

Microbioliths of Late Ediacaran Qigebulak Formation in Tarim Basin, Xinjiang, China

塔里木盆地阿克苏地区晚埃迪卡拉世奇格布拉克组微生物 岩石类型与形成环境

Reng-Yi Pei (裴初奕)¹, Hong-Xia Jiang (姜红霞)¹, Ying Li (李莹)^{2,3,4}, Guo Yang (杨果)^{5*}, Wen-Qing Pan (潘文庆)⁵, Yong-Quan Chen (陈永权)⁵

¹ Hebei International Joint Research Center for Paleoanthropology, College of Earth Science, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050000, China.

² Nanjing University, Nanjing 210000, Jiangsu, China.

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

⁴ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China.

⁵ Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, Petrochina, Korla 841000, China.

*Corresponding author: Guo Yang. Email: yangguo-tlm@petrochina.com.cn

Abstract

The Late Ediacaran Qigebulak Formation at Sugaitebulak, Aksu area, western Tarim Basin, Xinjiang, China, is a classic section for study of reservoir of dolomitic microbioliths. Microscopic examination of thin sections shows that the main microbialites in the formation include laminites and thrombolites. The laminites have two types of fabrics: filamentous laminated and agglomerated laminated; The thrombolites have three types of fabrics: spheroid, worm-like and patchy clotted. Based on fabrics and comparison with modern microbialites, the formation environments of the Qigebulak Formation of the Sugaitebulak Formation consist of several subtidal to supratidal cycles. The main diagenesis of the microbialites includes recrystallization and dissolution. Different from previous studies, the rounded intraclasts of the microbialites are derived from the breaking of the microbialites.

Key words: Tarim basin, Ediacaran System, Qigebulak Formation, microbiolith, microbialite, laminate, thrombolite

Funding: This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41972320) to Ya-Sheng Wu.

Cite it as: Pei, R.Y., Jiang, H.X., Li, Y., Yang, G., Pan, W.Q., Chen, Y.Q. 2024. Microbioliths of Late Ediacaran Qigebulak Formation in Tarim Basin, Xinjiang, China. *Biopetrology*, 4(1): 44- 64. <http://biopetrology.com/moleqf>

摘要

塔里木盆地西部阿克苏地区苏盖特布拉克上震旦统奇格布拉克组是微生物白云岩研究的经典剖面，是微生物碳酸盐岩油气储层发育的优质层段。本文通过镜下薄片研究，分析阿克苏地区苏盖特布拉克剖面奇格布拉克组微生物岩的结构、形成环境与形成模式、结构演化规律，取得如下认识：（1）研究区奇格布拉克组发育凝块石、层纹石两种微生物岩，分别具有纹层结构与凝块结构；（2）纹层结构包括丝状纹层与凝块状纹层结构两种类型，凝块结构包括球粒状、蠕虫状与斑块状凝块结构三种类型；（3）根据不同的微生物岩结构，结合现代微生物岩的形成模式，认为苏盖特布拉克上震旦统奇格布拉克组形成环境包括了多个由潮下带到潮上带的旋回；（4）微生物岩结构演化具有一定的规律，研究区内微生物岩的凝块结构与纹层结构在形成后都经历了重结晶作用与溶蚀作用的改造。微生物岩的碎屑是微生物岩的重要组成部分，不应归入泡沫绵层石。

关键词: 塔里木盆地，震旦系，奇格布拉克组，微生物岩，凝块，结构演化

1. 前言

微生物的作用形成的岩石叫微生物岩石，微生物岩石包括微生物岩、微礁岩、微屑岩（Wu, 2022; 吴亚生, 2023）。微生物岩（Burne and Moore, 1987）指底栖微生物群落的作用形成的岩石，包括叠层石、层纹石、核形石、包壳石、凝块石等（吴亚生, 2023）。叠层石指具有微生物成因的纹层结构的柱状、丘状岩石（Kalkowsky, 1908; 吴亚生, 2023）；层纹石指具有微生物成因的纹层结构的层状岩石（吴亚生, 2023）；凝块石具有凝块状或海绵状结构的丘状、柱状层状岩石（Aitken, 1976）。吴亚生（2023）认为凝块石以具有微观的凝块结构为特征，不应该根据宏观或中观结构识别凝块石。

前人对微生物岩的研究多集中于宏观与中观特征（Burne and Moore, 1987; Riding, 2000; 梅冥相等, 2007），对微观结构涉及较少。近年来逐渐有学者开始注重微生物岩微观结构的研究（吴亚生等, 2018）。根据对微生物岩显微结构的研究，吴亚生等（2021）提出了模孔的概念，指微生物死亡腐烂后留下的孔洞。丰富的模孔使得微生物岩容易形成良好的油气储层。目前在美国阿拉巴马州（Mancini et al., 2000）、哈萨克斯坦（Kenter et al., 2006）以及中国四川（王兴志, 1995）、华北渤海湾（余家仁和雷怀玉, 1998）等地区的不同层系中，都发现了微生物岩作为储层的大型油气田。微生物岩研究对油气资源勘探开发、认识地球环境演化有重要意义（罗平等, 2013; 赵文智等, 2018, 2019; 王建功等, 2020; 张文浩等, 2021; 沈安江等, 2022）。

塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组广泛发育白云质微生物岩，是当前和今后油气勘探的重要层系之一（郑剑锋等, 2021）。许多学者对其构造背景（周肖贝等, 2012）、地球化学特征

（钱一雄等，2015；郑剑锋等，2020, 2021）、储层特征（李朋威等，2015；石书缘等，2017；杨翰轩等，2020）、勘探选区（闫磊等，2022）、成岩演化（杨云坤等，2014；曹颖辉等，2020）进行了广泛的研究。然而，由于微生物白云岩在野外露头的识别特征不明显，以及微生物岩石研究理论和方法的滞后，微生物岩石微观结构研究不够深入，制约了对该地区上震旦统岩相古地理、油气储集层形成机制的认识。鉴于此，本文作者对塔里木盆地阿克苏地区苏盖特布拉克剖面开展了包括野外观察测量、薄片观察等综合研究，重点分析其微生物岩石的结构及其成岩演化，探讨其形成环境，以期对油气勘探开发提供依据。

2. 区域地质概况

此次研究的地层和剖面位于塔里木盆地西北部。塔里木盆地是由古生代克拉通盆地和新生代前陆盆地组合而成、经历了多期次沉降-隆升形成的大型复合式叠合盆地（贾承造，1997；石开波等，2016）。塔里木盆地震旦系地层在盆地西北方向的阿克苏-乌什地区、东北方向库鲁克塔格地区和西南方向铁克里克地区都有出露（宋立勋等，1990；刘永福等，2008）。阿克苏-乌什地区震旦系地层集中出露于阿克苏、乌什与柯坪地区的阿克苏-乌什县的南山一带，分布于奇格布拉克、尤尔美纳克、巧恩布拉克、苏盖特布拉克及肖尔布拉克地区（图1A）。在构造上，研究区位于柯坪断隆北端（图1B），奇格布拉克组在区内出露完整，与下伏苏盖特布拉克组呈平行不整合接触（图1C）（王宇等，2010；石开波等，2016；郑剑锋等，2021；郑潇宇等，2023）。

新元古代，塔里木板块在罗迪尼亚超大陆中位于澳大利亚板块北缘，伴随着罗迪尼亚超大陆的解体，在震旦纪时演化为克拉通内拗陷（石开波等，2018），形成了“南隆北拗”的古地理特征。早震旦世（635-550Ma）为大陆裂谷盆地发育阶段，在塔里木板块的边缘和内部均有大陆裂谷盆地发育，形成了一套厚度上千米的碎屑岩（钱一雄等，2014；杨云坤等，2014）。晚震旦世（550-542Ma），塔里木盆地处于稳定的构造背景之下，塔北地区为克拉通内拗陷演化阶段，整体接受沉积，稳定的构造背景以及陆源碎屑的减少，开始发育碳酸盐岩。塔西南地区继承早期被动大陆边缘沉积背景，同样以形成碳酸盐岩地层为主。震旦纪末期，整个塔里木盆地经历了一次构造抬升及海退过程，震旦系遭受长期风化剥蚀作用，形成了塔西北地区震旦系顶部的风化壳岩溶及高低起伏的古地貌（Lenton et al., 2014；杨鑫等，2014）。塔西北地区碳酸盐岩地层经历了白云岩化作用、岩溶作用等地质作用的改造，为深埋碳酸盐岩形成良好储层提供了保障（胡广等，2014；杨飞等，2017）。

3. 苏盖特布拉克剖面微生物岩特征

3.1 地层岩性特征

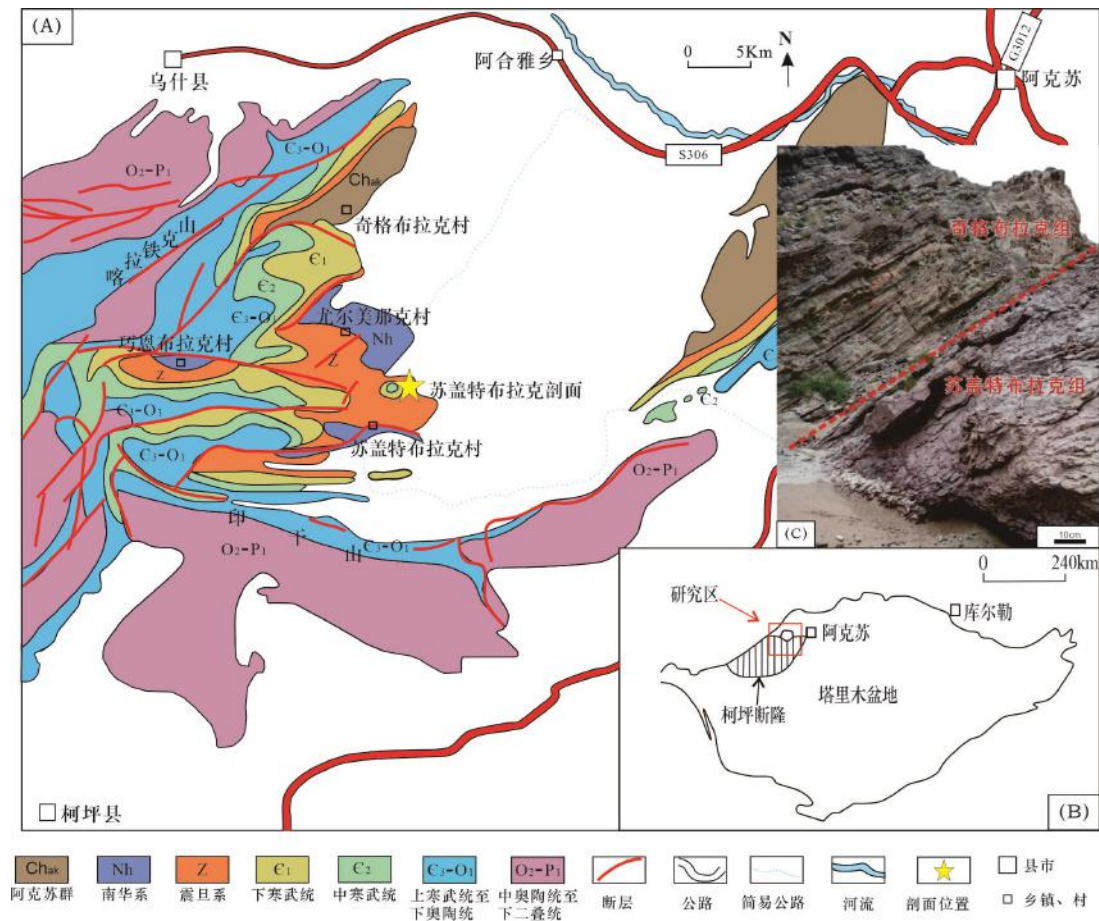


图1 塔里木盆地研究剖面所在地区地质简图及苏盖特布拉克剖面位置 (A据郑潇宇等, 2023修改)

Fig. 1 Location of the Sugaitbuluk section and geological map of the surrounding area (modified from Zheng et al., 2023)

苏盖特布拉克剖面大致位于阿克苏市正西方向75Km处。根据此次野外测量，该剖面奇格布拉克组厚约169 m，主要为灰色层状和块状白云岩，中下部普遍发育层纹石白云岩和凝块石白云岩(图2)。纵向上可分为三大段：Q1、Q2、Q3。

Q1段厚60m，主要为块状、其次为厚层和中层状的白云岩，底部有凝块石，下部发育大套层纹石，上部发育砂屑白云岩；Q2段厚58m，以灰色块状白云石为主，其次为中层、薄层状白云岩，有顺层的溶洞或蜂窝状溶孔；下部以凝块石为主，中部出现砂屑白云岩，上部以层纹石为主；Q3段厚51m，主要为浅灰色块状白云岩，具有砾屑残迹。

3.2 微生物岩结构类型

微生物岩石的结构是由微生物形成的，因此需要在微观尺度进行研究（吴亚生, 2023）。不同的微生物岩石有不同的结构，这些结构可以根据其变化做进一步的划分。苏盖特布拉克剖面奇格布拉克组主要发育层纹石和凝块石两种微生物岩和砂屑白云岩。这三种岩石可根据组分和结构变化做进一步分类。

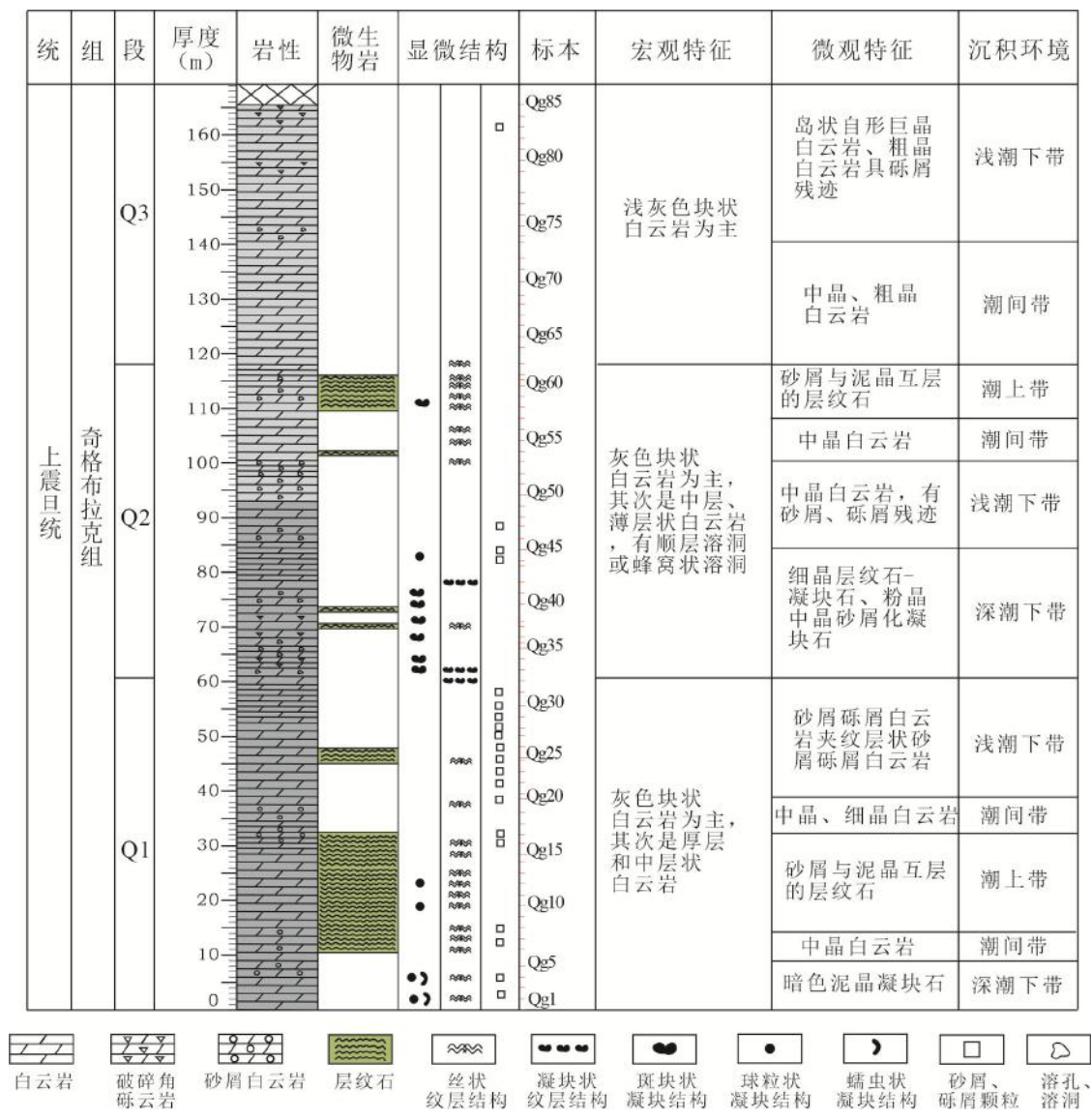


图2 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉世奇格布拉克组岩性柱状图

Fig. 2 Lithologic column of Late Ediacaran Qigebulak Formation in Sugaitebulak Section, Tarim Basin, Xinjiang, China

3.2.1 纹层结构

在本剖面上, 层纹石集中在Q1段下部及Q2段上部。大多数层纹石在露头上可见纹层结构, 由大致水平的但是有很多微小弯曲的纹层组成, 被认为是微生物成因的微纹层, 是层纹石的识别标志。这种纹层与无机沉积作用形成的水平层理的区别是后者没有微小弯曲。层纹石的基本组成单元是微生物成因的纹层, 它们一般由致密的泥晶碳酸盐矿物组成, 因为与其间的矿物在成分或结构上的不同, 往往具有差异风化, 从而在露头上容易识别。但是, 露头上的纹层结构需要在室内通过显微镜下观察, 确定更细微的结构。当然, 一部分根据露头确定的纹层结构, 在室内被确定不属于微生物成因的结构, 因而不是层纹石。

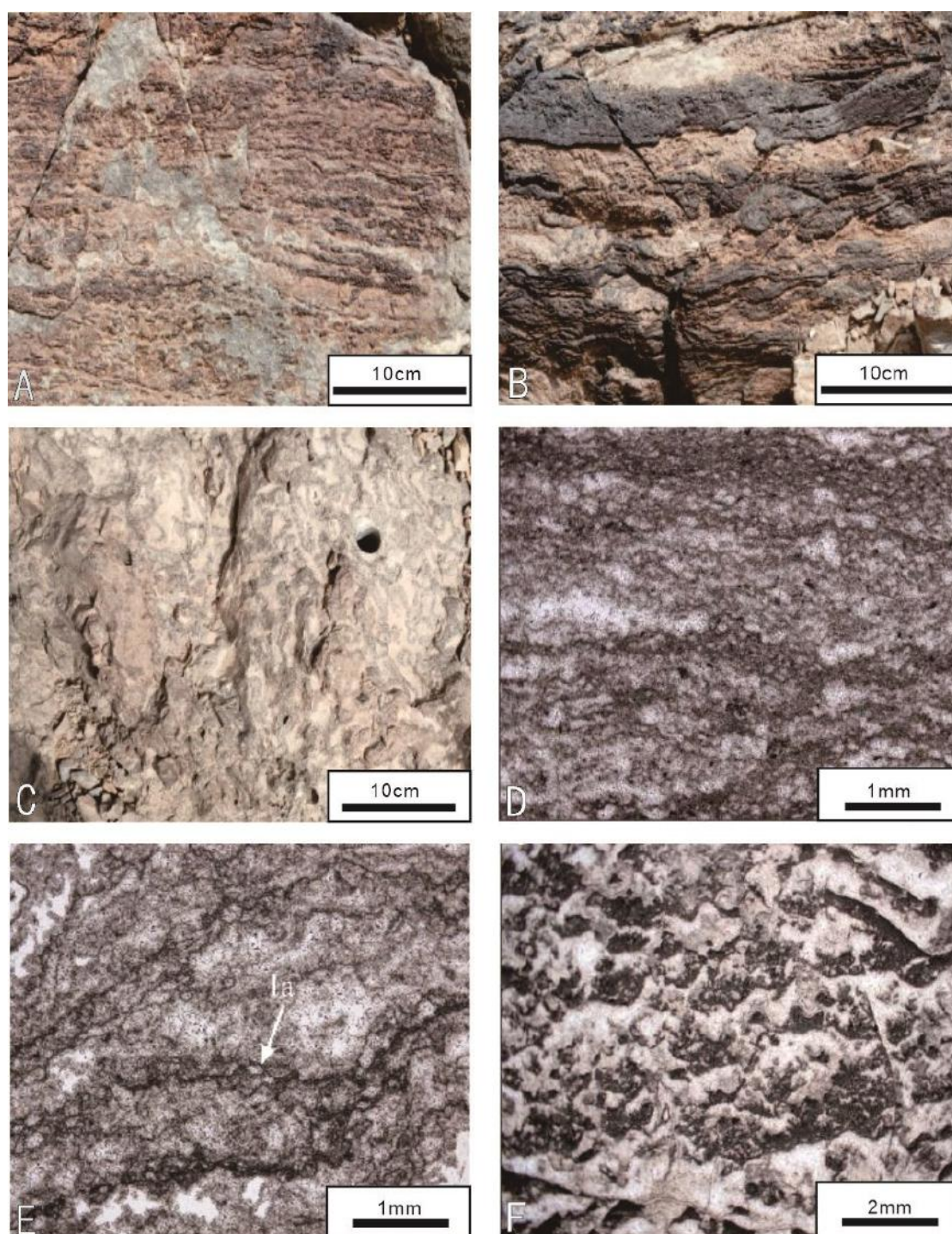


图3 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉世奇格布拉克组微生物岩石露头特征和层纹石显微结构。A, B: Q1段层纹石野外露头; C: Q2段蜂窝状岩溶白云岩野外露头; D: Q1段-7, 层纹石具丝状纹层结构, 由暗色波曲状细纹层和其间的胶结物组成, 单偏光; E: Q1段-11, 层纹石具丝状复合纹层结构, 由薄的暗色泥晶纹层 (la) 和稍厚的纹层的交互组成, 单偏光; F: Q2段-33, 层纹石具凝块状纹层结构, 纹层呈现断续分布, 亮晶胶结, 单偏光。

Fig. 3 Outcrop features and microfabrics of the laminites in the Late Ediacaran Qigebulak Formation in Sugaitebulak section, Tarim Basin.

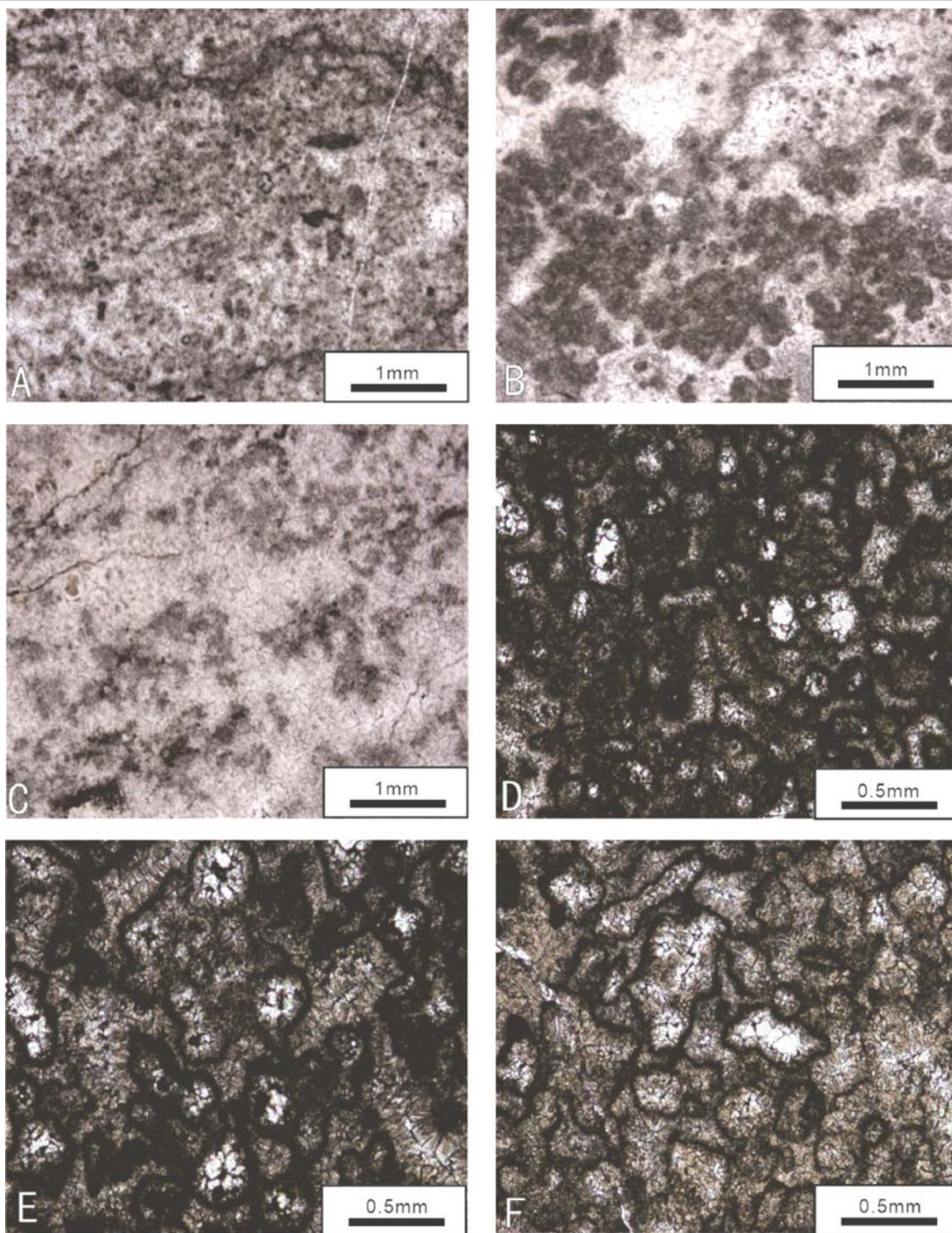


图4 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉纪世奇格布拉克组凝块结构与砂屑白云岩特征。

A: Q1段-10, 凝块石具球粒状凝块结构与蠕虫状凝块结构, 尺寸较小的暗色球状凝块穿插于微亮晶白云石中, 部分凝块拉长成蠕虫状, 还可以看到一组较为明显的纹层存在, 单偏光; B: Q2段-39, 凝块石具斑块状凝块结构, 凝块大小不一, 连接成片分布, 单偏光; C: Q2段-41, 凝块石具斑块状凝块结构, 凝块杂乱分布, 单偏光; D: Q1段-17, 砂屑白云岩, 单偏光; E: Q1段-20, 砂屑白云岩, 单偏光; F: Q1段-25, 砂屑白云岩, 单偏光。

Fig. 4 Fabrics of the thrombolites and dolomitic grainstone of the Late Ediacaran Qigebulak Formation in Sugaitebulak section, Tarim Basin, Xinjiang, China.

纹层结构是由暗色泥晶、泥粉晶白云石构成暗层、与细晶、中晶亮晶白云石组成的亮层交替形成。奇格布拉克组纹层多波曲，在镜下观察，可将层纹石分为丝状纹层结构和凝块状纹层结构两种。

丝状纹层结构由暗色泥晶纹层与浅色白云石胶结物互层组成（图3-D），细纹层呈致密波状，由极细的泥晶组成，一般单条或几条缠绕到一起，边缘较模糊，纹层厚度较细，不超过0.2mm。纹层之间还存在零散分布的暗色凝块，亮晶胶结物多为细晶、中晶的白云石，扫描电镜观察发现其间发育晶间溶孔。有时丝状纹层中会有砂屑，形成含砂屑的丝状复合纹层结构（图3-E）。凝块状纹层结构是由暗色泥晶纹层与亮晶白云石胶结物交互组成（图3-F），在镜下观察到纹层多呈断续分布，由暗色泥晶组成，纹层较为致密、厚度大，多超过1mm。

3.2.2 凝块结构

镜下研究发现，奇格布拉克组凝块石中凝块主要由暗色泥晶、泥粉晶白云石组成，呈圆球状或长条状分散分布，或是聚集在一起形成斑块状。凝块之间是细晶、中晶组成的亮晶白云石胶结物。根据镜下凝块形态，将凝块结构分为球粒状、蠕虫状与斑块状三种类型。

球粒状凝块结构在镜下可以看出多由深色泥晶或粉晶白云石组成，一般呈近圆形斑点（图4-A），直径约0.01mm，分布不均匀，呈分散孤立状分布，部分聚集在一起形成直径约为0.05mm的蠕虫状凝块，球粒凝块分布在细晶、中晶及微亮晶白云石中，并发育晶间溶孔，周围有时会出现暗色泥晶组成的纹层。

斑块状凝块结构中凝块多由暗色泥粉晶白云石组成，单个凝块呈圆形到似圆形（图4-B、C），斑块大小不一，直径约0.02-0.03mm，凝块斑块多数联结成片分布，联合形成的片状直径在1-2mm左右，并且在暗色斑块中存在亮晶胶结物。

砂屑白云岩（图4-D、E、F）的砂屑内部为亮晶，呈现出黑边白心的结构。局部颗粒间的亮晶胶结物可能是成岩早期的海底胶结物（图4-E、F），大部分为晚期的粒状胶结物。在镜下观察发现砂屑白云岩的溶蚀程度很高。此类砂屑白云岩通常被叫做泡沫绵层石（余浩元等，2018；郑剑锋等，2019），本文将在后面讨论其归属。

3.3 微生物岩结构演化

微生物岩不同的结构类型一是受微生物和环境控制，二是成岩作用改造控制。成岩作用会对岩石的原始结构进行不同程度的改造与破坏。根据薄片观察，奇格布拉克组至少经历了准同生白云石化作用、重结晶作用、溶蚀作用、胶结作用4种成岩作用。准同生白云石化作用是指在准同生期白云石取代方解石的过程。重结晶作用会使得原泥晶增大变为粉晶、细晶、中晶甚至部分可以变为粗晶；溶蚀作用可以破坏前面所有的结构，并产生溶蚀孔洞；胶结作用使溶蚀孔洞内被亮晶胶结物充填。

Q1段砂屑白云岩中重结晶作用明显, 砂屑内部多重结晶为亮晶(图5-A); Q2段的部分砂屑白云岩中可以看出颗粒多重结晶为中晶、细晶白云岩, 并且从晶间溶孔发育推断出其经历过溶蚀作用(图5-D); 在Q1段由暗色泥晶纹层与浅色砂屑纹层交互形成的丝状纹层结构层纹石的砂屑内部可以看出重结晶作用的结果(图5-B); 在Q2段组成层纹石的暗色细晶白云岩大多重结晶为粉晶, 并且连续性较差, 存在断续的特征(图5-E); Q2段凝块石的凝块间存在被中晶、粗晶亮晶白云石充填的溶蚀孔洞(图5-C); 发育于Q3段顶端自形晶粗晶白云岩以被重结晶为粉晶的砂屑白云岩为核心开始生长(图5-F)。

根据上述不同阶段成岩作用的产物, 可以对不同微生物岩结构进行结构演化推测, 推测其在成岩早期的原始形态(图6)。

蠕虫状凝块结构反演过程如图6-A所示, 其结构类型与图4-A属于同一种。晚成岩期不规则的凝块残迹是受到溶蚀作用的破坏而形成(图6-A-1), 残余凝块为细小零碎状, 较大的亮晶斑块(图6-A-2)是溶蚀严重的区域(图6-A-3)被亮晶充填形成; 被溶蚀之前应为较完整形态的斑块状或者细条带状(图6-A-1-4)。

斑块状凝块结构反演过程如图6-B所示, 其结构类型与图4-B、C属于同一种。晚成岩期的凝块残迹是受溶蚀作用的影响而形成(图6-B-1), 残余块状凝块为暗色泥晶团聚在一起形成, 凝块间的微亮晶斑块(图6-B-2-3), 是被溶蚀后又被亮晶充填形成; 被溶蚀前应为较完整的斑块状(图6-B-4)。

凝块状纹层结构反演过程如图6-C所示, 其结构类型与图3-F属于同一种。晚成岩期的纹层残迹是受溶蚀作用与重结晶作用而形成(图6-C-1), 残余纹层为断续的细晶泥晶纹层组成, 大片的亮晶层(图6-C-2)是受到溶蚀作用的强烈破坏被亮晶充填而成(图6-C-3); 被溶蚀与重结晶之前应为连续的泥晶纹层(图6-C-4)。

丝状纹层结构反演过程如图6-D所示, 其结构类型与图3-D、E属于同一种。晚成岩期的纹层残迹多是由早期的纹层遭受溶蚀作用与重结晶作用所得到(图6-D-1), 残余纹层多为断续排列, 彼此之间连续性较差, 一些微亮晶的区域(图6-D-2)是受到溶蚀作用破坏较为强烈的区域(图6-D-3)被亮晶充填而形成; 推测丝状纹层结构在沉积期可能为暗色藻丝体相互缠绕组成的厚薄不一的纹层组(图6-D-4)。

3.4 形成环境分析

参考鲨鱼湾现代微生物岩形成模式(Jahnert and Collins, 2012a)来分析研究区域内微生物岩石的形成环境。澳大利亚鲨鱼湾的全新世高盐碳酸盐岩体系以微生物岩(叠层石和凝块石)和潮上介壳灰岩海滩脊系统为代表。自4500年前以来, 晚全新世海平面下降, 潮上潮间带微生物岩石向海推进, 并且伴有双壳类贝壳(Jahnert et al., 2012b)。Jahnert and Collins(2012a)将鲨鱼湾微生物岩石分为含有脑状微生物岩石、共柱状微生物岩石、混合状微生物岩石、隆起状微

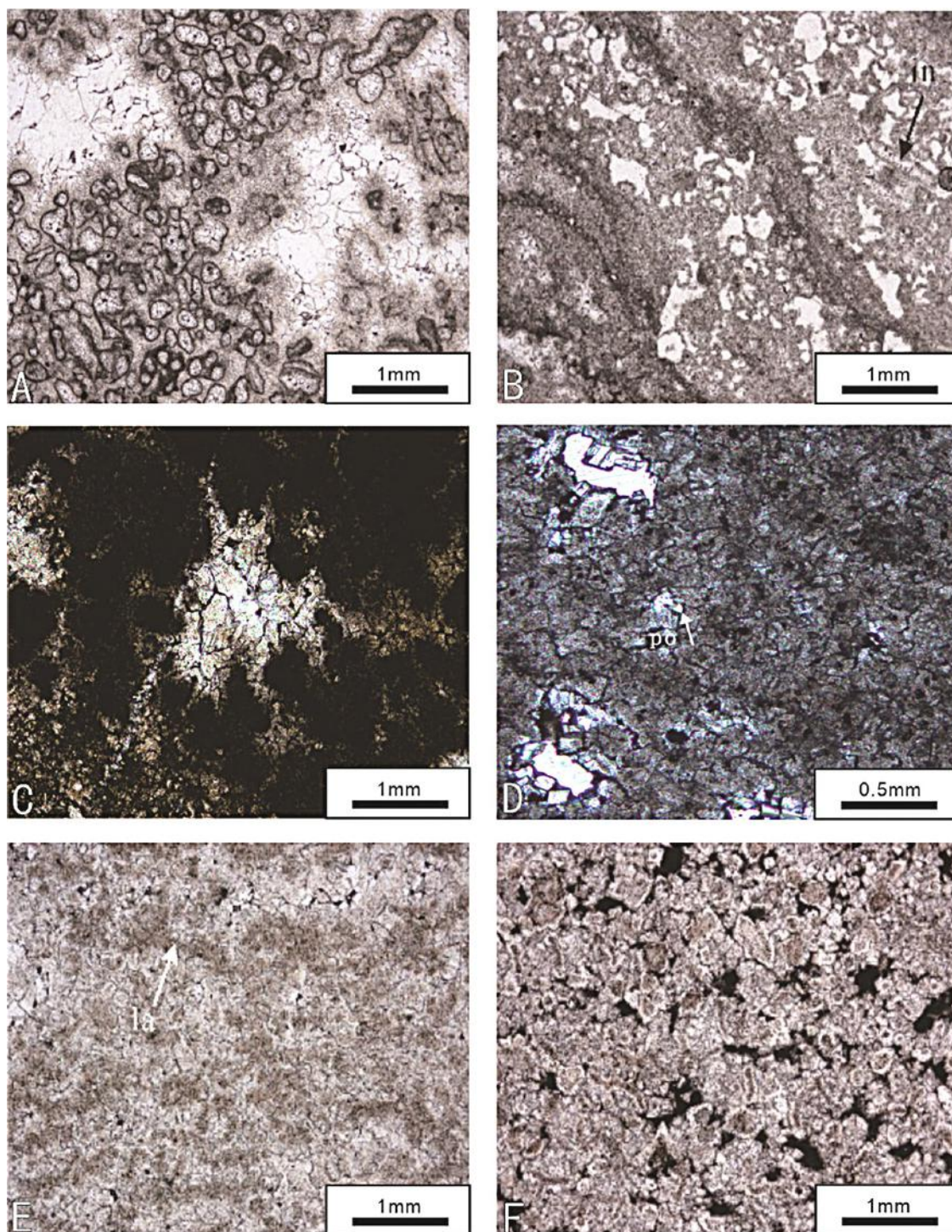


图5 塔塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉世奇格布拉克组微生物岩石成岩特征。

A: Q1段-13, 砂屑白云岩, 砂屑内部重结晶, 单偏光; B: Q1段-15, 层纹石, 由暗色泥晶薄纹层与浅色砂屑厚纹层的交互形成, 砂屑内部 (in) 重结晶, 单偏光; C: Q2段-39, 凝块石, 暗色凝块间存在被亮晶胶结的溶孔, 单偏光; D: Q2段-45, 砂屑白云岩, 重结晶为中晶白云岩, 存在溶蚀作用, 晶间溶孔 (po) 较为发育, 单偏光; E: Q2段-57, 砂屑层纹石, 暗色纹层 (la) 不明显, 泥晶纹层 (la) 和砂屑重结晶成粉晶, 胶结物重结晶成粗晶, 单偏光; F: Q3段-84, 砂屑白云岩, 砂屑重结晶成粉晶, 自形晶粗晶白云岩以

砂屑为核心，单偏光。

Fig. 5 Diagenetic features of the Late Ediacaran Qigebulak Formation Rocks in the Sugaitebulak section, Tarim Basin, Xinjiang, China.

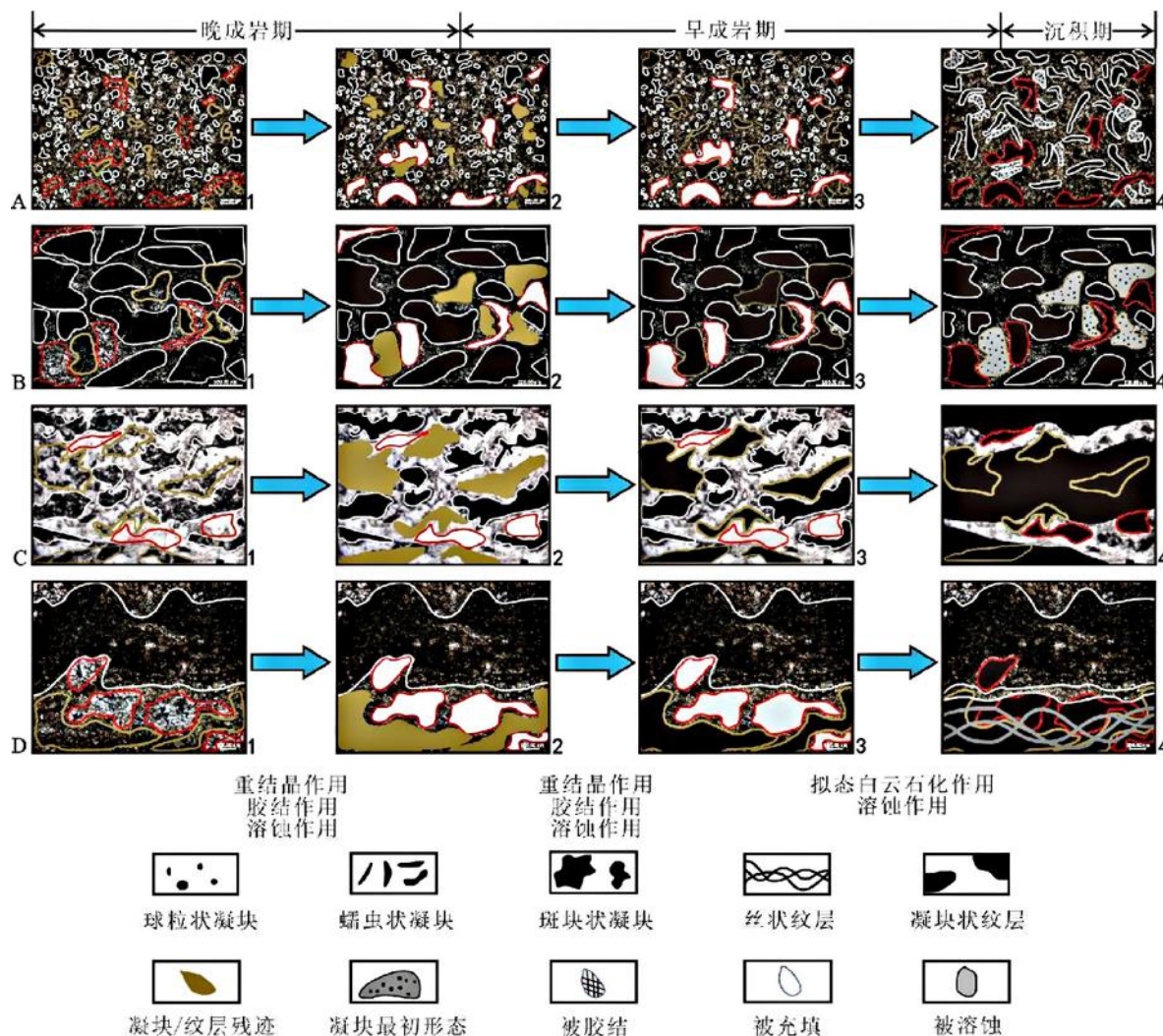


图6 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉世奇格布拉克组不同微生物岩石结构演化示意图。

Fig. 6 Schematic Diagram of diagenetic evolution of microbioliths of Late Ediacaran Qigebulak Formation of Sugaitebulak section, Tarim Basin, Xinjiang, China.

生物岩石几类，脑状与隆起状微生物岩石中含有凝块石，而共柱状微生物岩石中有叠层石，混合状两者特征都含有在内（Jahnert and Collins, 2011）。

苏盖特布拉克剖面主体为灰色白云岩，纵向上发育三个向上能量变强的旋回。Q1段底部为球粒状与蠕虫状凝块石，下部发育丝状与凝块状纹层结构的层纹石，岩性以粉晶、细晶白云岩为主，为深潮下带向潮上带环境转化；向上逐渐出现砂屑白云岩，层纹石含量开始下降，生物岩相向浅潮下带转化。砂屑最初出现在层纹石暗色纹层之间的亮层中，愈往上暗层厚度逐渐变薄，砂屑白云岩岩层厚度逐渐变厚，直至暗色纹层完全消失。Q2段在底部形成了一套块状具斑

块状结构的凝块石夹层纹石白云岩，之后又开始出现砂屑白云岩，表明水动力加强，该时期为深潮下带到浅潮下带的转化。Q2上段是层纹石发育的第二个主要时期，为潮上带环境，随后进入Q3段，纹层结构逐渐消失，主体为块状粗晶白云岩，镜下可见岛状自形巨晶白云岩及粗晶白云岩，同时伴随砾屑残迹，表明生物岩相变为浅潮下带。

综上所述，奇格布拉克组纵向上发育多个水体能量由弱变强环境下的生物岩旋回叠置（图7）。下段潮上带以层纹石大量发育为特点，潮上带底部会有层纹石夹砂屑白云岩；潮间带多发育层纹石、砂屑白云岩，在其底部有破碎的凝块石与层纹石夹凝块石和少量层纹石夹砂屑白云岩，潮间带砂屑白云岩开始增多，微生物岩石含量逐少；中上段为全都是砂屑白云岩的浅潮下带，偶见凝块石；上段为凝块石与凝块石丘混杂的深潮下带。凝块石丘在宏观形态上为丘状，内部无层理，主要由泥粉晶和细晶白云石组成，具有凝块石的结构特征。

4. 讨论

张荫本等（1996）提出泡沫状绵层云岩的特点是具有大量空腔的蓝细菌构成的格架、一般不具成层性、可以看出亮晶胶结。宋金民等（2014）对泡沫绵层石的定义为由泡沫状蓝细菌组成了网状或海绵状的格架，多由泥晶粉晶组成，有时可见叠层构造，格架内发育大量被亮晶白云石充填或半充填的空腔。两者的定义中均强调了格架特征，生物构成格架是需要相互接触的，然而，在薄片观察中，我们发现大部分的砂屑并没有相互接触（图8）。另外，作为生物体腔孔，大小和形态上应该具有相似性，变化不能太大。而我们发现，砂屑不论在形态还是在大小上都不规则，不具有相似性。

已报道的寒武系泡沫绵层石多具有以下特征：（1）在露头上可以看出中厚层状致密结晶白云岩，针孔极为发育（乔占峰等，2019）；（2）用肉眼观察可以看出毫米级的球状、椭球状孔隙均匀分布，外形似泡沫，呈层状分布（郑剑锋等，2019）；（3）在镜下可观察到大小均一的泥晶壁围成的球状，彼此之间紧密排列，环内腔体多被亮晶白云石充填（高洁等，2022）；除此之外还可以观察到其内部含有较多溶蚀孔洞（余浩元等，2018）。而张荫本等（1996）描述的关键特征之一就是不成层，从这一点上来看，寒武系的泡沫绵层石还需要再研究。

已报道的上震旦统泡沫绵层石特征有：（1）泡沫绵层石具有泡沫绵层结构，多由泥晶组成的暗色黑边和绵层腔孔组成，具有类似海绵状格架，在镜下可见花边状、似叶状体等特殊形态类型（李朋威等，2015b）；（2）其在宏观上多呈灰色、灰白色的厚层-块状，具有水平层理，并且可见大量针孔和顺层状溶蚀孔洞（杨翰轩等，2020；郑剑锋等，2021）；（3）在镜下可以看到以暗色泥晶为边缘的近似椭圆或圆形的环紧密相连，成层状分布，或者是以泡沫状形态出现（曹颖辉等，2020；刘禹等，2022）；（4）暗色泥晶环内多由亮晶充填（郑剑锋等，2021）。这些特征的描述中，对于格架的认识还需要再探讨。

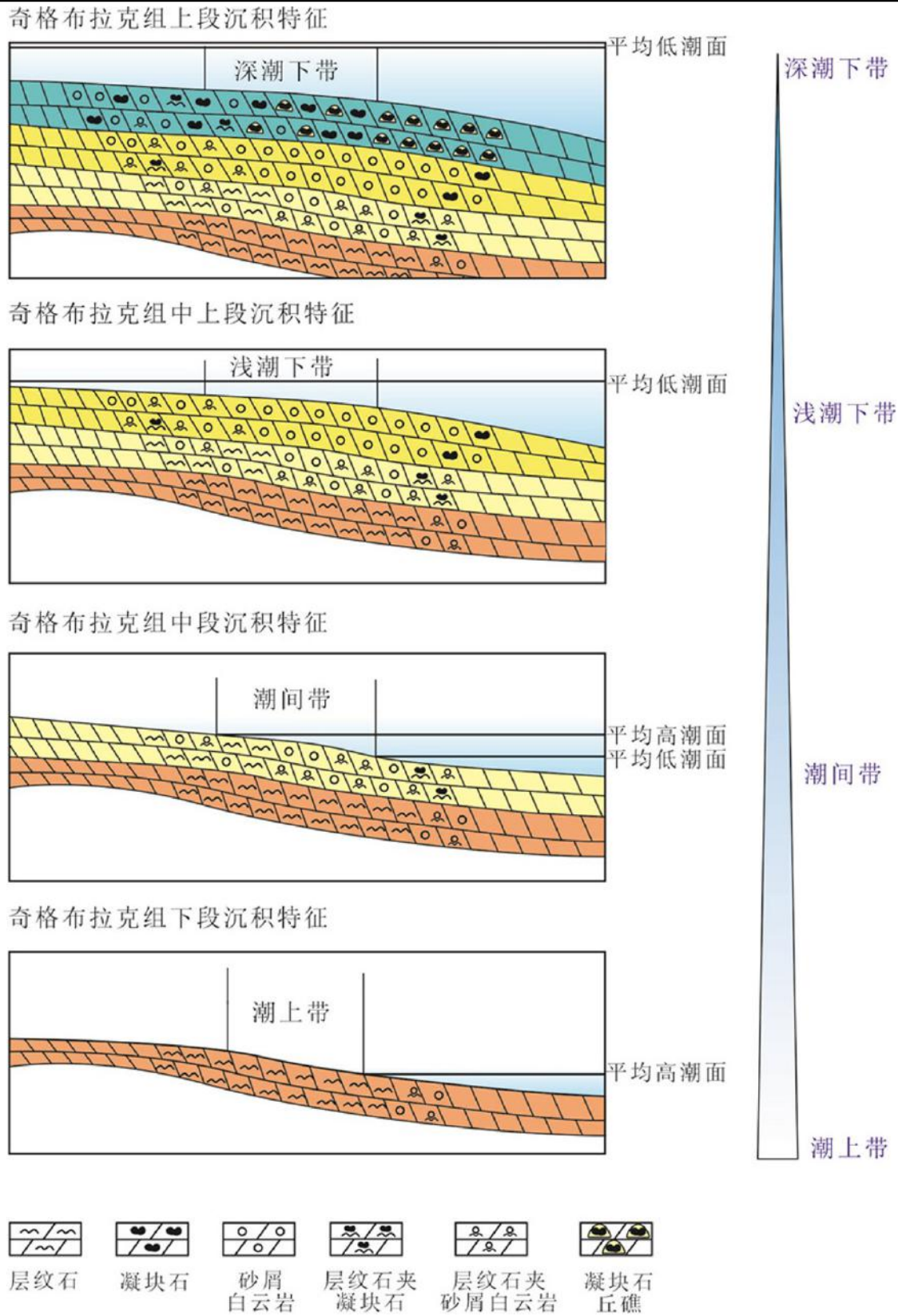


图7 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉世奇格布拉克组形成环境演化图。

Fig. 7 Evolution of environments of Late Ediacaran Qigebulak Formation of Sugaitebulak section, Tarim Basin, Xinjiang, China.

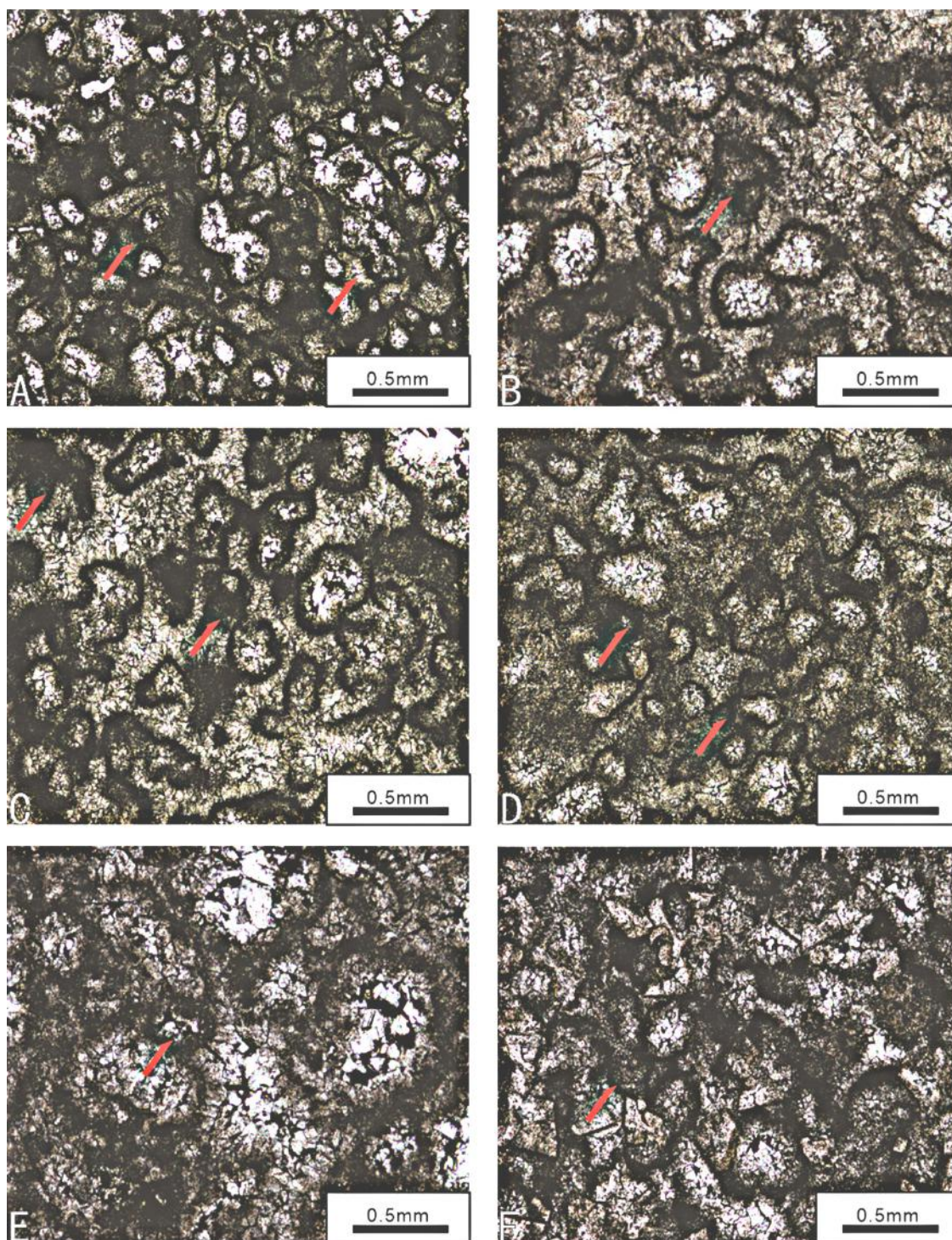


图8 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面晚埃迪卡拉世奇格布拉克组砂屑白云岩显微特征。

A: Q1段-17砂屑白云岩, 单偏光; B: Q1段-18砂屑白云岩, 单偏光; C: Q1段-20砂屑白云岩, 单偏光; D: Q1段-25砂屑白云岩, 单偏光; E: Q2段-45砂屑白云岩, 单偏光; F: Q3段-70砂屑白云岩, 单偏光。(红色箭头部分为指示溶蚀程度不一的较为明显的区域)。

Fig. 8 Microscopic characteristics of Late Ediacaran Qigebulak Formation dolomites of Sugaitebulak section, Tarim Basin, Xinjiang, China.

本文研究的奇格布拉克组砂屑白云岩有以下几个特征（图8）：（1）颗粒的大小不一，小颗粒直径约0.2-0.4mm，大颗粒直径可达1mm（图8-D、E）；（2）磨圆度不一，颗粒形状有长条状、椭圆状、微弱圆形，但不规则状占半数（图8-A-D、F）；（3）颜色整体偏深色、暗色（图8-A-F）；（4）溶蚀程度不同，大多数颗粒内部溶蚀严重，但仍有部分指发生轻微的内部溶蚀，或者没有溶蚀（图8-A-F）；（5）丰度不一，小颗粒和大颗粒排列没有规律与顺序，在不同剖面不同分段中丰度都不同（图8-B、E）；（6）没有像泡沫绵层石一样成泡沫状团聚在一起或者呈小圆球紧密排列，颗粒之间有空隙（图8-A-D、F）；（7）砂屑白云岩中溶孔较少，泡沫绵层石中溶孔较多；（8）颗粒可能是微生物成因的凝块碎屑，也可能是泥晶内碎屑（图8-B-D）。朱光有等（2023）也描述了类似的砂屑白云岩。李莹等（2020）提到微生物岩的砂屑结构，指出砂屑是微生物成因的凝块受后期的成岩改造而成。

由此表明，上震旦统奇格布拉克组的砂屑白云岩不是泡沫绵层石。砂屑可能为泥晶内碎屑，也可能为凝块碎屑，是否属于微生物岩还需要更深入的研究。

5. 结论

（1）塔里木盆地苏盖特布拉克剖面上震旦统奇格布拉克组发育微生物白云岩，主要有层纹石、凝块石两种微生物岩。

（2）微生物岩的显微结构可分为纹层结构与凝块结构两大类，纹层结构分为丝状纹层与凝块状纹层结构两种；凝块结构分为球粒状、蠕虫状与斑块状结构三种。该组微生物岩显微结构受到白云石化作用、重结晶作用、溶蚀作用与充填作用的影响。

（3）苏盖布拉克剖面上震旦统奇格布拉克组发育多个水动力能量由弱变强环境下的旋回。

（4）研究区域内的砂屑白云岩从显微特征观察发现其不是泡沫绵层石，砂屑可能是微生物成因的凝块碎屑，内部多被溶蚀，但溶蚀程度不同。

References

- Aitken, J.D. 1967. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the cambrian and ordovician of southwestern alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37(4): 1163-1178.
- Burne, R.V., Moore, L.S. 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios*: 241-254.
- Grey, K. 1998. Late Neoproterozoic stromatolites in glacial successions of the Kimberley region, West-ern Australia: evidence for a younger Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 92(1): 65-87.
- Jahnert, R.J., Collins, L.B. 2011. Significance of subtidal microbial deposits in shark bay, Australia. *Marine Geology*, 286(1-4): 106-111.
- Jahnert, R.J., Collins, L.B. 2012a. Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in shark bay, Australia. *Marine Geology*, 303-306: 115-136.

- Jahnert, R.V., Osni, P., Lindsay, C., et al. 2012b. Evolution of a coquina barrier in shark bay, Australia by GPR imaging: architecture of a Holocene reservoir analog. *Sedimentary Geology*, 81: 59-74
- Kalkowsky, E. 1908. Oolith und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 60: 68-125.
- Kenter, J.A., Harris, P.M., Collins, J.F., et al. 2006. Late Visean to Bashkirian platform cyclicity in the central Tengiz buildup, Precaspian Basin, Kazakhstan: Depositional evolution and reservoir development. *Giant hydrocarbon reservoirs of the world: From rocks to reservoir characterization and modeling: AAPG Memoir 88/SEPM Special Publication*: 7-54.
- Lenton, T.M., Boyle, R.A., Poulton, S.W., et al. 2014. Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era. *Nature Geosciences*, 7: 257-265.
- Mancini, E.A., Benson, D.J., Hart, B.S., et al. 2000. Appleton field case study (eastern Gulf coastal plain): Field development model for Upper Jurassic microbial reef reservoirs associated with paleotopographic basement structures. *AAPG bulletin*, 84(11): 1699-1717.
- Mancini, E.A., Blasingame, T.A., Archer, R., et al. 2004. Improving recovery from mature oil fields producing from carbonate reservoirs: Upper Jurassic Smackover Formation, Womack Hill field (eastern Gulf Coast, USA). *AAPG bulletin*, 88(12): 1629-1651.
- Riding, R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47: 179-214.
- Riding, R. 2011. Microbialites, Stromatolites, and Thrombolites. In: Reitner J Thiel V (eds) *Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht: 635-654.
- Shapiro, R.S., Awramik, S. 2000. Microbialite morphostratigraphy as a tool for correlating Late Cambrian-early Ordovician sequences. *The Journal of Geology*, 108(2): 171-180.
- Shapiro, R.S., Awramik, S. 2006. Favosamaceria cooper new group and form: a widely dispersed, time-restricted thrombolite. *Journal of Paleontology*, 80(3): 411-422.
- Tang, P., Chen, D., Wang, Y., et al. 2022. Diagenesis of microbialite-dominated carbonates in the Upper Ediacaran Qigebrak Formation, NW Tarim Basin, China: Implications for reservoir development. *Marine and Petroleum Geology*, 136.
- Turner, E.C., James, N.P., Narbonne, G.M. 2000. Taphonomic Control on Microstructure in Early Neoproterozoic Reefal Stromatolites and Thrombolites. *Palaios*, 15(2): 87-111.
- Webb, G.E., Kamber, B.S. 2000. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(9): 1557-1565.
- Wright, P., Tosca, N. 2016. A geochemical model for the Formation of the pre-salt reservoirs, Santos Basin, Brazil: Implications for understanding reservoir distribution. *AAPG Annual Convention & Exhibition*, Calgary, Alberta, Canada.
- 曹颖辉, 李洪辉, 王珊, 等, 2020. 塔里木盆地塔东隆起带上震旦统沉积模式探究. *天然气地球科学*, 31(8): 1099-1110.
- Cao, Y.H., Li, H.H., Wang, S., et al. 2020. An inquiry into the sedimentary model of Upper Sinian in Tadong Uplift of Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(8): 1099-1110.
- 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. *中国科学:地球科学*, 53(10): 2348-2369.
- Chen, X., Xu, Q., Hao, F., et al. 2023. Dolomite reservoir formation and diagenesis evolution of the Upper Ediacaran Qigebrak Formation in the Tabei area, Tarim Basin. *Science China Earth Sciences*, 53(10): 2348-2369.
- 高洁, 魏丹, 张昆, 2022. 微生物岩储层特征及主控因素——以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例. *断块油气田*, 29(1):53-59.

- Gao, J., Wei, D., Zhang, K. 2022. Reservoir characteristics and main controlling factors of microbialite: a case study of the Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation, Tarim Basin. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 29(1): 53-59.
- 韩作振, 陈吉涛, 张晓蕾, 等, 2009. 鲁西寒武系第三统张夏组附枝菌与附枝菌微生物灰岩特征研究. *地质学报*, 83(9):1097-1103.
- Han, Z.Z., Chen, J.T., Zhang, X.L., et al. 2009. Characteristics of *Epiphyton* and *Epiphyton* microbialites in the Zhangxia Formation (Third Series of Cambrian), Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1097-1103.
- 胡广, 刘文汇, 腾格尔, 等, 2014. 塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造—沉积环境控制因素. *石油与天然气地质*, 35(5): 685-695.
- Hu, G., Liu, W.H., Teng, G.E., et al. 2014. Tectonic-sedimentary constrains for hydrocarbon generating organism assemblage in the lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin. *Oil and Gas Geology*, 35(5): 685-695.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社. P1-P438.
- Jia, C.Z. 1997. Structural characteristics and oil and gas in Tarim Basin, China. Beijing: Petroleum Industry Press. P. 1-438.
- 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. *石油与天然气地质*, 36(3): 416-428.
- Li, P.W., Luo, P., Chen, M., et al. 2015a. Characteristics and origin of the Upper Sinian microbial carbonate reservoirs at the northwestern margin of Tarim Basin. *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寒武统为例. *石油学报*, 36(9): 1074-1089.
- Li, P.W., Luo, P., Chen, M., et al. 2015b. Microbial carbonate reservoirs microbial structure main controlling factors Upper Sinian-Lower Cambrian Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1074-1089.
- 李莹, 潘文庆, 吴亚生, 等, 2020. 塔里木盆地苏盖特布拉克剖面寒武系第二统第三阶微生物岩结构类型. *古地理学报*, 22(4): 663-679.
- Li, Y., Pan, W.Q., Wu, Y.S., et al. 2020. Structural types of the third stage microbial rocks of the Cambrian second series in Sugaitebulak section of the Tarim Basin. *Journal of Paleogeography*, 22(4): 663-679.
- 刘禹, 郑剑锋, 曾溅辉, 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. *天然气地球科学*, 33(1): 49-62.
- Liu, Y., Zheng, J.F., Zeng, J.H., et al. 2022. Micro characterization of microbial dolomite reservoir of Upper Sinian Qigeblak Formation in Keping area, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(1): 49-62.
- 刘永福, 桑洪, 孙雄伟, 等, 2008. 塔里木盆地东部震旦-寒武白云岩类型及成因. *西南石油大学学报*, 30(5): 27-31.
- Liu, Y.F., Sang, H., Sun, X.W., et al. 2008. The types and genesis of Cambrian and Siinurian dolostone in Eastern Tarim Basin. *Journal of Southwest Petroleum University*, 30(5): 27-31.
- 罗平, 王石, 李朋威, 等, 2013. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望. *沉积学报*, 31(5): 807-823.

- Luo, P., Yu, S., Li, P.W., et al. 2013. Review and Prospectives of Microbial Carbonate Reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5): 807-823.
- 梅冥相, 2007. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订:对灰岩成因结构分类体系的补充. *地学前缘*, 14(5): 222-234.
- Mei, M.X. 2007. Revised classification of microbial carbonates complementing the classification of limestones. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 222-234.
- 钱一雄, 杜永明, 陈代钊, 等, 2014. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面奇格布拉克组层序界面与沉积相研究. *石油实验地质*, 36(1): 1-8.
- Qian, Y.X., Du, Y.M., Chen, D.Z., et al. 2014. Stratigraphic sequence and sedimentary facies of Qigebulak Formation at Xianerbulak, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(1): 1-8.
- 钱一雄, 李国蓉, 董少峰, 等, 2015. 塔里木与四川上震旦统葡萄状白云岩地球化学特征及成因讨论. 2015年全国沉积学大会. 195-196.
- Qian, Y.X., Li, G.R., Dong, S.F., et al. 2015. Geochemical characteristics and genesis of the grape-like dolomites of the Upper Sinian Series in Tarim and Sichuan. *National Sedimentology Congress*. 195-196.
- 钱一雄, 何治亮, 李慧莉, 等, 2017. 塔里木盆地北部上震旦统葡萄状白云岩的发现及成因探讨. *古地理学报*, 19(2): 14.
- Qian, Y.X., He, Z.L., Li, H.L., et al. 2017. Discovery and genesis of upper Sinian grape dolomite in northern Tarim Basin. *Journal of Paleogeography*, 19(2): 14.
- 乔占峰, 沈安江, 倪新锋, 等, 2019. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘滩体系类型及其勘探意义. *石油与天然气地质*, 40(2): 392-402.
- Qiao, Z.F., Shen, A.J., Ni X.F., et al. 2019. Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration. *Oil & Gas Geology*, 40(2): 392-402.
- 沈安江, 胡安平, 张杰, 等, 2022. 微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律. *石油与天然气地质*, 43(3): 582-596.
- Shen, A.J., Hu, A.P., Zhang, J., et al. 2022. “Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution. *Oil & Gas Geology*, 43(3): 582-596.
- 石开波, 刘波, 田景春, 等, 2016. 塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古地理. *石油学报*, 37(11): 1343-1360.
- Shi, K.B., Liu, B., Tian, J.C., et al. 2016. Sedimentary characteristics and lithofacies paleogeography of Sinian in Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(11): 1343-1360.
- 石开波, 刘波, 姜伟民, 等, 2018. 塔里木盆地南华纪—震旦纪构造-沉积格局. *石油与天然气地质*, 39(5): 862-877.
- Shi, K.B., Liu, B., Jiang, W.M., et al. 2018. Nanhua-Sinian tectono-sedimentary framework of Tarim Basin, NW China. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 862-877.
- 石书缘, 刘伟, 黄擎宇, 等, 2017. 塔里木盆地北部震旦系齐格布拉克组白云岩储层特征及成因. *天然气地球科学*, 2017, 28(8): 1226-1234.
- Shi, S.Y., Liu, W., Huang, Q.Y., et al. 2017. Dolostone reservoir characteristic and its formation mechanism in Qigebulake Formtion, Sinian, north Tarim Basin. *Natural gas geoscience*, 28(8): 1226-1234.

- 史晓颖, 张传恒, 蒋干清, 等, 2008. 华北地台中元古代碳酸盐岩中的微生物成因构造及其生烃潜力. 现代地质, 22(5): 669-682.
- Shi, X.Y., Zhang, C.H., Jiang, A.Q., et al. 2008. Microbial Mats from the Mesoproterozoic Carbonates of the North China Platform and Their Potential for Hydrocarbon Generation. *Geoscience*, 22(5): 669-682.
- 宋立勋, 刘万祥, 1990. 塔里木地台震旦纪古地理概貌. 新疆石油地质, 11(3): 199-203.
- Song, L.Y., Liu, W.X. 1990. Central appearance of Sinian Palaeogeography of Tarim platform. *Xinjiang Petroleum Geology*, 11(3): 199-203.
- 宋金民, 罗平, 杨式升, 等. 2014, 塔里木盆地寒武统微生物碳酸盐岩储集层特征. 石油勘探与开发, 41(4): 404-413.
- Song, J.M., Luo, P., Yang, S.S., et al. 2014. Reservoirs of Lower Cambrian microbial carbonates, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(4): 404-413.
- 王建功, 张永庶, 李翔, 等, 2020. 柴达木盆地西部渐新统纹理石沉积特征与原位成藏. 石油学报, 41(8): 940-959.
- Wang, J.G., Zhang, Y.S., Li, X., et al. 2020. Sedimentary characteristic and insitu accumulation of the Oligocene laminites in the western Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 41(8): 940-959.
- 王兴志. 1995. 影响四川资阳地区震旦系灯影组储集空间的主要因素. 全国沉积学及岩相古地理学术研讨会, 561-564.
- Wang, X.Z. 1995. The main factors affecting the storage space of the Sinian Dengying Formation in Ziyang, Sichuan. *National Symposium on Sedimentology and Petrographic Paleogeography*: 561-564.
- 王宇, 何金有, 卫巍, 等, 2010. 新疆阿克苏地区新元古代晚期地层沉积相及层序地层研究. 岩石学报, 26(8): 2519-2528.
- Wang, Y., He, J.Y., Wei, W., et al. 2010. Study on the Late Proterozoic sedimentary facies and sequence stratigraphy in Aksu area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2519-2528.
- 吴亚生, 姜红霞, 虞功亮, 等, 2018. 微生物岩的概念和重庆老龙洞剖面p-t界线地层微生物岩成因. 古地理学报, 20(5): 737-775.
- Wu, Y.S., Jiang, H.X., Yu, G.L., et al. 2018. Conceptions of microbialites and origin of the Permian-Triassic boundary microbialites from Laolongdong, Chongqing, China. *Journal of Palaeogeography*, 20(5): 737-775.
- 吴亚生, 姜红霞, 李莹, 等, 2021. 微生物碳酸盐岩的显微结构基本特征. 古地理学报, 23(2): 321-334.
- 吴亚生, 2023. 生物岩的分类. 古地理学报, 第25卷第3期, 511-523
- Wu, Y.S., Jiang, H.X., Li, Y., et al. 2021. Basic microstructural characteristics of microbial carbonate rocks. *Journal of Paleogeography*, 23(2): 321-334.
- Wu, Y.S. 2022. Classification of biogenic carbonate rocks. *Biopetrology*, 1(1): 19-29. <http://biopetrology.com/yswcob>.
- 杨飞, 鲍志东, 潘文庆, 等, 2017. 塔里木盆地柯坪上震旦统奇格布拉克组优质储层形成机理. 石油科学通报, 2(1): 12-23.

- Yang, F., Bao, Z.D., Pan, W.Q., et al. 2017. The formation mechanism of high quality reservoirs in the Qigebulake Formation, Upper Sinian, Tarim Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 2(1): 12-23.
- 杨翰轩, 沈安江, 郑剑锋, 等, 2020. 塔里木盆地西北缘震旦系奇格布拉克组微生物白云岩发育特征及储集意义. *海相油气地质*, 25(1): 44-54.
- Yang, H.X., Shen, A.J., Zheng, J.F., et al. 2020. Sedimentary characteristics and reservoir significance of the microbial dolomite of Sinian Qigebrak Formation in the northwest margin of Tarim Basin. *Marine petroleum geology*, 25(1): 44-54.
- 杨浩, 王永标, 陈林, 2007. 地球微生物过程与潜在烃源岩的形成: 钙质微生物岩. *地球科学*, 32(6): 797-802.
- Yang, H., Wang, Y.B., Chen, L. 2007. Calci-microbialite as a kind of potential hydrocarbon source rock and its geomicrobiological processes. *Earth Science*, 32(6): 797-802.
- 闫磊, 魏国齐, 朱光有, 等, 2022. 塔里木盆地震旦系勘探领域分析及区带优选. *天然气地球科学*, 33(4): 548-555.
- Yan, L., Wei, G.Q., Zhu, G.Y., et al. 2022. Exploration field analysis and zone optimization of Sinian, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(4): 548-555.
- 杨鑫, 徐旭辉, 陈强路, 等, 2014. 塔里木盆地前寒武纪古构造格局及其对下寒武统烃源岩发育的控制作用. *天然气地球科学*, 25(8): 1164-1171.
- Yang, X., Xu, X.H., Chen, Q.L., et al. 2014. Palaeotectonics pattern in pre-Cambrian and its control on the deposition of the Lower Cambrian source rocks in Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(8): 1164-1171.
- 杨云坤, 石开波, 刘波等, 2014. 塔里木盆地西北缘震旦纪构造—沉积演化特征. *地质科学*, 49(1): 19-29.
- Yang, Y.K., Shi, K.B., Liu, B., et al. 2014. Tectono-sedimentary evolution of the Sinian in the Northwest Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 49(1): 19-29.
- 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. *石油实验地质*, 40(2): 233-243.
- Yu, H.Y., Cai, C.F., Zheng, J.F., et al. 2018. Influence of microbial textures on pore characteristics of microbial dolomites: A case study of Lower Cambrian Xiaoerbulake Formation in Keping area, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(2): 233-243.
- 余家仁, 雷怀玉, 1998. 华北地区石炭系, 二叠系碎屑岩储集层特征. *新疆石油地质*, 19(1): 50-53.
- Yu, J.R., Lei, H.Y. 1998. Characteristics of clastic reservoir rock in carboniferous and permian, Northern China. *Xinjiang Petroleum Geology*, 19(1): 50-53.
- 张荫本, 唐泽尧, 陈季高, 1996. 粘结岩分类及应用. *天然气勘探与开发*, 20(S1): 194-198.
- Zhang, Y.B., Tang, Z.R., Chen, J.G. 1996. Classification and application of boundstone. *Petroleum Exploration and Development*, 20(S1): 194-198.
- 张文浩, 汤冬杰, 杨焯, 等, 2021. 华北地台中—新元古界烃源岩沉积特征及生烃潜力. *中国地质*, 48(5): 1510-1523.
- Zhang, W.H., Tang, D.J., Yang, Y., et al. 2021. The sedimentary characteristics and hydrocarbon potential of Meso-Neoproterozoic source rocks in North China Platform. *Geology in China*, 48(5): 1510-1523.

- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等, 2018. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位. 石油勘探与开发, 45(1): 1-13.
- Zhao, W.Z., Hu, S.Y., Wang, Z.C., et al. 2018. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 1-13.
- 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 等, 2019. 中国元古宇烃源岩成烃特征及勘探前景. 中国科学: 地球科学, 49(6): 939-964.
- Zhao, W.Z., Wang, X.M., Hu, S.Y., et al. 2019. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China. *Chinese Science: Earth Science*, 49(6): 939-964.
- 郑潇宇, 张翔, 李建, 等, 2023. 塔里木盆地西北地区震旦系苏盖特布拉克组潮坪相碎屑岩成岩作用与成岩演化研究. 沉积与特提斯地质, 43(3): 530-541.
- Zheng, X.Y., Zhang, X., Li, J., et al. 2023. Diagenesis and diagenetic evolution of tidal flat facies clastic rocks of Sinian Sugetbrak Formation in Northwest Tarim Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(3): 530-541.
- 郑剑锋, 袁文芳, 黄理力, 等, 2019. 塔里木盆地肖尔布拉克露头区下寒武统肖尔布拉克组沉积相模式及其勘探意义. 古地理学报, 21(4): 589-602.
- Zheng, J.F., Yuan, W.F., Huang, L.L., et al. 2019. Sedimentary facies model of Lower Cambrian Xiaoerbluk formation in Xiaoerbluk outcrop area of Tarim Basin and its exploration significance. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(4): 589-602.
- 郑剑锋, 黄理力, 袁文芳, 等, 2020. 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. 天然气地球科学, 31(5): 12.
- Zheng, J.F., Huang, L.L., Yuan, W.F., et al. 2020. Geochemical characteristics and sedimentary and diagenetic environmental significance of the Lower Cambrian Xiaoerbluk Formation in Keping area, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(5): 12.
- 郑剑锋, 沈安江, 杨翰轩, 等, 2021. 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. 岩石学报, 37(7): 2189-2202.
- Zheng, J.F., Shen, A.J., Yang, H.X., et al. 2021. Geochemist and geochronology characteristics and their geological significance of microbial dolomite in Upper Sinian. NW Tarim Basin *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2189-2202.
- 周肖贝, 李江海, 傅臣建, 等, 2012. 塔里木盆地北缘南华纪—寒武纪构造背景及构造-沉积事件探讨. 中国地质, 39(4):900-911.
- Zhou, X.B., Li, J.H., Fu, C.J., et al. 2012. A discussions on the Cryogenian Cambrian tectonic-sedimentary event and tectonic setting of northern Tarim Basin. *Geology in China*, 39(4): 900-911.
- 朱光有, 李茜, 李婷婷, 等, 2023. 塔里木盆地震旦纪-寒武纪之交白云岩成因机理及Mg同位素差异. 中国科学:地球科学, 53(2): 319-344.
- Zhu, G.Y., Li, Q., Li, T.T., et al. 2023. Genetic mechanism and Mg isotope differences of dolomites at the turn of Sinian Cambrian in Tarim Basin. *Chinese Science: Earth Science*, 53(2): 319-344.