

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16184

海州湾及邻近海域日本枪乌贼时空分布的异质性

都煜, 徐宾铎, 薛莹, 任一平, 张崇良

中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003

摘要: 根据海州湾及邻近海域 2011、2013、2014 和 2015 年春、秋两季渔业资源底拖网调查的资料, 运用重心分布和空间变异函数等方法研究了日本枪乌贼(*Loligo japonica*)资源密度重心和个体大小分布的变化趋势及其时空分布的异质性。结果表明, 日本枪乌贼在不同年份春季的平均胴长均比秋季大, 且春季日本枪乌贼胴长的年间差异不显著($P>0.05$), 而秋季除 2011 与 2013 年、2013 与 2015 年胴长的年间差异不显著($P>0.05$)外, 其他年间胴长存在显著性差异($P<0.05$); 大、小个体日本枪乌贼空间分布的区域化差异不明显, 春、秋季日本枪乌贼的优势胴长组均为 20~50 mm; 春、秋季日本枪乌贼的资源分布重心移动轨迹相反, 在年际、季节间重心分布的差异不显著($P>0.05$); 日本枪乌贼的资源密度在 20~30 km 的尺度范围内空间异质比小于 75%, 呈现中等或强烈的空间自相关, 具有良好的空间结构性。对日本枪乌贼个体规格与资源密度时空异质性的研究, 可为其渔业合理的开发管理提供科学依据。

关键词: 日本枪乌贼; 海州湾; 空间自相关; 时空分布; 异质性

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)03-0558-08

由于过度捕捞、气候变化以及环境污染等多重因素的影响, 世界范围内许多重要经济鱼类资源处于衰退的状态, 而头足类资源开发程度相对较小, 具有很大的发展潜力, 因此近年来头足类渔业发展较快^[1-3]。严隽箕^[4]的研究表明, 黄海渔场中渔获量显著增加的种类为日本枪乌贼(*Loligo japonica*)。日本枪乌贼又名笔管、乌蛸等^[5], 属于 1 年生、浅海洄游性小型头足类^[6]。在我国, 仅分布于黄、渤海近海^[4]。日本枪乌贼在食物链中占据重要地位, 是底拖网渔业及某些定置网渔业的主要捕捞对象之一, 资源比较丰富, 是营养价值较高的一种海产品^[7]。日本枪乌贼在每年 3 月中、下旬开始进行生殖洄游, 一部分于 5 月上旬到达海州湾产卵, 亲体产完卵后死亡, 幼体在海州湾内生长发育, 9 月以后随着水温的下降, 群体向深水移动, 12 月进入黄海中部 34°~37°N、122°~124°E 的深水海域进行越冬^[5]。

由于日本枪乌贼具有重要的生态学和经济价

值, 众多学者着重研究了日本枪乌贼的生物学特性、生活习性及其在海州湾的怀卵量和生殖力, 也对其在黄渤海的空间分布和资源量有一定的研究, 并探索通过渔获量预报资源量的方法^[4-6, 8]。但由于相关研究中调查采样时间和空间的限制, 许多研究往往假设空间同质性而忽略了其分布的时空变异特征。同时由于经典统计学中常常假设空间数据相互独立, 忽略了空间数据存在一定程度的空间自相关, 从而导致结果产生偏差^[9]。因此, 本研究以海州湾及邻近海域为例, 根据底拖网调查的数据, 分析了日本枪乌贼资源分布重心的年际和季节变化, 用变异函数方法量化了日本枪乌贼分布的空间自相关程度, 以探讨日本枪乌贼资源在海州湾及邻近海域时空分布的异质性。此外, 考虑到个体大小在渔业中的意义, 进一步分析了日本枪乌贼个体大小的时空分布特征。研究日本枪乌贼分布的时空异质性, 对于从生态学意义上深入了解枪乌贼资源的时空分布格局以及指导相

收稿日期: 2016-06-15; 修订日期: 2016-08-29.

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305030); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ02-05).

作者简介: 都煜(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事渔业资源的研究. E-mail: m17864272507@163.com

通信作者: 张崇良. E-mail: Chongliang_zhang@126.com

应的渔业开发管理具有重要意义^[10]。

1 材料与方法

1.1 数据来源和处理

本文数据来自 2011、2013、2014、2015 年春(5月)、秋(10月)两季的海州湾及邻近海域渔业资源底拖网调查。调查的海域范围为 34°20′~35°40′N、119°20′~121°10′E。采用分层随机取样^[11]的方法来设计调查站位: 首先按经纬度设置均匀分布的网格状采样小区, 以每经度 10′、纬度 10′为 1 个采样小区, 全海域共设置 76 个小区; 其次根据水深、纬度方向、海流等因素的差异, 将调查海域分为 A、B、C、D、E 五个区域(图 1), 每个航次在各个区域内均随机选取一定数量的站位进行调查。2011 年每个调查航次选取 24 个站位, 2013 年之后进行了取样调查站位优化, 将站位数由 24 个减少到 18 个^[12]。

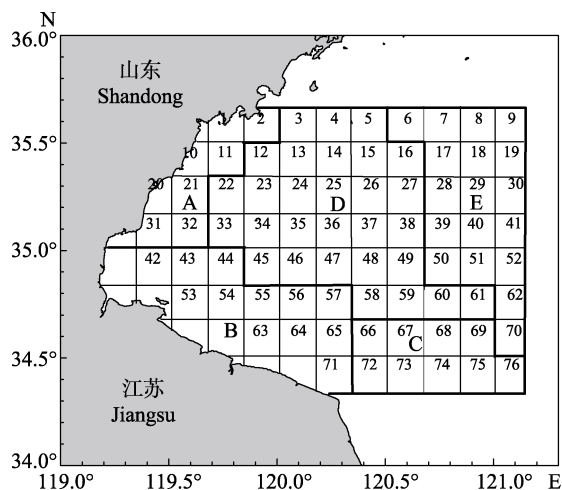


图 1 海州湾及邻近海域分层随机采样底拖网调查站位图
Fig. 1 Stratified random sampling stations of the bottom trawl survey in Haizhou Bay and adjacent waters

生物资源调查采用单拖渔船逐站底拖网的方法进行。采样设备为底层拖网, 网具网口宽度 12 m, 囊网网目 8 mm。拖速 2~3 kn, 平均每站位拖网 60 min。渔获物中的日本枪乌贼在带回实验室后按照《海洋调查规范》进行生物学测定^[13], 记录日本枪乌贼的数量, 体重, 胴长等数据。数据分析前, 为了便于不同年月的比较, 将网获质量进行了拖网时间(1 h)及拖速(2 kn)单位网次渔获量的换算, 将其作为日本枪乌贼资源密度的指标。

1.2 分析方法

以平均胴长作为衡量日本枪乌贼个体大小的指标, 采用方差分析研究不同年份春、秋季的日本枪乌贼个体大小的差异, 并比较不同个体大小的日本枪乌贼在海州湾及邻近海域空间分布的季节变化。

用 Garrison 的分布重心法^[14]分析日本枪乌贼空间分布的重心经纬度, 公式为:

$$\overline{\text{lon}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{lon}_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad \overline{\text{lat}} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{lat}_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

式中, $\overline{\text{lon}}$, $\overline{\text{lat}}$ 分别为重心分布的平均经度和纬度; lon_i , lat_i 分别为 i 站位的经度和纬度; D_i 为日本枪乌贼在 i 站位的资源密度; n 为站位数。

考虑到每个航次随机采样站位位置可能会使样品中日本枪乌贼的分布重心发生偏离, 以采样站位的平均经纬度检验随机设置采样站位是否会影响日本枪乌贼的分布重心, 初步分析表明随机采样站位的中心年间变化很小, 不影响对日本枪乌贼的分布重心的分析。

由于分布重心的分析结果观测误差的影响, 不同的随机采样调查下结果可能出现偏差。因此采用 Bootstrap 分析了分布重心置信区间。Bootstrap 方法是从样本中重抽样, 一般重复 1000 次以上, 构建某个估计的置信区间, 以此来比较日本枪乌贼在海州湾及邻近海域不同年份、不同季节分布重心变化的显著性。

变异函数是以区域化变量理论为基础来研究自然现象的空间变异和空间相关, 已被证明是一种有效描述空间数据的方法^[15]。日本枪乌贼资源密度的分布在空间上具有一定的随机性和结构性, 属于区域化变量^[16], 对应于站位数据, 将变异函数^[17]定义为:

$$r(h) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [D_{X_i} - D_{(X_i+h)}]^2 / n$$

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数; D_{X_i} 为在位置 X_i 处日本枪乌贼的资源密度; $D_{(X_i+h)}$ 为与 X_i 相距为 h 处的日本枪乌贼的资源密度; h 为站位点对间的距离(也称为滞后距离); n 为所有距离为 h 的点对数。在一定的

距离(变程 a)内,资源密度具有空间自相关特性,反之则不存在空间自相关。变异函数揭示了区域化变量在整个尺度上的空间变异格局, h 的取值范围应大于最邻近的两样点间距离而不超最大采样间隔长度的 $1/3\sim 1/2$ 才有统计学意义^[18-20]。

拟合变异函数的理论模型有球面模型,指数模型,高斯模型和线性模型^[21]等。指数模型和高斯模型不存在截然的变程,在实践中变程一般用 $3a$ 表示^[22]。由于 RSS(残差平方和)的敏感和稳健^[23],因此用其来评价模型拟合程度的优劣,选择拟合最优模型,一般其取值越小模型拟合程度越好。

利用 Surfer 11 软件绘制日本枪乌贼的空间分布图, R-gstat 程序包绘制变异函数图,建立模型, R-stata 程序包进行统计计算。

2 结果与分析

2.1 日本枪乌贼个体大小的时空变化

整个调查期间日本枪乌贼春季的平均胴长为 (45.2 ± 1.9) mm,秋季的平均胴长为 (33.1 ± 4.3) mm,不同年份春季的平均胴长均比秋季大(图 2)。对春

秋两季日本枪乌贼胴长做方差分析得出:春季胴长的年间差异不显著($P>0.05$),而秋季除 2011 与 2013 年、2013 与 2015 年胴长的年间差异不显著($P>0.05$)外,其他年间胴长存在显著性差异($P<0.05$)(表 1)。

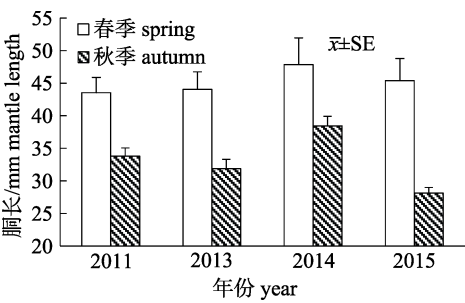


图 2 日本枪乌贼平均胴长的变化
Fig. 2 Variations in the average mantle length of *Loligo japonica*

在整个海州湾及邻近海域内均有日本枪乌贼分布,大、小个体的分布没有明显的区域化。季节间比较结果显示:春季的大个体日本枪乌贼比秋季多,但不论春、秋季胴长在 20~50 mm 的日本枪乌贼居多(图 3)。

表 1 春秋两季日本枪乌贼平均胴长的方差分析
Tab. 1 The analysis of variance in average mantle length of *Loligo japonica* in both spring and autumn

(I)年份 year	(J)年份 year	(I-J) 均值差 mean difference		标准误 standard error		P	
		春季 spring	秋季 autumn	春季 spring	秋季 autumn	春季 spring	秋季 autumn
2011	2013	-0.50	1.93	4.28	1.76	0.908	0.278
	2014	-4.33	-4.65	4.16	1.83	0.302	0.013*
	2015	-1.84	5.67	4.16	1.76	0.659	0.002*
2013	2014	-3.83	-6.58	4.84	1.98	0.431	0.001*
	2015	-1.35	3.74	4.84	1.91	0.782	0.054
2014	2015	-2.49	10.32	4.73	1.98	0.601	0*

注: *表示差异显著($P<0.05$).
Note: * indicates significant difference ($P<0.05$).

2.2 日本枪乌贼资源密度分布重心的时空变化

2011、2013、2014 和 2015 年日本枪乌贼秋季的资源密度均大于春季(图 4),其中,只有 2013 年春秋季间资源密度差异不显著($P>0.05$)。春季,2011 年日本枪乌贼的密度最大,为 (0.92 ± 0.23) kg/h, 2015 年密度最小;而秋季,2014 年的密度最大,为 (4.55 ± 1.30) kg/h, 2012 年密度最小。

为了明确日本枪乌贼分布重心在年际,季节间的变化规律,图 5 显示了日本枪乌贼资源密度重心的移动轨迹。春秋季若均以 2011 年日本枪乌贼资源密度的分布重心为原点,箭头所指的方向代表年份的推移,则春季日本枪乌贼资源密度的重心在经度方向上呈先减小再增大后又减小的变化趋势,在纬度方向上呈先增大再增大后减小的

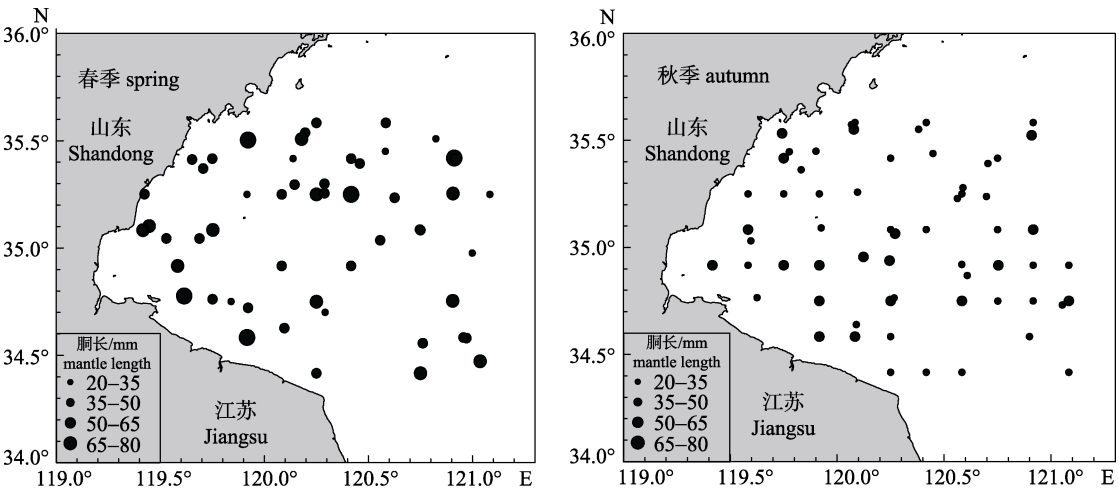


图 3 海州湾及邻近海域日本枪乌贼空间分布的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of spatial distribution in individual sizes of *Loligo japonica* in Haizhou Bay and adjacent waters

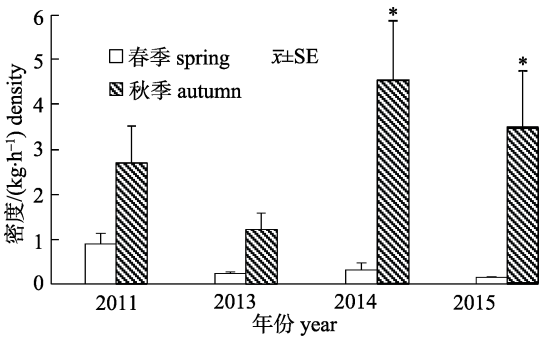


图 4 海州湾及邻近海域日本枪乌贼资源密度的季节变化

*表示季节间差异显著($P<0.05$).

Fig. 4 Seasonal variations of resource density of *Loligo japonica* in Haizhou Bay and adjacent waters

* indicates significant difference between seasons($P<0.05$).

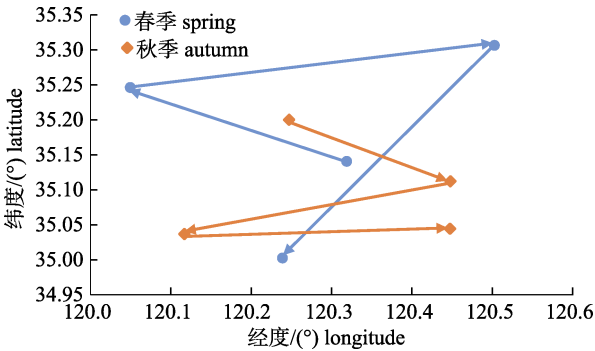


图 5 日本枪乌贼资源密度的分布重心移动轨迹

Fig. 5 Movement trends of the center of gravity in resource density of *Loligo japonica*

趋势;而秋季的重心移动轨迹在经纬度方向上均呈现与春季相反的变化趋势。年间秋季日本枪乌贼资源密度的重心分布比春季集中,2011、2015 年春秋季节的分布重心比 2013、2014 年集中,但 2015 比 2011 年较分散。

通过 Bootstrap 法得出 2011、2013、2014 和 2015 年春秋季节分布重心 95%的置信区间(表 2),结果表明不同年份、季节的经纬度的置信区间都有重叠,因此日本枪乌贼在海州湾年际、季节间的重心分布差异不显著。季节间日本枪乌贼资源密度的分布重心相对集中在海州湾的中部。

表 2 日本枪乌贼在海州湾及邻近海域年际、季节间分布重心的置信区间(95%)

Tab. 2 The interannual and seasonal confidence interval for the center of gravity of *Loligo japonica* in Haizhou Bay and adjacent waters (95%)

年份 year	春季 spring				秋季 autumn			
	经度(°) longitude	置信区间 confidence interval	纬度(°) latitude	置信区间 confidence interval	经度(°) longitude	置信区间 confidence interval	纬度(°) latitude	置信区间 confidence interval
2011	120.32	120.14–120.46	35.14	35.00–35.26	120.25	120.02–120.52	35.20	35.03–35.31
2013	120.05	119.81–120.33	35.25	35.13–35.34	120.45	120.22–120.60	35.11	35.01–35.21
2014	120.50	119.87–120.75	35.31	35.11–35.39	120.12	119.77–120.55	35.03	34.92–35.19
2015	120.24	119.89–120.55	35.00	34.81–35.26	120.45	120.18–120.59	35.04	34.92–35.19

2.3 空间自相关分析

根据变异函数公式绘制日本枪乌贼资源密度的变异函数散点图(图 6), 并用最优模型(图 6 中虚线)拟合变异函数, 通过模型参数(表 3)来定量分析日本枪乌贼资源密度的空间相关性。

块金值(C_0)代表测量误差和小于实际取样尺度(本研究中最小取样尺度为 10 km)引起的变异。年际间春季的块金值均相对较小, 且变化幅度小, 表示由随机因素引起的空间变异较小; 而秋季的块金值则相对较大, 且年际间的差异也较大(表 3, 图 7a), 特别是 2014、2015 年, 有较大的块金值, 表明较小尺度上的空间变异不容忽视。2011、2013 年季节间由随机因素引起的空间变异程度比后两年小, 其中, 2013 年季节间块金值相差最小。

基台值(C_0+C)的年际变化趋势与块金值的基

本一致(图 7b), 其代表系统内的总变异, 包括块金值和空间结构值。结果表明, 年际间日本枪乌贼的资源密度由随机因素引起的空间变异均小于结构性变异, 即日本枪乌贼在研究尺度上具有较强的空间自相关格局。空间异质比 $[C_0/(C_0+C)]$ 若小于 25%, 则说明存在较强的空间自相关, 在 25%~75%之间, 存在中等的空间自相关, 若大于 75%, 则空间自相关很弱。从表 3 中空间异质比可以得出除了 2015 年春季, 2011、2013 年秋季日本枪乌贼的资源密度表现为中等的空间自相关, 其他则具有强烈的空间自相关, 即日本枪乌贼的资源密度有良好的空间结构性。

2011、2013 年季节间变程有较大的差异, 而 2014、2015 年春秋季节的变程则基本相同(图 7c)。除 2011 年外, 其他 3 年春季的变程基本不变, 而

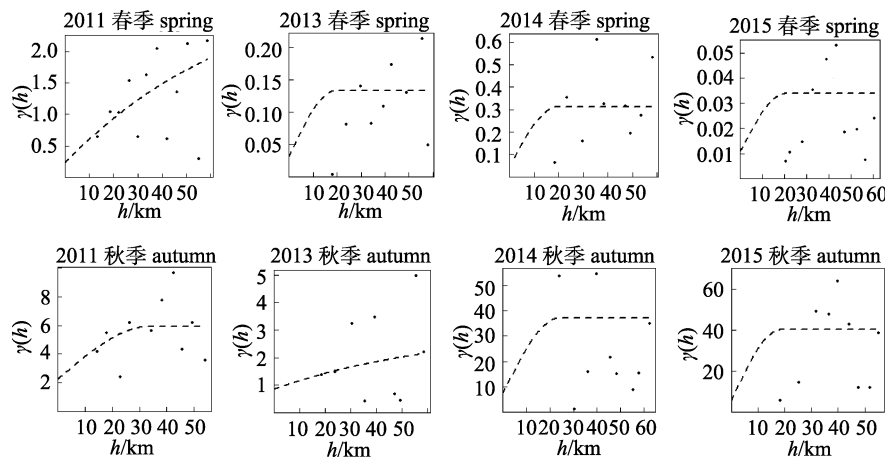


图 6 年际、季节间日本枪乌贼资源密度变异函数散点图及拟合模型
 $\gamma(h)$ 为变异函数, h 为滞后距离。

Fig. 6 The interannual and seasonal semivariogram plots for resource density of *Loligo japonica* and fitted model
 $\gamma(h)$ indicates semivariogram, h indicates lag distance.

表 3 日本枪乌贼资源密度变异函数理论模型的有关参数
Tab. 3 Parameters of semivariogram theoretical model for resources density of *Loligo japonica*

时间 time	理论模型 theoretical model	块金值 nugget	基台值 sill	空间异质比 nugget/sill	变程/km range	残差平方和 RSS
2011 春 spring 2011	指数模型 exponential model	0.230245	3.253406	0.070770	74.71	0.015
2013 春 spring 2013	球面模型 spherical model	0.030789	0.132933	0.231613	19.32	0.032
2014 春 spring 2014	球面模型 spherical model	0.039720	0.312109	0.127263	19.36	0.023
2015 春 spring 2015	球面模型 spherical model	0.008552	0.028687	0.298114	19.06	0.518
2011 秋 autumn 2011	球面模型 spherical model	2.259255	5.936299	0.380583	34.10	0.019
2013 秋 autumn 2013	指数模型 exponential model	0.842457	2.998233	0.280984	63.58	0.127
2014 秋 autumn 2014	球面模型 spherical model	7.304763	37.191233	0.196411	23.99	5.422
2015 秋 autumn 2015	球面模型 spherical model	5.741651	40.256071	0.142628	18.38	9.527

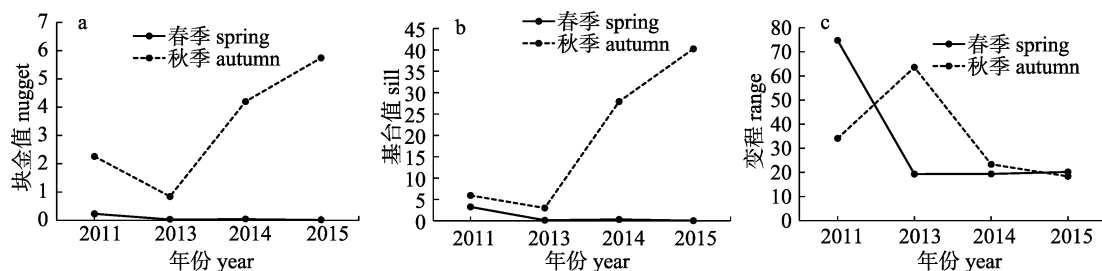


图7 变异函数参数的年际和季节变化

Fig.7 The interannual and seasonal variability of semivariogram parameters

秋季的变程在减小。变程反映了空间自相关的范围, 结果表明 4 年春、秋季的变程主要在 20~30 km, 即在此研究尺度范围内日本枪乌贼的资源密度存在中等或强烈的空间自相关, 有良好的空间自相关格局。

3 讨论

3.1 个体大小的变化

日本枪乌贼在春季的平均胴长均大于秋季, 且差异明显。这是因为日本枪乌贼在春季产卵, 春季捕获的日本枪乌贼由幼体和成体组成, 因此使春季日本枪乌贼的平均胴长增大。此外, 春、秋季海州湾及邻近海域内日本枪乌贼的优势胴长组均为 20~50 mm, 属于幼体期^[24]。邱显寅^[8]的研究结果表明, 海州湾日本枪乌贼产卵亲体的胴长范围为 90~125 mm, 通过胴长比较可知本研究中只捕获了少量的产卵亲体。幼体占日本枪乌贼渔获的主要组分, 这可能由以下原因造成: 首先, 大个体的产卵亲体多聚集在海州湾沿岸进行繁殖行为^[6], 而本研究中近岸的调查站位较少; 其次, 由于幼体的游泳能力比成体弱, 所以在拖网作业中更易捕获。拖网渔获中大量出现的枪乌贼幼体可能对渔业生产和管理有着重要的影响, 建议在今后的渔业管理中设置特定的捕捞季节和作业海区以维护资源补充量。

3.2 资源密度分布重心的变化

不同年份日本枪乌贼的资源密度分布重心虽在经纬度方向上呈现一定的变化趋势, 但在整体上并不存在向某一方向移动的规律, 这与严利平等^[25]研究的东海区经济乌贼类密集分布区域由近岸水域向外海移动的结论不一致。造成这种差

异的原因可能有: 第一, 时间尺度的差异, 从 20 世纪 80 年代到现在才形成东海区经济乌贼类密集分布区域的移动趋势, 本研究的时间间隔较短, 可能不足以体现整个移动趋势; 第二, 空间尺度的差异, 东海区调查的海域范围大, 而海州湾及邻近海域的空间范围较小, 可能只是反映了大尺度下的一个小范围的波动。上述结果同时也说明了小尺度时空变异性对于资源开发利用的重要影响。

日本枪乌贼作为海州湾及邻近海域底拖网调查的兼捕对象, 其捕捞量不能代表其在海州湾及邻近海域的渔获量(渔获量主要在石岛渔场, 海州湾的渔获量仅占黄渤海区的 6%~9%)^[6], 但是通过其标准化的单位捕捞努力量渔获量(CPUE)确定的重心分布能够反映其渔获量的密集分布区, 因此也能为渔业生产上的捕捞区域提供一定的科学参考。

3.3 空间自相关分析

本研究中用空间异质比作为度量空间自相关程度的指标, 苏奋振等^[17]的研究中也表明用 $C_0/(C_0+C)$ 和 Geary C 来度量空间分布的相关性是一致的。海州湾及邻近海域日本枪乌贼的资源密度呈现中等或强烈的空间自相关, 因此在进一步研究日本枪乌贼资源与环境的关系时, 就要考虑到空间自相关的影响。空间自相关分析在空间统计中占有重要地位, 其结果不仅可以为深入研究提供基础, 甚至可以预测空间格局的未来变化趋势^[26]。

在整个调查期间秋季的变异不容忽视, 除 2011 年外, 后 3 年的块金值逐渐增大, 说明日本枪乌贼的资源密度在小于最小取样尺度下的空间自相关减弱; 变程减小, 即日本枪乌贼的资源密

度空间自相关的范围减小。由此推测可能是由于环境变化,人为扰动等多种原因,破坏了日本枪乌贼原有的空间结构和空间自相关格局,导致其资源密度的不稳定。在变异函数散点图中,当 h 大于变程后,存在一些 $\gamma(h)$ 较小的点,说明在此距离间隔下日本枪乌贼资源密度存在空间自相关。这表明在相较于本调查更大的尺度下,日本枪乌贼的分布可能存在复杂的空间结构,还需要在今后的研究中进一步验证。

数据量丰富是模型拟合真实性的前提,海州湾及邻近海域调查中头足类的数据量相对较少,因此用理论模型拟合会存在一定的限制及误差。本研究中假定变异函数不存在各向异性,而实际上日本枪乌贼的资源密度与生物和非生物因子的空间分布与方向有着密切的关系,因此资源密度在各个方向上也具有一定的差异,在今后的研究中可以尝试应用各向异性(anisotropy)模型^[27]。饵料生物的空间分布特征与气象因子通常是引起日本枪乌贼空间异质性的因素,而它们之间的关系还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Zhou J G, Chen X J, Liu B L. Notes on the present status of exploitation and potential of cephalopod resources on the world[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(3): 268–275. [周金官, 陈新军, 刘必林. 世界头足类资源开发利用现状及其潜力[J]. 海洋渔业, 2008, 30(3): 268–275.]
- [2] Hu M Y, Chen X J. The sustainable development of distant-water squid jigging fisheries in China[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2000, 9(2): 157–162. [胡明育, 陈新军. 中国远洋鱿钓渔业的可持续发展探讨[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9(2): 157–162.]
- [3] Chen X J. The exploitation and resources of cephalopods in the world[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1996, 5(3): 193–201. [陈新军. 世界头足类资源及其开发利用[J]. 上海水产大学学报, 1996, 5(3): 193–201.]
- [4] Yan J J. On the distribution and catches of the neritic squid *Loligo japonica steenstrup* in the northern Yellow Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1981(4): 53–56. [严隽箕. 黄海北部日本枪乌贼的分布和渔获量[J]. 海洋湖沼通报, 1981(4): 53–56.]
- [5] Dong Z Z. On the geographical distribution of the cephalopods in the Chinese waters [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1978, 9(1): 108–117. [董正之. 中国近海头足类的地理分布[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 108–117.]
- [6] Ge Y C, Qiu S Y. On the primary investigation of catch forecasting method of *Loligo japonica steenstrup* in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Marine Fisheries, 1991, 13(2): 56–60. [葛允聪, 邱盛尧. 黄渤海区日本枪乌贼渔获量预报方法初探[J]. 海洋渔业, 1991, 13(2): 56–60.]
- [7] Liu Y F, Mao Y, Wang Y H, et al. Analysis of the nutritional components of *Loligo japonica*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(S1): 108–110. [刘玉峰, 毛阳, 王远红, 等. 日本枪乌贼的营养成分分析[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(S1): 108–110.]
- [8] Qiu X Y. The brood amount and fecundity of *Loligo japonica* in Haizhou Bay[J]. Marine Fisheries Research Series, 1982(28): 41–47. [邱显寅. 海州湾日本枪乌贼的怀卵量及生殖力[J]. 海洋水产研究丛刊, 1982(28): 41–47.]
- [9] Haining R P. Spatial Data Analysis: Theory and Practice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [10] Gu L, Jiang X X, Cheng Z H. The advance on research of spatial heterogeneity[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2005, 31(S1): 11–15. [顾磊, 江晓霞, 陈智华. 生态学空间异质性研究进展[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2005, 31(S1): 11–15.]
- [11] Chen Y, Sherman S, Wilson C, et al. A comparison of two fishery-independent survey programs used to define the population structure of American lobster (*Homarus americanus*) in the Gulf of Maine[J]. Fish Bull, 2006, 104(2): 247–255.
- [12] Xu B D, Zhang C L, Xue Y, et al. Optimization of sampling effort for a fishery-independent survey with multiple goals[J]. Environ Monit Assess, 2015, 187(5): 1–16.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Specifications for Oceanographic Survey-Part 6: Marine Biological Survey (GB/T12763.3-2007)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家质量监督检验检疫总局. 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查(GB/T12763.3-2007)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [14] Garrison L P. Spatial patterns in species composition in the Northeast United States continental shelf fish community during 1966-1999[C]//Spatial processes and management of marine populations. Alaska: University of Alaska Sea Grant, 2001: 513–559.
- [15] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 651–658. [李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651–658.]
- [16] Journel A, Huijbregts C. Mining Geostatistics[M]. London: Academic Press, 1978.
- [17] 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. [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.]
- [18] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[J]. Adv Soil Sci, 1985, 3(1): 1–70.
- [19] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. Ecol Monogr, 1992, 62(2): 277–314.
- [20] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Econ Geol, 1963, 58(8): 1246–1266.
- [21] Ge J P, Guo H Y. Geostatistics in ecology (I)-basic theory and methods[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(2): 88–94. [葛剑平, 郭海燕. 地统计学在生态学中的应用(I): 基本理论和方法[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(2): 88–94.]

- [22] Wang J, Fu B J, Qiu Y, et al. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on loess plateau—semivariograms[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 428–439. [王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 428–439.]
- [23] Tang T, Cai Q H, Pan W B. Application of geostatistics in freshwater ecology[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 280–289. [唐涛, 蔡庆华, 潘文斌. 地统计学在淡水生态学中的应用[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 280–289.]
- [24] Zhong Y D. Study on the resources of squid and fisheries dynamic and prediction in the Japan Sea[J]. *Modern Fisheries Information*, 1991, 6(8): 15–19. [钟亚丁. 日本海枪乌贼资源与近年渔业动态和预测[J]. *现代渔业信息*, 1991, 6(8): 15–19.]
- [25] Yan L P, Li S F, Ling J Z, et al. Study on the resource alteration of commercial cuttlefish in the East China Sea[J]. *Marine Science*, 2007, 31(4): 27–32. [严利平, 李圣法, 凌建忠, 等. 东海区经济乌贼类资源结构和空间分布的分析[J]. *海洋科学*, 2007, 31(4): 27–32.]
- [26] Li X M, Zhou S X, Luo S J, et al. Application of geostatistics in ecology[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(13): 245–247. [李秀梅, 周时学, 罗胜军, 等. 地统计学在生态学中的应用[J]. *现代农业科技*, 2014(13): 245–247.]
- [27] Hao R, Zhang J Q. Adaptive collocation based on anisotropy with application in missing data fitting[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(5): 33–37. [郝蓉, 张菊清. 基于各向异性的自适应拟合推估及其在缺失数据拟合中的应用[J]. *测绘通报*, 2015(5): 33–37.]

Analysis of temporal and spatial heterogeneity of Japanese squid (*Lololus japonica*) in Haizhou Bay and adjacent waters

DU Yu, XU Binduo, XUE Ying, REN Yiping, ZHANG Chongliang

College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: Numerous commercial fish populations have declined in recent years owing to the impacts of overfishing, climate change, environmental pollution, and other factors. However, the cephalopod fishery has continued to develop, including increasing harvests of Japanese squid *Lololus (Nipponololigo) japonica* (Hoyle 1885). *L. japonica* plays an important role in the food web of the Haizhou Bay ecosystem, where it is a primary catch in bottom trawls and some net fishing. The species spawns in the bay and adjacent waters annually in early May, and it uses these waters as a nursery ground. Despite the ecological and economic importance of the species, few studies of its spatio-temporal patterns of distribution are available, and spatial autocorrelation of data is often lacking in the studies. Analysis of temporal and spatial heterogeneity in the distribution of *L. japonica* in Haizhou Bay and adjacent waters has significance for sustainable utilization and scientific management of this fishery. To study this, we used the survey data of bottom trawls in Haizhou Bay and adjacent waters, collected in 2011, 2013, 2014 and 2015, for spatial analysis of center of gravity and semivariogram plots to investigate temporal and spatial distribution of *L. japonica* resource density and average body size. The average mantle length of *L. japonica* was larger in spring than in autumn for each of the four sample years, and the average mantle lengths did not significantly differ ($P>0.05$) for spring, but did significantly differ for autumn, except in 2011 and 2013, 2013 and 2015. The *L. japonica* population was distributed throughout Haizhou Bay and its adjacent waters, and local distribution showed no correlation with size. In both spring and autumn, the dominant size class was 20–50 mm mantle length. The resource density of *L. japonica* differed significantly ($P<0.05$) between spring and autumn, except in 2013, and was greater in autumn than in spring. Center of gravity of the resource density changed in opposite directions between spring and autumn: squid were more concentrated in the autumn than in the spring of each year; yet in both seasons, the resource density was relatively centered in the middle of Haizhou Bay and adjacent waters; differences in center of gravity among the years and seasons were not significant. Spatial heterogeneity in resource density of *L. japonica* appeared to be caused less by randomness than by structural variations. The spatial distribution of *L. japonica* in the study area displayed a well-organized structure, with medium to strong spatial autocorrelation in 20–30 km.

Key words: *Lololus japonica*; Haizhou Bay; spatial autocorrelation; temporal and spatial distribution; heterogeneity

Corresponding author: ZHANG Chongliang. E-mail: Chongliang_zhang@126.com