

文章编号:1000-0550(2020)01-0064-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.071

肥城邓家庄剖面寒武系微生物碳酸盐岩沉积序列

辛浩¹,肖恩照¹,王龙²,李屹尧³,张震武¹

1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

2.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,西安 710018

3.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

摘要 山东肥城邓家庄剖面寒武系出露连续,构成了7个三级层序。微生物碳酸盐岩主要发育在高位体系域和强迫型海退体系域单元中,以徐庄组凝块石、张夏组核形石、长山组叠层石、凤山组均一石为代表,是研究早古生代微生物碳酸盐岩复苏期的良好实例。多样化的微生物碳酸盐岩中可见大量保存精美的附枝菌(*Epiphyton*)、葛万菌(*Girvanella*)以及肾形菌(*Renalcis*)等钙化微生物残余物,指示了微生物碳酸盐岩形成与蓝细菌为主导的微生物新陈代谢活动密切相关。此外,微生物碳酸盐岩沉积特征反映了生长环境的分异性:均一石、凝块石分别生长在潮下带下部、上部;柱状叠层石主要发育在能量较高的潮间带环境;核形石指示了沉积环境浅且能量高的鲕粒滩相沉积环境。邓家庄寒武系剖面微生物碳酸盐岩为了解寒武纪地球微生物、古环境、古气候提供了重要的岩石记录。

关键词 微生物碳酸盐岩;钙化微生物;沉积序列;沉积模式;寒武系

第一作者简介 辛浩,男,1995年出生,硕士研究生,沉积学与地层学,E-mail: xinhao199510@163.com

中图分类号 Q913 P588.24 **文献标志码** A

0 引言

微生物碳酸盐岩是由微生物生长和代谢、细胞表面特性、细胞外聚合物与矿物沉淀、颗粒捕获相互作用而产生的沉积岩^[1-2],按照中观构造^[3]可划分为四种基本类型:叠层石、凝块石、均一石、树形石^[1-2]。Kalkowsky^[4]最早提出了叠层石名称,认为由纯粹的叠层纹层组成或由夹有鲕粒、岩屑等颗粒的许多叠层纹层组成;Aitken^[5]为描述与叠层石纹层状不同的非层状结构而提出凝块石的概念;Riding^[6]提出了树形石的概念,具有钙化微生物形成的厘米尺度的树枝状结构;Braga *et al.*^[7]将贫乏结构、相对均一的微生物碳酸盐岩命名为均一石,以发育在西班牙东南部中新世晚期地层中的微生物岩而建立。杨仁超等^[8]、梅冥相^[9]认为微生物生长过程中捕获、黏结碎屑物质围绕核心生成的核形石与发育纹理化构造的纹理石也分别代表了特殊的微生物沉积,应当纳入微生物碳酸盐岩分类体系。此外,部分学者根据微观构造提出了附枝菌格架岩^[10-11]、肾型菌格架岩^[12]概念,近年来又出现了迷宫状微生物岩^[13-15]、海绵生物丘^[16-17]术语。

微生物碳酸盐岩具有广泛的时空分布,从37亿年前的变碳酸盐岩^[18]到现代海洋、湖泊等环境^[19-22]中均有发现。寒武纪作为最漫长的微生物—后生动物过渡期^[23](Microbe-Metazoan transition, MMt),与微生物新陈代谢以及细胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)相互作用有关的叠层石、凝块石等微生物碳酸盐岩^[1,9]广泛发育。近年来国内外不少学者对华北地台寒武系微生物碳酸盐岩的形态分类及成因机制进行了分析探讨,并对微生物组分和微生物席特征进行了初步解释^[13,15,24-26]。本文通过对邓家庄寒武系剖面进行层序地层划分,探索微生物碳酸盐岩沉积特征与分布序列,分析不同类型微生物碳酸盐岩的沉积环境,为进一步研究“显生宙第一幕蓝细菌钙化作用发生期”^[1-2]与“微生物碳酸盐岩复苏期”^[2,27]提供良好的实例。

1 区域地质概况

华北地台是我国重要的构造单元,寒武纪期间没有大幅度的构造沉降,属典型的陆表海浅水沉积

收稿日期:2019-05-08; 收修改稿日期:2019-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41472090, 40472065) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41472090, 40472065]

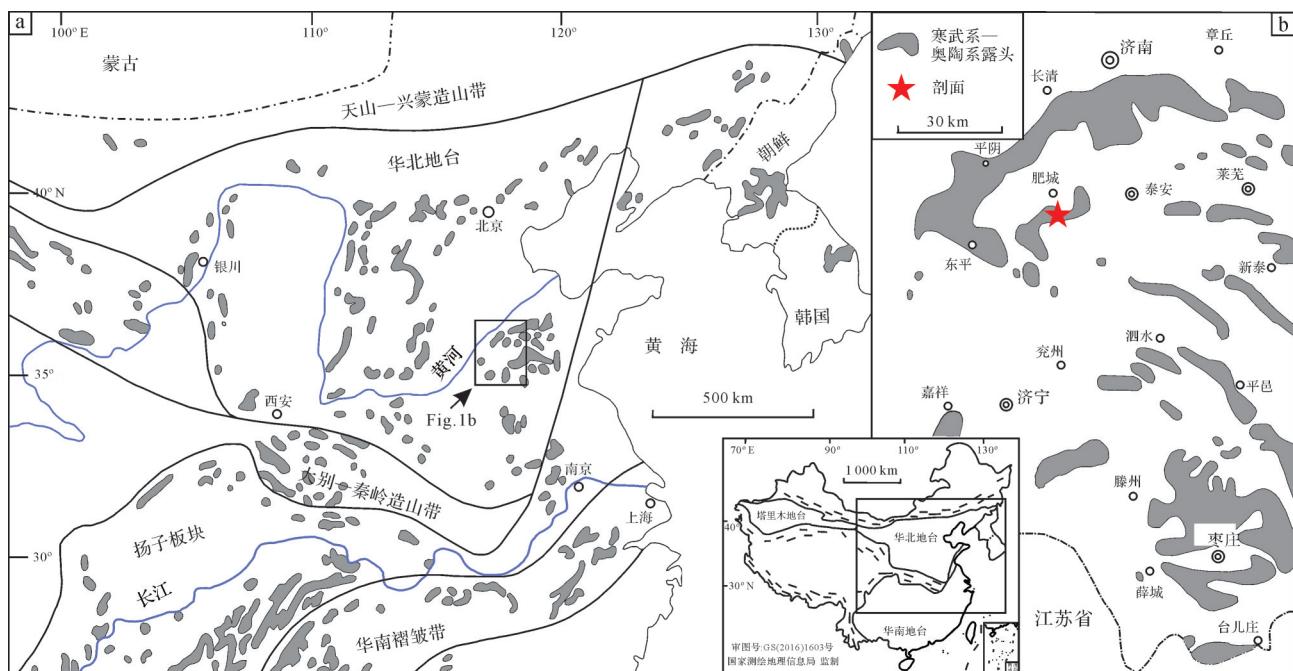


图1 华北地台地质简图及剖面所在位置(修改自文献[29])

(a)华北地台寒武系—奥陶系露头概况;(b)邓家庄剖面所在位置

Fig.1 Brief geological map of the North China Platform and location map of measured outcrop sections

(modified from reference [29])

(a) Cambrian-Ordovician outcrops of the North China Platform; (b) location map of Dengjiazhuang section

盆地^[28]。研究区位于华北地台东南部,肥城市区以南10 km处(图1)。寒武纪地层发育广泛,出露连续,与下伏古元古界二长花岗岩呈不整合接触,上覆为奥陶系冶里组厚层白云岩。结合寒武系划分方案与前人资料^[30-31]将邓家庄剖面寒武纪地层自下而上划分为:苗岭统(毛庄组、徐庄组、张夏组、崮山组)、芙蓉统(长山组、凤山组)。岩性主要为碎屑岩与碳酸盐岩混合的海相沉积,发育广泛的微生物碳酸盐岩。

根据沉积相序列与旋回性特征,将邓家庄寒武系剖面划分为7个三级层序,以徐庄组凝缩段(CS)为界可分为两个阶段:碎屑岩与碳酸盐岩混合沉积代表的发展阶段;鲕粒滩与碳酸盐泥主导的碳酸盐岩台地成熟阶段^[32]。苗岭统包括毛庄组、徐庄组、张夏组与崮山组,分别构成了DS₁、DS₂、DS₃、DS₄四个三级层序(图2)。而凤山组与长山组共同构成了芙蓉统,划分为DS₅、DS₆、DS₇三个三级层序(图2),其中凤山组组成了DS₆、DS₇两个三级层序。除了作为寒武系芙蓉统与下奥陶统界线的DS₇顶界面为典型的暴露间断面,类似于Exxon层序模式中的类型I层序界面^[33]外,其余层序界面均为典型的III型层序界面^[34],也称为淹没不整合面^[35]。

2 微生物碳酸盐岩沉积特征

微生物碳酸盐岩是由微生物生长和代谢、细胞表面特性、细胞外聚合物与矿物沉淀和颗粒捕获相互作用产生的^[1-2],与底栖微生物群落捕获并结合碎屑沉积物或矿物沉淀而形成的微生物岩^[36]相类似,均可以表示由微生物产生的沉积岩^[37]。本文按照微生物碳酸盐岩六大类划分方案^[9],在肥城邓家庄寒武系剖面中识别出以生物丘或生物层形式产出的多种微生物碳酸盐岩。苗岭统以徐庄组凝块状凝块石、张夏组椭圆状核形石为特征,主要产出在三级层序中的高位体系域单元;而芙蓉统微生物碳酸盐岩主要包括强迫型海退体系域单元中的长山组柱状叠层石、凤山组隐晶质均一石等。邓家庄寒武系剖面广泛发育的多样性微生物碳酸盐岩,代表了华北地台壮观的沉积现象。

2.1 凝块石

在邓家庄寒武系徐庄组构成的三级层序DS₂中,海侵体系域单元由夹钙质泥岩、条带状灰岩的块状泥晶灰岩与厚层鲕粒灰岩所组成(图3a),作为微生物与环境相互作用产物的凝块石以生物丘形式发育

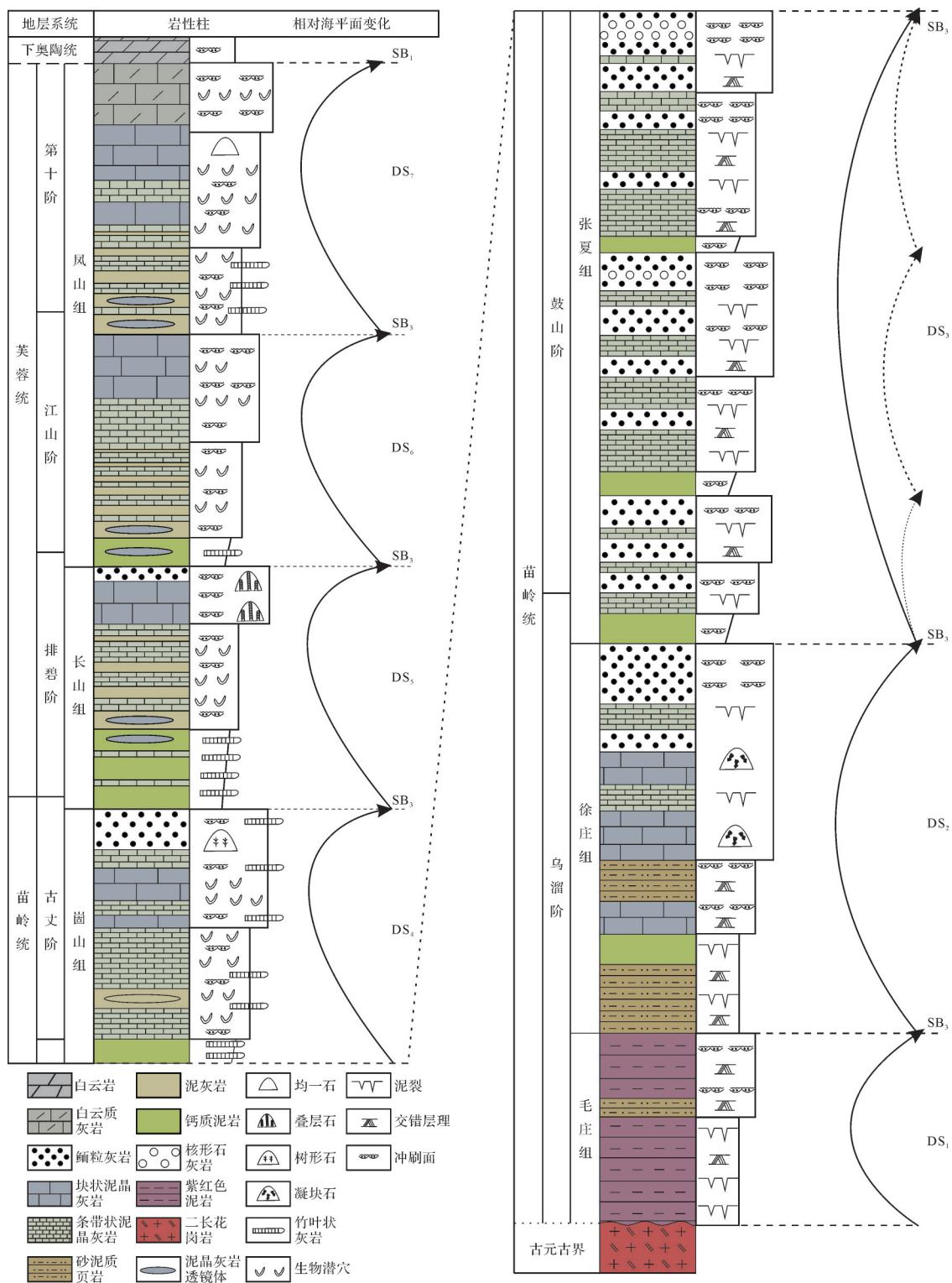


图2 邓家庄剖面寒武系层序地层序列

Fig.2 Sequence stratigraphical succession of the Cambrian at Dengjiazhuang section

在浅缓坡相沉积中,宏观可见独特的凝块状中观组构,区别于其他微生物碳酸盐岩。凝块呈黑灰色,以不规则斑点或团块状产出,大小不一、形态多样(图3b),按照形态划分而被归为斑状凝块石^[38]。凝块约

占岩石表面积的60%~70%,与周围的灰色泥晶基质具有明显区别。

显微观察可见,凝块石主要由泥晶基质与亮晶方解石所构成,包含凝块以及少量白云石胶结物、三

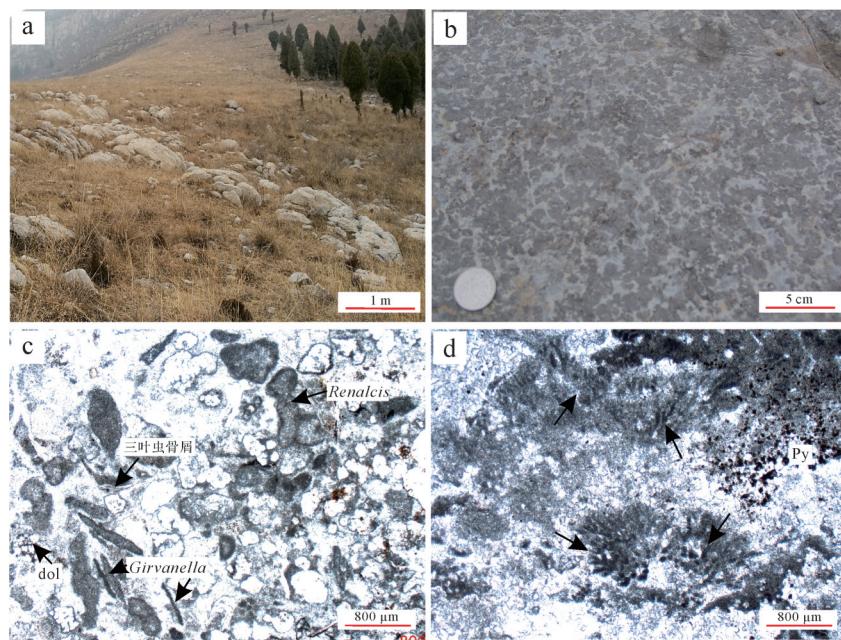


图3 邓家庄剖面徐庄组凝块石沉积组构

(a)徐庄组凝块石以生物丘形式产出;(b)凝块石表面可见以不规则或团块状凝块;(c)凝块石微观可见肾型菌、葛万菌等钙化微生物以及白云石、三叶虫生物碎屑等颗粒;(d)暗色泥晶中零星发育的附枝菌菌落(箭头所示)以及黄铁矿

Fig.3 Sedimentary fabrics of the thrombolite in the Xuzhuang Formation at Dengjiazhuang section

(a) thrombolite bioherm from Xuzhuang Formation; (b) irregular or clumpy clots be seen on the surface of the thrombolite; (c) calcified microorganisms such as *Renalcis* and *Girvanella*, with dolomite and trilobite in the thrombolite; (d) *Epiphyton* (arrowed) and pyrite in dark micrite

叶虫生物碎屑、黄铁矿等颗粒(图3c,d)。凝块主要为肾型菌(*Renalcis*)、葛万菌(*Girvanella*)以及少量附枝菌(*Epiphyton*)等微生物钙化与黏附作用产生的泥晶基质与残余钙化鞘。凝块石中肾型菌(*Renalcis*)呈不规则椭球或肾状,鞘壁主要由暗色泥晶基质所构成,而鞘内被亮晶方解石所充填(图3c);葛万菌(*Girvanella*)可见弯曲缠绕的丝状体,鞘体大小均匀,具有良好的管状构造(图3c);附枝菌(*Epiphyton*)主要由暗色泥晶所构成,呈现出灌木丛状组构(图3d)。大量微生物残余物的发现,表明了凝块石为蓝细菌为主导的微生物钙化产物。

2.2 核形石

张夏组构成了包含3个四级亚层序的三级层序DS₃,内部呈现出条带状灰岩向上减少、鲕粒灰岩向上变厚的沉积特点,构成的“条带状灰岩+鲕粒灰岩”潮下型米级旋回指示了周期约为10万年的旋回层序^[39]。在第二、三个四级亚层序高位体系域顶部,集中产出含有核形石的块状鲕粒灰岩,局部发育指示水流冲刷作用的单向交错层理(图4a)。核形石在岩层中自下往上数量增多,粒径变大,最大可达4 cm,多为1~2 cm。核形石之间被鲕粒、泥晶所填充,形状

多为圆形或椭圆形(图4b)。作为微生物碳酸盐岩中的包覆颗粒类型,核形石以不规则圈层和较大的直径区分于鲕粒。

张夏组核形石显微特征表现为椭圆状非均质包覆颗粒,主要由泥晶与微亮晶所构成,无明显核心且纹层不发育,类似于前人所描述的凝块状皮层核形石^[29]。核形石主要由微亮晶与暗色泥晶所构成(图4c),浅色包壳由微亮晶方解石所组成,而内部泥晶基质中存在可类比于现代织线菌^[6]的葛万菌丝状残余物(图4d,e),以及指示硫酸盐还原细菌活动的黄铁矿,指示了核形石内部复杂的微生物系统。与辽宁半岛碱厂组与馒头组核形石之间充填的凝块^[40]不同的是,邓家庄剖面张夏组核形石之间充填大量鲕粒,粒径大都在0.5~1 mm,呈游离状分布。

2.3 叠层石

芙蓉统长山组构成了三级层序DS₇,由凝缩段单元、高位体系域单元、强迫型海退体系域单元所组成。其中,在强迫型海退体系域单元中发育大型柱状叠层石生物层(图5a),以其保存完好、分布广泛的特征代表了华北地台寒武系特殊的叠层石现象。叠层石生物层厚度约为2 m左右,地面起伏较小。叠层

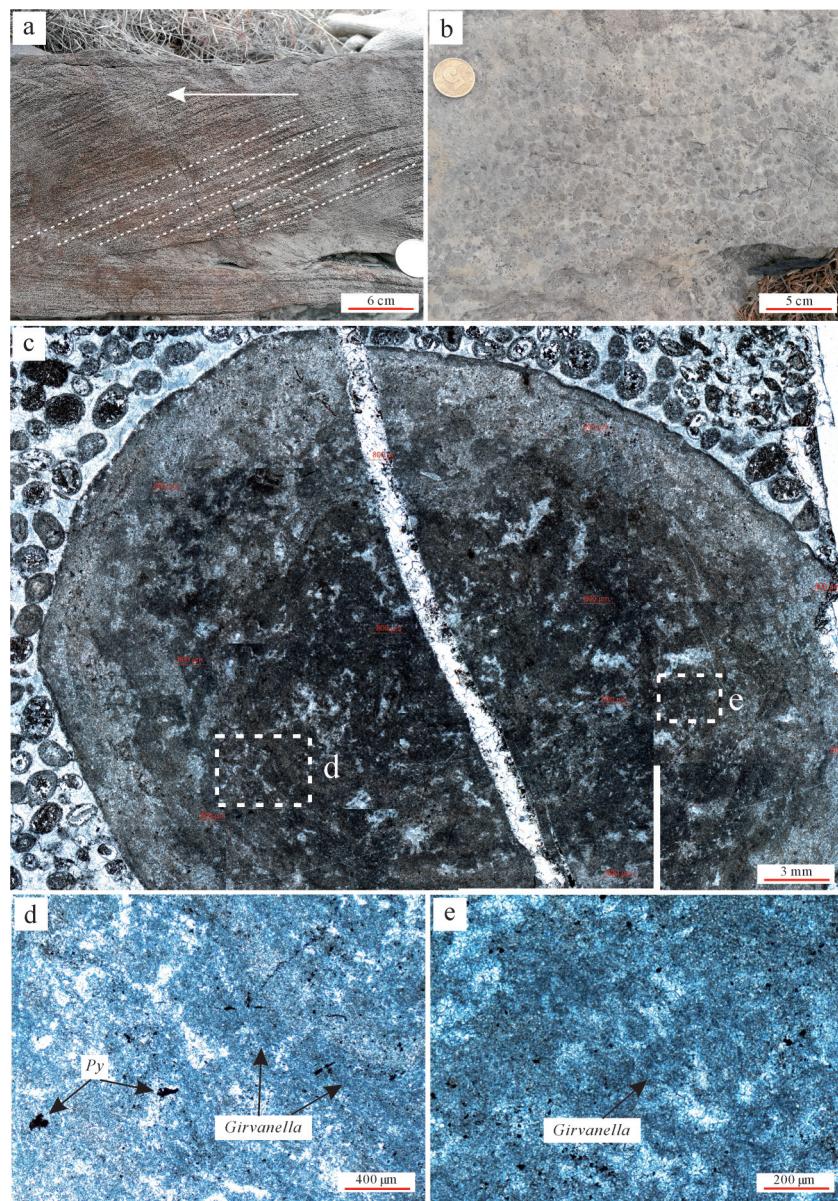


图4 邓家庄剖面张夏组核形石沉积结构

(a) 鲱粒灰岩中发育的单向交错层理;(b)核形石产出在鲕粒灰岩层中;(c)核形石微观特征,内部主要由微亮晶与暗色泥晶所构成,周围充填鲕粒;(d)零星分布的它形、半自形粒状黄铁矿晶体与葛万菌丝状体(箭头所示);(e)核形石内部泥晶基质中存在模糊的丝状体残余物(箭头所示)

Fig.4 Sedimentary fabrics of oncrite in the Zhangxia Formation at Dengjiazhuang section

(a) oolitic limestone with unidirectional cross-bedding; (b) oncrite in the oolitic limestone; (c) microstructures of the oncrite, mainly composed of microspar and dark micrite, surrounded by oolites; (d) scattered pyrite crystals and *Girvanella* (arrowed); (e) cyanobacterial filaments in micrite of the oncrite (the arrowed)

石个体大小不一。柱高为100~200 cm,半径为10~20 cm,少数可达30 cm。叠层石柱状体紧密排列,根据叠层石几何形态的分类方法^[41],长山组叠层石应当归为SH-V类型。圆状、椭圆状顶面(图5b~d)未见同心纹层发育,主要为均质泥晶组构,暗色的颗粒组分充填在柱体之间,部分发生白云石化;而纵剖面上可见明暗相间纹层,构成了叠层石的基本单元,纹层呈

穹窿状,粗糙而平缓,收敛于柱体边缘。

微观特征观察显示,邓家庄剖面长山组大型柱状叠层石由暗色泥晶与微亮晶构成,内部可见钙化微生物残余物、白云石、生物碎屑以及特殊的不规则网状物等。暗色泥晶中丰富而明显的钙化微生物残余物主要为葛万菌(*Girvanella*)(图5e)与肾形菌(*Renalcis*)(图5f)。葛万菌(*Girvanella*)由于缠绕、弯

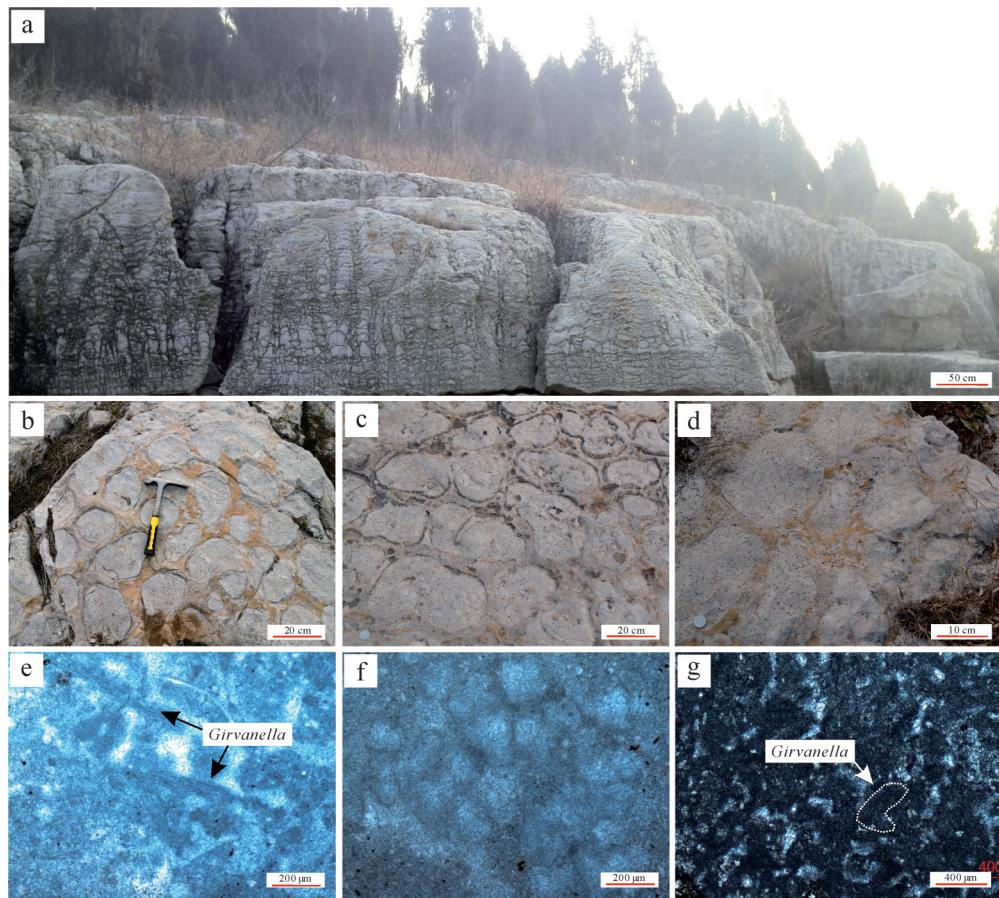


图5 邓家庄剖面长山组叠层石沉积组构

(a)长山组叠层石以生物层形式产出,纵剖面可见清晰纹层;(b)~(d)大型柱状叠层石具有圆状或椭圆状横剖面;(e)显微可见葛万菌残余物(箭头所示);(f)暗色泥晶中的肾形菌;(g)特殊的不规则网状物,可见葛万菌丝状体(箭头所示)

Fig.5 Sedimentary fabrics of stromatolite in the Changshan Formation at Dengjiazhuang section

(a) stromatolite biostrome in Changshan Formation, clear laminae in the longitudinal section; (b)~(d) rounded or elliptical cross-sections of the large columnar stromatolite; (e) *Girvanella* calcification residue (the arrowed); (f) *Renalcis* in dark micrite; (g) irregular network with *Girvanella* (arrowed)

曲而呈现不同的群落形态,但单个丝状体形态相似,均具有良好的管状构造;肾形菌(*Renalcis*)呈肾形或房室状,个体直径50~100 μm,内部无明显组构,紧密排列成葡萄状群落。更为特别的是,还发育着一种特殊的不规则网状物(图5g),常以分叉的孤立个体出现,部分学者将类似现象解释为“硅质海绵骨针”^[1,13,15]或“非骨针角质海绵”^[42],但网状物内部发现的丝状体残余物(图5g)显示了微生物作用的特点。

2.4 均一石

芙蓉统顶部的凤山组构成了DS₆、DS₇两个三级层序,而寒武纪最晚沉积的三级层序DS₇强迫型海退体系域单元,由浅缓坡相块状泥晶灰岩与潮坪相白云质灰岩所组成。在该单元块状泥晶灰岩中,发育构造贫乏而成分均一的隐晶质组构的均一石^[1,9,43],代表了一种特殊的微生物碳酸盐岩。与凝块状凝块石、纹层状叠层石等微生物碳酸盐岩具有典型中观

组构特征不同的是,发育在邓家庄剖面凤山组第二个三级层序DS₇中部的均一石(图6a)表现为贫乏纹层与凝块构造的致密泥晶特点,局部可见白云石化的生物潜穴,反映了不稳定的堆积以及组成的均一性^[7]。隐晶质的均一石在显微镜下呈现出多样性的组分,在暗色泥晶基质中发育窗格状微亮晶、黄铁矿晶体以及典型的丝状微生物化石(图6b),这些鞘体长约0.5~2 mm,直径为5~10 μm的钙化丝状体代表了均一石为蓝细菌主导的光合作用微生物席复杂钙化作用^[44]的产物。

3 邓家庄剖面微生物碳酸盐岩沉积模式

寒武纪时期华北地台处于低纬度地区温暖浅水环境^[45],以蓝细菌为主的微生物大量繁殖,为微生物

碳酸盐岩的形成提供了有利条件。在邓家庄寒武系剖面中呈现出凝块石—核形石—叠层石—均一石的演变序列,根据与生长环境具有良好相关性的沉积特征,本文建立了微生物碳酸盐岩沉积模式示意图(图7)。

发育在DS₇强迫型海退体系域单元中的均一石生物丘以灰泥为主,成分较为均一,贫乏碎屑物质,指示了潮下带下部的低能环境;而凝块石生物丘则主要发育在潮下带上部,内部游离破碎的凝块代表了高能的潮下带环境;叠层石以生物层形式产出在长山组中,柱体与围岩之间清晰的界线可能受到较强水流冲刷作用而成,以及柱间发育的风暴作用成因的竹叶状碎屑,说明叠层石形成于能量更高的潮间带;核形石生长在厚层鲕粒灰岩中,并发育交错层理,指示沉积环境浅且能量高的鲕粒滩相沉积环境。

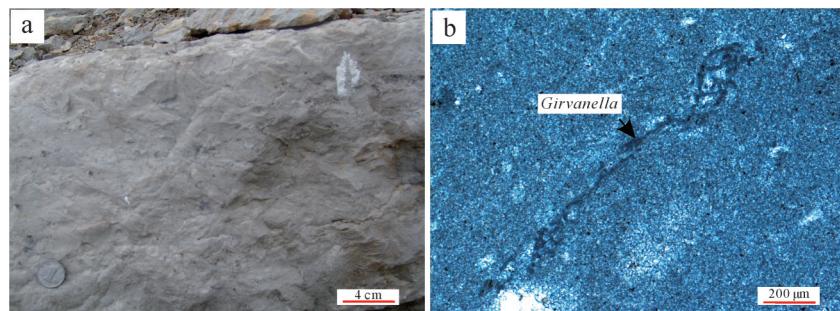


图6 邓家庄剖面凤山组均一石沉积结构
(a)贫乏纹层或凝块构造的均一石;(b)暗色泥晶基质中发育钙化微生物丝状体

Fig.6 Sedimentary fabrics of leiolite in the Fengshan Formation at Dengjiazhuang section
(a) leiolite without a laminated or clotted fabric; (b) calcified microorganism filaments in dark micrite

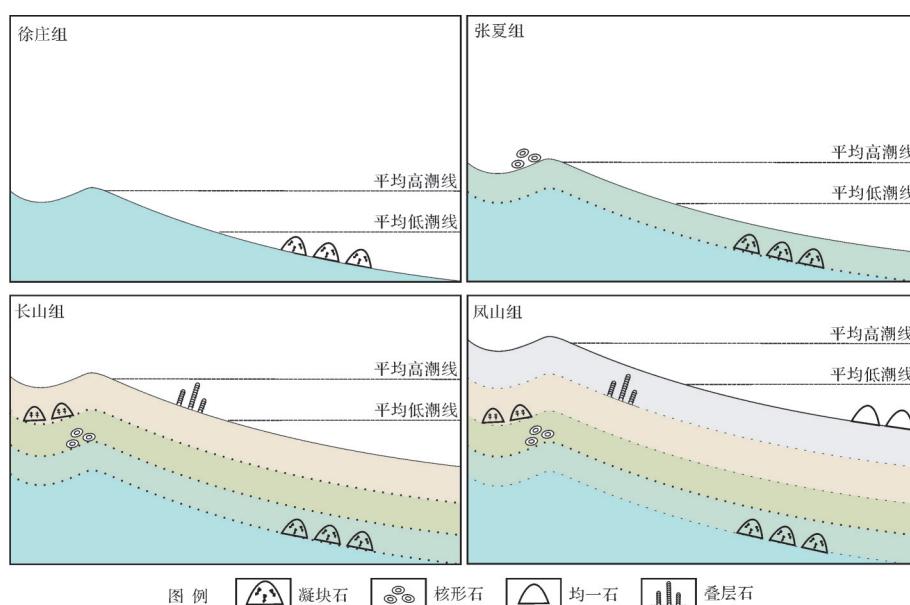


图7 邓家庄剖面寒武系微生物碳酸盐岩沉积模式示意图
Fig.7 Depositional model of Cambrian microbial carbonate at Dengjiazhuang section

4 讨论

邓家庄剖面寒武系中发育多种微生物碳酸盐岩,根据中观组构将其划分为凝块石、核形石、叠层石、均一石等类型,反映了寒武纪“微生物碳酸盐岩的复苏期”的特点。但微生物碳酸盐岩的分类较为复杂,尚未形成统一的标准。前人根据有无纹层将微生物碳酸盐岩简单分为叠层石、凝块石两大类,基于宏观(中观)构造分别提出叠层石、凝块石、均一石等三类,叠层石、凝块石、均一石、树形石等四类的分类体系。而后梅冥相^[9]补充了纹理石、核形石类型,将微生物碳酸盐岩类型划分为六大类。邓家庄寒武系剖面中凝块石、核形石、叠层石、均一石等微生物碳酸盐岩以生物丘、生物层等形式产出,以及显微可见钙化微生物残余物,指示了蓝细菌为主导的微生

物沉积特征。近年来对于树形石的概念存在争议,部分学者提出树形石与凝块石难以区分而被归为凝块石类^[46]以及建立附枝菌格架岩的新观点^[11]。但树形石具有典型的树枝状中观组构以及附枝菌(*Epiphyton*)显著发育的特点与具有凝块状组构以及显微可见的凝块特征的凝块石相区分。此外,树形石显微可见附枝菌(*Epiphyton*)、基座菌(*Hedstroemia*)、胞网菌(*Bacinella*)等多种钙化微生物。因此,树形石仍可作为单独的类型存在,并沿用微生物碳酸盐岩六大类的划分方案^[9]。

在凝块石、核形石、叠层石、均一石等微生物碳酸盐岩中均发现了钙化微生物残余物,主要包括附枝菌(*Epiphyton*)、葛万菌(*Girvanella*)、肾形菌(*Renalcis*)等,指示了微生物碳酸盐岩形成过程中微生物席内部存在复杂的新陈代谢活动,代表了寒武纪作为“显生宙早期第一幕蓝细菌钙化作用事件”^[1-2]发生期的特点。但不同微生物碳酸盐岩中的钙化微生物具有差异性,进而影响了微观形态。此外,钙化微生物的认识尚未统一。附枝菌(*Epiphyton*)的种属归类存在争议,最初认为附枝菌(*Epiphyton*)应当归为红藻^[47],后提出不属于光合作用蓝细菌的观点^[48]。而基于现代微生物岩研究^[49],认为附枝菌(*Epiphyton*)是由于异养细菌造成丝状蓝细菌菌落在微生物席钙化作用的结果。同时,在暗色泥晶中还存在一种特殊的丝状体网状物,许多学者解释为硅质海绵骨针^[13,15]、非骨针角质海绵^[43],而梅冥相等^[24,26]认为是石松藻状(*Lithocodium*)的钙化蓝细菌。在不规则网状物中发现的钙化微生物鞘化石显示了蓝细菌为主导的微生物沉积特征,这种复杂而特殊的组构应当是多细胞后生动物海绵与钙化微生物共同作用的结果^[17]。

微生物碳酸盐岩的形成与微生物席及其周围环

境之间的复杂相互作用密切相关。作为最古老的生态系^[50],微生物生态系统通过控制沉淀和溶解之间的平衡进而影响碳酸盐岩的形成。蓝细菌为主导的微生物通过有机矿化介导碳酸盐矿物沉淀,进而形成微生物碳酸盐岩。生物有机矿化的关键在于碱度发动机(碳酸钙饱和指数)和由细胞外聚合物(EPS)组成的有机基质^[51],微生物新陈代谢作用导致内部碱度增加与环境因素导致外部碱度增加(图8),进而促进了碳酸盐的沉淀^[52]。此外,微生物碳酸盐岩的多样化组构是了解形成过程的重要窗口:不同类型的微生物席在堆积物的顶部反复生长,形成了叠层石特有的纹层状组构^[50],顶面纹层若后期暴露、破化则会缺失;凝块石所具有的微凝块构成了凝块状组构,可归因于微生物群落的原位钙化^[53],而且某些特殊条件下叠层石与凝块石还会发生相互转化^[54-55];树枝状组构的树形石与叠层石、凝块岩不同,仅通过微生物钙化形成,而不是通过颗粒聚集形成^[1];具有核心与包壳的核形石是在微生物在生长过程中捕获、黏结碎屑物质和碳酸钙质点,围绕核心加积而成的^[8],而隐晶质的均一石则显示了均一的成分及不稳定的堆积^[7]。

邓家庄剖面中多样性的微生物碳酸盐岩显示出良好的沉积分异性,在寒武系层序地层框架内呈现出凝块石—核形石—叠层石—均一石的演变序列,分别代表了不同的沉积环境。作为微生物与环境共同作用的产物,微生物碳酸盐岩与海平面变化有着密切联系。当微生物碳酸盐岩生长速率与海平面上升同步时,反而形成了较厚的生物层沉积;相反,当海平面上升迅速,海平面上升速率大于微生物碳酸盐岩沉积速率时则表现为生物丘形态^[37]。此外,不同的组构可能指示不同的水深和水动力条件。因此,微生物碳酸盐岩能够反映生长时期的沉积环境以及

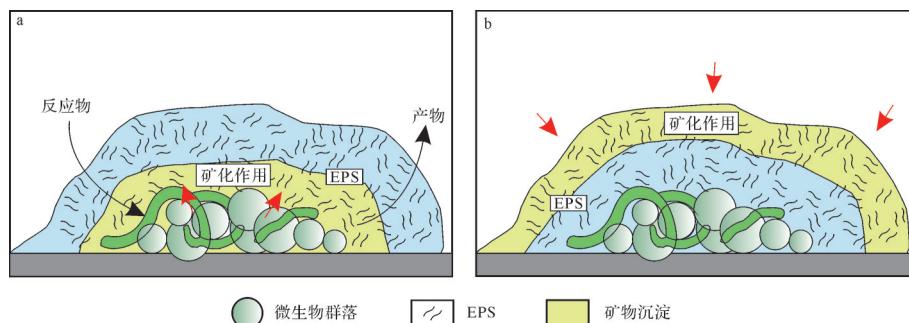


图8 微生物席中的碳酸盐沉淀模型(修改自文献[52])

(a)微生物新陈代谢作用导致内部碱度增加;(b)环境因素导致外部碱度增加

Fig.8 Model of carbonate precipitation within microbial mats (modified from reference [52])

(a) intrinsic, resulting from microbial metabolism; (b) extrinsic, resulting from environmental factors

古环境、古气候的信息。跨越漫长的成岩作用来解释微生物碳酸盐岩成因还存在巨大的挑战。巴哈马台地^[56]、澳大利亚鲨鱼湾^[19]等地现代微生物岩的发现,为寒武系微生物碳酸盐岩的认识提供了关键和窗口。但古生代海洋化学元素、氧化还原环境与现代海洋有着实质性的差异以及现代微生物席受后生生物的影响,现代微生物岩的成因机制不能直接用于寒武系微生物碳酸盐岩。因此,微生物碳酸盐岩成因以及蕴含的科学问题还需进一步的探讨和研究。

5 结论

(1) 肥城邓家庄寒武系剖面中微生物碳酸盐岩广泛发育,以徐庄组凝块石、张夏组核形石、长山组叠层石、凤山组均一石为典型。多样性微生物碳酸盐岩中发育丰富的钙化微生物残余物,包括附枝菌(*Epiphyton*)、葛万菌(*Girvanella*)、肾形菌(*Renalcis*)等类型,指示了微生物碳酸盐岩的形成过程中微生物席内部存在复杂的微生物新陈代谢活动,为“显生宙第一幕蓝细菌钙化作用发生期”提供了典型的岩石记录。

(2) 微生物碳酸盐岩沉积特征反映了生长环境的分异性:均一石产在低能的潮下带下部;凝块石主要生长在潮下带上部;柱状叠层石发育在能量较高的潮间带环境;核形石指示了沉积环境浅且能量高的鲕粒滩相沉积环境。作为微生物与环境共同作用的产物,邓家庄剖面寒武系多样性微生物碳酸盐岩为了解古环境与古气候提供了重要的窗口。

致谢 本项研究得到国家自然科学基金委的支持与资助,非常感谢梅冥相教授在野外工作与室内研究过程中的指导以及各位同门给予的帮助。

参考文献(References)

- [1] Riding R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Suppl. 1): 179-214.
- [2] Riding R. Microbialites, stromatolites, and thrombolites [M]//Reitner J, Thiel V. Encyclopedia of geobiology. Dordrecht: Springer, 2011: 635-654.
- [3] Shapiro R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. *PALAIOS*, 2000, 15 (2): 166-169.
- [4] Kalkowsky E. Oolith und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein [J]. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 1908, 60: 68-125.
- [5] Aitken J D. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1967, 37 (4): 1163-1178.
- [6] Riding R. Classification of microbial carbonates [M]//Riding R. *Calcareous algae and stromatolites*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991: 21-51.
- [7] Braga J C, Martin J M, Riding R. Controls on microbial dome fabric development along a carbonate-siliciclastic shelf-basin transect, Miocene, SE Spain [J]. *PALAIOS*, 1995, 10 (4): 347-361.
- [8] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 核形石研究现状与展望 [J]. 地球科学进展, 2011, 26 (5): 465-474. [Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, et al. Status and prospect of studies on oncoid [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26 (5): 465-474.]
- [9] 梅冥相. 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, 2007, 14 (5): 222-234. [Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: Complementing the classification of limestones [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (5): 222-234.]
- [10] Woo J, Chough S, Han Z. Chambers of *Epiphyton* thalli in microbial buildups, Zhangxia Formation (Middle Cambrian), Shandong province, China [J]. *PALAIOS*, 2008, 23 (1/2): 55-64.
- [11] 韩作振, 陈吉涛, 张晓蕾, 等. 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 [J]. 地质学报, 2009, 83 (8): 1097-1103. [Han Zuozhen, Chen Jitao, Zhang Xiaolei, et al. Characteristics of *Epiphyton* and *Epiphyton* microbialites in the Zhangxia Formation (Third Series of Cambrian), Shandong province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (8): 1097-1103.]
- [12] Shen J W, Yu C M, Bao H M. A Late-Devonian (Famenian) *Renalcis-Epiphyton* reef at Zhaijiang, Guilin, South China [J]. *Facies*, 1997, 37 (1): 195-209.
- [13] Chen J T, Lee J H, Woo J. Formative mechanisms, depositional processes, and geological implications of Furongian (late Cambrian) reefs in the North China Platform [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 414: 246-259.
- [14] Lee J H, Chen J T, Choh S J, et al. Furongian (Late Cambrian) sponge-microbial maze-like reefs in the North China Platform [J]. *PALAIOS*, 2014, 29 (1): 27-37.
- [15] Lee J H, Chen J T, Chough S K. Paleoenvironmental implications of an extensive macerite microbialite bed in the Furongian Chaomidian Formation, Shandong province, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297 (3/4): 621-632.
- [16] Coulson K P, Brand L R. Lithistid sponge-microbial reef-

- building communities construct laminated, Upper Cambrian (Furongian) 'stromatolites' [J]. *PALAIOS*, 2016, 31 (7): 358-370.
- [17] Lee J H, Riding R. Marine oxygenation, lithistid sponges, and the early history of Paleozoic skeletal reefs [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 181: 98-121.
- [18] Nutman A P, Bennett V C, Friend C R L, et al. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures [J]. *Nature*, 2016, 537 (7621): 535-538.
- [19] Allen M A, Goh F, Burns B P, et al. Bacterial, archaeal and eukaryotic diversity of smooth and pustular microbial mat communities in the hypersaline lagoon of Shark Bay [J]. *Geobiology*, 2009, 7 (1): 82-96.
- [20] Delfino D O, Wanderley M D, Silva L H S E, et al. Sedimentology and temporal distribution of microbial mats from Brejo do Espinho, Rio de Janeiro, Brazil [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 263-264: 85-95.
- [21] Reid R P, James N P, Macintyre I G, et al. Shark Bay stromatolites: Microfabrics and reinterpretation of origins [J]. *Facies*, 2003, 49 (1): 299-324.
- [22] 梅冥相, 孟庆芬. 现代叠层石的多样化构成:认识古代叠层石形成的关键和窗口 [J]. *古地理学报*, 2016, 18 (2): 127-146. [Mei Mingxiang, Meng Qingfen. Composition diversity of modern stromatolites: A key and window for further understanding of the formation of ancient stromatolites [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18 (2): 127-146.]
- [23] Chen Z Q, Tu C Y, Pei Y, et al. Biosedimentological features of major microbe-metazoan transitions (MMTs) from Precambrian to Cenozoic [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 189: 21-50.
- [24] 梅冥相, Latif K, 孟庆芬, 等. 寒武系张夏组鲕粒滩中微生物碳酸盐岩主导的生物丘:以河北秦皇岛驻操营剖面为例 [J]. *地质学报*, 2019, 93 (1): 227-251. [Mei Mingxiang, Latif K, Meng Qingfen, et al. Cambrian bioherms dominated by microbial carbonate within the oolitic grainstone bank, Zhangxia Formation of the Miaolingian, Zhuaoying section in Qinhuangdao city of Hebei province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93 (1): 227-251.]
- [25] 梅冥相, 郭荣涛, 胡媛. 北京西郊下苇甸剖面寒武系崮山组叠层石生物丘的沉积构造 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (8): 2473-2486. [Mei Mingxiang, Guo Rongtao, Hu Yuan. Sedimentary fabrics for the stromatolitic bioherm of the Cambrian Gushan Formation at the Xiaweidian section in the western suburb of Beijing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (8): 2473-2486.]
- [26] 梅冥相, 张瑞, 李屹尧, 等. 华北地台东北缘寒武系芙蓉统叠层石生物丘中的钙化蓝细菌 [J]. *岩石学报*, 2017, 33 (4): 1073-1093. [Mei Mingxiang, Zhang Rui, Li Yiyao, et al. Calcified cyanobacterias within the stromatolitic bioherm for the Cambrian Furongian Series in the northeastern margin of the North-China Platform [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33 (4): 1073-1093.]
- [27] Riding R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185 (3/4): 229-238.
- [28] 史晓颖, 陈建强, 梅仕龙. 华北地台东部寒武系层序地层年代格架 [J]. *地学前缘*, 1997, 4 (3/4): 161-173. [Shi Xiaoying, Chen Jianqiang, Mei Shilong. Cambrian sequence chronostratigraphic frame-work of the North China Platform [J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4 (3/4): 161-173.]
- [29] Han Z Z, Zhang X L, Chi N J, et al. Cambrian oncoids and other microbial-related grains on the North China Platform [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2015, 30 (4): 373-386.
- [30] 肖恩照, 覃英伦, Riaz M, 等. 吕梁山东北缘寒武系层序地层划分:以文水苍尔会剖面为例 [J]. *东北石油大学学报*, 2017, 41 (5): 43-53. [Xiao Enzhao, Qin Yinglun, Riaz M, et al. Sequence stratigraphy division of Cambrian in the northeast area of Luliang Mountain: A case study of the Cangerhui section in Wenshui city [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2017, 41 (5): 43-53.]
- [31] 卢衍豪, 朱兆玲, 袁金良, 等. 中国寒武纪地层对比表及说明书 [M]. 北京:科学出版社, 1982. [Lu Yanhao, Zhu Zhaoling, Yuan Jinliang, et al. Suggestions for the establishment of the Cambrian Stages in China [M]. Beijing: Science Press, 1982.]
- [32] 梅冥相, 马永生, 梅仕龙, 等. 华北寒武系层序地层格架及碳酸盐台地演化 [J]. *现代地质*, 1997, 11 (3): 275-282. [Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Mei Shilong, et al. Framework of Cambrian sedimentary sequence and evolution of carbonate platform in North China [J]. *Geoscience*, 1997, 11 (3): 275-282.]
- [33] Helland-Hansen W. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 94 (1/2/3/4): 95-97.
- [34] Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: Examples from Alpine Triassic platform carbonates [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102 (5): 535-562.
- [35] 梅冥相. 从正常海退与强迫型海退的辨别进行层序界面对比:层序地层学进展之一 [J]. *古地理学报*, 2010, 12 (5): 549-564. [Mei Mingxiang. Correlation of sequence boundaries according to discerning between normal and forced regressions: The first advance in sequence stratigraphy [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12 (5): 549-564.]
- [36] Burne R V, Moore L S. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. *PALAIOS*, 1987, 2 (3): 241-254.

- [37] Chen J T, Lee J H. Current progress on the geological record of microbialites and microbial carbonates [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(1): 260-275.
- [38] 陈金勇, 韩作振, 范洪海, 等. 鲁西寒武系第三统张夏组凝块石特征及其形成环境研究 [J]. *沉积学报*, 2014, 32(3): 494-502. [Chen Jinyong, Han Zuozhen, Fan Honghai, et al. Characteristics and sedimentary environment of thrombolite in the Zhangxia Formation (Third Series of Cambrian), Shandong province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(3): 494-502.]
- [39] 梅冥相. 碳酸盐岩米级旋回层序的成因类型及形成机制 [J]. *岩相古地理*, 1993, 13(6): 34-43. [Mei Mingxiang. Genetic types and mechanisms of the carbonate rock meter-scale cyclic sequences [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 1993, 13(6): 34-43.]
- [40] 梅冥相, Riaz M, 刘丽, 等. 辽东半岛复州湾剖面寒武系第二统光合作用生物膜建造的核形石 [J]. *古地理学报*, 2019, 21(1): 31-48. [Mei Mingxiang, Riaz M, Liu Li, et al. Oncoids built by photosynthetic biofilms: An example from the Series 2 of Cambrian at Fuzhouwan section in Liaodong Peninsula [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(1): 31-48.]
- [41] Logan B W, Rezak R, Ginsburg R N. Classification and environmental significance of algal stromatolites [J]. *The Journal of Geology*, 1964, 72(1): 68-83.
- [42] Luo C, Reitner J. First report of fossil “keratose” demosponges in Phanerozoic carbonates: Preservation and 3-D reconstruction [J]. *Naturwissenschaften*, 2014, 101(6): 467-477.
- [43] Xiao E Z, Latif K, Riaz M, et al. Calcified microorganisms bloom in Furongian of the North China Platform: Evidence from Microbialitic-Bioherm in Qijiayu Section, Hebei [J]. *Open Geosciences*, 2018, 10(1): 250-260.
- [44] Stal L J. Cyanobacterial mats and stromatolites [M]//Whitton B A, Potts M. The ecology of cyanobacteria: Their diversity in time and space. Dordrecht: Springer, 2000: 61-120.
- [45] 陈旭, 阮亦萍, 布科 A J. 中国古生代气候演变 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-325. [Chen Xu, Ruan Yiping, Boucot A J. Paleozoic climate evolution in China [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-325.]
- [46] 王龙, Latif K, Riaz M, 等. 微生物碳酸盐岩的成因、分类以及问题与展望: 来自华北地台寒武系微生物碳酸盐岩研究的启示 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1005-1023. [Wang Long, Latif K, Riaz M, et al. The genesis, classification, problems and prospects of microbial carbonates: Implications from the Cambrian carbonate of North China Platform [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1005-1023.]
- [47] Luchinina V A, Terleev A A. The morphology of the genus *Epiphyton Bornemann* [J]. *Geologija Croatica*, 2008, 61(2/3): 105-111.
- [48] Adachi N, Nakai T, Ezaki Y, et al. Late early Cambrian archaeocyath reefs in Hubei province, South China: Modes of construction during their period of demise [J]. *Facies*, 2014, 60(2): 703-717.
- [49] Laval B, Cady S L, Pollack J C, et al. Modern freshwater microbialite analogues for ancient dendritic reef structures [J]. *Nature*, 2000, 407(6804): 626-629.
- [50] 梅冥相. 微生物席的特征和属性: 微生物席沉积学的理论基础 [J]. *古地理学报*, 2014, 16(3): 285-304. [Mei Mingxiang. Feature and nature of microbial-mat: Theoretical basis of microbial-mat sedimentology [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 285-304.]
- [51] Dupraz C, Reid R P, Braissant O, et al. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(3): 141-162.
- [52] Dupraz C, Reid R P, Visscher P T. Microbialites, modern [M]//Reitner J, Thiel V. Encyclopedia of geobiology. Dordrecht: Springer, 2011: 617-635.
- [53] Kennard J M, James N P. Thrombolites and stromatolites: Two distinct types of microbial structures [J]. *PALAIOS*, 1986, 1(5): 492-503.
- [54] Dupraz C, Pattison R, Verrecchia E P. Translation of energy into morphology: Simulation of stromatolite morphospace using a stochastic model [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185(3/4): 185-203.
- [55] 梅冥相. 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*, 2007, 26(6): 1-9. [Mei Mingxiang. Discussion on advances of microbial carbonates from the terminological change of thrombolites [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 1-9.]
- [56] Reid R P, Foster J S, Radtke G, et al. Modern marine stromatolites of Little Darby Island, Exuma archipelago, Bahamas: Environmental setting, accretion mechanisms and role of euendoliths [M]//Reitner J, Quéric N V, Arp G. Advances in stromatolite geobiology. Berlin: Springer, 2011: 77-89.

Sedimentary Succession of Cambrian Microbial Carbonates at Dengjiazhuang Section at Feicheng

XIN Hao¹, XIAO EnZhao¹, WANG Long², LI YiYao³, ZHANG ZhenWu¹

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

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: The Dengjiazhuang section at Feicheng city, Shandong province, is characterized by a continuous Cambrian stratigraphic succession comprising seven third-order sequences. Microbial carbonates in the Dengjiazhuang section were developed in the HST and FRST, represented by thrombolite in the Xuzhuang Formation, oncolite in the Zhangxia Formation, dendrite in the Gushan Formation, stromatolite in the Changshan Formation, and leiolite in the Fengshan Formation, which is a typical example for studying a resuscitate period of microbial carbonates in the Early Paleozoic. Besides, a large number of well-preserved calcified microorganism fossils such as *Epiphyton*, *Girvanella* and *Renalcis* spp. are found in the microbial carbonates, which indicates that there are complex microbial metabolic activities led by cyanobacteria in the microbial mat during the formation of carbonates. Furthermore, the sedimentary characteristics of the microbial carbonates reflect the diversity of sedimentary environments. Leiolite and thrombolite grew respectively in the lower and upper part of the subtidal zone; columnar stromatolites were developed generally in the high-energy intertidal zone; oncolites indicate oolitic beach facies with shallow water and high energy. Therefore, the diversity of microbial carbonates at the Dengjiazhuang section in the Cambrian provides an important rock record for the study of earth microorganisms, paleoenvironment and paleoclimate in the Cambrian.

Key words: microbial carbonates; calcified microorganism; sedimentary succession; sedimentary model; Cambrian