

## 利用多种空间插值法分析西北太平洋柔鱼渔场

杨铭霞, 陈新军, 冯永玖, 官文江

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

**摘要:** 柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 是中国远洋鱿钓渔业的重要经济种类之一。以 2012 年 7 月 ~ 10 月柔鱼单位渔船日捕捞产量 (CPUE) 作为渔场分布的指标, 利用地统计学中全局多项式、局部多项式、径向基函数、反距离权重和普通克里格等 5 种插值方法对柔鱼渔场空间分布进行分析与比较。研究表明, 普通克里格插值法结果为最优, 其他依次为反距离权重插值法、径向基函数插值法、局部多项式插值法、全局多项式插值法; 以普通克里格插值法, 对 7 月 ~ 10 月各月柔鱼 CPUE 进行预测, 获得 7 月 ~ 10 月柔鱼中心渔场随月份的迁移分布情况; 与实际作业位置以及 CPUE 比较发现, 各月实际和预测 CPUE 均值相差不大, 各月 CPUE 预测值在  $0.51 \sim 1.95 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ , 误差控制在  $0.15 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  以下。研究认为, 普通克里格插值法在柔鱼中心渔场预报中具有较好的可靠性, 同时结合海洋环境因子对柔鱼渔场分布变化进行了讨论。

**关键词:** 西北太平洋; 柔鱼; 地统计学插值法; 中心渔场

中图分类号: S 934.182

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2015)02-0079-06

## Analysis of fishing ground for *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific based on different statistical interpolation methods

YANG Mingxia, CHEN Xinjun, FENG Yongjiu, GUAN Wenjiang

(Key Lab. of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education; National Distant-Water Fisheries Engineering Research Center; Collaborative Innovation Center for Distant-Water Fisheries; College of Marine Sciences of Shanghai Ocean University; Shanghai 201306, China)

**Abstract:** *Ommastrephes bartramii* is one of the most important economic species caught by Chinese squid jigging fleets. Based on the abundance index (CPUE, catch per day in one fishing vessel) of *O. bartramii* from July to October in 2012, we applied five statistical interpolation methods (global polynomial, local polynomial, radial basis function, inverse distance weighted and ordinary Kriging) to analyze the fishing ground of *O. bartramii* in the Northwest Pacific. The results show that ordinary Kriging was the best method for analyzing CPUE distribution, followed by inverse distance weighted, radial basis function, global polynomial and local polynomial. The optimal method of ordinary kriging was considered as an example to predict the CPUE distribution from July to October, so as to obtain the change of monthly fishing ground distribution. Little difference was found between actual CPUE and predicted CPUE; the mean monthly CPUEs varied from  $0.51 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  to  $1.95 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  and their absolute errors were less than  $0.15 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ . Finally, we discussed the distribution of fishing ground and its variation by combining with marine environmental factors. It is indicated that ordinary Kriging in-

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2014-09-07

资助项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA092303); 国家发改委产业化专项(2159999); 上海市科技创新行动计划项目(12231203900); 国家科技支撑计划项目(2013BAD13B01)

作者简介: 杨铭霞(1987-), 女, 硕士研究生, 从事渔业资源学研究。E-mail: yangmingxia0808@163.com

通信作者: 陈新军(1967-), 男, 教授, 博士, 从事渔业资源、远洋鱿钓渔业等研究。E-mail: xjchen@shou.edu.cn

terpolation method was suitable for forecasting the fishing ground of *O. bartramii*.

**Key words:** the Northwest Pacific; *Ommastrephes bartramii*; statistical interpolation methods; fishing ground

柔鱼 (*Ommastrephes bartramii*) 是西北太平洋的重要经济头足类, 20 世纪 70 年代初由日本鱿钓船首先开发和利用。中国于 1994 年对该资源进行规模化商业化捕捞, 并成为中国远洋鱿钓渔业的重要捕捞对象之一<sup>[1]</sup>。陈新军等<sup>[2-4]</sup>、沈新强等<sup>[5]</sup>、CAO 等<sup>[6]</sup>、ICHII 等<sup>[7]</sup>对柔鱼渔场形成、渔获量变动以及其与海洋环境之间的关系做了相关研究。北太平洋柔鱼渔场由黑潮和亲潮交汇形成, 其空间分布与海洋环境关系密切, 其中心渔场空间分布随月份迁移。地统计学是空间分析统计的重要手段, 并被广泛应用到相关领域<sup>[8-10]</sup>, 其中以普通克里格插值法应用最为广泛。为了了解和掌握北太平洋柔鱼中心渔场时空分布特征, 以及随时间的迁移规律, 该文尝试采用普通克里格插值法等 5 种地统计学方法, 根据中国鱿钓船提供的实际生产数据, 分析比较何种插值方法能很好地表征柔鱼中心渔场及其空间分布规律, 同时以最优插值方法来预测柔鱼中心渔场的分布, 为研究和掌握柔鱼中心渔场空间分布提供新手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究数据

渔获生产统计为 2012 年 7 月~10 月中国鱿钓船捕捞生产数据, 数据内容包括时间、经度、纬度和单船产量等。作业渔船数量为 225 艘。作业海域为 150°E~160°E、38°N~46°N 海域(图 1)。假设单位渔船日捕捞产量(CPUE)可作为资源丰度的指标, 其空间分布情况用来表征中心渔场的分布。空间分辨率为 0.5°×0.5°, 并设为一个渔区。每一个作业渔区即为一个样本。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 原始数检验** 为了满足地统计学空间分析的要求, 研究数据需要满足正态分布。为此, 该文采用 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验法, 对各月 CPUE 进行正态分布检验。对不符合正态分布的 CPUE 数据进行转换。K-S 检验方法为: 假设  $H_0$  为样本所来自的总体分布服从正态分布,  $H_1$  所来自的总体分布不服从正态分布。 $F_0(x)$  表示理论分布的分布函数,  $F_n(x)$  表示一组随机样本的累计频率函数。设  $D$  为  $F_0(x_0)$  与  $F_n(x)$  差距的最大值,

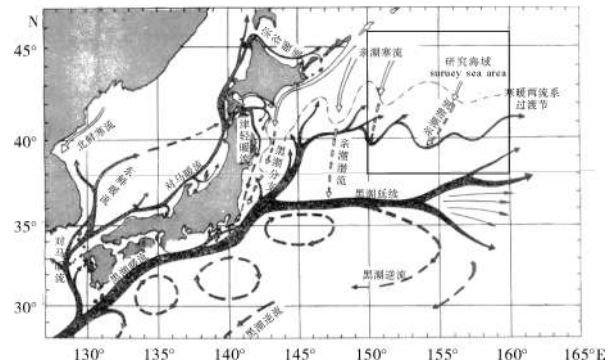


图 1 研究海域分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram survey sea area

定义如下式:

$$D = \max |F_n(x) - F_0(x)|$$

标准显著性水平  $\alpha$  设置为 0.05, 若显著性概率  $P[\text{Sig. (2-tailed)}] > 0.05$ , 表明接受假设  $H_0$ , 样本服从正态分布, 反之则不服从。

**1.2.2 空间插值法介绍** 空间插值是利用已知的部分空间样本信息对未知的地理空间特征进行估计, 也是 GIS 的重要功能模块之一<sup>[11]</sup>。常用的 5 种插值方法<sup>[12]</sup>为: 1) 反距离权重插值法 (inverse distance weighted, IDW), 以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均, 离插值点越近的样本点赋予的权重越大; 2) 径向基函数插值法 (radial basis function, RBF), 是多个数据插值方法的组合, 即经过各个已知样点生成一个圆滑曲面, 并使表面的总曲率最小; 3) 全局多项式插值法 (global polynomial, GP), 以整个研究区的样点数据集为基础, 用一个多项式计算预测值; 4) 局部多项式插值法 (local polynomial, LP), 采用处在特定重叠邻近区域内的多个多项式进行插值, 其产生的曲面更依赖于局部数据的变异; 5) 普通克里格插值法 (ordinary Kriging, OK), 是区域化变量的线性估计, 但其考虑了空间相关性, 更加符合空间数据的特点<sup>[12]</sup>。

**1.2.3 插值方法优劣评价** 对 7 月~10 月各月栅格化后的数据分别用不同的插值方法进行预测计算, 在各样本中随机选取 75% 为分析样本, 剩余 25% 为检验样本<sup>[12]</sup>。将预测得到的各月均方根值 (root-mean-square) 与检验值进行回归分析, 得到相关系数  $R^2$ , 以此判别其插值方法的优

劣<sup>[12]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 CPUE 数据描述性统计与正态分布检验

统计分析发现，渔汛期间各月 CPUE 为 0.01 ~10 t·d<sup>-1</sup>。其中，7 月平均 CPUE 最低，仅 0.67 t·d<sup>-1</sup>；8 月最高，达到 2.15 t·d<sup>-1</sup>（表 1）。各月 CPUE 的变异系数介于 0.6 ~0.9 t·d<sup>-1</sup>，均表现为中等变异。分析认为样本总体上具有较好的代表性。

各月 CPUE 的 K-S 检验表明，7 月~10 月各月

的  $P$  值分别为 0.51、0.42、0.01 和 0.80，因此 9 月 CPUE 数据不服从正态分布的假设 ( $P < 0.05$ )。经对 9 月 CPUE 数据进行对数、平方根、倒数以及 Cox-Box 等转换，转换后检验结果分别为 0、0.10、0、0，只有平方根转换后的数据接受假设 ( $P > 0.05$ )，因此各月 CPUE 数据(包括经过 9 月平方根转换的数据)均符合正态分布的要求(表 1)。

### 2.2 不同插值方法比较

比较 RMS 值发现，7 月和 10 月 RMS 最小值为普通克里格插值法，8 月和 9 月最小值为局部多项式插值方法(表 2)。各月预测 CPUE 与实际 CPUE

表 1 描述统计量及 K-S 检验值

Tab. 1 Descriptive statistics and K-S test value

月份 month	最小值/t·d <sup>-1</sup> Min.	最大值/t·d <sup>-1</sup> Max.	平均值/t·d <sup>-1</sup> Mean	标准差 Std.	变异系数 CV	K-S 检验 $P$
7	0.01	7.00	0.67	0.60	0.89	0.51
8	0.01	9.50	2.15	1.65	0.76	0.42
9	0.02	10.00	1.77	1.21	0.68	0.10(经平方根转换)
10	0.01	8.00	1.09	0.80	0.73	0.80

表 2 不同插值方法对柔鱼 CPUE 模拟建模评价指标

Tab. 2 Simulation modeling evaluation of *O. bartramii* CPUE by different interpolations

插值方法 interpolation	月份 month	预测 predict		检验 test	
		样本数 number of sample	均方根 RMS	样本数 number of sample	均方根 RMS
反距离权重插值法 IDW	7	83	0.30	28	0.32
	8	82	1.18	28	1.56
	9	83	0.42	28	0.46
	10	67	0.38	24	0.65
径向基函数插值法 RBF	7	83	0.30	28	0.32
	8	82	1.18	28	1.56
	9	83	0.43	28	0.47
	10	67	0.38	24	0.65
全局多项式插值法 GP	7	83	0.32	28	0.27
	8	82	1.22	28	1.16
	9	83	0.41	28	0.46
	10	67	0.42	24	0.73
局部多项式插值法 LP	7	83	0.32	28	0.25
	8	82	1.25	28	1.24
	9	83	0.43	28	0.45
	10	67	0.40	24	0.69
普通克里格插值法 OK	7	83	0.31	28	0.32
	8	82	1.18	28	1.56
	9	83	0.42	28	0.47
	10	67	0.40	24	0.65

的变异程度从小到大排序依次为：普通克里格插值法 > 反距离权重插值法 > 径向基函数插值法 > 局部多项式插值法 > 全局多项式插值法。

### 2.3 CPUE 空间分布预测

以普通克里格插值法进行计算，7 月 ~ 10 月各月柔鱼中心渔场的预测位置分别为 151°E ~ 154°E、38°N ~ 40°N，153°E ~ 158°E、41.5°N ~ 45.5°N，157°E ~ 158°E、41.5°N ~ 42.5°N，153°E ~ 158°E、42°N ~ 43.5°N 海域 (图 2)。这些预测位置与实际作业海域基本上重叠。

统计分析可知，7 月平均 CPUE 实际值和预测值分别为  $0.53 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $0.51 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ，相对误差为 3.4%；8 月分别为  $1.95 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1.83 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ，相对误差为 6.1%；9 月分别为  $1.28 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1.27 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ，相对误差为 0.8%；10 月分别为  $0.81 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$  和  $0.76 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ ，相对误差为 6.2%。分析认为，各月实际 CPUE 和预测值的均值相差不大，平均相对误差为 4.4%。

## 3 分析与讨论

### 3.1 中心渔场空间分布分析

西北太平洋柔鱼渔场是中国鱿钓船的传统作业海域，以捕捞西部冬春生群为主<sup>[13-15]</sup>。7 月 ~ 10 月柔鱼中心渔场随着月份的推移，其中心渔场由西南向东北方向迁移，但 10 月迁移范围不是很明显，这是由于 10 月柔鱼性腺基本成熟，开始准备南下产卵洄游<sup>[2,4]</sup>，从而导致柔鱼在北部海域多逗留一段时间 (图 2)。从经度上看，7 月中心渔场分布在 152°E ~ 154°E，8 月主要分布在 153°E ~ 158°E，9 月分布在 158°E 附近海域，10 月主要分布在 154°E、156°E 和 158°E 附近海域。与陈新军等<sup>[16]</sup> 比较，7 月中心渔场的位置与 1995 年 ~ 1997 年相似，8 月 ~ 10 月基本与 1998 年 ~ 2001 年作业渔场重心吻合；从纬度上看，7 月中心渔场在 39.5°N 附近海域，8 月分布在 41.5°N ~ 45.5°N 海域，9 月分布在 42°N 附近海域，10 月分布在 42°N ~ 43.5°N 海域，与 1995 年 ~ 2001

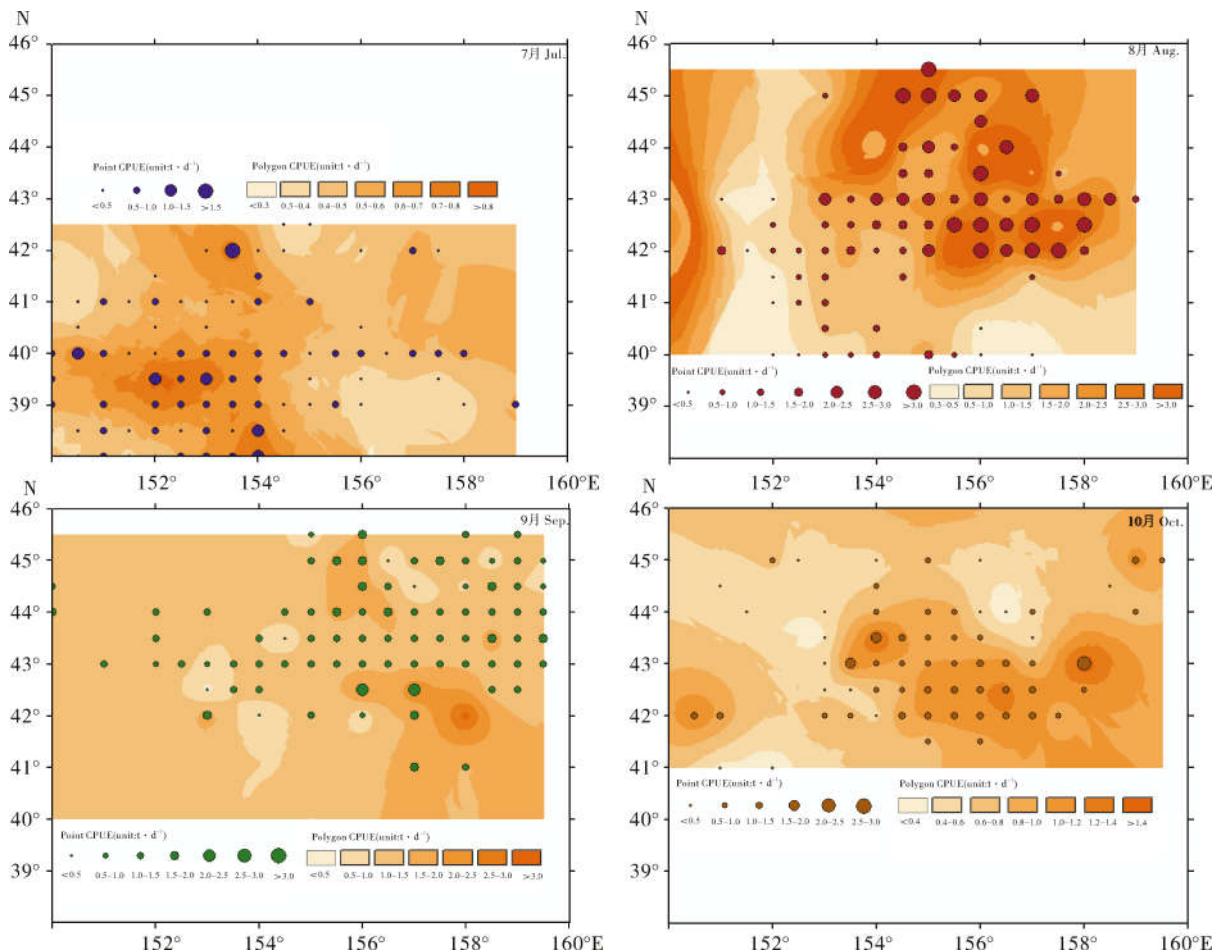


图 2 7 月 ~ 10 月柔鱼预测渔场分布及实际 CPUE 分布图

Fig. 2 Actual distribution and prediction of fishing ground for *O. bartramii* from July to October

年柔鱼渔场重心分布极为相似<sup>[16]</sup>。该研究说明, 利用克里格插值法基于 CPUE 来研究柔鱼中心渔场空间分布特征是可行的。另外, 从图 2 中发现 10 月在 150°E ~ 152°E 海域有一个小范围的中心渔场, 这可能是有新的群体补充到作业渔场<sup>[17]</sup>, 因为柔鱼的产卵时间为 12 月至翌年 6 月, 主要产卵时间为 2 月, 因此后期不断有小个体柔鱼补充到作业海域<sup>[4,13]</sup>。

### 3.2 渔场空间分布与水温之间的关系分析

表温与柔鱼中心渔场存在密切联系, 往往是寻找中心渔场的重要指标之一。渔汛期间, 7 月 ~ 9 月随着时间的推移, 柔鱼作业渔场的表温逐渐升高, 锋区逐渐向北推进。7 月中心渔场表温为 15 ~ 22 °C, 锋区分布在 151°E ~ 155°E 海域; 8 月表温为 15 ~ 23 °C, 锋区分布在 152°E ~ 156°E 海域; 9 月表温为 15 ~ 25 °C, 锋区分布在 153°E ~ 160°E; 10 月上旬表温为 13 ~ 23 °C, 锋区分布在 157°E ~ 160°E 海域, 中旬以后表温发生骤降, 下旬表温低至 10 °C<sup>[18]</sup>。有研究认为, 2009 年柔鱼低产是因为传统渔场的冷水涡使得表温以及深层水温偏低而导致, 2012 年虽然水温偏高, 但渔获总量却比往年偏低, 为 1995 年以来最低值<sup>[19]</sup>, 这说明除了水温外可能还有影响柔鱼渔获量的其他重要因素, 如厄尔尼诺等大尺度环境变化<sup>[20]</sup>。陈新军<sup>[21]</sup>、铃木史纪和赤羽光秋<sup>[22]</sup>一致认为, 柔鱼鱼群的分布密度还与水温的垂直分布关系密切, 0 ~ 100 m 的水温差与 CPUE 基本上成正比。但在该研究中, 没有考虑水温垂直结构的因素。

### 3.3 不同插值法的比较分析及展望

该文利用地统计学中常用的 5 种空间插值方法分别以经纬度值为  $X$  和  $Y$  坐标, CPUE 值为  $Z$  坐标, 模拟了并预测柔鱼中心渔场空间分布, 发现 5 种插值方法中克里格插值法建立的模型最为理想, 预测的 CPUE 和实际值相差不大, 这说明克里格插值法可用来分析和预测柔鱼中心渔场的空间分布。今后的研究中, 应该进一步结合作业海域的温度、盐度、叶绿素浓度等海洋环境因子以及不同空间结构<sup>[23-27]</sup>, 采用地统计学方法准确地分析柔鱼渔场分布与各环境因子之间的适应性关系, 以便更好掌握其渔场分布的空间特征及其规律。

#### 参考文献:

- [1] 陈新军, 田思泉, 陈勇, 等. 北太平洋柔鱼渔业生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 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.
- [3] 陈新军, 许柳雄. 北太平洋 150°E ~ 165°E 海域柔鱼渔场与表温及水温垂直结构的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2004(2): 36 - 44.
- [4] 陈新军, 田思泉, 许柳雄. 西北太平洋海域柔鱼产卵场和作业渔场的水温年间比较及其与资源丰度的关系[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(2): 168 - 175.
- [5] 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[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(3): 10 - 14.
- [6] CAO J, CHEN X J, CHEN Y. 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]. Mar Ecol Prog Ser, 2009, 381: 119 - 127.
- [7] 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]. Mar Ecol Prog Ser, 2009, 378(3): 1 - 11.
- [8] 王艺聪, 李庚新, 吴燕华, 等. 基于地统计分析的 1974 ~ 2004 年东北三省夏季气温时空演变规律[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(3): 1223 - 1225.
- [9] 杨晓明, 戴小杰, 朱国平. 基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4682 - 4690.
- [10] 苏奋振, 周成虎, 仇天宇. 东海水域中上层鱼类资源的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1971 - 1975.
- [11] TIAN Y, XIAO C C, LIU Y, et al. Effects of raster resolution on landslide susceptibility mapping: a case study of Shenzhen [J]. Sci China Ser E: Technol Sci, 2008, 51(S2): 188 - 198.
- [12] 王树良, 史文中, 李德毅, 等. 基于张力样条插值函数的土地数据挖掘[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(25): 5 - 7.
- [13] GONG C X, CHEN X J, GAO F, et al. Importance of weighting for multi-variable habitat suitability index model: a case study of winter-spring cohort of *Ommastrephes bartramii* in the Northwestern Pacific Ocean[J]. J Ocean Univ China, 2012, 11(2): 241 - 248.
- [14] CAO J, CHEN X J, CHEN Y. Generalized linear Bayesian models for standardizing CPUE of *Ommastrephes bartramii* for Chinese squid-jigging fishery in Northwest Pacific Ocean[J]. Scientia Marina, 2011, 75(4): 679 - 689.
- [15] CHEN X J, TIAN S Q, CHEN Y, et al. Variation of oceanic fronts and their influence on fishing grounds of *Ommastrephes bartramii* in the Northwestern Pacific[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 33(4): 45 - 54.
- [16] 陈新军, 钱卫国, 许柳雄, 等. 北太平洋海域柔鱼重心渔场的年间变动[J]. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(3): 26 - 32.
- [17] 唐峰华, 伍玉梅, 樊伟. 北太平洋柔鱼生殖群体结构特征及繁殖生物学[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(Z2): 72 - 78.
- [18] 陈新军, 田思泉. 西北太平洋海域柔鱼渔场分析探讨[J]. 渔业现代化, 2001(3): 3 - 6.

- [19] 杨铭霞, 陈新军, 刘必林, 等. 西北太平洋柔鱼渔获群体组成及生长率的年间比较[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(5): 872–877.
- [20] CHEN X J, ZHAO X H, CHEN Y. 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 J Mar Sci, 2007, 64(6): 1152–1160.
- [21] 陈新军. 西北太平洋柔鱼渔场与水温因子关系的探讨[J]. 上海水产大学学报, 1995, 4(3): 181–185.
- [22] 铃木史纪, 赤羽光秋. 北西太平洋におけるアカイカの分布について[J]. 日本海プロット試験研究集録, 1997(1): 63–70.
- [23] CHEN X J, CAO J, CHEN Y, et al. Effect of the Kuroshio on the spatial distribution of the red flying squid *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean[J]. Bull Mar Sci, 2012, 88(1): 63–71.
- [24] CHEN X J, TIAN S Q, CHEN Y, et al. A modeling approach to identify optimal habitat and suitable fishing grounds for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific[J]. Fish Bull, 2010, 108(1): 1–14.
- [25] 余为, 陈新军, 易倩, 等. 西北太平洋柔鱼传统作业渔场资源丰度年间差异及其影响因子[J]. 海洋渔业, 2013, 35(4): 373–381.
- [26] 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分析[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6427–6435.
- [27] 张鹏, 曾晓光, 杨齐, 等. 南海区大型灯光罩网渔场渔期和渔获组成分析[J]. 南方水产科学, 2013, 9(3): 74–79.