

文章编号: 1000-0615(2019)04-1038-10

DOI: 10.11964/jfc.20180411248

长牡蛎壳黑选育品系和野生群体在摄食和代谢方面的比较

种金豆¹, 李琪^{1,2*}, 王涛¹

(1. 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 山东青岛 266003;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东青岛 266200)

摘要: 为探究长牡蛎壳黑选育品系优良性状的生理学基础, 采用实验生态学方法比较研究了长牡蛎壳黑选育品系和野生群体在不同温度和盐度下的摄食和代谢差异。结果显示, 在16~32℃范围内, 温度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氮率均有显著影响。随温度升高, 两群体滤水率先增加后降低。野生群体滤水率在24℃达到最大值, 壳黑品系在28℃达到最大值。两群体耗氧率和排氮率均随温度升高呈增加趋势, 并未发现显著性转折点。长牡蛎壳黑选育品系和野生群体间滤水率和排氮率差异显著, 壳黑品系滤水率均高于野生群体, 耗氧率均低于野生群体, 且在32℃壳黑品系排氮率显著低于野生群体。在盐度15~35范围内, 盐度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氮率均有显著影响。随盐度升高, 两群体的滤水率、耗氧率和排氮率总体均呈先增加后降低的趋势。长牡蛎壳黑选育品系和野生群体间滤水率差异显著, 壳黑品系滤水率均高于野生群体, 且在盐度15~25条件下壳黑品系排氮率均低于野生群体。两群体O:N值均在16℃和盐度35组最大, 温度升高或盐度降低均会使两群体O:N值下降。温度实验中, 在32℃时, 野生群体O:N最低值为7.57, 壳黑品系O:N值变化范围为10.52~29.31。盐度实验中, 在盐度20时, 野生群体O:N最低值为9.10, 壳黑品系O:N值变化范围为11.51~22.98。研究表明, 相较于野生群体, 长牡蛎壳黑选育品系更能适应高温和低盐环境, 而较高的摄食率和较低的代谢率可为其提供更多的能量用于生长。

关键词: 长牡蛎; 壳色选育品系; 滤水率; 耗氧率; 排氮率; 温度; 盐度

中图分类号: S 968.3

文献标志码: A

长牡蛎(*Crassostrea gigas*)也称太平洋牡蛎, 具有生长速率快、养殖成本低、抗逆性高和适应性强等优点, 是重要的海产养殖经济贝类。2017年我国牡蛎养殖产量超过487.9万t, 占全国贝类总养殖产量的34%^[1]。作为主要的养殖贝类, 关于长牡蛎生长和存活性状的遗传改良已取得诸多成果^[2-4]。除此之外, 贝壳色、外套膜和闭壳肌痕着色等颜色相关的性状也引起越来越多的育种工作者的关注^[5-6]。贝类壳色影响着消费者的喜好和选择, 受消费者喜爱的壳色可以显著

提高其商品价值。因此, 本课题组自2010年开始进行连续4代家系选育, 对长牡蛎壳黑色性状进行纯化, 并在此基础上以壳高为选育指标进行群体选育, 构建长牡蛎壳黑选育品系。该新选育品系不仅具靓丽的外观, 还具有优良的生长性状^[7], 具有良好的产业应用前景。

滤食性贝类具有极强的滤水能力, 其摄食机制主要是通过过滤大量的水体, 利用鳃丝及其上着生的纤毛摄取浮游植物和有机碎屑获取食物^[8]。滤水率是反映贝类生理状态的重要指

收稿日期: 2018-04-14 修回日期: 2018-07-04

资助项目: 国家自然科学基金(31772843); 泰山学者种业计划专家项目; 青岛市产业培育计划项目(17-3-3-64-nsh); 山东省科技发展计划项目(2016ZDJS06A06)

通信作者: 李琪, E-mail: qili66@ouc.edu.cn

标, 与其生长发育密切相关^[9]。而贝类能量支出的主要方式为呼吸和排泄, 是贝类新陈代谢的基本生理活动。耗氧率和排氨率是衡量贝类呼吸和排泄代谢的重要指标, 不仅反映了贝类的生理活动状态, 也反映着机体在不同环境下的能量消耗情况^[10]。在自然海区, 贝类摄食行为与新陈代谢等生理活动会因温度和盐度等环境因素季节性变化而产生相应变化, 这是贝类为适应环境变化对自身生理状况调节的结果^[11]。因此, 对长牡蛎滤水率和耗氧率等生理性状的研究, 不仅可以了解长牡蛎生理活动状态, 还可以对其环境适应能力进行评估。

贝类摄食和代谢等内在生理性状的不同会导致个体间生长速率存在差异^[12-13]。研究表明, 快速生长个体通常与其较高的摄食能力、较低的代谢率和生长代谢值有关^[14-15]。而且, 从贝类幼虫培育时期到成贝养成期这种由于内在生理性状导致的快速生长个体均保持着优良的生长性状^[16-17]。这一现象为双壳贝类生长性状的改良提供了可行方案^[18-19]。本研究以长牡蛎野生群体为对照组, 研究不同温度和盐度条件对长牡蛎壳黑选育品系滤水率、耗氧率和排氨率的影响, 以探讨长牡蛎壳黑选育品系生理活动状态及其环境适应能力, 并对长牡蛎壳黑选育品系和野生普通群体的摄食活动和代谢水平进行比较研究, 以探讨长牡蛎壳黑选育品系优良性状

的生理基础, 为培育优良新品种提供基础资料。

1 材料与方方法

1.1 实验材料

实验样品采自养殖于山东荣成海域的第6代长牡蛎壳黑选育群体, 样品为2龄贝, 壳高为(89.26±9.01) mm。并采集同海区长牡蛎野生群体2龄贝为对照组, 壳高为(90.81±10.31) mm (图1)。实验前清除贝体表面附着物并暂养10 d, 期间水温16 °C, 盐度32。每2天100%换水1次, 每日投喂新月菱形藻(*Nschia closterium*) 4次。实验所用海水经沉淀、沙滤后贮存备用, 每次实验前充分曝气并测定盐度。

1.2 实验方法

实验梯度 设置5个温度梯度(16、20、24、28和32 °C), 采用水浴控温仪控制水温。每天升高或降低温度2 °C, 达到预设温度后稳定7 d, 盐度保持在33, 其他条件与暂养期间一致。设置5个盐度梯度(5、20、25、30和35), 每天升高或降低盐度2, 低盐度海水通过向自然海水中添加充分曝气的淡水配制而成, 高盐度海水通过向充分曝气的自然海水中添加海盐, 再经过脱脂棉过滤配制而成。达到预设盐度后稳定7 d, 温度保持在16 °C, 其他条件与暂养期间一致。

滤水率的测定 实验前停饵1 d, 取规格

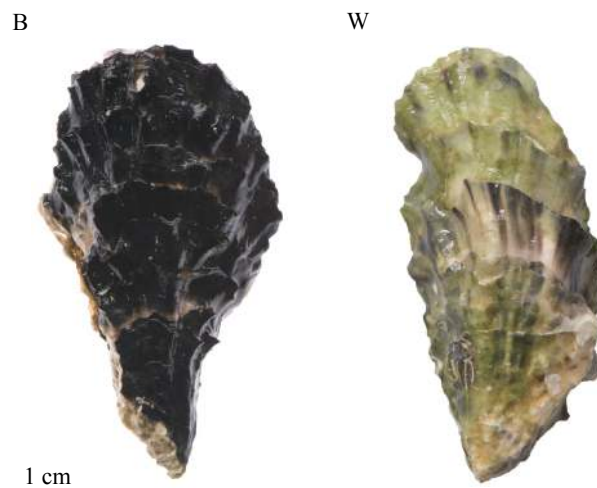


图1 实验所用长牡蛎壳黑选育品系和野生普通群体

B.壳黑选育品系; W.野生普通群体

Fig. 1 Samples of *C. gigas* from the black-shell strain and wild population

B. black-shell strain; W. wild population

一致的壳黑和野生长牡蛎各1个分别放入3 L广口瓶中, 设3个重复组和1个空白对照组。实验采用新月菱形藻, 初始浓度为 5×10^5 个/mL。实验持续1 h。实验结束时在显微镜下采用血球计数板计算藻的浓度。滤水率(clearance rate, CR)按以下公式计算:

$$CR = V \times \ln [(C_0 - C_0 \times S_d) / C_t] / (W \cdot t)$$

式中, CR为滤水率[L/(g·h)]; V为溶液体积(L); C_0 和 C_t 为实验开始时和t时间后藻液浓度(个/mL); W为实验所用贝软体部干重(g); t为实验所用时间(h); S_d 为对照组饵料的变化系数:

$$S_d = (C_{0d} - C_{td}) / C_{0d}$$

式中, C_{0d} 和 C_{td} 分别为对照组实验开始和t时间后的藻液浓度(个/mL)。

耗氧率和排氨率的测定 实验前停饵6 h, 以避免因摄食行为产生的特殊动力效应对实验的影响。各实验组设置情况与滤水率实验相同, 取规格一致的壳黑和野生长牡蛎各1个, 分别放入装满经脱脂棉过滤并过夜充氧的新鲜海水的3 L呼吸瓶中, 然后用保鲜膜封口。实验持续3 h, 结束后利用虹吸法取水样并采用Winker碘量法测定水中溶解氧; 采用次溴酸钠氧化法测定水中氨态氮浓度。耗氧率(oxygen consumption, OCR)和排氨率(ammonia-N excretion rate, AER)分别以下式计算:

$$OCR = (DO_0 - DO_t) \times V / (W \cdot t)$$

$$AER = (N_t - N_0) \times V / (W \cdot t)$$

式中, OCR、AER分别为单位干质量耗氧率[mg/(g·h)]和单位干质量排氨率[mg/(g·h)]; DO_0 、 DO_t 为实验开始时和t时间后水中溶解氧含量(mg/L); N_0 、 N_t 为实验开始时和t时间后水中氨氮的浓度(mg/L); V为呼吸瓶容积(L); W为实验所用贝软体部干重(g); t为实验所用时间(h)。

氧氮比(O : N)的计算公式:

$$O : N = (OCR / 16) / (AER / 14)$$

1.3 数据分析

数据以平均值±标准差(mean±SD)表示。所得数据采用SPSS 19.0进行分析, 对温度和群体及盐度和群体进行双因素方差分析(Two-Way ANOVA)。组间差异采用Duncan氏多重比较分析, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 两群体长牡蛎生物学数据的测定

水生生物的滤水率和耗氧率等生理指标易受个体规格和pH值等内在与外在因素的影响^[20-21]。为避免上述因素的干扰, 本研究中采用同一规格的长牡蛎壳黑选育品系和野生群体个体, 使其在壳高和湿重等生物学指标方面无显著差异($P > 0.05$)(表1)。

2.2 温度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率的影响

在16~32 °C, 温度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率均有显著影响($P < 0.05$)(表2)。长牡蛎两群体滤水率随温度升高先增加后降低(图2)。壳黑品系和野生群体的滤水率分别在28 °C和24 °C达到最大值, 均显著高于32 °C组($P < 0.05$)。

随温度升高, 长牡蛎壳黑品系耗氧率和排氨率均逐步增加(图3, 图4)。壳黑品系耗氧率和排氨率均在32 °C组最大, 与28 °C组无显著差异($P > 0.05$), 显著高于16 °C和20 °C组($P < 0.05$)。随温度升高, 长牡蛎野生群体排氨率呈上升趋势。野生群体排氨率在32 °C组达到最大值, 显著高于其他温度组($P < 0.05$)。方差分析表明, 两群体间滤水率和排氨率差异显著($P < 0.05$)。实验温度范围内, 长牡蛎壳黑品系滤水率均大于野生群体, 其耗氧率均小于野生群体, 且在28 °C组长牡蛎壳黑品系滤水率显著高于野生群体($P < 0.05$)。除28 °C组外, 长牡蛎壳黑品系排氨率均低于野

表 1 长牡蛎壳黑选育品系和野生群体生物学数据

Tab. 1 Biological characteristics of black shell strain and wild population of *C. gigas* (n=60)

| 实验组 experimental group | 壳高/mm shell height | 壳长/mm shell length | 壳宽/mm shell width | 湿重/g wet weight | 软体部干重 soft tissue weight |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 壳黑品系 black shell strain | 89.26±9.01 ^a | 54.26±8.59 ^a | 23.97±5.30 ^a | 59.35±12.41 ^a | 0.40±0.12 ^a |
| 野生群体 wild population | 90.81±10.31 ^a | 48.01±5.61 ^b | 25.13±4.43 ^a | 55.06±15.17 ^a | 0.37±0.09 ^a |

注: 同一列数据标注不同上标字母代表差异显著($P < 0.05$)

Notes: the different superscript letters of same column values are significantly different ($P < 0.05$)

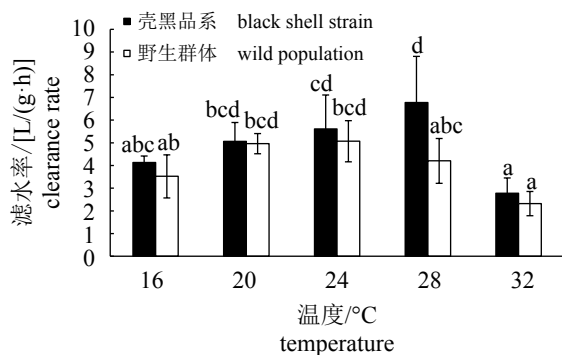


图 2 温度对长牡蛎壳黑品系和野生群体滤水率的影响

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Fig. 2 Effects of temperature on the clearance rate of black shell strain and wild population of *C. gigas*

Different letters means significant difference ($P < 0.05$), the same below

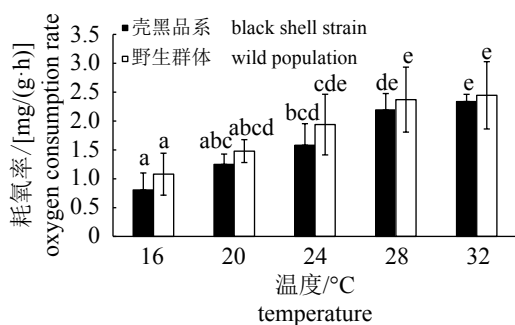


图 3 温度对长牡蛎壳黑品系和野生群体耗氧率的影响

Fig. 3 Effects of temperature on the oxygen consumption rate of black shell strain and wild population of *C. gigas*

表 2 温度和群体, 盐度和群体对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率影响的方差分析

Tab. 2 Two-Way ANOVA comparing the effects of temperature, population and salinity, population on clearance rate, oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *C. gigas*

| 方差来源 source of variation | 自由度 df | 滤水率/[L/(g·h)] clearance rate | | | | 耗氧率/[mg/(g·h)] oxygen consumption rate | | | | 排氨率/[mg/(g·h)] ammonia excretion rate | | | |
|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-------|--------|-------|---|-------|-------|--------|--|----|---|---|
| | | 均方 | MS | F | P | 均方 | MS | F | P | 均方 | MS | F | P |
| 温度 temperature | 4 | 9.276 | 8.567 | 0.000* | 2.240 | 13.956 | 0* | 0.035 | 28.142 | 0* | | | |
| 群体 population | 1 | 5.467 | 5.049 | 0.036* | 0.393 | 2.451 | 0.133 | 0.007 | 5.957 | 0.024* | | | |
| 温度×群体 temperature×population | 4 | 1.436 | 1.326 | 0.295 | 0.013 | 0.082 | 0.987 | 0.004 | 2.938 | 0.046* | | | |
| 盐度 salinity | 4 | 19.963 | 9.454 | 0* | 0.808 | 8.987 | 0* | 0.001 | 3.893 | 0.017* | | | |
| 群体 population | 1 | 13.767 | 6.519 | 0.019* | 0.001 | 0.007 | 0.933 | 0 | 0.391 | 0.539 | | | |
| 盐度×群体 salinity×population | 4 | 2.032 | 0.962 | 0.450 | 0.034 | 0.382 | 0.819 | 0 | 0.262 | 0.899 | | | |

注: *表示差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: * means significant difference ($P < 0.05$)

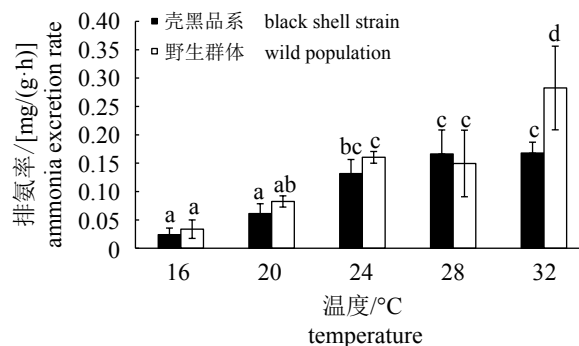


图 4 温度对长牡蛎壳黑品系和野生群体排氨率的影响

Fig. 4 Effects of temperature on the ammonia excretion rate of black shell strain and wild population of *C. gigas*

生群体, 且在 32 °C 组其排氨率显著低于野生群体 ($P < 0.05$)。

2.3 盐度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率的影响

在盐度 15~35, 盐度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率均有显著影响 ($P < 0.05$) (表 2)。长牡蛎两群体滤水率均随盐度升高先增加后降低。在盐度 30 组两群体滤水率均高于盐度 35 组, 与盐度 25 组无显著差异 ($P > 0.05$), 显著高于盐度 15 组 ($P < 0.05$) (图 5)。

随盐度增加, 两群体耗氧率和排氨率总体呈先增加后降低的趋势 (图 6, 图 7)。在盐度 30 组两群体耗氧率高于盐度 35 组, 显著高于盐度 20 和 15 组 ($P < 0.05$)。两群体排氨率在盐度 30 组最大,

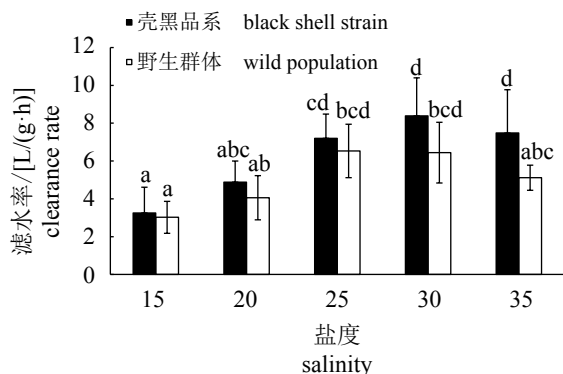


图5 盐度对长牡蛎壳黑品系和野生群体滤水率的影响

Fig. 5 Effects of salinity on the clearance rate of black shell strain and wild population of *C. gigas*

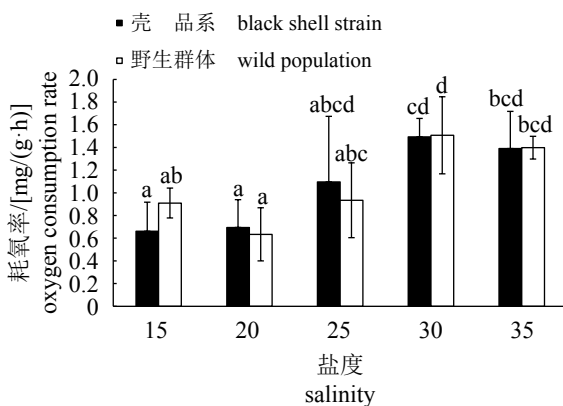


图6 盐度对长牡蛎壳黑品系和野生群体耗氧率的影响

Fig. 6 Effects of salinity on the oxygen consumption rate of black shell strain and wild population of *C. gigas*

均高于其他盐度组。方差分析表明, 两群体间滤水率差异显著($P < 0.05$)。实验盐度范围内长牡蛎壳黑品系滤水率均大于野生群体, 且在盐度35组其滤水率显著高于野生群体($P < 0.05$)。除盐度30组外, 长牡蛎壳黑品系排氨率均低于野生群体。

2.4 温度和盐度对长牡蛎O : N值的影响

在16~32 °C, 长牡蛎两群体O : N值均在16 °C组达到最大。随温度增加, 总体上呈降低趋势(表3)。在32 °C时, 野生群体O : N最低值为7.57, 长牡蛎壳黑品系和野生群体O : N值的范围分别为10.52~29.31和7.57~27.97。在盐度15~35范围内, 长牡蛎两群体O : N值均在盐度35组出现最大值。盐度降低会致使两群体O : N值下降, 在盐度20组野生群体出现O : N最低值为9.10, 长牡蛎

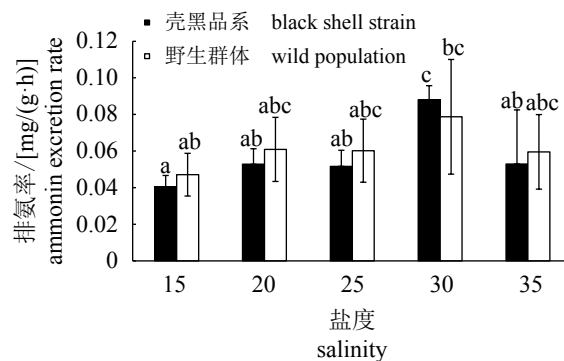


图7 盐度对长牡蛎壳黑品系和野生群体排氨率的影响

Fig. 7 Effects of salinity on the ammonia excretion rate of black shell strain and wild population of *C. gigas*

壳黑品系和野生群体O : N值的范围分别为11.51~22.98和9.10~20.53。

3 讨论

3.1 温度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率的影响

温度是影响水生生物新陈代谢的主要环境因子。在一定温度范围内, 贝类摄食和代谢等生理活动会随温度升高而增强, 而超过其适宜的生长存活范围时各生理指标显著下降。Guzmán-Aguero等^[9]的研究表明, 牡蛎(*C. corteziensis*)随温度升高滤水率先增加后降低, 并在29 °C达到最大值; 邓传敏等^[22]研究也表明, 长牡蛎在28 °C时摄食活力最强。本研究结果得到相似规律, 长牡蛎野生群体滤水率在24 °C最大, 壳黑品系在28 °C滤水率达到最大值。在贝类滤食活动中, 鳃丝侧纤毛的摆动是摄食行为的主要动力, 而其摆动频率与温度成正相关^[23], 这是温度对贝类滤食活动影响的主要原因。同时, 温度升高会使海水的黏滞度降低, 也有利于滤水率的增强。耗氧率作为贝类新陈代谢的生理指标, 其反映机体有氧呼吸的能量代谢水平。同时, 排氨率是评估贝类耐受环境压力的重要指标^[24-25]。温度升高会促使贝类体内的酶活性增加, 加速了各组织器官的生理生化反应, 从而提高机体物质代谢水平。但当温度超过机体耐受范围时, 会引起机体生理功能的紊乱^[26]。在实验温度范围内, 壳黑品系和野生群体的耗氧率和排氨率均随温度升高呈增加趋势, 但并未发现显著性转折点。Bougrier等^[27]在5~32 °C范围内对长牡蛎耗氧率的

表3 温度和盐度对5组长牡蛎O:N值的影响

| 温度/°C temperature | 壳黑品系 black strain | 野生群体 wild population | 盐度 salinity | 壳黑品系 black strain | 野生群体 wild population |
|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------|----------------------|-------------------------|
| 16 | 29.31 | 27.97 | 15 | 14.28 | 16.90 |
| 20 | 17.89 | 15.67 | 20 | 11.51 | 9.10 |
| 24 | 10.52 | 10.58 | 25 | 18.57 | 13.57 |
| 28 | 11.53 | 13.87 | 30 | 14.85 | 16.75 |
| 32 | 12.70 | 7.57 | 35 | 22.98 | 20.53 |

研究中也未发现转折点, 认为这是由于实验温度范围并未覆盖长牡蛎致死温度造成的。Resgalla等^[24]对贻贝(*P. perna*)的研究中, 发现在20~25 °C贻贝排氨率无显著性增加, 而在30 °C出现显著性增加, 关于这一现象, 其认为双壳贝类对于环境温度升高有一定的适应能力。在双壳贝类能适应的温度范围内, 其代谢率并不会出现显著性增加。但超出这一范围, 其代谢率会出现激增。本研究中也发现, 在24~28 °C野生群体排氨率没有显著性增加, 在32 °C出现显著性增加。而壳黑选育品系在24~32 °C排氨率均无显著性增加。因此, 可认为相较于野生群体, 壳黑选育品系能适应更高的温度环境。且本研究结果表明, 在实验温度范围内, 长牡蛎壳黑选育品系滤水率均高于野生群体, 而耗氧率和排氨率(除28 °C外)均低于野生群体。这一现象符合Bayne^[14]对长牡蛎快速生长生理学基础的研究结果, 较高的摄食能力和较低的代谢率可为长牡蛎提供更多的能量用于生长。

3.2 盐度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率的影响

盐度是影响水生生物分布的主要环境因子。盐度变化会影响贝类机体生理功能活性^[28], 不适宜的盐度环境会导致贝类鳃上皮纤毛活性的降低和瓣膜的部分关闭, 从而降低了贝类与外界的水体交换能力, 导致贝类摄食等生理活动的降低。邓传敏等^[22]研究表明, 随盐度升高, 长牡蛎在盐度30时滤水率达到最大后迅速下降; 栗志民等^[29]研究也表明, 随盐度的升高, 企鹅珍珠贝(*Pteria penguin*)滤水率在盐度31时达到最大值。本研究结果与上述结论相似, 随盐度增加, 长牡蛎滤水率先增加后降低, 在盐度30存在最大值。而盐度变化对贝类新陈代谢影响的作用一

直存在争议。Nie等^[30]认为盐度变化迫使机体渗透压的改变是影响水生生物代谢活动的主要原因。不适宜的盐度环境下, 贝类需要更多的能量用于渗透压的调节, 其能量代谢水平应高于正常值。Guzmán-Agüero等^[9]却认为双壳贝类作为变渗透性水生生物并不需要过多能量用于渗透压调节, 盐度变化对其代谢的影响主要体现于不适宜盐度环境下对其生理功能的抑制作用。本研究结果与后者一致, 长牡蛎耗氧率和排氨率在盐度30时存在最大值, 随盐度升高或降低, 耗氧率和排氨率均呈下降趋势。这一争论可能与不同研究动物对环境适应能力存在差异有关, 也有可能与实验方法差异有关。Resgalla等^[24]研究发现, 在突变和适应实验中, 盐度对*P. perna*生理代谢的影响存在差异。盐度突变会导致贻贝代谢水平激增, 然而这种代谢状态并不能维持太长时间^[31]。而在盐度适应实验中, 不适宜的盐度环境下*P. perna*代谢水平较低, 这一特性有利于其节约机体能量, 更适宜长期存活。本实验中, 逐步升降盐度至设定盐度值, 且长牡蛎各生理指标均在各实验环境下适应7 d后测定, 属于适应性实验。此外, 在低盐(盐度15~25)环境下, 长牡蛎壳黑选育品系排氨率均低于野生群体, 这表明相对于野生群体, 在低盐环境下长牡蛎壳黑选育品系有更高效率的蛋白质周转代谢效率^[17]。且实验盐度范围内, 长牡蛎壳黑选育品系滤水率均高于野生群体。长牡蛎壳黑选育品系高效的蛋白周转代谢效率与较高的滤水率使其在低盐环境下有更高的适应能力。

3.3 氧氮比

碳水化合物、脂肪和蛋白质是贝类机体的供能来源, O:N值是反映生物呼吸底物的重要生理指标^[32]。其值大小反映动物特定状态下机体

脂肪和糖类与蛋白质分解代谢的比率,可作为机体适应环境压力的指标^[31,33]。当机体以蛋白质代谢为主要供能方式时,其代谢产物以氨的形式释放,O:N值约为7.0~9.3^[32]。Ikeda^[34]认为,如果由脂肪和蛋白质二者供能,O:N值约为24。本实验中,长牡蛎壳黑品系的O:N值均高于9.3,而野生群体在32℃和盐度25组中其O:N值分别为7.57和9.10,这表明长牡蛎壳黑品系日常代谢中主要由脂肪和蛋白质二者提供能量,而相对于野生群体,长牡蛎壳黑选育品系有更高的低盐 and 高温耐受能力。长牡蛎夏季大量死亡的现象已有诸多报道,研究者认为长牡蛎的死亡是由夏季持续高温、机体瘦弱等诸多因素导致的^[35-36]。毛玉泽等^[37]对长牡蛎代谢率的季节变化研究表明,在海水温度为18℃的6月份,长牡蛎O:N值为全年最高。而随海水温度升高O:N值迅速下降,在海水温度为23.7℃的8月份,其O:N值降至14.7。这与本研究结果一致,表明长牡蛎为应对温度升高带来的压力,会增强蛋白代谢和消耗。而配子发生与产卵等生理活动消耗大量营养物质,致使机体瘦弱、抵抗力下降。产卵后机体瘦弱,不能应对高温压力可能是导致长牡蛎大量死亡的原因。本实验中,在盐度35组,长牡蛎两群体O:N值最高,盐度降低会致使O:N值下降。聂鸿涛等^[26]在对菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)的研究中发现,O:N值随盐度升高而升高;刘建业等^[21]在对合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)的研究中也报道,随着盐度的降低,O:N值总体呈下降的趋势。这表明低盐环境下水生动物蛋白质代谢比例增大,导致O:N值的降低。

综上所述,温度和盐度对长牡蛎滤水率、耗氧率和排氨率均有显著影响。长牡蛎壳黑品系和野生群体对环境的适应性存在差异,长牡蛎壳黑选育品系更能适应高温和低盐环境。且相对于野生群体,壳黑品系较高的滤水率和较低的代谢率可为其提供更多的能量用于生长发育。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China Fishery Statistical Yearbook 2018[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018(in Chinese).
- [2] Dégremont L, Bédier E, Boudry P. Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). II. Response to selection for survival and its influence on growth and yield[J]. Aquaculture, 2010, 299(1-4): 21-29.
- [3] Li Q, Wang Q Z, Liu S K, et al. Selection response and realized heritability for growth in three stocks of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. Fisheries Science, 2011, 77(4): 643-648.
- [4] Langdon C, Evans F, Jacobson D, et al. Yields of cultured Pacific oysters *Crassostrea gigas* Thunberg improved after one generation of selection[J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4): 227-244.
- [5] Kang J H, Kang H S, Lee J M, et al. Characterizations of shell and mantle edge pigmentation of a Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Korean Peninsula[J]. Asian-Australian Journal of Animal Sciences, 2013, 26(12): 1659-1664.
- [6] Batista F M, Ben-Hamadou R, Fonseca V G, et al. Comparative study of shell shape and muscle scar pigmentation in the closely related cupped oysters *Crassostrea angulata*, *C. gigas* and their reciprocal hybrids[J]. Aquatic Living Resources, 2008, 21(1): 31-38.
- [7] Xu L, Li Q, Yu H, et al. Estimates of heritability for growth and shell color traits and their genetic correlations in the black shell strain of Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. Marine Biotechnology, 2017, 19(5): 421-429.
- [8] 王芳, 董双林, 张硕, 等. 海湾扇贝和太平洋牡蛎的食物选择性及滤除率的实验研究[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(2): 139-144.
Wang F, Dong S L, Zhang S, et al. Experimental studies on feeding selectivity and the filter-feeding rate of *Argopecten irradians* and *Crassostrea gigas*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(2): 139-144(in Chinese).
- [9] Guzmán-Aguero J E, Nieves-Soto M, Hurtado M Á, et al. Feeding physiology and scope for growth of the oyster *Crassostrea corteziensis*(Hertlein, 1951) acclimated to different conditions of temperature and salinity[J]. Aquaculture International, 2013, 21(2): 283-297.
- [10] 包杰, 姜宏波, 董双林, 等. 红刺参和青刺参耗氧率与排氨率的比较研究[J]. 水产学报, 2013, 37(11): 1689-

- 1696.
- Bao J, Jiang H B, Dong S L, *et al.* Comparison of oxygen consumption rate and ammonia-N excretion rate between green type and red type *Apostichopus japonicus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(11): 1689-1696(in Chinese).
- [11] Mao Y Z, Zhou Y, Yang H S, *et al.* Seasonal variation in metabolism of cultured Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Sanggou Bay, China[J]. Aquaculture, 2006, 253(1-4): 322-333.
- [12] Meyer E, Manahan D T. Gene expression profiling of genetically determined growth variation in bivalve larvae (*Crassostrea gigas*)[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(5): 749-758.
- [13] Deng Y W, Yu Z N, Du X D, *et al.* Growth performance and physiological parameters of the second generation selected and control groups of *Pinctada martensii*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 30(2): 120-125.
- [14] Bayne B L. Physiological components of growth differences between individual oysters (*Crassostrea gigas*) and a comparison with *Saccostrea commercialis*[J]. Physiological and Biochemical Zoology, 1999, 72(6): 705-713.
- [15] Tamayo D, Ibarrola I, Urrutia M B, *et al.* The physiological basis for inter-individual growth variability in the spat of clams (*Ruditapes philippinarum*)[J]. Aquaculture, 2011, 321(1-2): 113-120.
- [16] Pace D A, Marsh A G, Leong P K, *et al.* Physiological bases of genetically determined variation in growth of marine invertebrate larvae: a study of growth heterosis in the bivalve *Crassostrea gigas*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 335(2): 188-209.
- [17] Tamayo D, Ibarrola I, Urrutxurtu I, *et al.* Physiological basis of extreme growth rate differences in the spat of oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Marine Biology, 2014, 161(7): 1627-1637.
- [18] Newkirk G F. Review of the genetics and the potential for selective breeding of commercially important bivalves[J]. Aquaculture, 1980, 19(3): 209-228.
- [19] Evans S, Langdon C. Direct and indirect responses to selection on individual body weight in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Aquaculture, 2006, 261(2): 546-555.
- [20] 刘旭佳, 沈夏霜, 黄国强, 等. 盐度和规格对光裸方格星虫耗氧率及排氨率的影响[J]. 水产学报, 2017, 41(1): 64-69.
- [21] Liu X J, Shen X S, Huang G Q, *et al.* Effects of salinity and body weight on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Sipunculus nudus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(1): 64-69(in Chinese).
- [21] 刘建业, 喻达辉, 李金碧. 盐度和pH对合浦珠母贝 (*Pinctada fucata*)耗氧率和排氨率的影响[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(4): 603-607.
- [21] Liu J Y, Yu D H, Li J B. Effects of salinity and pH on oxygen consumption and ammonia excretion rates in *pinctada fucata*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4): 603-607(in Chinese).
- [22] 邓传敏, 李琪, 孔令锋, 等. 长牡蛎壳金选育系F₄与普通养殖群体摄食和呼吸的比较研究[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 855-863.
- [22] Deng C M, Li Q, Kong L F, *et al.* Comparison of feeding and respiration of the forth golden shell color line and normal culture groups of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 855-863(in Chinese).
- [23] Jørgensen C B, Larsen P S, Riisgård H U. Effect of temperature on the mussel pump[J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 64(1-2): 89-97.
- [24] Resgalla Jr C, de Souza Brasil E, Salomão L C. The effect of temperature and salinity on the physiological rates of the mussel *Perna perna*(Linnaeus 1758)[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2007, 50(3): 543-556.
- [25] Smaal A C, Widdows J. The scope for growth of bivalves as an integrated response parameter in biological monitoring[M]. Kramer K J M. Biomonitoring of Coastal Waters and Estuaries. Boca Raton: CRC Press, 1994: 247-268.
- [26] 聂鸿涛, 霍忠明, 侯晓琳, 等. 温度和盐度突变对菲律宾蛤仔斑马蛤耗氧率和排氨率的影响[J]. 水生生物学报, 2017, 41(1): 121-126.
- [26] Nie H T, Huo Z M, Hou X L, *et al.* Comparison study on the effect of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion in zebra strain and wild *Ruditapes philippinarum*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(1): 121-126(in Chinese).
- [27] Bougrier S, Geairon P, Deslous-Paoli J M, *et al.*

- Allometric relationships and effects of temperature on clearance and oxygen consumption rates of *Crassostrea gigas*(Thunberg)[J]. *Aquaculture*, 1995, 134(1-2): 143-154.
- [28] Berger V J, Kharazova A D. Mechanisms of salinity adaptations in marine molluscs[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 355(1-3): 115-126.
- [29] 栗志民, 刘志刚, 邓海东. 温度和盐度对企鹅珍珠贝清滤率、滤食率、吸收率的影响[J]. *水产学报*, 2011, 35(1): 96-103.
- Li Z M, Liu Z G, Deng H D. Effects of temperature and salinity on clearance rate, filtration rate and absorption efficiency of *Pteria penguin*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(1): 96-103(in Chinese).
- [30] Nie H T, Chen P, Huo Z M, *et al.* Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion in different colour strains of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(6): 2778-2786.
- [31] Bayne B L. Physiological changes in *Mytilus edulis* L. induced by temperature and nutritive stress[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1973, 53(1): 39-58.
- [32] Mayzaud P. Respiration and nitrogen excretion of zooplankton. IV. The influence of starvation on the metabolism and the biochemical composition of some species[J]. *Marine Biology*, 1976, 37(1): 47-58.
- [33] 焦海峰, 郑丹, 严巧娜, 等. 温度、盐度及交互作用对僧帽牡蛎(*Saccostrea cucullata*)呼吸排泄的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 692-699.
- Jiao H F, Zheng D, Yan Q N, *et al.* Effects of water temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of *Saccostrea cucullata*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 692-699(in Chinese).
- [34] Ikeda T. Nutritional ecology of marine zooplankton[J]. *Memoirs of the Faculty of Fisheries Hokkaido University*, 1974, 22(1): 1-97.
- [35] Samain J F, Dégremont L, Soletchnik P, *et al.* Genetically based resistance to summer mortality in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) and its relationship with physiological, immunological characteristics and infection processes[J]. *Aquaculture*, 2007, 268(1-4): 227-243.
- [36] Le Moullac G, Quéau I, Le Souchu P, *et al.* Metabolic adjustments in the oyster *Crassostrea gigas* according to oxygen level and temperature[J]. *Marine Biology Research*, 2007, 3(5): 357-366.
- [37] 毛玉泽, 周毅, 杨红生, 等. 长牡蛎(*Crassostrea gigas*)代谢率的季节变化及其与夏季死亡关系的探讨[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(5): 445-451.
- Mao Y Z, Zhou Y, Yang H S, *et al.* Seasonal variation in metabolic rate of pacific oyster, *Crassostrea gigas* and its implication to summer mortality[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(5): 445-451(in Chinese).

Comparison of feeding and metabolism between black-shell strain and wild population of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)

CHONG Jindou¹, LI Qi^{1,2*}, WANG Tao¹

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes,

Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China)

Abstract: In order to clarify the physiological basis of fast growth traits of an excellent black-shell strain of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*), feeding and metabolism between the black-shell strain and wild population of *C. gigas* were compared. Results indicated that at the test temperature (16-32 °C), temperature had significant effects on clearance rate (CR), oxygen consumption rate (OCR) and ammonia excretion rate (AER) of *C. gigas*. With the increasing of temperature, the CR of the black shell strain of *C. gigas* began to rise, reached the maximum at 28 °C and then declined, while the CR of the wild population of *C. gigas* reached the maximum at 24 °C. The OCR and AER of black shell strain and wild population increased with temperature, no significant turning point was found. There were significant differences in CR and AER between black shell strain and wild population of *C. gigas*. The black shell strain had higher CR and lower OCR than wild population, and had significantly lower AER than wild population at 32 °C. At the test salinities of 15 to 35, salinity had significant effects on CR, OCR and AER of *C. gigas*. CR, OCR and AER of *C. gigas* increased firstly and then decreased with increasing salinity. There were significant differences in CR between the black shell strain and wild population of *C. gigas*. The black shell strain had higher CR than wild population, and its AER was lower than that of wild population in range of salinity 15 to 25. The O : N ratio of *C. gigas* reached the maximum at 16 °C and salinity 35, increase in temperature or decrease in salinity reduced O : N ratio. In the temperature experiment, the O : N ratio of the black shell strain ranged from 10.52-29.31. In the salinity experiment, the O : N ratio of the black shell strain ranged from 11.51-22.98. The present results demonstrated that the black shell strain of *C. gigas* could adapt to high temperature and low salinity environment, and selective breeding of black shell strain of *C. gigas* could produce oysters that have higher intake of energy and lower metabolic costs.

Key words: *Crassostrea gigas*; shell color breeding strains; clearance rate; oxygen consumption; ammonia excretion rate; temperature; salinity

Corresponding author: LI Qi. E-mail: qili66@ouc.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31772843); Taishan Scholar Seed Industry Experts Project; Industry Development Projects of Qingdao City (17-3-3-64-nsh); Science and Technology Development Project of Shandong Province (2016ZDJS06A06)