

# 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩 的阴极发光特征与成岩作用

黄思静<sup>1</sup>, 卿海若<sup>2</sup>, 胡作维<sup>1</sup>, 裴昌蓉<sup>1</sup>, 王庆东<sup>1</sup>, 王春梅<sup>1</sup>, 郜晓勇<sup>1</sup>

1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室沉积地质研究院, 四川成都 610059

2. Department of Geology, University of Regina, Regina SK S4S 0A2, Canada

**摘要:** 四川盆地东部三叠系飞仙关组是近年来我国发现的重要天然气储层, 高孔隙度、高渗透率的碳酸盐储层都分布于白云岩地层中, 因而碳酸盐的成岩作用, 尤其是白云岩化作用和白云岩的成因为石油地质学家和沉积学家高度关注。对四川盆地东部罗家寨构造三叠系飞仙关组 42 个碳酸盐岩样品进行了阴极发光分析, 结合与之有关的 Mn、Fe、Mg 元素分析和岩石学研究, 讨论了包括白云岩化作用在内的碳酸盐岩成岩过程中可能的成岩流体性质及来源。四川盆地东部三叠系飞仙关组碳酸盐岩普遍具有很弱的阴极发光性, 这与其很低的 Mn、Fe 含量有关, 说明沉积期后非海相流体对飞仙关组碳酸盐岩的影响非常有限, 海源流体在成岩过程中发挥了主导作用; 不同石灰岩类型和不同白云岩类型仍然具有不同的阴极发光性, 成岩组分含量越高的碳酸盐岩, 或者说与沉积期后流体(主要是孔隙流体)关系越密切的碳酸盐岩的阴极发光强度越低, 说明随着埋藏成岩作用的进行, 四川盆地东部三叠系碳酸盐岩孔隙流体受海源流体的影响是逐渐增强的; 阴极发光分析结果表明, 作为四川盆地东部主要储集岩的结晶白云岩形成机制与埋藏过程中的深循环流体有关, 这种深循环流体没有或很少穿越铝硅酸盐地层, 但穿越了三叠系内部的某些海相地层, 这些海相地层可能是广泛存在于四川盆地三叠系的蒸发盐地层, 由蒸发盐成岩过程提供的海源流体参与了结晶白云岩的白云岩化作用。

**关键词:** 四川盆地东部; 三叠系飞仙关组; 碳酸盐岩; 阴极发光; 成岩流体。

**中图分类号:** P57; P618

**文章编号:** 1000-2383(2008)01-0026-09

**收稿日期:** 2007-02-18

## Cathodoluminescence and Diagenesis of the Carbonate Rocks in Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan Basin of China

HUANG Si-jing<sup>1</sup>, QING Hai-ruo<sup>2</sup>, HU Zuo-wei<sup>1</sup>, PEI Chang-rong<sup>1</sup>, WANG Qing-dong<sup>1</sup>, WANG Chun-mei<sup>1</sup>, GAO Xiao-yong<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Department of Geology, University of Regina, Regina SK S4S 0A2, Canada

**Abstract:** The Feixianguan carbonates of Triassic in Eastern Sichuan basin are the most important gas reservoir of China, and the reservoir with higher porosity and permeability is all dolomites, so the diagenesis, specially origin of dolomites is drawing increasing attention of petroleum geologists and sedimentologists. 42 carbonate samples, from Feixianguan Formation, LuoJiazhai Gas Field of Eastern Sichuan basin, were studied by cathodoluminoscope. The results, together with the petrology analysis and Mn, Fe, Mg element tests, show that the carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan basin of China generally have dull cathodoluminescence, which results from very low Mn and Fe contents, suggesting the limited influence of non-marine fluid during post-sedimentation. The diagenesis of the carbonates should have been governed by some kinds of marine fluid. However, the limestones and dolomites with different structures also display various cathodoluminescent intensities. The carbonates with more diagenetic components luminesce duller, in other words,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 40672072); 教育部博士点基金项目(No. 20050616005)。

**作者简介:** 黄思静(1949-), 教授, 博士生导师, 现从事沉积地质学专业的教学与科研工作。E-mail: hsj@cdu.edu.cn

the carbonates influenced by more post-sedimentary fluids (mainly pore waters) luminesce dull, suggesting the enhancement of marine fluid effect with the process of burial diagenesis. The cathodoluminescence of crystalline dolomite, which is the most important gas reservoir, reflects the deep burial conditions of diagenetic fluids that have not circulated through elastic rocks within the basin, but through some marine beds such as thick evaporates which are widely distributed in the Triassic of Sichuan basin. The dissolution or dehydration of evaporates provided the marine fluid that participated in the dolomitization of crystalline dolomite.

**Key words:** eastern Sichuan basin; Feixianguan Formation of Triassic; carbonate rock; cathodoluminescence; diagenesis fluid.

阴极发光分析是碳酸盐沉积学研究的重要手段之一,有关 Mn 作为激活剂、Fe 作为猝灭剂的阴极发光原理 (Pierson, 1981; Ten-Have and Heijnen, 1985; 黄思静, 1992) 已为人们普遍接受. 近年来有关碳酸盐成岩作用(包括白云岩化作用)的研究都把不同结构或不同成分碳酸盐的阴极发光性的差别作为恢复成岩历史、判断成岩机制、推测成岩流体性质、鉴别与评估碳酸盐成岩蚀变性的主要依据之一,如 Bruhn *et al.* (2005) 对德国西北部上侏罗统碳酸盐岩成岩历史的研究, El-Tabakh *et al.* (2004) 对澳大利亚西部的南 Carnarvon 盆地志留系浅海相碳酸盐白云岩化作用的研究, Swennen *et al.* (2003) 对加拿大 British Columbia 地区中寒武统地层中与高温盐水有关的成岩白云岩形成机制的研究, Török (2000) 对匈牙利南部中三叠统碳酸盐白云岩化作用的研究, Azmy *et al.* (2001) 对巴西 São Francisco 盆地前寒武白云岩化的流体性质和白云岩化机制的研究, Walter *et al.* (2000) 对前寒武 840~544 Ma 时间段碳酸盐样品成岩蚀变性的评估, Veizer *et al.* (1999) 在公布显生宙海水同位素(锶、碳、氧、硫)曲线时对样品成岩蚀变性的评估, 黄思静等(2003, 2005, 2006b) 对早古生代海相碳酸盐和西藏南部晚白垩世厚壳蛤不同壳层的成岩蚀变性及其对海水信息保存性的评估等, 都不同程度地采用了阴极发光分析.

四川盆地东部三叠系飞仙关组是近年来我国发现的重要天然气储集层, 可采储量已超过  $1\ 000 \times 10^8 \text{ m}^3$  (王一刚等, 2004), 成为近年来中国油气的重点勘探地区之一(冉隆辉等, 2002; 王一刚等, 2004). 飞仙关组储集岩不仅物性很好, 且主要分布于白云岩地层中(王一刚等, 2002; 苏立萍等, 2004; 魏国齐等, 2005), 因而人们必须面对飞仙关组碳酸盐岩的成岩作用, 尤其是白云岩化作用和白云岩成因等问题. 已有较多的成果探讨四川盆地东部飞仙关组白云岩的成因, 并提出了不同的成因机制和模式: 如混

合水白云岩化和深埋藏溶解模式(王一刚等, 2002), 混合水、渗透回流和埋藏白云岩化模式(陈更生等, 2005), 渗透回流和埋藏白云岩化模式(苏立萍等, 2004), 混合水白云岩化模式(魏国齐等, 2005). 这些成果主要来源于油田的工程技术人员, 在一定程度上代表了我国目前白云岩形成机制领域的研究现状和水平. 本文试图从四川盆地东部三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光分析出发, 结合与之有关的 Mn、Fe、Mg 元素分析, 讨论包括白云岩化作用在内的碳酸盐岩成岩过程中可能的成岩流体性质及来源, 为四川盆地东部三叠系飞仙关组碳酸盐岩的成岩作用, 尤其是白云岩化作用提供新的研究思路.

## 1 研究区位置、样品和实验方法

研究区位于四川盆地东部的四川省宣汉县和重庆市开县境内(图 1), 所采集的 42 个样品中有 37 个分布在罗 2 井 3 196.2~3 299.1 m 之间厚约 100 m 的深度范围内(图 2)、有 5 个样品分布在罗 6 井 3 926.0~3 967.9 m 之间厚约 40 m 的深度范围内.

四川盆地东部及邻区飞仙关期可以划分为海槽(盆地)—陆棚(斜坡)—台地 3 个基本的沉积单元(江兴福等, 2003), 台地沉积单元又可进一步划分为台缘鲕粒滩坝和泻湖潮坪等次级沉积单元(图 1), 总体具有向上变浅的剖面层序(杨雨等, 2002; 并参见图 2). 作为样品主要采集钻井的罗 2 井飞仙关组位于台缘鲕粒滩坝沉积环境的近中心部位(图 1), 样品所分布的 3 196.2~3 299.1 m 深度范围基本上代表了一个滩体的厚度(图 2), 同时也包括少量台内泻湖潮坪相的细结构碳酸盐岩样品; 罗 6 井飞仙关期主要位于海槽盆地环境(图 1), 因而代表陆棚斜坡环境的粒屑碳酸盐岩的厚度很薄, 岩石没有完全白云岩化, 该井的 5 个样品大致分布在厚度 40 m 左右的地层内, 基本上代表了石灰岩和白云岩之间的过渡岩石类型.

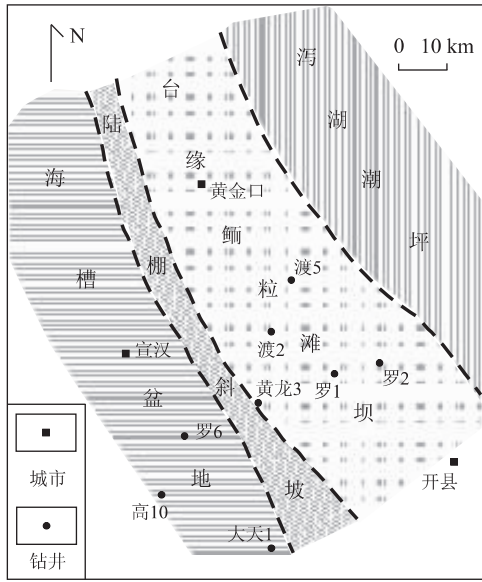


图 1 四川盆地东部三叠纪飞仙关期岩相古地理图(同时显示了罗 2 井和罗 6 井的位置,据江兴福等,2003 修改)

Fig. 1 Sketch paleogeographic map for Feixianguan stage of Triassic, eastern Sichuan basin of China

在对样品进行了薄片鉴定(包括茜素红和铁氰化钾染色分析以及铸体薄片分析)和 Fe、Mn、Mg 含量分析的基础上,利用成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室的 CL8200MK5 阴极发光仪(配以 Leica 偏光显微镜)进行阴极发光分析,由于大多数飞仙关组的样品都具有很低的 Mn 含量,因而测试时选择了较高的束电压(束电压 17 kV、束电流 500  $\mu$ A),同时考虑到样品的可对照性,所有样品都采用了相同的测试条件。

Mn、Fe、Mg 含量分析由四川攀枝花地矿检测中心完成。Mg 含量由常规化学分析方法测试,分析结果以氧化物表示,检测限 0.1%,误差 2%;Fe 含量由比色法测试,分析结果以氧化物( $Fe_2O_3$ )表示(为了与 Mn 对照,本文将其换算成了元素含量),检测限 0.01%,误差  $<8\%$ ;Mn 含量由原子吸收光度法测试,检测限为  $5 \times 10^{-6}$ ,误差为 13%。另外需要说明的是本文所涉及的岩石中白云石的含量均由化学分析中 MgO 含量换算,换算时假定白云石具有理想组成(X 射线衍射分析表明,本研究涉及的白云石接近化学计量组成, X 射线衍射分析结果中白云石的  $d_{104} = 0.2887 \sim 0.2889$  nm),并假定岩石由方解石和白云石两种矿物构成,这种假定对本文的研究没有实质性影响。

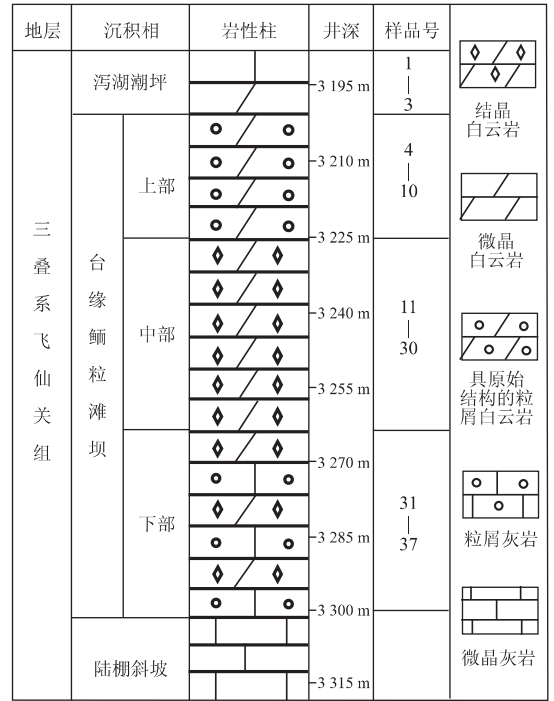


图 2 罗 2 井采样井深段剖面柱状图(更详细的采样位置参见黄思静等(2006a)中的表 1 和本文的表 2)

Fig. 2 General columnar section for the sampling interval of Feixianguan Formation of Triassic, well Luo 2 in eastern Sichuan basin of China

## 2 主要岩石学特征及其阴极发光性

本文涉及的四川盆地东部罗家寨构造三叠系飞仙关组的碳酸盐岩主要有以下 6 种类型:

(1)微晶或泥晶灰岩,没有白云岩化或部分白云岩化,几乎没有可利用的孔隙度,白云岩化时可向微晶或泥晶白云岩过渡,分布于向上变浅的剖面层序顶部的涪湖、潮坪环境中(图 2)。(2)微晶或泥晶白云岩,岩石几乎完全白云岩化,也几乎没有可利用的孔隙度,白云石晶体大小在微晶以下,也分布于向上变浅的剖面层序顶部的涪湖、潮坪环境中,并与微晶或泥晶灰岩伴生(图 2)。(3)粒屑灰岩,粒屑以鲕粒为主,可有团粒、团块和少量生物碎屑,填隙物可以是亮晶、微晶或二者共存,分布于台缘鲕粒滩坝环境的下部(图 2)。(4)粒屑灰岩和粒屑白云岩在成分上的过渡岩类,岩石部分白云岩化,白云石呈极好的菱形自形晶(粉晶以上),更多地分布在颗粒内部,有的岩石粒屑全由白云石组成,而胶结物仍为亮晶方解石,在成分上可以有含云灰岩、云质灰岩和灰质白云岩等,部分粒屑保存有微晶或泥晶结构,多数岩石中

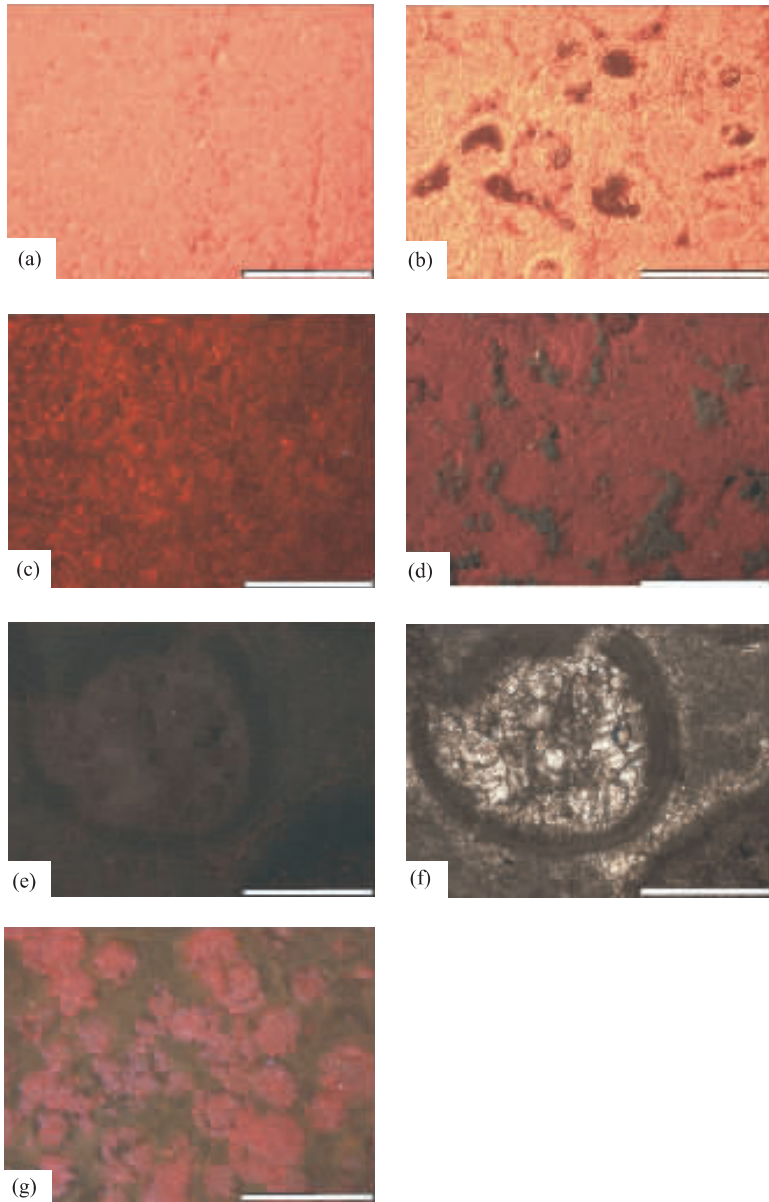


图 3 四川盆地东部三叠系飞仙关组不同碳酸盐岩的显微阴极发光照片

Fig. 3 Cathodoluminescence photomicrographs for Feixianguan carbonates of Triassic, eastern Sichuan basin of China  
 a. 微晶或泥晶白云岩, 极强的橙色阴极发光, 罗 2 井, 3 196. 2 m, 标尺长 0. 5 mm; b. 具原始结构的粒屑白云岩, 强的橙色阴极发光, 罗 2 井, 3 213. 5 m, 标尺长 1 mm; c. 微晶或泥晶灰岩, 中等强度的暗褐色阴极发光, 罗 2 井, 3 199. 8 m, 标尺长 0. 5 mm; d. 细晶白云岩, 弱的褐色阴极发光, 罗 2 井, 3 246. 9 m, 标尺长 1 mm; e. 粒屑灰岩, 在束电压 17 kV、束电流  $500 \mu\text{A}$  条件下无阴极发光, 束电压 20 kV 的条件下隐约可见视域中的粒屑, 可与其单偏光照片; f. 对照, 罗 2 井, 3 290. 0 m, 标尺长 0. 5 mm; g. 灰质粒屑白云岩, 不均一阴极发光, 白云岩化的粒屑具弱的褐色阴极发光, 粒间方解石胶结物完全没有阴极发光, 罗 6 井, 3 967. 9 m, 标尺长 0. 5 mm. 未附加说明的, 测试条件均为束电压 17 kV、束电流  $500 \mu\text{A}$

含 30% 以上的方解石, 样品均采自罗 6 井, 采样井段的古地理环境属陆棚斜坡带。(5) 结晶白云岩, 白云石的晶体大小至少是粉晶级, 大多数样品都在细晶以上, 样品可以识别出残余粒屑结构, 但构成岩石所有结构组分的白云石基本上都是细一中晶大小,

多数样品中方解石含量少于 10%, 晶间孔(或残余粒屑的粒间孔) 十分发育, 该类岩石主要分布于台缘鲕粒滩坝环境的核心部位(台缘鲕粒滩坝环境的中部, 图 2)。(6) 具原始结构的粒屑白云岩, 这类岩石基本上保留了岩石的原始沉积结构, 粒屑或基质可

表 1 四川盆地东部三叠系飞仙关组不同岩石类型 MgO、Mn、Fe 含量平均值、白云石含量和阴极发光性

Table 1 Average concentrations of MgO, Mn, Fe, cathodoluminescence and dolomite for different types of carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan basin of China

岩类 <sup>①</sup>	岩性	MgO(10 <sup>-2</sup> )	Mn(10 <sup>-6</sup> )	Fe(10 <sup>-6</sup> )	白云石(%)	样品数(个)	阴极发光强度
I	微晶或泥晶灰岩	0.41	34.0	1 678.6	4.4	2	中等
II	微晶或泥晶白云岩	18.94	111.0	2 727.7	92.7	1	极强
III	粒屑灰岩	0.30	7.5	244.8	3.6	2	极弱
IV	粒屑灰云(云灰)岩	9.13	9.5	160.9	52.4	8	不均一
V	结晶白云岩	20.97	20.8	361.6	97.2	23	弱
VI	粒屑白云岩(原始结构)	19.26	66.8	1 089.7	93.0	5	强
VII	斑块状亮晶方解石	0.16	15.0	769.4	2.61	1	极弱
	平均值或总计	16.00	26.1	533.2	76.9	42	

注:①有关岩类的划分与定义见正文的讨论,表 2 意义相同。

表 2 四川盆地东部罗 2 井三叠系飞仙关组的微晶或泥晶灰岩、粒屑灰岩和亮晶方解石的 MgO、Mn、Fe 含量、白云石含量及其阴极发光性

Table 2 Average concentrations of MgO, Mn, Fe, dolomite for micrite and grainy limestones, sparry calcite in Feixianguan Formation of Triassic, well Luo 2 of eastern Sichuan basin of China

深度(m)	岩性	岩类	样品号	MgO(10 <sup>-2</sup> )	Mn(10 <sup>-6</sup> )	Fe(10 <sup>-6</sup> )	白云石(%)	阴极发光强度
3 199.8	微晶或泥晶灰岩	I	2	0.4	26	839.3	4.3	中等
3 201.6	微晶或泥晶灰岩	I	3	0.42	42	251 7.9	4.5	中等
3 285.9	斑块状亮晶方解石	VII	33	0.16 <sup>①</sup>	15	769.4		极弱
3 290.0	粒屑灰岩	III	35	0.32	6	258.8	3.8	极弱
3 297.6	微晶团粒灰岩	III	36	0.27	9	230.8	3.4	极弱

注:除本表中所列的 5 个样品以外,本文涉及的其余 37 个样品的原始分析数据已由黄思静等(2006a)公布;①. 由于样品是方解石单矿物,因而 Mg 可能是方解石中 Ca 的取代离子。

以由微晶甚至泥晶级的白云石构成(在这一点上不同于结晶白云岩),亮晶(如果能识别出亮晶)则由它形的不等晶白云石构成,多数样品的白云石含量大于 90%,这类白云岩主要分布于台缘鲕粒滩坝环境上部靠近泻湖潮坪的部位(图 2)。

在本文的测试条件(17 kV 的束电压和 500  $\mu$ A 束电流)下,除个别岩石类型以外,四川盆地东部飞仙关组的大多数碳酸盐岩都具有强度不同的阴极发光(表 1),并显示出从褐色—橙色的发光颜色(图 3),实际上也反应了从弱—强的阴极发光强度。为了描述上的方便,本文将样品的阴极发光强度分为 5 级,即极强、强、中等、弱和极弱。在本文所研究的飞仙关组主要碳酸盐岩类型中,微晶或泥晶白云岩具极强的阴极发光(图 3a);具原始结构的粒屑白云岩的阴极发光强度仅次于微晶或泥晶白云岩而具强的阴极发光(图 3b);微晶或泥晶灰岩具中等强度的阴极发光(图 3c);而结晶白云岩(如粉晶白云岩、细晶白云岩和中晶白云岩)具弱的阴极发光(图 3d);粒屑灰岩和亮晶方解石胶结物在本研究的测试条件下几乎没有阴极发光(极弱的阴极发光)(图 3e、3f);在

成分上过渡的灰质白云岩和白云质灰岩等样品具不均一的阴极发光,已白云岩化的粒屑部分的阴极发光强度与结晶白云岩类似,具弱的阴极发光,而尚未白云岩化的亮晶方解石胶结物则基本上没有阴极发光(极弱的阴极发光)(图 3g)。

### 3 讨论

#### 3.1 阴极发光性与其 Mn、Fe 含量的关系

已有的研究(Pierson, 1981; Ten-Have and Heijnen, 1985; 黄思静, 1992)表明,碳酸盐的阴极发光性主要受其 Mn、Fe 含量的控制,不同的 Mn、Fe 含量区间有着不同的控制机制(黄思静, 1992),低 Mn 含量区间(如 Mn 含量小于  $40 \times 10^{-6}$ )碳酸盐的阴极发光性与 Mn 含量的关系更为密切,而与 Fe 含量的关系较少;当碳酸盐中 Fe 含量较高(如 Fe 含量大于  $5 000 \times 10^{-6}$ )时,其阴极发光性与 Fe 含量关系密切,与 Mn 含量关系较少。为了讨论四川盆地东部三叠系飞仙关组不同碳酸盐岩的阴极发光性与其 Mn、Fe 含量的关系,表 1 列出了前边所讨论的 6 种



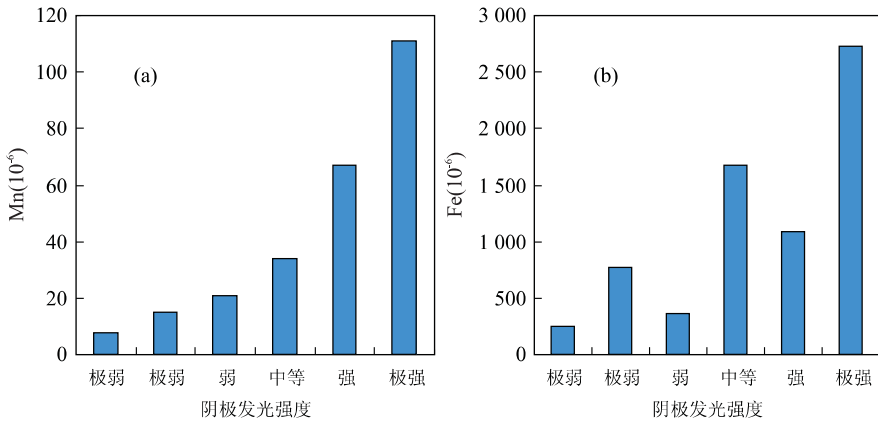


图 4 四川盆地东部三叠系飞仙关组具不同阴极发光强度碳酸盐样品的 Mn 含量直方图(a)和相应的 Fe 含量直方图(b)  
Fig. 4 Histogram for Mn concentrations of the samples with different cathodoluminescence intensities (a) and corresponding histogram for Fe concentrations (b) in Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan basin of China

岩石类型和斑块状亮晶方解石的 MgO、Mn、Fe 含量和白云石含量的平均值,以及相应的阴极发光强度。大多数样品(主要是白云岩)的 MgO、Mn、Fe 的原始基础数据已由黄思静等(2006a)公布,表 2 补充列出了与表 1 平均值有关且尚未公布的 5 个石灰岩(包括一个方解石单矿物)测试数据。

阴极发光分析表明,四川盆地东部三叠系飞仙关组的碳酸盐岩普遍具有很低的阴极发光强度,其发光强度显著低于过去所研究的四川盆地古生代的样品(黄思静等,2003)。样品的阴极发光分析和相应的 Mn、Fe 含量分析表明阴极发光强度与其 Mn 含量显著相关(图 4a,表 1),阴极发光强度从极弱到极强,其 Mn 含量从小于  $10 \times 10^{-6}$  到  $100 \times 10^{-6}$  以上,这与 Mn 作为碳酸盐矿物阴极发光激活剂的前人研究成果是一致的(Pierson, 1981; Ten-Have and Heijnen, 1985; 黄思静, 1992)。样品的阴极发光分析和相应的 Mn、Fe 含量分析也说明,当碳酸盐中 Mn、Fe 含量较低时(本文报道的大多数样品的 Mn 含量均小于  $40 \times 10^{-6}$ ,全部样品的 Fe 含量均小于  $3000 \times 10^{-6}$ ,参见黄思静等(2006a)公布的有关原始数据),其阴极发光性与 Mn 含量的关系更为密切,Fe 对碳酸盐矿物阴极发光的猝灭作用是有限的,虽然样品的阴极发光性与 Fe 含量之间仍表现出一种正的相关关系(图 4b),但这是碳酸盐岩中 Mn、Fe 含量本身就是一种正相关性造成的(Pierson, 1981; 黄思静, 1992)。

### 3.2 阴极发光性与碳酸盐岩的成岩作用

已有的研究(Brand and Veizer, 1980; 黄思静, 1990)表明,海相碳酸盐的成岩过程是一个 Mn、Fe

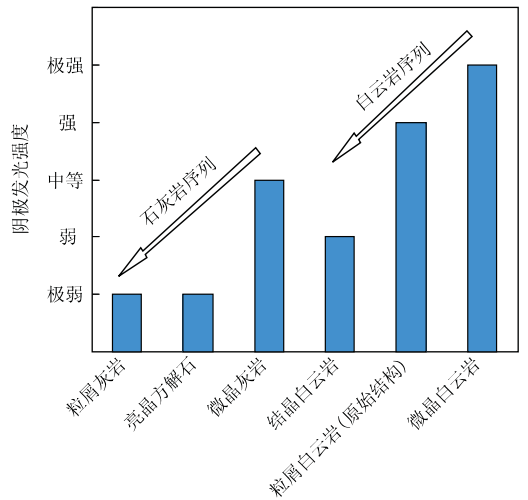


图 5 四川盆地东部三叠系飞仙关组不同类型碳酸盐岩的阴极发光强度分布直方图

Fig. 5 Histogram of cathodoluminescence intensity for different types of carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan basin of China

的获取过程,造成这种现象的原因与如下几个因素有关:(1)碳酸盐成岩流体(孔隙流体或大气水)中具有比沉积流体(海水)更高的 Mn、Fe 含量(Livingstone, 1963; Mason, 1966);(2)化学动力学效应,这里主要指海相碳酸盐矿物沉积过程与成岩过程有关化学反应速度的巨大差别;(3)晶体化学因素,主要控制因素是 Mn、Fe 元素更容易取代方解石(或白云石)中的 Ca(也包括 Mg),而难于取代文石中的 Ca,因而从海相沉积文石到成岩方解石的转变过程中碳酸盐矿物可以获得更多的 Mn、Fe。基于此,笔者认为,沉积海相碳酸盐矿物、或成岩蚀变性较弱的

海相碳酸盐矿物因其 Mn 含量较低缺乏足够的激活剂而没有阴极发光或只具有很弱的阴极发光,碳酸盐岩中的成岩组分、或经成岩蚀变的海相碳酸盐的沉积组分往往不同程度的阴极发光,因而海相碳酸盐矿物的阴极发光性也成为人们用以判断其成岩蚀变强度、或判断其对海水信息代表程度的有效方法之一 (Veizer *et al.*, 1999; Walter *et al.*, 2000; 黄思静, 1990; 黄思静等, 2003; 2006b)。

四川盆地东部三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光强度极低,如果单从阴极发光分析的角度,笔者甚至可以认为,四川盆地东部三叠系飞仙关组的海相碳酸盐岩的微量元素构成(实际上也包括同位素构成(黄思静等, 2006a))在很大程度上仍然保留了海水特征,沉积期后非海相流体对其的影响是非常有限的。然而,就相对发光强度而论,四川盆地东部三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光性表现出了与海相碳酸盐岩成岩作用经典理论相悖的特征,主要表现在以下 2 个方面:

(1)在石灰岩序列中,完全由沉积组分构成的微晶或泥晶灰岩具有较强的阴极发光性(中等的阴极发光强度,图 3(c)),同时也具有石灰岩序列中最高的 Mn 含量和最强的阴极发光强度(表 1,图 5);但与成岩孔隙流体关系更为密切的粒屑灰岩(包括完全由亮晶方解石构成的方解石单矿物)则具有很弱的阴极发光性(极弱的阴极发光强度,图 3(e),图 5),同时也具有很低的 Mn 含量(表 1)。(2)在白云岩序列中,其形成机制与海水关系最为密切的微晶或泥晶白云岩(其白云岩化作用通常发生在准同生阶段(刘宝珺, 1980))具有最强的阴极发光性(极强的阴极发光强度,图 3(a),图 5),同时也具有很高的 Mn 含量(表 1);而形成机制与孔隙流体关系更为密切、且完全由结晶白云石(细一中晶白云石为主)构成的结晶白云岩则具有最弱的阴极发光性(弱的阴极发光强度,图 3(d),图 5),同时也具有很低的 Mn 含量(表 1);原始结构保存的粒屑白云岩则介于微晶或泥晶白云岩和结晶白云岩之间,具有较强的阴极发光性(强的阴极发光强度,图 4(b),图 5),同时也具有白云岩序列中中等的 Mn 含量(表 1);白云岩序列中结晶白云岩的阴极发光强度已显著低于石灰岩序列中对海水有较好代表性的微晶或泥晶灰岩。

因此,可以认为,四川盆地东部三叠系飞仙关组碳酸盐岩所经历的成岩流体具有如下特征:

(1)埋藏前的相对较早的成岩阶段,如同生期,

可能经历了一定程度的大气水作用,如微晶或泥晶灰岩中文石或方解石的新生变形作用可能与大气水的参与有关,但参与程度也是有限的,因为这些碳酸盐组分对三叠系飞仙关组而言具有相对较强的阴极发光性和相对较高的 Mn 含量,但对于地质历史中广泛分布的碳酸盐岩而言,其 Mn 含量仍然是很低的(平均值只有  $34 \times 10^{-6}$ )。

(2)微晶或泥晶白云岩以及原始结构保存的粒屑白云岩的白云岩化过程可能有大气水参与,因为它们具有较强的阴极发光性和较高的 Mn 含量,蒸发泵和渗透回流作用可能是这些岩石白云岩作用的主要机理;而四川盆地东部广泛分布的富晶间孔隙的结晶白云岩,其白云岩化作用的孔隙流体可能远离大气淡水,极低的阴极发光强度和极低的 Mn 含量(平均值只有  $20 \times 10^{-6}$  左右)是作出这种假定的主要依据,前人(苏立萍等, 2004)对这类白云岩所进行的包裹体均一化温度研究(9 个样品的包裹体均一化温度变化在  $115.5 \sim 155$  °C 之间)也表明其白云岩化作用是在深埋藏环境中发生的。

(3)结晶白云岩极弱的阴极发光强度和极低的 Mn 含量还说明这类白云岩所经历的成岩流体在一定程度上具有海源流体的色彩,笔者难于在本文中对这种白云岩所经历的白云岩化流体的来源做出更为具体的回答,但可以做出这样的假定:结晶白云岩的白云岩化流体是一种深循环流体,它们与大气水关系很少,同时这种深循环流体也不同于一些前人 (Azmy *et al.*, 2001)报道的穿越铝硅酸盐地层的深循环流体,做出这种判断的依据同样是这类白云岩极弱的阴极发光强度和极低的 Mn 含量。

(4)对于罗家寨构造碳酸盐而言,受大气水影响的碳酸盐岩主要分布在向上变浅的剖面层序的顶部(图 2),因而这些岩石(如微晶或泥晶白云岩、微晶或泥晶灰岩、具原始结构的粒屑白云岩)具较强的阴极发光强度,同时也具有较高的 Mn 含量(Mn 含量在层序顶部显著增加(黄思静等, 2006a),这与向上变浅过程中大气水作用向上影响增加有关,这种形式的大气水作用显然发生在埋藏前的较早成岩阶段。

(5)对四川盆地东部乃至整个四川盆地范围内碳酸盐岩埋藏历史的研究、对三叠系地层中广泛分布的蒸发盐的溶解(包括含水蒸发盐的脱水)作用的研究、与溶解作用有关的海源流体的分布方式的研究以及盆地范围内流体运移与驱动方式的研究可以为作为四川盆地东部主要储集岩的飞仙关组结晶白

云岩形成机制研究提供重要的线索。

## 4 结论

(1)四川盆地东部三叠系飞仙关组的碳酸盐岩普遍具有很弱的阴极发光性,在常规测试条件下甚至没有阴极发光,其原因与其很低的 Mn 含量有关。

(2)四川盆地东部三叠系飞仙关组的碳酸盐岩很弱的阴极发光性说明沉积期后非海相流体对飞仙关组碳酸盐的影响非常有限,成岩流体与海水关系密切,海源流体参与的成岩作用是飞仙关组碳酸盐岩所经历的主要成岩作用。

(3)飞仙关组不同石灰岩和不同白云岩类型阴极发光性的差别说明了成岩组分含量越高的碳酸盐岩,或者说与沉积期后流体(主要是孔隙流体)关系越密切的碳酸盐岩的阴极发光强度越低,随着埋藏成岩作用的进行,飞仙关组碳酸盐岩孔隙流体受某种海源流体的影响是逐渐加深的。

(4)作为四川盆地东部主要储集岩的结晶白云岩形成机制与埋藏过程中的深循环流体有关,这种深循环流体没有穿越铝硅酸盐地层,但它们穿越了三叠系内部的某些海相地层,这些海相地层可能是广泛存在于四川盆地三叠系的蒸发盐地层,由蒸发盐成岩过程提供的海源流体参与了飞仙关组结晶白云岩的白云岩化作用。

## References

- Azmy, K., Veizer, J., Misi, A., et al., 2001. Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco basin, Brazil. *Precambrian Research*, 112: 303–329.
- Brand, U., Veizer, J., 1980. Chemical diagenesis of multi-component carbonate system-2; Trace elements. *Jour. Sed. Petrology*, 50: 1219–1236.
- Bruhn, F., Veizer, J., Buhl, D., et al., 2005. Diagenetic history of the Korallenoolith (Malm) of northwestern Germany; Implications from in-situ trace element and isotopic studies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 231: 518–523.
- Chen, G. S., Zeng, W., Yang, Y., et al., 2005. Discussion on dolomitization genesis of Feixianguan Formation in northeast Sichuan. *Natural Gas Industry*, 25(4): 40–41 (in Chinese with English abstract).
- El-Tabakh, M., Mory, A., Schreiber, B. C., et al., 2004. Anhydrite cements after dolomitization of shallow marine Silurian carbonates of the Gascoyne platform, southern Carnarvon basin, western Australia. *Sedimentary Geology*, 164: 75–87.
- Huang, S. J., 1990. Cathodoluminescence and diagenetic alteration of marine carbonate minerals. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 10(4): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., 1992. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals. *Mineralogy and Petrology*, 12(4): 74–79 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Qing, H. R., Pei, C. R., et al., 2006a. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan of China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2123–2132 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Qing, H. R., Hu, Z. W., et al., 2006b. Geochemistry in different shell layers of rudist bivalve from Late Cretaceous in the south of Tibet and preservation for the information of sea water. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(1): 68–74 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Shi, H., Mao, X. D., et al., 2003. Diagenetic alteration of earlier Palaeozoic marine carbonate and preservation for the information of seawater. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30(1): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Shi, H., Zhang, M., et al., 2005. Strontium isotope age calibration of rudist bivalves from Late Cretaceous section in southern Tibet. *Earth Science—Journal China University of Geosciences*, 30(4): 437–442 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. F., Yang, Y., Huang, J. Z., et al., 2003. Control of sedimentary facies on the reservoir of Feixianguan Formation in northeast Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 23(3): 141–143 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., 1980. Sedimentary petrology. Geological Publishing House, Beijing, 212–213 (in Chinese).
- Livingstone, D. A., 1963. Chemical composition of rivers and lakes. Data of Geochemistry, U. S. Geol. Sur. Prof. Papers, 440G: 41–44.
- Mason, B., 1966. Principles of geochemistry. 3rd. ed. John Wiley & Sons Inc, New York, 194–199.
- Pierson, B. J., 1981. The control of cathodoluminescence in dolomite by iron and manganese. *Sedimentology*, 28(5): 601–610.
- Ran, L. H., Chen, G. S., Zhang, J., et al., 2002. The study of



- Feixianguan oolitic beach reservoir distribution and analysis of exploration potential in the northeast of Sichuan basin. *China Petroleum Exploration*, 7(1): 46—55 (in Chinese with English abstract).
- Su, L. P., Luo, P., Hu, S. R., et al., 2004. Diagenesis of oolitic bank of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in Luoziashai gas field, northeastern Sichuan Province. *Journal of Palaeogeography*, 6(2): 182—190 (in Chinese with English abstract).
- Swennen, R., Vandeginste, V., Ellam, R., 2003. Genesis of zebra dolomites (cathedral formation; Canadian Cordillera fold and thrust belt, British Columbia). *Journal of Geochemical Exploration*, 78—79: 571—577.
- Ten-Have, A. H. M., Heijnen, W., 1985. Cathodoluminescence activation and zonation in carbonate rocks; An experimental approach. *Geologie en Mijnbouw*, 64(3): 297—310.
- Török, Á., 2000. Formation of dolomite mottling in Middle Triassic ramp carbonates (southern Hungary). *Sedimentary Geology*, 131: 131—145.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., et al., 1999.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, 161: 59—88.
- Walter, M. R., Veevers, J. J., Calver, C. R., et al., 2000. Dating the 840—544 Ma Neoproterozoic interval by isotopes of strontium, carbon, and sulfur in seawater, and some interpretative models. *Precambrian Research*, 100: 371—433.
- Wang, Y. G., Liu, H. Y., Wen, Y. C., et al., 2002. Distribution law, exploration method and prospectiveness prediction of the oolitic beach reservoirs in Feixianguan Formation in northeast Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 22(Suppl.): 14—19 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. G., Wen, Y. C., Hong, H. T., et al., 2004. Exploration target of the deep oolitic beach gas reservoir of the Triassic system Feixianguan Formation in northeast part of Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 24(12): 5—9 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. Q., Yang, W., Zhang, L., et al., 2005. Dolomitization genetic model of Feixianguan group reservoir in northeast Sichuan basin. *Natural Gas Geoscience*, 16(2): 162—166 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Zeng, Y. X., Liu, W., 2002. Control of sedimentary facies on distribution of oolitic bank reservoir of Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan. *Natural Gas Exploration & Development*, 25(3): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈更生, 曾伟, 杨雨, 等, 2005. 川东北部飞仙关组白云石化成因探讨. *天然气工业*, 25(4): 40—41.
- 黄思静, 1990. 海相碳酸盐矿物的阴极发光性与其成岩蚀变的关系. *岩相古地理*, 10(4): 9—15.
- 黄思静, 1992. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其 Fe、Mn 含量的关系. *矿物岩石*, 12(4): 74—79.
- 黄思静, 卿海若, 裴昌蓉, 等, 2006a. 川东三叠系飞仙关组白云岩铍含量、铍同位素组成与白云岩化流体. *岩石学报*, 22(8): 2123—2132.
- 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等, 2006b. 西藏南部晚白垩世厚壳蛤不同壳层的地球化学特征及其对古海洋信息的保存性. *沉积学报*, 24(1): 68—74.
- 黄思静, 石和, 毛晓冬, 等, 2003. 早古生代海相碳酸盐的成岩蚀变性及其对海水信息的保存性. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 30(1): 9—18.
- 黄思静, 石和, 张萌, 等, 2005. 西藏南部晚白垩世厚壳蛤的铍同位素年龄标定. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(4): 437—442.
- 江兴福, 杨雨, 黄建章, 等, 2003. 川东北地区飞仙关期沉积相对储层的控制作用. *天然气工业*, 23(3): 141—143.
- 刘宝珺, 1980. *沉积岩石学*. 北京: 地质出版社, 212—213.
- 冉隆辉, 陈更生, 张健, 等, 2002. 四川盆地东北部飞仙关鲕滩储层分布研究与勘探潜力分析. *中国石油勘探*, 7(1): 46—55.
- 苏立萍, 罗平, 胡社荣, 等, 2004. 川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕滩成岩作用. *古地理学报*, 6(2): 182—190.
- 王一刚, 刘划一, 文应初, 等, 2002. 川东飞仙关组鲕滩储层分布规律勘探方法与远景预测. *天然气工业*, 22(增刊): 14—19.
- 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等, 2004. 川东北三叠系飞仙关组深层鲕滩气藏勘探目标. *天然气工业*, 24(12): 5—9.
- 魏国齐, 杨威, 张林, 等, 2005. 川东北飞仙关组鲕滩储层白云石化成因模式. *天然气地球科学*, 16(2): 162—166.
- 杨雨, 曾云贤, 刘微, 2002. 川东北部地区飞仙关组沉积相对鲕滩储层分布的控制. *天然气勘探与开发*, 25(3): 1—9.