

广西六景泥盆系腕足壳体的微量元素组成及其对海水信息的保存

程红光^{1,2}, 李心清¹, 王克卓³, 黄思静⁴, 王 兵^{1,2}, 程建中^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

3. 新疆地质调查院 第一地质调查所, 乌鲁木齐 830011; 4. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

摘要: 低镁方解石腕足化石壳体被广泛地应用于地质历史时期原始海洋地球化学组成的重建研究, 其保存度的识别是该研究的一项重要内容。通常使用显微结构、阴极发光和微量元素含量等 3 种方法验证其对原始地球化学信息的保存, 微量元素含量的识别方法一直被置于较为次要的地位。我们对采自广西六景泥盆系腕足化石微量元素研究表明, 其 Fe、Mn、Sr 分别为 $(12\sim 2800)\times 10^{-6}$ 、 $(1\sim 711)\times 10^{-6}$ 和 $(243\sim 1835)\times 10^{-6}$ 。上述 3 种识别方法实质上都是微量元素的识别, 其余两种识别方法只是微量元素的不同表现而已。通过氧同位素组成、Mn 和 Sr/Mn 对比, 得知 Mn 含量小于 100×10^{-6} , Sr/Mn 值高于 10 的腕足化石壳体基本上保存完好。这一发现为利用腕足化石研究海水原始碳氧同位素提供了有力的判据。

关键词: 腕足化石; 微量元素; 碳同位素; 氧同位素; 泥盆系

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2007)03-0249-05

The Composition of Trace Elements of the Brachiopod Shell from Devonian System, Liujing, Guangxi, and Its Preservation of Original Seawater Information

CHENG Hong-guang^{1,2}, LI Xin-qing¹, WANG Ke-zhuo³, HUANG Si-jing⁴,
WANG Bing^{1,2}, CHENG Jian-zhong^{1,2}

1. State Key Lab. of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xinjiang Geological Survey Institute, Urumqi 830011, China; 4. State Key Lab. of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, China

Abstract: The articulate fossil of brachiopod shells consisting of low magnesian calcite is usually used for studying the geochemical composition of the initial ocean in geological history. To evaluate the state of original seawater information preserved in the articulate fossil is one of important research objects for this kind of study. Generally, three kinds of methods, including microstructure, cathodoluminescence and trace element concentration analysis, are applied to verify the preservation state of original geochemical information preserved in the articulate fossil. However, the trace element concentration analysis was not regarded as important as other two methods in previous studies. The trace element compositions in fossils of brachiopod shells from the Liujing Devonian System in Hengxian, Guangxi have been analyzed, with the Fe, Mn and Sr concentrations of $12\times 10^{-6} - 2800\times 10^{-6}$, $1\times 10^{-6} - 711\times 10^{-6}$ and $243\times 10^{-6} - 1835\times 10^{-6}$ respectively. Our study indicates that the trace element concentration analysis is the most essential method for evaluating the state of original seawater information preserved in the articulate fossil among three methods. The combined study on the oxygen isotope, Mn content and Sr/Mn ratio of the fossil indicates that the information is basically well preserved in shells characterized with $Mn < 100\times 10^{-6}$ and $\omega(Sr)/\omega(Mn) > 10$. This discovery has provided a good criterion for studying the original carbon and oxygen isotopes of seawater by using the brachiopod shell fossil.

Key words: fossil brachiopod; trace element; carbon isotope; oxygen isotope; Devonian

收稿日期: 2006-04-24 收到, 12-25 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40273011)

第一作者简介: 程红光(1981—), 男, 硕士研究生, 专业方向: 环境地球化学。E-mail: chenghongg@mails.gucas.ac.cn.

通讯作者: 李心清(1965—), 男, 教授。E-mail: xinqinglee@hotmail.com.

海相碳酸盐岩的碳、氧同位素组成及其演化特征分析是古气候、古海洋环境研究的一种常用手段。地质历史时期海相碳酸盐岩稳定同位素组成能近似地反映古海洋稳定同位素的组成^[1~4]。因此,研究海相碳酸盐岩稳定同位素组成对于了解古海洋平面变化、构造活动、全球气候冷暖变化、生物灭绝以及古海水温度、盐度等具有十分重要的意义。40多年碳酸盐岩碳、氧同位素研究表明,具有较强抵抗成岩后生作用改造能力的腕足化石壳体,是重建地质历史时期原始海洋碳、氧同位素的理想分析对象^[5~10]。但腕足化石碳、氧同位素信息能否真实反映海水原始碳、氧同位素组成,保存鉴定是个关键因素。目前腕足化石保存鉴定常用的识别方法有显微结构、阴极发光和微量元素含量识别^[11,12]。其中微量元素识别由于没有具体使用标准,一直处于次要地位。本文通过以上三种常用方法对广西六景剖面腕足化石进行保存鉴定,探讨三种方法的辨识能力,并判定其海水信息的原始性。

1 地质背景

广西泥盆系六景剖面是华南泥盆系的标准剖面,位于南宁市东郊的六景火车站附近(图1)。剖面出露完好。从上个世纪30年代开始,就有学者先后研究过生物、地层和沉积相^[13,14]。从那高岭组延续到融县组,共采集样品87件。

2 样品的制备、保存鉴定

微量元素分析使用地球化学研究所的 Vista MPX 型电感耦合等离子体-光发射光谱仪 ICP-OES (美国 Varian 公司),同位素分析利用连续流同位素质谱仪-IsoPrime。碳、氧同位素标准测定;测试精度分别为: $\delta^{13}\text{C}$ 为 $\pm 0.02\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 为 $\pm 0.03\text{‰}$ ($N=87$),所获数据均以 PDB 表示。

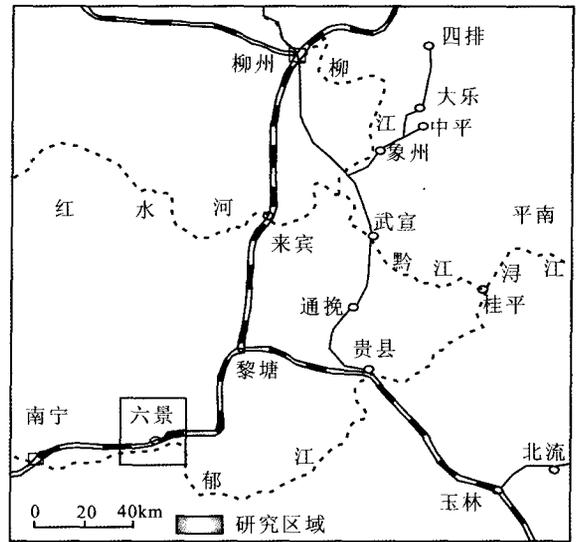


图1 研究区地理位置

Fig. 1 A sketch map showing sampling area

六景剖面腕足化石微体结构显示(图2):单偏光下腕足化石的纤维层和棱柱层都明显地同充填的后期改造物(图2左下角)分开,没有遭受明显的成岩后生作用。纤维层之间有暗色的后期改造物填充,且随纤维层的展布而不连续分布。棱柱层极少有后期改造物充填。

阴极发光实验中,腕足样品基本上在阴极射线照射下不发光,但在纤维层之间明显有着条带状沿纤维层展布的轻微发光,虽相对于填充物的发光而言非常微弱,但仍显示纤维层之间层与层之间有着后期改造的充填。

此外,六景剖面腕足化石同现代腕足以及 Lepzelter^[15]和 Veizer^[16]的研究对比如表1所示;部分样品中 Sr 偏低,部分样品 Mn 比较高,Fe 含量基本一致。

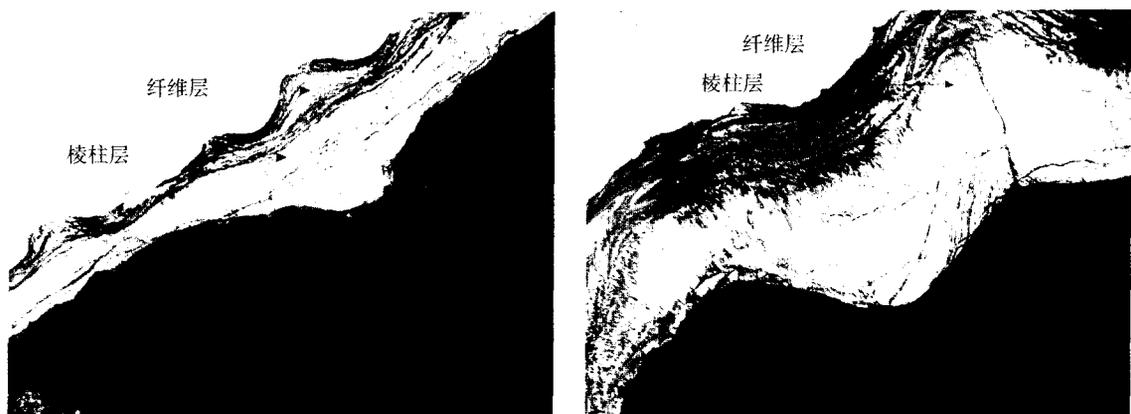


图2 腕足化石的微体结构(单偏光镜,放大倍数20)

Fig. 2 The microstructure of the brachiopod shell fossil($\times 20$, -)

表 1 样品中微量元素含量同现代腕足以及前人研究对比

Table 1 Trace element contents of modern brachiopod and brachiopod fossil $\times 10^{-6}$			
元素	现代腕足		腕足化石
	Lepzelter(1983)	Veizer(1976)	样品(N = 87)
Sr	739~2150	433~2948	243~1835
Mn	10~47	10~1250	1~711
Fe	80~2276	20~7764	12~2800

3 结果与讨论

保存鉴定显示,六景剖面腕足化石样品尽管有的纤维层有后期改造物充填,但绝大多数样品的棱柱层可供分析碳、氧同位素。仅 Sr 低于 400×10^{-6} 的样品(约 1%)可能遭受成岩后生作用的影响。其碳、氧同位素值分别为: $-2.56\% \sim 5.19\%$ (PDB), $-11.48\% \sim -3.05\%$ (PDB)。其中碳同位素基本上在 0 左右,而氧同位素则随时间的变化逐渐变重。

3.1 三种识别方法的比较

3.1.1 显微结构识别 主要用于腕足化石保存程度的识别。腕足化石的壳体分为薄的纤维层和内层棱柱层(图 1)。多数情况下纤维层保存不完整或者重结晶,但内层棱柱层能够很好地保存腕足化石微体结构^[17]。如果显微镜下壳体结构有明显的溶蚀现象,或任何重结晶及次生矿物的形成现象,则表明壳体已被成岩后生作用所改造^[6,18]。但是,因为光学显微镜和扫描电镜对腕足化石壳体显微结构的研究根本看不到原子级别上的变化。大多数情况下,原生结构识别仅仅能排除一些明显遭受过蚀变的腕足化石,经过原生结构识别的腕足化石并不能保证没有遭受成岩蚀变,即腕足化石原生结构的保存是其未经成岩后生改造的必要条件而不是充分条件。因此,原生结构遭到破坏的化石必然经受过成岩后生的改造,但结构得以保存的化石也可能遭受过成岩后生作用的改造,其氧、碳同位素是否也“保存完好”尚需验证^[19]。所以这种腕足化石保存程度的识别方法仅仅作为一种初步的筛选,而不能作为一种独立的方法。

3.1.2 阴极发光识别 是碳酸盐岩保存程度识别方法中最受重视的一种方法^[6,18],主要用来识别碳酸盐岩是否遭受过后期改造。碳酸盐矿物的阴极发光性主要受晶格中 Fe、Mn 含量的控制:Mn 作为活化剂,激活阴极发光,Fe 作为猝灭剂、猝灭阴极发光。一般认为阴极射线照射下发光的样品受过成岩后生作用的改造。事实上,当 Mn 小于 40×10^{-6} 时,阴极发光性主要受 Mn 绝对含量控制;小于 20×10^{-6} 时,不具阴极发光。Fe 大于 5000×10^{-6} 时,

阴极发光性与 Fe 的绝对含量最为密切;大于 10000×10^{-6} 时,不具阴极发光。Mn 大于 40×10^{-6} , Fe 小于 5000×10^{-6} 时,阴极发光性受 Fe/Mn 值的显著控制:当 Fe/Mn 小于 7 时,具强的阴极发光;大于 7 而小于 30 时,具中等强度的阴极发光;Fe/Mn 大于 30 时,具弱的阴极发光^[20]。通常情况下,大气水参与下的成岩后生作用一般会使碳酸盐岩矿物朝着增加 Mn 和 Fe 的方向发展^[21,22],但各自具体增加多少,视流体中 Mn、Fe 的含量和碳酸盐矿物对二者交换强度的相对大小而定。因为成岩后生作用不一定都能把碳酸盐矿物改造到 Mn^{2+}/Fe^{2+} 足以达到阴极射线照射下发光的程度^[23]。现代腕足生物壳体一般都不会发光。因此可以说,凡发光的样品都经受过使 Mn^{2+} 含量增加的成岩后生作用改造。但在实际中,腕足化石是否经历了成岩后生作用,仅仅凭阴极射线照射识别是远远不够的。这是因为地质历史时期的腕足壳体的地球化学特征与现代同类生物可能不同,将今论古在腕足的保存鉴别上几乎没有得到过任何验证。因此,实际应用中把所有发光样品都当作非原始样品而舍去,可能会丢掉一些实际上并未遭受后期改造的样品。更重要的是留下来的阴极射线照射下不发光的样品也可能遭受过后生成岩作用的改造。所以说阴极射线照射下没有发光的样品是否一定未受过后生成岩作用的改造,是不能确定的。

3.1.3 微量元素识别 通常腕足化石在阴极射线不发光时,微量元素依然显示样品经历过后生成岩作用的蚀变。六景剖面样品通过微体结构识别和阴极射线照射识别时,分别测出碳、氧同位素和微量元素(Mn、Fe 和 Sr)组成。现代腕足及前人研究的腕足化石的对比都显示其保存完好,但在微量元素对比中,与现代腕足对比是否可靠尚有疑问,“将今论古”思想受到质疑。前人认为,保存完整的腕足化石实际上也是通过上述三种方法鉴定,其微量元素根本没有具体标准。此种情况下,与经过其他论证保存完好的腕足化石对比不失为理想的途径。近年来以腕足壳体生长方式和生长过程为依据,提出以微量元素分布特征为判据^[11,12]来鉴定腕足化石的保存度。保存鉴定后指出,保存完整的六景剖面腕足化石中微量元素可与经过微量元素分布特征鉴定的化石^[11,12]四川龙门山泥盆纪腕足中 Sr、Mn 进行比较(图 3)。后生成岩作用会使 Sr 含量降低,六景剖面中腕足化石的 Sr 与四川龙门山样品中 Sr 的底线几乎完全一致。但 Mn 却有近 20% 的样品不一致;就是说用于碳、氧同位素分析的六景腕足化石仍有近 20% 的样品受过不同程度的后生成岩作用。

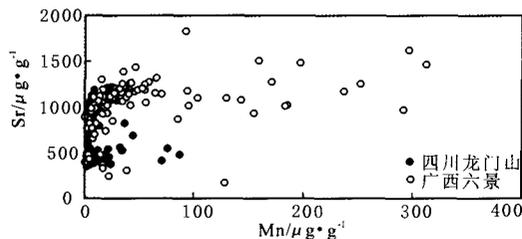


图3 广西六景和四川龙门山泥盆纪剖面腕足壳体中 Sr 和 Mn 对比

Fig. 3 A plot of Sr versus Mn contents of the brachiopod fossil from Devonian systems in longmenshan, Sichuan and in Liujing Guangxi

通常情况下,腕足化石中的碳、氧同位素与腕足动物生活时期周围的海水碳、氧同位素达到平衡^[7,21],腕足化石氧同位素能够反映当时的古海水温度。文献^[24]所使用的古温度计算所用公式为:

$$t(^{\circ}\text{C}) = 16.9 - 4.14(\delta_{\text{c}} - \delta_{\text{w}}) + 0.13(\delta_{\text{c}} - \delta_{\text{w}})^2,$$

其中, δ_{c} 、 δ_{w} 分别代表腕足化石和海水的氧同位素值, δ_{c} 以 PDB 为标准, δ_{w} 以 SMOW 为标准^[25]。王大锐等^[26]指出,湘中地区晚泥盆世弗拉斯期—法门期的古海水与北美地区同时期的海洋存在某种联系,或者说它们应处在相同的纬度,或它们之间可能有十分畅通的海水通道。为精确计算, δ_{w} 取值为美洲阿巴拉契盆地中泥盆世古海水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值 -3% ^[27],六景剖面腕足化石计算的古水温为 $17.1 \sim 61.8^{\circ}\text{C}$ 。泥盆纪时华南板块位于古赤道附近。湖南冷水江地区泥盆纪腕足化石研究^[26]显示, 39.5°C 时底栖生物绝灭;表明当时位于赤道附近的六景地区腕足动物生存温度低于 39.5°C 。据此推断样品所计算的古温度大约只有 80% 是正确的(图 4),即近 20% 的腕足化石中所含的氧同位素信息没有正确地反映当时的古海水温度。这说明样品在经过微体结构识别和阴极射线照射识别后,依然有约 20% 受过成岩蚀变的样品没有被清除。

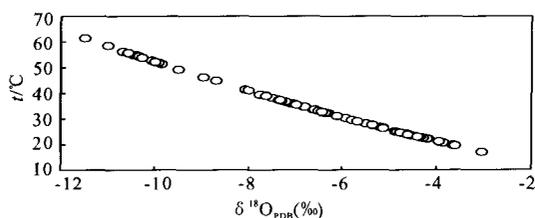
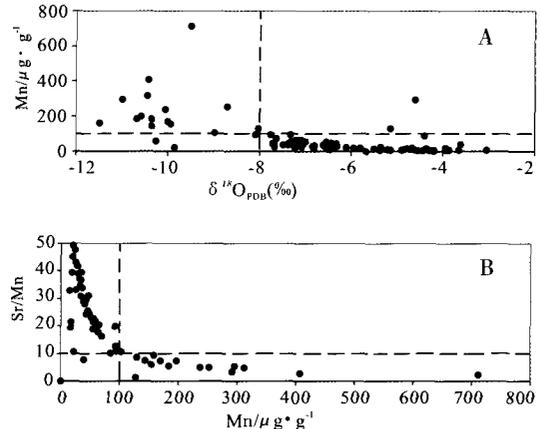


图4 $\delta^{18}\text{O}$ 值同温度的关系

Fig. 4 The relationship of $\delta^{18}\text{O}$ values and temperatures

阴极射线照射发光是根据样品中的 Mn、Fe 以及 Fe / Mn 值来判断样品是否达到在阴极射线照射下发光的要求,并且其发光与否都不能肯定地对其保存程度作出判断。这与微量元素识别是一致的,可以直接用 Fe、Mn 及其比值推断样品是否会发

光。图 4、5 显示, Mn 含量低于 100×10^{-6} , 且 Sr / Mn 值都高于 10 的样品,无论从其反演的古海水温度,还是与微量元素分布特征^[11,12] 对比方法的结果,都显示样品保存完好。



A. 虚线表示 $\text{Mn} > 100 \times 10^{-6}$, $\delta^{18}\text{O} < -7.9\%$ 的样品可能遭受后期成岩作用的影响; B. $\text{Mn} > 100 \times 10^{-6}$, $\text{Sr}/\text{Mn} < 10$ 的样品可能遭受成岩作用的影响

The dashed line represent that the fossil brachiopod shell possibly suffers the influence of the diagenesis when $\text{Mn} > 100 \times 10^{-6}$ and $\delta^{18}\text{O} < -7.9\%$ in A and when $\text{Mn} > 100 \times 10^{-6}$ and $\text{Sr}/\text{Mn} < 10$ in B

图5 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 Mn 含量及 Sr/Mn 与 Mn 含量的关系

Fig. 5 Plots of $\delta^{18}\text{O}$ values versus Mn contents(A) and Sr/Mn ratios versus Mn contents(B)

4 结 论

六景地区的古地理位置、古气候、氧同位素和微量元素分析表明,该区腕足化石的微体结构基本保存完好,其 Fe、Mn、Sr 分别为 $(12 \sim 2800) \times 10^{-6}$ 、 $(1 \sim 711) \times 10^{-6}$ 和 $(243 \sim 1835) \times 10^{-6}$ 。经过微体结构、阴极发光和微量元素识别,同时与氧同位素、Mn、Sr 及 Sr/Mn 的对比,得出如下结论:

(1) 腕足化石保存鉴定通常使用的三种鉴定方法并不一定都能在识别其保存完整性时发挥作用,其实质可归结为微量元素识别一种方法。

(2) 六景剖面腕足化石的微量元素和氧同位素数据表明, Mn 含量小于 100×10^{-6} 、Sr/Mn 大于 10 的样品基本上保存完好。

参考文献 (References):

[1] Nier A O, Gulbransen E A. Variations in the relative abundance of the carbon isotopes[J]. J. Am. Chem., 1939, 61: 697 - 698.
 [2] Urey H C, Lowenstam H A, Epsiein S, McKinney C R. Measurement of paleotemperatures and temperatures of the Upper Cretaceous of England, Denmark, and the southeastern United States[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1951, 62: 99 - 416.
 [3] Allan J R, Matthews R K. Carbon and oxygen isotopes as dia-

- genetic and stratigraphic tools; Data from subsurface of Barbados, West Indies[J]. *Geology*, 1977, 5: 16-20.
- [4] Scholle P A, Arthur M A. Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones; Potential stratigraphic and petroleum exploration tool[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1980, 64: 67-87.
- [5] Veizer J, Fritz P, Jones B. Geochemistry of brachiopods: Oxygen and carbon isotopic records of Paleozoic oceans [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1986, 40: 1679-1696.
- [6] Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A. Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones[J]. *GSA Bull.*, 1986, 97: 1262-1269.
- [7] Lowenstam H A. Mineralogy, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios, and strontium and magnesium contents of recent and fossil brachiopods and their bearing on the history of the oceans[J]. *J. Geol.*, 1961, 69: 241-260.
- [8] Brand U. Biogeochemistry of late Paleozoic North American brachiopods and secular variation of seawater composition [J]. *Biogeochemistry*, 1989, 7: 159-193.
- [9] Bruckschen P, Veizer J. Oxygen and carbon isotopic composition of Dinantian brachiopods; Paleoenvironmental implications for the lower Carboniferous of western Europe[J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1997, 132: 243-264.
- [10] Carpenter S J, Lohmann K C. $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of modern brachiopod shells [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 3749-3764.
- [11] 李心清, 胡瑞忠, 漆亮, 周会, 李月芳. 微量元素分布解释腕足化石壳体原始信息的保存现状 [J]. *地球化学*, 2000, 29(6): 594-591.
Li Xinqing, Hu Ruizhong, Qi Liang, Zhou Hui, Li Yuefang. Trace element distribution: An indicator of fossil brachiopod shell preservation [J]. *Geochimica*, 2000, 29(6): 594-591. (in Chinese with English abstract)
- [12] Xinqing Lec, Ruizhong Hu, Uwe Brand, Hui Zhou, Xiaoming Liu, Honglin Yuan, Chongling Yan, Hongguang Cheng. Ontogenetic trace element distribution in brachiopod shells: An indicator of original seawater chemistry [J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 49-65.
- [13] 王钰, 俞昌民, 许汉奎, 廖卫华, 蔡重阳. 华南泥盆纪生物地层 [J]. *地层学杂志*, 1979, 3(2): 81-88.
Wang Yu, Yu Changmin, Xu Hankui, Liao Weihua, Cai Chongyang. Biostratigraphy Devonian Huanan [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1979, 3(2): 81-88. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王成源, 阮亦萍, 穆道成, 王志浩, 戎嘉余, 殷保安, 邝国毅, 苏一保. 广西不同相区下、中泥盆统的划分和对比 [J]. *地层学杂志*, 1979, 3(4): 305-311.
Wang Chengyuan, Ruan Yiping, Mu Daocheng, Wang Zhihao, Rong Jiayu, Yin Baoan, Kuang Guoyi, Su Yibao. Division and comparison of different facies lower and middle Devonian, Guangxi [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1979, 3(4): 305-311. (in Chinese with English abstract)
- [15] Lepzelter C G, Anderson T F, Sandberg P A. Stable isotope variations in modern articulate brachiopods [J]. *AAPG Bull.*, 1983, 67: 500-501.
- [16] Veizer J, Hoefs J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1976, 40: 1387-1395.
- [17] Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system-2: Stable isotopes [J]. *J. Sediment. Petrol.*, 1981, 51: 987-997.
- [18] Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A. Textural, elemental and isotopic variations among constituents in Middle Devonian limestones, North America [J]. *J. Sediment. Petrol.*, 1986, 56: 715-727.
- [19] 李心清, 万国江. 碳酸盐岩氧、碳稳定同位素地球化学研究目前面临的几个问题 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 262-268.
Li Xinqing, Wan Guojang. Problems in studies on carbon and oxygen stable isotopes in carbonates [J]. *Adv. Earth Sci.*, 1999, 14(3): 262-268. (in Chinese with English abstract)
- [20] 黄思静. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其 Fe、Mn 含量的关系 [J]. *矿物岩石*, 1992, 12(4): 74-79.
Huang Sijing. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals [J]. *Mineral. Petrol.*, 1992, 12(4): 74-79. (in Chinese with English abstract)
- [21] Veizer J. Chemical diagenesis of carbonate rocks; Theory and application of trace element technique [A]. Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, *et al.* Stable isotopes in sedimentary geology [C]. 1983, III/1-III/100. short Course Notes 10, SEPM.
- [22] Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system-1: Trace elements [J]. *J. Sediment. Petrol.*, 1980, 50: 1219-1236.
- [23] Maliva R G, Dickson J A P, Raheim A. Modelling of chalk diagenesis (Eldfish, Norwegian North Sea) using whole rock and laser ablation stable isotope data [J]. *Geol. Mag.*, 1991, 128(1): 43-49.
- [24] Anderson, Arthur T F, Anderson, Arthur M A. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems [A]. Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, Veizer J, Land L S. Stable isotopes in sedimentary geology [C]. Short Course Notes. Tulsa, Oklahoma, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1983, 10: 1-151.
- [25] 郑淑惠, 郑斯成, 莫志超. 稳定同位素地球化学分析 [J]. 北京: 北京大学出版社, 1986: 410-415.
Zheng Shuhui, Zheng Sicheng, Mo Zhichao. The analysis of stable isotope in geochemistry [J]. Beijing: Publishing House of Peking University, 1986: 410-415. (in Chinese)
- [26] 王大锐, 马学平, 董爱正, 朱德升. 晚泥盆世弗拉斯期—法门期之交海水温度变化的同位素证据 [J]. *地球学报*, 2001, 22(2): 141-144.
Wang Darui, Ma Xueping, Dong Aizheng, Zhu Desheng. Isotopic evidence for the temperature change of the paleo-ocean between Late Devonian Frasnian period and Famennian period in South China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(2): 141-144. (in Chinese with English abstract)
- [27] McLaren D J, Goodfellow W D. Geological and biological consequences of giant impacts [J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1990, 18: 123-171.