

DOI: 10.12131/20230028

文章编号: 2095-0780-(2023)05-0066-09

不同底质环境对方斑东风螺稚螺生长、壳色及抗氧化性能的影响

梁晶¹, 于峰^{1,2}, 刘子岭¹, 瞿战¹, VASQUEZ Hebert Ely^{1,2}, 唐贤明³, 邢诒炫³,
郑兴^{1,2}, 顾志峰^{1,2}

1. 海南大学海洋学院, 海南海口 570228

2. 海南大学三亚南繁研究院, 海南三亚 572000

3. 海南省海洋与渔业科学院, 海南海口 571126

摘要: 为优化方斑东风螺 (*Babylonia areolata*) 健康养殖技术, 比较分析了方斑东风螺稚螺在5种底质环境下(河砂、棕色陶粒、黑色陶粒、黄色陶粒、白色陶粒)的生长、壳色及抗氧化性能差异。结果表明, 河砂组中底质氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)质量浓度为 $(0.382\pm0.010)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著高于其他实验组($P<0.05$); 棕色陶粒组的成活率最高 [$(62.00\pm2.00)\%$], 显著高于河砂 [$(56.00\pm1.00)\%$]、黄色陶粒 [$(48.00\pm2.00)\%$] 和白色陶粒 [$(42.50\pm3.00)\%$] 组($P<0.05$); 河砂组和棕色陶粒组的壳高、壳宽、体质量显著高于黑色、黄色、白色陶粒组($P<0.05$)。实验结束时, 棕色陶粒组的壳色更艳丽, 其壳色的明度值(L^*)、红度值(a^*)、黄度值(b^*)皆显著高于其他实验组($P<0.05$)。棕色陶粒组总抗氧化能力显著高于其他实验组, 而过氧化氢酶活性和丙二醛质量摩尔浓度分别为 $(12.614\pm0.378)\text{ U}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和 $(1.179\pm0.001)\text{ nmol}\cdot\text{mg}^{-1}$, 均低于其他实验组。综上所述, 底质环境会显著影响方斑东风螺稚螺的生长、壳色和抗氧化性能, 其中棕色陶粒较适合方斑东风螺稚螺的养殖, 在生产中可以选用棕色陶粒替代河砂作为底质。

关键词: 方斑东风螺; 稚螺; 底质; 壳色; 抗氧化能力

中图分类号: S 968.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of different substrate environments on growth, shell color and antioxidant capacity of *Babylonia areolata* juveniles

LIANG Jing¹, YU Feng^{1,2}, LIU Ziling¹, ZANG Zhan¹, VASQUEZ Hebert Ely^{1,2}, TANG Xianming³, XING Yixuan³,
ZHENG Xing^{1,2}, GU Zhifeng^{1,2}

1. Ocean College, Hainan University, Haikou 570228, China

2. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya 572000, China

3. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 571126, China

Abstract: To optimize the healthy culture technology of *Babylonia areolata*, we compared and analyzed its growth, shell color and antioxidant properties under five substrate environments (River sand, brown ceramsite, black ceramsite, yellow ceramsite, white ceramsite). The results indicate that the ammonia nitrogen content in the river sand group [$(0.382\pm0.010)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] was significantly higher than that in the other groups ($P<0.05$). The highest survival rate was observed in brown ceramide group [$(62.00\pm2.00)\%$], which was significantly higher than that of river sand group [$(56.00\pm1.00)\%$], yellow ceramides group

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-05-20

基金项目: 海南省自然科学青年基金(320QN207); 海南省院士创新平台建设项目(HD-YSZX-202011); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2021XDNY277); 海南大学科研启动基金[KYQD(ZR)20061, KYQD(ZR)-22050]

作者简介: 梁晶(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产动物健康养殖。E-mail: 1776930413@qq.com

通信作者: 郑兴(1990—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为水产动物遗传育种。E-mail: zhengxing_edu@163.com

顾志峰(1975—), 男, 教授, 博士, 研究方向为水产动物健康养殖。E-mail: hnugu@163.com

$(48.00 \pm 2.00)\%$] and white ceramides group [$(42.50 \pm 3.00)\%$] ($P < 0.05$). The shell height, shell width and body mass in river sand group were significantly higher than those in black, yellow and white ceramides groups ($P < 0.05$). At the end of the experiment, the values of lightness, redness and yellowness of shell color in brown ceramide group were significantly higher than those in the other groups ($P < 0.05$). The total antioxidant capacity (T-AOC) in brown ceramide group was significantly higher than that in the other groups ($P < 0.05$). However, the catalase (CAT) activity and malonaldehyde (MDA) content were lower than those in the other groups, with (12.614 ± 0.378) U·mg⁻¹ and (1.179 ± 0.001) nmol·mg⁻¹, respectively. In conclusion, substrate environment can significantly affect the growth, shell color, and antioxidant performance of juvenile *B. areolata*, and brown ceramide can be selected to replace river sand as the substrate in its farming.

Keywords: *Babylonia areolata*; Juvenile snail; Sediment; Shell color; Antioxidant performance

方斑东风螺 (*Babylonia areolata*)，隶属于软体动物门、腹足纲、新腹足目、蛾螺科、东风螺属，是一种经济价值较高的浅海底栖贝类，主要分布于东南亚、日本以及我国东南沿海地区^[1-3]。方斑东风螺因贝壳上具有漂亮的方形斑纹又被称为“花螺”，其味道鲜甜、肉质紧实有嚼劲，被誉为21世纪最具开发前景的养殖良种之一^[4-5]。近年来，东风螺养殖产业发展迅速，养殖规模进一步扩大^[6]。随着人们生活水平的不断提高，在追求产量的同时，对螺的品质和外观也提出了更高的要求，清晰而明艳的方形斑纹更受消费者青睐。

在水产动物健康养殖过程中，为水产动物提供适宜的栖息环境，不仅可以减少环境应激反应，对提高养殖成活率、增加养殖效益也具有重要意义^[7]。环境与生物是相互适应的，底质类型往往对潜沙型生物的生长、存活和生理状态产生更强的影响^[8]。已有研究表明，双壳贝类 *Mysella vitrea*、*Tellina deltoidalis* 和 *Timoclea scabra* 在砂质环境中的生长情况更好^[9-10]；管角螺 (*Hemifusus tuba* Gemlin) 在泥沙质或无底质环境中的生长率较高，而在沙质中较差^[11]；缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 稚贝在砂或掺有贝壳的泥质砂中的成活率较高^[12]；青蛤 (*Cyclina sinensis*) 在泥沙质中生长较好^[13]。而对于水泥池养殖的东风螺，相较于无砂环境，铺砂更利于其存活，且底质中含泥量在10%以内对东风螺无显著影响^[14]。除了不同的底质材质，水环境的颜色对水生生物生长也有显著影响。三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 在红色或黄色环境下，成活率较高，生长较快^[15]；而河鲈 (*Perca fluviatilis*) 则是在浅色环境下生长较快^[16]；红螯螯虾 (*Cherax quadricarinatus*) 在人工调配的蓝色水体中，成活率较高，生长较快，体色有较高的观赏价值^[17]。可见，底质环境对水产动物的影响是多方面的^[18-19]，

可以通过改变养殖底质环境达到促进生长和改善外观的目的。

当前方斑东风螺的养殖底质多为砂砾^[3]，在养殖过程中需要经常洗砂和换砂，不仅导致生产效率低下，还增加了养殖风险。陶粒为目前工厂化养殖的常用人工材料，由陶土烧制而成，具有质量轻、多气孔、比表面积及孔隙率大、含氧量高、可培育硝化细菌等特点，具有广阔的应用前景^[20-22]。本文以河砂为对照组，选择4种不同颜色的陶粒底质(棕色、黑色、黄色和白色)开展为期30 d的养殖对比实验，研究不同底质类型及颜色对方斑东风螺稚螺生长、壳色及抗氧化能力的影响，探讨其较适宜的养殖底质，以期筛选出传统河砂的替代物，为新型工厂化循环水养殖模式探索、东风螺健康养殖和壳色调控提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验于2022年1—2月在海南省琼海市海洋与渔业科学院科研基地进行，方斑东风螺稚螺由海南省文昌市坤田水产有限公司提供，在养殖系统中暂养7 d后，选取大小均匀、潜沙正常、活力较好的稚螺作为实验材料，其平均壳高、壳宽和体质量分别为 (10.40 ± 0.39) mm、 (6.90 ± 0.27) mm和 (0.231 ± 0.020) g。

河砂购自淘宝城固山货特产店，棕色、黑色、黄色、白色陶粒均购自淘宝灵寿县磊诚矿产品加工厂，粒径均为1 mm。

1.2 实验设计与养殖管理

实验设置河砂、棕色陶粒、黑色陶粒、黄色陶粒、白色陶粒共5个实验组，各实验组分别设置3个平行组，每个平行组放置100粒实验稚螺，底质厚度控制为2.5 cm，实验周期为30 d。

实验采用微流水养殖系统^[23]，使用经沉淀、沙滤及滤袋过滤后的新鲜海水（盐度29‰），控制水位高度30 cm，水温在(24.3±1.6)℃，盐度稳定在29‰，pH介于8~8.1，养殖系统24 h连续充氧并保证水体溶解氧质量浓度>7.0 mg·L⁻¹，每个处理组养殖水体的面积为0.48 m²，流速为70 L·h⁻¹。每天早上(8:00)投喂剪碎的新鲜牡蛎肉，日投喂量为体质量的25%，每天投喂1次。

1.3 样品的采集与处理

1.3.1 动物组织样品处理

实验结束时，从每个处理组3个重复中各取15粒螺，称量后去壳取完整软体组织，混合后按质量(g)：体积(mL)为1:9加入生理盐水，机械匀浆，3 000 r·min⁻¹离心10 min，取上清液于-80℃冰箱储藏，用于后续抗氧化酶活性测定。

1.3.2 底质样品处理

实验结束时，在每个处理组3个重复中各称取新鲜底质10 g(精确至0.1 g)，混合后放入三角瓶中，加入100 mL 2 mol·L⁻¹氯化钾(KCl)溶液，放入摇床常温下振荡30 min，立即过滤至水样瓶中用于底质氨氮(NH₄⁺-N)含量的测定。每组3个重复中各称取新鲜底质10 g，混合后放入三角瓶中，加入0.1 g硫酸钙(CaSO₄)和50 mL水，放入摇床常温下振荡10 min，静置5 min后，上清液过滤用于底砂亚硝酸盐(NO₂⁻-N)含量的测定。

1.4 检测指标与计算

1.4.1 底质指标的检测

对底质样品进行NH₄⁺-N和NO₂⁻-N含量分析(SmartChem-140化学分析仪)。NH₄⁺-N和NO₂⁻-N的测定分别采用靛酚蓝法和重氮耦合法。

1.4.2 生长指标及成活率

实验结束后，每个处理组的3个重复各随机挑选30粒螺用于生长指标的测定。使用游标卡尺对样品进行壳高(SH)和壳宽(SW)的测量(图1)，用分析天平进行体质量的称量。

成活率按下列公式计算：

$$R_s = N_t / N_i \times 100\% \quad (1)$$

式中： R_s 为成活率(%)； N_i 和 N_t 分别为实验开始时和结束后的成活个数。

1.4.3 外壳颜色指标检测

实验结束后，在每个处理组3个重复中各挑选30粒螺进行拍照，用于后期壳色分析。壳色测定采用图片分析法^[17]，在摄影箱(22 cm×22 cm×



图1 方斑东风螺外壳形态指标测量模式图

Fig. 1 Measurement of shell morphology indicators of juvenile *B. areolata*

22 cm)上方8 cm处对稚螺进行拍摄，随后采用Adobe Photoshop CS3软件测量不同实验组稚螺整个壳部的CIE(1976)-Lab表色系参数。颜色参数换算公式如下：

$$L^* = (L/255) \times 100 \quad (2)$$

$$a^* = (240a/255) \times 120 \quad (3)$$

$$b^* = (240b/255) \times 120 \quad (4)$$

式中： L 、 a 、 b 是通过Adobe Photoshop CS3软件获得的图片颜色参数直接数值。 L^* 代表明度； a^* 表示红度，表示从绿到红的变化，数值介于-120~120； b^* 代表黄度，表示从蓝到黄的变化，数值介于-120~120。

1.4.4 组织抗氧化能力及膜脂过氧化物含量的检测

采用南京建成生物科技有限公司的生化试剂盒进行总抗氧化能力(T-AOC)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量的测定，操作方法严格按照说明书进行。

1.5 数据处理

实验数据均以“平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)”表示，所有数据采用DPS 14.5软件进行数据处理，采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对各实验组进行显著性检验，利用Turkey法进行多重比较，以0.05为显著性阈值。

2 结果

2.1 不同底质的氨氮和亚硝酸盐含量分析

实验结束后，不同底质下的NH₄⁺-N和NO₂⁻-N质量浓度存在差异(图2)。黄色和白色陶粒组的NH₄⁺-N、NO₂⁻-N质量浓度分别为(0.234±0.008)、(0.029±0.000) mg·L⁻¹和(0.225±0.014)、(0.029±

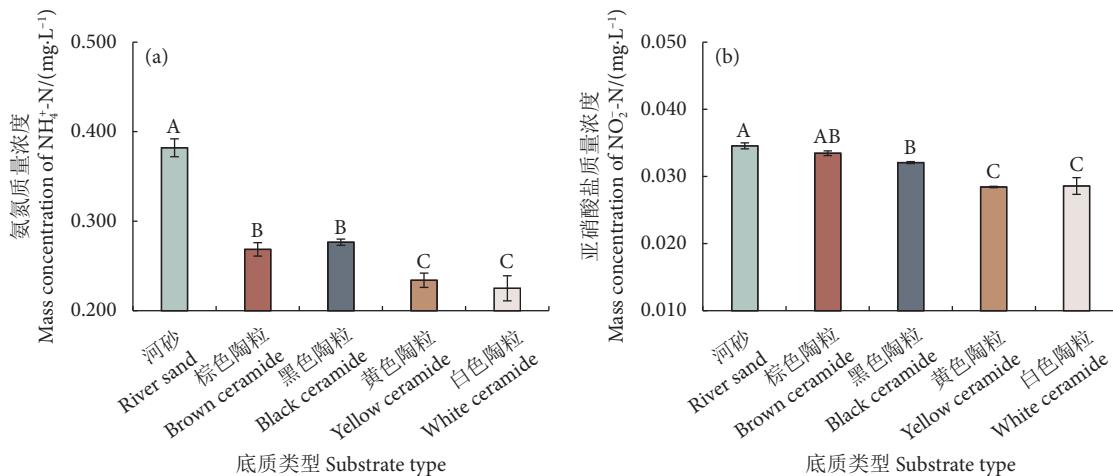


图2 不同底质中氨氮和亚硝酸盐质量浓度

注: 不同字母代表不同养殖底质各实验组之间存在显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

Fig. 2 Mass concentrations of NH_4^+ -N and NO_2^- -N in different substrate groups

Note: Different letters indicate significant differences among different groups ($P<0.05$). The same below.

0.001) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均显著低于其他实验组 ($P<0.05$); 河砂组中 NH_4^+ -N 质量浓度最高 [(0.382 ± 0.010) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$], 显著高于4种颜色的陶粒组 ($P<0.05$); 黄色和白色陶粒组间无显著性差异 ($P>0.05$)。

2.2 不同底质环境下的成活率

不同底质环境显著影响方斑东风螺稚螺的成活率(图3, $P<0.05$)。黄色和白色陶粒组稚螺的成活率显著低于河砂组、棕色和黑色陶粒组 ($P<0.05$), 而棕色和黑色陶粒组稚螺的成活率显著高于河砂组 ($P<0.05$)。实验结束时, 棕色陶粒组的成活率最高 [$(62.00\pm 2.00)\%$], 白色陶粒组最低 [$(42.50\pm 3.00)\%$], 且各实验组的成活率均小于65%。

2.3 不同底质环境下的生长情况

随着养殖时间的推移, 养殖在不同底质环境中

的稚螺在壳高、壳宽、体质量等生长指标上表现出差异(图4)。实验结束时, 河砂组稚螺的壳高、壳宽、体质量分别为 (14.22 ± 0.03) mm、 (9.37 ± 0.04) mm、 (0.541 ± 0.022) g, 显著高于黑色、黄色和白色陶粒组 ($P<0.05$), 但与棕色陶粒组之间无显著性差异 ($P>0.05$); 白色陶粒组稚螺平均体质量最小, 仅 (0.427 ± 0.024) g。

2.4 不同底质环境下的壳色分析

不同底质环境会显著影响方斑东风螺稚螺的壳色(图5)。各实验组稚螺壳的 L^* 、 a^* 和 b^* 具有一致的规律性; 棕色陶粒组的 L^* 、 a^* 、 b^* 最高, 分别为 45.86 ± 0.11 、 7.38 ± 0.12 、 26.53 ± 0.01 , 显著高于其他组 ($P<0.05$); 黑色陶粒组方斑东风螺的 L^* 、 a^* 、 b^* 次之, 分别为 43.67 ± 0.32 、 7.09 ± 0.06 、 24.35 ± 0.32 , 显著高于河砂组、黄色和白色陶粒组 ($P<0.05$); 而河砂组、黄色和白色陶粒组的 L^* 、 a^* 、 b^* 无显著性差异 ($P>0.05$)。

2.5 抗氧化酶活性和膜脂过氧化物含量分析

不同底质环境下稚螺抗氧化酶活性和膜脂过氧化物含量见图6。各组间稚螺的总抗氧化能力存在显著性差异(图6-a, $P<0.05$), 由高到低分别为: 棕色陶粒组 [(0.297 ± 0.009) $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$]>黑色陶粒组 [(0.246 ± 0.004) $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$]>河砂组 [(0.220 ± 0.007) $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$]>黄色陶粒组 [(0.168 ± 0.004) $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$]>白色陶粒组 [(0.141 ± 0.002) $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$]。

对CAT活性的影响见图6-b, 白色陶粒组稚螺的CAT活性为 (30.864 ± 0.623) $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$, 显著高于其

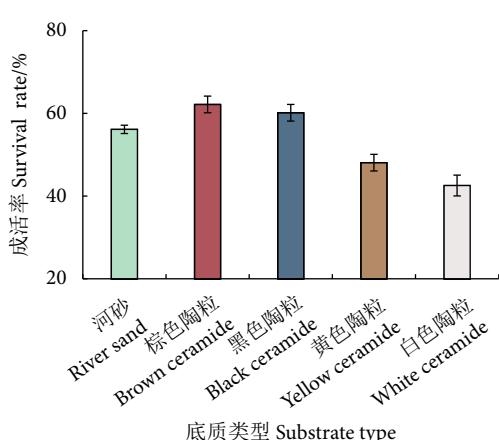


图3 不同底质养殖的方斑东风螺稚螺成活率

Fig. 3 Survival rate of juvenile *B. areolata* in different substrate groups

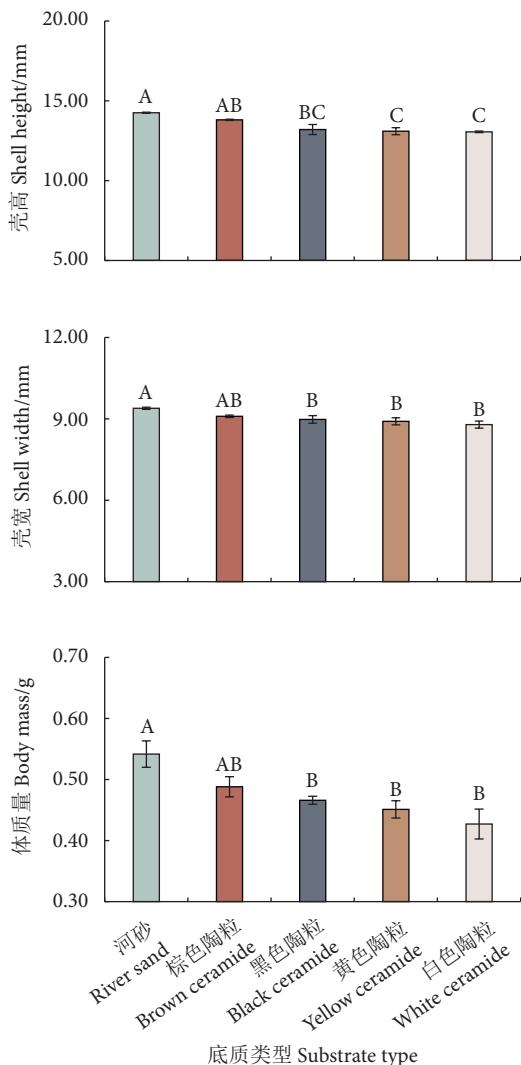


图4 不同底质养殖的方斑东风螺稚螺生长差异

Fig. 4 Growth differences of juvenile *B. areolata* in different substrate groups

他实验组；黄色陶粒组次之，显著高于另外3组；棕色陶粒组稚螺的CAT活性最低 [(12.614 ± 0.378) U·mg⁻¹]，显著低于其他组 ($P < 0.05$)。

黄色和白色陶粒组稚螺的SOD活性显著高于其他实验组 ($P < 0.05$)，其中河砂组的SOD活性最低 [(7.008 ± 0.817) U·mg⁻¹，图6-c]。

方斑东风螺稚螺膜脂过氧化物含量受底质环境影响显著 (图6-d)，黄色和白色陶粒组稚螺MDA质量摩尔浓度分别为 (1.539 ± 0.045) 和 (1.580 ± 0.015) nmol·mg⁻¹，显著高于其他3组 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 底质对养殖环境的影响

在养殖过程中，底质不仅是底栖贝类的栖息场所，还承担了大部分营养物质和有机物的沉积。饵

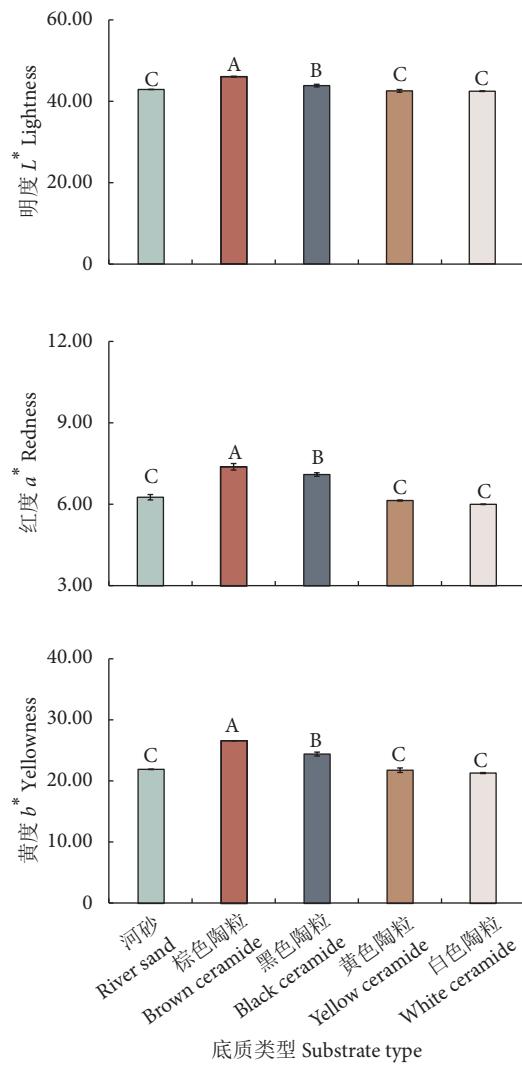


图5 不同底质养殖的方斑东风螺稚螺贝壳的明度、红度和黄度

Fig. 5 Lightness, redness and yellowness of juvenile *B. areolata* in different substrate groups

料残渣、排泄物以及动物尸体倾向于在底部聚集。当沉积物超出了底质自身的承载量，这些有毒物质会被释放到养殖水体中，间接对养殖动物造成影响^[24]。在水体中，NH₄⁺-N以NH₄⁺和NH₃的形式存在，NH₃可直接进入细胞膜，破坏膜结构、影响蛋白质代谢，甚至造成DNA损伤^[25]。在养殖水体和底质中，NH₄⁺-N与NO₂⁻-N是微生物利用含氮有机物进行硝化作用过程中产生的中间产物，其含量可作为判断养殖环境好坏的重要指标^[26]。本研究发现，不同底质环境中NH₄⁺-N和NO₂⁻-N的含量存在差异，河砂组中NH₄⁺-N含量高，陶粒组中NH₄⁺-N含量低。这可能与陶粒多孔、比表面积大的结构有关^[27]，有利于硝化细菌的繁殖，且陶粒间空隙较大有利于底质中的水体流动、物质交换。

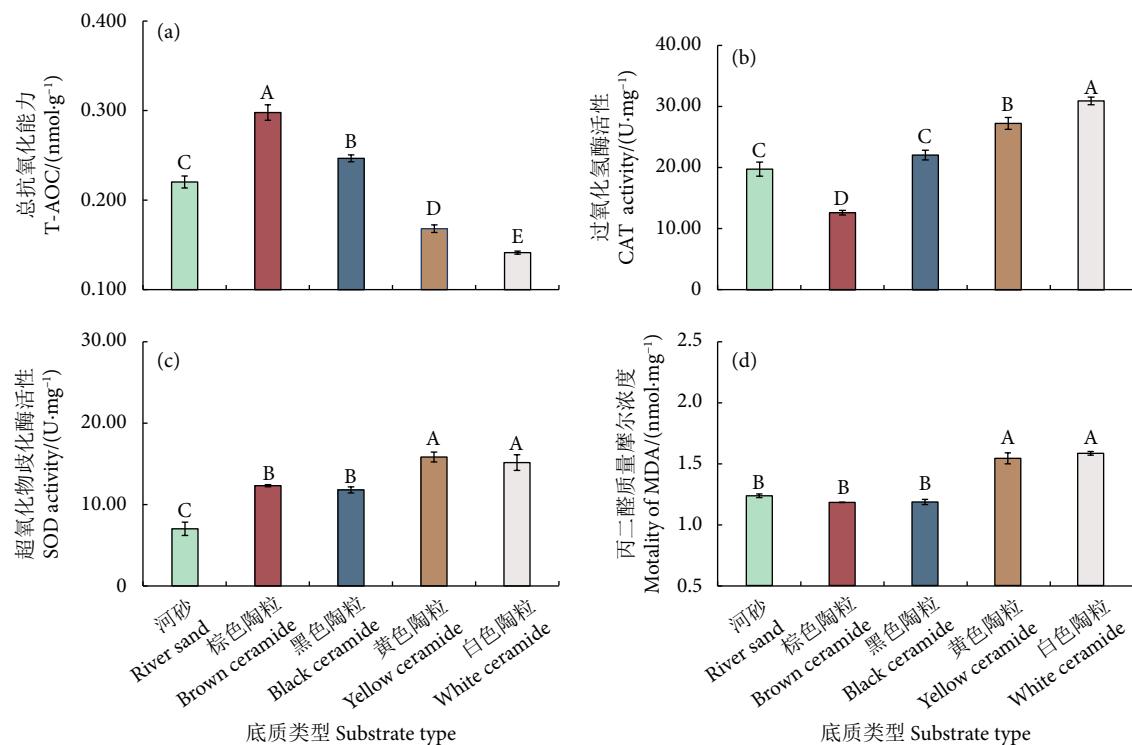


图6 不同底质养殖的方斑东风螺稚螺总抗氧化能力、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性及丙二醛含量

Fig. 6 T-AOC, CAT and SOD activities and MDA molality of juvenile *B. areolata* in different substrate groups

已有研究表明,陶粒能有效去除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 去除率高达 80%^[28]。本实验棕色陶粒组的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 含量与河砂组无显著性差异, 黄色和白色陶粒组 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量较低, 这可能与底质颜色影响养殖生物有关。在黄色和白色陶粒环境下, 浅色或更透亮的环境使稚螺受到较强的环境胁迫, 摄食减少, 排泄量降低, 从而导致 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量低。且在实验后期黄色和白色陶粒组稚螺成活个数较少, 通过流水可以充分地将残饵与粪便排出养殖系统。Abed 和 Zeng^[29] 研究表明深色背景能够明显促进生物摄食, 减轻生理压力, 而浅色背景下(白色)锯缘青蟹 (*Scylla serrata*) 的成活率最低。

3.2 底质对方斑东风螺存活与生长的影响

方斑东风螺具有潜埋习性, 对底质类型有一定要求, 且长时间生活在底质中, 受底质环境的影响久。而底质作为一种外界环境, 与温度、盐度、溶解氧共同影响着水生生物的生长发育、基因表达、能量积累、物质代谢等各个方面, 甚至威胁其生存^[30-32]。一般而言, 生物长期接受某种(类)不适当刺激会导致其消耗大量能量用于抵御外界胁迫、维持内稳态和机体组织损伤修复, 进而影响其生长^[33-34]。在水产动物养殖过程中, 为其提供适宜的栖息环境, 有利于减少其因不适当刺激而引起的能量

消耗, 从而促进其健康生长。本研究发现, 不合适的底质不仅会加速方斑东风螺稚螺的死亡速率, 同时也会降低存活个体的生长性能。在本实验条件下, 棕色陶粒和河砂更利于方斑东风螺的成活与生长, 而白色陶粒组生长最慢, 成活率最低。究其原因可能是由于方斑东风螺为海洋底栖生物, 浅色(黄色和白色)陶粒底质与东风螺自然栖息环境相差大, 造成了较强的环境胁迫, 使得稚螺处于应激状态, 这可从浅色陶粒组的 T-AOC 较低, CAT、SOD、MDA 较高得到证实。而这种对浅色陶粒底质环境的不适应使得稚螺长期处于应激状态, 将更多的能量用于抵御外界的环境应激, 导致其生长缓慢。而持续的胁迫使能量的重分配失衡^[34], 最终导致死亡, 造成白色陶粒组的死亡率高。已有研究也得出相似结果, 如底质环境较符合原来的生境时, 利于管角螺生长^[35]; 在黑色和红色背景环境下, 红鳌螯虾成活率最高^[36]。腹足类软体动物由于运动能力较差, 日间通常埋栖于海底或躲藏于礁石中, 避免被捕获^[37-40], 当养殖环境与其自然栖息地的环境差异较大时, 其生理会受到较大影响, 所以在养殖过程中应注意底质环境对方斑东风螺的影响。此外, 本实验结束时方斑东风螺稚螺的成活率总体不高, 主要由于实验在冬季进行(1—2月),

温度相对较低 [(24.3 ± 1.6) °C]，导致成活率普遍不高，这与生产经验相符。方斑东风螺为热带种，刘永等^[41]研究发现当水温超过 26 °C 时，方斑东风螺的活力好、摄食快且摄食量大，生长速度也较快；当水温在 24 °C 左右时，其摄食能力下降，活力也相对减弱，随着温度的下降，部分稚螺出现死亡。温度会影响生物的生长、存活、免疫、代谢等多个方面^[32,34]。因此，在方斑东风螺养殖过程中底质与水质环境都应得到重视。

3.3 底质对方斑东风螺外观的影响

外观与色泽作为重要的经济性状，是影响消费者购买经济动物的重要评判标准之一^[42-44]。漂亮的外观不仅给消费者带来视觉享受，还能显著提高其市场价值。贝类的壳色受遗传与环境调控，相较于生长发育、营养成分的影响，壳色变化与环境的关系更为紧密^[45]。而 L^* 、 a^* 、 b^* 作为评价经济动物色泽最直观的重要指标，在水产动物的体色研究中得到广泛应用^[46]，如红鳌螯虾^[17]，锦鲤 (*Cyprinus carpio*)^[47] 等。本研究利用 L^* 、 a^* 、 b^* 对不同底质条件下的壳色进行测定，发现棕色陶粒组养殖的稚螺贝壳更加鲜亮，其 L^* 、 a^* 、 b^* 均显著高于其他实验组。同时深色组（河砂组、棕色和黑色陶粒组）相较于浅色组，稚螺壳上斑点的颜色更深、更明显。这可能是在不同环境下，生物体倾向于选择与环境更相近的体色，从而在多变的环境下保存自己。Manriquez 等^[48] 研究发现智利鲍 (*Concholepas concholepas*) 的壳色会随着个体生长不断趋同于周围环境的颜色；Siegenthaler 等^[19] 发现褐虾 (*Crangon crangon*) 能够通过快速改变体色以适应周围环境；Stevens 等^[49] 研究指出角眼沙蟹 (*Ocypode ceratophthalmus*) 会根据每天色彩的变化节奏来调整在沙滩上的伪装。同样，在方斑东风螺的养殖过程中，可以通过改变底质颜色来培育特定壳色，以提高其经济价值。

3.4 不同底质对方斑东风螺抗氧化性能的影响

T-AOC 是机体内抗氧化能力的总体体现^[50]，是酶促和非酶促因子抗氧化能力的总合。本研究发现棕色陶粒组的 T-AOC 最高，表明在该养殖环境下稚螺具有更强的抗氧化能力。而 CAT、SOD 是机体内重要的抗氧化酶，CAT 和 SOD 的协同作用可维持自由基的动态平衡，进而减少机体的氧化损伤^[51]。SOD 活性间接反映了机体清除活性氧自由

基的能力，它能够让活性氧发生歧化，生成过氧化氢 (H_2O_2) 和氧气 (O_2)^[52]，而 CAT 能催化 H_2O_2 生成水 (H_2O) 和 O_2 。因此 CAT、SOD 活性的变化在一定程度上能反映出机体在环境胁迫下抗氧化系统的变化^[53]。本研究中，棕色陶粒组的 CAT、SOD 较低，表明在该养殖环境中东风螺的应激反应较小。MDA 是脂质过氧化物分解后的重要产物，是研究脂质过氧化作用的重要生物标志物，也可间接反映细胞的受损程度，其测定常与 SOD 和 CAT 测定配合使用^[54]。MDA 的检测结果同样显示棕色陶粒组的水平较低，细胞受损程度较小，进一步证实该养殖环境对东风螺稚螺的影响较小。而浅色陶粒的底质环境中，T-AOC 较低，CAT、SOD、MDA 较高，均表明稚螺处于较强的应激状态。其原因可能是背景色对养殖生物的生理水平产生了影响，相似的结果在其他生物中也有发现，如红鳌螯虾在黑色环境下具有较高的生长速度和成活率^[55]；拟穴青蟹 (*S. paramamosain*) 在红色环境下产生更强的氧化应激^[56]；牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 在较亮的环境中皮质醇含量增加^[57]。

4 结论

本研究通过对不同底质条件下的底质环境指标、生长成活情况、壳色变化、抗氧化能力以及氧化损伤程度的检测，发现不同底质类型和颜色可显著影响方斑东风螺稚螺的生长、壳色及抗氧化能力。在以棕色陶粒为底质的养殖条件下稚螺的成活率最高，生长速度较快，壳色更为艳丽，底质 NH_4^+-N 含量较低，总抗氧化能力最高，氧化损伤较低。可见，在生产中选择棕色陶粒作为方斑东风螺稚螺养殖底质替代河砂，具有广泛的应用前景。

参考文献：

- [1] 沈铭辉. 东风螺早期发育的生物学研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016: 1.
- [2] FU J Q, SHEN M H, SHEN Y W, et al. LC-MS/MS-Based metabolome analysis of biochemical pathways altered by food limitation in larvae of ivory shell, *Babylonia areolata* [J]. Mar Biotechnol (NY), 2018, 20(4): 451-466.
- [3] LYU W G, ZHONG M C, FU J Q, et al. Comparison and optimal prediction of optimal prediction of growth of *Babylonia areolata* and *B. lutosa* [J]. Aquac Rep, 2020, 18: 100425.
- [4] 朱丽丹, 王晓清, 曾志南, 等. 3 个群体方斑东风螺线粒体 COI 基因的遗传多样性分析 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学)

- 版), 2016, 42(4): 429-434.
- [5] 翁文明, 蔡岩, 卢明辉, 等. 方斑东风螺工厂化半循环水养殖试验 [J]. 科学养鱼, 2021(3): 64-65.
- [6] 董杨, 符书源, 王国福. 海南省方斑东风螺养殖业的发展及其前景展望 [J]. 科学养鱼, 2011(12): 39-40.
- [7] MACIEL C R, VALENTI W C. Effect of tank colour on larval performance of the Amazon River prawn, *Macrobrachium amazonicum*[J]. Aquac Res, 2014, 45(6): 1041-1050.
- [8] 凌慧. 方斑东风螺消化道和养殖环境细菌数量及细菌多样性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 4.
- [9] MACFARLANE G R, BOOTH D J. Estuarine macrobenthic community structure in the hawkesbury river, Australia: relationships with sediment physicochemical and anthropogenic parameters[J]. Environ Monit Assess, 2001, 72: 51-78.
- [10] SIVADAS S, INGOLE B, NANAJKAR M. Temporal variability of macrofauna from a disturbed habitat in Zuari estuary, west coast of India[J]. Environl Monit Assess, 2011, 173(7): 65-78.
- [11] 潘英, 陈锋华, 李斌, 等. 管角螺对几种环境因子的耐受性试验 [J]. 水产科学, 2008, 27(11): 566-569.
- [12] 何进金, 韦信敏, 许章程. 缘蛭稚贝饵料和底质的研究 [J]. 水产学报, 1986(1): 29-39.
- [13] 吴志广, 聂顺泽. 不同养殖因素对青蛤生长影响的试验报告 [J]. 河北渔业, 2002(3): 30.
- [14] 杨章武, 郑雅友, 李正良, 等. 方斑东风螺水泥池养殖不同底质的生长与存活试验 [J]. 福建水产, 2011, 33(2): 29-32.
- [15] SHI C, WANG J C, PENG K W, et al. The effect of tank colour on background preference, survival and development of larval swimming crab *Portunus trituberculatus*[J]. Aquaculture, 2019, 504: 454-461.
- [16] TAMAZOUZT L, CHATAIN B, FONTAINE P. Tank wall colour and light level affect growth and survival of Eurasian perch larvae (*Perca fluviatilis* L.)[J]. Aquaculture, 2000, 182(1): 85-90.
- [17] 廖秀睿, 杨金灵, 魏森, 等. 不同养殖水色对红螯螯虾稚虾存活、生长和体色的影响 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 77-83.
- [18] DUARTE R C, STEVENS M, FLORES A A. Shape, colour plasticity, and habitat use indicate morph-specific camouflage strategies in a marine shrimp[J]. BMC Evol Biol, 2016, 16(1): 1-15.
- [19] SIEGENTHALER A, MASTIN A, DUFAUT C, et al. Background matching in the brown shrimp *Crangon crangon*: adaptive camouflage and behavioural-plasticity[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 3292.
- [20] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展 [J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 1-10.
- [21] 彭明国, 葛秋凡, 李美娟, 等. 利用电镀污泥制备水处理用陶粒滤料 [J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(3): 142-146.
- [22] 贾兰, 童欢欢, 周继梅, 等. 新型功能性陶粒制备及水处理效能研究 [J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(10): 74-82.
- [23] 王师君. 鲤鱼微流水养殖渔业能耗测算与节能措施分析 [J]. 山东畜牧兽医, 2022, 43(1): 47-49.
- [24] 赵珍. 单过硫酸氢钾对低换水养殖环境和对虾生长的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研所), 2021: 3.
- [25] DUTRA F M, FORNECK S C, BRAZAO C C, et al. Acute toxicity of ammonia to various life stages of the Amazon river prawn, *Macrobrachium amazonicum*, Heller, 1862[J]. Aquaculture, 2016, 453: 104-109.
- [26] 邵长清, 高勤峰, 董双林, 等. 过碳酸钠对刺参养殖底质改良和生长效果的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2018(4): 126-132.
- [27] 散剑娣, 蔡德所, 欧文昌, 等. 底泥陶粒的制备及其性能研究 [J]. 金属矿山, 2022(11): 229-237.
- [28] 靖青秀, 张呈熙, 黄晓东, 等. 铜渣基水处理陶粒的制备及性能研究 [J]. 功能材料, 2020, 51(8): 8100-8104.
- [29] ABED G R, ZENG C S. Effects of tank colour on larval survival and development of mud crab *Scylla serrata* (Forskal)[J]. Aquac Res, 2005, 36: 1112-1119.
- [30] LECLERCQ E, TAYLOR J F, MIGAUD H. Morphological skin colour changes in teleosts[J]. Fish Fish (Oxf), 2010, 11(2): 159-193.
- [31] SHEN Y W, ZHANG Y, XIAO Q Z, et al. Distinct metabolic shifts occur during the transition between normoxia and hypoxia in the hybrid and its maternal abalone[J]. Sci Total Environ, 2021, 794: 148698.
- [32] YU F, WU Y Y, SHEN Y W, et al. Heat adhesion duration: a new high-throughput abalone thermal tolerance assessment method [J]. Aquaculture, 2021, 545: 737226.
- [33] BISWAS A K, SEOKA M, TAKII K, et al. Stress response of red sea bream *Pagrus major* to acute handling and chronic photoperiod manipulation[J]. Aquaculture, 2006, 252(2): 566-572.
- [34] POERTNER H O, FARRELL A P. Physiology and climate change [J]. Science, 2008, 322(5902): 690-692.
- [35] 林志华, 王铁杆, 夏彩国. 管角螺生态及繁殖习性观察 [J]. 海洋科学, 1998(5): 11-12.
- [36] ZHENG X, LIAO X R, ZHANG M, et al. The effect of aquarium color background on the survival, growth performance, body coloration, and enzymatic activity of laboratory cultured *Cherax quadricarinatus* juveniles[J]. Aquac Rep, 2023, 32: 101699.
- [37] 甘洋. 方斑东风螺嗅觉及其对海洋酸化的响应 [D]. 厦门: 厦门大学, 2017: 1-3.
- [38] 王平川, 张立斌, 潘洋, 等. 脉红螺摄食节律的研究 [J]. 水产学报, 2013, 37(12): 1807-1814.
- [39] 张爱菊, 尤仲杰. *Nassarius* 属织纹螺摄食行为及毒素的研究进展 [J]. 水利渔业, 2006, 26(1): 9-12.
- [40] 张林林. 管角螺摄食、生长及能量收支研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2012: 74.
- [41] 刘永, 梁飞龙, 毛勇, 等. 方斑东风螺的人工育苗高产技术 [J]. 水产养殖, 2004(2): 22-25.
- [42] REGUNATHAN C, WESLEY S G. Pigment deficiency correction in shrimp broodstock using *Spirulina* as a carotenoid source[J]. Aquac Nutr, 2006, 12(6): 425-432.
- [43] TUME R K, SIKES A L, TABRETT S, et al. Effect of background colour on the distribution of astaxanthin in black tiger prawn (*Penaeus monodon*): effective method for improvement of cooked

- colour[J]. Aquaculture, 2009, 296(1/2): 129-135.
- [44] LI K, CAI C F, YE Y T, et al. Comparison of non-volatile compounds and sensory characteristics of Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) reared in lakes and ponds: potential environmental factors[J]. Aquaculture, 2012, 364-365: 96-102.
- [45] 张跃环, 闫喜武, 张澎, 等. 贝类壳色多态的研究概况及展望 [J]. 水产科学, 2008, 27(12): 680-683.
- [46] CHRISTIANSEN R, ESTERMANN R, TORRISSEN O J, et al. Assessment of flesh colour in Atlantic salmon, *Salmo salar* L.[J]. Aquac Res, 1995, 26(5): 311-321.
- [47] 张春艳, 张震, 仇钧仪, 等. 饲料添加复合氨基酸对锦鲤生长和生理生化指标的影响 [J]. 经济动物学报, 2022, 26(4): 261-267.
- [48] MANRIQUEZ P H, LAGOS N A, JARA M E, et al. Adaptive shell color plasticity during the early ontogeny of an intertidal keystone snail[J]. P Nat Acad Sci USA, 2009, 106(38): 16298-16303.
- [49] STEVENS M, RONG C P, TODD P A. Colour change and camouflage in the horned ghost crab *Ocypode ceratophthalmus*[J]. Biol J Linn Soc Lond, 2013, 109(2): 257-270.
- [50] 段丽菊, 王晓平, 严彦, 等. NO 在甲醛介导的氧化损伤中的协同作用 [J]. 环境科学, 2006, 26(3): 505-508.
- [51] MARTINEZ A R M, MORALES A E, SANZ A. Antioxidant defences in fish: biotic and abiotic factors[J]. Rev Fish Biol Fish, 2005, 15(1/2): 75-88.
- [52] 叶建生, 王兴强, 马甡, 等. 盐度突变对凡纳滨对虾非特异性免疫因子的影响 [J]. 海洋水产研究, 2008, 29(1): 38-43.
- [53] 樊甄姣, 刘志鸿, 杨爱国. 氨氮对栉孔扇贝血淋巴活性氧含量和抗氧化酶活性的影响 [J]. 海洋水产研究, 2005, 26(1): 23-27.
- [54] MATHEW S, KUMAR K A, ANANDAN R, et al. Changes in tissue defence system in white spot syndrome virus (WSSV) infected *Penaeus monodon*[J]. Comp Biochem Physiol C, 2007, 145(3): 315-320.
- [55] 魏森, 顾志峰, 潘志, 等. 背景色对红螯螯虾生长、存活、体色及栖息行为的影响 [J]. 海洋科学, 2020, 44(10): 60-65.
- [56] 马湘成, 张高立, 高广春, 等. 养殖容器颜色对拟穴青蟹幼蟹生长、应激和甲壳颜色的影响 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 2021, 6(34): 43-49.
- [57] KANG D Y, KIM H C. Influence of density and background color to stress response, appetite, growth, and blind-side hypermelanism of flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. Fish Physiol Biochem, 2013, 39(2): 221-232.