

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0153

低盐胁迫对四角蛤蜊呼吸代谢的影响机制

邵晓娟, 管子谊, 王静恒, 刘文珂, 钟 森,
霍忠明, 王 华

(大连海洋大学 水产与生命学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要:四角蛤蜊 (*Macra veneriformis*) 是我国重要的滩涂养殖贝类之一, 低盐会对其呼吸代谢产生重要影响。本研究以盐度为 30 的天然海水为对照, 设置海水盐度分别为 25、20 和 15 进行低盐胁迫试验, 结合组织学观察、 Na^+/K^+ -ATP 酶活性测定及代谢组学分析, 系统评估低盐胁迫下四角蛤蜊的生理响应。结果表明, 当盐度为 15 时, 四角蛤蜊鳃组织出现呼吸上皮细胞脱落、鳃小片肿胀、细胞排列紊乱及鳃丝皱缩等病理变化, 且在 24 °C 条件下的损伤程度高于 10 °C。四角蛤蜊鳃的 Na^+/K^+ -ATP 酶活性随盐度降低而下降, 并在 24 °C 条件下的下降幅度高于 10 °C。代谢组学分析共检测到 1391 种代谢物, 筛选得到的差异代谢物主要富集于氨基酸代谢、能量代谢和脂质代谢通路, 表明低盐胁迫可能通过扰动能量供给与物质代谢, 影响四角蛤蜊的呼吸代谢稳态。本研究结果可为四角蛤蜊滩涂养殖环境监测预警提供科学依据。

关键词: 四角蛤蜊; 温度; 盐度; 呼吸代谢; 影响

中图分类号: S968.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)03-0352-11

Effects of low salinity stress on the respiratory metabolism of *Macra veneriformis*

Shao Xiaojuan, Guan Ziyi, Wang Jingheng, Liu Wenke, Zhong Miao,
Huo Zhongming, Wang Hua

(College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Low salinity is a common environmental stress in intertidal aquaculture and exerts significant effects on the respiratory metabolism of bivalves. To elucidate the mechanisms underlying the impact of low salinity on the respiratory metabolism of *Macra veneriformis*, we conducted experiments using natural seawater at salinity 30 as the control and set salinity gradients of 25, 20, and 15. Histological examination, Na^+/K^+ -ATPase activity assays, and metabolomic profiling were employed to assess the physiological responses of clams under low-salinity stress. The results showed that at salinity 15, gill tissues exhibited pathological changes such as epithelial cell detachment, lamellar swelling, cell disarrangement, and partial gill filament shrinkage, with more severe damage observed at 24 °C than at 10 °C. Na^+/K^+ -ATPase activity decreased with declining salinity, and overall activities were higher at 24 °C than at 10 °C. Metabolomic analysis identified 1,391 metabolites, with differentially expressed metabolites mainly enriched in amino acid, energy, and lipid metabolism pathways. These findings suggest that low salinity disrupts energy supply and metabolic homeostasis, thereby impairing

收稿日期: 2025-10-17, 修订日期: 2025-12-08

基金项目: 现代农业产业技术体系专项 (CARS-49); 辽宁省科技计划联合计划项目 (2024JH2/102600088)

作者简介: 邵晓娟 (2000—), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要研究方向为水生生物学, E-mail: 1658645535@qq.com

管子谊 (2000—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境化学, E-mail: 1031073363@qq.com

通信作者: 霍忠明 (1984—), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 主要研究方向为贝类增养殖学, E-mail: huozm@dlou.edu.cn

王 华 (1973—), 男, 辽宁铁岭人, 博士, 教授, 主要研究方向为养殖水环境化学, E-mail: wanghua@dlou.edu.cn

the respiratory metabolism of *Macra veneriformis*. This study provides new insights into the physiological responses of clams under salinity stress and offers scientific support for environmental regulation and sustainable aquaculture practices in intertidal zones.

Key words: *Macra veneriformis*; temperature; salinity; respiratory metabolism; impact

四角蛤蜊(*Macra veneriformis*)隶属于软体动物门(Mollusca)、双壳纲(Bivalvia)、帘蛤目(Veneroida)、蛤蜊科(Mactridae)、蛤蜊属(*Macra*),是我国重要的滩涂养殖贝类之一^[1],主要分布于辽宁、山东、江苏等沿海地区,特别是在有淡水注入的沙质和泥沙质的滩涂分布更为集中^[2-4]。滩涂养殖环境的波动往往对其生长发育及代谢过程产生影响,其中呼吸代谢作为生物能量学研究的重要内容而受到关注^[5]。已有研究表明,随着溶解氧浓度下降和胁迫时间延长,四角蛤蜊死亡率升高,抗氧化指标及呼吸相关酶活性显著变化^[6]。特别是,盐度变化会对四角蛤蜊的呼吸代谢产生影响,四角蛤蜊的耗氧率会随盐度降低而下降,排氨率则呈先升高后下降的趋势^[7]。

海水盐度受地理位置(河口、潮间带、近岸与远洋)及时间变化(潮汐、降雨、季节更迭)等因素影响,频繁波动对贝类存活和代谢均构成压力。当贝类处于非适宜盐度区间时,可能表现为运动迟缓、应激反应减弱及渗透压调节紊乱,严重时甚至出现死亡现象^[8-11]。相关研究也表明,盐度对四角蛤蜊的生长速率和摄食效率造成不利影响^[12-13],盐度波动亦会显著改变其滤水率^[14]。尽管已有研究揭示了盐度变化对四角蛤蜊生理和行为的影响,但关于低盐胁迫其呼吸代谢机制的研究较为有限。鉴于此,本研究以四角蛤蜊为研究对象,采用组织学、酶学和代谢组学方法,探讨低盐对其呼吸代谢的影响机制,以期为滩涂养殖环境调控及健康养殖提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用四角蛤蜊购自大连龙王塘海鲜市场,平均壳长为(46.5±1.3)mm,壳宽为(36.4±1.2)mm,壳高为(43.3±1.1)mm。实验前将健康且规格整齐的个体于实验室暂养7 d,其间置于充气养殖槽中(24 h连续曝气),每日全量换水,并投喂适量小球藻藻膏(盘锦光合蟹业有限公司提供)。

实验用海水取自大连市黑石礁近岸海域,经砂滤与紫外消毒处理后使用,其盐度为29.6±0.5, pH为8.0±0.2。

1.2 实验方法

实验在可控温的水生生物呼吸代谢测量系统中进行,设置水温24℃和10℃两个水平,以天然海水(盐度为30)为对照,分别将盐度调节至25、20和15作为处理组。各处理组的水体积为2 L,投放四角蛤蜊5只,每组设置3个重复,实验持续4 h。

实验结束后,将贝壳与软体分离,软体组织于70℃烘干24 h后称重。各组随机取3只四角蛤蜊,取鳃组织固定于4%多聚甲醛溶液中24 h,经70%乙醇洗涤3次,梯度脱水、透蜡、石蜡包埋后,切片厚度为5 μm。切片经展片、脱蜡及苏木精-伊红(H&E)染色处理,梯度乙醇脱水后以中性树脂封片,在光学显微镜下观察组织形态学变化。鳃丝组织Na⁺/K⁺-ATP酶活性采用北京索莱宝科技有限公司试剂盒,按说明书测定。

代谢物测定:鳃丝样品于4℃解冻,称取100 mg组织加入甲醇-乙腈-水(2:2:1),涡旋混合后低温超声30 min, -20℃静置10 min,经14000×g、4℃离心20 min,取上清液用于检测。LC-MS采用正/负离子双模式切换扫描,以提高代谢物覆盖度。代谢物数据经质控和标准化处理后筛选差异代谢物(DEMs),并结合京都基因与基因组百科全书(KEGG)数据库进行功能注释与通路富集分析。

1.3 数据处理

实验数据采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(ANOVA),多重比较采用Duncan法,显著性水平设定为 $p<0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 低盐对四角蛤蜊鳃组织结构的影响

在水温为10℃和24℃条件下,盐度变化对鳃组织结构影响显著(图1)。对照组的鳃组

织完整,呼吸上皮细胞排列规则,细胞结构正常(图1a)。当水温为10℃、盐度为15时,鳃丝弯曲且呼吸上皮细胞明显脱落,鳃小片上皮细胞排列紊乱并出现轻微肿胀(图1b)。在水温为24℃、

盐度为15条件下,鳃组织损伤更为严重,表现为鳃丝收缩、呼吸上皮细胞脱落及鳃丝间距显著增宽(图1c)。结果表明,温度升高可能加重低盐对鳃组织的损伤。

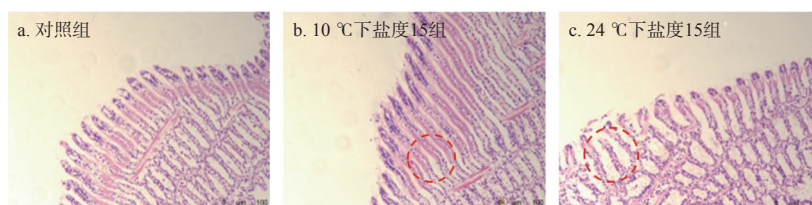


图1 水温10℃和24℃条件下低盐胁迫对四角蛤蜊鳃组织结构影响

Fig. 1 Effects of low salinity stress on gill tissue structure of *Mactra veneriformis* at water temperatures of 10℃ and 24℃

2.2 低盐度对鳃组织 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的影响

Na^+/K^+ -ATP 酶活性随盐度下降显著降低(图2)。在水温为10℃条件下,盐度为30、25、20、15的处理组的四角蛤蜊鳃组织 Na^+/K^+ -ATP 酶活性分别为1.680 U/(mg·prot)、1.184 U/(mg·prot)、0.679 U/(mg·prot)和0.284 U/(mg·prot);单因素方差分析显示,盐度为30的对照组显著高于盐度为15和20的处理组($p<0.05$),盐度为25与盐度为15的处理组亦显著不同($p<0.05$)。在水温为24℃条件下,盐度为30、25、20、15

的处理组的四角蛤蜊鳃组织 Na^+/K^+ -ATP 酶活性分别为2.993 U/(mg·prot)、2.413 U/(mg·prot)、1.885 U/(mg·prot)和1.149 U/(mg·prot),盐度为30的对照组与其他处理组差异显著($p<0.05$)。在相同盐度条件下,24℃下的 Na^+/K^+ -ATP 酶活性高于10℃,表明温度升高可能增强酶促反应。

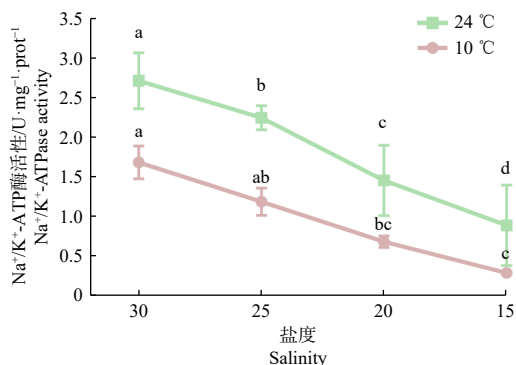
2.3 低盐对鳃组织代谢组学的影响

2.3.1 代谢物鉴定

经LC-MS分析,在正负离子模式下共检测到1391个代谢峰,其中正离子模式856个、负离子模式535个。经KEGG、HMDB和LIPID MAPS数据库注释,共获得1287个代谢物,其中,HMDB 522个、KEGG 467个、LIPID MAPS 298个。

2.3.2 水温10℃条件下差异代谢物分析

在水温10℃条件下,基于LC-MS非靶向代谢组学数据,对四角蛤蜊鳃组织样本进行主成分分析(PCA),对照组与盐度为25、20、15处理组的四角蛤蜊鳃组织代谢物明显分离(图3a—图3c),运用偏最小二乘判别分析(PLS-DA)验证(图3d—图3f),表明盐度对鳃组织代谢组有显著影响。进一步分析确定对照组与处理组之间的DEMs,其火山图如图4所示。结果表明,相较对照组,盐度为25的处理组检测到28种DEMs,其中23种上调(磷脂类、二肽类),5种下调(酚酸类、含氮杂磷脂类环化合物);盐度为20的处理组检测到162种DEMs,其中136种上调(磷脂类、脂肪酸类),26种下调(苯环类、神经酰胺类);盐度为15的处理组检测到78种DEMs,其中51种



注:同列(行)中标有不同小写字母者表示组间有显著性差异($p<0.05$),标有相同小写字母者表示组间无显著性差异($p>0.05$)

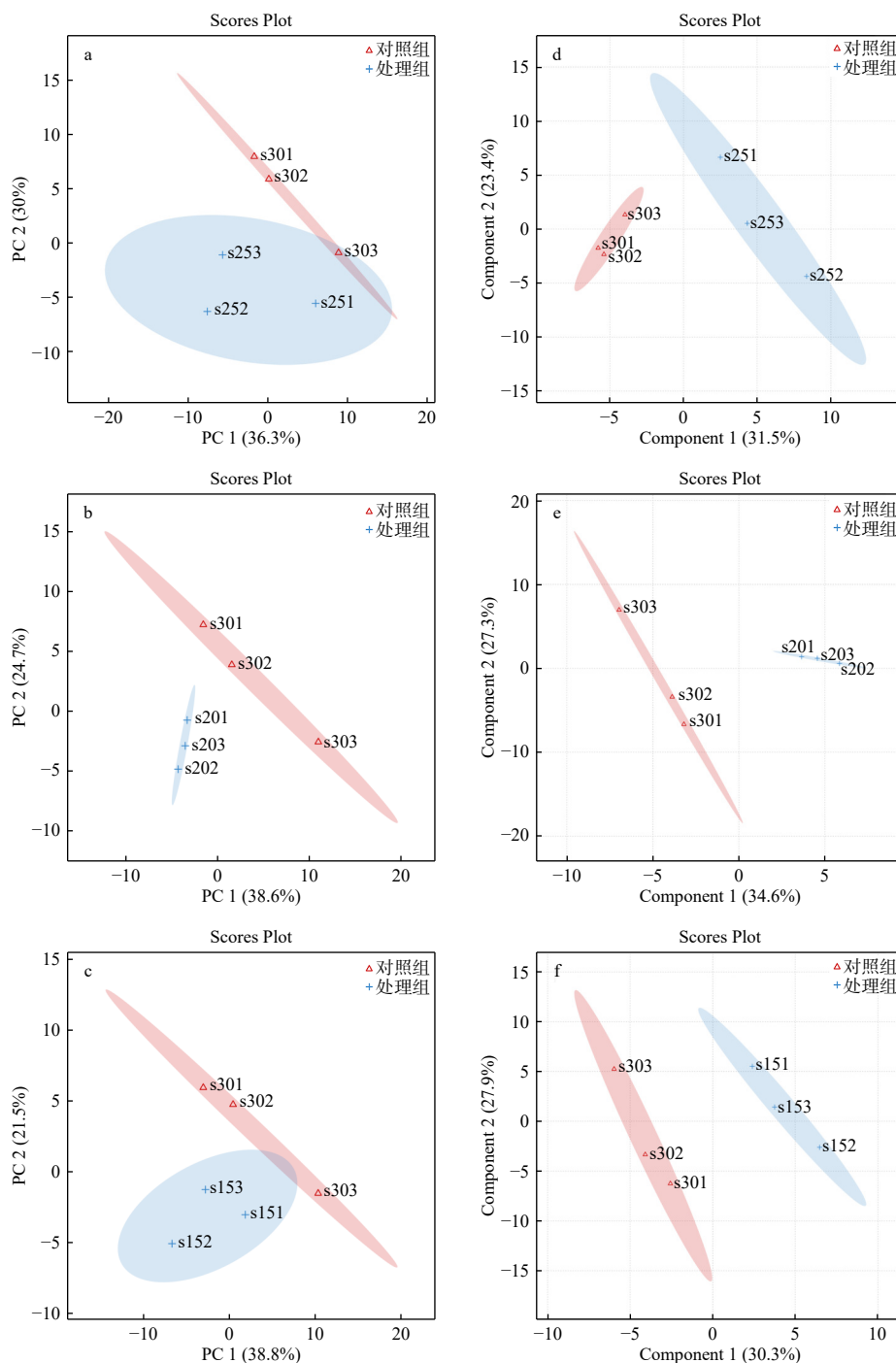
Note: The means with different letters within the same column(line) are significant differences at the 0.05 probability level, and the means with the same letters within the same column(line) are not significant differences

图2 水温10℃和24℃条件下低盐胁迫对四角蛤蜊 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的影响

Fig. 2 Effects of Low-Salinity Stress on Na^+/K^+ -ATPase Activity in *Mactra veneriformis* at 10℃ and 24℃

上调(磷脂类), 27 种下调(苯环类、神经酰胺类)。图 5 为 KEGG 富集分析, 盐度为 20 的处理组显著通路包括组氨酸与嘌呤衍生物碱生物

合成、嘌呤代谢及氨酰-tRNA 生物合成; 盐度为 15 的处理组显著富集通路为赖氨酸生物合成、GPI 锚定生物合成及组氨酸代谢($p < 0.05$)。

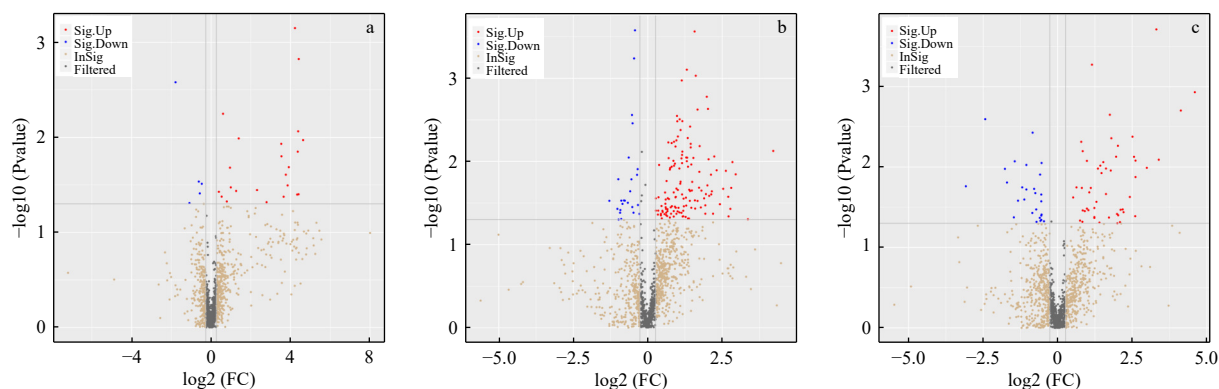


注: a/d 为对照组与盐度 25 的处理组; b/e 为对照组与盐度 20 的处理组; c/f 为对照组与盐度 15 的处理组

Note: a/d is Control vs. Salinity 25; b/e is Control vs. Salinity 20; c/f is Control vs. Salinity 15

图 3 水温 10 °C 条件下低盐胁迫对四角蛤蜊样品的代谢物分布主成分分析 (PCA, a-c) 和偏最小二乘判别分析 (PLS-DA, d-f) 得分

Fig. 3 PCA (a-c) and PLS-DA (d-f) for metabolite profiles of *Mactra veneriformis* exposed to low-salinity stress at 10 °C



注: a 为对照组与盐度 25 处理组; b 为对照组与盐度 20 处理组; c 为对照组与盐度 15 处理组; 图中数据点的颜色对应不同代谢物类别, 红色标识满足差异倍数及 P-value 双阈值的显著上调代谢物, 蓝色代表同时满足双阈值的显著下调代谢物, 灰色表示未达到差异倍数筛选阈值的代谢物, 黄褐色则标记仅满足差异倍数阈值但 P-value 未达到显著水平的代谢物

Note: a is Control vs. Salinity 25; b is Control vs. Salinity 20; c is Control vs. Salinity 15; in the volcano plot, the color of data points indicates the category of metabolites, Red is significantly upregulated metabolites meeting both fold change and P-value thresholds, Blue is significantly downregulated metabolites meeting both fold change and P-value thresholds, Gray is metabolites not meeting the fold change screening threshold, Tan is metabolites meeting the fold change threshold but not the P-value threshold

图 4 水温 10 °C 条件下低盐胁迫对四角蛤蜊样品代谢物的分布火山图

Fig. 4 Volcano plot of metabolite distribution in *Mactra veneriformis* under low-salinity stress at 10 °C

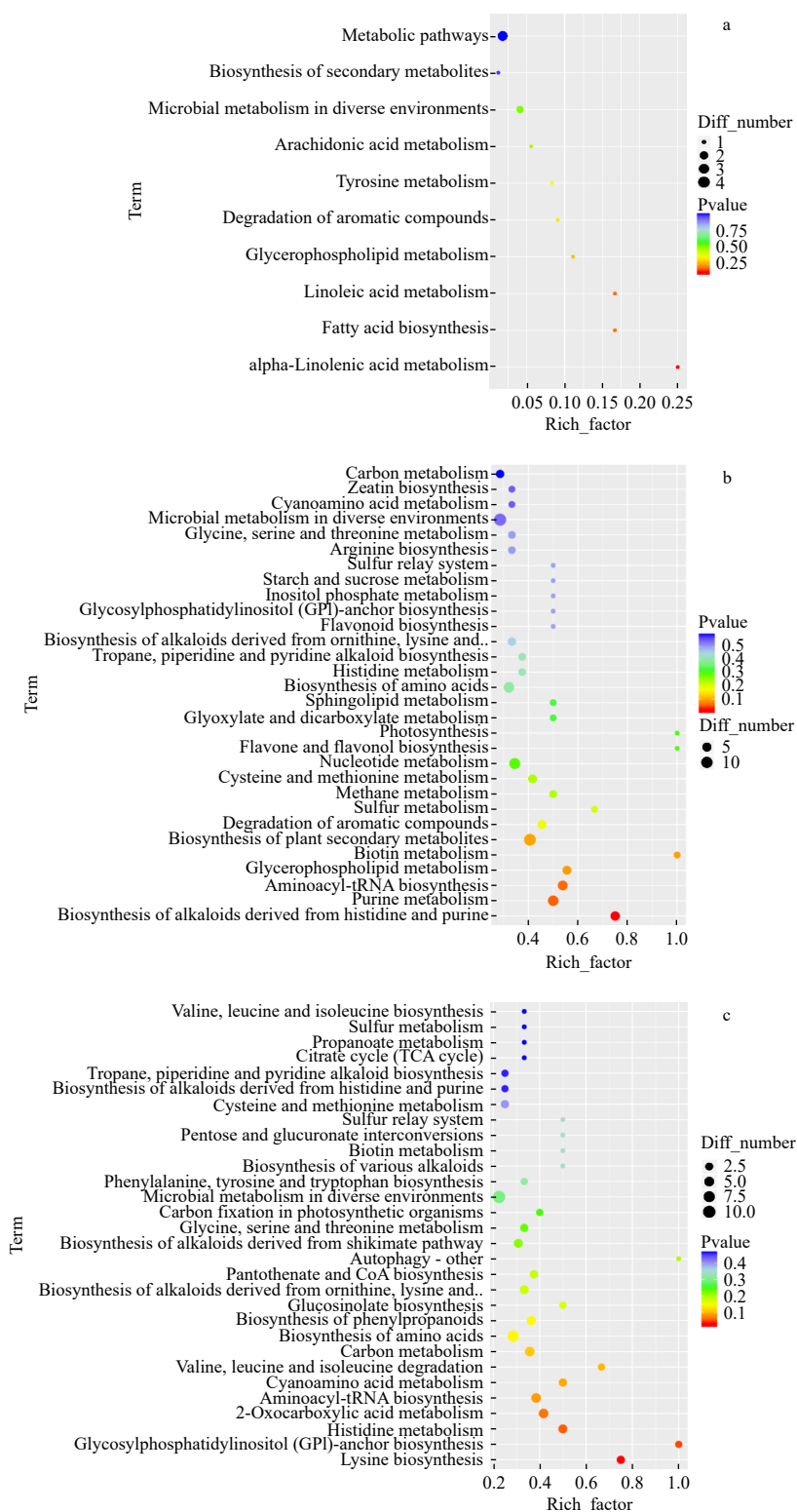
2.3.3 水温 24 °C 条件下差异代谢物分析

在水温为 24 °C 条件下, PCA 与 PLS-DA 分析显示, 对照组与各盐度处理组代谢物明显分离 (图 6), 说明盐度对鳃组织代谢组具有显著影响。进一步分析鉴定对照组与处理组的 DEMs 差异, 对应的火山图如图 7 所示。结果表明, 盐度为 25 的处理组检测到 221 种 DEMs, 其中 122 种上调(磷脂类、黄酮、萜类), 99 种下调(氨基酸及其衍生物、短链酰基肉碱); 盐度为 20 的处理组检测到 75 种 DEMs, 其中 21 种上调(脂质、氨基酸及其衍生物), 54 种下调(脂质、氨基酸); 盐度为 15 的处理组检测到 118 种 DEMs, 其中 58 种上调(磷脂类、萜类、生物碱、黄酮、脂肪酸酰胺), 60 种下调(核苷、鞘脂、有机酸)。KEGG 富集分析显示, 盐度为 25、20、15 的处理组分别影响 30、10、17 个通路, 其中类黄酮生物合成、类固醇生物合成及甘油磷脂代谢显著富集($p < 0.05$) (图 8)。

2.4 低盐对四角蛤蜊呼吸代谢的影响机制

本研究系统揭示了低盐胁迫对四角蛤蜊鳃组织结构及呼吸代谢的影响, 并分析了温度在调控低盐胁迫中的作用。实验结果显示, 在盐度

为 15 的条件下, 鳃丝弯曲且上皮细胞明显脱落, 鳃小片排列紊乱, 鳃丝间距显著增宽, 部分鳃丝出现皱缩现象。此外, 24 °C 条件下的组织损伤程度明显高于 10 °C, 提示温度升高可能加重低盐对鳃组织的损伤。贝类具有滤食的特点, 鳃作为贝类的主要呼吸器官, 不仅承担呼吸、摄食和排泄功能, 还在调节体内外渗透压平衡中起核心作用^[15-17]。在低盐环境下, 外界渗透压下降导致水分大量进入鳃上皮细胞, 引起细胞膨胀、鳃丝排列紊乱及上皮细胞损伤, 从而阻碍呼吸与过滤功能。类似现象在其他双壳贝类中也有报道, 例如, 贻贝 (*Mytilus galloprovincialis*) 在低盐条件下表现为上皮肿胀、血窦扩张及血细胞浸润^[18]; 菲律宾蛤仔在低盐条件下出现鳃丝松散、褶皱消失及纤毛活动停滞^[13]; 缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 在低盐条件下出现鳃丝肿胀、鳃腔扩张和鳃体体积增大^[19]。值得注意的是, 在实际河口养殖环境中, 低盐胁迫往往并非单独存在, 而是与缺氧、污染物等环境因子共存, 形成复合胁迫。已有研究报道表明, 在低盐度和高浓度亚硝酸盐氮胁迫下, 四角蛤蜊鳃丝结构出现鳃小片间隙扩张、鳃丝弯曲且收缩肿胀、部分鳃间隔细胞脱落等现

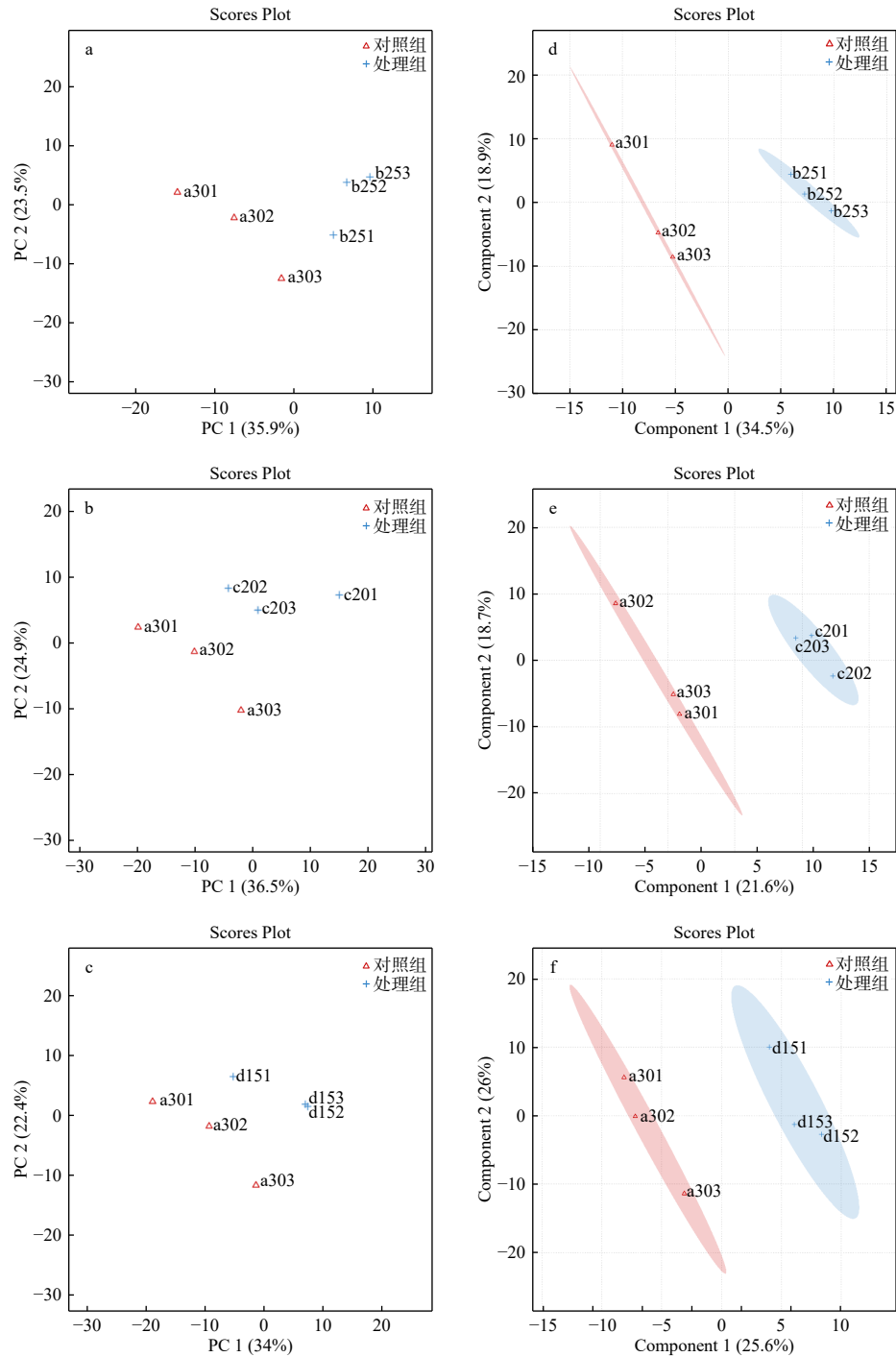


注: a 为对照组与盐度 25 处理组; b 为对照组与盐度 20 处理组; c 为对照组与盐度 15 处理组

Note: a is Control vs. Salinity 25; b is Control vs. Salinity 20; c is Control vs. Salinity 15

图 5 水温 10 °C 条件下低盐胁迫对四角蛤蜊样品差异代谢物的 KEGG 通路富集分析气泡图

Fig. 5 Bubble plot of KEGG pathway enrichment analysis for differential metabolites in *Macrta veneriformis* under low-salinity stress at 10 °C



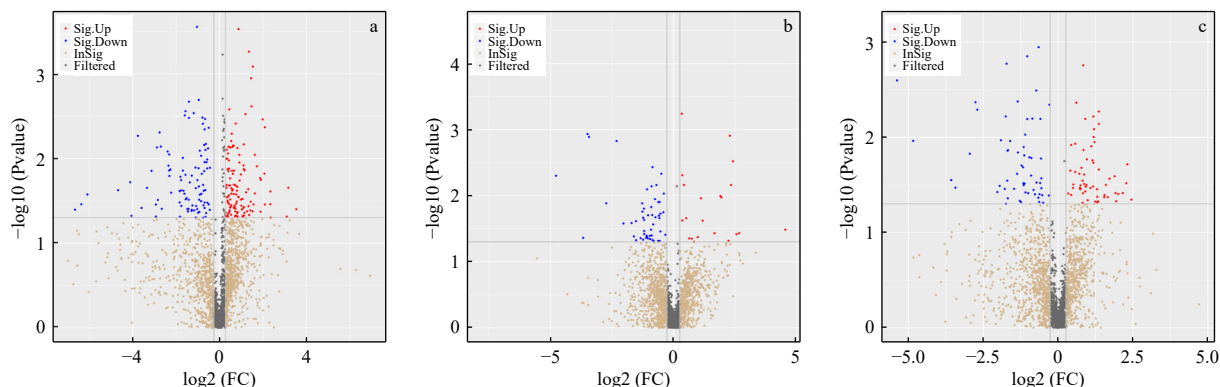
注: a/d 为对照组与盐度 25 处理组; b/e 为对照组与盐度 20 处理组; c/f 为对照组与盐度 15 处理组
Note: a/d is Control vs. Salinity 25; b/e is Control vs. Salinity 20; c/f is Control vs. Salinity 15

图 6 水温 24 °C 条件下低盐胁迫对四角蛤蜊样品的代谢物分布主成分分析 (PCA, a–c) 和偏最小二乘判别分析 (PLS-DA, d–f) 得分

Fig. 6 PCA (a–c) and PLS-DA (d–f) for metabolite profiles of *Mactra veneriformis* exposed to low-salinity stress at 24 °C

象^[7]。这些结果显示,低盐对鳃组织结构的破坏具有广泛性和规律性,其严重程度可能受温度、盐度幅度及暴露时间等因素共同影响。

Na⁺/K⁺-ATP 酶活性测定进一步揭示了低盐胁迫对呼吸代谢及渗透调节的影响。实验结果显示,鳃组织 Na⁺/K⁺-ATP 酶活性随盐度下降呈



注:a 为对照组与盐度 25 处理组;b 为对照组与盐度 20 处理组;c 为对照组与盐度 15 处理组;图中数据点的颜色对应不同代谢物类别,红色标识满足差异倍数及 P-value 双阈值的显著上调代谢物,蓝色代表同时满足双阈值的显著下调代谢物,灰色表示未达到差异倍数筛选阈值的代谢物;黄褐色则标记仅满足差异倍数阈值但 P-value 未达显著水平的代谢物

Note: a is Control vs. Salinity 25; b is Control vs. Salinity 20; c is Control vs. Salinity 15; in the volcano plot, the color of data points indicates the category of metabolites, Red is significantly upregulated metabolites meeting both fold change and P-value thresholds, Blue is significantly downregulated metabolites meeting both fold change and P-value thresholds, Gray is metabolites not meeting the fold change screening threshold, Tan is metabolites meeting the fold change threshold but not the P-value threshold

图 7 水温 24 °C 条件下低盐胁迫对四角蛤蜊样品代谢物的分布火山图

Fig. 7 Volcano plot of metabolite distribution in *Mactra veneriformis* under low-salinity stress at 24 °C

显著降低趋势,而在 24 °C 条件下的 Na^+/K^+ -ATP 酶活性普遍高于 10 °C。 Na^+/K^+ -ATP 酶广泛存在于生物膜系统中,既是膜蛋白载体,又具有酶活性,通过 ATP 水解提供能量,驱动离子转运,维持细胞内外渗透压平衡^[20-21]。盐度下降引起细胞外渗透压降低,水分涌入细胞,导致细胞膨胀、膜张力增大,从而抑制酶活性。温度升高可加快酶促反应速度,提高 ATP 水解及离子泵驱动力,部分缓解低盐对酶活性的抑制作用^[22]。由此可见,鳃组织形态学损伤与 Na^+/K^+ -ATP 酶活性下降之间存在密切联系:低盐通过破坏鳃丝微结构和抑制离子泵活性,削弱渗透调节和呼吸代谢能力,从而影响贝类整体生理状态。该结果与缢蛏、魁蚶(*Scapharca broughtonii*)及西施舌(*Coelomactra antiquata*)等双壳贝类在低盐条件下 Na^+/K^+ -ATP 酶活性变化的规律一致。说明低盐胁迫对离子转运调控具有普遍适用性^[23-25]。

2.5 四角蛤蜊在低盐胁迫下的生理调控机制

代谢物是细胞在调控过程中产生的中间或最终产物,能够作为生物系统对外界环境变化的响应指标^[26]。代谢组学分析可以揭示四角蛤蜊在低盐胁迫下的生理调控机制。通过 LC-MS 分

析可知,磷脂类、脂肪酸类和氨基酸类为主要差异代谢物。PCA 和 PLS-DA 分析显示,盐度为 30 的对照组与盐度为 25、20、15 的低盐胁迫处理组样品的代谢特征存在明显差异,说明盐度是影响鳃组织代谢网络的重要因子。四角蛤蜊在 10 °C 条件下盐度为 25、20、15 时分别产生 28、162、78 种 DEMs,24 °C 条件下则分别产生 221、75、118 种 DEMs,这表明水温升高有利于增强四角蛤蜊在低盐条件下对代谢网络的调控作用,抗氧化相关代谢物如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)显著增加,显示氧化应激被激活,鳃组织通过增强抗氧化能力减轻自由基损伤,从而提高低盐环境耐受性。已有研究表明,橄榄蛏蚌(*Solenia oleivora*)的 SOD、CAT、酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)以及谷胱甘肽(GSH)在盐度胁迫开始时(3~12 h)活性增加,而 SOD 和 ACP 活性在 48 h 后下降^[16],说明盐度会对抗氧化酶产生影响。盐度的变化还会影响毛蚶(*Scapharca subcrenata*)新陈代谢,随着盐度的降低,磷脂酰胆碱、磷脂酰乙醇胺、磷脂酰肌醇代谢上调,而磷脂酰肌醇神经酰胺和磷脂酰乙醇胺代谢显著下调,且各盐度处理组甘油磷脂代



注: a 为对照组与盐度 25 处理组; b 为对照组与盐度 20 处理组; c 为对照组与盐度 15 处理组

Note: a is Control vs. Salinity 25; b is Control vs. Salinity 20; c is Control vs. Salinity 15

图 8 水温 24 °C 条件下低盐胁迫对四角蛤蜊样品差异代谢物的 KEGG 通路富集分析气泡图

Fig. 8 Bubble plot of KEGG pathway enrichment analysis for differential metabolites in *Mactra veneriformis* under low-salinity stress at 24 °C

谢信号通路显著富集^[27]。贻贝的代谢途径也会随盐度的变化而改变,包括精氨酸生物合成、天冬氨酸和谷氨酸代谢、牛磺酸和次牛磺酸代谢等^[28]。作为典型滩涂养殖贝类的四角蛤蜊,其环境生理适应过程同样涉及多维度的代谢与生理调控。在组织学层面,当海水盐度降至15时,四角蛤蜊鳃组织出现呼吸上皮细胞脱落、鳃小片肿胀及鳃丝皱缩等显著病理变化,且在24℃条件下的损伤程度显著高于10℃,表明低盐直接削弱了四角蛤蜊气体交换能力,并破坏了离子转运的关键界面。在酶学层面, Na^+/K^+ -ATP酶活性随盐度降低而显著下降,在盐度为15时降幅最大,表明低盐环境严重抑制了 Na^+/K^+ -ATP酶的功能,引发渗透压失衡,这一影响过程与鳃上皮细胞肿胀和结构紊乱同时发生。在代谢组学层面,四角蛤蜊为应对低盐胁迫,氨基酸类代谢物(如甘氨酸、牛磺酸、L-精氨酸)显著上调,作为调节剂和能量底物参与TCA循环;磷脂类(如磷脂酰胆碱、磷脂酰乙醇胺)的动态变化则反映细胞膜脂质双层在低盐胁迫下的重构需求,且在24℃条件下差异代谢物数量及抗氧化与膜修复相关通路富集程度均显著高于10℃,表明较高适宜温度提升了低盐诱导的代谢应激强度。这些代谢重编程现象正是机体在离子失衡和结构损伤背景下,为维持基本生理功能而启动代偿性调控,但同时也加剧了能量分配冲突,最终影响呼吸效率。

3 结论

(1)本研究探讨了四角蛤蜊在低盐环境下的呼吸代谢机制,研究发现,低盐导致四角蛤蜊鳃丝结构紊乱,且随着盐度降低四角蛤蜊的 Na^+/K^+ -ATP酶活性下降。这一结果表明,低盐直接削弱了鳃的渗透调节功能。

(2)代谢组学研究进一步表明,四角蛤蜊通过激活氨基酸代谢、能量代谢及脂质重构,实现对渗透压失衡和氧化应激的代偿响应。

(3)24℃和10℃两个水温条件下的研究发现,温度显著调节了低盐胁迫的效应,提示其在贝类耐盐适应中具有一定作用。

(4)针对全球变暖叠加降雨导致的河口区盐

度骤降对滩涂贝类养殖产生的影响,本研究结果不仅可以为四角蛤蜊环境生物学研究提供基础资料,也可以为四角蛤蜊滩涂养殖区盐度监测与预警系统的构建提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 阎波,李英,高楠,等. 非-Cd单一与联合作用对毛蚶的氧化胁迫及损伤[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 858-864.
- [2] 宋松伟,郝咏芳,曹琛,等. 四角蛤蜊工厂化苗种繁育技术研究[J]. 科学养鱼, 2019(7): 63.
- [3] 闫喜武,张跃环,左江鹏,等. 北方沿海四角蛤蜊人工育苗技术的初步研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(5): 348-352.
- [4] 梁玉波,张喜昌,陈红星,等. 温度盐度对菲律宾蛤仔帕金虫病害发生的影响[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(1): 1-5.
- [5] 刘勇,施坤涛,张少华,等. 双壳贝类呼吸代谢的研究进展[J]. 南方水产, 2007, 3(4): 65-69.
- [6] 于帅,宋依琳,陈丽梅,等. 低氧胁迫对四角蛤蜊存活、抗氧化指标和呼吸相关酶的影响[J]. 水产科学, 2024, 43(4): 606-613.
- [7] 柴鸿煦,邵晓娟,刘文珂,等. 盐度和亚硝酸盐氮胁迫对四角蛤蜊呼吸代谢影响[J]. 中国渔业质量与标准, 2025, 15(1): 1-9.
- [8] Nie H T, Jahan K, Zhang W L, et al. Physiological and biochemical responses of different shell color strains of Manila clam to low salinity challenges[J]. Aquaculture Reports, 2020, 16: 100260.
- [9] Pourmozafer S, Tamadoni Jahromi S, Rameshi H, et al. The role of salinity in physiological responses of bivalves[J]. Reviews in Aquaculture, 2020, 12(3): 1548-1566.
- [10] 尤仲杰,陆彤霞,马斌,等. 盐度对墨西哥湾扇贝幼虫和稚贝生长与存活的影响[J]. 动物学杂志, 2003, 38(3): 58-60.
- [11] 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.
- [12] 孙雪梅,陈碧鹃,高萍,等. 高盐胁迫对黄河口四角蛤蜊摄食与生长的影响[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(5): 85-90.
- [13] 宋晓楠,马峻峰,秦艳杰,等. 盐度骤降对菲律宾蛤仔抗氧化酶活力及组织结构的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(1): 50-56,70.
- [14] 滕炜鸣,高士林,刘谔,等. 盐度对辽东湾四角蛤蜊和光滑河蓝蛤摄食率和滤水率的影响[J]. 水产科学, 2018, 37(5): 622-627.
- [15] 任加云,夏江宝,苗晶晶. 石油烃暴露对文蛤和四角蛤蜊解毒指标影响的对比研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 552-559,570.
- [16] Zhang T, Yao J T, Xu D P, et al. Gill physiological and transcriptomic response of the threatened freshwater mussel *Sole-*

- naia oleivora* to salinity shift[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 2021, 40: 100913.
- [17] 张娜, 刘瑞琦, 詹天宇, 等. 脯氨酸对高盐下缢蛏组织结构、抗氧化能力及细胞凋亡的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2025, 45(2): 27-34.
- [18] Andreyeva A, Gostyukhina O, Gavruseva T, et al. Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) under salinity stress: effects on antioxidant capacity and gill structure[J]. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 2025, 343(2): 184-196.
- [19] 詹天宇, 张娜, 叶凯, 等. 不同家系缢蛏耐低盐性能评估及其生理响应[J/OL]. *大连海洋大学学报*, 2025: 1-16.[2025-11-15]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1575.S.20250715.1128.008>.
- [20] 叶博. 缢蛏三个群体在不同盐度应激下的响应机制[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [21] 王尧, 曹善茂. 盐度对岩扇贝 Na^+/K^+ -ATP 酶活性的影响[J]. *科技风*, 2019(7): 241-243, 245.
- [22] Han Y T, Ye K, Gao G Q, et al. Integrated analysis of antioxidant defense and energy metabolism in the gills of *Sinonovacula constricta* under hyposalinity stress[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2025, 310: 111932.
- [23] 李智, 彭茂潇, 叶博, 等. 急性低盐度对缢蛏存活率、 Na^+/K^+ -ATPase 活性以及血淋巴细胞吞噬能力的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(4): 489-495.
- [24] 蔡星媛, 张秀梅, 田璐, 等. 盐度胁迫对魁蚶稚贝血淋巴渗透压及鳃 Na^+/K^+ -ATP 酶活力的影响[J]. *南方水产科学*, 2015, 11(2): 12-19.
- [25] 蔡思灿, 张方琪, 栗志民. 低盐胁迫对西施舌存活、非特异性免疫酶和 NKA 酶活性的影响[J]. *渔业研究*, 2025, 47(2): 161-170.
- [26] Fiehn O. Metabolomics-the link between genotypes and phenotypes[J]. *Plant Molecular Biology*, 2002, 48(1/2): 155-171.
- [27] Zhang M, Li L, Liu Y, et al. Effects of a sudden drop in salinity on *Scapharca subcrenata* antioxidant defenses and metabolism determined using LC-MS non-targeted metabolomics[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 7324.
- [28] Sokolova I M, Kovalev A, Timm S, et al. Species-specific metabolome changes during salinity downshift in sub-Arctic populations of *Mytilus edulis* and *M. trossulus*[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1403774.
- (本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 351 页)

- [25] Vila M, Camp J, Garcés E, et al. High resolution spatio-temporal detection of potentially harmful dinoflagellates in confined waters of the NW Mediterranean[J]. *Journal of Plankton Research*, 2001, 23(5): 497-514.
- [26] Luo Z H, Hu Z X, Tang Y Z, et al. Morphology, ultrastructure, and molecular phylogeny of *Wangodinium sinense* gen. et sp. nov. (Gymnodiniales, Dinophyceae) and revisiting of *Gymnodinium dorsalisulcum* and *Gymnodinium impudicum*[J]. *Journal of Phycology*, 2018, 54(5): 744-761.
- [27] 李俊佳, 陈磊, 王君玥, 等. 伊姆裸甲藻溶藻菌 LD-B3 的分离鉴定及溶藻作用[J]. *应用海洋学学报*, 2024, 43(1): 192-200.
- [28] Park J Y, Choi D H, Kim N Y, et al. Effects of zooplankton extracts on the production of paralytic shellfish toxins by *Gymnodinium catenatum* and *Alexandrium pacificum*[J]. *Ocean Science Journal*, 2024, 59(4): 50.
- [29] Kim C S, Lee S G, Lee C K, et al. Reactive oxygen species as causative agents in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*[J]. *Journal of Plankton Research*, 1999, 21(11): 2105-2115.
- [30] 陈波, 陆家昌, 许铭本, 等. 北部湾北部赤潮藻类生态环境特征与动力学响应机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- (本文编辑: 曲丽梅)