Chinese Journal of Applied Ecology, Nov. 2017, 28(11): 3789-3796 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201711.034

基于碳、氮稳定同位素研究胶州湾普氏栉虾虎鱼的摄食习性

隋昊志[1] 韩东燕[1] 薛 莹[1*] 麻秋云[1] 徐宾铎[1] 任一平[1,2]
([1]中国海洋大学水产学院, 山东青岛 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, 山东青岛 266000)

摘 要 普氏栉虾虎鱼属于小型暖温性底层鱼类,是胶州湾鱼类群落中的优势种之一,在胶州湾食物网和生态系统中发挥着重要作用.本文应用碳、氮稳定同位素技术,基于胶州湾渔业资源底拖网调查采集的样品,对普氏栉虾虎鱼的摄食习性进行了研究.结果表明:胶州湾普氏栉虾虎鱼的$\delta^{15}N$值范围为11.24‰~13.99‰,平均值为(12.70±0.70)‰,$\delta^{13}C$值范围为-20.67‰~-18.46‰,平均值为(-19.08±0.36)‰;各体长组的营养级范围为3.49~3.76,平均营养级为(3.62±0.21),其$\delta^{15}N$值和营养级与体长呈显著负相关,$\delta^{13}C$值与体长无显著相关性.普氏栉虾虎鱼摄食的主要饵料生物类群为多毛类、虾类和软体动物,浮游动物和颗粒有机物(POM)的饵料贡献率较小.聚类分析结果表明,普氏栉虾虎鱼各体长组食物组成的相似性均在92%以上,相似性较高,说明其摄食习性随体长变化无明显差异.普氏栉虾虎鱼在胶州湾生态系统中属于中级消费者,其摄食各饵料生物类群比例的变化可能是其营养级与体长呈负相关关系的主要原因.

关键词 稳定同位素;胶州湾;普氏栉虾虎鱼;营养级;摄食习性

Feeding habits of *Rhinogobius pflaumi* in Jiaozhou Bay, China based on carbon and nitrogen stable isotope analysis.

SUI Hao-zhi[1], HAN Dong-yan[1], XUE Ying[1*], MA Qiu-yun[1], XU Bin-duo[1], REN Yi-ping[1,2] ([1] *College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao* 266003, *Shandong, China*; [2] *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology/Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao* 266000, *Shandong, China*).

Abstract: *Rhinogobius pflaumi* is a small-sized, warm-temperate demersal fish species. It is one of the dominant species in fish community, and plays an important role in Jiaozhou Bay ecosystem. The trophic level and feeding habits of *R. pflaumi* were investigated by carbon and nitrogen stable isotope analysis, based on the data collected from the bottom trawl surveys during May 2011 in Jiaozhou Bay, China in this study. The results showed that the $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ values of *R. pflaumi* ranged from 11.24‰ to 13.99‰ and -20.67‰ to -18.46‰, respectively. The mean values of $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ were (12.70±0.70)‰ and (-19.08±0.36)‰, respectively. The mean trophic level of *R. pflaumi* was (3.62±0.21) for all size classes, ranging from 3.49 to 3.76 for different size classes. There was a significant negative correlation between the $\delta^{15}N$ values and standard length, while no significant correlation was observed between $\delta^{13}C$ values and standard length. The main prey groups of *R. pflaumi* were polychaeta, decapoda and mollusca. The trophic contributions of zooplankton and particle organic matter (POM) were relatively low. The similarities of prey species composition among different size classes were more than 92%, indicating that there was no significant difference in feeding habits with different standard lengths. *R. pflaumi* was an intermediate consumer in

本文由国家自然科学基金项目(41006083)、中央高校基本科研业务费专项(201562030,201612004)和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)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41006083), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (201562030, 201612004) and the Scientific and Technological Innovation Project Financially Supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology (2015ASKJ02-05).
2017-03-27 Received, 2017-08-12 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xueying@ouc.edu.cn

Jiaozhou Bay ecosystem. The significant negative correlation between trophic level and standard length might be due to variation in the proportion of different prey groups.

Key words: stable isotope; Jiaozhou Bay; *Rhinogobius pflaumi*; trophic level; feeding habits.

鱼类摄食习性和营养级的研究通常采用传统胃含物分析的方法,该方法鉴定饵料生物较为直观和准确,但是只能反映鱼类短期的摄食情况,而且无法鉴别消化程度较高的饵料生物和有机碎屑等,因此具有一定的局限性[1].此外,由于受到鱼类偶食性的影响,传统胃含物分析方法需要分析大量的样品以减少误差,增大了工作量和难度[2].碳、氮稳定同位素分析技术可以有效克服传统胃含物分析方法的不足,而且能够反映生物较长时间内的摄食情况,受采样、季节、温度等因素的影响较小,其中碳稳定同位素比值($\delta^{13}C$)在生物与饵料间富集度较低(0~1‰),常用于探讨食物来源情况,氮稳定同位素比值($\delta^{15}N$)在营养级间有相对稳定的富集度(约3.4‰),常用于估算生物的营养级[3].由于碳、氮稳定同位素技术在食性分析方面的优势,自 20 世纪 80 年代起,国内外很多学者开始应用碳、氮稳定同位素技术对鱼类摄食习性开展研究.例如:朱耘等[4]应用碳稳定同位素技术分析了池养草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的食性关系,李红燕[5]应用碳、氮稳定同位素技术分析了黄东海生态系统中鮸鱼(*Miichthys miiuy*)和鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)的营养级,颜云榕[6]应用碳、氮稳定同位素技术分析了北部湾主要鱼类摄食生态及食物关系,Benoit 等[7]分析了 2 种欧洲盐沼鲻鱼(*Liza aurata* 和 *L. ramada*)春季洄游的摄食生态,Sandra 等[8]应用碳、氮稳定同位素技术对智利巴塔哥尼亚北部的 *Sprattus fuegensis* 营养级进行了研究.

胶州湾位于山东半岛南岸,为典型的半封闭海湾,曾是许多经济渔业生物生长和繁殖的重要海域[9].20 世纪 80 年代以来,由于受过度捕捞、围海造田及养殖活动等人为和自然因素的影响,胶州湾海域的生态环境和渔业生物资源发生明显变化,小型底层鱼类逐渐占优势地位[10-12].近年来的调查发现,普氏栉虾虎鱼(*Rhinogobius pflaumi*)是胶州湾鱼类群落中的优势种之一[13-14],它既是多种高营养级鱼类的饵料生物[15-16],又是许多底栖生物的捕食者,在胶州湾食物网和生态系统中发挥着重要作用.普氏栉虾虎鱼属鲈形目(Perciformes)虾虎鱼科(Gobiidae),又名普氏缰虾虎鱼、普氏吻虾虎鱼和普氏细棘虾虎鱼,为小型暖温性底层鱼类,广泛分布于黄海、东海和南海沿海[17].虽然已有学者对普氏栉虾虎鱼的生物学特征开展过相关研究[18-19],然而应用稳定同位素技术对其摄食习性的研究尚未见报道.

本研究应用碳、氮稳定同位素技术分析胶州湾普氏栉虾虎鱼的摄食习性,查明其饵料生物的营养贡献率,分析计算其营养级,旨在全面了解其食性特征,揭示其在胶州湾生态系统物质循环和能量流动中的地位和作用,为胶州湾食物网和营养结构特征的研究提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采自 2011 年 5 月在胶州湾海域(35°59′—36°7′ N,120°13′—120°23′ E)进行的渔业资源底拖网调查(图 1).调查采用分层随机取样方法(stratified random sampling)[20-22],在胶州湾的湾内、湾口和湾外海域随机设置调查站位,站位数分别为 5、3 和 4 个,共 12 个调查站位(图 1).调查船为单拖渔船,功率为 44 kW,底拖网的网口目数为 900 目、囊网网目为 10 mm,每站位的拖网时间为 0.5 h 左右,平均拖速为 2 节左右.

每站位的渔获物中,以 5 mm 体长间隔划分为不同体长组,在每个站位每个体长组随机留取1尾

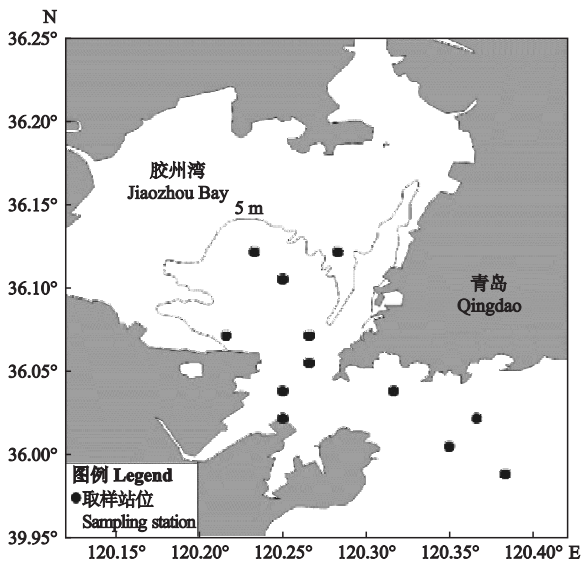


图 1 胶州湾渔业资源底拖网调查站位

Fig.1 Sampling stations by the bottom trawl survey in Jiaozhou Bay.

普氏栉虾虎鱼样品用于碳、氮稳定同位素分析，共获得 36 个样品.同时采集普氏栉虾虎鱼可能摄食的饵料生物样品[19]，包括虾类、多毛类、浮游动物、腹足类和双壳类等，浮游动物样品采用标准的大型浮游生物网从水底垂直拖网至水表进行采样，根据筛绢网目将浮游动物分成 100～300、300～500、500～900 和>900 μm 共 4 个粒径级别.采水器采集表层海水后，用预处理过的醋酸纤维滤膜过滤两次获得颗粒有机物(POM)样品，-20 ℃保存.将分别采自湾内、湾口、湾外同种饵料生物合并后进行碳、氮稳定同位素分析.

1.2　同位素样品的处理与分析

取普氏栉虾虎鱼第一背鳍附近白肌进行碳、氮稳定同位素分析，虾类取腹部肌肉，腹足类和双壳类取闭壳肌，沙蚕和浮游动物在 4 ℃条件下放置 1 d 排空胃后取生物整体作为样品，所有样品置于-20 ℃低温条件下保存.用锡箔纸包裹样品后，放入设定温度为 60 ℃的烘箱中烘干至恒量，在石英研钵中充分研磨至粉末状.依次使用脱脂溶液和脱碳溶液对研磨后的样品进行处理，脱脂溶液的配制采用 Kaehler 等[23]的方法，氯仿：甲醇：水=1∶2∶0.8，依照比例将甲醇和水混合均匀后滴加氯仿，并不断搅拌形成不分层的溶液，脱碳溶液采用 3 mol·L^{-1} 的盐酸溶液.样品在进行脱脂和脱碳处理后，重新烘干至恒量并研磨至粉末状，置于铬酸洗液清洗过并烘干的玻璃瓶中，干燥条件下保存.

所有样品在中国科学院海洋研究所地质实验室进行稳定同位素分析，使用英国 GV 公司的 IsoPrime 稳定同位素质谱仪测定碳、氮稳定同位素比值.

碳、氮稳定同位素比值以国际通用的 δ 值表示，碳稳定同位素标准采用 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite)国际标准，氮稳定同位素标准则采用大气氮，计算公式如下：

$$\delta^{13}C(‰)=\left(\frac{^{13}C/^{12}C_{sample}}{^{13}C/^{12}C_{VPDB}}-1\right)\times 1000‰$$

$$\delta^{15}N(‰)=\left(\frac{^{15}N/^{14}N_{sample}}{^{15}N/^{14}N_{air}}-1\right)\times 1000‰$$

式中：$^{13}C/^{12}C_{VPDB}$ 和 $^{15}N/^{14}N_{air}$ 分别为碳国际标准物(VPDB)和大气氮(N_2)的稳定同位素比值.在测定过程中，每 5 个样品后加测 1 个工作标准以保证仪器稳定性和结果准确性.$\delta^{13}C$ 值的精度为±0.15‰，$\delta^{15}N$ 值的精度为±0.18‰.

1.3　营养级的计算方法

胶州湾普氏栉虾虎鱼营养级的计算公式如下：

$$TL_{fish}=\frac{(\delta^{15}N_{fish}-\delta^{15}N_{baseline})}{\Delta^{15}N}+2$$

式中：TL_{fish} 表示胶州湾普氏栉虾虎鱼的营养级；$\delta^{15}N_{fish}$ 表示普氏栉虾虎鱼的氮稳定同位素比值；$\delta^{15}N_{baseline}$ 表示基准生物的氮稳定同位素比值.本研究选取胶州湾的中型浮游动物为基准生物[24]，其 $\delta^{15}N$ 平均值为 7.2‰；$\Delta^{15}N$ 为一个营养级的氮富集度，本研究中取 3.4‰；2 为基准生物的营养级.采用 Pearson 相关分析，对普氏栉虾虎鱼不同体长组的平均营养级进行差异显著性检验.

1.4　饵料贡献比

根据捕食者的碳、氮稳定同位素比值与其摄食饵料生物的同位素组成相一致原则[25]，结合韩东燕等[19]的研究结果及普氏栉虾虎鱼的生态习性[17,26]，将其可能摄食的饵料生物分为虾类、软体动物类(包括腹足类和双壳类)、多毛类、>900 μm 浮游动物、500～900 μm 浮游动物、300～500 μm 浮游动物、100～300 μm 浮游动物和颗粒有机物(POM)，取各个饵料生物类群稳定同位素的平均值代表该类群的同位素比值.根据普氏栉虾虎鱼及其饵料生物类群的 $\delta^{15}N$ 值和 $\delta^{13}C$ 值，采用 Phillips 等[27]以质量守恒模型为基础编写的 IsoSource 软件计算其可能摄食饵料生物的营养贡献率.

1.5　数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析.采用单因素(one-way ANOVA)进行方差分析($\alpha=0.05$)，用 Excel 2013 软件作图.图表中数据为平均值或平均值±标准差.

2　结果与分析

2.1　普氏栉虾虎鱼的碳、氮稳定同位素比值

胶州湾普氏栉虾虎鱼的 $\delta^{15}N$ 值范围为 11.24‰～13.99‰，平均值为(12.70±0.70)‰，最大差值为2.75‰；$\delta^{13}C$ 值范围为-20.67‰～-18.46‰，平均值为(-19.08±0.36)‰，最大差值为 2.21‰(表 1).普氏栉虾虎鱼的 $\delta^{15}N$ 值、$\delta^{13}C$ 值与体长的关系如图 2 所示.根据 Pearson 双因素相关分析，胶州湾普氏栉虾虎鱼 $\delta^{15}N$ 值与体长呈显著负相关，$\delta^{13}C$ 值与体长无显著相关性.

2.2　普氏栉虾虎鱼的营养级

根据胶州湾普氏栉虾虎鱼的 $\delta^{15}N$ 值及营养级的计算公式(图 3)，得出普氏栉虾虎鱼各体长组的营养级范围为 3.49～3.76，平均营养级为(3.62±0.21).体长组为25～30 mm的普氏栉虾虎鱼营养级

表 1 胶州湾各个体长组普氏栉虾虎鱼的碳、氮稳定同位素值

Table 1 $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ signatures of each size class of *Rhinogobiu spflaumi* in Jiaozhou Bay

体长组 Size class (mm)	样品数 Sample number	$\delta^{15}N$ (‰) 范围 Range	$\delta^{15}N$ (‰) 平均值±标准差 Mean±SD	$\delta^{13}C$ (‰) 范围 Range	$\delta^{13}C$ (‰) 平均值±标准差 Mean±SD
25~30	5	12.43~13.99	13.19±0.68	−19.42~−18.46	−18.93±0.43
31~35	7	11.72~13.81	12.96±0.81	−19.44~−18.81	−19.06±0.23
36~40	7	11.24~13.03	12.39±0.65	−19.10~−18.73	−18.97±0.14
41~45	6	12.36~13.75	12.96±0.61	−20.67~−18.50	−19.26±0.69
46~50	9	11.72~13.04	12.27±0.41	−19.41~−18.83	−19.14±0.19
51~55	2	11.90~13.57	12.74±1.18	−19.00~−18.96	−18.98±0.03

最高,平均营养级为(3.76±0.20);体长组为 46~50 mm 的普氏栉虾虎鱼营养级最低,其平均营养级为(3.49±0.12).根据 Pearson 相关分析,胶州湾普氏栉虾虎鱼的营养级与体长呈显著负相关.从平均体长和营养级的空间变化可以看出(表 2),胶州湾湾口处的普氏栉虾虎鱼平均体长最小,而平均营养级最高,湾内和湾外的平均体长高于湾口处,而平均营养级较湾口处低.

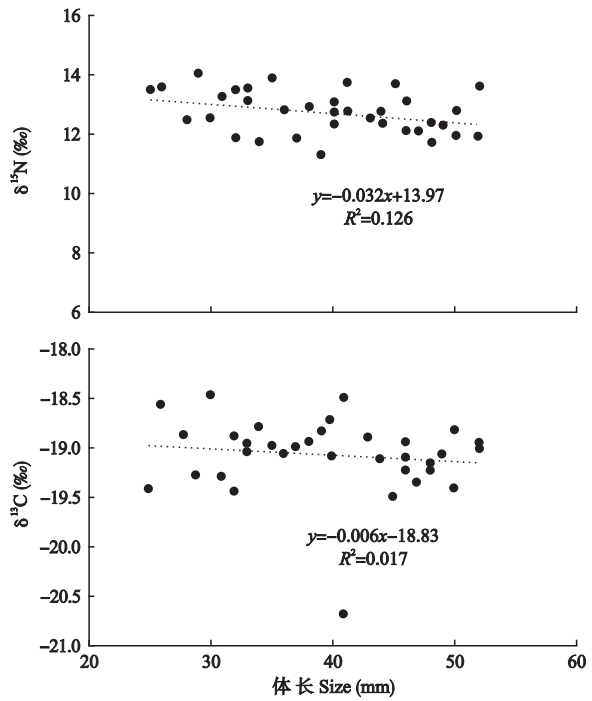


图 2 氮、碳稳定同位素比值随普氏栉虾虎鱼体长的变化

Fig.2 Variations of $\delta^{15}N$ and $\delta^{13}C$ signatures of *Rhinogobius pflaumi* with different size classes.

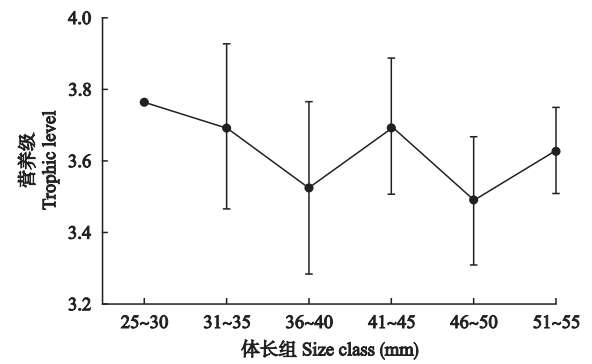


图 3 胶州湾各体长组普氏栉虾虎鱼的营养级

Fig.3 Trophic level of each size class of *Rhinogobius pflaumi* in Jiaozhou Bay.

2.3 普氏栉虾虎鱼可能摄食饵料生物的稳定同位素比值

普氏栉虾虎鱼可能摄食饵料生物的 $\delta^{15}N$ 值变化范围为 3.92‰~11.76‰,最大差值为7.84‰,相差一个营养级以上;$\delta^{13}C$ 值的变化范围为−25.63‰~−18.54‰,最大差值为 7.09‰(表 3).其中,软体动物类的$\delta^{15}N$值最高,其次是多毛类,颗粒有机物

表 2 胶州湾普氏栉虾虎鱼体长和营养级的空间变化

Table 2 Spatial variation of size and trophic level of *Rhinogobius pflaumi* in Jiaozhou Bay

区域 Area	体长 Size (mm)	营养级 Trophic level
湾内 Inner bay	41.95±6.17	3.48±0.45
湾口 Bay mouth	34.08±7.45	3.73±0.22
湾外 Outside bay	42.36±5.21	3.48±0.13

表 3 胶州湾普氏栉虾虎鱼可能摄食饵料生物的碳、氮稳定同位素比值

Table 3 $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ signatures of potential prey groups of *Rhinogobius pflaumi* in Jiaozhou Bay

饵料生物类群 Prey group	样品数 Sample number	$\delta^{15}N$ (‰)	$\delta^{13}C$ (‰)
虾类 Decapoda	6	10.97±0.54	−19.52±0.48
软体动物类 Mollusca	5	11.76±1.25	−20.08±1.84
多毛类 Polychaeta	1	11.24	−18.54
浮游动物 Zooplankton			
>900 μm	3	8.76±0.93	−23.96±0.49
500~900 μm	3	6.61±0.30	−23.99±1.42
300~500 μm	3	7.80±0.94	−25.63±0.09
100~300 μm	3	6.78±1.55	−25.39±0.55
颗粒有机物 POM	3	3.92±1.27	−21.00±0.51

表 4　胶州湾普氏栉虾虎鱼各个饵料生物类群的贡献率
Table 4　Contribution rate of prey groups of *Rhinogobius pflaumi* in Jiaozhou Bay (%)

饵料生物类群 Prey group	贡献率范围 Range of contribution rate	平均 Mean
虾类 Decapoda	0~54	10.6
软体动物类 Mollusca	0~34	6.3
多毛类 Polychaeta	46~92	75.5
浮游动物 Zooplankton		
>900 μm	0~8	1.2
500~900 μm	0~8	1.2
300~500 μm	0~6	0.8
100~300 μm	0~6	0.8
颗粒有机物 POM	0~20	3.6

的 $\delta^{15}N$ 值最低;浮游动物的 $\delta^{13}C$ 值相对于其他可能的饵料生物类群较低,多毛类的 $\delta^{13}C$ 值最高.

2.4　普氏栉虾虎鱼摄食饵料生物的贡献率

根据普氏栉虾虎鱼可能摄食饵料生物类群的 $\delta^{15}N$ 值和 $\delta^{13}C$ 值,用 Iso Source 软件计算各饵料类群的营养贡献率,结果如表 4 所示.普氏栉虾虎鱼摄食的主要饵料生物类群为多毛类、虾类和软体动物类,其饵料贡献率平均值分别为 75.5%、10.6% 和 6.3%,多毛类的饵料贡献率远高于其他类群,为普氏栉虾虎鱼最主要的饵料生物,浮游动物的饵料贡献率均较小(0.8%~1.2%).

普氏栉虾虎鱼的食物组成随体长的增加而变化(表 5),多毛类对体长为 26~30 mm 的普氏栉虾虎鱼的摄食贡献率最大,对体长为 41~45 mm 的普氏栉虾虎鱼贡献率最小,而虾类、软体动物类、浮游动物和 POM 等饵料的贡献率呈相反趋势.随着体长的增加,$\delta^{13}C$ 值较低的多毛类贡献率呈下降趋势,$\delta^{13}C$ 值较高的虾类、软体动物类、浮游动物和 POM 等饵料生物的贡献率则呈上升趋势.根据碳稳定同位素分析的饵料生物类群贡献率进行聚类分析(图 4),普氏栉虾虎鱼各体长组间的相似性均在 92% 以上,相似性较高,表明普氏栉虾虎鱼的摄食习性随体长无明显变化.

表 5　胶州湾各体长组普氏栉虾虎鱼饵料生物类群的贡献率
Table 5　Contribution rate of prey groups of *Rhinogobius pflaumi* in each size class in Jiaozhou Bay (%)

饵料生物类群 Prey group	体长 Size (mm)					
	26~30	31~35	36~40	41~45	46~50	51~55
虾类 Decapoda	8.4	10.5	9.0	13.5	11.7	9.2
软体动物类 Mollusca	5.1	6.3	5.5	8.2	7.1	5.6
多毛类 Polychaeta	80.9	75.7	79.3	67.8	72.5	78.9
浮游动物 Zooplankton						
>900 μm	0.9	1.2	1.0	1.7	1.4	1.0
500~900 μm	0.9	1.2	1.0	1.7	1.4	1.0
300~500 μm	0.5	0.8	0.6	1.1	0.9	0.6
100~300 μm	0.5	0.8	0.6	1.2	1.0	0.6
颗粒有机物 POM	2.8	3.6	3.1	4.8	4.1	3.1

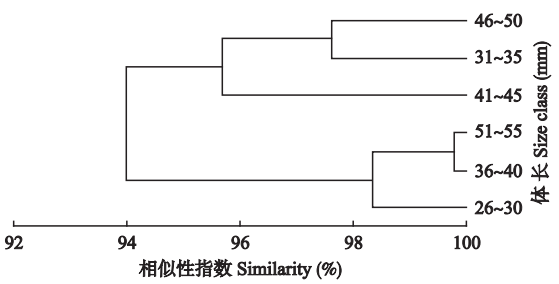


图 4　胶州湾各体长组普氏栉虾虎鱼食物组成的聚类分析
Fig.4　Cluster analysis of the prey composition of *Rhinogobius pflaumi* in each size class in Jiaozhou Bay.

3　讨　　论

普氏栉虾虎鱼作为胶州湾海域的优势底层鱼类之一,同时也是六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaeturichthyshexanema*)、长蛇鲻(*Saurida elongata*)等高营养级鱼类的饵料生物[15-16],在胶州湾食物网中占有重要地位.本研究根据各饵料生物类群的氮稳定同位素比值($\delta^{15}N$)及营养级的计算公式,得出普氏栉虾虎鱼的各体长组的营养级范围为 3.49~3.76,平均营养级为(3.62±0.21).根据麻秋云等[28]的研究结果,胶州湾鱼类的营养级主要集中在 3.0~4.0,因此普氏栉虾虎鱼属于胶州湾生态系统的中级消费者,与 20 世纪 80 年代杨伟祥等[29]对胶州湾普氏栉虾虎鱼胃含物分析计算所得结果相似.

本研究发现,胶州湾普氏栉虾虎鱼摄食的主要饵料生物类群为多毛类、软体动物类(包括腹足类和双壳类)及虾类,其中多毛类的营养贡献率远高于其他类群,成为普氏栉虾虎鱼最重要的饵料生物类群.根据韩东燕等[19]对 2011 年胶州湾 8 种虾虎鱼的胃含物分析结果,普氏栉虾虎鱼主要摄食多毛类、

双壳类、腹足类、介形类和桡足类,与稳定同位素分析结果较为一致,但各类群的比例有较大差异,本研究中多毛类和软体动物类对普氏栉虾虎鱼各体长组的贡献率范围分别为 67.8%~80.9%和 5.1%~8.2%,而文献中胃含物分析计算的比例分别为 41.2%和 37.3%[19],其原因可能有:1)鱼类肌肉的碳、氮稳定同位素能够反映鱼类在较长时间内的摄食习性,而胃含物分析所得的结果为短期摄食情况,受环境变化和时空范围等因素的影响,二者所得结果往往并不相同;2)鱼类对不同类型饵料生物的消化程度不同,腹足类和双壳类等较难消化的生物在鱼类胃中留存时间较长,而多毛类则相对消化较快,辨认和鉴定难度大,对胃含物分析结果产生一定影响.碳、氮稳定同位素分析方法可以反映鱼类长期的摄食习性,但却无法准确鉴别饵料生物的种类,在后续研究中需结合胃含物分析的方法以得到更全面的结果.

氮稳定同位素比值($\delta^{15}N$)在营养级间存在相对稳定的富集度(约为 3.4‰),常被用于估算生物的营养级[18].本研究表明,胶州湾普氏栉虾虎鱼的$\delta^{15}N$值与其体长呈显著负相关关系,即随着体长增加,其 $\delta^{15}N$ 值逐渐降低,营养级与体长也呈显著负相关关系,二者趋势相一致.根据前人的研究,鱼类营养级与体长关系通常呈正相关关系[25]或无显著相关性[30-34],但当鱼类的栖息水层范围广或属于杂食性、碎屑食性时,也会呈现负相关关系或负相关趋势[1,35].从普氏栉虾虎鱼各体长组所摄食的饵料生物贡献率可以看出(表 5),随着体长的增加,$\delta^{13}C$ 值较低的多毛类贡献率呈下降趋势,$\delta^{13}C$ 值较高的虾类、软体动物类、浮游动物和 POM 等饵料生物的贡献率则呈上升趋势,普氏栉虾虎鱼摄食各饵料生物类群比例的变化可能是其营养级与体长呈负相关关系的主要原因.而根据 Pearson 相关分析,普氏栉虾虎鱼的 $\delta^{13}C$ 值与体长无显著相关性,且聚类分析结果表明(图 4),其各体长组间的相似性在 92%以上,相似程度较高.其原因可能是多毛类在普氏栉虾虎鱼饵料生物中占绝对优势(67.8%~80.9%),其他饵料生物类群贡献率对其 $\delta^{13}C$ 值的影响较小,因此$\delta^{13}C$值与体长之间无显著相关关系.

另外,从平均体长和营养级的空间变化可以看出(表 2),胶州湾湾口处的普氏栉虾虎鱼平均体长最小,而营养级最高.文献[24]基于胃含物分析方法所计算的浮游动物营养贡献率约为 10%,高于本研究中基于 $\delta^{15}N$ 值所计算的浮游动物贡献率(0.5%~2.1%),表明普氏栉虾虎鱼营养级的变化趋势受生境中浮游动物数量的影响不可忽略.杨南南等[36]的研究表明,胶州湾湾口处受陆地河流的影响,尿素含量和溶解态有机氮含量均高于湾内,浮游植物和浮游动物数量也较多,这可能会使该区域的普氏栉虾虎鱼摄食软体动物类和多毛类的比例高于其他区域,进而使在该区域摄食的普氏栉虾虎鱼的 $\delta^{15}N$ 值和营养级也相对较高,这可能也是普氏栉虾虎鱼的 $\delta^{15}N$ 值和营养级与体长呈负相关关系的另一个主要原因.

普氏栉虾虎鱼为秋季胶州湾鱼类群落优势种之一,其优势度略低于六丝钝尾虾虎鱼[37],二者均为底栖动物食性,且普氏栉虾虎鱼与胶州湾其他虾虎鱼类尤其是六丝钝尾虾虎鱼的空间生态位重叠较高,具有潜在的竞争关系,但其营养生态位重叠相对较低,六丝钝尾虾虎鱼主要摄食虾类和双壳类,而摄食多毛类、桡足类和涟虫类等饵料生物较少[19].根据前人研究[38-39],食物重叠高的鱼类之间不一定存在竞争关系,仅在环境中饵料资源短缺的情况下才会发生激烈的食物竞争.另外,根据以往的研究,胶州湾普氏栉虾虎鱼的营养生态位宽度较高[19],可能在长期进化过程中,其通过提高其营养生态位宽度,增大食谱范围,进而减少与生态位相近鱼类的种间食物竞争.

参考文献

[1] Guo X-P (郭旭鹏), Li Z-Y (李忠义), Jin X-S (金显仕), *et al*. Feeding habit study of Anchovy (*Engraulis japonicus*) in the central and southern part of the Huanghai Sea with stable isotope techniques. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2007, **29**(2): 98-104 (in Chinese)

[2] Tonn WM, Prepas EE, Wassenaar LI. Individual specialization and trophic adaptability of northern pike (*Esox lucius*): An isotope and dietary analysis. *Oecologia*, 1999, **120**: 386-396

[3] Li Z-Y (李忠义), Jin X-S (金显仕), Zhuang Z-M (庄志猛), *et al*. Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(11): 3052-3060 (in Chinese)

[4] Zhu Y (朱 耘), Zhou X-X (周小兴), Yu R-S (于蓉生), *et al*. Preliminary study on feeding habits of pond cultured fishes by stable isotope. *Journal of Fisheries Research* (渔业研究), 1987(4): 18-20 (in Chinese)

[5] Li H-Y (李红燕). The Application of Stable Carbon and Nitrogen Isotopes to Ecosystems: Such as the Wudinghe River and the Yellow Sea and East China Sea.

PhD Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2003 (in Chinese)
[6] Yan Y-R (颜云榕). Feeding Ecology and Food Relations of the Main Fishes in the Beibu Gulf, South China Sea. PhD Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese)
[7] Lebreton B, Richard P, Parlier EP, *et al*. Trophic ecology of mullets during their spring migration in a European saltmarsh: A stable isotope study. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 2011, **91**: 502-510
[8] Montecinos S, Castro LR, Neira S. Stable isotope ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) and trophic position of Patagonian sprat (*Sprattus fuegensis*) from the Northern Chilean Patagonia. *Fisheries Research*, 2016, **179**: 139-147
[9] Liu R-Y (刘瑞玉). Ecology and Living Resources of Jiaozhou Bay. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese)
[10] Zeng X-Q (曾晓起), Pu C-H (朴成华), Jiang W (姜伟), *et al*. Biodiversity investigation in Jiaozhou Bay and neighbouring waters. *Periodical of Ocean University of China* (Natural Science) (中国海洋大学学报: 自然科学版), 2004, **34**(6): 977-982 (in Chinese)
[11] Ren Y-P (任一平), Xu B-D (徐宾铎), Ye Z-J (叶振江), *et al*. Preliminary study on community structure of fishery resources during spring and autumn in the coastal waters of Qingdao. *Periodical of Ocean University of China* (Natural Science) (中国海洋大学学报: 自然科学版), 2005, **35**(5): 792-798 (in Chinese)
[12] Xu B-D (徐宾铎), Zhang F (张　帆), Mei C (梅　春), *et al*. Characteristics of fish community structure in the central Jiaozhou Bay in spring and summer. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(6): 1558-1564 (in Chinese)
[13] Mei C (梅　春), Xu B-D (徐宾铎), Xue Y (薛　莹), *et al*. Fish community structure and species diversity during autumn and winter in the central waters of Jiaozhou Bay. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学), 2010, **17**(1): 110-118 (in Chinese)
[14] Zeng H-H (曾慧慧), Xu B-D (徐宾铎), Xue Y (薛　莹), *et al*. Study on fish species composition and seasonal variation in the shallow waters of Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China* (Natural Science) (中国海洋大学学报: 自然科学版), 2012, **42**(suppl.1): 73-80 (in Chinese)
[15] Han D-Y (韩东燕), Xue Y (薛　莹), Ji Y-P (纪毓鹏), *et al*. Feeding ecology of *Amblychaeturichthy hexanema* in Jiaozhou Bay, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(5): 1446-1452 (in Chinese)
[16] Dou S-Z (窦硕增), Yang J-M (杨纪明). Feeding habit and seasonal variation in food content of *Cynoglossus semilaevis* in the Bohai Sea. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1992, **12**(4): 368-376 (in Chinese)
[17] Wu H-L (伍汉霖), Zhong J-S (钟俊生). Fauna Sinica: Ostichthyes: Perciformes (V): Gobioidei. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese)
[18] Liu Y-W (刘元文), Xue Y (薛　莹), Ji Y-P (纪毓鹏), *et al*. Preliminary study on biological characteristics of *Amoya pflaumi* in Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China* (Natural Science) (中国海洋大学学报: 自然科学版), 2013, **43**(6): 38-43 (in Chinese)
[19] Han D-Y (韩东燕). Study on Feeding Ecology of Dominate Gobiid Fishes in Jiaozhou Bay. Master Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese)
[20] Cochran WG. Sampling Techniques. New York: John Wiley and Sons, 1977: 900
[21] Miller TJ, Skalski JR, Ianelli JN. Optimizing a stratified sampling design when faced with multiple objectives. *ICES Journal of Marine Science*, 2007, **64**: 97-109
[22] Manly BFJ, Akroyd JM, Walshe KAR. Two-phase stratified random surveys on multiple populations at multiple locations. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2002, **36**: 581-591
[23] Kaehler S, Pakhomov EA, Mcquaid CD. Trophic structure of the marine food web at the Prince Edward Islands (Southern Ocean) as determined by $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, **208**: 13-20
[24] Tamelander T, Renaud PE, Hop H, *et al*. Trophic relationships and pelagic-benthic coupling during summer in the Barents Sea Marginal Ice Zone, revealed by stable carbon and nitrogen isotope measurements. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, **310**: 33-46
[25] Deniro MJ, Epstein S. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, **42**: 495-506
[26] Chen D-G (陈大刚), Zhang M-Z (张美昭). Marine Fishes of China. Qingdao: China Ocean University Press, 2015 (in Chinese)
[27] Phillips DL, Gregg JW. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, **136**: 261-269
[28] Ma Q-Y (麻秋云), Han D-Y (韩东燕), Liu H (刘贺), *et al*. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in Jiaozhou Bay using stable isotope analysis. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(21): 7207-7218 (in Chinese)
[29] Yang W-X (杨伟祥), Yang J-M (杨纪明), Wu H-Z (吴鹤洲). Fish resources: Prey groups and feeding habits of fish// Liu R-Y (刘瑞玉), ed. Ecology and Living Resources of Jiaozhou Bay. Beijing: Science Press, 1992: 413-423 (in Chinese)
[30] Han D-Y (韩东燕), Ma Q-Y (麻秋云), Xue Y (薛　莹), *et al*. Feeding habits of *Amblychaeturichthy hexanema* in Jiaozhou Bay based on carbon and nitrogen stable isotope analysis. *Periodical of Ocean University of China* (Natural Science) (中国海洋大学学报: 自然科学版), 2016, **46**(3): 67-73 (in Chinese)
[31] Yang G-H (杨国欢), Hou X-Q (侯秀琼), Sun S-L (孙省利), *et al*. Trophic levels of *Sardinella clupeoides* in Liusha Bay, Guangdong Province, China, through stable carbon and nitrogen isotope analysis. *Journal of*

Oceanography in Taiwan Strait (台湾海峡), 2011, **30**(4): 467-472 (in Chinese)

[32] Yan Y-R (颜云榕), Zhang W-K (张武科), Lu H-S (卢伙胜), *et al*. Using stable isotopes to analyze feeding habits and trophic position of hairtail (*Trichiurus lepturus*) from the Beibu Gulf, South China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), 2012, **43**(1): 192-200 (in Chinese)

[33] Li S-Y (李世岩), Han D-Y (韩东燕), Ma Q-Y (麻秋云), *et al*. Feeding habits of *Enedrias fangi* in Jiaozhou Bay based on carbon and nitrogen stable isotope analysis. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学), 2014, **21**(6): 1220-1226 (in Chinese)

[34] Lu Z-C (鹿志创), Tian J-S (田甲申), Wang Z-H (王召会), *et al*. Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*). *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(1): 69-76 (in Chinese)

[35] Wang T-T (王田田), Lv Z-B (吕振波), Li F (李凡), *et al*. Determination of the trophic levels of four fish species in Engraulidae and Clupeidae in Laizhou Bay based on stable carbon and nitrogen isotopes. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学), 2013, **20**(5): 1076-1085 (in Chinese)

[36] Yang N-N (杨南南). Terrigenous Input, Distribution and Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in Jiaozhou Bay from 2012 to 2013. Master Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese)

[37] Zai L (翟 璐), Han D-Y (韩东燕), Fu D-J (傅道军), *et al*. Fish community structure and the relationship with environmental factors in Jiaozhou Bay and adjacent waters. *Journal of Fishery Sciences of China* (中国水产科学), 2014, **21**(4): 810-821 (in Chinese)

[38] Mckaye KR, Marsh A. Food switching by two specialized algae-scraping cichlid fishes in Lake Malawi, Africa. *Oecologia*, 1983, **56**: 245-248

[39] Robinson BW, Wilson DS. Optimal foraging, specialization, and a solution to Liem's paradox. *The American Naturalist*, 1998, **151**: 223-235

作者简介 隋昊志,女,1991 年生,博士研究生. 主要从事鱼类摄食生态研究. E-mail: 18306421312@163.com

责任编辑 肖 红

隋昊志, 韩东燕, 薛莹, 等. 基于碳、氮稳定同位素研究胶州湾普氏栉虾虎鱼的摄食习性. 应用生态学报, 2017, **28**(11): 3789-3796

Sui H-Z, Han D-Y, Xue Y, *et al*. Feeding habits of *Rhinogobiu spflaumi* in Jiaozhou Bay, China based on carbon and nitrogen stable isotope analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(11): 3789-3796 (in Chinese)