

地球微生物过程与潜在烃源岩的形成: 钙质微生物岩

杨 浩¹, 王永标¹, 陈 林¹, 董 曼²

1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 吉林大学古生物学与地层学研究中心, 吉林长春 130026

摘要: 钙质微生物岩是各种微生物生命活动引起的特殊的碳酸盐建造, 主要集中发育在前寒武纪及显生宙等重大地质转折期, 在我国华北及华南地区有着广泛的分布。微生物岩中大量微生物化石的存在反映当时的海洋具有很高的初级生产力。明显偏低的钼同位素值显示在前寒武纪相当长的时期里, 海洋底部处于缺氧状态。Th/U 值的急剧降低和黄铁矿在浅水台地区的广泛出现显示二叠纪大绝灭后, 海洋环境也同样呈现缺氧的还原状态。高生产力和还原的沉积环境为生物有机质的埋藏及烃源岩的形成创造了条件。前寒武纪及晚泥盆世微生物岩中沥青的发现, 进一步增加了钙质微生物岩作为潜在碳酸盐型烃源岩的可能性。

关键词: 钙质微生物岩; 潜在烃源岩; 地球微生物。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2007)06-0797-06

收稿日期: 2007-08-23

Calci-Microbialite as a Kind of Potential Hydrocarbon Source Rock and Its Geomicrobiological Processes

YANG Hao¹, WANG Yong-biao¹, CHEN Lin¹, DONG Man²

1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. The Center of Paleontology and Stratigraphy, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Calci-microbialite is a special carbonate buildup formed due to the activities of different kinds of microbes. Most of microbialites were developed in Precambrian or at the great transitional stages in Phanerozoic. Widespread microbialites have been found both in North and South China. Abundant microfossils preserved in the microbialites show high-level productivity during deposition. The obviously lower value of Mo isotope shows that the seafloor is of anoxic condition during the long time of Precambrian. The sharp reduction of Th/U value as well as the wide spread pyrite in shallow carbonate platforms indicate that the ocean environment is anoxic after end-Permian mass extinction. High-level productivity and anoxic sedimentary environment favor the efficient preservation of organic matter and thus the formation of source rocks. Bitumen observed in many outcrops of Precambrian and Late Devonian microbialites further raises the possibility of calci-microbialite as a potential hydrocarbon source rock.

Key words: calci-microbialite; potential hydrocarbon source rock; geomicrobes.

地球微生物学是地球生物学的一个分支(谢树成等, 2006), 主要研究地球微生物的类型、分布、生命过程及其对地球环境的影响和改造。地质历史上地球微生物学研究的重点对象是与微生物作用有关的各类微生物岩。古微生物岩的研究不但是认识地

球上微生物类群演化历史的需要, 而且能提高对地球环境演变历史和规律的认识。此外, 微生物岩广泛分布的时期也往往是全球海洋微生物大爆发、海洋环境处于还原状态的时期。高的微生物生产力和还原的环境条件为海相烃源岩的形成创造了有利的条

基金项目: 中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(No. G0800-06-ZS-319); 国家自然科学基金项目(Nos. 40572002, 40325004, 40232025)。

作者简介: 杨浩(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事微生物岩及古海洋环境研究。E-mail: 2003yanghao@163.com

件,因此微生物岩的研究在油气勘探和研究中同样具有重要的经济意义。

1 微生物岩形成的地球微生物学过程

1.1 微生物岩的定义及类型

Burne and Moore(1987)根据成因对微生物岩(microbialite)作出如下定义:“微生物岩是生物沉积物,即由底栖微生物群落捕获和粘结碎屑沉积物或以它们为矿物沉淀中心而形成的沉积物”。微生物岩与主要由钙藻骨骼大量机械堆积而形成的“钙藻灰岩”有着本质的不同,钙质微生物岩中的碳酸盐矿物颗粒及微生物化石大部分是原地形成的,机械搬运作用不明显。也许正因为微生物岩的这些特点,也有人常常将微生物岩作为生物礁的一种特殊类型。当然,微生物岩与由后生生物形成的生物礁在成因机理和形成环境上有很大的差异。

微生物岩的类型很多,包括叠层石、核形石、树形石、凝块石,某些鲕粒、团粒、球粒和泥晶(陈晋铤,1993;戴永定等,1996)。大部分微生物岩主要由碳酸盐矿物组成,称为钙质微生物岩(Calcium-microbialite)。

1.2 微生物岩中的微生物类群特征

从现代海洋叠层石中生物组成分析,微生物岩中的生物类型多样,包括:光合原核生物(蓝细菌)、真核微体藻类(如褐藻、红藻、硅藻等)、化学自养或异养微生物(如硫细菌等),以及一些后生动物(如介形虫及甲壳类 Crustacea 等)(Konishi *et al.*, 2001)。但大量研究显示,微生物岩中主要生物类型为蓝细菌及一些厌氧细菌。对地史时期钙质微生物岩中微生物类群的识别则要困难得多,因为相当大的微生物不具钙质骨骼,其保存为有形化石的可能性很小,只在特殊时期的特殊条件下,部分微生物可以被钙化而保存为化石。

在前寒武纪漫长的地质历史中,曾形成了大量的叠层石。关于叠层石的成因,一般认为它是蓝细菌生命活动及沉积作用共同作用的产物。然而,在前寒武纪大量碳酸盐叠层石中,几乎没有发现保存完好的钙质微生物化石,主要在一些硅质岩中发现球状或丝状微生物化石(朱土兴等,1993;曹瑞骥和袁训来,2003;严贤勤等,2006)。与前寒武纪不同,显生宙开始,在许多钙质微生物岩中均可发现大量钙化了的微生物化石(Riding and Liang, 2005)。根据目前研究,一般认为这些钙化微生物化石主要是蓝细菌。

由于相当大部分微生物在形态和大小上非常相似,特别是球状微生物化石,所以对其属种的鉴定显得非常困难。对这些微生物化石的类别鉴定主要依据形态、大小、沉积构造(如藻叠层等)及保存环境等综合信息。近年来,生物标志化合物分析技术的进步,也为沉积岩中微生物类群的确定提供了重要手段(Xie *et al.*, 2005)。

由于一部分蓝细菌在一定海洋化学条件下可以钙化,所以蓝细菌是目前在古代微生物岩中所能识别出来的主要微生物化石。比较常见的蓝细菌化石主要为葛万藻、肾形藻类及其它球状蓝细菌化石。不同时期的蓝细菌化石也存在一些差异,如早三叠世钙质微生物岩中经常见到的束囊状化石,其基本结构与肾形藻类相似,但肾形藻常常具有分枝现象,而早三叠世的这种束囊状化石基本上没有分枝现象。

1.3 微生物岩形成的地球微生物学过程

无论是现代,还是古代微生物岩都具有特定的地理分布区域,因此是一个相对独立的生态系。作为一个生态系,一般具有特定的生态系结构组成,即生产者、消费者及分解者等。现代澳大利亚西部及波斯湾叠层石环境中,除了菌藻生物外,仍有一些适应性很强的多细胞后生动物,如介形虫及一些甲壳类 Crustacea 等(Konishi *et al.*, 2001)。古代一些微生物岩的研究也显示,微生物岩所代表的是由菌藻生物、小型腹足类、双壳类及介形虫等构成的一代简单而独特的生态系(Wang *et al.*, 2005)。

与微生物岩形成有关的主要是底栖微生物群落。根据现代藻席及微生物岩的研究资料,其中的底栖微生物群落主要由光合原核生物(即蓝细菌)、真核微体藻类、化学自养或异养微生物(如硫细菌等)组成。除了这些微生物以外,微生物生态系中还常常有少量后生多细胞生物,一般主要为小型腹足类及介形虫等。微生物岩的形成主要通过底栖微生物群落与周围环境之间各种复杂的生物化学作用进行的。微生物群落常常以不同的组合方式与外界环境发生物质和能量的交换。梁玉左等(1995)将底栖微生物群落与沉积物相互作用的组合方式总结为三种:一是薄膜状,在薄膜中底栖微生物群落散布在松散固结的碎屑沉积物中;二是席状,在席中底栖微生物与被捕获和粘结的碎屑沉积物形成关系紧密的组合;三是结块状,常为灰岩,由与底栖微生物群落密切相关的矿化作用所形成(Burne and Moore, 1987)。

微生物群落与外界环境之间相互作用的结果是

促进物质和能量的循环,在特定条件下形成碳酸盐矿物的堆积,即微生物岩沉积体的形成.在微生物岩形成过程中,碳酸盐矿物的聚集和堆积大致可归纳为三种方式:一是微生物对碎屑颗粒的机械捕获和粘结;二是微生物本身的生物矿化作用(如蓝细菌的钙化等);三是无机沉淀作用,即碳酸盐矿物在生物或沉积物表面上的无机沉淀作用.

2 微生物岩的地史分布

微生物岩在地质历史上有着广泛的分布.从时间上看,前寒武纪和显生宙重大地质转折期(S/O、F/F、T/P等)是钙质微生物岩大量出现的时期.在前寒武纪,尽管存在各种不同类型的钙质微生物岩,但分布最为广泛的却是各种形态的叠层石(朱士兴等,1993).在显生宙,寒武纪、奥陶纪—志留纪之交(Sheehan and Harris, 2004)、晚泥盆世弗拉期—法门期之交、二叠纪—三叠纪之交是钙质微生物岩最为发育的几个时期.其中已报道的晚泥盆世微生物岩主要为肾形藻生物丘和叠层石礁(Shen and Webb, 2004a, 2004b).此外,我国广西晚泥盆世还形成有大量藻纹层灰岩,其中也富含微生物化石,应该属于该时期微生物岩的另一类型.二叠纪—三叠纪之交微生物岩是当前研究的一个热点.已报道发现的微生物岩包括亚美尼亚(Baud *et al.*, 1997)、伊朗(Heydari *et al.*, 2003)、匈牙利(Hips and

Haas, 2006)、意大利北部(Wignall and Twitchett, 1999)、土耳其(Marcoux *et al.*, 1986; Baud *et al.*, 2005)、华南(Kershaw *et al.*, 1999; Lehrmann, 1999; Wang *et al.*, 2005)、日本(Sano and Nakashima, 1997)及格陵兰(Wignall and Twitchett, 2002)等.除了部分剖面上发现的叠层石外,二叠纪—三叠纪之交微生物岩在岩石结构上表现出一些特殊性,其中普遍的特征是具有“花斑状”构造(图1).最近Baud *et al.* (2007)通过现有研究总结表明,这类微生物岩不仅出现在二叠纪—三叠纪界线附近,而且在整个早三叠世均有断续分布.

作为微生物岩的一种,现代海洋中的叠层石主要分布在波斯湾、澳大利亚西部及美国佛罗里达等地,与地质历史上的微生物岩相比,其分布区域非常局限.从空间上看,钙质微生物岩主要分布在浅水海湾或浅水碳酸盐台地上.

3 微生物原始生产力及有机质的保存

现代海洋叠层石环境中具有非常丰富的菌藻生物,由于菌藻生物繁殖迅速,所以具有很高的生物生产力,其强大的生产力可与植物生态系相媲美(Walter, 1994).古代一些微生物岩中仍保存有大量的微生物化石,如晚泥盆世和早三叠世的一些微生物岩(图2和图3)中保存下来的微生物化石量就非常高,而且碳酸盐微相分析显示这些微生物化石为底栖原地生物.因此,如此大量微生物化石的富集反映出当时微生物岩形成时具有很高的原始生产力水平.然而,由于很多微生物难以保存为化石,所以也有不少微生物岩中微生物化石非常少见,如在前寒武纪碳酸盐叠层石及早三叠世的部分钙质微生物岩中常常看不到微生物化石.对这些微生物岩形成时生物生产力的评估,一方面要采用将今论古的办法,另一方面,也可以通过对微生物岩中因微生物生命活动所留下的特殊生物地球化学指标的研究来进行.从已有的研究分析,由于微生物岩的形成与当时大量微生物的作用有关,因此,其原始生产力水平总体是比较高的.

尽管微生物岩具有高的原始生产力水平,但在成岩埋藏过程中,由于环境条件和微生物作用的影响,生物有机质的埋藏量会发生很大的变化.前面已经提到,钙质微生物岩大多产在浅水碳酸盐台地上.在正常条件下,浅水环境含氧量较高,生物死亡后其

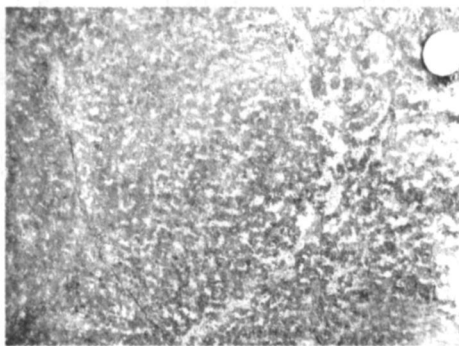


图1 重庆老龙洞二叠纪—三叠纪之交钙质微生物岩的“花斑状”构造,照片中白色部分由微晶碳酸盐矿物所组成,暗色部分由中粗晶碳酸盐矿物所组成

Fig. 1 “Graniphytic fabric” structure of the P/T boundary microbialites in Laolongdong section, Chongqing. The white part of the picture was composed of microlite carbonate minerals, the darkness composed of mid-coarse carbonate minerals

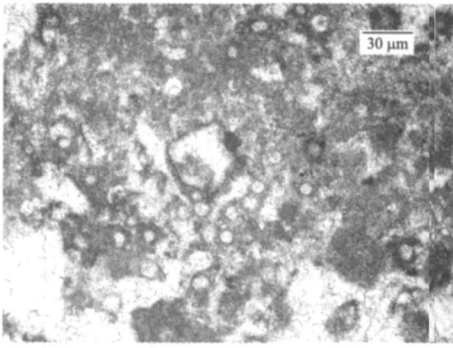


图 2 晚泥盆世钙质微生物岩中的微生物化石

Fig. 2 Microfossils in Late Devonian calci-microbialite

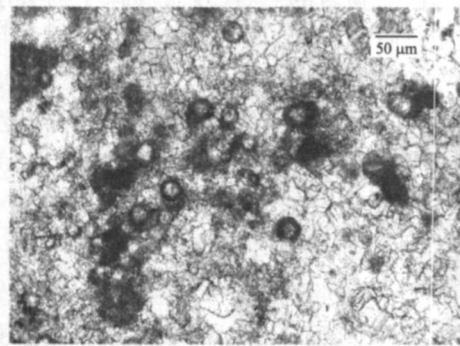


图 3 二叠纪—三叠纪之交钙质微生物岩中的微生物化石

Fig. 3 Microfossils in the calci-microbialite near the Permian-Triassic boundary

有机质容易被氧化, 因此对生物有机质的埋藏保存及烃源岩的形成非常不利. 这种现象可称为“高生产力, 低埋藏量”. 然而, 由于前寒武纪及显生宙重大地质转折期的海洋水化学条件或大气环境比较特殊, 特殊的环境条件使得浅水区微生物岩中有机质的有效保存成为可能. Arnold *et al.* (2004) 通过对澳大利亚中元古宙地层中钼同位素研究分析, 发现钼氧化物中钼同位素比值较现代静海相沉积物的要低约 2%, 显示在前寒武纪相当长的时间阶段里海洋底部处于缺氧状态. 显生宙几次重大生物集群绝灭事件后, 海洋环境也多出现缺氧状态. 例如, 华南地区二叠纪—三叠纪之交钙质微生物岩尽管多产在浅水碳酸盐台地或礁顶环境, 但其中普遍出现黄铁矿, 反映出还原的沉积环境 (李玉成和周忠泽, 2002). Wignall and Twitchett (1996) 通过对意大利北部、奥地利南部以及斯洛文尼亚地区二叠系—三叠系界线附近地球化学分析, 发现界线附近 Th/U 的值都在 2 以下, 显示在这个时期古海洋是一个缺氧的环境.

4 微生物岩作为潜在烃源岩的可能性

上述分析显示, 大部分钙质微生物岩不仅具有高的原始生产力水平, 而且因为其出现在特殊的地质历史时期, 所以海洋和大气环境对生物有机质的埋藏和保存总体比较有利. 因此, 从生物生产力和环境条件两方面分析, 前寒武纪及显生宙重大地质转折期的钙质微生物岩作为碳酸盐型烃源岩的可能性是存在的.

我国许多地区分布有不同时代的钙质微生物岩. 其中前寒武纪及显生宙重大地质转折期是钙质微生物岩出现最为集中的时期.

元古宙微生物岩在我国十分发育 (梁玉左等, 1995). 这一时期的微生物岩分布很广, 包括华北地台、华南地台和秦岭褶皱系. 在华北地台上, 它不但在其北部和东北部的燕山和辽宁省北部的清河地区有广泛的分布, 在其中部、南部和西部的中条山、太行山、小秦岭、鄂尔多斯、贺兰山和阴山等地也都有分布 (梁玉左等, 1984; 邱树玉等, 1992; 朱士兴等, 1993). 梁玉左等 (1993) 在华北地台北缘西段的白云鄂博到四子王旗东西一线的白云鄂博群中也发现了丰富的微生物岩, 并与燕山地区的中元古代高于庄组到雾迷山组在岩性、岩相和叠层石组合等方面极为相似, 并找到大量的微小型叠层石. 据梁玉左等 (1995) 估算, 如果华北地台北缘西段和东段形成时为统一的整体, 处于类似于陆表海的相同沉积环境中, 则其东西的延伸长度可达 1 000 km 左右, 南北的宽度也有 100 ~ 200 km. 在华北地台的西部和南部, 如果当时沉积范围也为统一的整体, 则其南北长度也应有 500 ~ 600 km, 东西宽约 300 ~ 400 km 的微生物岩分布. 这些微生物岩不但分布广, 而且厚度巨大, 一般多在 500 ~ 600 m 到 1 000 m 以上, 在燕山东段的宽城到蓟县一带, 可达 3 000 ~ 5 000 m 以上, 超过华北地台上自显生宙以来任何段代海相地层的厚度 (梁玉左等, 1995).

由于前寒武纪相当长时间内地球环境处于缺氧状态, 同时菌藻生物又相当繁盛, 因此即使在浅水陆表海环境中, 仍有可能形成碳酸盐型优质烃源岩. 在我国中元古代高于庄组到雾迷山组含有微小型叠层石的沥青质碳酸盐岩中, 已有相当多的地点发现油苗现象, 有的研究者认为这是很好的生油层位 (梁玉左等, 1995).

显生宙钙质微生物岩中以晚泥盆世及二叠纪—三叠纪之交两个时期最为重要. 在南盘江地区, 晚泥

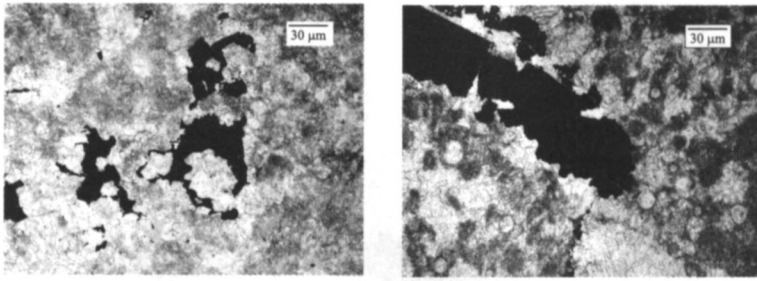


图4 广西晚泥盆世微生物岩中的沥青

Fig. 4 Remained bitumen found in the Late Devonian microbialites in Guangxi

盆世菌藻生物形成的钙质微生物岩不仅分布广泛,而且具有较大的厚度.相比之下,二叠纪—三叠纪之交微生物岩分布范围比晚泥盆世的要广泛得多,包括南盘江地区、川东、重庆及长江中下游地区等,但其厚度则相对较小,一般在几米左右,局部露头剖面上可达十几米.在广西,许多晚泥盆世微生物岩剖面上已发现沥青残留(图4).二叠纪—三叠纪之交的钙质微生物岩也与一般灰岩不同,岩石颜色总体偏暗.镜下观察发现有强的荧光显示,与现代巴哈马高盐度湖中微生物碳酸盐的情况十分相似(Dupraz *et al.*, 2004),反映其中包含有丰富的有机质.

总之,我国华南、华北地区广泛发育有不同时期的钙质微生物岩.这些微生物岩不仅分布广泛,而且具有一定的产出厚度,是一种值得研究的碳酸盐型潜在烃源岩.微生物岩本身既可能是生油母岩,又可能是很好的储油岩层(梁玉左等, 1995).钙质微生物岩中有机质的类型、有机质的埋藏变化过程及有机质的富存形式将是以后研究的重点.因此,对微生物岩形成的地球生物学过程进行系统研究,不仅将促进地球科学与生物学科的交叉发展,而且也将实现科学研究为国民经济服务的思想.

References

- Arnold, G. L., Anbar, A. D., Barling, J., *et al.*, 2004. Molybdenum isotope evidence for widespread anoxia in mid-Proterozoic oceans. *Science*, 304(5667): 87–90.
- Baud, A., Cirilli, S., Marcoux, J., 1997. Biotic response to mass extinction: The lowermost Triassic microbialites. *Facies* 36: 238–242.
- Baud, A., Richoz, S., Marcoux, J., 2005. Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units of the Taurus (SW Turkey), an anachronistic facies before the biotic recovery. *Comptes Rendus. Palevol.*, 4(6–7): 569–582.
- Baud, A., Richoz, S., Pruss, S. B., 2007. The lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time. *Global and Planetary Change*, 55(1–3): 81–89.
- Burns, R. V., Moore, I. S., 1987. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios* 2(3): 241–254.
- Cao, R. J., Yuan, X. L., 2003. Brief history and current status of stromatolite study in China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 20(1): 5–14 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. B., 1993. Progress and problems in research on stromatolites. In: Zhu, S. X., *et al.*, eds., *The stromatolites of China*. Tianjin Univ. Press, Tianjin, 205–214 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Y. D., Chen, M. E., Wang, Y., 1996. Development and perspective of research for microbialites. *Advances in Earth Science*, 11(2): 209–215 (in Chinese with English abstract).
- Dupraz, C., Visscher, P. T., Baumgartner, L. K., *et al.*, 2004. Microbe-mineral interactions: Early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology*, 51: 745–765.
- Heydari, E., Hassanzadeh, J., Wade, W. J., *et al.*, 2003. Permian-Triassic boundary interval in the Abadeh section of Iran with implications for mass extinction: Part 1. *Sedimentology, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193(3–4): 405–423.
- Hips, K., Haas, J., 2006. Calcimicrobial stromatolites at the Permian-Triassic boundary in a western Tethyan section, Bükk Mountains, Hungary. *Sedimentary Geology*, 185: 239–253.
- Kershaw, S., Zhang, J., Lan, G., 1999. A microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 146: 1–18.
- Konishi, Y., Prince, J., Knott, B., 2001. The fauna of thrombolitic microbialites, Lake Clifton, Western Australia. *Hydrobiologia* 457(1–3): 39–47.
- Lehrmann, D. J., 1999. Early Triassic calcimicrobial mounds

- and biostromes of the Nanpanjiang basin, South China. *Geology*, 27(4): 359–362.
- Li Y. C., Zhou, Z. Z., 2002. Massive dissociation of gas hydrate during oceanic anoxia as a cause of mass extinction at the end of Permian. *Geology Geochemistry*, 30(1): 57–63 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y. Z., Cao, R. J., Zhang, L. Y., et al., 1984. Pseudogymnosolenaceae of Late Precambrian in China. Geological Publishing House, Beijing, 1–200 (in Chinese).
- Liang, Y. Z., Wang, Y., Du, R. L., 1993. Structural deformation of microstromatolite in the Bayan Obo Group of Inner Mongolia and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 3: 229–238 (in Chinese with English abstract).
- Liang, Y. Z., Zhu, S. X., Gao, Z. J., et al., 1995. New progress in the study of stratolites—microbialite. *Regional Geology of China*, 1: 57–65 (in Chinese with English abstract).
- Marcoux, J., Baud, A., 1986. The Permian-Triassic boundary in the Antalya nappes (western Taurides, Turkey). *Memoria della Societa Geologica Italiana*, 34: 243–252.
- Qiu, S. Y., Liang, Y. Z., Cao, R. J., et al., 1992. Late Precambrian stromatolites and related mineral product. Northwest University Press, Xi'an (in Chinese).
- Riding, R., Liang, L. Y., 2005. Geobiology of microbial carbonates: Metazoan and seawater saturation state influences on secular trends during the Phanerozoic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219: 101–115.
- Sano, H., Nakashima, K., 1997. Lowermost Triassic (Griesbachian) microbial bindstone-cementstone, Southwest Japan. *Facies*, 36: 1–24.
- Sheehan, P. M., Harris, M. T., 2004. Microbialite resurgence after the Late Ordovician extinction. *Nature*, 430: 75–78.
- Shen, J. W., Webb, G. E., 2004a. Famennian (Upper Devonian) calcimicrobial (Renalcis) reef at Miaomen, Guilin, Guangxi, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 204: 373–394.
- Shen, J. W., Webb, G. E., 2004b. Famennian (Upper Devonian) stromatolite reefs at Shatang, Guilin, Guangxi, South China. *Sedimentary Geology*, 170(1–2): 63–84.
- Walter, M. R., 1994. Stromatolites: The main geological source of information on the evolution of early benthos. In: Bengtson, S., ed., *Early life on earth*. Columbia U. P., New York, 270–286.
- Wang, Y. B., Tong, J. N., Wang, J. S., et al., 2005. Calcimicrobialite after end-Permian mass extinction in South China and its palaeoenvironmental significance. *Chinese Science Bulletin*, 50: 665–671.
- Wignall, P. B., Twitchett, R. J., 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction. *Science*, 272: 1155–1158.
- Wignall, P. B., Twitchett, R. J., 1999. Unusual intraclastic limestones in Lower Triassic carbonates and their bearing on the aftermath of the end-Permian mass extinction. *Sedimentology*, 46(2): 303–316.
- Wignall, P. B., Twitchett, R. J., 2002. Permian-Triassic sedimentology of Jameson Land, East Greenland: Incised submarine channels in an anoxic basin. *Journal of the Geological Society*, 159: 691–703.
- Xie, S. C., Gong, Y. M., Tong, J. N., et al., 2006. Advancement from paleontology to geobiology. *Chinese Science Bulletin*, 51(19): 2327–2336 (in Chinese).
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Yin, H. F., et al., 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permian/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 434: 494–497.
- Yan, X. Q., Meng, F. W., Yuan, X. L., 2006. Geochemical characteristics of the cherts of the Neoproterozoic Jiudingshan Formation in northern Jiangsu and Anhui provinces. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 23(3): 295–302 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, S. X., et al., 1993. The stromatolites of China. Tianjin Univ. Press, Tianjin, 1–263 (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹瑞骥, 袁训来, 2003. 中国叠层石研究的历史和现状. 微体古生物学报, 20(1): 5–14.
- 陈晋镛, 1993. 叠层石研究的进展和问题. 见: 朱士兴, 等, 中国叠层石. 天津: 天津大学出版社, 205–214.
- 戴永定, 陈孟莪, 王尧, 1996. 微生物岩研究的发展与展望. 地球科学进展, 11(2): 209–215.
- 李玉成, 周忠泽, 2002. 华南二叠纪末缺氧海水中的有毒气体与生物集群绝灭. 地质地球化学, 30(1): 57–63.
- 梁玉左, 曹瑞骥, 张录易, 等, 1984. 晚前寒武纪假裸枝叠层石. 北京: 地质出版社.
- 梁玉左, 王楫, 杜汝霖, 1993. 内蒙古白云鄂博群中微小型叠层石(Ministmatilites)的构造变形及其地质意义. 地质通报, 3: 229–238.
- 梁玉左, 朱士兴, 高振家, 等, 1995. 叠层石研究的新进展——微生物岩. 中国区域地质, 1: 57–65.
- 邱树玉, 梁玉左, 曹瑞骥, 等, 1992. 晚前寒武纪叠层石及相关矿产. 西安: 西北大学出版社.
- 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 等, 2006. 从古生物学到地球生物学的跨越. 科学通报, 51(19): 2327–2336.
- 严贤勤, 孟凡巍, 袁训来, 2006. 徐淮地区新元古代九顶山组燧石结核的地球化学特征. 微体古生物学报, 23(3): 295–302.
- 朱士兴, 等, 1993. 中国叠层石. 天津: 天津大学出版社, 1–263.