变序列号	拟合值	相对误差/%	上限灾变序列号	拟合值	相对误差/%
X <sub>5</sub>	5.08	1.67	X <sub>12</sub>	10.61	11.61
X <sub>7</sub>	7.47	6.73	X <sub>13</sub>	12.61	2.99
X <sub>8</sub>	10.98	37.25	X <sub>14</sub>	14.99	7.10
X <sub>21</sub>	16.14	23.16	X <sub>16</sub>	17.83	11.42
X <sub>22</sub>	23.72	7.80	X <sub>23</sub>	21.20	7.85
平均相对误差		15.32	平均相对误差		8.19

表3 灰色灾变GM(1,1)模型的相关参数

Table 3 Related parameters of the GM(1,1) model

灰色灾变模型	发展系数 a	方差比 C	小误差概率 P	响应函数
下限灾变模型	-0.064	0.342	1.000	$x_{(t+1)}=10.823\exp(0.385t)-8.823$
上限灾变模型	0.117	0.341	1.000	$x_{(t+1)}=56.140\exp(0.173t)-45.140$

太平洋 SST 异常第一主分量。余为等<sup>[7]</sup>对不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境做出分析,认为 PDO 暖期会为仔幼鱼提供较好的摄食环境,易形成适宜的育肥场,导致 CPUE 较高, PDO 冷期则相反。根据美国华盛顿大气与海洋联合研究所的数据 (<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>) 结合灾变年份的分布来看(图2),基本上灾变年份符合 PDO 冷暖期的分布规律,即上限灾变年份位于 PDO 暖期,下限灾变年份位于 PDO 冷期。而且在冷暖期转换的年份(2001-2002年,2007-2008年,2014-2015年)灾变年份类型仍维持在转变期前的状态,说明 PDO 对柔鱼资源的影响具有一定的滞后性。此外,El Niño-La Niña 事件是太平洋海域气候变率的最强信号,对柔鱼资源

丰度也有较大的影响。如 Chen 等<sup>[6]</sup>认为 La Niña 事件发生时,柔鱼产卵场温度升高,不利于仔幼鱼的繁殖与孵化,导致资源补充量下降,反之 El Niño 事件时资源补充量上升。Yu 等<sup>[24]</sup>通过构建栖息地模型发现 La Niña 事件下产生的暖水团,使适宜的叶绿素浓度和海表面高度距平范围扩大,导致栖息地面积扩张,而 El Niño 事件则相反。根据 NOAA 对 El Niño 和 La Niña 事件的定义 (<http://ggweather.com/enso/oni.htm>),即若 Niño3.4 区 SST 异常连续 5 个月滑动平均值超过 +0.5℃ 认为发生一次 El Niño 事件;若连续 5 个月低于 -0.5℃ 则认为发生一次 La Niña 事件。结合灾变年份分布来看(图3),基本上上限灾变年份发生在 El Niño 事件期间,下限灾变年份发生在 La Niña 事件期间。相比于 PDO 而言,El Niño 和 La Niña 事件期间的灾变年份分布更为明显,如下限灾变年份 1996 年对应 La Niña 事件,上限灾变年份 2003-2005 年对应 El Niño 年,并且其滞后性比 PDO 更小。

#### 4.2 灾变预测模型分析

灾变预测年份显示(表3),在 4 a 或者更短的时间内,北太平洋柔鱼的资源丰度依旧很高,这也符合今后持续的 PDO 暖期与 El Niño 事件的气候变化背景,但在 PDO 冷暖期与 El Niño-La Niña 事件转化的年份,易发生资源丰度歉年,并在 11 a 左右的下一个周期开始仍处于低资源丰度的状态。所以建议北太平洋渔业生产企业和管理部门在 PDO 暖期与 El Niño 事件期间加大生产与捕捞努力量的投入,争取经济效益的最大化;相反,在 PDO 冷期与 La Niña 事件期间及时做好低产的准备,减少船只、人力、管理等方面由于多余投入而带来的经济损失。

灰色灾变预测实质上异常值预测,而异常值的设置往往是根据人们凭经验确定的,具有很强的主观性,因此灾变阈值的确定十分重要。本研究采用统计学上的四分位数法确定灾变阈值的上下限,从模型的

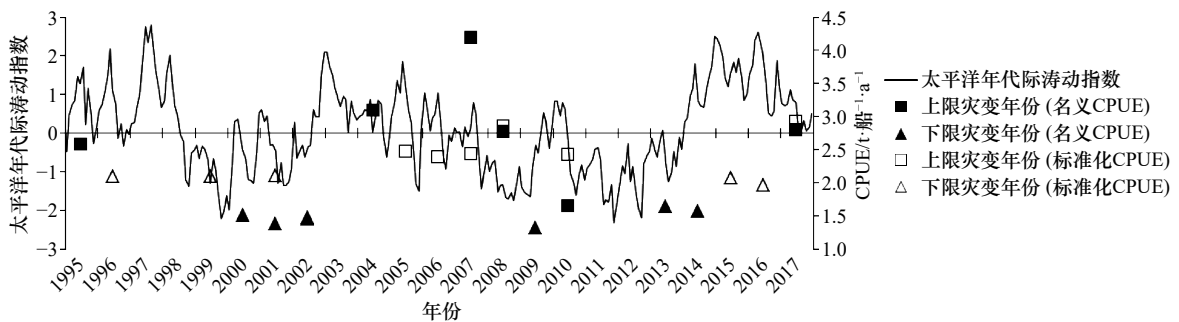


图2 1995-2017年太平洋年代际涛动(PDO)指数时间序列变化及灾变年份分布

Fig. 2 Time series of PDO and catastrophe year distribution from 1995 to 2017

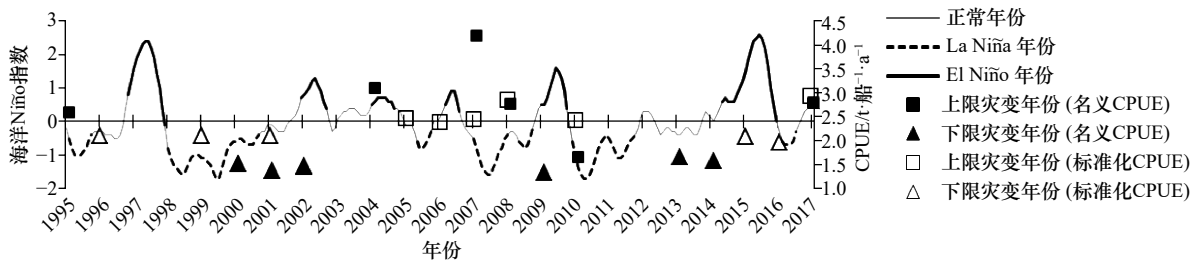


图3 1995–2017年El Niño和La Niña事件变化及灾变年份分布

Fig. 3 El Niño and La Niña event changes and catastrophic years distribution from 1995 to 2017

精度来看,灾变GM(1,1)模型可以有效地预测灾变发生时间。从预测模型的结果看(表2),对于短期的预测值精度都较高,但随着预测时序的增长,会出现误差较大的点,证明灰色灾变预测模型仅适合短期的灾变点预测。此外,灾变预测不能预测连续发生的灾变点,如本研究的连续灾变年份包括上限灾变点2005–2008年,下限灾变点2000–2001年,2015–

2016年。由于GM(1,1)模型过于依赖样本序列,所以样本长度不同,序列起始划分不同,预测值会具有一定的不确定性,如样本太少会导致结果失真,样本太多难以达到所要求序列满足的光滑度。建议以后的研究采用多样本序列组合形式建立多种模型,考虑渔获量或捕捞努力量等指标,筛选出最优模型用于灾变长期预报。

#### 参考文献:

- [1] 陈新军, 钱卫国, 刘必林, 等. 主要经济大洋性鱿鱼资源渔场生产性调查与渔业概况[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 344–356.  
Chen Xinjun, Qian Weiguo, Liu Bilin, et al. Productive survey and fishery for major pelagic economic squid in the world[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 344–356.
- [2] Chen Xinjun, Chen Yong, Tian Siqun, et al. An assessment of the west winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean[J]. Fisheries Research, 2008, 92(2/3): 221–230.
- [3] Rodhouse P G. Managing and forecasting squid fisheries in variable environments[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 3–8.
- [4] 陈新军, 刘必林. 2004年北太平洋柔鱼钓产量分析及作业渔场与表温的关系[J]. 湛江海洋大学学报, 2005, 25(6): 41–45.  
Chen Xinjun, Liu Bilin. Analysis on catch of *Ommastrephes bartramii* in squid jigging fishery and the relationship between fishing ground and SST in the North Pacific Ocean in 2004[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2005, 25(6): 41–45.
- [5] Chen Xinjun, Cao Jie, Chen Yong, et al. Effect of the Kuroshio on the spatial distribution of the red flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. Bulletin of Marine Science, 2012, 88(1): 63–71.
- [6] 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.
- [7] 余为, 陈新军, 易倩. 不同气候模态下西北太平洋柔鱼渔场环境特征分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 525–534.  
Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian. Analysis of variations in the environmental conditions on the fishing ground of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwestern Pacific Ocean under different climate modes[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 525–534.
- [8] 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 neon flying squid in the north Pacific fishing ground[J]. China Environmental Science, 2014, 34(8): 2093–2100.
- [9] 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.
- [10] 袁红春, 顾怡婷, 汪金涛, 等. 西北太平洋柔鱼中长期预测方法研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(10): 65–70.  
Yuan Hongchun, Gu Yiting, Wang Jintao, et al. Study on medium to long term forecasting of squid in the Northwestern Pacific[J]. Marine Sciences, 2013, 37(10): 65–70.
- [11] 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.
- [12] 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.  
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.
- [13] 陈新军, 郑波. 中西太平洋金枪鱼围网渔业鳀鱼资源的时空分布[J]. 海洋学研究, 2007, 25(2): 13–22.

- Chen Xinjun, Zheng Bo. Study on the temp-spatial distribution of skipjack resources for tuna purse seine in the west-central Pacific Ocean[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2007, 25(2): 13–22.
- [14] 赵龙明, 卢琪, 王娜, 等. 改进的灰色关联分析法在渔业水质评价中的应用[J]. *华北理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 39(2): 110–114, 119.
- Zhao Longming, Lu Qi, Wang Na, et al. Application of improved grey correlation analysis method in fishery water quality assessment[J]. *Journal of North China University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2017, 39(2): 110–114, 119.
- [15] 陈业华, 邱菀华. 灰色灾变预测模型及其应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 1998, 24(1): 79–82.
- Chen Yehua, Qiu Wanhua. Grey model of calamity forecast and its application to the calamity forecast[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(1): 79–82.
- [16] 陈芄. 东南太平洋秘鲁鳀渔情预报研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- Chen Peng. Study for the fishery forecast of the anchoveta (*Engraulis ringens*) in the Southeast Pacific Ocean[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [17] 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: 140–168.
- Liu Sifeng, Yang Yingjie, Wu Lifeng, et al. Grey System Theory and its Application[M]. 7th ed. Beijing: China Science Press, 2014: 140–168.
- [18] 李燕. 灰色预测模型的研究及其应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
- Li Yan. Research and application of the grey forecast model[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012.
- [19] 刘思峰, 邓聚龙. GM(1,1)模型的适用范围[J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 20(5): 121–124.
- Liu Sifeng, Deng Julong. The range suitable for GM (1,1)[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000, 20(5): 121–124.
- [20] Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian, et al. A review of interaction between neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) and oceanographic variability in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(4): 739–748.
- [21] 沈建华, 韩士鑫, 崔雪森, 等. 北太平洋巴特柔鱼渔业2001年低产原因分析[J]. *水产学报*, 2003, 27(4): 350–357.
- Shen Jianhua, Han Shixin, Cui Xuesen, et al. An explanation on poorer harvest of flying squid in the North Pacific in 2001[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2003, 27(4): 350–357.
- [22] 陈峰, 陈新军, 钱卫国, 等. 水温变动对2009年西北太平洋柔鱼产量下降的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2010, 30(1): 65–71.
- Chen Feng, Chen Xinjun, Qian Weiguo, et al. Influence of variability of temperature on decline of catch for *Ommastrephes bartramii* in the Northwestern Pacific Ocean in 2009[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2010, 30(1): 65–71.
- [23] 唐峰华, 崔雪森, 樊伟, 等. 北太平洋柔鱼渔获量与海洋环境关系的遥感学研究[J]. *海洋技术*, 2011, 30(2): 7–12.
- Tang Fenghua, Cui Xuesen, Fan Wei, et al. Study on relationship of neon flying squid yield in North Pacific Ocean with marine environment by remote sensing[J]. *Ocean Technology*, 2011, 30(2): 7–12.
- [24] Yu Wei, Chen Xinjun, Yi Qian, et al. Variability of suitable habitat of western winter-spring cohort for neon flying squid in the Northwest Pacific under anomalous environments[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0122997.

## Grey catastrophe year prediction for the abundance of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific

Xie Mingyang<sup>1</sup>, Chen Xinjun<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 5. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Neon flying squid *Ommastrephes bartramii* is a short-lived cephalopod species whose abundance is highly susceptible to marine environmental changes and has large interannual fluctuations. Based on the statistical data from the squid fishery in the Northwest Pacific from 1995 to 2017, catch per unit effort (CPUE) was derived as an abundance index and the grey catastrophic prediction method was used to establish the GM(1, 1) model for the upper and lower catastrophic years and to forecast the future catastrophic years. The results show that the average relative error of the lower limit catastrophic prediction model established based on GLM-model-standardized CPUE

is 15.32%, the average relative error of the upper catastrophic prediction model is 8.19%, and the accuracy tests for both models attain the level I accuracy. The study forecasts that the next upper catastrophic year may occur in 2021 ( $CPUE \geq 2.39$  t/(ship·a)), and the lower catastrophe year occurred in 2027 ( $CPUE \leq 2.13$  t/(ship·a)). The study also suggests that the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-La Nina events are important factors driving large fluctuations in the squid abundance. The forecast can provide a reference for squid fishing enterprises and managing departments in the Northwest Pacific.

**Key words:** *Ommastrephes bartramii*; abundance; grey catastrophic year prediction; GM (1, 1) model; climate change