

华南寒武纪早期牛蹄塘组黑色岩系中 Ni-Mo 多金属硫化物矿层的 Mo 同位素组成讨论

蒋少涌¹, 凌洪飞¹, 赵葵东¹, 朱茂炎², 杨竞红¹, 陈永权³

(1. 南京大学 地球科学系 成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093; 2. 中国科学院 南京地质古生物研究所, 江苏 南京 210009; 3. 中国石油塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 华南寒武纪早期牛蹄塘组黑色岩系底部赋存有一层富 Ni-Mo 多金属元素的硫化物矿层。Lehmann 等 (2007) 报道 Ni-Mo 矿石的 Mo 同位素组成十分均一, $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ 值为 $-1.24\% \pm 0.10\%$; 而赋矿围岩黑色页岩的 Mo 同位素组成变化较大, $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ 值为 $-1.82\% \sim -0.40\%$, 并认为 Mo 全部来源于海水。笔者发现, 含 Mo 低的黑色页岩具有 Mo 含量与 Mo 同位素组成的正相关关系, 可能反映了海水来源 Mo (以富重 Mo 同位素为特征) 与页岩中碎屑组来源 Mo (以富轻 Mo 同位素为特征) 两者的混合。Ni-Mo 矿石非常均一的 Mo 同位素组成可能反映了它们的 Mo 来源既不是海水, 也不是碎屑组, 而很可能是第 3 种来源, 即以海底热液占主导。有必要对含矿与不含矿的该套黑色岩系开展更详细的 Mo 同位素研究, 以便进一步确定寒武纪早期海水的 Mo 同位素组成和 Ni-Mo 矿层的成因。

关键词: Mo 同位素; Ni-Mo 矿; 黑色页岩; 牛蹄塘组; 华南

中图分类号: P597+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)04-0341-05

A discussion on Mo isotopic compositions of black shale and Ni-Mo sulfide bed in the early Cambrian Niutitang Formation in south China

JIANG Shao-yong¹, LING Hong-fei¹, ZHAO Kui-dong¹, ZHU Mao-yan², YANG Jing-hong¹ and CHEN Yong-quan³

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, NIGP, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Tarim Oilfield Company Exploration & Development Research Institute, Ku'erle 841000, China)

Abstract: A Ni-Mo sulfide bed occurs in the lower portion of the lower Cambrian Niutitang Formation in south China. Lehmann *et al.* (2007) reported data of Mo-isotopic compositions of the Ni-Mo sulfide ores and host black shales, and suggested a seawater origin for the Mo. The Ni-Mo sulfide ores show very limited Mo-isotopic variation with $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ values of $-1.24\% \pm 0.10\%$, whereas the host black shales show larger Mo-isotopic variations with $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ values from -1.82% to -0.40% . Those with low-Mo content black shales show a linear relationship between Mo contents and Mo-isotopic compositions. We suggest that this correlation may reflect a two end-member mixing of seawater Mo and clastic sediment Mo. The sources of Mo in the Ni-Mo sulfide ores were probably from submarine hydrothermal fluids. Further work is needed both on the Ni-Mo ore bed bearing and the barren black shales of the Niutitang Formation in south China, in order to better estimate the Mo-isotopic compositions of the early Cambrian seawater, and to better constrain the ore genesis.

Key words: Mo-isotopes; Ni-Mo sulfide bed; black shale; Niutitang Formation; south China

收稿日期: 2008-04-28; 修订日期: 2008-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40221301)

作者简介: 蒋少涌(1964-)教授, 地球化学专业, E-mail: shyjiang@nju.edu.cn

华南寒武纪早期牛蹄塘组广泛发育一套厚层的黑色岩系,在其底部赋存有一层极富各种金属元素的硫化物矿层,尤以富集 Ni、Mo 和铂族元素(PGE)为特征。该硫化物矿层虽然厚度不大(一般几至几十厘米),但层位十分稳定,在湘黔地区分布普遍,并被地方开采利用。由于这一硫化物矿层中多种金属元素不同寻常地富集,并且其赋矿层位与寒武纪生命大爆发事件关系密切,因而对它的形成时代及成因机理的研究,不但具有重要的矿床学意义,而且具有重大的古海洋学意义,有助于深入研究寒武纪生命大爆发时期的古海洋环境变迁。近几十年来,许多中外地质学家对该硫化物矿层及其围岩黑色页岩开展了大量的矿物学、沉积岩石学和地球化学(常、微量和稀土元素、碳、硫同位素等)的研究,对其形成机理及形成环境提出了多种不同认识。早期的观点认为与地外物质来源有关,但近年来争论的焦点集中在两种截然不同的成因假说上 ①海水成因说,即认为这些金属元素的超常富集是在还原环境中在沉积速率极低的条件下直接从海水中沉淀下来的(Mao *et al.*, 2002; Lehmann *et al.*, 2007); ②热液成因说,即认为这些金属元素的超常富集与海底热水喷流沉积作用有关,部分金属元素可能是由海底热液提供的(李胜荣等, 1995; Steiner *et al.*, 2001; Coveney, 2003; 杨瑞东等, 2005; Jiang *et al.*, 2006, 2007; Orberger *et al.*, 2007)。

最近 Lehmann 等(2007)报道了华南 Ni-Mo 硫化物矿石及其围岩牛蹄塘组黑色页岩样品的 Mo 同位素组成,并认为这些新的 Mo 同位素数据支持他们提出的 Ni-Mo 矿层的“海水成因说”。但是笔者通过对这些 Mo 同位素数据的分析发现,它们并不能支持 Lehmann 等的成因模式,相反却很可能与笔者及许多其他研究者提出的海底热液成因说相吻合。为此,笔者发表了对 Lehmann 等的成因观点的质疑(Jiang *et al.*, 2008)。本文将进一步阐明笔者对这些 Mo 同位素数据的成因解译,并指出下一步应如何运用 Mo 同位素来追踪 Ni-Mo 矿的成因。

1 赋矿地层概况

华南扬子地块寒武纪地层发育,层中存在许多金属及非金属矿床,特别是寒武纪早期发育的一套牛蹄塘组黑色岩系,富含磷、钒、镍、钼等多金属元素,主要沿扬子地块东南缘分布,分布范围广,储量丰富。矿层呈层状、似层状和透镜状分布。牛蹄塘组黑色岩系从下至上的典型层序为硅质岩、含磷结核和磷块岩的黑色页岩、Ni-Mo 多金属硫化物矿层、黑色页岩,其下覆地层为新元古代灯影组白云岩或留茶坡组硅质岩。图 1 列出了华南不同地区含 Ni-Mo 矿层的牛蹄塘组 3 个剖面与不含 Ni-Mo 矿层的云南大海寒武纪早期典型剖面的对比。从这些剖面可以看出, Ni-Mo 矿层均产出在近底部的位置,矿体厚度不大,大多几厘米厚。鉴于前人已对这套黑色岩系和其中的 Ni-Mo 矿层地质情况有详细介绍(如 Steiner *et al.*, 2001; Mao *et al.*, 2002; 范德廉等, 2004; 杨瑞东等, 2005; Jiang *et al.*, 2006, 2007)本文不作详述。

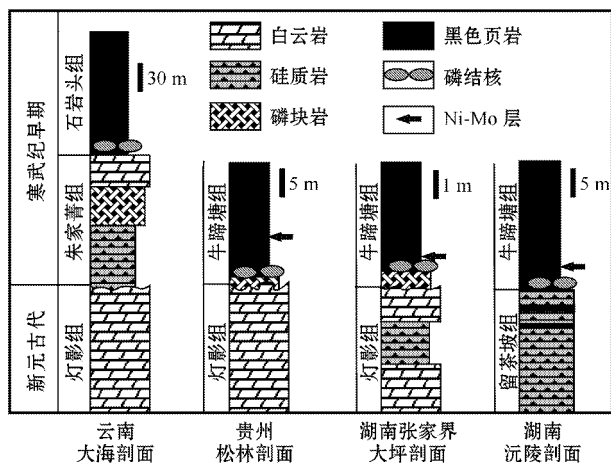


图 1 华南不同地区含 Ni-Mo 矿层的牛蹄塘组剖面与不含 Ni-Mo 矿层的云南大海典型剖面的对比

Fig. 1 Sections of the lower Cambrian Niutitang Formation in south China

2 Mo 同位素数据讨论

Mo 同位素是近年来迅速发展起来的一种非传统稳定同位素,它有 7 个稳定同位素,分别是 ^{92}Mo (14.84%)、 ^{94}Mo (9.25%)、 ^{95}Mo (15.92%)、 ^{96}Mo (16.68%)、 ^{97}Mo (9.55%)、 ^{98}Mo (24.13%) 和 ^{100}Mo (9.63%)。Mo 同位素组成一般用 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 或 $\delta^{97/95}\text{Mo}$ 来表示:

$$\delta^{97/95}\text{Mo} = \left[\frac{(^{97}\text{Mo}/^{95}\text{Mo})_{\text{样品}}}{(^{97}\text{Mo}/^{95}\text{Mo})_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000$$

$$\delta^{98/95}\text{Mo} = \left[\frac{(^{98}\text{Mo}/^{95}\text{Mo})_{\text{样品}}}{(^{98}\text{Mo}/^{95}\text{Mo})_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000$$

所采用的标准目前国际上还未统一,有的用 JMC(即由 Johnson Matthey 公司提供的标准溶液),也有的用 MOMO(即海水的平均 Mo 同位素组成: mean ocean Mo)。

Lehmann 等(2007)报道了华南 Ni-Mo 硫化物矿石和黑色页岩的 Mo 同位素组成(表 1),发现 Ni-Mo 矿石的 Mo 同位素组成十分均一, $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ 值为 $-1.24\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$; 而黑色页岩的 Mo 同位素组成变化较大, $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ 值为 $-1.82\text{‰} \sim -0.40\text{‰}$ 。他们认为, Ni-Mo 矿石中的 Mo 完全来源于海水,因此其 $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}$ 值代表了当时海水的 Mo 同位素组成。但笔者认为这一解释存在极大的问题,因为它无法回答为什么有的黑色页岩样品比当时的海水还富集重 Mo 同位素。这用 Lehmann 等(2007)底层海水中 H_2S 浓度的变化说是解释不通的。因为在强还原环境中当 H_2S 浓度高达一定阈值时(如 $[\text{H}_2\text{S}] > 100 \mu\text{mol/L}$),底层海水中 Mo 只以 MoS_4^{2-} 形式存在,此时沉积物的 Mo 同位素组成才与海水的值相同(图 2,图中 Mo 同位素组成采用 JMC 为标准)。当 H_2S 浓度变低时,底层海水中 Mo 会以 MoS_4^{2-} 、 $\text{MoO}_x\text{S}_{4-x}^{2-x}$ 和 MoO_4^{2-} 的形式存在,根据同位素分馏规律,此时沉积物的 Mo 同位素组成只会比海水的轻(图 2)。

表 1 华南寒武纪早期牛蹄塘组 Ni-Mo 硫化物矿石和黑色页岩的 Mo 同位素组成(据 Lehmann 等, 2007)

Table 1 Mo contents and Mo-isotopic compositions of the Ni-Mo sulfide ores and black shales from the lower Cambrian Niutitang Formation in south China(after Lehmann *et al.*, 2007)

样品及采样位置	距矿层垂直距离/m	$\alpha(\text{Mo})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}}/\text{‰}$	误差
ZG-1 遵义黄家湾 Ni-Mo 矿石	0	42 200	-1.36	0.04
ZG-2 遵义黄家湾 Ni-Mo 矿石	0	54 100	-1.25	0.02
ZH-1 遵义黄家湾 Ni-Mo 矿石	0	29 000	-1.17	0.04
ZH-2 遵义黄家湾 Ni-Mo 矿石	0	71 000	-1.33	0.02
ZH-5 遵义黄家湾 Ni-Mo 矿石	0	48 800	-1.10	0.04
ZG-3 湘西杆子坪黑色页岩	-0.7	209	-0.80	0.04
ZG-7(1) 湘西杆子坪黑色页岩	1.5	115	-0.40	0.04
ZG-7(2) 湘西杆子坪黑色页岩	1.5		-0.43	0.04
ZG-11 湘西杆子坪黑色页岩	1.8	102	-1.05	0.04
ZG-17(1) 湘西杆子坪黑色页岩	4.5	293	-1.49	0.04
ZG-17(2) 湘西杆子坪黑色页岩	4.5		-1.36	0.06
ZG-26 湘西杆子坪黑色页岩	46.5	54	-1.08	0.04
ZG-29 湘西杆子坪黑色页岩	61	35	-1.24	0.04
L-60 湘西沅陵黑色页岩	0	22	-1.20	0.04
L-66 湘西沅陵黑色页岩	6	12	-1.82	0.04

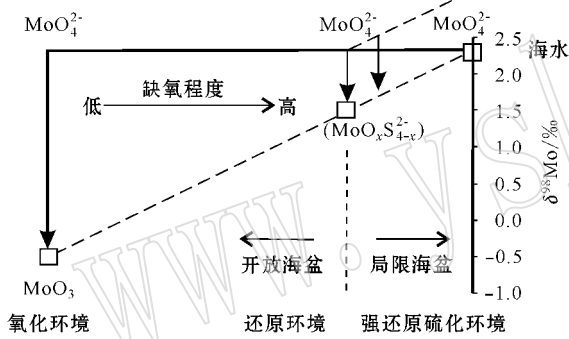


图 2 不同海洋环境中 Mo 的赋存状态及同位素组成 (据 Poulson 等, 2006)

Fig. 2 Mo chemical behavior and Mo-isotopic compositions in marine sediments(from Poulson *et al.*, 2006)

根据 Lehmann 的数据,笔者发现含 Mo 低的黑色页岩具有 Mo 含量与 Mo 同位素组成的正相关关系(图 3),因此黑色页岩中 Mo 同位素组成的变化可能是反映了两端混的结果,即海水来源 M_d (以富重 Mo 同位素为特征)与页岩中碎屑组分来源 M_c (以富轻 Mo 同位素为特征)两者的混合。此外, Mo 同位素变化的原因还可能与岩石形成的古沉积环境有关,不同层位的岩石其形成时的沉积环境会存在差异, Mo 同位素变化也可能与热液流体(如 $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}} \approx -1.55\text{‰}$)与底层海水或底层海水与上部海水的混合有关,这些均值得进一步开展研究工作。而部分含 Mo 很高的黑色页岩和 Ni-Mo 矿石样品具有非常均一的 Mo 同位素组成,反映了它们的 Mo 来源既不是海水,也不是碎屑组分,而很可能是第 3 种来源,即以海底热液占主导。这一推论与 McManus 等(2002)报道的现代大洋底沉积岩容矿的热液硫化物系统中热液的 Mo 同位素组成($\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{MOMO}} = -1.5\text{‰}$)相一致。为此,笔者对

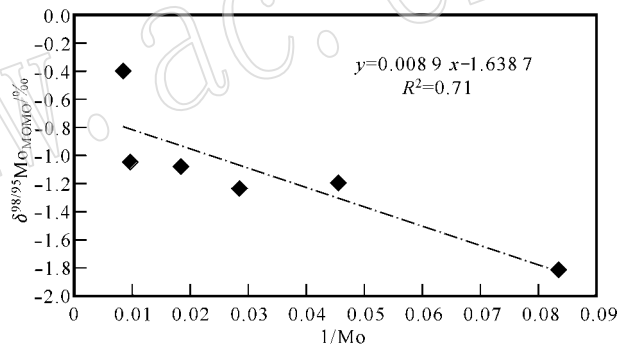


图 3 牛蹄塘组黑色页岩样品的 Mo 含量与 Mo 同位素组成关系

Fig. 3 Mo contents and Mo-isotopic compositions of the Niutitang Formation black shales

Lehmann 等(2007)的成因模式提出了质疑(Jiang *et al.*, 2008)。Lehmann 等(2008)在回复中认为,如果寒武纪早期的海水具有比 Ni-Mo 硫化物矿层高的 Mo 同位素组成,则在黑色岩系剖面靠上部的岩石可能受热液的影响要小得多,因此它应具有明显高于 Ni-Mo 矿层的 Mo 同位素组成。但 Lehmann 等仅在 Ni-Mo 矿层之上采了 1 个黑色页岩样品,其 Mo 同位素组成与 Ni-Mo 矿层差别并不大。笔者认为造成这种情况的原因可能有两方面:一是由于采样距离还不够远,所采的样品仍受到了海底热液的影响,一般而言,海底热液中 Mo 的含量比海水中要高得多,因此它的影响会对岩石中 Mo 同位素产生控制作用;二是由于这一样品形成的氧化还原环境有所不同,在氧化程度升高而还原程度降低的环境下,沉积物的 Mo 同位素往往会低于海水的值,这从图 2 中可清楚看出。实际上,已有许多研究者指出,随牛蹄塘组黑色岩系剖面向上,沉积环境的还原性大大减弱,岩石中碎屑组分也逐步增

高 (Pan *et al.*, 2004; Goldberg *et al.*, 2007)。因此,有必要挑选那些与 Ni-Mo 矿层位大体相当、具有极其还原的沉积环境、但无矿化的区域的牛蹄塘组黑色岩系样品来开展 Mo 同位素研究,这样才能较准确地获取同时期海水的 Mo 同位素组成,从而有利于进一步厘定 Ni-Mo 矿的成因。同时,鉴于 Lehmann 的样品实际上来自 3 个地方,放在一起作为 1 个剖面讨论可能不很妥当,因此,仍需对一个完整的含 Ni-Mo 矿层的剖面开展更详细的 Mo 同位素地球化学研究。

除 Mo 同位素外,前人也曾利用 Re-Os 同位素示踪来探讨 Ni-Mo 矿的成因。例如, Mao 等 (2002) 对 Ni-Mo 硫化物矿石进行了 Re-Os 同位素分析,获得一条等时线年龄为 541 ± 16 Ma, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.78 ± 0.19 , 认为成矿金属物质及 Os 来源于海水。Coveney (2003) 对 Mao 等的观点提出了质疑。Jiang 等 (2007) 对赋矿层位牛蹄塘组黑色页岩进行了 Re-Os 同位素分析,获得等时线年龄为 535 ± 11 Ma, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.80 ± 0.04 。Singh 等 (1999) 报道了印度同一层位不含矿的黑色页岩的 Re-Os 同位素分析结果,获得的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 1.18 ± 0.02 。可以看出,华南含 Ni-Mo 多金属元素矿化的黑色页岩比印度不含矿化的黑色页岩的 Os 同位素初始值稍低 (~ 0.3)。笔者认为这一特征反映了前者的形成很可能有海底热液的渗入,而后者记录了寒武纪早期海水的 Os 同位素组成。实际上,现代和古代的海底热液硫化物矿床均表现出与此类似的 Os 同位素组成特征。如大西洋中脊 TAG 热液区硫化物的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素组成为 $0.59 \sim 1.07$ (Brugmann *et al.*, 1998), 其最高值接近于现代海水的值,最低值与海水的值相差 ~ 0.4 。日本黑矿型块状硫化物矿床的 Re-Os 等时线年龄为 18.4 ± 0.6 Ma, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为 0.62 (Terakado, 2001), 而同时代海水的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值为 ~ 0.73 (Ravizza, 1993)。

3 结论

非传统稳定同位素是新近发展起来的一种新的地球化学示踪方法,近年来已在矿床成因研究中发挥越来越重要的作用。将 Mo 同位素方法应用于华南寒武纪早期黑色岩系中 Ni-Mo 多金属硫化物矿层的研究,可以为其成因的进一步厘定提供重要证据。从目前已有的少量 Mo 同位素数据看,认为它们为 Ni-Mo 矿层的海底热水沉积成因提供了新的证据,但由于现有数据太少,有必要系统地开展华南不同地区不同剖面含矿与不含矿牛蹄塘组黑色页岩的 Mo 同位素研究。

References

Brugmann G B, Birck J L, Herzig P M, *et al.* 1998. Os isotopic composition and Os and Re distribution in the active mound of the TAG hydrothermal system, Mid-Atlantic Ridge [A]. Herzig P M, Humphris S E, Miller D J, *et al.* Proceedings of the Ocean Drilling

Program, Scientific Results [C]. 158: 91~100.

Coveney R M Jr. 2003. Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geological significance-A discussion [J]. *Economic Geology*, 98(3): 661~662.

Fan Delian, Zhang Tao, Ye Jie, *et al.* 2004. Black Shale Sequences and Associated Ore Deposits in China [M]. Beijing: Science Press, 441 (in Chinese).

Goldberg T, Strauss H, Guo Q, *et al.*, 2007. Reconstructing marine redox conditions for the Early Cambrian Yangtze Platform: Evidence from biogenic sulphur and organic carbon isotopes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi: 10. 1016/j. palaeo. 2007. 03. 015.

Jiang S Y, Chen Y Q, Ling H F, *et al.* 2006. Trace- and 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 [J]. *Mineralium Deposita*, 41: 453~467.

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 [J]. an Os isotope and PGE geochemical investigation: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi: 10. 1016/j. palaeo. 2007. 03. 024.

Jiang S Y, Zhao K D, Li L, *et al.* 2008. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater [J]. *Comment. Geology*, e158-e159. doi: 10. 1130/G24437C. 1.

Lehmann B, Naegler T F and Holland H D. 2007. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater [J]. *Geology*, 35 (5): 403~406.

Lehmann B, Naegler T F, Wille M, *et al.* 2008. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater: Reply [J]. *Geology*, e158-e159. doi: 10. 1130/G24563Y. 1.

Li Shengrong and Gao Zhenmin. 1995. REE characteristics of black rock series of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Hunan-Guizhou provinces, China, with a discussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 225~229 (in Chinese).

Mao J, Lehmann B, Du A, *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 [J]. *Economic Geology*, 97: 1051~1061.

McManus J, Naegler T F, Siebert C, *et al.* 2002. Oceanic molybdenum isotope fractionation. Diagenesis and hydrothermal ridge-flank alteration [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, doi: 10. 1029/2002GC000356.

Orberger B, Vymazalova A and Wagner C. 2007. Biogenic origin of intergrown Mo-sulphide- and carbonaceous matter in Lower Cambrian black shales (Zunyi Formation, southern China) [J]. *Chemical Geology*, 238: 213~231.

Pan J, Ma D and Cao S. 2004. Trace element geochemistry of the Lower Cambrian black rock series from northwestern Hunan, South China [J]. *Progress in Natural Science, Special Issue*: 85~91.

Poulson R L , Siebert C , McManus J , *et al.* 2006. Authigenic molybdenum isotope signatures in marine sediments[J]. *Geology* , 34(8) : 617~620.

Ravizza G. 1993. Variations in the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of seawater over the past 28 million years as inferred from metalliferous carbonates[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 118 : 335~348.

Singh S K , Trivedi J R and Krishanswami S. 1999. Re-Os isotope systematics in black shales from the Lesser Himalaya : their chronology and role in the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ evolution of seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 63 : 2381~2392.

Steiner M , Wallis E and Erdtmann B. 2001. Submarine-hydrothermal exhalative ore layers in black shales from South China and associated fossils-insight into a Lower Cambrian facies and bio-evolution[J]. *Paleogeography , Paleoclimatology , Paleocology* , 169 : 165~191.

Terakado Y. 2001. Re-Os dating of the Kuroko ores from the Wanibuchi

mine , Shimane Prefecture , southwestern Japan[J]. *Geochemical Journal* , 35 : 169~174.

Yang Ruidong , Zhu Lijun , Gao Hui , *et al.* 2005. A study on characteristics of the hydrothermal vent and relating biota at the Cambrian bottom in Songlin , Zunyi County , Guizhou province[J]. *Geological Reviews* , 51(5) : 481~492 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 范德廉 , 张 焘 , 叶 杰 , 等. 2004. 中国的黑色岩系及其有关矿床 [M]. 科学出版社 : 441.
- 李胜荣 , 高振敏. 1995. 湘西地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式[J]. *矿物学报* , 15(2) : 225~229.
- 杨瑞东 , 朱立军 , 高 慧 , 等. 2005. 贵州遵义松林寒武系底部热液喷口及与喷口相关生物群特征[J]. *地质论评* , 51(5) : 481~492.

www.yskw.ac.cn