

顾靓, 胡思敏, 马林, 等. 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤发育过程的影响[J]. 海洋学报, 2024, 46(9): 64–72, doi:10.12284/hyxb2024092
Gu Liang, Hu Simin, Ma Lin, et al. Effects of different diet culture the developmental process of the *Robertgurneya* sp.[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(9): 64–72, doi:10.12284/hyxb2024092

不同饵料培养对罗格尼猛水蚤发育过程的影响

顾靓^{1,2,3}, 胡思敏^{1,2,4,5}, 马林⁶, 张琛^{1,2,3}, 张贝叶^{1,2,3}, 黄晖^{1,2,4,5,7,8}, 刘胜^{1,2,4,5*}

(1. 中国科学院南海海洋研究所 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院南海海洋研究所 广东省应用海洋生物学重点实验室, 广东 广州 510301; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 三亚海洋生态环境工程研究院 海南省热带海洋生物技术重点实验室, 海南 三亚 572000; 5. 三亚海洋生态环境工程研究院 三亚海洋科学综合(联合)实验室, 海南 三亚 572000; 6. 中国科学院海洋研究所 海洋生物分类与系统演化实验室, 山东 青岛 266071; 7. 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 海南 三亚 572000; 8. 海南三亚海洋生态系统国家野外科学观测研究站, 海南 三亚 572000)

摘要: 猛水蚤是分布广泛的小型底栖桡足类, 在珊瑚礁区的礁石表生藻席中尤为丰富, 由于其生境特殊性, 目前对发育过程、培养条件的研究较少。本研究于 2023 年夏季在海南三亚鹿回头珊瑚礁区采集礁石表生藻席, 从中分离出一种猛水蚤, 经形态学鉴定其属于罗格尼猛水蚤属 (*Robertgurneya* sp.)。在实验室内对其基本发育过程进行观察和记录, 并研究了不同饵料培养方式 (单种藻和混合藻) 对其发育过程的影响。结果显示, 罗格尼猛水蚤的成体体长为 0.5~0.7 mm, 生命周期为 61~68 d。单次怀卵量、产卵次数、繁殖周期和生命周期在不同饵料培养下没有显著差异, 但在混合藻培养下, 罗格尼猛水蚤在胚胎发育期的平均卵径、孵化率、幼体存活率、无节幼虫 VI 期的最大体长明显高于单种藻培养组 ($p < 0.05$), 且其胚胎发育阶段和桡足幼体期的累计发育时间明显较短 ($p < 0.05$)。研究结果表明, 该猛水蚤具有较短的生命周期和较强的繁殖能力, 鉴于藻席中存在丰富的底栖微藻和有机碎屑, 栖息其中的猛水蚤可能能够为珊瑚礁小型鱼类等捕食者提供巨大的潜在食物资源, 因此在珊瑚礁生态系统的物质循环和能量流通中发挥着重要的作用。

关键词: 猛水蚤; 珊瑚礁; 礁石表生藻席; 饵料; 培养方式; 发育过程

中图分类号: Q959.223⁺.32

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)09-0064-09

1 引言

猛水蚤隶属于节肢动物门 (Arthropoda), 桡足纲 (Copepoda), 足甲总目 (Podoplea), 猛水蚤目 (Harpacticoida), 个体较小 (一般体长小于 1 mm), 生长速率快, 且繁殖能力强、世代周期短, 对环境变化较敏感, 易受环境扰动^[1]。猛水蚤垂直分布广, 从潮间带到深海热液口均有分布, 是海洋小型底栖生物中丰度仅次于线虫的第二大类群, 在某些粗砂和海藻为主的底质中通常成为最优势的类群^[2-4]。猛水蚤营养价

值较高, 是多种经济鱼类以及虾蟹的开口饵料, 某些种类可作为海流水团的指示种及海水重金属毒性测试的标准生物^[5-6]。

近年来随着全球变化和人类活动的影响, 珊瑚礁呈现持续退化的趋势, 越来越多的近岸死亡珊瑚礁逐渐被草皮海藻所覆盖^[7]。草皮海藻不仅为多种生物提供食物和栖息场所, 还与其沉积捕获的有机、无机碎屑等非生物组分共同组成了礁石表生藻席 (epilithic algal matrix, 以下简称“EAM”)^[8], EAM 作为浅海珊瑚礁区中最丰富的底质覆盖物, 在迎风面覆盖面积占

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-05-06。

基金项目: 国家自然科学基金 (42176118); 国家重点研发计划课题 (2022FY100602)。

作者简介: 顾靓 (1995—), 女, 河南省南阳市人, 硕士, 主要从事海洋底栖动物生态学研究。E-mail: guliang21@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者: 刘胜 (1970—), 男, 四川省广安市人, 研究员, 主要从事珊瑚礁生态学研究。E-mail: shliu@scsio.ac.cn

30%以上,最高可达80%^[9-10]。研究发现猛水蚤作为EAM生境中的优势种,数量是所有其他小型无脊椎动物总和的7倍,它们个体微小,能够快速高效的消耗和利用初级生产力并将能量进一步传递给更高营养级的生物,在珊瑚礁的能量流动和物质循环中起着重要的作用^[11-13]。但由于它们通常栖息于珊瑚礁的隐蔽生境中,调查采样困难,目前对其生物学特征、生态功能等缺少系统的研究和认识。

三亚鹿回头珊瑚礁区属于典型的岸礁,珊瑚礁石上的藻席覆盖度约为68%~94%^[14],2022年1月调查发现藻席中猛水蚤丰度约为0.84 ind./cm²。EAM中含有丰富的微藻资源,底栖微藻的生物量通常超过上覆水域的浮游植物,研究发现小型隐底栖动物的数量与微藻数量密切相关^[15-16],表明微藻饵料的供给可能是影响EAM中猛水蚤丰度的重要因素。因此,本研究从鹿回头近岸珊瑚礁区EAM中分离了一种猛水蚤为实验对象,对其生命周期进行了观察记录,研究不同饵料培养方式对其发育动态的影响。研究结果有助于认识猛水蚤在珊瑚礁生态系统中的功能作用,也可为猛水蚤的规模化培养提供参考。

2 材料与方法

2.1 微藻培养

实验用到的微藻[扁藻(*Platymonas* sp.)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)、双眉藻(*Amphora* sp.)、角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、叉鞭金藻(*Dicrateria inornata*)]来源于中国科学院南海海洋研究所藻种库(<http://www.algadata.com/>)。在f/2培养基中培养微藻,盐度为30.8~31.9,pH为8.11~8.30,溶解氧为5~8 mg/L,接种后的藻液在FPG三温区光照培养箱(宁波莱福科技有限公司)中进行连续培养,设置光强4 000 lx,光暗周期L:D=12:12,温度为(27±1)°C。培养期间,每天固定时间取样,取样前充分摇匀,吸取1 μL藻液加入过滤海水稀释至1 mL加入鲁哥氏液(5% Lugol's 碘液)固定,充分摇匀后吸取0.1 mL稀释液用浮游植物计数框在显微镜下计数,重复3次,获取每种藻类生长曲线,选取处于对数生长期的微藻作为饵料,微藻浓度约为6.0×10⁵ cells/mL,单种藻投喂时直接稀释至该浓度,混合藻投喂时将单种藻等量混合后进一步稀释至该浓度。

2.2 猛水蚤分离培养

本实验于2023年4月22-29日退潮后在三亚鹿回头近岸珊瑚礁区(18°21'N, 109°47'E)(图1)潮间带采集富含草皮海藻的天然礁石,用过滤海水反复冲洗,将

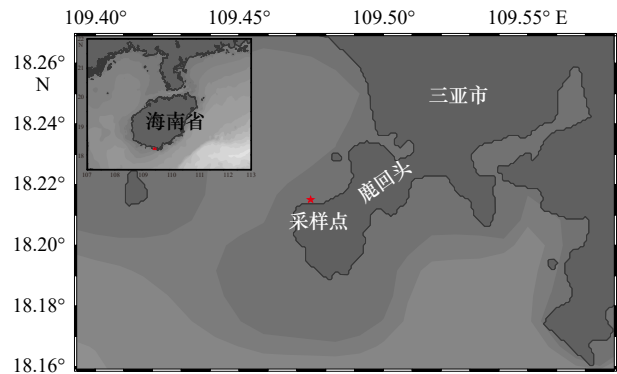


图1 罗格尼猛水蚤的采样区域(红色星号)

Fig. 1 Sample area (red asterisk) of *Robertgurneya* sp.

冲洗后的混合液带回实验室。静置约20 min,用60 μm筛绢过滤冲洗至烧杯中。在SMZ1270体视显微镜下挑取罗格尼猛水蚤进行驯化培养,培养期间每天换水一次,分别投喂单种和混合微藻,对罗格尼猛水蚤的形态特征进行拍照,解剖后确定种类,进行基本生物学和生命周期特征观察。

2.3 实验设置

实验设置单种藻(扁藻)和混合藻(5种微藻)处理组,将不同饵料处理组中培养的健康雌雄性个体成对挑出,分别单独移入6孔细胞培养板中,雌性个体挂卵后将雄性个体移出,待无节幼虫孵出后,将每个个体单独移入新的培养板中进行观察,每组设置24个重复。实验期间,每24 h分别使用ICX41倒置显微镜及SMZ1270体视显微镜对孵化后的无节幼虫和挂卵雌体进行形态观察和拍照,记录怀卵量、孵化量、体长、孵化率、存活率、发育特征等参数,同时清理死亡个体和粪团,更换新鲜的培养液,换水量约70%。

2.4 参数测定

观察时无节幼虫的体长指从眼点处所在的头部到肛门的长度,桡足幼体和桡足成体的体长指从额角与头胸节相接处到尾叉末端的长度。胚胎发育阶段的累计发育时间指从开始怀卵到破膜孵化的总时间;无节幼虫阶段的累计发育时间指无节幼虫I期到无节幼虫VI期的总发育时间;桡足幼体阶段的累计发育时间指桡足幼体I期到桡足幼体V期的总发育时间。

繁殖周期指从成体雌性开始怀卵到幼体发育到成体再次怀卵的时间。生命周期指从成体孵化后的第一天到生长、发育、交配繁殖、到死亡的全过程所经历的时间。产卵次数指的是成体雌性第一次开始怀卵到死亡时的产卵次数。猛水蚤孵化率和存活率计算方式如下:孵化率=单只挂卵雌性成功孵化的无节幼虫数/单只挂卵卵囊中的怀卵量,存活率=成体数量/单只挂卵雌性成功孵化的无节幼虫数。

2.5 数据分析

数据统计方法使用 SPSS 26.0 和 ORIGIN 2023 对数据进行独立样本 t 检验 (independent samples t test) 比较和绘图, 显著性水平为 $p < 0.05$ 。

3 结果

3.1 罗格尼猛水蚤在不同发育阶段的主要形态特征

分离的猛水蚤身体呈圆柱形, 前体部与后体部无明显的分界; 额角大; 雌性第一触角第四节具感觉毛; 第二触角外肢分 3 节; 第二胸足外肢第一节内侧无刚毛, 末节内侧具一根刚毛; 第三胸足内肢第二节内侧具一根刚毛, 尾叉短, 经形态学鉴定属于罗格尼猛水蚤属 (*Robertgurneya* sp.)。观察发现罗格尼猛水蚤多活动于细胞培养板的底部或侧壁, 多集群分布于弱光区域, 对强光刺激比较敏感。雌雄异体, 雌性腹部生殖节处有一较大的突起, 生殖方式为有性生殖, 繁殖习性为多周期性, 一生中可进行多次交配和产卵, 雌性在无节幼虫孵化 1~2 d 内产生新的卵囊, 部分雌性

在怀卵期间与雄性始终处于配对状态, 成对静止或短距离游动生活。

实验观察发现, 罗格尼猛水蚤的生命周期平均为 61~68 d, 繁殖周期约 23~24 d。胚胎发育期的累计发育时间约为 4~5 d, 平均卵径约 45 μm , 卵囊整体颜色在发育过程中不断变浅, 卵球间的界限逐渐清晰, 第一触角、第二触角、大颚、眼点等逐渐发育完全 (图 2B-G)。孵化破膜后进入无节幼虫期, 六次蜕皮后进入桡足幼体阶段 (图 3N I-NVI)。桡足幼体 I 期体长约 180 μm , 5 次蜕皮后发育为成体 (图 3C I-CV), 桡足幼体到成体阶段的累计发育时间约为 10 d。

3.2 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤发育的影响

在不同饵料培养下, 罗格尼猛水蚤成体的个体最大体长和生命周期无显著差异, 雌性的繁殖周期和产卵次数也无显著差异 (表 1), 但罗格尼猛水蚤在不同发育阶段的体长存在差异。混合藻培养下胚胎发育阶段的平均卵径 (43.88 $\mu\text{m} \pm 1.3 \mu\text{m}$) 明显大于单种藻培养组 (41.65 $\mu\text{m} \pm 2.49 \mu\text{m}$) ($p < 0.05$, 图 4b)。虽然

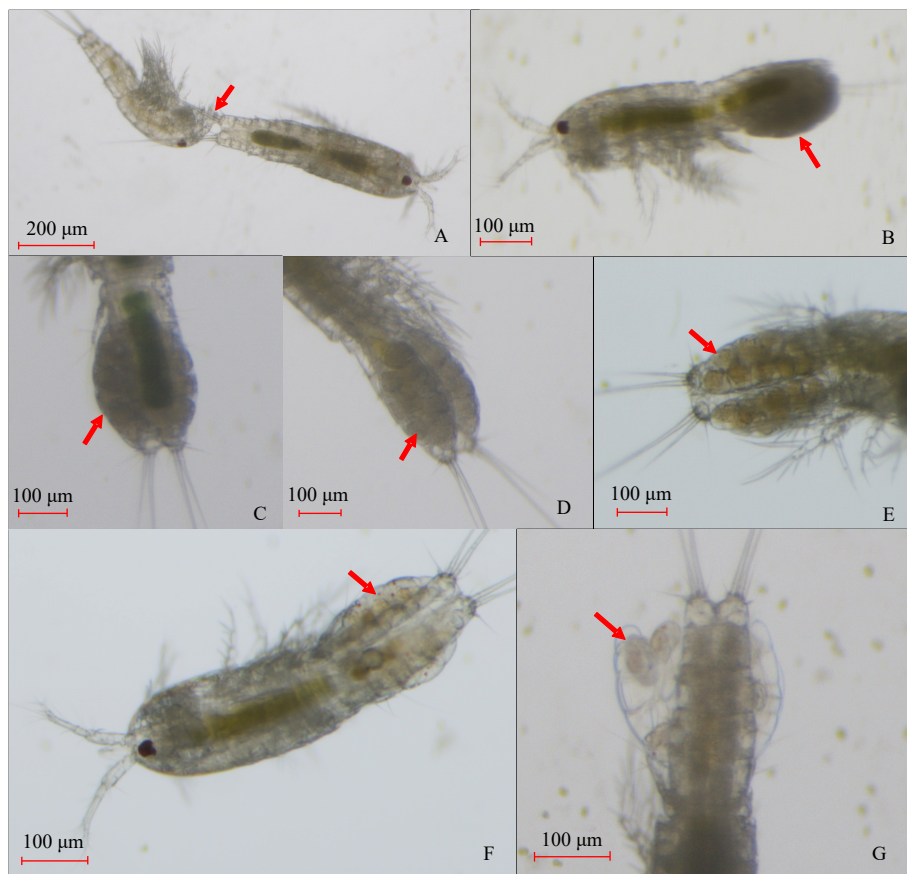


图 2 罗格尼猛水蚤在胚胎发育期的形态变化

Fig. 2 Morphological variation during embryonic development of *Robertgurneya* sp.

- A. Ovulation phase; B. multicellular stage; C. formation of carapace type embryo; D. appearance of appendage anlage; E. formation of pigment; F. appearance of eyespot; G. hatching

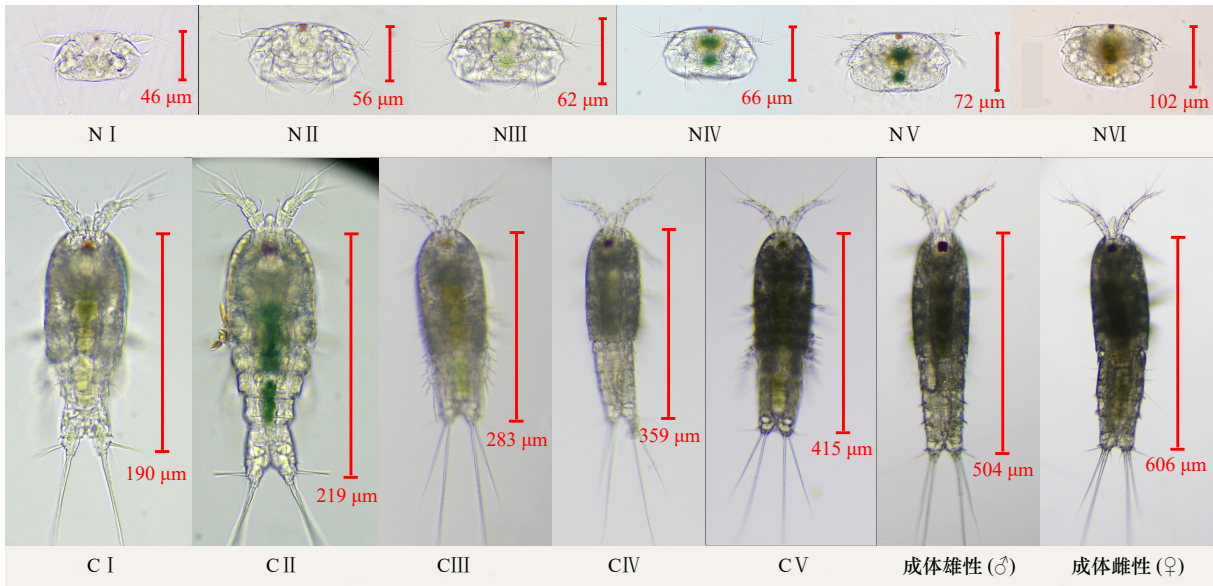


图3 罗格尼猛水蚤在无节幼虫、桡足幼体、成体阶段的形态变化
Fig. 3 Morphological variation during Nauplius, Copepodite and adult of *Robertgurneya* sp.

表1 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤繁殖周期、产卵次数、生命周期的影响

Table 1 Effects of different diet cultivation on the reproduction cycle, brood number and life cycle of the *Robertgurneya* sp.

营养类型	繁殖周期/d	产卵次数/只	生命周期/d
单种藻	24.60 ± 1.14 ^b	6.60 ± 0.55 ^b	64.6 ± 3.36 ^b
混合藻	23.80 ± 0.84 ^b	7.40 ± 0.89 ^b	65.4 ± 4.51 ^b

注: 相同字母代表不同饵料培养对罗格尼猛水蚤的繁殖周期、产卵次数及生命周期在 $p < 0.05$ 水平上无显著差异。

破膜孵化后的无节幼虫体长在不同饵料培养下没有明显差异 (42.22~49.64 μm)(图 4c), 但混合藻培养下

无节幼虫 VI 期最大体长 (102.08 μm ± 2.99 μm) 明显大于单种藻培养组 (90.49 μm ± 1.84 μm) ($p < 0.05$, 图 4d)。

罗格尼猛水蚤在不同饵料培养方式下的各阶段发育时间存在明显差异。在混合藻培养条件下, 猛水蚤的累计胚胎发育时间 (4.04 d ± 0.50 d) 和桡足幼体期的累计发育时间 (8.63 d ± 1.51 d) 明显快于单种藻培养组 (4.82 d ± 0.96 d 和 11.70 d ± 1.25 d) ($p < 0.05$), 但无节幼虫期的累计发育时间 (9.47 d ± 0.83 d) 要长于单种藻培养组 (7.83 d ± 0.39 d) ($p < 0.05$, 图 5a)。

3.3 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤生殖的影响

在不同饵料培养下, 罗格尼猛水蚤在胚胎发育期

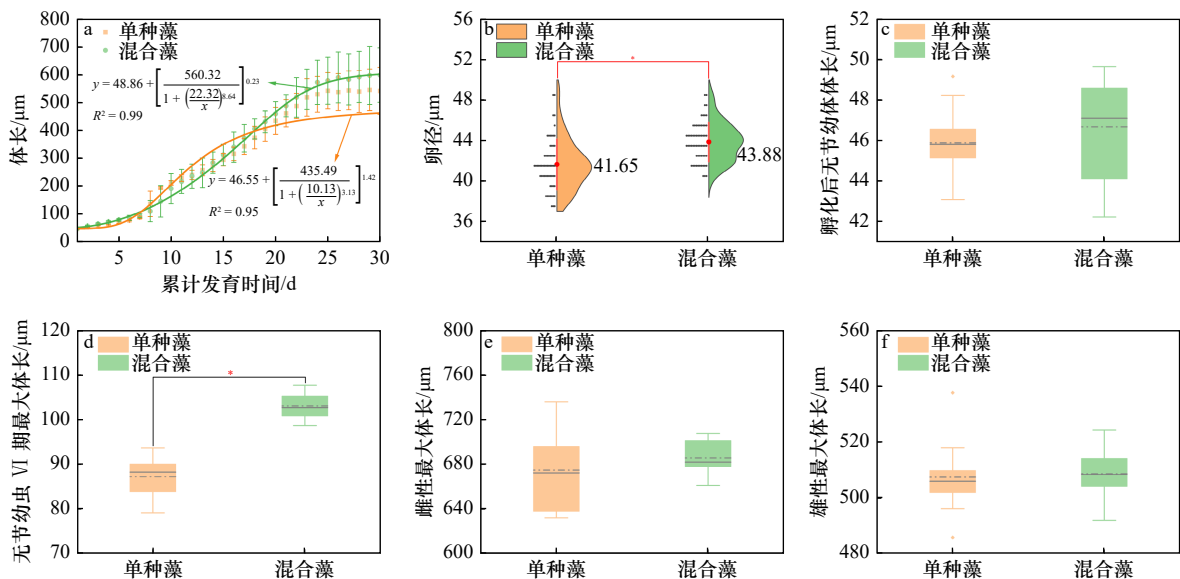


图4 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤各阶段体长的影响
Fig. 4 Effects of different diet cultivation to the body length of *Robertgurneya* sp.

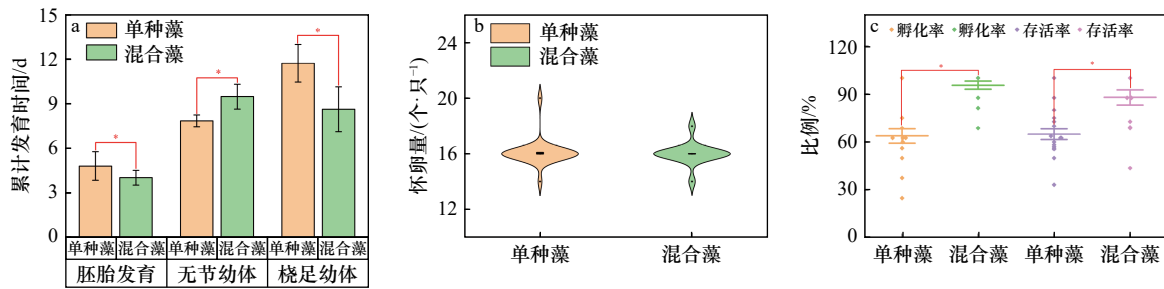


图5 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤累计发育时间(a), 怀卵量(b), 孵化率、成活率(c)的影响

Fig. 5 Effects of different diet cultivation to the accumulated developmental time (a), egg number (b), hatching rate and survival rate (c) of *Robertgurneya* sp.

的单次怀卵量无明显差异(图5b), 多为16个($n = 24$, 图5b), 但在混合投喂下, 孵化率($95.54\% \pm 9.28\%$)和存活率($87.82\% \pm 17.04\%$)明显高于单种藻处理组($63.81\% \pm 21.23\%$ 和 $64.90\% \pm 15.90\%$)($p < 0.05$, 图5c)。

4 讨论

4.1 不同饵料培养对罗格尼猛水蚤生殖的影响

研究发现, 底栖猛水蚤多为碎屑食性或杂食性种类, 有机碎屑、原生动物、细菌、微藻等均可以作为饵料^[17]。本实验中罗格尼猛水蚤单次怀卵量和产卵次数在不同饵料培养方式下没有明显差异, 但单种藻投喂下的产卵率明显较低, 表明总持续产幼量(=单次怀卵量 \times 产卵次数)在单一扁藻投喂下明显较少。以往研究发现, 美丽猛水蚤(*Nitocra affinis californica* Lang, 1965)在钙质角毛藻和混合微藻(50%钙质角毛藻 + 25%眼点拟微球藻 + 25%四列藻)培养下怀卵量和孵化量明显大于其他两种单一绿藻^[18], *Tisbe biminiensis* Volkmann-Rocco, 1973在小新月菱形藻培养下的怀卵量、内禀增长率比*Tetraselmis gracilis* (Kyllin Butcher, 1959)和混合藻培养下更大^[19]。研究指出, 扁藻、小球藻、叉鞭金藻、角毛藻、双眉藻的多不饱和脂肪酸在总脂肪酸中的比例分别为35.61%、20.74%、45.57%、69.11%、35.90%^[20-22], 因此硅藻和金藻比绿藻含有更高比例的多不饱和脂肪酸, 可能具有更高的营养价值, 表明硅藻或者含有硅藻的混合饵料较适宜作为猛水蚤的食物。虽然也有研究指出某些硅藻对桡足类的生长、胚胎发育、繁殖过程存在不利影响^[23], 但混合微藻培养可以有效减弱硅藻对桡足类无节幼虫发育的负面影响^[24], 由此可见, 饵料的营养组成对猛水蚤的发育过程影响因种类而异, 但这种影响机制还有待进一步的研究和分析。

罗格尼猛水蚤在混合藻培养下的孵化率和成活率明显较高, 而在单种藻培养条件下较多卵裂球在色素形成期和眼点形成期逐渐失去活力, 卵囊在扰动下

易脱落, 约41.67%($n = 24$)的挂卵雌性存在卵囊脱落现象, 少数脱落卵囊会再次被悬挂于生殖节处, 但超过90%的卵会在孵化失败后再次脱落。这种现象在以往其他猛水蚤的发育研究中多有报道。环小两栖猛水蚤(*Amphiascopsis cinctus* Claus, 1866)在低浓度的单一海生根鞭毛虫中培养时存在明显的孵化失败现象^[25]; 实验发现含有动物提取物的混合饵料比仅含单一藻的饵料更有利于*Tisbe holothuriae* Humes, 1957雌性增殖以及幼体的存活^[26]; *Tisbe carolinensis* Volkmann-Rocco, 1972在小球藻和聚球藻培养下的卵存活率、产卵次数、怀卵量明显低于筒柱藻及混合藻, 且出现卵囊滞留现象^[27]; 分叉日角猛水蚤*Tisbe furcata* (Baird, 1837)在混合藻或代用饵料混合培养下的群体增殖效果普遍优于单一饵料^[28]。表明猛水蚤在胚胎发育期可能需要摄食多种饵料以满足自身对不同氨基酸、脂肪酸、微量元素等物质的营养需求, 从而积累更多的能量用于繁殖^[29]。EAM中含有的各种微藻和有机碎屑能够给猛水蚤提供充足且多样的食物来源, 预计将会比实验中的个体拥有更高的孵化率。

4.2 不同饵料培养方式对罗格尼猛水蚤发育的影响

实验结果显示不同饵料组成会影响罗格尼猛水蚤不同阶段的累计发育时间及体长。在单一扁藻培养下, 罗格尼猛水蚤在胚胎发育期和桡足幼体期的累计发育时间较长, 发育较慢, 在无节幼虫期的累计发育时间较短但个体较小。其他研究指出, *Tisbe biminiensis* 在用*Tetraselmis gracilis* 作为饵料时的总发育时间要长于用小新月菱形藻作为饵料培养的时间^[19], 表明绿藻可能不是猛水蚤培养的良好饵料。分析北方磷虾(*Meganctiphanes norvegica* (M. Sars, 1857)、*Euphausia krohnii* (Brandt, 1851)与*Nyctiphanes couchii* (Bell, 1853)的蜕皮间隔时间与体型大小的关系发现, 体型较小、生长速度较快的磷虾比体型稍大、生长速度较慢的同种个体有更短的蜕皮间隔时间^[30]。本实验发现罗格尼猛水蚤在扁藻培养无节幼虫VI期的持

续发育时间约 36 h 且最大体长约 93 μm , 而在混合藻投喂下持续发育时间约 52 h 且最大体长约 105 μm , 推测可能原因是单种藻培养下无节幼虫因体型较小导致蜕皮间隔时间较短, 混合藻培养下较大的体型可能延长了罗格尼猛水蚤的蜕皮过程。

研究发现罗格尼猛水蚤在混合饵料培养下的生长状况受饵料种类及其营养价值等因素的影响。使用底栖蓝藻培养的猛水蚤在桡足幼体期的累计发育时间比底栖硅藻长 26%, 且以两种蓝藻为食的底栖猛水蚤在无节幼虫期全部死亡^[31]; 模范大吉猛水蚤 (*Tachidius discipes* Giesbrecht, 1881) 在球等鞭金藻和杜氏盐藻中单独培养时生长较差, 而在三角褐指藻培养时发育较快^[32]; 猛水蚤 (*Harpacticus* sp.) 在几种赤潮藻 (赤潮异弯藻、裸甲藻、小定鞭金藻) 与球等鞭金藻混合培养时的总生长效率明显低于球等鞭金藻^[33]。本实验观察发现部分罗格尼猛水蚤的无节幼虫在扁藻培养下活力较差, 进入桡足幼体期后, 死亡率大大降低但生长缓慢, 说明罗格尼猛水蚤在扁藻投喂下的生长率较低, 可能原因是猛水蚤在发育过程中随着口器大小的变化, 与粒径较大但 EPA 和 DHA 含量相对较低的扁藻 (10~30 μm) 相比, 混合藻中粒径较小但营养价值较高的叉鞭金藻等有助于无节幼虫在开口摄食期获得充足的营养^[34-35], 桡足幼体和成体可以通过从混合微藻中选择性摄食使得群体收益达到最大, 因此在混合藻培养下无节幼虫个体较大且桡足幼体的累计发育时间明显较短, 但具体的生理和分子机制还有待进一步研究。

4.3 展望

猛水蚤在礁石表生藻席中普遍存在, 个体小但丰度高^[36], 富含轮虫和卤虫缺乏的多种高不饱和脂肪酸 (Highly Unsaturated Fatty Acid, HUFA), 尤其是二十碳五烯酸 (Eicosapentaenoic Acid, EPA) 和二十二碳六烯酸 (Docosahexaenoic Acid, DHA) 等^[37], 食性广泛, 营养价值更高且极易被消化吸收, 更有利于海洋鱼类和甲

壳类等的存活、生长和发育^[38]。研究发现当食物组成中加入猛水蚤后, 鱼类幼体的食欲增强且生长速度有所提高^[39], 因而猛水蚤是一种极具潜力的饵料。

EAM 是许多近岸珊瑚礁中隐底栖性鱼类的重要摄食场所^[40], 研究发现这些小型隐底栖鱼类是珊瑚礁中单位面积消耗猛水蚤最多的类群, 如塘鳢科、鰕虎鱼科、雀鲷科、鹦嘴鱼科、隆头鱼科、三鳍鲷科等^[41-42]。通过对澳大利亚奥菲斯岛和先驱者海湾中 10 种常见鱼类进行肠道内容物分析发现, 甲壳动物占肠道内容物的 49.5%~100%, 且猛水蚤是其中的优势类群^[13]。不同鱼类通过不同的进化策略提高对猛水蚤的利用率, 小型肉食性的条尾矶塘鳢 (*Eviota zebrina*) 依靠准确高效的视觉定位利用猛水蚤, 消耗量可达 249 ind./($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 而小型条尾矶塘鳢在珊瑚礁区普遍存在, 经常作为大型鱼类的食物^[13]; 虹纹紫胸鱼 (*Stethojulis strigiventer*) 可以通过特殊的颌骨和口器从 EAM 碎屑及沉积物中分离高营养的猛水蚤^[43], 植食性鹦嘴鱼每天平均消耗约 5.28% (超过 12 000 ind./($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)) 的底栖猛水蚤。这表明猛水蚤在珊瑚礁 EAM 和更高营养级鱼类中发挥着重要的营养级联作用^[9-13], 同时考虑到猛水蚤在 EAM 中的高丰度和较强的繁殖能力, 可以为小型底栖鱼类等生物提供远超其现存生物量的巨大食物资源。

5 结论

罗格尼猛水蚤在近岸珊瑚礁区的礁石表生藻席中广泛存在, 繁殖周期短 (23~24 d), 繁殖力强 (16~22 ind./次), 可以在短时间内大量增殖, 为更高营养级别的生物提供源源不断的食物, 是珊瑚礁 EAM 生境的重要组成部分。通过比较单一饵料与混合饵料对罗格尼猛水蚤发育动态与生命周期的影响, 发现: 混合饵料有益于罗格尼猛水蚤的生长发育和群体增长, 而单一扁藻培养下较小的无节幼虫可能更有益于蜕皮发育成桡足幼体。

参考文献:

- [1] 连光山, 孙柔鑫, 王彦国, 等. 中国海及其邻近海域猛水蚤桡足类多样性 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Lian Guangshan, Sun Rouxin, Wang Yanguo, et al. Species Diversity of Marine Harpacticoid Copepods in China's Seas and Adjacent Waters[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [2] 马林. 中国海底栖桡足类的分类学研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所), 2011.
Ma Lin. Study on the taxonomy of benthic copepods in the China seas[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [3] Willen E. A new species of *Stenhelina* (Copepoda, Harpacticoida) from a hydrothermal, active, submarine volcano in the New Ireland fore-arc system (Papua New Guinea) with notes on deep sea colonization within the Stenhelinae[J]. *Journal of Natural History*, 2003, 37(14): 1691-1711.
- [4] 程浩楠, 王淑红, 程方平. 海洋桡足类作为生物活饵料的研究进展 [J]. *海洋渔业*, 2020, 42(4): 490-501.

- Cheng Haonan, Wang Shuhong, Cheng Fangping. Research progress on marine copepods as live prey[J]. *Marine Fisheries*, 2020, 42(4): 490–501.
- [5] 张志南, 周红, 华尔, 等. 中国小型底栖生物研究的 40 年——进展与展望 [J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(4): 657–671.
Zhang Zhinan, Zhou Hong, Hua Er, et al. Meiofauna study for the forty years in China ——progress and prospect[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(4): 657–671.
- [6] 曾艳艺, 黄小平. 日本虎斑猛水蚤的重金属急性毒性及其作为标准测试生物的潜在意义 [J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(2): 182–188.
Zeng Yanyi, Huang Xiaoping. Acute toxicity of heavy metals to *Tigriopus japonicus* and its implication as a standard test animal[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(2): 182–188.
- [7] 罗海业. 南海中北部珊瑚礁区草皮海藻分布特征及其对石珊瑚的潜在影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2019.
Luo Haiye. The distribution characteristics of turf algae and its potential effect on scleractinian coral in the reefs of min-northern South China Sea[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [8] Connell S D, Foster M S, Airoldi L. What are algal turfs? Towards a better description of turfs[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2014, 495: 299–307.
- [9] Wilson S K, Bellwood D R, Choat J H, et al. Detritus in the epilithic algal matrix and its use by coral reef fishes[J]. *Oceanography and Marine Biology*, 2003, 41: 279–309.
- [10] Tebbett S B, Bellwood D R. Algal turf sediments on coral reefs: what's known and what's next[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110542.
- [11] Kramer M J, Bellwood D R, Bellwood O. Benthic crustacea on coral reefs: a quantitative survey[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2014, 511: 105–116.
- [12] Kramer M J, Bellwood D R, Bellwood O. Large-scale spatial variation in epilithic algal matrix cryptofaunal assemblages on the Great Barrier Reef[J]. *Marine Biology*, 2014, 161(9): 2183–2190.
- [13] Kramer M J, Bellwood O, Bellwood D R. The trophic importance of algal turfs for coral reef fishes: the crustacean link[J]. *Coral reefs*, 2013, 32(2): 575–583.
- [14] 周天成. 三亚鹿回头珊瑚礁区礁石表生藻席演化与食源贡献研究 [D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2023.
Zhou Tiancheng. Studies on the evolution of epilithic algal matrix and their contribution to food sources in Luhuitou fringing reefs[D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [15] Buffan-Dubau E, Carman K R. Diel feeding behavior of meiofauna and their relationships with microalgal resources[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(2): 381–395.
- [16] Klumpp D W, McKinnon A D, Mundy C N. Motile cryptofauna of a coral reef: abundance, distribution and trophic potential[J]. *Marine Ecology - Progress Series*, 1988, 45(1/2): 95–108.
- [17] Guidi L D. The effect of food composition on ingestion, development, and survival of a harpacticoid copepod, *Tisbe cucumariae* Humes[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1984, 84(2): 101–110.
- [18] Matias-Peralta H M, Yusoff F M, Shariff M, et al. Reproductive performance, growth and development time of a tropical harpacticoid copepod, *Nitocra affinis californica* Lang, 1965 fed with different microalgal diets[J]. *Aquaculture*, 2012, 344–349: 168–173.
- [19] Pinto C S C, Souza-Santos L P, Santos P J P. Development and population dynamics of *Tisbe biminiensis* (Copepoda: Harpacticoida) reared on different diets[J]. *Aquaculture*, 2001, 198(3/4): 253–267.
- [20] 蒋霞敏, 郑亦周. 14 种微藻总脂含量和脂肪酸组成研究 [J]. *水生生物学报*, 2003, 27(3): 243–247.
Jiang Xiamin, Zheng Yizhou. Total lipid and fatty acid composition of 14 species of microalgae[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, 27(3): 243–247.
- [21] 高秀芝, 蒋霞敏, 张泽凌, 等. 5 株新分离海洋硅藻总脂和脂肪酸组成的比较研究 [J]. *生物学杂志*, 2014, 31(1): 60–63, 81.
Gao Xiuzhi, Jiang Xiamin, Zhang Zeling, et al. A comparative study on total lipid and fatty acid composition of five newly isolated marine diatom[J]. *Journal of Biology*, 2014, 31(1): 60–63, 81.
- [22] 林锡煌, 尹希杰, 袁秋兰, 等. 7 种富油微藻的超临界提取及脂肪酸分布特征 [J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(6): 127–132.
Lin Xihuang, Yin Xijie, Yuan Qiulan, et al. Supercritical extraction of lipid from 7 microalgae species and fatty acid distribution characteristics[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(6): 127–132.
- [23] Carotenuto Y, Ianora A, Buttino I, et al. Is postembryonic development in the copepod *Temora stylifera* negatively affected by diatom diets?[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 276(1/2): 49–66.
- [24] 李捷, 孙松, 李超伦, 等. 不同饵料对桡足类无节幼体存活、发育的影响研究 [J]. *海洋科学*, 2006, 30(12): 13–20.
Li Jie, Sun Song, Li Chaolun, et al. The effects of different diets on the survival and development of copepod nauplii[J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(12): 13–20.
- [25] 尹洁慧, 季道德, 刘炜炜. 不同浓度海生根鞭毛虫 (*Oxyrrhis marina*) 对环小两栖猛水蚤 *Amphiascopsis cinctus* (Claus, 1866) 发育时间、存活率、繁殖的影响 [J]. *生态科学*, 2023, 42(5): 12–18.
Yin Jiehui, Ji Daode, Liu Weiwei. Effects of different flagellate (*Oxyrrhis marina*) concentration to the development, survival rate and reproduction of a benthic copepod *Amphiascopsis cinctus* (Claus, 1866)[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(5): 12–18.
- [26] Miliou H, Moraitou-Apostolopoulou M. Effects of seven diets on the population dynamics of laboratory cultured *Tisbe holothuriae*

- Humes (Copepoda, Harpacticoida)[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1991, 45(3): 345–356.
- [27] Lee W Y, Zhang X K, Van Baalen C, et al. Feeding and reproductive performance of the harpacticoid *Tisbe carolinensis*(Copepoda, Crustacea) in four algal cultures[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 1985, 24: 273–279.
- [28] Abu-Rezq T S, Yule A B, Teng S K. Ingestion, fecundity, growth rates and culture of the harpacticoid copepod, *Tisbe furcata*, in the laboratory[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 347(1/3): 109–118.
- [29] 王笑月, 谢玺, 李大成, 等. 几种饵料对分叉小猛水蚤生殖量的影响 [J]. *河北渔业*, 2017(6): 6–9.
Wang Xiaoyue, Xie Xi, Li Dacheng, et al. Effect of several diets on the fecundity of *Tisbe furcata*[J]. *Hebei Fisheries*, 2017(6): 6–9.
- [30] Fowler S W, Small L F, Kečkeš S. Effects of temperature and size on molting of euphausiid crustaceans[J]. *Marine Biology*, 1971, 11(1): 45–51.
- [31] Caramujo M J, Boschker H T S, Admiraal W. Fatty acid profiles of algae mark the development and composition of harpacticoid copepods[J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(1): 77–90.
- [32] Arndt C, Sommer U. Effect of algal species and concentration on development and fatty acid composition of two harpacticoid copepods, *Tisbe* sp. and *Tachidius discipes*, and a discussion about their suitability for marine fish larvae[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2014, 20(1): 44–59.
- [33] Yu Juan, Tian Jiyan, Yang Guipeng. Ingestion, fecundity and population growth of *Harpacticus* sp. (Harpacticoida, copepod) fed on five species of algae[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(5): 2209–2220.
- [34] De Troch M, Chepurinov V, Gheerardyn H, et al. Is diatom size selection by harpacticoid copepods related to grazer body size?[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 332(1): 1–11.
- [35] Ribeiro A C B, Souza-Santos L P. Mass culture and offspring production of marine harpacticoid copepod *Tisbe biminiensis*[J]. *Aquaculture*, 2011, 321(3/4): 280–288.
- [36] Kramer M J, Bellwood D R, Bellwood O. Cryptofauna of the epilithic algal matrix on an inshore coral reef, Great Barrier Reef[J]. *Coral Reefs*, 2012, 31(4): 1007–1015.
- [37] Ackerman J L, Bellwood D R. Reef fish assemblages: a re-evaluation using enclosed rotenone stations[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 206: 227–237.
- [38] Fleeger J W. The Potential to Mass-culture Harpacticoid Copepods for Use as Food for Larval Fish[M]//Lee C S, O’Byrne P J, Marcus N H. *Copepods in Aquaculture*. Ames: Blackwell Publishing, 2005: 11–24.
- [39] Heath P L, Moore C G. Rearing dover sole larvae on *Tisbe* and *Artemia* diets[J]. *Aquaculture International*, 1997, 5(1): 29–39.
- [40] Wilson S K, Fisher R, Pratchett M S, et al. Exploitation and habitat degradation as agents of change within coral reef fish communities[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2796–2809.
- [41] Depczynski M, Bellwood D R. The role of cryptobenthic reef fishes in coral reef trophodynamics[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 256: 183–191.
- [42] Ng D, Taira D, Heery E C, et al. Antagonistic effects of seawalls and urban sedimentation on epilithic algal matrix (EAM)-feeding fishes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173: 113098.
- [43] Wainwright P C, Bellwood D R, Westneat M W, et al. A functional morphospace for the skull of labrid fishes: patterns of diversity in a complex biomechanical system[J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2004, 82(1): 1–25.

Effects of different diet culture the developmental process of the *Robertgurneya* sp.

Gu Liang^{1,2,3}, Hu Simin^{1,2,4,5}, Ma Lin⁶, Zhang Chen^{1,2,3}, Zhang Beiye^{1,2,3}, Huang Hui^{1,2,4,5,7,8}, Liu Sheng^{1,2,4,5}

(1. CAS Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Marine Biology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Tropical Marine Biotechnology of Hainan Province, Sanya Institute of Ocean Eco-Environmental Engineering, Sanya 572000, China; 5. CAS-HKUST Sanya Joint Laboratory of Marine Science Research, Sanya Institute of Ocean Eco-Environmental Engineering, Sanya 572000, China; 6. Department of Marine Organism Taxonomy and Phylogeny, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 7. Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China; 8. Sanya National Marine Ecosystem Research Station, Sanya 572000, China)

Abstract: Benthic harpacticoid copepods are widely distributed in marine ecosystem, which is particularly abundant in the epilithic algal matrix (EAM) of coral reefs. Due to its unique habitat, there is currently limited research on its developmental process and cultivation methods. In this study, we collected epilithic algal matrix from the coral reef of Luhuitou, Sanya, Hainan in the summer of 2023, from which we isolated one species of Harpacticoida, which was belonging to the genus *Robertgurneya* based on morphological characteristics. The effects of mono- and mixed-algal cultures on the developmental dynamics of *Robertgurneya* sp. were observed and recorded. The results showed that the adult body length of the *Robertgurneya* sp. was 0.5–0.7 mm, with an average life cycle of about 61–68 days. There were no significant differences in egg number per female each time, brood number, reproductive cycle, and life cycle between different feed cultivation techniques. However, under mixed algae culture, the average egg diameter, larval survival rate, and maximum body length of nauplii stage VI in the embryonic development stage of the *Robertgurneya* sp. were significantly higher than those in the mono-algae culture group ($p < 0.05$). Moreover, the embryonic development time and cumulative copepodid development time were significantly shorter under mixed-algal culture ($p < 0.05$). The results indicate that *Robertgurneya* sp. in EAM have a short life cycle and strong reproductive ability. Considering the abundant benthic microalgae and organic debris in the mats, harpacticoida may be able to provide huge potential food resources for predators such as small fish in coral reefs. Therefore, it may play an important role in the material cycle and energy flow of coral reef ecosystems.

Key words: harpacticoida copepods; coral reefs; epilithic algal matrix; diet; cultivation methods; developmental process