



# 锶、碳同位素演化在新元古代地层定年中的应用 ——以胶辽徐淮地层分区为例

刘燕学<sup>1</sup>, 旷红伟<sup>2</sup>, 孟祥化<sup>3</sup>, 葛 铭<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 2. 长江大学 湖北 荆州 434023; 3. 中国地质大学 北京 100083)

**摘 要:** 根据 Sr、C 同位素地层学原理, 利用胶辽徐淮地区晚前寒武纪地层 Sr、C 同位素数据, 与国际上已有的 Sr、C 同位素演化曲线对比, 结果表明, 胶辽徐淮地区晚前寒武纪地层是同一时期的沉积物, 沉积主体之间 Sr、C 同位素比值的对比性很好, 沉积时限约在 750~860 Ma 之间, 并延续到震旦纪, 为北方青白口纪及其后的沉积。同时也表明, Sr、C 同位素演化相结合是解决缺乏大化石的晚前寒武纪地层对比的有效方法。

**关键词:** 锶、碳同位素; 定年; 新元古代; 胶辽徐淮

中图分类号: P597+.2; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)04-0299-06

## The application of Sr and C isotope evolution to the dating of Neoproterozoic strata: a case study of the Jiao-Liao-Xu-Huai area in northern China

LIU Yan-xue<sup>1</sup>, KUANG Hong-wei<sup>2</sup>, MENG Xiang-hua<sup>3</sup> and GE Ming<sup>3</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Changjiang University, Jingzhou 434023, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on Sr and C isotopic sequence stratigraphy, this paper has made a comparison between the Pre-Cambrian Sr and C isotopic data from the Jiao-Liao-Xu-Huai area and the variation curves of Sr and C isotopes available abroad. It is shown that the Precambrian strata in the Jiao-Liao-Xu-Huai area were accumulated in the same period. The Sr and C isotopic ratios show good correlation in this area. The accumulation of the strata occurred from 750 to 860 Ma, and continued to the Sinian. These strata are sediments accumulated after Qingbaikou period. It is also shown from the comparison that dating with Sr and C isotopes is an effective way to solve the problem of Precambrian stratigraphic correlation in the case of lack of fossils.

**Key words:** Sr and C isotopes; dating; Neoproterozoic; Jiao-Liao-Xu-Huai

锶同位素测年是近年来才运用到前寒武纪地层测年的一种新方法。一般认为, 在任何一个地质时代, 全球海水中 Sr 元素在同位素组成上是均一的,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值是不变的, 而不同时期海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值不同, 因此地质历史中海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值在一定时间段内是常数, 其比值相对稳定, 这是锶同位素

地层学的基本原理(黄思静等, 2001, 2004)。海相同生沉积物形成时从海水中获取 Sr, 从而保留了其形成时的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 利用已建立的地质历史中海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  变化曲线, 可推断未知地层的可能年代。从这一角度来说, 锶同位素地层学为解决缺乏可供全球对比化石带的前寒武纪海相沉积岩的定年

收稿日期: 2005-10-25; 修订日期: 2006-05-15

基金项目: 国际地质对比计划项目 (IGCP447/SC/GEO/546/447); 国家自然科学基金资助项目 (40172043); 中国地质调查局地质调查项目 (200313000055)

作者简介: 刘燕学 (1964-), 男, 博士, 副研究员, 从事沉积学、地层学及区域地质研究, E-mail: lyxue@sohu.com

问题开辟了一个新的途径。

碳同位素地层学主要依赖于这样的事实,即海水碳同位素组成随时间的波动反映有机物埋藏速率的变化。在新元古代,海水碳酸盐岩中碳同位素组成变化非常大,其  $\delta^{13}\text{C}$  值的最大变化对应的就是新元古代中晚期的冰川沉积物,冰期前形成的碳酸盐岩特别富集  $^{13}\text{C}$  (大于 5‰),而在冰期和冰后期非常贫  $^{13}\text{C}$  (小于 0‰) (张同钢等, 2003)。这些波动被记录在未发生蚀变的自生碳酸盐岩中,有利于全球晚前寒武纪地层对比。

胶辽徐淮地区新元古代地层是我国地质界研究的一个热点,其时代和地层对比问题一直没有获得统一认识,其中震旦系的时代问题是争论的焦点。本文试图利用锶、碳同位素相结合的方法对震旦系的时代进行讨论。

## 1 胶辽徐淮地区震旦系研究现状

从下至上,吉林南部震旦系分别为桥头组、万隆组、八道江组和青沟子组,辽宁大连及复州地区震旦系分别为桥头组、长岭子组、南关岭组、甘井子组、营城子组、十三里台组、马家屯组、崔家屯组和兴民村组,江苏北部和淮北地区震旦系分别为寿县组、贾园组、赵圩组、倪园组、九顶山组、张渠组、魏集组、史家组和望山组,淮南地区震旦系分别为寿县组、九里桥组、四顶山组和奶奶庙组。其上均以风化壳(泥质或砾石质)与含大化石的寒武纪地层不整合接触。

中国新元古界有 4 个重要的时间界线,即新元古界底界年龄 1 000 Ma、青白口系与南华系界线年龄 800 Ma、南华系与震旦系界线年龄 680 Ma、震旦系与寒武系界线年龄 543 Ma (全国地层委员会, 2002)。在胶辽徐淮地区震旦系中,前人利用不同同位素测年方法取得了许多年龄,如长岭子组具有 Rb-Sr 全岩等时线年龄  $723 \pm 43$  Ma 和  $650 \pm 20$  Ma,页岩中伊利石 Ar-Ar 法全溶年龄  $776 \pm 7$  Ma (辽宁省地质矿产局, 1989);兴民村组 Rb-Sr 全岩等时线年龄为  $600 \pm 26$  Ma 及  $650 \pm 19$  Ma, K-Ar 年龄为 589 Ma (王东方, 1984) 和 677 Ma (洪作民等, 1991);吉南桥头组海绿石 K-Ar 年龄值为 629 Ma、656 Ma (吉林省地质矿产局, 1989),万隆组 Pb-Pb 法年龄为  $686 \pm 56$  Ma (乔秀夫等, 2001);凤台组底部砾岩 Pb-Pb 法年龄为  $608 \pm 34$  Ma (乔秀夫等, 2001)。

从生物化石方面来讲, *Chuarina* 首先在淮南地

区刘老碑组发现(郑文武, 1979, 1980;邢裕盛, 1989) 随后,在胶辽徐淮地区新元古代发现大量的后生植物,建立了 *Chuarina-Shouhsienia-Bipatinolla* 和 *Chuarina-Shouhsienia-Tawuia* 组合带(邢裕盛等, 1989;唐烽等, 1998) 这些生物的时代在伊迪卡拉生物群之前。

综上所述,研究区原震旦系的确切地质年代争论很大,主要分歧集中在:①基本上可以和南方震旦系对比(《中国地层典》编委会, 1997;乔秀夫等, 2001)。②桥头组—十三里台组相当于北方青白口系和南方南华系之间的一套地层,马家屯组—兴民村组相当于南方的南华系和震旦系(段吉业等, 1994)。③相当于南华系(高振家等, 2003)。④相当于北方青白口系和南华系南沱组或大塘坡组之间的一套地层(曹瑞骥, 2000;薛耀松, 2001)。造成分歧的原因在于:胶辽徐淮地区新元古代未发现冰雪沉积的痕迹,这与中国南方乃至全球各大洲震旦系均发育冰雪沉积物大不相同;新元古代微古生物演化缓慢,缺乏标志性化石,对比基础差;胶辽徐淮地区新元古代发育一种特殊的碳酸盐岩—臼齿碳酸盐岩,而中国南方震旦系不发育这类岩石;同位素测年不准确性问题,全球震旦系以白云岩沉积为主,而胶辽徐淮地区以灰岩沉积为主,白云岩相对较少。要解决胶辽徐淮地区原震旦系时代问题,依靠常规地质方法解决胶辽徐淮新元古代地层对比等问题很难,必须利用新方法、新思路来考虑。国际上目前倾向于采用同位素地球化学演化来解决前寒武纪地层的对比问题。

## 2 锶、碳同位素在晚前寒武纪的演化

上世纪 90 年代以来,世界各国地学工作者测定了大量的晚前寒武纪碳酸盐岩样品,建立了较为可信的晚前寒武纪海水锶同位素组成变化曲线(Asmerom *et al.*, 1991; Kaufman *et al.*, 1993; Brasier *et al.*, 1996; Montanez *et al.*, 1996; Yang Jiedong *et al.*, 1999; Shields, 1999), 为应用锶同位素确定全球上前寒武系地层时代和地层对比奠定了基础。

Shield (1999) 年根据对蒙古上前寒武系 Sr、C 同位素的测定,参考 Asmerom 等(1991)、Kaufman 等(1993)、Brasier 等(1996)、Montanez 等(1996)、Yang Jiedong 等(1999) 对世界各地上前寒武系的研究结果做出了最新的比较可靠的晚前寒武纪海水锶

和碳同位素比值随时间的变化图,这是到目前为止,国际上最为完整、针对海水最具代表性的晚前寒武纪锶、碳同位素演化曲线,也是晚前寒武纪海相地层定年重要的基础资料。

就演化趋势来说,晚前寒武纪锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值总体上随时间呈现曲折上升态势,受海平面变化的影响,其间虽有波动,但总趋势不变。碳同位素在晚前寒武纪已记录了较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(+10‰),反映了晚前寒武纪有机物埋藏比较丰富。同时 $\delta^{13}\text{C}$ 值的负波动(-5‰)反映了与冰川作用有关的沉积事件(Kaufman *et al.*, 1991),或者与冰川作用相对应的不整合地层有关(Brasier *et al.*, 1996)。二者在年龄谱线上的位置基本相互对应,并相互制衡。

### 3 样品采集与实验流程

样品分别采自吉林省南部通化市郊的二道江剖面万隆组中部、下部和白山市郊青沟子剖面的万隆组和八道江组的下部,岩石未经过蚀变(图 1)。

在采集的碳酸盐岩全岩样品中,挑选其中比较纯净的灰岩,粉碎至 200 目,然后用 0.5M 醋酸淋洗,把离心后的清液分为两份:一份测定 Sr 同位素比值,另一份测定 Rb、Sr 含量。测试由南京大学现代分析中心完成, Sr 的分离采用标准离子交换方法, Sr 同位素比值在 VG354 表面热电离同位素质谱仪上测定,清液 Rb、Sr 含量用同位素稀释质谱法测定(杨杰东等, 2001),有效样品 Rb/Sr 比值小于 0.1。测试实验结果列于表 1 和图 2。本次实验未做碳同位素分析,其在图 2 上的位置是根据野外地层序列确定的,其他碳同位素数据是在 MAT251 同位素质谱仪上测定的。

### 4 锶同位素对研究区震旦系时代的界定及对比

#### 4.1 锶同位素对研究区新元古代地层时代的界定

在获得吉南地区上前寒武系碳酸盐岩的 Sr 同位素值及收集了徐淮地区(杨杰东等, 2001)、辽东半岛上前寒武系的 Sr、C 同位素数据(郑文武等, 2004)(表 1)的基础上,把这些数据投到 Shields(1999)建立的 Sr、C 同位素演化曲线图上(图 2),并结合野外的地层层序,估算地层的地质年龄。从图中可以看出,除了大连地区兴民村组(L10)与淮北宿县沟后

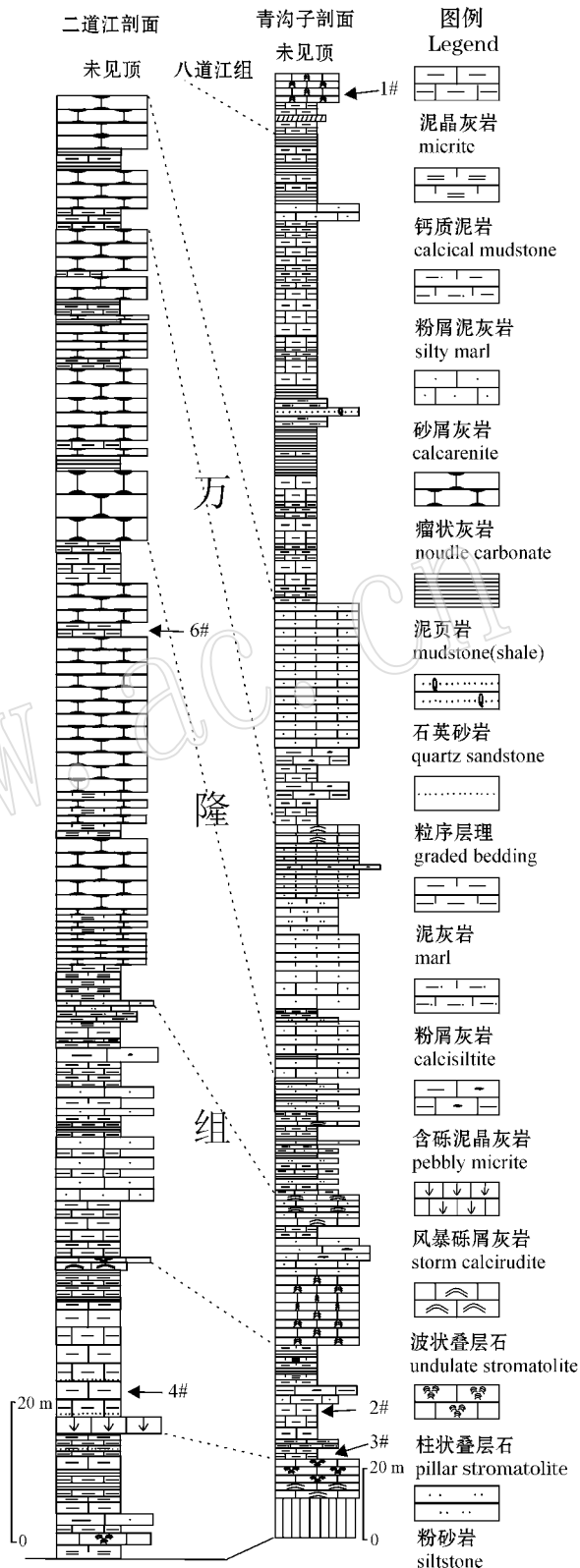


图 1 吉南万隆组—八道江组沉积层序及 Sr 同位素取样位置图

Fig. 1 Geological map showing deposition sequence of Wanlong Formation and Badaojiang Formation in southern Jilin Province and Sr isotope sampling sites

表 1 胶辽徐淮地区新元古代 Sr、C 同位素数据统计表

Table 1 Statistics of Sr and C isotopes in Jiao-Liao-Xu-Huai area

样品编号	采样地点	采样层位	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	资料来源
L-3	复州湾	洼里组	灰岩	3.899	-6.445	0.000 01	0.708 00	
L-6	大连金州	营城子组下部	灰岩	4.743	-6.795	0.000 01	0.707 35	郑文武等
L-7	大连金州	营城子组中上部	灰岩	2.758	-16.181	0.004 70	0.707 65	(2004)
L-10	大连金州	兴民村组	灰岩	3.744	-11.311	0.001 03	0.707 71	
1#	青沟子剖面	八道江组底部	叠层石灰岩			0.009 55	0.706 166	
2#	青沟子剖面	万隆组底部	微亮晶灰岩			0.009 06	0.705 708	
3#	青沟子剖面	万隆组底部	泥晶灰岩			0.009 49	0.705 967	本文
4#	二道江剖面	万隆组底部	泥晶灰岩			0.009 23	0.706 710	
6#	二道江剖面	万隆组底部	瘤状灰岩			0.010 94	0.706 956	
A2	金山寨东侧	沟后组中段	泥质灰岩	-0.370	-5.510	0.042 7	0.709 123	
A3	驴山东侧	金山寨组上段	叠层石灰岩	3.327	-7.735	0.060 2	0.707 332	
A4	黑峰岭东南侧	金山寨组上段	叠层石灰岩	-1.058	-10.325	0.015 5	0.707 152	
A5	驴山东侧	望山组上段	白云质灰岩	3.596	-7.885	0.016 4	0.706 401	
A7	黑峰岭东南侧	魏集组上段	叠层石灰岩	2.941	-8.840	0.010 1	0.706 943	
A8	张渠村东侧	张渠组下段	灰岩	4.165	-5.949	0.009 5	0.705 991	杨杰东等
A9	张渠村东侧	九顶山上段	沥青质灰岩	3.904	-10.366	0.066 5	0.705 252	(2001)
A10	东平山西侧	倪园组上段	白云质灰岩	3.273	-9.560	0.012 0	0.705 941	
A11	茅头山南侧	赵圩组上段	泥质灰岩	3.487	-8.380	0.032 5	0.706 479	
A12	四顶山西侧	四顶山组下段	白云质灰岩	3.201	-2.992	0.127 5	0.706 178	
A13	四顶山西侧	九里桥组下段	白云质灰岩	2.812	-5.623	0.031 4	0.706 386	
A15	店疙瘩村后	刘老碑组下段	灰岩	-0.166	-9.352	0.030 7	0.706 783	

Sr 同位素标准化值:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$ , 误差:  $\pm 2\sigma$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  超过新元古代海水值的数据未列入。

组(A2)、金山寨组(A3、A4)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值落点时序相位地质年龄小于 700 Ma 外, 胶辽徐淮地区其余各组的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值落点时序相位地质年龄均大于 700 Ma, 是跨越北方青白口系与南方震旦系之间的一套地层, 其地质时代约为 750~860 Ma。

淮北沟后组(A2)的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值为 0.709 12, 其落点在寒武纪时序相位内, 地质年龄约在 510 Ma 左右, 时代应归属于寒武纪; 金山寨组(A3、A4)的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值在图 2 落点位于 Marinona 和 Sturtian 冰期之间, 年龄在 680 Ma 左右, 相当于中国南方南华系顶部的沉积。大连兴民村组(L10)初始比值为 0.707 706, 地质年龄在 580 Ma 左右, 时代应归属于震旦纪, 这与王家坦页岩中发现的似水母化石时代一致。

#### 4.2 胶辽徐淮新元古代地层相互对比

目前胶辽徐淮地区 Sr、C 同位素数据较少, 但基本上能够反映其发育时代并进行简要对比。

从图 2 和表 1 可以看出, 徐淮地区寿县四顶山组与张渠村倪园组的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值不可区分, 寿县九里桥组、茅山赵圩组、驴山望山组的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值不可区分, C 同位素数据也处于基本相同的位置, 表明它们可能是属于同时代的沉积物。

吉辽南部新元古代的 Sr 同位素比值除了八道江组和兴民村组样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值小于 850 Ma 外, 其余的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值均在 850~860 Ma 之间。吉林地区青沟子剖面和二道江剖面万隆组底部  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值相近, 一方面验证了 Sr 同位素的可靠性, 另一方面同样也验证了吉南地区万隆组为同一时期的沉积物。辽南大连地区营城子组的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值与万隆组中部的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值基本一致, 表明它们虽然沉积的地层序列和沉积环境大为不同, 但却是同一时期的沉积, 可以对比。

地层层序和旋回变化已经证实了辽宁大连地区与复州地区为同一时期的沉积物(乔秀夫等, 2001), Sr、C 同位素也同样证实了两地为同一时期的沉积, 复州原洼里组  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值(0.708 00)同大连地区营城子组中上部  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值(0.707 65)在图 2 上的落点都在 855 Ma 左右, 其 C 同位素也基本上位于相同位置。

徐淮地区的新元古代赵圩组、倪园组、张渠组与淮南的九里桥组、四顶山组、奶奶庙组的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值与吉辽地区营城子组、洼里组(相当于南关岭组)万隆组的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值基本上一致, 说明胶辽徐淮地区新元古代为同时代的沉积, 完全可以对比。

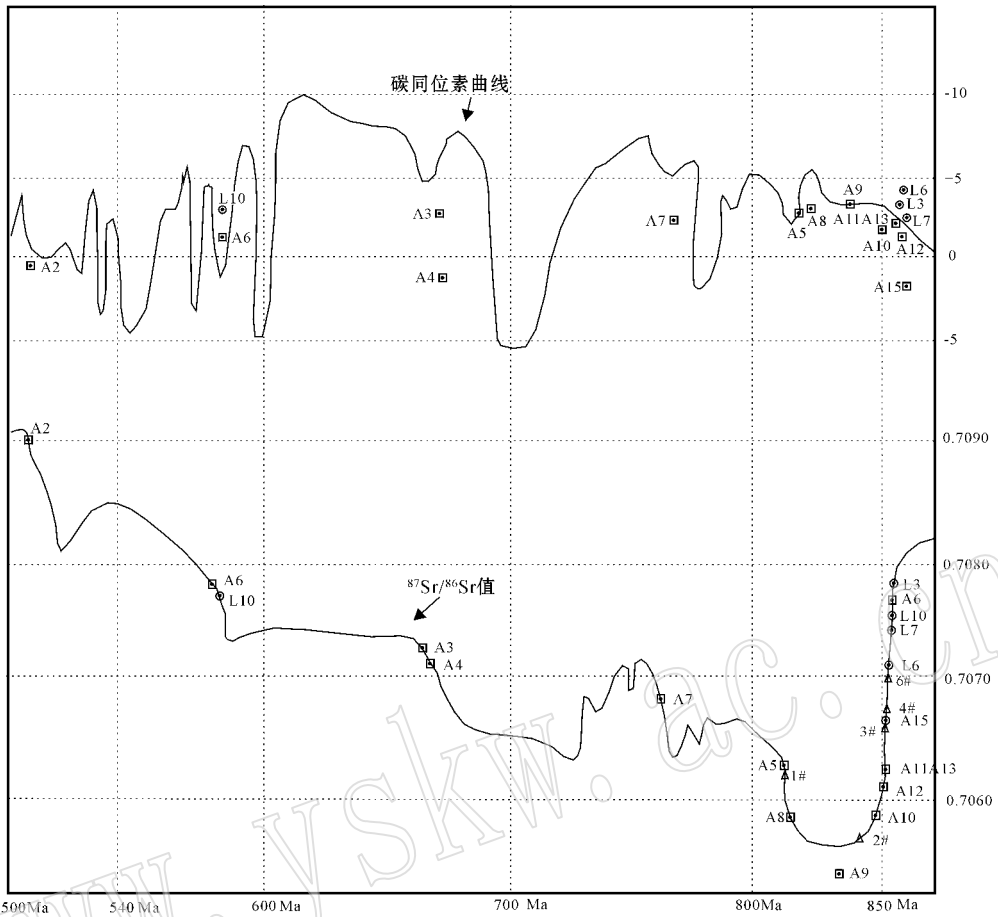


图 2 新元古代-寒武纪海水 Sr、C 同位素组成演变图 [据 Shields(1999), 郑文武等(2004)简化]  
 Fig. 2 The evolution of Sr and C isotopes in sea water from Neoproterozoic to Cambrian  
 [modified after Shields (1999) and Zheng Wenwu *et al.* (2004)]

## 5 讨论

本文工作表明,胶辽徐淮地区原震旦纪地层  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值的对应性很好,利用 Sr、C 同位素地层学确定前寒武纪海相地层的年龄是完全可行的,是解决前寒武纪地层时代和对比行之有效的方法。胶辽徐淮地区原震旦系沉积主体的地质时代在 750~860 Ma 之间,并延续到震旦纪,为北方青白口系及其后的沉积。

但目前胶辽徐淮地区 Sr、C 同位素数据较少,相互之间只能大致对比,还需要进一步采集样品进行验证。

## References

Asmerom Y, Jacobsen S B, Butterfield N J, *et al.* 1991. Sr isotope variations in Late Proterozoic seawater: Implications for crustal evolution

[J]. *Acta of Geochim. Cosmochim.* 55: 2883~2894.

Brasier M D, shields G A, Kuleshov V N, *et al.* 1996. Integrated chemo- and biostratigraphic calibration of early animal evolution: Neoproterozoic-early Cambrian of southwest Mongolia [J]. *Geological Magazine*, 133: 445~485.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1989. Regional Geology of Jilin Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 65~81 (in Chinese).

Cao Ruiji. 2000. Discussion on some problems in the Mesoproterozoic and Neoproterozoic stratigraphical study in China [J]. *Journal of Stratigraphy* 24(1): 1~7 (in Chinese).

Duan Jiye and An Sulan. 1994. On the Subdivision and correlation of Upper Precambrian System in South Liaoning Province, China [J]. *Liaoning Geology* (1~2): 30~43 (in Chinese with English abstract).

Gao Zhenjia and Chen Keqiang. 2003. The Nanhua System of Xinjiang and some geological issues of Nanhua System in China [J]. *Geological Survey Research*, 26(1): 8~13. (in Chinese with English abstract).

Hong Zuomin, Huang Zhenfu and Liu Xiaoliang. 1991. The Upper Precambrian Geology in the Southern Region of the Eastern Liaoning Peninsula [M]. Beijing, Geological Publishing House, 119~128 (in

- chinese).
- Huang Sijing, Shi He, Liu Jie, *et al.* 2001. Progress in Strontium isotope stratigraphy[J]. *Advance in Earth Sciences*, 16(2):194~200 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, *et al.* 2004. Application of Strontium Isotope Stratigraphy to Dating Ordovician Marine Sediments—An case study from the well Tazhong 12 in Tarim basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1):1~5 (in Chinese with English abstract).
- Kaufman A J, Jacobsen S B and Kroll A H. 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 120:409~920.
- Kaufman A J, Hayes J M, Kroll A H, *et al.* 1991. Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism[J]. *Precambrian Research*, 49:301~327.
- Montanez I P, Banner J L, Osleger D A, *et al.* 1996. Integrated Sr isotope variations and sea-level history of Middle to Upper Cambrian platform carbonates: Implications for the evolution of Cambrian seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Geology*, 24:917~920.
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi and Peng Yang. 2001. Neoproterozoic in Paleotanzhu Fault Zone—Catastrophe Sequences Biostratigraphy[M]. Beijing, Geological Publishing House, 108~122 (in Chinese).
- Shields G A. 1999. Working towards a new stratigraphic calibration scheme for the Neoproterozoic-Cambrian[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 92:221~233.
- Tang Feng and Gao Linzhi. 1998. Sinian Biota in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(3):193~204 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongfang, Wang Jiyuan and Lin Weixing. 1984. Research on the isotopic geochronology of the Precambrian in Liaoning Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 29(4):872~875 (in Chinese).
- Xing Yusheng. 1989. The Upper Precambrian of China, Stratigraphy of China(3[M]. Beijing: Geological Publishing House, 120~144 (in Chinese).
- Xue Yaosong, Cao Ruiji, Tang Tianfu, *et al.* 2001. The Sinian stratigraphic sequence of the Yangtze region and correlation to Late Precambrian strata of North China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 25(3):207~216 (in Chinese).
- Yang Jiedong, Sun Weiguo, Wang Zongzhe, *et al.* 1999. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater[J]. *Precambrian Research*, 93:215~233.
- Yang Jiedong, Zheng Wenwu, Wang Zongzhe, *et al.* 2001. Age determining of the Upper Precambrian System of Northern Jiangsu-Anhui by using Sr and C isotopes[J]. *Journal of Stratigraphy*, 25(1):44~47 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenwu. 1979. The principal characters of the "Huainan Biota" and its stratigraphic significance[J]. *Journal of University of Technology*, 7(2):97~108 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenwu. 1980. A new occurrence of fossil group of *Churia* from the Sinian System in north Anhui and its geological meaning[J]. *Bulletin of the Tianjin institute of Geology and Mineral Resources-Chinese Academy of Geological Sciences*, 1(1):49~67 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wenwu, Yang Jiedong, Hong Tianqiu, *et al.* 2004. Sr and C Isotopic Correlation and the Age Boundary Determination for the Neoproterozoic in the South Liaonan and Northern Jiangsu-Northern Anhui Provinces[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(2):165~178 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Feng Lianjun, *et al.* 2003. The Effects of the Neoproterozoic Snowball Earth on Carbon and Sulfur Isotopic Compositions in Seawater[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(6):487~493 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹瑞骥. 2000. 我国中新元古代地层研究中若干问题的探讨[J]. *地层学杂志*, 24(1):1~7.
- 段吉业, 安素兰. 1994. 论辽南上前寒武系的划分与对比[J]. *辽宁地质*, 1~2:30~43.
- 高振家, 陈克强. 2003. 新疆的南华系及我国南华系的几个地质问题[J]. *地质调查与研究*, 26(1):8~13.
- 洪作民, 黄镇福, 刘效良. 1991. 辽东半岛南部晚前寒武系地质[M]. 北京:地质出版社, 119~128.
- 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 2001. 锶同位素地层学研究进展[J]. *地球科学进展*, 16(2):194~200.
- 黄思静, 石和, 张萌, 等. 2004. 锶同位素地层学在奥陶系海相地层定年中的应用等等以塔里木盆地塔中12井为例[J]. *沉积学报*, 22(1):1~5.
- 吉林省地质矿产局. 1989. 吉林省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 65~81.
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 乔秀夫, 高林志, 彭阳. 2001. 古庐带新元古界——灾变、层序、生物[M]. 北京:地质出版社, 108~122.
- 全国地层委员会. 2002. 中国区域年代(地质年代)表说明书[M]. 北京:地质出版社.
- 唐烽, 高林志. 1998. 中国震旦生物群[J]. *地质学报*, 72(3):193~204.
- 王东方, 王集源, 林蔚兴. 1984. 辽宁前寒武纪同位素地质年代学研究[J]. *科学通报*, 29(4):872~875.
- 邢裕盛. 1989. 中国的前寒武系:中国地层(3[M]. 北京:地质出版社, 120~144.
- 薛耀松, 曹瑞骥, 唐天福, 等. 2001. 扬子区震旦纪地层序列和南、北方震旦系对比[J]. *地层学杂志*, 25(3):207~216.
- 杨杰东, 郑文武, 王宗哲, 等. 2001. Sr、C同位素对苏皖北部上前寒武系时代的界定[J]. *地层学杂志*, 25(1):44~47.
- 郑文武. 1979. "淮南生物群"的主要特征及其在地层研究中的意义[J]. *合肥工业大学学报*, 7(2):97~108.
- 郑文武. 1980. 皖北震旦系中 *Churia* 等化石的发现及其意义[J]. *中国地质科学院院报 天津地质矿产所分刊*, 1(1):49~67.
- 郑文武, 杨杰东, 洪天求, 等. 2004. 辽南与苏皖北部新元古代地层 Sr 和 C 同位素对比及年龄界定[J]. *高校地质学报*, 10(2):165~178.
- 张同钢, 储雪蕾, 冯连军, 等. 2003. 新元古代"雪球"事件对海水碳、硫同位素组成的影响[J]. *地球学报*, 24(6):487~493.
- 《中国地层典》编委会. 1997. 新元古界分册[M]. 北京:地质出版社.