

引用格式: 许亚鑫, 罗连超, 周刚, 等. 2026. 泡沫绵层白云岩研究进展与展望[J/OL]. 沉积学报, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.005
Xu Yaxin, Luo Lianchao, Zhou Gang, et al. 2026. Advances and Prospects of Foam-Like Dolostone[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI:
10.14027/j.issn.1000-0550.2026.005
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.005 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.005

泡沫绵层白云岩研究进展与展望

许亚鑫^{1,2,3}, 罗连超^{1,2,3}, 周刚⁴, 文华国^{1,2,3}

1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室 (成都理工大学), 成都 610059
2. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室 (成都理工大学), 成都 610059
3. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059
4. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610041

摘要 【意义】泡沫绵层白云岩在我国两大油气盆地中广泛分布, 与微生物岩关系密切, 是重要的碳酸盐岩储层类型之一, 其形成机制和发育规律对微生物白云岩沉积学研究及油气勘探具有重要意义。【进展】近年来, 国内外学者围绕泡沫绵层白云岩的宏观组构特征、岩石学与矿物学特征、成因类型及沉积—成岩演化过程开展了大量研究, 提出了包括气泡钙化、微生物矿化以及碳酸盐颗粒泥晶化与后期溶蚀改造等多种成因假说。相关研究表明, 泡沫绵层白云岩在不同时空背景下具有一定的共性特征, 但其形成过程受沉积环境、微生物活动及早期成岩作用等多重因素的共同控制, 不同成因模式间仍缺乏统一认识。【结论与展望】在系统梳理前人研究成果的基础上, 从时空分布、岩石学与矿物学特征、分类体系、岩性组合序列及地球化学特征等方面, 对泡沫绵层白云岩的研究进展进行综合评述, 认为其可能并非单一成因产物, 而是在特定沉积环境中, 碳酸盐颗粒在微生物介导的建设性泥晶化作用与早期溶蚀作用共同影响下形成的复合型颗粒白云岩, 通常具有较好的储集性能。在此基础上, 进一步指出未来研究需在精细岩相学约束下引入高精度微区地球化学与显微结构分析手段, 系统解析其成因机制、成岩流体演化及其所记录的古环境信息, 为深化对古海洋环境演化的认识及油气资源勘探提供理论支持。

关键词 泡沫绵层白云岩; 沉积特征; 成因机制; 储层特征; 地球化学

第一作者 许亚鑫, 女, 1997 年出生, 博士研究生, 碳酸盐岩沉积学, E-mail: xuyaxin@stu.cdut.edu.cn

通信作者 罗连超, 男, 博士, 研究员, 碳酸盐岩沉积学, E-mail: luolianchao@cdut.edu.cn

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

在我国两大油气盆地的部分碳酸盐岩地层中, 泡沫绵层白云岩因其独特的组构特征和重要的油气地质意义而备受关注。前人研究认为, 泡沫绵层白云岩是一类具有泡沫结构的、非纹层状或凝块状的微生物白云岩 (Zhou *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2022)。在中国, 泡沫绵层白云岩自 20 世纪 80 年代被识别以来, 已在多套碳酸盐岩地层中被广泛报道。在早期对灯影组微生物白云岩的研究过程中, 相继提出“海绵状藻白云岩”“变环状藻白云岩”以及“绵层组构”等概念, 奠定了泡沫绵层白云岩研究的基础 (唐天福等, 1980; 薛耀松等, 1984;

收稿日期: 2025-10-29; 收修改稿日期: 2026-02-11

基金项目: 中石油天然气股份有限公司西南油气田分公司勘探研究院项目 (XNS 勘研院 JS2023-094)

张荫本等, 1996)。由于该类组构形态上多呈泡沫状、外观似海绵, 后续学者遂将其称为“泡沫绵层”, 并在研究中得到广泛使用(李朋威等, 2015a; 徐哲航等, 2020; 罗青云等, 2024; 刘凯铭等, 2025)。在时空分布上, 泡沫绵层白云岩主要发育于塔里木盆地上震旦统至下寒武统(Chen *et al.*, 2020; 魏天媛等, 2023; Li *et al.*, 2024)、四川盆地震旦系灯影组(Song *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2022; 夏茂龙等, 2024)以及中三叠统雷口坡组(刘树根等, 2016; 王鑫等, 2020; Wang *et al.*, 2023), 并与多种微生物白云岩共生。然而, 其组构特征又明显区别于同时期常见的叠层石白云岩、凝块石白云岩和藻纹层白云岩, 显示出独特的沉积学意义。

尽管已有研究普遍将泡沫绵层白云岩与微生物作用联系起来, 但其是否属于典型微生物组构, 以及微生物在其形成过程中的具体作用方式, 至今仍缺乏统一认识。早期学者提出过多种成因假说, 包括气泡的钙化、泡沫状蓝细菌形成的海绵状格架、肾形藻的有机矿化、泥晶套等(朱同兴和罗安屏, 1992; 黄新翠, 2012; 严威等, 2017; Wang *et al.*, 2023)。然而, 这些解释多停留在推测层面, 缺乏直接证据支持。近期, Han *et al.* (2024) 提出新的观点, 可能来源于碳酸盐颗粒的泥晶化以及后期选择性溶解, 从而形成建设性的泥晶包壳。李凌等(2025)则从原岩性质与成岩演化路径的角度认为, 其原岩为颗粒岩, 微生物钻孔形成泥晶套, 随后受大气淡水岩溶改造所形成。这些解释为泡沫绵层白云岩的成因提供了新的思路, 但由于缺乏对其矿物学及与有机相关的微观研究, 以及与气泡钙化或藻类化石的系统对比, 使得泥晶边的起源仍存在不确定性, 也限制了我们对微生物在泡沫绵层形成过程中的真实作用的认识。

泡沫绵层白云岩在油气勘探中具有重要意义。该类白云岩是一类重要的油气储集岩类型, 在四川盆地和塔里木盆地的重点勘探层系中都有发现, 如高磨—蓬莱地区(文佳, 2021; 张本健等, 2023; 刘凯铭等, 2025)与柯坪—巴楚地区(严威等, 2017; 刘禹等, 2022; Tang *et al.*, 2022b)。正因泡沫绵层白云岩具有重要的油气勘探价值, 其成因机制与发育规律已成为当前研究中亟待深入探讨的重要科学问题。深入研究泡沫绵层白云岩的形成过程, 不仅有助于丰富和深化对白云石化作用及微生物白云岩形成机理的认识, 还可为油气勘探与开发提供关键的理论支持。同时, 泡沫绵层白云岩中的泥晶边和亮晶白云石既保存了沉积时期的古环境和古海水化学信息, 也记录了成岩流体对白云石形成的影响, 因此对于揭示古海洋环境演化具有重要意义。

鉴于此, 本文在系统梳理前人研究成果的基础上, 从时空分布、岩石学与矿物学特征、分类、岩性组合序列以及地球化学等方面, 对泡沫绵层白云岩的研究现状进行全面总结, 探

讨其成因机制与形成过程，指出目前存在的主要问题，并对未来研究方向加以展望。旨在为泡沫绵层白云岩的成因研究提供系统化的综述和思考，推动其在基础地质和油气勘探领域的进一步发展与应用。

1 泡沫绵层白云岩时空分布

目前，已有大量学者对泡沫绵层白云岩进行了研究报道。本次研究调研了国内外微生物岩相关资料，开展了系统对比工作，发现泡沫绵层白云岩作为主要的储层岩石类型之一，与叠层石白云岩、凝块石白云岩等不同，其主要分布于我国的两大油气盆地（四川盆地和塔里木盆地，图 1a），江苏地区可见少量报道，国外地区未见相关文献报道。

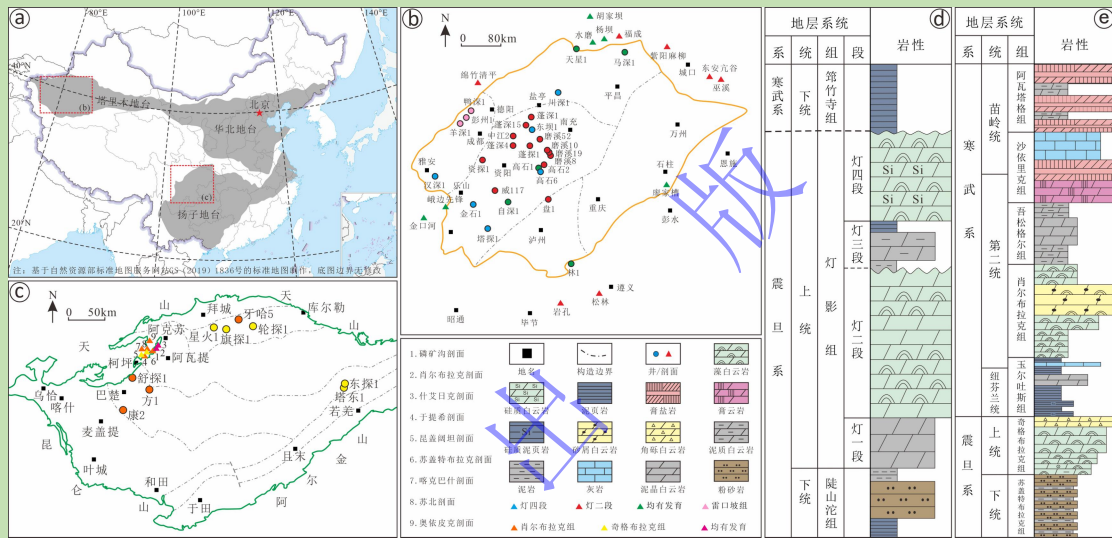


图 1 泡沫绵层白云岩时空分布

(a) 四川盆地及塔里木盆地地理位置（据潘桂棠等，2009 修改）；(b) 四川盆地泡沫绵层白云岩分布特征（据 Xu *et al.*, 2022 修改）；(c) 塔里木盆地泡沫绵层白云岩分布特征（据高孝巧，2018 修改）；(d) 四川盆地灯影组地层综合柱状图（据 Xu *et al.*, 2022 修改）；(e) 塔里木盆地西北部震旦系—寒武系地层综合柱状图（据 Zheng *et al.*, 2023 修改）
Fig.1 Temporal and spatial distribution of foam-like dolostone

(a) geographical locations of Sichuan and Tarim Basins (modified from Pan *et al.*, 2009); (b) distribution of foam-like dolostone within the Sichuan Basin (modified from Xu *et al.*, 2022); (c) distribution of foam-like dolostone within the Tarim Basin (modified from Gao, 2018); (d) comprehensive stratigraphic column of the Dengying Formation in the Sichuan Basin (modified from Xu *et al.*, 2022); (e) comprehensive stratigraphic column of the Ediacaran–Cambrian succession in the northwestern Tarim Basin (modified from Zheng *et al.*, 2023)

四川盆地位于扬子地台的西南部，是在上扬子克拉通基础上发展起来的大型多旋回叠合盆地。在新元古代埃迪卡拉纪灯影组时期，该区域是一个浅水碳酸盐岩台地，微生物岩发育广泛，泡沫绵层白云岩在台地内部及台地边缘均有发育，且主要发育在灯二段时期（图 1b, d）。灯四段微生物白云岩丰度减少，泡沫绵层白云岩发育占比相对减少。此外，三叠系雷口坡组也有少量报道（刘树根等，2016；余永强，2017；王鑫等，2020；Wang *et al.*, 2023）（图 1b）。

在塔里木盆地,泡沫绵层白云岩主要发育于上震旦统的奇格布拉克组的中上部及下寒武统的肖尔布拉克组上部(图 1c, e)。区域上,泡沫绵层白云岩在盆地西北部柯坪—巴楚地区最为富集,奇格布拉克组和肖尔布拉克组中均有发育;而在塔北、塔东地区,泡沫绵层白云岩主要见于奇格布拉克组地层之中。

2 泡沫绵层白云岩发育特征

2.1 岩石学特征

泡沫绵层白云岩颜色较浅,主要呈浅灰色—灰白色厚层状或块状产出,在野外肉眼通常难以分辨其特征。在部分区域及层位(如塔里木盆地柯坪地区的什艾日克剖面、肖尔布拉克剖面等),野外露头或手标本上可见大量针状的孔洞顺层发育(图 2a),断面呈蜂窝状结构(图 2b)。

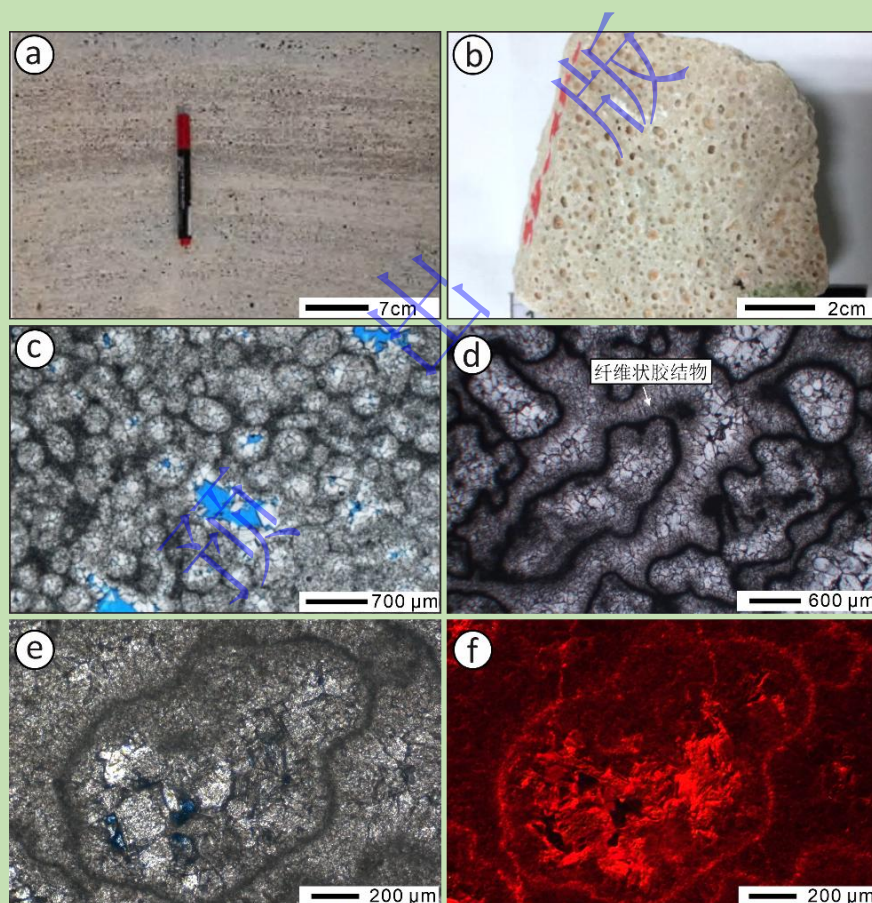


图 2 泡沫绵层白云岩岩石学特征

(a) 浅灰色泡沫绵层白云岩,顺层溶孔发育(据邓茜娅,2018);(b) 泡沫绵层白云岩断面呈蜂窝状结构(据穆亚飞,2019);(c) 泡沫绵层白云岩,泡沫体呈球形、椭圆形,发育粒内孔、晶间(溶)孔(据尚凯等,2025);(d) 泡沫绵层白云岩,泡沫体呈不规则花边,泥晶边外部可见纤维状胶结物,基质为粉晶白云石;(e) 泡沫绵层白云岩,粒内发育两期白云石,可见粒内溶孔;(f) 泡沫绵层白云岩,与 e 对应的阴极发光特征

Fig.2 Petrological characteristics of foam-like dolostone

(a) light gray foam-like dolostone with well-developed bedding-parallel dissolution pores (after Deng, 2018); (b) honeycomb-like texture (after Mu, 2019); (c) spherical to ellipsoidal foam bodies with intragranular and intercrystalline (dissolution) pores (after Shang *et al.*, 2025); (d) irregular, lace-like foam bodies; fibrous cements outside the micritic rims, and matrix of very fine crystalline dolomite; (e) two generations of dolomite within grains, with intragranular dissolution pores visible; (f) cathodoluminescence (CL) image corresponding to (e), showing luminescence of the foam-like dolostone

显微镜下显示其主要由大量密集发育的泡沫体所组成，单个泡沫大小不等，通常介于 0.05~0.5 mm，个别泡沫体可超过 1 mm。泡沫体形态多样，多呈球形、不规则椭圆形，少量呈长条形（图 2c, d）。单个的泡沫体主要由暗色的泥晶边和内部的孔隙或充填的白云石胶结物所组成，腔体外部的基质由泥—细晶白云石组成（图 2e），泥晶边外部可见纤维状胶结物发育（图 2d）。泡沫状腔体可以相互黏结形成多腔体或不规则花边状（图 2d），也可以孤立的存在于粉—细晶白云石基质中。泡沫体内的白云石多世代胶结，一世代为泥—粉晶白云石，二世代为粒状中—粗晶白云石，未充填部分则为泡沫绵层粒内孔（残余泡沫绵层体腔孔）（图 2e），部分可见石膏（冯琳等，2024）、沥青（梁锋等，2023）、石英（刘禹等，2022）充填。阴极发光下，泥晶边通常呈亮红色发光，粒内白云石的发光性不一致，泥—粉晶白云石主要呈暗红色，中—粗晶白云石呈亮红色（图 2e, f），少量可见环带状生长层理。

2.2 微观特征及分类

微观上，根据泡沫绵层泥晶边缘的形态和结构上的差异，可以将其分为 A~C 三种组构类型。A 型泡沫绵层具有等厚的泥晶边缘，厚 20~40 μm ，通常直径介于 0.2~0.5 mm（少数直径超过 1 mm），是泡沫绵层中最为常见的组构类型（图 3a）。泥晶边的粒内和粒外孔隙通常由亮晶白云石胶结，其形态变化多样，可见球形、椭圆形、长条形和不规则花边形。在 A 型组构中还发现一些复合状的泡沫绵层组分，其主要由泥晶边和内核两个部分所组成，泥晶边等厚，与 A 型相似，内核由 A 型或 B 型泡沫绵层所组成，直径介于 1.5~2.5 mm，部分可达 4 mm（图 3b）。B 型泡沫绵层与 A 型相比较为少见，但形态上与 A 型相似，通常较小（直径介于 0.1~0.3 mm），其粒内孔被亮晶白云石充填，粒间孔被泥晶白云石基质所充填，泥晶边缘与泥晶基质通常难以区分（图 3c）。C 型泡沫绵层较为少见，仅在部分剖面中偶尔出现，其泥晶边断续发育，难以区分粒内和粒间空间，孔隙主要由亮晶白云石胶结物充填，存在少量泥晶白云石基质（图 3d）。C 型组构所形成的泡沫绵层白云岩常与藻纹层白云岩互层。

在泡沫绵层白云岩的泥晶边中，发育多种的微量组分，根据其形态可分为片状、纤维状、雪花状、板条状和板片状（图 3e~i）。其中片状和纤维状通常介于 5~40 μm ，仅部分矿化，具有很高的 C、O 峰值，它们常见于 A 型泡沫绵层组构中。雪花状组分是含铁的镁钙碳酸盐，由多根细长的圆柱组成，通常长 2~4 μm ，能谱显示具有较高浓度的 C、O、Ca、Mg，

以及相对较低的 Fe 含量。板条状和板片状的硅酸盐—碳酸盐混合物较为常见，前者长 10~20 μm ，而后者长宽 4~6 μm ，在 A、B 组构类型中均有所发现。

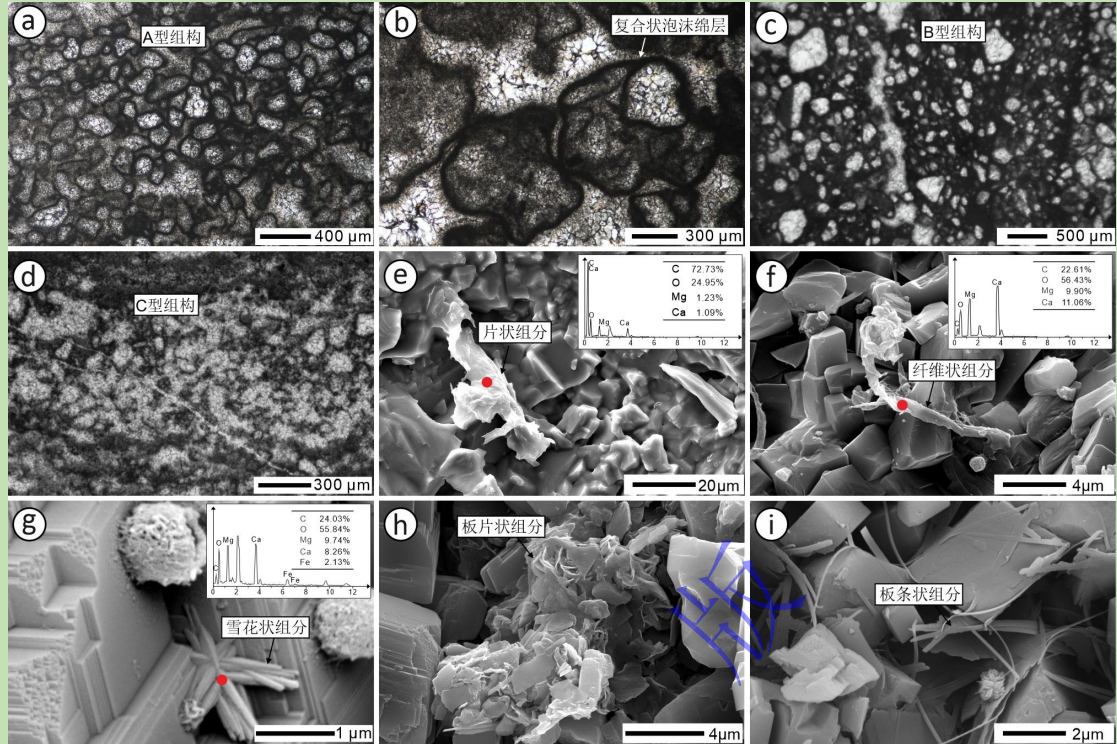


图 3 泡沫绵层组构分类及微量组分特征

(a) A 型泡沫绵层组构；(b) 复合状泡沫绵层组构；(c) B 型泡沫绵层组构；(d) C 型泡沫绵层组构（据 Xu *et al.*, 2025）；(e) 片状微量组分（据 Xu *et al.*, 2025）；(f) 纤维状微量组分；(g) 球形和雪花状微量组分；(h) 板片状微量组分（据 Xu *et al.*, 2025）；(i) 板条状微量组分（据 Xu *et al.*, 2025）

Fig.3 Classification of foam-like fabrics and characteristics of trace materials in foam-like dolostone

(a) Type A foam-like fabric; (b) composite foam-like component; (c) Type B foam-like fabric; (d) Type C foam-like fabric (after Xu *et al.*, 2025); (e) lamellar trace material (after Xu *et al.*, 2025); (f) fibrous trace material; (g) snowflake-like trace material; (h) plate-like trace material (after Xu *et al.*, 2025); (i) slat-like trace material (after Xu *et al.*, 2025)

前人已对泡沫绵层白云岩的分类开展了大量研究，通常根据泡沫体的形态特征、组构差异、接触方式的不同、基质的差异等划分泡沫绵层白云岩的类型。此前，Riding (2000) 将微生物碳酸盐岩划分为叠层石、凝块石、树枝石、均一石 4 大类。因此，基于这一分类标准，部分学者根据泡沫绵层的镜下形态特征及发育位置，将其归于凝块石（胡安平等，2021；齐哲，2021）或叠层石白云岩中（宋金民等，2014），认为泡沫绵层构成了叠层石的格架（李安鹏，2022）。此外，由于泡沫绵层形态特殊，与砂屑颗粒高度相似，有学者将其归属于颗粒白云岩，称其为包壳颗粒白云岩（Han *et al.*, 2024），是微生物诱导组构和粒内溶蚀共同作用的结果（表 1）。

然而，大部分学者是将泡沫绵层作为一种单独的岩石结构类型，与叠层石白云岩、凝块石白云岩、核形石白云岩、藻纹层白云岩等并列（Zhou *et al.*, 2020；文华国等，2024；刘

凯铭等, 2025)。根据泡沫体的形态特征和接触方式, 可将泡沫绵层白云岩分为 4 种类型 (李朋威等, 2015a, 2015b; 李凌等, 2025): (1) 蜂窝状泡沫绵层白云岩: 泡沫体多独立分布, 呈点接触, 部分呈线接触, 泡沫体多呈椭圆形, 未发生明显变形, 且相对较小, 但较为均一, 长轴直径介于 0.05~0.5 mm, 泡沫体之间的胶结物呈暗色; (2) 格架状泡沫绵层白云岩: 也称为不规则状泡沫绵层白云岩, 泡沫体主要呈线面接触, 泡沫体发生变形呈不规则状, 其长轴直径相对较大, 多分布在 0.5~1.5 mm, 泡沫体互相黏结形状似微生物格架; (3) 花边状泡沫绵层白云岩: 也被称为“葡萄花边构造”, 边缘由至少 2 层明暗相间的同心纹层所组成, 泡沫体腔较大, 呈椭圆形或长条形, 长轴直径最大约 5~7.5 mm, 该种类型发育较少, 仅出现在微生物岩段顶部; (4) “似叶状体”泡沫绵层岩: 呈孤立状分布, 边缘可见包覆结构。Han *et al.* (2024) 根据泡沫体与固结基质的关系将泡沫绵层分为 3 种类型: 未胶结的包壳颗粒、凝块胶结的包壳颗粒、纹层胶结的包壳颗粒, 分别由亮晶白云石或纤维状白云石、泥晶凝块组构、连续的波状有机质纹层所胶结、连接。

表 1 泡沫绵层白云岩分类

Table 1 Classification of foam-like dolostone

分类标准	名称	来源
泡沫体的形态特征和接触方式	蜂窝状泡沫绵层白云岩	李朋威等, 2015a, 2015b
	不规则状泡沫绵层白云岩 (像蜂窝)	Chen <i>et al.</i> , 2020
泡沫体与固结基质的关系	格架状泡沫绵层白云岩	李凌等, 2025
	未胶结包壳颗粒	Han <i>et al.</i> , 2024
	凝块胶结的包壳颗粒	
	纹层胶结的包壳颗粒	

2.3 岩性组合序列特征

泡沫绵层白云岩发育时期, 微生物岩大量发育, 通过调研总结发现, 泡沫绵层白云岩常与凝块石白云岩、叠层石白云岩、藻纹层白云岩、砂屑白云岩、泥—粉晶及细晶白云岩等共同发育。泥—粉晶白云岩、藻纹层白云岩多发育于泡沫绵层白云岩底部, 叠层石白云岩、凝块石白云岩、砂屑白云岩常与泡沫绵层白云岩间互发育, 顶部可见晶粒白云岩、砂屑白云岩等发育。其沉积序列类型主要有 8 种 (图 4)。

(1) 凝块石白云岩与泡沫绵层白云岩互层 (LA1): 该类岩性组合主要呈中—厚层状发育, 单层厚 1~6 m, 多见毫米—厘米级顺层发育的花边构造, 顶部发育黏结颗粒白云岩。以塔里木盆地奇格布拉克组发育于内缓坡环境的昆盖阔坦剖面、西沟剖面为典型, 其组合序列

指示了潮下带高能环境特征（郑剑锋等，2021a，2021b）。

(2) 砂屑白云岩与泡沫绵层白云岩互层 (LA2)：该沉积序列单层厚度差异较大，介于 0.25~5.5 m，中间可见薄层凝块石白云岩或泥—粉晶白云岩发育，以四川盆地灯影组岩孔剖面为代表，指示其形成受海平面多期快速变化影响，水体环境能量较高（Xu *et al.*, 2025）。

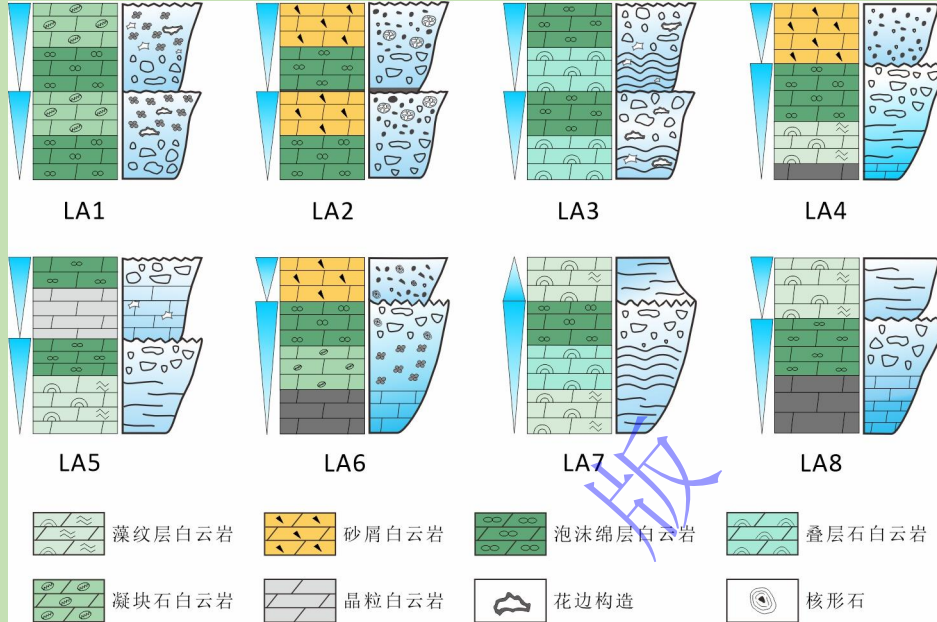


图 4 泡沫绵层白云岩岩性组合类型

Fig.4 Lithologic association types of foam-like dolostone

(3) 叠层石白云岩与泡沫绵层白云岩互层 (LA3)：塔里木盆地上震旦统什艾日克剖面作为典型剖面（李朋威等，2015a），其中叠层石白云岩主要呈层状，近水平或微波状，少量呈丘状，中间可见花边构造，部分学者认为这一组合主要发育于水动力较强的潮坪环境（李朋威等，2015a，2015b），而部分学者认为这一组合反映水体能量较高的潮下带环境（刘伟等，2021）。

(4) 泥粉晶白云岩/藻纹层白云岩—泡沫绵层白云岩—砂屑白云岩 (LA4)：该沉积序列主要呈中厚层发育，单层厚 0.5~3.0 m，中上部夹有少量薄层粉—细晶白云岩，砂屑白云岩顶部可见晶粒白云岩与藻纹层白云岩互层发育。泥粉晶白云岩、藻纹层白云岩主要发育在水动力较弱的低能环境，该岩性组合以灯影组先锋剖面为典型，反映水体环境能量逐渐增强。

(5) 藻纹层白云岩—泡沫绵层白云岩—晶粒白云岩—泡沫绵层白云岩 (LA5)：该岩性组合可见于四川盆地灯影组先锋剖面（Xu *et al.*, 2025）或廖家槽剖面，其中单层厚 0.4~3.5 m，呈中厚层发育。其中，底部可见泡沫绵层白云岩与藻纹层白云岩韵律式发育，中上部晶粒白云岩中可见少量葡萄花边结构。

(6) 泥晶白云岩—凝块石白云岩—泡沫绵层白云岩 (LA6)：以蓬莱气区蓬探 1 井灯二

段为代表（张本健等，2023），其中泡沫绵层白云岩主要发育在灯二段中上部，局部可见凝块石白云岩与泡沫绵层白云岩韵律式发育，中部夹有少量核形石白云岩，顶部颗粒白云岩发育增多，可见砂屑白云岩、核形石白云岩以及角砾状白云岩发育，反映沉积环境由下至上逐渐变浅，水体能量逐渐增强。

(7) 藻纹层白云岩—叠层石白云岩—泡沫绵层白云岩—藻纹层白云岩 (LA7)：在四川盆地灯影组胡家坝剖面中，少量泡沫绵层白云岩发育在叠层石白云岩顶部，指示了水体环境能量增强，泡沫绵层白云岩发育在体系域顶部（罗青云等，2024），该岩性组合顶部主要发育藻纹层白云岩及泥晶白云岩。

(8) 泥晶白云岩—泡沫绵层白云岩—藻纹层白云岩 (LA8)：该沉积序列发育于台内丘滩，其水体环境相对低能，典型代表可见于塔里木盆地柯坪地区东北部的肖尔布拉克组上段（白莹等，2021）。

3 有序度及稳定同位素特征

3.1 有序度

白云石的有序度不仅反映其结晶程度，还可指示晶体形成时的物理化学条件（曾理等，2004；Zvir *et al.*, 2021）。统计前人研究数据（陈芳文，2015；周吉羚等，2015；杨俊丰，2018；金民东等，2019；穆亚飞，2019；郑剑锋等，2020a, 2021a, 2021b；Zhou *et al.*, 2020；白莹等，2021；颜瑞晶，2022；Zheng *et al.*, 2023；冯琳等，2024）发现，泡沫绵层白云岩的有序度介于 0.45~0.87，平均值为 0.69（图 5）。在塔里木盆地，肖尔布拉克组和奇格布拉克组泡沫绵层白云岩的有序度整体偏低，分别为 0.45~0.76（平均值为 0.59）和 0.66~0.71（平均值为 0.69）。这一范围与同时期的藻纹层白云岩（0.50~0.80，平均值为 0.67）、凝块石白云岩（平均值为 0.64、0.69）、叠层石白云岩（平均值为 0.66）相似。这表明其形成于成岩早期、温度较低且白云石化速率较快的环境中（Zhou *et al.*, 2020；郑剑锋等，2021a）。相比之下，粉—细晶白云岩（0.83~1.00，平均值为 0.87）、细—中晶白云岩（0.65~0.99，平均值为 0.88）的有序度显著高于微生物白云岩，且随着晶粒的增大而同步升高，这表明重结晶作用能够有效提高有序度。

在四川盆地，灯影组泡沫绵层白云石的有序度普遍较高，介于 0.70~0.87（平均值为 0.78），明显高于同期的泥—粉晶白云岩（0.49~0.83，平均值为 0.66）、凝块石白云岩（0.60~0.78，平均值为 0.67），与叠层石白云岩（0.66~0.87，平均值为 0.74）、藻砂屑白云岩（0.59~0.93，平均值为 0.75）相似。与塔里木盆地肖尔布拉克组相似，灯影组的晶粒白云岩有序度整体大

于 0.8，明显高于微生物白云岩，且晶粒的大小与有序度呈正相关。泡沫绵层白云岩的中—高有序度表明其胶结物主要形成于埋藏成岩阶段，在较高温度及充分的孔隙空间条件下，晶格结构得以充分调整与重排，促进了高有序度白云石的形成（周吉羚等，2015；沈安江等，2022）。这一推测也与泡沫绵层白云岩的多期次胶结特征、较低的孔隙度及氧同位素结果一致，进一步说明灯影组泡沫绵层白云岩在后期成岩过程中经历了较强的胶结和重结晶作用。

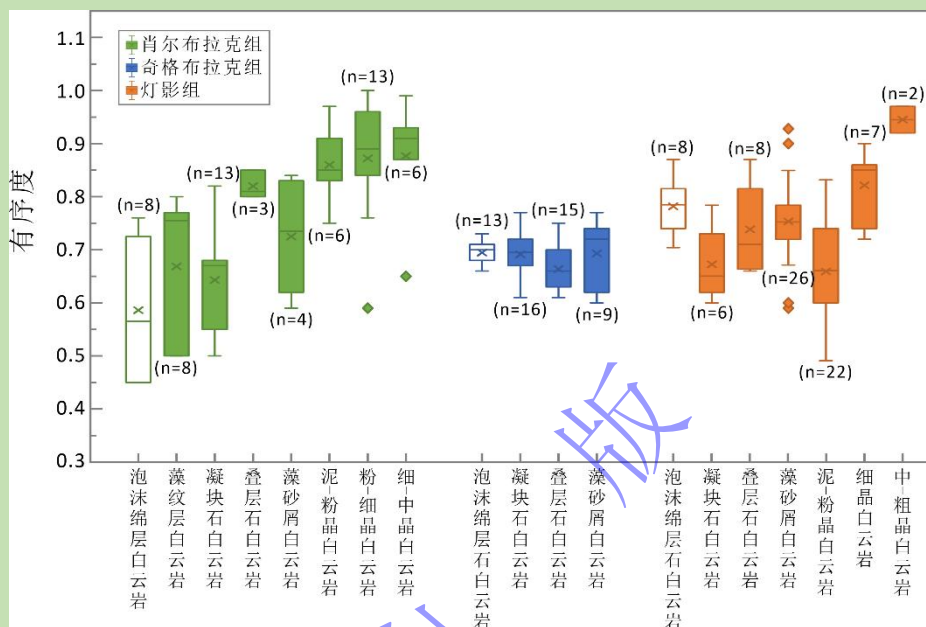


图5 不同类型白云石有序度特征

肖尔布拉克组数据源于文献（杨俊丰，2018；穆亚飞，2019；郑剑锋等，2020a；白莹等，2021；冯琳等，2024），奇格布拉克组数据源于文献（郑剑锋等，2021a，2021b；Zheng *et al.*, 2023），灯影组数据源于文献（陈芳文，2015；周吉羚等，2015；金民东等，2019；Zhou *et al.*, 2020；颜瑞晶，2022）

Fig.5 Ordered characteristics of different types of dolomite

Data sources: Xiaoerbulake Formation: Yang (2018), Mu (2019), Zheng *et al.* (2020a), Bai *et al.* (2021), Feng *et al.* (2024); Qigebulake Formation: Zheng *et al.* (2021a, 2021b), Zheng *et al.* (2023); Dengying Formation: Chen (2015), Zhou *et al.* (2015), Jin *et al.* (2019), Zhou *et al.* (2020), Yan (2022)

3.2 碳、氧同位素

对前人的碳、氧同位素数据（图6；数据引自丁一，2013；崔锋，2018；唐玄，2018；杨俊丰，2018；程丽娟等，2020；余晶洁，2020；郑剑锋等，2020a，2020b，2021a，2021b；Zhou *et al.*, 2020；刘伟等，2021；金鑫，2022；颜瑞晶，2022；陈旭东等，2023；许洋，2023；Zheng *et al.*, 2023；冯琳等，2024；Li *et al.*, 2024；李凌等，2025）汇总发现，泡沫绵层白云岩在不同地区和地层中表现出一定的差异性，但总体特征较为一致（图6）。其中，在塔里木盆地肖尔布拉克组泡沫绵层白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别介于 -2.2‰ ~ 3.4‰ 、 -9.4‰ ~ 3.1‰ ；与泥—粉晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ （ -1.5‰ ~ 2.9‰ ）和 $\delta^{18}\text{O}$ （ -7.2‰ ~ 2.9‰ ）变化范围基本一致。藻纹层白云岩、叠层石白云岩、凝块石白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 范围一致，变化范围

均小于泡沫绵层白云岩，分别为 0.5~3.2‰、-7.7~-6.3‰，-0.1‰~2.4‰、-6.9‰~-5.4‰，0.5‰~3.4‰、-9.4‰~-3.9‰。鞍形白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ (-3.4‰~1.8‰) 相对偏负， $\delta^{18}\text{O}$ (-16.7‰~-9.1‰) 显著低于上述岩石类型，指示其形成于温度较高的晚成岩阶段。

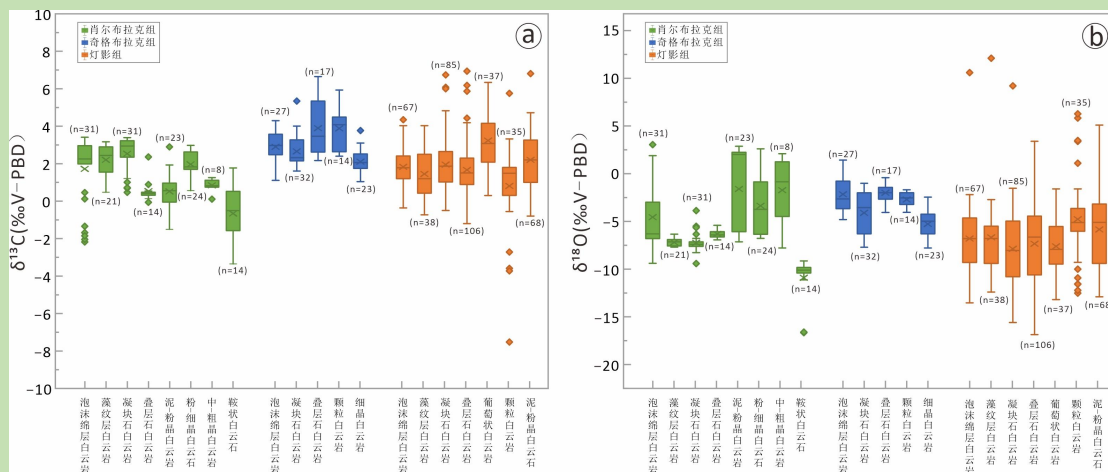


图 6 不同类型白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 组成

肖尔布拉克组数据源于文献（崔锋，2018；杨俊丰，2018；程丽娟等，2020；郑剑锋等，2020a，2020b；刘伟等，2021；冯琳等，2024；Li *et al.*，2024），奇格布拉克组数据源于文献（郑剑锋等，2021a，2021b；陈旭东等，2023；Zheng *et al.*，2023），灯影组数据源于文献（丁一，2013；唐玄，2018；余晶洁，2020；Zhou *et al.*，2020；金鑫，2022；颜瑞晶，2022；许洋，2023；李凌等，2025）

Fig.6 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ compositions of different types of dolostone

Data sources: Xiaerbulake Formation: Cui (2018), Yang (2018), Cheng *et al.* (2020), Zheng *et al.* (2020a, 2020b), Liu *et al.* (2021), Feng *et al.* (2024), Li *et al.* (2024); Qigebulake Formation: Zheng *et al.* (2021a, 2021b), Chen *et al.* (2023), Zheng *et al.* (2023); Dengying Formation: Ding (2013), Tang (2018), Yu (2020), Zhou *et al.* (2020), Jin (2022), Yan (2022), Xu (2023), Li *et al.* (2015)

在奇格布拉克组，泡沫绵层白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 1.1‰~4.3‰， $\delta^{18}\text{O}$ 为 -4.8‰~1.4‰，与同时期叠层石白云岩、凝块石白云岩、颗粒白云岩的同位素特征相似，分别为 2.2‰~6.7‰、-4.1‰~-0.4‰，1.6‰~5.3‰、-7.7‰~-1.0‰，2.4~5.9‰、-4.1‰~-1.7‰；细晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ (1.0‰~3.8‰) 与其他岩性相似，但 $\delta^{18}\text{O}$ (-7.8‰~-2.5‰) 相对较低，表明其形成过程中可能受到轻微的成岩流体改造。

四川盆地灯影组泡沫绵层白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -0.4‰~4.4‰、-13.5~-2.2‰。 $\delta^{13}\text{C}$ 与藻纹层白云岩 (-0.7‰~4.0‰)、叠层石白云岩 (-1.2‰~6.9‰)、凝块石白云岩 (-0.5‰~6.3‰)、葡萄状白云岩 (0.3‰~6.3‰)、泥-粉晶白云岩 (-0.8‰~6.8‰) 基本一致； $\delta^{18}\text{O}$ 与藻纹层白云岩相似 (-12.4‰~-2.7‰)，叠层石白云岩 (-16.9‰~-0.7‰)、凝块石白云岩 (-15.6‰~-1.5‰)、葡萄状白云岩 (-13.2~-1.6‰) 相对更低，泥-粉晶白云岩 (-12.9‰~-0.7‰) 略偏高。

综合三个地层组的对比可见，泡沫绵层白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为接近，总体偏正，与微生物白云岩、葡萄状白云岩、泥-粉晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围基本一致，均落在同期海相碳酸

盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征区间（震旦纪 0~6.0‰；寒武纪-1‰~3‰）（Cramer and Jarvis, 2020）。这表明泡沫绵层白云岩的白云石化流体可能主要来源于同期海水。

前人研究认为，灯影组早期白云石化的 $\delta^{18}\text{O}$ 值多分布于-2‰~-7‰（强深涛等, 2017；文华国等, 2025），反映其与浅埋藏阶段的海水-成岩体系有关。本次研究调研的灯影组泡沫绵层白云岩，其 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围与微生物白云岩、泥-粉晶白云岩及葡萄状白云岩相似，平均值均低于-8‰，局部样品明显偏负，表明其氧同位素组成受埋藏成岩作用过程中热作用的影响，反映出胶结物的氧同位素特征。相比之下，奇格布拉克组及肖尔布拉克组的泡沫绵层白云岩碳、氧同位素之间无正相关性，且整体与晚元古代及早寒武世海相碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近（Zempolich *et al.*, 1988；Major *et al.*, 1992），与保留原始组构的微生物白云岩、泥-粉晶白云岩变化范围相似，表明其受成岩作用改造弱，可能保存了原始的海相同位素信号。

3.3 锶同位素组成

为明确泡沫绵层白云岩的锶同位素组成及其成因意义，统计了不同地区和不同地层的泡沫绵层白云岩的锶同位素数据（崔锋, 2018；唐玄, 2018；杨俊丰, 2018；余晶洁, 2020；郑剑锋等, 2020a, 2021a, 2021b；金鑫, 2022；颜瑞晶, 2022；陈旭东等, 2023；Zheng *et al.*, 2023；冯琳等, 2024）。统计结果显示，塔里木盆地肖尔布拉克组泡沫绵层白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.708 979~0.712 456，平均值为 0.709 982（图 7）。藻纹层白云岩、凝块石白云岩及残余颗粒白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围较小，分别为 0.708 817~0.709 821（平均值为 0.709 190）、0.708 843~0.709 811（平均值为 0.709 189）、0.709 017~0.713 218（平均值为 0.709 587）。泥-粉晶白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围较宽（0.708 946~0.711 576，平均值为 0.709 838）。而鞍形白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显偏低（0.708 872~0.708 911，平均值为 0.708 885），且变化范围较窄。

奇格布拉克组泡沫绵层白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围较小（0.708 830~0.709 501）。而叠层石白云岩、凝块石白云岩的比值范围较大，分别为 0.708 906~0.710 710（平均值为 0.709 607）、0.708 745~0.710 749（平均值为 0.709 411）。颗粒白云岩和细晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为 0.708 970~0.710 885（平均值为 0.709 856）、0.709 662~0.711 992（平均值为 0.710 772），其中细晶白云岩较泡沫绵层白云岩显著增高且变化范围更大。

四川盆地灯影组泡沫绵层白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 0.708 685~0.713 574，平均值为 0.709 801。同时期，叠层石白云岩和凝块石白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 范围相似，分别 0.708 499~0.713 055、0.708 806~0.712 700，其中凝块石白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对较高。相比之下，泥-粉

晶白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 范围较窄 (0.708 139~0.710 365), 总体偏低。

总体而言, 不同地区和层系的泡沫绵层白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值部分落入同期海水锶同位素的分布范围内, 但多数样品显著偏高, 这一特征表明成岩流体在不同程度上受到了外来流体 (如陆源或深部流体) 的影响。其中, 四川盆地灯影组泡沫绵层白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值偏高且氧同位素显著偏负, 说明其成岩流体可能混入了富含放射成因锶的陆源流体或热液流体。且早期的泡沫绵层白云岩具有较高的原始孔隙度, 更容易捕获且保存这些富锶孔隙水。相比之下, 塔里木盆地奇格布拉克组和肖尔布拉克组的氧同位素普遍落于同期海水范围内, 且部分样品数据正偏。考虑到泡沫绵层白云岩主要发育于能量较高的滩坪体系域顶部, 其氧同位素正偏可能与蒸发作用引起的水体同位素富集有关。因此, 其形成反映了蒸发富集和外源流体混入的共同影响。

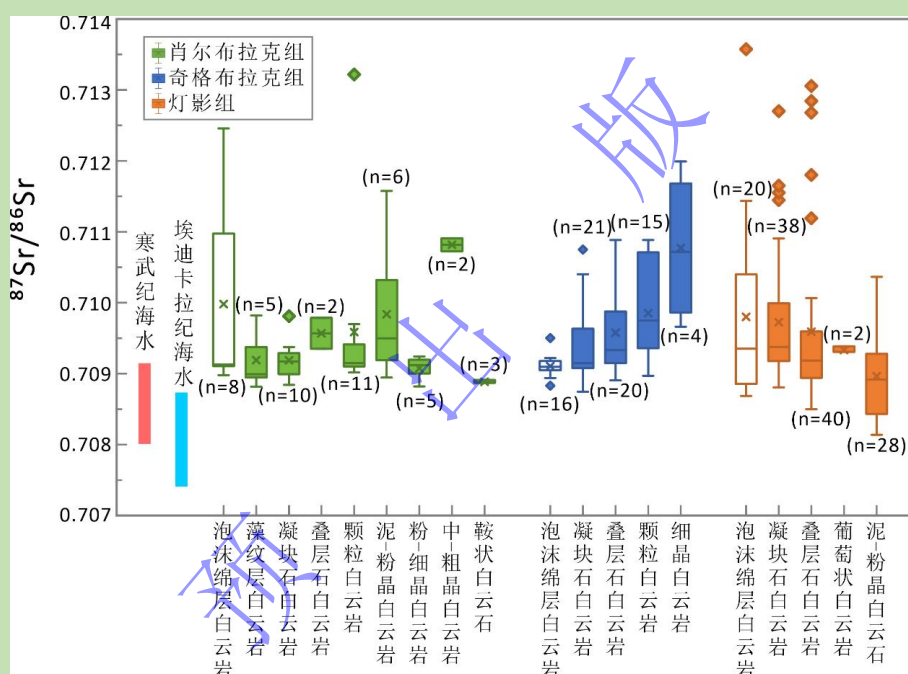


图7 不同类型白云岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成

肖尔布拉克组数据源于文献 (崔锋, 2018; 杨俊丰, 2018; 郑剑锋等, 2020a; 冯琳等, 2024), 奇格布拉克组数据源于文献 (郑剑锋等, 2021a, 2021b; 陈旭东等, 2023; Zheng *et al.*, 2023), 灯影组数据源于文献 (唐玄, 2018; 余晶洁, 2020; 金鑫, 2022; 颜瑞晶, 2022)

Fig. 7 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ compositions of different types of dolostone

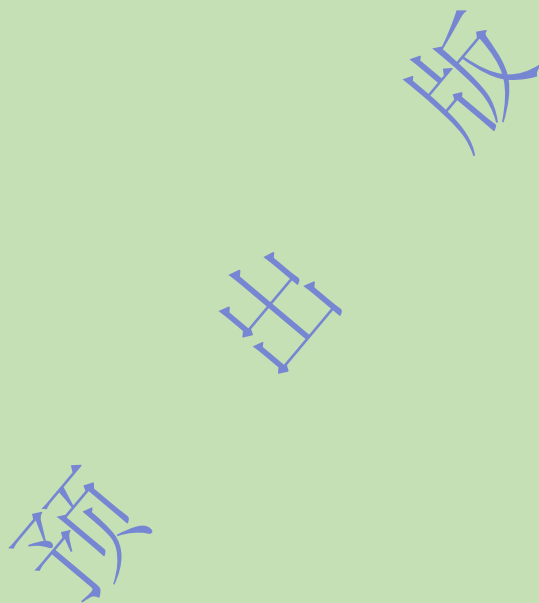
Data sources: Xiaoerbulake Formation: Cui (2018), Yang (2018), Zheng *et al.* (2020a), Feng *et al.* (2024); Qigebulake Formation: Zheng *et al.* (2021a, 2021b), Chen *et al.* (2023), Zheng *et al.* (2023); Dengying Formation: Tang (2018), Yu (2020), Jin (2022), Yan (2022)

4 储层特征

泡沫绵层白云岩拥有良好的储集性能, 是塔里木盆地奇格布拉克组、肖尔布拉克组及四川盆地灯影组的主要储集岩类型之一 (郑剑锋等, 2020b; 陈旭东等, 2023; 魏天媛等, 2023; 张本健等, 2023)。泡沫绵层白云岩发育多种孔隙类型, 主要为泡沫绵层粒内孔、晶间 (溶)

孔及溶蚀孔洞。粒内孔发育在泡沫绵层体腔内，大多被白云石充填，其孔隙直径较小，连通性较差，在泡沫绵层白云岩中发育最为广泛。晶间（溶）孔及溶蚀孔洞的孔隙差异较大，连通性较好。不同时期，泡沫绵层白云岩的物性差异较大。

物性数据统计表明四川盆地灯影组泡沫绵层白云岩孔隙度介于 1.07%~6.71%，平均值为 3.12%，渗透率介于 $(0.001\sim 1.796)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，平均值为 $0.566\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。塔里木盆地奇格布拉克组泡沫绵层白云岩孔隙度介于 0.28%~19.6%，平均值为 4.31%，渗透率介于 $(0.001\sim 6.190)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，平均值为 $0.274\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ；肖尔布拉克组孔隙度介于 0.14%~15%，平均值为 4.64%，渗透率介于 $(0.0004\sim 16.0121)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，平均值为 $1.0392\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ （图 8a, b）。



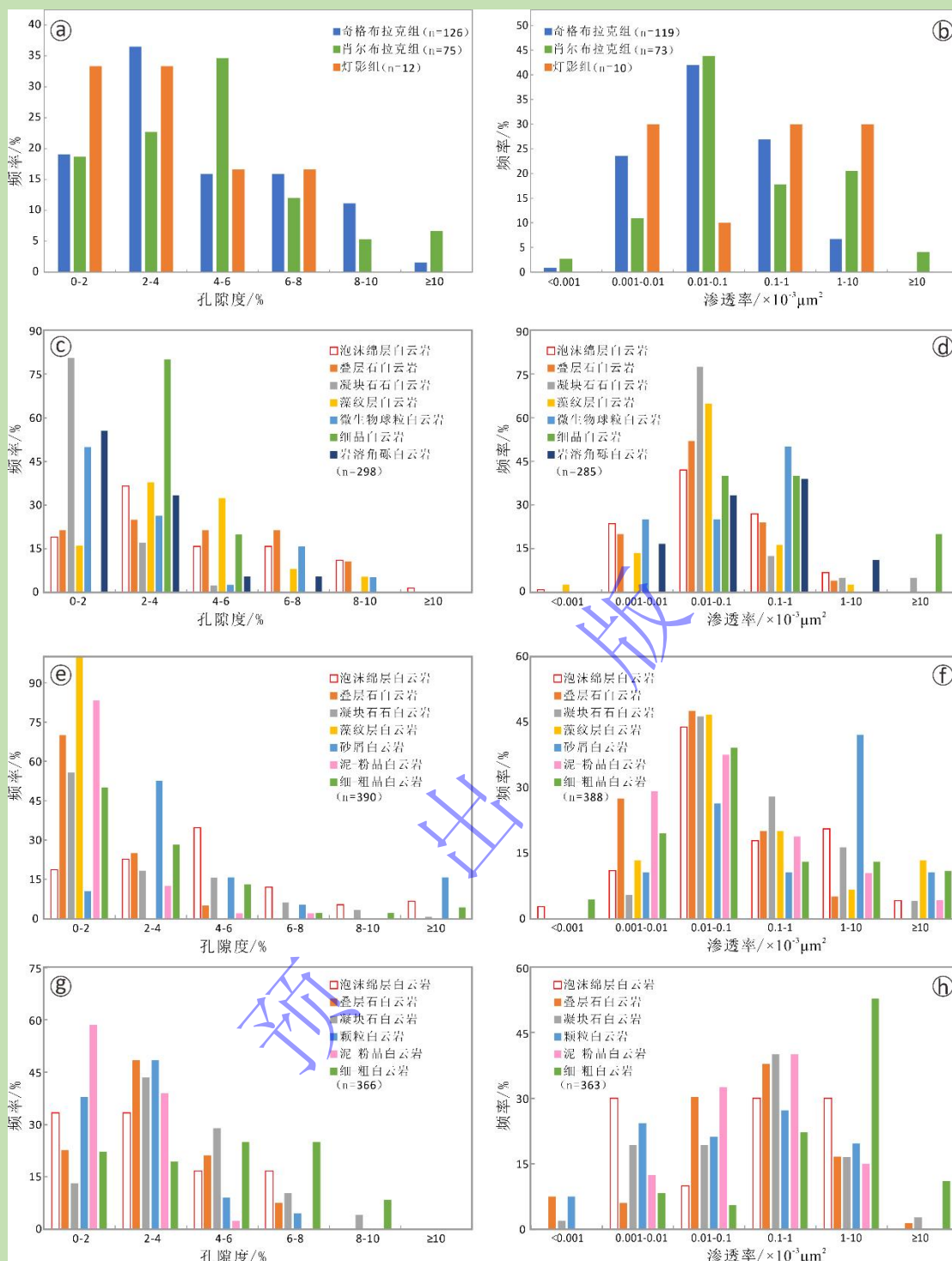


图 8 不同类型白云岩储层物性特征

(a, b) 不同时期泡沫层白云岩孔隙度、渗透率分布特征；(c, d) 奇格布拉克组泡沫层白云岩与其他岩性孔隙度、渗透率分布特征对比，数据来源（李朋威等，2015a；严威等，2019；Chen *et al.*, 2020；刘禹等，2022；Tang *et al.*, 2022b；陈旭东等，2023）；(e, f) 肖尔布拉克组泡沫层白云岩与其他岩性孔隙度、渗透率分布特征对比，数据来源（黄擎宇等，2016；高孝巧，2018；余浩元等，2018；刘伟等，2021；Wei *et al.*, 2023；薛玉芳，2023；Li *et al.*, 2024）；(g, h) 灯影组泡沫层白云岩与其他岩性孔隙度、渗透率分布特征对比，数据来源（彭俊，2010；曹建文等，2012；Feng *et al.*, 2017；李泽奇，2017；唐玄，2018；Wang *et al.*, 2020；Xu *et al.*, 2022；Hu *et al.*, 2023；张本健等，2023；刘凯铭等，2025）

Fig.8 Comparison of physical properties of different dolomite reservoir types

(a, b) porosity and permeability of foam-like dolostone at different stratigraphic intervals; (c, d) porosity and permeability of foam-like dolostone compared to other lithologies in the Qigebulake Formation (after Li *et al.*, 2015a; Yan *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2022b; Chen *et al.*, 2023); (e, f) porosity and permeability of foam-like dolostone compared to other lithologies in the Xiaoerbulake Formation (after Huang *et al.*, 2016; Gao, 2018; Yu *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2023; Xue, 2023; Li *et al.*, 2024); (g, h) porosity and permeability of foam-like dolostone compared to other lithologies in the Dengying Formation (after Peng, 2010; Cao *et al.*, 2012; Feng *et al.*, 2017; Li, 2017; Tang, 2018; Wang *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2025)

其中,塔里木盆地泡沫绵层白云岩的孔隙度变化范围很大,其中奇格布拉克组的孔隙度明显高于凝块石白云岩(平均值为1.38%)、岩溶角砾白云岩(平均值为2.20%)、微生物球粒白云岩(平均值为3.15%)、细晶白云岩(平均值为3.46%)、藻纹层白云岩(平均值为4.05%),与叠层石白云岩孔隙度(4.58%)相似,其孔隙度>6%的分别占28.6%、32.1%;其渗透率主要分布在 $(0.001\sim 0.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,占比约65.6%,明显低于岩溶角砾白云岩、细晶白云岩,具有较强的非均质性,属于低孔—中孔、低渗—中渗型储层(图8c, d)。肖尔布拉克组泡沫绵层白云岩与砂屑白云岩是主要的储集岩性,孔隙度介于2%~6%的分别占57.3%、68.4%,约24%和21%的样品孔隙度大于6%;渗透率明显优于奇格布拉克组,主要分布在 $(0.01\sim 10)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,但显著低于砂屑白云岩,属于低孔、低渗—中渗型储层(图8e, f)。

四川盆地灯影组晶粒白云岩的孔隙度最高(平均值为4.73%),且大于6%的占比最高,约33.3%;泡沫绵层白云岩的孔隙度略低于叠层石白云岩、凝块石白云岩,平均值分别为3.12%、3.26%、3.97%,且孔隙度介于4%~8%的分别为33.3%、28.8%、39.3%;颗粒白云岩孔隙度次之,泥—粉晶白云岩孔隙度最差。晶粒白云岩与凝块石白云岩的渗透性最好,主要分布于 $(0.1\sim 10)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图8g, h)。

5 泡沫绵层白云岩成因

与叠层石、凝块石白云岩等微生物碳酸盐岩相比,针对泡沫绵层白云岩的系统性研究仍较为薄弱(Han *et al.*, 2024; 李凌等, 2025),从而在一定程度上制约了对其形成过程和成因机制的深入理解。泡沫绵层白云岩主要由泥晶边及其内部或间隙中发育的白云石胶结物组成。后者在晶体大小、阴极发光特征以及与泥晶边的接触关系等方面,均表现出显著差异,指示其形成过程中可能涉及成岩阶段不同或化学性质存在差异的流体作用。相比之下,泥晶边或其前体更可能代表该类岩石的主要原始沉积组分。因此,泥晶边的来源与形成机制成为当前泡沫绵层白云岩研究中广泛关注的问题之一。目前,关于泥晶边的起源尚存在较大争议,相关解释主要包括生物和非生物两类(黄新翠, 2012; Tang *et al.*, 2022a; Wang *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2024)。

其中,一种观点认为,泥晶边的形成可能与沉积环境中气体的产生及其后续矿化过程有关(Wang *et al.*, 2023)。已有研究指出,有机质降解以及微生物代谢活动(尤其是光合作用)均可释放气泡(Bosak *et al.*, 2010)。若气泡被微生物或其胞外聚合物(EPS)捕获,并在其表面诱发碳酸盐沉淀,则可能形成具有中空结构的矿化气泡(图 9a),这类构造在温泉沉积物中广泛报道(Della Porta *et al.*, 2017; Shiraishi *et al.*, 2023)。然而,微生物产生的微米级气泡在上升过程中常发育为垂直延伸的中空圆柱管状或由多个气泡组成的不连续圆柱状构造(Della Porta *et al.*, 2017; Shiraishi *et al.*, 2023)。此外,尽管已有研究报道元古代海相沉积中存在气泡,但这些气泡通常作为叠层石中的次级组构出现(Bosak *et al.*, 2010),而非构成岩石的主体成分。相比之下,本研究所观察的泥晶边直径仅为 0.2~0.5 mm (图 2c, d),是泡沫白云岩的主要组成部分,不见于叠层石或凝块石中,且显微镜下未发现垂直延伸的圆柱状管。综合已有研究,气泡矿化作用在部分微生物碳酸盐沉积中具有重要意义,但其能否解释泡沫绵层白云岩中广泛发育的泥晶边特征,目前仍缺乏直接而系统的证据支撑。

蓝细菌,尤其是肾形菌(*Renalcis*)的有机矿化作用(图 9b),也被部分研究用以解释泡沫绵层白云岩泥晶边的形成(朱同兴和罗安屏,1992;余晶洁,2020;李柯然等,2024)。已有研究表明,肾型菌可形成具有泥晶边的中空腔室,其直径通常介于 0.15~0.35 mm (Lee *et al.*, 2014)。然而,在部分泡沫绵层白云岩的样品中,泥晶边结构的尺度明显偏大,其直径可超过 1 mm (图 2e, f),与已报道的肾型菌群化石以及常见的球形蓝细菌及其群体存在一定差异(Pratt, 1984; Komárek and Komárková, 2002; Stephens and Sumner, 2002; Barlow *et al.*, 2024)。与此同时,肾型菌在古生代礁相沉积中较为常见(尤其是寒武纪、早奥陶世和泥盆纪)(Pratt, 1984; Riding, 1991; Stephens and Sumner, 2002),而在元古代地层中的报道相对较少。此外,大多数肾型菌群化石呈现多腔室的葡萄状或分支聚集体(Pratt, 1984; Riding, 1991),而非孤立分布的中空泥晶边,这与本研究所观察到的特征存在显著差异。基于现有资料,肾型菌是否直接参与了泥晶边形成仍存疑,但不能完全排除是否存在其他尚未被识别的蓝细菌类群,通过有机矿化作用参与了泥晶边的形成。

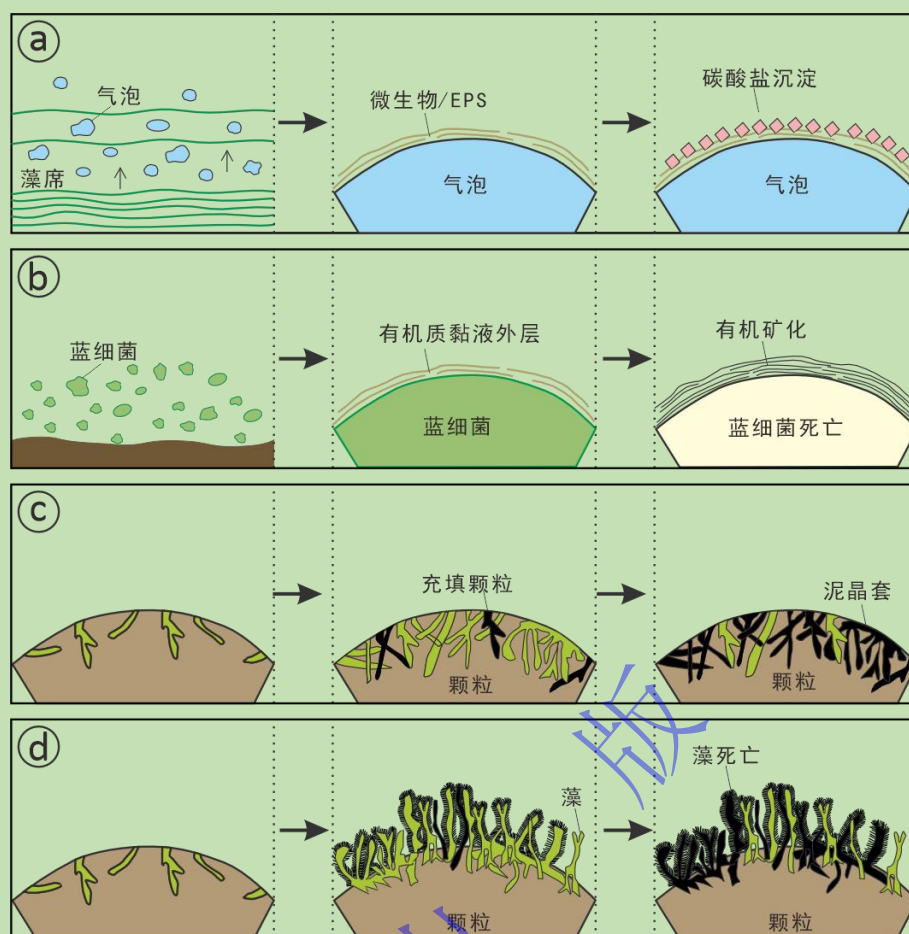


图9 泡沫绵层白云岩泥晶边的成因模式图

(a) 气泡表面矿化; (b) 蓝细菌表面有机矿化; (c) 破坏性泥晶化作用 (据 Bathurst, 1966 修改); (d) 建设性泥晶化作用 (据 Kobluk and Risk, 1977 修改)

Fig.9 Genetic model of micritic rim in foam-like dolostone

(a) mineralization on bubble surfaces; (b) organic mineralization on cyanobacterial surfaces; (c) destructive micritization (modified from Bathurst, 1966); (d) constructive micritization (modified from Kobluk and Risk, 1977)

近年来, 泥晶边被解释为碳酸盐颗粒泥晶化作用产物的观点逐渐受到关注, 其中包括破坏性 (图 9c) 与建设性泥晶化 (图 9d) 两种不同机制 (黄新翠, 2012; Han *et al.*, 2024; 李凌等, 2025)。其中, 破坏性泥晶化通常与内栖微生物钻孔活动以及快速泥晶充填有关, 其形成的泥晶套往往在颗粒内部表现出不规则的边界特征 (Bathurst, 1966; Ge *et al.*, 2020)。然而, 本研究所观察到的泥晶边未发现钻孔痕迹且具有平滑的内部边界 (图 2d-f), 故该机制可排除。相较之下, 建设性泥晶套的成因机制更具解释力。建设性泥晶化强调微生物群落或菌丝体在颗粒表面的附着、生长及其对沉积组分的捕获与泥晶沉淀作用 (Kobluk and Risk, 1977; Perry, 1999)。近年来有学者指出, 泡沫绵层白云岩泥晶边所具有的平滑内部边界和不均一厚度特征, 与建设性泥晶套在形态上具有一定相似性 (Han *et al.*, 2024)。但此前研究 (朱同兴和罗安屏, 1992; 黄新翠, 2012; Han *et al.*, 2024) 并未提供确凿证据来支持这

一观点：（1）没有证明泥晶边形成之前的内部空间存在颗粒；（2）也未确认泡沫绵层泥晶边内部存在明确的微生物特征（除泥晶结构本身外）。

基于此，Xu *et al.*（2025）根据泥晶边的形态和组构特征将其划分为 A~C 三种类型。3 种组构类型的泥晶边内部完全充填亮晶白云石胶结物，未保留前身颗粒的痕迹；而 A 型组构中发现有一种复合状的泡沫绵层组分（图 3b），其泥晶边的内部由 A 型或 B 型泡沫绵层构成，表明其主要来源于部分岩化的泡沫绵层白云岩或同沉积期被打碎的内碎屑再沉积。尽管如此，其泥晶边的镜下特征、矿物组成和阴极发光特征均显示其与其他类型泥晶边具有相似的起源，这间接表明其他类型泥晶边的内部曾经存在颗粒。同时，现代海相碳酸盐沉积物中已有微生物及其产物（尤其是胞外聚合物，EPS）参与形成构造性泥晶套的报道（Perry, 1999; Diaz and Eberli, 2022）。微生物及 EPS 能够通过多种途径（如通过活动改变水体 pH 值、作为晶体成核点以及捕获和黏结碳酸盐颗粒等）促进碳酸盐沉淀（Decho and Gutierrez, 2017; Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2022）。此外，泥晶边的拉曼光谱分析显示出强烈的有机质信号（Xu *et al.*, 2025），并且在部分泥晶边中还发现了微生物或 EPS 的部分钙化产物（图 3c~g）。因此，综合已有研究成果，尽管目前尚难以完全限定泥晶边的具体形成机制，但越来越多的证据表明，微生物介导的建设性泥晶化可能在泡沫绵层白云岩泥晶边的形成中发挥了重要作用。

6 存在问题及展望

尽管前期相关学者针对泡沫绵层白云岩岩石学、矿物学、地球化学、储层特征等方面开展了系列研究，关于泡沫绵层白云岩的沉积特征、成因机制、储层发育等的理解逐渐加深，但对于泡沫绵层的成因机制、影响因素尚不明确，其地球化学特征、微生物作用、流体来源和古气候记录等方面仍存在很多问题亟待解决。

（1）泡沫绵层白云岩与微生物白云岩的时空分布关系研究薄弱。目前，泡沫绵层白云岩的报道仅限于四川盆地和塔里木盆地的震旦系灯影组/奇格布拉克组、寒武系肖尔布拉克组以及三叠系雷口坡组，这些地层均发育微生物岩。然而，在全球其他盆地地区及微生物岩广泛发育的地层中，尚未见泡沫绵层白云岩的报道。其形成与特定沉积环境及微生物岩的时空分布之间的耦合机制仍不清楚，缺乏相关研究。

（2）泡沫绵层白云岩的地球化学特征及流体来源研究有待深入。其泥晶边及内部的亮晶白云石具有明显的成岩期次性，形成过程受海水性质、微生物活动、埋藏深度及温度等多种因素共同控制。然而，现有针对泡沫绵层白云岩的地球化学研究多基于全岩分析，高精度、

分期次的微区分析相对较少,其地球化学特征及成岩流体来源在时间序列上的演化仍有待进一步揭示。

(3) 泡沫绵层白云岩的成因机制仍存在争议。由于地质年代古老且埋藏深度大,常导致微生物活动的痕迹难以保存,其泥晶边的成因缺乏有效约束。同时,泥晶边内部组分(无论是亚稳态的碳酸盐颗粒,还是已经分解的藻类或细菌遗迹)都难以保存和获取原始信息。因此,泡沫绵层白云岩的成因研究仍具有挑战性。

(4) 泡沫绵层白云岩的岩性组合序列与形成环境研究仍有待加强。泡沫绵层白云岩发育广泛,在台缘及台内环境均有发育,且形成环境仍存在争议。尤其是对其成因属性的界定—究竟应归类为典型的微生物岩,还是具有特殊结构的颗粒白云岩—直接影响对其沉积环境的判定。岩性组合序列特征及其所反映的沉积环境是油气勘探与开发的重要基础,但是目前针对泡沫绵层物性分析与区域岩性组合序列、形成环境的关联性分析仍然较少。

(5) 泡沫绵层白云岩在古环境记录的意义研究十分薄弱。泡沫绵层白云岩泥晶边形成于同生—准同生时期,形成时间早,承载了沉积时期的古环境、古海水化学等信息,但是目前甚少涉及泡沫绵层与古环境记录的研究。

综上所述,随着科技进步带来的实验手段革新和实验精度的不断提升,未来泡沫绵层白云岩的研究亟须在研究视角与方法体系上实现进一步创新和深化,建议再加强如下方面泡沫绵层白云岩的研究:(1) 加强泡沫绵层白云岩在全球范围内的识别与报道,特别是其他盆地及微生物岩广泛发育地层的系统调查,明确其分布的地层学和区域学特征;(2) 在精细岩相学约束下,应用与开发高精度微区地球化学技术(如微米级同位素与微量元素原位分析技术)对泡沫绵层白云岩进行分期次分析,解析成岩流体演化;(3) 结合显微结构、生物标定、微生物痕迹与实验模拟等研究,深化泡沫绵层白云岩成因机制与微生物作用的耦合研究;(4) 结合岩相学、沉积学与层序地层学研究,明确岩性组合序列特征,进一步探究沉积环境、成因属性与储层特征间的内在联系;(5) 拓展泡沫绵层白云岩的古环境与古气候研究。

参考文献 (References)

- 白莹, 李建忠, 刘伟, 等. 2021. 塔里木盆地西北部下寒武统白云岩特征及多重白云石化模式[J]. 石油学报, 42 (9): 1174-1191.
[Bai Ying, Li Jianzhong, Liu Wei, et al. 2021. Characteristics and multiple dolomitization mode of the lower Cambrian dolomite reservoir, northwestern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(9): 1174-1191.]
- 曹建文, 梁彬, 张庆玉, 等. 2012. 黔中隆起及周缘地区灯影组古岩溶储层发育特征和控制因素[J]. 地质通报, 31 (11): 1902-1909.
[Cao Jianwen, Liang Bin, Zhang Qingyu, et al. 2012. The development features and controlling factors of reservoirs of Sinian Dengying Formation in central Guizhou uplift and its adjacent areas[J]. Geological Bulletin of China, 31(11): 1902-1909.]
- 陈芳文. 2015. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[D]. 成都: 西南石油大学: 1-68. [Chen Fangwen. 2015. The genesis of dolomite in the Dengying Formation of Sinian system in the Sichuan Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University: 1-68.]

- 陈旭东, 许启鲁, 郝芳, 等. 2023. 塔里木盆地塔北地区上震旦统奇格布拉克组白云岩储层形成与成岩演化[J]. 中国科学: 地球科学, 53(10): 2348-2369. [Chen Xudong, Xu Qilu, Hao Fang, et al. 2023. Dolomite reservoir formation and diagenesis evolution of the Upper Ediacaran Qigebrak Formation in the Tabei area, Tarim Basin[J]. Science China Earth Sciences, 53(10): 2348-2369.]
- 程丽娟, 李忠, 刘嘉庆, 等. 2020. 塔里木盆地巴楚—塔中地区寒武系盐下白云岩储层成岩作用及物性特征[J]. 石油与天然气地质, 41(2): 316-327. [Cheng Lijuan, Li Zhong, Liu Jiaqing, et al. 2020. Diagenesis and physical properties of subsalt dolomite reservoirs of the Cambrian, Bachu-Tazhong areas, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 41(2): 316-327.]
- 崔锋. 2018. 柯坪地区肖尔布拉克组白云岩储层成因与主控因素研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京): 51-56. [Cui Feng. 2018. The study of reservoir genesis and main control factors of Xiaoerblak Formation dolomites in Kalpin area[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing): 51-56.]
- 邓茜娅. 2018. 塔里木盆地肖尔布拉克组微生物岩储层特征及发育规律[D]. 北京: 中国石油大学(北京): 1-50. [Deng Qianya. 2018. Characteristics and developmental patterns of microbialite reservoir of Shawbrak Formation in the Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing): 1-50.]
- 丁一. 2013. 川北杨坝地区—川中高石1井—黔北遵义地区震旦系灯影组储层特征对比研究[D]. 成都: 成都理工大学: 21-26. [Ding Yi. 2013. Study on the reservoir characteristics comparison in Dengying Formation of Yangba area, north Sichuan—well Gaoshi 1, central Sichuan—Zunyi area, southeast Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 21-26.]
- 冯琳, 杨欢, 李乐, 等. 2024. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩特征及成因机理[J]. 断块油气田, 31(5): 827-835. [Feng Lin, Yang Huan, Li Le, et al. 2024. Characteristics and genetic mechanism of dolomites of lower Cambrian Xiaoerbulake Formation in Tarim Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 31(5): 827-835.]
- 高孝巧. 2018. 塔里木盆地巴楚—塔中地区肖尔布拉克组沉积特征及控储机理[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-124. [Gao Xiaqiao. 2018. Sedimentary characteristics and its control mechanisms on reservoirs of the Xiaoerbulak Formation in Bachu-Tazhong region, Tarim Basin, NW China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-124.]
- 胡安平, 沈安江, 郑剑锋, 等. 2021. 微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式[J]. 海相油气地质, 26(1): 1-15. [Hu Anping, Shen Anjiang, Zheng Jianfeng, et al. 2021. The classification, facies and sedimentary models of microbialites[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 26(1): 1-15.]
- 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 2016. 台内微生物丘沉积特征及其对储层发育的控制: 以塔里木盆地柯坪—巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. 天然气工业, 36(6): 21-29. [Huang Qingyu, Hu Suyun, Pan Wenqing, et al. 2016. Sedimentary characteristics of intra-platform microbial mounds and their controlling effects on the development of reservoirs: A case study of the lower Cambrian Xiaoerbulake Fm in the Keping-Bachu area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 36(6): 21-29.]
- 黄新翠. 2012. 川西南震旦系灯影组优质储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-75. [Huang Xincui. 2012. The characteristics of the high-quality reservoir of Dengying Formation in southwestern of Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-75.]
- 金民东, 谭秀成, 李毕松, 等. 2019. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[J]. 沉积学报, 37(3): 443-454. [Jin Mindong, Tan Xiucheng, Li Bisong, et al. 2019. Genesis of dolomite in the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(3): 443-454.]
- 金鑫. 2022. 川西地区震旦系灯影组古流体演化研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-90. [Jin Xin. 2022. Study on paleofluid evolution of Dengying formation in western Sichuan Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-90.]
- 李安鹏. 2022. 川中地区灯影组四段微生物碳酸盐岩沉积环境及分布规律[D]. 荆州: 长江大学: 1-57. [Li Anpeng. 2022. Sedimentary environment and distribution for microbial carbonates in the Fourth member of the Dengying Formation, central Sichuan Basin[D]. Jingzhou: Yangtze University: 1-57.]
- 李柯然, 宋金民, 刘树根, 等. 2024. 四川盆地灯影组微生物岩组构元素富集特征及意义[J]. 沉积学报, 42(1): 64-83. [Li Keran, Song Jinmin, Liu Shugen, et al. 2024. Element enrichment characteristics and paleoenvironmental significance of microbial rock fabric in Late Ediacaran strata from the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(1): 64-83.]
- 李凌, 邓禹, 张新宇, 等. 2025. 川中蓬莱—高磨地区震旦系灯影组二段泡沫绵层白云岩成因及地质意义[J]. 岩性油气藏, 37(2): 60-69. [Li Ling, Deng Yu, Zhang Xinyu, et al. 2025. Genesis and geological significance of foam-spongy dolomite in the Second

- member of Sinian Dengying Formation in Penglai-Gaomo area, central Sichuan[J]. *Lithologic Reservoirs*, 37(2): 60-69.]
- 李朋威, 罗平, 陈敏, 等. 2015a. 塔里木盆地西北缘上震旦统微生物碳酸盐岩储层特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 36(3): 416-428. [Li Pengwei, Luo Ping, Chen Min, et al. 2015a. Characteristics and origin of the Upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 416-428.]
- 李朋威, 罗平, 宋金民, 等. 2015b. 微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素: 以塔里木盆地西北缘上震旦统一下寒武统为例[J]. *石油学报*, 36(9): 1074-1089. [Li Pengwei, Luo Ping, Song Jinmin, et al. 2015b. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoirs: A case study of Upper Sinian-lower Cambrian in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1074-1089.]
- 李泽奇. 2017. 川北米仓山构造及前缘地区震旦系灯影组深层—超深层储集层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学: 39-46. [Li Zeqi. 2017. Research on deep- ultra deep reservoir characteristics of Sinian Dengying Fm in MiCangShan structures and front areas, northern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 39-46.]
- 梁锋, 谭谦, 王立恩, 等. 2023. 深层微生物丘滩储层成因机制探讨: 以川中北部灯二段为例[C]//第33届全国天然气学术年会(2023)论文集. 南宁: 中国石油学会天然气专业委员会: 12. [Liang Feng, Tan Qian, Wang Li'en, et al. 2023. Exploration of the formation mechanism of deep microbial hilly beach reservoirs: A case study of Deng 2 member in central and northern Sichuan[C]//33rd national natural gas academic annual conference. Nanning: Natural Gas Committee of Chinese Petroleum: 12.]
- 刘凯铭, 王兴志, 韦明洋, 等. 2025. 四川盆地蓬莱地区灯影组四段超深层白云岩储集层特征及主控因素[J]. *古地理学报*, 27(1): 109-125. [Liu Kaiming, Wang Xingzhi, Wei Mingyang, et al. 2025. Reservoir characteristics and main controlling factors of ultra-deep dolomite in the 4th member of Sinian Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(1): 109-125.]
- 刘树根, 宋金民, 罗平, 等. 2016. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 43(2): 129-152. [Liu Shugen, Song Jinmin, Luo Ping, et al. 2016. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(2): 129-152.]
- 刘伟, 黄擎宇, 白莹, 等. 2021. 同生—准同生期大气淡水溶蚀对微生物碳酸盐岩储层的控制作用: 以塔里木盆地地下寒武统为例[J]. *地质前缘*, 28(1): 225-234. [Liu Wei, Huang Qingyu, Bai Ying, et al. 2021. Meteoric water dissolution controls on microbial carbonate reservoir formation in the penecontemporaneous stage: Insight from the lower Cambrian Formation of the Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 225-234.]
- 刘禹, 郑剑锋, 曾灏辉, 等. 2022. 塔里木盆地柯坪露头区震旦系微生物白云岩储层微观表征[J]. *天然气地球科学*, 33(1): 49-62. [Liu Yu, Zheng Jianfeng, Zeng Jianhui, et al. 2022. Micro-characterization of microbial dolomite reservoir of Upper Sinian Qigebalak Formation in Keping area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 33(1): 49-62.]
- 罗青云, 王剑, 杜秋定, 等. 2024. 川北地区灯影组四段白云岩成岩演化对优质储层的控制作用[J]. *沉积学报*, 42(6): 2174-2190. [Luo Qingyun, Wang Jian, Du Qiuding, et al. 2024. Controls on the high-quality dolomite reservoir of the 4th member of Dengying Formation related to the diagenetic evolution, northern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(6): 2174-2190.]
- 穆亚飞. 2019. 柯坪地区下寒武统沉积储层特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京): 1-91. [Mu Yafei. 2019. Study on the characteristics of lower Cambrian sedimentary reservoir in Kalpin area[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing): 1-91.]
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1-28. [Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1-28.]
- 彭俊. 2010. 川东南地区震旦系灯影组储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学: 18-27. [Peng Jun. 2010. The research of reservoir characteristics of the Dengying Formation in southeast Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 18-27.]
- 齐哲. 2021. 上扬子西北缘震旦世古环境演化[D]. 成都: 成都理工大学: 1-62. [Qi Zhe. 2021. Paleo-environmental evolution of Late Sinian period in the northwestern margin of Upper Yangtze[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-62.]
- 强深涛, 沈平, 张健, 等. 2017. 四川盆地川中地区震旦系灯影组碳酸盐沉积物成岩作用与孔隙流体演化[J]. *沉积学报*, 35(4): 797-811. [Qiang Shentao, Shen Ping, Zhang Jian, et al. 2017. The evolution of carbonate sediment diagenesis and pore fluid in Dengying Formation, central Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(4): 797-811.]

- 尚凯, 何卿, 徐勤琪, 等. 2025. 塔里木盆地中一下寒武统白云岩储层特征及成因机制[J]. 云南大学学报(自然科学版), 47(1): 99-112. [Shang Kai, He Qing, Xu Qinqi, et al. 2025. Characteristics and origin of the middle-lower Cambrian dolostone reservoir in Tarim Basin, NW China[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 47(1): 99-112.]
- 沈安江, 罗宪婴, 胡安平, 等. 2022. 从准同生到埋藏环境的白云石化路径及其成储效应[J]. 石油勘探与开发, 49(4): 637-647. [Shen Anjiang, Luo Xianying, Hu Anping, et al. 2022. Dolomitization evolution and its effects on hydrocarbon reservoir formation from penecontemporaneous to deep burial environment[J]. Petroleum Exploration and Development, 49(4): 637-647.]
- 宋金民, 罗平, 杨式升, 等. 2014. 塔里木盆地地下寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 41(4): 404-413, 437. [Song Jinmin, Luo Ping, Yang Shisheng, et al. 2014. Reservoirs of lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(4): 404-413, 437.]
- 唐天福, 薛耀松, 俞从流. 1980. 中国南方震旦纪藻碳酸盐岩的特征及环境意义[J]. 科学通报, 25(18): 853-855. [Tang Tianfu, Xue Yaosong, Yu Congliu. 1980. Characteristics and environmental significance of Sinian algal carbonate rocks in southern China[J]. Chinese Science Bulletin, 25(18): 853-855.]
- 唐玄. 2018. 川西南地区震旦系灯影组微生物碳酸盐岩储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-74. [Tang Xuan. 2018. Characteristics of microbialite reservoir of Sinian Dengying Formation in the southwestern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-74.]
- 王鑫, 辛勇光, 田瀚, 等. 2020. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积储层研究进展[J]. 海相油气地质, 25(3): 210-222. [Wang Xin, Xin Yongguang, Tian Han, et al. 2020. Research progress on sedimentation and reservoir of Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 25(3): 210-222.]
- 魏天媛, 蔡春芳, 扈永杰, 等. 2023. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组储层成因[J]. 沉积学报, 41(2): 527-544. [Wei Tianyuan, Cai Chunfang, Hu Yongjie, et al. 2023. Origin of reservoirs in the lower Cambrian Xiaerbulak Formation, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 41(2): 527-544.]
- 文华国, 罗连超, 丁一, 等. 2025. 川中古隆起灯影组多期盐水成岩流体活动与成储意义[J]. 沉积学报, 43(5): 1679-1696. [Wen Huaguo, Luo Lianchao, Ding Yi, et al. 2025. Multiphase saline diagenetic fluid activity in the Dengying Formation of the Central Sichuan Paleo-Uplift: Implications for reservoir development[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(5): 1679-1696.]
- 文华国, 文龙, 丁一, 等. 2024. 四川盆地及周缘地区震旦系灯影组白云岩岩石类型及沉积相划分方案[J]. 天然气工业, 44(7): 27-41. [Wen Huaguo, Wen Long, Ding Yi, et al. 2024. Rock types and sedimentary facies division scheme of the Sinian Dengying Formation dolomite in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Industry, 44(7): 27-41.]
- 文佳. 2021. 贵州遵义地区震旦系灯影组微生物岩段沉积及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-85. [Wen Jia. 2021. Sedimentary facies and reservoir characteristics of Sinian Dengying Formation microbial rocks in Zunyi area, Guizhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-85.]
- 夏茂龙, 张本健, 曾乙洋, 等. 2024. 川中地区蓬莱气田震旦系灯影组二段储层发育主控因素及分布规律[J]. 岩性油气藏, 36(3): 50-60. [Xia Maolong, Zhang Benjian, Zeng Yiyang, et al. 2024. Main controlling factors and distribution of reservoirs of the Second member of Sinian Dengying Formation in Penglai gas field, central Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 36(3): 50-60.]
- 徐哲航, 兰才俊, 马肖琳, 等. 2020. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体储层沉积模式与物性特征[J]. 地球科学, 45(4): 1281-1294. [Xu Zhehang, Lan Caijun, Ma Xiaolin, et al. 2020. Sedimentary models and physical properties of mound-shoal complex reservoirs in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Earth Science, 45(4): 1281-1294.]
- 许洋. 2023. 四川盆地灯影组碳酸盐岩类型划分及沉积环境意义[D]. 北京: 中国石油大学(北京): 23-32. [Xu Yang. 2023. Classification of carbonate rocks types from the Dengying Formation in Sichuan Basin and their implications for sedimentary environment[D]. Beijing: China University of Petroleum: 23-32.]
- 薛耀松, 唐天福, 俞从流. 1984. 南京一巢县一带震旦纪灯影期碳酸盐台地沉积特征[J]. 地层学杂志, 8(1): 1-9. [Xue Yaosong, Tang Tianfu, Yu Congliu. 1984. The depositional characteristics of the carbonate platform of the Dengying age of Late Sinian, Nanjing-Chaoxian region[J]. Journal of Stratigraphy, 8(1): 1-9.]
- 薛玉芳. 2023. 多尺度白云岩储层孔隙结构表征及弹渗属性研究[D]. 武汉: 中国地质大学: 31-33. [Xue Yufang. 2023. Characterization of pore structure and elasticity and permeability properties of multi-scale dolomite reservoir[D]. Wuhan: China

- University of Geosciences: 31-33.]
- 严威, 杨果, 易艳, 等. 2019. 塔里木盆地柯坪地区上震旦统白云岩储层特征与成因[J]. 石油学报, 40(3): 295-307, 321. [Yan Wei, Yang Guo, Yi Yan, et al. 2019. Characteristics and genesis of Upper Sinian dolomite reservoirs in Keping area, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(3): 295-307, 321.]
- 严威, 郑剑锋, 陈永权, 等. 2017. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组白云岩储层特征及成因[J]. 海相油气地质, 22(4): 35-43. [Yan Wei, Zheng Jianfeng, Chen Yongquan, et al. 2017. Characteristics and genesis of dolomite reservoir in the lower Cambrian Xiaerblak Formation, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 22(4): 35-43.]
- 颜瑞晶. 2022. 川南—黔北地区震旦系灯影组储层特征与形成机制研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-159. [Yan Ruijing. 2022. Reservoir characteristics and Formation mechanisms of the Sinian Dengying Formation in southern Sichuan to northern Guizhou, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-159.]
- 杨俊丰. 2018. 巴楚隆起下寒武统肖尔布拉克组白云岩储层特征及分布[D]. 成都: 西南石油大学: 1-58. [Yang Junfeng. 2018. Characteristics and distribution of dolomite reservoirs in the Xiaerbulake Formation of the lower Cambrian in the Bachu uplift[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University: 1-58.]
- 余浩元, 蔡春芳, 郑剑锋, 等. 2018. 微生物结构对微生物白云岩孔隙特征的影响: 以塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组为例[J]. 石油实验地质, 40(2): 233-243. [Yu Haoyuan, Cai Chunfang, Zheng Jianfeng, et al. 2018. Influence of microbial textures on pore characteristics of microbial dolomites: A case study of lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Keping area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 40(2): 233-243.]
- 余晶洁. 2020. 川东地区灯影组微生物岩建造与储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学: 1-103. [Yu Jingjie. 2020. Carbonate rock microbial construction and reservoir characteristics of Sinian Dengying Formation in the eastern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-103.]
- 余永强. 2017. 川西中—北段中三叠统雷四3亚段储层特征[D]. 成都: 成都理工大学: 1-60. [Yu Yongqiang. 2017. Reservoir characteristics of T_2^{4+3} of the Middle Triassic in the middle-north area of western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-60.]
- 曾理, 万茂霞, 彭英. 2004. 白云石有序度及其在石油地质中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 27(4): 64-66, 72. [Zeng Li, Wan Maoxia, Peng Ying. 2004. Dolomite sequentiality and its application to petroleum geology[J]. Natural Gas Exploration and Development, 27(4): 64-66, 72.]
- 张本健, 马华灵, 李文正, 等. 2023. 四川盆地蓬莱气区灯二段储集层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 34(11): 1899-1915. [Zhang Benjian, Ma Hualing, Li Wenzheng, et al. 2023. Reservoir characteristics and main controlling factors in the Second member of the Dengying Formation in the Penglai gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 34(11): 1899-1915.]
- 张荫本, 唐泽尧, 陈季高. 1996. 粘结石分类及应用[J]. 天然气勘探与开发, 19(4): 24-33. [Zhang Yinben, Tang Zeyao, Chen Jigao. 1996. Classification and application of cohesive rocks[J]. Natural Gas Exploration & Development, 19(4): 24-33.]
- 郑剑锋, 黄理力, 袁文芳, 等. 2020a. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统肖尔布拉克组地球化学特征及其沉积和成岩环境意义[J]. 天然气地球科学, 31(5): 698-709. [Zheng Jianfeng, Huang Lili, Yuan Wenfang, et al. 2020a. Geochemical features and its significance of sedimentary and diagenetic environment in the lower Cambrian Xiaerblak Formation of Keping area, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 31(5): 698-709.]
- 郑剑锋, 刘禹, 朱永进, 等. 2021a. 塔里木盆地乌什地区上震旦统奇格布拉克组地球化学特征及其地质意义[J]. 古地理学报, 23(5): 983-998. [Zheng Jianfeng, Liu Yu, Zhu Yongjin, et al. 2021a. Geochemical features and its geological significances of the Upper Sinian Qigeblak Formation in Wushi area, Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(5): 983-998.]
- 郑剑锋, 潘文庆, 沈安江, 等. 2020b. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义[J]. 石油勘探与开发, 47(3): 499-511. [Zheng Jianfeng, Pan Wenqing, Shen Anjiang, et al. 2020b. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerblak Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(3): 499-511.]
- 郑剑锋, 沈安江, 杨翰轩, 等. 2021b. 塔里木盆地西北缘震旦系微生物白云岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 37(7): 2189-2202. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. 2021b. Geochemistry and geochronology characteristics and

- their geological significance of microbial dolomite in Upper Sinian, NW Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2189-2202.]
- 周吉羚, 李国蓉, 高鱼伟, 等. 2015. 川南地区震旦系灯影组白云岩地球化学特征及形成机制[J]. *东北石油大学学报*, 39 (3): 67-75. [Zhou Jiling, Li Guorong, Gao Yuwei, et al. 2015. Geochemistry and origin of dolomites of the Sinian Dengying Formation in south Sichuan area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 39(3): 67-75.]
- 朱同兴, 罗安屏. 1992. 一个最古老的肾形藻泥丘相的首次发现及其地质意义: 以滇东北地区震旦系灯影组为例[J]. *岩相古地理*, (4):20-28. [Zhu Tongxing, Luo Anping. 1992. First discovery of an oldest *Renalcis* mound facies and its geological significance: An example from the Upper Sinian Dengying Formation in northeastern Yunnan[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, (4): 20-28.]
- Barlow E V, House C H, Liu M C, et al. 2024. Distinctive microfossil supports Early Paleoproterozoic rise in complex cellular organisation[J]. *Geobiology*, 22(1): e12576.
- Bathurst R G C. 1966. Boring algae, micrite envelopes and lithification of molluscan biosparites[J]. *Geological Journal*, 5(1): 15-32.
- Bosak T, Bush J W M, Flynn M R, et al. 2010. Formation and stability of oxygen-rich bubbles that shape photosynthetic mats[J]. *Geobiology*, 8(1): 45-55.
- Chen L P, Zhang H, Cai Z X, et al. 2020. Characteristics and formation mechanisms of the unconformity-related paleokarst reservoirs in the Upper Sinian, northwestern Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 120: 104559.
- Cramer B D, Jarvis I. 2020. Carbon isotope stratigraphy[J]. *Geologic Time Scale 2020*, 1: 309-343.
- Decho A W, Gutierrez T. 2017. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems[J]. *Frontiers in Microbiology*, 8: 922.
- Della Porta G, Capezzuoli E, De Bernardo A. 2017. Facies character and depositional architecture of hydrothermal travertine slope aprons (Pleistocene, Acquasanta Terme, central Italy)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 87: 171-187.
- Diaz M R, Eberli G P. 2022. Microbial contribution to early marine cementation[J]. *Sedimentology*, 69(2): 798-822.
- Feng M Y, Wu P C, Qiang Z T, et al. 2017. Hydrothermal dolomite reservoir in the Precambrian Dengying Formation of central Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 82: 206-219.
- Ge Y Z, Lokier S W, Hoffmann R, et al. 2020. Composite micrite envelopes in the lagoon of Abu Dhabi and their application for the recognition of ancient firm- to hardgrounds[J]. *Marine Geology*, 423: 106141.
- Han Z Z, Dai S R, Zhang Y J, et al. 2024. Microbially induced fabrics in the Upper Ediacaran coated grain dolostone, northeast Sichuan Basin, SW China: Implications for reconstruction of the paleoceanic environment[J]. *Sedimentary Geology*, 467: 106653.
- Hu Y J, Cai C F, Sun P, et al. 2023. Palaeo-environmental significance of fibrous carbonate cement in Marinoan cap carbonates[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 155: 106392.
- Kobluk D R, Risk M J. 1977. Micritization and carbonate-grain binding by endolithic algae[J]. *AAPG Bulletin*, 61(7): 1069-1082.
- Komárek J, Komárková J. 2022. Review of the European *Microcystis* morphospecies (Cyanoprokaryotes) from nature[J]. *Fottea*, 2: 1-24.
- Lee J H, Lee H S, Chen J T, et al. 2014. Calcified microbial reefs in Cambrian Series 2, North China Platform: Implications for the evolution of Cambrian calcified microbes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 403: 30-42.
- Li Y, Hu Y J, Cai C F, et al. 2024. Diagenetic archives of the deeply-buried Cambrian Xiaerbulake Formation microbialite reservoirs, Bachu-Tazhong area, Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 167: 106987.
- Luo L C, Capezzuoli E, Rogerson M, et al. 2022. Precipitation of carbonate minerals in travertine-depositing hot springs: Driving forces, microenvironments, and mechanisms[J]. *Sedimentary Geology*, 438: 106207.
- Major R P, Lloyd R M, Lucia F J. 1992. Oxygen isotope composition of Holocene dolomite formed in a humid hypersaline setting[J]. *Geology*, 20(7): 586-588.
- Perry C T. 1999. Biofilm-related calcification, sediment trapping and constructive micrite envelopes: A criterion for the recognition of ancient grass-bed environments?[J]. *Sedimentology*, 46(1): 33-45.
- Pratt B R. 1984. *Epiphyton* and *Renalcis*: Diagenetic microfossils from calcification of coccoid blue-green algae[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 54(3): 948-971.
- Riding R. 1991. *Calcified cyanobacteria*[C]/Riding R. *Calcareous algae and stromatolites*. Berlin, Heidelberg: Springer: 55-87.

- Riding R. 2000. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 47(Suppl.1): 179-214.
- Shiraishi F, Hanzawa Y, Asada J, et al. 2023. Decompositional processes of microbial carbonates in Lagoa Vermelha, Brazil[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 93(3): 202-211.
- Song J M, Liu S G, Qing H, et al. 2018. The depositional evolution, reservoir characteristics, and controlling factors of microbial carbonates of Dengying Formation in Upper Neoproterozoic, Sichuan Basin, southwest China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 36(4): 591-619.
- Stephens N P, Sumner D Y. 2002. Renalcids as fossilized biofilm clusters[J]. *Palaios*, 17(3): 225-236.
- Suarez-Gonzalez P, Benito M I, Quijada I E, et al. 2019. ‘Trapping and binding’: A review of the factors controlling the development of fossil agglutinated microbialites and their distribution in space and time[J]. *Earth-Science Reviews*, 194: 182-215.
- Tang P, Chen D Z, Qian Y X, et al. 2022a. Types, Petrophysical properties and pore evolution of Late Ediacaran microbial carbonates, Tarim Basin, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 96(4): 1362-1375.
- Tang P, Chen D Z, Wang Y Z, et al. 2022b. Diagenesis of microbialite-dominated carbonates in the Upper Ediacaran Qigebrak Formation, NW Tarim Basin, China: Implications for reservoir development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 136: 105476.
- Wang L, He Y M, Peng X, et al. 2020. Pore structure characteristics of an ultradeep carbonate gas reservoir and their effects on gas storage and percolation capacities in the Deng IV member, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 44-65.
- Wang Y C, Shi K B, Liu B. 2023. Sedimentary structures of microbial carbonates in the Fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation, western Sichuan Basin, China[J]. *Scientific Reports*, 13(1): 2300.
- Wei T Y, Cai C F, Hu Y J, et al. 2023. Nature and evolution of diagenetic fluids in the deeply buried Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin, China[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 70(1): 126-144.
- Xu Y, Zhong Y, Zhou G, et al. 2025. Foamy fabric in the Ediacaran Dengying Formation dolostone (Upper Yangtze area, SW China): Origin and paleoenvironmental implications[J]. *Journal of Palaeogeography* (in press).
- Xu Z H, Lan C J, Zhang B J, et al. 2022. Impact of diagenesis on the microbial reservoirs of the terminal Ediacaran Dengying Formation from the central to northern Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 146: 105924.
- Yan R J, Xu G S, Xu F H, et al. 2022. The multistage dissolution characteristics and their influence on mound–shoal complex reservoirs from the Sinian Dengying Formation, southeastern Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 139: 105596.
- Zempolich W G, Wilkinson B H, Lohmann K C. 1988. Diagenesis of Late Proterozoic carbonates: The Beck Spring Dolomite of eastern California[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58: 656-672.
- Zheng J F, Wang H, Shen A J, et al. 2023. Genesis of dolomite reservoir in Ediacaran Chigbrak Formation of Tarim Basin, NW China: Evidence from U–Pb dating, isotope and element geochemistry[J]. *Minerals*, 13(6): 725.
- Zhou Y, Yang F L, Ji Y L, et al. 2020. Characteristics and controlling factors of dolomite karst reservoirs of the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Precambrian Research*, 343: 105708.
- Zvir Y, Pimentel C, Pina C M. 2021. The effect of stoichiometry, Mg-Ca distribution, and iron, manganese, and zinc impurities on the dolomite order degree: A theoretical study[J]. *Minerals*, 11(7): 702.

Advances and Prospects of Foam-Like Dolostone

XU YaXin^{1,2,3}, LUO LianChao^{1,2,3}, ZHOU Gang⁴, WEN HuaGuo^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China

2. Key Laboratory of Deep-Time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural

Foundation: Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company (Project No. XNSKYJS2023-094).

Corresponding author: LUO LianChao, E-mail: luolianchao@cdut.edu.cn

Resources (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China

3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610041, China

Abstract: [Significance] Foam-like dolostone is widely distributed in China's two major oil and gas basins and is closely associated with microbialites. It is an important type of carbonate reservoir rock, and understanding its formation mechanisms and development patterns is of great significance for studies of microbial dolostone sedimentology and for carbonate oil and gas exploration. [Progress] Extensive studies have been reported on the macroscopic fabric, petrographic and mineralogical characteristics, genetic types, and depositional–diagenetic evolution of foam-like dolostone. Many genetic hypotheses have been proposed, including gas-bubble calcification, microbially mediated mineralization, and micritization of carbonate grains coupled with subsequent dissolution. These studies indicate that foam-like dolostone exhibits common features across different temporal and spatial settings; however, its formation is jointly controlled by depositional environment, microbial activity, and early diagenetic processes, and no unified genetic model has yet been established. [Conclusion and Prospects] The present study is based on a systematic review of previous findings to synthesize research progress on foam-like dolostone in terms of its spatiotemporal distribution, petrographic and mineralogical characteristics, classification schemes, lithofacies associations, and geochemical features. It is unlikely to be the product of a single genetic process; rather, it is a composite grain-supported dolostone formed in specific depositional environments following the combined effects of microbially mediated constructive micritization and early-stage dissolution, and it commonly exhibits favorable properties for hydrocarbon reservoirs. It is recommended that future studies of foam-like dolostone should integrate high-precision in situ micro-area geochemical analyses and microstructural investigations within detailed petrofacies constraints to systematically clarify the recorded paleoenvironmental information together with its genetic mechanisms and diagenetic fluid evolution, to advance the level of understanding of paleo-ocean evolution and thus provide theoretical guidance for hydrocarbon exploration.

Key words: foam-like dolostone; sedimentary characteristics; genetic mechanism; reservoir properties; geochemistry

