

文章编号:1009-3850(2013)02-0052-07

羌塘盆地半岛湖地区上侏罗—下白垩统 生物礁相碳酸盐岩对海水信息的保存性评估

孙 伟, 陈 明, 何江林, 曹峻锋

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要:有关海相碳酸盐成岩蚀变性及其对海水信息保存性的研究是一个未曾被人们重视的领域,从而限制了古海洋学及其相关学科的研究水平。近年来,这一研究领域逐渐得到学者们的重视。本文对羌塘盆地半岛湖地区上侏罗—下白垩统生物礁相碳酸盐岩样品的微观组构观察、阴极发光分析、化学分析和同位素分析等研究表明,大部分样品都具有较低的 Mn 含量和较高的 Sr 含量,所有样品均具有较低的 Mn/Sr 比值,样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围波动较小。不同类型岩性对海水信息的保存性按含生屑泥晶灰岩→泥晶粒屑灰岩→粒屑泥晶灰岩→礁灰岩围岩部分→礁灰岩生物骨架部分的顺序依次变差。

关键词:海水信息;成岩蚀变;礁相碳酸盐岩;上侏罗—下白垩统;羌塘盆地

中图分类号:P512.2

文献标识码:A

1 引言

近年来,有关海相碳酸盐成岩蚀变及其对海水信息保存性的研究已经得到越来越多的重视。通过现有的古代碳酸盐样品中的各种信息可以正确反演古海水的信息,其发展对古海洋学及其相关学科研究水平的提高至关重要。由于海相碳酸盐对成岩作用有强烈的敏感性,可以认为不少地质历史中沉积形成的海相碳酸盐已经发生了成岩蚀变,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],从而使我们无法准确反演碳酸盐沉积物在沉积时水体的特征。因此,古代海相碳酸盐的成岩蚀变及其对海水信息保存程度的评估在古海洋学和沉积地质学等学科领域均有着重要意义。我们在应用碳酸盐岩对沉积地球化学、化学地层学及古环境和古气候变化等方面的研究时,必须要通过有效的方法来鉴定碳酸盐岩是否受到了成岩蚀变并评估其对海水信息的保存性。

在对海相碳酸盐成岩蚀变性的检测及样品对

海水信息保存性的判别中,通常采用的方法有偏光显微镜分析、扫描电镜分析、元素分析、阴极发光分析、稳定同位素分析,以及 X 射线衍射分析和氨基酸分析等^[4]。然而前人的众多研究表明,对于沉积地层中的海相碳酸盐来说,以上的一些方法都存在不同程度的局限性,只有元素分析、阴极发光分析和稳定同位素分析在实际应用中可成为判断古代海相碳酸盐成岩蚀变性较为有效的方法^[5-6]。碳酸盐岩的 Mn 含量、Sr 含量和 Mn/Sr 比值常被用指示碳酸盐岩受到成岩作用改变的程度。Dreyer 等^[7]认为只有当样品中 Sr 含量大于 200×10^{-6} 时,其组成才能较好地代表海水的信息;Korte 等^[8]通过研究将满足 $\text{Mn} < 250 \times 10^{-6}$,且 $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ 条件的样品视为成岩蚀变较小,能较好代表海水组成的样品;Kaufman 等^[9-10]认为 $\text{Mn}/\text{Sr} < 2 \sim 3$ 时,碳酸盐岩没有或仅受到弱成岩作用的影响,其元素和同位素组成可以代表沉积时的原始地球化学特征。

本文中,我们主要以 Dreyer 等^[7]和 Korte 等^[8]建议的 $\text{Sr} > 200 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Mn} < 250 \times 10^{-6}$ 作为基本评估

收稿日期:2013-03-05;改回日期:2013-05-21

作者简介:孙伟(1986-),男,硕士,从事沉积地质学研究。E-mail:sunwei162@163.com

标准,同时结合 Kaufman 等^[9-11]建议的 $Mn/Sr < 2$ 和碳氧同位素特征,试图通过元素分析和碳、氧同位素分析来综合评估样品是否遭受成岩蚀变及其对海水的保存性,为研究区进一步开展沉积地球化学、古环境和古气候变化等方面的研究提供参考。

2 样品采集与测试

众所周知,碳酸盐岩原始常微量元素和碳、氧同位素组成受后期成岩作用的影响较大,因此,样品的采集是开展元素地球化学研究的前提条件。本次研究涉及 4 处生物礁相碳酸盐岩剖面,剖面位于北羌塘坳陷中部半岛湖地区(图 1),共采集新鲜岩石样品 54 块。在样品的采集过程中,尽量选择未

经成岩蚀变的、无后期方解石脉充填的样品。在室内的处理过程中,首先通过薄片观察和阴极发光检测,对样品进行二次精选,挑选出 45 件样品,然后利用小型牙钻机和玛瑙研钵将样品粉碎至 200 目,进行元素地球化学测试。

常量和微量元素分析在国土资源部西南矿产资源监督检测中心用 X 荧光光谱法测试,所用仪器为 PANalytical 生产的 AXIOS 荧光光谱仪,相对误差小于 0.5%。C、O 同位素测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,所用仪器为 MAT253 质谱仪,测量结果以 PDB 为标准,记为 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ (精度优于 0.1‰), $\delta^{18}O_{V-PDB}$ (精度优于 0.2‰)。

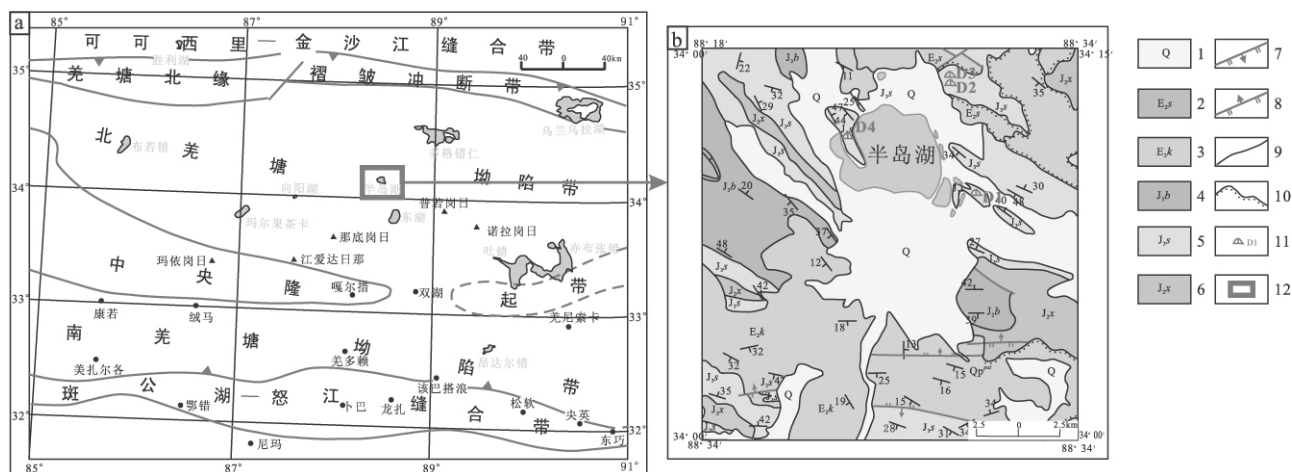


图 1 羌塘盆地构造单元划分及索瓦组生物礁位置(a)和羌塘盆地半岛湖地区地质简图(b)(引自文献^[1])

1. 第四系冲积物;2. 喷呐湖组;3. 康托组;4. 白龙冰河组;5. 索瓦组;6. 夏里组;7. 正断层;8. 逆断层;9. 地质界线;10. 不整合界线;11. 生物礁;12. 研究区

Fig. 1 Tectonic division, sampling site (a) and simplified geological map of the Bandao Lake region (b), Qiangtang Basin (after Sun Wei et al., 2013)

1 = Quaternary alluvial deposits; 2 = Suonahu Formation; 3 = Kangtuo Formation; 4 = Bailongbinghe Formation; 5 = Suowa Formation; 6 = Gyari Formation; 7 = normal fault; 8 = thrust fault; 9 = geological boundary; 10 = unconformity; 11 = organic reef; 12 = study area

3 分析结果

3.1 样品 Mn 和 Sr 含量及其比值

在薄片观察和阴极发光分析检测的基础上,笔者选择了 45 个样品进行元素分析和碳氧同位素分析(表 1),分析结果表明:

(1)大部分样品都具有较低的 Mn 含量。在所检测的 45 个样品中,80% 的样品 Mn 含量小于 250×10^{-6} ,最小值为 24×10^{-6} ,平均值为 163×10^{-6} ,近半数样品 Mn 含量集中在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$,9 个样品的 Mn 含量大于 250×10^{-6} 。因此,大多数样品达到了 Korte 等^[8]建议的进行碳酸盐岩同位素地层

学研究 Mn 含量标准,说明样品只遭受了较小的成岩蚀变,其地球化学信息在很大程度上能代表同期海水的组成。

(2)大多数样品都具有较高的 Sr 含量。在所检测的 45 个样品中,84% 的样品 Sr 含量大于 200×10^{-6} ,最大值为 394×10^{-6} ,平均值为 284×10^{-6} ,近半数样品 Sr 含量大于 300×10^{-6} ,只有 7 个样品的 Sr 含量小于 200×10^{-6} 。因此,大多数样品达到了 Derry 等^[9]建议的进行碳酸盐岩同位素地层研究的 Sr 含量标准,说明样品只遭受了较小的成岩蚀变,其地球化学信息在很大程度上能代表海水的组成。

表1 样品 Sr, Mn, Fe 元素含量、Mn/Sr 比值、碳氧同位素组成和综合评估

Table 1 Sr, Mn and Fe contents, Mn/Sr ratios, and carbon and oxygen isotopic compositions in the carbonate rock samples from the study area

序号	剖面	样号	岩石类型	Sr/ 10^{-6}	Mn/ 10^{-6}	Fe/ 10^{-6}	Mn/Sr	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	剔除 ^①
1	D1	D1-2-1w	含生屑泥晶灰岩	152	32	440	0.21	3.0	-4.9	
2	D1	D1-3-2s	礁灰岩生物骨架	191	42	260	0.22	2.4	-5.1	
3	D1	D1-3-2w	含生屑泥晶灰岩	155	34	440	0.22	2.9	-4.3	
4	D1	D1-4-1w	粒屑泥晶灰岩	161	30	180	0.19	3.1	-5.1	
5	D1	D1-5-1s	礁灰岩生物骨架	218	47	1200	0.22	3.0	-5.9	
6	D1	D1-7-1	泥晶粒屑灰岩	156	25	150	0.16	2.6	-4.1	
7	D1	D1-10-2	泥晶粒屑灰岩	163	30	130	0.18	2.5	-5.4	
8	D1	D1-11-1	泥晶粒屑灰岩	173	24	440	0.14	3.5	-4.6	
9	D2	D2-1s	礁灰岩生物骨架	302	280	1800	0.93	2.2	-7.4	Y
10	D2	D2-1wh	礁灰岩围岩部分	303	210	2300	0.69	3.2	-4.4	
11	D2	D2-1wl	礁灰岩围岩部分	289	160	1200	0.55	3.2	-4.3	
12	D2	D2-2s	礁灰岩生物骨架	288	220	1800	0.76	3.5	-4.4	
13	D2	D2-3s	礁灰岩生物骨架	294	260	1600	0.88	2.4	-7.9	Y
14	D2	D2-3wl	礁灰岩围岩部分	331	210	2000	0.63	3.2	-5.1	
15	D2	D2-4	泥晶粒屑灰岩	365	180	2800	0.49	3.5	-4.2	
16	D2	D2-5	泥晶粒屑灰岩	344	200	2300	0.58	3.3	-4.5	
17	D3	D3-1s	礁灰岩生物骨架	394	310	2400	0.79	1.2	-7.3	Y
18	D3	D3-1w	礁灰岩围岩部分	335	340	8000	1.01	1.1	-7.4	Y
19	D3	D3-2s	礁灰岩生物骨架	356	280	2300	0.79	1.3	-7.9	Y
20	D3	D3-2wh	礁灰岩围岩部分	291	200	2600	0.69	2.3	-5.2	
21	D3	D3-2wl	礁灰岩围岩部分	358	360	3400	1.01	1.0	-7.4	Y
22	D3	D3-3s	礁灰岩生物骨架	377	260	1700	0.69	0.9	-7.5	Y
23	D3	D3-3w	礁灰岩围岩部分	342	280	3800	0.82	1.8	-6.3	Y
24	D3	D3-4	泥晶粒屑灰岩	329	330	5200	1.00	3.3	-4.1	Y
25	D3	D3-6	泥晶粒屑灰岩	314	220	3000	0.70	3.3	-2.7	
26	D3	D3-9s	礁灰岩生物骨架	317	140	1100	0.44	3.0	-4.6	
27	D3	D3-9wh	礁灰岩围岩部分	295	240	3200	0.81	2.7	-6.4	
28	D3	D3-9wl	礁灰岩围岩部分	289	220	2800	0.76	2.8	-5.4	
29	D4	D4-1-1w	粒屑泥晶灰岩	352	140	560	0.40	2.5	-4.6	
30	D4	D4-1-2w	粒屑泥晶灰岩	346	130	720	0.38	2.6	-4.8	
31	D4	D4-2-1w	粒屑泥晶灰岩	322	120	580	0.37	2.8	-5.0	
32	D4	D4-2-2w	粒屑泥晶灰岩	318	120	670	0.38	2.7	-6.4	
33	D4	D4-3-1w	粒屑泥晶灰岩	304	120	600	0.39	1.9	-4.1	
34	D4	D4-3-3w	粒屑泥晶灰岩	288	93	720	0.32	2.6	-4.7	
35	D4	D4-4-1	泥晶粒屑灰岩	277	130	860	0.47	1.4	-7.2	
36	D4	D4-4-2	泥晶粒屑灰岩	253	120	730	0.47	1.6	-7.2	
37	D4	D4-5-1w	粒屑泥晶灰岩	332	140	850	0.42	2.2	-5.4	
38	D4	D4-5-2w	粒屑泥晶灰岩	241	110	590	0.46	2.2	-6.2	
39	D4	D4-6-1	粒屑泥晶灰岩	250	120	2000	0.48	1.1	-8.3	Y
40	D4	D4-6-2	粒屑泥晶灰岩	280	130	2300	0.46	1.9	-7.4	
41	D4	D4-6-3	粒屑泥晶灰岩	294	110	2000	0.37	2.6	-5.2	
42	D4	D4-7-1w	粒屑泥晶灰岩	241	150	1900	0.62	1.5	-6.7	
43	D4	D4-7-2w	粒屑泥晶灰岩	225	140	2000	0.62	1.5	-7.2	
44	D4	D4-7-3w	粒屑泥晶灰岩	238	160	1900	0.67	1.9	-6.3	
45	D4	D4-9-1w	泥晶粒屑灰岩	340	140	880	0.41	2.4	-4.8	

注:①通过综合评估作剔除处理的样品(用“Y”标记)

(3) 在所检测的 45 个样品中,全部样品的 Mn/Sr 比值均小于 2,最大比值为 1.01,平均比值仅为 0.54,且只有 3 个样品的 Mn/Sr 比值大于 1。因此,按照 Kaufman 等^[9-11]提出的利用 Mn/Sr 比值来判断样品成岩蚀变程度及其对海水信息保存性的参考标准,所有样品的地球化学信息在很大程度上能代表同期海水。

3.2 样品碳、氧同位素组成及其相关性

一般情况下,水-岩反应会使碳酸盐沉积物中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低,所以 $\delta^{18}\text{O}$ 值是判断碳酸盐沉积物在沉积期后是否发生水岩相互作用的重要标志。通常认为碳同位素组成对成岩作用具有一定的抵制能力,在氧同位素组成发生明显成岩改变的某些情况下,原始碳同位素组成仍可能较好地保留^[12-14]。显生宙以来,海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大多分布于 $-2\text{‰} \sim +6\text{‰}$ (PDB) 范围之间, $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $-8\text{‰} \sim 0\text{‰}$ (PDB)^[2,15],半岛湖地区上侏罗—下白垩统生物礁相碳酸盐岩的碳氧同位素组成见表 1,分析结果表明:

(1) 除一个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值有异常外,其余所有样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均分布在 Veizer 等^[2]公布的显生宙以来海相碳酸盐岩碳氧同位素组成区间内。 $\delta^{13}\text{C}$ 最大值为 3.5‰ ,最小值为 0.9‰ ,平均值为 2.4‰ ,70% 的样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 2.0‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 最大值为 -2.7‰ ,最小值为 -8.3‰ ,平均值为 -5.6‰ ,除最大值和最小值外,其余样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值均分布在 $-4\text{‰} \sim 8\text{‰}$

区间内。参照 Veizer 等^[2]公布的显生宙以来海相碳酸盐岩碳氧同位素组成区间范围,剔除一个 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.3‰ 的样品。

(2) 由图 2a 可知,所有样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在良好的相关性,相关系数为 0.8。黄文辉等^[14]通过对德国南部上侏罗统碳酸盐岩的碳、氧同位素研究发现,导致碳、氧同位素波动同步性变差的原因有两个:①古海洋沉积环境频繁而强烈的变化;②受到成岩后生作用的影响。Magarite 等^[17]曾指出,在平衡的成岩体系内, $\delta^{13}\text{C}$ 在固相中迁移至少需要大于其 1500 倍体积的孔隙溶液通过该体系,而相同的变化对于 $\delta^{18}\text{O}$ 而言,仅需 5 倍于它体积的孔隙溶液即可发生。可见, $\delta^{18}\text{O}$ 比 $\delta^{13}\text{C}$ 更易受成岩作用的影响,其结果必然使碳、氧同位素的波动不同步^[18]。反之,半岛湖地区上侏罗—下白垩统生物礁相碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在良好的相关性说明所采取的样品受成岩作用的改造较弱,原始的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 保存好,其同位素组成信息在很大程度上能代表同期海水。此外,碳酸盐沉积物沉积期后受到大气淡水的影响,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值会降低,Mn 含量会升高, $\delta^{18}\text{O}$ 值和 Mn 含量会呈现良好的负相关性。但是由图 2b 可知,研究区样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 Mn 含量相关性较差。因此,我们认为研究区碳酸盐沉积物沉积期后并未因大气淡水的影响而发生强烈的成岩改造。

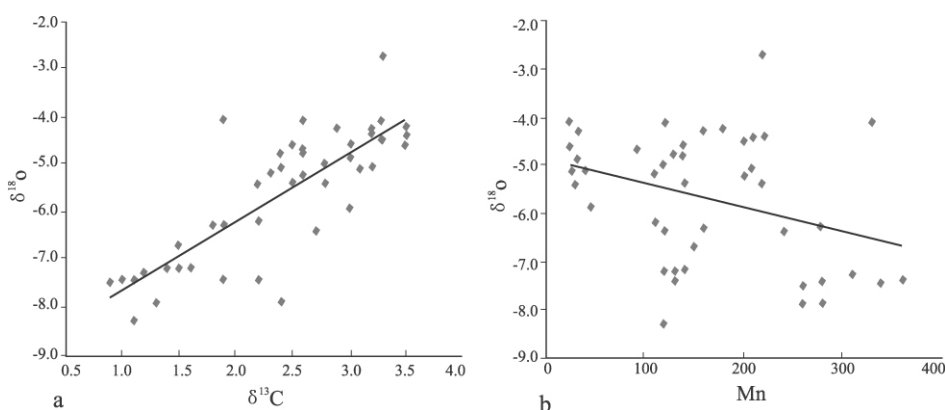


图 2 样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值(a)和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 Mn 含量(b)关系图

Fig. 2 Diagrams showing the relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values (a), and $\delta^{18}\text{O}$ and Mn contents (b)

4 讨论

4.1 利用 Mn、Sr、Fe、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值综合评估

碳酸盐在沉积期后,经常受大气降水的影响。由于大气降水一般比海水含有更多的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、

Zn^{2+} , 含有更少的 Sr^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} , 所以海相碳酸盐沉积受到大气降水影响后,其中的 Sr^{2+} 、 Na^{+} 含量会降低,而 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 含量会升高^[1,19]。对于氧同位素而言,由于大气降水中氧含量远高于碳酸盐中的含量,所以,在碳酸盐沉积物的胶结、重结晶和

交代过程中,来源于大气降水的地下水是普遍存在的氧源。因此,碳酸盐矿物不断的溶解-再沉淀过程不能够明显改变地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,但是能使碳酸盐矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显降低^[20-21]。在碳酸盐岩的成岩系统中,水/岩比值对碳来说,是非常低的,而对氧来说,该比值则是非常高的,因而成岩过程中氧同位素是最容易与成岩流体发生交换的,碳酸盐样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对成岩作用也是最为敏感的,并可作为成岩蚀变最为敏感的判断指标^[23]。

1. 以 Sr 含量为主导的综合评估

据上文对 Sr 含量的讨论可知,有 7 个样品的 Sr 含量小于 200×10^{-6} ,按 Dreery 等^[4]的建议,它们对海水的代表性较差,属于应该剔除的样品。然而值得注意的是,这 7 个样品同时具有较低的 Fe、Mn 含量,平均值分别为 31×10^{-6} 和 291×10^{-6} ;具有很低的 Mn/Sr 比值,平均值为 0.19;具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,平均值分别为 2.9‰ 和 4.8‰。实际上,对于海相地层中的碳酸盐而言,造成样品 Sr 含量较低的原因可能有两个:(1)成岩蚀变过程中 Sr 的丢失,这些样品同时也具有较高的 Mn 含量,因而有很高的 Mn/Sr 比值;(2)沉积因素,这些样品在 Sr 含量较低的同时也具有较低的 Mn 含量,说明其没有遭受强烈的成岩蚀变^[23]。因而,这 7 个样品低 Sr 的原因在很大程度上是沉积因素,其原始碳酸盐矿物并非文石型晶格,沉积过程中难于获得较多的 Sr,尽管这些样品的 Sr 含量较低,但其对海水信息仍具有代表性。

2. 以 Mn 含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 值为主导的综合评估

表 2 不同类型岩石样品 Mn(10^{-6})、Sr(10^{-6})、Mn/Sr 比值、 $\delta^{13}\text{C}$ (‰) 和 $\delta^{18}\text{O}$ (‰) 的分布范围及平均值

Table 2 The extents and averages of Mn(10^{-6}) and Sr(10^{-6}) contents, Mn/Sr ratios, and $\delta^{13}\text{C}$ (‰) and $\delta^{18}\text{O}$ (‰) values for the carbonate rock samples from the study area

		含生屑泥晶灰岩	泥晶粒屑灰岩	粒屑泥晶灰岩	礁灰岩围岩部分	礁灰岩生物骨架	所有样品
样品数量 ^①		2	10 (1)	15 (1)	9 (3)	9 (5)	45 (10)
Mn	分布范围	32~34	24~330	30~160	160~360	42~310	24~360
	平均含量	33	140	121	247	204	163
Sr	分布范围	152~155	156~365	165~252	291~358	191~394	152~394
	平均含量	153.5	271.4	279.5	314.8	304.1	284
Mn/Sr	分布范围	0.21~0.22	0.14~1.0	0.19~0.67	0.55~1.01	0.22~0.93	0.14~1.01
	平均值	0.21	0.46	0.44	0.78	0.64	0.54
$\delta^{13}\text{C}$	分布范围	2.9~3.0	1.4~3.5	1.1~3.1	1.0~3.2	0.9~3.5	0.9~3.5
	平均值	2.95	2.74	2.21	2.37	2.21	2.4
$\delta^{18}\text{O}$	分布范围	-4.3~-4.9	-2.7~-7.2	-4.1~-8.3	-4.1~-7.4	-4.4~-7.9	-2.7~-8.3
	平均值	-4.6	-4.9	-5.83	-5.77	-6.44	-5.6

注:①括号中为通过综合评估作剔除处理的样品数量

据上文对 Mn 含量的讨论可知,有 9 个样品的 Mn 含量大于 250×10^{-6} 。同时,这 9 个样品具有比其它样品显著高的 Mn/Sr 比值,平均值为 0.88;显著低的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,平均值分别为 1.7‰ 和 -7.0‰。因此,按 Korte 等^[8]的建议,这 9 个样品对海水信息的保存性较差,属于应该剔除的样品。此外,以 $\delta^{18}\text{O}$ 值为标准,按照 Veizer 等^[9]公布的显生宙以来海相碳酸盐岩氧同位素组成区间范围,有 1 个样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.3‰,位于区间范围之外,同时,这个样品具有相对较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,为 1.1‰。因此,我们认为这个样品对海水信息的代表性较差,属于应该剔除的样品。

4.2 不同岩性对海水信息的保存性评估

研究区含礁层系中,以发育石灰岩为主,包括以造礁生物为主的骨架岩和非礁碳酸盐岩。根据室内薄片观察和阴极发光分析,岩石类型主要有:泥晶灰岩、粒屑灰岩、角砾灰岩和礁灰岩。本文进行地球化学研究的样品为含生屑泥晶灰岩、粒屑泥晶灰岩、泥晶粒屑灰岩、礁灰岩生物骨架部分和礁灰岩围岩部分。

由表 2 可知,含生屑泥晶灰岩具有显著低的 Mn/Sr 比值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,显著高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。礁灰岩中的生物骨架和围岩部分则具有显著低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,显著高的 Mn/Sr 比值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。同时,不同岩性样品通过综合评估被剔除的数量按含生屑泥晶灰岩→泥晶粒屑灰岩→粒屑泥晶灰岩→礁灰岩围岩部分→礁灰岩生物骨架部分依次增多。

应用不同碳酸盐地球化学指标可以判断海相碳酸盐岩发生有大气降水参与的成岩蚀变程度,最常用的方法是根据 Mn/Sr 比值、 $\delta^{13}C$ 值、 $\delta^{18}O$ 值和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 之间的相关性^[20,24]。通过研究区不同类型岩性样品 Mn/Sr 比值与 $\delta^{13}C$ 值和 $\delta^{18}O$ 值之间的关系图(图 3a,b)可以看出,样品总体上按含生屑泥晶灰岩→泥晶粒屑灰岩→粒屑泥晶灰岩→礁灰岩围岩部分→礁灰岩生物骨架部分的成岩强度加大

的序列, Mn/Sr 比值向升高方向, $\delta^{13}C$ 值和 $\delta^{18}O$ 值向降低方向迁移的演化趋势明显。由此可知,不同岩性样品被剔除数量的多少与其成岩蚀变程度的高低相一致。综上所述,研究区不同岩性对海水信息的保存性按含生屑泥晶灰岩→泥晶粒屑灰岩→粒屑泥晶灰岩→礁灰岩围岩部分→礁灰岩生物骨架部分的顺序依次变差。

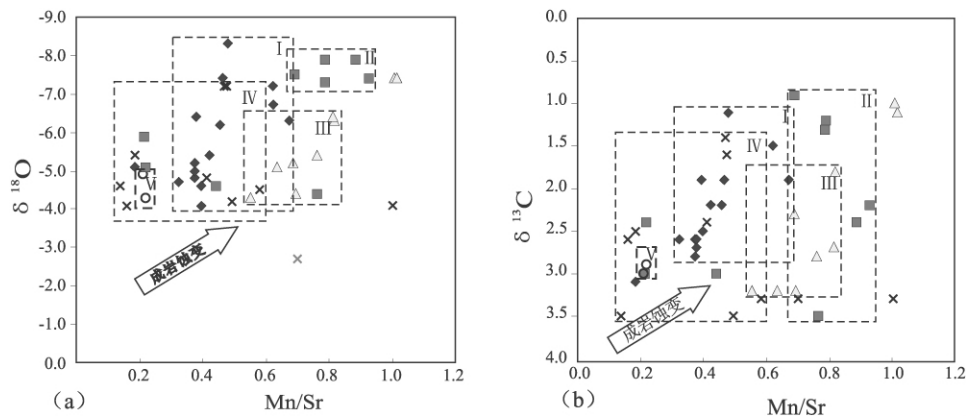


图3 不同类型岩性样品 Mn/Sr 比值与 $\delta^{18}O$ 值(a)和 $\delta^{13}C$ 值(b)关系图

I. 粒屑泥晶灰岩; II. 礁灰岩生物骨架; III. 礁灰岩围岩部分; IV. 泥晶粒屑灰岩; V. 含生屑泥晶灰岩

Fig. 3 Diagrams showing the relationship between $\delta^{18}O$ and Mn/Sr ratios (a), and $\delta^{13}C$ and Mn/Sr ratios (b)

I. Graing micritic limestone; II. Skeletal frameworks of reefal limestone; III. Wall rocks of reefal limestone; IV. Micritic graing limestone; V. Bioclastic micritic limestone

5 结论

(1) 研究区上侏罗统—下白垩统生物礁相碳酸盐岩的大部分样品都具有较低的 Mn 含量和较高的 Sr 含量,平均值分别为 163×10^{-6} 和 284×10^{-6} ;所有样品均具有较低的 Mn/Sr 比值,平均值仅为 0.54;样品 $\delta^{13}C$ 值和 $\delta^{18}O$ 值分布范围波动较小, $\delta^{13}C$ 值分布范围为 $0.9\text{‰} \sim 3.5\text{‰}$,平均值为 2.4‰ ; $\delta^{18}O$ 值分布范围为 $-2.7\text{‰} \sim -8.3\text{‰}$,平均值为 -5.6‰ 。

(2) 通过对样品微观组构、 Mn 和 Sr 元素含量及其比值、 $\delta^{13}C$ 值和 $\delta^{18}O$ 值等进行综合评估的基础上,我们认为有 10 个样品遭受了较强烈的成岩蚀变改造而对海水信息的保存性较差,需要予以剔除。

(3) 不同类型岩性对海水信息的保存性按含生屑泥晶灰岩→泥晶粒屑灰岩→粒屑泥晶灰岩→礁灰岩围岩部分→礁灰岩生物骨架部分的顺序依次变差,但大多数样品只遭受了较小的成岩蚀变改造,仍然在很大程度上保存了当时海水的信息。

参考文献:

- [1] BRAND U, VEIZER J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system—I: Trace elements [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1980, 50(4): 1219–1236.
- [2] VEIZER J, ALA D, AZMY K et al. $^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. Chemical Geology, 1999, 161(1–3): 59–88.
- [3] 胡作维, 黄思静, 黄可可, 等. 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 [J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1374–1382.
- [4] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2010. 103–114.
- [5] MCARTHUR J M. Recent trends in strontium isotope stratigraphy [J]. Terra Nova, 1994, 6: 331–358.
- [6] 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.
- [7] DERRY L A, KETO L S, JACOBSEN S B et al. Sr isotopic variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(9): 2331–2339.
- [8] 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(1): 47–62.
- [9] 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(2): 181–185.
- [10] 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(3–4): 409–430.
- [11] 孙伟, 陈明, 曾胜强. 西藏羌塘盆地半岛湖中生代索瓦组的层状礁: 群落结构和时代 [J]. *地质通报*, 2013, 32(4): 567–572.
- [12] MAGARITZ M M. Carbon and oxygen isotope composition of recent and ancient coated grains [A]. Peryt T M. *Coated Grains* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 27–37.
- [13] BRASIER M D, ANDERSON M M et al. Oxygen and carbon isotope stratigraphy of early Cambrian carbonates in southeastern Newfoundland and England [J]. *Geological Magazine*, 1992, 129(3): 265–279.
- [14] GALINDO C, CASQUET C, RAPELA C et al. Sr, C and O isotope geochemistry and stratigraphy of Precambrian and Lower Paleozoic carbonate sequences from the Western Sierras Pampeanas of Argentina: tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 2004, 131(1–2): 55–71.
- [15] 陈锦石, 陈正文. 碳同位素地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1983. 75–87.
- [16] 黄文辉, 刘文忠, W M Bausch. 德国南部地区上侏罗统麻姆组碳酸盐岩碳、氧稳定同位素研究 [J]. *地球化学*, 1999, 28(1): 97–102.
- [17] MAGARITE M M, STEMMEIK L. Carbon isotope variations in the Upper Carboniferous – Permian Mallemuk Mountain Group, eastern North Greenland [J]. *Geol. Soc. Denmark*, 1989, 37: 205–211.
- [18] 谭富文, 王剑, 王小龙, 等. 羌塘盆地雁石坪地区中—晚侏罗世碳、氧同位素特征与沉积环境分析 [J]. *地球化学*, 2004, 25(2): 119–126.
- [19] DERRY L A, KAUFMAN A J, JACOBSEN S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: Evidence from stable and radiogenic isotopes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1317–1329.
- [20] JACOBSEN S B, KAUFMAN A J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1–3): 37–57.
- [21] 赵彦彦, 郑永飞. 碳酸盐沉积物的成岩作用 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(2): 501–519.
- [22] 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*, 2005, 24(1): 68–74.
- [23] 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古海洋信息的保存性 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(1): 9–18.
- [24] XIAO S, BAO H, WANG H et al. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciation [J]. *Precambrian Research*, 2004, 130(1–4): 1–26.

The Upper Jurassic – Lower Cretaceous biohermal carbonate rocks from the Bandaohu region, Qiangtang Basin: Preservation of coeval sea water information

SUN Wei, CHEN Ming, HE Jiang-lin, CAO Jun-feng

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The evaluation of diagenetic alteration of marine carbonate rocks and the preservation of coeval sea water information has long been a negligible field. The examination of microscopic fabrics, cathodoluminescence images, trace elements and isotopes in the Upper Jurassic – Lower Cretaceous biohermal carbonate rock samples from the Bandaohu region, Qiangtang Basin has disclosed that these samples are characterized by low Mn and high Sr contents, low Mn/Sr ratios, and limited range of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values. The preservation of coeval sea water information tends to become progressively worse in the sequence of bioclastic micritic limestone → micritic grainy limestone → grainy micritic limestone → wall rocks of reefal limestone → skeletal frameworks of reefal limestone.

Key words: sea water information; diagenetic alteration; biohermal carbonate rock; Upper Jurassic – Lower Cretaceous; Qiangtang Basin