

13 种双壳类贝壳的扫描电镜观察

陈道海^{①②} 霍颖娴^②

① 岭南师范学院环北部湾海洋药用动物保护与利用研究所 湛江 524048; ② 岭南师范学院生命科学与技术学院
湛江 524048

摘要: 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对湛江地区的丽文蛤 (*Meretrix lusoria*)、琴文蛤 (*M. lyrata*)、文蛤 (*M. meretrix*)、波纹巴非蛤 (*Paphia undulata*)、菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*)、杂色蛤仔 (*R. variegata*)、伊萨伯雪蛤 (*Clausinella isobellina*)、格粗饰蚶 (*Anadara clathrata*)、泥蚶 (*Tegillarca granosa*)、栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*)、尖紫蛤 (*Sanguinolaria aauta*)、锈色朽叶蛤 (*Coecella turgida*) 和栉江珧 (*Atrina pectinata*) 这6科13种双壳类的贝壳形态微观结构特征进行观察。结果表明, 不同种的贝壳表面和横切面微观结构有一定差异。这些差异主要表现在晶体的组成和排列方式两个方面。贝壳角质层根据表面形态特征分为5种类型: 光滑平整、颗粒状、不规则多边形、蜂窝状和沟壑状。贝壳棱柱层的晶体形状有棱柱状、短柱状、片状和不规则形状。不同贝壳的晶体有两种排列方向, 垂直于横切面和平行于横切面。13种贝壳珍珠层的晶体有颗粒状、砖块状、圆形、块状和不规则的多边形。不同种的贝壳角质层、棱柱层和珍珠层的厚度也不同。研究贝壳微观结构之间的差异, 可以为分类提供基本资料。

关键词: 双壳类; 贝壳; 微观结构; 扫描电镜

中图分类号: Q954 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2015) 01-122-09

Shell Microstructure in Thirteen Species of Bivalves

CHEN Dao-Hai^{①②} HUO Ying-Xian^②

① Lingnan Normal University, Round Beibu Gulf Institute for the Protection and Utilization of Medical Marine Animals, Zhanjiang 524048; ② Lingnan Normal University, College of Life Science and Technology, Zhanjiang 524048, China

Abstract: Research on the shell microstructure was conducted in thirteen species of bivalves which belong to six families using the scanning electron microscopy (SEM). The 13 species are *Meretrix lusoria*, *M. lyrata*, *M. meretrix*, *Paphia undulate*, *Ruditapes philippinarum*, *R. variegata*, *Clausinella isobellina*, *Anadara clathrata*, *Tegillarca granosa*, *Chlamys farreri*, *Sanguinolaria aauta*, *Coecella turgid*, and *Atrina pectinata*, respectively. Three samples from each were fixed with 2.5% pentanediol, and then cut into 0.5 cm × 0.5 cm pieces. All sections of small pieces were grinded before observation by scanning electron microscope. Samples were measured and pictures were taken after observation. The results show that the shell surface microstructures

基金项目 广东省自然科学基金项目 (No. 10152404801000013);

第一作者介绍 陈道海, 男, 教授; 研究方向: 贝类生物学; E-mail: dhchen11@21cn.com.

收稿日期: 2013-09-19, 修回日期: 2014-03-11 DOI: 10.13859/j.cjz.201501015

vary in different species, mostly manifested in the composition and arrangement of the crystals. There are five types of shell surface morphologies of the corneum: smooth, granular, irregular polygon, honeycomb-like, and ravine. The crystals of the shell prismatic layer are in prism-like shape, short column, flakes, and irregular shape. There are two kinds of directions in the arrangement of the crystals in different shells: perpendicular to the cross-section, and parallel to the cross-section. The shapes of the crystals in nacre of thirteen kinds of shells are granular, brick-shaped, round, massive and irregular polygons. The thickness of the corneum, prismatic layer or nacre in different shells is also different. Research on the microstructure of the shells may provide a basis for their classification.

Key words: Bivalve; Shell; Microstructure; Scanning electron microscope

贝壳是一种典型的天然生物矿化材料, 内部存在令人叹为观止的特殊的显微结构, 同时具有最佳强韧性的匹配(谢忠东等 2006)。以往的研究表明, 贝壳的主要成分为 CaCO_3 , 并含有少量的有机质(戴永定 1994, Yang 1995)。贝壳的结构复杂多变, 典型的贝壳结构由外层(角质层)、中间层(棱柱层)和内层(珍珠层)组成。角质层仅由贝壳素(conchiolin)构成; 棱柱层(prismatic layer)由角柱状方解石(calcite)或霏石(aragonite)构成; 珍珠层(nacreous layer)由文石构成(吴小平等 1999)。20世纪50~60年代, 对贝壳类的生物矿物做了深入的研究(Bevelander et al. 1965, Watabe 1965, Towe et al. 1968, Burrage et al. 1969, Mutvei 1970), 对大多数贝壳类材料的结构特征和矿物成分有了比较完整的了解, 到了21世纪初, 不同学科的众多科学家开始参与到贝壳类生物材料的研究中。近年来, 也有国内学者对珍珠层的组织结构以及晶体学取向进行了详细的研究(Feng et al. 1999, 2000, Hou et al. 2003), 也有人研究双壳贝壳的珍珠层以及鲍鱼壳的显微结构、微量元素及宝石学特征(刘承松等 1984, 孙家美等 1991, 刘小明 1994, 周佩玲 1998), 但对贝壳细微结构在分类学上的应用则很少有人涉及。本文采用扫描电镜对13种双壳类贝壳表面和横切面进行观察, 通过比较, 不同贝壳存在种间的细微结构差异, 可以作为分类辅助依据。

1 材料与方法

将采集回来的13种双壳类的贝壳清洗干净, 分类鉴定到种(表1), 将贝壳制成 $0.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 的小块, 并把贝壳的横切面磨平, 将贝壳样品装在样品台上, 对样品表面导电处理约15 min。扫描电子显微镜(Philips XL-30, 产地: 荷兰)下观察并拍照。

2 结果

2.1 角质层

13种贝壳表面形态特征有5种类型(图1): 光滑平整、颗粒状、不规则多边形、蜂窝状和沟壑状。丽文蛤(*Meretrix lusoria*)、琴文蛤(*M. lyrata*)、杂色蛤仔(*Ruditapes variegata*)、文蛤(*M. meretrix*)、尖紫蛤(*Sanguinolaria aauta*)壳表面光滑平整(图1a~e), 前4种贝壳均属帘蛤科。泥蚶(*Tegillarca granosa*)、波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)、菲律宾蛤仔(*R. philippinarum*)、伊萨伯雪蛤(*Clausinella isobellina*)、锈色朽叶蛤(*Coecella turgida*)壳表面很粗糙, 可看到一些排列疏松的颗粒状小体(图1f~i, m), 栉江珧(*Atrina pectinata*)壳表面较光滑, 由一层多边形物质排列而成(图1j), 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)壳表面有很多孔隙, 像蜂窝一样(图1k), 格粗饰蚶(*Anadara clathrata*)表面可以看到有许多排列不规则的小沟(图1l)。

表1 用于本研究的实验材料
Table 1 The information of specimen for this study

科 Family	物种 Species	采集时间 (年-月-日) Acquisition time (Year-month-date)	标本来源 Specimen source
帘蛤科 Veneridae	丽文蛤 <i>Meretrix lusoria</i>	2009-11-26	湛江赤坎区南华市场 Zhanjiang coast, Guangdong
	琴文蛤 <i>M. lyrata</i>	2009-11-26	湛江赤坎区南华市场 Zhanjiang coast, Guangdong
	文蛤 <i>M. meretrix</i>	2010-01-01	湛江赤坎区金沙湾海滩 Zhanjiang coast, Guangdong
	菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	2009-11-26	湛江赤坎区南华市场 Zhanjiang coast, Guangdong
	杂色蛤仔 <i>R. variegata</i>	2009-12-10	湛江霞山区水产品批发市场 Zhanjiang coast, Guangdong
	伊萨伯雪蛤 <i>Clausinella isobellina</i>	2009-11-26	湛江赤坎区南华市场 Zhanjiang coast, Guangdong
	波纹巴非蛤 <i>Paphia undulata</i>	2009-11-26	湛江赤坎区南华市场 Zhanjiang coast, Guangdong
蚶科 Arcidae	格粗饰蚶 <i>Anadara clathrata</i>	2010-01-01	湛江赤坎区金沙湾海滩 Zhanjiang coast, Guangdong
	泥蚶 <i>Tegillarca granosa</i>	2009-12-10	湛江霞山区水产品批发市场 Zhanjiang coast, Guangdong
扇贝科 Pectinidae	栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	2009-11-26	湛江赤坎区南华市场 Zhanjiang coast, Guangdong
紫云蛤科 Psammobiidae	尖紫蛤 <i>Sanguinolaria aauta</i>	2010-01-01	湛江赤坎区金沙湾海滩 Zhanjiang coast, Guangdong
中带蛤科 Mesodesmatidae	锈色朽叶蛤 <i>Coecella turgida</i>	2010-01-01	湛江赤坎区金沙湾海滩 Zhanjiang coast, Guangdong
江珧科 Pinnidae	栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	2009-12-10	湛江霞山区水产品批发市场 Zhanjiang coast, Guangdong

2.2 棱柱层

13种贝类贝壳棱柱层横切面的微观特征见表2。其贝壳棱柱层的晶体形状有棱柱状、短柱状、片状和不规则形状。

交叉薄片晶体排列方向有垂直于切面和平行于切面两种。丽文蛤、栉孔扇贝、泥蚶、菲律宾蛤仔和栉江珧中间层为棱柱状(图2a~e),且晶体的长度是短柱状晶体长度的3~6倍。琴文蛤、波纹巴非蛤、伊萨伯血蛤、杂色蛤仔和文蛤,晶体长度短于棱柱状晶体长度,它的棱角不明显(图2f~j)。尖紫蛤和锈色朽叶蛤片状中间层呈片状,每一片叠在一起,形成很多层(图2k, l)。格粗饰蚶中间层呈不规则形状

(图2m)。

2.3 珍珠层

贝壳的珍珠层由排列不规则的晶体组成。这些晶体大多数为颗粒状,但也有一些是砖块状、圆形、块状和不规则多边形(表3)。

丽文蛤、波纹巴非蛤、尖紫蛤、泥蚶珍珠层为颗粒状,晶体形状不规则,体积很小(图3a~d)。琴文蛤和文蛤珍珠层的晶体为圆形,薄且面积很大,约 $3.2 \sim 4.3 \mu\text{m}^2$ (图3e, f)。伊萨伯雪蛤、杂色蛤珍珠层的晶体为不规则块状且很薄(图3i, j)。栉江珧珍珠层的晶体为不规则的多边形,有一定厚度,约 $8 \mu\text{m}$ (图3g)。格粗饰蚶珍珠层为砖块状,形状类似于长方形

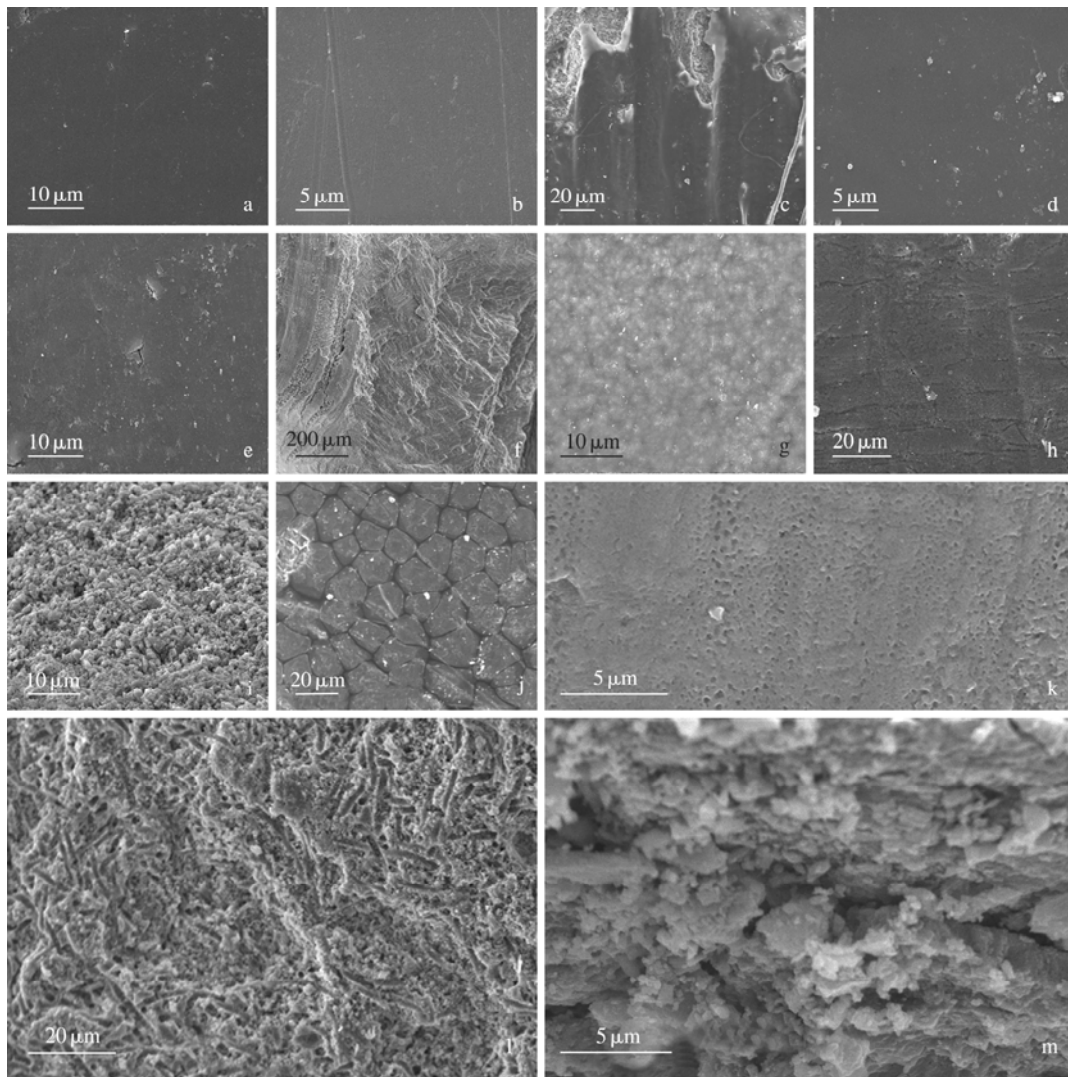


图1 贝壳的角质层表面

Fig. 1 The corneum surface microstructure of the shells

a. 丽文蛤; b. 琴文蛤; c. 杂色蛤仔; d. 文蛤; e. 尖紫蛤; f. 泥蚶, 箭头指示角质层表面; g. 波纹巴非蛤; h. 菲律宾蛤仔; i. 伊萨伯雪蛤; j. 栉江珧; k. 栉孔扇贝; l. 格粗饰蚶; m. 锈色朽叶蛤。

a. *Meretrix lusoria*; b. *M. lyrata*; c. *Ruditapes variegata*; d. *M. meretrix*; e. *Sanguinolaria aauta*; f. *Tegillarca granosa*, the arrow indicated to corneum surface; g. *Paphia undulata*; h. *R. philippinarum*; i. *Clausinella isobellina*; j. *Atrina pectinata*; k. *Chlamys farreri*; l. *Anadara clathrata*; m. *Coecella turgida*.

或菱形, 晶体较薄 (图3h)。珍珠层由两层组成且排列疏松的贝壳有两种类型: 一种是外层为不规则块状, 内层颗粒状的锈叶朽叶蛤 (图3k) 和菲律宾蛤仔 (图3l); 另一种是外层不规则的块状, 内层砖块状的扇贝科的栉孔扇贝 (图

3m)。

在贝壳的三层结构中, 对珍珠层的研究是最多的, 珍珠的结构并不复杂, 但从微观角度去考察却见细致、精巧。有人提出一种“砖块加泥浆”的模型来描述这种结构, 十分贴切,

表2 贝壳棱柱层横切面的微观结构特征

Table 2 The SEM of prismatic layer transverse section of shells

物种 Species	晶体类型 Crystal types	晶体排列 Crystal arrangement	晶体排列方向 Crystal directions
丽文蛤 <i>Meretrix lusoria</i>	棱柱状 Prism-like shape	疏松、规则 Loosened, regular	垂直于切面 Perpendicular to the cross-section
琴文蛤 <i>M. lyrata</i>	短柱状 Short column shape	紧密、不规则 Compact, irregular	平行于切面 Parallel to the cross-section
文蛤 <i>M. meretrix</i>	短柱状 Short column shape	疏松、不规则 Loosened, irregular	平行于切面 Parallel to the cross-section
菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	棱柱状 Prism-like shape	紧密、规则 Compact, regular	垂直于切面 Perpendicular to the cross-section
杂色蛤仔 <i>R. variegata</i>	短柱状 Short column shape	疏松、不规则 Loosened, irregular	平行于切面 Parallel to the cross-section
伊萨伯雪蛤 <i>Clausinella isobellina</i>	短柱状 Short column shape	疏松、不规则 Loosened, irregular	平行于切面 Parallel to the cross-section
波纹巴非蛤 <i>Paphia undulata</i>	短柱状 Short column shape	疏松、不规则 Loosened, irregular	平行于切面 Parallel to the cross-section
栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	棱柱状 Prism-like shape	疏松、规则 Loosened, regular	平行于切面 Parallel to the cross-section
尖紫蛤 <i>Sanguinolaria aaata</i>	片状 Flakes shape	紧密、不规则 Compact, irregular	垂直于切面 Perpendicular to the cross-section
锈色朽叶蛤 <i>Coecella turgida</i>	片状 Flakes shape	紧密、不规则 Compact, irregular	垂直于切面 Perpendicular to the cross-section
栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	棱柱状 Prism-like shape	疏松、规则 Loosened, regular	垂直于切面 Perpendicular to the cross-section
泥蚶 <i>Tegillarca granosa</i>	棱柱状 Prism-like shape	紧密、规则 Compact, regular	垂直于切面 Perpendicular to the cross-section
格粗饰蚶 <i>Anadara clathrata</i>	不规则形状 Irregular shape	疏松、不规则 Loosened, irregular	平行于切面 Parallel to the cross-section

“砖”就是厚度0.15 μm 左右的片状文石晶层，层内单晶片呈不规则的多边形，层与层之间嵌的有机质为“泥”，起“粘结”作用，其实是无机物-矿物被有机物“粘结”起来的复合材料（Roberts et al. 1990）。在栉孔扇贝和锈色朽叶蛤贝壳中看到有两层类似的构造，但是其他贝壳却只看到一层，可能是贝壳珍珠层外面那层脱落所致。菲律宾蛤仔珍珠层表面出现了两种不同的晶体，片状和颗粒状的晶体（图4a, b）。

2.4 各层的厚度

不同种贝壳各层厚度有一定的差异，即使是同属于帘蛤科的贝壳，它们之间也存在明显的差异，如丽文蛤、琴文蛤、伊萨伯雪蛤角质层和棱柱层较厚，而杂色蛤仔却很薄（表4）。

3 讨论

刘小明（1994）认为角质分泌细胞生成是由于表皮细胞直接受到水环境或外界较强烈作用而发生分泌性质变化，也可能是水的参入而改变分泌物性质。角质出现于贝壳修复初期及珍珠囊形成初期，正是伤口尚未完全复原，一旦修复伤口，恢复原来的细胞外环境，则细胞回到分泌珍珠质状态。丽文蛤、琴文蛤、杂色蛤仔、文蛤、尖紫蛤壳表面光滑平整，它们都是埋藏在细沙环境中，其表皮细胞生活在相同的外环境，分泌物性质也相同。泥蚶、波纹巴非蛤、菲律宾蛤仔、伊萨伯雪蛤和栉江珧分别生活在泥沙地环境、沙泥地环境，有的埋藏在

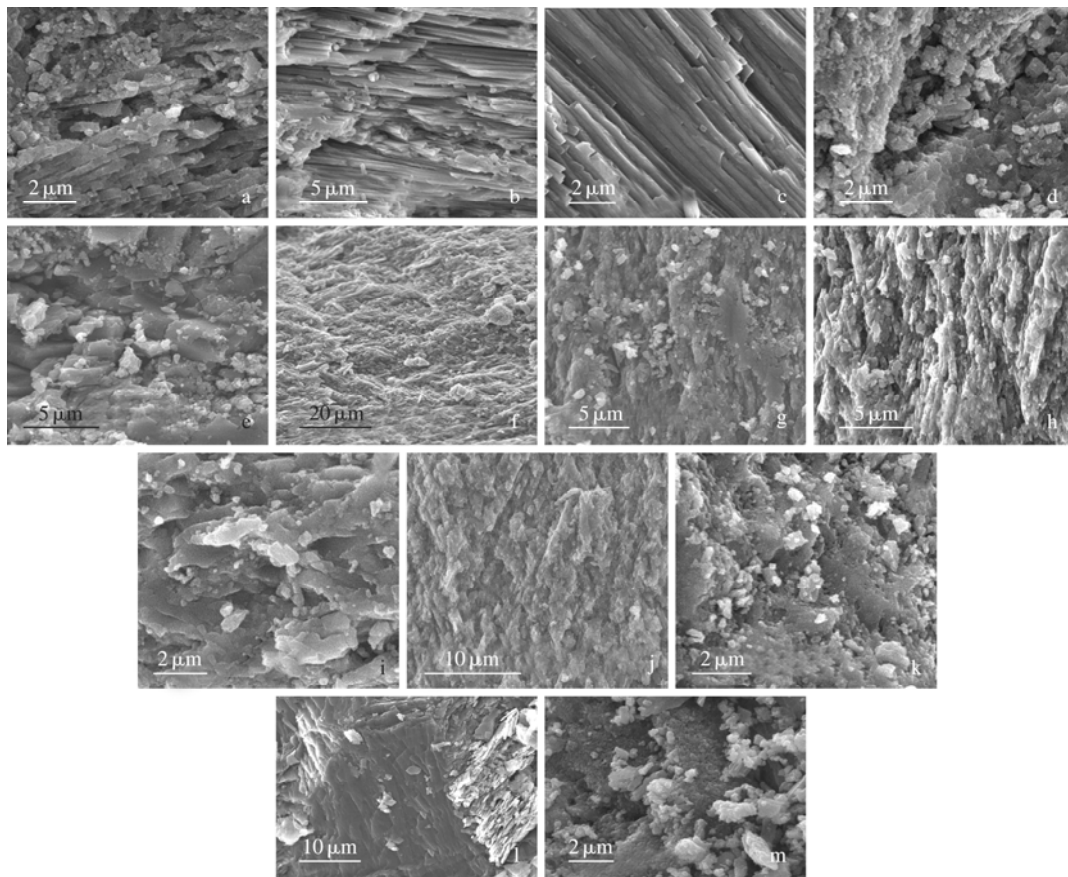


图2 贝壳棱柱层横切面

Fig. 2 The SEM of prismatic layer of shells

a. 丽文蛤; b. 栉孔扇贝; c. 泥蚶; d. 菲律宾蛤仔; e. 栉江珧; f. 琴文蛤; g. 波纹巴非蛤; h. 伊萨伯雪蛤; i. 杂色蛤仔; j. 文蛤; k. 尖紫蛤; l. 锈色朽叶蛤; m. 格粗饰蚶。

a. *Meretrix lusoria*; b. *Chlamys farreri*; c. *Tegillarca granosa*; d. *Ruditapes philippinarum*; e. *Atrina pectinata*; f. *M. lyrata*; g. *Paphia undulate*; h. *Clausinella isobellina*; i. *R. variegata*; j. *M. meretrix*; k. *Sanguinolaria aauta*; l. *Coecella turgid*; m. *Anadara clathrata*.

浅表面, 直接与海水环境接触, 所以其角质层的结构差异也明显。

贝壳有3种不同的晶体类型, 而且这3种晶体都具有各自典型的形态(Weiner et al. 1997), 分别是方解石(斜方六面体型)、文石(菱形、针形和球形)、球文石(多晶球形), 但球文石非常不稳定, 在正常的生物矿化体中一般不存在, 仅在少数软体动物贝壳的修复过程中报道过(邱安东等 1999)。而贝壳的棱柱层是由角柱状方解石或霏石构成, 珍珠层由文石构成。在13种双壳类贝壳中, 有10种贝壳的棱柱层晶体组成为柱状, 而这些柱状晶体形状与斜方六

面体相似, 可能是方解石。而珍珠层中呈颗粒状晶体与球形文石相似, 砖块状的晶体形状又与菱形文石相似。

以往的研究表明, 贝壳的类型及其微结构特征与其属、科具有一致性, 同一生物家族的钙化组织结构具有相同的排列, 但有时存在超级家族(梁金龙等 1999)。例如帘蛤科的贝壳(表2前7种贝壳)的棱柱层都呈柱状。但是, 帘蛤科的珍珠层晶体不完全一样, 波纹巴非蛤、丽文蛤和菲律宾蛤仔的贝壳珍珠层都有颗粒晶体组成, 琴文蛤和文蛤由圆形晶体组成, 伊萨伯雪蛤和杂色蛤则是不规则块状晶体组成。蚶

表 3 贝壳珍珠层的微观结构特征

Table 3 The microstructure feature of the shells' nacre

物种 Species	晶体形状 Crystal types	晶体排列 Crystal arrangement
丽文蛤 <i>Meretrix lusoria</i>	颗粒状 Granular	不规则、较紧密 Irregular, compact
琴文蛤 <i>M. lyrata</i>	圆形 Round	不规则、紧密 Irregular, compact
文蛤 <i>M. meretrix</i>	圆形 Round	不规则、紧密 Irregular, compact
菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	外层不规则块状, 内层颗粒状 Outer layer: irregular brick-shaped, inner granular	不规则、疏松 Irregular, loosened
杂色蛤仔 <i>R. variegata</i>	不规则块状 Irregular brick-shaped	不规则、较紧密 Irregular, compact
伊萨伯雪蛤 <i>Clausinella isobellina</i>	不规则块状 Irregular brick-shaped	不规则、较紧密 Irregular, compact
波纹巴非蛤 <i>Paphia undulata</i>	颗粒状 Granular	不规则、疏松 Irregular, loosened
栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	外层不规则块状, 内层砖块状 Outer layer: irregular brick-shaped, inner: brick-shaped	不规则、疏松 Irregular, loosened
尖紫蛤 <i>Sanguinolaria aauta</i>	颗粒状 Granular	不规则、疏松 Irregular, loosened
锈色朽叶蛤 <i>Coecella turgida</i>	外层不规则块状, 内层颗粒状 Outer Layer: irregular brick-shaped, inner: granular	不规则、疏松 Irregular, loosened
栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	多边形 Irregular polygons	规则、紧密 Regular, compact
泥蚶 <i>Tegillarca granosa</i>	颗粒状 Granular	不规则、疏松 Irregular, loosened
格粗饰蚶 <i>Anadara clathrata</i>	砖块状 Brick-shaped	不规则、较紧密 Irregular, compact

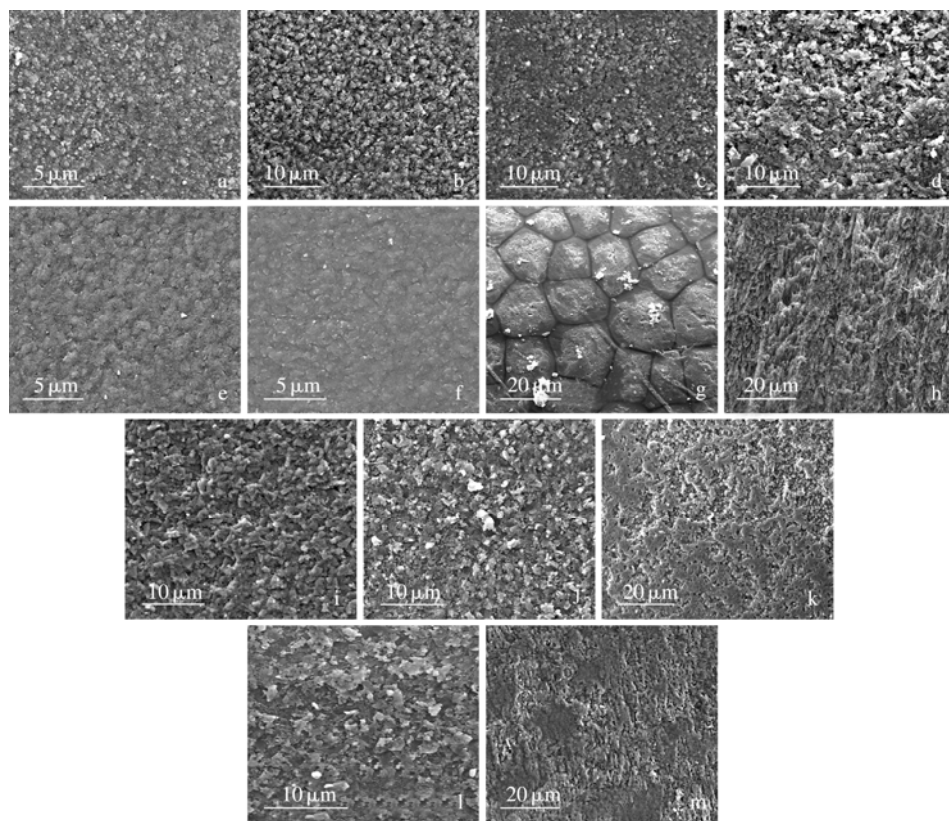


图3 贝壳珍珠层表面结构

Fig. 3 The nacre surface microstructure of the shells

a. 丽文蛤; b. 波纹巴非蛤; c. 尖紫蛤; d. 泥蚶; e. 琴文蛤; f. 文蛤; g. 栉江珧; h. 格粗饰蚶; i. 伊伊萨伯雪蛤; j. 杂色蛤仔; k. 锈色朽叶蛤; l. 菲律宾蛤仔; m. 栉孔扇贝。

a. *Meretrix lusoria*; b. *Paphia undulata*; c. *Sanguinolaria aauta*; d. *Tegillarca granosa*; e. *M. lyrata*; f. *M. meretrix*; g. *Atrina pectinata*; h. *Anadara clathrata*; i. *Clausinella isobellina*; j. *Ruditapes variegata*; k. *Coecella turgida*; l. *R. philippinarum*; m. *Chlamys farreri*.

表4 贝壳各层厚度比较 ($n = 39$)
Table 4 The comparison of the thickness from each layer of the shells ($n = 39$)

物种 Species	角质层 Corneum			棱柱层 Prismatic layer			珍珠层 Nacre		
	厚度 Thickness (μm)		壳厚比 (%) Thickness percentage	厚度 Thickness (μm)		壳厚比 (%) Thickness percentage	厚度 Thickness (μm)		壳厚比 (%) Thickness percentage
	范围 Range	平均值 $\pm$ 标准 差 Mean $\pm$ SD		范围 Range	平均值 $\pm$ 标准 差 Mean $\pm$ SD		范围 Range	平均值 $\pm$ 标准 差 Mean $\pm$ SD	
丽文蛤 <i>Meretrix lusoria</i>	33.2 ~ 33.6	33.30 $\pm$ 0.32	2.9	1 063.1 ~ 1 063.6	1 063.40 $\pm$ 0.63	93.3	42.9 ~ 43.4	43.30 $\pm$ 0.49	3.8
琴文蛤 <i>M. lyrata</i>	77.6 ~ 78.0	77.80 $\pm$ 0.92	5.0	1 453.0 ~ 1 453.5	1 453.30 $\pm$ 0.37	92.6	38.7 ~ 39.1	38.90 $\pm$ 0.81	2.4
文蛤 <i>M. meretrix</i>	1.1 ~ 1.4	1.20 $\pm$ 0.71	0.4	328.6 ~ 329.1	329.00 $\pm$ 0.38	99.1	1.5 ~ 2.0	1.80 $\pm$ 0.98	0.5
菲律宾滨蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	50.1 ~ 50.6	50.50 $\pm$ 0.29	6.3	659.7 ~ 660.2	660.00 $\pm$ 0.58	84.7	88.3 ~ 88.7	88.50 $\pm$ 0.72	9.0
杂色蛤仔 <i>R. variegata</i>	10.3 ~ 10.7	10.50 $\pm$ 0.52	20.0	39.7 ~ 40.3	40.00 $\pm$ 0.63	76.2	1.7 ~ 2.2	2.00 $\pm$ 0.75	3.8
伊萨伯雪蛤 <i>Clausinella isobellina</i>	69.9 ~ 70.1	69.80 $\pm$ 0.71	3.3	2 056.5 ~ 2 056.9	2 056.70 $\pm$ 0.85	96.6	3.2 ~ 3.7	3.50 $\pm$ 0.41	0.1
波纹巴非蛤 <i>Paphia undulata</i>	8.6 ~ 8.9	8.90 $\pm$ 0.51	1.3	617.8 ~ 618.3	618.00 $\pm$ 0.48	92.3	42.6 ~ 43.1	42.90 $\pm$ 0.57	6.4
栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	261.8 ~ 262.1	262.00 $\pm$ 0.75	17.8	891.8 ~ 892.4	892.00 $\pm$ 0.89	60.2	325.8 ~ 326.4	326.00 $\pm$ 0.76	22.0
尖紫蛤 <i>Sanguinolaria acuta</i>	39.9 ~ 40.2	40.00 $\pm$ 0.66	7.4	484.1 ~ 184.8	484.60 $\pm$ 0.84	90.0	13.0 ~ 13.6	13.40 $\pm$ 0.73	2.6
锈色朽叶蛤 <i>Coecella turgida</i>	60.2 ~ 60.6	60.50 $\pm$ 0.25	16.7	272.9 ~ 273.4	273.30 $\pm$ 0.58	75.2	28.8 ~ 29.3	29.20 $\pm$ 0.37	8.1
栉江珧 <i>Atrina pectinata</i>	56.0 ~ 56.7	56.60 $\pm$ 0.28	4.6	1 171.7 ~ 1 172.4	1 172.00 $\pm$ 0.36	95.3	1.3 ~ 1.6	1.40 $\pm$ 0.52	0.1
泥蚶 <i>Tegillarca granosa</i>	940.7 ~ 941.1	941.00 $\pm$ 0.69	37.3	1 426.8 ~ 1 427.3	1 427.00 $\pm$ 0.97	56.6	151.8 ~ 152.2	152.00 $\pm$ 0.92	6.1
格粗饰蛤 <i>Anadara clathrata</i>	57.9 ~ 58.4	58.20 $\pm$ 0.77	5.4	1 005.0 ~ 1 005.4	1 005.20 $\pm$ 0.44	93.9	6.1 ~ 6.7	6.60 $\pm$ 0.91	0.7

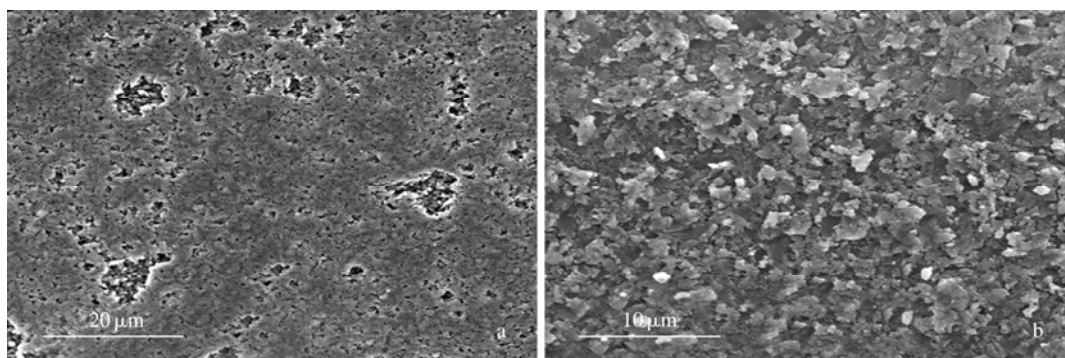


图4 菲律宾蛤仔的珍珠层

Fig. 4 The nacre microstructure in the shells of *Ruditapes philippinarum*

科的泥蚶和格粗饰蚶的晶体组成也不同。说明不同科属贝壳之间的微结构特征存在差异。

不同的材料其切面成像效果也有差异，会影响到晶体形态表现。在实际操作中，扫描速度对图像质量是有影响的（桂柳成等 2013），导电性和热稳性能好的样品与导电性和热稳性能差的样品其扫描速度选择是相反的。

参 考 文 献

- Bevelander G, Nahahara H. 1969. An electron microscope study of the formation of the nacreous layer in the shell of certain bivalve molluscs. *Calcified Tissue Research*, 3(1): 84–92.
- Burrage B J, Pitkethly D R. 1969. Aragonite transformations observed in the electron microscope. *Physica Status Solidi*, 32(1): 399–405.
- Feng Q L, Li H B, Cui F Z, et al. 1999. Crystal orientation domains found in the single lamina in nacre of the *Mytilus edulis* shell. *Journal of Materials Science Letters*, 18(19): 1547–1549.
- Feng Q L, Cui F Z, Pu G, et al. 2000. Crystal orientation, toughening mechanisms and a mimic of nacre. *Materials Science and Engineering: C*, 11(1): 19–25.
- Hou W T, Feng Q L. 2003. Crystal orientation preference and formation mechanism of nacreous layer in mussel. *Journal of Crystal Growth*, 258(3/4): 402–408.
- Mutvei H. 1970. Ultrastructure of the mineral and organic components of molluscan nacreous layers. *Biomaterialization*, 2: 49–72.
- Roberts W L, Campbell T J, Rapp G R Jr. 1990. *Encyclopedia of Minerals*. 2nd ed. New York: Edition Van Nostrand Reinhold, 116–121.
- Towe K M, Hamilton G H. 1968. Ultrastructure and inferred calcification of the mature and developing nacre in bivalve mollusks. *Calcified Tissue Research*, 1(1): 306–318.
- Watabe N. 1965. Studies on shell formation: XI. Crystal-matrix relationships in the inner layers of mollusk shells. *Journal of Ultrastructure Research*, 12(3): 351–370.
- Weiner S, Addadi L. 1997. Design strategies in mineralized biological materials. *Journal of Materials Chemistry*, 7(5): 689–702.
- Yang X F. 1995. A self-constraint strengthening mechanism and its application to seashells. *Journal of Material Research*, 10(6): 1485–1490.
- 戴永定. 1994. 生物矿物学. 北京: 石油工业出版社, 226–234.
- 梁金龙, 王惊涛, 彭明生. 1999. 贝壳珍珠层的研究与应用. *矿物岩石地球化学通报*, 18(4): 403–406.
- 刘承松, 陈婉颜, 谢玉坎. 1984. 大珠母贝贝壳珍珠层的化学成份研究. *动物学杂志*, 19(4): 7–9.
- 刘小明. 1994. 淡水贝类贝壳多层构造形成研究. *动物学报*, 40(3): 221–225, 256.
- 邱安东, 石安静, 孙奇志. 1999. 三角帆蚌珍珠囊的超微结构研究. *四川大学学报: 自然科学版*, 36(6): 1111–1115.
- 孙家美, 毛振伟. 1991. 贝壳珍珠层元素的X射线荧光光谱分析. *湛江水产学院学报*, 11(2): 25–30.
- 吴小平, 欧阳珊, 梁彦龄, 等. 1999. 蚌科贝壳的扫描电镜观察. *南昌大学学报: 理科版*, 23(1): 58–60, 66.
- 谢忠东, 丁晓非, 李凤敏, 等. 2006. 3种海产螺壳体相组成及结构特征分析. *水产科学*, 25(5): 253–255.
- 周佩玲. 1998. 贝壳的宝石学特征. *桂林工学院学报*, 18(1): 45–52.
- 桂柳成, 赖炳钊. 2013. 贝壳的场发射环境扫描电镜形貌观察条件研究. *广州化工*, 41(4): 72–75, 78.