

川东地区华蓥山海相三叠系不同类型岩石 对海水信息的保存性评估

胡作维, 黄思静, 魏文文, 刘辉伦, 刘涛

(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)

摘要:通过对川东地区华蓥山海相三叠系不同岩石类型样品的微观结构、阴极发光和微量元素等分析表明:川东地区华蓥山海相三叠系不同的岩石类型样品具有不同的抵抗成岩蚀变能力,其对海水信息的保存程度也不一致;钙质泥岩所记录的有关信息已基本不能代表海水,多数微晶灰岩所记录的有关信息可以较好地代表海水,而粉晶白云岩只有部分样品可以代表海水的信息,同时传统上被认为更容易遭受成岩蚀变的颗粒灰岩反而出现低Mn、高Sr和弱阴极发光等特征,其可能与早期海水胶结作用或者深埋藏条件下封闭海源流体作用有关。

关键词:海水信息;碳酸盐;成岩蚀变;三叠系;川东地区

中图分类号:P588.2;P595

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2011)02-0208-07

The capabilities of different Triassic marine rock types for preservation of coeval seawater information in the Huaying Mountain of eastern Sichuan

HU Zuo-wei, HUANG Si-jing, WEI Wen-wen, LIU Hui-lun and LIU Tao

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

Abstract: Different types of marine carbonate rocks have different capabilities of resisting diagenetic alteration and preserving coeval seawater information. Aragonite and high-magnesium calcite minerals, for example, are liable to suffering from relatively strong diagenetic alteration, and their preservation of the coeval seawater information is therefore relatively poor; by contrast, low-magnesium calcite mineral has much better capability for preservation of the coeval seawater information. It is thus thought that the evaluation of marine samples of different rock types for their diagenetic alteration and preservation of the coeval seawater information is a necessary basic work in sedimentary geochemistry and chemostratigraphy. The analyses of rock fabrics, cathodoluminescence and trace elements of Triassic marine samples of different rock types from the Huaying Mountains of eastern Sichuan were conducted in this paper to evaluate their capabilities for resisting diagenetic alteration and preserving coeval seawater information. The results indicate that the calcareous mudstone samples show strong luminescence, their average Mn concentration is higher than 800×10^{-6} , average Sr concentration is only 280×10^{-6} , average Mn/Sr ratio is higher than 3.3, which is the highest average Mn/Sr ratio in all the samples of different rock types. The micrite samples mostly show extremely weak or weak luminescence, with only a few samples showing moderate or strong luminescence, their average Mn concentration is 213×10^{-6} , average Sr concentration is 704×10^{-6} , and average Mn/Sr ratio is 0.44. The very fine-crystalline dolomite shows relatively weak luminescence, their average Mn concentration is 119×10^{-6} , average Sr concentration is 86

收稿日期:2010-05-11;修订日期:2010-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40839908,40672072),教育部博士点基金资助项目(20050616005)

作者简介:胡作维(1981-),男,博士,讲师,主要从事沉积地质学研究,E-mail:huzuowei@yahoo.com.cn

$\times 10^{-6}$, which is the lowest average Sr concentration in all the samples, and average Mn/Sr ratio is 1.46. The grainstone samples show no luminescence, their average Mn concentrations is only 4×10^{-6} , which is the lowest average Mn concentration in all the samples, average Sr concentrations is 1.015×10^{-6} , which is the highest average Sr concentration in all the samples, and average Mn/Sr ratio is very low (lower than 0.004). In summary, the Triassic marine samples of different rock types from the Huaying Mountain of eastern Sichuan have different capabilities for resisting diagenetic alteration and preserving coeval seawater information. All the calcareous mudstone samples which have the highest average Mn concentration, relatively low average Sr concentration, relatively high Mn/Sr ratio and strong luminescence could not represent the coeval seawater, so they must be excluded. Most micrite samples which have relatively low average Mn concentration, relatively high average Sr concentration, relatively low Mn/Sr ratio and weak luminescence or moderate luminescence could represent the coeval seawater, but a few of them must be excluded. A few of very fine-crystalline dolomite samples which have relatively low average Sr concentration and relatively high Mn/Sr ratio could not represent the coeval seawater, even though they have relatively low average Mn concentration, weak luminescence or moderate luminescence, but other samples still represent the coeval seawater. The grainstone samples which used to be regarded as rocks liable to suffering from stronger diagenetic alteration have low Mn concentration, high Sr concentration, and no luminescence, so that their diagenetic alteration might have been related to early seawater cementation or deep-buried trapped marine fluids, rather than to meteoric water.

Key words: seawater information; carbonate; diagenetic alteration; Triassic; eastern Sichuan

对于古老的海相沉积地层中不同类型岩石(矿物)而言,其在抵抗成岩蚀变和对海水信息的保存性等方面具有不同的能力(Veizer, 1983; Denison *et al.*, 1994; Reinhardt *et al.*, 2000; 黄思静, 1990; 黄思静等, 2003)。如文石和高镁方解石相对容易遭到成岩蚀变,对海水信息的保存较差,而低镁方解石在抵抗成岩蚀变和对海水信息的保存性等方面要好得多。一般认为,原始成分为低镁方解石(如有铈腕足壳体等)、磷酸盐矿物(如牙形石等)或其他一些内源沉积物(如石膏、重晶石等硫酸盐)的海相沉积组分对成岩蚀变有较强的抵抗能力(Banner and Kaufman, 1994; Veizer *et al.*, 1999; 李心清等, 1999; 黄思静等, 2001, 2003)。这些组分通常能较好地保存海水的信息,因而是进行沉积地球化学和化学地层学等研究的首选对象。然而,如果在上述首选海相沉积组分难以获取的情况下,只能利用其他一些可以代表(或者在很大程度上代表)海水且成岩蚀变程度低的碳酸盐矿物(如钙质泥岩、灰岩和白云岩中的碳酸盐矿物)加以代替。那么这些碳酸盐矿物对成岩蚀变的抵抗能力如何?其记录的有关信息是否可以代表海水?这些问题都还没有很好地得到回答。

川东地区华蓥山位于上扬子台地的中部,其海相三叠系厚度大,分布广,可为三叠纪研究提供优越的条件。由于二叠纪/三叠纪之交发生生物大灭绝,

三叠纪早期地层中腕足类动物基本灭绝,幸存的少数个体太小,同时由于缺少牙形石方面工作,因而开展沉积地球化学和化学地层学等研究将不得不选用全岩样品。本文试图通过对川东地区华蓥山海相三叠系不同岩石类型样品的微观组构、阴极发光和微量元素等分析来评估这些全岩样品对成岩蚀变的抵抗能力和对海水信息的保存程度,为进一步开展沉积地球化学和化学地层学等研究提供参考。

1 样品与分析方法

川东地区华蓥山仰天窝剖面位于四川广安市华蓥天池镇附近(图1,剖面起点坐标: $E106^{\circ}53'18.5''$, $N30^{\circ}25'43.9''$)构造上属华蓥山复式背斜中段西翼。该剖面沿北西-南东向展布,野外地表岩层出露较好,其中海相三叠纪地层以碳酸盐岩为主,累积厚度为1195.88 m。在已有工作(四川省区域地层表编写组, 1978; 四川省地质矿产局川东南地质大队, 1995)的基础上,根据岩石类型的多少及其分布情况,笔者在剖面实测过程中采集了钙质泥岩、微晶灰岩、白云岩和颗粒灰岩等62个样品。

目前阴极发光性和化学分析(尤其是Mn和Sr元素分析)已成为判断古代海相碳酸盐成岩蚀变性较为有效的方法(Burke *et al.*, 1982; Veizer *et al.*,

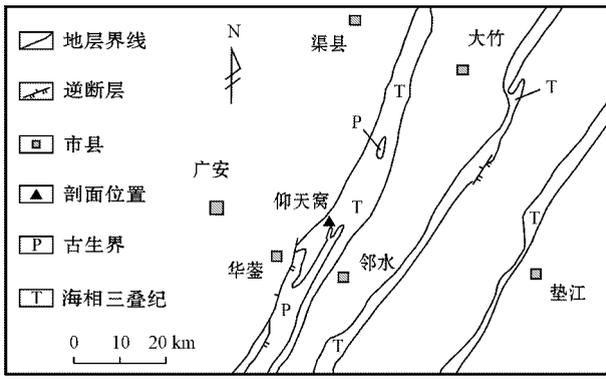


图 1 样品采集剖面的区域地质简图(据四川省地质矿产局,1991)

Fig. 1 Sketch regional geological map of the sampling area (after Geological & Mineral Bureau of Sichuan, 1991)

1999; Lee *et al.*, 2004; 李心清等, 2000; 黄思静等, 2001)。在大量川东地区华蓥山海相三叠系样品镜下微观结构观察基础上, 选择 32 个具有代表性样品磨制双面抛光的阴极发光薄片。阴极发光分析在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成, 使用英国 CITL 公司 CL8200MK5 型阴极发光

仪, 工作束电压为 10 kV, 束电流约为 500 μA ; 同时选择 55 个使用玛瑙研钵研磨至约 200 目的粉末样品进行 Mn 和 Sr 元素分析, 研磨前取样时尽可能回避岩石中风化表层、方解石脉和重结晶部分, Mn 和 Sr 元素分析在四川省地质矿产局华阳地矿检测中心完成, 使用日本 HITACHI 公司 Z8000 型原子吸收光谱分析仪, Mn 元素的检测限为 5×10^{-6} , 分析误差为 13%, Sr 元素的检测限为 42×10^{-6} , 分析误差为 14%。

2 分析结果

2.1 阴极发光性

川东地区华蓥山海相三叠系不同岩石类型样品的阴极发光分析结果见表 1。由表 1 可见, 微晶灰岩(23 个, 包括含泥、泥质、含颗粒或颗粒微晶灰岩)的阴极发光强度主要是极弱和弱(占 65%, 15 个), 其次是弱-中和中等(占 22%, 5 个), 中-强和强较少(占 13%, 3 个)(图 2a)。粉晶白云岩(5 个)的阴极发光强度主要是极弱和弱(占 80%, 4 个), 只有 1 个样品具有弱-中的阴极发光强度(图 2b); 颗粒灰岩(3

表 1 不同岩石类型样品的阴极发光强度、Mn 和 Sr 平均含量($w_B/10^{-6}$)及其 Mn/Sr 平均值

Table 1 Cathodoluminescence intensity, Mn and Sr mean concentrations and Mn/Sr ratios of samples of different rock types

		微晶灰岩	粉晶白云岩	颗粒灰岩	钙质泥岩	所有样品
阴 极 发 光 强 度	极弱 ^①	7 (30) ^②	1 (20)	2 (67)		10 (31)
	弱	8 (35)	3 (60)	1 (33)		12 (38)
	弱-中	3 (13)	1 (20)			4 (13)
	中	2 (9)				2 (6)
	中-强	2 (9)				2 (6)
	强	1 (4)			1 (100)	2 (6)
微 量 元 素	Mn					
	≤ 250	34 (74)	5 (83)	1 (100)		40 (73)
	> 250	12 (26)	1 (17)		2 (100)	15 (27)
	平均含量	213	119	4	908	224
	Sr					
	≥ 400	34 (74)		1 (100)		35 (64)
	< 400	12 (26)	6 (100)		2 (100)	20 (36)
	平均含量	704	86	1015	280	627
	Mn/Sr					
	≤ 2	45 (98)	4 (67)	1 (100)		50 (91)
	> 2	1 (2)	2 (33)		2 (100)	5 (9)
	平均值	0.44	1.46	0.004	3.30	0.65
分析数量/个		46	6	1	2	55

① 根据黄思静等(2003)提出的描述方案, 将阴极发光强度划分为 7 级: 极弱、弱、弱-中、中等、强和极强; ② 前面数字指在某个级别或范围中的样品数量, 后面括号内数字是上述样品数量所占其同种岩石类型样品总数的百分数, 如 7(30)是指 7 个微晶灰岩样品具有极弱阴极发光, 其占微晶灰岩样品总数的 30%。

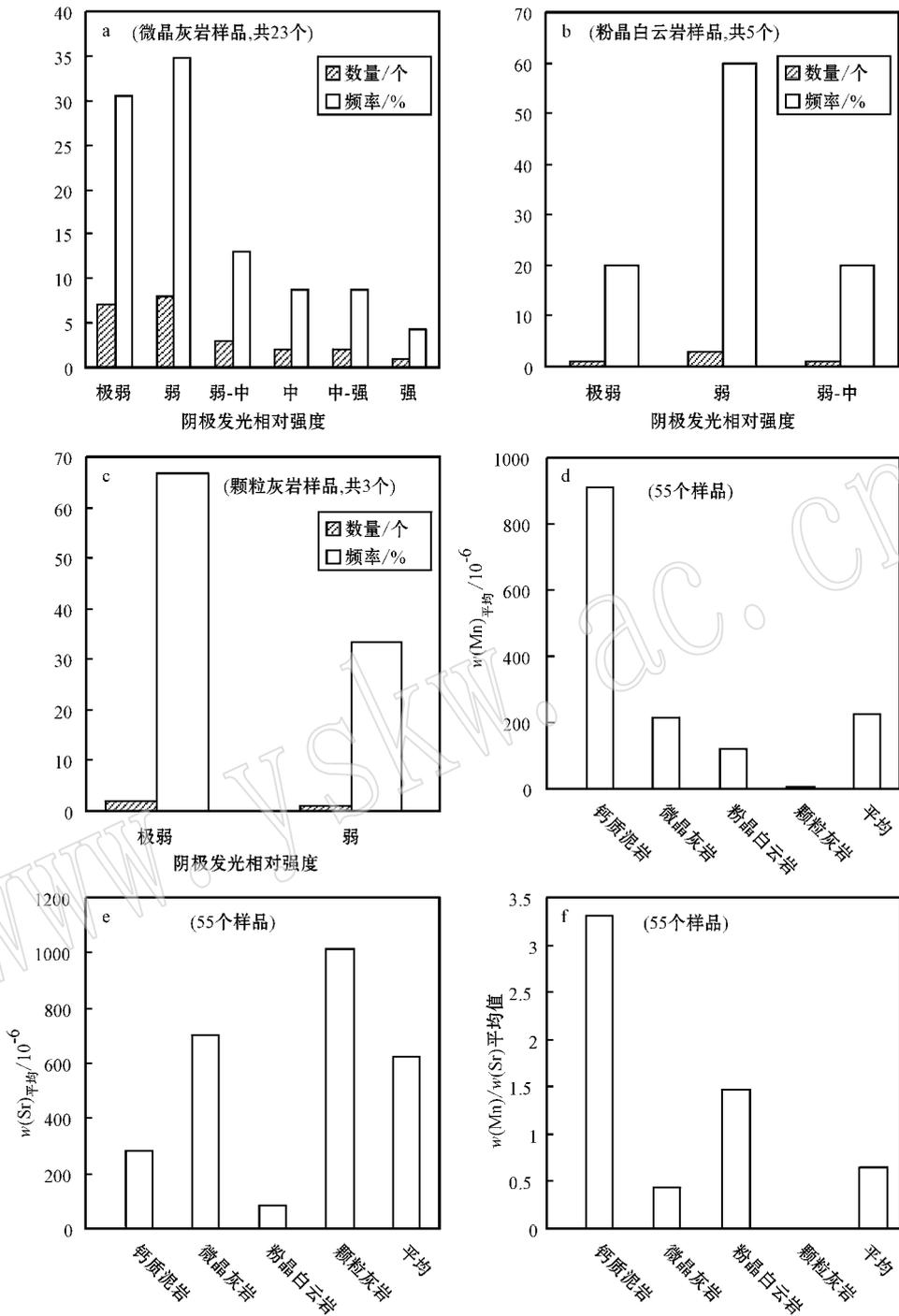


图 2 样品阴极发光强度(a、b、c)和 Mn、Sr 平均含量及其比值(d、e、f)直方图

Fig. 2 Histograms of cathodoluminescence intensity (a, b, c), Mn and Sr mean concentrations (d, e) and Mn/Sr ratios (f) of samples of different rock types

个 颗粒含量 > 50%) 的阴极发光强度都是极弱和弱 (图 2c); 钙质泥岩具有强的阴极发光强度(1 个, 100%)

2.2 微量元素含量

川东地区华蓥山海相三叠系钙质泥岩(2 个)具

有很高的 Mn 平均含量(表 1、图 2d),超过了 800×10^{-6} ,同时具有强的阴极发光强度;微晶灰岩(46 个)的 Mn 平均含量为 213×10^{-6} ,只有部分样品(15 个)的 Mn 含量超过了 250×10^{-6} 。相对而言,微晶灰岩的 Mn 平均含量较低(表 1、图 2d),同时与这些

样品具有较弱的阴极发光强度相一致(图 2a);粉晶白云岩(6个)的 Mn 平均含量较低,仅为 119×10^{-6} (表 1、图 2d),也与这些样品具有较弱的阴极发光强度相吻合(图 2a);仅有的 1 个颗粒灰岩却具有极低的 Mn 含量,只有 4×10^{-6} (表 1、图 2d),同时不具有阴极发光(图 2a)。

同时,钙质泥岩(2个)具有较低的 Sr 平均含量,只有 280×10^{-6} (表 1、图 2e);微晶灰岩(46个)的 Sr 平均含量为 704×10^{-6} ,只有少数样品(12个)的 Sr 平均含量低于 400×10^{-6} (表 1、图 2e);粉晶白云岩(6个)的 Sr 平均含量是最低的,仅为 86×10^{-6} (表 1、图 2e);仅有的 1 个颗粒灰岩具有最高的 Sr 含量,高达 1015×10^{-6} (表 1、图 2e)。

2.3 微量元素比值

对于川东地区华蓥山海相三叠系不同岩石类型的样品,钙质泥岩(2个)具有最高的 Mn/Sr 平均值,超过了 3.3(表 1、图 2f),并具有强的阴极发光强度;微晶灰岩(46个)的 Mn/Sr 平均值为 0.44,部分样品(11个)的 Mn/Sr 值超过了 0.5,但只有 1 个样品超过了 2,因而相对来说,微晶灰岩的 Mn/Sr 值还是比较低的(表 1、图 2f);粉晶白云岩(6个)的 Mn/Sr 平均值为 1.46(表 1、图 2f),但有 3 个粉晶白云岩的 Mn/Sr 值超过了 1.5,其中 1 个样品的 Mn/Sr 值更高达 3.22;仅有的一个颗粒灰岩具有极小的 Mn/Sr 值,不到 0.004(表 1、图 2f)。

3 讨论

由于海相碳酸盐矿物的阴极发光强度主要受到了 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 含量的控制,当海相碳酸盐矿物中的 Fe^{2+} 含量小于 $5000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ 时不具有阴极发光,可以认为这些海相碳酸盐矿物所经历的成岩蚀变较弱,可以在很大程度上代表海水;而当海相碳酸盐矿物具有中等及其以上阴极发光强度时,可以认为这些海相碳酸盐矿物所经历的成岩蚀变较强,应该怀疑其对海水的代表性(Pierson, 1981; Veizer *et al.*, 1999; 黄思静, 1992)。由于海水比淡水具有更低的 Mn 含量以及更高的 Sr 含量,海相碳酸盐的成岩蚀变过程是一个 Mn 的获取和 Sr 的丢失过程,因而可以认为 Sr 含量越高、Mn 含量越低的海相碳酸盐矿物越能代表海水(Brand and Veizer, 1980; 黄思静等, 2003)。Derry 等(1989)建议合格样品 Sr 含量下限值为 200×10^{-6} ,其后 Korte 等

(2003)建议好样品 Sr 含量下限值为 400×10^{-6} ,Mn 含量上限值为 250×10^{-6} ,Kaufman 等(1992, 1993)则建议了合格样品 Mn/Sr 值的上限值为 2~3。本文主要以 Korte 等(2003)建议的 Mn 含量($\leq 250 \times 10^{-6}$)和 Sr 含量($\geq 400 \times 10^{-6}$)作为基本评估标准,同时结合 Kaufman 等(1992, 1993)建议的 Mn/Sr 值(≤ 2)和阴极发光性综合评估样品是否可以在很大程度上代表海水。

3.1 钙质泥岩

尽管钙质泥岩经常被用于沉积地球化学研究,但对其是否可以代表海水仍然知之甚少。川东地区华蓥山海相三叠系钙质泥岩对海水信息保存性的评估结果见表 2。川东地区华蓥山海相三叠系钙质泥岩(2个)均具有很高的 Mn 平均含量和较低的 Sr 平均含量(表 1),同时具有较大的 Mn/Sr 值(图 2d、2e、2f)和强的阴极发光强度,可以认为钙质泥岩所记录的有关信息都不能代表海水,因而这类样品需要被剔除,在相同岩石类型样品中的剔除率达 100%(表 2、图 3)。

表 2 不同岩石类型样品的综合剔除率统计

Table 2 Integrated exclusion rates of samples of different rock types

岩石类型	样品数量/个	剔除数量/个	在所有样品中的剔除率/%	在同岩石类型样品中的剔除率/%
钙质泥岩	2	2	4	100
微晶灰岩	46	2	4	4
粉晶白云岩	6	2	4	33
颗粒灰岩	1	0	0	0
共计	55	6	11	

3.2 微晶灰岩

微晶灰岩是由细结构的方解石组成的,一般认为是沉积成因的,多数微晶灰岩均可以代表或者在很大程度上代表海水的组成,有效保留了海水的原始信息。川东地区华蓥山海相三叠系微晶灰岩对海水信息保存性的评估结果见表 2。川东地区华蓥山海相三叠系微晶灰岩(46个)中的 Mn 平均含量为 213×10^{-6} ,只有少数样品(15个)的 Mn 平均含量超过了 250×10^{-6} ,同时 Sr 平均含量为 704×10^{-6} ,只有少数样品(12个)的 Sr 平均含量低于 400×10^{-6} ,因而相对而言,这些微晶灰岩具有 Mn 平均含量较低、Sr 平均含量较高和 Mn/Sr 值较小的特点(表 1、图 2d、2e、2f),同时这些样品具有较弱的阴极发光强度(图 2a),可以认为微晶灰岩记录的有关信息较好代表了海水,因而微晶灰岩中只有 2 个样品需要被剔除,在相同岩石类

型样品中的剔除率仅为 4%(表 2、图 3)。

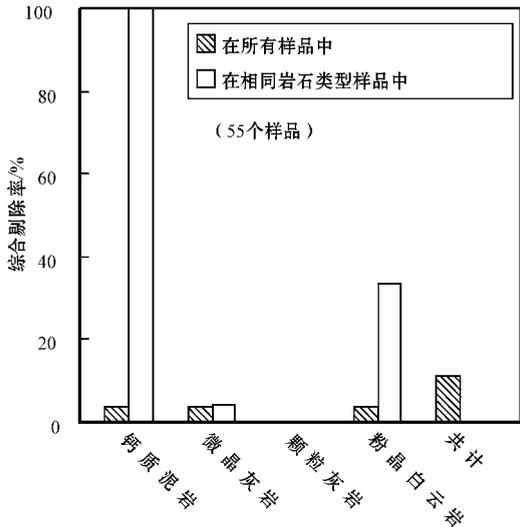


图 3 不同类型岩石样品的综合剔除率直方图

Fig. 3 Histograms showing integrated exclusion rates of samples of different rock types

3.3 粉晶白云岩

由于白云岩成因的复杂性(原生的,还是交代的或者其他成因的),造成了部分白云岩对海水信息的保存性较差。泥晶-微晶或粉晶白云岩的形成方式与海水关系最为密切,其白云岩化作用通常发生在准同生阶段(刘宝珺,1980),且岩石相对致密导致后期成岩流体难以进入与之发生反应,因而它们可能会在很大程度上记录了原始海水的有关信息。川东地区华蓥山海相三叠系粉晶白云岩中具有较低的 Mn 含量,平均含量只有 119×10^{-6} (表 1、图 2d),具相对较弱的阴极发光强度(图 2b),但具有所有岩石类型样品中最低的 Sr 平均含量,仅为 86×10^{-6} (图 2e),这可能与白云岩的晶体化学习性和 Sr 的化学动力学效应或者甚至与白云岩的成因有关(黄思静等,2006,2007)。同时这些粉晶白云岩的 Mn/Sr 平均值为 1.4(表 1、图 2f),有 3 个样品的 Mn/Sr 值超过了 1.5,其中 1 个样品的 Mn/Sr 值更高达 3.22,可以认为川东地区华蓥山海相三叠系粉晶白云岩中只有部分样品可以代表海水,其它都已经不能代表海水,因而粉晶白云岩中 2 个样品需要被剔除,在相同岩石类型样品中的剔除率为 33%(表 2、图 3)。

3.4 颗粒灰岩

一般认为颗粒灰岩更容易遭受成岩蚀变,而应该具有更高的 Mn 含量和更低的 Sr 含量。但研究发现,仅有的一个川东地区华蓥山海相三叠系颗粒灰

岩具有极低的 Mn 含量,只有 4×10^{-6} (表 1、图 2d),不具有阴极发光(图 2c),且具有较高的 Sr 含量,达到了 1.015×10^{-6} ,Mn/Sr 值不到 0.004(图 2e、2f),这与人们一般的认识相悖:由于颗粒灰岩相对更容易遭受成岩蚀变,相应地应该具有更高的 Mn 含量和较低的 Sr 含量,但这个样品却刚好相反,因而本文认为这些碳酸盐矿物的成岩蚀变(成岩作用)的发生极有可能与早期海水胶结作用或者深埋藏条件下封闭海源流体作用有关,而与地表大气淡水并没有直接的关系。就目前的判断依据并没有将其剔除(表 2、图 3),仍需继续进一步开展相关工作。

4 结论

川东地区华蓥山海相三叠系不同类型岩石具有不同的抵抗成岩蚀变能力,其对海水信息的保存程度也是不一致的:钙质泥岩具有很高的 Mn 平均含量和较低的 Sr 平均含量,同时具有较大的 Mn/Sr 值和强的阴极发光强度,其所记录的有关信息已基本不能代表海水;微晶灰岩具有相对较低的 Mn 平均含量、较高的 Sr 平均含量和较小的 Mn/Sr 值,多数样品具有中等以下阴极发光强度,多数样品所记录的有关信息可以较好地代表海水;粉晶白云岩尽管具有弱的阴极发光强度和相对较低的 Mn 平均含量,但较低的 Sr 平均含量和相对偏大的 Mn/Sr 值,说明只有部分样品可以代表海水的信息;颗粒灰岩具有极低的 Mn 含量和相对较弱的阴极发光强度,同时具有较高的 Sr 含量,Mn/Sr 值极小,这些样品的成岩蚀变(成岩作用)的发生极有可能与早期海水胶结作用或者深埋藏条件下封闭海源流体作用有关,而与地表大气淡水并没有直接的关系。

致谢 姜琳和钟鸣参加了野外采样工作,在此深表谢意。

References

- Banner J L and Kaufman J. 1994. The isotopic record of ocean chemistry and diagenesis preserved in non-luminescent brachiopods from Mississippian carbonate rocks, Illinois and Missouri[J]. GSA Bulletin, 106:1074~1082.
- Brand U and Veizer J. 1980. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system 1: Trace elements[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 50:1219~1236.

- Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, *et al.* 1982. Variation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time [J]. *Geology*, 10 : 516~519.
- Denison R E, Koepnick R B, Fletcher A, *et al.* 1994. Criteria for the retention of original seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in ancient shelf limestones [J]. *Chemical Geology*, 112 : 131~143.
- Derry L A, Keto L, Jacobsen S, *et al.* 1989. Sr isotopic variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 : 2331~2339.
- Editorial Board of Sichuan Province Regional Stratigraphic Scale. 1978. Regional Stratigraphic Scale of the Southwest of China-Fascicle of Sichuan Province [M]. Beijing : Geological Publishing House, 31~38 (in Chinese).
- Geological Branch of Southeast Sichuan, Sichuan Geological & Mineral Bureau. 1995. Geological map of China (Linshui County, 1:50 000) [R]. Chengdu : Sichuan Geological & Mineral Bureau (in Chinese).
- Huang Sijing. 1990. Cathodoluminescence and diagenetic alteration of marine carbonate minerals [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 10(4) : 9~15 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing. 1992. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 12(4) : 74~79 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, *et al.* 2007. The diagenesis and dolomitization of Feixianguan Carbonates of Triassic in NE Sichuan Basin: an overview [J]. *Advances in Earth Science*, 22(5) : 495~503 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Qing Hairuo, Pei Changrong, *et al.* 2006. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan of China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8) : 2123~2132 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Shi He, Liu Jie, *et al.* 2001. Progress in strontium isotope stratigraphy [J]. *Advances in Earth Sciences*, 16(2) : 194~200 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Shi He, Mao Xiaodong, *et al.* 2003. Diagenetic alteration of earlier Palaeozoic marine carbonate and preservation for the information of seawater [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30(1) : 9~18 (in Chinese with English abstract).
- Kaufman A J, Jacobsen S B and Knoll A H. 1993. The Vendian record of Sr- and C-isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimat [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 120 : 409~430.
- Kaufman A J, Knoll A H and Awramik S M. 1992. Biostratigraphic and chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic sedimentary successions: Upper Tindir Group, northwestern Canada, as a test case [J]. *Geology*, 20 : 181~185.
- Korte C, Kozur H W, Bruckschen P, *et al.* 2003. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 : 47~62.
- Lee Xinqing, Hu Ruizhong, Brand U, *et al.* 2004. Ontogenetic trace element distribution in brachiopod shells: an indicator of original seawater chemistry [J]. *Chemical Geology*, 209 : 49~65.
- Lee Xinqing, Hu Ruizhong, Qi Liang, *et al.* 2000. Trace element distribution: an indicator of fossil brachiopod shell preservation [J]. *Geochimica*, 29(6) : 584~591 (in Chinese with English abstract).
- Lee Xinqing, Wan Guojiang and Huang Ronggui. 1999. Different fossil brachiopod skeletal microstructure tells of different information on carbon and oxygen isotope contents [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(22) : 2087~2094.
- Liu Baojun. 1980. *Sedimentary Petrology* [M]. Beijing : Geological Publishing House, 219~221 (in Chinese).
- Pierson B J. 1981. The control of cathodoluminescence in dolomite by iron and manganese [J]. *Sedimentology*, 28 : 601~610.
- Reinhardt E G, Cavazza W, Patterson R T, *et al.* 2000. Differential diagenesis of sedimentary components and the implication for strontium isotope analysis of carbonate rocks [J]. *Chemical Geology*, 164 : 331~343.
- Sichuan Geological & Mineral Bureau. 1991. Regional Geology of Sichuan Province (Geological Map of Sichuan Province, 1:1 000 000) [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Veizer J. 1983. Chemical diagenesis of carbonate rocks: Theory and application of trace element technique [A]. Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, *et al.* *Stable Isotopes in Sedimentary Geology (Short Course Notes 10)* [C]. Tulsa : Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 3-1~3-100.
- 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 [J]. *Chemical Geology*, 161 : 59~88.

附中文参考文献

- 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 [J]. *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 [J]. *矿物岩石*, 12(4) : 74~79.
- 黄思静, Qing Hairuo, 胡作维, 等. 2007. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩成岩作用和白云岩成因的研究现状和存在问题 [J]. *地球科学进展*, 22(5) : 495~503.
- 黄思静, 卿海若, 裴昌蓉, 等. 2006. 川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量、锶同位素组成与白云石化流体 [J]. *岩石学报*, 22(8) : 2123~2132.
- 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 2001. 锶同位素地层学研究进展 [J]. *地球科学进展*, 16(2) : 194~200.
- 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 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 30(1) : 9~18.
- 李心清, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 2000. 微量元素分布揭示腕足化石壳体原始信息保存现状 [J]. *地球化学*, 29(6) : 584~591.
- 李心清, 万国江, 黄荣贵. 1999. 腕足化石壳体结构不同蕴含的氧、碳同位素信息有别 [J]. *科学通报*, 44(15) : 262~268.
- 刘宝瑛. 1980. *沉积岩石学* [M]. 北京 : 地质出版社, 219~221.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志(1:1 000 000 四川省地质图) [M]. 北京 : 地质出版社.
- 四川省地质矿产局川东南地质大队. 1995. 中华人民共和国地质图(邻水县幅, 1:5万) [R]. 成都 : 四川省地质矿产局.
- 四川省区域地层表编写组. 1978. 西南地区区域地层表——四川省分册 [M]. 北京 : 地质出版社, 31~38.