

福建牡蛎成贝及幼贝对低盐胁迫耐受性分析

薛海波¹, 秦凯瑞², 史博^{2,3}, 郭团玉¹, 缪雄平¹, 阙华勇^{2,3}

(1.厦门海洋职业技术学院 海洋资源保护与生态治理福建省高等学校应用技术工程中心 厦门市智慧渔业重点实验室, 福建 厦门 361100; 2.集美大学水产学院 农业农村部东海海水健康养殖重点实验室 福建省水产生物育种与健康养殖工程研究中心, 福建 厦门 361021; 3.海水养殖生物育种全国重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为探究福建牡蛎(*Crassostrea angulata*)对低盐胁迫的耐受性和响应, 本研究通过设置不同盐度梯度, 系统分析了低盐胁迫对其成贝和幼贝存活、繁殖能力、血淋巴渗透压调节及鳃组织结构的影响。结果表明, 福建牡蛎对低盐胁迫的耐受性存在明显的发育阶段差异: 成贝 7 d 半致死盐度(LS₅₀)为 13.5, 亚致死盐度为 19; 幼贝 LS₅₀为 9.5, 亚致死盐度为 14, 显示幼贝具有更强的低盐耐受能力。低盐环境(盐度小于 14)严重抑制其受精与孵化过程, 繁殖适宜盐度为 23~27。血淋巴渗透压在低盐胁迫下 12 h 内迅速与环境趋于一致, 表明该物种为典型的渗透压随变者。长期低盐胁迫可引起鳃组织损伤, 表现为鳃丝间距增大, 顶端细胞膨胀、纤毛脱落等结构变化。本研究明确了福建牡蛎在不同生活史阶段的低盐耐受限度与生理响应, 为其在河口及近海养殖区的健康养殖、种质资源保护及灾害防控提供了科学依据。

关键词: 福建牡蛎; 低盐胁迫; 盐度耐受性

中图分类号: S968.31 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2025)9-0000-00

DOI: 10.11759/hyhx20250929001

河口及潮间带作为牡蛎重要的养殖区与自然栖息地, 其盐度受降雨、径流和潮汐等多种因素共同影响, 可在短期内急剧降至 10 以下^[1-2]。近年来, 全球水循环失衡加剧与极端天气事件频发, 导致沿岸海域低盐胁迫问题日益凸显, 已成为影响牡蛎养殖存活率与苗种稳定供应的关键非生物胁迫因子之一^[3-5]。福建牡蛎(*Crassostrea angulata*)主产于我国长江以南海域, 是东南沿海重要的经济贝类, 其养殖产业对区域海洋经济具有重要支撑作用。然而, 在河口与近海养殖区中, 突发性淡水输入事件常引起盐度显著且持续降低, 严重抑制牡蛎的摄食和呼吸活动, 甚至导致其生理功能完全停滞, 最终引发大规模死亡^[6-7]。

盐度是影响海洋贝类分布与养殖的关键环境因子, 不同贝类在其早期发育阶段对低盐胁迫的响应存在显著差异。研究表明, 安氏牡蛎(*Ostrea angasi*)幼虫在盐度为 15 时生长受到抑制, 死亡率超过 80%^[9]; 岩牡蛎(*C. nippona*)幼虫最适生长盐度为 26, 偏离该盐度会导致存活率下降^[10]; 大砗磲(*Tridacna gigas*)在低盐环境中受精率、孵化率和幼虫发育均受到明显抑制^[11]。此外, 牡蛎(*C. gasar* 和 *C. belcheri*)^[12-13]

及黄蛤(*Mesodesma mactroides*)^[14]等种类在盐度低于特定阈值时无法完成正常胚胎发育或幼虫变态。血淋巴与鳃作为贝类进行渗透压调节的关键组织, 直接决定其对盐度波动的适应能力。例如, 日本巨牡蛎(*C. nipponia*)在低盐胁迫下血淋巴渗透压随环境盐度下降而降低, 而近江牡蛎在高盐胁迫下可升高血淋巴渗透压^[15]; 硬壳蛤(*Mercenaria mercenaria*)在盐度 10 胁迫下出现鳃丝排列紊乱、长度缩短等组织结构损伤^[16]。然而, 目前对福建牡蛎在不同生活史阶段对低

收稿日期: 2025-06-29; 修回日期: 2025-07-25

基金项目: 海洋资源保护与生态治理福建省高等学校应用技术工程中心开放基金课题(2025-05); 福建省高校产学研合作项目(2025N5010); 福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项资金项目(FJHYF-L-2023-2); 福建省农业引导性(重点)项目(2024N0057)

[Foundation: Applied Technology Engineering Center of Fujian Provincial Higher Education for Marine Resource Protection and Ecological Governance, No. 2025-05; University-Industry Cooperation Program of Fujian Province, No. 2025N5010; Fujian Province to Promote the High-quality Development of Marine and Fishery Industry Special Project, No. FJHYF-L-2023-2; Fujian Provincial Agricultural Guidance (Key) Projects, No. 2024N0057]

作者简介: 薛海波(1982—), 男, 山东广饶人, 博士, 讲师, 主要从事水产经济动物苗种繁育与养殖, E-mail: xuehaibo@xmoc.edu.cn; 史博(1987—), 通信作者, 男, 河南开封人, 副教授, 主要从事海洋贝类遗传育种, E-mail: shibo@jmu.edu.cn

盐胁迫的耐受能力仍缺乏系统性深入研究,其在急性低盐条件下生理调节机制、组织病理响应以及繁殖能力变化尚未明确。

本研究系统评估了福建牡蛎低盐胁迫下成贝和幼贝的半致死盐度、亚致死盐度,分析了低盐对受精率与孵化率、血淋巴渗透压调节能力以及鳃组织结构的影响,旨在揭示福建牡蛎对低盐环境的适应策略与耐受限度。研究结果可为福建牡蛎的健康养殖、种质资源保护及养殖区合理规划提供理论支撑,对于应对气候变化背景下日益频繁的盐度波动具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用福建牡蛎均取自福建诏安湾养殖海区。成贝为同一批次养殖的1龄个体,平均壳长83.5 mm。实验前,将成贝均匀放置于50 L自然海水中,在室内暂养5 d,水温控制在 $(27 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,盐度为29~30。暂养期间持续充气以保持溶氧充足,并于每日8:00和18:00时投喂少量小球藻,每天全量换水1次,暂养期间在壳闭合部开小口(确保不会因为闭壳而免受低盐胁迫)。幼贝为养殖3个月的个体,壳长范围为20~30 mm。将附着在贝壳上的幼贝带回实验室后,直接放置于100 L水槽中暂养5 d。暂养前3 d,每天换水2~3次,以清除壳表面附着的浮游生物和杂质;第4~5 d,每天换水1次。幼贝暂养期间的其他管理条件与成贝保持一致。

1.2 成贝和幼贝的半致死、亚致死盐度测定

根据预实验结果,分别设置等对数间距盐度梯度:成贝为10、12、15、18、22、27;幼贝为5、7、10、13、18、25。每个盐度梯度设3个平行,成贝每平行30只,饲养于45 L水体中;幼贝每平行30只,饲养于5 L水体中。实验海水均由 $0.45 \mu\text{m}$ 过滤自然海水与曝气24 h自来水配制,成贝实验水温控制在 $(27 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,幼贝实验水温为 $(22.7 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。实验期间每天及时清除并记录死亡个体,持续7 d。实验结束后,利用SPSS 24软件进行Probit回归分析,分别计算成贝和幼贝在低盐胁迫7 d后的半致死盐度(LS_{50})。为验证所得 LS_{50} 的有效性,分别以该盐度对成贝和幼贝进行为期7 d的低盐胁迫验证实验。耐盐性评价指标包括:累计死亡率、亚致死盐度、半致死盐度。

1.3 低盐胁迫对福建牡蛎受精率和孵化率的影响

实验所用福建牡蛎均取自福建诏安湾养殖海区。根据预实验结果,采用等对数间距方法将受精和孵化水体盐度梯度设置为10、12、14、17、20、23、27。实验容器为3 L的透明小桶,每个盐度梯度设置3个平行,受精水体为500 mL,孵化水体为2.5 L,水温为 $(27 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。通过解剖法分别获取精子和卵子,并计算其受精率和孵化率。

1.4 低盐胁迫对福建牡蛎血淋巴渗透压及鳃组织结构的影响

牡蛎暂养3 d后,将成贝置于亚致死盐度和自然海水(盐度27)中进行胁迫实验,每个处理组设置3个平行,每个平行设置30只个体。分别在0 h、6 h、12 h、24 h、48 h、96 h和168 h从各组随机挑选8只个体,使用1 mL无菌注射器采取血淋巴,同时采集相应海水1 mL。采用专用渗透压仪(YASN)测定血淋巴及各海水的渗透压^[18-19]。

分别在胁迫0 h、24 h和168 h从各处理组中随机选取5只牡蛎,解剖取其鳃组织后,置于4%多聚甲醛溶液中固定,之后经乙醇脱水、二甲苯透明,石蜡包埋并切片。切片经HE染色、脱水后,用中性树脂封片,并于光学显微镜下观察组织结构并拍照。

2 结果

2.1 福建牡蛎成贝和幼贝在低盐胁迫下的半致死、亚致死盐度测定

2.1.1 成贝的半致死、亚致死盐度测定

福建牡蛎成贝在不同盐度梯度下的存活情况如图1 a所示。在盐度10~27范围内,其存活率与盐度呈正相关关系。盐度27条件下存活率最高,几乎无个体死亡;而在盐度10时,存活率仅为32.2%。从胁迫第3 d起,盐度10~18处理组开始出现较大规模死亡,表明前3 d是福建牡蛎成贝响应低盐胁迫的关键适应期。经Probit回归分析,得出其7 d低盐胁迫的半致死盐度(LS_{50})为13.5,亚致死盐度为19。为验证该结果,使用盐度13.5对成贝进行7 d验证实验(图1 b),结果显示最终存活率为57.6%,表明所获半致死盐度数据具有一定的可靠性。

2.1.2 幼贝的半致死、亚致死盐度测定

福建牡蛎幼贝在不同盐度下的存活结果如图2 a所示。在盐度5~25范围内,存活率随盐度升高而上

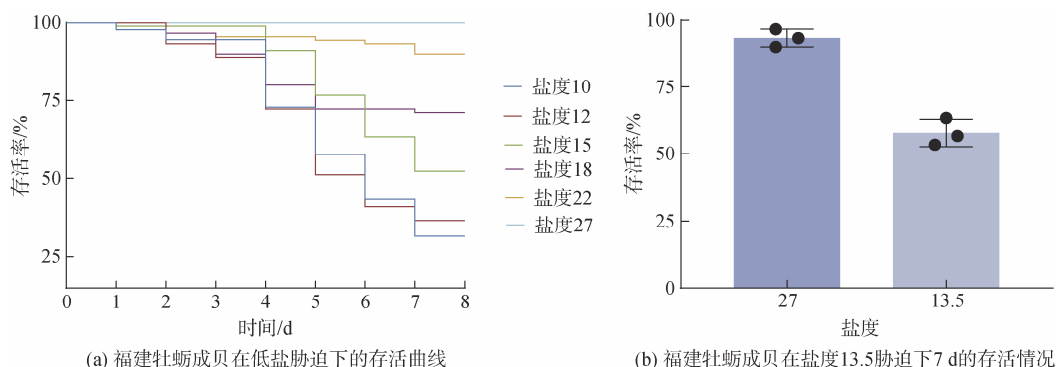


图 1 低盐胁迫对福建牡蛎成贝存活率的影响

Fig. 1 Effects of low-salinity stress on the survival rate of adult *Crassostrea angulata*

升。盐度 25 处理组存活率最高(97%)，而盐度 5 处理组存活率仅为 10%。从第 4 d 起，盐度 5~13 处理组出现大量死亡，表明前 4 d 为福建牡蛎幼贝抵御低盐胁迫的关键适应期。经 Probit 回归分析，测得福建牡

蛎幼贝在低盐胁迫 7 d 后的 LS_{50} 为 9.5，亚致死盐度为 14。以盐度 9.5 进行二次 7 d 胁迫验证，结果如图 2 b 所示：幼贝存活率为 48.3%，证明测得的幼贝半致死盐度数据具有有效性。

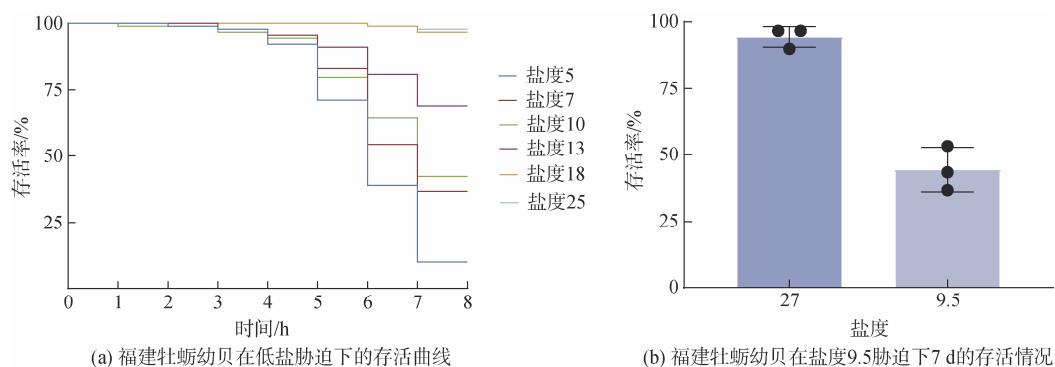


图 2 低盐胁迫对福建牡蛎幼贝存活率的影响

Fig. 2 Effects of low-salinity stress on the survival rate of juvenile *Crassostrea angulata*

2.2 低盐胁迫对福建牡蛎受精率和孵化率的影响

福建牡蛎在不同盐度梯度下的受精率和孵化率

测定结果如图 3 所示。在盐度 10~27 范围内，其受精率和孵化率均与盐度呈正相关($P < 0.05$)，即随着盐度升高而显著提高。最高受精率出现在盐度 27 条件

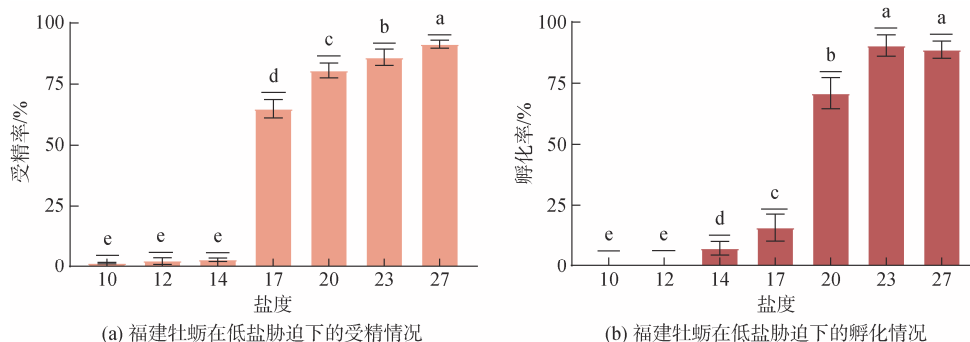


图 3 低盐胁迫对福建牡蛎受精率和孵化率的影响($P < 0.05$)

Fig. 3 Effects of low salinity stress on the fertilization and hatching rates of *Crassostrea angulata* ($P < 0.05$)

下, 达 91.36%; 孵化率在盐度 23~27 范围内达到最高, 介于 88.73%至 90.42%之间。而在盐度 10~14 的低盐条件下, 福建牡蛎基本无法完成正常的受精与孵化过程。

2.3 低盐胁迫对福建牡蛎血淋巴渗透压的影响

在盐度 19 胁迫下, 福建牡蛎成贝血淋巴渗透压的变化如图 4 所示。整个实验期间, 自然海水组

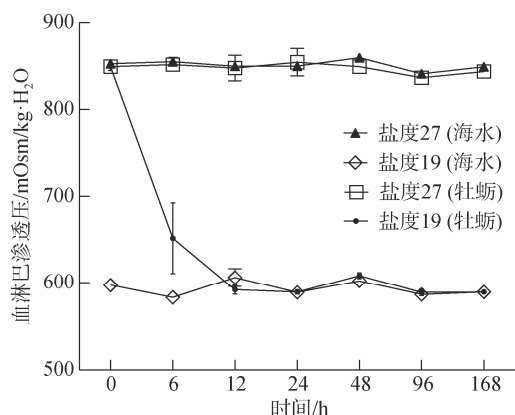


图 4 低盐胁迫下福建牡蛎成贝的血淋巴渗透压变化
Fig. 4 Changes in the hemolymph osmotic pressure of adult *Crassostrea angulata* under low-salinity stress

(盐度 27)和盐度 19 海水的渗透压分别稳定在约 851 mOsm/kg·H₂O 和 592.5 mOsm/kg·H₂O。在自然海水中, 牡蛎血淋巴渗透压与环境水体基本一致, 始终维持在 847.4 mOsm/kg·H₂O 左右。而在盐度 19 胁迫 6 h 后, 血淋巴渗透压自初始的 849.2 mOsm/kg·H₂O 急剧下降至 651.5 mOsm/kg·H₂O, 降幅达 23.3%; 至 12 h 时, 其渗透压(597.8 mOsm/kg·H₂O)已与外界环境趋于一致; 12~168 h 期间, 血淋巴渗透压始终与环境保持高度同步。上述结果说明, 福建牡蛎是一种典型的渗透压随变者, 其体内渗透压随外界环境盐度的变化而发生相应改变。

2.4 低盐胁迫对福建牡蛎鳃组织结构的影响

经盐度 13.5 胁迫后, 福建牡蛎成贝鳃组织的结构变化如图 5 所示。自然海水(盐度 27)中鳃组织形态结构正常, 鳃小片完整, 侧生纤毛排列整齐(图 5 a, b)。低盐胁迫 24 h 后, 鳃组织结构未见明显异常(图 5 c, d); 但胁迫至 168 h 时, 鳃丝间距增大, 顶端细胞明显膨胀, 额纤毛与侧生纤毛严重脱落(图 5 e, f)。结果表明, 短期急性低盐胁迫未对鳃组织造成显著结构损伤, 但长期胁迫会导致其出现明显的组织病理变化。

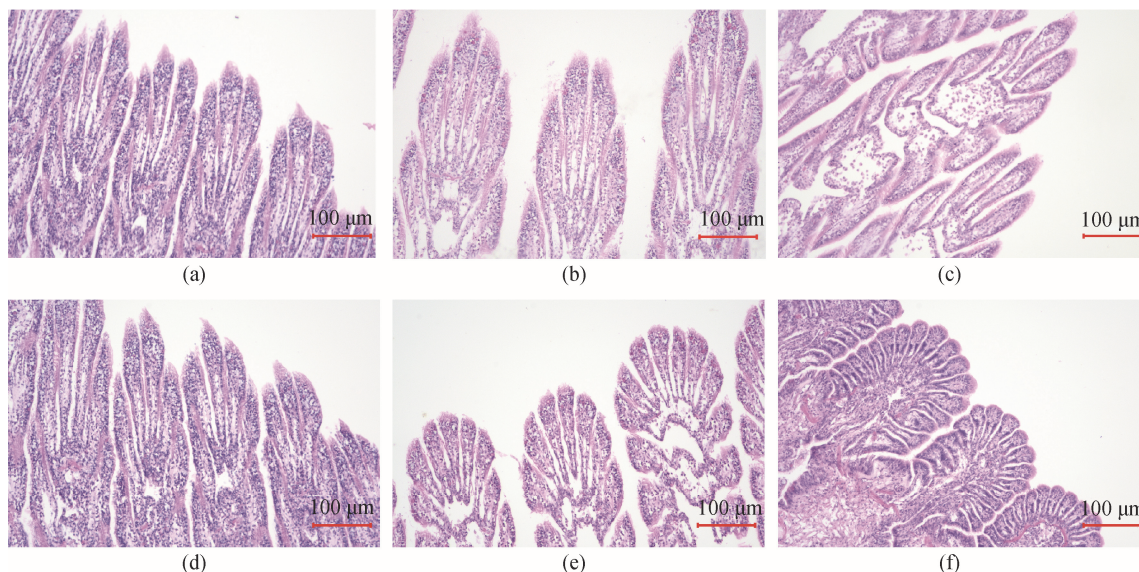


图 5 低盐胁迫对福建牡蛎成贝鳃组织结构的影响(横切)

Fig. 5 Effects of low-salinity stress on the gill tissue structure of adult *Crassostrea angulata* (transverse section)
注: (a, b)盐度 27 水体中的鳃组织切片; (c, d)盐度 13.5 胁迫 24 h 后的鳃组织切片; (e, f)盐度 13.5 胁迫 168 h 后的鳃组织切片

3 讨论

3.1 福建牡蛎对低盐胁迫的耐受性差异

多数具有重要经济价值的海洋贝类分布于或养

殖于河口、潮间带及近岸海域, 这些区域的环境因子(如盐度)易受台风、暴雨和高温等事件影响, 波动频率高、幅度大。贝类对盐度的耐受能力是其长期适应进化的结果, 同一物种在不同发育阶段或因地理分布

差异,其低盐耐受性往往存在显著差别^[20-23]。本研究首次系统评估并确定了福建牡蛎成贝与幼贝在低盐胁迫下的半致死及亚致死盐度,成贝 7 d-LS₅₀为 13.5、亚致死盐度为 19;幼贝分别为 9.5 和 14,表明幼贝的低盐耐受能力显著高于成贝。这一差异可能与幼贝在发育早期具有更活跃的离子调节酶(如 Na⁺/K⁺-ATP 酶)活性和更高效的细胞容积调节机制有关。类似结果在其他贝类中亦有报道:扇贝(*Chlamys opercularis*)幼贝(5~10 mm)也表现出比成贝(>30 mm)更强的低盐耐受性^[24];吴静等^[25]发现华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)成贝 96 h 半致死盐度为 20,而幼贝为 18,进一步印证部分贝类幼体阶段更强的低盐耐受性。值得注意的是,一些贝类表现出与本研究相反的耐受规律。彭茂潇等^[26]报道,不同规格缢蛭(*Sinonovacula constricta*)在低盐条件下的 48 h-LS₅₀存在差异,其中稚贝、幼贝和成贝的 48 h-LS₅₀分别为 1.45、1.29 和 0.75。Yuan 等^[27]对贻贝(*Mytella charruana*)的研究也表明,在盐度 9 胁迫下,幼贝死亡率(60%)显著高于成贝(0%)。这种物种间的差异可能与不同贝类的栖息地盐度环境、进化策略及生理调节模式有关。

3.2 低盐胁迫对福建牡蛎受精率与孵化率的影响

海洋贝类大多行体外受精,对环境中的盐度变化尤为敏感,适宜的海水盐度是精子活力得以激发和维持的必要条件。低盐对受精过程的抑制可能与精子活力和卵子激活机制受损有关。本研究结果表明,在盐度 10~27 的范围内,福建牡蛎在盐度 27 时受精率最高(91.36%),孵化率在盐度 23~27 时维持在较高水平(88.73%~90.42%);而当盐度低于 14 时,受精与孵化过程几乎完全被抑制,这一结果明确了福建牡蛎繁殖活动的适宜盐度范围,也揭示了低盐胁迫对其繁殖能力的强抑制作用。该研究结果与华贵栉孔扇贝、菲律宾蛤仔在盐胁迫下的结果高度吻合^[28-29]。这与多数经济贝类繁殖所需的适宜盐度范围一致。例如,长牡蛎(*C. gigas*)在低盐(4~12)处理下胚胎发育显著迟缓,且盐度越低发育速度越慢^[30]。类似地,环境盐度和低盐处理均对长牡蛎的卵裂率、孵化率有显著影响^[31]。

3.3 低盐胁迫对福建牡蛎血淋巴渗透压的影响

牡蛎是一种变渗动物,其机体渗透压会随外界环境渗透压的变化而变化。多项研究表明,血淋巴是

渗透压调节的重要组织,其渗透压水平可以直接反应牡蛎对环境渗透压变化的适应。本研究中,福建牡蛎在盐度 19(亚致死盐度)胁迫下,血淋巴渗透压在 12 h 内迅速下降并与环境趋于一致,表明其属于典型的渗透压随变者。这一策略虽可短期内减少能量消耗,但长期低盐会导致血淋巴离子浓度持续偏低,可能引起细胞功能紊乱、代谢抑制乃至生长停滞。本研究结果与日本巨牡蛎在低盐下血淋巴渗透压随环境下降的特征相似^[15]。牡蛎这种随变策略更适合盐度短期剧烈波动的近岸和河口区,通过快速调整体内渗透压以减少细胞内外渗透压梯度,降低细胞膜损伤风险。值得注意的是,福建牡蛎在胁迫 6 h 内渗透压下降幅度达 23.3%,表明其具备快速响应盐度突变的能力,这可能得益于鳃和肾管中离子通道和水通道蛋白的高效调控。然而,长期低盐环境下是否引发代偿性生理响应(如抗氧化酶活升高、渗透调节物质积累)仍需进一步研究。

3.4 低盐胁迫对福建牡蛎鳃组织结构的影响

鳃作为贝类进行摄食、呼吸、渗透压调节的关键器官,其结构的完整性可以作为适应盐度变化的标志。盐度的波动会引起鳃结构的变化,严重的会引起鳃组织出现器质性损伤,从而影响贝类的滤水效率、呼吸功能及渗透压调节能力^[32]。Musa 等^[33]在艾氏牡蛎(*C. iredalei*)的研究中,观察到低盐度会导致鳃丝出现吸水肿胀,并会出现坏死和结构破裂。王怡等^[34]在对紫石房蛤(*Saxidomus purpurata*)鳃组织的研究中发现,低盐时鳃丝皱缩和鳃丝间距增大。本研究显示,福建牡蛎鳃组织在盐度 13.5 胁迫 24 h 后,并未发生显著变化,这可能与其快速的渗透压调节相关;但在低盐胁迫 168 h 后,鳃丝开始出现明显的细胞膨胀、额纤毛和侧生纤毛脱落现象。这些结构损伤可能影响鳃的滤食、呼吸和离子调节功能,进而导致个体生理功能整体下降。类似结果在硬壳蛤中亦有报道^[16]。纤毛脱落可能与细胞骨架蛋白解聚或凋亡通路激活有关,而上皮细胞肿胀则可能是水通道蛋白调控失常的表现。后续研究可结合透射电镜与组学技术,进一步揭示低盐胁迫下鳃细胞的超微结构变化与分子调控网络。

4 小结

本研究通过设置不同盐度梯度,系统探究福建牡蛎成贝、幼贝及繁殖阶段对低盐胁迫的耐受性,结

果表明, 福建牡蛎对低盐胁迫的耐受性存在显著的发育阶段差异, 幼贝(7 d-LS₅₀ = 9.5)较成贝(7 d-LS₅₀ = 13.5)更具耐受能力; 低盐环境(盐度小于 14)会严重抑制其受精与孵化过程, 繁殖适宜盐度为 23~27; 福建牡蛎为典型的渗透压随变者, 血淋巴渗透压随环境盐度快速变化, 长期低盐会导致鳃组织损伤。本研究明确了福建牡蛎低盐耐受限度与适应机制, 可为其健康养殖、种质保护及极端低盐灾害防控提供理论依据。

参考文献:

- [1] 罗芳, 王玉珏, 石雅君, 等. 中国四个河口潮间带甲藻孢囊多样性研究[J]. 海洋科学, 2024, 48(4): 30-44. LUO Fang, WANG Yujue, SHI Yajun, et al. Study on the diversity of dinoflagellate cysts in the four estuary intertidal zones of China[J]. Marine Sciences, 2024, 48(4): 30-44.
- [2] Xiao S, Wong N K, Li J, et al. Analysis of *in situ* transcriptomes reveals divergent adaptive response to hyper- and hypo-salinity in the Hong Kong Oyster, *Crassostrea hongkongensis*[J]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 1491.
- [3] 汤秋鸿, 陈德亮. 全球变化加剧水循环失衡与水资源危机[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(9): 3209-3212. TANG QiuHong, CHEN Deliang. Global change exacerbates water cycle imbalances and intensifies water resource crises[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2025, 55(9): 3209-3212.
- [4] CHENG L, TRENBERTH K E, GRUBER N, et al. Improved estimates of changes in upper ocean salinity and the hydrological cycle[J]. Journal of Climate, 2020, 33(23): 10357-10381.
- [5] DU J, PARK K, JENSEN C, et al. Massive oyster kill in Galveston Bay caused by prolonged low-salinity exposure after Hurricane Harvey[J]. Science of The Total Environment, 2021, 774: 145132.
- [6] ASTUDILLO J C, BONEBRAKE T C, LEUNG K M Y. The recently introduced bivalve *Xenostrobus securis* has higher thermal and salinity tolerance than the native *Brachidontes variabilis* and established *Mytilopsis sallei*[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 118(1): 229-236.
- [7] MENG X L, DONG Y W, DONG S L, et al. Mortality of the sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka, exposed to acute salinity decrease and related physiological responses: Osmoregulation and heat shock protein expression[J]. Aquaculture, 2011, 316(1): 88-92.
- [8] 余利海, 甄秀维, 陈雅琦, 等. 台风“杜苏芮”对天津海域经济贝类的影响研究[J]. 天津农学院学报, 2025, 32(1): 51-55.
- [9] YU Lihai, ZHEN Xiuya, CHEN Yaqi, et al. Impact of typhoon “Doksuri” on economic shellfish from Tianjin sea area[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2025, 32(1): 51-55.
- [9] O'CONNOR S, MOLTSCHANIWSKYJ N, BOLCH C J S, et al. Assessment of temperature or salinity effects on larval development by catecholamine-induced metamorphosis of hatchery-reared flat oyster, *Ostrea angasi* (Sowerby 1871) larvae[J]. Aquaculture Research, 2015, 46(10): 2501-2511.
- [10] WANG T, LI Q, ZHANG J X, et al. Effects of salinity, stocking density, and algal density on growth and survival of Iwagaki oyster *Crassostrea nippona* larvae[J]. Aquaculture International, 2018, 26(4): 947-958.
- [11] SAYCO S L G, CONACO C, NEO M L, et al. Reduced salinities negatively impact fertilization success and early larval development of the giant clam *Tridacna gigas* (Cardiidae: Tridacninae)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2019, 516: 35-43.
- [12] LEGAT J F A, PUCHNICK-LEGAT A, GOMES C H A D M, et al. Effects of salinity on fertilization and larviculture of the mangrove oyster, *Crassostrea gasar* in the laboratory[J]. Aquaculture, 2017, 468: 545-548.
- [13] TAN S H, WONG T M. Effect of salinity on hatching, larval growth, survival and settling in the tropical oyster *Crassostrea belcheri* (Sowerby)[J]. Aquaculture, 1996, 145(1): 129-139.
- [14] SANTOS J J S, BERNARDES J P, RAMÍREZ J R B, et al. Effect of salinity on embryo-larval development of yellow clam *Mesodesma mactroides* (Reeve, 1854) in laboratory[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2020, 92(Suppl 1): e20190169.
- [15] GONG J W, LI Q, YU H, et al. Effects of low salinity on hemolymph osmolality and transcriptome of the Iwagaki oyster, *Crassostrea nippona*[J]. Fish and Shellfish Immunology, 2022, 126: 211-216.
- [16] ZHOU C, SONG H, FENG J, et al. Metabolomics and biochemical assays reveal the metabolic responses to hypo-salinity stress and osmoregulatory role of cAMP-PKA pathway in *Mercenaria mercenaria*[J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2022, 20: 4110-4121.
- [17] 侯西坦, 廖梅杰, 李彬, 等. 刺参 4 个不同选育品系幼参对低盐胁迫的耐受及生理生化响应[J]. 海洋科学, 2016, 40(5): 19-28. HOU Xitan, LIAO Meijie, LI Bin, et al. Response to low salinity of four strains of sea cucumber *Apostichopus japonicus* larvae[J]. Marine Sciences, 2016, 40(5): 19-28.
- [18] 丁鉴锋, 王锐, 闫喜武, 等. 菲律宾蛤仔 3 种壳色群体低盐耐受能力的比较研究[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 32(1): 51-55.

- 2013, 28(3): 264-268.
- DING Jianfeng, WANG Rui, YAN Xiwu, et al. Comparative tolerance to low salinity stress in Manila clam *Ruditapes philippinarum* with three shell colors[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(3): 264-268.
- [19] 安思琪, 何琳, 范建勋, 等. 盐度胁迫对缢蛏渗透压、游离氨基酸及肌肽合成酶基因的影响[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 97-111.
- AN Siqi, HE Lin, FAN Jianxun, et al. Effects of salinity stress on osmotic pressure, free amino acid levels, and the carnosine synthetase gene of *Sinonovacula constricta*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(4): 97-111.
- [20] LA PEYRE M K, EBERLINE B S, SONIAT T M, et al. Differences in extreme low salinity timing and duration differentially affect eastern oyster (*Crassostrea virginica*) size class growth and mortality in Breton Sound, LA[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 135: 146-157.
- [21] LI A, DAI H, GUO X M, et al. Genome of the estuarine oyster provides insights into climate impact and adaptive plasticity[J]. Communications Biology, 2021, 4(1): 1287.
- [22] MAYNARD A, BIBLE J M, PESPENI M H, et al. Transcriptomic responses to extreme low salinity among locally adapted populations of Olympia oyster (*Ostrea lurida*)[J]. Molecular Ecology, 2018, 27(21): 4225-4240.
- [23] MCFARLAND K, VIGNIER J, STANDEN E, et al. Synergistic effects of salinity and temperature on the eastern oyster *Crassostrea virginica* throughout the lifespan[J]. Marine Ecology Progress Series, 2022, 700: 111-124.
- [24] PAUL J D. Salinity-temperature relationships in the queen scallop *Chlamys opercularis*[J]. Marine Biology, 1980, 56(4): 295-300.
- [25] 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 Jing. Effects of temperature and salinity on survival, immune indexes and physiological indexes of *Mimachlamys nobilis* Reeve[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2016.
- [26] 彭茂潇. 缢蛏对内陆水域重要水环境因子耐受性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- PENG Maoxiao. Study on tolerance of Chinese Razor Clam (*Sinonovacula constricta*) to important water environmental factors in inland waters[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [27] YUAN W S, WALTERS L J, BRODSKY S A, et al. Synergistic effects of salinity and temperature on the survival of two nonnative bivalve molluscs, *Perna viridis* (Linnaeus 1758) and *Mytella charruana* (d'Orbigny 1846)[J]. Journal of Marine Biology, 2016, : 9261309.
- [28] 唐冬梅. 不同发育阶段华贵栉孔扇贝橙色和褐色品系对盐度胁迫的响应[D]. 汕头: 汕头大学, 2014.
- TANG Dongmei. The response of orange and brown strains of *Chlamys nobilis* at different developmental stages to salinity stress[D]. Shantou: Shantou University, 2014.
- [29] 范超, 温子川, 霍忠明, 等. 盐度胁迫对不同发育时期菲律宾蛤仔生长和存活的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(5): 497-504.
- FAN Chao, WEN Zichuan, HUO Zhongming, et al. Influence of salinity stress on growth and survival of Manila clam *Ruditapes philippinarum* at various developmental stages[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(5): 497-504.
- [30] 李阳春, 王昭萍, 马培振, 等. 低盐处理对长牡蛎胚胎发育及氧化应激、能量供应和渗透调节相关酶的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(10): 19-25.
- LI Yangchun, WANG Zhaoping, MA Peizhen, et al. Effect of hypotonic induction on embryonic development, energy metabolism, oxidation resistant and osmoregulation in Pacific Oyster *Crassostrea gigas*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(10): 19-25.
- [31] 陈洪发, 王昭萍, 于瑞海, 等. 不同盐度海水对低盐诱导长牡蛎三倍体的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(9): 24-28.
- CHEN Hongfa, WANG Zhaoping, YU Ruihai, et al. Effect of salinity on the induction of triploid oyster(*Crassostrea gigas*)[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(9): 24-28.
- [32] TAN K, YAN X Y, JULIAN R, et al. Effects of climate change induced hyposalinity stress on marine bivalves[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2023, 294: 108539.
- [33] NADIRAH M, NURHAFIZAH W W I, ALIA A S, et al. Salinity stress responses in Slipper cupped oyster *Crassostrea iredalei* from Setiu Wetlands, Terengganu, Malaysia[J]. Journal of Environmental Biology, 2018, 39(5): 754-760.
- [34] 王怡, 胡婉彬, 李家祥, 等. 急性盐度胁迫对紫石房蛤 (*Saxidomus purpurata*)鳃组织结构及 4 种酶活性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(5): 178-186.
- WANG Yi, HU Wanbin, LI Jiaxiang, et al. Effects of acute salinity stress on gill structure and four enzyme activities in *Saxidomus purpurata*[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(5): 178-186.

Low-salinity tolerance in adult and juvenile *Crassostrea angulata*

XUE Haibo¹, QIN Kairui², SHI Bo^{2, 3}, GUO Tuanyu¹, MIAO Xiongping¹,
QUE Huayong^{2, 3}

(1. Xiamen Ocean Vocational College, Applied Technology Engineering Center of Fujian Provincial Higher Education for Marine Resource Protection and Ecological Governance, Xiamen Key Laboratory of Intelligent Fishery, Xiamen 361100, China; 2. Fisheries College, Jimei University, Key Laboratory of Mariculture for the East China Sea, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fujian Engineering Research Center of Aquatic Breeding and Healthy Aquaculture, Xiamen 361021, China; 3. State Key Laboratory of Mariculture Breeding, Xiamen 361021, China)

Received: Sep. 29, 2025

Key words: *Crassostrea angulata*; low-salinity stress; salinity tolerance

Abstract: To explore the tolerance of *Crassostrea angulata* to low-salinity stress, this study systematically analyzed the effects of low-salinity stress on the survival, reproductive capacity, hemolymph osmoregulation, and gill tissue structure of adult and juvenile oysters by setting up a salinity gradient. The results indicated significant differences in the tolerance levels of *C. angulata* across developmental stages. For adults, the 7-day median lethal salinity (LS₅₀) was 13.5, with a sublethal salinity threshold of 19; for juveniles, these respective values were 9.5 and 14, indicating that juveniles were more tolerant. Salinity below 14 severely inhibited fertilization and hatching; the optimal salinity range for reproduction was 23–27. The hemolymph osmotic pressure equalized with that of the environment within 12 h of stress exposure, suggesting that this species is a typical osmoconformer. Long-term low-salinity stress damaged gill tissues, which manifested as a widening of the interlamellar space, swelling of apical cells, and detachment of cilia. This study clarifies the low-salinity tolerance limits of *C. angulata* at different life stages and the underlying physiological response mechanisms. It provides a scientific basis for healthy aquaculture, germplasm resource protection, and disaster prevention and control in estuarine and coastal areas.

(本文编辑: 杨 悦)