

# 贵州紫云上石炭统叶状藻礁灰岩胶结物特征

孙宝亮<sup>1</sup>, 巩恩普<sup>1</sup>, 李金梅<sup>2</sup>, 关长庆<sup>1</sup>, 张永利<sup>1</sup>

(1. 东北大学 地质系, 辽宁 沈阳 110004; 2. 有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 贵州紫云县猴场镇扁平村的上石炭统叶状藻礁及其周边灰岩中广泛发育大量的各类胶结物。通过对胶结物的形态、结构和阴极发光特征以及胶结物间的接触关系的研究, 可以确定成岩作用的先后并识别成岩环境。浅海海底同生成岩阶段大的孔隙中形成等厚环边针状胶结物、葡萄状胶结物, 小的孔隙里形成微晶胶结物。早成岩阶段形成微亮晶和斑块状亮晶方解石胶结物和放射纤维扇状胶结物, 表生成岩阶段的溶蚀作用和胶结作用强烈, 胶结物类型有斑块状或等粒的方解石胶结物和等厚环壁柱状胶结物, 等厚环壁柱状胶结物在所有胶结物中体积是较大的。早期胶结作用使叶状藻礁灰岩孔隙度大为降低。中、晚成岩阶段, 孔隙被等厚环壁刃状胶结物和晶簇或斑块状亮晶方解石所充填, 有些先成的胶结物被热液改造。后生作用阶段发生的主要是构造破裂作用, 其中少数裂隙被红褐色含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  微晶层和晶体粉砂及渗流豆粒充填。叶状藻礁灰岩的孔隙在晚成岩阶段前或中被胶结而之后没有创造出大且连通的孔隙, 是它没能成为油气储集层的原因之一。

**关键词:** 扁平村; 上石炭统; 叶状藻礁灰岩; 胶结物; 阴极发光

中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0050-11

## Cement characteristics of the Upper Carboniferous phylloid algal reef limestone in Ziyun County, Guizhou Province

SUN Bao-liang<sup>1</sup>, GONG En-pu<sup>1</sup>, LI Jin-mei<sup>2</sup>, GUAN Chang-qing<sup>1</sup> and ZHANG Yong-li<sup>1</sup>

(1. Department of Geology, Northeast China University, Shenyang 110004, China; 2. East China Bureau of Mineral Exploration and Development, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Diagenesis and its corresponding cements are extensively developed in the upper Carboniferous phylloid algal reef and circumjacent limestone of Bianping Village, Houchang Town, Ziyun County. These cements are prominent and representative in Houchang Town. A study of crystal shape, fabric and cathodoluminescence images of cements as well as the contacts between cements can help determine paragenetic sequences, recognize diagenetic environments, and understand the porosity evolution in the phylloid algal reef limestones. During the syndiagenetic stage, wackestone and packstone sediments generally had low porosity and permeability, pores were filled with sea-floor micrite cement, biological encrustation and sea-floor cementation sediments rich in the fragments of phylloid algal thalli had high porosity and big pores, and marine botryoidal cement and isopachous acicular cement grew in the pores. During the early diagenetic stage, cementation supplied a great amount of cements, constructed rock framework, and consequently decided the features of the limestone rock. Blocky calcite spar and calcite microspar were formed in small pores, and radiating cement fans grew in big pores. During the epidiagenetic stage, extensive dissolution and cementation occurred. Vuggy or channel porosity was created by dissolution in the recharge area, and calcite precipitation was greatly increased in downflow areas. Meteoric phreatic

收稿日期: 2010-10-13; 修订日期: 2011-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(090401011)

作者简介: 孙宝亮(1970-), 男, 汉族, 硕士, 讲师, 从事沉积学方面的研究, E-mail: sunbaoliang@mail.neu.edu.cn.

cements include isopachous columnar calcite and blocky or equant calcite cement. Isopachous columnar cement is volumetrically more abundant. The porosity of the reef limestone was reduced dramatically through the early-stage cementation, so the reef limestone could prevent mechanical compaction. During the middle and late diagenetic stage, nearly all porosity was occluded by cements with low rates of fluid influx and efflux, and the remaining pores were filled with isopachous bladed cement and drusy or blocky calcite spar. Some preexisting cements were altered during the middle or late diagenetic stage, the color of isopachous bladed to columnar calcite cement changed from gray to white, and the color of botryoidal cement became more blackish due to hydrocarbon infiltration. Some isopachous bladed to columnar calcite cement could be dissolved, leaving mouldic pores filled subsequently and radiating cement fans formed simultaneously. Construction fracturing is one of the main types of diagenesis during the catagenesis stage. Rusty microcrystalline layers containing  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  line the wall of some fractures, and vadose pisoids and ferruginous crystal silt containing  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  are deposited at the bottom of the cavities formed in the tectonic fractures, which indicates that they were formed in oxidizing vadose environments. Late-stage fractures are filled with coarse-grained white or green bladed and drusy or blocky calcite spar. The middle part of some of these fractures is filled with bitumen block. A reason for the phylloid algal reef limestone not becoming oil and gas reservoirs might be that the pores of the phylloid algal reef limestone were filled with cements before or during the late diagenetic stage, and no large interconnected secondary pores were created afterwards. Only limestone that has a great deal of secondary porosity generated during the catagenesis stage could become oil and gas reservoirs in the Nanpanjiang Basin.

**Key words:** Bianping Village; Upper Carboniferous; phylloid algal reef limestone; cement; cathodoluminescence image

贵州紫云县猴场镇以西约 4 km 的扁平村以南发育一个石炭纪马平期的叶状藻礁。礁体总体呈低起伏的丘状,规模较大,宽 55 m,厚 18 m(张永利等,2007;巩恩普等,2007;Gong *et al.*,2007;李金梅等,2010)。礁体由呈交错叠置的透镜状或层状、以叶状藻片等生物碎屑为骨架的、含大量同心黑、白、灰色等厚环壁胶结物和葡萄状胶结物的胶结岩(Flügel,2004)为造架部分,而生物碎屑粒泥灰岩或泥粒灰岩作为其基底或充填于其间。礁体岩石以高生物含量和多生物种类及含大量等厚环壁胶结物(指在原生或次生孔隙壁上生长的等厚胶结物层)为显著特征。

成岩作用是指沉积物脱离沉积环境在变质作用前随时间发生的物质成分或结构构造的改变。扁平叶状藻礁碳酸盐由最初的高孔隙度沉积物到几乎零孔隙度的岩石,经历了各种成岩作用,这些成岩作用都可直接或间接地通过胶结物反映出来。也就是说,碳酸盐对环境是比较敏感和有记忆力的,可通过胶结物展示出来。

扁平叶状藻礁及其周边灰岩中广泛发育大量的各类胶结物,这些不同成岩阶段形成的胶结物在猴场研究区内是显著的和有代表性的。通过对这些胶

结物的研究,可以确定各种成岩作用的发生序列并识别成岩环境,了解扁平叶状藻礁的孔隙演化,而且也能从形态学和结构及阴极发光上为其他的胶结物和成岩作用研究提供有益的参考。

## 1 区域地质背景

贵州紫云县猴场镇的上石炭统位于扬子地台南缘,地层分区属华南区滇-黔-桂分区 黔南-桂北-滇东南小区(王增吉,1990)。该区石炭—二叠纪地层连续沉积,属开阔台地边缘沉积环境(焦大庆等,2003a;梅冥相等,2004)。晚石炭世—二叠纪是文石海(Sandberg,1983;James and Choquette,1990),在低纬度区的南盘江盆地(王立亭,1994;王俊达等,1998)沉积的碳酸盐矿物以文石为主。猴场镇位于南盘江盆地的中北部。南盘江盆地经历的构造变动多,特别是印支—燕山期以来的构造变动,对古生代盆地进行了反复改造,使原有盆地面貌彻底解体(刘特民等,2001;梅冥相等,2001;赵孟军等,2007)。频繁的构造变动使晚古生代的南盘江盆地存在多期次的岩溶作用(麻建明等,2005)。在黔南石炭—二叠纪的层序地层格架中,石炭系马平组对

应较高位的相对海平面(梅冥相等, 2002, 2004; 焦大庆等, 2003a, 2003b; 林小兵等, 2007), 发育有海侵体系域和高水位体系域(林小兵等, 2007), 后续相对海平面的变化驱动了孔隙流体化学组分的改变, 并依次控制了碳酸盐早期矿物稳定化和和孔隙演化(Moore, 2001)。

## 2 研究方法

本文通过野外观察和室内的 80 个光片、40 个薄片观察(Dravis and Yurewicz, 1985; Dravis, 1991) 以及对 20 个薄片的阴极发光的观察和染色(Dickson, 1965, 1966) 等方法对礁体岩石成岩作用进行研究。通过肉眼和透射光显微结合阴极发光显微, 观察每块标本胶结物的形态学和结构以及接触(包括截切)关系, 并对比、分析不同标本, 来确定胶结物所指示的成岩作用的形成先后, 进而识别成岩环境。

阴极发光显微技术为碳酸盐沉积、成岩作用研究提供了一种主要以元素含量确定发光程度的观察视角, 弥补了一般光学显微的不足。本文使用的阴极发光系统包括阴极发光仪 CL8200MK5(CAMBRIDGE IMAGE)和偏光显微镜 DM2500P(Leica) 及 CCD 摄像头 DFC310FX(Leica), 电子束电流 240~300  $\mu\text{A}$ , 束流电压 17.5~19.0 kV, 曝光时间 5.0~7.0 s。尽管该曝光时间够长, 绝大多数胶结物的阴极发光依然较暗, 且不同阴极发光间的差距不明显。为了达到更好的视觉效果, 特用 ACDsee 软件调整了照片的亮度中的曝光值和伽玛值。经染色法确定碳酸盐中的矿物几乎都是方解石。

## 3 胶结物术语介绍

胶结物类型的描述和划分是依据胶结物的形态学和结构(Flügel, 2004)。由于描述胶结物的术语多且含义比较混乱, 所以有必要对本文采用的胶结物术语的含义做明确说明。

针状的(acicular): 是指晶体的纤维或针形态, 垂直底质生长, 晶体长度与宽度之比  $>6:1$  并且宽度  $<10 \mu\text{m}$  (Scholle and Ulmer-Scholle, 2003; Flügel, 2004)。针状胶结物形成时可能是纤维文石, 经新生变形作用后成方解石, 从尘点状包裹体指示的残留的平直边界才能看出针状纤维(Frisia *et al.*, 2000, 2002)。

柱状的(columnar): 是指纤维晶体的一种形式,

垂直底质生长, 方解石晶体长度与宽度之比  $>6:1$  并且宽度  $>10 \mu\text{m}$ 。柱状方解石又可分为 3 种形式: 放射纤维、放射轴纤维、光束状纤维(Kendall and Broughton, 1978; Given and Wilkinson, 1985; Kendall, 1993; Frisia *et al.*, 2000, 2002; Scholle and Ulmer-Scholle, 2003; Flügel, 2004)。

刃状的(bladed): 方解石晶体长度与宽度之比  $<6:1$  而  $>1.5:1$ , 一般宽约  $10 \mu\text{m}$  或  $<20 \mu\text{m}$ , 长度  $>100 \mu\text{m}$  (Choquette and James, 1990; Scholle and Ulmer-Scholle, 2003; Flügel, 2004)。

犬牙状的(dog tooth): 顶端呈尖锐的长的偏三角面体或菱形的方解石晶体。垂直及斜交底质生长, 晶体大小有数十微米到数百微米 (James and Choquette, 1990; Flügel, 2004)。

葡萄状的(botryoidal): 矿物沉淀或矿物集合体所具有的一串葡萄的曲线形状, 是由放射的长纤维晶体组成和具有球形的表面, 单个的圆形晶簇叫葡萄状体(Sandberg, 1985; James and Choquette, 1990; Scholle and Ulmer-Scholle, 2003; Flügel, 2004)。

放射纤维扇状(radiating cement fan): 是由放射的长纤维晶体组成和具有不太圆的表面, 扇的角度相对较小。

等粒(equant): 亮晶方解石由中到粗粒晶体组成, 单晶体的长度与宽度之比  $<1.5:1$  (Scholle and Ulmer-Scholle, 2003; Flügel, 2004)。

晶簇状(drusy): 充填孔隙、洞穴或破裂的等粒至长的、他形至半自形的方解石晶体, 通常大于  $10 \mu\text{m}$ , 向孔洞的中心晶体颗粒变大(Flügel, 2004)。

斑块状(blocky): 由中至粗粒(几十微米至几毫米)方解石晶体组成, 没有定向性, 他形和半自形结构常见(Choquette and James, 1990; Flügel, 2004)。

微晶层(microcrystalline) 由微晶组成的围绕颗粒形成薄的包壳层或贴壁的环边层(Frisia *et al.*, 2000)。

## 4 胶结物特征

经过各尺度、角度观察和分析胶结物物理出各种成岩作用发生的时间序列, 并根据孔金祥等(2003), 确定扁平叶状藻礁及其周边灰岩所经历的各成岩阶段和成岩环境依次有: 同生成岩阶段、早成岩阶段、表生成岩阶段、中晚成岩阶段、后生(后成)作用阶段(图 1)。下面将依次描述各成岩阶段的成岩作用和胶结物的特征(表 1)。

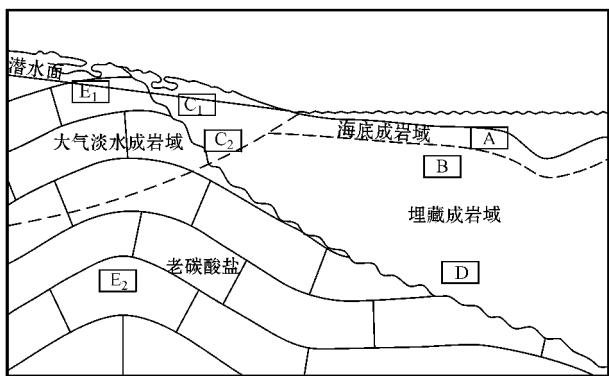


图 1 成岩环境及扁平叶状藻礁灰岩经历的成岩阶段示意图

Fig. 1 Schematic diagram illustrating the diagenetic environments and stages that Bianping phylloid algal reefal limestone experienced

A—浅海海底同生成岩阶段；B—早成岩阶段；C<sub>1</sub>—表生成岩阶段的地下水补给区；C<sub>2</sub>—淡水潜流环境的下流区；D—中、晚成岩阶段；E<sub>1</sub>—后生作用阶段的浅部构造破裂作用；E<sub>2</sub>—深部构造破裂作用

A—sea-floor syndiagenetic stage；B—early diagenetic stage；C<sub>1</sub>—recharge area of groundwater at the epidiagenetic stage；C<sub>2</sub>—downflow area of the meteoric phreatic environment；D—middle and late diagenetic stage；E<sub>1</sub>—shallow structural fracturing at the epigenetic stage；E<sub>2</sub>—deep structural fracturing

表 1 扁平叶状藻礁灰岩各成岩阶段的胶结物特征

Table 1 Characteristics of various stages of cements in Bianping phylloid algal reefal limestone

成岩阶段	胶结物形态和结构	阴极发光
海底同生成岩	结壳或泥晶套或微晶	暗红色
	等厚环边针状胶结物	暗红色或黑红色
	葡萄状胶结物	黑色
早成岩	斑块状亮晶	黑红色
	放射纤维扇状胶结物	蓝黑或黑
表生成岩	斑块状亮晶	蓝黑
	犬齿状胶结物	蓝黑
	等厚环壁柱状胶结物	蓝或蓝黑, 内有暗色生长条带等
中、晚成岩	等厚环壁刃状胶结物	褐色夹杂蓝黑色
	晶簇状亮晶	暗或黑色, 孔隙中心有中等亮度红或橙色金字塔或菱形发光环带
	放射纤维扇状胶结物	黑色
后生/后成作用	微晶层	暗红和橙色
	犬齿状胶结物	蓝黑
	等厚环壁柱状胶结物	蓝黑色或晚期暗红和黑色折线交替叠置
	等厚环壁刃状胶结物	黑色
	晶簇状亮晶	暗或黑色, 孔隙中心有中等亮度红或橙色金字塔或菱形发光环带

#### 4.1 浅海海底同生成岩阶段

扁平叶状藻礁的海底胶结作用在不同大小的孔隙中形成不同的胶结物。叶状藻片丰富的沉积物由于藻片支撑和生物结壳及海底胶结作用而有大的孔隙和高的孔隙度, 发生泥晶化作用、胶结作用。腕足壳、叶状藻片、苔藓虫等生物碎屑有泥晶套(泥晶化作用)或微生物结壳。孔隙中形成等厚环边针状胶结物、葡萄状胶结物。含叶状藻片较少的生物碎屑粒泥和泥粒沉积物孔隙度低且渗透性差, 孔隙里形成微晶胶结物 (James and Choquette, 1990) (图 2a、3a), 微晶胶结物与上述泥晶和沉积灰泥等无大差别, 又经后期的作用而不易识别。大部分沉积物、结壳、泥晶套和微晶胶结物等阴极发光为暗红色, 即使它们经历后续阶段的新生变形作用, 也没有显著改变其原始的阴极发光色。

等厚环边针状胶结物肉眼呈黑色, 显微镜下呈暗黄色, 阴极发光为深黑蓝色, 从由尘点状包裹体连线看针状纤维细直, 宽度小于 10 μm, 长 0.5 mm (图 3a、图 2b、2c、2h、2i、2l、2m)。有些针状胶结物重结晶成模糊的刃状或犬牙状。等厚环边针状胶结物常见在叶状藻片和苔藓虫上及腕足壳内生长。

葡萄状胶结物(图 3a、4a), 肉眼观察呈黑色, 镜下观察呈暗黄色, 阴极发光为黑色。葡萄状胶结物扇外缘较圆, 半径可达 3~4 mm, 不同扇间有竞争生长关系, 常见在叶状藻片间的孔隙、生物壳空腔等较大空间里生长。从由尘点状包裹体连线看出葡萄状胶结物由放射的针状纤维组成(图 2a、2b、2c)。针状纤维形成时可能是文石, 经新生变形和重结晶作用后, 已变成较大方解石晶体, 块状消光。葡萄状胶结物在扁平叶状藻礁灰岩中很常见, 是形成胶结岩的主要胶结物之一。

#### 4.2 早成岩阶段

早成岩阶段成岩作用发生于海底之下几米至几十米范围的浅埋藏环境 (Choquette and James, 1990; Flügel, 2004)。由于层状和丘状的叶状藻片丰富, 海底胶结作用强烈的岩化区起到支撑作用, 叶状藻礁整体只有较轻的机械压实现象。溶蚀作用产生选择性组构如铸模孔隙和非选择性组构如通道孔隙。

海水埋藏成岩作用的组构(如斑块状亮晶方解石胶结物、铸模孔、新生变形和微亮晶等)可以和大气水成岩作用具有相似性 (Robert, 1995; Leslie et al., 1995; Melima et al., 2002; 黄思静等, 2009)。胶结作用提供大量胶结物并构造了岩石骨架从而决

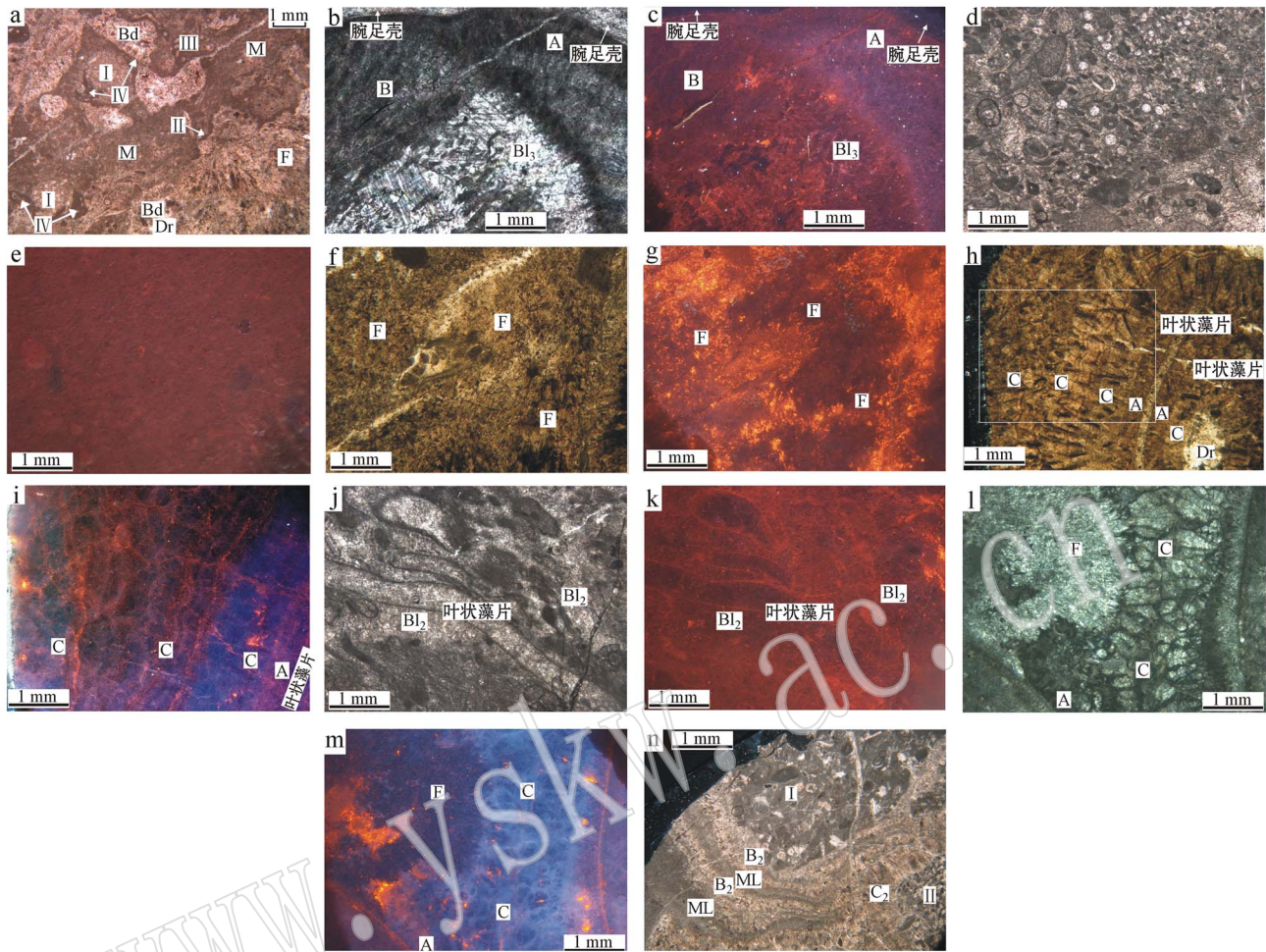


图 2 各类胶结物的显微照片和阴极发光照片

Fig. 2 Microphotographs and cathodoluminescence photographs of cements

a—生物结壳和微晶胶结：I—苔藓虫；II—软体动物壳；III—*Tubiphytes*；IV—苔藓虫上的有孔虫结壳；M—海水微晶胶结物；F—浅埋藏放射纤维扇状胶结物；Bd—深埋藏等厚环边刃状胶结物；Dr—深埋藏晶簇状或斑块状亮晶胶结物；b—腕足壳内的海底葡萄状胶结物(B)和等厚环边针状胶结物(Δ)，深埋藏环境的斑块状亮晶(B<sub>1</sub>)；d—浅埋藏的微亮晶和斑块状亮晶方解石胶结物；f—几组浅埋藏放射纤维扇状胶结物(F)；h—叶状藻片被海底等厚环边针状胶结物(Δ)胶结，上覆淡水潜流有生长条带的等厚环边柱状胶结物(C)；i—对应h中白框的阴极发光；j—淡水潜流的溶蚀及斑块状亮晶方解石胶结物(B<sub>2</sub>)；l—深埋藏放射纤维扇状胶结物(F)，破坏了淡水等厚环边刃(或柱)状胶结物(C)；n—渗流豆粒，豆粒核心构造砾块(Ⅰ)被同心的相间的暗色微晶纹层(ML)和浅色斑块状亮晶纹层(B<sub>2</sub>)围绕，偏离球状外形，向左下方向变厚，右下部纹层被后期的围绕构造砾块(Ⅱ)的等厚环边柱状胶结物(C<sub>2</sub>)所破坏；c、e、g、h、m分别对应前一照片的阴极发光，经过ACDsee软件调亮；b、d、j、l为单偏光，a、f、h、n为正交偏光

a—biogenic encrustations and microcrystalline cementation: I—*Bryozoan*; II—mollusk shell; III—*Tubiphytes*; IV—encrustation of foraminifera (*Palaemonubecularia*) on a *Bryozoan*; M—marine micrite cement; F—shallow-burial radiating cement fans; Bd—deep-burial isopachous bladed cement; Dr—deep-burial drusy or blocky calcite spar; b—marine botryoidal cement (B) and isopachous acicular cement (Δ) in a brachiopod shell, deep-burial blocky spar (B<sub>1</sub>); d—shallow-burial blocky calcite spar and calcite microspar; f—several shallow-burial radiating cement fans(F); h—a piece of phylloid algal fragment surrounded by isopachous, acicular marine cement (Δ), the cement is overlain by isopachous, columnar meteoric-phreatic cement with concentric, various gray growth layers; i—CL image of the area shown in the white rectangle frame in h; j—meteoric-phreatic dissolution and blocky calcite spar (B<sub>2</sub>); l—meteoric-phreatic isopachous columnar cement (C) destroyed by deep-burial radiating cement fans (F); n—closeup of a vadose pisoid, an angular fragment (Ⅰ), as the nucleus of the vadose pisoid, is surrounded by concentric banded microcrystalline layers (ML) and blocky calcite spar layers (B<sub>2</sub>), the vadose pisoid showing deviations from the spherical shape, and exhibiting downward thickening, layers (bottom right) cut by isopachous columnar cements (C<sub>2</sub>) that surround angular fragments (Ⅱ); c, e, g, k and m are cathodoluminescence images of the previous sample, all of them are adjusted with software ACDSee; b, d, j, l are plainlight, a, f, h, n are crossed nicols

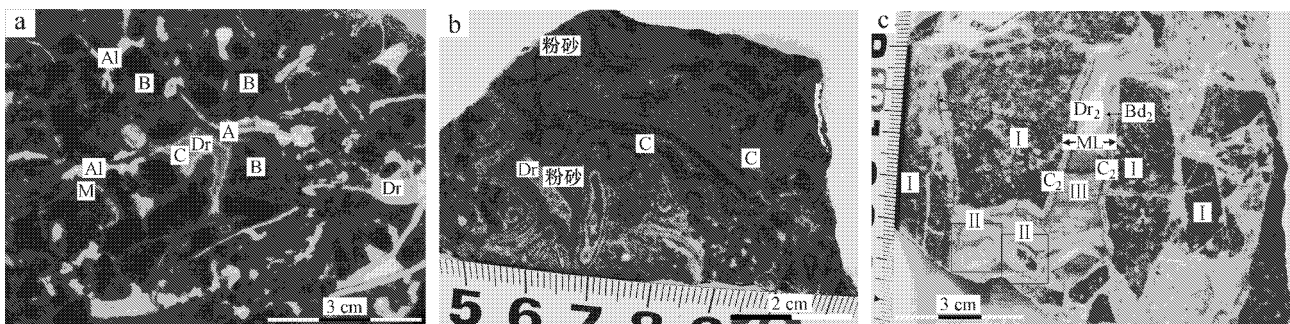


图 3 胶结物光片照片

Fig. 3 Photographs of polished slab of cements

a—以葡萄状胶结物为主的胶结岩,胶结物序列是:海底叶状藻片有结壳或泥晶套且被泥晶胶结(M),葡萄状胶结物(B),等厚环边针状胶结物(A);淡水潜流等厚环壁柱状胶结物(C);深埋藏晶簇状或斑块状亮晶胶结物(Dr),被改造的胶结物(Al);b—淡水潜流的等厚环壁柱状胶结物(C),有明暗生长带的等厚环壁柱状胶结物(C),晶体粉砂和深埋藏晶簇状或斑块状亮晶胶结物(Dr)组成示顶底构造;c—后生作用阶段的构造破裂作用,构造裂隙充填序列:构造角砾(I),渗流豆粒(II),等厚环壁柱(或刃)状胶结物(C<sub>2</sub>),红褐色含Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的微晶层(ML),纹层状红褐色晶体粉砂(III),等厚环壁刃状胶结物(Bd<sub>2</sub>),晶簇状亮晶方解石(Dr<sub>2</sub>)

a—the cement stone consists predominantly of botryoidal cement, the sequence of cements is as follows: in the sea-floor environment, phylloid algal fragment is commonly encrusted or surrounded by micrite envelopes and cemented by micrite (M), botryoidal cement (B), isopachous acicular cement (A); the isopachous layers of meteoric-phreatic columnar cement (C); deep-burial drusy or blocky calcite spar (Dr), preexisting cements (Al) are altered; b—the isopachous layers of meteoric-phreatic columnar cement (C), isopachous, meteoric-phreatic columnar cement (C) with concentric, various gray growth-layers; the remaining pore space has a geopetal fill that consists of crystal silt and deep-burial drusy or blocky calcite spar (Dr); c—structural fracturing during the catagenetic stage, I: angular fragments, II: vadose pisoidsthe, C<sub>2</sub>: isopachous layers of columnar cement, ML: rusty microcrystalline layers containing Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, III: finely-laminated rusty crystal silt, Bd<sub>2</sub>: isopachous bladed cements, Dr<sub>2</sub>: drusy calcite spar

定岩石的最终形态。微亮晶和斑块状亮晶方解石胶结物主要形成于原生孔隙度低和孔隙小的生物碎屑粒泥和泥粒沉积物中(图 2d、2e),阴极发光为黑红色。

浅埋藏环境里易识别的胶结物是位移性的放射纤维扇状胶结物(Choquette and James, 1990)(图 2a、2f、2g)。浅埋藏环境里形成的放射纤维扇与海底环境的葡萄状胶结物扇的区别在于:①扇的外缘生长受空间限制不能长成一个形态好的圆弧;②多数扇的角度和半径要小,半径在 1.2~3.6 mm 间,角度在 30°~180°之间;③扇由两种宽度的放射纤维组成,一种是针状纤维宽度小于 10 μm,另一种是柱状纤维宽度大于 10 μm 小于 30 μm,方头顶端,以单个柱状纤维为消光单位。有的放射纤维扇状胶结物内部包裹有生物碎屑,说明在孔隙里生长的葡萄状胶结物大到接触外围物体之后对其施加了位移性的力,甚至会把它包裹进来。相邻的放射纤维扇状胶结物间有竞争生长关系。阴极发光为蓝黑或黑。有的标本显示浅埋藏环境的葡萄状胶结物含量非常高,可达到整个薄片面积的 1/3~1/2。

#### 4.3 表生成岩阶段

暴露及接近地表成岩环境的这时期称为表生成岩阶段,扁平叶状藻礁灰岩经历了大气淡水的新生变形作用、溶蚀作用、胶结作用。

在 Moore (2001) 总结的淡水潜流含水层成岩模型中,在补给区的淡水渗流或潜流环境中不饱和淡水对碳酸盐沉积物和岩石主要是溶蚀作用,形成晶洞孔隙或通道孔隙;在下流区当淡水潜流环境对方解石饱和后,发生的成岩作用主要是方解石胶结作用。胶结物类型有淡水潜流环境形成的等厚环壁柱状胶结物和斑块状或等粒的方解石胶结物。斑块状或等粒胶结物(图 2j、2k)与早成岩阶段的比较难区别,阴极发光也接近(表 1)。等厚环壁柱状胶结物(图 3a、3b、4a、4b、4c)在扁平叶状藻礁灰岩中,是最常见的且含量较高的,在有的标本中可以达到薄片面积的 50%~60%,是形成胶结岩的另一种主要胶结物。

一些灰岩中有包括叶状藻片在内的细条状的东西看来是松散漂浮的(图 3b),实际是已被胶结的枝丛状沉积物,经不饱和淡水的溶蚀作用后形成的相

连通的复杂的孔隙网络,广泛分布于叶状藻礁内。单个孔隙从截面上看为弯曲的长条形或几个弯曲的长条形的组合。饱和淡水的沉淀作用在这样的孔隙壁上形成同心的多层的黑、白、灰的等厚环壁柱状胶结物(Kendall and Broughton, 1978; Given and Wilkinson, 1985; Kendall, 1985, 1993; González *et al.*,

1992; Scholle and Ulmer-Scholle, 2003; Nielsen *et al.*, 2005; Csoma *et al.*, 2006)(图 3b、4b、4c)。残留的孔隙发育示顶底构造,下部沉积粉砂,上部覆盖亮晶方解石胶结物(图 3b)。同心等厚环壁柱状胶结物层的不同灰度,反映了孔隙系统中的水化学条件的不断变化,黑色的含有较高沥青成分。

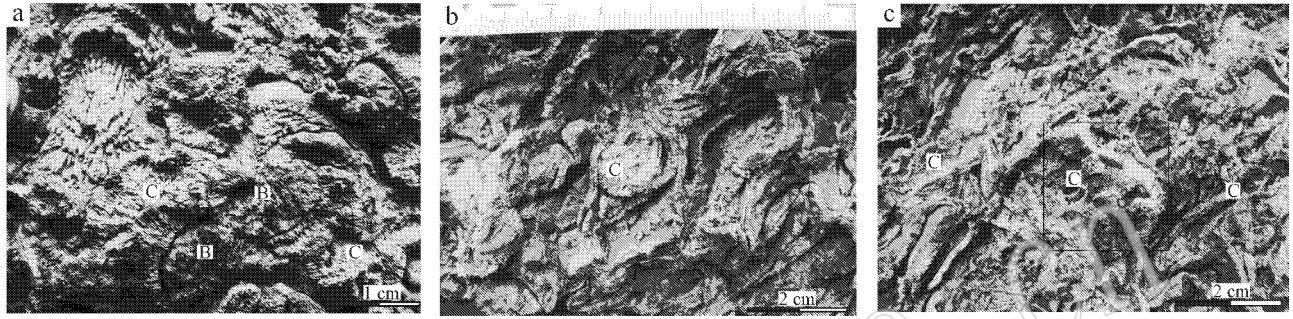


图 4 胶结物风化面照片

Fig. 4 Weathering surface photographs of cements

a—海底葡萄状胶结物(B)和淡水潜流等厚环壁柱状胶结物(C); b—淡水潜流等厚环壁柱状胶结物(C); c—淡水潜流的多层的等厚环壁柱状胶结物(C)(黑框内)

a—submarine botryoidal cement(B) and meteoric-phreatic isopachous columnar cement(C); b—meteoric-phreatic isopachous columnar cement(C) lining open pores; c— isopachous layers of meteoric-phreatic columnar cement(C)(in the black rectangle frame)

淡水潜流环境胶结物的微观特征如下。环孔隙壁一般先生长一层等厚犬牙状胶结物,单个晶体宽 0.2~0.6 mm,长 0.1~0.6 mm。之上生长等厚环壁柱状胶结物,就是 Kendall 所定义的有波状消光和直的双晶面的放射纤维(Kendall and Tucker, 1971; Kendall, 1985)(图 2h、2i、2k、2m)。柱状晶体宽 0.12~0.3 mm,向顶略变粗,长 1.8~3 mm,长度与宽度之比大于 6:1,顶端形状为金字塔形,边界不平直,具非平行轴(non-paraxial)结构即常见不规则晶体边界和复杂的非竞争生长结构(Dixon and Wright, 1983)相邻晶体近平行有小的夹角,交错纠缠在一起(图 4b、4c)。阴极发光为深黑蓝色(图 2h、2i)。等厚环壁柱状胶结物层在曲率剧变的底质竞争生长,形成竞争生长平面。等厚环壁柱状胶结物层一般多层叠置生长(图 3b、4b、4c),从显微镜下观察上下层被一由微晶层和溶蚀形成的不整合面所组成的平的曲面所分隔。

#### 4.4 中、晚成岩阶段

中、深成岩阶段大体发生于中-深埋藏成岩环境,这个阶段的胶结作用是以形成等厚环壁刃状胶结物和晶簇或斑块状亮晶方解石为特征的(Cho-

quette and James, 1990)(图 2a、3a、3b)。在中深成岩阶段,由于孔隙接近封闭状态,流入和流出的流体慢,成岩物质少,结晶缓慢,所以更易形成清透的晶簇或斑块状亮晶方解石(图 2h)(Given and Wilkinson, 1985; González *et al.*, 1992)。相对小的溶蚀孔隙一般没有被一向伸长的胶结物(针状、柱状、刃状)环壁生长,而是只被晶簇或斑块状亮晶方解石所充填。通过阴极发光看这个亮晶区的发光暗或黑色,中心有中等亮度红或橙色金字塔或菱形发光环带。

中、深成岩阶段先成的胶结物被热液改造。在热液的作用下,孔隙度较大的灰色等厚环壁柱状胶结物重结晶形成结构没变化而杂质含量少的白色同类胶结物(图 3a),其中的微孔隙被方解石充填;某些生长带会因为致密而阻挡热液向内部的渗透。热液使葡萄状胶结物扇产生溶蚀孔,热液携带少量的有机质渗透,有机质在小孔隙和死端孔隙滞留下来,使葡萄状胶结物扇和一些生物碎屑中有较高的沥青含量,颜色变黑。另外有一些溶蚀洞穴被亮晶方解石充填,从阴极发光看其中部分发亮橙色光的网格状脉浸染周围,反映了热液溶蚀和结晶的特点。

扁平叶状藻礁灰岩中有一小部分胶结物可能在深埋藏环境被溶蚀形成铸模再被充填, 目前未见到与此现象相似的报道, 详述如下。

先成的等厚环壁刃(或柱)状胶结物明显被溶解形成铸模。相邻刃(或柱)状胶结物(横切面为蜂窝状)界线是等宽度的亮线条, 它由两侧的粗细不均的黑线勾勒出来, 这种黑线是刃(或柱)状胶结物形成铸模后沉淀的微晶层(图 21)。后充填铸模的亮晶方解石羽毛状消光, 阴极发光为蓝黑色(图 2m)。等厚环壁刃(或柱)状胶结物交汇三角处的晶体粉砂没有变化。与铸模被充填同时, 新形成的放射纤维扇状胶结物和由柱状纤维合并成的刃状胶结物, 破坏等厚环壁刃(或柱)状胶结物的底质。放射纤维扇角度在  $30^{\circ} \sim 150^{\circ}$  之间, 纤维长  $1.2 \sim 3 \text{ mm}$ , 宽  $30 \mu\text{m}$ , 方头顶端, 多数扇形的两边不等长, 以单个柱状纤维为消光单位(图 21)。不同扇间有竞争生长关系。阴极发光为黑色(图 2m)。

#### 4.5 后生(后成)作用阶段

后生(后成)作用是指沉积物固结成岩之后到遭受变质或再次风化之前所发生的变化(夏文杰等, 1995)。在扁平叶状藻礁灰岩中观察到的后生作用主要是构造破裂作用, 它是指碳酸盐在固结成岩后, 由于受到构造应力作用, 岩石中发育规模、大小不同的构造裂隙, 后被矿物质半充填或全充填(王正允等, 2009)。

##### 4.5.1 浅部(氧化还原界面附近)渗流和潜流环境的构造破裂作用

图 3c 展示的标本体现了典型浅部的构造破裂作用, 通过对它的观察建立的一个比较复杂的成岩作用序列如下。由大小混杂堆积的形成于张性裂隙的黑灰色和少量红褐色构造角砾, 可以看出它们是礁灰岩埋藏后成岩的。①渗流环境下, 角砾间孔隙被奶白色和灰色方解石胶结, 同时少数小角砾被白色和灰色同心胶结物层包围形成渗流豆粒; 后沿洞穴壁和新生的细裂隙壁生长等厚环壁胶结物, 上有含红褐色含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的微晶层沉淀。②裂隙喉道堵塞后形成的洞穴下部沉积异地来源的小砾石和红褐色含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  晶体粉砂, 层理比较明显, 向上颗粒变细, 指示这时是氧化的渗流环境。③上部的洞穴被等厚环壁刃状胶结物和晶簇或斑块状亮晶方解石充填, 表明成岩环境已转为还原的潜流环境。

渗流豆粒的核心是棱角和次棱角及次圆状砾石, 被弯曲的明暗相间的同心胶结物纹层包围, 暗色

纹层是微晶层, 浅色纹层是斑块状或略显刃状亮晶层, 豆粒偏离球状外形, 向某个方向变厚, 纹层消失在周围的沉积物里(图 2n), 说明了渗流豆粒是在化学沉淀作用下原地生长的低能“静水”豆粒(Flügel, 2004)。

上述充填构造裂隙的胶结物的微观特征如下。一般角砾上都是先生长一条线状微晶层, 阴极发光为暗红或橙色。而后是一薄层近等厚环壁犬牙状胶结物, 近垂直底质生长, 底宽  $0.2 \text{ mm}$ , 高  $0.5 \text{ mm}$ , 有双晶纹或解理, 阴极发光为蓝黑色。然后生长等厚环壁柱状胶结物, 柱状晶体就是具有波状消光和直的双晶面的放射纤维, 宽  $0.2 \text{ mm}$ , 高  $1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$ , 阴极发光为黑色或晚期暗红和黑色折线交替叠置。等厚环壁柱状胶结物被略厚的微晶层覆盖, 有的柱状晶体尖端的金字塔形被微晶层保存较好, 有的晶体尖端被溶蚀掉。微晶层上又生长了环壁刃状胶结物, 宽  $0.2 \text{ mm}$ , 高  $1.5 \text{ mm}$ , 块状消光, 阴极发光为黑色。残余洞穴被晶簇或斑块状亮晶方解石充填, 阴极发光为暗或黑色, 洞穴中心有中等亮度红或橙色金字塔或菱形发光环带。

##### 4.5.2 在深部环境的构造破裂作用

构造裂隙在深部埋藏环境下被白色、绿色粗粒的刃状和晶簇或斑块状亮晶方解石充填。一小部分构造裂隙的中间部位充填沥青, 或以层状存在, 或赋存于粗粒方解石晶间孔隙。

## 5 结论

贵州紫云县猴场镇扁平村的上石炭统中的叶状藻礁及其周边灰岩中广泛发育大量的各类胶结物, 这些胶结物在猴场研究区内是显著的和有代表性的。

(1) 浅海海底同生成岩阶段, 藻片支撑的叶状藻片丰富的沉积物有大的孔隙和高的孔隙度, 孔隙中形成等厚环边针状胶结物、葡萄状胶结物; 生物碎屑粒泥和泥粒沉积物孔隙度低且渗透性差, 孔隙里形成微晶胶结物。

(2) 早成岩阶段, 胶结作用提供大量胶结物和构造了岩石骨架从而决定岩石的最终形态。微亮晶和斑块状亮晶方解石胶结物形成于小孔隙, 放射纤维扇状胶结物形成于大孔隙。

(3) 表生成岩阶段发生剧烈的溶蚀作用和胶结作用, 胶结物类型有淡水潜流环境形成的等厚环壁



柱状胶结物和斑块状的或等粒的方解石胶结物,同心等厚环壁柱状胶结物在所有胶结物中体积是较大的。早期胶结作用使孔隙度大为降低,因此礁灰岩能抵抗压实作用。

(4)中、晚成岩阶段,孔隙被等厚环壁刃状胶结物和晶簇或斑块状亮晶方解石所充填;先成的胶结物被改造,等厚环壁柱状胶结物由灰变白色,葡萄状胶结物扇由于有机质渗入而变黑;一部分先成等厚环壁刃、柱状胶结物可能被溶蚀形成铸模后被充填,同时形成放射纤维扇状胶结物。

(5)在后生作用阶段发生的主要是构造破裂作用。有些裂隙有环壁的红褐色微晶层和在洞穴的下部沉积渗流豆粒和红褐色含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  晶体粉砂,表明它们形成于接近地表的氧化渗流环境。晚期的裂隙被白色、绿色粗粒的刃状和晶簇或斑块状亮晶方解石所充填,有些裂隙中间部位充填沥青。

叶状藻礁灰岩的孔隙系统较早被胶结,在第一次深埋藏过程中孔隙就几乎被胶结物完全充填,是此叶状藻礁灰岩没能成为油气储集层的原因之一。南盘江盆地内可能只有在后生作用阶段形成大而连通的次生孔隙的灰岩才可能成为油气储集层。

## References

Choquette P W and James N P. 1990. Limestone—the burial diagenetic environment [ A ]. McIlreath I A and Morrow D W. Diagenesis [ C ]. Toronto : Geological Association of Canada , 75 ~ 112.

Csoma A E , Goldstein R H and Pomar L. 2006. Pleistocene speleothems of Mallorca : implications for palaeoclimate and carbonate diagenesis in mixing zones [ J ]. Sedimentology , 53 : 213 ~ 236.

Dixon J and Wright V P. 1983. Burial diagenesis and crystal diminution , the origin of crystal diminution in some limestones from South Wales [ J ]. Sedimentology , 30 : 537 ~ 546.

Dravis J J. 1991. Carbonate petrography—update on new techniques and applications [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology , 61 : 626 ~ 628.

Dravis J J and Yurewicz D A. 1985. Enhanced carbonate petrography using fluorescence microscopy [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology , 55 ( 6 ) : 795 ~ 804.

Dickson J A D. 1965. A modified staining technique for carbonates in thin section [ J ]. Nature , 205 : 587 ~ 587.

Dickson J A D. 1966. Carbonate identification and genesis as revealed by staining [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology . 36 : 491 ~ 505.

Flügel E. 2004. Microfacies of Carbonate Rocks [ M ]. New York : Springer , Berlin Heidelberg , 1 ~ 976.

Frisia S , Borsato A , Fairchild I J , et al. 2000. Calcite fabrics , growth mechanisms , and environments of formation in speleothems from the Italia Alps and Southwestern Ireland [ J ]. Journal of Sedimentary Research , 70 ( 5 ) : 1 183 ~ 1 196.

Frisia S , Borsato A , Fairchild I J , et al. 2002. Aragonite-calcite relationships in speleothems ( Grotte De Clamouse , France ) : environment , fabrics , and carbonate geochemistry [ J ]. Journal of Sedimentary Research , 72 ( 5 ) : 687 ~ 699.

Given R K and Wilkinson H B. 1985. Kinetic control of morphology , composition , and mineralogy of abiotic sedimentary carbonates [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology , 55 ( 1 ) : 109 ~ 119.

Gong Enpu , Elias Samankassou , Guan Changqing , et al. 2007. Paleocology of Pennsylvanian phylloid algal buildups in south Guizhou , China [ J ]. Facies , 53 : 615 ~ 623.

Gong Enpu , Zhang Yongli , Guan Changqing , et al. 2007. Primary features of reef building communities of Carboniferous reef in South Guizhou Province [ J ]. Acta Geologica Sinica , 81 ( 9 ) : 1 183 ~ 1 194 ( in Chinese with English abstract ).

Gonzalez L A , Carpenter S J and Lohmann K C. 1992. Inorganic calcite morphology : roles of fluid chemistry and fluid flow [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology , 62 ( 3 ) : 382 ~ 399.

Huang Sijing , Zhang Xuehua , Liu Lihong , et al. 2009. Progress of research on carbonate diagenesis [ J ]. Earth Science Frontiers , 16 ( 5 ) : 219 ~ 231 ( in Chinese with English abstract ).

James N P and Choquette P W. 1990. Limestone—the sea floor diagenetic environment [ A ]. McIlreath I A and Morrow D W. Diagenesis [ C ]. Toronto : Geological Association of Canada , 13 ~ 34.

Jiao Daqing , Ma Yongsheng , Deng Jun , et al. 2003a. The sequence-stratigraphic framework and the evolution of paleogeography for Carboniferous of the Guizhou and Guangxi areas [ J ]. Geoscience , 17 ( 3 ) : 294 ~ 302 ( in Chinese with English abstract ).

Jiao Daqing , Ma Yongsheng , Deng Jun , et al. 2003b. The Permian sequence stratigraphic framework and evolution of sedimentary facies and paleogeography in Guizhou and Guangxi areas [ J ]. Petroleum Geology & Experiment , 25 ( 1 ) : 18 ~ 27 ( in Chinese with English abstract ).

Kendall A C. 1985. Radial fibrous calcite : a reappraisal [ A ]. Schueidermann N and Harris P M. Carbonate cements [ C ]. Oklahoma : Society of Economic Paleontologists and Mineralogists , 59 ~ 78.

Kendall A C. 1993. Columnar calcite in speleothems : discussion [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology , 63 ( 3 ) : 550 ~ 552.

Kendall A C and Broughton Paul L. 1978. Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals [ J ]. Journal of Sedimentary Petrology , 48 ( 2 ) : 519 ~ 538.

Kendall A C and Tucker M E. 1971. Radial fibrous calcite as a replacement after syn-sedimentary cement [ J ]. Nature , 232 : 62 ~

- 63.
- Kong Jinxiang and Li Guorong. 2003. The Division of Diagenetic Stages in Carbonate Rock( SY/T54782-2003 [ M ]. Beijing : Petroleum Industry Publishing House , 1 ~ 13( in Chinese with English abstract ).
- Leslie A M , Peter K S and Robert G M. 1995. Meteoric-like fabrics forming in marine waters : implications for the use of petrography to identify diagenetic environments[ J ]. *Geology* , 23( 8 ): 755 ~ 758.
- Li Jinmei , Gong Enpu , Sun Baoliang , *et al.* 2010. Sedimentary environment and microfacies analysis of the Late Carboniferous phylloid algal reef in the Ziyun County , Guizhou[ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica* , 28( 1 ): 26 ~ 33( in Chinese with English abstract ).
- Lin Xiaobing , Li Guozhong , Tian Jingchun , *et al.* 2007. Study on diagenesis of the carbonate rocks in the Carboniferous sequence stratigraphic framework of South Guizhou[ J ]. *Journal of Chengdu University of Technology ( Science & Technology Edition )* , 34( 3 ): 267 ~ 272( in Chinese with English abstract ).
- Liu Temin , Liu Bingwen , Chen Guodong , *et al.* 2001. Tectonic evolution and hydrocarbon preservation region division in Nanpanjiang Basin[ J ]. *Natural Gas Industry* , 21( 1 ): 18 ~ 23( in Chinese with English abstract ).
- Ma Jianming , Hou Mingcai , Chen Hongde , *et al.* 2005. The palaeokarstification in the Late Palaeozoic Youjiang Basin , Southwestern China[ J ]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology* , 25( 1 ~ 2 ): 203 ~ 209( in Chinese with English abstract ).
- Mei Mingxiang , Ma Yongsheng , Dai Shaowu , *et al.* 2001. Late paleozoic filling succession of the Nanpanjiang Basin and the division of association of oil generating strata , reservoir and capping bed[ J ]. *Geoscience* , 15( 1 ): 74 ~ 82( in Chinese with English abstract ).
- Mei Mingxiang , Meng Qingfen , Yi Dinghong , *et al.* 2004. Carboniferous sequence framework in Guizhou and Guangxi , southern China [ J ]. *Acta Geoscientica Sinica* , 25( 1 ): 39 ~ 46( in Chinese with English abstract ).
- Mei Mingxiang , Gao Jinhao , Yi Dinghong , *et al.* 2002. Study on sequence stratigraphic framework and relative sea-level changes of the Permian in Guizhou and Guangxi areas , South China[ J ]. *Geological Journal of China Universities* , 8( 3 ): 318 ~ 333( in Chinese with English abstract ).
- Melima L A , Westphal H , Swart P K , *et al.* 2002. Questioning carbonate diagenetic paradigms : evidence from the Neogene of the Bahama[ J ]. *Marine Geology* , 185 : 27 ~ 53.
- Moore C H. 2001. Carbonate Reservoirs : Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework[ M ]. New York : Elsevier , 185 ~ 219.
- Nielsen P , Muech P , Heijlen W , *et al.* 2005. Columnar calcites as testimony of diagenetic overprinting at the boundary between Upper Tournaisian dolomites and limestones ( Belgium ) : multiple origins for apparently similar features[ J ]. *Sedimentology* , 52 : 945 ~ 967.
- Robert G M. 1995. Recurrent neomorphic and cement microtextures from different diagenetic environments , Quaternary to Late Neogene carbonates , Great Bahama Bank[ J ]. *Sedimentary Geology* , 97 : 1 ~ 7.
- Sandberg P A. 1983. An oscillating trend in Phanerozoic non-skeletal carbonate mineralogy[ J ]. *Nature* , 305 : 19 ~ 22.
- Sandberg Philip. 1985. Aragonite cements and their occurrence in ancient limestone[ A ]. Schueidermann N and Harris P M. Carbonate Cements[ C ]. Oklahoma : Society of Economic Paleontologists and Mineralogists , 33 ~ 58.
- Scholle P A and Ulmer-Scholle D S. 2003. A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks : Grains , Textures , Porosity , Diagenesis [ M ]. Oklahoma : The American Association of Petroleum Geologists , 1 ~ 459.
- Wang Junda and Li Huamei. 1998. Carboniferous paleo-latitude and bauxite deposit of Central Guizhou Province[ J ]. *Geochimica* , 27( 6 ): 576 ~ 578( in Chinese with English abstract ).
- Wang Liting. 1994. Evolution of the Paleogeography in Guizhou[ J ]. *Guizhou Geology* , 11( 2 ): 133 ~ 140( in Chinese with English abstract ).
- Wang Zengji. 1990. The Carboniferous System of China[ M ]. Beijing : Geological Publishing House , 215 ~ 248( in Chinese with English abstract ).
- Wang Zhengyun , Zhang Ziguang , Zhang Min , *et al.* 2009. Diagenesis and features of diagenetic facies of Wumishan Formation of Jibei depression by taking the Weizhangzi section of Lingyuan county in Liaoning province for example[ J ]. *Journal of Oil and Gas Technology* , 31( 4 ): 1 ~ 8( in Chinese with English abstract ).
- Xia Wenjie and Li Xiaohua. 1995. A review of the classification of diagenesis[ J ]. *Geological Review* , 41( 5 ): 444 ~ 451( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Yongli , Gong Enpu , Guan Changqing , *et al.* 2007. Carboniferous phylloid algal reefs in Ziyun County , Guizhou ( South China ) : evidence of algal blooms[ J ]. *Acta Sedimentologica Sinica* , 25( 2 ): 177 ~ 182( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Mengjun , Zhan Shuichang , Zhao Lin , *et al.* 2007. Geochemical features and genesis of the natural gas and bitumen in paleo-oil reservoirs of Nanpanjiang Basin , China[ J ]. *Science in China Series D : Earth Sciences* , 50( 5 ): 689 ~ 701.

## 附中文参考文献

巩恩普, 张永利, 关长庆, 等. 2007. 黔南石炭纪生物礁造礁群落的

- 基本特征[J]. 地质学报, 81(9):1183~1194.
- 焦大庆, 马永生, 邓军, 等. 2003a. 黔桂地区石炭纪层序地层格架及古地理演化[J]. 现代地质, 17(3):294~302.
- 焦大庆, 马永生, 邓军, 等. 2003b. 黔桂地区二叠纪层序地层格架及古地理演化[J]. 石油实验地质, 25(1):18~27.
- 黄思静, 张雪花, 刘丽红, 等. 2009. 碳酸盐成岩作用研究现状与前瞻[J]. 地质前缘, 16(5):219~231.
- 孔金祥, 李国蓉. 2003. 碳酸盐岩成岩阶段划分(SY/T54782-2003)[M]. 北京:石油工业出版社, 1~13.
- 李金梅, 巩恩普, 孙宝亮, 等. 2010. 贵州紫云晚石炭世叶状藻礁灰岩微相特征与沉积环境的研究[J]. 沉积学报, 28(1):26~32.
- 林小兵, 李国忠, 田景春, 等. 2007. 黔南石炭系层序地层格架中碳酸盐岩成岩作用研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(3):267~272.
- 刘特民, 刘炳温, 陈国栋, 等. 2001. 南盘江盆地构造演化与油气保存区划分[J]. 天然气工业, 21(1):18~23.
- 麻建明, 侯明才, 陈洪德, 等. 2005. 晚古生代右江盆地古岩溶作用研究[J]. 沉积与特提斯地质, 25(1~2):203~209.
- 梅冥相, 高金汉, 孟庆芬, 等. 2002. 黔桂地区二叠纪层序地层格架及相对海平面变化研究[J]. 高校地质学报, 8(3):318~333.
- 梅冥相, 马永生, 戴少武, 等. 2001. 南盘江盆地晚古生代盆地充填序列特征及生储盖组合划分[J]. 现代地质, 15(1):74~82.
- 梅冥相, 孟庆芬, 易定红, 等. 2004. 黔桂地区石炭系层序地层格架及海平面变化[J]. 地球学报, 25(1):39~46.
- 王俊达, 李华梅. 1998. 贵州石炭纪古纬度与铝土矿[J]. 地球化学, 27(6):576~578.
- 王立亭. 1994. 贵州古地理的演变[J]. 贵州地质, 11(2):133~140.
- 王增吉. 1990. 中国的石炭系[M]. 北京:地质出版社, 215~248.
- 王正允, 张紫光, 陈梦蛟, 等. 2009. 冀北拗陷雾迷山组的成岩作用及成岩相特征——以辽宁省凌源县魏杖子剖面为例[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 31(4):1~8.
- 夏文杰, 李秀华. 1995. 沉积成岩作用阶段划分的有关问题[J]. 地质论评, 41(5):444~451.
- 张永利, 巩恩普, 关长庆, 等. 2007. 贵州紫云石炭纪叶状藻礁:藻类繁盛的标志[J]. 沉积学报, 25(2):177~182.
- 赵孟军, 张水昌, 赵陵, 等. 2007. 南盘江盆地古油藏沥青、天然气的地球化学特征及成因[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 37(2):167~177.

## 撤稿声明 Letter of retraction

张欣、曾翠萍于 2011 年 11 月在本刊发表了题为《岩溶沉积物中微生物分离及对碳酸钙沉淀的影响》的研究论文,该研究工作系第二作者曾翠萍在中国地质大学(武汉)完成,张欣没有参加相关工作。论文发表前,第一作者向编辑部提供了全体作者签名的授权协议书。论文发表后,我刊于 2011 年 11 月底收到曾翠萍关于论文严重侵权问题的投诉,随后收到张欣的撤稿函,承认该论文涉及的研究工作系由他人完成,张欣本人并未直接参与,请求撤稿,并就自己的错误行为向被侵权人道歉。我刊立即进行了有关调查,结果表明,授权协议书中第二作者曾翠萍的签名系由张欣在未征得本人同意的情况下代签。在双方事实清楚的基础上,现郑重声明撤销包括纸质版和电子版在内的该论文,请勿再以任何形式引用本文。由此对读者造成的不便,我们深表歉意。

《岩石矿物学杂志》编辑部

2011-12-26