



盐度对罗氏沼虾能量代谢和运动能力的影响

李江涛, 邱小龙, 邱晓桐, 方俊超, 黄菲菲, 梁日深, 李清清, 林鑫, 吕晓静

仲恺农业工程学院, 广州市水产病害与水禽养殖重点实验室, 广东 广州 510225

摘要: 为研究盐度对罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)能量代谢和运动能力的影响, 设置了 0 (对照)、4、8 和 12 共 4 个盐度胁迫水平, 研究了罗氏沼虾在胁迫 48 h 后的耗氧率、鳃丝和肌肉能量代谢酶活性及其游泳和弹跳能力。结果显示, 耗氧率在盐度升至 4 时并无显著变化($P>0.05$), 但 8 和 12 盐度组的耗氧率显著高于对照组($P<0.05$)。鳃丝己糖激酶(HK)、磷酸果糖激酶(PFK)和乳酸脱氢酶(LDH)活性在不同盐度条件下并无显著变化($P>0.05$), 但鳃丝丙酮酸脱氢酶(PDH)和细胞色素 C 氧化酶(COX)活性在盐度为 8 时显著升高($P<0.05$), 并且鳃丝 PDH 和 COX 活性均与耗氧率呈显著线性正相关($P<0.05$)。盐度在 8 时罗氏沼虾的游泳足肌肉和腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 活性并无显著变化($P>0.05$), 但游泳足肌肉和腹部肌肉 PDH 和 COX 活性显著下降($P<0.05$); 盐度升至 12 时游泳足肌肉和腹部肌肉 HK、PFK、LDH、PDH 和 COX 活性均显著下降($P<0.05$)。运动能力结果显示, 盐度升至 8 时游泳能力显著下降($P<0.05$), 盐度升至 12 时弹跳能力显著下降($P<0.05$)。游泳能力与游泳足肌肉 PDH 和 COX 活性呈显著线性正相关($P<0.05$); 弹跳能力与腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 活性呈显著线性正相关($P<0.05$)。研究表明, 罗氏沼虾通过增加氧气摄取用于鳃丝有氧代谢以应对盐度胁迫, 但这些生理调节导致肌肉能量代谢酶活性下降, 造成罗氏沼虾的游泳和弹跳能力减弱。

关键词: 盐度; 罗氏沼虾; 行为; 游泳; 弹跳; 能量代谢

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)10-1291-12

运动能力不仅是水生动物获取食物、寻找合适生境等生命活动的重要实现方式, 也是其摄食、求偶、洄游和交配成功与否的关键^[1]。目前水生动物的运动行为学研究主要集中在鱼类^[2], 研究成果广泛应用于水产养殖^[3]、增殖放流^[4]、鱼道设计^[5]和捕捞技术改良^[6]等。虾类游泳和弹跳运动行为学研究近年来已逐渐引起重视^[7]。游泳主要用于虾类巡游、觅食等日常活动^[8]; 弹跳是速度最快的运动方式, 通常持续时间较短, 主要功能是躲避攻击和打斗等^[9]。

水产动物经常受到生存环境中各种环境因子的刺激, 从而使其行为和生理发生变化。监测环境胁迫下虾类的行为生理变化, 确保虾类处于最

适养殖环境, 是虾类福利化养殖的关键。盐度作为虾类养殖环境的一个重要理化因子, 与虾类的渗透压、能量代谢和行为等密切相关^[10]。水产动物通过渗透调控来应对水体盐度变化。渗透调控需要额外消耗能量。研究显示水生动物在渗透调节过程中的能量消耗占能量消耗总量的 10%~50%^[11-12], 用于渗透调节的能量主要通过动物鳃丝中的能量物质如蛋白质、脂肪和糖类等的分解获取^[13-14]。近年来, 研究者逐渐聚焦盐度胁迫对虾类运动行为影响的研究。例如, Yu 等^[15]研究了不同盐度条件下凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)游泳能力的变化规律, 结果显示, 盐度从 30 降至 20 时, 凡纳滨对虾的游泳能力显著下降。

收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2021-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32002375); 广东省教育厅青年创新人才项目(2020KQNCX029); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515410006).

作者简介: 李江涛(1988-), 男, 博士, 特聘副教授, 研究方向为虾类行为生理学. E-mail: jtaoli@163.com

通信作者: 吕晓静, 副教授, 研究方向为水产种质资源. E-mail: xjinglv@zhku.edu.cn

Li 等^[16]研究发现, 盐度从 30 降至 10 会导致中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)的游泳和弹跳能力发生显著变化。虾类运动需要额外消耗能量, 主要源自肌肉糖原和甘油三酯分解^[17]。糖原和甘油三酯等能量物质的分解方式与氧气供应程度有关。氧气供应充足则能量物质通过有氧代谢分解供能, 氧气供应不足则通过厌氧糖酵解获取能量^[18]。水体盐度变化能够影响虾类的能量代谢^[19]。例如, Li 等^[20]研究发现, 盐度从 32 降至 3 时, 凡纳滨对虾的耗氧率显著上升, 意味着需要消耗更多能量; Wang 等^[21]研究发现, 渗透调节过程中凡纳滨对虾糖代谢通路酶的基因表达发生显著性变化。由此可见虾类的能量代谢调节是导致运动能力发生变化的关键因素^[16]。

罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)又称马来西亚大虾、淡水长臂虾, 广泛分布于印度洋、太平洋区域热带和亚热带地区的淡水或半咸水水域中^[22]。自 1976 年从日本引进我国后, 因其个体大、生长快、易养殖、高蛋白、低脂肪等特点, 已成为我国重要的水产养殖品种^[23]。罗氏沼虾能适应一定的盐度范围, 且随着幼虾的生长和发育, 其盐度适应范围会发生一定程度的变化^[24]。目前多数研究主要通过存活、生长、摄食和性别分化来探究罗氏沼虾的盐度适应特征^[25-27]。已有学者通过代谢率来探究罗氏沼虾的盐度适应^[28], 但渗透调节过程中罗氏沼虾肌肉和鳃丝的能量代谢和运动行为特征却较少报道, 罗氏沼虾是如何通过能量代谢和运动调节来应对盐度胁迫的, 目前仍未得知。本研究分别以临界游泳速度(critical swimming speeds, U_{crit})和弹跳速度(tail-flipping speeds, U_{tail})作为游泳能力和弹跳能力的参考指标, 研究了不同盐度条件下罗氏沼虾的耗氧率、鳃丝和肌肉能量代谢酶活性以及游泳、弹跳能力的变化特征, 以期丰富虾类运动生理理论知识, 为罗氏沼虾的盐度耐受研究及福利化养殖提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验动物

罗氏沼虾来自广东海兴农集团有限公司, 放

入室内循环水养殖系统暂养 1 周。暂养期间, 水温维持在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$, 溶解氧含量大于 6 mg/L, 盐度为 0, 光照周期为 14 h 光照: 10 h 黑暗。实验虾每天饱食投喂 2 次配合饲料(粗蛋白 42%, 粗脂肪 5%, 粗灰分 15%, 水分 12%)。随机挑选 360 尾实验虾[湿重 (5.31 ± 0.54) g, 体长 (6.42 ± 0.29) cm]用于后续实验。所有实验虾处于蜕皮间期, 蜕皮间期通过头胸甲硬度来判断。

1.2 实验设计

已有研究显示 24 h 的盐度胁迫可对罗氏沼虾的行为和生理代谢产生显著影响^[25,28], 因此本研究的盐度胁迫时间设为 48 h。大量研究显示, 盐度超过 10 时罗氏沼虾的摄食、存活和生长等显著下降^[25-28], 意味着罗氏沼虾的耐受盐度为 10 左右, 因此本研究的最高盐度设为 12。盐度设 4 个水平: 0 (对照)、4、8 和 12, 每个水平设 3 个平行。盐度 12 人工半咸水的简化配方为: NaCl 9.5 g/L, MgCl_2 2.0 g/L, KCl 0.3 g/L, CaCl_2 2.0 g/L。盐度 4 和 8 的实验水由盐度 12 人工半咸水稀释而成, 盐度 0 的实验水为曝气 24 h 自来水。

配制好的实验水装入对应的 12 个(4 个盐度水平 $\times$ 3 个平行) 100 L 水槽中。360 尾实验虾随机放入水槽中, 每个水槽包含 30 尾实验虾。温度、溶解氧和光照周期等环境因子与暂养期间相同。48 h 后, 每个水槽中随机挑选 26 尾实验虾, 分成 4 组, 剩余实验虾留作备用。第 1 组包含 3 尾实验虾用于测量耗氧率; 第 2 组包含 3 尾实验虾用于测量鳃丝和肌肉生化指标; 第 3 组和第 4 组各包含 10 尾罗氏沼虾, 分别用于测量临界游泳速度和弹跳速度。

1.3 耗氧率测量

耗氧率测量参考 Li 等^[20]并作进一步改进。测量前实验虾禁食 24 h。实验虾单尾放入 500 mL 呼吸瓶中适应 12 h 以消除应激胁迫。另取一空白呼吸瓶(不包含实验虾)作为对照。适应期间水体持续充气维持溶解氧饱和, 温度和光照周期与盐度胁迫期间相同。耗氧率测量期间呼吸器密封, 呼吸时间为 30 min。呼吸器中溶解氧浓度通过便携式溶氧仪(中国台湾产, AZ-8430)测量。耗氧率计算公式如下:

$$R=(O_0-O_t+O_c)V/W\times T$$

式中, R 为耗氧率($\text{mg/g}\cdot\text{h}$), O_0 是初试溶解氧浓度(mg/L), O_t 是实验组呼吸器(包含实验虾)结束时溶解氧浓度(mg/L), O_c 是对照组呼吸器(不包含实验虾)结束时溶解氧浓度(mg/L), V 为呼吸器体积(L), W 为实验虾体重(g), T 为测量时间(h)。

1.4 鳃丝和肌肉生化测量

用于生化分析的实验虾被快速掐除头部予以处死, 然后分离出鳃丝、游泳足肌肉和第三腹节肌肉(腹部肌肉)。单尾实验虾的鳃丝和肌肉样品加入 3 倍体积缓冲液进行匀浆, 匀浆液于 4°C 和 2500 r/min 条件下离心 10 min , 取上清液用于生化分析。本研究测量的生化指标为: 厌氧代谢酶[己糖激酶(HK)、磷酸果糖激酶(PFK)和乳酸脱氢酶(LDH)]和有氧代谢酶[丙酮酸脱氢酶(PDH)、苹果酸脱氢酶(MDH)和细胞色素 C 氧化酶(COX)]活性。

鳃丝和肌肉 HK、PFK、LDH、MDH 和 COX

酶活性通过南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。鳃丝和肌肉 PDH 酶活性通过北京索莱宝科技有限公司生产的试剂盒测定。酶活性测量方法参考试剂盒说明书。HK、PFK 和 MDH 酶活性测量吸光度均为 340 nm 。LDH、PDH 和 COX 酶活性测量的吸光度分别为 450 nm 、 605 nm 和 550 nm 。

1.5 运动能力

游泳和弹跳能力测量装置参考 Li 等^[17]的设计并做了改进(图 1), 主体为长 $100\text{ cm}\times$ 宽 $30\text{ cm}\times$ 高 30 cm 的长方形玻璃水槽。实验水槽实际水深为 25 cm , 通过控制电机转速来调控水流速度。水流速度采用精密水位流速测定仪(澳大利亚产, Starflow 6526)。水槽上方悬挂 1 只 22 W 日光灯, 以保证观察槽的光照条件一致。实验期间所有环境因子与盐度胁迫时期相同, 具体为水温维持在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$, 溶解氧含量大于 6.0 mg/L 。

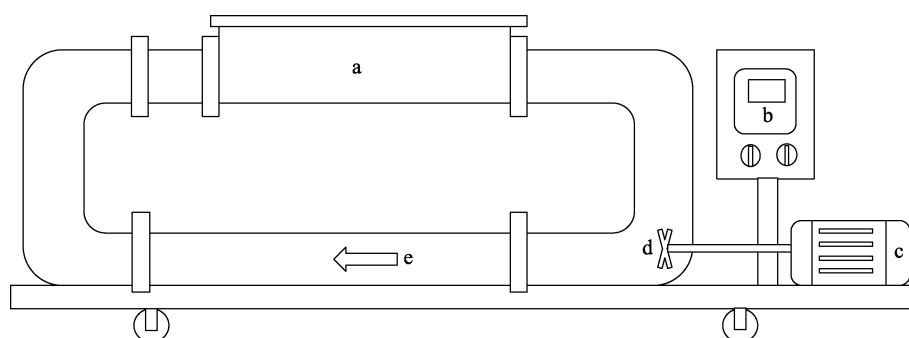


图 1 罗氏沼虾游泳和弹跳能力测量装置简图

a: 行为观察水槽; b: 流速控制板; c: 电机; d: 螺旋桨; e: 水流方向。

Fig. 1 Diagram of the measuring device for swimming and tail-flipping abilities of *Macrobrachium rosenbergii*
a: behavior observation tank; b: control panel; c: motor; d: propeller; e: water flow direction.

临界游泳速度(U_{crit})测量方法参考 Robles-Romo 等^[9]、Yu 等^[15]和 Li 等^[16]并作进一步改进。罗氏沼虾单尾放入水槽内, 在 6.4 cm/s 水流速度下适应 10 min , 然后每隔 10 min 增加 6.4 cm/s 水流速度, 直至实验虾游泳疲劳。游泳疲劳判断以实验虾停止游泳并被水流冲到水槽下游拦网上, 用小抄网将实验虾移动到水槽上游 3 次也不重新游泳为标准。临界游泳速度(U_{crit})计算公式如下:

$$U_{\text{crit}} = V + \left(\frac{t}{\Delta T} \right) \times \Delta V$$

式中, $V(\text{cm/s})$ 是实验虾能够完成完整 10 min 游泳历时的最大水流速度, ΔV 是速度增量(6.4 cm/s), 即每次增加的水流速度; ΔT 为游泳历时(10 min), 即每隔 10 min 使水流速度增加一个梯度; $t(\text{min})$ 为实验虾在达到疲劳状态时在 10 min 游泳历时内所经历的实际游泳时间。

弹跳速度测量参考 Yu 等^[29]并做进一步改进。实验期间水槽电机关闭, 保证水槽水体处于静止状态。实验虾单尾放入水槽并适应 5 min 。用小抄网的手柄尾部轻触实验虾的额角基部, 使其产生

弹跳运动。弹跳触碰期间拍摄 30 s 视频。实验视频用 Photoshop 软件将第一次连续弹跳运动的第一帧与最后一帧截图进行合成,测量实验虾额剑通过的距离作为弹跳距离(d , cm)。弹跳时间(t , s)= $N/25$, N 为弹跳运动的帧数(每帧为 1/25 s)。弹跳速度(v , cm/s)= d/t 。每尾实验虾连续测量 3 次弹跳取平均值。

1.6 数据分析

数据为平均值±标准误($\bar{x}\pm\text{SE}$)。耗氧率和代谢酶活性的样本量为 9 ($n=9$, 3 个平行, 每个平行测量 3 尾实验虾)。运动能力的样本量为 30 ($n=30$, 3 个平行, 每个平行测量 10 尾实验虾)。耗氧率、代谢酶活性和运动能力数据均符合正态分布($P>0.05$, Kolmogorov-Smirnov 检验), 并且方差均显示齐性($P>0.05$, Levene 检验)。因此不同盐度之间数据差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 其中盐度设为固定因子, 平行设为随机因子。单因素方差分析结果显示差异显著($P<0.05$)时, 各数据进一步通过 Duncan 法进行两两对比。相关性分析采用曲线估计中的线性拟合, 检验方法为方差分析(ANOVA)。所有统计分析均通过 SPSS 19.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 耗氧率

盐度从 0 升至 4 时(图 2), 罗氏沼虾的耗氧率未发生显著性变化($P>0.05$); 但在盐度从 0 升至 8 时, 耗氧率增加了 55.2% ($P<0.05$); 盐度从 8 进一

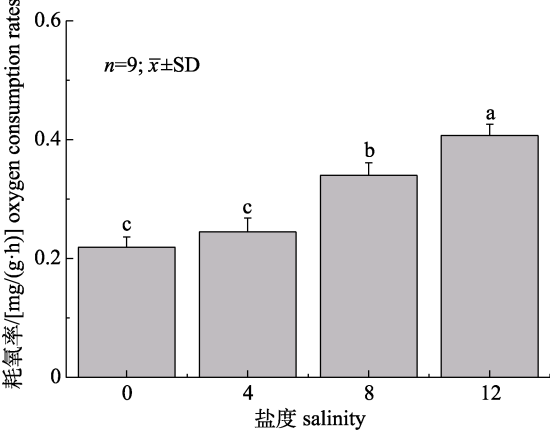


图 2 不同盐度水平下罗氏沼虾耗氧率
不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Fig. 2 Oxygen consumption rates of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels
Different letters indicate significant differences ($P<0.05$).

步升至 12 时, 其耗氧率增加了 19.5% ($P<0.05$)。

2.2 鳃丝能量代谢

2.2.1 鳃丝能量代谢酶活性 不同盐度条件下罗氏沼虾鳃丝能量代谢酶活性结果见表 1。鳃丝己糖激酶 HK、磷酸果糖激酶 PFK、乳酸脱氢酶 LDH 和苹果酸脱氢酶 MDH 的活性在不同盐度条件下并未发生显著性变化($P>0.05$)。

鳃丝丙酮酸脱氢酶 PDH 和细胞色素 C 氧化酶 COX 的活性在不同盐度条件下展现出相似的规律: 盐度从 0 升至 4 时上述酶活性均无显著性变化($P>0.05$); 然而, 盐度进一步升至 8 时上述酶活性增加了 25.4%~38.0% ($P<0.05$); 盐度从 8 升至 12 时上述酶活性增加了 26.1%~27.4% ($P<0.05$)。

表 1 不同盐度条件下罗氏沼虾鳃丝能量代谢酶活性
Tab. 1 Enzyme activities of energy metabolism in gill of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels
 $n=9$; $\bar{x}\pm\text{SE}$; $\mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g prot})$

酶 enzyme	盐度 salinity				单因素方差分析 one-way ANOVA	
	0	4	8	12	F	P
己糖激酶 HK	76.53±4.54	81.02±4.66	74.21±6.83	80.84±3.51	0.442	0.724
磷酸果糖激酶 PFK	43.09±2.12	39.28±2.74	44.77±2.09	47.32±2.36	2.076	0.123
乳酸脱氢酶 LDH	99.50±6.06	87.70±6.51	93.98±5.62	84.19±4.76	1.380	0.267
丙酮酸脱氢酶 PDH	80.60±4.07 ^c	75.28±5.27 ^c	94.42±5.23 ^b	120.27±7.58 ^a	12.515	<0.001
苹果酸脱氢酶 MDH	223.94±6.30	218.80±7.89	239.77±8.53	234.43±7.87	1.547	0.221
细胞色素 C 氧化酶 COX	12.65±0.78 ^c	12.29±0.72 ^c	16.95±1.24 ^b	21.38±1.04 ^a	19.517	<0.001

注: 同行不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Notes: Different letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2.2 鳃丝能量代谢酶活性与耗氧率的关系 不同盐度条件下罗氏沼虾鳃丝能量代谢酶活性与耗氧率关系见图 3。盐度从 0 升至 12 时, 鳃丝 PDH 和 COX 酶活性均与耗氧率呈极显著线性正相关 ($P<0.001$)。

2.3 肌肉能量代谢酶活性

2.3.1 游泳足肌肉 不同盐度条件下罗氏沼虾游泳足肌肉能量代谢酶活性结果见表 2。游泳足肌肉 MDH 酶活性在不同盐度条件下并未发生显著性变化 ($P>0.05$)。游泳足肌肉 HK、PFK 和

LDH 酶活性在不同盐度条件下表现出相似的规律: 盐度从 0 升至 8 时上述酶活性均无显著性变化 ($P>0.05$); 然而, 盐度进一步升至 12 时上述酶活性均显著下降 ($P<0.05$)。游泳足肌肉 PDH 和 COX 酶活性在不同盐度条件下表现出相似的规律: 盐度从 0 升至 4 时上述酶活性均无显著性变化 ($P>0.05$); 然而, 盐度从 4 升至 8 时上述酶活性下降了 18.5%~32.0% ($P<0.05$); 盐度从 8 升至 12 时上述酶活性下降了 14.9%~29.7% ($P<0.05$)。

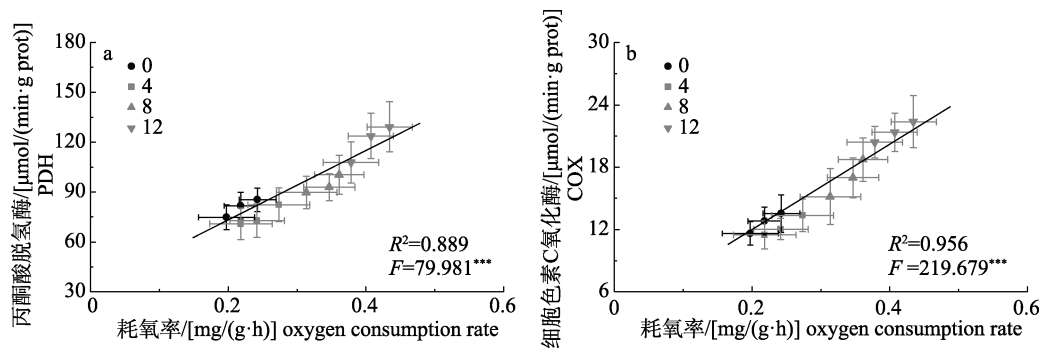


图 3 不同盐度条件下罗氏沼虾耗氧率与鳃丝能量代谢酶活性关系
***表示耗氧率与鳃丝酶活性之间具有极显著相关性($P<0.001$)。

Fig. 3 Relationship between oxygen consumption rates and energy metabolism enzyme activities in gills of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels

*** indicates extremely significant correlation ($P<0.001$) between oxygen consumption rates and enzyme activities in gill.

表 2 不同盐度条件下罗氏沼虾游泳足肌肉能量代谢酶活性

Tab. 2 Energy metabolism enzyme activities in pleopod muscles of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels
 $n=9$; $\bar{x} \pm SE$; $\mu\text{mol}/(\text{min} \cdot \text{g prot})$

酶 enzyme	盐度 salinity				单因素方差分析 one-way ANOVA	
	0	4	8	12	F	P
己糖激酶 HK	57.86±3.09 ^a	60.67±2.88 ^a	55.56±3.52 ^a	43.04±2.10 ^b	6.980	0.001
磷酸果糖激酶 PFK	64.54±2.36 ^a	63.54±3.03 ^a	67.95±2.99 ^a	52.59±1.51 ^b	6.817	0.001
乳酸脱氢酶 LDH	139.28±8.57 ^a	131.58±7.88 ^a	140.24±10.44 ^a	103.55±5.86 ^b	4.233	0.013
丙酮酸脱氢酶 PDH	227.74±11.86 ^a	208.99±8.07 ^a	170.28±7.43 ^b	144.91±7.33 ^c	17.761	<0.001
苹果酸脱氢酶 MDH	387.52±12.39	394.42±10.71	371.17±11.43	389.22±11.30	0.767	0.521
细胞色素 C 氧化酶 COX	20.40±1.32 ^a	22.39±1.44 ^a	15.22±1.01 ^b	10.70±0.69 ^c	20.870	<0.001

注: 同行不同字母表示差异显著 ($P<0.05$).
Notes: Different letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$).

2.3.2 腹部肌肉 不同盐度条件下罗氏沼虾腹部肌肉能量代谢酶活性结果见表 3。腹部肌肉 MDH 酶活性在不同盐度条件下并未发生显著性变化 ($P>0.05$)。

盐度从 0 升至 8 时, 腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 酶活性并未发生显著性变化 ($P>0.05$); 然而, 盐度进一步升至 12 时, 腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 酶活性显著下降 ($P<0.05$)。

盐度从 0 升至 4 时, 腹部肌肉 PDH 和 COX 酶活性并未发生显著性变化($P>0.05$)。然而, 盐度进一步升至 8 时, 腹部肌肉 PDH 和 COX 酶活性显著下降($P<0.05$)。盐度从 8 升至 12 时, 腹部肌肉 PDH 和 COX 酶活性同样显著下降($P<0.05$)。

2.4 运动能力

不同盐度条件下罗氏沼虾的运动能力见表 4。盐度从 0 升至 4 时, 罗氏沼虾临界游泳速度并未

发生显著性变化($P>0.05$); 盐度从 0 升至 8 时, 罗氏沼虾临界游泳速度下降了 31.1% ($P<0.05$); 盐度从 4 升至 12 时罗氏沼虾临界游泳速度下降了 47.3% ($P<0.05$)。

盐度从 0 升至 4 时罗氏沼虾弹跳速度未发生显著性变化($P>0.05$); 盐度进一步升至 8 时弹跳速度依然未发生显著性变化($P>0.05$); 盐度从 4 升至 12 时罗氏沼虾弹跳速度显著下降($P<0.05$)。

表 3 不同盐度条件下罗氏沼虾腹部肌肉能量代谢酶活性
Tab. 3 Energy metabolism enzyme activities in abdominal muscles of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels
 $n=9$; $\bar{x} \pm SE$; $\mu\text{mol}/(\text{min} \cdot \text{g protein})$

酶 enzyme	盐度 salinity				单因素方差分析 one-way ANOVA	
	0	4	8	12	F	P
己糖激酶 HK	72.89±3.80 ^a	71.75±3.41 ^a	68.23±3.95 ^a	52.27±4.66 ^b	5.751	0.003
磷酸果糖激酶 PFK	137.72±3.78 ^a	134.16±3.89 ^a	128.07±2.27 ^a	118.67±3.05 ^b	6.335	0.002
乳酸脱氢酶 LDH	151.88±7.53 ^a	144.98±8.56 ^a	141.60±7.51 ^a	117.64±6.21 ^b	3.939	0.017
丙酮酸脱氢酶 PDH	227.74±11.86 ^a	208.99±8.07 ^a	170.28±7.43 ^b	144.91±7.33 ^c	18.153	<0.001
苹果酸脱氢酶 MDH	512.46±16.57	499.69±12.34	484.23±10.35	479.65±13.10	1.274	0.300
细胞色素 C 氧化酶 COX	15.82±0.94 ^a	14.94±0.82 ^a	11.34±0.70 ^b	8.28±0.54 ^c	20.780	<0.001

注: 同行不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Notes: Different letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$).

表 4 不同盐度条件下罗氏沼虾运动能力
Tab. 4 Locomotor ability of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels
 $n=30$; $\bar{x} \pm SE$; cm/s

运动能力 locomotor ability	盐度 salinity				单因素方差分析 one-way ANOVA	
	0	4	8	12	F	P
临界游泳速度 U_{crit}	20.35±1.06 ^a	19.27±1.00 ^a	14.01±1.04 ^b	10.71±0.64 ^c	22.641	<0.001
弹跳速度 U_{tail}	52.42±1.48 ^a	50.43±1.80 ^a	47.04±1.67 ^a	38.30±1.29 ^b	15.841	<0.001

注: 同行不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Notes: Different letters in the same line indicate significant differences ($P<0.05$).

2.5 运动能力与肌肉能量代谢的关系

2.5.1 游泳能力与游泳足肌肉能量代谢的关系

不同盐度条件下罗氏沼虾游泳能力与游泳足肌肉能量代谢关系见图 4。盐度从 0 升至 12 时, 罗氏沼虾临界游泳速度与游泳足肌肉 PDH 和 COX 酶活性呈极显著线性正相关($P<0.01$)。

2.5.2 弹跳能力与腹部肌肉能量代谢的关系

不同盐度条件下罗氏沼虾弹跳能力与腹部肌肉能量代谢关系见图 5。盐度从 0 升至 12 时, 罗氏沼虾

弹跳速度与腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 酶活性呈显著线性正相关($P<0.05$, 图 5)。

3 讨论

3.1 盐度对罗氏沼虾能量代谢的影响

大部分甲壳类属于渗透压适应动物, 渗透调节能力相对较弱^[13], 但虾类展现出相对较强的渗透调节能力^[30]。研究表明, 虾类的渗透调节能力主要取决于栖息生境的盐度波动范围^[31]。水体盐

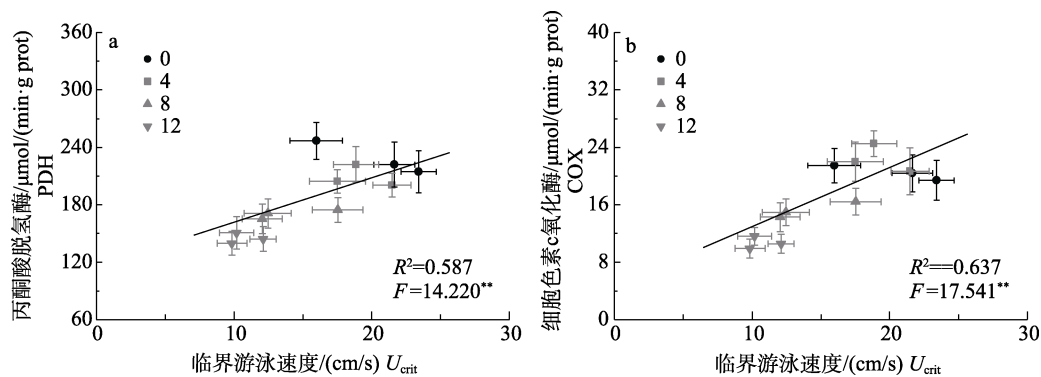


图 4 不同盐度条件下罗氏沼虾临界游泳速度与游泳足肌肉能量代谢酶活性关系

**表示临界游泳速度和游泳足肌肉能量代谢酶活性之间具有极显著相关性($P<0.01$).

Fig. 4 Relationship between critical swimming speeds (U_{crit}) and energy metabolism enzyme activities in pleopod muscles of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels

** indicates very significant correlation ($P<0.01$) between critical swimming speeds and energy metabolism enzyme activities in pleopods muscles.

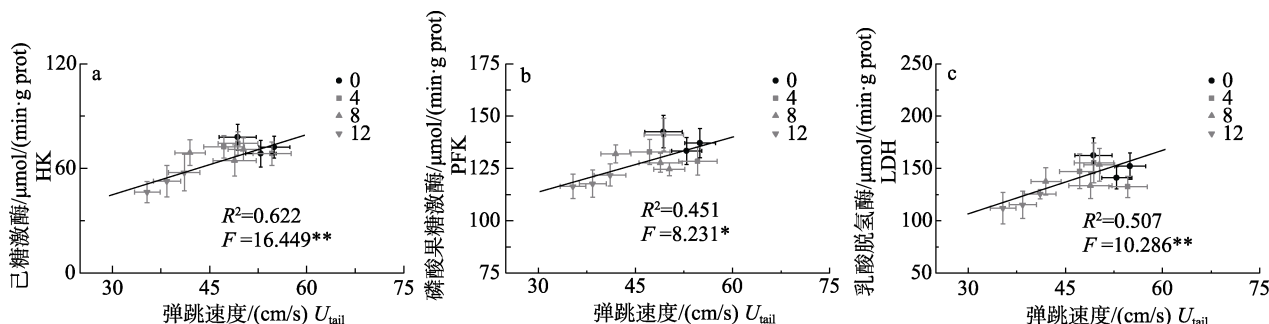


图 5 不同盐度条件下罗氏沼虾弹跳速度与腹部肌肉能量代谢酶活性间的关系

*和**分别表示弹跳速度和腹部肌肉能量代谢酶活性之间具有显著($P<0.05$)和极显著相关性($P<0.01$).

Fig. 5 Relationship between tail-flipping speeds and enzyme activities of energy metabolism in abdominal muscles of *Macrobrachium rosenbergii* under different salinity levels

* and ** indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant correlations ($P<0.01$) between tail-flipping speeds (U_{tail}) and energy metabolism enzyme activities in abdominal muscles, respectively.

度发生变化时, 虾类上调呼吸代谢速率, 从而需要分配更多能量满足渗透调节^[20,32]。Dalla Via^[33]早期研究发现, 盐度从 37 降至 10 时, 日本对虾 (*Penaeus japonicus*) 的耗氧率增加了将近两倍。Li 等^[16]研究发现, 中国明对虾在 25 盐度环境中渗透调节耗能最少, 其耗氧率显著小于其他盐度水平。邹中菊等^[28]研究发现罗氏沼虾在 0~3 盐度下耗氧率最低。本研究中, 盐度从 0 升至 4 时罗氏沼虾的耗氧率并未发生显著变化, 但盐度进一步升至 8 时罗氏沼虾耗氧率显著提高, 再次证实罗氏沼虾渗透调节需要额外消耗氧气。由此可以认为, 罗氏沼虾养殖期间水体盐度不宜超过 8, 在此盐度条件下用于渗透调节的能量最少, 有利于提高

摄食能量的利用效率, 增加罗氏沼虾的养殖产量。

动物在盐度胁迫下能量代谢通路如糖酵解、三羧酸循环和呼吸链发生变化, 反映了渗透调节过程中能量代谢的调控^[34]。测量特定组织如鳃丝、肌肉、大脑等代谢酶活性可定向分析该器官的能量需求状况, 相关研究已在鱼类中大量报道。例如, Bystriansky 等^[35]研究发现, 盐度胁迫能够改变红点鲑 (*Salvelinus alpinus*) 鳃丝有氧代谢相关酶的活性; Vargas-Chacoff 等^[34]研究发现, 盐度发生变化时, 鱼类 *Eleginops maclovinus* 的肝脏己糖激酶和果糖-1,6-二磷酸酶的活性发生了显著性变化。对于虾类, Li 等^[16]研究发现, 低盐胁迫对中国明对虾厌氧糖酵解酶如 PFK、LDH 和有氧代谢

酶如 CS 和 COX 等具有显著性影响, 对 HK、PK 和 MDH 等酶活性并无显著性影响, 由此认为盐度胁迫不会调控虾类能量代谢通路的所有酶, 只有特定的通路酶受到盐度调控。本研究发现, 无论鳃丝或肌肉, 其 MDH 酶活性在不同盐度条件下均未发生显著性变化, 再次证明盐度胁迫不会调控能量代谢通路的所有酶这一观点, 原因可能是因为 MDH 是能量代谢通路的非限速酶。非限速酶双向调控代谢通路, 并且酶活相对较高, 不是能量代谢通路的限制性因子^[36], 因此盐度胁迫对罗氏沼虾 MDH 酶活并无显著性影响。然而, 本研究中罗氏沼虾鳃丝和肌肉的 HK 酶活性受到盐度调控, 与中国明对虾的 HK 酶活性不受盐度调控结果有所不同^[16]。原因可能与罗氏沼虾鳃丝和肌肉的 HK 酶活性相对较低有关。本研究中, 正常条件下罗氏沼虾鳃丝和肌肉的 HK 酶活性范围为 57.86~72.89 $\mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g prot})$, 低于中国明对虾的 70.15~98.56 $\mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g prot})$ ^[16]。相对较低的酶活性更易受到环境调节, 因此盐度对罗氏沼虾的 HK 酶活性具有显著性影响。

鳃丝是虾类呼吸、离子转移和渗透调控的重要器官^[37-38]。已有研究显示, 虾类渗透调控过程中 75% 的能量源自鳃丝的能量物质分解^[39]。因此, 渗透调节过程中虾类的能量获取主要与鳃丝代谢有关^[40]。本研究中, 盐度由 0 升至 8 和 12 时, 罗氏沼虾鳃丝 PDH 和 COX 酶活性显著升高, 并且鳃丝 PDH 和 COX 酶活性与耗氧率呈显著线性正相关, 表明罗氏沼虾通过增加鳃丝有氧代谢水平来满足渗透调节所需能量。

对于肌肉, 本研究中盐度从 0 升至 8 时, 与鳃丝能量代谢特征相反, 罗氏沼虾游泳足肌肉和腹部肌肉 PDH 和 COX 酶活性显著下降, 表明渗透调节过程中肌肉能量代谢受到一定程度抑制。原因可能与肌肉能量来源及氧气输送有关。虽然动物能够分解多种能量物质获取能量, 但大部分能量主要源自蛋白质、脂肪和糖类^[41]。动物在不同生命活动过程中对蛋白质、脂肪和糖类的优先利用顺序有所不同。渗透调节主要消耗脂肪^[13, 40]和蛋白质^[42-43]以获取能量。肌肉主要与虾类运动有

关, 其能量主要依靠分解糖类获取^[7, 17]。脂肪和蛋白质只能通过有氧代谢通路分解供能^[19, 35], 而糖类可以通过有氧和无氧代谢通路分解供能^[7, 35]。动物能够改变血液氧气供应顺序, 从而确保氧气优先输送至特定组织器官^[44]。渗透调节过程中, 虾类鳃丝分解脂肪和蛋白质需要消耗大量氧气, 氧气优先输送至鳃丝而非肌肉, 肌肉中可利用的氧气下降, 因此肌肉 PDH 和 COX 酶活性显著下降。此外, 12 的盐度相对较高, 罗氏沼虾渗透调节期间鳃丝需要消耗大量氧气用以分解能量物质, 导致肌肉氧气供应不足。严重缺氧能够降低虾类厌氧糖酵解酶活性^[45], 因此 12 盐度环境下罗氏沼虾游泳足肌肉和腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 等厌氧代谢酶活性显著下降。

3.2 盐度对罗氏沼虾运动能力的影响

本研究中, 盐度从 0 升至 8 时, 罗氏沼虾临界游泳速度显著下降, 表明 8 盐度环境能够明显降低罗氏沼虾的游泳运动。原因可能与渗透调节过程中肌肉能量代谢下降有关。虾类游泳过程中主要依靠游泳足肌肉的能量物质分解供能^[7, 17]。在鱼类中, 临界游泳速度属于有氧运动, 主要通过有氧代谢通路获取能量^[46]。本研究中游泳足肌肉 PDH 和 COX 等有氧代谢酶活性与罗氏沼虾临界游泳速度呈显著线性正相关, 表明罗氏沼虾的临界游泳速度同样属于有氧运动。盐度升至 8 和 12 时罗氏沼虾游泳足肌肉氧气供应不足, 导致肌肉有氧代谢下降, 因此游泳能力也随之下降。由此可以认为, 罗氏沼虾渗透调节过程中虽然增加了氧气摄取, 但氧气优先输送至鳃丝用于能量代谢, 导致肌肉氧气供应不足, 引起游泳能力下降, 影响了罗氏沼虾的日常活动如巡游、洄游和觅食等。

弹跳能力主要与虾类躲避攻击、打斗等相关行为密切相关^[9]。已有研究显示, 互残攻击行为是虾类养殖期间死亡的关键因素^[47]。罗氏沼虾具有明显的领域等级、互相残杀、剧烈打斗等习性^[48]。现阶段罗氏沼虾大多采用高密度养殖模式, 随着养殖密度逐步增加, 其互残攻击行为更为明显, 因此稳定的弹跳躲避能力是罗氏沼虾存活的关键。本研究中, 盐度从 0 升至 8 时罗氏沼虾的弹

跳能力依然保持稳定水平, 只有盐度进一步升至 12 时罗氏沼虾的弹跳能力才开始显著下降。原因可能与渗透调节过程中腹部肌肉能量代谢发生变化有关。虾类弹跳是一种高强度运动, 能量最初由磷酸肌酸分解获取^[49], 但腹部肌肉中磷酸肌酸含量很低, 因此弹跳所需能量大部分源自厌氧糖酵解^[50]。本研究中, 盐度升至 8 时罗氏沼虾腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 等厌氧代谢酶活性并未发生显著性变化, 意味着腹部肌肉依然有充足的能量供应于虾类弹跳, 因此罗氏沼虾依然保持稳定的弹跳能力。盐度升至 12 时罗氏沼虾腹部肌肉 HK、PFK 和 LDH 酶活性开始显著下降, 表明渗透调节过程中腹部肌肉厌氧供能下降, 能量供应不足, 因此弹跳能力下降。由此可以认为, 罗氏沼虾在渗透调节过程中稳定的厌氧糖酵解有助于保持弹跳运动处于稳定状态, 从而利于在盐度胁迫下躲避攻击和捕食, 但是盐度升至 12 时腹部肌肉厌氧代谢酶活性显著下降, 导致存活能力降低。以上结果表明, 罗氏沼虾采取一系列生理调节应对盐度胁迫, 但盐度胁迫造成的行为变化却不利于罗氏沼虾的生存, 因此评估罗氏沼虾应对盐度胁迫的生存策略时应同时考虑生理调节和行为变化。

综上所述, 本研究分析了盐度胁迫下罗氏沼虾能量代谢和行为变化, 发现罗氏沼虾通过增加氧气摄取用于鳃丝有氧代谢以应对盐度胁迫, 但这些生理调节导致肌肉能量代谢酶活性下降, 其中游泳足肌肉有氧代谢酶活性下降导致罗氏沼虾游泳能力降低, 而腹部肌肉厌氧代谢酶活性下降导致罗氏沼虾弹跳能力下降。本研究结果有助于进一步了解虾类应对水体盐度变化的调控机制, 为罗氏沼虾的盐度耐受研究及福利化养殖提供基础数据。

参考文献:

- [1] Wells R M G, Lu J, Hickey A J R, et al. Ontogenetic changes in enzyme activities associated with energy production in the spiny lobster, *Jasus edwardsii*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2001, 130(3): 339-347.
- [2] Kieffer J D. Perspective—Exercise in fish: 50+ years and going strong[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 156(2): 163-168.
- [3] Palstra A P, Planas J V. Fish under exercise[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2011, 37(2): 259-272.
- [4] Li J T, Li W T, Zhang X M. Effects of dissolved oxygen, starvation, temperature, and salinity on the locomotive ability of juvenile Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Ethology Ecology & Evolution, 2019, 31(2): 155-172.
- [5] Peterson R H, Harmon P. Swimming ability of pre-feeding striped bass larvae[J]. Aquaculture International, 2001, 9(5): 361-366.
- [6] Yanase K, Eayrs S, Arimoto T. Influence of water temperature and fish length on the maximum swimming speed of sand flathead, *Platycephalus bassensis*: Implications for trawl selectivity[J]. Fisheries Research, 2007, 84(2): 180-188.
- [7] Li J T, Li W T, Zhang X M, et al. Physiological and behavioral responses of different modes of locomotion in the whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) (Caridea: Penaeidae)[J]. Journal of Crustacean Biology, 2018, 38(1): 79-90.
- [8] Zhang P D, Zhang X M, Li J, et al. The effects of temperature and salinity on the swimming ability of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2007, 147(1): 64-69.
- [9] Robles-Romo A, Zenteno-Savín T, Racotta I S. Bioenergetic status and oxidative stress during escape response until exhaustion in whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2016, 478: 16-23.
- [10] Abou Anni I S, Bianchini A, Barcarolli I F, et al. Salinity influence on growth, osmoregulation and energy turnover in juvenile pompano *Trachinotus marginatus* Cuvier 1832[J]. Aquaculture, 2016, 455: 63-72.
- [11] Sokolova I M, Frederich M, Bagwe R, et al. Energy homeostasis as an integrative tool for assessing limits of environmental stress tolerance in aquatic invertebrates[J]. Marine Environmental Research, 2012, 79: 1-15.
- [12] Tseng Y C, Hwang P P. Some insights into energy metabolism for osmoregulation in fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2008, 148(4): 419-429.
- [13] Palacios E, Racotta I S. Salinity stress test and its relation to future performance and different physiological responses in shrimp postlarvae[J]. Aquaculture, 2007, 268(1-4): 123-135.
- [14] Spanopoulos-Hernández M, Martínez-Palacios C A, Vane-

- gas-Pérez R C, et al. The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874)[J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1-4): 341-348.
- [15] Yu X M, Zhang X M, Duan Y, et al. Effects of temperature, salinity, body length, and starvation on the critical swimming speed of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2010, 157(4): 392-397.
- [16] Li J T, Xu X W, Li W T, et al. Linking energy metabolism and locomotor variation to osmoregulation in Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2019, 234: 58-67.
- [17] Li J T, Xu X W, Li W T, et al. Behavioural and physiological responses to low- and high-intensity locomotion in Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis*[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2019, 205(1): 87-102.
- [18] Zhu Z M, Song B L, Lin X T, et al. Effect of sustained training on glycolysis and fatty acids oxidation in swimming muscles and liver in juvenile tinfoil barb *Barbonymus schwanefeldii* (Bleeker, 1854)[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2016, 42(6): 1807-1817.
- [19] Li E C, Wang X D, Chen K, et al. Physiological change and nutritional requirement of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* at low salinity[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2017, 9(1): 57-75.
- [20] Li E C, Chen L Q, Zeng C, et al. Growth, body composition, respiration and ambient ammonia nitrogen tolerance of the juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities[J]. *Aquaculture*, 2007, 265(1-4): 385-390.
- [21] Wang X D, Li E C, Chen K, et al. Response of facilitative glucose transporter 1 to salinity stress and dietary carbohydrate nutrition in white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, 23(1): 90-100.
- [22] Yang S P, Ding S J, Sun C B, et al. Effect of diet and salinity on the growth and survival rate of juvenile shrimps of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2014, 5(2): 101-106. [杨世平, 丁树军, 孙成波, 等. 饵料和盐度对罗氏沼虾幼虾生长和存活率的影响[J]. *热带生物学报*, 2014, 5(2): 101-106.]
- [23] Yang G L, Chen X F, Wang J Y, et al. Social and economical factors of sustained growth of *Macrobrachium rosenbergii* industry in mainland China[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2011, 30(5): 450-457. [杨国梁, 陈雪峰, 王军毅, 等. 罗氏沼虾产业在中国持续增长的经济与社会原因分析[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2011, 30(5): 450-457.]
- [24] Zhou M Y. Effect of stocking density, salinity and temperature on sex differentiation and early gonadal development on *Macrobrachium rosenbergii*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [周梦颖. 养殖密度、盐度和温度对罗氏沼虾性别分化和早期性腺发育的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [25] Chand B K, Trivedi R K, Dubey S K, et al. Effect of salinity on survival and growth of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (de Man)[J]. *Aquaculture Reports*, 2015, 2: 26-33.
- [26] Wu Y L, Dai X L, Zhou M Y, et al. Effect of salinity on growth and sex differentiation of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(9): 2118-2124. [邬育龙, 戴习林, 周梦颖, 等. 盐度对罗氏沼虾生长和性别分化的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(9): 2118-2124.]
- [27] Wei J, Tian L, Wang Y K, et al. Effects of salinity, photoperiod, and light spectrum on larval survival, growth, and related enzyme activities in the giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Aquaculture*, 2021, 530: 735794.
- [28] Zou Z J, Jiang H X, Duan D Y, et al. Effect of salinity on oxygen consumption and $\text{NH}_3\text{-N}$ excretion of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2004, 38(1): 82-84. [邹中菊, 姜红霞, 段德勇, 等. 盐度对罗氏沼虾代谢率的影响[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 38(1): 82-84.]
- [29] Yu X M, Zhang X M, Zhang P D, et al. Critical swimming speed, tail-flip speed and physiological response to exercise fatigue in kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2009, 153(2): 120-124.
- [30] Castille F L Jr, Lawrence A L Jr. The effect of salinity on the osmotic, sodium and chloride concentrations in the hemolymph of euryhaline shrimp of the genus *Penaeus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1981, 68(1): 75-80.
- [31] Brito R, Chimal M E, Rosas C. Effect of salinity in survival, growth, and osmotic capacity of early juveniles of *Farfantepenaeus brasiliensis* (Decapoda: Penaeidae)[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, 244(2): 253-263.
- [32] Villarreal H, Hinojosa P, Naranjo J. Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus vannamei* postlarvae[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1994, 108(2-3): 331-336.

- [33] Dalla Via G J. Salinity responses of the juvenile penaeid shrimp *Penaeus japonicus*: I. Oxygen consumption and estimations of productivity[J]. Aquaculture, 1986, 55(4): 297-306.
- [34] Vargas-Chacoff L, Moneva F, Oyarzún R, et al. Metabolic responses to salinity changes in the subantarctic notothenioid teleost *Eleginops maclovinus*[J]. Polar Biology, 2016, 39(7): 1297-1308.
- [35] Bystriansky J S, Frick N T, Ballantyne J S. Intermediary metabolism of Arctic char *Salvelinus alpinus* during short-term salinity exposure[J]. The Journal of Experimental Biology, 2007, 210(Pt 11): 1971-1985.
- [36] Soengas J L, Fuentes J, Andrés M D, et al. The effect of gradual transfer to sea water on muscle carbohydrate metabolism of rainbow trout[J]. Journal of Fish Biology, 1995, 46(3): 509-523.
- [37] McNamara J C, Faria S C. Evolution of osmoregulatory patterns and gill ion transport mechanisms in the decapod Crustacea: A review[J]. Journal of Comparative Physiology B, 2012, 182(8): 997-1014.
- [38] Piller S, Henry R, Doeller J, et al. A comparison of the gill physiology of two euryhaline crab species, *Callinectes sapidus* and *Callinectes similis*: Energy production, transport-related enzymes and osmoregulation as a function of acclimation salinity[J]. The Journal of Experimental Biology, 1995, 198(Pt 2): 349-358.
- [39] Holliday C W. Salinity-induced changes in gill Na, K-ATPase activity in the mud fiddler crab, *Uca pugnax*[J]. Journal of Experimental Zoology, 1985, 233(2): 199-208.
- [40] Palacios E, Bonilla A, Luna D, et al. Survival, Na⁺/K⁺-ATPase and lipid responses to salinity challenge in fed and starved white Pacific shrimp (*Litopenaeus vannamei*) post-larvae[J]. Aquaculture, 2004, 234(1-4): 497-511.
- [41] Li J T, Lin X T, Zhou C H, et al. Effects of starvation on the consumption of energy sources and swimming performance in juvenile *Gambusia affinis* and *Tanichthys albonubes*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 282-290. [李江涛, 林小涛, 周晨辉, 等. 饥饿对食蚊鱼和唐鱼幼鱼能量物质消耗及游泳能力的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 282-290.]
- [42] Rosas C, Martinez E, Gaxiola G, et al. The effect of dissolved oxygen and salinity on oxygen consumption, ammonia excretion and osmotic pressure of *Penaeus setiferus* (Linnaeus) juveniles[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1999, 234(1): 41-57.
- [43] Shinji J, Wilder M N. Dynamics of free amino acids in the hemolymph of Pacific whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* exposed to different types of stress[J]. Fisheries Science, 2012, 78(6): 1187-1194.
- [44] Jackson D C. Metabolic depression and oxygen depletion in the diving turtle[J]. Journal of Applied Physiology, 1968, 24(4): 503-509.
- [45] Dupont-Prinet A, Pillet M, Chabot D, et al. Northern shrimp (*Pandalus borealis*) oxygen consumption and metabolic enzyme activities are severely constrained by hypoxia in the Estuary and Gulf of St. Lawrence[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2013, 448: 298-307.
- [46] Brett J R. The metabolic demand for oxygen in fish, particularly salmonids, and a comparison with other vertebrates[J]. Respiration Physiology, 1972, 14(1-2): 151-170.
- [47] Romano N, Zeng C S. Cannibalism of decapod crustaceans and implications for their aquaculture: A review of its prevalence, influencing factors, and mitigating methods[J]. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 2017, 25(1): 42-69.
- [48] Liang H F. Biology of Shrimps and Crabs[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. [梁华芳. 虾蟹类生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.]
- [49] England W R, Baldwin J. Anaerobic energy metabolism in the tail musculature of the Australian yabby *Cherax destructor* (Crustacea, Decapoda, Parastacidae): Role of phosphagens and anaerobic glycolysis during escape behavior[J]. Physiological Zoology, 1983, 56(4): 614-622.
- [50] Gruszczyk B, Kamp G. The shift from glycogenolysis to glycogen resynthesis after escape swimming: Studies on the abdominal muscle of the shrimp, *Crangon crangon*[J]. Journal of Comparative Physiology B, 1990, 159(6): 753-760.

Effects of salinity on the energy metabolism and locomotive ability of *Macrobrachium rosenbergii*

LI Jiangtao, QIU Xiaolong, QIU Xiaotong, FANG Junchao, HUANG Feifei, LIANG Rishen, LI Qingqing, LIN Li, LYU Xiaojing

Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou Key Laboratory of Aquatic Animal Diseases and Waterfowl Breeding, Guangzhou 510225, China

Abstract: To explore the characteristics of energy metabolism in *Macrobrachium rosenbergii* and their relationship with locomotive abilities under salinity stress, an experiment with four salinity levels [0 (control), 4, 8, and 12] was conducted. Oxygen consumption rates, key energy metabolism enzyme activity levels in gills and muscles, and swimming and tail-flipping abilities were determined after 48 hours of salinity stress. The results showed that there were no significant differences in oxygen consumption rates as salinity increased from 0 to 4; however, the values were significantly higher in the 8 and 12 salinity groups when compared with those in the control group (0 salinity). There were no significant differences in the activity levels of hexokinase (HK), phosphofructokinase (PFK), and lactate dehydrogenase (LDH) in the gill among different salinity level groups. However, the activity levels of pyruvate dehydrogenase (PDH) and cytochrome c oxidase (COX) in the gill were significantly elevated as salinity increased from 0 to 8. Moreover, the activity levels of PDH and COX in the gill were positively correlated with oxygen consumption rates. The activity levels of HK, PFK, and LDH in pleopod and abdominal muscles did not change significantly when salinity increased from 0 to 8, but PDH and COX activity levels in pleopod and abdominal muscles significantly decreased under the same condition. Significant decreases in the activity levels of HK, PFK, LDH, PDH, and COX were observed as salinity increased from 0 to 12, either in pleopod or abdominal muscles. With regard to locomotion, swimming ability significantly decreased when salinity increased from 0 to 8; meanwhile, the same decrease for tail-flipping ability was observed at a salinity of 12. Swimming ability was positively correlated with PDH and COX activity levels of the pleopod muscles, whereas tail-flipping ability was positively correlated with the activity levels of HK, PFK, and LDH in abdominal muscles. Our findings indicate that as a response to salinity stress, *M. rosenbergii* increases its reliance on aerobic metabolism in the gill, as evidenced by the increase in oxygen intake. However, these physiological regulations reduce the enzyme activity levels associated with energy metabolism in muscles, resulting in observed decrease in swimming and tail-flipping abilities of *M. rosenbergii*.

Key words: salinity; *Macrobrachium rosenbergii*; behavior; swimming; tail-flipping; energy metabolism

Corresponding author: LYU Xiaojing. E-mail: xjinglv@zhku.edu.cn