

三峡地区寒武纪—三叠纪古海水 Sm/Nd 变化特征:来自牙形石的证据

周 炼¹, 陈孝红², 李志宏², 刘勇胜¹, 张 利¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质调查局地层古生物研究中心, 湖北宜昌 443003

摘要: 牙形石作为划分地层的标准化石, 具有确切的地层层位和较高的 REE 含量, 并不容易受成岩作用的影响, 因此作为研究古海水演化的指示剂引起人们的广泛关注. 利用同位素稀释法对扬子克拉通三峡地区寒武纪—三叠纪海相碳酸盐岩中代表古海水化学组成牙形石的 Sm/Nd 比值进行测定, Sm/Nd 比值在 0.108~0.348 之间, 有较大的变化范围. 建立 Sm/Nd 比值随时间的演化曲线, 并结合已有沉积地层学和沉积地球化学的成果进行研究, 结果表明, 古海水 Sm/Nd 比值变化与海平面升降、古陆块的隆起有明显对应关系, 同时, 区域性构造运动, 如海底地壳拉张产生的幔源组分和地幔柱活动也会影响古海水的 Sm/Nd 比值. 因此, 古海水的 Sm/Nd 比值对海平面的升降、古大陆的风化作用和区域构造事件有指示意义.

关键词: Sm/Nd 比值; 牙形石; 古环境; 扬子克拉通.

中图分类号: P736.4

文章编号: 1000-2383(2006)01-0136-07

收稿日期: 2005-04-15

Variational Characteristics of Sm/Nd Ratio in Cambrian-Triassic Paleoseawater from Three Gorges Area Conodont Evidence

ZHOU Lian¹, CHEN Xiao-hong², LI Zhi-hong², LIU Yong-sheng¹, ZHANG Li¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Centre for Stratigraphy and Paleontology, China Geological Survey, Yichang 443003, China

Abstract: Conodonts have received extensive attention in terms of their potential as geochemical tracers, due to their precise stratigraphic age and high REE concentration as well as their relative resistance to diagenetic alternation. The ratios of Sm/Nd of paleoseawater from the Cambrian to the Triassic in the northern of the Yangtze craton were determined using the Isotope Dilution Mass Spectrometry method. The samples exhibit a large variation in Sm/Nd ratio (0.108–0.348). It shows that the temporal variability in Sm/Nd ratios of the seawater from the Cambrian to the Triassic is characterized by strongly correlated eustatic changes of sea level and submergence history of old continental in the Three Gorges area, corresponding to the previously published sedimentological and geochemical studies on these areas. In the other hand, the preliminary conclusion revealed that the submarine hydrothermal system (mantle flux) and the Emeishan mantle plume with higher Sm/Nd ratios, which were existing in the subarea adjacent to the Three Gorges area during the Phanerozoic, may likely influence the Sm/Nd values of contemporaneous seawater. It allows us to speculate that the Sm/Nd curve of paleoseawater constructed by using conodonts has a potentially wide range of applications in studies relating to the paleoenvironmental and regional tectonic event.

Key words: Sm/Nd ratio; conodont; paleoenvironment; Yangtze craton.

根据已有对古海水的微量元素和钆同位素分析 (Haley, 2000), 在海洋环境中, 古海水化学组成主要结果 (Elderfield and Greaves, 1982; Martin and 受控于大陆古老岩石风化剥蚀和洋中脊热液系统的

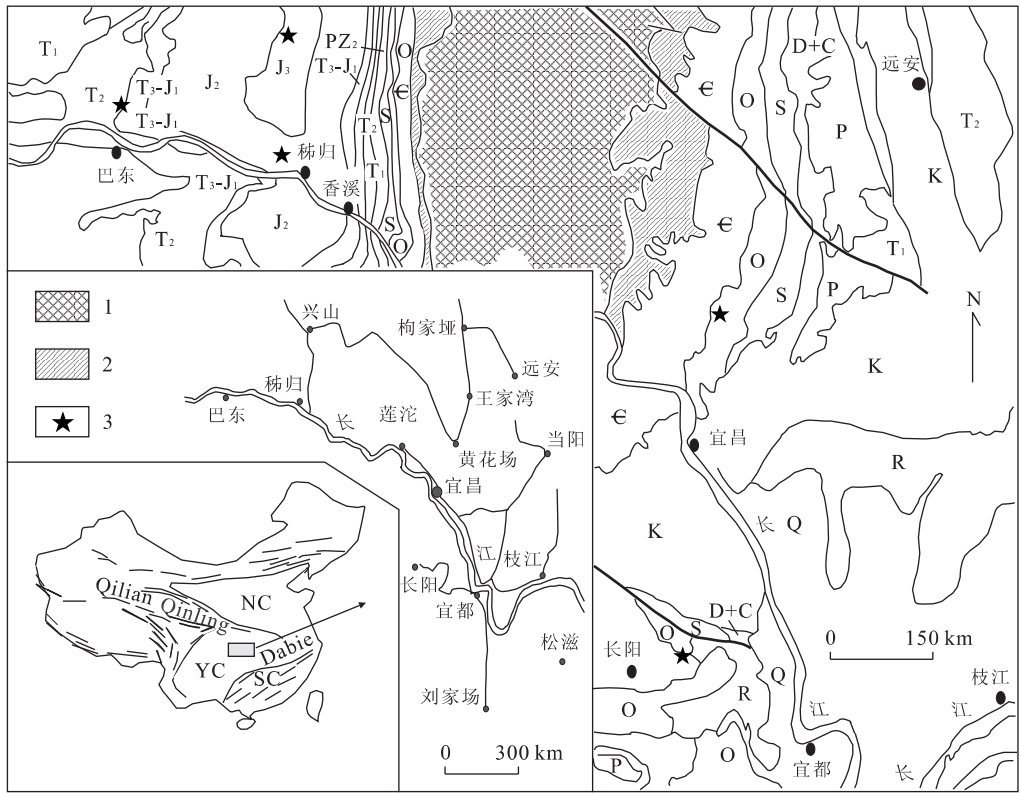


图 1 三峡地区地质略图(汪啸风等(1987))

Fig. 1 Schematic geologic map of the Three Gorges area

1. 黄陵花岗岩崆岭群片麻岩; 2. 震旦纪; 3. 取样位置

提供, 各种全球事件, 如全球构造运动、风化速率、洋壳增生速率、洋中脊热液系统变化、冰川活动和全球海平面变化等都会以不同方式改变海水的化学组成。牙形石(Conodont)是一类已绝灭的某种海生生物的骨骼器官, 广泛分布于寒武纪至三叠纪的各种海相地层之中, 尤以碳酸盐岩中最为丰富。近 20 年来, 大量研究成果表明 (Bertram *et al.*, 1992; Grandjean-Leécuyer *et al.*, 1993; Reynard *et al.*, 1999): 生物沉积磷酸盐可以代表古海水的化学组成, 特别是牙形石和无铍腕足类等磷酸盐化石, 不容易受到后期成岩和变质作用的影响, 记录着丰富的古环境变化的信息, 同时, 牙形石是划分地层的标准化石, 具有精确的年代和确切的地层层位, 对其成分进行研究, 可以有效地揭示古环境变化规律。同位素稀释法是一种灵敏度高、准确性好的测量方法, 它不需进行样品的定量分离, 在环境科学、地质科学以及标准物质研制等方面广泛应用。本文利用同位素稀释法对扬子克拉通三峡地区寒武纪—三叠纪标准剖面海相碳酸盐岩中牙形石的 Sm/Nd 比值进行准确测定, 以探讨古海水化学特征和区域构造演化。

1 地质背景和样品采集

三峡地区是扬子克拉通显生宙标准地层剖面建立地区, 发育有从震旦纪—早三叠世连续完整的海相地层剖面, 且未经过明显的变质作用, 除志留纪以外的各个时期具有较完整的海相碳酸盐岩和丰富的化石记录, 特别是在寒武纪、奥陶纪、石炭纪—三叠纪等地层的灰岩中保存有大量的牙形石和腕足类化石。

本文样品分别取自扬子克拉通北缘宜昌黄花场、宜都、松滋和兴山等地区寒武纪—三叠纪不同时期的碳酸盐岩样品(图 1)。晚寒武世样品取自宜昌地区黄花场陈家河雾渡河组顶部的灰白色厚层白云岩, 该层局部夹钙质白云岩, 含少量硅质条带; 奥陶纪灰岩样品取自黄陵背斜东翼的宜昌黄花场剖面, 自下而上对包括西陵峡组、南津关组、分乡组、红花园组、大湾组、牯牛潭组、庙坡组和宝塔组的灰岩进行系统取样; 志留纪纱帽组和罗惹坪组灰岩取自宜都梯子口剖面灰岩透镜体。该区只有中晚泥盆世出露, 取样剖面位于兴山县建阳坪乡建阳坪村和大峡口之间, 仅从写经寺组灰黄色泥灰岩中获得牙形石

样品;研究区石炭系发育不完全,出露较差,在具有代表性的松滋锈水沟剖面获得早石炭世底部灰黑色金陵灰岩和大塘组灰岩。鄂西建始—巴东地区二叠纪地层发育良好,沉积类型多样,化石丰富,自下而上,对茅口组、吴家坪组和长兴组海相碳酸岩进行取样,实测剖面为兴山县大峡口地区,同时对重庆巫山茅口组灰岩进行取样。峡区三叠纪对称分布于黄陵背斜的东西两侧,本区发育连续,其中早三叠世沉积了一套以灰岩、白云岩为主的碳酸盐岩组合,自下而上分为大冶组(T_d)和嘉陵江组(T_j),大冶组以灰色薄层石灰岩为主,夹中厚层含泥质灰岩或白云岩及鲕状灰岩,底部夹少量钙质泥岩,与下伏大隆组及上覆嘉陵江组均呈整合接触;嘉陵江组以白云岩出现为底界,主要为灰色中厚层白云岩夹灰岩、盐溶角砾岩,与上覆巴东组(T_b)呈整合接触。中三叠统称巴东组,以黄灰色钙质泥岩出现为底界,以灰岩为主夹少量白云岩及钙质泥岩。以上详细的地层古生物资料见汪啸风等(1987)。

2 实验方法和结果

研究样品主要采用灰岩中的牙形石等磷酸质壳体,为避免污染,样品在破碎前须充分刷洗并用去离子水清洗,破碎到 1~2 cm 大小,将样品浸泡于 10%冰醋酸水溶液中进行酸解处理,待反应完后进行湿筛筛洗。先用 20 目筛洗去掉较大颗粒,再用 160 目筛洗去除泥质及细小颗粒,充分清洗后自然风干。在双目镜下挑选出牙形石个体以备研究。在超声波中用去离子水反复清洗化石,然后用甲醇清洗,以减少陆源物质的影响。为了保证牙形石没有受到后期成岩作用的影响,选择颜色变化指数 CAI 为 2~3 的牙形石进行分析(赖旭龙等,1995)。

在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成 Sm、Nd 含量的同位素稀释法测定,取一定量经过清洗的牙形石个体,加入 ^{145}Nd — ^{149}Sm 混合稀释剂,充分混合,加入 6N HNO_3 溶解 12 h 后,在电炉上低温蒸干,加入 6N HCl 溶解样品,观察溶液是否澄清,否则继续加入王水 5 mL,溶解样品。样品完全溶解后,利用 AG50×8 阳离子交换树脂分离 Sm、Nd 与碱金属和碱土金属。Sm-Nd 同位素在 MAT261 同位素质谱仪上完成,每次测定样品之前,通过测定标准 La Jolla 校准仪器的状态。La Jolla 的测定结果: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511856 \pm$

表 1 三峡地区寒武纪—三叠纪不同时期牙形石 Sm/Nd 比值
Table 1 Sm/Nd ratios of conodont from Cambrian to Triassic in the Three Gorges area

样号	时代	组	Nd($\mu\text{g/g}$)	Sm($\mu\text{g/g}$)	Sm/Nd
Bt-82-1	T_2b	巴东组	10.03	2.52	0.251
VG-9	T_3j	嘉陵江组	59.87	11.09	0.185
VG-8	T_1d	大冶组	3.87	0.48	0.125
VG-4	T_1d	大冶组	5.88	0.64	0.108
Pd-Of1	P_3d	大隆组	45.04	9.73	0.216
XF-130	P_3ch	长兴组上部	39.96	8.52	0.213
TP-CN80-2	P_3ch	长兴组下部	198.45	52.21	0.263
C-68	P_3w	吴家坪顶部	50.94	11.78	0.231
XF-103	P_3w	吴家坪顶部	31.08	6.50	0.209
W-2	P_2w	吴家坪底部	45.69	7.18	0.157
W-2	P_3w	吴家坪底部	234.14	42.15	0.180
XF-74	P_2m	茅口组	5.60	1.05	0.187
Pm	P_2m	茅口组	7.53	1.27	0.168
锈 G-19	C_7	大塘组	28.79	6.41	0.223
NG-9	Cl	岩关组	14.97	4.22	0.282
Dsh-4	P	写经寺组	26.32	6.82	0.259
TZKSS-4	S	纱帽组	48.39	16.83	0.348
TZKL-2	S	罗惹坪组	10.78	1.90	0.177
MP-1C	O	宝塔组	99.61	29.14	0.293
Sco-M-5-6	O	庙坡组	39.23	12.77	0.326
MG-4	O	牯牛潭组	26.92	6.01	0.223
MD-1	O	大湾组	69.40	15.80	0.228
MH-2	O	红花园组	111.60	23.00	0.206
MF-9	O	分乡组	50.60	10.02	0.198
MN-5	O	南津关组	30.67	4.94	0.161
LT-9F1	∈	雾渡河组	190.14	35.29	0.186

0.000012(2σ 测定次数 $n=12$),与标准值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511864 \pm 0.00009$)的相对偏差小于 0.005%。全过程本底为:Sm= 3×10^{-11} ,Nd= 1.2×10^{-10} 。对标准物质 BCR-2 的测定结果为: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512643 \pm 0.000015(2\sigma)$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1365$,Nd= 28.32×10^{-6} ,Sm= $6.52 \times 10^{-6}(2\sigma)$ 测定次数 $n=8$ 。Sm、Nd 含量和 Sm/Nd 比值分析结果见表 1。

3 讨论

牙形石等磷酸质壳体的微量元素之所以可以反映古气候、古海洋地球化学的演化过程,是由于它不容易受到后期成岩和变质作用的影响(Elderfield and Greaves, 1982; Bertram *et al.*, 1992)。迄今为止,讨论最多的是利用牙形石等磷酸壳体的钕、锆同位素和 REE 组成探讨古海水的环境意义。

在秦岭造山带内,由前寒武纪基底岩层组成的

隆起区和由显生宙地层构成的沉积盆地广泛共存,当前寒武基底一旦在地表被抬升剥露,均有成为沉积物源供给区的可能. 欧阳建平和张本仁(1996)研究表明,除秦岭群和佛坪杂岩具有相对低的 Sm/Nd 比值(<0.20)外,陡岭群、毛堂群、武当群、耀岭河群、鱼洞子群和西乡群均以较高的 Sm/Nd 比值(>0.20)为特征. 而作为扬子克拉通北缘已知出露时代最老的基底岩系崆岭群,主体由闪长质—英云闪长质—奥长花岗质—花岗闪长片麻岩和花岗质片麻岩组成,根据 Gao *et al.* (1999)对扬子克拉通基底岩太古代崆岭群各岩类的分析结果,崆岭群英云闪长质片麻岩和变泥质岩的 Sm/Nd 比值在 $0.13\sim0.19$ 之间. 因此,不同构造单元和地段的前寒武纪地层 Sm/Nd 比值特征存在明显的差异,这种差异为研究扬子克拉通古海水化学组成的演化与前寒武纪基底和显生宙地层构成的沉积盆地之间存在的耦合关系提供了可能. 殷鸿福和彭元桥(1995)、殷鸿福等(1999)根据古地磁、构造、沉积、古生物的研究成果,对晚寒武世至早三叠世古海洋图进行了恢复,表明三峡地区与南秦岭为同一沉积盆地,两者海水应是连通的,应具有相似的海水组成,因此,这些古陆块的风化剥蚀都有可能影响扬子克拉通北缘古海水的性质.

研究表明(Holmden and Creaser, 1996; Picard *et al.*, 2002; Lecuyer *et al.*, 2004),世界各地代表古海水化学组成牙形石和鱼骨的 Sm/Nd 比值在 $0.15\sim0.50$ 之间,有较大的变化范围. Fanton (2002)对北美中部边缘碳酸盐岩的钷同位素和 Sm/Nd 比值进行研究表明,该区晚奥陶世克拉通大陆边缘古海水的钷同位素和 Sm/Nd 比值变化与其相邻陆块的沉积物源、海平面变化和构造演化有密切关系. 表 1 中三峡地区寒武纪—三叠纪反映古海水组成牙形石的 Sm/Nd 比值在 $0.10\sim0.35$ 之间,扬子克拉通北缘寒武纪晚期古海水具有较低的 Sm/Nd 比值(0.18) (表 1),比较接近崆岭群的比值,说明主要受扬子克拉通太古代基底崆岭群物源的控制,这与寒武纪晚期存在全球性海退有关. 奥陶纪牙形石的 Sm/Nd 比值具有较大的变化范围($0.161\sim0.326$) (表 1),而从分乡组到庙坡组 Sm/Nd 比值随时间依次有明显增大的趋势($0.198\sim0.326$, 图 2),并大于崆岭群英云闪长质片麻岩和变泥质岩的 Sm/Nd 比值($0.13\sim0.19$) (Gao *et al.*, 1999),显然单从崆岭群提供物源不可能产生这种效果,奥陶纪是地球历史上一次较大范围的海侵期,虽

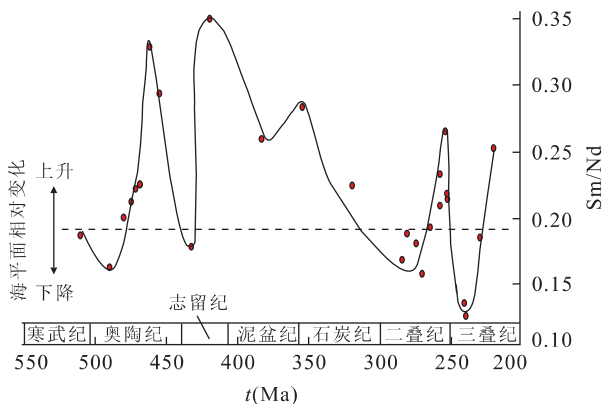


图 2 三峡地区显生宙牙形石 Sm/Nd 比值随时间演化
Fig. 2 Sm/Nd ratio distribution of conodonts in response to the age changes during the Phanerozoic in the Three Gorges area

然海水进退存在着多旋回现象,其总趋势是海侵范围不断扩大和海水不断加深(陈孝红和汪啸风, 1999). 因此,随着海平面的升高,太古代崆岭群岩石进一步淹没,使得这些古老基底岩的风化减小,并在该区边缘海水所占的份额减少,特别是庙坡组和宝塔组具有明显高的 Sm/Nd 比值,与庙坡组中部具有的含 *Nemagraptus gracilis* 笔石及 *Sericodea* 腕足群落的黑色页岩所表现出凝缩沉积的特点一致,这些沉积特点是该时期海平面上升到最大时期的沉积产物(陈孝红和汪啸风, 1999). 庙坡组上部黄绿色页岩的出现标志此次海侵的结束和海退的开始,从宝塔组古海水的 Sm/Nd 比值上看,有一定程度的降低,由此可见,该区奥陶纪古海水的 Sm/Nd 比值变化与海平面升降以及表现出的沉积记录明显相关,对这种相关的机理研究还需进一步的考证,不排除该时期一定数量幔源物质的加入,如洋壳活动的加剧,包括洋中脊等幔源物质的影响. 另外,当海平面上升时,由于古老陆块的暴露面积减小,由风化作用流入海水的“陆源”物质减少,使得 Sm/Nd 比值与海平面的变化呈正相关.

志留纪 2 个样品(罗惹坪组、纱帽组)的 Sm/Nd 比值变化较大,分别为 0.177 和 0.348 (表 1). 龙马溪组上部黄绿色页岩段和上覆罗惹坪组泥岩、粉砂岩和生物灰岩总体上具有向上变浅的沉积特征,宝塔组沉积结束后,区域性构造运动使得上扬子地台南部和该地台北缘相继发生宜昌上升和西乡上升运动(陈旭等, 1990),同时存在全球海平面下降. 从本文数据来看,崆岭群在早志留世的隆起表现得更为

明显,并遭受剥蚀,使得海水具有较低的 Sm/Nd 比值.晚志留世纱帽组具有最高的 Sm/Nd 比值(0.348)(表 1,图 2),说明海水受到区域强烈构造活动的影响,并达到最高峰,似乎与扬子克拉通北缘的紫阳—竹溪小区构成的北西西—南东东向发育的火山岩可以对应,是否与宜昌地区奥陶纪—志留纪之交发生过多次较大规模的火山喷发活动(Su *et al.*, 2003)存在内在联系,还需要进一步考证.

早期作为扬子北部大陆边缘具有稳定沉积的特点,泥盆纪开始扬子克拉通向南秦岭挤压加强,扬子陆块边缘与北秦岭对接和碰撞的发生,破坏了原有的沉积物源供给关系,泥盆纪开始具有多源、混源的特征(欧阳建平和张本仁,1996),因此,除扬子克拉通源区之外,散布在南秦岭地区形成“孤岛”状的前寒武纪地层剥露区,如陡岭群、耀岭河群、武当群、佛坪杂岩和鱼洞子群及北秦岭秦岭群碎屑物质的风化都有可能影响古海水的化学组成.建始剖面晚泥盆世写经寺组灰岩透镜体中牙形石的 Sm/Nd 比值为 0.259,明显高于扬子克拉通古老太古代基底崆岭群的比值,一方面可能与具有较高 Sm/Nd 比值的耀岭河群、武当群的风化剥蚀有关,秦岭群由于受到这些古陆块的阻隔,可能对扬子克拉通北缘古海水的影响不大.

早石炭世海水的 Sm/Nd 比值在 0.22~0.28 之间,总体具有比崆岭群高的比值,这可能与早石炭世全球海平面的上升有关(黄思静等,2001),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,该地区古气候及海平面变化与沉积层序形成以及全球海平面变化相关.

值得注意的是从早二叠世初期茅口组到晚二叠世吴家坪组底部,古海水 Sm/Nd 比值一直保持在 0.16~0.19 之间,比较接近扬子克拉通基底的组成.根据王成善等(1999)对该区早二叠世古海平面的分析结果,茅口末期水平面大幅度下降,形成了碳酸盐台地、孤台、被动边缘等大范围暴露;茅口组灰岩的碳、氧同位素证据也表明(牛志军等,2000),该时期出现的岩溶不整合面与海平面发生下降有关,使得茅口口中期该区曾一度大面积的暴露,因此,在这种浅水环境,海水的成分更容易接受扬子克拉通北缘崆岭群的风化剥蚀.

从晚二叠世吴家坪底部开始到二叠纪晚期长兴组上部,古海水的 Sm/Nd 比值随时间变化,有一个明显的峰值,在 0.23~0.26 之间(图 2),说明该时

期古海水受到一定程度幔源物质的影响,在时间上可以与中上扬子区早、晚二叠世之间多期次喷发的峨嵋地幔柱的活动(Xu *et al.*, 2001)对应.根据徐义刚和钟孙霖(2001)对峨嵋山玄武岩 Sm-Nd 同位素的研究结果,该区玄武岩的 Sm/Nd 比值有较大变化范围,在 0.19~0.26 之间,从扬子克拉通北缘古海水晚二叠世 Sm/Nd 比值随时间分布的峰值分析,与峨嵋山玄武岩喷发时间大体一致,可以推测晚二叠世峨嵋山玄武岩的喷发所产生的火山灰影响了扬子克拉通北缘晚二叠世古海水的组成.也有证据表明(牛志军等,2000),峨嵋山玄武岩的火山灰已经影响到扬子克拉通鄂西建始县等地区.另一方面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,晚二叠世的海侵是非渐进性的,海平面的上升在相对短时间内发生,其上升幅度也大大超过早二叠世,同时,锶同位素演化曲线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(黄思静,1997),而该区晚二叠世吴家坪底部开始 Sm/Nd 的上升到二叠纪晚期长兴组上部 Sm/Nd 比值的下降所表现出的“峰值”与该时期古海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的趋势有相似之处,反映出 Sm/Nd 比值与海平面升降之间的耦合关系,同时建始大隆组和长兴组上部牙形石具有相似的 Sm/Nd 比值,作为鄂西地区二叠系最高层位的大隆组,可以与晚二叠世长兴期的沉积产物进行对比.

通过对该区早—中三叠世灰岩中牙形石的 Sm/Nd 进行测定,发现该区早三叠世大冶组第一段(T_{1d})、嘉陵江组第三段(T_{3j})及其上覆地层巴东组第二段(T_{2b})中牙形石的 Sm/Nd 比值依次有增大的趋势(图 2),即 Sm/Nd 比值为 0.125~0.251,与全球海平面的变化规律相似(Haq and Vail, 1987),即从早三叠世到中三叠世海平面总体上升,但与该时期扬子地块海平面变化规律不一致(杨遵仪等,1991;殷鸿福等,1994),扬子地块主体表现为在早三叠世中期海侵高峰之后,早三叠世末及中三叠世,扬子地块海平面正开始下降,最后形成了遍及扬子主体的拉丁期大海退,这与早三叠世末及中三叠世的印支运动有关,由于早三叠世末期扬子板块向南俯冲导致上扬子台地抬升形成暴露的陆架并普遍覆盖了中酸性火山灰(绿豆岩)(黄照先等,1999),在这种构造背景下,使得早三叠世晚期和中三叠世古海水的成分发生变化,并具有较高的 Sm/Nd 比值.

4 结论

利用牙形石等磷酸盐壳体研究古海水的性质并探讨古环境的演化规律,已经得到国外学者的广泛关注,国内的研究则刚刚起步。在三峡地区是扬子克拉通发育有从震旦纪—早三叠世连续完整的海相地层剖面,该区未经过变质作用且保留着除志留纪以外的各个时期较完整的海相碳酸盐岩和丰富的化石记录,并具有较完整的地层古生物资料,对研究古海水演化规律及机理具有得天独厚的条件,但与碳、氧、硫同位素研究相比,该区积累的代表古海水化学组成的数据较少,研究水平也相对滞后。本文利用同位素稀释法对扬子克拉通三峡地区晚寒武世—三叠纪反映古海水特征牙形石的 Sm/Nd 比值进行研究,初步结果表明:Sm/Nd 比值变化与海平面的升降可以对比,具有较低 Sm/Nd 比值的扬子克拉通太古代基底崆岭群的剥蚀程度与海平面的升降存在一定的联系,同时区域构造运动伴随的海底扩张、火山喷发所产生的基性物质也会影响古海水的化学组成。

致谢:中国地质调查局地层古生物研究中心陈辉明副研究员协助完成了部分野外工作,在此表示衷心感谢。

References

- Bertram, C. J., Elderfield, H. J., Aldridge, R. J. et al., 1992. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and REEs in Silurian phosphatic fossils. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113:239—249.
- Chen, X., Xu, J. T., Cheng, H. J., et al., 1990. On the Hannan old land and Dabashan uplift. *Journal of Stratigraphy*, 14(2):81—116 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Wang, X. F., 1999. Multiple stratigraphic subdivision and sea level changes of the Early Paleozoic in Yangtze gorges area. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3:1—11 (in Chinese with English abstract).
- Elderfield, H., Greaves, M. J., 1982. The rare earth elements in seawater. *Nature*, 296:214—219.
- Fanton, K. C., Holmden, C., Nowlan, G. S., et al., 2002. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd stratigraphy of Upper Ordovician epeiric sea carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(2):241—255.
- Gao, S., Lin, W. L., Qiu, Y., et al., 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63(13/14):2071—2088.
- Grandjean-Leécuyer, P., Feist, R., Albarède, F., 1993. Rare earth elements in old biogenic apatites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57:2507—2514.
- Haq, B. U., Vail, P. R., 1987. The chronology of fluctuating sea level since the Triassic. *Science*, 235(1):156—1167.
- Holmden, C., Creaser, R. A., Muehlenbachs, K., et al., 1996. Isotopic and elemental systematics of Sr and Nd in 454 Ma biogenic apatites; Implications for paleoseawater studies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142:425—437.
- Huang, S. J., 1997. Carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic marine carbonates in the upper Yangtze platform, Southwest China. *Acta Geologica Sinica*, 71(1):45—53 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Shi, H., Zhang, M., et al., 2001. Strontium isotope evolution and global sea-level changes of Carboniferous and Permian marine carbonate, upper Yangtze platform. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4):481—487 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. X., Li, Z. H., Chen, L. D., et al., 1999. Early-Middle Triassic sequence stratigraphy in Wushan area, Chongqing. *Geology and Mineral Resources of South China*, 4:50—56 (in Chinese with English abstract).
- Lai, X. L., Zhou, H. W., Qi, S. H., 1995. Study of low-very low grade metamorphism of carbonate by conodont colour alternation index (CAI). *Geological Science and Technology Information*, 14(2):23—30 (in Chinese with English abstract).
- Lecuyer, C., Reynard, B., Grandjean, P., 2004. Rare earth element evolution of Phanerozoic seawater recorded in biogenic apatites. *Chemical Geology*, 204:63—102.
- Martin, E. E., Haley, B. A., 2000. Fossil fish teeth as proxies for seawater Sr and Nd isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64:835—847.
- Niu, Z. J., Duan, Q. F., Fu, T. A., et al., 2000. Paleokarst unconformity on the top of the Maokou Formation in the Jianshi-Badong area, Hubei: Its discovery and significance. *Regional Geology of China*, 19(3):276—280 (in Chinese with English abstract).
- Niu, Z. J., Xu, A. W., Duan, Q. F., et al., 2000. Origin and enrichment of selenium in Permian strata in the northern part of Jianshi, Hubei. *Regional Geology of China*, 19(4):396—401 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang, J. P., Zhang, B. R., 1996. Geochemistry of sedimentary provenance in Qinling orogenic belt and its implications for tectonic evolution. *Earth Science—Journal of*

- China University of Geosciences*, 21(5): 465—468 (in Chinese with English abstract).
- Picard, S., Lécuyer, C., Barrat, J. A., et al., 2002. Rare-earth element contents of Jurassic fish and reptile teeth and their potential relation to seawater composition (Anglo-Paris basin, France and England). *Chemical Geology*, 186: 1—16.
- Reynard, B., Lecuyer, C., Grandjean, P., 1999. Crystal-chemical controls on rare-earth element concentrations in fossil biogenic apatites and implications for paleoenvironmental reconstructions. *Chemical Geology*, 155: 233—241.
- Su, W. B., He, L. Q., Wang, Y. B., et al., 2003. K-bentonite beds and high-resolution integrated stratigraphy of the uppermost Ordovician Wufeng and the lowest Silurian Longmaxi formations in South China. *Science in China (Series D)*, 46(11): 1121—1133.
- Wang, C. S., Li, X. H., Chen, H. D., et al., 1999. Permian sea-level changes and rising-falling events in South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 536—541 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. F., Ni, S. Z., Zeng, Q. L., et al., 1987. Biostratigraphy of the Yangtze gorge area: (2) Early Palaeozoic era. Geological Publishing House, Beijing, 43—137 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Chung, S. L., 2001. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions. *Geochimica*, 30(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., Chung, S. L., Jahn, B. M., et al., 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145—168.
- Yang, Z. Y., Wu, S. B., Yin, H. F., et al., 1991. Permian-Triassic events of South China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yin, H. F., Peng, Y. Q., 1995. Evolution of the Phanerozoic paleo-ocean of Qinling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(6): 605—611 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Tong, J. N., Ding, M. H., et al., 1994. Late Permian-Middle Triassic sea level changes of Yangtze platform. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 628—632 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Wu, S. B., Du, Y. S., et al., 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(1): 1—11 (in Chinese).
- ### 附中中文参考文献
- 陈孝红, 汪啸风, 1999. 长江三峡地区早古生代多重地层划分与海平面升降事件. *华南地质与矿产*, 3: 1—11.
- 陈旭, 徐均涛, 成汉钧, 等, 1990. 论汉南古陆及大巴山隆起. *地层学杂志*, 14(2): 81—116.
- 黄思静, 1997. 上扬子地区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究. *地质学报*, 71(1): 45—53.
- 黄思静, 石和, 张萌, 等, 2001. 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. *沉积学报*, 19(4): 481—487.
- 黄照先, 李志宏, 陈立德, 等, 1999. 重庆市巫山地区早、中三叠世层序地层研究. *华南地质与矿产*, 4: 50—56.
- 赖旭龙, 周汉文, 祁士华, 1995. 论利用牙形石色变度值研究碳酸盐岩低级—极低级变质作用. *地质科技情报*, 14(2): 23—30.
- 牛志军, 段其发, 傅泰安, 等, 2000. 湖北建始—巴东地区茅口组顶部古岩溶不整合面的发现. *中国区域地质*, 19(3): 276—280.
- 牛志军, 徐安武, 段其发, 等, 2000. 湖北建始北部二叠纪地层晒的来源与富集. *中国区域地质*, 19(4): 396—401.
- 欧阳建平, 张本仁, 1996. 秦岭造山带沉积物源地球化学研究及其构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 21(5): 465—468.
- 汪啸风, 倪世钊, 曾庆奎, 等, 1987. 长江三峡地区生物地层学早古生代分册(2). 北京: 地质出版社, 43—137.
- 王成善, 李祥辉, 陈洪德, 等, 1999. 中国南方二叠纪海平面变化及升降事件. *沉积学报*, 17(4): 536—541.
- 徐义刚, 钟孙霖, 2001. 峨眉山火山成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. *地球化学*, 30(1): 1—9.
- 杨遵仪, 吴顺宝, 殷鸿福, 等, 1991. 华南二叠—三叠纪过渡期地质事件. 北京: 地质出版社.
- 殷鸿福, 彭元桥, 1995. 秦岭显生宙古海洋演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(6): 605—611.
- 殷鸿福, 童金南, 丁梅华, 等, 1994. 扬子区晚二叠世—中三叠世海平面变化. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(5): 628—632.
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(1): 1—11.