

关于鲕粒形成原因的相关研究综述

杨闰轲¹, 孙博辉¹, 薛清元¹, 张海涛¹, 王肖明²

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²安徽省宿州工业学校, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

鲕粒这种特殊的沉积颗粒, 在地质学中具有重要的意义。它们广泛存在于古代和现代沉积环境中, 常被用作反映古气候和古海洋学指标的依据, 如海平面、氧化还原状态、水深、温度、盐度和水动力环境等。关于鲕粒的成因, 主要有无机成因和有机成因两种说法。无机成因认为, 鲕粒是在碳酸盐过饱和且扰动的水体环境中, 由溶液中析出的碳酸钙围绕着被水扰动浮起的质点为核心沉淀而成的。这个过程需要满足一定的条件, 如碳酸钙的过饱和、充足的核心以及动荡的水流等。而有机成因则主张鲕粒的形成与微生物的活动有关。一些学者认为, 微生物的代谢活动可以改变溶液中的pH值, 从而导致碳酸盐矿物的沉淀。此外, 胞外聚合物还可以为碳酸盐矿物的生长提供成核位置。不过, 也有学者通过实验和观察对有机成因提出了挑战, 他们认为微生物活动并不是鲕粒形成的直接原因, 而是强调了化学过程在鲕粒形成中的重要性。

关键词

鲕粒, 有机成因, 无机成因, 微生物作用, 生物碎屑, 碳酸岩

A Review of Related Studies on Oolitic Genesis

Runke Yang¹, Bohui Sun¹, Qingyuan Xue¹, Haitao Zhang¹, Xiaoming Wang²

¹School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²Suzhou Industrial School of Anhui Province, Suzhou Anhui

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

Abstract

Oolitic is a special sedimentary particle, which is of great significance in geology. They exist widely in ancient and modern sedimentary environments, and are often used as the basis for reflecting

文章引用: 杨闰轲, 孙博辉, 薛清元, 张海涛, 王肖明. 关于鲕粒形成原因的相关研究综述[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(4): 586-592. DOI: 10.12677/aep.2025.154066

paleoclimate and paleoceanographic indicators, such as sea level, REDOX state, water depth, temperature, salinity and hydrodynamic environment. There are two kinds of theories about the origin of oolite: inorganic origin and organic origin. According to the inorganic origin, the oolitic particles are precipitated by the calcium carbonate precipitated from the solution around the particles floated by the water disturbance in the supersaturated and disturbed water environment. This process requires certain conditions, such as supersaturation of calcium carbonate, an adequate core, and turbulent water flow. The organic origin suggests that the oolitic formation is related to the activity of microorganisms. Some scholars believe that the metabolic activity of microorganisms can change the pH in the solution, which leads to the precipitation of carbonate minerals. In addition, extracellular polymers can also provide nucleation sites for the growth of carbonate minerals. However, some scholars have challenged the organic origin through experiments and observations. They believe that microbial activities are not the direct cause of oolitic formation, but emphasize the importance of chemical processes in oolitic formation.

Keywords

Oolitic, Organic Origin, Inorganic Origin, MICROBIAL Action, Biocritus, Carbonate Rock

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

早在 1879 年,英国地质学家索比就在他的著作《石灰岩的结构和成因》中,详细探讨了鲕粒的结构,他认为鲕粒是碳酸盐岩中最有趣的组成部分。从那时起,关于鲕粒成因的研究就一直没有停止过。

豫北卫辉馒头组含铁鲕粒^[1]是寒武纪浅海高能氧化环境的产物,其形成依赖陆源铁输入、水动力搅动和微生物-化学协同作用。这一现象不仅为恢复古地理提供了重要线索,也为探讨早期地球表生系统铁循环机制提供了典型实例。

随着科学技术的不断进步和研究方法的不断创新,对鲕粒成因的研究也取得了新的进展。现代的研究更加注重多学科交叉和综合分析,通过结合地质学、沉积学、化学、生物学等多个学科的知识,来揭示鲕粒形成的奥秘。

总之,鲕粒成因的研究背景既悠久又复杂,它涉及到多个学科的知识,是地质学研究中的一个重要领域,也是今后研究的一个重要方向。

2. 研究意义

关于鲕粒的成因,学术界已争论了百余年。一种观点认为,鲕粒是由浅层、温暖、碳酸盐饱和及搅动的水动力共同作用形成的化学沉淀,即无机成因。另一种观点则强调微生物的代谢活动对溶液 pH 值的影响,导致碳酸盐矿物沉淀,胞外聚合物(EPS)为碳酸盐矿物的生长提供了成核位置,即有机成因。近年来,有学者通过实验表明物理环境在控制鲕粒的生长方面可能更为重要,但这一观点尚缺乏野外证据的支持。

对于鲕粒成因的研究,不仅具有理论价值,更有着广泛的实践意义。首先,鲕粒成因的研究有助于我们深入认识沉积学的基本原理。鲕粒的形成是一个复杂的过程,涉及物理、化学和生物等多种因素。通过对鲕粒成因的深入研究,我们可以更好地理解沉积物在水体中的运移、沉积和成岩过程,揭示沉积

环境的变化规律。这有助于我们更准确地解读地质历史记录，为地质勘探和资源开发提供科学依据。其次，鲕粒作为沉积岩中的一种重要组分，其成因研究对于沉积岩的分类和识别具有重要意义。

3. 国内外研究现状

国内研究现状

1) 铁质鲕粒的研究：

中国科学院南京地质古生物研究所的科研人员与加拿大萨斯喀彻温大学及西安大略大学的科研人员合作，对华南上扬子区中 - 上奥陶统的铁质鲕粒及地层序列开展了沉积学和岩石矿物学的研究。

不同相区的铁质鲕粒在结构和矿物组成上存在差异。例如，川滇交界至川西南地区的鲕粒以赤铁矿(3价铁氧化物)为特征，而滇东北 - 川南 - 黔北以及陕南川北地区的鲕粒则以鲕绿泥石(2价3价铁层状硅酸盐)为主。华北地区广泛出露的震旦系 - 寒武系 - 奥陶系中，冶金用白云岩主要产于奥陶系三山子组，其他层位较少，而安徽宿州龟山矿区[2]熔剂用白云岩矿赋存于寒武系张夏组上段($\epsilon_{2z} \sim 2$)。白云岩矿体总体呈单斜层状产出，矿体走向 NE-NNE，矿体南北长大约 2 km，储量超过 6500 万吨，规模为大型。

研究发现，华北寒武系竹叶状灰岩丘[3]是浅海高能环境(尤其是风暴作用)的产物，其形成涉及灰岩破碎、搬运、再沉积及成岩作用。这一特殊沉积构造不仅为研究寒武纪古海洋环境提供了重要线索，也为碳酸盐岩储层勘探提供了潜在目标。

研究还表明，周期性的环境变化是圈层形成的决定因素，而与不同沉积过程相关的氧化还原波动则造成了不同类型铁质鲕粒间的矿物分异，这些过程可能还受到微生物如微需氧铁细菌和铁还原细菌等的生命活动控制和影响。

2) 晚二叠世 - 早三叠世鲕粒的研究：

国内学者对华南地区的晚二叠世 - 早三叠世鲕粒[4]的沉积特征、时空分布及演化进行了研究，同时对其微观岩石学及地球化学特征进行了分析。

这些研究建立了鲕粒时空分布与古海洋环境变化的响应关系，并探讨了其成因机制及环境意义。

国外研究现状

1) 微生物作用假说：

国外学者曾提出鲕粒形成的微生物成因假说。例如，Brehm 等人在实验室条件下培养出了一个球状微生物群落，并观察到了与化石鲕粒相似形式的碳酸盐沉淀作用。他们认为，鲕粒的形成可能与微生物作用过程有关。

然而，这一假说也受到了挑战。Duguid 等人对现代巴哈马鲕粒的观察与研究表明，鲕粒的形成与微生物活动不存在一个直接的关系，从而重新强调了鲕粒形成的化学过程。

2) 化学作用与物理作用的研究：

除了微生物作用外，国外学者还关注鲕粒形成的化学作用和物理作用过程。他们认为，鲕粒的形成需要满足一定的条件，如核心的存在、有序更新并经常脱二氧化碳的相对于钙碳酸盐超饱和的海水以及一个允许二氧化碳脱气的动荡的环境等。这些条件共同促进了鲕粒皮层的形成和演化。同时，物理作用如水流冲刷等也可能对鲕粒的形态和分布产生影响。

综合评价：

综上所述，国内外对于鲕粒成因的研究已经取得了一定的进展。然而，由于鲕粒形成过程的复杂性和多样性，目前仍存在许多争议和未解之谜。未来的研究需要更加深入地探讨鲕粒形成的各种机制及其相互关系，并结合现代沉积环境和古海洋环境的变化来进一步揭示鲕粒的成因和演化规律。

4. 评述

鲕粒灰岩的形成始于海洋环境中的波浪和潮汐作用。这种自然现象导致水介质的不断搅动,使得包括生物碎屑、球粒、内碎屑、陆源碎屑等物质处于悬浮状态。在这一过程中,二氧化碳从水体中逸出,促使过饱和的碳酸钙(文石针)围绕悬浮的碎屑颗粒沉淀,形成了一圈圈同心纹包壳。这一循环搅动过程持续进行,最终形成了具有一圈圈同心纹包壳的鲕粒。

当鲕粒达到一定的大小,其质量超过波浪、水流搅动的能量时,便不再被继续搅动,而是堆积在海底。随着时间的推移,亮晶方解石开始胶结这些鲕粒,形成亮晶鲕粒灰岩。如果鲕粒被带到低能环境,则形成泥晶鲕粒灰岩。这一过程展示了自然界中复杂而又有序的地质作用,形成了我们今天所见的鲕粒灰岩。

鲕粒灰岩的形成是海洋环境与地质过程相互作用的结果,体现了自然界的动态平衡与复杂性。从生物碎屑到鲕粒,再到鲕粒灰岩,这一过程展示了从微小生命体到岩石层的演化链。鲕粒灰岩不仅为我们提供了关于古环境的宝贵信息,还揭示了地球历史上海洋环境的变化。

高镁石灰岩矿床[5]的形成是沉积环境、成岩作用和后期改造共同作用的结果,其地质特征和成因机制为研究古环境演化和资源勘探提供了重要依据。燕子埠地区大规模出露张夏组厚层状鲕粒灰岩[6],为苏北地区的古海洋环境研究提供了材料。采用野外观察、镜下鉴定、化学测试等方法,对研究区张夏组下段鲕粒灰岩的岩石学及地球化学特征开展了研究。结果表明:研究区鲕粒灰岩主要由鲕粒和亮晶方解石胶结物组成;微量元素与稀土元素分布特征具有一致性,表明张夏组沉积期海洋环境保持相对稳定;鲕粒灰岩的地球化学特征受陆源物质混染及成岩作用的影响较弱,可用于古环境恢复;综合地球化学和岩石学判别指标,认为研究区张夏组下段鲕粒灰岩形成于炎热干旱、蒸发量大、氧化高能陆表海边缘沉积环境。河北井陉南王庄水泥用灰岩矿是典型的浅海台地相碳酸盐岩矿床,其形成受控于寒武纪-奥陶纪清澈的浅海环境和稳定的构造背景[7],为鲕粒的形成提供了重要参考。

利川龚家垭口三叠系飞仙关组储层[8]的成岩作用复杂多样,孔隙演化经历了原生孔隙减少、次生孔隙形成和裂缝发育等多个阶段。优质储层主要受白云石化、溶解作用和裂缝控制,其分布规律对鲕粒灰岩形成研究具有重要意义。

为了研究青海碱山地区七个泉组鲕粒灰岩(图 1)成因,对鲕粒灰岩的光薄片鉴定及稀土元素特征进行了分析,结果表明:碱山地区鲕粒灰岩主要由鲕粒、豆粒、团块、不透明矿物和胶结物组成,鲕粒可划分为表鲕、球形鲕、椭球鲕、破裂鲕、复鲕以及豆鲕等,其中以球形鲕为主,椭球鲕次之。多数鲕粒的鲕核直径小于鲕壳厚度,鲕壳同心层圈数多,具有形成于高能水体动荡环境的特征。



Figure1. Oolitic limestone in the alkali mountain area of Qinghai
图 1. 青海碱山地区鲕粒灰岩

通过对临沂苍山、济宁嘉祥、莱芜九龙山等寒武系剖面进行野外测量,发现鲁西寒武系张夏组凝块广泛发育,在馒头组和炒米店组只有少量出露。本文主要研究张夏组的凝块鲕粒灰岩(图 2),根据野外实测剖面分析其宏观特征,得出其共生岩相主要有页岩夹薄层泥晶灰岩相、页岩相、泥岩与灰岩互层相、鲕粒灰岩相、微生物灰岩相。江苏徐州地区寒武系绿石形成于浅海陆棚微氧环境,其沉积特征和成因模式反映了寒武纪古海洋的地球化学条件和沉积-成岩过程。绿石的研究对鲕粒的成因研究具有重要意义[9]。根据研究区凝块石灰岩的宏观特征与微观特征,对其沉积环境进行了分析,其主要形成于水动力条件较弱、阳光充足、营养物质丰富较浅水的潮间——潮下低能的环境。根据鲁西地区张夏组凝块石灰岩的微观特征,笔者发现此研究区的凝块石灰岩经历的成岩作用主要有微生物的钙化作用、泥晶化作用、胶结作用、压实和压溶作用、新生变形作用以及交代作用,其中最重要的是微生物的钙化作用,它是形成凝块石的基础。结合研究区凝块石灰岩的宏观特征与微观特征,将此研究区的凝块石灰岩分为钙化微生物凝块石灰岩、粗粒粘聚状凝块石灰岩和沉积后——生物扰动的凝块石灰岩,并分析了不同种类的凝块石灰岩的形成方式和环境。结合鲁西地区张夏组凝块鲕粒灰岩的形成方式和沉积环境,推测了凝块石灰岩的形成机制。



Figure 2. Section view of oolitic limestone of Zhangxia Formation in Luxi area
图 2. 鲁西地区张夏组鲕粒灰岩剖面图

对湖北宜昌下奥陶统分乡组、四川旺苍 Llandovery 统南江组鲕粒灰岩的岩石特征及沉积环境进行了较为详细的分析和对比研究。宜昌地区下奥陶统为一套典型的陆表海碳酸盐沉积,旺苍地区 Llandovery 统为一套陆源碎屑-碳酸盐岩混积缓坡沉积。不同环境下的鲕粒灰岩,其沉积、岩石特征均存在很大的差异。扬子台地西南部奥陶系宝塔组底部的含鲕绿泥灰石岩是浅海陆棚微氧-弱还原环境的产物,其形成受陆源输入、海洋自生作用和成岩作用的共同控制。这种岩石不仅为恢复奥陶纪古环境提供了重要依据,还具有地层对比、资源勘探和古地理重建的科学意义[10]。分乡组鲕粒灰岩(图 3)以滩相产出,中-厚层的鲕粒灰岩与生物碎屑灰岩互层沉积。鲕粒与砂屑、砾屑、生屑共生,鲕粒均为原始鲕,保存完好。岩石地球化学分析显示宜昌地区分乡组 CaCO_3 含量高达 69%,陆源碎屑极少,表明当时海水清洁,为原地滩沉积提供了良好的条件。分乡组鲕粒在镜下只有一些轻微压溶、重结晶现象,不见白云石化。其 Mn/Sr 比值、氧同位素组成特征、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相关性均显示后期成岩作用较弱,样品能够较好的保存原始同位素信息。而旺苍地区南江组鲕粒灰岩产自于陆源碎屑-碳酸盐混积缓坡中,以 10~20 cm 的薄层夹杂在南江组中上部厚层的泥质粉砂岩中。鲕粒破碎,大小不一,与半自形、他形的生物碎片、陆源碎屑(石英)

等颗粒混杂在一起，颗粒粒度、形状变化大、分选差。岩石地球化学分析显示南江组陆源碎屑含量高达42%，水体环境不适合鲕粒的原地形成。这些特征均说明南江组鲕粒为异地沉积。该组鲕粒在镜下的压实、压溶现象明显，可见大量的缝合线，有些鲕粒重结晶严重，已变成单晶鲕，很多鲕粒已白云石化。其Mn/Sr比值、氧同位素组成、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相关性等均显示此区鲕粒遭受了强烈地后期成岩作用，因此所测同位素数据不能代表原始海水信息，需校正后使用。根据Sr/Ba进行的古盐度分析，分乡组沉积水体的古盐度较南江组略高。根据 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行的古水温估算，分乡组古温度范围为 $27^{\circ}\text{C}\sim 33^{\circ}\text{C}$ ，均值为 31°C ；南江组古温度为 $22^{\circ}\text{C}\sim 34^{\circ}\text{C}$ ，均值为 26°C 。这一温度范围显示上扬子地区奥陶纪早期及志留纪早期均为干热或温暖气候都应属于中低纬度气候带。



Figure 3. Oolitic limestone of the lower ordovician township formation in Yichang, Hubei province
图 3. 湖北宜昌下奥陶分乡组鲕粒灰岩

5. 对研究结果的总结

鲕粒的成因研究揭示了其形成过程中复杂的物理、化学和生物相互作用。尽管传统观点强调无机化学沉淀的作用，但现代研究表明微生物活动和水动力条件在鲕粒形成中同样重要。鲕粒不仅是沉积学研究的重要对象，还为古环境重建和油气勘探提供了关键信息。未来的研究应进一步结合现代实验模拟和古代实例

6. 综述

鲕粒形成机制研究展望及建议：

鲕粒作为一种重要的沉积构造，其形成机制研究对理解古环境、古气候及资源勘探具有重要意义。未来研究需在以下方面深入探讨：

1) 多学科交叉，揭示鲕粒形成机制

流体力学与化学耦合：结合数值模拟和实验，研究不同水流条件下碳酸钙过饱和度的变化，以及颗

粒碰撞、聚集与流体剪切力的相互作用。

微生物作用机制：利用分子生物学和高分辨率成像技术，探究微生物种类、代谢活动及其对碳酸钙沉淀和鲕粒生长的具体影响。

有机质-无机质相互作用：分析有机质在鲕粒形成中的角色，研究有机质如何影响碳酸钙的成核、生长和胶结过程。

2) 建立定量模型，预测鲕粒特征

多因素耦合模型：综合考虑水动力、化学、生物和有机质等因素，建立鲕粒大小、形态和内部结构的定量预测模型。

现代沉积与古代记录对比：通过现代鲕滩观测与古代鲕粒岩记录对比，验证模型并完善其适用性。

3) 提出可操作方案，指导资源勘探

鲕粒岩储层预测：利用鲕粒形成机制和定量模型，预测有利储层分布，为油气勘探提供依据。

古环境重建：通过鲕粒特征分析，重建古水深、水动力和古气候条件，为古地理研究提供支持。

环境监测与修复：研究现代鲕滩形成机制，监测海洋环境变化，并为生态修复提供参考。

基金项目

本文受到国家级大学生创新创业训练计划项目：宿州栏杆地区馒头组鲕粒灰岩成因初探(202410379060)；安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202410379174)；宿州学院大学生创新创业训练计划项目(编号：ZCXM24-39 和 ZCXM24-40)的支持。

参考文献

- [1] 许吁潇, 齐永安, 何雯逸, 等. 豫北卫辉地区寒武系馒头组含铁鲕粒的特征及形成机制[J]. 古地理学报, 2024, 26(4): 863-879.
- [2] 莫福成, 李桂生. 安徽宿州龟山石灰岩与白云岩共生矿产地质特征及矿床成因分析[J]. 安徽地质, 2023, 33(3): 205-210.
- [3] 陈吉涛. 再论华北寒武系竹叶状灰岩丘成因[J]. 沉积学报, 2023, 41(6): 1662-1672.
- [4] 朱小二. 华南晚二叠世-早三叠世鲕粒成因机制及其环境意义[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- [5] 田彦凯, 朱兴葛, 张利晨. 辽西南营子熔剂用高镁石灰岩矿床地质特征及成因分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(4): 29-32.
- [6] 王国强, 张凤鸣, 王博, 等. 苏北燕子埠地区张夏组鲕粒灰岩地球化学特征及成因[J]. 中国地质调查, 2023, 10(2): 54-63.
- [7] 杨永超, 余腾, 张志富, 等. 河北井陉南王庄水泥用灰岩矿地质特征及矿床成因[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2023(3): 43-46, 54.
- [8] 杨鹏, 袁海峰, 叶子旭. 利川龚家垭口三叠系飞仙关组储层成岩作用及孔隙演化[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(5): 34-45.
- [9] 祝玉琳. 江苏徐州地区寒武系海绿石沉积特征及成因模式[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [10] 陈思, 曾敏, 田景春, 等. 扬子台地西南部奥陶系宝塔组底部含鲕绿泥石灰岩成因意义[J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3107-3122.