

晚震旦世至早寒武世扬子地台北缘碳同位素研究

郭庆军¹⁾ 刘丛强¹⁾ Harald Strauss²⁾ Tatiana Goldberg²⁾

(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, 贵州 贵阳 550002 2) Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 48148 Münster, Germany)

摘 要 震旦-寒武交变期是地史上一个重大转折期, 亦是一个具有特殊意义的过渡时期。运用碳同位素地球化学方法, 探讨扬子地台北缘四川南江地区晚震旦世-早寒武世交变期, 碳同位素地球化学异常与环境变化和生物演化的相互联系。南江剖面沉积岩有机碳同位素组成在 $-35.8\text{‰} \sim -30.1\text{‰}$ 间变化, 碳酸盐碳同位素组成从 $-3.5\text{‰} \sim +0.5\text{‰}$ 。在灯影组顶部、牛蹄塘组下部和上部, 变化的碳、硫同位素组成和不同的黄铁矿与有机碳含量反映了有机碳埋藏量和环境的变化。下寒武统富有机碳和黄铁矿的黑色页岩沉积, 暗示了早寒武世早期缺氧环境的存在。

关键词 晚震旦世至早寒武世 碳同位素组成 环境变化 扬子地台 四川南江

Isotopic Investigation of Late Neoproterozoic and Early Cambrian Carbon Cycle on the Northern Yangtze Platform, South China

GUO Qingjun¹⁾ LIU Congqiang¹⁾ Harald Strauss²⁾ Tatiana Goldberg²⁾

(1) State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou, 550002;

2) Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 48148 Münster, Germany)

Abstract The Precambrian-Cambrian transition is one of the critical time intervals in Earth history. Profound geotectonic climatic and biological changes occurred during late Neoproterozoic and the period of its transition into early Cambrian. This paper has studied paired carbonate and organic carbon isotope determinations of samples from Nanjiang of Sichuan Province on the northern Yangtze Platform, and provided a preliminary geochemical explanation for environmental changes in relation to bio-events on the northern Yangtze Platform during the Precambrian-Cambrian transitional interval. Organic carbon isotopic compositions of sediments vary from -35.8‰ to -30.1‰ and carbonate carbon isotopic compositions change between -3.5‰ and $+0.5\text{‰}$ along the Nanjiang section. Varied carbon and sulfur isotopic compositions and different contents of pyrite and organic materials reflect the changing environment and the burial of organic matter in the Dengying Formation and the lower and upper parts of Niutitang Formation. The anoxic conditions result in the widespread preservation of organic-rich sediments and pyrites in the black shale on the Yangtze Platform.

Key words Late Sinian to Early Cambrian carbon isotope composition environmental change Yangtze platform Nanjiang in Sichuan

由于一系列的地质事件出现在震旦-寒武交变期, 如晚震旦世的板块活动、全球性冰期、全球海平面上升运动、'帽'碳酸盐沉积、一系列的'生物群'出现、成磷事件、寒武纪生物大爆发事件、黑色页岩和多金属矿等, 使该时期成为地学研究的热点之一。前人已对扬子地台东缘和南缘晚震旦世及震旦-寒武纪边界地层开展过大量地球化学的研究工作, 但对扬子地台北缘地球化学研究还很欠缺、对分析

该时期的生命演化过程和环境变化关系的研究还不足、从地质环境背景的角度来探讨震旦-寒武交变期地质过程的科学努力显然不够。因为扬子地台震旦系和寒武系广泛发育, 化石丰富, 是研究地层古生物、沉积学和地球化学的理想地区。利用同位素地球化学研究手段, 采用沉积碳酸盐和与之共生的有机碳同位素组成进行研究, 目的是为扬子地台北缘环境变化和生物事件提供地球化学证据, 利用碳循

本文由国家自然科学基金项目(40072047, 40303001)和德国基金项目(Str 281/16-1)资助。

责任编辑 宫月萱。

第一作者 郭庆军, 1975 年生, 博士, 从事环境地球化学和同位素地球化学研究, E-mail: gqjowen@sohu.com, gqjowen@sina.com

环反映全球海洋/大气系统地球化学扬子地台北缘混乱的情况;了解古海水同位素成分分布,分析和探讨该时期的生命演化过程与环境变化的关系,具有重要的研究意义。

1 地质背景

扬子地台位于昆仑秦岭槽地以南、西藏台地以东、华北地台以南和江南盆地西北,与西藏台地相连接(钱逸,1999)。四川南江地区位于扬子地台西北部,是中国震旦纪过渡层系发育地区之一,古地理位置属于碳酸盐台地相。

四川北部南江和旺苍一带发育有晚震旦世和早寒武世地层。处于浅水或斜坡区,沉积厚度大,是一套以碳酸盐岩、含磷酸盐岩及碎屑岩为主的海相地层。该区主要出露上震旦统灯影组、下寒武统郭家坝组等。小壳化石主要分布于灯影组顶部和郭家坝组底部。区内以南江沙滩剖面(图1)中的小壳化石和生物地层研究较为详细。灯影组上部(高家山段)为浅灰色、灰白色白云岩(杨遵和等,1983,1984;何原相等,1986),产叠层石等。其上连续沉积磨坊岩段,主要为深灰色、灰黑色含沥青质灰岩及硅质条带白云岩、灰岩。局部地段下部夹磷矿或含磷条带,此段产大量小壳化石等。其上连续沉积下寒武统郭家坝组,该组下段为深灰色泥质粉砂岩,底部为黑色页岩;上段为深灰色-灰黑色含粉砂页岩夹灰岩透镜体,产三叶虫。上覆地层为筇竹寺组。

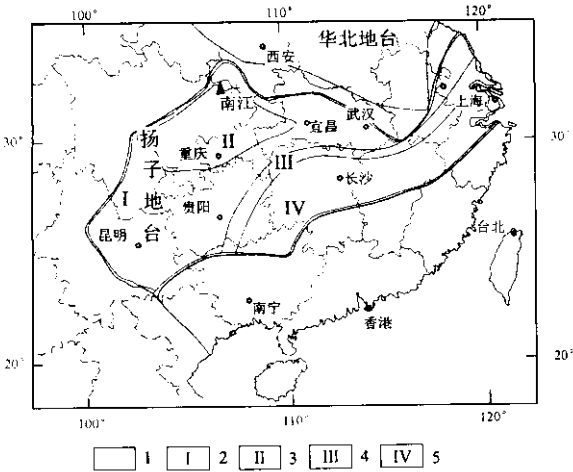


图1 区域地质图(据 Steiner 等,2001 有改动)

Fig.1 Regional geological map

(modified after Steiner et al., 2001)

1-剖面位置 2-台地相区 3-碳酸盐台地 4-过渡相区 5-盆地相区

1-shatan section position 2-platform 3-carbonate belt;

万方数据

4-transition belt 5-basin belt

2 样品采集和实验方法

沙滩剖面位于四川北部的南江县沙滩,出露地层为灯影组、郭家坝组等,剖面厚度约为 155 m。笔者在南江沙滩剖面进行了系统采样,包括灯影组和牛蹄塘组白云岩、硅质岩和黑色页岩等样品 47 件。

总碳、总无机碳含量和有机碳同位素组成分析工作主要在德国威斯特法伦州威廉·明斯特大学的稳定同位素实验室进行。

2.1 碳、硫含量分析

使用 CS-MAT 5500 设备进行分析,采用 NDIR spectroscopy (无弥散红外线光谱)在 1 350 ℃ 或 1 000 ℃ 下燃烧粉末样品(总无机碳(TIC)粉末样品与盐酸溶液(25%)反应生成的二氧化碳气体),分析总碳(TC)、总无机碳(TIC)、总有机碳(TOC)等含量。采用含有 12% 碳酸盐碳的 100% 碳酸钙作为标准,测定精度为 ±0.01%。

2.2 无机碳同位素组成分析

碳酸盐样品的 CO₂ 制备采用的饱和磷酸法(McCrea,1950;郑淑蕙等,1986),将净化后的不同样品在不同的时间和温度条件下与 100% 饱和磷酸反应生成 CO₂ 气体,然后经过液氮冷阱等真空系统收集纯化,并使用 MAT 252 气体质谱仪测定。实验过程中使用 GBW 04406 δ¹³C_{carb} 为 (-10.85 ± 0.05)‰,δ¹⁸O_{carb} 为 (-12.40 ± 0.15)‰ 作为质量控制标准。实验数据以 PDB 为标准,测定精度均为 ±0.1‰。无机碳样品碳同位素组成的前处理和分析主要在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进行。

2.3 有机碳同位素组成分析

密封石英管燃烧法是将样品中的有机碳转化为 CO₂。分析有机碳同位素组成的实验过程相当复杂,由于排除了样品中难溶矿物和水及杂质气体等对同位素组成分析有干扰的物质,所以分析精度较高。

2.3.1 密封氧化铜石英管有机碳同位素组成分析法 采用 EA-ConFlo-IRMS 进行测定,测定精度均为 ±0.1‰。

具体提取步骤为:① 在石英管中,将配制的盐酸溶液除去样品碳酸盐部分,并烘干剩余样品;② 将一定量的氧化铜装入有烘干样品的石英管,在真空系统中封闭,放入马弗炉 4 h,温度调至 850 ℃;③ 在真空系统中将纯净的 CO₂ 转移到普通玻璃管里,使用质谱仪进行分析。

2.3.2 干酪根提取和分析 使用一定浓度的盐酸和氢氟酸反复除去样品中所含的碳酸盐岩和硅质成份,分离重金属成份,残余物是酸、碱、有机溶剂都不能溶的那部分物质,即干酪根。干酪根 H/C 原子比的测定在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室进行,采用德国 Heraeus CHN O 元素快速分析仪测定干燥的干酪根 H/C 原子比,实验数据的测定精度为 $\pm 0.15\%$ 。

2.4 原岩 Fe、Mn、Sr、Ca、Mg 元素含量

使用原子吸收法测定样品中碳酸盐所含 Fe、Mn、Sr、Ca、Mg 的含量。元素含量分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室分析中心进行,分析误差低于 5% 。

3 沙滩剖面沉积岩地球化学分析

灯影组: $\delta^{13}C_{carb}$ 从 -2.3% 到 $+0.6\%$, 平均值为 $(-0.6 \pm 0.8)\%$, 相对应的 $\delta^{18}O_{carb}$ 主要为 -12.7% 到 -4.4% , 平均值为 $(-7.3 \pm 2.6)\%$; $\delta^{13}C_{org}$ 为 -35.6% 到 -34.1% , 平均值为 $(-35.1 \pm 0.6)\%$ 。 $\Delta\delta$ 为 32.7% 到 34.6% , 平均值为 $(33.9 \pm 0.7)\%$; TC 值为 7.2% 到 14.7% ; TIC 值为 7.2% 到 12.8% ; TOC 值在 0% 到 3.4% 。

郭家坝组 寒武系底部碳酸盐碳同位素组成为 -3.5% 到 -1.7% , 平均值为 $(-2.6 \pm 0.5)\%$, 有机碳同位素组成为 -33.7% 到 -35.1% , 平均值为 $(-34.3 \pm 0.4)\%$; TOC 为 0.9% 到 4.9% , 平均值为 3.1% ; S 同位素组成也有类似特点 (Goldberg 等, 2003a, 2003b)。黄铁矿平均含量为 0.96% ; 有机硫平均含量为 0.82% ; 黄铁矿 S 同位素组成为 -16.2% 到 $+8.4\%$, 平均值为 $(0.3 \pm 7.5)\%$; 有机 S 同位素组成为 -10.7% 到 $+10.8\%$, 平均值为 $(3.4 \pm 7.1)\%$ 。 $\delta^{13}C_{carb}$ 和 $\delta^{13}C_{org}$ 在郭家坝组底部的起伏变化。郭家坝组的中上部 C 同位素组成变化平稳, 海水 C 同位素组成重化 (即 $\delta^{13}C$ 升高), 与该组下部的 C 同位素组成特征差异很大。碳酸盐 C 同位素组成为 0.6% 到 -1.4% , 平均值为 $(-0.2 \pm 0.7)\%$, 有机碳同位素组成为 -32.1% 到 -30.1% , 平均值为 $(-31.4 \pm 1.3)\%$, 呈现稳定的正漂移; TOC 为 0.2% 到 1.6% , 平均值为 0.8% 。样品的黄铁矿平均含量是 0.5% (Goldberg 等, 2003a, 2003b); 有机硫平均含量为 0.07% ; 黄铁矿 S 同位素组成为 $+23\%$ 到 $+12.3\%$, 平均值为 $(17.8 \pm 3)\%$; 有机硫同位素组成为 $+22.1\%$ 到 $+11.7\%$, 平均值为 $(16.9 \pm 1.8)\%$ 。

4 有机质和碳酸盐样品的可靠性评价

4.1 有机质保存

沉积期后热扰动作用极其重要, 可能导致生物标志物信息的流失, 同时也致使有机质 ^{13}C 的损耗 (Strauss 等, 1992; Samuelsson 等, 1999; Kaufman 等, 1995)。因此, 评价沉积有机质保存的可靠性, 对有机质 C 同位素组成的解释至关重要。

H/C 原子比值是评价干酪根保存状态的重要因素。研究表明, H/C 和 $\delta^{13}C_{org}$ 有直接的联系 (Strauss 等, 1992): H/C 值大于 0.2 的样品, $\delta^{13}C_{org}$ 受到后期作用的影响低于 3% 。干酪根样品受到热扰动作用影响越大 (H/C 小于 0.2), 样品越富集 ^{13}C 。同时结合野外采集新鲜样品、室内分选和分析来排除可能已经变化的样品。

沙滩剖面 H/C 原子比为 $0.3 \sim 1.1$ 。样品的 H/C 比值高于 0.2 , 有机质样品干酪根的保存完好。

4.2 碳酸盐岩样品可靠性评价

虽然碳酸盐 C 同位素组成能反映海水的化学组成, 但受成岩作用影响的碳酸盐将失去最初沉积信息。所以进行碳酸盐样品的可靠性评价尤为重要。在海相沉积过程中, 灰岩受到成岩作用影响, 当 Mn 被吸附和结合时, Sr 被排出, Mn 含量升高, Sr 含量降低 (Veizer, 1983; Marshall, 1992), 因此 Mn/Sr 比被认为是一个好的评价热扰动作用程度的指示剂。减少的 C、O 同位素组成反映在碳酸盐沉积过程中 CO_2 起源于有机质氧化的结果; Mn/Sr 减少则是流体水改造的结果。为了量化碳酸盐成岩后期作用的程度, 一定的评价指标是必要的。Kaufman 等 (1995) 提出 Mn/Sr 小于 10 、 $\delta^{18}O_{carb}$ 大于 -10% 和 $\Delta\delta$ 值为 $(30 \pm 2)\%$ [TOC 为 $1 g$ 样品中含大于 $1 mg$ 的碳, $\Delta\delta$ 值可以达到 $(33 \pm 2)\%$], 表明样品未受成岩后期作用和热扰动作用的影响, 而保留了最初海水 $\delta^{13}C_{carb}$ 的值。可以发现, 绝大多数样品满足以上评价原则, $\delta^{13}C_{carb}$ 较好地反映最初海水的同位素组成。

沙滩剖面 $\delta^{18}O_{carb}$ 值主要为 -13.5% 到 -4.4% ; $\Delta\delta$ 为 30.3% 到 34.6% 。样品 Mn/Sr 比值大多小于 5 。灯影组的白云岩 $\delta^{18}O_{carb}$ 多为 -5% 到 -10% , 样品 Mn/Sr 比值大多小于 5 , 样品保存较好; 郭家坝组黑色页岩 Mn/Sr 比值小于 5 , 但部分样品的 $\delta^{18}O_{carb}$ 小于 -10% 。因此大多数样品保存较好。

5 讨论和环境初探

5.1 分析和探讨

在界线剖面的震旦系灯影组顶部碳酸盐 C 同位素组成为 0.6‰~2.3‰ (图 2) ;同时有机质 C 同位素组成由 -35.6‰~-34‰,有机碳埋藏速率缓慢降低 ;在震旦-寒武交界期,碳同位素组成负漂移出现在前寒武/寒武界线附近,反映了碳短期的变化,可能指示了震旦纪末环境变化导致了生物的绝灭^① (雷家锦等,2000 ;Shen 等,2000a,2000b)。同时碳酸盐中含有的硅质成分有机质含量很低,这与盆地相区的硅质岩富有机质相反 (Lambert 等,1987 ;Magaritz,1989 ;Wang 等,1994),可能由于晚震旦世过渡区热水作用减弱,古海水营养组成的急剧减少,或是下降的海平面导致大陆和大陆架有机质氧化增加 (Lambert 等,1987 ;Magaritz,1989 ;Wang 等,1994),使海水相对富集,¹²C 含量上升,海水碳同位素组成下降。

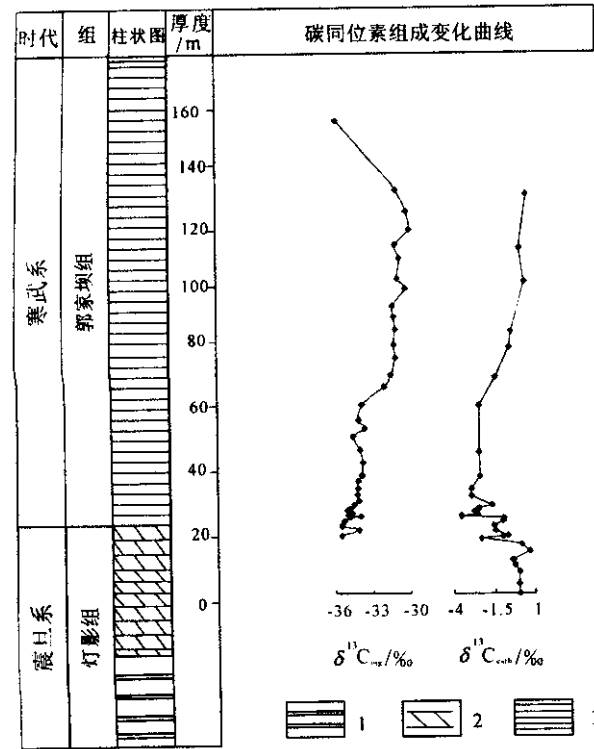


图 2 扬子地台北缘四川南江震旦-寒武界线剖面岩性和 C 同位素组成曲线

Fig. 2 Profiles of lithology and carbon isotopic composition at the Nanjiang section, Sichuan province on the northern Yagtzte platfrom during late Neoproterozoic and early Cambrian interval
1-硅质岩 2-白云岩 3-黑色页岩
1-chert 2-dolomite 3-black shale

在缺氧条件下一般形成高的有机质保存和黄铁矿的形成,有机碳含量和黄铁矿的绝对含量能在一定程度上反映缺氧环境^①。黑色岩系的形成受 2 个重要条件的限制:①生物生产率要高,能够向海底提供充分的沉积有机质;②必须具备有利于沉积有机质保存、聚集与转化的条件。牛蹄塘组、郭家坝组的黑色页岩形成于海侵阶段海水相对较深的沉积条件,构成黑色岩系含矿序列。

下寒武统底部的黑色页岩分布层位稳定,可与全球大洋缺氧事件对比。在许多厌氧背景条件下,由于可利用铁的数量变化,黄铁矿的形成受到限制,但也会造成黄铁矿含量的一些变化,有机碳、无机碳、不同形态硫同位素可用来评价黑色页岩沉积条件^① (雷家锦等,2000 ;Shen 等,2000a,2000b),寒武系底部郭家坝组无机 C 同位素组成为 -3.5‰~0.6‰,出现短暂的负漂移,并达到最低负值 ;有机质的 C 同位素组成为 -30.1‰~-35.8‰,有机碳埋藏速率较高,量大,使沉积样品的有机碳含量较高。沙滩剖面黑色页岩 TOC 为 0.2%~4.9%,平均值为 2.5%,远远超过缺氧事件的黑色页岩 1% 的标准 ;黄铁矿含量较高 (平均值为 0.96%),富有机质和黄铁矿的黑色岩系揭示了大范围分层海体的存在,或者至少是区域大量孤立缺氧盆地的出现,海水滞流。说明在早寒武世早期海平面上升、缺氧事件发生。牛蹄塘组-郭家坝组底部有机碳、无机碳、有机硫、黄铁矿硫同位素组成值相对较低 (图 3),变化范围小,这在 STDEV 值 (图 3) 上反映明显,说明在早寒武世早期处于一段特殊的时期。δ¹³C_{carb}、δ¹³C_{org}、δ³⁴S_{org}、δ³⁴S_{carb} 在牛蹄塘组-郭家坝组底部的变化 (图 3),反映了环境条件的不稳定和迅速变化 ;在郭家坝组的中上部 C、S 同位素组成重化、趋于稳定,有机碳埋藏量增大,这可能由于海平面上升和全球 CO₂ 含量下降,导致海水氧化带范围扩大、寒武系生物产量大幅度增加,稳定的环境条件使海水 C 同位素组成重化。

从不同阶段的碳同位素组成分布图中可以发现 (图 2,图 3),有机碳同位素组成平均值有从灯影组→郭家坝组逐渐降低趋势,指示了牛蹄塘组黑色页岩在缺氧环境下有机质碳同位素组成更轻。

晚震旦世-早寒武世在扬子区并不存在封闭,滞流盆地,同时该期黑色岩系在印度、巴基斯坦北部、伊朗、法国、英格兰、威尔士、阿曼、俄罗斯、蒙古、澳

① 吴朝东等,2004. 扬子地台北缘震旦-寒武界线剖面岩性和 C 同位素组成研究 (中国科学院博士论文)。

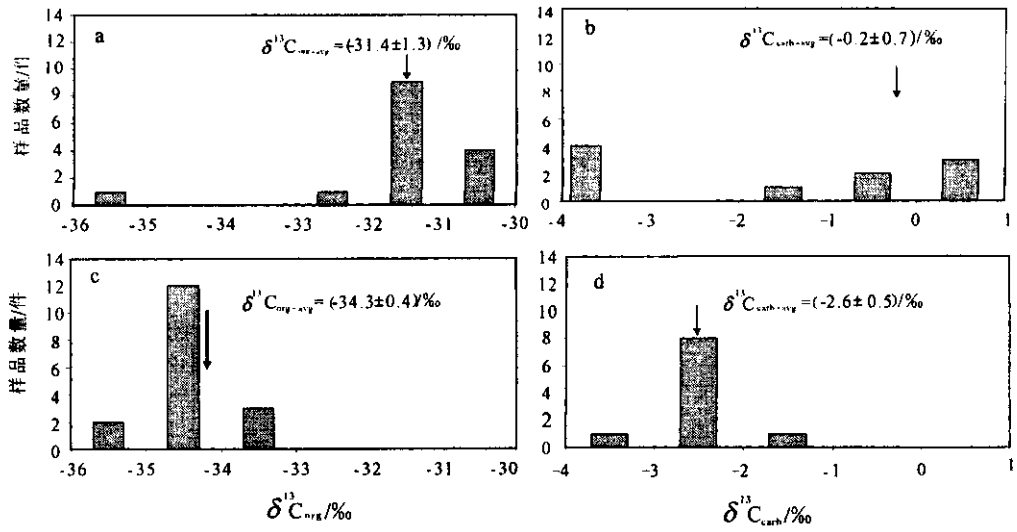


图 3 下寒武统郭家坝组 C 同位素组成比较

Fig. 3 Carbon isotope composition distribution of the study in the Guojiaba Fm.

a,b-郭家坝组上部 ;c,d-郭家坝组下部

a,b-upper of Guojiaba Fm. ;c,d-lower of Guojiaba Fm.

大利亚、加拿大等范围内有广泛分布,具有全球性^① (Fan 等,1984 ;Brasier,1990 ;陈锦石等,1995 ;Li 等,1999 ;李任伟等,1999 ;Veizer 等,1999 ;Hayes 等,1999 ;吴朝东,2000 ;雷家锦等,2000 ;Steiner 等,2001 ;Mao 等,2002)特征。在中国,早寒武世早期的黑色岩系广泛分布于扬子地台、新疆各地等,在扬子地台区其分布近百万平方公里,所以,黑色页岩可作为区域和全球对比的重要标志,反映了缺氧的、滞流的、弱的水动力条件。

5.2 环境初探

自晚震旦世晚期以来,整个南方处于地壳拉张裂陷作用之后,海平面迅速上升,江南陆坡海盆形成水体较深的非补偿沉积环境。由于受古构造控制作用的影响,地形分割渐趋明显,形成水下隆起和凹地^② (吴朝东,2000) 受到多个沉积板块边缘抬升构造控制,得到上升氧化海水补充的滞留海水,为多金属硫化物层、磷矿、重晶石和石煤(可燃的黑色页岩)提供了环境和条件(Mao 等,2002) 在海底,硫化物被硫酸盐还原细菌还原、有机质被氧化,以致本来还原的环境变得更为缺氧。硫和碳同位素组成较负,黄铁矿和有机质含量较高。缺氧环境是全球性的,有利于有机质的保存,形成了现在丰富的黑色页岩。在牛蹄塘组中晚期,硫和碳同位素组成重化、有机质和黄铁矿含量降低,指示全球变暖、海平面上升,寒武纪初期植物的繁衍和带壳动物的爆发,在大气圈

和水圈中 CO_2 含量降低(CO_2 被转化为碳酸盐沉积和碳被固化)、氧含量上升。

致谢 在此谨向中德合作项目:”From Snow-ball Earth to the Cambrian Bio-radiation :A Multidisciplinary Analysis of the Yangtze Platform, China”的所有成员表示诚挚的敬意和衷心的感谢!对给予基金(Nr. 40072047、40303001, Nr. Str 281/16-1)支持的中国国家基金委(NSFC)和德国基金委(DFG)表示感谢。

参 考 文 献

陈锦石,闻传芬,钟华,刘培伦等. 1995. 古生代海洋碳同位素演化. 地质科学,30(4) :338~347.

何原相,杨遵和. 1986. 四川南江早寒武世早期的腔肠动物化石. 中国地质科学院成都地质矿产研究所刊,(7) :31~48.

雷家锦,李任伟,Tobschall H J 等. 2000. 扬子地台南缘早寒武世黑色岩系中形态硫特征及成因意义. 中国科学(D),30(6) :592~601.

李任伟,卢家烂,张淑坤等. 1999. 震旦纪和早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成. 中国科学,29(4) :351~357.

钱逸. 1999. 中国小壳化石分类学与生物地层学. 北京:科学出版社,1~247.

吴朝东. 2000. 湘西震旦-寒武纪交替时期古海洋环境的恢复. 地学前缘,7(增刊) :45~57.

杨遵和,何廷贵. 1984. 四川南江地区下寒武统梅树村阶小壳化石新属种. 地层古生物论文集,北京:地质出版社,13 :35~47.

杨遵和,何原相,邓守和. 1983. 四川南江地区震旦系-寒武系界线及小壳化石群. 中国地质科学院成都地质矿产研究所刊,(4) :91

① 吴朝东. 1997. 湘西上震旦统-下寒武统黑色岩系及含矿性研究(中国科学院博士论文).

~110.

郑淑蕙, 郑斯成, 莫志超. 1986. 稳定同位素地球化学分析. 北京: 北京大学出版社, 1~486.

References

- Brasier M D, Magaritz M, Corfeld R et al. 1990. The carbon-and oxygen-isotopic record of the Precambrian-Cambrian boundary interval in China and Iran and their correlation. *Geo. Mag.*, 127: 319~332.
- Chen Jinshi, Wen Chuanfen, Zhong Hua et al. 1995. Carbon isotope variation of Paleozoic marine carbonate sequences. *Scientia Geologica Sinica*, 30(4): 338~347 (in Chinese with English abstract).
- Fan Delian, Yang Ruiying, Huang Zhongxiang. 1984. The Lower Cambrian black shale series and iridium anomaly in South China, In *Developments in Geosciences, Contribution to 27th IGC.*, Beijing: Moscow, Sciences Press, 215~224.
- Goldberg T, Strauss H. 2003a. The late Neoproterozoic to early Cambrian sulfur cycle: an isotopic investigation of sedimentary rocks from Yangtze platform. *Geophysical Research Abstracts*, 5: EAE03-A-00319.
- Goldberg T, Strauss H, Guo Q et al. 2003b. The late Neoproterozoic to early Cambrian sulphur cycle: an isotopic investigation of sedimentary rocks from the Yangtze platform. *Progress in Natural Science*, 13(12): 946~950.
- Hayes J M, Strauss H, Kaufman A J. 1999. The abundance of ^{13}C in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800 Ma. *Chem. Geol.*, 161: 103~125.
- He Yuanxiang Yang Xianhe. 1986. Coelenterate fossils of the Early Cambrian from Nanjiang, Sichuan province, China. Chengdu Institute of Geological Mineral Deposits Publication, CAGS, 7: 31~48 (in Chinese).
- Kaufman A J et al. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Res.*, 73: 27~49.
- Lambert I B, Walter M R, Zhang W et al. 1987. Paleoenvironment and carbon isotope stratigraphy of Upper Proterozoic carbonates of the Yangtze platform. *Nature*, 325: 140~142.
- Lei Jiajin, Li Renwei, Tobschall H J et al. 2000. The characteristics of the sulfur species and their implications in lower Cambrian black shales from southern margin of Yangtze platform. *Science in China (D)*, 30(6): 392~601 (in Chinese with English abstract).
- Li R, Chen J, Zhang et al. 1999. Spatial and temporal variations in carbon and sulfur isotopic compositions of Sinian sedimentary rocks in the Yangtze platform, South China. *Precambrian Res.*, 97: 59~75.
- Li Renwei, Lu Jialan, Zhang Shukun et al. 1999. Organic carbon isotopes of the Sinian and Early Cambrian black shales on Yangtze platform, China. *Science in China (Series D)*, 42(6): 351~358 (in Chinese with English abstract).
- Magaritz M. 1989. ^{13}C minima follow extinction events: A clue to faunal extinction. *Geology*, 17: 337~340.
- Mao J W, Lehmann B, Du A D et al. 2002. Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geologic significance. *Economic Geology*, 97: 1051~1061.
- Marshall J D. 1992. Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geol. Mag.*, 129: 143~160.
- McCrea J M. 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18: 849~857.
- Qian Yi. 1999. Taxonomy and biostratigraphy of small shelly fossils in China. Beijing: Science Press, 1~247 (in Chinese).
- Samuelsson J, Strauss H. 1999. Stable isotope geochemistry and paleobiology of the upper Visingsö Group (early Neoproterozoic), southern Sweden. *Geol. Mag.*, 136: 63~73.
- Shen Y, Schidlowski M. 2000a. New C isotope stratigraphy from southwest China: implications for the placement of the Precambrian-Cambrian boundary on the Yangtze platform and global correlations. *Geology*, 28: 623~626.
- Shen Y, Schidlowski M, Chu X. 2000b. Biogeochemical approach to understanding phosphogenic events of the terminal Proterozoic to Cambrian. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleocol.*, 158: 99~108.
- Steiner M, Wallis E, Erdtmann B D et al. 2001. Submarine-hydrothermal exhalative ore layers in black shales from South China and associated fossils-insights into a Lower Cambrian facies and bio-evolution. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleocol.*, 169: 165~191.
- Strauss H et al. 1992. Proterozoic organic carbon-its preservation and isotopic record. In: Schidlowski M, Golubic S, Kimberley M M, McKirdy D M, Trudinger P A. (Eds.) *Early Organic Evolution: Implications for Mineral and Energy Resources*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag: 203~211.
- Veizer J. 1983. Chemical diagenesis of carbonates: theory and application. In: Arthur M. A. et al. (Eds.) *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*. S. E. P. M. Short Course, 10: 1~100.
- Veizer J, Ala D, Azmy K et al. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, 161: 59~88.
- Wang Darui, Bai Yulei, Jia Chengzao. 1994. Carbon isotope anomaly and significance at the Boundary between Precambrian and Cambrian on Keping section, Xinjiang, Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 39(15): 1285~1289.
- Wu Chaodong. 2000. Recovery of the Paleoocean environment in the altering epoch of late Sinian and early Cambrian in the west Hunan. *Earth Science Frontiers*, 7(Sup.): 45~57 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xianhe, He Yuanxiang, Deng Shouhe. 1983. Precambrian-Cambrian boundary and small shelly fossils fauna from Nanjiang, Sichuan province, China. Chengdu Institute of Geological Mineral Deposits Publication, CAGS, 4: 91~110 (in Chinese).
- Yang Xianhe, He Tinggui. 1984. New small shelly fossils genera of the Lower Cambrian from Nanjiang, Sichuan province, China. *Strata and Palaeontology Papers Assemblage*, 13: 35~47 (in Chinese).
- Zhen Shuhui, Zhen Sicheng, Mo Zhichao. 1986. Geochemistry analysis of stable isotopes. Beijing: Peking University Press, 1~486 (in Chinese).