

doi: 10. 20008/j. kckc. 202309008

# 黔西南雄武金矿床元素地球化学特征 及其地质意义

宋威方<sup>1,2</sup>, 刘建中<sup>2,3</sup>, 吴攀<sup>2</sup>, 谢卓君<sup>4</sup>, 王泽鹏<sup>5</sup>, 杨成富<sup>5</sup>, 邹院兵<sup>1</sup>, 熊扬福<sup>1</sup>,  
陈松<sup>1</sup>, 刘兴平<sup>1</sup>

(1. 湖北省地质局 第六地质大队, 湖北 孝感 432000; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550004; 4. 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, 贵州 贵阳 550002; 5. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇五地质大队, 贵州 贵阳 550018)

**摘要** 黔西南雄武金矿床为赋存在构造蚀变体(SBT)中的一中型金矿床, 为了探讨雄武金矿床水岩交换过程中的元素迁移规律、矿质来源和成矿流体特征, 本次研究基于ICP-MS对雄武金矿典型剖面上的8个矿石和近矿围岩样品进行微量元素和稀土元素测试, 结果显示, 在水岩反应过程中微量元素主要以Au、As、Sb、Hg、Li、U等元素进入围岩, Co、Ni、Sr、Hf、Th被带出容矿岩石为特征。经球粒陨石标准化后的稀土元素曲线主要表现为轻稀土相对富集的右倾型, 围岩与矿石 $\Sigma$ LREE为 $24.69 \times 10^{-6} \sim 283.31 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma$ HREE为 $3.94 \times 10^{-6} \sim 25.15 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE为3.90~8.21, 曲线显示典型的“四分组”特征, 指示轻稀土分馏相对较强的特点, 且矿石经历了显著的热液蚀变反应; 根据矿石的Ce负异常和Eu正异常值, 指示成矿流体部分来源于深部弱酸性和还原性温度较高(>250 °C)的流体特征, 成矿物质可能来源于深部。本次研究成果对于深入了解雄武金矿床成因具有重要意义。

**关键词** 黔西南; 雄武金矿床; 元素地球化学; “四分组”效应; 弱酸性流体

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1674-7801(2023)09-1621-09

## Geochemical characteristics of elements and geological significance of the Xiongwu gold deposit in Southwest Guizhou

SONG Weifang<sup>1,2</sup>, LIU Jianzhong<sup>2,3</sup>, WU Pan<sup>2</sup>, XIE Zhuojun<sup>4</sup>, WANG Zepeng<sup>5</sup>, YANG  
Chengfu<sup>5</sup>, ZOU Yuanbing<sup>1</sup>, XIONG Yangfu<sup>1</sup>, CHEN Song<sup>1</sup>, LIU Xingping<sup>1</sup>

(1. Sixth Geological Team of Hubei Geological Bureau, Xiaogan 432000, Hubei, China; 2. Guizhou University Resource and

[收稿日期]2020-11-14; [修回日期]2023-02-20

[基金项目]本文受湖北省自然科学基金联合基金项目(2023AFD230)、湖北省地质局科研项目“鄂东北地区战略性矿产成矿条件与找矿方向研究”(KJ2023-29)、国家自然科学基金联合基金项目(U1812402)和贵州省科技计划项目“贵州省卡林型金矿成矿与找矿科技创新人才团队建设”(黔科合人才平台-CXTD[2021]007)联合资助。

[第一作者简介]宋威方,男,1992年生,博士,工程师,主要从事矿床学研究;E-mail:865770658@qq.com。

[引用格式]宋威方,刘建中,吴攀,谢卓君,王泽鹏,杨成富,邹院兵,熊扬福,陈松,刘兴平. 2023. 黔西南雄武金矿床元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿产勘查, 14(9): 1621-1629.

Song Weifang, Liu Jianzhong, Wu Pan, Xie Zhuojun, Wang Zepeng, Yang Chengfu, Zou Yuanbing, Xiong Yangfu, Chen Song, Liu Xingping. 2023. Geochemical characteristics of elements and geological significance of the Xiongwu gold deposit in Southwest Guizhou [J]. Mineral Exploration, 14(9): 1621-1629.

*Environmental Engineering College, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province, Guiyang 550004, Guizhou, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 5. Brigade 105, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province, Guiyang 550018, Guizhou, China)*

**Abstract:** The Xiongwu gold deposit in Southwest Guizhou Province is a medium-sized gold deposit occurring in structural alteration variation (SBT). In order to explore the element migration rule, mineral source and ore-forming fluid characteristics in the water-rock exchange process of Xiongwu gold deposit, this study conducted trace and rare earth elements test on 8 ore and surrounding rock samples from the typical section of Xiongwu gold deposit based on ICP-MS. In the process of water-rock reaction, the trace elements are mainly Au, As, Sb, Hg, Li, U and other elements enter the surrounding rock, and Co, Ni, Sr, Hf, Th are carried out of the ore-bearing rock. The curve of rare earth elements normalized by chondrites mainly shows a right-leaning type of relative enrichment of light rare earth elements. The  $\Sigma$ LREE of surrounding rock and ore ranges from  $24.69 \times 10^{-6}$  to  $283.31 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma$ HREE ranges from  $3.94 \times 10^{-6}$  to  $25.15 \times 10^{-6}$ , and LREE/HREE ranges from 3.90 to 8.21. The curves show typical “four-group” characteristics, indicating that light rare earth fractionation is relatively strong, and the ore has undergone significant hydrothermal alteration reaction. According to the negative Ce anomaly and positive Eu anomaly of the ores, it indicates that the ore-forming fluid is partly derived from the fluid characteristics of deep weak acidity and high reducing temperature ( $>250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), and the ore-forming material may come from the deep. This study is of great significance to further understand the genesis of the Xiongwu gold deposit.

**Keywords:** Southwest Guizhou; Xiongwu gold deposit; elemental geochemistry; “four grouping” effect; weak acid fluid

## 0 引言

近几十年来随着勘探水平和分析测试技术的提高,国内许多超大型、大型矿床相继被发现。滇黔桂“金三角”卡林型金成矿区为全球两大低温成矿域之一,其大地构造位置位于扬子板块西南缘与右江褶皱带交汇部,区内报道金矿床(点)50余个,这些金矿床(点)在区域构造、含矿层位、容矿岩性、矿石类型、矿体展布和就位空间等方面有诸多相似之处,特别是在矿床基本特征方面极为相似,区内金矿化受构造、地层和岩性控制明显(郑禄林, 2017;覃英等, 2021)。产于中国黔西南的卡林型金矿其成矿动力学背景、成矿机制、成矿作用、成矿期次及成矿物质来源较为复杂且存在较大争议,不同学者提出过不同的成矿模式(王砚耕, 1994;何立贤, 1996;罗孝恒, 1997;郭振春, 2002;夏勇等, 2009;姜伟等, 2022),主要有:①盆地沉积岩系出渗卤水混合大气降水成因模式(贾大成和胡瑞忠, 2001);②沉积盆地底部热水喷流成因模式(刘家军等, 1997;贾大成和胡瑞忠, 2001);③沉积地层释放层间水成因模式(刘建明等, 2001);④与深埋地下

的全隐伏岩体释放的岩浆热液相关的成因模式(刘建中等, 2018;赵胜利等, 2021);⑤地层水或盆地流体在中—上二叠统之间不整合面聚集成因模式(陈开礼, 2000);⑥深部含油气热流体沿穿层构造向上运移成因模式(向才富等, 2002)。区内雄武金矿床发现以来,前人主要针对矿床地质特征(邓存新和郑懋荣, 2003;刘民元等, 2007;陈坡等, 2017)、土壤地球化学(苏信明等, 2006)和地球物理勘查(何立贤等, 1994;李朝晋等, 2007)开展了部分研究,有关矿床元素地球化学、物质来源、流体来源和矿床成因等的研究尚不深入。针对以上问题,本次研究系统采集雄武金矿床野外剖面的岩石和矿石样品,从稀土元素组成特征和微量元素迁移变化规律切入,厘清其成矿作用类型和成矿流体来源及性质,为更加深入的理论研究提供基础资料和元素地球化学支撑,为与本区同类型矿床对比提供可靠的元素地球化学数据,并指导该区找矿预测研究。

## 1 区域地质背景和矿体特征

### 1.1 区域地质背景

研究区大地构造位于扬子与华夏古板块接触

部位西南缘(图 1a),是中国西南重要的卡林型金矿床矿集区的重要组成部分,处于中生代金-铅-锌-铋-铜-锰-铝-磷成矿区中部。滇黔桂“金三角”是由南丹—昆仑、个旧—宾阳和弥勒—师宗 3 个区域性穿层大断裂围成的三角形区域(刘建中等, 2018)。区域构造活动显示出多期、多阶段、多性质的活动特征,岩浆活动较为强烈,地层层序完整,热液型矿种多样,各种矿床及矿点呈片状、带状产出,矿床产出位置及矿体特征多样。其中共发现大小金矿床(点)200 余处,包括 2 个超大型金矿床和 6 个大型金矿床,截止目前,已查明金金属量超过 920 t,即将突破千吨,成为中国最重要的金矿产区之一(图 1)。自古生代以来,区内岩浆活动主要划分为两期,分别是早期的峨眉大火成岩省玄武岩喷溢和“金三角”南部的基性辉绿岩脉侵入,该次岩浆活动

大致发生在海西期,相应的岩浆岩体(脉)主要分布在黔西南普安县—晴隆县一线以西;而晚期岩浆活动相对局限,且多以碱性—基性岩脉形式侵入到二叠纪和三叠纪地层和断裂构造中,本次岩浆活动大致发生于燕山期,多集中产出在黔西南北盘江以南、贞丰县以北地区(何立贤等, 1993;冯博等, 2022)。本区岩浆活动事件对区域影响最大的是峨眉地幔柱活动和相关的拉斑玄武岩溢流,此次岩浆活动始于晚古生代,古生代末期至整个中生代岩浆活动频繁,且规模巨大,直至新生代早期喷发接近尾声。在区内岩浆活动早期,基性岩浆大规模喷溢至地表形成峨眉山玄武岩,其在黔西有较广泛分布,在威宁地区为最厚(大致呈东薄西厚),延伸至瓮安、福泉一代逐渐尖灭,呈向东凸的舌形(贵州省地质矿产局, 1987)。

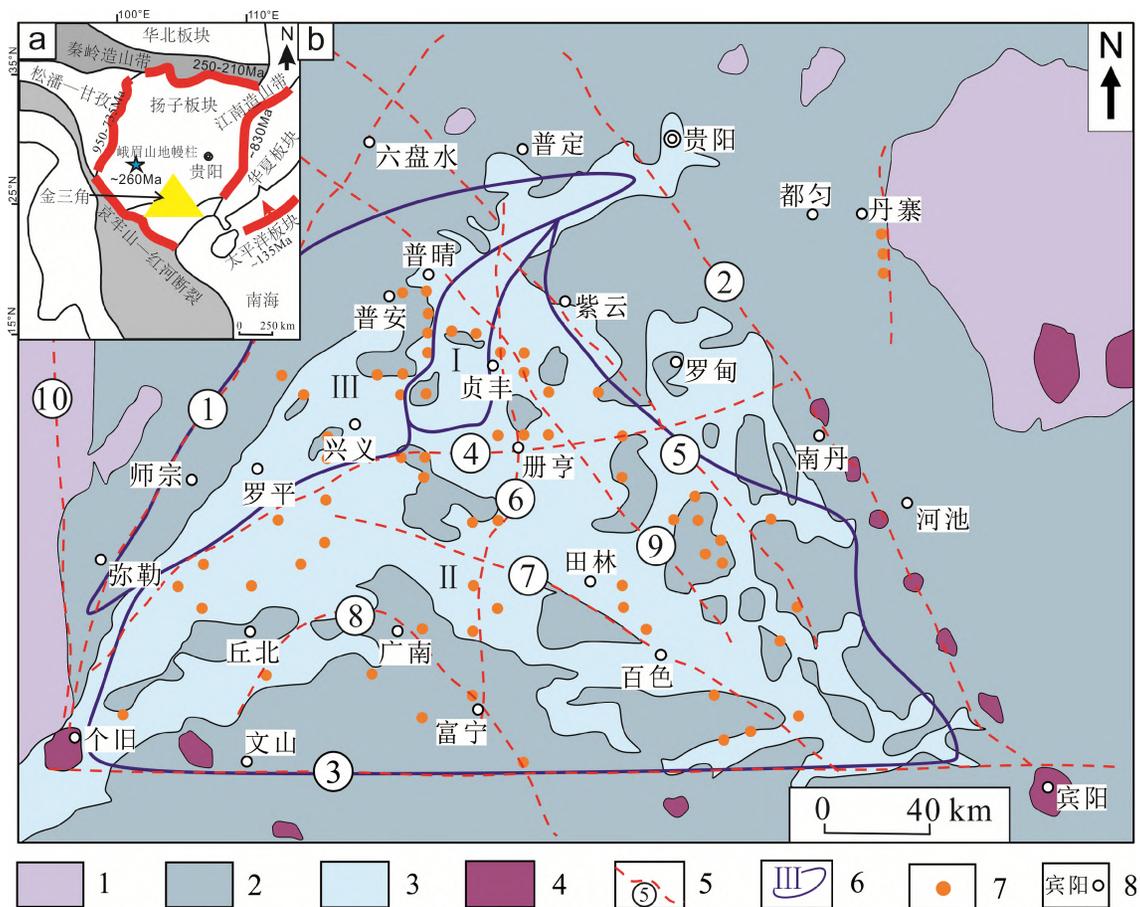


图 1 滇黔桂“金三角”大地构造位置图(a)及中国西南部滇黔桂“金三角”地质简图(b,据刘建中等,2017修改)

1—元古宇—震旦系;2—古生界;3—三叠系;4—花岗岩体;5—深断裂及编号;6—成矿带及编号(I—兴仁—安龙金矿带;II—右江金矿带;III—晴隆—罗平金矿带);7—金矿床;8—地名

①—师宗—弥勒断裂;②—南丹—昆仑关断裂;③—个旧—宾阳断裂;④—开远—平塘断裂;⑤—紫云—坝都断裂;⑥—普定—册亨断裂;  
⑦—右江深断裂;⑧—文山—广南—富宁断裂;⑨—晴隆—册亨断裂;⑩—小江断裂

## 1.2 矿床地质特征

黔西南地区雄武金矿床是受构造蚀变体(SBT)控制的金矿床,也是构造蚀变体(SBT)重要的地表出露点,底部与中二叠统茅口组不整合接触,两组地层界线清晰,顶部由硅化黏土岩或次生硅质岩逐渐过渡到炭质泥岩(图2)。雄武金矿床主要受雄武背斜及两翼断裂构造控制,雄武背斜走向近北东向,两翼断裂走向与背斜轴线一致且具有多期次活动的迹象和特征,断层性质从早期的张性变化为晚期的压扭性。雄武金矿床金矿类型按成因可划分为原生金矿体和红土型金矿体,其中原生金矿体为主要矿床类型,产出位置均在背斜核部。矿体展布方向与背斜轴线一致,形状上主要为透镜状和似层状,矿体延伸约15 km;氧化矿体出露地表,形状不规则,矿体延伸长度较小,均不超出140 m(邓存新和郑懋荣,2003)。矿石主要呈角砾状,角砾大小悬殊,无磨圆,棱角分明,角砾成分与上覆和下伏地层一致,与区域内其他受构造蚀变体(SBT)控制的矿床一致,在区域上此种类型金矿体普遍发育,成为寻找原生金矿体最重要、最直观的找矿标志。矿石矿物主要是富砷黄铁矿和少量毒砂,次要矿石矿物有雄黄和雌黄,其他脉石矿物较少,主要是石英、玉髓、方解石等(图3)。

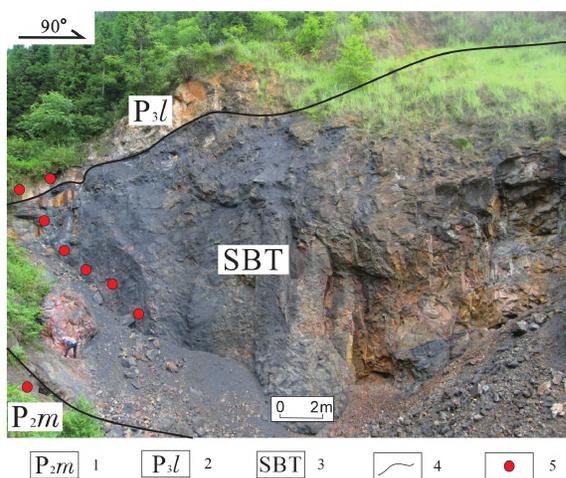


图2 雄武金矿床野外典型剖面

1—中二叠统茅口组;2—上二叠统龙潭组;3—构造蚀变体;4—地层界线;5—采样点位置

## 2 样品的采集与分析测试

本次对雄武金矿床含矿岩系及围岩包括构造

蚀变体(SBT)、中二叠统茅口组( $P_2m$ )和上二叠统龙潭组( $P_3l$ )进行系统采样,包括茅口组灰岩样品1件,构造蚀变体矿石样品5件和龙潭组黏土岩及粉砂岩样品2件(图2),构造蚀变体(SBT)是一套强硅化蚀变构造角砾岩组合,颜色为深灰色,角砾成分为硅化钙质粉砂岩、硅化碳酸盐岩、硅化黏土岩等,是在沉积作用基础上,经构造破碎和流体蚀变作用下形成的一套特殊的控矿地质体(刘建中等,2009),是金矿重要产出层位,雄武剖面SBT地质描述及采样位置见图2。实验分析测试在贵州地矿局测试中心实验室完成,使用的ICP-MS是美国THERMO公司生产的X SERIES 2型,该测试设备的工作功率为1150 W;仪器分辨率不高于0.75 amu;粉末提取锥的孔径小于1.0 mm;截取锥低于0.7 mm;使用Ar为冷却气体,释气条件为13 L/min;雾化器流速(Ar)0.74~0.95 L/min;进样泵速30 rpm;氦气 $\varphi$ (Ar)=99.99%。

仪器测试操作方法和流程简述如下:用 $\Phi 12.5$  cm的中速率滤纸制成漏斗状,称量10~20 g风干的样品粉末置于漏斗中,分多次吸取80~100 mL 4%的硫酸铵溶液反复淋洗滤纸中的粉末,直至获取100 mL的淋洗液,然后充分摇匀并静置,等溶液澄清后用滴管吸取定容1 mL以上液体并滴入聚乙烯制成的试管中,用硝酸(3+97)稀释至10 mL并充分摇匀,并按事先选好的实验仪器和测试流程进行测定。采用 $^{103}\text{Rh}$ 为本次分析测试的唯一内标元素。

## 3 微量元素地球化学特征

由雄武金矿床含矿岩系8个样品中微量元素含量测试结果可以发现雄武金矿床含矿空间构造蚀变体(SBT)中以Au、Sb、Hg、Li、As、U等元素的显著富集为特征(表1),且明显高于围岩,表明以上元素组合为含矿热液带入;Co、Ni、Sr、Hf、Th被带出容矿岩石,显示出一定程度的亏损,此分析结果与贵州其他卡林矿床一致(夏勇等,2009)。经中国东部大陆地壳元素组成标准化之后的矿石和围岩微量元素曲线图显示(图4),矿石和上下围岩的主要微量元素组成和含量基本相似,暗示矿石的微量元素主要继承了围岩角砾的成分。夏勇等(2009)从岩、矿石微量元素角度分析评价了本区最大的金矿床水银洞金矿床的元素行为,结果表明,除了主要造岩元素含量相差无几外,矿石中的As、Sb、Tl、Cu、Au等

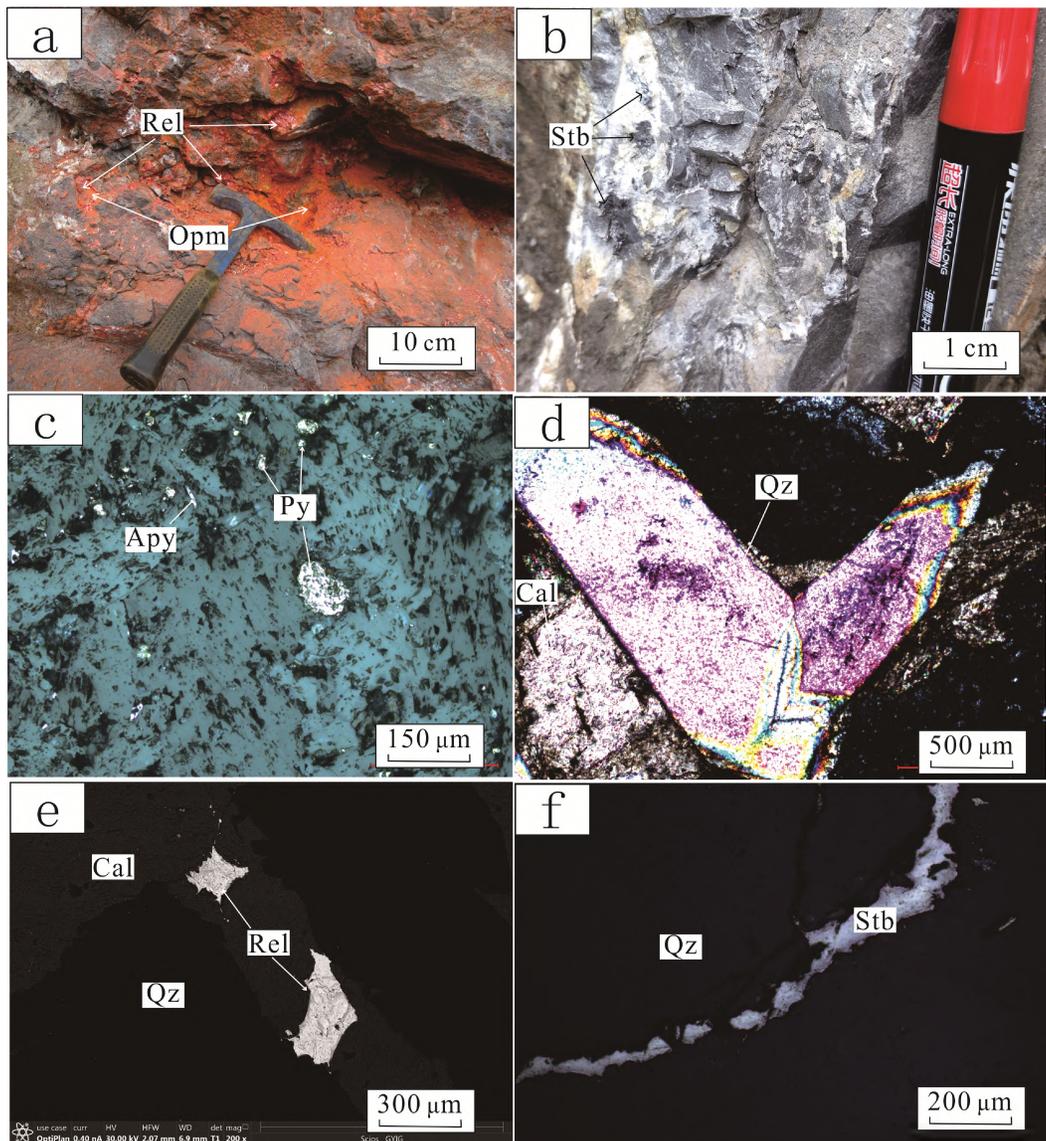


图3 雄武金矿床主要热液矿物矿相学特征

a—破碎带和裂隙中充填共生的雄黄和雌黄;b—石英脉裂隙中充填的辉锑矿;c—不同粒度的半自形黄铁矿和针状毒砂颗粒;d—正交偏光镜下粗粒石英的生长环带和晚期充填的方解石脉;e—扫描电镜下晚期沿石英裂隙充填的方解石脉中产生的雄黄;f—沿石英脉裂隙充填的辉锑矿;Py—黄铁矿;Apy—毒砂;Rel—雄黄;Opm—雌黄;Stb—辉锑矿;Cal—方解石;Qz—石英

元素含量相较于围岩成指数增加,并认为这些元素应该是成矿流体带入。与水银洞金矿床相比,雄武金矿床相关元素组合和富集特征具有一定相似性,但富集程度相对较低。由图4可以发现,矿石的微量元素曲线位置大致与茅口组相当,而明显低于龙潭组的曲线位置,可能说明 SBT 的原岩更多来源于茅口组灰岩。

#### 4 稀土元素特征与流体性质

前人研究显示,稀土元素具有相似的离子半径

和地球化学行为,在各类地质作用和热液流体中往往显示相似的迁移变化规律,除了发生重熔和岩浆改造外,它们的迁移规律一般不会发生明显变化;但是,在某些特殊的因素影响下,这种整体迁移和变化的规律性会受到微弱影响,产生稀土元素分馏,这种分馏效应能够十分敏感地反映流体环境变化,是研究成矿流体氧化还原变化和反映流体性质的良好示踪元素组合(刘建中等,2018)。本次研究利用等离子质谱方法系统地研究了雄武金矿床矿石和围岩的稀土元素组成,分析结果见表2。利用

表1 雄武金矿床微量元素含量(10<sup>-6</sup>)

样品编号	Cs	Rb	Bi	Pb	Tl	As	Sb	Be	W	Ta	Nb	Zr	Hf
XW-P <sub>2</sub> m	1.267	27.99	0.253	10.57	0.142	10.670	0.664	0.478	0.289	0.228	2.309	145.2	3.243
XW-SBT	1.543	29.60	0.237	15.58	0.178	10.270	1.132	0.557	1.025	0.455	6.895	194.8	4.563
XW-SBT	1.599	29.06	0.221	10.54	0.176	10.200	2.611	0.499	0.796	0.297	3.700	156.6	3.703
XW-SBT	1.344	25.76	0.219	13.85	0.650	8.550	6.019	0.467	1.091	0.231	2.525	140.3	3.391
XW-SBT	3.047	26.49	0.280	10.98	0.690	6.424	5.522	0.410	1.499	0.299	3.211	141.9	3.548
XW-SBT	7.970	29.87	0.278	29.79	1.850	9.295	3.900	0.491	5.180	0.594	8.293	196.5	4.770
XW-P <sub>3</sub> l	17.270	87.13	0.275	15.47	1.366	8.538	2.311	1.411	70.710	3.619	78.350	837.9	15.370
XW-P <sub>3</sub> l	12.490	64.29	0.258	12.64	0.594	8.163	1.854	1.191	45.240	3.098	60.960	757.7	14.500

样品编号	Au	Li	Ga	V	Zn	Cu	Sc	Ge	Mn	Ti	Co	Cr	Ni
XW-P <sub>2</sub> m	0.06	5.911	7.156	74.78	63.86	2.900	3.951	0.437	165.00	318.7	2.962	23.91	32.20
XW-SBT	0.04	8.398	7.540	93.83	68.73	8.807	5.144	0.672	465.60	753.6	5.310	81.38	25.57
XW-SBT	0.06	10.510	7.753	90.69	66.40	4.667	4.225	0.596	345.90	534.2	3.426	65.61	27.46
XW-SBT	0.04	10.600	6.858	75.68	68.30	4.963	5.297	0.471	356.20	355.2	5.655	32.57	29.63
XW-SBT	0.18	43.960	7.437	64.13	71.96	7.943	2.465	0.469	62.89	400.5	1.332	25.50	7.289
XW-SBT	1.04	47.110	10.130	87.09	71.89	11.460	3.184	1.074	54.47	1322.0	2.962	29.88	10.04
XW-P <sub>3</sub> l	0.03	914.900	26.180	121.30	85.31	72.570	11.370	1.715	84.45	20660.0	16.600	102.00	29.62
XW-P <sub>3</sub> l	0.01	873.50	21.950	95.16	67.11	57.160	9.767	1.350	76.40	16470.0	6.152	81.84	17.21

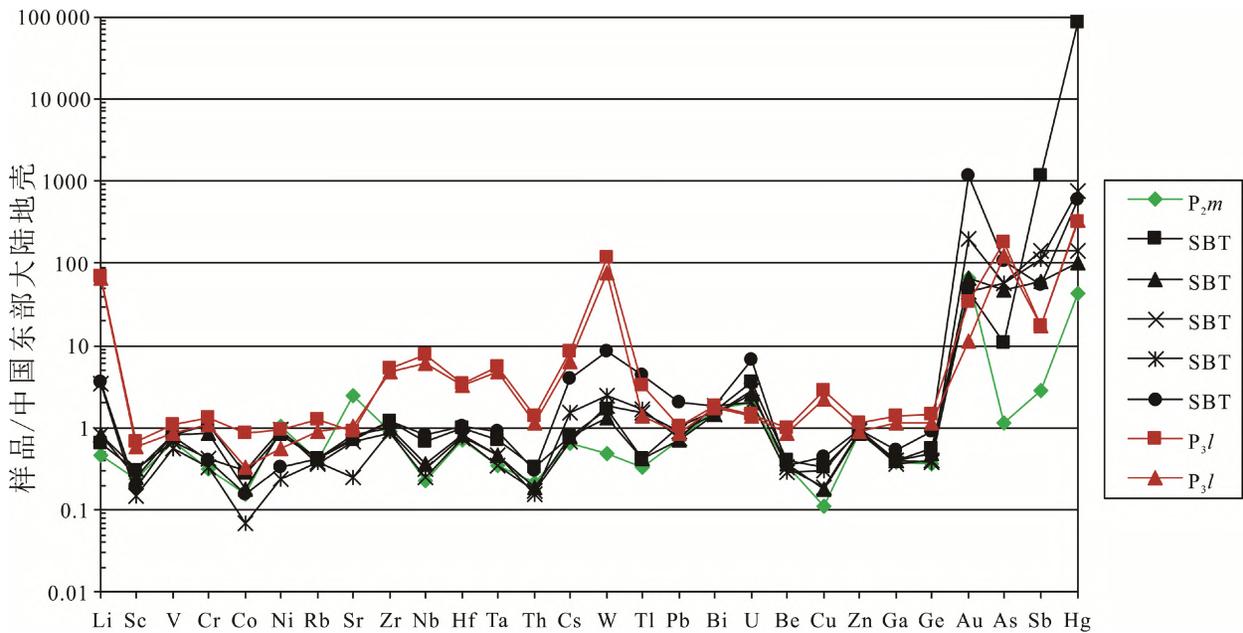


图4 雄武金矿床样品微量元素大陆地壳标准化曲线图(中国东部大陆地壳数据据黎彤和袁怀雨,2011)

CI球粒陨石稀土元素组成对样品的稀土元素含量进行标准化(Deines, 1989),采用 Boynton 的稀土元素配分模式成图(Boynton, 1984)(图5)。雄武金矿床各岩(矿)石样品中  $\Sigma\text{REE}$  变化范围为  $31.01 \times 10^{-6} \sim 308.00 \times 10^{-6}$ , 平均  $107.30 \times 10^{-6}$ , 表现 LREE 相对富集, HREE 相对亏损, 轻、重稀土之比(LREE/HREE)为 3.90~11.27, 均值 7.15, 样品的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$

均值为 1.69, 亦表现为轻稀土相对富集(表2)。

由图5可见,各样品的稀土曲线均显示“W”型四分组效应,曲线向右倾斜,说明样品富集轻稀土, LREE/HREE 为 3.90~11.27, 轻稀土相较于重稀土分馏更明显,  $\delta\text{Eu}=1.04 \sim 1.66$ ,  $\delta\text{Ce}=0.45 \sim 0.63$ ,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N=0.66 \sim 2.83$ , 稀土元素标准化曲线“四分组”效应明显,其中轻稀土分异更加明显,表明热液蚀变

表 2 雄武金矿床稀土元素分析结果和特征值

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	
XW-P <sub>2m</sub>	10.27	10.24	2.01	7.99	1.76	0.48	1.62	0.24	1.39	0.30	
XW-SBT	25.89	19.95	3.96	14.45	2.57	0.71	3.75	0.51	3.01	0.67	
XW-SBT	13.31	11.39	2.52	10.64	2.48	0.72	2.49	0.46	2.61	0.58	
XW-SBT	7.16	7.50	1.46	6.35	1.68	0.54	1.38	0.29	1.76	0.40	
XW-SBT	11.00	10.59	1.88	7.32	1.25	0.36	2.14	0.12	0.73	0.11	
XW-SBT	12.38	15.32	2.66	11.29	2.36	0.67	2.57	0.23	1.21	0.18	
XW-P <sub>3l</sub>	63.58	138.40	15.08	55.12	8.85	2.28	10.86	1.16	6.38	0.92	
XW-P <sub>3l</sub>	55.40	113.20	12.51	48.17	8.21	2.16	10.00	1.13	6.25	0.96	
XW-SBT 平均	13.95	12.95	2.49	10.01	2.07	0.60	2.46	0.32	1.86	0.39	
XW-P <sub>3l</sub> 平均	59.49	125.80	13.80	51.65	8.53	2.22	10.43	1.15	6.32	0.94	
样品编号	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	δEu	δCe
XW-P <sub>2m</sub>	0.85	0.13	0.78	0.12	38.18	32.75	5.43	6.03	1.25	1.32	0.53
XW-SBT	2.00	0.30	1.60	0.27	79.62	67.52	12.10	5.58	1.53	1.04	0.45
XW-SBT	1.53	0.23	1.38	0.22	50.56	41.06	9.50	4.32	0.91	1.35	0.46
XW-SBT	1.14	0.17	1.03	0.17	31.01	24.69	6.33	3.90	0.66	1.66	0.55
XW-SBT	0.35	0.06	0.37	0.07	36.32	32.38	3.94	8.22	2.83	0.97	0.54
XW-SBT	0.56	0.09	0.61	0.10	50.23	44.68	5.55	8.04	1.91	1.26	0.63
XW-P <sub>3l</sub>	2.57	0.40	2.47	0.38	308.46	283.31	25.15	11.27	2.42	1.08	1.06
XW-P <sub>3l</sub>	2.62	0.42	2.62	0.39	264.04	239.65	24.40	9.82	1.99	1.10	1.02
XW-SBT 平均	1.12	0.17	1.00	0.16	49.55	42.07	7.48	5.62	1.32	1.23	0.51
XW-P <sub>3l</sub> 平均	2.59	0.41	2.55	0.39	286.25	261.48	24.77	10.56	2.20	1.09	1.04

注:除LREE/HREE、La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>、δEu、δCe外,其余项目单位为10<sup>-6</sup>。

作用强烈。雄武金矿床 SBT 中矿石的 CI 球粒陨石标准化配分模式图中均表现为 Ce(0.45~0.63) 显著负异常,数值接近茅口组灰岩的 Ce 异常值,但明显低于龙潭组地层,前人研究发现氧化条件敏感元素 Ce 在相对氧化的环境下常常被部分氧化为 Ce<sup>+4</sup>,从而导致其在离子半径上与其他稀土元素发生较大差异,而脱离整体,形成负异常(丁振举等,2000;李厚民等,2003),暗示矿床是在相对氧化的环境下形成的,结合矿石发生的显著的去碳酸盐化和硅化现象,表明含矿流体为弱酸性富含硅质的热液流体。矿石的 CI 球粒陨石标准化配分模式图中均表现为 Eu(1.04~1.66) 微弱至显著正异常,数值上接近或略高于茅口组地层,分析认为其除了继承了地层的稀土元素之外,成矿流体也带来了富含 Eu<sup>2+</sup> 的稀土元素。前人通过对 Eu<sup>2+</sup>/Eu<sup>3+</sup> 处于氧化还原平衡时热液流体的 pH 值、温度和压力等参数与流体氧逸度的关系进行研究,当流体的温度急速升高时,相应的其氧逸度也会随之快速增高,相反地,随着流体压力的急速变大,流体氧逸度则会发生缓慢的

降低(Sverjensky, 1984; Bau, 1991),以上研究认为,较高的温度是稀土元素 Eu 以 Eu<sup>2+</sup> 离子在流体中长时间稳定存在的重要条件。为形成雄武金矿床的热液流体来源于深部,在上升至浅部地壳由于温度压力降低和物理化学性质变化,导致金卸载成矿。相对较低的 LREE 含量可能与热液蚀变过程中稀土元素活化迁移造成的。

## 5 结论

(1) 雄武金矿床含矿层位构造蚀变体(SBT)中以 Au、As、Sb、Hg、Li、U 等元素的富集为显著特征,且明显高于围岩,Co、Ni、Sr、Hf、Th 被带出;W、Bi 等元素相对茅口组(P<sub>2m</sub>)富集,而明显低于龙潭组(P<sub>3l</sub>),可能说明构造蚀变体(SBT)的原岩更多来自于茅口组。

(2) 雄武金矿床矿石和围岩的稀土总量和标准化后的配分曲线基本相似,二者均展示出轻稀土分馏明显的特征,曲线倾斜度较高;重稀土元素含量变化不大且分馏不显著,曲线倾斜度很低。雄武金

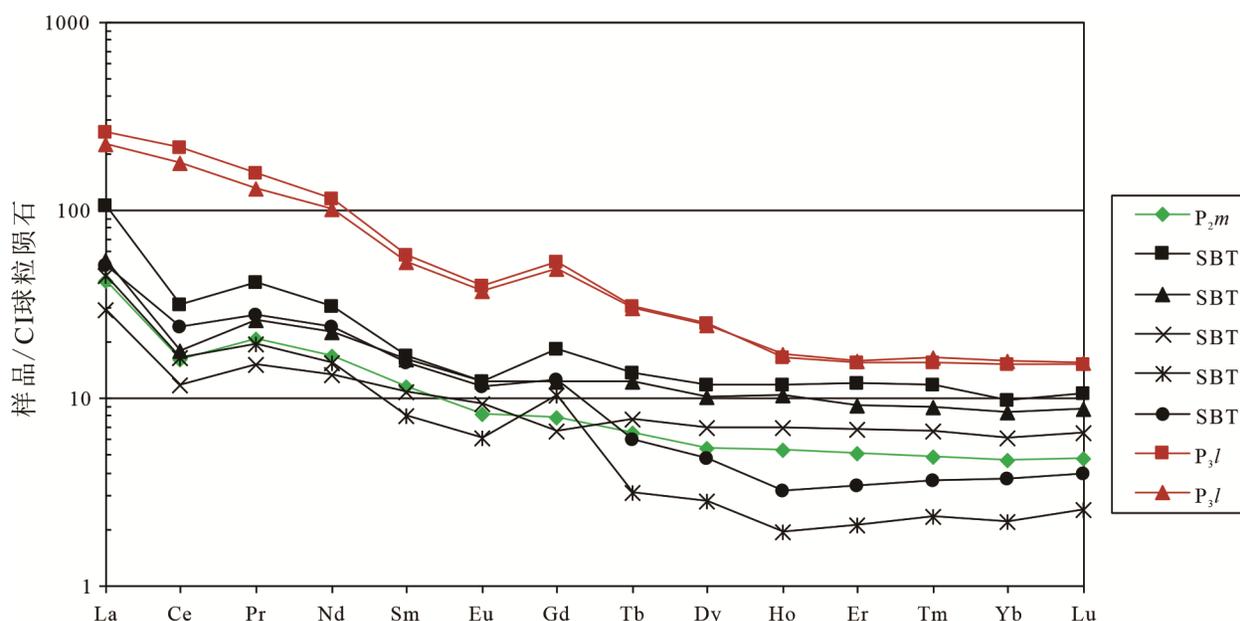


图5 雄武金矿床样品稀土元素球粒陨石配分模式图(球粒陨石数据据 Deines, 1989)

矿床SBT的CI球粒陨石标准化均表现为Ce负异常,数值接近茅口组灰岩的Ce异常值,但明显低于龙潭组地层,结合矿石发生的显著的去碳酸盐化和硅化现象,表明含矿流体为弱酸性流体;矿石 $\delta Eu$ (1.04~1.66)显示基本无异常至明显的正异常,数值上接近或略高于茅口组和龙潭组地层,分析认为其除了继承了地层的稀土元素,同时表明含矿流体为还原性高温流体。矿石样品均表现为稀土元素的“四分组”效应,可能主要是热液流体蚀变作用和氧化环境形成。

(3)构造蚀变体(SBT)的 $\Sigma REE$ 为31.0~79.6,远低于龙潭组碎屑岩,且配分曲线与龙潭组差异较大,而略高于茅口组地层,可能证明其原岩主要来源于茅口组,并从热液流体中继承了部分稀土元素,这一结果与微量元素分析结果相一致。

**致谢** 贵州大学矿业学院郑禄林教授和贵州地矿局105地质队的李俊海研究员在梳理思路和成文过程中给予了巨大的帮助,审稿专家对本论文提出了宝贵的意见和建议,编辑部老师在审稿和编辑论文中做出了重要工作,在此一并表示衷心感谢!

参考文献

Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 93: 219-230.  
 Boynton W V. 1984. Chapter 3-Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 2:

63-114.  
 Deines P. 1989. Stable isotope variation in carbonatites//Bell K ed. *Carbonatites: Genesis and Evolution* [C]. London: Unw in Hyman, 301-359.  
 Sverjensky D A. 1984. Europium redox equilibria in aqueous solution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 67: 70-78.  
 陈开礼. 2000. 桂西古侵蚀沉积断面型金矿床[J]. *广西地质*, 13(4): 19-22.  
 陈坡,李城茂,周海,田驰,杨柱,麻杰磊. 2017. 黔西南雄武背斜地区找矿远景浅析——以小补衣金矿勘查区为例[J]. *贵州地质*, 34(4): 231-236.  
 邓存新,郑懋荣. 2003. 贵州省兴义市雄武地区金矿分布规律及找矿方向[J]. *贵州地质*, 20(4): 205-211.  
 丁振举,刘从强,姚书振,周宗桂. 2000. 海底热液系统高温流体的稀土元素组成及其控制因素[J]. *地球科学进展*, 15(3): 307-312.  
 冯博,段培新,邓国武,李再勇,杨彦超,卢辉雄,汪冰,张恩. 2022. 贵州晴隆丁头山铅锌矿床地质特征及找矿标志[J]. *矿产勘查*, 13(11): 1649-1655.  
 贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.  
 郭振春. 2002. 黔西南灰家堡金矿田“两层楼”模式及找矿意义[J]. *黄金地质*, 8(4): 18-23.  
 何立贤,曾若兰,林立青. 1993. 贵州金矿地质[M]. 北京:地质出版社.  
 何立贤. 1996. 黔西南金矿“热、液、矿”同源成矿模式[J]. *贵州地质*, 13(2): 154-160.  
 贾大成,胡瑞忠. 2001. 滇黔桂地区卡林型金矿床成因探讨[J]. *矿床地质*, 20(4): 378-384.  
 姜伟,令狐东,罗洪远,宫学智,黄凯. 2022. 贵州三都排正金-铅-锌多金属矿床地质特征及矿床成因[J]. *矿产勘查*, 13(2/3): 211

- 219.
- 李朝晋,任明强,胡从亮,苏信明,牟军,陈启飞,罗明学. 2007. 雄武背斜湾子地区物化探异常特征与找矿前景[J]. 贵州地质, 24(3): 207-211.
- 李厚民,沈远超,毛景文,刘铁兵,朱和平. 2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家式金矿为例[J]. 岩石学报, 19(2): 267-274.
- 黎彤,袁怀雨. 2011. 大洋岩石圈和大陆岩石圈的元素丰度[J]. 地球化学, 40(1): 1-5.
- 刘家军,刘建明,顾雪祥,林丽. 1997. 黔西南微细浸染型金矿床的喷流沉积成因[J]. 科学通报, 42(19): 2126-2127.
- 刘建明,叶杰,刘家军,顾雪祥. 2001. 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, 20(4): 367-377.
- 刘建中,夏勇,邓一明,苏文超,张兴春,邱林,陈明,陈发恩,付芝康. 2009. 贵州水银洞Sbt研究及区域找矿意义探讨[J]. 黄金科学技术, 17(3): 1-5.
- 刘建中,夏勇,陶琰. 2018. 贵州西南部SBT研究[M]. 武汉:中国地质大学(武汉)出版社.
- 刘建中,杨成富,王泽鹏,王大福,祁连素,李俊海,胡承伟,徐良易. 2017. 贵州省贞丰县水银洞金矿床地质研究[J]. 中国地质调查, 4(2): 32-41.
- 刘民元,王燕龙,刘民元,王燕龙,吴尚清,郑懋荣. 2007. 贵州省兴义市马路坡金矿床地质特征及成矿条件[J]. 贵州地质, 24(3): 174-178.
- 罗孝恒. 1997. 黔西南右江区金矿床控矿构造样式及成矿作用分析[J]. 贵州地质, 14(4): 312-320.
- 覃英,陈启飞,范玉梅,徐遥. 2021. 贵州汞矿地质地球化学特征[J]. 矿产勘查, 12(10): 2017-2025.
- 苏信明,陈智,牟军,袁宏,胡从亮,张美雪. 2006. 雄武背斜东南翼岩石土壤地球化学特征及金矿找矿方向探讨[J]. 贵州地质, 23(3): 192-196.
- 王砚耕. 1994. 试论黔西南卡林型金矿区域成矿模式[J]. 贵州地质, 11(1): 1-7.
- 夏勇,张瑜,苏文超,陶琰,张兴春,刘建中,邓一明. 2009. 黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J]. 地质学报, 83(10): 1473-1482.
- 向才富,庄新国,陆友明,李军虹. 2002. 有机流体成矿作用与古油藏成藏作用相互耦合——以右江盆地微细浸染型金矿为例[J]. 地球科学, 27(1): 35-39.
- 赵胜利,黄波,杨涛,马力克,朱和书,于宁,曹其琛,孙芳芳. 2021. 黔西地区晚古生代岩浆活动与成矿再认识[J]. 矿产勘查, 12(11): 2169-2178.
- 郑禄林. 2017. 贵州西南部泥堡金矿床成矿作用与成矿过程[D]. 贵阳:贵州大学.