

# 四川江油马角坝地区下三叠统飞仙关组一段 “圆珠状”灰岩特征及其意义

王霞<sup>1</sup>, 邹灏<sup>1, 2\*</sup>, 马成龙<sup>3</sup>, 张强<sup>1</sup>, 陈恒强<sup>1</sup>, 胡宁宁<sup>4</sup>

1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059; 2. 构造矿成藏国土资源部重点实验室, 成都 610059;  
3. 辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 4. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

**摘要:**为探讨四川江油马角坝地区下三叠统飞仙关组一段“圆珠状”灰岩的内部组成及形成环境,开展了野外调查与室内研究,结果发现“圆珠”外部成分主要为泥微晶方解石,内部成分则以亮晶-连晶方解石为主,亮晶方解石约占“圆珠”的70%~80%,构成其核心,泥微晶方解石主要构成“圆珠”的纹层。“圆珠”状灰岩的典型构造类似核形石,发育不规则断续纹层,由于后期的白云石化、黄铁矿化和褐铁矿化作用,纹层多已模糊不清。结果表明,“圆珠状”灰岩形成于能量较低的局限台地,其作为一种微生物岩,可能为P-T生物大灭绝事件之后生物迟缓复苏即“错时相”在马角坝地区的表现,在区域上表现为由南向西向北东变薄,反映当时的水体由西向东变深,其尖灭位置为局限台地与开阔台地的界线。

**关键词:**“圆珠状”灰岩; 形成环境; 沉积环境演化; 错时相; 飞仙关组一段; 江油马角坝地区

中图分类号:P588.2 文章编号:1007-2802(2017)06-0927-11 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2017.06.008

## Characteristic of the Lowest Member of the Feixianguan Formation “Bead like” Limestone in the Majiaoba Area, Northwestern Sichuan Province, and Its Implications

WANG Xia<sup>1</sup>, ZOU Hao<sup>1, 2\*</sup>, MA Cheng-long<sup>3</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, CHEN Heng-qiang<sup>1</sup>, HU Ning-ning<sup>4</sup>

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Key Laboratory of Tectonic Mineralization Accumulation Of Land Resources, Chengdu 610059, China;

3. Liaohe Oilfield Company Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Panjin Liaoning 124010, China;

4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract** “Bead like” limestone is well-preserved in the lowest member of the Feixianguan Formation in Majiaoba, Jianyong County. Field investigation and petrography study show that the outer part of “bead” is dominantly made up of micritic-microcrystalline calcite and the inner part mainly consists of sparry-intergrown calcite. Sparry calcite accounts for 70%~80% of the “bead”, forming the core; whereas the micritic-microcrystalline calcite makes up the laminae of the rock. The “Bead like” limestone exhibits irregular intermittent laminae, similar structure as oncoids. Due to later alteration including dolomitization, pyritization and ferritization, most of the laminae have been modified. This study suggests that “bead like” limestone was generally deposited in low-energy restricted platforms. As a kind of microbialite, “bead like” limestone probably is “anachronistic facies”, which formed after P-T biological extinction event in Majiaoba. The “bead like” limestone wedged out from SW to NE, indicating that the depth of lagoon became shallower northeastwards. The wedging out also marked the boundary between the restricted platform and open platform.

**Key words** “beadlike” limestone; forming environment; depositional environment evolution; “anachronistic facies”; the lowest member of the Feixianguan Formation; Majiaoba region

收稿日期: 2016-09-14 收到, 2017-03-14 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702108); 资源勘查工程专业教育部卓越工程师教育培养计划项目(11100-17z0511)

第一作者简介: 王霞(1994-), 女, 资源勘查工程专业(固体矿产)学生, E-mail: 865437094@qq.com.

\* 通讯作者简介: 邹灏(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 矿产勘查与评价等, E-mail: zouhao21@sina.com.

古生代与中生代之交生物灭绝事件(P-T事件)是显生宙以来影响最深刻、规模最大的一次,种族灭绝率高达80%~90%(Stanley and Yang, 1994),三叠纪特别是早三叠世的“错时相”(Sepkoski *et al.*, 1991)沉积是灭绝事件之后的效应,也是近年来研究的热点之一。在四川江油马角坝地区,下三叠统飞仙关组一段底部发育一套黄灰色泥灰岩和钙质泥岩互层,其中发育一套“圆珠状”灰岩,其作为夹层产出,在研究区的中部到南西部整个地层呈北东—南西展布(图1c),厚度不大(杨伟, 2009)。“圆珠状”灰岩是由于黄灰色泥灰岩上发育有圆珠形颗粒而得名,但在多年的马角坝地质实习过程中,对教材上提及的“圆珠状”灰岩的成因一直存在较大争议。自20世纪以来,前人对马角坝及其周边地区各种典型的碳酸盐岩和地层做了大量研究,如对豹斑灰岩(郝毅等, 2012)、核形石灰岩(徐锦龙等, 2013)、鲕粒灰岩(武向峰等, 2010)、牙形石(龚大明, 1990)和瘤状灰岩(郭福生, 1989; 袁志华, 1998; 靳学斌等, 2014)等等;地层中研究最多的主要为石炭系(覃建雄等, 1996; 惠博等, 2009)。但是前人对马角坝三叠系“圆珠状”灰岩的研究却非常少。本文主要通过实测该地区下三叠统飞仙关组一段的地层剖面,手标本观察及镜下观察,对“圆珠

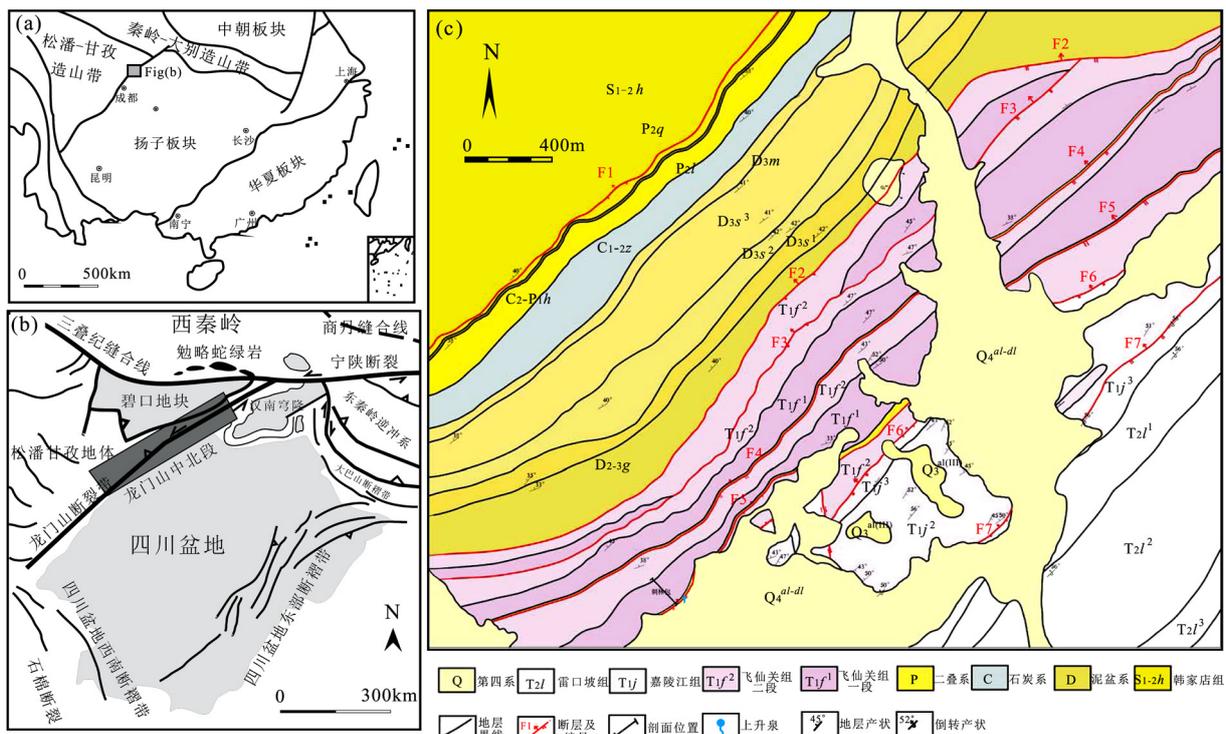
状”灰岩的成分和结构构造进行分析和研究,结合前人研究成果,对“圆珠状”灰岩的形成环境进行探讨,以有助于了解该地区P-T事件之后的沉积响应,三叠纪海平面的变化及沉积环境的演化史。

### 1 区域地质概况

马角坝地区位于扬子板块西北缘的龙门山推覆构造带的东南侧(图1a),其北部为秦岭造山带,西侧为松潘-甘孜褶皱带,北西侧为碧口地块,中间以龙门山造山带为界(图1b)。其内山系呈北东—南西走向,属于构造山系。

在区域地层中,马角坝位于四川盆地分区,该区的沉积地层由两部分组成:(1)震旦系-上三叠统须家河组,主要为相对稳定的滨浅海沉积;(2)上三叠统须家河组-白垩系-古近系沉积,主要为前陆陆相沉积。而须家河组则被认为是海相向陆相转变的过渡类型沉积。马角坝地区地层出露比较齐全,包括古生代的寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系;中生代的三叠系、侏罗系、白垩系;新生代的第四系。其中泥盆系至三叠系海相碳酸盐建造极为发育。研究区内出露的地层有志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、第四系。

本文研究重点为二叠纪向三叠纪过渡这段时



(a) 研究区构造格局; (b) 四川盆地及邻区构造略图(修改自赵德军和王刚, 2015); (c) 马角坝区域地质图

图1 马角坝区域地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the Majiaoba area

间所发生的沉积事件以及所反映的沉积演化特征。马角坝地区三叠系出露的地层主要有飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组,据前人研究,飞仙关组下段沉积环境为台间盆地,上段沉积环境为滨海三角洲,嘉陵江组为碳酸盐台地-潮坪环境;雷口坡组为潟湖和潮坪环境(杜其良和黄邦强,2001)。由飞仙关组到雷口坡组,海水逐渐变浅。

马角坝及其邻近地区可划分为4个构造单元,自南向北分别为摩天岭推覆构造带、映秀-北川推覆构造带、龙门山前陆推覆构造带和川西前陆盆地。马角坝处于松潘-甘孜造山带与扬子陆块的结合部位的龙门山推覆构造带之马鞍塘冲断代。夹持于雁门坝断裂与马角坝断裂之间,北西侧为楼子坝推覆岩片,南东侧为竹园坝开阔褶皱变形区(赵德军和王刚,2015)。

区内构造复杂,褶皱主要有仰天窝复式向斜、雁门坝倒转背斜、五花洞复式背斜和二郎庙向斜。马角坝-罗家坝断裂带是区域的主要断裂构造,断层走向多为北东-南西,且多数为逆断层。

## 2 研究区概况

受三叠纪末印支运动的影响,研究区在西北向东南的推挤应力作用下形成一系列褶皱和断层。马角坝倒转背斜为区内主褶皱,其西北翼发育雁门坝断层、白岩山断层、小白岩山断层、滚柴坡断层、中梁山断层和漆树湾断层(F1-F6逆断层),其枢纽延伸方向都与主褶皱一致。褶皱主要有小白岩山背斜、灌林包背斜、白虎头背斜及小池塘向斜;南东翼发育李家湾断层(F7逆断层)。F1-F7断层走向均为北东-南西,组成叠瓦式逆冲断层,区内最高点大圆包海拔1028 m,最低处为马角坝河,海拔约630 m,切割350 m左右,属于浅切割区(图1c)。

二叠纪末马角坝地区发育的吴家坪组是一套厚度仅1~2 m 燧石结核(条带)灰岩,其中含有丰富的生物碎屑,产古蜓和腕足类,代表一套开阔碳酸盐台地环境之沉积。早三叠世飞仙关组下段发育有一套“圆珠状”灰岩,研究区三叠纪接受第一次海侵,海水由东向西侵入(杨伟,2009)。气候炎热,泥质含量大大增加,形成了飞仙关组一段底部的泥灰岩和钙质泥岩互层及二段紫红色泥页岩。该时段生物含量较少,仅发现有克氏蛤化石。二叠纪末全球发生了大规模的生物灭绝事件,而早三叠世发育的“圆珠状”灰岩作为微生物岩的一种极有可能就是“错时相”在马角坝地区的表现,是三叠纪生物迟缓复苏的表现。

## 3 “圆珠状”灰岩岩石学特征

### 3.1 宏观特征

“圆珠状”灰岩呈夹层不均匀产出,有的仅在灰岩层下部有圆珠,并凸出陷入其下的土黄色泥页岩中,使灰岩底面凹凸不平。圆珠大小与岩层的单层厚度有一定关系:单层厚度大则圆珠较大,单层厚度小则圆珠较小。它在野外露头不连续,常被植被和土地覆盖。岩石整体为灰白色-灰黄色,风化面为灰黑色(图2a)。从露头可以看到,“圆珠”分布非常密集,呈凸出状态。“圆珠”表面颜色较整块岩石更深(图2b),而新鲜面颜色为黄褐色(图2c、2d)。

从手标本来,看,岩石新鲜面为浅灰色-黄灰色,风化面为深灰色-深灰黄色。风化程度不均匀,导致风化面极不平整(图3a)。岩石多数为块状构造,局部发育缝合线构造(图3b),缝合线内常被方解石脉充填。岩石的矿物成分以方解石为主,泥质含量次之,少量白云质成分。

“圆珠”约占全岩的30%~50%,直径多为1~1.5 cm,少为0.4~0.7 cm,为次圆-椭圆-圆。“圆珠”整体颜色为锈红色,外部填隙物为浅灰色-黄灰色;同时“圆珠”本身内部也存在明显的颜色差异,靠近中心部位为锈红色,约占“圆珠”的85%~90%,其外部包绕一圈深灰色物质,约占“圆珠”的10%~15%(图3c),深灰色物质形成的圈层有时不连续且不规则,显示一定的纹层特征,滴5%的稀盐酸剧烈气泡,初步断定为灰质成分。从手标本可以看到,圆珠内部的物质更加酥松多孔(图3d)，“圆珠”内部锈红色深浅不一,表明其矿物成分不均匀。

在“圆珠”内部清楚可见透明状方解石,其含量较少,约占“圆珠”的15%~20%。“圆珠”相对于其外部的填隙物呈凸出状态,说明其抵抗风化的能力更强。有的“圆珠”仅剩下核心部分,有的则不见圆珠仅剩凹坑(图3b),为差异风化作用所致。“圆珠”内部的锈红色物质颗粒明显较粗,常发生溶蚀作用,形成大小不一的孔洞,外部的深灰色灰质圈层则溶蚀较弱(图3d)。

### 3.2 镜下特征

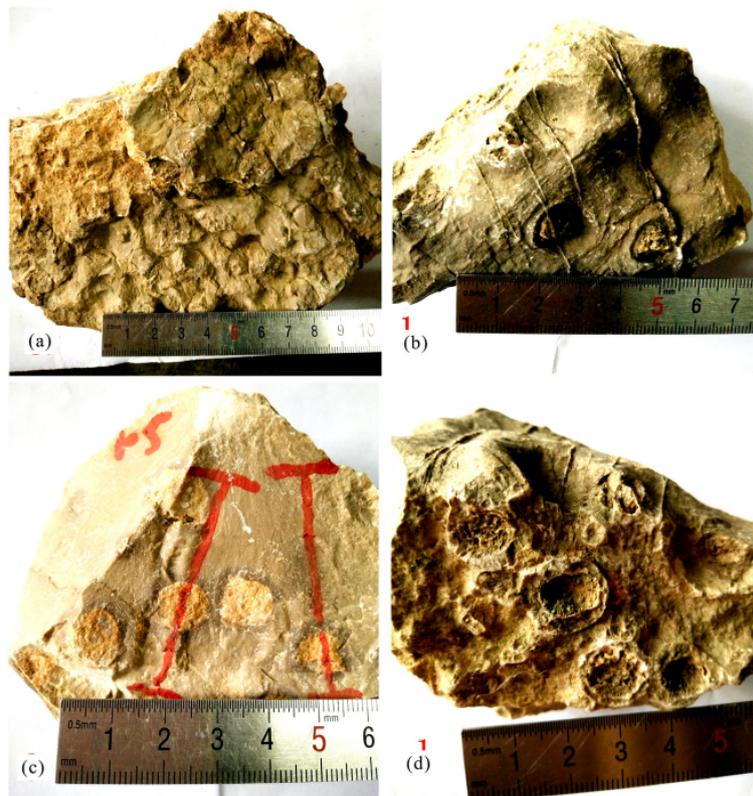
“圆珠状”灰岩的主要成分为方解石,其次为泥质成分,局部可见白云石化、弱去白云石化、黄铁矿化和褐铁矿化。“圆珠状”灰岩可分为颗粒部分和粒间部分。

3.2.1 颗粒部分 “圆珠”由核心和纹层两部分组成,由于强烈的溶蚀作用,核心和纹层多已模糊不



图 2 “圆珠状”灰岩野外露头特征

Fig.2 The outcrop characteristics of “bead like”limestone



(a) 差异风化导致“圆珠状”灰岩表面凹凸不平; (b) “圆珠状”灰岩发育的缝合线构造,内部被方解石脉充填。“圆珠”容易发生风化作用,仅剩下部分或被完全风化剩下凹坑; (c) “圆珠”核心大部分为锈红色物质,其外部包绕一圈烟灰色的灰质成分; (d) “圆珠”核心锈红色物质发生溶蚀,剩下外部包绕圈层,外部圈层也被一定程度的溶蚀

图 3 “圆珠状”灰岩手标本特征

Fig.3 Hand specimen photos of “bead like” limestone

清。有的核心可见生物碎屑,由于“圆珠”内部被锈红色物质覆盖,难以区分生物种类。核心主要有两种,一种位于“圆珠”中心,另一种则偏向“圆珠”一侧,但其外形都为椭圆形或近圆形。

“圆珠”核心主要成分为亮晶方解石,约占“圆珠”的70%~80%。晶粒粒径多为0.1~0.2 mm,少数可达0.3~0.4 mm,中-细晶结构,多为半自形-他形晶,亮晶方解石常呈集合体产出,构成连晶方解石(图4a)。“圆珠”中还可见到少量的白云石,由方解石发生白云石化而来,白云石常为他形晶,偶见菱形自形晶,其边缘发生溶蚀作用,形成不规则溶蚀边(图4b)。白云石晶粒边缘亦可见到被方解石交代的弱去白云化现象。在方解石的晶间往往含铁质尘点和残余灰泥。

“圆珠”的纹层内外侧常常见到干净方解石,方解石较为新鲜,蚀变较弱(图4c),其颗粒形态不规则,粒径多为0.3~0.7 mm,两组菱形解理极为常见(图4d),沿解理常发生石膏化而表现出异常干涉色(图4e)。用茜素红对“圆珠状”灰岩进行染色,方解石被染成红色,而白云石不变色,但由于“圆珠”内部本身的锈红色干扰,区分二者较难,但可以明显分辨的是,“圆珠”外部的填隙物均被染成红色,说明填隙物中方解石含量很高,而白云石很少。

“圆珠”内部发育的纹层呈舒缓波状(图4f)。纹层厚度很小,约为0.06~0.12 cm,且往往发育不连续,不能构成完整的圈层构造。在大部分“圆珠”中纹层仅可见1~3层。纹层内部物质为泥微晶方解石,局部有重结晶现象,但粒度明显小于“圆珠”内其他部位的方解石(图4f)。

3.2.2 粒间部分“圆珠”被泥微晶方解石胶结,为基底式胶结,颗粒间互不接触。胶结物粒度很小,与“圆珠”内部物质形成巨大反差(图4g)。胶结物局部发生弱白云石化,白云石约占胶结物的10%。胶结物有一定程度的重结晶,局部可见较大颗粒的方解石。在“圆珠”与胶结物接触边缘常可见裂隙与孔洞,其中常被有机质充填。由于这些裂隙与孔洞的发育,导致某些溶蚀型流体易于进入“圆珠”内部并与之反应,导致“圆珠”脱落,在表面上形成凹坑。

在泥微晶填隙物中发育有缝合线构造,缝合线呈不规则锯齿状(图4h),内部被黑色有机质充填,结合露头中缝合线的特点,推测其可能为沥青质成分。

电镜扫描及能谱分析表明,“圆珠”内部发生黄

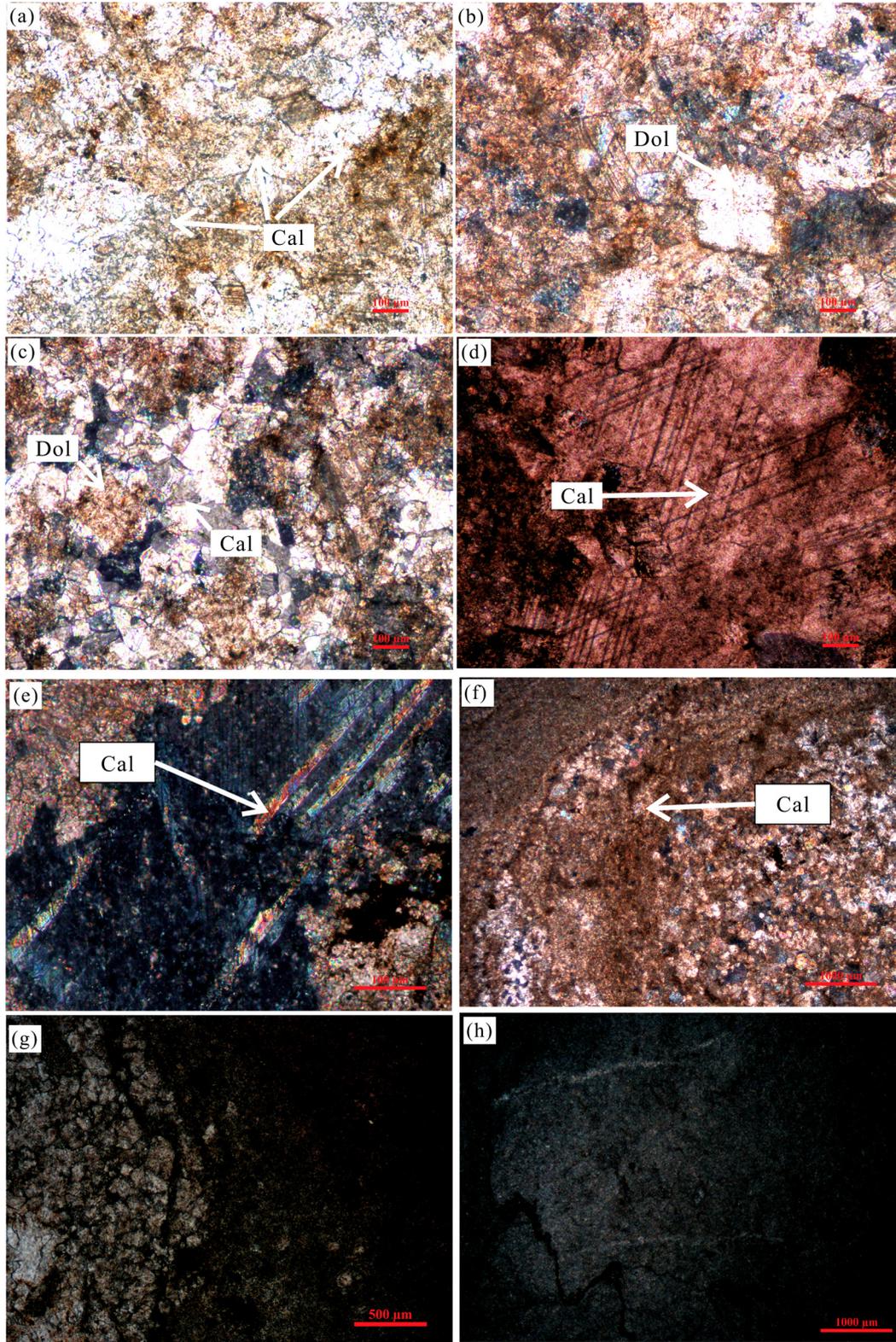
铁矿化和褐铁矿化,导致“圆珠”内部因铁质含量很高而呈现锈红色(图5a,5b)。有的晶粒间还可见重晶石(图5c,5d)。“圆珠”内部溶蚀孔非常发育,被粒状方解石充填(图5e)。在基质中还可见到裂缝,其间充填亮晶方解石,但裂缝未贯穿“圆珠”(图5f)。由于“圆珠”状灰岩溶孔和裂隙较为发育,且含有铁质和沥青质成分,其可能对寻找金属硫化物矿床和油气藏具有一定的指示意义。

综合手标本和镜下特征,笔者认为“圆珠”状灰岩为一种特殊的核形石灰岩,因为:①核形石是由核心和纹层两个部分组成,其组分主要为灰质和少量磷质、铁质及锰质等(Flügel *et al.*, 1982),而“圆珠”亦由这两个部分组成,它保留了核形石最典型的构造;②核形石的纹层中以泥晶纹层最为常见,且成分为微晶方解石。多数为半连续,不等厚纹层,纹层厚度为0.05~0.2 mm,且由于后期成岩作用影响,纹层多已模糊不清(Verrecchia *et al.*, 1997; Arenas *et al.*, 2007; 徐锦龙等, 2013),这与“圆珠”内部纹层特点一致。由于蚀变很强,导致纹层较少且不连续,重结晶作用也使纹层模糊不清,内部物质分布无规律可循;③核形石灰岩中常发育密集缝合线构造,“圆珠”状灰岩中缝合线也极为发育。核形石内部往往可见泥晶化侵蚀构造,在“圆珠”的纹层边部和白云石边缘也可以见到泥晶化侵蚀构造;④核形石的形成环境多样,尤以局限台地的中低能环境最为发育,而马角坝三叠纪时为局限台地环境,结合“圆珠”的形态,将其归为核形石是合理的。

## 4 “圆珠状”灰岩的形成环境和沉积环境演化

### 4.1 形成环境

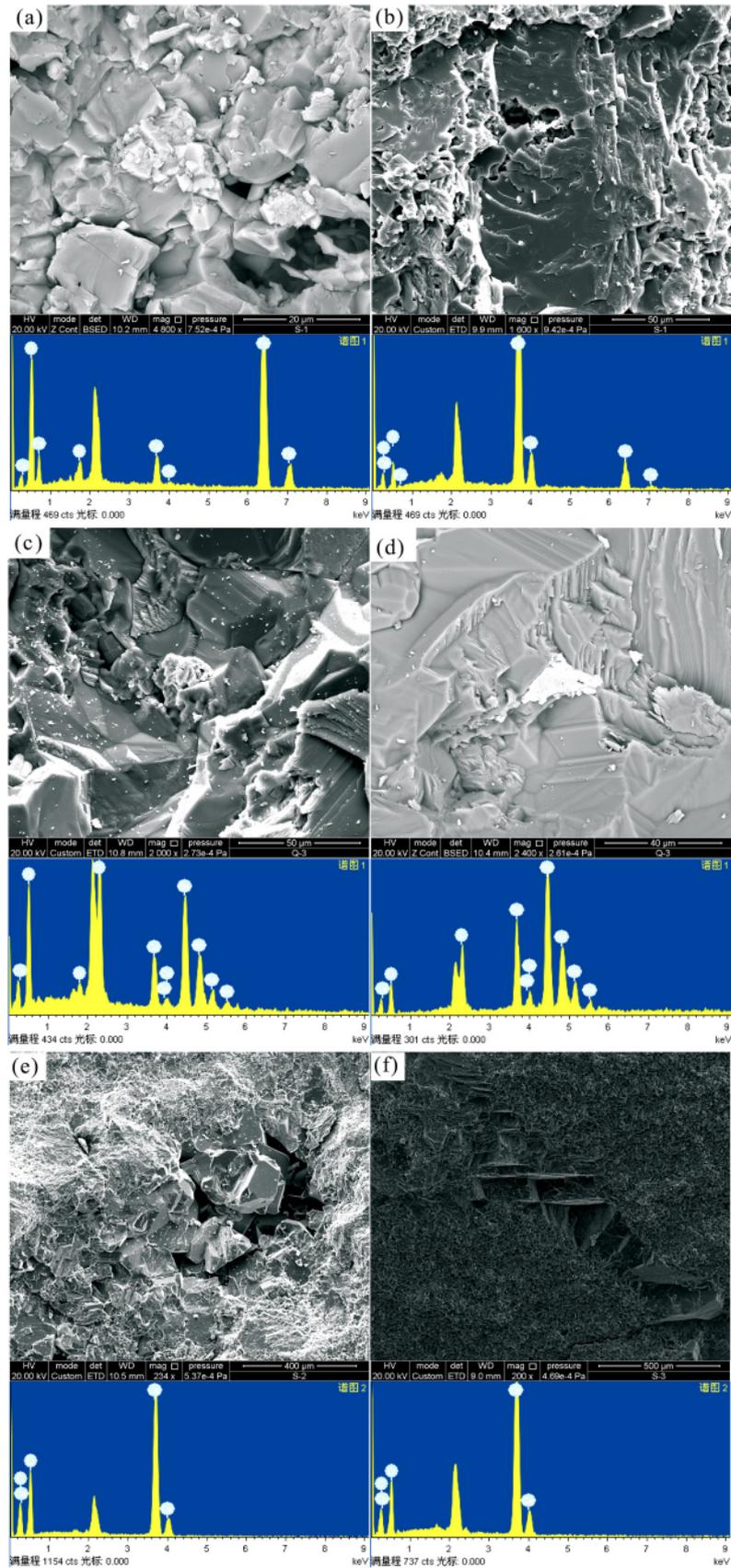
核形石的形成方式主要有藻(菌)类自身钙化、原地沉淀、硫酸盐还原菌、藻类光合作用、藻类捕获和粘结等作用(Dahanayake, 1978; Peryt, 1983; 李熙哲等, 2000; Whalen *et al.*, 2002; 梅冥相, 2007)。目前关于核形石的分类主要有3种:以形分类,以组分分类,以形+成因分类(杨仁超等, 2011)。核形石的形成主要受4个因素的控制:海平面变化和层序(Arp *et al.*, 2003; Gradziński *et al.*, 2004)、水体能量和水深(张园园等, 2009)、古气候(Strasser and Sarmakassou, 2003)和台地形态(Hug, 2003)。而根据对“圆珠状”灰岩内部成分、结构构造的研究,笔者认为“圆珠状”灰岩作为核形石的一种,被认为是一些以蓝细菌为主导的底栖微生物群落,在条件恶劣、缺乏后生动物的捕食和扰动条件下形成的生物



(a) 方解石呈集合体产出, 构成连晶方解石; (b) 白云石的菱形自形晶边缘发生泥化, 形成不规则溶蚀边; (c) 晶粒较大的方解石, 较为新鲜, 蚀变弱, 旁边为白云石的菱形晶体, 表面为褐色; (d) 方解石发育的两组菱形极完全解理; (e) 方解石沿解理发生石膏化, 呈现异常干涉色(图中白色箭头所指); (f) “圆珠”内部发育的纹层构造, 纹层内充填的泥微晶方解石; (g) “圆珠”内部颗粒明显大于外部胶结物, 胶结物为泥微晶方解石, 可见重结晶现象; (h) 填隙物中发育的缝合线构造, 缝合线呈锯齿状, 被有机质充填; Dol: 白云石; Cal: 方解石

图4 “圆珠状”灰岩的镜下微观特征

Fig.4 Microphotos of “bead like”limestone



(a)、(b) “圆珠”内部的黄铁矿化和褐铁矿化；(c)、(d) 晶粒间的重晶石；(e) “圆珠”内部溶孔极为发育，其间充填粒状方解石；(f) 基质中发育的裂隙，其间充填亮晶方解石

图5 “圆珠状”灰岩在扫描电镜下的特征

Fig.5 BSE image and elemental spectrum of “bead like”limestone

沉积建造 (Schubert and Bottjer, 1992; Kershaw *et al.*, 1999; Ezaki *et al.*, 2001, 2003; Lehmann *et al.*, 1999; Pruss and Bottjer, 2005; 赵小明, 2010; 何冰辉等, 2014)。大部分“圆珠”外形为近圆形, 而核心则有位于“圆珠”中心和偏向“圆珠”一侧两种。根据“圆珠”的形状及核心的位置推测其有两种形成方式, 即滚动生长和摇摆生长(图6)。“圆珠”的形态及内部结构是由核心的形状及纹层的成因决定的, 而“圆珠”的结构特征、核心及纹层的物质组成则能够很好的反应其形成环境 (Silvia and Ricardo, 1998; 迟乃杰, 2011)。“圆珠”的核心偏向一侧, 纹层发育不连续, 这是由于藻类只在向光的垂向或侧向上生长 (Freeman *et al.*, 1982; 曾允孚等, 1983; Védrine *et al.*, 2007) 非常类似于帽状核形石。核形石往往代表了中低能水动力条件, “圆珠”作为一种核形石, 在其形成之后由于海水盐度变高, 这种高盐度的海水沿孔隙进入“圆珠”内部, 发生黄铁矿化、褐铁矿化和少量白云石化, “圆珠”的胶结物为泥微晶方解石, 而泥微晶方解石代表低能环境。因此, 推测“圆珠”形成于水体较深, 盐度较高、动力较小的弱搅动低能之局限台地沉积环境较为合适。

“圆珠状”灰岩产于飞仙关组一段底部的黄灰色泥灰岩和钙质泥岩互层中, 马角坝地区飞仙关组一段地层剖面沉积环境分析(图7)表明, 该套岩性组合的沉积环境为局限台地相。灰岩与泥岩的不等厚互层表了低能水动力条件。紫红色的泥岩往往代表暴露的氧化环境, 而黑色的泥岩则代表深海的还原环境。此处泥灰岩为黄灰色, 低能环境“圆珠”的核心较大, 纹层很薄, 且纹层内都为泥微晶充填, 基质中生物碎屑很少见, 都表明其沉积于安静、能量相对较低的局限台地环境。因此, “圆珠状”灰岩的形成环境与沉积环境基本保持一致。

## 4.2 沉积环境演化

“圆珠状”灰岩产于飞仙关组一段底部的黄灰色泥灰岩和钙质泥岩互层中, 作为夹层产出, 由南西向东北方向厚度变薄, 在研究区南西部狮子坟最为发育, 厚5~6 m, 而在刺林包实测剖面中其厚度为4.44 m, 再向东北方向到达滚柴坡, 其出露厚度仅1 m左右, 直至尖灭。“圆珠”的生长和分布受控于海平面和气候, 而内陆地区降水量和湿度的变化控制了黏土和营养物质等陆源混入物 (迟乃杰, 2011), 也影响到“圆珠状”灰岩的物质组成。因此, “圆珠”的核心与纹层还可间接反应古气候和古海平面变化情况。

二叠纪与三叠纪之交, 发生了显生宙以来最大的生物灭绝事件, 海洋生态系统遭极大破坏, 这次事件之后, 微生物岩在全球范围内广泛发育, 而且大部分都发育在低纬度的浅水海洋环境, 向深水很快尖灭 (雷丽丹, 2011)。微生物岩的出现往往代表一种特殊的生态环境, 对这套微生物岩的研究有助于揭示二叠纪末期-早三叠世全球事件在礁相或浅水碳酸盐岩台上的具体反映 (王永标等, 2005)。“圆珠状”灰岩在地层中的产出特点印证了地质发展简史中所说的早三叠世晚期海水由西向东退去, 西部形成局限台地环境, 东部为开阔台地, 两者之间被边缘浅滩分隔。“圆珠状”灰岩的尖灭位置可能就代表了台间盆地与碳酸盐台地的分界位置, 而这一切又刚好与上述“错时相”中的微生物岩向深水很快尖灭非常吻合 (图8)。

## 5 结论

(1) “圆珠状”灰岩是一种特殊的核形石灰岩, 在其形成后, 由于“圆珠”内溶孔和基质中裂隙的发育, 海水进入, 后期发生白云石化、黄体矿化和褐铁

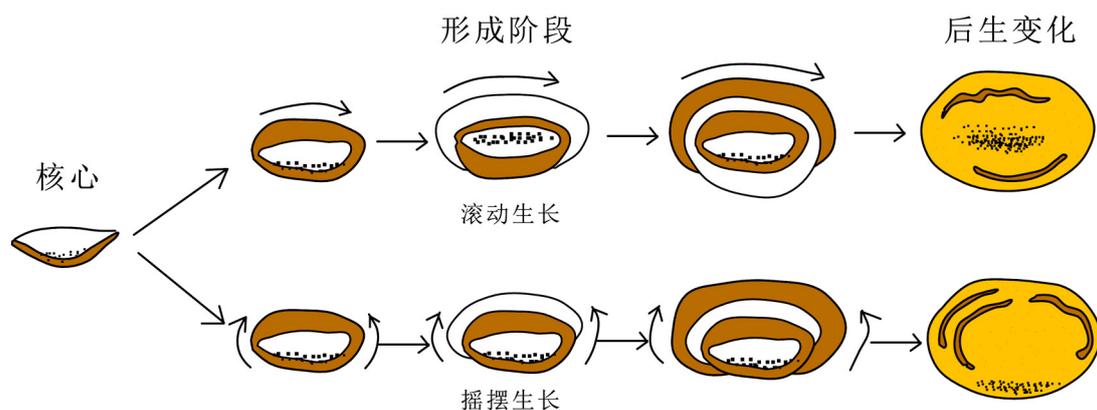


图6 “圆珠状”灰岩成因模式图

Fig.6 Genetic model of “Bead like” limestone

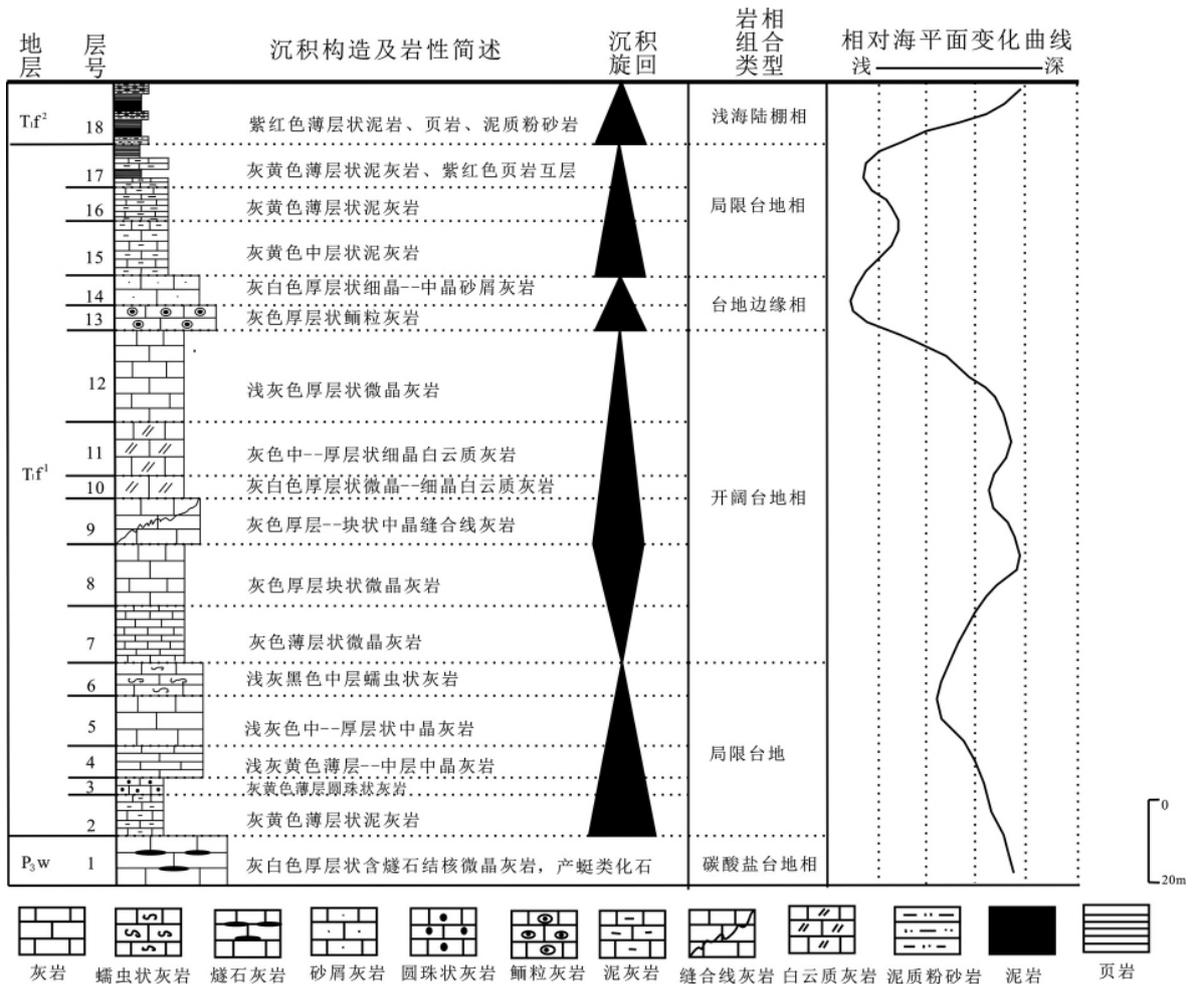


图7 马角坝刺林包下三叠统飞仙关组一段地层剖面沉积环境分析  
Fig.7 Sedimentary environment of the Feixianguan formation in Cilinbao

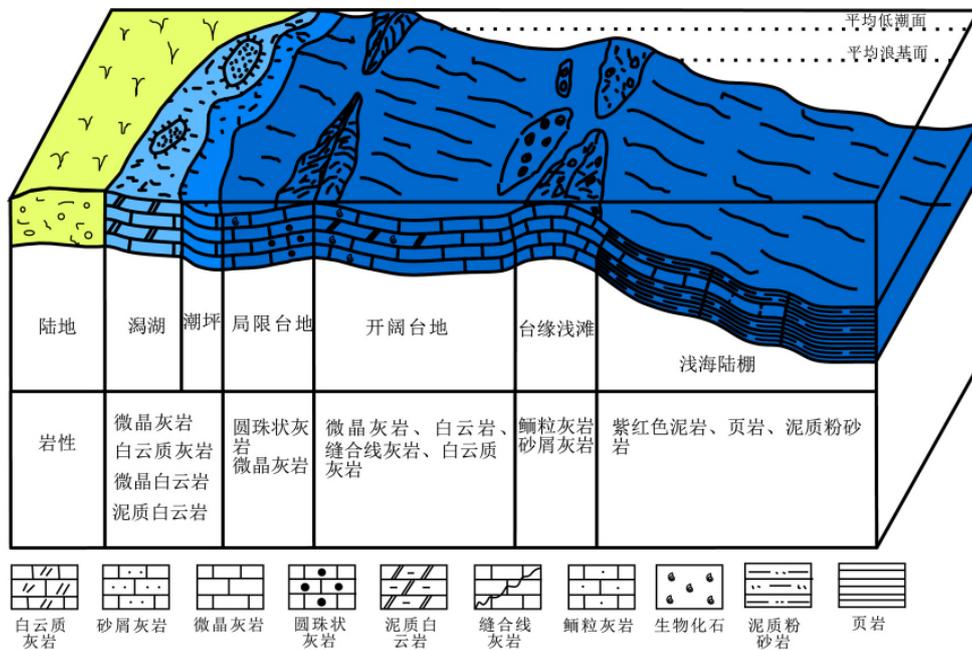


图8 马角坝地区地层沉积环境演化示意图  
Fig.8 Sedimentary environment of the Majaoba Area

矿化,导致纹层模糊不清。

(2) “圆珠状”灰岩是“错时相”中的微生物岩,它以蓝细菌为主导的底栖微生物群落,在缺乏后生动物的捕食和扰动条件下形成,是对二叠纪末期海洋环境异常和后动物化石稀少的生态系面貌的自然响应。

(3) “圆珠状”灰岩的形成环境和沉积环境基本一致,未发生较大变化,总体处于局限台地的低能环境中。

(4) “圆珠状”灰岩的分布特征表明当时研究区内海平面为东深西浅,“圆珠状”灰岩的尖灭位置代表了局限台地与开阔台地的界线。

#### 参考文献 (References):

- Arenas C, Cabrera L, Ramos E. 2007. Sedimentology of tufa facies and continental microbialites from the Palaeogene of Mallorca Island (Spain). *Sedimentary Geology*, 197(1-2): 1-27
- Arp G, Reimer A, Reitner J. 2003. Microbialite formation in seawater of increased alkalinity, Satonda Crater Lake, Indonesia. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(1): 105-127
- Dahanayake K. 1978. Sequential position and environmental significance of different types of oncoids. *Sedimentary Geology*, 20: 301-316
- Ezaki Y, Liu J B, Adachi N. 2001. Microbialites and their responsible microbes following the end-Permian extinction in Sichuan, South China. *Gondwana Research*, 4(4): 614
- Ezaki Y, Liu J B, Adachi N. 2003. 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. *Palaios*, 18(4-5): 388-402
- Flügel E. 1982. Microfacies analysis of limestone. Christenson K, trans. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 624-654
- Freeman T, Rosell J, Obrador A. 1982. Oncolites from lacustrine sediments in the Cretaceous of north-eastern Spain. *Sedimentology*, 29(3): 433-436
- Gradziński M, Tyszka J, Uchman A, Jach R. 2004. Large microbial-foraminiferal oncoids from condensed lower-middle Jurassic deposits: A case study from the Tatra Mountains, Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 213(1-2): 133-151
- Hug W A. 2003. Sequenzielle Faziesentwicklung der karbonatplattform des schweizer Jura im Späten Oxford und Frühesten Kimmeridge. Doctoral Thesis. Switzerland: University of Fribourg: 155
- Kershaw S, Zhang T S, Lan G Z. 1999. A microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 146(1-4): 1-18
- Lehrmann D J. 1999. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China. *Geology*, 27(4): 359-362
- Peryt T M. 1983. Oncoids: Comment to recent developments. In: Peryt T M ed. *Coated Grains*. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 273-275
- Pruss S B, Bottjer D J. 2005. The reorganization of reef communities following the end-Permian mass extinction. *Comptes Rendus Palevol*, 4(6-7): 553-568
- Schubert J K, Bottjer D J. 1992. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster forms. *Geology*, 20(10): 883-886
- Sepkoski J Jr, Bambach R K, Droser M L. 1991. Secular changes in Phanerozoic event bedding and the biological overprint. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 298-312
- Silvia L, Ricardo M P. 1998. Environmental implications of oncoids and associated sediments from the Remoredo Formation (Cambrian Jurassic Mendoza, Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 140: 357-366
- Stanley S M, Yang X. 1994. A double mass extinction at the end of the Paleozoic Era. *Science*, 266(5189): 1340-1344
- Strasser A, Samankassou E. 2003. Carbonate sedimentation rate today and in the past: Holocene of Florida Bay, Bahamas and Bermudavs. Permian Jurassic and Cambrian Cretaceous of the Jura Mountains (Switzerland and France). *Geologia Croatica*, 56(1): 1-18
- Védrine S, Strasser A, Hug W. 2007. Oncoid growth and distribution controlled by sea-level fluctuations and climate (late Oxfordian, Swiss Jura Mountains). *Facies*, 53(4): 535-552
- Verrecchia E P, Frey P, Julien J, Baltzer F. 1997. The unusual hydrodynamical behaviour of freshwater oncolites. *Sedimentary Geology*, 113(3-4): 225-243
- Whalen M T, Day J, Eberli G P. 2002. Microbial carbonates as indicators of environmental change and biotic crises in carbonate systems: Examples from the Late Devonian, Alberta basin, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181(1-3): 127-151
- 迟乃杰. 2011. 鲁西寒武系核形石灰岩特征与沉积环境分析 [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 1-78
- 杜其良, 黄邦强. 2001. 四川江油马角坝地质填图教学实习指导书 (内部资料). 成都: 成都理工大学, 1-11
- 龚大明. 1990. 马角坝泥盆系观雾山组顶部的牙形石. *成都地质学院学报*, 17(4): 10-15
- 郭福生. 1989. 下扬子地区三迭系下统瘤状灰岩成因研究. *华东地质学院学报*, 12(4): 17-22, 34
- 郝毅, 林良彪, 周进高, 倪超, 张建勇, 陈薇. 2012. 川西北中二叠统栖霞组豹斑灰岩特征与成因. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 39(6): 651-656
- 何冰辉, 常蓝天, 吴鹏, 陈心路, 李超, 王永超, 张安东, 白玉, 李王鹏, 季慧丽. 2014. 古-中生代生物灭绝与华南早三叠世错时相沉积研究. *长江大学学报(自科版)*, 11(26): 24-30
- 惠博, 伊海生, 陈三运, 时志强. 2009. 龙门山马角坝地区石炭纪沉积相和层序地层研究. *断块油气田*, 16(6): 10-12
- 靳学斌, 李壮福, 陆鹿, 冯乐. 2014. 下扬子巢湖地区下三叠统瘤状灰岩成因再探讨. *高校地质学报*, 20(3): 445-453
- 雷丽丹. 2011. 微生物岩在地质历史时期的研究. *科技传播*, (21): 104
- 李熙哲, 管守锐, 谢庆宾, 汪泽成. 2000. 平邑盆地下第三系官中段核形石成因分析. *岩石学报*, 16(2): 261-268
- 梅冥相. 2007. 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. *地学前缘*, 14(5): 222-234

- 覃建雄, 曾允孚, 黄志勋, 吴勇. 1996. 四川龙门山马角坝地区石炭纪层序地层及海平面变化研究. 岩相古地理, 16(1): 19-33
- 王永标, 童金南, 王家生, 周修高. 2005. 华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩及古环境意义. 科学通报, 50(6): 552-558
- 武向峰, 伊海生, 惠博, 杨伟, 杜秋定. 2010. 四川龙门山马角坝组铁质鲕粒成因及沉积环境. 沉积与特提斯地质, 30(1): 25-31
- 徐锦龙, 洪天求, 贾志海, 王伟, 罗雷. 2013. 四川江油马角坝地区船山组核形石基本特征及其环境意义. 沉积学报, 31(1): 1-9
- 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 迟乃杰. 2011. 核形石研究现状与展望. 地球科学进展, 26(5): 465-474
- 杨伟. 2009. 川西北马角坝实习基地泥盆系-三叠系碳酸盐岩沉积环境研究[硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学
- 袁志华. 1998. 中扬子地区下三叠统大冶组瘤状灰岩成因研究. 地球化学, 27(3): 276-282
- 曾允孚, 张锦泉, 林文球, 叶亚平. 1983. 广西泗顶泥盆系上统融县组中核形石的类型及其环境意义. 沉积学报, 1(1): 42-49
- 张园园, 杨海军, 王建坡, 黄智斌, 李越. 2009. 塔里木板块塔中上奥陶统良里塔格组的核形石. 微体古生物学报, 26(3): 234-242
- 赵德军, 王刚. 2015. 龙门山马角坝地区地质调查实习教程(内部资料). 成都: 成都理工大学, 2-66
- 赵小明, 牛志军, 童金南, 姚华舟. 2010. 早三叠世生物复苏期的特殊沉积-“错时相”沉积. 沉积学报, 28(2): 314-323

(本文责任编辑: 龚超颖, 英文审校: 高剑峰)

## • 亮点速读 •

### 太古宙科马提岩的氧同位素组成揭示早期地幔的不均一性

由于30亿年前的火成岩保存太少, 我们对于早期地球动力学过程(尤其是地壳与深部地幔相互作用)的了解还很缺乏。作为最为广泛应用的传统稳定同位素体系之一, 地幔氧同位素组成随时间的演化并没有被很好地限定。尽管目前已测得44亿年岩浆锆石(来自上地幔或者地壳的熔体)的氧同位素组成接近现代地幔值( $\delta^{18}\text{O} = 5.5\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$ ), 但是对于太古宙以前深部地幔的氧同位素组成, 还没有相关报道。

美国路易斯安那州立大学 Byerly 博士及其合作者测定了来自 Barberton 绿

岩带 Weltevreden 科马提岩(年龄为32.7亿年)中新鲜橄榄石斑晶的氧同位素组成。斑晶的主微量元素组成显示它们很好地保存了初始岩浆信息; 这些科马提岩浆是深部地幔柱部分熔融的产物。橄榄石斑晶的  $\delta^{18}\text{O}$  值从 2.9‰ 变化到 4.1‰ 相对于现代地幔低 2‰ 左右。结合其他相关结果和质量平衡计算, 他们认为低的氧同位素组成不是由地壳物质同化混染、矿物包裹体或者地表物质加入、矿物结晶分异等过程导致的, 直接代表了科马提岩的地幔源区。另外, 如此低的氧同位素组成也不能由源区存在再

循环洋壳物质来解释(需要 50% ~ 80% 再循环物质的加入, 与基于其他元素的估计相悖)。

文章指出, Weltevreden 科马提岩源区可能是约 44 亿年前岩浆海结晶时形成的科马提岩源区与对流地幔长期分离使得岩浆海结晶时产生的氧同位素不均一性得到保存。作者推测, 低  $\delta^{18}\text{O}$  应该是地球早期过程的结果, 可能是在深部岩浆海矿物从硅酸盐相向金属氧化物相转变过程中形成的。文章最后还提到, 早期岩浆海不均一残余的性质和极端同位素分馏的原因还需进一步研究。

这一成果发表在国际著名期刊 *Nature Geoscience* 上: Byerly B L, Kareem K, Bao H, Byerly G R, 2017. Early earth mantle heterogeneity revealed by light oxygen isotopes of Archean komatiites. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGE03054.

(袁超 摘编)