



引用格式:林俊逸,覃杰,汪正源,等.生理能量学探究方斑东风螺不同生长阶段的温度适应性[J].海南大学学报(自然科学版中英文),DOI:10.65658/j.hndk.2025071401.

Citation:LIN Junyi, QIN Jie, WANG Zhengyuan, et al. Comparison of temperature adaptability of *Babylonia areolata* at different growth stages from the perspective of physiological energetics[J]. Natural Science of Hainan University, DOI:10.65658/j.hndk.2025071401.

Open Access

生理能量学探究方斑东风螺不同生长阶段的温度适应性

林俊逸^{1,3}, 覃杰^{1,3}, 汪正源^{1,3}, 蔡浩南^{1,3}, 吴颖茵^{1,3}, 田坤⁴,
刘春胜^{1,2}, 王爱民¹, 顾志峰^{1,2,3}, 於锋^{1,2,3}✉

(1. 海南大学海洋生物与水产学院, 海南 海口 570228;

2. 海南大学三亚南繁研究院, 海南 三亚 572000;

3. 海南大学热带水产产业学院, 海南 海口 570228;

4. 海南坤田海洋生物科技有限责任公司, 海南 文昌 571343)

摘要:为探究不同生长阶段方斑东风螺(*Babylonia areolata*)对不同温度的生理响应规律,比较了不同温度(20℃、25℃、30℃)下不同生长阶段方斑东风螺(幼螺、成螺)的摄食率、排粪率、耗氧率和排氨率。结果表明:幼螺、成螺的摄食生理和代谢水平与温度呈现正相关。在20℃以及25℃下,方斑东风螺幼螺和成螺的摄食率存在显著差异($P<0.05$)。两者的排粪率、耗氧率、排氨率均随温度升高呈现依次递增的趋势,且在各个温度下均具有显著差异($P<0.05$);双因素方差分析显示,温度和生长阶段均显著影响各生理指标,且存在显著的交互作用。不同温度下的能量收支方程显示,成螺在30℃下生长能所占比重达到最大(51.327%),其能量收支方程为 $100C=48.146F+0.463R+0.063U+51.327G$,幼螺在25℃下生长能所占比重达到最大(50.081%),其能量收支方程为 $100C=42.861F+6.239R+0.817U+50.081G$ 。不同生长阶段方斑东风螺对温度的生理适应存在显著差异,方斑东风螺幼螺在25℃下的生长状态更好,而成螺具有更好的高温适应性。研究结果可为方斑东风螺的精细化养殖提供数据支持。

关键词:方斑东风螺;温度;幼螺;成螺;生理代谢;能量收支

中图分类号:S917.4 **文献标志码:**A

DOI:10.65658/j.hndk.2025071401 **CSTR:**32403.14.hndk.2025071401

Comparison of temperature adaptability of *Babylonia areolata* at different growth stages from the perspective of physiological energetics

LIN Junyi^{1,3}, QIN Jie^{1,3}, WANG Zhengyuan^{1,3}, CAI Haonan^{1,3}, WU Yingyin^{1,3}, TIAN Kun⁴,
LIU Chunsheng^{1,2}, WANG Aimin¹, GU Zhifeng^{1,2,3}, YU Feng^{1,2,3}✉

(1. School of Marine Biology and Fisheries, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China; 2. Sanya Institute of Breeding and Multiplication, Hainan University, Sanya 572000, Hainan, China; 3. School of Tropical Aquaculture Industry, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;

4. Hainan Kuntian Marine Biotechnology Co., Ltd., Wenchang 571343, Hainan, China)

Abstract: Temperature is a critical factor influencing the physiological performance of shellfish. This study

Received: 2025-07-14; **Revised:** 2025-08-06; **Accepted:** 2025-08-06;

investigated the physiological responses of *Babylonia areolata* (*B. areolata*) at different growth stages (juveniles and adults) to varying temperatures (20 °C, 25 °C, 30 °C) by analyzing changes in feeding rate, faecal production rate, oxygen consumption rate, and ammonia excretion rate. Results showed that temperature significantly affected the physiological parameters of *B. areolata* ($P < 0.05$). Feeding physiology and metabolic levels of juveniles and adults exhibited a positive correlation with temperature. At 20 °C and 25 °C, feeding rates differed significantly between juveniles and adults ($P < 0.05$), while no significant differences were observed at 30 °C. Faecal production rate, oxygen consumption rate, and ammonia excretion rate of both juveniles and adults increased with rising temperatures, with significant differences across all temperatures ($P < 0.05$). Two-way ANOVA revealed that both temperature and growth stage significantly influenced all physiological indices, with a significant interaction effect. Energy budget equations at different temperatures indicated that adults achieved the highest growth energy proportion (51.327%) at 30 °C, described by the equation: $100C = 42.861F + 6.239R + 0.817U + 50.081G$. Juveniles showed the highest growth energy proportion (50.081%) at 25 °C, with the equation: $100C = 42.861F + 0.410R + 0.072U + 48.658G$. These findings demonstrate that juveniles of *B. areolata* exhibit optimal growth at 25 °C, while adults display better high-temperature adaptability. This study enriches our understanding of the physiological temperature adaptability of invertebrates and provides data support for the precision aquaculture of *B. areolata*.

Keywords: *Babylonia areolata*; temperature; juveniles; adults; physiological metabolism; energy budget

0 引言

方斑东风螺(*Babylonia areolata*), 隶属于软体动物门(Mollusca)、腹足纲(Gastropoda)、新腹足目(Neogastropoda)、蛾螺科(Buccinidae)、东风螺属(*Babylonia*), 为肉食性底栖生物, 多分布于热带和亚热带区域^[1]。目前, 方斑东风螺是中国东风螺养殖的主导品种, 海南省为人工养殖东风螺的主要产区^[2]。随着养殖技术的持续进步和养殖规模的稳步扩大, 方斑东风螺的集约化养殖水平日益提升, 其产量亦显著增加^[3]。然而, 方斑东风螺的养殖周期约1年, 需经历多个不同的养殖阶段。其间, 养殖模式及极端天气导致的持续高温或温度骤变, 会直接影响东风螺的生长发育, 甚至引发大规模死亡^[4]。因此了解不同生长阶段方斑东风螺对不同温度下的生理适应, 对于推动东风螺行业的精细化养殖以及健康发展具有重要意义。

温度是影响水生动物生长发育的主要环境指标之一, 直接影响生物的摄食代谢和生理代谢^[5]。在贝类中, 关于温度与生理能量学的研究已有大量的报道, 如大珠母贝(*Pinctada maxima*)、翡翠贻贝(*Perna viridis*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、橄榄蛸蚌(*Solenia oleivira*)、缢蛏(*Sinonovacula constricta*)^[6-10]。在不同温度下, 贝类的生理能量分配策略有所不同。杨静茹等^[11]研究表明, 马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)的耗氧和排氨在15~35 °C之间随温度的上升而上升。阎希柱等^[12]研究发现, 在23 °C时九孔鲍(*Haliotis diversicolor*)的生长状态达到最佳, 其摄食代谢和生长活动显著增强, 饵料转化率亦较高。刘英杰等^[13]的研究表明, 在20~35 °C的温度范围内, 青蛤(*Cyclina sinensis*)的排氨率和耗氧率与温度呈正相关, 而摄食率则呈负相关; 当温度升至35 °C及以上时, 青蛤的呼吸能和粪便能占摄食能的比例急剧上升, 导致其生长能出现负值。Strahl等^[14]报道, 女王扇贝(*Aequipecten opercularis*)的摄食水平与温度呈正相关趋势, 其免疫和代谢功能均受到温度的显著影响。不同贝类生长发育受温度的影响有所不同, 孙云超等^[4]的研究发现, 方斑东风螺的摄食生理和生长能表现出随温度上升先增加后减少的趋势, 但其研究未涉及方斑东风螺的不同生长阶段。

贝类在不同生长阶段的生理状态及其对环境的适应性存在显著差异^[15-16]。随着生长阶段的变化, 贝类个体规格增大, 生长速率逐渐降低, 较大的个体因已过快速成长期而逐步进入性成熟期^[17]。吕国华等^[9]对橄榄蛸蚌(*S. oleivora*)的研究指出, 稚蚌和幼蚌在温度为15 °C时生长能占比低于35 °C, 而成蚌相反, 表明稚蚌和幼蚌对低温的耐受能力较弱。Webb等^[18]研究发现, 长牡蛎(*Crassostrea gigas*)中的成熟大牡

蛎摄食率要显著高于小牡蛎。Newkirk 等^[19]研究表明,长牡蛎(*C. gigas*)的规格会随其年龄的增长而增加,而生长速率反而随之下降。贝类的生理状态会随着发育时间的推移经历阶段性转变,其生长阶段从根本上决定了生长速率、代谢活动以及环境胁迫耐受性等特征。

本研究通过比较不同温度下、不同生长阶段方斑东风螺的摄食率、耗氧率、排粪率、排氨率,探究温度和生长对方斑东风螺生理状态的影响,了解不同生长阶段方斑东风螺对温度的生理适应。研究结果可为预测方斑东风螺在气候变化影响下的生长潜力和生存能力提供重要的数据支持,同时为推动方斑东风螺精细化养殖提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料收集 本实验所用方斑东风螺均来自海南省坤田海洋生物科技有限公司养殖场(110°41'12"E, 19°23'45"N),收集健康的幼螺和成螺各 100 只(各随机取 10 只解剖并测定基础数据,数据见表 1),在海南大学海洋生物与水产学院养殖室循环系统进行为期 7 d 的暂养。养殖海水为天然海水,暂养盐度为(29±0.85)‰、温度为(25±0.55)℃、pH 为 7.15±0.22。暂养期间持续充气,每天投喂 1 次鲜鱿鱼,待其完全进食 2 h 后及时清理残饵,并更换 1/2 海水。

表 1 不同生长阶段方斑东风螺的基础数据

生长阶段	壳高/mm	总质量/g	软组织湿质量/g	软组织干质量/g
幼螺	21.81±1.43 ^a	1.70±0.32 ^a	0.53±0.10 ^a	0.15±0.12 ^a
成螺	45.46±2.35 ^b	23.24±3.68 ^b	10.06±1.59 ^b	2.30±0.64 ^b

注:不同小写字母代表成螺与幼螺的不同基础数据存在显著性差异($P<0.05$)。

1.2 实验设计 实验在 35 cm×35 cm×40 cm 的循环系统中进行,为将海南文昌地区海水温度变化规律(20~30℃)与方斑东风螺的生长阶段相结合,设置了温度和生长阶段的双因素实验,温度设置 20℃、25℃、30℃ 共 3 个梯度,生长阶段分为幼螺和成螺,每个组合设置 3 个平行,每组 10 个个体,共 180 个个体。温度由加热棒和冷水机控制,以 1℃·h⁻¹ 的升温速度升至实验目标温度,在各温度下驯化 7 d,实验期间需要每天更换水体,持续充气,每隔 12 h 观察是否有死亡个体并及时清理。

1.3 摄食率的测定 驯化结束后,各温度组根据方斑东风螺的基础数据(表 1)选取健康的方斑东风螺成螺与幼螺投喂过量新鲜鱿鱼,供其摄食 2 h。投喂结束后,收集残饵,将残饵放入烘干箱进行烘干,根据饵料中水分含量计算出摄食质量,然后计算出最终的摄食率(R_{FI})。

1.4 排粪率的测定 将投喂后的东风螺取出,放入盛有新鲜海水的养殖槽中进行排粪实验。采用 GF/C 膜过滤收集粪便,烘干,用马弗炉灼烧至恒质量,测定有机物含量,参照全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283)海洋监测规范第 5 部分:沉积物分析:GB 17378.5—2007 方法计算排粪率(R_F)。

1.5 耗氧率的测定 采用密闭循环水法,使用水生生物呼吸测定仪(Loligo Systems, 丹麦)进行耗氧率测定。将方斑东风螺放入具有相应盐度的呼吸仪密闭的容器中(容器内腔体积 1.6 L),持续时间 2 h,流水速率为 5 L·min⁻¹。根据预实验的结果,每个呼吸仪容器中放 5 只方斑东风螺。在进行耗氧率测定的同时,另设 3 组未放方斑东风螺的密闭呼吸室作为对照。

1.6 排氨率的测定 实验开始时与结束后分别采集水生生物呼吸器中 50 mL 海水,用于氨氮浓度测定。水体中氨氮浓度按《水杨酸-次氯酸盐光度法》进行测定,所用仪器为奥克丹 X-II 型水质分析仪(无锡奥克丹生物科技有限公司,丹麦),排氨率(R_N)是以实验前后水体中氨氮质量浓度变化来计算^[21]。

1.7 指标计算

$$R_{FI} = - (FI_2 - FI_1) / (w \times t) \quad (1)$$

$$R_F = (W_1 - W_2) / (w \times t) \quad (2)$$

$$R_O = [(OD_0 - OD_t) \times V] / (w \times t) \quad (3)$$

$$R_N = [(N_t - N_0) \times V] / (w \times t) \quad (4)$$

$$O/N = R_O/R_N \quad (5)$$

式中, w 为方斑东风螺软体部干质量(g), t 是实验持续时间(h), FI_2 是饵料的投喂量(g), FI_1 是饵料的剩余量(g); W_1 是粪便样品烘至恒定的质量, W_2 是 W_1 样品处理并冷却后的质量; V 是呼吸器体积(L), R_{FI} 、 R_F 、 R_O 、 R_N 分别为单位体质量摄食率、排粪率、耗氧率和排氮率; V 是呼吸器体积(L), OD_0 和 OD_t 分别是实验开始和实验结束后水中的溶氧含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); N_t 和 N_0 分别是实验开始和实验结束后水中总氮质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

1.8 生理能量学方程构建 能量收支方程: $C=F+R+U+G$ 。式中, C 为摄食能, F 为排粪能, R 为呼吸能, U 为排泄能, G 为生长能。 C 、 F 、 R 和 U 分别通过食物中有机物(POM)、粪便中 POM、呼吸率和排氮率计算。

本实验采用以下能量转换因子: $1 \text{ mg POM} = 20.78 \text{ J}$; $1 \text{ mg O}_2 = 14.24 \text{ J}$; $1 \text{ mg NH}_4^+-\text{N} = 24.87 \text{ J}$ 。

1.9 数据分析 实验数据以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ S.D.)表示, 采取 DPS(v9.5)和 GraphPad Prism(v8.0.2)软件对数据进行分析并作图, 对数据进行 Turkey 多重比较、双因素方差分析, $P<0.05$ 表示处理组间差异达到显著性水平。

2 实验结果

2.1 不同温度下方斑东风螺的摄食率 不同温度下两种生长阶段的方斑东风螺的摄食率均如图 1 所示, 摄食率整体呈现随温度上升而上升的趋势。幼螺的摄食率在不同温度下差异显著($P<0.05$), 20 $^{\circ}\text{C}$

时最低为 (15.578 ± 0.663) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 显著低于 25 $^{\circ}\text{C}$ (65.284 ± 3.694) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$ (75.587 ± 1.001) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。同样, 成螺摄食率在各个温度下均存在显著差异($P<0.05$), 由小到大分别为 (22.086 ± 1.420) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (20 $^{\circ}\text{C}$)、(49.980 ± 3.454) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (25 $^{\circ}\text{C}$)、(83.822 ± 5.351) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (30 $^{\circ}\text{C}$)。在 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$ 时, 东风螺成螺的摄食率显著高于幼螺, 而在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 成螺摄食率显著低于幼螺摄食率($P<0.05$)。双因素方差分析显示, 方斑东风螺摄食率不仅受温度和生长阶段的影响, 也受其交互作用的影响($P<0.05$) (表 2)。

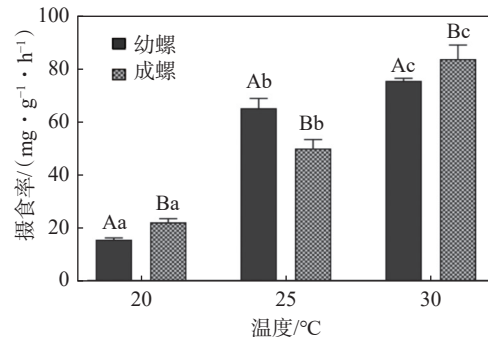


图 1 不同温度下不同生长阶段方斑东风螺的摄食率
注: 大写字母表示不同生长阶段间的比较, 小写字母表示不同温度间的比较, 不同字母表示存在显著差异($P<0.05$)

表 2 温度和生长阶段对方斑东风螺摄食率影响的双因素方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
温度	9 391.221	2	9 391.221	977.135	0.000
生长阶段	1 144.190	1	572.095	59.525	0.000
温度*生长阶段	1 377.276	2	688.638	71.651	0.000
误差	115.332	12	9.611		

2.2 不同温度下方斑东风螺的排粪率 方斑东风螺幼螺与成螺的排粪率均呈现随温度升高而上升的趋势(图 2), 其中成螺的排粪率在各个温度组中均呈现显著差异, 而幼螺在 25 $^{\circ}\text{C}$ 与 30 $^{\circ}\text{C}$ 时的排粪率并无显著差异。在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时, 幼螺与成螺的排粪率为 (14.720 ± 1.096) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 (8.455 ± 0.402) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 为 (33.847 ± 0.828) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 (26.934 ± 2.232) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时, 为 (37.993 ± 0.649) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 (35.270 ± 0.842) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$ 时, 生长阶段对方斑东风螺排粪率的影响达到显著水平($P<0.05$), 同时在 20 $^{\circ}\text{C}$ 该影响达到极显著水平($P<0.01$)。在 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$ 时, 成螺的排粪

率显著高于幼螺;而在 25 ℃ 时,成螺排粪率显著低于幼螺。通过双因素分析表明,方斑东风螺的排粪率不仅受到温度和生长阶段的显著影响($P<0.01$),同时也受两者之间的交互作用的显著影响($P<0.01$)(表 3)。

表 3 温度和生长阶段对方斑东风螺排粪率影响的双因素方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
温度	1 624.539	2	1 624.539	1 194.700	0.000
生长阶段	219.330	1	109.665	80.649	0.000
温度×生长阶段	337.151 6	2	168.576	123.972	0.000
误差		16.317		12	1.360

2.3 不同温度下方斑东风螺的耗氧率 两种生长阶段的方斑东风螺在不同温度下的耗氧率均呈现随温度上升而上升的趋势(图 3)。在 20 ℃ 时,幼螺耗氧率为(0.450 ± 0.027) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,显著低于 25 ℃ [(0.716 ± 0.021) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] 和 30 ℃ [(1.101 ± 0.079) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] 下的幼螺耗氧率。在 20 ℃ 下,成螺耗氧率为(0.212 ± 0.007) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,显著低于 25 ℃ [(0.295 ± 0.021) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] 和 30 ℃

[(0.586 ± 0.012) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$] 下的成螺耗氧率。在三个温度条件下,生长阶段对方斑东风螺耗氧率的影响达到极显著水平($P<0.01$),均呈现幼螺的耗氧率显著高于成螺。双因素方差分析显示,耗氧率还受到温度与生长阶段两者间的交互作用的影响($P<0.01$)(表 4)。

表 4 温度和规格对方斑东风螺耗氧率影响的双因素方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
温度	1 624.539	2	1 624.539	1 194.700	0.000
生长阶段	219.330	1	109.665	80.649	0.000
温度×生长阶段	337.151 6	2	168.576	123.972	0.000
误差		16.317		12	1.360

2.4 不同温度下方斑东风螺的排氨率 幼螺与成螺的排氨率在不同温度下差异显著($P<0.05$),如图 4 所示,随着温度升高,排氨率整体呈上升态势。幼螺在 20 ℃、25 ℃、30 ℃ 的排氨率分别为(0.025 ± 0.003) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、(0.054 ± 0.004) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、(0.066 ± 0.004) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$;成螺在 20 ℃、25 ℃、30 ℃ 下的排氨率分别是: (0.011 ± 0.001) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、(0.028 ± 0.002) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 、(0.044 ± 0.001) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。双因素分析表明,方斑东风螺的排氨率不仅受温度和生长阶段的显著影响($P<0.01$),且受温度与生长阶段交互作用的影响也极为显著($P<0.01$)(表 5)。

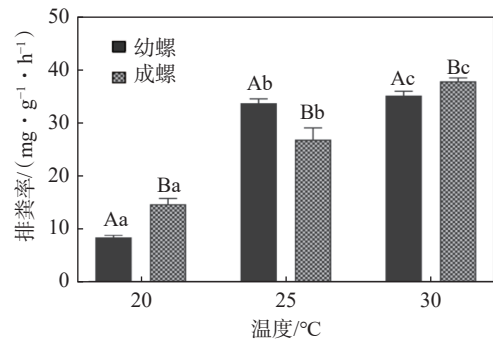


图 2 不同温度下不同生长阶段方斑东风螺的排粪率
注: 大写字母表示不同生长阶段间的比较, 小写字母表示不同温度间的比较, 不同字母表示存在显著差异($P<0.05$)

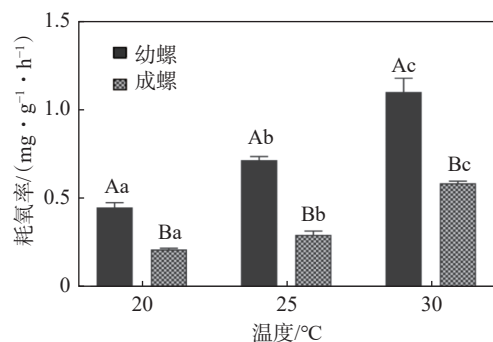


图 3 不同温度下不同生长阶段方斑东风螺的耗氧率
注: 大写字母表示不同生长阶段间的比较, 小写字母表示不同温度间的比较, 不同字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)

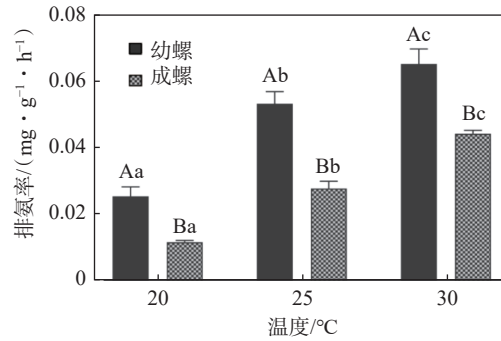


图4 不同温度下不同生长阶段方斑东风螺的排氮率

注: 大写字母表示不同生长阶段间的比较, 小写字母表示不同温度间的比较, 不同字母表示存在显著差异 ($P < 0.05$)

表5 温度和生长阶段对方斑东风螺排氮率影响的双因素方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
温度	0.004	2	0.005	600.795	0.000
生长阶段	0.000	1	0.000	42.577	0.000
温度×生长阶段	0.000	2	0.000	27.759	0.000
误差	0.000	12	0.000		

2.5 不同温度下方斑东风螺的氧氮比 由图5可知, 方斑东风螺在不同温度下的氧氮比存在显著差异 ($P < 0.05$), 低温胁迫和高温胁迫均明显提高氧氮比。其中, 幼螺在 20 °C 下氧氮比为 17.778 ± 1.925 , 显著高于 25 °C 的氧氮比 (13.452 ± 1.352) ($P < 0.05$)。成螺在 20 °C 的氧氮比为 18.333 ± 1.443 , 显著高于 25 °C 的氧氮比 (10.667 ± 1.528) ($P < 0.05$)。当温度升至 30 °C 时, 幼螺与成螺的氧氮比显著升高, 此时幼螺氧氮比为 16.806 ± 0.636 , 显著高于成螺的 13.202 ± 0.480 ($P < 0.05$)。

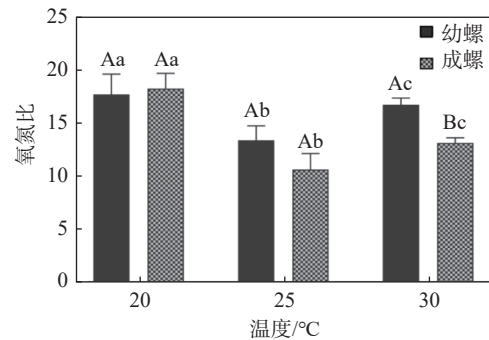


图5 不同温度下不同生长阶段方斑东风螺的氧氮比

注: 大写字母表示不同生长阶段间的比较, 小写字母表示不同温度间的比较, 不同字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.6 不同温度下方斑东风螺的能量收支方程 不同规格方斑东风螺在不同温度下的能量收支方程见

表6, 排粪能和生长能的占比较大。随着温度升高, 成螺排粪能占比逐渐减小, 生长能占比逐渐增大。而幼螺的排粪能占比随着温度升高呈现先减小后增大, 生长能占比呈现先增大后减小, 在 25 °C 时拥有最小的排粪能占比 (42.861%) 和最大生长能占比 (50.081%)。成螺在低温下的呼吸能占比最大, 达到 0.552%, 幼螺在高温下的呼吸能占比最大, 达到 8.318%。能量收支方程显示, 成螺和幼螺在不同温度下的能量分配模式存在显著差异。

表6 不同生长阶段方斑东风螺在不同温度下的能量收支方程

生长阶段	温度/°C	能量收支方程
成螺	20	$100C = 66.913F + 0.552R + 0.053U + 32.482G$
	25	$100C = 50.860F + 0.410R + 0.072U + 48.658G$
	30	$100C = 48.146F + 0.463R + 0.063U + 51.327G$
幼螺	20	$100C = 54.246F + 1.651R + 0.162U + 43.941G$
	25	$100C = 42.861F + 6.239R + 0.817U + 50.081G$
	30	$100C = 46.662F + 8.318R + 0.865U + 44.155G$

注: C为摄食能, F为排粪能, R为呼吸能, U为排泄能, G为生长能。

3 讨论

3.1 温度对贝类生理代谢的影响 温度是影响贝类生理代谢的关键环境因子之一^[22-25]。本研究中,方斑东风螺的摄食率、排氨率、排粪率和耗氧率均呈现随温度升高而上升的趋势,方斑东风螺在高温下的生长状态更优、活力更强,这与方斑东风螺自然分布在热海海域,属于热带种的特征相符^[26-27]。方斑东风螺在海南的实际养殖温度在 20~30℃,本实验以 25℃ 作为常温组,20℃ 作为低温组,30℃ 作为高温组,符合海南文昌方斑东风螺养殖规律。Jørgensen 等^[28]研究表明温度对蓝贻贝(*M. edulis*)的摄食率有促进作用,摄食率会随温度升高而呈现上升趋势。胡高宇等^[29]研究结果显示,随着温度的升高文蛤(*Meretrix petechialis*)的耗氧率会随着温度的升高而提高。Saucedo 等^[30]在珠母贝(*P. margaritifera*)中的研究发现珠母贝的排氨率在试验温度范围内持续上升。方斑东风螺在一定温度范围内,能通过调节自身代谢强度来适应温度变化,这种代谢可塑性使其在温度波动的环境中,能够调整生理活动,维持生命活动的正常进行,在蓝贻贝(*M. edulis*)、菲律宾蛤仔(*R. philippinarum*)、中华圆田螺(*Cipangopaludina cathayensis*)中也发现了类似的现象^[28,31-32]。水生生物对温度的耐受阈值是重要的生理指标,而本实验并未出现生理指标明显下降的现象,表明本实验所设定的温度范围仍在方斑东风螺可承受的温度区间之内,尚未触及其耐温阈值,因此提高实验温度上限、细化梯度是未来进一步优化的方向^[33-35]。

氧氮比(O/N ratio)作为衡量动物能量代谢的重要生理指标,能够反映蛋白质、脂肪与糖类三大能源物质的关系,常用于评估生物对环境变化的适应策略^[36-37]。当氧氮比约为 7 时,蛋白质是主要供能物质;当氧氮比升至 24 左右,供能模式转变为脂肪与蛋白质混合供能;而当氧氮比极高时,则以糖类和脂肪作为主要能量来源^[37]。Nie 等^[38]在双壳贝类生理代谢评估中发现,马尼拉蛤仔(*R. philippinarum*)的生命活动主要依赖蛋白质分解供能,其氧氮比特征与此模式一致;Zheng 等^[39]对幼鳖(*Trionyx sinensis*)的研究也表明,在 6~20℃ 的温度下,氧氮比在 13.12 到 20.91 之间,主要为蛋白质代谢供能,而在 20~25℃ 的温度下,氧氮比为 51.37,以蛋白质和脂质混合供能。本研究中方斑东风螺的氧氮比范围为 10.667~18.333,供能以脂肪与蛋白质混合供能为主。而低温和高温均会显著提高氧氮比,脂肪供能比例增加,反映出对不同环境条件下的代谢策略变化,这与马尼拉蛤仔(*R. philippinarum*)^[38]、僧帽牡蛎(*Saccostrea cucullata*)^[40]、织锦巴非蛤(*Paphia textile*)^[41]等的研究结果类似。

3.2 不同生长阶段对贝类生理代谢的影响 生长阶段作为贝类生理代谢的关键影响因子,其对能量收支和生命活动的调控作用已被广泛证实^[42-43]。本实验结果表明,方斑东风螺的生理代谢特征在不同生长阶段呈现出显著的差异性($P<0.05$)。同一温度下,方斑东风螺的耗氧率和排氨率均随规格增大而下降,这与缢蛏(*S. constricta*)、暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)的研究结果一致^[44-45]。对于摄食率和排粪率,25℃ 最适温度下随规格增大而下降,而在高温和低温胁迫下,摄食率和排粪率随规格增大而上升,显示出规格对方斑东风螺的生理代谢存在显著影响。Webb 等^[18]对长牡蛎(*C. gigas*)摄食行为的研究进一步表明,大规格个体对海虱(*Lepeophtheirus salmonis*)幼虫的摄食量和消化效率均显著优于中小规格个体($P<0.05$),体现了规格差异对摄食功能的直接影响。王崇懿^[46]对于九孔鲍(*H. diversicolor*)的研究表明幼体的摄食率和排粪率会显著高于成体($P<0.05$)。Sukhotin 等^[47]对蓝贻贝(*M. edulis*)的研究则进一步证实,规格差异会影响其生理代谢水平。本实验结果表明幼螺在适宜生长温度下,其代谢水平和摄食能力均高于成螺,这可能是因为幼螺因生长需求需维持更高的能量摄入,而成螺因为生长速度减缓,其各项代谢指标下降。而在极端温度下幼螺摄食率和排粪率低于成螺,且高温下幼螺的氧氮比显著高于成螺,表明高温胁迫下幼螺可能通过提高脂肪供能占比维持更高的能量供给,反映出贝类在不同生长阶段对极端温度的代谢策略分化^[45,48-49]。

3.3 生长阶段和温度对贝类的影响 大量的单因素实验表明贝类的生理代谢和能量分配受到生长阶段和环境温度的影响^[50-52]。本研究的双因素实验显示,幼螺的排氨率和耗氧率显著高于成螺($P<0.05$),且两者均随温度升高呈递增趋势;摄食率与排粪率的生长阶段差异受温度调控,表现为 20℃ 和 30℃ 下成螺显著高于幼螺($P<0.05$),而 25℃ 时幼螺反超成螺($P<0.05$),这与华贵栉孔扇贝(*C. nobilis*)、菲律宾蛤仔(*R. philippinarum*)的研究结论相似^[53-54]。进一步通过双因素方差分析表明,温度与生长阶段对方斑东风

螺(*B. areolata*)的摄食率、排粪率、耗氧率和排氨率存在显著交互影响($P<0.01$)。这可能是因为不同生长阶段的贝类对于高温与低温的耐受有所不同,成贝在生长过程中经历了更长时间的高温胁迫,因此形成了更强的高温适应性,以保证其在高温环境下的生存和繁殖^[50,55]。

方斑东风螺不同温度下不同生长阶段的能量收支方程(表6)显示:温度与生长阶段显著影响方斑东风螺的能量流向($P<0.01$)。成螺生长能占比随温度升高持续增加,30℃时达最大值51.327%。幼螺生长能在25℃时达峰值50.081%,超过该温度后呈下降趋势,这与青蛤(*C. sinensis*)^[13]、皱纹盘鲍(*Haliotis ducis hannai*)^[56],以及LYU等^[57]对于方斑东风螺(*B. areolata*)的研究结论相似。造成这一现象的原因可能是,在较为适宜的温度下随着温度的上升方斑东风螺会将更多的能量分配于生长,以支持其体型的增加和组织的发育。相反,在较高或较低的温度下,方斑东风螺可能会调整其能量分配策略,将更多的能量用于维持基本生存需求,确保生存和适应环境,从而导致其生长能所占比例减少,生长速度降低^[58-60]。因此,方斑东风螺在个体发育的不同阶段展现出各异的环境适应策略。幼螺在高温环境中需消耗更多能量以应对高温挑战,而成螺则因机能相对完善,在相同环境下表现出更强的耐热能力,并能有效分配能量以支持生长,这对提升其生存及繁殖力具有显著益处^[56,61-62]。然而,当前对方斑东风螺适应机制的深入研究仍显不足,后续计划借助组织学观察、转录组学及代谢组学等多维度方法,深入探究其在不同生长阶段对高温和低温适应机制的差异性。

4 结 论

本研究通过测定不同温度下方斑东风螺幼螺和成螺摄食生理和代谢生理,建立能量收支模型,分析了温度对不同生长阶段方斑东风螺能量收支的影响。研究结果显示温度与规格及其交互对方斑东风螺的摄食率、排粪率、耗氧率和排氨率均存在极显著差异($P<0.01$)。方斑东风螺的氧氮比范围为10.667~18.333,表明方斑东风螺以蛋白质和脂肪混合供能为主,而温度胁迫可显著提升其比值。在能量收支分析中,成螺在30℃的能量收支方程为 $100C=48.146F+0.463R+0.063U+51.327G$,生长能所占比重达到最大51.327%,幼螺在25℃的能量收支方程为 $100C=42.861F+0.410R+0.072U+48.658G$,其生长能所占比重达到最大50.081%。研究表明,温度与规格及其交互对方斑东风螺的摄食生理和代谢生理具有显著影响,且幼螺对低温的适应力较好,成螺对高温的耐受能力更高。本研究结果不仅有助于揭示贝类对环境变化的适应机制,还为方斑东风螺的精细化养殖提供了坚实的数据支撑。

参考文献:

- [1] ZHU Y Y, FU D, CAI H N, et al. High-throughput screening of thermal tolerant candidate genes in the ivory shell (*Babylonia areolata*) based on the yeast strain INVSc1[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 2025, 54: 101428.
- [2] 蒋启成, 许芮, 刘晓坤, 等. 湛江市方斑东风螺产业发展现状及对策[J]. *海洋开发与管理*, 2024, 41(7): 135-142.
JIANG Q C, XU R, LIU X K, et al. The development status and countermeasures of Fangban Dongfeng snail (*Babylonia areolata*) industry in Zhanjiang City[J]. *Ocean Development and Management*, 2024, 41(7): 135-142.
- [3] 洪鑫. 方斑东风螺对急性氨氮胁迫的生理响应及其转录组学分析[D]. 海口: 海南大学, 2024.
HONG X. Physiological responses and transcriptomic analysis of *Babylonia areolata* to acute ammonia stress[D]. Haikou: Hainan University, 2024.
- [4] 孙云超, 马靖霞, 王爱民, 等. 不同温度对方斑东风螺生理代谢的影响[J]. *海洋科学*, 2022, 46(12): 183-190.
SUN Y C, MA Q X, WANG A M, et al. Effects of different temperatures on the physiological metabolism of *Babylonia areolata*[J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(12): 183-190.
- [5] ASWARAMOORTHY M, THOMPSON W A, FRAZ S, et al. Elevated temperature during rearing diminishes swimming and disturbs the metabolism of yellow perch larvae[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2025, 228(20): jeb250164.
- [6] 彭汝雨, 李曦, ELY VASQUEZ H, 等. 不同规格大珠母贝稚贝生长、生理及肠道菌群组成[J]. *海南热带海洋学院学报*,

- 2022, 29(2): 14–19.
- PENG R Y, LI X, ELY VASQUEZ H, et al. Differences of growth, physiology and intestinal microflora composition between two sizes of *pinctada maxima* juvenile[J]. Journal of Hainan Tropical Ocean University, 2022, 29(2): 14–19.
- [7] MA Z H, FU Z Y, YANG J R, et al. Combined effects of temperature and salinity affect the survival of Asian Green Mussel (*Perna viridis*) through digestive and antioxidant performance[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(10): 2009.
- [8] SONG J A, LEE E, CHOI Y U, et al. Effects of temperature changes on oxidative stress and antioxidant defense system in the Zhikong scallop *Chlamys farreri*[J]. *Fisheries Science*, 2025, 91(2): 291–299.
- [9] 吕国华, 梁建超, 徐东坡, 等. 温度对不同规格橄榄蛱蚌能量收支的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(6): 1177–1186.
- LYU G H, LIANG J C, XU D P, et al. Effects of temperature on energy budget of *Solenia oleivira* with different sizes[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, 44(6): 1177–1186.
- [10] 李春, 刘琦, 陈宇宽, 等. 高温对缢蛏生理代谢和抗氧化水平的影响 [J]. 水产学报, 2025, 49(6): 82–90.
- LI C, LIU Q, CHEN Y K, et al. Effects of high temperature on the physiological metabolism and antioxidant levels of *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Fisheries of China, 2025, 49(6): 82–90.
- [11] 杨静茹. 温度和盐度对马氏珠母贝 (*Pinctada martensii*) 生理特征的联合效应影响 [D]. 海口: 海南大学, 2022.
- YANG J R. Combined effects of temperature and salinity on physical characteristics of *Pinctada martensii*[D]. Haikou: Hainan University, 2022.
- [12] 阎希柱, 王桂忠, 李少菁, 等. 不同温度对九孔鲍能量收支影响的研究 [J]. 水产学杂志, 2005, 18(2): 35–42.
- YAN X Z, WANG G Z, LI S J, et al. A study on temperature affect the energy budget of *Haliotis diversicolor* aquatilis[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2005, 18(2): 35–42.
- [13] 刘英杰, 马甦, 田相利, 等. 不同温度下青蛤能量收支的研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(增刊 2): 89–92.
- LIU Y J, MA S, TIAN X L, et al. Energy budget at different temperatures in *Cyclina sinensis*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(S2): 89–92.
- [14] STRAHL J, ABELE D. Cell turnover in tissues of the long-lived ocean quahog *Arctica islandica* and the short-lived scallop *Aequipecten opercularis*[J]. *Marine Biology*, 2010, 157(6): 1283–1292.
- [15] 李俊辉, 叶尚芳, 杜晓东, 等. 温度和规格对波纹巴非蛤耗氧率和排氨率的影响 [J]. 水生态学杂志, 2010, 31(5): 96–99.
- LI J H, YE S F, DU X D, et al. Effects of temperature and size on the oxygen consumption and ammonia excretion rates of *Paphia undulate*[J]. Journal of Hydroecology, 2010, 31(5): 96–99.
- [16] 吴加莹, 戴明珠, 刘志刚, 等. 温度对织锦巴非蛤稚贝生存和生长的影响 [J]. 南方水产科学, 2023, 19(2): 62–69.
- WU J Y, DAI M S, LIU Z G, et al. Effects of temperature on survival and growth of *Paphia textile* juveniles[J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(2): 62–69.
- [17] ZHAO N Y, YAN H, YANG Y J, et al. A 23.7-year long daily growth rate record of a modern giant clam shell from South China Sea and its potential in high-resolution paleoclimate reconstruction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 583: 110682.
- [18] WEBB J L, VANDENBOR J, PIRIE B, et al. Effects of temperature, diet, and bivalve size on the ingestion of sea lice (*Lepeophtheirus salmonis*) larvae by various filter-feeding shellfish[J]. *Aquaculture*, 2013, 406–407: 9–17.
- [19] NEWKIRK G F. Review of the genetics and the potential for selective breeding of commercially important bivalves[J]. *Aquaculture*, 1980, 19(3): 209–228.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第 5 部分: 沉积物分析: GB 17378.5—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The specification for marine monitoring—Part 5: sediment analysis: GB 17378.5—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

- [21] 环境保护部. 水质 氨氮的测定 水杨酸分光光度法: HJ 536—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
Ministry of Environmental Protection. Water quality-Determination of ammonia nitrogen-Salicylic acid spectrophotometry: HJ 536—2009[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.
- [22] LYU W G, SHEN M H, FU J Q, et al. Combined effects of temperature, salinity and rearing density on growth and survival of juvenile ivory shell, *Babylonia areolata* (Link 1807) population in Thailand[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(4): 1648–1665.
- [23] HU Z, FENG J, SONG H, et al. Metabolic response of *Mercenaria mercenaria* under heat and hypoxia stress by widely targeted metabolomic approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151172.
- [24] DONG X X, YANG Z J, LIU Z, et al. Metabonomic analysis provides new insights into the response of Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) to heat stress by improving energy metabolism and antioxidant capacity[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(6): 1084.
- [25] 符登, 朱妍云, 林俊逸, 等. 基于光电信号方斑东风螺高温胁迫下的心脏性能研究 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(5): 179–187.
FU D, ZHU Y Y, LIN J Y, et al. Study on cardiac performance of *Babylonia areolata* under high temperature stress based on photoelectric signals[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(5): 179–187.
- [26] SU H C, DUAN S J, HU X J, et al. Spatiotemporal dynamics, bioaccumulation, and critical influencing factors of antibiotics in tilapia aquaculture: a study on source identification and environmental fate within typical farming systems[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 477: 135328.
- [27] RUANGSRI J, THAWONSUWAN J, WANLEM S, et al. Effect of body size and sub-optimal water quality on some hemato-immunological parameters of spotted babylon snail *Babylonia areolata*[J]. *Fisheries Science*, 2018, 84(3): 513–522.
- [28] JØRGENSEN C B, LARSEN P S, RIISGÅRD H U. Effect of temperature on the mussel pump[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 64(1/2): 89–97.
- [29] 胡高宇, 张翔, 林兴管, 等. 温度对文蛤生理代谢的影响 [J]. 浙江农业学报, 2020, 32(9): 1581–1590.
HU G Y, ZHANG X, LIN X G, et al. Effect of temperature on physiology metabolism of *Meretrix petechialis*[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(9): 1581–1590.
- [30] SAUCEDO P E, OCAMPO L, MONTEFORTE M, et al. Effect of temperature on oxygen consumption and ammonia excretion in the Calafia mother-of-pearl oyster, *Pinctada mazatlanica* (Hanley, 1856)[J]. *Aquaculture*, 2004, 229(1/2/3/4): 377–387.
- [31] LOMPRÉ S J, CUNHA M, PINTO J, et al. Cellular responses of *Ruditapes philippinarum* clams to global changes: assessing the risks of rising temperatures and E-waste[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2025, 319: 109262.
- [32] 孙陆宇, 温晓蔓, 禹娜, 等. 温度和盐度对中华圆田螺和铜锈环棱螺标准代谢的影响 [J]. 中国水产科学, 2012, 19(2): 275–282.
SUN L Y, WEN X M, YU N, et al. Influence of water temperature and salinity on standard metabolism of *Cipangopaludina cathayensis* and *Bellamya aeruginosa*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(2): 275–282.
- [33] HORWITZ R, NORIN T, WATSON S A, et al. Near-future ocean warming and acidification alter foraging behaviour, locomotion, and metabolic rate in a keystone marine mollusc[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 5461.
- [34] MATOO O B, LANNIG G, BOCK C, et al. Temperature but not ocean acidification affects energy metabolism and enzyme activities in the blue mussel, *Mytilus edulis*[J]. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(7): 3366–3379.
- [35] DALL W, SMITH D M. Oxygen consumption and ammonia-N excretion in fed and starved tiger prawns, *Penaeus esculentus* Haswell[J]. *Aquaculture*, 1986, 55(1): 23–33.
- [36] RUYET J P L, MAHÉ K, LE BAYON N, et al. Effects of temperature on growth and metabolism in a Mediterranean population of European sea bass, *Dicentrarchus labrax*[J]. *Aquaculture*, 2004, 237(1/2/3/4): 269–280.
- [37] MAYZAUD P. Respiration and nitrogen excretion of zooplankton. II. Studies of the metabolic characteristics of starved

- animals[J]. *Marine Biology*, 1973, 21(1): 19–28.
- [38] NIE H T, CHEN P, HUO Z M, et al. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion in different colour strains of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(6): 2778–2786.
- [39] ZHENG Z M, JIN C H, LI M Y, et al. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile miiuy croaker, *Micthys miiuy* (Basilewsky)[J]. *Aquaculture International*, 2008, 16(6): 581–589.
- [40] 焦海峰, 郑丹, 严巧娜, 等. 温度、盐度及交互作用对僧帽牡蛎呼吸排泄的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(2): 692–699.
JIAO H F, ZHENG D, YAN Q N, et al. Effects of water temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Saccostrea cucullata*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 692–699.
- [41] 陆莉莉, 喻达辉, 覃绥杰, 等. 温度和盐度对织锦巴非蛤耗氧率和排氨率的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(2): 360–364.
LU L L, YU D H, QIN S J, et al. Effects of different temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia-N excretion rate of *Paphia textile*[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(2): 360–364.
- [42] RATO A, JOAQUIM S, MATIAS A M, et al. The impact of climate change on bivalve farming: combined effect of temperature and salinity on survival and feeding behavior of clams *Ruditapes decussatus*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 932310.
- [43] AN S, SON M, YOUN S H, et al. Intraspecific variation in paralytic shellfish toxin compositions of *Alexandrium catenella* strains isolated from Jinhae-Masan Bay, Korea: effects of temperature and salinity on growth and toxicity[J]. *Marine Environmental Research*, 2025, 212: 107518.
- [44] 范德朋, 潘鲁青, 马甦, 等. 温度对缢蛏(*Sinonovacula constricta*)耗氧率和排氨率的影响 [J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(1): 56–62.
FAN D P, PAN L Q, MA S, et al. Effects of temperature on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Sinonovacula constricta*[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(1): 56–62.
- [45] 王培军, 赵清良, 殷宁, 等. 暗纹东方鲀鱼苗耗氧率和窒息点的初步研究 [J]. 水利渔业, 2002, 22(6): 3–4.
WANG P J, ZHAO Q L, YIN N, et al. Preliminary study on oxygen consumption rate and asphyxiation point of *Takifugu obscurus* fry[J]. *Reservoir Fisheries*, 2002, 22(6): 3–4.
- [46] 王崇懿, 胡宝华, 刘建勇, 等. 温度、体质量对九孔鲍耗氧率和排氨率的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 387–391.
WANG C Y, HU B H, LIU J Y, et al. Effects of temperature and body weight on oxygen consumption and ammonia excretion rates of variously colored abalone *Haliotis diversicolor supertexta*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 387–391.
- [47] SUKHOTIN A A, LAJUS D L, LESIN P A. Influence of age and size on pumping activity and stress resistance in the marine bivalve *Mytilus edulis* L.[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 284(1/2): 129–144.
- [48] LIN S H, WU F C, ZHANG G F. Analysis of monthly variation of biological conditions, metabolic parameters and antioxidative capacities in sea-based farmed Pacific abalone during summer days[J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(3): 1345–1359.
- [49] KANG H Y, LEE Y J, SONG W Y, et al. Physiological responses of the abalone *Haliotis discus hannai* to daily and seasonal temperature variations[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8019.
- [50] 袁有宪, 曲克明, 陈聚法, 等. 栉孔扇贝对环境变化适应性研究-温度对存活、呼吸、摄食及消化的影响 [J]. 中国水产科学, 2000, 7(3): 24–27.
YUAN Y X, QU K M, CHEN J F, et al. Adaptability of *Chlamys farreri* to environment—Effects of temperature on survival, respiration, ingestion and digestion[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2000, 7(3): 24–27.
- [51] MARTINEZ-PONCE D R, SEARCY-BERNAL R. Grazing rates of *Haliotis rufescens* post larvae feeding on the benthic diatom *Navicula incerta*[J]. *Journal of Shellfish Research*, 1998, 17(3): 627–630. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请

确认)

- [52] RATO A, JOAQUIM S, MATIAS A M, et al. The impact of climate change on bivalve farming: combined effect of temperature and salinity on survival and feeding behavior of clams *Ruditapes decussatus*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 932310. (查阅网上资料, 本条文献与第 42 条文献重复, 请确认)
- [53] 吴静. 温度和盐度对华贵栉孔扇贝(*Mimachlamys nobilis* Reeve)存活、免疫指标及生理指标的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2016.
- WU J. Effects of temperature and salinity on survival, immune indexes and physiological indexes of *Mimachlamys nobilis* Reeve[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2016.
- [54] HAN K N, LEE S W, WANG S Y. The effect of temperature on the energy budget of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*[J]. *Aquaculture International*, 2008, 16(2): 143–152.
- [55] RAJAGOPAL S, VAN DER VELDE G, JANSEN J, et al. Thermal tolerance of the invasive oyster *Crassostrea gigas*: feasibility of heat treatment as an antifouling option[J]. *Water Research*, 2005, 39(18): 4335–4342.
- [56] 段骄阳, 刘慧, 陈四清, 等. 温度对皱纹盘鲍摄食和耗氧率的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(27): 153–157.
- DUAN J Y, LIU H, CHEN S Q, et al. Temperature effects on feeding and oxygen consumption rate of *Haliotis discus hannai* Ino[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(27): 153–157.
- [57] LYU W G, SHEN M H, FU J Q, et al. Combined effects of temperature, salinity and rearing density on growth and survival of juvenile ivory shell, *Babylonia areolata* (Link 1807) population in Thailand[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(4): 1648–1665. (查阅网上资料, 本条文献与第 22 条文献重复, 请确认)
- [58] 董莎莎, 聂鸿涛, 闫喜武. 贝类低温胁迫响应机制研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(3): 457–462.
- DONG S S, NIE H T, YAN X W. Research progresses on mechanisms of cold stress responses in shellfish: a review[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(3): 457–462.
- [59] 徐东, 张继红, 王文琪, 等. 温度变化对虾夷扇贝耗氧率和排氨率的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1101–1106.
- XU D, ZHANG J H, WANG W Q, et al. Effects of temperature elevation on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Patinopecten yessoensis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(5): 1101–1106.
- [60] YU W C, SHEN Y W, LIU J Y, et al. Genotype by environment interactions in feed efficiency of Pacific abalone (*Haliotis discus hannai*) reared at different water temperatures[J]. *Aquaculture*, 2023, 562: 738764.
- [61] ZEIGLER M P, TODD A S, CALDWELL C A. Evidence of recent climate change within the historic range of Rio Grande cutthroat trout: implications for management and future persistence[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2012, 141(4): 1045–1059.
- [62] PÖRTNER H O, FARRELL A P. Physiology and climate change[J]. *Science*, 2008, 322(5902): 690–692.

作者简介

林俊逸(2004—), 男, 福建福州人, 海南大学海洋生物与水产学院, 学士, 从事水产养殖研究, E-mail: 18760441727@163.com
於 锋(1989—), 男, 重庆人, 海南大学海洋生物与水产学院, 副教授, 博士, 从事贝类遗传育种与逆境生物学研究, E-mail: fengyu2022@hainanu.edu.cn

(责任编辑: 王玖琪)