

陆源碎屑岩中微生物诱发的沉积构造 的成因类型及其分类体系

梅冥相

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京,100083

内容提要:当蓝绿藻被修正为蓝细菌的时候,多年使用的藻席的概念就被修正为微生物席。科学家们长期观察和研究的结果表明:微生物席实际上是一种多种生物共生的、而且是同营养生物的同生微生物群落,这个复杂的微生物群落几乎包含了曾经出现在地球上的所有的新陈代谢途径。尽管还存在一些争议,多年来认为碳酸盐叠层石是“藻席”(微生物席)的建造物的理念,促使沉积学家们在碎屑岩中寻找微生物席的生命活动留下的痕迹。随着对早年描述的一些可疑的遗迹化石的重新解释,产生了席底和席底构造的新概念;也随着现代和化石记录中更多的与微生物席相关的沉积构造在碎屑岩中的发现,从而出现了将碎屑岩中的微生物诱发的沉积构造(Microbial induced sedimentary structure;简称为 MISS 构造)归到第五类原生沉积构造的新认识;在强调了包含一个较宽泛的物理、化学和生物过程的基础上,微生物诱发的沉积构造还被进一步归为微生物席生长、新陈代谢、破坏、腐烂和成岩过程几个大类。成因类型的挖掘和分类体系的建立,促进了在地球生物学框架下的碎屑岩微生物席沉积学的发展。

关键词:成因类型;分类体系;微生物诱发的沉积构造;碎屑岩沉积

微生物,最为简单的定义是所有显微级别的生物,总体上被认为包括了细菌(包括蓝细菌)、菌类、小型藻类和原生动物(Brock et al., 1994)。微生物,以其新陈代谢的多样性和在地球上无所不在、无与伦比的巨大生物量(Newman and Banfield, 2002; Warren and Kauffman, 2003),曾经被认为是“生物学中沉睡的巨人”(Woese, 1998)。基于很多原因,微生物是很重要的,完全付出是它们的责任,而且微生物间接地或直接地承担了我们呼吸所需的几乎所有的氧气;氧气是光合作用期间所产生的,光合作用产生氧气可以写成一个反应式即: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$;在这里,“ CH_2O ”是地球科学家对非常复杂的有机质基团形式的速记(Kastingl and Siefert, 2002)。30多年前,微生物学的一个重要变化是“蓝绿藻”最终被弄清楚是“蓝细菌”(Krumbein, 1979; Rippka et al., 1979),术语“微生物席”就替代了“藻席”并得到了广泛的接受和使用(Brock, 1994)。就像 Krumbein (2003)所指出的那样:微生物席可以总体上看成是“大规模的生物膜”;生物膜,即附着在地表的微体生物的密切相关的聚集体而且经常嵌入在细胞外聚合物(EPS)之中,包含了曾经出现在地球上的所有的新陈代谢途径。

现代生物膜的底层是岩石表面以及深裂缝和深裂隙、土壤、湖泊环境中的沉积颗粒体系、河边和海洋环境,而且它们还发生在从极地地区的冰盖内部到深海热水水道的壁上,生物膜因此是很普遍的,具有附带条件即生态条件的生物膜最终会形成从生物膜到生物席的序列;大多数成功扩展生物膜的是蓝细菌,这是因为蓝细菌在太阳光可以照着的沉积物表面具有巨大的形态多样性变化以及生物稳化作用的能力(Gerdes, 1993)。与厌氧光合生物、厌氧和需氧化能生物、有机和无机呼吸作用和发酵作用等结合在一起,蓝细菌主导的微生物席成功地在沉积物中留下记录,因而在较低的程度同时也在岩石中留下记录(Gerdes, 1993; Krumbein, 2003)。随着对现代硅质碎屑沉积物中的微生物席特征的深入研究,以及在前寒武纪碎屑岩中微生物席沉积特征的进一步发现和研究,并聚焦于地球早期的沉积作用记录中微生物席的影响,类似于碳酸盐岩中的叠层石,大大地促进了沉积学家对碎屑岩中与微生物席相关的沉积构造的发掘和研究。成因类型的挖掘和分类体系的建立,促进碎屑岩微生物席沉积学的发展(Noffke et al., 2001; 梅冥相等, 2006; Schieber et al., 2007; 史晓颖等, 2008; 郑元等, 2009)。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号 49802012, 40472065)和中石化海相前瞻性项目(编号 C0800-07-ZS-164)的成果。

收稿日期:2010-10-31;改回日期:2011-01-10;责任编辑:章雨旭。

作者简介:梅冥相,1965年生。教授,主要从事沉积学与地层学研究。Email:meimingxiang@263.net。

1 早期的研究:对早期发现的可疑化石的重新解释

尽管在砂岩和泥岩中的微生物席沉积特征在几十年以前就已经被识别出来(Davis, 1968; Schieber, 1986), 由于微生物席存在的直接证据常常缺乏, 所以, 与微生物席相关的沉积构造和特征的识别则具有很强的挑战性(Hagadorn et al., 1999; Schieber, 1999; 郑元等, 2009); 就像孙枢(2005)所指出的那样:“寒武纪以来的显生宙约占全部地球历史的 1/10, 因此对前寒武纪地球的了解是地质科学古老而始终引人入胜的命题”。所以, 一直到上个世纪末期, 关于在碎屑岩中寻找和识别类似于“叠层石”的沉积构造还处在一个激烈争论和探索的阶段。

对碎屑岩中的微生物席构造和特征的研究, 即碎屑岩微生物席沉积学的研究, 最早的驱动力是来源于早年的学者所描述的一些可疑化石或假化石的重新认识与研究, 其中最为典型的代表是(如图 1 所示): 满洲藻迹(*Manchuriophycus*); 肯尼亚构造(*Kinneyia*); ③星状迹(*Astropolithon*)。

1.1 满洲藻迹

满洲藻迹是日本人 Endo 于 1939 年在我国辽南地区的新元古界桥头组砂岩中首先描述的一种构造, 当时是作为一种遗迹化石对来进行描述。“满洲藻迹”曾经被重复性地误认为一种宏观藻或蠕虫迹[见 Hofmann(1971)的综述和回顾]的构造, 这是一种在砂岩波痕面上分布的一种蜿蜒弯曲的特别像动物潜穴的一种沉积构造(图 1a 所示), 就像郑元等(2009)对类似现象进行的有益讨论所指出的那样, 类似的构造还曾经被命名为“长城迹(*Changchengia*)”或其他名称, 而作为古老的动物遗迹化石代表(胡健民等, 1991; 高建华等, 1993; 杨式溥等, 1995, 2004), 同时古生物学家又将其作为“假化石”的典型代表(Knaust and Hauschke, 2004)。

满洲藻迹式的构造表明了波痕谷内的填充物具有在埋藏后收缩和开裂的趋势(图 1a 所示)。由波痕等高线所导向, 裂缝变成正弦式弯曲, 并在干涉波痕之中具有变成螺旋式的趋势(Pflüger, 1999); 在另外一些情况下, 收缩影响了一个连续的、平坦的沉积物席状体, 结果是在相邻的层面上保存为砂填充的纺锤状收缩裂缝, 形成为绝大多数是正向的地表地势起伏(图 1b 所示)。这些沉积构造多数具有以下共同点: ①均受到很弱的生物扰动作用影响; ②

均需要一种不同寻常的流变学行为, 尤其是粘性和柔软性; 以及 ③均在显生宙很罕见, 即使出现也主要发育在低氧相之中。随着时间向前追索, 这样的构造在早寒武世就变得较为普遍, 而且在前寒武纪的浅海序列中变得更加普遍(Gehling, 1991); 因为在前寒武纪, 微生物席不但发育在受到压制的生境中的沉积面上, 而且可能繁盛在所有的水生环境(Schieber and Pflüger, 1994), 造成这种状况的主因是有效的后生动物觅食过程和生物扰动过程的贫乏。

更为重要的是, Wachendörfer 等(1994)的研究表明, 在微生物席中, 粘结沉积物的有机质可能占据了 75% 的沉积物体积; 反过来, 这种有机质又几乎为 99% 的水所组成(Neu, 1994), 这就提醒了 Krumbein(1994)将微生物席作为“在合适的温度下稳定了的而且具有良好结构的结构水”。

尽管 Pratt(1998)将类似于图 1 所示的这些裂缝状构造还解释为地震诱发的脱水过程的产物, 但是, 即使不排除地震作用会诱发其形成, 这些构造形成所需要的粘性和柔软性的流变学行为是其形成的关键。所以, 综合起来考虑, 尤其是考虑到微生物席粘结的沉积物具有很显著的收缩和膨胀潜力, Pflüger(1999)直接将类似的微生物席构造组合(与粘性微生物席相关的膨胀和收缩裂缝过程所形成的裂缝)称为“满洲藻迹相(*Manchuriophycus* Facies)”。

后来的进一步观察和研究证实了上述认识, 即“满洲藻迹”代表了一种特殊的微生物席收缩裂缝, 而且属于“微生物席的物理破坏作用类型”的微生物诱发的沉积构造(Schieber, 2004; Schieber et al., 2007), 属于微生物稳定作用的产物(Noffke et al., 2001)。

1.2 肯尼亚构造

肯尼亚(*Kinneyia*)构造首先被 Quenstedt 在 1858 年描述, 被怀疑是“在水平的底上由强降雨冲击所形成的沟槽”。后来 Walcott 在 1914 年的前寒武纪“带序列”(Belt Series)中描述了一个有点不太典型的标本并将其当作藻而命名为 *Kinneyia simulan*。这个解释后来受到质疑(Häntzschel, 1975), 但是其名称还在使用。作为一种物理沉积构造, “肯尼亚”被认为是以下过程所形成的构造: ①在浅海之中由风所形成的皱褶(Rücklin, 1953); ②类似于深水中的“沉淀微波痕”(Martinsson, 1965); ③在潮坪上作为风所驱动的泡沫的标志(Allen,

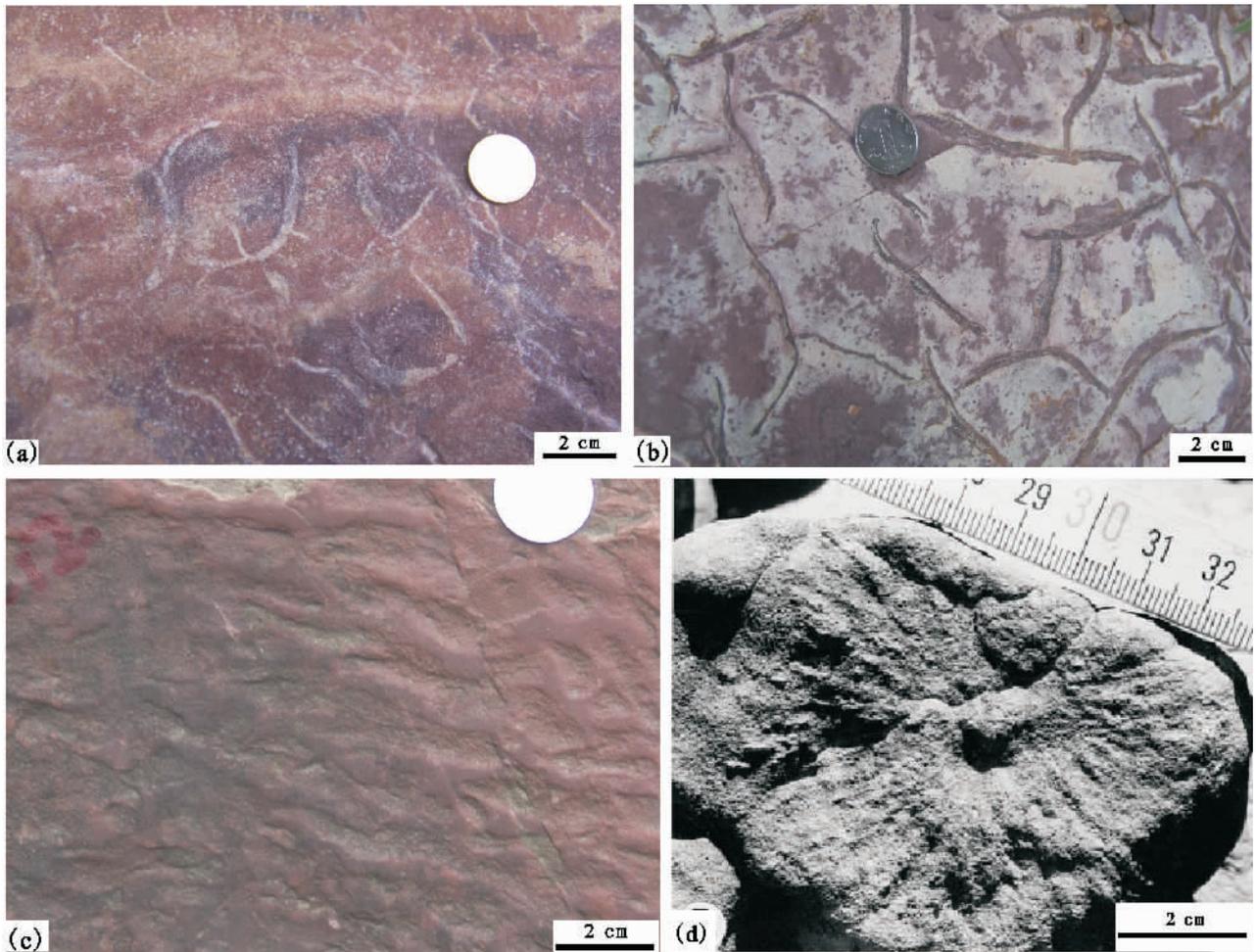


图 1 早期常常被误认为可疑化石的微生物席特征或构造

Fig. 1 Images showing microbial-mat features or structures that are frequently thought as the dubiofossils in the early time

(a)和(b)代表曾经被归为“满洲藻迹”式的收缩裂缝:(a)在干涉波纹面上主要发育在波痕谷中的螺旋式和复杂形态的裂缝,这是典型的“满洲藻迹”;(b)在相同层面上的纺锤状收缩裂缝,河南卢氏县城北的元古界高山河组。(c)可以解释为肯尼亚构造的小级别波痕状构造,这些小级别波痕状构造以平坦的脊和陡峭的边缘为特征,应该归为“肯尼亚”构造(Bloos, 1976; Beukes, 1996; Pflüger, 1999),代表微生物席之下、可归因于微生物席的埋藏和腐烂过程产生的气体捕获过程的产物,河南汝阳县云元古界梦山组。(d)类似于罕见的“砂火山”的“星状迹”构造,从中心管向外放射的岩墙可能只是形成在一种具有粘性的宿主沉积物之中,在这种情况下最有可能的是微生物粘结的砂,所以归到砂岩中的微生物席特征(Pflüger, 1999; Schieber et al., 2007)。利比亚西南部 Murzuk 盆地的志留系,修改自 Pflüger(1999)

(a) and (b) refer to shrinkage cracks that had been grouped into “*Manchuriophycus*”: (a) Spiral cracks and their relative complex morphological cracks that age mainly developed in troughs of interference ripples; (b) Spindle-shaped cracks in the same bedding plane. Proterozoic Gaoshanhe Formation, Lushi county of Henan Province. (c) refers to small scale ripple-shaped structures that can be interpreted as the “*Kimneyia*” structure, these small scale ripple-shaped structures are characteristic of both top-flat crests and steep margins, and can be grouped into the “*Kimneyia*” structure (Bloos, 1976; Beukes, 1996; Pflüger, 1999) and can be interpreted as the result of gas capturing generated from the burying and the decomposing of microbial mats, Proterozoic Yunmengshan Formation, Ruyang county, Henan province. (d) shows “*Astropolithon*” structure that is similar to a rare type of sand volcano, and the dikes radiating from the central pipe can only form in a cohesive host sediment, in this case most likely a microbially bound sand; thus, this structure should be grouped into the microbial-mat feature in sandstones (Pflüger, 1999; Schieber et al., 2007), Silurian of the Murzuk Basin of southwest Libya, adapted from Pflüger (1999)

1967); ④ 在潮间坪中作为小级别的削顶的干涉波纹(Kummel and Teichert, 1970); ⑤ 在极浅水背景的粘性沉积物中由于风的剪切作用力所形成的皱纹(Singh and Wunderlich, 1978); ⑥ 在细粒的粉砂沉

积物上的振荡水体的运动所产生的皱纹(Bloos, 1976); ⑦ 在非稳定的松散沉积物内的与沉积物负载过程和脱水过程相联系的产物(Seilacher and Aigner, 1991)。这些研究还将其归为其他的几种小

级别的波痕状构造,例如剪切皱饰痕(=Runzelgirlanden; Seilacher and Hemleben, 1966)、横向皱饰痕(Dzulynski, 1963)、皱饰痕(=Runzelmarken; Reineck, 1969)、或毫米级别的波痕(Singh and Wunderlich, 1978)。这些类似于毫米级别波痕的沉积构造,还曾经被描述为假化石(Kinneyia dubia; Desio, 1940),或者被描述为“肯尼亚”波痕或微波痕(Schwarz, 1975)、以及很小级别的振荡波痕(Oszillations- Kleinstrippeln; Bloos, 1976)。Singh和Wunderlich(1978)介绍为“毫米级别的波痕”,但是只是对于层面构造而言而没有涉及到层内构造;术语“毫米级别的波痕”后来还被经常使用(如Jennette and Pryor, 1993)。Bloos(1976)还进一步阐明真正的“肯尼亚”具有特征的平坦的脊和陡峭的槽谷的斜坡(图2所示),不可能形成在浅水背景或暴露的环境之中,因为槽谷陡峭的微地势将是不稳定的而且不可能在风和波浪作用的情况下保存下来,所以就意味着区别于“小级别波痕”或“皱饰痕”。因此,似乎“肯尼亚”形成在微生物席封闭的沉积物内,所以在现代沉积物中从来没有见到过;鉴于这些特征,Pflüger(1999)将其解释为微生物席之下的与气体活动相关的、包含着强烈的生物席和生物稳定作用证据的“席底构造”而统称为“肯尼亚相”,进一步将其明确为形成在微生物席之下、可归因于微生物席的埋藏和腐烂过程产生的气体捕获过程的产物。

Hagadorn和Bottjer(1997)已经注意到,“毫米级别的波痕”、“皱饰痕和皱饰构造”、“肯尼亚构造”等术语常常被使用来描述同一类型的构造而造成概念混乱。Porada和Bouougri(2007)最近强调,对于发育在硅质碎屑沉积物中可以怀疑为微生物诱发成因的小级别皱饰构造已经建立了好几个术语:从历史上讲,术语“肯尼亚波痕”或简称为“肯尼亚”是首先出现的,被用到形成在微生物席之下的可能的构造,然而“大象皮”是首先被用来描述生物席表面的微生物生长构造;而且,术语“皱饰痕”(Runzelmarken)部分等同于“肯尼亚”而且部分被用来指物理成因的构造,如小型负载构造。就像Hantzschel和Reineck(1968)所描述的那样,等同于古代“皱饰痕”的现代构造,还没有被观察到,但是古代实例却很多;它们还曾被描述为“肯尼亚波痕”(Bloos, 1976)、“肯尼亚构造”(Beukes, 1996)、或者简称为“肯尼亚”(Pflüger, 1999),而且Reineck和Singh(1973, 1980)还被进一步归为“皱饰构造”。后

来,Hagadorn和Bottjer(1999)因而将形成在微生物席之下的肯尼亚类型的皱饰构造与其他的一些反映生物席生长形态的“皱饰构造”相区分开。

自从Hagadorn和Bottjer(1997, 1999)认为“皱饰构造”可能形成于微生物活动以及Pflüger(1999)对“肯尼亚相”小级别构造的微生物成因解释以来,Noffke等(2001)将其归到她所提出的一组新的“微生物诱发的沉积构造”(MISS)之中,各种各样“皱饰构造”已经得到了较为详尽的描述(Noffke, 2000; Noffke et al., 2001, 2002, 2003; Bouougri and Porada, 2002; Pruss, 2004; Banerjee and Jeevankumar, 2005; Parizot et al., 2005; 梅冥相等, 2006; Schieber et al., 2007; Porada and Bouougri, 2007; Mata and Bottjer, 2009),地质学家们已经越来越警觉到图2所示的小级别构造成因机制的复杂性。考虑到形成这种类型构造的微生物席厚度,从而被划分为“透明的”和“非透明的”皱饰构造(Noffke, 2000; Noffke et al., 2001, 2002, 2003);或者特征化地描述为发育成正向或负向的地面地势起伏(Bouougri and Porada, 2002)的“裂开平行的、横切的、穹窿状的细线的”皱痕。这些不同的认识似乎就意味着“皱饰构造”可以发育成一系列的形态和保存样式。

微生物诱发的皱饰构造,不太容易与那些非生物成因的起皱的古代层面上的各种变异的形态区分开,可能的错误解释主要源于两个方面:①广泛被接受的“皱饰构造”的概念是由Hagadorn和Bottjer(1997, 1999)所提出的,他们把皱饰构造描述为“奇异扭曲的、缩成皱纹的不规则的疱疹物,常常呈准多角形的、陡峭的既可以发育在顶层面也可以发育在底层面的表面形态”,但是,在这个术语下将包含一系列不同成因的构造;②不一直使用的术语是“皱饰痕”(Runzelmarken)以及它的相似物,但是又不完全与Hagadorn和Bottjer(1997, 1999)的术语“皱饰构造”雷同。许多小级别的、在古代层面上起皱的不规则物形成于没有微生物群落参与的物理过程,例如,鱼鳞痕(Reineck and Singh, 1973, 1980)、冲击痕(Reineck, 1956)、泡沫和迁移泡沫的凹陷(Reineck and Singh, 1973, 1980)、粘附的疣状突起和粘附的波痕(“反向小涟漪”; van Straaten, 1953)、风成的微波痕(Hunter, 1969)、雨水冲击痕(Clifton, 1977; Robb-III, 1992);小级别的负载构造(Allen, 1985)等。

在“皱饰构造”组合内,鉴于其特殊的几何形态

和产出样式,可以归为微生物成因的两种类型的构造得到了较好的定义和容易的识别:

① 一种是“大象皮”(Allen, 1985; Gerdes et al., 1993; Gehling, 1999; Schieber et al., 2007),反映了微生物席生长的形态,而且主要发育在泥质粉砂岩或粉砂质泥页岩层面上,有时与许多白云母片产在一起,被认为是粘附在先前生物席的粘性表面。这种构造以尖棱的脊为特征,可达 1 mm 高,较为典型地结合成网状形态,形成多角形的网状物,这些网状物一般为 5 到 10 mm 宽(Noffke, 2000; Noffke et al., 2001, 2002, 2003; Bouougri and Porada, 2002; Pruss, 2004; Banerjee and Jeevankumar, 2005; Parizot et al., 2005; Schieber et al., 2007; Porada and Bouougri, 2007)。

② 另一种定义得较好的是“肯尼亚”,这种构造可能形成在微生物席之下,而且经常保存在平坦的粉砂岩和砂岩层的上层面上,这些粉砂岩和砂岩是事件沉积。它是经典的而且是经常见到的“皱饰构造”,已经从太古宙到侏罗纪得到证实(Pflüger, 1999; Bloos, 1976; Noffke, 2000; Noffke et al., 2001, 2002, 2003; Bouougri and Porada, 2002; Pruss, 2004; Banerjee and Jeevankumar, 2005; Parizot et al., 2005; Schieber et al., 2007; Porada and Bouougri, 2007; Mata and Bottjer, 2009);最为特征的是波痕脊的平坦的顶和陡峭的边缘(图 1c)而与小级别干涉波痕之类的非生物成因构造相区分。

1.3 星状迹

“星状迹(*Astropolithon*)”是 Dawson 在 1878 年首先描述和研究的一种极为罕见的沉积构造(引自 Hantzschel, 1975),这种构造由于具有特殊的放射状形态,所以 Dawson 当年将其考虑为寒武纪的一种遗迹化石所以被命名为“*Astropolithon hindii*”。这种沉积构造的基本特征是(图 1d):由一些突出于较厚的乃至块状砂层上的平坦状凸起物所组成,中心被一个垂直的管、而且其余部分为放射状岩墙所穿透。根据这一特征,后来有将其归为一种特殊的沙火山(Walter, 1972),最后被解释为一种气体或液体的逃逸构造(Pickerill and Harris, 1979)。

进一步观察和研究发现,其宿主沉积物是一种纯净的石英砂,在突出于水柱之前为了使液化的砂膨胀,这些纯净的石英砂必定包含着不寻常的粘性(Seilacher and Goldring, 1996),从而进一步证实为以前作为气体或液体逃逸构造的推断(Pickerill and

Harris, 1979)。到今天,这种构造被解释为形成于具有压力的气体或液体穿过具有粘性的微生物席表面的逃逸过程的产物,气体和液体均产生在埋藏的微生物席物质的腐烂过程之中。一旦腐烂过程在继续,在微生物席之下的气体和液体的压力就会增强,而且增强到当所捕获的气体或液体能够刺穿生物席表面的时候,从而在生物席的上层面沉积一个锥丘状的沉积体;只要压力被释放,这个中心带就会垮塌而产生凹陷;放射状构造可能是当沉积物流到或膨胀进生物席的上层面时的一个带,它们有时会穿过球状体本身的边缘。所以说,这种当年被作为遗迹化石的沉积构造,应该归到微生物席腐烂过程所形成的沉积构造而纳入碎屑岩的微生物席特征(Pflüger, 1999; Schieber et al., 2007)或微生物诱发的沉积构造(Noffke et al., 2001)的范畴,而且进一步归到微生物席腐烂过程所形成的微生物席特征或构造,即放射状的气体或液体逃逸构造(Pflüger, 1999)。与星状迹代表的放射状的气体或液体逃逸构造常常共生的是那些非放射状的气体或液体逃逸构造,二者均归为与微生物席腐烂过程相关的、通过一个粘性微生物席表面承受着压力的气体或液体的逃逸过程的产物,统称为“气穹隆”;具有放射状的星状迹式的构造,可能是因为沉积物以一个更加均一的形式流出破裂处所致,或者是因为这些气穹隆被埋藏所致(Pflüger, 1999)。

上文已经提到,在微生物席中,粘结沉积物的有机质可能占据了 75% 的沉积物体积;反过来,这种有机质又几乎为 99% 的水所组成(Neu, 1994; Krumbein, 1994);再者,在微生物席的腐烂过程之中,常常会产生富集甲烷、二氧化碳、一氧化碳和硫化氢的气体(Gerdes et al., 2000; Noffke, 2000; Noffke et al., 2001, 2002, 2003; Draganits and Noffke, 2004; Schieber et al., 2007)。所以说,被富含水和有机质的微生物席封闭的砂质沉积物,在微生物席的腐烂过程之中,容易形成类似于“星状迹”之类的气体或液体逃逸构造。

基于“席底和席底构造”(Seilacher and Pflüger, 1994)的概念,尽管 Pflüger(1999)在研究利比亚西南部 Murzuk 盆地的志留系的席底构造时,将“星状迹”之类的构造也纳入“满洲藻迹相”之中,从而将与微生物席膨胀和收缩所形成的裂缝状构造统称为“满洲藻迹相”,而且将小级别波痕状的皱饰构造之类的微生物席之下的气体捕获过程形成的席底构造统称为“肯尼亚相”,这种富有逻辑的归类就

像重要的“席底和席底构造”(梅冥相等,2006)概念一样为后来的进一步研究奠定了重要的理论和实践基础。

2 碎屑岩中微生物诱发的沉积构造(MISS构造)的分类体系

对于像地质学这样以描述性为主要特色且研究对象极为复杂的学科来说,总是需要合理的分类分类的目的有两个:一是从明显无序的状态中创造有序从而加深记忆;二是能更加清楚地了解成因过程(Miall,1999)。随着对现代微生物席和微生物膜的在浅海碎屑岩中所留下的沉积记录的系统观察和研究、以及相关的实验室研究(详见 Gerdes(2007)的系统总结),还有 Krumbein 等(2003)对现代生物膜和化石生物膜的高度总结和系统论述,意味着碎屑岩微生物席沉积学这一分支学科已经走向逐渐成熟的新时代(Schieber et al.,2007)。

2.1 碎屑沉积物中的微生物结构信号的分类

Gerdes 等(2000)选择了两个沿着环潮坪海岸的碎屑沉积物的现代典型区域,即北海和突尼斯作为研究区域,来了解现代微生物活动的结构信号。他们识别出六种类型的生物成因所调节的碎屑沉积组构,这些组构归为:① 内在的生物因素,实际上就是生物膜以及它们的更加坚固的对等物即微生物席的形态和行为;② 对物理扰动的生物响应;③ 碎屑沉积物的捕获和粘结过程;④ 被生物稳定化了的碎屑沉积物面的机械变形作用;⑤ 埋藏后过程;⑥ 生物扰动过程。这个分类方案是微生物信号在现代环潮坪背景中的一个分类体系,这些组构和特征的化石化作用意味着它还可能提供一个进行成因分类的基础,这个分类为以后的分类体系提供了重要线索和思考的途径。

2.2 碎屑岩中微生物诱发的沉积构造(MISS构造)的分类

鉴于沉积学家 Pettijohn 和 Potter(1964)已经将原生沉积构造划分为四大类并一直被广泛应用至今,所以 Noffke 等(2001)将“席底构造”称为“微生物诱发的沉积构造”(Microbial induced sedimentary structure;简称“MISS”),并将其归为“第五类原生沉积构造”。

Noffke 等(2001)总结出了 5 种生物作用过程来解释 MISS 构造的形成,包括:① 夷平作用;② 生物稳化作用;③ 印记形成作用;④ 微生物颗粒分离作用;⑤ 障积、捕获和黏结作用。由这些微生物活动或作用过程所形成的原生沉积构造包括层面构造和层内构造(表 1)。后来,Noffke(2009)进一步将 MISS 区分出 5 种成因类型:由微生物席生长产生的构造、由生物稳定化作用产生的构造、由障积作用形成的构造、由捕获和粘结作用形成的构造以及所有这些参数相互作用形成的构造(图 2);鉴于叠层石包括了平面状和上窿状特征,17 种 MISS 构造以其独特形态组成了从毫米级到米级的、富有特殊意义的沉积构造组合(图 2)。这个关于 MISS 构造的富有逻辑性的分类和后来的高度总结,促进了碎屑岩微生物席沉积学的发展。需要指出,有些与微生物席相关的构造或特征是几种过程的综合作用产物,与 Gerdes 等(2000)的分类体系一样,还难以说表 1 和图 2 所示的分类就是一个彻底完全的分类体系。

2.3 微生物席在其宿主沉积物中所留下的构造分类

保存在碎屑岩石记录之中的微生物席特征和构造,实际上属于极为复杂的有机物理-化学成因,就像叠层石一样暂时归为沉积构造(Pettijohn and Potter,1964),对其进行的过程一响应的分类方案是 Schieber(2004)提出的方案,并在 2007 年得到了进一步的补充。这个方案强调了包含一个较宽泛的物理、化学和生物过程,而且还强调这些与微生物席相关的特征和构造可以类比为遗迹化石,并进一步认为微生物席的影响及其先成存在可以从沉积物属性的观察中推断出来,这些沉积物属性包括:原生沉积物的粘性、抗拉强度、以及在沉积作用期间的抗剥蚀作用强度,还有那些能够推断在早期成岩过程中的原生渗透性和地球化学行为等特征。这个分类方案由一组特征所组成,包括从活跃的微生物席、经过

表 1 第五类原生沉积构造——“微生物诱发的原生沉积构造”分类表,据 Noffke 等(2001)修改

Table 1 Classification of the Primary sedimentary structures of a fifth category (Microbially induced primary sedimentary structures) adapted from Noffke et al. (2001)

亚类划分	产出特点	进一步归类
第一亚类	层面	① 被夷平的沉积面和皱饰构造;② 微生物席的碎片;③ 剥蚀作用残余物和残余坑穴;④ 多向/变余波痕;⑤ 卷曲的微生物席和收缩裂隙
第二亚类	层内	① 海绵状孔隙组构、气穹隆、渗流构造;② S形纹理;③ 定向颗粒、底栖鲕粒;④ 有机纹理、微生物和微生物层粘结的各种大小的颗粒

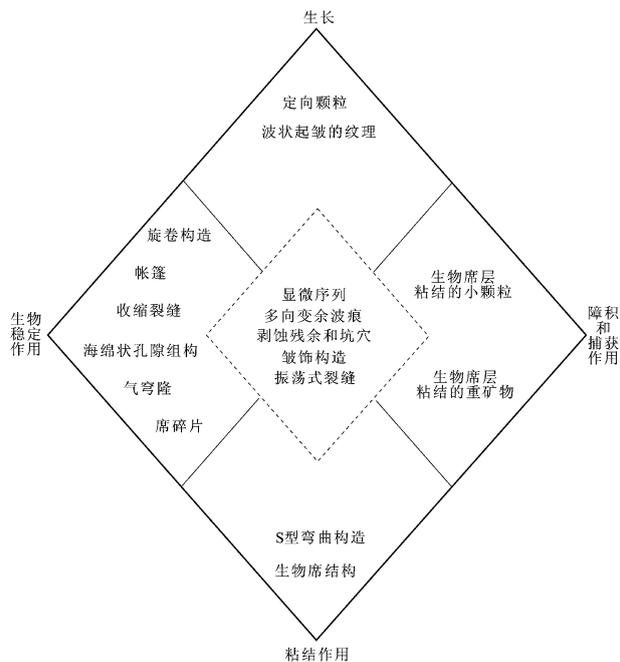


图 2 微生物诱发的沉积构造的分类和成因关系

Fig. 2 Diagram showing the classification and genetic relationships for the microbially induced sedimentary structures

17 种类型的构造被组合在它们的形成作用方式之中,引自 Noffke(2009)

17 main types are grouped in accordance to their modes of formations, adapted from Noffke (2009)

微生物席的新陈代谢作用到生物席的破坏作用以及最后的腐烂和成岩作用的一系列过程谱系。Schieber 等(2007)还强调其中有些特征可能多成因,如“星状迹(*Astropolithon*)”式的液体和气体逃逸构造(上文的图 1d 所示),正是在这些认识的基础上,以他为首的科学家们出版了里程碑式的著作——《保存在硅质碎屑岩中的微生物席特征图集》,也正是在该著作之中正是提及到“微生物席沉积学”,同时也是没有采用“MISS”概念重要原因。

2.3.1 保存在砂岩中的微生物席特征

保存在砂岩中的生物膜或生物席调节的沉积构造, Schieber(2004)将其划分为:①生物席生长特征;②生物席新陈代谢特征;③生物席破坏特征;④生物席腐烂特征;⑤生物席成岩作用特征;实际上,有些特征还可能是几个过程的产物,所以还应该包括“⑥复杂特征”。生物席腐烂特征主要是指那些埋藏在粘性的生物膜之下的有机质的腐烂过程所产生的液体或气体的逃逸而造成的特征。因为一种细菌的腐烂将会是另一种细菌的新陈代谢作用,所以新

陈代谢的特征与微生物席腐烂的特征实际上难以截然分开(Schieber, 2004; Schieber et al., 2007)。

第一、形成在微生物席生长条件下的特征。碎屑沉积物的生物稳定化作用(Gerdes et al., 2000),主要是颗粒的障积、捕获和粘结过程,相互缠结的砂颗粒、以及微生物丝状体组成的较薄生物膜在物理和改造过程之后会稳定沉积物面。发育在砂岩层面上的与微生物席生长过程相关的特征和构造主要有:①多向波痕和变余波痕(Noffke, 1998; Pflüger, 1999);②从毛须物、针状物和水疱物到突起物和网状饰物(如“大象皮”(Gehling, 1999)),以及一系列的皱饰构造(包括肯尼亚构造,如上文的图 1c 所示),皱饰构造还被 Noffke(2009)归到综合作用的特征之中(图 2),对这种构造的认识还存在较多的分歧(Pflüger, 1999; Bloos, 1976; Noffke, 2000; Noffke et al., 2001, 2002, 2003; Bouougri and Porada, 2002; Pruss, 2004; Banerjee and Jeevankumar, 2005; Parizot et al., 2005; Schieber et al., 2007; Porada and Bouougri, 2007; Mata and Bottjer, 2009);③穹窿状特征(曾经被描述为“砂叠层石”(Davis, 1968; Garlick, 1988; Schieber, 1998);④帐篷和帐篷脊,那些因为微生物席的生长可能会受到水流、风、气体的发育或间隙性的干裂作用的干扰,所形成的背形构造被定义为帐篷和帐篷脊(Gehling, 1999; Reineck et al., 1990; Gerdes et al., 1990)。类似的微生物生长相关的过程,也能在层内产生独特的纹理特征,这些特征包括:①生物纹理(Biolamination; Noffke et al., 1997; Schieber, 2004; Schieber et al., 2007);②特殊的“有机层”(Noffke et al., 1997; Schieber, 2004; Schieber et al., 2007);③特殊矿物如重矿物或云母富集的纹理(Garlick, 1988; Gerdes et al., 2000)。

第二、归因于微生物席生长过程中新陈代谢影响的特征。在现代微生物席中,就像光合作用之类的新陈代谢过程,会改变碳酸盐的溶解度,从而产生碳酸盐矿物在微生物席内的丝状体之间或沿着丝状体的沉淀作用(Gerdes and Krumbein, 1987; Chafetz and Buczynski, 1992; Gerdes et al., 1993; Chafetz, 1994; Krumbein, 1994; Krumbein et al., 2003)。这些矿物沉淀作用的影响可以在岩石记录中保存为:①不规则的鲕粒(Gerdes and Krumbein, 1987)、分散的碳酸盐颗粒(Kropp et al., 1997),或者在陆源碎屑颗粒间的泥晶胶结物、以及在纹层状砂岩中的高度特殊纹理化的碳酸盐胶结作用

(Gerdes and Krumbein, 1987; Chafetz and Buczynski, 1992; Gerdes et al., 1993; Chafetz, 1994; Krumbein, 1994; Kropp et al., 1997; Krumbein et al., 2003); ②早期形成的成岩白云石(Krumbein and Werner, 1983); ③碳酸盐基质之中的“漂浮状的”颗粒(Bouougri and Porada, 2002; Draganits and Noffke, 2004), 它们还曾经被认为与粒间球状细菌及其粘液的出现存在关联(Noffke et al., 2001); ④特殊的粘土矿物聚集体, 可能形成于微生物席内部的生物地球化学过程(Schieber and Riciputi, 2005); ⑤高度纹理化且整合分布的黄铁矿聚集体(Schieber, 1999; Schieber and Riciputi, 2005)。

第三、微生物席的物理破坏作用形成的特征和构造。在砂岩中, 在粘土基质缺乏的情况下, 富含水的微生物丝状体和细胞外聚合物(EPS)构成的沉积基质, 一旦干裂就会产生收缩, 收缩形成的砂裂缝、以及这种砂裂缝在抗拒水流的剥蚀作用过程之中会产生一系列微生物席特征和构造。这些构造包括: ①纺锤状砂质裂缝及其叠加组合(Bouougri and Porada, 2002; Schieber, 2004; Sarkar et al., 2005, 2006), 这些纺锤状裂缝本身将会被砂充填(如上文的图 1b 所示), 那些弯曲到圆形的、而且主要分布在在波痕谷中的裂缝形成了一种特殊的情况就是著名的“满洲藻迹”(上文的图 1a 所示), 这可能归因于在波痕谷内较厚的微生物席层(Pflüger, 1999; Gehling, 2000; Sarkar et al., 2005, 2006; Schieber et al., 2007); ②在砂岩中的层内微断层, 曾经被解释为被埋藏在反映砂质沉积之中的微生物席层的粘性行为(Pflüger, 1999; Gehling, 2000; Sarkar et al., 2005, 2006; Schieber et al., 2007); ③波痕斑(Neumann et al., 1970; Gerdes et al., 2000; Schieber, 2004; Schieber et al., 2007); ④一些特殊的旋卷物(Garlick, 1988; Schieber, 1998; Simonson and Carney, 1999; Eriksson and Simpson, 2000; Gerdes et al., 2000; Noffke et al., 2001; Schieber et al., 2007; Noffke, 2009); ⑤微生物席砂质碎片, 这是遭受过剥蚀的微生物席片段的残留物(Pflüger and Gresse, 1996; Garlick, 1988; Schieber, 1998; Bouougri and Porada, 2002; Sarkar et al., 2005, 2006; 梅冥相等, 2007a, b; 图 3 所示)。

第四、形成于生物席腐烂和成岩作用的特征。一旦微生物席开始腐烂, 腐烂产生的气体可以搅动生物席之下的沉积物以及对生物席本身产生破坏,

形成各种各样的特征和构造: ①气穹隆、缠绕状的层间纹理(Gerdes et al., 2000); ②著名的“星状迹”(“*Astropolithon*”; Pflüger, 1999; 上文的图 1d 所示); ③“肯尼亚构造”(图 1c 所示); ④“缺氧”的自生矿物如黄铁矿、绢云母和铁质白云石, 微生物席的特殊组成会造成一个特殊的地球化学边界(Bauld, 1981), 从而在微生物席之下的厌氧腐烂过程将有利于“缺氧”矿物如黄铁矿、绢云母和铁质白云石的形成, 它们代表了特殊的“生物席腐烂矿化作用”(Schieber, 1998, 2004; Schieber et al., 2007); ⑤微生物丝状体或生物席片段的“幻影”, 是指被搬运过的席片段的幻影轮廓(Pflüger and Gresse, 1996; Garlick, 1988; Schieber, 1998; Schieber and Riciputi, 2005; Schieber et al., 2007), 这些特殊物质可能保存在砂岩的胶结物之中。

2.3.2 保存在页岩中的微生物席特征

一旦遭到埋藏, 地表的泥就会产生高度的压实作用; 由于微生物席的粘结、捕获和障积过程, 在泥质底层上所形成的地表特征在岩石记录中就会被保存为更加轻微的地表起伏, 在泥岩中的微生物席特征相对较为细小而且经常被忽视, 所以在泥岩中识别微生物席特征和构造就变得更加困难(Schieber, 1986, 1999, 2004; Schieber et al., 2007)。尽管如此, 微生物席的存在改变了表面泥质物的流变学特征, 一旦进入腐烂和埋藏过程, 微生物席产生的有机质会赋予泥质物特殊的成岩作用特征; 然而, 有机生物席结构, 诸如有机表面的形态(如光滑的、皱纹的、突起的和针状的)以及在微生物席内丝状体的排列, 一旦受到腐烂和压实之后均可以完全丢失, 所以说微生物席赋予沉积物的物理和化学属性(如可剥蚀性、粘性、氧化还原条件和自生矿物特征), 必须通过小心的检测才能识别出来。

第一、形成于微生物席生长的特征。在泥质底层的页岩之中, 已经得到确定的与微生物席生长相关的特征和构造包括: ①波状起皱的纹理, 这种纹理与形成在物理沉积作用过程期间来源于悬浮作用的泥岩中形成的水平纹层存在很明显的区别(Fairchild and Herrington, 1989; O'Brien, 1990; Logan et al., 1999; Schieber, 1986, 1999, 2004; Schieber et al., 2007; Noffke, 2009); ②穹窿状建隆(Logan et al., 1999; Schieber, 1986, 1999, 2004; Schieber et al., 2007; Noffke, 2009); ③假的交错纹层(Schieber, 1986, 1998, 1999, 2004); ④杂乱定向的富集云母的组构(Schieber, 1986, 1998, 1999,

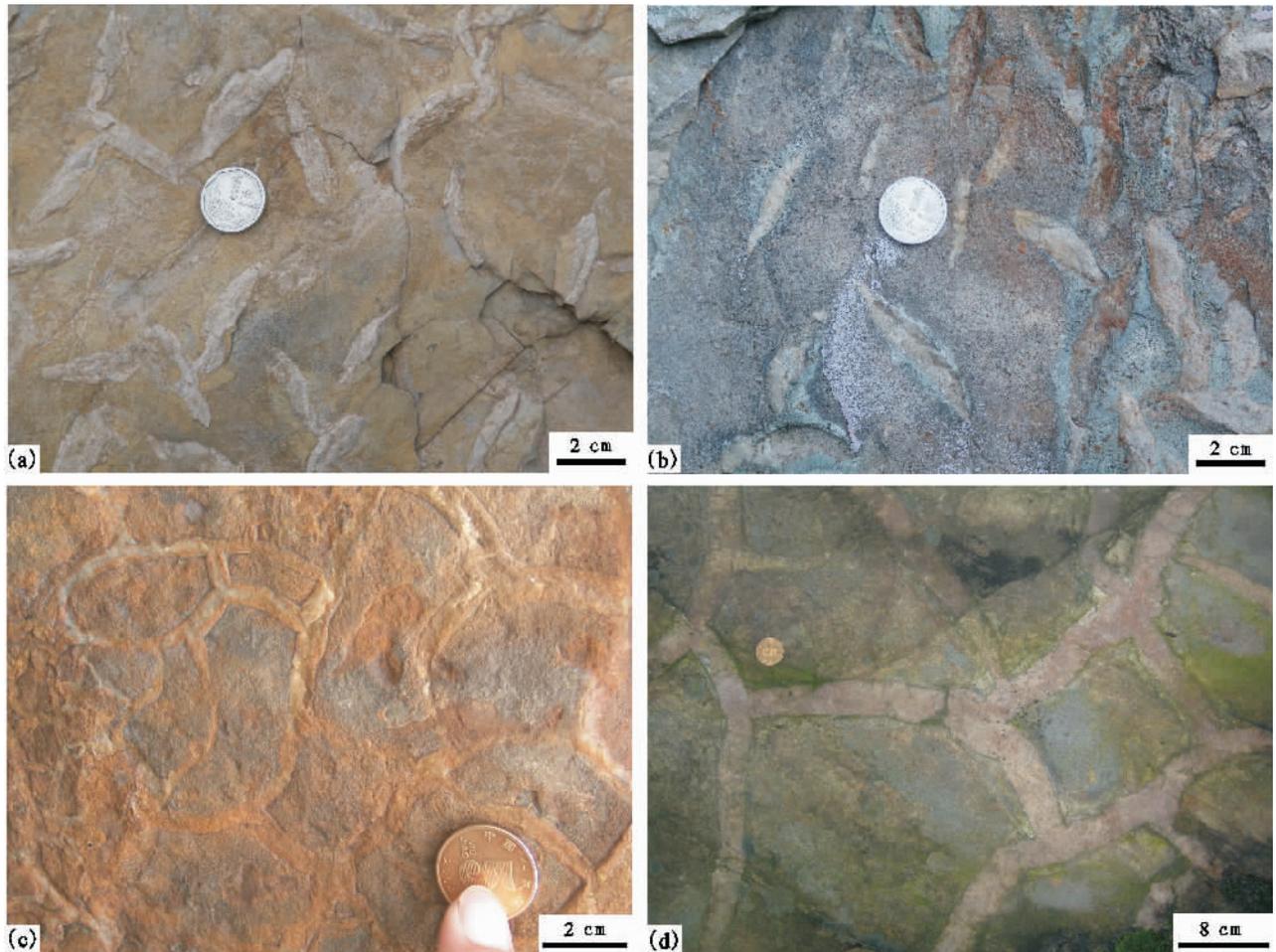


图 3 中元古界大红峪组砂岩中形态多样的微生物席砂质碎片

Fig. 3 Microbial-mat sandy chips with diversforms of the Mezoproterozoic Dahongyu Formation

(a) 双向分布的竹叶状形态,北京昌平南口虎峪剖面的大红峪组;(b) 单向分布的竹叶状形态,北京延庆千沟剖面的大红峪组;(c) 小型的多角形网状物,河北兴隆大水泉剖面的大红峪组;(d) 大型的多角形网状物,河北兴隆红石砬剖面的大红峪组

(a) edgewise chips with the distribution of dual directions, Nankou section in Huyu, Changping, Beijing; (b) edgewise chips with the mono-direction distribution, Qiangou section, in Yanqing county, Beijing; (c) small polygon reticulation made up of microbial-mat chips, Dashuiquan section, in Xinglong county, Hebei province; (d) Large polygon reticulation made up of microbial-mat chips, Hongshila section in Xinglong county, Hebei province

2004); ⑤ 特殊聚集的内碎屑砾石 (Schieber, 1986, 1999); ⑥ 相对较小的负载构造; ⑦ 可能相对较小的皱饰构造和帐篷等层面构造。

第二、与微生物席新陈代谢作用相关的特征和构造。在泥质底层之中,能够反映微生物席新陈代谢作用的特征或构造主要有:① 同生的碳酸盐沉淀物 (Schieber, 1986, 1998, 1999, 2004); ② 具有独特特征的沥青质聚集体,这些沥青质的有机质聚集体有可能是微生物席沉积之中的分泌物,对它们进行碳同位素、生物标志物和硫同位素的检测,可能表明作用在沉积作用期间的新陈代谢途径 (Brassell, 1992; Logan et al., 1999),生命标志物会有助于推

断出在活着的生物席之中哪一种细菌占优势,例如蓝细菌(需氧光合作用)、光合作用的硫细菌(厌氧光合作用)、或硫化物氧化细菌(化能自养生物) (Gallardo, 1977; Williams and Reimers, 1983; Brock et al., 1994)。

第三、微生物席的物理破坏作用产生的特征。总的来讲,形成于生物席粘结的泥质表面的剥蚀作用特征与那些微生物席粘结的砂质沉积物的剥蚀作用形成的特征可以类比。生物席粘结的泥层表现出“层内的”粘性,在受到剥蚀和搬运的时候,与“正常的”泥层相比较,将表现为不同的流变学属性(固定的面团物,较小的压缩) (Schieber, 1986; Schieber

et al., 2007), 因而在泥质底层之中会留下一些特殊的痕迹: ① 翻转的生物席边、倒转皱褶的生物席层以及大小变化很大的“上卷”构造 (Schieber, 1986, 1999; Schieber et al., 2007), 撕破的生物席以及席片段通常显示出磨损的边缘, 有时在现代生物席中被称作“吸墨水纸效应” (Gerdes et al., 1993; Gerdes, 2007); ② 被破坏的微生物席片段在特殊的泥质底层上留下的不规则印记 (Schieber, 1986, 1999; Schieber et al., 2007); ③ 较粗颗粒的束状体 (Fagerstrom, 1967; Olsen et al., 1978; Oschmann, 2000; Schieber, 1986, 1998, 1999, 2004; Schieber et al., 2007)。

第四、形成在生物席腐烂和成岩过程中的特征和构造。因为泥岩更倾向于保存有机质, 微生物席可能保存为碳质页岩层, 通过连续的微生物席生长而造成的这些层的形成, 可能意味着早期的微生物席纹层被埋藏并经历过腐烂过程, 最为特别的是这种腐烂发生在缺氧环境中而且为那些“缺氧”矿物提供了有力的沉淀作用条件, 这些缺氧矿物包括黄铁矿、绢云母和其他的铁质碳酸盐岩矿物。因此, 形成于微生物席腐烂和成岩作用的特征和构造包括: ① 粗颗粒的聚集体 (Olsen et al., 1978; Oschmann, 2000; Schieber, 1986, 1998, 1999, 2004; Schieber et al., 2007), 这个特征可以与上文所描述过的微生物席破坏特征进行类比, 从而强调了很多与微生物席相关的沉积构造的多成因属性; ② “缺氧矿物”的聚集体和富集层 (Schieber, 1986, 1998, 1999, 2004; Schieber et al., 2007); ③ 黄铁矿化的纹层, 这实际上可以与波状起皱的生物席纹层相比拟 (Berner, 1984; Strauss and Schieber, 1990; Schieber, 1986, 1998, 1999, 2002, 2004; Schieber et al., 2007); ④ 过度生长的黄铁矿以及具有胶结作用属性的原生细粒黄铁矿颗粒, 它们常常发生在早期成岩作用期间 (Strauss and Schieber, 1990; Schieber, 2002); ⑤ 增大和重结晶的碳酸盐矿物, 主要发生在同生成因碳酸盐堆积作用的层中 (Schieber, 1986, 1998, 1999, 2004; Schieber et al., 2007); ⑥ 网状的碳质纹层 (Schieber et al., 2007)。

2.3.2 复杂构造

并非在现代环境中所有观察到的与微生物席相关的构造都能够包含在 Schieber (2004) 的分类方案之中, 这部分归因于它们的描述的缺乏, 也部分归因于古代对等物的缺乏。很多构造不是简单的“事件”而是反映了微生物群落对“事件”的一系列反应, 甚

至反映了很多生命形式的综合作用而不是仅仅的一种, 而且所有这些“事件”都是向生态体系输入能量的源泉。体系的同成因反应, 可能在一种反馈之中, 能够产生中等乃至宏观的构造。这就解释了为什么许多构造在表面上如此的相似, 因而被归类为“凸起”和“帐篷”等。穿越微生物席所占据的区域, 一种成因的影响可能不是均一的, 生物的破坏和生长可能直接发生在彼此相邻的区域。

Zavarzin (2003) 论述到, 以蓝细菌占优势的生物席是一种高度灵活的生物体系, 这种生物席主导地球相当长的历史, 从古元古代早期到新元古代末期, 而且还延续到后生植物 (海草等) 和后生动物难以生存的生境之中。为了了解微生物席的时空延续性, 许多物理过程的干扰 (如裂隙作用、撕裂作用、搬运和冲刷作用等) 常常是不可预测的, 建立其“准历史”的过程就显得特别重要。微生物膜和微生物席的功能和粘性, 可以与生物组织相比较 (Krumbein et al., 2003), 而且与活着的植物或者乃至动物组织的细胞相似, 具有保护作用而免受伤害。另一方面, 还要了解为什么这些体系能够经受巨大的物理营力的破坏和改造、并且在干旱海岸的潮间到潮上坪中如此的繁盛, 这可能归因于在那些具有良好的保护作用的生物膜和生物席、在其生长发育过程中不同的新陈代谢和形态类型的协同生长 (Krumbein et al., 2003)。所以, 微生物席或微生物膜就会形成一些自我修复的形态和特征, 即与上文所述的与干裂作用和裂隙作用同时发生的生物席生长的特征。自我修复的形式、生物膜抗拒失水和紫外线照射、与生境多样性相响应的生物席的几何和结构相似性 (Zavarzin, 2003), 均不能用线性过程来加以解释。就像 Krumbein 和 Schellnhuber (1990, 1992) 所论述到的那样, 这些过程不是热动力过程, 但是遵循控制耗散或动力体系的规律。就像章雨旭 (2005) 所强调的地质过程的漫长性和复杂性一样, 这些就是形成于自组织过程的复杂构造的属性, 而且受到“复杂的分形系统物理学”的控制。

由外部营力所驱使的生物席生长响应的复杂构造, 不能简单地根据物理变形或破坏作用来加以分类, 反而表现出微生物席和微生物膜生长发育的“准历史”、以及具有活力的属性, 这就赋予了微生物席和微生物膜生长和延伸行为的非线性规律, 最终形成一些复杂构造。这些复杂构造包括 (Ericsson et al., 2007): ① 生长脊呈网状排列的微生物席生长形式, 这是在较薄的水覆盖层 (数厘米) 之下, 波痕脊

的小型地面抬升处、PS(光合作用的)穹隆或气穹隆将成为丝状蓝细菌的局部生长地点,丝状蓝细菌如 *Lynghya* sp., 会生长发育成网状排列的生长脊;②极为显眼的复杂构造,如蜥蜴皮式结构、以及破裂气泡的过度生长和稳定化的边缘等,它们可能形成一个序列式变化的过程,开始于气泡的产生、由 EPS 产生的沉积物捕获和稳定化过程、以及运用气泡界面的微生物的过度生长等;③“卷曲边缘”构造,一旦暴露,在较薄的微生物席上的小型的隆升区域就会成为加速干裂、收缩和最初破裂的地点,如果干裂的生物席还具有足够的弹性、而且在生物席底层中的水力的“向上压力”还能够足以产生地下水上升的话,干裂边缘的“卷曲”和卷绕就会发生,“卷曲的边缘”可能会发生翻转而且在微生物席表面上保存为线性的、突起状的特征,最终形成圆形次圆形的“卷曲边缘”构造。这些构造可能是微生物进一步延伸所造成的过度生长所致,而且这些“复杂构造”反映了在重复性的、具有陆上暴露和淹没周期的潮汐旋回期间的微生物生长和裂缝的增强的翻转过程。虽然这些主要来自于现代环境研究而识别出的复杂构造,还没有在岩石记录之中识别出,但是为今后的深入研究提供了重要线索并奠定了重要基础。

3 展望:从微生物席特征到微生物席沉积学

从生态学观点看,微生物席是一个地理范围特别小(只有数米的级别)的生态系统,这个生态系统包含了基本的营养组合(如原始生产者、消耗者和分解者),而且它们的种群被组织成相互之间存在影响并且与环境相互作用的特殊群落(Stolz et al., 1988; Visscher and Stolz, 2005);基于它们的新陈代谢属性(Visscher et al., 1992)以及埋藏过程之中的连锁反应(Ward et al., 1997),这些种群还进一步组合成特殊的生物基团和组合。在这个特别的生态系统中,物理和化学环境(即氧气、硫化物和光)以很陡的梯度(如氧气的聚集作用可以在几毫米的范围内从超饱和到忽略不计)为代表,从而产生变化多端的微环境,这些微环境提供了一个特殊的生境,并且产生一个表现为时空不均一性的群落结构。因此,微生物席是一个动态的生态系统,这个生态系统支撑了物种的巨大多样性,这些多样的物种在紧密近程内发生着各种各样的新陈代谢过程,这些新陈代谢过程常常产生支撑坚固的生物地球化学循环的耦合反应(如诸如元素碳、硫、氮等的氧化反应和还原反应,或者

换句话说讲,化合物的渐进式还原反应和氧化反应)。当这些过程经历了时间环境的动荡变化的时候(即昼夜和季节旋回)(Visscher et al., 1994),其最终产物可能是那些重要的终端产物如示踪气体和矿物沉淀物(Visscher and Stolz, 2005; Dupraz et al., 2009)。

微生物席所表征的生态系被广泛认为是地球最早的生态系(Tice and Lowe, 2004, 2006)而且在地球上已经出现了 30 亿年(Hofmann et al., 1999; Schopf, 2006)。自始自终,微生物席通过蓝细菌活动、固氮作用而消失在空间中(Hoehler et al., 2001),并且以其特别的含氧光合作用过程来影响地球大气圈和水圈的演化(Kasting, 1991; Jørgensen, 2001; Kasting and Howard, 2006),从而改变其氧化还原条件(Des Marais, 2000; Farmer, 2000)。

尽管在碎屑岩中直接识别造席生物几乎已经不可能,有幸的是,相关的沉积物层理、颗粒的聚合作用过程以及化学影响,会产生一些具有代表性的而且具有良好保存潜力的构造。微生物丝状体和细胞外聚合物(EPS)会改变原始松散的(砂)、或几乎不具有粘性的(含水的泥)沉积物的应力响应形式,这些形式大致可以总结为:①一旦沉积面上繁殖微生物席,有机碎屑颗粒和非粘性的砂就会以不同的形式与物理营力相响应;②增加的粘性和 EPS 的浸入会使它们表现为更像一层泥,一旦干化就会形成干化裂缝,由于顶和底的不同的收缩程度而造成卷曲,并且一旦遭到剥蚀作用就会形成砾状的扁平物和旋卷的碎片;③微生物所繁殖的泥的表面会表现出一系列的特征,这些特征与粘土和粉砂的含水混合物所表现出的行为是不一样的;④除了形成于与微生物席特殊的粘性相关的沉积特征,微生物席所稳定的泥的表面还以那些表示出微生物席生长的纹层结构为特征,而且与那些反映生物席之下的有机质腐烂的自生矿物相关联;⑤很多微生物粘结的泥层表现出波状和波状起皱的纹理,由于有机质腐烂颜色变得较暗,而且还显示出特殊的富集黄铁矿的纹层。就像上文所介绍的 Noffke 等(2001)以及 Noffke(2009)关于 MISS 构造的分类体系的论述一样, Schieber(2004)以及 Schieber 等(2007)对这些不定型和定型的、以及意外行为的微生物席特征的精彩论述,成为我们在陆源碎屑岩之中识别微生物席特征的普遍指导,同时也意味着碎屑岩微生物席沉积学的诞生迈出了艰难的一步,而且所面临的下列几个方面的问题将赋予这个年轻学科分支巨大的

挑战性和强大的生命力。

(1) 已经描述和识别的微生物席在岩石记录中所留下的特征还没有完全彻底而作为一个清单(Gerdes et al., 2000; Schieber, 1998, 1999, 2004; Noffke et al., 2001; Schieber et al., 2007; Noffke, 2009), 就像把“微生物砂质碎片(Microbial sand chips)”作为一种内碎屑而且认为是一种“非现实主义沉积构造”(Pflüger and Gresse, 1996; Pflüger, 1999), 运用现代环境中的“复杂构造”(Ericsson et al., 2007)的观察和描述去挖掘岩石记录, 就充分表现出“要准备并有勇气去发展同现今不同的非现实主义模式”(Reading, 1996)。

(2) 对于微生物席所表征的微生物生态系来说, 因为微生物新陈代谢作用和其他的物理化学属性之间的协同作用在地球历史中起到了关键作用, 这就需要在不同种群之间、或者在其内存在一个化学交换(Decho et al., 2009); 但是, 所有这些过程都需要具有一个相当详细的了解, 而现在我们只是触及到冰山的一角, 再加上地质作用的漫长性, 最大的挑战是将现代所观察到的过程和产物穿越成岩作用过滤器应用到化石记录中的解释之中, 因此, 剖析碎屑岩中的微生物诱发的沉积构造所蕴含的地球大气圈、水圈和生物圈演变的意义, 将是一个重要的主题(Decho et al., 2009)。

(3) 对地震事件造成的微生物席的破坏所产生的特殊的微生物席构造的研究(Donaldson and Chiarenzelli, 2007)表明, 微生物席从其生长和新陈代谢过程、到腐烂和埋藏石化过程, 均连续地与其其他的物理和化学(在显生宙甚至还包括生物作用)营力相互作用, 地震事件不但会破坏微生物席而且也会诱发相关构造的形成(Pratt, 1998; 乔秀夫和高林志, 2007), 所以说, 各种复杂的地质作用对碎屑岩中的微生物席特征的影响, 在解释和发掘新类型的构造时应该得到应有的重视和注意。

(4) Bernhard等(2000)的研究表明, 硫化物氧化细菌的生物席, 例如 *Beggiatoa*, 在低氧背景之中覆盖在海底, 加利福利亚海岸的之外的 Santa Barbara 盆地就是一个典型的现代实例, 是一个非光合作用生物席群落的典型实例。也就是说, 除了碎屑岩和碳酸盐岩中的微生物席的研究以外, 微生物席沉积学还面临着一个宽广的内容。

(5) 在漫长的前寒武纪, 即一个消耗微生物席的后生动物缺乏的时期, 微生物席可以在所有的环境中繁盛(Schieber, 2004; Sarkar et al., 2005,

2006; Eriksson et al., 2005; Schieber et al., 2007)。再者, 陆相(即非海相)微生物席体系已经被证明可以追索到 18 亿年(Eriksson et al., 2000; Prave, 2002)。所以说, 对于前寒武纪沉积学来讲, 微生物席特征的研究, 始终是一个永恒的主题。

(6) 随着后生动物觅食者在寒武纪的出现, 微生物席被局限到极端环境条件, 这种极端条件排除或严格限制后生动物的到达或接近。前寒武纪席底生境的消减(Seilacher and Pflüger, 1994; Pflüger, 1999; Seilacher, 1999; Pruss et al., 2004; Mata and Bottjer, 2009)可能造成了很多埃迪卡拉纪生物的死亡, 而且这些埃迪卡拉生物再也不能轻易使其本身停靠在浅海底层之中(Seilacher, 2008; Callow and Brasier, 2009)。微生物席及其相关的特征总是在生物大灭绝事件之后的荒凉海底环境之中繁盛(Schieber, 2004; Pruss et al., 2004; Schieber et al., 2007; Mata and Bottjer, 2009), 所以微生物席特征的研究对重建显生宙荒凉海底的古环境具有重要意义。

(7) 由于缺乏早期胶结物, 压实作用、分解作用和其他生物造成的消耗作用总体上会在硅质碎屑沉积(和其他的沉积)中消除微生物席产生的有机质; 但是, 在一个生物席覆盖层之下的缺氧条件和较低的沉积物渗透性, 将会促使滨外页岩成为富集有机碳生物席纹层的较好宿主岩石(Schieber, 2004; Banerjee and Jeevankumar, 2005; Banerjee et al., 2006; Schieber et al., 2007), 这为重新认识和评价烃源岩提供了一个较为重要的线索。

(8) 微生物诱发的沉积构造(MISS构造(Noffke et al., 2001; Noffke, 2009)或碎屑岩中的微生物席特征(Schieber, 2004; Schieber et al., 2007), 似乎主要针对碎屑岩而言, 实际上在前寒武纪非叠层石碳酸盐岩沉积序列之中也发育类似的特征和构造, 以我国燕山地区的中元古界高于庄组第三段最为典型(Mei, 2007, 2008; 梅冥相等, 2009), 就像 Bernhard等(2000)研究的硫化物氧化细菌的生物席一样, 这种现象多蕴含的待于进一步研究的沉积学意义是: 如果将发育 MISS 构造的宿主岩石(隐晶质泥晶灰岩)解释为异养细菌的新陈代谢产物(Castanier et al., 1999)而作为自生泥晶工厂的产物(Schlager, 2003; Pomar and Hallock, 2008), 就可能存在造席的微生物群落(形成 MISS 的微生物群落)与非造席的异养细菌群落共存的现象。

(9) 应该强调的是, 随着“蓝绿藻”最终被修订

为“蓝细菌”、“藻席”被修订为“微生物席”(Krumbein, 1979; Rippka et al., 1979; Brock, 1994),多年来将“藻”简单地代指“微生物”而产生的不规范术语,如“藻灰结核”、“藻屑”、“藻鲕”、“藻叠层石”等等,应该随着上述概念的修正和转变而予以抛弃,因为“地质学专业术语是地质学定义明确的专业用语,它反映了地质学基本特征及其释义”(杨建超等,2007)。而清晰的定义,可以避免不必要的争论(章雨旭,2005)。

4 结语

当把蓝绿藻最终修订为蓝细菌,多年来习称的“藻席”就自然被修订为“微生物席”,概念的修正和转变不但意味着科学家们对微生物活动历史的更加关注,而且意味着科学的重要进步。随着对现代环境的深入研究,在上世纪90年代中晚期就促使沉积学家在古老的岩石记录之中寻找和挖掘类似于碳酸盐岩中的“叠层石”之类的特征和构造,伴随着新概念如席底与席底构造、微生物诱发的沉积构造(MISS构造)的出现,沉积学家们对碎屑岩中的那些不定型和定型的、以及意外行为的微生物席特征已经取得了较为系统的认识,并对其成因类型进行了系统研究而建立了至关重要的分类体系。尽管这些分类体系所囊括的特征和构造还没有完全彻底,但是,艰难而重要的第一步意味着在地球生物学框架内的碎屑岩微生物席沉积学的诞生,这个年轻的学科分支就像层序地层学对地层序列的分析带来了若干新概念而翻新了沉积学的概念体系一样,微生物席沉积学在新世纪为沉积学带来了若干新概念、和新的思考与研究途径,从而成为沉积学最晚一次概念革命的一个年轻的沉积学分支。

致谢:吕洪波教授对本文的仔细审阅并提出了许多宝贵的修改意见,在成文过程之中也承蒙章雨旭研究员的大力帮助,在此一并致以衷心感谢!

参 考 文 献 / References

高建华,蔡克勤,杨式溥,李亚文. 1993. 蓟县长城系中发现最古老的遗迹化石. 科学通报, 38(20): 1891~1895.

胡健民,孟庆任. 1991. 豫西长城系遗迹化石及其意义. 地质论评, 37(5): 437~444.

刘鹏举. 2003. 燕山地区中元古代常州沟组洞穴化石. 地质论评, 49(5): 522~524.

梅冥相,高金汉,孟庆芬. 2006. 从席底构造到第五类原生沉积构造:沉积学中较为重要的概念. 现代地质, 20(3): 413~422.

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屑片:以北京南口虎峪剖面大红峪组为例. 地学前缘, 14(2): 197

~204.

梅冥相,高金汉,孟庆芬. 2009. 中元古界非叠层石灰岩中的 MISS: 以北京延庆千沟剖面高于庄组第三段为例. 地学前缘, 16(5): 207~216.

乔秀夫,高林志. 2007. 燕辽裂隙槽中元古代古地震与古地理. 古地理学报, 9(4): 337~352.

史晓颖,王新强,蒋干清,刘典波,高林志. 2008. 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示. 地质论评, 54(5): 577~586.

孙枢. 2005. 中国沉积学的今后发展:若干建议与思考. 地学前缘, 12(2): 3~10.

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): 205~209.

杨式溥,张建平,杨美芳. 2004. 中国遗迹化石. 北京:科学出版社, 1~353.

章雨旭. 2005. 地质学研究中常见逻辑方面的问题分析. 高校地质学报, 12(1): 147~152.

郑元,吕洪波,章雨旭,王敏,孙闯. 2009. 山西黎城中元古代砂岩层面多种痕迹特征及成因初析. 地质论评, 55(1): 1~6.

杨建超,章雨旭,黄泽光. 2007. 地质学某些术语用词辨析. 中国科技术语, (3): 35~38.

Allen J R L. 1967. A beach structure due to wind-driven foam. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 691~692.

Allen J R L. 1985. Wrinkle marks: an intertidal sedimentary structure due to aseismic soft-sediment loading. *Sedimentary Geology*, 41: 75~95.

Banerjee S, Dutta S, Paikaray S, Mann U. 2006. Stratigraphy, sedimentology and bulk organic geochemistry of black shales from the Proterozoic Vindhyan Supergroup (central India). *Journal of Earth System Sciences*, 115: 37~48.

Banerjee S, Jeevankumar S. 2005. Microbially originated wrinkle structures on sandstone and their stratigraphic context: Palaeoproterozoic Koldaha Shale, central India. *Sedimentary Geology*, 176: 211~224.

Banerjee S, Jeevankumar S. 2005. Microbially originated wrinkle structures on sandstones and their stratigraphic context: Paleoproterozoic Koldaha Shale, central India. *Sedimentary Geology*, 176: 211~224.

Bauld J. 1981. Geobiological role of cyanobacterial mats in sedimentary environments: production and preservation of organic matter. *BMR Journal of Australia Geology and Geophysics*, 6: 307~317.

Berner R A. 1984. Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 605~615.

Bernhard J M, Buck K R, Farmer M A, Bowser S S. 2000. The Santa Barbara basin is a symbiosis oasis. *Nature*, 403: 77~80.

Beukes N J. 1996. Sole marks and combined-flow storm event beds in the Brixton Formation of the siliciclastic Archean Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 567~576.

Bloos G. 1976. Untersuchungen über Bau und Entstehung der feinkörnigen Sandsteine des schwarzen Jura alpha (Hettangium u. tiefstes Sinemurium) im schwäbischen Sedimentationsbereich. Arbeiten des Instituts für Geologie und Paläontologie der Universität Stuttgart, 71: 270~271.

Bouougri E, Porada H. 2002. Mat-related sedimentary structures in Neoproterozoic peritidal passive margin deposits of the West African Craton (Anti-Atlas, Morocco). *Sedimentary Geology*,

- 153; 85~106.
- Brassell S C. 1992. Biomarkers in sediments, sedimentary rocks and petroleum; biological origins, geological fate and applications. In: Pratt L M, Comer J B, Brassell S C. *Geochemistry of Organic Matters in Sediments and Sedimentary Rocks*. Tulsa: SEPM Short Course, 27: 29~72.
- Brock T D, Madigan M T, Martinko J M, Parker J. 1994. *Biology of Microorganisms*. New Jersey: Prentice Hall, 1~909.
- Callow R H T, Brasier M D. 2009. Remarkable preservation of microbial mats in Neoproterozoic siliciclastic settings; Implications for Ediacaran taphonomic models. *Earth-Science Reviews*, 96: 207~219.
- Castanier S, Métayer-Levrel G L, Perthuisot J. 1999. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis — the microbiogeologist point of view. *Sedimentary Geology*, 126: 9~23.
- Chafetz H S, Buczynski C. 1992. Bacterially induced lithification of microbial mats. *Palaios*, 7: 277~293.
- Chafetz H S. 1994. Bacterially induced precipitates of calcium carbonate and lithification in microbial mats. In: Krumbein, W E, Paterson D. M, Stal L J, eds. *Biostabilization of Sediments: Bibliotheks- and Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg*. Oldenburg; (BIS)-Verlag, 149~164.
- Clifton H E. 1977. Rain-impact ripples. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47: 678~679.
- Davis R A. 1968. Algal stromatolites composed of quartz sandstone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 38: 953~955.
- Decho A W, Visscher P T, Ferry J, Kawaguchi T, He L, Przekop K M, Norman R S, Reid R P. 2009. Autoinducers extracted from microbial mats reveal a surprising diversity of N-acylhomoserine Lactones (AHL's) and abundance changes that may relate to diel pH. *Environmental Microbiology*, 11: 409~420.
- Des Marais D J. 2000. When did photosynthesis emerge on Earth-Science, 289: 1703~1705.
- Desio A. 1940. Vestigia problematiche paleozoiche della Libia. *Annali del Museo Libico di Storia Naturale*, 2: 47~92.
- Donaldson J A, Chiarenzelli J R. 2007. Disruption of mats by seismic event. In: Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, Banerjee S, Sarker S, Altermann W, Catuneanu O. *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 245~247.
- Draganits E, Noffke N. 2004. Siliciclastic, domed stromatolites from the Lower Devonian Muth Formation, NW Himalaya. *Journal of Sedimentary Research*, 74: 191~202.
- 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. *Earth-Science Reviews*, 96: 141~162.
- Dzulynski S. 1963. Directional structures in flysch. *Studia Geologicae Poloniae*, 12: 136~137.
- Eriksson K A, Simpson E L. 2000. Quantifying the oldest tidal record: The 3. 2 Ga Moodies Group, Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Geology*, 28: 831~834.
- Ericsson P G, Schieber E, Bouougri G, Gerdes H, Porada H, Banerjee S, Bose P K, Sarker S. 2007. Classification of structures left by microbial mats in their host sediments. In: Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, Banerjee S, Sarker S, Altermann W, Catuneanu O. *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 39~52.
- Eriksson P G, Catuneanu O, Sarker S, Tirsgaard H. 2005. Patterns of sedimentation in the Precambrian. *Sedimentary Geology*, 176: 17~42.
- Eriksson P G, Simpson E L, Eriksson K A, Bumby A J, Steyn G L, Sarker S. 2000. Muddy roll-up structures in siliciclastic interdune beds of the ca. 1. 8 Ga Waterberg Group, South Africa. *Palaios*, 15: 177~183.
- Fagerstrom J A. 1967. Development, flotation and transportation of mud crusts—neglected factors in sedimentology. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 73~79.
- Fairchild I J, Herrington P M. 1989. A tempestite—stromatolite—evaporate association (late Vendian, East Greenland): a shoreface—lagoon model. *Precambrian Research*, 43: 101~127.
- Farmer J D. 2000. Hydrothermal systems: doorways to early biosphere evolution. *GSA Today*, 10: 1~10.
- Gallardo V A. 1977. Large benthic microbial communities in sulfide biota under Peru—Chile subsurface counter current. *Nature*, 268: 331~332.
- Garlick W G. 1988. Algal mats, load structures, and synsedimentary sulfides in Revett Quartzites of Montana and Idaho. *Economic Geology*, 83: 1259~1278.
- Gebelein C D, Hoffman P. 1973. Algal origin of dolomite laminations in stromatolitic limestone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 43: 603~613.
- Gehling J G. 1991. The case for Ediacaran roots to the metazoan tree. *Memoirs of the Geological Society of India*, 20: 181~224.
- Gehling J G. 1999. Microbial mats in Terminal Proterozoic siliciclastics: Ediacaran death masks. *Palaios*, 14: 40~57.
- Gehling J G. 2000. Environmental interpretation and a sequence stratigraphic framework for the terminal Proterozoic Ediacara Member within the Rawnsley Quartzite, south Australia. *Precambrian Research*, 100: 65~95.
- Gerdes G, Krumbein W E. 1987. *Biolaminated Deposits: Lecture Notes in Earth Sciences-9*. Berlin: Springer-Verlag, 1~183.
- Gerdes G, Claes M, Dunajtschik-Piewak K, Riege H, Krumbein W E, Reineck H E. 1993. Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures. *Facies*, 29: 61~74.
- Gerdes G, Klenke Th, Noffke N. 2000. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments; a catalogue. *Sedimentology*, 47: 279~308.
- Gerdes G. 2007. Structures left by modern microbial mats in their host sediments. In: Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, et al. *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 5~38.
- Grotzinger J P, Knoll A H. 1999. Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks?. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 27: 313~358.
- Hagadorn J W, Bottjer D J. 1997. Wrinkle structures: microbially mediated sedimentary structures common in subtidal siliciclastic settings at the Proterozoic Phanerozoic transition. *Geology*, 25: 1047~1050.
- Hagadorn J W, Bottjer D J. 1999. Restriction of a late Neoproterozoic biotope: suspect-microbial structures and trace fossils at the Vendian Cambrian transition. *Palaios*, 14: 73~85.
- Hagadorn J W, Pfi ger F, Bottjer D J. 1999. Unexplored microbial worlds. *Palaios*, 14: 1~2.
- Häntzschel W, Reineck H E. 1968. *Fazies-Untersuchungen im*

- Hettangium von Helmstedt (Niedersachsen). Mitteilungen des Geologischen Staatsinstituts Hamburg, 37: 5~39.
- Häntzschel W. 1975. Trace fossils and problematica. In: Teichert C. Treatise on Invertebrate Paleontology, Part W, Supplement 1. Lawrence: Geological Society of America and University of Kansas Press, 269~270.
- Hoehler T M, Bebout B M, Des Marais D J N. 2001. The role of microbial mats in the production of reduced gases on the early Earth. *Nature*, 412: 324~327.
- Hofmann H J. 1971. Precambrian fossils, pseudofossils and problematica in Canada. *Bulletin of Geological Survey of Canada*, 189: 146~147.
- Hofmann H J, Grey A H, Hickman A H, Thorpe R I. 1999. Origin of 3.45 Ga coniform stromatolites in Warrawoona Group, Western Australia. *Geological Society of America Bulletin*, 111: 1256~1262.
- Hunter R E. 1969. Eolian microridges on modern beaches and a possible ancient example. *Journal of Sedimentary Petrology* 39: 1573~1578.
- Jennette D C, Pryor W A. 1993. Cyclic alteration of proximal and distal storm facies; Kope and Fairview Formations (Upper Ordovician), Ohio and Kentucky. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63: 183~203.
- Jørgensen B B. 2001. Space for hydrogen. *Nature*, 412: 286~289.
- Kasting J K. 1991. Box models for the evolution of atmospheric oxygen: an update. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 97: 125~131.
- Kasting J F, Siefert J L. 2002. Life and the evolution of Earth's atmosphere. *Science*, 296: 1066~1068.
- Kasting J K, Howard M T. 2006. Atmospheric composition and climate on the early Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B361: 1733~1742.
- Knaust D, Hauschke N. 2004. Trace fossils versus pseudofossils in Lower Triassic playa deposits, Germany. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215: 87~97.
- Kropp J, Block A, Von Bloh W, Klenke T, Schellnhuber H J. 1997. Multifractal characterization of microbially induced magnesian calcite formation in recent tidal flat sediments. *Sedimentary Geology*, 109: 37~51.
- Krumbein W E. 1979. Cyanobakterien—Bakterien oder Algen? Littman-Druck, Oldenburg; Oldenburger Symposium fiber Cyanobakterien, 1~130.
- Krumbein W E, Werner D. 1983. The microbial silica cycle. In: Krumbein W E. eds. *Microbial Geochemistry*. Oxford: Blackwell Science, 125~157.
- Krumbein W E, Schellnhuber H J. 1990. Geophysiology of carbonates as a function of bioplanets. In: Itteccot V S. *Facets of Modern Biogeochemistry*. Berlin: Springer-Verlag, 5~22.
- Krumbein W E, Schellnhuber H J. 1992. Geophysiology of mineral deposits — a model for a biological driving force of global changes through earth history. *Terra Nova*, 4: 351~362.
- Krumbein W E. 1994. The year of the slime. Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J. eds. *Biostabilization of Sediments*. Oldenburg: Bibliotheks und Informationssystem der Universität Oldenburg, 17.
- Krumbein W E, Paterson D M, Zavarzin G A. 2003. Fossil and Recent Biofilms. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1~828.
- Kummel B, Teichert C. 1970. Stratigraphy and paleontology of the Permian—Triassic boundary beds in the Salt Range and Trans-Indus ranges, West Pakistan. Kansas: University of Kansas Department of Geology, Special Publication, 4: 56~57.
- Logan G A, Calver C R, Gorjan P, Summons R E, Hayes J M, Walter M R. 1999. Terminal Proterozoic mid-shelf benthic microbial mats in the Centralian Superbasin and their environmental significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 1345~1358.
- Martinsson A. 1965. Aspects of a middle Cambrian thanatotope on land. *Geologiska Föreningens i Stockholm Föreläsningar*, 87: 181~230.
- Mata S A, Bottjer D J. 2009. The paleoenvironmental distribution of Phanerozoic wrinkle structures. *Earth-Science Reviews*, 96: 181~195.
- Mei Mingxiang. 2007. Implications of the Precambrian Non-Stromatolitic Carbonate Succession Making up the Third Member of Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation in Yanshan Area of North China. *Journal of China University of Geosciences (English edition)*, 18(3): 191~209.
- Mei Mingxiang. 2008. Sedimentary Features and Implications for the Precambrian Non-stromatolitic Carbonate Succession: A Case Study of the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation at the Qiangou Section in Yanqing County of Beijing. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 82(2): 295~309.
- Miall A D. 1999. In defense of facies classifications and models. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1): 2~5.
- Neu T R. 1994. Biofilms and microbial mats. In: Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J. eds. *Biostabilization of Sediments*. Oldenburg: Bibliotheks und Informationssystem der Universität Oldenburg, 9~15.
- Neumann A C, Gebelein C D, Scoffin T P. 1970. The composition, structure and erodability of subtidal mats, Abaco, Bahamas. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40: 274~297.
- Newman D K, Banfield J F. 2002. Geomicrobiology: How molecular-scale interactions underpin biogeochemical system. *Science*, 296: 1071~1077.
- Noffke N, Gerdes G, Klenke T, Krumbein W E. 1997. A microscopic sedimentary succession indicating the presence of microbial mats in siliciclastic tidal flats. *Sedimentary Geology*, 110: 1~6.
- Noffke N. 1998. Multidirected ripple marks rising from biological and sedimentological processes in modern lower supratidal deposits (Mellum Island, southern North Sea). *Geology*, 26: 879~882.
- Noffke N. 2000. Extensive microbial mats and their influences on the erosional and depositional dynamics of a siliciclastic cold water environment (Lower Arenigian, Montagne Noir, France). *Sedimentary Geology*, 136: 207~215.
- Noffke N, Gerdes G, Klenke T, Krumbein W E. 2001. Microbially induced sedimentary structures: A new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71: 649~656.
- Noffke N, Knoll A H, Grotzinger J P. 2002. Sedimentary controls on the formation and preservation of microbial mats in siliciclastic deposits: a case study from the Upper Neoproterozoic Nama Group, Namibia. *Palaios*, 17: 533~544.
- Noffke N, Hazen R, Nhlenke N. 2003. Earth's earliest microbial

- mats in a siliciclastic marine environment (2.9 Ga Mozaan Group, South Africa). *Geology*, 31:673~676.
- Noffke N. 2009. The criteria for the biogenicity of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Archean and younger, sandy deposits. *Earth-Science Reviews*, 96: 173 ~ 180.
- O'Brien N R. 1990. Significance of lamination in the Toarcian (Lower Jurassic) shales from Yorkshire, Great Britain. *Sedimentary Geology*, 67:25~34.
- Olsen P E, Remington C L, Corliss B, Thompson K S. 1978. Change in Late Triassic lacustrine communities. *Science*, 201: 729~733.
- Oschmann W. 2000. Microbes and black shales. In: Riding R E, Awramik S M. *Microbial Sediments*. Berlin: Springer-Verlag, 137~148.
- Parizot M, Eriksson P G, Aifa T, Sarkar S, Banerjee S, Catuneanu O, Altermann W, Bumby A J, Bordy E M, van Rooy J L, Boshoff A J. 2005. Suspected microbial mat-related crack-like sedimentary structures in the Palaeoproterozoic Magaliesberg Formation sandstones, South Africa. *Precambrian Research*, 138:274~296.
- Pettijohn F J, Potter P E. 1964. *Atlas and Glossary of Primary Sedimentary Structure*. Berlin: Springer-Verlag, 1~370.
- Pflüger R, Gresse P G. 1996. Microbial sand chips — a non-actualistic sedimentary structure. *Sedimentary Geology*, 102: 263~274.
- Pflüger F. 1999. Matground structures and redox facies. *Palaio*, 14: 25~39.
- Pickerill R K, Harris L M. 1979. A reinterpretation of *Astropolithon hindii* Dawson 1878. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49: 1029~1036.
- Pomar L, Hallock P. 2008. Carbonate factories: A conundrum in sedimentary geology. *Earth-Science Reviews*, 87: 134~169.
- Porada H, Bouougri E H. 2007. Wrinkle structures — a critical review. *Earth-Science Reviews*, 81: 199~215.
- Pratt B R. 1998. Syneresis cracks: Subaqueous shrinkage in argillaceous sediments caused by earthquake-induced dewatering. *Sedimentary Geology*, 117: 1~10.
- Prave A R. 2002. Life on land in the Proterozoic: Evidence from the Torrodonian rocks of northwest Scotland. *Geology*, 30:811~814.
- Pruss S, Fraiser M, Bottjer D J. 2004. Proliferation of Early Triassic wrinkle structures; implications for environmental stress following the end-Permian mass extinction. *Geology*, 32: 461~464.
- Reading H G. 1996. *Sedimentary environment: Processes, facies and stratigraphy*. Oxford, U K: Blackwell, 1~688.
- Reineck H E. 1956. Die Oberflächenspannung als geologischer Faktor in Sedimenten. *Senckenbergiana Lethaea*, 37:265~287.
- Reineck H E. 1969. Die Entstehung von Runzelmarken (The origin of wrinkle marks). *Natur und Museum*, 99: 386~388.
- Reineck H E, Singh I B. 1973. *Depositional Sedimentary Environments*. Berlin: Springer-Verlag, 1~439.
- Reineck H E, Singh I B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. Berlin: Springer-Verlag, 1~551.
- Reineck H E, Gerdes G, Claes M, Dunajtschik K, Riege H, Krumbain W E. 1990. Microbial modification of sedimentary surface structures. In: Heling D, Rothe P, F rstner U, Stoffers P. *Sediments and Environmental Geochemistry*. Berlin: Springer-Verlag, 254~276.
- Rippka R, Deruelles J, Waterbury J B, Herdman M, Stanier R Y. 1979. Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria. *Journal of General Microbiology*, 111: 1~61.
- Robb-III A J. 1992. Rain-impact microtopography (RIM): an experimental analogue for fossil examples from the Maroon Formation, Colorado[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 530~535.
- Rücklin H. 1953. Die Grenzsichten Buntsandstein/Muschalkalk im Saarland — ein fossiles Watt. *Jahresberichte und Mitteilungen der oberrheinischen geologischen Vereinigung, Neue Folge*, 35: 26~41.
- Sarkar S, Banerjee S, Eriksson PG, Catuneanu O. 2005. Microbial mat control on siliciclastic Precambrian sequence stratigraphic architecture; examples from India. *Sedimentary Geology*, 176: 191~205.
- Sarkar S, Banerjee S, Samanta P, Jeevankumar S. 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 Systematic Science*, 115:49~60.
- Schieber J. 1986. The possible role of benthic microbial mats during the formation of carbonaceous shales in Proterozoic basins. *Sedimentology*, 33: 521~536.
- Schieber J. 1998. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: examples from the Mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana, USA. *Sedimentary Geology*, 120:105~124.
- Schieber J. 1999. Microbial mats in terrigenous clastics: the challenge of identification in the rock records. *Palaio*, 14: 3~12.
- Schieber J. 2002. Sedimentary pyrite: A window into the microbial past. *Geology*, 30: 531~534.
- Schieber J. 2004. Microbial mats in the siliclastic rock record: A summary of diagnostic features. In: Eriksson P G, Altermann W, Nelson D R, Mueller W U, Catuneanu O. eds. *The Precambrian Earth: Times and Events*. Amsterdam: Elsevier, 663~673.
- Schieber J, Riciputi L. 2005. Pyrite and marcasite coated grains in the Ordovician Winnipeg Formation, Canada: An intertwined record of surface conditions, stratigraphic condensation, geochemical "reworking", and microbial activity. *Journal of Sedimentary Research*, 75:907~920.
- Schieber J, Bose P K, Eriksson P G, Banerjee S, Sarker S, Altermann W, Catuneanu O. 2007. *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 1~313.
- Schlager W. 2003. Benthic carbonate factories of the Phanerozoic. *International Journal of Earth Science*, 92: 445~464.
- Schopf J W. 2006. Fossil evidence of Archean life. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B* 361:869~885.
- Schwarz H U. 1975. Sedimentary structures and facies analysis of shallow marine carbonates (Lower Muschelkalk, Middle Triassic, Southwestern, Germany). *Contributions to Sedimentology*, 3: 1~100.
- Seilacher A, Hemleben C. 1966. Beitrag zur Sedimentation und

- Fossilführung des Hunsrückschiefers. Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Notizblätter, 94; 40~53.
- Seilacher A, Aigner T. 1991. Storm deposition at the bed, facies, and basin scale: The geologic perspective. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin:Springer, 249~267.
- Seilacher A, Pflüger F. 1994. From biomats to benthic agriculture; A biohistoric revolution. In: Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J. eds. *Biostabilization of Sediments*. Oldenburg: Bibliotheks und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 97~105.
- Seilacher A, Goldring R. 1996. Class Psammocorallia (Coelenterata, Vendian—Ordovician); Recognition, systematics, and distribution. *Geologiska Föreningens i Stockholm Föreläsningar*, 118:207~216.
- Seilacher A. 1999. Biomat-related lifestyles in the Precambrian. *Palaaios*, 14; 86~93.
- Seilacher A. 2008. Biomats, biofilms, and bioglime as preservational agents for arthropod trackways. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 270; 252~257.
- Simonson B M, Carney K E. 1999. Roll-up structures: evidence of in situ microbial mats in Late Archean deep shelf environments. *Palaaios*, 14; 13~24.
- Singh I B, Wunderlich F. 1978. On the terms wrinkle marks (Runzelmarken), millimetre ripples, and mini ripples. *Senckenbergiana Maritima*, 10; 75~83.
- Stolz J F, Botkin D B, Dastoor M N. 1988. The integral biosphere. In: Rambler M B, Margulis L, Fester R. *Global Ecology: Towards a Science of the Biosphere*. Boston: Academic Press, 31~50.
- Strauss H, Schieber J. 1990. A sulfur isotope study of pyrite genesis: the Mid-Proterozoic Newland Formation, Belt Supergroup, Montana. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54; 197~204.
- Tice M M, Lowe D R. 2004. Photosynthesis microbial mats in the 3.416-Myr-old ocean. *Nature*, 431; 549~552.
- Tice M M, Lowe D R. 2006. Hydrogen-based carbon fixation in the earliest known photosynthetic organisms. *Geology*, 34; 37~40.
- van Straaten L M J U. 1953. Rhythmic pattern on Dutch North Sea beaches. *Geologie en Mijnbouw*, 15; 31~43.
- Visscher P T, Prins R A, van Gernerden H. 1992. Rates of sulfate reduction and thiosulfate consumption in a marine microbial mat. *FEMS Microbiology and Ecology*, 86; 283~294.
- Visscher P T, van den Ende F P. 1994. Diel and spatial fluctuations of sulfur transformations. In: Stal L J, Caumette P. eds. *Microbial Mats. Structure, Development and Environmental Significance*. Berlin:Springer-Verlag, 353~360.
- Visscher P T, Stolz J F. 2005. Microbial mats as bioreactors: populations, processes, and products. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219; 87~100.
- Wachendörfer V, Riege H, Krumbein W E. 1994. Parahistological sediment thin sections. In: Krumbein W E, Paterson D M, Stal L J. eds. *Biostabilization of Sediments*. Oldenburg: Bibliotheks und Informationssystem der Universität Oldenburg, 257~277.
- Walter M R. 1972. Tectonically deformed sand volcanoes in a Precambrian greywacke, Northern Territory of Australia. *Journal of the Geological Society of Australia*, 18; 395~399.
- Ward D M, Santegoeds C M, Nold S C, Ramsing N B, Ferris M J, Bateson M M. 1997. Biodiversity within hot spring microbial mat communities: molecular monitoring of enrichment cultures. *Antonie van Leeuwenhoek*, 71; 143~150.
- Warren L A, Kauffman M E. 2003. Microbial geoengeers. *Science*, 299; 1027~1029.
- Williams L A, Reimers C. 1983. Role of bacterial mats in oxygen-deficient marine basins and coastal upwelling regimes: preliminary report. *Geology*, 11; 267~269.
- Woese C R. 1998. Default taxonomy; Ernst Mayr's view of the microbial world. *Proceeding of National Academy of Sciences, USA*, 95; 11034~11046.
- Zavarzin G A. 2003. Diversity of cyanobacterial mats. In: Krumbein W E, Paterson D M, Zavarzin G A. eds. *Fossil and Recent Biofilms*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 141~150.

Genetic Types and Their Classification for the Microbial Induced Sedimentary Structure within Terrigenous Clastic rocks

MEI Mingxiang

School of Earth Science and Natural Resource, China University, Beijing, 100083

Abstract: The term algal-mat that is traditionally used in long time was changed into the term microbial mat and was widely adopted, which is resulted from the conceptual transformation of the blue—green algae that should be grouped into cyanobacteria. Long-time researches and studies indicate that the microbial mat is actually a complex microbial community, and this microbial community is actually a consortium of varied kinds of symbiotic/syntrophic organisms that embrace all metabolic pathways that ever emerged on Earth. Although there are some disagreements, an important idea that carbonate stromatolites were the constructs of algae mats (microbial mats) urges sedimentologists to seek the imprint of microbial activities in terrigenous clastic rocks. The reinterpretation for some problematic trace fossils that were found in the early times results in emergence of some new concepts such as the mat ground and

the matground structure. Also, more and more observations of the microbial-mat relative features within clastic rocks led to a new recognition, i. e. the microbial induced sedimentary structure (MISS) can be grouped into a fifth category of primary sedimentary structures. On the basis of emphasizing that microbial mats influence the depositional fabric of clastic deposits across a wide range of physical, chemical and biological processes, the microbial induced sedimentary structures can further be grouped into several genetic categories that contain the microbial-mat growth, the metabolism, the disruption, the decomposing and the diagenesis types. The establishment of both the genetic type and the classification for the microbial-mat feature that are left in clastic rocks promote the development of the microbial-mat sedimentology in clastic rocks and within the framework of geobiology.

Key words: genetic type; classification; microbial induced sedimentary structure; clastic deposit