

# 海平面升降中的元素地球化学响应<sup>①</sup>

## ——以塔中地区奥陶纪为例

鲍志东<sup>1</sup> 朱井泉<sup>2</sup> 江茂生<sup>2</sup> 夏勇<sup>1</sup>

1(石油大学地球科学系 北京 102200)

2(中国科学院地质研究所 北京 100029)

**摘要** 海相岩石自生矿物中的锶同位素组成可反映其沉积时期的海平面波动趋势。塔中地区奥陶系<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr分析表明,在早奥陶世海平面总体呈下降趋势,而在中晚奥陶世海平面则持续上升并保持在奥陶纪平均海平面之上。氧同位素分析表明,塔中地区下奥陶统的白云岩主要为低海平面期高盐度环境沉积的准同生白云岩。微量元素分析结果支持同位素研究结论。分析测试表明,锶、氧同位素及一些微量元素均对海平面升降波动具有敏感的反应。

**关键词** 海平面升降 同位素演化 负相关 塔里木盆地

**第一作者简介** 鲍志东 男 34岁 博士 副教授 沉积学和石油地质学

在特定的大地构造背景及特定的沉积环境中形成的地层,发育着相应的沉积地球化学分布型式。沉积地球化学指标是构造相和沉积相的重要指示,它可以高精度地计算古环境中沉积介质深度及物理化学性质等的变化。同时,沉积地球化学指标亦是沉积层序及充填演化史等盆地分析的重要参数。

### 1 概述

塔里木盆地位于中国西北的新疆维吾尔自治区的南部,面积达56万km<sup>2</sup>,是我国能源工业的重要战略接替区。塔中地区位于塔里木盆地中央隆起的中部,其中奥陶系岩石以海相碳酸盐岩为主,这使得我们能够尝试以锶同位素法分析海平面升降,因为只有海洋自生矿物(如碳酸盐矿物)中的锶才可以作为海平面升降的监测器。

锶的四种天然同位素(<sup>88</sup>Sr、<sup>87</sup>Sr、<sup>86</sup>Sr、<sup>84</sup>Sr)均属于稳定同位素。海水及海相碳酸盐沉积物中的初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值受控于锶的主要来源:(1)地壳及上地幔岩石的风化作用,(2)海相碳酸盐岩的化学风化作用,和(3)海底扩张及玄武质岩浆作用。其中壳源锶的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值较高。由于进入海洋中的锶元素一般在瞬间即可达到浓度均衡,所以锶同位素在海洋中容易实现均一化。即在同一地质时期

内,海洋中一定区域内的锶同位素组成接近于一致,并且以<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值等于或近于0.709 0为特征<sup>[1-5]</sup>。在不同地质历史时期,不同来源物质对海洋输入的相对量均有所变化,从而造成海洋及其沉积物的Sr同位素组成的变化。大量海相碳酸盐岩分析资料亦显示,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr在显生宙发生了系统变化。

由于进入海洋中的锶主要来自壳源物质化学风化作用、海洋碳酸盐的重溶及海底扩张作用等,所以,在海平面下降期间,暴露于洋面之上的大陆面积增加,导致由大陆壳风化而进入海洋的壳源锶增加,从而引起海洋碳酸盐的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值升高;相反,在海平面上升期间,由于暴露于洋面之上的陆地面积减少,由风化作用进入海洋的壳源锶减少,从而导致海洋碳酸盐的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr降低。因此,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。<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值的 变化与海平面升降呈负相关。

碳酸盐岩的氧同位素组成可反映沉积相、古水深与氧化还原度、古盐度等。现代沉积表明,氧的重同位素<sup>18</sup>O一般富集于盐度较高的海水中<sup>[6]</sup>,因而<sup>δ</sup>18O值的大小与介质盐度之间存在着正相关关系。

本次研究中,我们还从15种测试的微量元素中

① 国家“九五”科技攻关项目:96-111-01-05-02子专题研究成果的一部分。

选择了 Mn、Ni、V 和 Cr 四种元素进行古水深和海平面变化研究。关于 Mn 的古水深意义, 研究表明, 由于  $Mn^{2+}$  在溶液中较稳定, 因而  $Mn^{2+}$  在正常海水中趋于聚集并沉淀在离岸较远的地方, 即常富集于静水海底<sup>[6]</sup>。所以, 海相泥(页)岩及泥晶石灰岩中的  $Mn^{2+}$  含量较陆相同类岩石中要高得多, 海盆中心较岸边高得多。鉴此, 可以把泥(页)岩及泥晶石灰岩中的 Mn 或  $MnO$  含量作为离岸远近的指标(又称近岸指数), 亦可以用来推测相对古水深。在正常海相沉积中, Ni、V 和 Cr 主要是以粘土吸附的形式存在。在塔中奥陶纪的沉积中, 粘土矿物的含量具有随水深及离岸距离的增大而增高的趋势, 即奥陶系岩石中的 Ni、V、Cr 的含量与古水深变化成正相关关系。

本次研究首次将锶同位素法引入塔中地区奥陶纪海平面变化研究, 并辅以氧同位素及微量元素分析进行验证。这些研究结果均支持沉积相及层序地层研究结论<sup>①</sup>。

## 2 塔中地区奥陶纪锶同位素特征与海平面波动

本次工作选择了塔中地区奥陶系发育较为完全的 9 口井, 即塔中 1(TZ1)、塔中 12(TZ12)、塔中 28

表 1 塔中地区奥陶系碳酸盐岩  $^{87}Sr/^{86}Sr$  分析数据

Table 1 Ordovician carbonate  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ratio in middle Tarim basin

井号	$Sr/^{86}Sr$	
	下奥陶统 平均(变化范围)	中上奥陶统 平均(变化范围)
TZ12	0.708 3	0.708 1
	(0.706 4~0.709 0)	(0.706 7~0.709 4)
TZ29		0.708 3
		(0.708 2~0.708 4)
TZ30		0.708 3
		(0.708 1~0.708 8)
BD2		0.708 2
		(0.708 1~0.708 3)

(TZ28)、塔中 29(TZ29)、塔中 30(TZ30)、塔中 32(TZ32)、塔中 45(TZ45)、巴东 2(BD2)和塔东 1(TD1)等进行研究。在岩心观测描述及照相的基础上, 对其中 TZ12 等 4 口井的岩心进行了系统的碳酸盐岩取样, 进行 Sr 同位素测定。分析结果参见表 1。

从表 1 可以看出, 这 4 口井岩心中的 50 件碳酸

盐岩样品的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值均在 0.706 4~0.709 4 之间, 属于正常比值范畴。其平均值为 0.708 2, 即由此可以认为, 塔中地区奥陶系碳酸盐岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  平均值为 0.708 2 左右。

我们暂且以  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.708 2$  为标准, 作为塔中地区奥陶纪平均海平面的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值。即如样品超过此值则代表碳酸盐岩沉积时的洋面降低至平均海平面以下, 而低于此值则认为其洋面升高至平均海平面上。据此, 现以塔中 12 井为例, 根据岩心剖面上的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值分布特征对海平面升降变化趋势进行分析。参见图 1。

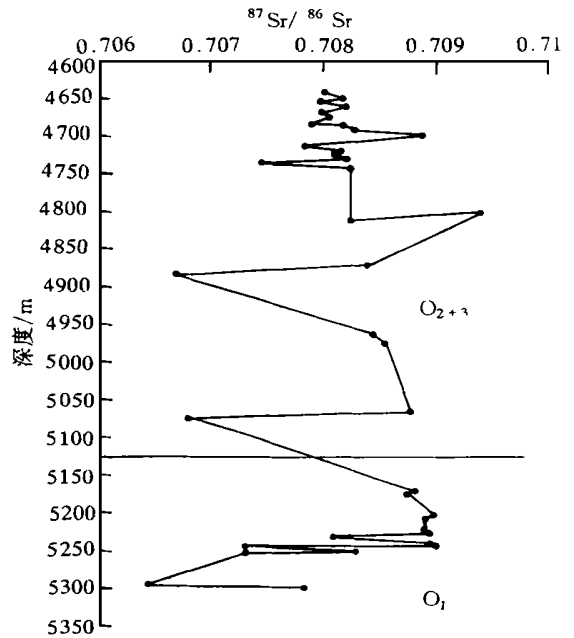


图 1 塔中 12 井奥陶系  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值纵向分布  
Fig. 1 The vertical distribution of  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ratio of Ordovician in Well TZ 12

从图 1 可得出如下认识, 在塔中 12 井中:

在井段 5 300~5 245 m(O<sub>1</sub> 下部), 碳酸盐岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  波动较大, 其值大多 < 0.708 0, 5 件样品平均值为 0.707 4。这说明此碳酸盐岩沉积期间海平面较高(持续达到最高点), 但升降较为频繁。

在井段 5 245~5 170 m(O<sub>1</sub> 上部), 碳酸盐岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值较稳定, 9 件样品中有 8 件样品均大于 0.708 2, 平均值为 0.708 8。这说明此时海平面较低(持续达到最低点), 且相对稳定。

在井段 5 075~4 803 m(O<sub>2+3</sub> 下部), 碳酸盐岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值变化范围很大, 最低值为 0.706 7, 而最高值达 0.709 4, 8 件平均值为 0.708 1。这说

明此时期海平面波动幅度较大, 但总体较  $O_1$  晚期有明显上升。

在井段 4 744 ~ 4 640 m ( $O_{2+3}$ 上部), 碳酸盐岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值又趋稳定, 其值多介于 0.708 0 ~ 0.708 2 之间, 16 件样品平均值为 0.708 1。这说明此时期海平面持续上升, 并略高于奥陶系平均海平面。

同样, 通过对 TZ29 井下奥陶统的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  分析, 可以得到如同 TZ12 井下部的海平面升降趋势的认识, 即水位由高处持续下降; 从 TZ30 井(图 2) 以及 BD2 井的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  纵向演化特点, 也可以发现类似于 TZ12 井中上部的海平面变化趋势, 即水位持续上升。

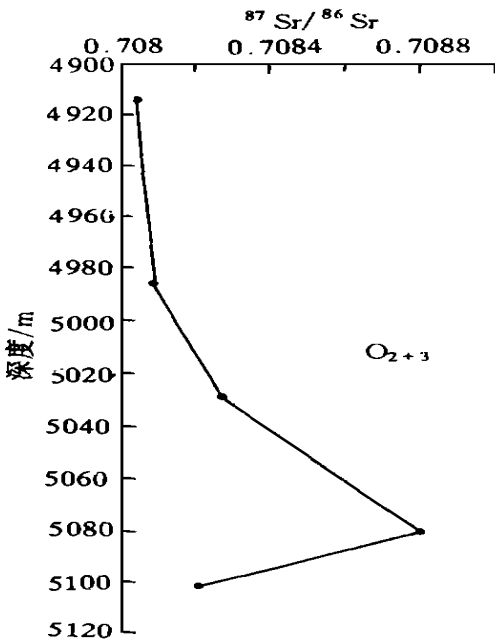


图 2 塔中 30 井中上奥陶统  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值纵向分布

Fig. 2 The vertical distribution of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of Ordovician in Well TZ 30

### 3 氧同位素特征与塔中奥陶纪盐度及海平面变化

在本次研究中, 对塔中地区的 TZ1 和 TZ12 井等 5 口井的碳酸盐岩岩心进行了  $\delta^{18}\text{O}$  测试分析。参见表 2。

从表 2 可以看出, 在下奥陶统, TZ1 井碳酸盐岩具有相对最高的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 平均  $-4.42\text{‰}$ ; TZ12 井碳酸盐岩具有相对最低的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 平均为  $-6.65\text{‰}$ ;

而 TZ29 井碳酸盐岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值介于两者之间, 平均为  $-5.31\text{‰}$ 。这些说明, 在早奥陶世, TZ1 井区海域具有相对较高的古盐度, 海水比较闭塞, 准同生白云化作用易于进行就说明了塔中 1 井下奥陶统的大套白云岩应主要为准同生白云岩; 而在 TZ29 井区海域, 特别是 TZ12 井区海域, 早奥陶世古盐度相对偏低, 水流相对通畅, 准同生白云化作用不太强。在中上奥陶统, 各井岩心碳酸盐岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值普遍降低, 由下奥陶统的平均  $-5.67\text{‰}$  降为中上奥陶统的平均  $-6.17\text{‰}$ 。说明中晚奥陶世塔中地区海水古盐度有所下降, 海平面有所上升, 沉积水体更加开阔通畅。

表 2 塔中地区奥陶系碳酸盐岩  $\delta^{18}\text{O}$  分布特点

Table 2 Ordovician carbonate  $\delta^{18}\text{O}$  data in middle Tarim basin

井号	下奥陶统	中上奥陶统
	平均(变化范围) / $\text{‰}$ (PDB)	平均(变化范围) / $\text{‰}$ (PDB)
BD2		$-5.60$ ( $-8.13 \sim -4.46$ )
TZ1	$-4.42$ ( $-4.90 \sim -3.86$ )	
TZ12	$-6.65$ ( $-9.12 \sim -4.82$ )	$-5.78$ ( $-8.16 \sim -4.30$ )
TZ29	$-5.31$ ( $-6.60 \sim -4.17$ )	$-7.66$ ( $-10.99 \sim -5.48$ )
TZ30		$-5.98$ ( $-8.77 \sim -3.34$ )

上述分析表明, 由  $\delta^{18}\text{O}$  值分析得出的古盐度及海平面升降变化结果, 支持由  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  分析得出的结论。

### 4 微量元素特征与古水深及海平面升降变化

本次研究中, 还对 BD2、TZ12、TZ28、TZ29、TZ30、TZ32 和 TD1 等七口井的岩心碳酸盐岩进行了 15 种微量元素测试分析。各井碳酸盐岩中典型微量元素的分布特征见表 3 及图 3。

从表 3 中可以看出, 在 BD2、TZ12、TZ29、TZ30 井, 奥陶系碳酸盐岩的 MnO、Ni、Cr、V 的含量一般分别小于  $0.06\%$ 、 $30 \times 10^{-6}$ 、 $80 \times 10^{-6}$ 、 $80 \times 10^{-6}$ ; 而在 TZ28、TZ32、TD1 井, 它们的含量一般分别大于  $0.06\%$ 、 $40 \times 10^{-6}$ 、 $90 \times 10^{-6}$ 、 $90 \times 10^{-6}$ 。即在横向上, 自西往东 MnO、Ni、Cr、V 的含量逐渐增加。这些微量元素变化规律, 说明了古水

表 3 塔中地区奥陶系碳酸盐岩微量元素分布特征

Table 3 Ordovician carbonate trace elements data in middle Tarim basin

微量元素 井号	Ni/ $\times 10^{-6}$ 平均(变化范围)	Cr/ $\times 10^{-6}$ 平均(变化范围)	V/ $\times 10^{-6}$ 平均(变化范围)	MnO/ $\times 10^{-5}$ 平均(变化范围)
BD2	12.38 (0.0002—27.26)	54.84 (3.02—113.6)	53.63 (7.35—98.39)	55.08 (3.0—116.2)
TZ12	1.12 (0.0002—15.77)	34.99 (15.75—106.8)	16.24 (4.41—50.62)	10.19 (1.9—40.9)
TZ30	10.13 (0.0002—40.16)	39.62 (15.51—89.04)	35.2 (9.52—127.1)	
TZ29	27.62 (0.0002—53.49)	82.82 (31.32—130.0)	80.18 (9.87—123.5)	69.44 (11.5—138.3)
TZ28	43.56 (39.11—46.15)	99.00 (91.03—112)	120.3 (111.6—132.1)	
TZ32	73.12 (30.88—156.93)		46.21 (12.22—83.08)	
TD1	47.56 (31.77—60.2)	95.48 (91.84—103.2)	95.46 (69.3—113.7)	

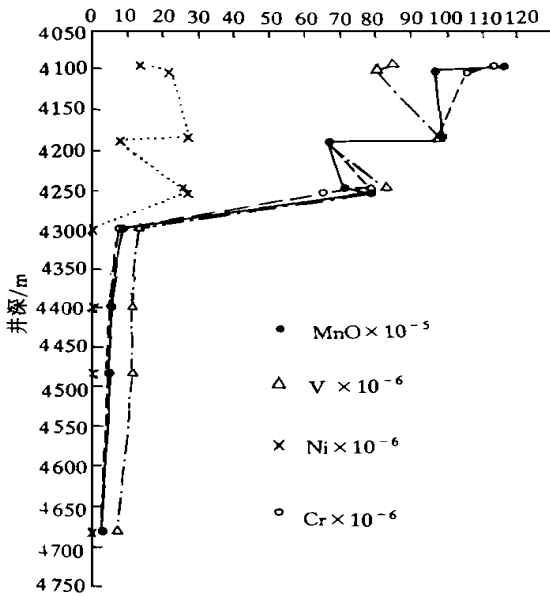


图 3 巴东 2 井(BD2)中上奥陶统微量元素含量纵向分布  
Fig. 3 The vertical distribution of trace element content of Middle and Upper Ordovician in Well BD 2

深的横向变化趋势为, 自西往东古水深逐渐加大。这一认识与沉积环境分析结论基本一致, 即在奥陶纪塔中地区的东部为浅水碳酸盐台地, 西部为较深水盆地<sup>①</sup>。

分析数据还显示, 在纵向上, 岩心剖面上的 MnO、Ni、V、Cr 含量从下到上总体呈增加之势。但下奥陶统(O<sub>1</sub>)与中上奥陶统(O<sub>2+3</sub>)中的微量元素演化趋势却有所不同: 在下奥陶统, 这些元素的含量

从下到上逐渐降低; 而在中上奥陶统, 这些元素的含量从下到上明显增高, 参见图 3。这些表明, 在早奥陶世时, 塔中区具有古水深逐渐变浅、海平面逐渐下降之势; 而在中晚奥陶世时, 则具有古水深明显加大、海平面迅速上升之势。结合上述分析还可知, 这些元素在台地区(即 BD2、TZ12、TZ29、TZ30 井区)剖面比其在盆地区(即 TZ28、TZ32、TD1 井区)剖面上的递增趋势更强, 这说明微量元素在浅水区较之在深水区对海平面升降具有更敏感的反应。

由上可见, 在塔中地区奥陶系, 由微量元素分析所得到的古水深及海平面升降变化趋势, 同上述的由<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和  $\delta^{18}O$  分析所得到的相关认识基本一致。

### 5 几点认识

综上所述, 可以得出如下几点认识:

(1) <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值可以作为海平面升降的示踪, 即<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值变化与海平面升降呈负相关。分析表明, 塔中地区早奥陶世的海平面升降趋势是由相对高水位降至较低水位, 而中晚奥陶世的海平面演化趋势则为水位持续上升并保持在高于平均海平面之上。此认识还可进而应用于古水深变化及沉积层序划分的研究。

① 鲍志东, 朱井泉等. 塔里木盆地各层系古水深古气候研究, 国家“九五”科技攻关“96-111”项目阶段报告, 1997

(2)  $\delta^{80}$  值变化与介质盐度之间存在着正相关关系。塔中1井下奥陶统白云岩主要为准同生沉积成因。分析表明早奥陶世塔中地区海水逐渐变浅,中晚奥陶世海水逐渐加深。

(3) 微量元素分析结果支持锶氧同位素研究结论。

(4) 在海平面波动期间,沉积元素均具有敏感的反应。

总之,在海平面升降期间,锶氧同位素及 Mn、Ni、V 和 Cr 等微量元素均具有敏感的反应。

作者诚挚地感谢冯增昭教授审阅本文初稿并提出修改意见,感谢张一伟教授、金之钧教授、王毅博士、刘国臣博士、顾家裕教授和张宝民教授给予研究工作的大力支持。

## 参 考 文 献

- 1 Depaolo D J, Ingram B L. High-resolution stratigraphy with Strontium isotope. *Science*, 1985, 227: 938~941
- 2 Montanez I P, Banner J L, Olseger D A, et al. Integrated Sr isotope variation and sea-level history of Middle to Upper Cambrian platform carbonates: Implications for the evolution of Cambrian seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . *Geology*, 1996, 24(10): 917~920
- 3 Richter F M, Rowley D B, DePaolo D J. Sr isotope evolution of seawater: the role of Tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109: 11~23
- 4 Ruppel S C, James E W, Barrick J E, et al. High-resolution  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  chemostratigraphy of the Silurian: Implications for event correlation and strontium flux. *Geology*, 1996, 24(9): 831~834
- 5 孙志国, 刘宝柱, 刘健. 西沙珊瑚礁锶同位素特征及其古环境意义. *科学通报*, 1996, 43(5): 434~437
- 6 刘岫峰主编. 沉积岩实验室研究方法. 北京: 地质出版社, 1991. 218~228

## Isotope and Trace Element Evolution: Responding to Sea-level Fluctuation—An Example of Ordovician in Middle Tarim Basin

Bao Zhidong<sup>1</sup> Zhu Jingquan<sup>2</sup> Jiang Maosheng<sup>2</sup> Xia Yong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Petroleum University, Beijing 102200)

<sup>2</sup>(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

### Abstract

The Strontium isotope composition of marine autogenetic minerals can reflect the sea level fluctuation trend during the minerals deposited. The analysis of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of Ordovician shows the sea level dropped in Early Ordovician, and then rose continuously and stayed above the average level in Middle and Late Ordovician in middle Tarim area. The study of oxygen isotopes indicates the dolostones of the Lower Ordovician are mainly penecontemporaneous dolostones which deposited in the sedimentary environment of the high salinity of the lower sea-level. The trace elements geochemistry draws the same conclusion as that of the study of the isotope analysis.

In brief, the variation trend of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio was reversely interrelated with the sea level fluctuation. Both oxygen isotopes and some elements made remarkably response to the sea-level fluctuation during the Ordovician.

**Key words** sea level fluctuation isotopes evolution reverse interrelationship Tarim basin