

刘建清, 赵瞻, 林家善, 等. 四川盆地东南缘中上寒武统白云岩地球化学特征及成因机制[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1682-1692.
Liu Jianqing, Zhao Zhan, Lin Jiashan, et al. The characteristics and genetic mechanism of middle-upper Cambrian dolomite on the southeast margin of Sichuan Basin [J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1682-1692(in Chinese with English abstract).

四川盆地东南缘中上寒武统白云岩地球化学特征及成因机制

刘建清 赵 瞻 林家善 冯伟明 黄学平 魏洪刚

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要:以系统的岩石学及中上寒武统3条剖面地球化学特征对比分析为基础,认为中上寒武统白云岩主要形成于埋藏早期高盐度卤水的渗透回流交代作用,次为混合水交代成因,其主要依据体现在:①中上寒武统白云岩及灰岩Sr/Ba总体较高,仅少量数据点Sr/Ba小于1;②灰岩Na、K含量较高,灰岩Na含量高于淡水成因的美国Wisconsin中奥陶统Mifflin Member灰岩以及美国Tennessee东部Tongling地区上奥陶统灰岩,白云岩Na含量与开宁盆地巴洼阶地潮上萨布哈白云岩中Na含量相近;③ m 值反映出灰岩为海水沉积环境,白云岩为与潟湖相关的沉积环境;④ B_{R} 值反映出该区白云岩及灰岩主要形成于咸水—半咸水沉积环境,局部受淡水作用影响。该区白云岩化过程中Sr有明显带出现象,Na、K可能也有带出现象。

关键词:白云岩;地球化学;渗透回流;混合水

中图分类号:P584;P581 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)05-1682-11

近年来,随着普光等特大型油气田的发现,四川盆地及其周边地区海相油气地质前景成为普遍关注的焦点。四川盆地东南缘齐岳山以东、雪峰山以西的盆、山结合部位,受中燕山期雪峰山陆内造山作用的影响,震旦纪至侏罗纪地层同期发生褶皱、隆升,上古生界大量剥蚀,仅下古生界具勘探前景,中上寒武统白云岩无疑成为潜在的有利目标层系。然而,该套白云岩的特征及成因机制目前的研究十分薄弱,已有的工作主要是在零星地区基于岩石结构特征的简单描述和分析,岩石地球化学特征和成因分析尚未系统开展^[1],重庆南川三泉—秀山膏田—湖南花垣一线所在的扬子东南缘地区中上寒武统白云岩的研究则更是接近空白。同时,前人

的研究表明,寒武纪时期,扬子东南缘地区为一稳定的被动大陆边缘盆地^[2],自北西向南东,中上寒武统呈现稳定的碳酸盐台地—台地边缘—台缘斜坡—陆棚相的变化,碳酸盐台地及台地边缘相为大套白云岩,厚度在1000 m以上,台缘斜坡相发育大套钙屑浊积岩,可见鲍马序列,具有明显的冲刷和同生变形特征,陆棚相则发育深色薄板状灰岩。这些为对比研究中上寒武统白云岩提供了良好的场所。为此,在垂直沉积相带及现今构造方向,本文选择了重庆南川三泉白云岩剖面、重庆秀山膏田白云岩剖面、湖南花垣排碧灰岩剖面开展同时代地层的地球化学特征及对比研究,旨在从岩石地球化学的角度深入分析中上寒武统白云岩特征及成因机

收稿日期:2013-06-19;改回日期:2014-05-20

基金项目:成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室开放研究基金(PLC200901)资助。

作者简介:刘建清,男,1969年生,副研究员,主要从事沉积学专业研究;E-mail: liujq1@tom.com。

制。其中,南川三泉剖面相当于局限台地相,秀山膏田剖面相当于台地边缘相,花垣排碧剖面相当于台缘斜坡相(图1~3)。剖面中采集的样品涵盖了3条剖面所有岩石学类型,以开展白云岩与灰岩的地球化学对比分析,每件样品岩石学特征见表1。

1 白云岩岩石学特征

1.1 白云岩矿物组成

该区白云岩矿物成分主要由白云石和方解石组成。

白云石含量85%~95%,一般为半自形-他形粒状,主要呈细-微晶产出,不规则相间分布,晶棱除细晶白云岩外,多不平直。白云石偶见环带构造,呈暗桔红色-亮桔红色的交替变换。

方解石含量5%~15%,主要有2种类型:一种为被交代的残余方解石,在镜下亦难观察,但染色后,呈星点状分布于白云石内部或颗粒之间;另一种为后期方解石脉,表面一般很干净,呈大小不一的连晶状,充填于白云石晶间孔、晶间缝和晶间溶孔,多为后期富Ca碳酸盐岩水溶液沿孔缝充填而成。

1.2 白云岩岩石结构特征

该区白云岩主要具有残余粒屑结构、藻纹层构造及微-细晶结构(图4)。

残余粒屑结构被大量普通薄片及铸体薄片研究证实。以秀山膏田剖面XGP80最为典型,粒屑主要为鲕粒、内碎屑。鲕粒呈圆形-椭圆形,以圆形为主,直径0.3~0.6 mm,具放射状结构,最外部有1~

2个同心圈层,但多数看不清或没有;内碎屑由浑浊微晶白云石组成,形状各异,以竹叶状、不规则椭圆状为主,粒度为0.45~6 mm,具代表性的有6 mm×0.5 mm,4 mm×2.5 mm,2.5 mm×1.25 mm,0.8 mm×0.4 mm,0.45 mm×0.25 mm等。磨圆度中等-偏好(次圆-一次棱角状)。填隙物为亮晶方解石(白云石),由干净、明亮粉-细晶镶嵌组成。粒屑大部分交代比较彻底,呈交代幻影,颗粒边界模糊可辨,部分颗粒形态保存完好,但实际均呈镶嵌颗粒状(图4-a)。

微-细晶结构:主要由白云石和少部分方解石组成,含少量黄铁矿、铁泥质和陆屑(图4-b、c)。以南川三泉剖面NSP36样品最为典型,白云石呈他形至半自形微粒状,粒度较均匀,相互紧密嵌生,结构均匀致密,部分间隙有少量方解石和铁泥质充填,保留原灰质残余较多,色较暗,表面不干净,局部溶蚀重结晶为干净的细晶白云岩;方解石一部分充填白云石间隙,一部分为白云石交代残余,不均匀保留在白云石中,染色表面多呈红色微点。偶尔见陆源碎屑,为石英粉屑。

具藻纹层构造白云岩分为2类:一种为藻丘礁,其叠层石藻礁常与高能带颗粒滩共生。藻丘基座为泥晶-亮晶颗粒灰岩(白云岩),礁核相由蓝绿藻叠层石组成,呈半球状、叠锥状和灌丛状,叠锥宽度5~15 cm,高度10~35 cm,以秀山膏田XGP83样品较为典型(图4-d)。个别规模较大,宽度、高度均大于0.5 m,藻礁侧部相连,礁顶被颗粒灰岩(白云岩)覆

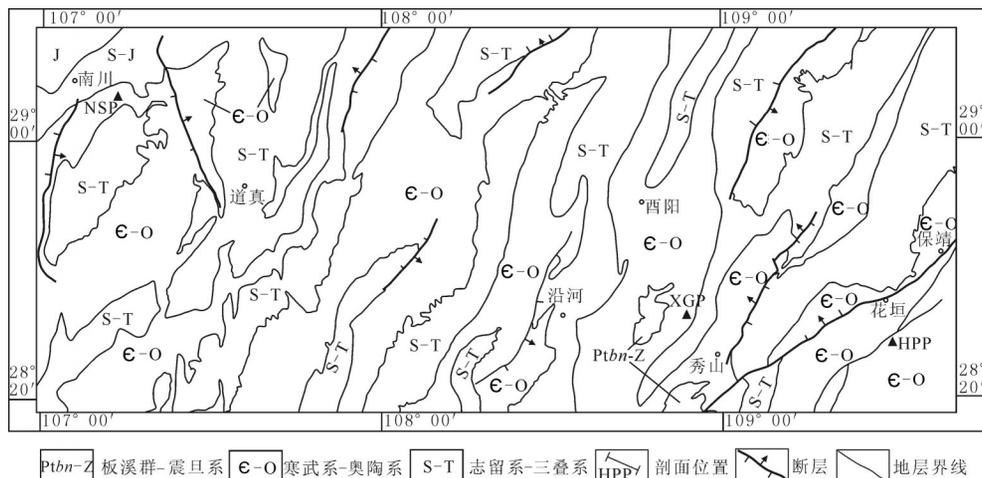


图1 研究区地质简图及剖面位置图

Fig.1 Simplified geological map of the study area and the locations of profiles

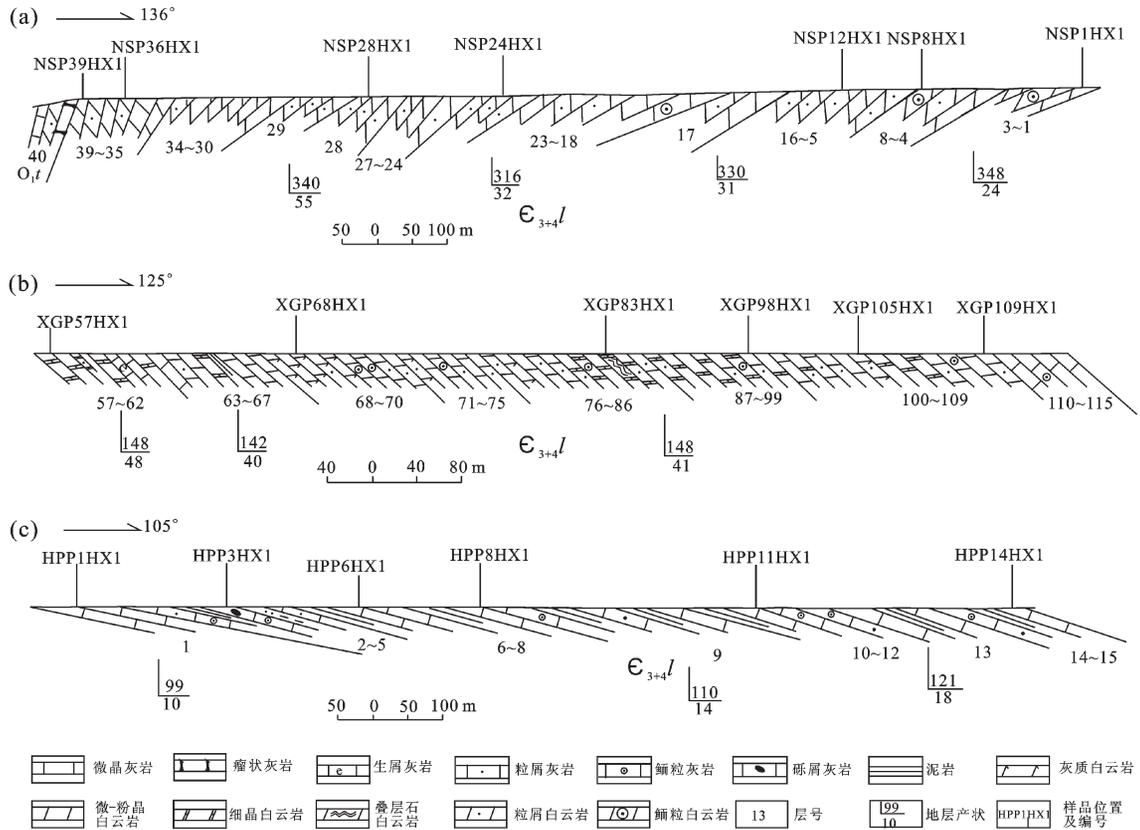


图2 四川盆地东南缘中上寒武统典型剖面横剖面图

a—南川三泉剖面; b—秀山膏田剖面; c—花垣排碧剖面

Fig.2 The transverse section of typical middle-upper Cambrian profiles
a—Nanchuan Sanquan profile; b—Xiushan Gaotian profile; c—Huayuan Paibi profile

盖。叠层石藻丘礁向海一侧坡度较陡,可见塌积成因的前斜坡碎石裙堆积角砾岩,角砾大小5~15 cm,最大见有20~30 cm礁岩块,这种特征在花垣排碧剖面可见;另一种为潮坪藻席,其特征主要为藻纹层与层面平行,走向上延伸稳定,其延伸长度常大于3 m,其中藻类种属亦为蓝绿藻。藻纹层白云岩中白云石粒度主要为微晶结构,在阴极发光显微镜下均可见到白云石交代灰岩后方解石残留体呈星点状分布。

以上白云岩原生组构特征说明,该区白云岩并非超盐水原生沉淀或准同生白云岩,而系交代成因。

2 白云岩及伴生灰岩的地球化学特征

2.1 Sr、Sr/Ba、Sr/Ca

2.1.1 Sr

原生的碳酸钙(高镁方解石、文石、原生白云石),其Sr含量均较高。但是白云岩化作用和成岩

作用使Sr含量明显降低。现代环境中,从海洋直接形成的高镁方解石、文石及原生白云石, Sr含量或平均含量分别为 $400 \times 10^{-6} \sim 5000 \times 10^{-6}$ 、 9800×10^{-6} 、 $245 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ [3-5],文石被白云石化后,其典型的Sr含量为 $500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ 。方解石被白云石化,低Sr白云石就会形成,海相高镁方解石和低镁方解石将会被含Sr低($n \times 10^{-6}$)的白云石取代。而成岩方解石具更低的Sr,它将被Sr含量近于枯竭的白云石取代。同时,海相碳酸盐岩(文石、高镁方解石、低镁方解石)的早期白云岩化将导致较富Sr的白云石,而相对稳定的海相碳酸盐(由成岩低镁方解石组成)的晚期白云石化将有贫Sr的白云石[6]。

研究区灰岩及白云岩Sr含量具明显的分布特征:首先,灰岩与白云岩相比,含量明显偏高,在Sr-Ca、Sr-Mg、Sr-Na、Sr-K、Sr-Sr/Ca、Sr-Sr/Ba相关图上(图5-a, b)呈现出2个明显的集中区域,白云岩Sr含量明显偏低,集中于左侧,而灰岩Sr含量偏

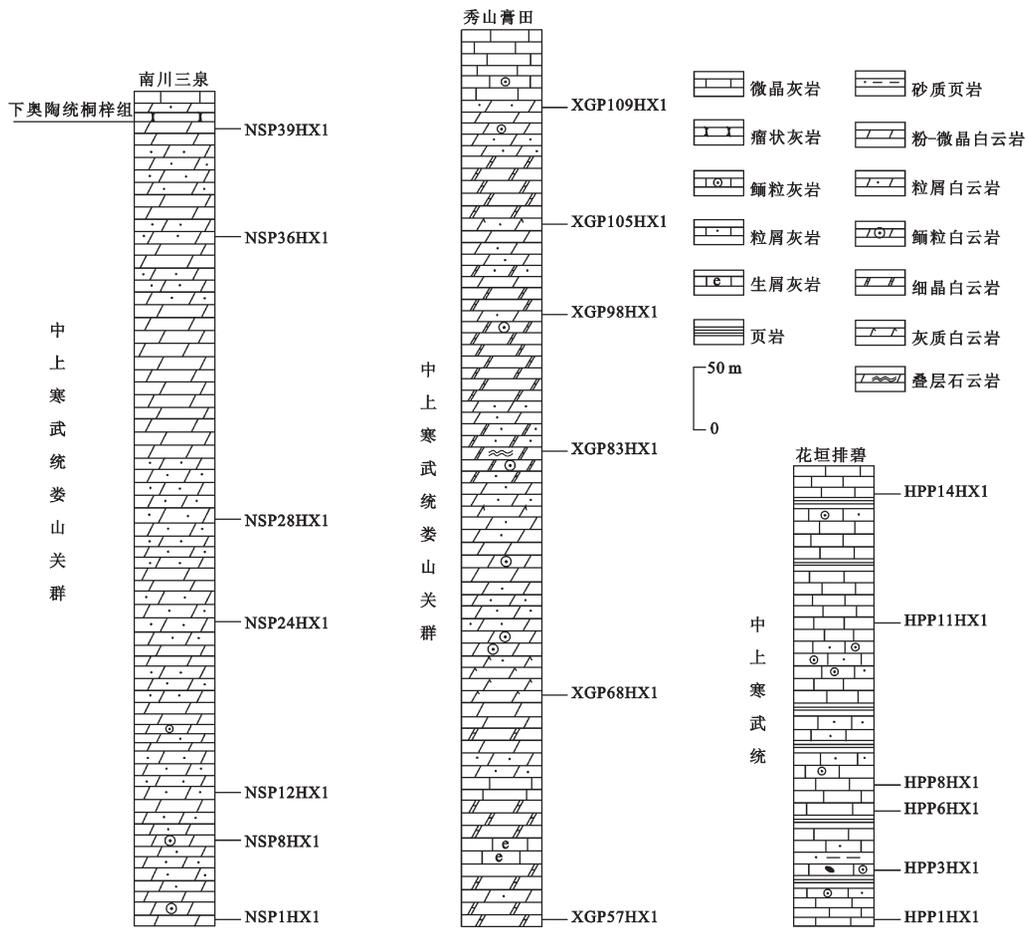


图3 四川盆地东南缘中上寒武统典型剖面柱状图

Fig.3 The columnar section of typical middle-upper Cambrian profiles on the southeastern margin of Sichuan Basin

高,集中于右侧。

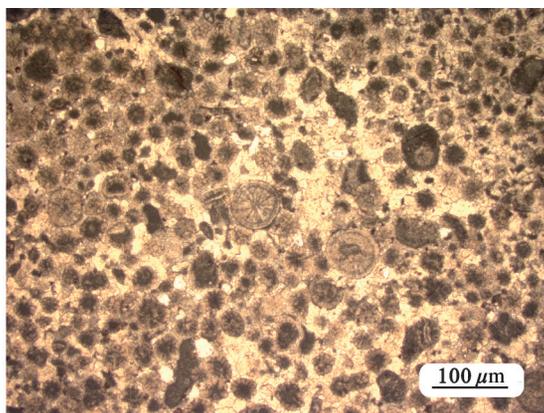
花垣排碧剖面灰岩Sr含量平均值为 519.83×10^{-6} ,其中最高为 1170×10^{-6} ,最低为 226×10^{-6} (表2),大部分 $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, 1000×10^{-6} 左右的数据仅有1个(Hpp6Hx1);南川三泉剖面白云岩Sr含量平均值为 89.51×10^{-6} ,最大值为 260×10^{-6} ,最小值为 38.70×10^{-6} ;秀山膏田剖面白云岩Sr含量平均值为 160.90×10^{-6} ,最大值为 406×10^{-6} ,最小值为 52.80×10^{-6} 。这些特征表明,中上寒武统白云岩在其形成过程中,有明显的Sr带出现象。

2.1.2 Sr/Ba

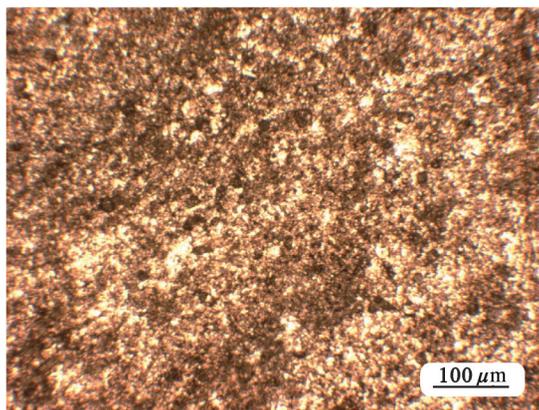
Ba与Sr的化学性质十分相近,但与Sr相比,其化合物溶解度要低,Sr的迁移能力要高于Ba。一般认为,海相沉积物中 $Sr/Ba > 1$,淡水沉积物中 $Sr/Ba < 1$;埋藏成岩方解石Sr/Ba相对较高,而海水成岩方解石

Sr/Ba含量接近海水平均值^[7]。

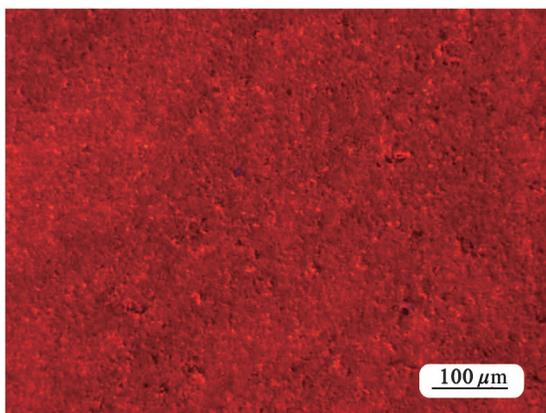
该区灰岩与白云岩Sr/Ba含量明显低于海水平均值(533.3)^[8],但灰岩与白云岩相比Sr/Ba含量仍有一定的差别,表现为灰岩低、白云岩高的特点(图5-f)。其中,花垣排碧剖面灰岩Sr/Ba平均值为2.45,最大值10.73,最小值0.35;南川三泉剖面白云岩中Sr/Ba平均值3.49,最大值8.01,最小值1.77(表2);秀山膏田剖面白云岩中Sr/Ba平均值14.43,最大值30.99,最小值0.20。以上特征表现出,该区碳酸盐岩Sr/Ba总体较高,有少量数据点Sr/Ba小于1,反映出其主要形成于埋藏环境,少数形成于海陆交互环境,不同程度地受到淡水的作用和影响。其可能的白云岩化模式如图6所示。花垣排碧剖面位于台地边缘以东,受广海水体控制,水体循环较好,淡水影响较小,有3个数据点Sr/Ba值小于1,表明该灰岩在其成



a-XGP80粒屑白云岩结构特征, 鲕粒呈放射状, 见同心圈层构造。内碎屑表面较脏, 呈交代幻影, 颗粒周围为干净的亮晶方解石(白云石)



b-NSP3-粉-细晶白云岩, 白云石颗粒呈半自形-他形



c-视域同b, 在阴极发光显微镜下方解石呈交代残留体星点状分布, 发桔黄色光



d-XGP-83, 叠层石白云岩, 叠层石呈半球状, 侧部相连

图4 白云岩典型组构特征

Fig.4 Typical microstructure of dolomite

岩作用过程中可能有Ba的带入现象,导致Sr/Ba较低;秀山膏田及其以西地区,均不同程度发生白云岩化,整体处于潟湖至蒸发潮坪沉积环境,水体咸度较高,为高矿化度卤水。这种高密度卤水的形成打破了整个水力系统的平衡,从而引起与周围及深部低密度海水(密度为 1.03 g/cm^3)的对流。当这种高盐度富Mg流体渗入到台地石灰岩地层时,便以孔隙充填物或直接交代形式沉淀白云岩,或与地下正常海水混合后再引起白云岩化,形成较大规模的白云岩层。而台地边缘及潮坪的下部,处于古地理的相对高点或合适的古地理部位,受大气降水等淡水影响,发生混合水交代白云岩化作用。秀山膏田即处于这样的古地理环境,见有个别Sr/Ba数据点小于1。南川三泉则可能为潟湖沉积环境,未见Sr/

Ba值小于1。中上寒武统大规模的白云岩化作用可能为上述埋藏早期的渗透回流白云岩化作用及混合水交代作用。白云岩化过程中Ba可能与Sr相似,有带出的情况。

2.1.3 Sr/Ca

碳酸盐岩中Sr含量与沉积环境有着密切的关系:一般认为其富集与高盐度有关。前苏联学者C. M.卡特钦科夫曾用Sr/Ca比来判断沉积条件,他认为在淡水沉积物中Sr/Ca <1 ,而在海相沉积物中Sr/Ca >1 ,在蒸发相中Sr/Ca则特别高^[7]。

对该区灰岩及白云岩Sr/Ca比计算表明:其比值均远低于1。其中花垣排碧剖面灰岩中Sr/Ca均值0.0019,最大值0.0038,最小值0.0012;南川三泉剖面白云岩中Sr/Ca比值均值0.0004,最大值0.0013,最小

表1 研究区所采样品岩石学特征

Table 1 Lithologic characteristics of samples in the study area

样号	岩性	岩石学特征
NSP1HX1	微-粉晶白云岩	晶粒结构,原岩结构基本消失。以粉晶为主,约占50%,微晶约占28%,细晶约占20%,均为不规则他形粒状。微-粉晶较混浊,细晶较干净。
NSP8HX1	残余鲕粒晶粒白云岩	残余粒屑结构,粒屑圆-椭圆形,以椭圆形为主,0.3~0.55 mm,粒度较均匀,由微-细晶较混浊的晶粒白云石镶嵌组成,推测为鲕粒。填隙物为干净、明亮粉-细晶不规则他形晶粒白云石镶嵌组成。
NSP12HX1	残余亮晶内碎屑云岩	具残余内碎屑结构,由较混浊的细晶白云石组成,多为椭圆及不规则状,没有棱角,粒度0.5~4 mm;填隙物为相对干净的细晶他形白云石,围绕粒屑分布。
NSP24HX1	残余亮晶内碎屑云岩	具残余粒屑结构,粒屑由混浊微-粉晶白云石组成,形状不规则,大小不一,一般在0.5~3 mm。粒屑周围为干净、明亮的细晶白云石分布。
NSP28HX1	残余粒屑晶粒云岩	具残余粒屑结构,由相对较混浊的微-粉晶组成粒屑,圆-椭圆形,以后者为主。粒屑周围是细晶及少量粉晶白云石,干净、明亮。
NSP36HX1	砂质微-粉晶白云岩	具晶粒结构,以粉晶为主,约占40%,微晶约占30%,均为不规则他形粒状。陆源碎屑,主要是石英,含量28%,一般为细-中砂级,最大0.6 mm,次棱角状-次圆状,为单晶,强波状消光。
NSP39HX1	微晶白云岩	具晶粒结构,微晶白云石约占80%,粉晶白云石约占20%。微晶他形粒状,晶形不清;粉晶自形较干净、明亮,呈星散分布于微晶白云岩中。
HPP1HX1	微晶灰岩	具晶粒结构,微晶为主,呈他形粒状。晶粒部分混浊,部分较干净。晶形部分模糊,部分较清楚,粒度较均匀。
HPP3HX1	砾屑灰岩	具砾屑结构,砾屑为内碎屑,由混浊微晶方解石组成,大小从0.05~0.9 mm不等,一般0.1~0.4 mm,以椭圆为主,圆形为次,底部粒度一般较大,为2~9 mm,向上变细,为0.05~0.2 mm。填隙物为亮晶方解石,干净、明亮。
HPP6HX1	微晶灰岩	具晶粒结构,由微晶方解石及白云石组成,方解石含量88%,白云石含量10%。方解石,他形粒状,晶粒部分混浊,部分较干净,晶形部分较模糊,部分较清楚,粒度较均匀;白云石,他形粒状,晶粒较干净,晶形较清楚,粒度较均匀,与方解石混生。
HPP8HX1	微晶灰岩	具晶粒结构,由方解石、白云石及少量陆源碎屑组成,方解石含量65%,白云石含量5%,石英含量28%。方解石,微晶为主,约占55%,粉晶约占10%,不规则他形粒状,晶粒较混浊,晶形较清楚;白云石,他形粒状,星散分布于方解石晶间;陆屑为石英,细粉砂级、棱角状。
HPP11HX1	微晶灰岩	具晶粒结构,微晶为主,呈他形粒状。晶粒部分混浊,部分较干净。晶形部分模糊,部分较清楚,粒度较均匀。
HPP14HX1	微晶灰岩	具晶粒结构,由微晶方解石及白云石组成,方解石含量88%,白云石含量10%。方解石,他形粒状,晶粒部分混浊,部分较干净,晶形部分较模糊,部分较清楚,粒度较均匀;白云石,他形粒状,晶粒较干净,晶形较清楚,粒度较均匀,与方解石混生。
XGP57HX1	微晶白云岩	具晶粒结构,岩石由微晶白云石组成,呈他形粒状,晶粒较混浊,晶形不清楚,结构单一。含微量陆屑(1%),为石英,微粒-粉砂级,棱角状,局部相对集中形成纹层延伸。
XGP68HX1	微-细晶灰质白云岩	具晶粒结构,其中白云石呈微晶他形粒状,晶粒混浊,晶形不清楚,以不规则团块状为主,广泛分布;方解石,微晶-粉晶-细晶都有,晶粒干净明亮,晶形较模糊,呈残余不规则团块状。
XGP83HX1	叠层石白云岩	具叠层石构造,由蓝绿藻叠层石组成,呈半球状、叠锥状和灌丛状,叠锥宽度5~15 cm,高度10~35 cm。显微镜下叠层石构造由较暗色的微晶-粉晶白云石组成,向同一方向大致弯曲平行延伸。
XGP98HX1	残余粒屑晶粒白云岩	具残余粒屑结构,由白云石晶粒组成,残余粒屑为内碎屑。残余内碎屑是在晶粒结构的背景上呈现混浊的暗斑,其大小0.3~2 mm不等,多为椭圆形,主要由较混浊的粉晶、微晶及少部分细晶组成,有时周围由较干净的细晶、中晶组成。
XGP105HX1	残余亮晶粒屑灰云岩	具残余粒屑结构,粒屑为内碎屑,填隙物为亮晶白云石及方解石。残余内碎屑由较混浊微晶白云石组成,形状多样,多为不规则状,大小在0.3~1.5 mm,多数在0.5~0.8 mm。有的粒屑被粉晶白云石交代,晶粒较干净,晶形也清楚。
XGP109HX1	亮晶内碎屑白云岩	具粒屑结构,粒屑为内碎屑,由混浊他形微晶白云石组成为主,粒屑大小悬殊,两极分化明显,大的粒屑0.8~3 mm,一般1~2 mm,>2 mm者极少,小的粒屑在0.2 mm左右,形状多为椭圆形、短柱状,磨圆度较好,分选中等偏差;填隙物为亮晶白云石,由干净、明亮细-中晶他形晶粒镶嵌组成。

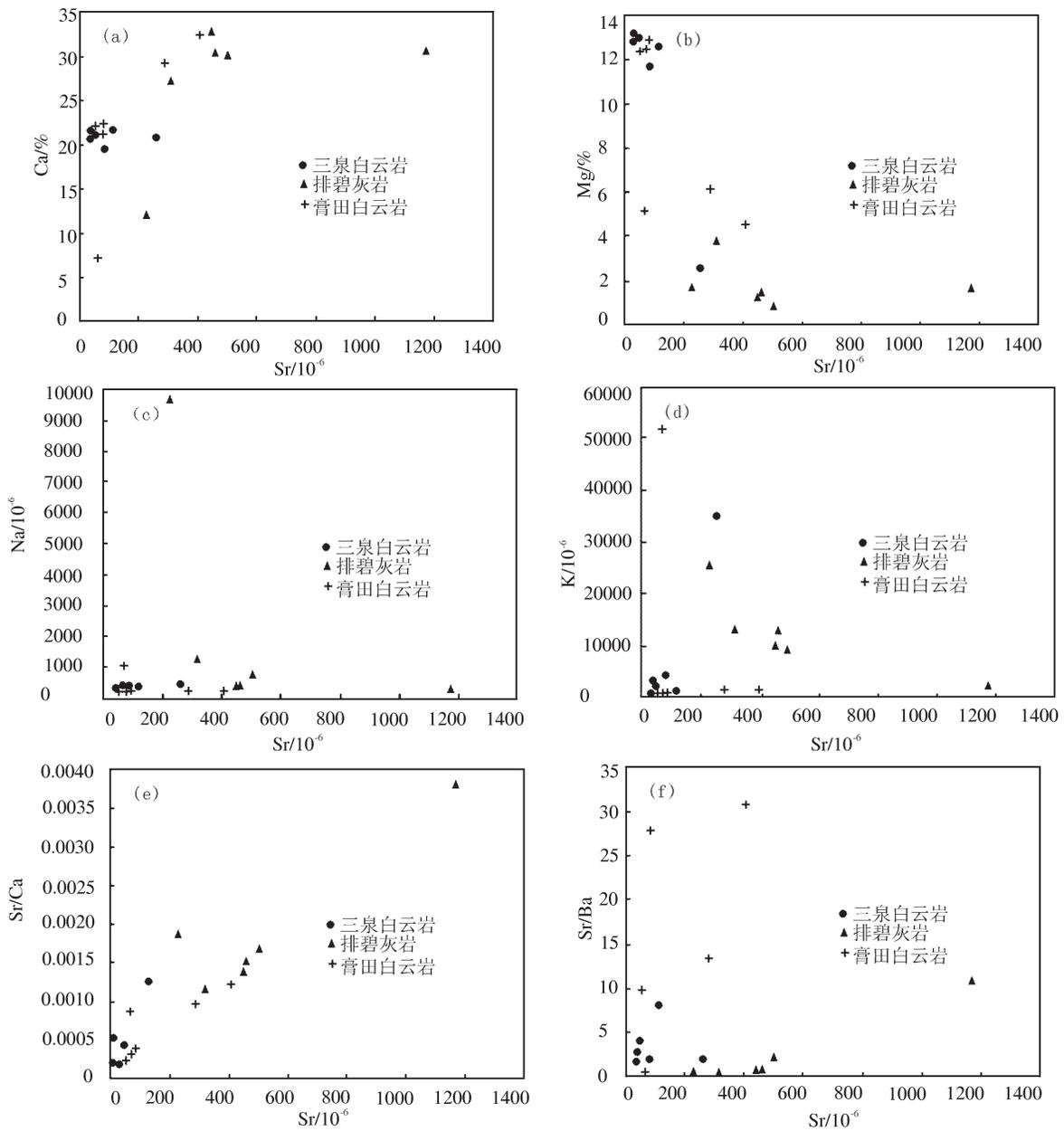


图5 研究区灰岩及白云岩Sr对Ca、Mg、Na、K、Sr/Ca和Sr/Ba图解

Fig.5 The relationship between Sr and Ca, Mg, Na, K, Sr/Ca, Sr/Ba in dolomite and concomitant calcite of the study area

值0.0002;秀山膏田剖面白云岩中Sr/Ca比值均值0.0007,最大值0.0012,最小值0.0002。以上特征表明该区碳酸盐岩,特别是白云岩的原岩,在沉积过程中明显受到淡水的作用和影响。该区碳酸盐Sr/Ca较低的现象除与淡水作用有关,很可能与成岩及白云岩化过程中Sr的丢失有关,但在Sr-Sr/Ca相关图上(图5-e),二者呈线性正相关关系,表明灰岩在

经历成岩作用及白云岩化过程之后,和Sr-Sr/Ba一样元素在一定程度上仍保留了其原有的组成特点。

2.2 Na、K

碳酸盐岩中微量元素Na是判断沉积环境的有效指标之一。Land L S and Hoops G K(1973)分析过去从二叠系至中生代海相和礁灰岩中的Na含量,认为与现代沉积一样,这些岩层中的Na含量明显受

表2 研究区灰岩及白云岩常量及微量元素含量及元素特征值
Table 2 Main elements and trace roelemnts values of calcite and dolomite in the study area

样号	岩性	$/10^{-2}$										$/10^{-6}$				m	Fe/Mn	Sr/Ba	Sr/Ca	$B_{w}/10^{-6}$
		Al	Fe	Ca	Mg	Mn	K	Na	Sr	Ba	B									
NSP1HX1	微-粉晶白云岩	0.1112	0.22	21.49	13.02	0.0046	1161.70	296.77	39.4	22.2	4.38	10333.33	47.19	1.77	0.0002	265.93				
NSP8HX1	残余鲕粒晶粒白云岩	0.1271	0.23	21.21	12.96	0.0050	1659.57	296.77	43.7	10.9	4.64	9000.00	46.34	4.01	0.0002	197.20				
NSP12HX1	残余亮晶内碎屑云岩	0.1482	0.26	21.53	12.96	0.0054	1991.49	296.77	49.2	12.8	5.75	7714.29	48.77	3.84	0.0002	203.65				
NSP24HX1	残余亮晶内碎屑云岩	0.3018	0.29	20.67	12.78	0.0070	3153.19	296.77	38.7	13.2	4.38	3736.84	41.50	2.93	0.0002	97.97				
NSP28HX1	残余粒屑晶粒云岩	0.1800	0.34	21.69	12.54	0.0062	1493.62	356.13	113	14.1	5.97	6147.06	55.22	8.01	0.0005	281.92				
NSP36HX1	砂质微-粉晶白云岩	0.4924	0.30	19.33	11.82	0.0201	4812.77	296.77	82.6	44.2	5.67	2118.28	15.06	1.87	0.0004	83.09				
NSP39HX1	微晶白云岩	3.9018	2.44	20.77	2.622	0.0217	35100.00	445.16	260	133	33.2	59.29	112.52	1.95	0.0013	66.71				
HPP1HX1	微晶灰岩	1.1329	0.99	32.59	1.272	0.0139	10206.38	304.19	448	678	14.2	99.07	71.06	0.66	0.0014	98.13				
HPP3HX1	碎屑灰岩	1.3341	1.13	30.47	1.476	0.0178	12944.68	341.29	459	727	20.2	97.62	63.69	0.63	0.0015	110.06				
HPP6HX1	微晶灰岩	0.9000	0.95	30.79	1.698	0.0124	2323.40	296.77	1170	109	10.5	166.47	76.62	10.73	0.0038	318.75				
HPP8HX1	微晶灰岩	5.0347	3.17	12.09	1.656	0.0263	25723.40	9645.16	226	637	63.5	29.02	120.54	0.35	0.0019	174.11				
HPP11HX1	微晶灰岩	1.6888	1.24	30.10	0.834	0.0356	9210.64	667.74	502	262	22.9	43.57	34.81	1.92	0.0017	175.36				
HPP14HX1	微晶灰岩	1.5141	1.06	27.19	3.768	0.0310	13359.57	1187.10	314	784	23	219.58	34.29	0.40	0.0012	121.43				
XGP57HX1	微晶白云岩	5.2782	2.71	7.26	5.226	0.0186	52110.64	1112.90	64.4	326	123	87.36	145.75	0.20	0.0009	166.48				
XGP68HX1	微-细晶白云质灰岩	0.2012	0.44	29.29	6.24	0.0062	721.91	296.77	286	20.9	15.3	2736.84	71.04	13.68	0.0010	1494.83				
XGP83HX1	亮晶内碎屑云岩	0.0688	0.09	22.14	12.9	0.0077	141.06	296.77	84.9	3.02	7.24	16538.46	10.98	28.11	0.0004	3620.00				
XGP98HX1	残余粒屑晶粒白云岩	0.6618	0.06	21.31	12.54	0.0062	365.11	296.77	71.3	20.2	3.48	1672.00	10.07	3.53	0.0003	672.27				
XGP105HX1	残余亮晶粒屑灰云岩	0.1376	0.16	32.76	4.596	0.0031	614.04	296.77	406	13.1	5.17	2946.15	50.96	30.99	0.0012	593.85				
XGP109HX1	亮晶内碎屑白云岩	0.0376	0.12	21.94	12.42	0.0039	124.47	296.77	52.8	5.24	6.19	29154.93	30.92	10.08	0.0002	3507.67				

注:①样品分析由国家地质实验测试中心采用ICP-OES完成,样品测定值均为氧化物重量百分比,测定误差小于0.02%;表中微量元素值根据分子量换算所得, $m=100 \times MgO/Al_2O_3$;测定误差小于0.02%;②NSP为南川三泉剖面;HPP为花垣排碧剖面;XGP为秀山膏田剖面。

不同盐度的控制^[9]。高含量($80 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$)与中含量(150×10^{-6})多见于潟湖环境和有蒸发盐的碳酸盐地层中;低含量($30 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$)则见于开阔浅海相和礁相灰岩中^[7]。

该区灰岩及白云岩具有Na含量较高的特征,同时灰岩与白云岩相比,灰岩Na含量更高(图5-c)。其中花垣排碧剖面灰岩Na平均含量 2073.71×10^{-6} ,最高值 9645.16×10^{-6} ,最低值 296.77×10^{-6} ,样品大多数数据分布于 $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 。而南川三泉剖面白云岩Na平均含量为 326.45×10^{-6} ,最高值 445.16×10^{-6} ,最小值 296.77×10^{-6} ;秀山膏田剖面白云岩Na平均含量为 432.80×10^{-6} ,最高值 1112.90×10^{-6} ,最小值 296.77×10^{-6} 。该区灰岩Na含量与美国Wisconsin中奥陶统Mifflin Member灰岩以及美国Tennessee东部Tongling地区上奥陶统灰岩相对比,含量明显偏高,后两者Na平均含量分别为 153×10^{-6} 和 82×10^{-6} ,被认为是淡水存在下海洋碳酸盐沉积物的新生变形标志^[10,11]。这表明本区灰岩存在Na元素明显的富集,在成岩作用过程中无大气淡水的参与;而白云岩中Na含量与开宁盆地巴洼阶地潮上萨布哈白云岩中Na含量($400 \times 10^{-6} \sim 1500 \times 10^{-6}$)^[12]相近。众多的研究证实,中上寒武统白云岩形成于高盐度的卤水环境,白云岩中见石盐假晶及石膏等膏岩类沉积物,其沉积时应具有较高的Na、K含量,而灰岩Na含量高,白云岩Na含量反而低的特征表明,白云岩化过程中可能存在Na的带出现象。就交代白云岩化作用而言,有3种主要形式:埋藏成因、构造成因、混合水交代成因。该区白云岩化明显受沉积相带控制,与断裂亦无明显的关系,白云岩Na含量与开宁盆地潮上萨布哈白云岩中Na含量相近等特征表明,其形成机制可能为埋藏早期渗透回流交代成因。

元素K与Na具有相似的地球化学性质,在沉积相带中多集中于高盐度环境。对该区灰岩与白云岩K含量分析表明,K在灰岩中总体上具富集的特点(图5-d)。其中花垣排碧剖面灰岩中K平均含量 12294.68×10^{-6} ,最大值 25723.40×10^{-6} ,最小值 2323.40×10^{-6} ;南川三泉剖面白云岩中K平均含量 7053.19×10^{-6} ,最大值 35100×10^{-6} ,最小值 1161.70×10^{-6} ;秀山膏田剖面白云岩中K平均含量 9012.87×10^{-6} ,最大值 52110.64×10^{-6} ,最小值 124.67×10^{-6} ;这些特征表明该区碳酸盐岩K与Na一样可能受沉积

环境影响较小,而主要受白云岩化过程控制,灰岩在白云岩化过程中有明显的K带出现象。

2.3 B

硼(B)在海水中含量高于淡水中的含量,海相沉积物中硼的含量明显高于陆相沉积物中硼的含量,因此利用沉积物中硼的含量区分海陆相是一种有效的方法。为消除伊利石的影响,对实测结果采用以下公式进行校正^[13]:

$$B_{\text{校}} = 8.5 \times B_{\text{测}} / K_2O$$

式中, $B_{\text{测}}$ 为实测重量百分含量, $B_{\text{校}}$ 为校正重量百分含量。当 $B_{\text{校}} < 200 \times 10^{-6}$ 时,为淡水环境;当 $200 \times 10^{-6} < B_{\text{校}} < 300 \times 10^{-6}$ 时,为半咸水环境;当 $B_{\text{校}} > 300 \times 10^{-6}$ 时为咸水环境。花垣排碧剖面灰岩 $B_{\text{校}}$ 均值为166.31,最大值为318.75,最小值为98.13;南川三泉剖面白云岩中 $B_{\text{校}}$ 均值为 170.92×10^{-6} ,最大值为 281.92×10^{-6} ,最小值为 66.71×10^{-6} ;秀山膏田剖面白云岩中 $B_{\text{校}}$ 均值为 1675.85×10^{-6} ,最大值为 3620.00×10^{-6} ,最小值为 166.48×10^{-6} (表2)。以上特征表明:该区碳酸盐岩 $B_{\text{校}}$ 值主要为 $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$,并见大于 300×10^{-6} ,以及小于 200×10^{-6} 的数据点,主要形成于咸水—半咸水沉积环境,局部受淡水作用影响。

2.4 Mg、Al、Fe、Mn

沉积岩中镁铝含量比是沉积环境的标志之一。根据沉积岩中MgO含量的亲海性, Al_2O_3 含量的亲陆性可建立如下比值关系: $m = 100 \times MgO / Al_2O_3$ ^[7,14-15]。在不同的沉积环境中 m 的变化范围是:①淡水沉积环境 $m < 1$;②陆海过渡环境 $1 < m < 10$;③海水沉积环境(水体盐度 $> 30.63\%$) $100 < m < 500$;④陆表海(或潟湖碳酸盐沉积环境) $m > 500$ 。根据计算结果,花垣排碧剖面灰岩 m 均值109.22,最大值219.58,最小值29.02(表2);南川三泉剖面白云岩中 m 均值5587.01,最大值10333.33,最小值59.29;秀山膏田剖面白云岩中 m 均值8855.96,最大值29154.93,最小值87.36。花垣排碧剖面数据总体特征反映为海水沉积环境,南川三泉及秀山膏田数据偏大,总体反映为与潟湖相关的沉积环境,其数据偏大的特征应系白云岩化MgO含量增高的结果。

Fe、Mn在沉积及成岩环境中有着不同及相似的地球化学表现而成为沉积地球化学研究的重要指标。一般认为,Fe多沉积于浅海,而Mn多沉积在深海,因而在沉积学的研究中常将Fe/Mn作为陆地

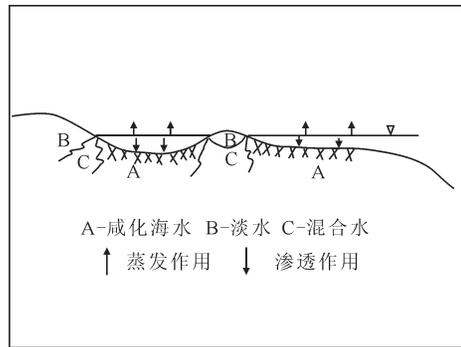


图6 中上寒武统白云岩化模式

Fig.6 The dolomitization model of middle-upper Cambrian

影响,即淡水介入程度的指标^[7]。对现代碳酸盐沉积物的研究也证明了这一点:海水成因方解石 $Fe/Mn \approx 1/30 \sim 2$,淡水成因方解石 $Fe/Mn \approx 5.5 \sim 11$ ^[7];而在埋藏成岩环境中,随着地层水浓度的逐步增大, Fe 、 Mn 含量均有增高的特点。对该区灰岩及白云岩的 Fe 、 Mn 含量的分析表明,二者略呈正相关关系(图7),说明 Fe 、 Mn 含量主要受成岩环境控制,而受沉积环境影响较小,白云岩系埋藏成因。花垣排碧灰岩 Fe/Mn 均值为66.84,最大值120.54,最小值34.29;南川三泉剖面白云岩 Fe/Mn 均值为52.37,最大值112.52,最小值15.06;秀山膏田剖面白云岩 Fe/Mn 均值为53.29,最大值145.75,最小值10.07。这些数据特征明显反映出该区灰岩及白云岩明显受到埋藏作用的影响,白云岩化系早期埋藏条件下高盐度卤水的渗透回流交代作用。

3 讨论

通过对南川三泉剖面、秀山膏田剖面、花垣排碧剖面3条剖面白云岩及灰岩地球化学对比分析认为,该区白云岩化过程 Sr 有明显的带出现象, Sr/Ba 总体表现为灰岩低、白云岩高的特点,且 Sr/Ba 总体较高,仅少量数据点 Sr/Ba 小于1,反映出其主要形成于埋藏环境,少数形成于海陆交互环境,不同程度地受到淡水的作用和影响。灰岩在成岩作用过程中 Ba 可能有带入现象,而白云岩在其形成过程中, Ba 可能有带出现象; Sr/Ca 可能受到白云岩化过程 Sr 带出影响,普遍比值小于1;灰岩与白云岩相比,灰岩 Na 含量明显偏高,不仅高于白云岩,而且高

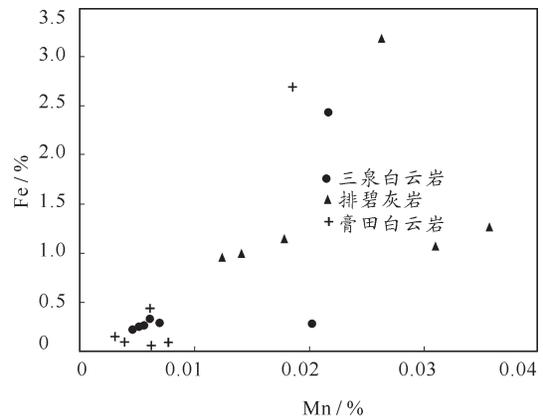


图7 研究区灰岩及白云岩Fe-Mn相关图

Fig.7 The relationship between Fe and Mn

于淡水成因的的美国 Wisconsin 中奥陶统 Mifflin Member 灰岩以及美国 Tennessee 东部 Tongling 地区上奥陶统灰岩。白云岩 Na 含量与开宁盆地巴洼阶地潮上萨布哈白云岩中 Na 含量相近。灰岩及白云岩中 K 含量与 Na 含量相似,白云岩化过程中 K 、 Na 可能有带出现象;灰岩与白云岩 m 值相比,花垣排碧剖面数据总体特征反映为海水沉积环境,南川三泉及秀山膏田数据偏大,总体反映为与潟湖相关的沉积环境。 Fe/Mn 较大,反映出该区灰岩及白云岩明显受到埋藏作用的影响; $B_{\text{核}}$ 值反映出该区白云岩及灰岩主要形成于咸水—半咸水沉积环境,局部受淡水作用影响。结合该区白云岩普遍存在的交代结构以及石盐、膏盐等沉积物,认为该区白云岩主要形成于早期埋藏条件下高盐度卤水的渗透回流交代作用,少数形成于受淡水影响的混合水白云岩化作用。

参考文献(References):

- [1] 胡明毅. 湖南石门中上寒武统白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2003, 14(2): 153-160.
Hu Mingyi. Origin of Middle-upper Cambrian Dolomites in Shimen, Hunan[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 14(2): 53-160(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 16-20.
Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al. The Sedimentary Evolution and Mineralization of Ancient Continent in South China[M]. Beijing: Science Press, 1993: 16-20(in Chinese).
- [3] Land L S, Goreau T F. Submarine lithification of Jamaican reefs[J].

- J. Sed. Petrol., 1970, 40: 457–462.
- [4] Kinsman D J J. Interpretation of Sr^{2+} concentration in carbonate minerals and rocks[J]. J. Sed. Petrol., 1969, 39: 486–508.
- [5] Baker P A, Burns S J. Occurrence and formation of dolomite in organic-rich continental margin sediments[J]. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 1985, 69: 1917–1930.
- [6] Tucker M E, Wright V P. Carbonate Sedimentology[M]. Blackwell Scientific Publication. Oxford, London, 1990: 314–400.
- [7] 邱家骧, 林景任. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 235–238.
Qiu Jiaxiang, Lin Jingqian. Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 235–238(in Chinese).
- [8] 米利曼 J D 著. 中国科学院地质研究所译. 海洋碳酸盐[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 121–126.
Miliman J D. Ocean Carbonate[M]. Translated by Geology Institute of Chinese Academy of Science. Beijing: Science Press, 1978: 121–126(in Chinese).
- [9] Land L S, Hoops G K. Sodium in carbonate and rocks: a possible index to the salinity of diagenetic solution[J]. J. Sed. Petrol., 1973, 43: 614–617.
- [10] Churnet H G, Misra K C. Genetic implication of trace element distribution pattern in the Upper Knox carbonate rocks, Copper Ridge District, East Tennessee[J]. Sediment Geol., 1981, 30: 173–194.
- [11] Badiozamani K. The Dorag dolomitization model—application to the Middle Ordovician of Wisconsin[J]. J. Sediment. Petrol., 1973, 43: 965–984.
- [12] Wallace M W. Origin of dolomitization on the Barbwire Terrace, Canning Basin, Western Australia[J]. Sedimentary, 1990, 37: 105–122.
- [13] 刘宝珺, 曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 73–82.
Liu Baojun, Zeng Yunfu. Lithofacies Palaeogeography Foundation and Method of Work[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 73–82(in Chinese).
- [14] 焦存礼, 邢秀娟, 何碧竹, 等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储层特征与成因类型[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1008–1015.
Jiao Cunli, Xing Xiujian, He Bizhu, et al. Characteristics and genetic types of Cambrian–Ordovician dolomite reservoirs in Tarim basin[J]. Geology in China, 2011, 38(4): 1008–1015(in Chinese with English abstract).
- [15] 李让彬, 樊太亮, 高志前, 等. 塔里木盆地卡塔克隆起卡1三维区块奥陶系鹰山组储层特征与影响因素[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1016–1024.
Li Rangbin, Fan Taijiang, Gao Zhiqian, et al. Characteristics and influencing factors of reservoirs in the Ordovician Yinshan Formation of the Ka1 three dimensional seismic area within Katakone uplift, Tarim basin[J]. Geology in China, 2011, 38(4): 1016–1024(in Chinese with English abstract).

The characteristics and genetic mechanism of middle–upper Cambrian dolomite on the southeast margin of Sichuan Basin

LIU Jian–qing, ZHAO Zhan, LIN Jia–shan, FENG Wei–ming,
HUANG Xue–ping, WEI Hong–gang

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

Abstract: Based on petrological and geochemical analysis of middle–upper Cambrian dolomite in three different profiles, the authors hold that the dolomite was mainly formed by brine reflux dolomitization in the early bury period, together with mixing water replacement. The evidence obtained is as follows: ① the ratios of Sr/Ba in dolomite and calcite are high, with only a few data being lower than 1; ② the values of Na and K are high in calcite, the content of Na in calcite is higher than that of middle Ordovician Mifflm Member calcite in Wisconsin and that of upper–Ordovician calcite in Tongling of eastern Tennessee characterized by fresh water origin, and the content of Na in dolomite is equal to that of Sabkha dolomite in Barbwire terrace of Canning basin; ③ the values of m suggest that the calcite was in a seawater sedimentary environment, and the dolomite was in a lagoon sedimentary environment; ④ the values of revised B show that the calcite and dolomite were formed in salt and semi–salt water, partly affected by fresh water. The Sr values were impoverished during the dolomitization, and Na and K might also have been impoverished in this process.

Key words: dolomite; geochemistry; brine reflux; mixed water

About the first author: LIU Jian–qing, born in 1969, vice professor, mainly engages in the study of sedimentary geology; E–mail: liujq1@tom.com.