

引用格式: 杨雪飞, 李之民, 唐浩, 等. 2026. 川西北地区中泥盆统金宝石组砂岩结核特征及成因机制[J/OL]. 沉积学报, 1-17.

Yang Xuefei, Li Zhimin, Tang Hao, et al. 2026. Characteristics and genesis mechanism of sandstone concretions in the Middle Devonian Jinbaoshi Formation, northwestern Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 1-17.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.061

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.061

川西北地区中泥盆统金宝石组砂岩结核特征及成因机制

杨雪飞^{1,2}, 李之民³, 唐浩^{1,2}, 廖子超^{1,2}, 谢国锦^{1,2}, 张绪鑫^{1,2}, 周嘉桐^{1,2}, 杜垚⁴, 何珍^{1,2}

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610500

3. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

4. 中国石油西南油气田公司勘探事业部, 成都 610041

摘要 【目的】沉积岩中的结核成因不仅能揭示沉积环境也可作为研究成岩演化的关键证据, 对沉积岩孔隙演化研究具有重要意义。【方法】以四川盆地西北部葛底坝剖面泥盆系金宝石组野外剖面为研究对象, 开展野外精细描述、岩石薄片和扫描电镜观察以及能谱分析等研究, 详细分析了金宝石组结核特征并探讨其成因机制。【结果】葛底坝剖面金宝石组石英砂岩成熟度高, 孔隙较发育, 顺层发育了大量结核, 形态椭球—近圆球状, 表面呈褐—棕褐色。微观镜下, 结核与周围砂岩的石英颗粒形态、大小、分选性、磨圆度、结构等基本一致, 与石英砂岩相比, 结核内石英颗粒排列稀疏, 以点接触为主, 多被硅质胶结, 次为铁质胶结和黏土矿物胶结, 局部残余孔隙内可见原油充填。结核发育层段发育小型穹窿构造及生物扰动, 扫描电镜下见丝状微生物残体和硅化细菌菌落。【结论】综合分析认为, 葛底坝剖面金宝石组结核的形成与微生物席 (microbial mats) 密切相关, 微生物分解有机质所产生的气体向上排出在沉积物表面形成穹窿构造, 当微生物席厚度不足所产生的气体较少难以向上排出时, 将导致局部碎屑颗粒稀疏化并发生早期硅质胶结及铁质胶结, 在后续埋藏过程中抵抗压实作用, 保持球状形态, 抬升地表后结核中的铁质胶结物遭受氧化呈褐色。建立了微生物席诱导碎屑岩结核成因演化模式, 可为理解金宝石组石英砂岩的成岩演化及孔隙结构调整提供依据, 对油气勘探具有重要的地质意义。

关键词 川西北地区; 金宝石组; 石英砂岩; 结核; 成因机制

第一作者简介 杨雪飞, 女, 1988 年出生, 副教授, 沉积学与储层地质学, E-mail: yangxf_swpu@163.com

中图分类号: P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550 (2026) 00-0000-00

0 引言

结核是沉积岩中常见而又复杂的一类沉积构造 (Möller and Kvingan, 1988; Pettijohn, 2004), 主要发育于碳酸盐岩、细粒硅质碎屑岩及硅质岩中, 通常与早期成岩胶结作用相关 (Rahmani, 1970; Theakstone, 1981; Banerjee *et al.*, 2006b; Banerjee and Jeevankumar, 2007; 庞谦等, 2017; 秦凤蕊等, 2024)。结核的类型多样, 形态各异, 成分复杂, 常见钙

收稿日期: 2025-08-20; 收修改稿日期: 2025-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42102190, 42102193); 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC1105); 新型油气勘探开发国家科技重大专项 (2025ZD1400402); 西南石油大学大学生课外开放实验重点项目 (2023KSZ02009, 2024KSZ02001)

质、硅质和铁质等(刘新宇和颜佳新, 2007; 刘超等, 2023; 樊婷婷等, 2023; 陈健等, 2024), 结核的成因不仅能揭示沉积环境也可作为研究成岩演化的关键证据, 吸引了越来越多地质工作者对其开展研究(刘红光和刘波, 2017; 黄铨铮等, 2024; 王东东等, 2024; 梁天, 2024)。

四川盆地西北部中泥盆统金宝石组为一套典型的滨岸石英砂岩沉积, 由于长期未取得重大油气突破, 针对该套地层的钻井较少, 研究程度相对较低。在川西北地区葛底坝剖面野外勘探过程中发现金宝石组石英砂岩分选磨圆较好, 成熟度较高, 具有一定的原始孔隙, 在部分砂岩地层中顺层发育大量结核, 其分布较稳定, 具有成层性, 结核呈圆或次圆状。前人针对沉积岩中结核的研究鲜少聚焦于中粗粒砂岩中(Molenaar and Martinius, 1990), 高成熟度石英砂岩中发育的结核与其他类型的结核成因是否相似? 对石英砂岩孔隙的影响如何也有待进一步研究。

因此, 本文针对川西北地区青川县葛底坝剖面中泥盆统金宝石组石英砂岩中的结核进行详实野外观察后, 选取典型岩石样品, 通过普通薄片、扫描电镜、阴极发光等多种实验手段分析结核的物质组成、结构和构造, 并在此基础上对胶结物类型进行能谱分析明确其化学元素组成, 最终揭示其成因及意义, 讨论结核对金宝石组石英砂岩孔隙的影响。

1 区域地质概况

葛底坝剖面位于四川省广元市青川县建峰镇葛底村, 该剖面构造上处于龙门山山前带, 经历了震旦纪—中三叠世的被动大陆边缘以及晚三叠世以来的碰撞造山运动(龙学明, 1991; 刘树根等, 1993)。泥盆纪, 龙门山地区处于上扬子板块西北边缘, 属于被动大陆边缘拉张伸展型开阔海湾盆地内(汪泽成等, 2002)(图 1a)。龙门山地区泥盆系地层发育稳定的滨浅海沉积, 中泥盆统金宝石组沉积时海平面间歇性下降, 四周古陆出露地表并遭受风化剥蚀产生大量的陆源碎屑(图 1b), 金宝石组整体以碎屑岩沉积为主(冯春强, 2016)。川西北地区金宝石组则发育滨岸相前滨—后滨亚相(图 1c), 沉积了一套典型的滨岸石英砂岩和泥质粉砂岩; 金宝石组与其上覆中泥盆统观雾山组为整合接触, 岩性以白云岩为主; 与其下伏下泥盆统养马坝组为平行不整合接触, 岩性为泥质粉砂岩、泥页岩和灰岩(张东宇, 2022)(图 1d)。

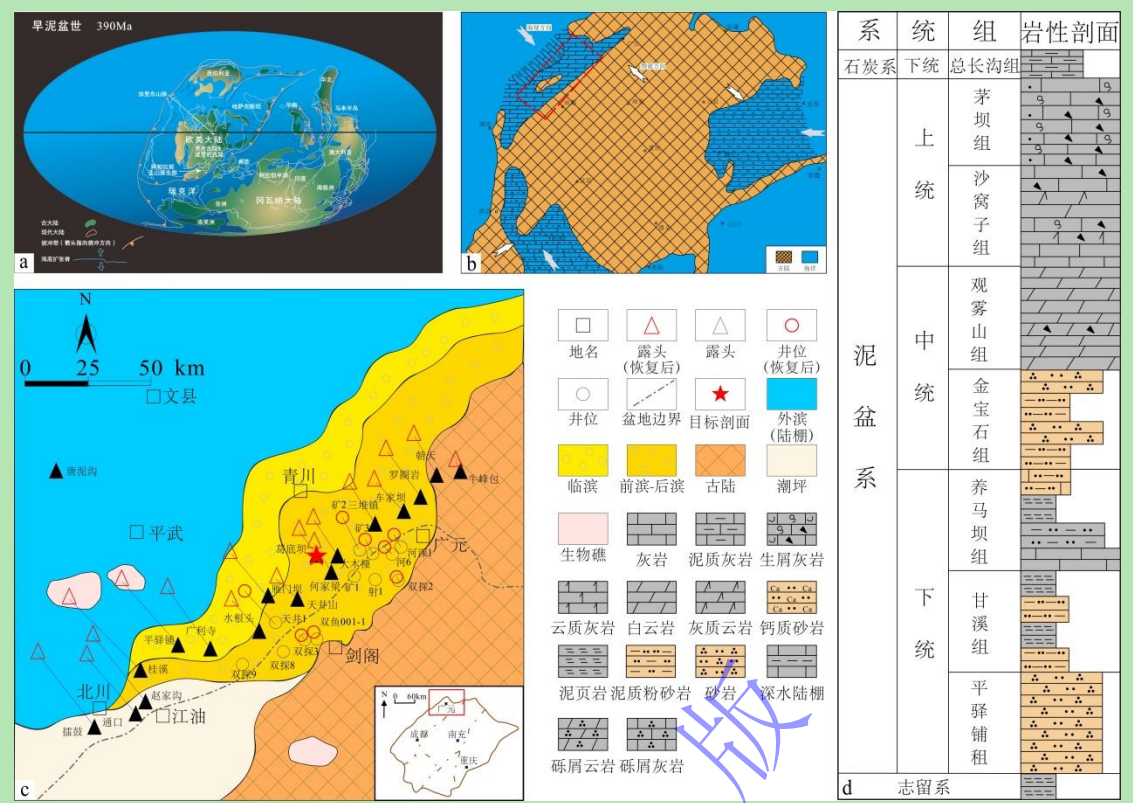


图1 四川盆地西北部中泥盆统金宝石组岩相古地理及地层综合柱状图

(a) 泥盆纪全球古地理图(据 Scotese, 2001 修改); (b) 四川盆地早泥盆世岩相古地理; (c) 川西北地区中泥盆统金宝石组沉积相平面分布图; (d) 川西北地区泥盆系地层柱状图(据张东宇, 2022 修改)

Fig.1 Paleogeographical map and stratigraphic column of the Middle Devonian Jinbaoshi Formation in the northwestern Sichuan Basin

(a) global paleogeographic map of the Devonian (modified from Scotese, 2001); (b) lithofacies paleogeographical map of the Lower Devonian in the Sichuan basin; (c) sedimentary facies map of the Middle Devonian Jinbaoshi Formation in the northeastern Sichuan Basin; (d) stratigraphic column of the Devonian in the northwestern Sichuan Basin (modified from Zhang, 2022)

2 金宝石组野外特征

川西北地区葛底坝剖面出露奥陶系、泥盆系、石炭系和二叠系，其中中泥盆统金宝石组出露良好。该剖面金宝石组厚约 39.5 m，自然伽马整体呈平稳低值（图 2），岩性主要为灰黄色中厚层一块状细一中粒石英砂岩夹少量粉砂质泥岩（图 3a），与上覆观雾山组呈整合接触，由金宝石组石英砂岩逐渐过渡为白云岩；与其下伏奥陶系临湘—宝塔组灰岩呈角度不整合接触。

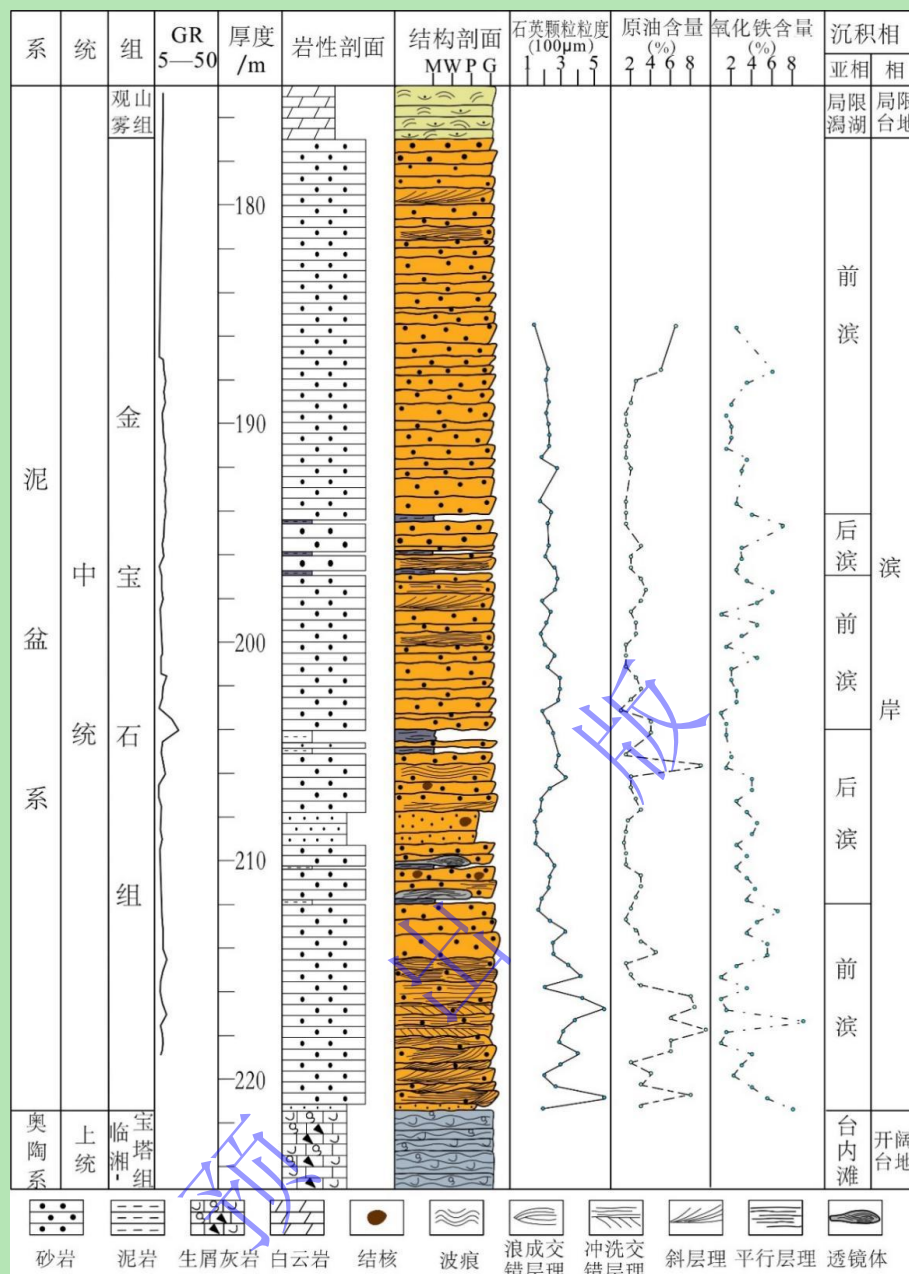


图2 葛底坝剖面中泥盆统金宝石组地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column in the Gejiaba section of the Middle Devonian Jinbaoshi Formation

金宝石组石英砂岩中常发育平行层理、斜层理（图 3b）以及冲洗交错层理和对称波痕（图 3c）等沉积构造，指示水体能量相对较高的沉积环境。显微镜下，石英砂岩中石英平均含量约为 97%，长石平均含量约为 0.5%，其他碎屑平均含量约为 2.5%，以细—中粒为主，分选良好，磨圆中等，呈颗粒支撑结构。整体上石英砂岩成熟度较高，孔隙发育，以残余粒间孔为主，常见硅质胶结（图 3d）、褐铁矿胶结（图 3e）和原油充填（图 3f），偶见钙质胶结物（图 3g）。石英砂岩中发育生物钻孔和潜穴（图 3h），呈圆形—椭圆形，潜穴内部充填杂基和泥质（图 3i）。

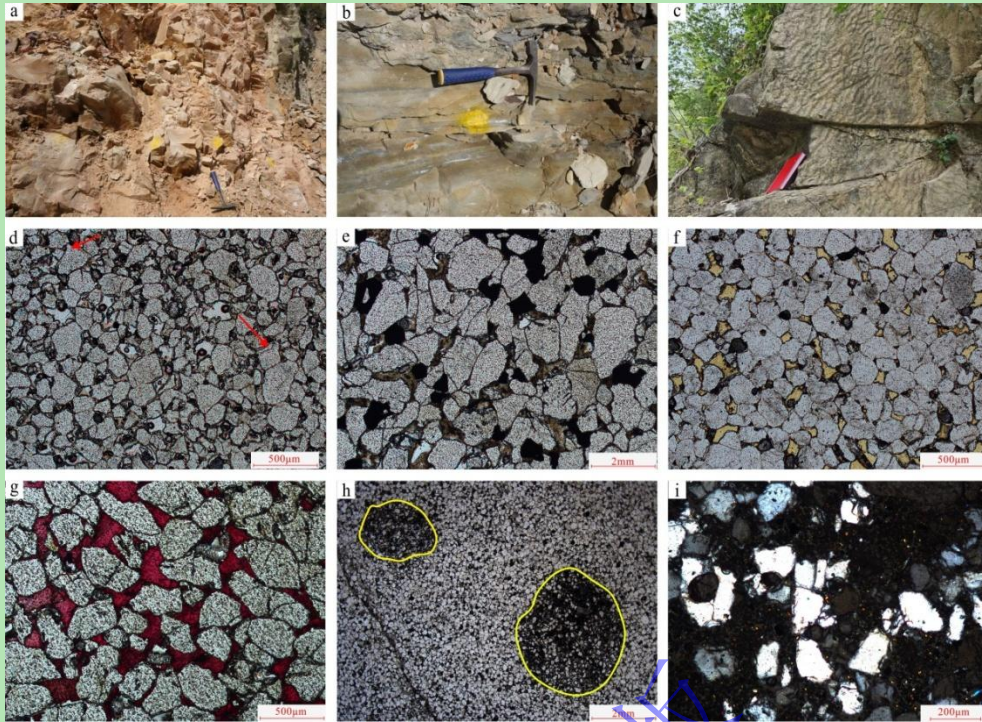


图3 葛底坝剖面金宝石组石英砂岩宏微观照片

(a) 中厚层石英砂岩, 209.5 m; (b) 冲洗交错层理, 193.2 m; (c) 对称波痕, 221.8 m; (d) 硅质胶结, 石英次生加大边(箭头), 孔隙为残余粒间孔, 73.5 m, 单偏光; (e) 石英颗粒间褐铁矿胶结, 57.5 m, 单偏光; (f) 石英砂岩颗粒间充填原油, 71.5 m, 单偏光; (g) 石英颗粒间钙质胶结, 60.5 m; (h) 生物扰动、潜穴, 内充填泥质(黄线区域), 68.5 m, 单偏光; (i) 对应图 h 潜穴内部, 68.5 m, 正交偏光

Fig.3 Macroscopic and microscopic photographs of quartz sandstone in the Jinbaoshi Formation, Gediba section (a) medium-thick-bedded quartz sandstone, 209.5 m; (b) cross-bedding, 193.2 m; (c) symmetrical wave ripples, 221.8 m; (d) siliceous cementation, overgrowth of quartz grains (red arrow), residual intergranular pores, 73.5 m, plane-polarized light (PPL); (e) limonite cementation between quartz grains, 57.5 m, PPL; (f) crude oil filled in the pores between quartz grains, 71.5 m, PPL; (g) calcareous cementation between quartz grains, 60.5 m; (h) bioturbation and burrows (yellow lines), 68.5 m, PPL; (i) corresponding to the burrow in Fig.3h, 68.5 m, cross-polarized light (XPL)

3 结核发育特征

3.1 结核岩石学特征

本文所研究的结核发育于金宝石组中下部石英砂岩中, 发育层段厚约 6 m (图 4), 结核呈不规则椭球状, 顺层分布且凸出于层面易于识别 (图 5a), 由于风化作用结核常从岩层中脱落留下圆形印模 (图 5b)。结核大小不一, 直径 4~10 cm, 表面呈暗褐—褐红色 (图 5c), 摸之污手, 内部颜色整体偏黄或白色 (图 5b), 横切面可见同心圈层结构 (图 5d)。

显微镜下, 结核的成分和结构特征与围岩石英砂岩基本一致, 但孔隙度明显高于石英砂岩, 结核内石英颗粒多为点接触 (图 5e), 颗粒间除部分石英次生加大外, 多被褐铁矿胶结 (图 5f), 单偏光下呈黑色, 反射光下呈金属黄色 (图 5g), 扫描电镜下衬度较高易于

识别（图 5h）。此外，结核内石英颗粒之间还可见残余原油充填，呈黄—橘黄色（图 5i）。

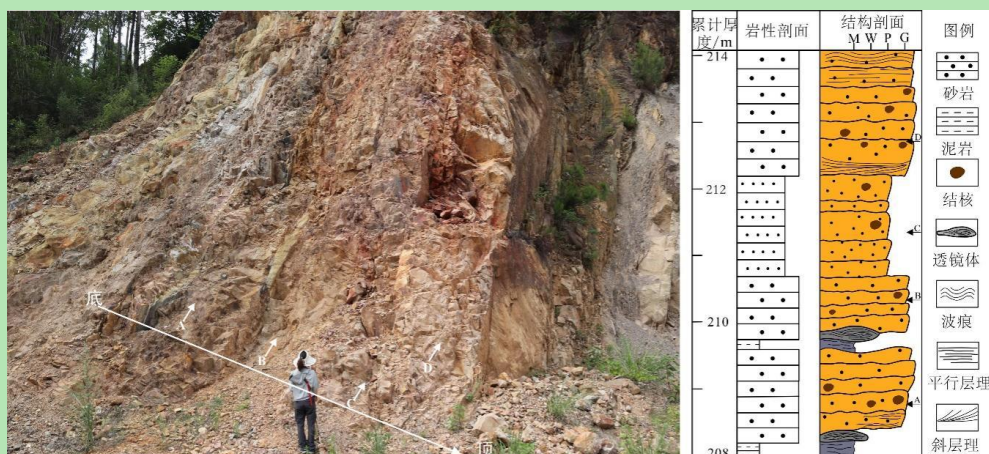


图 4 葛底坝剖面金宝石组结核产出层位结构剖面图

Fig.4 Stratigraphic column of the concretion layer in the Gejiba section of the Jinbaoshi Formation

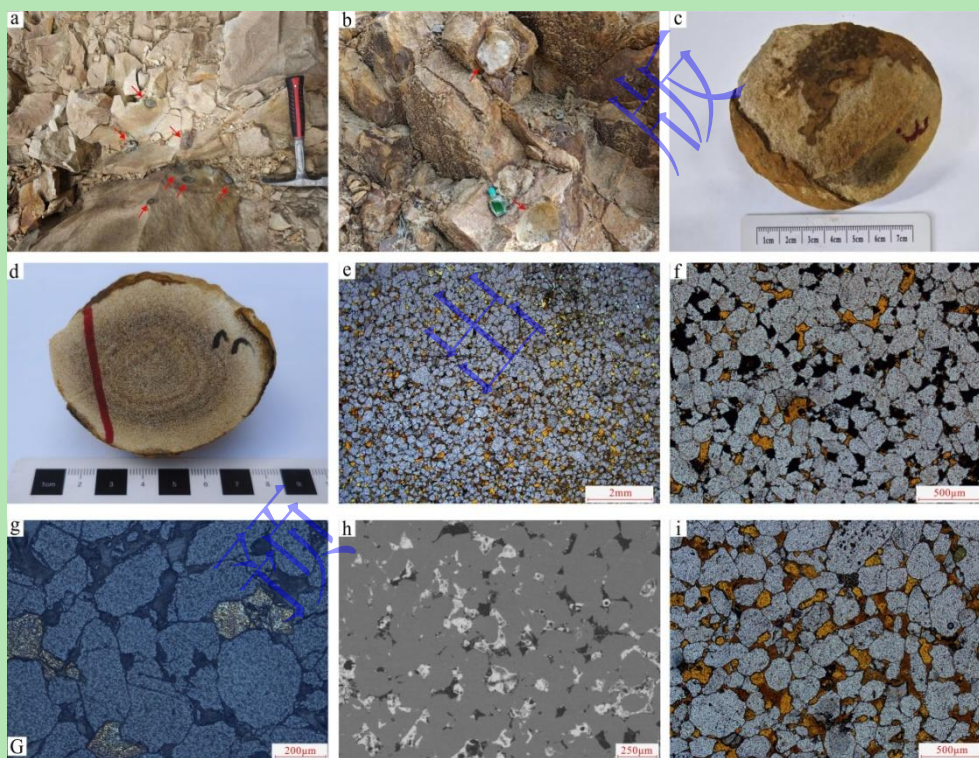


图 5 葛底坝剖面金宝石组结核宏微观照片

(a) 金宝石砂岩中结核顺层发育，金宝石组上部结核 C 小层；(b) 结核风化脱落后留下圆球形印模，结核 B 小层；(c) 单个结核，采自结核发育层段 B；(d) 单个结核横截面呈同心圈层状，采自结核 C 小层；(e) 结核内石英砂岩，孔隙发育，颗粒呈点接触—线接触，结核 B 小层；(f) 结核内石英颗粒间褐铁矿胶结，并被原油充填，结核 C 小层，单偏光；(g) 结核内石英颗粒间充填褐铁矿，反射光下呈金色，金宝石组上部结核 C 小层，反射光；(h) 图 f 对应的扫描电镜照片；(i) 结核内石英颗粒间充填原油，单偏光，结核 C 小层

Fig.5 Photographs of macroscopic and microscopic concretions in the Gediba section of the Jinguangshi Formation

(a) concretions in the Jinbaoshi sandstone developed along bedding, layer C in the upper part of the Jinbaoshi Formation; (b) a spherical concretion mold after weathering, layer B; (c) a single concretion, collected from the concretion layer B; (d) cross-section of a single

concretion showing concentric layering, collected from layer C; (e) quartz sandstone within the concretion, with well-developed pores and grains in point-to-point and line-to-line contact, nodule layer B, plane polarized light; (f) limonite cementation between quartz grains within the nodule, filled with crude oil, nodule layer C, PPL; (g) limonite filling between quartz grains within the nodule, presenting a golden color under reflected light, nodule layer C in the upper part of the Jinbaoshi Formation; (h) SEM image corresponding to Fig.5f; (i) crude oil infill between quartz grains within the nodule, nodule layer C, PPL

3.2 矿物微观形貌特征

对结核内外矿物微观形貌特征分析，石英颗粒形态逐渐自形，晶面平直（图 6a），石英颗粒周围见大量自生微晶石英生长（图 6b），结核及围岩胶结物类型主要为硅质，以石英次生加大形式出现，颗粒间常发育残余粒间孔，可见褐铁矿胶结，以针柱状单体形态及肾状集合体形态出现（图 6c, d）。此外，可见书页状高岭石晶体嵌入石英颗粒（图 6e）。部分孔隙中还发育沥青充填，镜下可见固体沥青，包覆于碎屑颗粒表面，内部常发育微纳米级气孔，圆形或椭圆形，呈气泡状（图 6f）。可见少部分丝状微生物残体（图 6g）及硅化细菌菌落，单个细菌形态以球形为主（图 6h），部分细菌聚集成团（图 6i）。

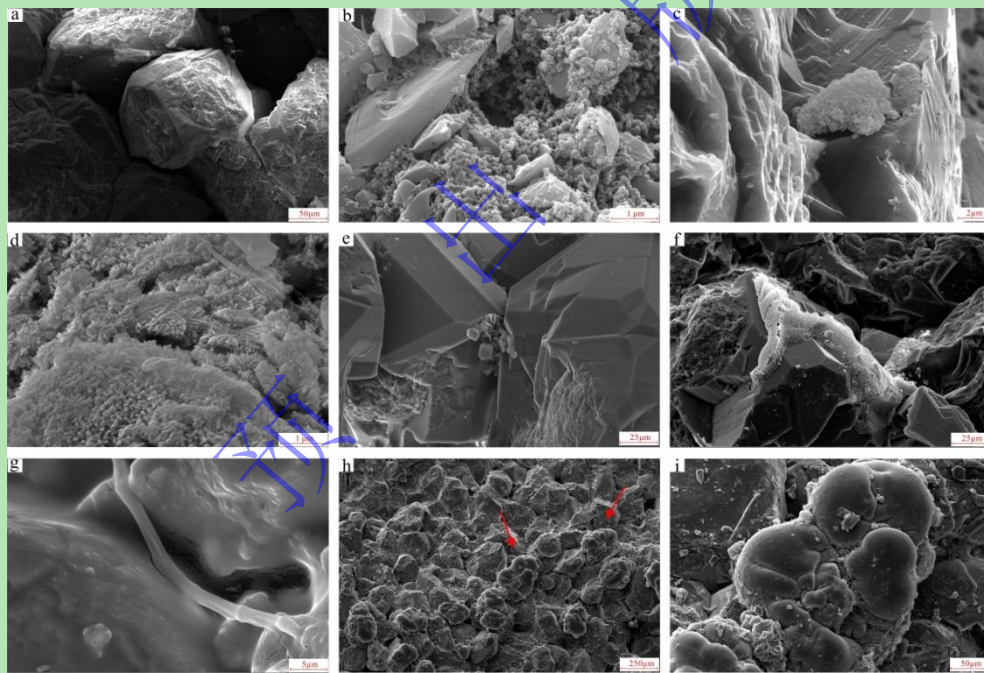


图 6 葛底坝剖面金宝石组结核及围岩扫描电镜照片

（a）硅质胶结，石英次生加大；（b）自生微晶石英颗粒；（c）褐铁矿，肾状集合体；（d）褐铁矿，单体针柱状；（e）高岭石，呈书页状嵌入石英颗粒；（f）固体沥青，可见圆形—椭圆形气孔，多孔；（g）丝状微生物残体；（h）硅化细菌菌落（箭头）；（i）对应图 h 中红色箭头所指，细菌聚集成团

Fig.6 SEM images of concretions and host rocks of the Jinbaoshi Formation in Gediba section

(a) siliceous cementation, overgrowth of quartz; (b) authigenic microcrystalline quartz grains; (c) limonite, reniform aggregates; (d) needle-like columnar single crystal of limonite; (e) kaolinite, sheet-like embedded in quartz grains; (f) solid bitumen, with visible circular-elliptical pores, porous; (g) filamentous microbial remains; (h) silicified bacterial colonies (red arrow); (i) bacteria aggregated into clusters, corresponding to the red arrow in Fig.6h

3.3 地球化学特征

利用扫描电镜和能谱分析 (SEM-EDAX), 对葛底坝剖面金宝石组结核内颗粒间充填物进行能谱分析, 发现充填物的化学成分主要为硅 (Si)、碳 (C) 和铁 (Fe) (图 7)。通过分类型统计四个结核样品的能谱数据, 共采集 11 个样品点, ①—③为硅质胶结物, 其中 O 的含量在 6.73%~23.70%, Si 的含量在 12.93%~15.49%, C 的含量在 24.12%~27.91%, Al 和 Fe 的含量可忽略不计; ④—⑥为铁质胶结物, 其中 O 的含量在 14.41%~27.13%, Fe 的含量在 34.34%~36.43%, Si 和 Al 的含量可忽略不计; ⑦—⑧为黏土矿物, 其中 O 的含量在 18.45%~3.77%, Si 的含量在 6.90%~15.05%, Al 的含量在 9.13%~15.05%, Fe 的含量可忽略不计; ⑨—⑪为原油, 其中 O 的含量在 5.36%~6.73%, C 的含量在 51.29%~52.58%, Si、Al 和 Fe 的含量可忽略不计 (表 1)。

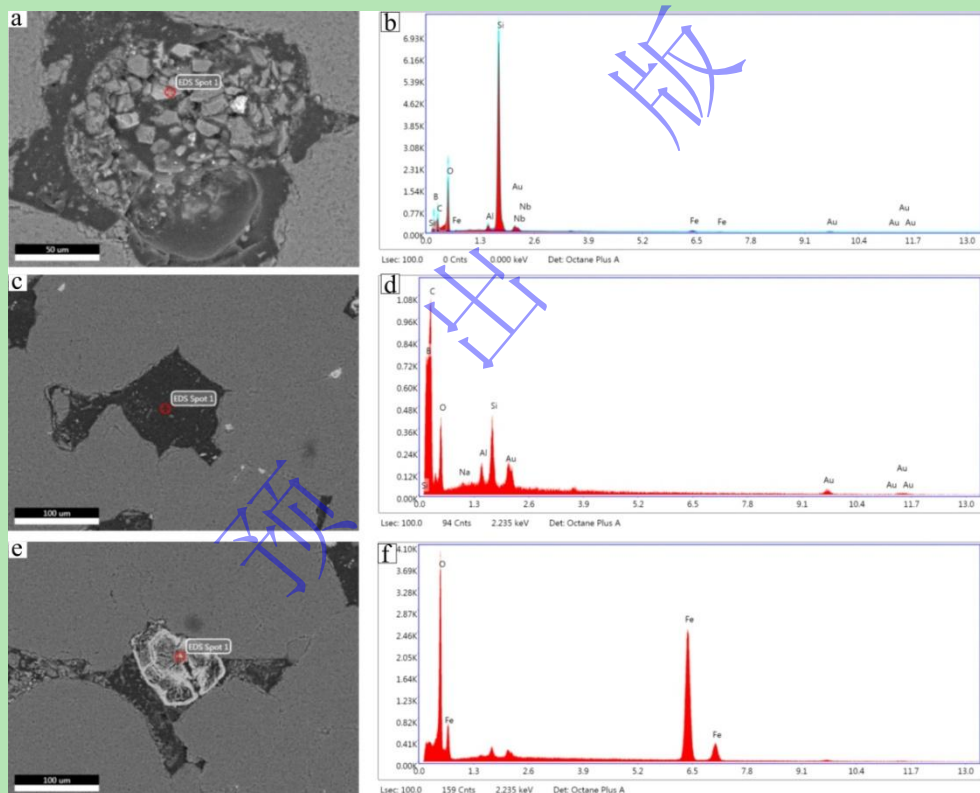


图 7 葛底坝剖面金宝石组结核能谱分析图

(a) 石英颗粒间的硅质胶结, 可见胶结物形态为粒状; (b) 对应图 a 圆点能谱分析, 显示硅 (Si) 的高峰; (c) 碎屑颗粒间充填的橘黄色原油; (d) 对应图 c 圆点能谱分析, 显示碳 (C) 的高峰; (e) 碎屑颗粒间充填的黑色金属矿物; (f) 对应图 e 圆点能谱分析, 化学成分主要为铁 (Fe) 和氧 (O)

Fig.7 Energy spectrum analysis diagram of concretions in the Jinbaoshi Formation in Gediba section
(a) siliceous cement between quartz grains, with cement exhibiting granular morphology; (b) EDAX analysis of dot in Fig.7a, showing high peak of silicon (Si); (c) crude oil filling the spaces between detrital grains; (d) EDAX analysis of the dot in Fig.7c, showing a high peak of carbon (C); (e) black metallic minerals filling the spaces between detrital grains; (f) EDAX analysis of the dot in Fig.7e, showing high peaks of iron (Fe) and oxygen (O)

表 1 结核元素含量表

Table 1 Element content of concretion

类型	样品点	O/%	Si/%	Al/%	Fe/%	C/%
硅质胶结物	①	23.70	15.49	0.78	0.00	27.91
	②	6.73	12.93	0.37	0.00	25.84
	③	17.40	14.78	0.47	0.57	24.12
	④	27.13	0.68	0.39	34.34	0
铁质胶结物	⑤	14.41	0.63	0.24	36.43	14.42
	⑥	22.94	0.47	0.14	35.88	0
	⑦	23.77	15.05	10.68	1.90	0
黏土矿物胶结	⑧	18.45	6.90	9.13	0	20.58
	⑨	5.36	0.28	0	0	52.58
	⑩	5.75	1.01	0.36	0.00	51.29
原油	⑪	6.73	0.26	0.13	0.00	52.10

4 讨论

4.1 砂岩中穹窿构造的成因

川西北地区葛底坝剖面金宝石组石英砂岩地层中发育数层砂岩结核，该类结核规模不大，呈椭球—球形，表面多见褐色铁质环边，在偏光显微镜下，结核以硅质胶结为主，铁质胶结次之，孔隙度大于砂岩围岩（结核胶结物较围岩更多），砂岩中可见到生物扰动构造，扫描电镜下观察到丝状微生物残体和硅化细菌菌落。同时在结核发育层段可见底平顶凸的穹窿构造（图 8a），穹窿中暗色纹层与浅色纹层互层状产出，形态不规则，形似叠层石（图 8b）。

前人研究发现在浅海砂岩中可发育与有机质分解有关的穹窿构造，作为一种特殊的层理构造在印度中元古代 Chorhat 砂岩（Sarkar *et al.*, 2006, 2008）和澳大利亚西北部金伯利地区埃迪卡拉纪冰期后的 Yurabi 砂岩（Lan and Chen, 2012）中均有所报道。这类层内穹窿发育于均质石英砂岩中，其物质成分单一全部为石英碎屑颗粒，可排除由差异负载导致的成岩压实作用成因，同时，其所具备的双凸形态和均一成分也区别于脱水构造（Lan and Chen, 2012）。穹窿表面缺少放射状条纹和凹陷构造，表明这些穹窿并非由单纯物理作用形成的疱状结构（Dormbos *et al.*, 2007）。因此，碎屑岩中的穹窿构造多被认为是由有机质（微生物/细菌）介导形成的（Schieber, 2004；郑伟等, 2016；邢智峰等, 2020）。

与碳酸盐岩沉积环境相比，关于硅质碎屑环境中微生物席诱导矿物沉淀的研究相对较少。在碳酸盐岩沉积环境中，微生物席（microbial mats）主要通过直接促进方解石矿物沉淀从而加速碳酸盐岩的形成；而在硅质碎屑环境中，微生物可在砂质沉积物表面定殖，尤其是在沉积速率足够低的情况下（Schieber, 2007；Cuadrado *et al.*, 2012），如索尼亚砂岩在沉积间

歇期微生物席生长旺盛 (Sarkar *et al.*, 2008), 有机物质在早成岩阶段很容易被微生物分解并产生 CO_2 、 CH_4 和 H_2S 等气体 (Logan *et al.*, 1974; Skyring *et al.*, 1989)。对于厚度较大且水平连续的微生物席, 有机质分解所产生的气体将有助于形成富氧—缺氧的边界, 随着气体不断积累, 当蒸汽压力 (V_p) 超过上覆沉积物的静水压力 (P_w) 时, 气体将顺着流体通道从较深处的富有机质沉积物中向上逃逸, 在地表处, 微生物黏液组织会阻碍气体向空气或水体中逸散, 从而导致在沉积物表层向上隆起形成穹隆构造 (Lan and Chen, 2012) (图 8c)。图 8c 所示的穹隆构造形成过程引用自 Gerdes *et al.* (1993) 的经典研究, 其“微生物席分解产气—压力驱动隆起”的核心逻辑, 为本次研究微生物席参与成岩的推论提供了关键理论支撑。

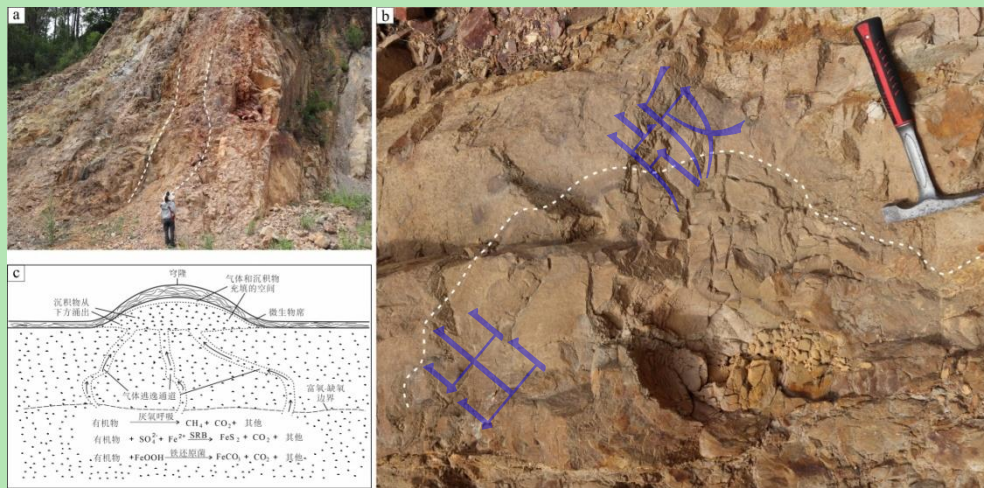


图 8 野外穹隆构造特征及穹隆构造形成过程

(a) 四川盆地西北部葛底坝剖面金宝石组穹隆构造具有底平顶凸的宏观特征, 远景, 白色线框所示; (b) 金宝石组穹隆构造中可见暗色纹层和浅色纹层向上隆起, 且形态似叠层石, 近景; (c) 穹隆构造形成过程 (据 Gerdes *et al.*, 1993 修改)

Fig.8 Field characteristics and the formation process of dome structures in the Jinbaoshi Formation in Gediba section

(a) macroscopic characteristics of dome structure in the Jinbaoshi Formation, distant view, indicated by the white line; (b) close view of dark laminae and light laminae are observed arching upward in the dome structure, resembling stromatolites in form, indicated by the white line; (c) formation process of dome structures (modified from Gerdes *et al.*, 1993)

4.2 金宝石组砂岩结核成因

在上述砂岩穹隆构造形成过程中, 当微生物席厚度不足或者在横向上不连续时, 所产生的气体压力 (V_p) 未超过静水压力 (P_w), 导致气体不足以通过垂直通道向上排出, 但可造成局部沉积物中颗粒排列疏松 (sediment rarefaction zone, SRZ), 并且由于气体较高的相对渗透率, 孔隙中的水将被排出。这就导致在相邻沉积物中孔隙水压力 ($P_p = P_w + \delta P_w$) 增加, 沉积物加速固结成岩。这一观点由 Singh *et al.* (2013) 提出, 在印度拉贾斯坦邦焦特

布尔镇地区的索尼亚砂岩中，砂岩中结核的孔隙度（表现为高胶结物含量）高于围岩，表明颗粒稀疏化导致局部孔隙度增加。由微生物席产生的气体压力（ V_p ）虽然足够高可以导致颗粒稀疏化，但未达到突破静水压力（ P_w ）排出的临界值，因此不足以造成气体向上垂直逃逸形成前文所述穹窿构造。

硅质碎屑颗粒沉积时受微生物席影响，往往会被有机质和微生物分泌的胞外聚合物（EPS）包裹（Schieber *et al.*, 2007），进入埋藏后，有机质被微生物分解过程中，除硫酸盐还原反应生成黄铁矿（ FeS_2 ）外，异化铁还原作用（ Fe^{3+} 被有机质还原为 Fe^{2+} ）可进一步促进 Fe^{2+} 与孔隙水中 HCO_3^- 结合形成菱铁矿（ FeCO_3 ）（张璐，2014），共同参与结核中铁质胶结。这些矿物在后期抬升至地表或受地下水渗透时易被氧化，导致碎屑颗粒周围出现暗红色铁质条纹以及结核砂岩中出现氧化铁团块（Garlick, 1988; Schieber, 1999; Banerjee and Jeevankumar, 2005; Banerjee *et al.*, 2006a; Schieber *et al.*, 2007; Samanta *et al.*, 2011）。这类特征常被认为是微生物席生长的标志，如美国蒙大拿州贝尔特群雷维特层（Garlick, 1988; Schieber *et al.*, 2007）、印度温德亚群 Chorhat 砂岩层（Sarkar *et al.*, 2006），印度焦特布尔群元古代 Sonia 砂岩层（Samanta *et al.*, 2011）。

由微生物席导致局部颗粒稀疏形成的沉积物稀疏区，其内部常发生二氧化硅胶结，且胶结物含量明显高于围岩（Singh *et al.*, 2013）。Siever（1962）关于 0 °C~200 °C 温度区间内无定形二氧化硅与石英相平衡关系的研究表明，在低温条件下，由于无定形二氧化硅的亚稳态平衡特性以及石英结晶过程受阻，二氧化硅会以隐晶质形式沉淀析出，若沉积物中同时存在石英与无定形二氧化硅，理论上无定形二氧化硅会逐渐溶解而石英将发生沉淀。Emery and Rittenberg（1952）提出硅质可吸附有机质，吸附在硅质表面的有机质会抑制硅质溶蚀，当硅质表面存在有机物时，这类物质会阻止硅质与周围水体达成平衡，上述溶解—沉淀过程便无法实现。

根据本文能谱分析中检测到的碳（C）、铁（Fe）高峰以及碎屑颗粒周围铁质条纹的普遍发育，证明浅层埋藏成岩阶段存在相对富集的有机物，以微生物席的形式出现。有机物通过以下两种方式促进硅质沉淀与早期胶结：①在浅层埋藏阶段发生降解作用，生成 CO_2 、 CH_4 等气体，导致孔隙水 pH 值（可能低于 7）降低，从而抑制二氧化硅溶解；②通过提供局部晶种或成核模板，定向引导硅质矿物结晶生长（Knoll, 1985; Simonson, 1987）。在埋藏初期，无定形二氧化硅沿碎屑颗粒边缘胶结，使砂岩局部固结，砂岩中早期固结的部分

在持续埋藏过程中抵抗压实作用，而其余未固结部分则发生显著压实，这就是为什么结核内石英颗粒以点接触为主，而砂岩围岩中以线、面接触（常呈缝合状）结构的普遍发育。

金宝石组砂岩中的结核因早期局部固结形成，这与浅埋藏阶段微生物席分解导致的无定形二氧化硅胶结密切相关，这一推论与成岩阶段结核的形成是由于含硅水溶液的次生硅质胶结相悖。事实上，在碳酸盐沉积物海底成岩过程中，早期胶结作用和硬底构造的形成报道较多（Banerjee *et al.*, 2005），而在硅质碎屑沉积物的成岩历史中，早期胶结作用未被充分重视（Singh *et al.*, 2013）。尽管已有实验研究表明有机质的存在在低温范围内对硅的溶解和沉淀起着重要作用（Siever, 1962; Knoll, 1985; Simonson, 1987），但是关于有机质在砂岩硅质胶结过程中的作用及其对结核形成的影响，目前还缺少详细的研究和记录。

综合矿物岩石学分析和 SEM-EDAX 分析，本文针对川西北地区金宝石组石英砂岩中的结核提出一种新的成因模式，金宝石组沉积期研究区位于滨海环境，沉积物表面伴生了微生物席（图 9a），进入浅埋藏环境，微生物分解排气造成沉积物表面形成了小规模的穹窿构造（图 9b），当微生物席厚度不足且横向不连续时，在埋藏分解过程中所产生的蒸汽压力不足以克服静水压力向上排出，将造成局部石英碎屑颗粒稀疏化（图 9b），推动孔隙水排出，并通过形成局部缺氧环境来促进无定形二氧化硅的沉淀，同时微生物还进一步导致菱铁矿的胶结（图 9c），在后期抬升至地表后发生氧化造成结核表面发育褐色氧化铁环边（图 9d）。

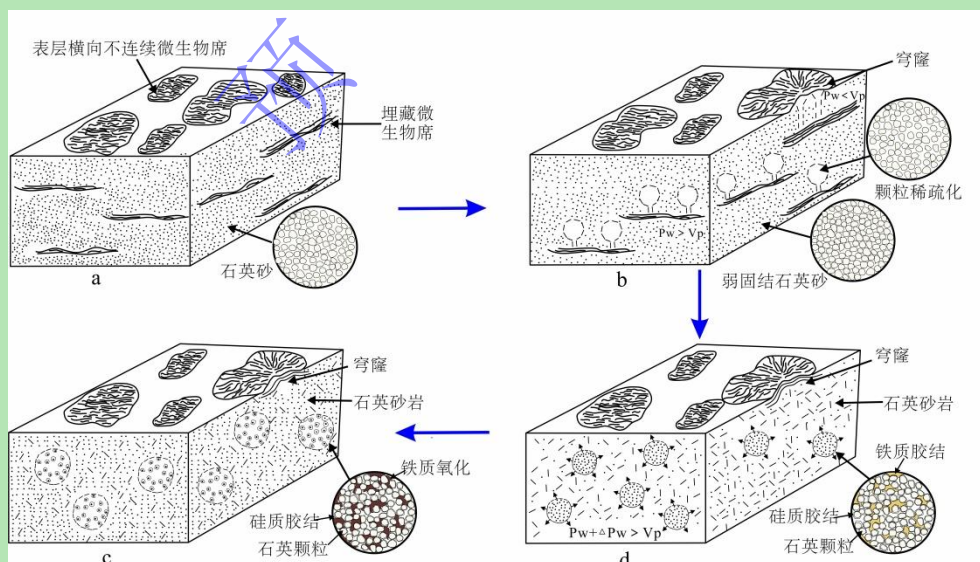


图9 川西北葛底坝剖面金宝石组结核成因模式图（据 Singh *et al.*, 2013 修改）

（a）沉积物表面和内部均存在横向不连续的微生物席；（b）埋藏的微生物席分解产生蒸汽压力（ V_p ），部分蒸汽压力大于沉积物静水压力导致蒸汽向上逃逸形成小型穹窿构造，但多数微生物席所产生的蒸汽压力强度低于静水压力（ P_w ），气体不能排出导致局部颗粒稀疏化；（c）气体的相对渗透率较高，将孔隙水排出沉积物稀疏区（SRZ），高压使沉积物稀疏区（SRZ）

的 pH 值降低，促进硅质胶结；（d）由于持续压实作用，沉积物稀疏区（SRZ）固结并形成结核

Fig.9 Genetic model of concretions in the Gediba section of the Jinbaoshi Formation, northwestern Sichuan
(modified from Singh *et al.*, 2013)

(a) laterally discontinuous microbial mats exist both on the surface and within the sediment; (b) decomposition of buried microbial mats generates vapor pressure (Vp). When the vapor pressure exceeds the sediment hydrostatic pressure, it leads to upward vapor escape, forming small dome structures. However, in most cases, the vapor pressure generated by microbial mats is lower than the hydrostatic pressure (P_w), preventing gas escape and resulting in localized particle sparseness; (c) the relatively high permeability of gas expels pore water from the sediment rarefaction zone (SRZ). The high gas pressure lowers the pH in the SRZ, promoting silica cementation; (d) the SRZ consolidates and forms concretions due to continuous compaction

4.3 油气地质意义

川西北地区葛底坝剖面中泥盆统金宝石组为滨岸沉积环境，其中的结核是在浅埋藏阶段成岩早期胶结过程中形成的，以硅质胶结为主，次为铁质胶结，偶见高岭石和钙质胶结，石英颗粒间的残余孔隙常充填原油。金宝石组沉积早期海水退去，海平面间歇性下降，古陆出露地表并遭受风化剥蚀，产生大量陆源碎屑，砂质供给充足，在滨岸环境中沉积了石英砂岩，颗粒分选好、磨圆中等，成分及结构成熟度均较高，以颗粒支撑结构为主，反映相对高能的沉积水体能量和较高的原始孔隙度。

沉积后，微生物席分解产生 CO_2 、 CH_4 、 H_2S 等气体，并形成菱铁矿（ FeCO_3 ）、黄铁矿（ FeS_2 ）等早期胶结物，气体的生成使孔隙水 pH 值降低，抑制了二氧化硅溶解，导致无定形二氧化硅以胶结物形式出现，在后续埋藏过程中抵抗压实作用，保持球状形态，抬升地表后遭受氧化导致球状结核表面发育褐红色氧化铁环边（Singh *et al.*, 2013）。在此过程中硅质胶结和铁质胶结对砂岩储层的孔隙结构和渗透性具有重要的影响，早期胶结导致石英砂岩原始孔隙减少，降低储层的渗透性，但埋藏后期由于抗压实作用避免孔隙度减少进而保存了孔隙。在金宝石组局部石英砂岩中，可见黑色炭质斑点，且孔隙内还残留原油，说明金宝石组结核发育层段具备储层条件，可作为潜在的油气勘探接替层系。

5 结论

（1）葛底坝剖面中泥盆统金宝石组结核中石英颗粒粒度、分选性、磨圆度、结构等与石英砂岩基本一致，但孔隙度明显高于石英砂岩且多被胶结，胶结物类型主要为硅质环边胶结，次为氧化铁胶结，同时可见高岭石胶结，残余孔隙中见原油充填及沥青残余。

（2）金宝石组结核发育层段石英砂岩中可见小型穹窿构造及生物扰动现象，显微镜下见丝状微生物残体和硅化细菌菌落，表明该套地层沉积时生物活动较为频繁。

（3）有机质分解产生蒸汽向上排出形成部分小型穹窿构造，当微生物席厚度不足所产

生的气体较少难以向上排出时,将导致局部碎屑颗粒稀疏化并发生早期无定形二氧化硅沿碎屑颗粒边缘胶结,使砂岩局部固结,在后续埋藏过程中抵抗压实作用,保持球状外部形态,埋藏期微生物进一步导致铁质胶结,抬升地表遭受氧化后最终呈褐色结核。

参考文献 (References)

- 陈健, 李洋, 齐啸威, 等. 2024. 安徽巢湖凤凰山栖霞组臭灰岩段黄铁矿结核的地球化学[J]. 地质学报, 98(8): 2486-2498. [Chen Jian, Li Yang, Qi Xiaowei, et al. 2024. Geochemistry of nodular pyrites occurred in the odorous limestone of the Early Permian Qixia Formation from Fenghuang Hill of Chaohu city, Anhui province[J]. Acta Geologica Sinica, 98(8): 2486-2498.]
- 樊婷婷, 柳益群, 周鼎武, 等. 2023. 鄂尔多斯南缘长 7 油页岩中钙质结核成因探讨[J]. 沉积学报, 41(3): 932-944. [Fan Tingting, Liu Yiqun, Zhou Dingwu, et al. 2023. Genesis of calcareous concretions in Chang 7 oil shale, southern Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 932-944.]
- 冯春强. 2016. 川西北部地区泥盆系有利储集相带预测[D]. 成都: 西南石油大学. [Feng Chunqiang. 2016. Prediction of favorable reservoir facies belts of the Devonian system in the northwestern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University.]
- 黄铨铮, 陈睿倩, 商斐, 等. 2024. 白垩纪中期二氧化碳浓度波动及其古气候响应: 来自昌都盆地钙质结核的证据[J/OL]. 沉积学报, <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.107>. [Huang Chengzheng, Chen Ruiqian, Shang Fei, et al. 2024. Fluctuations of carbon dioxide concentrations in the Middle Cretaceous and its paleoclimate response: Evidence from paleosol carbonates in Qamdo Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.107>.]
- 梁天. 2024. 北秦岭南召盆地上三叠统钙质结核成因及其地质意义[D]. 焦作: 河南理工大学. [Liang Tian. 2024. The genesis and geological significance of the Upper Triassic calcareous concretions in the Nanzhao Basin, North Qinling[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University.]
- 刘超, 梁天, 刘萧萧, 等. 2024. 海相沉积岩中钙质结核成因综述[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 43(1): 51-60. [Liu Chao, Liang Tian, Liu Xiaoxiao, et al. 2024. Origin of calcareous concretions in marine sedimentary rocks[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 43(1): 51-60.]
- 刘红光, 刘波. 2017. 显生宙碳酸盐岩中燧石结核的几种成因模式[J]. 地质通报, 36(9): 1635-1644. [Liu Hongguang, Liu Bo. 2017. Several genetic models of nodular chert hosted in Phanerozoic carbonate[J]. Geological Bulletin of China, 36(9): 1635-1644.]
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 1993. 内蒙古海拉尔盆地演化研究[J]. 成都地质学院学报, 20(2): 78-87. [Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui, et al. 1993. Studying the evolution of the Hailaer Basin, Neimenggu[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 20(2): 78-87.]
- 刘新宇, 颜佳新. 2007. 华南地区二叠纪栖霞组燧石结核成因研究及其地质意义[J]. 沉积学报, 25(5): 730-736. [Liu Xinyu, Yan Jiaxin. 2007. Nodular chert of the Permian Chihhsia Formation from South China and its geological implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(5): 730-736.]
- 龙学明. 1991. 龙门山中北段地史发展的若干问题[J]. 成都地质学院学报, 18(1): 8-16. [Long Xueming. 1991. Several questions of geochronic evolution in the mid-northern segment of Longmenshan mountains[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 18(1): 8-16.]
- 庞谦, 李凌, 胡广, 等. 2017. 川北地区下寒武统筇竹寺组钙质结核特征及成因机制[J]. 沉积学报, 35(4): 681-690. [Pang Qian, Li Ling, Hu Guang, et al. 2017. Characteristics and genetic mechanism of calcareous concretions in the Early Cambrian Qiongzhusi Formation of northern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(4): 681-690.]
- 秦凤蕊, 季少聪, 巴俊杰. 2024. 页岩中结核类型及成因研究[J]. 中国矿业, 33(S1): 631-633. [Qin Fengrui, Ji Shaocong, Ba Junjie. 2024. Study on the types and genesis of nodules in shale[J]. China Mining Magazine, 33(S1): 631-633.]
- 王东东, 胡鸿畅, 毛强, 等. 2024. 山东淄博地区太原组菱铁质结核成因及古环境意义[J]. 古地理学报, 26(5): 1185-1200. [Wang Dongdong, Hu Hongchang, Mao Qiang, et al. 2024. Genesis and palaeoenvironmental significance of siderite nodules in the Taiyuan

- Formation, Zibo area of Shandong province, China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 26(5): 1185-1200.]
- 汪泽成, 赵文智, 彭红雨. 2002. 四川盆地复合含油气系统特征[J]. *石油勘探与开发*, 29(2): 26-28. [Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Peng Hongyu. 2002. Characteristics of multi-source petroleum systems in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 29(2): 26-28.]
- 邢智峰, 刘云龙, 付玉鑫, 等. 2020. 豫西鲁山中元古界云梦山组微生物成因沉积构造发育特征及古环境意义[J]. *沉积学报*, 38(1): 46-54. [Xing Zhifeng, Liu Yunlong, Fu Yuxin, et al. 2020. Characteristics of microbially induced sedimentary structures and their paleoenvironmental significance from the Mesoproterozoic Yunmengshan Formation in Lushan area, western Henan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 46-54.]
- 张东宇. 2022. 川西北泥盆纪地层特征与沉积演化[D]. 成都: 成都理工大学. [Zhang Dongyu. 2022. Devonian stratigraphic characteristics and sedimentary evolution in Northwest Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.]
- 张璐. 2014. 胶州湾沉积物中硫酸盐还原和铁异化还原的影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. [Zhang Lu. 2014. Study on factors influencing sulfate reduction and microbial iron reduction in Jiaozhou Bay sediment[D]. Qingdao: Ocean university of China.]
- 郑伟, 袁余洋, 邢智峰, 等. 2016. 鲁山地区中—新元古界汝阳群和洛峪群微生物席及其矿物显微构造特征[J]. *高校地质学报*, 22(2): 385-394. [Zheng Wei, Yuan Yuyang, Xing Zhifeng, et al. 2016. Microbial mats and mineral microstructure features of Meso-Neoproterozoic Ruyang and Luoyu Group in Lushan area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(2): 385-394.]
- Banerjee S, Jeevankumar S. 2005. Microbially originated wrinkle structures on sandstone and their stratigraphic context: Palaeoproterozoic Koldaha Shale, central India[J]. *Sedimentary Geology*, 176(1/2): 211-224.
- Banerjee S, Bhattacharya S K, Sarkar S. 2005. Facies, dissolution seams and stable isotope compositions of the Rohtas Limestone (Vindhyan Supergroup) in the Son valley area, central India[J]. *Journal of Earth System Science*, 114(1): 87-96.
- Banerjee S, Bhattacharya S K, Sarkar S. 2006a. Carbon and oxygen isotope compositions of the carbonate facies in the Vindhyan Supergroup, central India[J]. *Journal of Earth System Science*, 115(1): 113-134.
- Banerjee S, Jeevankumar S, Sanyal P, et al. 2006b. Stable isotope ratios and nodular limestone of the Proterozoic Rohtas Limestone, Vindhyan Basin, India[J]. *Carbonates and Evaporites*, 21(2): 133-143.
- Banerjee S, Jeevankumar S. 2007. Facies and depositional sequence of the Mesoproterozoic Rohtas Limestone: Eastern Son valley, Vindhyan Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(1): 82-92.
- Cuadrado D G, Carmona N B, Bournod C N. 2012. Mineral precipitation on modern siliciclastic tidal flats colonized by microbial mats[J]. *Sedimentary Geology*, 271-272: 58-66.
- Dornbos S Q, Noffke N, Hagadorn J W. 2007. Mat-decay features[M]//Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record. Amsterdam: Elsevier, 106-110.
- Emery K O, Rittenberg S C. 1952. Early diagenesis of California Basin sediments in relation to origin of oil[J]. *AAPG Bulletin*, 36(5): 735-806.
- Garlick W G. 1988. Algal mats, load structures, and synsedimentary sulfides in Revett quartzites of Montana and Idaho[J]. *Economic Geology*, 83(6): 1259-1278.
- Gerdes G, Claes M, Dunajtschik-Piewak K, et al. 1993. Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures[J]. *Facies*, 29(1): 61-74.
- Knoll A H. 1985. Exceptional preservation of photosynthetic organisms in silicified carbonates and silicified peats[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 311(1148): 111-122.
- Lan Z W, Chen Z Q. 2012. Exceptionally preserved microbially induced sedimentary structures from the Ediacaran post-glacial successions in the Kimberley region, northwestern Australia[J]. *Precambrian Research*, 200-203: 1-25.
- Logan B W, Hoffman P, Gebelein C D. 1974. Algal mats, cryptalgal fabrics, and structures, Hamelin Pool, western Australia[J]. *AAPG Memoir*, 22: 140-194.
- Molenaar N, Martinius A W. 1990. Origin of nodules in mixed siliciclastic-carbonate sandstones, the Lower Eocene Roda Sandstone member, southern Pyrenees, Spain[J]. *Sedimentary Geology*, 66(3/4): 277-293.

- Möller N K, Kvingan K. 1988. The genesis of nodular limestones in the Ordovician and Silurian of the Oslo Region (Norway)[J]. *Sedimentology*, 35(3): 405-420.
- Pettijohn F J. 2004. *Sedimentary rocks*[M]. 3rd ed. Washington, DC: CBS Publishers.
- Rahmani R A. 1970. Carbonate concretions in the Upper Cretaceous Cedar District Formation, British Columbia[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 18(2): 282-288.
- Samanta P, Mukhopadhyay S, Mondal A, et al. 2011. Microbial mat structures in profile: The Neoproterozoic Sonia Sandstone, Rajasthan, India[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2): 542-549.
- Sarkar S, Banerjee S, Samanta P, et al. 2006. Microbial mat induced sedimentary structures in siliciclastic sediments: Examples from the 1.6 Ga Chorhat Sandstone, Vindhyan Supergroup, M.P., India[J]. *Journal of Earth System Science*, 115(1): 49-60.
- Sarkar S, Bose P K, Samanta P, et al. 2008. Microbial mat mediated structures in the Ediacaran Sonia Sandstone, Rajasthan, India, and their implications for Proterozoic sedimentation[J]. *Precambrian Research*, 162(1/2): 248-263.
- Schieber J. 1999. Microbial mats in terrigenous clastics: The challenge of identification in the rock record[J]. *Palaos*, 14(1): 3-12.
- Schieber J. 2004. Microbial mats in the siliciclastic rock record: A summary of the diagnostic features[M]//Eriksson P G, Ahernmann W, Nelson D, et al. *The Precambrian earth: Tempos and events, developments in Precambrian geology*. Amsterdam: Elsevier, 663-673.
- Schieber J. 2007. Microbial mats on muddy substrates-examples of possible sedimentary features and underlying processes[M]//Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. *Atlas of microbial mat, features preserved within the clastic rock record*. Amsterdam: Elsevier, 117-134.
- Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. 2007. *Atlas of microbial mat features preserved within the siliciclastic rock record*[M]. Amsterdam: Elsevier, 311.
- Scotese C R. 2001. *Atlas of earth history*[M]. Arlington: PALEOMAP Project.
- Siever R. 1962. Silica solubility, 0°C - 200°C, and the diagenesis of siliceous sediments[J]. *The Journal of Geology*, 70(2): 127-150.
- Simonson B M. 1987. Early silica cementation and subsequent diagenesis in arenites from four Early Proterozoic iron formations of North America[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 57(3): 494-511.
- Singh A, Anand V, Pandey P, et al. 2013. Nodular features from Proterozoic Sonia Sandstone, Jodhpur Group, Rajasthan: A litho-biogenic perspective[J]. *Journal of Earth System Science*, 122(2): 309-320.
- Skyring G W, Lynch R M, Smith G D. 1989. Quantitative relationship between carbon, hydrogen and sulfur metabolism in cyanobacterial mats[M]//Cohen Y, Rosenberg E. *Microbial mats: Physiological ecology of benthic microbial communities*. Washington, DC: American Society of Microbiology, 170-179.
- Theakstone W H. 1981. Concretions in glacial sediments at Seglvatnet, Norway[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 51(1): 191-196.

Characteristics and Genesis Mechanism of Sandstone Concretions in the Middle Devonian Jinbaoshi Formation, Northwestern Sichuan Basin

YANG XueFei^{1,2}, LI ZhiMin³, TANG Hao^{1,2}, LIAO ZiChao^{1,2}, XIE GuoJing^{1,2}, ZHANG XuXin^{1,2}, ZHOU JiaTong^{1,2}, DU Yao⁴, HE Zhen^{1,2}

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

3. School of Resource and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42102190, 42102193; Natural Science Foundation of Sichuan Province, No. 2022NSFSC1105; National Science and Technology Major Project for New Oil and Gas Exploration and Development, No. 2025ZD1400402; Key Projects of Extracurricular Open Experiments for Undergraduates of Southwest Petroleum University, No. 2023KSZ02009, 2024KSZ02001

Corresponding author: YANG XueFei, E-mail: yangxf_swpu@163.com

4. Exploration Division of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, China

Abstract: [Objective] The origin of concretions in sedimentary rocks reveals the depositional environment and also serves as key evidence for studying diagenetic evolution, holding significant importance for research on pore evolution in sedimentary rocks. [Methods] This study focuses on the Devonian Jinbaoshi Formation in the Gediba section of the northwestern Sichuan Basin. The characteristics of concretions in the Jinbaoshi Formation were examined using detailed analysis of rock thin sections, scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), and their genetic mechanisms were explored. [Results] The quartz sandstone in the Jinbaoshi Formation of the Gediba section exhibits high maturity and well-developed pores, with numerous ellipsoidal brown to dark-brown sub-spherical concretions distributed along the bedding planes. Microscopic analysis reveals that the quartz grains within the concretions are consistent with the surrounding sandstone in terms of morphology, size, sorting, roundness and texture. Unlike in quartz sandstone, the quartz grains in the concretions are sparsely arranged, primarily in point contact, and are predominantly cemented by silica, followed by iron and clay minerals. Residual pores locally filled with crude oil were observed. The concretion-bearing intervals exhibit small-scale dome structures and bioturbation, with filamentous microbial remnants and silicified bacterial colonies identified under SEM. [Conclusions] Comprehensive analysis suggests that the formation of these concretions is closely related to microbial mats. Gases produced by the decomposition of organic matter migrated upward, forming dome structures on the sediment surface. When the microbial mats were too thin to produce sufficient gas for upward migration, localized sparse distribution of detrital grains occurred, accompanied by early siliceous and ferruginous cementation. These concretions resisted compaction during subsequent burial processes, maintaining their spherical morphology, and turned brown due to oxidation after being uplifted to the surface. This study establishes a genetic evolution model of the concretions, which will provide an insight into the diagenetic evolution and pore structure adjustment of the quartz sandstone in the Jinbaoshi Formation, and which has important geological significance for hydrocarbon exploration.

Key words: northwestern Sichuan Basin; Jinbaoshi Formation; quartz sandstone; concretions; genetic mechanism