

文章编号: 1674-5566(2019)06-0882-08

DOI:10.12024/jsou.20190202615

三角帆蚌所育不同颜色珍珠及其相关组织金属元素种类和含量差异分析

姜琦^{1,2}, 白志毅^{1,2,3}, 孙朝虎⁴

(1. 上海海洋大学 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水产动物遗传育种中心 上海市协同创新中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 江苏省盱眙县水产技术指导站, 江苏 淮安 211700)

摘要: 为研究 Mn、Mg、Fe、Cu、Zn、Co 这 6 种金属元素对珍珠颜色的影响, 选用产自同一养殖池塘的三角帆蚌, 比较分析这 6 种金属元素在内壳色为深紫色、浅紫色和白色的三角帆蚌中分别培育的紫色和白色珍珠中的含量差异, 并分析金属元素含量与珍珠 L、a、b 颜色参数的相关性。结果显示: Mn、Mg、Fe、Co 4 种金属元素在深紫色珍珠中均呈现最高含量, 在白色珍珠中未检出 Fe; Cu 除了在三角帆蚌内壳色为浅紫色的珍珠中稍有体现之外, 其余组均未检出; Zn 在所有颜色珍珠中均未检测出。通过金属元素含量与珍珠颜色参数相关性分析发现, 在各颜色育珠蚌组中, 所育珍珠的 Fe 含量均与 dE 值呈正相关 ($R^2 > 0.83$), Mg 含量均与 L 值呈负相关 ($R^2 > 0.80$), Mn 含量则均与 a 值呈正相关 ($R^2 > 0.64$), 仅在深色蚌组中发现, 所育珍珠的 Co 含量与 L 值的负相关性最高 ($R^2 > 0.94$)。进一步比较分析了深紫色、浅紫色和白色三角帆蚌不同部位外套膜以及间液的金属元素含量, 深紫色蚌组不同位点外套膜 Fe 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 1 号位点含量最高; 不同壳色蚌的 2 号位点外套膜 Mn、Co 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其中白色蚌 Mn 含量显著高于其他两组, 深紫色蚌 Co 含量显著高于其他两组。在白色蚌组的间液中, Mg 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。综上所述, 淡水紫色珍珠的颜色深浅与 Fe、Mg、Co、Mn 含量存在相关性。

关键词: 珍珠; 颜色; 三角帆蚌; 金属元素; 组织

中图分类号: S 917 **文献标志码:** A

三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii*) 是我国特有物种, 也是我国最重要的淡水珍珠蚌^[1], 其形成的珍珠具有珠质光滑细腻、色泽鲜艳等优点, 是淡水蚌中育珠质量最佳者^[2-3]。在决定珍珠品质的众多因素中, 颜色是最重要的因素之一^[4-6]。珍珠的颜色由体色、伴色以及晕彩 3 部分组成。体色指的是珍珠本身的颜色, 有关研究发现其与珍珠中所含有机色素以及金属元素的种类和含量相关^[4,7-9]。

离子致色原理在其他领域应用广泛, 如国内外对致色金属元素在彩色珠光颜料的制备上均有涉及, 且取得了不同程度的研究进展。国外制造珠光云母颜料一般采用稀土金属为沉积剂, 而

国内基本采用 Fe、Co 等金属离子。红色的珠光云母颜料主要成分为 Fe (Fe^{2+} 和 Fe^{3+}) 氧化物或氢氧化物; 绿色系列是以铬制得; 蓝色则以钴包覆云母为主制得的珠光云母颜料。黄色系列珠光云母颜料主要是由二氧化铈和铁及其氧化物制得^[10-11]。LAMBERT 等^[12]认为珍珠的颜色和金属元素含量密切相关。何雪梅等^[13]研究发现淡水白色珍珠和漂白珍珠的颜色与 Mg 和 Zn 有关, 淡水粉色珍珠的颜色与 Mg、Fe 有关, 淡水黄色珍珠的颜色与 Cu、Zn 有关, 淡水紫色珍珠的颜色与 Fe、Zn 有关。严峻等^[14]通过对白、紫、粉红 3 种颜色的淡水养殖珍珠的呈色机理进行较为系统的研究, 发现有部分金属元素在白色与粉色珍

收稿日期: 2019-04-09 修回日期: 2019-06-05

基金项目: 国家重点研究计划(2018YFD0901406); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-49)

作者简介: 姜琦(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为三角帆蚌珍珠颜色。E-mail: 827791121@qq.com

通信作者: 白志毅, E-mail: zybai@shou.edu.cn

珠中含量相差较大,但是相同的金属元素在白色和紫色珍珠中对比没有太大差异,并推断金属元素不是珍珠致色的主要因素。

从已有研究可以发现,珍珠颜色与金属元素之间的关系仍旧存在很大的争议,有必要进一步深入研究。根据前期研究结果最终选择了 Mn、Mg、Fe、Cu、Zn、Co 这 6 种金属元素,采用原子吸收光谱仪中的火焰法来检测这 6 种离子在不同颜色珍珠中的含量差异。另外,外套膜是分泌珍珠的组织,大部分珍珠形成前的物质以间液形式存在于外套膜和贝壳珍珠层间。因此,本研究同时分析不同颜色珍珠的育珠蚌外套膜和间液的金属元素含量,旨在分析金属元素对珍珠颜色的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用内壳色为紫色和白色品系的三角帆蚌互为受体蚌和育珠蚌进行插核育珠,为了控制养

殖环境对珍珠颜色的影响,试验用蚌均吊养在浙江武义伟民水产养殖有限公司同一个养殖池塘中。插核 2 年后,随机选取 33 只用于实验检测。

1.2 试验药品

试验药品包括 HNO_3 (优级纯)、 H_2O_2 、超纯水和 1 000 mg/L 的 Fe、Cu、Mn、Mg、Zn、Co 这 6 种标准溶液。

1.3 样品收集及贝壳珍珠质颜色参数测定

如图 1 所示,贝壳内壳色由 1 号至 3 号位呈递减状态,每只蚌提取 3 个位点的外套膜、间液(即三角帆蚌内壳与外套膜之间的液体,存在大量珍珠形成前的物质)以及珍珠至离心管内,并标上序号备用。贝壳颜色采用 Lovibond-RT200 表面色度计测量^[15],测量参数主要为 L、a、b 和 dE。L 为明度,L > 0 时颜色偏白,L < 0 时颜色偏暗;a > 0 时颜色偏红,a < 0 时颜色偏绿;b > 0 时颜色偏黄,b < 0 时颜色偏蓝;dE 代表色差,dE 越大颜色越深。

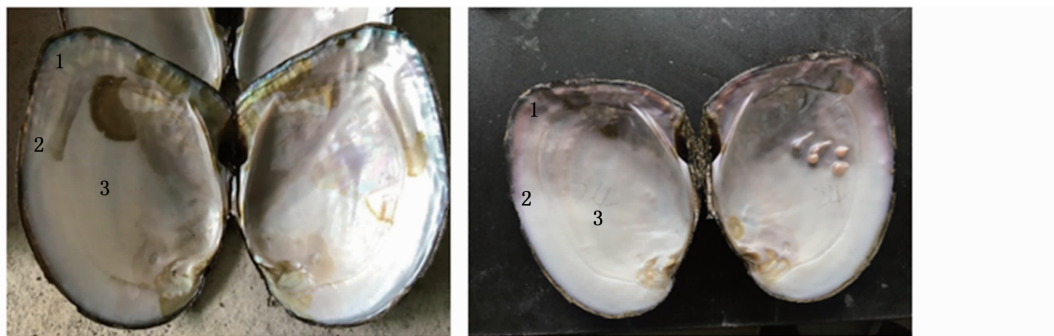


图 1 三角帆蚌外套膜选取位点

Fig. 1 Selection site of mantle of cultured pearl mussel

根据肉眼观察再结合这 3 个参数值,将三角帆蚌按不同内壳色平均分为深紫色、浅紫色以及白色 3 个组。根据分组结果将提取的外套膜、间液按顺序混样,并依次精密称重,每个混样后的样品重量不得超过 2 g,间液混样后重量在 1 g 左右。同时每个组选取适量紫色、浅紫色和白色的珍珠,每个珍珠样品重量在 0.5 g 左右,并用色度仪检测珍珠的 L、a、b 和 dE 4 个参数。

1.4 金属元素含量测定

1.4.1 标准溶液的制备

取 6 种标准溶液,制备 0.5、1、2、4、8、10 mg/L 的 Zn、Mg、Fe、Cu、Mn、Co 混合标准系列工作溶

液各 50 mL。

1.4.2 上机液的制备

将称重后的样品置于离心管中,加入 5 mL HNO_3 ,静置过夜后每个离心管内加入 2 mL H_2O_2 ,换置于耐高温压力微波消解罐中,将其密封后置于高温压力微波消解仪内进行样品消解。

待消解液冷却至 70 °C 左右时,将微波消解罐转置于数显型电热板上进行赶酸,赶酸温度为 180 °C。赶酸直至罐内消解液如黄豆粒般大小,将消解液转移至 25 mL 的容量瓶内,用超纯水洗涤罐壁数次,洗涤液合并入容量瓶内,用超纯水定容至刻度线,最后用滴管混匀得上机液。同时

制备空白试剂。

1.4.3 金属元素含量测定

采用德国耶拿 contrAA700 原子吸收光谱仪对待测样品进行测定,具体采用的方法为火焰法。

1.4.4 浓度计算

金属元素浓度 C (mg/kg) 的计算公式为

$$C = cv/m \quad (1)$$

式中: c 为样品原子吸收光谱测定值 (mg/L); v 为定容体积, 25 mL; m 为样品的质量, g。

1.5 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件分析和处理数据, $P > 0.05$ 代表无显著差异, $P < 0.05$ 代表差异显著。对数据拟合线性回归方程及相关系数 R^2 。

2 结果

2.1 不同内壳色三角帆蚌所育不同颜色珍珠的金属元素含量比较分析

育珠蚌内壳色颜色相同时,对每种三角帆蚌所育不同紫色珍珠和白色珍珠的金属元素含量进行对比(表1),发现 Mn、Mg、Fe、Co 这4种金属

元素在深紫色珍珠中均呈现最高含量。在所有颜色珍珠中, Mn 含量是这几种元素中含量最高的, Mg 含量次之。Cu 在这几组珍珠中的含量均较低,除了育珠蚌内壳色为浅紫色稍有体现之外,其余均检测不出含量。Zn 在所有颜色珍珠中均未检测出含量。

将同一内壳色所育的不同颜色的珍珠的金属元素含量进行对比,发现 Fe、Mg 在紫色珍珠中含量最高,且育珠蚌内壳色越深的组含量越高,而在白色珍珠中 Fe 未检测出,表明颜色越深, Fe、Mg 含量越高。Cu 含量均较低,体现不出其含量与珍珠颜色的相关性。Mn 在所有珍珠中含量均是最高,其中内壳色为深紫色和浅紫色的蚌中均是在颜色最深的珍珠中 Mn 含量最高,而内壳色为白色的蚌中则是微紫色珍珠 Mn 含量最高。Co 在三角帆蚌内壳色为深紫色和白色的组中均是再所育的颜色最深的珍珠中含量最高,而内壳色为浅紫色的蚌中则是浅紫色珍珠 Co 含量最高。这说明育珠蚌对所育珍珠金属元素沉积具有一定影响。

表1 不同内壳色三角帆蚌所育不同颜色珍珠金属元素含量

育珠蚌内壳色 Inner shell color of host pearl mussel	珍珠颜色 Pearl color	金属元素 Metallic element					
		Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Co
深紫色 Dark purple	深紫色	7.94	0.00	40.00	2349.30	0.00	1.73
	浅紫色	2.87	0.00	14.76	334.98	0.00	0.42
	白色	0.00	0.00	12.06	422.41	0.00	0.00
浅紫色 Lilac colour	紫色	2.18	0.59	23.81	948.50	0.00	0.00
	浅紫色	0.00	0.06	21.85	190.10	0.00	0.31
	白色	0.00	0.13	11.35	599.71	0.00	0.00
白色 White	浅紫色	0.78	0.00	17.68	324.37	0.00	0.53
	微紫色	0.58	0.00	12.39	558.69	0.00	0.00
	白色	0.00	0.00	8.28	85.29	0.00	0.60

2.2 珍珠颜色参数与金属元素含量的相关性

将珍珠金属元素含量与颜色参数进行相关性分析,发现在各颜色育珠蚌组中,所育珍珠的 Fe 含量均与 dE 值呈正相关(图2, $R^2 > 0.83$), Mg

含量与 L 值均呈负相关(图3, $R^2 > 0.80$), Mn 含量则是均与 a 值呈正相关(图4, $R^2 > 0.64$)。仅在深色蚌组中发现,所育珍珠的 Co 含量与 L 值的负相关性最高($R^2 > 0.94$)。

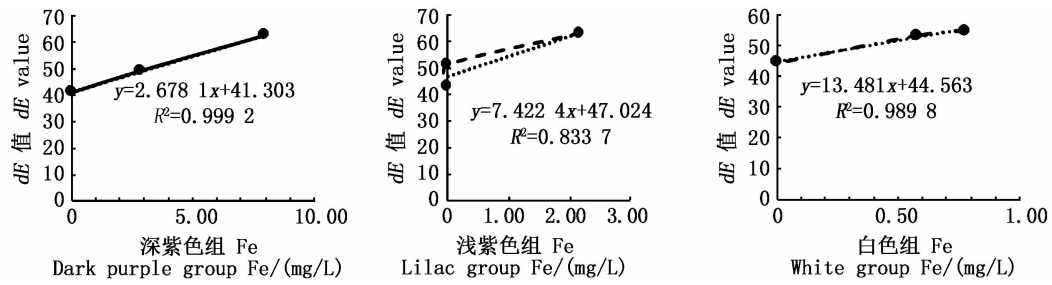


图 2 不同颜色珍珠中 Fe 含量与 dE 值的相关性

Fig. 2 Correlation between Fe content and dE value in pearls of different colors

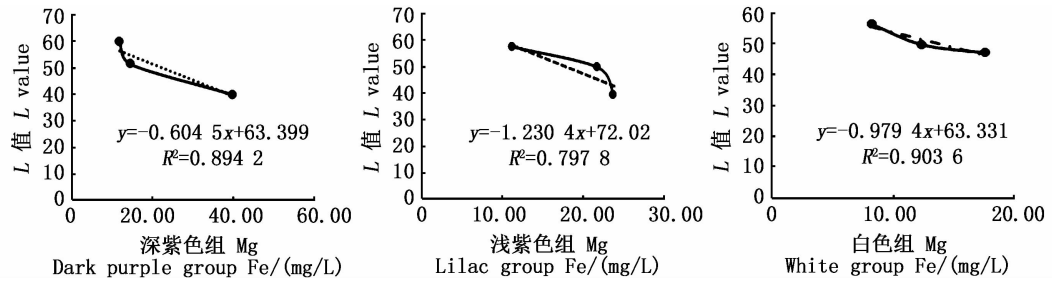


图 3 不同颜色珍珠中 Mg 含量与 L 值的相关性

Fig. 3 Correlation between Mg content and L value in pearls of different colors

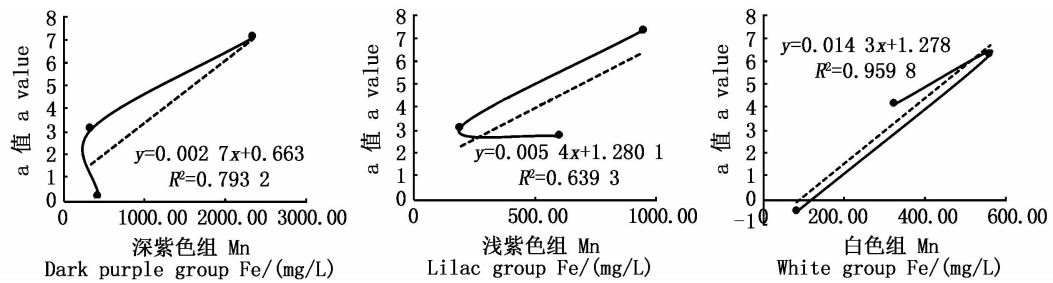


图 4 不同颜色珍珠中 Mn 含量与 a 值的相关性

Fig. 4 Correlation between Mn content and a value in pearls of different colors

2.3 不同颜色三角帆蚌不同部位外套膜中金属元素含量差异分析

内壳色为深紫色、浅紫色和白色的三角帆蚌不同部位外套膜的金属元素含量见表 2。3 组蚌中 Fe 含量由 1 号位到 3 号位呈递减趋势:1 号位均最高,分别为 (260.20 ± 59.60) mg/kg、 (266.31 ± 223.32) mg/kg 和 (132.41 ± 53.93) mg/kg;3 号位均最低,分别为 (72.72 ± 1.54) mg/kg、 (69.92 ± 16.83) mg/kg 和 (56.92 ± 24.64) mg/kg,其中深紫色蚌不同位点外套膜中 Fe 含量差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。Zn 则在浅紫色蚌组内的不同位点的外套膜含量中差异显著 ($P < 0.05$),含量最高的是 1 号位点,高达

(69.87 ± 17.48) mg/kg。三组蚌中 Mg 均是 2 号位含量最高,分别为 (211.69 ± 291.78) mg/kg、 565.65 mg/kg 和 (135.08 ± 120.98) mg/kg, Mn 则是在 3 号位含量最高,分别为 (492.71 ± 556.96) mg/kg、 (147.05 ± 150.23) mg/kg 和 (708.59 ± 703.08) mg/kg,但均未发现显著差异 ($P > 0.05$)。Cu、Co 含量普遍较低,且在不同位置间差异不显著。

育珠蚌内壳色为深紫色和浅紫色的蚌组内均为 1 号位 Fe 含量最高,2 号位 Mg 含量最高,3 号位 Mn 含量最高;三角帆蚌内壳色为白色的蚌组 1、2、3 号位均为 Mn 含量最高。不同内壳色蚌组 2 号位点外套膜 Mn、Co 含量存在显著性差异

($P < 0.05$), 其中白色蚌组 Mn 含量显著高于其他两组, 达到 (255.85 ± 211.26) mg/kg; Co 含量随着蚌壳颜色的加深而增高, 即深紫色蚌组 Co 含量显著高于其他两组。三角帆蚌内壳色越深, Fe、Co 元素的含量越高, 即 Fe、Co 与珍珠层颜色深浅具有相关性。

2.4 不同颜色三角帆蚌间液中金属元素含量差异分析

内壳色为深紫色、浅紫色和白色的三角帆蚌间液中金属元素含量见表 3。育珠蚌内壳色为深紫色的间液中 Fe 含量最高, 其余两组均为 Mg 含量最高, Mg 在间液中差异显著 ($P < 0.05$), 且白

色蚌间液 Mg 含量最高, 达到 (26.34 ± 5.43) mg/kg, 表现为颜色越浅的蚌, Mg 含量越高, 而珍珠中则是颜色越深, Mg 含量越高。Mn 在外套膜以及珍珠中含量均较高, 但在间液中含量较低且差异不显著 ($P > 0.05$)。Fe 在珍珠、外套膜以及间液中均呈现为颜色越深, 含量越高。Cu、Co 以及 Zn 在间液中含量均不高, 且 Cu 在珍珠以及外套膜中含量也很低; 而 Zn 在珍珠中未检测出, 在外套膜中, Zn 在浅紫色和白色蚌组中颜色越深的位点, 含量越高; Co 虽然含量均不高, 但是在外套膜和间液中均是颜色越深, 含量越高, 在珍珠中也是在深紫色中含量是最高的。

表 2 不同位点的外套膜中金属元素含量比较

位点 Site	三角帆蚌内壳色 Inner shell color of host pearl mussel	金属元素 Metallic element					
		Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Co
1	深紫色 Dark purple	260.20 ± 59.60 ^{Aa}	0.34 ± 0.24 ^{Aa}	188.61 ± 199.15 ^{Aa}	217.23 ± 41.79 ^{Aa}	63.56 ± 26.85 ^{Aa}	0.44 ± 0.39 ^{Aa}
	浅紫色 Lilac	266.31 ± 223.32 ^{Aa}	0.15 ± 0.14 ^{Aa}	46.06 ^{Aa}	26.76 ^{Aa}	69.87 ± 17.48 ^{Aa}	0.32 ± 0.28 ^{Aa}
	白色 White	132.41 ± 53.93 ^{Aa}	0.26 ± 0.25 ^{Aa}	31.82 ± 29.31 ^{Aa}	180.08 ± 185.15 ^{Aa}	58.26 ± 5.52 ^{Aa}	0.16 ± 0.13 ^{Aa}
2	深紫色 Dark purple	176.02 ± 26.26 ^{Ab}	0.31 ± 0.20 ^{Aa}	211.69 ± 291.78 ^{Aa}	23.62 ± 9.25 ^{Aa}	99.14 ± 83.72 ^{Aa}	0.55 ^{Aa}
	浅紫色 Lilac	126.72 ± 136.02 ^{Aa}	0.18 ^{Aa}	565.65 ^{Aa}	17.42 ^{Aa}	43.86 ± 20.31 ^{Aa}	0.37 ± 0.13 ^{Ba}
	白色 White	91.20 ± 79.13 ^{Aa}	0.36 ± 0.99 ^{Aa}	135.08 ± 120.98 ^{Aa}	255.85 ± 211.26 ^{Ba}	44.20 ± 33.30 ^{Aa}	0.28 ^{Ba}
3	深紫色 Dark purple	72.72 ± 1.54 ^{Ab}	0.14 ± 0.13 ^{Aa}	206.15 ± 153.87 ^{Aa}	492.71 ± 556.96 ^{Aa}	19.97 ± 7.73 ^{Aa}	0.53 ± 0.35 ^{Aa}
	浅紫色 Lilac	69.92 ± 16.83 ^{Aa}	0.1 ^{Aa}	35.97 ± 2.65 ^{Aa}	147.05 ± 150.23 ^{Aa}	10.54 ± 6.29 ^{Ab}	0.37 ± 0.36 ^{Aa}
	白色 White	56.92 ± 24.64 ^{Aa}	0.17 ± 0.78 ^{Aa}	53.67 ± 34.44 ^{Aa}	708.59 ± 703.08 ^{Aa}	15.86 ± 6.91 ^{Aa}	0.12 ^{Aa}

注: 所有数值均为平均值 ± 标准差, 每列内具有相同字母的数值差异不显著 ($P > 0.05$); 大写字母代表不同壳色三角帆蚌相同部位外套膜金属元素含量差异; 小写字母代表同一壳色三角帆蚌不同部位外套膜金属元素含量差异; 1-3 号位点为图 1 所示外套膜取样位置
Notes: All values were mean (+ standard deviation), and there was no significant difference in the values with the same letters in each line ($P > 0.05$). Capital letters represent the difference of metal elements content in mantle of the same part of *Hyriopsis cumingii* with different shell colors, and lower letters represent the difference of metal elements content in mantle of different parts of *Hyriopsis cumingii* with the same shell color. Location 1-3 is the location of mantle test (as shown in Fig. 1)

表 3 不同内壳色三角帆蚌间液中金属元素含量比较

Tab. 3 Metallic element content in intermediate solution of *H. cumingii* with different inner shell colors

三角帆蚌内壳色 Inner shell color of host pearl mussel	金属元素 Metallic element					
	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Co
深紫色 Dark purple	26.23 ± 26.7 ^a	0.03 ^a	21.34 ± 4.68 ^a	4.44 ± 0.69 ^a	0.00 ^a	0.31 ^a
浅紫色 Lilac	0.51 ^a	0.00 ^a	22.49 ± 9.91 ^a	6.19 ± 5.94 ^a	5.39 ^a	0.16 ± 0.22 ^a
白色 White	0.32 ± 0.14 ^a	0.09 ± 0.42 ^a	26.34 ± 5.43 ^b	1.96 ± 0.03 ^a	0.46 ± 0.33 ^a	0.12 ± 0.13 ^a

注: 所有数值均为平均值 ± 标准差, 每列内具有相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 具有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: All values were mean (+ standard deviation). There was no significant difference between the same letters in each column ($P > 0.05$), but there was significant difference between different letters ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 珍珠中金属元素种类和含量对其颜色的影响

育珠蚌内壳色为深紫色即深色三角帆蚌所育珍珠的 Fe 含量高于其他颜色的蚌,紫色珍珠的 Fe 含量也最高,且白色珍珠中未检测到 Fe 含量,将金属元素含量与珍珠颜色参数进行相关分析,发现 Fe 与 dE 值之间的关系比较密切,在各颜色蚌组中,所育珍珠的 Fe 含量均与 dE 值呈正相关,且 Fe 元素与各个参数之间的 R^2 均大于 0.50,表明珍珠紫色度越深,Fe 含量越高。这与马红艳等^[16]对于紫色珍珠与 Fe 有关的研究结果一致。Mn、Mg 相对来说在紫色珍珠中含量最高,且颜色越深的蚌中紫色珍珠中其含量越高。Mn 与 a 值之间相关性最高,在各颜色蚌组中,所育珍珠的 Mn 含量与 a 值均呈正相关,可以看出 Mn 含量对 a 值有一定影响。Mn 在所有珍珠中含量均较高,表明淡水珍珠中普遍存在 Mn 元素。江琰等^[17]发现白色珍珠中含有较多的 Mn 元素,这与本实验结果相一致。Mg 与各参数比较分析后发现其与 L 值相关性最高,在各颜色蚌组中,所育珍珠的 Mg 含量与 L 值均呈负相关,可以确定 L 值与珍珠中的 Mg 含量有关,即 Mg 含量的高低影响珍珠的明度。Co 在紫色珍珠中含量相对最高,这一结果佐证了杨明月等^[18]的研究,他认为 Co 元素使珍珠呈现紫色,但他也认为珍珠颜色与 Zn 有关,而本实验发现,Cu、Zn 在珍珠中含量均不高,珍珠中的 Zn 均未检出。这也与何雪梅等^[13]的 Zn 与珍珠颜色有关相悖,而外套膜中均能检出 Zn,说明不是养殖环境或测量误差产生的。这些差异也许是由于外部环境对珍珠颜色亦有很大影响,而部分研究忽略该影响造成的。

3.2 外套膜和间液中金属元素种类和含量与所产珍珠颜色的相关性

外套膜是分泌珍珠质的关键组织,间液是外套膜的分泌物,是外套膜与贝壳珍珠层之间的液体。本实验发现,不同金属元素在三角帆蚌不同部位含量存在差异。在所测的外套膜与间液的金属元素中,Fe、Zn 在同一壳色育珠蚌不同部位的外套膜间差异显著($P < 0.05$),Co、Mn 在不同壳色育珠蚌相同部位的外套膜中差异显著($P < 0.05$),Mg 在不同壳色育珠蚌的间液中差异也显

著($P < 0.05$)。其中,深紫色蚌组不同位点外套膜 Fe 含量存在显著差异($P < 0.05$),1 号位点含量最高。Zn 则在浅紫色蚌组内的不同位点的外套膜含量中差异显著($P < 0.05$),也是 1 号位点含量最高,说明外套膜生长越快速的前端,Fe、Zn 含量越高。不同壳色蚌组的 2 号位点外套膜 Mn、Co 含量存在显著差异($P < 0.05$),其中白色蚌 Mn 含量显著高于其他两组,紫色蚌 Co 含量显著高于其他两组。珍珠颜色越深,含量越高的 Mg 元素在间液中则是颜色越浅的蚌组中,含量越高,说明白色蚌中 Mg 元素并没有被吸收。Mn 在外套膜以及珍珠中含量均很高,但在间液中含量较低且差异不显著($P > 0.05$),说明含 Mn 的间液物质矿化为珍珠层是受到选择的。

然而,不能单从含量的高低来衡量金属元素对珍珠颜色的影响。而且,影响颜色的金属元素可能是单一的,也可能是多种作用的结果。张蕴韬等^[19]发现金属元素以金属卟啉的形式存在于珍珠中,影响着珍珠的光泽色彩,且金属元素与卟啉类都显著影响三角帆蚌的壳色以及珍珠的颜色。李清清等^[15]通过对紫色三角帆蚌选育系 F₃ 育珠性状的研究,发现供片蚌内壳色与无核珍珠颜色相关性极显著。日本学者 WADA 等^[20]于 1996 年报道了以马氏珠母贝白色品系作为外套膜小片供体时,可培育出高质量的白色珍珠。这说明珍珠的颜色与提供外套膜小片的个体(供体)的壳色具有显著相关性。已有的海水有核珍珠的试验证明,提供组织小片制片的贝壳珍珠层颜色决定了珍珠的颜色^[21-22]。通过本实验发现,外套膜组织中金属元素 Fe 和 Co 含量越高,珍珠层颜色则更深,可以将检测外套膜组织中金属元素含量作为选育彩色珍珠贝的生理性指标。

参考文献:

- [1] LI J L, LI Y S. Aquaculture in China-Freshwater pearl culture [J]. World Aquaculture, 2009, 40(1): 60.
- [2] 汪桂玲,白志毅,刘晓军,等. 三角帆蚌种质资源研究进展[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1618-1627.
WANG G L, BAI Z Y, LIU X J, et al. Research progress on germplasm resources of *Hyriopsis cumingii* [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1618-1627.
- [3] 李家乐,刘越. 影响养殖珍珠质量的主要因子[J]. 水产学报, 2011, 35(11): 1753-1760.
LI J L, LIU Y. The main influencing factors on the quality of cultured pearls [J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35

- (11): 1753-1760.
- [4] 宋中华, 喻学惠, 章西焕. 养殖珍珠质量影响因素分析[J]. 宝石和宝石学杂志, 2001, 3(1): 18-21.
SONG Z H, YU X H, ZHANG X Y. Analysis of influencing factors on quality of cultured pearls[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2001, 3(1): 18-21.
- [5] SOUTHGATE P C, LUCAS J S. The pearl oyster [M]. Amsterdam: Elsevier, 2008: 273-302.
- [6] 李西雷, 李卿青, 朱庭耀, 等. 添加类胡萝卜素对三角帆蚌总胡萝卜素含量及贝壳珍珠质颜色的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(4): 477-486.
LI X L, LI Q Q, ZHU T Y, et al. Effect of dietary carotenoid on total carotenoids content and shell color in *Hyriopsis cumingii* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(4): 477-486.
- [7] 郭守国. 珍珠—成功与华贵的象征[M]. 上海: 上海文化出版社, 2004: 143-155.
GUO S G. Pearl-symbol of success and luxury [M]. Shanghai: Shanghai Culture Publishing House, 2004: 143-155.
- [8] 郝之奎, 王嫣, 顾志峰, 等. 珍珠颜色的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 35(11): 3260-3261.
HAO Z K, WANG Y, GU Z F, et al. Research advances in pearl color [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 35(11): 3260-3261.
- [9] 小林新二郎, 渡部哲光. 珍珠的研究[M]. 熊大仁, 译. 北京: 农业出版社, 1966: 288-302.
XIAO L X E L, DU B Z G. The research of pearl [M]. XIONG D R, trans. Beijing: Agricultural Publishing House, 1966: 288-302.
- [10] 景晓明, 廖戎, 岑贵利, 等. 金属彩光云母珍珠光颜料的制备[J]. 西南民族学院学报·自然科学版, 2002, 28(3): 310-313.
JING X M, LIAO R, CEN G L, et al. Preparation of mica iron pearlite paints with metallic lustre [J]. Journal of Southwest University for Nationalities · Natural Science Edition, 2002, 28(3): 310-313.
- [11] 白翠萍, 朱瀛波, 管俊芳, 等. 致色金属离子在珠光云母颜料中的应用[J]. 矿场综合利用, 2008, (5): 29-32.
BAI C P, ZHU Y B, GUAN J F, et al. Application of the colouring metallic ions in the mica pearly pigment [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2008, (5): 29-32.
- [12] LAMBERT G. Trace element composition in pearls [D]. Western Australia: Murdoch University, 1998.
- [13] 何雪梅, 吕林素, 张蕴韬. 珍珠中的金属卟啉及其致色机理探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(S1): 96-98.
HE X M, LV L S, ZHANG Y T. Metalloporphyrins in pearls and their chromogenic mechanism [J]. Mineral and rock Geochemistry Bulletin, 2007, 26(S1): 96-98.
- [14] 严俊, 胡仙超, 王巨安, 等. 不同颜色的淡水养殖珍珠呈色机理研究[J]. 岩矿测试, 2013, 32(2): 263-268.
YAN J, HU X C, WANG J A, et al. Investigation on the coloring mechanism of freshwater cultured pearls with different color [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(2): 263-268.
- [15] 李清清, 白志毅, 刘晓军, 等. 三角帆蚌生长性状和内壳色与所产无核珍珠质量的相关性分析[J]. 水产学报, 2015, 39(11): 1631-1639.
LI Q Q, BAI Z Y, LIU X J, et al. Correlation analysis of nonnucleated pearl quality parameters with growth traits and inner shell color of *Hyriopsis cumingii* [J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(11): 1631-1639.
- [16] 马红艳. 养殖珍珠质量内在受控因素及优化处理研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1999.
MA H Y. Study on internal controlled factors and optimum treatment of pearl quality [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1999.
- [17] 江琰, 刘克武, 李静, 等. 三角帆蚌黄白黑珍珠元素分析及药用价值评价[J]. 化学研究与应用, 2003, 15(3): 433-434.
JIANG Y, LIU K W, LI J, et al. Elemental analysis and pharmaceutical evaluation for yellow white and black pearls of *Hyriopsis cumingii* (Lea) [J]. Chemical Research and Application, 2003, 15(3): 433-434.
- [18] 杨明月, 郭守国, 史凌云, 等. 淡水养殖珍珠的化学成分与呈色机理研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2004, 6(2): 10-13.
YANG M Y, GUO S G, SHI L Y, et al. Study on compositions and colouring mechanism of freshwater cultured pearls [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2004, 6(2): 10-13.
- [19] 张蕴韬. 卟啉及金属卟啉对珍珠颜色的贡献及致色机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
ZHANG Y T. Contribution of porphyrin and Metalloporphyrin to pearl color and study on its chromogenic mechanism [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [20] WADA K T, KOMARU A. Color and weight of pearls produced by grafting the mantle tissue from a selected population for white shell color of the Japanese pearl oyster *Pinctada fucata martensii* (Dunker) [J]. Aquaculture, 1996, 142(1/2): 25-32.
- [21] GERVIS M H, SIMS N A. The biology and culture of pearl oysters (Bivalvia: Pteridae) [M]. London: Overseas Development Administration (ODA) of the United Kingdom, 1992: 1-49.
- [22] WADA K. Experimental biological studies on the occurrence of yellow color in pearls [J]. Bulletin of the National Pearl Research Laboratory, 1969, 14: 1765-1820.

Analysis of metallic element types and contents in pearls of different colors and their related tissues in *Hyriopsis cumingii*

JIANG Qi^{1,2}, BAI Zhiyi^{1,2,3}, SUN Chaohu⁴

(1. Key Laboratory of Freshwater and Aquatic Germplasm Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Ocean University Aquatic Animal Genetics and Breeding Center, Shanghai Cooperative Innovation Center, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Aquaculture Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Xuyi County Fisheries Technical Guidance Station, Jiangsu Province, Huaiian 211700, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the effects of six metal elements, i. e. Mn, Mg, Fe, Cu, Zn, and Co on the color of pearls, *Hyriopsis cumingii* from the same breeding pond were selected, and the different shell elements were analyzed for dark purple and light purple. The difference between the purple and white pearls cultivated in the white *Hyriopsis cumingii* was analyzed, and the correlation between the metal element content and Lab color parameters of the pearl was analyzed. The results showed that: the four metal elements of Mn, Mg, Fe, and Co exhibited the highest content in deep purple pearls, the Fe was not detected in the white pearl; Cu was slightly reflected in the pearl with a light purple inner shell; the other groups were not detected. Zn content was not detected in all color pearls. Correlation analysis between the content of metal elements and the color parameters of pearls showed that the Fe content of the pearls in each color group was positively correlated with the dE value ($R^2 > 0.83$), and the Mg content was negatively correlated with the L value ($R^2 > 0.80$). The Mn content was positively correlated with the a value ($R^2 > 0.64$). Only in the dark color group, the negative correlation between the Co content of the pearl and the L value was the highest ($R^2 > 0.94$). The contents of metal elements in mantle and interstitial fluid of different parts of *Hyriopsis cumingii* were further compared and analyzed. There were significant differences in the contents of Fe in mantle at different sites in *Hyriopsis cumingii* group ($P < 0.05$), and the highest in site 1. There were significant differences in the contents of Mn and Co in mantle of site 2 in different groups of *Hyriopsis cumingii* ($P < 0.05$). The content of Co in the dark purple mussel was significantly higher than that in the other two groups. There was a significant difference in Mg content in the interstitial fluid of the white mussel groups ($P < 0.05$). The color of freshwater purple pearls is correlated with the contents of Fe, Mg, Co, and Mn.

Key words: pearl; color; *Hyriopsis cumingii*; metal element; tissue