

王月,沈建伟,杨红强,等. 微生物碳酸盐沉积及其研究意义[J]. 地球科学进展,2011,26(10):1 038-1 049. [Wang Yue, Shen Jianwei, Yang Hongqiang, et al. Microbial carbonates and its research significance[J]. Advances in Earth Science,2011,26(10):1 038-1 049.]

微生物碳酸盐沉积及其研究意义*

王月¹,沈建伟¹,杨红强^{1,2},王旭^{1,2},刘苗苗^{1,2}

(1. 中国科学院边缘海地质重点实验室,中国科学院南海海洋研究所,广东 广州 510301;

2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要: 结合国际和国内有关微生物碳酸盐沉积研究的主要成果,归纳微生物碳酸盐沉积的定义、特征、分类和研究范围;探讨微生物碳酸盐沉积在地质时期重大气候和环境变化事件、全新世环境气候变化和恢复以及矿物沉淀、油气成储和天然气水合物示踪等方面的研究和应用意义;并综合微生物碳酸盐沉积建造与油气成藏的关系和最新研究成果,以及微生物碳酸盐目前的研究热点和发展趋势,指出微生物碳酸盐沉积作为微生物活动、碳酸盐沉积和地球化学综合作用的产物是沉积学、古生物学、石油地质学、沉积地球化学、(古)环境学和(古)气候学研究的新的切入点。

关键词: 微生物碳酸盐沉积; 特征; 定义

中图分类号: P588. 24

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2011)10-1038-12

微生物碳酸盐沉积是当今国际上地质学研究的一个热点,其着重阐明微生物类形成碳酸盐沉积的机理及其在成岩过程中的作用,研究微生物类的媒介作用对区域或全球的碳及其他元素生物地球化学循环的影响。微生物碳酸盐沉积是由微生物生长和新陈代谢而形成的碳酸盐沉积物,是地质微生物学的一个分支内容^[1,2]。微生物是地球生物圈的重要组成部分,在数量上约占生物总数的80%,并很可能在地球地史上也占有同样重要的地位。虽然由于成岩与氧化作用的破坏,大部分微生物很难保存成为化石,但微生物对地球表层系统,尤其是环境改造作用的重要性已经得到了越来越多的肯定^[3-6]。1987年 Burne 等^[7]正式提出微生物岩(Microbialites)的概念,指出其是由底栖(原核或真核)菌类(Cyanobacteria)群落捕获和粘结碎屑颗粒或其生物化学过程引发的碳酸盐沉淀物。随后 Riding^[8]将不同地质时期的微生物碳酸盐沉积进行类比,进一步阐述和明确了微生物碳酸盐沉积的定

义和分类,论述了地质时期微生物碳酸盐沉积的时间丰度变化。

本文在参考国内外主要研究成果的基础上结合对地质时期和现代微生物碳酸盐沉积的研究,综述微生物碳酸盐沉积的特征、定义、分类和研究范围;归纳微生物碳酸盐沉积在地质时期重大气候和环境变化事件、层序地层学、全新世环境气候变化和恢复以及矿物沉淀、油气成储和天然气水合物示踪等方面的研究和应用意义;并总结微生物碳酸盐沉积建造与油气成藏的关系和最近研究成果,以及微生物碳酸盐目前的研究热点和发展趋势。

1 国内外研究现状

钙质微生物(calcimicrobes)及其沉积产物(microbolite 或 microbial carbonates)是近20年提出的术语^[1,7]。微生物在现代珊瑚礁和海滩环境中广泛发育,微生物群落及其沉积物被用来作为环境和气候变化的指标和影响现代珊瑚礁发育的重要因素,并

* 收稿日期:2010-07-16;修回日期:2011-08-21.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“华南晚泥盆世微生物岩的古气候和古环境意义”(编号:40872078);中国科学院南海海洋研究所知识创新工程领域前沿项目“南海北部陆坡深水碳酸盐沉积研究”(编号:LYQY200806)资助。

作者简介:王月(1982-),女,辽宁葫芦岛人,助理研究员,主要从事海相(洋)碳酸盐沉积研究. E-mail: yuewang@scsio.ac.cn

指出微生物碳酸盐岩沉积在湿热的季节里生长发育更快^[9~12]。在一些现代礁系统中(如南太平洋新喀里多尼亚岛和法属玻利尼西亚岛),海面温度的升高会刺激微生物碳酸盐沉积的形成;因此,微生物碳酸盐沉积可用作环境和气候变化的指标。最新的研究还证实微生物群落及其沉积物在热带珊瑚礁区的迅速扩散与对珊瑚群落发育有害的环境变化和气候事件有关,它们的繁盛和广布会导致珊瑚礁的毁坏和衰减^[12]。Webb 等^[13,14]通过对大堡礁南端 Heron 岛的珊瑚礁坪和海滩岩隐生环境中微生物沉积物的同生结构演化、微晶胶结物的成因和稀土元素地球化学的研究,指出高镁方解石的微生物凝块叠层石结壳产出在全新世珊瑚礁骨架的隐生礁穴,而显微柱状的微生物沉积物生长在现代潮间海滩岩溶蚀增大的空穴的表面,并据此推断微生物碳酸盐形成的环境条件及其珊瑚礁生长的关系。

近 10 年来,微生物碳酸盐沉积与古气候和古环境的关系不断被认识和讨论^[15]。过去对古生代的环境、气候和重大生物事件的研究大都是从后生动物(Metazoan)及其相关的地层和沉积方面着手^[16],而对地质历史中大量存在的、占整个生物界最底层的微生物及其相关的微生物碳酸盐沉积研究不足。也就是说,过去多重视“帝王将相”在地质历史发展中的作用,而忽视了“广大人民群众”的作用。微生物生长和新陈代谢及由它们形成的胶结物在太古宙以来的碳酸盐沉积形成过程中的作用近年来不断受到重视^[17]。

国内对地质时期和现代钙质微生物和微生物碳酸盐沉积的研究相对滞后,戴永定等^[18]曾根据国外的研究资料和进展,介绍了微生物岩的发展和展望;Shen 等^[19]报道和研究了桂林晚泥盆世的微生物岩礁。近 10 年来国际上微生物碳酸盐沉积的研究热潮逐步影响到国内地学界,很多研究工作涉及到地质时期的微生物碳酸盐沉积,开始用地质微生物学的方法对其进行微观的系统研究、分类和描述;从宏观方面来讲,有些研究涉及碳酸盐沉积体和生物礁中的钙质微生物和微生物碳酸盐沉积与古气候和古环境的关系,但更多的研究主要讨论微生物碳酸盐沉积与古生代生物灭绝的关系,特别是二叠纪/三叠纪之交^[20~23]。梅冥相^[24]在国外已有的微生物碳酸盐沉积分类体系的基础上,提出国外划归叠层微生物结构的核形石应该单独划出,并从凝块石概念的演变讨论了微生物碳酸盐沉积的研究进展。最近的研究表明微生物岩在整个第四纪一直存在,并且是

全新世珊瑚礁增长的重要贡献者^[25]。Teng 等^[26]和 Wang 等^[27]在三亚鹿回头水尾岭和小东海海滩岩找到了微生物碳酸盐沉积;并通过对比得出微生物碳酸盐岩沉积不适合波浪作用强烈的高能带,而更趋向于隐生环境。此外,Shen 等^[28]在美济礁发现以绒毛状、发状和细刺状生长形势的微生物沉积,猜测可能是由丝状蓝菌经钙化后形成的。这些研究证实了微生物碳酸盐沉积在南海珊瑚礁沉积中的发育,显示出微生物作用过程在现代珊瑚礁系统形成中的重要性。

2 微生物碳酸盐沉积的定义、分类和特征

微生物碳酸盐沉积是由底栖的原核或真核微生物群落通过捕获和粘结碎屑颗粒,或由微生物引发的碳酸盐沉淀加积而成的碳酸盐沉淀物,是一种由生物媒介作用沉积的产物^[1,7]。构成微生物碳酸盐沉积的微生物组分包括细菌、藻类、真菌、参与生物膜和微生物席生长的物质,以及部分包着外壳的底栖无脊椎动物^[1,8]。其最关键的特征是以微生物的骨骼或由微生物生长和生理活动粘结捕获的沉积物为主要成分^[29]。微生物碳酸盐沉积的研究范围包括各种微生物岩、有机泥晶(organomicrites)和原地泥晶(automicrites)。构成微生物岩的物质成分主要有碳酸盐岩、磷块岩、铁岩、锰岩和有机质页岩。对微生物岩的分类主要依据它们的中型组构^[30]和宏观结构^[1],可划分为叠层石、凝块石、树形石和均一石 4 种类型,其分类图参见图 1^[1,31]。

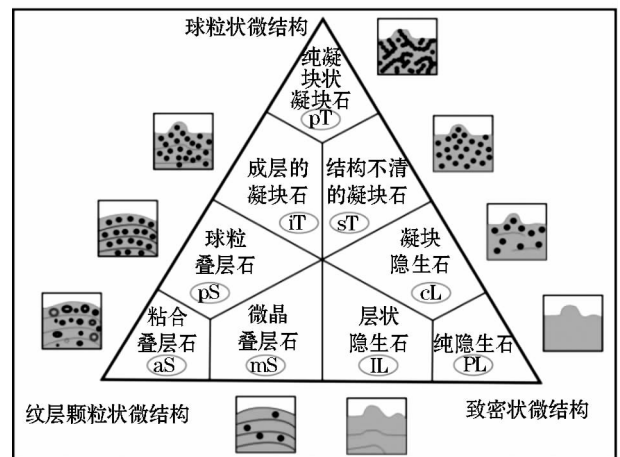


图 1 微生物岩的分类方案图(据文献[1,31]修改)

Fig. 1 Classification map of microbialites
(Modified by references [1,31])

Kalkowsky^[5]定义的叠层石为内部结构呈纹层状紧密排列的生物沉积灰岩。Riding^[1]根据它的内部结构、宏观结构和微生物沉积之间的作用方式等特点,将叠层石详细划分为:①骨骼叠层石,这是一种由微生物的原位钙化作用而形成的,构成这种叠层石的有机组织通常是以钙化化石形式保存起来;②粘结叠层石,由微生物圈捕和绑定的微粒沉积物构成的沉积;③细粒叠层石,是一种细粒而纹层发育良好的叠层石,曾被归类到粘结叠层石,Riding 将其单独划分出来,但是在阐明这类细粒叠层石到底是粘结的还是沉积的一直存在很大困难;④石灰华叠层石,这类叠层石与骨骼叠层石最大的区别在于沉积物主要沉积在矿物表面而不是内部,是无机矿化的产物;⑤陆生叠层石,是在干燥的环境中主要由矿化作用而形成的纹层微生物沉积。由于钙质结壳内部的微生物(如蓝细菌、真菌等)的作用同蒸发作用一样可以大大加速 CaCO_3 的沉积,因此其也被认为是陆生叠层石^[1,29]。

凝块石是指宏观上呈凝块状的底栖微生物沉积,这种微生物碳酸盐有着不规则的颗粒形态。主要类型有:①钙化微生物凝块石,由微生物钙化形成的凝块石;②粗糙颗粒粘结凝块石,这类凝块石有复杂的内部结构,粘接着砂—砾石大小的鲕粒或生物碎屑;③树枝凝块石,有树枝状的宏观结构,这种结构不同于树形石的地方是可以达到分米级别构造,可以将其看作是凝块石到树形石的过渡;④石灰华凝块石,这是 Riding^[1]新提出的概念,由 CaCO_3 强烈的结壳作用形成于有机体表面;⑤后沉积凝块石(后生凝块石),由同沉积形成的凝块石由于后期的重结晶作用或/和交代作用增大而形成^[1,32]。

树形石是典型的钙化微生物的产物,有厘米级别灌木状的穹隆和柱体;树形石通常由微生物钙化而成,而不是由颗粒粘结形成,这区别于叠层石和凝块石^[1]。最早的树形石保存在下寒武统中,广泛分布于早寒武世—早奥陶世和晚泥盆世岩层中^[1]。

均一石是一种相对无结构、隐晶质或泥晶质、宏观结构缺少清晰纹层、凝块或树形状结构的微生物碳酸盐沉积。均一反映不规则的增长形式或物质组成的同质性,如同分选很好的鲕粒砂和微晶礁壳^[1]。

此外,梅冥相^[24]将核形石和纹理石补充到微生物岩的分类中。尽管众多学者从不同角度对微生物岩进行了分类,但自然界中远比这几类要多,如由附枝菌构成微生物灰岩就不属于以上的分类^[33]。

微生物碳酸盐沉积在地质时期长期存在,通过

碳同位素推测在 3 800 Ma BP 的地层中就有微生物发育,有固定形态的微生物化石发育在 3 400 Ma BP,这与最古老的叠层石几乎出现在同一时代^[34,35]。微生物碳酸盐沉积在前寒武纪和显生宙重大地质转折期处于繁盛阶段,在 1 000 ~ 2 800 Ma BP 的晚太古代—元古代叠层石的数量达到一个峰值。在显生宙,寒武纪、奥陶纪—志留纪之交、晚泥盆世弗拉期—法门期之交、二叠纪—三叠纪之交是微生物碳酸盐沉积最为发育的几个时期^[36]。现代微生物碳酸盐沉积主要分布在浅水湾或浅水碳酸盐台地上。在波斯湾、澳大利亚西部及美国佛罗里达等地都有现代海洋叠层石的报道^[37~39],这同其地质历史上的分布相比显得非常局限^[40]。

3 微生物碳酸盐沉积的研究意义

最近 20 多年的研究成果显示,微生物群落适应热带、极地和海底热液等极端生境,分布广泛;微生物礁(microbial reef)和灰泥丘(mud mound)等与微生物相关的沉积在地质时期大量发育,纵贯古今^[1,41]。通过对微生物碳酸盐沉积的研究不仅可以了解生物进化的历程,还有助于从微生物碳酸盐沉积中提取有效反映气候和环境变化的化学元素指标,从而进行古气候和古环境的重建。此外微生物在石油、石灰华和钙泉华形成的整个过程中也发挥着相当大的作用。微生物碳酸盐沉积中的生物泥丘构造是良好的储油层位和铅—锌矿的容矿体,同时微生物碳酸盐沉积本身就是有用的矿产资源和容矿岩体,具有重要的经济意义^[42],其研究意义具体表现在以下几个方面:

3.1 微生物碳酸盐建隆(微生物礁和丘)

微生物在生物礁丘中的建造作用越来越受到关注,现在普遍认为微生物碳酸盐和微生物促生的胶结物是地质历史中生物礁骨架的重要贡献者^[43]。从太古代开始,钙质碳酸盐中的微生物沉淀是碳酸盐台地和生物礁发育的重要贡献者^[1,43]。它们在大多数古生代碳酸盐建隆中都很普遍,微生物分泌胞外粘液质形成生物膜胶结沉积质点,构成微生物席粘结生物矿物体或微生物沉积构造体及它们的碎片形成构架,组成微生物结构(叠层石、凝块石、树形石、均一石等)加固生物礁并填充孔隙和空洞^[1,43]。生物礁种类繁多,不同地质时期的生物组分不同,仅就造礁生物来考虑,前寒武纪生物礁主要是以蓝细菌为主^[44],古生代寒武纪中晚期的生物礁与前寒武类似^[45],志留纪的生物礁建造主体仍然是钙化的蓝

细菌,但管孔藻科也占据同样重要的地位^[46]。晚古生代泥盆纪生物礁中的蓝细菌已经不占有优势,但晚泥盆世法门期和密西西比纪杜内期则以微生物单独形成礁体为特征^[47]。宾西法尼亚纪以叶状藻为主,在宾西法尼亚纪晚期和二叠纪蓝细菌再次成为典型的造礁生物^[48]。晚古生代二叠纪末期生物大灭绝后,早三叠世的生物礁丘主要是由钙化微生物构成^[49],在侏罗纪中期和晚期,蓝细菌和海绵的造礁作用仍然明显^[50]。古近纪—新近纪相对白垩纪寒冷,珊瑚和钙藻成为了生物礁建造的主要生物,但蓝细菌依然起到了生物建造的作用^[39,51]。微生物碳酸盐沉积在全新世和现代珊瑚礁形成过程中也起着重要的作用^[52]。

3.2 微生物碳酸盐沉积与生物灭绝事件

在奥陶纪/志留纪、晚泥盆世和泥盆/石炭纪及二叠/三叠纪生物事件前后,微生物碳酸盐沉积在生物灭绝事件之后达到了极大繁盛,表明微生物群落和微生物碳酸盐沉积的繁盛与地球重大变化时期的环境和气候变化有关^[22,23]。微生物群落在中、晚寒武纪和早奥陶世的复苏和在生物礁生态环境中占统治地位是显生宙早期生物礁发育最显著和最受关注同时又是很困惑的问题^[53]。最初用来解释生物礁中微生物碳酸盐沉积复苏,是认为骨骼造礁后生生物在集群灭绝事件中被从海洋生境中移除后导致了一个造礁生物复苏滞后期^[54]。Schubert 等^[55]认为微生物是灭绝事件后唯一留下来的造礁种群,将其称为“灾后泛滥种”。但这种假说不适用于晚泥盆世至密西西比纪^[47],主要根据是:①微生物在骨骼造礁生物灭绝前就是重要的造礁生物;②虽然骨骼后生生物(如层孔虫)在法门期重新分异,但在生物礁中不占主要位置;③密西西比纪生物礁包含各种各样、极有可能造礁的生物,但这些生物很少能和微生物碳酸盐竞争而成为绝对主要的造礁生物。在早奥陶世时期也有同样的情况。Rowland 等^[53]认为一些外在因素的结合,如全球营养物质缺乏、高温或海水的化学成分变化可能在调节生物礁群落(某些类型的压力)。海洋中 pH 值的增加能明显地提高微生物碳酸盐的生产率^[56],但肯定还有其他因素的限制作用在决定着微生物群落和其他造礁骨骼生物的相对丰度。晚泥盆世法门期一般被认为是生物礁发育的贫困期,没有真正的骨骼后生生物骨架;然而,微生物类和藻类作为这一时期碳酸盐沉积的主要贡献者已在世界泥盆系的主要发育区得到了证实,如我国华南区、加拿大和澳大利亚^[15,47,57]。微生物碳

酸盐沉积和微生物礁在我国桂林及西澳大利亚的坎宁和波拿巴特盆地的分布超越了骨骼后生生物灭绝的界线;密西西比纪是后生生物成礁的贫困期,但却是晚泥盆世生物灭绝后生物礁发育史上的一个重要阶段。这一时期骨骼造礁生物少见,主要以微生物凝块石和叠层石为主,附属有少量珊瑚、苔藓虫和藻类^[58]。同样,微生物碳酸盐沉积在华南二叠纪/三叠纪生物灭绝事件前后也是连续发育且分布广泛^[59]。从晚二叠纪晚期(长兴期)的海绵和微生物碳酸盐沉积到二叠/三叠系界线的微生物石结壳^[60,61],再到三叠纪最早期的微生物石沉积^[59],呈现出从生物事件之前的后生生物和微生物碳酸盐沉积组合到生物灭绝事件之后的单一微生物碳酸盐沉积的一种变化。

礁生态系统中的后生生物格架岩在数次生物灭绝事件中几乎消失殆尽,而微生物碳酸盐沉积在大多数古生代碳酸盐建隆中却很普遍,它们更经常产出在生物灭绝事件前夕,并在生物灭绝事件后达到高峰,如奥陶/志留纪、晚泥盆世和泥盆/石炭纪以及二叠/三叠纪生物事件前后的微生物碳酸盐沉积,表明微生物群落和微生物碳酸盐沉积的繁盛与地球重大变化时期的环境和气候变化有关^[15,62]。

通过地球化学方法证实,在我国广西上泥盆统弗拉阶—法门阶的生物灭绝与海洋浮游植物和浮游动物类微生物大量繁盛相耦合^[21];煤山二叠系/三叠系界线附近的微生物阶段性变化与高分辨率的无脊椎动物灭绝相耦合^[22]。这种耦合关系可能反映了微生物对灾变事件的响应,这种灾变事件导致了动物的集群灭绝和随后生态系统的变化^[23]。广泛接受的观点是微生物碳酸盐沉积受后生动物的竞争和干扰,这种影响包括对空间的掠夺、竞争以及底部环境的改变等^[1]。但是微生物碳酸盐沉积在寒武纪随着后生动物的爆发而增长,并且在晚奥陶世、晚三叠世和晚白垩世的生物灭绝事件之后没有明显的增加,这说明仅仅从单方面解释微生物碳酸盐沉积的变化是行不通的,还要考虑环境作用、成岩作用的强度以及微生物进化等因素,这些方面都显著影响着长时间尺度的微生物碳酸盐沉积^[1,43]。

3.3 微生物碳酸盐在指示环境、气候变化的应用

微生物群落及其沉积物与环境气候的变化关系十分密切,它们被用来作为环境和气候变化的指标是一个新的研究领域^[15,17]。古生代的气候重大变化时期如奥陶纪末、晚泥盆世和二叠纪末,分别代表全球气候从冰室向温室、温室向冰室、再从冰室向温

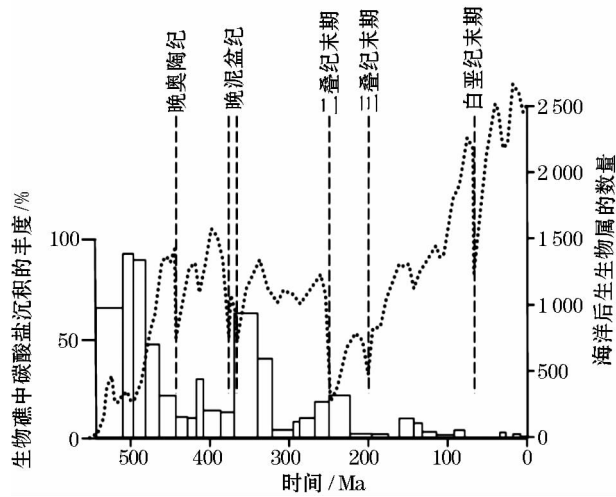


图 2 微生物碳酸盐沉积在显生宙生物礁中的相对丰度与后生生物相对丰度的对比
(图片据于文献[16,48,63]修改)

Fig. 2 Comparison of relative abundances between microbial carbonates and metazoans in Phanerozoic reefs (Modified by references [16,48,63])

室的变化转折期^[63]。志留纪至中、晚泥盆世是全球范围内的温室气候时期,骨骼后生生物礁大量发育;晚泥盆世法门期开始的冰室气候已在巴西和南美的一些地区得到证实,这次气候变冷经密西西比纪和宾西法尼亚纪到早二叠世结束。晚二叠纪开始了又一次全球气候变冷,异常干燥的寒冷气候取代了盘古大陆中部的温暖气候,极地冰盖向北延伸到了非洲南部。目前已证实在古生代重大变化时期,特别是在冰室气候阶段,微生物群落和微生物碳酸盐沉积往往成为海洋环境中主要的生物群落和沉积物;如在我国川西汉源,即当时的康滇古陆边缘保存有晚奥陶世最晚期大渡河组微生物礁^[64]。这套微生物碳酸盐沉积出现在奥陶纪末大灭绝之际^[65]。在北美奥陶纪末冰期高峰之后志留纪之初,也出现了大量的微生物礁^[36]。

在潮间带、热泉、高盐度或高 CaCO_3 饱和度和人类活动干扰等恶劣环境下后生动物往往不能忍受,此时微生物群落呈现优势^[66]。如在生物水体污染或富营养化的特殊环境中,蓝细菌作为先驱者往往趋于繁盛,又因为其在微生物碳酸盐沉积中的重要贡献,因而蓝细菌的大量繁殖必然导致微生物碳酸盐沉积发育^[67]。

微生物碳酸盐沉积与气候环境变化关系的研究成果也很多,澳大利亚大堡礁隐生环境中的珊瑚—

珊瑚红藻—微生物岩序列指示一种海侵层序^[9];佛罗里达珊瑚礁岛的微生物碳酸盐生产率的增加是由海洋环境营养增加和养分富集引起的^[10];巴哈马滩现代潮间带由微生物形成的凝块叠层石研究代表一种海平面上升和营养物质增加的环境^[11];西澳鲨鱼湾潮间带微生物形成的叠层石反映一种海平面下降沉积环境^[1];通过对现代微生物碳酸盐沉积的研究还证实,微生物碳酸盐沉积对季节的变化很敏感,它们在湿热的季节里生长和发育得更快^[12]。国外对现代珊瑚礁与微生物碳酸盐沉积的关系已开展了许多研究,也有一些高水平的论文发表,但在我国南海珊瑚礁区,这方面的工作才开始不久^[26,27]。

3.4 微生物与矿物沉淀作用

微生物与矿物沉淀作用,特别是与碳酸盐矿物沉淀作用关系的研究是微生物碳酸盐沉积研究的一个热点。微生物地球化学研究表明微生物对矿物形成起到了至关重要的作用,它们在改变微生物沉淀的地球化学条件的同时,也作用于碳酸盐矿物沉淀的晶核^[68]。Vasconcelos 等^[69]研究了缺氧条件下微生物媒介白云岩沉淀和成岩作用,表明原先认识的现代白云岩的形成环境,如根据对巴哈马安德罗斯岛潮上白云石结壳的研究,应当重新来评估白云石沉淀过程中微生物媒介的重要性。Reid 等^[70]对现代海洋叠层石在生长、成层和岩化过程中微生物的作用进行了研究指出现代海洋叠层石的生长代表了一种沉积和间歇蓝细菌席岩化的动态平衡。Hammes 等^[71]研究了 pH 值和钙代谢在微生物碳酸盐沉淀过程中的关键作用,认为微生物的钙代谢是特定沉淀条件下的一种不可避免的事件,活性钙代谢可能造成独特的沉淀条件,而且碳酸钙沉淀在化学上利于细菌生存和扩散。Gautret 等^[72]研究现代泻湖微生物岩中碳酸钙沉淀的生物化学控制,强调由蓝菌鞘腐烂释放出的二羧基的天门冬氨酸和谷氨酸含量在碳酸钙形成过程中的重要性,超细泥晶的原地沉淀是一种具有高度选择性的过程,微生物岩建造中的蓝菌种群的生物亲和力和是控制原地沉淀的碳酸钙生物化学差别的主要因素之一。Mn 的微生物氧化物常见于陆地、深海、湖泊和温泉环境的沉积物中,Spilde 等^[73]通过培养洞穴中的微生物来研究天然和人工锰矿物的锰氧化微生物引发的矿物沉淀,结果显示至少有 2 个不同的生物体株在 2 个不同的媒介类型中被分离,2 个都沉淀 Mn,一个需要低的有机碳,而另一个需要很少或根本不需要有机碳。

细菌和藻类的光无机营养和化学有机营养活动与海滩岩的形成和退化有一定关系^[74]。在一些现代礁系统中,海平面变化和温度的升高会刺激微生物碳酸盐沉积的形成。微生物碳酸盐沉积不仅受外界环境变化影响,同时也会主动改变外界环境。如某些微生物可以通过参与地质地球化学作用(如氨类物质的氨化作用、有机质降解过程中尿素的水解作用等),使碳酸盐的碱度和 pH 升高,进而使碳酸盐结晶析出,达到直接或间接地促进 CaCO_3 成核的目的^[74]。微生物碳酸盐沉积有利于形成各种多金属矿产,如四川威远气田和云南东川铜矿等^[68]。

3.5 微生物碳酸盐地层与油气成藏

微生物碳酸盐不但构成生物礁的主要格架,还可形成纯微生物碳酸盐岩建造^[75]。微生物在石油形成的整个过程也起着至关重要的作用,其生长贯穿整个地质历史时期,古代的微生物直接影响石油和天然气蕴藏量。营养盐的增加会引起微生物的爆发,从而使该地区有极高的微生物碳酸盐生产率,同时养分富集的地区也是有机质生产力较高的沉积区,可以看出微生物碳酸盐沉积的发育背景与有机质沉积层的发育背景有很好的一致性^[10,15]。微生物碳酸盐沉积构成叠层石礁丘、泥晶丘、核形石—鲕粒滩、粘结生物矿物体和生物碎屑建造生物礁丘等,这类生物礁储层具有良好的渗透率和孔隙度,埋藏大量有机质,有利于石油的聚集和保存^[76,77]。在我国广西许多泥盆世微生物碳酸盐沉积剖面上已发现沥青残余,反映微生物碳酸盐沉积地层中包含有丰富的有机质,可能作为潜在的碳酸盐型烃源岩。微生物碳酸盐构造不仅是良好的储油层同时还是生油层^[42],目前已发现在美国墨西哥湾海岸、哈萨克斯坦和土库曼斯坦的侏罗纪地层中,尤其是墨西哥湾 SMACKOVER 组层状凝块石组成的微生物碳酸盐油气藏,这直接证明了在微生物地层中可以发现油气藏^[75]。

由于微生物碳酸盐在对古地理的恢复中有良好的指示作用,同时可以通过分析微生物碳酸盐沉积的生物标志化合物特征评价有机质类型,更进一步通过研究有机质的保存情况可以评价生烃能力。因此微生物碳酸盐对勘探地质历史时期的含微生物碳酸盐沉积的油气层有重要的指导意义^[42]。我国四川盆地寒武纪和志留纪的凝块叠层石的标志化合物的分析和研究揭示了细菌和菌藻类等生物是主要的有机质贡献者^[77]。

3.6 冷泉碳酸盐岩的微生物作用

冷泉沉积及其生态系统作为深水冷渗漏碳酸盐

沉积的典型代表和天然气水合物的示踪标志是地质学和生物学交叉的前沿领域和发展热点^[78]。冷泉碳酸盐岩可以提供有关流体来源、液体排放、迁移路径和地质时代等方面的信息,是海底天然气渗漏系统的重要标志,也是指示天然气水合物可能存在的重要证据^[79]。冷泉碳酸盐岩沉积主要是甲烷氧化古细菌和硫酸盐还原细菌促使甲烷缺氧氧化形成生物碳酸盐,而局部的碳酸盐超饱和进而形成的凝块状微晶灰岩、放射状和葡萄状文石胶结物^[80]。在冷泉口附近以甲烷为能源的微生物可形成微生物席、高达数米的微生物礁丘和泥晶丘^[79]。

20 世纪 70 ~ 80 年代在海底热液喷口^[81]和冷甲烷渗漏处首次发现以化学合成固碳为主的生物类群^[82],随后在大西洋、太平洋、印度洋和北冰洋活动和被动大陆边缘的浅水大陆架到超深渊都发现了热液喷口和甲烷渗漏^[83~87]。我国也陆续发现冷泉喷溢形成的“九龙甲烷礁”和“明珠甲烷礁”^[88~90]。地质时期与冷泉有关的碳酸盐沉积也常表现出微生物碳酸盐沉积的特点^[91]。在澳洲 3.25 亿年的皮尔巴拉克拉通和奥陶纪温莎山火山岩带的古热液喷口沉积物中证实微生物是古老热液喷口沉积的主要生物^[92],微生物结构和冷泉生境的腕足类也在摩洛哥志留纪的冷渗漏沉积中有发现。因此,微生物碳酸盐沉积在研究冷泉沉积的形成和发育等方面具有重要意义^[93]。

4 微生物碳酸盐的研究热点和发展趋势

对微生物碳酸盐沉积的研究,在当今地学界已引起了极大的兴趣和关注。在最近 20 多年里,微生物的沉积作用及其环境意义是发展很快的研究领域,也是地质生物学的核心内容,研究热点包括以下几个方面。

4.1 微生物礁丘

微生物礁是由底栖固着菌藻类钙化格架障积或结灰泥和碳酸盐骨骼颗粒形成的、三维空间上具有一定隆起的碳酸盐岩体^[6]。现在已逐渐证实,微生物是生物礁丘建造的重要贡献者,其中菌藻类是地史中最早的礁建造者,其非钙质的蓝细菌通过生物化学作用沉降灰泥形成叠层石的历史可追溯到前寒武纪^[94]。其造礁生物主要为在生长过程中不断钙化的蓝菌类,这些造礁微生物(主要是矿化细菌)分泌胞外粘液质形成生物膜胶结沉积质点,构成微生物席粘接生物骨骼或微生物沉积构造体及它们的碎片形成格架,组成叠层石加固生物礁,并充填孔隙和空洞。

4.2 热泉和喀斯特沉积

热泉生态系统的初级生产者大多是依赖地球深部喷出的流体的化学能生存的嗜热细菌和古细菌^[95]。这种微生物作用已得到证实,目前所能找到的最早的细菌化石是在 3 235 Ma BP 的澳大利亚 Pilbara 克拉通火山的块状硫化物中发现的黄铁矿化的丝状体^[92]。这些丝状体是一种生活在太平洋底的嗜热细菌,被认为是原核生物的遗迹。在意大利中部罗马附近和美国黄石国家公园的现代热泉华也有微生物活动的踪迹,其中黄石国家公园温泉的石灰华沉积物中生活着一些杆状细菌和硅藻,这些微生物形成硅化的微生物席。一些碳酸盐热泉中的微生物会产生胞外聚合物(EPS),这些生物膜被硅或铁的氧化物包裹起来并长期保存^[96]。微生物迅速被沉淀物覆盖,形成独特的矿物结构。

在考虑生物因素作用下的喀斯特微观形态时,Folk 等^[97]首先考虑的是植物的作用,并提出了“植物喀斯特”的概念,1984 年 Viles^[98]首次定义了“生物喀斯特”将研究内容由仅限于植物的喀斯特溶蚀作用扩展至包括植物、动物和微生物对碳酸盐的侵蚀溶蚀作用和沉积作用。微生物在喀斯特沉积过程中起到的作用包括分泌作用、捕获和粘结作用、结壳作用、钙化作用,不同环境下多种微生物可参与和影响喀斯特沉积过程。

4.3 磷铁锰微生物岩

微生物活动及其代谢作用不但可改变成矿的物理和化学环境,促进金属元素迁移和富集,而且可吸附和吸收成矿元素,在有利成矿部位直接成矿。

微生物岩与磷矿石或矿层的产出相关,欧洲侏罗系鲕状赤铁矿就是由微生物管状壳组成的^[18]。我国上扬子江区早寒武世黑色页岩和黔中晚震旦世广泛发育的微生物岩中,P 的富集与叠层石藻体有紧密关系^[99,100]。用扫描电镜观察黔中晚震旦世的叠层石磷块岩,磷质球粒或磷灰岩颗粒附件都有细菌微生物钻孔作用的痕迹,这是微生物直接参与富集作用的标志^[100]。Fe 是地球上分布最广的元素之一,Fe 的氧化还原作用在细菌的参与下变得迅速和完全,从而形成了重要的矿物沉淀也可以诱导细胞外铁的氢氧化物形成^[101]。不同的 pH 条件下一旦有铁细菌参加,该矿床就会变得规模大且更富集。如英国的约克郡里阿斯菱铁矿、美国明尼苏达州梅萨比铁矿、新泽西州南部海岸平原的沼泽铁矿等都与生物成矿有关^[101],欧洲侏罗系鲕状赤铁矿也是由微生物管状壳组成的^[18]。锰细菌的催化作用在

深海锰结核的形成中起了重要作用,可以将深海锰结核看作是一种微生物建隆,如以色列和北非白垩系的磷块岩由管状和球状壳及杆状体和层纹组成^[102]。

4.4 微生物烃源岩

微生物在石油的形成过程中起到了至关重要的作用,是石油形成和演化的物质基础。圈闭在地质历史时期海相和湖相沉积物中的蓝细菌和藻类逐渐转变为石油,在有机质转换过程中,细菌对有机质的初期转化起着重要作用,微生物分解一部分有机质,把释放能量的一部分转给另一部分剩余的有机质,使之脱氧、脱氢、加氢,向石油转变。地层中繁殖的微生物产生 H₂、CO₂ 和 CH₄ 等气体,可增加地层压力,并可溶解于原油中,降低粘度,提高流动性。已经在墨西哥湾海岸、哈萨克斯坦和土库曼斯坦的侏罗纪地层中发现以微生物碳酸盐包壳为主的油气储层^[103]。

4.5 现代海底冷泉和天然气水合物

天然气水合物作为一种替代性的新型能源已经受到国际上重视。甲烷为天然气水合物的主要气体成分,其中生物成因的甲烷气主要是由微生物分解地质时期的生物遗骸等有机质而产生的^[104]。冷泉沉积及其生态系统作为深水冷渗漏碳酸盐沉积的典型代表和天然气水合物的示踪标志是地质学和生物学交叉的前沿领域和发展的热点^[79]。实验已经发现在海底冷泉碳酸盐岩的矿物中保存了细菌丝状体形态,并在碳酸盐岩的断裂面和外表层都显示出细菌形态特征,从而证明碳酸盐岩是海底天然气泄露系统中细菌对甲烷气氧化的产物^[104]。

5 结 语

钙质微生物及其沉积产物是近 20 年提出的术语,用于定义微生物群落形成的纹层和非纹层的碳酸盐沉积。微生物岩包括叠层石、凝块石、树枝石和均一石 4 种类型。对微生物碳酸盐沉积的研究,在当今地质界已引起了极大的兴趣和关注。在最近 20 多年里,微生物的沉积作用及其环境意义是发展很快的研究领域,微生物地质学和地球化学的成果已经从根本上修订了地球科学的核心观点。微生物碳酸盐沉积作为一种由底栖微生物群落生长和生理作用粘接并捕获沉积质点或由其生物矿化作用引起表面矿物沉淀而形成的生物沉积岩,参与并促进众多沉积和地球化学过程,并控制大气成分。对微生物碳酸盐沉积的研究在阐明生物礁和丘的微生物沉

积作用、重塑环境和气候变化、查明地质重大变化时期微生物群落繁盛与生物事件的关系、研究微生物引发的矿物沉淀作用、评价海相碳酸盐沉积地层的油气远景、寻找海域天然气水合物等方面都具有非常重要的研究价值。微生物碳酸盐沉积的研究涉及到多门学科相互交叉,对其研究可以促进地质微生物学、沉积学、古生物学、石油地质、地球化学及(古)气候环境等相关学科的融合,同时又从全新的角度探讨这些相关学科的研究意义及应用价值。

参考文献 (References):

- [1] Riding R. Microbial carbonate: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. *Sedimentology*, 2000, 47: 179-214.
- [2] Fowle D A, Roberts J A, Fortin D, et al. The evolution of geomicrobiology: Perspectives from the mineral-bacteria interface[J]. *Geobiology*, 2007, 5: 207-210.
- [3] Warren L A, Kauffman M E. Microbial geoengineers[J]. *Science*, 2003, 299: 1 027-1 029.
- [4] Sorby H C. On the structure and origin of limestones[C]// Anniversary Address of the President. Geological Society of London, 1879, 35: 39-95.
- [5] Kalkowsky E. Oolith und Stromatolith in norddeutschen Buntsandstein[J]. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 1908, 60: 68-125.
- [6] Aitken J D. Classification and environmental significance of crystalgal limestones and dolomites, with illustration from Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1967, 37: 1 163-1 178.
- [7] Burne R V, Moore L S. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities[J]. *Palaios*, 1987, 2: 241-254.
- [8] Riding R. Classification of microbial carbonates[C]// Riding R ed. *Calcareous Algae and Stromatolites*. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 21-51.
- [9] Reitner J. Modern cryptic microbialite/metazoan facies from Lizard Island (Great Barrier Reef, Australia)—Formation and concepts[J]. *Facies*, 1993, 29: 3-40.
- [10] Delgado O, Lapointe B E. Nutrient-limited productivity of calcareous versus fleshy macroalgae in a eutrophic, carbonate-rich tropical marine environment[J]. *Coral Reefs*, 1994, 13(3): 151-159.
- [11] Feldmann M, McKenzie J A. Stromatolite-thrombolite associations in a modern environment, Lee Stocking Island, Bahamas[J]. *Palaios*, 1998, 13: 201-212.
- [12] Sprachta S, Camoin G, Golubic S, et al. Microbialites in a modern lagoonal environment: Nature and distribution, Tikehau atoll (French Polynesia) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 175: 103-124.
- [13] Webb G E, Baker J C, Jell J S. Inferred syngenetic textural evolution in Holocene cryptic reefal microbialites, Heron Reef, Great Barrier Reef, Australia[J]. *Geology*, 1998, 26: 355-358.
- [14] Webb G E, Kamber B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: A new shallow seawater proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 1 557-1 565.
- [15] Whalen M T, Day J, Eberli G P, et al. Microbial carbonates as indicators of environmental change and biotic crises in carbonate systems: Examples from Upper Devonian, Alberta basin, Canada [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 181: 127-151.
- [16] Sepkoski Jr J. Mass extinctions in the Phanerozoic oceans: A review[C]// Silver L T, Schultz P H, eds. *Geological Implications of the Impact of large Asteroids and Comets on the Earth*. Special Papers of Geological Society of America, 1982, 190: 283-290.
- [17] Camoin G F, Gautret P. Microbialites and microbial communities: Biological diversity, biogeochemical functioning, diagenetic processes, tracers of environmental changes[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185: 127-130.
- [18] Dai Yongding, Chen Meng'e, Wang Yao. Development and perspective of research for microbialites[J]. *Advances in Earth Science*, 1996, 11(2): 209-215. [戴永定, 陈孟莪, 王尧. 微生物岩研究的发展与展望[J]. *地球科学进展*, 1996, 11(2): 209-215.]
- [19] Shen J W, Yu C M, Bao H M. A Famennian Renalcis-Epiphyton reef at Zhajiang, Guilin, South China[J]. *Facies*, 1997, 37: 195-210.
- [20] Shen J W, Teng J B, Pedoja Kevin. Middle and Late Devonian microbial carbonates, reefs and mounds in Guilin, South China and their sequence stratigraphic, paleoenvironmental and paleochimatic significance [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(11): 1 900-1 912.
- [21] Gong Yiming, Xu Ran, Tang Zhongdao, et al. Relationships between bacterial-algal proliferating and mass extinction in the Late Devonian Frasnian-Famennian transition: Enlightening from carbon isotopes and molecular fossils [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(2): 140-148. [龚一鸣, 徐冉, 汤中道, 等. 晚泥盆世 F-F 之交菌藻微生物繁荣与集群灭绝的关系: 来自碳同位素和分子化石的启示[J]. *中国科学: D 辑*, 2005, 48(2): 140-148.]
- [22] Wang Yongbiao, Tong Jiannan, Wang Jiasheng, et al. Calcimicrobialite after end-Permian mass extinction in South China and its palaeoenvironmental significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 665-671.
- [23] Xie S C, Pancost R D, Yin H F. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction[J]. *Nature*, 2005, 434: 494-497.
- [24] Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: Complementing the classification of limestones[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 222-234. [梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 222-234.]

- [25] Camoin G F, Gautret P, Montaggioni L F, *et al.* Nature and environmental significance of microbialites in Quaternary reefs: The Tahiti paradox[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126:271-304.
- [26] Teng Jianbin, Shen Jianwei. Microbial carbonates in Holocene beachrocks, Shuiweiling, Luhuitou Peninsula, Hainan Island [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51(1): 30-40.
- [27] Wang Yue, Shen Jianwei, Long Jiangping. Ecological-sedimentary zonations and carbonate deposition, Xiaodonghai reef flat, Sanya, Hainan Island[J]. *Science in China (Series D)*, 2011, 54(3): 359-371.
- [28] Shen Jianwei, Wang Yue. Modern microbialities and their environmental significance, Meiji reef atoll, Nansha (Spratly) Island, South China Sea [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51(4): 608-617.
- [29] Awramik S M, Schopf J W, Walter M A. Filamentous fossil bacteria from the Archean of Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 1983, 20:357-374.
- [30] 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.
- [31] Schmid D U, Leinfelder R R, Nose M. Growth dynamics and ecology of Upper Jurassic mounds, with comparisons to Mid-Palaeozoic mounds[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 145: 343-376.
- [32] Feldman M, MacKenzie J A. Messinian stromatolite-thrombolite associations, Sonta Pola, SE Spain; An analogue for the Palaeozoic? [J]. *Sedimentology*, 1997, 44:893-914.
- [33] Woo J, Chough S K, Han Z Z. Chambers of Epiphyton thalli in microbial buildups, Zhangxia Formation (middle Cambrian), Shandong province, China [J]. *Palaeor*, 2008, 23:55-64.
- [34] Schidlowski M. A 3800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks [J]. *Nature*, 1988,333: 313-318.
- [35] Lowe D R. Stromatolites 3,400-Myr old from the Archean of Western Australia [J]. *Nature*, 1980, 284: 441-443.
- [36] Sheehan P M, Harris M T. Microbialite resurgence after the late Ordovician extinction [J]. *Nature*, 2004, 430: 75-78.
- [37] Shinn E A. Worm and algal-built columnar stromatolites in the Persian Gulf [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1972, 42: 837-840.
- [38] Papineau D, Walker J J, Mojzsis S J, *et al.* Composition and structure of microbial communities from stromatolites of Hamelin Pool in Shark Bay, Western Australia [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(8): 4 822-4 832.
- [39] Dravis J J. Hardened subtidal stromatolites, Bahamas [J]. *Science*, 1983, 219:385-386.
- [40] Awramik S M. The history and significance of stromatolites [C] //Schidlowski M, *et al*, eds. *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Berlin:Springer-Verlag, 1992:435-449.
- [41] Loisy C, Verrecchia E P, Dufour P. Microbial origin for pedogenic micrite associated with a carbonate paleosol (Champagne, France) [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 126: 193-204.
- [42] Teng Jianbin, Shen Jianwei, Jin Chunhua. Relationship between microbial carbonates and hydrocarbon reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 522-526. [滕建彬, 沈建伟, 金春花. 微生物碳酸盐地层与油气成藏 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 522-526.]
- [43] Webb G E. Was Phanerozoic reef history controlled by the distribution of non-enzymatically secreted reef carbonates (microbial carbonate and biologically induced cement)? [J]. *Sedimentology*, 1996, 43:947-971.
- [44] Grotzinger J P. Introduction to Precambrian reefs [C] //Geldsetzer H H J, *et al*, eds. *Reefs, Canada and Adjacent Area*. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1989, 13:9-12.
- [45] Riding R. Calcified cyanobacteria [C] //Riding R ed. *Calcareous Algae and Stromatolites*. Berlin:Springer-Verlag, 1991:57-60.
- [46] Copper P. Silurian and Devonian reefs: 80 million years of global greenhouse between two ice ages [C] //Kiessling W, Flügel E, Golonka J, eds. *Phanerozoic Reef Patterns*. Tulsa: SEPM Special Publication, 2002, 72:181-238.
- [47] Webb G E. Latest Devonian and Early Carboniferous reefs: Depressed reef building following the middle Paleozoic collapse [C] //Flügel E, Kiessling W, Golonka J, eds. *Phanerozoic Reef Patterns*. Tulsa: SEPM Special Publication, 2002, 72:239-269.
- [48] Riding R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 185:229-238.
- [49] Lehrmann D J. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China [J]. *Geology*, 1999, 27:359-362.
- [50] Stanley G D. The history of early Mesozoic reef communities: A three-step process [J]. *Palaios*, 1988, 3:170-183.
- [51] Arenas C, Pomar L. Microbial deposits in upper Miocene carbonates, Mallorca, Spain [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297(2):465-485.
- [52] Cabioch G, Camoin G, Webb G E, *et al.* Contribution of microbialites to the development of coral reefs during the last deglacial period; Case study from Vanuatu 9 South-West Pacific) [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 185:297-318.
- [53] Rowland S M, Shapiro R S. Reef patterns in the Cambrian and earliest Ordovician [C] //Flügel E, Kiessling W, Golonka J, eds. *Phanerozoic Reef Patterns*. Tulsa: SEPM Special Publication, 2002, 72:239-269.
- [54] Copper P. Ancient reef ecosystem expansion and collapse [J]. *Coral Reefs*, 1994, 13:3-11.
- [55] Schubert J K, Bottjer D J. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster forms [J]. *Geology*, 1992, 20:883-886.
- [56] Webb G E. Biologically induced carbonate precipitation in reefs through time, Chapter 5 [C] //Stanley G ed. *The History and Sedimentology of Ancient Reef Systems: Topics in Geobiology*, Vol. 17. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001:159-203.
- [57] Yu C M, Shen J W. Devonian Reef Complexes in Guilin, South China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing

- House, 1998.
- [58] Shen J W, Webb G E. Metazoan-microbial framework fabrics in a Mississippian (Carboniferous) coral-sponge-microbial reef, Monto, Queensland, Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 178(1/2):113-133.
- [59] Ezaki Y, Liu J B, Adachi N. Earliest triassic microbialite micro-to Megastructures in the Huaying area of Sichuan province, south China: Implications for the nature of oceanic conditions after the End-Permian Extinction[J]. *Palaios*, 2003, 18:388-402.
- [60] Shen J W, Xu H L. Microbial carbonates as contributors to upper Permian (Guadalupian-Lopingian) biostromes and reefs in carbonate platform margin setting, Ziyun county, south China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 218:217-238.
- [61] Kershaw S, Guo L, Swift A, et al. Microbialites in the Permian-Triassic boundary interval in central China: Structure, age and distribution[J]. *Facies*, 2002, 47:83-90.
- [62] Shen Jianwei, Webb G E. Famennian (Upper Devonian) calcimicrobial reef at Miaomen, Guilin, Guangxi, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 204:373-394.
- [63] Kiessling W, Flügel E, Golonka J. Phanerozoic Reef Patterns [M]. Tulsa: SEPM Special Publication, 2002, 72:775.
- [64] Fan D L, Hein J R, Ye J. Ordovician reef-hosted Jiaodingshan Mn-Co deposit and Dawashan Mn deposit, Sichuan province, China[J]. *Ore Geology Review*, 1999, 15:135-151.
- [65] Li Yue, Feng Hongzhen, Li Jun. Benthic algae in improvement of ecologic crisis of the Late Ordovician in the west margin of the Yangtze Platform [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2002, 41(2):16-23. [李越, 冯洪真, 李军. 底栖藻对扬子地台西缘晚奥陶世生态危机的改善作用[J]. 古生物学报, 2002, 41(2):16-23.]
- [66] Golubic S, Seong-Joo L, Browne K M. Cyanobacteria: Architects of sedimentary structures[C]//Riding R E, Awramik S M, eds. *Microbial Sediments*. Berlin: Springer, 2000:57-67.
- [67] Golubic S. The continuing importance of cyanobacteria [C]// Bengtson S ed. *Early Life on Earth*, Nobel Symposium 84. New York: Columbia University Press, 1994:334-340.
- [68] Ehrlich H L. How microbe influence mineral growth and dissolution[J]. *Chemical Geology*, 1996, 132:1-3.
- [69] Vasconcelos C, McKenzie J A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67:378-390.
- [70] Reid R P, Visscher P T, Decho A W, et al. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites[J]. *Nature*, 2000, 406:989-992.
- [71] Frederik H, Verstraete W. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2002, 1(1):3-7.
- [72] Gautret P, Camoin G, Golubic S, et al. Biochemical control of calcium carbonate precipitation in modern lagoonal microbialites, Tikehau Atoll, French Polynesia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74:462-478.
- [73] Spilde M N, Boston P J, Schelble R T, et al. Mineral Precipitation by Mn-oxidizing Microbes: Comparing natural and cultured Mn-minerals [C] // 33rd Annual Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, abstract no. 1 090, 2002.
- [74] Krumbein W F. Photolithotropic and chemiorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf of Apaba, Sinai) [J]. *Geomicrobia*, 1979, 1:139-203.
- [75] Mancini E A, Llina' s J C, Parcell W C, et al. Upper Jurassic thrombolite reservoir play, northeastern Gulf of Mexico [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(11):1 573-1 602.
- [76] Yang Xiaoping, Zhao Wenzhi, Cao Hong, et al. Formation and distribution of Triassic Feixianguan oolitic bank favorable reservoir in the NE Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1):17-21. [杨晓萍, 赵文智, 曹宏, 等. 川东北三叠系飞仙关组鲕滩气藏有利储集层的形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1):17-21.]
- [77] Zhang Tingshan, Shen Zhaoguo, Lan Guangzhi, et al. Microbial fossils and their biosedimentation and buildup in Paleozoic mud mounds, Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2):229-237. [张廷山, 沈昭国, 兰光志, 等. 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[J]. 沉积学报, 2002, 20(2):229-237.]
- [78] Buggisch W, Krumm S. Palaeozoic cold seep carbonates from Europe and North Africa—An integrated isotopic and geochemical approach [J]. *Facies*, 2005, 51:566-583.
- [79] Reitner J. Organomineralization: A clue to the understanding of meteorite-related “bacteria-shaped” carbonate particles [C] // Seckbach J ed. *Origins: Genesis, Evolution and Diversity of Life*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004:195-212.
- [80] Campbell K A, Farmer J D, Marais D D. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: Carbonate geochemistry, fluids and palaeoenvironments [J]. *Geofluids*, 2002, 2:63-94.
- [81] Lonsdale P. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers [J]. *Deep-Sea Research*, 1977, 24:857-863.
- [82] Paull C K, Hecker B, Commeau R, et al. Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa [J]. *Science*, 1984, 226:965-967.
- [83] Miura T, Tsukahara J, Hashimoto J. Lamellibranchia satsuma, a new species of vestimentiferan worms (Annelida: Pogonophora) from a shallow water hydrothermal vent in Kagoshima Bay, Japan [J]. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 1997, 110:157-162.
- [84] Bohrmann G, Heeschen K, Jung C, et al. Widespread fluid expulsion along the seafloor of the Costa Rica convergent margin [J]. *Terra Nova*, 2002, 14:69-79.
- [85] Fujikura K, Kojima S, Tamaki K, et al. The deepest chemosyn-

- thesis-based community yet discovered from the hadal zone, 7326 deep, in the Japan Trench[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 190:17-26.
- [86] Van Dover C L, Humphris S E, Fornari D, *et al.* Biogeography and ecological setting of Indian Ocean hydrothermal vents[J]. *Science*, 2001, 294:818-823.
- [87] Edmonds H N, Michael P J, Baker E T, *et al.* Discovery of abundant hydrothermal venting on the ultraslow-spreading Gakkel ridge in the Arctic Ocean[J]. *Nature*, 2003, 421:252-256.
- [88] Zhu Youhai, Zhang Guangxue, Lu Zhenquan, *et al.* Gas hydrate in the South China Sea: Background and indicators [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 29(5): 6-10. [祝有海, 张光学, 卢振权, 等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J]. 石油学报, 2001, 29(5):6-10.]
- [89] Chen Zhong, Yan Wen, Chen Muhong, *et al.* Discovery of seep authigenic carbonate nodules on northern continental slope of South China Sea: New evidence of gas hydrate[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 51(9):1 065-1 072. [陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 天然气水合物新证据[J]. 科学通报, 2006, 51(9):1 065-1 072.]
- [90] Han X Q, Erwin S, Huang Y Y, *et al.* Jiulong methane reef: Microbial mediation of seep carbonates in the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2008, 249:243-256.
- [91] Campbella K A, Francisb D A, Collinsa M, *et al.* Hydrocarbon seep-carbonates of a Miocene forearc (East Coast Basin), North Island, New Zealand[J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 204:83-105.
- [92] Rasmussen B. Filamentous microfossils in a 3235-million-year-old volcanogenic massive sulfide deposit[J]. *Nature*, 2000, 405: 676-679.
- [93] Barbieri R, Ori G G, Cavalazzi B. A Silurian cold-seep ecosystem from the Middle Atlas, Morocco[J]. *Palaios*, 2004, 19: 527-542.
- [94] Mu Xi'nan, Yan Huijun, Li Yue, *et al.* Temporal and spatial distribution of microbiolitic reefs of middle Cambrian, eastern north China craton[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2003, 20(3):279-285. [穆西南, 严惠君, 李越, 等. 华北地台东部中寒武世微生物礁的时空分布[J]. 微体古生物学报, 2003, 20(3):279-285.]
- [95] Feng Jun, Li Jianghai, Niu Xianglong. The identification of the microbe fossil and its scientific implication[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2005, 20(2):136-142. [冯军, 李江海, 牛向龙. 热泉微生物化石的识别研究及其科学意义[J]. 微体古生物学报, 2005, 20(2):136-142.]
- [96] Labrenz M, Druschel G K, Tamara T E, *et al.* Formation of Sphalerite (ZnS) Deposits in natural biofilms of sulfate-reducing Bacteria[J]. *Science*, 2000, 290:1 744-1 747.
- [97] Folk R L, Robert H H, Moore C H. Black phytokarst from Hell, Cayman Islands, British West Indies[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1973, 84(7): 2 351-2 360.
- [98] Viles H A. Biokarst-review and prospect[J]. *Progress in Physical Geography*, 1984, 8(4): 523-542.
- [99] Lei Jiajin, Li Renwei, Tobschall H J, *et al.* Characteristics of black shale-hosted concretionary phosphates and the mechanisms of microbes mediated phosphorus precipitation in Cambrian Horizon on Yangtze Platform[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(6):592-601. [雷加锦, 李任伟, Tobschall H J, 等. 扬子江地台南缘早寒武世黑色页岩系中形态硫特称及成因意义[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(6):592-601.]
- [100] Chen Meng'e, Li Juying, Chen Qiyang. The late Sinian microbiolite and its phosphorus enrichment in central Guizhou province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 3:446-452. [陈孟莪, 李菊英, 陈其英. 黔中晚震旦世微生物岩及其磷的富集[J]. 岩石学报, 1999, 3:446-452.]
- [101] Ja Rongfen, Li Rongsen, Wei Yangbao. The influence and significance of microbial in the Fe geologic cycle[J]. *Geological-Geochemistry*, 1992, 3:62-69. [贾容芬, 李荣森, 卫杨保. 微生物在铁的地质循环中的作用及其意义[J]. 地质地球化学, 1992, 3:62-69.]
- [102] Bian Lizeng, Lin Chengyi, Zhang Fusheng, *et al.* Pelagic manganese nodules—A new type of concolite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(3):232-236. [边立曾, 林承毅, 张富生, 等. 深海锰结核——核形石的新类[J]. 地质学报, 1996, 70(3):232-236.]
- [103] Leinfelder R, Schmid T, Nose M, *et al.* Jurassic Reef Patterns—The Expression of a Changing Globe[M]. Tulsa:SEPM Special Publication, 2002, 72: 465-520.
- [104] Wu Houbo, Su Xiaobo, Yan Wen. The microbial genesis of submarine gas hydrate and its microbiological indication[J]. *Science Scope*, 2008, 32:396-100. [吴后波, 苏晓波, 颜文. 海底天然气水合物的微生物成因及识别[J]. 科学视野, 2008, 32:396-100.]

Microbial Carbonates and Its Research Significance

Wang Yue¹, Shen Jianwei¹, Yang Hongqiang^{1,2}, Wang Xu^{1,2}, Liu Miaomiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology

Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper clarified the characteristics, definition, classification and the research aspects of microbial carbonates, documented the research and application significances of microbial carbonates in major environmental and climatic events, Holocene climate change research and environmental restoration work, as well as in mineral deposition, oil and gas reservoirs, and tracing the hydrate, and further discussed the relationships between microbial carbonate buildups and hydrocarbon reservoirs and latest research achievements on this research field, as well as the research focus and development tendency of microbial carbonates. As a product formed by integrated processes of microbial activities, carbonate sedimentology and geochemistry, microbial carbonates could be a new intersection for sedimentological, paleontological, petroleum geological, sedimentary geochemical, paleoenvironmental and paleoclimatic studies.

Key words: Microbial carbonates; Characteristics; Definition.

城市增长危及全球环境

《公共科学图书馆—综合》(PLOS ONE)杂志上的一篇采用元分析的文章指出,未来 20 年,全世界城市的爆炸性增长将对人口和全球环境构成重大威胁。

来自耶鲁大学、亚利桑那州立大学、德克萨斯农工大学和斯坦福大学的研究人员预测,到 2030 年,城市的面积将扩大 59 万平方英里——几乎是蒙古的大小——以满足 14.7 亿多城市人口的需求。

该研究的首席作者,耶鲁大学林业与环境学院的城市环境研究副教授 Karen Seto 说,这些城市有可能会在生物多样性最丰富的地方发展。它们将增长和扩张到森林、生物热点区、热带草原、海岸线等敏感和脆弱的地区。

研究人员发现,城市地区已在海岸地区快速扩张。在城市增长的所有地区中,海岸是最脆弱的地区。人类及基础设施面临着洪水、海啸、飓风及其他环境灾害的威胁。

该研究首次评估了目前及未来全球城市地区增长的速度。Seto 说,对于全球城市人口增长的模式我们了解得很多,但对于城市地区是如何变化的却知之甚少。土地覆盖的变化和城市化共同驱动环境发生众多变化,从生境丧失和农用地转用到地方和区域的气候变化。

研究人员仔细分析了利用卫星数据绘制城市增长地图的同行评议研究,发现 1970—2000 年间,世界城市足迹至少增长了 2.24 万平方英里,约是俄亥俄州面积的一半。

Seto 说,这一数值是巨大的,但是,实际上城市土地的扩张要远大于我们的分析结果,因为我们仅分析了那些利用卫星数据的公开发表的研究。我们发现利用卫星数据研究的最稠密城市地区只有 48 个。这意味着我们还未对世界上大部分的最大城市的自然扩张进行跟踪分析。

在中国,一半的城市土地扩张是受不断增大的中产阶级的驱动,而印度和非洲城市的大小则是受人口增长的驱动。收入的增加促使对更大的住房面积和城市发展所需土地的需求上升,这将对生物多样性保护、碳汇丧失和能源利用产生极大影响。

(熊永兰 编译)

原文题目:Growth of Cities Endangers Global Environment

来源: <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/08/110819155428.htm>