

四川东部华蓥山三叠系 海相碳酸盐岩对海水信息的保存性评估

胡作维 黄思静 黄可可 孙 伟 龚业超

(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:海相碳酸盐成岩蚀变及其对海水信息保存程度的认识与评估在古海洋学和沉积地质学等学科领域研究中有着重要意义,尤其对于沉积地球化学和化学地层学等方面的研究是必不可少的基础工作。笔者通过对四川东部华蓥山仰天窝剖面三叠系海相碳酸盐岩样品的微观组构观察、阴极发光和微量元素等分析表明,大多数的样品保留了较好的原始沉积组构,具有极弱和弱的阴极发光强度、较低的 Mn 含量和较高的 Sr 含量,同时也具有较小的 Mn/Sr 值。只有 6 个样品被认为遭受了较大的成岩蚀变而对海水信息的保存程度较差,需要被剔除,而大多数的样品只遭受了较小的成岩蚀变作用,较好地保留了当时海水的信息,仍然在很大程度上代表了当时的海水。

关键词:成岩蚀变;碳酸盐;海相地层;三叠系;四川东部

中图分类号:P588.2;P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)05-1374-09

1 引言

有关海相碳酸盐成岩蚀变及其对海水信息保存程度的认识与评估,一直是一个不为人们所重视的领域,从而限制了地质历史中(尤其是古老地质历史中)海相碳酸盐作为有关古海洋信息有效载体的深入研究。由于海相碳酸盐对成岩作用的强烈敏感性,可以认为不少地质历史中沉积形成的海相碳酸盐在其经历的漫长成岩历史中已经发生了成岩蚀变,因此在很大程度上不能代表(甚至已完全不能代表)原始沉积时的海相碳酸盐,其原来所记录的古海洋信息已经发生了不同程度的丢失^[1-3],故古代海相碳酸盐的成岩蚀变及其对海水信息保存程度的认识与评估在古海洋学和沉积地质学等学科领域研究中有着重要意义,尤其对于沉积地球化学和化学地层学等方面的研究是必不可少的基础工作。

四川东部位于上扬子台地的中部,其海相三叠

纪地层厚度大、分布广,可为三叠纪的研究提供优越的野外条件。然而,前人积累的大量成果主要集中在岩石地层和生物地层等研究,很少涉及到沉积地球化学和化学地层学等方面的内容。事实上,正是由于对三叠系海相碳酸盐成岩蚀变及其对海水信息保存程度的认识与评估等基础工作的缺乏,在很大程度上制约了上述研究内容的开展,因而四川东部华蓥山地区三叠系海相碳酸盐是否遭受了成岩蚀变(或者说遭受何种程度的成岩蚀变),是否很好地保留了当时海水的信息(或者说在何种程度上保留了当时海水的信息),也就是说,它们是否可以代表当时的海水(或者说在何种程度上代表当时的海水)?这些问题都是人们所关心的,也是人们进一步开展沉积地球化学和化学地层学等研究不得不面对的基础问题。同时这些工作的开展,将加深人们对四川东部华蓥山地区三叠系海相地层的认识,可望为中国南方三叠纪古海洋学和沉积地质学等研究提供有价值的

收稿日期:2009-09-08;改回日期:2009-11-24

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

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

基础资料。

2 样品采集

样品采自于四川广安华蓥市天池镇附近的仰天窝剖面(起点位置:106°53'18.5"E、30°25'43.9"N),位于四川盆地东部华蓥山背斜中段西翼(图 1)。该剖面的海相三叠纪地层主要以海相碳酸盐岩为主,地表岩层出露较好(图 1)。样品是按照地层自老而新采集的,包括了下三叠统飞仙关组、嘉陵江组和中三叠统雷口坡组(分别对应于三叠系的印度阶、奥伦尼克阶和安尼阶^[4]),共 62 个样品。其岩石类型包括灰岩和白云岩,少数样品为钙质泥岩。

3 评估方法

对于古老的海相沉积地层中的海相碳酸盐来说,海相碳酸盐的成岩蚀变性及其对海水信息的代

表性具有相对性,如三叠系海相碳酸盐从沉积到现在已经经历了超过 200 Ma 的时间,没有蚀变几乎是不可能的。同时不同海相碳酸盐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,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^[5-8]。在海相碳酸盐的成岩蚀变性评估中,一般常用的方法包括以下几种:1)扫描电子显微镜(SEM),2)X 射线衍射分析(XRD),3)氨基酸分析,4)偏光显微镜分析(薄片分析),5)阴极发光分析(CL),6)稳定同位素分析,7)化学分析(尤其是 Mn 和 Sr 等微量元素分析)等^[7-13]。然而前人众多研究实践表明,对于古老的海相沉积地层中的海相碳酸盐来说,以上的一些方法都不同程度地存在局限性,只有阴极发光分析和化学分析(尤其是 Mn 和 Sr 等微量元素分析)在实际应用中成为判断古代海相碳

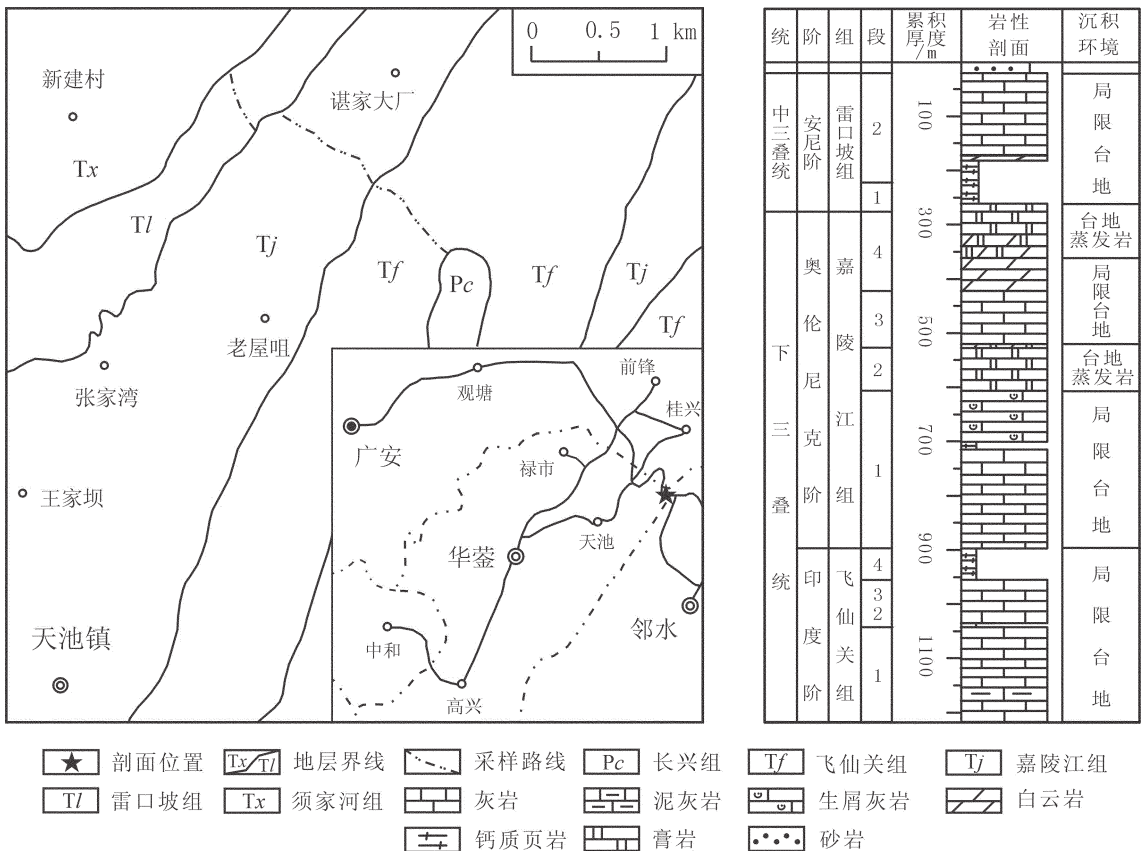


图 1 样品采集剖面的地理位置、地质略图及地层柱状图
Fig.1 Sketch geographic and geological map and stratigraphic column of the sampling area

①四川省地质矿产局川东南地质大队, 中华人民共和国地质图(邻水县幅,1:5 万)。成都: 四川省地质矿产局, 1995。

酸盐成岩蚀变性较为有效的方法和常用手段^[9,11],因而笔者也采用了这几种方法和手段对四川东部华蓥山三叠系海相碳酸盐进行成岩蚀变性评估:

(1) 阴极发光分析。海相碳酸盐矿物的阴极发光强度主要受到 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 含量的控制,前者作为阴极发光的激活剂,后者则作为阴极发光的猝灭剂。 Mn^{2+} 含量在 $20 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 即可激发阴极发光,而 Fe^{2+} 含量在 10000×10^{-6} 即可完全猝灭阴极发光^[14-15],当 Mn^{2+} 含量大于 20×10^{-6} 和 Fe^{2+} 含量小于 10000×10^{-6} 时,海相碳酸盐矿物具有不同程度的阴极发光^[14,16]。大气水参与的成岩过程将造成海相碳酸盐中 Mn^{2+} 含量的增加,而近地表风化过程的溶解与沉淀作用则造成了 Fe^{2+} 含量的增加^[17],这也是利用阴极发光性评估海相碳酸盐矿物成岩蚀变性的理论基础。当样品中的 Fe^{2+} 含量小于 $5000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ 时不具有阴极发光,那么可以认为这些样品所经历的成岩蚀变较小,而当样品具有中等及其以上阴极发光强度时,那么可以认为这些样品所经历的成岩蚀变较大,应该就这些样品对海水的代表性提出怀疑。

(2) 微量元素含量(尤其是 Mn 和 Sr 含量)。由于海水是 Sr 最为重要的来源,海相碳酸盐的成岩蚀变过程是一个 Mn 的获取过程和 Sr 的丢失过程,因而 Sr 的含量越高, Mn 的含量越低,那么可以认为样品越能代表海水^[15,19]。为此, Derry 等^[18]曾建议了锶同位素地层学研究中样品的 Sr 含量下限值为 200×10^{-6} ,其后 Korte 等^[19]建议了锶同位素地层学研究中好样品的 Sr 含量下限值为 400×10^{-6} ,同时还建议了锶同位素地层学研究中好样品的 Mn 含量上限值为 250×10^{-6} 。

(3) 微量元素比值(主要是 Mn/Sr 值)。由于海水比淡水具有更低的 Mn 含量、更高的 Sr 含量,同时由于晶体化学特性和元素化学动力学效应^[5],因而蚀变程度低的海相碳酸盐往往具有更低的 Mn 含量、更高的 Sr 含量,那么相应就会有较小的 Mn/Sr 值。基于此, Kaufman 等^[20-21]在研究新元古代锶同位素组成时的建议: Mn/Sr 值的上限为 2~3。

4 实验分析

为了解四川东部华蓥山三叠系海相碳酸盐样品对海水信息的代表性,根据上述讨论的有关判断地质历史中海相碳酸盐成岩蚀变性及其对海水代表性的方法和手段,笔者在野外采集了新鲜样品(包括微晶灰岩和粉晶白云岩,少数样品为钙质泥岩),并在

此基础上进行了显微结构、阴极发光和微量元素等分析。

显微结构和阴极发光强度观察是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,其中阴极发光仪器型号为 CL8200MK,工作束电压为 10 kV,束电流约为 $500 \mu A$ 。由于碳酸盐矿物的阴极发光颜色都基本类似,其典型颜色为桔红色—桔黄色,当阴极发光强度较低时,发光颜色向暗红色过渡;而当阴极发光强度较高时,发光颜色向亮黄色过渡,因而在阴极发光实验中描述阴极发光性时,一般只描述阴极发光强度,而很少描述其颜色。根据 Ebers 等^[22]提出的描述方案,将碳酸盐矿物的阴极发光强度划分为 7 级,从弱到强依次是:极弱、弱、弱—中、中、中—强、强和极强(将 Ebers 等^[22]划分的 8 级简化为 7 级,将发光强度中等的两级合并为 1 级——中等(中)^[8])。微量元素分析由四川省地质矿产局华阳地矿检测中心完成, Mn 和 Sr 含量是利用原子吸收光度法测定,检测限分别为 5×10^{-6} 和 42×10^{-6} ,误差分别为 13% 和 14%。

5 结果与讨论

5.1 阴极发光性

在对岩石样品薄片进行了大量微观结构仔细观察的基础上,笔者进行了阴极发光实验分析,共包括了 32 个样品。在相同的仪器类型和测试条件下,大多数样品都是具有极弱和弱的阴极发光强度,只有不到 20% 的样品(6 个样品)具有中等或以上的阴极发光强度(表 1),因而可以认为华蓥山三叠系海相碳酸盐只遭受了较小的成岩蚀变,对海水的信息还是具有较好的保存性。但值得注意的是,虽然个别样品的整体阴极发光强度较低,但是由于重结晶作用和次生方解石脉等后期改造产物的出现,造成了样品的局部地方会出现较强的阴极发光。在 32 个样品中,具有极弱和弱的阴极发光强度的样品占 68.75% (22 个)、具有弱—中的阴极发光强度的样品占 12.5% (4 个)、具有中等的阴极发光强度的样品占 6.25% (2 个)、具有中—强和强的阴极发光强度的样品占 12.5% (4 个)(表 2,图 2-a)。

事实上,阴极发光强度与样品的 Mn 含量和 Mn/Fe 值有着直接的关系^[5,14-16],但由于 Fe 的来源较为复杂,不见得都是来自于海相碳酸盐成岩蚀变过程中 Fe 的进入,因而笔者一般只考虑 Mn 的含量;

表 1 样品阴极发光强度、Mn 和 Sr 含量及其比值和综合评估
Table 1 Cathodoluminescence intensity, Mn and Sr concentrations, Mn/Sr ratios
for the samples and their integrated evaluation

序号	层位 ^①	样号	累积厚度(m) ^②	岩石类型	阴极发光强度	Sr/10 ⁶	Mn/10 ⁶	Mn/Sr 值	剔除 ^③
1	雷 2	HY106	1195.88	微晶灰岩	—	128	143	1.12	
2	雷 2	HY105	1185.88	微晶灰岩	弱	280	93	0.33	
3	雷 2	HY103	1178.88	微晶灰岩	—	540	147	0.27	
4	雷 2	HY102	1158.88	微晶灰岩	弱-中	—	—	—	
5	雷 2	HY101	1148.88	微晶灰岩	—	210	128	0.61	
6	雷 2	HY100	1118.88	颗粒微晶灰岩	弱	65	97	1.49	
7	雷 2	HY99	1098.88	泥质微晶灰岩	—	255	85	0.33	
8	雷 2	HY97	1063.88	泥质微晶灰岩	弱	40	70	1.75	Y
9	雷 2	HY96	1043.88	微晶灰岩	—	145	54	0.37	
10	雷 1	HY94	993.88	微晶灰岩	—	135	186	1.38	
11	雷 1	HY93	983.88	泥质粉晶白云岩	—	75	151	2.01	
12	雷 1	HY92	981.88	细晶白云岩	弱-中	—	—	—	
13	雷 1	HY91	966.88	粉晶白云岩	—	95	306	3.22	Y
14	嘉 4	HY89	942.88	粉晶白云岩	弱	—	—	—	
15	嘉 4	HY88	939.88	微晶灰岩	弱-中	220	101	0.46	
16	嘉 4	HY86	892.88	颗粒灰岩	极弱	1015	4	0.004	
17	嘉 4	HY84	877.88	粉晶白云岩	—	100	58	0.58	
18	嘉 4	HY80	846.88	粉晶白云岩	弱	90	50	0.56	
19	嘉 4	HY77	826.98	粉晶白云岩	弱	35	58	1.66	
20	嘉 3	HY75	791.98	微晶灰岩	—	770	39	0.05	
21	嘉 3	HY73	761.98	含颗粒微晶灰岩	极弱	235	31	0.13	
22	嘉 3	HY71	743.98	微晶灰岩	—	585	70	0.12	
23	嘉 3	HY69	721.98	微晶灰岩	—	1310	31	0.02	
24	嘉 3	HY67	705.98	微晶灰岩	弱	210	46	0.22	
25	嘉 2	HY64	688.98	粉晶白云岩	极弱	120	89	0.74	Y
26	嘉 2	HY61	648.98	微晶灰岩	—	430	174	0.40	
27	嘉 1	HY60	608.98	微晶灰岩	—	900	143	0.16	
28	嘉 1	HY58	596.48	微晶灰岩	—	1190	39	0.03	
29	嘉 1	HY56	576.48	含泥微晶灰岩	极弱	910	35	0.04	
30	嘉 1	HY54	557.48	微晶灰岩	—	525	77	0.15	
31	嘉 1	HY52	533.48	微晶灰岩	—	665	97	0.15	
32	嘉 1	HY50	515.48	含泥微晶灰岩	中	270	325	1.20	
33	嘉 1	HY48	501.38	微晶灰岩	—	620	259	0.42	
34	嘉 1	HY46	481.88	颗粒灰岩	极弱	—	—	—	
35	嘉 1	HY45	468.38	含泥微晶灰岩	弱	735	85	0.12	
36	嘉 1	HY43	448.68	微晶灰岩	—	750	182	0.24	
37	嘉 1	HY41	427.68	颗粒微晶灰岩	极弱	745	8	0.01	
38	嘉 1	HY40	415.68	微晶灰岩	极弱	—	—	—	
39	嘉 1	HY39	403.68	微晶灰岩	—	560	23	0.04	
40	嘉 1	HY37	379.68	微晶灰岩	—	1310	50	0.04	
41	嘉 1	HY35	363.18	微晶灰岩	极弱	530	8	0.02	
42	嘉 1	HY33	340.18	微晶灰岩	极弱	—	—	—	
43	嘉 1	HY31	323.62	微晶灰岩	弱	655	108	0.16	
44	飞 4	HY30	288.18	钙质泥岩	强	310	848	2.74	Y
45	飞 4	HY29	272.18	钙质泥岩	—	250	968	3.87	Y
46	飞 2+3	HY27	257.68	含颗粒微晶灰岩	中	1050	329	0.31	
47	飞 2+3	HY25	233.18	微晶灰岩	—	705	387	0.55	
48	飞 2+3	HY23	208.18	微晶灰岩	极弱	875	112	0.13	
49	飞 2+3	HY22	191.18	微晶灰岩	弱	815	236	0.29	
50	飞 1	HY20	169.48	微晶灰岩	—	765	259	0.34	
51	飞 1	HY18	149.78	微晶灰岩	弱	985	101	0.10	
52	飞 1	HY16	124.38	微晶灰岩	—	625	97	0.16	
53	飞 1	HY15	105.48	微晶灰岩	弱-中	1015	325	0.32	
54	飞 1	HY14	104.38	颗粒灰岩	弱	—	—	—	
55	飞 1	HY11	82.38	微晶灰岩	—	2415	182	0.08	
56	飞 1	HY9	62.38	含泥微晶灰岩	中-强	1396	418	0.30	
57	飞 1	HY7	31.88	微晶灰岩	—	1360	523	0.38	
58	飞 1	HY6	15.88	微晶灰岩	—	1120	999	0.89	
59	飞 1	HY5	11.88	微晶灰岩	中-强	1035	635	0.61	
60	飞 1	HY4	6.68	微晶灰岩	—	900	794	0.88	
61	飞 1	HY3	4.18	微晶灰岩	—	920	108	0.12	
62	飞 1	HY2	1.38	微晶灰岩	强	470	1367	2.91	Y

注:①层位单位为段,飞:飞仙关组,嘉:嘉陵江组,雷:雷口坡组;②从剖面起点(以二叠/三叠系界线附近最后一层事件粘土层作为三叠系的开始)逐样累积计算;③综合考虑作剔除处理(用“Y”标记)。

表 2 样品阴极发光强度、Mn 和 Sr 含量及其比值统计
Table 2 Statistics of the cathodoluminescence intensity, Mn and Sr concentrations, Mn/Sr ratios for the samples

阴极发光相对强度	极弱	弱	弱-中	中	中-强	强	总数
数量(个)	10	12	4	2	2	2	32
频率(%)	31.25	37.5	12.5	6.25	6.25	6.25	100
Mn 含量(10^{-6})	<50	50~100	100~200	200~300	300~600	>600	总数
数量(个)	12	13	14	3	7	6	55
频率(%)	21.82	23.64	25.45	5.45	12.73	10.91	100
Sr 含量(10^{-6})	<100	100~200	200~300	300~600	600~1000	>1000	总数
数量(个)	7	4	8	8	17	11	55
频率(%)	12.73	7.27	14.55	14.55	30.91	20.00	100
Mn/Sr 值	<0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0	总数
数量(个)	11	15	10	8	6	5	55
频率(%)	20.00	27.27	18.18	14.55	10.91	9.09	100

从实验分析结果来看,样品阴极发光强度与样品中 Mn 的含量有很好的相关性(表 2,图 2-b),同时阴极发光强的样品具有较大的 Mn/Sr 值(表 2,图 2-c)。当然 Fe 的影响也是不能排除的,对于个别样品的较弱阴极发光,可能是由 Fe 的影响造成的,也就是说,一些具有较弱阴极发光的样品并非没有遭受较大的成岩蚀变,可能是这些样品中同时具有较高的 Fe 含量,从而对样品阴极发光强度产生猝灭作用^[5,14-16],因而阴极发光分析并不能作为单一或唯一判断样品成岩蚀变性的标准。同时由于缺少 Fe 含量的分析,因而也无法估计这方面的影响,但由于更为古老的下古生界寒武系海相碳酸盐中 Fe 的含量都基本不超过 5000×10^{-6} ^[8],那么可以认为,四川华蓥山三叠系海相碳酸盐中也不会具有很高的 Fe 含量,这方面的影响不是主要的。

5.2 Mn、Sr 含量

由于海相碳酸盐的成岩蚀变过程是一个 Mn 的获取过程和 Sr 的丢失过程^[1,5,10],那么就可以利用 Mn 和 Sr 在样品中的含量来判断样品的成岩蚀变程度及其对海水信息的保存性。在进行样品阴极发光分析的基础上,笔者选择了 55 个样品进行了微量元素分析(包括 Mn 和 Sr 含量,表 1),实验分析结果表明:

(1)多数样品都具有较低的 Mn 含量,所有样品的 Mn 平均含量为 224×10^{-6} (55 个样品),其中 $<50 \times 10^{-6}$ 的样品占 21.82%(12 个), $50 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 的样品占 23.64%(13 个), $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 的样品占 25.45%(14 个), $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 的样品占 5.45%(3 个), $>300 \times 10^{-6}$ 的样品占 23.64%(13 个)(表 2、图 2-d),也就是说,约四分之三样品中 Mn 含量小于 250×10^{-6} ;因而大多数样品属于 Korte 等^[9]建议的

锶同位素地层学研究中的好样品,说明它们只遭受了较小的成岩蚀变,其地球化学信息在很大程度上可以代表同期海水。

(2)大部分样品都是具有较高的 Sr 含量,所有样品的 Sr 平均含量为 627×10^{-6} (55 个样品),其中 $>1000 \times 10^{-6}$ 的样品占 20%(11 个), $600 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 的样品占 30.91%(17 个), $300 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ 的样品占 14.55%(8 个), $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 的样品占 14.55%(8 个), $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 的样品占 7.27%(4 个), $<100 \times 10^{-6}$ 的样品占 12.73%(7 个)(表 2、图 2-e),这也说明五分之四的样品中 Sr 含量大于 200×10^{-6} ;因而大多数样品达到 Derry 等^[18]建议的锶同位素地层学研究样品的 Sr 含量标准,进一步说明它们只遭受了较小的成岩蚀变,其地球化学信息在很大程度上可以代表同期海水。

5.3 Mn/Sr 值

由于在单独利用锰或锶元素在样品中的含量来判断样品的成岩蚀变程度及其对海水信息保存性的时候,还存在一定的局限性,那么是否可以提出一个参数能将二者兼顾起来?为此,Kaufman 等^[20-21]在研究新元古代锶同位素组成时提出利用参数——Mn/Sr 值来判断样品的成岩蚀变程度及其对海水信息的保存性。在利用 55 个样品的微量元素实验分析结果的基础上进行有关计算(表 1),获得了以下结果:

大多数样品都是具有较小的 Mn/Sr 值,所有样品的 Mn/Sr 平均值仅为 0.65(55 个样品),其中 <0.1 的样品占 20%(11 个), $0.1 \sim 0.3$ 的样品占 27.27%(15 个), $0.3 \sim 0.5$ 的样品占 18.18%(10 个), $0.5 \sim 1.0$ 的样品占 14.55%(8 个), $1.0 \sim 2.0$ 的样品占 10.91%(6 个), >2.0 的样品占 9.09%(5 个)(表 2、图 2-f),也即绝大

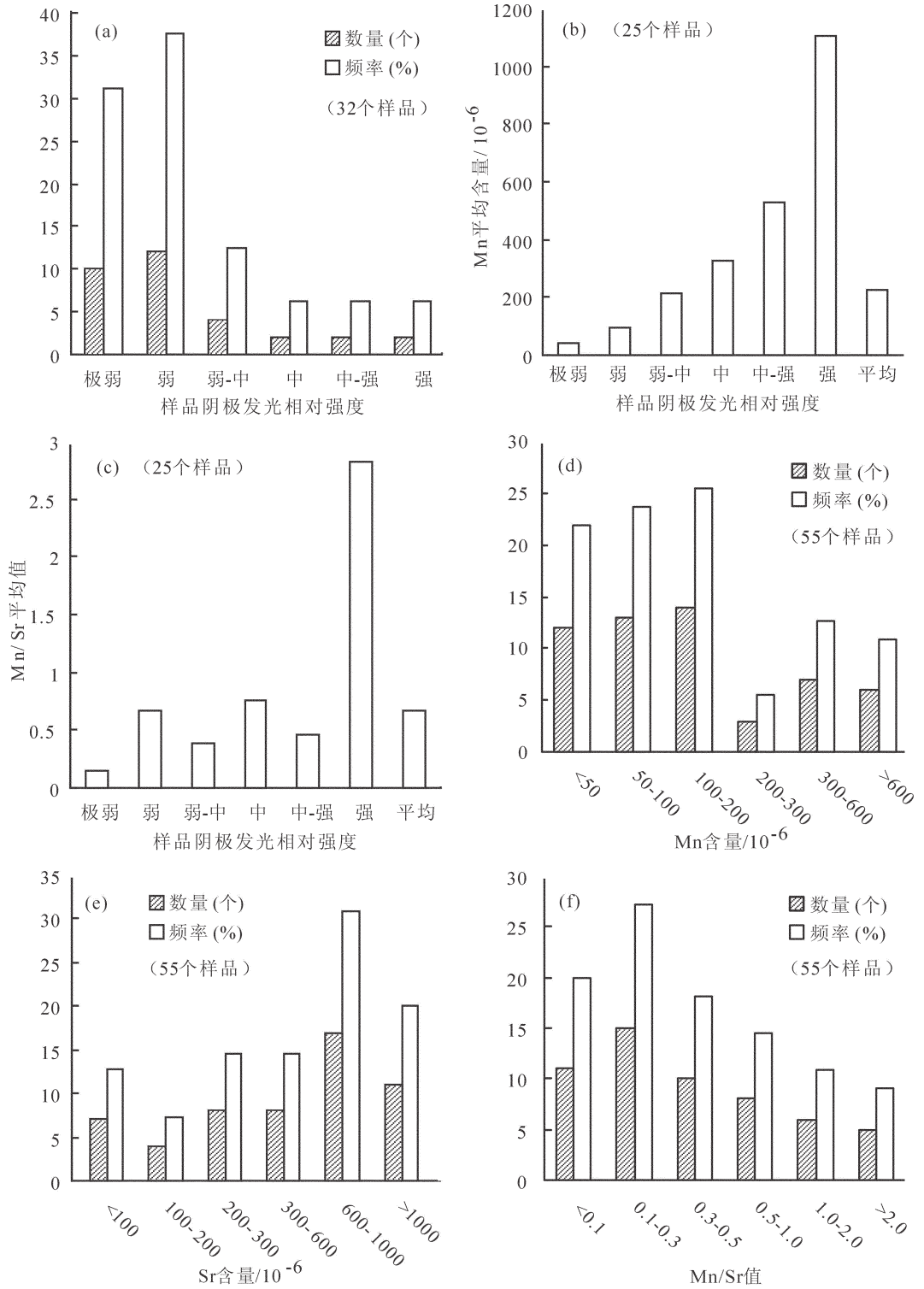


图 2 样品阴极发光强度及与 Mn、Mn/Sr 值的关系图(a、b、c), 样品 Mn、Sr 含量及其比值统计图(d、e、f)
 Fig.2 Histograms of cathodoluminescence intensity (a), relationship between cathodoluminescence intensity and Mn concentrations (b) and Mn/Sr ratios (c); histograms of Mn and Sr concentrations (d, e) and Mn/Sr ratios (f) for the samples

多数的样品均小于 2, 绝大多数样品达到了 Kaufman 等^[20-21]建议的样品标准, 也进一步说明它们只遭受了较小的成岩蚀变, 其地球化学信息在很大程度上可以代表同期海水。

5.4 讨论

在结合以上岩石样品微观结构、阴极发光强度、Mn 和 Sr 微量元素及其比值等分析的基础上, 同时参考了前人的有关评估实例^[2,6-8,12,18-21], 笔者对这 62 个样品的成岩蚀变性及其对海水信息的保存程度进行较为综合的评估:

首先是根据样品的阴极发光性判断其成岩蚀变性及其对海水信息的保存程度, 那么具有较强阴极发光强度的钙质泥岩 HY29、HY30 和微晶灰岩 HY2 需要剔除(表 1~2、图 2); 但由于阴极发光分析并不能作为单一或唯一判断样品成岩蚀变性的标准, 因而笔者暂时将这 3 个样品列入剔除的候选名单, 也就是说, 这些被怀疑遭受了较大的成岩蚀变及其对海水信息保存程度较差的样品, 可能会被剔除。然后在此基础上, 笔者再根据 Mn 和 Sr 在样品中的含量判断其成岩蚀变性及其对海水信息的保存程度, 尽管在这 55 个样品中有 13 个样品(包括了已经被列入到剔除候选名单的 HY2、HY29 和 HY30)的 Mn 含量大于 300×10^{-6} (表 1~2、图 2), 但根据其中 10 个未被列入到剔除候选名单的样品还是具有较高的 Sr 含量的事实, 并参考了样品的 Mn/Sr 值, 笔者只将其中的粉晶白云岩 HY91 也列入到剔除候选名单(表 1); 同时笔者再利用了样品中的 Sr 含量来判断其成岩蚀变性及其对海水信息的保存程度, 尽管在这 55 个样品中有 11 个样品(包括了已经被列入到剔除候选名单的 HY91)的 Sr 含量小于 200×10^{-6} (表 1~2、图 2), 但根据其中 10 个未被列入到剔除候选名单的样品还是具有较低的 Mn 含量和较弱的阴极发光强度的事实, 并参考样品的 Mn/Sr 值(表 1~2、图 2), 笔者也只将其中的粉晶白云岩 HY64 和微晶灰岩 HY97 列入到剔除候选名单(表 1)。

因此通过以上多方面资料的综合分析, 笔者最后认为以下样品遭受了较大的成岩蚀变及其对海水信息的保存程度较差, 需要被剔除: 钙质泥岩 HY29、HY30, 微晶灰岩 HY2、HY97, 粉晶白云岩 HY64、HY91(共 6 个样品, 表 1), 不到样品总数的十分之一。

6 结 论

(1) 样品保留了较好的原始沉积结构, 大多数样品均具有极弱和弱的阴极发光强度, 只有不到 20% 的样品具有中等或以上的阴极发光强度。

(2) 多数样品均具有较低的 Mn 含量, 所有样品的 Mn 平均含量仅为 224×10^{-6} , 而大部分样品具有较高的 Sr 含量, 所有样品的 Sr 平均含量高达 627×10^{-6} , 同时大多数样品也具有较小的 Mn/Sr 值, 所有样品的 Mn/Sr 平均值仅为 0.65。

(3) 在综合样品微观结构、阴极发光强度、Mn 和 Sr 元素含量及比值的基础上, 只有 6 个样品被认为遭受了较大的成岩蚀变而对海水信息的保存程度较差, 需要被剔除。

(4) 大多数的样品只遭受了较小的成岩蚀变作用, 较好地保留了当时海水的信息, 仍然在很大程度上代表了当时海水。

致谢: 姜琳、钟鸣参加了野外采样工作, 在此深表谢意。

参考文献(References):

- [1] Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system I: Trace elements [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1980, 50: 1219-1236.
- [2] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161: 59-88.
- [3] 李心清, 万国江. 碳酸盐岩氧碳同位素地球化学研究目前面临的几个问题 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 262-268.
Lee Xinqing, Wan Guojiang. Problems in studies on carbon and oxygen stable isotopes in carbonates [J]. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(3): 262-268 (in Chinese with English abstract).
- [4] 中国地层典编委会. 中国地层典——三叠系 [M]. 北京: 地质出版社, 2000: 11-13.
Editorial Board of the Stratigraphic Lexicon of China. *Stratigraphic Lexicon of China——Triassic* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 11-13 (in Chinese).
- [5] 黄思静. 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*, 1990, 10(4): 9-15.
Huang Sijing. Cathodoluminescence and diagenetic alteration of marine carbonate minerals [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1990, 10 (4): 9-15 (in Chinese with English abstract).
- [6] Reinhardt E G, Cavazza W, Patterson R T, et al. Differential diagenesis of sedimentary components and the implication for

- strontium isotope analysis of carbonate rocks [J]. *Chemical Geology*, 2000, 164:331–343.
- [7] 李心清, 万国江, 黄荣贵. 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*, 1999, 44(15):262–268.
Lee Xinqing, Wan Guojiang, Huang Ronggui. Different fossil brachiopod skeletal microstructure tells of different information on carbon and oxygen isotope contents [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(22):2087–2094.
- [8] 黄思静, 石和, 毛晓冬, 等. 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)*, 2003, 30(1):9–18.
Huang Sijing, Shi He, Mao Xiaodong, et al. Diagenetic alteration of earlier Palaeozoic marine carbonate and preservation for the information of seawater [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003, 30(1):9–18 (in Chinese with English abstract).
- [9] McArthur J M. Recent trends in strontium isotope stratigraphy [J]. *Terra Nova*, 1994, 6:331–358.
- [10] Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A. Textural, elemental and isotopic variations among constituents in Middle Devonian limestones, North America [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1986, 56:715–727.
- [11] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 锶同位素地层学研究进展[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2):194–200.
Huang Sijing, Shi He, Liu Jie, et al. Progress in strontium isotope stratigraphy [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16 (2):194–200 (in Chinese with English abstract).
- [12] 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 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 [J]. *沉积学报*, 2006, 24(1):68–74.
Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuowei, et al. Geochemistry in different shell layers of rudist bivalve from Late Cretaceous in the south of Tibet and preservation for the information of sea water [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(1):68–74 (in Chinese with English abstract).
- [13] 石和, 黄思静, 赵鹏肖. 贵州惠水石炭纪锶同位素曲线及年代地层对比[J]. *中国地质*, 2003, 30(2):138–143.
Shihe, Huang Sijing, Zhao Pengxiao. Strontium isotopic curve of the Carboniferous in Huishui, Guizhou, and chronostratigraphic correlation [J]. *Geology in China*, 2003, 30(2):138–143 (in Chinese with English abstract).
- [14] 黄思静. 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*, 1992, 12(4):74–79.
Huang Sijing. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1992, 12 (4):74–79 (in Chinese with English abstract).
- [15] Pierson B J. The control of cathodoluminescence in dolomite by iron and manganese [J]. *Sedimentology*, 1981, 28:601–610.
- [16] Hemming N G, Meyers W J, Grams J C. Cathodoluminescence in diagenetic calcites; the role of Fe and Mn as deduced from electron probe and spectrophotometric measurements [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59:404–411.
- [17] Kaufman A J, Hayes J M, Knoll A H, et al. Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from Upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism [J]. *Precambrian Research*, 1991, 49:301–327.
- [18] Derry L A, Keto L, Jacobsen S, et al. Sr isotopic variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:2331–2339.
- [19] Korte C, Kozur H W, Bruckschen P, et al. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67:47–62.
- [20] Kaufman A J, Knoll A H, Awramik S M. Biostratigraphic and chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic sedimentary successions: Upper Tindir Group, northwestern Canada, as a test case [J]. *Geology*, 1992, 20:181–185.
- [21] Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr- and C-isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120:409–430.
- [22] Ebers M L, Kopp O C. Cathodoluminescent microstratigraphy in Gange dolomite, the Mascot-Jefferson City District, Tennessee [J]. *Economic Geology*, 1979, 74:908–918.

Preservative evaluation of coeval seawater information for the Triassic marine carbonate rocks in the Huaying Mountain, eastern Sichuan

HU Zuo-wei, HUANG Si-jing, HUANG Ke-ke, SUN Wei, GONG Ye-chao

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

Abstract: Diagenetic alteration and preservative evaluation of the coeval seawater information for the marine carbonate are of great significance in paleo-oceanography and sedimentology, and can especially serve as the basic work in sedimentary geochemistry and chemostratigraphy. In this paper, rock fabric observation and cathodoluminescence and trace element analysis show that most of marine carbonate rock samples from the Yangtianwo section of the Huaying Mountain in eastern Sichuan preserve original textures, show dull cathodoluminescence, and have low Mn concentrations, high Sr concentrations, and low Mn/Sr ratios, with the exception of only six samples, which are considered to have suffered from stronger diagenetic alteration, and hence could not represent the coeval seawater. Therefore, most of marine carbonate rock samples have only suffered limited diagenetic alteration, and hence contain relatively abundant original information and can represent the coeval seawater.

Key words: diagenetic alteration; carbonate; marine strata; Triassic; eastern Sichuan

About the first author: HU Zuo-wei, male, born in 1981, doctor and lecturer, engages in the study of sedimentary geology; E-mail: huzuowei@yahoo.com.cn.