

文章编号 1000-0550(2002)02-0243-06

四川盆地早古生代灰泥丘中的微生物 及其造岩和成丘作用^①

张廷山 沈昭国 兰光志 王顺玉 戴鸿鸣

(西南石油学院 四川南充 637001)

摘 要 作为生物礁的特殊类型,灰泥丘在古生代十分发育,许多学者都认为它们是通过微生物造岩作用而形成的,而且,也在现代湖泊中发现了由蓝菌藻的生命活动所形成的灰泥沉积物及灰泥丘。但是国际上一直没有在古生代灰泥丘中发现过细菌等微生物的实体化石,微生物促使碳酸钙沉淀、聚集的能力和机理也不明确。四川盆地北缘寒武纪和志留纪灰泥丘发育,笔者通过扫描电镜及能谱分析,在国际上首次发现了(川西北志留纪)灰泥丘中菌藻类微生物的实体化石及其特征的造岩成丘现象,发现的菌藻类微生物实体化石有三种类型:1.表面光滑的卵形球体型;2.表面粗糙的椭球体型;3.网状结构型。而且,对寒武纪和志留纪灰泥丘凝块石作生物标志化合物分析也证明了其有机质生源为菌藻类微生物。这些凝块石灰泥丘中的菌藻类实体化石都显示了不同的沉积、造岩和成丘功能,因而证实了微生物在形成古生代灰泥丘中具有重要作用。

关键词 微生物 灰泥丘 生物沉淀作用 造丘作用 早古生代

第一作者简介 张廷山 男 1961 年出生 博士生导师 沉积学、石油微生物研究

中图分类号 P534.4 **文献标识码** A

1 前言

一般认为灰泥丘是一种缺乏宏观造礁生物的较深水的,主要由灰泥组成的生物礁。作为生物礁的特殊类型,灰泥丘(mud mound 或 micrite mound)在古生代十分发育^[1],许多学者都认为它们是通过微生物造岩作用而形成的^[1-9],而且,也在现代湖泊中发现了由蓝菌藻(Synechococcus)的生命活动所形成的灰泥沉积物及灰泥丘^[10]。但是国际上一直没有在古生代灰泥丘中发现过细菌等微生物的实体化石,而对微生物促使碳酸钙沉淀、聚集的能力和机理也不明确。因此,国际地科联及联合国教科文组织将微生物建隆的生物沉积学(Biosedimentology of Microbiobuildups)立项作为国际地质对比计划(IGCP 380)^[11]。近年来,由于生物成矿作用受到国内外的普遍关注,微生物的地质营力,包括沉积作用、成矿作用、溶解作用、富集作用等也日益受到重视^[12-15]。在沉积方面,人们发现,因细菌等微生物的生命活动会引起环境的 pH 值等的变化,从而能促使碳酸钙的沉淀,其现象可初步划分出 5 种情况^[16,17,18]。Chafetz 和 Buczynski^[12]研究了德克萨斯岸外海湾以及巴哈马等现代碳酸盐潮坪环境中叠层石的发育,指出微生物作用是导致叠层石形成、沉积的主要原因。在叠层石中,蓝菌藻(Cyanobacteria)层发

育在光合作用带中,石化现象弱。随着深度的增加,蓝菌藻层逐渐被细菌层所取代且石化作用增强,而且实验室中所作的微生物培养比较研究也证实了此点,即蓝菌藻的钙化是在其死亡后,在细菌的作用下发生的。Defarge 等^[19,20]分别对南太平洋 Tuamotu 群岛和中太平洋的现代叠层石进行了研究,指出其形成及钙化过程为水体盐度、钙离子和镁离子的浓度变化及细菌的生命活动综合效应的结果。Folk^[21]、Pedone 和 Folk^[13]通过扫描电镜观察发现,尤他州大盐湖(Great Salt Lake)沉积物粒内及其间的文石胶结物中有细菌及微细菌(nannobacteria)实体存在,而细菌的菌壁在其生活过程中,对钙、镁离子具有很强的吸附性,因此碳酸盐矿物能以细菌体作为结晶核心而结晶。此外,在现代喀斯特洞穴黑暗环境中,也发现有菌、藻类成因的叠层石和凝块石存在^[22,23],说明在无光的条件下,微生物群也可促使碳酸钙沉淀。上述研究说明,细菌在促使碳酸盐沉积方面起着重要的作用。

笔者通过扫描电镜及能谱分析,发现了(川西北志留纪)灰泥丘中菌类微生物的实体化石及其造岩成丘现象^[24]。并且,通过生物标记化合物的分析,进一步证实了四川盆地志留纪、寒武纪凝块石灰泥丘中有机质来源以微生物为主,从而充分证明了微生物在形成古生代灰泥丘中具有重要作用。

^① 国家九五重点攻关和国家重点实验室项目成果之一(96-110 补-2-08 和 PLN020)

2 地质概况

早古生代时,四川盆地北缘处于上扬子地台北缘,为陆表海沉积环境,生物礁发育,分布较广,从寒武纪到志留纪都发育了一系列灰泥丘、骨架礁等。

在米仓山、大巴山南缘地区的南郑、南江、西乡、镇巴、紫阳和城口等地,寒武纪为陆棚开阔台地沉积环境,早寒武世时,从下而上沉积了筇竹寺组、仙女洞组、阎王碛组和石龙洞组,凝块石灰泥丘、海绵骨架礁主要发育于仙女洞组中(镇巴以西),礁组合的厚度自北西向东南呈减薄的趋势。本文所研究的灰泥丘位于四川南江沙滩仙女洞组中。

在志留纪兰多维列世—温洛克世早期,四川盆地北缘广元至陕南地区为受古陆控制的宽缓的陆表海区,从下而上沉积了龙马溪组、崔家沟组、王家湾组和宁强组。生物礁散布于深缓坡上部至浅缓坡,发育有凝块石灰泥丘、层孔虫—珊瑚灰泥丘以及珊瑚—层孔虫格架点礁^[25]。本文所研究的灰泥丘位于陕南宁强县城郊王家湾组中。

3 灰泥丘中的微生物特征及沉积、造岩作用

3.1 灰泥丘中的微生物

由于凝块石灰泥丘内无宏观造礁生物,微生物在其形成的过程中起着重要的作用。研究区志留纪灰泥丘中的微生物实体化石产于陕南宁强王家湾组下部凝块石灰泥丘的小型近球形凝块石内,其区域沉积环境属深缓坡上部。通过扫描电镜观察,发现三种不同类型的微生物实体化石:1.表面光滑的卵形球体(图版 I-1),钙质、卵球形、表面光滑,其大小为 $6\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$,其形态和大小与真菌的菌孢相当,长轴一端具圆形凹坑,另一端具小球形凸起,这些凹坑和凸起可能是真菌菌孢中常见的出芽芽体和芽体脱落后留下的痕迹。化石嵌于微晶凝块石之中;2.表面粗糙的椭球体(图版 I-2),椭球形,其大小为 $60\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$,表面粗糙,具蠕虫状断续条纹,壳壁上有压褶和凹陷,壳体上生长有方解石胶结物。从形态上比较,此类微体化石可归为疑源类,但其壳壁经全屏能谱分析为碳酸钙,而疑源类应为碳化壁,因此也可能是某种菌孢;3.网状结构,由钙化的胶质席状物和粗细不等的分枝枝状体、丝状体组成,网呈匍匐状盖覆于灰泥之上,枝状分叉,分叉角近 90° 。网眼不规则,呈多边形至近圆形,大的网眼直径可达 $35\mu\text{m}$,而小的可小于 $1\mu\text{m}$,丝体直径约 $1/3\mu\text{m}$ (图版 I-3 A、5、6)。经全屏能谱分析,网状结构化石由碳酸钙组成,根据其形态结构推测为藻类叶状

体。

通过对研究区寒武纪和志留纪凝块石的生物标志化合物的分析,显示其主要表现为细菌和菌藻类生物对有机质来源的贡献,具体表现为:

(1) 正构烷烃分布以低碳数的偶碳数优势为特征。正构烷烃的主峰碳数分布和奇偶优势比值等可提供有机母质的生源构成、演化状况和沉积环境等方面的信息。低碳数正构烷烃与低等的菌藻类生源有关,而高碳数正构烷烃则与高等植物生源有关。米仓山南缘下寒武统仙女洞组以及下志留统王家湾组生物灰泥丘凝块石的正构烷烃分布特征为峰形前高后低,以低碳数($n\text{C}_{15} \sim n\text{C}_{20}$)主峰碳单峰形分布为主,表明其有机质的生源构成是以细菌、低等藻类等为主(图1)。虽然正构烷烃分布特征也与烃源岩的热演化程度有关,在高过成熟阶段也可能会出现以低碳数正构烷烃分布为主的现象,但是,从中晚奥陶世起,维管束植物才开始演化,且十分稀少^[26],所以所研究的正构烷烃分布特征显然代表了细菌、低等藻类等有机质的生源构成。

(2) 五环三萜烷分布以 C_{30} 藿烷主峰为特征, $\text{C}_{31} \sim \text{C}_{35}$ 升藿烷系列随碳数增加含量依次降低(图2)。以藿烷为代表的五环三萜化合物主要分布于蕨类、苔藓植物、蓝藻和细菌中,而且在蓝藻和细菌中广泛分布^[27]。

(3) 甾类化合物分布以 C_{29} 甾烷优势为特征(图2)。在早期研究中, C_{29} 甾烷(醇)常被作为陆生高等植物有机质存在的重要证据,然而,在前寒武纪、寒武纪等蓝菌藻叠层石及海相地层中存在 C_{29} 甾醇(烷)优势^[27],在近代沉积物中也发现含丰富 C_{29} 甾醇的蓝菌藻。因此,根据生物演化和上述综合分析,所研究的样品中的 C_{29} 甾烷优势,反映其可能为细菌、蓝藻类生源。

3.2 微生物的沉积、造岩作用

野外观察,寒武纪、志留纪凝块石灰泥丘具有一定的规模和和形态,并形成单独的地质体;室内扫描电镜分析发现,志留纪凝块石灰泥丘中的菌藻类实体化石都显示了不同的沉积、造岩和成丘功能。如网状结构化石在灰泥丘凝块石中呈分枝状,穿叉、盖覆生长在围岩中,起着明显的盖覆、粘结作用。正是由于它的存在,才使灰泥物质得以固定和被粘结,绑结成凝块石格架,形成灰泥丘,其作用类似于皮壳状层孔虫、皮壳状珊瑚或皮壳状红藻等宏观造礁生物。同时,此类化石在局部放大至 4 000 倍时,可见菌藻组织具与围岩逐渐过渡的特征,在灰泥丘中还具有一定的造岩功能(图版 I-3 A、5、6)。而表面粗糙的椭球体壳壁面上有大

量方解石胶结物的生长,说明其有助于使灰泥产生胶结作用,形成凝块石。表面光滑的卵形球体常仅作为颗粒沉积组份赋存在微晶凝块之内。

4 灰泥丘的形成和古生态讨论

由于凝块石灰泥丘内无宏观的造架生物,因而长期以来对其成因有多种认识。以 Pratt 和钱宪和为代表的一批生物礁研究者认为凝块石灰泥丘为微生物成因,其岩石组成为微生物岩(microbiolites)^[3,4]。作者所研究的志留纪灰泥丘产于四川盆地北缘陕西宁强县西南部王家湾组中,厚约 30~50 cm,长约 2~3 m,由呈灰绿色的凝块石规则球体或不规则球体堆积而成,球体直径 10 cm 左右。灰泥丘夹于灰绿色含化石稀少

的页岩之中,其表面因凝块石球体的堆积而呈凹凸不平状。凝块石球体可单独产于页岩中,也可堆积形成凝块石灰泥丘,因此,凝块石球体为构成凝块石灰泥丘的基本单元。在凝块石球体内,可见由灰绿色致密微晶凝块石所形成的向上生长格架以及由格架建造所围成的孔洞空间。其中,充填有灰泥和细小生屑的为沉积时开放孔洞,由亮晶胶结或第二世代致密微晶凝块石所充填的为沉积时遮闭孔洞(图 3)。微晶凝块石格架为凝块石球体(灰泥丘)的初级格架体系,具早期固结和抗新生变形特点,其上生长有由 *Girvanella*, *Solenopora* 等蓝菌藻类所形成的骨架,呈向上分枝的多期生长状(图 3),构成了凝块石灰泥丘的次级生长格架。凝块石灰泥丘的初级格架由各种微生物共同形

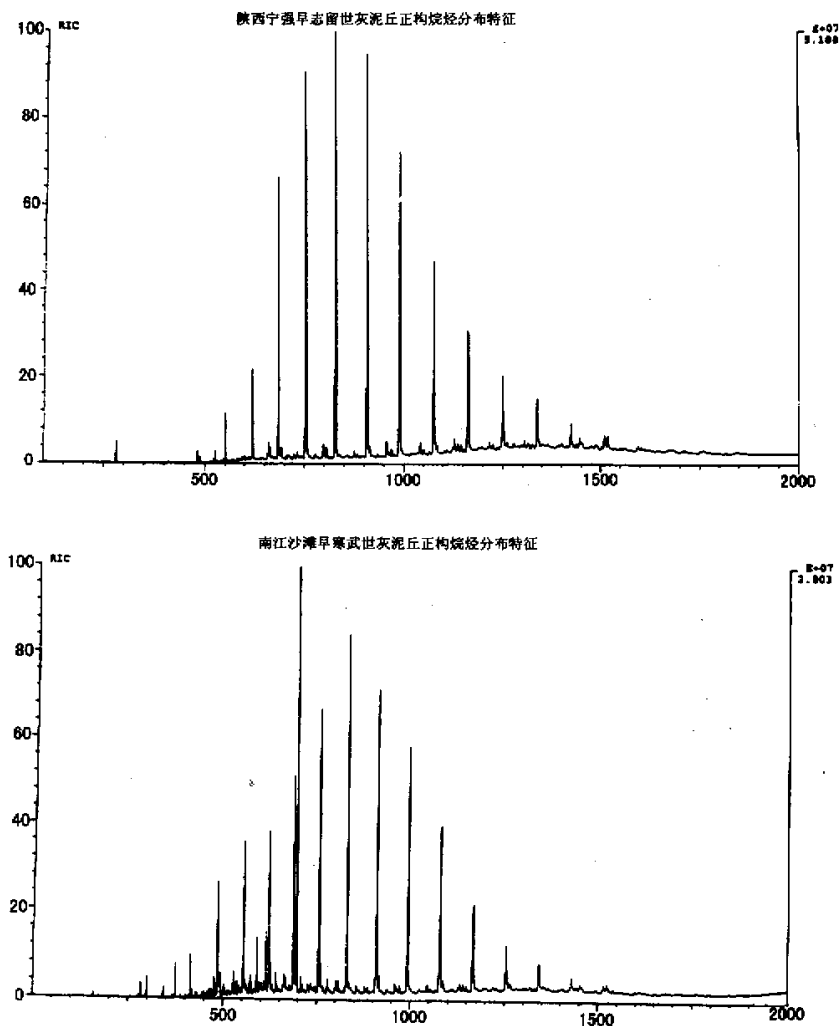


图 1 寒武系及志留系生物礁正构烷烃分布特征

Fig. 1 Distributions of normal alkanes in mud mounds of Early Cambrian and Early Silurian

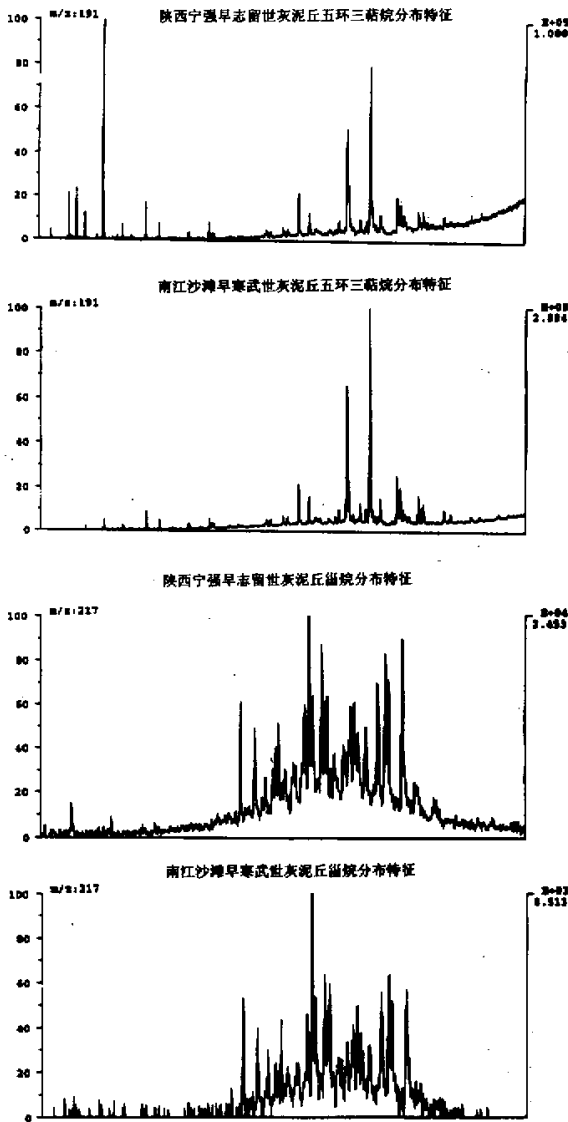
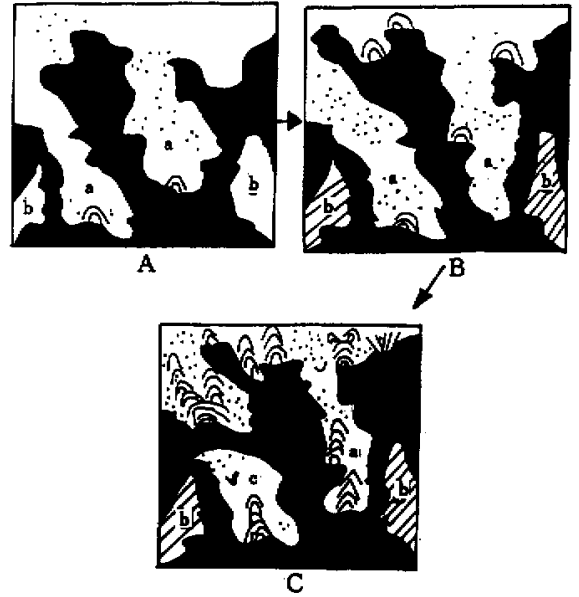


图 2 寒武系及志留系生物礁五环三萜烷分布特征图
 Fig.2 Distributions of steranes and terpenoids in mud mounds of Early Cambrian and Early Silurian

成,其形成过程首先是各种微生物在合适的环境下大量繁殖,在生长过程中一方面粘结灰泥,另一方面钙化的微生物参与造岩,同时也是灰泥的提供者。在各种微生物的共同作用下,形成了具早期固结特点的凝块石格架,成为灰泥丘的初级格架。然后, Girvanella, Solenopora 等蓝菌藻类以初级格架为基底,生长发育起来,形成了凝块石灰泥丘的次级生长格架。在开放的格架孔中,可充填灰泥和细小生屑等沉积物,而在遮闭的格架孔中,可被亮晶方解石充填,或者,可继续发育成为第二世代凝块石等(图 3)。凝块石球体在合适



A. 隐藻微生物形成的凝块石格架发育并固结(初级格架), a. 开放式孔洞, b. 遮闭式孔洞, B. 凝块石格架继续发育的同时,在其上面长出钙藻的格架(次级格架)遮闭孔洞为第二世代凝块石或亮晶充填,以前者为主, C. 凝块石格架及钙藻格架继续发育,形成灰泥丘的格架体系,前期的部分开放孔洞格架封闭,形成遮闭孔洞。

图 3 凝块石灰泥丘的发育过程示意图(局部)

Fig.3 Development of skeletal thrombolites(part)

的环境下,不断发展,相互粘连,最后形成了凝块石灰泥丘。

综上所述,微生物的沉积、造岩造丘作用明显,早古生代凝块石灰泥丘的发育主要是微生物生命活动的结果。

南京大学地球科学系方一亭教授、边立曾教授提供了许多宝贵意见,南京地质古生物研究所杨万容研究员一直关心此项研究,在此表示感谢!

参 考 文 献 (References)

- 1 Leinfelder R R *et al.* The origin of Triassic reefs: current research developments and result [J]. *Facies*, 1993, 31: 1~56
- 2 Bathurst R G C. Stromatactes origin related to submarine-cemented cursts in Paleozoic mud mound [J]. *Geology*, 1980, 8: 132~134
- 3 Pratt B R. Stromatolitic framework of carbonate mud mounds [J]. *J. Sed. Geol.* 1982, 52: 1203~1227
- 4 钱宪和. 微晶灰岩与微晶丘, 它们的问题与成因 [J]. 台湾中央地质调查所特刊第五号, 1991. 213~229 [Tsien H H. Micrites and micrite mounds, their problems and origin [J]. Special issue of Center Bureau of Geological Survey, Taiwan. No. 5, 1991. 213~229]
- 5 Guo L, Riding R. Microbial micritic carbonate in uppermost Permian reefs, Sichuan Basin, Southern China: some similarities with recent travertines [J]. *Sed.* 1992, 39: 1067~1069

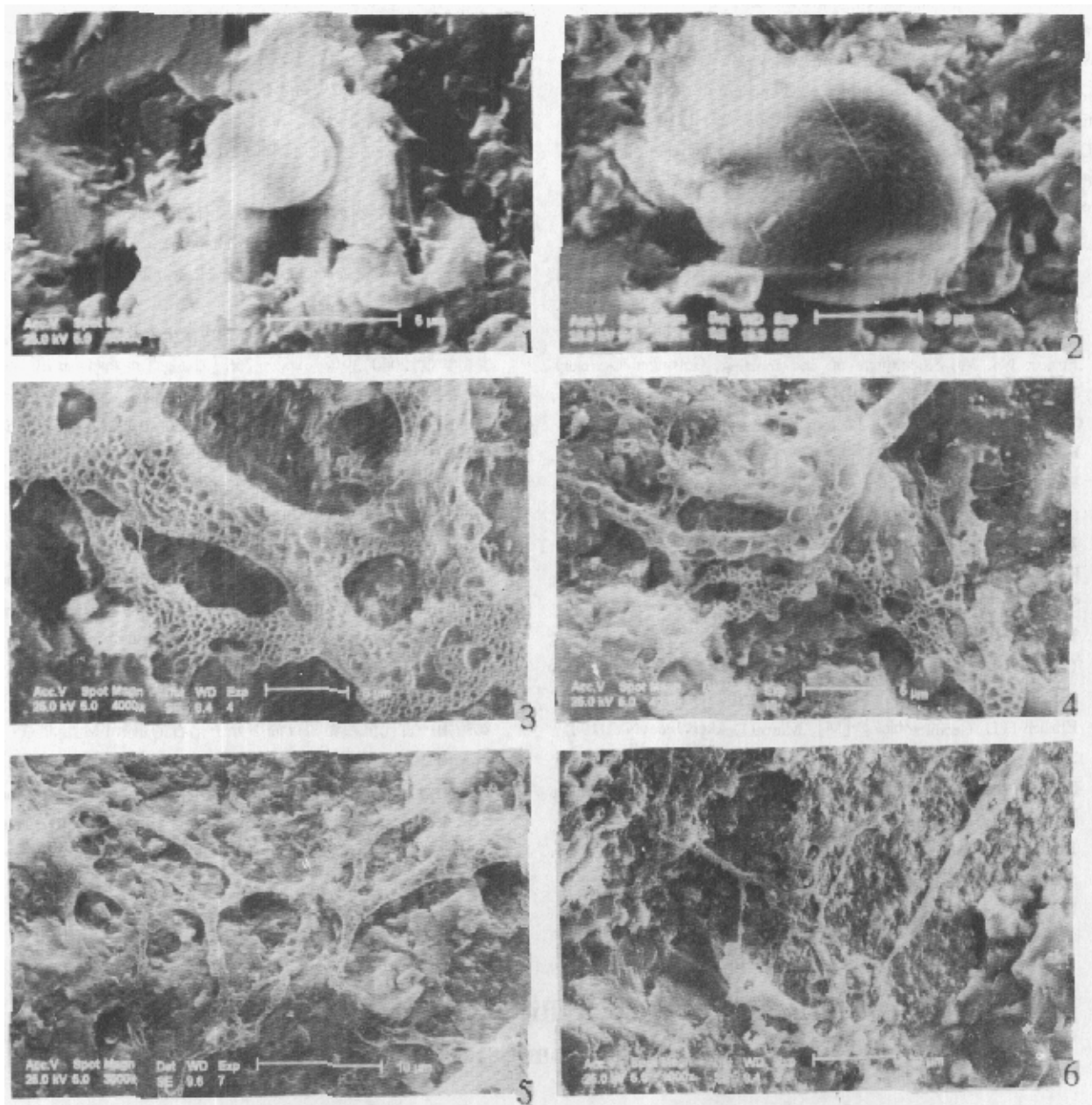
- 6 Tsien H H. Contribution of reef building organisms in reef carbonate [J]. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, 1994, 172 : 95 ~ 102
- 7 Tsien H H. The role of microorganisms and the origin of micrite components in algal reefs and micrite mounds [J]. *Memoires Instituts Geologique Del Univ. Catholique de Louvain*, 1994b, t. xxxv : 123 ~ 135
- 8 De Freitas T A, *et al.* Silurian microbial buildups of the Canadian Arctic [J]. *Spec. Pubs. Int. Ass. Sediments*, 1995, 23 : 151 ~ 169, 393
- 9 Dupraz C, Strasser A. microbialites and micro-encrusters in shallow coral bioherms (Middle to Late Oxfordian Swiss Jura Mountains [J]. *Facies*, 1999, 40 : 101 ~ 130
- 10 Thompson J B, Ferris F G. Cyanobacteria precipitation of gypsum, calcite and magnesite from natural alkaline lake water [J]. *Geology*, 1990, 18 : 995 ~ 998
- 11 Neuweiler F, *et al.* Biosedimentology of microbial buildups. IGCP Project No. 380-Proceedings of 2nd meeting, Gottingen/Germany 1994 [J]. *Facies*, 1997, 36 : 195 ~ 284
- 12 Chafetz H S, Buczynski C. Bacterially induced lithification of microbial mat [J]. *Palaios*, 1992, 7 : 277 ~ 293
- 13 Pedone V A, Folk R L. Formation of aragonite cement by nanobacteria in the Great Salt Lake [J]. *Utah. Geology*, 1996, 24 (8) : 743 ~ 765
- 14 Konhauser K O. Diversity of bacterial iron mineralization [J]. *Earth Science Reviews*, 1998, 43 (1998) : 91 ~ 121
- 15 刘志礼. 藻类及其有机质成矿作用试验 [J]. *沉积学报*, 1999, 17 (1) : 9 ~ 18 [Liu Zhili, *et al.* Mineralization tests made by algae and its organic matters [J]. *Acta Sedi. Sinica*, 1999, 17 (1) : 9 ~ 18]
- 16 Ehrlich H L. *Geomicrobiology* [M]. Marcel Dekker, Inc., NY, 1981. 393
- 17 Ehrlich H L. How microbes influence mineral growth and dissolution [J]. *Chem. Geo.*, 1996, 132 : 5 ~ 9
- 18 Ehrlich H L. *Geomicrobiology : its significance for geology* [J]. *Earth Science Reviews*, 1998, (45) : 45 ~ 60
- 19 Defarge C. *et al.* Kopara in Polynesian atolls : early stages of formation of calcareous stromatolites [J]. *Sed. Geo.*, 1994, 89 : 9 ~ 24
- 20 Defarge C. *et al.* Texture of microbial sediments revealed by cryo-scanning electron microscopy [J]. *J. Sed. Res.*, 1996, 66 : 935 ~ 947
- 21 Folk R L. SEM imaging of bacteria and nanobacteria in carbonate sediments and rocks [J]. *J. Sed. Petro.*, 1993, 63 : 990 ~ 999
- 22 王福星. 洞穴黑暗带中有无叠层石 ? [J]. *中国岩溶*, 1998, 17 (3) : 278 ~ 284 [Wang Fuxing, *et al.* Do Stromatolites occur in the dark-zone of Karst caves ? [J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17 (3) : 278 ~ 284]
- 23 戎昆方. 初论生物成因的洞穴叠层石的形成条件 [J]. *中国岩溶*, 1998, 17 (3) : 285 ~ 290 [Rong Kunfang, *et al.* Developed conditions of biogenic cave stromatolite [J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17 (3) : 285 ~ 290]
- 24 张廷山. 陕西宁强早志留世灰泥丘中微生物及其造岩意义 [J]. *古生物学报*, 2000, 39 (2) : 263 ~ 266 [Zhang Tingshan, *et al.* Microbial fossils in Lower Silurian micritic mound, Ningqiang, Southern Shaanxi [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39 (2) : 263 ~ 266]
- 25 张廷山. 川西北地区早志留世陆源碎屑—碳酸盐混积缓坡 [J]. *沉积学报*, 1995, 13 (4) : 27 ~ 36 [Zhang Tingshan, *et al.* Early Silurian siliciclastic-carbonate ramp deposits in NW Sichuan [J]. *Acta Sedi. Sinica*, 1995, 13 (4) : 27 ~ 36]
- 26 Richardson J B. Lower and Middle Palaeozoic records of terrestrial palynomorphs [A]. In : Jansonius J & McGregor D C ed. *palynology : principles and applications* ; American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation [C]. 1996, 2 : 555 ~ 574
- 27 Peters K E, Moldowan J M 著, 姜乃煌, 张水昌等译. *生物标记化合物指南—古代沉积物和石油中分子化石的解释* [M]. 北京 : 石油工业出版社, 1995. 82 ~ 149 [Peters K E, Moldowan J M. *The biomarker guide : interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments*. Prentice Hall, Inc., 1993 (Translated by Jiang Daihuang and Zhang Shuichang *et al.*). Beijing : Petroleum Industry Publishing House, 1995. 82 ~ 149]

Microbial Fossils and Their Biosedimentation & Buildup in Paleozoic Mud Mounds, Sichuan Basin

ZHANG Ting-shan SHEN Zhao-guo LAN Guang-zhi WANG Shun-yu DAI Hong-ming
(Southwest Petroleum Institute, Nanchong Sichuan 637001)

Abstract As one of the special bioherms, mud mounds (micrite mounds) developed during the Paleozoic. According to recent researches, many experts in the world have believed that many mud mounds be built by different microbes in the Paleozoic, the lime mud sediments and the mud mounds built by cyanobacteria have also been found in modern lakes. But the body fossils of microbes such as bacteria have not been seen in the Paleozoic mud mounds, and the function of the microbial biosedimentation & buildup, and how the bacteria made carbonate deposition are not clear. During Early Paleozoic, there were many mud mounds developed in the north Sichuan. According to the SEM studies, the authors found three kinds of microbial body fossils from the Silurian mud mounds and the microbial biosedimentation : 1. Smooth ball-like body fossil with egg shape $5\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ in size ; 2. Rough ellipsoid fossil, $60\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ in size ; 3. Foamed network-like fossil formed by foamed network biofilm material covered the micrite. The biomarks analyses also proved that the microbial materials are in mud mounds. The microbial body fossils of mud mounds shower different function of biosedimentation & buildup. The studies confirmed the microbes were very important in the mud mound formation in Paleozoic.

Key words microbes, mud mound, biosedimentation, buildup, Early Paleozoic



图版 I 说明 1. 表面光滑的卵形球体化石, $\times 6000$ 2. 表面粗糙的球体化石, $\times 1200$ 3. 泡沫网格状化石, $\times 4000$ 4. 泡沫网格状化石, 具粘结沉积物现象, $\times 4000$ 5. 泡沫网格状化石, 具粘结沉积物现象, $\times 3000$ 6. 泡沫网格状化石, 具粘结沉积物现象, $\times 1000$.