

文章编号: 1000-0550(2011)05-0857-09

从微观角度认识微生物席在中元古代的繁盛^①

——以豫西云梦山组为例

邢智峰 齐永安 郑伟 袁余洋

(河南理工大学资源环境学院 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室 河南焦作 454003)

摘要 豫西云梦山组发育了大量的微生物成因沉积构造(MISS)。在地层纵剖面上,毫米级的深色沉积物层和浅色的石英颗粒层交替出现,形成典型的微生物席纹层,代表着微生物席在沉积表面的多次生长和埋藏。深色层包含有泥质物和细砂—粉砂颗粒,被认为是先前微生物席的残留区;浅色层则是较纯净的石英颗粒,由物理沉积作用形成。进一步对纹层区的薄片观察揭示了5种明显的MISS微结构类型,分别是:波曲层(wavy crinkled laminae)、网状结构(network fabrics)、定向颗粒层(oriented grains)、细小颗粒层(mat layer bound small grains)和重矿物层(heavy minerals mat layer bound)。这些微结构代表了微生物席在沉积物表面殖居、生长、代谢以及与沉积物相互作用的一些特征,同时也指示了当时的水动力状况和古环境特征。

关键词 微生物成因沉积构造 云梦山组 微生物席 微生物席纹层 微结构

第一作者简介 邢智峰 女 1973年出生 副教授 博士研究生 地球生物学 E-mail: xingzhifeng925@126.com

中图分类号 P52 **文献标识码** A

0 引言

微生物在前寒武纪海洋中居统治地位,微生物席作为当时微生物生命活动的主要产物之一,广泛分布于海底,其存在可以回溯到前寒武纪3.4 Ga^[1]。前寒武纪微生物因缺乏钙化外壁而很少能保存为实体化石,故以往对前寒武纪微生物群落的认识主要来自碳酸盐岩地层中保存的生物沉积构造(如叠层石、核形石及凝块石),而对碎屑岩沉积条件下微生物群的发育与分布知之甚少^[2,3],只有少数科学家对硅质碎屑岩地层中的微生物标志进行过研究^[4,5]。直到20世纪末,硅质碎屑岩中的生物沉积构造被大量报道,促进了这种生物沉积作用的研究^[6-9]。这些沉积构造被地质学家命名为“席相关沉积构造”^[10]、“微生物席诱导构造”、以及“微生物成因沉积构造”(Microbially Induced Sedimentary Structures,简称MISS)^[11]等。微生物群通过生命活动及其与沉积物相互作用而形成的微生物席不仅对基底有保护(protecting)、夷平(leveling)、光滑(smoothing)和生物稳化(biostabilization)作用,而且自身的代谢活动对表层沉积物性质与古海洋海水的化学成分产生重要影响^[2,11,12],进而改变了海底环境与沉积过程,形成一种微生物非建隆构造。这种微生物群通过生命代谢、生长、破坏、

腐烂等过程在沉积物中留下的各种生物沉积构造,也可被视为一种广义的遗迹化石^[3,12],广泛分布在前寒武纪地层以及寒武纪以来后生动物缺乏的环境中。这种构造在我国元古代碎屑岩地层中有广泛分布^[3,13]。

微生物群落与沉积环境的相互作用,在宏观上表现为各种沉积构造(MISS),在微观上也具有独特的特征。这些特征有利于我们区分MISS和相似的物理成因构造。对微观结构的研究更多地借鉴了现代微生物席研究的一些成果,对比得到了古代微生物席的一些微观特征,如在微生物席区出现包被颗粒(coated grains)、定向颗粒(oriented grains)和颗粒递变(grain grading)等,是微生物席与沉积颗粒相互作用的结果;云母、黄铁矿等矿物在席层中的堆积则与微生物群落的代谢作用密切相关^[12,14,15]。Noffke总结了9种主要的微结构类型作为微生物席曾经存在的必要标识^[16]。这种在微观尺度上对微生物席的解读,能更精确地描述微生物群落与环境的相互作用,对古环境的重建具有重要意义。

豫西中元古代云梦山组也发育了大量的微生物成因沉积构造,可划分为微生物席生长构造(mat growth features)、微生物席代谢相关构造(mat metabolism features)、微生物席破坏构造(mat destruction fea-

^①国家自然科学基金项目(批准号:41072003)和河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室开放基金(编号:506076)资助。
收稿日期:2010-09-18;收修改稿日期:2010-12-10

tures) 和微生物席腐烂构造(mat decay features) 四大类^[12]。MISS 在云梦山组的大量出现,证实了当时微生物席在滨海地带的繁盛。本文拟通过对这些构造的显微结构研究及成因分析,并结合常见矿物的形成和分布,为我国元古代微生物成因沉积构造和微生物席的研究提供佐证。

1 区域地质概况和地层描述

豫西地区在构造古地理上属于华北地台南缘。在古元古代末的中条运动之后,华北板块已初具规模,构成了统一的华北古陆。进入中元古代后,沿古大陆的南部边缘又发生了大规模的裂陷运动,形成了一个三叉裂谷系。大约 1 450 Ma 以后这个三叉裂谷系便进入缓慢冷却和热收缩条件下的下沉阶段,由此形成相对稳定下降的沉积盆地,并接受了大量沉积,

形成汝阳群(豫西)碎屑岩、碳酸盐岩沉积组合^[17]。云梦山组位于汝阳群下部,为一套硅质碎屑岩沉积,广泛分布于豫西及太行山地区。

研究剖面位于焦作市云台山,厚约 105 m。云梦山组角度不整合于太古代地层之上,是基底上的第一盖层,上覆与寒武系呈平行不整合接触。该组主要为一套滨浅海陆源碎屑岩沉积,以紫红色石英砂岩为主,多为细砂岩和中砂岩,少见粗砂岩^[18]。岩石变质程度低,整体组成以石英颗粒为主,含量在 90% 以上,最多可达 96%。地层最底部是在盆地裂谷期形成的以冲积作用和河流沉积为主的快速沉积,发育紫红色、灰白色厚层状砾岩层。中下部以灰白色或紫红色石英砂岩为主,夹薄层状泥岩;岩石中铁质含量高,发育板状交错层理、羽状交错层理、潮汐复合层理等;层面常见不规则多边形及规模不等、形态各异、组合

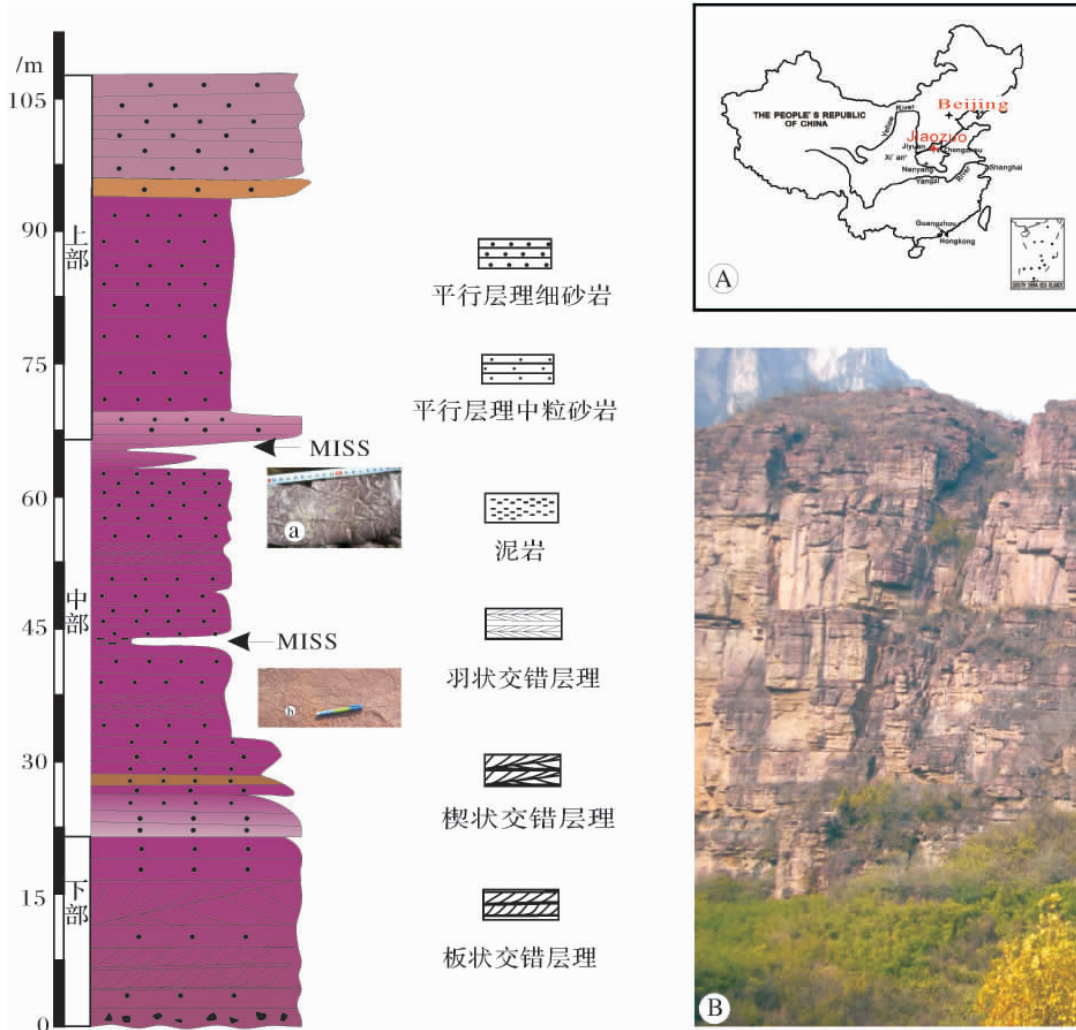


图 1 豫西中元古界云梦山组地层序列(焦作剖面)

左侧为云梦山组地层序列图; a、b 为层面分布的 MISS 举例。右侧 A 示研究的剖面位置; B 为云梦山组剖面照片

Fig. 1 Simplified stratigraphic succession from Yunmengshan Formation (Jiaozuo outcrop) of Western Henan

门类齐全的波痕,为潮坪环境下的产物。上部则为紫红色、肉红色中—粗粒石英砂岩,向上颜色变浅,岩石较纯净,发育低角度交错层理、小波痕层理等,是典型的海滩沉积。

微生物成因沉积构造(MISS)在云梦山组中下部广泛发育,是该区的主要特征,主要出现在间歇性暴露机会较多、浅水、而水动力条件又不很强的潮间带与潮上带,偶尔出现在潮下带(图1),表明活跃的微生物活动和高有机质产量。

2 微生物成因沉积构造的微观结构和成因分析

微生物席殖居和生长在沉积物表面,不仅在层面形成了特征的沉积构造(图2b),而且在纵向上形成了碎屑岩中的微生物席纹层(mat biolaminites)(图2a)。

在云梦山组纵剖面上,毫米级的深色沉积物层(暗层)和浅色的石英颗粒层(亮层)交替出现,形成典型的微生物席纹层(图2a,c)。薄层状的深色沉积物和现代潮坪保存在沉积物内部的微生物席层很相似,可能来自于微生物席中的生物群落生长、代谢以及与沉积物的相互作用^[19],相似构造也发育在南非 Moodies 群(3.2 Ga)、纳米比亚新元古代的 Nama 群,以及法国古生代的 Montagne Noire 的砂岩中^[15]。

经偏光显微镜观察,深色层除了含大量的细砂和粉砂颗粒外,还包含有绢云母、铁氧化物和似沥青质的黑色物质(图2c;图4f),被认为古代微生物席的残留区;亮层则是较纯净的石英颗粒,由物理沉积作用形成(图2c)。这种构造与碳酸盐岩中出现的叠层石非常相似,明暗层相间,分别代表着沉积颗粒层和微生物席层,但云梦山组地层未形成叠层石似的大型建隆构造。微生物席纹层构造在云台山剖面中非常常见,可能代表着微生物席在沉积表面的多次生长和多次埋藏,同时也表明了微生物席在本地区曾繁盛了很长一段时间。

经激光显微拉曼光谱仪分析,得到了深色层中存在的黑色似沥青质物质的拉曼谱图(图3),主要拉曼峰波数为 $\sim 2\,900\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 1\,640\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 1\,450\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 1\,320\text{ cm}^{-1}$,而有机质标准拉曼图谱的主要峰值为 $1\,620\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,340\text{ cm}^{-1}$,说明此黑色物质含有机质成分。进一步与有机聚合物乙基纤维素(ethylcellulose)、尼龙66(nylon66)以及聚降冰片烯(polynorbornene)进行比对,与三者的拉曼谱图有较高的相似

性,进一步说明深色区含有机成分。

云梦山组纵向上出现的微生物席薄层对应于层面上的多种沉积构造,多见于微生物席破坏和生长构造,如多边形脱水裂缝、皱饰构造等。这表明古代微生物席在潮间带上部和潮上带下部的繁盛。进一步研究还发现,云梦山组的这种深色层往往是上下沉积物的分界面,较易剖开。在剖开的层面上也见 MISS 发育,说明是微生物席的存在,使上下的沉积物易于分层。

偏光显微镜观察岩石纵剖面薄片,在深色层鉴别出5种明显的 MISS 微结构(microstructures)类型,分别是:波曲层(wavy crinkled laminae)、网状结构(network fabrics)、定向颗粒层(oriented grains)、细小颗粒层(mat layer bound small grains)、重矿物层(heavy minerals mat layer bound)。这些微结构的发现揭示了微生物席生长、代谢以及与沉积物相互作用的一些特征^[15,16]。

2.1 波曲层(图4c)

在纵切面上可见黑色的波形丝状层,在石英颗粒间蜿蜒曲折延伸很长。这可能代表了当时微生物席存在和生长状态。云梦山组波曲层的约几十微米厚,很似现代微生物席中丝状体的分布,被解释为古代蓝藻丝状体的残留区,代表古代微生物席的伸展状态。现代鲨鱼湾(Shark Bay)和阿拉伯海湾(Arabian Gulf)分布的微生物席纹层,可达几十厘米厚,出现多层的波曲层,是以蓝藻为主的微生物席被沉积物覆盖后的产物^[12]。

众所周知,细胞很难在砂岩中保存下来,其包含的生物大分子也容易在当时的环境下分解,大多生成了生物源的矿物。深色层的进一步放大可见矿物质的堆积,使丝状物呈弥散状。波曲层往往呈多层平行分布,这可能表明了微生物席生长的多期性。各层之间的石英颗粒来自于沉积物的被动堆积或微生物群落的主动获取,后者由于 EPS 存在会使多个颗粒粘结,形成包裹颗粒。

2.2 定向颗粒层(图4b)

和波曲层一样,这种结构是和微生物群落的生长密切相关的。柔软席层中包裹的颗粒会沿着最适于减少阻力和抵抗重力的方向排列,从而使分布在席层中的颗粒的长轴方向倾向于与水流方向平行,呈现定向性。这种定向性只在席层中进行,基底由于颗粒间的紧密接触不能重新排列,不会呈现此特征。在后期的沉积期和成岩期,由于地层的微变质不足以改变颗

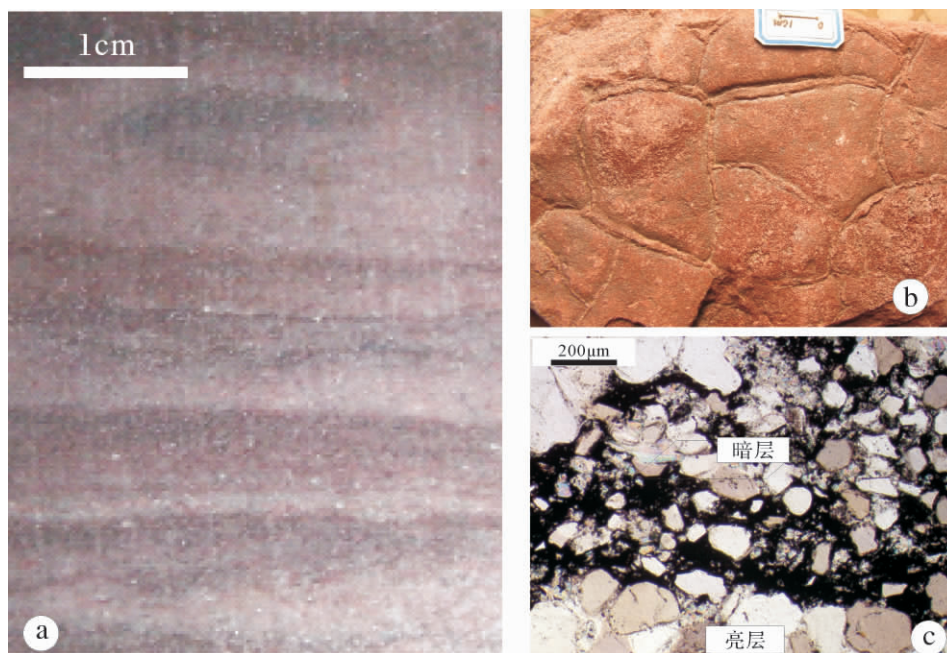


图2 层面发育的 MISS 及纵面微生物席纹层

a. 纵面分布的微生物席纹层; b. 层面发育的 MISS(多边形脱水构造); c. 微生物席纹层微观观察, 可见明显分异的明暗层。

Fig. 2 MISS on the surface and biolaminites in the vertical section

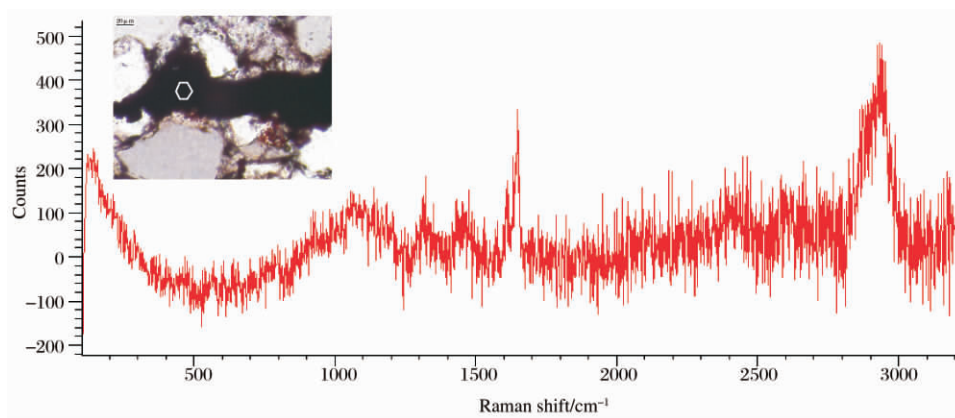


图3 纹层区黑色物质的拉曼谱图

左上图片示样品(深层中分布的黑色物质)六边形示激光聚焦区;红色线示样品 Raman 谱图。比对后,与有机聚合材料乙基纤维素(ethylcellulose)、尼龙 66(nylon66)以及聚降冰片烯(polynorbornene)的拉曼谱图有较高的相似性,说明深色区含有机成分。

Fig. 3 Raman shift of black spot from biolaminites

粒的排列情况,定向颗粒层就在砂岩中保存下来,成为微生物席曾经存在的证据。在现代微生物席的研究中,定向颗粒往往出现在 EPS 丰富的微生物席中,单个的颗粒被 EPS 包裹,可以悬浮(float)在微生物席中,颗粒的长轴定向于平行于微生物席层面,这是最适于减少重力及水流对颗粒作用力的方向^[14]。

云梦山组样品出现明显的定向颗粒层:在席层有机质降解的区域,即原来的微生物席层,可以清晰地观察到绝大多数颗粒的长轴方向倾向平行于沉积面,

形成明显的定向性,这种定向性和古代微生物席的存在有直接的关联性。

2.3 网状结构(图 4 d)

较厚的微生物席层中的丝状体缠绕着沉积物颗粒,在纵切面上会形成网状结构,成为微生物席存在的一个重要标识。这种网状结构表明当时微生物群落的丝状体生长旺盛,交接成网,沉积物颗粒经微生物的障积、粘结、缠绕、包裹等作用,在网中留存下来。颗粒的定向性也会被网中保存的沉积物完美的

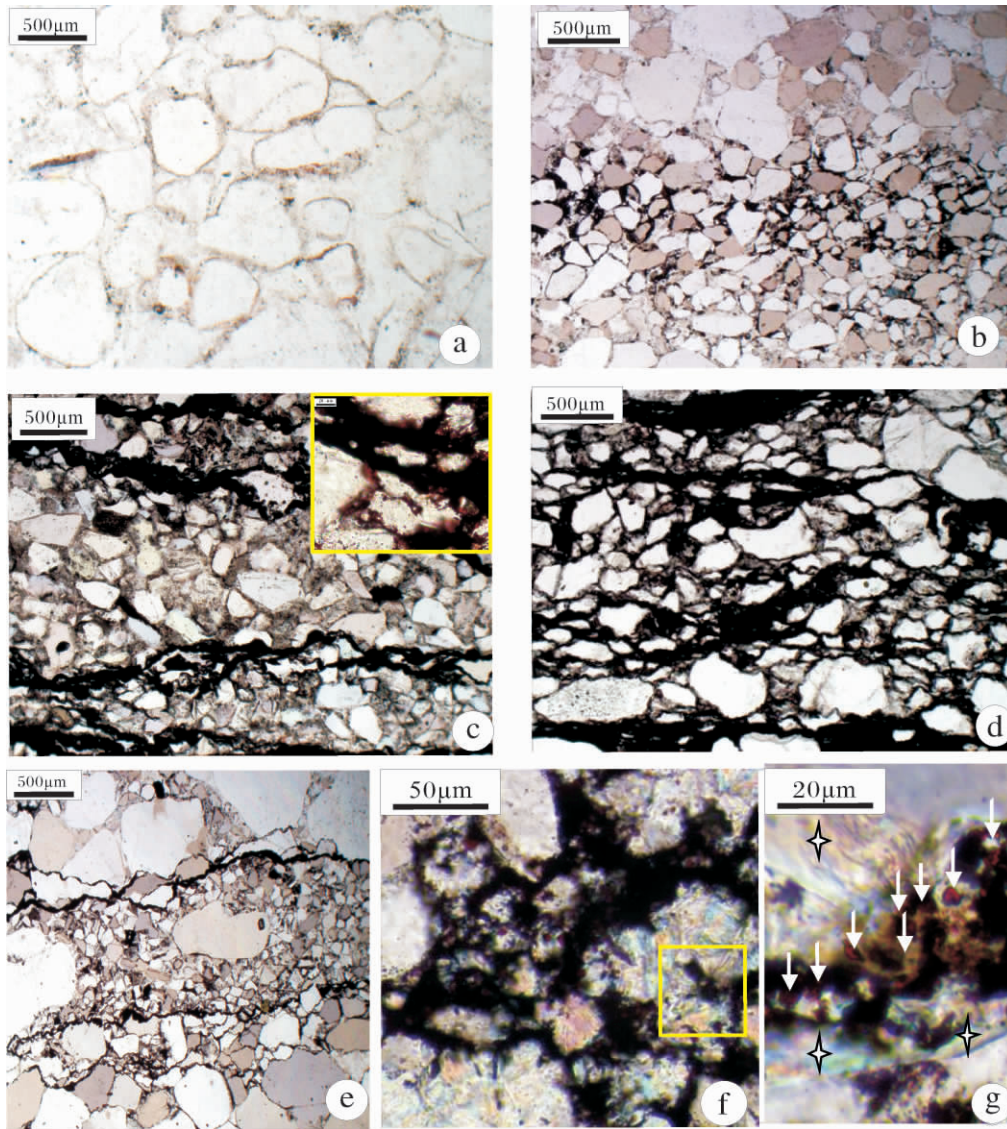


图 4 云梦山组微生物成因沉积构造的微观结构特征

a. 对照(未发育 MISS 的石英砂岩); b. 定向颗粒层; c. 波曲层, 左上侧示部分放大的弥散状丝状物; d. 网状结构; e. 细小颗粒层; f. 重矿物层; g. 为 f 部分放大, 星号示绢云母, 箭头指示氧化铁矿物。

Fig. 4 Microscopic features of MISS from Yunmengshan Formation

演示。这和现代微生物席中微生物群落对沉积物的作用是一致的^[14, 19]。云梦山组中发现的网状结构厚度可达 2 mm, 说明当时有较厚微生物席存在, 同时也表明了微生物席的生物群落可以在一定深度的沉积颗粒下正常生长。这与石英颗粒的透光性有着密切的联系。云梦山组沉积期海水对沉积物的反复淘洗等作用, 使最终形成的纯净石英砂岩透光性好, 这有利于微生物群落在沉积物表层之下一定深度内生长。

通过现代微生物席的研究发现的生长在沉积物表面和内部的典型微生物席, 是以 *Oscillatoriceae* 为优势种群, 分布于安德鲁斯岛(Andors Island)的潮上

带的蓝藻席, 发育 mm 级厚度的微生物席层^[20]。这种现代微生物席的分布环境对云梦山组的精细环境解释将具有指导意义。

2.4 细小颗粒层(图 4 e)

样品在纵切面上也显示出规律的粒度变化(grading): 微生物席残留层以细砂和粉砂颗粒为主, 夹少量中粒石英颗粒; 基质层则多为中粒或少量的粗粒石英颗粒。这种分异成层性明显, 会出现细粒和中粒或粗粒层交互出现。对照组(未出现 MISS 的石英砂岩)(图 4 a)颗粒均匀、纯净, 多为中砂。有机质残留层为远古的微生物席定居层, 微生物席中的

丝状菌竖立的细丝截留悬浮层中细小颗粒形成细小颗粒层。另外,在洪水期的末期,细小的颗粒会因微生物席的存在而沉积下来,并夹带含泥物质的沉积,因此,细小颗粒层的存在可能与风暴沉积存在一定联系,指示此时的微生物席发育在潮上带^[15,16]。

云梦山组出现的细小颗粒层,颗粒小至粉砂级,分选好,并和基质层的粗粒物质呈现明显的分异,表现为较弱水动力下的沉积,可能来自于一次潮汐作用的末期。而基质和上覆层所显示的粗粒物被认为是强烈的水动力作用造成的,这种水动力已经不适于微生物席的生长。这种粒序的递变给我们演示了当时的环境变化,以及微生物席在不同水动力条件下的生长状况。这些细粒沉积物中的石英颗粒,由于其稳定和成熟,留存至今,形成细小颗粒层,沉积在微生物席层而成为微生物席曾经存在的标识。当时沉积下来的粘土物质会形成云母类矿物,在席层区聚集。在切片上明显观察到绢云母(sericite)密集分布在石英颗粒间。从现代微生物席的研究来看,粘土矿物作为绢云母形成的母质,其来源有三种可能:首先,微生物群落可以促进铁铝硅酸盐类沉淀在微生物细胞表面,经过微生物的生物地球化学过程形成自生粘土类矿物^[21];其次,微生物裂解生成粘土类矿物;最后,可以通过微生物席层中丝体的粘结、捕捉等作用从水流中获得。可见,席层中出现的绢云母的堆积可能与当时的微生物群落有密切的联系(图5)^[10,12,22]。大多数样品的席层残留区都见绢云母的堆积,有些样品中出现特征的绢云母带,这代表了微生物席矿物沉积的一个重要特征。

从以上沉积物的粒度分异可以看出,元古代微生物席在滨海定居的最适宜地带为中等或弱水动力条件下的潮间带或潮上带。这也是适合现代微生物席生长发育的最佳区域^[23]。这种相似性可能预示着现

代微生物席在群落组成、生长方式、形成的沉积构造类型以及环境意义等方面,对古代微生物席的研究都具有指导意义。

2.5 重矿物层(图4 f g)

岩石中分布的重矿物以 Fe^{3+} 矿物为主,这也是岩石呈紫红色的原因。光镜下的观察可见红色透明的氧化铁矿物颗粒聚集在有机质残留层,围岩只在石英颗粒间见零星分布。云梦山组的 Fe^{3+} 矿物的大量出现,应来自于 Fe^{2+} 矿物的氧化。现代微生物席的研究表明,微生物席的生物群落通过吸附、络合以及促进沉淀等方式,可以使铁矿物在席层产出或聚集^[24]。

根据现代对 Fe^{2+} 氧化的研究,在pH值中到酸性的情况下, Fe^{2+} 的氧化如果没有微生物的参与是很缓慢的,微生物起了一个催化剂的作用^[25,26]。在中元古代酸化的海洋里,从地层的氧化速率和程度来看,微生物席的存在对云梦山组 Fe^{2+} 的氧化起到了促进作用。一方面微生物的光合作用释放大量氧气,改变局部微环境,直接参与元素的氧化还原过程,并促进金属元素的迁移和富集;另一方面,微生物细胞具有较大的比表面积和丰富的表面电荷以及粘性网状的细胞外基质的存在,既具有从周围环境中吸附和富集金属的能力,又可利用独特的细胞壁结构作为矿物结晶的成核位置和成核模板^[23,25,27,28],从而使微生物席层成为氧化铁矿物的富集层。可以想象,当时广阔的滨海区域被呈现红褐色的微生物席所覆盖,微生物席层聚集了大量的 Fe^{3+} 矿物。

总之,微生物席的存在对云梦山组的矿物沉积起了重要作用。微生物群落可以促进不稳定物质的分解,形成厚层状纯净石英砂岩;氧化铁和绢云母也由于微生物群落的作用在席层大量堆积,形成的特征矿物层,成为古代微生物席存在的间接证据(图5)。

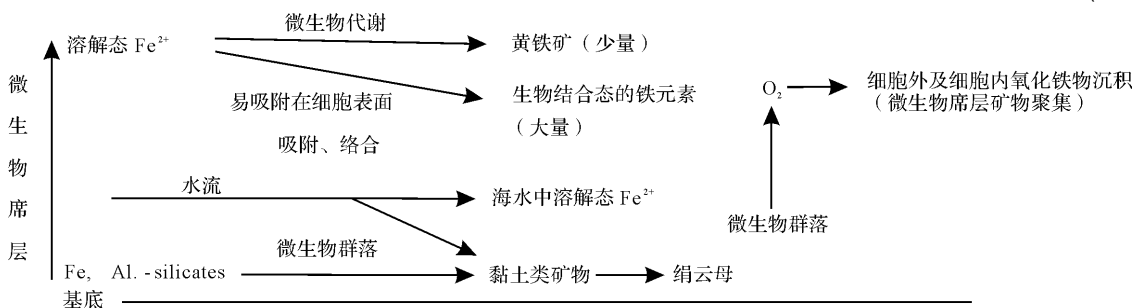


图5 云梦山组矿物沉积示意图

Fig. 5 Minerals precipitation patterns in Yunmengshan Formation

3 讨论及结论

豫西中元古代云梦山组碎屑岩中的微生物席纹层,以毫米级的深色层包裹着细砂或粉砂石英颗粒和明亮的中砂岩层交替出现为特征。深色层被认为是先前微生物席的残留,有机质含量高;明亮层则主要是石英颗粒。这种结构代表着一定的古环境特征: i) 微生物席定居在中等到弱水动力的潮间带或潮上带环境,具有稳定的基底,再作用力弱; ii) 沉积物供应不很充足,微生物席能在沉积物表面大量生长,席层多沉积细砂—粉砂颗粒。

微生物群落通过粘结、障积、捆绑等活动对沉积物颗粒进行作用,使其和基底区分开来,形成特征的微生物席层构造。细胞外基质和微生物代谢产生各种物质,形成了适合一些矿物沉积的微环境,促进了细胞内和细胞外的矿物沉积。经岩石纵切面的薄片观察,我们在微生物席纹层区发现了5种明显的MISS微结构类型,分别是:波曲层(wavy crinkled laminae)、网状结构(network fabrics)、定向颗粒层(oriented grains)、细小颗粒层(mat layer bound small grains)、重矿物层(heavy minerals mat layer bound)。席层微生物对颗粒的包裹、缠绕、粘结和障积等作用,形成了定向颗粒层、细小颗粒层和网状结构等微结构类型。在微生物席中,由于微生物的吸附作用使元素浓度增加,一些矿物(如铁铝硅酸盐等)容易过饱和析出;微生物在生长和新陈代谢过程中也能促进一些矿物质沉淀下来;再加上微生物席对矿物颗粒的捕获作用,在微生物席层中往往出现矿物堆积,形成特征矿物层,如云梦山组地层中氧化铁矿物在微生物席残留层的堆积以及绢云母带的出现等,微生物群落都起着重要的作用。

微生物席中微生物群落的光合作用不仅增加了大气的氧含量,而且也对远古海洋的氧含量的增加起了重要作用,光合微生物应该是当时微生物席的优势种群之一。微生物群落的代谢作用以及与沉积物的相互作用,促进了沉积物的增加和氧化铁矿物的形成;微生物群落光合作用释放的氧气,增加了海洋和大气中的氧含量,促进了大气圈的演化,为新元古代后生动物的出现奠定基础。

参考文献(References)

1 Tice M M, Lowe D R. Photosynthetic microbial mats in the 3.416-Myr-old ocean[J]. *Nature*, 2004, 431: 549-552

2 Riding R. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic-Cambrian changes in atmospheric composition[J]. *Geobiology*, 2006, 4: 299-316

3 史晓颖,王新强,蒋干清,等. 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识[J]. *地质论评*, 2008, 54(4): 575-586 [Shi Xiaoying, Wang Xinqiang, Jiang Ganqing, et al. 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*, 2008, 54(4): 575-586]

4 Schieber J. The possible role of benthic microbial mats during the formation of carbonaceous shales in shallow mid-Proterozoic basins[J]. *Sedimentology*, 1986, 33: 521-536

5 Gerdes G, Claes M, Dunajtschik-piewak K, et al. Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures[J]. *Facies*, 1993, 29: 61-74

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

7 Schieber J. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: examples from the Mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana, U. S. A. [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 120: 105-124

8 Noffke N, Gerdes G, Klenke T, et al. Biofilm impact on sedimentary structures in siliciclastic tidal flats[J]. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 1997, 201: 297-305

9 Noffke N. Erosional remnants and pockets evolving from biotic-physical interactions in recent lower supratidal environment[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 123: 175-181

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

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

12 Schieber J, Banerjee S, Bose P K, et al. Atlas of microbial mat features preserved in the siliciclastic rock record[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007: 1-276

13 梅冥相,孟庆芬,高金汉. 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]. *地学前缘*, 2007, 14(2): 197-204 [Mei Mingxiang, Meng Qingfen, Gao Jinhan. 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*, 2007, 14(2): 197-204]

14 Noffke N, Gerdes G, Klenke T, et al. A microscopic sedimentary succession of graded sand and microbial mats in modern siliciclastic tidal flats[J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 110: 1-6

15 Bouougria E, Porada H. Siliciclastic biolaminites indicative of widespread microbial mats in the Neoproterozoic Nama Group of Namibia

- [J]. *Journal of African Earth Sciences* ,2007 ,48 : 38-48
- 16 Noffke N. The criteria for biogenicity of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Archean sandy deposits [J]. *Earth-Science Reviews* ,2009 ,96: 173-180
- 17 左景勋. 豫西汝阳中上元古界层序地层划分及其岩石地层格架 [J]. *河南地质* ,1997 ,15(1) : 29-35 [Zuo Jingxun. The classification of sequence stratigraphy of the middle of upper proterozoic erathem and its lithostratigraphy of Ruyang Area in the west of Henan Province [J]. *Henan Geology* ,1997 ,5(1) : 29-35]
- 18 王兴民,王佩钰,朱玉莲,等. 浅议云台山世界地质公园地质遗迹现状及保护对策 [J]. *地质与资源* ,2007 ,16(2) : 150-154 [Wang Xingmin , Wang Peiyu , Zhu Yulian , *et al.* Present situation and protection of the geologic relics in Yuntaishan Geopark , Henan Province [J]. *Geology and Resources* ,2007 ,16(2) : 150-154]
- 19 Gerdes G , Klenke Th , Noffke N. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue [J]. *Sedimentology* ,2000 ,47: 279-308
- 20 Bridge J S , Demicco V. *Earth Surface Process , Landform and Sedimentary Deposits* [M]. New York: Cambridge University Press , 2008: 342-344
- 21 Konhauser K O , Urrutia M M. Bacterial clay authigenesis: a common biogeochemical process [J]. *Chemical Geology* ,1999 ,161: 399-413
- 22 Draganits E , Noffke N. Siliciclastic stromatolites and other microbially induced sedimentary structures in an early Devonian barrier-island environment (Muth Formation , NW Himalayas) [J]. *Journal of Sedimentary Research* ,2004 ,74: 191-202
- 23 Noffke N , Gerdes G , Klenke T , *et al.* Microbially induced sedimentary structures indicating climatological , hydrological and depositional conditions within recent and Pleistocene coastal facies zones (southern Tunisia) [J]. 2001 , *Facies* ,44: 23-30
- 24 吴自军,贾楠,袁林喜,等. 浙江舟山海岸带古木埋藏区铁的微生物成矿作用 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报* ,2008 ,33(4) : 465-473 [Wu Zijun , Jia Nan , Yuan Linxi , *et al.* Iron biomineralization and biometallogenesis in the ancient-wood buried zone from coast of Zhoushan Island , Zhejiang Province [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* ,2008 ,33(4) : 465-473]
- 25 Fortin T D , Langley S. Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals [J]. *Earth-Science Reviews* ,2005 ,72: 1-19
- 26 Gillan D C , Ridder C D. Accumulation of a ferric mineral in the biofilm of *Montacuta ferruginosa* (Mollusca , Bivalvia) – biomineralization , bioaccumulation , and inference of paleoenvironments [J]. *Chemical Geology* ,2001 ,177: 371-379
- 27 Trouwborst R E , Johnston A , Koch G , *et al.* Biogeochemistry of Fe (II) oxidation in a photosynthetic microbial mat: implications for Precambrian Fe(II) oxidation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 2007 ,71: 4629-4643
- 28 James R E , Ferris F G. Evidence for microbial-mediated iron oxidation at a neutrophilic groundwater spring [J]. *Chemical Geology* , 2004 ,212 : 301-311

Microscopic Characteristics of Extensive Microbial Mats in Mesoproterozoic Era: An example from the Yunmengshan Formation , Western Henan

XING Zhi-feng QI Yong-an ZHENG Wei YUAN Yu-yang

(Institute of Resources and Environment , Key Laboratory of Biogenic Traces and Sedimentary Minerals of Henan Province , Henan Polytechnic University , Jiaozuo , Henan 454003)

Abstract The Precambrian biosphere includes almost exclusively microbiota. Activities of benthic prokaryotes in response to the sedimentary dynamics could form the characteristic structures known as " Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS) " , arising syndepositionally from the interactions of biofilms and microbial mats with the sedimentary grains due to the variations in hydraulic parameters in siliciclastic aquatic environments. Yunmengshan Formation , belonging to Mesoproterozoic Ruyang Group , lies in the south margin of the North China Platform and consists mainly of siliciclastic sedimentary successions. MISS occur on the surface of purple or yellow sandstone interbedded with mudstone or siltstone , especially on junction surface between sandstone and mud lamination. They displayed a plenty of morphologies and were preserved in accompanying with ripple markers as usual. The well-preserved structures include mat growth features , mat metabolism features , mat destruction features and mat decay features. In vertical section , the typical stacked mm-level siliciclastic biolaminites consisting of alternations of dark silty mudstones and light quartz sandstone represent repeated growth and burial of mats during repeated depositional events. The dark layers also included Fe-oxides , sericite and dark asphaltene-like minerals which included $1\ 620\ \text{cm}^{-1}$ and $1\ 340\ \text{cm}^{-1}$

organic Raman shift and displayed high dimensional similarities with ethylcellulose , nylon66 and polynorbornene. The dark layers which have been found modern analogues in tidal flat and formed by the mat growth , mat metabolism and the interactions of biofilms and microbial mats with the sediments are considered to represent the remains of ancient microbial mats , whereas the light layers consist of physical process induced quartz grains. The participation of microbial mats in the accretion of the siliciclastic biolaminites is indicated by various MISS , especially mat growth and destruction structures. In the further investigation of thin-sections , five types of microstructures have been found: wavy crinkled laminae , network fabrics , mat layer bound small grains , mat layer bound heavy minerals and oriented grains. Wavy crinkled laminae represent the presence of ancient biofilms or microbial mats , and caused by mat growth; oriented grains , mat layer bound small grains and network fabrics related to baffling , trapping and binding of biofilms and microbial mats; The presence of biofilms and microbial mats in the ancient environment promoted the productions of Fe-oxides and sericite and lined the mat layers. These microscopic units testify the presence of thick mat in moderate to low hydrodynamic disturbance and reflect the unique characters of sediments which were occupied , stabilized and fixed by microbial mats. Microstructures can mainly be preserved in the favorable ecological sites where microbial mats colonized , such as upper intertidal and lower supratidal zones. Microstructures could be used to reconstruct small-scaled facies within coastal environments , and include hints to paleoclimatological , hydrological and sedimentological conditions.

Key words Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS) ; Yunmengshan Formation; microbial mat; mat biolaminite; microstructure

欢迎订阅《沉积学报》

《沉积学报》是中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会、中国地质学会沉积地质专业委员会、中国科学院兰州地质研究所共同主办的综合性学术刊物,是全国自然科学核心期刊。主要刊载沉积学、沉积矿产、地球化学以及相关分支学科、交叉学科的基础和应用基础研究的创新性研究成果和高水平论文,介绍沉积学研究的新技术、新理论及国内外最新沉积学论著,同时也报导有关学术活动、学科研究动态及学术思想的讨论和争鸣。优先发表国家、省、部级重大科技项目及基金资助的在沉积学、地球化学前沿各分支领域以及学科交叉点上有创造性的研究成果。读者对象为大专院校地学专业的师生及科研院所的地学工作者。

《沉积学报》为双月刊,16开本,每期180页,逢双月10日出版,定价50元,全年定价300元。国内外公开发行,欢迎广大读者到当地邮局订阅。

国内邮发代号:54-45

国外发行代号:Q832

同时欢迎各位专家学者踊跃投稿。

网址: www.cjxb.ac.cn

地址:兰州市东岗西路382号 中国科学院兰州地质研究所《沉积学报》编辑部

邮政编码:730000

联系电话:(0931)4960916 4960917 传真:(0931)4960916

Email: cjxb@lzb.ac.cn