

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

黝铜矿族矿物分类与命名方案

曲凯^{1,2*}, 谷湘平³, 王艳娟⁴, 吴鹏⁵, 司马献章¹, 汤超¹, 程银行¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
5. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093

黝铜矿族作为“古老”的矿物种族, 常见于多种类型热液矿床中。该族矿物为等轴晶系, 空间群 $I\bar{4}3m$ (#217), $a = 10.232 \text{ \AA} - 10.985 \text{ \AA}$ 。由于多个结晶学位置存在同价或异价元素替代, 常被认为是最复杂的硫盐矿物族, 素有“硫盐矿物中的角闪石”之称 (Sack and Loucks, 1985)。其族名取自黝铜矿 (tetrahedrite), 这一名称最早由 Haidinger (1845) 根据其晶体常显示出的四面体构型而引入。这一形象的命名也被国际矿物学会 (IMA) 新矿物命名与分类委员会 (CNMNC) 采纳为官方族名。

关于黝铜矿族矿物最早的文献记录可以追溯到 1819 年, 十九世纪关于该族矿物的研究工作主要是矿物形态和化学成分的基本描述。随着二十世纪初 X 射线衍射技术的发展应用, 该族矿物的晶体结构才被首次测定 (Machatschki, 1928), 但他们当时假定的理想化学成分为 Cu_3SbS_3 。Pauling 等 (1934) 测定出与化学成分更一致的结构分子式 $(\text{Cu}, \text{Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, 并提出了一种由闪锌矿型结构衍生的晶体模型。30 年后, Wuensch (1964) 对其中的四面体结构进行了更为详细的描述, 他们提出黝铜矿具有类似方钠石 (SOD) 的架状基型, 并在此基础上给出该族的晶体化学式为: $M(2)_6M(1)_6X(3)_4S(1)_{12}S(2) (Z = 2)$ 。

最近 50 年来, 随着对晶体化学研究的不断深入, 人们发现黝铜矿族的晶体结构在化学成分上具有很大的弹性, 阳离子可由电价 (+1 ~ +4) 和离子半径变化范围很大的离子占据, 阴离子位置还存在 Se 和 S 的置换。上世纪 70 ~ 90 年代, 前人对世界不同产地的三千余件黝铜矿族矿物进行比对, 发现在 $M(2)$ 和 $M(1)$

位置中的 $\Sigma_{\text{Ag}+\text{Cu}} (\text{Me}^+) \text{ apfu}$ 一般在 10 左右, $[M(1)]_6$ 位置中 Me^{2+} 的占位一般应为 2 apfu, 而且大量数据表明 $M(1)$ 位置 Me^+ 与 Me^{2+} 的占位比例约为 4 : 2 (Charlat and Lévy, 1974; Mozgova and Tsepin, 1983; Johnson et al., 1986)。这是很重要的发现, 因为原有晶体化学式中 $M(1)$ 位没有将具有矿床成因指示意义的二价元素独立出来, 导致理想化学式电价不平衡。最近, 部分含银黝铜矿的 $S(2)$ 位置存在空位的现象被陆续报道, $M(2)$ 位置出现罕见的 Ag-Ag 金属键, 并通过 $6^{M(2)}\text{Ag}^+ + {}^{S(2)}\text{S}^{2-} = {}^{M(2)}(\text{Ag}_6)^{4+} + {}^{S(2)}\square$ 的元素替代方式, 从而使矿物的理想化学式保持电价平衡 (Welch et al., 2018; Qu et al., 2020)。

基于此, 国际矿物学会新矿物命名与分类委员会 (IMA-CNMC) 决定对该族矿物进行系统的梳理与定义, 并正式批准了下述分类命名方案。黝铜矿族矿物的化学通式为: ${}^{M(2)}A_6{}^{M(1)}(B_4C_2)X(3)D_4S(1)Y_{12}S(2)Z$, 其中 A 位可为 Cu^+ 、 Ag^+ 、 \square (空位) 或 $[\text{Ag}_6]^{4+}$ 基团; B 位可为 Cu^+ 、 Ag^+ ; C 位可为 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cu^+ 及 Fe^{3+} ; D 位可以是 Sb^{3+} 、 As^{3+} 、 Bi^{3+} 和 Te^{4+} ; Y 位可以是 S^{2-} 或 Se^{2-} ; Z 位可以为 S^{2-} 、 Se^{2-} 或空位 (Biagioni et al., 2020)。

截至目前, 黝铜矿族根据 A 、 B 、 D 及 Y 位不同的元素端元可细分为 10 个矿物系列, IMA-CNMC 认可且完全有效的矿物共 23 种, 包括今年在中国发现的 4 个黝铜矿族新种: Kenoargentotetrahedrite-(Zn) (Qu et al., 2020); Argentotetrahedrite-(Hg) (Wu et al., 2020); Tennantite-(Ni) (Wang et al., 2021a); Tetrahedrite-(Ni) (Wang et al., 2021b)

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

川南普格杏仁状玄武岩中沥青葡萄石脉的特征

张良钜, 曾伟来, 李东升

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004

在国家自然科学基金的资助下, 作者曾对川南普格杏仁状玄武岩中沥青的地质产出进行研究(张良钜等, 2013; 2017; 2019; 2020)。根据沥青不同地质产出的矿物及其矿物组合与原油受热裂解为沥青的温度, 初步认为玄武岩中的沥青形成有三个世代: 第一世代沥青产出于石英晶洞中, 其原油受热的裂解温度最高(约 300°C); 第二世代沥青产于绿泥石杏仁中; 第三世代沥青与石英、自然铜共同产出于杏仁体或玄武岩的压性裂隙脉中, 并有赤铜矿、黑铜矿、硅孔雀石及孔雀石等系列铜矿物产出, 其沥青是寻找研究地区的铜矿化或铜矿的重要标志。第二、三世代沥青的原油受热裂解温度为 270°C~230°C。普格玄武岩中的第一世代沥青更有利于天然气(主要为甲烷 CH₄)的形成, 第三世代沥青则更有利于自然铜的形成。

最近作者在普格吉乐乡西罗河岸陡崖玄武岩葡萄石脉中也发现有较多沥青质或沥青产出。葡萄石脉宽 6~8cm, 沿走向延伸约 50~80cm, 脉壁与玄武岩有清晰的接触界线, 在平面上葡萄石脉呈收缩膨大现象, 其形貌明显受原裂隙所制约。脉中的葡萄石呈浅绿色, 葡萄石柱状单晶体多聚集呈葡萄球状或晶簇

状, 晶簇基底两侧葡萄石晶体背向生长。沥青呈球粒状或块状散布在葡萄石球粒的表面或球间隙或晶簇基底间的缝隙中, 并有菱面体方解石晶体产出在沥青团块中。表明葡萄石脉中最先晶出的是葡萄石, 其后依次为沥青→方解石, 无自然铜、石英产出, 根据葡萄石脉中的矿物及组合, 可与研究地区的其他产出的沥青相区别。

葡萄石脉中的沥青, 其有机碳含量远低于研究地区的其他产出的沥青(表 1)。

表中可见第一世代沥青(晶洞)的有机碳含量最高可达 84.31 w_B%, 第二、三世代沥青的有机碳含量依次降低, 最低为葡萄石脉中的沥青, 其沥青中的有机碳含量只有 27.29 w_B%, 表明原油受热裂解沥青的温度相应呈由高→低演变, 并认为葡萄石脉中的沥青是原油受热裂解的最终产物, 是研究地区原油受热裂解最晚形成的沥青, 原油受热裂解沥青的温度小于 200°C, 因沥青形成于葡萄石之后, 属于第四世代沥青, 沥青中的方解石晶体是成矿热液中的有机碳氧化为 CO₂ 与成矿热液中的 Ca 结合形成, 方解石的出现表明研究地区成矿(矿化)作用的结束。

表 1 沥青的 C、H、N、S 元素含量
Table 1 C、H、S and N contents of asphalt

样品	C	H	S	N	H/C
沥青晶洞中的沥青(第一世代)	84.31	4.97	1.09	0.34	0.71
沥青-绿泥石杏仁体中的沥青(第二世代)	60.97	3.98	1.02	0.27	0.78
沥青-石英晶洞中的沥青(第三世代)	55.76	4.35	1.04	0.28	0.93
沥青-葡萄石脉(第四世代)	27.29	2	0.52	0.16	0.87

研究地区不同世代沥青与相应的矿物组合是玄武岩成岩后的构造应力与晚期基性火山活动共同作用形成的含有机质成矿热液演化的结果, 其形成过程为: 玄武质岩浆喷发末期(基性岩浆作用末期)→含铜的火山热液(火山热液

作用)→构造应力→含有机质的成矿热液→石英与第一世代沥青→绿泥石→第二世代沥青→乳白色石英→烟灰色石英、第三世代沥青、自然铜→辉铜矿→葡萄石→第四世代沥青→方解石。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

冀南邯邢地区白涧矽卡岩型铁矿中磁铁矿与赤铁矿交代现象对矿床成因的启示

金雅楠^{1,2}, 张聚全^{1,2*}, 范琳琳^{1,2}, 白富生^{1,2},
唐玉莹^{1,2}, 秦超^{1,2}, 胡艳春³

1. 河北地质大学区域地质与成矿作用重点实验室, 河北 石家庄 050031;

2. 河北地质大学 地球科学学院, 河北 石家庄 050031;

3. 山东省第一地质矿产勘察院, 山东 济南 250100

邯邢地区地处于河北省南部, 大地构造上位于华北克拉通中部, 中生代太行山构造—岩浆—成矿带南段。前人对该地区磁铁矿成分特征、结构等方面做了详尽研究, 但在成矿物质来源、成因方面仍存在较多争议, 主要将其划分为接触交代成矿和“矿浆”贯入式成矿。作者在对邯邢地区白涧铁矿岩相学观察过程中发现, 该矿床中明显分别存在两个期次的磁铁矿和赤铁矿, 并根据二者之间的交代关系, 将其划分为早、晚两个期次, 并根据成矿流体的演化, 将铁矿化过程划分为四个阶段。磁铁矿与赤铁矿之间的转变机制主要分为氧化还原反应和非氧化还原反应, 本次研究主要根据二者之间的转变机制来精细刻画铁的成矿

过程以及氧逸度对成矿的控制作用。第一阶段: 早期成矿流体从岩浆中分离并交代碳酸盐围岩形成矽卡岩, 同时形成接触带矿; 第二阶段: 随着接触带磁铁矿的形成, 具有更高氧逸度的演化的流体沿着断裂带充填和交代碳酸盐地层形成早期赤铁矿; 第三阶段: 随着赤铁矿形成, 氧逸度降低至磁铁矿—赤铁矿缓冲线之下, 形成层间的磁铁矿; 第四阶段: 伴随层间磁铁矿大量形成, 成矿流体氧逸度进一步升高, 形成晚期赤铁矿; 伴随温度和氧逸度的进一步降低, 成矿作用进入硫化物形成时期。整个成矿过程中氧逸度控制了成矿过程及其产物, 对矽卡岩型铁矿的形成起到了主导作用。

表 1 白涧铁矿床中磁铁矿-赤铁矿电子探针成分分析结果

样品号	点数	矿物	wt%												
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	NiO	Total
ZK0602-605-3	1	Mag	1.16	0.03	0.50	88.16	0.18	2.44	0.10	0.08	0.11	0.02	0.02	0.00	92.78
	2	Mag	0.49	0.00	0.29	90.26	0.24	2.06	0.00	0.02	0.05	0.06	0.00	0.00	93.46
	3	Mag	0.54	0.04	0.27	89.37	0.20	1.98	0.00	0.07	0.05	0.00	0.04	0.00	92.56
	4	Hem	0.38	0.02	0.18	84.53	0.17	1.79	0.00	0.20	0.03	0.00	0.00	0.00	87.30
	5	Hem	0.49	0.05	0.25	85.50	0.18	1.85	0.00	0.13	0.03	0.01	0.00	0.00	88.48
	6	Hem	0.25	0.05	0.14	87.22	0.00	0.32	0.00	0.12	0.04	0.01	0.01	0.01	88.17
ZK0602-613-2	1	Mag	0.24	0.08	0.38	90.00	0.11	1.83	0.00	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	92.73
	2	Mag	0.15	0.10	0.27	90.61	0.17	1.98	0.00	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	93.38
	3	Mag	0.13	0.13	0.26	90.93	0.10	1.86	0.00	0.08	0.02	0.03	0.00	0.00	93.53
	4	Mag	0.20	0.06	0.28	91.42	0.16	1.84	0.00	0.06	0.02	0.00	0.04	0.01	94.07
	5	Mag	0.38	0.05	0.39	90.33	0.13	2.04	0.00	0.05	0.04	0.04	0.01	0.00	93.45
	6	Hem	0.17	0.00	0.37	84.29	0.15	2.24	0.00	0.26	0.04	0.04	0.00	0.00	87.54

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602028)、河北省自然科学基金资助项目(D2021403028)、河北省教育厅在读研究生创新能力培养项目(CXZZSS2021121)、河北地质大学学生科技基金科研项目(KAY202105)联合资助

第一作者简介: 金雅楠(1995-), 在读硕士, 成因矿物学. E-mail: 357299129@qq.com

*通信作者简介: 张聚全(1983-), 副教授, 成因矿物学. E-mail: juquan1983@163.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

自然界首次发现的镍端元黝铜矿族新矿物 Tetrahedrite-(Ni) 及 Tennantite-(Ni) 矿物学特征及意义

王艳娟¹, 陈儒军², 谷湘平^{2*}, 侯增谦³, 杨竹森⁴, 曲凯⁵

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

5. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

黝铜矿是低温热液矿床的常见矿物, 在我国分布广泛且产出种类众多, 晶体化学通式为: $M(2)_6M(1)_6X(3)_4S(1)_{12}S(2)$ 。本文简要介绍由国际矿物学会新矿物分类与命名委员会(IMA-CNMNC)正式批准的 2 个新矿物种: Tetrahedrite-(Ni)(IMA2021-031)及 Tennantite-(Ni)(IMA2021-018)的矿物学特征及成因意义。

一、新矿物 Tetrahedrite-(Ni) (中文译名: 镍黝铜矿)

镍黝铜矿是自然界发现的第一个镍端元的黝铜矿族新矿物, 在西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现, 矿物浸染状分布于白云石、菱镁矿、石英、含铬斜绿泥石和白云母基质中, 与辉砷镍矿、方硫镍矿、硫铜锑矿、自然金等共伴生。不透明, 红黑色条痕, 计算密度 4.859g/cm³, 粒度 2~20μm。经验化学式: $M(2)(Cu_{6.00})^{M(1)}[Cu_{4.00}(Ni_{1.67}Fe_{0.39})_{\Sigma 2.06}]_{\Sigma 6.06}^{X(3)}(Sb_{3.15}As_{0.96})_{\Sigma 4.11}S_{12.83}$ 。理想化学式: $Cu_6(Cu_4Ni_2)Sb_4S_{13}$ 。单晶结构精修结果表明, 镍黝铜矿具有与黝铜矿类似的结构模型。等轴晶系, 空间群: $\bar{I}43m$ (#217), 晶胞参数: $a = 10.3478(4) \text{ \AA}$, $V = 1108.00(4) \text{ \AA}^3$ 。晶体结构的骨架由 $[M(1)S(1)_4]$ 四面体共角顶连接而成, 笼中包含以 $S(2)$ 为中心的 $M(2)_6$ 八面体以及其周围的 4 个 $[X(3)S(1)_3]$ 三方锥状配位多面体。

二、新矿物 Tennantite-(Ni) (中文译名: 镍砷黝铜矿)

镍砷黝铜矿与镍黝铜矿在同一标本上发现, 物理

性质与镍黝铜矿接近。经验化学式 $M(2)Cu_{6.01}^{M(1)}[Cu_4(Ni_{0.98}Cu_{0.53}Fe_{0.49})_{\Sigma 2}]_{\Sigma 6}^{X(3)}(As_{3.00}Sb_{1.07})_{\Sigma 4.07}S_{12.92}$ 。简化式: $Cu_6(Cu_4Ni_2)As_4S_{13}$ 。 $a = 10.274(4) \text{ \AA}$, $V = 1084.6(3) \text{ \AA}^3$ 。它是自然界发现的第一个 Ni 端元砷黝铜矿系列新矿物。

三、研究意义

黝铜矿是低温热液矿床的常见矿物, 镍也并非稀散元素且锰铁钴镍铜锌化学性质相近, 之前自然界却未能发现镍端元黝铜矿, 说明其形成条件可能极为苛刻。特殊地质条件下容易形成特殊矿物, 而特殊矿物也往往因此记录了特殊的地质过程。因此, 本次发现的镍黝铜矿无论形成于低氧逸度的高压环境, 还是形成于后期高氧逸度的浅成环境, 其晶体化学与形成条件特征都将具有成因指示意义。

黝铜矿作为地球上较为丰富的天然矿物族, 主要由铜硫等环保元素组成, 其每个晶胞具有大量原子的复杂晶体结构, 有助于提供低热导率。由于其高对称的晶体结构而具有高能带简并度, 有助于提高功率因数, 兼具高效、低成本、环境友好的特征。因此, 黝铜矿特别是富含镍钴元素的黝铜矿已经成为大规模热电材料应用领域的热门候选材料。本次在自然界中发现的这一特殊矿物, 其晶体化学性质与形成机制可为人工合成材料领域提供新的参考。

基金项目: 国家自然科学基金项目(4207021113), 重大研究计划项目(92062105)

第一作者简介: 王艳娟(1986-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学研究. E-mail: wangyanjuan_cugb@foxmail.com

*通信作者简介: 谷湘平(1964-), 教授, 研究方向: 结晶学与矿物学. E-mail: guxp2004@163.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

红壤中羟基间层粘土矿物 (HIM) 的起源、结构及转化研究

刘冬^{1,2*}, 袁鹏^{1,2}, 李梦圆^{1,2,3}, 田倩^{1,2,3}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室/广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广州 510640;
2. 中国科学院深地科学卓越中心, 广州 510640;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

红壤是我国分布最为广泛的土壤类型之一。受气候影响, 红壤组份长期受到强烈淋溶作用, 其矿物组成, 尤其是粘土矿物组成具有独特性——羟基铝间层粘土矿物 (HIM) 就是这一类土壤中典型的、具有特殊结构的过渡型粘土矿物。另一方面, 粘土矿物是土壤中最活跃的矿物之一, 其参与并调控着土壤中关键元素的迁移和循环。例如, 粘土矿物被认为对土壤固碳具有决定性作用。因此, 作为红壤的重要组成矿物, HIM 很可能是上述过程的主要参与者并起到关键作用。然而, 迄今为止, 对 HIM 的矿物学特性缺乏系统性的研究, 其来源、结构及其演化机制等仍尚不清楚。

本研究以提取自典型红壤的天然 HIM 为研究对象, 借助高分辨微束 (高分辨透射电镜, HRTEM)

和精细谱学 (能量损失谱, EELS) 技术, 对 HIM 矿物学特性进行了探索。结果表明: (1) HIM 可由伊利石转化而来。HRTEM 观测发现, 红壤样品中存在伊利石和 HIM 两种粘土矿物片层的混层, 并发现伊利石片层经插层后向 HIM 转化的现象, 由此推测 HIM 或来源于伊利石插层。(2) HIM 层间赋存有稳定的多羟基铝。基于 EELS 对层间域的探测, 发现 HIM 层间赋存有铝离子; 这些多羟基铝很难被环境中的阳离子所交换, 因此 HIM 具有较低的阳离子交换性。(3) HIM 向高岭石转化。HRTEM 观测发现, 一个 HIM 片层可直接转化为两个高岭石片层, 表现出固相转化的高岭石化机制。上述初步研究结果为红壤中典型粘土矿物结构和性质的明确及其在土壤关键元素迁移中作用的深入认识提供了依据。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

安徽宣城茶亭斑岩铜金矿床硬石膏和石膏稀土元素 地球化学指示意义

许心悦, 徐晓春

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009

安徽宣城茶亭铜金矿床是我国东部长江中下游成矿带近年来新发现的大型斑岩型矿床。相较于长江中下游地区其它斑岩型及斑岩-矽卡岩型矿床, 茶亭矿床地质特征较为独特, 表现为赋矿岩体浅成侵入于碳酸盐岩地层中, 在接触带形成环状大理岩带而未见矽卡岩型矿体, 矿床中发育巨量硬石膏, 局部形成硬石膏岩。本文基于矿床地质研究, 针对矿床矿石中的硬石膏和石膏开展研究, 通过 LA-ICP-MS 原位分析获得的稀土元素地球化学特征探讨其成因, 进而揭示成矿流体的演化。

根据矿床围岩蚀变和矿物共生组合, 本文将茶亭矿床中的(硬)石膏划分为 3 种类型, 分别为产于钾硅酸盐化带中, 与磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿共生, 多呈浅紫色的硬石膏(A₁型); 产于黄铁绢英岩带中, 呈硬石膏脉或硬石膏-石英脉, 与黄铜矿、黄铁矿共生常呈白色的硬石膏(A₂型); 呈细脉状穿切早阶段矿脉的石膏(A₃型)。这 3 类硬石膏和石膏分别形成于成矿早、中、晚阶段。

分析结果表明, 稀土元素含量变化较大, 稀土元素配分模式也有明显差异。硬石膏的沉淀需要降低盐度、降压或升温(Rimstidt, 1997)。硬石膏在高温环境下更容易沉淀, 但要求成矿热液流体一直向高温演

化, 显然与地质事实不符。茶亭矿床以发育因减压突变而形成的隐爆角砾岩为特征, 由此推测早阶段硬石膏的沉淀主要与压力下降有关。早阶段硬石膏富集 REE, 中阶段硬石膏和晚阶段石膏 REE 总量大幅度降低, 可能指示了大气降水加入成矿热液而导致 REE 的稀释, 这一结果与矿床 H-O、C-O、S、Pb 同位素特征(徐晓春等, 2019)一致。而根据矿床流体包裹体盐度变化特征, 推测中阶段硬石膏的沉淀主要与盐度降低有关, 晚阶段石膏的形成可能由早、中阶段硬石膏水化而来。

Migdisov 等(2009)认为, 若岩浆流体中更富 Cl⁻, 主要络阴离子为 Cl⁻时, 更易与 LREE 形成络合物, 导致 LREE 相对富集。Bau and Dulski (1999)认为流体偏碱性时有利于 F 络合物的形成, 而 REE 以 F 络合物形式运移, 流体中的 Y 则会与 HREE 发生脱耦作用。矿床中磁铁矿和黑云母地球化学特征表明, 成矿热液具有高 Cl 低 F 的特征(肖庆玲等, 2019), 硬石膏和石膏的 REE 总量差别较大, 但配分模式均呈右倾形式, 且从早阶段到晚阶段右倾趋势减弱, Y 与 LREE 和 HREE 均呈良好的正相关关系, 表明成矿热液流体中的 REE 主要以 Cl 络合物进行搬运, 早阶段流体偏碱性且至晚阶段逐渐向偏酸性演化。

基金项目: 受国家重点研发计划项目(编号 2016YFC0600209)和国家自然科学基金(编号 41472066)资助

第一作者简介: 许心悦(1996-), 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. Email: 727422367@qq.com

*通信作者简介: 徐晓春(1961-), 汉族, 教授, 博导, 主要从事岩浆岩石学和矿床学教学和研究. E-mail: xuxiaoch@sina.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

甘肃临泽盆地凹凸棒石粘土矿物组成及成因

徐帆, 谢巧勤*, 陈天虎, 周跃飞, 徐亮

合肥工业大学资源与环境工程学院, 纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 合肥 230009

甘肃临泽地区凹凸棒石粘土矿床位于临泽县黑河北面杨台洼滩断陷盆地内, 矿区出露地层主要为新近系白杨河组及第四系(王孝通等, 2005; 白昌彬, 2019), 其中白杨河组为赋矿地层和控矿地层, 为一套以陆源物质为主的河湖相碎屑沉积建造, 含凹凸棒石矿层主要赋存于白杨河组中段。区内凹凸棒石粘土资源丰富, 已探明储量在 10 亿吨以上, 但矿石品位普遍较低, 目前相关研究主要集中在应用技术开发方面(张建利, 2020; 任珺等, 2021; 洪晓梅等, 2021), 缺少对凹凸棒石粘土系统的纳米矿物学研究, 对临泽凹凸棒石粘土纳米矿物特性的认识和了解不足, 从而制约了对凹凸棒石粘土矿产资源的进一步开发利用。本文采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)以及透射电镜(TEM)等纳米矿物学研究手段, 对临泽县正北山凹凸棒石粘土矿床的矿物组成和微观结构进行分析。结果表明, 矿层矿石组成矿物相似, 主要由碎屑矿物(石英和长石)、粘土矿物、碳酸盐(白云石和方解石)、可溶盐和硫酸盐, 其中粘土矿物以凹凸棒石和伊利石为主, 含有少量的高岭石、绿泥石、蒙脱石以及伊蒙混层矿物。矿层剖面中碎屑矿物含量变化较大, 介于 12.35%~64.34%之间, 粘土矿物总量和凹凸棒石含

量分别为 14.05%~47.86%和 10.31%~37.93%。根据主要矿物组合将矿层矿石分为六种类型: 凹凸棒石粘土、伊利石型凹凸棒石粘土、碳酸盐型凹凸棒石粘土、石膏型凹凸棒石粘土、凹凸棒石型石膏、石膏。矿物定量分析发现, 矿层剖面中凹凸棒石含量与碳酸盐占比具有显著的负相关性, 暗示凹凸棒石形成与碳酸盐溶解和转化可能存在成因联系。同时, 矿层中凹凸棒石高含量层一般对应低 pH 值和伊利石的低结晶度, 这些相关性可能说明碱性条件有利于源区碎屑矿物和粘土矿物的溶解, 为凹凸棒石形成提供充足的物源。

扫描电镜和透射电镜观察发现矿层中凹凸棒石普遍存在, 具短棒状、纤维状、束状等多种形态, 且矿石中发育大量凹凸棒石与前驱体转化、具成因关系的特征微结构, 如片状伊蒙矿物边缘外延生长丝状凹凸棒石、纤维状凹凸棒石包裹菱面体白云石并从白云石溶解孔洞中生长等(陈天虎等, 2004; Xie et al., 2013; Ryan et al., 2019)。通过对临泽正北山凹凸棒石粘土矿层矿石纳米矿物学研究, 揭示了凹凸棒石粘土纳米矿物学特征、凹凸棒石成因及形成机制, 研究结果对于临泽地区低品位凹凸棒石矿产资源勘查、高附加值功能材料开发利用具有重要指导意义。

基金项目: 甘肃省临泽县凹凸棒石产业发展开放课题(LZKFKT-1902)

第一作者简介: 徐帆(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 环境工程材料. E-mail: xufan9@mail.hfut.edu.cn

*通信作者简介: 谢巧勤(1970-), 博士, 教授, 主要研究方向为成因矿物学. E-mail: qqxie424@hfut.edu.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

江西全南大吉山 69 号花岗岩中构造角砾岩 及其 Ta-Nb 矿化研究

吴开兴*, 郭小飞, 孙涛, 胡咏梅, 刘卫明, 龚子涵

江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000

稀有金属花岗岩的成岩成矿问题既是重要的地质理论问题, 也关乎关键金属的安全保障问题, 因而被广泛关注; 但是, 迄今为止, 稀有金属花岗岩的成岩成矿过程仍不清楚, 主要存在两种观点: 岩浆成因论和岩浆岩蚀变论。二者之间的激烈争论始于上世纪 30 年代(Breiter et al., 2017)。从公开发表文献来看, 二者在学术界的影响此消彼长, 交替更迭, 大致可分为四个阶段: (1) 1960 年以前, 岩浆成因论占主导地位(Breiter et al., 2017); (2) 1960~1989 年, Beus et al. (1962) 提出的钠长石化观点获得广泛支持, 从而进入到岩浆岩蚀变论与岩浆成因论分庭抗礼阶段(Breiter et al., 2017; Abu El-Rus et al., 2017); (3) 1990~2019 年, 完全由岩浆作用形成或以岩浆作用为主的观点再次占居上风(Breiter et al., 2017; Zhu et al., 2001; Guo et al., 2018; 吴福元等, 2017; Wu et al., 2017; Abu Amarah et al., 2019; Van Lichtervelde et al., 2018); (4) 2020 年至今, 岩浆结晶分异作用和岩浆-热液过渡期的交代作用均有重要贡献的观点占主导地位(Su et al., 2021; Wang et al., 2020; Michaud et al., 2020; Zoheir et al., 2020; Yang et al., 2021; Abu Amarah et al., 2021)。就 Nb-Ta 矿化而言, 目前一般认为铌钽铁(锰)矿是岩浆成因的, 但往往遭受岩浆后期热液蚀变, 形成次生钽锡锰矿(Wu et al., 2017; Liu et al., 2019; Seddik et al., 2020)。此外, 也有个别研究者认为江西雅山岩体和 414 钽铌矿床是花岗岩

化成因(王成发, 1986)。

我国南岭地区的黑钨矿床世界闻名。其中, 江西全南县大吉山钨矿床 69 号花岗岩型矿体是 W-Ta-Nb 共生成矿的典型代表(Wu et al., 2017; 孙恭安等, 1989; Liu et al., 2019)。根据现场观察、矿山地质资料及 Wu et al. (2017); 孙恭安等(1989); Liu et al. (2019), 王旭东等(2013)等文献资料, 对 69 号花岗岩地质产状特征概述如下: 该岩体状似岩盖, 中心厚且产状平缓, 向四周倾斜变薄, 南北长约 650m, 东西宽约 320m, 平均厚度 28m; 岩体上、下盘围岩均为寒武系浅变质沉积岩。岩体顶面, 即与上盘围岩接触面平直整齐, 而岩体底面, 即与下盘围岩的接触面则凹凸不平, 既可见突入岩体的围岩捕虏体, 还可见较大规模的构造角砾岩带, 表明 69 号花岗岩的产出是受断裂控制(孙恭安等, 1989)。69 号花岗岩与深部岩体的关系并不清楚(Wu et al., 2017)。

本研究通过对 69 号花岗岩中构造角砾岩样品的岩相学观察, 发现大量针状-柱状铌钽铁(锰)矿集合体形成于变质砂岩角砾的边缘, 与后者的花岗岩化作用密切相关, 岩浆成因的可能性小。电子探针分析表明它们与前人(Wu et al., 2017)发表的 69 号花岗岩中的铌钽铁(锰)矿具有一致的成分变化范围。本摘要的目的是拟通过分会场口头报告详细展示课题组相关观察和矿物学研究结果, 与与会专家和同行探讨稀有金属花岗岩成岩成矿过程和机制。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

安徽铜陵及巢湖地区黄龙-船山组沉积环境分析

王家宇, 谢巧勤, 徐亮, 周跃飞*, 刘童, 陈天虎, 徐晓春

合肥工业大学资源与环境工程学院, 纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 合肥 230009

安徽铜陵矿集区是长江中下游成矿带中的重要组成部分, 区内常发育位于石炭系黄龙-船山组地层中的层状、似层状铜金硫化物矿床, 其成因一直存在着较大的争议。有关包括古地理在内的成矿地质背景问题则成为解决成矿成因认识争议的关键问题之一。前人研究发现在石炭纪时铜陵地区存在古岛剥蚀区, 在铜陵古岛和江南古陆间形成了一个半封闭陆缘海盆地, 其沉积环境明显区别于以巢湖北部(后称“巢北”)地区为代表的古特提斯洋开阔台地。铜陵及巢北地区石炭系地层均发育一套海相碳酸盐岩地层。本文通过对铜陵及巢北地区黄龙-船山组碳酸盐岩地层微量元素对比, 分析了两地沉积环境的差异。

铜陵和巢北地区在黄龙-船山组的微量元素组成特征上呈现相对富 Fe、Mn, 贫 Co、Ni 的特点, 显示出海水沉积的特点; 两地的 ΣREE 、Al、Ti 等含量均较低, $\text{Y}/\text{Ho}>40$, Eu 为轻微的正异常, Ce 异常不明显, 显示受到陆源的影响较小, 在黄龙组早期可能有轻微的热液流体的加入。相对而言, 铜陵地层 Mn、Co、Ni、Pb、Zn、V、U 含量明显更高, 显示出铜陵地区盆地水更深, 并在附近有陆岛存在的特征, 与巢北地区的台地环境有明显的不同。铜陵地区的 Sr/Ba 值平均为 21, 巢北地区 Sr/Ba 值平

均为 97; V/Ni 值铜陵地区和巢北地区平均都为 1.4, 指示铜陵地区的盆地环境水体更深, 古盐度相对较低。铜陵地区的 V/Cr、Ni/Co、V/Sc 和 Th/U 平均值分别为 0.65、4.3、2.00 和 0.36, 巢北地区平均值分别为 0.49、2.35、1.01 和 0.30; 铜陵地区(Cu+Mo)/Zn 平均值为 0.15, 巢北地区为 0.27, 这些指标显示出铜陵地区相对巢北地区更贫氧, 基本处于氧化-还原过渡环境。随时间变化的沉积过程中, V/Ni 值在黄龙组前期巢北地区更高, 黄龙组中后期铜陵地区更高, 船山组巢北地区更高, 指示黄龙-船山组期间铜陵和巢北地区经历了不同时段的海侵海退过程。铜陵地区氧化还原指标比值的深度变化与巢北地区呈现不同的波状特点, 例如 Ni/Co 值在黄龙组前期铜陵地区相对较高, 在黄龙组中期巢北地区更高, 而黄龙组后期和船山组铜陵地区更高。这些氧化还原指标在时间上的变化特征与当时的海侵海退有关, 同时暗示了当时沉积环境和构造抬升的波状变化。铜陵地区沉积环境与巢北地区的差别, 也指示了铜陵古岛的存在对沉积过程的影响。这些特点也暗示了铜陵独特的陆缘海盆地环境以及导致相关元素的富集构成了成矿的有利条件, 对于研究铜陵地区石炭纪层状矿体的成矿机制问题具有参考意义。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41672038, 41872043)

第一作者简介: 王家宇(1995-), 硕士研究生, 研究方向: 成因矿物学. E-mail: wangjiayu1101@163.com

*通信作者简介: 周跃飞(1977-), 博士, 副教授, 主要从事矿物学研究. E-mail: alphazhou@hfut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

老柞山金矿床中金递进富集的矿物学记录

孟林, 黄菲*, 高文元, 赵福德, 黎永丽, 孙琪, 刘波

东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819

黑龙江老柞山金矿床位于中亚造山带东缘佳木斯板块中部, 受西伯利亚克拉通、华北克拉通和太平洋板块之间的相互作用, 先后经历了多期构造-岩浆活动, 形成了复杂的矿物结构和构造。这些矿物特征记录了老柞山金矿床成岩、成矿作用的重要信息, 是揭示佳木斯板块内生金成矿作用的重要窗口。

老柞山金矿床现已探明的金资源储量约 32 吨, 平均品位 7.38 g/t。通过室内外研究, 将老柞山金矿床的成矿作用划分为矽卡岩成矿期和热液成矿期, 进一步分为七个成矿阶段, 其中三个阶段是主要的金矿化阶段。矿床内主要载金矿物为毒砂、黄铜矿、磁黄铁矿和少量的 Bi-Te 矿物。运用场发射扫描电镜、电子探针观察并获得了毒砂、Bi-Te 矿物和金矿物的显微结构、元素分布和主、微量元素成分特征。

根据不同矿物组合, 将该矿床中毒砂分为四个世代 (Apy-1~Apy-4), 其中 Apy-1~Apy-3 与金矿化密切相关: Apy-1 颗粒较小, 分布在粗粒毒砂边部; Apy-2 呈粗粒, 交代早期的硫化物; Apy-3 与石墨等共生, 裂隙发育。EPMA 数据显示, Apy-1 与 Apy-3 含有较高的 Co (1%~7%), 且 As 含量也偏高; 而 Apy-2 成分接近理论值, 仅在局部出现 Co 异常。将金矿物划分为三个世代 (Au-1~Au-3), 与 Bi-Te 矿物 (Bi-Te-1~Bi-Te-2) 密切共生, 呈半自形-他形或液滴状, 二者通常以包裹体或裂隙充填的形式赋存于毒砂 (Apy-1~Apy-3) 颗粒中。三个世代的金矿物与 Bi-Te

矿物颗粒变化显著, Au-1、Au-2 与 Bi-Te-1、Bi-Te-2 粒径 10~300 μm , 而 Au-3 和 Bi-Te-3 粒径明显减小, 约 5~50 μm 。EPMA 数据显示, Au-1 与 Au-2 化学成分稳定, 分别以银金矿和自然金为主, Au-3 以银金矿为主, 但成分变化较大。金矿物中均含有少量的 Bi、Te 元素, 且 Au 与 Bi 呈正相关关系, 与 Te 呈负相关关系。

在上述研究结果基础上, 根据矿物显微结构、组合特征和主、微量元素特征, 利用成因矿物学、地球化学原理分析认为: 初始热液在运移过程中通过淋滤矿源层形成含矿流体, 并在构造有利位置通过与围岩进行水岩反应, 在低 $f\text{O}_2$ 和富 As 还原条件下形成丰富的磁黄铁矿或毒砂, 完成了 Au 的初步富集。在高温条件下沉淀的毒砂与磁黄铁矿等硫化物使流体中 $f\text{S}_2$ 降低、金的络合物失稳析出 Au, 同时毒砂等矿物与流体界面的氧化还原过程诱导流体中 Bi ($\text{Bi}_2\text{S}_2(\text{OH})_2^0$) 失稳析出。由于含矿流体温度高于 Bi 的熔点 (271 $^\circ\text{C}$), 因此 Bi 以熔体形式富集 Au。二者形成固溶体并在流体或硫化物中进一步富集 Au。随着温度降低, Au-Bi 固溶体达到饱和, 在毒砂中或毒砂裂隙、边部共沉淀。从整体上看, 老柞山金矿床中 Au 的富集先后经历富硫\富砷流体的粗富集和 Bi 熔体的细富集两个过程, 其中 Bi 熔体富集模式是控制 Au 富集的主要机制, 对形成高品位金矿体具有重要意义。

基金项目: 本文受到国家自然科学基金面上项目 (编号: 41272062)、东北大学基本科研业务费 (N170106001) 和国土资源部东北亚矿产资源评价重点实验室开放基金 (DBY-KF-8-04) 联合资助

第一作者简介: 孟林 (1991-), 博士后, 研究方向: 成因矿物学与成矿学方向. E-mail: menglin177@163.com

通信作者简介: 黄菲 (1959-), 教授, 研究方向: 成因矿物学与成矿学方向. E-mail: huangfei@mail.neu.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

低温热液石英不同 CL 环带 Al 浓度变化的原因

袁茂文¹, 李胜荣^{1,2*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

阴极发光(CL)图像可以很好地显示石英中的微观结构, 而石英中微量元素的浓度则可以有效地反映石英生长过程的物理化学条件。基于此, CL 图像结合石英中微量元素浓度被广泛地用于解译热液体系演化和石英脉形成过程的复杂历史。以往研究显示在斑岩型矿床及许多火山岩中的石英中, CL 强度与 Ti、Al 等元素浓度具有明显的正相关关系, 且温度在 Ti、Al 浓度变化中具有重要调控作用。在低温热液石英中不同 CL 强度与 Al 浓度变化的相关性却复杂得多。例如, 在大多数低温热液石英中, Al 浓度与 CL 强度呈正相关关系, 而在一些低温热液石英中, Al 浓度与 CL 强度则又呈现负相关关系。是什么导致了低温热液石英中 Al 浓度与 CL 强度相关关系的巨大变化? 这些变化又指示了哪些地质信息? 目前还一直未得到很好的解释。

本研究在前人研究基础上, 选取胶东乳山金矿及

阜平石湖金矿床中的成矿早期石英为研究对象, 利用扫描电镜-阴极发光(SEM-CL)、电子探针(EMP)及电子背向散射衍射 EBSD 开展了石英矿物学的系列研究。结果发现胶东乳山金矿床中的石英 CL 强度与 Al 浓度成明显的正相关关系, 而石湖金矿中的石英 CL 强度则与 Al 浓度成负相关关系, 其他元素如 Ti、Na、K、Ga、Ge 等则无明显变化。EBSD 面扫结果显示, 石湖金矿不同 CL 强度的石英具有相同的结晶取向, 变形程度小且滑移密度极为一致, 显示稳定结晶的特性; 而乳山金矿中石英 CL 亮带与 CL 暗带则具有明显的结晶取向差异, 不同 CL 环带的变形程度与滑移密度也存在明显差别, 显示快速结晶的特征。综合来看, 低温热液石英中 Al 浓度与 CL 强度的正相关关系可能是石英快速结晶的结果, 而 Al 浓度与 CL 强度的负相关则可能是石英结晶过程中物理化学条件变化导致的, 如 pH。

基金项目: 国家自然科学基金(41872038), 科技部重点研发计划(2016YEC0600106)

第一作者简介: 袁茂文(1993-), 博士后, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: 851497705@qq.com

*通信作者简介: 李胜荣(1956-), 教授/博士, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: llsr@cugb.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

南秦岭早寒武世黑色岩系黄钾铁矾成因及指示意义

左鹏飞^{1*}, 刘学飞², 郝金华², 郑德顺¹

1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

黑色岩系作为富含有机碳的一套沉积岩及相应变质岩强还原性岩石组合, 常伴随大量金属元素(范德廉等, 1973, 1987; 王登红, 1997; Gregory et al., 2016; Pufahl and Lee, 2017), 扬子克拉通和南秦岭下寒武统黑色页岩系构成了世界重要的黑色岩系多金属成矿带, 但对其形成环境及成矿元素富集机制认识分歧显著。南秦岭浙川地区集中发育众多钒多金属矿床, 呈层状产于下寒武统水沟口组黑色岩系, 矿化特色鲜明, 是深入研究黑色岩系中钒成矿机制, 揭示早寒武世黑色岩系形成环境的理想对象。

南秦岭北部镇安-浙川地区下寒武统内陆棚水沟口组黑色岩系下部发育硅质岩和泥质岩类组合, 向上过渡为泥灰岩、灰岩和白云岩。水沟口组黑色岩系中产出有大量黄钾铁矾, 主要以结核状和片状发育在水沟口组黑色岩系的泥质类岩石中。黄钾铁矾与磷灰石密切共生, 通过系统对比矿物共生组合指示其形成于成岩早期或同沉积阶段。黄钾铁矾属明矾石超族, 明

矾石族化学通式为 $AB_3(XO_4)_2(OH)_6$, 黄钾铁矾标准分子式为 $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ 。明矾石与黄钾铁矾的划分依据 B 位 Fe/Al 是否小于 1.0 (Scott, 1987)。黄钾铁矾中 V、Al、Cu、Cr 可以代替 Fe, K 常被 Ag、Pb、 NH_4 、 H_3O 等代替(王濮等, 1982; Stoffregen et al., 2010)。其常见成因除黄铁矿的氧化外, 在酸性介质条件下也可直接生成, 常产于矿山废水、火山喷气口、高盐度卤水、酸性地下水中、热液矿床蚀变带、南极冰川以及火星表面(Burns, 1987; McHenry et al., 2011; Jennings and Driese, 2014; Baccolo et al., 2021)。南秦岭及扬子克拉通周缘下寒武统黑色岩系中钒的富集, 一般认为与粘土矿物以及钒酸盐和金属硫化物密切相关(鲍正襄等, 2002; 刘家军等, 2008; 朱红周等, 2010; 杨剑和易发成, 2012)。电子探针结果显示黄钾铁矾异常富集钒, 分子式计算表明该黄钾铁矾 Fe/Al 为 1.0 到 2.5, 远低于黄钾铁矾标准分子式中的比值, 暗示其并非是由黄铁矿的直接氧化形成。

*通信作者简介: 左鹏飞(1988-), 副教授, 从事沉积构造演化与沉积矿床研究. E-mail: pzuo@foxmail.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

大兴安岭东北部二道坎银矿床岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄 及对成矿的指示意义

李成禄¹, 杨元江¹, 袁茂文², 鲍希波¹, 李胜荣²

1. 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

二道坎银矿床位于大兴安岭东北部, 黑龙江省嫩江市罕达气镇附近。紧邻多宝山大型斑岩铜矿、争光金矿。是著名的多宝山一大新屯国家级整装勘查区内又一新发现的大型矿床。该矿床的发现不仅弥补了黑龙江省独立银矿床的空白, 且其品位极高也在国内甚至世界罕见。

1 矿区地质特征

二道坎银矿区出露的地层主要有中生界下白垩统中基性-中酸性火山岩及沉积岩; 古生界主要为上志留-中泥盆统泥鳅河组长石杂砂岩、岩屑砂岩、细粉砂岩及含钙质粉砂质泥岩、泥质灰岩, 其内部产出同时异相的基性火山岩。矿区内侵入岩不发育, 仅出露多条北西向的中基性-中酸性脉岩; 矿区内断裂构造较发育, 主要为北东向和北西向, 北东向构造为区域性大断裂, 控制区内及区域上的中生代地层、火山岩以及中基性-中酸性脉岩的展布; 北西向断裂则多表现为北东向大断裂的次级断裂, 整体显示张性特征。

2 矿体及矿石特征

二道坎银矿体主要赋存于上志留统一中泥盆统泥鳅河组含钙质的粉砂质泥岩、灰岩与辉绿岩脉接触部位, 泥岩普遍发育碳酸盐脉。矿区内共圈出北西西向 2 条银多金属矿体及 8 条从属银多金属矿体。其中 I 号银多金属矿体走向控制长度 315.86m, 东端未封闭, 倾向控制最大延深 114.71m, 矿体形态为脉状(上宽下窄); 矿体真厚度 1.41~29.48m, 走向 288°, 倾向 198°, 倾角 82°-88°, 近直立, 银品位 42.80~10940.97g/t, 矿体平均品位 557.61g/t; 同时伴生有铅、锌、锰。II 号银多金属矿体与 I 号矿体产于同一北西西向构造带中, 成矿特征基本相似。

二道坎银矿床中矿石主要为石英细脉和硅质胶结的构造蚀变角砾岩。成矿大致分为四个成矿阶段, 即早期的石英-黄铁矿-磁铁矿阶段、沥青-黄铁矿-石英阶段, 主成矿期的石英-含银多金属硫化物阶段以

及晚期的石英-方解石阶段。

3 锆石 U-Pb 年龄结果

根据野外观察和室内鉴定, 矿区内岩浆岩主要类型有辉绿岩、闪长岩、石英闪长岩、闪长玢岩、石英闪长玢岩、英安质晶屑岩屑凝灰岩、安山岩、(玄武)安山岩和玄武岩。

辉绿岩多呈灰绿色, 个别邻近矿体处表现明显的褐红色, 岩石中锆石为明显的岩浆成因。87 个锆石点中仅 7 个点组成的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 235.5 ± 1.2 Ma, MSWD=5.6, 平均年龄为 235.4 ± 2.4 Ma, MSWD=0.63, 二者年龄一致。玄武安山岩多呈灰绿色, 变余斑状结构, 岩石中锆石为明显的岩浆成因, 20 个锆石点中 10 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较集中, 谐和年龄值为 232.4 ± 1.1 Ma, MSWD = 0.066, 平均年龄为 232.5 ± 2.2 Ma, MSWD = 0.38。安山岩/安山玢岩中的锆石为典型的岩浆成因, 23 个锆石点中的 16 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为 232.1 ± 0.96 Ma, MSWD = 0.029, 平均年龄为 232.1 ± 1.9 Ma, MSWD = 0.79。石英闪长玢岩中锆石为典型的岩浆成因, 22 个锆石点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄值为 225.7 ± 0.79 Ma, MSWD = 0.001, 平均年龄为 225.5 ± 1.5 Ma, MSWD = 0.53。整体反映矿区内岩浆岩普遍形成于晚三叠世。

4 对二道坎银矿成矿时代的指示

矿区内的辉绿岩脉与矿体关系密切, 产状基本一致并相互伴生, 且基本处于矿体顶部位置。岩石地球化学特征显示蚀变较强, 烧失量可达 20%, 其应遭受了明显的蚀变作用, 综合认为其应与银成矿同期或稍早于成矿期, 初步限定成矿时代的上限。而玄武安山岩、安山岩等与辉绿岩特征基本一致、产状相近、成岩时代一致, 综合显示应为同期岩浆产物。而石英闪长玢岩脉经钻孔岩心观察, 蚀变明显变弱, 虽未直接观察到切穿矿体, 但成岩时代为 225.7Ma, 与其他岩浆岩时代相差约 8Ma, 应为成矿晚期产物, 这应限定

了成矿时代的下限。

Yuan (2021) 等最新获取了黄铁矿、方铅矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 $232.9 \pm 2.3 \text{Ma}$ ；方铅矿、沥青的 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 $234.9 \pm 1.4 \text{Ma}$ ，MSWD=1.9，与岩浆锆石年龄基本一致，这很好地确认了二道坎银矿的成矿年龄应在中三叠世。

5 对区域成矿的指示意义

二道坎银矿位于多宝山一大新屯国家级整装勘查区范围内，是著名的多宝山矿集区内又一重大发现，其独立的银成矿填补了区域矿种的空白，而本次确定的三叠纪成矿在区域内也是重大发现。李成禄 (2018) 在对二道坎银矿东南的区域性嫩江-黑河构造混杂岩带内的孟德河金矿开展较为系统的研究显示，其中晚三叠世形成的韧性剪切带型金矿床，并提出三叠纪成矿事件的重要性；郝宇杰 (2015) 在开展多

宝山铜矿和铜山铜矿研究时也发现了三叠纪 (226.6-235.4Ma) 的小岩体，并伴随明显的钼矿化，提出在奥陶纪铜矿成矿作用基础上，后期叠加了三叠纪的钼矿化。毛景文等 (2012) 认为三叠纪构造演化在中国地质历史过程中强度大、影响范围广泛，并随之伴随大规模的三叠纪成矿事件。但通过统计三叠纪成矿事件显示，目前在东北及邻区主要出露三叠纪斑岩型钼矿、铜镍硫化物矿和脉状金矿，尚未见三叠纪的银矿床；朱裕生等 (2002) 认为研究区所处的滨太平洋构造域在印支旋回开始了强烈活动，使之前呈稳定大陆边缘的亚洲东部明显转为活动大陆边缘，这种转变十分有利于银等金属的矿化。

综上，多宝山一大新屯国家级整装勘查区三叠纪成矿事件应引起有关部门在矿床勘查与研究中的重视。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

白云鄂博碳酸岩脉霓长岩化过程对 REE 成矿的启示

杨帆, 陈唯*

中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

白云鄂博 Fe-REE-Nb 矿床是世界上最大的轻稀土矿床, 该矿床经历了多期次复杂的变质作用, 导致目前对其岩石成因和成矿过程仍存在较大争议。最新高温高压实验表明 REE 在碱质岩浆或热液中具有广泛的活动性, 而碳酸岩岩浆侵位过程中广泛存在的碱交代作用(霓长岩化)对 REE 矿化的贡献尚不明确。本研究以白云鄂博霓长岩化发育良好的典型碳酸岩脉(1号脉, Wu dyke)为研究对象, 通过详细的岩相学、全岩地球化学和原位微区元素组成等研究来揭示霓长岩化过程对 REE 富集成矿的贡献。

1号脉碳酸岩主要由方解石和霓石组成, 含少量氟碳(钙)铈矿并与重晶石紧密共生。碳酸岩极度富集 REE (高达 7.39 wt%), 轻重稀土分异明显 ($La/Yb_N=1203$)。围岩为石英角砾岩, 主要矿物为石英, 含有少量钾长石及钠长石。从中心碳酸岩脉至围岩, 依次发育有钠质、钾质霓长岩。钠质霓长岩主要由方解石、磷灰石、霓石、钠闪石组成; 钾质霓长岩主要由钾长石、石英组成。随着霓长岩化作用进行, 碱性流体中的 Na、K 逐渐迁移到围岩中, 分别在低级钠质霓长岩和钾质霓长岩中达到峰值; 霓长岩中 CaO、SrO、BaO、SO₃ 含量逐渐降低, SiO₂、Al₂O₃ 含量逐渐升高。钠质霓长岩中 REE 较为富集 (1.19-2.25 wt%), 其中 LREE 赋存在独居石中, HREE 则主要赋存在磷灰石中 (含量为 653-3059 ppm); 而钾质霓长岩中 REE 含量较低 (0.04 wt%)。此外, 钠质与钾质霓长岩中轻重稀土分异程度 ($La/Yb_N=53-170$) 均明显低于碳酸岩。值得一提的是, 白云鄂博碳酸岩脉相伴生的霓长岩化过程中, 稀土的迁移与分异与硫酸盐和磷酸盐关系密切, REE 与 SO₃ 含量、HREE 与

P₂O₅ 含量呈现很好的正相关关系。碳酸岩脉显著富集 SO₃ (5.85 wt%), 且稀土较为富集的钠质霓长岩中独居石与重晶石紧密共生, 表明 SO₄²⁻ 很可能是碳酸岩流体中 REE 迁移的主要载体。富 LREE 独居石分离结晶导致残余流体相对富集 HREE, 继而沉淀出富 HREE 的热液磷灰石。

方解石原位 C 和 Sr 同位素表明碳酸岩脉同位素组成较为均一, 均指示典型地幔来源 ($\delta^{13}C = -4.36 \sim -5.16$; $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70344 \sim 0.70358$)。霓长岩 Sr 同位素组成变化较大且更为富集放射性同位素 ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70374 \sim 0.70588$), $\delta^{13}C$ 值显著偏负 ($\delta^{13}C = -4.92 \sim -9.87$), 表明了出溶碳酸岩流体与围岩组分 ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0.72394$) 两端元混合过程同时伴随着 CO₂ 脱气作用。碳酸岩中早期和晚期方解石具有不同的稀土含量和配分模式, 早期富集 REE (1437-2162 ppm), 呈现右倾型 REE 配分模式, La/Yb_N 平均值为 14.0; 而晚期相对亏损 REE (573-889 ppm), La/Yb_N 值降低 ($La/Yb_N = 1.82 \sim 3.90$)。霓长岩中方解石 REE 含量较低且变化大 (127-1111 ppm), 呈现平坦型 REE 配分模式, La/Yb_N 平均值为 1.42。方解石稀土含量和配分模式主要受控于熔体或流体含量和伴生稀土矿物(如氟碳铈矿、独居石)分离结晶的影响。

白云鄂博碳酸岩 1号脉相伴生的霓长岩中大量独居石的结晶表明碳酸岩霓长岩化过程可以导致轻稀土的局部矿化, 但相对碳酸岩矿化规模较小。霓长岩中 HREE/LREE 值明显高于碳酸岩, 表明岩浆侵位过程中出溶的碱性流体相对富集 HREE, 形成重稀土局部富集的霓长岩, 主要富集在磷灰石条带中。同时, 碱性流体出溶进一步导致了残余碳酸岩熔体轻重稀土分异, 利于碳酸岩轻稀土矿化。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

铜陵叶山五通组砂岩矿物组成及地质意义

刘童, 谢巧勤*, 王家宇, 周跃飞, 阚立波, 徐晓春

合肥工业大学资源与环境工程学院, 纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 合肥 230009

铜陵矿集区是长江中下游铜铁金多金属成矿带重要组成部分, 区内铜铁资源丰富, 矿床多以层控型、矽卡岩型为主。其中层控型矿床主要赋存于石炭系和泥盆系地层之间, 但是对于矿床中铁的来源仍缺乏深入研究。泥盆系五通组在长江中下游地区广泛出露, 前人研究认为五通组上段顶部存在多层富铁沉积层和含铁结核层 (约 18 层), 铁的含量及赋存形式影响其中生代岩浆及热液活动过程中的铁活化与迁移, 同时也制约区域层状铁铜矿床的成矿作用。为此, 本次工作对铜陵叶山铁矿区出露的五通组顶部剖面进行系统的野外勘查和室内研究。根据沉积层颜色变化, 从剖面顶部至底部逐层采样, 且对含铁结核层加密采样, 共采集 16 件样品。采用粉晶 X 射线衍射 (XRD)、场发射扫描电镜 (SEM) 等分析方法, 对采集的岩石和矿石样品开展矿物组成及微结构研究。

结果显示整个剖面矿物组成基本相似, 但是矿物相对含量和组合存在较大差别。根据矿物组合, 将叶山五通组顶部分为四段, 从顶部至底部依次为: 石英砂岩段 (I 段)、石英砂质泥岩段 (II 段)、泥质石英砂岩段 (III 段)、赤铁矿段 (IV 段)。I 段主要组成矿物为石英, 其次黏土矿物和赤铁矿, 其中黏土矿物主要为伊利石, 其次为叶腊石, 该段矿物组合为石英+伊利石-叶腊石+赤铁矿。II 段主要矿物组成为黏土矿物, 石英次之, 少量赤铁矿, 其中黏土矿物主要为

叶腊石, 高岭石次之, 少量伊利石, 该段矿物组合为叶腊石-高岭石-伊利石+石英+赤铁矿。III 段主要组成矿物为石英, 赤铁矿次之, 少量黏土矿物, 其中黏土矿物主要为高岭石和叶腊石, 微量伊利石, 该段矿物组合为石英+赤铁矿+高岭石/叶腊石-伊利石。IV 段为赤铁矿层, 主要组成矿物为赤铁矿, 含少量高岭石、叶腊石伊利石, 该段矿物组合为赤铁矿+叶腊石/高岭石-伊利石+石英。从剖面顶部至底部, 沉积层中赤铁矿呈现逐渐增多, 石英逐渐减少的趋势, 且富叶腊石层显示亏损赤铁矿。

SEM 观察发现石英颗粒粗大, 表面光滑, 呈次圆形、圆形, 总体显示石英磨圆度较高。赤铁矿主要呈鳞片或他形形态, 颗粒粒度均一, 为亚微米粒级, 且在赤铁矿结核中共存自形磷灰石。原位观察显示赤铁矿和石英矿物接触边界处, 赤铁矿颗粒并没有显著的变化, 说明了赤铁矿与石英经历相同的地质作用。叶腊石等黏土矿物皆为片状、叶片状形态, 与粒状石英、赤铁矿堆垛成他形的复合大颗粒, 富叶腊石层为原生沉积高岭石经过热液作用而成。基于矿物学和微尺度观察认为, 五通组中含赤铁矿层 (结核) 可能由原始沉积铁 (氢) 氧化物经过沉积-热变质作用, 沉积层中该状态的铁在中生代岩浆-热液作用过程中具有较高活化迁移能力, 可以为区域层状铁矿和硫化物型铜铁矿床提供部分铁源。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41672038, 41872043)

第一作者简介: 刘童 (1998-), 硕士, 研究方向: 矿物学研究. E-mail: 365541908@qq.com

*通信作者简介: 谢巧勤 (1970-), 博士, 教授, 主要研究方向为成因矿物学. E-mail: qqxie424@hfut.edu.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

渤中凹陷深层砂砾岩流体矿物相互作用 及其对储层演化的影响

臧春艳, 张旭东, 税蕾蕾, 杨纪磊

中海石油能源发展股份有限公司工程技术分公司渤海实验中心, 天津 300459

渤中凹陷西南部深层钻遇巨厚砂砾岩, 厚度超过 500 米, 钻探表明上部砂砾岩物性好, 产能高。孔店组砂砾岩可分为上部和下部两个大的单元, 上部单元储层物性好, 测试产能高, 下部单元储层物性相对较差, 测试产能低。为了进一步落实上下储层的成因差异, 本文开展了压实物理模拟实验, 矿物溶蚀实验, 同时开展了同位素, 电子探针分析。在压实物理模拟实验中, 配比了与研究区成分相近的砂砾岩, 通过压实模拟在 3500 米以下, 砾石接触部位出现了的大量裂缝, 与岩心薄片下观察到的裂缝发育特点相似, 证实压实背景下, 杂基含量较低的净砂砾岩可以生成大量裂缝。通过岩石应力模拟实验证实长石矿物形成裂缝能力有很大区别, 钾长石相对于斜长石在压力背景下更容易形成晶内共轭微裂缝并在埋藏高温条件下溶蚀, 这一点与薄片观察到的现象一致, 钾长石先破碎后溶蚀提供了大量储集空间。两类长石深层裂缝形成及溶蚀特点差异主要是由于斜长石更容易黏土矿化, 黏土矿化后的斜长石裂缝形成能力下降; 另外, 斜长石的结晶特点让其更容易发生晶格的滑动产生书斜式变形, 这一点也降低了其裂缝形成能力。

溶蚀作用对储层形成起到了重要作用, 溶蚀流体主要有两个不同的来源, 早期抬升暴露期形成了明显

的淋滤溶蚀带, 表现为长石含量显著降低, 石英含量相对增加, 电子探针分析表明上单元储层中的 MnO , FeO 含量显著低于下部单元, 反映上部单元为更为开放的流体环境; 碳酸盐胶结物的碳氧同位素分析表明, 上部的碳酸盐胶结物同位素与古近系生物碎屑的同位素接近, 两者为不整合接触关系, 进一步说明上部砂砾岩与上部地层有着充分的流体交换过程。早期的大气水淋滤作用对上部单元优质储层的形成起到了决定性影响。深部流体主要是幔源二氧化碳流体, 通过碳同位素及氦同位素图版证实二氧化碳主要来源于幔源。推测构造二氧化碳流体与周边晚期的火山岩侵入体为同期活动。二氧化碳侵位之后与早期溶蚀作用叠加, 强化了早期溶蚀作用; 钾长石在低温条件下相对稳定, 高温下易溶蚀, 深层钾长石的大量溶蚀主要是晚期二氧化碳侵位导致的。

上下储层单元由于早期杂基含量差异, 分布位置差异, 使两者储层物性演化产生较大差异。上部储层杂基含量低, 在压实背景下易产生裂缝, 上部储层受到大气水的强烈淋滤作用产生大量早期溶蚀孔; 下部储层杂基含量高储层不易产生压实缝, 下部储层距离风化壳距离大, 主要为封闭成岩环境。上述早期条件差异是上下储层单元物性差异演化的根本原因。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

东川石族新矿物—首次发现全新成分和全新结构的新矿物族

李国武^{1*}, 孙宁岳¹, 薛源¹, 沈洪涛², 郝金华¹

1. 中国地质大学(北京) 科学研究院, 北京;
2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉

最近, 课题组在云南东川铜矿带发现两种全新化学成分组成和全新晶体结构类型的新矿物, 本次发现的新矿物不是单个的矿物种, 而是由多个结构相似而成分占位不同的新矿物种组成的全新矿物大家族。根据其发现地, 我国著名铜都云南东川, 将该族矿物命名为东川石族, 属于磷砷酸盐的表生矿物类。目前, 首批获得国际矿物学协会新矿物命名及分类委员会(IMA-CNMNC)批准的两个新矿物种分别是具有东川石型结构的锌东川石 Dongchuanite (IMA2021-058) 和铜东川石 Cuprodongchuanite (IMA2021-065)。该矿物新族的发现, 为矿物宝库又添加了一个全新的矿物新族, 此前从未发现过类似的本族矿物。

化学成分和晶体结构研究发现, 该族新矿物具有全新的化学成分组成, 矿物族晶体化学通式 $A_4B^{VI}B^{IV}_2(X^1O_4)_2(X^2O_4)_2(OH)_2$, 式中 A 为 Pb, B^{IV} 为四次配位的 Zn, B^{VI} 为六次配位的 Zn 或 Cu, X^1 、 X^2

可有 P 和 As。新矿物种锌东川石的晶体化学式为 $Pb_4Zn^{VI}Zn^{IV}_2(PO_4)_2(PO_4)_2(OH)_2$, 铜东川石的晶体化学式为 $Pb_4Cu^{VI}Zn^{IV}_2(PO_4)_2(PO_4)_2(OH)_2$ 。隶属于该族的各矿物种具有全新的相同晶体结构类型, 三斜晶系, $P\bar{1}$ 空间群, 晶胞参数接近。其中, 锌东川石晶胞参数 $a = 4.7620(10) \text{ \AA}$, $b = 8.507(2) \text{ \AA}$, $c = 10.3641(19) \text{ \AA}$, $\alpha = 97.110(17)^\circ$, $\beta = 101.465(17)^\circ$, $\gamma = 92.273(18)^\circ$, $V = 407.44(15) \text{ \AA}^3$, $Z = 1$ 。晶体结构为特殊的全新层状结构, B 类、 X 类离子分别呈四面体和八面体共角顶构成网层状平行(011)分布, A 类离子充填层间。在锌东川石矿物晶体结构中首次发现了 Zn 元素独特的晶体化学性质, 在同一晶体结构中 Zn 同时具有四面体配位 Zn^{IV} 和八面体配位 Zn^{VI} , 其中, 四面体配位的 Zn 在整个矿物族中稳定占据 B^{IV} 位置, 这一新发现对于研究 Zn 的晶体化学行为有重要的意义。同时, 晶体学位置 X^1 、 X^2 分别存在磷和砷的占位, 显示了该族矿物丰富的潜在矿物新种。

*通信作者简介: 李国武(1964-), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新矿物及矿物晶体结构与晶体化学. Email: liguowu@cugb.edu.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

湖南锡田晚侏罗世花岗岩矿物学和地球化学特征及其地质意义

宋宏星¹, 周云^{1*}, 付伟^{1,2}, 蔡永丰^{1,2}, 杜宇晶¹

1. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541004

为探讨湘东锡田地区晚侏罗世花岗质岩浆作用及其地质意义, 本文对锡田垄上黑云母二长花岗岩进行了矿物学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究。锆石 U-Pb 年代学研究表明花岗岩形成于~150 Ma, 为晚侏罗世。锆石原位 Hf 同位素的研究结果显示花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -11.68~-7.40, Hf 的二阶模式年龄为 1.55~1.34 Ga。花岗岩黑云母的化学成分特征显示其含铁指数为 0.96~0.98, 显示出低的氧

逸度, 白云母 Mg 原子数为 0.02~0.08, 表现出次生白云母的特征。上述数据资料并结合相关区域地质资料, 表明锡田晚侏罗世花岗岩主要来源于古老地壳物质的重熔, 其形成与中生代时期华南发生的岩石圈伸展与减薄作用有关。锡田晚侏罗世花岗质岩浆活动与锡田钨锡多金属矿床具有一致的形成时代, 暗示晚侏罗世花岗质岩浆活动与本区钨锡多金属矿床的形成具有密切关联。

基金项目: 本文受广西自然科学基金项目 (2020GXNSFGA297003; 2018GXNSFBA281069)

第一作者简介: 宋宏星 (1995-), 硕士研究生, 主要从事构造地球化学研究工作

*通信作者简介: 周云 (1988-), 副教授, 主要从事矿物岩石矿床学研究工作. Email: zhouyun@glut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

伟晶岩石榴石中 Li、P 和 Y+REE 的耦合替换 及成岩和成矿指示意义

凤永刚^{1,2*}, 梁婷¹, 王梦玺¹, 谭细娟^{1,2}, 岑炬标¹, 郝媛媛¹, 闫珊珊³

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054;
2. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 西安 710054;
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

石榴石的化学通式可以表示为 $X_3Y_2(ZO_4)_3$, 其中 X、Y、Z 分别代表十二面体、八面体及四面体对应的结构位置。我们对东秦岭花岗伟晶岩以及新疆阿尔泰造山带卡鲁安稀有金属伟晶岩中的石榴石进行了细致的岩相学及矿物化学研究, 利用 LA-ICP-MS 测定石榴石中锂、磷及稀土等微量元素含量。观测结果表明, 锂、磷及稀土可以通过耦合替换进入伟晶岩的石榴石晶格。Y+REE 存在石榴石的 X 位, P 占据 Z 位, 而 Li 及同为碱金属的 Na 则占据 X 位, 为 Y+REE 或 P 提供电价补偿。三者之间的耦合替换主要包括以下两种: $[^X(Li,Na)_1^X(Y,REE)_1^X(R^{2+})_2]$ 以及 $[^X(Li,Na)_1^ZP_1^X R^{2+}_1^Z Si_1]$, 其中 R 代表 X 位上的二价金属阳离子。伟晶岩石榴石中, 何种替换方式起主导作用主要取决于伟晶岩熔体的地球化学性质。由此, 在 NYF (铌-钇-氟) 型伟晶岩以及具有 NYF 亲和性的混合型伟晶岩中, Li 主要通过第一种耦合替换, 与 Y+REE 进入石榴石晶格; 而在相对富 P 的 LCT (锂-铯-钽) 型伟

晶岩以及无矿化伟晶岩中, Li 主要经第二种耦合替换, 与 P 共同进入石榴石晶格。此外, 尽管 Sc 和 Ti 在伟晶岩石榴石中含量相对较低, Sc 和 Ti 进入石榴石晶格也可能需要与 Li (及 Na) 进行耦合替换。

伟晶岩石榴石中的 Y、REE 以及 Sc 环带主要受制于伟晶岩熔体成分以及石榴石和其它富 Y+REE 矿物 (如磷钇矿、褐钇铌矿、独居石等)、富 Sc 矿物 (如黑云母) 的结晶作用。综合本研究与前人的观测结果, 相较于 LCT 型伟晶岩和无矿化伟晶岩中的石榴石, NYF (铌-钇-氟) 型伟晶岩以及具有 NYF 亲和性的混合型伟晶岩中石榴石往往具有极高的 Y (可达~20000 ppm)、REE (可达~20000 ppm) 及 Sc (可达~2400 ppm) 含量, 但 P 含量极低 (< 100 ppm)。但是, 无论何种伟晶岩类型均可以产出低 Y、REE、Sc 以及 P 的石榴石。因此, 伟晶岩石榴石中 Li、P 和 Y+REE 的耦合替换和石榴石 Y、REE 和 Sc 含量及环带特点应当相结合来揭示伟晶岩的岩石、矿化类型及成因。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

福建霞浦大湾铍矿的矿物学特征及其成因

张志琦, 饶灿*, 王琪

浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

福建霞浦大湾的铍(钼)矿床位于闽东火山断拗带北端, 福安—南靖断裂带东侧。铍和钼矿产均已达到了工业品位, 其中铍矿床资源储量已经达到 2621.56t, 是目前在东南沿海地区发现的规模较大的火山岩型铍钼矿床。该区出露的地层主要为晚侏罗世南园组第二、第三段酸一中酸性火山岩。侵入岩为燕山期的钠长石化碱长花岗岩。福鼎—福清北北东向断裂带的张性裂隙为主要的控矿、容矿构造。矿体主要赋存在火山岩和花岗岩的接触带附近, 呈脉状产出。

通过研究发现, 铍主要以日光榴石、羟硅铍石和绿柱石形式存在, 钼只以辉钼矿的形式存在; 这些矿石矿物通常和萤石、石榴子石共生, 常常伴有黄铁矿、闪锌矿等硫化物。结合岩芯的观察发现, 大湾的矿区的从深部到浅部依次发生了云英岩化、绢英岩化、黄铁矿化以及硅化的蚀变作用。其中日光榴石和羟硅铍石在不同的蚀变带均有出现, 绿柱石只存在于硅化带内。云英岩化带处于矿区的深部, 该区的日光榴石(I期)常被交代, 晶形差; 绢英岩化-黄铁矿化带位于该矿区的中部位置, 矿化带出现大量的硫化物(闪锌

矿和黄铁矿)和石榴子石, 颗粒大且晶形好; 日光榴石(II期)颗粒较大, 晶形好, 部分具有生长环带。硅化蚀变发生在角岩内, 位于最浅部。日光榴石(III期)晶形完整且大, 存在生长环带。羟硅铍石均是后期沿裂隙充填日光榴石内部。绿柱石被石英和云母交代, 晶形很差。

对日光榴石以及石榴子石的主微量测试分析得出, 该区的日光榴石均是 Mn 端元, 从 I 期-III 期(由深到浅), 日光榴石的 Fe 含量增加, 这可能是后期成矿流体中含有大量的 Fe 元素。日光榴石和石榴子石均出现明显的 Eu 负异常, 重稀土含量明显高于轻稀土含量。

前人通过锆石 U-Pb 定年得出碱长花岗岩的年龄为 $93.0 \text{ Ma} \pm 0.6 \text{ Ma}$ (黄新鹏, 2018), 辉钼矿的 Re-Os 定年得出矿体年龄为 $92.2 \text{ Ma} \pm 1.3 \text{ Ma}$ (赵芝等, 2019)。因此, 该矿区的成矿物质可能来自侵入的花岗岩中。但是在该矿区出现大量的日光榴石, 脉厚约 50 厘米, 可能属于一种新的火山岩型铍矿, 其成矿机理有待进一步研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(9206220020)

第一作者简介: 张志琦(1998-), 博士研究生, 研究方向: 矿物、岩石、矿床研究. E-mail: zhiqizhang@zju.edu.cn

*通信作者简介: 饶灿(1978-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 关键金属成矿矿物学. E-mail: canrao@zju.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

新矿物: 竺可桢石

饶灿^{1*}, 谷湘平², 王汝成³, 夏群科¹

1. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027;
2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210046

新矿物竺可桢石“Chukochenite”(IMA 编号: 2018-132a, 国家博物馆馆藏号: M13818), 为纪念我国著名科学家、教育学家竺可桢院士(1890-1974) 而命名。竺可桢是气象科学领域的奠基人、“文军长征”的领导者、地球科学系的创建者、求是精神的追梦者、教育教学的先行者, 深受国内和国外人士尊敬和爱戴。该新矿物产于湖南省郴州地区香花岭矽卡岩, 与萤石、金云母、金绿宝石、尼日利亚石、绿泥石等矿物一起产出; 晶体呈自形-半自形, 晶体化学式为 LiAl_3O_8 , 斜方晶系, 空间群为 $I mma$, 晶胞参数: $a = 5.6593(4) \text{ \AA}$, $b = 16.8981(9) \text{ \AA}$, $c = 7.9938(5) \text{ \AA}$, $V = 764.46(8) \text{ \AA}^3$, $Z = 6$, 晶体结构模型如 1。

竺可桢石是自然界发现的第一个锂铝氧化物, 具体特殊的物理性质。该新矿物的发现, 为了解超轻金属锂的地球化学行为提供重要信息, 具有重要的科学意义, 对铍矿和锡矿的指导找矿也具有重要指示意义。

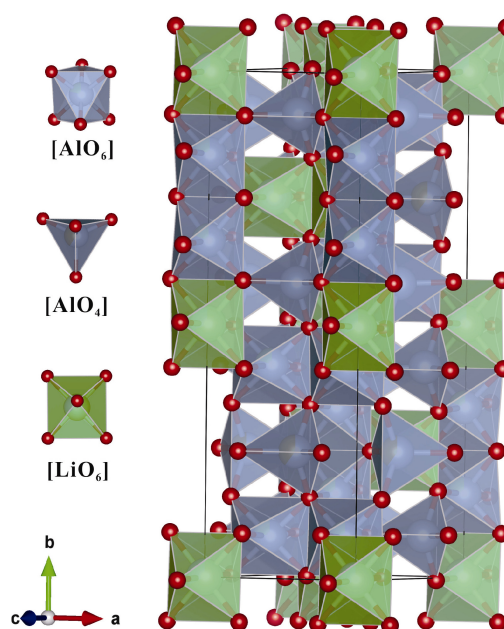


图 1 竺可桢石的晶体结构图

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41772031)

第一作者简介: 饶灿(1978-), 教授, 研究方向: 关键金属成矿矿物学. E-mail: canrao@zju.edu.cn

*通信作者简介: canrao@zju.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

云南个旧卡房矿田花岗岩黑云母成分特征 及其对锡成矿的指示

华洁文, 蔡永丰*

桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心&广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004

云南个旧锡矿是闻名于世的超大型锡多金属矿床, 矿区面积约 1911 km², 目前已发现约 1000 多个具有工业价值的矿体, 主要赋存在中三叠统个旧组 and 法郎组, 以锡、铜等金属矿为主, 探明的有色金属总储量不少于 1000 万吨。个旧地区地处扬子与华夏地块交界处的最西南段, 其北部以弥勒-师宗断裂与扬子地块分界, 西南以红河断裂与哀牢山构造带相邻, 南部为越北古陆。前人对个旧锡矿的基本地质特征、矿床地质特征、成矿时代、成矿规律、找矿预测和成矿模式等问题以及区内岩浆岩的岩石学特征、地球化学、形成时代、形成构造背景等方面均展开了大量工作, 并取得了一系列的研究成果。尽管如此, 目前对个旧锡矿的矿床成因仍存在激烈争议, 主要有 1) 海底火山沉积-喷流热水沉积成因; 2) 燕山期花岗质岩浆期后热液成因; 3) 海底火山沉积-喷流热水沉积+燕山期花岗质岩浆期后热液叠加改造成因; 4) 红海型热水沉积成因; 5) 印支期中晚期海底基性火山沉积成矿+海底喷流热水沉积成矿+燕山期中晚期岩浆热液叠加成矿的多复成因等成因模式。

现有的研究表明, 不论是何种成因, 燕山期花岗质岩浆活动对个旧锡矿的形成发挥了重要作用。黑云

母是花岗岩中最常见的暗色矿物, 它有特殊的层状结构, 是一些成矿元素(如锡、钨等)的运移载体, 利用其化学成分可揭示岩浆形成的氧逸度、温度、压力、深度等条件, 进而为揭示出成岩成矿信息提供指示。因此, 为了探讨花岗质岩浆活动与个旧锡矿的成因联系, 我们对个旧锡矿区卡房矿田内分布的花岗岩展开研究, 利用电子探针系统研究了花岗岩中黑云母的化学组成, 以期从矿物化学成分角度为揭示花岗质岩浆活动与锡矿的成因联系提供约束。

电子探针分析结果表明, 卡房花岗岩中黑云母 FeO^T 含量为 22.81%~26.17%, 含铁指数为 0.75~0.81, 属于富铁黑云母。黑云母硅、铝、钾、钛含量较高, 锰、镁、钙、钠含量较低, 具有较低的氧逸度。利用 Henry 等(2002)提出的黑云母 Ti 温度计算公式得到其结晶温度为 616~691 °C; 利用 Uchida 等(2007)提出的黑云母全铝含量与花岗岩形成压力之间的计算式得到其结晶压力为 318~403 MPa, 对应的结晶深度为 12.03~15.24 km, 表明花岗岩形成于中低温环境、属于中深成相。综合研究认为, 个旧卡房矿田出露的具有高铁指数以及较低氧逸度等特征的花岗岩有利于锡成矿, 此类花岗岩与区内构造交界处、岩性分界处等部位可能是锡富集成矿的有利部位。

基金项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281069); 国家自然科学基金项目(41502180)

第一作者简介: 华洁文(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石地球化学研究. E-mail: likeflyaway@163.com

*通信作者简介: 蔡永丰(1986-), 博士, 研究方向: 岩石地球化学研究. Email: caiyongfeng@glut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

Mineralogy, fluid inclusions, H-O isotopes, and trace element of the Dongzigou Pb-Zn deposit in the Sangmuchang metallogenic belt, China

Ying Gu, Cuihua Chen*

School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059

The Dongzigou Pb-Zn deposit is located in the south-eastern margin of Yangtze block, midwest China. A small number of deposits have been found in the Sangmuchang metallogenic belt, among which the Dongzigou Pb-Zn deposit is one of the representative deposits, and few relevant researches have been carried out before. However, many Pb-Zn deposits have been found in the adjacent northwestern Pb-Zn metallogenic belt (Feng, et al., 2004; Jin, et al., 2005; Liu, 2010), which makes it of great significance to carry out the related research on the Pb-Zn deposits in the Sangmuchang metallogenic belt as soon as possible. Up to now, only Zhang, et al., (2011) compared the geochemical characteristics of trace elements and the geochemical characteristics of rare earth elements with sedimentary exhalative deposits (SEDEX) (Qiandongshan, Eriihe Pb-Zn deposits) and SEDEX-like Pb-Zn deposits (Nanshagou, Jiangpo Pb-Zn deposit) (Song, et al., 2003a; Song, et al., 2003b; Hou, et al., 2007) and the Mississippi Valley-type (MVT) deposit (Mayuan Pb-Zn deposit in Nanzheng, Shaanxi) (Hou, et al., 2007b; Li, et al., 2007) for comparison, and preliminary inference that the Dongzigou deposit is MVT deposit. This conclusion of Dongzigou Pb-Zn deposit is obviously insufficient.

Ore bodies are hosted in Sinian carbonate rocks. The main metallic minerals are sphalerite and galena, while the non-metallic minerals are dolomite, barite and quartz, etc. Three stages of hydrothermal mineralization are: an early quartz-pyrite stage (Stage I), a middle

sphalerite-galena stage (Stage II), and a late sphalerite-barite stage (Stage III).

The main types of fluid inclusions for the Dongzigou deposit are liquid-rich inclusions (L_0 -type). Laser Raman analysis indicates that the fluid inclusions within the hosted minerals are dominated by H_2O . Given the fluid inclusion data, the homogenization temperatures range from 220.0-300.0 °C (stage I), 126.7-243.9 °C (stage II), and 117.0-201.0 °C (stage III), respectively (Table 1). Fluid salinities range from 3.4-11.8 wt% NaCl eq. (stage I), 3.6-10.7 wt% NaCl eq. (stage II), and 2.0-6.5 wt% NaCl eq. (stage III), respectively (Table 1). Indicating that the ore-forming fluid of the Dongzigou deposit tends to decrease in salinity and homogenization temperature during the fluid evolution process. The δD (-63.4% to -49.8%) and $\delta^{18}O_{H_2O}$ (0.6% to 13.7%) data from stage I to stage III which indicate that, the ore-forming fluids derived from formation water, and in the late stage of hydrothermal mineralization mixed with meteoric water. The LA-ICPMS results show that sphalerite enriched Cd (1272-3437 ppm), Ge (201-717 ppm) and Ga (0.1-130 ppm), but poor in In (0.01-0.1 ppm). Through comparative studies with the trace elements of sphalerite from different types of Pb-Zn deposits, it is found that the trace element characteristics of the Dongzigou deposit are most similar to the MVT deposits.

Overall, the Dongzigou Pb-Zn deposit is an atypical MVT deposit, and the salinity of fluid inclusions is lower than that of typical MVT deposits.

Table 1 Microthermometric characteristics of two-phase aqueous inclusions from the Dongzigou Pb-Zn deposit.

Sample	Mineral/Stage	Types	$T_{m-ice}/^{\circ}C$ (N)	$T_h/^{\circ}C$ (N)	Salinity/ wt% NaCl eq.	P/g cm^{-3}
DZG 09-1	Quartz (I)	L_0	-7.3 to -2.01 (20)	222.6 - 272.6 (21)	3.4 - 10.9	0.86 - 0.89
DZG 24-2	Quartz (I)	L_0	-8.1 to -2.6 (16)	220.0 - 300.0 (15)	4.3 - 11.8	0.79 - 0.91
DZG 06-1	Barite (II)	L_0	-5.2 to -2.1 (10)	126.7 - 243.9 (10)	3.6 - 8.1	0.83 - 0.98

基金项目: 国家自然科学基金项目“热流体作用及其铅锌成矿和油气成藏效应—以四川盆地震旦系富有机质碳酸盐岩型铅锌矿床为例”(41372093)

第一作者简介: 辜鹰 (1993-), 博士研究生, 研究方向: 矿床成因与成矿流体特征. E-mail: steven_guying@163.com

*通信作者简介: 陈翠华 (1972-), 教授, 博士生导师, 主要从事矿相学, 地球化学工作. Email: chencuihua@cdu.edu.cn

Continued 1

Sample	Mineral/Stage	Types	T _{m-ice} /°C (N)	T _h /°C (N)	Salinity/ wt% NaCl eq.	P/g cm ⁻³
DZG 08-3	Quartz (II)	L ₀	-6.6 to -2.2 (15)	150.1 – 193.0 (16)	3.7 – 10.0	0.90 – 0.98
DZG 25-1	Sphalerite (II)	L ₀	-5.8 to -2.9 (4)	152.0 – 168.0 (4)	4.8 – 8.9	0.95 – 0.97
DZG 06-4	Sphalerite (II)	L ₀	-6.0 to -2.6 (7)	154.5– 173.0 (7)	4.3 – 9.2	0.93 – 0.97
DZG 05-3	Calcite (II)	L ₀	-7.2 to -2.3 (17)	132.1 – 144.3 (17)	3.9 – 10.7	0.96 – 1.01
DZG 05-2	Sphalerite (III)	L ₀	-2.0 to -1.2 (2)	134.6 – 148.0 (4)	2.0– 3.4	0.94 – 0.96
DZG 21-2	Quartz (III)	L ₀	-4.0 to -1.5 (19)	117.0 – 165.9 (19)	2.6 – 6.5	0.93 – 0.98
DZG 08-2	Barite (III)	L ₀	-4.0 to -1.9 (8)	129.1 – 201.0 (8)	3.2 – 6.4	0.89 – 0.98

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

浙江青田火山岩型铍成矿潜力

王琪, 饶灿*, 张志琦, 吴润秋

浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

火山岩型铍矿是目前国际上主要的铍资源, 是研究的重点和热点之一。我国东南沿海出露大量的火山岩, 且具有铍的地球化学异常, 因此研究我国东南沿海火山岩型铍成矿潜力成为当前寻找火山岩型铍资源的重点。浙江青田地区位于浙江东南沿海晚中生代火山—侵入杂岩带, 区内主要出露的地层为上侏罗统西山头组, 是一套酸性的陆相火山碎屑岩, 晚白垩世存在大量花岗斑岩脉侵入。前人曾对浙江青田火山岩型铍矿床做过报道, 但铍成矿的规模、赋存形式及其成矿机制有待进一步深入研究。

本文在对浙江青田地区野外考察的基础上, 对所采集的火山岩样品进行主微量成分分析以及电子探针化学成分测试。研究表明: 浙江青田地区火山岩型

铍矿主要沿着花岗斑岩脉分布, 已经发现三个铍矿点(沙湾、后垟、黄山垄); 该地区主要的铍矿物为硅铍石, 羟硅铍石与日光榴石; 铍矿物主要赋存于花岗斑岩与火山岩的接触带中, 且普遍出现钠长石化, 岩石微量元素分析结果表明钠长石化石英斑岩中铍含量最高可达 939 ppm。青田地区的三个铍矿点: 沙湾铍矿点中硅铍石、羟硅铍石与日光榴石主要与萤石、云母等紧密共生; 黄山垄铍矿点中铍矿物还可与赤铁矿、闪锌矿及其他硫化物等共生; 后垟铍矿点中铍矿物显示出沿裂隙充填的特征。这些铍矿物的特征及其矿物组合, 显示浙江青田火山岩型铍矿的形成与晚期富 F 热液的交代作用密切相关, 具有较大的火山岩型铍成矿潜力。

基金项目: 国家自然科学基金项目(92062212)

第一作者简介: 王琪(1997-), 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: wq0333@zju.edu.cn

*通信作者简介: 饶灿, 教授, 从事稀有金属矿物学研究. E-mail: canrao@zju.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

闪锌矿反射色颜色指数与化学成分的相关性及其地质意义研究

赖翔, 陈翠华*, 刘舒月

成都理工大学, 成都 610059

金属矿物的反射色, 是金属矿物的重要属性之一, 也是反射偏光显微镜下鉴定这类矿物的主要鉴定依据, 颜色不同的矿物往往其反射色也是不一样的。根据矿物的主微量元素、元素质量分数及矿物晶体结构的不同, 矿物会呈现不同的反射光性特征。从成因矿物学矿物标型理论上讲, 矿物中某些元素对地质环境反应异常敏感, 其含量及比值往往具有一定的指示作用, 对成矿理论与矿产勘查具有重要的科学意义和生产实际意义。长期以来, 在绝大多数研究中表述金属矿物的反射色采用的是所谓的主观描述法, 如黄铜矿被称为黄色, 辉铜矿被称为淡蓝色等。这种描述方法缺少定量概念, 在观察时也易因人为因素产生较大误差。Piller (1966) 首次介绍了将色度学原理应用于显微镜下测定金属矿物的反射色, 并测试了 13 种矿物。之后陆续有学者开始应用色度学原理和方法测试金属矿物的反射色特征, 通过颜色指数表达金属矿物的颜色, 已经成为一种定量描述金属矿物反射色的可靠方法 (Henry, N. F et al., 1977; Chen Z., et al., 1979; Zhen C. S., 1981; Xu, G. F. and Mei J. M., 1987)。之后, 因测试技术及仪器精度的限制, 定量分析金属矿物反射色的相关研究逐渐减少。现代光度计测试束斑最小可达微米级别, 完全可以与电子探针和 LA-ICP-MS 等原位成分测试的分析束斑大小对应, 这也为将矿物的光

学性质与化学成分相结合进行分析提供了可能性。

闪锌矿的反射率变化主要取决于其化学成分变化, 且主要与 Fe 元素的含量高低有关; Zn-S 的成键要强, Fe-S 的成键要弱, 即 Zn-S 键的共价性比 Fe-S 键要强, 随着闪锌矿中 Fe 含量增高, 结构中化学键的金属键性增加, 化学键的强度则随之降低, 结构的稳定性减小, 自由单电增加, 吸收边能量减小, 从而使反射率增大 (雷蕴芬等, 1991; 邹正光 1993; Awadh, 2009)。然而反射率只是金属矿物颜色指数的一部分, 目前关于金属矿物颜色与成分相关性的研究也多处于定性阶段, 比较薄弱。本文通过显微分光光度计对不同类型矿床中闪锌矿反射色进行定量分析, 结合原位成分测试结果, 分析闪锌矿颜色指数与元素组成的相关性, 同时探讨闪锌矿颜色指数的地质意义。得到了以下结果:

Fe, Mn 对闪锌矿反射色颜色指数影响较大。Cu, Co 等闪锌矿中常见的微量元素与其颜色指数没有显著的相关性。

Tl 与 Ga, In 类似, 以 3 价的形式和 Ag+Cu 耦合取代 Zn。Ge 的取代机制更倾向于 $2M^+ + Ge^{4+} \leftrightarrow 3Zn^{2+}$ 或 $2M^+ + M^{2+} + Ge^{4+} \leftrightarrow 4Zn^{2+}$

闪锌矿的反射色颜色指数可以指示矿床的形成温度同时可以利用其进行矿床类型的划分。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目《热流体作用及其铅锌成矿和油气成藏效应--以四川盆地震旦系富有机质碳酸盐岩型铅锌矿床为例》(41372093); 四川省教育厅自然科学基金重点项目《西藏蒙亚啊砷卡岩铅锌矿床矿物学特征及成因意义》(SZX040)

第一作者简介: 赖翔 (1989-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学. E-mail: laixiang16@qq.com

*通信作者简介: 陈翠华(1972-), 教授, 主要从事矿床学、矿相学、地球化学研究工作. E-mail: chencuihua@cdu.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

大渡河流域一柱香金矿床矿石特征

刘舒月, 陈翠华*

成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059

大渡河金成矿带是 20 世纪 80 年代以来西南地区发现的一个重要的金成矿带, 金矿床在结晶基底、不整合界面和沉积盖层里均有分布。本文研究的一柱香金矿床产于结晶基底之中, 是大渡河流域典型金矿床之一。该金矿床大地构造位置处于扬子地台西缘与松潘—甘孜造山带东部相邻区, 位于康滇地轴南北向构造带北端 (许红英, 2016)。金矿床赋存于前震旦系康定岩群咱里岩组中, 矿区出露的地层主要为一套变质地层, 该套地层遭受不同程度的混合岩化作用。围岩蚀变以绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、黄铜矿化为主。

通过偏光显微镜观察, 一柱香金矿床金属矿物成分为黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、闪锌矿、少量孔雀石、自然金。其中自然金以显微金状态为主, 赋存于黄铁矿裂隙中或赋存于黄铁矿颗粒间及黄铁矿颗粒与石英颗粒的接触部位。主要的脉石矿物为石英, 其次有少量斜长石、绢云母、角闪石等。主要的矿石构造为角砾状构造、浸染状构造、脉状构造、条带状构造、土状构造。主要的矿石结构为自形—它形晶粒状结构、填隙结构、嵌晶结构、交代残余结构、包含结构、压碎结构等。黄铁矿为该矿床中主要的载金矿物, 由于存在含铅、含铋的硫酸盐矿物, 按照载金矿物中主要硫化物、硫酸盐矿物出现的期次对矿石类型进行划分为三类: 黄铁矿—石英型、黄铁矿—多金属硫化物型、褐铁矿型, 其中褐铁矿型不具有工业开采价值。

通过电子探针、粉晶衍射仪等设备测试矿石样品相关参数, 从而进一步研究载金矿物的标型特征。主量元素测试结果表明一柱香金矿中的黄铁矿 Fe 的质量分数为 44.760%~46.713%, 平均为 45.642%, S 的

质量分数为 51.729%~53.430%, 平均为 52.920%, 与其理论值 $w(\text{Fe})=46.55\%$, $w(\text{S})=53.45\%$ 相比, Fe 和 S 的质量分数均低于理论值, $\text{S}/\text{Fe}>2$ 显示了铁亏损的特点。由微量元素测试结果可得一柱香金矿床黄铁矿 Co/Ni 比值为 0.17~5.26。在一般情况下, Co/Ni 比值在火山热液型金矿大于 5, 岩浆热液型矿床为 1~5, 变质热液型金矿接近 1, 沉积型金矿比值远远小于 1 (严育通等, 2012)。故矿区主要属于岩浆和热液区, 少量为沉积改造区。黄铁矿多呈五角十二面体晶型。在 (100) 和 (110) 面上分布着 Fe 和 S 原子, 而在 (111) 面上则只有一种原子 Fe 或 S。相同的 $[\text{S}_2]^{2-}$ 中 S—S 原子间距为 2.10Å, 不同 $[\text{S}_2]^{2-}$ 中 S—S 间距为 3.09Å, Fe—S 间距为 2.26Å, 其标准的晶胞参数值为 $a_0=5.4176\text{Å}$, $u_0=1.590087\text{Å}$ (魏明秀, 1986; 曹志敏, 1991), 但由于受到微量元素 Co、Ni、As 的影响, 黄铁矿的棱长 a_0 , 晶胞体积等参数值等会发生变化。Co、Ni、As、Se、Te 等进入黄铁矿会使 a_0 值增大 (陈光远等, 1989)。一柱香黄铁矿的晶胞体积为 5.4188, 要略大于标准晶胞参数值, 说明 Co、Ni、As 等元素以类质同象方式进入黄铁矿。

综上所述, 由黄铁矿的主量元素测试数据可知 Fe 和 S 的质量分数均低于理论值, $\text{S}/\text{Fe}>2$, 显示为铁亏损。黄铁矿中 Fe 亏损时会造成其晶胞棱长值增大, 而矿区中黄铁矿晶胞棱长 a_0 值大于标准值, 也反应了黄铁矿铁亏损的特点, Fe 可能被类质同象混入物代替。Co/Ni 比值为 0.17~5.26, 主要属于岩浆和热液区, 少量为沉积改造区。矿区矿物组合结合黄铁矿微量元素测试结果说明了一柱香金矿床形成于中低温环境。

第一作者简介: 刘舒月 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: 954113466@qq.com

*通信作者简介: 陈翠华 (1972-), 教授, 主要从事矿床学、矿相学、地球化学研究工作. E-mail: chencuihua@cdut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

栖霞山铅锌银多金属矿床硫化物微量元素 对成矿过程的启示

弓昊天^{1,2}, 齐有强^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

栖霞山铅锌银多金属矿床位于长江中下游多金属成矿带宁镇矿集区, 是华东地区最大的铅锌矿之一。矿区内未见岩浆岩体出露, 制约了矿床成矿物质来源及成矿过程的精细研究。前人从矿物学、矿床地球化学、年代学等不同角度开展了大量勘查与综合研究工作, 确定成矿物质主要来源于岩浆热液。本次研究, 我们利用 LA-ICPMS 对两个深钻孔 (-625m 以深) 岩芯中的硫化物样品进行了微量元素分析, 试图揭示栖霞山铅锌银矿床的精细成矿过程。

根据矿物结构及共生关系, 栖霞山矿床可以分为以下四个阶段: (1) 黄铁矿 (Py1) 为主, 半自形-自形; (2) 黄铁矿 (Py2) + 方铅矿 + 闪锌矿 (Sp1), Py2 包裹 Py1, 呈半自形-他形、孔隙状, 并与深色闪锌矿 (Sph1) 共生; (3) 黄铁矿 (Py3) + 闪锌矿 (Sph2), Py3 表面光滑, 自形-半自形, Sph2 颜色较浅; (4) 方解石 + 石英, 呈脉状包裹、穿插前期矿物。第二阶段是主要成矿阶段。系统岩相学结合 LA-ICPMS 测试及元素 Mapping 显示黄铁矿中 Co、Ni、As、Se 主要以类质同象的形式进入黄铁矿晶格;

Pb、Zn、Mn 主要以显微包裹体的形式存在。闪锌矿中 Fe、Cd、Mn、Ag、Sn、Sb 通过类质同象形式置换进入闪锌矿晶格; Pb、Cu 则主要以显微包裹体的形式存在于闪锌矿中。不同阶段的硫化物 LA-ICPMS 分析结果显示, Py1 富集 Co、Ni、Cu、As 元素; Py2 富集 Mn、Zn、Pb、Se 元素; Py3 微量元素的含量最低。综合矿相学工作, Py2 具有典型的溶解再沉淀特征, 在后期富 Pb、Zn、Mn 热液作用下, Py1 微量元素发生反应: $Py1 + fluids (Zn^{2+}, Pb^{2+}, Se^-, Mn^{2+}) (aq) \rightarrow Py2 + Apy + Gn + Sp + fluids (Co^{2+}, Ni^{2+}, As^-) (aq)$ (Wu et al., 2019)。铅锌沉淀后, 磁铁矿的发育指示 fO_2 逐渐增加。Sph1 相对 Sph2 更富集 Fe、Mn、In, 结合 In/Ga (0.01-5), Zn/Cd (100-500), 表明主成矿期温度位于中温区间 (200-300°C), 成矿过程温度逐渐降低, 此条件利于早期矿物中 Ag 的出溶、富集。通过对栖霞山铅锌银多金属矿床微量元素的研究, 成矿期富 Pb、Zn 热液对 Py1 进行了改造, 导致微量元素的迁入迁出, 不同阶段黄铁矿微量元素组成的, 记录了成矿过程。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0600207); 国家自然科学基金项目 (No.41973049), 西部青年学者”项目类 A 类

第一作者简介: 弓昊天 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: gonghaotian17@mails.ucas.ac.cn

*通信作者简介: 齐有强 (1982-), 博士, 副研究员, 研究方向: 岩石与矿床地球化学. E-mail: qiyouqiang@mail.gyig.ac.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

瑞利分离结晶模型对稀有金属伟晶岩演化和成因的适用性研究—以新疆卡鲁安-阿祖拜地区为例

岑炬标^{1,2}, 梁婷^{1,2*}, 凤永刚^{1,2}, 高景刚¹, 何蕾¹, 周义¹

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安, 710054;

2. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 西安, 710054

认为, 伟晶岩脉由残余的花岗质熔体演化而来 (Jahns and Burnham, 1969; Černý, 1991b; Selway et al., 2005; London, 2018), 因而可使用瑞利分离结晶模型研究伟晶岩脉群的形成和分异演化机制, 并判断伟晶岩脉群的“母岩” (Hulsbosch et al., 2014; Barros and Menuge, 2016; Garate-Olave et al., 2017)。然而前人应用瑞利分离结晶模型时, 对同一矿集区不同矿化类型的稀有金属伟晶岩缺乏精细的区分和年代学研究。新疆阿尔泰稀有金属成矿带的卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田, 其稀有金属伟晶岩矿化类型丰富, 取得了大量的年代学数据限定了伟晶岩、花岗岩的时空格架, 是探讨瑞利分离结晶模型对模拟稀有金属伟晶岩演化适用性的良好对象。

矿区内伟晶岩脉发育, 主要侵位于中-上志留统库鲁木提群黑云母石英片岩。根据伟晶岩的主要矿化类型, 又可将其分为富 Be 伟晶岩 (阿祖拜)、富 Li 伟晶岩 (卡鲁安)。前人成果表明 (马占龙等, 2015; 周天怡, 2015; Zhang et al., 2016; Zhou et al., 2018; Feng et al., 2019; 刘涛等, 2020), 卡鲁安-阿祖拜伟晶

岩田的稀有矿化时代为中三叠世-早侏罗世 (232.6~191.6Ma)。根据野外调研和室内综合研究, 我们认为新发现的群库尔白云母花岗岩 (240.1Ma; 高景刚等, 待发表) 与伟晶岩之间的联系更为密切。

统计获得富 Be 伟晶岩结晶年龄的最早、最晚的结晶年龄比富 Li 伟晶岩小, 显然不太符合典型的岩浆分异模式 (Černý, 1991; London, 2005; London, 2018)。岩相学、Hf 同位素数据则表明卡鲁安-阿祖拜地区花岗岩、稀有金属伟晶岩并非同源演化的直接产物。但本次研究发现, 年代学、矿物学和同位素证据揭示白云母花岗岩、富 Li 和富 Be 伟晶岩并非简单的同源岩浆演化, 其云母成分的变化仍符合瑞利分馏的趋势。计算步骤、公式主要参考了 Hulsbosch et al. (2014), 计算参数见表 1。

因此, 若想利用瑞利分离结晶模型研究稀有金属伟晶岩的演化过程, 花岗岩-伟晶岩系统具有合理的时空分布、源自同一岩浆源的特征是正确建立的瑞利分离结晶模型的前提。

表 1 瑞利分离结晶模型参数

矿物	Qtz	Pl	Zrn	Afs	Mnz	Ap	Bt	Ms	Tur	Grt	
类型	X_j (%)										
富 Be 伟晶岩	22.0	38.0	0.0	17.1	0.0	0.0	0.0	16.7	6.2	0.0	
富 Li 伟晶岩	23.2	40.1	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0	17.6	0.0	1.1	
Element	C_0^{liq}	K_d									
K ₂ O (wt%)	4.00	0.013	0.10	-	3.12	-	-	2.50	2.50	0.19	-
Rb (ppm)	443.60	0.014	0.09	-	0.90	-	-	2.00	1.75	0.30	0.009
Cs (ppm)	28.20	0.022	0.12	-	0.03	-	-	0.27	0.16	0.056	0.001
元素比值	D(K)		D(Rb)		D(Cs)		A		B		
Log(K/Rb)- Log(Rb)											
富 Be 伟晶岩	1.05		0.51		0.09		-1.09		5.19		
富 Li 伟晶岩	1.00		0.50		0.09		-1.01		4.94		
均值	1.02		0.51		0.09		-1.05		5.07		
Log(K/Cs)- Log(Cs)											
富 Be 伟晶岩	1.05		0.51		0.09		-1.05		4.95		
富 Li 伟晶岩	1.00		0.50		0.09		-1.00		4.92		
均值	1.02		0.51		0.09		-1.03		4.94		

基金项目: 科技部重大研发计划项目 (2019YFC0605202、2017YFC0602701) 以及陕西省科技计划项目 (2020JM-215)、中国地质调查局项目 (DD20190379-53)

第一作者简介: 岑炬标 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学研究. E-mail: 472420865@qq.com

*通信作者简介: 梁婷 (1967-), 山东青州人, 教授, 工学博士. E-mail: Liangt@chd.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

碳酸岩型稀土矿床岩浆源区特征及其成矿过程

刘琰*, 侯增谦

中国地质科学院, 地质研究所, 北京 100037

稀土元素(REEs)是 21 世纪全球竞相争夺的战略性关键金属矿产资源, 被广泛应用于航空航天、国防科技、新型材料和核能清洁能源等高科技产业 (Chakhmouradian et al., 2012)。在众多的 REE 矿床类型中, 碳酸岩型 REE 矿床是世界上最重要的 REE 矿床类型和最主要的 REE 来源, 提供世界 REE 储量的一半以上 (51.4%)。据统计, 全球共产出 527 个碳酸岩岩体, 但仅有不到 10% 的能形成具有经济价值的 REE 矿床。因而, 碳酸岩型 REE 矿床成因及其动力学背景是长期以来国际研究的科学难题。

经典理论认为, 碳酸岩成因与地幔柱或深下地幔有关 (Bell and Simonetti, 2010)。然而, 现有认识指出, 地幔柱或深下地幔任何比例的部分熔融或者分离结晶作用均不能形成含矿碳酸岩 (Hou et al., 2009, 2015)。这也同时暗示, 成矿的碳酸岩可能具有非地幔柱成因。一方面, 通过全球主要的含矿和无矿碳酸岩地球化学特征对比发现, 含矿碳酸岩较无矿碳酸岩具有: (1) 更富集的 Sr-Nd 和较广泛的 Pb 同位素组成; (2) 高含量的 Sr、Ba 和 REE 元素 (1000~3000 ppm); (3) 更高的 C-O 同位素组成; (4) 更低的惰性气体同位素组成 ($^3\text{He}/^4\text{He} < 4$)。以上特征表明含矿碳酸岩岩浆源区具有交代富集地幔特征。另一方面, 碳酸岩型 REE 矿床往往位于克拉通边缘 (如: 我国

白云鄂博和牦牛坪, 美国芒廷帕斯, 澳大利亚芒廷威尔特等) 暗示其源区经历过洋壳俯冲, 壳源物质大量加入与源区 REE 富集密切相关。此外, 近年来太平洋、印度洋和大西洋等各个海域均发现了富 REEs 的海洋沉积物 (Kato et al., 2011)。且实验岩石学证据显示富碳酸盐相沉积物在深俯冲过程中可以释放 CO_2 流体 (Kerrick and Connolly, 2011), 而这种流体可以携带大量 REEs。结合含矿碳酸岩地球化学特征及其产出背景, 认为含矿碳酸岩成因与洋壳俯冲有关, 且俯冲作用导致海洋沉积物脱出富 REE 的 CO_2 流体交代岩石圈地幔, 使岩浆源区初始富集稀土 (Hou et al., 2015; Liu and Hou, 2017)。

此外, 碳酸岩岩浆中流体出溶和热液演化过程对 REE 富集成矿也至关重要。野外观察和镜下研究均显示, REE 大规模矿化仅发生在热液成矿期最晚阶段, 如白云鄂博, 牦牛坪和微山稀土矿床。碳酸岩出溶的成矿流体往往为富 SO_4^{2-} 、REE 和挥发分的碱性卤水。其中, SO_4^{2-} 、Cl⁻ 和碱 (Na+K) 可以高效迁移稀土, 而 F⁻ 主要起沉淀稀土作用。成矿流体冷却和与大气降水混合, 导致 PH 值的升高、络合物的裂解, 以及萤石、重晶石、方解石等矿物的大规模结晶, 很可能是导致 REE 大规模沉淀的主要机制 (Liu et al., 2019a, b; Zheng et al., 2021)。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

Petrogenesis and across-arc variation: Evidence from in situ isotopic and trace-element study of zircon and apatite from granodiorites in the Gangdese, southern Tibet.

Jia-Xing Yu¹, Bo Xu^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. ARC Centre of Excellence for Core to Crust Fluid Systems (CCFS) and GEMOC, Macquarie University, NSW 2109, Australia

3. The Beijing SHRIMP Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

The Gangdese Belt is the most significant magmatic and metallogenic belts among the world. There were multi-stage magmatism and many deposits, which have great scientific research value and economic benefits. However, some issues remain controversial such as across-arc variation of Jurassic arc. This paper presents whole-rock major and trace elements, in situ apatite Sr isotopic and zircon O isotopic compositions, and trace-element concentrations of zircon and apatite to investigate the source and crystallization of magma in Pengcuolin, western Gangdese Belt. The zircon U-Pb ages of granodiorites were 169.12 ± 0.68 Ma and 165.28 ± 0.82 Ma, consistent with former research. All samples were depleted in high-field-strength elements (HFSEs)

and enriched in large-ion lithophile elements (LILEs). In situ isotopic compositions showed low apatite $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.7036-0.7057) and zircon $\delta^{18}\text{O}$ values (4.29-6.04). In addition, the granodiorites were lack of strong Eu anomaly and had relatively elevated zircon $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ ratios (111-1040) but low zircon saturation temperatures (708-726°C). The published data combined with these results indicate that the magma derived from partial melting of asthenospheric mantle wedge metasomatized slab-derived fluid and emplaced in the Middle Jurassic under an active continental margin background. And the magma was characterized by high volatiles and oxidation state, which are ideal conditions for formation of porphyry deposits.

Table 1 Jurassic igneous rock locations from Gandese belt, their longitude, ages, SiO_2 , zircon $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$, $T_{\text{Ti-zr}}$, S in magma and isotopic analyses

Region	Rock-type	Longitude(°)	Age(Ma)	SiO_2 (wt.%)	Zircon $\delta^{18}\text{O}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Zircon $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$	$T_{\text{Ti-zr}}$ (°C)	S in magma(ppm)
		88.02	165-172	65.49-65.90	4.29-6.04	0.7036-0.7057	47-325	670-722	64.28-138.61
		88.05-89.26	172-192	64.24-74.15			14-863	587-804	7.26-246.77
		88.25-88.33	170-182	57.46-65.63		0.7038-0.7045			
		88.32-89.25	166-183	60.00-67.45		0.7034-0.7042	38-830	597-792	
		88.33		61.97-66.57					
		88.35-89.38	143-190	55.50-79.11	3.39-6.50		18-806	603-795	
		88.40-88.43	165-175	62.78-64.42			57-828	640-759	14.52-442.74
West	I	88.43	175-195	61.97-64.31		0.7039-0.7054			
		88.59	190	75.20-75.97					
		88.63-90.18	168-184	61.35-75.04					
		88.65	182	60.51-62.28		0.7040-0.7044			
		88.65-88.72	165	43.56-53.25		0.7039-0.7050			
		88.65-88.72	170-173	51.41-65.08					
		88.67	190	48.33-52.27		0.7033-0.7043			
		88.67	174	55.81-67.32		0.7040-0.7051			

第一作者简介: 于佳兴 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学岩石学矿床学. E-mail: 13718543492@163.com

*通信作者简介: 许博 (1988-), 副教授, 研究方向: 矿物学岩石学矿床学. E-mail: bo.xu@cugb.edu.cn

Table 1 Continued

Region	Rock-type	Longitude(°)	Age(Ma)	SiO ₂ (wt.%)	Zircon δ ¹⁸ O	87Sr/86Sr	Zircon Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺	T _{Ti-zr} (°C)	S in magma(ppm)
West	I	88.67-88.71	162-174		4.73-6.35			607-758	7.26-297.58
		88.75	177-180	46.52-62.73					
		88.83	177-192	44.53-61.12		0.7035-0.7036			
		88.90		59.47-60.81					
		89.08	184	68.88-72.08	4.30-5.28	0.7035-0.7038			
	89.62	188	72.37			0.7052			
	90.10	178	73.38-76.06						
	V	88.38-88.43	165-170	40.64-65.70					
		88.37-88.43	183	57.78-71.83		0.7041-0.7052			
		88.37-89.37	167-180	54.38-66.34		0.7034-0.7047	40-831	591-759	
88.42		161-167	63.07-69.70						
88.50-89.86		177-184	47.35-70.86		0.7029-0.7043				
East	I	91.60-92.50	172-188	72.52	4.82-6.58			609-896	
		91.68-91.75	156-160	45.66-68.71					
		91.67-92.70	173-195	59.04-68.81			31-555	632-816	
		91.80	172						0-108.87
		92.10	158	43.95-68.43		0.7041-0.7044			
	92.22-92.83	184-199	58.43-70.05						
	92.43-92.66	193-201	62.09-67.13						
	92.66-92.7	199-201	39.3-77.6		0.7037-0.7059				
	92-93.92	188-200	47.60-75.30		0.7059-0.7088				
	92.97	169.7						14.52-137.90	
93.30-93.32	192-203	66.46-74.73							
V	90.58	189	44.63-55.96		0.7035-0.7038				
	91.27-91.43	174-183	40.83-72.22		0.7038-0.7053				
	91.27-92.72	168-182	48.00-75.41		0.7034-0.7047				
	91.30-91.50	174-190	40.90-68.92		0.7034-0.7064				
	91.50	173-190	47.00-72.90			1-169	547-1053		
	91.66	191-194	76.48-80.00		0.7050-0.7061				
	92.03	189-196	47.08-67.04		0.7040-0.7055				

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

东昆仑造山带海德乌拉铀矿床沥青铀矿 年代学特征及成因研究

朱坤贺^{1,2}, 戴佳文³, 王凯兴^{1,2*}, 刘晓东¹, 余驰达¹,
雷勇亮¹, 孙立强^{1,2}, 何世伟¹

1. 核资源与环境国家重点实验室, 东华理工大学, 江西南昌 330013;

2. 地球科学学院, 东华理工大学, 江西南昌 330013;

3. 青海省核工业地质局, 青海西宁 810001

海德乌拉铀矿床位于东昆仑造山带东段, 是我国西北地区最近发现的与火山岩有关的独立铀矿床, 对该矿床的研究有助于揭示青藏高原热液铀成矿机制。本文利用背散射、电子探针分析和激光原位分析等技术对海德乌拉铀矿床沥青铀矿开展了化学成分分析和同位素定年等工作。分析结果显示海德乌拉铀矿床沥青铀矿具有较高的 Ca 和稀土元素含量, 较低的轻重稀土比值。沥青铀矿电子探针 U-Th-Pb 化学年龄为 226~350 Ma,

峰值为 289 Ma; 沥青铀矿 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 234.6 ± 1.2 Ma (MSWD=0.99, n=17)。两组年龄的差异可能与海德乌拉铀矿床沥青铀矿中存在普通铅而导致电子探针 U-Th-Pb 化学定年失准有关。结合沥青铀矿化学成分, 认为海德乌拉铀矿床沥青铀矿形成于岩浆期后富 Ca 的中温热液, 该铀矿床的形成与古特提斯构造域布青山-阿尼玛卿洋北向俯冲-碰撞后的伸展环境有关。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072095)、中国核工业集团高校科研攻关项目(No.201619)和青海省科技厅重点研发与转化计划“青海省东昆仑火山岩型铀矿资源调查理论创新与找矿突破(2021-SF-157)”联合资助

第一作者简介: 朱坤贺(1996-), 硕士研究生, 地质学. E-mail: 1293682238@qq.com

*通信作者简介: 王凯兴, 副教授, 矿产普查与勘探专业. E-mail: xy2gmo02@ecut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

白云鄂博东矿闪石型矿石特征分析

于俊芳, 孟文祥, 杨波, 沈茂森

包钢集团矿山研究院, 内蒙古 包头 014030

摘要: 白云鄂博矿床蕴藏着占世界已探明总储量的 41% 以上的稀土矿物、铌、磷、萤石、铁、锰等 175 多种具有经济价值的矿产资源, 被称为稀土之都 (徐海申, 刘建勇等, 2004), 也是目前世界上发现新矿物种类最多的矿区之一。钠闪石型铌稀土铁矿石, 简称闪石型矿石, 是本区分布较为广泛的一种矿石类型, 蕴含铁、稀土、萤石、铌矿物等多种有经济价值的元素及矿物, 因此对其展开矿物学等特征研究具有重要的意义, 也为后续的矿物综合利用有很好的指导性作用。通过野外工作采集白云鄂博东矿闪石型矿

石, 并制作成薄片进行岩相学观察鉴定以及制成粉末样品进行工艺矿物学分析。结果表明: 显微镜下钠闪石多呈柱状或者放射状结构分布, 粒径 0.25~1.2mm。萤石以不规则粒状填充于闪石以及铁矿物周围, 粒径大小不均, 一般为 0.1~0.5 mm。矿石中主要为钠闪石、白云石、萤石、重晶石、磷灰石、氟碳铈矿、独居石、磁铁矿、霓石等; 矿石中主要氧化物是 CaO 和 SiO₂, CaO 在不同样品中含量变化不大, 从工艺矿物学角度分析, 矿石中铁矿物含量均较高, 有的矿样中铁矿物高达 70%, 较低的也有 40%。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

白云鄂博矿床中铌的赋存特征

杨波, 杨莉, 于俊芳, 孟文祥

包钢集团矿山研究院, 内蒙古 包头 014030

铌原子序数 41, 是现代高新技术产业及特种材料制作中不可缺少的重要原料, 被称为“工业味精”, 对国民经济发展有重要意义 (曹飞等, 2019; 王登红, 2019)。但我国 90% 的铌资源依靠进口, 国内铌资源开发程度明显不足 (张去非, 2003)。白云鄂博矿床拥有铌资源 660 万吨 (以 Nb_2O_5) (王维维等, 2020), 虽然 2016 年我国第一条选铌、萤石、钽、硫精矿综合利用生产线在白云鄂博建成, 但是选铌工艺尚未彻底打通, 有必要加强对铌资源的研究和利用, 同时从矿物学角度深化对白云鄂博矿床铌赋存机理的认识。

借助显微镜、扫描电镜 (SEM)、TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA)、电子探针 (EPMA)、粉晶衍射 (XRD) 等技术手段, 对白云鄂

博矿床矿石及工艺流程中的铌精矿进行研究, 发现: (1) 白云鄂博矿床中铌主要以独立矿物形式存在, 形成的矿物主要为易解石、铌铁金红石、烧绿石、铌铁矿、铌锰矿、铌钽矿、包头矿、铌钙矿; (2) 本次采集的样品中, 易解石是矿物含量最大的含铌矿物, 铌铁金红石次之; (3) 易解石结晶肉眼可见, 多产出于霓石型铌稀土铁矿石, 考虑到易解石元素组成复杂且易发生变生作用, 电子探针是最合适的准确定名方法; (4) 铌铁矿、铌锰矿、铌钙矿中往往易赋存钽, 鉴于矿区无独立钽的矿物且钽在铌铁矿中表现较为富集, 建议综合利用铌资源时可考虑与钽资源同时利用; (5) 钛坦铌酸盐的铌矿物元素组成复杂, 类质情况现象普遍, 元素相互间的类质同象替换很有可能形成新的铌矿物。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

甘肃阳山金矿的矿物学特征及金的赋存状态

刘晓宇, 梁金龙*

成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

阳山金矿位于甘肃省文县, 是陕甘川“金三角”中代表性的超大型类卡林型金矿床之一。黄铁矿是主要的载金矿物, 因此, 对黄铁矿进行矿物学研究对认识矿床的成因具有重要意义。本文主要对阳山金矿主要载金矿物—黄铁矿开展了岩相学和矿物学研究。显微镜观察和背散射电子图像显示, 除了草莓状黄铁矿之外, 矿石中还存在大量自形—半自形及它形黄铁矿和

毒砂。其中, 自形—半自形黄铁矿往往发育环带结构。电子探针成分分析表明, 黄铁矿以富集 Au-As-Fe-S-Cu-Sb 等元素为特征, 且 As 主要分布于热液黄铁矿环带之中; As、S 呈明显的负相关, 表明 As 替代 S 进入黄铁矿。结合前人研究, 本文认为金主要以晶格金形式存在, As 进入黄铁矿晶格替代 S 引起的晶格缺陷导致金进入黄铁矿晶格中, 从而形成“不可见金”。

第一作者简介: 刘晓宇 (1996-), 硕士, 研究方向: 矿物学、矿床学、岩石学研究. E-mail: 569503145@qq.com

*通信作者简介: 梁金龙, 博士, 教授. Email: richardlj104@aliyun.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

原位拉曼光谱及其谱学成像技术探测粘土矿物 对甲烷水合物生成的影响

宋弘喆^{1,2,3}, 李赞⁴, 袁鹏^{1,2*}, 卜红玲¹, 刘冬^{1,2}

1. 广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室/广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 南方科技大学 前沿与交叉科学研究院 广东海洋实验室深圳分部-天然气水合物实验室, 深圳 518055;

甲烷水合物 (Methane Hydrate, MH) 是一种清洁高效的新兴能源, 广泛分布于大陆边缘盆地和永久冻土带的沉积物中。粘土矿物是 MH 赋存环境中常见的矿物, 其比表面积较大, 表面反应活性较高, 因此对水合物形成-分解的动力学、热力学及微观结构均具有重要影响。但由于粘土矿物颗粒细小、表面结构复杂, 基于目前的宏观测试方法难以准确解析 MH 在粘土矿物悬浮液中的微观分布和生成机制。本研究提出了一种基于熔融石英毛细管结合拉曼光谱面扫描成像的测试方法, 原位分析研究了 MH 分别在蒙脱石、伊利石和高岭石悬浮液中的形成规律, 用甲烷在 MH 相应笼形结构中的特征峰强度计算其空间分布、孔穴占有比等特征进行成像分析, 以期从微观层次上认识富粘土水体环境中 MH 的形成机理提供依据。

研究表明, 蒙脱石、伊利石悬浮液中, MH 在远离矿物颗粒表面的位置发生均相成核, MH 的生

长动力学在粘土矿物富集的部位受到抑制; 与蒙脱石和伊利石体系不同, 高岭石悬浮液中, MH 在其表面异相成核, 促进了 MH 在富高岭石部位的生成与富集。此外, 由于蒙脱石颗粒所形成的“卡房”结构对 MH 中的大笼结构 ($5^{12}6^2$) 可能具有空间限制效应, 因此蒙脱石悬浮液中 MH 的孔穴占有比出现明显下降; 而高岭石表面的羟基基团与水分子形成类似 MH 小笼 (5^{12}) 的“半笼形”结构, 增强了小笼中甲烷的拉曼强度, 从而引起了高岭石悬浮液中 MH 孔穴占有比的下降。

上述研究结果初步表明, 不同粘土矿物对 MH 空间分布和晶体结构具有不同影响, MH 中甲烷分子的孔穴占有比和生成初期的空间分布等特征受到粘土矿物孔结构和表面亲疏水性的强烈制约。未来, 还须结合拉曼光谱下的热力学微观实验, 进一步探索水合物赋存环境中粘土矿物的组成与含量对水合物的生成与富集行为的影响机理。

基金项目: 国家高层次人才特殊支持计划领军人才项目 (41972045)

第一作者简介: 宋弘喆 (1994-), 博士研究生; 研究方向: 矿物表面作用. E-mail: songhongzhe@gig.ac.cn

*通信作者简介: 袁鹏, 研究员; 研究方向: 矿物的资源环境与生态效应、应用矿物学. E-mail: yuanpeng@gig.ac.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

深地幔超高压矿物学研究的新进展

谢先德*

中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

深地幔超高压矿物学研究是现代地球系统科学的一个重要组成部分。近十多年来, 由于高压实验技术和样品测试技术的发展, 超高压矿物学研究领域取得了突破性和系统性的成果。与此同时, 基于受冲击陨石和陨石撞击坑的深入研究, 很多新的天然产出的超高压相矿物不断被发现。以我国的随州陨石为例, 在其冲击熔脉的内部和边缘, 就发现了多达 22 种超高压矿物, 其中除林伍德石、瓦茨利石、布里奇曼石、阿伦斯石、镁铁榴石、镁铁-镁铝榴石、玲根石、阿基墨石、镁方铁矿和 $\text{TiO}_2\text{-II}$ 等 10 种在其他陨石中已有发现的超高压矿物外, 还有 12 种是自然界首次发现的新超高压矿物, 即涂氏磷钙石(Tuite)、谢氏超晶石(Xieite)、陈鸣矿(Chenmingite)、王道德矿(Wangdaodeite)、汉姆利石(Hemleyite)、阿斯摩石(Asimowite)、赫洛瑟石(Heroseite)、珀瑞尔石(Poirierite)、艾格莱斯石(Elgorsyite)、四方晶系准尖晶石结构的 $(\text{Mg,Fe,Si})_2(\text{Si},\square)\text{O}_4$ 、四方晶系石榴子石结构的 MgSiO_3 和斜方晶系的 Ca-钙钛矿。此外, 我们还发现了一种常压相新矿物—沈庄镍铁矿(Shenzhuangite)。另外, 在我国依兰陨石撞击坑中发现了属于深地幔的以三价 Fe 为主要组成的毛河光矿(Maohokite), 在博茨瓦纳一个深部来源的金刚石中, 发现了具钙钛矿结构的超高压新矿物—毛钙硅石(Davemaoite, CaSiO_3)。深地幔超高压矿物的不断被发现, 不仅丰富了地球和类地行星内部矿物组成的内容, 也可能促进地幔地球化学, 甚至地球深部研究面貌的改变。下面对 8 种新超高压矿物作一简要报道。

(1) 具 Fe_7O_9 结构、化学式为 $(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_2\text{O}_9$ 的 Fe-Mg 硅酸盐的新超高压矿物—艾戈莱斯石(Elgorsyite): 该新矿物是由 L. Bindi 等与本文作者(2021)在我国随州陨石的冲击熔脉中发现的, 它的晶体结构与在 24-26 GPa 和 1873-1973 K 稳定的 Fe 的高压氧化物 Fe_7O_9 的结构相同。该新矿物很可能是具有相对高的 $\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{SiO}_2)$ 比值的富 Fe 类地行星内部的一个组成矿物。它是以德国著名天体矿物学家 El Goresy A. 的姓氏命名的。这一新矿物的发现说明, 含 Fe 的镁

硅酸盐能够采用类似于同族系列的 Fe 的高压氧化物的晶体结构。此外, 此新的 Fe-Mg-硅酸盐作为深部岩浆的一个潜在液态相, 将会控制类地行星地幔化学的演化。

(2) 具立方晶系钙钛矿结构、化学式为 CaSiO_3 的下地幔重要矿物—毛钙硅石(Davemaoite): 具有钙钛矿结构的 MgSiO_3 (布里奇曼石)是下地幔体量最大的矿物。深部地幔中另外一种重要的具有钙钛矿结构的硅酸盐— CaSiO_3 , 却长期没有被发现。不久前, O. Tschauer 等(2020)在博茨瓦纳 Orapa 金伯利岩筒的金刚石中, 首次发现了具有 CaSiO_3 成分的钙钛矿型矿物包体, 以毛河光院士的英文名和姓命名为“Davemaoite”, 该矿物是第二个下地幔的主要组成矿物。毛钙硅石的形成与洋壳深俯冲作用相关, 代表洋壳 MORB 物质俯冲进入下地幔的重要证据, 也揭示了深部壳幔交代过程。

(3) 具斜方晶系钙钛矿结构、化学式为 $(\text{Ca,Mg})\text{SiO}_3$ 的下地幔重要矿物—斜方 Ca-钙钛矿: 本文作者和与中南大学的谷湘平(2023)在随州陨石的熔脉中, 发现透辉石($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)已崩解成结晶质的斜方晶系 $(\text{Ca}_{0.663}\text{-Mg}_{0.314})\text{SiO}_3$ -钙钛矿和 $(\text{Mg}_{0.642}\text{Ca}_{0.290}\text{Fe}_{0.098})\text{SiO}_3$ -钙钛矿玻璃 + 结晶质的 $(\text{Mg}_{0.578}\text{Ca}_{0.414})\text{SiO}_3$ -镁铁榴石和 $(\text{Mg}_{0.853}\text{Ca}_{0.167})\text{SiO}_3$ -钙钛矿玻璃等四种硅酸盐。推定透辉石崩解时经受的温压条件为 20~24 GPa 和 1800~2000°C。四种物相中, 以 Ca 为主的斜方晶系钙钛矿, 是继布里奇曼石和毛钙硅石之后, 属于下地幔的第三个主要组成矿物。

(4) 铁辉石 FeSiO_3 的钙钛矿结构超高压矿物—赫洛瑟石(Hiroseite): 钙钛矿结构的 $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ 矿(布里奇曼石)是以 Mg 为主的硅酸盐高压多形, 而赫洛瑟石则以 Fe 为主要组成, 这是意大利的 L. Bindi 等与本文作者(2020)在我国随州陨石冲击熔脉内发现的新硅酸盐矿物, 该矿物以合成“后钙钛矿相”的日本东京工业大学 Kei Hirose 教授的姓氏命名。它以细小的颗粒产于镁方铁矿中, 其共生矿物有林伍德石、 MgSiO_3 熔体等。赫洛瑟石在自然界的发现, 丰富了

下地幔超高压矿物学的内容。

(5) 镁橄榄石 Mg_2SiO_4 的 ϵ 相超高压矿物—珀瑞尔石 (Poirierite): 该新矿物是日本的 N. Tomioka 等与本文作者(2021)在我国随州陨石和加拿大 Tenham 陨石的冲击熔脉中先后发现的, 它呈纳米条带与瓦茨利石互生在一起, 也有产于林伍德石中的。这是继橄榄石(α 相)、瓦茨利石(β 相)和林伍德石(γ 相)之后, 发现的镁橄榄石的又一超高压矿物相, 是 Mg_2SiO_4 的准尖晶石(spineloid)结构新矿物, 即介于橄榄石、瓦茨利石和林伍德石结构之间的亚稳态结构的 Mg-Fe 硅酸盐。该新矿物以法国巴黎地球物理学院高压矿物学家 Jean-Paul Poirier 的姓氏命名。它是剪切作用的产物, 推测它是球粒陨石在退冲击变质作用中, 相对低温时的快速分解而形成的。

(6) 铁橄榄石 Fe_2SiO_4 的 β -尖晶石相超高压矿物—阿斯摩石 (Asimowite): 该新矿物是 L. Bindi 与本文作者合作研究发现的, 它产于我国随州陨石未熔主体中, 是辉石的又一种 $\text{Fe} > \text{Mg}$ 的超高压相新矿物, 呈硅酸盐小液滴状体, 埋存在 FeNi 金属的颗粒之中。该新矿物以美国加州理工学院的矿物物理学家 P. D. Asimow 的姓氏命名。与阿斯摩石密切共生的超高压

矿物有镁橄榄石(Mg_2SiO_4)的 β -尖晶石相超高压矿物—瓦茨利石, 以及母矿物铁橄榄石等。

(7) 一种富含空位和部分已倒转的准尖晶石硅酸盐— $(\text{Mg, Fe, Si})_2(\text{Si}, \square)\text{O}_4$: 这是一种四方晶系准尖晶石结构的新超高压硅酸盐矿物, 它是由美国加州理工学院的马驰博士等与本文作者(2019)在我国随州陨石和加拿大 Tenham 陨石的冲击熔脉中先后发现的。与林伍德石相比, 该物相中的 Si 有倒转, 同时具有固有的空位和降低的对称性。最重要的是, 这一准尖晶石占据了这两块陨石熔脉基质体积的约 30%~40%。

(8) 天然产四方晶系、石榴子石结构的 MgSiO_3 的硅酸盐高压多形: 立方晶系石榴子石结构的 MgSiO_3 高压多形称为镁铁榴石(majorite), 该镁铁榴石在许多 L6 群球粒陨石的冲击熔脉中很常见, 而四方晶系石榴子石 MgSiO_3 虽被实验证实有存在, 但它是在自然界唯一长期未能找到的高压多形。最近, 此四方晶系高压多形被 N. Tomioka 等(2016)在 Tenham 球粒陨石中被发现。它是由母岩中低钙辉石在 17~20 GPa 和 1900~2000℃ 的温压条件下, 经过固态相变而形成的。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

东昆仑造山带海德乌拉铀矿床赤铁矿地球化学特征及其对成矿流体的指示

杨建俊^{1,2}, 戴佳文^{3*}, 吴佳², 王凯兴^{1,2*}, 刘晓东¹, 余驰达¹,
刘文恒², 朱坤贺^{1,2}

1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013;

2. 核资源与环境国家重点实验室, 东华理工大学, 江西南昌 330013;

3. 青海省核工业地质局, 青海西宁 810001

海德乌拉铀矿床是在我国西北地区探明的首个与火山岩有关的独立铀矿床, 具有重要的科研和找矿意义^[1]。由于探明时间尚短, 目前仅从成矿围岩特征和成矿时代等方面对该矿床开展了工作^[1-3], 对矿床成矿物质来源、流体特征与成矿过程等重要信息尚未开展系统的研究。赤铁矿广泛存在于各类型岩石中, 同时也是铁矿床的主要矿石矿物和众多热液矿床的常见金属矿物^[4]。在热液铀矿床中赤铁矿是重要的成矿期蚀变矿物, 与铀成矿之间有紧密联系, 其形成过程伴随着成矿元素铀的活化迁移和沉淀^[5]。因此, 赤铁矿可以为铀矿床的成矿流体来源和性质、成矿物理化学条件以及矿床成因研究提供素材。本文以海德乌拉铀矿床成矿期赤铁矿为研究对象, 在显微镜和扫描电镜 (SEM) 观察蚀变矿物组合的基础上, 利用电子探针 (EPMA) 和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 对赤铁矿开展原位微区元素含量测定, 以探讨矿床流体来源、矿床流体特征以及矿床成因等一系列问题, 寄望该研究对东昆仑造山带热液铀矿床勘察与开发提供新的依据。通过对海德乌拉铀矿床赤铁矿的岩相学特征和地球化学特征进行研究, 并结合矿床地质背景等资料, 综合分析得出以下结论: (1) 海德乌拉铀矿床赤铁矿形成时的流体具有大气降水和幔源

流体混合的特征, 幔源流体可能与三叠纪辉绿岩岩浆活动有关; (2) 海德乌拉赤铁矿中 U-Mo-W 同步富集说明了矿床成矿物质可能主要源自于寄主长英质火山岩; (3) 强氧化的成矿热液与黄铁矿和围岩中的 Fe²⁺ 发生反应, 形成赤铁矿, 并对成矿环境的氧化性进行制约, 使成矿流体氧化性降低, 导致沥青铀矿沉淀成矿。

参考文献:

- [1] 朱坤贺, 戴佳文, 王凯兴, 等, 2022. 东昆仑造山带海德乌拉铀矿床沥青铀矿年代学特征及成因. 地球科学, 47(08): 2940-2950.
- [2] 雷勇亮, 戴佳文, 白强, 等, 2021. 东昆仑造山带海德乌拉铝质 A 型流纹岩成因及其意义. 岩石学报, 36(7): 1964-1982.
- [3] 孙立强, 王凯兴, 戴佳文, 等, 2022. 东昆仑造山带海德乌拉辉绿岩成因及其地质意义[J/OL]. 地球科学, 1-31[2022-10-09].
- [4] Cabral, A. R., Zeh, A., Galbiatti, H. F., et al., 2015. Late Cambrian Au-Pd Mineralization and Fe Enrichment in the Itabira District, Minas Gerais, Brazil, at 496 Ma: Constraints from U-Pb Monazite Dating of a Jacutinga lode: Economic Geology, 110: 263-272.
- [5] 李海东, 潘家永, 夏菲, 等, 2016. 相山李家岭铀矿床热液蚀变作用地球化学特征. 现代地质, 30(03): 555-566.

项目基金: 本文受国家自然科学基金面上项目 (42072095)、青海省科学技术厅重点研发与转化计划 (2021-SF-157)、江西省研究生创新创业基金项目 (YC-2022-s596) 和中国核工业地质局高校科研攻关项目 (No.201619) 联合资助。

第一作者简介: 杨建俊 (2000-), 男, 硕士研究生, 从事热液铀矿床成矿机制研究; E-mail: 3020205090@qq.com.

*通讯作者简介: 戴佳文 (1986-), 男, 高级工程师, 从事区域铀成矿预测与勘查; E-mail: 454877008@qq.com;

王凯兴 (1985-), 男, 副教授, 从事热液铀矿床成因研究; E-mail: xy2gmo02@ecit.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

桂东南岑溪地区花岗岩地球化学特征及其对离子吸附型 稀土矿的成矿指示

赵永山, 周云*

桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541004

离子吸附型稀土矿是我国的优势矿产, 该类矿床的初期勘察主要分布于我国南方七省 (赣、闽、浙、湘、粤、桂和滇), 目前已扩大至 11 个省份。广西离子吸附型稀土矿主要分布于防城港中部, 经钦州北部、玉林北部、贵港南部, 延伸至梧州中南部一带。近年来, 随着广西稀土勘探工作的陆续开展, 在桂东南大容山-十万大山一带圈定出了一些离子吸附型稀土矿的成矿潜力区。为探讨桂东南地区离子吸附型稀土矿具体的成矿条件, 作者对桂东南岑溪一带分布的花岗岩进行了详细的年代学、地球化学及稀土矿物学研究。锆石 U-Pb 年代学研究显示, 花岗岩的形成时

代为 155 ± 1 Ma, 为燕山期岩浆活动的产物; 岩石地球化学研究显示, 花岗岩具有高硅富碱的特征, 属于高钾钙碱性、准铝质-弱过铝质岩石; (Zr+Nb+Ce+Y) 含量与 $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 值较高, 表现出与 A 型花岗岩相似的地球化学属性; 花岗岩的 Sr、P、Ti、Eu 负异常明显, 显示出高分异演化特征; 稀土矿物学研究显示, 岩石富含独居石、氟碳钙铈矿、锆石、磷灰石等稀土矿物, 其中, 独居石和氟碳钙铈矿的稀土氧化物总量分别达 58.07%~67.66% 和 64.25%~64.59%; 结合该区域高温高湿、降雨充沛、风化作用强烈等外生条件, 推测该地区具有形成离子吸附型稀土矿的成矿潜力。

第一作者简介: 赵永山 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿物岩石学. Email: 596931337@qq.com

*通讯作者简介: 周云 (1988—), 女, 博士, 研究方向: 岩石地球化学. Email: zhouyun@glut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

金青顶金矿粗粒黄铁矿的形态演化和微量元素组成对成矿过程的标识

李士胜^{1,2}, 李胜荣^{2*}, 李林^{2,3}

1. 宿州学院 资源与土木工程学院, 宿州 234000;

2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质大学 科学研究院, 北京 100083

胶东金青顶金矿黄铁矿绢英岩中可见粗粒黄铁矿, 黄铁矿复杂的形态演化不同程度上见证了成矿过程。结合黄铁矿形态演化和化学成分已被证实有助于跟踪成矿环境中热液的组成和物理化学条件的变化, 在这里, 我们研究了粗粒黄铁矿的热电性、微观结构特征和化学成分, 试图从矿物尺度来揭示金青顶金矿的成矿过程。金青顶金矿黄铁矿绢英岩中粗粒黄铁矿的详细光学观察和热电性研究表明, 四个粗粒黄铁矿整体具有一致的形态演化趋势, 即核部为 Py_a 或 Py_o , 中部为 Py_o 或 Py_m , 边缘为 Py_e 和 Py_{e+a} 。黄铁矿的形态演化指示了核部 Py_a 形成于较高温度和硫饱和度低的环境, 边缘的 Py_e 和 Py_{e+a} 则形成于中温和硫饱和度高的环境中, 而中部 Py_o 或 Py_m 形成的温度和硫过饱和度介于核部和边缘之间。局部异常相同形态以及逆向形态演化指示了成矿流体的温度和硫过饱和度存在多旋回性。粗粒黄铁矿的热电系数显示核部和中部的

Py_a 、 Py_o 和 Py_m 一般呈 N 型, 边缘的 Py_e 和 Py_{e+a} 一般呈 P 型, 进一步指示了成矿流体温度由高温至中温的变化趋势。微量元素分析结果显示粗粒黄铁矿核部 Py_a 、 Py_o 和 Py_m 的 As 含量较低, 而边缘 Py_e 和 Py_{e+a} 的 As 含量较高, 核部和边缘 As 含量相差三个数量级以上。As 浓度变化与热电系数高度一致, 指示黄铁矿的 P 型是由 As 以 AsS^{3-} 二价阴离子替代黄铁矿中 S 导致的。Au 与 As 和黄铁矿形态没有明显的相关性, 指示 As 的浓度和黄铁矿形态与 Au 的富集作用关系不大。Au、Ag 和 Bi 呈较强的正相关性且主要富集在形态过渡带内的多孔黄铁矿中, 这种异常富集可能是由多孔黄铁矿的快速结晶产生大量晶格缺陷促进 Au、Ag 和 Bi 进入黄铁矿晶格中。导致多重形态过渡带内多孔黄铁矿的快速结晶, 可能是单次流体事件中成矿流体压力周期性波动使成矿流体的温度、硫过饱和度等急剧变化引起的。

项目基金: 科技部重点研发计划(批准号: 2016YEC0600106). 国家自然科学基金(批准号:41872038)

作者简介: 李士胜(1992-), 男, 博士研究生, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: lisscugb@163.com

*通讯作者: 李胜荣(1956-), 男, 教授/博士, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: lizr@cugb.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

云南-老挝盐类矿床物质来源探讨——来自石盐成因矿物学、稳定同位素及古环境的证据

李明慧¹, 颜茂都¹, 方小敏¹, 孙淑蕊^{1,2}

1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100083;

2. 国家自然科学基金委, 北京 100083

云南兰坪-思茅盆地的勐野井钾盐矿是我国重要的固体钾盐矿产, 但规模小。相邻的泰国呵叻盆地和老挝万象盆地却发育大型钾盐矿床。白垩纪晚期, 泰国呵叻盆地、老挝沙空那空盆地钾盐矿床盆地和中国云南的思茅盆地可能处于同一北西向构造带上, 它们之间具有大致相同的古气候古地理条件、沉积环境、物质来源、生物群和成矿物质, 以及相似的矿物组合、沉积韵律、Br 含量、古流向等, 这些现象说明云南钾盐矿床的成矿水体可能来源于呵叻-沙空那空盆地(包括老挝的万象盆地)。既然如此, 云南兰坪-思茅盆地应该有与泰国呵叻盆地和老挝万象盆地相类似的大型钾盐矿, 至少比目前发现的储量大。几十年来学者们从不同方面对比研究, 试图在云南找到更多的钾盐, 并解释勐野井钾盐矿床规模小的原因。

关于云南-泰国-老挝盐类矿床的争议问题有: 1、成矿年代(古新世、白垩纪), 2、板块运移(独立运移、整体运移), 3、物质来源(海相、陆相、热液)。通过老挝 600m 钻孔中石盐矿物、稳定同位素地球化学数据, 结合前人的资料, 研究认为: 该矿床成矿卤水中残留海水很少, 以陆源水体为主、热液来源可能非常重要。主要依据为: (1) 沉积相为湖相沉积, 成矿卤水的主体应为陆相来源; (2) 钻孔古地磁年代为晚白垩纪, 石盐中硫同位素与同时代海相同位素相比, 显示为陆相来源, 大部分锶同位素显示为陆相来源; 基底石盐 Br 含量显示为陆相来源; 硼同位素显示为陆相来源; (3) 晚白垩纪盆地处于干旱气候带上, 可能为沙漠环境, 因此很难有大量海水补给到盆地。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

白云鄂博矿床磁铁矿成分标型与深部富铁矿体预测

徐志豪^{1, 2}, 闫国英³, 杨宗锋^{1, 2*}, 王昭静³,
申俊峰², 张萌萌², 李培培^{1, 2}, 徐渴鑫²

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿床资源国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院 成因矿物学研究中心, 北京 100083;
3. 包头钢铁(集团)有限责任公司矿山研究院(有限责任公司), 内蒙古 包头 014010

白云鄂博稀土-铈-铁矿床蕴藏着大量的铁资源, 其中磁铁矿作为矿石矿物被广泛研究。磁铁矿的矿物标型特征可以指示矿床成因、成矿规律以及深部找矿, 但磁铁矿标型矿物学尚未在白云鄂博矿床中普及与应用。

本研究使用了 22 条勘探线全铁数据, 利用扫描电镜能谱、电子探针、LA-ICP-MS 的矿物微区成分测试方法, 测试了覆盖 600 m×600 m, 纵深 800 m 范围内 10 条勘探线的 45 件样品, 将白云鄂博矿床中的磁铁

矿分为岩浆型和热液型, 表明岩浆和热液在白云鄂博矿床中均形成或改造磁铁矿。岩浆型磁铁矿是火成碳酸岩早期结晶产物, 并且是铁矿主要来源。矿床中磁铁矿结晶温度范围为: 250℃~700℃, 岩浆型磁铁矿总体略高于热液型磁铁矿。岩浆型磁铁矿占比高的区域, 以及高温和低镍磁铁矿区域更易形成厚大富铁矿体。据此, 推测主矿东侧深部可能存在岩浆通道和厚大富铁矿体。低钛磁铁矿是寻找稀土矿体的标型矿物, 推测主矿东西两侧深部存在厚大稀土矿体。

基金项目: 包头钢铁(集团)有限责任公司矿山研究院(有限责任公司) 2021 年 A 类重点项目“白云鄂博稀土-铈-铁资源矿物标型学研究”(BGKY-ZH-2021-Z-017)

第一作者简介: 徐志豪(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: 2001200062@cugb.edu.cn

*通信作者简介: 杨宗锋(1984-), 副教授, 研究方向: 火成岩相关的矿物学、岩石学和地球化学研究工作. E-mail: yangzefeng@cugb.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

白钨矿微量元素与氧同位素分析对矽卡岩型钨成矿过程与成因机理的启示：以湖南柿竹园为例

吴锬言, 刘飏*, 吴堃虹

中南大学, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙, 410083

白钨矿广泛分布在各种类型的钨矿床中, 包括矽卡岩型、云英岩型、石英脉型、斑岩型等, 是主要的载钨矿物。白钨矿独特的晶体结构可容纳大量微量元素, 其阴极发光 (CL) 图像、稀土元素分配曲线、变价元素 Mo、Eu、Ce 等含量和氧同位素特征详细记录了钨成矿过程、流体性质与源区等信息。此外, 随着测试方法的不断进步, 高 U 白钨矿可以用于原位 U-Pb 同位素定年, 是直接约束钨成矿时代的良好对象。柿竹园矿床是华南典型的矽卡岩型钨锡多金属矿床, WO_3 金属量高达 80 万余吨, 与成矿密切相关的千里山花岗岩形成于 154~165 Ma, 为多期岩浆活动组成的复式岩体。白钨矿广泛发育于进变质矽卡岩阶段、退变质矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物-石英脉阶段、云英岩阶段 (近端块状云英岩和远端脉状云英岩)、石英-方解石-萤石阶段。

不同阶段的白钨矿 CL 图像差异显著, 在进变质、退变质和氧化物阶段 CL 图像具有清晰的振荡环带, 而在石英-硫化物脉阶段环带不明显, 在石英-方解石-萤石阶段呈均一图像 CL 反应, 指示成矿由相对封闭的稳定环境转向开放的动荡环境。而云英岩阶段白钨矿颗粒内存在明暗两类 CL 图像, 表明可能存在多期次成矿流体叠加交代。不同阶段白钨矿的 MoO_3 含量显示了规律性变化, 早阶段-晚阶段白钨矿中 MoO_3 含量的不断降低, 表明成矿环境发生了从氧化到还原的转变。此外, 整体上从进变质矽卡岩阶段到石英-萤石-方解石脉阶段, 白钨矿颗粒 ΣREE 含量也呈下

降趋势, 指示成矿流体中稀土元素的不断贫化, 但是石英-硫化物脉阶段存在上升趋势, 可能是不同期次的成矿流体引起的, 其白钨矿 U-Pb 年龄也证实这一结论。白钨矿稀土模式指示母源流体特征和成矿流体变化, 从早期的 LREE 富集型逐渐转变为晚期的 MREE 富集型, 可能与富稀土共生矿物结晶 (例如石榴子石、透辉石)、大气降水的加入及强烈的水岩反应有关。相比之下, 云英岩中白钨矿的稀土元素配分曲线与千里山花岗岩相似, 认为其最大程度保留母源流体的特征。

柿竹园白钨矿氧同位素和石英流体包裹体均一温度计算结果显示, 在进变质阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H_2O} = 7.78\sim 8.28\%$, 平均值为 7.98%; 退变质阶段 $\delta^{18}O_{H_2O} = 6.20\%$; 石英-方解石-萤石阶段 $\delta^{18}O_{H_2O} = 3.29\%$; 云英岩阶段 $\delta^{18}O_{H_2O} = 2.38\sim 5.36\%$, 近端块状云英岩和远端脉状云英岩阶段 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 平均值分别为 4.96% 和 2.83%, 其中进变质阶段与岩浆流体组成一致, 退变质和石英-方解石-萤石阶段有不同比例的大气降水的加入, 与传统云英岩矿体不同, 柿竹园远端脉状云英岩成矿流体中也存在较大比例的大气降水。

综上所述, 柿竹园矿床经历了多阶段流体活动与钨成矿作用, 而长期的水岩反应与晚阶段大气降水的加入可能是触发大规模钨沉淀的主控因素, 未来白钨矿原位氧同位素分析与精细的流体包裹体研究将会进一步揭示白钨矿生长过程中成矿流体性质与源区的变化过程, 解密白钨矿的沉淀机理。

基金项目: 国家重点研发计划-钦杭成矿带湘南段铜锡多金属矿产深部探测技术示范 (批准号: 2018YFC0603902)

第一作者简介: 吴锬言 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 矿物微区分析与成矿作用研究 E-mail: wukunyan@csu.edu.cn

*通信作者简介: 刘飏 (1989-), 男, 讲师, 研究方向: 主要从事成矿过程与深部预测研究 E-mail: biaoliu@csu.edu.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

江西大吉山 69 号花岗岩体中变质岩角砾的蚀变与矿化研究

吴开兴^{*1,4}, 龚子涵², 郭小飞^{1,4}, 孙涛^{1,4}, 胡咏梅³, 刘卫明^{1,4}

1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000;
2. 江西理工大学研究生学院, 江西赣州 341000;
3. 江西理工大学分析测试中心, 江西赣州 341000;
4. 江西省矿业工程重点实验室, 江西赣州 341000

稀有金属花岗岩的成岩成矿问题既是重要的地质理论问题, 也关乎“关键金属”的安全保障问题, 因而被广泛关注; 但是, 迄今为止, 稀有金属花岗岩的成因机制与成岩成矿过程仍不清楚, 主要存在两种观点, 即岩浆成因论和花岗岩自交代成因论。二者之间的激烈争论始于上世纪30年代, 从公开发表文献来看, 二者在学术界的影响此消彼长, 交替更迭, 大致可分为四个阶段: (1) 上世纪六十年代以前, 岩浆成因论占主导地位; (2) 上世纪六十年代至八十年代中期, 岩浆期后钠长石化成岩成矿观点获得广泛支持; (3) 上世纪八十年代后期至本世纪初, 岩浆成因论再次占居主导地位; (4) 2010年左右至今, 尽管多数学者仍然认为稀有金属花岗岩的成岩成矿以岩浆作用为主, 但较为普遍地认为在岩浆演化的晚期至后期存在自交代作用, 并对稀有金属成矿有着或多或少的贡献。就Nb-Ta矿化而言, 目前一般认为铌钽铁(锰)矿是从岩浆和岩浆-热液过渡性流体结晶形成, 但往往遭受岩浆期后热液蚀变, 形成次生富钽相(锡锰钽矿或钽铁矿)。此外, 也有个别研究者认为江西雅山

岩体和414钽铌矿床是花岗岩化成因。

我国南岭地区的黑钨矿床世界闻名。其中, 江西全南县大吉山钨矿床69号花岗岩型矿体是W-Ta-Nb共生成矿的典型代表。根据现场观察、矿山地质资料及公开发表文献, 对69号花岗岩体地质产状特征概述如下: 该岩体状似岩盖, 中心厚且产状平缓, 向四周倾斜变薄, 南北长约650m, 东西宽约320m, 平均厚度28m; 岩体上、下盘围岩均为寒武系浅变质沉积岩。岩体顶面, 即与上盘围岩接触面平直整齐, 而岩体底面, 即与下盘围岩的接触面则凹凸不平, 既可见突入岩体的围岩捕虏体, 还可见较大规模的构造角砾岩带, 表明69号花岗岩的产出是受断裂构造控制, 69号花岗岩与深部岩体的关系并不清楚。

本文通过对 69 号花岗岩中变质岩角砾的岩/矿相学观察, 发现大量针状-柱状铌钽铁(锰)矿集合体赋存于变质砂岩角砾与花岗岩的接触带, 与变质砂岩角砾的花岗岩化作用密切相关, 岩浆成因的可能性小。电子探针分析表明它们与前人发表的 69 号花岗岩中的铌钽铁(锰)矿的成分一致。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

西秦岭三叠纪酸性侵入岩中高 An 值斜长石的成因及其地质意义

宁亚格¹, 李小伟^{1,2,3*}, 胡俊强², 莫宣学^{1,2}, 孙雨沁³, 张国坤²,
谢元惠², 汪方跃⁴

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 成因矿物学研究中心, 中国地质大学(北京)地质资源勘查实验教学中心, 北京 100083;

3. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东省地质科学研究院, 济南 250013;

4. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥工业大学矿床成因与勘查技术研究中心(ODEC), 合肥 230009

研究 I 型花岗岩中再循环晶的成分和结构特征, 对揭示岩浆系统的形成和演化历史以及壳源和幔源岩浆的相互作用具有重要的意义。本文以西秦岭北西段三叠纪过马营复式岩体内的不同造岩矿物为主要研究对象, 通过对具有不同结构特征的斜长石“粗晶”和黑云母展开电子探(EMPA)、LA-ICP-MS 微量元素面扫描、原位 Sr 同位素分析, 来探讨含高 An 斜长石的成因, 示踪不同岩浆房端员的属性, 约束岩浆演化过程并建立多级岩浆房模型。过马营复式岩体的岩性分为偏铝质花岗岩类和过铝质花岗闪长岩类, 两类岩性中均存在 An 值呈突变的筛状结构斜长石, 即高 An(72~85)区与低 An(20~55)区在同一颗粒中并存, 其对应主、微量元素也存在截然变化。与低 An 区相比, 高 An 区具有高 Fe、Mg, 高 Ba 的特征。高钙区斜长石可进一步分为两类, 第 1 类高钙区斜长石(An_{80-85}), 和第 2 类高钙区斜长石(An_{72-78})。第 1 类高钙区比第 2 类高钙斜长石区具有更高的 Ca、Al、Fe、Mg、Ba 含量。本研究中斜长石晶体存在核_{高 An}-边_{低 An}与核_{低 An}-幔_{高 An}-边_{低 An}两种不同类型的环带结构, 表明其各自的生长过程有所不

同。高 An 区与低 An 区之间 An 值跳跃式的变化与对应微量元素 Fe、Mg、Sr、Ba 含量特征均指示斜长石成分差异并非晶内扩散、动力学作用以及物理条件的变化造成的, 更可能形成于开放的岩浆系统。本文认为斜长石粗晶为再循环晶, 其内部的高 An 区形成于深部富 H₂O 玄武质岩浆, 低 An 区形成于浅部酸性岩浆房(偏铝质与过铝质)。两种不同高钙区斜长石及其对应的主、微量元素差异指示它们很可能结晶于两批次不同的玄武质岩浆, 其中第 1 类高钙区斜长石的母岩浆相对更富 Fe、Mg、Ba。两种玄武质岩浆携带高 An 斜长石沿岩浆通道向上运移, 上升过程熔蚀先前结晶的高 An 斜长石, 将其带入浅部酸性岩浆房后与内部花岗质/花岗闪长质岩浆发生混合。混合之后的岩浆沿高 An 斜长石残晶边部继续结晶生长, 同时高温玄武质岩浆的注入导致浅部岩浆房已结晶的低 An 斜长石被熔蚀形成筛状结构, 随后玄武质岩浆、混合后岩浆依次沿其边部继续生长。笔者认为两批次的玄武质岩浆输入通量较小并未对浅部酸性岩浆房整体主微量成分造成大的影响。

基金项目: 国家自然科学基金委重点项目(41730426)

第一作者简介: 宁亚格(1991-), 博士研究生, 研究方向: 岩浆作用与深部过程. E-mail: 310946940@qq.com

*通信作者简介: 李小伟(1985-), 副教授, 研究方向: 成因矿物学与岩石学. E-mail: xwli@cugb.edu.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

新疆阿尔泰二叠纪不成矿伟晶岩对源区的指示: 来自磷灰石年代学和 Sr-Nd 同位素证据

郑贝琪^{1,*}, 陈斌²

1. 韶关学院旅游与地理学院, 韶关 512005;

2. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

中国阿尔泰造山带位于中亚造山带西南部, 区域内红山嘴-诺尔特断裂, 阿巴宫-库尔提断裂, 特斯巴汗断裂和额尔齐斯断裂将阿尔泰造山带分为北阿尔泰、中阿尔泰、南阿尔泰和琼库尔构造单元。区域内分布十余万条伟晶岩脉, 主要集中在中阿尔泰和琼库尔构造单元, 是我国稀有金属 Li-Be-Nb-Ta、宝石级电气石、绿柱石及白云母矿产的重要产地(邹天人等, 2006)。

青河伟晶岩矿集区位于琼库尔构造单元东南侧, 毗邻著名可可托海三号脉矿区, 其发育大量典型不成矿伟晶岩。这些伟晶岩走向以 NW320~330° 为主, NE 向的次之、近 EW、SN 向的伟晶岩较少。伟晶岩分带性差, 以透镜状或脉状侵入到上奥陶纪哈巴河群变质沉积岩。5 条伟晶岩脉采样点位置青河县城周边 5 公里范围内。该 5 条伟晶岩原生磷灰石定年结果为 249.9~300.5Ma, 表明与青河地区成矿伟晶岩均是

二叠纪产物(张辉等, 2019)。

青河伟晶岩矿物组合中云母占比高, 致使全岩样品 Rb/Sr 比过高, 影响初始 Sr 同位素计算, 而磷灰石具有低 Rb/Sr, Sm/Nd 的特点, 因此磷灰石 Sr、Nd 同位素更适合代表伟晶岩体系同位素组成。青河伟晶岩被认为是哈巴河群中上地壳角闪岩相低程度部分熔融的结果(Chen et al., 2020), 5 条脉磷灰石 Nd 同位素组成变化大 $\epsilon_{Nd}(t)$ -4.51~+1.93, 指示哈巴河群组成极为复杂 Lv et al. (2021)。其中 2 条伟晶岩脉相距不足 1 公里, 而磷灰石 Sr 同位素组成分别为 0.7207~0.7413, 0.7117~0.7134。与围岩哈巴河群云母片岩 Sr 同位素组成(0.7089~0.7426)不重合, 排除围岩混染作用。据此, 本研究认为青河伟晶岩并非起源于共有的沉积岩源区, 而是每一个伟晶岩脉均有独立来源, 甚至同一伟晶岩脉的形成中可能存在来自不同源区的多期熔体侵入。

第一作者简介: 郑贝琪, 博士, 讲师, 研究方向: 矿物学. E-mail: beckyzheng@sgu.edu.cn

*通信作者简介: 郑贝琪, 博士, 讲师, 研究方向: 矿物学. E-mail: beckyzheng@sgu.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

深海铁锰结核亚微米结构层特征

周军明^{1, 2}, Toshihiro Kogure^{3*}, Taiga Okumura³,
Yoshio Takahashi³, 杨胜雄¹, 袁鹏^{4*}

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

3. 东京大学 理学院地球与行星科学系, 东京 113-0033;

4. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006;

深海铁锰结核广泛分布于全球水深为 4000–6500 米的海洋沉积物表层或沉积物中, 是主要由纳米铁/锰(氢)氧化物矿物组成的规则或不规则的球形聚集体, 其截面整体呈层状结构特征。根据物质来源, 铁锰结核分为水成型(海水)、成岩型(孔隙水)和热液型(热液)。铁锰结核生长速率缓慢, 水成型铁锰结核生长速率低于 5 mm/Ma; 因此, 这些铁/锰(氢)氧化物矿物可充分吸附海水中的钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、稀土(REY)等金属离子。从而, 铁锰结核是一种重要的深海多金属矿产资源。此外, 铁锰结核的结构层也记录着生长过程中海洋环境(如, 化学环境、氧化还原环境等)的信息, 是认识古海洋环境的优良指示剂。解析铁锰结核的层结构特征对认识其生长机制和成矿环境具有重要意义, 但铁锰结核中结构层的层厚仅有亚微米~几微米, 难以对单一结构层开展有效的矿物学研究, 致使目前对该亚

微米结构层的特征及其变化规律仍不清楚。

针对这一问题, 本研究以库克群岛的水成型铁锰结核为研究对象, 采用微区 X 射线荧光光谱、微区 X 射线衍射、扫描电子显微镜、聚焦离子束和高分辨透射电子显微镜等多种微区矿物学分析方法, 探究了结核中亚微米结构层的特征。研究表明: (1) 铁锰结核存在背散射图衬度对比“明显”和“不明显”两种结构层; (2) “明显”结构层主要由 10Å 和 7Å 的层状锰酸盐矿物组成, “不明显”结构层主要由复水锰矿(水羟锰矿)组成; (3) 背散射图中的“明显”结构层并非由化学组成的差异性所致, 而是因为该亚微米结构层由粒径较大和较小的锰氧化物矿物交替排列所致。

上述研究结果揭示了铁锰结核的生长可能在较短时间尺度下呈周期性变化, 对进一步认识铁锰结核的形成和生长机制提供了依据。

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M720888)、国家高层次人才特殊支持计划领军人才项目

第一作者简介: 周军明(1992–), 博士后, 研究方向: 风化淋积型稀土矿床和深海矿产资源(稀土、结核和结壳). E-mail: zhoujunming@gmlab.ac.cn

*通信作者简介: Toshihiro Kogure(1962–), 教授, 研究方向: 矿物学、电子显微学. E-mail: kogure@eps.s.u-tokyo.ac.jp

袁鹏(1975–), 教授, 研究方向: 矿物资源与环境. E-mail: yuanpeng@gdut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

卡林型金矿中“不可见金”赋存状态的定量表征

杨美稚^{1,2}, 聂信², 罗宿星³, 万泉^{2*}

1. 贵州开放大学(贵州职业技术学院), 贵阳, 550081;

2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550081;

3. 遵义师范学院, 遵义, 563000

卡林型金矿中“不可见金”常以固溶体(Au^+)以及纳米级自然金颗粒(Au^0)的形式赋存在主要载金矿物含砷黄铁矿中。目前关于金化学状态量化的表征方法较缺乏且获得的定量数据极少, 仅见于少数基于同步辐射 XANES 的相关文献中。理解金的赋存状态对完善成矿作用和提升冶炼工艺具有重要的指示意义, 因此卡林型金矿中金赋存状态的量化表征仍是当前研究的热点和难题。

采集贵州贞丰水银洞卡林型金矿的矿石样品, 首先进行粉碎淘选得到黄铁矿较富集的初始样品。采用非氧化性的盐酸对样品进行逐级酸蚀处理, 得到一系列酸蚀溶液和代表不同酸蚀深度的固体粉末样品。根据每次酸蚀溶液中 Fe、As、Au 的含量, 估算每次酸蚀被溶解黄铁矿的质量和厚度, 以及 Au、As 在被溶解黄铁矿中的含量。

As 在被溶解黄铁矿中含量变化由外向内呈现先降后升然后趋于平稳的趋势, 而 Au 含量变化趋势与 As 不同步呈单调递增, 这在一定程度上反映了相关元素在成矿流体中的演化规律。根据 Au 的含量变化推断黄铁矿最外层存在一个贫金层, 其平均含量

($\sim 0.0017 \text{ at}\%$) 远低于 X 射线光电子能谱(XPS)的检出限($\sim 0.1 \text{ at}\%$), 并且其厚度($\sim 400 \text{ nm}$)远大于 XPS 的检测深度($\sim 10 \text{ nm}$)。该贫金层对 Au 的 XPS 信号检测造成了屏蔽作用, 而酸蚀可起到去除贫金层暴露内部富金层的作用 (Yang et al., 2021)。

酸蚀前样品的 Au 4f 信号较弱且被样品中白云石强烈的 Mg 2s 信号掩盖, 而酸蚀后出现明显 Au 4f 峰信号, 说明 Mg 2s 会对 XPS 金信号造成较强干扰。Au 4f_{7/2} 峰分峰拟合结果表明水银洞金矿样品中 Au 同时存在 Au^+ 和 Au^0 两种价态, 根据 Au^0 结合能大小估算纳米金颗粒的平均粒径约为 6 nm, 最小可达 1~2 nm。根据拟合的峰面积比例得出 Au^0 百分比平均值变化范围为 31.2~59.8%, Au^+ 则为 40.2~68.8%, 且随酸蚀深度增加 Au^+ 百分比有轻微上升的趋势 (Yang et al., 2021)。

逐级酸蚀作为深度剖析方法可以将酸蚀厚度稳定控制在纳米级范围内。搭配 XPS 约 10 nm 的检测深度, 可以实现 Au 赋存状态在黄铁矿不同深度连续分布特征的定量分析。在后续研究中此方法有望用于低品位卡林型金矿样品以及其他类型地质样品的定量分析。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(批准号: (B类) XDB41000000)、国家自然科学基金(批准号: 41902041、41872046、41173074)、贵州省特色重点实验室项目(黔教合 KY 字[2018]004)

第一作者简介: 杨美稚(1991-5), 女, 博士, 研究方向: 纳米矿物学; 实验地球化学. Email: yangmeizhi@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 万泉(1971-6), 男, 研究员, 研究方向: 纳米地球科学; 矿物学; 材料科学. Email: wanquan@vip.gyig.ac.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

新矿物标本编号、登记与研究使用管理

叶颖, 叶青培, 杨小男*

中国地质博物馆, 北京 100034

新矿物标本是人类不断认识自然界中矿物的过程中不可或缺的实物证据, 因此, 对新矿物标本进行编号、登记与研究使用显得尤为重要。开展新矿物研究, 除发表相应的论文成果外, 还需要将有关“物证”——新矿物标本——永久性地存放于一家专业的博物馆或被认可的矿物收藏单位作为重要的参考物质, 供后续开展研究及共享使用。博物馆或其他收藏单位在收到新矿物标本并完成登记接收后, 应当向研究者出具带有收藏编号的收藏凭据。其中的收藏编号可以方便研究者在开展进一步研究申请时, 检索借阅有关标本。

中国地质博物馆承担着地学类标本收藏、保护、管理职责, 持续提升新矿物标本管理服务水平。目前将新矿物标本纳入矿物类藏品登记管理, 馆内已登记收藏新矿物标本 130 余种。新矿物研究者可根据初步取得的研究结果向中国地质博物馆提出标本送交申请, 待研究完成后将新矿物标本交予博物馆作为藏品永久收藏。申请受理后, 博物馆通常会直接把藏品编号反馈给研究者, 待新矿物研究成果获得国际矿物学协会新矿物命名及分类委员会正式批

准后, 再办理新矿物标本接收。由于新矿物研究和获得批准需要一定周期, 甚至在某种意义上具有不确定性, 为了进一步完善矿物标本编号登记工作: 一方面便于研究者获取所需的收藏证据及收藏编号, 另一方面优化博物馆矿物典藏编号分配使用, 中国地质博物馆专门制定出台了新矿物标本收藏编号管理规则, 进一步明确新矿物标本登记入馆流程, 注重加强新矿物相关资料的收集存档, 持续跟踪新矿物研究进度, 定期对外发布博物馆新矿物收藏情况等; 同时充分利用藏品信息化管理手段, 同步完善标本登记字段和检索功能, 从而改进新矿物标本编号、登记管理工作。

为了加强和规范馆藏地质标本保护和利用, 充分挖掘标本的科学内涵, 安全有序开展馆藏地质标本研究, 中国地质博物馆专门制定了地质标本取样分析管理办法。该管理办法同样施用于新矿物标本的研究使用。通过细化无损分析和有损分析所涉及各类情况, 明确相应的申请审批流程, 规范标本取样分析。在确保馆藏标本安全的前提下, 促进标本研究不断深入, 充分发挥标本科研价值。

部门预算项目: 自然资源科普与重大科技成果宣传 (12111300000018001)

第一作者简介: 叶颖 (1995-), 助理工程师, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: 715421592@qq.com

*通信作者简介: 杨小男 (1983-), 高级工程师, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: 1463637035@qq.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

松辽盆地海力锦铀矿床成矿流体性质——来自黄铁矿微区微量元素和硫同位素的指示

田明明¹, 李子颖¹, 贾立城^{1*}, 张云龙¹

1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029;

黄铁矿作为铀矿物的共伴生矿物之一, 广泛赋存于砂岩型铀矿之中, 其硫同位素及 Co、Ni、As、Mo、Sb、Se 等微量元素变化是示踪成矿流体性质、成矿地质条件和判断铀矿床成因的重要指标。松辽盆地铀资源丰富, 尤其是盆地西南部, 近年来先后发现并落实了钱家店(钱 II 块、钱 III 块、钱 IV 块)、宝龙山和海力锦、大林等大型、特大型铀矿床, 前人从构造演化、成矿地质条件、沉积相及沉积环境、赋矿岩性-岩相组合、成矿预测及成矿时代等对松辽盆地内铀矿床进行了较为详细的研究, 但这些研究多数这些研究多数强调传统的层间氧化渗入成矿模式对铀矿床的形成起决定性作用, 而忽视了深部流体渗出对铀矿床形成所起的作用, 尤其是随着松辽盆地海力锦铀矿床的发现, 其含矿层姚下段特有的“两黄夹一灰”现象并不能用传统的层间氧化成矿模式解释。为了查明海力锦铀矿床成矿流体性质, 本文选取海力锦铀矿床含矿目的层—上白垩统姚下段赋矿灰色砂体中黄铁矿作为研究对象, 利用激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)方法, 原位微区分析了微量元素及硫同位素特征。结果表明:(1)黄铁矿 Co/Ni 比值为 0.17—2.29, 均值为 0.79, 以沉积成岩型黄铁矿为主(图 1);(2)从黄铁矿核部到边部, As、Mo、Sb 和 Se 等亲硫元素含量明显增高, Se 元素含量均值可达 134.25×10^{-6} ,

表明黄铁矿形成过程中有来源于深部的还原性流体加入, 且具有一定温度;(3)硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 -49.72% — -2.58% , 极差值为 47.14%, 从核部到边部的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值表现为明显的降低, 暗示黄铁矿的形成环境发生了较大的改变, 亦或有其他性质的流体参与黄铁矿的形成。这些研究结果表明海力锦铀矿床与传统的层间氧化渗入成因铀矿床有所不同, 其成矿流体也并非大气降水流体, 其成因可能为深部富铀还原性流体沿断裂构造向上渗出形成。

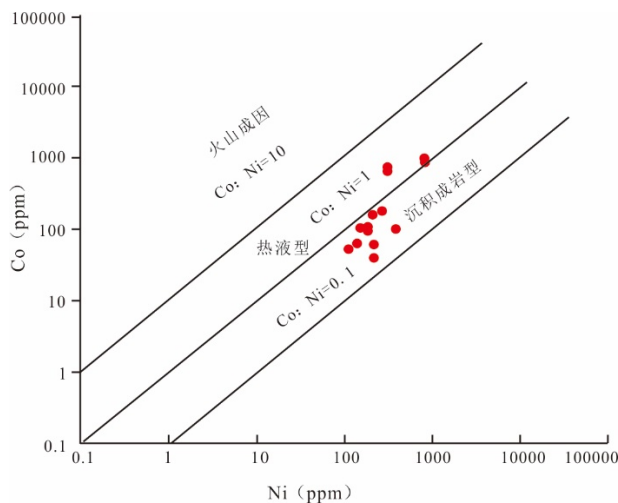


图 1 海力锦铀矿床黄铁矿 Co-Ni 图解

基金项目: 松辽盆地砂岩型铀矿成矿作用与时空定位研究 (SD01-05)

第一作者简介: 田明明 (1987-), 高级工程师, 研究方向: 砂岩型铀成矿作用. E-mail: tian_ming_ming@126.com

*通信作者简介: 贾立城 (1979-), 高级工程师, 研究方向: 沉积岩石学. E-mail: 13717542711@163.com

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

低温热液型石英 CL 环带成因及其指示意义

袁茂文¹, 李胜荣^{1,2*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

阴极发光(CL)图像可以很好地显示石英中的微观结构,而石英中微量元素的浓度则可以有效地反映石英生长过程的物理化学条件。基于此,CL 图像结合石英中微量元素浓度被广泛地用于解译热液体系演化和石英脉形成过程的复杂历史。以往研究显示在斑岩型矿床及许多火山岩中的石英中,CL 强度与 Ti、Al 等元素浓度具有明显的正相关关系,且温度在 Ti、Al 浓度变化中具有重要调控作用。在低温热液石英中不同 CL 强度与 Al 浓度变化的相关性却复杂得多。例如,在大多数低温热液石英中,Al 浓度与 CL 强度呈正相关关系,而在一些低温热液石英中,Al 浓度与 CL 强度则又呈现负相关关系。是什么导致了低温热液石英中 Al 浓度与 CL 强度相关关系的巨大变化?这些变化又指示了哪些地质信息?目前还一直未得到很好的解释。

本研究在前人研究基础上,选取胶东乳山金矿及阜平石湖金矿床中的成矿早期石英为研究对象,利用扫描电镜-阴极发光(SEM-CL)、电子探针(EMP)及电子背向散射衍射 EBSD 开展了石英矿物学的系

列研究。结果发现胶东乳山金矿床中的石英 CL 强度与 Al、K 浓度成明显的正相关关系,CL 亮带中富集 Al、K 元素;而石湖金矿中的石英 CL 强度则与 Al 浓度成负相关关系,CL 暗带中相对富集 Al、H、Li 元素。其他元素如 Ti、Na、Ga、Ge 等则无明显变化。EBSD 面扫结果显示,石湖金矿不同 CL 强度的石英具有相同的结晶取向,变形程度小,具有较少的结晶缺陷;而乳山金矿中石英 CL 亮带与 CL 暗带则具有明显的结晶取向差异,不同 CL 环带的变形程度与结晶缺陷密度也存在明显差别。综合来看,乳山金矿石英阴极发光环带形成可能与 $Al^{3+}-K^{+}-Si^{4+}$ 类质同像取代有关, $Al^{3+}-K^{+}-Si^{4+}$ 取代越多,阴极发光强度越大;而石湖金矿石英阴极发光环带则可能受 $Al^{3+}-(H^{+}/Li^{+})-Si^{4+}$ 类质同像取代影响, $Al^{3+}-(H^{+}/Li^{+})-Si^{4+}$ 取代越多,阴极发光强度越弱。 $Al^{3+}-K^{+}$ 充当了石英阴极发光的激活剂,而 $Al^{3+}-(H^{+}/Li^{+})$ 充当着石英阴极发光抑制剂的作用。低温热液石英 CL 环带的形成可能与石英结晶过程中热液 pH 变化密切相关。

部门预算项目: 国家自然科学基金(批准号: 41872038), 科技部重点研发计划(批准号: 2016YEC0600106)

第一作者简介: 袁茂文(1993-), 男, 博士后, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: 851497705@qq.com

*通信作者简介: 李胜荣(1956-), 男, 教授/博士, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: lizr@cugb.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

湖相细粒沉积岩中晶粒方解石成因及其对火山-热液活动的指示-以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例

李克¹, 蕙克来^{1*}, 操应长¹, 王有成¹, 林救若¹

1. 中国石油大学(华东) 深层油气重点实验室, 山东, 266580;

细粒沉积岩中自生矿物的形成对其沉积与成岩环境具有极其重要的指示作用。本文以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩中晶粒方解石为研究对象, 综合运用岩心观察、薄片观察、阴极发光分析、流体包裹体测试、扫描电镜分析、微区 XRF 分析、AMICS 全矿物分析、电子探针分析、LA-ICP-MS 分析、激光拉曼光谱分析、同位素分析等手段对其成因开展研究。结果表明: 晶粒方解石呈层状分布于沉凝灰岩发育层段或沉凝灰岩与泥晶白云岩过渡层段的细粒沉积物中。方解石颗粒具有明显的阴极发光环带, 可分为三期: I 期方解石核心不发光, 含有较高

的 Sr 元素, 包裹体中包含羧基硫成分, 均一温度超过 170 °C, 直接由火山-热液喷流物质沉积形成; II 期方解石内环呈亮黄色光, 含有较高的 Fe、Mn、Mg 元素, 轻稀土富集, 包裹体均一温度高, 为热液喷流沉积的钙质环边重结晶形成; III 期方解石外环呈暗橙色发光的环带, 含有较高的 Mg、P、V 等元素, 稀土元素无明显分异, 包裹体均一温度低, 为埋藏过程中成岩转化作用形成。晶粒方解石在垂向上规律性出现, 并且其形成温度由颗粒中心向边缘降低, 为芦草沟组细粒沉积岩沉积时期的火山-热液活动提供了直接证据。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072161)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(22CX07008A)

第一作者简介: 李克(1996-), 博士研究生, 研究方向: 非常规油气储层地质学. E-mail: 1293759824@qq.com

*通信作者简介: 蕙克来(1988-), 教授, 研究方向: 非常规油气储层地质. E-mail: xikelai@upc.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

黄铁矿 Sr-Nd-Fe-S 同位素示踪金属矿床成因： 以辽东青城子矿集区为例

许蕾¹, 杨进辉^{1*}, 曾庆栋², 朱昱升²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

黄铁矿是中-低温热液型金多金属矿床中重要的矿石矿物, 多与其他金属矿物交互共生, 其生长贯穿整个成矿过程, 能够完整地记录成矿历史。黄铁矿通常含有长石、云母等包裹体, 这些包裹体中的 K 和 Ca 被 Rb 和 Sr 以类质同像的形式替代进入晶格中, 使得黄铁矿 Rb/Sr 比值有一定的变化范围, 可用于高精度 Rb-Sr 等时线定年。此外, 黄铁矿 (FeS₂) 成分虽然简单, 但其主要成分的 S 可用于直接约束成矿物质来源; 主要成分的 Fe 对氧化还原条件敏感, 易受到平衡分馏及动力学分馏的控制, 特别是在热液系统中, 黄铁矿的快速沉淀、成矿流体与控矿围岩的水岩相互作用、成矿流体的物理化学性质突变等均会造成强烈的 Fe 同位素分馏效应, 对反演成矿的精细过程具有重要潜力。

辽东青城子地区广泛分布着铅锌金银矿床, 是我国重要的多金属资源产地。但其成矿时代、成矿物质来源以及精细成矿过程等问题仍存在争议。相对于不同空间部位所采集的样品, 选取同一块手标本不同部位的黄铁矿作为亚样品, 更容易达到 Sr 同位素平衡和初始比值的均一化。亚样品分析是目前黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年较为理想的分析手段。本研究从同一手标本的五份亚样品中挑选出与方铅矿和闪锌矿共生的黄铁矿, 通过阶段性化学淋滤、分离和质谱测试, 获得在误差范围内一致的五个 Rb-Sr 等时线年龄: 156±11Ma、143±12Ma、149±31Ma、159±12Ma 和 149.6±9.6Ma。将测得的亚样品数据重新计算, 获得年龄为 151.9±4.2Ma, 与加权平均年龄相同, 代表了青城子矿集区铅锌矿的成矿时代。

黄铁矿 Sr-Nd 同位素分析结果表明, 铅锌矿石中的黄铁矿具有富集的 Nd 同位素组成, 且与新太古代 TTG 岩石、古元古代变沉积岩 (即成矿围岩) 和花岗岩、镁铁质脉岩及侏罗纪花岗岩类似。但黄铁矿初始 Sr 同位素组成明显高于镁铁质脉岩, 而与侏罗纪花岗岩和古元古代岩石相似, 揭示成矿物质可能来源于控矿围岩或中生代花岗岩; 黄铁矿原位微区 S 同位素分析结果表明, 青城子铅锌矿石中的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 4.7~8.5‰, 湾地沟金矿石中的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 9.7~12.7‰, 指示成矿物质 (即铅-锌-金) 主要来源于围岩和晚侏罗世花岗岩, 与早白垩世五龙金矿的单一岩浆来源特征明显不同 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 0.9~2.5‰)。

黄铁矿溶液 Fe 同位素分析结果表明, 铅锌矿石中黄铁矿和古元古代变沉积岩中黄铁矿的 Fe 同位素组成与古元古代基底岩石及中生代花岗岩均不相同, 且铅锌矿石中的黄铁矿 Fe-Nd 同位素组成呈正相关, 而围岩中的黄铁矿 Fe-Nd 同位素组成呈负相关。结合黄铁矿激光原位 Fe 同位素分析数据, 表明相较于湾地沟金矿石及五龙金矿石, 青城子铅锌矿石中的黄铁矿经历了更加复杂的成矿过程: 未发生 Fe 同位素分馏的围岩 ($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$ 值为 $0\pm 0.39\%$) 与成矿流体发生强烈的水岩相互作用形成蚀变岩, 蚀变岩中富集轻 Fe 同位素组成的黄铁矿 ($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$ 值为 $-0.52\pm 0.55\%$) 快速沉淀, 导致残余流体在有利的构造部位沉淀成矿, 逐步沉淀出 Fe 同位素组成越来越重、金属含量不同的三期黄铁矿 ($0.35\pm 0.28\%$ 、 $0.72\pm 0.28\%$ 、 $0.94\pm 0.23\%$)。

基金项目: 地球化学 (42288201)

第一作者简介: 许蕾 (1990-), 高级工程师, 研究方向: 分析地球化学、矿床学. E-mail: leixu@iggcas.ac.cn

*通信作者简介: 杨进辉 (1971-), 研究员, 研究方向: 岩石学、地球化学、矿床学. E-mail: jinhui@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

庙垭碳酸岩体烧绿石族矿物特征及其对铌成矿的指示意义

胡寅秋¹, 邬斌^{1*}, 任倩¹, 桂欣¹, 李光来¹

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013

湖北庙垭正长岩-碳酸岩杂岩体产出我国第二大碳酸岩型 REE-Nb 矿床, 其位于南秦岭南缘武当地块西南部, 受板块俯冲和碰撞造山运动的影响, 断裂发育, 构造破碎。区内出露地层有新元古代耀岭河群浅变质石英角斑岩, 其次为志留系梅子垭群的绢云母片岩。庙垭杂岩体沿以上变质岩之间的构造脆弱带分布, 整体呈近长轴透镜状, 沿 NNW 向展布, 与区域构造线方向基本一致, 碳酸岩以岩脉或岩株的形式侵入碱性正长岩中构成复合杂岩体。

庙垭碳酸岩中铌矿物根据岩相学和矿物学特征分为岩浆期和热液期两个阶段。岩浆期铌矿物主要包括铌铁矿、含铌金红石和烧绿石族矿物, 其中烧绿石族矿物经历了从贫铀烧绿石到铀烧绿石再到铌钛铀矿端元的演化, Ti 和 U 的含量增加, Nb 含量和 Nb/(Nb+Ta) 比值降低。热液期铀烧绿石经历流体交代, 根据蚀变程度由弱到强可识别出 3 种次生矿物组合: (1) 多孔蚀变铀烧绿石+晶质铀矿; (2) 铀烧绿石残余+次生铌铁矿+晶质铀矿+含铌金红石±方铅矿±锆石; (3) 由次生铌铁矿+晶质铀矿+含铌金红石±锆石组成的铀烧绿石假晶。蚀变铀烧绿石相比新鲜铀烧绿石亏损 Na、Ca 和 F、富集 Fe、Sr、Ba 和 Si, 并生成一系列的次生蚀变矿物, 包括铌铁矿、晶质铀矿和含铌金红石等。次生铌铁矿与岩浆期铌铁矿相比, Ta 含量和 Ta/Nb 比值上升; 次生金红石与岩浆期金红石相比, Nb、Ta、Fe 和 U 含量上升, 可能部分成分继承了铀烧绿石。与蚀变铀烧绿石伴生的方解石与新鲜方

解石相比具有 Fe 和 Mn 富集, Sr 和 REE 含量亏损的特征, 并且此类方解石裂隙中含有富 Fe-S-Si-Nb-Ti-U 氧化物的细脉, 指示了流体阶段 Nb、U 等元素迁移。

铀烧绿石蚀变产物——晶质铀矿的 U-Th-Pb 电子探针化学年龄为 $235.4 \pm 4.1 \text{ Ma}$, 与热液独居石的 Th-Pb 同位素年龄 $235.1 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 一致, 与华北古板块与扬子古板块沿勉略断裂碰撞, 勉略洋的闭合 (221~246Ma) 相关的区域变质事件同步, 明显晚于侵位年龄 (~430Ma), 并与前人研究获得主体碳酸岩中热液期铌铁矿年龄 (~230Ma) 较为一致, 共同指示了庙垭碳酸岩成岩后, 经历了晚期与勉略洋闭合有关的流体作用叠加改造。含蚀变铀烧绿石的碳酸岩样品与新鲜样品相比, $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值相似, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高, 向海洋沉积物方向偏移, 也佐证了该观点。

综上, 可以将庙垭碳酸岩铌矿化模式总结为: 在岩浆期 (~430Ma), 主体碳酸岩中的早期贫铌矿物 (方解石、钾长石等) 分离结晶导致残余熔体中 Nb 含量升高, 并以铌铁矿、金红石和烧绿石族矿物的形式结晶; 在热液期 (~235Ma), 铀烧绿石的退晶质化以及与勉略洋闭合相关的还原性高温 (Fe、Si、S、CO₂) 流体的共同作用, 促进了 Nb 和 U 的再活化。随温度的逐渐下降, 大部分的 Nb 和 U 在溶解的铀烧绿石假晶中原位再沉淀形成铌铁矿、晶质铀矿和含铌金红石等次生矿物; 另一部分从铀烧绿石中释放出来的 Nb 和 U, 随着流体迁移数百微米, 最终沉淀为富 Fe-S-Si-Nb-Ti-U 氧化物脉。

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42272087, 42063006, 41972071)

第一作者简介: 胡寅秋 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 碳酸岩成矿矿物学. E-mail: 876824498@qq.com

*通信作者简介: 邬斌 (1990-), 副教授, 研究方向: 碱性岩与碳酸岩成矿矿物学. E-mail: wubin@ecut.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

锆石年代学和矿物化学揭示大湖塘超大型钨矿区 多阶段岩浆演化过程

杨炎申^{1,2}, 杨志明^{1,2*}, 潘小菲², 李鑫³, 侯增谦²

1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100037;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100026;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100037

大湖塘钨矿区位于江南造山带东段,是近年来新探明的一个超大型钨矿区(1.07 Mt WO₃)。矿区内成矿母岩为高演化的晚中生代花岗质侵入体,钨矿化主要赋存于晚中生代侵入体与新元古代花岗闪长岩的接触带中。前人对大湖塘晚中生代花岗岩开展了详细的年代学、地球化学等研究工作,研究表明这些花岗岩侵位时代相近(~150–140 Ma)、为起源于元古代变质基底部分熔融的同源岩浆经历不同程度岩浆演化的产物,并大致存在从黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩到锂云母钠长花岗岩的岩浆演化趋势。然而,成矿花岗岩的演化过程以及钨的富集过程至今未得到有效约束。

锂云母钠长花岗岩是大湖塘矿区内演化程度最高的晚中生代侵入岩,其所含锆石具有复杂的内部结构,可以被划分为四种类型。第一类锆石呈自形的长柱状,以核部形式存在,并具有清晰且较明亮的震荡环带。第二类锆石也呈自形的长柱状并以核部形式存在,但其在阴极发光图像上较第一类锆石更暗,在背散射图像上则更加明亮。第三类锆石具有极弱的阴极发光(震荡环带几乎不发育)和极强

的背散射发光性,其常围绕第一类或第二类锆石生长,在后两类锆石的外部形成增生边;在锆石接触带附近可以观察到港湾状熔蚀结构、筛状结构以及独居石充填,显示出典型的溶解再沉淀特征。第四类锆石通常为他形增生边或呈他形脉状穿切前三类锆石,且锆石阴极发光和背散射发光均最弱。综合锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 定年、锡石 U-Pb 定年以及白云母 Ar-Ar 定年的结果,花岗岩的形成时代在 145–142 Ma,四类锆石应为一期岩浆事件中不同演化阶段结晶的产物。从第一类锆石到第四类锆石,锆石中的 Hf、U 和 Th 含量显著升高、Eu/Eu* 逐渐降低,同时锆石 Ti 温度逐渐降低(781 ± 36 °C 降低至 686 ± 43 °C)。根据瑞利分馏模型计算,相比于初始岩浆组分,形成锂云母钠长花岗岩的花岗质熔体经历了非常强烈的分离结晶作用(超过 90%)。同时,随着分离结晶作用的进行,锆石所记录的岩浆熔体中 W、Nb 和 Ta 的含量逐渐升高(提升一个数量级)。本研究表明,多阶段的岩浆演化可以有效促进钨在岩浆熔体中不断富集,可能是控制形成超大型钨矿床的关键要素。

基金项目: 华南超大型 W-Cu 矿床成因研究: 以朱溪和大湖塘矿床为例(批准号: 92062104)

第一作者简介: 杨炎申(1992年-),男,博士后,研究方向: 钨锡成矿作用,研究. E-mail: yanshen_yang@163.com

*通信作者简介: 杨志明(1978年-),男,研究员,研究方向: 矿床学, E-mail: zm.yang@hotmail.com

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

东秦岭八里坪黑云二长花岗岩中含铀复稀土金矿的矿物学研究

魏小燕, 汪双双, 周宁超, 朱津蕊

中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710119

铀复稀土金矿((U, Y)(Ti, Nb, Ta)₂O₆)作为一种矿石矿物, 是工业上提取稀有金属的重要原料, 而铀复稀土金矿的矿物学特征及元素地球化学特征研究对 U-Nb-Ta 矿床的形成具有重要指示意义。本文首次在东秦岭八里坪黑云二长花岗岩中发现了含铀复稀土金矿, 并利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、电子探针(EPMA)等多种测试手段, 对含铀复稀土金矿的光学性质、化学成分、赋存状态等矿物学特征进行了详细研究。结果表明: 含铀复稀土金矿颜色多为黑色、深红棕色, 半透明至不透明, 具有半金属光泽; 呈大的板柱状或细小不规则粒状分布, 大板柱状颗粒粒径多为一毫米左右, 薄片上肉眼可见, 细小颗粒状的粒

径多为十几微米到几百微米不等。含铀复稀土金矿主要有两种赋存状态, 一是以独立矿物的形式包裹于正长石、斜长石、石英之中, 二是与黑云母、磁铁矿、钛铁矿、榍石、锆石等矿物伴生。电子探针分析显示, 主要化学组成为 UO₂、Y₂O₃、TiO₂、Nb₂O₅, 计算所得晶体化学式为: (Y_{0.481}U_{0.268}REE_{0.204}Th_{0.043}Fe_{0.027}Pb_{0.016}Ca_{0.008})_{1.047}(Ti_{1.388}Nb_{0.582}Ta_{0.023}Si_{0.008})_{2.001}O₆, 与其理想化学式 (U, Y)(Ti, Nb, Ta)₂O₆ 基本一致。背散射电子图像下显示含铀复稀土金矿颗粒内存在裂隙, 且沿裂隙发生了蚀变, 元素面扫描和定量分析初步研究显示, 蚀变是由于 Ca 元素替代了 Y 元素, Si 元素替代了 Ti 元素而引起的, 即 2Y³⁺+Ti⁴⁺ = 3Ca²⁺+Si⁴⁺。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41502036)

第一作者简介: 魏小燕 (1987-), 高级工程师, 研究方向: 岩石学与矿物学. E-mail: 176227609@qq.com

*通信作者简介: 汪双双 (1984-), 高级工程师, 研究方向: 同位素地球化学与年代学. E-mail: sharonwang84@sina.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

生长导致的成分分带: 阳原玄武岩中一颗橄榄石骸晶的记录

杨宗锋^{1, 2*}, 饶彤¹, 刘禹¹, 陈昊¹, 张馨月¹, 申俊峰¹

1. 中国地质大学(北京)成因矿物学研究中心, 北京 100083;

2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

通常认为橄榄石周围熔体成分以及晶内扩散主导了橄榄石的成分分带模式, 因而橄榄石的成分被广泛用来约束镁铁质岩浆系统的源区性质和时间尺度。然而, 近些年的研究显示, 快速生长时扩散控制的生长机制同样可以造就橄榄石显著的成分分带, 但对这种机制在自然界是否普遍存在, 以及多大程度上影响了橄榄石的成分变化还很不清楚, 因而与分离结晶, 岩浆混合和晶内扩散等很难区分。我们在阳原陆内碱性玄武岩里的一颗橄榄石骸晶中观察到了扩散控制生长过程中橄榄石形态和成分演化过程。这颗骸晶橄榄石中镁橄榄石含量变化范围很大 ($Fo=65-81$), 但 Fo 并非常见的同心环状, 而是出现了四个高值中心 ($Fo>78$), 且远离高值中心的 Fo 等值线整体呈骨骸状, 类似橄榄石整体形态 (图 1)。

面扫描和高精度成分剖面测试显示快速扩散的铁-镁与缓慢扩散的磷元素在橄榄石核部高 Fo 区域出现了耦合变化, 排除了橄榄石结晶后晶内元素扩散对成分分带的影响。以上观察以及橄榄石 Fo , 磷和镍含量在不同结晶学方向的系统变化关系表明, 分离结晶和扩散控

制的生长共同影响了橄榄石的成分环带发育。我们的研究表明, 自然界结晶的橄榄石其主量和微量元素可以同时保留生长初始阶段的特征, 并且受到动力学和热力学的双重影响, 但容易误认为是结晶分异演化和扩散作用的产物, 需要借助高精度的成分填图识别。

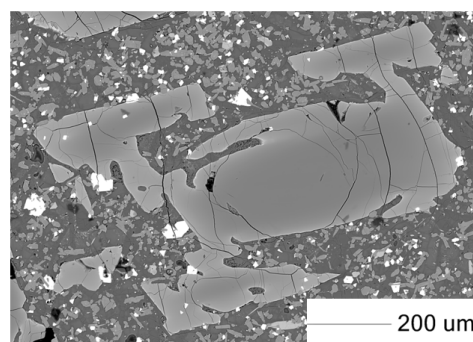


图 1 阳原碱性玄武岩中一颗骨骸状橄榄石背散射电子图 (BSE) 和 Fo 值等值线填图

右侧伪彩色图是左侧 BSE 图的伪彩色图, BSE 图中灰度与橄榄石 Fo 值的关系通过高精度电子探针数据校正, 图中相邻等值线之间 Fo 值的差异 ~ 0.3 mol %, 图中其他矿物的伪彩色与图中右下方标注的 Fo 值没有直接对应关系。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

西藏南部冈底斯带东段晚白垩世中性侵入岩的成因矿物学研究：对构建穿地壳岩浆系统的启示

王文鲁^{1,4}, 李小伟^{1,4*}, 张泽明^{2,4}, 田作林^{2,4}, 李增胜³,
孙雨沁³, 刘强³, 丁慧霞¹, 郝昭歌¹

1. 中国地质大学(北京)成因矿物学研究中心, 地质资源勘查实验教学中心, 北京 100083;
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 山东省地质科学研究院, 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013
4. 中国地质科学院, 大陆动力学集成矿物分析仪(TIMA)实验室, 北京 100037

穿地壳岩浆系统为认识岩浆岩中矿物成因以及矿物间的不平衡关系提供了一个新的切入点, 即造岩矿物在固结之前, 可能在不同地壳层次的岩浆房内经历过生长、熔蚀或流体改造等过程。如何追踪和梳理不同造岩矿物的演化历史, 成为阐明岩浆岩成因的一个关键科学问题。本文以西藏冈底斯弧东段里龙含单斜辉石石英闪长岩和黑云母闪长岩为主要研究对象, 对其中主要造岩矿物(单斜辉石、角闪石、黑云母、斜长石等)进行了系统的成因矿物学研究, 并构建了穿地壳岩浆系统的组成要素。根据矿物的稀土元素含量和不同矿物之间的接触关系, 将含单斜辉石石英闪长岩中的单斜辉石和角闪石分为 I 型单斜辉石(Σ REE 含量高)、II 型单斜辉石(Σ REE 含量低)、I A 型角闪石(Σ REE 含量高), 以及 I B 型角闪石(Σ REE 含量低); 将黑云母闪长岩中的角闪石命为 II 型角闪石。经过矿物温压计和水活度计计算获得了相应的结晶温压条件和体系水含量, 其中 I 型单斜辉石:

温度 1159~1175 °C, 压力 637~799 MPa, 含水量 2.5%~3.4%; II 型单斜辉石: 温度 1180~1181 °C, 压力 482~524 MPa, 含水量 2.4%~2.8%; I A 型角闪石: 温度 806~854 °C, 压力 320~434 MPa, 含水量 7.5%~7.9%; I B 型角闪石: 温度 776~848 °C, 压力 196~386 MPa, 含水量 6.9%~8.6%; II 型角闪石: 温度 783~857 °C, 压力 0.25~0.33 MPa, 含水量 6.5%~9.4%。这表明单斜辉石的温度、压力比角闪石高, 而含水量比角闪石低, 暗示单斜辉石和角闪石来自于不同层次的岩浆房。进一步对与单斜辉石平衡的熔体进行了计算, 推断至少一部分单斜辉石来自于演化的玄武安山质岩浆, 而与角闪石对应的平衡熔体 Mg# 值较低, 对应流纹质岩浆。本研究还对单斜辉石与角闪石“再循环晶”进行了识别, 指示了整个岩浆过程是在开放岩浆系统中完成的, 并经历了不同期次的岩浆补给或混合事件。本研究发现中性岩的母岩浆可以由不同成因的再循环晶与中酸性熔体混合形成。

基金项目: 国家自然科学基金委特提斯重大研究计划重点项目(91855210); 国家重点研究开发项目(2016YFC0600310)

第一作者简介: 王文鲁(1998-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: 1027626328@qq.com

*通信作者简介: 李小伟(1985-), 男, 副教授, 博士生导师, 成因矿物学与岩石学. E-mail: xwli@cugb.edu.cn

· 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 ·

滇东南荒田白钨矿床地球化学、Sr 同位素特征及其地质意义

王中良¹, 林木森^{1*}, 周瑞辉¹

1. 福州大学, 福州 350110

滇东南荒田钨矿床属于老君山 W-Sn 多金属矿集区的一个大型白钨矿床, 位于华夏板块与扬子板块、印支板块结合部位, 处于红河断裂带与文山—麻栗坡断裂带之间, 矿体主要赋存于寒武系龙哈组大理岩中。前人对荒田白钨矿床进行了地质调查研究工作, 对矿床成因有了一定认识。然而, 矿床的成矿流体演化过程与成矿机制目前仍不清楚, 这也制约着对矿床成因的深入理解。针对上述问题, 本文在前人的工作基础上, 对荒田钨矿床进行原位 LA-ICP-MS 微量元素及原位 Sr 同位素分析, 旨在探讨白钨矿成矿流体的演化过程, 示踪成矿物质来源, 为进一步研究老君山 W-Sn 多金属成矿区的成矿规律提供新的地质依据。

通过钻孔编录和矿相学特征研究, 将荒田白钨矿床分为两个成矿阶段: 石英-萤石-白钨矿阶段 (I)、白钨矿-碳酸盐阶段 (II)。微量元素研究结果显示, 白钨矿 Mo 含量较低, 远低于赣东北朱溪钨矿床 (刘善宝等, 2017), 与赣北石门寺矿床 (Sun et al., 2017) 相似, 从早阶段 I 到晚阶段 II 的 Mo 含量变化较大, 整体呈下降的趋势, 表明成矿流体存在一个从相对氧化到还原的转变过程 (Sun et al., 2017; Song et al., 2019; Yu et al., 2021)。此外白钨矿 II 阶段中 Sr 含量较高, 平均值 314.04×10^{-6} , 远高于白钨矿 I 阶段 Sr 含量平均值 144.75×10^{-6} , 说明成矿阶段后期矿体与碳酸盐岩围岩发生了强烈的水岩反应, 大量的 Sr 及 Ca 被带入到成矿流体中。

稀土元素研究结果显示, 荒田钨矿各阶段 Σ REE 变化范围较大, 轻重稀土分馏程度不同。其中 I 阶段稀土元素球粒陨石配分模式显示略微向上凸起的稀土模式, II 阶段则呈轻稀土富集右倾模式, 与老君山花岗岩类似, 说明后期成矿流体可能来自于与老君山花岗岩有关的深部隐伏花岗岩体。绝大多数样品均呈

现 Eu 正异常的特征, 然而老君山花岗岩以 Eu 负异常为主 (刘艳宾等, 2014), 赋矿围岩则出现 Eu 正负异常均有的情况, 推测成矿流体与岩石之间的水岩反应是造成荒田白钨矿 Eu 正异常的原因之一 (Sun et al., 2017; Sun et al., 2019)。

原位 Sr 同位素研究结果显示, 白钨矿 I 阶段 ^{88}Sr 信号强度变化较小, 且白钨矿 ^{88}Sr 信号强度较低, 为 0.25~1.17V, 平均 0.70V, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较小, 为 0.72025~0.72840, 平均为 0.72425。白钨矿 I 阶段 Sr 同位素含量低比值高, 比值集中变化范围小, 指示了矿体早期形成过程中, 流体与围岩反应充分并达到了平衡。一般地层 Sr 含量低而同位素比值高, 岩浆流体则具有含量高比值低的特征, 本文白钨矿 I 阶段 Sr 同位素平均比值为 0.72425, 远远高出该地区矽卡岩白钨矿 (王忠强等, 2020), 如此高的 Sr 同位素比值不太可能是由岩浆热液所引起的, 可能是由变质流体所形成。本区域花岗片麻岩中发现有约 800Ma 的继承锆石 (张斌辉等, 2012), 暗示深部有古老基底的存在, 因此早期白钨矿成矿流体的形成可能是来自于深部更古老的地层。

据此, 本文推测荒田钨矿的成矿流体从早期到晚期经历了一个从相对氧化到还原的过程。白钨矿 I 阶段 Sr 含量低而同位素比值高的特点指示白钨矿早期成矿阶段成矿流体主要由深部地层提供。白钨矿 II 阶段球粒陨石稀土配分模式与 I 阶段不同, 呈现轻稀土富集右倾模式, 与老君山花岗岩稀土配分模式类似, 反映成矿流体可能来自于与老君山花岗岩有关的深部隐伏花岗岩体。白钨矿样品 Eu 正异常与成矿后期 Sr 的富集表明成矿流体与围岩发生了强烈的水岩反应。成矿物质来源岩体和地层, 正是近年来对矿床多成因、成矿物质多来源观点的体现。

基金项目: 福建省教育厅 2021 年度中青年教育科研项目 (编号 JAT210031)

第一作者简介: 王中良 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 区域地质与矿山地质工程. E-mail: 17789257756@163.com

*通信作者简介: 林木森 (1987-), 博士, 讲师, 研究方向: 大地构造、矿产勘查. E-mail: linmusen@fzu.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

黑龙江省大型二道坎银矿床磁铁矿特征及其对成矿过程的指示意义

符安宗, 李成禄, 杨文鹏, 杨元江, 郑博, 赵瑞君

黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036

磁铁矿在黑龙江省大型二道坎银矿床中普遍发育, 以条带状、团块状、同心圆状、零散碎粒状等形态产出, 显微镜下呈条带状、环带状、放射状、浸染状、同心环状、板柱状、细环脉状、零散细粒状等, 局部被赤铁矿交代。本次研究对二道坎银矿床矿石中各个形态的磁铁矿进行了 EPMA 成分分析, 分析了 TiO_2 、 CaO 、 Ag_2O 、 P_2O_5 、 NiO 、 FeO 、 MnO 、 Cr_2O_3 、 V_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 ZnO 、 CoO 等 14 中氧化物。结果显示: 磁铁矿 TiO_2 含量 $< 0.1\%$ (大部分都低于电子探针的检出限), SiO_2 含量 $> 0.1\%$ (平均 1.62%), 显示出低 Ti 高 Si 的特征, 与热液型和热液叠加型磁铁矿的特征相似。矿区磁铁矿按 SiO_2 含量分类, 可分为贫硅磁铁矿 ($\text{SiO}_2 < 1\%$)、硅质磁铁矿 (SiO_2 含量 $1\sim 4\%$) 和高硅磁铁矿 ($\text{SiO}_2 > 4\%$)。贫硅磁铁矿在镜下呈条带状、放射状、板柱状、稀疏浸染状、零散细粒状, 环带状的亮色环带也显示贫硅特征; 硅质磁铁矿在镜下呈细粒状, 与暗色细环状高硅磁铁矿共生, 或呈蠕虫状, 与暗色高硅磁铁矿交替生长; 高硅磁铁矿在镜下呈暗色同心圆状、细环脉状、细粒浸染状, 或与蠕虫状硅质磁铁矿交替生长。此外, 高品位矿石 (Ag 品位 $> 5000\text{g/t}$) 中细粒浸染状磁铁矿

富集 Mn ($\text{MnO} > 6\%$)。对颗粒较粗的条带状、环带状、团块状磁铁矿进行了 LA-ICP-MS 成分分析, 结果显示: 磁铁矿相对富集 Sb (均值为 1102×10^{-6})、Zn (275×10^{-6})、Pb (26.3×10^{-6})、B (42×10^{-6}) 等元素, 而亏损稀土元素和 Ti、V、Cr、Co、Ni 等元素。环带状磁铁矿暗色环相对亮色环和其他磁铁矿具有更高含量的 Li、B、Na、Mg、K、Ca、Si、Mn、Pb、Zn 等成分, 暗示了两种不同的生长环境。综合以上特征, 二道坎银矿床成矿作用可能经历了三个热液阶段: 第一阶段的热液流体贫 Si、Mn、Pb、Zn 等元素, 生长空间大, 该阶段的磁铁矿颗粒较粗, 局部被后期赤铁矿交代, 被石英和黄铁矿沿裂隙穿插, 部分受后期构造影响破碎呈放射状, 应为成矿前阶段; 第二阶段的热液流体富 Si、Mn、Pb、Zn、Sb 等元素, 磁铁矿沿早期磁铁矿边部生长呈环带状、细环脉状, 或呈细粒浸染状, 或叠加交代同心圆状沉积型黄铁矿, 应为主成矿期阶段; 第三阶段的热液流体可能从围岩中萃取了大量的锰元素, 形成富锰流体, 该阶段的磁铁矿颗粒细, 多为细粒浸染状磁铁矿, 可能为二次成矿叠加阶段, 该阶段 Ag 叠加成矿的同时也伴随 Mn 成矿。

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

西藏冈底斯西段诺仓南矽卡岩矿床 Ag-W 赋存状态及意义

陈浩¹, 郑有业^{1*}, 陈鑫¹, 李森², 姜军胜³, 姜晓佳¹, 郑顺利¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 自然资源部矿产资源储量评审中心, 北京 100035

3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205

诺仓南矽卡岩矿床位于西藏阿里地区措勤县境内, 大地构造单元位于冈底斯西段-下察隅火山岩岩浆弧的西部, 隆格尔-工布江达弧背断隆带北部, 是近年来矿产地质调查中冈底斯西段首次发现的 Ag-W 多金属矿床。矿体主要产在下二叠统昂杰组(P_{1a})碎屑岩-碳酸盐岩地层中, 受区域 EW 向张性断裂构造控制, 成矿主要与古近系林子宗群典中组(K₂-E_{1d})的火山岩有关。为查明 Ag-W 矿石元素共生组合、探索 Ag-W 元素赋存状态、揭示 Ag-W 成矿物理化学条件、划分成矿期次, 我们对发现的矿体中的以 Ag-W 为主的多金属矿石进行了化学全分析、光谱分析、岩相学-矿相学观察; 对可能赋存 Ag、W 元素的矿物进行了扫描电镜分析、BSE 图像分析、电子探针分析; 对伴生的石英、方解石、萤石中的流体包裹体进行了激光拉曼测试。研究结果表明: (1) 诺仓南 Ag-W 矿石中有益组分主要有: Ag、W、Sn、Pb、Zn、Cu、Cd、Bi, 有害组分主要有: S、Fe、As、Si 等; 矿石主要的构造有: 块状构造、浸染状构造、斑点状构造、

条带状构造等, 少数氧化矿石中见土状构造、薄膜状构造。矿石的结构主要有: 交代结构、自形—半自形粒状结构、他形粒状结构、骸晶结构、乳滴状结构、胶状结构、固溶体的分离结构、及碎裂结构、溶蚀结构、揉皱结构等, 而以交代结构最为发育。(2) 根据矿床中矿石结构-构造、矿物组合特征、矿化情况, 诺仓南矽卡岩矿床成矿期次大体可分矽卡岩期、石英硫化物期、石英碳酸岩期和表生期, 矽卡岩期又可细分为早期矽卡岩阶段、晚期矽卡岩阶段、氧化物阶段。(3) 矿石中 Ag 主要以类质同像、次显微包体的形式存在于方铅矿、黄铜矿、黄铁矿中; W 主要赋存在白钨矿和钨华中, 其中白钨矿居多, 钨华少量, 白钨矿中的 Ca 主要来源于灰岩地层。(4) 通过各阶段的流体包裹体分析, 成矿期流体氧逸度的升高、温度的降低、流体的沸腾及不混溶作用是导致成矿物质沉淀的主要机制。该研究对于认识诺仓南矿床的成矿作用过程、矿物沉淀机制、潜力评价以及找矿勘查工作具有较大的理论和现实意义。

中央引导地方项目: 科技创新基地建设(XZ202202YD0006C); 基金项目: 石榴子石微区化学解码早期流体组分和物化条件对后期成矿的制约: 以西藏诺仓 Pb-Zn-W 矿床为例(42202092)

第一作者简介: 陈浩(1987-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 矿产勘查与评价. E-mail: haochencugb@163.com

*通信作者简介: 郑有业(1962-), 男, 长江学者特聘教授, 研究方向: 成矿规律与找矿理论. E-mail: zhyouye@163.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

滇西保山地块金厂河 Fe-Cu-Pb-Zn 矽卡岩型多金属矿床黑柱石原位成分及地质意义

陆波德¹, 刘学龙^{1*}, 周云满², 赵成峰², 王基元², 李方兰¹,
李庆锐², 王海², 李守奎¹, 曹振梁¹, 周杰虎¹

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南黄金矿业集团股份有限公司, 昆明 650224

西南三江金厂河 Fe-Cu-Pb-Zn 矽卡岩型多金属矿床位于保山地块北部, 其形成可能与原特提斯洋俯冲消减作用形成的弧岩浆活动密切相关, 成矿时代为晚寒武世 (508~502Ma 之间), 是保山地块核桃坪矿集区的重要矿床。目前对金厂河多金属矿床的研究多侧重于年代学、成矿物质来源、流体包裹体、同位素等, 而对于矽卡岩矿物学与地球化学研究则相对薄弱。黑柱石是一种含 Ca-Fe 的岛状硅酸盐矿物, 为少见的矽卡岩矿物, 多与铅锌矿、磁铁矿密切共生。现阶段, 国内外主要以黑柱石的结构构造和稳定性能等研究为主, 未对其蕴含的地球化学信息做更深入的研究, 可能会掩盖其中的地质过程的认知, 忽略了黑柱石在金属成矿作用的联系。故为厘清金厂河矿区黑柱石成矿过程中与铅锌铁铜多金属成矿作用的关系, 我们选取了产出于不同蚀变带中的黑柱石为研究对象, 利用电子探针和 LA-ICP-MS 原位微区分析技术研究了黑柱石的矿物地球化学成分, 在此基础上进一步探讨黑柱石的成因机制、分带性及其铅锌铁铜成矿的关系。研究结果表明: (1) 金厂河多金属矿区黑柱石含锰黑柱石及锰质黑柱石, 其化学简式为:

$\text{Ca}_{0.95-1.08}(\text{Fe}_{0.87-1.97}\text{Mn}_{0.08-0.36}\text{Mg}_{0.01-0.06})_{1.89-2.03}^{2+}(\text{Fe}_{0.82-1.04}\text{Al}_{0.01-0.03})_{0.88-1.15}^{3+}[\text{Si}_{1.94-2.08}\text{O}_7]\text{O}(\text{OH})$, 产于铅锌矿体中的黑柱石具有贫铁、富锰的特征, 产于磁铁矿体中的黑柱石具有富铁、贫锰的特征, 与 Mn^{2+} - Fe^{2+} 等离子替换机制有关; (2) 具有三种典型的黑柱石矿物组合类型: 晚期矽卡岩阶段以黑柱石+磁铁矿+石榴子石+辉石矿物组合为主, 退蚀变阶段以黑柱石+磁铁矿+黄铁矿+黄铜矿矿物组合为主, 石英-硫化物阶段则为黑柱石+方铅矿+闪锌矿+黄铜矿的矿物组合; (3) 区内三个蚀变带均产出黑柱石, 与金属矿化带耦合, Pb-Zn 矿化带及 Cu 矿化带中产出锰质黑柱石, Fe 矿化带则为含锰黑柱石, 其存在由矽卡岩内带向外带交代的趋势, 黑柱石为金厂河矿区间接找矿标志; (4) 黑柱石稀土元素配分模式与石榴子石类似, 一定程度上保留了石榴子石的稀土元素特征; 此外, 黑柱石在不同阶段中成矿元素含量均有不同, Zn、W 含量会有明显的差别, Cu、Pb 含量没有很大的跨度变化。这些研究结果为我们认识金厂河矿床的成矿作用过程提供了新的地质地球化学依据, 对认识成矿作用理论和实际资源勘查具有重要的价值。

基金项目: 滇西保山地块金厂河铁铜铅锌多金属矿床成矿规律研究 (HZ2021F0500A)、国家自然科学基金项目 (41862009)、云南省基础研究计划项目 (2019FB062、2019FA018)、云南省万人计划“青年拔尖人才”专项 (20190028)

第一作者简介: 陆波德 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 矽卡岩矿物研究. E-mail: 2250892638@qq.com

*通信作者简介: 刘学龙 (1983-), 教授, 研究方向: 从事云南三江地区地质矿产研究及矿床学教学工作. E-mail: xuelongliu@foxmail.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

川西简阳地区二叠系火山碎屑岩中方柱石矿物的发现及成岩指示

李月娥, 刘小洪*, 冯明友, 王委委, 岳怀海

西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500

火山碎屑岩中特殊矿物可揭示构造/成岩流体活动。在详细岩心观察基础上, 利用薄片鉴定、X 射线衍射、电子探针、包裹体均一温度及成分测试等手段对四川盆地西部二叠系火山碎屑岩开展精细研究, 重点对方柱石矿物学及蚀变特征分析其成因及演化, 进而探讨成岩环境演化, 为火山碎屑岩储层成因机理研究提供理论依据。

岩心观察表明, 岩石类型主要为角砾熔岩, 除见方柱石巨晶矿物外, 还可见玄武岩等中基性岩岩屑、塑性浆屑、塑性岩屑、长石晶屑等。

显微镜下观察显示, 手标本中宏观可见暗色网状细脉; 方柱石主要呈半自形, 绕过楣石细脉生成或局部将脉体断开; 方柱石被石英、钠长石、楣石、重晶石、方解石、绿泥石等矿物交代或溶蚀-再充填, 仅剩矿物假象。

全岩及黏土矿物 X 衍射分析表明, 岩石中石英含量少, 矿物成分主要为钠长石及绿泥石, 同时含有较多的楣石; 黏土矿物全为绿泥石。

电子探针分析结果显示交代方柱石的石英普遍含有少量 CaO、FeO 以及 Al₂O₃ 等组分; 以条带状产出的微晶楣石以及充填长石溶孔的楣石中均含有一定量的 Al₂O₃、FeO 以及 BaO 等组分, 但充填长石溶孔的楣石含相对较低的 TiO₂ 及较多的 Al₂O₃; 与楣石共同充填孔隙的板条状钠长石、具方沸石假象的钠长

石均为钠长石 (Ab) 大于 99% 的纯钠长石, 仅含少量钾长石 (Or)、钙长石 (An) 组分; 重晶石中普遍含少量 SrO、FeO 以及 SiO₂ 等组分, 显示 Sr、Fe、Si 等类质同象替代元素含量相对较高。

方柱石是一种富含挥发分、具架状结构的钙铝硅酸盐矿物, 成分基本介于 Na₄Al₃Si₉O₂₄Cl (Ma) 和 Ca₄Al₆Si₆O₂₄CO₃ (Me) 两个端员之间, 常作为基性原岩中斜长石经高温气交代作用产物, 方柱石同时是早期 (高温) 大部分挥发分 (如 Cl、CO₂、SO₃) 的存储介质。

综合以上研究表明: (1) 川西简阳地区二叠系火山碎屑岩中出现的方柱石矿物主要以巨晶产出, 晶内矿物及岩石包裹体发育; (2) 方柱石形成于微晶楣石之后——为岩浆期后阶段基性原岩中斜长石经高温气交代作用的产物, 高温气交代作用同时在下部玄武岩地层中形成电气石、方柱石等富含挥发性组分矿物; (3) 方柱石受二次热液流体交代蚀变作用后形成石英、钠长石等矿物、仅保留原矿物假象, 孔隙中的石盐、重晶石为方柱石遭受蚀变后的产物, 淡水与富钠热液流体的混合导致了重晶石矿物的沉淀; (4) 方柱石矿物的硅化及热液溶蚀、富钠质基质矿物的钠长石化增加了孔隙体积, 有利于后期热液流体进入, 多期次、多来源热液流体蚀变作用最终形成了以微孔隙为主要储集空间的火山碎屑岩储层。

基金项目: 国家科技重大专项“四川盆地二、三叠系构造~沉积演化及储层形成机制研究”(2016ZX05007004-001); 国家自然科学基金青年基金项目“火山岩储层中多种自生矿物共生理理及流体示踪意义”(编号 4120219);

第一作者简介: 李月娥 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 储层地质学. E-mail: 2969333428@qq.com

*通信作者简介: 刘小洪 (1980-), 副教授, 研究方向: 储层成岩作用方面的教学和研究工作. E-mail: liuxiaohong_swpu@163.com

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

黄铁矿硫的来源及成因

杨文霞^{1, 2}, 桂丽黎^{1*}, 鲁雪松¹, 卓勤功¹, 李传新², 陈玮岩¹

1. 中石油勘探开发研究院盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

黄铁矿是富有机质页岩沉积的特征矿物,是恢复沉积环境的重要指标,也可以指示页岩的含油气性。研究样品取自高泉背斜白垩系清水河组底部砂砾岩岩心,包括高泉 5 井 4 块、高 101 井 1 块以及 GHW001 井 1 块。采用显微镜、扫描电镜观察、拉曼光谱、以及硫同位素、微量元素测试分析等,研究黄铁矿的产状、成因、形成环境及过程。

四棵树清水河组储层中黄铁矿普遍发育,形态类型丰富多样,总体上可以分为三类:块状充填、脉状充填和不定形状充填。同时,依据原位硫同位素值可以将高泉地区黄铁矿可以分为两类:第一类为 $-40\text{‰} \sim -30\text{‰}$,第二类为 $-30\text{‰} \sim -10\text{‰}$;块状黄铁矿硫主要来自于沉积硫,但是由于黄铁矿的形成除了受硫的控制外,还受体系中活性铁的控制,这就导

致了硫同位素在一定范围内波动。不定形黄铁矿经过后期油气充注以及不同阶段微生物硫酸盐还原作用的改造,导致硫同位素变低,硫源可能为有机质硫。

沉积成因黄铁矿 $\text{Co/Ni} < 1$; 岩浆热液成因黄铁矿的 Co/Ni 比值介于 1~5 之间; 变质热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值更接近于沉积成因的黄铁矿,一般 < 1 ; 与火山岩有关的矿床中黄铁矿 Co 、 Ni 含量较高, Co/Ni 大于 5 [27-29]。从两类黄铁矿的 Co/Ni 比可以看出,第一类黄铁矿主要为沉积成因的特征,第二类黄铁矿则表现为热液成因的特征。结合镜下观察、成分分析、及硫同位素分析,第一类黄铁矿主要是早期充填在裂隙中的块状黄铁矿,为沉积成因,主要受到孔隙水的控制;第二类黄铁矿主要是晚期充填在裂隙中脉状、不定形黄铁矿,主要以热液成因为主。

基金项目: 中国石油科技开发项目(2021DJ0105, 2021DJ0203, 2021DJ0303); 国家自然科学基金(No.42172164, No.42002177)。

第一作者简介: 杨文霞(1996-), 硕士研究生, 研究方向: 油气成藏. E-mail: 1513688734@qq.com

*通信作者简介: 桂丽黎(1986-), 高级工程师, 研究方向: 油气成藏年代学分析与成藏综合研究. E-mail: gll@petrochina.com.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

滇东南那丹锑矿床方解石 LA-ICP-MS 微量及 稀土元素地球化学特征

彭旋¹, 罗开^{1,2*}

1. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500;

2. 云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 昆明 650500

华南锑矿带位于华夏板块与扬子板块交汇处, 是华南大面积低温成矿域的重要组成部分。该成矿带发育 >200 个锑矿床(点), 已探明资源量占全球的 55%。近二十年, 华南锑矿带在成矿作用与成矿预测方面的研究已取得深入认识和重要突破。然而, 由于缺乏精细的矿物学和微区地球化学研究, 其成矿流体性质及热液系统演化过程依旧较为薄弱, 严重制约了对锑成矿过程的深入理解。云南那丹锑矿床是华南锑矿带内代表性矿床之一, 其主要脉石矿物方解石的形成贯穿整个成矿过程, 并携带了丰富的成矿信息。因此, 本文拟以那丹锑矿的热液方解石为载体, 开展系统的矿物学和矿物化学工作, 以期精细刻画整个流体成矿过程, 完善区域内锑成矿模式。

根据矿物共生组合以及穿插交代关系, 将热液方解石划分为 3 期。早期方解石 (Cal-I) 主要为角砾, 被后期方解石脉包裹。中期方解石 (Cal-II) 以中粒自形 (8~10mm) 为主, 与针状 (<0.2mm)、柱状 (1.5~3.0mm) 辉锑矿共生。晚期方解石 (Cal-III) 多呈细粒他形 (3~5mm), 不与辉锑矿共生, 以脉状集合体形式穿插或包裹早期方解石。激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 LA-ICP-MS 微量分析结果表明, 那丹锑矿床 3 期方解石在 Fe、Mn、Sr、Ba 等微量元素含量上有较大变化, 在 Fe-Mn、Sr/Ca-Ba/Ca 和

Y/Ho-La/Ho 图解上变化范围也有差异, 暗示流体演化过程存在混染作用。3 期方解石稀土总量 ($\Sigma\text{REE}=0.63\times 10^{-6}\sim 52.75\times 10^{-6}$) 明显低于围岩 (坡脚组灰岩, $\Sigma\text{REE}=13.20\times 10^{-6}\sim 72.24\times 10^{-6}$), 且均显示中重稀土富集特征, 与围岩富轻稀土特征不一致, 表明成矿物质不完全来自围岩溶解, 可能与深部作用有关。其中, Cal-I 的稀土总量 ($\Sigma\text{REE}=0.94\times 10^{-6}\sim 5.67\times 10^{-6}$) 明显低于 Cal-II ($\Sigma\text{REE}=1.92\times 10^{-6}\sim 34.22\times 10^{-6}$) 和 Cal-III ($\Sigma\text{REE}=0.63\times 10^{-6}\sim 34.60\times 10^{-6}$), 暗示中晚期成矿流体与围岩的水岩反应更加强烈, 从围岩中获取更多稀土元素。另外, 3 期方解石均具有 Eu 负异常特征, 前人对热液方解石包裹体测温结果 (184.1~244.5℃) 显示成矿期温度 >200℃, 说明该矿床以热化学还原作用为主。Cal-I 的 Y/Ho 值为 42.2~58.0、Cal-II 的 Y/Ho 值为 35.0~64.3、Cal-III 的 Y/Ho 值为 38.3~52.7, 推测成矿流体早期在沉淀前与海相碳酸盐围岩或者地层水发生了混合, 而成矿中期可能有深部流体加入, 使混染加剧, Y/Ho 值变化范围急剧增大, 在成矿晚期, 混染逐渐完成, 流体趋于均一。

综上, 笔者认为那丹锑矿床 3 期方解石是同一成矿流体不同阶段的产物, 流体混合以及水岩反应等过程可能诱发成矿流体的物理化学条件 (温度、pH 等) 改变, 导致辉锑矿沉淀。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41872095, U1812402, 42172082); 研究生科研创新基金项目 (2021Z100) 联合资助

第一作者简介: 彭旋 (1997-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. E-mail: peng.nee@qq.com

*通信作者简介: 罗开 (1993-), 副教授, 研究方向: 热液矿床成矿作用. E-mail: luokai@ynu.edu.cn

• 专题 3: 成岩、成矿作用和过程的矿物学记录及新矿物研究 •

电气石主微量及硼同位素对伟晶岩岩浆-热液过程的示踪: 以阿尔泰造山带青河伟晶岩为例

郑贝琪^{1,*}, 陈斌²

1. 韶关学院旅游与地理学院, 韶关 512005;

2. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

伟晶岩岩浆演化是研究伟晶岩成岩成矿的基础问题, 但鲜有系统性报道伟晶岩岩浆侵位后组分, 尤其是挥发性组分演化。电气石以其丰富的元素组成, 作为副矿物广泛的产出, 较宽的温度压力适应性, 耐酸耐碱, 成功被应用于示踪岩浆-热液过程 (Trumbull et al., 1999; Yang and Jiang, 2012; Hu and Jiang, 2020)。

中国阿尔泰造山带位于中亚造山带西南部, 区域内红山嘴-诺尔特断裂, 阿巴宫-库尔提断裂, 特斯巴汗断裂和额尔齐斯断裂将阿尔泰造山带分为北阿尔泰、中阿尔泰、南阿尔泰和琼库尔构造单元。区域内分布十余万条伟晶岩脉, 主要集中在中阿尔泰和琼库尔构造单元, 是我国稀有金属 Li-Be-Nb-Ta, 宝石级电气石, 绿柱石及白云母矿产的重要产地 (邹天人等, 2006)。青河伟晶岩矿集区位于中阿尔泰构造单元东南侧, 其发育大量典型不成矿伟晶岩。这些伟晶岩普遍分带性差, 以脉状或透镜状侵入到上奥陶纪哈巴河群云母片岩。本研究选取该地区一条较为罕见的分带性良好的伟晶岩脉, 该伟晶岩脉从结构上可划分为边缘带、过渡带和核部带, 各分带均产出电气石。通过细致的岩相学观察, 将其划分为原生的岩浆成因

边缘带、过渡带和核部带电气石, 以及次生的岩浆期后热液电气石。对这些电气石进行了原位主微量及硼同位素分析测试。

所有的电气石都属于碱基电气石, 进一步划分为铁电气石固溶体系列。大部分电气石都遵循 (Na+Mg) (Al+Xvac)₋₁、FeMg₋₁ 和 MnMg₋₁ 演化关系, 但核部带电气石则与其他电气石不同, 它表现出 Fe 和 Mg 正相关性及 Fe 和 Al 负相关性, 指示岩浆演化晚期氧逸度增加。氧逸度增加可能归因于晚期核部带水富集。水逐渐饱和并导致了 Si、Mg、Co、Pb、Sr 核部带电气石的富集和 Al、Fe、Mn、Li 的亏损。此外, 核部带电气石具有正 Eu 异常, 是由于 Ca²⁺在核部带的少量汇聚 (Jahns, 1982)。

边缘带和过渡带电气石具有相似的硼同位素组成 -14.0 ~ -12.2‰, 但核部带硼同位素组成却明显更轻 (-14.4‰ ~ -13.3‰)。重硼同位素 (¹¹B) 更倾向于富集在流体相 (Meyer et al., 2008), 核部带电气石重硼同位素亏损指示伟晶岩岩浆晚期出现流体出溶。根据瑞利分馏模拟, 出溶流体规模不足 10%, 小规模流体出溶可能是该伟晶岩不成矿原因之一。

第一作者简介: 郑贝琪, 博士, 讲师, 研究方向: 矿物学. E-mail: beckyzheng@sgu.edu.cn

*通信作者简介: 郑贝琪, 博士, 讲师, 研究方向: 矿物学. E-mail: beckyzheng@sgu.edu.cn