



刘旭佳, 黄国强, 曾梦清, 等. 水温对不同规格糙海参代谢与存活的影响 [J]. 水产学报, 2026, 50(5): 059613.

Liu X J, Huang G Q, Zeng M Q, et al. Effects of water temperature on metabolism and survival of *Holothuria scabra* with different body weights [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(5): 059613 (in Chinese).

水温对不同规格糙海参代谢与存活的影响

刘旭佳¹, 黄国强², 曾梦清³, 姜发军¹, 程楚航¹, 郁二蒙^{1*}

(1. 广西科学院广西海洋科学院, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007;

2. 广西中医药大学海洋药物研究院, 广西南宁 530200;

3. 广西海洋研究有限责任公司, 广西北海 536000)

摘要: 【目的】为了探究水温对不同规格糙海参代谢与存活率的影响。【方法】采用实验生态学方法, 研究了 8 个水温梯度 (14、17、20、23、26、29、32 和 35 °C) 对 4 种规格 XS [(0.68±0.33) g]、S [(13.52±2.64) g]、M [(33.43±5.79) g] 和 L [(51.16±10.06) g] 糙海参耗氧率 (OCR)、排氨率 (AER) 以及存活率 (SR) 的影响。【结果】 OCR_{ind}/AER_{ind} 与体重之间呈幂函数关系 $R_{ind}=aW^b$ ($0<b<1$, 除 35 °C 的 AER_{ind} 以外); 糙海参 OCR_{mass} 和 AER_{mass} 与水温呈幂函数关系 $R=aT^b$ ($b>1$)。四种规格糙海参 OCR_{mass} 和 AER_{mass} 均随水温升高而显著增加, OCR_{mass} 最大值出现在 32~35 °C, AER_{mass} 最大值出现在 29~32 °C, 随水温继续升高而降低。水温对 4 种规格糙海参 OCR_{mass} 和 AER_{mass} 影响均显著, 水温和规格的交互作用对 OCR_{mass} 和 AER_{mass} 影响极显著。 Q_{10} 分析显示, 低温对糙海参代谢的影响高于高温。在存活率实验中, 低温 14 °C 条件下 XS 组糙海参全部死亡, L 组存活率最高为 83.3%±11.8%; 随着温度升至 20~32 °C, S、M、L 组存活率均为 100%, XS 组 23 °C 时存活率才达到 100%; 当温度升至 35 °C 时, XS、S 组存活率分别降至 30.0%±8.2%、79.2%±5.9%, M、L 组存活率分别为 94.4%±7.9%、100%。较大规格个体表现出显著更强的温度适应性, 尤其在 14 °C 和 35 °C 水温条件下更为明显。【结论】低温对糙海参代谢影响更为显著, 且大规格个体对温度胁迫的耐受性更强; 糙海参生理活动的最适水温范围为 26~29 °C; 幼参与中大规格糙海参适宜生存水温范围分别为 23~32 °C、20~32 °C。研究结果为糙海参人工养殖中的水温管理提供了关键数据支撑。

关键词: 糙海参; 水温; 规格; 代谢; 存活率

中图分类号: S 968.9

文献标志码: A

呼吸和排泄是动物能量代谢的基本生理活动, 其中耗氧率和排氨率是衡量二者代谢强度的关键

指标。探究外部环境因子 (光照、温度、饵料等) 和内在因子 (体重、发育期等) 对呼吸和排泄的影

收稿日期: 2026-01-15 修回日期: 2026-02-25

资助项目: 国家自然科学基金 (31960225); 广西赋能行动计划项目 (桂科 FN2600640359); 广西自然科学基金 (2021GXNSFAA196074); 广西向海经济人才项目 (2025XHRC16)

第一作者: 刘旭佳, 从事养殖生态学研究, E-mail: lxu0312@126.com

通信作者: 郁二蒙, 从事水产动物营养研究, E-mail: yem34@gxas.cn



响,是揭示海洋生物能量代谢与营养生理的核心内容^[1]。水温和规格是调控海参生理状态的关键因子,会显著影响其生理活动^[2]、代谢^[3-4]、生长^[5-9]以及脂肪酸组成和蛋白质表达^[10-11]等一系列生命活动。因此,准确掌握水温与个体规格对海参代谢及存活的影响,对于优化其养殖策略至关重要。

糙海参 (*Holothuria scabra*) 俗称沙参,是一种分布于热带及亚热带沿海地区的高价值海参物种,具有重要经济、生态以及药用价值^[12-15]。在印度-太平洋地区的许多国家,糙海参是重要的渔业资源^[16-18],在我国主要分布于海南、广东及广西近海岸水域 20 m 以内水深处^[19]。然而随着需求量不断增加,过度捕捞导致野生糙海参数量不断下降,糙海参已经被 IUCN 评估为濒危物种^[20]。因此,人工养殖成为解决市场需求和保护自然资源的关键。值得注意的是,不同地理种群糙海参在体型、体色及适温范围等方面存在差异,这提示其生理响应可能具有地域特异性^[21-23]。目前,水温对我国糙海参代谢与存活的影响未见研究报道。本研究通过测定 4 种规格糙海参在 8 个温度梯度下的耗氧率、排氨率以及存活情况,以期为我国糙海参人工养殖提供依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验中的糙海参亲参 [(135.9±16.2) g] 来自海南省陵水 (109°58' N, 18°23'E), 幼参 [(0.68±0.33) g] 为广西海洋科学院人工繁育的子代,较大规格个体来自人工养殖。所有个体均在室内水泥池 (长宽高: 400 cm×350 cm×120 cm) 中暂养,池底铺设 2~5 cm 的海砂 (粒径 40~80 目),使用砂滤海水。每日 16:00 投喂刺参配方饲料 (由马尾藻、豆粕、海洋酵母、螺旋藻粉、维生素和矿物质预混料组成),投喂量为体重的 5%。暂养期间水温 27~32 °C,盐度 27~31, pH 7.9,溶解氧 >4.5 mg/L。光周期为 14L:10D。

选择健康个体用于实验。根据体重将糙海参分为 XS 组 [(0.68±0.33) g]、S 组 [(13.52±2.64) g]、M 组 [(33.43±5.79) g] 和 L 组 [(51.16±10.06) g]。

1.2 实验装置

实验装置包括 2 个控温水箱,规格为 1 500 L (长宽高: 250 cm×100 cm×60 cm),分批次开展实

验,放置 4 种规格的养殖箱,分别为 XS 组 (长宽高: 38.5 cm×26.0 cm×21.0 cm); S 组 (长宽高: 48.5 cm×33.0 cm×26.5 cm); M 组 (长宽高: 55.5 cm×37.5 cm×30.0 cm); L 组 (长宽高: 61.5 cm×41.5 cm×33.0 cm)。养殖箱底部铺设 2~5 cm 海砂 (粒径 40~80)。水温通过控温机 (型号: HC-1000b)、加热棒或空调机 (格力 KFR-35GW) 达到目标温度。实验过程中操作人员严格遵守实验动物伦理规范,并按照实验动物伦理委员会制定的规章制度执行。

1.3 实验设计

代谢实验 设置了 8 个水温 (14、17、20、23、26、29、32 和 35 °C),代表我国糙海参全年自然栖息地及养殖水温范围^[24]。四种规格糙海参分别在对应规格的养殖箱暂养 7 d,养殖密度约为 XS 组 100 头/m²、S 组 50 头/m²、M 组 30 头/m²、L 组 15 头/m² (XS 组 10 头/箱、S 组 8 头/箱、M 组 6 头/箱、L 组 4 头/箱),水温以每天 6 °C 的速率从暂养水温调整至目标温度。实验采用静水法,将不同规格的糙海参分别置于相应体积的锥形瓶 (XS、S 组: 1 L; M 组: 2 L; L 组: 5 L) 中,瓶中充满充氧砂滤海水,并置于对应温度的控温水箱内。每个温度-规格组合设 9 个锥形瓶 (每瓶 1 头海参) 和 3 个空白对照瓶 (无海参)。用封口膜密封瓶口,24 h 后采集水样。

使用 YSI 溶氧仪 (Pro ODO, 美国) 直接测定溶解氧含量。水样中的氨氮采用次溴酸盐氧化法测定 (GB 17378.4—2007)。

生存实验 生存实验 15 d,水温梯度、水温控制方式以及规格设置同代谢实验。每个温度-规格组合设 3 个重复,养殖密度与代谢实验的暂养密度一样。每日 16:00 投喂刺参配方饲料 (由马尾藻、豆粕、海洋酵母、螺旋藻粉、维生素和矿物质预混料组成),投喂量为海参体重的 5%,每 5 天换 1 次水,换水温度与实验温度相同。盐度 27~31, pH 7.9,溶解氧 >4.5 mg/L。光周期为 14L:10D。每日观察记录存活情况。

1.4 处理方法

采用水瓶法测定糙海参代谢瓶和对照瓶的溶解氧 (DO_t、DO₀, μg/L) 和氨氮 (A_t、A₀, μg/L) 含量。耗氧率 (OCR) 和排氨率 (AER) 的计算公式: 个体耗氧率 OCR_{ind} [μg/(头·h)] = (DO₀ - DO_t) × V / t

单位体重耗氧率 $OCR_{mass}/[(\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h}))] = OCR_{ind}/BW$

个体排氮率 $AER_{ind}/[\mu\text{g}/(\text{头}\cdot\text{h})] = (A_t - A_0) \times V/t$

单位体重排氮率 $AER_{mass}/[(\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h}))] = AER_{ind}/BW$

式中, V 为实验瓶的体积 (L), BW 为体重 (g), t 为代谢时间 (h)。

温度系数 Q_{10} :

$$Q_{10} = (M_2/M_1)^{10/(t_2-t_1)}$$

式中, M_1 和 M_2 分别代表实验水温 t_1 和 t_2 下的 OCR_{mass} 。

氧氮原子数比的计算公式:

$$\text{氧氮比} = (OCR_{mass}/16)/(AER_{mass}/14)$$

生存率 (SR) 计算公式:

$$SR(\%) = (N_s/N_i) \times 100\%$$

式中, N_s 和 N_i 分别代表存活个体数和初始个体数。

1.5 统计分析

采用 SPSS 20.0 软件对所有代谢数据进行方差和双因子方差分析, 采用 LSD 方法进行比较检验, 通过 Levene 检验检查方差齐性。若方差不齐, 则在统计分析前对数据进行对数转换。以 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 分别作为差异显著与极显著的标准。

2 结果

2.1 水温对不同规格糙海参耗氧率的影响

在 14~35 °C 水温范围内, 糙海参 OCR_{ind} 与体重之间呈幂函数关系 $R_{ind} = aW^b$ (回归关系参数 a 和 b 见表 1, 曲线见图 1)。参数 a 为代谢水平系数, 参数 b 为异速生长指数 ($0 < b < 1$), 均随水温升高呈现先上升后下降的变化趋势。

随着水温升高, XS 组糙海参 OCR_{mass} 在 35 °C 达到峰值; S、M 和 L 组的耗氧率在 32 °C 达到峰值, 随后在 35 °C 下降 (图 2)。四个规格处理组糙海参 OCR_{mass} 随水温升高均呈现显著增加趋势 [XS 组: $F(7, 64) = 23.786, P < 0.001$; S 组: $F(7, 64) = 77.293, P < 0.001$; M 组: $F(7, 64) = 117.715, P < 0.001$; L 组: $F(7, 64) = 88.246, P < 0.001$]。不同水温组, 除 29 °C 外, 糙海参的 OCR_{mass} 随体重增加均有显著变化 [14 °C: $F(3, 32) = 97.029, P < 0.001$; 17 °C: $F(3, 32) = 43.348, P < 0.001$; 20 °C: $F(3, 32) = 11.909, P < 0.001$; 23 °C: $F(3, 32) = 10.011, P < 0.001$; 26 °C:

表 1 不同水温条件下糙海参个体耗氧率/排氮率与体重的回归关系

Tab. 1 Regressive relationship between body weight and individual OCR/AER of *H. scabra* at different water temperatures ($n=36$)

水温/°C water temperature	耗氧率/ $[\mu\text{g}/(\text{头}\cdot\text{h})]$ OCR	排氮率/ $[\mu\text{g}/(\text{头}\cdot\text{h})]$ AER
14	$6.516 2W^{0.619 0} (R^2=0.960 6)$	$0.440 4W^{0.831 6} (R^2=0.903 6)$
17	$11.055 0W^{0.666 6} (R^2=0.939 3)$	$0.476 2W^{0.838 9} (R^2=0.880 3)$
20	$12.818 6W^{0.844 0} (R^2=0.959 2)$	$0.501 0W^{0.859 0} (R^2=0.922 3)$
23	$13.542 1W^{0.863 0} (R^2=0.974 7)$	$1.000 6W^{0.820 8} (R^2=0.963 2)$
26	$15.287 3W^{0.927 8} (R^2=0.979 0)$	$1.093 2W^{0.921 8} (R^2=0.926 2)$
29	$16.288 5W^{0.970 6} (R^2=0.963 2)$	$2.582 3W^{0.734 9} (R^2=0.860 1)$
32	$30.096 4W^{0.839 5} (R^2=0.980 1)$	$2.526 5W^{0.831 5} (R^2=0.891 7)$
35	$28.559 8W^{0.811 0} (R^2=0.963 2)$	$1.051 4W^{1.012 2} (R^2=0.945 9)$

$F(3, 32) = 7.233, P = 0.001$; 29 °C: $F(3, 32) = 0.730, P = 0.543$; 32 °C: $F(3, 32) = 17.875, P < 0.001$; 35 °C: $F(3, 32) = 24.858, P < 0.001$]。糙海参 OCR_{mass} 与水温之间符合幂函数关系 $R = aT^b$ (回归曲线见图 3, a、b 值见表 2)。

Q_{10} 值反映了水温对糙海参代谢率的影响程度 (表 3)。对于幼参, Q_{10} 在低温阶段 14~17 °C 具有最高值 11.32, 其次为 26~29 °C 时的 6.60, 而在其他水温范围内, 其值在 1.12 至 1.62 之间变化。对于其他 3 个规格组, 较高的 Q_{10} 值出现在 14~17 °C 和 17~20 °C, 而在其他水温范围内的值分别在 0.38~3.62、0.74~5.50 以及 0.60~3.06。方差分析表明, 体重、水温及其交互作用均对糙海参的 OCR_{mass} 具有极显著影响 ($F(21, 256) = 6.140, P < 0.001$) (表 4)。

2.2 水温对不同规格糙海参排氮率的影响

在 14~35 °C 水温范围内, 糙海参 AER_{ind} 与体重之间呈幂函数关系 $R_{ind} = aW^b$ (回归关系参数 a 与 b 见表 1, 曲线见图 4)。参数 a 随水温升高呈现先上升后下降的变化趋势。参数 b 值随水温升高呈波动变化, 35 °C 下的 b 值为 1.012 2, 为唯一大于 1 的情况。

糙海参 AER_{mass} 随水温升高呈先上升后下降趋势, 四个规格糙海参 AER_{mass} 均随水温升高而显著增加, 并分别在 29 °C (XS 组)、32 °C (S 组)、32 °C (M 组) 和 32 °C (L 组) 达到峰值, 之后随水温继续升高而下降 [XS 组: $F(7, 64) = 23.970, P < 0.001$; S 组: $F(7, 64) = 13.218, P < 0.001$; M 组:

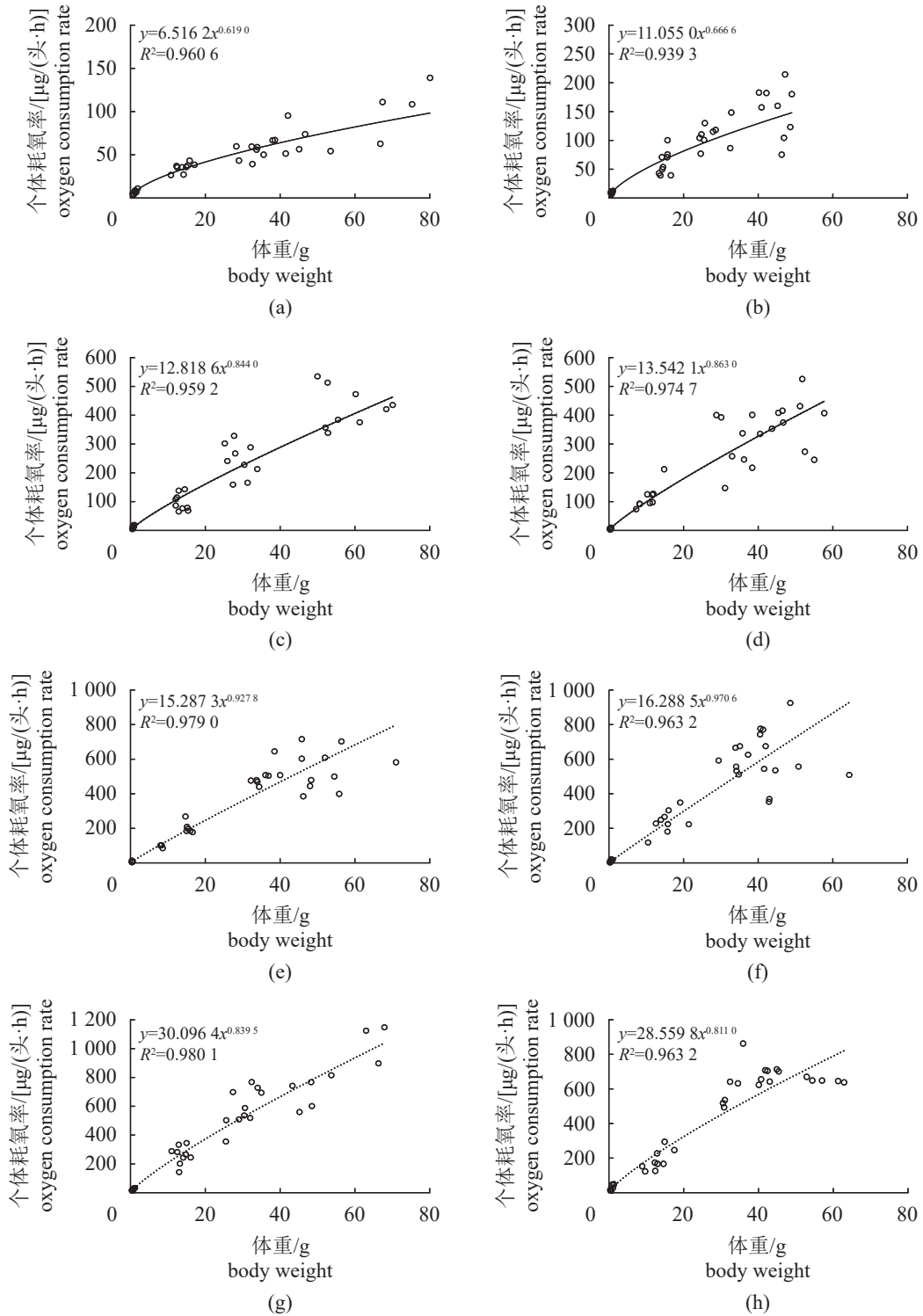


图 1 8 个水温条件下糙海参个体耗氧率与体重的回归关系

(a)–(h) 分别代表 14、17、20、23、26、29、32 和 35 °C，图 4 同。

Fig. 1 Regression relationship between oxygen consumption rate and body weight of individual *H. scabra* under eight water temperature conditions

(a)–(h) represent 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32 and 35 °C, respectively, the same as Fig.4.

$F(7, 64)=74.396$, $P<0.001$; L 组: $F(7, 64)=15.780$, 外, 糙海参 AER_{mass} 随其体重的增加均呈现显著 $P<0.001$] (图 5)。各水温条件下, 除 26 °C 和 35 °C 变化 [14 °C : $F(3, 32)=5.938$, $P=0.002$; 17 °C :

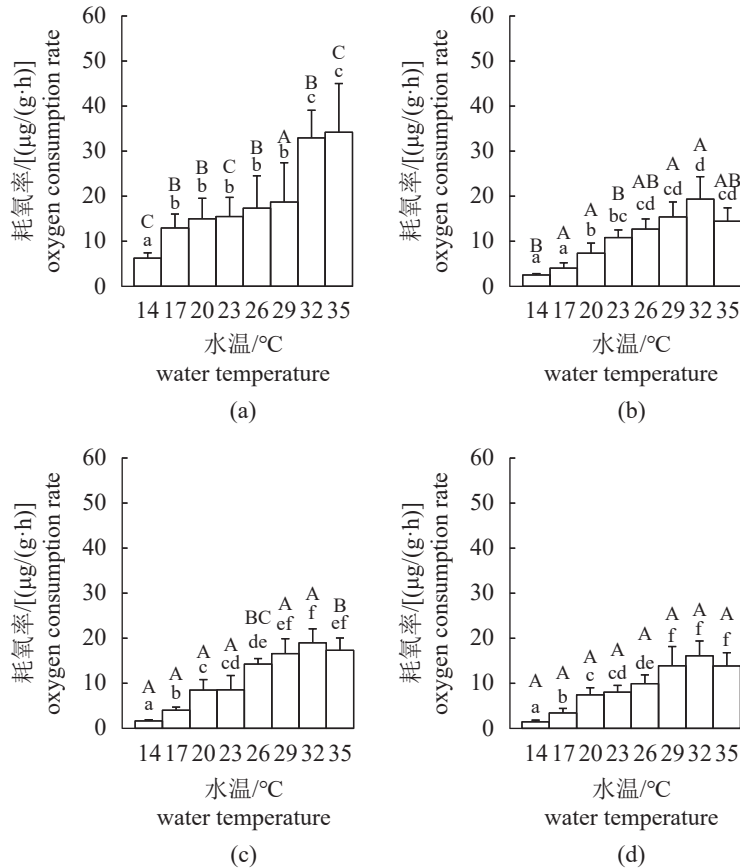


图 2 水温对四种规格糙海参单位体重耗氧率的影响

(a)~(d) 分别代表 XS 组, S 组、M 组、L 组。不同小写字母表示相同规格下不同水温间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同水温下不同规格间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Fig. 2 Effect of water temperature on the oxygen consumption rate per unit body weight of four groups of *H. scabra*

(a)~(d) represent the XS group, S group, M group, and L group, respectively. Different lowercase letters represent significant difference at water temperature for the same body weight ($P < 0.05$), and different uppercase letters represent significant difference at different body weight for same water temperature ($P < 0.05$), the same below.

$F(3, 32) = 4.461, P = 0.010$; 20 °C: $F(3, 32) = 4.070, P = 0.015$; 23 °C: $F(3, 32) = 15.108, P < 0.001$; 26 °C: $F(3, 32) = 1.853, P = 0.157$; 29 °C: $F(3, 32) = 12.886, P < 0.001$; 32 °C: $F(3, 32) = 4.371, P = 0.011$; 35 °C: $F(3, 32) = 1.444, P = 0.248$ (图 5)。方差分析表明, 体重、水温及二者的交互作用均对糙海参 AER_{mass} 有极显著影响 [$F(21, 256) = 2.326, P = 0.001$] (表 4)。 AER_{mass} 与水温符合幂函数关系 $R = aT^b$ (a、b 值见表 2, 回归曲线见图 6)。

2.3 不同水温下 4 种规格组糙海参的 O/N 值

4 种规格组糙海参的 O/N 值均随水温升高显著增加, 达到峰值后, 随水温继续升高而显著下降 [XS 组: $F(7, 64) = 10.375, P < 0.001$; S 组: $F(7, 64) = 6.110, P < 0.001$; M 组: $F(7, 64) = 9.928, P < 0.001$; L 组: $F(7, 64) = 6.346, P < 0.001$] (表 5)。

在各水温条件下, 除 20、23、26 及 32 °C 外, 糙海参的 O/N 值随体重增加均存在显著性差异 [14 °C: $F(3, 32) = 5.296, P = 0.004$; 17 °C: $F(3, 32) = 8.097, P < 0.001$; 20 °C: $F(3, 32) = 2.709, P = 0.061$; 23 °C: $F(3, 32) = 1.839, P = 0.160$; 26 °C: $F(3, 32) = 0.592, P = 0.625$; 29 °C: $F(3, 32) = 11.883, P < 0.001$; 32 °C: $F(3, 32) = 1.179, P = 0.333$; 35 °C: $F(3, 32) = 13.318, P < 0.001$]。

2.4 水温对不同规格糙海参存活率的影响

水温对糙海参的影响呈现出明显的阈值效应和规格依赖性, 具体可分为 3 个温度区间图 7。

低温胁迫区间 (14~17 °C): 14 °C 所有规格糙海参的生理活动均受到显著抑制, 且规格越小, 抑制效应越强。XS 组幼参完全丧失运动能力, 滞留于砂面, 无摄食行为 (未见粪便排出)。达到 14 °C

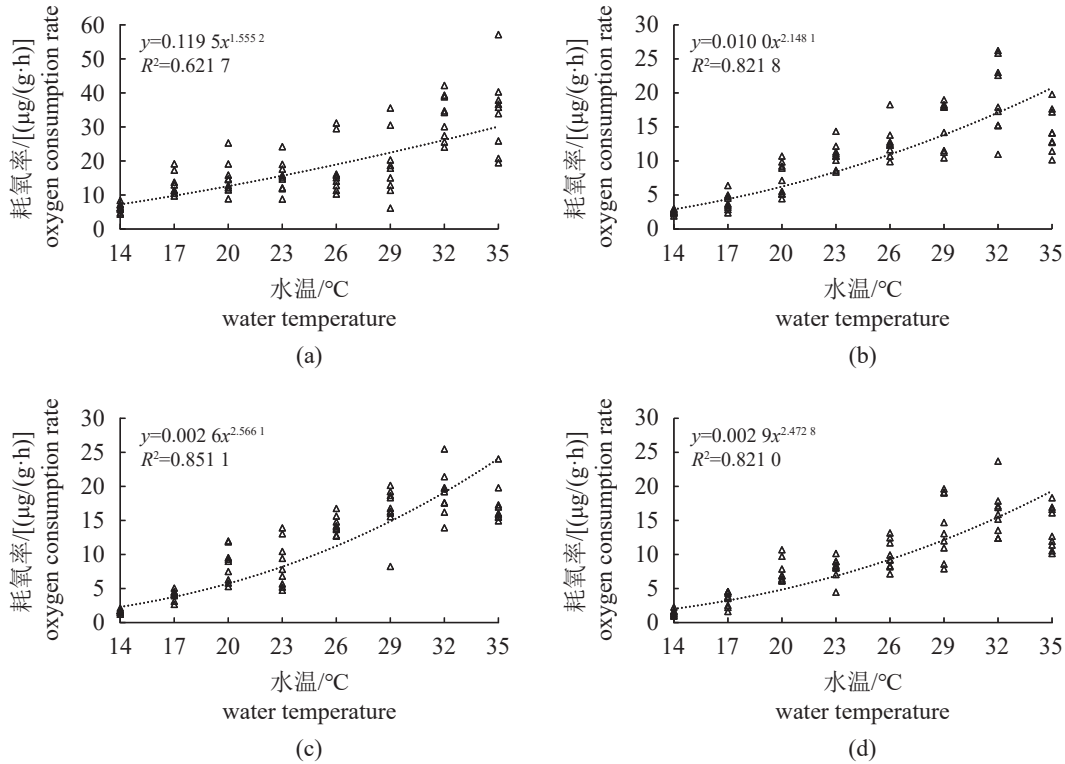


图 3 四种规格糙海参单位体重耗氧率与水温回归关系

Fig. 3 Regression relationship between oxygen consumption rate per unit body weight and water temperature in four groups of *H. scabra*

表 2 不同规格糙海参水温与耗氧率/排氨率的回归关系

Tab. 2 Regressive relationship between water temperature and OCR/AER of *H. scabra* at different body weights ($n=72$)

规格 body weight	耗氧率/ $[\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})]$ OCR _{mass}	排氨率/ $[\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})]$ AER _{mass}
XS	$0.11957x^{1.5552}$ ($R^2=0.6217$)	$0.00207x^{1.9675}$ ($R^2=0.4611$)
S	$0.01007x^{2.1482}$ ($R^2=0.8218$)	$0.00337x^{1.6894}$ ($R^2=0.4811$)
M	$0.00267x^{2.5661}$ ($R^2=0.8511$)	$0.00047x^{2.3556}$ ($R^2=0.8249$)
L	$0.00297x^{2.4728}$ ($R^2=0.8210$)	$0.00067x^{2.1235}$ ($R^2=0.5721$)

后第 3 天, 其口部及背部体表开始出现白点状化皮, 然后蔓延至全身, 5 天后全部化皮死亡。S、M、L 组存活率分别为 $29.2\% \pm 5.9\%$ 、 $50.0\% \pm 13.6\%$ 、 $83.3\% \pm 11.8\%$, 其化皮现象开始于第 7 天, 存活个体均无摄食行为, “昼伏夜出”的潜沙行为不规律。17 °C 条件下, XS 组海参化皮个体出现于第 8 天, 第 15 天海参化皮面积过半, 幼参存活率 30.0%; S、M、L 组糙海参存活个体摄食行为未恢复, 体重明显降低, 体壁肌肉松弛变薄。

适宜生存区间 (20~32 °C): 20 °C 是糙海参生

表 3 温度对糙海参代谢的影响程度

Tab. 3 The extent of temperature influence on metabolism rate of *H. scabra*

水温范围/ $^{\circ}\text{C}$ temperature ranges	Q_{10}			
	XS	S	M	L
14~17	11.32	4.83	19.32	17.33
17~20	1.62	7.38	12.01	13.24
20~23	1.12	3.62	1.02	1.30
23~26	1.46	1.71	5.50	2.02
26~29	1.28	1.90	1.65	3.06
29~32	6.60	2.14	1.57	1.64
32~35	1.13	0.38	0.74	0.60

理活动的关键恢复阈值, S、M、L 组个体开始恢复摄食 (可见粪便排出)。XS 组幼参在第 10 天部分个体出现化皮, 无摄食行为, 第 15 天时存活率为 60.0%。其余各组海参存活率均为 100%, 但是摄食量明显降低。随着温度升高至 23~32 °C, 所有体重组摄食、潜沙等行为均表现活跃, 体表健康, 维持 100% 存活率。

高温胁迫区间 (35 °C): 在 35 °C 高温下, 所有规格糙海参均全部暴露于砂面之上, 无潜沙行

表 4 水温与规格对糙海参代谢影响的双因素方差分析结果

Tab. 4 The results of Two-Way ANOVA of the metabolic rates of *H. scabra* with body weight and water temperature

代谢率 metabolism rate	影响因子 factor	SS	df	MS	F	P
耗氧率 OCR_{mass}	水温×规格	1.775	21	0.085	6.140	0.000
	水温	24.363	7	3.480	252.863	0.000
	规格	5.055	3	1.685	122.417	0.000
	误差	3.524	256	0.014		
	总和	315.205	288			
排氨率 AER_{mass}	水温×规格	1.920	21	0.091	2.326	0.001
	水温	22.798	7	3.257	82.886	0.000
	规格	3.603	3	1.201	30.564	0.000
	误差	10.059	256	0.039		
	总和	45.834	288			

为。尽管大规格个体(L组)未出现死亡,但始终处于热应激状态,表现为摄食量显著减少、活动频率降低。相比之下,小规格个体(尤其是XS组幼参)在此温度下生理失衡更为剧烈,最终导致存活率锐减。

3 讨论

3.1 水温对不同规格糙海参代谢的影响

水温是影响海参生理与生长的关键环境因子^[2,6,8,25]。糙海参分布广泛,不同纬度及海域的水温耐受阈值存在一定差异^[26],我国糙海参对水温变化的生理响应尚不明确。本实验选取 14~35 °C 的水温范围,涵盖了我国糙海参全年可能经历的温度,旨在明确水温与规格对其代谢的影响。

水温对不同规格糙海参耗氧率的影响

耗氧率是棘皮动物能量代谢的重要指标,其与环境水温的相关性已被广泛研究^[2-4,6,27-28]。

个体耗氧率 OCR_{ind} 反映生物整体的总能量代谢需求。本研究中,不同水温条件下糙海参 OCR_{ind} 与体重均呈显著幂函数关系 ($OCR_{ind}=aW^b$),这与多数生物的研究结果一致^[3,27]。参数 a 随水温升高呈先升后降趋势,在 14~32 °C 从 6.516 2 持续上升至 30.096 4, 35 °C 时略有下降,表明糙海参基础代谢强度随温度升高而增强,至 32 °C 达最大, 35 °C 时出现高温抑制。参数 b (体重系数)揭示了 OCR_{ind} 随体重增长的变化规律,根据单位体重耗氧率公式 $OCR_{mass}=OCR_{ind}/DW=aW^{b-1}$, 由于 $b-1<0$, 所以 OCR_{mass} 随体重增加而下降,下降的

速率取决于 b 值。14 °C 时 b 值为 0.619 0, 表明大个体 OCR_{mass} 远低于小个体,推测低温对大个体代谢的抑制更为强烈。20~26 °C 时 b 值升至 0.844 0~0.927 8, 规格依赖性减弱。29 °C 时 b 值为 0.970 6 (接近等速生长), 所有规格糙海参的代谢潜力均得到充分发挥。32~35 °C 时 b 值回落至 0.839 5~0.811 0, 高温再次加剧了代谢的体型差异,大个体代谢受抑更为明显。在 26~29 °C 时, b 值接近 1, 代谢活性最高且个体差异最小,是糙海参生理活动的最适温度范围。与温带刺参 (*Apostichopus japonicus*) 相比,糙海参代谢温度响应表现出明显的热带种特征。普通刺参耗氧率在 20 °C 出现低谷(可能与夏眠有关), 30 °C 代谢率极高但伴随死亡, 高温耐受性较差^[3]。红刺参代谢率持续上升至 27 °C, a 值无显著下降, b 值波动但总体接近 1, 反映其对高温的耐受性优于普通刺参^[27]。糙海参最适温度较高 (26~32 °C), 耗氧率在 32 °C 时达到峰值, b 值随温度升高而增大, 反映其通过提高代谢率应对高温的适应策略, 但超过阈值后代谢受抑。

单位体重耗氧率与水温的关系可表示为 $OCR_{mass}=aT^b$ 。幼参(XS组) OCR_{mass} 在各温度下均高于较大规格个体,且在 14~35 °C 持续升高, 35 °C 时达峰值。而其他规格均在 32 °C 时达到最大值, 35 °C 时下降, 表明幼参呼吸强度更高, 与其快速生长的能量需求有关。刺参大规格个体 [(52.1±12.9) g、(149.9±28.0) g] 的 OCR_{mass} 在 10~20 °C 内随水温上升而增加, 在 20~30 °C 内则随水温升高而下降^[3]。小规格 [(17.3±5.5) g] 的耗氧率在整个

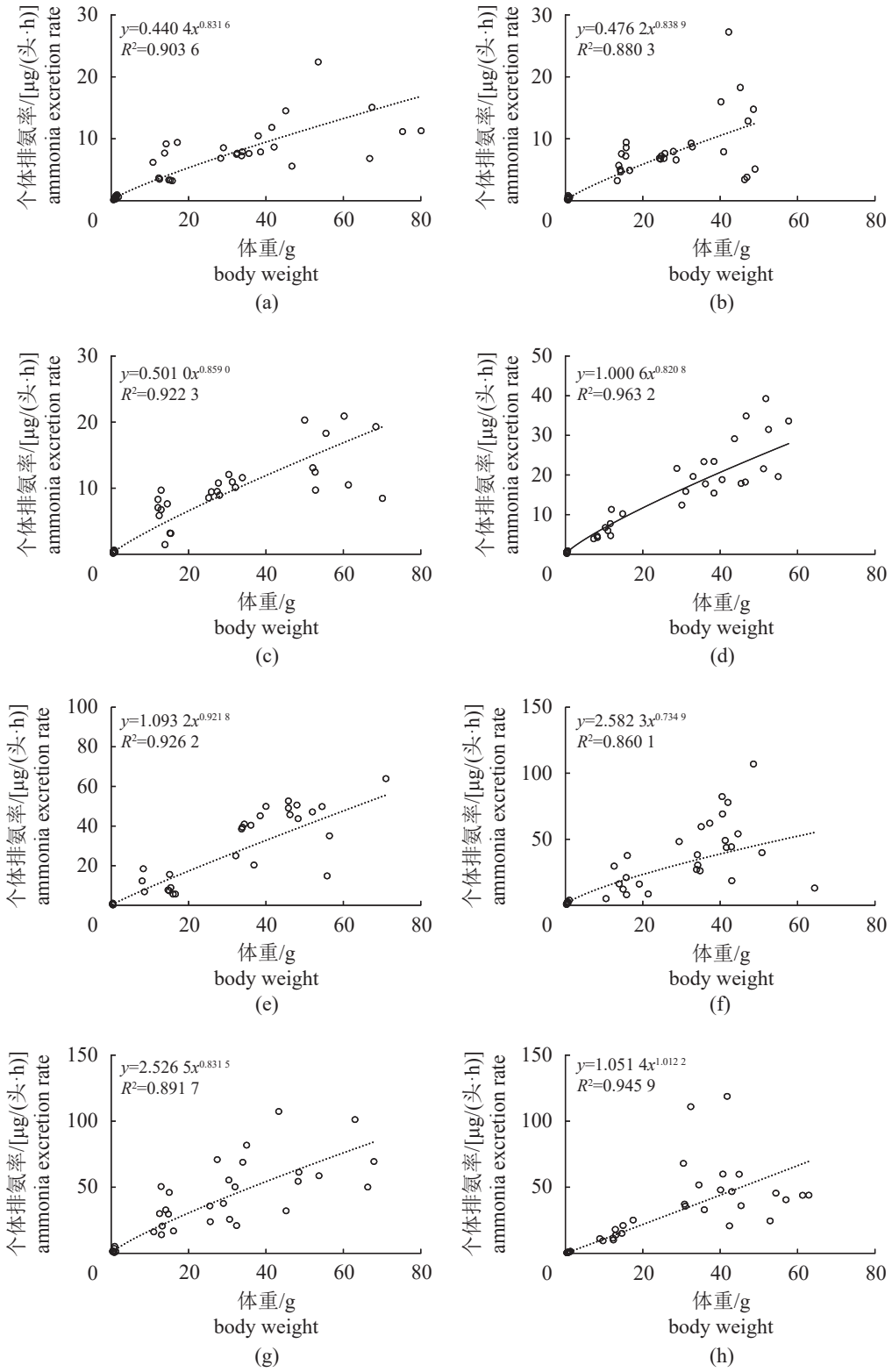


图 4 8 个水温条件下糙海参个体排氨率与体重的回归关系

Fig. 4 Regression relationship between ammonia excretion rate and body weight of individual *H. scabra* under eight water temperature conditions

实验温度范围内缓慢上升, 表明温度变化对小规格刺参影响较小, 其在实验温度下夏眠不彻底或

不进行夏眠, 这一响应特征与热带种糙海参的生理机制存在明显差异。幂函数中参数 a 随糙海参

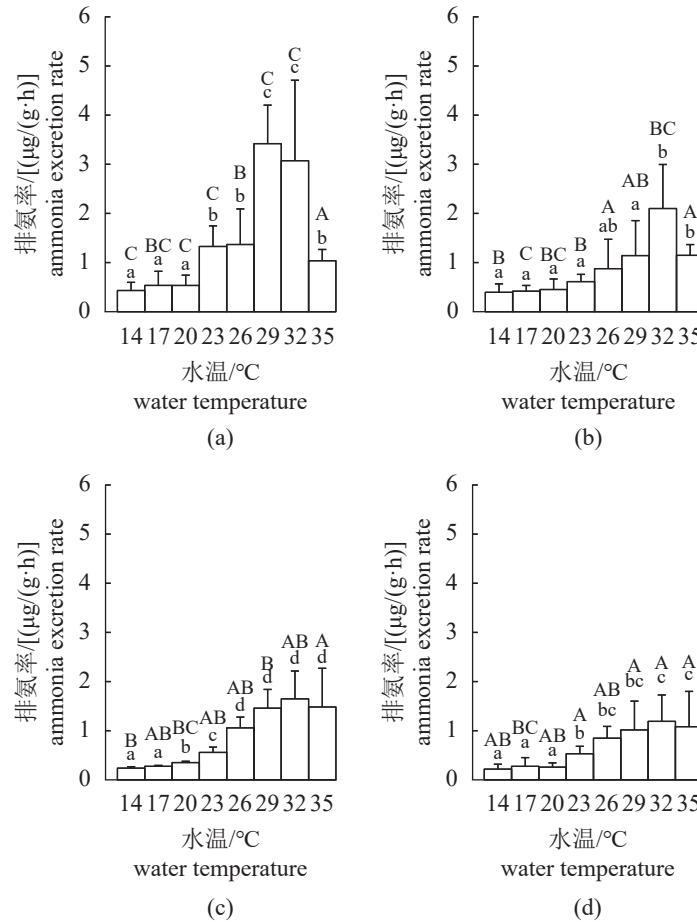


图 5 水温对四种规格糙海参单位体重排氨率的影响

Fig. 5 Effect of water temperature on the ammonia excretion rate per unit body weight of four groups of *H. scabra*

规格增大呈递减趋势 (XS: 0.119 5、S: 0.010 0、M: 0.002 6、L: 0.0029), 表明在相同水温下, OCR_{mass} 随个体增大而显著降低, 符合代谢率与体重呈负相关的生理规律 [3,29-30]。参数 b 反映 OCR_{mass} 对水温变化的敏感程度, b 值随规格增大呈先升后降趋势 (XS: 1.555 2、S: 2.148 2、M: 2.566 1、L: 2.472 8), 显示中等规格对水温变化最敏感, 其耗氧率随温度上升的增速最快。

在适宜水温范围内, 温度系数 Q_{10} 可用于表征水生生物代谢对水温变化的调节能力。较低 Q_{10} 值意味着生物对环境水温变化适应性强, 能在极端冷热条件下以较低能耗维持稳定生理活动。在低温阶段 (14~17 °C、17~20 °C), 糙海参的 Q_{10} 值高于其他温度阶段, 表明低温变化对其代谢影响更为显著。作为热带种, 糙海参对水温 (26~29 °C) 适应性更强, 而温带种刺参则对高温 (>20 °C) 更加敏感 [6,27]。

水温对不同规格糙海参排氨率的影响 氨氮

是水产动物蛋白质与氨基酸代谢产生的主要含氮排泄物 [30]。本研究中, 不同水温条件下糙海参 AER_{ind} 与体重均呈显著幂函数关系 ($AER_{ind}=aW^b$)。参数 a 在 14~20 °C 范围内缓慢上升 (0.440 4~0.501 0), 在 23~29 °C 急剧上升至 2.582 3、32~35 °C 急剧下降至 1.051 4, 表明糙海参的蛋白质代谢强度具有明显的温度依赖性。14~20 °C 时排氨活动较弱, 可能与其摄食活动减少、蛋白质代谢水平低有关。在 23~29 °C 时排氨率显著增强, 29 °C 时达到峰值, 对应摄食活跃、蛋白质代谢旺盛的生长加速期。水温超过 32 °C 后, 排氨率急剧下降, 35 °C 时抑制效应显著, 表明极端高温导致蛋白质代谢功能受损。排氨率峰值温度 (29 °C) 略低于耗氧率 (32 °C), 提示糙海参的蛋白质代谢对高温的耐受范围可能比整体能量代谢更窄。参数 b 随水温升高呈波动变化趋势, 揭示了不同温度下排氨代谢的规格依赖。14~26 °C 时 b 值为 0.820 8~0.921 8 ($b<1$), 大个体单位体重排氨率低于小个体, 符合

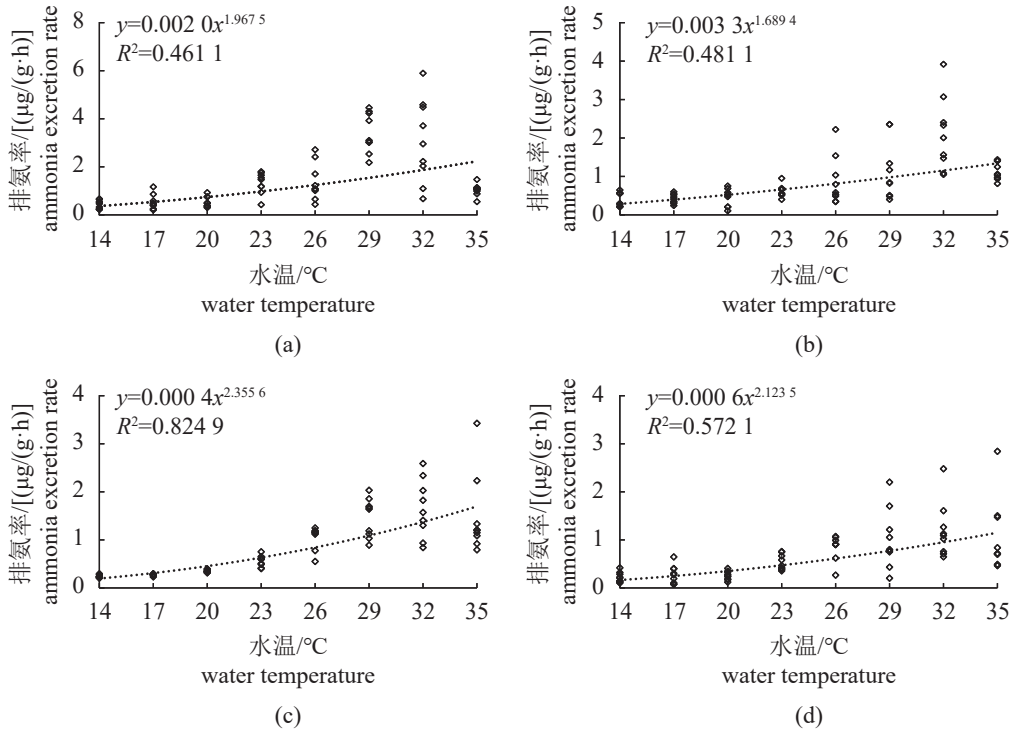


图 6 4 种规格糙海参单位体重排氨率与水温回归关系

Fig. 6 Regression relationship between ammonia excretion rate per unit body weight and water temperature in four groups of *H. scabra*

小个体蛋白质周转率较高的生理规律。29 ℃ 时 b 值为 0.734 9，可能与大个体通过主动下调蛋白质

表 5 不同水温与规格糙海参 O/N 值

Tab. 5 O/N ratio of *H. scabra* with various body weights under different water temperatures

水温/℃ water temperature	O/N 值			
	XS	S	M	L
14	15.8±8.9 ^{bB}	7.0±3.2 ^{abA}	6.2±1.1 ^{aA}	7.1±3.2 ^{abA}
17	27.1±12.8 ^{dD}	8.7±2.2 ^{AB}	12.9±2.3 ^{bcB}	15.2±8.0 ^{bcB}
20	28.4±14.4 ^{bd}	18.1±10.6 ^{ABC}	21.3±5.9 ^{abC}	27.4±8.5 ^{bc}
23	11.8±5.7 ^{ABC}	16.0±2.7 ^{bc}	13.7±5.6 ^{abB}	14.0±4.0 ^{abB}
26	15.5±9.8 ^B	18.1±9.2 ^{ABC}	12.6±3.9 ^B	11.6±5.1 ^B
29	4.9±1.9 ^{aA}	15.6±6.6 ^{bABC}	10.4±2.8 ^{bb}	15.5±7.9 ^{bb}
32	13.6±10.1 ^{bc}	8.9±3.0 ^{AB}	11.3±4.4 ^B	14.0±7.0 ^B
35	29.0±6.4 ^{bd}	11.1±1.3 ^{aB}	12.2±5.0 ^{ab}	14.6±7.1 ^{ab}

注：同一行中不同小写字母表示相同水温下不同体重组间存在显著性差异($P<0.05$)，同一列中不同大写字母表示相同体重组在不同水温间存在显著性差异($P<0.05$)。

Notes: Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among different body weight groups at the same water temperature ($P<0.05$); different capital letters within the same column indicate significant differences among the same body weight group at different water temperatures ($P<0.05$)

代谢以应对潜在的热应激有关。而小个体可能因较高的表面积/体积比，受温度影响更直接，仍需维持较高的代谢水平。35 ℃ 时 b 值升至 1.012 2，结合 a 值在 35 ℃ 急剧下降 (1.0514) 分析，b>1 并非意味着大个体排氨率真正升高，而是极端高温胁迫下小个体排氨功能严重受损、下降幅度远大于大个体的结果。

种间比较显示，刺参的 a 值 (0.872 6~9.346 0)^[3] 远高于红刺参 (0.713~2.723)^[27] 和糙海参 (0.440 4~2.582 3)，尤其在高温下更为明显；糙海参 b 值范围 (0.734 9~1.012 2) 高于刺参在 15~30 ℃ 下的 0.627 4~0.844 1^[3]，红刺参 7~27 ℃ 下的 0.540~0.909^[27]，反映出热带糙海参与刺参 AER_{ind} 与体重异速关系的显著差异，这种差异与其地理分布和生态习性密切相关。刺参作为温带内湾性种群，栖息地环境波动较大 (温度、盐度、食物供应变化剧烈)，可能进化出较高的基础代谢率以快速响应环境变化^[2]。红刺参栖息于外洋性岩礁环境，水温相对稳定，可能采取低代谢、高能量效率的策略以适应可能的食物短缺期^[27-28]。糙海参作为热带种，在适温下更注重代谢效率而非代谢速率，这可能是在高温环境中减少能量消耗、避免氧化

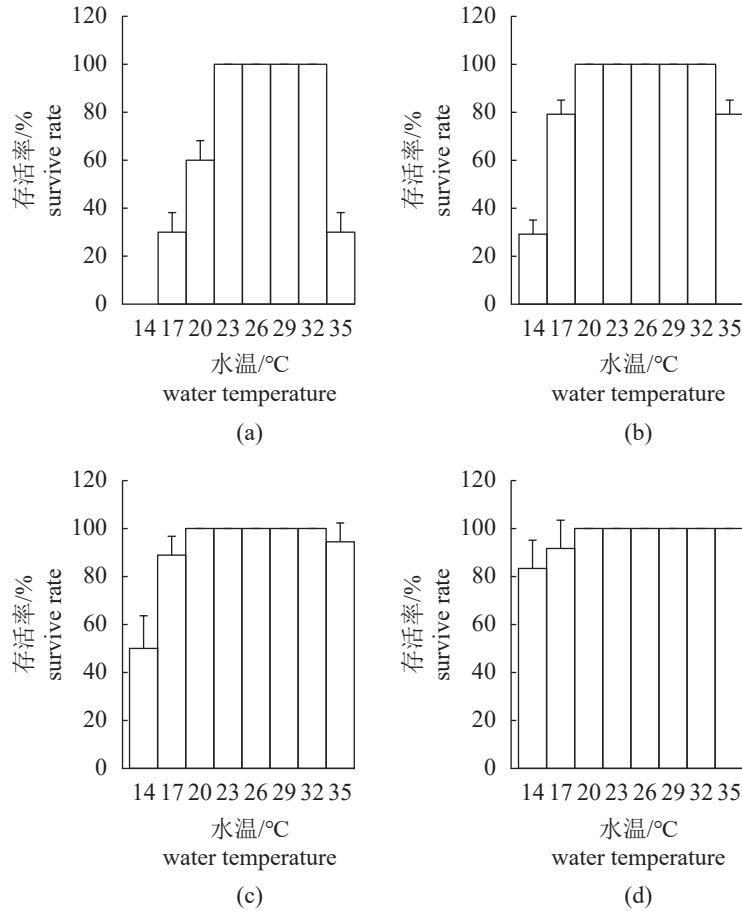


图 7 8 个水温条件下四种规格糙海参的存活率

Fig. 7 Survival rates of four groups of *H. scabra* under eight water temperature conditions

胁迫的适应策略^[19,23]。

单位体重排氨率与水温的关系可表示为幂函数 $AER_{mass}=aT^b$ 。糙海参 AER_{mass} 随水温升高而增加, 4 个规格组分别在 29、32、32 及 32 °C 达到峰值, 变化趋势与耗氧率相似。刺参在 10~25 °C 范围内, 随温度升高不同规格排氨率均明显增加, 小规格最高值出现在 25 °C, 中、大规格在 20 °C 达到最高值, 在 30 °C 均出现下降^[3], 推测刺参进入夏眠状态导致代谢率下降。水温从 15 °C 升至 21 °C 时, 海参 *Australostichopus mollis* 的排氨率随之升高^[31]。在 15、20、25 及 30 °C 水温条件下, 米氏海参的排氨率也呈现持续上升趋势^[2], 这与同为热带海域糙海参排氨率的变化类似。糙海参参数 a 随规格增大呈先增后降的趋势 (XS: 0.002 0、S: 0.003 3、M: 0.000 4、L 组: 0.000 6)。a 值的差异反映了在相同水温下, 不同规格糙海参基础排氨强度的差异, S 组单位体重基础排氨率相对较高, 而 M 组和 L 组则显著较低, 表明中等及以上规格个体的单位体重蛋白质代谢水平可能随生

长而下降。参数 b 反映单位体重排氨率对水温变化的敏感程度, b 值随规格增大呈现先降后升再降的趋势 (XS: 1.967 5、S: 1.689 4、M: 2.355 6、L: 2.123 5), 这表明 M 组糙海参的排氨率对水温变化最为敏感, 其随温度上升的增速最快, 这与耗氧率部分 M 组糙海参对温度变化最敏感的结果高度一致, 进一步印证了中等规格糙海参代谢活动对水温变化响应最为活跃的特点。

3.2 水温对不同规格糙海参 O/N 值的影响

O/N 值可指示动物生长代谢过程中蛋白质与脂类的利用情况, 以及碳水化合物作为能量来源的代谢途径, 对评估动物能量代谢及营养利用特征具有重要意义^[32-33]。本研究中, 糙海参幼参在 17、20 及 35 °C 时 O/N 值较高 (分别为 27.1 ± 12.8 、 28.4 ± 14.4 及 29.0 ± 6.4), 表明其在低温与高温季节主要依赖碳水化合物和/或脂类作为代谢能源。S、M 及 L 规格组在 20 °C 时 O/N 值较高, 20 °C 似为关键阈值, 当水温降至 14 °C 时 O/N 值则

持续降低。同为热带海参的米氏海参在不同水温下均表现出较高的 O/N 值, 说明其高度依赖碳水化合物和/或脂类供能^[2]。虽然糙海参与米氏海参变化趋势相似, 但前者 O/N 值低于后者, 说明糙海参更倾向于以蛋白质作为主要代谢底物, 而幼参在低温和高温条件下会消耗碳水化合物以满足能量需求。

3.3 水温对糙海参存活率的影响

水温是影响海参存活与生长的关键环境因子, 适宜的水温范围能够有效促进其生长^[6-8]。然而, 不同种类的海参对水温的适应性存在显著差异。例如, 刺参适宜的水温范围为 10~20 °C, 并与个体规格有关, 规格越大, 适宜的生长温度相对越低^[6]。尖塔海参 (*H. spinifera*) 幼参在 28~32 °C 条件下存活与生长最佳^[34]。Liu 等^[23]研究表明糙海参幼参的特定生长率在 28 °C 时最高, 且长期低温对其生长的影响比长期高温更为显著。本研究确认了糙海参最适水温范围 (20~32 °C), 与其在热带海域的自然分布特征一致。同时, 本实验发现幼参的生存水温范围 (23~32 °C) 明显窄于较大规格个体 (20~32 °C), 温度胁迫效应具有显著的规格依赖性。这种温度响应随不同规格而呈现差异的现象, 可能与代谢率与体重间的异速生长关系有关: 较小规格的幼参具有更高的单位体重代谢率, 能量储备有限, 因此在极端温度下能量平衡更易被破坏。

在低温 14~17 °C, 所有规格个体的生理活动均受到抑制, 但幼参反应最为剧烈。幼参因能量储备有限, 在摄食停止后迅速耗尽能量, 导致无法维持基础的免疫防御功能, 进而对条件致病菌的易感性增加, 14 °C 下 5 天内全部化皮死亡, 17 °C 下存活率仅 30.0%±8.2%。相比之下, 较大规格个体 (S、M、L) 在 14 °C 虽停止摄食、体重下降, 但仍能维持较高的存活率 (29.2±5.9%~83.3%±11.8%), 显示出更强的能量缓冲能力和免疫耐受性。类似现象也见于温带物种刺参, 其幼参在冬季因低温引发的皮肤溃疡综合征死亡率远高于成参^[29], 说明早期发育阶段是海参应对温度胁迫的普遍脆弱期。在 20 °C 下, 糙海参幼参存活率为 60.0%±8.2%, 而 S、M 和 L 组虽未出现死亡, 但摄食量显著下降, 表明该水温虽未达到致死阈值, 但已对糙海参正常生理活动产生负面影响。在高温胁迫区间 (35 °C), 规格差异同样显著, XS 组存

活率骤降至 30.0%±8.2%, S 组为 79.2%±5.9%, 而 M 和 L 组仍保持 (94.4%±7.9%)~100%。结合相关代谢数据, 极端高温下小个体的崩溃可能是多因素耦合的结果: 一方面, 高温直接导致蛋白质代谢紊乱 (如排氨率异常); 另一方面, 小个体因表面积/体积比较大, 失水速率更高, 进一步加剧生理失衡, 最终导致代谢崩溃。

本研究结果为糙海参养殖的温度管理提供了依据。针对小规格幼参, 需实施更严格的温度控制, 避免水温低于 20 °C 或高于 32 °C, 以确保其高存活率和健康生长。对较大规格个体, 可在相对较宽的温度范围内进行管理, 但需警惕长期处于 20 °C 或 35 °C 临界点可能引发的摄食下降等亚健康状态。需要指出的是, 本研究结论基于室内恒温胁迫实验, 自然环境中温度的渐变过程及多因子耦合效应仍有待进一步研究。

4 结论

研究表明, 低温对糙海参代谢的影响大于高温, 较大个体对温度胁迫的耐受性更强。糙海参生理活动的最适温度为 26~29 °C。幼参 [(0.68±13.52) g] 与中、大个体 [(13.52~51.16) g] 的适宜生存水温范围分别为 23~32 °C 和 20~32 °C。研究结果为糙海参人工养殖的科学管理提供基础依据。

(作者声明本文无利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 刘旭佳, 沈夏霜, 黄国强, 等. 盐度和规格对光裸方格星虫耗氧率及排氨率的影响 [J]. 水产学报, 2017, 41(1): 64-69.
Liu X J, Shen X S, Huang G Q, et al. Effects of salinity and body weight on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Sipunculus nudus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(1): 64-69 (in Chinese).
- [2] Yu Z H, Luo P, Liu W G, et al. Influence of water temperature on physiological performance of the sea cucumber *Holothuria moebii* [J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(11): 3595-3600.
- [3] 李宝泉, 杨红生, 张涛, 等. 温度和体重对刺参呼吸和排泄的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(2): 182-187.
Li B Q, Yang H S, Zhang T, et al. Effect of temperature on respiration and excretion of sea cucumber *Apostichopus japonicus* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(2): 182-187 (in Chinese).
- [4] Shao Y N, Li C H, Chen X C, et al. Metabolomic responses of

- sea cucumber *Apostichopus japonicus* to thermal stresses[J]. *Aquaculture*, 2015, 435: 390-397.
- [5] Battaglene S C, Seymour J E, Ramofafia C. Survival and growth of cultured juvenile sea cucumbers, *Holothuria scabra*[J]. *Aquaculture*, 1999, 178(3-4): 293-322.
- [6] 董云伟, 董双林, 田相利, 等. 不同水温对刺参幼参生长、呼吸及体组成的影响 [J]. *中国水产科学*, 2005, 12(1): 33-37.
Dong Y W, Dong S L, Tian X L, *et al.* Effects of water temperature on growth, respiration and body composition of young sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(1): 33-37 (in Chinese).
- [7] Yang H S, Yuan X T, Zhou Y, *et al.* Effects of body size and water temperature on food consumption and growth in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) with special reference to aestivation[J]. *Aquaculture Research*, 2005, 36(11): 1085-1092.
- [8] An Z H, Dong Y W, Dong S L. Temperature effects on growth-ration relationships of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. *Aquaculture*, 2007, 272(1-4): 644-648.
- [9] Ji T T, Dong Y W, Dong S L. Growth and physiological responses in the sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka: aestivation and temperature[J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1-4): 180-187.
- [10] Yu H B, Zhang C, Gao Q F, *et al.* Impact of water temperature on the growth and fatty acid profiles of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2016, 60: 155-161.
- [11] Huo D, Sun L N, Zhang L B, *et al.* Global-warming-caused changes of temperature and oxygen alter the proteomic profile of sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. *Journal of Proteomics*, 2019, 193: 27-43.
- [12] Agudo N. Sandfish Hatchery Techniques[M]. Noumea: Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), the Secretariat of the Pacific Community (SPC) and the World-Fish Center, 2006.
- [13] Bordbar S, Anwar F, Saari N. High-value components and bioactives from sea cucumbers for functional foods-a review[J]. *Marine Drugs*, 2011, 9(10): 1761-1805.
- [14] Thongbuakaew T, Suwansa-ard S, Chaiyamoorn A, *et al.* Sex steroids and steroidogenesis-related genes in the sea cucumber, *Holothuria scabra* and their potential role in gonad maturation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 2194.
- [15] 冯永勤, 翁文明, 方再光, 等. 糙海参苗种规模化繁育技术研究 [J]. *水产科学*, 2021, 40(5): 750-756.
Feng Y Q, Weng W M, Fang Z G, *et al.* Large-scale breeding techniques of rough sea cucumber *Holothuria scabra*[J]. *Fisheries Science*, 2021, 40(5): 750-756 (in Chinese).
- [16] Hamel J F, Conand C, Pawson D L, *et al.* The sea cucumber *Holothuria scabra* (Holothuroidea: Echinodermata): its biology and exploitation as Beche-de-Mer[J]. *Advances in Marine Biology*, 2001, 41: 129-223.
- [17] Purcell S W, Hair C A, Mills D J. Sea cucumber culture, farming and sea ranching in the tropics: progress, problems and opportunities[J]. *Aquaculture*, 2012, 368-369: 68-81.
- [18] 刘旭佳, 黄国强, 李坚明, 等. 室内养殖不同月龄糙海参营养成分分析 [J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(2): 85-90.
Liu X J, Huang G Q, Li J M, *et al.* Analysis on nutritive content of wet and dry sand fish *Holothuria scabra* cultured in indoor pond with different month ages[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(2): 85-90 (in Chinese).
- [19] 李智巧, 刘旭佳, 姜发军, 等. 水温对糙海参幼参生长、抗氧化酶及免疫酶活力的影响 [J]. *中国水产科学*, 2023, 30(12): 1429-1444.
Li Z Q, Liu X J, Jiang F J, *et al.* The effects of water temperature on growth, antioxidant enzyme and immune enzyme activities of juvenile sea cucumber, *Holothuria scabra*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(12): 1429-1444 (in Chinese).
- [20] Hamel J F, Mercier A, Conand C, *et al.* *Holothuria scabra*. The IUCN red list of threatened species 2013: e. T180257A1606648 [EB/OL]. (2013-03-18)[2026-01-10]. https://www.researchgate.net/publication/295547237_Holothuria_scabra_The_IUCN_Red_List_of_Threatened_Species_2013_eT180257A1606648.
- [21] Kühnhold H, Kamyab E, Novais S, *et al.* Thermal stress effects on energy resource allocation and oxygen consumption rate in the juvenile sea cucumber, *Holothuria scabra* (Jaeger, 1833)[J]. *Aquaculture*, 2017, 467: 109-117.
- [22] Kamyab E, Kühnhold H, Novais S C, *et al.* Effects of thermal stress on the immune and oxidative stress responses of juvenile sea cucumber *Holothuria scabra*[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2017, 187(1): 51-61.
- [23] Liu X J, Lai J X, Jiang F J, *et al.* The growth, nutrient composition, immune-related gene expression, and Hsp70 protein levels in the juvenile sea cucumber *Holothuria scabra*: threshold temperature for normal feeding[J]. *Aquaculture Reports*, 2025, 42: 102731.
- [24] 杨学明, 张立, 甘西. 热带海参养殖的优良品种——糙海参 [J]. *广西水产科技*, 2010(4): 18-21.
Yang X M, Zhang L, Gan X. The excellent variety of tropical sea cucumber for aquaculture *Holothuria scabra*[J]. *Fisheries*

- Science & Technology of Guangxi, 2010(4): 18-21 (in Chinese).
- [25] Dong Y W, Dong S L, Tian X L, *et al.* Effects of diel temperature fluctuations on growth, oxygen consumption and proximate body composition in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka[J]. *Aquaculture*, 2006, 255(1-4): 514-521.
- [26] Purcell S W. Diel burying by the tropical sea cucumber *Holothuria scabra*: effects of environmental stimuli, handling and ontogeny[J]. *Marine Biology*, 2010, 157(3): 663-671.
- [27] 包杰, 姜宏波, 田相利, 等. 温度和盐度对红刺参 (*Apostichopus japonicus*) 耗氧率与排氨率的影响 [J]. *渔业科学进展*, 2015, 36(4): 116-121.
- Bao J, Jiang H B, Tian X L, *et al.* Effects of temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia-N excretion rate of red *Apostichopus japonicus* (Selenka)[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(4): 116-121 (in Chinese).
- [28] 包杰, 姜宏波, 董双林, 等. 红刺参和青刺参耗氧率与排氨率的比较研究 [J]. *水产学报*, 2013, 37(11): 1689-1696.
- Bao J, Jiang H B, Dong S L, *et al.* Comparison of oxygen consumption rate and ammonia-N excretion rate between green type and red type *Apostichopus japonicus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(11): 1689-1696 (in Chinese).
- [29] 赵斌, 李成林, 胡炜, 等. 低温对不同规格刺参幼参生长与耗氧率的影响 [J]. *海洋科学*, 2011, 35(12): 88-91.
- Zhao B, Li C L, Hu W, *et al.* Effects of low temperature on the growth and oxygen consumption rate of different sizes of sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*) in industrial aquaculture [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(12): 88-91 (in Chinese).
- [30] 包杰, 姜宏波, 董双林, 等. 棘皮动物呼吸代谢研究进展 [J]. *海洋湖沼通报*, 2013(1): 85-89.
- Bao J, Jiang H B, Dong S L, *et al.* Progress of studies on respiratory metabolism of echinoderms[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(1): 85-89 (in Chinese).
- [31] Zamora L N, Jeffs A G. Feeding, metabolism and growth in response to temperature in juveniles of the Australasian sea cucumber, *Australostichopus mollis*[J]. *Aquaculture*, 2012, 358-359: 92-97.
- [32] Ikeda T. Nutritional ecology of marine zooplankton[J]. *Memoirs of the Faculty of Fisheries Hokkaido University*, 1974, 22(1): 1-97.
- [33] Mayzaud P. Respiration and nitrogen excretion of zooplankton. IV. The influence of starvation on the metabolism and the biochemical composition of some species[J]. *Marine Biology*, 1976, 37(1): 47-58.
- [34] Asha P S, Muthiah P. Effects of temperature, salinity and pH on larval growth, survival and development of the sea cucumber *Holothuria spinifera* Theel[J]. *Aquaculture*, 2005, 250(3-4): 823-829.

Effects of water temperature on metabolism and survival of *Holothuria scabra* with different body weights

LIU Xujia¹, HUANG Guoqiang², ZENG Mengqing³, JIANG Fajun¹,
CHENG Chuhang¹, YU Ermeng^{1*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Marine Sciences,
Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China;

2. Institute of Marine Drugs, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning, 530200, China;

3. Guangxi Institute of Oceanology Co., Ltd., Beihai 536000, China)

Abstract: *Holothuria scabra*, or sandfish, is a commercially valuable sea cucumber species predominantly inhabiting tropical coastal regions. In this study, two laboratory trials were conducted to assess the influence of water temperature and body weight on the metabolism and survival rate of *H. scabra*. First, a metabolism experiment was conducted with four groups of different body weights, namely, XS [(0.68±0.33) g], S [(13.52±2.64) g], M [(33.43±5.79) g] and L [(51.16±10.06) g] exposed to eight experimental water temperatures (14-35 °C), representing the water temperature range in the natural habitat and aquaculture environment of *H. scabra* in China. Subsequently, four groups of *H. scabra* were cultured in temperature-controlled tanks at eight experimental water temperatures for 15 days to determine the survival rate. The results showed a power function relationship between OCR_{ind}/AER_{ind} and body weight expressed as $R_{ind}=aW^b$ ($0<b<1$, with the exception of AER_{ind} at 35 °C). The relationship between body weight-specific OCR_{mass}/AER_{mass} and water temperature also followed a power function, $R_{mass}=aT^b$ ($b>1$). For all four groups of *H. scabra*, both OCR_{mass} and AER_{mass} increased with rising water temperature. The maximum OCR_{mass} occurred at 32-35 °C, while the maximum AER_{mass} was observed at 29-32 °C, followed by a decrease as the temperature continued to rise. Water temperature had a significant effect on both OCR_{mass} and AER_{mass} across all groups ($P<0.05$). Furthermore, the interaction between water temperature and body weight had a highly significant effect on OCR_{mass} and AER_{mass} ($P<0.01$). Q_{10} indicated that low water temperature had a greater impact on the metabolism of *H. scabra* than high water temperature. In the survival trial of *H. scabra*, all individuals in the XS group perished at 14 °C, while the L group exhibited the highest survival rate at this temperature (83.3%±11.8%). As the temperature increased to 20-32 °C, the survival rate for the S, M, and L groups reached 100%; the XS group only achieved 100% survival at 23 °C. When the temperature rose to 35 °C, survival rates in the XS and S groups dropped to 30.0%±8.2% and 79.2%±5.9%, respectively, while the M and L groups maintained high survival rates of 94.4%±7.9% and 100%. Larger individuals exhibited significantly stronger temperature adaptability, particularly under the water temperature conditions of 14 °C and 35 °C. The study indicates that low temperature has a more significant impact on the metabolism of *H. scabra*, and larger individuals exhibit stronger tolerance to temperature stress. The optimal water temperature range for the physiological activities of *H. scabra* is 26-29 °C. The suitable survival temperature ranges for juvenile and medium-to-large individuals are 23-32 °C and 20-32 °C, respectively. These findings provide critical data to support water temperature management in the aquaculture of *H. scabra*.

Key words: *Holothuria scabra*; water temperature; body weight; metabolism; survival rate

Corresponding author: YU Ermeng. E-mail: yem34@gxas.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31960225); Guangxi Enablement Action Plan Project (Guike FN2600640359); Guangxi Natural Science Foundation (2021GXNSFAA196074); Guangxi Marine Economy Talent Project (2025XHRC16)