

DOI: 10.12264/JFSC2024-0243

高通量测序分析东山湾代表性鱼类对污损生物的摄食差异

谭清元^{1,2}, 张方圆^{1,2}, 赵峰², 杨刚², 张涛²

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海长江口渔业资源增殖和生态修复工程技术研究中心, 上海 200090

摘要: 近年来, 生物污损对我国海水养殖业造成了严重的经济损失。为探索一种新型、绿色的防控技术, 本研究选择长鳍篮子鱼(*Siganus canaliculatus*)、黄鳍棘鲷(*Sparus latus*)、平鲷(*Rhabdosargus sarba*)和双刺三棘鲷(*Triacanthus biaculeatus*)等 4 种福建东山湾代表性鱼类作为研究对象, 利用高通量测序技术分析了这些鱼类消化道内的 18S rDNA 基因, 以查明其食物组成, 并探讨它们对污损生物的摄食差异。研究结果显示, 4 种鱼类的食物组成存在显著差异。双刺三棘鲷主要以硬骨鱼类为食, 表现出明显的肉食性偏好; 而长鳍篮子鱼、黄鳍棘鲷和平鲷则表现为杂食性, 其中黄鳍棘鲷偏向植物性饵料, 平鲷更偏于肉食性。值得注意的是, 长鳍篮子鱼在摄食污损生物方面表现出较高的偏好, 尤以海鞘纲生物为主要食物。研究还发现, 大规格的长鳍篮子鱼[(180±2) mm]相比小规格[(120±2) mm], 摄食海鞘的量更大, 摄食的种类也更多。本研究揭示了长鳍篮子鱼在污损生物生态防治中的潜在应用价值, 研究结果为探索污损生物的生态防治策略和方法提供了新的见解和依据。

关键词: 生物污损; 食性; 长鳍篮子鱼; 海鞘; 18S rDNA

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2025)01–0083–10

海洋污损生物是指生长在船底、码头、管道、网箱和人工设施上的动物、植物和微生物的总称。生物污损可以定义为污损生物在各类人造构筑物设施上附着聚集, 并且对人类的生产活动产生不利影响的现象^[1]。相关研究统计, 全世界记录的污损生物有 4000 余种, 主要包括大型藻类、水螅、外肛动物、龙介虫、双壳类、藤壶和海鞘等^[2]。中国作为世界上最大的海产品出口国, 海水网箱养殖已经成为我国重要的经济支柱之一, 而生物污损防控是海水网箱养殖的一大难点^[3]。根据防除原理, 目前污损生物防治方法主要分为物理防治法、化学防治法和生物防治法这 3 种^[4], 其中, 物理防治法较为传统、使用范围受限, 无法做到提前预防; 化学防治法对环境以及环境中存在的生物都存在影响; 生物防治法包括生物涂料法和

生态防治法, 现有研究中生物涂料法仍停留在实验室阶段, 实际运用困难, 利用食物链下行效应对污损生物进行控制是目前海洋污损生态防除领域的研究热点之一^[5]。例如丁平真^[6]利用长鳍篮子鱼(*Siganus canaliculatus*)杂食性偏植食性喜食浒苔的特性, 对绿潮藻浒苔进行防治, 将其作为清除绿潮的工具种。利用食物链下行效应探究出的新型生态防治法正在成为一种新的污损防治途径。

东山湾地处台湾海峡西侧, 生物资源量丰富, 群落结构复杂多样, 是我国东南沿海重要的渔业生产基地^[7–11], 1999—2012 年间东山湾海水养殖面积扩大了 10 倍^[12]。统计数据显示, 2019 年东山湾浅海、网箱、滩涂、池塘养殖面积达 7377 hm², 其中, 鱼类、贝类、藻类和池塘养殖面积分别约

收稿日期: 2024-08-23; 修订日期: 2024-10-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2601305); 上海市科技兴农项目[沪农科创字(2022)第 2-1 号].

作者简介: 谭清元(2000–), 男, 硕士, 主要研究方向为污损生物的调查与治理. E-mail: tqcynhbes@163.com

通信作者: 张涛, 研究员, 主要从事鱼类生态学与繁育生物学研究, E-mail: zhangtaifi@163.com; 杨刚, 副研究员, 博士, 主要从事长江口及邻近水域的水生生物多样性和资源变动规律, E-mail: yangg@ccsf.ac.cn

为 172 hm²、4912 hm²、1200 hm² 和 1093 hm²^[13]。鱼类养殖主要为网箱养殖, 主要养殖品种为斜带髯鲷、真鲷、鲈以及石斑鱼等, 养殖产量为 1.2×10⁴ t。但是, 东山湾海水养殖在发展过程中, 海洋生物污损问题逐渐凸显, 是亟须解决的难题^[14]。现有研究发现, 东山湾污损生物种类丰富, 附着强度大, 种类组成主要为近岸暖水种, 主要包括多毛类、甲壳类、软体动物、藻类、海鞘类等, 群落组成与厦门湾、三沙湾相近, 与泉州湾、汕头湾有一定差异^[15-16]。其中, 主要污损生物海鞘附着期从 5 月开始, 6 月为东山湾海鞘附着的高峰期, 附着时间可持续至 11 月, 夏季为海鞘主要附着季节^[17]; 藤壶的附着高峰期为 4—10 月, 夏季附着强度最高^[18]。东山湾污损生物的附着周期主要都集中在夏季, 与网箱中养殖对象具有相似的生活习性, 两者之间具有竞争关系, 进而严重影响养殖种类品质, 增加养殖成本, 降低养殖产量。此外, 网衣上大量污损生物的附着会导致网衣网孔减小, 甚至堵塞, 阻碍网箱整体的水体交换^[19-21]。

目前, 鱼类的食性研究方法主要包括镜检分析法、稳定同位素示踪法以及高通量测序法^[22-23]。对污损生物有摄食行为的鱼类, 其摄食方式主要为研磨和刮食, 使用镜检分析法通常无法辨认出其食物组成, 而稳定同位素示踪法^[24]无法直接确定摄食关系, 且当饵料生物种类过多或其稳定同位素比值较为接近时, 准确率也会降低。高通量测序法^[25-26]具有数据通量大、灵敏度高的优势, 能够捕获频次低的 DNA 序列并且可将食物分类精确到种级别分类单元, 准确度高。高通量测序法能够解决镜检分析法中的物种鉴定问题, 并且得到的食物谱比稳定同位素法覆盖更加全面, 准

确性更高。目前已有少量研究利用高通量测序技术检测到鱼类胃含物中含有污损生物, 例如: 林先智等^[27]在大亚湾金钱鱼(*Scatophagus argus*)仔稚鱼的胃含物中检出海鞘等, 孙鹏等^[28]在象山港黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)的胃含物中检出海鞘、牡蛎、石莼等。

本研究选取了长鳍篮子鱼、黄鳍棘鲷(*Sparus latus*)、平鲷(*Rhabdosargus sarba*)和双棘三刺鲃(*Triacanthus biaculeatus*)等 4 种东山湾代表性鱼类, 利用 18S rDNA 的 V4 区域通用引物, 运用 Illumina Miseq 高通量测序技术方法对比分析 4 种鱼类的饵料食物组成差异, 以期为后续利用食物链下行效应开展污损生物的生物防治选定目标鱼种。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2023 年 7 月份在福建东山湾海域采集了鱼类样品, 共收集了长鳍篮子鱼、黄鳍棘鲷、平鲷及双棘三刺鲃等 4 种区域代表性鱼类。每种鱼取 6 尾用于食性分析, 为确保样品新鲜程度以及胃含物不会进一步分解, 采集后立即进行生物学指标(体长、体重、肠胃重、净重、摄食强度)测量, 同时解剖取得胃含物置于干冰中保存。4 种实验鱼类的生物学信息如表 1 所示。

1.2 肠道胃含物的 18S rDNA 基因高通量测序

用 QIAamp Fast DNA Stool Mini Kit 试剂盒提取 DNA, 下一步使用扩增片段 380 bp 的通用引物 TAR-euk454FWD1-TAReukREV3 (TAReuk454FWD1: 5'-CCAGCASXCYGCGGTAATTCC-3'; TAReukREV3: 5'-ACTT TCGTTCTTGA-3')对 18S rDNA V4 区域

表 1 东山湾四种鱼类样品基础生物学信息

Tab. 1 Biological information of four fish species collected from Dongshan Bay

种类 species	全长/mm total length	体长/mm body length	体重/g body weigh	净重/g somatic body weight	肠胃重/g intestinal weight	摄食等级 feeding level
长鳍篮子鱼 <i>Siganus canaliculatus</i>	161±30	136±25	66.83±33.34	58.12±28.41	4.50±2.56	3
黄鳍棘鲷 <i>Sparus latus</i>	230±13	196±4	227.09±20.42	213.29±23.31	11.36±2.53	3
平鲷 <i>Rhabdosargus sarba</i>	116±8	97±6	28.09±5.67	26.79±5.48	0.71±0.23	3
双棘三刺鲃 <i>Triacanthus biaculeatus</i>	154±3	129±4	44.32±1.23	36.84±0.98	1.02±0.22	1

进行扩增。扩增在 20 μL 体系中进行: 4 μL 5×FastPfu 缓冲液, 2 μL 2.5 mmol/L dNTPs, 5 μmol/L 的正反引物各 0.8 μL, 0.4 μL FastPfu 聚合酶, 10 ng DNA 模板。PCR 程序为: 95 °C 预变性 3 min; 95 °C 变性 20 s, 55 °C 退火 20 s, 72 °C 延伸 30 s, 进行 5 个循环; 最后 72 °C 下延伸 5 min。

PCR 产物经琼脂糖凝胶电泳检测后, 在 Illumina HiSeq 测序平台进行测序, 得到的下机数据经过拆分、去引物序列、E Reads 拼接、Tags 质量及长度过滤和截取以及去嵌合体后获得最终的有效数据, 然后基于有效数据进行 OUT 聚类分析。选取代表性的 OTUs 序列, 用 RDP Classifier V2.2 方法与 Silva 数据库进行物种系统进化注释分析。当 OTUs 序列在 Silva 数据库中不能匹配相应的门类信息时, 将该序列在 NCBI 中进行 Blast 分析, 进一步确定 OTUs 的分类信息。

1.3 数据分析

使用 Excel 制作 4 种代表性鱼类的稀释性曲线。通过 Excel 统计分析 OTUs 在纲分类水平下的相对丰度, 同时选取 OTUs 相对丰度较高的种类, 使用 BLAST (basic local alignment search tool) 与 GenBank 数据库进行比对, 探究相近的物种信息。选取隶属于污损生物的 OTUs 序列, 并运用 MEGA 11 软件构建系统发育树, 根据各污损生物

的 OTUs 相对丰度分析 4 种鱼对东山湾海域污损生物的摄食差异。

2 结果与分析

2.1 鱼类的食物组成

基于纲分类水平下, 4 种代表性鱼类的胃含物的食物组成成分如图 1 所示。其中, 长鳍篮子鱼胃中食物组成主要隶属于硬骨鱼纲(Osteichthyes)、绿藻纲(Chlorophyceae)、线虫纲(Nematoda)以及海鞘纲(Ascidiacea), 占其总食物来源的 63.76%。黄鳍棘鲷的食物来源主要为硬骨鱼纲和绿藻纲, 这两大主要类群的相对丰度之和占据黄鳍棘鲷食物组成的 81.73%。平鲷的食物组成主要为硬骨鱼纲、线虫纲(Nematoda)以及绿藻纲, 这 3 类群占其总食物量的 95.52%。双棘三刺鲀食物组成主要为硬骨鱼纲, 其相对丰度在 99.5%以上。

综上所述, 双棘三刺鲀为典型的肉食性鱼类, 而长鳍篮子鱼、黄鳍棘鲷和平鲷则表现出杂食性特征。其中, 黄鳍棘鲷的食性以植物性食物为主, 而平鲷则更偏向于肉食性。通过胃含物分析, 发现长鳍篮子鱼食物成分中包含了硅藻纲(Bacillariophyceae)、绿藻纲、双壳纲、海鞘纲、寻常海绵纲(Demospongiae)及珊瑚纲(Anthozoa)中的若干污损生物类群。

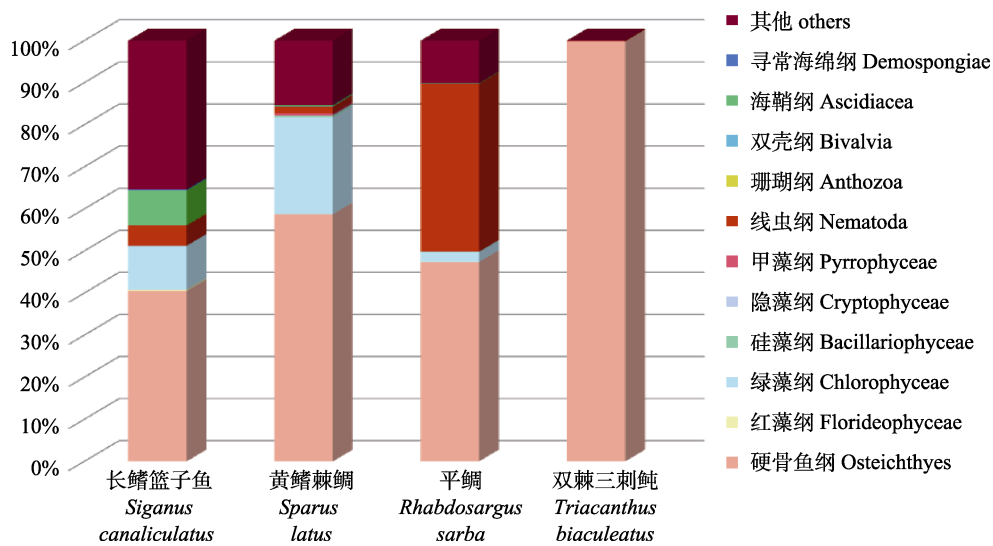


图 1 四种鱼类食物组成
Fig. 1 The food composition of four fish species

2.2 鱼类对污损生物的摄食差异

上述检测结果表明, 双棘三刺鲃对污损生物没有摄食行为, 因此不作为主要分析对象。其余 3 种鱼类食物组成中属于污损生物的种类如图 2 所示。物种比对结果显示: 三者均摄食硅藻、海绵纲的美人海绵(*Halichondria attenuata*)、绿藻纲的石莼(*Ulva flexuosa*)。珊瑚虫纲的美丽固边海葵(*Exaiptasia pallida*)亦属于污损生物, 3 种鱼中只有长鳍篮子鱼对其有摄食行为。长鳍篮子鱼和平鲷对纹藤壶(*Amphibalanus* sp.)有一定摄食行为, 二者摄食量不大。

此外, 研究结果显示, 长鳍篮子鱼、黄鳍棘鲷和平鲷在摄食污损生物方面表现出明显差异。三者在海鞘纲的摄食种类均较为丰富, 尤其是长鳍篮子鱼, 其摄食的污损生物主要集中在海鞘纲内。相比之下, 黄鳍棘鲷和平鲷对海鞘纲物种的摄食相对丰度均未超过 1%。

由图 2 可见, 3 种鱼类在摄食污损生物时主要

选择了海鞘。然而, 不同鱼类对各类海鞘的摄食量存在差异。长鳍篮子鱼、黄鳍棘鲷和平鲷的胃含物中均含有大洋纵列海鞘(*Symplegma rubra*)、绿鳃纵列海鞘(*S. viride*)、皱瘤海鞘(*Styela plicata*)以及红贺海鞘(*Herdmania momus*)。其中, 长鳍篮子鱼胃含物中大洋纵列海鞘和绿鳃纵列海鞘的相对丰度高于黄鳍棘鲷和平鲷, 而黄鳍棘鲷对皱瘤海鞘以及红贺海鞘的摄食量高于长鳍篮子鱼和平鲷的摄食量。此外, 菊海鞘(*Botrylloides niger*)和史氏菊海鞘(*Botryllus schlosseri*)只在长鳍篮子鱼和平鲷的胃含物中检测到。值得注意的是, 在所有分析的鱼类中, 只有长鳍篮子鱼的胃含物中检测到了特定的海鞘纲物种, 包括日本胶海鞘(*Perophora japonica*)、次口海鞘、史氏菊海鞘(*Phallusia mammillata*)、乳突皮海鞘(*Molgula manhattensis*)和硬突小齐海鞘(*Microcosmus exasperatus*)。这一发现表明, 长鳍篮子鱼在摄食海鞘物种方面表现出独特的选择性。

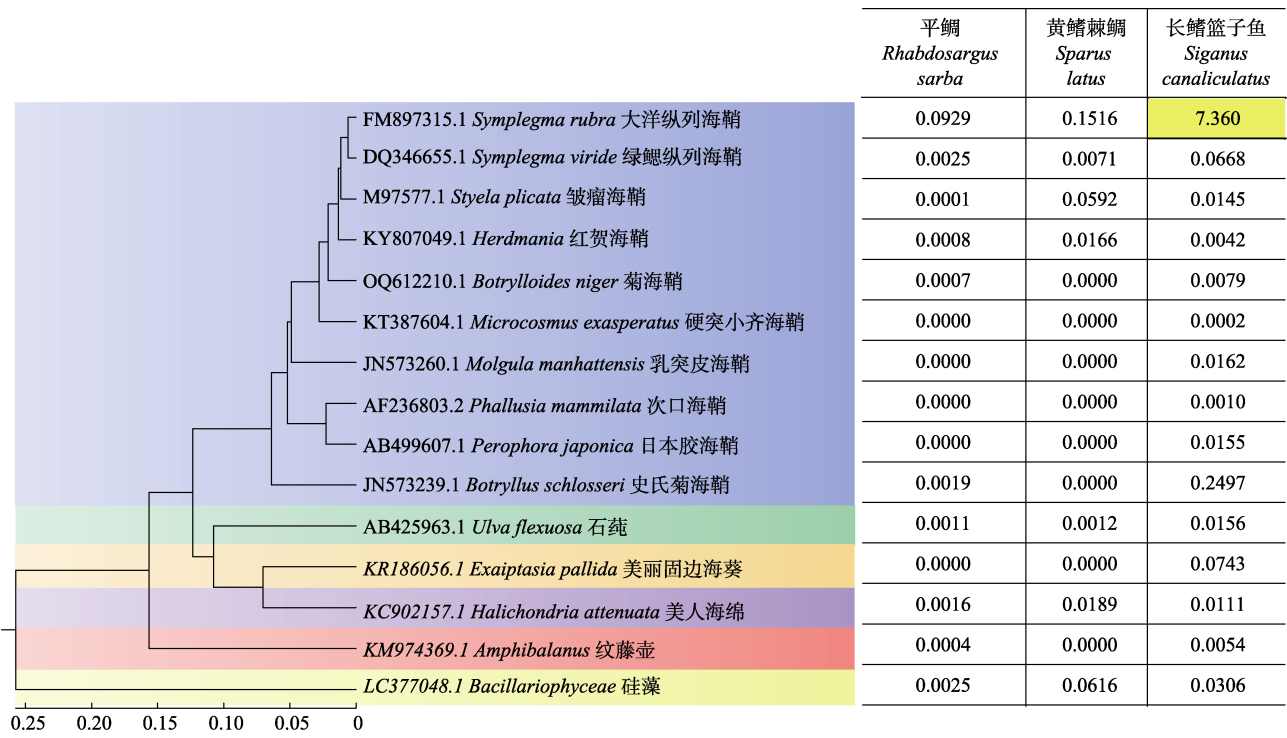


图 2 18S rDNA 基因的高通量分析三种鱼类胃含物中污损生物种类组成
右侧表格中数字表示摄食相对丰度。

Fig. 2 Composition of fouling organisms in stomach contents of three fish species based on high throughput sequencing analysis of 18S rDNA gene
Figures in the right table indicate prey relative abundance.

2.3 不同体长组长鳍篮子鱼对海鞘的摄食情况

研究结果显示长鳍篮子鱼对海鞘的摄食情况强于其他 3 种鱼类。因此, 针对长鳍篮子鱼进行了追加采样, 根据体型大小分为两种: 大规格(180±2) mm 和小规格(120±2) mm。并对两种规格的长鳍篮子鱼胃含物的食物组成再次测序分析, 流程与上述测序流程一致。

测序结果如图 3 所示, 东山海域不同规格的长鳍篮子鱼对海鞘的摄食量存在差异。两种规格的长鳍篮子鱼的食物组成中, 海鞘总相对丰度在大规格

的长鳍篮子鱼胃含物中占比为 15.79%, 在小规格的长鳍篮子鱼胃含物中占比为 8.47%。摄食海鞘的总量上, 大规格的长鳍篮子鱼高于小规格。在食物组成上, 就大洋纵列海鞘、绿鳃纵列海鞘、菊海鞘、乳突皮海鞘以及菊海鞘的相对丰度, 大规格长鳍篮子鱼都高于同种小规格。而日本胶海鞘以及史氏菊海鞘的相对丰度则是小规格高于大规格; 在摄食海鞘的种类上, 规格不同的篮子鱼也有所区别。小规格长鳍篮子鱼的食物组成中并没有检测出次口海鞘和硬突小齐海鞘, 而大规格含有这两个种类的海鞘。

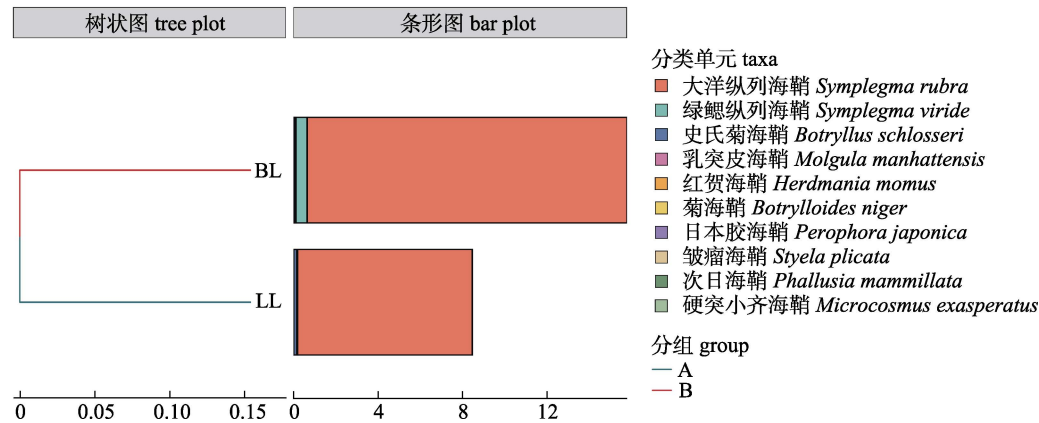


图 3 小规格(A)和大规格(B)长鳍篮子鱼对海鞘的摄食情况

Fig. 3 Species composition of Ascidiacea in stomach contents of small (A) and large (B) *Siganus canaliculatus* samples

3 讨论

3.1 东山岛海域四种鱼类的食物组成差异

基于高通量测序的分析结果, 双棘三刺鲃对肉食性来源的食物摄食丰度较高, 主要摄食硬骨鱼纲的物种。张新艳等^[29]基于 Ecopath 模型对厦门湾的整个生态系统进行分析, 发现厦门湾鲷科属于第Ⅲ营养级, 其食物组成主要为海鲷科、鲷科、鲱科和舌鲷科; 崔钰莹等^[30]使用 DNA 技术和耳石形态鉴定分析热带东太平洋中上层食物网结构, 发现海域中刺鲃科的食物组成主要为硬骨鱼纲, 上述成果与高通量测序结果一致。Lin 等^[31]所编著的《东山湾及其邻近海域常见游泳动物》中提到平鲷、黄鳍棘鲷以及长鳍篮子鱼食性杂, 喜摄食藻类、虾类、有机碎屑等。朱文涛等^[32]利用稳定同位素的方法对大亚湾珊瑚礁生态系统的食物网结构进行分析, 发现珊瑚礁中的平鲷、黄

鳍棘鲷以及长鳍篮子鱼在大亚湾珊瑚礁生态系统中营养级处于 2.7~3.0 之间, 以食物网中鱼类、双壳类、腹足类、藻类等为食。以上研究成果与实验检测出的 3 种鱼类的食物组成结构相一致。黄鳍棘鲷从仔鱼向成鱼发育的过程中, 其对饵料食物的选择发生变化, 从动物性饵料变为以植物性饵料为主, 摄食绿藻等藻类的行为逐渐增加。因此, 在其食物组成上, 藻类占有一定比例。平鲷下颌具门齿和多排臼齿, 利于摄取礁岩上的附着物, 以及嚼碎螺类和蚌类等肉食性来源的食物。同时平鲷食道短粗, 胃分化明显, 幽门部等部位分界明显, 属于肉食性鱼类的特征。

3.2 鱼类对污损生物的摄食差异

4 种鱼类在摄食污损生物方面表现出显著差异。其中, 双棘三刺鲃并未摄食污损生物, 而平鲷和黄鳍棘鲷的摄食量极少。相较之下, 长鳍篮子鱼对污损生物表现出较高的摄食偏好, 其食物组

成中污损生物主要成分包括硅藻、石莼、海鞘、藤壶和海绵等。而且东山湾海域污损生物种类主要有硅藻、石莼、藤壶、海鞘等,以近岸暖水种为主。由此可见,长鳍篮子鱼的食物组成中出现的污损生物种类与东山湾海域优势污损生物种类一致。

因此,在东山岛海域采集的代表性鱼类中,长鳍篮子鱼在防控污损生物方面具有更强的潜力。它更适合在东山湾网箱养殖中担任“清道夫”的角色,有助于清理网箱上的污损生物。现有研究初步证实,篮子鱼在控制藻类生长方面具有较好的潜力。例如,冯广朋等^[33]在研究海水网箱养殖长鳍篮子鱼的摄食与生长特性的实验中,发现长鳍篮子鱼喜欢摄食养殖网箱上附着的藻类,控制整体养殖环境中藻类的繁殖增长。崔兆进等^[34]、郑志勇等^[35]以及王浩等^[36]利用篮子鱼喜食藻类的习性,将篮子鱼放于海水刺参养殖池塘中混养,发现篮子鱼对海水池塘的丝藻控制能够起到良好作用,大大提高了刺参养殖的经济效益。赵博强等^[37]通过实验发现点篮子鱼对长石莼有较强的喜好程度并且摄食积极,具有对辽东湾核电厂冷源取水海域进行海藻生态防治的潜力。长鳍篮子鱼隶属于鲈形目、刺尾鱼亚目、篮子鱼科,主要分布于我国东海和南海,属于暖水性近海鱼,喜结群,常栖息于水体中下层。而且篮子鱼的生长过程与水温有着密切联系,吕旭宁等^[38]研究显示篮子鱼在水温为 24 ℃时,日均增长量达到最高;当平均水温降到 17 ℃时,日均增长量降到最低,且篮子鱼在水温较高时对网衣附着的污损生物的摄食量更高,防控效果更好。而东山湾主要污损生物,如海鞘、藤壶等附着高峰期均集中在夏季,夏季水温较高,与长鳍篮子鱼高水温下生长效率更高以及对污损生物的防控效果更好相互吻合。因此,选择长鳍篮子鱼在东山湾进行污损生物防控具有一定的理论依据和较高的防控潜力。结合东山湾主要污损生物的附着生长周期,可以推测水温高的夏季为最佳防控“窗口期”,此时在养殖网箱中投放一定数量的长鳍篮子鱼将能实现最佳防控效果。

3.3 长鳍篮子鱼针对海鞘摄食的差异

摄食总量的差异与其个体差异相关,个体大小是鱼类种群营养生态位分化的重要驱动因子^[39]。随着体长的增加,长鳍篮子鱼在饵料选择上逐渐转向更高营养级的生物。小个体的长鳍篮子鱼主要依赖于此海域的藻类作为植物性食物来源。然而,随着个体的逐渐发育,藻类不再能够满足其生长需求,长鳍篮子鱼开始摄食此海域中更高级的饵料生物,如海鞘纲物种。因此,在大个体的长鳍篮子鱼中,海鞘的相对丰度显著高于小个体。六丝钝尾虾虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*)^[40]、双带鲹(*Elagatis bipinnulata*)^[41]、大头狗母鱼(*Trachinocephalus myops*)^[42-43]、小眼绿鳍鱼(*Chelidonichthys spinosus*)^[44]等也都有随生长转向更高级饵料生物摄食的倾向。随着鱼类的发育和体长增加,其捕食能力也得到增强,能够摄食的饵料生物种类和个体大小也随之发生变化。这种现象是鱼类生长繁殖过程中的一种适应性变化^[45-46],通常,体长较大的鱼类更倾向于摄食更高级的饵料生物^[47]。同时体长的差异对于其鱼类群落功能群也是一个重要影响因素,不同体长的同种鱼可以规划成不同功能群^[48]。魏秀锦等^[49]将小黄鱼分为幼鱼和成鱼来研究渤海鱼类的功能群组成,分别将它们归为浮游动物食性功能群和虾/鱼食性功能群。由此可见,详细研究不同体长的长鳍篮子鱼对海鞘的摄食变化是非常重要的。长鳍篮子鱼在不同的发育阶段有着不一样的营养需求,随其生长发育,增强了对海鞘的摄食,这种行为既能够满足不同生长发育阶段对整体生长发育的营养需求,又可以缓解它们对饵料资源的竞争。

不同种类的海鞘摄食量差异与海鞘自身形态结构以及不同规格的鱼的摄食选择相关,鱼的个体越长,活力越强,口器发育越完全,臼齿可更轻易地将食物压碎^[50]。污损性海鞘的研究中显示,次口海鞘、硬突小齐海鞘、皱瘤海鞘外表被囊较硬,乳突皮海鞘个体较大^[51-52],小个体篮子鱼口小,口器未发育完全,摄食这几种海鞘困难。而史氏菊海鞘以及日本胶海鞘被囊软,更适合小个体摄食。另外,纵列海鞘呈片状附着,其小个体以及

被囊的软硬程度都能比其他几种海鞘更适合长鳍篮子鱼的摄食。

4 结论

通过对东山岛海域采集的 4 种鱼类食物组成进行 18S rDNA 基因的高通量分析, 发现它们的食物组成存在显著差异。双棘三刺鲃主要以肉食性食物为主, 其食物来源以硬骨鱼纲为主。相比之下, 黄鳍棘鲷、平鲷和长鳍篮子鱼的食物谱更为广泛, 表现出杂食性, 摄食对象不仅包括硬骨鱼纲, 还涵盖线虫纲、绿藻纲、硅藻纲和海鞘纲等。其中, 长鳍篮子鱼的食物组成中海鞘纲的相对丰度明显高于其他 3 种鱼类。此外, 不同规格的长鳍篮子鱼在摄食海鞘的总量上存在差异, 体型越大的个体摄食量越大。不同规格的长鳍篮子鱼在摄食海鞘的种类和摄食量上也存在一定的差异。上述结果为未来在东山湾开展生物防治提供了参考, 特别是在海水网箱养殖中, 通过生物混养的方式清理网箱附着的污损生物时, 关于选择混养鱼类种类及其规格的决策具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] Dobretsov S, Rittschof D. "Omics" techniques used in marine biofouling studies[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(13): 10518.
- [2] Huang Z G. Marine Fouling and Its Prevention (volume II)[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008. [黄宗国. 海洋污损生物及其防除(下册)[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.]
- [3] Schultz M P, Bendick J A, Holm E R, et al. Economic impact of biofouling on a naval surface ship[J]. *Biofouling*, 2011, 27(1): 87-98.
- [4] Wang H T, Zhang D X, Zheng Y. A review: Research progress on prevention and removal technology of marine fouling organisms[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2018, 31(6): 47-50. [王海涛, 张东兴, 郑岩. 防除海洋污损生物附着的技术研究进展[J]. *水产学杂志*, 2018, 31(6): 47-50.]
- [5] Cao W H, Yan T, Liu Y H, et al. Antifouling mechanisms of marine organisms and their application prospects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1): 146-151. [曹文浩, 严涛, 刘永宏, 等. 海洋生物防污作用机制及应用前景[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 146-151.]
- [6] Ding P Z. Green tide algal ecological restoration ability and the green tide algae removal research[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [丁平真. 绿潮藻生态修复能力评估及绿潮藻清除研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [7] Chen S M. Spatiotemporal dynamics of mariculture area in Sansha Bay and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1137-1145. [陈思明. 三沙湾海水养殖区时空动态变化及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1137-1145.]
- [8] Ye S Z, Luo D L, Cai J D, et al. Characteristics of community structure and biomass distribution of fishery resources in Dongshan Bay[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2018, 40(5): 358-365. [叶孙忠, 罗冬莲, 蔡建堤, 等. 东山湾渔业生物群落结构及生物量分布特征[J]. *渔业研究*, 2018, 40(5): 358-365.]
- [9] Wu H R. Survey on status of fishery resources of Dongshan Bay in Fujian[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2016, 38(2): 112-125. [吴煌荣. 福建东山湾渔业资源现状调查研究[J]. *渔业研究*, 2016, 38(2): 112-125.]
- [10] Guan Y, Song P Q, Wang L M, et al. Differences in community structure of nekton in the coastal waters of Dongshan Bay between generations[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2023, 53(4): 31-42. [官莹, 宋普庆, 王良明, 等. 东山湾及其邻近海域游泳动物群落结构的年代际差异性[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 53(4): 31-42.]
- [11] Zhang J, Xu S J, Li Y, et al. Studies on fish community structure in Dongshan Bay and its adjacent areas[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(4): 51-57. [张静, 徐思嘉, 李渊, 等. 东山湾及其邻近海域鱼类群落结构分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(4): 51-57.]
- [12] Gao L M, Li Y, Zhong S L, et al. Remote sensing detected mariculture changes in Dongshan Bay[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(4): 35-42. [高亮明, 李炎, 钟硕良, 等. 东山湾海水养殖布局变化的遥感研究[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(4): 35-42.]
- [13] Zheng H D. Constructing and evaluating an index system for aquaculture carrying capacity in Dongshan Bay[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2019, 41(5): 393-398. [郑惠东. 东山湾水产养殖承载力指标体系的构建与评价[J]. *渔业研究*, 2019, 41(5): 393-398.]
- [14] Lin H S, Wang J J, Zheng C X, et al. Ecological research of marine fouling in Dongshan Bay, China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(6): 160-169. [林和山, 王建军, 郑成兴, 等. 东山湾污损生物生态研究[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(6): 160-169.]
- [15] Yu H T, Ding Y M, Xian W W, et al. Seasonal characteristics of fishery community structures in the Rongcheng Bay[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(2): 67-75. [于海婷, 丁月旻, 线薇薇, 等. 荣成湾渔业资源群落结构季节变化特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2013(2): 67-75.]

- [16] Zhang L, Wang J W, Ren R Z, et al. Fishery resources in northern Haizhou Bay in spring[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(5): 1-7. [张亮, 王尽文, 任荣珠, 等. 海洲湾北部海域春季渔业资源的群落结构特征[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(5): 1-7.]
- [17] Liu L C. Study on the construction of barnacle culture system and its application in marine antifouling[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. [刘梁程. 藤壶养殖系统的构建及其在海洋防污中的应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.]
- [18] Zhang X L, Che Y, Xu S. Biological characteristics of *Ascidian* and its commercial value[J]. Modern Fisheries Information, 2005, 20(5): 3-5. [张晓凌, 车育, 徐杉. 海鞘 (*Ascidian*) 的生物学特性及经济价值[J]. 现代渔业信息, 2005, 20(5): 3-5.]
- [19] Xu B D, Zeng H H, Xue Y, et al. Community structure and species diversity of fish assemblage in the coastal waters of Jiaozhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3074-3082. [徐宾铎, 曾慧慧, 薛莹, 等. 胶州湾近岸浅水区鱼类群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3074-3082.]
- [20] Alberte R S, Snyder S, Zahuranec B J, et al. Biofouling research needs for the United States Navy: Program history and goals[J]. Biofouling, 1992, 6(2): 91-95.
- [21] Wang C C. The Study on the seasonal characteristics of macrofaunal fouling community in the shellfish aquaculture in the South China Sea[D]. Haikou: Hainan University, 2016. [王超超. 南海贝类养殖海域大型污损动物群落季节性变化规律研究[D]. 海口: 海南大学, 2016.]
- [22] Wu P, Wang T, Liu Y, et al. Macroalgal consumption by two herbivorous coral-reef fish species from Jinjing Island, Xisha[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(6): 1509-1516. [吴鹏, 王腾, 刘永, 等. 高通量测序分析西沙晋卿岛两种草食性鱼类对大型海藻的摄食差异[J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1509-1516.]
- [23] Yan L J, Wang P, Shi Q L, et al. Applications of animal diet analysis based on DNA metabarcoding in ecological research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3007-3019. [严丽君, 王普, 施启龙, 等. 动物食性分析在生态学中的应用研究进展——基于 DNA 宏条形码技术[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3007-3019.]
- [24] Wang J, Jiang R J, Hu C L, et al. Feeding ecology of *Engraulis japonicus* based on stomach contents and stable isotope[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6): 2035-2044. [王静, 蒋日进, 胡翠林, 等. 基于胃含物分析和稳定同位素技术鳀的摄食生态研究[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2035-2044.]
- [25] Wang X Q, Wang G H, Qiao F, et al. Progress on high-throughput sequencing and its applications in food web analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2530-2539.
- [26] Liu G, Ning Y, Xia X F, et al. The application of high-throughput sequencing technologies to wildlife diet analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3347-3356. [刘刚, 宁宇, 夏晓飞, 等. 高通量测序技术在野生动物食性分析中的应用[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3347-3356.]
- [27] Lin X Z, Hu S M, Liu S, et al. Comparison between traditional sequencing and high-throughput sequencing on the dietary analysis of juvenile fish[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 3093-3101. [林先智, 胡思敏, 刘胜, 等. 传统测序与高通量测序在稚鱼食性分析中的比较[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 3093-3101.]
- [28] Sun P, Ling J Z, Zhang H, et al. Diet composition and feeding habits of black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) in Xiangshan Bay based on high-throughput sequencing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 41(3): 1221-1228. [孙鹏, 凌建忠, 张辉, 等. 基于高通量测序的象山港海域黑鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*) 食性分析[J]. 生态学报, 2020, 41(3): 1221-1228.]
- [29] Zhang X Y, Chen B, Ding S X, et al. Analysis of ecosystem structure and function changes in Xiamen Bay in the past 10 years based on Ecopath model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(2): 217-224. [张新艳, 陈彬, 丁少雄, 等. 基于 Ecopath 模型的厦门湾生态系统结构与功能变化分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(2): 217-224.]
- [30] Cui Y Y, Lin Q Q, Zhu J F, et al. Analysis of indicators of pelagic food web in the tropical eastern Pacific Ocean[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(6): 1533-1541. [崔钰莹, 林琴琴, 朱江峰, 等. 热带东太平洋中上层食物网结构指数分析[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(6): 1533-1541.]
- [31] Lin L S, Zhang J, Song P Q, et al. Common Nekton in Dongshan Bay and Its Adjacent Waters[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013. [林龙山, 张静, 宋普庆, 等. 东山湾及其邻近海域常见游泳动物[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.]
- [32] Zhu W T, Qin C X, Ma H M, et al. Stable isotope analysis of simple food web in coral reef ecosystem of Daya Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(7): 1112-1123. [朱文涛, 秦传新, 马鸿梅, 等. 大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素[J]. 水产学报, 2020, 44(7): 1112-1123.]
- [33] Feng G P, Zhang L Z, Zhuang P, et al. Feeding habit and growth characteristics of *Siganus canaliculatus* cultured in sea net cage[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(1): 37-42. [冯广朋, 章龙珍, 庄平, 等. 海水网箱养殖长鳍篮子鱼的摄食与生长特性[J]. 海洋渔业, 2008, 30(1): 37-42.]
- [34] Cui Z J, Fu Z, Zhao C L, et al. The introduction of point

- basket fish ecological control of seawater pond macrofilament algae technology[J]. Hebei Fisheries, 2017, 31(5): 26, 33. [崔兆进, 付仲, 赵春龙, 等. 引进点篮子鱼生态防治海水池塘大型丝藻技术[J]. 河北渔业, 2017, 31(5): 26, 33.]
- [35] Zheng Z Y, Wang G Y, Du L, et al. Trial on biological control of ulothrix with *Siganus guttatus* in pond farming of *Apostichopus japonicus*[J]. Hebei Fishiers, 2019(9): 21-22, 26. [郑志勇, 王广宇, 杜磊, 等. 利用篮子鱼控制池塘丝藻养殖刺参技术试验[J]. 河北渔业, 2019(9): 21-22, 26.]
- [36] Wang H, Li H T, Zhao J J, et al. Experiment of polyculture *Siganus guttatus* in pond of sea cucumber[J]. Hebei Fisheries, 2015(3): 29-31. [王浩, 李洪涛, 赵建军, 等. 刺参池塘混养点篮子鱼试验[J]. 河北渔业, 2015(3): 29-31.]
- [37] Zhao B Q, Guan C J, Xu P, et al. Primary study on ecological prevention of the algae using *Siganus guttatus* in the sea area of the water cooling system intake of the nuclear power plant in Liaodong bay[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(1): 46-52. [赵博强, 关春江, 徐鹏, 等. 点篮子鱼(*Siganus guttatus*)对辽东湾核电厂冷源取水海域海藻生态防治的初步探讨[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 46-52.]
- [38] Lyu X N, Jiang Z J, Fang J G, et al. Biological control of macroalgae fouled on the net of marine cage using *Siganus oramin* in northern China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(5): 50-56. [吕旭宁, 蒋增杰, 方建光, 等. 黄斑篮子鱼(*Siganus oramin*)对北方养殖网箱网衣附着藻类的生物清除作用[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(5): 50-56]
- [39] Jiang Y Z, Lin N, Yuan X W, et al. Trophic niches of nine gobiid fishes in Xiangshan Bay determined by carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1579-1585. [姜亚洲, 林楠, 袁兴伟, 等. 基于碳、氮稳定同位素技术研究象山港虾虎鱼类营养生态位[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1579-1585.]
- [40] Yin M C. Fish Ecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. [殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.]
- [41] Chuwen B. Characteristics of the ichthyofaunas of offshore waters in different types of estuary in western Australia, including the biology of black bream *Acanthopagrus butcheri*[D]. Perth: Murdoch University, 2009.
- [42] Sui H Z, Han D Y, Xue Y, et al. Feeding habits of *Rhinogobius pflaumi* in Jiaozhou Bay, China based on carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3789-3796. [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[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3789-3796.]
- [43] Wang S Q, Wang X F, Xu L X, et al. Feeding habits and trophic niche of rainbow runner *Elagatis bipinnulata* in the western and central Pacific Ocean[J]. Environmental Biology of Fishes, 2022, 105(1): 139-149.
- [44] McAskil S, Paxton S, Geist S J. Trophic niche partitioning of three larval *Sciaenidae* species in the north-western Gulf of Mexico[J]. Journal of Plankton Research, 2022, 44(1): 99-115.
- [45] Lu H S, Ou F, Yan Y R, et al. Study on trophic level of main fishes in the Leizhou Bay with stable nitrogen isotope techniques[J]. Haiyang Xuebao, 2009, 31(3): 167-174. [卢伙胜, 欧帆, 颜云榕, 等. 应用氮稳定同位素技术对雷州湾海域主要鱼类营养级的研究[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 31(3): 167-174.]
- [46] Guo J T, Wang T, Chen D F, et al. Feeding habits of *Acanthopagrus schlegeli* in the Daya Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(8): 1041-1050. [郭家彤, 王腾, 陈得仿, 等. 大亚湾黑棘鲷的摄食习性[J]. 中国水产科学, 2021, 28(8): 1041-1050.]
- [47] Li Z H, Xu K D, Jiang R J, et al. Diet composition and feeding habits variation with body length of *Chelidonichthys spinosus* in central and northern East China Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(1): 185-193. [李振华, 徐开达, 蒋日进, 等. 东海中北部小眼绿鳍鱼的食物组成及摄食习性的体长变化[J]. 中国水产科学, 2011, 18(1): 185-193.]
- [48] Pompanon F, Deagle B E, Symondson W O C, et al. Who is eating what: Diet assessment using next generation sequencing[J]. Molecular Ecology, 2012, 21(8): 1931-1950.
- [49] Wei X J, Zhang B, Shan X J, et al. Feeding habits of small yellow croaker *Larimichthys polyactis* in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(6): 1289-1298. [魏秀锦, 张波, 单秀娟, 等. 渤海小黄鱼摄食习性[J]. 中国水产科学, 2018, 25(6): 1289-1298.]
- [50] Yan T, Han S S, Wang J J, et al. An overview of fouling ascidians[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6647-6655. [严涛, 韩帅帅, 王建军, 等. 污损性海鞘的生态特点研究展望[J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6647-6655.]
- [51] Han S S, Cao W H, Chen D, et al. Review of fouling ascidians in the coastal waters of China[J]. Ecological Science, 2018, 37(1): 186-191. [韩帅帅, 曹文浩, 陈迪, 等. 中国沿海污损性海鞘生态特点及研究展望[J]. 生态科学, 2018, 37(1): 186-191.]
- [52] Yan T, Yan W, Dong Y, et al. Marine fouling of offshore installations in the northern Beibu Gulf of China[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2006, 58(2): 99-105.

Analysis of feeding differences on fouling organisms of representative fish species in Dongshan Bay, Fujian by high-throughput sequencing

TAN Qingyuan^{1,2}, ZHANG Fangyuan^{1,2}, ZHANG Tao², ZHAO Feng², YANG Gang²

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Biofouling refers to the phenomenon where fouling organisms attach to and accumulate on artificial surfaces, adversely impacting human production activities. In recent years, the economic losses caused by biofouling have accounted for a substantial portion of the production costs in China's mariculture industry. However, current control technologies remain inadequate, highlighting the urgent need to develop green and sustainable control strategies tailored to marine aquaculture environment. Using trophic cascade effects to control fouling organisms has become a focal point of recent research. This approach enables the selection of different biological agents based on the specific environmental characteristics of a given marine area, achieving effective control of fouling organisms while also providing certain economic benefits. This study focused on the selection of representative fish species including *Siganus canaliculatus*, *Sparus latus*, *Rhabdosargus sarba*, and *Triacanthus biaculeatus*, from the Dongshan Bay region of the Fujian Province, to evaluate their potential as ecological controllers of biofouling in Dongshan Bay. High-throughput sequencing technology was used to analyze the 18S rDNA gene sequences within the digestive tracts of these four fish species to elucidate their dietary composition and assess the differences in their consumption of fouling organisms. The results indicated significant differences in the dietary composition of the four fish species. *Triacanthus biaculeatus* predominantly consumed osteichthyes, displaying a strong carnivorous preference, while *Siganus canaliculatus*, *Sparus latus*, and *Rhabdosargus sarba* exhibited omnivorous feeding habits. Notably, *Sparus latus* showed a preference for herbivorous diet, while *Rhabdosargus sarba* tended towards carnivorous prey. Of particular interest is the finding that *Siganus canaliculatus* demonstrated an obvious preference for consuming fouling organisms, particularly ascidians, as a major component of its diet. Furthermore, the study revealed that larger individuals of *Siganus canaliculatus* [(180±2) mm] consumed a greater quantity and variety of ascidians than smaller individuals [(120±2) mm]. This study highlights the potential application of *Siganus canaliculatus* in the ecological control of biofouling, providing new scientific insights and theoretical support for the development of ecological biofouling control strategies and methods.

Key words: biofouling; feeding habit; *Siganus canaliculatus*; Ascidiacea; 18S rDNA

Corresponding author: YANG Gang. E-mail: yangg@ecsf.ac.cn