

贵州惠水石炭纪锶同位素曲线及年代地层对比

石 和¹ 黄思静² 赵鹏肖¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 本文简要介绍了锶同位素地层学的基本原理, 根据贵州惠水地区石炭系剖面中的 19 个锶同位素测试数据建立了此剖面的锶同位素演化曲线并与 R.E. Denison 的北美同时代锶同位素曲线进行了对比。两条锶同位素演化曲线的极大相似性, 证实了地质历史上古海洋中的锶同位素组成具有全球一致的演化规律, 是进行全球年代地层对比的可靠工具。根据对比, 笔者讨论了石炭纪的全球性海平面变化和惠水石炭系剖面的年代地层划分对比, 认为下石炭统与上石炭统的界线大致位于摆佐组的近底部, 证实了石炭—二叠系的界线位于马平组内部。

关键词: 锶同位素地层学; 贵州; 惠水; 石炭系; 年代地层

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)02-0138-06

瑞典地质学家 F.E. Wickman 在 1948 年认为海水中的锶同位素组成在地质历史中是不断变化的, 可据其对海相地层进行广泛对比, 并由他本人于 1984 年提出了锶同位素地层学 (Strontium Isotope Stratigraphy) 这一地层学分支学科。

海水中的锶同位素组成主要受壳源锶和幔源锶控制。由大陆岩石经风化向海洋提供相对富放射性成因的锶为壳源锶, 具较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 全球平均值为 0.7119^[1]; 幔源锶则主要由洋中脊热液系统提供, 为相对贫放射性成因的锶, 具较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 全球平均值为 0.7035^[2]。地质历史中许多全球性地质事件, 如构造运动、冰川活动、洋中脊热液系统变化、洋壳的增生衰减等都会引起全球性海平面的升降(即海陆面积的消长变化), 从而造成了海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的变化。此外, 壳源锶和幔源锶在海水中完全混合仅需 10^3 年^[3], 而在海水中存留的时间可达 1.9×10^7 年^[4]。鉴于上述, 海水中的锶同位素组成在地史过程中随海平面升降而不断变化, 并具有基本一致的变化规律, 这就是锶同位素地层学进行海相沉积地层全球对比的基本原理。

锶同位素地层学在国外地质界已受到广泛的关注和应用, 已有大量锶组成数据和演化曲线被公布^[5-11], 近年来对锶同位素地层学的研究也受到我国地质工作者的重视, 有关研究成果逐年增多^[12-15], 显示了锶同位素地层学的广阔的应用前景。本文根据从贵州惠水地区石炭系剖面中获得的 19 个锶同位素测试数据, 建立了此剖面的锶同位素演化曲线, 讨论了石炭纪的全球性海平面变化和惠水石炭系剖面的年代地层划分对比。

1 地质背景及测试条件

1.1 地质背景

从未经蚀变的海相碳酸盐岩中获得能代表原始海水锶组成值, 是锶同位素地层学进行全球年代地层对比的关键。中国黔南海相石炭纪碳酸盐岩地层发育, 本文中的 19 个锶同位素测试样品采自黔南惠水地区的摆金、祥摆石炭系剖面。剖面中石炭纪地层发育完整, 共厚 1 864.9 m, 整合于泥盆系尧梭组灰岩之上, 平行不整合于二叠系梁山组泥页岩之下, 根据前人资料, 按岩性组合和化石组合该剖面石炭系

收稿日期: 2002-09-25; 改回日期: 2003-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(49972044)资助。

作者简介: 石和, 男, 1950 年生, 教授, 从事地层学、古生物学教学、科研工作; E-mail: shihe@cdu.edu.cn。

从下至上划分如下:

革老河组:岩性主要为深灰色灰岩、泥灰岩夹页岩。下部含床板珊瑚 *Syringoporids* 及腕足类、腹足类、层孔虫等化石,原称为者王组;上部含 *Cystophrentis* 等珊瑚化石;厚 159.0 m。

汤耙沟组:以灰色、深灰色泥质灰岩为主,夹深灰色微晶灰岩、泥页岩及砂岩透镜体,含 *Pseudouralinia* 等珊瑚及腕足类、三叶虫、棘皮类化石;厚 208.0 m。

祥摆组:灰色、深灰色石英砂岩夹黑色页岩及薄煤层,含植物化石碎片,厚 196.7 m。

旧司组:深灰色、灰黑色灰岩、页岩不等厚互层,夹泥灰岩,含 *Thysanophyllum*, *Kueichouphyllum* 等珊瑚及腕足类、双壳类化石;厚 290.6 m。

上司组:深灰色灰岩夹灰黑色页岩,含 *Yuanophyllum*, *Kueichouphyllum* 等珊瑚及腕足类、双壳类化石;厚 387.0 m

摆佐组:深灰色、灰色灰岩夹白云岩,含 *Eostaffella*, *Millerella*, 珊瑚 *Yuanophyllum*, *Koninckophyllum*, *Kionophyllum*, 腕足 *Striatifera*, *Gondolina* 等化石, 261.8 m。

黄龙组:灰色、浅灰色灰岩,含 *Pseudostaffella*, *Eostaffella*, *Staffella*, 腕足 *Choristites* 的下部又称滑石板组;产 *Profusulinella*, *Fusulina*, *Fusulinella*, *Protriticites* 的上部又称为达拉组,厚 217.3 m。

马平组:岩性为灰色、浅灰色灰岩,含腕足、珊瑚等,下部含 *Triticites*, *Quasifusulina*, 上部含 *Pseudoschwagerina*, *Rugosofusulina*, *Eoparafusulina* 等,厚 143.7 m。

1.2 测试条件

为了保证研究的地层剖面中的锶同位素值能代表原始海水的锶同位素组成,笔者在野外采集未明显受蚀变影响的微晶灰岩、泥晶灰岩及腕足类化石外壳作为测试样品,全部样品在室内破碎前用蒸馏水仔细进行了清洗,经岩石薄片鉴定和阴极发光检测,并作了铁氰化钾溶液染色,一部分样品还作了 Fe、Mn 元素分析,排除了部分蚀变样品。再用 2.5 mol/L 的盐酸溶样,铷、锶经装有 AG-50WX8 树脂的离子交换柱分离纯化,用 MAT-261 质谱仪测定锶同位素比值并进行归一化处理,每盘样品都插入了 NBS987 标准,8 件标准样测量平均值为 0.71027±0.000042,全部分析数据的标准偏差在 0.000016~0.000284 之间,控制了样品的测量精度和准确性。

2 惠水石炭纪锶同位素曲线对比

利用惠水石炭系剖面中 19 个未经蚀变样品的锶同位素组成值与其在剖面上的采样位置对应关系(表 1),作出了剖面的锶同位素演化曲线(图 1a),并与 R.E.Denison 等的北美石炭—二叠纪锶同位素演化曲线中的石炭纪部分^[10](图 1b)进行对比,两条锶同位素曲线极为吻合。由于后者是相对地质年龄而作的锶演化曲线,因而为惠水石炭系剖面的年代地层划分对比提供了依据。

表 1 惠水石炭系剖面的锶同位素测试数据

Table 1 Strontium isotopic data of samples from the Carboniferous section in Huishui, Guizhou

地层单位	采样长位置/m	样品岩性	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
马平组	1841.1	灰白色 鲕灰岩	0.707 88
	1795.5	浅灰色微晶灰岩	0.708 16
黄龙组	1646.7	浅灰色微晶灰岩	0.708 26
	1619.6	浅灰色微晶灰岩	0.708 24
	1505.8	浅灰色微晶灰岩	0.708 14
摆佐组	1448.9	浅灰色泥晶灰岩	0.708 14
	1326.2	浅灰色微晶灰岩	0.708 14
上司组	1239.0	灰色含长身贝微晶灰岩	0.707 85
	953.5	灰黑色生物屑微晶灰岩	0.707 68
	915.5	黑色含珊瑚微晶灰岩	0.707 75
	875.5	黑色含珊瑚微晶灰岩	0.707 76
旧司组	834.5	黑色微晶灰岩	0.707 62
	684.5	黑色泥质灰岩	0.707 64
	584.5	黑色泥质粉微晶灰岩	0.707 65
祥摆组		未采样	
汤耙沟组	273.4	腕足	0.70801
	182.4	微晶灰岩	0.70806
革老河组	118.9	微晶灰岩	0.70819
	50.3	微晶灰岩	0.70827
	15.0	含介形虫微晶灰岩	0.70828

注:锶同位素分析测试由成都理工大学同位素研究室完成

2.1 锶同位素曲线的特征对比

惠水石炭纪锶同位素组成值介于 0.707 62~0.708 28 之间,与 R.E.Denison 的该值变化于 0.707 57~0.708 30 之间基本一致。两条锶同位素演化曲线在形态特征上极为相似,皆由形态相似的早期波谷(曲线左凸)和晚期波峰(曲线右凸)组成,其中的波峰又是由两个次级波峰组成。两条不同地区获得的曲线的极大

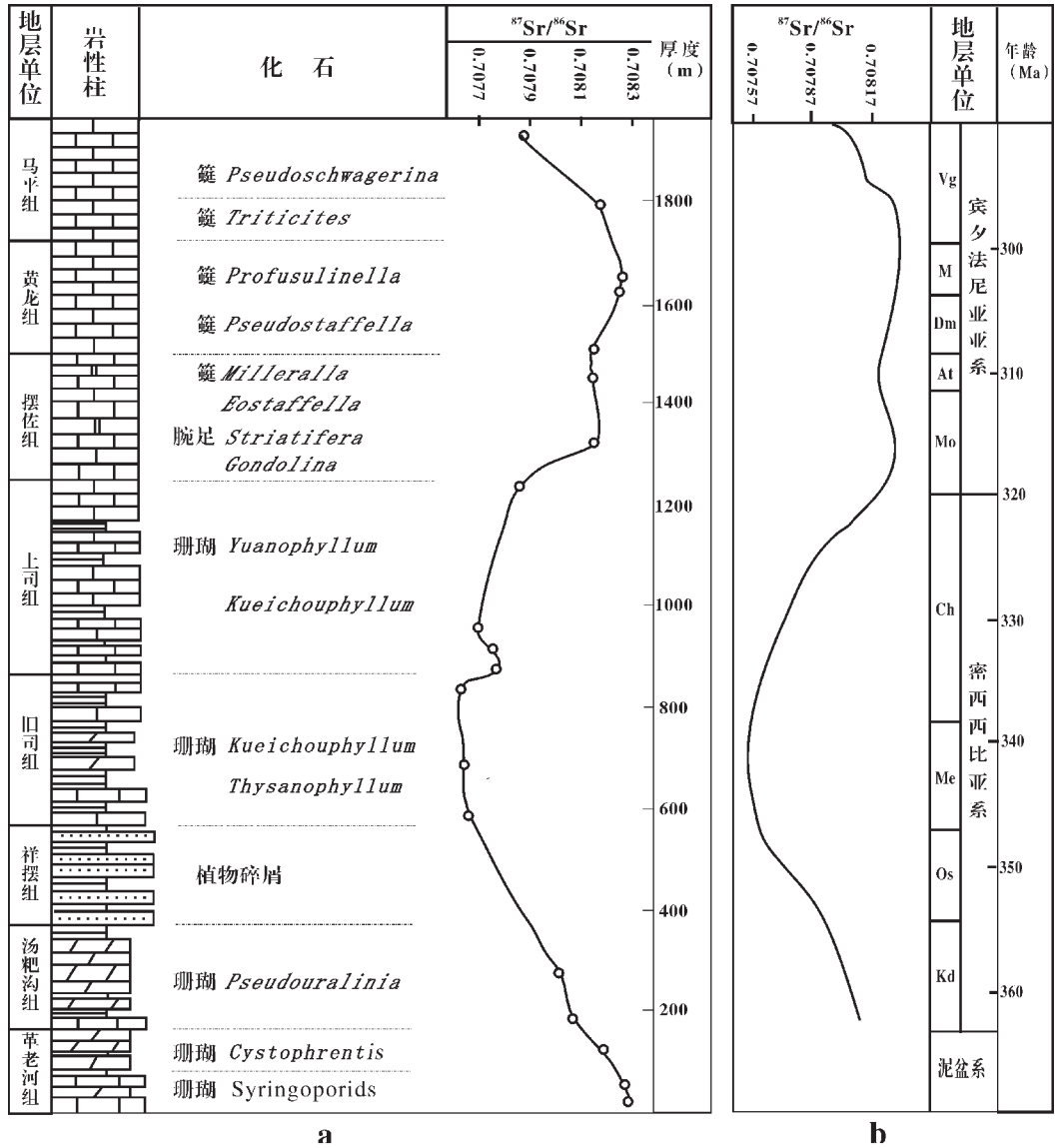


图 1 锶同位素演化曲线对比图

Fig. 1 Correlation of strontium isotopic evolutionary curves

Kd (Kinderhookian)—肯德胡克阶; Os (Osagian)—奥萨根阶; Me (Meramecian)—麦拉马克阶; Ch (Chesterian)—切斯特阶; Mo (Morrowan)—莫洛阶; At (Atokan)—阿托肯阶; Dm (Desmoinesian)—德士菲阶; M (Missourian)—密苏里阶; Vg (Virgilian)—维尔吉尔阶

一致性证实了地质历史上古海洋中的锶同位素组成具有全球一致的演化规律, 可以作为不同地区进行年代地层划分对比的可靠工具。

两条曲线间仍有一些差异, 这主要可能由以下因素影响: 最重要的因素是二者的采样位置标定的单位不同。惠水剖面的采样位置是以剖面的地层累计厚度为单位, 由于惠水石炭纪时在早期有较多的碎屑物质参与沉积, 而晚期则全是碳酸盐沉积, 沉积速率的差别造成了曲线中波谷波峰分界的上移。其

次, 笔者认为, 由于存在一些区域性的地质事件, 会造成同一时期不同沉积盆地中的锶组成背景值有轻微的差值, 这虽不致于明显影响锶演化曲线的总体轮廓(长期旋回), 但在短期旋回(低级别轮廓)上仍可有一些区域性地质事件的影响。R.E. Denison 的曲线中的锶同位素值来自美国、加拿大各地 140 余件样品, 是在 Burke 等人工作基础上拟合而成的演化曲线, 可代表北美(甚至全球)石炭纪的锶演化总轮廓, 而惠水剖面锶曲线仅由局部地区的 19 个锶组

成值拟合,有一定的地方性色彩。第三,并不能完全排除存在锶同位素测试数据上的一些轻微误差。

2.2 海平面升降分析

各种大规模的地质事件多引起全球性海平面的升降和海陆面的消长变化,从而造成海洋中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的增减。反过来,可根据锶同位素演化曲线中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值负向偏移或正向偏移判断海平面的升降。

本文中的两条石炭纪锶同位素曲线皆从早期的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值负向偏移转变为正向偏移,并在晚期从正向偏移转变为负向偏移,显示了两条曲线都反映了石炭纪时全球经历了大规模的海侵→海退→海侵的过程。根据R.E.Denison的演化曲线,石炭纪时全球性海侵最大时期为345 Ma,而全球性海退最大时期为300 Ma。

晚石炭世的海退海侵由两次全球性次级海退海侵过程组成,其间的次级海侵—海侵中期约310 Ma左右。此外,惠水曲线约在上司组沉积初期还有一个小型的波峰突起显示,这是华南地区在祥摆组—旧司组沉积期发生的地区性海退引起的锶同位素值变化(区域性短期旋回)的滞后表现,还是锶同位素分析中的误差所致,有待今后锶数据的积累证实。

2.3 锶同位素曲线与年代地层划分对比

对沉积地层进行准确的年代地层划分是地层研究中的难点之一,对地层中的生物群识别至今仍是沉积地层、年代地层划分对比的主要手段。但是,由于生物群的分区、环境的差异、生物化石带的穿时、化石保存条件和采集的限制,利用生物学方法准确进行年代地层划分对比也存在很大困难,利用锶同位素地层学原理为全球海相沉积地层的年代地层研究提供了一个重要工具。

对照R.E.Denison的以地质年龄为纵坐标的石炭纪锶同位素演化曲线,笔者将对惠水地区的石炭系剖面的年代地层划分对比作一些初步的探讨。

泥盆—石炭系界线:图1显示,早石炭世初的海侵是泥盆纪后期全球性海侵的继续,难以从锶演化曲线形态上判断剖面的石炭系下界准确位置,但从图1a曲线来看,泥盆—石炭系界线上的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为0.7081,如果惠水剖面的锶曲线无明显分析误差和区域性锶背景值影响,则该剖面上的石炭系下界应在革老河组—汤耙沟组界线附近。若按J. Remane的国际地层表^[17],泥盆—石炭系界线的年龄值为355 Ma或354 Ma,则惠水剖面的该界线还应

提高到汤耙沟组—祥摆组界线附近。

下石炭—上石炭统界线:在华南,传统上将摆佐组作为下石炭统的最高层位。摆佐组与上覆的黄龙组和下伏上司组在岩性上常难区分,一般以下部*Striatifera*, *Gondolina*等腕足类化石的出现作为摆佐组的底界,而以**筴类** *Pseudostaffella*、腕足类 *Choristites*、菊石 *Reticuloceras*的出现归为黄龙组下部(滑石板组)。下石炭统—上石炭统(即密西西比亚系—宾夕法尼亚亚系)界线的年龄值为320 Ma,将图1中的两条曲线作形态比较,则惠水剖面中的下、上石炭统的界线应大致在摆佐组的近底界,而不是其顶界。

石炭—二叠系界线:过去,中国华南地区将马平组与上覆梁山组之间的普遍平行不整合面(也是岩性上的明显分界面)作为石炭—二叠系界线,近年来中国的地学界已取得共识并与国际接轨,将*Pseudoschwagerina*的出现作为二叠系的开始^[18],这一**筴带**出现于马平组上部。在R.E.Denison的曲线中,石炭—二叠系界线(宾夕法尼亚亚系或Vigilian阶上界)年龄为290 Ma。其对应的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值约为0.7080。若惠水剖面锶同位素值基本代表原始海水的锶组成,则该 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值对应于剖面上马平组内距顶约40 m处。在J. Remane的国际地层表中,石炭—二叠系界线的年龄值为295 Ma(G.S. Odin提议)或298 Ma(国际地层委员会地层分会提议),则惠水剖面的石炭—二叠系界线还应适当下移至马平组下部或中部。总之,按锶同位素演化曲线所确定的石炭—二叠系界线与按*Pseudoschwagerina*出现划分的该界线大致吻合,马平组是一跨石炭—二叠系的岩石地层单位。

一些岩石地层单元的年代地层对比:同理,可以对照R.E.Denison的曲线,将惠水剖面的岩石地层单位与北美石炭系进行年代地层对比。如,摆佐组中下部应大致为北美莫洛期(Morrowan)沉积,摆佐组上部—黄龙组下部可能大致对应于北美的阿托肯阶(Atokan),旧司组大致为麦拉麦克期(Meramecian)沉积。

3 结论

海相沉积地层中锶同位素组成演化主要受地质历史中海平面升降及其升降幅度影响,具有全球基本一致的演化规律,是作为全球性地质事件(尤其是全球性海平面升降)的判别和进行全球性年代地层

划分对比的有效工具。

贵州惠水石炭系剖面的锶同位素演化曲线与 R.E.Denison 的北美相应曲线具有极其一致的形态特征, 据此可判断石炭纪时全球经历了一个海侵—海退—海侵过程; 惠水剖面泥盆—石炭系界线应作适当上移; 下石炭—上石炭统界线应大致位于摆佐组的近底部; 石炭—二叠系界线位于马平组内部, 与以 *Pseudoschwagerina* 的出现作为二叠系开始的认识相当, 但两种方法所确定的石炭—二叠系界线可能并不完全吻合。

锶同位素地层学是一门发展历史不长的地层学分支学科, 在国外已取得长足的进展。中国这方面的研究起步晚, 研究程度低, 须加强研究, 积累大量数据以纠正和完善各时代的锶同位素演化曲线, 方能提高海相沉积地层的年代地层划分对比精度。因此, 根据惠水石炭系剖面中有限的锶同位素数据构筑的演化曲线所得出的上述结论是初步的, 有待深入研究修正认识。

锶同位素分析测试由成都理工大学同位素研究室完成, 在此深致谢意。

参考文献 (References):

- [1] Palman M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth & Planetary Science letters*, 1989, 92: 11~26.
- [2] Palman M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr[J]. *Nature*, 1985, 314: 526~528.
- [3] 福尔 G, 鲍威尔 J L. 锶同位素地质学[M]. 中国科学院贵阳地化所译. 北京: 科学出版社, 1975. 1~208.
Faure G., Powell J. L. Strontium isotope geology[M] (translated by Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang). Beijing: Science Press, 1975. 1~208.
- [4] Goldberg E D. Minor elements in sea water[A]. In: Riley J P, Skirrow G (eds). *Chemical Oceanography* [C] New York: Academic Press, 1986.
- [5] Burke W H, Denison R E, Hetherington R B, et al. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time [J]. *Geology*, 1982, 10: 516~519.
- [6] Gao G, Land L S. Geochemistry of Cambro-Ordovician Arbuckle limestone, Oklahoma: implications for diagenetic $\delta^{18}\text{O}$ alteration and secular $\delta^{13}\text{C}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variation [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1991, 55: 2911~2920.
- [7] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chem. Geol.*, 1999, 161: 59~88.
- [8] Denison R E, Kirkland D W, Evans R. Using strontium isotopes to determine the age and origin of gypsum and anhydrite beds [J]. *J. Geol.*, 1998, 106: 1~17.
- [9] Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Silurian and Devonian seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve [J]. *Chem. Geol.*, 1997, 140: 109~121.
- [10] Montanez I P, Osleger D A, Banner, J L et al. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans [J]. *GSA Today*, 2000, 10: 1~7.
- [11] McArthur J M, Crame A J, Thirlwall M F. Major revision of Late Cretaceous stratigraphy of Antarctica using strontium isotope stratigraphy [J]. *J. Geol.*, 2000, 108: 623~640.
- [12] 卢武长, 崔秉荃, 张平, 等. 石炭纪海相碳酸盐的锶同位素演化及其意义 [J]. *矿物岩石*, 1992, 12(2): 86~93.
Lu Wuchang, Cui Bingquan, Zhang Ping, et al. Strontium isotopic evolution of the Carboniferous marine carbonates from Majiaoba profile [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 12(2): 86~93 (in Chinese with English abstract).
- [13] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 锶同位素地层学研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 194~200.
Huang Sijing, Shi He, Liu Jie, et al. Progress in strontium isotope stratigraphy [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 194~200 (in Chinese with English abstract).
- [14] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(3): 359~366.
Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, et al. Application of strontium isotope stratigraphy to diagenesis research [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 359~366 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨杰东, 郑文武, 王宗哲, 等. Sr、C 同位素对苏皖北部上寒武系时代的界定 [J]. *地层学杂志*, 2001, 25(1): 44~47.
Yang Jiedong, Zheng Wenwu, Wang Zongzhe, et al. Age determining of the upper Precambrian system of northern Jiangsu-Anhui by using Sr and C isotopes [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2001, 25(1): 44~47 (in Chinese with English abstract).
- [16] Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Mississippian, Pennsylvanian and Permian seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve [M]. *Chemical Geology*, 1994, 112: 145~167.
- [17] Remane J, Faure-Muret A, Odin G S. 国际地层表说明 [J]. 金玉玕, 王向东, 王玥译. *地层学杂志*, 2000, 24(增刊).
Remane J, Faure-Muret A, Odin G S. International Stratigraphic chart and Explanatory Note to the International Stratigraphic Chart [J]. translated by Jin Yugan, Wang Xiangdong, Wang Yue. *Journal of Stratigraphy*, 2000, 24(SuPP).
- [18] 金玉玕, 尚庆华, 曹长群. 二叠纪地层研究述评 [J]. *地层学杂志*, 2000, 24(2): 99~107.
Jin Yugan, Shang Qinghua, Cao Changqun. A review of Permian stratigraphy [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2000, 24(2): 99~108 (in Chinese with English abstract).

Strontium isotopic curve of the Carboniferous in Huishui, Guizhou, and chronostratigraphic correlation

SHI He¹, HUANG Si-jing², ZHAO Peng-xiao¹

(1. *Geoscience Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

2. *State Key Laboratory of Oil and Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: The fundamental principle of Sr isotopic stratigraphy is introduced briefly in the paper. An evolutionary curve of the Sr isotopic composition of the Carboniferous has been constructed based on 19 unaltered carbonate samples collected from the Huishui section, Guizhou. It was correlated with a contemporaneous Sr isotope curve of North America constructed by R.E. Denison. The very close similarity between the two curves supports the globally consistent evolutionary feature of the Sr isotopic composition of ancient seawater during the geologic history. So the curve is a reliable tool for the global chronostratigraphic correlation. This paper discusses the global sea-level changes during the Carboniferous and the chronostratigraphic division and correlation of the Huishui Carboniferous section. The authors suggest that the Lower–Upper Carboniferous boundary is broadly located near the base of the Bazuo Formation and that the Carboniferous–Permian boundary lies inside the Maping Formation.

Key words: strontium isotopic stratigraphy; Huishui; Guizhou; Carboniferous; chronostratigraphy