

河北兴隆中元古界大红峪组微生物成因构造特征及其地质意义

陈留勤^{1,2}

- (1. 东华理工大学 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013;
2. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要:河北兴隆一带的中元古界长城系大红峪组(1 650~1 600 Ma)以潮下坪灰白色厚层块状细粒石英砂岩为主,在砂岩层面上产出丰富的微生物成因构造(MISS)。详细描述了 MISS 的沉积特征,并对其成因进行了初步分析。这些微生物成因构造可能反映了华北中元古代浅海潮坪环境被大面积分布的微生物席所覆盖,微生物席对砂质沉积物表面起到有效的保护作用,在一定程度上降低了沉积物的侵蚀和改造作用,从而影响基本沉积作用过程。大红峪组砂岩层面上发育的 MISS 为探索元古宙浅海环境微生物-沉积作用关系提供了研究材料,对这些 MISS 的深入研究可以加深对元古宙碎屑沉积体系的理解,从而促进微生物席沉积学的发展。

关键词:微生物成因构造;微生物席;中元古界;大红峪组;兴隆剖面

中图分类号:P512.2;Q913

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2013)03-0366-07

Characteristics and geological significance of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Mesoproterozoic Dahongyu Formation of Xinglong County, Hebei Province

CHEN Liu-qin^{1,2}

- (1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. College of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Mesoproterozoic Dahongyu Formation (1 650~1 600 Ma) is characterized by subtidal grayish white thick and blocky fine-grained quartz sandstone in Xinglong area of Hebei Province. Microbially induced sedimentary structures (MISS) are widespread on the sandstone surfaces. This paper described in detail sedimentary features and preliminarily analyzed the origin of the MISS. The existence of the MISS probably suggests that a large area of subtidal shallow marine environment was covered by omnipresent microbial mats during Mesoproterozoic in North China. Microbial mats effectively protected the surfaces of sandy sediments and reduced the extent of erosion and reworking. Therefore, the growth of microbial mats had an important influence on the basic process of siliciclastic sedimentation. The MISS on the sandstone surfaces of Dahongyu Formation provide materials for the study of the coordinated development relationship between microbial mats and sedimentation in the Proterozoic shallow marine environment. The in-depth study of the MISS is beneficial for the better understanding of the Proterozoic siliciclastic depositional system and contributes to promoting the development of microbial-mat sedimentology.

收稿日期:2013-01-08;修订日期:2013-04-08

基金项目:东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室开放基金项目(NRE1210);博士后科研启动基金项目(DHBHK1102);江西省博士后科研择优资助项目;江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ13438)

作者简介:陈留勤(1983-),男,讲师,博士后,主要从事沉积学和层序地层学教学和科研工作,E-mail:liuqinchen@163.com

Key words: microbially induced sedimentary structure; microbial mat; Mesoproterozoic; Dahongyu Formation; Xinglong section

微生物对三大沉积体系(硅质碎屑岩、蒸发岩和碳酸盐岩)具有重要的沉积动力学影响(Noffke *et al.*, 2003),在碳酸盐岩中形成许多特殊的微生物-沉积构造,比较典型的如叠层石和臼齿构造,而在碎屑岩中则统称为微生物成因构造(Microbially Induced Sedimentary Structures, 缩写为 MISS (Noffke *et al.*, 2001)。最常见的 MISS 主要包括皱饰构造(wrinkle structures (Hagadorn and Bottjer, 1997)、变余波痕(palimpsest ripples (Seilacher, 1999)和卷曲构造(roll-up structures (Simonson and Carney, 1999)。近年来微生物席及其相关沉积构造在碎屑岩沉积环境中的广泛发育逐渐引起地质学家的重视,因为微生物在碎屑岩沉积和成岩作用过程中也扮演了重要的、不可忽视的角色(Schieber *et al.*, 2007; Noffke, 2010)。微生物影响基本物理沉积作用过程,这些由微生物席和沉积物之间相互作用而形成的特殊沉积构造较好地保存在前寒武纪岩石记录中(Schieber *et al.*, 2007; Seckbach and Oren, 2010; Noffke, 2010)。

华北地台中、新元古代地层出露良好,地层层序齐全,岩石基本未发生变质,是华北板块同时代沉积的典型代表(宋天锐等, 1991),产出从常州沟组到景儿峪组的全套地层,为探索研究前寒武纪微生物-沉积作用提供了得天独厚的条件。MISS 是我国近年来沉积学研究的一个热点,在华北地区中元古代地层记录中发现了大量微生物形成的原生沉积构造(Shi and Chen, 2006; 梅冥相等, 2007; 黄秀等, 2010; 史晓颖等, 2008a, 2008b; 汤冬杰等, 2011),前人已经对 MISS 产出层位、宏观特征及成因进行了初步描述和研究。燕山地区 MISS 主要见于中元古界长城系常州沟组、串岭沟组和大红峪组等碎屑岩为主的地层当中,包括帐篷脊、皱饰构造、变余波痕、微生物席碎片、不规则网络状裂缝、砂脉构造等,这些沉积构造的特殊之处在于其形成过程中微生物席与沉积介质之间发生了相互作用。本文对河北兴隆剖面大红峪组砂岩层面上发现的 MISS 进行初步研究,为前寒武纪碎屑岩沉积体系中浅海环境微生物-沉积作用研究提供实际材料。

1 MISS 的形成、定义和分类

微生物及其粘性胞外聚合物像粘结有机质套一样覆盖、包裹沉积物颗粒(Bouougri and Porada, 2002)形成微生物膜,微生物膜在适当条件下继续生长、变厚,因具较明显的纹层而被称为微生物席(Decho, 2000)。根据现代研究结果(Noffke *et al.*, 2003),大面积分布的微生物席主要通过以下几种生物作用参与到沉积作用过程中:①生物稳化作用;②生物夷平作用;③障积、捕集、粘结作用;④颗粒分离作用;⑤压实形成印记作用等。在叠层石形成过程中,同沉积化学沉淀和早期胶结作用具有重要影响。然而,对于硅质碎屑岩沉积体系,在 MISS 的形成过程中,微生物席与碎屑沉积物之间的相互协调却起到了重要作用:障积作用引起沉积物沉积,生物稳化作用减弱了沉积介质对沉积物的侵蚀和改造作用,而在硅质碎屑沉积期之间的平静水动力条件下则发生微生物席组构的粘结和生长(Noffke *et al.*, 2008)。

目前, MISS 定义为底栖微生物所形成的微生物席和生物膜与其他物理营力(如剥蚀作用、沉积作用、搬运作用和变形作用等)相互协调而形成的生物沉积构造,包括层面构造(如皱饰构造、微生物席碎片、剥蚀残余物和残余坑穴、多向变余波痕、收缩裂缝等)和层内构造(海绵状空隙组构、气穹窿、S形纹理、定向颗粒、有机纹理等)(表1),被归为第五类原生沉积构造(Noffke *et al.*, 2001),相关研究是近年来沉积学领域的重要研究进展之一。Schieber 等(2007)甚至提出“微生物席沉积学(Microbial Mat Sedimentology)”的概念,梅冥相(2011)对微生物席沉积学诞生的历史背景、研究现状及存在问题进行了全面的综述。有关 MISS 及其生物地质作用过程的研究近年来发展迅速,为深刻认识地球早期生命演化及微生物与环境系统相互作用提供了重要信息,已经成为当前地球生物学(Geobiology)一个活跃的研究方向(Noffke, 2010)。

表 1 微生物成因构造分类(Noffke et al. , 2001)

Table 1 The classification of microbially induced sedimentary structures(after Noffke et al. , 2001)

A类 层面构造	B类 层内构造
1) 被夷平的沉积面 皱饰构造	1) 海绵状孔隙结构、气穹隆、窗孔构造
2) 微生物席碎片	2) S形纹层
3) 侵蚀残余物和残余坑穴	3) 定向颗粒 底栖鲕粒
4) 多向变余波痕	4) 生物纹层 微生物席束缚的颗粒
5) 卷曲的微生物席 收缩裂缝	

2 MISS 产出的地质背景

研究区位于河北省东北部兴隆县境内,西部与北京密云接壤,东部毗邻遵化,承德位于其北,南界为蓟县(图 1)。根据前人研究成果(朱士兴等, 1994;陈晋镛等, 1999),燕山地区中元古代大红峪组的时限大致为1 650~1 600 Ma。大红峪组的含义经历了多次修改和补充。高振西等(1934)在天津蓟县下营乡大红峪沟首次将其命名为“大红峪石英岩夹安山岩流”,1959年第一次全国地层会议决定改称为大红峪组。据陈晋镛等(1999),大红峪组现在的定义为:以发育碎屑岩为特色,主要由石英岩状砂岩、长石石英砂岩和白云岩组成,中部为富钾粗面

岩、火山碎屑岩,底部以紫红色页岩夹砂岩为标志与下伏团山子组整合接触,顶界则以遭受侵蚀的锥叠层石白云岩顶面为界。

区内中、新元古代地层发育齐全,自下而上包括长城系、蓟县系和青白口系,总体呈近东西向展布。大红峪组为长城群最上部的一个地层单位,下部以碎屑岩沉积为主,往上渐变为以碳酸盐岩沉积为主,垂向上可划分为3个三级层序和1个二级大层序,与上、下地层分别呈假整合接触;横向上可分为东部碎屑岩区、西部碳酸盐岩区,两相区为同时异相,两相区之间呈指状交错的相变关系(徐德斌等, 2002)(图 2)。

兴隆地区的大红峪组为一套碎屑岩、碳酸盐岩混合沉积,岩性、岩相、厚度在区内存在明显的变化规律,具体表现在从东到西碎屑成分逐渐减少,直至尖灭,而碳酸盐岩的成分则由少到多,叠层石从不发育到发育,硅结壳西部最发育,暴露带最宽,碎屑岩和碳酸盐岩在龙窝—庆丰一带形成广阔的交互带,从东到西地层厚度由厚变薄,从 657 m 变为 171 m,反映了大红峪组沉积晚期东部沉降幅度相对较大(徐德斌等 2002)。因此,大红峪组的沉积环境被归纳为砂质海滩型沉积和浅水碳酸盐岩沉积两大套,

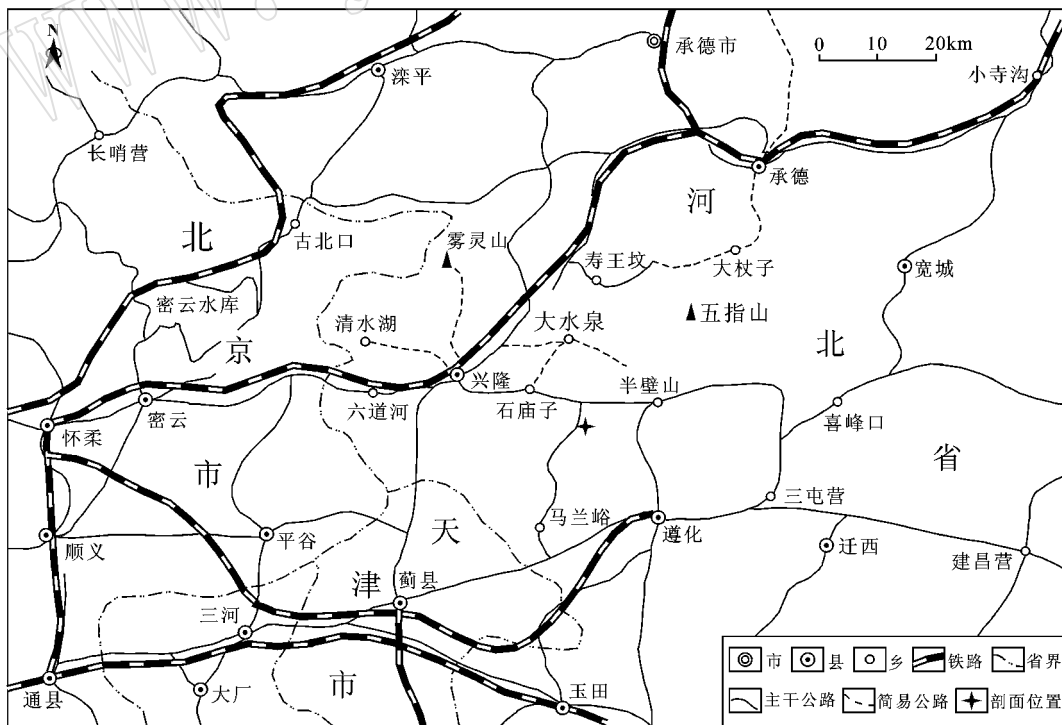


图 1 研究区交通位置图

Fig. 1 Location of the study area

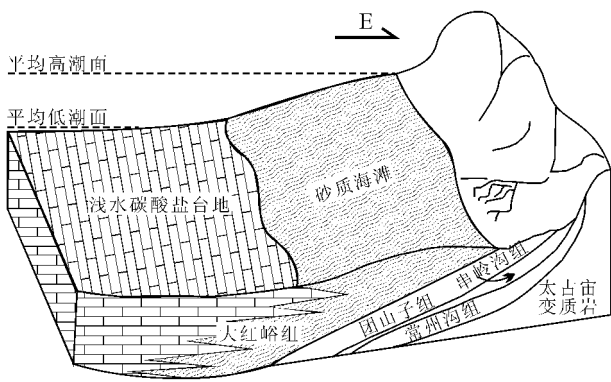


图2 河北兴隆中元古代大红峪组沉积模式
(徐德斌等, 2002)

Fig. 2 Depositional model of Mesoproterozoic Dahongyu Formation in Xinglong County, Hebei Province
(after Xu Debin *et al.*, 2002)

在龙窝—庆丰一带呈现锯齿状交叉的相变特征,砂质海滩型沉积在岩性组合上由矿物成熟度和结构成熟度较高的石英砂岩和粉砂岩组成,石英含量平均95%以上。在厚层块状(单层厚度为50~150 cm)石英砂岩单元层内发育双向交错层理、板状和楔状交错层理以及透镜状和脉状交错层理等典型沉积构造,反映了研究区大红峪组砂质海滩型沉积为一种较为成熟的海滩沉积。

3 MISS的沉积特征

河北兴隆剖面大红峪组厚层石英砂岩层面上产出特殊的微生物成因构造(图3),包括多向变余波痕、微生物席碎片、不规则网络状裂缝等。其中,不规则网络状裂缝在外部形态上与常见的泥裂构造具有一些相似之处,但在形态、成分和产出环境上两者都表现出极为不同的特点。泥裂构造在层面上呈现多边形形状,交叉点一般为三联点,在沉积环境暴露变浅的条件下形成于泥质岩类的层面上,所以多年来将泥裂构造作为近地表暴露的相标志。河北兴隆剖面中元古界长城系大红峪组中产出的不规则网络状裂缝具有自身的独特之处(图3):①在露头剖面上呈多边形网络状,与其他微生物成因构造相伴产出;②产于较纯净的石英砂岩中,石英砂岩单层厚度为50~150 cm,这是最令人困惑的一点,也是最让人产生兴趣的特征;③充填多边形裂缝的不是泥质物,而是白色或灰白色的砂质沉积,砂质裂缝在风化

面上比围岩颜色浅,在新鲜面上不可分辨;④裂缝的宽度可分为两类:大级别砂质裂缝为1 cm左右,小级别多在3~6 mm之间,二者在空间上形成联通的网络。

4 MISS成因讨论

在碳酸盐岩沉积体系中,由微生物形成的原生沉积构造以叠层石著称,多年来的研究无论是国内还是国外均取得了极为丰硕的成果(比如朱士兴, 1993; Riding, 2000; 曹瑞骥等, 2006)。而对于硅质碎屑岩沉积体系,由于通常缺乏微生物席或微生物膜存在的直接证据,导致微生物席或微生物膜的是否存在只能根据沉积物在未石化以前不同寻常的粘性和柔软性来加以推断,这就需要研究微生物席与砂质沉积物相互作用而形成的MISS。

MISS又被称为“席底构造(matground structure)”(Schieber, 1999),这是因为富有机质的微生物席所粘结的沉积物具有良好的粘性和柔软性,与水流和其他物理营力相互作用会形成一系列独特的微生物席相关沉积构造。而其他受水流作用形成的诸如波痕、交错层理和重力荷载铸模等原生沉积构造则被称为“混合底构造(mixground structure)”(Schieber, 1999)。梅冥相等(2007)在北京南口及邻区较为完整的大红峪组海侵体系域砂岩中发现的微生物席碎片,可作为“席底构造”的一种类型,与之共生的变余波痕和皱饰构造等特殊的沉积构造均应属于第五类原生沉积构造(Noffke *et al.*, 2001)中的A类即层面构造类,这反映了在砂质沉积物表面上可能发育过微生物席或微生物膜。

微生物是前寒武纪生物圈构成中的主体部分(Schopf, 1999),微生物席广泛发育在正常浅海环境砂质沉积物表面,对物理沉积作用产生重要影响,从而使得微生物成因构造在前寒武纪地层记录中普遍产出。随着寒武纪“耕作革命(Agronomic revolution)”(Seilacher and Pflüger, 1994)的开始,席底和叠层石几乎全部被混合底所替代,这可能主要归因于后生动物的觅食和潜穴作用(Pflüger, 1999)。寒武纪以后,在广大浅海环境后生动物迅速替代了微生物,导致在显生宙MISS多发育在不利于后生动物生存的环境。现在,各种各样的造席微生物群落繁盛于缺氧环境、潮间带、潮上带、高盐度环境和热水环境等“避难所”(Neu, 1994)。而在显生宙几次大的

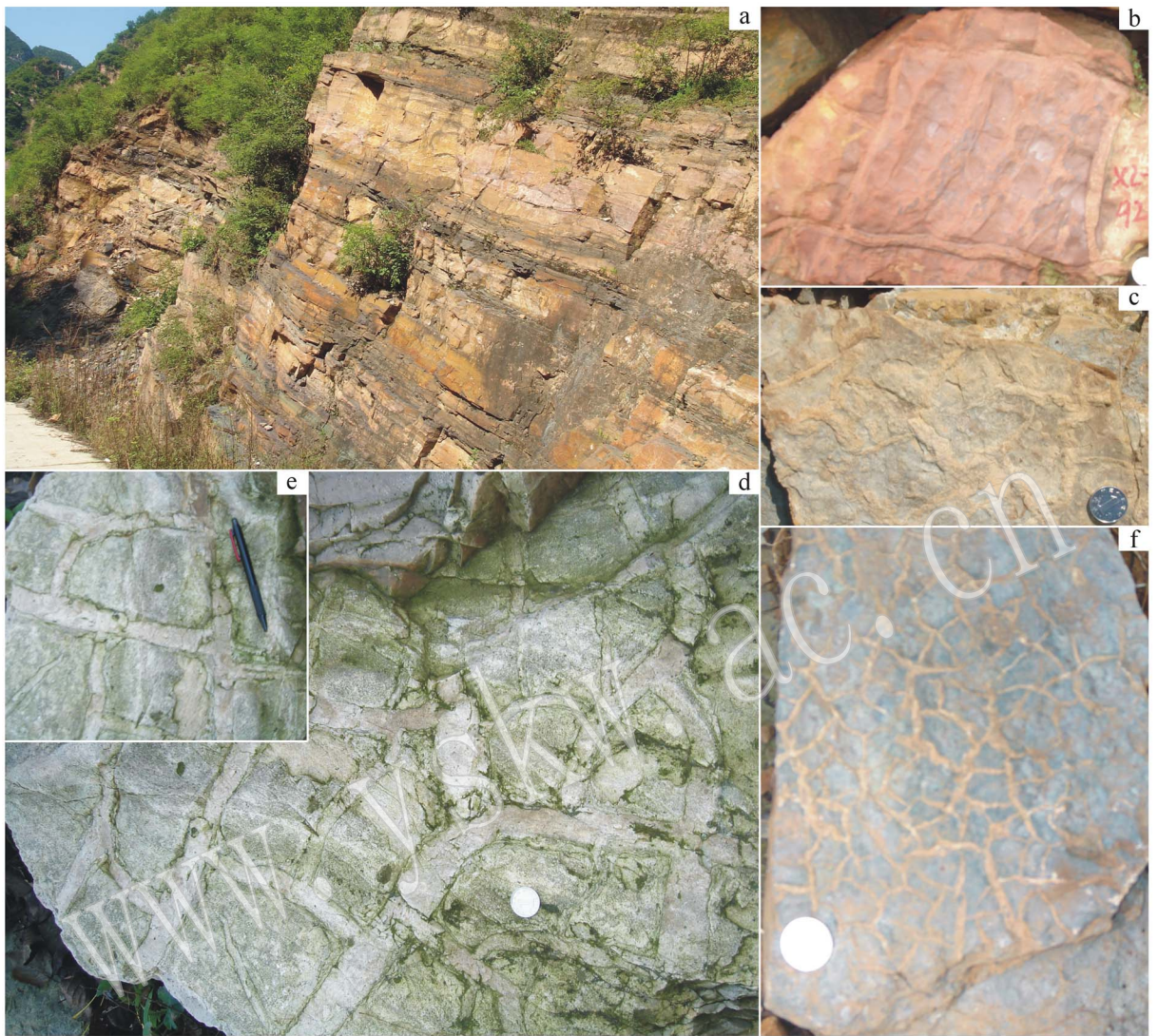


图 3 河北兴隆剖面微生物成因构造(MISS)的沉积特征

Fig. 3 Photographs showing sedimentary features of microbially induced sedimentary structures (MISS) along Xinglong section, Hebei Province

a—大红峪组露头剖面; b—变余波痕; c—微生物席碎片; d、e、f—不规则网络状裂缝

a—outcrop section of Dahongyu Formation; b—palimpsest ripple; c—microbial mat fragments; d, e, f—irregular network fissures

生物灭绝事件之后与微生物活动有关的岩石类型和沉积构造增加的事实(比如在晚泥盆世、晚二叠世叠层石数量的回升现象)导致 Schubert 和 Bottjer (1995)视叠层石为灾后泛滥生物群(disaster biotas),更加说明了在约占地球历史 9/10 的前寒武纪微生物活动对三大沉积体系具有不可低估的作用。在寒武纪后生动物演化及古海洋化学条件发生重大改变之前,微生物构成了浅海海底主要的生物群落,微生物席有效地保护了沉积物表面,降低了水流对沉积

物的侵蚀和改造作用,这可能也影响到前寒武纪层序地层构成样式。也就是说,前寒武纪层序地层研究需要考虑微生物席发育的影响作用。因此,微生物席对前寒武纪正常浅海沉积动力学具有重要影响。对较少受到关注的碎屑岩沉积体系中 MISS 的研究可以补充硅质碎屑岩沉积体系中微生物研究内容。MISS 的综合研究可以为探索复杂多变的前寒武纪世界提供重要线索。

5 结语

河北兴隆剖面中元古界长城系大红峪组潮下坪石英砂岩层面上产出特殊的沉积构造,包括多向变余波痕、微生物席碎片、不规则网络状裂缝等。由于大红峪组砂岩层面上沉积构造独特的形态特征和产出的时空属性,可能与已有研究的皱饰构造、变余波痕、卷曲构造等同属于“席底构造”范畴,即属于第五类原生沉积构造——微生物成因沉积构造(MISS),它们可能是元古宙正常浅海环境微生物席与沉积作用相互协调的产物,反映了前寒武纪微生物活动对碎屑岩沉积体系的重大影响。对硅质碎屑岩沉积体系中 MISS 的研究将会是一个有待深入研究的领域。未来有关 MISS 的研究重点,可能是综合多方面因素,讨论 MISS 及其组合的沉积环境意义,进一步探索研究前寒武纪浅海底微生物及微生物席的发育对沉积作用的影响,同时对微生物席和沉积环境之间的相互协调发育关系进行探索研究,从而加深对前寒武纪微生物-沉积作用过程的理解,以促进微生物席沉积学的发展。

References

Bouougri E and Porada H. 2002. Mat-related sedimentary structures in Neoproterozoic peritidal passive margin deposits of the West African Craton (Anti-Atlas, Morocco) [J]. *Sedimentary Geology*, 153: 85~106.

Cao Ruiji and Yuan Xunlai. 2006. *Stromatolites* [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1~383 (in Chinese).

Chen Jinbiao, Zhang Pengyuan, Gao Zhenjia, et al. 1999. Stratigraphy of China (Mesoproterozoic) [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1~89 (in Chinese with English abstract).

Decho A W. 2000. Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within biofilms [A]. Riding R and Awramik S. *Microbial Sediment* [C]. Berlin: Springer-Verlag: 9~15.

Gao Zhenxi, Xiong Yongxian and Gao Ping. 1934. Sinian stratigraphy of northern China [J]. *Geological Society of China*, 13: 243~288 (in Chinese).

Hagadorn J W and Bottjer D J. 1997. Wrinkle structures: microbially mediated sedimentary structures in siliciclastic settings at the Proterozoic-Phanerozoic transition [J]. *Geology*, 25: 1047~1050.

Huang Xiu, Zhang Zhao, Zhou Hongrui, et al. 2010. Microbial Induced Sedimentary Structures (MISS) of the Mesoproterozoic

Ruyang Group in western Henan Province [J]. *Geology in China*, 37(5): 1399~1404 (in Chinese with English abstract).

Mei Mingxiang. 2011. Microbial-mat Sedimentology: A Young Branch from Sedimentology [J]. *Advances in Earth Science*, 26(6): 586~597 (in Chinese with English abstract).

Mei Mingxiang, Meng Qingfen and Gao Jinhan. 2007. Microbial sand chips in transgressive sandstones of the Precambrian: an example from the Dahongyu Formation at the Huyu Section of the Nankou Town in Beijing [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 197~204 (in Chinese with English abstract).

Neu T R. 1994. Biofilms and microbial mats [A]. Krumbein W E, Patterson D M and Stal L J. *Biostabilization of Sediments* [C]. Oldenburg: Bibliotheks und Informationssystem der Universität Oldenburg, 9~15.

Noffke N. 2010. *Geobiology: Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archean Era to Today* [M]. Berlin: Springer-Verlag: 1~200.

Noffke N, Beukes N, Bower D, et al. 2008. An actualistic perspective into Archean worlds (cyano-)bacterially induced sedimentary structures in the siliciclastic Nhlazatse Section, 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa [J]. *Geobiology*, 6: 5~20.

Noffke N, Gerdes G and Klenke T. 2003. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic) [J]. *Earth-Science Reviews*, 62: 163~176.

Noffke N, Gerdes G, Klenke T, et al. 2001. Microbially induced sedimentary structures: A new category within the classification of primary sedimentary structures [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 71: 649~656.

Pflüger F. 1999. Matground structures and redox facies [J]. *Palaios*, 14: 25~39.

Riding R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 47: 179~214.

Schieber J. 1999. Microbial mats in terrigenous clastics: the challenge of identification in rock record [J]. *Palaios*, 14: 3~12.

Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. 2007. Atlas of microbial mat features preserved within the siliciclastic rock [C]. Amsterdam: Elsevier: 1~311.

Schopf J W. 1999. Cradle of Life: The Discovery of Earth's Earliest Fossil [M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1~367.

Schubert J K and Bottjer D J. 1995. Aftermath of the Permian-Triassic mass extinction event; paleoecology of Lower Triassic carbonates in the western USA [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 116: 1~39.

Seckbach J and Oren A. 2010. *Microbial Mats: Modern and Ancient Microorganisms in Stratified Systems* [M]. Berlin: Springer-Ver-

- lag: 1~500.
- Seilacher A. 1999. Biomat-related lifestyles in the Precambrian[J]. *Palaos*, 14: 86~93.
- Seilacher A and Pflüger F. 1994. From biomats to benthic agriculture: A biohistoric revolution[A]. Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J. *Biostabilization of Sediments*[C]. Oldenburg: Bibliotheks und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 97~105.
- Shi Xiaoying and Chen Changqing. 2006. Microbially induced sedimentary structures (MISS) from the Changcheng Group (ca 1.6 Ga), North China Platform, and their implications for an oxygen-deficient shallow sea environment[A]. Yang Q, Wang Y and Weldon E A. *Ancient life and Modern Approaches*[C]. Hefei: China University Science and Technology Press, 188~189.
- Shi Xiaoying, Jiang Ganqing, Zhang Chuanheng, et al. 2008b. Sand Veins and Microbially Induced Sedimentary Structures from the Black Shale of the Mesoproterozoic Chuanlinggou Formation (ca. 1.7 Ga) in North China: Implications for Methane Degassing from Microbial Mats[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 33(5): 577~590 (in Chinese with English abstract).
- Shi Xiaoying, Wang Xinqiang, Jiang Ganqing, et al. 2008a. Pervasive Microbial Mat Colonization on Mesoproterozoic Peritidal Siliciclastic Substrates: an Example from the Huangqikou Formation (ca 1.6 Ga) in Helan Mountains, NW China[J]. *Geological Review*, 54(5): 577~586 (in Chinese with English abstract).
- Simonson B M and Carney K E. 1999. Roll-up structures: evidence of in situ microbial mats in Late Archean deep shelf environments[J]. *Palaos*, 14: 13~24.
- Song Tianrui, Zhao Zhen, Wang Changyao, et al. 1991. Proterozoic sedimentary rocks in north China[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press: 1~201 (in Chinese with English abstract).
- Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Li Tao, et al. 2011. Morphologic association of microbially induced sedimentary structures as paleoenvironment indicator: an example from Meso- to Neo-Proterozoic siliciclastics of southern North China Platform[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 36(6): 1 033~1 043 (in Chinese with English abstract).
- Xu Debin, Bai Zhida, Wang Dunze, et al. 2002. On sedimentary environment of the Dahongyu Formation in Xinglong region, Hebei[J]. *Journal of Stratigraphy*, 26(1): 73~79 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Shixing. 1993. *Stromatolite of China*[M]. Tianjin: Tianjin University Press: 191~196 (in Chinese).
- Zhu Shixing, Xing Yusheng and Zhang Pengyuan. 1994. Meso- to Neoproterozoic Biostratigraphic Sequence in North China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 12~32 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹瑞骥,袁训来. 2006. 叠层石[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1~383.
- 陈晋镛,张鹏远,高振家,等. 1999. 中国地层典(中元古界)[M]. 北京: 地质出版社, 1~89.
- 高振西,熊永先,高平. 1934. 中国北部震旦纪地壳[J]. *中国地质学会志*, 13: 243~288.
- 黄秀,张钊,周洪瑞,等. 2010. 豫西中元古代汝阳群微生物形成的沉积构造简介[J]. *中国地质*, 37(5): 1 399~1 404.
- 梅冥相. 2011. 微生物席沉积学: 一个年轻的沉积学分支地[J]. *球科学进展*, 26(6): 586~597.
- 梅冥相,孟庆芬,高金汉. 2007. 前寒武纪海侵砂岩中的微生物砂质碎片: 以北京南口虎峪剖面大红峪组为例[J]. *地质前缘*, 14(2): 197~204.
- 史晓颖,蒋干清,张传恒,等. 2008b. 华北地台中元古代串岭沟组页岩中的砂脉构造: 17亿年前甲烷气逃逸的沉积标识?[J]. *地球科学*, 33(5): 577~590.
- 史晓颖,王新强,蒋干清,等. 2008a. 贺兰山地区中元古代微生物席成因构造——远古时期微生物群活动的沉积标志[J]. *地质论评*, 54(5): 577~586.
- 宋天锐,赵震,王长尧,等. 1991. 华北元古宙沉积岩[M]. 北京: 北京科技出版社, 1~201.
- 汤冬杰,史晓颖,李涛,等. 2011. 微生物席成因构造形态组合的古环境意义: 以华北南缘中-新元古代为例[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 36(6): 1 033~1 043.
- 徐德斌,白志达,王敦则,等. 2002. 河北省兴隆地区大红峪组沉积古环境研究[J]. *地层学杂志*, 26(1): 73~79.
- 朱士兴. 1993. 中国叠层石[M]. 天津: 天津大学出版社, 191~196.
- 朱士兴,邢裕盛,张鹏远. 1994. 华北地台中上元古界生物地层序列[M]. 北京: 地质出版社, 12~32.