

扬子海盆中部晚奥陶世五峰期海平面变化

何卫红 汪啸风 卜建军

(中国地质调查局地层古生物研究中心, 湖北 宜昌, 443003)

摘 要 通过稀土元素和稳定同位素变化分析以及生物的丰度、分异度变化、生态位更替的讨论, 认为三峡地区(扬子海盆中部)晚奥陶世五峰期海平面由上升到下降, 其中经历了 5 次海平面波动。

关键词 稀土元素 稳定同位素 海平面 五峰期 三峡地区

Sea-level Change of the Central Yangtze Sea Basin in the Late Ordovician Wufengian Period

HE Weihong WANG Xiaofeng BU Jianjun

(Center for Stratigraphy and Palaeotology, China Geological Survey, Yichang, Hubei, 443003)

Abstract Based on analyzing rare earth elements and stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$), and discussing the change of abundance and degree of differentiation as well as the ecological niche, the author holds that the sea-level of the Yangtze Gorges area in central Yangtze basin underwent the change from rising to falling in Late Ordovician Wufengian period, in which five sea-level fluctuations can be recognized.

Key words rare earth element stable isotope sea-level Wufengian period Yangtze Gorges area

上奥陶统五峰阶(汪啸风等, 1996)在湖北宜昌及其附近地区位于上扬子盆地中部, 沉积稳定、地层连续、化石丰富, 为华南乃至世界早古生代地层学和古海洋学研究的理想地区, 其中海平面变化为地质学家争论的焦点之一。主要有 5 种说法: ① 五峰期扬子区周缘环陆, 古陆不断扩大, 扬子海不断发生海退(穆恩之等, 1981); ② 该时期上扬子区处于连续海退状态(戎嘉余, 1984); ③ 海退只发生在奥陶纪末, 即赫南特亚阶(戎嘉余等, 1999; 2000); ④ 该期海平面经历了二次海侵与海退(冯洪真等, 1993); ⑤ 五峰期至早志留世初期发生了一次全球性海平面上升事件, 其间五峰期发生过海平面振荡(冯洪真等, 2000)。通过对湖北远安苟家垭五峰组剖面进行稀土元素、有机碳同位素和放射虫分析(平均采样间距为 20 cm), 并据此对该时期海平面变化作了进一步探讨。稀土元素、有机碳同位素由中国地质调查局同位素地球化学重点实验室测试。

1 Ce 异常与海平面变化

氧化环境中, 全岩 Ce 以 +4 价出现而不易溶于

水, 所以 Ce 在海水和沉积物中出现亏损而呈负异常。沉积环境越呈氧化态, Ce 的负异常越突出。当还原环境降临时, Ce 活化并以 +3 价释放出来, Ce 在海水和沉积物中富集呈正异常, 介质的还原性越强, Ce^{+3} 浓度越高, Ce 的正异常越突出, 所以在理论上, 古代化学沉积物表现出来的 Ce 异常可以反应出其沉积时的氧化还原条件(高长林, 1990; 王中刚, 1989; Wang 等, 1986; 刘英俊等, 1985; 冯增昭, 1997), 氧化还原性的变化又与海平面变化相关, 全岩 Ce 异常可以作为海平面变化的指标(冯洪真等, 2000), 但 Ce 异常还可能与岩石类型、特殊矿物的存在、沉积盆地是否完全封闭等因素相关。为此, 笔者对样品的 Ce 异常与 ΣREE 、Ce 异常与 LREE/HREE 分别作了相关系数分析(图 1), 得知 ΣREE 与 LREE/HREE 的相关系数较小($r=0.440$), 因此 Ce 异常与特殊矿物无关。Ce 异常与 ΣREE 的相关系数很小($r=0.151$), 相关性较差, 所以 Ce 异常与岩石类型也无关。另外, 上扬子盆地当时处于半封闭状态(陈旭等, 1999), 与大洋有通道存在, 仍受大洋影响, 尤其是全球海平面升高时, 上扬子盆地的生

本文为中国地质调查局研究项目“震旦系及显生宙年代地层划分的界线标志和时限的研究”成果的一部分。

改回日期: 2001-9-13; 责任编辑: 宫月莹。

第一作者: 何卫红, 女, 1972 年生, 博士研究生, 从事综合地层学研究。

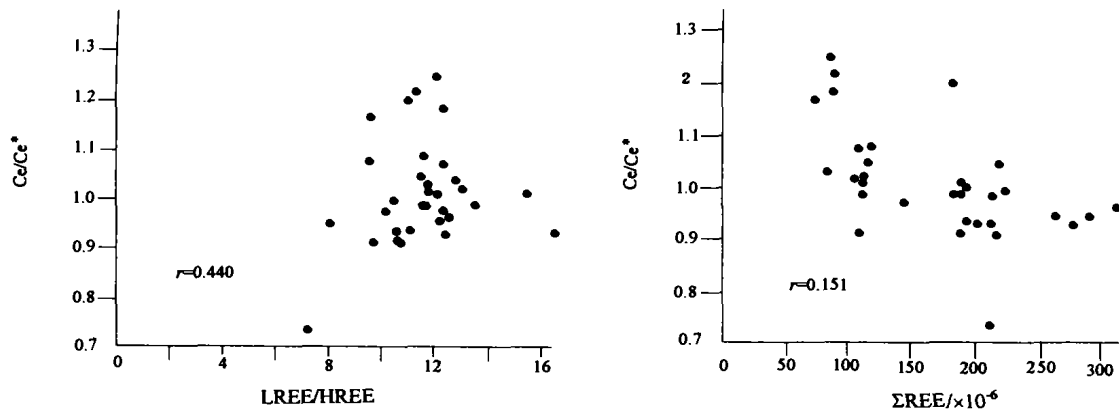


图1 晚奥陶世五峰期中全岩Ce异常与 Σ REE和LREE/HREE相关关系

Fig. 1 Correlation between whole-rock Ce anomaly and Σ REE, and LREE/HREE from the Wufengian of the Late Ordovician

物面貌与其他地区具有相似性(如浮游笔石、放射虫的发育)。因此笔者认为,Ce异常主要与沉积物沉积时的氧化-还原状态、海平面升降相关。当然海平面变化比较复杂,主要包括全球性海平面升降和局部受区域构造运动影响所引起的海平面变化,但五峰期Ce异常主要受控于全球性海平面升降,因为:①当时上扬子区东南部古陆不断向西北推进(陈旭等,1999),理论上该盆地的容纳空间在缩小,海平面下降,但从生物地层学和地球化学的角度看海平面并非持续下降。这就否定了Ce异常主要受控于局部区域构造运动所引起的海平面变化;②五峰期黑色笔石页岩、硅质岩中的笔石、放射虫、头足类、腕足类具有区域甚至全球可比性(汪啸风等,1987,1999a;Hirokozu等,1992),且五峰组的放射虫个体较大,多为球形,囊壁厚且简单,习于深水(冷水)生活(冯增昭,1997),说明上扬子盆地水深不会太浅,至少形成于大洋较深处、富含放射虫的上升洋流应该可以作用到。这从另一侧面表明上扬子海盆当时并不是一个孤立、局限盆地,从而为上扬子海盆Ce异常受大洋以及全球海平面变化影响创造了条件。

海平面变化(四级旋回)除了与古气候、冰期和间冰期引起的海平面变化有关之外,还与地球轨道周期性变化相关,即与米兰柯维奇周期性变化相关(孟祥化等,1993)。天文学的观测结果表明,地球轨道要素在漫长的历史中呈现出明显的周期性变化,其周期分别为:①黄赤交角变化周期,约为41 ka;②岁差周期,约为21 ka;③偏心率周期,约为100 ka。地球轨道要素控制着地球上所接受的太阳辐射量,轨道要素的周期性变化引发了地球气候的周期性变化,进而导致旋回沉积作用(吴智勇,1995)。米兰柯维奇旋回留下的地质记录主要表现为岩石的成分、结构、颜色呈韵律性变化;元素的地球化学性质

也表现出相同的周期性变化。上扬子区苟家垭五峰组(图2)自下而上岩性变化为:底部为黄绿至灰黄色钙质泥岩、炭质泥岩,厚约60 cm;向上为浅灰色硅质泥岩,厚约1.8 m;再向上是深灰色硅质岩夹厚约30 cm的浅灰色硅质泥岩,硅质岩单层厚约5~10 cm,相邻单层硅质岩被毫米至厘米级黑色页岩分开而形成韵律。五峰组Ce异常,即 $\delta Ce = Ce_N / [(La + Pr)_N / 2]$,表现为:Ce正异常有5个峰值,Ce异常的变化与岩性的变化具有近似等时性。五峰组经历的地质年限为3~4 Ma(汪啸风等,1996;王鸿祯等,1990;Wang Xiaofeng等,1990),共经历了5次岩性和地球化学Ce异常的周期性变化,变化周期为 10^5 a。这种变化可能对映于米兰柯维奇旋回(吴智勇,1995)引起的四级海平面变化,其中包括海平面的5次上升与下降。

上扬子区五峰期Ce异常的第三个正异常峰值最为突出(图2),因此,推断与*P. pacificus*带的*P. sinensis*亚带相当的地质时期海平面上升幅度最大。另外,最后一次海平面下降(相当于赫南特亚阶)系由2个次一级的海平面下降复合而成。Ce异常总的变化趋势也大致表现为:五峰期早期以正异常增大为主,五峰期晚期向负异常方向偏移,所以五峰期以海侵为主,五峰期晚期发生海退。非洲摩洛哥当时位于冈瓦拉北缘,晚奥陶世的冰川作用在该区的沉积序列中留下了较丰富的痕迹,据沉积序列的划分与海平面变化曲线(Naima等,1999),同期海平面经历了5次较大的下降;另外,北美同期海平面也经历了5次上升与下降(Ross等,1995;Schutter等,1992),因此上扬子海盆五峰期Ce异常所显示出来的海平面变化与非洲、北美同期海平面波动是一致的。

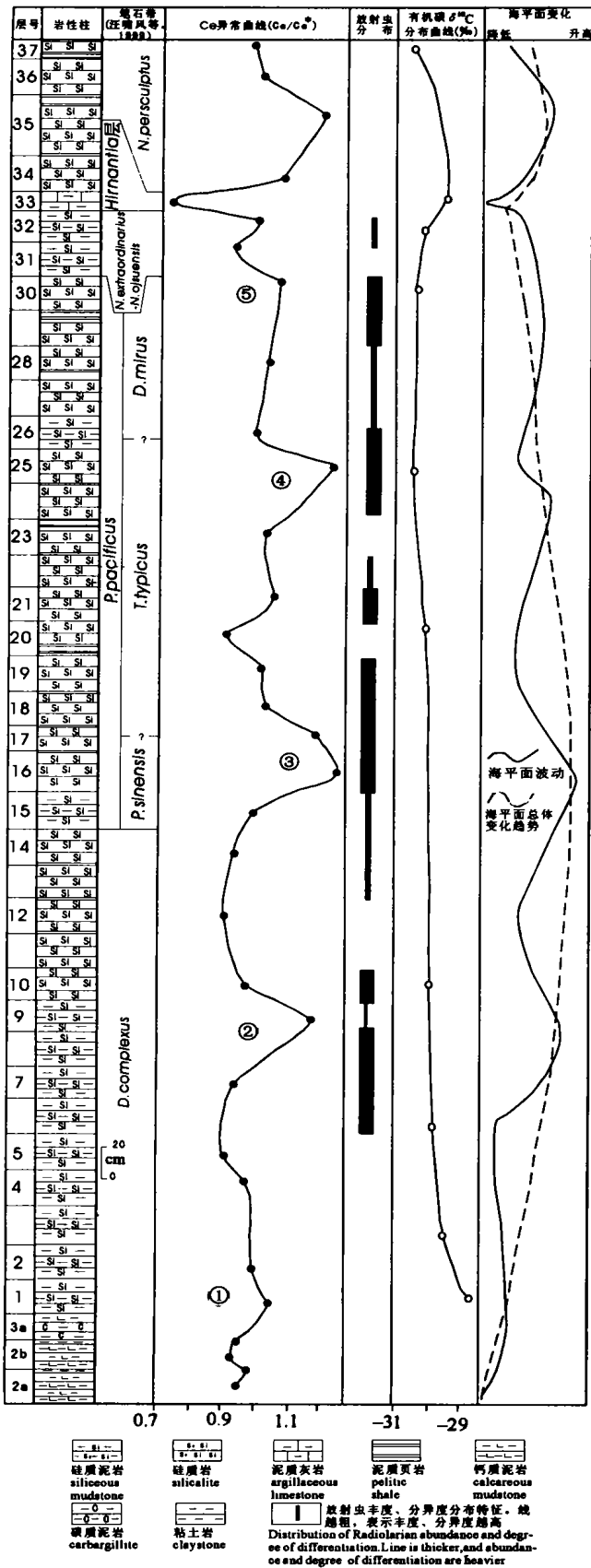


图 2 晚奥陶世五峰期地球化学异常与海平面变化
Fig. 2 Geochemical anomaly and sea-level changes in the Wufengian of the Late Ordovician

经测试发现苟家垭五峰组 Ce 异常以负异常为主,与冯洪真等(2000)测试结果(全为负异常)有出入。笔者认为,在稀土测试方法与数据处理方法相同的情况下,这种差异主要与盆地内部局部范围内介质的氧化-还原性略有差异有关。冯洪真等(2000)指出五峰期 Ce 异常发生过 3 次波动,相应地存在 3 次海平面变化。同时还提出了非生物成因海洋生成物中 Ce 相对富集与亏损的机理:当上覆水体缺氧且呈酸性时,Ce 以 +3 价溶解并相对邻近元素富集,而海洋生成物中的 Ce 则相对亏损,出现负 Ce_{anom} ;当上覆水体富氧且呈碱性时,Ce 以 +4 价进入铁的氢氧化物或磷酸盐絮状物中并沉淀。因此上覆水体中 Ce 相对亏损,而海洋生成物中的 Ce 则相对富集,呈正 Ce_{anom} 或者负 Ce_{anom} 基本消失。笔者在此坚持传统说法(高长林,1990;王中刚,1989;Wang 等,1986;刘英俊等,1985;冯增昭,1997):即氧化环境中,Ce 以 +4 价沉淀下来,所以底层海水和沉积物中出现 Ce 亏损,相反还原环境中,底层海水和沉积物中出现 Ce 的正异常。

(1)海洋环境中二氧化硅的来源有 3 种:①生物的硅质介壳和骨骼;②来自大陆的母岩风化产物;③海底火山喷发及深层热液物质(冯增昭,1997)。苟家垭位于当时的上扬子海盆中部,来源于大陆母岩风化的 SiO_2 在注入浅海盆地的过程中已与盆地边缘的酸性介质作用形成正硅酸(H_2SiO_4)而沉淀下来,所以,“大陆母岩风化”不是盆地中二氧化硅的主要来源;经稀土模式分析,发现样品的稀土模式与北美页岩的稀土模式(赵伦山等,1987)很相似,并经相关系数分析也发现与火山作用时带入的特殊矿物无关,当然不能完全否认有火山、热液的影响,但火山作用绝对不是 SiO_2 的主要来源。样品富含大量放射虫以及海绵骨针,有机质也相当丰富,暗示该时期宜昌及其附近地区含放射虫硅质岩的沉积物主要来源于生物的硅质介壳和骨骼(高长林,1990;王中刚,1989;Wang 等,1986;刘英俊等,1985;冯增昭,1997),而“非生物成因海洋生成物中 Ce 相对富集和亏损的机理”的说法值得商榷。

(2)赫南特亚阶发生海退已被广泛接受。按照冯洪真等(2000)提出的机理,该时期应该出现 Ce 的正异常,但苟家垭五峰组剖面上赫南特层(第 33 层)及其附近却出现很明显的 Ce 负异常。

(3)冯洪真等(2000)指出,从下寒武统至下志留统共采集了 65 个全岩样品,笔者从五峰组(总厚约 8.6 m 左右)测试了 32 个样品,Ce 异常的变化曲线

说明:五峰期经历了5次海平面上升和5次下降(图2)。

另外,苟家垭五峰组微量元素 Rb, Sc 等与 Ce 异常有同样的变化规律,表现为完全同步的5次波动,如图3^①。这主要因为微量元素 Rb, Sc 等在还原状态下易于聚集,对氧化-还原状态具有指示作用(Wang Kun 等,1993;李积金等,1993)。图3中样品代号 SGO-W2b、SGO-W1 分别对应图2中的层号 2b 和 1,其他依此类推, O/S 界线位置采用国内划分方案(汪啸风等,1999b)。需要指出的是, Rb, Sc 的变化总趋势不同于 Ce 异常的变化总趋势,可见微量元素 Rb, Sc 等除了与全球海平面升降导致水体的氧化-还原环境相映变化有关之外,还与生物大量死亡,有机质含量增加,对微量元素产生很大的吸附作用有关。

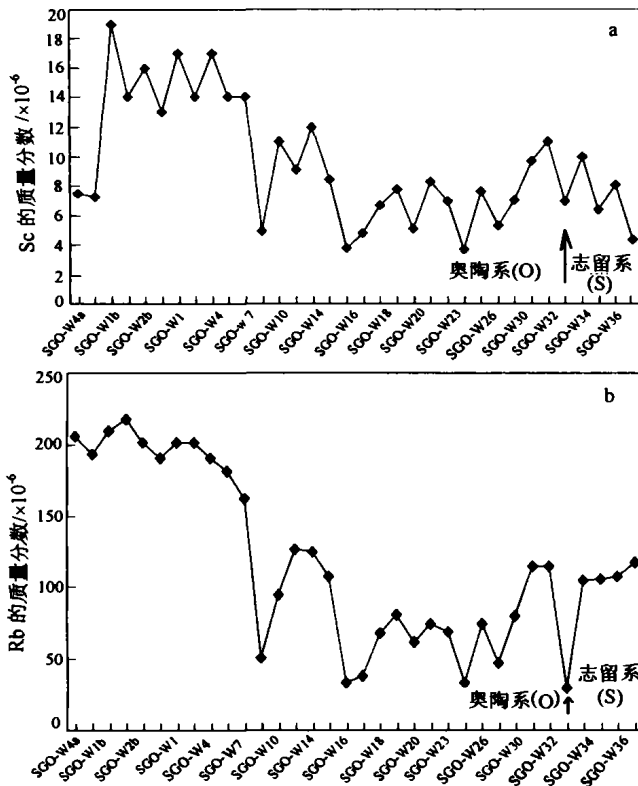


图3 苟家垭剖面 O/S 界线附近 Sc、Rb 含量变化曲线
Fig.3 Variation of Sc and Rb content from the Ordovician-Silurian boundary beds of the Goujiaya section

2 笔石、放射虫、腕足类的分布与海平面变化的关系

海平面变化是造成生物群落更替(非演替)的主要原因,海平面升降控制着生态位变化,影响着群落

生活环境的各种参数,如海底底质、水体深度、营养源、海水盐度、水流状态等,从而改变群落的丰度和分异度,所以研究生物的丰度、分异度以及生境有助于分析海平面变化。

由表1可知,五峰期早期发育小个体腕足类 *Conotreta*, 标志生态位为 BA6, 为浮游群落, 相当于 *Complexus* 带至 *T. typicus* 亚带中部, 五峰期晚期先后被 *Manosia* 和 *Hirnantia-Kinnella* 取代, 指示生态位分别为 BA4-5、BA3-4, 可见五峰期晚期海平面相对下降。

表1 上扬子区五峰期生物丰度、分异度变化及生态位迁移

Table 1 Changes of biotic abundance, degree of differentiation and ecologic niche of the Wufengian in the Upper Yangtze region

腕足类及其生态位(曾庆奎,1991)	笔石带(汪啸风等,1999)		放射虫丰度变化
<i>Hirnantia-Kinnella</i> (BA3-4)	<i>bohemicus-extraordinarius</i>		丰度较低
<i>Manosia</i> (BA4-5)	<i>P. pacificus</i>	笔石体简单化、分异度明显下降	
<i>Conotreta</i> (BA6)		笔石体复杂化、分异度明显较高	丰度较高
	<i>Complexus</i>		

由于海平面变化,宜昌王家湾剖面笔石由 *T. typicus* 带的10个属下降至 *D. mirus* 亚带的7个属,宜昌分乡剖面则由前者的8个属下降至后者的6个属,并且随着笔石分异度的下降,丰度也明显下降,笔石体由复杂向简单的方向发展(王传尚等,2000)。

苟家垭五峰组放射虫相对较少,第21~23层中放射虫丰度相对15~20层有所下降,其主要原因是:五峰期初期苟家垭五峰组放射虫以内射虫为主,剖面中15~20层放射虫的丰度较大,1~14层放射虫丰度较小,反映海平面相对较低,与大洋的连通性差,五峰期早期随着海平面上升,来源于大洋的放射虫大为增加,五峰期晚期海平面开始下降,但放射虫并没有随同海水的退却而被带回大洋,且残留在上扬子海盆中。随海退进一步扩大,放射虫越来越少。

无论底栖型的腕足类,还是浮游型的笔石、放射虫对海平面升降均有明显反映,并且从生物地层角

① 引用于王传尚 2001 年硕士毕业论文。

度分析得出的海平面变化与稀土元素分析得出的结论是一致的。五峰期早期海平面上升,晚期下降。

3 有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势与海平面变化的关系

海平面变化的同时,海水中的化学组成也在发生变化,其中稳定同位素值的偏移曲线则被认为是最能反映三级及其以下二级和准二级海平面升降事件(李祥辉等,2000)。海平面升降与同位素变化关系如下:海平面上升, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈负偏变化, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 则呈正偏;海平面下降, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈正偏变化, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 则呈负偏,说明 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 之间明显存在着“映像”关系(李祥辉等,2000)。对苟家垭五峰组剖面进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 测试(图 2)结果表明,五峰组剖面自下往上, $\delta^{13}\text{C}$ 值先负向偏移(第 1 层 $\delta^{13}\text{C} = -28.50\%$,第 25 层 $\delta^{13}\text{C} = -30.53\%$),到 25 层以后发生正向偏移,第 33 层偏移达到最大值($\delta^{13}\text{C} = -29.54\%$)。Wang Kun 等(1993)对宜昌黄花场和王家湾剖面也进行过有机碳($\delta^{13}\text{C}$)的测试,发现了同样的规律,即从 *D. mirus* 带(大致相当于图 2 的 26 层)开始, $\delta^{13}\text{C}$ 发生正向游移,到 *Hirnantia-Kinnella* 层达最大值。这和 Ce 异常总体变化趋势一致,但是 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线的正向偏移位置落后于 Ce 异常总体变化趋势中的负偏位置。一方面说明 $\delta^{13}\text{C}$ 值的偏移主要受海平面的变化影响,但生物的繁衍、更替也影响着 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化,生物大量绝灭,使有机质沉积物中富 ^{12}C ,贫 ^{13}C ,这样将延缓 ^{13}C 的正向偏移。另外,也反应了受控于冰川活动的三级海平面变化,五峰期早期,全球海平面上升, $\delta^{13}\text{C}$ 发生负向游移;晚期气温下降,冰川形成,海平面开始下降,同时 p_{CO_2} 减小,阻碍了 C 同位素的分馏, $\delta^{13}\text{C}$ 发生正向游移(Wang Kun 等,1993),到 *Hirnantia-Kinnella* 层(第 33 层) $\delta^{13}\text{C}$ 达到最大值,因为此时冰川活动处于高峰期,海平面下降的幅度最大,到志留纪,冰川消融,海平面回升,这和戎嘉余等(1999)论述的奥陶纪末冰川活动基本一致。

4 结论

(1)以稀土元素 Ce 异常分析、比较为基础,以生物丰度、分异度、生态位的变化、C 同位素变化的分析为佐证,认为晚奥陶世五峰期发生过 5 次海平面波动(四级海平面变化)。海平面变化的总趋势是五峰期早期海平面上升,晚期开始下降。

(2)晚奥陶世经历的地质历程约 3~4 Ma(汪啸

风等,1996;王鸿祯等,1990;Wang 等,1990),因此晚奥陶世海平面波动周期约 0.6~0.8 Ma,这种海平面波动可能受控于地球轨道周期性(偏心率周期)变化。而地球轨道周期性变化留下的沉积记录具有全球对比意义,有助于提高年代地层对比和划分精度。有关海平面波动幅度仍有较大争议,有待进一步研究。

致谢 在成文过程中,吴浩若研究员为放射虫的鉴定提供了极为宝贵的资料;在样品采集过程中得到了陈孝红、王传尚等同志的帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 陈旭,戎嘉余.1999.从生物地层学到大地质构造学——以华南奥陶系和志留系为例.现代地质,13(4):385~389.
- 冯洪真,俞剑华,方一亭.1993.五峰期上扬子海古盐度分析.地层学杂志,17(3):179~185.
- 冯洪真,Erdtmann B D,王海峰.2000.上扬子区早古生代全岩 Ce 异常与海平面变化.中国科学(D 辑),30(1):66~72.
- 冯增昭主编.1997.沉积岩石学.北京:石油工业出版社.
- 高长林.1990.东秦岭俯冲消减古洋壳的地球化学鉴定.石油实验地质,11(2):135~146.
- 李祥辉,包向农.2000.海平面变化成因及其盆地响应.地球科学进展,15(1):71~75.
- 李积金,王琨,B D E 查特顿.1993.中国扬子海盆奥陶纪末期生物集群绝灭事件.地层学杂志,17(4):292~301.
- 刘英俊,曹勤民主编.1985.元素地球化学导论.北京:地质出版社,60~61.
- 孟祥化等著.1993.沉积盆地与建造层序.北京:地质出版社,66~80.
- 穆恩之,李积金,葛梅钰等.1981.华中区晚奥陶世古地理图及说明书.地层学杂志,5(3):165~170.
- 戎嘉余.1984.上扬子区晚奥陶世海退的生态地层证据与冰川活动影响.地层学杂志,8(1):9~20.
- 戎嘉余,詹仁斌.1999.华南奥陶-志留纪腕足动物群的更替兼论奥陶纪末冰川活动的影响.现代地质,13(4):390~393.
- 戎嘉余,陈旭,Harper D A T, Mitchell C E.2000.关于奥陶系最上部赫南特(Hirnantian)亚阶全球层型的建议.地层学杂志,24(3):176~181.
- 王传尚,汪啸风,陈孝红.2000.奥陶纪笔石体的复杂化及其与海平面升降变化的关系.华南地质与矿产,(1):12~15.
- 王鸿祯,李光岑编译.1990.国际地质时代对比表[M].北京:地质出版社.
- 王中刚.1989.稀土元素地球化学.北京:科学出版社,247~342.
- 汪啸风,倪世钊,曾庆鑫等.1987.长江三峡地区生物地层学(2)早古生代分册.北京:地质出版社,43~137.
- 汪啸风,陈旭,陈孝红,朱慈英编著.1996.中国地层典——奥陶系.北京:地质出版社.
- 汪啸风,陈孝红.1999a.中国奥陶纪古生物地理与古气候.地层古生物论文集,(27):13~15.

- 汪啸风, Erdtmann B D, 陈孝红. 1999b. “赫南特阶”和奥陶系-志留系界线的厘定. 华南地质与矿产, (3): 12~18.
- 吴智勇. 1995. 米兰柯维奇旋回及年代地层意义. 地层学杂志, 19(2): 156~160.
- 曾庆鑫. 1991. 峡东地区奥陶纪腕足类群落与海平面升降变化. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, (16): 13~39.
- 赵伦山, 张本仁编著. 1987. 地球化学. 北京: 地质出版社, 154~156.

References

- Chen Xu, Rong Jiayu. 1999. From biostratigraphy to tectonics with Ordovician and Silurian of South China as an example. *Geoscience. Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 13(4): 385~389 (in Chinese with English abstract).
- Feng Hongzhen, Yu Jianhua, Fang Yiting. 1993. Analysis on paleosalinity from Wufengian in the Upper Yangtze region. *Journal of Stratigraphy*, 17(3): 179~185 (in Chinese).
- Feng Hongzhen, Erdtmann B D, Wang Haifeng. 2000. Whole-rock Ce anomaly and long-term sea-level changes from early Paleozoic in the Upper Yangtze region. *Chinese Science(D)*, 30(1): 66~72 (in Chinese).
- Feng Zengzhao. 1997. *Sedimentary petrology*. Beijing: Petroleum Industrial Publishing House (in Chinese).
- Gao Changlin. 1990. Geochemical examination on subducting paleo-oceanic crust in east Qinling. *Petroleum Experimental Geology*, 11(2): 135~146 (in Chinese).
- Hirokozu G, Masaki U, Hiroaki I. 1992. Late Ordovician radiolarians from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Mem. Fac. Sci. Shimane Univ.*, (26): 145~170.
- Li Jijin, Wang Kun, Chatterton B D E. 1993. The latest Ordovician mass extinction in the Yangtze basin, China. *Journal of Stratigraphy*, 17(4): 292~301 (in Chinese).
- Li Xianghui, Bao Xiangnong. 2000. Responses of sedimentary basin to sea-level changes. *Advance in Earth Sciences*, 15(1): 71~75 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Limin. 1985. *Introduction to elemental geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 60~61 (in Chinese).
- Meng Xianghua et al. 1993. *Sedimentary basin and deposuite-sequence*. Beijing: Geological Publishing House, 66~80 (in Chinese).
- Mu Enzhi, Li Jijin, Ge Meiyu et al. 1981. Paleogeographic map of late Ordovician in central China and its directions. *Journal of Stratigraphy*, 5(3): 165~170 (in Chinese).
- Naima H. 1999. Upper Ordovician glaciation spreading and its sedimentary record in Moroccan North Gondwana margin. *Acta Universitatis Carolinae-geologica*, 43(1/2): 111~114.
- Rong Jiayu. 1984. The ecostratigraphic evidence of regression and the effect of glacier fluctuation from Late Ordovician in the Upper Yangtze region. *Journal of Stratigraphy*, 8(1): 9~20 (in Chinese).
- Rong Jiayu, Zhan Renbin. 1999. Ordovician-Silurian brachiopod fauna turnover in South China. *Geoscience—Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 13(4): 390~393 (in Chinese with English abstract).
- Rong Jiayu, Chen Xu, Harper D A T et al. 2000. Proposal of a GSSP Candidate section in South China for a new Hirnantian boundary stratotype. *J. Stratigraphy*, 24(3): 176~181 (in Chinese with English abstract).
- Ross C A, Ross J R P. 1995. North American Ordovician depositional sequences and correlations. In: Cooper J D, Droser M L, Finney S C, eds. *Ordovician Odyssey*, SEPM Pacific Section. Las Vegas: University of Nevada, 309~313.
- Schutter S R. 1992. Ordovician hydrocarbon distribution in North America and its relationship to eustatic cycles. In: Webby B D, Lauric J R, eds. *Global perspectives on Ordovician geology*. Rotterdam: Balkema, 421~432.
- Wang Chuanshang, Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong. 2000. Relationships between rhabdosome complication and Ordovician sea level changes. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 12~15 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen, Li Guangcen. 1990. *Correlation of international geologic age*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Kun, Charles J Orth, Moses Attrep Jr et al. 1993. The great latest Ordovician extinction on the South China Plate: Chemostratigraphic studies of the Ordovician-Silurian boundary interval on the Yangtze Platform. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 104(1993): 61~79.
- Wang Xiaofeng, Ni Shizhao, Zeng Qingluan et al. 1987. *Biostratigraphy of the Yangtze Gorge Area(2) early Palaeozoic Era*. Beijing: Geological Publishing House, 43~137 (in Chinese).
- Wang Xiaofeng, Chai Zhifang. 1990. Ordovician-Silurian boundary extinction and its relationship to iridium and carbon isotope anomalies. *Acta Geologica Sinica*, 3(1): 81~92.
- Wang Xiaofeng, Chen Xu, Chen Xiaohong et al. 1996. *Chinese stratigraphical dictionary—Ordovician*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Xiaofeng, Chen Xiaohong. 1999. *Palaeobiogeography and palaeoclimatology of Ordovician in China*. *Professional Papers of Stratigraphy and Palaeontology*, (27): 13~15 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaofeng, Erdtmann B D, Chen Xiaohong. 1999. The “Hirnantian Stage” and the identification of the Ordovician-Silurian boundary. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 12~18 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L et al. 1986. Rare earth element geochemistry of South Atlantic deep sea sediments Ce anomaly change at 54 Ma. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (50): 1337~1355.
- Wang Zhonggang. 1989. *Rare elemental geochemistry*. Beijing: Science Publishing House, 247~342 (in Chinese).
- Wu Zhiyong. 1995. Milankovitch cycles and its chronostratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 19(2): 156~160 (in Chinese).
- Zeng Qingluan. 1991. Ordovician brachiopod communities and eustatic changes of sea level in the eastern Yangtze Gorges Area, China. *Bulletin of the Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, (16): 13~39 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lunshan, Zhang Benren. 1987. *Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 154~156 (in Chinese).