

塔中地区寒武系—奥陶系碳酸盐岩 Sr 元素和 Sr 同位素特征

黄文辉¹, 杨 敏¹, 于炳松¹, 樊太亮¹, 初广震¹, 万 欢¹, 朱井泉²,
吴仕强², 王 旭²

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要: 使用 VG354 固体同位素质谱仪对中 1、中 4 井的 25 个碳酸盐岩样品做了 Sr 同位素测试, 并利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)对塔中地区 4 口井共 109 个碳酸盐岩样品测试了 Sr、Mn 元素的含量. 通过对 Sr、Mn 元素含量分析, 及中 1、中 4 井碳酸盐岩的 Sr 同位素组成分析, 对比全球奥陶系海相碳酸盐的 Sr 同位素分析结果及演化趋势, 得出了如下认识: (1)塔中地区奥陶纪⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与全球海水 Sr 同位素演化趋势基本一致, 具有随时间下降的总体趋势, 这与广阔陆表海和有关的沉积物对放射性成因铀的封存作用有关, 说明海平面变化和白云岩化作用仍然是该区海相碳酸盐岩铀同位素组成与演化的主要控制因素; (2)塔中地区早奥陶世的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与全球海水 Sr 同位素比值相当, 说明该区早奥陶世碳酸盐岩成岩环境为正常海水, 且早奥陶世⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值有单调降低的规律, 说明与海平面变化有关; (3)塔中地区晚奥陶世⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值比全球海水高, 其原因是白云岩化作用和晚奥陶世盆地抬升近地表水带来高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值, 且晚奥陶世⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为整体升高的趋势; (4)塔中地区奥陶纪碳酸盐岩中 Mn 元素含量变化不大, 反映了塔中地区奥陶纪成岩环境主要为浅水相, 但也有深水相, 白云岩化对其影响不大; (5)塔中地区奥陶纪碳酸盐岩中 Sr 元素含量变化较大, 反映该时期该区碳酸盐岩成岩流体主要为海水, 但也有混合水, 白云岩主要为 III 类白云岩和 I 类白云岩.

关键词: 塔中地区; 碳酸盐岩; Sr 元素; Sr 同位素.

中图分类号: P578.6; P597

文章编号: 1000-2383(2006)06-0839-07

收稿日期: 2006-05-15

Strontium Isotope Composition and Its Characteristics Analysis of Cambrian-Ordovician Carbonate in Tazhong District, Tarim Basin

HUANG Wen-hui¹, YANG Min¹, YU Bing-song¹, FAN Tai-liang¹, CHU Guang-zhen¹,
WAN Huan¹, ZHU Jing-quan², WU Shi-qiang², WANG Xu²

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: In this paper, ICP-MS analytic technology is employed to test the strontium and manganese contents of 109 samples collected from four wells in Tazhong area, Tarim basin. In addition, strontium isotope composition tests have also been conducted, with VG354 solid isotope mass spectrograph, on 25 samples from Zhong 1 and Zhong 4 wells. The analysis of strontium and manganese contents, the research into the characteristics of strontium isotope composition from Zhong 1 and Zhong 4 wells, the comparison between the results from strontium analysis of the global Ordovician marine carbonate and its evolution trend, and the combination of sedimentary facies characteristics of isolated wells in this area conclude the following five points: (1) The marine carbonate strontium isotope curve in the Tazhong area of Tarim basin is consistent with the global evolution trend generally descending with time, the direct reason of which is the evolution of paleogeographic environ-

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2005CB422103); 中石化委托项目.

作者简介: 黄文辉(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油气储层地质学、煤田地质学等领域研究工作. E-mail: huangwh@cugb.edu.cn

ment. The Ordovician paleogeographic environment ranged from the restricted platform to the open platform and then to the shallow marine shelf in Tazhong area, Tarim basin. Dolomitization is another secondary reason, and the inversion of fluid with high manganese can lead to heavy strontium; (2) The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of the Upper Ordovician in Tazhong area characterized by an apparent mono-decline trend that goes with the time, similar to the global strontium isotope ratio, implies the starting point of the variation of the Upper Ordovician sea level, the overall trend of which is rising; (3) Compared with the global seawater strontium ratios, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of the Lower Ordovician is much higher, and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of the Lower Ordovician is often increasing, with its maximum value determined at 0.709 727. The dolomitization, the evaporation of the supratide, and the reflux of high manganese haline, closely associated with such an increasing ratio, can lead to the increase in the content of the strontium and the rise in the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio; (4) The manganese content varies little, and is affected little by dolomitization; (5) Large variations occur in the strontium values of Ordovician carbonate in the Tazhong district. Apart from paleogeographic environment and petrography, other factors that can affect the values of strontium are the content of the terrestrial clastics and the diagenesis modification which may result in the further change in the strontium values.

Key words: Tarim basin; carbonate rock; strontium composition; strontium isotope.

塔里木盆地位于我国西北边陲,面积约 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$,是我国最大的内陆盆地.塔中地区在区域构造位置上属中央隆起中段的塔中低隆起,北以塔中 1 号断裂带与满加尔凹陷相邻,西面及南面分别与阿瓦提凹陷和塘古孜巴斯凹陷呈斜坡过渡关系,东与塔中东凸起相邻,是塔里木油田的主要采油区之一.以奥陶系碳酸盐岩为重点目的层的油气勘探已取得了重大突破.

锶在海水中的残留时间大大长于海水的混合时间,因此任一时代全球范围内海相锶元素在同位素组成上是均一的(McArthur *et al.*, 1992),从而导致了地质历史中海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是随时间而变化的(Wickman, 1948).海水中 Sr 同位素组成主要由 3 种 Sr 源决定:(1)大陆壳硅铝质岩石经风化剥蚀提供的 Sr 源,具有极高的 $N(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 值,平均为 0.720;(2)地幔铁镁质岩石通过海底扩张或火山活动提供的 Sr 源,其 Sr 同位素值低至 0.704 0;(3)古老海相碳酸盐岩重溶提供的 Sr 源,其 Sr 同位素组成介于前两者之间,平均为 0.708 0(Depaolo and Ingrain, 1985; Richter *et al.*, 1992; Montanez *et al.*, 1996; Ruppel *et al.*, 1996; 孙志国等, 1996).胡明毅(1994)在研究碳酸盐岩中 Sr 元素时指出, Sr 元素与 Ca、Mg、Ba 等元素的离子半径相近,以及碳酸盐岩矿物成分和海水、淡水中 Sr 含量差别等原因,在不同程度上直接或间接影响了 Sr 在碳酸盐岩中的分布.海洋中锶同位素组成,基本上是大 陆表面和海洋盆地中暴露于化学风化作用之下的各种岩石及其表面积的综合反映. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的 变化与海平面升降呈负相关(鲍志东等, 1998).

1 样品介绍

本次测试样品为塔中地区卡塔克 3 区的中 12 井和中 13 井,研究区以及采样井点见图 1.其中,中 12 井共采集 23 块样品:前 5 个样品采自中奥陶统一间房组(O_2y_j),沉积相为开阔台地相内滩亚相;后 18 个样品采自下奥陶统鹰山组(O_1y_s),沉积相为局限台地相泻湖亚相.中 13 井采集 21 块样品,这些样品均采自下奥陶统丘里塔格群上亚群鹰山组(O_1y_s),前 9 个样品的沉积相为局限台地相泻湖亚

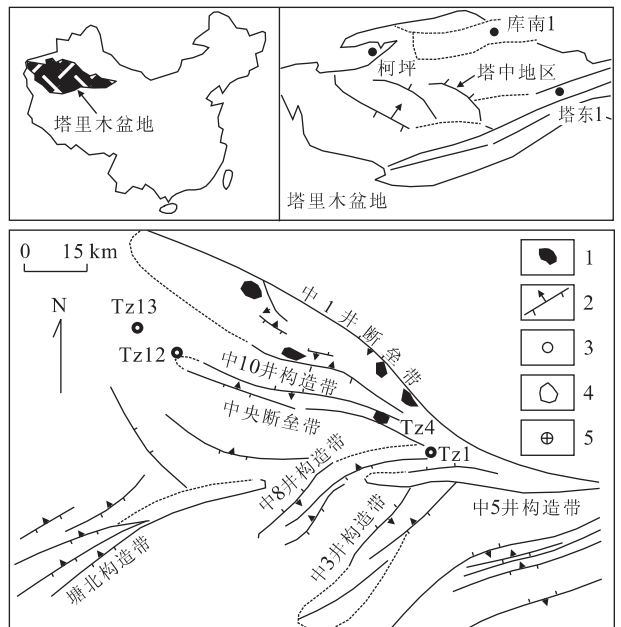


图 1 研究区以及采样井点位置示意图

Fig. 1 Study area and places of sampling wells
1. 含油气区域; 2. 断层; 3. 油气井; 4. 研究区域; 5. 干井

相,10~21 号样品沉积相为台地潮坪相潮间亚相。中 4 井 Z4-6 前为下奥陶统白云岩样品,Z4-11 之后为寒武系白云岩样品,其中 Z4-7 至 Z4-10 为上奥陶统白云质灰岩样品。

使用 VG354 固体同位素质谱仪对中 1、中 4 井的 25 个碳酸盐岩样品做了 Sr 同位素测试,实验在中国科学院地质与地球物理研究所实验室完成。

2 塔中地区白云岩 Sr、Mn 元素特征

用 ICP-MS 对塔中地区中 1、中 4、中 12、中 13 井的共 109 个元素进行了测试,其平均值见表 1。同时做出了各井的 Mn、Sr 元素含量趋势图,如图 2、3 所示。

2.1 Mn 元素含量特征

李双应等(1995)指出,白云岩化本身并不在 Mn 含量上产生明显的影响;胡明毅(1994)在研究柯坪地区碳酸盐岩时指出,Mn 元素在深水相中含量高(平均值在 200×10^{-6} 以上),在浅水相中含量低(平均值在 100×10^{-6} 以下,一般为 $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$)。

表 1 塔中地区碳酸盐岩 Mn、Sr 同位素平均值

Table 1 Average values of Mn and Sr isotopes in carbonate rocks of Tazhong area

井位	Mn(10^{-6})	Sr(10^{-6})
中 1	48.87	135.00
中 4	176.39	409.77
中 12	75.29	155.00
中 13	22.88	138.00

从表 1 和图 2 可以看出,中 4 井 Mn 元素含量最高,平均值达到了 176.39×10^{-6} ,中 13 井 Mn 元素含量最低,平均值为 22.88×10^{-6} 。从深度来说,各井的 Mn 元素变化规律不明显。

从图 2 可以看出,中 4 井 Mn 元素主要分布在 $80 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 之间,在 $40 \times 10^{-6} \sim 440 \times 10^{-6}$ 之间都有分布,说明主要为浅水相,也有深水相;中 1 井、中 12 井、中 13 井 Mn 元素主要分布在 $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ 、 $0 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 、 $16 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 之间,比较特殊的是中 12 井在 $360 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 之间还有一个样品,说明中 1、中 12、中 13 井主要以浅水相为主,但也有深水相沉积。

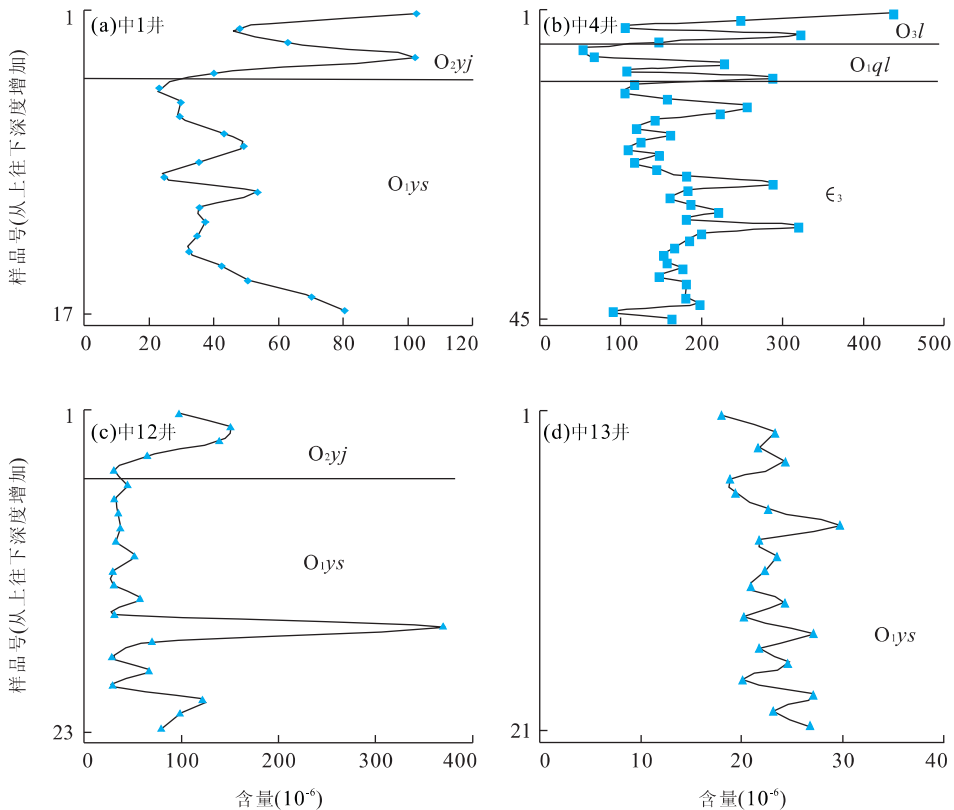


图 2 塔中 1、4、12、13 井 Mn 元素含量趋势图

Fig. 2 Mn contents in Zhong 1, 4, 12 and 13 wells

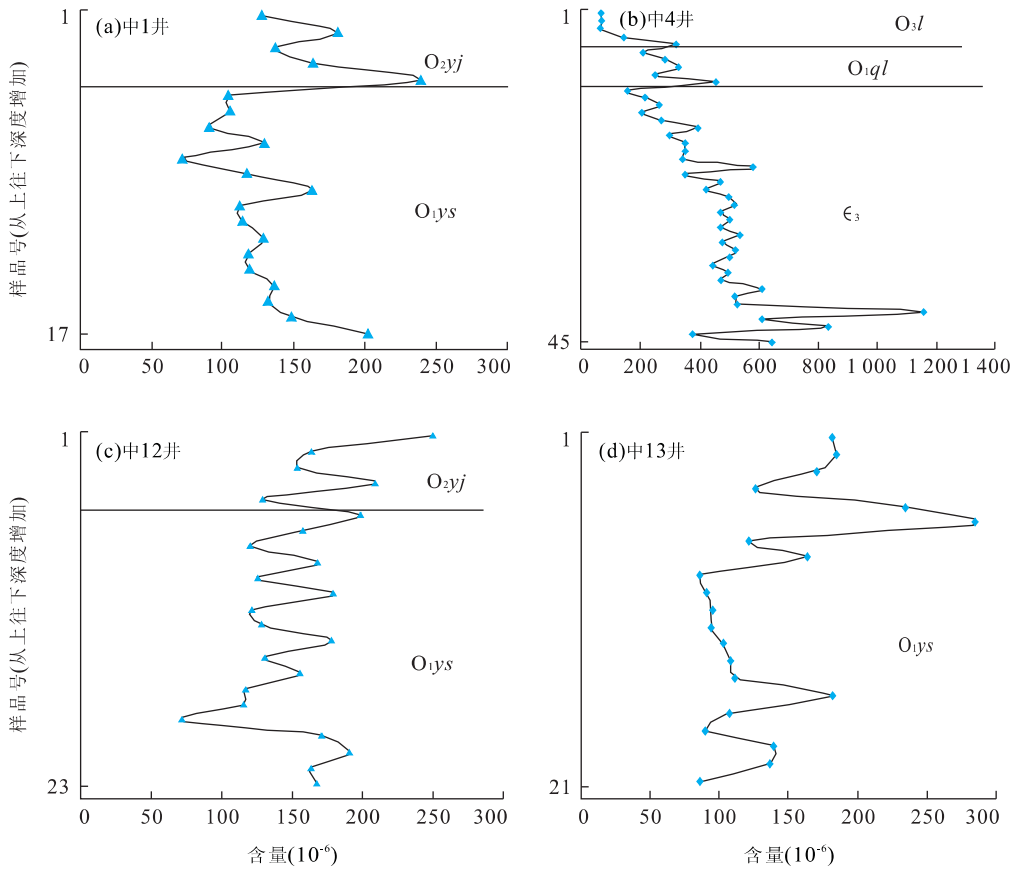


图 3 塔中 1、4、12、13 井 Sr 元素含量趋势图

Fig. 3 Sr contents in Zhong 1, 4, 12 and 13 wells

2.2 Sr 元素含量特征

覃建雄和曾允孚(1994)指出, I 类白云岩中 Sr^{2+} 含量平均 318.5×10^{-6} , 明显大于 75×10^{-6} , 这除了反映具超浓缩成岩卤水的泻湖、膏盐湖或潮坪相沉积物对 Sr^{2+} 的吸附延缓了 Sr^{2+} 的成岩消减之外, 尤其表明了成岩过程中缺乏淡水的影响; 同时指出, I 类白云岩的 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 含量最低, 其形成于泻湖、膏盐湖或潮坪等具氧化和蒸发特征的近地表成岩环境; II 类白云岩中 Sr^{2+} 含量最低(最小仅 15×10^{-6}), Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 中等偏低, 反映了大气淡水的特征, 这与氧碳同位素分析结果一致; III 类白云岩中 Sr^{2+} 平均含量 175×10^{-6} , 表明成岩流体含盐度较高, 应为还原深埋环境产物。因为在深埋环境中, 温压高, 还原性强, 有利于 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ 的转化并进入粗晶白云石晶格中, 从而造成 III 类白云岩明显富 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 。

从表 1 和图 3 可以看出, 中 4 井 Sr 元素含量最高, 平均值达 409.77×10^{-6} , 中 1 井 Sr 元素含量最低, 平均值为 135×10^{-6} ; 但总的来说中 1、12、13 井

的 Sr 元素含量比较接近, 而中 4 井与其他三口井的 Sr 元素含量差别较大。从深度来说, 各井的 Sr 元素变化规律不大, 只中 4 井有随深度增加 Sr 元素含量升高的趋势。

从图 3 可以看见, 中 4 井 Sr 元素含量主要分布在 $200 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ 和 $0 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$ 之间, 说明中 4 井的 Sr 元素丰度变化范围很宽, 3 种类型白云岩成因都有, 且以 I 类白云岩和 III 类白云岩为主, 淡水作用也存在; 中 1 井、中 12 井、中 13 井 Sr 元素主要分布分别在 $100 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$ 、 $100 \times 10^{-6} \sim 180 \times 10^{-6}$ 、 $80 \times 10^{-6} \sim 140 \times 10^{-6}$ 之间, 故其白云岩主要为 III 类白云岩类型, 且在成岩过程也有淡水加入, 成岩流体为混合水。

3 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩 Sr 同位素特征

对中 1 井、中 4 井共 25 个样品进行了 Sr 同位素测试, 数据见表 2、表 3。并据此做出了奥陶纪碳酸

盐岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 折线图(图 4),并根据资料得到奥陶纪海水 Sr 同位素演化曲线图(图 5)。

从图 4、图 5 可以看出,奥陶纪塔中地区的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与全球海水 Sr 同位素演化趋势一致,具有随时间单调下降的总体趋势。黄思静等(2004)分析认为其原因与晚寒武世—奥陶纪的全球淹没事件,以及广阔陆表海和有关的沉积物对放射性成因铀的封存作用有关,本文的数据也支持这一观点。

3.1 早奥陶世海相碳酸盐高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值和比值的降低

全球早奥陶世海水的铀同位素⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值大于 0.708 8。Qing *et al.* (1998)和 Denison *et al.* (1998)测试的数据的平均值为 0.708 737。从 McArthur *et al.* (2001)拟合的曲线数据中早奥陶世的平均值为 0.708 988;塔中地区早奥陶世成分变化连续,而大面积的古地理环境演变发生在奥陶纪内部,其中尤其在奥陶纪的中晚期更加剧烈,这些变化在铀的地球化学特征上有所体现。江茂生等(2002)在研究塔里木盆地 Sr 同位素时,塔中 12 井下奥陶统海相碳酸盐的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值中有 4 个样品小于 0.708 3,普遍比全球海水铀同位素比值小。由于成岩蚀变作用或样品处理过程等,都会导致其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的增加,因而将其铀同位素比值低于同期海水值的主要原因都归于深部流体带来的低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的幔源铀的影响。但此次研究发现,中 4 井早奥陶世的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值平均值为 0.708 611,其中多数大于 0.708 8;中 1 井早奥陶世⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 平均值为 0.708 899,全部大于 0.708 8(表 2),其结果与全球海水 Sr 同位素比值相当,说明该区早奥陶世碳酸盐岩成岩环境为正常海水。微相分析也表明,从下奥陶统中部开始,就已经表现为碳酸盐岩浅水开阔台地相沉积,原始岩石类型主要为砂屑石灰岩和生物颗粒石灰岩,到中奥陶统局部发育礁相沉积,这个时期的海水完全与外海连通,属于正常海水环境。本次所测数据应属正常,但由于影响铀同位素比值的因素还有岩溶作用等其他因素,所以江茂生等(2002)测的数据偏低可能是其他因素所致,深部流体的影响确实存在,但可能不是唯一原因。

同时,早奥陶世⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值普遍表现为单调降低,寒武—奥陶纪过渡带比值最高。结合古地理演变分析,我们认为其原因主要与原始沉积环境中的海水盐度从最早期的超高变为正常有关,其次寒武纪—奥陶纪过渡期的碳酸盐岩沉积速率较慢,岩层

表 2 塔里木盆地塔中地区中 1 井奥陶系碳酸盐岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值

Table 2 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio of Ordovician carbonate rocks of Zhong-1 in Tazhong area, Tarim basin

地层	样品	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ
O ₂ yj	Z1-1(微晶石灰岩)	0.708 392	11
O ₂ yj	Z1-2(微晶石灰岩)	0.708 103	10
O ₂ yj	Z1-3(云质石灰岩)	0.708 383	12
O ₂ yj	Z1-4(瘤状石灰岩)	0.708 323	11
	中奥陶世平均值	0.708 300	
O ₁ ys	Z1-6(灰质白云岩)	0.708 906	12
O ₁ ys	Z1-7(中晶白云岩)	0.708 935	10
O ₁ ys	Z1-11(细晶白云岩)	0.708 800	12
O ₁ ys	Z1-12(细晶白云岩)	0.708 828	10
O ₁ ys	Z1-16(中晶白云岩)	0.709 019	12
O ₁ ys	Z1-17(中晶白云岩)	0.708 904	12
	早奥陶世平均值	0.708 899	

表 3 塔里木盆地塔中地区中 4 井寒武—奥陶系碳酸盐岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值

Table 3 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio of Cambrian and Ordovician carbonate rocks of Zhong-4 in Tazhong area

地层	样品	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ
O ₃ l	Z4-2(中晶白云岩)	0.709 727	17
O ₃ l	Z4-3(粗晶白云岩)	0.709 233	15
O ₃ l	Z4-4(粗晶白云岩)	0.709 356	14
O ₃ l	Z4-5(断层角砾白云岩)	0.708 375	14
	晚奥陶世平均值	0.709 173	
O ₁ ql	Z4-6(生屑石灰岩)	0.708 290	11
O ₁ ql	Z4-7(生屑云质灰岩)	0.708 235	13
O ₁ ql	Z4-8(藻砂屑亮晶云质灰岩)	0.708 818	13
O ₁ ql	Z4-9(藻砂屑亮晶云质灰岩)	0.708 820	13
O ₁ ql	Z4-10(藻砂屑亮晶云质灰岩)	0.708 890	12
	早奥陶世平均值	0.708 611	
Є ₃ ql	Z4-11(含石膏中晶白云岩)	0.709 026	19
Є ₃ ql	Z4-19(中晶白云岩)	0.709 985	21
Є ₃ ql	Z4-31(中晶白云岩)	0.708 708	13
Є ₃ ql	Z4-32(含萤石中晶白云岩)	0.708 801	13
Є ₃ ql	Z4-39(粗晶白云岩)	0.708 727	13
Є ₃ ql	Z4-42(含海绿石粗晶白云岩)	0.709 072	17
	寒武纪平均值	0.709 053	

厚度较薄,碳质和泥质混入物较多,也导致了铀的同位素比值偏高。深部流体带来的低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的幔源铀的影响可能只在局部地区存在,但是这种影响在中 4 井并不明显。

3.2 晚奥陶世海相碳酸盐岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 特征与 T₇⁰和 T₇⁴界面的关系

全球晚奥陶世海水的 Sr 同位素⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值小于 0.708 2(Qing *et al.*, 1998; Denison *et al.*,

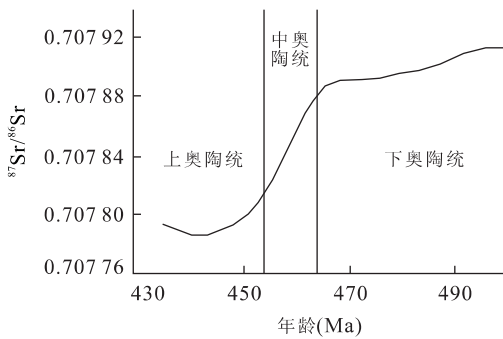


图 4 奥陶纪海水 Sr 同位素演化曲线

Fig. 4 Diagram of Sr isotope evolution in Ordovician seawater 曲线据 McArthur *et al.* (2001) 拟合曲线中心部分的数据做出, 上、中、下奥陶统的界线按 Remane *et al.* (2001) 的国际地层的年龄值

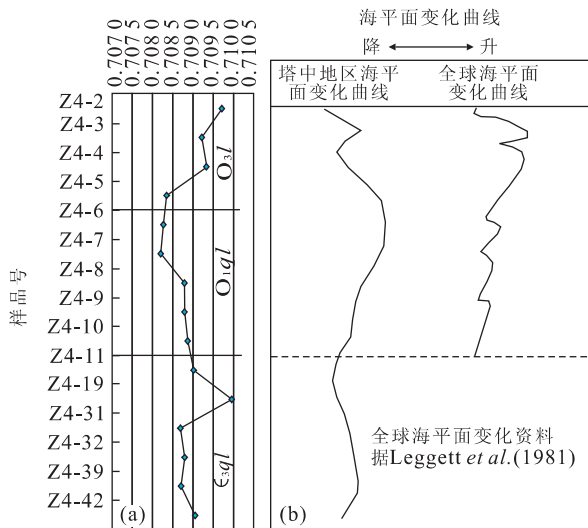


图 5 塔中地区寒武—奥陶系 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(a)与海平面变化曲线(b)

Fig. 5 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio (a) and sea level variation curves (b) of Cambrian and Ordovician in Tazhong area

1998; McArthur *et al.*, 2001), 江茂生等(2002)研究塔中 12 井时, 上奥陶统海相碳酸盐的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值中样品基本都大于 0.7082。此次研究发现, 中 4 井晚奥陶世的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.709173(表 3), 大于全球海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。晚奥陶世盆地海平面变化加快显然影响了锶同位素比值的变化, 但是在塔中地区普遍缺失上奥陶统, 加里东运动使得沉积盆地的隆升, 接受长时间的剥蚀, 其间地表大气淡水作用可能造成一定影响。在 T_7^0 和 T_7^4 界面附近的样品的测试数值普遍变化较大, 碳氧同位素和其他微量元素测试结果也表明, 在这两个关键界面上下也有显著的变化。这表明古地理环境的确对碳酸盐岩的微量元素和同位素等地球化学特征起到了控制作用。

3.3 塔中地区寒武—奥陶系海平面变化情况

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化与海平面升降呈负相关关系。从图 5 可以看出, 塔中地区在晚寒武世海平面处于比较平稳的状态, 但有缓慢下降的趋势; 到早奥陶世海平面开始上升, 其间有波动; 在中奥陶世具有一次明显的海平面升高事件; 到晚奥陶世晚期, 海平面又开始大幅下降。其整个变化趋势与全球海平面变化趋势基本一致, 说明全球海平面变化仍然是塔里木盆地海相 Sr 同位素组成与演化的主要控制因素。

4 结论

(1) 塔中地区奥陶纪 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与全球海水 Sr 同位素演化趋势基本一致, 具有随时间下降的总体趋势, 这与广阔陆表海和有关的沉积物对放射性成因锶的封存作用有关, 说明海平面变化和白云岩化作用仍然是该区海相碳酸盐岩锶同位素组成与演化的主要控制因素。(2) 塔中地区早奥陶世的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与全球海水 Sr 同位素比值相当, 说明该区早奥陶世碳酸盐岩成岩环境为正常海水, 且早奥陶世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值有单调降低的规律, 说明与海平面变化有关。(3) 塔中地区晚奥陶世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比全球海水高, 其原因是白云岩化作用和晚奥陶世盆地抬升近地表水带来高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 且晚奥陶世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为整体升高的趋势。(4) 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩中 Mn 元素含量变化不大, 反映了塔中地区奥陶纪成岩环境主要为浅水相, 但也有深水相, 白云岩化对其影响不大。(5) 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩中 Sr 元素含量变化较大, 反映该时期该区碳酸盐岩成岩流体主要为海水, 但也有混合水, 白云岩主要为 III 类白云岩和 I 类白云岩。

References

- Bao, Z. D., Zhu, J. Q., Jiang, M. S., et al., 1998. Isotope and trace element evolution; Responding to sea-level fluctuation—An example of Ordovician in middle Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(4): 32—36 (in Chinese with English abstract).
- Denison, R. E., Koepnick, R. B., Burke, W. H., et al., 1998. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve. *Chem. Geol.*, 152: 325—340.
- Depaolo, D. J., Ingrain, B. L., 1985. High-resolution stratigraphy with strontium isotope. *Science*, 227: 938—941.
- Hu, M. Y., 1994. Geochemical characters and environmental

- significance of Ordovician carbonate rocks in Keping area, Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 15(2):158—163 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Liu, S. G., Li, G. R., et al., 2004. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(1):1—7 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, M. S., Zhu, J. Q., Chen, D. Z., et al., 2002. Carbon and strontium isotope characteristic and response with sea level variation of Ordovician carbonate rocks in Tarim basin. *Science in China (Series D)*, 32(1):36—42 (in Chinese).
- Leggett, J. M., Mckerrow, W. S., Cock, L. R. M., et al., 1981. Periodicity in the Early Palaeozoic marine realm. *Journal of the Geological Society*, 138:167—176.
- Li, S. Y., Jin, F. Q., Wang, D. X., 1995. Geochemical characteristics of carbonate rock diagenesis. *Experimental Petroleum Geology*, 17(1):55—61 (in Chinese with English abstract).
- McArthur, J. M., Burnett, J., Hancock, J. M., 1992. Strontium isotopes at K/T boundary: Discussion. *Nature*, 355(6355):28.
- McArthur, J. M., Howarth, R. J., Bailey, T. R., 2001. Strontium isotope stratigraphy: Lowess version 3, best fit to the marine Sr-isotope curve for 0—509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *J. Geol.*, 109:155—170.
- Montanez, I. P., Banner, J. L., Olseger, D. A., et al., 1996. Integrated Sr isotope variation and sea-level history of Middle to Upper Cambrian platform carbonates: Implications for the evolution of Cambrian sea-water $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Geology*, 24(10):917—920.
- Qing, H., Barnes, C. R., Buhl, D., et al., 1998. The strontium isotopic composition of Ordovician and Silurian brachiopods and conodonts: Relationships to geological events and implications for coeval seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10):1721—1733.
- Remane, J., Faure-Muret, A., Odin, G. S., 2001. International stratigraphic chart. *Journal of Stratigraphy*, 24(Suppl.):321—340.
- Richter, F. M., Rowley, D. B., DePaolo, D. J., 1992. Sr isotope evolution of seawater: The role of tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 109:11—23.
- Ruppel, S. C., James, E. W., Barrick, J. E., et al., 1996. High-resolution $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ chemostratigraphy of the Silurian: Implications for event correlation and strontium flux. *Geology*, 24(9):831—834.
- Sun, Z. G., Liu, B. Z., Liu, J., 1996. Strontium isotope's characteristic and paleoenvironmental meaning in the coral reef of Westsand. *Chinese Science Bulletin*, 43(5):434—437 (in Chinese).
- Qin, J. X., Zeng, Y. F., 1994. Geochemistry of Lower Ordovician dolostones in eastern Ordos basin. *Acta Mineralogica Sinica*, 14(1):22—31 (in Chinese with English abstract).
- Wickman, F. E., 1948. Isotope ratios: A clue to the age of certain marine sediments. *J. Geol.*, 56:61—66.

附中文参考文献

- 鲍志东,朱井泉,江茂生,等,1998.海平面升降中的元素地球化学响应——以塔中地区奥陶纪为例. *沉积学报*, 16(4):32—36.
- 胡明毅,1994.塔北柯坪奥陶系碳酸盐岩地球化学特征及环境意义. *石油天然气地质*, 15(2):158—163.
- 黄思静,刘树根,李国蓉,等,2004.奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(1):1—7.
- 江茂生,朱井泉,陈代钊,等,2002.塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩的碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应. *中国科学(D辑)*, 32(1):36—42.
- 李双应,金福全,王道轩,1995.碳酸盐岩成岩作用的微量元素地球化学特征. *石油实验地质*, 17(1):55—61.
- 孙志国,刘宝柱,刘健,1996.西沙珊瑚礁锶同位素特征及其古环境意义. *科学通报*, 43(5):434—437.
- 覃建雄,曾允孚,1994.鄂尔多斯盆地东部下奥陶统白云岩地球化学研究. *矿物学报*, 14(1):22—31.