

pH 对不同大小泥蚶清滤率、 滤食率、吸收率的影响

奚捷捷^{①②} 何琳^{②*} 徐永健^① 林志华^{②*}

① 宁波大学海洋学院 宁波 315010; ② 浙江万里学院, 浙江省水产种质资源高效利用技术研究重点实验室 宁波 315100

摘要: 本文以泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 为实验对象, 研究不同大小个体在不同 pH (6.5 ~ 9.5) 静水水体中的清滤率、滤食率和吸收率。泥蚶共 3 组, 分别为小规格、中规格和大规格, 其壳长分别为 9.12 mm、22.38 mm、32.35 mm。结果表明, 在 pH 为 8.5 时, 泥蚶清滤率由高到低依次为大规格、中规格、小规格; 滤食率由高到低为中规格、大规格、小规格; 吸收率由高到低为中规格、小规格、大规格。虽然大规格泥蚶有最高的清滤率, 但结合吸收率和滤食率, 中规格泥蚶具有更高的摄食和吸收能力。双因素方差分析显示, 在清滤率、滤食率和吸收率的实验中, 泥蚶受 pH 快速变化的影响程度均与其规格有关 ($P < 0.05$)。随 pH 变化, 清滤率受影响程度由小到大为小规格 ($P < 0.05$)、中规格 (参照)、大规格 ($P > 0.05$); 滤食率受影响程度由小到大为大规格 ($P > 0.05$)、小规格 (参照)、中规格 ($P < 0.05$); 吸收率受影响程度由小到大为小规格 ($P > 0.05$)、中规格 (参照)、大规格 ($P < 0.05$)。中规格泥蚶的滤食水平受 pH 变化的影响较大, 大规格泥蚶的吸收率受 pH 变化的影响较大。

关键词: 泥蚶; pH; 清滤率; 滤食率; 吸收率

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2019) 05-746-08

Effects of pH on Clearance Rate, Ingestion Rate and Absorption Efficiency of Different Sizes of *Tegillarca granosa*

XI Jie-Jie^{①②} HE Lin^{②*} XU Yong-Jian^① LIN Zhi-Hua^{②*}

① *School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315010;* ② *Key Laboratory of Aquatic Germplasm Resource of Zhejiang, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315010, China*

Abstract: The effect of ocean acidification on shellfish was a long-term process, however, the water pH can be changed rapidly in aquaculture. Therefore, the study of physiological responses of shellfish in different sizes under different pH stress would be with significantly value in the aquaculture. In this study, we used the blood clam (*Tegillarca granosa*) with different sizes (9.12 mm, 22.38 mm and 32.35 mm) as a model to explore the effects of feeding physiology under different pH (6.5 - 9.5) stress (Table 1). Clearance rate,

基金项目 宁波市 2015 年度科技富民项目 (No. 2015C10008), 国家贝类产业技术体系项目 (No. CARS-49);

* 通讯作者, E-mail: hlwithyou@qq.com, zhihua9988@126.com;

第一作者简介 奚捷捷, 男, 硕士研究生; 研究方向: 生态养殖; E-mail: 435121961@qq.com。

收稿日期: 2019-03-27, 修回日期: 2019-06-13 DOI: 10.13859/j.cjz.201905016

ingestion rate and absorption efficiency were determined in static bioassay tests, which were used to represent the feeding physiology of the mud clam. At pH = 8.5, the clearance rates from high to low were as follows: large > medium > small (Fig. 1); the ingestion rates from high to low were as follows: medium, large, small (Fig. 2); and the absorption efficiencies from high to low as follows: medium > small > large (Fig. 3). Although the large blood clam had the highest Clearance rate, the medium blood clam had higher ingestion and absorption capacity. The clearance rate, ingestion rate and absorption efficiency of blood clam were related to pH and its size ($P < 0.05$) by two-way ANOVA. The influence of pH on the clearance rates were as follows: small ($P < 0.05$) < medium (reference) < large ($P > 0.05$) (Fig. 1); the influence of ingestion rates were as follows: large ($P > 0.05$) < small (reference) < medium ($P < 0.05$) (Fig. 2); and the influence of absorption rates were as follows: small ($P > 0.05$) < medium (reference) < large ($P < 0.05$) (Fig. 3). The Ingestion rate of medium blood clam was greatly affected by the environmental pH, and the absorption efficiency of large blood clam was greatly affected by the environmental pH.

Key words: *Tegillarca granosa*; pH; Clearance rate; Ingestion rate; Absorption efficiency

随着人类活动的加剧, 导致大气 CO₂ 浓度不断增加, 而海洋吸收了过量的 CO₂ 导致海洋酸化, 这可能使得贝类出现长期的变化 (Wittmann et al. 2013), 包括对受精、发育、钙化率、摄食等方面的影响 (王有基等 2014)。相关研究表明, 当平均 pH 低于 7.5 或最低 pH 低于 7.2 时, 蛤蜊生长速率只有正常 (pH = 7.6) 条件下的 50% (Ringwood et al. 2002); 无论是 HCl 还是 CO₂ 酸化海水, 都会使雌雄配子的受精能力显著降低 (Shi et al. 2017); 低 pH 会使青蛤 (*Cyclina sinensis*) 钙化效率出现显著性下降 (蔡娟等 2018)。

海洋酸化对贝类的影响是一个长期的过程, 但在养殖过程中更多是人为短时间内改变了水体 pH。因此, 研究不同规格贝类在不同 pH 条件下的摄食生理响应对贝类养殖具有重要意义。目前, 泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 养殖多为虾贝混养模式, 在池塘蓄水养殖过程中, 投喂虾饵会造成水体短暂 pH 下降 (王方国 1995), 降水及人工增氧也会使水体 pH 下降 (何义进等 2009)、池塘消毒 (陈剑锋等 2006)、水质底质改良 (夏来根等 2012)、养殖水交换等均可能在短时间内改变水体 pH。水体 pH 突变又会间接影响贝类的各项生理指标。当 pH 为 7.8 时, 三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii*) 幼蚌

的滤水率达到高峰, pH 为 6 时, 滤水率下降, 过酸或过碱, 滤水率微小 (彭建华等 2004)。pH 在 7 以下时, 贝类的贝壳保持无力而松弛张开状态, 进、出水管呈最大限度的扩张, 机体的摄食活动明显下降, 贝类处于一种近乎麻痹状态 (包永波等 2006)。实验证明 pH 对合浦珠母贝 (*Pinctada fucata*) 耗氧率具有极显著影响 ($P < 0.01$), 是影响其呼吸和排泄的重要环境因子 (刘建业等 2011)。本文研究了不同 pH 变化对三种大小规格泥蚶清滤率、滤食率、吸收率的影响, 为泥蚶育苗、养殖提供基础参考与支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验泥蚶均采自浙江万里学院在宁波海洋与渔业科技创新基地培育的家系群。按照壳长分为三种规格, 大规格泥蚶平均壳长 (32.35 ± 1.95) mm、中规格泥蚶平均壳长 (22.38 ± 1.51) mm 和小规格泥蚶平均壳长 (9.12 ± 0.79) mm, 实验用泥蚶的生物学数据见表 1。实验贝采集后挑取活力良好无损伤个体, 用洁净毛刷清洗壳表面污垢和附生生物, 暂养于宁波海洋与渔业科技创新基地。采用 100 L 白桶, 使用砂滤海水暂养 7 d, 实验期间不间断供气, 每日换水

表 1 实验用泥蚶的生物学数据 ($n = 30$, 平均值 \pm 标准误)Table 1 Biological measurements of *Tegillarca granosa* in the experiment of pH ($n = 30$, Mean \pm SE)

规格 Size	壳长 Shell length (mm)	壳宽 Shell width (mm)	壳高 Shell height (mm)	干壳重 Dry shell weight (g)	干肉重 Dry body weight (g)
小 Small	9.12 \pm 0.79	5.52 \pm 0.49	7.08 \pm 0.59	0.162 3 \pm 0.037 0	0.017 4 \pm 0.002 8
中 Medium	22.38 \pm 1.51	14.00 \pm 0.93	17.49 \pm 1.19	2.833 8 \pm 0.151 5	0.081 3 \pm 0.003 5
大 Large	32.35 \pm 1.95	21.49 \pm 1.15	23.96 \pm 1.87	10.301 4 \pm 0.701 6	0.930 4 \pm 0.063 2

量 100%，早晚各投喂足量球等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*)。海水盐度 21.5‰ \pm 0.7‰，pH 8.5 \pm 0.1。使用控温电热棒控制水温为 (25 \pm 1) °C。

1.2 实验方法

1.2.1 pH 设定 使用 1 mol/L 的 NaOH 或者 HCl 调节 pH，用 pH 计 (哈希 QH40，精度 0.1) 进行校准，本实验共设置 7 个 pH 水平 (6.5、7.0、7.5、8.0、8.5、9.0、9.5)。

1.2.2 实验组设计 大、中、小每个规格按 1.2.1 设定的 pH 分为 7 个实验组，每个组设 3 个平行，一个空白组，空白组除不加入泥蚶外其他条件均相同，包括藻浓度及 pH。每个实验组中，大规格泥蚶放入 4 只，中规格泥蚶放入 8 只，小规格泥蚶放入 30 只。实验采用 15 cm \times 20 cm \times 20 cm 的聚乙烯方桶静水系统，共使用 84 个方桶。

1.2.3 实验过程 实验时在每个方桶中加入砂滤海水和球等鞭金藻，使得作为饵料的球等鞭金藻的浓度为 1×10^8 cell/L，相关文献表明此浓度对贝类摄食较适宜且未达到贝类假粪阈值 (朱雨瑞等 2010，何苗等 2017)，实验水体总体积为 4 L。调节各实验桶内 pH，最后按规格放入暂养的实验泥蚶。实验期间连续充气，且保证充气量不搅动缸底粪便。为保证实验条件的适宜稳定，实验期间饵料浓度的变化幅度控制在 20% \sim 30% 之间 (栗志民等 2011)，温度控制在 (25 \pm 1) °C (林志华等 2015)，用吸光光度法 (何苗等 2017) 检测饵料浓度的变化，使用控温电热棒调控温度。三种规格泥蚶实验同步进行，待泥蚶全部开壳后，开始计时，实验持续 2 h。经测定，实验前后各实验组中 pH 变化率在 0.1% \sim 2.0% 之间，变化幅度较小，

水体 pH 较稳定。

1.3 参数测定及处理

1.3.1 饵料浓度测定 实验中所有饵料藻浓度的计算采用海水中颗粒有机物 (particulate organic matter, P_{OM}) 作为测定指标。颗粒有机物和悬浮颗粒有机物 (total particulate matter, T_{PM}) 的比值 (P_{OM}/T_{PM}) 作为无灰分干重比例 (匡世煊等 1996)，用于吸收率的计算。

颗粒有机物和悬浮颗粒有机物的测定方法为：先将 GF/c 玻璃纤维滤纸 (whatman1822-055，孔径 1.2 μ m) 经过 450 °C 灼烧 6 h，以精密电子天平 (梅特勒 MS104TS，量程 0 \sim 120 g，精度 0.1 mg) 称重，记为 W_0 (mg)。取 1 L 水样，用上述经 450 °C 灼烧 6 h 的 GF/c 玻璃纤维滤纸抽滤，所滤物用 0.5 mol/L 的甲酸铵 (约 10 ml) 漂洗掉盐分，然后在 110 °C 烘干至恒重后称重，重量数据记为 W_{110} (mg)；再经 450 °C 灼烧 6 h 后称重，重量数据记为 W_{450} (mg)。悬浮颗粒有机物 (T_{PM}) 和颗粒有机物 (P_{OM}) 的计算方法为： $P_{OM} = W_{110} - W_{450}$ ， $T_{PM} = W_{110} - W_0$ 。

1.3.2 清滤率测定 清滤率 (C_R) 是指单位时间的平均清滤率 (L/h)，其计算公式为 (Coughlan et al. 1969)： $C_R = V \ln[C_0 - (C_0 S_d / C_t)] / (NT)$ ，式中， V 为实验用水的体积 (L)， N 为实验泥蚶个体数， T 为实验持续时间 (h)， C_0 和 C_t 分别为实验开始和 T 时间实验水体中颗粒有机物 (P_{OM}) 浓度 (mg/L)， S_d 为对照饵料的变化系数。 $S_d = (C_{0d} - C_{td}) / C_{0d}$ ，式中， C_{0d} 和 C_{td} 分别为对照组实验开始和 T 时间的颗粒有机物 (P_{OM}) 浓度 (mg/L)。

实验结束后，取出所有泥蚶，用游标卡尺

(ARZ 电子数显卡尺, 量程 0~150 mm, 精度 0.01 mm) 测其壳长、壳宽, 用解剖刀把贝壳打开, 取软体部于 65 °C 下烘干至恒重, 称重。

1.3.3 滤食率测定 滤食率 (I_R) 是指单位体重滤食率 (mg/h), 其计算公式为 (Jørgensen 2010): $I_R = V(C_{td} - C_{td}S_d - C_t) / (NT)$, 式中, C_{td} 、 C_t 分别为实验结束时对照组、实验组水体内的颗粒有机物 (P_{OM}) 浓度 (mg/L), T 为实验时间 (h), V 为实验水体体积 (L), N 为实验贝个数, S_d 为对照饵料的变化系数。

1.3.4 吸收率测定 吸收率 (A_E), 是指贝类经消化系统吸收的物质占其摄食量的比例 (%), 其计算公式为 (Conover 1966): $A_E = (W_F - W_E) / [(1 - W_E) W_F] 100\%$, 式中, W_F 为水体中无灰分干重的比例 (P_{OM}/T_{PM}), W_E 为粪便中无灰分干重的比例 (P_{OM}/T_{PM})。

1.3.5 数据分析及处理 为了消除实验个体差异对泥蚶生理指标的影响, 将实验数据转换为 1g 标准下的数据进行比较。采用以下公式: $S_s = (1 / W_e)^b S_e$, 式中, S_s 为 1 g 泥蚶的生理指标 (清滤率、滤食率), S_e 为实验情况下生理指标 (清滤率、滤食率) 的实测值, W_e 为实验贝软体部干重 (g), b 为重量指数, 取值 0.62 (Bayne et al. 1983)。

使用 Graphpad Prism 5 软件统计数据 and 作图, 使用 SPSS13.0 软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析 (ANOVA) 比较同规格泥蚶在不同 pH 条件下清滤率、滤食率、吸收率差异; 采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 比较 pH 与规格, 若两者具有显著性差异, 则说明泥蚶受 pH 影响与其规格有关, 反之则无; 标准偏差用以衡量数据值偏离算术平均值的程度, 本实验中采用标准偏差来反映不同规格泥蚶受 pH 影响程度。

2 结果

2.1 不同 pH 对三种规格泥蚶清滤率的影响

在不同 pH 条件对三种规格泥蚶的影响实验中, 每个 pH 水平所用泥蚶清滤率、滤食率、

吸收率为 3 个平行组的平均值。实验结果表明, 三种规格的泥蚶在 pH (6.5~8.5) 范围内, 随 pH 的升高, 清滤率均呈现由低到高的趋势; 在 pH (8.5~9.5) 范围内, 随 pH 的升高, 清滤率均呈现由高到低的趋势。所有规格泥蚶清滤率在 pH = 8.5 时达到峰值, 大、中、小规格泥蚶的峰值分别为 0.69 L/h、1.21 L/h、1.91 L/h (图 1)。对比相同 pH 下不同规格泥蚶的清滤率, 均表现出清滤率按照大、中至小规格逐渐降低。双因素方差分析, pH 与规格之间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 说明泥蚶清滤率受 pH 影响与其规格有关。标准偏差分析, 大、中、小规格泥蚶在 pH 6.5~9.5 范围内平均清滤率的标准偏差分别为 0.344、0.331、0.171, 大规格略小于中规格泥蚶的标准偏差, 但无显著性差异 ($P > 0.05$), 小规格泥蚶小于大、中规格泥蚶的标准偏差, 且具有显著性差异 ($P < 0.05$), 表明随 pH 变化, 大、中规格泥蚶清滤率受影响程度相近, 小规格泥蚶受 pH 影响程度小于大、中规格泥蚶。

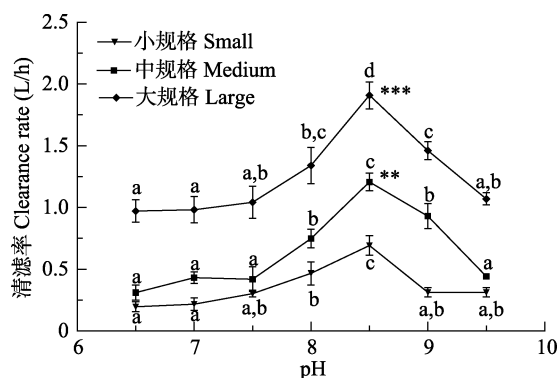


图 1 不同 pH 下三种规格泥蚶的清滤率 ($n = 3$)

Fig. 1 Clearance rates of *Tegillarca granosa* with different pH

同一规格折线图中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$); ** ($P < 0.01$)、*** ($P < 0.001$) 表示 pH = 8.5 时, 以小规格泥蚶为对照的显著性差异。

Different letter on line chart indicate significant difference in same specification; ** ($P < 0.01$), *** ($P < 0.001$) indicate significant difference with small specification as control in pH = 8.5.

2.2 不同 pH 对三种规格泥蚶滤食率的影响

三种规格的泥蚶在 pH 6.5 ~ 8.5 范围内, 随 pH 的升高, 滤食率均呈现由低到高的趋势; 在 pH 8.5 ~ 9.5 范围内, 随 pH 的升高, 滤食率均呈现由高到低的趋势; 所有规格泥蚶滤食率在 pH = 8.5 时达到峰值, 大、中、小规格泥蚶的峰值分别为 8.72 mg/h、13.92 mg/h、7.85 mg/h (图 2)。双因素方差分析, pH 与规格之间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 说明泥蚶滤食率受 pH 影响与其规格有关; 标准偏差分析, 大、中、小规格泥蚶在 pH 6.5 ~ 9.5 范围内平均滤食率的标准偏差为 1.35、4.53、1.99, 大规格略小于小规格泥蚶的标准偏差, 但无显著性差异 ($P > 0.05$), 中规格泥蚶大于大、小规格泥蚶的标准偏差, 具有极其显著性差异 ($P < 0.001$), 表明随 pH 变化, 大、小规格泥蚶滤食率受影响程度相近, 且大、小规格泥蚶受影响程度小于中规格泥蚶 (图 2)。

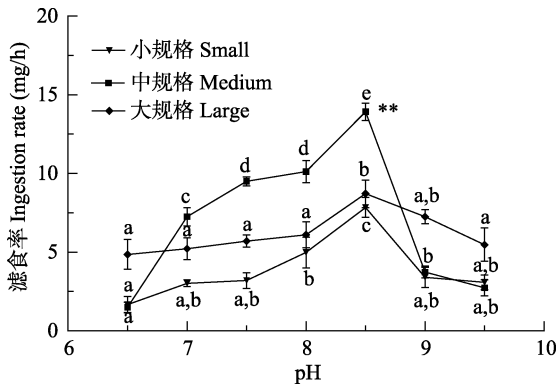


图 2 不同 pH 下三种规格泥蚶滤食率 ($n = 3$)

Fig. 2 Ingestion rates of *Tegillarca granosa* with different pH

同一规格折线图中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$); ** ($P < 0.01$) 表示 pH = 8.5 时, 以小规格泥蚶为对照的显著性差异。Different letter on line chart indicate significant difference in same specification; ** ($P < 0.01$) indicate significant difference with small specification as control in pH = 8.5.

2.3 不同 pH 对三种规格泥蚶吸收率的影响

实验结果表明, 三种规格的泥蚶在 pH 6.5

~ 8.5 范围内, 随 pH 的升高, 吸收率均呈现由低到高的趋势; 在 pH 8.5 ~ 9.5 范围内, 随 pH 的升高, 吸收率均呈现由高到低的趋势。所有规格泥蚶吸收率在 pH = 8.5 时达到峰值, 大、中、小规格泥蚶的峰值分别为 78.80%、86.68%、81.87%, 各规格泥蚶吸收率无显著性差异 ($P > 0.05$)。对比相同 pH 下不同规格泥蚶的吸收率, 均表现出吸收率按照中、小至大规格逐渐下降 (图 3)。双因素方差分析, pH 与规格之间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 说明泥蚶吸收率受 pH 影响与其规格有关。标准偏差分析, 大、中、小规格泥蚶在 pH 6.5 ~ 9.5 范围内平均吸收率的标准偏差为 13.90、8.06、7.95, 小规格略小于中规格泥蚶的标准偏差, 但无显著性差异 ($P > 0.05$), 大规格泥蚶大于中、小规格泥蚶的标准偏差, 具有显著性差异 ($P < 0.05$), 表明随 pH 变化, 中、小规格泥蚶吸收率受影响程度相近, 中、小规格泥蚶受影响程度小于大规格泥蚶。

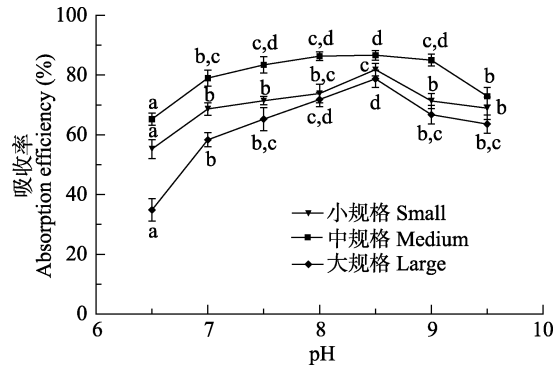


图 3 不同 pH 下三种规格泥蚶的吸收率 ($n = 3$)

Fig. 3 Absorption Efficiencies of *Tegillarca granosa* with different pH

同一规格折线图中字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。Different letter on line chart indicate significant difference in same specification.

3 分析与讨论

3.1 泥蚶规格对清滤率、滤食率、吸收率的影响

吴洪喜等 (2004) 的研究发现, 1 年龄后

泥蚶壳生长开始变缓, 而体重却呈现生长加快, 说明小规格与中规格泥蚶之间存在由壳生长为主转变为软组织生长为主的物质积累方向改变的过程。因此, 在 $\text{pH} = 8.5$ 时, 中规格泥蚶清滤率、滤食率、吸收率均大于小规格泥蚶的原因可能不仅仅是发育程度的不同所导致。相关研究发现, 中国对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 自生长转入繁殖期, 性腺开始发育后, 机体的物质与能量代谢水平发生了显著性变化, 物质积累的方向也发生了改变 (孙建明等 1995)。性成熟泥蚶滤食水平可能与生殖周期有关。性成熟泥蚶每一年都有一个生殖周期, 其中, 休止期的泥蚶肥满度最低 (郑家声等 1995)。本实验中大规格泥蚶已性成熟且处在生殖周期中的休止期, 这可能是造成大规格泥蚶滤食水平 (滤食率、吸收率) 相比与中规格泥蚶要低的原因之一。

3.2 pH 对清滤率、滤食率、吸收率的影响

泥蚶成贝通过鳃丝的摆动形成漩流, 海水中的食物通过鳃丝过滤, 颗粒大小适宜的食料借助鳃纤毛的运动通过唇瓣进入体内, 大颗粒食料则排出体外 (林志华等 2015)。实验表明, 过高或过低的 pH 短时间内会抑制鳃丝纤毛运动, 而且会导致组织细胞损坏 (徐在宽 1998) 克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 在高 pH ($\text{pH} = 10.2$) 胁迫下其鳃组织结构变化较为明显, 随着胁迫时间的延长, 呼吸上皮细胞逐渐脱落坏死, 角质层出现破损, 鳃叶受损程度加剧 (陶易凡等 2016)。除此之外, 鳃组织细胞中离子转运酶也同样会受到 pH 的影响。鳃丝组织中的 $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ 活性对水生生物生理活动具有显著性影响 (蔡星媛等 2015)。相关研究表明, 短时间过酸或过碱水环境对克氏原螯虾鳃的 $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ 活性有抑制作用, 且碱性条件具有更强的抑制作用 (郭春雨等 2007), 随着 pH 下降和低 pH 暴露的时间延长同样会使鱼鳃组织的 $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ 酶活力明显下降 (卢健民等 2001)。上述结果表明, pH 变化会对水生生物的鳃组织结构及鳃组织中

$\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ 活力产生影响, pH 超过一定限度甚至可能造成鳃组织损坏。泥蚶的鳃担负着滤食和呼吸的功能, 鳃组织结构损伤、鳃组织细胞内离子转运酶受抑制, 必定会对其摄食造成影响, 从而影响生长发育, 甚至造成死亡。

3.3 泥蚶受 pH 影响程度与规格的关系

水体 pH 对泥蚶的清滤率、滤食率、吸收率具有显著性影响 ($P < 0.05$), 但对不同规格泥蚶的影响程度不同。在清滤率实验中, 大、中规格与小规格泥蚶受 pH 影响程度相比较发现, 小规格泥蚶受影响程度更小, 这与潘鲁青等 (2002)、Bamber (1990) 和黄洋等 (2014) 对其他双壳贝类的研究结果不同, 这可能是由于实验规格跨度、贝种类不同所造成的区别。环境 pH 的突变可以导致贝类内环境失衡, 进而做出应激反应, 青蛤在短时间的 pH 胁迫下, 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 的含量显著升高 ($P < 0.05$) (蔡娟 2016), 超氧化物歧化酶活性的上升意味着机体受到活性氧自由基的伤害减小 (徐立红等 1995), 从而在一定程度上缓解了 pH 变化对贝类滤食水平的影响。在滤食率实验中, 大规格泥蚶受 pH 影响程度比中规格泥蚶更小, 这说明大规格泥蚶的抗应激能力优于中规格泥蚶。泥蚶吸收率的变化与贝类消化酶活性有直接关系。张永普等 (2003) 研究表明, 年龄显著影响泥蚶蛋白酶、淀粉酶活力, 低龄泥蚶消化酶活力高于高龄泥蚶。这与本实验中, 小规格和中规格泥蚶吸收率高于大规格泥蚶的实验结果相同。相关研究表明, 当海水 pH 低于 7.5 时, 软体动物的免疫功能将会受损, 且新陈代谢将会永久性降低 (Michaelidis et al. 2005)。pH ≤ 7.5 和与 pH ≥ 9 的实验组泥蚶在 2 h 后都有不同程度的不适反应, 部分或全部贝壳紧闭, 直接影响泥蚶摄食。

机体的生长是伴随着摄食数量的增多、营养物质消化吸收率增高和营养物质积累的增多而实现的, 因此, 在投饵、降水及人工增氧、池塘消毒、水质底质改良、养殖水交换等过程

中, 应控制池塘水体 pH 在 7.5 ~ 9.0 之间, 以防过大的 pH 变化导致泥蚶生长发育受阻甚至死亡。通过 pH 变化对清滤率、滤食率、吸收率影响的研究可以更直观地反映泥蚶机体对 pH 变化所做出的反馈, 但水体 pH 影响泥蚶摄食的具体机理还有待进一步研究。

参 考 文 献

- Bamber R N. 1990. The effects of acidic seawater on three species of lamellibranch mollusk. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 143(3): 181–192.
- Bayne B L, Newell R C. 1983. *Physiological energetics of marine mollusks*// Saleuddin A S M, Wilbur K M. *The Mollusca Physiology*. Vol.1.4. New York: Academic Press, 407–515.
- Conover R J. 1966. Assimilation of organic matter by Zooplankton. *Limnology & Oceanography*, 11(3): 338–345.
- Coughlan J. 1969. The estimation of filtering rate from the clearance of suspensions. *Marine Biology*, 2(4): 356–358.
- Jørgensen C C B. 2010. On the water transport through the gills of bivalves. *Acta Physiologica*, 5(4): 297–304.
- Michaelidis B, Ouzounis C, Palaras A, et al. 2005. Effects of long-term moderate hypercapnia on acid base balance and growth rate in marine mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Marine Ecology Progress*, 293(1): 109–118.
- Ringwood A H, Keppler C J. 2002. Water quality variation and clam growth: Is pH really a non-issue in estuaries? *Estuaries*, 25(5): 901–907.
- Shi W, Zhao X, Han Y, et al. 2017. Effects of reduced pH and elevated pCO₂ on sperm motility and fertilisation success in blood clam, *Tegillarca granosa*. *New Zealand Journal of Marine & Freshwater Research*, 51(4): 543–554.
- Wittmann A C, Pörtner H O. 2013. Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change*, 3(11): 995–1001.
- 包永波, 尤仲杰. 2006. 海洋滤食性贝类摄食率影响因子研究现状. *渔业科学进展*, 27(1): 76–80.
- 蔡娟. 2016. pH 对青蛤胚胎发育、幼虫生长及相关酶活性的影响. 上海: 上海海洋大学硕士学位论文, 22–32.
- 蔡娟, 周凯, 盛文权, 等. 2018. pH 对青蛤的钙化率和两种酶活性的影响. *海洋渔业*, 40(1): 57–64.
- 蔡星媛, 张秀梅, 田璐, 等. 2015. 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. *南方水产科学*, 11(2): 12–19.
- 陈剑锋, 赖延和, 童万平. 2006. 南美白对虾工厂化养殖水体 pH 值的变化特征. *水产科学*, 25(9): 456–458.
- 郭春雨, 管越强, 刘波兰. 2007. 温度、pH 和盐度对克氏原螯虾鳃 Na⁺-K⁺-ATPase 活性的影响. *动物学杂志*, 42(6): 96–102.
- 何苗, 周凯, 么宗利, 等. 2017. 饵料浓度、温度对缢蛏能量代谢的影响. *海洋学报*, 39(8): 129–135.
- 何义进, 周群兰, 刘勃, 等. 2009. 不同增氧方式对中华绒螯蟹养殖池塘水质的影响. *渔业现代化*, 36(4): 23–26.
- 黄洋, 黄海立, 邓乐平, 等. 2014. 盐度、pH 和规格对尖紫蛤滤水率、摄食率、吸收率的影响. *广东海洋大学学报*, 34(1): 42–47.
- 匡世焕, 方建光, 孙慧玲, 等. 1996. 桑沟湾栉孔扇贝不同季节滤水率和同化率的比较. *海洋与湖沼*, 27(2): 194–199.
- 栗志民, 刘志刚, 邓海东. 2011. 温度和盐度对企鹅珍珠贝清滤率、滤食率、吸收率的影响. *水产学报*, 35(1): 96–103.
- 林志华, 董迎辉, 陈彩芳, 等. 2015. *泥蚶养殖生物学*. 北京: 科学出版社, 19–24.
- 刘建业, 喻达辉, 李金碧. 2011. 盐度和 pH 对合浦珠母贝 (*Pinctada fucata*) 耗氧率和排氨率的影响. *海洋与湖沼*, 42(4): 603–607.
- 卢健民, 卢玲. 2001. 低 pH 对鲤鳃组织 Na⁺-K⁺-ATPase 酶活性的影响. *水生生物学报*, 25(1): 102–104.
- 潘鲁青, 范德朋, 马姓, 等. 2002. 环境因子对缢蛏滤水率的影响. *水产学报*, 26(3): 226–230.
- 彭建华, 陈文祥, 栾建国, 等. 2004. 温度、pH 对二种淡水贝类滤水率的影响. *动物学杂志*, 39(6): 2–6.
- 孙建明, 刘亚杰, 周遵春. 1995. 不同生长时期中国对虾蛋白酶、脂肪酶活性变化的研究. *水产科学*, 14(2): 11–13.
- 陶易凡, 强俊, 王辉, 等. 2016. 高 pH 胁迫对克氏原螯虾的急性毒性和鳃、肝胰腺中酶活性及组织结构的影响. *水产学报*, 40(11): 1694–1704.
- 王方国. 1995. 对虾养殖水质与饵料的关系研究. *海洋学研究*, 13(2): 9–15.
- 王有基, 李丽莎, 李琼珍, 等. 2014. 海洋酸化和全球变暖对贝类生理生态的影响研究进展. *生态学报*, 34(13): 3499–3508.
- 吴洪喜, 柴雪良. 2004. 浙江乐清湾泥蚶的繁殖习性和生长特性. *动物学杂志*, 39(3): 47–50.
- 夏来根, 宋学宏, 张磊磊, 等. 2012. 4 种微生态制剂对虾池水质及青虾生长性能的影响. *水生态学杂志*, 33(3): 101–106.
- 徐立红, 张甬元, 陈宜瑜. 1995. 分子生态毒理学研究进展及其在水环境保护中的意义. *水生生物学报*, 19(2): 171–185.
- 徐在宽. 1998. 三角帆蚌鳃瓣活力的研究. *水产养殖*, 12(3): 17–19.

张永普, 孙建礼, 周化斌. 2003. 不同年龄泥蚶几种消化酶活性的季节变化. 动物学杂志, 38(4): 28-31.

郑家声, 王梅林, 王志勇, 等. 1995. 泥蚶的性腺发育和生殖周期.

青岛海洋大学学报, 25(4): 503-510.

朱雨瑞, 徐继林, 严小军. 2010. 5 种微藻对 4 种滩涂贝类稚贝生长的影响. 海洋学研究, 28(3): 60-66.