

doi: 10.12029/gc20180616

贡云云, 姜含璐, 倪胜利. 2018. 辽宁金州寒武系长山组生物丘沉积特征[J]. 中国地质, 45(6): 1271–1288.

Gong Yunyun, Jiang Hanlu, NI Shengli. 2018. Sedimentary characteristics of the bioherm in Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area, Liaoning Province[J]. Geology in China, 45(6): 1271–1288(in Chinese with English abstract).

辽宁金州寒武系长山组生物丘沉积特征

贡云云 姜含璐 倪胜利

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:在辽宁金州寒武系长山组顶部,发育一层厚约 15 m 的生物丘。宏观上,生物丘主要由凝块石和均一石组成;微观上,由致密泥晶结构和各种类型的颗粒组成。在生物丘内部,各种类型的颗粒如钙化微生物、底栖鲕粒、核形石、生物碎屑和凝块等的发育,显示了生物丘复杂的显微组构。其中,三叶虫碎屑表面的泥晶结壳,表现出建设性和破坏性泥晶化作用。泥晶中分散分布的生物碎屑,反映了生物丘形成过程中泥晶较强的黏聚作用。致密泥晶中大量黄铁矿颗粒的发育,反映了异养细菌活动对泥晶形成的贡献。生物丘内部各种类型的颗粒与黄铁矿颗粒的共生,反映了生物丘形成过程中存在复杂的微生物作用,这为微生物沉积作用的研究提供了基础素材,也为生物丘内部各种类型颗粒的研究提供了重要实例和线索。

关键词:沉积特征;生物丘;长山组;寒武系;辽宁金州

中文分类号:P585 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2018)06-1271-18

Sedimentary characteristics of the bioherm in Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area, Liaoning Province

GONG Yunyun, JIANG Hanlu, NI Shengli

(School of Earth Resources and Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A bioherm 15m in thickness is exposed at the top of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area, Liaoning Province. Macroscopically, the bioherm is made up of thrombolite and leiolite, and microscopically, it is mainly composed of dense micrites and different kinds of grains. There are different types of grains, such as calcified microbes, benthic oolites, oncolites, bioclasts and clots, in the inner part of the bioherm, which indicates complex microfabric of the bioherm. The surface of trilobite skeletal clastics encrusted by micrites shows constructive and destructive micritization. Bioclasts dispersedly distributed within the dense micrite reflect relatively strong binding during the development of the bioherm. Large quantities of pyrite crystals existent in the dense micrites demonstrate that the formation of dense micrite was genetically related to heterotrophy–bacteria activities. Together with pyrite crystals, all kinds of grains within the bioherm reflect complex microbial activities during the formation of the bioherm, which

收稿日期:2016-09-25;改回日期:2017-02-19

基金项目:中国地质调查项目(1212011121268)及国家自然科学基金(41472090,40472065)联合资助。

作者简介:贡云云,女,1989年生,博士,主要从事沉积学与地层学研究;E-mail: yunyunong@sina.com。

provides not only prerequisite for the study of microbial sedimentation but also an important example and clue for the research on different types of grains within the bioherm.

Key words: sedimentary features; bioherm; Changshan Formation; Cambrian; Jinzhou in Liaoning Province

About the first author: GONG Yunyun, female, born in 1989, doctor, mainly engages in the study of sedimentology and stratigraphy; E-mail: yunyungong@sina.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011121268) and National Natural Science Foundation of China (No. 41472090, 40472065).

1 引言

微生物在地表环境中广泛分布并大量存在 (Brock et al., 1994), 广泛地参与着沉积物的产生、堆积和成岩作用 (Nealson, 1997; Riding and Awramik, 2000)。从太古宙以来, 由微生物生长和新陈代谢所产生的沉积物一直都是碳酸盐沉积物的重要构成 (Riding, 2000)。微生物的生长和同化作用、细胞表面的性质及矿物沉积和捕获颗粒的胞外聚合物 (EPS) 的交互作用产生了微生物碳酸盐岩 (Riding, 2011a), 其产物主要包括叠层石、凝块石、树形石、均一石、纹理石以及核形石 (Riding, 2000; 梅冥相, 2007a)。微生物碳酸盐岩作为意义重大的沉积物, 主要体现在以下几个方面: (1) 具有最长的地质分布范围的任何类型的生物成因灰岩; (2) 形成在各种沉积环境中; (3) 氧化了地球的大气圈; (4) 产生并储集了较大体积的油气 (Bosence et al., 2015); (5) 为整个地质历史时期与微生物活动相关的生物矿化作用过程提供有价值的信息 (Bahniuk et al., 2015)。近来, 微生物碳酸盐岩的研究已经成为热点, 从前寒武系到显生宙都有 (王文之等, 2016; 贡云云, 2016)。在海洋环境中, 微生物碳酸盐岩常以三种形式产出: 生物礁、生物丘和生物层 (梅冥相, 2001a)。

寒武纪以在传统早寒武世之初快速多样化、传统早寒武世中期达到顶峰的海洋骨骼生物的出现和辐射为特征 (Sepkoski, 1992; Brasier, 1995)。然而, 接近传统早—中寒武世界线 (大体与第二世和第三世界线相当) 的灭绝事件, 使得这些骨骼生物骤然减少 (Sepkoski, 1992; Brasier, 1995)。在这次灭绝事件后, 以古杯产生的生物礁在寒武纪第三世和芙蓉世中变得稀少 (Hong et al., 2012), 在早奥陶世期间后生动物建造的生物礁复苏之前, 寒武纪第

三世—芙蓉世以叠层石和凝块石为代表的微生物岩为主 (Wood, 1999; Riding, 2006), 这些微生物岩又可以叫作“微生物礁” (Riding, 2002a)。微生物礁中发育大量的钙化微生物 (Lee et al., 2014), 由于海平面变化, 导致了第三世和芙蓉世钙化微生物种类的差异, 附枝菌在第三世末期逐渐灭绝, 在芙蓉世已被其他的钙化微生物代替 (Chen Jitao et al., 2014; Lee, 2015)。

Cummings and Shrock (1928) 提出生物丘是像穹隆状的、透镜状的或者是其他与周围存在明显界限的各种形状的物体, 这种物体单独或主要由固着生物所建造, 而且包含在不同岩性的正常岩石之中。辽宁大连金州地区西北部的七顶山镇之 (西) 南约 5 km 的地方, 较好地出露了寒武系长山组和凤山组的地层, 在长山组顶部出露了一套厚约 15 m 的块状泥晶灰岩, 与周围的宿主岩石存在明显区别, 符合“生物丘”的定义 (Cummings and Shrock, 1928)。辽东半岛金州剖面长山组出露的较为典型的生物丘, 为生物丘的研究提供了基础, 也为查看第三世和芙蓉世岩石之间的差异提供了前提。因此, 以辽东半岛金州剖面长山组生物丘为研究对象, 通过对其宏观和微观特征进行详细观察, 较好地了解此剖面长山组生物丘的沉积特点, 为今后寒武纪生物丘相关的研究提供了一个重要实例, 也为泥晶灰岩生物丘中碳酸盐颗粒的多样性提供了一个岩石记录。

2 芙蓉统长山组

根据传统的年代地层划分, 华北地台的寒武系长山组, 由孙云铸 (1924) 建立, 其岩性主要为黄绿—紫红色页岩、灰色薄层灰岩、泥质条带泥晶灰岩、似瘤状灰岩及竹叶状灰岩, 后人将其转化为上寒武统中部的长山阶 (卢衍豪等, 1994; 项礼文等, 2000)。随着全球寒武系地层四统划分方案及芙蓉统的建

立(彭善池等,2004;彭善池,2006;Peng Shanchi et al.,2012;樊隽轩等,2015),长山组及其上覆的凤山组一起组成了与芙蓉统大体相当的地层,长山组的大部分大致属于芙蓉统的排碧阶。此次研究剖面位于辽宁大连金州地区西北部七顶山镇之西约5 km处(图1),此处出露的地层大致属于寒武系的芙蓉统,重点研究长山组生物丘。1997年《辽宁省岩石地层》(杨欣德等,1997)在清理地层时,建议恢复炒米店组,下伏的崮山组则大体相当于以前的长山

组和崮山组。梅冥相等(2001b)指出“利用层序地层划分华北北部晚寒武世地层崮山组、长山组、凤山组的地层是可行的,只不过组的分界面相对于阶的分界面要低一些”。在此之前也有学者在研究华北地台寒武纪地层时使用长山组和凤山组的划分方案(董熙平等,2001;朱兆玲等,2005;武爽等,2008),此次研究也将摒弃炒米店组和崮山组,采用传统的岩石地层划分方案,即使用传统的长山组和凤山组。在七顶山镇剖面,长山组底部为一厚层

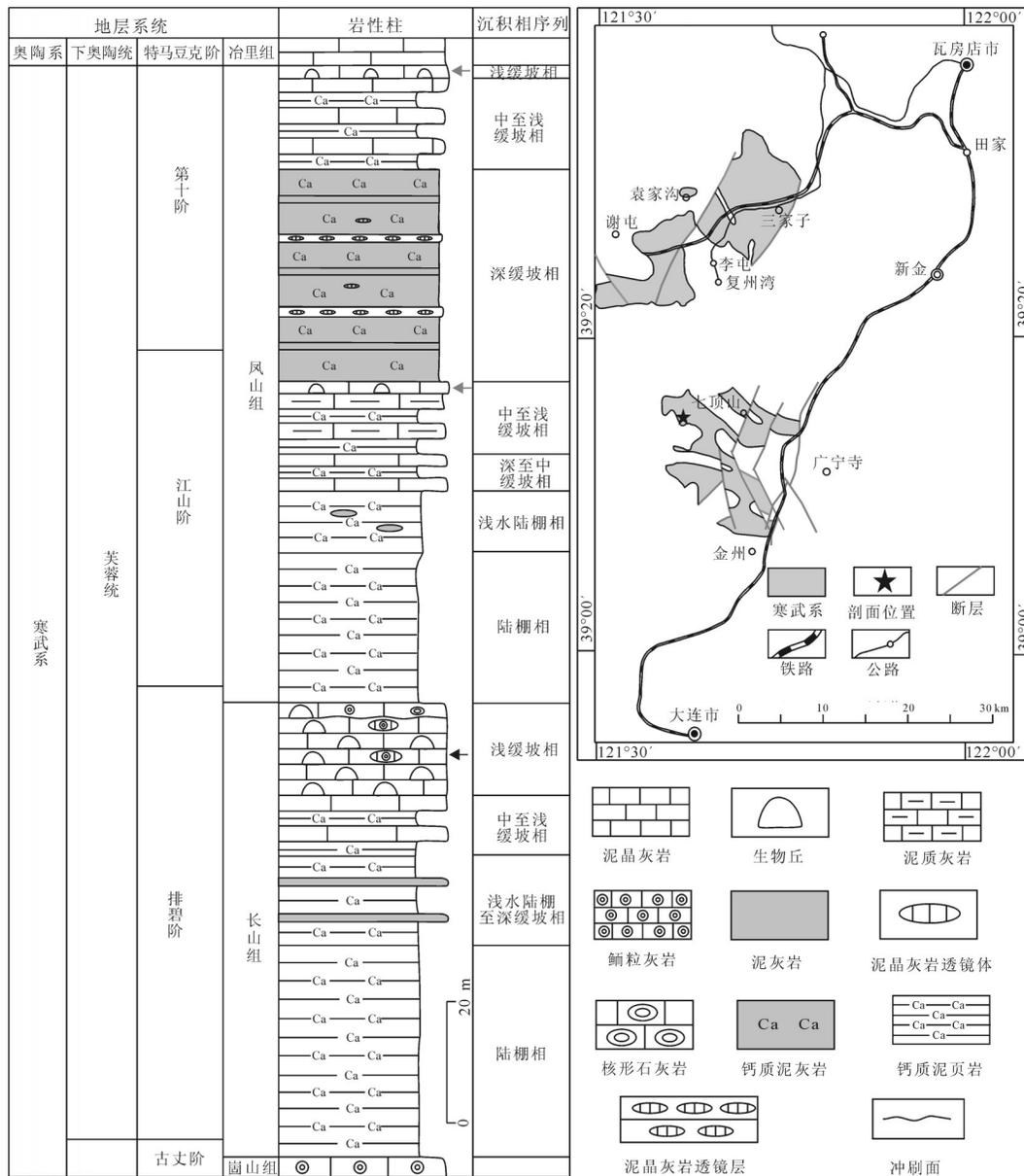


图1 辽宁金州寒武系芙蓉统岩性柱状图和剖面位置

Fig.1 Lithological column of Cambrian Furongian Series and locality of Jinzhou area in Liaoning Province

陆棚相钙质泥岩,下伏的崮山组顶部发育的鲕粒灰岩成为与长山组分界的标志。长山组中部为一套深缓坡相中薄层钙质泥岩夹少量泥灰岩,中上部为中缓坡相中薄层钙质泥页岩与中薄层泥晶灰岩互层;顶部发育一套较为典型的浅缓坡相厚层块状泥晶灰岩,夹少量鲕粒灰岩透镜体,并在鲕粒灰岩与泥晶灰岩生物丘之间见冲刷面,上覆的凤山组底部为钙质泥岩,其底界是该组与长山组之间的界线(图1)。

3 长山组生物丘宏观特征

金州地区长山组的地层,显示了从底部到顶部水体逐渐变浅的沉积序列(图1)。顶部发育了一套典型的生物丘,可见穹隆状构造(图2b)。其下伏地层为互层的中薄层钙质泥页岩和泥灰岩,其上覆地层为凤山组的深水细粒沉积物——陆棚相钙质泥岩,与周围的宿主岩石存在明显的岩性差异(图2a)。在此层顶部可见颗粒较粗的鲕粒和核形石颗粒灰岩中产出部分泥晶生物丘层(图2d),并在鲕粒灰岩中可见少量的砂屑、核形石,表明了生物丘产出在相对浅水的环境中。根据生物丘宏观上的内部组构,在部分岩石中可见中型凝块构造(Shapiro, 2002),为凝块石(Riding, 2000;梅冥相, 2007)。部分岩石看不到任何明显的内部组构,由均一石构成(Riding, 2000;梅冥相, 2007)。这些微生物岩生物丘又可以归于典型的“微生物礁”(Riding, 2002a)。凝块石中凝块为圆一椭圆状,大小为0.1~0.7 cm,部分凝块呈不规则状,界线不清晰者呈网状分布(图2c)。可见部分凝块只剩下泥晶套,中间为亮晶充填(图2f),可能是重结晶或后期溶蚀作用的结果,还在部分团块周围见棕褐色,可能是发生了选择性白云石化;凝块间常为泥晶胶结,少数为亮晶胶结。部分泥晶灰岩中可见少量生物碎屑(图2e),泥晶胶结。岩体多在后期成岩作用中形成了裂缝,可能是埋藏压实作用的结果。

4 长山组生物丘微观特征

4.1 总体微观特征

在显微镜下,金州长山组生物丘整体上表现为致密的泥晶组构,在泥晶组构中局部粘结了较多的生物碎屑(图3a),包括三叶虫、腕足类、棘皮类等,

并在泥晶中见半自形—他形的黄铁矿颗粒(图3f),大小多为9~37 μm ,较大者可达400 μm ;同时还发育着钙化微生物、努亚藻,以及底栖鲕粒、核形石、包粒和凝聚颗粒等颗粒。长山组生物丘中发育的钙化微生物及多样性的颗粒,为了解生物丘形成过程中复杂的微生物作用过程提供了一个重要的岩石记录。

在长山组生物丘中,凝块常由富有机质的暗色泥晶组成(图3b),可见部分凝块由钙化微生物形成(图3d和7a),椭圆形—不规则,大小不一(0.1~3.5 mm)。局部见较多由致密泥晶重结晶形成的颗粒(图3c),部分颗粒为完全重结晶,并可见泥晶的白云石化(图3b),白云石颗粒常呈自形—半自形的菱形,大小为50~200 μm 。在三叶虫碎屑表面见泥晶结壳(图3e),并常在颗粒之中见到多世代胶结物,第一世代胶结物常呈纤维状垂直于颗粒表面,第二世代呈等粒或嵌晶状,少数可见第三世代胶结物(图3c-e)。

4.2 钙化微生物

钙化微生物最先出现在前寒武纪,并从寒武纪基底大幅度多样化(Turner et al., 1993; Zhuravlev, 1996; Riding, 2001; Kah and Riding, 2007),是寒武纪生物礁的重要构成(Rowland and Shapiro, 2002)。在长山组生物丘中发现的钙化微生物有葛万菌(*Girvanella*)、附枝菌(*Epiphyton*)和*Subtifloria*。

葛万菌是长山组生物丘含量最多的一种钙化微生物,钙质管状丝状体,具有均一的直径,为9~19 μm ,其薄的泥晶壁厚约2~3 μm 。葛万菌常以单个丝状体(图4d)或成群出现。成群出现的葛万菌可见不同的排列方式,有的平行于生物碎屑表面结壳(图4b),有的散乱分布(图5d)或相互缠绕,部分以生物碎屑为核心形成皮层结壳(图4c),以及部分葛万菌被生物碎屑结壳(图4d),这可能也说明了微生物的钙化作用早于胶结作用。

Riding(1991)描述了附枝菌外观上由致密泥晶构成,可能是呈杆状的、明显的灌木状的或管状的窄树枝状丝状体,呈直立或悬挂生长。在长山组生物丘中局部见到泥球状及树枝状附枝菌(图4e),直径为18~63 μm ,树枝状常呈二分枝,与葛万菌相比,含量较少,常常黏聚成团块,呈现扇形、椭圆形和不规则形(7a)。还可见以附枝菌为核心形成的鲕粒



图2 辽宁金州寒武系长山组生物丘宏观特征

a—长山组顶部生物丘与凤山组之间的界线;b—穹隆状泥晶灰岩生物丘;c—凝块石生物丘;d—夹于颗粒灰岩之间的泥晶生物丘;e—泥晶灰岩,可见少量生物碎屑及凝块;f—凝块石,可见不同形状的凝块,并见部分凝块只剩下泥晶套

Fig.2 Macroscopic features of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—The boundary between bioherm in the uppermost part of Changshan Formation and the Fengshan Formation; b—Dome-shaped micritic limestone bioherm; c—Thrombolitic bioherm; d—Bioherm between the grainstones; e—Micritic limestone, including bioclasts and clots; f—Thrombolite with different clots and clots with micritic encrustation

(图4e),并在附枝菌形成的团块表面见垂直于其生长的纤维状方解石,有部分附枝菌中的泥晶已变成微亮晶。

Riding (1991) 和 Liu et al. (2016) 描述了 *Subtifloria* 具有均一直径的钙化管状丝状体,近于平行,常常轻微弯曲,凝聚成束。丝状体通常密集排列,有时交织,其薄的泥晶壁,类似于某些葛万菌,但是整体上成捆排列成并列丝状体。长山组生物丘中发现了极少量的 *Subtifloria*, 呈捆排列,轻微弯

曲(图4f)。

4.3 努亚藻

努亚藻(*Nuia*)的特征是由带状生长的纤维状方解石晶体围绕泥晶中心的圆柱状晶体(Flügel, 2004),最早由 Maslov(1954)描述。此次研究的长山组生物丘中局部发育了大量的努亚藻(图5),为努亚藻的研究提供了进一步的线索。

大小——长山组生物丘中的努亚藻长度为 875~6000 μm , 宽度为 100~1800 μm , 依据努亚藻的

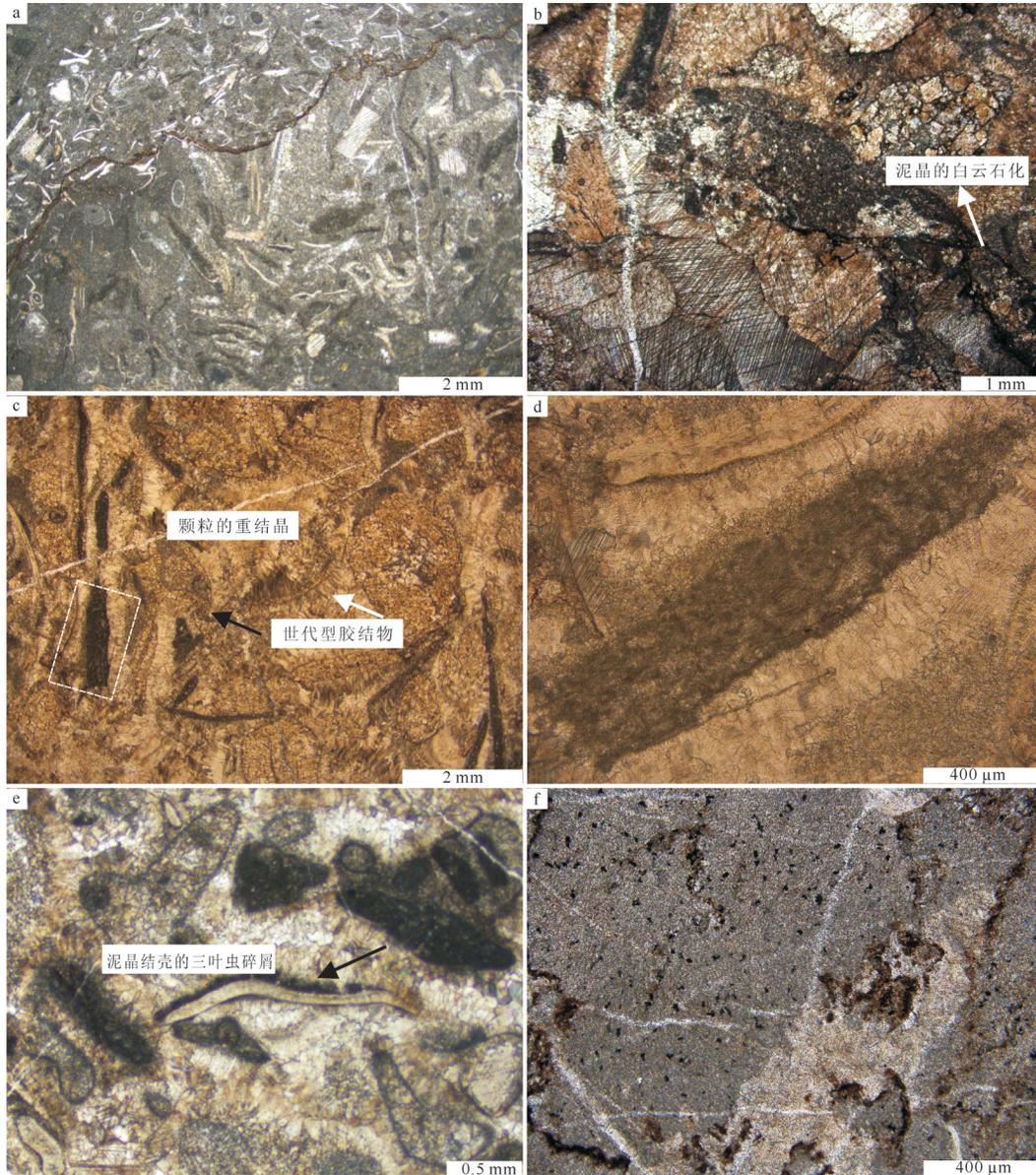


图3 辽宁金州寒武系长山组生物丘微观特征

a—泥晶黏聚了大量的生物碎屑;b—凝块中泥晶的白云石化;c—生物丘中葛万菌丝状体(d)形成的凝块、颗粒的重结晶及世代型胶结物;
d—c中矩形区域的放大;e—泥晶结壳的三叶虫碎屑,并见垂直于其表面的纤维状胶结物;f—泥晶中发育的众多的黄铁矿⁺颗粒

Fig. 3 Microscopic features of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—Large amounts of bioclasts bound by micrites; b—Micrites in the clot replaced by dolomite; c—Clot formed by *Grivanella* filaments (d), recrystallization of grain and generation type cement; d—Magnification of rectangle in c; e—Trilobite sclerite encrusted by micrites, and fibrous calcite cement perpendicular to its surface; f—Pyrite crystals in the micrites

尺寸和整个颗粒断面方向,单个个体的长宽比从1到9变化。

核心——努亚藻的核心或者由几乎呈圆形断面且直的或轻微弯曲的钙质管构成,或者由暗色泥晶构成,或由以上两者共同构成(图5),核心宽度为100~1200 μm。根据核心的差异,研究区生物丘总体上存在4种努亚藻:(1)以沿着葛万菌丝状体延长方

向生长的努亚藻(图5b),(2)以相互平行的短的葛万菌丝状体为核心的努亚藻(图5c),(3)以散乱分布的葛万菌和泥晶为核心的努亚藻(图5d),(4)只有泥晶为核心的努亚藻(图5e)。

皮层——努亚藻的皮层由围绕中心呈放射状排列的纤维状方解石组成。通常围绕椭圆形核心的纤维状方解石皮层在末端长度减少,有的甚至在

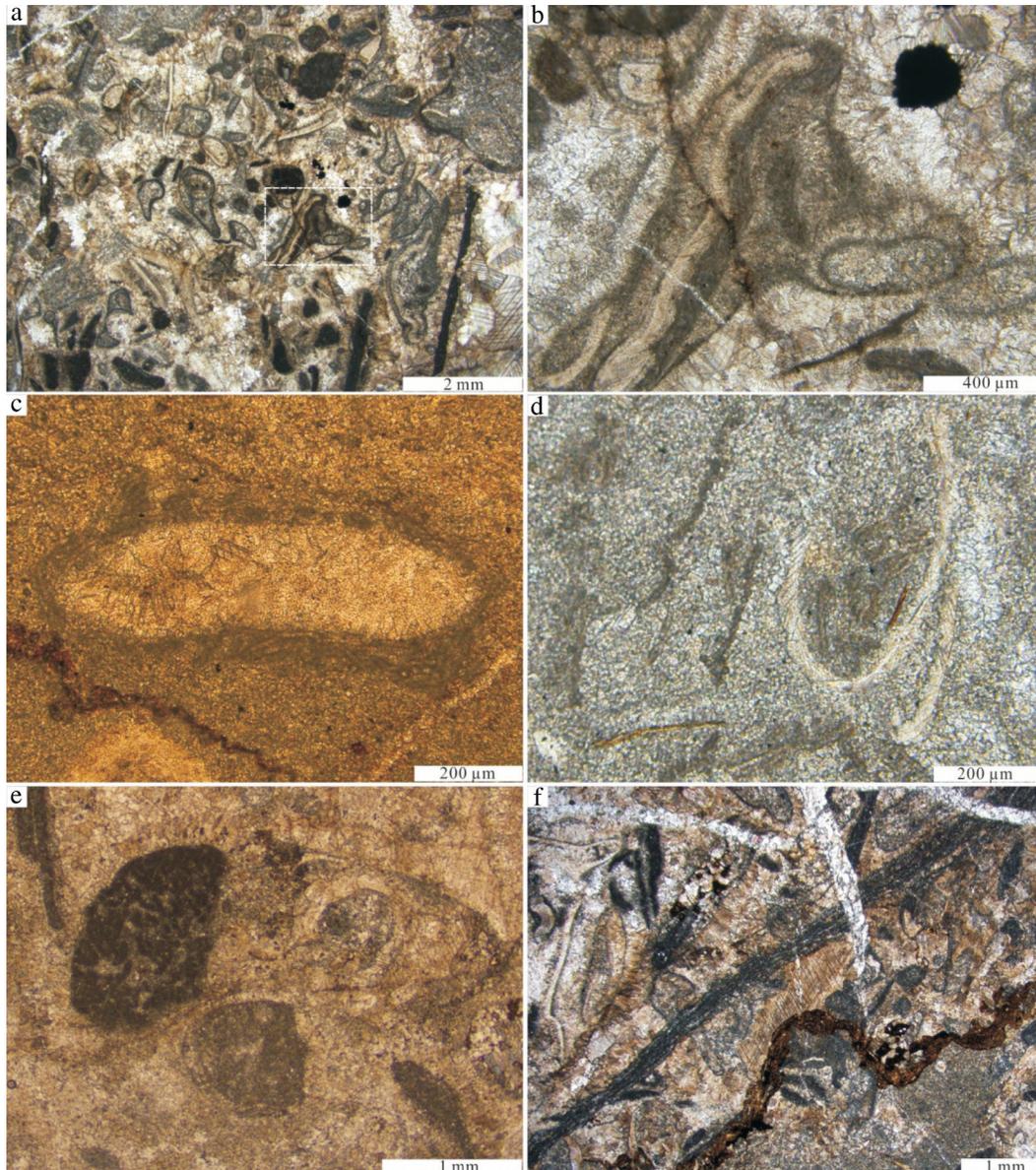


图4 辽宁金州寒武系长山组生物丘中的钙化微生物

a—三叶虫表面的葛万菌结壳,可见葛万菌平行于三叶虫表面;b—a中矩形区域的放大;c—围绕生物碎屑表面并担当皮层的杂乱葛万菌结壳;
d—被生物碎屑结壳的葛万菌;e—以附枝菌为核心的鲕粒;f—相互平行排列成捆的 *Subtifloria*

Fig.4 Calcified microbes within bioherm of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—Tribolite sclerites encrusted by *Grivanella* parallel to the sclerite surface; b—Magnification of rectangle in a; c—Bioclasts encrusted by disperse *Grivanella*; d—*Grivanella* encrusted by bioclast; e—Nucleus of oolite made up of *Epiphyton*; f—Parallely bundled *Subtifloria*

末端歼灭,导致核心的两端或一端没有皮层(图5)。皮层通常是单层的,但是可能展示了多样的且具有不均匀厚度的中心层,或者皮层内含有生物碎屑物质(图5e、f),并且不均匀的同心泥晶层可能截断了纤维状放射方解石。这些泥晶层中出现的残留葛万菌丝状体,可能表明了葛万菌后期对努亚藻的一种结壳作用(图5f)。这些插入的泥晶层的存在,为寒武纪努亚藻形成中的微生物影响、从有利

放射状努亚藻形成到有利钙化微生物结壳(可能更低的能量)的水动力条件的变化提供了证据。此外,在努亚藻皮层外部见世代型胶结物,第一世代胶结物为栉壳状,第二世代为等粒状(图5a),反映了胶结作用在成岩过程中的重要性。

4.4 底栖鲕粒

长山组生物丘中,局部发育了较多的鲕粒,与浮游鲕粒不同的是,这些鲕粒产出在生物丘内部,

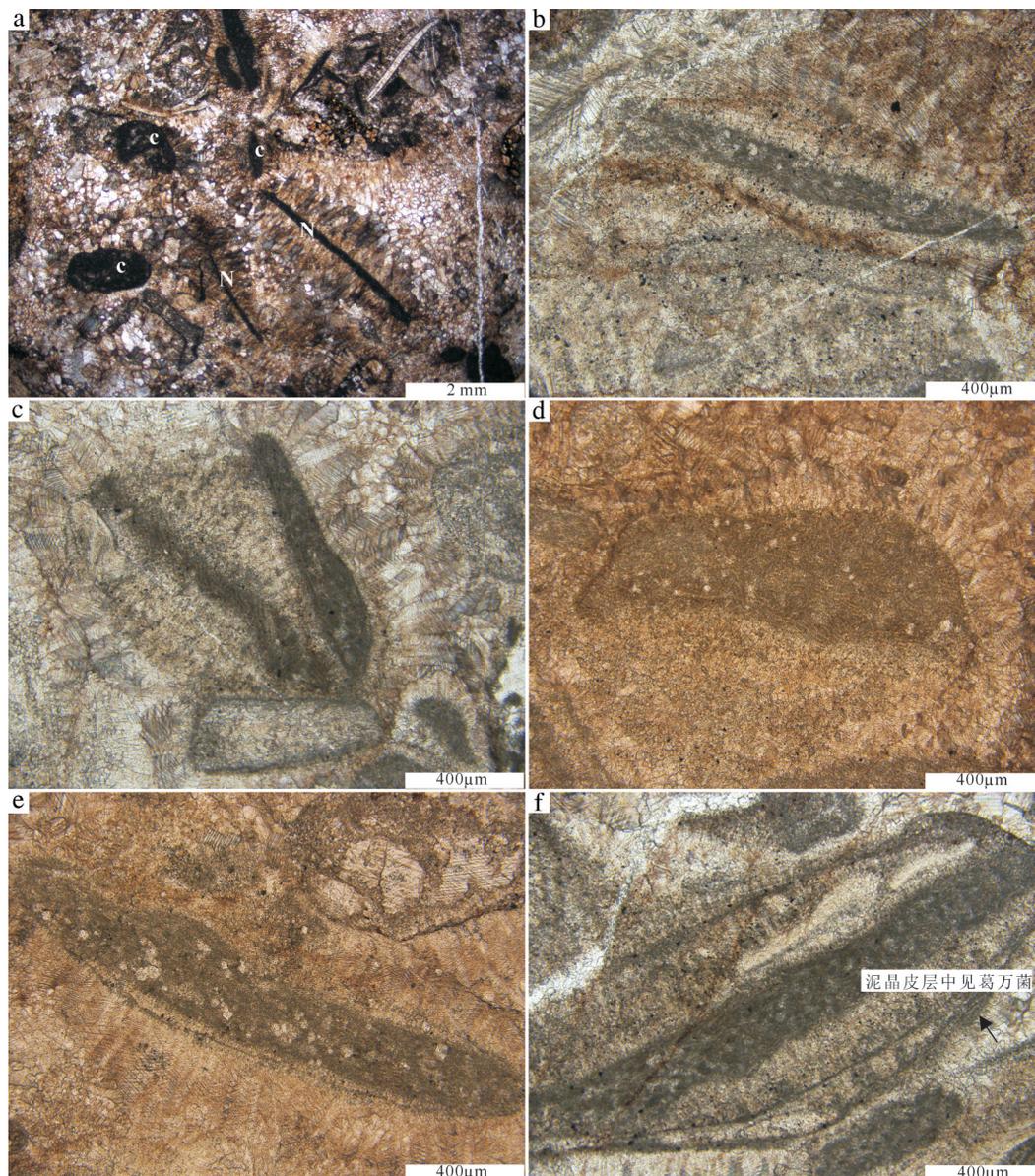


图5 辽宁金州寒武系长山组生物丘中的努亚藻

a—努亚藻(N)和凝块(c); b—沿着葛万菌两端延伸的努亚藻; c—以相互平行的葛万菌为核心的努亚藻; d—以散乱分布的葛万菌为核心的努亚藻; e—以泥晶为核心的努亚藻; f—多纹层努亚藻, 泥晶皮层可见葛万菌丝状体

Fig.5 *Nulia* distributed in bioherm of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—*Nulia* (N) and clots (c); b—*Nulia* extending from the ends of *Girvanella*; c—Nucleus of *Nulia*, composed of *Girvanella* parallel to each other; d—Nucleus of *Nulia*, consisting of dispersed *Girvanella*; e—Nucleus of *Nulia*, made up of micrites; f—Multilayered *Nulia*, with *Girvanella* filaments in the micritic layer

属于微生物成因的底栖鲕粒(Gerdes et al., 1994; Flügel, 2004)。这些底栖鲕粒多漂浮在致密泥晶中(图6a, e), 部分鲕粒周围可见两期亮晶胶结物。鲕粒直径为0.2~3 mm, 多为圆形—椭圆形, 少数为不规则形, 少数鲕粒发育圈层或核心, 大部分鲕粒没有圈层或核心。根据其基本的显微结构, 可以将鲕

粒分为以下几种类型(图6):

(1)有核同心—放射鲕粒。这种鲕粒的核心由泥晶或部分泥晶和微亮晶组成的内碎屑构成(图6c, d)。鲕的核心大小为0.09~0.6 mm, 为圆形—椭圆形, 少数为不规则形(图6e, f)。鲕粒大小为1~1.2 mm, 圆形—椭圆形, 鲕粒圈层较少, 同心圈层平

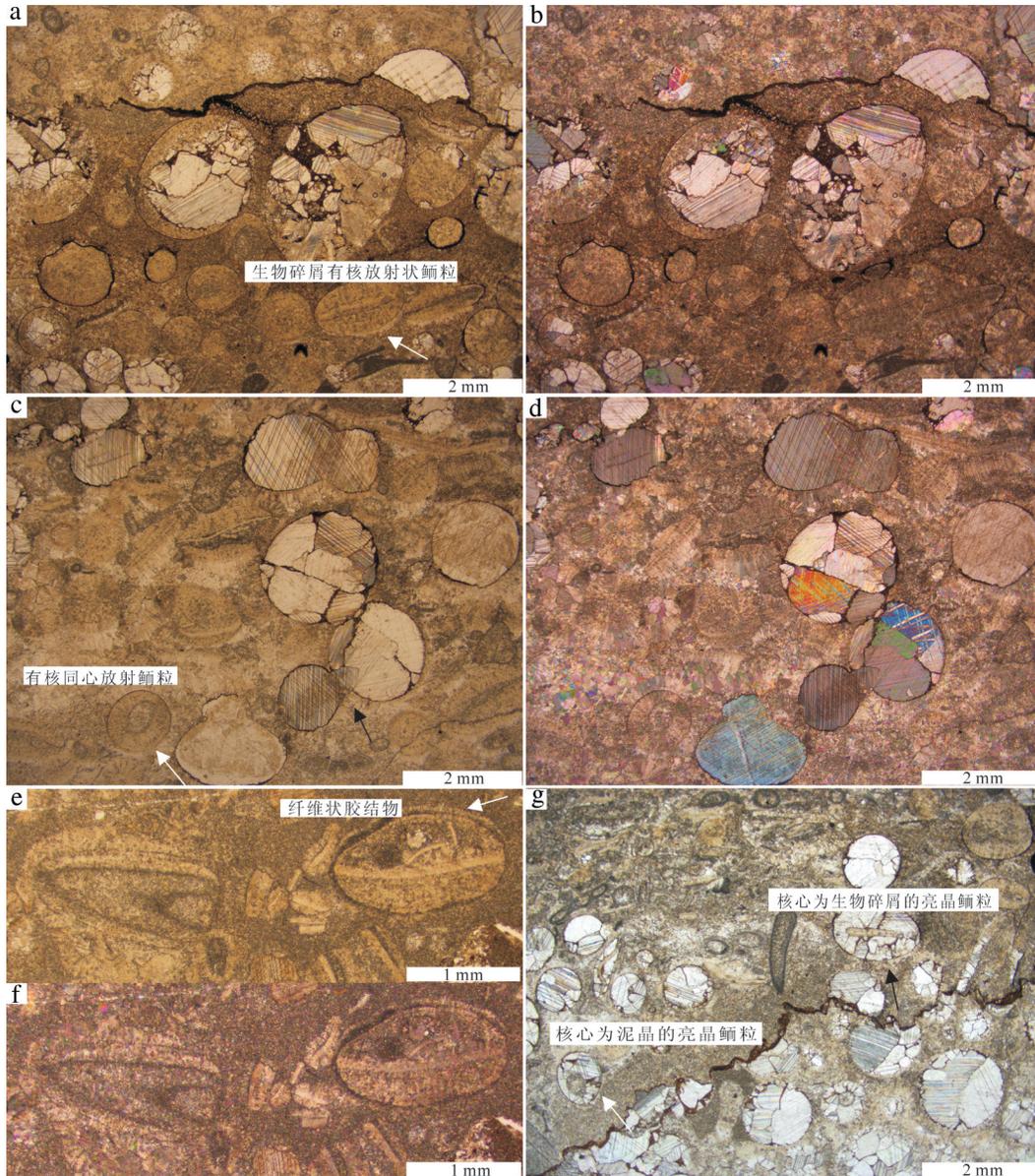


图6 辽宁金州寒武系长山组生物丘中的底栖鲕粒

a—无核、有核放射状鲕粒及无核鲕粒,可见生物碎屑为核心的放射状鲕粒;b—a的正交照片;c—有核同心放射状鲕粒、复鲕、相互贯穿的鲕粒(黑色箭头)及不对称的鲕粒;d—c的正交照片;e—偏心鲕及生物碎屑为核心的鲕粒,生物碎屑、泥晶、微亮晶截断了放射状鲕粒的皮层,并见垂直于鲕粒外部泥晶套的纤维状方解石胶结物;f—e的正交照片;g—核心分别为生物碎屑和泥晶组成的亮晶鲕粒

Fig.6 Benthic oolites within bioherm of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—Radiated oolites with or without oolitic nucleus; the nucleus of radiated oolites composed of bioclast; b—Corresponding image of a in the orthogonal light; c—Radiated-concentric oolites with oolitic nucleus, composite oolites, oolites embedded by each other, and asymmetric oolites; d—Corresponding image of c in the orthogonal light; e—Eccentric oolite and the oolite with nucleus that consists of bioclast, cortex of radiated oolite, interrupted by bioclasts, micrites, and microspar; the fibrous calcite cement perpendicular to micritic envelope at the edge of oolite; f—Corresponding image of e in the orthogonal light; g—Spar oolites with nucleuses composed of bioclasts and micrites

滑较为连续,且由致密的暗色泥晶组成,圈层厚度为0.1~0.2 mm。鲕粒皮层主要由放射纤维状方解石组成(图6c、d),由于皮层中泥晶的浸染,这些放射状方解石总是呈现出斑驳的外观。部分鲕粒呈

现出放射状外部纹层和内部泥晶纹层的双矿物偏心鲕的形态(图6e)。

(2)有核放射状鲕粒。这类鲕粒的核心为泥晶构成的内碎屑、生物碎屑以及由他形到半自形的亮晶

方解石晶体组成(图6a、b、e)。这类鲕粒的圈层不发育,圆形—椭圆形,皮层通常为围绕核心分布的放射纤维状方解石。在生物碎屑为核心的鲕粒中,皮层在生物碎屑两端变薄或歼灭(图6a、e),可见部分鲕粒呈现出偏心鲕的形态(图6a)。并在部分鲕粒周围见泥晶套和生物碎屑及泥晶截断了纤维状方解石皮层(图6e)。由于皮层中泥晶的浸染,这些放射状方解石总是呈现出斑驳的外观,并见垂直于鲕粒外部泥晶层的纤维状胶结物。具有少数以钙化微生物形成的内碎屑为核心的鲕粒,其圈层具有较多泥晶浸染(图4e)。

(3)无核放射鲕粒。这种类型鲕粒的核心和圈层都不发育,圆形—椭圆形,大小为0.5~1.5 mm,由放射纤维状方解石所组成(图6a、b)。部分鲕粒周围可见锯齿状(图6a),可能与后期成岩作用过程中的压溶作用有关。部分鲕粒中可见微亮晶(图6a),可能与后期重结晶作用有关,并常在這些鲕粒周围常见一层暗色物质及内部发育的一些碳酸盐泥晶。

(4)有核鲕粒。这种类型鲕粒的核心通常是生物碎屑和泥晶组成的内碎屑,不发育圈层,圆形—椭圆形,大小为0.3~1.4 mm。其外部皮层通常为亮晶方解石(图6g),这些亮晶方解石并不是由单一的晶体形成,而是由多个他形—半自形的方解石晶体共同形成,并在这些晶体中常见暗色有机质,Woods(2013)在描述微生物成因的鲕粒时将这种暗色有机质鉴别为黄铁矿覆膜。

(5)无核鲕粒。这种鲕粒不发育圈层和核心(图6a、c),圆形—椭圆形,大小为0.2~3 mm,通常由亮晶方解石形成,部分由单个方解石晶体形成,为单晶鲕;部分由多个方解石组成,为多晶鲕,形成多晶鲕的他形—半自形方解石晶体边界之间或颗粒之间的空隙常可见暗色物质;部分鲕粒由亮晶、微亮晶或富泥晶方解石共同组成,可能显示出鲕粒形成过程中所经历的周围环境的变化或微生物活动的差异性。这些鲕粒周围常见完整—不完整的泥晶套,部分鲕粒边缘呈现出锯齿状(图6g),可能由后期成岩作用过程中的埋藏压实作用造成的。

(6)特殊类型的鲕粒。在长山组生物丘内部,除见到以上几种类型的鲕粒外,还见到一些形态不规则的特殊鲕粒,这些鲕粒包括复鲕、相互贯穿的鲕粒、不规则的及破碎的鲕粒。复鲕由两个鲕粒共用一边形

成(图6c),其中一个鲕粒可见三叶虫碎屑核心,另一个鲕粒无核心,都由亮晶方解石形成。可见一个刺状鲕粒与另一鲕粒相互贯穿(图6c),及缝合线处常见破碎的鲕粒,这展示了鲕粒在成岩作用过程中经历的压实作用及压溶作用,部分鲕粒出现不对称的外形(图6c)。这种类型鲕粒周围也常见暗色泥晶套。

4.5 核形石

核形石通常是由多种颗粒构成的核心和/或皮层组成的无所属的、磨圆的瘤状体,其皮层或者由钙化的微生物、藻类构建,或者由后生动物(如结壳的有孔虫类)构建(Riding, 1991; Flügel, 2004)。核形石作为另外一种包覆颗粒,其形成与微生物活动有着密切的关系(杨仁超等, 2011; Flügel, 2004),曾被作为叠层石的一种类型——球状叠层石。

在长山组生物丘中,局部分布着少量的微核形石,这些微核形石大小不一,有的与凝块及凝聚颗粒一起产出,有的与底栖鲕粒一起产出。这些颗粒与底栖鲕粒相比,表面通常是不规则的,形状从椭圆形到不规则之间变化,核心和纹层是多变的。根据这些核形石的核心和圈层特征,大致可以将其分为以下几类:

(1)核心轮廓不清楚,具有圈层,但是发育的纹层不对称,亮晶与泥晶层交替出现,部分泥晶纹层重叠并在一侧逐渐歼灭(图7a)。

(2)核心轮廓不清楚,外部圈层不对称,并在圈层中见较多重结晶的方解石晶体,并在核形石外部见薄的泥晶套(图7b)。

(3)有核心,核心为泥晶,部分可见葛万菌外部轮廓较规则,形态为椭圆形,具有圈层,圈层由泥晶和(或)微亮晶组成,并在核心的两端歼灭(图8a、b)。

(4)核心为生物碎屑,发育圈层,但是圈层不对称,一侧比另一侧发育更多的圈层(图8e)。

(5)核心为泥晶,部分核心中可见葛万菌丝状体,外部圈层由泥晶组成且界限不清晰,可见生物碎屑,形状不规则,并在其周围见栉壳状胶结物(图7c、d)。

(6)泥晶组成的核心,可见薄的泥晶纹层与含有微亮晶的泥晶圈层交替组成的外部皮层,形态为椭圆—不规则,并在部分核形石周围见栉壳状胶结物(图7c)。

(7)无核心,或核心不可辨,泥晶纹层与亮晶纹

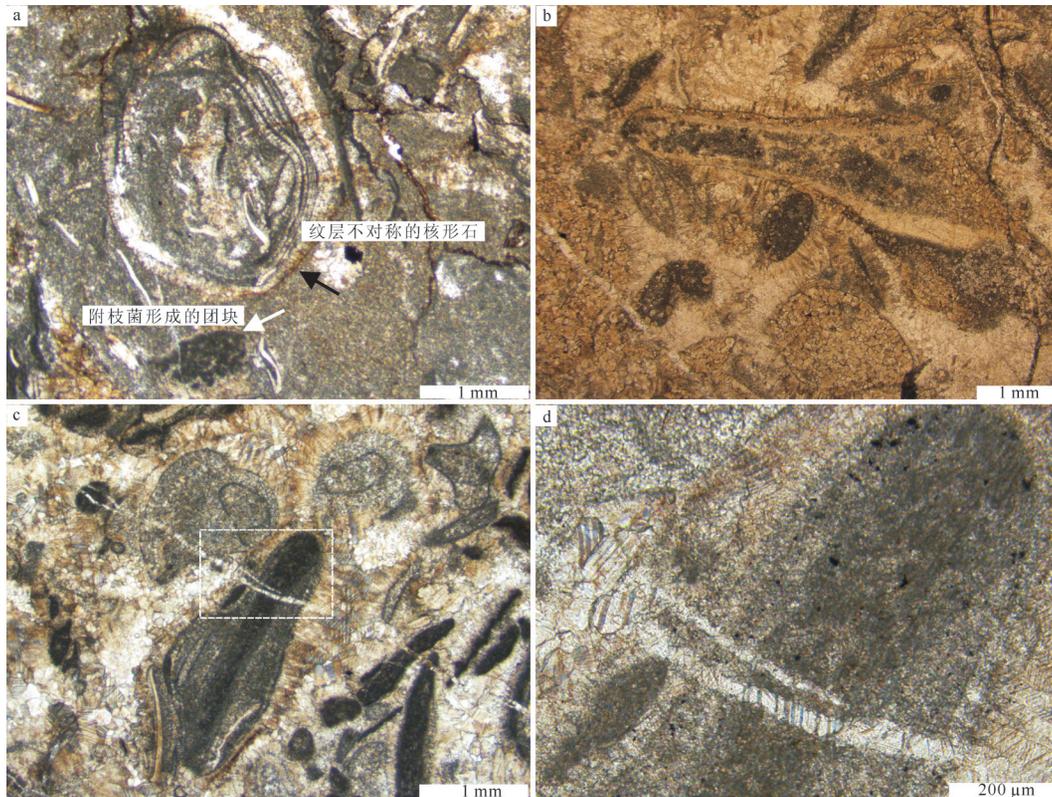


图7 辽宁金州寒武系长山组生物丘中的核形石

a—核心轮廓不清楚、纹层不对称的核形石和附枝菌形成的团块;b—核心为泥晶的核形石,部分泥晶重结晶;c—核心为泥晶(可见葛万菌,如图d所示)的核形石,外部圈层界限不清楚;d—c中矩形区域的放大

Fig.7 Oncolites within bioherm of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—Oncolite with nucleus indistinctly outlined and asymmetrically layered and clot developed by *Epiphyton*; b—Oncolite with micritic nucleus; a part of micrites recrystallized; c—Oncolite with micritic nucleus (with *Givanelia* as shown in d), whose outer layer is poorly outlined; d—Magnification of rectangle in c

层之间不规则交替,形状不规则。泥晶可见主要由葛万菌丝状体组成,并见核形石外部发生白云石化,白云石颗粒呈自形一半自形(图8c、d)。

4.6 包粒

生物碎屑、鲕粒或岩屑和似球粒这些特殊类型的碳酸盐颗粒,周围可常见围绕颗粒的无纹层的壳——被叫作“泥晶套”的泥晶边缘,通常把这种类型的颗粒叫包(皮)粒(Flügel, 2004)。根据此定义及 Gerdes et al. (1994)对现代微生物席中碳酸盐颗粒多样性的研究,在研究区发现的很多具有完整泥晶套的底栖鲕粒可以归于包粒,但是研究区除了此种类型的包粒,更普遍的是由泥晶层包覆似球粒(图4a)和生物碎屑(图3e、9a)形成的包粒。

包覆颗粒的泥晶层厚度为26~230 μm ,在研究区的均一石和凝块石中均有发现。根据研究区包覆骨骼颗粒的泥晶套的特征,发现泥晶套既有建设

性成因,又有破坏性成因。建设性成因泥晶套的证据如下:(1)泥晶套似乎从颗粒表面产生(图3e);(2)泥晶套和异化颗粒之间的接触是光滑的,图4b展示了葛万菌丝状体沿着三叶虫表面生长;(3)泥晶套通常厚度可变,并常常在包覆的异化颗粒一边比另一边更厚(图3e、4b)。与建设性泥晶套成因不同的是,破坏性泥晶套的形成常常与生物微钻孔有关(Flügel, 2004),部分生物碎屑已经完全泥晶化,对其内部放大观察后,可见葛万菌丝状体(图9b),或泥晶套与生物碎屑之间常常不规则接触(图9a),并在生物碎屑表面可见微钻孔(图9b),这些证据显示了泥晶套的一种破坏性成因。(4)泥晶套似乎不是依靠底质的:各种类型的颗粒展示了泥晶套,包括内碎屑(图4a)、底栖鲕粒(图6e)、凝聚颗粒(图9e)。以内碎屑为底质的包粒,常可见形成内碎屑的泥晶或多或少已重结晶(图4a、5c)。构成覆膜的泥

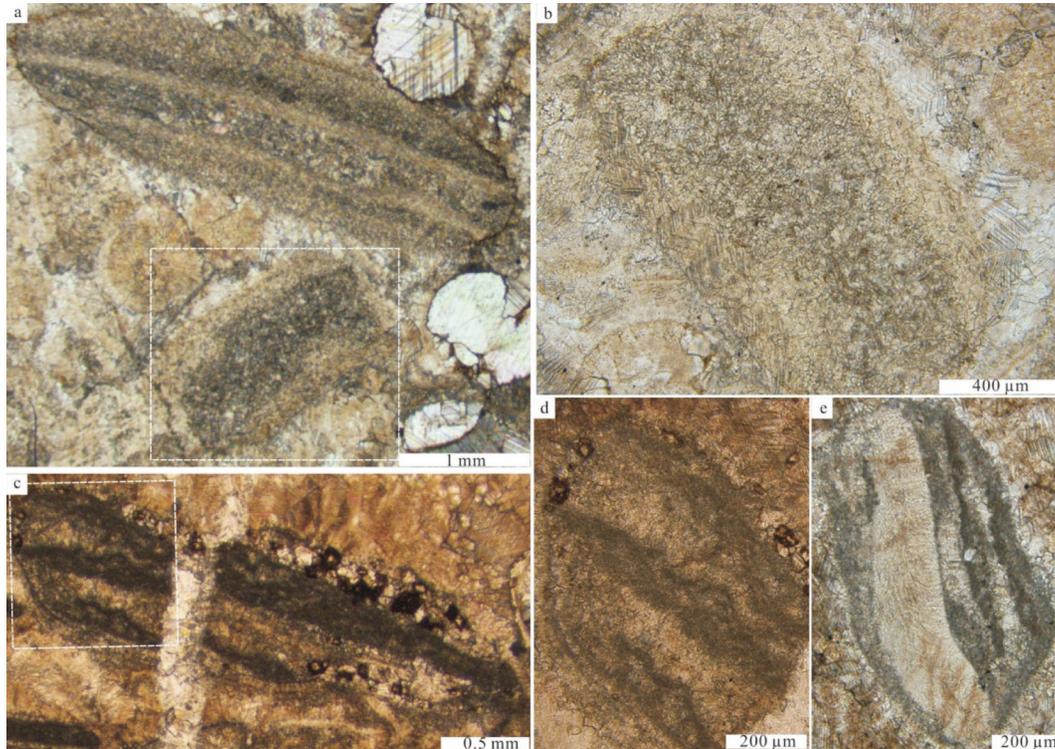


图8 辽宁金州寒武系长山组生物丘中的核形石

a—核心为泥晶,纹层在两端歼灭椭圆形的核形石;b—a中矩形区域的放大,核心为泥晶,可见葛万菌,外部圈层由微亮晶组成;c—核心不可识别的核形石,可见由葛万菌丝状体组成的泥晶(d),并见部分泥晶白原始化;d—c中矩形区域的放大;e—核心为生物碎屑的核形石,外部圈层不对称

Fig.8 Oncolites within bioherm of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province

a—Oncolite with micritic core, lack of cortical development at the ends of the oncolite; b—Magnification of rectangle in a, core composed of micrite, *Girvanella*, outer layer made up of microspar; c—Oncolite without nucleus, *Girvanella* within the micrites (d); d—Magnification of rectangle in c; e—Oncolite with nucleus composed of bioclast and asymmetric cortex

晶类似于构成鲕粒皮层的泥晶,泥晶套可能是致密的和云状的(图3e、5c)。

4.7 凝聚颗粒

凝聚颗粒是由生物膜、结壳生物和文石或镁方解石胶结物把最初分散的鲕粒、生物碎屑及其他的颗粒粘结在一起形成的复合颗粒,包括葡萄石、凝块(或团块)和其他的复合颗粒(Flügel, 2004; 梅冥相, 2007b)。

在长山组生物丘中局部可见较多的凝聚颗粒,包括凝块和由各种颗粒形成的复合颗粒。凝块从圆形—椭圆形到不规则形态变化,可见粉砂状凝块、砂状凝块及砾状凝块(图3, 4a),这些凝块多是由泥晶黏聚而成(图4e),可见由钙化微生物葛万菌或附枝菌相互黏聚形成的凝块(图3c, 7a)。部分凝块或者全部变为微亮晶,或者部分变为微亮晶(图3c),这可能表明凝块在后期成岩作用中发生了较大

程度的重结晶作用,并常在这些颗粒表面形成垂直于其表面生长的纤维状方解石(图3c)。在少数凝块中有自形程度较好的白云石晶体(图3b),说明了凝块中的泥晶发生了选择性白云石化作用。

长山组生物丘中局部见较多的复合颗粒,最大可达3.5 mm。这些凝聚颗粒由包粒、凝块、核形石和小的复合颗粒形成(图9c),或由鲕粒、凝块、生物碎屑黏聚形成(图9d),或由凝块、生物碎屑、核形石形成(图9e)。形成这些凝聚颗粒的颗粒之间或者由泥晶填充,或者由亮晶填充(图9c、e)。由形成复合颗粒中包粒的重结晶作用(图9c)可以推测这些复合颗粒之间填充的微亮晶,可能与后期成岩作用有很大的关系。对形成复合颗粒长的凝块进行放大观察,发现很多凝块中都含有葛万菌丝状体(图9f),而且这些复合颗粒边部的泥晶套也显示了由残余的丝状体,其边部具有典型的不规则轮廓,明显

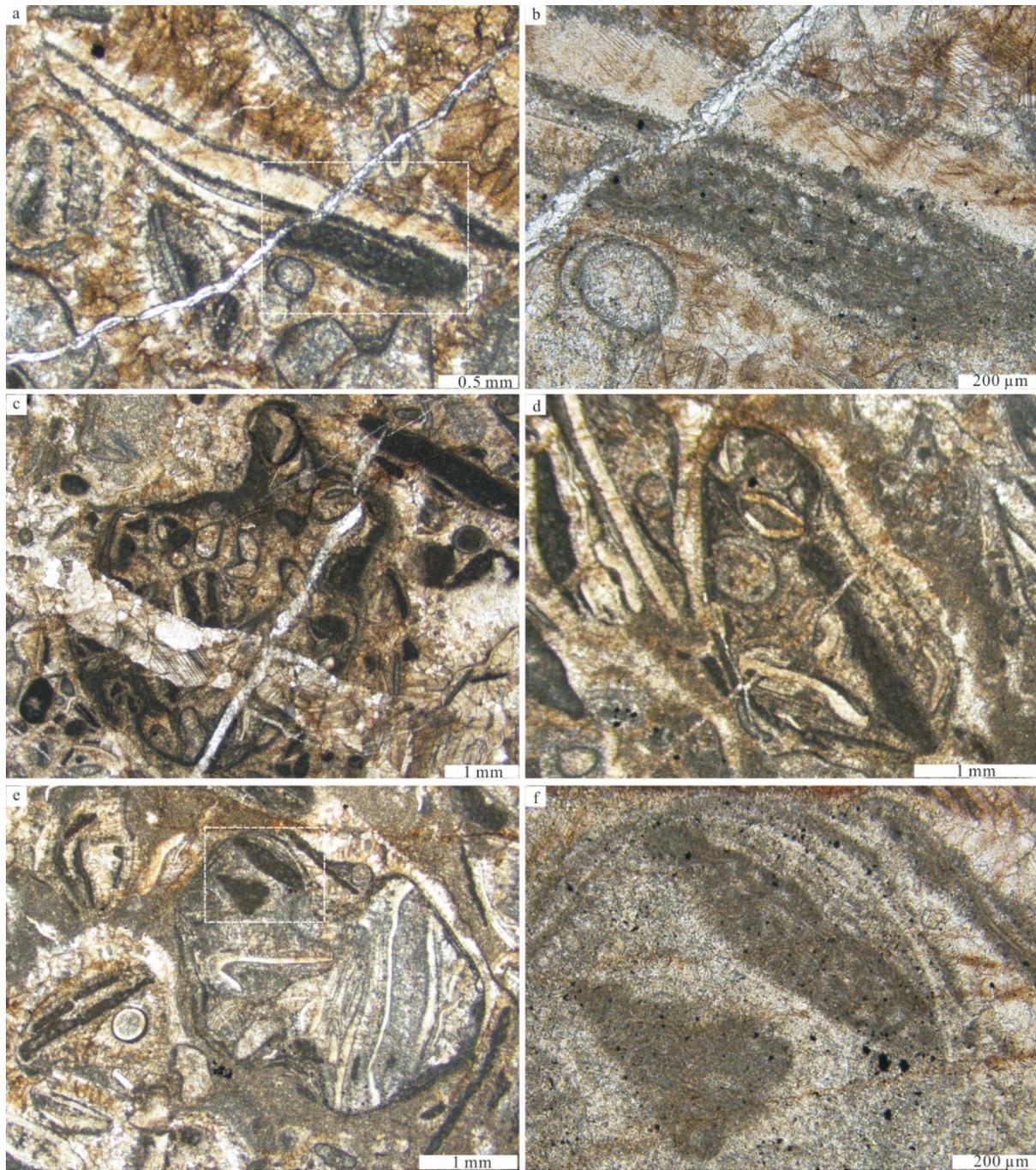


图9 辽宁金州寒武系长山组生物丘中的包粒和凝聚颗粒

a—破坏性泥晶化作用形成的包粒,泥晶中可见葛万菌丝状体(如图b所示);b—a中矩形区域的放大;c—由包粒、凝块、核形石和小的复合颗粒形成的凝聚颗粒;d—由鲕粒、凝块和生物碎屑形成的凝聚颗粒;e—由凝块、生物碎屑、核形石形成的凝聚颗粒,在凝块中可见葛万菌丝状体(如图f所示);f—e中矩形区域的放大

Fig.9 Cortoids and aggregate grains within bioherm of Cambrian Changshan Formation in Jinzhou area of Liaoning Province
 a—Cortoids formed by destructive micritization, *Girvanella* filaments in the micrites (shown in b); b—Magnification of rectangle in a; c—Aggregate grains composed of cortoids, clots, oncolites and small composites; d—Aggregate grains composed of oolites, clots and bioclasts; e—Aggregate grains composed of clots, bioclasts and oncolites, *Girvanella* filaments in the clots (shown in f); f—Magnification of rectangle in e

外凸和内凹的形态(图9c、e),表明这种颗粒可能是结壳状复合颗粒(Flügel, 2004)。一些复合颗粒还显示出了薄的鲕状结壳(图9d、e),并在一些复合颗粒表面出现了薄的胶结物(图9d)。

4.8 含黄铁矿的致密泥晶组构

在寒武系长山组的生物丘中,尽管在其内部可见生物碎屑、钙化微生物、努亚藻、底栖鲕粒、核形石、包粒和凝聚颗粒,但是,更普遍的组构还是泥晶。在泥晶中普遍发育着黑色小点,为细小的黄铁矿颗粒。黄铁矿颗粒直径为9~45 μm ,部分可达100 μm ,呈半自形—他形(多为他形),大量产出在有机质和富葛万菌的颗粒中。这些黄铁矿颗粒可能间接表明了异养细菌——硫酸盐还原细菌(SRB)在长山组生物丘形成过程中所起到的重要作用。以泥晶组构为主的许多微生物碳酸盐岩,明显的均一性掩盖了一系列可能的成因(Riding, 2000)。因此,根据前人研究,结合长山组生物丘的宏观和微观特征,认为研究区的泥晶成因可能与以下几方面有关:

(1)钙化的细菌细胞(Riding, 2000)。死亡和即将死亡的细菌在溶解期间(Krumbein, 1979)产生的分散的圆形体的钙化(Riding, 2000)。

(2)生物成因的白垩(Riding, 2011b)。超微型浮游生物如聚球蓝细菌(Synechococcus)缺乏鞘(Thompson and Ferris, 1990; Thompson, 2000)。钙碳酸盐不是在鞘内或细胞表面成核,而是在细胞表面附近成核,能够沉淀为缺乏构造的生物成因的白垩,这种成因的碳酸盐泥可能适用于解释古生代产生的灰泥(Riding, 2006b, 2011b)。

(3)丝状蓝细菌钙化后破碎的产物(Pratt, 2001; Arp, 2002)。研究区的生物丘中含有大量的葛万菌丝状体,并常常在泥晶形成的颗粒中见葛万菌残余物(图9f)。

(4)异养细菌群落对周围有机物质富集响应(Castanier et al., 1999)。异养细菌在分解有机物质导致了细粒的沉淀,有微晶或更粗的颗粒(Chafetz and Buczynski, 1992)。研究区中黄铁矿颗粒的富集,可能显示了异养细菌群落对泥晶的贡献。

(5)钙化的生物膜(Riding, 2000)。一些建设性的微晶覆膜可能代表生物膜钙化作用(Perry, 1999)。图3e中所示的三叶虫表面的泥晶套代表了建设性的泥晶覆膜,这可能代表了钙化的生物膜

(Riding, 2002b)。

(6)生物侵蚀和钻孔(Flügel, 2004)。图9a-b显示了生葛万菌对三叶虫骨屑的侵蚀及钻孔,可见部分三叶虫骨屑已被完全侵蚀并形成泥晶。

另外,不管是在致密的泥晶组构中,还是由泥晶凝聚形成的凝块或是其他类型的颗粒中,常见一些微亮晶,这些微亮晶可能代表了岩石形成过程中的孔隙(Riding, 2000)。也可能是泥晶的重结晶作用,或者是异养细菌分解有机物时的细粒沉积物(Chafetz and Buczynski, 1992),反映了微生物所起的作用(Flügel, 2004)。

5 讨 论

大连金州寒武系长山组生物丘中,各种钙化微生物及不同类型微生物成因的颗粒的出现,为了解生物丘的主体岩石在形成过程中所经历的复杂的微生物过程提供了重要的线索。近年来,随着对各种微生物碳酸盐岩的广泛研究,对参与其形成的钙化微生物的研究也越来越广泛。有关钙化微生物的生物学属性,虽然部分已经得到了一致的认同,如葛万菌普遍被看作是丝状蓝细菌钙化的鞘(Riding, 1991, 2006b),但是,对于附枝菌等,由于缺乏现代类似物,其属性一直存在争议。Riding (1991)虽然将其归为蓝细菌,但是Chafetz et al. (1992, 1999)的研究认为附枝菌和肾形菌是细菌诱导的产物,Luchinina (2009)认为附枝菌代表了藻类生命周期的不同阶段,Adachi et al. (2014)在研究寒武纪古杯生物礁时提出“葛万菌可能是蓝细菌,而附枝菌是后来的结壳者,可耐受低的光强度,很可能不是蓝细菌”;鉴于以上这些看法,Liu et al. (2016)已经将附枝菌归为可疑类化石。而且,在辽宁金州寒武系芙蓉统长山组中附枝菌的存在表明,并不像前人推测的那样附枝菌已经在寒武系第三统末期逐渐灭绝。

努亚藻已从最初建议将其作为可疑化石(Toomey and Klement 1966),到现在这种认识一直在流行(Riding et al., 2001; Flügel, 2004)。Spincer (1998)提出努亚藻实质上是一种有关鲕粒的观点,指出努亚藻鲕粒可以与其他寒武系鲕粒对比。这是因为努亚藻常出现在传统早寒武世到早奥陶世时期的岩石中,相对于其他鲕粒展示了时

间分布上的局限性。虽然丝状钙化微生物的出现不受努亚藻分布的控制,但有学者提议努亚藻鲕粒的特殊分布时期可能与钙化蓝细菌的幕式分布有关(Spincer, 1998)。

与努亚藻鲕粒不同的是,长山组生物丘中的底栖鲕粒常发育一层泥晶套,这种泥晶套不仅出现在鲕粒中,还出现在其他类型的颗粒中。在多晶鲕粒中还含有有机质,如果这些有机质如Woods(2013)所研究的是黄铁矿覆膜,那么更进一步验证了底栖鲕粒形成过程中微生物所起的重要作用。泥晶套常常有建设性和破坏性两种成因,长山组生物丘中出现的泥晶套既有建设性成因,也有破坏性成因。建设性成因的泥晶套主要表现在泥晶沉淀在颗粒表面,可能是通过生物膜内的泥晶沉淀(Perry, 1999),或者颗粒表面蓝细菌丝状体的钙化作用(Kobluk and Risk, 1977)。建设性泥晶套的微生物成因的另一证据是,在颗粒的对立边上覆膜的厚度常常不相等,表明覆膜一边比另一边生长更快。图4b展示了葛万菌在三叶虫表面形成结壳,其一边明显比另一边更厚。破坏性的泥晶套常常表现在颗粒表面钻孔及泥晶套与颗粒之间的不光滑接触(图6a、e, 9b)。微生物在活着和死后都能够钙化(Chafetz and Buczynski, 1992; Pratt, 2000, 2001; Défarge et al., 1994; Turner et al., 2000),图9b中所示的葛万菌丝状体之间的微亮晶即是丝状蓝细菌钙化后的结果(Dupraz et al., 2004)。这些丝状体之间的泥晶及黄铁矿颗粒的存在也表明丝状蓝细菌死后曾发生了钙化作用,也说明异养细菌对丝状蓝细菌死后所进行的分解作用,反映了泥晶的破坏性成因。已有研究表明,有些泥晶是形成各种微生物岩过程中,底栖微生物活动的直接结果(Pratt, 1982, 2000; Reid et al., 1995; Reitner et al., 1996),在这个过程中,建设性与破坏性泥晶化在长山组生物丘中的泥晶形成中曾起到了重要作用,它反映了早期石化作用及其对岩石形成中的重要影响。但是,正如Dupraz et al. (2009)所说,目前我们只是触及到了碳酸盐冰山一角,要想了解具体的过程,我们所面临的挑战是必须穿越成岩作用这一“过滤器”。

6 结 论

(1) 辽宁金州寒武系长山组顶部发育的生物丘

产出在水较浅的缓坡环境中,由典型的微生物碳酸盐岩组成。生物丘内部的显微组构,显示了多种颗粒的微生物成因特点,其中,生物结壳和破坏性泥晶化组构反映了早期石化作用的重要性。

(2) 有关提议努亚藻实际上是一种放射性鲕粒的观点,值得科学家们探讨与研究。钙化微生物是地质历史记录中重要的化石贡献者。部分钙化微生物的生物学属性一直是个热烈争论的主题,如附枝菌,体现了不同微生物间钙化作用的差异及其复杂性。

(3) 致密泥晶组构中黄铁矿的存在反映了泥晶的异养细菌成因,与各种类型的微生物成因颗粒一起,进一步说明了生物丘形成中复杂的微生物过程。这方面的研究为解决开谜一样的微生物碳酸盐岩的成因提供了基础,也为寒武系生物丘的研究提供了一个重要实例。

致谢:感谢导师在论文资料收集及撰写过程中给予的帮助,感谢审稿专家对论文提出了宝贵修改意见,同门师兄、师弟、师妹和同学在野外样品采集及室内分析中给予的帮助!

References

- Adachi N, Nakai T, Ezaki Y, Liu J. 2014. Late Early Cambrian archaeocyath reefs in Hubei Province, South China: Modes of construction during their period of demise [J]. *Facies*, 60:703-717.
- Arp G, Reimer A, Reitner J. 2002. Calcification of cyanobacterial filaments: *Girvanella* and the origin of lower Paleozoic lime mud: Comment and Reply [J]. *Geology*, 30(6): 579-580.
- Bahniuk A M, Anjos S, França A B, Matsuda N, Eiler J, Mckenzie J A, Vasconcelos C. 2015. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): Implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions [J]. *Sedimentology*, 62: 155-181.
- Bosence D, Gibbons K, Le Heron D P, Morgan W A, Pritchard T, Vining B A. 2015. Microbial carbonates in space and time: introduction [C]//Bosence D W J, Gibbons K A, Le Heron D P, Morgan W A, Pritchard T, Vining B A (eds.). *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. London: Geological Society Special Publications, 418: 1-15.
- Brasier M D. 1995. The basal Cambrian transition and Cambrian bio-events (from terminal Proterozoic extinctions to Cambrian biomes) [C]//Walliser O H (ed.). *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin & Heidelberg: Springer-

- Verlag, 113–138.
- Brock T D, Madigan M T, Martinko J M, Parker J. 1994. *Biology of Microorganisms* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 271–282.
- Castanier S, Le Métayer–Levrel G, Perthuisot J P. 1999. Ca–carbonates precipitation and limestone genesis—the microbiogeologist point of view [J]. *Sedimentary Geology*, 126(1): 9–23.
- Chafetz H S, Buczynski C. 1992. Bacterially induced lithification of microbial mats [J]. *Palaios*, 7: 277–293.
- Chafetz H S, Guidry S A. 1999. Bacterial shrubs, crystal shrubs, and ray–crystal shrubs: Bacterial vs. abiotic precipitation [J]. *Sedimentary Geology*, 126(1): 57–74
- Chen J, Lee J H, Woo J. 2014. Formative mechanisms, depositional processes, and geological implications of Furongian (late Cambrian) reefs in the North China Platform [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 414: 246–259.
- Cumings E R, Shrock R R. 1928. Niagaran coral reefs of Indiana and adjacent states and their stratigraphic relations [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 39(2): 579–620.
- Défarge C, Trichet J, Coute A. 1994. On the appearance of cyanobacterial calcification in modern stromatolites [J]. *Sedimentary Geology*, 94(1/2): 11–19.
- Dong Xiping, Hao Weicheng, Wang Renhou, Wei Xi, Zhang Fang, Li Yan. 2001. Conodont biostratigraphy of Late Cambrian and Early Ordovician in the East Part of Liaohe Fault Basin [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 18(3): 219–228 (in Chinese with English abstract).
- Dupraz C, Visscher P T, Baumgartner L K, Reid R P. 2004. Microbe–mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas) [J]. *Sedimentology*, 51(4): 745–765.
- Dupraz C, Reid R P, Braissant O, Decho A W, Norman R S, Visscher P T. 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats [J]. *Earth–Science Reviews*, 96(3): 141–162.
- Fan Junxuan, Peng Shanchi, Hou Xudong, Chen Dongyang. 2015. Official website of the International Commission on Stratigraphy and the release of the International Chronostratigraphic Chart (v2015/01) [J]. *Journal of Stratigraphy*, 39(2): 125–134 (in Chinese with English abstract).
- Flügel E. 2004. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application* [M]. Berlin & Heidelberg: Springer–Verlag, 73–571.
- Gerdes G, Dunajtschik–Piewak K, Riege H, Taher A G, Krumbein W E, Reineck H E. 1994. Structural diversity of biogenic carbonate particles in microbial mats [J]. *Sedimentology*, 41(6): 1273–1294.
- Gong Yunyun. 2016. Sedimentary Fabrics for Cambrian thrombolytic bioherm: An example from the Zhangxia Formation in Western Shandong Province [J]. *Geoscience*, 30(2): 436–444 (in Chinese with English abstract).
- Hong J, Cho S H, Choh S J, Woo J, Lee D J. 2012. Middle Cambrian siliceous sponge–calcimicrobe buildups (Daegi Formation, Korea): Metazoan buildup constituents in the aftermath of the Early Cambrian extinction event [J]. *Sedimentary Geology*, 253: 47–57.
- Kah L C, Riding R. 2007. Mesoproterozoic carbon dioxide levels inferred from calcified cyanobacteria [J]. *Geology*, 35(9): 799–802.
- Kobluk D R, Risk M J. 1977. Micritization and carbonate–grain binding by endolithic algae [J]. *AAPG Bulletin*, 61(70): 1069–1082.
- Krumbein W E. 1979. Calcification by bacteria and algae [C]// Trudinger P A, Swaine D J (eds.). *Biogeochemical Cycling of Mineral–forming Elements*. Amsterdam: Elsevier, 47–68.
- Lee J H, Lee H S, Chen J, Woo J, Chough S K. 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.
- Lee J H, Chen J, Chough S K. 2015. The middle–late Cambrian reef transition and related geological events: A review and new view [J]. *Earth–Science Reviews*, 145: 66–84.
- Liu L, Wu Y, Yang H, Riding R. 2016. Ordovician calcified cyanobacteria and associated microfossils from the Tarim Basin, Northwest China: systematics and significance [J]. *Journal of Systematic Palaeontology*, 14(3): 183–210.
- Lu Yanhao, Zhang Wentang, Zhu Zhaoling, Xiang Liwen, Lin Huanling, Zhou Zhiyi, Yuan Jingliang, Peng Shanchi, Qian Yi, Zhang Sengui, Li Shanji, Guo Hongjun, Luo Huilin. 1994. The suggestion of building stage about Cambrian in China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 18(4): 318 (in Chinese).
- Luchina V A. 2009. Renalcis and Epiphyton as different stages in the life cycle of calcareous algae [J]. *Paleontological Journal*, 43(4): 463–468.
- Maslov V P. 1954. On the Lower Silurian of eastern Siberia [C]// Shatskiy N S (ed.). *Matters of Geology of Asia*. Moscow: Academy of Sciences of SSSR, 495–529.
- Mei Mingxiang. 2001. A review on genetic–textural classification of limestones and the discussion of relative problems [J]. *Geological Science and Technology Information*, 20(4): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- Mei Mingxiang. 2007a. Revised classification of microbial carbonates: complementing the classification of limestones [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 222–234 (in Chinese with English abstract).
- Mei Mingxiang. 2007b. Discussion on advances of microbial carbonates from the terminological change of thrombolites [J]. *Geological Science and Technology Information*, 26(6): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Nealson K H. 1997. Sediment bacteria: who's there, what are they doing, and what's new?[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1): 403–434.
- Peng Shanchi, Babcock L E, Lin Huanling, Chen Yongan, Qi Yuiping,

- Zhu Xuejian. 2004. Global Standard Stratotype-section and Point for the Paibian Stage and Furongian Series of Cambrian System [J]. *Journal of Stratigraphy*, 28(2): 104–113 (in Chinese with English abstract).
- Peng Shanchi. 2006. A new global framework with four series for Cambrian System [J]. *Journal of Stratigraphy*, 30(2): 147–148 (in Chinese).
- Peng S, Babcock L E, Cooper R A. 2012. The Cambrian Period [C]// Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G (eds.). *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam: Elsevier, 2: 437–488.
- 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. 1982. Stromatolitic framework of carbonate mud-mounds [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 52(4): 1203–1227.
- Pratt B R. 2000. Microbial contribution to reefal mud-mounds in ancient deep-water settings: evidence from the Cambrian [C]// Riding R E, Awramik S M (eds.). *Microbial sediments*. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag, 282–288.
- Pratt B R. 2001. Calcification of cyanobacterial filaments: *Girvanella* and the origin of Lower Paleozoic lime mud [J]. *Geology*, 29(9): 763.
- Reid R P, Macintyre I G, Browne K M, Steneck R S, Miller T. 1995. Modern marine stromatolites in the Exuma Cays, Bahamas: Uncommonly common [J]. *Facies*, 33(1): 1–17.
- Reitner J. 1996. Globale und regionale Steuerungsfaktoren biogener Sedimentation: DFG-Schwerpunktprogramm [M]. Göttingen: Geologische Institute der Georg-August-Universität Göttingen, 1–428.
- Riding R. 1991. Calcified cyanobacteria [C]//Riding R (ed.). *Calcareous Algae and Stromatolites*. Berlin: Springer, 55–87.
- Riding R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 47(1): 179–214.
- Riding R E, Awramik S M. 2000. *Microbial Sediments* [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1–331.
- Riding R, Fan J. 2001. Ordovician calcified algae and cyanobacteria, northern Tarim Basin subsurface, China [J]. *Palaeontology*, 44(4): 783–810.
- Riding R. 2002a. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories [J]. *Earth-Science Reviews*, 58(1): 163–231.
- Riding R. 2002b. Biofilm architecture of Phanerozoic cryptic carbonate marine veneers [J]. *Geology*, 30(1): 31–34.
- Riding R. 2006a. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. *Sedimentary Geology*, 185(3): 229–238.
- Riding R. 2006b. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic-Cambrian changes in atmospheric composition [J]. *Geobiology*, 4(4): 299–316.
- Riding R. 2011a. Microbialites, stromatolites, and thrombolites [C]// Reitner J, Thiel V (eds.). *Encyclopedia of Geobiology*. Dordrecht: Springer, 635–654.
- Riding R. 2011b. Calcified cyanobacteria [C]//Reitner J, Thiel V (eds.). *Encyclopedia of Geobiology*. Dordrecht: Springer, 211–223.
- Rowland S M, Shapiro R S. 2002. Reef patterns and environmental influences in the Cambrian and earliest Ordovician [J]. *Phanerozoic Reef Patterns*, 12: 95–128.
- Sepkoski Jr J J. 1992. Proterozoic-Early Cambrian diversification of metazoans and metaphytes [C]// Schopf J K, Klein C (eds.). *The Proterozoic Biosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 553–564.
- Shapiro R S. 2000. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. *Palaios*, 15(2): 166–169.
- Spincer B R. 1998. Oolitized fragments of filamentous calcimicrobes and the pseudofossil affinity of *Nuia* maslov from the Upper Cambrian rocks of central Texas [J]. *Journal of Paleontology*, 72(3): 577–584.
- Sun Yunzhu. 1924. Cambrian Animals' Fossils in the Northern China [M]. *Palaeontologia Sinica*, B species, 1, 4. Beijing: Science Press, 1–109 (in Chinese).
- Thompson J B, Ferris F G. 1990. Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite, and magnesite from natural alkaline lake water [J]. *Geology*, 18(10): 995–998.
- Thompson J B. 2000. Microbial whittings [C]//Riding R, Awramik S M (eds.). *Microbial Sediments*. Berlin: Springer-Verlag, 250–260.
- Toomey D F, Klement K W. 1966. A problematical micro-organism from the El Paso Group (Lower Ordovician) of west Texas [J]. *Journal of Paleontology*, 40(6): 1304–1311.
- Turner E C, Narbonne G M, James N P. 1993. Neoproterozoic reef microstructures from the Little Dal Group, northwestern Canada [J]. *Geology*, 21: 259–262.
- Turner E C, James N P, Narbonne G M. 2000. Taphonomic control on microstructure in Early Neoproterozoic reefal stromatolites and thrombolites [J]. *Palaios*, 15(2): 87–111.
- Wang Wenzhi, Yang Yueming, Wen Long, Luo Bing, Luo Wenjun, Xia Maolong, Sun Sainan. 2016. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: A case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 43(1): 306–318 (in Chinese with English abstract).
- Wood R. 1999. *Reef Evolution* [M]. Oxford: Oxford University Press, 413–414.
- Woods A D. 2013. Microbial ooids and cortoids from the Lower Triassic (Spathian) Virgin Limestone, Nevada, USA: Evidence for an Early Triassic microbial bloom in shallow depositional environments [J]. *Global and Planetary Change*, 105: 91–101.
- Wu Shuang, Ma Qingli, Hu Zhenghui. 2008. Study on paleontology and sedimentary environment of Cambrian sequences in East Liaodong Peninsula [J]. *Resources and Industries*, 10(1): 119–123

- (in Chinese with English abstract).
- Xiang Liwen, Zhu Zhaoling, Li Shanji, Zhou Zhiqiang. 2000. Stratigraphical Lexicon of China · Cambrian [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-95 (in Chinese).
- Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, Chi Naijie. 2011. Status and prospect of studies on oncoid [J]. *Advances in Earth Science*, 26(5): 465-474 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xinde, Li Xingyun. 1997. A Correlation Study of Multiple Stratigraphic Division in China: the Rock Strata in Liaoning Province [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 58-85 (in Chinese).
- Zhu Zhaoling, Xiang Liwen, Liu Shucui, Luo Kunli, Du Shengxian, Liang Zongwei. 2005. New advance in the Study of the Upper Cambrian Kushanian Stage of North China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 29(S1): 462-466 (in Chinese with English abstract).
- Zhuravlev A Y, Wood R A. 1996. Anoxia as the cause of the mid-Early Cambrian (Botomian) extinction event [J]. *Geology*, 24: 311-314.
- 附中文参考文献**
- 董熙平, 郝维城, 王仁厚, 魏喜, 张放, 李岩. 2001. 辽河断陷东部晚寒武世至早奥陶世牙形石生物地层[J]. *微体古生物学报*, 18(3): 219-228.
- 樊隽轩, 彭善池, 侯旭东, 陈冬阳. 2015. 国际地层委员会官网与《国际年代地层表》(2015/01版) [J]. *地层学杂志*, 39(2): 125-134.
- 贡云云. 2016. 寒武系凝块石生物丘的沉积结构: 以鲁西地区张夏组为例[J]. *现代地质*, 30(2): 436-444.
- 卢衍豪, 张文堂, 朱兆玲, 项礼文, 林焕令, 周志毅, 袁金良, 彭善池, 钱逸, 章森贵, 李善姬, 郭鸿俊, 罗惠麟. 1994. 关于我国寒武系建阶的建议[J]. *地层学杂志*, 18(4): 318.
- 梅冥相. 2001a. 灰岩成因——结构分类的进展及其相关问题讨论[J]. *地质科技情报*, 20(4): 12-18.
- 梅冥相, 马永生. 2001b. 华北北部晚寒武世层序地层及海平面变化研究——兼论与北美晚寒武世海平面变化的对比[J]. *地层学杂志*, 25(3): 201-206.
- 梅冥相. 2007a. 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[J]. *地学前缘*, 14(05): 222-234.
- 梅冥相. 2007b. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展 [J]. *地质科技情报*, 26(6): 1-9.
- 彭善池, Babcock L E, 林焕令, 陈永安, 祁玉平, 朱学剑. 2004. 寒武系全球排碧阶及芙蓉统底界的标准层型剖面 and 点位[J]. *地层学杂志*, 28(02): 104-113.
- 彭善池. 2006. 全球寒武系四统划分框架正式确立[J]. *地层学杂志*, 30(02): 147-148.
- 孙云铸. 1924. 中国北部寒武纪动物化石, 第四册[M]. 北京: 农商部地质调查所, 1-109.
- 王文之, 杨跃明, 文龙, 罗冰, 罗文军, 夏茂龙, 孙赛男. 2016. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究——以四川盆地高磨地区灯影组为例[J]. *中国地质*, 43(1): 306-318.
- 武爽, 麻清莉, 胡争辉. 2008. 辽东半岛寒武纪地层古生物及沉积环境[J]. *资源与产业*, 10(1): 119-123.
- 项礼文, 朱兆玲, 李善姬, 周志强. 2000. 中国地层典·寒武系[M]. 北京: 地质出版社, 1-95.
- 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 迟乃杰. 2011. 核形石研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 26(05): 465-474.
- 杨欣德, 李星云. 1997. 全国地层多重划对比研究: 辽宁省岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 58-85.
- 朱兆玲, 项礼文, 章森桂, 刘书才, 雒昆利, 杜圣贤, 梁宗伟. 2005. 华北上寒武统崮山阶研究新进展[J]. *地层学杂志*, 29(S1): 462-466.