

长江靖江段近岸小型渔业生物碳氮稳定同位素特征分析^{*1}

俞雅文¹ 徐东坡² 王媛² 徐跑^{1, 2*}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏无锡 214081;

2. 农业部长江下游渔业资源环境科学观测实验站, 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏无锡 214081)

【摘要】:长江靖江段是众多洄游性渔业生物的重要栖息地, 为进一步的研究和渔业资源评估提供基础生物学资料、掌握该水域食物网结构特征, 应用碳、氮稳定同位素技术测定了2016年8月在长江靖江段近岸采集的蟹类、小型鱼类、虾类等渔业生物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 并由此构建了所采集的各类渔业生物连续营养谱。结果表明:长江靖江段近岸各类生物中浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 为 -30.34% ;其次是底栖碎屑的 -30.24% ;贝类、水生植物类、鱼类和虾类居中, 它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值分别为 $-29.75\% \pm 0.75\%$ 、 $-28.98\% \pm 0.88\%$ 、 $-26.74\% \pm 2.37\%$ 、 $-26.1\% \pm 0.16\%$;蟹类最高, 为 $-25.86\% \pm 0.74\%$ 。水生植物类的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值最低, 为 $5.16\% \pm 0.85\%$;底栖碎屑其次, 为 5.58% ;贝类、鱼类、浮游动物和蟹类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均居中, $\delta^{15}\text{N}$ 均值分别为 $8.13\% \pm 0.31\%$ 、 $11.56\% \pm 1.59\%$ 、 12.02% 和 $12.51\% \pm 1.43\%$;虾类的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值最高, 为 $13.05\% \pm 0.45\%$;营养级由低到高依次为:水生植物类、底栖碎屑、贝类、浮游动物、小型鱼类、蟹类和虾类。近岸水域的小型鱼类、蟹类和虾类拥有着比较接近的食物源, 生态位重叠较为明显。

【关键词】:碳氮稳定同位素;靖江段近岸;小型渔业生物;营养级

【中图分类号】:S932 **【中图分类号】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)12-2091-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201712018

稳定同位素技术已经成为现代生态学评估生态资源、揭示生态系统中的物质循环和能量流动过程的重要手段之一^[1, 2], 便于积累基础资料, 为保护生态系统、修复生态环境及合理利用生态资源奠定理论依据。传统的生物营养级主要通过胃(肠)含物分析法进行研究, 但该方法主要反映生物被捕提前短期内的摄食情况, 不能全面地反映生物所处的营养位置及食物来源^[3-5], 只能提供消费者某一个暂时性时间段的食物来源信息^[6], 存在很大的局限性和不确定性^[1, 7]。稳定同位素法反映的是捕食者长

¹ 收稿日期:2017-07-14;修回日期:2017-09-07

基金项目:江苏省自然科学基金一面上研究项目:长江江苏段中华绒螯蟹栖息地和适合度评价(BK20131088) [Project of Jiangsu Natural Science Foundation of China(BK20131088)];农业部物种(渔业)资源保护项目-长江下游鲢鳙中华绒螯蟹增殖放流效果跟踪(22130135037) [USDA Species(Fisheries)Resource Conservation Project(22130135037)]

作者简介:俞雅文(1993~), 女, 硕士研究生, 主要从事渔业资源方面的研究. E-mail:729893606@qq.com

***通讯作者** E-mail:xup@ffrc.cn

期生命活动的摄食情况^[8, 9], 可研究生态系统食物网结构、揭示生物的有机来源、消费者的食物组成以及相互之间的营养关系^[10, 11]。通常运用碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)来确定消费者的食物来源^[3, 12]、氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)来确定研究对象的营养层次^[12, 13]。消费者的氮稳定性同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)相对其食物的 $\delta^{15}\text{N}$ 发生3%~4%的富集已经得到广泛的应用^[2, 14]。

长江靖江段水文状况受潮汐和径流的双重影响, 每日水流有2次逆水期, 且江段上、下两端均有沙洲将江面分叉, 形成了流态复杂的水域环境^[15]。该水域营养物质丰富, 多种渔业生物在此栖息、索饵、繁育, 是中华绒螯蟹及鳊的传统渔区, 地方渔业主管部门为保护渔业种质资源, 在该水域建立了中华绒螯蟹、鳊鱼国家级水产种质资源保护区^[16]。近岸水域是中华绒螯蟹的主要索饵水域, 本研究运用碳、氮稳定同位素技术分析中华绒螯蟹及其他小型渔业生物的稳定同位素特征, 以期丰富该水域基础生物学资料, 为进一步保护中华绒螯蟹栖息地开展生态摄食研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样时间及地点

样品采集于2016年8月靖江市新桥镇滨江村江边的近岸滩涂湿地的典型地点(120° 07' 33.45" E; 31° 57' 11.86" N)(图1)。

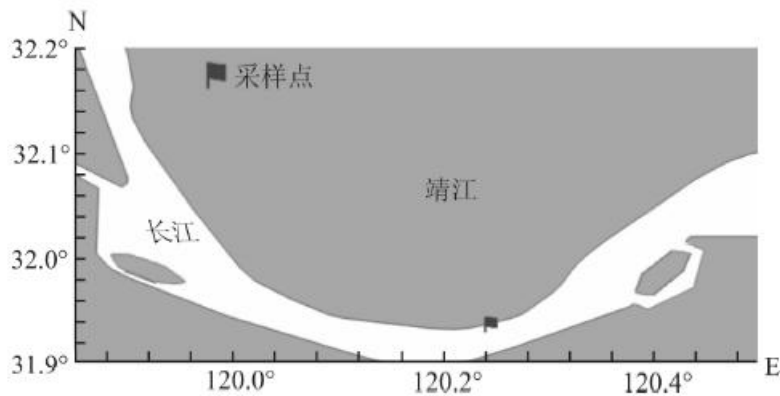


图1 长江靖江段近岸水域采样点示意图

Fig. 1 Sampling Sites in Jingjiang Nearshore Aquatic Section of the Yangtze River

1.2 样品采集

使用定制网具捕获蟹类数尾;用13号浮游动物网采集大型枝角类和桡足类;使用箱式采泥器采集底泥收集底栖碎屑;用定制网具采集小型鱼、虾类、铜锈环棱螺、三角帆蚌等;最后徒手采集水生植物。所有的样品通过低温冷藏运回实验室于-20℃冰箱中保存备用。

1.3 样品处理及稳定同位素分析

1.3.1 样品处理

蟹样品测量完生物指标后取肌肉;鱼类取背部白肌;虾类取腹部肌肉;铜锈环棱螺、三角帆蚌均去壳取其肌肉;浮游动物经聚

光灯照明人工挑拣后用预烧 (450°C, 4h) 的玻璃纤维膜 (GF/CWhatman) 通过真空泵抽滤之后和滤膜一起作为浮游动物样品, 并用 1mol/L 的稀盐酸处理以去除可能影响 $\delta^{13}\text{C}$ 的碳酸钙等碳酸盐, 酸化后的滤膜用蒸馏水冲洗去除可能残留的盐酸。底栖碎屑用蒸馏水清洗干净; 水生植物取新鲜叶片, 用蒸馏水漂洗。所有的样品放入 60°C 烘箱中烘干至恒重 (48~60h), 然后用研钵和研棒磨成均匀的粉末, 放入干燥器中保存待测。

1.3.2 稳定同位素测定

稳定同位素分析所用到的仪器由同位素比率质谱仪 (Delta Vadvantage) 与元素分析仪 (FlashEA1112HT) 耦合而成。稳定性碳 ($\delta^{13}\text{C}$) 和氮 ($\delta^{15}\text{N}$) 的标准分别为 VPDB 和 N_2 , 分析结果表示为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$:

$$\delta X(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$$

式中: X 表示测定的重同位素 (^{13}C 或 ^{15}N); R 为重同位素自然丰度与轻同位素自然丰度的比值 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)。每隔 10 个样品测定后分析一个标准物质, 并随机挑选 20% 的样品进行复测, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的重复测量的标准误差分别小于 0.2‰ 和 0.3‰。

1.3.3 营养级的确定

通常用稳定性氮同位素来评估生物营养级, 一般采用生态系统中常年存在的、食性简单的底栖贝类作为基线生物^[16]。本研究根据 Post^[14] 的建议选取螺、蚌分别作为底栖生活和中上层生活渔业生物的基准物来计算各生物类群的营养级。氮同位素富集度采用 2.5‰ 与 3.6‰ 的平均值, 其中 2.5‰ 来自于蔡德陵等^[17] 在实验室控制条件下用合成饵料培养的蛄与合成饵料的氮稳定同位素差值, 3.6‰ 为相关氮稳定同位素文章统计的平均值^[14, 18]。

将初级生产者营养级定为 1, 则营养级计算公式为^[2]:

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

式中: $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 表示消费者的氮同位素比值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 表示基准生物的氮同位素比值, $\Delta \delta^{15}\text{N}$ 为营养级传递过程中氮同位素富集度。

1.4 统计分析

采用单因子方差分析 (one-way analysis of variance, ANOVA) 检验食物网各成分之间的稳定同位素差异; 应用 Origin9.0 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 碳稳定同位素特征

本研究共分析了中华绒螯蟹及其潜在食物共 27 个生物种类的稳定同位素值(表 1)，其中鱼类最多(12 种)，虾类 2 种，蟹类 2 种，贝类 2 种(螺、蚌)，水生植物类 7 种，此外还有浮游动物及底栖碎屑。

表 1 长江靖江段近岸水域主要生物种类的营养级

种类	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	TL
芦竹 <i>Arundo donax</i>	-30.02	4.10	0.58
菱蒿 <i>Artemisia selengensis</i>	-28.83	4.52	0.71
马兰 <i>Kalimeris indica</i>	-27.21	4.81	0.81
水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	-29.54	5.11	0.91
底栖碎屑 <i>Benthic clastic</i>	-30.24	5.58	1.06
芦苇 <i>Phragmites australias</i>	-29.37	5.66	1.09
<i>Zizania latifolia</i>	-28.92	6.73	1.44
三角帆蚌 <i>Hyriopsis cumingii</i>	-30.51	7.82	1.80
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	-29.00	8.44	2.00
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	-23.43	8.49	2.02
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	-26.07	9.46	2.33
Wfe <i>Mylopharyngodon piceus</i>	-29.27	10.42	2.65
细鳞斜颌鲴 <i>Xenocypris microlepis</i>	-24.88	10.67	2.73
无齿相手蟹 <i>Chiromantes dehaani</i>	-23.85	10.78	2.76
大银鱼 <i>Protosalanx hyalocranius</i>	-21.96	10.90	3.01
子陵吻虾虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i>	-27.86	11.43	2.98
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	-30.12	11.77	3.30
浮游动物 Zooplankton	-30.34	11.80	3.31
翘嘴鲌 <i>Culler alburnus</i>	-29.36	12.31	3.47
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	-25.94	12.60	3.36
银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	-28.51	12.65	3.38
中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>	-26.09	12.68	3.39

鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	-26.06	13.10	3.53
秀 白 鲢 <i>Exopalaemon modestus</i>	-26.26	13.51	3.66
<i>Perea fluviatilis</i>	-26.29	13.65	3.71
W <i>Carassius auratus</i>	-27.06	13.86	3.78

结果表明, 长江靖江近岸各类小型渔业生物的碳稳定性同位素值有一定的差异。浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最低, 为 -30.34% ; 其次是底栖碎屑的 -30.24% ; 贝类、水生植物类、鱼类和虾类居中, 它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值分别为 $-29.75\% \pm 0.75\%$ 、 $-28.98\% \pm 0.88\%$ 、 $-26.74\% \pm 2.37\%$ 、 $-26.1\% \pm 0.16\%$; 蟹类最高, 为 $-25.86\% \pm 0.74\%$ (图 2)。大部分鱼类、蟹类和虾类等生物的稳定同位素比值比较接近 (图 2), 表明其食物组成和生活习性可能比较相似。

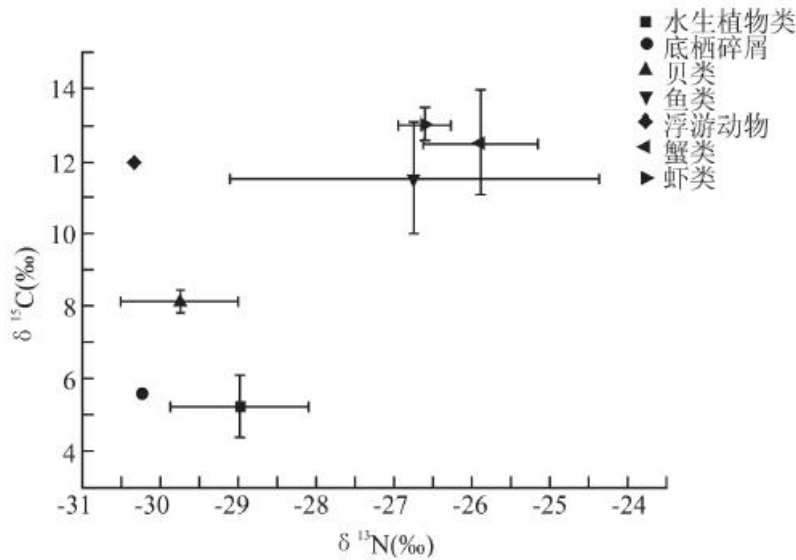


图 2 长江靖江段近岸渔业生物类群 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素比值

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Values of Fishery Organisms in Jingjiang Nearshore Section of the Yangtze River

2.2 氮稳定同位素特征

长江靖江段近岸小型渔业生物种类中水生植物类的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值最低, 为 $5.16\% \pm 0.85$; 底栖碎屑其次, 为 5.58% ; 贝类、鱼类、浮游动物和蟹类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均居中, 它们的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值分别为 $8.13\% \pm 0.31\%$ 、 $11.56\% \pm 1.59\%$ 、 12.02% 和 $12.51\% \pm 1.43$; 虾类的 $\delta^{15}\text{N}$ 均值最高, 为 $13.05\% \pm 0.45\%$ (图 2), 大多数鱼类、蟹类和虾类等生物碳氮同位素值域存在重叠 (图 2), 与张硕等^[19]应用稳定同位素技术测定的海州湾水域渔获物碳氮同位素值域形成的生态位重叠现象相似, 表明该生境水域生物形成了生态位重叠的现象。活动范围较小的近岸小型鱼类、虾类和蟹类在相应水域中生活习性可能较为接近, 甚至食物源重叠, 较为接近的

稳定同位素比值正验证了这种现象。

2.3 营养级

由表 1 可以看出, 长江靖江段近岸水域主要生物类群的营养级范围为 0.58(芦竹)~3.78(鲫), 主要渔业生物种类中水生植物类营养级最低, 为 0.92 ± 0.28 ; 其次为底栖碎屑的 1.06; 贝类、鱼类和浮游动物和蟹类的营养级分别为 1.90 ± 0.10 、 3.09 ± 0.52 、 3.31 和 3.33 ± 0.47 ; 虾类的最高, 为 3.51 ± 0.15 。

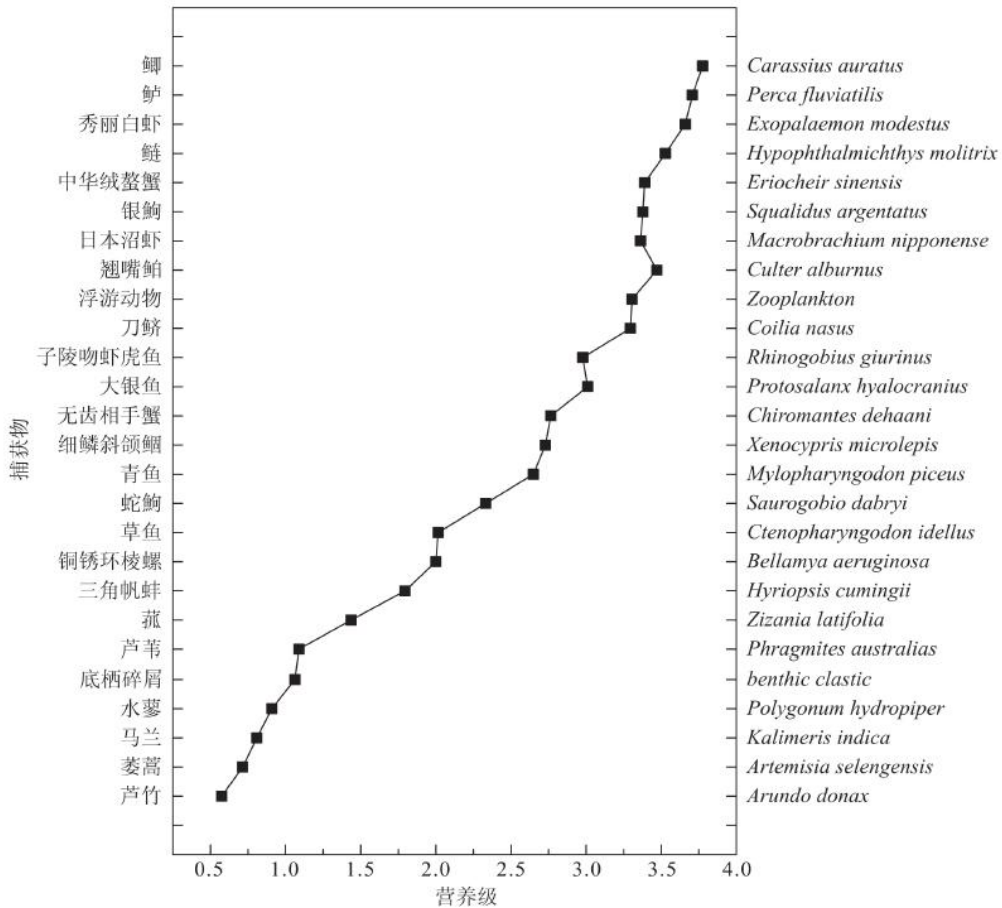


图 3 长江靖江段近岸水域食物网的连续营养谱

Fig. 3 Continuous Trophic Spectrum Level of Nearshore Aquatic Food Web in Jingjiang Section of the Yangtze River

根据营养级的计算结果, 构建了长江靖江段近岸水域食物网的连续营养谱(图 3)。水生植物类营养级均位于 2 以下, 为初级生产者; 三角帆蚌与铜锈环棱螺营养级均较低, 为初级消费者; 鱼类、蟹类和虾类等次级消费者所处的营养位置较高, 符合营养级位置分布规律。

3 讨论

3.1 长江靖江段近岸小型渔业生物 $\delta^{13}C$ 值分析

长江靖江段近岸不同类群生物间 $\delta^{13}C$ 同位素比值差异极显著 ($F=4.674, P<0.01$), 其中消费者 $\delta^{13}C$ 值的分布从三角帆蚌

的-30.51%到大银鱼的-21.96%，变化范围较大(表1)，与蒋日进等^[20]运用稳定同位素技术研究的枸杞近岸海域消费者碳同位素比值范围情况相似，均未出现 $\delta^{13}\text{C}$ 值随 $\delta^{15}\text{N}$ 值的升高而变大的趋势，且该水域各小型渔业生物种类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $\delta^{15}\text{N}$ 值之间无相关性($r=0.376$, $P>0.05$)，其值与营养级之间无规律性关系，表明该食物网是非线性食物网^[21]，碳源组成的影响因素较为复杂。在太湖贡湖湾食物网的研究中也发现群落中所有种类的碳氮同位素值之间无相关性^[22]，由此可能说明近岸群落及整体群落均不存在这种相关关系。与之相比，敞水区域的相关研究表明生物类群的碳、氮稳定同位素通常存在相关关系^[23, 24]。关于河流生态系统的食物网中消费者的基础碳源问题一直存在争议^[6]，有学者认为主要来源于外源性碳源^[25]，也有研究表明内源性碳源贡献更大^[26]，本研究中消费者的碳源组成较为复杂，可能来源于浮游动物、水生植物等 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低的内源性碳源，也有可能来源于工业、生活排放等 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的外源性碳源，有待进一步研究。稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值常用来评价生物食物来源^[20]，长江靖江段近岸消费者的碳同位素比值跨度较大，也说明其饵料生物种类丰富，消费者的摄食食性复杂多样。本研究中，中华绒螯蟹与大多数小型鱼类和虾类的碳稳定性同位素值无显著性差异，说明中华绒螯蟹与该生境中共同生活的小型鱼类、虾类存在饵料资源竞争。今后可在此研究基础上进一步研究该生境各消费者的食性。

3.2 长江靖江段近岸小型渔业生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值分析

渔业生物 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值由小到大依次为水生植物类、底栖碎屑、贝类、鱼类、浮游动物、蟹类和虾类。该生境从初级生产者到初级消费者再到次级消费者 $\delta^{15}\text{N}$ 逐渐递增从而证明了消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 值相对于它们的食物源会产生富集，可以用来指示生物所处的营养级^[27]。本研究中不同类群生物之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素数值存在生态位重叠，可能由于该江段近岸不同类群渔业生物存在摄食共同饵料生物的情况，即存在竞争，在该情况下一些高营养级物种往往会摄食较低营养级的生物。高等水生植物的碳、氮稳定同位素值能够反映其生态学特征，是多种水生动物的栖息地和营养来源^[28]。

含有大量N的生活及工农业污水排入河流会影响水生植物等初级食物源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值，通过捕食关系对鱼类、虾类及蟹类等消费者的 $\delta^{15}\text{N}$ 值产生影响^[29]。本研究中华绒螯蟹、无齿相手蟹 $\delta^{15}\text{N}$ 值与全为民^[30]测定的长江口盐沼湿两种蟹的 $\delta^{15}\text{N}$ 值相比均较高，而与闫光松^[31]测定的长江口盐沼湿地中华绒螯蟹相比较低，可能由于长江靖江江段近岸水域与长江口相比受污染程度较高，而长江口盐沼湿地受污染程度更高。除此原因之外，同种生物在不同水域、不同生活史阶段的食物组成不完全相同，即使是同一水域、同一生活史阶段的生物，其个体食性上的差异也会对 $\delta^{15}\text{N}$ 值产生影响^[17]，导致 $\delta^{15}\text{N}$ 值存在差异。本研究中的草鱼、翘嘴鲌、鲫等大多数生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与长江中游^[32]、长江口^[31]、千岛湖^[33]、太湖^[3, 22]等水域的相应鱼类均有着不同程度的差异，这恰恰验证了 $\delta^{15}\text{N}$ 值在同种生物上的差异性。

3.3 营养位置的确定

基准生物的选择会直接影响生态系统营养级的计算结果^[34]，选择适合的基准物是定量评价与准确分析生态系统结构与功能的基础^[1]，Post研究发现螺类和蚌类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值能够代表初级生产者 $\delta^{15}\text{N}$ 值季节变化的平均特征，且它们生命周期长、 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化较小，较低的周转率更适用于判断环境中长期的生态学与环境化学变动的指示^[35]。图3长江靖江段近岸水域食物网的连续营养谱显示出了该水域食物网结构中不同渔业生物营养级的变化，从而可以表示从生产者到消费者的能量流途径的改变^[36]，中华绒螯蟹位于次级消费者水平，此次研究选取的长江靖江段近岸中华绒螯蟹壳宽范围为38.19~60.08mm，计算所得营养级范围为2.73~4.09，相差2个营养级，说明中华绒螯蟹在不同的生长阶段可能有不同的食性，从而导致其处于不同的营养位置，其摄食习性和食物组成会随着生活史的不同阶段发生变化，与Rudnick等^[37]所得结果一致。

水生植物类作为初级生产者，它与底栖碎屑营养级均应为1，本研究其营养级计算结果分别为0.92、1.06，均与1接近，符合规律。在河流生态系统中，浮游动物食性的消费者及浮游动物的稳定同位素值往往表现为低 $\delta^{13}\text{C}$ 值、高 $\delta^{15}\text{N}$ 值^[38]。该江段是长江下游与河口的交汇水域，水文状况受潮汐和径流的影响明显，潮汐和径流的交汇能够丰富浮游动物群落^[39, 40]，可能因此导致浮游动物出现了较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值，并且受基准值及富集度选择的影响，从而计算出的营养级较高，并且使得摄食浮游食物源相对较多的秀丽白虾也表现出较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值，在该食物网连续营养谱中处于较高位置。

往往同种生物在不同区域营养级计算结果会产生差异, 导致这一差异的重要因素在于基准生物及氮稳定同位素富集度的选择。除此之外, 研究所选取的生物样品个体大小也可能影响营养级的计算结果, 往往其机体的 $\delta^{15}\text{N}$ 值会随着个体大小和所处的栖息地不同对营养级计算结果产生影响^[19]。本研究中华绒螯蟹、鲫、翘嘴鲌、草鱼等大多数生物的营养级计算结果与巴家文^[32]研究的长江中游干流江段的水生动物及闫光松^[31]测定的长江口生物营养级相比存在差异正佐证了此结论。

4 结论

本研究利用稳定同位素分析法测定了长江靖江段近岸中华绒螯蟹、小型鱼类、虾类等渔业生物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 计算出各渔业生物的营养层次, 初步探讨了长江靖江段近岸小型渔业生物的稳定同位素特征及营养级, 丰富了中华绒螯蟹的基础生物学资料, 为长江靖江段近岸渔业生态系统进一步研究和渔业资源评估及其合理利用提供基础生物学资料。主要结论为: (1) 长江靖江段近岸小型渔业生物样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布图显示该水域各生物类群存在生态位重叠; (2) $\delta^{15}\text{N}$ 平均值由小到大依次为水生植物、底栖碎屑、蚌类、螺类、小型鱼类、浮游动物、蟹类和虾类, 初级生产者及蚌、螺等初级消费者营养位置较低, 鱼类、蟹类及虾类营养位置较高, 符合营养位置分布规律; (3) 各类群生物营养级受基准生物及氮稳定同位素富集度的影响。

致谢: 感谢靖江市渔政大队对本研究的支持, 感谢南京农业大学和上海海洋大学 2016 级研究生同学在样品处理过程中的帮助, 感谢同课题组师兄师姐在数据处理过程中提供的指导。

参考文献:

- [1] 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 J, ZHANG M, XIE P. Variability of stable nitrogen isotopic baseline for trophic modeling [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1) : 8—20. 】
- [2] VENDER ZANDEN M J, JOSEPH B R. Variation in the ^{15}N and ^{13}C trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies [J]. Limnol Oceanogr, 2001, 46(8) : 2061—2066.
- [3] 李云凯, 贡艺. 基于碳、氮稳定同位素技术的东太湖水生食物网结构 [J]. 生态学杂志, 2014, (06) : 1534—1538.
- 【LI Y K, GONG Y. Food web structure of the East Lake Taihu by analysis of stable carbon and nitrogen isotopes [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6) : 1534—1538. 】
- [4] MAO Z G, GU X H, ZENG Q F, et al. Food web structure of a shallow eutrophic lake (Lake Taihu, China) assessed by stable isotope analysis. Hydrobiologia, 2012, 683: 173—183.
- [5] ZANDEN M J V, FETZER W W. Global patterns of aquatic food chain length [J]. Oikos, 2007, 116: 1378—1388.
- [6] 李斌. 三峡库区小江鱼类食物网结构、营养级关系的 C、N 稳定性同位素研究 [D]. 西南大学. 2012.
- 【LI B. Ecological studies on fish food web structures and trophic relationship with stable isotope technology in a tributary in the Three Gorges Reservoir areas(TGR) [D]. Southwest University. 2012. 】

-
- [7] 于灏, 吴莹, 张经. 特定化合物同位素分析技术在海洋食物网研究中的应用 [J]. 质谱学报, 2006, 27(2) :123.
- 【YU H, WU Y, ZHANG J. Application of compound-specific isotope analysis in marine food web studies [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2006, 27(2) : 123. 】
- [8] 李由明, 黄翔鹤, 刘楚吾. 碳氮稳定同位素技术在动物食性分析中的应用 [J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(4) :99-102.
- 【LI Y M, HUANG X H, LIU C W. Application of animal feeding habit analysis with stable isotope techniques [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2007, 27(4) : 99-102. 】
- [9] GREY J. The use of stable isotope analyses in freshwater ecology: current awareness [J]. Polish Journal of Ecology, 2006, 54(4) : 563-584.
- [10] 曾庆飞, 孔繁翔, 张恩楼, 等. 稳定同位素技术应用于水域食物网的方法学研究进展 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(1) : 13-20.
- 【ZENG Q F, KONG F X, ZHANG E L, et al. Assessment of sample processing methods for stable isotope analysis of aquatic food webs [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1) : 13-20. 】
- [11] MCCALLISTER S L, BAUER J E, CHERRIER J E, et al. Assessing sources and ages of organic matter supporting river and estuarine bacterial production: A multiple - isotope ($\delta^{14}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{15}\text{N}$) approach [J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(5) : 1687-1702.
- [12] 李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用 [J]. 生态学报, 2005, 25(11) : 3052-3060.
- 【LI Z Y, JIN X S, ZHUANG Z M, et al. Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11) : 3052-3060. 】
- [13] MINAGAWA M, WADA E. Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. Geochim Cosmochim Acta, 1984, 48(5) : 1135-1140.
- [14] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions [J]. Ecology, 2002, 83(3) : 703-718.
- [15] 戴玉红, 顾树信, 郭弘艺, 等. 长江靖江段鱼类资源调查与开发 [J]. 水产养殖, 2013 (07) : 28-33.
- 【DAI Y H, GU S X, GUO H Y, et al. Fishes resource investigation and exploitation in Jingjiang section of Yangtze River [J]. Journal of Aquaculture, 2013, (07) : 28-33. 】
- [16] 顾树信, 沈林宏, 戴玉红, 等. 长江靖江段鱼虾资源调查与分析 [J]. 淡水渔业, 2006(04) : 34-36.

【GU S X, SHEN L H, DAI Y H, et al. Resource Investigation and Analysis of Fishes and Shrimps in Jingjiang Section of Yangtze River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2006, (04) : 34–36. 】

[17] 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*, 2005, 35(2) : 123–130.

【CAI D L, LI H Y, TANG Q S, et al. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in Yellow and East China Sea. *Sciences in China Series C: Life Sciences*, 2005, 35 (2) : 123–130】

[18] 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: 75–85.

[19] 张硕, 谢斌, 符小明, 等. 应用稳定同位素技术对海州湾拖网渔获物营养级的研究 [J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(04) : 507–511.

【ZHANG S, XIE B, FU X M, et al. Trophic level estimation of organisms in landings from Haizhou bay using stable carbon and nitrogen isotope analysis [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(04) : 507–511. 】

[20] 蒋日进, 章守宇, 王凯, 等. 枸杞岛近岸海域食物网的稳定同位素分析 [J]. *生态学杂志*, 2014, (04) : 930–938.

【JIANG R J, ZHANG S Y, WANG K, et al. Stable Isotope analysis of the offshore food web of Gouqi Island [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, (04) : 930–938. 】

[21] ANA P, H L NE R, FRANCOIS R. Stable carbon and nitrogen isotope quantitative structural assessment of dominant species from the Vaccarès Lagoon trophic web (Camargue Biosphere Reserve, France) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(2) : 261–272.

[22] 温周瑞, 熊鹰, 徐军, 等. 太湖贡湖湾食物网特征研究 [J]. *水生生物学报*, 2016, 40(01) : 131–138.

【WEN Z R, XIONG Y, XU J, et al. THE studies on the structures of the food web and the trophic relationships in the gonghu bay of the taihu lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(01) : 131–138. 】

[23] VIZZINI S, SAVONA B, CARUSO M, et al. Analysis of stable carbon and nitrogen isotopes as a tool for assessing the environmental impact of aquaculture: a case study from the western Mediterranean [J]. *Aquaculture International*, 2005, 13(1) :157–165.

[24] HOBSON K A, WELSH H E. Determination of trophic relationships within a high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 84(6) : 9–18.

[25] KLOSKOWSKI J, TREMBACZOWSKI A. Fish reduce habitat coupling by a waterbird: evidence from combined stable isotope and conventional dietary approaches [J]. *Aquatic Ecology*, 2015, 49(1) : 21–23.

-
- [26] THORP J H, DELONG M D. Dominance of autochthonous autotrophic carbon in food webs of heterotrophic rivers [J]. *Oikos*, 2002, 96(3) : 543–550.
- [27] MICHAEL J, DE N, EPSTEIN S. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals [J]. *Geochimica et CosmochimActa*, 1978, 42(4) : 495–506.
- [28] 温周瑞, 徐军, 谢平. 太湖高等水生植物稳定碳、氮同位素特征 [J]. *湖泊科学*, 2016, 28(1) : 163–169.
- 【WEN Z R, XU J, XIE P. Carbon and nitrogen stable isotopes of macrophytes from Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(1) : 163–169. 】
- [29] XU J, XIE P, ZANG M, et al. Variation in stable isotope signatures of seston and a zooplanktivorous fish in a eutrophic Chinese lake. *Hydrobiologia*, 2005, 541: 215–220.
- [30] 全为民. 长江口盐沼湿地食物网的初步研究: 稳定同位素分析 [D]. 复旦大学, 2007.
- 【QUAN W M. Food web Analysis of Salt Marshes of the Yangtze River Estuary by Using Stable Isotope [D]. Fudan University, 2007. 】
- [31] 闫光松. 基于稳定同位素技术对长江口主要渔业生物营养结构的研究 [D]. 上海海洋大学, 2016.
- 【YAN G S. Research on trophic structure of the major fishery species from the Yangtze Estuary based on stable isotope technology [D]. Shanghai Ocean University. 2016. 】
- [32] 巴家文. 基于稳定同位素技术的长江中游干流生态系统食物网结构及能量来源研究 [D]. 西南大学, 2015.
- 【BA J W. Food web structure and energy source of the main stream ecosystem in the middle reaches of the Yangtze River based on the stable isotope analyses [D]. Southwest University, 2015. 】
- [33] 宋固, 胡梦红, 刘其根. 运用稳定同位素技术研究千岛湖秋季刺网渔获物的食性和营养级 [J]. *上海海洋大学学报*, 2014, 23(01) : 117–122.
- 【SONG G, HU M H, LIU Q G. Study on the feeding habits and trophic levels of the gillnet catches of Qiandao Lake in autumn by stable isotope technology [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2014, 23(01) : 117–122. 】
- [34] JAKE V Z M, FETZER W W. Global patterns of aquatic food chain length [J]. *Oikos*, 2007, 116(8) : 1378–1388.
- [35] GUSTAFSON L, SHOWERS W, KWARK T, et al. Temporal and spatial variability in stable isotope compositions of a freshwater mussel: implications for biomonitoring and ecological studies [J]. *Oecologia*, 2007, 152: 140–150.
- [36] 蔡德陵, 张淑芳, 张经. 稳定碳、氮同位素在生态系统研究中的应用 [J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*,

2002(02) : 287—295.

【CAI D L, ZHANG S F, ZHANG J. Applications of stable carbon and nitrogen isotope methods in ecological studies [J]. Periodical of Ocean University of China, 2002 (02) : 287—295. 】

[37] RUDNICK D A, RESH V H. Stable isotopes, mesocosms, and gut content analysis demonstrate trophic differences in two invasive decapod crustacea [J]. Freshwater Biology , 2005, 50:1323—1336.

[38] BUNN S E, DAVIES P M, WINNING M. Sources of organic carbon supporting the food web of an arid zone floodplain river [J]. Freshwater Biology, 2003, 48(4) : 619—635.

[39] 刘歆璞, 王丽卿, 张宁, 等. 青草沙水库后生浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2013, (05) : 1238—1248.

【LIU X P, WANG L Q, ZHANG N, et al. Community structure of metazoan zooplankton and its relationships with environmental factors in Qingcaosha Reservoir of Shanghai, East China. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, (05) : 1238—1248. 】

[40] 郑重. 河口浮游生物研究 [J]. 自然杂志, 1982, 5(3) :218—221.

【ZHENG H. The research of estuarine plankton [J]. Chinese Journal of Nature, 1982, 5(3) : 218—221. 】