

陆亚楠, 张瑞, 张虎, 等. 应用稳定同位素技术研究江苏近海食物网营养结构的季节性变化[J]. 海洋学报, 2022, 44(2): 1–10, doi:10.12284/hyxb2022040

Lu Ya'nan, Zhang Rui, Zhang Hu, et al. Seasonal variation in the trophic structure of food webs in coastal waters of Jiangsu Province based on stable isotope techniques[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(2): 1–10, doi:10.12284/hyxb2022040

应用稳定同位素技术研究江苏近海食物网 营养结构的季节性变化

陆亚楠¹, 张瑞¹, 张虎², 张硕^{1,3*}, 高世科^{1*}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007; 3. 长江口水生生物资源监测与保护联合实验室, 上海 200922)

摘要: 本研究基于稳定同位素技术对江苏近海春、夏、秋季采集的不同生物类群(鱼类、甲壳类、头足类和底栖动物等)进行稳定同位素的分析,利用 SIBER 模型计算不同季节消费者的营养生态位,并计算出 6 种营养结构的量化指标。结果表明,3 个季节的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值均差异不显著 ($p>0.05$)。春季 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-24.47\text{‰}\sim-14.50\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $6.86\text{‰}\sim(14.98\pm 0.49)\text{‰}$, 营养级范围为 $1.52\sim(4.28\pm 0.17)$; 夏季 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $-19.86\text{‰}\sim-14.44\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $5.79\text{‰}\sim(12.54\pm 3.50)\text{‰}$, 营养级范围为 $1.25\sim 3.52$; 秋季 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $(-22.17\pm 4.90)\text{‰}\sim(-14.21\pm 0.36)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $6.30\text{‰}\sim(14.60\pm 0.51)\text{‰}$, 营养级范围 $1.34\sim(4.15\pm 0.14)$ 。各个季节的食物网结构稳定,一些消费者的营养生态位出现不同程度的重叠现象。其中,春季的食物来源较为广泛,生物营养层次和群落多样性更高;夏季消费者的食物来源更加丰富,但生态位分化程度较低;秋季的食物网结构比较单一,但营养生态位分布较广。本研究结果为进一步评估江苏近海渔业生态系统的营养结构奠定了基础,也为江苏近海渔业环境保护和渔业资源的恢复与管理提供一定科学依据和参考基础。

关键词: 稳定同位素; 江苏近海; 营养结构; 生态位; 季节性变化

中图分类号: P734.2²4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)02-0001-10

1 引言

理解水生生态系统中的食物网结构及生物群落构成是生态学领域的一个重要方向^[1-2]。研究食物网中结构、功能及营养相互作用,有助于了解生态系统生物多样性、稳定性和功能^[3-5]。几十年来, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素技术多被用于分析海域生态环境中的能量流动和物质交替变化,在构建海域食物网、确定营养生态位和鱼类食性特征方面取得了重大进展,也为研究海洋生物营养结构和动力学方面提供了重

要见解^[6-7]。稳定同位素比率($\delta^{13}\text{C}/\delta^{15}\text{N}$)可以代表生物个体在食物网中的所有营养途径^[8],而同位素生态位反映了消费者-资源之间的营养相互作用,可用于反映生物营养结构的时空分布特征^[9-10]。此外,基于稳定同位素值量化的各项生态指标不仅能够用于描述物种和群落水平上的生态位宽度和重叠程度,还能评估不同因素对物种生态位宽度的影响,从而表征食物网的多样性和复杂性^[11-13]。

江苏近海的渔业资源丰富,是我国重要的渔场。近年来,随着沿海商业渔业的发展,江苏近海局部地

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-10-24。

基金项目: 江苏海州湾国家海洋牧场示范项目(D-8005-18-0188); 上海市科委地方能力建设项目(21010502200)。

作者简介: 陆亚楠(2000—),女,江苏省南通市人,主要研究方向为近海生态环境修复。E-mail: 1549577486@qq.com

* 通信作者: 张硕(1976—),男,博士,教授,主要研究方向为近海生态环境修复。E-mail: s-zhang@shou.edu.cn; 高世科(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为近海生态连通性。E-mail: Gshike@163.com

区海域污染状况愈发严重^[14]。不断发展的渔业装备技术和生产水平加剧了渔业过度捕捞,使得鱼类种群数量持续下跌,自然生境遭到破坏,对海洋生物的生存环境造成了严重威胁^[15-16]。因此,急需开展对该地区主要鱼类群落营养结构时空变化规律的调查,以便及时制定相应政策和管理措施。

本文利用稳定同位素技术研究了江苏近海春、夏、秋3季主要海洋生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和营养级特征,对比分析3个季节食物网的营养结构和变动规律,结合食物网量化指标,从物种和群落水平上反映渔业资源现状及季节变动情况,以期为进一步评估江苏近海渔业生态系统的营养结构变化奠定基础,为保护沿海海域生态系统以及渔业资源的养护和管理提供一定科学依据和参考基础。

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究分别于2017年5月7-24日(春季)、8月3-23日(夏季)和10月4-19日(秋季)在江苏近岸海域(31.794°~35.583°N, 119.301°~122.243°E)通过拖网渔船进行样品采集。3个季节分别设置站点23个、17个和30个(图1)。样品的采集和处理方法遵照《海洋监测规范第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6-2007)^[17],浮游动物样品用I型浮游生物网定点垂直拖网采集,垂直拖网平均深度为10 m,在海水

中清养1~2 h排空胃含物,然后置于1 L聚乙烯瓶中。其他生物均采用单船有翼单囊底拖网(规格40 m×94 m或40 m×49.3 m),平均拖速为3.0 kn,每网拖行近1 h。将生物样品鉴定到种(未能鉴定到种的做好挂牌登记),测量体长、体重,分类冷冻保存后带回实验室。

2.2 稳定同位素分析样品预处理

浮游动物用少量蒸馏水反复清洗,去除混杂在其中的杂质,然后置于清洁培养皿中挑选。其他生物每个物种选取3个大小相近的个体(对于采样数量少于3个的种类,则选取全部个体),鱼类取第一背鳍下方肌肉、虾类取腹部肌肉、蟹类取第一鳌足肌肉、头足类取腕部肌肉、腹足类去壳取肌肉、双壳类取闭壳肌、中国毛虾(*Acetes chinensis*)因个体小,选取10尾相近个体混合、马尾藻(*Sargassum*)取其叶片。所有样品用去离子水洗净后放入离心管,-20℃冷冻保存。后续分析前,用冷冻干燥机(Christ 1-4a)干燥32 h,并用混合型球磨机(Retsch MM440)研磨成粉。

研究发现,对脂肪含量不同的组织样品进行 $\delta^{13}\text{C}$ 分析时,可能产生较大偏差^[18]。因此,本研究预先使用三氯甲烷和甲醇(体积比为2:1)对肌肉组织样品进行脱脂处理,然后使用锡杯包被1.0 mg送入稳定同位素质谱仪(IsoPrime 100, Isoprime Corporation, Cheadle, UK)进行分析,稳定同位素测定在上海海洋大学摄食生态学实验室进行。

2.3 稳定同位素分析

碳、氮稳定同位素值分别用国际通用的标准物质VPDB和大气氮作为参考标准。结果分别用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 表示,其计算公式为

$$\delta X = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10^3, \quad (1)$$

式中, X 为 ^{13}C 值或者 ^{15}N 值; R 为 ^{13}C 值和 ^{12}C 值或者 ^{15}N 值和 ^{14}N 值的比值; R_{sample} 为样品的 R 值; R_{standard} 为标准样品的 R 值。为保证实验结果的精度和准确度,每10个样品,放入3个标准品。根据氮稳定同位素比值可以计算生物的营养级(Trophic Level, TL),公式为

$$\text{TL} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta^{15}\text{N}} + \lambda, \quad (2)$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为消费者的氮稳定同位素比值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为基线生物的氮稳定同位素比值; λ 表示基线生物所处的营养级,本文选择春季采集沟纹鬚螺(*Phalium strigatum*)作为基线生物,其营养级定为2,原因是沟纹鬚螺的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与毛蚶(*Scapharca subcrenata*)、紫贻贝(*Mytilus edulis*)比较接近^[19-20]; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为沟纹鬚螺的氮稳定同位素比值的平均值; $\Delta^{15}\text{N}$ 表示营养级之间氮稳定同位素的富集度,这里取2.5‰

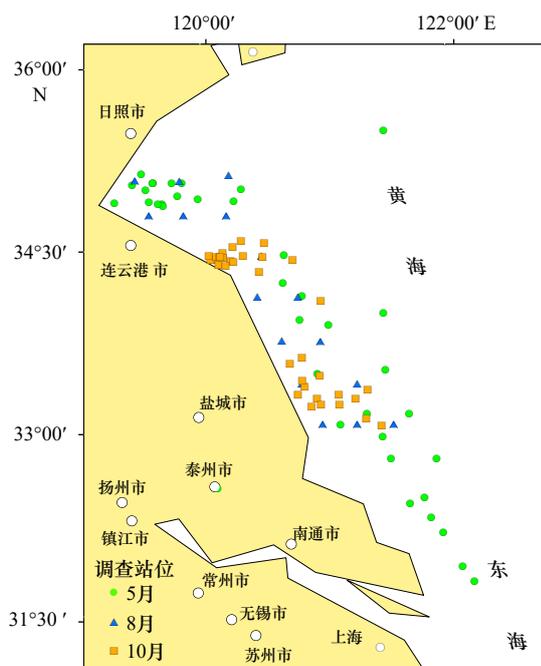


图1 江苏近海采样点位置

Fig. 1 Locations of sampling sites in the coastal waters of Jiangsu Province

和 3.4‰ 的平均值,其中 2.5‰ 是蔡德陵等^[19]通过喂养实验得到的鳀鱼(*Engraulis japonicus*)与饵料间的氮稳定同位素富集值,而 3.4‰ 出自 Post^[21]的研究结果。

数据分析及制图采用 Origin 2020 和 R 语言中的 SIBER 程序包。根据 Layman 等^[11]提出的碳氮稳定同位素二维坐标系代表群落营养结构的方法,选取 NR、CR、TA、CD、NND、SDNND 6 种参数来反映生物群落营养结构的季节变化情况。其中 NR 为食物网中 $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围,表示消费者营养层次;CR 为 $\delta^{13}\text{C}$ 的最大差值,表示食物来源的多样性;TA 为食物网营养结构总面积,代表生物多样性水平;CD 为平均离心距离,代表群落整体的多样性水平;NND 为平均最邻近距离;SDNND 为平均最邻近距离标准差,反映营养冗余程度。考虑到 TA 可能因个别数据产生较大偏差,使用贝叶斯标准椭圆面积(SEA)可以减少样本误差,若样本数小于 30,则比较标准椭圆校正后的面积(SEA_c)^[22-23]。

2.4 数据处理

通过 ArcGIS 10.3 软件绘制调查海域站位图;根据聚类分析结果,运用 OriginPro 2020 软件构建连续营养谱;数据处理和表格制作通过 EXCEL 2020 完成;利用 SPSS 25.0 软件进行显著性 t 检验。

3 结果

3.1 春、夏、秋 3 季生物的碳、氮稳定同位素特征

春季共采集到生物样品 31 种,其中鱼类 16 种、甲壳类 5 种、头足类 3 种、底栖动物 6 种、浮游生物 1 种(附表 A1)。其 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -24.47‰ (马尾藻)~ -14.50‰ (黄鲷 *Dasyatis bennettii*); $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 6.86‰ (马尾藻)~ $(14.98\pm 0.49)\text{‰}$ (中国花鲈 *Lateolabrax maculatus*)(附表 A1,图 2)。夏季共采集到生物样品 32 种,其中鱼类 17 种,甲壳类 7 种,头足类 3 种,腹足类 2 种,双壳类 3 种。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 -19.86‰ (江珧 *Atrina pectinata*)~ -14.44‰ (脊尾白虾 *Exopalaemon carinicauda*); $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 5.79‰ (江珧)~ $(12.54\pm 3.50)\text{‰}$ (赤鼻棱鳀 *Thryssa kammalensis*)。秋季共采集到生物样品 24 种,其中鱼类 11 种,甲壳类 6 种,头足类 3 种,腹足类 1 种,双壳类 2 种以及浮游动物 1 种。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $(-22.17\pm 4.90)\text{‰}$ (鲮 *Mugil cephalus*)~ $(-14.21\pm 0.36)\text{‰}$ (短吻舌鳎 *Cynoglossus abbreviatus*); $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 6.30‰ (浮游动物)~ $(14.60\pm 0.51)\text{‰}$ (中国花鲈)。总体上,鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值的跨度最广,最低的是鲮,为 $(-22.17\pm 4.90)\text{‰}$,最高的是短吻舌鳎,为 $(-14.21\pm 0.36)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $(8.43\pm 0.38)\text{‰}$ (棘头梅童鱼 *Collichthys lucidus*)~ $(14.79\pm$

$0.19)\text{‰}$ (中国花鲈)。

3.2 江苏近海营养结构的季节性变化特征

配对样本 t 检验的结果表明(表 1),2017 年春、夏、秋 3 个季节江苏近海海洋生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均没有显著性差异($p>0.05$)。

由于鲮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其他消费者存在明显差别,对营养结构影响过大,为了更准确地反映群落营养结构的季节变化,本研究选择除鲮和浮游动物外的所有消费者进行空间生态位的计算,结果见图 3,参数见表 2。不同类群对生物资源利用情况不同。春季,甲壳类对生态空间利用率较其他类群高,而底栖动物由于整体营养级较低,与其他类群生态空间重叠不明显;夏季,生物的生态空间利用情况较春季一致,但重叠程度不如春季明显;秋季,不同类群生物的生态空间利用率

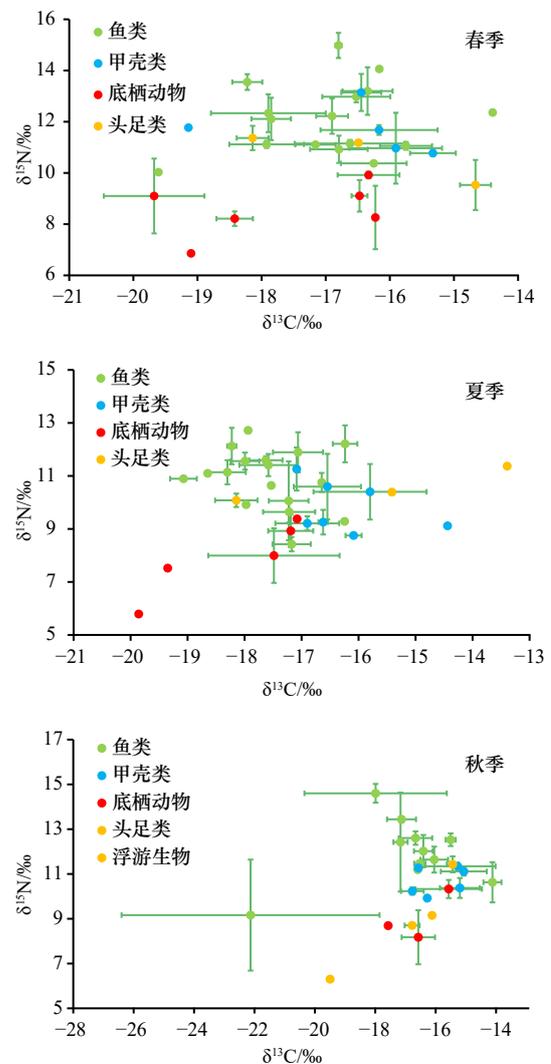


图 2 春、夏、秋 3 季江苏近海生物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的双坐标图

Fig. 2 The biplot of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ of organisms from the coastal waters of Jiangsu Province in spring, summer and autumn

较小,头足类、甲壳类和底栖动物的生态空间重叠程度较为明显。此外,不同季节相同类群生物对生态空间利用情况也不同。总体上,3个季节鱼类的生态空间利用率最高,最低为底栖动物。

通过 R 语言对春、夏、秋 3 个季节营养结构的 6 种生态位指标进行计算,结果见图 4。结果显示,春季的营养级长度最长,其次为夏季、秋季;在生态位多样化程度和生物对生态空间利用方面由大到小依次为春季、夏季、秋季;平均营养级多样性和营养冗余程度也均呈现出春季最高,秋季最低。

3.3 春、夏、秋 3 季江苏近海生物的营养级特征

春季江苏近海海洋生物的营养级范围为 1.52(江珧)~4.28±0.17(中国花鲈),营养层次长度为 4 级(图 5)。其中,底栖动物属于第 1~2 营养级,营养级最高的是脉红螺(*Ostrea denselamellosa*)(2.56±0.04);头足类属于第 2 营养级,火枪乌贼(*Loligo beka*)的营养级达到 3.05±0.16;甲壳类属于第 2~3 营养级,口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)营养级最高,为 3.66±0.25,其次是中国毛虾(3.19)和日本蟳(*Charybdis japonica*, 3.16±0.06);鱼类属于第 4 营养级,营养级范围为 2.6(日本

鳗)~4.29±0.17(中国花鲈)。而夏季的营养层次长度较短,为 3 级,营养级范围为 1.25(江珧)~3.52(长蛇鲻, *Saurida elongata*)。其中,多数底栖动物属于第 2 营养级,仅有毛蚶和江珧为 1.84 和 1.25。甲壳类中,仅有鹰爪虾(*Trachypenaeus curvirostris*)属于第 3 营养级(3.11±0.28),其余均为第 2 营养级。鱼类属于 2~3 营养级,范围从 2.06±0.10(棘头梅童鱼)~3.52(长蛇鲻)。秋季的营养层次长度亦为 4 级,营养级范围是 1.34(浮游动物)~4.15±0.14(中国花鲈)。其中,浮游动物属于第 1 营养级,多数底栖动物、头足类和甲壳类属于第 2~3 营养级,只有毛蚶为 1.97±0.41。鱼类中仅有中国花鲈营养级最高,为 4.15±0.14,其余鱼类均属于 2~3 营养级。

4 讨论

4.1 春、夏、秋 3 季江苏近海生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 特征

本研究基于渔业资源调查采集生物样品,应用稳定同位素技术构建江苏近海的食物网营养结构。消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以指示其有机质和能量来源。本研究不同季节食物网中,生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值没有明显差异($p>0.05$),这与高世科等^[24]的研究中春季吕泗渔场主要生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一致,说明各季节的有机质来源可能差异不大。春、秋季鲻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度较大,远低于其他消费者,说明其在食物网中可能存在个体特殊化现象^[25],即在食物网中,同一物种的不同个体始终对不同的生产力来源进行摄取。生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值可以指示其营养级,在江苏近海食物网中,不同季节生物的 $\delta^{15}\text{N}$

表 1 春、夏、秋 3 季生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异性分析

Table 1 Difference analysis in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values for organisms in spring, summer and autumn

	平均数	检验值 t	自由度	p
$\delta^{13}\text{C}$	0.533	2.461	22	0.509
$\delta^{15}\text{N}$	0.287	1.052	22	0.637

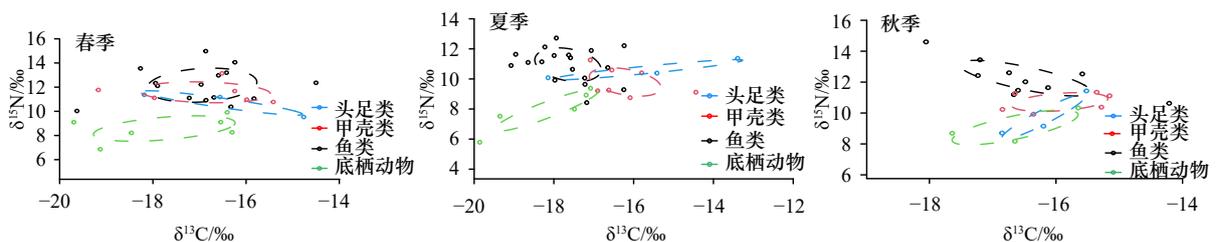


图 3 春、夏、秋 3 季江苏近海生物营养框架

Fig. 3 Stable isotope bio-plotting of the trophic structure in the coastal waters of Jiangsu Province in spring, summer and autumn

表 2 春、夏、秋 3 季生物的 TA、SEA 和 SEA_C 值

Table 2 TA, SEA and SEA_C for organisms in spring, summer and autumn

	春季				夏季				秋季			
	鱼类	甲壳类	底栖动物	头足类	鱼类	甲壳类	底栖动物	头足类	鱼类	甲壳类	底栖动物	头足类
TA	4.53	13.93	6.34	1.17	8.26	3.28	2.70	1.03	4.83	1.79	1.33	0.60
SEA	3.77	5.15	4.49	2.13	2.80	2.45	2.35	1.86	2.48	1.35	2.41	1.08
SEA _C	4.71	5.55	5.62	4.26	2.98	2.94	3.13	3.72	2.79	1.69	4.81	2.16

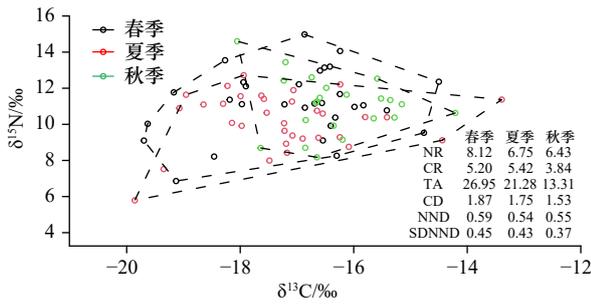


图4 春、夏、秋季江苏近海生物群落稳定同位素参数值

Fig. 4 Community-wide metrics based on stable isotopic ratios for organisms from coastal waters of Jiangsu Province in spring, summer and autumn

值也没有明显差异 ($p>0.05$), 说明该食物网营养结构稳定, 各季节的营养层次基本一致。此外, 本研究各个季节采样站点分布不均匀。这种空间差异性可能会影响结果, 可能原因是不同区域受人类活动影响和水体富营养化程度不同^[26]。所以在今后的采样设计中应该尽可能选择相同区域的生物样品进行对比分析。

4.2 江苏近海食物网营养结构的季节性变化

3个季节中, 春季鱼类与甲壳类、头足类的生态位重叠程度较高, 说明这些消费者可能在生活环境和食物溯源上存在一定相似性(图3)。江苏近海拥有多个重要的过路渔场(如吕泗渔场、海州湾渔场等), 是多种经济洄游性鱼类的必经之地^[27-28]。此外, 春季饵料缺乏, 鱼类需要大量摄食以保证生存和繁殖^[29]。在一定程度上, 这可能是导致春季鱼类食性较为广泛的原因。春季底栖动物的 $\delta^{13}C$ 值跨度范围较大, 亦可说明春季的食物来源分布广泛。并且, 秋季底栖动物的生态位与头足类部分重叠, 而春、夏季不与任何类群重叠(图3)。这不仅与种类、生物量有关, 还与生物体大小相关^[30]。研究表明, 随着生物体的增长, $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 会不断富集, 而摄食器官大小和饵料选择的变化也会引起同位素的季节性变化^[30-31]。本研究还显示, 夏季鱼类的 TA 值为 8.26, SEA 为 2.80, 说明夏季鱼类种类多样性较高, 但生态位分化程度低, 种间竞争不激烈, 同一现象还出现于春季的甲壳类(TA: 13.93, SEA: 5.15)(表2)。这种生态位的空间差异可

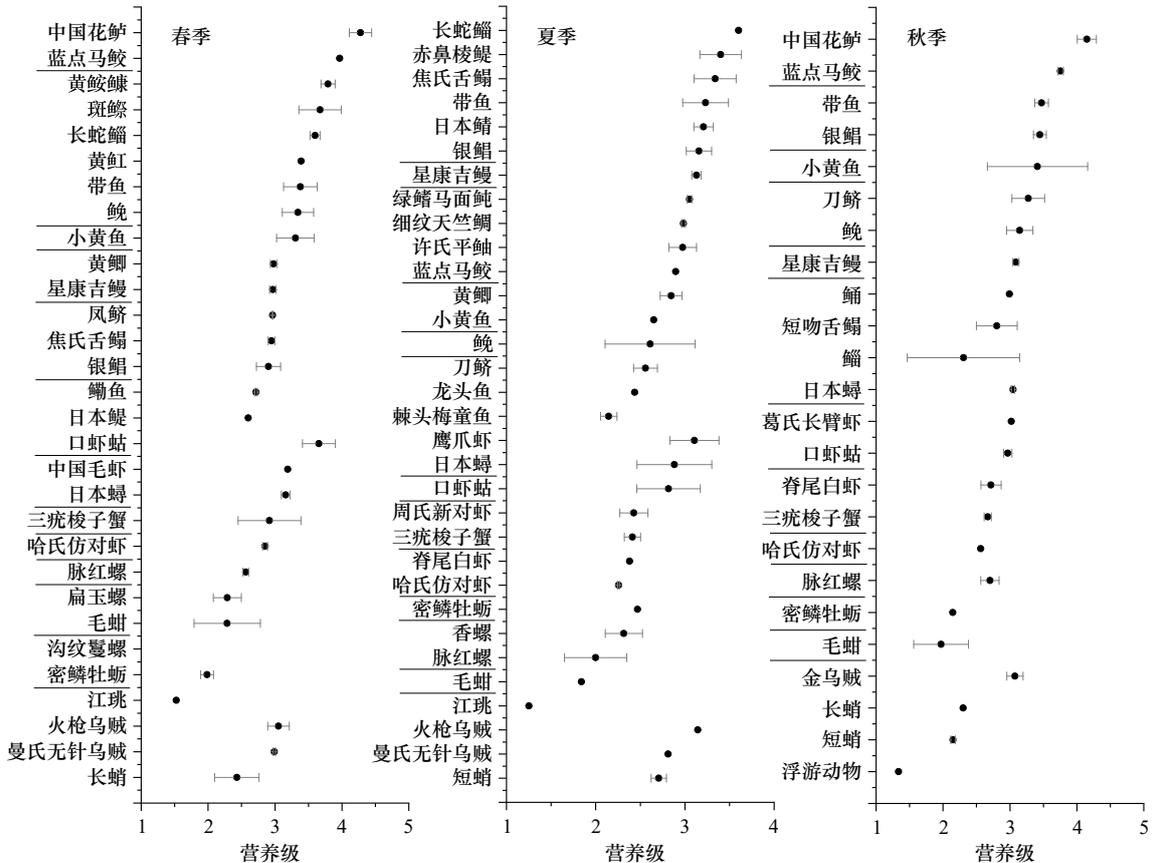


图5 春、夏、秋3季江苏近海生物营养级对比

Fig. 5 The comparison of trophic level of organisms from coastal waters of Jiangsu Province in spring, summer and autumn

—代表3个季节中共同出现的物种

—represents the species occurred in three seasons

能是内外因素共同导致,比如食性偏好,亦或是区域间复杂的环境因素^[32-33],因此还需要深入研究。

位于营养结构边界的生物,对于维系该食物网的稳定具有重要意义^[20]。本研究中,处于营养结构端点位置的生物包括顶级捕食者(如中国花鲈、鳊(*Müchthys müüü*)),浮游食性的消费者(如赤鼻棱鳃、中国毛虾)和底栖消费者(如黄鲇、脊尾白虾等),与纪炜炜等^[34]的研究结果一致。江苏近海3个季节生物群落的稳定同位素参数存在差异。春季NR和TA值最高,说明春季消费者的营养层次和群落多样性更高。当饵料充足时,摄食生物对特定食物会有选择性,食源多样性CR相应就会减少^[34]。夏季CR值高于春秋两季,说明夏季消费者的食物来源更加丰富,食源多样性更高。春季和夏季的CD值差别很小,说明食物网营养多样性在春夏季比较稳定。秋季NR、CR、TA值最低,说明秋季食物网结构单一,群落多样性水平最低。在海洋生物群落中,饵料生物数量的变动引起消费者的竞争关系发生改变。若饵料生物数量减少,消费者对于食物的激烈竞争导致生态位重叠,群落营养冗余程度增加^[20]。本研究中,3个季节NND值十分接近,说明各季节营养冗余度差别不大。SDNND值在秋季略低,说明秋季食物网中营养生态位分布较广。鉴于本研究只从分析季节性特征来反映江苏近海海域的营养结构特征,将来应该从方法比较以及时间尺度上来进一步阐明该海域的营养结构变化。生

物营养级的差异取决于多个因素,比如生物体规格大小、 $\Delta^{15}\text{N}$ 和基线生物的选取^[34-35]。本研究3个季节同种生物的营养级差异均不显著($p>0.05$)(图5)。除了银鲳(*Pampus argenteus*)、星康吉鳗(*Conger myriaster*)和密鳞牡蛎(*Ostrea denselamellosa*),同种生物的营养级最低值均出现在夏季,这与夏季捕获的生物规格较小有关(附表A1)。此外,为了统一化比较,本研究3个季节的所有个体都被视为具有相同的基线生物,但基线生物也存在季节性差异。如季节性水温变化会影响浮游植物的光合作用及其对氮元素的吸收和分馏,进而影响作为基线生物的浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[35]。因此,在估算时空尺度上消费者的营养状况时,应考虑不同或多个基线的选择。

5 结论

本文利用稳定同位素技术研究江苏近海不同季节主要海洋生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值特征。结果表明,各季节的食物网结构稳定,一些消费者的营养生态位出现不同程度的重叠现象。其中,春季的食物来源较为广泛,生物营养层次和群落多样性更高;夏季消费者的食物来源更加丰富,但生态位分化程度较低;秋季的食物网结构比较单一,但营养生态位分布较广。本研究结果为进一步评估江苏近海渔业生态系统的营养结构奠定基础,也为江苏近海渔业环境保护和渔业资源的恢复与管理提供一定科学依据和参考基础。

参考文献:

- [1] Hairston N G, Smith F E, Slobodkin L B. Community structure, population control, and competition[J]. *The American Naturalist*, 1960, 94(879): 421-425.
- [2] Duffy J E, Cardinale B J, France K E, et al. The functional role of biodiversity in ecosystems: incorporating trophic complexity[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(6): 522-538.
- [3] Thompson R M, Brose U, Dunne J A, et al. Food webs: reconciling the structure and function of biodiversity[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, 27(12): 689-697.
- [4] Christianen M J A, Middelburg J J, Holthuijsen S J, et al. Benthic primary producers are key to sustain the Wadden Sea food web: stable carbon isotope analysis at landscape scale[J]. *Ecology*, 2017, 98(6): 1498-1512.
- [5] Yen J D L, Cabral R B, Cantor M, et al. Linking structure and function in food webs: maximization of different ecological functions generates distinct food web structures[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2016, 85(2): 537-547.
- [6] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18: 293-320.
- [7] Burdon F J, McIntosh A R, Harding J S. Mechanisms of trophic niche compression: evidence from landscape disturbance[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2020, 89(3): 730-744.
- [8] Dauby P. The stable carbon isotope ratios in benthic food webs of the gulf of Calvi, Corsica[J]. *Continental Shelf Research*, 1989, 9(2): 181-195.
- [9] Newsome S D, del Rio C M, Bearhop S, et al. A niche for isotopic ecology[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(8): 429-436.
- [10] Flaherty E A, Ben-David M. Overlap and partitioning of the ecological and isotopic niches[J]. *Oikos*, 2010, 119(9): 1409-1416.
- [11] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 42-48.
- [12] Layman C A, Quattrochi J P, Peyer C M, et al. Niche width collapse in a resilient top predator following ecosystem fragmentation[J].

- Ecology Letters*, 2007, 10(10): 937–944.
- [13] Layman C A, Araujo M S, Boucek R, et al. Applying stable isotopes to examine food-web structure: an overview of analytical tools[J]. *Biological Reviews*, 2012, 87(3): 545–562.
- [14] 李云凯, 张瑞, 张硕, 等. 基于碳氮同位素技术研究重金属在春季江苏近海食物网中的累积[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2415–2425.
- Li Yunkai, Zhang Rui, Zhang Shuo, et al. Assessment of heavy metal bioaccumulation in food web of the coastal waters of Jiangsu Province, China, based on stable isotope values ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2415–2425.
- [15] 刘海林, 仲霞铭, 汤建华, 等. 江苏近海鱼类群落组成和多样性的季节变化[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(1): 9–20.
- Liu Hailin, Zhong Xiaming, Tang Jianhua, et al. Seasonal changes of fish community composition and diversity in the offshore waters of Jiangsu[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(1): 9–20.
- [16] 许星鸿, 姚海洋, 孟霄, 等. 连云港附近海域海水、表层沉积物和水产品的重金属污染及生态风险评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(5): 110–116.
- Xu Xinghong, Yao Haiyang, Meng Xiao, et al. Evaluation on heavy metals pollution and potential ecological risk in seawater, surface sediment and marine organisms in lianyungang sea areas[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(5): 110–116.
- [17] 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 12763.6–2007, Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [18] Ricca M A, Miles A K, Anthony R G, et al. Effect of lipid extraction on analyses of stable carbon and stable nitrogen isotopes in coastal organisms of the Aleutian archipelago[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2007, 85(1): 40–48.
- [19] 蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 等. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立: 来自碳氮稳定同位素方法的结果[J]. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 48(6): 531–539.
- Cai Deling, Li Hongyan, Tang Qisheng, et al. Establishment of trophic continuum in the food web of the Yellow Sea and East China Sea ecosystem: Insight from carbon and nitrogen stable isotopes[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 48(6): 531–539.
- [20] 谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2292–2298.
- Xie Bin, Li Yunkai, Zhang Hu, et al. Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2292–2298.
- [21] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [22] Jackson A L, Inger R, Parnell A C, et al. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-stable isotope bayesian ellipses in R[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2011, 80(3): 595–602.
- [23] De Smet B, Fournier J, De Troch M, et al. Integrating ecosystem engineering and food web ecology: testing the effect of biogenic reefs on the food web of a soft-bottom intertidal area[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0140857.
- [24] 高世科, 孙文, 张硕. 基于稳定同位素方法的吕泗渔场近岸海域主要生物潜在碳源及营养级分析[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 71–80.
- Gao Shike, Sun Wen, Zhang Shuo. The potential carbon source and trophic level analysis of main organisms in coastal water of Lüsü fishing ground, based on carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 71–80.
- [25] Matthews B, Mazumder A. A critical evaluation of intrapopulation variation of $\delta^{13}\text{C}$ and isotopic evidence of individual specialization[J]. *Oecologia*, 2004, 140(2): 361–371.
- [26] 刘春云, 姜少玉, 宋博, 等. 烟台养马岛潮间带大型底栖动物食物网结构特征[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(3): 467–476.
- Liu Chunyun, Jiang Shaoyu, Song Bo, et al. Food web structure of macrobenthos in the intertidal zone of Yangma Island, Yantai, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(3): 467–476.
- [27] 徐兆礼, 陈佳杰. 小黄鱼洄游路线分析[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(6): 931–940.
- Xu Zhaoli, Chen Jiajie. Analysis on migratory routine of *Larimichthys polyactis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(6): 931–940.
- [28] 仲霞铭, 张虎, 汤建华, 等. 江苏近岸海域小黄鱼时空分布特征[J]. *水产学报*, 2011, 35(2): 238–246.
- Zhong Xiaming, Zhang Hu, Tang Jianhua, et al. Temporal and spatial distribution of *Larimichthys polyactis* Bleeker resources in offshore areas of Jiangsu Province[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(2): 238–246.
- [29] Madurell T, Fanelli E, Cartes J E. Isotopic composition of carbon and nitrogen of suprabenthic fauna in the NW Balearic Islands (western Mediterranean)[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 71(3/4): 336–345.
- [30] Power M, Power G, Caron F, et al. Growth and dietary niche in *Salvelinus Alpinus* and *Salvelinus Fontinalis* as revealed by stable isotope analysis[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2002, 64(1/3): 75–85.
- [31] Wilson R M, Chanton J, Lewis G, et al. Isotopic variation ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{34}\text{S}$) with body size in post-larval estuarine consumers[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 83(3): 307–312.
- [32] Rothhaupt K O, Hanselmann A J, Johannes E. Niche differentiation between sympatric alien aquatic crustaceans: An isotopic

- evidence[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2014, 15(5): 453–463.
- [33] Cornelissen I J M, Vijverberg J, Van Den Beld A M, et al. Heterogeneity in food-web interactions of fish in the Mwanza Gulf, Lake Victoria: a quantitative stable isotope study[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 805(1): 113–130.
- [34] 纪炜炜, 姜亚洲, 阮雯, 等. 基于稳定同位素方法分析东海中北部及黄海南部春季主要鱼类的食性特征[J]. *海洋渔业*, 2013, 35(4): 415–422.
- Ji Weiwei, Jiang Yazhou, Ruan Wen, et al. Stable isotope analysis on the feeding character of representative fishes during spring in central and northern East China Sea and south Yellow Sea[J]. *Marine Fisheries*, 2013, 35(4): 415–422.
- [35] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 8–20.
- Xu Jun, Zhang Min, Xie Ping. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 8–20.

附录

表 A1 春、夏、秋 3 季江苏近海主要生物数量、体长及碳、氮稳定同位素
Table A1 The number, mean length and the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of organisms in the coastal waters of Jiangsu Province in spring, summer, autumn

学名	春季				夏季				秋季			
	数量	体长/cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	数量	体长/cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	数量	体长/cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
鱼类												
星康吉鳗	3	31.37~34.63	-17.97±0.57	11.12±0.14	2	—	-17.63±0.29	11.59±0.15	3	—	-16.6±0.19	11.47±0.13
银鲱	3	18.03~23.37	-16.86±0.44	10.92±0.53	3	10~13	-17.58±0.51	11.41±0.42	3	13.6~14.2	-15.58±0.16	12.53±0.28
带鱼	3	35.36~37.24	-17.94±0.88	12.33±0.74	23	45~74	-17.06±0.44	11.89±0.76	3	21.7~25.3	-16.74±0.55	12.6±0.3
中国花鲈	3	—	-16.87±0.05	14.98±0.49	—	—	—	—	3	36.7~51.0	-18.05±2.34	14.6±0.42
小黄鱼	3	16.4~17.4	-17.9±0.3	12.11±0.83	1	12.5	-17.00	9.92	3	11.6~14.5	-17.23±0.23	12.42±2.21
鲩	2	25.55~41.05	-16.97±0.25	12.22±0.69	4	18.9~42.0	-17.23±0.35	10.06±1.49	3	30.5~33.3	-16.13±0.45	11.64±0.58
黄鲫	2	14.33~16.27	-16.69±0.85	11.15±0.14	3	15.3~15.7	-16.65±0.04	10.75±0.36	—	—	—	—
焦氏舌鳎	3	18.18~19.42	-15.83±0.4	11.06±0.15	3	22.5~28.0	-16.24±0.22	12.21±0.7	—	—	—	—
短吻舌鳎	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	-14.21±0.3	10.63±0.9
长蛇鲻	3	33.1~36.5	-16.59±0.52	12.98±0.22	1	29.5	-17.94	12.72	—	—	—	—
蓝点马鲛	1	—	-16.24	14.06	1	21.5	-17.53	10.64	3	43.0~43.1	-17.2±0.48	13.44±0.12
鳎鱼	2	17.63~21.37	-16.33±0.5	10.38±0.05	—	—	—	—	—	—	—	—
斑鲈	3	18.94~19.66	-16.42±0.38	13.2±0.93	—	—	—	—	—	—	—	—
刀鲚	—	—	—	—	3	22.2~22.7	-17.22±0.46	9.64±0.39	2	21.0~22.8	-16.48±0.31	12.02±0.72
日本鲭	—	—	—	—	4	21.7~23.9	-17.99±0.25	11.56±0.32	—	—	—	—
细纹天竺鲷	—	—	—	—	3	—	-19.07±0.23	10.89±0.06	—	—	—	—
绿鳍马面鲀	—	—	—	—	2	25.0~28.4	-18.65±0	11.1±0.07	—	—	—	—
棘头梅童鱼	—	—	—	—	2	8.2~9.0	-17.18±0.34	8.43±0.27	—	—	—	—
鲷	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	-16.67	11.19
鲷	—	—	—	—	—	—	—	—	4	30.4~34.0	-22.17±4.24	9.16±2.48
许氏平鲉	—	—	—	—	3	—	-18.3±0.32	11.14±0.46	—	—	—	—
龙头鱼	—	—	—	—	1	—	-16.25±0	9.29±0	—	—	—	—
赤鼻棱鳀	—	—	—	—	2	—	-18.22±0.08	12.13±0.69	—	—	—	—

续表 A1

学名	春季				夏季				秋季			
	数量	体长/cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	数量	体长/cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	数量	体长/cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
日本鳀	1	-	-19.63	10.03	-	-	-	-	-	-	-	-
凤鲚	2	15~19	-17.22±0.31	11.11	-	-	-	-	-	-	-	-
黄鮟鱇	3	-	-18.27±0.23	13.55±0.31	-	-	-	-	-	-	-	-
黄鲢	1	40	-14.5	12.36	-	-	-	-	-	-	-	-
甲壳类												
口虾蛄	3	14.07~14.73	-16.52±0.31	13.14±0.72	17	8.3~13.6	-15.8±0.99	10.4±1.05	3	12.0~13.2	-15.15±0.76	11.11±0.18
哈氏仿对虾	3	7.4~8.8	-15.42±0.35	10.77±0.11	2	-	-16.09±0.14	8.75±0.03	1	-	-16.36	9.92
中国毛虾	1	-	-19.17	11.77	-	-	-	-	-	-	-	-
脊尾白虾	-	-	-	-	1	-	-14.44	9.12	3	-	-15.28±0.66	10.38±0.45
周氏新对虾	-	-	-	-	2	10.8~13.4	-16.62±0.08	9.26±0.47	-	-	-	-
鹰爪虾	-	-	-	-	3	-	-17.09±0.02	11.26±0.81	-	-	-	-
葛氏长臂虾	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-16.65	11.27
日本蛄	3	6.66~7.34	-16.24±0.9	11.68±0.19	3	7.58~8.81	-16.55±0.59	10.6±1.24	3	8.00~8.93	-15.36±1.25	11.34±0.07
三疣梭子蟹	3	12.84~15.56	-15.99±0.71	10.97±1.38	3	16.63~18.15	-16.9±0.56	9.21±0.27	3	15.57~19.38	-16.85±0.37	10.23±0.16
底栖动物												
脉红螺	2	-	-16.41±0.48	9.92±0.13	3	-	-17.49±1.15	7.99±1.03	3	-	-15.65±1.09	10.33±0.41
毛蚶	3	-	-19.70±0.77	9.10±1.46	1	-	-19.35	7.52	4	-	-16.65±0.55	8.17±1.21
密鳞牡蛎	2	-	-18.46±0.28	8.22±0.29	1	-	-17.08	9.38	1	-	-17.64	8.69
江珧	1	23	-19.13	6.86	1	-	-19.86	5.79	-	-	-	-
香螺	-	-	-	-	3	-	-17.19±0.4	8.93±0.61	-	-	-	-
扁玉螺	3	-	-16.54±0.12	9.11±0.62	-	-	-	-	-	-	-	-
沟纹鬘螺	1	23	-16.3	8.26	-	-	-	-	-	-	-	-
头足类												
长蛸	3	11.33~12.27	-14.76±0.24	9.53±0.98	-	-	-	-	1	-	-16.20	9.15
火枪乌贼	2	-	-18.19±0.24	11.37±0.48	1	-	-13.39	11.37	-	-	-	-
短蛸	-	-	-	-	3	-	-18.15±0.37	10.08±0.25	3	-	-16.85±0.25	8.7±0.1
曼氏无针乌贼	2	17	-16.56±0.04	11.18±0.05	1	-	-15.42	10.39	-	-	-	-
针乌贼	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-15.52±0.19	11.43±0.36
浮游生物												
马尾藻	1	23	-24.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
浮游动物	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-19.55	6.30

注: -代表物种未在该季节出现。

Seasonal variation in the trophic structure of food webs in coastal waters of Jiangsu Province based on stable isotope techniques

Lu Ya'nan¹, Zhang Rui¹, Zhang Hu², Zhang Shuo^{1,3}, Gao Shike¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Jiangsu Marine Fisheries Research Institute, Nantong 226007, China; 3. Joint Laboratory for Monitoring and Conservation of Aquatic Living Resources in the Yangtze Estuary, Shanghai 200922, China)

Abstract: In this study, we used stable isotope technology to analyze different species (fish, crustaceans, cephalopods, benthos, etc.) collected in spring, summer and autumn in the coastal waters of Jiangsu Province. We used SIBER model to calculate the trophic niche of consumers, and calculated the quantitative indicators of six metrics in different seasons. The results showed that there were no significant differences in $\delta^{13}\text{C}$ and nitrogen $\delta^{15}\text{N}$ values among three seasons ($p>0.05$). In spring, the $\delta^{13}\text{C}$ values ranged from -24.47‰ to -14.50‰ , the $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 6.86‰ to $(14.98\pm 0.49)\text{‰}$, and the trophic level ranged from 1.52 to 4.28 ± 0.17 . In summer, the $\delta^{13}\text{C}$ values ranged from -19.86‰ to -14.44‰ , the $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 5.79‰ to $(12.54\pm 3.50)\text{‰}$, and the trophic level ranged from 1.25 to 3.52. In autumn, the $\delta^{13}\text{C}$ values ranged from $(-22.17\pm 4.90)\text{‰}$ to $(-14.21\pm 0.36)\text{‰}$, the $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 6.30‰ to $(14.60\pm 0.51)\text{‰}$, and the trophic level ranged from 1.34 to 4.15 ± 0.14 . The structure of food web was stable in each season, and the trophic niche of some species overlaps in different degrees. In addition, the food sources are more extensive, and the trophic level and community diversity are higher in spring, the food sources of consumers are more abundant, but the degree of trophic niche differentiation is lower in summer, while in autumn, the structure of food web is relatively simple, but the distribution of trophic niche is wider.

Key words: stable isotopes; coastal waters of Jiangsu Province; trophic structure; trophic niche; seasonal variation