

doi:10.3799/dqkx.2016.092

黔东松桃南华系大塘坡组锰矿层物源： 来自 Sr 同位素的证据

余文超¹, 杜远生^{1*}, 周琦², 彭头平³, 王萍¹, 袁良军⁴, 徐源¹,
潘文⁴, 谢小峰⁴, 齐靓¹

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州贵阳 550003

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

4. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队, 贵州铜仁 554300

摘要: 锰矿床的物质来源是锰矿床研究的难点问题之一。辨别黔东松桃地区南华系大塘坡组锰矿沉积的物质来源有助于加深对锰矿成矿过程的理解。对黔东松桃地区南华系大塘坡组锰矿沉积的 Sr 同位素研究显示, 15 个锰矿石、锰质页岩及炭质页岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值变化范围为 0.705 727~0.732 536, 其中炭质页岩样品具有最高的 Sr 同位素比值 0.732 536, 含锰岩系样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值平均值为 0.711 128。样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随着 Al 含量的上升, 分别出现 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值上升与下降的两个分异趋势。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随 Mn 含量的上升总体呈现下降的趋势, 但该趋势无显著相关性, 残差分析显示这主要是由于样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随着 Mn 含量上升出现收敛性波动造成。上述现象是由于陆源碎屑成分和海底热液成分混合输入造成。通过与大塘坡组同时代(约 660 Ma)古海水 Sr 同位素组成, 世界范围内不同时代锰矿沉积以及现代红海沉积物的 Sr 同位素结果对比, 发现黔东松桃地区南华系锰矿层中 Sr 同位素比值分布范围较宽, 部分锰矿样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值低于古海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 与典型大洋成因的锰矿层或铁锰结核具有不同的 Sr 同位素特征。联系黔东南华系大塘坡组锰矿层形成时期的特殊地质背景, 认为锰质积累过程与沉淀过程为不同阶段产物——锰质的积累过程在 Sturtian 冰期盆地缺氧水体中完成, 可能主要以海底热液喷溢系统完成; 而锰矿的沉淀过程则是在间冰期伊始古海洋化学条件动荡的水体中完成。

关键词: Sr 同位素; 大塘坡组; 锰矿; 物源; 贵州; 矿产地质。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2016)07-1110-11

收稿日期: 2015-08-21

Provenance of Nanhuan Datangpo Formation Manganese Mn Deposit in Songtao Area, East Guizhou Province: Evidence from Sr Isotope

Yu Wenchao¹, Du Yuansheng^{1*}, Zhou Qi², Peng Touping³, Wang Ping¹, Yuan Liangjun⁴,
Xu Yuan¹, Pan Wen⁴, Xie Xiaofeng⁴, Qi Liang¹

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang 550004, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

4. 103 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Tongren 554300, China

Abstract: Provenance of manganese deposit is a key problem in the manganese metallogenic study. For a better understanding on the metallogenic process of the Nanhuan manganese deposit in Songtao area, East Guizhou Province, we need to gain a clear idea of the provenance of this manganese deposit. The Sr isotope study on the Mn deposit in Lower Nanhuan Datangpo Formation in Songtao, East Guizhou Province indicates that $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in 15 samples vary in 0.705 727-0.732 536. Studied samples include Mn ore, Mn shale

基金项目: 中国地质调查局项目(No.12120114016701); 国土资源部公益性行业科研专项经费(No.201411051)。

作者简介: 余文超(1988-), 男, 博士, 主要从事古生物与地层学方面研究。E-mail: yuwenchao@163.com

* 通讯作者: 杜远生, E-mail: duyuanheng126@126.com

引用格式: 余文超, 杜远生, 周琦, 等, 2016. 黔东松桃南华系大塘坡组锰矿层物源: 来自 Sr 同位素的证据. 地球科学, 41(7): 1110-1120.

and black shale in the Mn-bearing layer and the highest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio appears in the black shale sample. With Al (%) increasing in samples, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios show two changing trends; the rising trend indicates terrigenous materials input and the falling trend indicates the deep hydrothermal sources input. As to $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios via Mn (%), there is no significant correlation coefficient, but $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios decrease when Mn (%) increase generally, according to residual analysis, we find that this is caused by the convergence fluctuation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios against the Mn (%) changes. The broad variation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in Mn layer is caused by the dual inputs from terrigenous materials and hydrothermal sources. Compared with the contemporary (about 660 Ma) Sr isotope ratio in paleoseawater and the Sr isotope data from different ages Mn deposit world wide, we find that the broad variation of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in the Datangpo Formation, Mn layer does not conform to the feature of hydrogenetic Mn deposit. Considered with the specific geological background, we believe that the accumulation and precipitation of manganese are separated processes; the accumulation of Mn had finished in the anoxic basin during the Sturtian glaciation, whereas the Mn deposit precipitated in an unstable paleoceanographic environment at the beginning of interglaciation.

Key words: Sr isotope; Datangpo Formation; Mn deposit; provenance; Guizhou Province; mineral geology.

锰矿床的物质来源是锰矿床研究的难点问题之一 (Okita and Shanks Iii, 1992; Huckriede and Meischner, 1996; Nicholson *et al.*, 1997; El Rhazi and Hayashi, 2003; Maynard, 2003). 现代大洋中的锰质沉积主要以铁锰氧化物及氢氧化物结核的形式散布于海底, 这些结核可通过其成因特征进一步划分为由富氧底流控制形成的水成结核及由热液喷流作用控制形成的热液结核, 这两类结核在化学组成上存在差异. 而在那些赋存于古老地层岩石的锰矿床中矿石或矿胚的主要成分为菱锰矿 (MnCO_3), 其形成过程与盆地水体的氧化还原条件关系密切 (Maynard, 2003; Roy, 2006). 由于锰元素会溶解于还原性水体中而在氧化水体中沉淀, 因而在一个出现氧化还原水体分层的盆地中, 盆地还原水体中溶解的锰离子会在水体氧化还原界面附近发生沉淀, 形成氧化锰与氢氧化锰颗粒. 这些颗粒进入富有机质的沉积物后, 在早期成岩作用阶段与有机质反应形成碳酸锰沉积 (Huckriede and Meischner, 1996; Böhn and Stanistreet, 1997). 菱锰矿石形成时所经历的上述复杂成矿过程对原始锰质来源判别带来了许多干扰: 锰在沉淀之初多以不定形氧化物/氢氧化物形式存在, 这些不定形的锰氧化物/氢氧化物的化学性质影响了矿床最终的矿物组成 (Nicholson, 1992). 现在保存在菱锰矿层中的矿物是初始沉淀锰矿物经矿物转化的产物, 该过程不仅会导致原始不定形锰氧化物/氢氧化物消失, 也会导致具有成因指示意义的微量元素的迁移. 对于前寒武纪地层中的锰质沉积而言尤为如此 (Roy, 2000).

中一晚新元古代是全球板块运动、气候变化、生命演化及矿产形成的关键时期. 以 Rodinia 超大陆的裂解为构造背景, 全球范围内出现裂谷盆地特征的沉积序列, 与此同时, 地球经历了至少两次全球性的

冰期事件, 条带状铁建造 (Banded Iron Formation, BIF) 在消失了近 12 亿年之后又再次于成冰纪 (对应国内南华系) 在全球范围内出现 (Hoffman *et al.*, 1998; Eyles and Januszczak, 2004; Le Heron and Craig, 2012), 该时期也是全球最重要的成锰时期, 纳米比亚、巴西、印度及我国华南地区在该层位均出现巨量锰矿沉积 (Roy, 2006). 我国华南地区的新元古代锰矿主要分布于扬子板块东南缘湘黔桂交界地区, 在重庆秀山、贵州松桃、湖南花垣—湘潭等地均存在重要的锰矿沉积. 赋矿层位为大塘坡组底部, 矿层厚度变化较大. 长期以来, 关于大塘坡组的锰质来源的讨论持续不断, 存在陆源风化来源 (张飞飞等, 2013)、火山来源 (刘巽锋等, 1983; 杨绍祥和劳可通, 2006)、热水沉积来源 (王砚耕, 1990; 陈多福和陈先沛, 1992; 杨瑞东等, 2002; 何志威等, 2014) 及古天然气泄漏 (周琦等, 2007a, 2007b, 2013) 等不同看法.

锶元素在海水中滞留时间 ($3 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ a) 远超过海水的混合时间 (约 10^3 a), 因此在同一地质历史时期中全球大洋海水具有相同锶同位素组成, 并会随着时间的变化而变化 (Capo *et al.*, 1998). 海洋中锶元素的来源主要有两种: 陆地输入海洋的锶和海底热液系统释放的锶, 这两种不同来源的锶具有不同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值. 现代大洋海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值为 0.709 2, 陆地风化物质通过河流系统带入海洋中的锶具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 为 0.712 ± 0.001 ; 从 MOR 型玄武岩淋滤进入海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则较低, 一般为 0.703 左右 (Palmer and Edmond, 1989; McArthur, 1994), 现代海洋 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值即是这两端元组分在海水中的混合作用所决定. 基于以上原理, 全球新元古代以来的锶同位素变化曲线已被建立 (Veizer *et al.*, 1999; McArthur *et al.*, 2012), 其中, 锶同位素地层学对于

前寒武纪地层意义更加重大,因为前寒武纪地层时代缺乏生物地层学的限定,绝对地层年龄数据也并不完整,锶同位素地层学恰为全球范围的地层对比及整合地层记录提供了重要依据.同时,由于海底热液输入与陆源碎屑输入决定海水锶同位素的改变,其对于地层物质来源,陆地风化速率的改变及古气候变化均存在指示意义(Jacobsen and Kaufman, 1999; Halverson *et al.*, 2007).今次研究尝试对黔东松桃地区南华系大塘坡组地层底部锰矿石及含锰碳质页岩样品进行锶同位素研究,以期解决锰矿层物质来源问题.

1 地质背景

研究区所处的黔湘渝毗邻区位于江南造山带西南段,区内广泛出露前寒武地层.当约 820 Ma 晋宁—四堡造山运动结束,扬子地块与华夏地块于江南造山带区域发生拼合.在约 760 Ma 之后,拼合区再次转化成为拉张背景,南华盆地保持裂谷盆地特征直至南华纪结束(Wang and Li, 2003; 何卫红等, 2014; Lan *et al.*, 2015).南华盆地这种拉张构造背景与其他同时期盆地,如加拿大境内科迪勒拉山系北段 Amundsen 盆地(Thomson *et al.*, 2015),美国犹他州北部 Uinta Mountain 盆地(Dehler *et al.*, 2010)及澳大利亚西南部新元古代沉积盆地(Press, 2000; de Vries *et al.*, 2008)可对比:在 780~670 Ma 这些盆地与南华盆地类似,均处于拉张沉降机制控制下的构造背景,这表明南华裂谷盆地的发展是 Rodinia 超大陆裂解过程中的一幕.来自地球物理学的资料也显示,上扬子地区东南,形成横跨川黔湘地区的裂陷带,该裂陷带由深大断裂控制(刘文均, 1985; 蔡学林等, 2008; 袁学诚和华九如, 2011).

在黔东地区,南华系两期冰期事件沉积之间的间冰期沉积被命名为大塘坡组,该组底部即为锰矿赋矿层位,下部凝灰层定年结果限定其底界年龄约为 663 Ma(Zhou *et al.*, 2004; 尹崇玉等, 2006).大塘坡组总体为一套碎屑岩沉积,与下伏铁丝拗组及上覆南沱组冰期地层均为整合接触,底部以菱锰矿层与下伏铁丝拗组碳质泥岩或杂砂岩分隔,第一段为黑色碳质页岩,进入第 2、3 段后岩性变为灰色—深灰色粉砂岩.大塘坡组厚度变化范围较大,主要受到沉积时期地垒隆起与地堑盆地分布的控制.在地堑区内大塘坡组总厚多为 200~300 m,部分区域可达 600~1 000 m,第 1 段厚度一般为 20~30 m,但

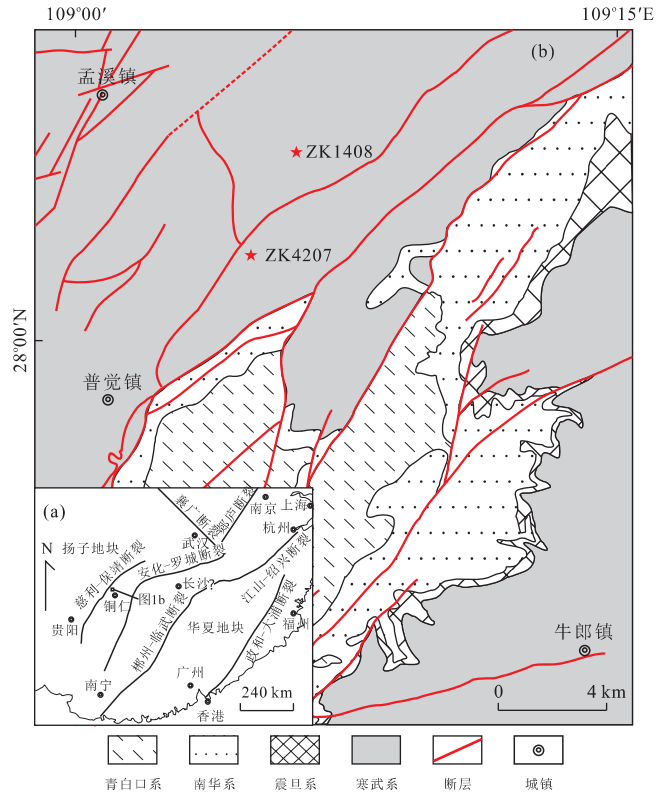


图 1 华南构造简图(a)和黔东松桃西溪堡矿区地质简图及采样钻孔位置(b)

Fig.1 Simplified tectonic map of South China (a) and geological map of Xixibao area in Songtao, East Guizhou and locations of sampling drilling cores (b)

也有区域大于 100 m;在地垒区,大塘坡组总厚度减小至 <100 m,第 1 段缺失或仅厚数十厘米.

2 采样

新近探明的西溪堡锰矿区位于贵州东部松桃县平头乡,区内出露南华系—寒武系地层,其中大塘坡组底部锰矿层为华南“大塘坡型”锰矿的典型代表.菱锰矿矿体呈现层状—似层状产出,根据钻孔资料统计,区内大塘坡组有自东南向西北逐渐变厚的趋势,其总厚度范围为 250~650 m,其中第 1 段黑色页岩段厚度在 20~190 m 范围内变化,菱锰矿矿体厚度在 1~16 m 范围内变化.矿石中矿物以菱锰矿为主,其他矿物包括石英、长石、白云石、以伊利石为主的黏土矿物等.含锰页岩及锰矿石中 Mn 含量变化范围为 2%~30%.本次采样所选取的两口钻孔 ZK4207 与 ZK1408 分别位于矿区中心及靠近北部边界位置(图 1),其中 ZK4207 见矿深度为 1 238 m, ZK 1408 见矿深度为 889 m. ZK4207 中大塘坡组总

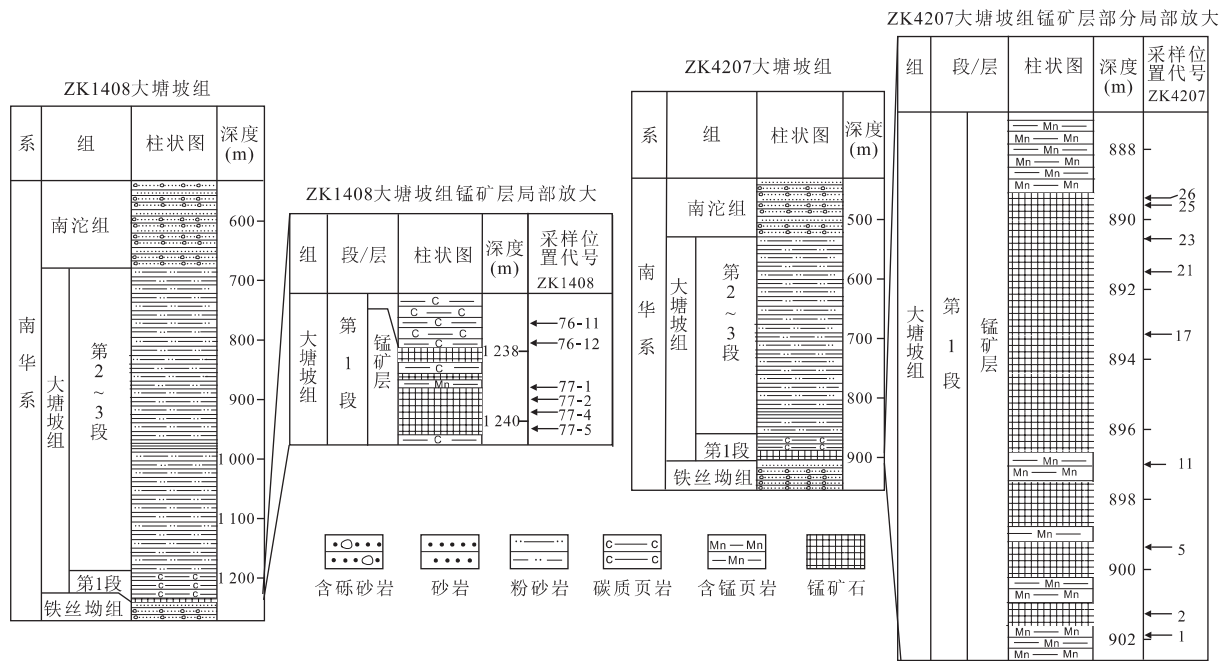


图 2 黔东松桃地区西溪堡矿区 ZK1408 与 ZK4207 柱状图及采样位置

Fig.2 Lithological columns of drilling core ZK 1408 and ZK 4207 in Xixibao area, Songtao Country, East Guizhou

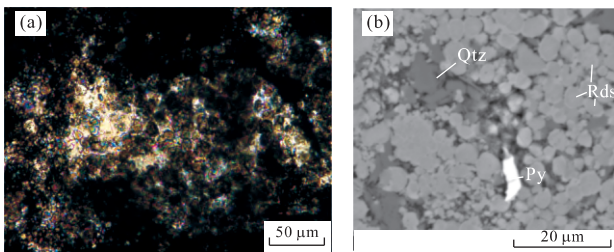


图 3 黔东松桃地区西溪堡矿区 ZK1408 中菱锰矿石薄片照片(a)及 SEM 照片(b)

Fig.3 Optical and SEM micrographs of Mn ore in drilling core ZK1408 in Xixibao area, Songtao Country, East Guizhou

a. 正交偏光 40x; Py. 黄铁矿; Rds. 菱锰矿; Qtz. 石英

厚度为 349.65 m, 第 1 段厚度为 39.55 m, 矿体总厚 13.19 m, 在矿体中采集了 9 个样品, 其中包括 3 个矿层中所夹含锰炭质页岩样品(ZK4207-1, ZK4207-21, ZK4207-11), 及其余 6 个菱锰矿样品. ZK1408 中大塘坡组总厚度为 592.91 m, 第 1 段厚度为 39.96 m, 矿体厚度为 2.49 m, 在矿体中采集样品 5 块, 在上覆黑色页岩中采集一块样品 ZK1408-76-11(图 2).

3 分析方法

岩石光薄片的扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)工作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.扫描电镜观察使用 JSM-5610 型扫描电子显微镜完成,加速电压为 20 kV,束流大小在 1~3 nA.通过扫描电子显微镜配备的能谱分析附件,可对微区成分进行半定量分析,从而在对微细矿物颗粒进行观察时提供矿物颗粒的化学成分数据,便于对矿物颗粒进行分析鉴定.15 个菱锰矿、含锰页岩及炭质页岩样品 Sr 同位素测定在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成.前处理流程包括将样品在 150 °C 温度下灼烧 30 min 以去除有机质,之后将样品用 HF+HNO₃+HCl 分解,经标准离子交换纯化并收集 Sr 进行上机测试,部分样品由于 Rb、Sr 含量较低因此在称样时增加样品的溶样量,以保证同位素分馏时的回收率.测试使用仪器为 VG 354 型热电质谱仪(TIMS).Sr 同位素测试所使用标样为 SRM987(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 265±12).⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值依据 ICP-MS 测试所得 Rb、Sr 含量进行计算.样品 Rb、Sr 含量测试在澳实矿物实验室(广州)完成,对 200 目样品粉末采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解法溶解,溶液蒸至近干后用稀盐酸溶解定容并加入 Rh 内标溶液进行上机测试.测试使用仪器为美国 PerkinElmer 公司 Elan 9000 型 ICP-MS,测试精度优于 3%.

4 结果

通过偏光显微镜及扫描电子显微镜对锰矿石光

表 1 黔东松桃地区大塘坡组锰矿层 Sr 同位素测试数据

Table 1 Sr isotope data of Mn deposit in Datangpo Formation in Xixibao area, Songtao Country, East Guizhou

样品号	岩性	样品时代(Ma)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	Rb(10 ⁻⁶)	Sr(10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	初始 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Al(%)	Mn(%)
ZK1408-76-11	黑色页岩	660	0.745 166	0.000 014	81.4	172.0	1.341 4	0.732 536	17.42	0.47
ZK1408-76-12	菱锰矿	660	0.723 849	0.000 016	115.0	169.0	1.924 7	0.705 727	11.38	13.56
ZK1408-77-1	含锰页岩	660	0.723 347	0.000 026	57.5	213.0	0.763 5	0.716 158	9.21	2.56
ZK1408-77-2	菱锰矿	660	0.712 724	0.000 032	24.9	211.0	0.333 4	0.709 584	2.38	27.67
ZK1408-77-4	含锰页岩	660	0.724 816	0.000 027	110.5	161.0	1.941 4	0.706 536	13.84	6.43
ZK1408-77-5	含锰页岩	660	0.721 299	0.000 020	97.8	198.0	1.396 7	0.708 147	11.52	2.33
ZK4207-26	含锰页岩	660	0.731 784	0.000 013	103.5	119.5	2.451 7	0.708 699	11.30	9.81
ZK4207-25	菱锰矿	660	0.730 458	0.000 012	109.5	158.5	1.955 3	0.712 047	11.45	10.60
ZK4207-23	菱锰矿	660	0.727 100	0.000 013	92.1	147.5	1.766 7	0.710 465	9.72	14.49
ZK4207-21	含锰页岩	660	0.729 591	0.000 016	87.2	133.0	1.855 5	0.712 120	12.60	8.36
ZK4207-17	菱锰矿	660	0.720 587	0.000 014	30.8	257.0	0.338 9	0.717 396	12.60	21.56
ZK4207-11	含锰页岩	660	0.729 526	0.000 016	85.5	146.0	1.657 3	0.713 921	9.33	6.85
ZK4207-5	菱锰矿	660	0.724 907	0.000 013	88.2	156.0	1.599 3	0.709 848	9.85	13.92
ZK4207-2	菱锰矿	660	0.717 525	0.000 014	34.0	183.5	0.523 7	0.712 593	3.97	20.04
ZK4207-1	含锰页岩	660	0.728 197	0.000 012	104.5	178.0	1.661 2	0.712 555	12.10	5.26

注:Al 与 Mn 数据引用自齐靛等 (2015).

薄片样品进行观察与鉴定,发现锰矿石中锰质主要以球形—椭圆形菱锰矿微球粒的形式存在,粒径约 3~10 μm,随着菱锰矿微球粒的生长,数个微球粒可结合成为不规则状菱锰矿团块.在锰矿石中尚可见到石英、长石、黏土矿物(以伊利石与绿泥石为主)及黄铁矿等矿物,在锰质页岩中碎屑成分含量上升.在所有锰矿石及含锰页岩岩矿薄片未发现火山碎屑物存在.

由于⁸⁷Rb 会发生 β 衰变形成⁸⁷Sr,因此需要对测试所获得⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值进行校正:

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{初始}} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{测试}} - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})(e^{\lambda t} - 1), \quad (1)$$

式中,λ 为⁸⁷Rb 的衰变常数,取 λ = 0.014 2 × 10⁻⁹ a⁻¹; t 为样品年龄,研究中使用 660 Ma(Zhou *et al.*, 2004).⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值可依据样品 Rb、Sr 含量依下式进行计算:

$$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = (\text{Rb}/\text{Sr})_c \times [Ab(^{87}\text{Rb}) \times \omega(\text{Sr})] / [Ab(^{86}\text{Sr}) \times \omega(\text{Rb})], \quad (2)$$

其中:(Rb/Sr)_c 为样品中这两种元素的浓度比; Ab(⁸⁷Rb)和 Ab(⁸⁶Sr)分别为⁸⁷Rb(0.278 5)和⁸⁶Sr(0.098 6)的同位素丰度;ω(Rb)与 ω(Sr)为样品中两种元素的各自的原子量.

对钻孔 ZK1408 及 ZK4207 中所取得 15 个样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值进行⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 校正获得初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(表 1).经分析,钻孔 ZK1408 中 6 个样品的初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值范围为 0.705 727~0.732 536,均值为 0.713 114,其中最高值来自于黑色页岩样品 ZK1408-76-11.钻孔 ZK4207 的 9 个样品初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值范围为 0.708 699~0.717 396,均值为 0.712 183. 14 个锰矿层样品的均值为 0.711 128.根据样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 Al 含量变化二元图可见(图 4a),随着铝含量的上升,数据点出现

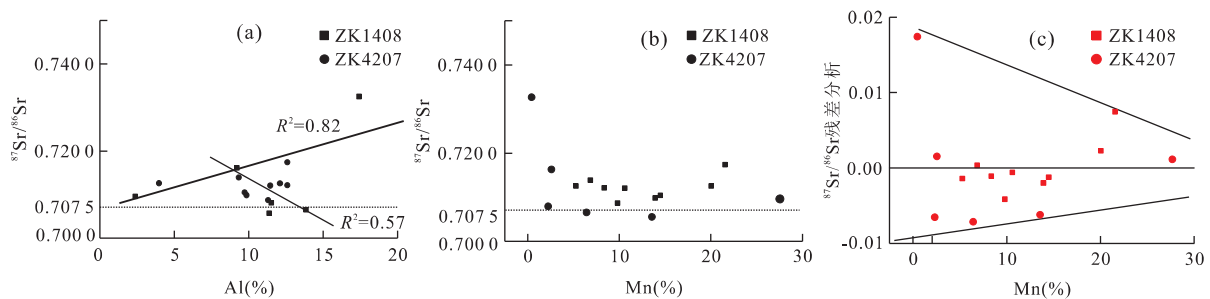


图 4 黔东松桃地区西溪堡矿区锰矿样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 Al 元素(a)、Mn 元素(b)含量变化图解和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 Mn 元素含量变化残差分析(c)

Fig.4 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr - Al(a), Mn (b) binary diagrams and residual analysis diagram of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-Mn (c) in Xixibao area, Songtao Country, East Guizhou

显著分异.可用两个相关函数来描述其分异趋势,一部分样品随 Al 含量上升出现 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值下降趋势($R^2=0.54$),另一部分样品随 Al 含量上升出现 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值上升趋势($R^2=0.82$). $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随 Mn 含量的上升总体呈现下降的趋势(图 4b),但是这种趋势在相关性上并不明显,这主要是由于样品中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值存在收敛性波动现象,以 Mn 含量作为独立变量对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行残差分析可见(图 4c), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的这种波动性随 Mn 含量上升呈现逐渐减弱的趋势.

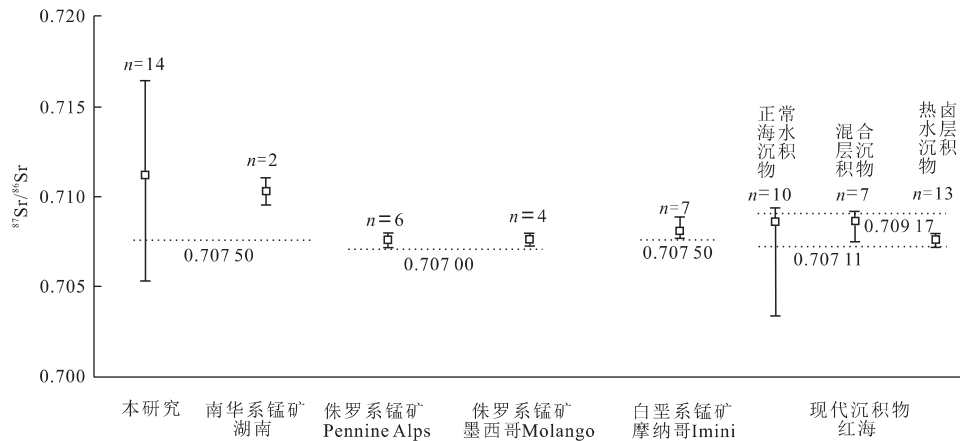
5 讨论

通过收集世界范围内其他锰矿床 Sr 同位素研究结果(图 5),我们发现不同沉积环境中的锰矿石所具有的 Sr 同位素地质意义存在较大差异.在本宁阿尔卑斯地区、墨西哥 Molango 地区及摩纳哥 Imini 地区,侏罗系及白垩系锰矿赋存于海相碳酸盐岩中(Stille *et al.*, 1989; Doe *et al.*, 1996).在本宁阿尔卑斯地区中出现含锰大理岩、浅变质放射虫硅质岩、板岩与浅变质玄武岩的地层组合,显示出洋壳缝合带的特征(Stille *et al.*, 1989).以上地区的锰矿石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均接近或略高于同时期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,指示锰质在沉淀过程中应直接从海水析出,保留了当时的古海水 Sr 同位素信息,类似于现今大洋中水成锰结核的形成机理(Goldstein and O'Nions, 1981; Amakawa *et al.*, 1991).

唐世瑜(1990)在湖南花垣民乐南华系锰矿沉积 2 个样品得出 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.709 350~0.711 450(图 5),而锰矿上覆碳质页岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高达 0.742 650~0.758 080.湖南花垣民乐南华系锰矿与贵州松桃地区南华系锰矿为同一成锰事件产物,其锰矿样品中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值与本研究测得数据平均值接近.但本研究在对 15 件样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行统计后发现,黔东地区南华系锰矿及锰质页岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围变化较大,部分锰矿样品(如 ZK1408-76-11、ZK1408-76-11、ZK4207-17 等)具有较高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,其中锰含量最少的炭质页岩样品 ZK1408-76-11 具有最高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 0.732 536,说明这部分样品中存在较多的壳源物质输入.另一部分样品,如 ZK1408-76-12(0.705 726)与 ZK1408-77-4(0.706 536),其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值则较低,不仅小于壳源硅铝质物质平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 0.712 000,同时也小于同时期(约

660 Ma)的古海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 0.707 500(Halver-son *et al.*, 2007),并且在对其进行光学显微镜及 SEM 观察时均未发现其中含有火山碎屑物,证明存在有非放射性成因 Sr 输入使得锰矿层中低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的现象出现.还有一部分样品(如 ZK1408-77-2、ZK1408-77-5、ZK4207-26 和 ZK4207-5) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值虽大于同时期古海水 Sr 同位素比值,但小于陆源输入碎屑物质 Sr 同位素比值,这部分样品在形成过程中可能发生了具有不同 Sr 同位素比值物质的混合作用.

现代红海地区的研究案例对具有深源特征的热液系统及碎屑物质输入如何影响沉积物中 Sr 同位素比值这一问题具有重要参考意义.位于东非大裂谷最东段的红海,是地幔柱上涌导致地壳强烈拉张的产物(Rogers *et al.*, 2000).受到目前仍在活动的深部岩浆作用的影响,红海底部一些区域,如著名的 Atlantic II 及 Shaban 海渊,存在强烈热液活动,热液系统从下伏玄武岩中萃取出元素带入海水,其中不仅包括大量金属元素,也包括稀土及锶等元素(李军等, 2014).在这些海渊区域,海水出现明显的分层,底层是高温缺氧的热卤水层,表层是低温富氧的表层海水,两者之间存在厚度不定的混合海水层,底层热卤水中富含金属元素,Fe、Mn 等元素一般以氧化物及氢氧化物的形式被固定于混合层位置(Anschütz *et al.*, 1995; Hartmann *et al.*, 1998; Butuzova *et al.*, 2009).针对红海中不同类型现代沉积物的 Sr 同位素比值研究证明(Cocherie *et al.*, 1994)(图 5),在热卤水层内的沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围为 0.707 320~0.707 810,平均为 0.707 540,略高于热卤水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 0.707 105(Anschutz *et al.*, 1995);而混合水层与浅部海水区域的沉积物均具有与表层海水 0.709 170(Anschutz *et al.*, 1995)相接近的平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,当沉积物中出现玄武质火山岩碎屑时,会出现极低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(如图 5 中红海正常海水沉积物中 0.703 320).这说明,深源物质进入沉积物后会导致沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低.本研究中出现随着 Al 含量上升出现 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值下降及低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值现象的出现说明锰矿层在形成过程中接受了深部来源物质的输入,由于在锰矿层样品中未见火山碎屑物质,因此可能是以热液系统的形式影响锰矿层内部的 Sr 同位素组成.与之相对,在黔东地区南华系锰矿中存在相当一部分锰矿及锰质页岩样品中出现高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,结合在镜下观察到的锰矿层中存在陆源碎屑物质的现象,

图 5 世界不同时代锰矿石或沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值数据Fig.5 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data of Mn deposits with different ages in the world

湖南南华系锰矿数据来源于唐世瑜(1990); Pennine Alps 侏罗系锰矿数据来源于 Stille *et al.*(1989); 墨西哥 Molango 地区侏罗系锰矿及摩洛哥 Imini 地区数据来源于 Doe *et al.*(1996); 红海现代沉积物数据来源于 Cocherie *et al.*(1994). 图中虚线表示锰矿或沉积物形成时期古海水/现代海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值

我们认为锰矿层中高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的出现是陆源碎屑物质输入的结果。

基于以上分析,若大塘坡组锰矿的锰质全部来源于陆源风化产物,那么在样品中观察到的现象应观察到类似现代波罗的海锰质沉积中 Sr 同位素值远高于海水 Sr 同位素值的现象(Amakawa *et al.*, 1991).此外,本研究样品的初始 Sr 同位素与那些明确来自水成环境的样品相比存在更大的值域范围,如墨西哥 Molango 地区及摩纳哥 Imini 地区,这两个地区锰矿样品 Sr 同位素值保存了古海水 Sr 同位素值信息,因而 Sr 同位素值分布极为集中(图 5).而本研究中的大塘坡锰矿沉积赋存于南华纪间冰期的黑色页岩序列中,且处于裂谷盆地古地理背景中.样品的地球化学及矿物学结果也显示(齐靓等, 2015),大塘坡组锰矿层中的锰矿及含锰页岩存在含量不定的陆源碎屑物质.这些陆源碎屑物质是泥级至粘土级的细粒沉积物,一般认为是在风化与搬运过程中充分混合的产物,因此不会出现物质组成上的极大分异(Cox *et al.*, 1995).但是在大塘坡组锰矿层中的样品却出现随着 Al_2O_3 含量上升 Sr 同位素变化趋势分异的现象.排除掉物源变化的因素之外,有理由认为这种变化趋势反映了陆源碎屑物质与热液成分混合的现象.当排除了陆源碎屑物质携带锰质进入盆地后,热液系统的输入锰质应是最为合理的解释。

华南南华盆地在南华纪表现出由深大断裂控制的裂谷盆地特征(Wang and Li, 2003),与此同时,南华盆地在新元古代冰期阶段,在冰川事件导致海平面下降的机制下出现与广海的隔绝(Li *et al.*,

2012).在此背景下,华南巨量锰矿沉积出现在 Sturtian 间冰期伊始,且在之后的地层中并未再次出现,说明该时期的锰矿沉积是一个特殊的事件沉积(杜远生等, 2015).在 Sturtian 冰期时期,由于冰盖覆盖,盆地内水体与外界交流被切断,盆地内水体呈现缺氧环境(Zhang *et al.*, 2015),而盆地内部海底热液系统仍在不断供给锰质进入盆地内缺氧水体,使得南华盆地形成“锰储库”.随着 Sturtian 冰期结束,海面冰盖消融使得南华盆地内海水与外部的沟通重新建立,水体中氧化还原条件急剧变化,转变为氧化还原分层的水体(Li *et al.*, 2012),氧化环境的再次出现使锰质得以固定,进入沉积物中.与此同时,间冰期强烈的陆上风化作用使得大量碎屑物质进入盆地.热液物质与陆源碎屑物质的信息同时保存在锰矿层中,导致其 Sr 同位素比值出现较为宽泛的变化范围.可以认为黔东地区南华系锰矿是海底热液系统与表层系统共同作用下的产物。

6 结论

黔东松桃地区南华系锰矿层中 Sr 同位素比值兼具海底热液系统及壳源信息.那些具有低于同时期古海水 Sr 同位素比值的锰矿石样品中并未发现存在火山碎屑物质,而那些高于平均地壳平均 Sr 同位素比值的样品中则出现较多陆源碎屑物质,此外,尚发现锰矿层样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与 Al 含量出现两个分异趋势,以上证据证实锰矿层中物源的双重性。

通过与所收集到的世界其他地区不同时代锰矿沉积及现代红海沉积物的 Sr 同位素结果对比,发现黔东松桃地区南华系锰矿层中 Sr 同位素比值分布范围较宽,与典型的直接从海水沉淀出的锰矿层具有不同的 Sr 同位素特征.结合该锰矿形成时期的特殊地质背景,我们认为锰质积累与沉淀过程具有不同阶段——锰质的积累通过深源热液系统在 Sturtian 冰期盆地缺氧水体中完成,而锰矿的沉淀过程则是在间冰期伊始古海洋化学条件动荡的水体中完成.

References

- Amakawa, H., Ingri, J., Masuda, A., et al., 1991. Isotopic Compositions of Ce, Nd and Sr in Ferromanganese Nodules from the Pacific and Atlantic Oceans, the Baltic and Barents Seas, and the Gulf of Bothnia. *Earth and Planetary Science Letters*, 105 (4): 554 – 565. doi: 10.1016/0012-821X(91)90192-K
- Anschutz, P., Blanc, G., Stille, P., 1995. Origin of Fluids and the Evolution of the Atlantis II Deep Hydrothermal System, Red Sea; Strontium Isotope Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (23): 4799 – 4808. doi: 10.1016/0016-7037(95)00350-9
- Bühn, B., Stanistreet, I.G., 1997. Insight into the Enigma of Neoproterozoic Manganese and Iron Formations from the Perspective of Supercontinental Break-Up and Glaciation. *Geological Society, London, Special Publications*, 119 (1): 81 – 90. doi: 10.1144/gsl.sp.1997.119.01.05
- Butuzova, G. Y., Drits, V. A., Morozov, A. A., et al., 2009. Processes of Formation of Iron-Manganese Oxyhydroxides in the Atlantis-II and Thetis Deeps of the Red Sea. In: John Parnell, Y. L., Chen, C., eds., *Sediment-Hosted Mineral Deposits*. Blackwell Publishing Ltd., London, 57 – 72.
- Cai, X. L., Cao, J. M., Zhu, J. S., et al., 2008. The System of Crust-Mantle Ductile Shear Zones in China Continental Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 15 (3): 36 – 54 (in Chinese with English abstract).
- Capo, R. C., Stewart, B. W., Chadwick, O. A., 1998. Strontium Isotopes as Tracers of Ecosystem Processes: Theory and Methods. *Geoderma*, 82 (1): 197 – 225. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00102-X
- Chen, D. F., Chen, X. P., 1992. Geological and Geochemical Characteristics of Songtao Hydrothermal Sedimentary Manganese Deposits, Guizhou. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10 (4): 35 – 43 (in Chinese with English abstract).
- Cocherie, A., Calvez J. Y., Oudin-Dunlop, E., 1994. Hydrothermal Activity as Recorded by Red Sea Sediments; Sr-Nd Isotopes and REE Signatures. *Marine Geology*, 118 (3 – 4): 291 – 302. doi: 10.1016/0025-3227(94)90089-2
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (14): 2919 – 2940. doi: 10.1016/0016-7037(95)00185-9
- de Vries, S. T., Pryer, L. L., Fry, N., 2008. Evolution of Neoproterozoic and Proterozoic Basins of Australia. *Precambrian Research*, 166 (1 – 4): 39 – 53. doi: 10.1016/j.precamres.2008.01.005
- Dehler, C. M., Fanning, C. M., Link, P. K., et al., 2010. Maximum Depositional Age and Provenance of the Uinta Mountain Group and Big Cottonwood Formation, Northern Utah: Paleogeography of Rifting Western Laurentia. *Geological Society of America Bulletin*, 122 (9 – 10): 1686 – 1699. doi: 10.1130/b30094.1
- Doe, B., Ayuso, R., Futa, K., et al., 1996. Evaluation of the Sedimentary Manganese Deposits of Mexico and Morocco for Determining Lead and Strontium Isotopes in Ancient Seawater. *Earth Processes: Reading the Isotopic Code*, 95: 391 – 408. doi: 10.1029/GM095p0391
- Du, Y. S., Zhou, Q., Yu, W. C., et al., 2015. Linking the Cryogenian Manganese Metagenetic Process in the Southeast Margin of Yangtze Block to Break-Up of Rodinia Supercontinent and Sturtian Glaciation. *Geological Science and Technology Information*, 34 (6): 1 – 7 (in Chinese with English abstract).
- El Rhazi, M., Hayashi, K. I., 2003. Origin and Formational Environment of Noda-Tamagawa Manganese Ore, Northeast Japan: Constraints from Isotopic Studies. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 63 (2): 149 – 162. doi: 10.1078/0009-2819-00028
- Eyles, N., Januszczak, N., 2004. ‘Zipper-Rift’: A Tectonic Model for Neoproterozoic Glaciations during the Break-up of Rodinia after 750 Ma. *Earth-Science Reviews*, 65 (1 – 2): 1 – 73. doi: 10.1016/S0012-8252(03)00080-1
- Goldstein, S. L., O’Nions, R. K., 1981. Nd and Sr Isotopic Relationships in Pelagic Clays and Ferromanganese Deposits. *Nature*, 292 (5821): 324 – 327. doi: 10.1038/292324a0
- Halverson, G. P., Dudás, F. Ö., Maloof, A. C., et al., 2007. Evolution of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Composition of Neoproterozoic Seawater. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 256 (3 – 4): 103 – 129. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.02.028
- Hartmann, M., Scholten, J. C., Stoffers, P., et al., 1998. Hy-

- drographic Structure of Brine-Filled Deeps in the Red Sea—New Results from the Shaban, Kebrit, Atlantis II, and Discovery Deep. *Marine Geology*, 144 (4): 311—330. doi:10.1016/S0025-3227(97)00055-8
- He, W. H., Tang, T. T., Yue, M. L., et al., 2014. Sedimentary and Tectonic Evolution of Nanhuan-Permian in South China. *Earth Science*, 39(8): 929—953 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. W., Yang, R. D., Gao, J. B., et al., 2014. The Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of Manganese-Bearing Rock Series of Daotuo Manganese Deposit, Songtao County of Guizhou Province. *Geological Review*, 60(5): 1061—1075 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Huckriede, H., Meischner, D., 1996. Origin and Environment of Manganese-Rich Sediments within Black-Shale Basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(8): 1399—1413. doi:10.1016/0016-7037(96)00008-7
- Jacobsen, S. B., Kaufman, A. J., 1999. The Sr, C and O Isotopic Evolution of Neoproterozoic Seawater. *Chemical Geology*, 161(1—3): 37—57. doi:10.1016/S0009-2541(99)00080-7
- Lan, Z., Li, X. H., Zhu, M., et al., 2015. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China, SIMS U-Pb Zircon Age Constraints and Regional and Global Significance. *Precambrian Research*, 263: 123—141. doi:10.1016/j.precamres.2015.03.012
- Le Heron, D. P., Craig, J., 2012. Neoproterozoic Deglacial Sediments and Their Hydrocarbon Source Rock Potential. *Geological Society, London, Special Publications*, 368 (1): 381—393. doi:10.1144/sp368.16
- Li, C., Love, G. D., Lyons, T. W., et al., 2012. Evidence for a Redox Stratified Cryogenian Marine Basin, Datangpo Formation, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 331—332: 246—256. doi:10.1016/j.epsl.2012.03.018
- Li, J., Sun, Z. L., Huang, W., et al., 2014. Modern Seafloor Hydrothermal Processes and Mineralization. *Earth Science*, 39 (3): 312—324 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. J., 1985. Evolution of Hunan-Guizhou Fault Zone and the Features of Mineralization. *Geological Review*, 31 (3): 224—231 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Hu, Z., Zeng, L. X., et al., 1983. Origin and Characteristics of Sedimentary Facies of Sinaian Manganese Deposits in Guizhou. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1 (4): 106—116, 138—139 (in Chinese with English abstract).
- Maynard, J. B., 2003. Manganiferous Sediments, Rocks, and Ores. *Treatise on Geochemistry*, 7: 289—308.
- McArthur, J. M., 1994. Recent Trends in Strontium Isotope Stratigraphy. *Terra Nova*, 6(4): 331—358. doi:10.1111/j.1365-3121.1994.tb00507.x
- McArthur, J. M., Howarth, R. J., Shields, G. A., 2012. The Geologic Time Scale. Elsevier, Boston, 127—144.
- Nicholson, K., 1992. Contrasting Mineralogical-Geochemical Signatures of Manganese Oxides; Guides to Metallogenesis. *Economic Geology*, 87 (5): 1253—1264. doi:10.2113/gsecongeo.87.5.1253
- Nicholson, K., Nayak, V. K., Nanda, J. K., 1997. Manganese Ores of the Ghorajhor-Monmunda Area, Sundergarh District, Orissa, India; Geochemical Evidence for a Mixed Mn Source. *Geological Society, London, Special Publications*, 119 (1): 117—121. doi:10.1144/gsl.sp.1997.119.01.08
- Okita, P. M., Shanks III, W. C., 1992. Origin of Stratiform Sediment-Hosted Manganese Carbonate Ore Deposits: Examples from Molango, Mexico, and Taojiang, China. *Chemical Geology*, 99(1—3): 139—163. doi:10.1016/0009-2541(92)90036-5
- 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
- Preiss, W. V., 2000. The Adelaide Geosyncline of South Australia and Its Significance in Neoproterozoic Continental Reconstruction. *Precambrian Research*, 100 (1—3): 21—63. doi:10.1016/S0301-9268(99)00068-6
- Qi, L., Yu, W. C., Du, Y. S., et al., 2015. Paleoclimate Evolution of the Cryogenian Tiesi'ao Formation-Datangpo Formation in Eastern Guizhou Province; Evidence from Chemical Index of Alteration. *Geological Science and Technology Information*, 37 (6): 47—57 (in Chinese with English abstract).
- Rogers, N., MacDonald, R., Fitton, J. G., et al., 2000. Two Mantle Plumes beneath the East African Rift System: Sr, Nd and Pb Isotope Evidence from Kenya Rift Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 176 (3): 387—400. doi:10.1016/S0012-821X(00)00012-1
- Roy, S., 2000. The Manganese Formation of the Neoproterozoic Penganga Group, India—Revision of an Enigma—A Discussion. *Economic Geology*, 95(1): 237—238. doi:10.2113/gsecongeo.95.1.237
- Roy, S., 2006. Sedimentary Manganese Metallogenesis in Re-

- sponse to the Evolution of the Earth System. *Earth-Science Reviews*, 77(4): 273–305. doi: 10.1016/j.earsci-rev.2006.03.004
- Stille, P., Clauer N., Abrecht J., 1989. Nd Isotopic Composition of Jurassic Tethys Seawater and the Genesis of Alpine Mn-Deposits; Evidence from Sr-Nd Isotope Data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(5): 1095–1099. doi: 10.1016/0016-7037(89)90214-7
- Tang, S. Y., 1990. Isotope Geological Study of Manganese Deposit in Minle Area, Hunan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(4): 77–84 (in Chinese with English abstract).
- Thomson, D., Rainbird, R. H., Krapez, B., 2015. Sequence and Tectonostratigraphy of the Neoproterozoic (Tonian-Cryogenian) Amundsen Basin Prior to Supercontinent (Rodinia) Breakup. *Precambrian Research*, 263: 246–259. doi: 10.1016/j.precamres.2015.03.001
- 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. *Chemical Geology*, 161(1–3): 59–88. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00081-9
- Wang, J., Li, Z. X., 2003. History of Neoproterozoic Rift Basins in South China: Implications for Rodinia Break-Up. *Precambrian Research*, 122(1–4): 141–158. doi: 10.1016/S0301-9268(02)00209-7
- Wang, Y. G., 1990. Old Hot Brine Manganese Deposit in a Shallow-Sea Rift Basin: An Example from the Sinian Manganese Deposits in the Wuling Mountain Area. *Sedimentary Facies and Paleogeography*, 10(1): 38–45 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. D., Ouyang, Z. Y., Zhu, L. J., et al., 2002. A New Understanding of Manganese Carbonate Deposits in Early Sinian Datangpo Stage. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(4): 329–334 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. X., Lao, K. T., 2006. Mineralization Model for the Manganese Deposits in Northwestern Hunan: An Example from Minle Manganese Deposit in Huayuan, Hunan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(2): 72–80 (in Chinese with English abstract).
- Yin, C. Y., Wang, Y. G., Tang, F., et al., 2006. SHRIMP II U-Pb Zircon Date from the Nanhua Datangpo Formation in Songtao County, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 273–278 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X. C., Hua, J. R., 2011. 3D Lithospheric Structure of South China. *Geology in China*, 38(1): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. F., Yan, B., Guo, Y. L., et al., 2013. Precipitation Form of Manganese Ore Deposit in Gucheng, Hubei Province, and Its Paleoenvironment Implication. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 245–258 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Zhu, X., Yan, B., et al., 2015. Oxygenation of a Cryogenian Ocean (Nanhua Basin, South China) Revealed by Pyrite Fe Isotope Compositions. *Earth and Planetary Science Letters*, 429: 11–19. doi: 10.1016/j.epsl.2015.07.021
- Zhou, C., Tucker R., Xiao, S., et al., 2004. New Constraints on the Ages of Neoproterozoic Glaciations in South China. *Geology*, 32(5): 437–440. doi: 10.1130/g20286.1
- Zhou, Q., Du, Y. S., Qin, Y., 2013. Ancient Natural Gas Seepage Sedimentary-Type Manganese Metallogenic System and Ore-Forming Model: A Case Study of ‘Datangpo Type’ Manganese Deposits Formed in Rift Basin of Nanhua Period along Guizhou-Hunan-Chongqing Border Area. *Mineral Deposits*, 32(3): 457–466 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Du, Y. S., Wang, J. S., et al., 2007a. Characteristics and Significance of the Cold Seep Carbonates from the Datangpo Formation of the Nanhua Series in the North-east Guizhou. *Earth Science*, 32(3): 339–346 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., Du, Y. S., Yan, J. X., et al., 2007b. Geological and Geochemical Characteristics of the Cold Seep Carbonates in the Early Nanhua System in Datangpo, Songtao, Guizhou Province. *Earth Science*, 32(6): 845–852 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡学林, 曹家敏, 朱介寿, 等, 2008. 中国大陆岩石圈壳幔韧性剪切带系统. *地学前缘*, 15(3): 36–54.
- 陈多福, 陈先沛, 1992. 贵州省松桃热水沉积锰矿的地质地球化学特征. *沉积学报*, 10(4): 35–43.
- 杜远生, 周琦, 余文超, 等, 2015. Rodinia 超大陆裂解、Sturtian 冰期事件和扬子地块东南缘大规模锰成矿作用. *地质科技情报*, 34(6): 1–7.
- 何卫红, 唐婷婷, 乐明亮, 等, 2014. 华南南华纪一二叠纪沉积大地构造演化. *地球科学*, 39(8): 929–953.
- 何志威, 杨瑞东, 高军波, 等, 2014. 贵州松桃道垭锰矿含锰岩系地球化学特征和沉积环境分析. *地质论评*, 60(5): 1061–1075.
- 李军, 孙治雷, 黄威, 等, 2014. 现代海底热液过程及成矿. *地球科学*, 39(3): 312–324.
- 刘文均, 1985. 湘黔断裂带的演化及其成矿作用特点. *地质论评*, 31(3): 224–231.
- 刘翼锋, 胡肇荣, 曾励训, 等, 1983. 贵州震旦纪锰矿沉积相特征及其成因探讨. *沉积学报*, 1(4): 106–116, 138–139.
- 齐靓, 余文超, 杜远生, 等, 2015. 黔东南华纪铁土坳组一大塘

坡组古气候的演变——来自 CIA 的证据.地质科技情报,37(6):47-57.

唐世瑜,1990.湖南花垣民乐震旦系锰矿床同位素地质研究.沉积学报,8(4):77-84.

王砚耕,1990.一个浅海裂谷盆地的古老热水沉积锰矿——以武陵山震旦纪锰矿为例.岩相古地理,10(1):38-45.

杨瑞东,欧阳自远,朱立军,等,2002.早震旦世大塘坡期锰矿成因新认识.矿物学报,22(4):329-334.

杨绍祥,劳可通,2006.湘西北锰矿床成矿模式研究——以湖南花垣民乐锰矿床为例.沉积与特提斯地质,26(2):72-80.

尹崇玉,王砚耕,唐烽,等,2006.贵州松桃南华系大塘坡组凝灰岩锆石 SHRIMP II U-Pb 年龄.地质学报,80(2):

273-278.

袁学诚,华九如,2011.华南岩石圈三维结构.中国地质,38(1):1-19.

张鹏飞,闫斌,郭跃玲,等,2013.湖北古城锰矿的沉淀形式及其古环境意义.地质学报,87(2):245-258.

周琦,杜远生,覃英,2013.古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例.矿床地质,32(3):457-466.

周琦,杜远生,王家生,等,2007a.黔东北地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义.地球科学,32(3):339-346.

周琦,杜远生,颜佳新,等,2007b.贵州松桃大塘坡地区南华纪早期冷泉碳酸盐岩地质地球化学特征.地球科学,32(6):845-852.

《Journal of Earth Science》(英文版)2015 影响因子升至 0.953

据汤姆森路透最新发布的 JCR(期刊引证报告),我校主办的英文期刊《Journal of Earth Science》(简称 JES)2015 影响因子升至 0.953,总引用次数 574 次,近 5 年影响因子为 0.873.近年来 JES 期刊影响因子逐年提升,2013 年为 0.546,2014 年为 0.757.

影响因子是衡量期刊国际影响力的重要指标.近年来,JES 主编赖旭龙教授、编委专家和编辑部成员为了提高期刊影响力,从多个方面进行谋划,组织专辑稿件,筛选高水平的研究成果。如,夏江海教授组织的“近表层地球物理勘查”专栏,Robert E. Criss 教授组织的“水资源与洪涝灾害”专辑,生物地质与环境地质国家重点实验室李超教授的“地球早期生氧事件与生命演化”专辑等.此外,编辑部注重网站建设,积极搭建期刊与新媒体融合推广平台,如微信、微博等,加大优质稿件的宣传力度.同时鼓励编辑参加地球科学类相关的国际会议,进行期刊推广和邀约稿件.