

香港巨牡蛎 X 射线衍射分析及指纹图谱建立

米顺利^{1,2,3,4}, 李琪琦^{1,2,3,4#}, 陈艺萍⁴, 陈美娟^{1,2,3,4}, 高程海^{1,2,3,4*}, 易湘茜^{1,3,4*}

1. 广西海洋药物重点实验室, 广西 南宁 530200
2. 海洋中药资源高效利用广西高校工程研究中心, 广西 南宁 530200
3. 北部湾海洋药物和生物制品开发利用工程技术创新中心, 广西 南宁 530200
4. 广西中医药大学海洋药物研究院/药学院, 广西 南宁 530200

摘要: 目的 建立香港巨牡蛎的 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 指纹图谱并测定其碳酸钙含量。方法 采用 XRD 法对 16 批香港巨牡蛎样品进行分析建立指纹图谱; 根据层次聚类分析 (hierarchical clustering analysis, HCA) 及正交偏最小二乘法-判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA), 以变量重要性投影 (variable importance projection, VIP) 值 > 1 筛选出可用于香港巨牡蛎鉴别的特征信息; 运用 EDTA 络合滴定法测定样品中碳酸钙的含量。结果 建立了香港巨牡蛎的 XRD 指纹图谱, 其物相结构归属于碳酸钙的方解石型, 并确定了 13 个共有峰, 16 批样品相似度均大于 0.99; HCA 将 16 批香港巨牡蛎样品分为 3 类, OPLS-DA 的 VIP 值显示 5 个衍射角贡献较大, 分别为 47.41°、65.51°、61.28°、47.04°、57.34°; 16 批香港巨牡蛎样品中, 有 15 批碳酸钙含量均超过了 94%。结论 XRD 指纹图谱可用于香港巨牡蛎的鉴定与分析, 香港巨牡蛎的质量符合《中国药典》2025 年版对牡蛎的项下规定, 为其开发为中药材及综合应用提供参考。

关键词: 香港巨牡蛎; X 射线衍射; 指纹图谱; 相似度; 碳酸钙

中图分类号: R282.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)14-5470-06

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.14.009

X-ray diffraction analysis and fingerprint establishment of *Crassostrea hongkongensis*

MI Shunli^{1,2,3,4}, LI Qiqi^{1,2,3,4}, CHEN Yiping⁴, CHEN Meijuan^{1,2,3,4}, GAO Chenghai^{1,2,3,4}, YI Xiangxi^{1,3,4}

1. Guangxi Key Laboratory of Marine Drugs, Nanning 530200, China
2. University Engineering Research Center of High-efficient Utilization of Marine Traditional Chinese Medicine Resources, Nanning 530200, China
3. Beibu Gulf Engineering and Technology Innovation Center for the Development and Utilization of Marine Drugs and Bioproducts, Nanning 530200, China
4. Institute of Marine Drugs/Faculty of Pharmacy, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China

Abstract: Objective To establish X-ray diffraction (XRD) fingerprint profiles of *Crassostrea hongkongensis* and determine its calcium carbonate content. **Methods** A total of 16 batches of *C. hongkongensis* samples were analyzed by XRD to establish the fingerprint. Based on hierarchical clustering analysis (HCA) and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA), characteristic information for identification of *Crassostrea Hongkongensis* concha was screened with variable importance in projection (VIP) value > 1. The content of calcium carbonate in the samples was determined by EDTA complexometric titration. **Results** The XRD fingerprint of *C. hongkongensis* was established, and its phase structure belongs to calcite-type calcium carbonate, with 13

收稿日期: 2026-05-03

基金项目: 中药壮瑶药创新药物教育部工程研究中心经费资助 (ZYZZY2025036); 广西海洋药物重点实验室能力强化建设项目资助 (桂科 LT2600640033); 2026 年广西向海经济人才培养支持专项; 广西青年岐黄学者培养项目 (GXQH202412); 广西中医药大学岐黄工程高层次人才团队培育项目 (202404); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069014); 广西中医药大学研究生教育创新计划项目 (YCSY2023066)

作者简介: 米顺利, 研究员/正高级工程师, 研究方向海洋中药研究。E-mail: mishunli@126.com

#共同第一作者: 李琪琦, 硕士研究生, 研究方向为中药学。E-mail: 25782377772@qq.com

*通信作者: 高程海, 研究员, 研究方向为海洋中药研究。E-mail: yixiangxi2017@163.com

易湘茜, 研究员, 研究方向为海洋中药研究。E-mail: gaoch@gxtcmu.edu.cn

common peaks identified. The similarity of all 16 batches of samples was greater than 0.99. HCA divided the 16 batches into 3 categories, and the VIP values of OPLS-DA showed that 5 diffraction angles made great contributions, which were 47.41°, 65.51°, 61.28°, 47.04° and 57.34° respectively. Among the 16 batches of samples, 15 batches had a calcium carbonate content exceeding 94%.

Conclusion The established XRD fingerprint can be used for the identification and analysis of *C. hongkongensis*. Their quality meets the standards specified under *Ostreae Concha* recorded in the Pharmacopoeia of the People's Republic of China (2025 edition), offering technical support for their development as traditional Chinese medicinal material and comprehensive utilization.

Key words: *Crassostrea hongkongensis* Dunker; X-ray diffraction; fingerprint; similarity; calcium carbonate

牡蛎为《中国药典》2025 年版收载的牡蛎科动物长牡蛎 *Ostrea gigas* Thunberg、大连湾牡蛎 *O. talienwhanensis* Crosse 或近江牡蛎 *O. rivularis* Gould 的贝壳^[1]。牡蛎作为海洋中药中使用最广泛的药材，用药历史悠久，最早被记载于东汉《神农本草经》中，列为上品。牡蛎其味咸，性微寒，归肝、胆、肾经。具有重镇安神、潜阳补阴、软坚散结之效，临床上常用于治疗心悸失眠、眩晕耳鸣、瘰癧痰核、癥瘕痞块^[1]。牡蛎中以碳酸钙含量为主，并含有少量磷酸钙、硫酸钙等，除此之外还有少量氨基酸、多糖、蛋白质、脂类等有机成分和 Zn、Fe、Ca、Mg、Al、Cu、Ba、Mn 等多种微量无机元素^[2]。

随着中医药产业的快速发展，传统药用牡蛎资源需求量逐年增加，而野生资源因过度捕捞、栖息地破坏等因素日益匮乏，人工养殖虽在一定程度上缓解了资源压力，但传统基原物种的养殖布局集中、产能有限，难以满足市场长期稳定供应需求，因此，筛选优质、可持续的药用牡蛎替代资源成为当前中医药资源研究的重要课题。通过本实验室前期研究，香港巨牡蛎 *Crassostrea hongkongensis* Dunker 在显微鉴定、酸不溶性灰分检查、重金属、碳酸钙含量测定上均与《中国药典》2025 年版中近江牡蛎的检测结果相近^[2]，说明其具有替代近江牡蛎的可能。香港巨牡蛎作为中国南海特有优势贝类，其主要分布在广东，广西和福建沿海，其养殖历史悠久、产业规模庞大，具备充足的资源储备和规模化可持续养殖能力^[3-4]。目前，已有研究明确其分类地位、种质特征、营养成分及养殖生物学特性，证实其贝壳（以下称为香港巨牡蛎）和中药牡蛎的基本成分均是碳酸钙，且人工养殖环境可控，安全性符合药用标准。本研究团队前期已对香港巨牡蛎的性状、鉴别、检查等指标进行了检验并证实相关指标均符合《中国药典》2025 年版中药牡蛎的规定，同时课题组还对香港巨牡蛎中含有的其它无机元素进行了测定，结果表明香港巨牡蛎不仅含有可调控神经肌肉兴奋性、具有血管扩张等生理效应的 Mg 元素，而且含有调节神经肌肉兴奋

性、促进成骨细胞增殖及促进骨骼生长作用^[5-7]的人体必需微量元素 Sr^[8-11]，香港巨牡蛎具备作为牡蛎药用替代资源的潜在价值。

然而，香港巨牡蛎的指纹图谱和质量标志物含量稳定性研究数据欠缺，尚不能明确其可否列入药用基源。本研究旨在建立香港巨牡蛎的 XRD 指纹图谱，讨论其作为牡蛎中药材替代资源的可行性，为推动香港巨牡蛎纳入药用基原、缓解传统药用牡蛎资源压力、促进海洋养殖产业与中医药产业融合发展提供理论依据与实践支撑。

1 材料和仪器

1.1 样品

采集广西和广东 2 个主产地香港巨牡蛎样品 16 个批次，详细信息见表 1，所有样品均经广西中医药大学刘昕明副研究员鉴定为牡蛎科动物香港巨牡蛎 *C. hongkongensis* Dunker 的壳。将所有批次的样品进行清洗，去除杂质，晒干，粉碎备用。

表 1 香港巨牡蛎样品来源信息

Table 1 Source information of *Crassostrea hongkongensis* samples

编号	采样地点	编号	采样地点
S1	广西钦州茅尾海	S9	广东湛江东海岛
S2	广西钦州大风江	S10	广东湛江特呈岛
S3	广西北海铁山港	S11	广东潮州饶平
S4	广西北海西场	S12	广东汕头牛田洋
S5	广西北海廉州湾	S13	广东台山广海
S6	广西防城港珍珠湾	S14	广东阳江阳西程村
S7	广西防城港红沙村	S15	广东珠海高栏港
S8	广东湛江官渡石门海湾	S16	广东深圳蛇口

1.2 仪器

LX-0711 型马弗炉，天津莱玻特瑞仪器设备有限公司；FW100 型高速万能粉碎机，天津市泰斯特仪器有限公司；MiniFlex 600 型粉末衍射仪，日本 Rigaku 公司；JA1203N 型千分之一分析天平，上海菁华科技仪器有限公司；100 目筛；DHG-9626A 型电热鼓风干燥箱，上海精宏实验设备有限公司。

2 方法与结果

2.1 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 图谱的测定

2.1.1 测定条件 Cu 靶 K α 射线; 管压 36 kV, 电流 30 mA; 石墨单色器, 扫描速度 10°/min, 扫描范围 5°~80°, 步长 0.01°。

2.1.2 供试品的制备 将不同批次的香港巨牡蛎壳粉碎研细, 过 100 目筛, 干燥后, 放入干燥器中, 备用。

2.1.3 物相分析及共有峰的标定 应用 MDI Jade 6.0 分析软件对 16 批香港巨牡蛎样品的数据进行平滑、扣除空白和寻峰处理, 根据寻峰报告得到各个峰的相对强度 (I/I_0), 见表 2。选择其中衍射强度相对较大的共有峰进行标定, 采用平均数法分别获得香港巨牡蛎样品的 XRD 共有模式图谱, 与 2004 版 XRD-PDF 卡

片库进行物相检索, 并对其进行对比。结果如图 1 所示, 香港巨牡蛎样品呈现 13 个特征衍射峰, 其物相结构归属于碳酸钙的方解石型 (PDF 卡片号: 05-0586), 与张洪怡等^[12]得到的近江牡蛎晶体结构一致。未出现文石、球霰石及其他杂质相的特征峰, 说明其主要无机矿物相为结晶度良好、结构稳定的方解石型碳酸钙, 晶面衍射无明显位移或宽化, 反映出晶格参数均一、无显著离子取代或晶格畸变。这种单一方解石晶型与药用基原牡蛎的晶型特征一致, 为二者物质基础的同源性提供了晶体学依据。尖锐的峰形与高结晶度也印证了其碳酸钙纯度高、杂质含量低, 与碳酸钙含量测定结果相互印证。同时, 方解石晶型的热稳定性良好, 有利于炮制过程的质量控制, 表明香港巨牡蛎在晶型特征上与药用牡蛎样品具有等效性, 可作为其质量评价的重要支撑依据。

表 2 共有特征峰的峰位 (2θ) 与 I/I_0

Table 2 Peak position (2θ) and relative intensity value (I/I_0) of common characteristic peaks

共有峰 $2\theta(^{\circ})$		I/I_0															
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
1	22.98	4.60	4.90	4.70	4.30	4.80	4.80	4.40	4.30	5.10	5.10	5.00	3.90	4.40	4.20	4.10	4.50
2	29.32	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	31.37	4.50	4.90	4.40	4.60	4.60	5.20	4.70	4.400	4.10	4.10	4.50	4.30	4.50	4.60	4.70	4.40
4	35.90	6.30	6.80	5.40	5.10	5.50	5.20	5.60	4.80	6.30	6.90	6.50	4.10	5.20	4.80	5.40	5.60
5	39.36	11.20	11.40	9.40	9.40	9.90	9.30	10.10	8.80	10.30	11.60	10.60	7.10	8.60	9.20	9.20	9.90
6	43.06	8.50	8.30	6.20	6.60	6.90	6.60	7.20	6.60	7.50	9.10	7.60	5.00	6.40	6.50	6.60	7.50
7	47.04	4.70	5.00	4.30	3.00	4.00	3.80	3.90	3.90	4.00	4.30	4.00	3.20	3.40	3.80	3.60	3.80
8	47.41	35.50	33.40	32.10	35.80	32.40	34.40	35.60	34.30	30.40	38.30	32.80	31.00	35.00	38.00	35.90	27.90
9	48.42	17.50	18.40	16.00	16.40	15.90	15.40	16.50	16.00	16.20	19.90	16.60	13.00	15.50	17.30	16.70	14.90
10	57.34	3.80	3.90	3.20	3.00	3.30	2.90	3.10	2.90	3.60	4.40	3.50	2.30	2.90	3.10	3.00	3.40
11	61.28	3.50	3.50	3.20	3.30	3.00	3.20	3.40	3.20	2.80	3.80	3.30	3.20	3.30	3.70	3.60	2.80
12	65.51	5.60	6.20	5.40	6.10	5.30	6.00	5.70	5.80	4.70	6.20	5.30	5.60	5.80	6.60	5.50	4.60
13	77.05	3.80	3.70	3.20	3.60	3.00	3.30	3.10	3.50	2.50	4.00	3.40	3.70	3.40	4.00	3.40	2.40

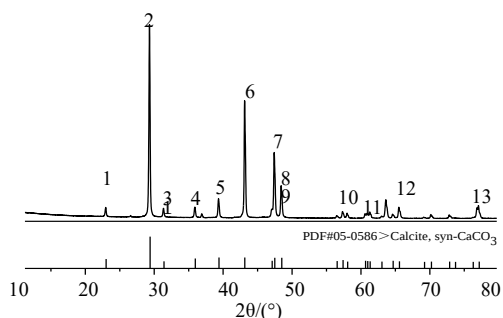


图 1 香港巨牡蛎 XRD 物相分析

Fig. 1 XRD phase analysis diagram of *C. hongkongensis*

2.1.4 XRD 指纹图谱的建立 采用 Origin 2021 软件对 16 批样品的 XRD 图谱进行处理, 通过数据叠加算法将 16 批样品的 XRD 曲线进行平均叠加, 获得香港巨牡蛎的典型 XRD 指纹图谱, 结果如图 2 所示。

2.1.5 相似度评价 采用 Excel 2016 软件对 16 批样品的 XRD 指纹图谱进行相似性分析。以 16 批样品 XRD 图谱中共同衍射峰的衍射强度平均值作为参照标准, 通过计算各样品与参照图谱之间的相关系数和夹角余弦值, 定量评估样品间的相似程度。分析结果见表 3, 16 批样品 XRD 指纹图谱的

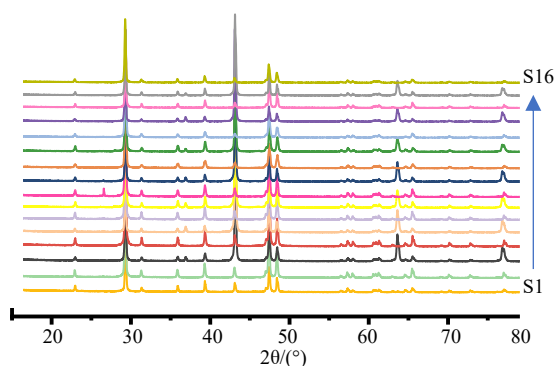


图 2 16 批次香港巨牡蛎样品 XRD 指纹图谱

Fig. 2 XRD fingerprints of 16 batches of *C. hongkongensis*

表 3 香港巨牡蛎样品 XRD 指纹图谱相似度值
Table 3 Similarity results of XRD fingerprints of *C. hongkongensis*

编号	均值相关系数	均值夹角余弦	中位数相关系数	中位数夹角余弦
S1	0.999 7	0.999 6	0.999 7	0.999 6
S2	0.999 7	0.999 5	0.999 6	0.999 4
S3	0.999 8	0.999 8	0.999 7	0.999 8
S4	0.999 8	0.999 8	0.999 9	0.999 9
S5	0.999 9	0.999 9	0.999 8	0.999 8
S6	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9
S7	0.999 8	0.999 9	0.999 9	0.999 9
S8	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9
S9	0.999 2	0.999 4	0.998 9	0.999 2
S10	0.998 7	0.998 5	0.998 8	0.998 5
S11	0.999 8	0.999 9	0.999 7	0.999 8
S12	0.998 9	0.998 6	0.998 9	0.998 6
S13	0.999 8	0.999 8	0.999 9	0.999 9
S14	0.999 0	0.999 2	0.999 2	0.999 4
S15	0.999 7	0.999 8	0.999 8	0.999 9
S16	0.998 0	0.998 4	0.997 7	0.998 2

均值相关系数和中位数相关系数均大于 0.99, 均值夹角余弦和中位数夹角余弦均在 0.99 以上, 表明所建立的 XRD 指纹图谱具有良好的重现性和科学性, 可用于香港巨牡蛎壳的矿物组成特征分析和质量控制。

2.2 化学计量学分析

2.2.1 层次聚类分析 (hierarchical clustering analysis, HCA) 以衍射峰 I/I_0 为变量, 采用 Ward 法, 以欧氏距离为度量标准进行分析。结果如图 3 所示, 当欧氏距离为 15 的时候, 样品被分为 3 类, S3、S5、S9、S11、S12、S16 为第 1 类, S1、S2、S10 为第

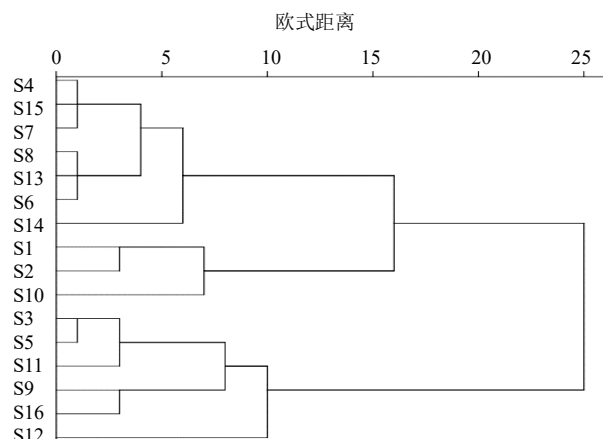


图 3 16 批香港巨牡蛎样品 HCA 树状图

Fig. 3 HCA dendrogram of 16 batches of *C. hongkongensis*

2 类, S4、S6、S7、S8、S13、S14、S15 为第 3 类。当欧氏距离为 9 时, 第 1 大类又可分为 2 小类, 其中 S12 单独为一类, S3、S5、S9、S11、S16 为一类。表明不仅不同产地的香港巨牡蛎的质量有所不同, 而且即使是同一产地不同海域的样品质量也存在一定差异。

2.2.2 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 以 I/I_0 为变量进行主成分分析, 模型累计解释参数 $R^2_X=0.932$, 预测能力参数 $Q^2=0.745$, 结果如图 4 所示, 16 批样品可分为 3 类, 结果与上述 HCA 基本一致。

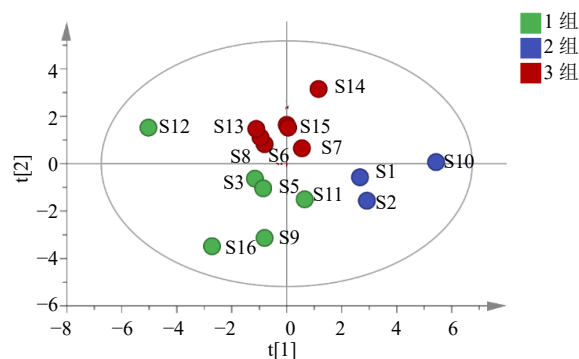


图 4 16 批香港巨牡蛎 PCA

Fig. 4 Principal component analysis of 16 batches of *C. hongkongensis*

2.2.3 正交偏最小二乘-判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA) 为了进一步探寻香港巨牡蛎不同批次之间产生差异性的质量标志物, 以 I/I_0 为变量, 采用 SIMCA 对 16 批样品进行 OPLS-DA 分析。结果如图 5-A 所示, 在该模型下 R^2_X 、 R^2_Y 、 Q^2 依次为 0.97、0.883、0.614, 均大于 0.5, 表明该模型可靠, 且有较好的预测能力。进

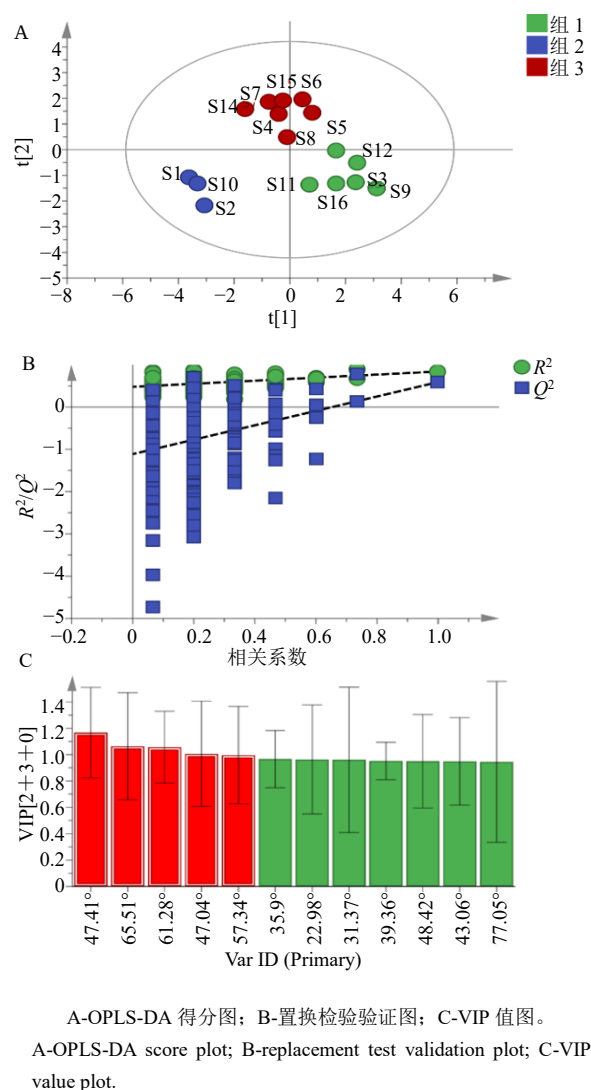


图 5 16 批香港巨牡蛎样品 XRD 的 OPLS-DA
Fig. 5 OPLS-DA from XRD of 16 batches of *C. hongkongensis*

行 200 次置换检验模型内部验证,结果如图 5-B,回归线 R^2 和 Q^2 分别与左侧纵轴相交,且所有随机排列得到的 R^2 和 Q^2 值均低于原始模型的对应值,未出现过拟合现象,进一步说明模型稳定可靠。进一步以 VIP 值 >1 为标准进行筛选,识别出 5 个对模型贡献度较高的关键衍射角度,如图 5-C 所示分别为 47.41° 、 65.51° 、 61.28° 、 47.04° 、 57.34° ,这些衍射角可作为鉴别不同产地、批次香港巨牡蛎品质差异的潜在标志物。

2.3 碳酸钙含量测定^[2]

参照《中国药典》2025 年版一部^[2]牡蛎中碳酸钙含量测定方法测定样品的碳酸钙含量。结果见表 4。与 HCA 一致,本次检测的 16 批香港巨牡蛎样品中,碳酸钙含量存在一定差异,其中 15 批样品碳

表 4 16 批香港巨牡蛎样品碳酸钙含量 ($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 4 Content of calcium carbonate in 16 batches of *C. hongkongensis* ($\bar{x} \pm s, n=3$)

样品编号	碳酸钙/%	样品编号	碳酸钙/%
S1	94.11 ± 0.16	S9	94.47 ± 0.52
S2	93.31 ± 0.56	S10	95.01 ± 0.47
S3	94.51 ± 0.32	S11	95.39 ± 0.35
S4	94.29 ± 0.24	S12	96.50 ± 0.98
S5	94.61 ± 0.17	S13	95.97 ± 0.48
S6	94.04 ± 0.11	S14	96.69 ± 0.23
S7	95.07 ± 0.45	S15	94.83 ± 0.30
S8	94.18 ± 0.31	S16	95.00 ± 0.43

酸钙含量大于 94%,仅 S2 样品碳酸钙含量略低于 94%。分析 S2 样品含量偏低的原因,可能分为 3 类情况:香港巨牡蛎生长过程中,贝壳层间隙与孔隙易吸附沉积水体中的泥沙、硅酸盐等无机杂质;贝壳自身含有的贝壳硬蛋白、多糖等天然有机组分,以及附着的藤壶、石灰虫等外来生物残体,会稀释碳酸钙的相对占比;生长环境差异或生长年限不足,会造成贝壳矿化程度不完全,导致碳酸钙本底含量偏低。

由此可见,其主要成分为碳酸钙^[12],碳酸钙含量可作为质量标志物,但并非所有牡蛎个体的碳酸钙含量都能达到 94%,《中国药典》2025 年版对中药牡蛎的碳酸钙含量作出明确限定是非常必要的。

3 讨论

动物香港巨牡蛎主要分布在地处中国南海的广东、广西和海南,在福建部分河口地区也可能见到其踪迹,是两广沿海地区的主要养殖种类,其产量在 2018 年已达到了 175.18 万 t,在全国牡蛎总产量中占比 22.21%^[13-14],其中广西贡献了 63.61 万 t。广西钦州茅尾海等沿岸河口海区是其最重要的原种分布地,2018 年 8 月动物香港巨牡蛎列入首批广西农业品牌目录,钦州市钦南区荣获“香港巨牡蛎中国特色农产品优势区”^[15-16]。目前,动物香港巨牡蛎的研究与开发多集中于蚝肉,对于占其质量 60% 以上的牡蛎壳研究和利用较少,大部分壳被直接倾倒入海或填埋处理,不仅造成水体和土壤污染,而且威胁生态与人类健康^[17-21]。

本研究首次建立香港巨牡蛎的 XRD 指纹图谱,并分别对其共有峰进行相似度评价和聚类分析。结果显示,各样品之间的 XRD 图谱相似度较高,通过与对照图谱比对,指认了 13 个共有峰并建立了香港巨

牡蛎的 XRD 指纹图谱。但不同产地的不同样品的衍射峰的数量和峰强有所不同,表明不同产地的样品所含成分存在一定差异,可能与不同地区的水质与无机杂质及生长年限等相关。此外,结合 PDF 卡片比对得知,香港巨牡蛎物相结构归属于碳酸钙的方解石型,与近江牡蛎晶体结构一致。碳酸钙含量测定的结果显示,并非所有香港巨牡蛎个体的碳酸钙含量都能达到 94%。碳酸钙含量不低于 94% 的香港巨牡蛎符合《中国药典》对牡蛎的项下规定,具有作为药用牡蛎替代资源的可能,为将香港巨牡蛎开发为中药材和实施综合应用方面提供借鉴和参考。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 国家贝类产业技术体系. 中国牡蛎产业发展报告 [J]. 中国水产, 2021(6): 20-31.
- [2] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 128.
- [3] 唐敏, 石安静, Tang Min, 等. 贝类钙代谢研究概况 [J]. 水产学报, 2000, 22(1): 86-91.
- [4] Bonnard M, Boury B, Parrot I. Key insights, tools, and future prospects on oyster shell end-of-life: A critical analysis of sustainable solutions [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(1): 26-38.
- [5] 张志军. 龙骨与牡蛎的药理作用 [J]. 国外医学: 中医中药分册, 1999(4): 5-8.
- [6] Wang P, Xin S Y, Wang Z, et al. Chaihu-Longgu-Muli Decoction promotes sleep in mice with insomnia [J]. *Trop J Pharm Res*, 2023, 22(5): 1037-1042.
- [7] Cao X L, Peng X M, Li G B, et al. Chaihu-Longgu-Muli decoction improves sleep disorders by restoring orexin-a function in CKD mice [J]. *Front Endocrinol*, 2023, 14: 1206353.
- [8] 刘欢欢. 锶对骨生成的影响及其应用的研究进展 [J]. 天津医科大学学报, 2019, 25(5): 548-550.
- [9] 张礼冲. 钴的生物学功能及其对反刍动物的应用研究进展 [J]. 湖南畜牧兽医, 2023(6): 56-58.
- [10] 齐占会, 史荣君, 于宗赫, 等. 滤食性贝类养殖对浮游生物的影响研究进展 [J]. 南方水产科学, 2021, 17(3): 115-121.
- [11] 刘海新, 余颖, 席英玉, 等. 福建闽南沿海养殖牡蛎食用健康风险评估 [J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 921-932.
- [12] 张洪怡, 周靖惟, 刘佳雯, 等. 基于 AHP-CRITIC 复合加权法优选牡蛎的炮制工艺及其重金属元素健康风险评估 [J]. 中草药, 2025, 56(5): 1549-1563.
- [13] 金翔, 张微, 张德新, 等. 基于 MEK/ERK 通路探讨柴胡加龙骨牡蛎汤治疗失眠大鼠的机制 [J]. 中药药理与临床, 2020, 36(1): 51-54.
- [14] 张洪怡, 周靖惟, 刘佳雯, 等. 牡蛎(近江牡蛎)药材、煅牡蛎饮片及其标准汤剂的物相变化及量质传递分析 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(5): 1209-1223.
- [15] 闫兴丽, 张建军, 曾凤英. 三种牡蛎矿质元素的含量测定与分析 [J]. 中国中医基础医学杂志, 2009, 15(3): 218-218.
- [16] 陈榕恩, 张岗, 王辉, 等. 海洋中药牡蛎的用药历史、炮制沿革及现代研究进展 [J]. 中国海洋药物, 2025, 44(1): 83-94.
- [17] 唐小华, 宋文东. 紫贻贝壳与牡蛎壳及珍珠的氨基酸和微量元素比较分析 [J]. 农村经济与科技, 2016, 27(1): 109-110.
- [18] Tran N K S, Kwon J E, Kang S C, et al. *Crassaostrea gigas* Oyster shell extract inhibits lipogenesis via suppression of serine palmitoyltransferase [J]. *Nat Prod Commun*, 2015, 10(2): 1934578X1501000236.
- [19] 周明慧, 杨永滨, 张永春, 等. 几种常见动物性中药中腺嘌呤含量的测定 [J]. 中华保健医学杂志, 2012, 14(5): 343.
- [20] Yang X, Zhou S L, Ma A C, et al. Chemical profiles and identification of key compound caffeine in marine-derived traditional Chinese medicine *Ostreae Concha* [J]. *Mar Drugs*, 2012, 10(5): 1180-1191.
- [21] Alabaraoye E, Achilonu M, Hester R. Biopolymer (chitin) from various marine seashell wastes: Isolation and characterization [J]. *J Polym Environ*, 2018, 26(6): 2207-2218.

[责任编辑 时圣明]