

贵州水银洞金矿构造蚀变体稀土元素地球化学特征

杨成富¹, 刘建中², 陈睿¹, 王泽鹏³, 闫宝文³, 夏勇³, 莫荣思¹

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550003; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队, 贵阳 550018; 3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002

摘要:水银洞金矿构造蚀变体(SBT)为产出茅口组(P_2m)和龙潭组(P_3l)之间不整合面上的一套强硅化灰岩、灰岩角砾岩、硅化粘土岩组合。采用 ICP-MS 测定钻孔岩芯中构造蚀变体样品稀土元素组成, 对比研究 SBT 围岩、区域岩浆岩及现代海底热水系统流体稀土元素组成。结果显示, SBT 的轻重稀土分馏明显 [$LREE/HREE = 4.92 \sim 17.51$, $(La/Yb)_N = 5.94 \sim 38.37$], 曲线右倾型; 轻稀土分异明显, 曲线右倾程度大; 重稀土分异不明显, 曲线平坦; 负 Eu ($\delta Eu 0.61 \sim 0.94$)、Ce ($\delta Ce 0.52 \sim 1.07$) 异常明显; SBT 及围岩均具有明显 W 型稀土元素四分组效应, 而不同于区域岩浆岩和现代海底热水系统流体, 表明热液流体来源以壳源为主。

关键词:构造蚀变体; 稀土元素; 四分组效应; 水银洞金矿

中图分类号: P595.73 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)04-0404-10

Geochemical Characteristics of REEs in Structure Alteration Rocks of the Shuiyingdong Gold Deposit, Guizhou Province

YANG Cheng-fu¹, LIU Jian-zhong², CHEN Rui¹, WANG Ze-peng³,
YAN Bao-wen³, XIA Yong³, MO Rong-si¹

1. College of resources and environmental engineering, Guizhou University, Guiyang 550002, China;
2. Geological Party 105, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang 550018, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: The structural alteration rocks (named as SBT), composed by heavily silicified limestones, silicified limestone breccias and silicified mudstones are altered from those rocks overlying the unconformity between Permian Maokou Formation and Longtan Formations in the Shuiyingdong gold deposit, southwest Guizhou Province, China. REEs concentrations in SBT samples from drill cores were analyzed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The result showed that REEs in SBT samples are characterized by enrichment of LREEs. $LREE/HREE = 4.92 \sim 17.51$, $(La/Yb)_N = 5.94 \sim 38.37$, notable LREE fractionation with right-inclined REEs distribution patterns, negative Eu anomaly ($\delta Eu 0.61 \sim 0.94$) and Ce anomaly Ce ($\delta Ce 0.52 \sim 1.07$). These characteristics are very similar to those of their host rocks (tetrad effect of REE found in both SBT and host rocks), and are quite distinct from those of igneous rocks near the Shuiyingdong gold deposit and modern seafloor hydrothermal fluids. As a result, it is suggested that hydrothermal fluids in the Shuiyingdong gold deposit may mainly derive from the crust.

Key words: structural alteration rocks; REE; tetrad effect; Shuiyingdong gold deposit

水银洞金矿区茅口组(P_2m)和龙潭组(P_3l)之间不整合接触面附近产出的一套强硅化灰岩、灰岩角砾岩、粘土角砾岩、硅化粘土岩组合, 为水银洞金

矿重要的含矿岩系, 仅其中 I a 矿体的金储量就超过 25 t^[1]。已有诸多学者对黔西南台地相区的这一套岩石组合投入大量研究, 但多从宏观地质特征

收稿日期: 2011-09-03 收到, 09-23 改回

基金项目: 贵州大学研究生创新基金资助项目(校研理工 2011014); 贵州省地矿局重大科研项目[黔地矿科(2009)11 号]

第一作者简介: 杨成富(1984-), 男, 硕士研究生, 专业方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: yangcf1616@163.com.

通讯作者: 刘建中. E-mail: liujianzhong868@sina.com.

入手,系统研究程度较低且观点迥异。有学者认为是峨眉山玄武岩与茅口组灰岩的接触热蚀变产物,将其定名为“大厂层”(P₃dc)或将其归为龙潭组一段(P₃l¹)^[2~4];有学者认为是海底喷流沉积成因^[5~11];也有学者认为是峨眉山玄武岩喷发之后,在构造作用下沿不同能干性的岩层界面发生拆离、滑脱而形成的层间构造角砾岩层^[1,12~15]。刘建中等^[1]在对控制水银洞金矿 I a 矿体产出的这套岩石组合详细研究的基础上提出构造蚀变体(SBT)的概念,建立了水银洞金矿床成矿模式,在这一模式指导下的灰家堡矿田勘探中,水银洞金矿区和紫木凶金矿区均发现赋存于 SBT 中的隐伏盲矿体,水银洞金矿成为超大型矿床。稀土元素在热液蚀变轻微的岩石中可以保留未蚀变原岩稀土元素特征,而蚀变强烈的岩石则更接近热液流体稀土元素特征。因此,深入研究水银洞金矿区 SBT 稀土元素分布特征,对于正确认识 SBT 成因,探讨成矿热液来源及演化,对指示黔西南地区深部由 SBT 控制的盲金(锑)矿体找寻方向,扩大矿区范围,二度空间找矿取得突破具有重要意义。

意义。

1 基本地质特征

1.1 区域地质背景及矿床地质特征

滇黔桂“金三角”是指由区域性北东向弥勒—师宗深断裂、东西向个旧—宾阳深断裂、北西向南丹—昆仑关深断裂围限的三角形夹块。区域上位于扬子准地台西南缘与华南加里东褶皱系西缘右江褶皱带的结合部位。成矿作用与右江裂陷带的产生、发展与演化密切相关。成矿构造环境表现为地块边缘裂陷槽拉张与挤压两种环境的交替演化。两个大地构造单元接合部位不同级别断裂构造控制和制约金矿集中区和区内不同矿床、矿田和矿带的形成及空间分布。水银洞金矿区为滇黔桂“金三角”独具特色的层控型金矿集中产出区域,次级构造位于以贞丰、者相、大山、兴仁四点连线圈出的弱应变域内的强应变带——灰家堡背斜^[16]。水银洞超大型金矿与紫木凶大型金矿、太平洞大型金矿共同组成黔西南灰家堡矿田(图 1)。



1-永宁镇组; 2-夜郎组; 3-长兴+大隆组; 4-龙潭组; 5-地层界线; 6-正断层; 7-逆断层; 8-性质不明断层; 9-背斜轴; 10-向斜轴; 11-金矿床; 12-金矿点; 13-汞矿床; 14-汞矿点; 15-铊矿点; 16-钻孔及采样位置
 1-Yonglinzhen formation; 2-Yelang formation; 3-Changxing and Dalong formation; 4-Longtan formation; 5-the stratum borderline; 6-measured and inferred normal fault and its number; 7-measured and inferred reverse fault and its number; 8-undefined fault; 9-axis of anticline; 10-axis of syncline; 11-gold deposit; 12-gold occurrence; 13-mercury deposit; 14-mercury occurrence; 15-thallium occurrence; 16-location of drill and sampling

图 1 灰家堡背斜金矿田地质图

Fig. 1 The Geologic map of the Huijiabao anticline

矿区以灰家堡背斜为主要构造,背斜东起贞丰县者相,西至兴仁县大山,长约 20 km,宽约 6 km。背斜轴向总体近东西,为两翼大致对称的宽缓背斜。自西向东,沿背斜轴部依次分布紫木凶大型金矿、太平洞大型金矿、大坝田汞矿、滥木厂汞铊矿、水银洞超大型金矿、雄黄岩小型金矿及普子垅、皂凡山金矿

等,形成一条近东西向的金、汞铊矿化带(图 1)。灰家堡金矿富集区,控制金储量大于 200 t^[14]。水银洞金矿床位于矿田东段中部,由西矿段—中矿段(已经投入生产)—东矿段—雄黄岩矿段—簸箕田矿段—纳秧矿段组成,东西长 13 km,南北宽 0.8 km。

矿区内大面积分布下三叠统夜郎组及永宁镇组

地层,上二叠统龙潭组、长兴组、大隆组仅零星出露于背斜核部。区内无岩浆岩出露。

矿体赋存于上二叠统龙潭组(P₃l)地层中,主矿体呈层状、似层状产出于灰家堡背斜核部(以背斜轴为中心向两翼 300 m 范围内)的不纯碳酸盐岩和 SBT 中,产状与岩层产状一致,走向上具波状起伏向东倾没、空间上具有多个矿体上下重叠的特点^[14](图 2)。

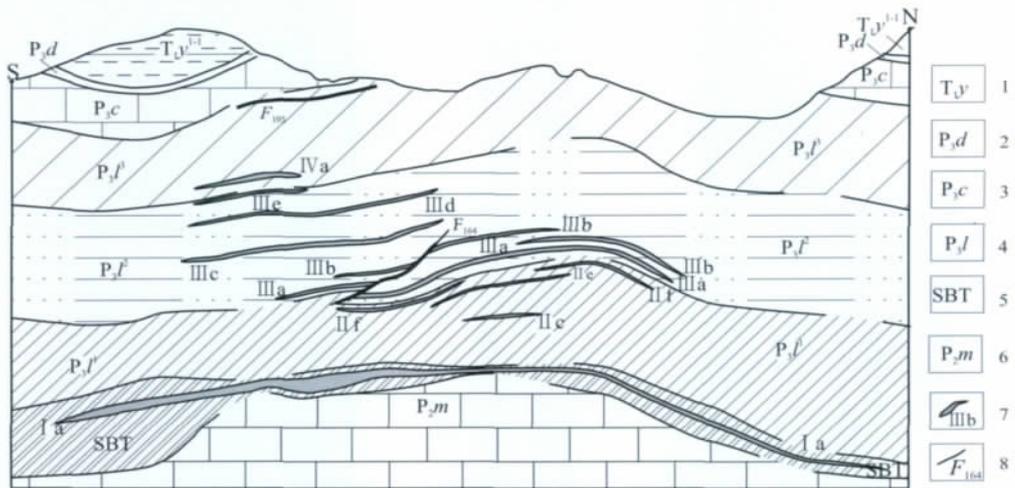
矿区矿化、蚀变类型主要有黄铁矿化、硅化、白云石化、毒砂化、雌(雄)化、方解石化、辉锑矿化、萤石化、滑石化、粘土化等。其中硅化、白云石化、黄铁矿化和金矿关系密切^[13]。

矿石主要呈莓状、球状、胶状、自形晶、交代、假象、碎裂结构呈星散浸染状、缝合线、脉(网脉)状、晶洞、生物遗迹、角砾、条纹、薄膜状构造等。

黄铁矿和毒砂是最主要载金矿物,研究表明^[12,13]:金主要以亚微米—纳米级的颗粒状不均匀浸染状赋存于热液成因的砷黄铁矿环带中(在成矿前的自形黄铁矿内核的基础上,于成矿期生长成的砷黄铁矿环带)。

1.2 SBT 基本地质特征

SBT 定义为产于 P₂m 和 P₃l 或 P₃β 之间沉积间断面一不整合界面附近的一套深灰色中厚层强硅化灰岩、角砾状强硅化灰岩、硅质岩及角砾状粘土岩组合,是由区域性构造作用形成并经热液蚀变的构造蚀变岩石。是沉积作用、构造作用和热液蚀变的综合产物,包含了 P₂m 顶部硅化灰岩和 P₃l 底部硅化粘土岩两部分,向下依蚀变强度由强硅化角砾状灰岩—强硅化灰岩—弱硅化灰岩—正常的 P₂m 灰岩呈渐变关系,向上由硅化角砾状粘土岩—硅化碎裂化粘土岩向正常 P₃l 粘土岩过渡,弱硅化灰岩—强硅化灰岩—强硅化角砾状灰岩—硅化角砾状粘土岩—碎裂化粘土岩部分即划入构造蚀变体(SBT)。岩石中常见斑块状及细脉状白色、绿色石英,偶见辉锑矿及片状石膏。岩石普遍具硅化、黄铁矿化、萤石化、雄(雌)黄化、锑矿化、金矿化等。厚度 5.08~41.51 m,平均厚度 16.23 m。为一跨时的地质体^[1,12~14](图 2)。灰家堡背斜区内的 SBT 隐伏于地表 300~1500 m 以下。



1-夜郎组;2-大隆组;3-长兴组;4-龙潭组;5-构造蚀变体;6-茅口组;7-矿体及编号;8-断层及编号
 1-Yelang formation; 2-Dalong formation; 3-Changxing formation; 4-Longtan formation; 5-structure alteration body;
 6-Maokou formation; 7-fault and number; 8-ore body and number

图 2 贵州省贞丰县水银洞金矿床 7 勘探线剖面图

Fig. 2 Profile map of the No. 7 exploiting section of the Shuiyindong gold deposit Zhenfeng, Guizhou

赋存于 SBT 中的 I a 矿体为水银洞超大型金矿最大的矿体(图 2)。矿体呈层状—似层状产出,走向与背斜轴线一致,呈东西向展布,走向长 1400 m,倾向宽 680 m,与 SBT 形态一致,倾向南或北,倾角 10°左右。储量达 25999.96 kg,矿石量 5699211 t,平均品位 4.56×10⁻⁶。单矿体达大型矿床规模。品位变化系数为 51.54%,厚度变化系数为 115.58%。有

用组分分布均匀,厚度较稳定^[1]。

2 样品的采集及分析测试

2.1 样品

笔者在对水银洞金矿区部分钻孔进行仔细观察的基础上,对钻孔普遍揭露的 SBT 进行了详细编录并分层取样,通过分析比较,选取滥木厂矿段

ZK6833 钻孔和簸箕田矿段 ZK15116 钻孔揭露的 SBT 样品进行分析(图 3、4)。分析测试由贵州省地质矿产中心实验室完成。分析仪器为美国 THERMO 公司生产的 X-SERIES-2 型 ICP-MS, 仪器工作

参数为:功率 1150 W;分辨率 0.75 amu;采样锥孔径 1.0 mm;截取锥孔径 0.7 mm;冷却气(Ar)13 L/min;雾化器流速(Ar)0.74~0.95 L/min;进样泵速 30 rpm;氦气 $\varphi(\text{Ar})=99.99\%$ 。

地层	柱状图 1:500	厚度 (m)	层号	岩性描述	样品号
龙潭组 (P ₁)		>4.5	1	浅灰色薄层条带状粘土质粉砂岩, 层见面厚约1-3mm黄铁矿薄脉	ZK15116-01
SBT		3.4	2	深灰色薄层条带状粘土质粉砂岩, 偶见方解石细脉和黄铁矿细脉, 局部夹2-3cm厚黑色粘土岩。	ZK15116-02
		5.7	3	深灰色薄层状弱硅化粘土质粉砂岩, 局部见方解石脉, 高岭土化, 偶见黄铁矿细脉, 中部见3-5cm厚角砾状粘土岩。	ZK15116-03
		15.6	4	深灰色强硅化钙质粉砂岩角砾岩, 角砾成分为粉砂岩, 次棱角状, 粒径5-10cm, 胶结物为硅质、钙质胶结。石英团块、石英脉很发育, 多呈晶簇状, 晶洞发育, 节理裂隙多被石英脉充填, 节理面偶见高岭土, 局部见针柱状辉钨矿, 见辰砂和绿石英。	ZK15116-04
		1.3	5	深灰色中层状粘土质粉砂岩, 以弱硅化为特征。	ZK15116-05
		10.5	6	强硅化角砾岩, 角砾成分为粘土岩, 粘土质粉砂岩, 分选较差, 棱角状, 粒径一般为2-10cm, 节理裂隙发育, 多被石英脉充填, 见团块状、细脉状、晶簇状石英, 局部见高岭土化。	ZK15116-06
		2.9	7	黑色硅化碳质粘土岩。	ZK15116-07
		4.6	8	浅灰色中厚层状弱硅化灰岩, 局部见方解石团块, 中部夹1-2cm厚碳质粘土岩。	ZK15116-08

图 3 ZK15116 SBT 岩性描述及采样位置

Fig. 3 Characteristics and positions of SBT samples in the ZK15116 drill core

地层	柱状图 1:500	厚度 (m)	层号	岩性描述	样品号
龙潭组 (P ₁)		>10	1	深灰色薄层粘土岩与浅灰色薄层细砂岩互层, 见大量微细粒黄铁矿呈浸染状、细脉状分布, 偶见方解石薄脉。	ZK6833-01
		>10	2	深灰色薄层状细砂岩, 方解石脉较发育, 见黄铁矿呈星点状分布。	ZK6833-02
SBT		4.3	3	深灰色强硅化灰岩角砾岩, 角砾成分为灰岩, 分选较差, 棱角至次棱角状, 粒径一般为5-10cm, 胶结物主要为硅质和钙质。自形、半自形石英呈团块状、脉状沿溶孔、裂隙充填, 黄铁矿呈细粒浸染状分布。	ZK6833-03
		5.5	4	灰黑色硅化粘土质粉砂岩, 多被溶蚀呈蜂巢状, 溶孔、溶洞中充填微细粒黄铁矿, 节理裂隙中充填有石英脉。	ZK6833-04
		2.1	5	深灰色硅化钙质粘土岩, 裂隙、溶孔发育, 多被石英充填, 黄铁矿呈浸染状分布, 偶见黄铁矿细脉。	ZK6833-05
		5.0	6	深灰色硅化粘土角砾岩、硅化灰岩角砾岩, 成分为灰岩, 粘土岩, 分选较差, 棱角至次棱角状, 粒径2-8cm。胶结物为石英和黄铁矿细脉, 裂隙发育。	ZK6833-06
		7.1	7	硅化灰岩、细砂岩角砾岩互层, 硅化灰岩角砾岩, 角砾成分为灰岩, 粘土岩, 分选较差, 棱角至次棱角状, 粒径2-6cm。胶结物为硅质和钙质胶结。硅化细砂岩中含大量浸染状黄铁矿, 硅化灰岩角砾岩较致密。	ZK6833-07
		5.1	8	深灰色粘土岩角砾岩, 角砾主要为粘土岩, 胶结物为硅质、钙质胶结。裂隙、溶孔发育, 弱硅化。	ZK6833-08
		2.0	9	灰色薄至中层状粘土岩。	ZK6833-09
		2.5	9	灰色薄至中层状粘土岩。	ZK6833-09
茅口组 (P _{2m})		3.4	10	灰色中至厚层细到中晶泥质灰岩, 偶见方解石脉, 局部夹2-3cm碳质泥岩。	ZK6833-10

图 4 ZK6833 SBT 岩性描述及采样位置

Fig. 4 Characteristics and positions of SBT samples in the ZK6833 drill core

分析方法及步骤简述如下:用中速滤纸($\Phi 12.5$ cm)做好漏斗,称干粗样 10~20g 于漏斗中,用 4% 的硫酸铵溶液(80~100 mL)分多次淋洗至 100 mL 容量瓶中,定容,摇匀,澄清。移取清液 1.00 mL 于聚乙烯试管中,用硝酸(3+97)稀释至 10.0 mL,摇匀,按选定的仪器工作条件及测定模式上机测定。本方法选择 103Rh 作 ICP-MS 测定所有元素的单一内标元素。

2.2 测试结果

稀土元素分析结果见表 1,REE 配分模式采用 Boynton^[21](图 5、6)。为便于对比,笔者收集了前人对水银洞金矿区茅口组灰岩和贵州西部地区区域基性—超基性岩测试的原始数据。对收集的原始数据进行分类并求取平均值,然后根据 Boynton^[21] 球粒陨石值对平均后的数据进行标准化,绘制 REE 配分模式图(图 7)。

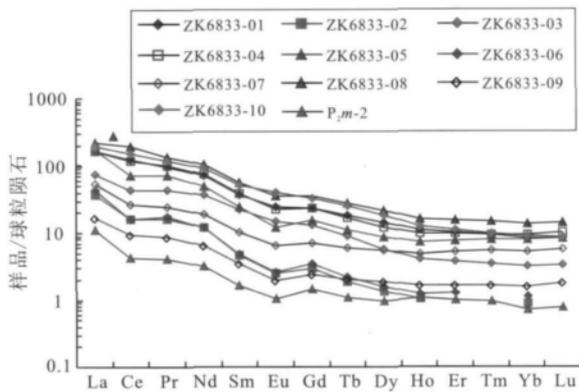


图5 水银洞金矿区 ZK6833 SBT 稀土元素球粒陨石标准化模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of SBT from the ZK6833 drill core in the Shuiyongdong deposit

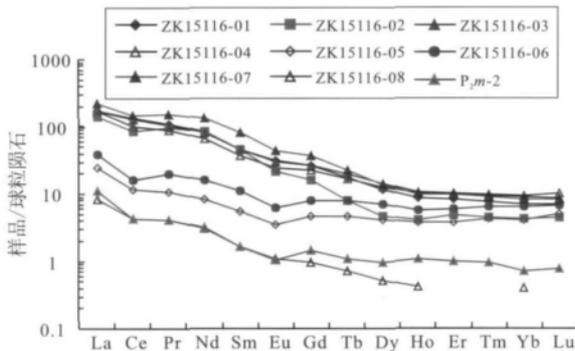
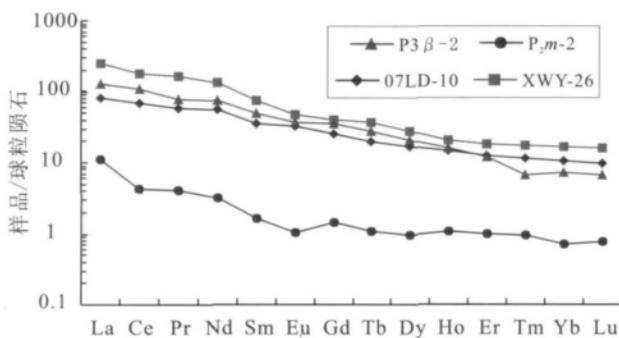


图6 水银洞金矿区 ZK15116 SBT 稀土元素球粒陨石标准化模式图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of SBT from the ZK15116 drill core in the Shuiyongdong deposit



07LD-10-罗甸晚二叠世辉绿岩; XWY-26-贵州西部玄武岩; $P_3\beta-2$ -晴隆大厂玄武岩
07LD-10-Late Permian Diabase in Luodian; XWY-26-Basalt in west of Guizhou; $P_3\beta-2$ -Basalt in Dachang of Qinglong
图7 区域基性-超基性岩及水银洞金矿区茅口组灰岩稀土元素球粒陨石标准化模式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of regional basite and ultrabasics and limestone of the Maokou Formation in the Shuiyongdong deposit

2.2.1 ZK6833 稀土元素特征 ZK6833 的稀土总量为 $(20.27 \sim 334.50) \times 10^{-6}$; LREE/HREE 为 $8.11 \sim 17.51$, $(La/Yb)_N$ 为 $10.03 \sim 38.37$, 总体上轻稀土富集, 配分曲线右倾; 轻稀土有明显的分馏, 而重稀土分馏不明显。 δEu 为 $0.61 \sim 0.94$, 负 Eu 异常明显; δCe 为 $0.52 \sim 1.07$, Ce 明显的负异常到弱正异常。值得注意的是, 在图 5 中茅口组灰岩, 龙潭组粘土岩、细砂岩和 SBT 均具有明显的 W 型稀土四分组效应(四条下凹曲线)。总体上, SBT 与其顶和底正常沉积的龙潭组粘土岩(225.09×10^{-6})、细砂岩(35.39×10^{-6})和茅口组灰岩(10.72×10^{-6})配分模式十分相似, 但是稀土总量比茅口组灰岩高, 比龙潭组粘土岩要低。一般认为岩石中不溶于稀盐酸组分比例越大, 则稀土含量越高^[22]。

2.2.2 ZK15116 稀土元素特征 ZK15116 的稀土总量为 $9.18 \sim 315.67 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 $4.92 \sim 15.87$, $(La/Yb)_N$ 为 $5.94 \sim 32.70$, 总体上轻稀土富集, 配分曲线右倾; 轻稀土有明显的分馏, 而重稀土分馏不明显。 δEu 为 $0.64 \sim 0.84$, 负 Eu 异常明显; δCe 为 $0.55 \sim 0.95$, Ce 负异常明显。另外, 龙潭组粘土岩、细砂岩和 SBT 也具有明显的 W 型稀土四分组效应(图 6)。钻孔中仅 ZK15116-08 稀土总量(9.18×10^{-6})与茅口组灰岩(10.72×10^{-6})相当, 其余均比之高。总体配分曲线相似, 除了 ZK15116-05 [$(La/Yb)_N 5.94$] 和 ZK15116-06 [$(La/Yb)_N 6.09$] 轻重稀土分馏相比较不明显, 曲线为缓右倾型。相对低的 LREE 含量可能与热液蚀变作用过程中稀土元素活化进入含 CO_2 的流体中(流体包裹体成分以 CO_2 含量高为特征, 其摩尔浓度在 $0.14 \sim 7.68$ ^[23]) 形成 $[RE(CO_3)_3]_3$ -络离子^[22], 在成矿晚期沉淀出方解石脉的过程有关。

3 讨 论

3.1 热液流体来源

对于滇黔桂“金三角”卡林型金矿的成矿流体特征及成矿物质来源, 一直是争论的焦点。由于各主要金矿与岩浆岩没有直接而明显的联系, 一些学者倾向于认为成矿物质来源于右江盆地, 成矿流体为富含矿质的盆地流体^[24~26]。陈懋弘等^[27]对烂泥沟卡林型金矿含砷黄铁矿运用 Re-Os 同位素法获得等时线的初始 $n(^{187}Os)/n(^{188}Os)$ 值为 1.127 ± 0.043 , 指示成矿物质来源于地壳而不是地幔。而刘建明等^[6~8]认为成矿发生在沉积和成岩期, 而非后期地质-热事件的产物。

也有学者提出与基性-超基性岩浆岩有关的幔

表1 水银洞金矿区 SBT 及区域岩浆岩稀土元素含量

Table 1 The REEs contents of regional basite, ultrabasics and SBT in the Shuiyongdong deposit area

×10⁻⁶

样号	ZK6833-01	ZK6833-02	ZK6833-03	ZK6833-04	ZK6833-05	ZK6833-06	ZK6833-07	ZK6833-08	ZK6833-09	ZK6833-10
La	49.640	11.420	22.260	50.860	51.850	13.430	16.200	67.900	5.099	57.900
Ce	95.970	12.500	34.040	92.140	56.920	12.570	21.390	151.800	7.366	117.800
Pr	11.510	1.941	5.312	11.920	8.411	2.056	2.941	16.070	1.017	14.190
Nd	42.560	6.970	21.600	44.750	29.390	7.163	11.160	60.440	3.823	54.130
Sm	7.117	0.879	4.292	7.443	4.612	0.940	1.937	10.690	0.657	10.040
Eu	1.772	0.180	1.076	1.633	0.867	0.185	0.459	2.602	0.137	2.886
Gd	5.980	0.738	3.313	5.858	3.947	0.879	1.812	8.912	0.606	8.182
Tb	0.864	0.087	0.415	0.779	0.505	0.104	0.282	1.299	0.095	1.176
Dy	4.547	0.414	1.827	3.789	2.688	0.506	1.708	6.727	0.580	5.794
Ho	0.779	0.073	0.291	0.686	0.518	0.086	0.338	1.156	0.116	0.900
Er	2.057	<0.3	0.775	2.009	1.581	0.265	1.078	3.153	0.336	2.306
Tm	0.293	<0.1	0.109	0.303	0.248	<0.1	0.176	0.473	0.053	0.317
Yb	1.734	0.184	0.667	1.938	1.610	0.236	1.089	2.826	0.328	1.844
Lu	0.270	<0.1	0.110	0.336	0.269	<0.1	0.184	0.455	0.057	0.279
Y	19.640	2.342	8.746	17.570	14.710	2.797	11.350	28.230	4.086	22.190
∑REE	225.093	35.386	96.087	224.444	163.416	38.420	60.754	334.503	20.270	277.744
δCe	0.93	0.59	0.73	0.87	0.60	0.52	0.69	1.07	0.74	0.96
δEu	0.81	0.67	0.84	0.73	0.61	0.61	0.74	0.79	0.65	0.94
LREE	208.569	33.890	88.580	208.746	152.050	36.344	54.087	309.502	18.099	256.946
HREE	16.524	1.496	7.507	15.698	11.366	2.076	6.667	25.001	2.171	20.798
LREE/HREE	12.62	22.65	11.80	13.30	13.38	17.51	8.11	12.38	8.34	12.35
(La/Yb) _N	19.30	41.84	22.50	17.69	21.71	38.37	10.03	16.20	10.48	21.17

样号	ZK15116-01	ZK15116-02	ZK15116-03	ZK15116-04	ZK15116-05	ZK15116-06	ZK15116-07	ZK15116-08	07LD-10	XWY-26	P _{3β-2}	P _{2m-2}
La	52.100	41.610	51.840	51.240	7.534	11.710	66.370	2.565	24.730	77.100	39.045	3.415
Ce	106.200	65.780	103.600	78.910	9.036	12.620	114.800	3.351	55.530	142.400	86.245	3.355
Pr	13.090	11.390	12.570	10.380	1.253	2.351	18.050	0.489	7.090	19.400	9.470	0.495
Nd	49.310	49.080	47.840	39.250	4.890	9.474	77.940	1.833	32.430	79.400	44.535	1.865
Sm	8.827	8.635	8.558	7.161	1.060	2.144	15.670	0.320	6.818	14.030	9.610	0.315
Eu	2.263	1.558	2.180	1.722	0.248	0.442	3.180	0.079	2.349	3.410	2.675	0.075
Gd	6.685	4.126	6.866	5.695	1.174	1.987	9.391	0.239	6.427	10.090	8.930	0.375
Tb	0.806	0.376	0.916	0.775	0.217	0.363	1.025	0.033	0.935	1.750	1.270	0.050
Dy	3.632	1.488	4.453	3.962	1.308	2.188	4.245	0.160	5.255	8.650	6.575	0.300
Ho	0.597	0.287	0.752	0.709	0.263	0.407	0.688	0.030	1.036	1.440	1.130	0.075
Er	1.691	1.011	2.078	2.081	0.770	1.203	2.030	<0.3	2.560	3.760	2.485	0.205
Tm	0.240	0.141	0.301	0.313	0.137	0.203	0.282	<0.1	0.360	0.550	0.210	0.030
Yb	1.432	0.858	1.825	1.957	0.855	1.297	1.731	0.082	2.211	3.380	1.490	0.145
Lu	0.231	0.142	0.285	0.336	0.162	0.218	0.269	<0.1	0.314	0.530	0.215	0.025
Y	14.710	7.951	19.530	18.590	9.195	12.700	23.520	0.851	28.170			
∑REE	247.104	186.482	244.064	204.491	28.907	46.607	315.671	9.181	148.045	365.890	213.885	10.725
δCe	0.96	0.72	0.95	0.78	0.65	0.55	0.78	0.68	1.00	0.86	1.05	0.55
δEu	0.87	0.70	0.84	0.80	0.68	0.64	0.74	0.84	1.07	0.84	0.87	0.67
LREE	231.790	178.053	226.588	188.663	24.021	38.741	296.010	8.637	128.947	335.740	191.580	9.520
HREE	15.314	8.429	17.476	15.828	4.886	7.866	19.661	0.544	19.098	30.150	22.305	1.205
LREE/HREE	15.14	21.12	12.97	11.92	4.92	4.92	15.06	15.88	6.75	11.14	8.59	7.90
(La/Yb) _N	24.53	32.70	19.15	17.65	5.94	6.09	25.85	21.09	7.54	15.38	17.67	15.88

注:部分数据来源:07LD-10 为罗甸晚二叠世辉绿岩 10 个样品平均,据文献 [17];XWY-26 为贵州西部玄武岩 26 个样品平均,据文献 [18]; P_{3β-2} 为晴隆大厂玄武岩 2 个样品平均,据文献 [19];P_{2m-2} 为水银洞金矿区茅口组灰岩 2 个样品平均,据文献 [20]

源流体参与成矿的可能性。苏文超等^[28]通过研究石英流体包裹体中的 Co、Ni、Cu、Pb、Zn、Pt 等微量元素特征,认为成矿物质来源于上地幔分异的流体。苏文超等^[29]对烂泥沟金矿流体包裹体的 Sr 同位素示踪发现,成矿流体的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值(0.7101)普遍低于赋矿围岩(0.7124),通过与金牙、丹寨卡林型金矿的对比,认为成矿物质可能主要不是赋矿围岩来源。朱赖民等^[30]通过对黔西南板其、丫他及戈塘金矿硫化物铅、硫同位素、石英包裹体氢氧同位素研究

认为,成矿流体应来源于深源,成矿作用与深源流体活动关系密切。

据刘建中等^[13]水银洞超大型金矿成矿模式, SBT 产出的 P_{2m} 与 P_{3l} 不整合界面(区域构造滑脱面)是成矿热液侧向远距离运输的通道。而热液体系中稀土元素可以有效地示踪成矿流体的来源和提供热液蚀变过程中水-岩作用的有用信息^[31],因此,研究 SBT 中热液作用强烈的岩矿石的稀土元素地球化学特征能很好的示踪成矿流体的来源和性

质。

现将本文 SBT 稀土元素测试结果及收集的稀土元素数据做如下比较。

(1) SBT 围岩: 钻孔岩心中发现, SBT 与围岩地层地质特征区别明显。在其顶部采取龙潭组(P_3L)岩石, 因底部钻孔揭露茅口组不完整, 因此收集了刘建中等^[20]测试的茅口组灰岩的数据。从图 5、6 可见, 在钻孔 ZK6833 中, SBT 稀土配分型式与龙潭组(粘土质粉砂岩、粘土岩)和茅口组(灰岩)十分相似, 曲线位置、稀土总量总体介于两者之间。在钻孔 ZK15116 中, SBT 稀土配分型式除 ZK15116-05 $[(La/Yb)_N 5.94]$ 和 ZK15116-06 $[(La/Yb)_N 6.09]$ 外, 轻重稀土分馏不明显, 为缓右倾型, 其余均相似。陈懋弘等^[32]对烂泥沟金矿含砷黄铁矿和脉石英及其包裹体的稀土元素, 研究表明其与矿床矿石和围岩稀土配分型式及特征值十分相似, 具有壳源沉积特点, 反应成矿流体以壳源为主。

(2) 区域岩浆岩: 本文收集了罗甸晚二叠世辉绿岩^[17], 贵州西部玄武岩^[18], 晴隆大厂玄武岩^[19] 稀土元素数据(表 1)。然后根据 Boynton^[21] 球粒陨石值对平均后的数据进行标准化处理(图 7)。

总体上看西部玄武岩、罗甸辉绿岩、大厂玄武岩配分型式十分相似, 均表现为缓右倾型, 西部玄武岩稀土总量为 365.89×10^{-6} , LREE/HREE 为 11.14, $(La/Yb)_N$ 为 15.38, δEu 为 0.84, Eu 弱负异常; δCe 为 0.86, Ce 弱负异常; 罗甸辉绿岩稀土总量为 148.04×10^{-6} , LREE/HREE 为 6.75, $(La/Yb)_N$ 为 7.54, δEu 为 1.07, Eu 弱正异常; δCe 为 1.00, Ce 无异常; 大厂玄武岩稀土总量为 213.89×10^{-6} , LREE/HREE 8.59, $(La/Yb)_N$ 17.67, δEu 0.87, Ce 弱负异常; δCe 1.05, Eu 弱正异常。这些特征与钻孔 ZK 为 15116-05 和 ZK15116-06 SBT 稀土组成及其特征值明显不同。刘建中等^[20]在对比水银洞金矿矿石和峨眉山玄武岩的稀土组成及配分型式之后, 认为二者的稀土配分曲线不相似, 玄武岩可能与 SBT 形成及成矿无关。

3.2 Eu、Ce 异常与成矿流体性质

Eu、Ce 异常产生与其价态有关。一般认为, 风化或蚀变作用中 REE 的净增和净减取决于: ①未蚀变岩石 REE 丰度, REE 在岩石中矿物相内的分配和富集位置; ②流体的 REE 浓度, REE 在矿物相和流体相之间的分配情况, 流体萃取迁移 REE 的能力; ③次生矿物容纳原生矿物释放的 REE 的能力^[31]。

钻孔 ZK6833 和钻孔 ZK15116 的 δEu 分别为

0.61~0.94 和 0.64~0.84, 具有明显负 Eu 异常, 保持着沉积岩的基本特征, 成矿热液的稀土特征可能是对源岩的继承。而 Eu 在还原条件下主要以 Eu^{2+} 存在, 而导致与稀土元素发生的分离, 形成 Eu 的正异常或负异常。前人对滇黔桂金矿的研究证实成矿流体为中酸性^[23], 这与 SBT 中大量发育黄铁矿、辉锑矿、毒砂、雌(雄)黄等硫化物的事实相符。因此, 流体的性质也可对 Eu 异常产生影响。

Ce 异常是 Ce^{3+} 被氧化成 Ce^{4+} 后的分馏所致。钻孔 ZK6833 和 ZK15116 中 SBT δCe 分别为 0.52~1.07 和 0.55~0.95, 具有明显负异常到弱正异常, 变化较大。一般认为, 海水明显亏损 Ce。因此, 封存于地层中的古海水的加入可能是导致 Ce 明显负异常的原因。

3.3 SBT 及围岩稀土元素四分组效应

Masuda 等^[33]最先发现海相环境具有 W 型稀土元素四分组效应。赵振华等^[34,35]发现我国华南稀有金属花岗岩具有 M 型稀土四分组效应。另外, 近年来有关河北省东坪水泉沟钾长石化-硅化碱性正长岩的研究发现一种 M 型和 W 型同时存在的 MW 复合型(MW 型)稀土四分组效应, 被认为是流体/熔体(水-岩)相互作用及富 Cl、 CO_2 、Si、K、Al, 高温、中低盐度流体热液流体交代蚀变作用的叠加所致^[36]。彭建堂等^[37]发现湘西沃溪白钨矿中存在稀土元素的 M 型四分组效应, 认为白钨矿的成因与流体作用或水-岩反应有关。越来越多的研究证实, 某些热液成因的岩石其全岩和单矿物均存在稀土元素“四重效应”, 而且流体作用可能是这种效应产生的主要原因。由图 5、6 可见, 钻孔 ZK6833 和钻孔 ZK15116 的 SBT 及围岩均具有明显的 W 型稀土元素四分组效应。值得注意的是, 在图 7 中采自黔西南大厂 SBT 上部的玄武岩同样具有这一效应, 而 SBT 与围岩的界限往往是根据野外地质特征划定的, 对 SBT 顶、底部围岩的显微镜下观察研究也发现围岩地层均具有程度不同的热液蚀变特征, 而且水银洞金矿床主要矿体产于龙潭组地层。因此, 各种热液流体(以壳源为主)淋滤、渗滤围岩地层而发生的流体作用或水-岩反应可能是 SBT 及围岩具有明显 W 型稀土元素四分组效应的主要控制因素。

3.4 SBT 成因

调查表明^[38~41], 海底热水系统流体普遍具有 LREE 富集、显著的 Eu 正异常特征, 与水银洞金矿区 SBT 中稀土配分型式(Eu 负异常)明显不同, 热液流体主要不是来源于海底热水, SBT 形成可能与

热水喷流沉积无关。

通过对部分出露点野外剖面实测和室内显微镜下详细观察研究,发现 SBT 以角砾状构造和强硅化蚀变为显著特征,角砾成分主要为灰岩、粘土岩等,多被石英、方解石胶结,角砾无分选,棱角状。显微镜下见两期石英,第一期颗粒细小,微至细晶它形粒状,粒径 0.01~0.1 mm,交代泥晶方解石而呈方解石假像,局部见方解石残余;第二期石英颗粒较粗,自形-半自形,粒径 0.2~0.5 mm,呈团块状、脉状产出。主要载金矿物黄铁矿呈立方体、十二面体、草莓状星散分布。节理裂隙面见辉锑矿、雌(雄)黄等低温热液矿物。可见,SBT 具有明显构造-热液活动的痕迹,系原岩岩层在构造破碎呈角砾的基础上又叠加了后期热液交代作用的产物。陈懋弘等^[27]认为黔西南卡林型金矿成矿作用发生在从印支期挤压造山向燕山期伸展转变的构造转换期。断裂系统及角砾岩的存在,大大提高了含金热液渗透率,含矿热液最终在灰家堡背斜核部减压扩容空间沉淀,形成灰家堡矿田。

4 结 论

(1) SBT 稀土配分曲线型式与龙潭组(粘土质粉砂岩、粘土岩)和茅口组(灰岩)十分相似,稀土总量总体介于两者之间,表现为轻重稀土分馏明显,曲线右倾型;轻稀土分异明显,曲线右倾程度大;重稀土分异不明显,曲线平坦。负 Eu、Ce 异常明显。Eu 负异常的出现可能主要是对围岩的继承 Ce 明显负异常可能是地层中的古海水的加入所致。

(2) SBT 稀土元素配分型式与区域基性-超基性岩差别大,而与围岩配分型式相似,表明成矿流体主要以壳源为主。

(3) SBT 及围岩均具有明显 W 型稀土元素四分组效应,热液流体淋滤、渗滤围岩地层而发生的流体作用或水-岩反应可能是主要控制因素。

(4) SBT 稀土配分型式与现代海底热水差别大,表明热液流体不是来自于海底热水系统流体;水银洞金矿区钻孔揭露的 SBT 以角砾状构造和强蚀变为显著特征,SBT 应为构造-热液成因,可能与热水喷流沉积无关。

致 谢:野外工作得到贵州紫金矿业公司陈明、陈发恩、付芝康工程师等的大力支持和帮助,成文过程得到贵州大学顾尚义教授悉心指导和帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- [1] 刘建中,夏勇,邓一明,苏文超,张兴春,邱林,陈明,陈发恩,付芝康. 贵州水银洞 Sbt 研究及区域找矿意义探讨[J]. 黄金科学技术, 2009, 17(3):1-5.
Liu Jianzhong, Xia Yong, Deng Yiming, Su Wenchao, Zhang Xinchun, Qiu Lin, Chen Ming, Chen Fa'en, Fu Zhikang. Researches on the Stb of Shuiyindong gold deposit and significance for regional prospecting[J]. Gold Science and Technology, 2009, 17(3):1-5. (in Chinese with English abstract)
- [2] 曹鸿水. 黔西南“大厂层”形成环境及其成矿作用的探讨[J]. 贵州地质, 1991, 8(1):5-12.
Cao Hongshui. Researches on the forming environment and metallization of the Dachang stratum in SW-Guizhou, China [J]. Guizhou Geology, 1991, 8(1):5-12. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘巽锋,陶平. 贵州火山凝灰岩型金矿地质特征及找矿意义[J]. 中国地质, 2001, 28(1):30-35.
Liu Xunfeng, Tao Ping. Geological characteristic of volcanic tuff type gold deposit and prospecting significance in Guizhou [J]. Geology in China, 2001, 28(1):30-35. (in Chinese)
- [4] 陶平,朱华,陶勇. 黔西南凝灰岩型金矿的层控特征分析[J]. 贵州地质, 2004, 21(1):30-37.
Tao Ping, Zhu Hua, Tao Yong. Stratabound feature of tuff-type gold deposits, southwest Guizhou[J]. 2004, 21(1):30-37. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高振敏,李红阳,杨竹森,陶琰,罗泰义,刘显凡,夏勇,饶文波. 滇黔地区主要类型金矿的成矿与找矿[M]. 北京:地质出版社, 2002.
Gao Zhenmin, Li Hongyang, Yang Zhusen, Tao Yan, Luo Taiyi, Liu Xianfan, Xia Yong, Rao Wenbo. Exploration and metallogenesis of the Main Gold Deposits in Dianqian Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘建明,刘家军. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. 矿物学报, 1997, 17(4): 448-456.
Liu Jianming, Liu Jiajun. Basin fluid genetic model of sediment-hosted microdisseminated gold deposits in the gold-triangle area between Guizhou, Guangxi and Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1997, 17(4):448-456. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘建明,刘家军,郑明华,顾雪祥. 微细浸染型金矿床的稳定同位素特征与成因探讨[J]. 地球化学, 1998, 27(6): 585-591.
Liu Jianming, Liu Jiajun, Zheng Minghua, Gu Xuexiang. Stable isotope compositions of micro-disseminated gold and genetic discussion[J]. Geochimica, 1998, 27(6): 585-591. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘建明,叶杰,刘家军,顾雪祥. 论我国微细浸染型金矿床与沉积盆地演化的关系——以右江盆地为例[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 367-377.
Liu Jianming, Ye Jie, Liu Jiajun, Gu Xuexiang. Relationship between sediments-hosted micro-disseminated gold deposits and basin evolution: Case study in Youjiang Basin, China[J].

- Mineral Deposits, 2001, 20(4): 367—377. (in Chinese with English Abstract)
- [9] 刘家军, 刘建明, 顾雪祥, 林丽. 黔西南微细浸染型金矿床的喷流沉积成因[J]. 科学通报, 1997, 42(19): 2126—2127.
Liu Jiajun, Liu Jianming, Gu Xuexiang, Lin Li. The exhalation sedimentation genetic of sediments-hosted micro-disseminated gold deposits in southwest Guizhou[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(19): 2126—2127. (in Chinese)
- [10] Gu X X, Liu J M, Schulz O. Syngenetic origin for the sediment-hosted disseminated gold deposits in NW-Sichuan, China: Ore fabric evidence [J]. Ore Geology Review, 2002, 22: 91—116.
- [11] 陈翠华, 何彬彬, 顾雪祥, 刘建明. 右江沉积盆地演化与微细浸染型金矿床成矿作用关系探讨[J]. 地质与勘探, 2004, 40(1): 21—25.
Chen Cuihua, He Binbin, Gu Xuexiang, Liu Jianming. Relationship between evolution of the Youjiang sedimentary basin and metallogenesis of micro-disseminated gold deposits[J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(1): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘建中. 贵州水银洞金矿床矿石特征及金的赋存状态[J]. 贵州地质, 2003, 20(1): 30—34.
Liu Jianzhong. Ore characteristics and the location and state of gold of the Shuiyindong gold deposit, Zhenfeng, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 2003, 20(1): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘建中, 邓一明, 刘川勤, 张兴春, 夏勇. 贵州省贞丰县水银洞层控特大型金矿成矿条件与成矿模式[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 168—177.
Liu Jianzhong, Deng Yiming, Liu Chuanqin, Zhang Xinchun, Xia Yong. Metallogenic conditions and model of the superlarge Shuiyindong stratabound gold deposit in Zhengfeng County, Guizhou Province[J]. Geology in China, 2006, 33(1): 168—177. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘建中, 陈景河, 邓一明, 付芝康, 陈发恩, 陈明, 游彬. 贵州水银洞超大型金矿勘查实践及灰家堡矿集区勘查新进展[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(2): 139—145.
Liu Jianzhong, Chen Jinghe, Deng Yiming, Fu Zhikang, Chen Fa'en, Chen Ming, You Bin. Exploration of the Shuiyindong super-scale gold deposit and the evolution of exploration for metallogenic belt of the Huijiabao anticline in Guizhou Province[J]. Geological Survey and Research, 2009, 32(2): 139—145. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘显凡, 吴德超, 刘远辉, 罗孝桓, 陶平, 阳正熙, 王雪华. 黔西南低温成矿域中不同层位不同类型金矿的内在统一成矿机制探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(3): 93—101.
Liu Xianfan, Wu Dechao, Liu Yuanhui, Luo Xiaohuan, Tao Ping, Yang Zhengxi, Wang Xuehua. The genetic mechanisms of the gold deposits in low-temperature mineralization area in southwestern Guizhou [J]. Sediment. Geol. Tethyan Geol., 2003, 23(3): 93—101. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王砚耕, 索书田, 张明发. 黔西南构造与卡林型金矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Wang Yangeng, Suo Shutian, Zhang Mingfa, Tectonics and Carlin-type gold deposits in southwestern Guizhou[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 曹远志, 张静艺. 贵州罗甸二叠世辉绿岩及其区域构造意义[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 798—799.
Han Wei, Luo Jinhai, Fan Junlei, Cao Yuanzhi, Zhang Jingyi. Late Permian diabase in Luodian, southeastern Guizhou, and its tectonic significances[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 798—799. (in Chinese with English abstract)
- [18] 成杭新, 庄广民, 赵传东, 张勤, 俞劲松. 贵州西部 Pt, Pd 异常源稀土元素地球化学示踪的初步研究[J]. 地质与勘探, 2003, 39(2): 47—48.
Cheng Hangxin, Zhuang Guangming, Zhao Chuandong, Zhang Qin, Yu Jingsong. A preliminary study on REE geochemical trace for anomaly source of Pt and Pd in western Guizhou Province [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(2): 47—48. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈代演. 滇东黔西若干层控锑汞矿床稀土元素地球化学特征[J]. 有色金属矿产与勘查, 1993, 2(4): 202—210.
Chen Daiyan. REE geochemical characteristics of some stratabound Sb-Hg deposits in western Guizhou and eastern Yunnan [J]. Nonferrous Metal Mineral Resources and Exploration, 1993, 2(4): 202—210. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘建中, 刘川勤. 贵州省贞丰县水银洞金矿床稀土元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 21(2): 135—139.
Liu Jianzhong, Liu Chuanqin. REE Geochemical Characteristics of the Shuiyindong gold deposit, Zhenfeng, Guizhou [J]. Bull. Mineral. Petrol. Geochem., 2005, 21(2): 135—139. (in Chinese with English abstract)
- [21] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. Dev. Geochem., 1984, 2: 63—114.
- [22] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 科学出版社, 1989.
Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. Geochemistry of Rare Earth Elements[M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
- [23] 刘显凡, 苏文超, 朱赖民. 滇黔桂微细粒浸染型金矿深源流体成矿机理探讨[J]. 地质与勘探, 1999, 35(1): 14—19.
Liu Xianfan, Su Wenchao, Zhu Laimin. An approach on mechanism of juvenile fluid mineralization for Carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi[J]. Geology and Prospecting, 1999, 35(1): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘东升, 耿文辉. 我国卡林型金矿的地质特征、成因及找矿方向[J]. 地质与勘探, 1987, 23(12): 1—12.
Liu Dongsheng, Geng Wenhui. Geological characteristics and origins and prospect of Carlin-type gold deposits in China [J]. Geology and Prospecting, 1987, 23(12): 1—12. (in Chinese with English abstract)

- [25] 韩至均, 温学庸. 黔西南金矿及其成矿模式[J]. 贵州地质, 1996, 13(2): 146—153.
Han Zhijun, Wen Xueyong. Gold deposits in southwest Guizhou and their metallogenetic model[J]. Guizhou Geology, 1996, 13(2): 146—153. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王国芝, 胡瑞忠, 苏文超, 朱赖民. 滇黔桂地区右江盆地流体流动与成矿作用[J]. 中国科学(D), 2002, 23(增刊): 78—86.
Wang Guozhi, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Zhu Liming. The Youjiang sedimentary basin fluid and metallogenesis in the gold-triangular area between Guizhou, Guangxi and Yunnan [J]. Science in China (series D), 2002, 23(suppl.): 78—86. (in Chinese)
- [27] 陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 吴六灵, Phillip J u., Tony Norman, 郑建民, 秦运忠. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义[J]. 地质论评, 2007, 3(55): 372—381.
Chen Maohong, Mao Jingwen, Qu Wenjun, Wu Liuling, Phillip J U., Tony Norman, Zheng Jianmin, Qin Yunzhong. Re-Os dating of arsenian pyrites from the lannigou gold deposit, Zhenfeng, Guizhou Province, and its geological significances[J]. Geol. Rev., 2007, 3(55): 372—381. (in Chinese with English abstract)
- [28] 苏文超, 胡瑞忠, 漆亮, 方维萱. 黔西南卡林型金矿床流体包裹体微量元素研究[J]. 地球化学, 2001, 30(6): 512—516.
Su Wenchao, Hu Ruizhong, Qi Liang, Fang Weixuan. Trace elements in fluid inclusions in the Carlin-type gold deposits, southwestern Guizhou Province[J]. Geochimica, 2001, 30(6): 512—516. (in Chinese with English abstract)
- [29] 苏文超, 胡瑞忠, 彭建堂, 方维萱. 滇黔桂地区卡林型金矿床物质来源的锶同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 256—259.
Su Wenchao, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Fang Weixuan. The Sr isotope evidence for source of ore-forming materials in the Carlin-type gold deposits, in the gold-triangular area between Guizhou, Guangxi and Yunnan [J]. Bull. Mineral. Petrol. Geochem., 2000, 19(4): 256—259. (in Chinese with English abstract)
- [30] 朱赖民, 金景福, 何明友, 胡瑞忠. 初论黔西南微细浸染型金矿床深源流体成矿[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 3(16): 173—16.
Zhu Laimin, Jin Jingfu, He Mingyou, Hu Ruizhong. An initial study of the mineralization of plutonic fluid of the fine-disseminated gold deposit in southwest Guizhou Province[J]. Bull. Miner. Petrol. Geochem., 1997, 3(16): 173—16. (in Chinese with English abstract)
- [31] Henderson P. Rare earth element geochemistry [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1984: 175—213.
- [32] 陈懋弘, 吴六灵, Phillip J U. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含砷黄铁矿和脉石英及其包裹体的稀土元素特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(20): 2423—2432.
Chen Maohong, Wu Liuling, Phillip J. Uttlerly, Tony Norman, Zheng Jianmin, Qin Yunzhong. REE features of arsenian pyrite and vein quartz and their fluid inclusions in the Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(20): 2423—2432. (in Chinese with English abstract)
- [33] Masuda A. Ikeuchi Y. Lanthanide tetrad effect observed in marine environment[J]. Geochem J., 1979, 13: 19—22.
- [34] 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, 1992, 21(3): 221—233.
Zhao Zhenhua, Masuda, Shabani. Tetrad effects of rare, earth elements in rare-metal granites[J]. Geochimica, 1992, 21(3): 221—233. (in Chinese with English abstract)
- [35] 赵振华, 熊小林, 韩小东. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨——以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J]. 中国科学(D), 1999, 29(4): 331—338.
Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Han Xiaodong. Forming mechanism of tetrad effects of rare earth elements in granites: Taking Qianlishan and Barze granites as examples[J]. Sci. in China(D), 1999, 29(4): 331—338. (in Chinese)
- [36] 赵振华, 包志伟, 乔玉楼. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应: 以水泉沟碱性正长岩为例[J]. 科学通报, 2010, 55(15): 1474—1488.
Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Qiao Yulou. A peculiar composite M- and W-type REE tetrad effect: Evidence from the Shuiquangou alkaline syenite complex, Hebei Province, China[J]. Chin. Sci. Bull., 2010, 55(15): 1474—1488. (in Chinese)
- [37] 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲, 袁顺达. 湘西沃溪金锑钨矿床中白钨矿的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 115—126.
Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, Fu Yazhou, Yuan Shunda. Rare earth element (REE) geochemistry for scheelite from the Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan [J]. Geochimica, 2005, 34(2): 115—126. (in Chinese with English abstract)
- [38] Michard A, Albarède F, Michard G. Rare-earth elements and uranium in high-temperature solutions from East Pacific Rise hydrothermal vent field (13°N) [J]. Nature, 1983, 303: 795—797.
- [39] Mills R A, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59: 3511—3524.
- [40] Klinkhammer G P, Elderfield H, Mitra A. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58: 5105—5113.
- [41] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 周宗桂. 海底热液沉积物稀土元素组成及其意义[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 27—35.
Ding Zhenju, Liu Congqiang, Yao Shuzhen, Zhou Zonggui. REE composition of hydrothermal sediment in seafloor and its implication[J]. Inform. Geol. Sci. Tech., 2000, 19(1): 27—35. (in Chinese with English abstract)