

文章编号 :1000-0550(2001)04-0481-07

# 上扬子石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化与全球海平面变化<sup>①</sup>

黄思静 石 和 张 萌 沈立成 刘 洁 武文慧

(成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,沉积地质研究所 成都 610059)

**摘 要** 地质历史中海水的锶同位素组成是时间的函数,全球海平面变化是其最主要的控制因素,上扬子地区石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化曲线与海平面变化曲线有着很好的一致性。锶同位素演化曲线说明:1)早石炭世是一个海水逐渐加深的全球海平面上升时期,锶同位素最小值所显示的最大海泛面的年龄为 342 Ma,位于杜内阶和韦宪阶的界线上;2)晚石炭世是一个全球海平面下降时期;3)整个二叠纪都是全球海平面上升时期,晚二叠世的海平面上升不仅幅度大,而且海水在短时间内迅速加深;4)晚二叠世具有古生代海相碳酸盐的锶同位素最小值,显示晚二叠世末的全球淹没事件,最大海泛面的年龄为 250 Ma,正好在二叠/三叠纪界线附近;5)二叠/三叠纪之交的全球生物绝灭事件可能与二叠世末的全球淹没事件有关。

**关键词** 石炭—二叠纪 锶同位素地层曲线 全球海平面变化

**第一作者简介** 黄思静 男 1949 年出生 教授(博士生导师) 沉积学

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 1 引言

地质历史中海水的锶同位素组成是时间的函数,其随时间的变化主要受两个来源的锶的控制:1)由大陆古老的硅铝质岩石化学风化作用通过河流向海水提供的相对富放射性成因的锶,具较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,全球平均值为 $0.7119^{(1)}$ ;2)由洋中脊热液系统向海水提供的相对贫放射性成因的锶,具较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,全球平均值为 $0.7035^{(2)}$ ;现代海水的锶同位素比值便是这两个来源锶平衡的结果,其平均值为 $0.709073 \pm 0.000003$ (按 Denison 等<sup>[3]</sup>超过 100 个现代贝壳的锶同位素组成平均值)。基于上述原理,海水的锶同位素随时间的变化受控于如下两个因素:1)全球风化速率及风化岩石的类型的变化;2)洋壳增生所伴随的洋中脊热液系统的变化。从这个意义上来说,造山运动、冰川活动、海底扩张速率和古气候等地质事件都用来解释海水锶同位素组成的变化<sup>[4~11]</sup>。由于这些事件都直接或间接地影响到,至少在一定程度上影响到全球海平面变化,因此,地质历史中海水锶同位素的组成和变化,或者说代表原始海水组成的海相内源沉积物(主要是碳酸盐、硫酸盐和磷酸盐等)锶同位素的组成和变化是全球海平面的灵敏指示剂。

## 2 实验样品及测试结果

研究剖面位于上扬子地区的四川和贵州两省,包括四川广元的三叠系底部、贵州罗甸二叠系和贵州惠水的石炭系剖面等(图 1)。

所有样品都在阴极发光下进行了检测,少数发光强度大的样品的同位素资料没有采用,以尽可能地保证测试结果代表了原始海水而不是成岩作用的结果。

同位素分析在 MAT-261 质谱仪上进行,锶同位素分析的每盘样品都插入 NBS987 标准,8 件标准样测量平均值为 $0.71027 \pm 0.000042$ 。同位素分析均由成都理工学院同位素室完成。

测试结果列于表 1 中, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值按 Denison 等<sup>[3]</sup>的公式换算成  $\Delta\text{SW}$  :

$$\Delta\text{SW} = [^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{未知}) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{现代海水})] \times 10^5$$

式中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{现代海水}) = 0.709073 \pm 0.000003$ 。

由表 1 数据作出的上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线如图 2 所示,该曲线在演化趋势上与 Denison 等<sup>[3]</sup>的曲线有较好的一致性(图 3),显示全球海水锶同位素的年代效应和控制因素的全球性。由于 Denison 等<sup>[3]</sup>曲线的横坐标是年龄刻度,因而有着更好的可利用性。

① 国家自然科学基金项目“上扬子古生代海相碳酸盐的锶同位素组成及主要控制因素”(批准号:49972044)资助

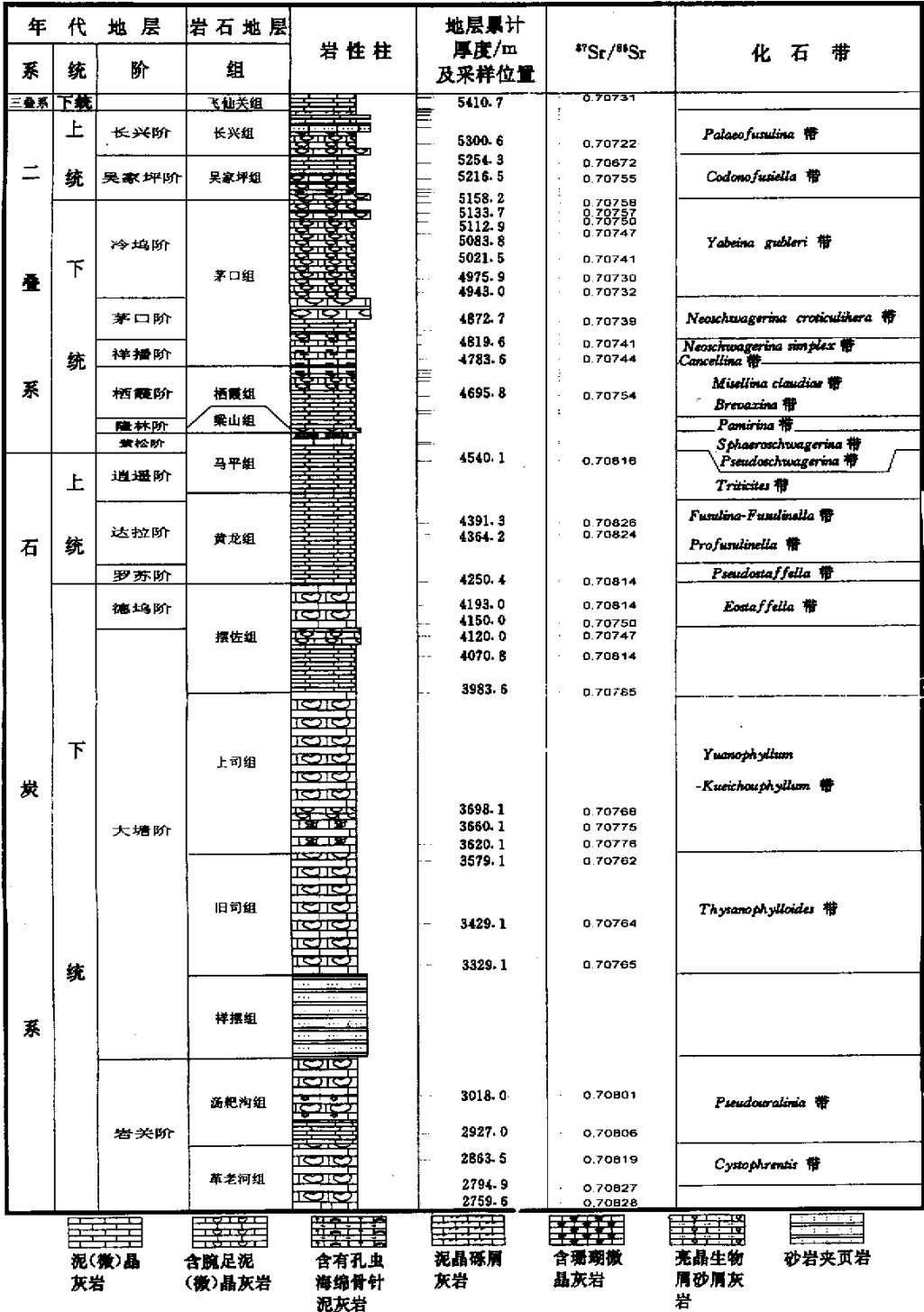


图 1 采样剖面柱状图

Fig. 1 Column of the sampling section

\* 年代地层及生物带划分是根据前人<sup>[12,13]</sup>在本地区的工作 结合《中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版)》综合而成。

表 1 广元上寺三叠系 贵州惠水石炭系和贵州罗甸二叠系海相碳酸盐锶同位素测试结果\*

Table 1 Strontium isotopic composition of marine carbonate of Carboniferous and Permian Upper Yangtze Platform, Southwest China

地层组	地层累计厚度/m	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	ΔSW	地层组	地层累计厚度/m	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	ΔSW	
飞仙关组	5410.7	0.70731	-176.3	栖霞组	4741.5	0.70757	-150.3	
	5384.3	0.70728	-179.3		4730.8	0.70753	-154.3	
	5381.6	0.70704	-203.3		4695.8	0.70754	-153.3	
长兴组	5376.4	0.70743	-164.3		4660.8	0.70782	-125.3	
	5369.5	0.70742	-165.3		4653.0	0.70821	-86.3	
	5358.2	0.70684	-223.3	马平组	4585.7	0.70788	-119.3	
5340.5	0.70697	-210.3	4581.5		0.70824	-83.3		
5300.6	0.70722	-185.3	4540.1		0.70816	-91.3		
吴家坪组	5254.3	0.70672	-235.3	黄龙组	4391.3	0.70826	-81.3	
	5216.5	0.70755	-152.3		4364.2	0.70824	-83.3	
	5191.9	0.70725	-182.3		4250.4	0.70814	-93.3	
	茅口组	5183.7	0.70752	-155.3	摆佐组	4193.0	0.70814	-93.3
		5174.4	0.70758	-149.3		4150.0	0.70750	-157.3
5158.2		0.70758	-149.3	4120.0		0.70747	-160.3	
5133.7		0.70757	-150.3	4070.8		0.70814	-93.3	
5112.9		0.70750	-157.3	上司组	3983.6	0.70785	-122.3	
5083.8	0.70747	-160.3	3698.1		0.70768	-139.3		
5021.5	0.70741	-166.3	3660.1		0.70775	-132.3		
4975.9	0.70730	-177.3	3620.1		0.70776	-131.3		
栖霞组	4943.0	0.70732	-175.3	旧司组	3579.1	0.70762	-145.3	
	4872.7	0.70739	-168.3		3429.1	0.70764	-143.3	
	4852.5	0.70745	-162.3		3329.1	0.70765	-142.3	
	4841.6	0.70744	-163.3	汤耙沟组	3018.0	0.70801	-106.3	
	4819.6	0.70741	-166.3		2927.0	0.70806	-101.3	
	4783.6	0.70744	-163.3	革老河组	2863.5	0.70819	-88.3	
	4757.2	0.70744	-163.3		2794.9	0.70827	-80.3	
4749.6	0.70734	-173.3	2759.6		0.70828	-79.3		

\* 1) 石炭系祥摆组的样品分析失败 2) 石炭系样品采自贵州惠水剖面 二叠系样品采自贵州罗甸剖面 三叠系样品采自四川广元上寺剖面 3) 地层累计厚度的起始点为泥盆系底界。

### 3 石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线及其与海平面变化的关系

#### 3.1 早石炭世

总的说来无论是从上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线, 还是从北美的锶同位素演化曲线来看, 早石炭世都是全球海平面上升时期, 基本构成了一个从海侵到海退的完整旋回, 并具有如下几个特点: 1) 由于图 3 中最老的样品的年龄是 361 Ma, 因而该海平面上升始于 360 Ma 以前的晚泥盆世弗拉斯阶(按 Palmer 等(1999)的地质年代表<sup>[14]</sup>, 泥盆纪/石炭纪的界线年龄为 354 Ma), 因而早石炭世的海侵是晚泥盆世全球海平面上升的继续; 2) 早石炭最大海泛面的时间在 342 Ma 附近, 锶同位素最小值样品的年龄为 342 Ma<sup>[3]</sup>, 该年龄正好是杜内阶和韦宪阶的界线(按 Palmer 等(1999)的地质年代表<sup>[14]</sup>), 在上扬子石炭—二叠纪的锶同位素分析数据中, 按目前样品密度的锶同位素最

小值正好位于上司组和旧司组的界线上, 因而从锶同位素地层学的角度来说, 是否可以将旧司组及其以下地层归入杜内阶, 上司组及其以上地层归入韦宪阶, 还需要更多锶同位素数据的积累来给以验证; 3) 曲线的宽缓形态说明, 早石炭世的全球海平面上升具有持续性和渐进性。就上扬子海盆而言, 这种海平面上升与盆地的充填速率是基本平衡的, 从而造就了石炭统较大的沉积物厚度。

#### 3.2 晚石炭世

晚石炭世是一个全球海平面下降时期, 是早石世中期海平面达到最大值后, 海平面持续下降的继续。晚石炭世基本构成了一个从海退到海侵的完整旋回, 海平面最低点的年龄在 300 Ma 附近, 就上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线而言, 该最低点的位置在黄龙组地层内。

#### 3.3 早二叠世

上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线和北美有一些差异, 但由于我国的锶同位素演化曲线目前还

处于较低水平 样品位置是按地层厚度标定而不是按年龄标定 因而与国外的演化曲线难于对比。总的说来 早二叠世是一个全球海平面上升时期 从北美的锶同位素演化曲线中年所反映的早二叠世全球海平面上升情况来看 最大海泛面的位置在 280 Ma 附近 这可能与国内众多研究者<sup>[15]</sup>所报道的中国南方早二叠世

的海平面变化曲线不一致。然而 按我国上扬子石炭一二叠纪的锶同位素演化曲线 锶同位素最小值和海平面上升最大值出现在茅口组的中部 这与中国南方的二级海平面变化曲线一致<sup>[15]</sup>。另外 早二叠世早期的海平面上升也具有幅度大 发展快的特点(图 2, 图 3)。

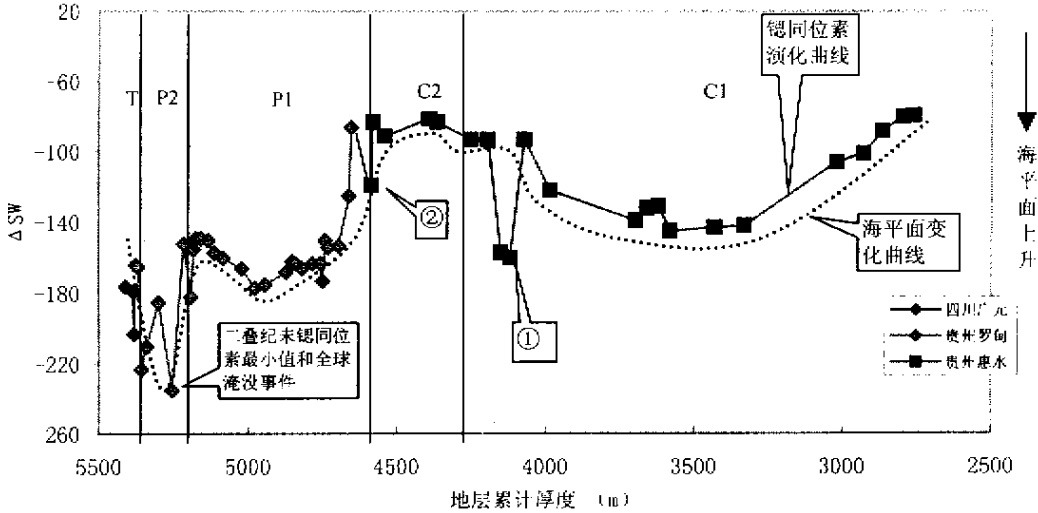


图 2 上扬子石炭一二叠纪的锶同位素演化曲线和根据锶同位素演化趋势判断的全球海平面变化曲线

Fig.1 Strontium stratigraphy curves of Carboniferous-Permian, Upper Yangtze Platform, Southwest China, and the corresponding global sea-level change trend

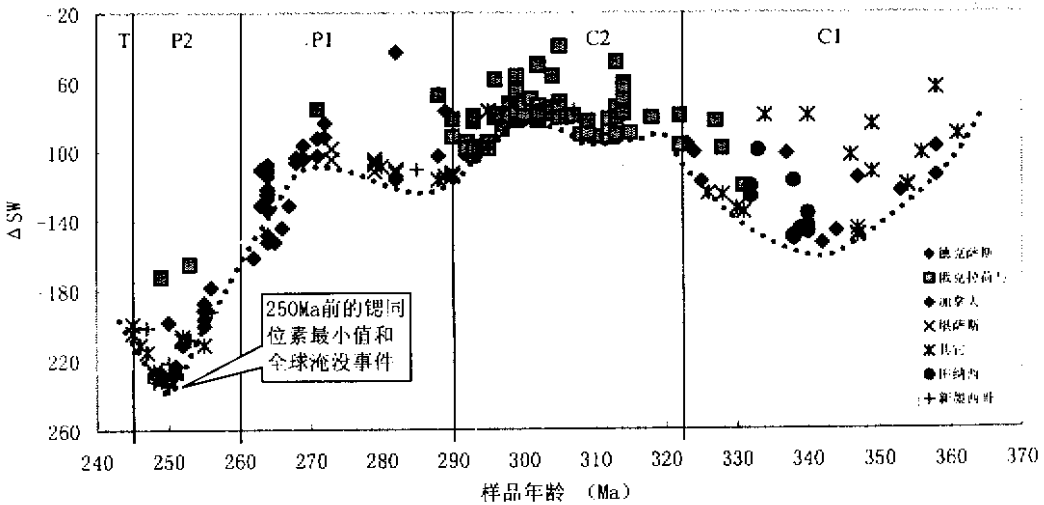


图 3 北美石炭一二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化曲线(据 Denison 等<sup>[3]</sup>的数据)

Fig.3 Plot of <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr vs. age in the late Paleozoic(Data from Denison *et al.*(1994))

### 3.4 晚二叠世

上扬子石炭一二叠纪的锶同位素演化曲线和北美曲线是类似的 都表明晚二叠世是一个全球海平面上

升时期 并构成一个独立的海侵—海退旋回(按 Palmer 等<sup>[14]</sup>的地质年代表将二叠/三叠界线的位置定在 248 Ma)。另外 两个锶同位素演化曲线都显示出晚二叠

世存在锶同位素最小值,该最小值也是整个晚古生代的锶同位素演化过程的最小值(参阅黄思静的晚古生代锶同位素演化曲线)<sup>[16]</sup>;同时晚二叠世的海侵是非渐进性的,海平面的上升是在相对短时间内发生的,其上升幅度也大大超过早二叠世。

## 4 一些问题的讨论

### 4.1 锶同位素地层曲线判断的海平面变化与其它方法判断结果的一致性

由上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线所判断的石炭—二叠纪海平面变化与陈洪德等<sup>[15]</sup>通过层序地层学所获得的二级海平面变化曲线一致,包括早石炭世的高海平面时间间隔、晚石炭世的低海平面时间间隔,以及从晚石炭世末开始、一直持续到晚二叠世末的海平面上升。对更高一级的海平面变化的识别,取决于锶同位素分析样品的密度。另外,锶同位素演化曲线上也有些偏离海平面变化曲线的“异常点”,图2中的①和②,是否分别代表了早石炭世末和晚石炭世末的短暂海平面上升,目前还缺乏足够的证据。

### 4.2 晚二叠世末的全球海平面上升

晚二叠世是否存在全球海平面上升,一直是一个有争议的问题。由于晚二叠世的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值的降低与Vail<sup>[17]</sup>的海平面变化曲线矛盾,黄思静<sup>[16]</sup>没有用海平面上升来解释晚二叠世锶同位素的急剧降低。然而,近年来,越来越多的研究,尤其是有关中国南方二叠纪海平面变化的研究<sup>[18~20]</sup>说明,晚二叠世不但存在海平面上升,而且可能发生全球淹没事件。陈中强<sup>[20]</sup>还从层序地层与地层古生物学的角度列举了该全球淹没事件对中国华南、华北、新疆塔里木盆地北缘及准噶尔盆地南缘、加拿大埃尔斯米尔岛极区、南阿尔卑斯地区,以及澳大利亚Perth盆地和Bown盆地的影响。由于北美石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线和中国上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线中都存在锶同位素最小值,因而晚二叠世的海平面上升应是全球性的和强幅度的。

### 4.3 晚二叠世末锶同位素最小值和二叠/三叠纪的生物绝灭事件

在北美石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线中,具有锶同位素最小值(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.706 72)的样品的绝对年龄为250 Ma,也就是说,在250 Ma时,全球海平面达到最大值。按Palmer等的地质年代表<sup>[14]</sup>,全球海平面达到最大值出现的时间离二叠/三叠纪界线仅仅2 Ma,如果按殷鸿福<sup>[18]</sup>对二叠/三叠纪界线年龄的建议,这个全球海平面最大值正好在二叠/三叠纪界线上,换句话说,二叠/三叠纪之交,曾经发生全球淹没事件。

晚二叠世锶同位素演化曲线的大斜率还说明这次全球淹没事件是在较短的时间内达到海侵最大值的,因而这次全球淹没事件可能是二叠/三叠纪之交生物绝灭的重要原因。

### 4.4 我国上扬子和北美早二叠世锶同位素演化曲线的差别

北美的锶同位素演化曲线中所反映的早二叠世全球海平面上升的最大海泛面的位置与我国南方海平面变化趋势不一致,我国上扬子石炭—二叠纪的锶同位素演化曲线所反映的海平面上升最大值出现在茅口组的中部,这与中国南方海平面变化趋势一致。这种差别是样品对原始海水的代表性或其它分析原因造成的,还是我国和北美的锶同位素演化曲线本身就存在差别,后者涉及到海水锶同位素全球性的重大基本理论问题。此外,我国地层组和国外阶的对比目前仍然有很多困难,石炭/二叠纪的界线也仍然在讨论之中<sup>①</sup>。造成上述差别的原因何在,还需要我国南方和国外其它地区锶同位素数据的进一步积累及一些地层学基本问题的解决。

### 4.5 锶同位素对地层界线绝对年龄的标定

海相地层的锶同位素演化曲线的核心问题是锶同位素地层学问题,最终可能成为一个重要的地层学方法<sup>[21]</sup>,但目前还处于初期阶段,尤其是国内,应该还处于萌芽阶段。用锶同位素判断的地层绝对年龄,如旧司组 and 上司组界线的绝对年龄及其与国外阶的对比问题,可能与我国目前传统划分方案<sup>[22]</sup>不一致。锶同位素地层学正确性与可靠性的验证,需要更多锶同位素地层学数据的积累。

## 5 结论

(1) 地质历史中海水的锶同位素组成是时间的函数,全球海平面变化是其最主要的控制因素。

(2) 上扬子地区石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化曲线与世界其它地方的锶同位素演化曲线有着较好的一致性,反映全球事件对海相碳酸盐锶同位素组成的控制作用。

(3) 上扬子地区石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化曲线与海平面变化曲线有着很好的一致性。锶同位素演化曲线显示:

1) 早石炭世是一个海水逐渐加深的全球海平面上升时期,锶同位素最小值所显示的最大海泛面的年龄为342 Ma,位于杜内阶和韦宪阶的界线上,贵州惠水石炭系剖面则位于旧司组 and 上司组的界线上;

<sup>①</sup> 中国地层指南及中国地层指南说明书修订版(第三届全国地层会议讨论稿)2000年3月

2) 晚石炭世是一个全球海平面下降时期,海平面最低点在 300 Ma 附近,就贵州惠水石炭系剖面而言,该最低点的位置在黄龙组地层内;

3) 整个二叠纪是一个全球海平面上升时期,晚二叠世的海平面上升不仅幅度大,而且海水是在短时间内迅速加深的,晚二叠世具有古生代海相碳酸盐的锶同位素最小值,显示晚二叠世末的全球淹没事件,最大海泛面的年龄为 250 Ma,正好在二叠/三叠纪界线附近;

4) 由于锶同位素显示的晚二叠世末的全球淹没事件的最大海泛面正好在二叠/三叠纪界线附近,同时海水也是在短时间内迅速加深的,因而二叠/三叠纪之交的全球生物绝灭事件可能与该全球海泛事件有关;

5) 海相地层的锶同位素演化曲线的核心问题是锶同位素地层学问题,用锶同位素对地层界线绝对年龄的标定目前还处于一种幼稚阶段,要使其得到发展,需要更多锶同位素地层学数据的积累。

#### 参 考 文 献

- Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean [ J ]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1989, 92 :11 ~ 26
- Palmer M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr [ J ]. *Nature*, 1985, 314 :526 ~ 528
- Denison R E, Koelpnick R B, Burke W H, Hetherington E A, Fletcher A. Composition of the Mississippian, Pennsylvanian and Permian seawater <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr curve [ J ]. *Chem. Geol.* 1994, 112 :45 ~ 167
- Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles [ J ]. *Geology*, 1988, 16 :649 ~ 653
- Capo R C, DePaolo D J. Seawater strontium isotopic variations from 2.5 million years ago to the present [ J ]. *Science*, 1990, 249 :51 ~ 55
- Edmond J M. Himalayan tectonics, weathering processes, and the strontium isotope record in marine limestones [ J ]. *Science*, 1992, 258 :1 594 ~ 1 597
- Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [ J ]. *Nature*, 1992, 359 :117 ~ 122
- Hairuo Q, Barnes C R, Buhl D, Veizer J. The strontium isotopic composition of Ordovician and Silurian brachiopods and conodonts: relationships to geological events and implications for coeval seawater [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(10): 1 721 ~ 1 733
- Stoll H M, Schrag D P. Effects of quaternary sea level cycles on strontium in seawater [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(7): 1 107 ~ 1 118
- Azmy K, Veizer J, Wenzel B, Bassett M G, Copper P. Silurian strontium isotope stratigraphy [ J ]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1999, 111(4): 475 ~ 483
- Zachos J C, Opdyke B N, Quinn T M, Jones C E, Halliday A N. Early Cenozoic glaciation, antarctic weathering, and seawater <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr: Is there a link [ J ]. *Chem. Geol.* 2000, 161(3): 165 ~ 180
- 贵州省地层古生物工作队. 西南地区区域地层表贵州省分册 [ M ]. 北京:地质出版社, 1977. 365 ~ 411
- 张正华, 王治华, 李昌全. 黔南二叠纪地层 [ M ]. 贵阳:贵州人民出版社, 1988. 3 ~ 67
- Palmer A R, Geissman J. Geologic time scale [ R ]. The Geological Society of America, Product code CTS004. 1999
- 陈洪德, 覃建雄, 田景春, 彭军, 侯中建. 右江盆地层序充填动力学初探 [ J ]. *沉积学报* 2000, 18(2): 165 ~ 171
- 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究 [ J ]. *地质学报*, 1997, 71(1): 45 ~ 53
- Vail P R, Mitchum R M, Thompson III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4: Global cycles of relative changes of sea level [ A ]. In: Payton C. E. ed. *Seismic Stratigraphy, Applications to Hydrocarbon Exploration* [ C ]. AAPG Memoir, 1977, 26: 83 ~ 97
- 殷鸿福. 二叠系—三叠系研究进展 [ J ]. *地球科学进展*, 1994, 9(2): 1 ~ 9
- 殷鸿福, 童金南, 丁侮华, 张克信, 赖旭龙. 扬子地区晚二叠世—中三叠世海平面变化 [ J ]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1994, 19(5): 627 ~ 632
- 陈中强. 二叠纪末的全球淹没事件 [ J ]. *岩相古地理*, 1995, 15(3): 34 ~ 39
- McArthur J M. Recent trends in strontium isotope stratigraphy [ J ]. *Terra Nova*, 1994, 6: 331 ~ 358
- 王增吉等. 中国地层(8), 中国的石炭系 [ M ]. 北京:地质出版社, 1990, 288 ~ 309

# Strontium Isotope Evolution and Global Sea-Level Changes of Carboniferous and Permian Marine Carbonate , Upper Yangtze Platform

HUANG Si-jing SHI He

ZHANG Meng SHEN Li-cheng LIU Jie WU Wen-hui

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

## Abstract

The evolution of strontium isotopic composition of original seawater is a function of geological time , and mainly controlled by the global sea-level changes. The evolutionary curves of the strontium isotopic composition of Carboniferous and Permian marine carbonate rocks , Upper Yangtze Platform is quite consistent with trend of the sea-level changes. This variation curve of the strontium isotope shows the following facts :

1 )The global sea-level rise is corresponding to the falling of strontium isotope. The point of the minimum value of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in the early Carboniferous is just the position of maximum flooding surface for the period of early Carboniferous , of which the numeric age is 342 Ma. This key point is just located at the boundary of Tournaisian and Visean , for the Huishui section in Guizhou of Province , which is located at the boundary between Jiusi and Shangsi formation.

2 )The late Carboniferous is a period of global sea-level falling.

3 )The Permian , from the beginning to the end , is a period of global sea-level rise. During the late Permian , we can see that the sea level was rising unceasingly and the marine water became deeply in short time.

4 )The late Permian is provided with the strontium isotopic minimum of marine carbonate rocks throughout the Late Palaeozoic , representing the global marine flooding event. The numeric age of the flooding is 250 Ma , which nears to the Permian-Triassic boundary.

5 )The mass extinction at the boundary of Permian-Triassic is probably due to the global marine flooding event of late Permian.

**Key words** Carboniferous and Permian , strontium isotopic evolutionary curve , global sea-level changes