

DOI: 10.5846/stxb201805151072

王荣夫,刘淑德,任一平,张崇良,徐宾铎,薛莹.海州湾秋季小眼绿鳍鱼摄食习性的空间异质性研究.生态学报,2019,39(17): - .

Wang R F, Liu S D, Ren Y P, Zhang C L, Xu B D, Xue Y. Study on spatial heterogeneity in feeding habits of *Chelidonichthys spinosus* in Haizhou Bay during autumn. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

海州湾秋季小眼绿鳍鱼摄食习性的空间异质性研究

王荣夫¹, 刘淑德³, 任一平^{1,2}, 张崇良¹, 徐宾铎¹, 薛莹^{1,*}

1 中国海洋大学水产学院, 青岛 266003

2 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 青岛 266237

3 山东省水生生物资源养护管理中心, 烟台 264003

摘要: 研究海州湾小眼绿鳍鱼摄食习性的空间异质性, 对于海州湾食物网构建和资源保护具有重要意义。根据 2011 及 2013—2016 年秋季在海州湾海域进行的渔业资源底拖网调查数据, 结合小眼绿鳍鱼 (*Chelidonichthys spinosus*) 的空间分布特征及其胃含物样品的分析结果, 研究了海州湾小眼绿鳍鱼的摄食热点海域及其摄食习性的空间异质性。结果表明, 小眼绿鳍鱼是海州湾秋季底层鱼类群落中的优势鱼种, 且各年均主要分布在海州湾 35°N 附近及以北海域。细螯虾 (*Leptochela gracilis*)、戴氏赤虾 (*Metapenaeopsis dalei*) 和疣背宽额虾 (*Latreutes planirostris*) 是小眼绿鳍鱼最重要的三种饵料生物。研究发现, 海州湾小眼绿鳍鱼的摄食热点海域主要集中在 30 m 等深线附近, 且尚未呈现出明显的年间变化趋势。根据各站位小眼绿鳍鱼食物组成的相似性, 将调查海域划分为两个区域, 即近岸区和远岸区, 近岸区小眼绿鳍鱼的体长和体重均显著小于远岸区 ($P < 0.05$), 小眼绿鳍鱼在近岸区主要摄食细螯虾和疣背宽额虾, 在远岸区则主要摄食戴氏赤虾。近岸区小眼绿鳍鱼的空胃率显著小于远岸区 ($P < 0.05$), 条件指数显著大于远岸区 ($P < 0.05$), 平均胃饱满指数大于远岸区, 但尚未呈现出显著差异 ($P > 0.05$), 表明海州湾秋季小眼绿鳍鱼的摄食习性存在明显的空间异质性。

关键词: 海州湾; 小眼绿鳍鱼; 摄食热点海域; 摄食习性; 空间异质性

Study on spatial heterogeneity in feeding habits of *Chelidonichthys spinosus* in Haizhou Bay during autumn

WANG Rongfu¹, LIU Shude³, REN Yiping^{1,2}, Zhang Chongliang¹, XU Binduo¹, XUE Ying^{1,*}

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

2 Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

3 Shandong Hydrobios Resources Conservation and Management Center, Yantai 264003, China

Abstract: Spatial heterogeneity in fish feeding ecology is the basis for understanding energy flow and material circulation, and for constructing food webs in marine ecosystems. In this study, based on the survey data collected by bottom trawls in Haizhou Bay during the autumn of 2011 and 2013—2016, combined with the spatial distribution pattern and analysis of stomach contents of *Chelidonichthys spinosus*, the feeding hotspots and spatial heterogeneity in feeding habits of *C. spinosus* were studied. The results showed that *C. spinosus* had become one of the dominant fish species in the fish community and mainly distributed in the north of 35°N in Haizhou Bay. *Leptochela gracilis*, *Metapenaeopsis dalei*, and *Latreutes planirostris* were the most important prey species for *C. spinosus*. Feeding hotspot analysis showed that the feeding hotspots of *C. spinosus* were mainly distributed around the 30 m isobath in Haizhou Bay but did not show clear variation between years. According

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFE0104400); 国家自然科学基金项目 (31772852); 中央高校基本科研业务费专项 (201562030, 201612004)

收稿日期: 2018-05-15; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xueying@ouc.edu.cn

to the similarity in the dietary composition of *C. spinosus* at each station, the surveyed area was divided into two areas, i.e., an inshore area and offshore area. The body length and body weight of *C. spinosus* in the inshore area were significantly lower than those in the offshore area ($P < 0.05$). Feeding habit analysis showed that *L. gracilis* and *L. planirostris* were the primary prey species for *C. spinosus* among a total of 56 prey species in the inshore area. In contrast, *C. spinosus* mainly fed on *M. dalei* among 64 species present in the offshore area. The overlap index between the two areas is 0.55, which is not significant. The percentage of empty stomachs of *C. spinosus* in the inshore area was significantly lower than that in the offshore area ($P < 0.05$), and the condition index was significantly higher in the inshore area ($P < 0.05$). The mean stomach fullness index in the inshore area was higher than that in the offshore area, but there was no significant difference ($P > 0.05$). This study showed that there was obvious spatial heterogeneity in the feeding habits of *C. spinosus*. Therefore, we conclude that it is essential to consider spatial heterogeneity when studying the feeding ecology of fish.

Key Words: Haizhou Bay; *Chelidonichthys spinosus*; feeding hotspots; feeding habits; spatial heterogeneity

海州湾位于黄海西南部,属开敞型海湾^[1],地处东亚亚热带-暖温带过渡区^[2],具明显季风气候特点^[3],是小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、银鲳(*Pampus argenteus*)、真鲷(*pagrosomus major*)等多种鱼类的产卵场^[4]。近年来,由于沿岸港口建设及污水排放等问题,海州湾内生态环境遭到破坏,加之渔业捕捞强度的增加,湾内带鱼(*Trichiurus japonicus*)、小黄鱼等多种渔业资源出现严重衰退现象^[5-6]。近年对海州湾渔业资源调查结果认为,小眼绿鳍鱼(*Chelidonichthys spinosus*)已成为海州湾秋季底层鱼类群落中的优势种之一^[7]。

小眼绿鳍鱼,又称棘绿鳍鱼、绿鳍鱼,系鲈形目(Scorpaeniformes),鲂鲷科(Triglidae),绿鳍鱼属(*Chelidonichthys*),属暖温性近海底层鱼类,喜群居,多栖息于沙泥底质海区,广泛分布于我国渤海、黄海、东海、南海以及日本海域、朝鲜半岛海域^[8]。小眼绿鳍鱼是典型的洄游性鱼类,春季部分群体北上生殖洄游,分别游向近岸水域产卵,春末夏初为产卵期^[9],秋季鱼群逐渐南移,返回越冬场越冬。

摄食行为是保证鱼类种群延续的重要活动,深入了解鱼类的摄食习性,是研究海洋生态系统能量流动和物质循环的基础。目前,已有国外学者指出研究鱼类摄食习性的空间异质性有助于了解鱼类在不同环境下的适应能力^[10]和同种鱼类在不同海域间营养级的差异^[11],而国内针对鱼类摄食习性空间异质性的研究较少,亟待开展深入研究。特别是针对小眼绿鳍鱼摄食习性的研究,仅见于李振华^[12-14]对东海中北部小眼绿鳍鱼摄食习性的研究,而对于海州湾海域小眼绿鳍鱼摄食习性空间异质性的研究则未见报道。

本研究基于2011年及2013—2016年秋季(9—10月)在海州湾海域进行的渔业资源底拖网调查数据,结合胃含物分析的结果,初步探索了小眼绿鳍鱼在海州湾海域的空间分布特征、摄食热点海域及其摄食习性的空间差异,旨在全面了解海州湾小眼绿鳍鱼的种群动态和摄食习性,为海州湾小眼绿鳍鱼的资源保护与合理开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究样品取自2011年9月及2013—2016年10月在海州湾海域(119°20'—121°10' E, 34°20'—35°40' N)进行的渔业资源底拖网调查。根据水深等环境条件的差异,将调查海域划分为A、B、C、D、E5个区域(图1)。各航次调查中,均采用分层随机取样方法^[15]在各区域内随机抽取一定数量的站位进行调查,其中2011年共调查24个站位,2013年后,通过站位优化设计,将每个航次调查的站位数量减少至18个,具体调查站位数量还需取决于实际情况。样品的采集与处理均按照《海洋调查规范》^[16]进行。

1.2 样品分析

在实验室内测定小眼绿鳍鱼样品的体长(mm)、体重(g)等生物学数据,取出胃含物样品,目测摄食等级并称重,准确标记每个胃含物样品的采集时间、站位、编号等信息后,冷冻保存。使用体式显微镜进行胃含物

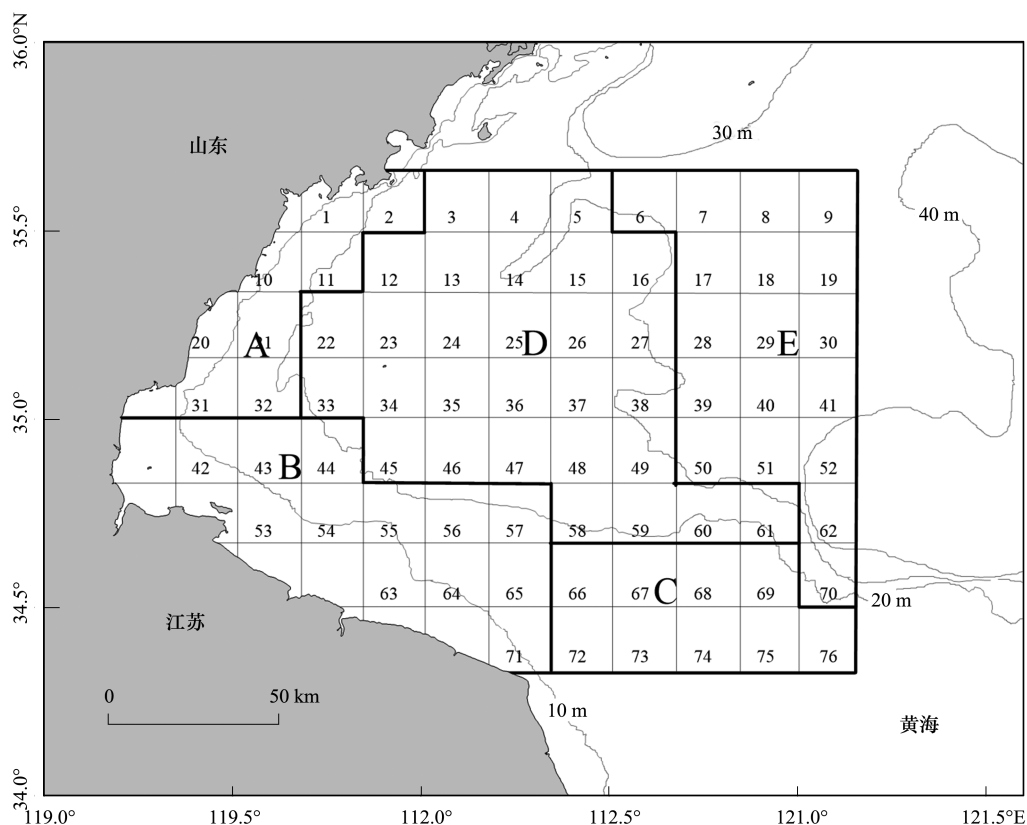


图1 海州湾调查海域

Fig.1 Sampling area in Haizhou Bay

分析,根据食物团的形态特征,以尽可能鉴定到种为原则,对饵料种类进行鉴定与计数,使用精密分析天平(精确到 0.0001 g)测定饵料生物质量,称量前使用吸水纸将饵料生物表面多余水分尽可能吸干。表 1 列出了各年份用于胃含物分析的小眼绿鳍鱼样品数量。

表 1 各年海州湾小眼绿鳍鱼胃含物样品的数量

Table 1 Stomach sample size of *Chelidonichthys spinosus* in Haizhou Bay in different years

年份 Year	样品数量 Sample size	体长范围/mm Range of body length	体重范围/g Range of body weight
2011	255	88—186	12.35—130.40
2013	238	106—210	22.44—166.80
2014	76	113—219	24.21—215.84
2015	164	110—215	23.67—186.27
2016	213	102—201	16.18—137.11

1.3 数据处理

受恶劣天气等实际调查条件的限制,各站位的实际拖网时间和拖网速度存在差异,为降低分析误差,使各站位小眼绿鳍鱼的生物量具有可比性,数据分析前,以拖网时间 1h 和拖速 2 kn 为标准,将小眼绿鳍鱼生物量数据进行标准化处理,以标准化生物量(g/h)表示小眼绿鳍鱼的资源密度。使用 Surfer 11 软件,以小眼绿鳍鱼的资源密度为指标,绘制各调查航次小眼绿鳍鱼的资源空间分布图。采用 Garrison 的分布重心法^[17],计算各调查航次小眼绿鳍鱼资源分布重心的经纬度,以了解小眼绿鳍鱼资源空间分布结构的年间差异,计算公式为:

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

式中, $\overline{\text{lon}}$ 和 $\overline{\text{lat}}$ 分别为资源分布重心的经度和纬度, lon_i , lat_i 分别为 i 站位的经度和纬度, D_i 为小眼绿鳍鱼在 i 站位的标准化生物量, n 为站位数量。

鱼类的摄食热点海域是指鱼类的生物量和摄食强度均相对较高的海域^[18]。本研究中, 将小眼绿鳍鱼标准化生物量与平均胃饱满指数同时占各年采集到小眼绿鳍鱼样品站位数量前 40% 的站位, 定义为小眼绿鳍鱼的摄食热点海域, 并以小眼绿鳍鱼摄食最多的饵料种类定义该摄食热点的属性。

应用 ARCGIS10.0 软件绘制各站位小眼绿鳍鱼食物组成的空间分布图。以各饵料种类的质量百分比为指标, 得到 Bray-Curtis 相似性矩阵, 对不同站位小眼绿鳍鱼的食物组成进行聚类分析, 分析前去除不可辨认的饵料, 此操作在 PRIMER5.2 软件中实现。使用 R 软件分析小眼绿鳍鱼样品的体长、体重组成。通过对经验体长-体重关系式: $W = a \times L^b$ ^[19], 进行对数转化后, 得到 $\ln W = \ln a + b \ln L$, 应用广义线性模型 (generalized linear model, GLM) 拟合小眼绿鳍鱼的体长—体重关系。式中, L 和 W 分别为小眼绿鳍鱼的体长和体重, a 为生长的条件因子, b 为幂指数系数。

本研究采用质量百分比和个数百分比评价各饵料生物的重要性, 采用饱满指数和空胃率^[20-22], 评估小眼绿鳍鱼的摄食强度; 香农-威纳指数^[23] (Shannon-Weiner index, H') 用于描述小眼绿鳍鱼摄食饵料种类的多样性; 采用 Pianka's^[24] 的重叠指数 (Pianka's index, O_{jk}) 比较不同海域小眼绿鳍鱼摄食饵料种类的相似性, 变化范围为 0—1, 其值越大, 表示越相似, 当 $O_{jk} > 0.3$ 时, 表示重叠具有意义, 当 $O_{jk} > 0.6$ 时, 表示显著重叠^[25]; 采用条件指数 K' 描述各小眼绿鳍鱼的肥满度^[26], 各指数计算公式为:

$$\text{质量百分比}(W\%) = \frac{\text{某饵料生物质量}}{\text{饵料生物总质量}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{个数百分比}(N\%) = \frac{\text{某饵料生物个数}}{\text{饵料生物总个数}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{饱满指数}(\%) = \frac{\text{食物团实际质量}}{\text{鱼体纯体质量}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{空胃率}(\%) = \frac{\text{空胃个数}}{\text{胃总个数}} \times 100 \quad (5)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (6)$$

$$O_{jk} = \sum_{i=1}^S P_{ij} P_{ik} / \sqrt{\sum_{i=1}^S (P_{ij})^2 \sum_{i=1}^S (P_{ik})^2} \quad (7)$$

$$K' = (10^5 W) / L^b \quad (8)$$

式中, H' 为物种多样性指数; s 为饵料物种数目; P_i 表示属于种 i 的个体在全部个体中的比例, 本研究中, 采用饵料质量比例。 O_{jk} 为重叠指数, S 为各区域内饵料物种数目; P_{ij} 和 P_{ik} 表示饵料种类 i 分别占 j 和 k 区域饵料生物总质量比例。 K' 为条件指数, L 和 W 分别表示小眼绿鳍鱼样品的体长和体重, b 为小眼绿鳍鱼体长—体重关系中的回归系数。

2 结果

2.1 小眼绿鳍鱼资源分布的时空变化

从图 2 可看出, 小眼绿鳍鱼在海州湾内的空间分布是极不均匀的, 各年主要分布在海州湾 35°N 线附近及以北海域, 各调查航次均有少数站位未采集到小眼绿鳍鱼样品, 且这些站位均分布在海州湾内纬度相对较

低的海区。从资源密度来看,秋季小眼绿鳍鱼的资源密度在 2014 年最低,为 (1615.52 ± 657.35) g/h,2016 年资源密度最高,为 (5013.63 ± 2005.84) g/h。在调查的各年份中,小眼绿鳍鱼的资源密度除 2014 年略低外,其余各年均均为海州湾渔获物中资源密度最高的鱼种。资源分布重心的计算结果显示(图 3),各年小眼绿鳍鱼在海州湾内的资源分布重心变化幅度较小,主要分布在海州湾中部 30 m 等深线附近的海域(35.16° — 35.28° N, 120.35° — 120.45° E)。

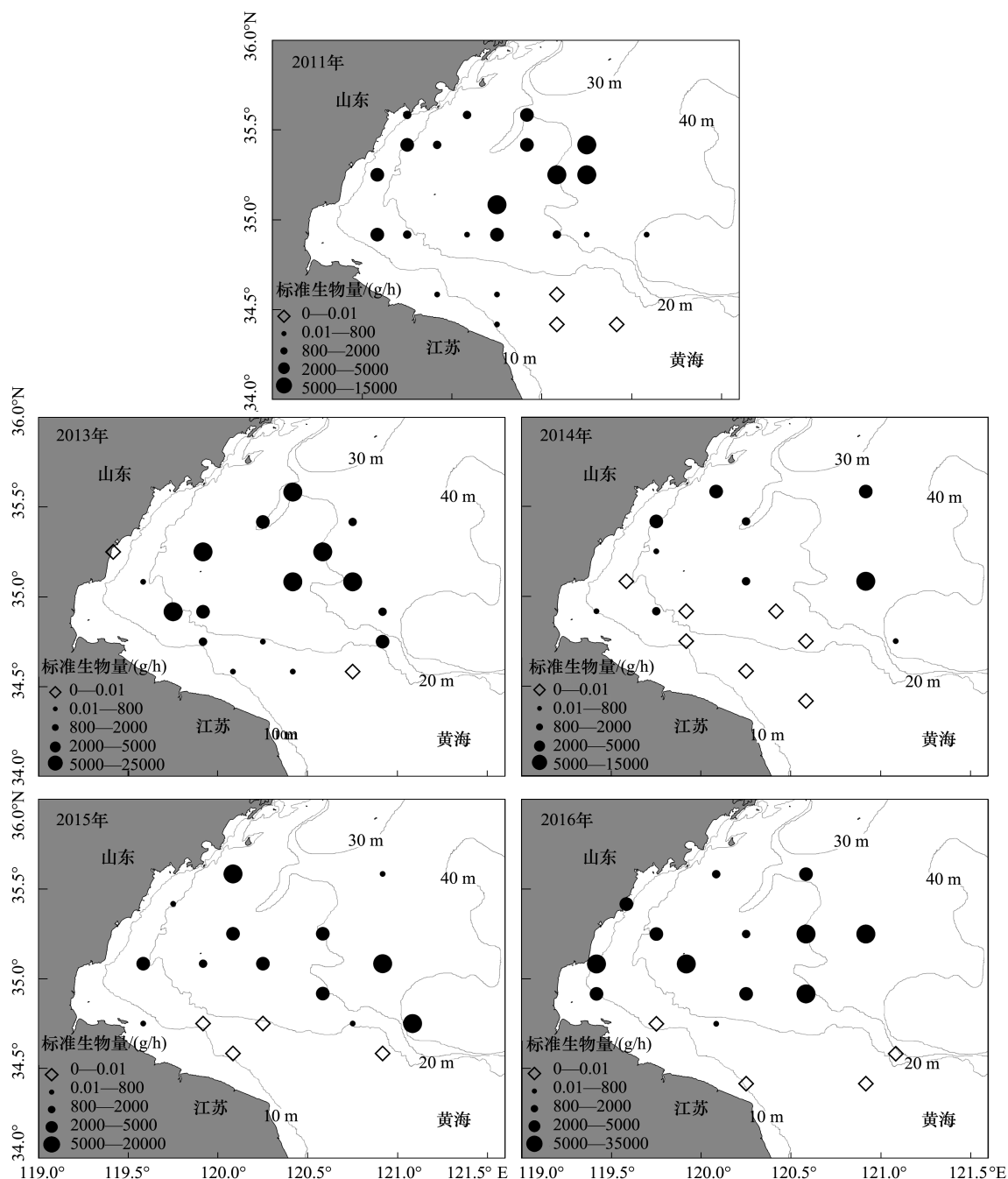


图2 海州湾 2011 及 2013—2016 年秋季小眼绿鳍鱼资源密度(g/h)的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of resources density(g/h) *Cheilodichthys spinosus* in Haizhou Bay during autumn of 2011 and 2013 — 2016

2.2 小眼绿鳍鱼的摄食热点海域

研究表明,不同年份海州湾秋季小眼绿鳍鱼的摄食热点站位除 2015 年和 2016 年有一个站位重合外,其

余各年摄食热点站位均不相同,且空间变化范围较大(34.75 °N—35.42 °N,119.42 °E—120.92 °E),无明显变化趋势,但各年均至少有一个摄食热点站位位于 30 m 等深线附近(图 4)。从摄食热点的属性来看,17、27、49 站主要摄食戴氏赤虾,14、21、31、45 站主要摄食细螯虾,36 站主要摄食疣背宽额虾,而 61 站摄食数量最多的饵料种类为口虾蛄。

根据胃含物分析结果,海州湾秋季小眼绿鳍鱼摄食饵料生物种类达 80 余种,其中细螯虾、戴氏赤虾和疣背宽额虾是最重要的三种饵料生物,三者质量百分比之和达 54.48%,个数百分比之和达 78.67%。比较不同年份摄食热点站位三种主要饵料生物所占比例发现,就质量百分比而言,各年摄食戴氏赤虾的质量百分比波动较大($32.39\pm15.74\%$),而摄食细螯虾($15.66\pm2.83\%$)和疣背宽额虾($4.87\pm4.13\%$)的质量百分比相对稳定,戴氏赤虾的质量百分比除 2015 年略低于细螯虾外,在其余各年份中均为最高,而疣背宽额虾的质量百分比在所有年份中均最低。从个数百分比来看,除 2015 年疣背宽额虾的个数百分比略高于细螯虾外,其余各年份细螯虾的个数百分比均为最高,戴氏赤虾的个数百分比除在 2011 年高于疣背宽额虾外,其余各年份均为最低(表 2)。

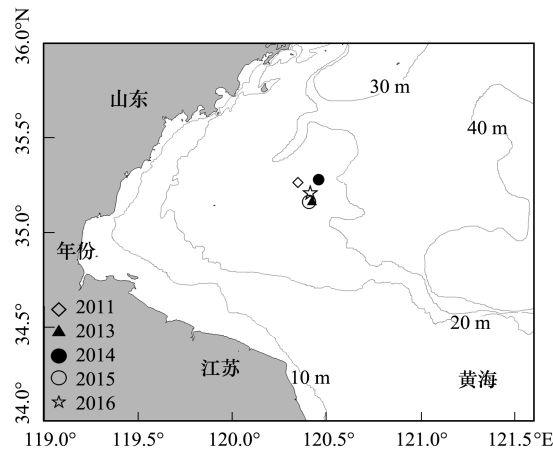


图 3 海州湾 2011 及 2013—2016 年秋季小眼绿鳍鱼资源密度的分布重心
Fig.3 Center of gravity in resources density of *Chelidonichthys spinosus* in Haizhou Bay during autumn of 2011 and 2013 — 2016

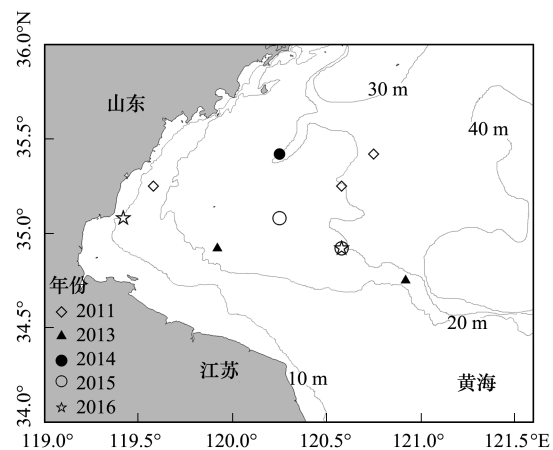


图 4 海州湾 2011 及 2013—2016 年秋季小眼绿鳍鱼摄食热点的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of foraging hotspots of *Chelidonichthys spinosus* in Haizhou Bay during autumn of 2011 and 2013 — 2016

表 2 海州湾小眼绿鳍鱼摄食热点海域的饵料组成

Table 2 Dietary composition of <i>Chelidonichthys spinosus</i> in foraging hotspots in Haizhou Bay								
年份 Year	戴氏赤虾 <i>Metapenaeopsis dalei</i>		细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>		疣背宽额虾 <i>Latreutes planirostris</i>		其他 Others	
	质量百分比 Weight/%	个数百分比 Number/%	质量百分比 Weight/%	个数百分比 Number/%	质量百分比 Weight/%	个数百分比 Number/%	质量百分比 Weight/%	个数百分比 Number/%
2011	47.34	32.94	15.53	43.22	3.27	9.35	33.87	14.49
2013	18.33	1.15	13.52	40.11	5.83	31.29	62.32	27.45
2014	36.06	17.24	12.29	68.96	1.72	11.72	49.95	2.06
2015	13.60	10.84	18.63	37.42	11.64	44.38	56.13	7.36
2016	46.63	12.86	18.35	61.90	1.89	14.13	33.14	11.11

2.3 小眼绿鳍鱼食物组成和摄食强度的空间差异

根据各站位小眼绿鳍鱼食物组成相似性的聚类分析结果,结合站位的空间分布,将调查海域从空间上大致分为两个区域,即近岸区和远岸区(图 5)。近岸区小眼绿鳍鱼样品的体长($P<0.05$)、体重($P<0.05$)均显著小于远岸区(图 6)。

胃含物分析结果显示,近岸区小眼绿鳍鱼共摄食 56 种饵料,远岸区小眼绿鳍鱼共摄食 64 种饵料,其中 40 种饵料生物被两区小眼绿鳍鱼共同摄食,两区饵料重叠指数为 0.55,近岸区和远岸区饵料多样性指数分别为 2.22 和 2.30。从摄食的三种主要饵料生物来看,小眼绿鳍鱼在远岸区摄食戴氏赤虾的比例较高,而在近岸区则主要摄食细螯虾和疣背宽额虾(表 3)。

分析结果表明,近岸区小眼绿鳍鱼的空胃率显著小于远岸区($P<0.05$)。两区小眼绿鳍鱼的平均胃饱满指数差异不显著($P>0.05$)(表 4)。广义线性模型分析结果显示,海州湾秋季小眼绿鳍鱼体长-体重关系中,幂指数系数 b 为 2.95。统计分析结果表明,近岸区小眼绿鳍鱼条件指数显著高于远岸区($P<0.05$)。

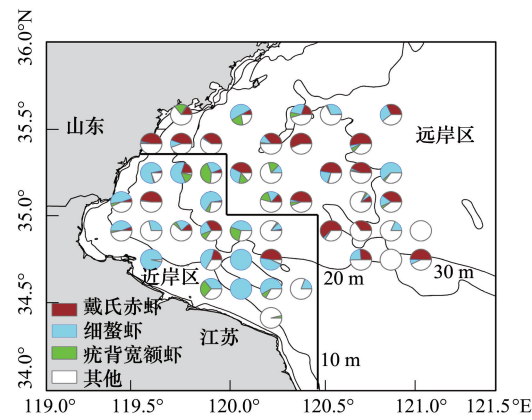


图 5 海州湾各站位小眼绿鳍鱼的食物组成
Fig.5 Dietary composition of *Chelidonichthys spinosus* at each station in Haizhou Bay

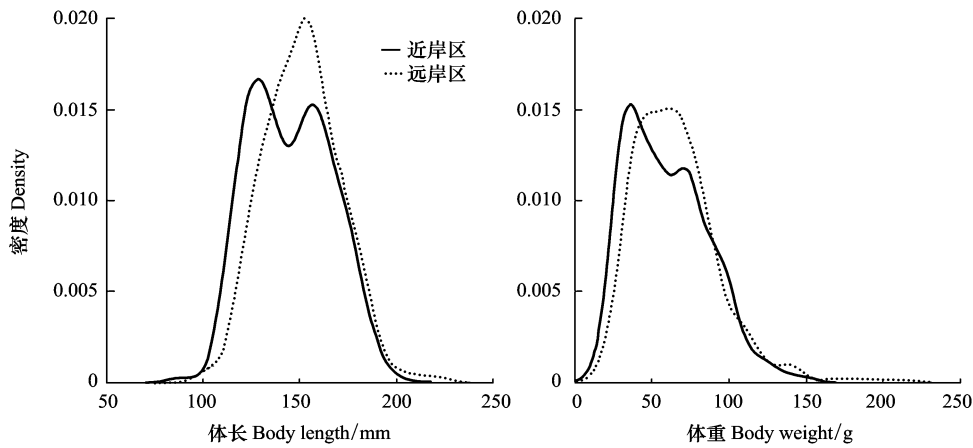


图 6 海州湾不同海域小眼绿鳍鱼的体长和体重分布
Fig.6 Body length and body weight density distribution of *Chelidonichthys spinosus* in different areas in Haizhou Bay

表 3 海州湾不同海域小眼绿鳍鱼的优势饵料组成								
Table 3 Dietary composition of <i>Chelidonichthys spinosus</i> in different areas in Haizhou Bay								
海域 Areas	戴氏赤虾 <i>Metapenaeopsis dalei</i>		细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>		疣背宽额虾 <i>Latreutes planirostris</i>		其他 Others	
	W%	N%	W%	N%	W%	N%	W%	N%
近岸区 Inshore area	9.97	4.33	31.67	53.23	7.46	29.80	50.90	12.65
远岸区 Offshore area	40.52	17.36	13.77	36.30	3.58	18.00	42.13	28.34

表 4 海州湾不同海域小眼绿鳍鱼的摄食强度指数和条件指数			
Table 4 Feeding indices of <i>Chelidonichthys spinosus</i> in different areas in Haizhou Bay			
指标 Indices	海域 Areas		
	近岸区 Inshore area	远岸区 Offshore area	P
空胃率 Percentage of empty stomach	3.47%	6.82%	0.04
平均胃饱满指数 Mean stomach fullness index	0.0164±0.0125	0.015±0.0125	0.68
条件指数 Condition factor	2.37±0.29	2.32±0.34	0.01

3 讨论

3.1 海州湾小眼绿鳍鱼的空间分布特征

鱼类自身的生物学特征、饵料生物、竞争者和捕食者的丰度和空间分布及环境条件等都是影响其空间分布的重要因素^[27-28]。本研究发现,近年来海州湾秋季小眼绿鳍鱼的空间分布特征基本稳定,各年均主要分布在海州湾内 35 °N 附近及以北的海域,且资源分布重心的年间变化极小。小眼绿鳍鱼为典型的底层鱼类,其胸鳍长且宽大,两侧胸鳍前下方各生三根游离的指状鳍条,有利于其在海底爬行和挖掘穴居的饵料生物^[29]。海州湾底质以粉砂和黏土为主,较适合小眼绿鳍鱼栖息。根据本研究的调查结果,海州湾秋季小眼绿鳍鱼的资源密度,除在 2014 年略低于方氏云鲷外,其余年份均为海州湾内资源密度最高的鱼种。随着海州湾内传统经济鱼种,如带鱼、小黄鱼等渔业资源的衰退^[6],小眼绿鳍鱼已经逐渐成为海州湾的优势鱼种。同时,作为目前海州湾内营养级较高的鱼类,小眼绿鳍鱼的捕食会对其饵料生物产生一定的下行控制作用^[30],对饵料生物的资源量及空间分布起到重要的调控作用。因此,小眼绿鳍鱼在海州湾渔业生物群落中具有重要的生态作用。

3.2 海州湾小眼绿鳍鱼的摄食热点海域

鱼类的集群行为是一种极为普遍的现象,集群的目的在不同种类间存在差异,主要包括生殖、越冬、摄食及抵御捕食者侵袭等^[31-34]。本研究中小眼绿鳍鱼的摄食热点海域是指其生物量和摄食强度都相对较高的站位,因此导致其在摄食热点海域集群的主要原因是它们具有相似的摄食行为^[18]。摄食是保证鱼类一切活动顺利进行的基础,在适宜的环境条件下,鱼类会倾向于选择饵料生物丰度更高、可获得性更强的海域摄食,但鱼类的摄食行为,不仅存在种间竞争^[35-37],也存在种内竞争^[38],过高的资源密度会加剧捕食者对饵料生物资源竞争,并最终导致捕食者丰度的降低。

摄食热点海域具有相对较高的捕食者密度,说明摄食热点海域的饵料生物资源相对充足,这就减少了激烈的种内食物竞争。探索鱼类摄食热点海域的变化规律,一方面有助于寻找鱼群,指导渔业生产^[18];另一方面,也有助于了解鱼类与其饵料生物的空间重叠关系^[39]。本研究发现,在海州湾小眼绿鳍鱼的摄食热点站位中,17、27、49 站主要饵料生物是戴氏赤虾,而在离岸更近的 14、21、41、45 站主要摄食细螯虾,在纬度最低的 61 站,主要摄食口虾蛄。而且对细螯虾、戴氏赤虾、疣背宽额虾三种主要饵料生物的摄食热点均分布在 35 °N 附近及以北海域,这说明海州湾这三种饵料虾类与小眼绿鳍鱼的空间分布存在一定程度的重叠,因此成为小眼绿鳍鱼摄食的热点海域。

3.3 海州湾小眼绿鳍鱼摄食习性的空间异质性

本研究以小眼绿鳍鱼食物组成的空间相似性为依据,将调查海域从空间上划分为近岸区和远岸区两部分。近岸区和远岸区小眼绿鳍鱼摄食的饵料种类数分别为 56 种和 64 种,饵料多样性指数分别为 2.22 和 2.30,表明小眼绿鳍鱼在不同海域内摄食的饵料种类既存在重叠,也存在差异。结合胃含物分析结果,发现小眼绿鳍鱼是以虾类为主,兼食小型蟹类和鱼类等多种饵料生物的广食性鱼类,这与李振华等^[12]对东海中北部小眼绿鳍鱼摄食习性研究的结果相似。两处海域小眼绿鳍鱼摄食的饵料种类中,有 40 种饵料生物在小眼绿鳍鱼的胃含物中同时出现,饵料重叠指数为 0.55,未达到显著重叠水平,说明小眼绿鳍鱼的饵料组成存在明显的空间异质性。饵料生物的空间分布差异很可能是导致两处海域小眼绿鳍鱼饵料组成存在差异的主要原因。本研究中,就小眼绿鳍鱼的三种主要饵料生物而言,近岸区小眼绿鳍鱼摄食戴氏赤虾的质量百分比和个数百分比均明显低于远岸区,而摄食细螯虾和疣背宽额虾的质量百分比和个数百分比均高于远岸区。进一步表明细螯虾和疣背宽额虾在近岸海域分布较多,戴氏赤虾则主要分布在离岸较远的海域。

研究结果表明,近岸区小眼绿鳍鱼的空胃率显著低于远岸区,说明近岸区小眼绿鳍鱼的摄食强度更高,这与其生长发育特点有关。分析结果显示,近岸区小眼绿鳍鱼的体长、体重均显著小于远岸区,而小个体的鱼类生长速率相对较快,能量消耗快,因此需要不断进食;而对于体长相对较大的个体,根据“最佳摄食理论”^[40],

捕食者为从捕食行为中获得最大收益,更倾向于捕食个体较大的饵料,从而降低摄食频率,减少能量消耗,即摄食强度相对较低。另一方面,出现这种现象也与小眼绿鳍鱼主要饵料种类的空间差异有关,近岸区小眼绿鳍鱼主要摄食细螯虾和疣背宽额虾,这两种饵料生物个体较小,活动能力较弱,增加了饵料生物的可获得性,使得小眼绿鳍鱼的摄食强度也较高。

参考文献 (References):

- [1] 吴桑云, 王文海. 海湾分类系统研究. 海洋学报, 2000, 22(4): 83-89.
- [2] 李飞, 徐敏. 海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价. 环境科学, 2014, 35(3): 1035-1040.
- [3] 唐峰华, 沈新强, 王云龙. 海州湾附近海域渔业资源的动态分析. 水产科学, 2011, 30(6): 335-341.
- [4] 王在峰. 海州湾海洋特别保护区生态恢复适宜性评估[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [5] 朱鑫华, 吴鹤洲, 徐凤山, 赵紫晶, 叶懋中. 黄、渤海沿岸水域游泳动物群落结构时空格局异质性研究. 动物学报, 1994, 40(3): 241-252.
- [6] 章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 李曰嵩, 朱孔文. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化. 水产学报, 2006, 30(4): 475-480.
- [7] 隋昊志, 薛莹, 任一平, 邹易阳, 于磊. 海州湾鱼类生态类群的研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2017, 47(12): 59-71.
- [8] 陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2015: 798-798.
- [9] 曹玉茹. 中国海洋鱼类图谱. 北京: 中国大百科全书出版社, 2010: 151-151.
- [10] Garrido S, Murta A G. Interdecadal and spatial variations of diet composition in horse mackerel *Trachurus trachurus*. Journal of Fish Biology, 2011, 79(7): 2034-2042.
- [11] Persson L. Trophic cascades: abiding heterogeneity and the trophic level concept at the end of the road. Oikos, 1999, 85(3): 385-397.
- [12] 李振华, 蒋日进, 徐开达, 潘国良. 东海中北部小眼绿鳍鱼的摄食习性分析. 福建水产, 2010, (2): 33-37.
- [13] 李振华, 徐开达, 蒋日进, 朱增军. 东海中北部小眼绿鳍鱼食性的季节变化. 海洋渔业, 2010, 32(2): 192-198.
- [14] 李振华, 徐开达, 蒋日进, 周永东, 潘国良. 东海中北部小眼绿鳍鱼的食物组成及摄食习性的体长变化. 中国水产科学, 2011, 18(1): 185-193.
- [15] Chen Y, Sherman S, Wilson C, Sowles J, Kanaiwa M. A comparison of two fishery-independent survey programs used to define the population structure of American lobster (*Homarus americanus*) in the Gulf of Maine. Fishery Bulletin, 2006, 104(2): 247-255.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6—2007 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] Garrison L P. Spatial patterns in species composition in the Northeast United States continental shelf fish community during 1966-1999//Kruse G H, Bez N, Booth A, Dorn M W, Hills S, Lipcius R N, Pelletier D, Roy C, Smith S J, Witherell D, eds. Spatial Processes and Management of Marine Populations. Fairbanks, Alaska; University of Alaska Sea Grant College Program, 2001: 513-559.
- [18] Richardson D E, Palmer M C, Smith B E. The influence of forage fish abundance on the aggregation of Gulf of Maine Atlantic cod (*Gadus morhua*) and their catchability in the fishery. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(9): 1349-1362.
- [19] Keys A B. The weight-length relation in fishes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1928, 14(12): 922-925.
- [20] Cortés E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54(3): 726-738.
- [21] 薛莹, 金显仕, 张波, 梁振林. 黄海中部小黄鱼摄食习性的体长变化与昼夜变化. 中国水产科学, 2004, 11(5): 420-425.
- [22] Xue Y, Jin X, Zhang B, Liang Z. Seasonal, diel and ontogenetic variation in feeding patterns of small yellow croaker in the central Yellow Sea. Journal of Fish Biology, 2005, 67(1): 33-50.
- [23] Wilhm J L. Use of biomass units in Shannon's formula. Ecology, 1968, 49(1): 153-156.
- [24] Pianka E R. The structure of lizard communities. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 53-74.
- [25] Wathne J A, Haug T, Lydersen C. Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. groenlandica* in the Barents Sea. Marine Ecology Progress Series, 2000, 194: 233-239.
- [26] Tesch F W. Age and growth//Ricker W E, ed. Methods for Assessment of Fish Production in Fresh Waters. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1971: 93-123.
- [27] 杨林林, 姜亚洲, 程家骅. 东海太平洋褶柔鱼生殖群体的空间分布及其与环境因子的关系. 生态学报, 2010, 30(7): 1825-1833.
- [28] 刘潇, 张崇良, 任一平, 徐宾铎. 黄河口及邻近水域矛尾虾虎鱼资源丰度的时空分布. 中国水产科学, 2015, 22(4): 791-798.
- [29] 王迎春, 周勤, 段晓英. 八种海产硬骨鱼类消化系统的比较解剖研究. 海洋湖沼通报, 1997, (3): 46-51.

- [30] 林涛, 崔福义, 陈卫, 刘冬梅. 鱼类控制水蚤类浮游动物孳生的下行效应试验. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2008, 32(5): 646-650.
- [31] Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, Lewis A, Picaut J. El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*, 1997, 389 (6652): 715-718.
- [32] 胡文革, 刘新成. 乌鳢鱼苗集群行为的观察及生态适应分析. 石河子大学学报: 自然科学版, 2001, 5(1): 46-47, 71-71.
- [33] 陈新军, 俞存根, 卢伙胜. 渔业资源与渔场学. 北京: 海洋出版社, 2004: 77-78.
- [34] 周应祺, 王军, 钱卫国, 曹道梅, 张仲秋, 柳玲飞. 鱼类集群行为的研究进展. 上海海洋大学学报, 2013, 22(5): 734-743.
- [35] 郭旭鹏, 李忠义, 金显仕, 戴芳群. 应用稳定同位素技术对南黄海两种鳀科鱼类食物竞争的研究. 杭州师范学院学报: 自然科学版, 2007, 6(4): 283-287.
- [36] 陈国柱, 林小涛, 陈佩. 食蚊鱼(*Gambusia* spp.)入侵生态学研究进展. 生态学报, 2008, 28(9): 4476-4485.
- [37] 王凯, 章守宇, 汪振华, 赵静, 许敏, 林军. 枸杞岛岩礁生境主要鱼类的食物组成及食物竞争. 应用生态学报, 2012, 23(2): 536-544.
- [38] 张波. 东、黄海带鱼的摄食习性及其随发育的变化. 海洋水产研究, 2004, 25(2): 6-12.
- [39] Lasley-Rasher R S, Brady D C, Smith B E, Jumars P A. It takes guts to locate elusive crustacean prey. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 538: 1-12.
- [40] Gerking S D. *Feeding Ecology of Fish*. San Diego: Academic Press, 1994: 416-416.