doi:10.3799/dqkx.2011.109

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

汤冬杰[1]，史晓颖[1,2*]，李 涛[1]，赵贵生[1]

1. 中国地质大学地球科学与资源学院，北京 100083
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京 100083

摘要： 微生物席成因构造(microbially induced sedimentary structures, MISS)是由微生物与沉积物相互作用形成的生物—沉积构造，可作为早期微生物群活动的重要标识，但对其指示古环境的研究尚显不足. 华北地台南部中—新元古代汝阳群(Pt_2)和洛峪群(Pt_3)以近岸浅水陆源碎屑沉积为主，其中发育大量MISS，包括多向波痕、微生物席稳化波痕、微生物席碎片、微生物席平滑波痕、多种微生物席脱水形成的砂裂及不规则网状生长脊等. 研究表明，在潮坪环境中MISS最为发育. 地势差异对水动力、基底暴露、水分补给和沉积条件等环境因素具有显著控制作用，影响微生物席的发育与结构，因此，MISS的形态组合特征能够反映沉积微相变化. 研究发现，在潮上带以微生物席脱水形成的砂裂构造为主，潮间带上部以破坏—改造型构造为主，潮间带下部—潮下带一般少见原位MISS，但可见再沉积微生物席碎片. 据潮间带下部至潮上带上部MISS产出类型及其形态组合分析，识别了4个MISS形态组合带，MISS形态组合由潮间带下部至潮上带上部的变化反映了古地形由低到高的明显变化.

关键词： 华北地台；微生物席成因构造；形态组合带；沉积微相；古环境指示；地层学.

中图分类号： P736 **文章编号：** 1000—2383(2011)06—1033—11 **收稿日期：** 2010—05—18

Morphologic Association of Microbially Induced Sedimentary Structures As Paleoenvironment Indicator: An Example from Meso- to Neo-Proterozoic Siliciclastics of Southern North China Platform

TANG Dong-jie[1], SHI Xiao-ying[1,2*], LI Tao[1], ZHAO Gui-sheng[1]

1. *School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *State Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*

Abstract: Microbially induced sedimentary structures (MISS) are derived from the interaction of microbes and sedimentation by various geological processes, and have been studied more often as biosignature for early life, while their significance in paleoenvironmental analysis has not been adequately studied yet. Our study shows that the Ruyang (Pt_2) and Luoyu Groups (Pt_3) in the southern North China Platform are dominated by peritidal silisiclastics with abundant MISS, especially those related with mat destruction, and indicates that the morphologic variation and association of MISS are largely influenced by topography. The topography, to some extent, determines the hydrodynamics, substrate exposure duration and water supplement, and exerts influence on mat growth and their destruction, and in turn influence the morphology of MISS, especially in peritidal environments. From the subtidal to supratidal, four zones have been recognized, each of them with its own distinctiveness in MISS morphological association. The subtidal to lower intertidal zone is short of *in situ* MISS but has some redeposited mat chips, while the upper intertidal is featured by mat protected ripple marks and chips. The lower supertidal is rich in various MISS, especially sand cracks, for its low hydrodynamics, sufficient water supplement and frequently exposed environment, with thick

基金项目： 国家自然科学基金项目(Nos. 40921062，40972022)；国家重点基础研究发展计划(No. 2009CB421001)；教育部高校引智计划(No. B07011).

作者简介： 汤冬杰(1985—)，男，博士研究生，古生物学及地层学专业. E-mail：dongjtang@126.com

* **通讯作者：** 史晓颖(1956—)，男，教授，主要从事古生物学与地层学及沉积学研究. E-mail：shixyb@cugb.edu.cn

mats, while the upper supertidal abounds smaller sand cracks than those in lower supertidal zone due to relatively thin microbial mats. Thus, Meso- to Neo-proterozoic MISS from the southern North China Platform show that the morphologic association of MISS can be used as good indicators for paleoenvironmental reconstruction.

Key words: North China Platform; microbially induced sedimentary structures (MISS); morphologic association; sedimentary facies; paleoenvironmental indicator; stratigraphy.

0 引言

现代的微生物席(microbial mat)主要由蓝细菌(及其他细菌)微生物群落粘结沉积物而形成,通常呈层状发育于沉积物表层至浅表层(Gerdes *et al*., 2000; Noffke *et al*., 2006a). 成熟的微生物席常具双层结构:下层主要由球状菌及其分泌的胞外聚合物(EPS)粘结沉积物构成,其不透气性有稳固沉积物的功能;上部由交织成网状的丝状菌粘结沉积物组成,具有很强的韧性和保护作用(Sarkar *et al*., 2008; 史晓颖等,2008). 丝状菌可垂直层面生长,并通过捕获和障积沉积物颗粒形成脊状以至网状构造(Gerdes *et al*., 2000). 微生物群通过生命活动和多种生物地质过程影响沉积作用,并可形成多种微生物成因沉积构造(microbially induced sedimentary structures, MISS)(Schieber, 1998; Noffke *et al*., 2001a, 2003, 2006a, 2006b; Schieber *et al*., 2007). 因而,MISS 不仅是地球早期生命活动的证据(Noffke *et al*., 2003; Noffke, 2005),同时也很好地反映了微生物与环境的相互作用(史晓颖等,2008). 在微生物席发育所经历的生长、代谢、破坏和腐烂这 4 个主要阶段中,都能形成具有独特性质的 MISS(Schieber, 2004; Eriksson *et al*., 2007;史晓颖等,2008). 由于粗碎屑,特别是砂质沉积具有良好的透气性,且多处于氧化环境,微生物席生长、代谢及腐烂形成的沉积构造较难保存或不易识别,而微生物席破坏所产生的沉积构造常具明显有别于围岩的形态特征,易被保存并识别. 笔者在鲁山地区发现的 MISS 多属后者,仅有不规则网状生长脊属、微生物席生长构造.

硅质碎屑岩中的微生物研究开始较晚,直到 20 世纪 80 年代,其中存在微生物活动的标志才有报道(Gerdes *et al*., 1985). 对 MISS 的研究主要源于对现代硅质碎屑沉积(Noffke *et al*., 2001b)和个别古代碎屑岩地层(Eriksson *et al*., 2000)中 MISS 的识别. 近年的研究表明,MISS 是环潮坪(peri-tidal)及其他后生动物发展受到限制的沉积环境中常见的组成部分. 但对 MISS 在古环潮坪环境中分布规律的研究至今仍显不足(Gerdes *et al*., 2000; Noffke *et al*., 2001b;史晓颖等,2008; Bose and Chafetz, 2009). 从 MISS 的形成过程和条件分析,在环潮坪环境中,MISS 的形态差异主要取决于地形差异导致的水动力条件、暴露时间、水分补给和微生物群活跃程度及微生物席结构变化. 因此,地形分带应该能够导致 MISS 组合类型发生改变,通过 MISS 形态组合与沉积环境关系的研究有可能重塑古环境特征.

MISS 在国内的研究刚刚起步. 目前已报导的 MISS 主要见于华北中元古代大红峪组(Shi and Chen, 2006;梅冥相等,2007)和贺兰山黄旗口组(史晓颖等,2008). 本文主要研究豫西中—新元古代汝阳群和洛峪群中发现的 MISS,其中一些曾被记述为遗迹化石(杨式溥和周洪瑞,1995;齐永安,2005),重点研究 MISS 的形态组合及其与沉积环境的相互关系,并结合现代和古代 MISS 的研究成果,建立 MISS 形态组合的环境分布模型.

1 地质背景

在中—新元古代,华北地台南部为发育裂谷系的被动大陆边缘(Lu *et al*., 2008),总体为滨海—浅海环境,间夹有少量河流和冰川环境沉积(周洪瑞等,1998;王鸿祯等,2000),海水由南向北逐渐变浅. 在这个地区古元古代晚期发育以熊耳群、西洋河群为代表的裂谷火山—碎屑沉积;其上发育中元古代汝阳群和新元古代洛峪群滨浅海沉积,与下伏熊耳群呈显著的角度不整合(图 1a),代表重大的构造转折(Lu *et al*., 2008). 汝阳群主要由紫红色砂砾岩、厚层石英砂岩和泥岩组成,顶部有含砂屑白云岩,产叠层石,构成明显向上变细的沉积序列;洛峪群及其上覆的震旦系由 4 套碎屑岩与 3 套碳酸盐岩构成 3 个大的沉积旋回,碳酸盐岩中一般均发育小型叠层石(图 1a~1c).

鲁山地区中—新元古界厚约 2 200 m,至少可识别 14 个沉积层序(图 1b,1c),构成 5 个大的沉积旋回(王鸿祯等,2000). 汝阳群、洛峪群及震旦系共包括 7 种主要的沉积相类型(图 1d):(1)河流—洪积

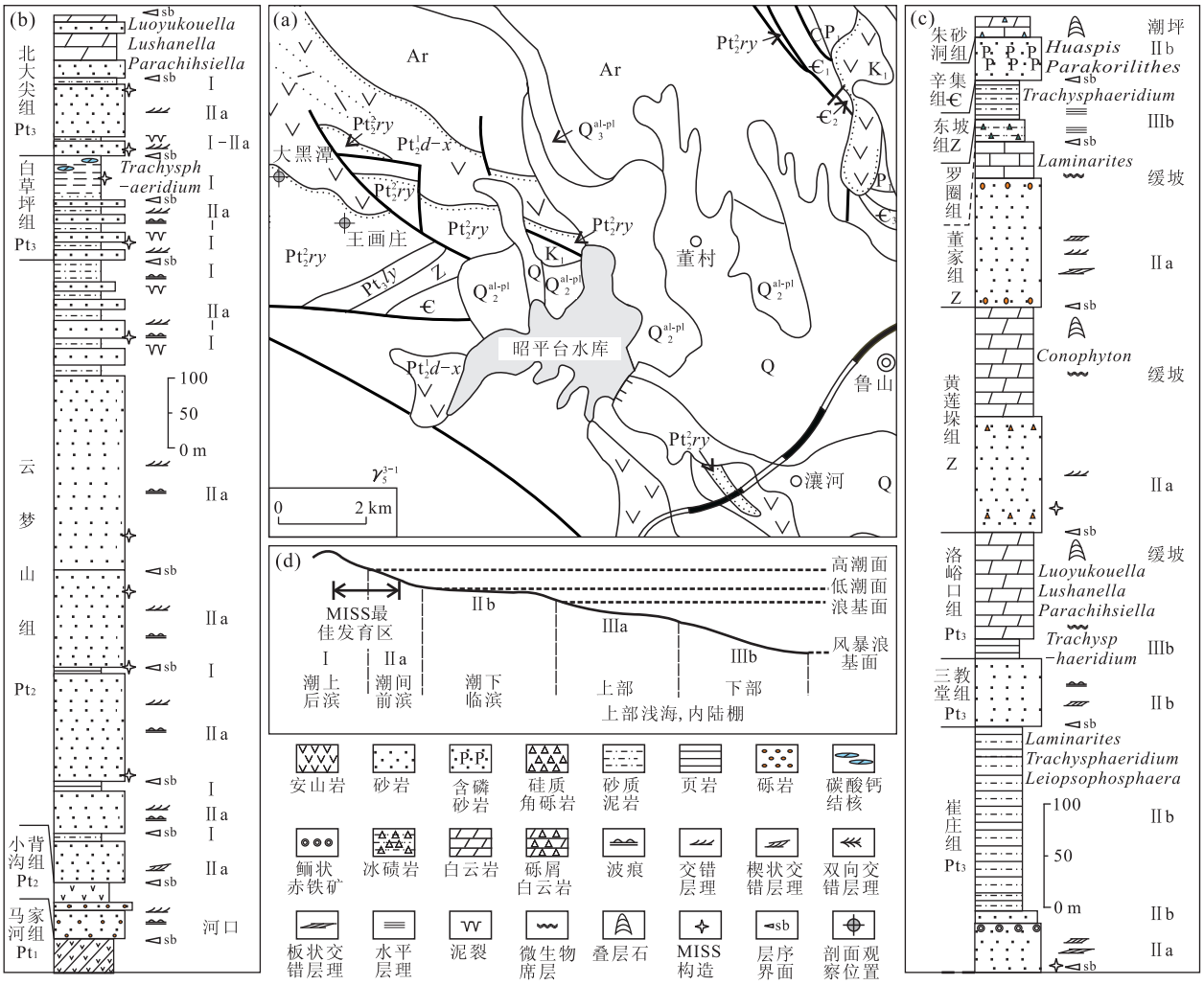

图 1　豫西鲁山中—新元古界地层序列及研究区地质简图

Fig. 1　Stratigraphic succession of the Meso- to Neo-proterozic in Lushan, western of Henan and sketch geologic map of study area

a. 研究区地质略图(据赵建敏,1995. 中华人民共和国 1∶5 万区域地质调查报告鲁山幅简化);b. 鲁山中元古代沉积序列;c. 鲁山新元古代沉积序列;d. 碎屑岩型滨—浅海环境划分与沉积相模式

相,以厚层砂砾岩为主夹有中厚层石英砂岩. 这种沉积限于汝阳群底部小背沟组,其内未见 MISS;(2)后滨泥坪相,紫红色薄层泥岩及泥质粉砂岩,夹有少量薄层砂岩和白云岩结核. 这种沉积相主要分布于云梦山组顶部、白草坪组上部、崔庄组上部. 其中发育网状砂裂以及粗大的收缩砂裂;(3)后滨—前滨过渡相,以中—薄层石英砂岩为主,与紫红—黄色薄层粉砂岩—粉砂质页岩互层. 这种沉积类型主要出现在云梦山组上部、白草坪组下部. 其中 MISS 非常发育,类型多样,微生物席脱水形成的不规则及网状砂裂占主导,微生物席保护波痕较多;(4)前滨相,以紫红色中厚层石英砂岩为主,在本区所占比例很大. 分布于云梦山组下—中部、北大尖组下部、崔庄组底部、三教堂组、黄连垛组下部及董家组下部. 其中见有较多 MISS,主要是微生物席脱水形成的形态多变的不规则砂裂以及少量微生物席碎片;(5)临滨—远滨上部深灰—暗色—灰黄泥页岩相,主要出现在崔庄组中下部、洛峪口组底部以及东坡组,沉积水深相对较大. 其中少见 MISS,偶见再沉积的小微生物席碎片和席卷构造;(6)碳酸盐岩潮坪相,以中厚层粉红—灰色云质灰岩—白云岩为特征,其中见多种小型叠层石和藻纹层,未见 MISS;(7)中缓坡含砾屑—鲕粒云质灰岩相,主要见于北大尖组中上部,发育冲洗层理和少量叠层石,但不产 MISS. 除上述主要的 7 种沉积相类型外,罗圈组代表近岸的冰碛岩相.

汝阳群和洛峪群中发现有多种形态的 MISS(主要为微生物席破坏构造),在潮间带—潮上带沉积中尤其发育,但随沉积相不同,其组合类型也呈现规律性变化. 本文研究的 MISS 主要产于上述第 2、3、4、5 沉积相类型中(图 1d). 但在具体的层位上,还

有较明显的沉积微相变化.

2 沉积相带中 MISS 形态及组合特征

鲁山地区中－新元古界硅质碎屑岩可划分为无障壁和有障壁海岸两种沉积体系(周洪瑞等,1998).两者中都发育 MISS.但在有障壁海岸沉积体系中由于水动力条件受到限制,其中发育的 MISS 更为丰富多样.以下就 MISS 形态特征及其组合在不同沉积相带的变化予以分析.

2.1 潮下带－潮间带下部(临滨－前滨下带)

鲁山中新元古界潮下带上部－潮间带下部沉积以中粗粒含砾石英砂岩为主要特征,交错层理发育(图 2a).潮下带之下(远滨)沉积主要为灰绿色页岩夹少量粉砂质页岩,发育水平层理.潮下带下部(下临滨)沉积主要为粉砂岩－粉砂质泥页岩,常含海绿石,少见沉积构造,潮下带上部(上临滨)沉积主要为细粒石英砂岩,发育小型交错层理.潮间带下部(前滨)沉积主要为中粗粒中厚层石英砂岩,发育低角度交错层理、波痕等沉积构造.

在该沉积体系的潮下带－潮间带下部(临滨－前滨下带)沉积岩中均少见原位 MISS,仅存在大量经异地搬运再沉积的微生物席碎片(mat chips),其数量随水深增大而减少.这些微生物席碎片多表现为红色泥片且沿交错层理面展布(图 2a,2b),系由潮上带干裂破碎的微生物席片被波浪搬运至此并顺层理面散布而成.在该沉积相带中部分微生物席碎片表现为近于顺层分布的椭圆形薄片(图 2g),一般为 4 cm×5 cm,厚度小于 5 mm,成分与围岩显著不同:微生物席碎片主要由磨圆很好、成分较纯的细石英质砾石粘结而成,而围岩则为含泥和铁质的中粗粒石英砂,成分复杂.

潮下带上部－潮间带下部以及临滨－前滨下带都缺乏原位 MISS,可能与这些区域长时间较强水动力改造破坏和相对较高的沉积速率有关.在这种条件下不易形成较厚的微生物席,而微生物多以微生物膜的形式包裹砂粒而存在(Gerdes *et al*., 2000; Noffke *et al*., 2008).这种情况与南非太古代 Nhlazatse 组(2.9 Ga; Noffke *et al*., 2008)及 Mellum 岛现代潮坪(Noffke and Krumbein, 1999)的潮下带－潮间带下部的情形相似.

2.2 潮间带上部(前滨上带)

潮间带上部主要为中粗粒石英砂岩夹粉砂质泥页岩,常发育多向波痕(图 2c,2d)、微生物席保护波痕(图 2e)和微生物席碎片(图 2f)等多种 MISS.

在潮间带上部环境中,微生物席一般不凸出于层面生长,仅以毫米级的内栖微生物席形式覆盖部分潮间带(Noffke *et al*., 2008).由于这种微生物席薄且不凸出于层面,因而被覆盖的沉积层表面仍能显现其原始形态(如波痕),而不会像潮上带下部那样形成微生物席平滑波痕.这种微生物席在 Mellum 岛现代潮间带上部广泛发育(Noffke and Krumbein, 1999),由微生物席保护所导致的多向波痕与微生物席碎片等在太古宙地层中也有实例(Noffke *et al*., 2008).

2.2.1 多向波痕及微生物席保护波痕 多向波痕在前寒武碎屑岩中发现的实例很多(Sarkar *et al*., 2006; Bouougri and Porada, 2007),一般解释为由于微生物席的保护作用,先成波痕未被完全破坏,经多期波痕叠加所致.在北大尖组砂岩层面上发育有较好的微生物席保护波痕(图 2e)与多向波痕,波长多在 2～5 cm 间(图 2c,2d).对 Mellum 岛现代潮坪环境下这种波痕形成过程的研究表明,在温暖的春季未被微生物席覆盖的先成波痕由于风或洪水的改造会在其上产生新的不同方向的波痕,而受到微生物席保护的波痕仍能保持其原始的波痕形态.在随后的几个月里,每一次改造事件都会产生新一代波痕,并在平静期被微生物席覆盖而稳化,随着微生物席覆盖面积的逐渐增大各个不同方向的波痕就逐渐被保存下来.到秋季时多向波痕已经覆盖了大部分潮坪区域,而其上均发育有很好的微生物席保护层(Noffke, 1998; Noffke *et al*., 2008).

2.2.2 微生物席碎片 云梦山组潮间带上部砂岩层面发育一种由细砂岩组成的微生物席碎片,表现为顺层分布的不规则状砂片(图 2f),直径约 5 cm,厚约 3 mm,表面形态随基底起伏.其颜色和成分与围岩存在明显差别:砂片为暗紫－黑色含泥质细粒石英砂岩,而围岩为黄色中粗粒石英砂岩.

微生物席碎片是微生物席在水动力条件较强的情况下被撕裂的结果.例如,在春季高潮汐流的作用下(Noffke *et al*., 2008),即使具有很强韧性的较厚微生物席也会被大潮潮汐流撕裂并随机散布至潮坪上.有些很薄的席片具有明显的折叠结构(Pflüger and Gresse, 1996),成分与围岩明显有别,表明这些席片必定是由粘滞性很强的基质如微生物席粘结松散的颗粒所形成.

2.3 潮上带下部(后滨下带)

潮上带下部沉积主要为中粒石英砂岩夹极薄层泥质层,波痕发育.这种沉积相中发育有多种类型 MISS 与原位矿化的微生物席层,属表栖型

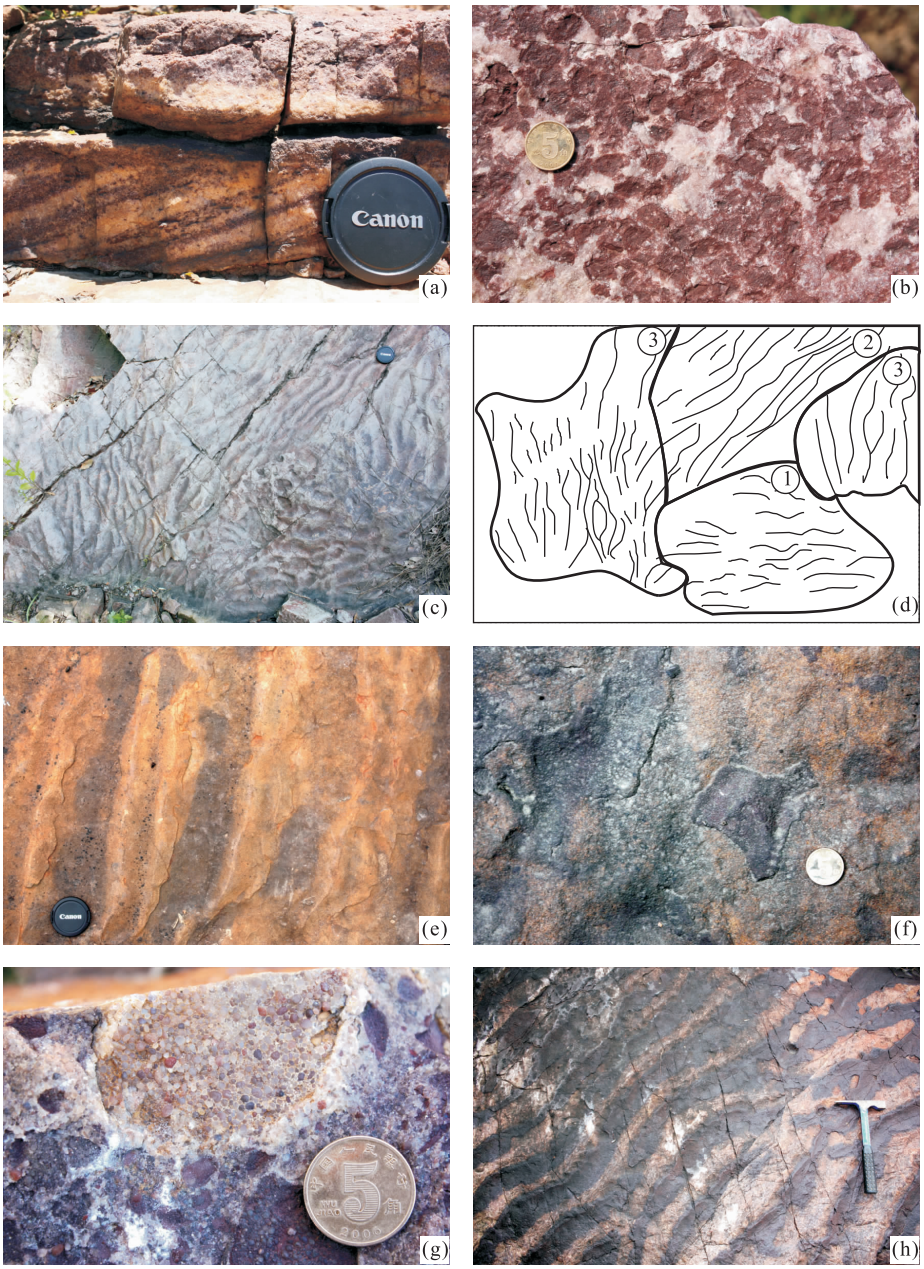

图 2　豫西鲁山中新元古界潮下带—潮上带下部 MISS 形态特征

Fig. 2　Photographs showing morphology of the MISS from subtidal to lower supertidal in Meso- to Neo-proterozic, Lushan, western Henan

a. 云梦山组潮下带—潮间带下部中粗粒石英砂岩,发育板状交错层理,微生物席碎片顺层理面散布;b. 云梦山组潮下带—潮间带下部交错层理面上的微生物席碎片;c. 北大尖组潮间带上部砂岩层面上的多向波痕;d. 照片 C 中多向波痕示意图,图中数字表示该波痕斑块的形成期次,其中 1 期波痕占总面积的 20%,2 期波痕占 22%,3 期波痕占 37%,未被占据的面积约 21%(形成越早的波痕保留的部分越少,每期斑块内的波痕方向一致);e. 云梦山组潮间带上部砂岩层面上的微生物席保护波痕,在波痕表面覆有微生物席层成因的砂薄片;f. 云梦山组潮间带上部砂岩层面上残留的席片;g. 云梦山组潮间带下部粗砂岩层面上残留的砂砾斑块;h. 云梦山组潮上带下部细砂岩层面上被微生物席平滑的波痕;图中镜头盖直径 5.5 cm,硬币直径 2 cm,地质锤长度 32 cm

(epibenthic),即发育在沉积物表面的厚实微生物席(Noffke *et al.*, 2008). 这种微生物席具有很强的平滑沉积物表面的作用,并对其下的沉积层有很好的保护作用,往往会使原始形成的沉积构造(如波痕)变得难以识别.

该相带能够形成厚实的表栖微生物席主要由于这一区域能提供微生物群生命活动所需的最佳条件,如较弱的水动力条件有利于活跃的微生物群充分发展,能形成稳定的微生物席而不易被波浪破坏;其次毛细作用能维持沉积表层处于最佳湿度. 此外,

充足的光照和缓慢的沉积速率也为形成厚实的微生物席提供了条件. 因而,潮上带下部是海岸带最适合微生物席生长发育的区域,微生物席厚度可达数厘米. 鲁山中新元古代微生物席破坏成因 MISS 发育的最佳相带与现代 Mellum 岛潮坪带(Noffke and Krumbein, 1999)、Tunisia 海岸带(Noffke *et al.*, 2001b)、Bahamas 海岸带(Hardie, 1977)、Texas 海岸带(Bose and Chafetz, 2009)及贺兰山地区中元古代识别的 MISS 最佳发育相带一致(史晓颖等,2008).

2.3.1 微生物席平滑波痕(microbially smoothed ripple marks) 被微生物席平滑的波痕在云梦山组最具典型性(图 2h). 如图 2h 所示,在左上方微生物席覆盖整个层面,最初形成的波痕已不可见;而右下方由于后期的风化作用,揭示出了原始波痕的特征. 这种微生物席平滑波痕的发育主要是由于在潮间/潮上过渡相带微生物席具有最为旺盛的生长能力,能形成极厚实的微生物席层. 在现代潮坪相应区带形成的微生物席可厚达 3 cm 或更多(Bose and Chafetz, 2009). 这些旺盛生长的微生席对下伏不平的沉积表层有很强的填平补齐能力,最终会将那些先成的波痕完全平滑掉.

2.3.2 砂裂(sandcracks) 砂裂是潮上带下部最常见的 MISS 类型之一. 尽管砂裂与泥裂在形态上很相似,但在成因上却有着显著区别,砂裂是由覆盖在砂岩表面的微生物席脱水开裂所导致. 由于砂岩一般发育有大量的孔隙,蒸发脱水过程不会导致砂裂形成. 只有当其表面发育微生物席时,微生物席自身干裂形成裂痕,后期被砂岩充填后才能形成砂岩中的砂裂(Noffke *et al.*, 2001b; 2006a; 2008). 而且由于微生物席仅覆盖于砂岩表层,其干裂只能形成"U"形裂痕而不能形成典型泥裂所具有的"V"形裂痕. 在潮上带下部往往发育纺锤状、鸟足状、不规则多边形及其他形态多样的砂裂(图 3a～3i). 纺锤状砂裂平面上表现为长 1～3 cm 不等、中间粗两端略收尖的直线或略弯曲形纺锤状砂脊,多孤立产出. 有时可见砂裂相互接触,但并无截切关系(图 3a). 在垂向切面上这些砂脊表现为附着在层面上的椭圆形脊状体,厚 1～3 mm 不等,向下呈弧形或椭圆形而非"V"型收敛(图 3c),这点明显区别于泥裂. 砂裂还常与波痕伴生,主要发育于波谷中(图 3b). 纺锤状砂裂也可相互连接形成放射状,平面上表现为三至六叉脊状形式,数条纺锤状的砂裂相交于一个共节点. 这种砂裂的单一分支呈近直线状的纺锤体,长 1～6 cm不等;断面上表现为高 3～5 mm 不等的椭圆形或脉状(图 3d). 多边形网状脱水砂裂,平面上表现为由近直线形砂脊交互形成不规则的多边形网状结构(图 3f～3i);断面上表现为突出于层面的脊状隆起. 小的砂脊宽 2～5 mm,突出层面 1～3 mm 不等(图 3f);规模大的砂脊宽 2～5 cm,突出层面可达 6 cm(图 3h). 偶尔可见有石盐假晶与多边形网状脱水砂裂相伴生(图 3g).

砂裂在潮上带下部广泛发育的重要原因是沉积表层发育厚实的织网状微生物席(Gerdes *et al.*, 2000; Bose and Chafetz, 2009)以及具间歇性暴露的环境特点. 伴生的石盐假晶证实了多边形脱水砂裂的暴露－干裂脱水成因. 而砂裂的不同形态主要取决于微生物席暴露脱水时间的长短(Eriksson *et al.*, 2007)和席层的厚度. 暴露时间较短会形成纺锤状等不完全型砂裂,随着暴露时间的加长则形成鸟足状以至完全型网状砂裂(史晓颖等,2008). 砂脊的高度和宽度则往往与生物席层的厚度密切相关. 一般而言,地形起伏与离海岸线的远近决定了暴露时间长短,相对远离海岸线的潮坪区微生物席暴露时间长,易形成完全型脱水收缩砂裂.

网状砂裂的砂脊大小变化明显,可能主要与微生物席的厚度有关(史晓颖等,2008; Bose and Chafetz, 2009). 较厚的微生物席干裂卷曲可形成具粗大砂脊的脱水砂裂,突出于层面的砂脊高度大致代表了微生物席的厚度. 当微生物席厚度超过 2 cm 后,在干裂收缩过程中不同的微生物席层收缩幅度差异显著,会导致不同微生物席层脱落,最终导致随着微生物席厚度的增加,干裂形成席卷的高度显著增加. 砂脊高度大于 2 cm 的砂裂可能经历了多期"微生物席生长－暴露干裂"的叠加过程(Noffke *et al.*, 2001b). 故而云梦山组突出于层面 6 cm 的多边形砂裂很可能是多期叠加的结果(图 3h).

潮上带下部还发育有形态特殊的砂裂,如曲形砂裂(*Manchuriophycus*)(图 3e). 这种砂裂表现为在波谷内近"S"形弯曲的砂脊,砂脊宽 2～3 mm,可能为暴露期波谷内残存水能够为微生物席发育提供更有利的生长环境,形成的微生物席较厚所致(史晓颖等,2008).

砂裂还可表现出级别(图 3i)和期次(图 3d). 在图 3i 中较粗砂脊代表最初形成的砂裂;而网格内的细小砂脊则代表了网状砂裂形成之后微生物席进一步发育形成的次级收缩痕. 图 3i 可能反映了同一期次 4 个级别微生物席砂裂的叠加. 而在图 3d 中,不同层面上交叠的纺锤状砂裂是不同期次砂裂叠加的结果.

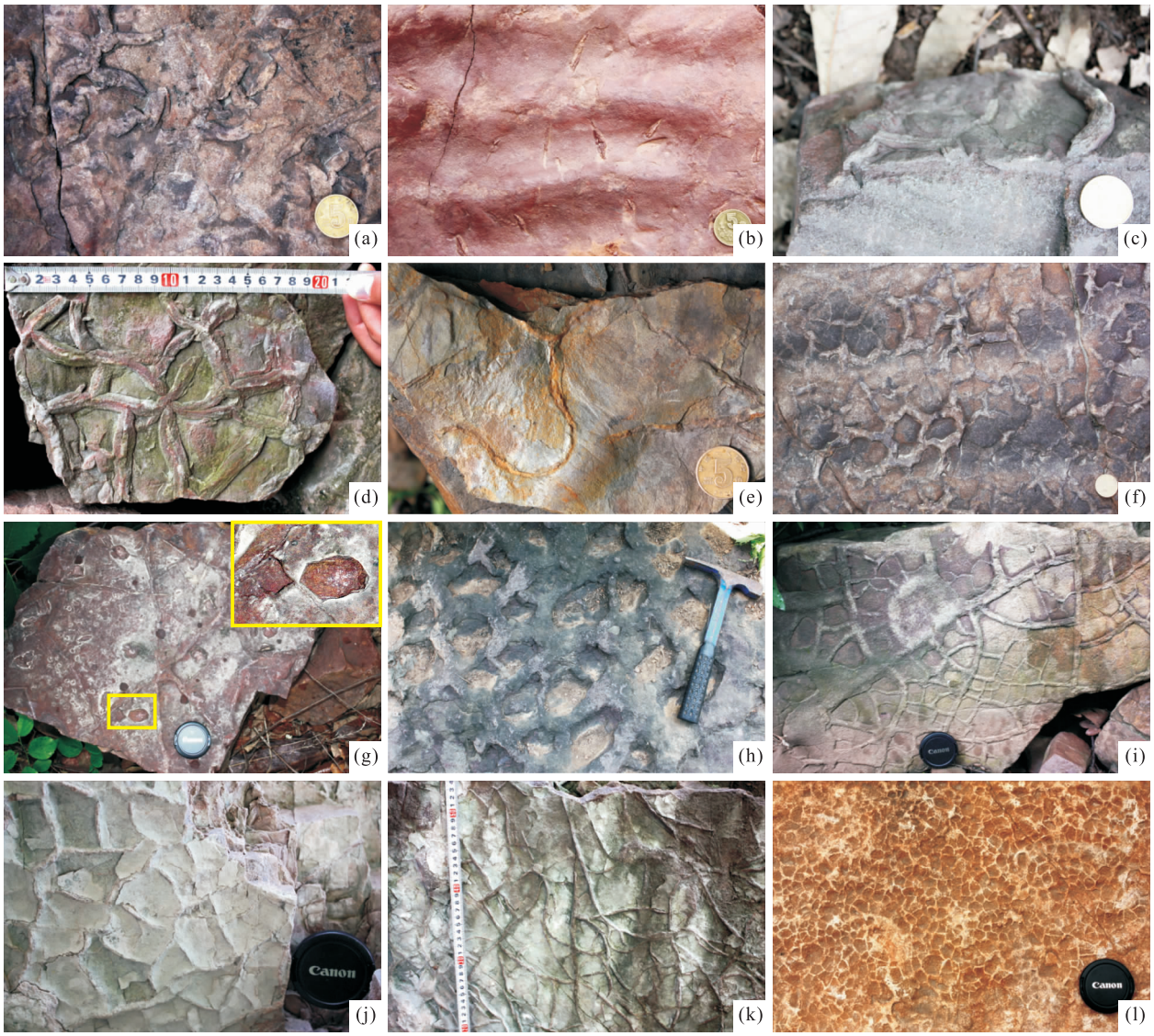

图 3　豫西鲁山中新元古界潮上带 MISS 形态特征

Fig. 3　Photographs showing morphology of the MISS from supertidal in Meso- to Neo-proterozic, Lushan, western Henan

a. 北大尖组纺锤状砂裂；b. 云梦山组与波痕伴生的纺锤状砂裂；c. 北大尖组纺锤状砂裂在断面上的形态；d. 北大尖组相互叠加的鸟足状砂裂；e. 北大尖组曲形砂裂；f. 云梦山组与波痕伴生的网状砂裂；g. 云梦山组与石盐假晶共生的网状砂裂，图中右上角照片为左下角方框部位的放大图，显示了两种不同晶型的石盐假晶；h. 云梦山组砂脊粗大的网状砂裂；i. 云梦山组具多级分支的叶脉状砂裂；j. 白草坪组中的纺锤状砂裂（底面）；k. 白草坪组中的树枝状砂砂裂（底面）；l. 云梦山泥质细砂岩组砂岩层面上的网状生长脊；图中镜头盖直径 5.5 cm，硬币直径2 cm，地质锤长度 32 cm

2.4　潮上带上部（后滨上带）

该带沉积主要为紫红色泥－页岩夹少量泥质粉砂岩和薄层砂岩，泥岩中泥裂构造发育，该区带中主要发育微生物席生长脊构造及细长的多边形网格状或叶脉状砂裂.

网状生长脊是由于席表微生物生长速度和方向发生变化而形成的细小网状构造（Gerdes *et al.*，2000；史晓颖等，2008），属于微生物席生长阶段产生的沉积构造，表现为略凸出于层面的细小砂脊交互形成的不规则多边形构造. 砂脊宽 1～3 mm，突出层面 0.5～2.0 mm 不等，网孔直径小于 1 cm（图 3l）. 这种构造的规模远小于微生物席脱水形成的网状砂裂，成因也不同. 细的生长脊仅限于表层，常因风化而保存不全. 这种构造在现代潮坪发育的微生物席表面常见（Gerdes *et al.*，2000；Noffke *et al.*，2003；Banerjee and Jeevankumar，2005；Gerdes，2007）. 在前寒武纪地层中，这种构造曾被解释为皱饰（Prave，2002），也有人解释成为“象皮”构造（Porada and Bouougri，2007）. 网孔大小与微生物席发育的成熟状态相关，发育的时间越长网孔越小（史晓

颖等,2008).

与潮上带下部相似,在该相带中发育的破坏型 MISS 主要为砂裂. 但是本相带中发育的砂裂构造类型相对单一,一般呈细长的网格状和叶脉状(图 3j,3k),宽度为毫米级,长度可达数十厘米,砂裂发育的期次和级别较单一,很少出现纺锤状砂裂或粗大的砂脊;表明潮上带上部水动力条件较弱,沉积基底湿度相对较低,已经超出了成席微生物生长的最佳区域,所形成的微生物席较薄而难以形成较厚大的砂裂. 另外,其形态分布与 2.3.2 中的砂裂有明显区别,本区带的砂裂一般由砂质下切下伏泥质而形成底部呈弧形的砂脊(这是区别于该区带泥裂构造的标志,见图 3j,3k 中底面构造),这种砂裂构造在云梦山组上部及百草坪组砂—泥岩互层构成的潮上带上部沉积相中尤其发育,这似乎表明泥质含量的增加有利于发育和保存 MISS 的趋势. Noffke *et al*. (2006b)对南非 Witwatersrand 超群(2.9 Ga)中 MISS 分布进行了研究,认为 MISS 一般发育于进积—退积的转折期,并限于特定的沉积相,更多的是发育在薄—中层状砂—泥岩互层相中,这与本区观察到的情况一致.

3 讨论

3.1 MISS 形成的主要环境控制因素

对现代海岸带微生物席的研究表明,沉积物表层的湿度和后生动物的觅食程度是影响微生物席生长的两个关键因素(Bose and Chafetz, 2009;史晓颖等,2008). 从潮上带下部到潮上带上部,微生物席厚度明显减薄主要是由于随湿度减小,微生物席生长受到了限制;同时由于后生动物啃食和微生物席分解破坏作用的增强,使微生物席保存的机会大大降低. 在 Mellum 岛和 Tunisia 潮坪区微生物席厚度变化也有相似的趋势(Gerdes *et al*., 2000). 但在没有后生动物发育的前寒武纪,控制微生物席发育的主要环境因素为水动力条件、沉积速率、光照、沉积表层湿度及暴露时间. 在水动力条件较强的潮下带—潮间带下部,微生物群的活动多形成围绕砂粒生长的微生物膜,而难以形成完全发育的微生物席(Noffke *et al*., 2008),这是潮间带以下沉积中少有原位 MISS 发育的原因之一. 沉积速率对微生物席生长的影响主要表现为需要较长时间(至少 1～2 周)未被沉积物覆盖才能形成明显的微生物席层(Gerdes, 2007),如果沉积速率很高,则只能形成环绕沉积物颗粒的微生物膜. 光照的控制作用与沉积速率的影响类似. 沉积表层的湿度能为微生物群的发展提供必需的水分及无机盐养分,是控制微生物群分布和活跃程度的关键因素. 因而,潮上带下部能发育厚实的微生物席,而潮上带上部一般仅发育薄的微生物席. 间歇性暴露则是形成砂裂等破坏型 MISS 的重要前提.

从鲁山中新元古界发现的 MISS 组合类型特征分析,控制本区微生物席发育和 MISS 分布的主要因素应是水动力条件、沉积速率、沉积表层湿度和间歇性暴露条件. 这些因素都与海岸带微地貌相关,而 MISS 的形态组合特征主要取决于微生物席本身的特征及其遭受地质过程影响的程度,因此,对 MISS 形态组合的深入剖析可以反映沉积环境的特点,并能用作沉积微相的指示标志.

3.2 MISS 空间分布特征

MISS 形态组合在海岸带的分布随相带位置不同而明显变化. 总的来说,潮上带以微生物席干裂构造为主,潮间带上部以水动力破坏构造为主,潮间带下部和潮下带则少见原位 MISS,但可见再沉积的微生物席碎片等构造. 有关不同时代与地区 MISS 在潮坪区的分布已有一些研究(Gerdes *et al*., 2000; Noffke *et al*., 2001b,2008;史晓颖等,2008; Bose and Chafetz, 2009),但对 MISS 形态组合特征与海岸带地形变化的相关性研究还很不够. 本文根据对鲁山中—新元古代 MISS 的研究并结合前人的工作,建议将陆源碎屑为主导的海岸带的 MISS 分布划分为以下 4 个与沉积亚相相对应的区带(图 4).

MISS 区带Ⅰ:潮下带—潮间带下部(临滨—前滨下带),少见砂裂等典型的破坏性 MISS,可见再沉积的微生物席碎片等. 由于高水动力条件的影响,微生物席发育不充分,但常见包裹沉积颗粒的富有机质微生物膜.

MISS 区带Ⅱ:潮间带上部(前滨上带),主要为多向波痕和微生物席碎片. 水动力扰动的强度和时间低于潮间带中—下部,能够形成较薄的微生物席,为多向波痕形成提供条件,但在大的高潮期和风暴期微生物席可被撕裂,形成大量的微生物席碎片.

MISS 区带Ⅲ:潮上带下部(后滨下带),发育多样的砂裂;由于水流影响较小,毛细作用和高潮汐作用能为该区提供充足的水分,故常形成厚实的微生物席;间歇性暴露为形成多样的 MISS 创造了良好条件. 在这个区带内,不完全型纺锤状砂裂出现的位

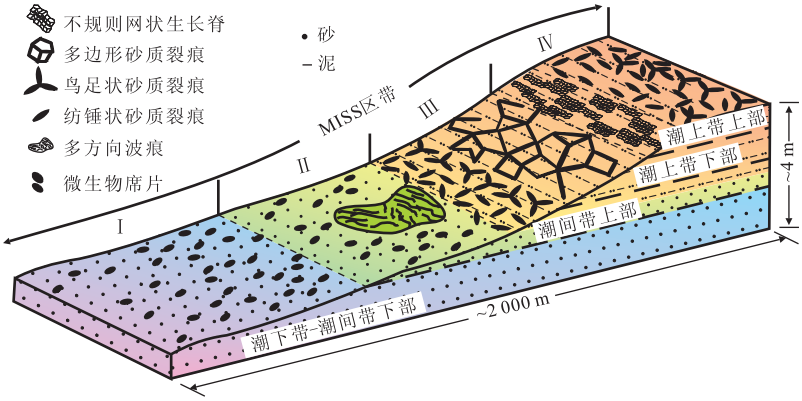

图 4　豫西鲁山中新元古界 MISS 区带分布模式

Fig. 4　A schematic diagram of the distribution of the MISS in Meso- to Neo-proterozic, Lushan, western Henan

置相对较低,而网状砂裂出现的位置相对较高,鸟足状砂裂多集中在中部. 砂脊较突出的砂裂在靠下的部位比较集中.

MISS 区带Ⅳ:潮上带上部(后滨上带),主要发育微生物席生长脊构造和其他较小砂裂构造. 砂裂规模一般较小,砂脊较细长,围岩以泥岩—含粉砂质泥岩为主,主要发育于砂—泥岩互层部位.

4　结论

豫西鲁山中新元古界发育大量的 MISS,以微生物席破坏构造为主,包括多向波痕、微生物席碎片、纺锤状砂裂、鸟足状砂裂、网格状砂裂、微生物席稳化波痕、网状微生物席生长脊等. 此外,在 MISS 区带Ⅳ中还发现属于微生物席生长阶段形成的微生物席生长脊构造,表明在中—新元古代华北地台南缘以陆源碎屑主导的海岸带环境,活跃着丰富的微生物群.

MISS 形态组合特征在海岸环潮坪带不同相区随地势和距海岸线远近而呈现规律性变化. 这种变化主要受微生物群活跃程度以及影响微生物席发育和形成 MISS 的地质条件约束,也反映了沉积表层湿度和水动力条件的差异. 潮上带下部是最适合微生物席发育并形成多样 MISS 的最佳地带. 因此能够将 MISS 形态组合特征用于前寒武纪沉积相分析和古海岸线位置的标定.

根据海岸带不同相区 MISS 分布特征的研究,识别了 4 个以 MISS 形态组合为标志的 MISS 区带,它们与环潮坪地区的地势和水文条件密切相关,可以用作古地理与古环境分析的重要参考.

致谢:在研究过程中曾与周洪瑞、张世红、张传恒、龚一鸣教授及王新强博士进行过学术讨论,受益颇深,在此谨致谢意.

References

Banerjee, S., Jeevankumar, S., 2005. Microbially originated wrinkle structures on sandstone and their stratigraphic context: palaeoproterozoic Koldaha Shale, Central India. *Sedimentary Geology*, 176(1—2): 211—224. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.12.013

Bose, S., Chafetz, H. S., 2009. Topographic control on distribution of modern microbially induced sedimentary structures (MISS): a case study from Texas coast. *Sedimentary Geology*, 213(3—4): 136—149. doi: 10.1016/j.sedgeo.2008.11.009

Bouougri, E. H., Porada, H., 2007. Siliciclastic biolaminites indicative of widespread microbial mats in the Neoproterozoic Nama Group of Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 48(1): 38—48. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2007.03.004

Eriksson, P. G., Schieber, J., Bouougri, E., et al., 2007. Classification of structures left by microbial mats in their host sediments. In: Schieber, J., Bose, P. K., Eriksson, P. G., et al., eds., Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record. Elsevier, Amsterdam, 39—52.

Eriksson, P. G., Simpson, E. L., Eriksson, K. A., et al., 2000. Muddy roll-up structures in siliciclastic interdune beds of the c. 1.8 Ga Waterberg Group, South Africa. *Palaios*, 15(3): 177—183. doi: 10.1669/0883—1351(2000)015<0177:MRUSIS>2.0.CO

Gerdes, G., 2007. Structures left by modern microbial mats in their host sediment's. In: Schieber, J., Bose, P. K., Eriksson, P. G., et al., eds., Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record. Elsevier,

Amsterdam, 5－38.

Gerdes, G., Klenke, T., Noffke, N., 2000. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, 47(2): 279－308. doi: 10.1046/j.1365－3091.2000.00284.x

Gerdes, G., Krumbein, W. E., Reineck, H. E., 1985. The depositional record of sandy, versicolored tidal flats Mellum Island, southern North Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 55(2): 265－278. doi: 10.1306/212F8698－2B24－11D7－8648000102C1865D

Hardie, L. A., 1977. Sedimentation on the modern carbonate tidal flats of northwest Andros Island, Bahamas. Johns Hopkins University Press, Maryland.

Lu, S. N., Zhao, G. C., Wang, H. C., et al., 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China craton: a review. *Precambrian Research*, 160(1－2): 77－93. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.017

Mei, M. X., Meng, Q. F., Gao, J. H., 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. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 197－204 (in Chinese with English abstract).

Noffke, N., 1998. Multidirected ripple marks rising from biological and sedimentological processes in modern lower supratidal deposits (Mellum Island, southern North Sea). *Geology*, 26(10): 879－882. doi: 10.1130/0091－7613(1998)026<0879:MRMRFB>2.3.CO;2

Noffke, N., 2005. Geobiology—a holistic scientific discipline. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219(1－2): 1－3. doi: 10.1016/j.palaeo.2004.10.010

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. *Geobiology*, 6(1): 5－20. doi: 10.1111/j.1472－4669.2007.00118.x

Noffke, N., Beukes, N., Gutzmer, J., et al., 2006a. Spatial and temporal distribution of microbially induced sedimentary structures: a case study from siliciclastic storm deposits of the 2.9 Ga Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 146(1－2): 35－44. doi: 10.1016/j.precamres.2006.01.003

Noffke, N., Eriksson, K. A., Hazen, R. M., et al., 2006b. A new window into Early Archean life: microbial mats in Earth's oldest siliciclastic tidal deposits (3.2 Ga Moodies Group, South Africa). *Geology*, 34(4): 253－256. doi: 10.1130/G22246.1

Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T., 2003. Bethic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic). *Earth Science Review*, 62(1－2): 163－176. doi: 10.1016/S0012－8252(02)00158－7

Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T., et al., 2001a. Microbially induced sedimentary structures: a new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5): 649－656. doi: 10.1306/2DC4095D－0E47－11D7－8643000102C1865D

Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T., et al., 2001b. Microbially induced sedimentary structures indicating climatological, hydrological and depositional conditions within recent and Pleistocene coastal facies zones (southern Tunisia). *Facies*, 44(1): 23－30. doi: 10.1007/BF02668164

Noffke, N., Krumbein, W. E., 1999. A quantitative approach to sedimentary surface structures contoured by the interplay of microbial colonization and physical dynamics. *Sedimentology*, 46(3): 417－426. doi: 10.1046/j.1365－3091.1999.00218.x

Pflüger, F., Gresse, P. G., 1996. Microbial sand chips—a non-actualistic sedimentary structure. *Sedimentary Geology*, 102(3－4): 263－274. doi: 10.1016/0037－0738(95)00072－0

Porada, H., Bouougri, H. E., 2007. Wrinkle structures—a critical review. *Earth Science Reviews*, 81(3－4): 199－215. doi: 10.1016/j.earscirev.2006.12.001

Prave, A. R., 2002. Life on land in the Proterozoic: evidence from the Torridonian rocks of Northwest Scotland. *Geology*, 30(9): 811－814. doi: 10.1130/0091－7613(2002)030<0811:LOLITP>2.0.CO;2

Qi, Y. A. 2005. Trace fossils from Yumengshan Formation (Ruyang Group) of Lushan Country, Henan Province. *Journal of Henan Polytechnic University*, 24(1): 33－37 (in Chinese with English absract).

Sarkar, S., Banerjee, S., Samanta, P., et al., 2006. Microbial mat-induced sedimentary structures in siliciclastic sediments: examples from the 1.6 Ga Chorhat sandstone, Vindhyan supergroup, M, P., India. *Journal of Earth System Science*, 115(1): 49－60. doi: 10.1007/BF02703025

Sarkar, S., Bose, P. K., Samanta, P., et al., 2008. Microbial mat mediated structures in the Ediacaran Sonia Sandstone, Rajasthan, India, and their implications for Proterozoic sedimentation. *Precambrian Research*, 162(1－

2)：248－263. doi：10. 1016/j. precamres. 2007. 07. 019

Schieber，J.，1998. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones：examples from the Mid-Proterozoic belt Supergroup，Montana，USA. *Sedimentary Geology*，120(1－4)：105－124. doi：10. 1016/S0037－0738(98)00029－3

Schieber，J.，2004. Microbial mats in the siliciclastic Rock record：a summary of diagnostic features. In：eriksson，P. G.，Altermann，W.，Nelson，D. R.，et al.，eds.，The Precambrian earth：tempos and events. Developments in Precambrian Geology，12. Elsevier，Netherlands，663－673.

Schieber，J.，Bose，P. K.，Eriksson，P. G.，et al.，2007. Atlas of microbial mat features preserved within the siliciclastic rock record. Elsevier，Netherlands.

Shi，X. Y.，Chen，C. Q.，2006. Microbially induced sedimentary structures (MISS) from the Changcheng Group (ca 1. 6 Ga)，North China Platform，and their implications for an oxygen-defficient shallow sea environment. In：Yang，Q.，Wang，Y.，Weldon，E. A.，eds.，Ancient life and mordern approaches. China University of Science and Technology Press，Hefei，188－189.

Shi，X. Y.，Wang，X. Q.，Jiang，G. Q.，et al.，2008. Pervassive microbial mat colonization on Mesoproterozoic peritidal siliciclastic substrates：an example from the Huangqikou Formation (ca 1. 6 Ga) in Helan Mountains，NW China. *Geological Review*，54(5)：577－586 (in Chinese with English abstract).

Wang，H. Z.，Shi，X. Y.，Wang，X. L.，et al.，2000. Research on the sequence stratigraphy of China. Guangdong Science and Technology Press，Guangzhou (in Chinese).

Yang，S. F.，Zhou，H. R.，1995. Trace fossils from the Precambrian Ruyang Group of western Henan. *Geological Review*，41(3)：205－210 (in Chinese with English abstract).

Zhou，H. R.，Wang，Z. Q.，Cui，X. S.，1998. Study on sedimentology and sequence stratigraphy of the Mesoproterozoic and Neoproterozoic in the west of Henan Province. *Geoscince*，12(1)：17－24 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

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. 地学前缘，14(2)：197－204.

齐永安，2005. 河南鲁山汝阳群云梦山组遗迹化石. 河南理工大学学报，24(1)：33－37.

史晓颖，王新强，蒋干清，等，2008. 贺兰山地区中元古代微生物席成因构造——元古时期微生物群活动的沉积标志. 地质论评，54(5)：577－586.

王鸿祯，史晓颖，王训练，等，2000. 中国层序地层研究. 广州：广东科技出版社.

杨式溥，周洪瑞，1995. 豫西前寒武纪汝阳群遗迹化石. 地质论评，41(3)：205－210.

周洪瑞，王自强，崔新省，1998. 豫西地区中、新元古代地层沉积特征及层序地层学研究. 现代地质，12(1)：17－24.