

盐度与 pH 对 3 种南方贝类呼吸率和钙化率的影响

饶科, 黄明坚, 章逃平, 林尚书, 岳晓彩, 黄建荣, 黎祖福

(中山大学生命科学院, 广东 广州 510275)

摘要:测定了近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、翡翠贻贝(*Perna viridis*)和波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)3种南方重要养殖贝类在20、25、30和35共计4个盐度梯度和8.1、7.7、7.3和7.0共计4个pH梯度下的呼吸率和钙化率。结果表明,盐度和pH对3种贝类的呼吸率和钙化率均有显著影响($P < 0.05$);盐度为20~35,近江牡蛎的呼吸率和钙化率均随盐度的升高而降低,而翡翠贻贝和波纹巴非蛤在盐度为20~30时,呼吸率和钙化率随盐度的升高而升高,盐度30~35时,随盐度的升高而下降。pH为8.1~7.0时,3种贝类的呼吸率和钙化率均随着pH的下降而显著性下降($P < 0.05$)。

关键词:近江牡蛎;翡翠贻贝;波纹巴非蛤;盐度;pH值;呼吸率;钙化率

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2014)04-0074-07

作为海洋物质流与能量流重要的驱动者,海水贝类对海洋碳循环特别是近海碳循环有着重要的作用。一方面,贝类可以通过滤食作用将海水中的颗粒物质输送到底层加速生物沉积,起到了碳汇的作用;另一方面,贝类的呼吸作用和钙化作用又能够产生CO₂,成为碳源(Tang et al, 2011; Chauvaud et al, 2003, Martin et al, 2006)。环境能通过对贝类呼吸和钙化活动的作用对海洋碳循环产生影响(张明亮等, 2011c)。因此,作为海洋碳循环的重要参与者,贝类的作用有其复杂性,对其呼吸和钙化活动研究有重要理论意义。

作为世界第一水产养殖大国,中国的水产养殖产量约占世界的2/3,其中有77%的产量是贝类养殖贡献的,而牡蛎、贻贝、蛤蜊又占到了贝类产量的70%~80%(农业部渔业局, 2011; Tang et al, 2011)。近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)、翡翠贻贝(*Perna viridis*)和波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)是南方重要的养殖贝类。近江牡蛎广泛分布于广东、广西和海南等地,以左壳固着生活在河口附近的低盐海域;翡翠贻贝以足丝附着生活在低潮区至浅海岩礁上,广泛分布在广东、广西和海南及东海等地;波纹巴非蛤主要分布于广东、广西、海南、浙江和福建

等地潮间带至浅海的泥沙底中(杨文等, 2013)。本研究选取以上3种养殖贝类,测定环境因子中的盐度和pH对其呼吸率和钙化率的影响,为研究盐度变化和海洋酸化对贝类的作用积累资料。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验贝类于2013年3月采自广东省湛江市特呈岛海区(21°11.132 N; 110°25.513 E),带回中山大学湛江海洋生物技术示范基地,清洗贝壳表面,除去污损生物后驯养在100 L水箱中,每天换水1次,投喂小球藻(*Chlorella*),并用虹吸法除去箱底废物,1周后进行实验。驯养过程中,海水温度为(25.0 ± 1.0)°C, pH(8.1 ± 0.5),盐度(30.0 ± 0.5)。驯养完毕后,取大小相似的近江牡蛎(壳长67~76 mm)、翡翠贻贝(壳长55~60 mm)和波纹巴非蛤(壳长35~40 mm)进行实验。

1.2 海水配置

实验海水取自湛江市特呈岛近岸海域,盐度为30。采集后的海水用玻璃纤维滤纸进行过滤后再进行调配,用曝气自来水和分析纯NaCl调配至20、25、30和35共计4个盐度梯度。pH的调配采用通入高纯度CO₂的方法,将过滤后原pH为8.1的近岸海水调配到7.7、7.3和7.0,共设计4个pH实验梯度,阴凉处密封保存,1~2 h后再测定pH和溶解氧,如果pH的变化小于0.1个单位且溶解氧饱和度大于90%,则调配海水可作为酸化组用水(何盛毅等, 2011)。pH调配过程中,用pH电极监控其变化(NBS缓冲液标定);溶解氧则使用电极测定。

收稿日期:2014-02-22

基金项目:中央分成海域使用金支出项目(国海办字[2013]543号);广东省教育部产学研结合示范基地项目(2012B090700017);广东省自然科学基金博士启动项目(2010330004203984)。

通讯作者:黎祖福,研究员。E-mail: zufuli02@163.com

作者简介:饶科,1989年生,男,硕士研究生,主要从事水生生物学研究。E-mail: raoke@mail2.sysu.edu.cn

1.3 实验设计与测定方法

将实验贝类放入20个10 L的水箱中,每个盐度或pH梯度设置5个重复,每个水箱中放入5个贝类,暂养5 d。每天换水并投喂小球藻,实验前24 h停止喂食。

从10 L水箱中随机挑选3个贝类放入5 L的呼吸瓶中,盐度和pH实验的每个梯度均设5个重复和1个对照,对照组不放入贝类。实验前在呼吸瓶中装满海水,当贝类在呼吸瓶中适应30 min后密封呼吸瓶,静置2 h。密封前后分别测定水样的总碱度(TA)和溶解氧(DO)。实验结束后将贝类取出,测量其总湿重。溶解氧采用溶解氧电极法测定。TA采用25 mL样Gran电位滴定法测定。实验前后用50 mL注射器取水样以测定TA,取样后的水样经GF/F滤膜过滤,加入氯化汞并贮存在避光阴冷处冷藏,24 h内测定(Dickson et al,2007)。

根据所测得数据计算贝类(鲜重)在不同温度下的呼吸率和钙化率,公式如下(Smith et al,1975):

$$R_o = \frac{(DO_1 - DO_2) \times V}{T \times M}$$

$$G = \frac{(TA_1 - TA_2) \times V}{2 \times T \times M}$$

式中: R_o 为贝类呼吸率[$\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$]; G 为钙化率[$\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$]; DO_1 和 DO_2 分别表示实验前后的溶解氧($\mu\text{mol}/\text{L}$); TA_1 和 TA_2 分别表示实验前后的总碱度($\mu\text{mol}/\text{L}$); V 表示试验水体体积(L); T 为试验时间(h); M 为实验贝类总鲜重。

1.4 数据分析与处理

采用单因素方差分析(ANOVA)比较盐度或pH对贝类呼吸率和钙化率的影响。利用R 3.0.1软件进行数据统计分析与作图,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 盐度对贝类呼吸率和钙化率的影响

结果表明(图1),近江牡蛎的呼吸率和钙化率受盐度影响显著($P < 0.05$)。在盐度为20时,其呼吸率和钙化率达到最大值,分别为 $(2.23 \pm 0.20) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $(0.39 \pm 0.04) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$;此后随着盐度的升高,呼吸和钙化速率均有所下降,在盐度为25~35时,其呼吸率和钙化率均无显著性差异($P > 0.05$)。

不同盐度之间翡翠贻贝的呼吸率和钙化率也有显著性差异($P < 0.05$)。但与近江牡蛎不同,翡翠贻贝的呼吸率和钙化率的变化呈单峰状,表现为在盐度20~30时,其呼吸率和钙化率均随盐度的增加而增加;在盐度为30时,其呼吸率和钙化率达到最高值,分别为 $(2.02 \pm 0.11) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $(0.34 \pm 0.03) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$;当盐度超过30时,呼吸率和钙化率反而随盐度的上升而下降(图2)。

波纹巴非蛤在不同盐度下的呼吸率和钙化率也有显著性差异($P < 0.05$)(图3);其呼吸率和钙化率的变化趋势与翡翠贻贝相似。在20~30的盐度范围内,波纹巴非蛤的呼吸率和钙化率随盐度升高而升高;在盐度为30时达到最大值,分别为 $(2.13 \pm 0.09) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $(0.36 \pm 0.06) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$;此后其呼吸率和钙化率有所下降。

2.2 pH对贝类呼吸率和钙化率的影响

pH对3种贝类的呼吸率和钙化率均有显著性影响($P < 0.05$)。由图4-6可以看出,3种贝的呼吸率和钙化率均随pH的下降而下降,但不同贝类对pH变化的敏感度有所不同。

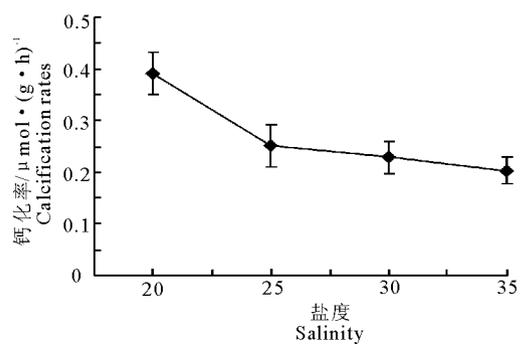
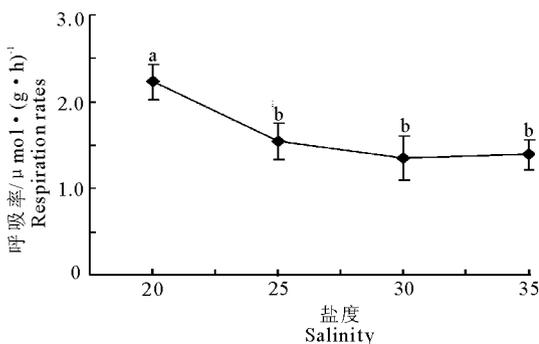


图1 盐度对近江牡蛎呼吸率和钙化率的影响

Fig.1 Effect of salinity on the respiration rate and calcification rate of *Crassostrea rivularis*

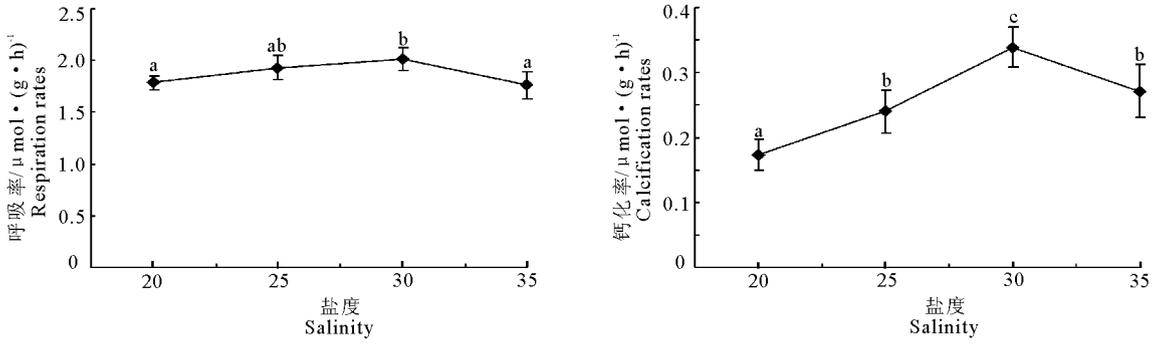


图2 盐度对翡翠贻贝呼吸率和钙化率的影响

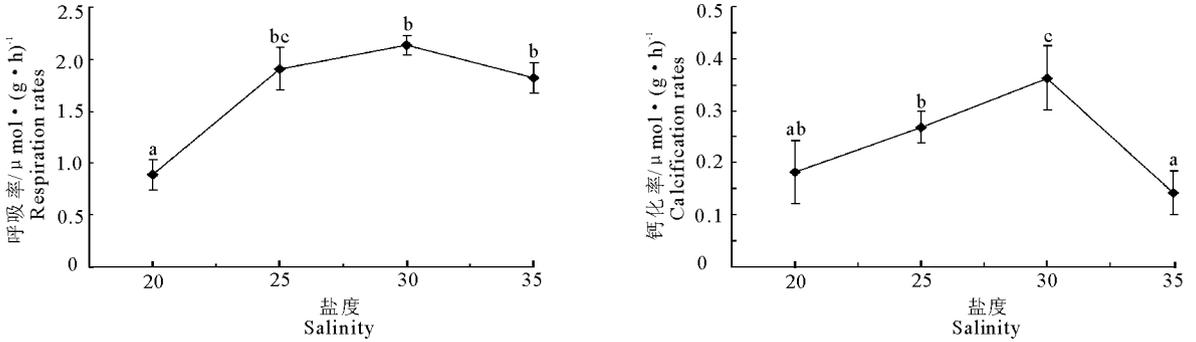
Fig. 2 Effect of salinity on the respiration rate and calcification rate of *Perna viridis*

图3 盐度对波纹巴非蛤呼吸率和钙化率的影响

Fig. 3 Effect of salinity on the respiration rate and calcification rate of *Paphia undulata*

图4所示,近江牡蛎的呼吸率从pH 8.1时的最大值(1.43 ± 0.11) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下降到pH 7.0时的(1.00 ± 0.16) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,钙化率从pH 8.1时的(0.27 ± 0.04) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下降到pH 7.0时的(-0.21 ± 0.04) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。在pH 8.1和7.7时,无论是呼吸率还是钙化率均没有显著性差异($P > 0.05$)。

波纹巴非蛤呼吸率和钙化率的变化与近江牡蛎相似,在pH 8.1、7.7时均没有显著差异($P > 0.05$),其呼吸率从pH 8.1时的(1.73 ± 0.1) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下降到pH 7.0时的(1.44 ± 0.08) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$;

钙化率则从pH 8.1时的(0.20 ± 0.04) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下降到pH 7.0时的(-0.21 ± 0.11) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

与上述2种贝类不同的是,翡翠贻贝在pH为8.1~7.3时的呼吸率差异不显著($P > 0.05$),最大值为pH 7.7时的(2.14 ± 0.17) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$,在pH 7.0时达到最小值(1.56 ± 0.11) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$;而钙化率则变化较大,从pH 8.1时的(0.31 ± 0.04) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 下降到pH 7.0时的(-0.18 ± 0.05) $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

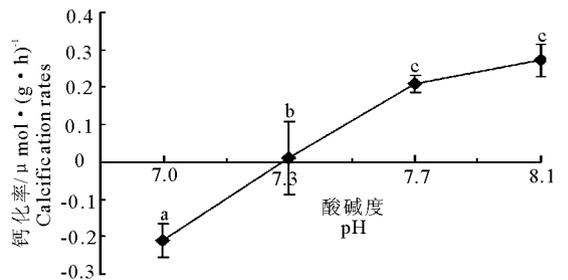
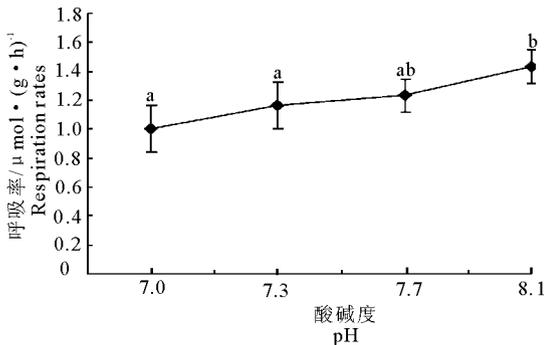


图4 pH对近江牡蛎呼吸率和钙化率的影响

Fig. 4 Effect of pH on the respiration rate and calcification rate of *Crassostrea rivularis*

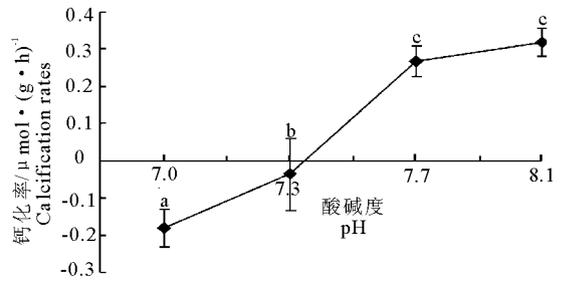
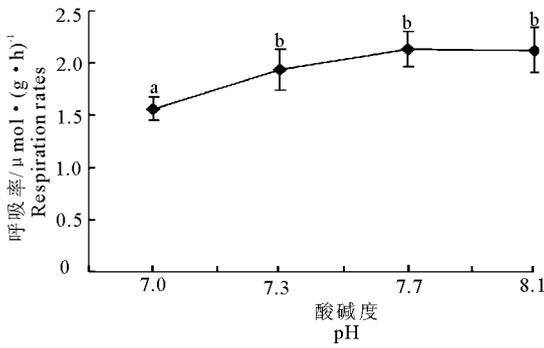


图5 pH对翡翠贻贝呼吸率和钙化率的影响

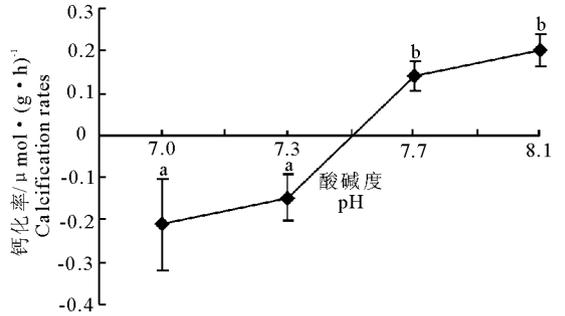
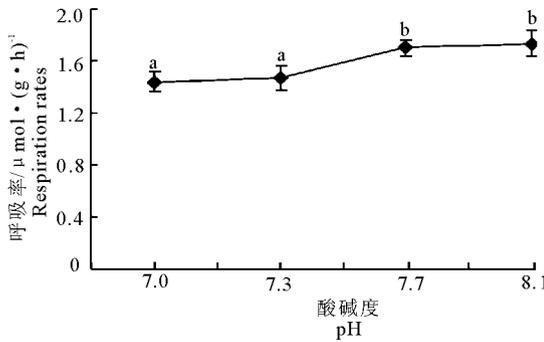
Fig. 5 Effect of pH on the respiration rate and calcification rate of *Perna viridis*

图6 pH对波纹巴非蛤呼吸率和钙化率的影响

Fig. 6 Effect of pH on the respiration rate and calcification rate of *Paphia undulata*

3 讨论

3.1 盐度对贝类呼吸和钙化活动的影响

张明亮等(2011a)研究发现,栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)的钙化率和呼吸率在盐度15~35的范围内呈单峰状,二者均在盐度为25时达到最高。本研究探讨了在3种贝类在均能生存的盐度下,翡翠贻贝和波纹巴非蛤的呼吸率和钙化率均在盐度为30时达到最高,在此盐度前后分别呈上升和下降趋势,不同的是近江牡蛎的呼吸率和钙化率在盐度20时达到最高,此后随着盐度的上升,二者均有不同程度的下降。造成上述现象的原因可能是不同贝类的最适盐度有所不同。近江牡蛎属于广盐性贝种,适宜盐度5~25,最适盐度10~20,对低盐度耐性较强,高盐度耐性较弱;当盐度为25~35时,近江牡蛎已不能适应盐度的变化,因而其钙化率和呼吸率都出现了下降(薛凌展等,2007;栗志民等,2011)。与之相比,翡翠贻贝的适盐范围为19.5~31.4,波纹巴非蛤的最适盐度为28~32,它们适宜在相对高的盐度下生存,因而当盐度升高时,其呼吸率和钙化率有所上升,但当盐度超过最适盐度时,其呼吸率和钙化率也会出现下降(李碧全等,2009)。

3.2 盐度对贝类生理的影响

盐度对贝类的影响与贝类的渗透压调节能力、遗传变异以及营养状况等因素有关,其中贝类渗透压调节能力是影响贝类盐度适应能力的主要生理因素。盐度的改变造成了渗透压的变化,贝类为适应渗透压的变化需要将更多的能量用于维持渗透压的调节,因而能用于其他生理活动的能量便有所下降;此外,盐度的过高或过低也会给贝类带来诸如胸腔压力增大、心跳减慢、免疫能力下降等生理机能上的损害,因此当贝类不能适应所在盐度时会出现滤水率、呼吸率、钙化率等新城代谢活动的下降(大连水产学院,1979;尤仲杰等,2003;李碧全等,2009)。薛凌展等(2007)发现低盐度对近江牡蛎的生长发育有促进作用,其幼虫的生长速度和存活率在低盐度条件下均显著高于高盐组;杨晓新等(2000)发现翡翠贻贝在盐度为16~32时滤水率随盐度的上升而增大;李俊辉等(2011)在研究盐度对波纹巴非蛤呼吸率的影响时得出其耗氧率和排氨率在20~32的盐度范围内呈单峰状,二者在盐度为28时达到峰值;王冬梅等(2009)发现波纹巴非蛤在盐度为32时,滤水率最大;马洪明等(2006)通过盐度突降实验发现,栉孔扇贝的血细胞数和SOD活性下降,而

血浆蛋白含量和 ACP 活性相对升高,得出在盐度胁迫下其抗感染能力下降的结论。与上述实验结果相似,本实验中 3 种贝类在最适盐度范围之外也表现出呼吸活动和钙化活动受胁迫的现象。因而贝类可以通过降低滤食、呼吸、钙化、排氨、免疫等新陈代谢活动来补偿不利的盐度环境所带来的负面影响。

3.3 未来盐度变化对贝类的影响

盐度是贝类生理活动重要的影响因子,不仅影响贝类的渗透压,而且盐度所代表的海水中溶解碳酸盐和钙的多少还是贝类生产碳酸钙壳的原料。从短期来看,因为近岸的海水盐度受到陆源淡水以及大气沉降的影响,所以其具有季节性波动的特点;从长期来看,全球气温的升高则可能导致两极冰川的融化,从而使海水盐度降低(Joos et al, 1999)。Waldbusser 等(2011)发现,太平洋牡蛎(*Crassostrea virginica*)在低盐度和低温的条件下,钙化率随 pH 下降呈显著性下降;但在高盐度和高温的条件下,太平洋牡蛎对 pH 的下降有一定抵抗能力,由此认为在低盐度、低 pH 海域生活的生物会更容易受到海洋酸化的影响。因此,未来海水盐度变化可能会与其他气候因子一同对贝类产生影响。

3.4 海洋酸化对贝类呼吸的影响

Liu 等(2012)发现,翡翠贻贝(*Perna viridis*)和合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)的呼吸率在 pH 为 7.4~8.1 时没有显著性差异,而栉孔扇贝的呼吸率在此范围内随 pH 的降低有显著的下降;张明亮等(2011b)发现,栉孔扇贝的呼吸率在 pH 为 7.0~8.1 时,其呼吸率随 pH 的降低而显著下降。本实验根据 IPCC(2007)的报告设置了 7.0、7.3、7.7、8.1 共计 4 个 pH 梯度,分别代表不采取 CO₂ 减排措施情况下的当前、2100 年、2300 年以及极端酸化条件下海水的 pH。结果表明,3 种贝类在 pH 为 7.7 和 8.1 时呼吸率均没有显著变化,甚至当 pH 为 7.3 时,翡翠贻贝的呼吸率也没有出现显著的下降;这一结果说明 3 种贝类对酸化均有一定程度的抵抗力,当 pH 下降幅度不大时,其呼吸活动所受影响不大;然而,当 pH 为 7.0 时,3 种贝类的呼吸率均显著降低,表明 pH 的剧烈变化会对贝类的呼吸活动产生负面影响。

3.5 海洋酸化对贝类钙化的影响

本次实验中,3 种贝类的钙化率均随 pH 的降低而下降,在 pH 为 7.7~8.1 的范围内,贝类的钙化率并没有显著的变化,表明这 3 种贝类的钙化活动对酸化也有一定的抵抗力。然而,当 pH 为 7.3 时,

近江牡蛎和翡翠贻贝的钙化率接近为 0,波纹巴非蛤的钙化率甚至小于 0,并且随着 pH 的持续降低,3 种贝类的钙化率均出现了负值,表明贝壳出现了溶解现象。张明亮等(2011)发现,栉孔扇贝的钙化率在 pH 降低时也有不同程度的下降,当 pH 降低到 7.9 时,其钙化率下降了 33%,当 pH 下降到 7.3 时,钙化趋近 0;Miler 等(2009)则发现海洋酸化对不同贝类有不同的影响,在 pH 7.7~8.1 的范围内,美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)幼虫的壳面积和钙含量分别有 16% 和 42% 的下降,而近江牡蛎(*Crassostrea ariakensis*)无论是生长还是钙化都没有受到显著影响;Gazeau 等(2007)的室内模拟实验也表明,海洋酸化对太平洋牡蛎和紫贻贝(*Mytilus edulis*)的钙化均有负面影响,并估计到 21 世纪末贻贝和牡蛎的钙化将分别下降 25% 和 10%。

3.6 海洋酸化对贝类生理的影响

造成上述现象的原因可能有 3 个方面:(1)酸化导致海水渗透压的变化使得贝类需要用大部分的能量来维持渗透压的调节,从而使贝类用于呼吸、钙化等其他生理活动的能量有所下降;(2)海水 pH 的下降抑制了催化贝类新陈代谢酶的活性,尤其体现在酸化会造成贝类幼虫生长代谢速率减慢,死亡率增加;(3)贝类主要利用海水中的 CO₃²⁻ 形成钙质贝壳,然而海洋酸化改变了海水碳酸盐系统的平衡引起了自工业革命以来海水 CO₃²⁻ 饱和度不断下降;因此,海洋酸化直接导致了贝类钙化作用原料的减少和钙化率的下降(Orr et al, 2005; Doney et al, 2009; 刘文广等, 2012)。目前的室内实验均表明,海洋酸化对贝类等软体动物的钙化有负面影响,其幼体成壳受到的影响更为显著(汪思茹等, 2012)。本实验中的 3 种贝类对低程度的酸化表现出来的耐受性可能是因为其生活在近海,此区域的海水 pH 易受到来自陆地水源、降水等的影响,故其对 pH 的变化具有一定程度的适应能力。Miler 等(2009)发现,即便在碳酸钙饱和度小于 1 的情况下,生活在盐水、半咸水的美洲牡蛎和近江牡蛎的幼虫还是能生成碳酸钙外壳,但在碳酸钙饱和度下降的情况下,贝类会付出更多的能量用于生物钙化;Wood 等(2008)观察到海蛇尾(*Amphiura filiformis*)在酸化条件下其钙化不降反升,但这种钙化的增加是以损耗其肌肉质量以及降低呼吸和捕食活动为代价的。海洋酸化除了影响呼吸和钙化活动外,还可以对贝类的其它生理活动特别是其生长发育产生影响。刘文广等(2012)研究表明,pH 对马氏珠母贝(*Pinctada mar-*

tensi)的早期发育有显著性影响,酸化组幼虫的壳长、壳高、存活率显著低于对照组,畸形率则显著高于对照组;何盛毅等(2011)则观察到酸化组马氏珠母贝幼虫的发育明显滞后于对比组;Liu等(2012)研究发现,酸化对翡翠贻贝、合浦珠母贝以及栉孔扇贝的滤水率和排氨率产生了负面的影响;Beesley等(2008)发现,在酸化条件下,紫贻贝的壳发生了溶解现象,而溶解产生的 Ca^{2+} 进入到紫贻贝的体内,导致其体内产生一系列的生理机能紊乱,为此紫贻贝不得不耗费大量的能量以保护组织不受酸化海水的影响,进而导致其在酸化海水中生长缓慢;此外,Todgham(2009)等发现,紫色球海胆(*Strongylocentrotus purpuratus*)在酸化海水条件下其生物矿化、细胞应激、新陈代谢以及细胞凋亡相关基因的表达有所下降。

综上所述,盐度和pH对近江牡蛎、翡翠贻贝以及波纹巴非蛤的呼吸和钙化活动有显著的影响,因此未来气候变化所导致的盐度和pH的变化很可能威胁到经济贝类的生存。在今后的工作中,需要进一步探究不同贝类在盐度或pH变化条件下的遗传与生理响应机制,以便更好地预测贝类应对气候变化的方式,防止可能造成的损失。

参考文献

大连水产学院. 1979. 贝类养殖学[M]. 北京:农业出版社: 128-155.

何盛毅,林传旭,何毛贤,等. 2011. 海洋酸化对马氏珠母贝胚胎和早期幼虫发育的影响[J]. 生态学杂志, 30(4): 747-751.

李碧全. 2009. 海水贝类增殖养殖技术[M]. 北京:化学工业出版社:106-107.

李俊辉,刘红礼,杜晓东,等. 2011. 盐度和规格对波纹巴非蛤 *Paphia undulate* 耗氧率和排氨率的影响[J]. 海洋学研究, 29(4): 95-99.

栗志民,刘志刚,谢丽,等. 2011. 近江牡蛎耗氧率和排氨率的研究[J]. 广东海洋大学学报, 31(1): 28-33.

刘文广,林坚士. 2012. 海洋酸化对马氏珠母贝受精及早期发育的影响[J]. 海洋科学, 36(4): 19-23.

马洪明,刘晓伟,麦康森,等. 2006. 盐度突降对栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 抗病力指标的影响[J]. 高技术通讯, (16): 746-751.

农业部渔业局. 2011. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社.

宋金明. 2011. 中国近海生态系统碳循环与生物固碳[J]. 中国水产科学, 18(3): 703-711.

汪思茹,殷克东,蔡卫君,等. 2012. 海洋酸化生态学研究

进展[J]. 生态学报, 32(18): 5859-5869.

王冬梅,李春强,彭明,等. 2009. 盐度、pH对波纹巴非蛤滤水率的影响[J]. 海洋通报, 28(2): 23-27.

薛凌展,阙华勇,张国范,等. 2007. 盐度对近江牡蛎幼虫生长及存活的影响[J]. 海洋科学, 31(9): 73-77.

杨文,蔡英亚,邝雪梅. 2013. 中国南海经济贝类原色图谱[M]. 北京:中国农业出版社.

杨晓新. 2000. 翡翠贻贝对浮游植物滤食压力的研究[J]. 海洋科学, 24(6): 36-39.

尤仲杰,陆彤霞,马斌,等. 2003. 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, (3): 58-60.

张明亮,刘学光,方建光,等. 2011a. 盐度变化对栉孔扇贝钙化与呼吸的影响[J]. 渔业现代化, 38(6): 1-10.

张明亮,邹健,方建光,等. 2011b. 海洋酸化对栉孔扇贝钙化、呼吸以及能量代谢的影响[J]. 渔业科学进展, 32(4): 48-54.

张明亮,邹健,毛玉泽,等. 2011c. 养殖栉孔扇贝对桑沟湾碳循环的贡献[J]. 渔业现代化, 38(4): 13-16.

周毅,杨红生,毛玉泽,等. 2003. 桑沟湾栉孔扇贝生物沉积的现场测定[J]. 动物学杂志, 38(4): 40-44.

Beesley A, Lowe D, Pascoe C, et al. 2008. Effects of CO_2 -induced seawater acidification on the health of *Mytilus edulis* [J]. Climate Research (Open Access for articles 4 years old and older), 37: 215-225.

Chauvaud L, Thompson J K, Cloern J E, et al. 2003. Clams as CO_2 Generators: The *Potamocorbula amurensis* Example in San Francisco Bay[J]. Limnology and Oceanography, 48: 2086-2092.

Dickson A G, Sabine C L, Christian J R. 2007. Guide to best practices for ocean CO_2 measurements[M]. PICES Special Publication 3, 191pp.

Doney S C, Fabry V J, Feely R A, et al. 2009. Ocean Acidification: The Other CO_2 Problem[J]. Annual Review of Marine Science, 1: 169-192.

Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system [J]. Science, 290: 291-296.

Feely RA, Sabine CL, Lee K, et al. 2004. Impact of anthropogenic CO_2 on the CaCO_3 system in the oceans [J]. Science, 305: 362-366.

Frankignoulle M, Canon C, Gattuso J P. 1994. Marine calcification as a source of carbon dioxide: Positive feedback of increasing atmospheric CO_2 [J]. Limnology and Oceanography, 39: 458-462.

Frankignoulle M. 1994. A complete set of buffer factors for acid/base CO_2 system in seawater [J]. Journal of Marine Systems, 5: 111-118.

- Gazeau F, Quiblier C, Jansen J M, et al. 2007. Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification[J]. *Geophys Res Lett*, 34(7):1–5.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis [J]. *Agenda*, 6(7):1–18.
- Joos F, Plattner G K, Stocker TF, et al. 1999. Global warming and marine carbon cycle feedbacks on future atmospheric CO₂[J]. *Science*, 284: 464–467.
- Liu WG, He M X. 2012. Effects of ocean acidification on the metabolic rates of three species of bivalve from southern coast of China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 30:206–211.
- Martin S, Thouzeau G, Chauvaud L, et al. 2006. Respiration, Calcification, and Excretion of the Invasive Slipper Limpet, *Crepidula fornicata* L.: Implications for Carbon, Carbonate, and Nitrogen Fluxes in Affected Areas[J]. *Limnology and Oceanography*, 51: 1996–2007.
- Miller A W, Reynolds A C, Sobrino C, et al. 2009. Shellfish Face Uncertain Future in High CO₂ World: Influence of Acidification on Oyster Larvae Calcification and Growth in Estuaries[J]. *PLoS ONE*, 4(5):1–8.
- Orr J C, Fabry V J, Aumont O, et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms[J]. *Nature*, 437: 681–686.
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂[J]. *Science*, 305: 367–371.
- Smith S, Key G. 1975. Carbon dioxide and metabolism in marine environments[J]. *Limnol Oceanogr*, 20: 493–495.
- Tang Q S, Zhang J H, Fang J G. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 424: 97–104.
- Todgham A E, Hofmann G E. 2009. Transcriptomic response of sea urchin larvae *Strongylocentrotus purpuratus* to CO₂-driven seawater acidification[J]. *Journal of Experimental Biology*, 212: 2579–2594.
- Waldbusser G, Voigt E, Bergschneider H, et al. 2011. Biocalcification in the Eastern Oyster (*Crassostrea virginica*) in Relation to Long-term Trends in Chesapeake Bay pH[J]. *Estuaries and Coasts*, 34: 221–231.
- Wood H L, Spicer J I, Widdicombe S. 2008. Ocean acidification may increase calcification rates, but at a cost[J]. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 275: 1767–1773.

(责任编辑 万月华)

Effects of Salinity and pH on Respiration and Calcification of Three Kinds of Shellfish in Southern China

RAO Ke, HUANG Ming-jian, ZHANG Tao-ping, LIN Shang-shu, YUE Xiao-cai, HUANG Jian-rong, LI Zu-fu

(School of Life Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P. R. China)

Abstract: In order to study the effects of salinity and pH on the respiration and calcification of three kinds of shellfish (*Crassostrea rivularis*, *Perna viridis*, and *Paphia undulata*) cultured in the South of China, we measured their respiration and calcification rates at different salinities (20, 25, 30, 35) and pH (8.1, 7.7, 7.3, 7.0). The results showed that both salinity and pH had significant effects on respiration and calcification ($P < 0.05$). The respiration and calcification rates of *Crassostrea rivularis* declined with the increasing of salinity in the range of 20–35. The respiration and calcification rates of *Perna viridis* and *Paphia undulata* increased with the increasing of salinity in the range of 20–30, while decreased with the increasing of salinity in the range of 30–35. The respiration and calcification rates of three species all decreased significantly as pH declined in the range of 8.1–7.0 ($P < 0.05$).

Key words: *Crassostrea rivularis*; *Perna viridis*; *Paphia undulata*; salinity; pH; respiration; calcification