DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20250217002 http://www.yykxjz.cn/

屈佩, 于国旭, 庞敏, 杜丽侠, 王鹏功, 宫于琛, 吴忠迅, 初永忠, 周军, 孙畅, 张朝晖, 王宗灵. 稳定同位素指示的长山列岛野生和底播仿刺参食物来源解析. 渔业科学进展, 2026, 47(1): 01–11
QU P, YU G X, PANG M, DU L X, WANG P G, GONG Y C, WU Z X, CHU Y Z, ZHOU J, SUN C, ZHANG Z H, WANG Z L. Food source analysis of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) in seaweed bed of Changshan Archipelago indicated by stable isotopes. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(1): 01–11

稳定同位素指示的长山列岛野生和底播仿刺参食物来源解析*

屈 佩[1①] 于国旭[2] 庞 敏[1] 杜丽侠[3] 王鹏功[4] 宫于琛[1]
吴忠迅[2] 初永忠[2] 周 军[2] 孙 畅[1] 张朝晖[1] 王宗灵[1]

(1. 自然资源部第一海洋研究所 渤海海峡生态通道野外科学观测站 山东 青岛 266061；2. 长岛国家海洋公园管理中心 山东 烟台 265899；3. 世界自然基金会(瑞士)北京代表处 北京 100037；4. 中国认证检验集团山东检测有限公司 山东 青岛 266000)

摘要 本研究基于碳、氮稳定同位素的指示，识别长山列岛海藻场仿刺参(*Apostichopus japonicus*)相对营养级的基础上，分析了野生和底播仿刺参主要食物来源。结果显示，海藻场仿刺参 $\delta^{13}C$ 平均值为–19.48‰，$\delta^{15}N$ 平均值为 8.81‰，其中，底播仿刺参 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 平均值分别为–19.13‰和 9.97‰，野生仿刺参平均值为–19.84‰和 7.66‰。野生仿刺参相对营养级为 2.32，比海藻场底播区域仿刺参相对营养级 3.00 低 0.68。食物源贡献度结果显示，大型藻对野生仿刺参具有最高的贡献度(0.78)，进一步拆分食物源的分析结果显示，褐藻对海藻场野生仿刺参平均贡献度最高为 0.320，其次是红藻(0.224)、绿藻(0.222)；大型海藻对底播仿刺参平均贡献度为 0.632；其中，拆分后绿藻为 0.245，褐藻为 0.221，红藻为 0.166。本研究通过稳定同位素的指示，显示自然环境中海藻对仿刺参具有较高的食物源贡献。

关键词 仿刺参；稳定同位素；食物源；大型藻类；海草

中图分类号 P735 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2026)01-0001-11

分布于我国北方海藻场的仿刺参(*Apostichopus japonicus*) (蒋冰雪等, 2021)，富含海参多糖、皂苷、不饱和脂肪酸和氨基酸等生物活性物质(郭盈莹等, 2014; 孙志恒等, 2023)，具备多种生物学功能(Aminin *et al*, 2015; 何丽霞等, 2016; Xu *et al*, 2018)。但受生长环境的影响，仿刺参的化学成分具有较大差异(Feng *et al*, 2020; Gao *et al*, 2016; Li *et al*, 2019; Wen *et al*, 2010)。仿刺参的营养价值与产地、产出方式密切相关，相关研究已对不同来源仿刺参的营养成份展开分析，例如通过比较海参多糖、脂肪酸和氨基酸等成份来评估它们的营养价值(Feng *et al*, 2020; Gao *et al*, 2016; Li *et al*, 2021)。但关于导致这些营养成份差异的食物来源因素鲜有报道，海藻场野生仿刺参的食物来源仍不明确。

碳和氮稳定同位素($\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$)是指示食物网营养关系的有力工具(蔡德陵等, 2005; Nagelkerken *et al*,

* 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022MD027)、自然资源部渤海站开放基金(BH202407; BH202408)和深圳市地球自然基金(P00PF001022)共同资助。
① 通信作者：屈 佩，副研究员，Email: qupei@fio.org.cn
收稿日期: 2025-02-17, 收修改稿日期: 2025-03-30

2020)。目前，稳定同位素示踪技术已被证明是实现水产品溯源的可靠有效方法，逐渐开始被推广应用(Li *et al*, 2016; Kang *et al*, 2021)。仿刺参等海洋生物的稳定同位素特征受到环境的影响而产生差异，这种差异能反映环境的变化，指示它们的食物来源(Christianen *et al*, 2017)。本研究基于 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 的指示，以长山列岛海藻场的野生仿刺参和底播仿刺参为研究对象，逐步分析仿刺参在海藻场食物网中的相对营养级(trophic level, TL)，以及与其他海洋生物的营养关系位置；在此基础上，识别各种潜在食物来源，并揭示各种潜在食物来源对仿刺参的相对贡献，为海藻场仿刺参的识别和溯源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样本采集

1.1.1 样本采集区域和站位设计 样本采集的研究海域位于长山列岛近海的海藻场。根据本研究对长山列岛海藻场的前期调查信息，识别野生和底播仿刺参产出区域，在海藻场位置共设置了 9 个仿刺参的采样站位(A~I)，其中，A、B、D、E 站位是底播刺参采样区域，F~I 站位是野生刺参采样区域，C 站位是养殖刺参采样区域，如图 1 所示；此外其他生物样本也在 A~I 站位采集。

1.1.2 样本采集时间 仿刺参样本采集时间为 2024 年 4—6 月，每月 1 次，采集样本数量满足稳定

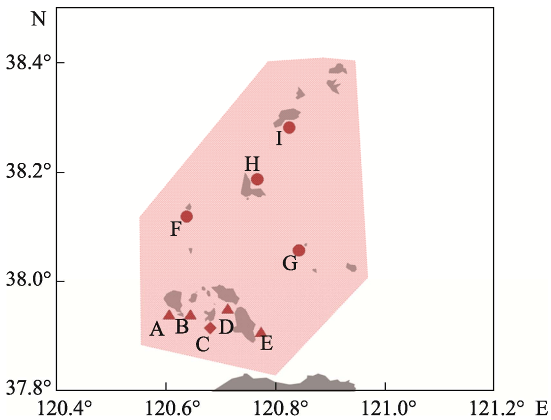

图 1 研究海域采样位置

Fig.1 Sampling sites in study area

A：大黑山岛小濠；B：大黑山岛南砣子礁；C：庙岛；D：北长山岛；E：南长山岛；F：高山岛；G：车由岛；H：砣矶岛；I：大钦岛。

A: Xiaohao at Daheishan Island; B: Nantuozi at Daheishan Island; C: Miaodao Island; D: Beichangshan Island; E: Nanchangshan Island; F: Gaoshan Island; G: Chenyou Island; H: Tuoji Island; I: Daqin Island

同位素检测，其他近海生物样本于 2024 年 4—5 月休渔期前持续采集，包括近海鱼类、无脊椎动物、大型藻类、海草和微藻等样本。

1.1.3 样本采集方法 本研究针对海藻场成年仿刺参的摄食情况开展研究。在采样位点采集样品时，每个站位随机选择采集新鲜性成熟仿刺参个体样本。样本采集后，密封袋包装，置于–20 ℃冷冻保存，以备稳定同位素分析。同时，在各个采样位点通过低潮期间潮间带捡拾、潜水、定置网笼和垂钓等方式采集获得生物样本，密封袋包装，置于–20 ℃冷冻保存，以备稳定同位素分析。微藻样本通过抽滤方式将采样站位采集的海水经过 20 μm 玻璃纤维膜过滤，抽滤获得滤饼，密封袋包装，置于–20 ℃冷冻保存，以备稳定同位素分析。

1.2 样品处理和稳定同位素检测

本研究在长山列岛海藻场研究区域采集仿刺参样本 100 个，其中，海藻场底播区域仿刺参样品为 50 个(图 1，站位 A~E)，海藻场非底播完全自然生长仿刺参即野生仿刺参 50 个(图 1，站位 F~I)。除仿刺参外，作为计算仿刺参营养级相对位置的参考，在海藻场研究区域同步采集了 148 个其他无脊椎动物(66 个)和鱼类(82 个)样本(图 1，站位 A~I)以测稳定同位素值。在本研究初步设计阶段，海藻场初级生产者被假设为仿刺参的主要潜在食物来源，因此，进行了比较详尽的细化样本采集工作，相应地对 142 个初级生产者样本(图 1，站位 A~I)进行了稳定同位素检测。初级生产者的样本包括在长山列岛海藻场的主要代表性物种：海草主要物种为鳗草(*Zostera marina*)；绿藻包括石莼(*Ulva lactuca*)、缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)等 4 个物种；褐藻包括海黍子(*Sargassum miyabei*)、铜藻(*Sargassum horneri*)等 6 个物种；红藻包括红毛菜(*Bangia fusco-purpurea*)、紫菜(*Gracilaria verrucosa*)等 6 个物种。为了深入探讨不同食物来源的不同海域仿刺参稳定同位素特征差异，本研究还分析了 69 个其他区域养殖仿刺参样本，包括长岛本地养殖的非海藻场刺参(39 个，图 1 站位 C 庙岛近海)、大连蚂蚁岛附近海域底播刺参(30 个)。庙岛属于长山列岛南部海岛，与北部海岛相比，近海环境受人类养殖活动影响相对较高；由于蚂蚁岛海域属于海洋保护地，水环境较好，适宜刺参等底栖生物生长，其临近海域仿刺参养殖方式主要为底播，采集方式为潜水员捡拾。

不同的生物样品经过前处理进行稳定同位素分析。其中，鱼类和无脊椎动物样品处理需要去除骨骼，选取有机质部分用于稳定同位素分析。微藻经镜检挑

除杂质后，前处理方式与动物处理方式基本相同；大型海藻和海草选取叶片组织去除杂质后，前处理方式也与动物基本相同。所有样品置于烘箱 70℃下干燥 24~48 h，达到恒重后，使用研磨机均质成均匀粒度的粉末，粉末状样品用锡箔纸包埋后，利用同位素比率质谱仪(IRMS, isotope ratio mass spectrometer, Delta Q)进行 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 测定。

按照国际惯例，$\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 分别采用国际通用的 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite)标准和大气氮(N_2)作为参考标准，按以下公式算出：

$$\delta^{13}C(‰)=\left(\frac{^{13}C/^{12}C_{sample}}{^{13}C/^{12}C_{VPDB}}+1\right)\times 1\,000 \quad (1)$$

$$\delta^{15}N(‰)=\left(\frac{^{15}N/^{14}N_{sample}}{^{15}N/^{14}N_{air}}+1\right)\times 1\,000 \quad (2)$$

式中，$^{13}C/^{12}C_{sample}$ 为样品的实际碳同位素比值，$^{13}C/^{12}C_{VPDB}$ 为国际标准物 VPDB 的碳同位素比值；$^{15}N/^{14}N_{sample}$ 为样品的实际氮同位素比值，$^{15}N/^{14}N_{air}$ 为标准大气氮同位素比值。

1.3　相对营养级计算和食物源分析

摄食者相对营养级的计算是基于相邻营养级间具有稳定的 $\delta^{15}N$ 分馏系数(Caut *et al*, 2009、2010)，通常采用以下经典的营养级公式(3)进行计算：

营养级(TL)公式：

$$TL=\frac{\delta^{15}N_c-\delta^{15}N_b}{\Delta^{15}N} \quad (3)$$

式中，TL 为摄食者的相对营养级，$\delta^{15}N_c$ 为摄食者的氮稳定同位素值，$\Delta^{15}N$ 为氮稳定同位素在相邻营养级间的分馏系数，$\delta^{15}N_b$ 为相对营养级计算的基准值。

但近年来的研究发现，$\Delta^{15}N$ 不是一个常数，消费者的营养级与 $\Delta^{15}N$ 具有线性关系(Hussey *et al*, 2014)，$\Delta^{15}N$ 随着营养级的增加而缩小，该模式更准确地表示海洋食物网的营养级结构(Reum *et al*, 2015)，得到式(4)和相应的 TL 方程(5)：

$$\Delta^{15}N=\frac{\beta_0-\beta_1\times\delta^{15}N_{TL}}{1-\beta_1} \quad (4)$$

$$TL=\frac{\ln(\delta^{15}N_{lim}-\delta^{15}N_{base})-\ln(\delta^{15}N_{lim}-\delta^{15}N_{TL})}{k}+TL_{base} \quad (5)$$

$$k=-\ln\left(\frac{\beta_0-\delta^{15}N_{lim}}{-\delta^{15}N_{lim}}\right) \quad (6)$$

$$\delta^{15}N_{lim}=\frac{-\beta_0}{\beta_1} \quad (7)$$

式中，$\delta^{15}N_{TL}$ 是消费者的 $\delta^{15}N$；TL_{base} 是基线生物营养级；k 是 $\delta^{15}N$ 接近每营养级极限值的速率，由公式(6)计算获得；$\delta^{15}N_{lim}$ 是随着营养级增加而饱和的 $\delta^{15}N$ 极限值，由式(7)计算获得，其中，β_0 为 5.92，β_1 为–0.27，这是基于规模化营养框架实验数据的最高后验密度(95%置信区间)的中位数。本研究采用方程(5)计算消费者的 TL，确定每个消费者的 $\Delta^{15}N$ 和多次分馏的发生情况。

1.4　食物源分析

本研究对食物源的分析采用了 IsoSource 程序，该模型可以利用样品的稳定同位素数据计算每一种潜在食物源的贡献度平均值及其取值范围。本研究将稳定同位素检测获得的仿刺参和潜在食物源的稳定同位素数值带入该程序，计算了在增量 2%水平上食物源对仿刺参贡献的所有可行解，并对可行解的平均值及其取值范围进行统计，以此作为仿刺参食物源贡献度分析的依据。

1.5　稳定同位素生态位分析

本研究采用基于 R 语言的 SIBER 程序(Stable Isotope Bayesian Ellipses in R) (Jackson *et al*, 2011)中贝叶斯椭圆模型参数对不同来源仿刺参的稳定同位素生态位进行分析。本研究基于该程序构建 $\delta^{13}C$-$\delta^{15}N$ 稳定同位素营养生态位关系，并给出相关参数以比较不同来源仿刺参的稳定同位素特征差异，其中包括生态位总面积(total area, TA)、标准椭圆面积(standard ellipse area, SEA)和矫正后标准椭圆面积(corrected standard ellipse area, SEAc)。TA 代表仿刺参占据稳定同位素生态位的总程度，但容易受到个体极端值的影响，因此，通常采用标准椭圆面积 SEA 代替，而 SEAc 是在 SEA 基础上更准确的营养生态位重叠校正结果(Parnell *et al*, 2013)。

2　结果

2.1　稳定同位素特征

长山列岛海藻场仿刺参 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 数据与当地大型藻类、海草等初级生产者进行比较，绘制 $\delta^{13}C$-$\delta^{15}N$ 正交散点图(图 2)。海藻场仿刺参 $\delta^{13}C$ 范围在–22.04‰~ –17.15‰，平均值为–19.48‰；$\delta^{15}N$ 范围在 6.40‰~11.54‰，平均值为 8.81‰。

2.1.1　*长山列岛野生和底播仿刺参稳定同位素特征差异*　在采样和检测过程中，对海藻场底播区域的仿刺参进行特别区分。海藻场底播区域仿刺参的 $\delta^{13}C$ (–19.13‰±1.00‰) 显著高于海藻场野生仿刺参

(–19.84‰±1.05‰；*t*-test, $P<0.01$, $n=50$)。海藻场野生仿刺参 δ15N 为 7.66‰±0.69‰；底播区域的仿刺参 δ15N 为 9.97‰±0.85‰，显著高于海藻场野生仿刺参(*t*-test, $P<0.01$, $n=50$)。

2.1.2 长山列岛初级生产者稳定同位素特征与仿刺参对应关系 长山列岛海藻场的主要潜在食物源为藻类和海草。大型藻类的 δ^{13}C 为–20.24‰±3.82‰；δ^{15}N 为 8.13‰±2.06‰，覆盖了海藻场仿刺参的稳定同位素值分布范围(图 2)，预示了其作为仿刺参潜在食物来源具有极高的可能性。本研究进一步将大型藻类进行区分，按门类分为红藻、绿藻和褐藻(表 1)。通过比较发现，红藻的 δ^{13}C 值显著低于绿藻和褐藻($P<0.01$)；褐藻的 δ^{15}N 显著低于绿藻和红藻($P<0.01$)，与海藻场野生仿刺参(δ^{13}C 和 δ^{15}N 平均值分别为–19.84‰和 7.66‰)接近；绿藻的 δ^{15}N 显著高于红藻和褐藻($P<0.01$)，与海藻场底播仿刺参(δ^{13}C 和 δ^{15}N 平均值分别为–19.13‰和 9.97‰)最为接近。长山列岛近海研究区域海草 δ^{13}C 显著高于大型藻类($P<0.01$)，超出了仿刺参 δ^{13}C 范围；δ^{15}N 特征与大型藻类相近。研究区域微藻 δ^{13}C 与海藻场仿刺参相近；δ^{15}N 特征显著低于大型藻类($P<0.01$)。

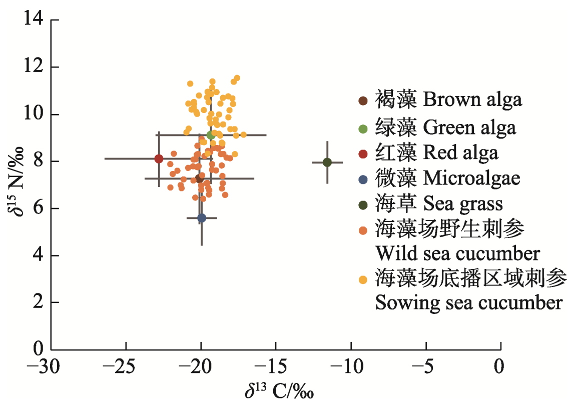

图 2 长山列岛海藻场仿刺参及初级生产者 δ^{13}C 和 δ^{15}N 正交散点图

Fig.2 Orthogonal scatter diagram for δ^{13}C and δ^{15}N of sea cucumber and its primary producers in the seaweed bed of Changshan Archipelago

表 1 长山列岛海藻场初级生产者稳定同位素特征

Tab.1 Stable isotopic feature of primary producers in seaweed bed of Changshan Archipelago (Mean±SD)

初级生产者 Primary producers		样本量 Sample size (n)	δ^{13}C /‰	δ^{15}N /‰
大型藻类 Macro-algae	褐藻 Brown algae	52	–20.10±3.65	7.26±1.92
	红藻 Red algae	19	–22.80±3.60	8.10±1.18
	绿藻 Green algae	46	–19.33±3.70	9.12±2.09
海草 Sea grass	鳗草 Zostera	17	–11.57±1.02	7.95±0.90
微藻 Microalgae		12	–19.95±2.78	5.60±1.17

2.1.3 长山列岛仿刺参与大连近海刺参稳定同位素特征差异 为进一步比较仿刺参稳定同位素特征差异，本研究加测了来自大连蚂蚁岛近海的仿刺参的 δ^{13}C 和 δ^{15}N 值。结果显示，其他产地(大连蚂蚁岛近海)仿刺参稳定同位素特征 δ^{13}C 平均值为–14.20‰±1.22‰，δ^{15}N 平均值为 10.11‰±1.16‰，δ^{13}C 特征显著高于长山列岛海藻场仿刺参的 δ^{13}C 特征($P<0.01$) (图 3)。仿刺参 δ^{15}N 特征显示长山列岛海藻场野生仿刺参显著低于底播仿刺参($P<0.01$)，大连仿刺参 δ^{15}N 特征显著高于长山列岛海藻场的野生仿刺参($P<0.01$)，但与海藻场底播仿刺参无显著差异($P=0.119$)。

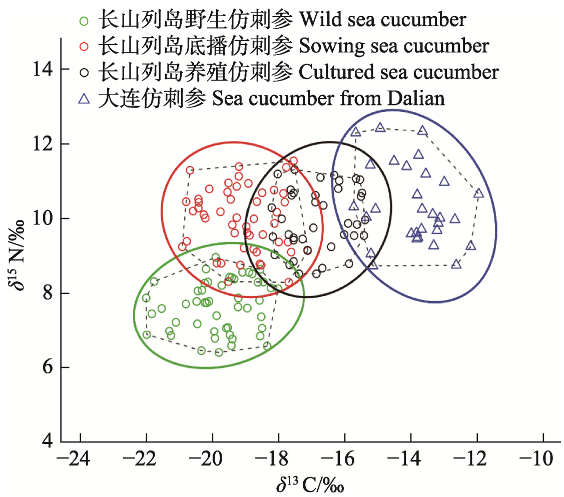

图 3 不同产地的仿刺参 δ^{13}C 和 δ^{15}N 正交散点图

Fig.3 Orthogonal scatter plots for δ^{13}C and δ^{15}N of sea cucumber from different origins

表 2 不同产地和养殖方式的仿刺参稳定同位素生态位

Tab.2 Stable isotopic niche of sea cucumber from different area

面积 Area	长岛野生 Wild-Changdao	长岛底播 Sowing-Changdao	长岛养殖 Cultured-Changdao	大连 Dalian
TA	7.97	10.22	6.64	11.29
SEA	2.24	2.63	2.38	3.23
SEAc	2.29	2.69	2.44	3.35

注：TA 为稳定同位素生态位所占面积，SEA 为标准椭圆面积，SEA_C 为重叠矫正后椭圆面积。

Note: TA: Total area; SEA: Standard ellipse area; SEAc: Corrected standard ellipse area.

稳定同位素生态位结果显示(表 2)，长岛野生仿刺参 SEAc 最小，为 2.29 (TA: 7.97)，相反大连底播仿刺参 SEAc 最高，为 3.35 (TA: 11.29)，其他依次为长岛底播仿刺参(SEAc: 2.69, TA: 10.22)，长岛养殖刺参(SEAc: 2.44, TA: 6.64)。

2.2　海藻场仿刺参营养级特征

根据营养级公式计算，海藻场野生仿刺参相对营养级均值为 2.32，处于所采无脊椎动物最低营养级位置(图 4)。底播仿刺参相对营养级均值为 3.00，相比野生仿刺参相对营养级高 0.68。其他无脊椎动物相对营养级均高于海藻场野生仿刺参，平均相对营养级区间在 2.33~3.78；鱼类位于更高的营养级，平均相对营养级区间在 3.40~4.46，显著高于无脊椎动物的相对营养级(P<0.01)。

海藻场野生仿刺参与同属于棘皮动物的光棘球海胆(*Strongylocentrotus nudus*)相对营养级(2.39±0.15)相近，与大多数贝类具有相似的低营养级特征，如皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*) (2.33±0.08)、紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*) (2.48±0.12)、牡蛎(2.56±0.12)等，但多数贝类等软体动物低于底播仿刺参的 3.00。野生和底播仿刺参的相对营养级均显著低于与其同为棘皮动物的多棘海盘车(*Asterias amurensis*) (3.33±0.50) (P<0.01)；其他如日本鼓虾(*Alpheus japonicus*) (3.14±0.40)、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*) (3.31±0.16)、日本蟳(*Charybdis japonica*) (3.42±0.23)等节肢动物的相对营养级均高于仿刺参。营养级的分析结果显示，野生仿刺参在海藻场处于初级消费者的位置，其潜在食物来源定位在当地的初级生产者。

2.3　食物来源贡献度分析

基于营养级分析，获得长山列岛海藻场野生仿刺参的相对营养级为 2.32。这一结果显示，长山列岛海藻场野生仿刺参的相对营养级均低于采集的所有鱼类和无脊椎动物样本的相对营养级，未发现低于野生仿刺参营养级的海洋消费者。处于该营养级，野生仿

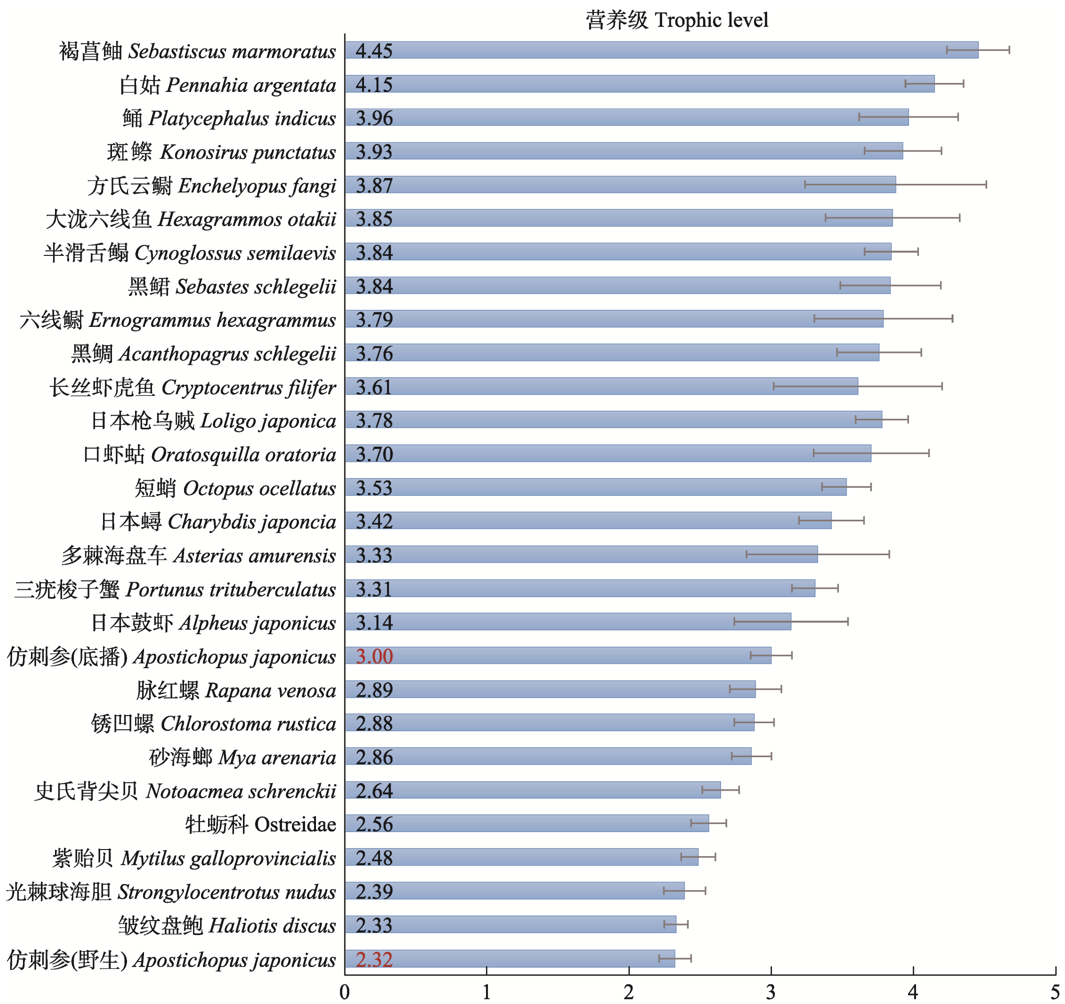

图 4　海藻场无脊椎动物和鱼类的相对营养级及仿刺参与它们的相对营养位置

Fig.4　Trophic level of invertebrates and fish in seaweed bed, and their relative trophic position comparing with sea cucumber

刺参食物来源为其他动物或者腐殖质的可能性较低，属于典型的初级消费者，因此，指示其食物来源主要源自初级生产者。基于此结果，对长山列岛的主要初级生产者包括大型藻类、海草和微藻进一步进行食物源贡献度分析。

食物源贡献度结果显示，大型藻对海藻场野生仿刺参具有最高的贡献度(0.78)。该结果是通过 IsoSource 计算获得的唯一解，显示了大型藻对仿刺参贡献的主导地位。基于此，本研究又对大型藻进行了进一步细分，区分红藻、褐藻、绿藻作为不同的食物来源，重新计算了贡献度，结果显示大型藻类仍然占据较高的贡献度(表 3)。褐藻对海藻场野生仿刺参平均贡献度最高为 0.320，贡献度范围在 0.02~0.76 之间；其次是红藻平均贡献度为 0.224，范围为 0~0.56；绿藻平均贡献度为 0.222，范围为 0~0.52。与区分前相比，微藻平均贡献度略有下降，为 0.155，范围为 0~0.38；海草平均贡献度略有上升，为 0.079，范围为 0~0.200。

此外，该部分研究也尝试对海藻场底播仿刺参的贡献度进行分析，计算过程中发现，底播仿刺参的 $\delta^{15}N$ 显著高于所有初级生产者，即使减去与分馏系数相应的值(Caut *et al*, 2009、2010)，也无法有合理的解集。因此，初级生产者对底播仿刺参的贡献度计算仅使用了 $\delta^{13}C$ 值。与海藻场野生仿刺参相同，大型海藻对底播仿刺参贡献度较高，平均贡献度合计占 0.632；不同的是，绿藻对底播仿刺参平均贡献度最高为 0.245，范围为 0~0.900；微藻的平均贡献度更高，为 0.228，范围为 0~0.900；相应的红藻平均贡献度降低，为 0.166，范围在 0~0.660。

3 讨论

3.1 海藻场仿刺参的主要食物来源

已有研究表明，仿刺参属于杂食性动物，主要摄食大型海藻、海草、微藻以及小型软体动物、甲壳类、桡足类和原生动物等海洋生物(王晓艳等, 2018)。仿刺参的生存环境，如食物供给、水源很大程度上决定了它们自身的化学成份，如矿物元素、稳定同位素特征等(Kang *et al*, 2021)。

在天然的海藻场中，处于开放生存状态的仿刺参能够接触到充足的饵料生物，其成份更多取决于其自身的摄食偏好。本研究通过稳定同位素的指示，对这些生物进行了识别。首先，营养级分析结果显示，长山列岛海藻场野生仿刺参的相对营养级为 2.32，均低于所有鱼类和无脊椎动物样本的相对营养级，未发现低于野生仿刺参的海藻场生物，因此，排除鱼类和无脊椎动物为仿刺参主要食物来源的可能，缩小识别范围；野生仿刺参处于第二营养级，属于典型的初级消费者，指示其食物来源主要源自初级生产者，基于此结果进一步缩小识别范围，对长山列岛的主要初级生产者，包括大型藻类、海草和微藻，进一步进行食物源贡献度分析；在分析过程中，进一步区分了大型藻类中的红藻、褐藻和绿藻食物源贡献度差异。通过逐层识别，结果显示，长山列岛海藻场野生仿刺参的摄食偏好依次为大型海藻(褐藻、红藻、绿藻)、微藻、海草以及其他海洋生物。该研究结果与山东靖海湾混养池塘的研究结果相似，大型藻对仿刺参的贡献度较高(Feng *et al*, 2014)。在养殖条件下，仿刺参也显示明显的摄食偏好，通常认为属于褐藻门的马尾藻是仿刺参养殖的理想饵料，尤其是以鼠尾藻为饵料会显著促进仿刺参生长(王志刚等, 2015; 王晓艳等, 2018; 白伟等, 2020)，这与本研究在海藻场自然环境的研究结果相吻合。本研究中，褐藻对海藻场野生仿刺参的平均贡献度最高，为 0.320，在天然海藻场环境中验证了以上结论。

大型海藻对海藻场野生仿刺参食物源贡献度较高，但几种海藻(红藻、褐藻和绿藻)本身贡献度差异较小，分别为 0.320、0.224 和 0.222，体现仿刺参在

表 3 区分大型藻类后食物源对仿刺参的贡献度及其限值(*为平均贡献度最高值)

Tab.3 Mean contribution and threshold values of food source to sea cucumber after distinguishing macroalgae (* is the highest mean contribution)

藻类 Algae	项目 Items	海草 Sea grass	褐藻 Brown algae	红藻 Red algae	绿藻 Green algae	微藻 Microalgae
海藻场野生仿刺参 Wild sea cucumber	平均值 Mean	0.079	0.320*	0.224	0.222	0.155
	最小值 Minimum	0.000	0.020	0.000	0.000	0.000
	最大值 Maximum	0.200	0.760	0.560	0.520	0.380
海藻场底播仿刺参 Sowing sea cucumber	平均值 Mean	0.140	0.221	0.166	0.245*	0.228
	最小值 Minimum	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000
	最大值 Maximum	0.320	0.860	0.660	0.900	0.900

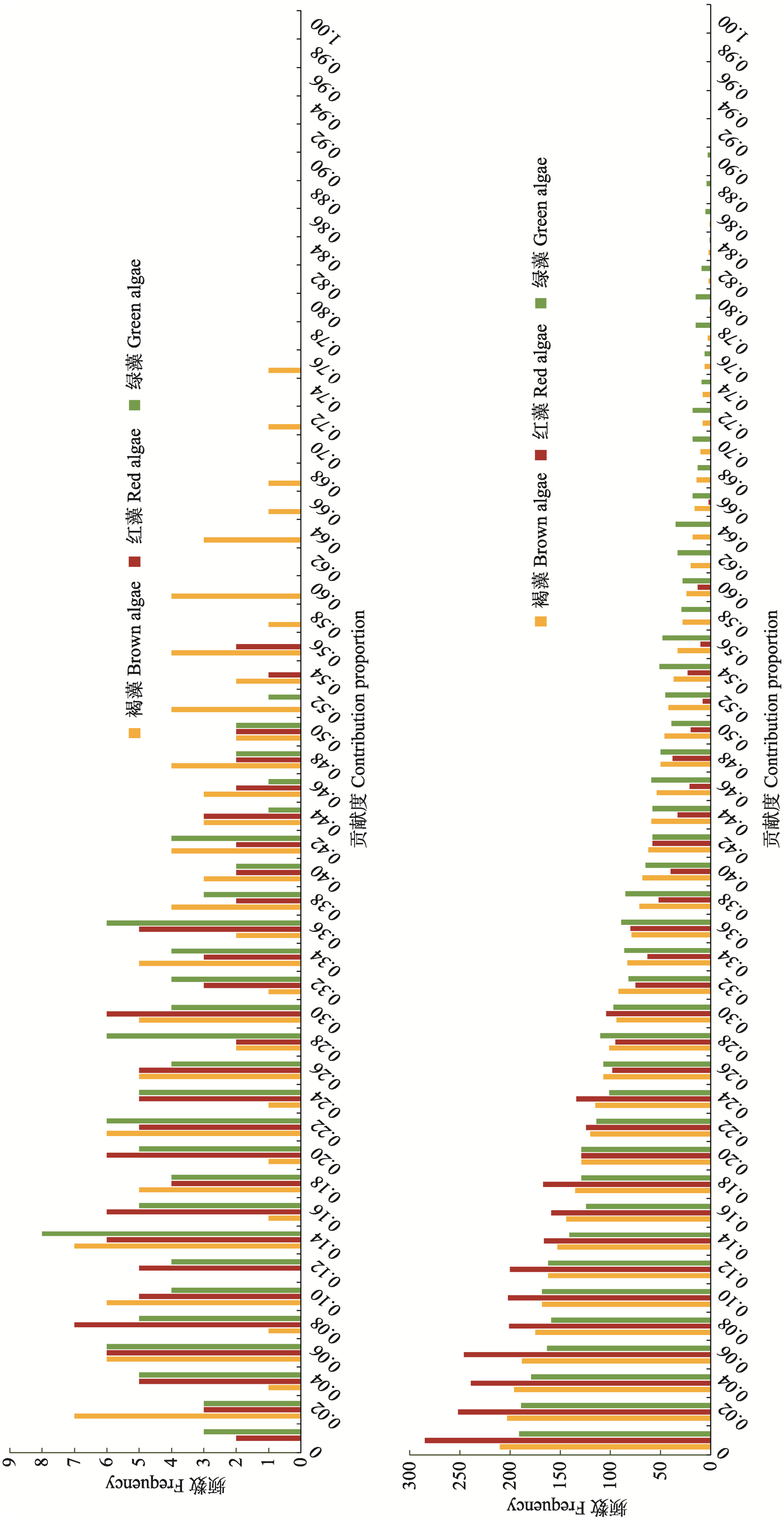

图5　大型海藻对海藻场野生(上图)和底播(下图)仿刺参的食物源贡献度在0~1(100%)区间分布

Fig.5　The contribution of macroalgae as food sources to wild (above) and sowing (below) sea cucumber distributing in the range of 0~1 (100%)

自然环境中对大型藻摄食的均衡性，与前期在养殖条件下的研究结果相符：通常混合的大型藻类饲料能够促进仿刺参的生长(王晓艳等, 2019)。其他室内可控研究也表明，混合食物来源不仅有利于仿刺参的生长，更能促进仿刺参活性物质的合成(Yu *et al*, 2015)。相反，在大型藻类及其他饵料缺乏的情况下，仿刺参转而摄食底栖硅藻、浮游植物等微藻(王摆等, 2019)，降低仿刺参的生长速率，改变其化学成份含量。

与野生仿刺参不同，长山列岛海藻场底播仿刺参处于较高营养级(3.00)，高于绝大多数贝类，处于第三营养级边缘。稳定同位素记录了生物长期摄食的情况(Camin *et al*, 2016、2018; Kang *et al*, 2021; 赵永松等, 2024)，这些结果揭示了底播仿刺参在投入海藻场前摄食的主要食物来源与野生仿刺参有所差异。在养殖条件下，仿刺参幼体、稚参培育过程中，根据不同发育阶段的营养需求不同，投喂盐藻(*Dunaliella salina*)、小新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)等微藻(王晓艳等, 2018)；用海藻粉混合虾粉、贝类和鱼糜对仿刺参进行投喂(殷旭旺等, 2015)，但随着海藻的过度开发利用，资源日渐匮乏，养殖饵料逐渐开发陆生植物如豆粕、麸皮、玉米粉、地瓜粉等原料(王晓艳等, 2018; 刘泽鑫等, 2023; Yu *et al*, 2015)。结合以上前期研究，本研究结果指示了底播仿刺参还存留养殖过程中获得的稳定同位素特征。

3.2 仿刺参稳定同位素特征差异

稳定同位素示踪技术已被证明是食品溯源的可靠且有效的方法，逐渐被用于确定水产品的地理来源(Li *et al*, 2016; Kang *et al*, 2021)，这其中重要的部分归咎于溯源地食物源等对摄食者的贡献，也就是说各产地或生产方式的食物来源差异在一定程度上决定了仿刺参的稳定同位素特征。刺参 $\delta^{13}C$ 特征揭示了其他区域近海刺参与长山列岛近海刺参的地理差异(Newsome *et al*, 2007)，相关研究记录的其他区域仿刺参 $\delta^{13}C$ 特征与研究结果相符(Kang *et al*, 2021)，如大连近海(–15.44‰±2.04‰)、福建近海(–17.47‰±0.48‰)、青岛近海(–15.84‰±2.04‰)、东营近海(–17.10‰±1.05‰)和秦皇岛(–16.62‰±0.38‰)均高于本研究区域野生仿刺参平均值–19.48‰，以及底播仿刺参平均值–19.13‰，体现了仿刺参 $\delta^{13}C$ 特征显著的地域性差异。

仿刺参 $\delta^{15}N$ 特征所指示的更多是产出方式差异。本研究结果与其他产出区域的仿刺参一致，养殖仿刺参 $\delta^{15}N$ 特征显著高于野生刺参($P<0.01$)，如福建(10.08‰±1.48‰)、青岛(9.47‰±2.29‰)、大连(10.81‰±1.16‰)和秦皇岛(9.70‰±2.34 ‰)(Kang *et al*, 2020)。影响养殖仿刺参 $\delta^{15}N$ 特征的最重要原因是外源饲料的添加(胡冉冉等, 2019; 蒋冰雪等, 2021)。鼠尾藻等马尾藻属的大型褐藻被认为是养殖仿刺参最适合的饵料，由于天然马尾藻场的过度开采，以及无法商业化的规模生产，导致马尾藻不能满足仿刺参养殖生产的需求，人们开始使用海带、裙带菜和石莼等作为替代饵料(王晓艳等, 2018、2019; 白伟等, 2020; 刘泽鑫等, 2023)，这也符合绿藻对长山列岛海藻场底播仿刺参食物源贡献度较高的结果。另有研究开始探索用陆源食物，如麦麸、红薯秧、玉米粉和豆粕等植物类饵料(王晓艳等, 2018; 刘泽鑫等, 2023)进行投喂仿刺参，这会显著影响仿刺参的 $\delta^{13}C$ 特征(Newsome *et al*, 2007)；采用如鸡肉、兔肉、鱼肉、扇贝、虾壳等动物类饵料(王晓艳等, 2018; 刘泽鑫等, 2023)，不仅会影响仿刺参的 $\delta^{13}C$ 特征，还会显著影响仿刺参的 $\delta^{15}N$ 特征(Caut *et al*, 2009)。

4 结论与展望

本研究基于稳定同位素分析，识别了长山列岛海藻场不同产出方式的仿刺参相对营养级及其食物来源。研究结果显示，不同产出方式下的仿刺参具有差异：养殖和底播仿刺参 $\delta^{15}N$ 特征显著高于野生仿刺参，相应的营养级也较高；野生仿刺参主要食物来源为海藻场大型藻类，而养殖仿刺参由于外源饲料的添加，导致其 $\delta^{13}C$ 特征与野生刺参具有显著差异。

以上稳定同位素特征差异可以作为近海仿刺参溯源的研究基础。稳定同位素作为特定生境塑造的生物"天然指纹"，是一种极具前景的识别农副生态产品真实性和溯源性的可靠工具，随着相关研究的不断完善，将来可以实现仿刺参的地理来源追溯、原产地追溯、生产方法追溯等需求。

参 考 文 献

白伟, 吴香莹, 左然涛, 等. 饲料中添加不同海藻对刺参幼参生长、免疫、消化及营养组成的影响. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2): 169–176 [BAI W, WU X Y, ZUO R T, *et al*. Effects of dietary sea weed levels on growth, immunity, digestion and nutritional composition of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicas* Selenka. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(2): 169–176]

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. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2005, 35(2): 123–130 [CAI D L, LI H Y, TANG Q S, *et al*. Establishment of continuous nutrient spectrum of food web in Yellow Sea and East China Sea ecosystem: Results from stable isotope method of carbon and nitrogen. Science in China, Series C, 2005, 35(2): 123–130]

郭盈莹, 丁燕, 徐飞飞, 等. 海参中主要生物活性成分研究进展. 食品科学, 2014, 35(15): 335–344 [GUO Y Y, DING Y, XU F F, *et al*. Progress in research on main bioactive constituents of Sea Cucumber. Food Science, 2014, 35(15): 335–344]

何丽霞, 陈启贺, 刘睿, 等. 海参寡肽海参寡肽: 免疫调节作用及机制研究. 科技导报, 2016, 34(11): 42–47 [HE L X, CHEN Q H, LIU R, *et al*. Sea cucumber oligopeptides: Immunomodulatory effects and its mechanism. Science & Technology Review, 2016, 34(11): 42–47]

胡冉冉, 邢冉冉, 张九凯, 等. 海参鉴别技术研究进展. 食品科学, 2019, 40(7): 304–313 [HU R R, XING R R, ZHANG J K, *et al*. Advances in identification of sea cucumber. Food Science, 2019, 40(7): 304–313]

蒋冰雪, 张晓梅, 何晓霞, 等. 商品海参溯源分析技术研究进展. 食品科学, 2021, 42(13): 309–318 [JIANG B X, ZHANG X M, HE X X, *et al*. Recent advances in analytical techniques for the traceability of commercial sea cucumber. Food Science, 2021, 42(13): 309–318]

刘泽鑫, 武琳, 韩雨哲, 等. 大型海藻及陆生植物在仿刺参饲料中应用的研究进展. 饲料工业, 2023, 44(24): 24–29 [LIU Z X, WU L, HAN Y Z, *et al*. Research progress on application of macroalgae and terrestrial plants in *Apostichopus japonicus* feed. Feed Industry, 2023, 44(24): 24–29]

孙志恒, 刘桂英, 王冰姿, 等. 仿刺参中两种新海参烷型皂苷. 高等学校化学学报, 2023, 44(4): 35–42 [SUN Z H, LIU G Y, WANG B Z, *et al*. Two new holostane-type glycosides from *Apostichopus japonicus* Selenka. Chemical Journal of Chinese Universities, 2023, 44(4): 35–42]

王摆, 田甲申, 董颖, 等. 应用稳定同位素分析辽东湾池塘仿刺参的食性. 水产科学, 2019, 38(2): 236–240 [WANG B, TIAN J S, DONG Y, *et al*. Using carbon and nitrogen stable isotopes to evaluate feeding habits of sea cucumber *Apostichopus japonicus* in aquaculture ponds in Liaodong Bay. Fisheries Science, 2019, 38(2): 236–240]

王晓艳, 乔洪金, 黄炳山, 等. 5 种海藻在刺参幼参饲料中的应用研究. 渔业科学进展, 2019, 40(3): 160–167 [WANG X Y, QIAO H J, HUANG B S, *et al*. Application research of five seaweeds in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka). Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(3): 160–167]

王晓艳, 乔洪金, 黄炳山, 等. 海藻在刺参养殖中的营养应用研究进展. 海洋渔业, 2018, 40(3): 377–384 [WANG X Y, QIAO H J, HUANG B S, *et al*. Research progress of algae nutrition utilization in *Apostichopus japonicus* culture. Marine Fisheries, 2018, 40(3): 377–384]

王志刚, 胡凡光, 郭萍萍, 等. 鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)对刺参生长及水环境的影响. 渔业科学进展, 2015, 36(3): 125–130 [WANG Z G, HU F G, GUO P P, *et al*. The effects of *Sargassum thunbergii* on the growth of sea cucumbers and the water environment. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(3): 125–130]

殷旭旺, 李文香, 白海锋, 等. 不同海藻饲料对刺参幼参生长的影响. 大连海洋大学学报, 2015, 30(3): 276–280 [YIN X W, LI W X, BAI H F, *et al*. Effects of different seaweed diets on growth of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Journal of Dalian Ocean University, 2015, 30(3): 276–280]

赵永松, 单秀娟, 杨涛, 等. 稳定同位素模型在水生生态系统食物网中的研究进展. 渔业科学进展, 2024, 45(1): 1–13 [ZHAO Y S, SHAN X J, YANG T, *et al*. Research progress of stable isotope models in aquatic ecosystem food webs. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(1): 1–13]

AMININ D L, MENCHINSKAYA E S, PISLIAGIN E A, *et al*. Anticancer activity of sea cucumber triterpene glycosides. Marine Drugs, 2015, 13(3): 1202–1223

CAMIN F, BONTEMPO L, PERINI M, *et al*. Stable isotope ratio analysis for assessing the authenticity of food of animal origin. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(5): 868–877

CAMIN F, PERINI M, BONTEMPO L, *et al*. Stable isotope ratios of H, C, O, N and S for the geographical traceability of Italian rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Food Chemistry, 2018, 267: 288–295

CAUT S, ANGULO E, COURCHAMP F, *et al*. Trophic experiments to estimate isotope discrimination factors. Journal of Applied Ecology, 2010, 47(4): 948–954

CAUT S, ANGULO E, COURCHAMP F. Variation in discrimination factors (Δ^{15}N and Δ^{13}C): The effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction. Journal of Applied Ecology, 2009, 46(2): 443–453

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. Ecology, 2017, 98(6): 1498–1512

FENG J H, ZHANG L N, XIA X B, *et al*. Effect of geographic variation on the proteome of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). Food Research International, 2020, 136: 109498

FENG J X, GAO Q F, DONG S L, *et al*. Trophic relationships in a polyculture pond based on carbon and nitrogen stable isotope analyses: A case study in Jinghai Bay, China. Aquaculture, 2014, 428/429(1): 258–264

GAO Y, LI Z B, QI Y X, *et al*. Proximate composition and nutritional quality of deep sea growth sea cucumbers (*Stichopus japonicus*) from different origins. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(7): 2378–2383

HUSSEY N E, MACNEIL M A, MCMEANS B C, *et al*. Rescaling the trophic structure of marine food webs. Ecology Letters, 2014, 17(2): 239–250

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. Journal of Animal Ecology, 2011, 80(3): 595–602

KANG X M, ZHAO Y F, LIU W, *et al*. Geographical traceability of sea cucumbers in China *via* chemometric analysis of stable isotopes and multi-elements. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 99: 103852

KANG X M, ZHAO Y F, SHANG D R, *et al*. Identification of the geographical origins of sea cucumbers in China: The application of stable isotope ratios and compositions of C, N, O and H. Food Control, 2020, 111: 107036

LI L, BOYD C E, SUN Z L. Authentication of fishery and aquaculture products by multi-element and stable isotope analysis. Food Chemistry, 2016, 194: 1238–1244

LI M, GAO Y, QI Y X, *et al*. Assessment of the nutritional value of cultured sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2021, 30(7): 868–879

LI M, QI Y X, MU L, *et al*. Effects of processing method on chemical compositions and nutritional quality of ready-to-eat sea cucumber (*Apostichopus japonicus*). Food Science & Nutrition, 2019, 7(2): 755–763

NAGELKERKEN I, GOLDENBERG S U, FERREIRA C M, *et al*. Trophic pyramids reorganize when food web architecture fails to adjust to ocean change. Science, 2020, 369(6505): 829–832

NEWSOME S D, DEL RIO C M, BEARHOP S, *et al*. A niche for isotopic ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(8): 429–436

PARNELL A C, PHILLIPS D L, BEARHOP S, *et al*. Bayesian stable isotope mixing models. Environmetrics, 2013, 24(6): 387–399

REUM J C P, JENNINGS S, HUNSICKER M E. Implications of scaled δ15N fractionation for community predator-prey body mass ratio estimates in size-structured food webs. Journal of Animal Ecology, 2015, 84(6): 1618–1627

WEN J, HU C Q, FAN S G. Chemical composition and nutritional quality of sea cucumbers. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(14): 2469–2474

XU C, ZHANG R, WEN Z Y. Bioactive compounds and biological functions of sea cucumbers as potential functional foods. Journal of Functional Foods, 2018, 49: 73–84

YU H B, GAO Q F, DONG S L, *et al*. Changes in fatty acid profiles of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) induced by terrestrial plants in diets. Aquaculture, 2015, 442: 119–124

(编辑 冯小花)

Food Source Analysis of Sea Cucumber (*Apostichopus japonicus*) in Seaweed Bed of Changshan Archipelago Indicated by Stable Isotopes

QU Pei[1①], YU Guoxu[2], PANG Min[1], DU Lixia[3], WANG Penggong[4], GONG Yuchen[1], WU Zhongxun[2], CHU Yongzhong[2], ZHOU Jun[2], SUN Chang[1], ZHANG Zhaohui[1], WANG Zongling[1]

(1. *First Institute of Oceanography, Observation and Research Station of Bohai Strait Eco-Corridor, Ministry of Natural Resources, Qingdao* 266061, *China*; 2. *Changdao National Marine Park Management Center, Yantai* 265899, *China*; 3. *WWF Beijing Office, Beijing* 100037, *China*; 4. *China Certification & Inspection Group Shandong Testing Co., LTD., Qingdao* 266000, *China*)

Abstract Sea cucumber *Apostichopus japonicus*, belonging to the family Stichopodidae, is primarily distributed in seaweed beds in the Bohai Sea and Yellow Sea of China. It is characterized as having high nutritional value and valued for its taste, containing polysaccharides, saponins, unsaturated fatty acids, amino acids, and other bioactive substances. It also possesses multiple biological functions, such as cancer prevention, immune regulation, prevention of digestive tract injuries, reduction of inflammation, and other pharmacological effects. The multiple nutrients and biological functions of sea cucumbers are influenced by the environment and output process.

Food sources are considered the main factors leading to variation in their chemical composition. This study analyzed the trophic level and food sources of sea cucumber in the seaweed bed of Changshan Archipelago based on the carbon and nitrogen stable isotope ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) analysis.

① Corresponding author: QU Pei, Email: qupei@fio.org.cn

The average $\delta^{13}C$ value of macroalgae was –20.24‰, ranging from –29.32‰ to –11.19‰, while the average $\delta^{15}N$ value was 8.13‰, ranging from 3.32‰ to 14.64‰, which covered the distribution range of sea cucumber values. The average $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values of sea cucumbers from the study site were –19.48‰ and 8.81‰, respectively, with $\delta^{13}C$ ranging from –22.04‰ to –17.15‰ and $\delta^{15}N$ ranging from 6.40‰ to 11.54‰. The average $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values of sea cucumbers from the sowing area were –19.13‰ and 9.97‰, significantly higher than those of wild sea cucumbers ($P<0.01$), which had values of –19.84‰ and 7.66‰ in the seaweed bed. These results indicated that macroalgae in the seaweed bed were the dominant food source of the wild sea cucumbers, while sowing sea cucumbers retained some stable isotopic characteristics acquired during the breeding process.

The average relative trophic level of wild sea cucumbers was 2.32, the lowest among the marine animals collected, which was 0.68 lower than that of sea cucumbers in the sowing area (3.00). Sea cucumbers exhibited a low trophic level similar to other echinoderms, such as sea urchin (2.39±0.15), and shared this characteristic with most shellfish, including *Abalone rugosa* (2.33±0.08), *Mussel purpurea* (2.48±0.12), and oyster (2.56±0.12). However, the trophic level of mollusks such as shellfish was not significantly higher than that of sowing sea cucumbers. The trophic level of wild and sowing sea cucumber was significantly lower than that of sea star *Asterias amurensis* (3.33±0.50) ($P<0.01$). The trophic level results indicated that wild sea cucumbers were the primary consumers in the seaweed bed, with their potential food sources being local primary producers. The $\delta^{13}C$ values of macroalgae ranged from –29.32‰ to –11.19‰, and $\delta^{15}N$ values ranged from 3.32‰ to 14.64‰, encompassing the stable isotope values of sea cucumbers, indicating that macroalgae contributed the majority to the diet of wild sea cucumbers with a contribution degree of 0.78. Based on this result, macroalgae were further subdivided into brown algae, green algae, and red algae as different food sources.

The average $\delta^{13}C$ of red algae was –22.80‰, ranging from –29.32‰ to –17.70‰, which was significantly lower than that of green algae and brown algae ($P<0.01$). The average $\delta^{15}N$ of red algae was 8.10‰, ranging from 6.12‰ to 10.60‰. The average $\delta^{13}C$ of brown algae was-20.10‰, ranging from –27.45‰ to –14.61‰. The average $\delta^{15}N$ of brown algae was 7.26‰, ranging from 3.32‰ to 11.72‰, which was significantly lower than that of green algae and red algae ($P<0.01$), and close to that of wild sea cucumber (average $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values were –19.84‰ and 7.66‰, respectively). The average $\delta^{13}C$ of green algae was –19.33‰, ranging from –24.76‰ to –11.19‰. The average $\delta^{15}N$ of green algae was 9.12‰, ranging from 4.72‰ to 14.64‰, which was significantly higher than that of red algae and brown algae ($P<0.01$). The average contribution degree of brown algae to the diet of wild sea cucumber was 0.320, ranging from 0.02 to 0.76. The average contribution of red algae was 0.224, ranging from 0 to 0.56. The average contribution of green algae was 0.222, ranging from 0 to 0.52. The feeding preferences of wild sea cucumber in seaweed beds were as follows: large algae (brown algae > red algae > green algae) > microalgae > seagrass, and other marine organisms.

Stable isotope analysis (SIA) has been proven to be a reliable and effective method for determining the geographical origin of aquatic products, which can be attributed to its contribution to food source traceability. The stable isotope characteristics of sea cucumbers indicate differences in food sources from different locations or production methods. To further compare these differences, sea cucumbers from other coastal areas were included in the discussion to reveal regional variations. In this study, we identified the differences between wild and cultured sea cucumbers from various growth localities in terms of food sources and stable isotope characteristics, which helped us understand the food sources of sea cucumbers in the seaweed beds and provide essential evidence for traceability.

Key words　Sea cucumber; Stable isotope; Food source; Macroalgae; Sea grass