中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 3 期: 423 ~ 432
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

山东寒武系毛庄阶微生物团块的形态特征与成因

杨仁超[①②*], 樊爱萍[②], 韩作振[②], 迟乃杰[③], 韩豫[④]

① 中国石化股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;
② 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东科技大学地质学院, 青岛 266590;
③ 山东省地质科学实验研究院, 济南 250013;
④ 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
* E-mail: yang100808@126.com

收稿日期: 2012-04-18; 接受日期: 2012-08-18
国家自然科学基金(批准号: 40972043)、教育部科学技术研究重点项目(编号: 211097)、山东省中青年科学家基金(编号: BS2009HZ020, 2010BSE06022)、山东省高校科学计划项目(编号: G08LD01, J09LE04)和山东科技大学科研创新团队计划(编号: 2010KYTD103)资助

摘要 在山东省微山县两城剖面寒武系毛庄阶发现一种微生物团块, 通过对其宏观及微观形态特征的详细解剖, 指出该类型微生物团块与内碎屑的异同, 并分析了微生物团块的成因和指相意义. 微生物团块可被磨圆而外形较光滑, 或粘聚成不规则状; 无核心或有多个不规则"核心", 内部无构造, 菌藻类含量高, 泥晶化作用发育; 其粒径组成以砂级和砾级颗粒为主, 颗粒组分主要包括磨圆的凝块石和鲕粒, 颗粒与亮晶胶结物界限清楚. 微生物团块是浅海环境中由蓝细菌类或其他微生物在其生命活动中通过对碳酸盐颗粒钻孔、泥晶化胶结和分泌的胞外聚合物(EPS)粘结而成, 属非固着生长的块状碳酸盐岩颗粒, 可在潮下带较高能环境中形成. 由于其成因与蓝细菌等微生物直接相关, 应该将微生物团块归属于微生物碳酸盐岩的范畴.

关键词
寒武系
毛庄阶
微生物
团块
碳酸盐岩

由底栖微生物群落捕获、粘结碎屑沉积物, 或以之微环境为沉淀中心而形成的微生物碳酸盐岩占据碳酸盐岩的大部分, 对其丰度变化和成因机制的探讨成为地球生物学(Geobiology)的研究热点[1]. 微生物碳酸盐岩是诠释地质历史时期碳酸盐岩台地生产力和水体环境的重要指标. 中元古代和早古生代大量碳酸盐岩是由钙化微生物组成的[2], 如 *Girvanella*, *Epiphyton*, *Renalsis*, *Chabakobia*, *Angulocellularia* 及 *Tarthinia* 等蓝绿菌属导致了寒武系微生物碳酸盐岩建造从宏观到微观的多样性[3]. 微生物岩的形态学塑造取决于微生物属种、钙化方式和沉积环境[4~6], 延伸出叠层石、核形石、凝块石、纹理石、均一石及树形石等 6 种宏观或微观乃至成因上均有特定差异的类型, 是对 Folk 和 Dunham 碳酸盐岩分类体系中颗粒类型的细化和补充[7,8].

作为成因与微生物直接相关的碳酸盐岩颗粒类型, 团块(或藻团块)很早即受到地质学家们的关注. 团块(lump)是具不规则外形的复合颗粒, 没有核心或有多个不规则的"核心", 这些小颗粒被蓝细菌凝聚和粘结在一起, 其外有或无包皮[9], 其大小可从砾石级到粉砂级. 团块是指外形较光滑而且具一内部孔洞的凝聚颗粒[10]. 典型的现代团块见于巴哈马滩, 故又称巴哈马石(bahamite)或葡萄石(grapestone). 运用电子显微镜研究发现, 团块和葡萄石的形成过程存在微生物粘结阶段、葡萄石阶段、团块阶段和成熟团块阶段等4个生长阶段[11]. 成因与团块相似的另外两

中文引用格式: 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 山东寒武系毛庄阶微生物团块的形态特征与成因. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 423–432
英文引用格式: Yang R C, Fan A P, Han Z Z, et al. Characteristics and genesis of microbial lumps in the Maozhuang Stage (Cambrian Series 2), Shandong Province, China. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 494–503, doi: 10.1007/s11430-012-4539-4

种碳酸盐岩颗粒是由蓝细菌凝聚和粘结而成的凝块石和核形石.

凝块石(thrombolite)一词最早于 1967 年提出, 被定义为“与叠层石相关的隐藻构造, 但缺乏纹层而以宏观的凝块状组构为特征”[12]. 凝块石一般不显内部结构, 外形极不规则, 呈血凝块状[9]. 其特殊的凝块状非纹层组构曾被解释为“受到生物扰动作用和次生成岩作用破坏、改造的叠层石”[13]. 但前寒武纪等古老的地层中发现的凝块石[14]显然不能用生物扰动来解释. 凝块石通常是蓝绿藻类生物在生命活动过程中, 沉淀并粘结灰泥而成, 故其内部可以保存藻类丝状体的痕迹, 如凝块石可由球粒和葛万藻组成[15,16]. 凝块石常与核形石共生, 但其形成过程与核形石不同, 它不是靠藻类粘结作用去捕集质点, 而是积极的生理沉积作用使藻细胞中重碳酸钙发生分解反应, 结果碳酸钙沉淀出来, 形成一个围绕藻体的粘质块体, 其形成过程表明其属于凝聚型碳酸盐颗粒[10].

核形石(oncoid)早在 1916 年即被提出[17], 被描述为具非同心层、圆状或叶状的碳酸盐包粒, 有或无包裹体, 或有不明显的边界, 以便与鲕粒相区分. 而后衍生出与核形石有关的术语包括“叠层石 SS 型”[18]、藻鲕粒和藻豆[19]、藻灰结核[20,21]、藻球和藻饼[22]、藻包粒[10]等. 若遵循目前生物学家把“蓝绿藻”修订为“蓝绿菌”的说法, 这些冠以“藻”的术语均需作相应的修改而冠以“菌”.

近年来有关微生物岩的生长过程[23,24]、沉积环境[25~27]、营养机制[28]、造礁作用[29]、成因及分类[7]等方面研究皆有重要进展. 本文将发现于山东微山(图 1)寒武系毛庄阶的一种碳酸盐岩颗粒归属于“微生物团块”, 通过对其形态结构特征的详细解剖, 重点探讨了微生物团块的成因及指相意义.

1 地质背景

寒武纪华北板块大部为陆表海环境[30], 早期海水从东南方向(现今的临沂、苏北、淮北一带)入侵[31].

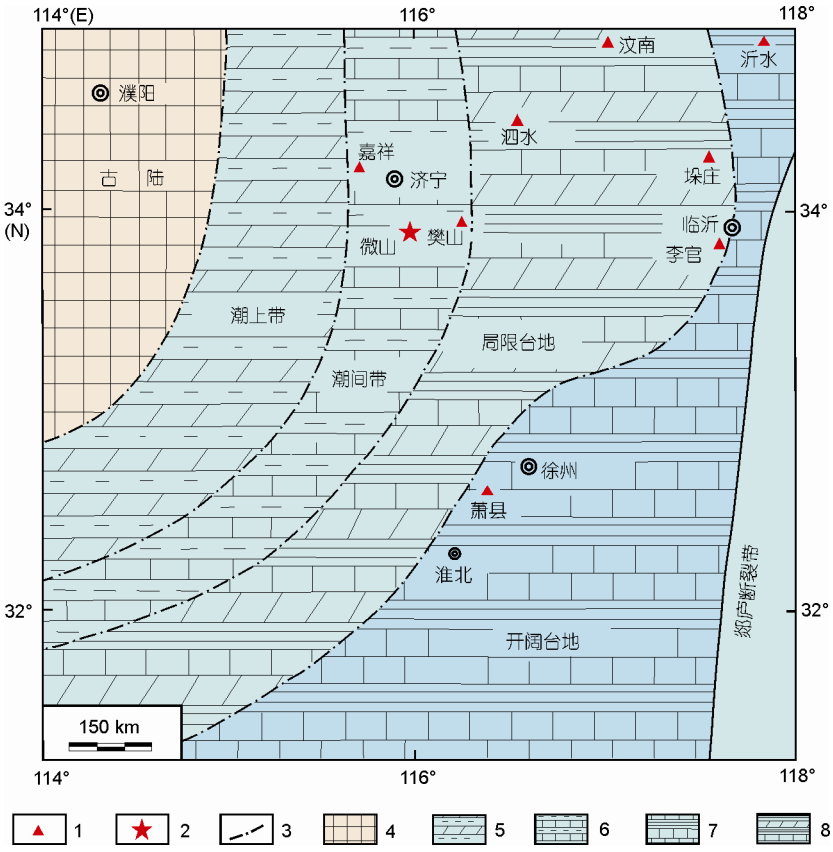


图 1 华北板块东南部毛庄期岩相古地理图

1. 剖面位置; 2. 样品点; 3. 岩相界限; 4. 古陆; 5. 泥岩、白云岩组合; 6. 灰岩、泥岩组合; 7. 灰岩夹页岩; 8. 灰岩、页岩及白云岩组合

馒头组岩性为紫红色泥页岩、灰岩及砂岩呈不同比例互层, 特别是氧化色强烈的粘土岩与砂岩频繁互层, 反映出半干旱-半湿润性热带气候及其高频变化特征[32]. 碳-氧同位素及微量元素地球化学数据表明, 鲁西早-中寒武世沉积古水温约 28~35℃, 属热带-亚热带近岸海区, 海水盐度频繁受淡水注入影响[33]. 山东微山两城剖面寒武纪地层出露连续, 序列自下而上为朱砂洞组、馒头组、张夏组、崮山组和炒米店组, 馒头组自下而上可次分为石店段、页岩段(毛庄阶)和洪河砂岩段. 本文微生物团块材料发现于该剖面寒武系毛庄阶的上部(图 2), 层厚约 1.7 m, 横向呈丘状分布. 该层底部为薄层状凝块石灰岩, 之下为灰白色中-厚层颗粒灰岩, 以鲕粒、砂屑、生屑为主, 偶见交错层理; 上部为浅灰色磨圆度较高的砂屑灰岩和砾屑灰岩, 顶部见羽状交错层理. 综合岩性、沉积构造及岩相的叠置关系, 认为山东微山地区毛庄期以潮坪沉积环境为主, 潮间带单元最发育.

2　微生物团块的形态、结构特征

2.1　宏观特征

灰岩中的微生物团块约占岩石体积的 70%, 亮晶方解石孔隙式胶结, 胶结物约 30%. 微生物团块分布较均匀, 无序排列. 团块形状多不规则, 粒径 2~5 mm 不等, 少数可达 1 cm 以上. 深灰-浅灰色, 多数内部无核心, 或有多个不规则核心(图 3(a), (b)). 岩石抛光面上, 可见深色泥晶或微生物将碳酸盐颗粒凝聚和粘结在一起, 从而形成体积较大的团块, 团块间为

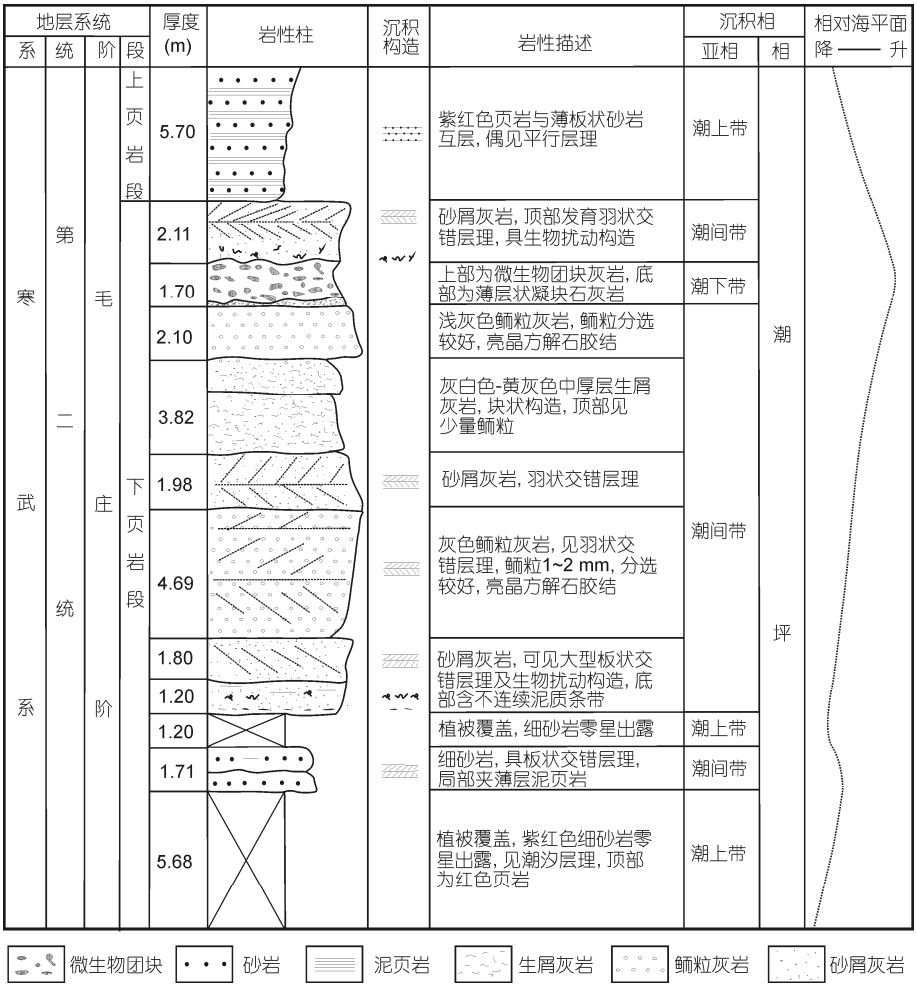


图 2　山东微山寒武系毛庄阶岩相柱状图

亮晶方解石胶结(图 3(c)).

2.2 微观特征

偏光显微镜下可观察到微生物团块呈不规则状、叶状、朵状等, 边缘起伏不平(图 4(a)), 但其边缘与胶结物的界线清楚. 微生物团块主要由磨圆的凝块石、泥晶化鲕粒、微生物和泥晶组成. 其中的凝块石颗粒常呈椭圆状、球状, 边缘较光滑, 表现出受较强水动力条件的磨圆(图 4(b)); 凝块石颗粒的分选较差, 在较大的凝块石颗粒周围分布着许多体积悬殊的小凝块石群体, 表现出大小截然不同的双峰式粒径特点(图 4(c)). 椭球状凝块石内部不规则凝块结构清楚, 由隐藻及其吸附的碳酸盐岩颗粒组成, 隐藻多呈团块状杂乱排列(图 4(a)-1, (f)-1), 约占凝块石体积的50%~70%; 暗色的血凝块状隐藻之间, 常见较多的亮晶方解石(图 4(a)-2, (f)-2), 可能为凝块的胶结物. 磨圆的凝块石之间常见泥晶胶结物(图 4(a)-3, (b)-1, (c)-3, 等). 微生物团块之间发育世代性明显的亮晶方解石胶结, 常见第一期纤维状方解石、第二期栉壳状方解石 (图 4(a)-4, (b)-2, (c)-1)和第三期方解石颗粒嵌晶状分布(图 4(a)-5, (b)-3, (c)-2). 第三期颗粒状方解石内气液两相包裹体发育, 包裹体直径 5~15 μm, 气液比 10%~15%, 均一温度介于 51.5~72.6℃, 表明亮晶方解石主要形成于早成岩阶段. 亮晶方解石胶结物溶孔的孔径 0.05~0.3 mm, 孔洞内常充填红褐色氧化物(图 4(f)-4), 可能形成于地层抬升剥蚀之后的表生成岩阶段氧化环境.

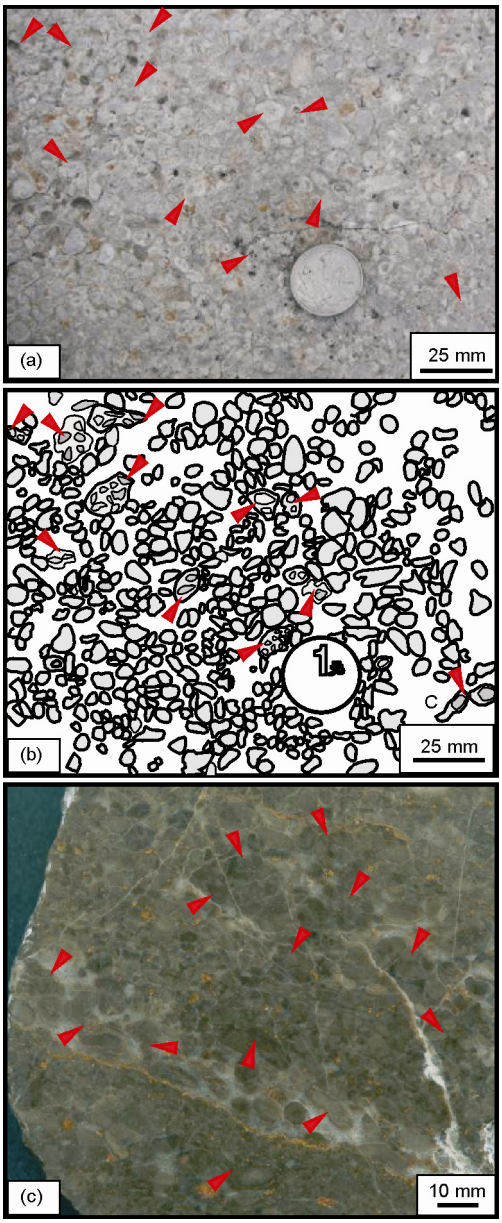


图 3 山东微山微生物团块宏观结构

(a) 岩石露头; (b) 照片(a)的素描图; (c) 剖光面. C. 亮晶胶结物, 红色箭头指示微生物团块

一些颗粒存在泥晶化现象, 一些颗粒的泥晶化程度较弱, 仅在边部表现为泥晶套(图 4(e)-1); 另一些颗粒表现出中等强度的泥晶化(图 5(b)-2) ; 还有一些颗粒发生强烈的泥晶化现象, 原有的结构被破坏(图 5(a)-1, 2), 形成较均匀的泥晶(图 5(b)-1). 颗粒的泥晶化往往是由菌藻类的穿孔作用造成的, 穿孔的藻类和真菌类对碳酸盐颗粒自外向内反复穿孔, 碳酸盐颗粒逐渐地被泥晶交代, 故藻穿孔常与泥晶化作用共生(图 5(b)-3). 经过藻类和真菌类的穿孔作用, 碳酸盐颗粒的内部构造变得脆弱, 在海浪和潮水的冲蚀作用下更容易被磨圆和破碎[34]. 显微镜下, 可见这种由藻穿孔作用形成的泥晶贯穿圆形颗粒(图 4(e)-2). 泥晶化作用受颗粒的大小的影响, 小颗粒更容易遭受强烈的泥晶化形成泥晶套或泥晶铸型(图 5(b)-1), 颗粒越大, 泥晶化进程越缓慢(图 5(b)-2).

阴极发光显微镜下观察, 发现小颗粒(图 5(c)-1)与大颗粒连接处的阴极发光特征与颗粒基本一致, 无法区分颗粒与连接物(图 5(c)-2, 3). 为了更清晰地观察微生物团块的内部结构, 笔者尝试在阴极光激发基础上叠加了单偏光, 发现小颗粒(图 5(d)-1)与大团块由泥晶紧密连接, 仍难以区分 (图 5(d)-2, 3); 表明泥晶化作用可能发生于较早的同沉积作用阶段. 微生物团块之间几乎全为亮晶方解石胶结, 表明沉

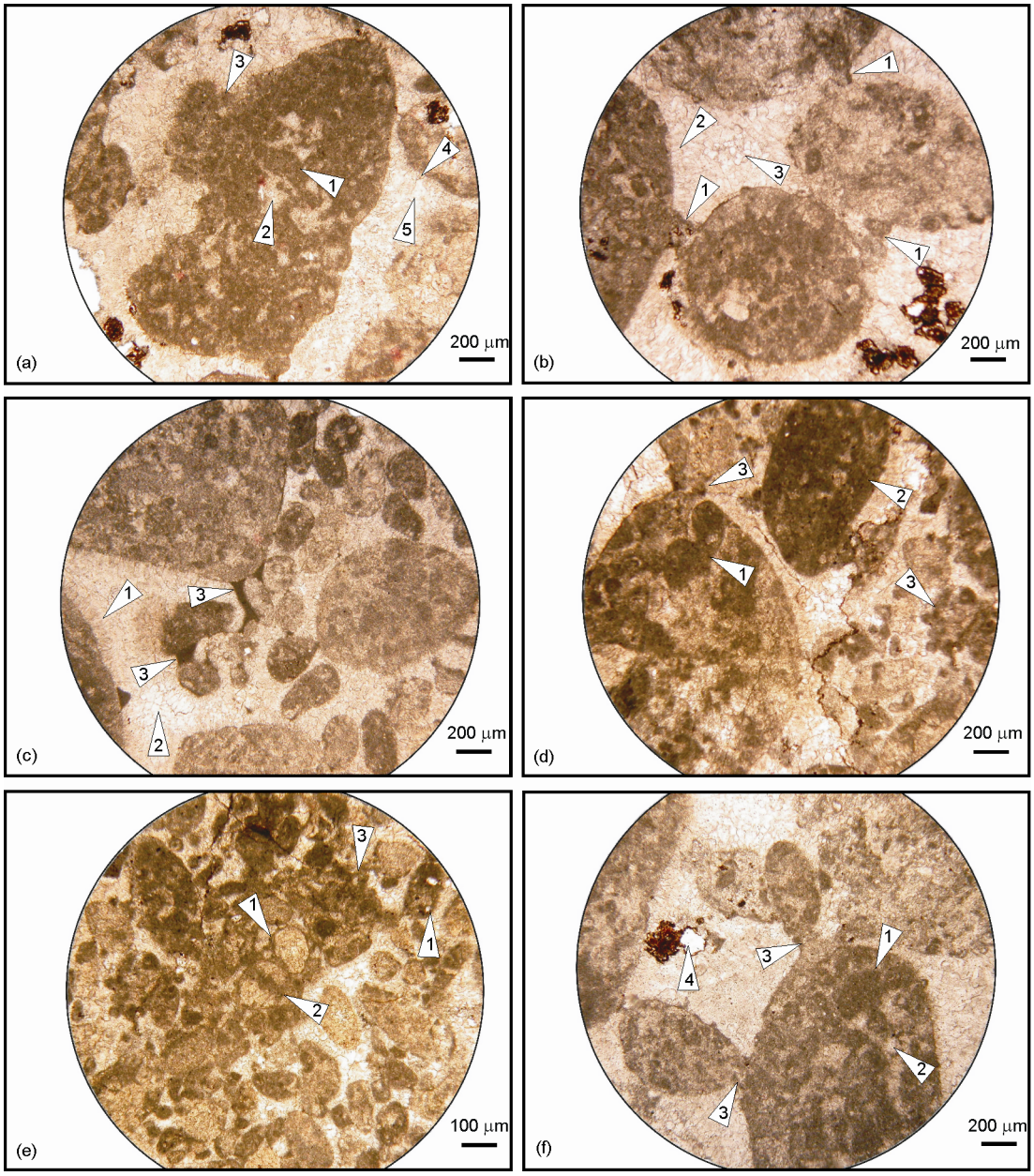


图 4　山东微山毛庄阶微生物团块显微结构

(a) 叶状微生物团块: 1. 不规则状凝块; 2. 凝块间方解石; 3. 泥晶胶结物; 4. 栉壳状方解石; 5. 晶粒状方解石. (b) 微生物团块: 1. 泥晶胶结物; 2. 栉壳状方解石; 3. 晶粒状方解石. (c) 微生物团块, 粒径呈双峰式分布: 1. 栉壳状方解石; 2. 晶粒状方解石; 3. 泥晶胶结物. (d) 椭圆状微生物团块: 1. 不规则状凝块; 2. 磨圆的凝块石颗粒; 3. 泥晶胶结物. (e) 椭圆状微生物团块: 1. 泥晶套; 2. 石内藻的泥晶化; 3. 微生物团块. (f) 朵状微生物团块: 1. 不规则凝块; 2. 凝块间方解石; 3. 石隙藻泥晶胶结物; 4. 胶结物溶蚀孔及氧化物充填. (a)~(d) 样品 WS-18; (e)~(f): 样品 WS-19, 皆为单偏光

积水动力条件较强, 难以形成泥晶沉积; 较强水动力条件下, 凝块石颗粒可以被磨圆, 难以保留这些突出的犄角, 故团块内颗粒间的泥晶更可能形成于同沉积阶段的泥晶化. 一些球形和椭球形颗粒在成岩过程中发生交代作用和重结晶作用, 颗粒的轮廓变得模糊, 但在阴极发光显微镜下, 其颗粒的原始形态被较好地再现(图 5(e)-1, 2). 颗粒间的泥晶与颗粒的阴极发光特征相似, 代表其形成时间较早(图 5(e)-3);

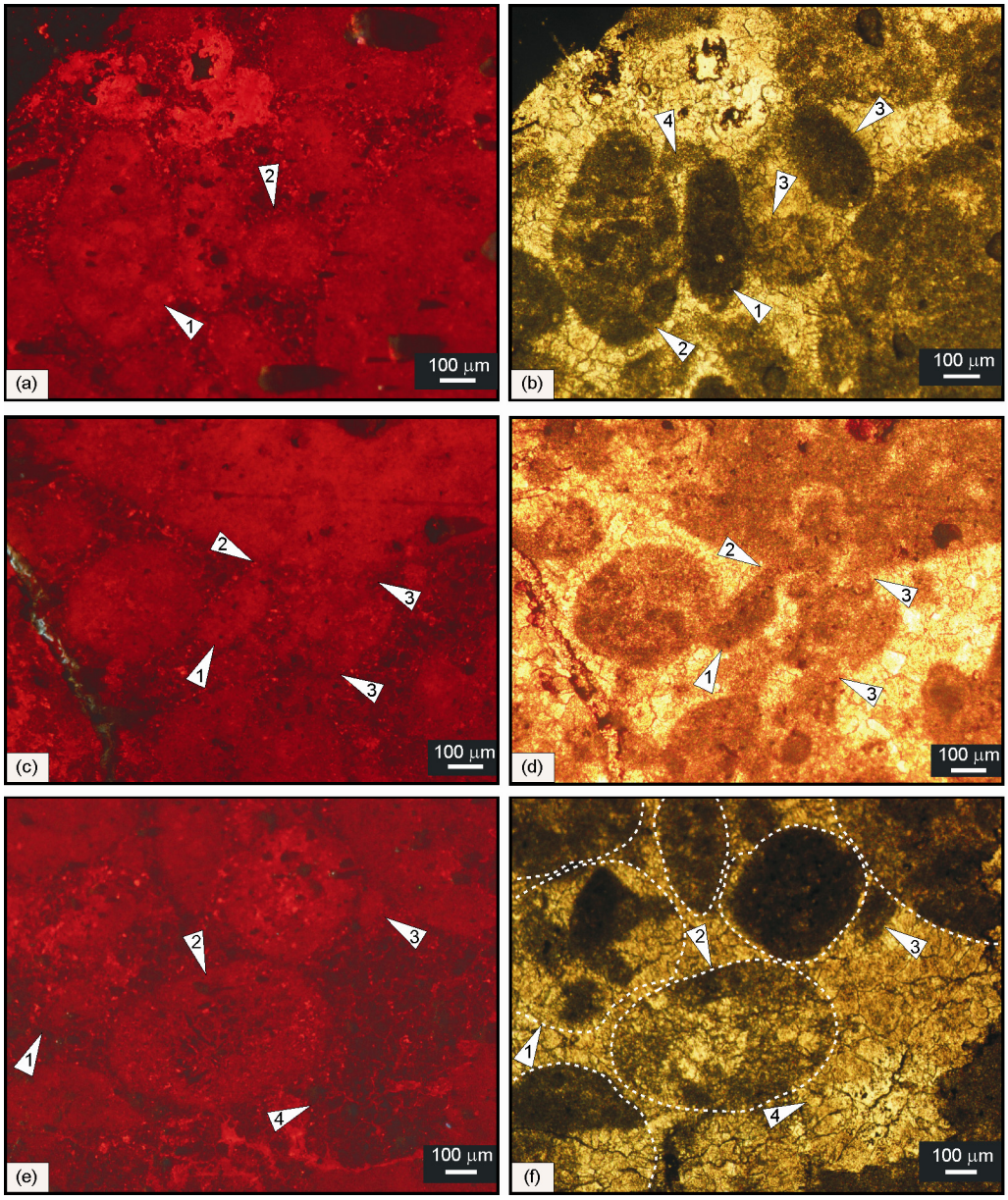


图 5　山东微山毛庄阶微生物团块的原形恢复

(a) 微生物团块: 1. 椭圆形鲕; 2. 球形鲕. (b)为(a)的单偏光: 1. 强泥晶化鲕粒; 2. 中等泥晶化鲕粒; 3. 藻穿孔; 4. 泥晶胶结. (c), (d) 微生物团块: 1. 椭球形小颗粒; 2. 泥晶连接物; 3. 不规则分布的泥晶方解石. (e)~(f) 微生物团块: 1, 2. 椭球形颗粒; 3. 泥晶胶结物; 4. 亮晶方解石. (a), (b): 样品 WS-18; (c)~(f) 样品 WS-19. (a), (c), (f) 阴极光; (b), (f) 单偏光; (d) 单偏光+阴极光

颗粒间的亮晶方解石在阴极光激发下, 呈现红褐色(图 5(e)-4), 多为含铁方解石, 一般出现于晚期成岩作用阶段. 对照阴极发光特征, 可恢复颗粒的原始形貌(图 5(f)-1, 2), 这些球形和椭球形颗粒分选不好, 形状相差较大, 颗粒一般大于 1 mm, 由此推测其为球粒的可能性极小, 可能是鲕粒或高度磨圆的凝块石.

通过扫描电镜分析发现微生物团块内可见较多的丝状蓝细菌(图 6(a)). 扫描电镜研究发现, 微生物团块中的蓝细菌菌丝体与方解石微晶之间呈紧密接触(图 6(b)-1, 2), 菌丝体之间及菌丝体之上可见方解石微晶(图 6(b)-3), 可能为菌类粘附的方解石矿物, 表明团块的形成与蓝细菌的粘附和凝聚作用密切相

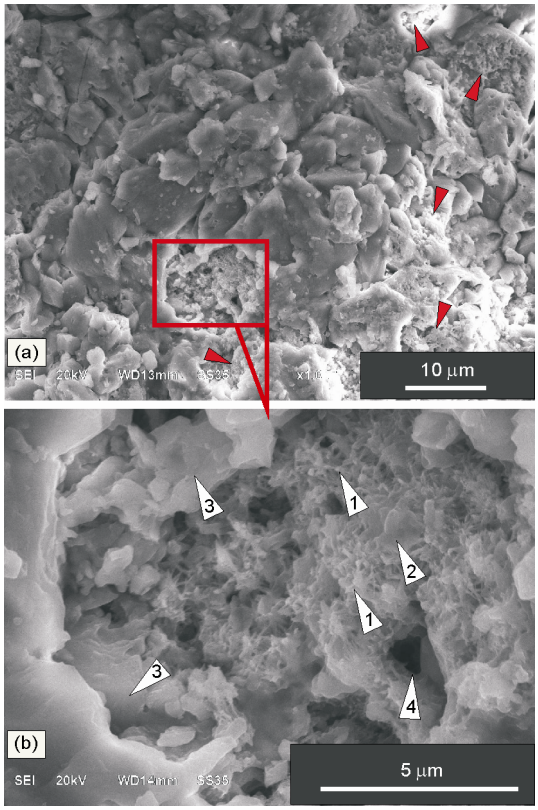


图 6　微生物团块局部的扫描电镜图像

(a) 微生物团块局部 SEM 图像, 红色箭头指示钙化蓝细菌; (b) 为(a)的局部放大. 1. 菌丝体; 2. 粘附的微晶方解石; 3. 方解石解理; 4. 菌丝体间微孔隙. 样品 WS-19 来自山东微山寒武系毛庄阶

关. 菌丝体之间还可见微孔隙, 大小 1~5 μm (图 6(b)-4).

3　微生物团块与内碎屑的异同

本文展示的微生物团块受较强水动力改造, 部分颗粒具较好的圆球度; 岩石由颗粒和填隙物两部分组成. 在此方面与砾屑、砂屑等内碎屑有相似之处. 但受机械作用改造的微生物团块与磨圆的内碎屑在微观上有 5 个明显的差异要素.

(1) 微生物团块可没有核心, 或含多个不规则核心, 团块内可包含多个颗粒, 颗粒可以是鲕粒、内碎屑、磨圆的凝块石等, 颗粒之间以菌藻类粘聚凝结, 或由藻穿孔引起的泥晶化胶结物相连接; 而磨圆的内碎屑不具备这些特征.

(2) 微生物团块内部含有大量隐藻, 具网状或团块状结构, 浅色的碳酸盐矿物颗粒与菌藻类呈不规则状杂乱分布; 而内碎屑多由泥晶灰岩破碎而成, 颗粒内部一般多为均匀的灰泥结构.

(3) 扫描电镜下可见蓝细菌内部捕获或粘附的方解石(图 6), 与磨圆的内碎屑不同.

(4) 微生物团块颗粒常可见体积大小相差悬殊的两个群体共存, 可能与藻穿孔引起的破碎有关; 而磨圆的内碎屑常呈连续变化的不等粒状.

(5) 磨圆的内碎屑可能受压实作用而连接在一起, 而本区灰岩的微观特征表明, 压实作用并不强. 颗粒多松散分布, 原因可能是碳酸盐岩在早成岩阶段强烈的胶结作用制约了机械压实作用的发展.

4　成因分析与形成模式

4.1　成因分析

山东微山寒武系毛庄阶中发现的微生物团块与凝块石、核形石、藻鲕等存在共性: 成因与藻(菌)类微生物生命活动有关, 都应归属于微生物碳酸盐岩的范畴; 多形成于滨浅海碳酸盐岩沉积环境, 光照充足, 营养丰富, 具较高的微生物碳酸盐岩生产力; 微生物团块及其它微生物碳酸盐岩的沉积速率一般较低.

微生物团块中常见大小截然悬殊的两种群体共生, 这种现象难以用磨圆的内碎屑来解释, 因为在相同的水动力条件下, 较大颗粒更容易被磨圆, 呈现圆球度更高的形态; 而实际情况恰好相反, 细小的颗粒似乎圆球度更高(图 4(c)). 另外可见较多的被磨圆的颗粒彼此相连, 也无法用磨圆的内碎屑解释, 因为颗粒在磨圆情况下, 凸出的犄角、棱角会被优先磨圆, 且颗粒之间脆弱的连接物在动荡的水动力条件下也难以保存. 大小颗粒之间的泥晶连接物可能为沉积的灰泥, 但颗粒较高的磨圆度反映了较强的水动力条件, 在此情况下, 灰泥是难以沉淀的; 颗粒间亮晶方解石的大量发育也反映了较强的水动力条件.

而颗粒内藻穿孔及泥晶化作用的发育, 以及扫描电镜下大量菌丝体的发现, 预示颗粒间的泥晶连接物源于菌藻类泥晶化作用的可能性更大. 菌藻类对碳酸盐颗粒穿孔的原因可能有: 汲取颗粒内的有机质或矿物质, 或寻求居住和隐蔽场所[35]. 藻穿孔及泥晶化(图 4(e)-1)的直径(35~50 μm)比穿孔的菌藻类直径(5~20 μm)大, 可能与生物机械破碎作用、生物化学侵蚀作用有关. 遭受藻穿孔和泥晶化的碳酸盐颗粒, 更易于被潮汐和波浪破碎、磨圆, 可能是小颗粒

比大颗粒圆球度高的原因之一.

4.2 形成阶段与模式

(1) 凝块石沉积阶段. 既然从生物群落、生境、营养水平和食物链等角度证明了正在原地生长的每一个核形石颗粒即为一个开放的微生态系统[23], 那么是否可以考虑每一个凝块石同样具有类似的生态功能? 微生物群体以沉积底质为依托, 生成、粘结或捕捉矿物和碳酸盐颗粒. 随着粘附物质含量的增加, 其重量不断增大, 且藻球体内部能流动的海水、透过的光线、摄取的营养趋于减少, 当藻类粘附的矿物达到一定程度, 菌藻的生长逐渐停止, 遂以凝块石的形式沉淀下来(图 7(a)).

(2) 凝块石磨圆阶段. 刚沉淀下来的凝块石可以被潮汐和波浪反复滚动, 并逐渐被磨圆; 尤其是在海平面下降时, 这种对新生沉积物的侵蚀和磨圆作用表现得更强(图 7(b)). 而较高部位浅滩的鲕粒也可被搬运至低洼之处, 这是微生物团块中含有较多鲕粒和磨圆的凝块石的主要原因. 较大的凝块石由于粘附的矿物颗粒多, 即使在较强水动力条件下也难以被搬运, 多就近沉积, 故其磨圆度也较差; 而较小的凝块石多以滚动的方式被海水搬运和磨圆, 这可能是较小颗粒比较大颗粒圆球度高的另一原因. 故凝块石可能为原地凝块聚合与颗粒整体移动两种方式共同作用的结果.

(3) 微生物生长粘结阶段. 现代大巴哈马滩的葡萄石带主要分布于从动荡鲕粒滩到局限灰泥发育的浅水环境之间, 菌藻类繁盛, 在葡萄石发育带的一些地区还可形成面状微生物席. 在较强水动力条件下, 菌藻类生长必须依附于沉积底质, 故磨圆的凝块石颗粒及鲕粒之间有大量的菌藻类附着生长. 包括内碎屑、鲕粒、磨圆的凝块石等各种颗粒, 可以被丝状微生物粘结在一起(图 7(c)); 发生于丝状体之上的钙结壳作用会产生较坚固的结构.

(4) 团块形成阶段. 同生作用期, 随着大量菌藻类在颗粒间的附着生长, 微生物席内部的水动力、水体物理化学、生物化学等微环境发生重大改变. 生物钻孔作用泥晶化作用产物沉淀于颗粒间; 泥晶将小颗粒粘结为较大的微生物团块(图 7(d)). 这种粘结作用和微生物泥晶化作用也能发育在高能环境中, 高能事件将临近的鲕粒、磨圆的凝块石等颗粒搬运至相对低洼的藻席中, 从而保证了微生物团块的物质来源. 本文发现的微生物团块即主要由磨圆的凝块石、鲕粒等碳酸盐颗粒经菌藻类凝聚及其伴生的泥晶化作用粘结而成.

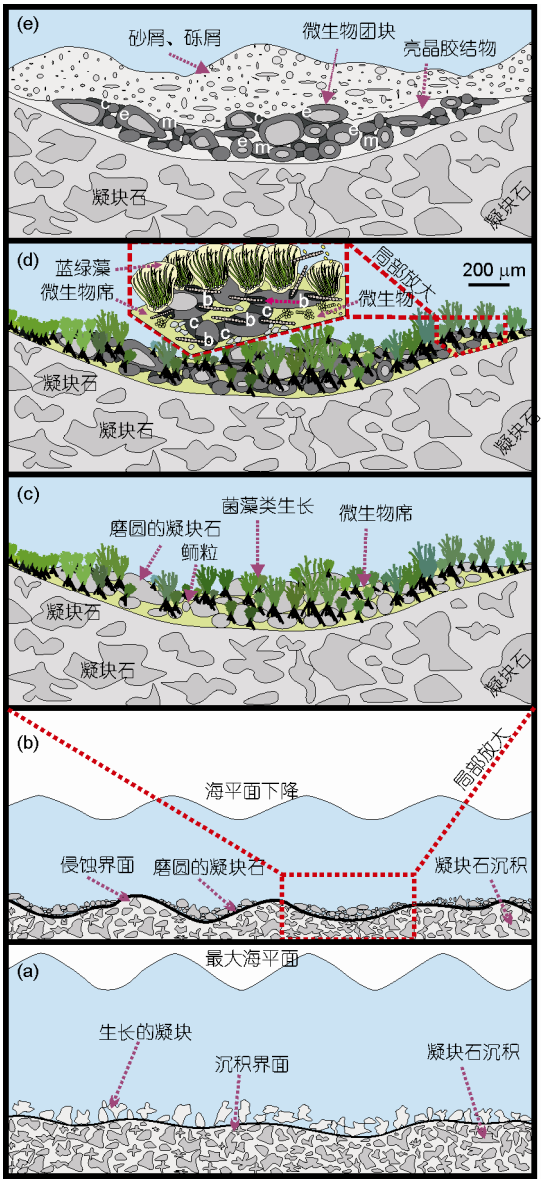


图 7 微生物团块形成阶段及成因模式

(a) 凝块石沉积阶段; (b) 凝块石磨圆阶段; (c) 微生物生长粘结阶段; (d) 团块形成阶段; (e) 埋藏胶结阶段. b-微生物钻孔; c-泥晶胶结; e-泥晶套; m-泥晶化颗粒

(5) 埋藏胶结阶段. 海平面的小幅下降造成临近高地的内碎屑浅滩发生侧向搬运, 并将微生物团块整体埋藏, 有利于微生物繁衍生长的环境被点断, 菌藻类微生物大量死亡(图 7(e)). 从颗粒藻穿孔、泥晶套厚度、

泥晶化程度以及颗粒间的泥晶含量来看, 微山毛庄阶微生物团块总体处于团块形成过程的第二至第三阶段, 即葡萄石阶段至团块阶段, 未达到成熟团块阶段, 这可能与随后的海平面的下降和沉积环境变化有关. 随着沉积物与水体隔离, 孔隙水中方解石逐渐沉淀, 微生物团块被亮晶方解石胶结, 由此进入早成岩阶段.

5 微生物团块的指相意义

早寒武世毛庄期, 来自内陆的营养物质可与碎屑沉积物一起被搬运至滨海地带. 微生物团块产出层位之下出现约 15 m 的厚层灰岩, 陆源碎屑输入量的急剧减少和较高的碳酸盐生产率表明海平面的小幅快速上升. 厚层鲕粒灰岩段发育潮汐通道亚相的大型交错层理, 此后海侵范围进一步扩大, 由高能潮间带转变为较高能潮下带, 藻菌类大量繁盛, 紧邻微生物团块之下产出凝块石灰岩. 微生物岩常被认为是重大生物灭绝事件之后的“灾难层”, 其出现预示海平面、营养供给和生物群落的改变, 故可作为碳酸盐沉积环境和生态系统变化的重要指标[35~38]. 1.7 m 厚的团块灰岩之上, 出现2.1 m羽状交错层理发育的砂屑灰岩, 表明海水由深变浅, 潮间带沉积单元再一次占据主导地位, 有利于微生物团块形成的沉积环境被点断.

微生物团块的形态特征与环境控制的相关性指标对再造海底古地貌具有重要意义. 毛庄期, 微山两城地区为一总体为强水动力条件的潮间带环境; 微生物团块沉积时, 海平面开始下降, 微生物团块丰富. 由于微生物层一般生长较慢[39], 核形石、叠层石等微生物碳酸盐岩沉积速率较慢[40~42]. 微生物团块内部不显纹层, 其生长速率可能高于纹层状核形石和叠层石, 但其沉积速率仍然低于其层位上下的砂屑灰岩和鲕粒灰岩.

6 结论

虽然国内外地质学家从不同的角度探讨了微生物碳酸盐岩的分类, 但漫长的地史期海洋水体的物理、化学、生物条件的多变造就了微生物碳酸盐岩的多样性, 也凸显出对微生物碳酸盐岩成因机制解释的多样化. 即使对于同类型的微生物团块而言, 也可能存在多种机理共同作用的过程, 其内部结构在不同沉积环境、不同地史时期也有不同的组成. 山东微山寒武系毛庄阶微生物团块的实例对于传统的团块或葡萄石的内涵和外延作了有益的补充, 并对其成因过程及指相意义提出了新的解释: 微生物团块是浅海环境中由蓝细菌类或其它微生物在其生命活动中通过对碳酸盐颗粒钻孔、泥晶化作用和粘结而成, 属非固着生长的块状碳酸盐岩颗粒. 微生物团块无核心或有多个不规则“核心”, 内部无构造, 泥晶化作用发育; 其形状、大小多变, 可以被磨圆; 其组成多以砂级颗粒和砾级颗粒为主. 虽然低能环境有利于微生物团块的发育, 但在高能环境中也可形成. 既然微生物团块的形成与蓝细菌等微生物直接相关, 那么应该将微生物团块灰岩归属于微生物碳酸盐岩的范畴. 微生物碳酸盐岩的沉积环境和控制因素复杂, 形成微生物碳酸盐岩不同类型的主控因素仍需深入研究. 在野外实践中, 常发现叠层石、核形石、纹理石、凝块石等共生. 在同一露头同一岩层内, 相距不过数十公分, 无法用沉积水动力和水体环境等外部因素来解释. 因此, 笔者认为, 菌(藻)的种类、密度及微生物种群的结合方式是内因, 直接控制微生物碳酸盐岩的类型、形状、大小、内部结构等重要参数; 而海平面升降、气候变化、水体能量、水体深度、营养水平、台地形态和沉积速率等外因则影响微生物碳酸盐岩的生长和分布规模.

致谢 中国科学院南京古生物研究所李越研究员协助修改原稿, 审稿专家提出了宝贵的建议, 作者对此致以谢忱.

参考文献

1 Burne R V, Moore L S. Microbialites: Organose-sedimentary deposits of benthic microbial communities. Palaios, 1987, 2: 241–254
2 Riding R. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time. Sediment Geol, 2006, 185: 229–238
3 Riding R, Voronova L G. Morphological groups and series in Cambrian calcareous algae. In: Toomey D F, Nitecki M H, eds. Paleoalgology: Contemporary Research and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 56–78
4 Cherchi A, Schroeder R. Remarks on the systematic position of Lithocodium Elliott: A problematic microorganism from the Mesozoic carbonate platforms of the Tethyan realm. Facies, 2006, 52: 435–440

5 Pratt B R. Calcification of cyanobacterial filaments: Girvanella and the origin of lower Paleozoic lime mud. Geology, 2001, 29: 763–766
6 高建平, 朱士兴. 晋东北地区寒武系微生物岩及其与沉积环境的关系. 微体古生物学报, 1998, 15: 166–177
7 梅冥相. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展. 地质科技情报, 2007, 26: 1–9
8 Riding R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. Sedimentology, 2000, 47: 179–214
9 刘宝珺. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 1980. 198
10 梅冥相, 马永生, 周丕康, 等. 碳酸盐沉积学导论. 北京: 地震出版社, 1997. 39–40
11 Aitken J D. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of southwestern Alberta. J Sediment Petrol, 1967, 37: 1163–1178
12 Kennard J M, James N P. Thrombolites and stromatolites: Two distinct types of microbial structures. Palaios, 1986, 1: 492–503
13 Aitken J D, Narbonne G. Two occurrences of Precambrian thrombolites from the Mackenzie Mountains, northwestern Canada. Palaios, 1989, 4: 384–388
14 Adachi N, Ezaki Y, Pickett J W. Marked accumulation patterns characteristic of Lower Devonian stromatoporoid bindstone: Palaeoecological interactions between skeletal organisms and microbes. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2006, 231: 331–346
15 Adachi N, Ezaki Y. Microbial impacts on the genesis of Lower Devonian reefal limestones, eastern Australia. Palaeoworld, 2007, 16: 301–310
16 梅冥相, 马永生, 周丕康, 等. 碳酸盐沉积学导论. 北京: 地震出版社, 1997. 39–40
17 Heim A. Monographie der Churfürsten-MattstockGruppe (3. Teil). Beitr Geol Karte Schweiz NF, 1916, 20: 369–573
18 Logan B W, Rezark R, Ginsburg R N. Classification and environmental significance of algal stromatolites. J Geol, 1964, 72: 68–83
19 Wolf K H. Petrogenesis and paleoenvironment of Devonian algal limestones of New South Wales. Sedimentology, 1965, 4: 113–178
20 Dahanayake K. Sequential position and environmental significance of different types of oncoids. Sediment Geol, 1978, 20: 301–316
21 Glass S W. The Peterson limestone-Early Cretaceous lacustrine carbonate deposition in western Wyoming and southeastern Idaho. Sediment Geol, 1980, 27: 143–160
22 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学. 北京: 石油工业出版社, 2001. 155
23 Hägele D, Leinfelder R, Grau J, et al. Oncoids from the river Alz, southern Germany: Tiny ecosystems in a phosphorus-limited environment. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2006, 237: 378–395
24 Cavalazzia B, Barbieria R, Orib G G. Chemosynthetic microbialites in the Devonian carbonate mounds of Hamar Laghdad AntiAtlas, Morocco. Sediment Geol, 2007, 200: 73–88
25 Gradziński M, Tyszka J, Uchman A, et al. Large microbial foraminiferal oncoids from condensed Lower Middle Jurassic deposits: A case study from the Tatra Mountains Poland. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2004, 213: 133–151
26 Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. Berlin, Heideberg, New York: Springer, 2004. 976
27 Arenasa C, Cabrerab L, Ramos E. Sedimentology of tufa facies and continental microbialites from the Palaeogene of Mallorca Island (Spain). Sediment Geol, 2007, 197: 1–27
28 Fugagnoli A. Trophic regimes of benthic foraminiferal assemblages in Lower Jurassic shallow water carbonates from northeastern Italy (Calcari Grigi, Trento Platform, Venetian Prealps). Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2004, 205: 111–130
29 李越, 穆西南, Steve K. 陕南川北志留系特列奇阶宁强组礁相中的微生物岩和钙藻. 微体古生物学报, 2002, 19: 170–177
30 冯增昭, 彭勇民, 金振奎. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理. 北京: 石油工业出版社, 2004
31 孟祥化, 葛铭. 中朝板块层序. 事件. 演化—天文周期的沉积响应和意义. 北京: 科学出版社, 2004
32 Strasser A, Hillgärtner H, Hug W, et al. Third-order depositional sequences reflecting Milankovitch cyclicity. Terra Nova, 2000, 12: 303–3l1
33 张国仁. 利用沉积地球化学特征分析古环境及海平面变化——以鲁西东部中下寒武统为例. 辽宁地质, 1997, 1: 9–13
34 韦龙明. 菌藻对碳酸盐颗粒的泥晶化作用研究——以滇西保山地区下石炭统研究为例. 沉积学报, 1995, 13: 89–97
35 Whalen M T, Day J, Gregor P E, et al. Microbial carbonates as indicators of environmental change and biotic crises in carbonate systems: Examples from the Late Devonian, Alberta basin, Canada. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2002, 181: 127–151
36 Baud A, Richoz S, Marcoux J. Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units: Western Taurus occurrences (SW Turkey). Comptes Rendus Pale, 2005, 4: 569–582
37 Baud A, Richoz S, Pruss S. The lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time. Glob Planet Change, 2007, 55: 81–89
38 Zamagni J, Košir A, Mutti M. The first microbialite-coral mounds in the Cenozoic (uppermost Paleocene) from the Northern Tethys (Slovenia): Environmentally-triggered phase shifts preceding the PETM. Palaeogeogr Palaeoclimat Palaeoecol, 2009, 274: 1–17
39 Strasser A, Védrine S. Controls on facies mosaics of carbonate platforms: A case study from the Oxfordian of the Swiss Jura. Spec Pub Int Ass Sed, 2009, 41: 199–213
40 Hug W. Sequenzielle Faziesentwicklung der Karbonatplattform des Schweizer Jura im Späten Oxford und frühesten Kimmeridge. Geol Focus Univ Fribourg, 2003. l55
41 Dupraz C, Strasser A. Microbialites and micro-encrusters in shallow coral bioherms (Middle to Late Oxfordian. Swiss Jura Mountains). Facies, 1999, 40: 101–130
42 Strasser A, Samankassou E. Carbonate sedimentation rates today and in the past: Holocene of Florida Bay, Bahamas, and Bermuda versus Upper Jurassic and Lower Cretaceous of the Jura Mountains (Switzerland and France). Geol Croat, 2003, 56: 1–18