

基于空间相关性的西北太平洋柔鱼 CPUE 标准化研究

徐 洁¹, 官文江^{1,2,3,4}, 陈新军^{1,2,3,4*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学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资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306;

4. 上海海洋大学远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘要: CPUE 标准化方法通常都假设名义 CPUE 之间是相互独立且没有相关性, 然而鱼类集群分布通常存在着空间相关性, 为此本研究以西北太平洋柔鱼的 CPUE 标准化为例, 采用 1999—2012 年 6—11 月中国鱿钓生产数据以及对应的海表面温度和叶绿素浓度的环境数据, 将空间相关性加入广义线性模型 (general linear model, GLM) 中。在空间 GLM 模型中运用 4 个距离模型 (指数模型、球面模型、线性模型和高斯模型), 进行标准 GLM 模型和 4 种空间 GLM 模型的 CPUE 标准化结果比较。结果发现, 4 种空间 GLM 模型均比标准 GLM 模型的最小信息准则 (akaike information criterion, AIC) 更小, 标准化结果更准确。同时, 在 4 个距离模型中, 指数模型的 AIC 值最小, 其 CPUE 标准化结果最佳。研究表明, 在 CPUE 标准化中, 鉴于鱼类集群与分布特性, 应该充分考虑空间相关性这一因素。

关键词: 柔鱼; 空间相关性; CPUE 标准化; 西北太平洋

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

近年来, 很多传统渔业资源出现了不同程度的衰退, 比如中国近海大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)^[1]。为了渔业资源的可持续利用, 需要对渔业进行合理的资源评估, 从而对渔业资源实施科学管理。由于我国通过科学调查所获得的渔业数据相对缺乏, 商业性的渔业数据是我国渔业资源评估数据的主要来源^[2]。单位捕捞努力量渔获量 (catch per unit effort, CPUE) 是用来表示渔业资源丰度的相对指标, 也是渔业资源评估中重要的内容之一^[2-3]。但大量研究表明, CPUE 可能会受到捕捞能力、海洋环境和时间空间等因素的影响^[4-5]。CPUE 的标准化是渔业资源评估的基础性工作^[6-7], 其往往直接影响渔业资源评估的结果。因此, 对名义 CPUE 进行标准化, 排除外界因素对 CPUE 的影响和干扰, 使它能真实反映渔业资源的丰度变化, 从而减少资源评估中的误差和不确定性。很多方法已经用于 CPUE 标准化研究, 比如回

归树 (regression trees)^[8]、广义线性模型 (general linear model, GLM)^[9-10] 和广义加性模型 (general additive model, GAM)^[11] 等。然而这些方法都假设名义 CPUE 数据之间都是相互独立、没有相关性的。事实上这个假设对于鱼类分布来说是不成立的。因为鱼类会有集群、摄食和洄游等习性, 他们之间有着很大相关性^[12]。因此在传统的 CPUE 标准化方法中加入空间相关性显得尤为重要。

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 属于软体动物门 (Mollusca), 头足纲 (Cephalopoda), 枪形目 (Teuthida), 柔鱼科 (Ommastrephidae), 是西北太平洋重要经济头足类, 具有集群和趋光的习性, 主要由光诱鱿钓渔船所捕捞^[12]。鱿钓船通常聚集在某一中心渔场进行捕捞作业。因此, 本研究以西北太平洋柔鱼渔业 CPUE 标准化为案例, 拟将空间相关性加入到 GLM 模型中, 比较基于空间相关性的 GLM 模型和未加入空间相关性的 GLM

收稿日期: 2014-11-09 修回日期: 2015-01-15

资助项目: 国家自然科学基金 (NFSC41306127, NSFC41276156); 上海市自然科学基金 (13ZR1419700); 上海市教委创新项目 (13YZ091); 教育部博士点基金 (20133104120001); 大洋渔业可持续开发教育部重点实验室开放基金 (S30702)

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

模型的 CPUE 标准化结果,为 CPUE 标准化提供新的途径和方法。

1 材料与方法

1.1 数据来源

采用 1999—2012 年 6—11 月中国西北太平洋柔鱼生产数据以及对应的海表面温度(SST)和叶绿素浓度(CHLA)的环境数据,时间分辨率为月,空间分辨率为经纬度 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。经纬度范围为 $140^\circ\text{E} \sim 170^\circ\text{W}$, $37^\circ\text{N} \sim 46^\circ\text{N}$ 。其中生产数据包括月份、作业次数以及日产量,CPUE 为每天的捕捞量(t/d)。SST 和 CHLA 数据来自美国 NOAA 的 Oceanwatch 数据库 (<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/>)。

1.2 研究方法

采用两种方法对西北太平洋柔鱼 CPUE 进行标准化:第一种是传统的广义线性模型(以下称为标准 GLM 模型),第二种是在传统广义线性模型的基础上加入空间相关性的 GLM 模型(以下称为空间 GLM 模型),空间模型考虑了指数模型、球面模型、线性模型和高斯模型 4 种模型^[13]。以上这些模型采用 R 软件中的 GLM 函数和广义最小二乘法(generalized least squares, GLS)函数进行实现^[13]。

标准 GLM 模型 传统的 GLM 模型可用公式表示为^[14]

$$g(\mu_i) = X_i^T \beta \quad (1)$$

式中, g 为链接函数, $\mu_i = E(Y_i)$, X_i 为第 i 个响应变量的解释变量, β 为模型估计参数, Y_i 为第 i 个响应变量。

实验假设 CPUE 服从对数正态分布,因此 GLM 模型又可表示为

$$\begin{aligned} \ln(N_CPUE_{i,j,k,l} + 1) = & \text{intercept} + \alpha_1 \text{year}_i + \\ & \alpha_2 \text{month}_j + \alpha_3 \text{lon}_k + \alpha_4 \text{lat}_i + \alpha_5 \text{SST} + \\ & \alpha_6 \text{CHLA} + \alpha_7 \text{Interactions} + \varepsilon_{i,j,k,l} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, N_CPUE 为每艘船每天的捕捞产量;interaction 为交互项,表示时间与空间变量的交互效应; $\alpha_1 \sim \alpha_7$ 为模型参数; ε 为误差项,假设其服从正态分布。在该模型中,将时间(年、月)、空间(经度、纬度)、环境(SST、CHLA)因素作为解释变量,其中变量年、月、经度、纬度为分类离散变量,其他变量为连续变量。CPUE 加上常数 1,再作对数变换后,作为响应变量,以解决 CPUE 为 0 的情况^[15-17]。 i, j, k, l 分别表示年份、月份、经度、纬度变量的具体值,即第 i 年、第 j

月、 k 经度和 l 纬度等。

空间 GLM 模型 将公式(1)改写成:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{Y} = [\ln(N_CPUE_{1111} + \text{const}), \dots, \ln(N_CPUE_{ijkl} + \text{const})]$,它是标准 GLM 模型中 CPUE 的向量化形式, \mathbf{X} 是相应的设计矩阵 $\varepsilon(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{ijkl})$,

以上公式假设 CPUE 和 ε 都是独立的变量,但事实上这个假设对于一个鱼类种群来说是不成立的,因为它忽略了种群间的空间相关性。鱼类种群之间通常有着很大的空间依赖性,若观测的种群空间越小,则该种群内的相似性越大,因此在 CPUE 标准化的过程中应该考虑到这种空间正相关性。因此可将式(3)改为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad \varepsilon \sim N(0, V), V[\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)] \quad (4)$$

式中, V 是 $n \times n$ 的方差-协方差矩阵,其他项的含义与式(3)相同。这就是空间 GLM 模型。

对于协方差矩阵 $\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)$ 最常用的模型有指数模型、球面模型、高斯模型和线性模型^[13]。

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = \sigma^2 \times \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{d_{ij}}{r}\right) & (\text{指数模型}) \\ 1 - \frac{3d_{ij}}{2r} + \frac{d_{ij}^3}{2r^3} & (\text{球面模型}) \\ 1 - \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{r^2}\right) & (\text{高斯模型}) \\ 1 - rd_{ij} & (\text{线性模型}) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)中的各个参数和式(3)中的向量参数 β 可以用限制性最大似然估计(restricted maximum likelihood estimation, REML)方法估算得到。其对数似然函数公式^[13]:

$$\begin{aligned} \text{REML: } ll(\beta, \sigma_0^2, \sigma^2, r) = & -0.5n \ln(|V|) - 0.5n \times \\ & \ln(X'V^{-1}X) - 0.5(n-p) \times \ln(D'V^{-1}D) - \\ & 0.5(n-p) \left\{ 1 + \ln\left[\frac{2\pi}{n-p}\right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $D = Y - X(X'V^{-1}X)^{-1}X'V^{-1}Y$, p 是 X 的排名。

空间 GLM 模型采用 R 软件中的 GLS 函数进行实现。

最佳模型的选择 选取 AIC 值最小的模型为最佳模型^[18]。AIC 值的计算方法如下:

$$\text{AIC} = -2 \ln l(p_1, \dots, p_m, \sigma^2) + 2m \quad (7)$$

式中, m 为方程中参数的个数^[19]。

资源量丰度指数计算 在 GLM 模型中,第 i 年的丰度指数可以通过对年效应进行指数运算

得到。计算公式^[18]：

$$AI = \exp(\alpha_i) - 1 \quad (8)$$

式中, α_i 是第 i 年的年效应, AI (abundance indices) 是指资源量的丰度指数。

2 结果

2.1 响应变量 $\ln(N_CPUE + 1)$ 的统计分布检验

K-S 检验显示, $\ln(N_CPUE + 1)$ 趋向于服从正态分布(图 1-a)。 $\ln(N_CPUE + 1)$ 的数据点在正态

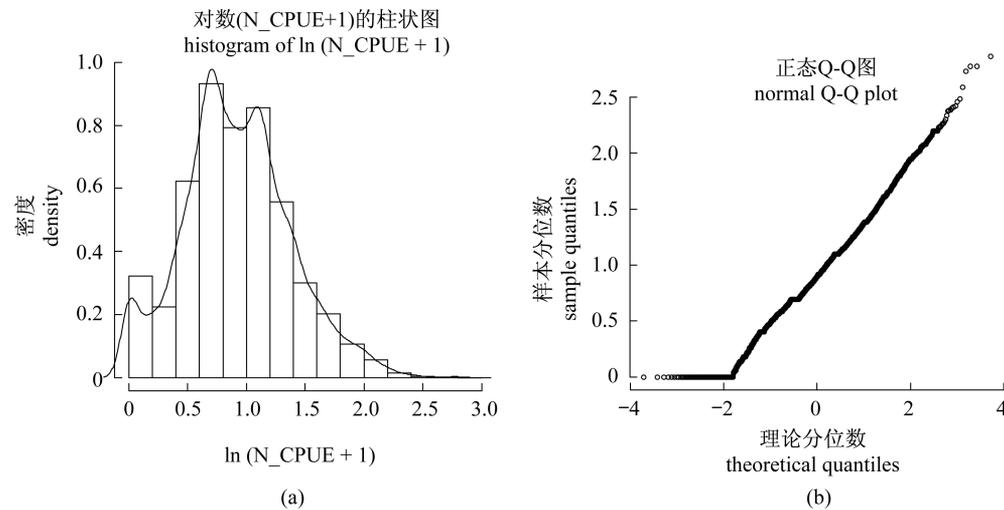


图 1 1999—2012 年西北太平洋柔鱼 $\ln(N_CPUE + 1)$ 的频次分布及其检验

(a) $\ln(N_CPUE + 1)$ 的频次分布; (b) $\ln(N_CPUE + 1)$ 的正态 Q-Q 图

Fig. 1 The $\ln(N_CPUE + 1)$ distribution for the Chinese squid jiggling fishery in the Northwest Pacific from 1999 to 2012 and its distribution tests

(a) frequency distribution of $\ln(N_CPUE + 1)$; (b) normal Q-Q plot of $\ln(N_CPUE + 1)$

表 1 5 个 GLM 模型的 R^2 , AIC 值和 AIC 值的排序情况

模型 models	R^2	AIC	AIC 排名 AIC rank
标准 GLM standard GLM	0.574	5 051	5
空间 GLM spatial GLM			
指数模型 exponential model	0.739	3 208	1
高斯模型 Gaussian model	0.735	3 315	2
线性模型 linear model	0.720	3 328	3
球面模型 spherical model	0.713	3 445	4

空间 GLM 模型的 CPUE 标准化结果比标准 GLM 模型的结果年间波动更小, 同时空间 GLM 模型标准化后的年平均 CPUE 值比标准 GLM 模型所得的值更小(图 2)。因此, 根据 AIC 值最小的原则, 基于指数相关性的空间 GLM 模型的 CPUE 标准化结果, 比标准 GLM 模型的结果更加准确。同时, 基于指数相关性的空间 GLM 模型比标准 GLM 模型的置信区间小(图 3, 图 4)。

Q-Q 图中几乎形成一条直线(图 1-b), 这说明 $\ln(N_CPUE + 1)$ 服从正态分布。上述结果表明, 关于 $\ln(N_CPUE + 1)$ 服从正态分布的假设是合理的。

2.2 GLM 分析

空间 GLM 模型的 AIC 值普遍比标准 GLM 模型小, 拟合度更好(表 1)。在 4 种空间 GLM 模型中, 指数模型的 AIC 值最小, 拟合度最佳。因此, 基于指数相关性的空间 GLM 模型是适用于西北太平洋柔鱼 CPUE 标准化的最佳模型。

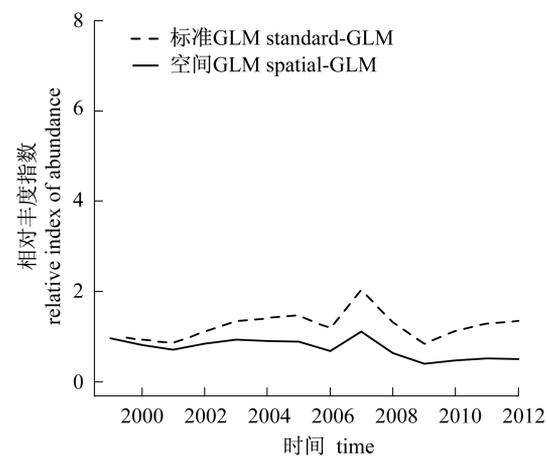


图 2 两种 CPUE 标准化模型(标准 GLM 模型和基于指数相关性的空间 GLM 模型)所得的西北太平洋柔鱼资源相对丰度的年间对比

Fig. 2 A comparison of the relative index of abundance of *O. bartramii* from the spatial-GLM with that from the standard-GLM

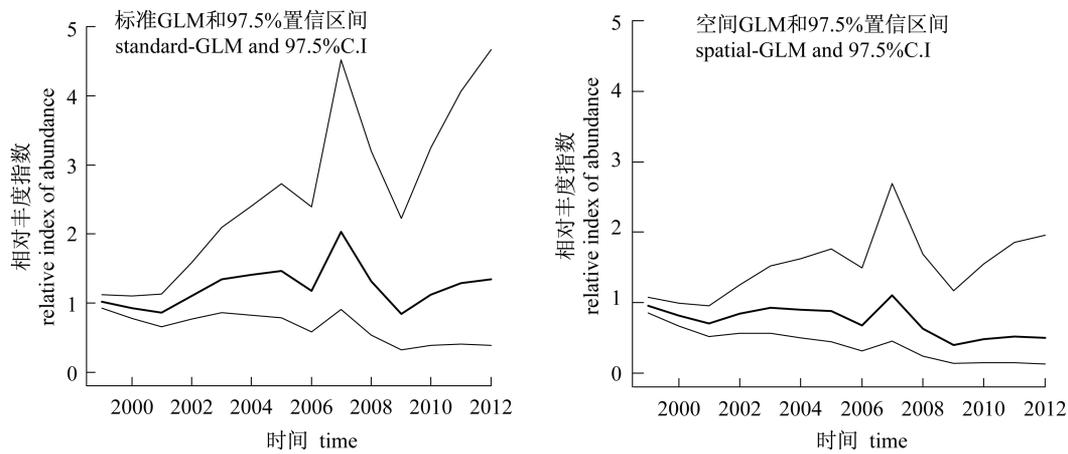


图3 两种 CPUE 标准化模型(标准 GLM 模型和基于指数相关性的空间 GLM 模型) 所得的西北太平洋柔鱼资源相对丰度及其 97.5% 置信区间的对比图

Fig. 3 A comparison of the relative index of abundance of *O. bartramii* and its 97.5% confidence intervals (C. I.) from the spatial-GLM with that from the standard-GLM

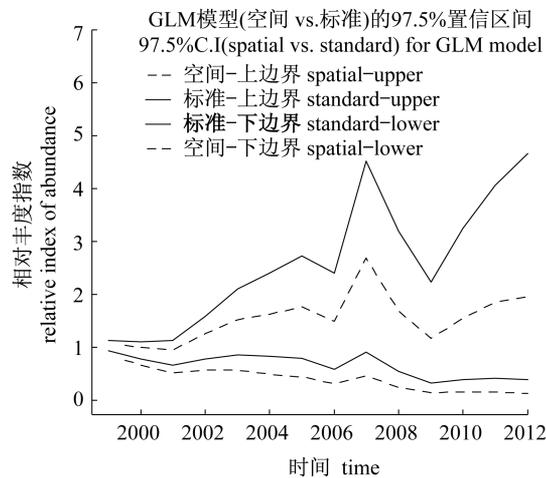


图4 标准 GLM 模型和基于指数相关性的空间 GLM 模型的 97.5% 置信区间的资源丰度对比

Fig. 4 A comparison of the 97.5% confidence intervals (CI) of the relative index of abundance of *O. bartramii* and ratios of 95% CI from the spatial-GLM with that from the standard-GLM

2.3 名义 CPUE 和标准化 CPUE 的比较

两种模型标准化后的 CPUE 趋势相近,标准化后的 CPUE 也明显低于名义 CPUE,这表明标准化后的 CPUE 排除了其他因素的影响。同时,名义 CPUE 与标准化后的 CPUE 趋势也相似,但是名义 CPUE 年间波动更大,而标准化后的年平均 CPUE 年间波动较小,2007 年到达最高值。总体来说,基于指数相关性的空间 GLM 模型标准化后的平均 CPUE 值较标准 GLM 模型小(图 5)。

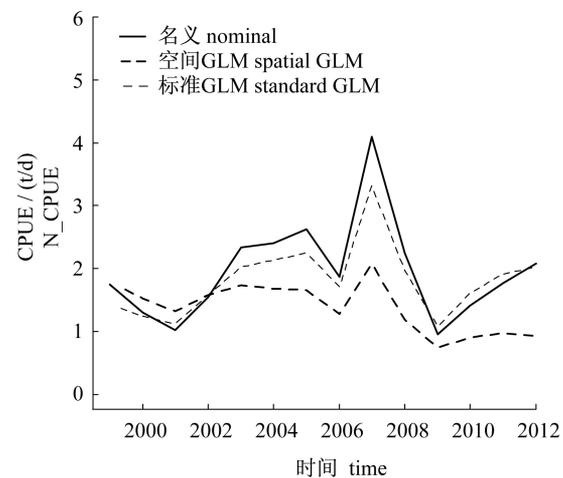


图5 1999—2012 年西北太平洋柔鱼渔业名义 CPUE 与采用标准 GLM 模型和基于指数相关性的空间 GLM 模型标准化后 CPUE 的关系

Fig. 5 Relationship between nominal CPUE and standard-GLM CPUE and spatial-GLM CPUE of *O. bartramii* in the Northwest Pacific Ocean during 1999—2012

3 讨论

一般而言,渔业资源的空间分布受很多因素的影响,如经度、纬度、季节和海洋表面温度等环境条件^[20-22],而捕捞量的季节变化和年变化又受到资源和船队空间分布的影响,以及海洋环境条件变化的影响^[23-24]。标准 GLM 模型和空间 GLM 模型的研究结果都表明,标准化后的 CPUE 通常都比名义 CPUE 小并且年际变化和季节变动

也小,这说明这两种模型都能够一定程度地排除时间、空间和海洋环境等其他因素对 CPUE 的影响,同时也说明这些因素在渔业 CPUE 变动方面扮演着重要角色。

GLM 模型是目前 CPUE 标准化的最常用方法之一,在过去十年中得到越来越广泛的运用^[25]。GLM 模型允许偏离均值的随机误差服从不是正态分布,如随机误差可服从指数散布族中的任一种分布,包含了泊松分布、伽马分布等。而且,GLM 模型不要求随机变量的均值是解释变量的线性函数,但进行某些变换后应是线性^[25]。但是 GLM 也有一些固有的弱点,如无法处理应变量间存在的相关性等问题^[4,25]。所以,当应变量间存在相关关系时,应对线性模型进行扩展,广义最小二乘法则是有效方法之一^[26]。GLS 的使用条件为要符合正态分布假设并知道模型相关关系的结构,比如当存在空间相关时,需要确定相关模型是否为球面模型、线性模型、高斯模型或指数模型等,并需要足够的据来估计这些相关关系^[13]。

对比和分析这两种模型对西北太平洋柔鱼 CPUE 标准化的结果可知,空间 GLM 模型标准化后的结果比标准 GLM 模型的结果更加可靠,其中基于指数相关性的空间 GLM 模型 CPUE 标准化结果为最佳,这与作业方式有着很大的关系。由于现代科技的进步,利用遥感等技术高效率地寻找渔场的方式^[27]以及渔船与渔船之间的交流,使得鱼类资源的作业地点一般都集中在一个很小的区域范围内,这使得这些渔业有着作业集中的特点^[28],这样的特点使得未考虑空间相关性的 CPUE 标准化方法可靠性降低,因此,考虑渔业资源 CPUE 之间的空间相关性,可大大提高鱼类 CPUE 标准化的准确性。

虽然本实验用空间 GLM 模型对西北太平洋柔鱼 CPUE 标准化取得了不错的结果,但是仍可以进行许多后续的研究。本实验只将空间相关性加入到了 GLM 模型中,还有很多统计模型同样可以加入空间相关性进行 CPUE 的标准化,例如回归树模型、神经网络模型和广义加性模型等。目前,国内外有关加入空间相关性的 CPUE 标准化研究非常少,只有 Nishida 等^[13]将空间相关性加入到黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 延绳钓渔业的 CPUE 标准化中。在今后的研究中,建议可

以将空间相关性加入到各个 CPUE 标准化模型中,同时将其结果与未加入空间相关性的 CPUE 标准化模型结果进行对比,从而分析和挑选出对某种渔业最有效的 CPUE 标准化模型。这其实是一个比较复杂的研究,特别是考虑到空间相关性的程度以及用哪个距离模型来进行空间相关性的计算。在今后的研究中,对空间相关性进行模拟是一个比较有效的方法,在模拟中假设不同的 CPUE 之间空间相关性的程度以及用不同的距离模型进行 CPUE 的标准化,最后对比多种不同的空间相关性 CPUE 标准化方法的结果以及未加入空间相关性的标准化结果,同时也考虑不同模型之间的结果,通过大量的模拟与对比,最后可以建立一个简单的规则来挑选某种渔业最适的 CPUE 标准化方法。

参考文献:

- [1] Xu K D, Liu Z P. The current stock of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea* in the East China Sea with respects of its stock decline [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2007, 22 (5): 392 - 396. [徐开达, 刘子藩. 东海区大黄鱼渔业资源及资源衰退原因分析. 大连水产学院学报, 2007, 22 (5): 392 - 396.]
- [2] Hilborn R, Walters C J. Quantitative fisheries stock assessment choice, dynamics and uncertainty [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992: 65 - 73.
- [3] Battaile B C, Quinn II T J. Catch per unit effort standardization of the eastern Bering Sea walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) fleet [J]. Fisheries Research, 2004, 70 (2): 161 - 177.
- [4] Maunder M N, Punt A E. Standardizing catch and effort data: A review of recent approaches [J]. Fisheries Research, 2004, 70 (2): 141 - 159.
- [5] Maunder M N, Start P J. Fitting fisheries models to standardized CPUE abundance indices [J]. Fisheries Research, 2003, 63 (1): 43 - 50.
- [6] Quinn T J, Deriso B R. Quantitative Fish Dynamics [M]. New York: Oxford University Press, 1999: 70 - 85.
- [7] Guan W J, Gao F, Lei L, et al. Retrospective problem in fishery stock assessment [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21 (5): 841 - 847. [官文江, 高峰, 雷林, 等. 渔业资源评估中的回顾性问题. 上海海洋大学学报, 2012, 21 (5): 841 - 847.]

- [8] Watters G, Deriso R B. Catch per unit of effort of bigeye tuna; A new analysis with regression trees and simulated annealing [J]. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin, 2000, 21(8) : 527 – 571.
- [9] Brynjarsdttir J, Stefnsson G. Analysis of cod catch data from Icelandic groundfish surveys using generalized linear models [J]. Fisheries Research, 2004, 70(2) : 195 – 208.
- [10] Maynou F, Demestre M, Sfinchez P. Analysis of catch per unit effort by multivariate analysis and generalized linear models for deep-water crustacean fisheries off Barcelona (NW Mediterranean) [J]. Fisheries Research, 2003, 65(1) : 257 – 269.
- [11] Bigelowk A, Boggs C M, He X. Environmental effects on swordfish and blue shark catch rates in the US North Pacific longline fishery [J]. Fisheries Oceanography, 1999, 8(3) : 178 – 198.
- [12] John R B, Taro I. The red flying squid (*Ommastrephes bartramii*): A review of recent research and the fishery in Japan [J]. Fisheries Research, 2005, 76(1) : 39 – 55.
- [13] Nishida T, Chen D G. Incorporating spatial autocorrelation into the general linear model with an application to the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) longline CPUE data [J]. Fisheries Research, 2004, 70(2) : 265 – 274.
- [14] Guisan A, Edwards T C, Hastie T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene [J]. Ecological Modelling, 2002, 157(2) : 89 – 100.
- [15] Howell E A, Kobayashi D R. El Nino effects in the Palmyra Atoll region: Oceanographic changes and bigeye tuna (*Thunnus obesus*) catch rate variability [J]. Fisheries Oceanography, 2006, 15 (6) : 477 – 489.
- [16] Denis V, Lejeune J, Robin J P. Spatio-temporal analysis of commercial trawler data using general additive models: Patterns of Loliginid squid abundance in the north-east Atlantic [J]. ICES Journal of Marine Science, 2002, 59(3) : 633 – 648.
- [17] Campbell R A. CPUE standardization and the construction of indices of stock abundance in a spatially varying fishery using general linear models [J]. Fisheries Research, 2004, 70(2) : 209 – 227.
- [18] Damalas D, Megalofonou P, Apostolopoulou M. Environmental, spatial, temporal and operational effects on swordfish (*Xiphias gladius*) catch rates of eastern Mediterranean Sea longline fisheries [J]. Fisheries Research, 2007, 84(2) : 233 – 246.
- [19] Imai C, Sakai H, Katsura K. Growth model for the endangered cyprinid fish *Tribolodon nakamurai* based on otolith analyses [J]. Fisheries Research, 2002, 68(4) : 843 – 848.
- [20] Shen X Q, Fan W, Cui X S. Study on the relationship of fishing ground distribution of *Ommastrephes bartramii* and water temperature in the Northwest Pacific Ocean [J]. Marine Fisheries Research, 2004, 25(3) : 10 – 14. [沈新强, 樊伟, 崔雪森. 西北太平洋柔鱼渔场分布与水温关系的研究. 海洋水产研究, 2004, 25(3) : 10 – 14.]
- [21] Wang W Y, Shao Q Q, Xue Y C, et al. On the relationship between the resources of *Ommastrephes bartramii* and marine environment in the Northwest Pacific Ocean based on GIS [J]. Geo-information Science, 2003, 1 : 39 – 44. [王文宇, 邵全琴, 薛允传, 等. 西北太平洋柔鱼资源与海洋环境的 GIS 空间分析. 地球信息科学, 2003, 1 : 39 – 44.]
- [22] Feng Y J, Chen X J, Yang M X, et al. An exploratory spatial data analysis-based investigation of the hot spots and variability of *Ommastrephes bartramii* fishery resources in the Northwest Pacific Ocean [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (7) : 1841 – 1850. [冯永玖, 陈新军, 杨铭霞, 等. 基于 ESDA 的西北太平洋柔鱼资源空间热点区域及其变动研究. 生态学报, 2014, 34(7) : 1841 – 1850.]
- [23] Chen X J, Tian S Q. Study on the Catch Distribution and Relationship Between Fishing Ground and Surface Temperature for *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean [J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(1) : 101 – 107. [陈新军, 田思泉. 西北太平洋海域柔鱼的产量分布及其作业渔场与表温的关系研究. 中国海洋大学学报, 2005, 35(1) : 101 – 107.]
- [24] Chen X J, Tian S Q. Temp-spatial Distribution on abundance index of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific using generalized additive models [J]. Journal of Jimei University: Natural Science, 2006, 11(4) : 295 – 300. [陈新军, 田思泉. 西北太平洋柔鱼资源丰度时空分布的 GAM 模型分析. 集美大学学报: 自然科学版, 2006, 11(4) : 295 – 300.]
- [25] Venables W N, Ripley B P. GLMs, GAMs and GLMMs: An overview of theory for applications in fisheries research [J]. Fisheries Research, 2004, 70(2) : 319 – 337.
- [26] 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 Science of China, 2014, 21(4): 852 - 862. [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. 中国水产科学, 2014, 21(4): 852 - 862.]
- [27] Yu J, Li Y Z. Recent progress on remote sensing technology for marine fisheries in China [J]. South China Fisheries Science, 2007, 3(1): 62 - 68. [于杰, 李永振. 海洋渔业遥感技术及其渔场渔情应用进展. 南方水产, 2007, 3(1): 62 - 68.]
- [28] Chen X J, Tian S Q. Analysis of fishing ground of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean [J]. Fishery Modernization, 2001, 28(3): 3 - 6. [陈新军, 田思泉. 西北太平洋海域柔鱼渔场分析探讨. 渔业现代化, 2001, 28(3): 3 - 6.]

A study of incorporating spatial autocorrelation into CPUE standardization with an application to *Ommastrephes bartramii* in the northwest Pacific Ocean

XU Jie¹, GUAN Wenjiang^{1,2,3,4}, CHEN Xinjun^{1,2,3,4*}

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

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

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

4. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: Catch per unit effort (CPUE) of a fishery is often used as an abundance index which is usually assumed to be proportional to the stock abundance. Observed fisheries CPUE data are, however, influenced by many factors, in addition to fish population abundance, including spatial-temporal factors such as area and season and environmental factors such as sea surface temperature (SST) and sea surface salinity. The impacts of these factors on CPUE may shift the assumed proportionality between observed CPUE and stock abundance. Thus, CPUE standardization is needed to remove the impacts of factors other than population abundance. Many statistical models have been developed for CPUE standardization such as General Linear Model (GLM) and General Additive Model (GAM). Generally, statistical methods always assume the independence of the observed CPUEs. However, this assumption is invalid for a fish school and distribution because of their spatial autocorrelation. Therefore, in this study, we take a CPUE standardization of red flying squid (*Ommastrephes bartramii*) as an example. Based on the fishing data in jigging fishery by Chinese fishing fleet and the corresponding SST data and the Chlorophylla data in the Northwest Pacific Ocean from June to November from 1999 to 2012, the spatial autocorrelation is incorporated into the standard general linear model (GLM). Four distance models (Gaussian, exponential, linear and spherical) are examined for spatial autocorrelation using the CPUE standardization of red flying squid. It is found that the four spatial-GLMs always produce the better goodness-of-fit to the data than that for the standard GLM. And the exponential model generates the best goodness-of-fit to the data in the four distance models. Therefore, it is suggested that spatial autocorrelation into CPUE standardization should be considered when the nominal CPUEs are strongly spatially autocorrelated.

Key words: *Ommastrephes bartramii*; spatial autocorrelation; CPUE standardization; northwest Pacific Ocean

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