

武定迳纳厂 Fe-Cu-REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义

杨耀民 涂光炽 胡瑞忠 石学法

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 西北有色地质勘探局物化探总队, 西安 710068. E-mail: yangyaomin@fio.org.cn)

摘要 通过典型矿床-武定迳纳厂 Fe-Cu-REE 矿床中矿石及萤石稀土元素特征和 Sm-Nd 同位素体系的研究, 对昆阳群稀土富集及矿化时代进行了限定. 研究表明, 成矿期呈浸染状紫红色萤石中稀土总量高, 强烈富集轻稀土, 正 Eu 异常; 成矿期后脉状浅绿色萤石中稀土总量低, 相对富集重稀土. 成矿期萤石 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 1539 ± 40 Ma, $\epsilon_{Nd}(t) = -4.6$; 矿石 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 1617 ± 100 Ma, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -3.2 . 表明矿床形成于中元古代早期, 成矿物质来源于富集地幔, 矿床成因为火山喷流-同生沉积. 在对比研究的基础上, 提出中元古代稀土大规模爆发成矿可能与当时大陆边缘裂谷环境产出的富碱非造山型岩浆有密切的关系.

关键词 昆阳裂谷 稀土铁铜矿床 萤石 Sm-Nd 同位素体系 中元古代

扬子地块西南缘为我国重要铁、铜成矿区之一^[1], 在铁、铜成矿过程中, 伴随有稀土的富集或矿化现象, 如东川的稀矿山铁铜矿床、笔架山铁矿床、武定-禄丰地区的迳纳厂稀土铁铜矿床、鹅头厂铁矿床及易门含铜磁铁矿石的上下盘围岩-硅质白云岩等中均发现稀土有不同程度的富集和矿化^[2~4], 尤其是武定迳纳厂矿床中稀土具有一定的工业利用价值¹⁾, 矿石的元素组合和矿体产出的地质特征与我国的白云鄂博超大型 REE-Fe-Nb 矿床具可比性^[5~7], 而且其与近年来国际大力研究和勘探的铁氧化物(Cu-Au-U-REE)工业类型矿床的成矿特征较为相似^[8,9]. 前人对铁、铜的成矿时代和成因进行了较为深入的研究^[1,3,10,11], 相对而言, 对这类矿床中稀土富集、矿化及其指示意义等研究较为薄弱, 特别是尚未见有关稀土成矿时代的报道.

Sm-Nd 同位素体系相对易保持封闭, 具有较强的抗风化、抗蚀变能力, 为精确确定矿床年代的有效手段之一^[12,13]. 尤其是一些单矿物如方解石、萤石、白钨矿、电气石中, Sm, Nd 主要替代矿物晶格中 Ca^{2+} 的位置而存在. 自 20 世纪 80 年代末以来, 国内外学者应用萤石、方解石等含钙矿物的 Sm-Nd 体系在确定成矿时代方面进行了较多的研究^[14~18].

本文选用迳纳厂矿床矿石和萤石的 Sm-Nd 同位素体系对稀土富集时代进行了较为精确的限定, 探讨昆阳群地层中富稀土成矿流体的来源和矿床的形成机

制, 同时对比研究我国的白云鄂博 REE-Fe-Nb 超大型矿床和澳大利亚的 Olympic Dam 超大型多金属矿床, 初步探讨全球中元古代稀土大规模爆发成矿的机制.

1 地质特征

武定迳纳厂矿床就位于昆阳裂谷的禄丰-武定火山断陷盆地中, 赋矿地层迳纳厂组的归属仍存在较大的争论, 现暂归于昆阳群因民组地层中. 矿体主要赋存于因民组顶部与上覆落雪组白云岩过渡部位, 呈层状、似层状或透镜状, 矿层沿走向厚度变化不大, 与围岩整合接触. 矿体顶底板围岩为石榴石黑云母片岩、黑云母微晶片岩、黑云片岩、含石榴石黑云片岩、钠长黑云片岩等, 其特点是以铁黑云母组成主要矿物, 含有铁铝榴石, 对其原岩恢复, 主要为变碱性粗面安山岩. 原生矿石主要由金属矿物(磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿)和浅色矿物(萤石、磷灰石、石英、碳酸盐等矿物)形成不同组合的条纹、条带.

成矿期萤石在矿石中主要呈条带状或浸染状分布, 呈它形、半自形至自形, 大多数粒度较小, 在 0.01 ~ 1.00 mm 范围内, 浅紫色至紫红色, 与磁铁矿、黄铜矿、菱铁矿等形成不同颜色的条带状矿石. 成矿后期形成的萤石主要呈细脉状, 脉宽在 0.1~1.0 cm, 数量较少, 主要分布在矿体接近上下盘围岩的接触部位, 为无色或浅绿色, 透明, 颗粒较为粗大.

1) 云南省武定县迳纳石铁铜矿区详勘地质报告(第二期), 1979

2 样品的采集与测试分析

本次研究所有样品均采自迤纳厂矿区的大宝山露天采场和东方红矿段的坑道中. 矿石主要选择条纹条带状、浸染状矿石及块状矿石. 萤石单矿物是通过全岩样品粉碎、过筛、磁选、电磁选、手工淘洗, 然后在双目显微镜下剔除杂质和其他矿物, 使其纯度达到 99% 以上.

萤石样品的微量元素分析在中国科学院地球化学研究所采用 ICP-MS 进行, 详细分析方法见文献 [19], 分析精度相比同位素稀释法稍差 ($\pm 10\%$), 分析结果见表 1. Sm-Nd 同位素组成在中国科学院地质与地球物理研究所超净实验室完成, 称取样品约 50~100 mg, 加入 ^{149}Sm - ^{150}Nd 稀释剂, 用 $\text{HF}+\text{HClO}_4$ 在 Teflon 密闭容器中低温溶解一星期, 采用 AG50W $\times 8(\text{H}^+)$ 阳离子交换柱和 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Sm 和 Nd. 同位素测量在 VG354 固体同位素质谱计上进行¹⁾, Nd 同位素分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正. 对国际标准岩石样品 BCR-1 两次测定结果分别为 $\text{Sm}=6.54, 6.55 \mu\text{g/g}^{-1}$; $\text{Nd}=25.55, 28.38 \mu\text{g/g}^{-1}$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512633 \pm 9, 0.512619 \pm 9$. Sm, Nd 全流程空白本底值约为 $5 \times 10^{-11}\text{g}$, 年龄采用 ISOPLOT 软件计算. 分析结果见表 2 和表 3.

3 结果

3.1 萤石稀土元素特征

成矿期萤石稀土含量高, 变化范围(ΣREE : 394~3531 $\mu\text{g/g}$), 富集 LREE, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化在 5.97~

69.47 之间, 明显的正 Eu 异常(δEu 1.35~5.78), 弱的负 Ce 异常或无异常. 成矿期后萤石稀土总量均小于 100 $\mu\text{g/g}$, 明显富集 HREE, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化在 0.07~1.44, $\delta \text{Eu}=1.81\sim 2.52$. 两期萤石稀土元素球粒陨石标准化配分模式见图 1.

3.2 矿石的 Sm-Nd 年龄

矿石采样位置、Sm, Nd 含量及同位素组成见表 1. 从表 1 中可以看出, 两个矿段矿石的 Sm, Nd 含量变化不大, 条带状矿石中含量相对较高. 在 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解中, 所有矿石均表现出良好的线性关系(图 2). 利用 ISOPLOT 软件包, 输入参数: $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 的误差为 0.5%, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的绝对误差为 0.00005, ^{147}Sm 的衰变常数为 $6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$. 可求得矿石的等时线年龄 $t=1617 \pm 100 \text{Ma}$ (2σ), $\text{MSWD}=1.3$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值为 0.51383 ± 62 , 对应的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -3.2.

3.3 萤石 Sm-Nd 年龄

6 个成矿期萤石单矿物样品进行了 Sm-Nd 同位素测定. 计算方法同矿石, 结果见表 2 和图 3. 等时线表现良好的线性关系, 所得年龄为 $1539 \pm 40 \text{Ma}$ (2σ), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值为 0.510408 ± 38 , $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.6$, MSWD 值为 0.33. 成矿期后 YDFH-15 的萤石样品所测定的同位素组成明显不同与成矿期的萤石中 Sm, Nd 同位素组成, 不能参与成矿年代的计算.

4 讨论

4.1 成矿时代的厘定

萤石中 Sm, Nd 等稀土元素主要是以置换矿物晶

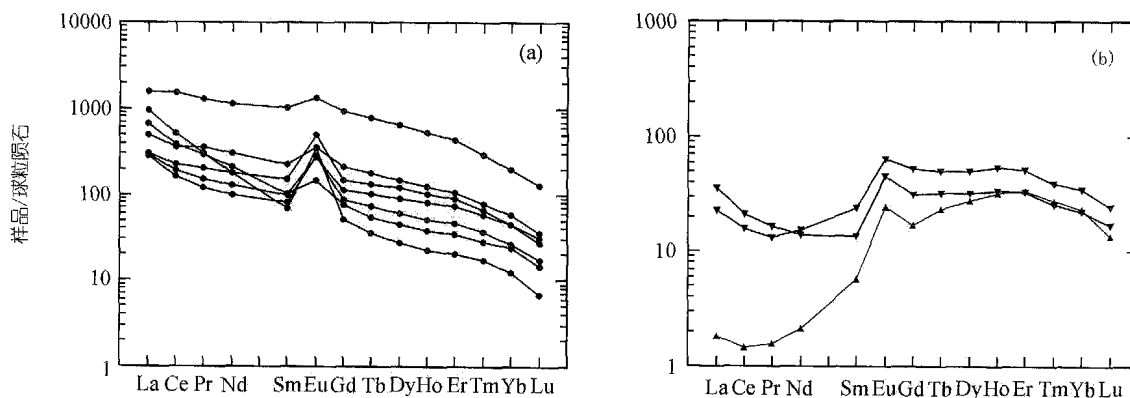


图 1 迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床不同阶段萤石稀土元素配分模式图解
(a) 成矿期萤石, (b) 成矿期后萤石

1) 乔广生. 多接收 Nd 同位素比值与含量一次性质谱分析方法. 中国专利申请 99125079.6

表 1 迳纳厂稀土铁铜矿床不同阶段萤石的稀土元素组成($\mu\text{g/g}$)及特征参数

样品号	YDB-4	YDFH-1	YDFH-2	YDFH-3	YDFH-6	YDFH-9	YDFH-10	YDFH-16	YDFH-19	YDFH-15
形成阶段	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
颜色	淡紫色	淡紫色	淡紫色	淡紫色	淡紫色	淡紫色	淡紫色	无色	浅绿色	浅绿色
La	295	91.1	482	92.8	210	87.5	156	7.02	10.9	0.59
Ce	413	156	1230	183	309	130	291	12.5	17.2	1.19
Pr	37.0	18.7	160	24.6	36.1	14.5	43.6	1.63	2.02	0.19
Nd	107	78.2	689	108	125	59.2	182	9.14	8.21	1.26
Sm	13.3	19.4	198	29.2	20.1	15.6	43.1	4.63	2.61	1.10
Eu	25.3	20.3	96.6	36.7	10.9	20.8	26.1	4.68	3.37	1.81
Gd	13.4	28.8	242	37.8	19.8	22.4	54.8	13.5	8.09	4.38
Tb	1.68	4.79	37.5	6.19	2.62	3.47	8.43	2.40	1.53	1.09
Dy	8.69	28.9	211	38.4	14.7	19.4	47.5	16.0	10.4	8.87
Ho	1.60	5.79	38.5	7.341	2.73	3.70	9.00	3.85	2.44	2.28
Er	4.29	15.3	91.5	18.5	7.27	9.55	21.9	10.7	6.94	7.02
Tm	0.56	1.88	9.51	2.14	0.91	1.17	2.56	1.27	0.83	0.89
Yb	2.60	9.36	41.7	9.54	4.91	5.59	12.0	7.14	4.62	4.89
Lu	0.23	1.02	4.20	0.89	0.48	0.57	1.19	0.82	0.56	0.45
Y	55.4	288	1140	289	94.2	141	304	430	366	236
ΣREE	924	479	3531	595	765	394	898	95	80	36
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	69.5	5.97	7.09	5.97	26.2	9.60	7.97	0.60	1.44	0.07
Y/Ho	34.6	49.8	29.6	39.4	34.6	38.1	33.8	112	150	104
La/Ho	184	15.7	12.5	12.6	77.0	23.6	17.3	1.83	4.45	0.25
δEu	5.78	2.62	1.35	3.38	1.68	3.40	1.64	1.81	2.24	2.52
δCe	0.95	0.91	1.07	0.92	0.85	0.88	0.85	0.89	0.88	0.87

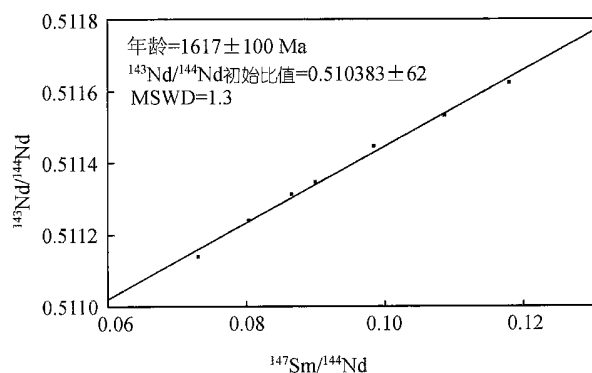


图 2 迳纳厂 Fe-Cu-REE 矿床矿石 Sm-Nd 同位素等时线图解

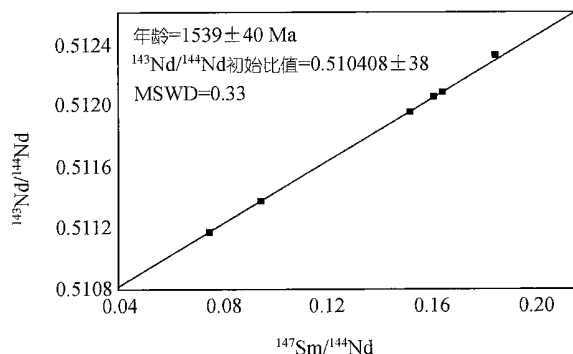


图 3 迳纳厂 Fe-Cu-REE 矿床萤石的 Sm-Nd 等时线图解

格中心 Ca^{2+} 的形式存在, 且实验研究表明, Sm, Nd 等稀土元素在萤石中扩散速率较低, 萤石的 Sm-Nd 同位素体系易处于封闭状态^[20], 故利用萤石的 Sm, Nd 同位素体系确定成矿时代得到了广泛的应用^[12,14]. 本次同位素所测定的萤石矿物主要呈条带状、纹层状或浸染状分布在矿石中, 与磁铁矿、菱铁矿、黄铜矿等共生, 在 Y/Ho-La/Ho 图解中表现同期形成^[21](图略), 符合同位素测定同一来源的要求; 进行同位素分析的矿石样品主要为条带条纹状矿石, 遭受后期热液交代和变质改造程度较浅, 条纹条带在矿体垂直剖面上表现出一定的沉积韵律层. 矿石和萤石的同位素数据在 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解中, 呈现

良好的线性关系, MSWD 值小, 在 $1/\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图解中也未表现出线性分布特征, 故可断定现测定的矿石和萤石 Sm-Nd 同位素体系应反映其成矿时的初始信息, 所计算矿石形成年龄 $1621 \pm 110 \text{ Ma}(2\sigma)$ 和萤石形成年龄 $1538 \pm 43 \text{ Ma}(2\sigma)$ 具有实际的地质意义, 基本代表矿石和萤石的沉积年龄, 两者测定年龄在误差范围内, 也与野外地质条件相符.

4.2 矿床成因的限定

成矿期萤石稀土配分呈现强烈的 LREE 富集和正 Eu 异常(图 1(a)), 与矿石的稀土配分特征基本一致^[4], 说明萤石沉淀过程中稀土元素没有发生明显的分异, 萤石中稀土特征可以反映初始成矿流体中稀

表 2 迤纳厂稀土铁铜矿床矿石 Sm-Nd 同位素组成

采样位置	样号	矿石类型	Sm/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
大宝山矿段	DB-11	块状矿石	19.2	142	0.0803	0.511239	08	-3.16
	DB-31	条带状矿石	25.1	201	0.0731	0.511139	10	-3.60
	YDB-4	浸染状矿石	32.1	231	0.0865	0.511314	07	-2.98
东方红矿段	DFHIII-2	条带状矿石	22.3	141	0.0984	0.511446	08	-2.87
	DFH-3	条带状矿石	86.8	445	0.1179	0.511624	10	-3.46
	YDFH-6	浸染状矿石	40.4	271	0.0900	0.511347	13	-3.05
	YDFH-8	条带状矿石	23.9	129	0.1086	0.511532	11	-3.32

表 3 迤纳厂稀土铁铜矿床萤石 Sm-Nd 同位素组成

样号	颜色	Sm/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
YDFH-1	淡紫色	26.9	87.1	0.1869	0.512309	12	-4.58
YDFH-3	淡紫色	20.0	74.5	0.1626	0.512048	12	-4.90
YDFH-6	淡紫色	24.9	158	0.0953	0.511367	09	-5.49
YDFH-10	紫色	33.2	131	0.1526	0.511953	09	-4.77
YDB-4	浅紫色	15.3	123	0.0751	0.511175	11	-4.23
YDFH-2	浅紫色	221	808	0.1654	0.512077	12	-3.93
YDFH-15	无色~淡绿色	0.88	1.10	0.4853	0.513331	18	-43.64

土特征. 成矿流体稀土元素这一组成特征与典型热水沉积矿石或热水沉积岩中稀土元素的配分模式基本一致^[22-24], 同时较大的正 Eu 异常(最高可达 5.78)反映富稀土的成矿流体具较高温($>250^\circ\text{C}$)^[25].

矿石形成年龄较接近赋矿地层年龄(1800~1600 Ma)^[10], 反映矿床与地层同时沉积, 但地层中稀土总量低, 稀土分布特征与矿石完全不同^[4], 说明地层不可能为成矿流体提供大量的稀土元素. 考虑到成矿流体中稀土分布特征与矿体顶、底板围岩-石榴石黑云母片岩的稀土配分特征基本相似, 均表现出轻稀土富集和正 Eu 异常^[4], 可以认为稀土的富集、成矿作用可能与顶、底板围岩有密切的联系. 同时研究发现: (1) 矿体与顶、底板围岩整合产出; (2) 对顶、底板围岩-石榴石黑云母片岩的原岩恢复, 确定其主要为变碱性的粗面安山岩^[2,4]; (3) 矿区出露的粗面安山岩的 U-Pb 年龄 1676 Ma, 与本次测定成矿年龄基本一致^[26]; (4) 粗面安山岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值变化范围在 0.511038~0.511771 之间(杨耀民等未发表资料, 测试单位: 中国科学院广州地球化学研究所放射性同位素实验室), 与矿石的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(0.511239~0.511624)分布范围相互重叠, 两者平均值分别为 0.511377 和 0.511363, 十分接近. 据以上研究, 可以肯定富稀土的成矿流体的主要来自昆阳裂谷初期的粗面安山岩或其分异出的热液. 矿石和萤石 Sm-Nd 等时线获得的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 -3.2 和 -4.6, 全为负值并接近 0, 结合矿石黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均在

2.5‰^[1], 分布具陨石硫特征, 可以认为迤纳厂矿床的成矿物质来源于早-中元古代形成的富集地幔, 这一结论也与张鸿翔等人^[27]提出早元古代前特提斯元古大洋板块与古扬子板块西部存在板块俯冲作用, 地幔源区含有 EM1 成分的认识相吻合.

迤纳厂矿床的矿床成因曾有与火成碳酸岩相关的报道^[2,28], 元素组合为 Fe-Cu-REE(Nb,Co,F,P), 与火成碳酸岩的元素组合也有一定的相似性, 均表现出富集 LREE, Nb, F, P, 同时南非 Phalaborwa 碳酸岩中也发现有 Cu 矿产出^[29]. 但进一步研究不难发现, 火成碳酸岩中 LREE 富集程度一般较高, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 均在 100 左右, Sr 含量一般 $>1000 \mu\text{g}/\text{g}$, Eu 不具异常或出现弱的负异常, 而且一般火成碳酸岩的产出同时伴随有大量的霓长岩、钠闪石等碱性矿物的出现或交代作用等^[30-33]. 上述特征在迤纳厂矿床中均没有出现^[4], 相反, 矿体完全呈层状、似层状与围岩整合接触, 矿石中条纹条带状和出现的韵律纹层明显反映沉积成因, 基本可排除成矿的火成碳酸岩成因.

综上所述, 根据迤纳厂矿体产出的地质条件和矿石和萤石的 Sm-Nd 同位素年代学研究, 可以发现中元古代昆阳裂谷初期拉张环境下形成火山断陷盆地中, 出现来自于富集地幔碱性火山岩的大量喷发^[34]. 迤纳厂矿床是在火山岩喷发间歇期, 富含稀土、挥发份的成矿流体经火山喷流-同生沉积成矿.

4.3 中元古代稀土大规模爆发成矿机制的制约

全球中元古代稀土具大规模爆发性成矿的特征已

表 4 中元古代稀土成矿典型矿床地质地球化学特征对比^{a)}

矿区	迤纳厂	白云鄂博	Olympic Dam
矿床类型	Fe-Cu-REE 中小型矿床	REE-Fe-Nb 超大型矿床	Cu-U-Au-Ag-REE 超大型矿床
大地构造背景	扬子地块西南缘大陆边缘昆阳裂谷	华北古大陆板块北缘裂谷	Gawler 克拉通东北边缘边缘裂谷环境(或陆架的拉张地堑环境).
含矿围岩	中元古代白云岩	中元古代硅质岩、白云岩(H8)	Olympic Dam 组的碱性花岗岩
控矿构造	易门同生断裂, 矿区背斜	乌兰宝力格深大断裂、同生大断层、向斜	ODBC(Olympic Dam Breccia Complex)碱性花岗岩-赤铁矿为主的角砾岩筒-岩墙杂岩及断裂
岩浆岩及年龄	变碱性中性火山岩(粗面安山岩: 1685 Ma)	非造山型岩浆岩(1.54~1.92 Ga)为主, 后期有辉长岩与碳酸岩参与成矿	Roxby Downs 碱性花岗岩及碱性铁镁质/超铁镁质岩墙(1590Ma)
主成矿时代	矿石 1621 Ma; 萤石 1537 Ma	中期成矿, 中元古代为主(128 Ma)	1572 Ma
稀土来源	矿石 $\epsilon_{Nd}(t)$: -2.87~-3.6, 萤石的 $\epsilon_{Nd}(t)$: -3.93~5.49, 稀土元素主要来自于富集地幔或粗面安山岩	矿石 $\epsilon_{Nd}(t)$: -1.74~+0.45, 非造山型岩浆岩 $\epsilon_{Nd}(t)$: 4.52~5.88, 稀土主要来自于非造山型岩浆热液或地幔流体(REE, Ba, Ta, S, F, Na)	Gawler 组火山岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$: -5.3~-5.4, 碱性铁镁质/超铁镁质岩墙的 $\epsilon_{Nd}(t)$: 0.1~4.0, 矿石及单矿物的 $\epsilon_{Nd}(t)$: -0.3~-4.0. 稀土来自于地幔或碱性铁镁质/超铁镁质岩浆热液
成矿方式	热水沉积和微弱的后期改造	多种成矿作用叠加, 热水沉积-岩浆气液交代为主	流体混合及岩浆喷气爆破交代

a) 据 Johnson 等人^[36]、白鸽等人^[5]、王一先等人^[7]及本文资料综合整理

为众多研究者所认同^[35], 但产生这一特殊成矿地质事件的机制还有待深入研究. 对比研究迤纳厂稀土铁铜矿床与我国白云鄂博稀土铌铁矿床、澳大利亚 Olympic Dam 超大型多金属矿床(表 4), 发现稀土大规模富集成矿的时代主要在 1.3~1.6 Ga, 成矿的大地构造背景均为大陆边缘裂谷, 而且裂谷初期大量喷发的富碱非造山型岩浆伴随稀土成矿^[9,11,34,36,37], 富稀土的成矿流体主要来自地幔或富碱的非造山型岩浆热液. 可以认为中元古代稀土大规模爆发成矿与当时大陆边缘裂谷环境产出的富碱非造山岩浆有密切的关系.

愈来愈多的资料显示元古代在 Rodinia 超级大陆前还可能有 Columbia 超级大陆的存在^[38,39], 这个超级大陆在 2.1~1.8 Ga 汇聚, 从 1.6 Ga 开始裂解, 裂解期间出现大量的非造山期岩浆活动. 岩浆系列主要为 AMCG 岩套(斜长岩-纹长岩-紫苏花岗岩-花岗岩), 同时也有大量的金伯利岩、钾镁煌斑岩、碳酸岩等碱性超基性岩的侵入^[38,40], 代表一次重要的地幔上涌事件, 从而导致 Columbia 超级大陆的裂解^[38,41,42]. 迤纳厂矿床、白云鄂博矿床及 Olympic Dam 矿床中与稀土成矿有关的非造山型岩浆岩, 可能是早-中元古代 Columbia 超级大陆的裂解的产物, Columbia 超级大陆的裂解伴随的非造山型富碱岩浆为稀土的大规模爆发成矿的主要制约因素, 但这一认识还有待进一步证实.

5 结论

(1) 云南迤纳厂矿石及萤石 Sm-Nd 同位素等时线年龄分别为 1617 ± 100 和 1539 ± 40 Ma, 表明矿床

形成于中元古代早期根据矿石和萤石等时线年龄计算的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别变化在 -3.2 和 -4.6, 反映成矿物质可能来自于富集地幔. (2) 矿石和成矿期萤石稀土分布显示初始成矿流体具明显富集 LREE 和正 Eu 异常, 与现代海底热液和古代典型热水沉积矿床稀土分布特征一致; 富稀土的成矿流体可能主要来源于矿体的顶、底围岩-粗面安山岩或其分异出的热液; 昆阳群稀土富集、成矿可能与裂谷形成早期碱性火山岩的大量喷发有密切的关系. 在火山岩喷发间期, 富稀土的成矿流体进入海底, 热水同生沉积成矿. (3) 中元古代稀土元素的大规模爆发成矿可能与早-中元古代 Columbia 超大陆的裂解所形成的大量富碱非造山岩浆岩有密切的关系.

致谢 作者衷心感谢蒋少涌教授及另一位审稿人对本文所提出的建设性修改意见. 论文撰写过程中与彭建堂研究员进行了多次有启发的讨论, 同位素分析得到中国科学院地质与地球物理研究所乔广生、储著银、陈福坤等研究员的大力支持, 野外样品的采集得到了迤纳厂矿山工作人员的极大帮助, 在此一并表示感谢. 本工作受中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-125)和中国大洋协会“十五”开发项目(DY105-01-05-02)资助.

参 考 文 献

- 1 龚琳, 何毅特, 陈天佑. 云南东川元古宙裂古型铜矿. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 1~248
- 2 白鸽, 袁忠信. 碳酸岩地质及其矿产. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1985, 13: 151~156
- 3 秦德先, 田毓龙, 燕永锋, 等. 云南易门狮子山铜矿的地球化学. 地质学报, 2000, 74(1): 72~84

- 4 Yang Y M, Tu G Z, Hu R Z. REE and Trace element Geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE Deposit, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2004, 23(3): 265~274
- 5 白鸽, 袁忠信. 白云鄂博矿床地质特征和成因论证. 北京: 地质出版社, 1996. 1~92
- 6 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初谈非常规超大型矿床. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(增刊): 1~6
- 7 王一先, 裘愉卓, 高计元, 等. 内蒙古白云鄂博矿区古代非造山岩浆岩及其对成矿的制约. *中国科学, D 辑*, 2002, 32 (增刊): 21~32
- 8 Hitzman M W. Iron oxide-Cu-Au deposits: Where, when, why. In: Porter T M, ed. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits, A Global Perspective*. Adelaide: Australian Mineral Foundation, 2000. 27~41
- 9 Hitzman M W, Oreskes N, Einaudi Mt. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxides(Cu-U-Au-REE) deposits. *Procamb Res*, 1992, 58: 241~287
- 10 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁, 等. 扬子地块西南缘滇中元古宇特征与超大型矿床的可能性. 见: 涂光炽等著. *中国超大型矿床*(). 北京: 科学出版社, 2000. 95~117
- 11 吴健民, 黄永平, 黎功举. 扬子地台西缘带大型铜矿床的“叠加裂谷-多源-热水”成矿作用. *矿产与地质*, 1996, 10 (1): 17~21
- 12 李华琴, 刘家齐, 杜国民, 等. 内生金属矿床成矿作用年代学研究——以西华山钨矿为例. *科学通报*, 1992, 37 (12): 1109~1112
- 13 Halliday A N, Shepherd T J, Dicken A P, et al. Sm-Nd evidence for the age and origin of a Mississippi Valley Type ore deposit. *Nature*, 1990, 344: 54~56
- 14 Chesley J T, Halliday A N, Scrivener R C. Samarium-Neodymium direct dating of fluorite mineralization. *Science*, 1991, 252: 949~951
- 15 Anglin C D, Jonasson I R, Franklin J M. Sm-Nd dating of scheelite and tourmaline: Implications for the genesis of Archean gold deposits, Val d'Or, Canada. *Econ Geol*, 1996, 91: 1372~1382
- 16 Jiang S Y, Slack J F, Palmer M R. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. *Geology*, 2000, 28: 751~754
- 17 彭建堂, 胡瑞忠, 林源贤, 等. 锡矿山铋矿床热液方解石的 Sm-Nd 同位素定年. *科学通报*, 2002, 47(10): 789~792
- 18 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年体系. *科学通报*, 2003, 48(18): 1976~1981
- 19 Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. 2000, *Talanta*, 51: 507~513
- 20 Cherniak D K, Zhang X Y, Wayne N K, et al. Sr, Y, and REE diffusion in fluorite. *Chem Geol*, 2001, 181: 99~111
- 21 Bau M, Dulski P. Comparative study of yttrium and rare earth elements behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 119: 213~223
- 22 Michard A. RRE systematic in hydrothermal fluid. *Geochim CosmochimActa*, 1989, 53: 745~750
- 23 Klimhammer G P, Elderfield H, Edmond J M, et al. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from Mid-ocean ridge. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 5105~ 5113
- 24 Lottermoser B G. Rare earth element behavior associated with strata-bound schelite mineralization (Broken Hill, Australia). *Chem Geol*, 1989, 78: 119~134
- 25 Sverjersky D A. Europium equilibria in aqueous solution. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 67: 70~78
- 26 吴懋德. 云南昆阳群地质. 昆明: 云南科技出版社, 1990. 1~265
- 27 张鸿翔, 刘丛强. 扬子板块西缘早元古代俯冲体系的地球化学证据——有关变基性岩的微量元素地球化学研究. *矿物学报*, 2001, 21: 231~238
- 28 Zhang Y B, Wei Q R, Xu C Y, et al. Discovery of the proterozoic low-grade metamorphic submarine carbonatite lavas in China. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 43 (5): 416~420
- 29 Groves D J, Vidlericher N M. The Phalabowra carbonatite-hosted magnetite-copper sulfide deposit, South Africa: An end-member of the iron-oxide copper-gold-rare earth element deposit group? *Mineralium deposita*, 2001, 36: 189~194
- 30 杨学明, 杨晓勇, LeBas M J. 碳酸岩是大陆岩石圈构造背景和地幔交代作用的指示岩石. *地球物理学报*, 1998, 41(增刊): 228~235
- 31 Woolly A R, Kempe K R C. Carbonatites: Nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In: Bell K, ed. *Carbonatites: Genesis and Evolution*. London: Unwin Hyman, 1989. 1~14
- 32 Keller J, Spettel B. The trace element composition and petrogenesis of Natrocarbonite. In: Bell K, Keller J, eds. *Carbonatite Volcanism-Oldoinyo Lengai and the petrogenesis of Natrocarbonatite*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995. 70~85
- 33 Cullers R L, Graf J L. Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Predominantly basic and ultrabasic rocks. In: Henderson P, ed. *Developments in Geochemistry, No 2. Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984. 237~274
- 34 张学城. 康滇裂谷带火山活动及其碱性(钠质)火山岩系特征. *云南地质*, 1995, 14 (2): 81~98
- 35 涂光炽. 九十年代固体地球科学及超大型矿床研究若干进展. *矿物学报*, 1997, 17(4): 357~363
- 36 Johnson J P, McCulloch M T. Source of mineralizing fluids for the Olympic Dam deposit (South Australia): Sm-Nd isotopic constrains. *Chem Geol*, 1995, 121: 177~199.
- 37 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据. *地球学报*, 1994, (1-2): 85~93
- 38 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 早-中元古代 Columbia 超大陆研究进展. *科学通报*, 2002, 47 (16): 1361~1364
- 39 Rogers J, Santosh M. Configuration of Columbia: A Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Res*, 2002, 5: 5~22
- 40 Pirajno F. Hotspots and mantle plumes: Global intraplate tectonics, magmatism and ore deposits. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 82: 183~216
- 41 Condie K C. Breakup of a paleoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res*, 2002, 5: 41~43
- 42 Windley B F. Proterozoic anorogenic magmatism and its orogenic connection. *J Geol Soc London*, 1993, 150 (1): 39~50

(2005-01-20 收稿, 2005-05-27 收修改稿)