

文章编号: 1674-5566(2016)02-0271-11

6-9 月秘鲁外海茎柔鱼资源的空间异质性研究

方学燕¹, 冯永玖^{1,2,3,4}, 陈新军^{1,2,3,4}, 马迪¹

(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. 大洋渔业可持续发展省部共建教育部重点实验室, 上海 201306; 4. 远洋渔业协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 根据 2003-2012 年 6-9 月(2005 年数据缺失)秘鲁外海茎柔鱼渔获数据, 利用全局和局部自相关性分析, 结合半变异函数模型, 探讨秘鲁外海茎柔鱼资源分布的异质性特点, 并寻找影响茎柔鱼空间分布的关键环境因子。研究认为: (1) 全局自相关统计量 Moran's I 和局部自相关统计量 Getis-Ord G_i^* 的 Z 得分结果显示, 秘鲁外海茎柔鱼呈斑块状中等程度的聚集分布, 7 月份的聚集性强; (2) 趋势性分析认为, 6-9 月茎柔鱼资源在南北方向上基本都呈现出南低北高的变化趋势, 而东西方向上均呈现出中间高两端低的分布趋势; (3) 6、8 月份的最优模型为高斯模型, 7 月份的最优模型为球状模型, 9 月份的最优模型为指数模型, 6-9 月份的块金系数分别为 41.33%、24.66%、25.89% 和 35.42%, 其反映了中等程度自相关性, 与全局自相关的分析结果一致; (4) 相关性检验认为, 秘鲁外海茎柔鱼资源局部聚集分布主要是受到海表面高度的影响。对秘鲁外海茎柔鱼资源分布空间异质性的研究, 对揭示其栖息地分布及其生态学意义具有一定的作用。

关键词: 茎柔鱼; 空间自相关; 空间异质性; 秘鲁外海

中图分类号: S 931.4 **文献标识码:** A

茎柔鱼 (*Docidicus gigas*) 属于大洋性浅海种, 是世界头足类中较大个体之一, 广布于加利福尼亚 (37°N) 至智利 (40°S) 一带海域^[1]。自 20 世纪 90 年代以来, 茎柔鱼资源得到大规模开发利用^[2], 之后国内外学者对其生物学特征^[3]、种群结构^[4]、遗传学^[5] 和渔场学^[6] 等方面做了一定的研究, 这些研究为掌握茎柔鱼资源分布规律及其基础生物学提供了参考价值。鱼类通常是以个体、种群、群落的形式分布在特定空间上, 具有高度的空间自相关性和空间异质性, 由于经典统计学受基本假设的限制, 在解决相关问题上存在较多的缺陷^[7-8]。19 世纪 80 年代 CANION 将地统计学引入到海洋渔业领域^[9], 为定量分析和解释渔业空间数据的空间相关性和空间异质性提供了有效方法^[7,10]。为此, 本研究采用地统计学中的探索性空间数据分析 (ESDA) 方法, 研究秘鲁外海茎柔鱼资源分布的空间异质性, 分析比较茎

柔鱼全局和局部空间分布模式, 了解其资源分布与海洋环境之间的关系, 为后续研究秘鲁外海茎柔鱼渔场分布及其形成机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究数据

我国鱿钓渔船主要是在秘鲁外海海域 (6°S ~ 20°S) 进行全年作业, 由于每年 6-9 月是茎柔鱼的渔汛旺期^[11], 因此从上海海洋大学鱿钓技术组提供的渔业数据库中筛选出 2003-2012 年 6-9 月 (2005 年数据缺失) 数据进行研究, 包括时间、经纬度、作业船只和渔获产量等。研究范围为 6°S ~ 20°S, 75°W ~ 88°W, 将其处理成以月为单位, 空间分辨率为 0.5° × 0.5° 的数据格式。以单位捕捞努力量渔获量 (CPUE) 作为资源密度指标, 计算公式为^[12]:

$$CPUE = \frac{\sum C}{\sum D} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-04-04 修回日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC41476129; NSFC41276156); 国家高技术研究发展计划 (2012AA092303); 上海市研究生教育创新计划和国家科技支撑计划 (2013BAD13B01); 上海市自然科学基金面上项目 (13ZR1419300)

作者简介: 方学燕 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为渔业资源与渔场学。E-mail: fangxueyan@163.com

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

式中: C 为产量; ΣC 为渔区中多年所有渔船的捕捞产量之和; D 为捕捞作业天数; ΣD 为渔区中多年所有渔船的作业天数之和。

根据 TAIPE 等^[13]、ROBINSON 等^[14]、胡振明等^[15] 和汪金涛等^[16] 的研究结果,环境数据选用海表面温度(sea surface temperature, SST)、海表面高度(sea surface height, SSH)、叶绿素浓度(*Chl. a* 数据下载网址: <http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/index>) 和海表面盐度(sea surface salinity, SSS, 数据下载网址: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.BelowSeaLevel/.SALTY/dataselection.html>), 时间分辨率为月,空间分辨率分别为 $0.1^\circ \times 0.2^\circ$ 、 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、 $0.05^\circ \times 0.15^\circ$ 、 $0.33^\circ \times 1^\circ$ 。为了与渔业数据匹配,将各环境因子多年求平均处理成时空分辨率为以月为单位, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的数据格式。

1.2 分析方法

1.2.1 数据分布检验

使用地统计学方法进行空间统计分析的前提条件是研究数据要符合正态分布^[17]。为此,本文采用单样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法,并运用 SPSS 17.0 对各月 CPUE 值进行正态性检验。对非正态分布的数据进行对数、倒数、反正弦平方根、Box-Cox^[18] 和平方根等一系列转换,以选择满足地统计学分析要求的转换数据。

单样本 K-S 检验的基本原理如下: $F_0(x)$ 为理论分布的分布函数, $F_n(x)$ 为一组随机样本的累积频率函数。设 D 为 $F_0(x)$ 与 $F_n(x)$ 差距的最大值,定义^[17]:

$$D = \max |F_n(x) - F_0(x)| \quad (2)$$

式中:标准显著性水平设置为 0.05。

1.2.2 全局趋势性分析

趋势分析可反映物体在空间区域内变化的主体特征,揭示研究对象的总体规律^[19]。本研究应用 ArcGIS 10.1 的地统计模块 Geostatistical Analyst 中数据分析工具 Trend Analysis,获取茎柔鱼 CPUE 空间趋势图,分析其空间分布趋势。为了满足地统计学分析时的平稳或内蕴假设,通常在克里金插值中要剔除全局趋势^[20]。

1.2.3 空间自相关分析

空间自相关是指同一个变量在不同空间位置上的相关性,是空间单元属性值积聚程度的一

种度量^[21]。采用 ESDA 中的全局空间自相关统计量 Moran's I 进行分析茎柔鱼资源可能存在的聚集、离散和随机分布模式^[22],公式如下^[23]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [W_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})]}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

式中: n 是参与计算的样本数量; x_i 是空间单元 i 的属性值; x_j 是空间单元 j 的属性值; \bar{x} 是全部空间单元的平均值; W_{ij} 是空间权重矩阵,表示 i 和 j 的邻近关系,相邻为 1,不相邻为 0。Moran's I 值域范围为 $[-1, 1]$,大于 0 时为正相关,小于 0 时为负相关,其绝对值越大表示空间分布的自相关程度越高,空间分布呈现聚集现象;绝对值越小表示空间分布的自相关程度越低,空间分布呈现分散格局;当 Moran's I 值等于 0 时,表示空间分布呈现随机分布^[24-25]。

对于局部空间自相关性,可通过 ArcGIS 的空间统计方法获得茎柔鱼资源的空间热点。利用 Getis-Ord G_i^* 统计量进行局部空间自相关分析,以识别在整体分布状况下局部的分布特征,其计算公式为^[22]:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{s \sqrt{[n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n W_{ij})^2] / (n-1)}} \quad (4)$$

式中: S 为标准差; G_i^* 统计结果用 z 得分表示;正 z 得分表示渔业资源高产值聚集区,称为热点;负 z 值表示渔业资源低产值聚集区,称为冷点。 z 得分无论正负,当其绝对值越大,表明渔业资源的聚集性越强^[8,26]。

另外,利用 SPSS 17.0 统计包中的相关分析对 SST、SSS、SSH 和 *Chl. a* 与 CPUE 进行相关性检验,分析引起局部空间自相关的相关环境因子。以每月 CPUE 平均值为阈值,大于该阈值的 CPUE 认为高值 CPUE,绘制在相关环境因子下不同范围内高值 CPUE 频次占有 CPUE 的比重,即不同环境范围内的高值 CPUE 频次比,以此说明秘鲁茎柔鱼适宜分布的环境范围。计算公式为:

$$P = \frac{M_{>i}}{N} \quad (5)$$

式中: i 为 6-9 月份各月份 CPUE 平均值; M 为大于 i 的 CPUE 值的个数; N 为所有各月中所有 CPUE 个数。

1.2.4 空间异质性分析

半变异函数是探测研究对象空间变异性的
重要工具,能够定量描述变量的空间变异和空间
分布模式。半变异函数计算公式为^[20]:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2}{2N(h)} \quad (6)$$

式中: h 为样点的空间间隔距离,称为步长; n 是
距离等于 h 时点对数; $Z(x_i)$ 是位置 x_i 的实测值;
 $Z(x_i + h)$ 是位置 x_i 距离为 h 处样点的值。

基于各向同性条件下,利用 GS + 9.0 进行理
论半变异函数模型的拟合,其中有效滞后距可通
过 ArcGIS 10.1 软件 Toolbox 中的 Average Nearest
Neighbor 命令计算得到^[27]。常用的拟合半变异
函数类型有球状模型、指数模型和高斯模型,决
定系数(R^2)和残差平方和(RSS)是反映拟合模
型精度的指标, R^2 越大,RSS 越小,则表示模型的
拟合效果越好^[28]。

拟合的半变异函数用块金值(C_0)、偏基台值
(C)和变程(a)3 个参数来描述研究对象的空间
分布结构。其中 $h = 0$ 时的变异称为块金值,通
常表示由实验误差或小于实验取样尺度引起的
变异,基台值($C_0 + C$)表示系统内的总变异^[20]。
块金值与基台值之比(块金系数)表示由随机性

因素引起的空间异质性占系统总变异的比
例,是反映区域化变量空间异质性程度的重要
指标^[29]。块金系数小于 25% 时,系统变异主
要是由系统内部的结构因素引起的,表明系统
变量具有较强的空间自相关性,异质性程度低;
块金系数大于 25% 小于 75% 时,表明系统变
量的空间相关性处于中等水平;块金系数大于
75% 时,变异主要是由随机因素引起的,表明
系统变量具有较弱的空间相关性,异质性程度
较高^[17]。

2 结果

2.1 常规统计和全局自相关

表 1 可知,6-9 月份 CPUE 为 0 ~ 25.6 t/d,
平均值为 3.87 ~ 4.99 t/d。所有偏态 $S_k > 0$,表
明频数分布为正偏;峰度 > 3 ,属于高狭峰。这
说明 6-9 月秘鲁外海茎柔鱼资源密度分布以
低密度区域为主,高密度区域较少,经 K-S 检
验 6-8 月份 CPUE 数据不符合正态分布要求,
9 月份 CPUE 数据呈正态分布($P = 0.58 > 0.05$)。
变异系数(Coefficient of variation, C_v)值均
大于 10%,但小于 100%,这表明秘鲁外海茎
柔鱼资源密度值具有中等程度上的差异性。

表 1 秘鲁外海茎柔鱼 CPUE 经典统计

Tab.1 Traditional statistics about *Dosidicus gigas*'s CPUE in the high sea off Peru

月份 month	平均值 average	最大值 max	最小值 min	极差(R) range	偏度(S_k) skewness	峰度(K) kurtosis	标准差(Sd) standard deviation	变异系数(C_v)/% coefficient of variation
6	3.87	20.30	0	20.30	2.32	9.80	3.47	89.64
7	4.46	16.36	0	16.36	1.42	6.33	2.80	65.44
8	4.64	16.40	0	16.40	1.03	4.33	3.12	66.91
9	4.95	13.37	-0	13.37	0.55	3.14	2.62	52.93

由表 2 可知,对 6 月份 CPUE 进行对数、倒
数和 Box-Cox 转换均满足正态分布的要求($P >$
 0.05);对 7 月份 CPUE 进行平方根、反正弦平
方根和 Box-Cox 转换均满足正态分布要求($P >$
 0.05);对 8 月份 CPUE 进行倒数、平方根、反正

弦平方根和 Box-Cox 转换均能达到地统计学的
正态分布要求($P > 0.05$)。在本文中,为与
ArcGIS 转换方式相一致及各月统一,6-9 月
CPUE 数据均选用 Box-Cox 转换。

表 2 数据转换后的 K-S 检验值

Tab.2 K-S test of transformed data

月份 month	样品数 number of sample	对数 logarithm	平方根 square root	反正弦平方根 arcsine square root	倒数 inverse	Box-Cox Box-Cox
6	155	0.69	0.05	0.03	0.80	0.31
7	158	0.00	0.34	0.38	0.00	0.37
8	171	> 0.15	> 0.15	> 0.15	0.00	> 0.15

全局自相关 Moran's I 统计量计算认为(表 3),6-9 月份茎柔鱼资源均为正相关(Moran's I > 0),并呈现出一定的聚集特征,6 月份和 8 月

份的聚集性要好于 7 月份和 9 月份。6-9 月的 Z 值较大,P 值全为 0,表明秘鲁茎柔鱼资源呈显著的聚集分布(表 3)。

表 3 秘鲁茎柔鱼 CPUE 数据转换经典统计
Tab.3 Traditional statistics about *Dosidicus gigas*'s transformed CPUE in the high sea off Peru

月份 month	平均值 average	最大值 max	最小值 min	极差 range	偏度 skewness	峰度 kurtosis	标准差 standard deviation	变异系数 coefficient of variation	Moran's I	Z-score	P-score
6 June	2.41	3.94	1.74	2.20	1.13	4.81	0.43	0.18	0.194	11.208	0.00
7 July	2.27	6.33	-0.68	7.00	0.20	4.03	1.27	0.56	0.195	7.979	0.00
8 Agust	1.92	4.57	-0.66	5.24	-0.09	2.71	1.05	0.55	0.267	18.094	0.00
9 September	4.95	13.37	-0	13.37	0.55	3.14	2.62	0.53	0.138	6.433	0.00

2.2 局部空间自相关

根据 Z 得分进行普通克里金插值可得到 6-9 月份茎柔鱼热点特征面状分布图(图 1)。6 月份,在研究区域存在 3 个热点区域(图 1),其中 1 个较为明显,面积较大,为主热点,位于 11°S ~

16°S、78°W ~ 82.5°W,无太明显方向性,另外 2 个则比较小;同时存在 2 个冷点区域,较大 1 个位于 18°S ~ 20°S、78°W ~ 82°W,呈东西走向分布,另 1 个位于 12°S ~ 15°S、83.5°W ~ 85.5°W。7 月份,在研究区域仅存在 1 个较大的热点区域,位于

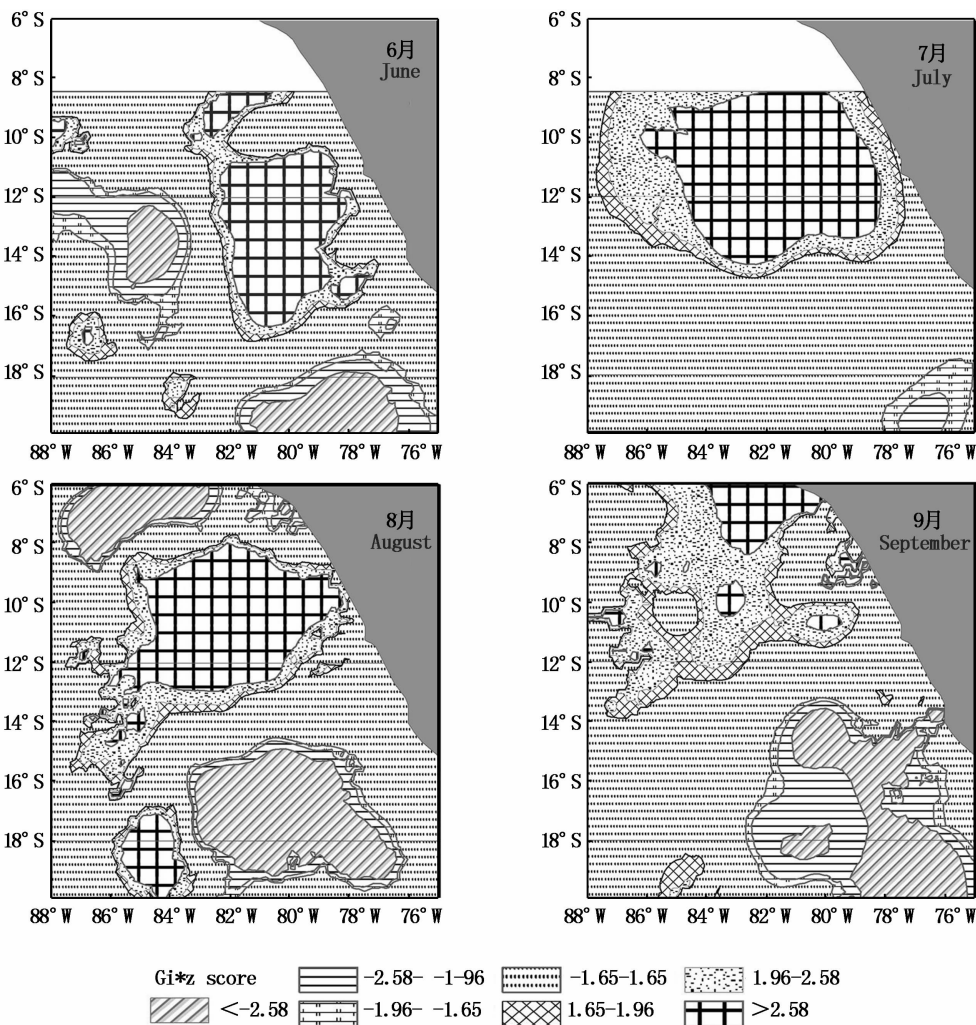


图 1 6-9 月份秘鲁茎柔鱼资源热点分布特征

Fig.1 Hot spots distribution features of *Dosidicus gigas* during June to September

9°S~14°S,78°W~86°W,呈东西向分布,无冷点区域出现。8月份,该研究区域有2个较明显的热点区域,主热点区位于8°S~13°S,78°W~85°W,呈东西向分布,另外1个位于17°S~20°S,83°W~85°W,无方向性;2个较明显的冷点区域分别位于东南和西北方向上,具体地理位置为15°S~19.5°S,76°W~83°W和6°S~9°S,83°W~87.5°W,大体都为东西向分布。9月份,在研究区域则出现3个较小的热点区域,主要位于6°S~12°S以北,面积均较小;1个较明显的冷点位于14°S~20°S,75.5°W~81°W,呈西北东南。

从图1可知,6、7、8月均有一个明显的较大热点地带,其大体位置相同,9月份的热点区域并

不十分明显,但9月份的冷点区域位置与6、8月份的大体相同。从热点特征来看,6、7、8月份的局部空间自相关性较强于9月份的局部空间自相关性,秘鲁外海茎柔鱼资源呈现出斑块状聚集分布。

2.3 茎柔鱼资源分布趋势

空间趋势分析的结果可知,6、7、9月茎柔鱼资源在南北方向上基本都呈现出南低北高的变化趋势,8月份总体趋势是南低北高,具体来看中间高两端低(图2);而东西方向上均呈现出中间高两端低的趋势,可以用二阶曲线拟合。因此在后续操作中需要剔除空间趋势。

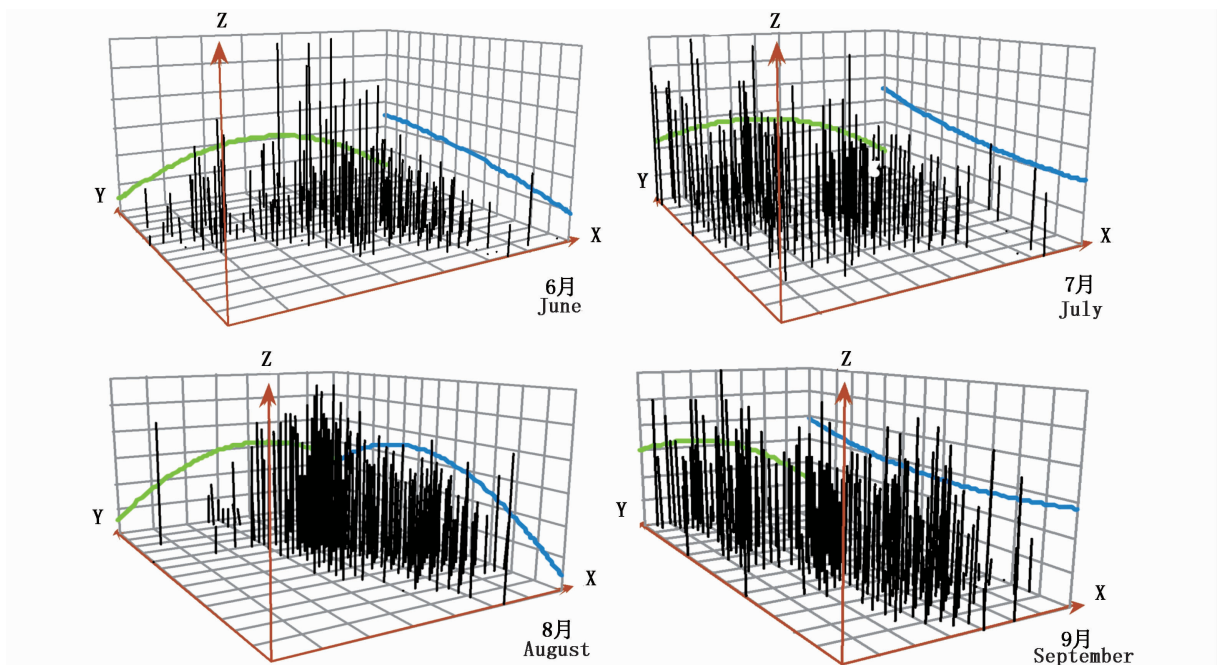


图2 2003-2012年6-9月秘鲁茎柔鱼资源分布趋势

Fig. 2 Distribution trend of *Dosidicus gigas* during June to September from 2003 to 2012

X轴表示正东方向, Y轴表示正北方向, Z轴表示各采样点CPUE值, X Y轴所在平面上的竖棒表示每一个空间位置上的CPUE值。南北方向趋势线和东西方向趋势线分别为CPUE值在南北方向和东西方向投影的拟合曲线。

X represents east direction, Y represents north direction, and Z represents the CPUE at sampled location. The CPUE value at every station is characterized by vertical bar in the XY plane. Trend lines in north-south direction and in east-west direction are fitted curves in respective direction.

2.4 茎柔鱼资源空间变异

从表4可知,6月份最适模型为高斯模型,其 R^2 和RSS分别为0.950和 6.891×10^{-4} ,变程(即自相关范围)为 5.768° ,块金系数分别为41.33%,具有中等水平的空间自相关性。7月份最适模型为球状模型,其 R^2 和RSS分别为0.981

和0.059,自相关范围为 9.04° ,块金系数为24.66%,具有较强的空间自相关。8月份最适模型为高斯模型,其 R^2 和RSS分别为0.993和0.0125,自相关范围为 9.04° ,块金系数为25.89%,具有中等水平的空间自相关性。9月份最适模型为指数模型,其 R^2 和RSS分别为0.966

和 0.0275, 自相关范围为 11.85° , 块金系数为 35.42%, 具有中等水平的空间自相关性。

表 4 6-9 月秘鲁茎柔鱼资源半变异函数拟合模型
Tab. 4 Semi-variogram models for *Dosidicus gigas* from June to September

月份 month	步长 length	有效滞后距 effective lag distance	模型类型 model	块金值 nugget	基台值 sill	块金系数 nugget coefficient	变程 range	决定系数 determination coefficient	残差平方和 residual sum of squares
6 June	0.528	6.339 8	球状模型	0.054 4	0.167 8	0.324 2	6.920	0.934	8.989×10^{-4}
	0.528	6.339 8	指数模型	0.049 8	0.211 3	0.235 7	14.550	0.924	1.040×10^{-3}
	0.528	6.339 8	高斯模型	0.069 1	0.167 2	0.413 3	5.768	0.950	6.891×10^{-4}
7 July	0.531	7.027 6	球状模型	0.609 0	2.470 0	0.246 6	9.040	0.981	5.90×10^{-2}
	0.531	7.027 6	指数模型	0.486 0	2.982	0.163 0	16.290	0.981	6.04×10^{-2}
	0.531	7.027 6	高斯模型	0.811 0	2.316	0.350 2	6.686	0.969	9.76×10^{-2}
8 August	0.534	6.815 5	球状模型	0.246 0	1.678 0	0.146 6	9.070	0.983	2.94×10^{-2}
	0.534	6.815 5	指数模型	0.200 0	2.410 0	0.083 0	21.810	0.976	4.15×10^{-2}
	0.534	6.815 5	高斯模型	0.415 0	1.603 0	0.258 9	7.084	0.993	1.25×10^{-2}
9 September	0.512	8.420 9	球状模型	0.725 0	1.601 0	0.452 8	7.020	0.958	3.44×10^{-2}
	0.512	8.420 9	指数模型	0.645 0	1.821 0	0.354 2	11.850	0.966	2.75×10^{-2}
	0.512	8.420 9	高斯模型	0.791 0	1.583 0	0.499 7	5.387	0.948	4.67×10^{-2}

2.5 CPUE 与环境因子的相关性检验

从表 5 可知, 6 月份的 CPUE 与 SSH、*Chl. a* 和 SSS 的相关性显著 ($P < 0.05$), 而 CPUE 与 SST 相关性不显著 ($P > 0.05$)。7 月份的 CPUE 与 SSH 和 SSS 的相关性显著 ($P < 0.05$), 而与 SST 和 *Chl. a* 的相关性不显著 ($P > 0.05$)。8 月份的 CPUE 与 SSH、*Chl. a* 的相关性显著 ($P < 0.05$), 而与 SSS 和 SST 的相关性不显著 ($P > 0.05$)。9 月份的 CPUE 与 *Chl. a* 和 SST 的相关性显著 ($P < 0.05$), 而与 SSH 和 SSS 相关性不显著 ($P > 0.05$)。

图 3(a-1)-(a-3) 表征 6 月份秘鲁茎柔鱼主要分布在 $SSH \approx 25 \sim 35 \text{ cm}$, $Chl. a \approx 0 \sim 0.4 \text{ mg/m}^3$, $SSS \approx 35.1 \sim 35.3$ 的区域, 但在 $Chl. a > 0.6$ 的高值区也占有一定比例; (b-1)-(b-2) 表征 7 月份秘鲁茎柔鱼主要分布在 $SSH \approx 25 \sim 30 \text{ cm}$, $SSS \approx 35.1 \sim 35.3$ 的区域; (c-1)-(c-2) 表征 8 月份秘鲁茎柔鱼主要分布在 $SSH \approx 25 \sim 35 \text{ cm}$, $Chl. a \approx 0 \sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ 的区域; (d-1)-(d-2) 表征 9 月份秘鲁茎柔鱼主要分布在 $SST \approx 18 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $Chl. a \approx 0 \sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ (图 3)。

表 5 Pearson 相关性检验结果
Tab. 5 Summary of Pearson correlation test

月份 month	SSH		<i>Chl. a</i>		SSS		SST	
	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	<i>P</i>	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	<i>P</i>	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	<i>P</i>	Pearson 相关系数 Pearson correlation coefficient	<i>P</i>
6 June	0.363	0	0.294	0.002	-0.191	0.049	0.078	0.426
7 July	0.318	0.001	0.155	0.106	-0.270	0.007	0.102	0.291
8 August	0.254	0.001	0.092	0.254	-0.124	0.124	0.095	0.242
9 September	0.088	0.260	0.160	0.040	-0.150	0.849	0.247	0.001

3 讨论与分析

3.1 茎柔鱼资源的空间自相关和异质性

本研究在进行热点分析时, 由于 6、7 月份在

$6^\circ\text{S} \sim 8^\circ\text{S}$ 之间没有渔业数据, 普通克里金不能完成对无数据区域的估值^[20], 所以在 6、7 月的面状分布图中 $6^\circ\text{S} \sim 8^\circ\text{S}$ 之间未显示可视化结果。本研究着重分析研究区域内热点的分布位置及其不

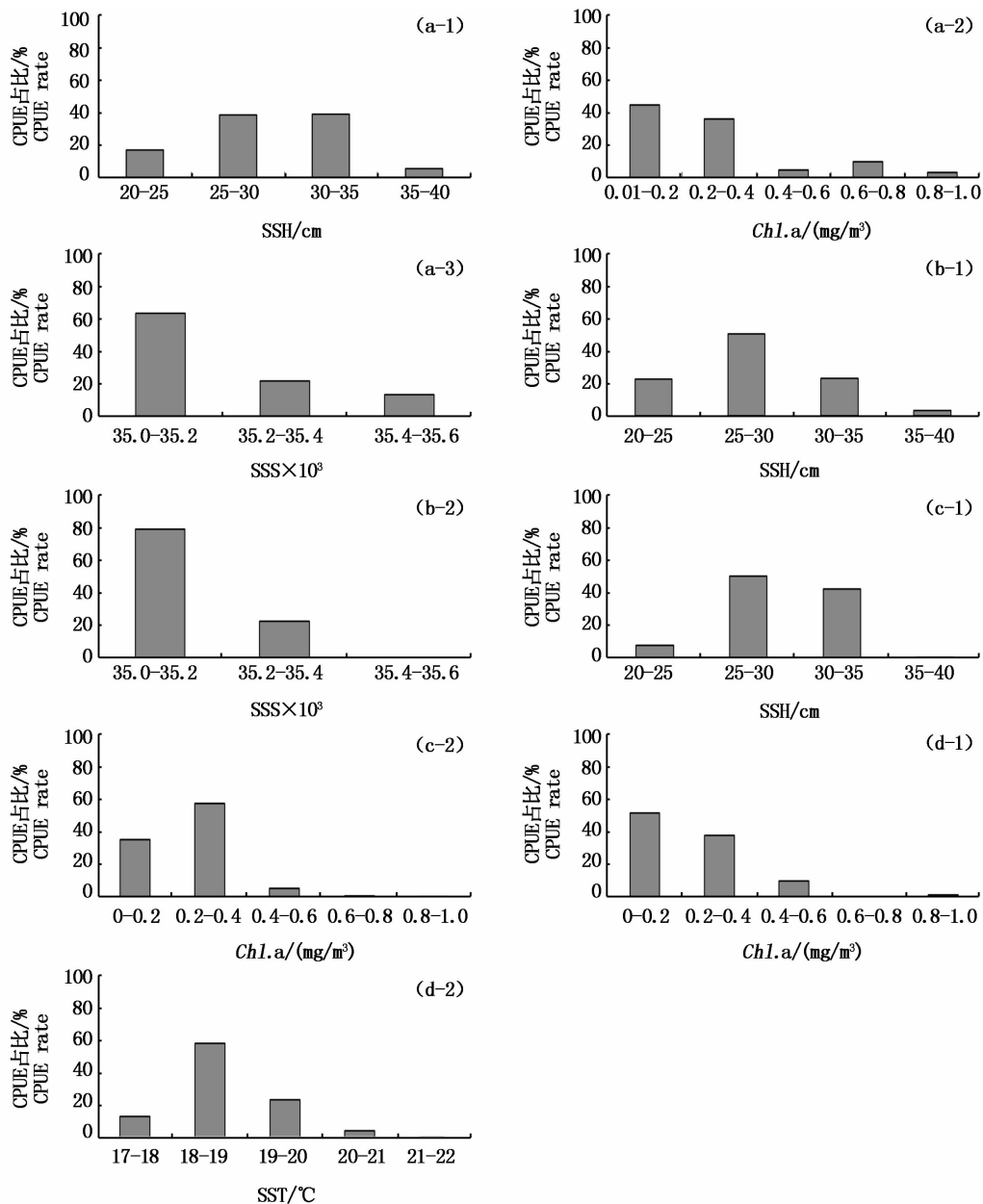


图3 6-9月份相关环境因子下CPUE分布图

Fig.3 CPUE histogram based on related environmental factors from June to September

(a-1) - (a-3)是6月份的CPUE分布;(b-1) - (b-2)是7月份的CPUE分布;

(c-1) - (c-2)是8月份的CPUE分布;(d-1) - (d-2)是9月份的CPUE分布

(a-1) - (a-3) are in June; (b-1) - (b-2) are in July; (c-1) - (c-2) are in August; (d-1) - (d-2) are in September

均匀性,因此即使6°S-8°S无插值对研究区域的结果影响不大。

具备高度洄游特性的茎柔鱼,在南半球主要分布区域为秘鲁至智利沿岸,位于秘鲁寒流流经区域。根据相关研究^[30]可知,秘鲁外海的茎柔鱼有两个大小群体,小型群体分布于秘鲁北部,大型群体分布于秘鲁南部,并且全年产卵,其中

7-8月是其产卵高峰期之一^[13]。TAIPE等^[13]认为,从6月开始茎柔鱼向秘鲁近岸进行洄游,本研究的时间范围恰为6-9月,茎柔鱼进入产卵场进行产卵,呈现一定的聚集分布。茎柔鱼的全局自相关较弱,但在局部范围内自相关性较强,这表明产卵期茎柔鱼分布受局部周围环境的影响较大,呈现出斑块状分布状态,表现出明显的

异质特性。由高 CPUE 值聚集的热点区域主要位于 8°S - 15°S 近岸区域,低 CPUE 值聚集的冷点主要分布在南部,这可能与大小群体的分布有关。6 - 9 月,茎柔鱼局部聚集性由强变弱,热点数量和面积由多变少,其分布与时空变化有着显著的内在联系,从侧面揭示了 6 - 9 月茎柔鱼分布规律:6 月聚集向岸洄游,7、8 月达到产卵高峰期,聚集性较强,范围较大,9 月的聚集面积最小,分布最为零散。

在半变异函数模型类型中,球状模型表示聚集性分布较强,指数和高斯模型表示中等程度聚集^[28]。6、8 月份属于高斯模型,7 月份属于球状模型,9 月份属于指数模型,这说明 7 月份茎柔鱼分布聚集性最强,这与局部空间自相关分析结果相一致。块金系数的计算结果表明,茎柔鱼资源分布具有中等程度的空间变异,由随机性因素引起的变异所占比重中等。块金值的存在,主要是由于各船捕捞作业方式、集鱼灯光照强度等因素的不同引起。

3.2 茎柔鱼资源分布与环境的关系

空间异质性反映了自然界各物体分布的不均匀性现象,通常以斑块状的形式存在,其主要是由生物和非生物变量之间的相互作用引起的。进行空间自相关研究,对认识变量的空间异质性具有内在的支撑意义。不同的环境因子对茎柔鱼空间变异影响各不相同。*Chl. a* 作为初级生产力的代表,主要影响茎柔鱼的摄食状况,ROBINSON 等^[14]认为,茎柔鱼喜欢生长在高叶绿素区域;SST 和 SSS 是水中生物生存的基础条件,分别影响其新陈代谢和渗透压的调节^[31]。SSH 可用以表征中尺度涡旋特征^[32],冷涡旋内营养盐含量、浮游植物和动物的生物量较周围海域明显高,温度则低,海面上升;暖涡旋则具有相反特征^[33],冷暖涡旋的存在对幼鱼的生长及存活率产生一定影响。

作为短生命周期的茎柔鱼,在其生活史的不同阶段,对海域环境条件的需求有所不同^[34],环境条件的空间异质性导致茎柔鱼聚集性分布的差异。6 月份可能是秘鲁茎柔鱼产卵前期,存在一定的摄食行为,其分布在一定程度上受 *Chl. a* 的影响,在 *Chl. a* 高值区有一定比例的茎柔鱼分布;7、8 月份可能进入产卵高峰期,影响较大的主要是 SSH;9 月份热点零散,区域较小,产卵过后

成体死亡^[3],群体分布不集中。6 - 8 月茎柔鱼资源分布均呈现出高值聚集区,并且与 SSH 相关性显著,但 9 月份没有明显高值聚集区的,其 CPUE 与 SSH 的相关性不显著,因此研究认为产卵期茎柔鱼资源聚集性分布特点主要由 SSH 决定,主要集中在 SSH 为 25 ~ 35 cm 的海域。但 SSH 对该时期的茎柔鱼资源分布影响机制如何?为何在产卵阶段秘鲁茎柔鱼倾向于生活在 25 ~ 35 cm 的海域?这需要今后仍从茎柔鱼的生物生理及行为学上深入探讨。

参考文献:

- [1] 陈新军,刘必林,王尧耕. 世界头足类[M]. 北京:海洋出版社,2009.
CHEN X J, LIU B L, WANG Y G. The World Cephalopods [M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.
- [2] 胡振明,陈新军,周应祺. 东南太平洋茎柔鱼渔业生物学研究进展[J]. 广东海洋大学学报,2009,29(3):98-102.
HU Z M, CHEN X J, ZHOU Y Q. The research progress of *Dosidicus gigas* in the southeast Pacific [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2009, 29(3): 98-102.
- [3] NIGMATULLIN C M, NESIS K N, ARKHIPKIN A I. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) [J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 9-19.
- [4] ARGÜELLES J, RODHOUSE P G, VILLEGAS P, et al. Age, growth and population structure of the jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in Peruvian waters [J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 51-61.
- [5] 刘连为,许强华,陈新军,等. 基于线粒体 DNA 分子标记的东太平洋茎柔鱼群体遗传多样性比较分析[J]. 水产学报,2013,37(11):1618-1625.
LIU L W, XU Q H, CHEN X J, et al. Comparative analysis of genetic diversity of *Dosidicus gigas* from eastern Pacific Ocean based on molecular markers of mitochondrial DNA [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(11): 1618-1625.
- [6] 徐冰,陈新军,田思泉,等. 厄尔尼诺和拉尼娜事件对秘鲁外海茎柔鱼渔场分布的影响[J]. 水产学报,2012,36(5):696-707.
XU B, CHEN X J, TIAN S Q, et al. Effects of El Niño/La Niña on distribution of fishing ground of *Dosidicus gigas* off Peru waters [J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(5): 696-707.
- [7] 苏奋振,周成虎,仇天宇,等. 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.
SU F Z, ZHOU C H, ZHANG T Y, et al. Spatial

- heterogeneity of pelagic fishery resources in the East China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1971-1975.
- [8] 杨晓明,戴小杰,田思泉,等. 中西太平洋鲑鱼围网渔业资源的热点分析和空间异质性[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3771-3778.
- YANG X M, DAI X J, TIAN S Q, et al. Hot spot analysis and spatial heterogeneity of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) purse seine resources in the western and central Pacific Ocean[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3771-3778.
- [9] CONAN G. Assessment of shellfish stocks by geostatistical techniques[R]. International Council for the Exploration of the Sea, CM, 1985: 30.
- [10] 苏奋振,周成虎,史文中,等. 东海区底层及近底层鱼类资源的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 683-686.
- SU F Z, ZHOU C H, SHI W Z, et al. Spatial heterogeneity of demersal fish in East China Sea[J], Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 683-686.
- [11] 张新军,杨军勇,连大军. 秘鲁外海茎柔鱼资源及渔业开发[J]. 齐鲁渔业, 2005, 22(3): 44-45.
- ZHANG X J, YANG J Y, LIAN D J. *Dosidicus gigas* off Peruvian high sea and its resources exploration[J]. Shandong Fisheries, 2005, 22(3): 44-45.
- [12] TIAN S Q, CHEN X J, CHEN Y, et al. Evaluating habitat suitability indices derived from CPUE and fishing effort data for *Ommastrephes bartramii* in the northwestern Pacific Ocean[J]. Fisheries Research, 2009, 95(2/3): 181-188.
- [13] TAIPE A, YAMASHIRO C, MARIATEGUI L, et al. Distribution and concentrations of jumbo flying squid (*Dosidicus gigas*) off the Peruvian coast between 1991 and 1999[J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 21-32.
- [14] ROBINSON C J, GOMEZ-GUTIERREZ J, DE LE-G D A S. Jumbo squid (*Dosidicus gigas*) landings in the Gulf of California related to remotely sensed SST and concentrations of chlorophyll a (1998-2012)[J]. Fisheries Research, 2013, 137: 97-103.
- [15] 胡振明,陈新军,周应祺,等. 利用栖息地适宜指数分析秘鲁外海茎柔鱼渔场分布[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 67-75.
- HU Z M, CHEN X J, ZHOU Y Q, et al. Forecasting fishing ground of *Dosidicus gigas* based on habitat suitability index off Peru[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(5): 67-75.
- [16] 汪金涛,陈新军,高峰,等. 基于环境因子的东南太平洋茎柔鱼资源补充量预报模型研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(6): 1185-1191.
- WANG J T, CHEN X J, GAO F, et al. Fish recruitment forecasting for *Dosidicus gigas* based on multi-environmental factors in the Southeastern Pacific[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(6): 1185-1191.
- [17] 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.
- [18] 杨剑锋,刘玉敏,贺金凤. 基于 Box-Cox 幂转换模型的非正态过程能力分析[J]. 系统工程, 2006, 24(8): 102-106.
- YANG J F, LIU Y M, HE J F. Process capability analysis in non-normality based on box-cox power transformation [J]. Systems Engineering, 2006, 24(8): 102-106.
- [19] 高义民,同延安,常庆瑞. 陕西关中葡萄酒土壤有效钾空间格局研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 95-99.
- GAO Y M, TONG Y A, CHANG Q R. Study on the spatial pattern of available K in grapey in Shaanxi Guanzhong[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2009, 37(9): 95-99.
- [20] 刘爱利,王培法,丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- LIU A L, WANG P F, DING Y Y. The Introduction to Geostatistics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [21] 常变蓉,李仁东,徐兴建,等. 基于 GIS 空间自相关的江汉平原钉螺分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 972-978.
- CHANG B R, LI R D, XU X J, et al. Analysis of oncomelania Hupensis's distribution characteristics in Jiangnan plain based on GIS spatial autocorrelation[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(7): 972-978.
- [22] 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[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1841-1850.
- 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 northwestern Pacific Ocean [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1841-1850.
- [23] 冯永玖,杨铭霞,陈新军. 基于 Voronoi 图与空间自相关的西北太平洋柔鱼资源空间聚集特征分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(12): 74-84.
- FENG Y J, YANG M X, CHEN X J. Analyzing spatial aggregation of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific Ocean based on Voronoi diagram and spatial autocorrelation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(12): 74-84.
- [24] MITCHELL A. The ESRI guide to GIS analysis, Vol. 2: Spatial measurements and statistics[M]. ESRI Press, 2005.
- [25] 张松林,张昆. 全局空间自相关 Moran 指数和 G 系数对比研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(4): 93-97.

- ZHANG S L, ZHANG K. Comparison between general moran \hat{s} index and getis-ord general g of spatial autocorrelation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(4): 93-97.
- [26] ZULU L C, KALIPENI E, JOHANNES E. Analyzing spatial clustering and the spatiotemporal nature and trends of HIV/AIDS prevalence using GIS: the case of Malawi, 1994 - 2010[J]. BMC Infectious Diseases, 2014, 14: 285.
- [27] GETIS A, ORD J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [28] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 514-520.
- ZHAO B, CAI Q H. An application of Geostatistical analysis in freshwater ecosystem [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, 24(5): 514-520.
- [29] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究 - - 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557-563.
- GUO X D, FU B J, MA K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557-563.
- [30] TAFUR R, VILLEGAS P, RABI M, et al. Dynamics of maturation, seasonality of reproduction and spawning grounds of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) in Peruvian waters [J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 33-50.
- [31] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 等. 基础生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 15-42.
- SUN R Y, LI Q F, NIU C J, et al. Basic Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 15-42.
- [32] PASCUAL E M A, MCWILLIAMS J C. A new sea surface height - based code for oceanic mesoscale eddy tracking[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(5): 1181-1188.
- [33] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 76-85.
- CHEN C S. Marine Ecosystem Dynamics and Modeling[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 76-85.
- [34] ARKHIPKIN A, ARGUELLES J, SHCHERBICH Z, et al. Ambient temperature influences adult size and life span in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 72(3): 400-409.

Spatial heterogeneity of *Dosidicus gigas* in the high sea off Peru from June to September

FANG Xueyan¹, FENG Yongjiu^{1,2,3,4}, CHEN Xinjun^{1,2,3,4}, MA Di¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. The 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: Based on commercial fishing data (Catch per unit effort, CPUE) from June to September selected from 2003 to 2012 (without the data of 2005), this study aims to explore the spatial structure of *D. gigas* resources and reveal the correlated environmental factors. To reach the research goals, the methods of geo-statistics were used, including global and local spatial auto-correlation, and semi-variogram. Classical statistics and global spatial autocorrelation showed that there was medium degree of aggregation over the study area. Relatively strong aggregated distributions were observed for *Dosidicus gigas* in the high sea off Peru in June. Additionally, trend analysis demonstrated that there were more squids distributed in the northern areas than those in the southern. However, there are more squids in the middle than those at the both ends in longitude direction. According to determination coefficient (R^2) and residual sum of squares (RSS), Gaussian models were fitted in June and August, spherical model fitted in July, and exponential model was fitted in September. Moreover, nugget coefficients were 41.33%, 24.66%, 25.89% and 35.42% from June to September, respectively, and whose implications of aggregation for distribution were consistent with global auto-correlation. Finally, the correlation analysis between CPUE and environmental factors revealed the reason of spatial heterogeneity of *D. gigas* in the high sea off Peru from June to September. The environmental factors included sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), sea surface height (SSH) and chlorophyll-a (*Chl. a*). And this study suggested SSH was the most influential among those four factors. However, the mechanism of how SSH affects the distribution of *D. gigas* was not investigated in this study. All in all, it is important for habitat distribution and ecological study to analyze this species distribution and its spatial heterogeneity.

Key words: *Dosidicus gigas*; spatial autocorrelation; spatial heterogeneity; the high sea off Peru