

文章编号: 1000-4734(2024)01-0043-15

西南低温成矿域 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 矿床方解石 REE 地球化学特征及找矿指示

付浩¹, 王加昇^{1*}, 常晋阳², 王燕³, 王博¹, 叶彬¹, 李浩宇¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004;
3. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216)

摘要: 西南大面积低温成矿域是我国 Au、Sb、Hg、Pb-Zn 等中低温热液矿床的重要基地, 各种热液矿床之间是否存在成因关系仍是一个悬而未决的科学问题。方解石是各种热液矿床的重要脉石矿物, 本文选择上述各种中低温矿种中的丫他卡林型金矿床、晴隆-巴年锑矿床、拉峨汞矿床、会泽铅锌矿床等作为典型矿床, 并对矿床中出露的成矿和非成矿期方解石进行 REE 对比研究。结果发现, 不同类型矿床成矿期方解石明显具有不同的 REE 特征, 卡林型金矿床中显示 MREE 富集, 锑矿床显示 M-HREE 富集的特征, 说明金、锑矿床的成矿流体来源可能与深部隐伏花岗岩体有关; Pb-Zn-Hg 矿床整体显示 LREE 富集, Hg 矿床与标准海相碳酸盐岩 LREE 富集的配分模式一致, 但 Pb-Zn 矿床中轻稀土元素内部具有 La、Ce 亏损的左倾特征, 说明 Hg 矿床成矿流体可能主要来自于大气降水对赋矿海相碳酸盐岩的溶解作用, 铅锌矿床成矿流体可能来自于盆地卤水浸取基底地层及其围岩所形成的混合流体。无论何种矿种, 与成矿无关的方解石均具有 LREE 富集的特征, 方解石的上述 REE 配分模式特征也可作为各种类型热液矿床的重要找矿标志。

关键词: Au-Sb-Hg-Pb-Zn 矿床; 方解石; 稀土元素; 西南大面积低温成矿域

中图分类号: P578.61; P595; P618.2

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2024.44.012

第一作者: 付浩, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: fuhao1202@sina.cn

The REE geochemical characteristics of calcites from Au-Sb-Hg-Pb-Zn deposits in the southwestern China and their prospecting implications

FU Hao¹, WANG Jiasheng^{1*}, CHANG Jinyang², WANG Yan³, WANG Bo¹, YE Bin¹, LI Haoyu¹

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541004, China; 3. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China)

Abstract: The large areal low-temperature metallogenic domain in the southwestern China is an important base for Au, Sb, Hg, Pb-Zn and other medium-low temperature hydrothermal deposits in China. Whether there is genetic relationship among those various hydrothermal deposits is still an unresolved scientific issue. Calcite as an important gangue mineral is widely distributed in various types of hydrothermal deposits. In this paper, the Yata Carlin-type gold deposit, Qinglong and Banian antimony deposits, La'e mercury deposit and Huize lead-zinc deposit in the above region are selected as research objects of typical deposits to comparatively study characteristics of rare earth elements (REE) of their calcites collected from various veins of different mineralization and non-mineralization periods. The results show that calcites of metallogenic periods in different types of deposits have obviously different REE patterns. Calcites of the Carlin-type gold deposits show enrichment characteristics of the MREE and those of antimony deposits have enrichment characteristics of

收稿日期: 2023-09-09

基金项目: 云南省科技计划项目 (编号: 202202AG050006); 国家自然科学基金面上项目 (编号: 41772070); 云南省万人计划青年拔尖人才项目 (编号: 云人社通[2020]150 号)

* 通信作者, E-mail: jiashengwang@126.com

the M-HREE, indicating that the ore-forming fluids of gold and antimony deposits could be sourced from the magma of deep concealed granite. Calcites of the Pb-Zn-Hg deposits generally show enrichment characteristics of the LREE. In addition, the REE distribution patterns of calcites in Hg deposit are consistent with those of the standard marine carbonate rocks, whereas those of calcites in Pb-Zn deposit are characterized with the left-inclined REE patterns with the La and Ce depletion. These characteristics indicate that the ore-forming fluid of mercury deposit could be mainly sourced from the dissolution of marine carbonate rocks by meteoric water, but the ore-forming fluid of lead-zinc deposit could be sourced from the mixed fluid through the leaching of basement strata and wall rocks by the basinal brine. No matter what kinds of ore deposits, calcites which are unrelated to mineralization have the LREE enrichment characteristics of REE distribution patterns. The above REE distribution pattern characteristics of calcites can also be used as important indicators for prospecting various types of hydrothermal deposits in the area.

Keywords: Au-Sb-Hg-Pb-Zn deposits; Calcite; Rare earth elements; The large areal low temperature metallogenic domain in the southwestern China

中国西南大面积低温成矿域及美国中西部大面积低温成矿域是目前世界上最为著名的 2 大低温成矿域, 以广泛发育卡林型金矿床和锑、汞、砷、铅、锌等低温矿床 (200~250℃ 及以下) 为特征^[1]。我国西南低温成矿域主要分布在川、滇、黔、桂、湘等省份, 主要包括川滇黔 Pb-Zn 矿集区、右江盆地 Au-Sb-As-Hg 矿集区和湘中盆地 Sb-Au 矿集区, 相较于美国低温成矿域具有更多的矿床类型^[2-3]。在该成矿域中, Au、Sb、As、Hg 等一系列地球化学性质相近的低温元素, 在同一流体中相互依存, 共同迁移、沉淀后形成的各种类型的矿床, 在时间和空间上相互伴生, 且在同一矿床内部, 也常具有 Au-Sb-As-Hg 的分带特征, 表现出共生特征。同时, 在成矿过程中, 由于成矿元素自身地球化学性质及成矿环境等存在的差异, 各种成矿元素又可能发生不同差异性沉淀, 形成相对独立的矿带或矿集区, 并且其所形成的矿床在数量和储量上相对于其他成矿元素形成的矿床在矿带或矿集区占据主要地位, 使得共生的矿床之间又表现出分异性^[2]。众多学者对于西南低温成矿域中各类矿床的成矿流体、物质来源及矿床成因^[4-5]、成矿时代^[2,4,6-8]、成矿动力学背景^[2,7]等方面做了详细的研究, 但以往研究大多集中在某一特定的矿床或矿种, 对于各种热液矿床之间有无成因联系还缺乏深入的认识。

稀土元素 (REE) 由于其独特的地球化学性质, 在地质作用过程中, 基本不可能以简单的离子形式在热水溶液中迁移, 而是常作为一个整体 (络合物) 进行迁移和聚集^[9-10]。所以热液 (或从热液中沉淀的) 矿物的 REE 可以反映流体的来源 (如, 源岩、源流体等) 和物理化学条件 (如, 压力、温度、氧化状态、pH 值等) 的变化^[10]。碳酸盐中, REE 通过 Ca^{2+} 与 REE^{3+} 之间发生置换从而进入碳酸盐的晶体, 同时除了晶体溶解之外, 其它过程基本不可能破坏碳酸盐的稀土元素配分模式这个地质记录密码。因此, 碳酸盐矿物 REE 特征被广泛用于指示流体-岩石相互作用和成矿过程^[9-15]、判断氧化还原环境^[16-17]、识别流体来源和性质^[18-20]等。方解石作为热液过程的重要产物, 在西南低温成矿各种热液矿床中广泛发育, 是 REE 的重要载体。因此本文拟以西南大面积低温成矿域 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 等热液矿床中的方解石为研究对象, 对其开展 REE 地球化学研究, 不但为矿床流体来源、元素共生分异等问题进行约束, 同时也为找矿勘查提供启示。

1 地质概况

西南大面积低温成矿域位于扬子地块西南缘和华夏地块西北缘, 其基底为元古代的变质岩, 盖层为显生宙的沉积岩 (以发育有黑色岩系的碳酸盐岩-细碎屑岩为主)^[7]。西南低温成矿域自古生代以来, 长期处于相对稳定状态, 深源的基性岩浆活动相对于酸性的花岗岩浆活动较强、较发育^[1], 其大规模的低温成矿时代主要集中在晚印支期 (230~200 Ma) 和燕山期 (160~130 Ma)^[2-3], 成矿域内矿床受构

造控制明显, 多分布在背斜和穹窿轴部的破碎带、不同方向的断裂交汇处以及“背斜加一刀”的构造系统中。Pb-Zn 矿床多赋存于震旦系、石炭系和二叠系白云岩、白云质灰岩中; 卡林型 Au 矿床多发育在三叠系的泥质灰岩、砂岩中; Hg 矿床多发育在寒武系、奥陶系灰岩中; Sb 矿床多发育在泥盆系、中-晚二叠统的碳酸盐岩、钙质碎屑岩、燧石岩和火山碎屑岩中^[2-4,7]。本文选取右江盆地 Au-Sb-As-Hg 矿集区及周边的丫他 Au 矿床、晴隆和巴年 Sb 矿床、拉峨 Hg 矿床以及川滇黔 Pb-Zn 矿集区的会泽 Pb-Zn 矿床等 5 个典型矿床进行对比研究 (图 1)。

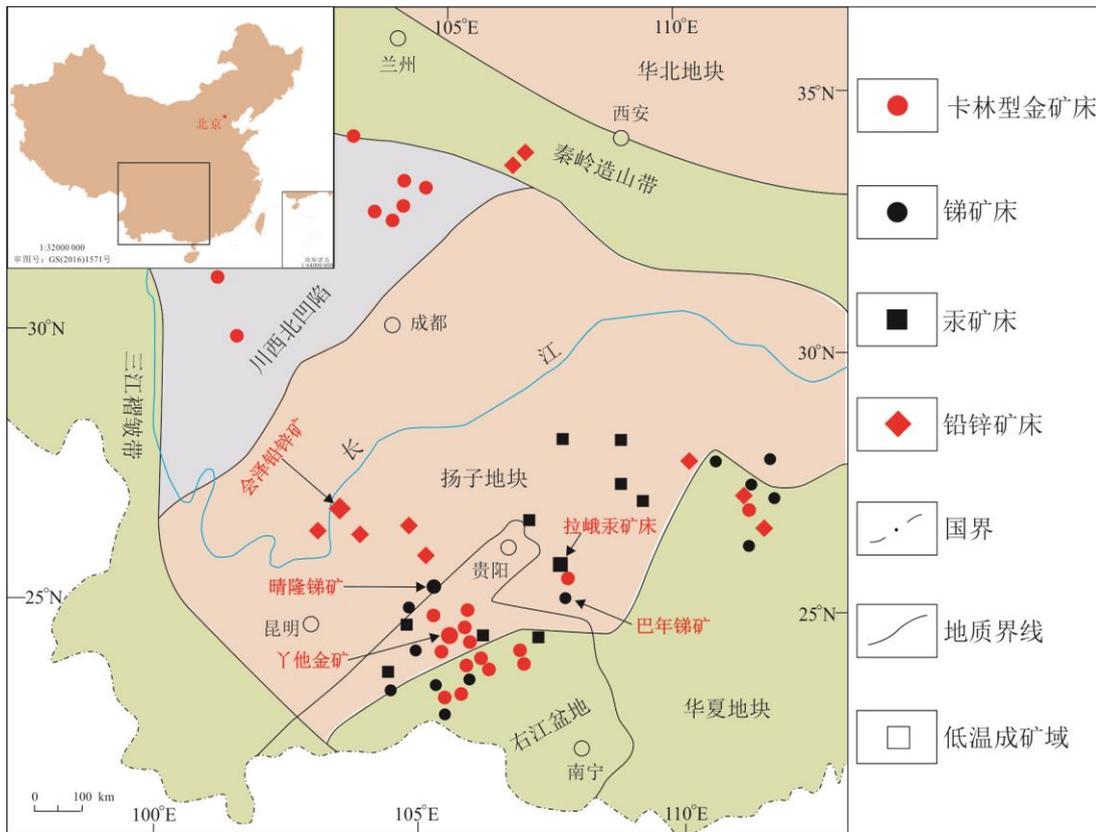


图 1 西南大面积低温成矿域典型矿床分布图 (据文献[21]修编)

Fig. 1. Distribution of typical deposits in the large areal low temperature metallogenic region in the SW China.

丫他金矿床地处右江褶皱带册亨一望谟构造变形区, EW 向构造同矿床关系密切。矿区出露的地层主要为中三叠统的新苑组 (T_{2x}) 和边阳组 (T_{2b}), 赋矿岩石为中三叠统新苑组 (T_{2x}) 的杂砂岩和黏土岩; 出露的岩浆岩主要为玄武岩、辉绿岩等偏碱性超基性岩。矿体主要呈透镜状、脉状、似层状产出, 矿石矿物主要有含砷黄铁矿、毒砂、辉锑矿等, 脉石矿物可见石英、方解石、白云石等^[22]。

巴年锑矿床位于扬子地台—黔南台陷—贵定南北向构造变形区中的独山箱状背斜区, NNW 向、NE 向构造与矿床关系密切。矿区出露地层主要为中-下泥盆统, 赋矿岩石主要为中泥盆统独山组 (D_{2d}) 下段的灰岩。矿体呈似层状、透镜状产出, 矿石矿物主要有辉锑矿、黄铁矿等, 脉石矿物主要有方解石、白云石等^[20]。

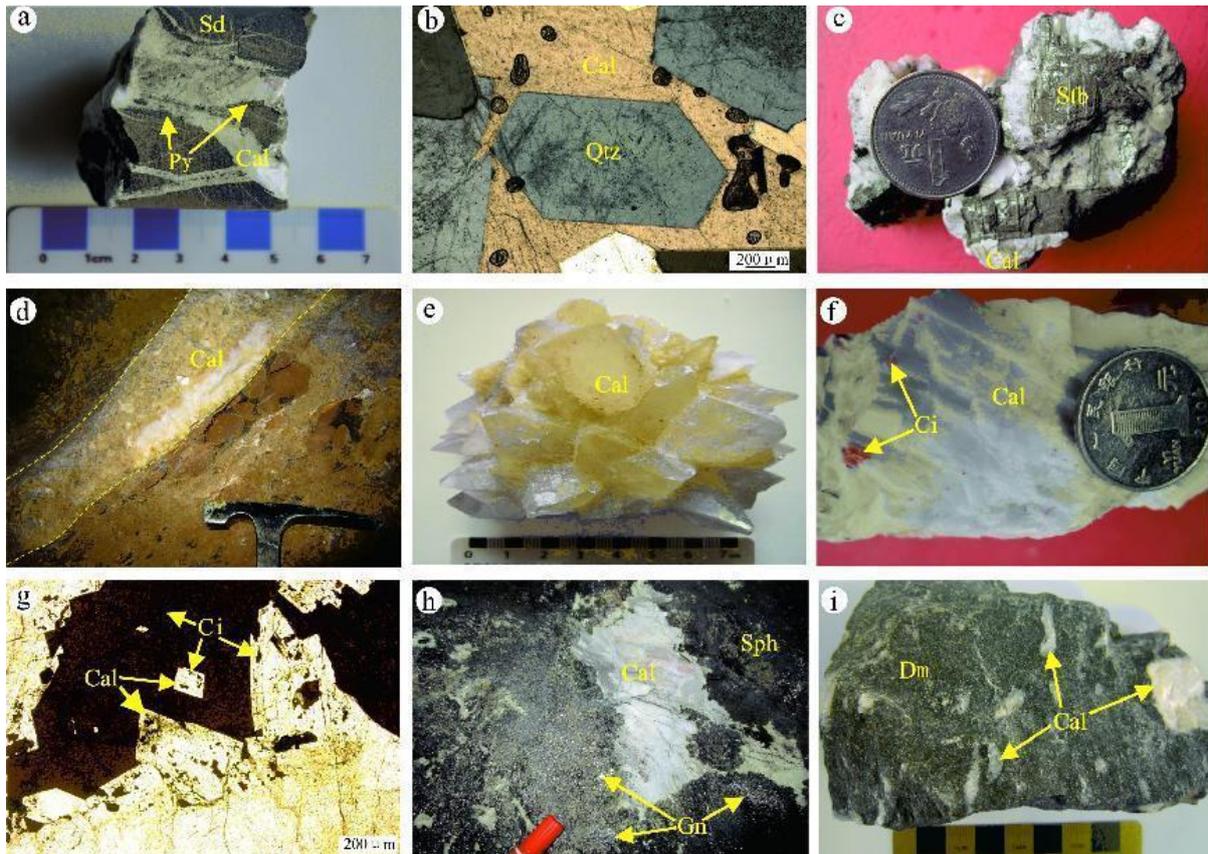
晴隆锑矿床位于扬子地块西南缘南盘江—右江盆地的黔西南凹陷^[23], NE 向构造同矿床关系密切, 主要由大厂、水井湾、滴水岩、固路、西舍等矿段组成。矿区出露有中二叠统茅口组、大厂层、峨眉山玄武岩及龙潭组地层, 赋矿地层主要为下二叠统茅口组灰岩的顶部、上二叠统峨眉山玄武岩的底部以及其间的火山碎屑岩组成的“大厂层 (P_{2d})”。矿体主要呈层状、似层状、透镜状产出, 矿石矿物主要是辉锑矿、黄铁矿等, 脉石矿物主要有萤石、石英、方解石等^[4]。

拉峨汞矿床位于江南古陆西缘与其边缘褶皱带的结合部位,受川黔经向系及新华夏系的复合构造控制,近SN向的断裂构造与矿床关系密切。矿区出露地层有寒武系、奥陶系,赋矿岩石主要为下奥陶统锅塘组第二段(O_{1g2})的灰岩,矿区内目前尚未发现岩浆岩出露。矿石矿物主要有辰砂、雄黄、雌黄、黄铁矿等,脉石矿物主要有方解石、白云石、重晶石等^[24]。

会泽铅锌矿床位于扬子板块西南缘,川滇黔铅锌银多金属成矿域的中南部,处于小江深断裂带和昭通—曲靖隐伏深断裂带间的北东构造带、南北构造带及北西紫云—垭都构造带的构造复合部位;SN向、NE向、NW向构造与矿床关系密切,主要由矿山厂、麒麟厂、银厂坡等矿段组成。矿区发育有震旦系、寒武系、中-上泥盆统、石炭系和二叠系地层,赋矿岩石为早石炭统摆佐组(C_{1b})白色厚层状白云岩。矿区范围内岩浆活动主要为海西期晚期的峨眉山玄武岩。矿体呈脉状、透镜状、囊状产出。矿石矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,脉石矿物可见白云石、方解石、重晶石等^[25]。

2 样品采集及测试

丫他金矿床3件成矿期的方解石样品均采自含矿钻孔,成矿期方解石呈白色脉状,可见细脉状载金矿物黄铁矿与方解石共生(图2a),镜下可见自形程度较高的石英被方解石包围(图2b)。巴年锑矿床引用了Wang等(2012)^[20]中的6件成矿期方解石样品数据,方解石呈淡粉色—粉色的团块状,与柱状、针状的辉锑矿紧密共生(图2c)。晴隆锑矿床6件成矿期后的方解石样品采自大厂矿段,沿成矿后构造裂隙呈大面积梳状分布,方解石晶体自形程度好,呈白色、半透明的粒状、晶簇(图2d、e)。拉峨汞矿床6件成矿期后的方解石样品采自大厂矿段,沿成矿后构造裂隙呈大面积梳状分布,方解石晶体自形程度好,呈白色、半透明的粒状、晶簇(图2f、g)。会泽铅锌矿床6件成矿期后的方解石样品采自大厂矿段,沿成矿后构造裂隙呈大面积梳状分布,方解石晶体自形程度好,呈白色、半透明的粒状、晶簇(图2h、i)。



Cal—方解石; Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Py—黄铁矿; Ci—辰砂; Qtz—石英; Dm—白云岩; Sd—砂岩
a、b. 丫他卡林型金矿床; c. 巴年锑矿床; d、e. 晴隆锑矿床; f、g. 拉峨汞矿床; h、i. 会泽铅锌矿床

图2 方解石野外、手标本及显微镜下照片

Fig. 2. Photographs microphotographs for calcites in hand specimens and veins of ores.

状 (图 2d, e)。拉峨汞矿床引用了韩振春等 (2017) [24] 中的 8 件成矿期方解石样品数据, 方解石呈白色、乳白色的团块状, 与红色浸染状辰砂共生 (图 2f), 镜下可看到辰砂被包裹于方解石中 (图 2g)。会泽铅锌矿床 3 件成矿期样品采自矿山厂矿段 1274 中段, 4 件围岩中自生的方解石样品采自地表宰格组地层, 成矿期方解石呈白色的团块状, 与方铅矿、闪锌矿紧密共生 (图 2h), 围岩自生的方解石呈白色、乳白色的团块状 (图 2i)。

先将所采集的方解石样品碎成小块, 并手工挑选出纯净的方解石, 之后粉碎至 60 目, 并用超纯水或酒精冲洗粉碎后的方解石, 去除杂质, 在低温 ($<60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 条件下烘干, 在双目镜下手工挑选干净透明的方解石, 最后用玛瑙研钵将挑纯的方解石样品研磨至 200 目以下。方解石的 REE 测试分析在广州澳实分析检测集团澳实矿物实验室进行, 将试样加入到硼酸锂 (LiBO_2) 熔剂中, 混合均匀, 在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的熔炉中熔化。当熔液冷却后, 加入一定体积的硝酸定容, 再用 PerkinElmer Elan6000 电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 对溶液进行分析, 分析误差小于 10%。

3 分析结果

丫他金矿床、巴年、晴隆锑矿床、拉峨汞矿床、会泽铅锌矿床中不同期次方解石的稀土元素 (REE) 含量及其特征参数见表 1, 方解石样品的稀土元素标准化采用 Sun 和 McDonough [26] 所测球粒陨石数据。由表 1 可知, 不同矿种成矿期方解石及同一矿种不同期次/阶段方解石样品的稀土元素 (REE) 特征均存在显著差异。

表 1 方解石样品特征、稀土元素含量 ($\mu\text{g/g}$) 及参数

Table 1. Characteristics, REE contents and parameters of calcite samples

矿种	矿床	样品号	产状	颜色	期次	La	Ce	Pr	Nd	资料来源
Au	丫他	YT-2	脉状	白色		0.15	0.42	0.07	0.42	
		YT-4	脉状	白色	成矿期	0.18	0.64	0.14	1.07	本文
		YT-5	脉状	白色		0.07	0.17	0.03	0.21	
Sb	巴年	BN-9-2	团块状	粉红色		<0.50	1.20	0.20	1.00	
		BN-17	团块状	粉红色		<0.50	0.50	0.09	0.60	
		BN-22	团块状	粉红色	成矿期	<0.50	<0.50	0.06	0.40	[20]
		BN-23	团块状	粉红色		<0.50	<0.50	0.07	0.40	
		BN-26-2	团块状	粉红色		<0.50	<0.50	<0.03	0.10	
		BN-27	团块状	粉红色		<0.50	<0.50	0.06	0.40	
	晴隆	QL-1	晶簇状	白色		1.01	1.33	0.22	0.99	
Hg	拉峨	QL-2	晶簇状	白色		0.56	0.74	0.13	0.61	
		QL-3	晶簇状	白色	成矿期后	0.41	0.52	0.08	0.38	本文
		QL-10	团块状	白色		0.44	0.53	0.07	0.36	
		QL-11	团块状	白色		1.53	2.11	0.37	1.95	
		QL-12	团块状	白色		1.20	1.09	0.17	0.79	
Pb-Zn	会泽铅锌矿	LE-2	脉状	白色		6.30	11.00	1.20	4.00	
		LE-3	脉状	白色		14.00	24.00	2.50	8.10	
		LE-4	脉状	白色		8.80	18.00	2.10	7.10	
		LE-7	脉状	白色	成矿期	6.70	12.00	1.30	4.40	[24]
		LE-8	脉状	白色		13.00	27.00	3.00	10.00	
		LE-11	脉状	白色		13.00	25.00	2.80	9.20	
		LE-12	脉状	白色		9.70	18.00	2.20	6.70	
		LE-13	脉状	白色		5.80	9.70	1.10	3.80	
Pb-Zn	会泽铅锌矿	1274-1	团块状	粉红色		1.74	7.16	1.28	6.42	
		1274-2	团块状	白色	成矿期	12.52	57.18	10.59	54.45	本文
		1274-3	团块状	白色		6.84	35.90	7.24	40.02	

续表 1

矿种	矿床	样品号	产状	颜色	期次	La	Ce	Pr	Nd	资料来源			
Pb-Zn	会泽铅锌矿	WW-02	团块状	白色	围岩自生	2.60	5.64	0.97	4.69	本文			
		WW-19	脉状	粉红色		0.44	1.25	0.18	0.86				
		WW-76	脉状	粉红色		0.32	0.58	0.07	0.29				
		WW-79	团块状	粉红色		1.80	5.11	0.61	2.91				
矿种	矿床	样品号	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Sb	巴年	BN-9-2	0.34	0.20	1.50	0.26	1.57	0.27	0.59	0.06	0.76	0.11	9.50
		BN-17	2.21	1.87	6.67	1.00	5.73	0.99	2.37	0.29	0.73	0.10	12.00
		BN-22	0.43	0.34	1.72	0.27	1.56	0.26	0.60	0.06	0.95	0.13	18.00
		BN-23	0.50	0.23	1.20	0.25	1.60	0.31	0.86	0.12	1.60	0.24	25.00
		BN-26-2	0.50	0.25	1.40	0.31	2.00	0.38	1.00	0.13	0.43	0.05	6.70
		BN-27	0.59	0.35	1.90	0.45	2.80	0.54	1.40	0.17	1.00	0.14	17.00
	晴隆	QL-1	0.64	0.50	2.70	0.67	4.10	0.85	2.20	0.32	0.08	0.01	2.48
		QL-2	0.14	0.12	0.70	0.17	1.10	0.21	0.56	0.08	0.05	0.01	1.81
		QL-3	0.57	0.35	1.00	0.44	2.80	0.55	1.40	0.19	0.03	0.00	1.37
		QL-10	0.24	0.10	0.31	0.04	0.25	0.04	0.11	0.01	0.03	0.00	1.28
		QL-11	0.16	0.07	0.21	0.03	0.17	0.03	0.08	0.01	0.22	0.03	15.40
		QL-12	0.10	0.04	0.15	0.02	0.11	0.02	0.05	0.00	0.07	0.01	3.68
Au	丫他	YT-2	0.10	0.04	0.14	0.02	0.11	0.02	0.05	0.00	0.35	0.04	11.19
		YT-4	0.62	0.30	1.08	0.16	0.93	0.17	0.42	0.04	1.85	0.24	35.48
		YT-5	0.19	0.07	0.30	0.04	0.25	0.05	0.13	0.01	0.39	0.05	11.60
Hg	拉峨	LE-2	0.75	0.28	0.76	0.10	0.44	0.09	0.22	0.02	0.15	0.02	2.90
		LE-3	1.40	0.73	1.60	0.19	0.88	0.16	0.43	0.04	0.28	0.04	5.70
		LE-4	1.40	0.34	1.30	0.19	1.00	0.21	0.49	0.06	0.37	0.05	6.00
		LE-7	0.97	0.95	1.10	0.11	0.51	0.10	0.25	0.03	0.23	0.06	4.10
		LE-8	1.90	0.58	2.00	0.31	1.50	0.32	0.81	0.11	0.62	0.08	9.10
		LE-11	1.80	0.80	1.80	0.25	1.20	0.25	0.64	0.07	0.44	0.06	7.50
		LE-12	1.10	0.81	1.00	0.12	0.53	0.11	0.27	0.04	0.14	0.02	3.50
		LE-13	1.00	1.30	1.20	0.12	0.52	0.11	0.28	0.06	0.41	0.12	5.20
Pb-Zn	会泽铅锌矿	1274-1	1.47	0.36	1.58	0.20	1.05	0.18	0.43	0.05	0.23	0.03	9.89
		1274-2	11.47	2.30	10.84	1.15	5.18	0.78	1.56	0.13	0.67	0.07	45.07
		1274-3	9.58	1.40	9.57	1.12	5.35	0.83	1.77	0.16	0.79	0.08	46.14
		WW-02	1.17	0.29	1.43	0.22	1.41	0.29	0.79	0.10	0.57	0.07	14.69
		WW-19	0.18	0.04	0.17	0.02	0.12	0.02	0.05	0.00	0.04	0.00	0.92
		WW-76	0.05	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.35
		WW-79	0.77	0.31	1.06	0.15	0.84	0.15	0.35	0.04	0.23	0.03	7.83
矿种	矿床	样品号	Σ REE	Σ REE+Y	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce			
Sb	巴年	BN-9-2	8.34	17.84	3.13	5.21	0.60	-	0.91	-			
		BN-17	7.99	19.99	1.94	6.05	0.32	-	0.91	-			
		BN-22	9.74	27.74	1.40	8.34	0.17	-	1.01	-			
		BN-23	14.29	39.29	1.61	12.68	0.13	-	1.16	-			
		BN-26-2	3.66	10.36	0.36	3.30	0.11	-	1.17	-			
		BN-27	8.90	25.90	1.38	7.52	0.18	-	1.42	-			
	晴隆	QL-1	4.74	7.22	3.89	0.85	4.58	9.06	1.12	0.69			
		QL-2	2.86	4.67	2.27	0.59	3.85	8.03	1.17	0.67			
		QL-3	1.91	3.28	1.53	0.38	4.03	9.80	1.00	0.70			
		QL-10	1.91	3.19	1.54	0.37	4.16	10.52	1.03	0.74			
		QL-11	9.93	25.33	6.88	3.05	2.26	4.99	1.12	0.69			
		QL-12	4.37	8.05	3.51	0.86	4.08	12.30	0.90	0.59			
Au	丫他	YT-2	6.24	17.43	1.60	4.64	0.34	0.31	0.86	1.00			
		YT-4	25.25	60.73	6.11	19.14	0.32	0.07	1.49	0.99			
		YT-5	6.16	17.76	1.25	4.91	0.25	0.13	1.21	0.91			

续表 1

矿种	矿床	样品号	Σ REE	Σ REE+Y	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
Hg	拉峨	LE-2	25.33	28.23	23.53	1.80	13.07	30.13	1.13	0.98
		LE-3	54.35	60.05	50.73	3.62	14.01	35.86	1.49	0.99
		LE-4	41.41	47.41	37.74	3.67	10.28	17.06	0.77	1.03
		LE-7	28.71	32.81	26.32	2.39	11.01	20.90	2.81	1.00
		LE-8	61.23	70.33	55.48	5.75	9.65	15.04	0.91	1.06
		LE-11	57.31	64.81	52.60	4.71	11.17	21.19	1.36	1.02
		LE-12	40.74	44.24	38.51	2.23	17.27	49.70	2.36	0.96
		LE-13	25.52	30.72	22.70	2.82	8.05	10.15	3.63	0.94
Pb-Zn	会泽铅锌矿	1274-1	22.19	32.08	18.44	3.75	4.91	5.37	0.72	1.18
		1274-2	168.89	213.96	148.51	20.38	7.29	13.44	0.63	1.22
		1274-3	120.67	166.81	100.98	19.69	5.13	6.18	0.45	1.25
		WW-02	20.23	34.92	15.36	4.87	3.15	3.28	0.69	0.87
		WW-19	3.40	4.32	2.97	0.43	6.85	8.45	0.76	1.07
		WW-76	1.47	1.82	1.32	0.15	9.11	11.81	0.71	0.98
		WW-79	14.34	22.17	11.51	2.83	4.07	5.73	1.03	1.20

3.1 卡林型金矿床

丫他金矿床成矿期方解石 REE 总量 (Σ REE, 不包括 Y, 下同) 为 6.16~25.25 $\mu\text{g/g}$, LREE/HREE 为 0.25~0.34, 以富集 MREE (Sm~Ho) 为特征, 稀土元素配分模式呈“弓”型 (图 3), Eu、Ce 异常不明显。

3.2 锑矿床

巴年锑矿床成矿期方解石 Σ REE (3.66~14.29 $\mu\text{g/g}$) 相对较低, LREE/HREE 为 0.11~0.60, REE 配分模式为左倾型 (图 4A), 以富集 H-MREE (Sm-Lu) 为特征, 特别是 La 和 Ce 等 LREE 强烈亏损, 甚至低于检测限, Eu 异常不明显。

晴隆锑矿床成矿期后方解石 Σ REE 为 1.91~9.93 $\mu\text{g/g}$, LREE/HREE 为 2.26~4.58, 以富集 LREE (La~Nd) 为特征, REE 配分模式为右倾型 (图 4B), Eu 异常不明显, 具有中等 Ce 负异常 (δ Ce 值为 0.59~0.74, 平均 0.68)。

3.3 汞矿床

拉峨汞矿床成矿期方解石 Σ REE 为 25.33~61.23 $\mu\text{g/g}$, LREE/HREE 为 8.05~17.27, 以富集 LREE (La~Nd) 为特征, REE 配分模式为右倾型 (图 5), 普遍显示 Eu 正异常 (δ Eu 值为 0.77~3.63, 平均 1.81), 无 Ce 异常。

3.4 铅锌矿床

会泽铅锌矿床中成矿期和围岩自生方解石 REE 特征存在一定差别, 其中成矿期方解石 Σ REE 相对较大 (Σ REE 值为 22.19~168.89 $\mu\text{g/g}$), LREE/HREE 值为 4.91~7.29, 以富集 LREE (La~Nd) 为特

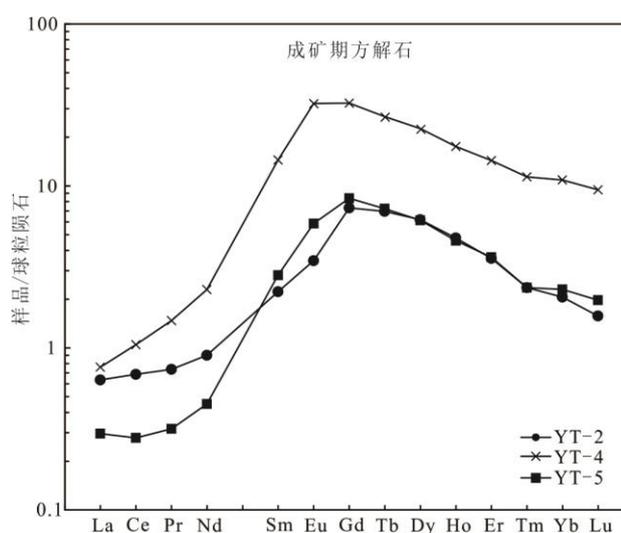


图 3 丫他金矿床热液方解石 REE 配分模式图

Fig. 3. The REE distribution patterns for hydrothermal calcites from the Yata gold deposit.

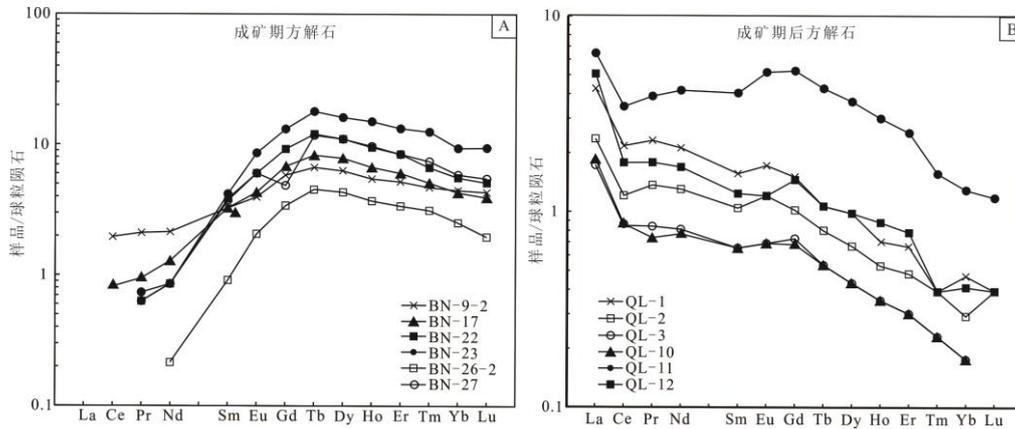


图4 巴年(A)和晴隆锑矿床(B)热液方解石REE配分模式图(巴年锑矿床数据来源于文献[20])

Fig. 4. The REE distribution patterns for hydrothermal calcites from the Banian (A) and Qinglong (B) antimony deposits.

征, REE 配分模式整体为右倾型(图 6A), 但局部 LREE 内部则具有左倾特征, 显示中等 Eu 负异常(δEu 值为 0.45~0.72, 平均 0.6)和弱的 Ce 正异常(δCe 值为 1.18~1.25, 平均 1.22)。围岩自生方解石 ΣREE 相对较低(ΣREE 值为 1.47~20.23 $\mu\text{g/g}$), 以富集 LREE (La~Nd) 为特征, LREE/HREE 为 3.15~9.11(图 6B), 有弱 Eu 负异常(δEu 值为 0.69~1.03, 平均 0.80), Ce 异常不明显, 与成矿期方解石相比, LREE 没有明显的左倾特征。

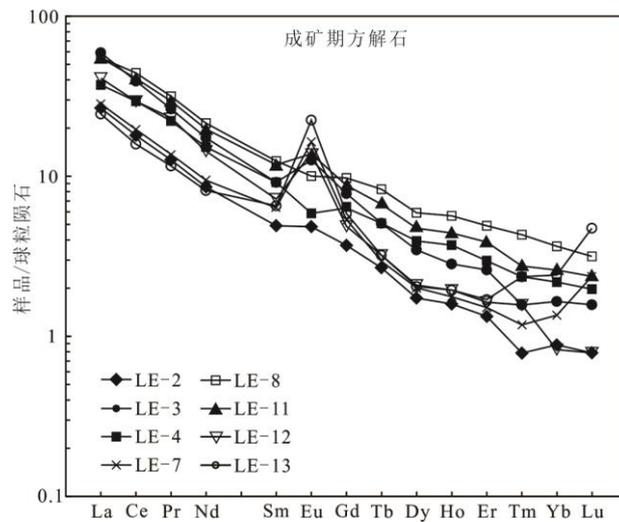


图5 拉峨汞矿床热液方解石REE配分模式图(数据来源于文献[25])

Fig. 5. The REE distribution patterns for hydrothermal calcites from the La'e mercury deposit.

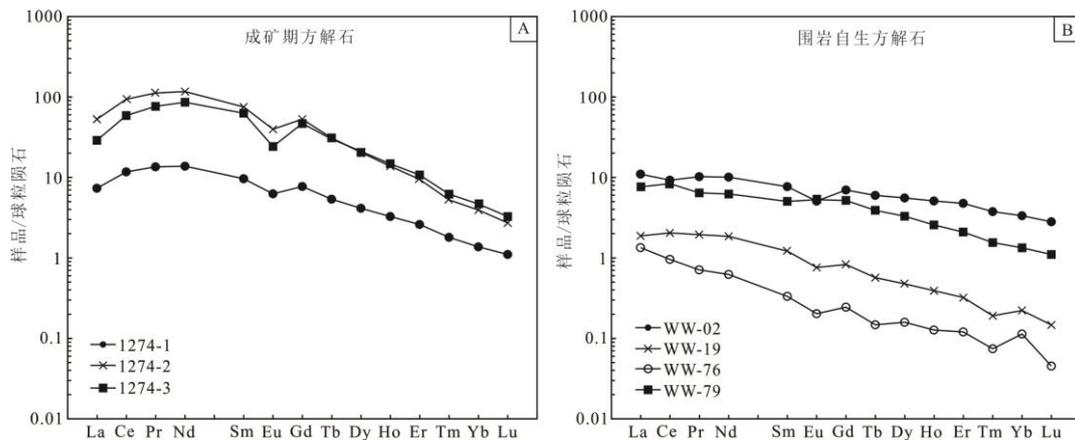


图6 会泽铅锌矿热液方解石REE配分模式图

Fig. 6. The REE distribution patterns of hydrothermal and authigenic calcites from the Huize Pb-Zn deposit.

4 讨论

4.1 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 矿床成矿流体来源

4.1.1 金矿床流体来源

丫他卡林型金矿床同滇黔桂金三角中的水银洞^[27]、簸箕田^[16]、紫木函^[28]、板其^[29]、灰家堡^[30]等金矿床一样,成矿期方解石普遍具有 MREE 富集的特征。但各个矿床之间也有一定区别,丫他、水银洞等金矿床具有相对对称的 MREE 富集、LREE 和 HREE 亏损的“弓”型特征;簸箕田、紫木函等金矿床 REE 配分模式相对平缓, MREE 略微凸起;板其、灰家堡金矿床 REE 配分模式与锑矿床比较相近,富集 MREE 的同时也相对富集 HREE,特别亏损 LREE。

朱赖民等^[22]报道了丫他金矿正常沉积灰岩的 Σ REE 为 172.34 $\mu\text{g/g}$,砂岩为 81.95~216.35 $\mu\text{g/g}$,两者 REE 配分模式均呈右倾的 LREE 富集型,显示中等 Eu 负异常($\delta\text{Eu}_{\text{灰岩}}$ 值为 0.494, $\delta\text{Eu}_{\text{砂岩}}$ 值为 0.506~0.759)的特征。同上述金矿床成矿期方解石富集 MREE 的特征相差较大,暗示矿区围岩地层对成矿期方解石 REE 的贡献很小。

世界上已发现的绝大多数卡林型金矿床均与岩浆作用具有密切的成因关系,如内华达卡林型金矿床的形成与始新世的长英质岩浆作用有关^[31];伊朗的 Agdarreh 和 Zarshouran 金矿床被认为与中新世火成岩的侵入有关^[32];马来西亚东部婆罗洲 Bau 地区的卡林型金矿床则与中新世的斑岩侵入体有关^[33];马其顿 Allchar 地区的卡林型金矿床 (Au-Sb-As-Tl) 与上新世的后碰撞高钾钙碱性到玄粗质火山-侵入体有关^[34];中国西秦岭地区的卡林型金矿床 (拉尔玛、大水等) 的形成也被认为与区域上广泛出露的燕山早期 (174~190 Ma) 中酸性岩脉有关^[35]。仅加拿大育空地区新发现的 Nadaleen trend 卡林型金矿床,由于研究程度低,尚未见与成矿密切相关的中酸性侵入体出露^[36]。

滇黔桂卡林型金矿床的形成是否同区域上的中酸性岩浆作用有关,一直以来是众多学者的研究热点。近年来,越来越多的研究显示区内的锑金成矿与岩浆作用有关^[1,37-38]。朱经经等 (2016)^[39]通过对桂西北巴马、料屯和下巴哈石英斑岩脉中所发育的继承锆石开展 LA-ICP-MS 和 SIMS 原位 U-Pb 定年,认为右江盆地及周缘可能存在 130~140 Ma 和约 242 Ma 的隐伏花岗岩体,该年龄同目前众多学者测得的该区金矿床的成矿年龄 200~240 Ma 和 120~160 Ma 相近 (表 2)。此外,区域内金矿床原位 S、C-O 等同位素证据也进一步支持了前人关于 Au、S 来自于岩浆的认识^[40-41]。

4.1.2 锑矿床流体来源

华南锑矿带内重要的单锑型矿床的赋矿地层多为泥盆纪地层,但其赋矿围岩则有一定差别,如锡矿山锑矿赋矿围岩为下泥盆统侏田桥组硅化灰岩,半坡锑矿床的赋矿围岩为下泥盆统丹林群的陆缘滨海相碎屑岩,巴年锑矿床为中泥盆统独山组下段灰岩,木利锑矿的赋矿围岩为下泥盆统坡脚组的燧石岩和灰岩。这些单锑型锑矿床 (锡矿山、半坡、木利等) 具有和巴年锑矿床成矿期方解石一致的 REE 配分模式,其成矿期方解石均表现出非常一致的 LREE 严重亏损、M-HREE 富集的左倾型特征^[13,55-56]。华南锑矿带单锑型锑矿床 H-O 同位素 (分别为-128‰~-46‰, -10.2‰~11.9‰),显示大多数单锑型锑矿的成矿流体为岩浆水和大气水的混合^[57]。最新的 Hg 同位素研究显示,华南锑矿带单锑型锑矿床具有相似的 Hg 同位素组成,表明其具有相同的金属来源^[58]。综合上述特征说明上述锑矿床成矿流体的来源和演化特征非常一致,与 Pb-Zn-Hg 矿床成矿流体特征完全不同。

巴年和半坡锑矿床同属于独山锑矿田,赋矿地层均为泥盆纪地层,邓红等^[55]测得该区上泥盆统地层层中非碳酸盐岩地层的 Σ REE 为 19.08~99.79 $\mu\text{g/g}$,碳酸盐岩地层的 Σ REE 为 3.88~13.24 $\mu\text{g/g}$,两者的 REE 配分模式均为 LREE 富集型,上述围岩 REE 特征与巴年锑矿床方解石 REE 特征截

表 2 西南低温成矿域 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 矿床成矿时代

Table 2. Metallogenic ages of Au-Sb-Hg-Pb-Zn deposits in the low temperature metallogenic domain in the southwestern China

矿种	矿床	测试方法	年龄/Ma	数据来源
Au	丫他金矿床	黄铁矿 Re-Os	235±33	[42]
	泥堡金矿	磷灰石 SIMS U-Pb	142±3	[43]
	烂泥沟金矿	毒砂 Re-Os	204±19	[44]
	紫木函金矿	方解石 Sm-Nd	148.4±4.8	[45]
	水银洞金矿	方解石 Sm-Nd	(136±6) ~ (134±3)	[27]
		毒砂 Re-Os	235±33	[44]
	板其金矿	沥青 Re-Os	228±16	[42]
		锆石 SIMS U-Pb	141±1.9	[46]
	者桑	金红石 SIMS U-Pb	213.6±5.4	[47]
	Sb	晴隆锑矿	萤石 Sm-Nd	148.0±8.5
萤石 Sm-Nd			142±16	[43]
萤石 Sm-Nd			141±20	[45]
巴年锑矿		方解石 Sm-Nd	126.4±2.7	[20]
		方解石 Sm-Nd	128.2±3.2	[20]
木利锑矿		石英 Ar-Ar	165	[7]
独山锑矿		方解石 Sm-Nd	130.5±3.0	[48]
锡矿山		成矿期方解石 Sm-Nd	155.5±1.1	[6]
		成矿晚期方解石 Sm-Nd	124.1±3.7	[6]
Hg		拉峨汞矿床	方解石 Sm-Nd	129±20
Pb-Zn	会泽铅锌矿	方解石 Sm-Nd	226±16 (麒麟厂)	[49]
		方解石 Sm-Nd	225±38 (矿山厂)	[49]
	乐红铅锌矿	闪锌矿 Rb-Sr	223.5±3.9	[50]
		闪锌矿 Rb-Sr	200.9±8.3	[51]
		闪锌矿 Rb-Sr	206.8±3.7	[52]
		萤石 Sm-Nd	201.1±6.2	[53]
杉树林铅锌矿	闪锌矿 Rb-Sr	212.7±9.5	[54]	

然不同,说明方解石的 REE 特征并非通过继承矿区围岩地层而来。晴隆锑矿床成矿期后方解石显示 LREE 富集的右倾型特征,与围岩(中等硅化凝灰岩)的 REE 配分模式基本一致^[23],但是成矿期萤石与成矿期后方解石 REE 配分模式差别较大,显示为 MREE 富集型,与卡林型金矿床成矿期方解石稀土特征近似,这可能是由于该矿床外围同时也发育金矿化^[59],因此成矿期萤石稀土配分模式显示与卡林型金矿床更接近的特征。Chen 等^[59]认为晴隆锑矿成矿流体来自于同深部基底岩石发生相互作用的热液流体。本文综合分析认为围岩地层对晴隆锑矿床成矿流体的贡献较小,但对成矿期后方解石 REE 的影响较大,成矿期后方解石可能继承了部分矿区围岩 REE 特征。

Schwinn 等^[60]发现花岗岩及其淋滤液的 REE 配分模式呈 M-HREE 富集型,其与华南锑矿带成矿期方解石的 REE 配分模式基本一致。同时,已有研究认为,西南大面积低温成矿域燕山期的成矿作用与侏罗纪深部花岗岩浆活动可能具有密切联系。西南低温成矿域 Au-Sb-As-Hg 矿集区的中生代岩浆活动相对微弱,但是其周缘有少量花岗岩、花岗斑岩和基性脉岩存在^[2,21],已有的遥感资料解译出的环状构造以及地球物理资料所指示的异常特征,也进一步支持着矿集区深部存在有隐伏岩体^[2]。同时,研究团队最近在滇东南木利矿区外围也发现~160 Ma 的闪长岩脉,与前人获得的木利锑矿床成矿时代相近^[7]。胡瑞忠等^[3]认为该区锑矿床是在岩石圈伸展背景下深部花岗岩浆活动驱动大气成因地下水循环、浸取矿源层中的成矿元素并成矿的产物。陈娟等^[37]对晴隆锑矿中成矿流体的 He-Ar 同位素进行了研究,说明含地幔 He 的高温流体可能来自其深部隐伏岩体。因此结合前人研究,本文认为形成锑矿床的成矿流体可能与深部隐伏的中酸性岩体有关,区域地层可能对于成矿流体中稀土元素的贡献较小。

4.1.3 汞矿床流体来源

拉峨汞矿床同湘黔汞矿带中的万山、大碛喇、茶田等汞矿床^[14]中成矿期的方解石 REE 配分模式较为一致, 均为 LREE 富集型, 说明该区汞矿床应该具有相似的成矿流体来源和性质。此外, 拉峨汞矿床围岩下奥陶统锅塘组灰岩与湘黔汞矿带各矿床围岩的 REE 配分曲线都呈一致右倾的 LREE 富集型, 说明热液方解石继承了围岩的 REE 特征, 形成汞矿床的成矿流体可能主要来自于大气降水对赋矿海相碳酸盐岩的溶解, 这一认识也与拉峨汞矿床方解石 C、O 同位素研究结果一致^[14]。方解石具有变化的 Eu 异常, 明显区别于围岩的负 Eu 异常, 这可能是成矿过程中氧化还原环境的变化造成的。

4.1.4 铅锌矿床流体来源

会泽铅锌矿床同川滇黔地区的乐红、天桥、杉树林等铅锌矿床成矿期方解石的 REE 配分模式基本一致^[18, 61-62], 均为右倾的 LREE 富集型, Eu 负异常的特征, 暗示川滇黔地区的 MVT 铅锌矿床具有相似的成矿流体来源。Xu 等^[5]通过对川滇黔地区多个铅锌矿床 Pb、Zn、S、Cd 等同位素的综合分析也支持上述观点, 认为该区域中铅锌矿的成矿流体可能来自于同一热液流体系统。

会泽铅锌矿区各时代非碳酸盐岩地层和变质基底具有较高的 Σ REE, 分别为 65.75~227.47 $\mu\text{g/g}$ 和 2.73~449.38 $\mu\text{g/g}$, 而碳酸盐岩地层的 Σ REE 较低, 为 0.94~34.46 $\mu\text{g/g}$, 三者 REE 配分模式均显示 LREE 富集, 并具有 Eu 负异常特征^[63]。由此可以看出, 矿区各地层和变质基底的稀土配分模式同本文所测得的成矿期和围岩自生的方解石 REE 配分模式相似, 都显示出 LREE 富集, Eu 负异常的特征。成矿期 Σ REE (22.19~168.89 $\mu\text{g/g}$) 高于矿区碳酸盐岩地层而低于非碳酸盐岩地层。同时, Michard^[64]研究发现富含高 REE 的流体一般不是由碳酸盐岩地层淋滤出来。此外, 会泽铅锌矿床成矿期方解石中的 LREE (La~Nd) 还具有特殊的左倾特征, 暗示方解石 REE 并非全部来自于围岩地层。结合已有的 S、Pb、Sr 等同位素证据^[52, 65], 指示铅锌矿床的成矿流体应来自于深部, 可能是高盐度的盆地流体浸取基底地层及其围岩中的有用组分形成^[3]。

4.2 西南低温成矿域成矿流体演化和共生分异作用

西南低温成矿域中 Pb-Zn 矿床的成矿年代主要集中在 226~200 Ma, Hg、Sb 矿床的成矿年代主要集中在 165~124 Ma, 卡林型 Au 矿床的成矿时代集中在 235~204 Ma 和 148~134 Ma (表 2)。川滇黔 Pb-Zn 矿集区广泛分布的峨眉山玄武岩成岩时代为 262~251 Ma^[66], 会泽铅锌矿与其年龄相差约 30 Ma, 此外, 会泽铅锌矿床的重要控矿断裂, 麒麟厂断裂带内夹杂着大量的玄武岩, 说明成岩作用发生在成矿作用之前^[24]。胡瑞忠等^[2-3]认为印支地块与华南陆块沿松马缝合带的后碰撞造山运动, 驱动较高盐度的盆地流体循环并浸取出基底和/或围岩中的有用组分并运移至相对开放的断裂空间就位成矿。

从整个西南低温成矿域来看, 川滇黔 Pb-Zn 矿床主要位于弥勒一师宗断裂以北的川滇黔接壤区, 与 Au-Sb-Hg 矿床在空间上明显分隔, 而且矿物组合上也有明显差别, 与 Sb-Hg 矿床在成矿时代上也差别较大。虽然 Pb-Zn 矿床成矿时代与部分卡林型 Au 矿床印支期年龄数据重合, 但结合方解石 REE 数据等说明, Pb-Zn 矿床与 Au-Sb-Hg 矿床并没有成因上的联系。

西南大面积低温成矿域中 Au、Sb、Hg 矿床无论是矿田尺度还是矿床内部, 均在空间上密切相伴, 矿化蚀变和矿物组合相近, 并具有一定分带特征。卡林型金矿床 (如紫木垭) 中, 自下而上, 由矿床中心向外依次表现为 Au-Sb-As-Hg 的分带特征^[67]。在整个西南低温成矿域中, 由南东向北西依次出现 Au-Sb-As-Hg 分带特征^[68], 且其均围绕华南锡钨成矿域北西侧分布, 显示出明显的共生分异现象。此外, 成矿时代上也相对一致, 主要集中于燕山晚期, 只有少量卡林型 Au 矿床成矿时代属于印支期 (表

2)。从方解石 REE 配分模式看, Hg 矿床和 Sb、Au 矿床截然不同。Hg 矿床中方解石显示相对单一的 LREE 富集型, Sb、Au 矿床都富集 MREE, 只是 Sb 矿床相对富集 HREE 和亏损 LREE, 而且 Sb 矿床中方解石普遍显示相对单一的 M-HREE 富集型, Au 矿床则变化较大, 普遍具有 MREE 富集的特征, 部分金矿床(如板其、灰家堡金矿田)则与锑矿床一致^[29-30]。上述 Sb、Hg 矿床方解石相对单一的 REE 特征说明成矿流体的性质比较单一, 也与相对单一的成矿时代(都属于燕山晚期)是相互印证的, 金矿床 REE 配分模式变化较大可能也与成矿时代具有多期性有关(印支期和燕山晚期); 另一方面, 上述 REE 特征也说明 Au、Sb 矿床的形成具有密切的成因关系, 两者成矿流体来源相近, 可能都与深部隐伏岩体有关, 两者 REE 特征的微小差异可能是成矿流体迁移演化共生分异的结果。因为不少研究者发现, 无论是 Sb 矿床还是 Au 矿床, 成矿晚阶段较早阶段的方解石更富集 LREE^[13,16,29]。此外, Hg 矿床与 Sb-Au 矿床明显不同的 REE 配分模式说明两者成矿流体来源或性质不同, Sb-Au 矿床代表的是与隐伏岩体有关的深部流体, 而汞矿床代表的可能是形成时代相对偏晚^[8], 以大气降水为主的浅成流体亦或是 Sb-Au 矿床演化最晚阶段的产物。

4.3 西南低温成矿域 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 矿床方解石稀土元素找矿指示

西南低温成矿域中方解石贯穿 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 等矿床形成的各个时期, 其化学成分特征可以用来揭示流体演化特征并指导找矿。已有研究发现, 方解石中的 Fe、Mn 元素含量同矿化程度之间存在一定联系。魏爱英^[69]在对昭通毛坪铅锌矿床研究中发现, 铁白云石和铁方解石化同铅锌矿体之间有着密切联系, 铅锌矿体周边的方解石中 Mn 和 REE 含量远高于远离矿体和围岩中的含量。板其金矿床也具有类似的特点, 成矿期方解石具有高的 Fe、Mn 元素含量以及不同于围岩和非成矿期方解石的 REE 特征^[30]。此外, Han 等^[56]在滇东南木利锑矿床中也发现了具有高的 Fe、Mn 元素的方解石常可指示矿体的存在。

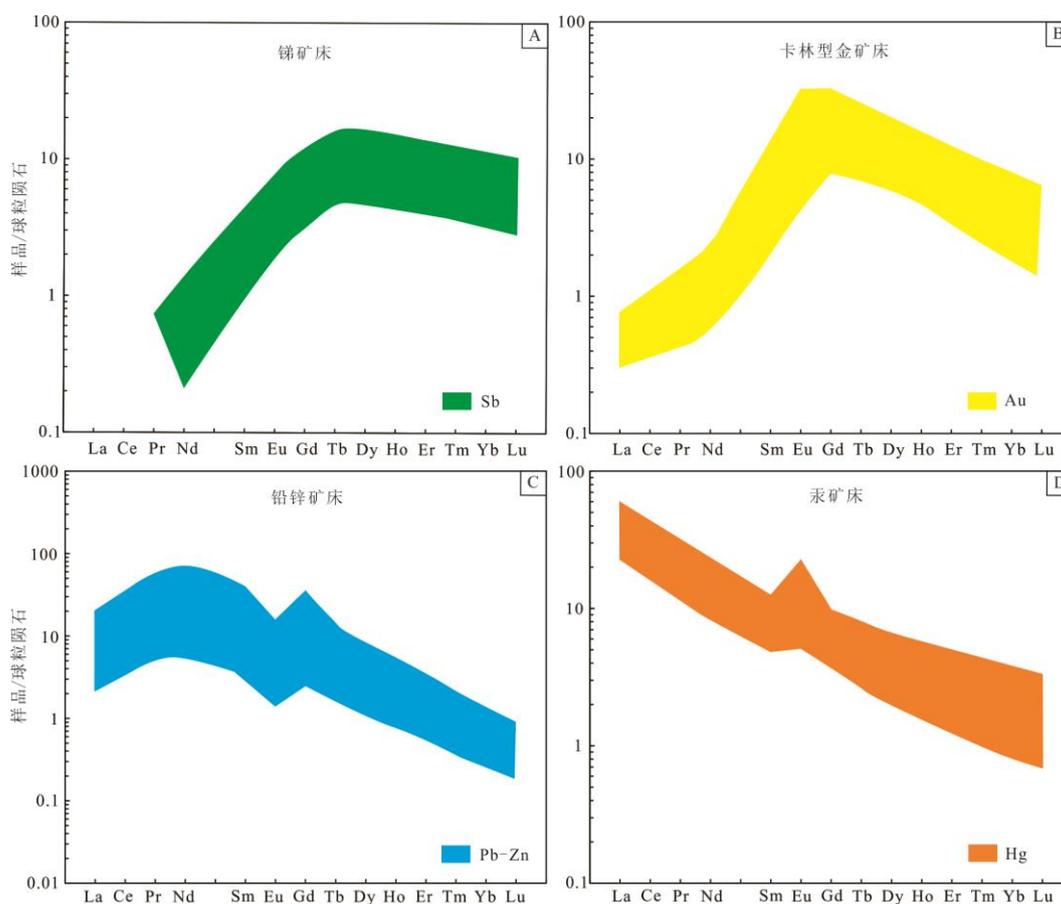
由于不同类型的方解石常表现出明显不同的 REE 特征, 西南低温成矿域中与成矿无关(包括成矿前或成矿后)的方解石多具有 LREE 富集的特征^[16,29-30,56]。综合本文及前人已发表的数据, 本文构筑了方解石 REE 找矿模型示意图(图 7), 其中锑矿床具有明显富集 M-HREE, 强烈亏损 LREE(特别是 La 和 Ce)的特征(图 7A); 卡林型金矿床具有富集 MREE, 但 LREE 和 HREE 分馏相对较小, 且不同矿床之间 REE 配分模式变化相对较大的特征(图 7B); 铅锌矿床整体具有富集 LREE, 但 LREE 局部呈左倾的特征(图 7C); 汞矿床方解石 REE 特征则具有与沉积岩相似的 LREE 富集的右倾型特征(图 7D)。因此, 上述特征可作为各种类型矿床成矿期方解石的典型特征, 可作为重要的找矿标志。方解石上述 REE 特征也在水银洞卡林型金矿床和锡矿山锑矿床深部和外围找矿过程中发挥了重要作用^[16]。

5 结论

1) 滇黔桂卡林型金矿床和华南锑矿带锑矿床应具有相近的成矿流体来源, 可能与深部隐伏花岗岩体有关; 湘黔汞矿带中的汞矿床成矿流体可能主要来自于大气降水对赋矿海相碳酸盐岩的溶解; 川滇黔地区的铅锌矿床成矿流体具有同源性, 其成矿流体可能来自于盆地卤水浸取基底地层及其围岩中的有用组分所形成的混合流体。

2) 从整个西南低温成矿域来看, Pb-Zn 矿床与 Au-Sb-Hg 矿床并没有成因上的联系, 但 Au、Sb、Hg 矿床的形成是成矿流体不断演化、共生分异的结果。

3) 方解石稀土元素特征可作为西南低温成矿域 Au-Sb-Hg-Pb-Zn 矿床的重要找矿标志, 其中卡林



Au、Pb-Zn 矿床数据来自本文, Sb 矿床数据来自文献[20], Hg 矿床数据来自文献[24]

图 7 方解石 REE 找矿模型示意图

Fig. 7. Schematic diagrams of the REE patterns of calcites for prospecting various types of deposits.

型金矿床内以富集 MREE 为特征, 锑矿床内以富集 H-MREE 为特征, 汞矿床和铅锌矿床均以富集 LREE 为特征, 但铅锌矿床中 LREE (La~Nd) 往往具有左倾特征。

致谢: 会泽、丫他、晴隆等矿山领导及技术人员对野外工作给予大力支持, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Hu R Z, Fu S L, Huang Y, et al. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 137: 9-34.
- [2] 胡瑞忠, 付山岭, 肖加飞, 等. 华南大规模低温成矿的主要科学问题[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3239-3251.
- [3] 胡瑞忠, 陈伟, 毕献武, 等. 扬子克拉通前寒武纪基底对中生代大面积低温成矿的制约[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 137-150.
- [4] 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪, 等. 萤石 Sm-Nd 同位素体系对晴隆锑矿床成矿时代和物源的制约[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 785-791.
- [5] Xu C, Zhong H, Hu R Z, et al. Sources and ore-forming fluid pathways of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in Southwest China: implications of Pb-Zn-S-Cd isotopic compositions[J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55(3): 491-513.
- [6] Peng J T, Hu R Z, Burnard P G. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1): 129-136.
- [7] 胡瑞忠, 彭建堂, 马东升, 等. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代[J]. *矿床地质*, 2007, 26(6): 583-596.
- [8] 王加昇, 温汉捷. 贵州交犁拉峨汞矿床方解石 Sm-Nd 同位素年代学[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(5): 1384-1393.
- [9] Zhong S J, Alfonso M. Partitioning of rare earth elements (REEs) between calcite and seawater solutions at 25°C and 1 atm, and high dissolved REE concentrations[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 443-453.

- [10] Migdisov A, Williams-Jones A E, Brugger J, et al. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: Experimental data and thermodynamic calculations[J]. *Chemical Geology*, 2016, 439: 13-42.
- [11] Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 1991, 93(3/4): 219-230.
- [12] Volkov A V, Sidorov A A, Savva N E, et al. Epithermal mineralization in the Kedon Paleozoic volcano-plutonic belt, Northeast Russia: Geochemical studies of Au-Ag mineralization[J]. *Volcanol Seismol*, 2017, 11: 1-19.
- [13] 彭建堂, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 锡矿山热液方解石的 REE 分配模式及其制约因素[J]. *地质论评*, 2004, (1): 25-32.
- [14] 王加昇, 温汉捷, 石少华, 等. 湘黔汞矿带脉石矿物方解石稀土元素、碳氧同位素特征及其指示意义[J]. *矿物学报*, 2010, 30(2): 185-193.
- [15] Guo L N, Hou L, Liu S S, et al. Rare Earth Elements Geochemistry and C-O Isotope Characteristics of Hydrothermal Calcites: Implications for Fluid-Rock Reaction and Ore-Forming Processes in the Phapon Gold Deposit, NW Laos[J]. *Minerals*, 2018, 8(10): 438-438.
- [16] 张瑜, 夏勇, 王泽鹏, 等. 贵州簸箕田金矿单矿物稀土元素和同位素地球化学特征[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 385-395.
- [17] Ling H F, Chen X, Li D, et al. Cerium anomaly variations in Ediacaran-earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: Implications for oxygenation of coeval shallow seawater[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 110-127.
- [18] 陈冕, 刘俊安, 赵生贵, 等. 贵州天桥铅锌矿床 REE 地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 360-365.
- [19] Zhao M Y, Zheng Y F. A geochemical framework for retrieving the linked depositional and diagenetic histories of marine carbonates[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 460: 213-221.
- [20] Wang J S, Wen H J, Fan H F, et al. Sm-Nd geochronology, REE geochemistry and C and O isotope characteristics of calcites and stibnites from the Banian antimony deposit, Guizhou Province, China[J]. *Geochemical Journal*, 2012, 46(5): 393-407.
- [21] 黄智龙, 胡瑞忠, 苏文超, 等. 西南大面积低温成矿域: 研究意义、历史及新进展[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 309-314.
- [22] 朱赖民, 何明友, 王自友, 等. 丫他微细粒浸染型金矿床地球化学及成矿机理[J]. *地质找矿论丛*, 1996(4): 13-26.
- [23] 王津津, 胡煜昭, 韩润生, 等. 贵州晴隆锑矿田微量元素地球化学特征及其对成矿流体的指示意义[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 571-577.
- [24] 韩振春, 王加昇, 高振华, 等. 贵州拉峨汞矿床方解石 REE、C、O 同位素地球化学特征及意义[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(3): 28-37.
- [25] 韩润生, 王峰, 胡煜昭, 等. 会泽型(HZT)富锗银铅锌矿床成矿构造动力学研究及年代学约束[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(4): 758-771.
- [26] Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London. Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [27] Su W C, Hu R Z, Xia B, et al. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. *Chemical Geology*, 2009, 258(3/4): 269-274.
- [28] 王泽鹏, 夏勇, 宋谢炎, 等. 太平洞一紫木函金矿区同位素和稀土元素特征及成矿物质来源探讨[J]. *矿物学报*, 2012, 32(1): 93-100.
- [29] 王加昇, 韩振春, 李超, 等. 黔西南板其卡林型金矿床方解石 REE、Fe、Mn 元素特征及其对找矿的指示意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(3): 494-504.
- [30] 杨成富, 顾雪祥, 刘建中, 等. 黔西南灰家堡金矿田热液方解石稀土元素与 C-O-Sr 同位素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(1): 124-137.
- [31] Cline J S, Muntean J L, Gu X X, et al. A Comparison of Carlin-type Gold Deposits: Guizhou Province, Golden Triangle, Southwest China, and Northern Nevada, USA[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 1-18.
- [32] Daliran F, Hofstra A, Walther J, et al. Ore genesis constraints on the Agdarreh and Zarshouran Carlin-Style gold deposits in the Takab region of northwestern Iran[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 299-333.
- [33] Percival T J, Hofstra A H, Gibson P C, et al. Sedimentary rock-hosted gold deposits related to epizonal intrusions, Bau District, Island of Borneo, Sarawak, East Malaysia[J]. *Society of Economic Geologists*, 2018, 20: 259-297.
- [34] Palinkas S S, Hofstra A H, Percival T J, et al., Comparison of the All char Au-As-Sb-Tl deposits, Republic of Macedonia, with Carlin-type gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 335-363.
- [35] 陈耀宇. 甘南地区金矿找矿标志与找矿模型——大水、早子沟、拉尔玛金矿床对比分析[J]. *矿产与地质*, 2020, 34(1): 7-18.
- [36] Tucker M J, Lane J C, Hart C J. R. Overview of Carlin-Type prospects of the Nadaleen trend: a Yukon analogue to Carlin-Type gold mineralization of the great basin[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 235-258.
- [37] 陈炯, 苏文超, 黄勇, 等. 贵州晴隆锑矿床成矿流体 He-Ar 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3312-3320.
- [38] Zhu J, Zhang Z C, Santosh M, et al. Carlin-style gold province linked to the extinct Emeishan plume[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 530(C): 115940.
- [39] 朱经经, 钟宏, 谢桂青, 等. 右江盆地酸性脉岩继承锑石成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3269-3280.
- [40] Xie Z J, Xia Y, Cline J S, et al. Magmatic origin for sediment-hosted Au deposits, Guizhou Province, China: in situ chemistry and sulfur isotope composition of Pyrites, Shuiyindong and Jinfeng deposits[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(7): 1627-1652.
- [41] Zhuo Y Z, Hu R Z, Xiao J F, et al. Trace elements and C-O isotopes of calcite from Carlin-type gold deposits in the Youjiang Basin, SW China: Constraints on ore-forming fluid compositions and sources[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113(C): 103067.

- [42] Ge X, Selby D, Liu J J, et al. Genetic relationship between hydrocarbon system evolution and Carlin-type gold mineralization: Insights from Re-Os pyrobitumen and pyrite geochronology in the Nanpanjiang Basin, South China[J]. *Chemical Geology*, 2021, 559: 119953.
- [43] Chen M H, Bagas L, Liao X, et al. Hydrothermal apatite SIMS Th-Pb dating: Constraints on the timing of low-temperature hydrothermal Au deposits in Nibao, SW China[J]. *Lithos*, 2019, 324-325: 418-428.
- [44] Chen M H, Mao J W, Li C, et al. Re-Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi “golden triangle”, southwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64(1): 316-327.
- [45] 王泽鹏. 贵州省西南部低温矿床成因及动力学机制研究——以金、锑矿床为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [46] 高伟. 桂西北卡林型金矿床成矿年代学和动力学[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2018.
- [47] Pi Q H, Hu R Z, Xiong B, et al. In situ SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52(8): 1179-1190.
- [48] 肖宪国. 贵州半坡锑矿床年代学、地球化学及成因[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [49] 李文博, 黄智龙, 陈进, 等. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究[J]. *矿物学报*, 2004, 24(2): 112-116.
- [50] Yin M D, Li W B, Sun X W. Rb-Sr isotopic dating of sphalerite from the giant Huize Zn-Pb ore field, Yunnan Province, Southwestern China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2009, 28(1): 70-75.
- [51] 张云新, 吴越, 田广, 等. 云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源: Rb-Sr 和 S 同位素制约[J]. *矿物学报*, 2014, 34(3): 305-311.
- [52] Zhou J X, Huang Z L, Yan Z F. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China: Constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 39-47.
- [53] Zhang C H, Wu Y, Hou L, et al. Geodynamic setting of mineralization of Mississippi Valley-type deposits in world-class Sichuan-Yunnan-Guizhou Zn-Pb triangle, southwest China: Implications from age-dating studies in the past decade and the Sm-Nd age of Jinchachang deposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 103: 103-114.
- [54] 廖开立, 吕昶良, 马文富, 等. 贵州杉树林铅锌矿床中闪锌矿 Rb-Sr 定年及其意义[J]. *矿产与地质*, 2020, 34(2): 273-277.
- [55] 邓红, 黄智龙, 肖宪国, 等. 贵州半坡锑矿床方解石稀土元素地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2014, 34(2): 208-216.
- [56] Han Z C, Wang J S, Li C, et al. REE geochemistry of gangue minerals and their geological significance in the Muli antimony ore deposit in Yunnan, China[J]. *Acta Geochimica*, 2019, 38(6): 848-862.
- [57] Yan J, Fu S L, Liu S, et al. Giant Sb metallogenic belt in South China: A product of Late Mesozoic flat-slab subduction of paleo-Pacific Plate[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022(prepublish): 104697.
- [58] 邓昌州, 张嘉玮, 胡瑞忠, 等. 汞同位素对华南晚中生代锑矿床成因的制约[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(2): 327-339.
- [59] Chen J, Yang R D, Du L J, et al. Multistage fluid sources and evolution of Qinglong Sb-(Au) deposit in northern margin of Youjiang basin, SW China: REE geochemistry and Sr-H-O isotopes of ore-related jasperoid, quartz and fluorite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127: 103851.
- [60] Schwinn G and Markl G. REE systematics in hydrothermal fluorite[J]. *Chemical Geology*, 2005, 216(3/4): 0-248.
- [61] 赵冻, 韩润生, 王加昇, 等. 滇东北乐红大型铅锌矿床稀土元素地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2017, 37(5): 588-595.
- [62] 杨松平, 包广萍, 兰安平, 等. 黔西北杉树林铅锌矿床微量和稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2018, 38(6): 600-609.
- [63] Huang Z L, Li X B, Zhou M F, et al. REE and C-O Isotopic Geochemistry of Calcites from the World-class Huize Pb-Zn Deposits, Yunnan, China: Implications for the Ore Genesis[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2010, 84(3): 597-613.
- [64] Michard A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(3): 745-750.
- [65] Bao Z W, Li Q, Wang C Y. Metal source of giant Huize Zn-Pb deposit in SW China: New constraints from in situ Pb isotopic compositions of galena[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 824-836.
- [66] Lo C H, Chung S L, Lee T Y, et al. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198(3/4): 449-458.
- [67] 朱赖民, 胡瑞忠, 段启杉. 元素共生分异机制的研究现状和趋势——以黔西南微细浸染型金矿区为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, (2): 119-125.
- [68] 马东升. 华南中、低温成矿带元素组合和流体性质的区域分布规律——兼论华南燕山期热液矿床的巨型分带现象和大规模成矿作用[J]. *矿床地质*, 1999, 4: 347-358.
- [69] 魏爱英, 薛传东, 洪托, 等. 滇东北毛坪铅锌矿床的蚀变-矿化分带模式——蚀变-岩相填图证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(5): 723-735.