doi:10.3799/dqkx.2012.00

扬子克拉通峡东地区新元古代一寒武纪黑色岩系 Os 同位素地球化学特征及其地质意义

王 浩^{1,2},凌文黎^{1,3*},段瑞春⁴,白 晓^{1,2,3},陈子万^{1,2,3},秦雅东^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

2. 中国地质大学研究生院,湖北武汉 430074

3. 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

4. 武汉地质矿产研究所,湖北武汉 430205

摘要:报道了扬子克拉通峡东地区新元古代至寒武纪含碳黑色泥质岩的 Re-Os 同位素和微量元素地球化学组成特征,并对地 层沉积环境的演化性质及其地质意义进行了讨论.研究表明:(1)峡东地区新元古代晚期一寒武纪早期细粒碎屑沉积岩 Os 同 位素初始比值呈规律变化,且具高 Os 同位素初始比值的层位与前人研究中发现的 C 同位素负漂移地层相对应;(2)南沱组冰 碛岩具高放射成因 Os 同位素组成特征,而其上覆盖帽碳酸盐岩为低放射成因 Os 同位素比值,向上地层 Os 同位素初始比值 表现为局部波动、总体增高的演化趋势;(3)微量元素 U/Th 比值与 *o*U 值指示莲沱组砂岩与南沱组冰碛岩具氧化环境的特 征,而陡山沱组、灯影组以及水井沱组底部黑色泥质岩则形成于相对还原环境;(4)Y/Ho 比值和 *o*Ce 值的负相关性特征指示 部分地层沉积过程中有海底热液物质参与,应为导致剖面上部分层位出现低放射性成因 Os 同位素组成的重要原因之一.高 Os 同位素比值和深海的脉冲式演化以及古生物群的产出之间很好的对应关系为探讨大陆风化与大气和海洋中氧气含量增加 的联系提供了新的地球化学证据.南沱组冰碛岩 Os 同位素以及微量元素特征暗示其并非形成于完全冰封的地球表面环境, 而是存在较强的大陆岩石风化作用.

关键词:峡东地层剖面;新元古代晚期;寒武纪;黑色岩系;Re-Os 同位素;环境演化. 中图分类号: P595 文章编号:1000-2383(2012)03-0000-12 收稿日期:2011-00-00

Os Isotopic Geochemistry of Neoproterozoic-Cambrian Black Shales in Eastern Three Gorges of Yangtze Craton and its Geological Significance

WANG Hao^{1,2}, LING Wen-li^{1,3*}, DUAN Rui-chun⁴, BAI Xiao^{1,2,3}, CHEN Zi-wan^{1,2,3}, QIN Ya-dong^{1,2}

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

4. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, China

Abstract: This paper presents an integrated Re-Os isotope and trace element investigation of the Neoproterozoic to Cambrian organic-bearing black mudstones in the eastern Three Gorges, the Yangtze Craton. Their sedimentary environmental evolution and geological significance are then discussed. It shows that (1) initial Os isotopic ratios of fine-grained sedimentary rocks from the strata display regular variations along the stratigraphic column. Of the strata, layers with negative $\delta^{13}C$ excursions are coupled with high initial Os isotopic ratios; (2) the Nantuo tillites display higher initial Os isotopic ratio than that of the overlying cap carbonate, while the overlying successive strata show an increase trend with several fluctuations; (3) geochemical features of U/Th ratio and δU value for the samples suggest that the Liantuo sandstones and Nantuo tillites were formed within oxidation environments, whereas black mudstones of the Doushantuo, Dengying and Shuijingtuo Formations were formed within reductive environments; (3) negative correlation between Y/Ho ratio and δC value for the black mudstones is likely indicative of

基金项目:教育部大学生创新性实验计划、国家自然科学基金委员会(Nos. 40673025,40873017);教育部长江三峡库区地质灾害研究中心研究项目(No. TGRC201027)资助.

作者简介:王浩(1986一),男,博士研究生,地球化学专业.E-mail. wanghaocug014051@163.com. * 通讯作者:凌文黎,E-mail. wlling@cug.edu.cn

variable involvement of seafloor hydrothermal activity during some sediments deposited, which likely accounts for their low Os isotopic ratios. The correlation between high initial Os isotopic ratios and pulsed oxidation of deep ocean as well as appearance of metazoan in late Neoproterozoic-early Cambrian afford a new clue for the linking of continental weathering extent with oxygen content in atmosphere and ocean. These Os isotopic and trace element features infer that the Nantuo tillites were formed in an environment where the earth's surface had not been fully covered by ice layer, and continent-derived inputs by intensive weathering played an important role.

Key words: strata in eastern Three Gorges; Late Neoproterozoic; Cambrian, black shales; Re-Os isotope; environmental evolution.

由于发生了 Rodinia 超大陆裂解、"雪球地球" 和埃迪卡拉动物群的出现等重大地质事件,地球于 新元古代的演化过程受到了地质学家们的格外关注 (Hoffman, 1991; Hoffman *et al.*, 1998; Knoll *et al.*, 2006).我国扬子克拉通是研究新元古代地 质的重要地区之一(Ling *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Yin *et al.*, 2007; 谢士稳等,2009), 而峡东地区出露了华南新元古代晚期至古生代的典 型剖面,并积累了相应的精细地层年代学成果 (Condon *et al.*, 2005).新元古代晚期一寒武纪早 期地层中发育的黑色岩系被认为是地球深海还原性 即将结束时的标志(叶杰和范德廉,2000; Anbar and Knoll, 2002; McFadden *et al.*, 2008),开展对 这一时期古海洋环境的研究,对认识生命演化与地 质环境的关系具有重要意义.

峡东地区新元古代一古生代早期地层中普遍发 育含硫化物和高有机碳(\geq 1%)的暗色硅质岩、碳酸 盐岩、泥质岩(含层状凝灰岩)等黑色岩系,代表了缺 氧环境的沉积产物(叶杰和范德廉,2000).本地区已 积累了有关新元古代一寒武纪地层的大量研究成 果,尤以古生物和 C、S 稳定同位素及 Sr 放射成因 同位素等研究较为突出,从各自领域探讨了生物演 化与环境变化的关系(Yang *et al.*, 1999; Condon *et al.*, 2005; Ling *et al.*, 2007; Yin *et al.*, 2007; McFadden *et al.*, 2008, 2009).随着分析技术的进 步,根据黑色页岩 Re-Os 同位素体系对重要地质时 期环境演化及其对生物影响的研究受到了越来越多 的重视(Koeberl *et al.*, 2004; 杨兢红等,2005; Jiang *et al.*, 2007; Turgeon and Creaser, 2008).

黑色页岩中 Re 和铂族元素主要赋存于硫化物 矿物和有机物中,而在陆源碎屑中的含量极低,因此 其 Os 同位素初始值可代表当时海水的 Os 同位素 组成(Cohen *et al.*, 1999; Selby and Creaser, 2003, 2005; 杨 兢 红 等,2005; Kendall *et al.*, 2006). 与多数稳定或放射成因同位素相似,海水中 Os 的质量平衡取决于陆源物质、洋底蚀变物质和地

外物质(宇宙尘等)的相对贡献.在地幔岩石部分熔 融作用中,Re 表现为中等不相容元素,Os 表现为相 容元素,因此来自古老地壳岩石的陆源物质具较高 的 Os 同位素比值, 而宇宙成因或蚀变洋壳来源的 物质以低 Os 同位素比值为特征(Cohen, 2004). 在 地质历史时期,大陆岩石的强风化作用与大气中氧 气量的阶梯式增加有关(Campbell and Allen, 2008),并在同期海水的同位素组成上得到反映 (Sharma et al., 1997; Oxburgh, 1998; Singh et al., 1999; Veizer et al., 1999; Jiang et al., 2007). Os 在海水中的平均滞留时间仅为~10⁴a (Sharma et al., 1997; Oxburgh, 1998),远小于 Sr 在海水中百万年尺度的滞留时间(Palmer and Edmond, 1989),因此 Os 同位素能更灵敏地反映大气 和海洋环境的变化(Cohen, 2004;杨兢红等, 2005). 本文报道了峡东地区新元古代晚期-寒武纪 早期黑色页岩的 Re-Os 同位素和微量元素组成,并 探讨了地层沉积环境的改变与重大生物演化事件的 关系.

1 区域地质背景

湖北省秭归县泗溪景区出露了峡东地区典型的 新元古代晚期-寒武纪地层(图1),由底向上分别 为南华纪莲沱组、南沱组,震旦纪陡山沱组、灯影组 和寒武纪水井沱组、石牌组、天河板组、石龙洞组、覃 家庙组等.莲沱组(~80 m)底部为紫红色石英砾岩, 不整合覆盖在黄陵岩基或崆岭群变质岩之上,主体 为紫红色砂岩夹粉砂质泥岩,顶部可见晶屑玻屑凝 灰岩;南沱组(~330 m)为黄绿色含砾冰碛泥岩;陡 山沱组(~130 m)由上至下分别为灰色粉晶白云岩 夹黑色页片状炭质泥岩(含透镜状燧石结核)、含磷 泥晶白云岩夹黑色页岩、灰-深灰色泥质泥晶白云 岩和粉晶白云岩夹含燧石结核黑色页岩,底部为含 砾砂屑泥晶灰岩、泥粉晶灰岩夹页片状白云质泥岩, 即盖帽碳酸盐岩;灯影组(~200 m)为白云岩、灰岩



图 1 峡东地区新元古代一寒武纪地层区域分布简图及剖 面位置(据张永清等,2008)

Fig. 1 Geological sketch map of the eastern Three Gorges showing sampling profile location

夹炭质页岩组合;水井沱组(~100 m)下段为黑色炭 质泥岩、粉晶灰岩夹含磷层或磷质结核等,中段为灰 一深灰色薄层状粉晶泥质灰岩夹薄层泥岩、粉砂质 细晶灰岩,上段为灰一深灰色薄一中层状泥粉晶灰 岩、含亮晶泥晶球粒灰岩等(张永清等,2008).

2 样品分析方法与测试结果

本次研究样品的采样层位示于图 2. 样品加工 采用刚玉中碎机和 MD7-2L 球磨玛瑙内胆细碎机 完成,碎样粒度 200 目. 微量元素和 Re-Os 同位素 分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源 国家重点实验室完成.

Re-Os 同位素样品分析采用反王水+Carius 管 溶样法(Shirey and Walker, 1995;杨红梅, 2009): (1)称取约1g样品与3mL高纯浓盐酸以及适量 Os 稀释剂加入 Carius 管,在一90℃条件下冷冻.然 后加入适量 Re 稀释剂与6mL高纯浓硝酸并通过 煤气+氧气火焰焊封管口;(2)焊好的 Carius 管放 入烘箱,在230℃条件下加热溶样24h后取出;(3) 将 Carius 管放入超声波中加热振荡 30min 后,再次



图 2 研究区新元古代-寒武纪地层采样位置示意(据 Zhu, 2004)

Fig. 2 Stratigraphic column of the Neoproterozoic-Cambrian strata for the eastern Three Gorges and sampling positions

放入烘箱于 230 ℃下加热 24 h;(4)冷却后经冷冻开 管,加入3mLCCl4 溶液进行萃取,将溶液转入离心 管并再次萃取一次后高速离心 3 min;(5)将 CCl4 溶 液相转移至4mLHBr溶液中,在85℃电热板上加 热 2~3 h 进行反萃取;(6)移除 CCl₄ 溶液相,将 HBr 溶液在电热板上蒸至 40 µL 后转移至锥底瓶盖 中央,加入 20~30 µLCrO3-H2SO4 氧化剂溶液,用 10 µL浓 HBr 溶液作为吸收液进行微蒸馏 3 h 以提 取纯化 Os,然后把吸收液蒸干后备测;(7)将离心管 中反王水相转移到 15 mLTeflon 瓶中,蒸至近干,加 5 mL 0.4N HNO3,放到电热板上过夜;(8)所得溶 液经离心后取上层清液,用离子交换柱分离 Re. 交 换树脂为 AG-1X8 阴离子树脂,依次加入 3 mL 0.8N HNO3、5 mL 8N HNO3 (2 次)和 3 mL 0.8N HNO3淋洗后,载入样液,依次用 6 mL 和 3 mL 0. 8N HNO3 淋洗交换柱,最后用

4 mL 8N HNO₃解析 Re; 蒸干后加 3 mL 0.5% HNO₃溶解以备 ICP-MS 测试.

实验所用试剂均为优级纯试剂并经过亚沸蒸馏 对瓶两次纯化,详细的分析流程参见文献(杨红梅, 2009). 样品 Os 同位素比值用热电离同位素质谱仪 (Triton TI)在负离子状态下测定,并采用等概率模 型对数据进行脱氧校正处理(杨红梅,2009).国际标 样 DTM 的 12 次分析结果的平均值为 0.173 92± 15(2o),与推荐值 0.173 9 一致(图 3). 实验室内部 标样 XG26 的187 Os/188 Os 三次分析结果均与文献报 道值在误差范围内一致(表1)(Yuan et al., 2007). 为选择性溶解有机物和硫化物,防止陆源碎屑矿物 中Os的混入,前人曾报道了黑色页岩 Re-Os 同位 素分析的 CrO₃-H₂SO₄ 混合液溶样方法(Selby and Creaser, 2003). 本次工作对样品 ZG08-13 进行了 CrO3-H2SO4 溶液溶样方法实验,其187 Os/188 Os 测 定结果为 2.606 8±3,与反王水溶样法所得结果一 致(表1).该结果说明对于黑色页岩,两种不同的溶 样方法对样品 Os 同位素分析结果的影响不明显, 样品中 Re、Os 主要以硫化物和有机物为寄主物质. 由于 CrO3-H2SO4 溶液会络合 AG-1X8 阴离子树脂 使其对 Re 的分离能力显著降低,会影响 Re 的分析 结果:再者,对CrO₃-H₂SO₄溶液的还原需要耗费大 量的亚硫酸试剂,导致流程的 Re 本底值增加;此 外,确定 CrO3-H2SO4 溶液与亚硫酸试剂的还原反 应是否完全,通常缺乏有效的判别标志.结合本次对 比实验,表明反王水溶样法与 CrO₃-H₂SO₄ 溶液溶 样法的结果在误差范围内并无明显差异(Selby and Creaser, 2003).

Re 同位素分析用电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent 7500a)完成,用普通 Re 标准溶液对样品 Re 同位素分馏进行了校正.样品 Re 和 Os 含量均 采用同位素稀释法测定,全流程空白 Re<3 pg,Os <2 pg.

微量元素分析样品采用 HNO₃ + HF 混合酸和 特氟隆溶样弹溶解(190℃,48 h),溶好样液经蒸干 后加入 3 mL 30% HNO₃,在溶样弹中再次溶解 (190℃,24 h).溶解好的样液用 2% HNO₃ 在聚乙 烯瓶中定容至约 100 mL,用电感耦合等离子体质谱 仪(Agilent 7500a)进行测试.对国际标样 BCR-2、 AGV-2、BHVO-2和 GSR-3 监测结果表明,元素含 量相对误差优于 5%~10%(Liu *et al.*, 2008).样 品的 Re-Os 同位素和微量元素组成分别列于表 2 和表 3.



图 3 Os 同位素标样 DTM 的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值测定结果

Fig. 3 Plot of measured ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os ratios for DTM standard

表 1 实验室标样 XG26 与 ZG08-13 的¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os 比值分析 结果及其与文献值对比

Table 1 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os ratios of the in-house standard XG26 and sample ZG08-13 and comparison with literature

序号	样号	岩性	¹⁸⁷ Os/188Os 比伯	直 文献来源
1	XG26	橄榄岩	0.11582 ± 19	Yuan et al., 2007
2	XG26	橄榄岩	0.11484 ± 27	同上
3	XG26	橄榄岩	0.11593 ± 36	本文
4	XG26	橄榄岩	0.11589 ± 8	本文
5	XG26	橄榄岩	0.114 66 \pm 12	本文
6	ZG08-13	碳质页岩	2.6068 \pm 3	本文(CrO3-H2SO4 溶液溶样)
7	ZG08-13	碳质页岩	2.6061 \pm 12	本文(反王水溶液溶样)

3 Re-Os 同位素地球化学特征

区内南华系、震旦系和寒武系底部细碎屑岩 Re 含量范围为 0.1~21.0 ng/g,均值为 5.5 ng/g,高于 大陆地壳丰度的 2 ng/g(Sun *et al.*, 2003);Os 含量 为 0.01~0.72 ng/g,均值为 0.22 ng/g,同样高于大 陆地壳丰度(0.05 ng/g)(Esser and Turekian, 1993).灯影组碳质页岩(ZG08-13)的 Re 和 Os 含量 最高,而泥质灰岩(ZG08-12 和 ZG08-24)、冰碛岩 (ZG08-25)和莲沱组细碎屑沉积岩的 Re 和 Os 含量 较低,可能与其低有机质含量有关.样品的 Re/Os 比值变化范围为 7.2~36.8,均值 22.7,且 Re-Os 含 量具明显的正相关性(图 4).

莲沱组粉砂质泥岩的 Re(0.10 ng/g)、Os (0.011 ng/g)含量和 Os 同位素初始比值(0.31)均较低;类似地,南沱组冰碛岩的 Re(0.09 ng/g)和 Os (0.011 ng/g)含量也较低,但 Os 同位素初始比值较高(0.77);相反,陡山沱组样品(除泥质灰岩样品ZG08-24 外)的 Re(2.57~12.46 ng/g)和 Os(0.085~

表 3 峡东泗溪剖面新元古代一寒武纪黑色岩系微量元素组成(µg/g)

Table 3 Trace element compositions of the Neoproterozoic-Cambrian black shales from the Sixi profile of the eastern Three Gorges

样号	ZG08-8	ZG08-9-2	ZG08-12	ZG08-13	ZG08-14-1	ZG08-14-2	ZG08-14-3	ZG08-14-4
层位	水井沱组	水井沱组	灯影组	灯影组	陡山沱组	陡山沱组	陡山沱组	陡山沱组
岩性	黑色页岩	里色页岩	泥质灰岩	碳质页岩	里色页岩	里色页岩	沥青	里色页岩
Ni	85.4	31.9	3.06	<u> </u>	50.6	16.3	42.9	23.0
Y	30.9	51.5	1.49	11.1	44.0	33.0	76.7	14.3
La	19.4	49.9	1.22	9.36	48.2	33.7	95.9	12.7
Ce	25.3	53.2	1.02	11.2	65.6	31.9	99.5	21.2
Pr	3.72	10.6	0.26	1.85	16.9	8.63	25.9	3.51
Nd	14.8	43.6	1.06	6.94	77.1	38.3	115	14.3
Sm	2.90	8.18	0.20	1.19	13.9	6.71	19.4	2.97
Eu	0.64	1.63	0.057	0.24	2.02	1.40	3.63	0.65
Gd	3.04	7.79	0.21	1.05	10.7	6.02	15.7	2.78
Tb	0.46	1.12	0.036	0.18	1.35	0.84	2.08	0.42
Dy	2.95	6.40	0.20	1.45	7.26	4.48	11.3	2.45
Ho	0.72	1.35	0.043	0.38	1.39	0.91	2.25	0.50
Er	2.09	3.59	0.10	1.34	3.67	2.35	5.79	1.34
1 m	0.29	0.51	0.014	0. ZZ	0.47	0.30	0.74	0.16
Yb	1.82	Z. 68	0.076	1.63	Z. 80	1.51	4.20 0.58	1.07
	0.27	0.41	0.010	0.26	0.43	0.21	0.00	0.10
	1.57	3.03	0.032	1.44	2.67	1.22	Z. 5Z	1.48
Dh	7 24	10.02	0.010	2.01	18.8	4.98	16 0	6.37
T b Th	7.34 3.65	8 33	0.03	2 50	7 54	4.90 2.39	7 24	2 47
II	35 5	5.87	1 73	4.52	10 1	1.85	7.32	1 00
Y/Ho	43 1	38 1	34 3	29 1	31.5	36 3	34 1	28 7
U/Th	9.72	0.71	23. 0	1, 81	1. 35	0.77	1.01	0.41
δU	34.3	3.10	1.70	3.68	7.63	1.05	4.90	0.18
ΣREE	78.4	191	4.50	37.3	252	137	402	64.2
(La/Yb) _N	7.54	13.2	11.3	4.06	12.2	15.8	16.1	8.44
ðСе	0.70	0.56	0.43	0.64	0.58	0.46	0.50	0.79
δEu	0.63	0.59	0.81	0.62	0.47	0.64	0.59	0.66
				01 01	0 a .	01 0 1	0.00	0.00
样号	ZG08-15	ZG08-23-1	ZG08-23-2	ZG08-23-3	ZG08-24	ZG08-25	ZG08-26	ZG08-29
样号 层位	ZG08-15 陡山沱组	ZG08-23-1 陡山沱组	ZG08-23-2 陡山沱组	ZG08-23-3 陡山沱组	ZG08-24 陡山沱组	ZG08-25 南沱组	ZG08-26 莲沱组	ZG08-29 莲沱组
样号 层位 岩性	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩	ZG08-25 南沱组 冰碛岩	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩
样号 层位 岩性 Ni	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4
样号 层位 岩性 Ni Y	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8
样号 层位 岩性 Ni Y La	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 105	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 0.52	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 2.4	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.5 5.07	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.07	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.80	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.05	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.91	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.400
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Cd	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.10	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 2.40	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 2.77	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27 0.055 0.27	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 2.01	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 0.21
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Th	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27 0.055 0.27 0.038	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dv	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8 44
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 168
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr d Sm Gd Tb Dy Ho Er	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr d Sm Gd Tb Dy Ho Er Tm	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 1.25 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr d Sm Ce Pr d Sm Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr d Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.013 0.033	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47 4.93	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47 4.93 0.73	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.033 0.014 0.52	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47 4.93 0.73 11.1	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1. 73 16. 2 35. 2 57. 9 6. 17 21. 9 3. 38 0. 81 3. 01 0. 44 2. 57 0. 53 1. 50 0. 24 1. 59 0. 35 12. 8	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014 0.52 0.096	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.73 11.1 8.83	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th U	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014 0.52 0.96 1.98	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.73 11.1 8.83 1.46	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1. 73 16. 2 35. 2 57. 9 6. 17 21. 9 3. 38 0. 81 3. 01 0. 44 2. 57 0. 53 1. 50 0. 24 1. 59 0. 35 12. 8 4. 04 0. 67	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th U Y/Ho Y	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82 33.0	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08 31.2	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30 32.0	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44 35.1	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.933 0.014 0.52 0.96 1.98 42.0	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.73 11.1 8.83 1.46 26.3	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04 0.67 30.6	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45 27.9
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th U Y/Ho U/Th	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82 33.0 0.90	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08 31.2 0.71	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30 32.0 0.78	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44 35.1 1.35	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.98 0.014 0.52 0.96 1.98 42.0 21.0	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.73 11.1 8.83 1.46 26.3 0.17	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04 0.67 30.6 0.17	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45 27.9 0.19
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Ce Pr Nd Sm Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th U Y/Ho U/Th & U	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82 33.0 0.90 1.77	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08 31.2 0.71 1.10	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30 32.0 0.78 1.32	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44 35.1 1.35 2.59	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014 0.52 0.096 1.98 42.0 21.0 1.95	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.73 11.1 8.83 1.46 26.3 0.17	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04 0.67 30.6 0.17 -0.68	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45 27.9 0.19 -1.13
样号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th U Y/Ho U/Th &U [®] SREE [©]	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82 33.0 0.90 1.77 87.9 0.62	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08 31.2 0.71 1.10 83.7 7.55 2.55 2.55 2.55 3.25 3.55	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30 32.0 0.78 1.32 84.4	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44 35.1 1.35 2.59 93.3 7.02	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014 0.52 0.096 1.98 42.0 21.0 1.95 5.11 0.26	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47 4.93 0.73 11.1 8.83 1.46 26.3 0.17 -1.49 146 26.2	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04 0.67 30.6 0.17 -0.68 136	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45 27.9 0.19 -1.13 241
様号 层位 岩性 Ni Y La Ce Pr Nd Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu Hf Ta Pb Th U Y/Ho U/Th 参U [®] ② (La/Yb) [№] [®]	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82 33.0 0.90 1.77 87.9 8.02	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08 31.2 0.71 1.10 83.7 7.85 0.70	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30 32.0 0.78 1.32 84.4 7.75	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44 35.1 1.35 2.59 93.3 7.82 0.74	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014 0.52 0.096 1.98 42.0 21.0 1.95 5.11 9.20 0.46	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47 4.93 0.73 11.1 8.83 1.46 26.3 0.17 -1.49 146 6.36 0.77	ZG08-26 莲沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04 0.67 30.6 0.17 -0.68 136 15.7 0.21	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45 27.9 0.19 -1.13 241 7.41
样号层位岩性NiYLaCePrNdSmEuGdTbDyHoErTmYbLuHfTaPbThUY/HoU/Th δU^{0} 定REE②(La/Yb)N [®] ふCe [@] シン.(®)	ZG08-15 陡山沱组 黑色页岩 36.3 25.2 18.1 27.5 4.61 19.3 4.01 0.97 4.19 0.63 3.66 0.77 2.04 0.29 1.60 0.24 2.03 0.41 6.73 3.13 2.82 33.0 0.90 1.77 87.9 8.02 0.74 0.60	ZG08-23-1 陡山沱组 黑色页岩 39.9 20.8 17.9 28.1 4.22 17.1 3.53 0.89 3.49 0.55 3.25 0.67 1.83 0.26 1.62 0.23 2.04 0.41 6.65 2.92 2.08 31.2 0.71 1.10 83.7 7.85 0.79 0.74	ZG08-23-2 陡山沱组 黑色页岩 40.5 22.3 17.3 27.2 4.44 18.5 3.84 0.95 3.77 0.56 3.27 0.70 1.89 0.26 1.58 0.22 1.92 0.40 5.92 2.94 2.30 32.0 0.78 1.32 84.4 7.75 0.77	ZG08-23-3 陡山沱组 黑色页岩 44.3 28.5 19.3 28.9 4.81 20.6 4.22 1.07 4.42 0.67 3.94 0.81 2.23 0.30 1.74 0.25 1.42 0.34 4.88 2.54 3.44 35.1 1.35 2.59 93.3 7.82 0.74 0.72	ZG08-24 陡山沱组 泥质灰岩 3.08 1.90 1.30 1.13 0.27 0.055 0.27 0.055 0.27 0.038 0.22 0.045 0.13 0.017 0.10 0.013 0.033 0.014 0.52 0.96 1.98 42.0 21.0 1.95 5.11 9.20 0.46	ZG08-25 南沱组 冰碛岩 21.4 29.7 28.4 56.2 7.16 27.5 5.87 1.14 5.46 0.89 5.45 1.13 3.20 0.49 3.16 0.47 4.93 0.73 11.1 8.83 1.46 26.3 0.17 1.49 146 6.36 0.97 0.58	ZG08-26 蓬沱组 长石石英砂岩 1.73 16.2 35.2 57.9 6.17 21.9 3.38 0.81 3.01 0.44 2.57 0.53 1.50 0.24 1.59 0.25 2.93 0.35 12.8 4.04 0.67 30.6 0.17 -0.68 136 15.7 0.91 0.72	ZG08-29 莲沱组 粉砂质泥岩 13.4 46.8 46.6 91.4 12.0 47.5 9.61 2.49 9.31 1.42 8.44 1.68 4.61 0.68 4.46 0.67 7.37 0.69 15.0 7.73 1.45 27.9 0.19 -1.13 241 7.41 0.95

注:①∂U=U-Th/3;②∑REE 表示为稀土元素总含量;③下标 N 代表球粒陨石标准化(Sun and McDonough, 1989);④∂Ce=2×Ce_N/(La_N+Pr_N);⑤∂Eu=2×Eu_N/(Sm_N+Gd_N).



图 4 秭归泗溪剖面新元古代晚期-寒武纪早期黑色岩系 Re-Os 含量关系

Fig. 4 Re-Os correlation plot for late Neoproterozoic-early Cambrian black shales from the eastern Three Gorges

0.475 ng/g)含量普遍较高,且 Os 同位素初始比值 沿剖面变化明显:由底部泥质灰岩的 0.39 逐步上升 至陡山沱组第二段中上部的 0.88,至陡山沱组顶部 时变化为 0.81;因岩性的差异,灯影组样品的 Re 和 Os 含量差别明显(表 2),其底部 Os 同位素初始比 值较高(0.89),向上下降为 0.69;寒武纪底部水井 沱组黑色页岩的 Re(2.49 ng/g)和 Os(0.344 ng/g) 含量较高,Os 同位素初始比值为0.80,与前人研究 结果相似(Jiang *et al.*, 2007).由底向上,剖面地层 Os 同位素初始比值总体上呈上升趋势,表现出与 Sr 同位素比值相似的特征(Yang *et al.*, 1999),但 Os 同位素的波动性特点更为明显(图 5).事实上, 类似现象在中生代一新生代海水组成的研究中已有 报道(Cohen, 2004).

4 讨论

4.1 Os 同位素组成对生物与环境演化的指示

海水的 Os 同位素组成为 3 种主要物源 Os 质 量平衡的结果,包括(1)由热液作用从年轻洋壳岩石 带出的 Os 元素,其¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os≈0.127;(2)河流带 入海 洋 的 大 陆 风 化 产 物 中 的 Os 元 素,其 ¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os≈1.4;(3)陨石和宇宙尘沉降落入海洋 中的 Os 元素,其¹⁸⁷ Os/¹⁸⁸ Os≈0.127 (Cohen, 2004).研究表明,陨石和宇宙尘对海水的 Os 贡献 在大多数情况下可以忽略.现今海水的 Os 同位素 比值约为 1.06 (Sharma *et al.*, 1997; Oxburgh, 1998),其中约 81% 的 Os 元素来自大陆 (Sharma *et al.*, 1997). 莲沱组较低的 Os 同位素初始比值(0.31)指示 沉积物质中有幔源物质或(和)新生地壳物质加入. 该组地层的形成时代与新元古代地幔柱在华南地区 的第 2 个峰期时间(780~740 Ma)(Li *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2003)相对应,较低的 Os 同位素初始 比值可能为其沉积物对地幔柱活动的响应.

南沱组冰碛岩的 Os 同位素初始比值较高 (0.77),质量平衡计算表明,约51%的 Os 来自陆源 碎屑,指示这一时期大陆风化对大洋 Os 的贡献增 加.该现象显然与"硬壳雪球地球"模型(Hoffman *et al.*,1998)相矛盾,因为完全冰封的地球表面将 限制地壳岩石风化和剥蚀作用的发生.事实上,对 "硬壳雪球地球"模型的质疑也得到了生物标志化合 物和沉积记录研究的支持(李美俊和王铁冠,2007; Allen and Etienne, 2008),指示应存在无冰水体.

南沱组冰碛岩之上的盖帽碳酸盐岩的 Os 同位 素初始值降低至 0.39.前人已报道了盖帽碳酸盐岩 存在显著的 C 同位素负漂移现象(图 5)(Hoffman et al., 1998; Jiang et al., 2003; Condon et al., 2005; McFadden et al., 2008),并认为是 CO₂ 或 CH₄ 气体的大量排放导致了冰期结束(Hoffman et al., 1998; Jiang et al., 2003; Bao et al., 2008),但对这两种温室气体的来源缺乏约束.本研 究表明,盖帽碳酸盐岩具低 Os 同位素初始比值特 征,指示这些温室气体可能来源于幔源岩浆的去气 作用,该认识也与盖帽碳酸盐岩低放射性成因 Sr 同 位素特征相符合(图 5)(Yang et al., 1999).

至陡山沱组第二段上部,地层的 Os 同位素初 始比值达到 0.88 的高值,与同期(或稍晚期)地层碳 同位素的明显负漂移相对应(图 5)(Condon et al., 2005; McFadden et al., 2008). 目前对该期碳同位 素负漂移产生的原因存在争议,如 Condon et al. (2005)认为是 Gaskiers 冰期事件所致, 而 McFadden et al. (2008)则认为可能是深海的一次脉冲式 氧化.基于地层的高 Os 同位素初始值,本文倾向认 为本期碳同位素负漂移可能反映的是氧化事件,因 为大气氧的增加与大陆风化作用的增强有很好的对 应关系(Campbell and Allen, 2008). 陡山沱组上覆 地层的 Os 同位素初始值逐渐下降,但 Sr 同位素比 值却没有明显变化.至陡山沱组顶部时,Os同位素 初始值再次升高至 0.81,指示大陆风化物质再一次 成为海水 Os 的主要来源. 顶部地层同样具有明显 的 C 同位素负漂移现象,并对应了庙河动物群的产 出,这被认为是指示了深海的另一氧化事件(图 5)



图 5 峡东地区新元古代一寒武纪剖面 Os-C-Sr 同位素初始比值变化示意

Fig. 5 Variation trends of Os, C and Sr isotopes for the Neoproterozoic-Cambrian strata in the eastern Three Gorges C 同位素数据来自 Condon *et al.*,2005; Sr 同位素数据来自 Yang *et al.*,1999

(Zhu, 2004; Condon et al., 2005; McFadden et al., 2008). 灯影组碳质页岩与西陵峡动物群产 出的层位相对应(Zhu, 2004),其高 Os 同位素初始 比值(0.89)同样指示了强烈的大陆风化作用. 灯影 组顶部地层的 Os 同位素组成再次下降,但在下寒 武统底部的黑色页岩中重新恢复到 0.80 的高值. 对 下寒武统黑色页岩已有的研究揭示,其 Os 同位素 初始比值由下而上逐渐增高(Singh et al., 1999; Jiang et al., 2007),而寒武纪生命大爆发事件发生 于该过程.

与 Sr 同位素特征(Yang et al., 1999)类似, 剖 面地层 Os 同位素初始比值逐渐升高的演化趋势反 映了新元古代晚期大陆风化作用不断增强. 新元古 代晚期-寒武纪早期不仅是地球后生生物大发展的 关键时期,也是大气与海洋中氧气含量最重要的增 长期之一(Fike et al., 2006; Campbell and Allen, 2008; Konhauser et al., 2009). 通过对比超大陆演 化与大气氧气量的关系, Campbell and Allen(2008) 认为大陆物质的强烈风化与沉积导致了大气氧含量 的增加.通过对陡山沱组 C 同位素负漂移的分析, 前人提出该现象反映了通过脉冲式氧化,深海由整 体还原性向氧化性的转变过程,这为生命的多幕式 爆发提供了有利条件(Shen and Schidlowski, 2000; Condon et al., 2005; McFadden et al., 2008). 本次研究显示,震旦纪地层中C同位素负漂 移以及古生物群产出的层位具有高放射性成因 Os 同位素组成(图 5),而前人的研究表明,Os 同位素 的变化可以略先于 C 同位素的波动,指示海洋对环 境变化的缓冲作用(Turgeon and Creaser, 2008). 高 Os 同位素比值与 C 同位素负漂移和古生物群之 间相互对应的关系,支持了大陆强风化作用与大气、 海洋中含氧量增加之间存在因果联系的认识 (Campbell and Allen, 2008),并为探讨两者之间的 联系提供了新的地球化学线索.虽然 Sr 同位素演化 也反映出大陆风化作用增强的过程(Yang et al., 1999),但明显缺乏对海水多期脉冲式氧化的响应. 因此,Os 同位素可以更加敏感地记录海水环境的变 化. 值得指出的是,采自陡山沱组上部的沥青样品



- 图 6 峡东地区新元古代晚期-寒武纪早期细碎屑沉积岩 氧化还原环境 ᠔U-U/Th 判别
- Fig. 6 U/Th-δU plot for the late Neoproterozoic-early Cambrian fine-grained sedimentary rocks from the eastern Three Gorges

(ZG08-14-3)由于经历了成烃过程,故其较高的 Os 同位素初始比值(1.22)已不能代表当时海水的组成,指示区内可能存在更古老的烃源岩.

4.2 微量元素对沉积环境的判别

还原环境形成的岩石常表现为 U/Th>0.75 和 dU(=U-Th/3)>1(Dobrzinski et al., 2003).在 图 6上,水井沱组、灯影组和陡山沱组样品均落在缺 氧环境区间,与其富含有机碳和硫化物的岩性相符; 而南沱组冰碛岩和莲沱组砂岩则落于 U/Th<0.75 和 dU<1 的区域,指示了氧化环境.前人对扬子克 拉通内其他剖面上南沱组冰碛岩进行了类似研究, 也得出冰碛岩形成于氧化环境的认识(Dobrzinski et al., 2003).因此本文认为,华南地区南沱组冰碛 岩可能普遍形成于氧化环境,这一现象与"硬壳雪球 地球"模型相矛盾,因为完全冰封的地球表面将阻止 大气氧对海洋的供给,使得海洋出现还原环境.

Y和Ho均属广义稀土元素,在岩浆作用过程 中分配系数相近,所以岩浆岩和陆源碎屑沉积物中 有着相对固定约 28 的 Y/Ho 比值. 海底热液富含 F 离子,更易与元素Y结合而使得受热液影响的沉积 物具有较高的 Y/Ho 比值(Bau, 1996; Jiang et al., 2006). 区内部分层位细碎屑沉积岩的 Y/ Ho 值明显高于 28(表 3),反映其形成过程可能受到 海底热液影响. Ce 和 Eu 是变价稀土元素,氧化还原 环境的变化会导致两元素价态发生变化从而使其出 现异常. 热液活动导致黑色页岩中出现 Ce 异常的 现象已有文献报道(Jiang et al., 2006),而对于沉 积岩中 &Ce 值的高低能否反映氧化还原环境的变化 还存在很大争议(Wilde et al., 1996; Pattan et al., 2005). 若氧化还原环境的变化是导致 Ce 异 常的原因,那么 &Ce 与 &Eu 将会出现明显的负相关 性.本研究中样品的 &Ce 与 Y/Ho 之间有一定的负 相关性(图 7a),而 δ Ce 与 δ Eu 之间的相关性并不明 显(图 7b),指示海底热液活动应是导致 Ce 异常的 主要原因.结合前文 Os 同位素的讨论,本文认为海 底热液对幔源初生洋壳的交代作用导致了新元古代 晚期一寒武纪早期部分层位的低放射性成因 Os 同 位素比值特征.

5 结论

(1)沿剖面由老至新,新元古代一寒武纪早期地 层泥质岩样品 Os 同位素初始比值总体呈上升趋势,且与 C、Sr 同位素组成存在明显的相关性.相对 于 Sr 同位素,Os 同位素能更敏感地记录沉积环境



图 7 峡东地区新元代晚期-寒武纪早期细碎屑沉积岩 Y/Ho-&Ce(a)和 &Eu-&Ce(b)关系

Fig. 7 Plots of δCe versus Y/Ho (a) and δEu (b) for the late Neoproterozoic-early Cambrian black shales from the eastern Three Gorges

氧化还原条件的变化. 高 Os 同位素比值与深海脉 冲式氧化和古生物群的产出之间具明显对应关系, 为探讨大陆风化强度与大气和海洋中氧气量增加的 关系提供了新的地球化学线索;(2)Os 同位素初始 比值和微量元素特征表明,南沱组冰碛岩形成时地 球表面可能并没有完全被冰川覆盖,因而不支持"硬 壳雪球地球"模型,而盖帽碳酸盐岩的低 Os 同位素 比值指示南沱冰期的结束可能与地幔岩浆大规模的 去气活动有关;(3)Y/Ho 比值和 &Ce 值的负相关性 指示,部分层位黑色页岩的形成过程受到了海底热 液活动的影响,因而显示出低 Os 同位素初始比值 特征. 相反,部分地层的高 Os 同位素初始比值指示 了强烈的大陆风化作用,并与古海洋脉冲式的氧化 过程相联系.

References

- Allen, P. A., Etienne, J. L., 2008. Sedimentary challenge to Snowball Earth. Nature Geoscience, 1(12): 817-825. doi:10.1038/ngeo355
- Anbar, A. D. , Knoll, A. H. ,2002. Proterozoic ocean chemistry and evolution: a bioinorganic bridge? *Science*, 297 (5584):1137-1142. doi:10.1126/science.1069651
- Bao, H. M., Lyons, J. R., Zhou, C. M., 2008. Triple oxygen isotope evidence for elevated CO₂ levels after a Neoproterozoic glaciation. *Nature*, 453(7194): 504 - 506. doi: 10.1038/nature06959
- Bau, M., 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho,Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323-333. doi:10.1007/s004100050159
- Campbell, I. H., Allen, C. M., 2008. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen. Nature Geoscience, 1(8):554-558. doi:10.1038/ngeo259
- Cohen, A. S. ,2004. The rhenium-osmium isotope system: applications to geochronological and palaeoenvironmental problems. *Journal of the Geological Society*, *London*, 161(4): 729-734. doi:10.1144/0016-764903-084
- Cohen, A. S. , Coe, A. L. , Bartlett, J. M. , et al. , 1999. Precise Re-Os ages of organic-rich mudrocks and the Os isotope composition of Jurassic seawater. *Earth and Planetary Science Letters*, 167(3-4): 159-173. doi:10.1016/ S0012-821X(99)00026-6
- Condon, D., Zhu, M. Y., Bowring, S., et al., 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. Science, 308 (5718): 95 - 98. doi: 10. 1126/science. 1107765

- Dobrzinski, N., Bahlburg, H., Strauss, H., 2003. Geochemistry of Sinian tillites from Hunan Province, South China—a test of the snowball earth hypothesis. *Progress in Natural Science*, 13 (11): 867 – 874. doi: 10. 1080/ 10020070312331344570
- Esser, B. K., Turekian, K. K., 1993. The osmium isotopic composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57 (13): 3093 – 3104. doi: 10. 1016/ 0016-7037(93)90296-9
- Fike, D. A., Grotzinger, J. P., Pratt, L. M., et al., 2006. Oxidation of the Ediacaran Ocean. Nature, 444 (7120): 744-747. doi:10.1038/nature05345
- Gao, W., Zhang, C. H., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the Huangling granite and the tuff beds from Liantuo Formation in the Three Gorges area of Yangtze River, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 28 (1): 45-50 (in Chinese with English abstract).
- Hoffman, P. F., 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? Science, 252(5011):1409-1412. doi:10.1126/science.252.5011.1409
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., et al., 1998.
 A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 281 (5381): 1342-1346. doi:10.1126/science, 281.5381.1342
- Jiang, G. Q., Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426 (6968): 822 – 826. doi:10.1038/nature02201
- Jiang, S. Y., Chen, Y. Q., Ling, H. F., et al., 2006. Traceand rare-earth element geochemistry and Pb-Pb dating of black shales and intercalated Ni-Mo-PGE-Au sulfide ores in lower Cambrian strata, Yangtze Platform, South China. *Mineralium Deposita*, 41(5):453-467. doi:10. 1007/s00126-006-0066-6
- Jiang, S. Y., Yang, J. H., Ling, H. F., et al., 2007. Extreme enrichment of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au in lower Cambrian black shales of South China: an Os isotope and PGE geochemical investigation. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology Palaeoecology*, 254 (1-2): 217-228. doi:10.1016/j. palaeo. 2007.03.024
- Kendall, B., Creaser, R. A., Selby, D., 2006. Re-Os geochronology of postglacial black shales in Australia: constraints on the timing of "Sturtian" glaciation. *Geology*, 34(9): 729-732. doi:10.1130/G22775.1
- Knoll, A. H., Walter, M. R., Narbonne, G. M., et al., 2006. The Ediacaran Period: a new addition to the geologic time scale. *Lethaia*, 39 (1): 13 - 30. doi: 10. 1080/ 00241160500409223
- Koeberl, C., Farley, K. A., Peucker-Ehrenbrink, B., et al.,

2004. Geochemistry of the end-Permian extinction event in Austria and Italy: no evidence for an extraterrestrial component. *Geology*, 32 (12): 1053 — 1056. doi: 10. 1130/G20907.1

- Konhauser, K. O., Pecoits, E., Lalonde, S. V., et al., 2009. Oceanic nickel depletion and a methanogen famine before the Great Oxidation Event. *Nature*, 458 (7239): 750-753. doi:10.1038/nature07858
- Li, M. J., Wang, T. G., 2007. Molecular geochemical evidence for the paleoenvironment of the Late Neoproterozoic "snowball earth" age in the Yangtze region. Acta Geologica Sinica, 81(2): 220-229 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X. ,Li, X. H. ,Kinny, P. D. , et al. ,2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1-4): 85-109. doi:10.1016/S0301-9268(02)00208-5
- Ling, H. F., Feng, H. Z., Pan, J. Y., et al., 2007. Carbon isotope variation through the neoproterozoic Doushantuo and Dengying formations, South China: implications for chemostratigraphy and paleoenvironmental change. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 254 (1 – 2): 158–174. doi:10.1016/j. palaeo. 2007.03.023
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., et al., 2003. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of the Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 122(1-4): 111-140. doi:10.1016/S0301-9268(02)00222-X
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and magmatic history of eclogues and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates. *Chemical Geology*, 247(1-2): 133-153. doi:10.1016/j. chemgeo. 2007. 10.016
- McFadden, K. A., Huang, J., Chu, X. L., et al., 2008. Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(9): 3197-3202. doi: 10. 1073/pnas.0708336105
- McFadden, K. A., Xiao, S. H., Zhou, C. M., et al., 2009.
 Quantitative evaluation of the biostratigraphic distribution of acanthomorphic acritarchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China. *Precambrian Research*, 173(1-4): 170-190. doi:10.1016/j. precamres, 2009.03.009

Oxburgh, R. , 1998. Variations in the osmium isotope compo-

sition of sea water over the last 200 000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 159(3-4): 183-191. doi:10.1016/S0012-821X(98)00057-0

- Palmer, M. R., Edmond, J. M., 1989. The strontium isotope budget of the modern ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1): 11-26. doi:10.1016/0012-821X (89)90017-4
- Pattan, J. N., Pearce, N. J. G., Mislankar, P. G., 2005. Constraints in using cerium-anomaly of bulk sediments as an indicator of paleo bottom water redox environment: a case study from the Central Indian Ocean basin. *Chemical Geology*, 221 (3 - 4): 260 - 278. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2005. 06. 009
- Selby, D., Creaser, R. A., 2003. Re-Os geochronology of organic rich sediments: an evaluation of organic matter analysis methods. *Chemical Geology*, 200(3-4): 225-240. doi:10.1016/S0009-2541(03)00199-2
- Selby, D., Creaser, R. A., 2005. Direct radiometric dating of the Devonian-Mississippian time-scale boundary using the Re-Os black shale geochronometer. *Geology*, 33(7): 545-548. doi:10.1130/G21324.1
- Sharma, M., Papanastassiou, D. A., Wasserburg, G. J., 1997. The concentration and isotopic composition of osmium in the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61 (16): 3287-3299. doi:10.1016/S0009-2541(03)00199-2
- Shen, Y., Schidlowski, M., 2000. 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 (7): 623-626. doi: 10. 1130/0091-7613(2000)28<623: NCISFS>2. 0. CO;2
- Shirey, S. B., Walker, R. J., 1995. Carius tube digestion for lowblank Rhenium-Osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67 (13):2136-2141. doi:10.1021/ac00109a036
- Singh, S. K., Trivedi, J. R., Krishnaswam, S., 1999. Re-Os isotope systematics in black shales from the Lesser Himalaya: their chronology and role in the ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸ Os evolution of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (16): 2381-2392. doi:10.1016/S0016-7037(99)00201-X
- Smoliar, M. I., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. Re-Os isotope ages of Group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science*, 271(5252):1099-1102. doi:10.1126/ science, 271.5252.1099
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Sanders, A. D., Norry, M. J., ed., Magmatism in the ocean basins. Geological Society Special Publications, London, 313-345.

- Sun, W. D., Bennett, V. C., Eggins, S. M., et al., 2003. Enhanced mantle-to-crust rhenium transfer in undegassed arc magmas. *Nature*, 422(6929): 294 297. doi: 10.1038/nature01482
- Turgeon, S. C. , Creaser, R. A. , 2008. Cretaceous oceanic anoxic event 2 triggered by a massive magmatic episode. *Nature*, 454 (7202): 323 - 329. doi: 10. 1038/nature07076
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., et al., 1999. ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr, δ¹³ C and δ¹⁸ O evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161(1-3): 59-88. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00081-9
- Walker, R. J., Morgan, J. W., 1989. Rhenium-Osmium isotope systematics of carbonaceous chondrites. *Science*, 243 (4890): 519-522. doi:10.1126/science, 243.4890.519
- Wilde, P., Quinby-Hunt, M., Erdtmann, B., 1996. The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of the anoxic facies. *Sedimentary Geology*, 101 (1-2): 43-53. doi: 10. 1016/S0009-2541(99)00081-9
- Xie, S. W., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2009. U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons of Nanhua sedimentary rocks from the Yangtze Gorges: implications for genesis of Neoproterozoic magmatism in South China. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 34(1): 117-126 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. M. ,2009. An improved analytical method of Re-Os isotopes for the basic to intermediate basic igneous rocks and its application to the study of the Mesozoic lithospheric thinning in Shandong Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 27-56 (in Chinese).
- Yang, J. D., Sun, W. G., Wang, Z. Z., et al., 1999. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: evidence for the oxygenation of Proterozoic seawater. *Precambrian Research*, 93(2-3): 215-233. doi:10.1016/S0301-9268(98)00092-8
- Yang, J. H., Jiang, S. Y., Ling, H. F., et al., 2005. Re-Os isotope tracing and dating of black shales and oceanic anoxic events. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 143-150(in Chinese with English abstract).
- Ye, J., Fan, D. L., 2000. Characteristics and mineralization of ore deposits related to black shale series. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 19(2): 95-102(in Chinese with English abstract).
- Yin, L. M., Zhu, M. Y., Knoll, A. H., et al., 2007. Doushantuo embryos preserved inside diapause egg cysts. Nature, 446(7136): 661-663. doi:10.1038/Nature05682

- Yuan, H. L., Gao, S., Rudnick, R. L., et al., 2007. Re-Os evidence for the age and origin of peridotites from the Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chemical Geology*, 236 (3 - 4): 323 - 338. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2006. 10. 009
- Zhang, Q. R., Chu, X. L., Bahlburg, H., et al., 2003. Stratigraphic architecture of the Neoproterzoic glacial rocks in the "Xiang-Qian-Gui" region of the central Yangtze block, South China. *Progress in Natural Science*, 13 (10): 783-787. doi:10.1080/10020070312331344430
- Zhang, Y. Q., Ling, W. L., Li, F. L., 2008. Elemental and Sr-Nd isotopic mobility during weathering process of the Nanhua-Cambrian Sedimentary strata in the eastern Three Gorges and its geochemical implication. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 33(3): 301-312(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. *Earth-Science Reviews*, 62(1-2): 105-161. doi:10.1016/S0012-8252(02)00133-2
- Zhu, M. Y., 2004. Biological and geological processes of the cambrian explosion: evidence from the Yangtze platform of South China introduction. *Progress in Natural Science*, V-X.

附中文参考文献

- 高维,张传恒,2009. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地层意义. 地质通 报,28(1):45-50.
- 李美俊,王铁冠,2007.扬子区新元古代"雪球"时期古环境的 分子地球化学证据.地质学报,81(2):220-229.
- 谢士稳,高山,柳小明,等,2009.扬子克拉通南华纪碎屑锆石 U-Pb年龄、Hf同位素对华南新元古代岩浆事件的指 示.地球科学——中国地质大学学报,34(1): 117-126.
- 杨红梅,2009. 基性一中基性岩浆岩 Re-Os 同位素分析测试 技术及其在山东中生代岩石圈减薄事件研究中的应用 (博士学位论文). 武汉:中国地质大学,27-56.
- 杨兢红,蒋少涌,凌洪飞,等,2005.黑色页岩与大洋缺洋事件 的 Re-Os 同位素示踪与定年研究.地学前缘,12(2): 143-150.
- 叶杰,范德廉,2000.黑色岩系型矿床的形成作用及其在我国 的产出特征.矿物岩石地球化学通报,19(2):95-102.
- 张永清,凌文黎,李方林,2008.峡东地区南华纪-寒武纪地 层风化过程元素及 Sr-Nd 同位素演化特征及其地球化 学意义.地球科学——中国地质大学学报,33(3): 301-312.