

豫西白土金铅矿床稀土元素、微量元素特征
及对矿床成因的指示意义

蔡焕花^{1,2}, 张苏坤^{1,2,3*}, 刘玉刚^{1,2}, 姚小东^{1,2}, 王俊德^{1,2}, 王小涛^{1,2}, 程蓓雷^{1,2}

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院;

2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室; 3. 成都理工大学地球与行星科学学院)

摘要:白土金铅矿床位于康山—上官断裂与马超营断裂交会部位,大地构造位于华北陆块南缘,金矿体、银矿体与铅矿体异体共生,主要呈脉状、似层状产于碳酸盐岩中的次级断裂中。通过对白土金铅矿床主要岩矿石进行稀土元素、微量元素测试,稀土元素特征说明热液交代和变质交代作用普遍发育,具体特征为:① $w(\text{REE}_{\text{大理岩}}) > w(\text{REE}_{\text{石英正长岩}}) > w(\text{REE}_{\text{安山岩}}) > w(\text{REE}_{\text{构造岩}}) > w(\text{REE}_{\text{矿化白云岩}}) > w(\text{REE}_{\text{矿化石英脉}})$,呈现出蚀变矿化程度越强稀土元素总量越低的特征;②稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现出随矿化增强呈斜率增大、轻稀土元素富集程度降低、重稀土元素富集程度增加的趋势;③蚀变对安山岩、构造岩、大理岩等岩石的 Eu 异常影响不明显,矿化则使 Eu 呈现出明显负异常,且蚀变对安山岩、构造岩、大理岩等岩石的 Ce 异常影响明显,使 Ce 由正异常逐渐演变成负异常,矿化则使 Ce 负异常程度进一步加大。将主要岩矿石微量元素与华北陆块壳微量元素含量对比,发现安山岩、大理岩作为主要赋矿围岩,成矿元素 Ag、Sb、Pb、W、Zn 呈富集状态,为铅成矿提供了高背景值,蚀变后安山岩中 Pb、W 呈现出明显富集现象,暗示热液流体本身携带 Pb、W 成矿元素或对围岩成矿元素有热液交代富集作用;异常强度上,构造岩、石英脉、石英正长岩、(大理)白云岩与安山岩类相比,富集或亏损强度较大,且异常强度依次加强,说明成矿物质来源与龙家园组碳酸盐岩关系密切。综上所述,白土金铅矿床的成因总体上以岩浆热液充填交代为主,但叠加了后期陆相火山沉积改造。

关键词:豫西;白土金铅矿床;稀土元素;微量元素;矿床成因;蚀变

中图分类号:TD11 P618.51

文章编号:1001-1277(2024)08-0099-13

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240817

引言

在豫西栾川地区已发现百炉沟、赤土店、冷水北沟、三道沟、西沟、中鱼库、白沙洞、银洞沟、洪洞沟和核桃岔等一系列铅锌矿床^[1-6],赋矿层位主要为栾川群和官道口群,成矿流体具有浅—中成、中温和低盐度特征^[7-8],来源以原生岩浆热液为主,晚期混有大气降水^[3,9-10],成矿物质主要来源于地层或深源^[3,9,11-13],成矿年龄集中在早白垩纪^[3,10,14-15]。综上,栾川地区铅锌矿床成因认识主要有岩浆热液充填交代型矿床^[3-4,6,8,10-11,16-17]和沉积叠加改造型矿床^[5,9],以上研究多从地质特征、流体包裹体、稳定同位素地球化学特征和同位素年代学等方面开展,区域铅锌矿床的稀土元素、微量元素特征研究较少。本次研究的白土金铅矿区属白土铅矿带,该矿带位于康

山—上官断裂与马超营断裂交会部位,东西长约 25 km,产于南沟门—铁岭倒转复背斜北翼白云岩内。该矿带内老硐、民采遗迹密布,矿化蚀变类型基本一致,表现出热液充填特征,金属矿物以方铅矿为主,次为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等。自 20 世纪 70 年代以来,该矿带探矿工作断续进行,本次研究在河南省地勘基金项目“河南省栾川县康山—白土深部金、铅矿普查”工作基础上,总结了白土金铅矿床地质特征和控矿因素,对 4 个钻孔岩性进行了系统的稀土元素、微量元素地球化学研究,进而探讨岩石成因、矿质来源,以及蚀变矿化过程中微量元素、稀土元素的地球化学行为,丰富矿床成因证据。

1 区域地质背景

白土金铅矿床位于白土铅矿带,行政区划隶属

收稿日期:2024-02-25; 修回日期:2024-05-25

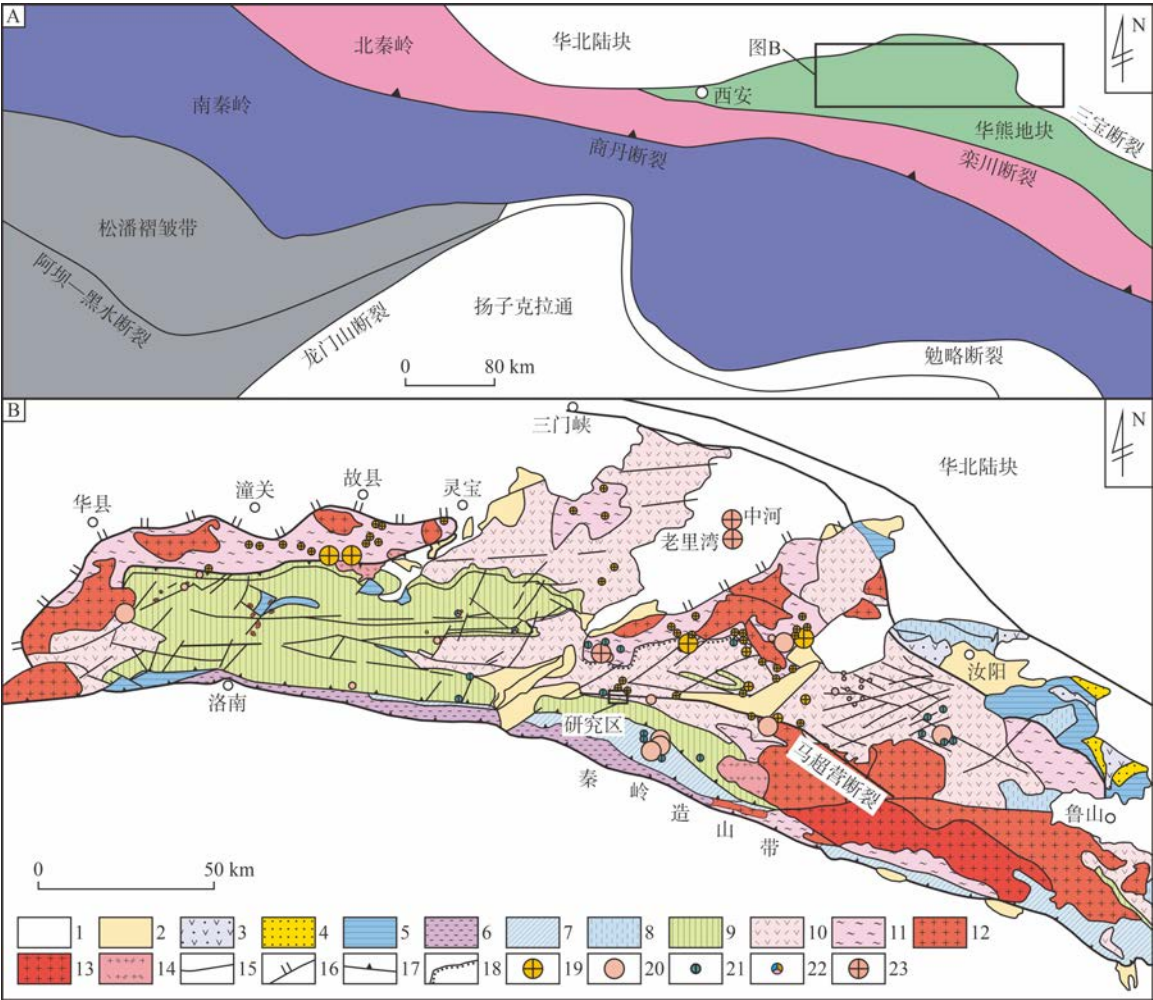
基金项目:河南省重点研发与推广专项科技攻关项目(232102320316);河南省地矿局自筹科研项目(豫地矿科研[2021]Z-1号);河南省自然资源科研项目(2023-610-11);河南省地勘基金项目(豫国土资发[2015]70号,[2017]22号)

作者简介:蔡焕花(1982—),女,工程师,从事矿产地质勘查及研究工作;E-mail:huazhiyin8282@163.com

*通信作者:张苏坤(1988—),男,高级工程师,博士研究生,从事固体矿产勘查及矿床研究等工作;E-mail:zhangsukun091128@vip.qq.com

河南省栾川县白土镇,大地构造位于华北陆块南缘,南侧为秦岭褶皱带(见图1-A)。区域地层总体呈东西向展布,包括由新太古界太华岩群角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩构成的结晶基底和中元古界熊耳群安山岩、安山玄武岩、流纹岩、英安斑岩夹火山碎屑岩类^[18],官道口群条带状白云岩^[19-21]构成的盖层。区域断裂发育,北西西向马超营断裂(见图1-B)最为显著,长50 km,

走向270°~300°,倾向北,倾角50°~80°,深部倾角明显变缓,具有向北犁式俯冲特征,局部下切深度大于10 km^[22-24]。该断裂经历多期次挤压收缩、伸展滑脱、逆冲推覆等变形变质作用,并伴有密切相关的沉积事件、变质事件和岩浆事件^[25]。区域岩浆活动发育,出露燕山期的花山、五丈山、合峪等重熔型花岗岩体,另外还有一些小型斑岩体及爆破角砾岩体^[20]。



- 1—第四系—新近系 2—上白垩统古近系 3—早白垩世火山碎屑沉积岩 4—上侏罗统—下白垩统 5—寒武系—奥陶系
6—奥陶系陶湾群 7—新元古界栾川群 8—中新元古界汝阳群、震旦系 9—中元古界官道口群 10—中元古界熊耳群 11—太古宇
12—晚侏罗世花岗岩岩 13—燕山期花岗岩类 14—中元古代花岗岩 15—断裂 16—拆离断裂 17—洛南—栾川推覆体的逆冲断裂
18—角度不整合界线 19—金矿床 20—钼矿床 21—铅锌矿床 22—多金属矿床 23—银多金属矿床

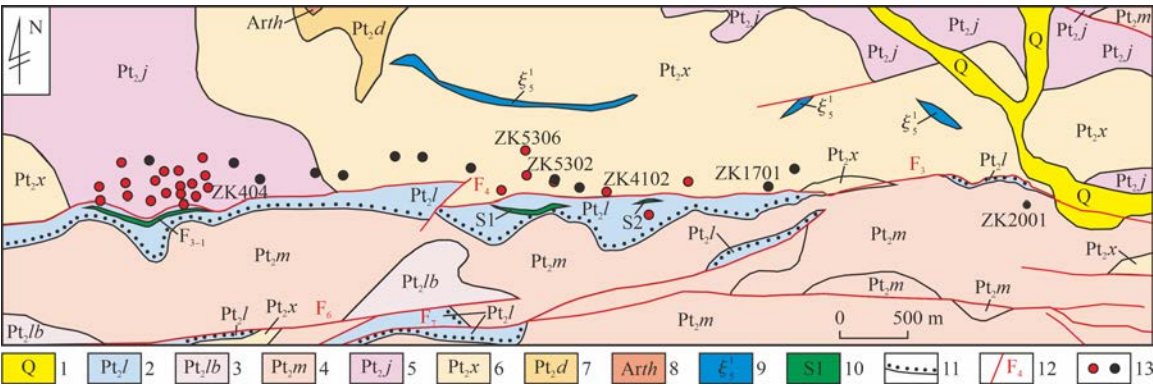
图1 东秦岭地区区域地质简图(据文献[26]修改)

Fig. 1 Regional geological sketch of East Qinling region

2 矿区及矿床地质特征

矿区出露地层主要有中元古界熊耳群大古石组许山组、鸡蛋坪组、马家河组、龙脖组(见图2),岩性以安山岩、流纹岩为主,少量中元古界官道口群龙家园组,岩性以隐晶—微晶白云岩、含硅质条带状白云岩、大理岩为主。矿区断裂发育,主要为马超营断裂(F₃),总体

走向为270°~300°,呈舒缓波状延伸,整体北倾,倾角58°~78°,构造破碎带和片理化带宽达数十米至数百米,构造破碎带中蚀变强烈,普遍发育方铅矿化、闪锌矿化、黄铁矿化、褐铁矿化、硅化、碳酸盐化等,且与马超营断裂平行的一系列次级断裂也较为发育。矿区岩浆岩出露较少,除大面积出露熊耳群喷出岩外,仅见少量辉长(绿)岩、正长岩等岩脉,规模一般较小。



1—第四系 2—龙家园组 3—龙脖组 4—马家河组 5—鸡蛋坪组 6—许山组
7—大古石组 8—太华岩群片麻岩 9—正长岩脉 10—矿体及编号 11—不整合接触界线 12—断裂 13—钻孔

图 2 白土金铅矿区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of Baitu Au - Pb District

矿体多呈脉状、薄脉状、透镜状、豆荚状,局部地段为平行复脉状分布于白云岩内的次级断裂中,具膨大狭缩、分支复合、尖灭再现等特征。在地表,铅矿体产出较均匀,从顶板至底板均有分布;深部工程揭露情况显示,仅靠近顶板发育铅矿体,靠近底板极少见铅矿体分布^[27-34]。金矿体、银矿体与铅矿体异体共生,但多为单工程控制,延续性较差。

矿石结构主要为半自形晶粒状结构、碎裂结构,其次为填隙结构、胶状结构。矿石构造以块状构造、浸染状构造、细脉状构造及角砾状构造为主。金属矿物以黄铁矿为主,次为闪锌矿、黄铜矿等,含极少量自然金、银金矿、磁铁矿、铜蓝、辉铜矿、镜铁矿等。

3 样品采集及分析结果

分别对 ZK1701、ZK2001、ZK5302、ZK5306 等 4 个钻孔岩芯进行系统采样,采样以岩性自然分层为基础,一般岩性采样间距为 10 m,构造蚀变带加密采样,共采集样品 435 件。采集样品经过破碎、混匀、缩分、粉碎至 200 目进行分析测试,测试项目包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Y、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 等 15 种稀土元素, Au、Ag、As、Sb、Hg、Ba、Cu、Mn、Mo、Pb、V、W、Zn、Li、Be、Ga、Ge、Se、Rb、Zr、Nb、Cd、In、Te、Cs、Tl、Hf 等 27 种微量元素。测试分析工作由河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院实验室承担,仪器采用美国 Thermo Electron 电感耦合等离子体质谱仪。

原始样品采集一般采样间距为 10 m,样品数量较多,分析结果对比后发现,相同岩性稀土元素、微量元素分析结果相差不大,故按岩性自然分层进行了二次编录,即将相同岩性的样品合并,取加权平均值,以减少样品数量,有利于作图及对比分析。合并后的结果见表 1~3。

4 讨论

4.1 稀土元素特征及对矿床成因的指示

钻孔 ZK5302 孔深 450.39 m,岩性为(杏仁状)安山岩、(硅质、条带状)大理岩及石英脉。其中,样品 ZK5302-10(安山岩)、ZK5302-11(石英脉)见明显方铅矿化。安山岩样品稀土元素总量为 $73.4 \times 10^{-6} \sim 250.7 \times 10^{-6}$,平均值为 174.8×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 7.2~15.3,平均值为 11.5; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 6.7~22.4,平均值为 15.3。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土明显富集的右倾模式(见图 3),与钻孔 ZK1701、ZK2001 中安山岩相比,稀土元素总量较低,右倾斜率更大,可能与安山岩矿化蚀变较强有关; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.8~3.7,平均值为 2.8,轻稀土元素富集程度相对较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.2~4.9,平均值为 3.4,重稀土元素富集程度较低。(硅质、条带状)大理岩稀土元素总量为 $10.8 \times 10^{-6} \sim 79.8 \times 10^{-6}$,平均值为 41.5×10^{-6} ,与钻孔 ZK2001 相比大幅降低,可能与该孔大理岩具有明显矿化有关; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 6.0~19.5,平均值为 12.6。 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 3.8~21.1,平均值为 12.8,稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素明显富集的右倾模式(见图 3-a), $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.2~6.0,平均值为 4.0,轻稀土元素富集程度较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.2~2.8,平均值为 1.9,重稀土元素富集程度较高。石英脉长仅 3.08 m,稀土元素总量为 8.6×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 1.8, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.8。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线近似水平,轻稀土元素富集不明显, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 0.4,轻稀土元素富集程度极低; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.1,重稀土元素富集程度较高。

表 1 钻孔采样顺序及岩性分层情况
Table 1 Sampling sequence and lithology stratification of drill holes

钻孔编号	起/m	止/m	岩性	钻孔编号	起/m	止/m	岩性
ZK2001	6.33	109.79	杏仁状安山岩	ZK5306	3.46	23.67	杏仁状安山岩
	109.79	133.68	蚀变碎裂岩		23.67	27.39	硅化蚀变岩
	133.68	148.92	蚀变碎裂大理岩		27.39	111.74	杏仁状安山岩
	148.92	180.97	构造角砾岩		111.74	121.76	蚀变安山岩
	180.97	203.34	蚀变碎裂岩		121.76	141.93	石英正长岩
	203.34	279.86	蚀变碎裂安山岩		141.93	146.60	蚀变安山岩
	279.86	297.31	蚀变玄武安山岩		146.60	153.39	石英正长岩
	297.31	321.50	安山岩		153.39	161.80	蚀变安山岩
ZK5302	2.31	79.82	褐铁矿化安山岩		161.80	174.04	石英正长岩
	79.82	93.69	碎裂安山岩		174.04	179.26	蚀变岩
	93.69	231.85	安山岩		179.26	202.51	杏仁状安山岩
	231.85	248.31	褐铁矿化碎裂大理岩		202.51	210.74	蚀变岩
	248.31	324.15	硅质条带状大理岩		210.74	249.12	杏仁状安山岩
	324.15	333.16	黄铁矿化硅质条带状大理岩		249.12	253.35	蚀变碎裂岩
	333.16	367.34	白云石大理岩		253.35	339.70	杏仁状安山岩
	367.34	389.84	硅化大理岩		339.70	344.94	蚀变安山岩
	389.84	391.80	安山岩		344.94	424.68	斑状安山岩
	391.80	394.88	石英脉		424.68	435.18	蚀变斑状安山岩
	394.88	399.60	硅化碳酸盐化方铅矿化碎裂安山岩		435.18	479.83	斑状安山岩
	399.60	450.39	杏仁状安山岩		479.83	510.94	安山岩
ZK1701	13.97	51.43	碎裂安山岩		510.94	558.42	硅质条带状白云岩
	51.43	177.97	安山岩		558.42	573.39	方铅矿化硅质条带状白云岩
	177.97	183.19	镜铁矿化安山岩		573.39	582.65	硅化白云岩
	183.19	218.60	安山岩		582.65	591.40	方铅矿化安山岩
	218.60	224.26	蚀变碎裂岩		591.40	610.55	方铅矿化白云岩
	224.26	265.88	安山岩		610.55	616.49	安山岩
	265.88	268.80	构造角砾岩		616.49	621.22	蚀变碎裂岩
	268.80	296.28	碎裂安山岩		621.22	629.43	安山岩
	296.28	301.85	构造角砾岩		629.43	633.62	硅化蚀变安山岩
	301.85	335.90	安山岩		633.62	651.69	安山岩
	335.90	341.20	蚀变碎裂岩				
	341.20	389.41	安山岩				
	389.41	417.36	蚀变碎裂岩				
	417.36	463.80	安山岩				
	463.80	469.90	蚀变碎裂岩				
	469.90	484.35	安山岩				

 钻孔 ZK5306 孔深 651.69 m,岩性为(杏仁状)安山岩、白云岩及石英正长岩,白云岩中见明显矿化。安山岩稀土元素总量为 $139.7 \times 10^{-6} \sim 372.5 \times 10^{-6}$,平均值为 232.0×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 $7.9 \sim 12.2$,平均值为 9.3; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $8.6 \sim 39.5$,平均值为 14.3。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线为轻稀土元素明显富集的右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 $2.1 \sim 4.4$,平均值为 3.4,轻稀土元素富

集程度较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $1.5 \sim 5.6$,平均值为 2.6,重稀土元素富集程度较低。蚀变安山岩稀土元素总量为 $86.4 \times 10^{-6} \sim 316.7 \times 10^{-6}$,平均值为 222.9×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 $9.4 \sim 13.7$,平均值为 11.7; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $13.4 \sim 35.1$,平均值为 20.2。稀土元素总量较新鲜安山岩低,配分曲线表现为轻稀土元素富集的右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 $3.1 \sim 5.1$,平均值为 3.7,轻稀土元素

表 2 稀土元素分析结果

Table 2 Analysis results of rare earth elements

钻孔编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	REE	LREE	HREE	w(LREE)/w(HREE)	w(La) _N /w(Yb) _N	δEu	δCe
ZK2001	35.5	94.1	8.9	37.0	6.8	1.9	6.3	1.1	6.9	1.5	4.1	0.7	3.9	0.5	35.8	209.1	184.2	24.9	7.4	6.6	0.9	1.3
	37.9	90.2	9.6	39.0	6.9	1.9	6.0	0.9	4.9	1.0	2.6	0.4	2.6	0.4	19.3	204.2	185.4	18.8	9.9	10.6	0.9	1.1
	55.2	203.3	25.7	93.9	15.0	3.2	12.7	1.7	7.6	1.5	4.2	0.7	4.8	0.8	31.2	430.1	396.2	33.9	11.7	8.3	0.7	1.3
	41.5	121.3	15.3	58.2	9.7	2.3	7.9	1.0	4.1	0.7	1.9	0.3	1.8	0.3	15.8	266.2	248.2	18.0	13.8	16.3	0.8	1.2
	24.8	81.2	8.9	37.5	7.8	2.3	6.8	1.0	4.6	0.9	2.3	0.4	2.1	0.3	17.4	180.9	162.5	18.4	8.8	8.4	1.0	1.3
	25.9	87.2	10.7	43.8	8.1	2.2	7.3	1.2	6.5	1.3	3.5	0.6	3.5	0.4	16.7	202.2	178.0	24.2	7.3	5.3	0.9	1.3
	23.7	80.8	8.5	39.2	8.2	2.2	7.5	1.1	5.1	0.9	2.2	0.4	2.6	0.3	10.2	182.8	162.6	20.2	8.1	6.5	0.9	1.4
	45.0	182.0	21.0	85.2	16.5	3.9	13.7	1.9	8.2	1.4	3.6	0.5	3.7	0.5	17.1	387.1	353.6	33.5	10.6	8.7	0.8	1.4
	33.2	101.8	10.1	39.7	6.6	1.6	5.1	0.6	2.9	0.5	1.7	0.3	1.3	0.2	12.6	205.9	193.2	12.7	15.2	17.7	0.8	1.3
	34.5	99.7	12.4	48.2	8.4	1.7	6.4	0.7	2.9	0.5	1.4	0.2	1.1	0.2	10.3	218.3	204.9	13.4	15.3	22.4	0.7	1.2
ZK5302	38.8	111.1	13.9	55.0	9.1	2.0	7.1	1.1	5.2	1.0	2.9	0.5	2.6	0.5	15.9	250.7	229.9	20.9	11.0	10.6	0.7	1.2
	6.3	20.9	1.3	5.0	1.4	0.3	1.1	0.1	0.8	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	4.4	38.5	35.2	3.3	10.6	9.3	0.8	1.7
	1.4	5.4	0.4	1.1	0.8	0.2	0.5	0	0.3	0.1	0.3	0	0.3	0	2.4	10.8	9.2	1.5	6.0	3.8	1.1	1.8
	8.4	12.8	0.6	1.7	0.9	0.2	0.7	0.1	0.5	0.1	0.4	0	0.4	0.1	3.4	26.9	24.7	2.2	11.2	13.7	0.9	1.0
	10.9	27.8	1.9	6.2	1.4	0.4	1.1	0.1	0.7	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	3.9	51.6	48.5	3.1	15.7	16.1	1.0	1.4
	14.3	44.1	3.3	11.8	2.0	0.4	1.7	0.2	0.8	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	4.2	79.8	75.9	3.9	19.5	21.1	0.7	1.5
	27.4	53.2	6.9	27.0	4.7	1.1	4.6	0.7	4.0	0.6	1.6	0.2	1.3	0.2	15.1	133.5	120.4	13.1	9.2	15.1	0.7	0.9
	0.6	2.6	0.3	0.9	0.9	0.3	0.7	0.1	0.9	0.2	0.6	0.1	0.5	0.1	4.8	8.6	5.5	3.1	1.8	0.8	1.1	1.5
	9.0	36.6	2.8	11.9	3.2	1.0	2.9	0.5	2.6	0.5	1.2	0.1	1.0	0.1	11.1	73.4	64.4	9.0	7.2	6.7	1.0	1.8
	26.8	72.6	8.8	36.6	6.9	1.8	5.9	0.8	3.8	0.6	1.4	0.2	1.0	0.1	12.9	167.3	153.5	13.8	11.1	19.2	0.8	1.2
ZK1701	35.6	101.7	12.8	51.6	9.1	2.2	7.5	1.1	4.8	0.9	2.3	0.3	1.9	0.3	19.2	232.1	213.1	19.1	11.2	13.2	0.8	1.2
	36.2	90.5	11.7	47.8	8.5	2.2	6.8	0.9	4.2	0.8	2.0	0.3	1.8	0.3	16.9	213.9	196.8	17.1	11.5	14.2	0.9	1.1
	30.8	129.3	17.1	67.2	12.4	3.0	9.9	1.3	5.3	0.8	2.2	0.3	2.3	0.4	18.8	282.4	259.9	22.5	11.5	9.5	0.8	1.4
	40.0	79.4	9.8	41.6	7.3	1.9	5.6	0.7	3.4	0.7	1.6	0.2	1.7	0.2	11.8	194.0	179.9	14.1	12.8	17.3	0.9	1.0
	38.0	76.3	9.6	40.3	7.0	1.9	5.6	0.8	4.1	0.8	2.1	0.3	2.0	0.3	20.0	189.1	173.0	16.1	10.7	13.5	0.9	1.0
	39.7	80.3	10.4	43.0	7.5	1.9	6.1	0.9	4.7	1.0	2.6	0.4	2.5	0.3	20.0	201.4	182.8	18.6	9.8	11.3	0.9	1.0
	25.1	67.0	6.1	26.7	4.7	1.1	3.6	0.5	2.3	0.4	1.1	0.2	1.1	0.2	9.8	139.8	130.6	9.2	14.1	16.9	0.8	1.3
	38.1	76.5	9.7	39.8	7.0	1.8	5.4	0.8	3.7	0.7	2.0	0.3	1.9	0.3	15.3	187.7	172.8	15.0	11.6	14.3	0.9	1.0
	29.9	94.8	12.3	49.9	8.5	2.0	6.9	1.0	4.6	0.9	2.4	0.4	2.3	0.3	19.8	216.1	197.4	18.6	10.6	9.5	0.8	1.2
	33.1	65.0	8.5	36.7	6.4	1.6	5.2	0.8	4.2	0.8	2.4	0.4	2.3	0.3	19.2	167.8	151.4	16.4	9.2	10.3	0.9	0.9
	32.8	64.7	8.2	35.1	6.1	1.6	5.1	0.8	4.2	0.9	2.3	0.4	2.3	0.3	17.8	164.9	148.6	16.3	9.1	10.1	0.9	1.0
	35.3	92.0	12.3	50.6	8.8	2.1	6.9	0.9	4.5	0.9	2.3	0.3	2.0	0.3	18.5	219.1	201.1	18.0	11.1	12.5	0.8	1.1

表 2 (续)
Table 2 (continued)

钻孔编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	REE	LREE	HREE	w(LREE)/w(HREE)	w(La) _N /w(Yb) _N	δEu	δCe
ZK5306	33.2	118.3	15.5	60.4	9.9	2.3	7.9	1.1	4.9	0.9	2.3	0.3	1.9	0.2	19.1	259.0	239.5	19.5	12.3	12.7	0.8	1.3
	30.3	123.6	15.8	62.9	10.5	2.4	8.7	1.3	6.9	1.3	3.5	0.5	3.1	0.4	30.0	271.3	245.6	25.8	9.5	7.1	0.8	1.4
	29.2	118.7	15.4	59.1	10.1	2.2	8.2	1.2	6.1	1.2	3.2	0.5	2.8	0.3	25.4	258.2	234.8	23.5	10.0	7.6	0.7	1.4
	35.6	116.7	14.8	58.4	10.2	2.3	8.5	1.3	6.8	1.3	3.6	0.6	3.2	0.4	28.5	263.4	237.9	25.5	9.3	8.0	0.7	1.2
	56.5	117.0	26.4	110.0	17.8	3.8	14.8	2.1	10.9	1.9	5.5	0.8	4.7	0.5	52.3	372.5	331.4	41.1	8.1	8.7	0.7	0.7
	79.7	75.1	18.6	76.7	12.5	3.0	10.8	1.4	7.0	1.2	3.5	0.5	2.9	0.3	34.0	293.0	265.4	27.6	9.6	19.6	0.8	0.5
	64.8	114.5	25.4	105.5	17.1	3.9	14.3	2.0	10.9	1.9	5.5	0.8	4.4	0.5	54.8	371.5	331.2	40.4	8.2	10.5	0.7	0.7
	66.3	85.7	19.4	80.8	13.4	2.9	10.6	1.3	6.3	1.1	2.9	0.5	2.8	0.3	26.0	294.3	268.5	25.7	10.4	17.1	0.7	0.6
	73.9	88.1	14.9	55.6	8.1	1.9	6.3	0.7	2.8	0.4	1.1	0.1	0.8	0.1	11.0	254.9	242.5	12.4	19.6	66.5	0.8	0.6
	68.9	109.2	22.1	81.2	11.5	2.4	9.2	1.1	4.7	0.8	2.7	0.5	2.3	0.3	19.9	316.7	295.2	21.5	13.7	21.3	0.7	0.7
	37.7	71.9	8.5	35.4	6.9	1.7	4.8	0.6	2.8	0.4	1.1	0.2	1.3	0.2	12.1	173.5	162.1	11.4	14.2	21.1	0.9	0.9
	47.2	73.3	10.6	39.4	6.0	1.5	4.8	0.6	2.9	0.5	1.6	0.3	1.9	0.3	13.3	191.1	178.1	13.0	13.7	18.0	0.8	0.8
	89.3	167.0	27.8	102.0	12.5	2.1	9.9	0.9	3.1	0.5	1.4	0.2	0.9	0.2	11.3	417.6	400.6	17.0	23.5	70.0	0.6	0.8
	60.4	96.0	18.8	79.1	12.0	2.7	9.5	1.3	6.4	1.2	3.5	0.6	3.2	0.4	32.3	295.0	268.9	26.1	10.3	13.4	0.7	0.7
	44.7	85.2	10.1	40.4	6.5	1.8	5.6	0.8	4.8	0.9	2.6	0.4	2.5	0.3	26.2	206.6	188.7	17.9	10.5	12.7	0.9	0.9
	36.2	73.1	8.7	34.6	5.9	1.6	4.8	0.7	3.7	0.7	2.0	0.3	2.0	0.3	19.2	174.5	160.1	14.4	11.1	12.8	0.9	1.0
	43.4	79.6	10.4	42.2	7.6	2.1	6.5	1.1	6.5	1.2	3.6	0.6	3.6	0.4	36.8	208.7	185.2	23.5	7.9	8.6	0.9	0.9
	44.0	62.3	10.8	45.3	8.2	1.8	6.5	0.8	3.5	0.6	1.7	0.3	1.5	0.2	16.2	187.3	172.3	15.1	11.4	21.7	0.7	0.7
	35.4	70.6	8.6	34.8	6.3	1.9	5.4	0.9	5.0	0.9	2.7	0.4	2.6	0.3	28.5	175.8	157.5	18.3	8.6	9.8	1.0	1.0
	17.5	33.7	4.5	17.6	3.6	1.2	3.0	0.4	2.2	0.4	1.0	0.2	0.9	0.1	10.7	86.4	78.1	8.3	9.4	13.4	1.1	0.9
	72.7	79.8	17.6	71.5	12.8	3.0	10.0	1.2	5.2	0.8	2.3	0.3	2.3	0.3	19.0	280.0	257.4	22.6	11.4	22.2	0.8	0.5
ZK5306	56.1	79.2	13.6	56.1	10.5	2.6	8.8	1.2	5.6	0.9	2.6	0.4	2.5	0.4	16.9	240.5	218.1	22.4	9.7	16.1	0.8	0.7
	62.6	72.3	15.3	62.2	11.4	2.7	9.5	1.2	5.7	1.0	2.8	0.4	2.9	0.4	20.2	250.5	226.4	24.0	9.4	15.4	0.8	0.6
	36.8	73.4	9.3	37.0	6.7	1.7	5.5	0.8	4.5	0.9	2.4	0.4	2.6	0.3	19.4	182.1	164.8	17.3	9.5	10.4	0.8	0.9
	1.9	1.8	0.7	0.6	0.2	0.1	0.2	0.0	0.4	0.1	0.2	0	0.2	0	2.6	6.5	5.3	1.2	4.3	8.3	1.6	0.4
	39.6	64.8	11.3	45.2	7.6	1.8	6.3	0.9	4.3	0.8	2.2	0.3	2.0	0.2	20.2	187.2	170.3	16.9	10.0	14.4	0.8	0.7
	23.8	28.2	5.4	19.8	3.0	0.9	2.6	0.4	1.9	0.4	1.0	0.2	0.8	0.1	10.2	88.2	81.0	7.2	11.2	21.4	0.9	0.6
	61.8	112.3	24.3	100.2	15.7	3.8	12.9	1.8	9.5	1.6	4.8	0.7	3.8	0.5	49.1	353.7	318.1	35.6	8.9	11.6	0.8	0.7
	9.4	13.8	1.9	5.0	0.8	0.2	0.6	0.1	0.5	0.2	0.3	0.1	0.4	0.1	3.4	33.2	31.0	2.2	13.8	18.9	0.8	0.8
	25.5	67.7	6.4	26.4	5.6	1.5	5.1	0.8	4.3	0.7	1.8	0.3	1.6	0.2	13.7	148.0	133.0	15.0	8.9	11.1	0.8	1.3
	84.7	98.3	20.9	83.3	13.6	3.6	11.1	1.6	8.1	1.5	4.1	0.6	3.2	0.3	45.2	334.8	304.3	30.4	10.0	19.2	0.9	0.6
	61.1	60.8	12.9	54.0	9.4	2.5	7.6	0.9	4.2	0.6	1.6	0.2	1.1	0.2	16.1	217.1	200.7	16.4	12.2	39.5	0.9	0.5
	47.4	71.8	12.4	51.5	8.9	2.3	6.7	0.8	3.6	0.6	1.3	0.2	1.0	0.1	14.4	208.5	194.2	14.3	13.5	35.1	0.9	0.7
	26.9	54.9	6.8	28.3	5.7	1.9	5.1	0.8	4.0	0.7	1.9	0.3	2.2	0.4	15.8	139.7	124.3	15.3	8.1	8.8	1.1	1.0

注:稀土元素质量分数为10⁻⁶。

表 3 微量元素分析结果

Table 3 Analysis results of microelements

钻孔编号	Au	Ag	As	Sb	Hg	Ba	Cu	Mn	Mo	Pb	V	W	Zn	Li	Be	Ga	Ge	Se	Rb	Zr	Nb	Cd	In	Te	Cs	Tl	Hf
ZK5302	2.0	0.6	1.1	0.5	0	1 503.1	10.0	1 544.3	0.6	40.5	90.6	27.7	200.7	8.4	1.9	20.2	2.1	0.2	251.0	114.3	9.8	0.8	0.1	0	4.2	2.0	2.5
	0.9	0.2	1.5	0.6	0	1 588.0	3.0	645.0	0.6	30.2	44.3	91.3	86.4	4.2	1.2	20.8	2.2	0.1	213.7	126.8	11.4	0.5	0.1	0	2.7	1.6	2.5
	1.3	0.2	0.9	0.4	0	1 674.1	14.2	897.3	1.0	22.3	119.6	38.5	119.4	18.3	2.4	20.3	2.1	0.2	129.5	258.3	14.8	0.6	0.1	0	6.1	0.6	5.6
	0.3	2.4	2.3	0.9	0.1	293.6	22.4	513.2	1.0	415.8	32.5	7.9	432.3	12.1	1.0	3.1	0.5	0.2	52.2	122.5	2.0	3.5	0	0.1	1.0	0.2	1.7
	0.4	2.8	2.2	1.0	0	262.9	12.2	747.1	1.3	582.4	12.7	3.9	367.6	1.4	0.4	0.6	0.3	0.1	9.7	95.2	0.9	1.8	0	0	0.4	0.1	1.3
	0.3	1.3	2.7	0.5	0	161.7	9.9	663.8	2.6	110.5	13.2	7.7	182.9	3.1	0.3	1.2	0.4	0.1	33.3	123.5	0.9	0.6	0	0.1	0.7	0.2	2.0
	0.5	3.1	2.2	2.1	0	551.2	23.3	561.9	1.1	491.9	14.8	71.2	386.5	3.3	0.5	1.4	0.5	0.1	32.5	93.3	0.8	1.9	0	0	0.7	0.2	1.3
	0.7	1.0	1.1	0.5	0	155.0	14.0	163.9	3.1	179.8	16.0	313.1	92.4	3.0	0.5	1.9	0.6	0.1	38.4	97.1	1.0	0.4	0	0	0.6	0.2	1.7
	0.4	0.2	0.7	0.3	0	1 038.0	2.1	146.0	1.0	27.0	172.0	57.4	198.0	6.6	2.7	15.2	1.6	0.1	95.4	148.0	3.2	0.2	0.1	0.1	2.6	0.4	2.6
	0.6	0.5	0.7	0.3	0	218.5	8.3	686.0	0.6	3 992.9	10.0	483.0	45.7	0.2	0.1	0.4	0.3	0.1	8.7	6.7	0.4	1.2	0	0	0.4	0.1	0.1
	0.8	0.6	0.5	0.3	0	1 268.7	4.0	996.3	0.7	3 255.2	140.8	110.5	126.5	4.2	2.7	14.1	1.4	0.1	98.9	59.1	2.4	1.0	0.1	0	1.8	0.3	1.2
	0.9	0.3	1.1	0.3	0	1 995.7	4.5	370.3	0.6	49.5	168.0	25.8	110.2	32.3	1.8	16.6	2.1	0.1	112.8	91.4	5.1	0.2	0.1	0	3.6	0.5	1.5
ZK5306	1.2	0.1	1.3	0.4	0	1 964.3	10.0	880.0	0.8	15.5	119.3	18.1	114.1	15.9	2.3	23.8	2.7	0.1	90.3	173.0	19.9	0.1	0.1	0	3.1	0.6	5.6
	2.0	1.5	1.1	0.7	0	1 450.5	150.7	6 305.5	0.5	1 000.5	87.3	4.3	326.0	8.0	2.5	20.1	2.7	0.1	115.5	79.4	13.5	0.6	0.7	0.1	7.8	1.4	2.8
	0.9	0.2	1.9	2.4	0	1 981.5	18.7	1 171.9	1.3	40.1	115.5	17.0	158.2	13.3	2.4	23.6	2.6	0.2	92.5	156.9	18.0	0.2	0.1	0.1	6.7	0.6	4.7
	1.2	0.2	2.3	0.5	0	1 961.6	18.0	1 570.4	1.0	64.3	112.5	22.8	267.8	6.3	3.0	22.1	2.5	0.2	116.7	111.7	17.1	0.3	0.1	0	22.0	1.3	4.0
	0.6	0.1	1.6	0.3	0	1 408.3	2.7	402.3	0.6	27.3	41.9	100.2	67.5	7.5	1.8	14.0	1.7	0.2	114.6	124.0	8.9	0.1	0.1	0	5.0	1.1	2.8
	1.3	0.4	1.2	0.7	0	2 185.5	4.5	702.0	0.5	19.2	117.5	35.0	221.5	11.5	2.7	22.3	2.3	0.2	109.5	127.4	12.1	0.4	0.1	0.1	6.1	1.5	3.8
	0.5	0.1	1.2	2.0	0	1 880.0	3.6	921.0	0.5	5.0	48.9	40.5	111.0	22.2	1.5	19.5	1.8	0.2	142.0	153.0	12.6	0.1	0.1	0	5.5	0.9	3.3
	0.5	0.1	1.3	2.6	0	1 446.5	11.8	906.3	0.5	11.5	111.0	15.1	184.3	13.4	1.8	18.8	1.8	0.2	98.5	131.0	7.9	0.2	0.2	0	8.6	1.0	3.7
	1.7	0.1	1.3	2.2	0	1 609.5	2.7	542.5	0.5	14.8	50.2	94.8	98.5	11.0	1.7	17.6	2.0	0.2	84.3	121.6	5.1	0.2	0.1	0	4.9	0.9	3.8
	0.8	0.1	1.9	3.2	0	1 442.0	4.5	1 150.0	1.2	11.3	124.3	35.0	99.2	21.1	1.8	20.3	2.3	0.2	91.3	162.7	13.2	0.1	0.1	0	4.7	0.6	4.5
	0.6	0.1	1.2	0.3	0	872.3	16.4	996.3	1.0	24.6	119.0	16.0	94.7	17.4	1.8	18.9	1.9	0.2	105.0	64.3	8.6	0.1	0.1	0	5.4	0.7	2.6
	0.5	0.1	2.1	0.5	0	1 047.3	7.2	1 072.3	0.7	24.7	112.3	9.4	97.8	11.0	2.3	17.2	1.8	0.2	115.3	77.4	7.3	0.1	0.1	0	5.7	1.3	2.5
0.6	0.1	1.7	0.3	0	1 149.3	5.4	1 252.8	0.6	13.9	158.8	7.2	117.3	27.2	1.5	20.3	2.2	0.2	65.5	101.1	8.5	0.1	0.1	0	5.1	0.5	3.4	
0.5	0.2	1.4	0.6	0	1 112.5	8.5	791.0	0.5	29.5	85.4	39.5	73.3	14.8	1.2	20.0	2.0	0.2	120.0	99.9	9.7	0.1	0.1	0	13.4	1.5	3.2	
0.6	0.1	1.7	0.3	0	1 139.0	12.1	1 169.9	0.6	16.4	135.5	5.9	103.9	19.6	1.6	16.8	1.9	0.2	96.2	96.4	7.6	0.1	0.1	0	5.2	0.9	2.9	
0.5	0.1	1.2	0.5	0	705.0	5.4	1 001.5	0.6	15.9	101.1	13.8	131.0	7.4	2.0	14.0	1.7	0.2	103.4	43.7	3.0	0.1	0.1	0	3.3	2.0	1.5	
0.8	0.1	1.0	0.3	0	1 972.0	2.7	869.0	0.6	11.8	73.3	29.4	124.5	10.7	4.0	25.3	2.4	0.2	117.6	127.2	9.1	0.1	0.1	0	6.5	1.6	4.2	
0.8	0.1	1.7	0.4	0	2 041.0	5.1	887.8	0.6	20.1	82.8	59.5	151.5	10.2	4.1	22.8	2.2	0.2	131.4	214.0	13.9	0.1	0.1	0	4.5	1.5	5.8	
0.7	0.1	1.2	0.3	0	1 869.0	5.1	1 005.8	0.6	19.4	84.0	32.4	215.8	14.9	4.8	27.7	2.7	0.2	138.4	256.8	13.2	0.2	0.1	0	7.7	1.8	6.7	
1.0	0.2	1.4	0.3	0	1 042.3	14.9	1 082.5	0.8	58.9	143.6	6.1	168.8	35.1	1.6	16.2	1.9	0.2	97.7	131.8	9.4	0.1	0.1	0	6.0	0.7	4.0	

表 3 (续)

Table 3 (continued)

× 10⁻⁶

钻孔编号	Au	Ag	As	Sb	Hg	Ba	Cu	Mn	Mo	Pb	V	W	Zn	Li	Be	Ga	Ge	Se	Rb	Zr	Nb	Cd	In	Te	Cs	Tl	Hf
ZK5306	0.3	1.9	1.5	0.8	0.1	205.7	10.8	975.1	1.5	815.9	21.0	3.8	505.5	0.8	0.7	0.3	0.5	0.2	2.3	10.3	0.9	1.7	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3
	1.3	0.6	1.5	0.9	0	1 224.1	13.5	1 049.2	1.2	363.3	88.7	47.6	208.3	12.0	2.0	15.2	1.8	0.2	81.1	103.0	8.2	0.5	0.1	0	5.0	0.8	2.9
	1.6	0.4	1.5	0.3	0	761.4	26.2	218.1	1.6	65.0	34.1	260.7	166.9	3.2	1.1	5.3	0.9	0.1	26.6	32.7	3.4	0.3	0	0	1.1	0.2	0.9
	1.1	0.1	2.2	0.3	0	1 897.2	8.7	1 075.4	1.7	18.8	111.9	61.9	144.2	15.8	2.9	24.0	2.9	0.2	91.4	99.9	17.9	0.1	0.1	0	3.3	0.6	3.3
	5.7	1.2	4.6	1.2	0	188.7	45.2	104.2	9.8	376.9	23.9	630.8	461.5	0.6	0.3	2.4	0.8	0.2	19.9	75.9	1.1	1.6	0	0	0.4	0.2	1.1
	0.6	0.2	1.1	0.4	0	494.5	5.8	174.5	3.7	12.1	139.4	38.9	60.9	13.2	3.2	19.3	1.6	0.1	57.5	109.9	5.8	0.1	0.1	0	2.7	0.5	3.0
	1.2	0.2	7.9	1.2	0.1	2 307.5	28.5	1 109.0	1.3	61.6	96.6	32.6	205.5	13.0	3.0	21.1	2.5	0.2	123.0	72.6	15.2	0.6	0.1	0	9.3	0.8	2.4
	1.2	0.1	1.2	1.0	0	713.0	2.0	311.0	0.6	32.0	156.0	11.2	81.3	6.3	1.7	21.8	2.0	0.1	120.0	51.3	4.2	0.2	0.1	0	1.7	0.9	1.1
	8.2	0.1	1.0	0.6	0	1 580.5	2.1	1.3	0.6	12.4	76.1	26.3	105.2	1.2	0.7	14.1	2.2	0.2	117.5	59.3	4.6	0.2	0.1	0	0.9	1.2	1.1
	1.0	0.2	1.4	0.4	0	1 227.5	2.2	630.5	0.5	517.9	131.0	3.8	213.3	32.0	2.2	21.6	2.5	0.2	107.1	100.0	6.1	0.7	0.1	0	3.1	0.8	3.2
ZK2001	0.7	0.2	0.7	0.4	0	1 001.3	16.2	1 216.9	1.2	42.4	173.3	17.0	132.3	31.4	1.3	17.9	1.9	0.2	89.8	137.2	13.2	0.1	0.1	0	1.0	0.4	4.2
	0.6	0.2	0.6	0.3	0	1 278.7	7.9	1 236.3	1.1	14.8	144.1	9.1	125.9	35.5	1.6	17.8	1.8	0.2	129.7	139.0	12.5	0.1	0.1	0	4.3	0.5	4.2
	0.8	0.1	1.2	0.4	0	1 704.8	9.1	762.5	1.1	30.4	61.2	40.8	288.2	27.4	4.2	26.1	2.6	0.2	169.5	372.9	20.0	0.6	0.1	0.1	16.9	1.2	14.5
	0.9	0.4	1.5	0.4	0	1 597.9	16.0	903.6	1.4	138.3	116.1	40.5	815.8	11.1	3.2	21.9	2.1	0.2	143.6	146.4	18.2	1.9	0.1	0	15.3	1.5	3.4
	0.8	0.4	1.5	0.7	0	2 217.8	12.4	1 285.1	0.8	123.5	137.9	10.4	783.5	11.2	3.0	20.3	1.9	0.2	157.4	108.6	14.1	2.5	0.1	0	21.0	1.4	3.1
	1.1	0.1	1.2	0.7	0	1 263.9	5.7	1 301.2	0.7	29.5	144.2	18.3	140.6	25.6	2.4	20.2	1.8	0.1	121.2	128.1	13.8	0.5	0.1	0	7.2	1.0	4.5
	1.1	0.1	1.5	1.8	0	1 617.5	4.1	454.5	0.6	52.9	139.5	53.1	269.3	8.7	2.2	22.8	2.5	0.1	195.5	160.3	9.5	1.4	0.1	0	3.1	1.5	5.1
	1.5	0.3	1.0	0.6	0	1 254.7	17.6	704.3	0.9	37.4	179.3	31.3	230.3	28.7	5.0	39.5	4.6	0.3	341.3	260.7	12.1	0.7	0.2	0	30.1	2.3	6.9
	1.0	0.7	4.1	1.0	0	1 324.0	14.4	1 163.7	1.4	121.6	147.0	11.1	716.0	11.3	2.8	19.9	2.1	0.2	91.1	100.7	15.0	2.5	0.1	0	25.7	0.8	2.4
	1.0	0.2	0.8	1.1	0	1 545.8	15.9	1 238.5	0.9	31.2	156.9	8.2	206.2	21.8	2.2	20.3	2.1	0.2	109.6	89.7	12.5	0.3	0.1	0	13.3	0.7	2.4
	0.4	0.6	0.8	1.0	0	1 840.3	6.2	1 860.7	1.4	19.3	170.0	2.5	195.0	12.2	3.3	20.9	2.9	0.2	119.3	106.3	10.5	0.5	0.4	0	11.5	0.9	3.8
ZK1701	0.5	0.9	0.6	0.7	0	1 385.5	22.0	1 109.3	1.0	17.4	142.8	11.4	223.0	21.9	1.8	19.5	1.8	0.2	94.1	65.2	10.9	0.2	0.1	0.1	6.6	0.7	2.1
	0.4	0.2	0.5	0.4	0	1 591.0	3.8	1 188.0	0.8	8.5	140.7	4.3	312.0	23.3	1.6	19.2	1.7	0.2	89.2	103.2	10.5	0.2	0.1	0	4.9	0.6	3.2
	0.3	0.1	0.5	0.6	0	1 320.0	18.9	1 077.2	1.0	41.1	153.8	3.5	231.4	26.0	1.8	22.0	2.0	0.2	89.4	96.7	12.7	0.3	0.1	0	5.2	0.6	3.3
	1.8	0.3	1.0	0.6	0.1	784.0	6.0	933.5	0.9	18.0	106.5	43.6	144.5	10.0	1.4	15.3	1.6	0.2	97.3	61.8	9.3	0.3	0.1	0	9.3	0.6	1.3
	0.4	0.1	0.5	0.8	0	1 026.0	5.4	1 007.8	0.9	5.6	145.5	2.8	142.0	24.6	1.4	21.5	2.0	0.2	93.1	119.3	12.0	0.1	0.1	0	5.3	0.5	2.8
	0.5	0.3	0.5	0.9	0	1 045.3	6.9	1 156.0	1.3	39.5	154.3	4.8	219.7	20.9	1.7	22.0	2.1	0.2	87.1	82.6	14.6	0.5	0.1	0	10.7	0.7	3.0
	0.5	0.5	0.6	1.1	0	1 159.4	33.9	1 364.4	1.5	84.9	144.4	4.8	495.4	32.6	1.4	18.5	1.9	0.2	123.6	104.8	12.0	2.2	0.1	0	4.5	0.6	3.3
	1.0	0.3	0.6	0.5	0	1 271.3	11.8	1 189.7	0.9	19.4	135.7	4.5	146.0	32.2	1.3	17.3	1.9	0.2	108.3	116.2	11.9	0.1	0.1	0	5.1	0.6	3.3
	0.8	0.1	0.6	0.5	0	1 561.8	20.2	1 330.8	1.5	19.0	152.7	4.3	190.3	36.5	1.8	19.2	2.2	0.2	112.2	86.5	14.3	0.3	0.1	0	4.0	0.6	3.4
	0.8	0.1	0.6	0.9	0	1 820.1	4.0	1 128.1	0.6	17.4	140.6	6.5	155.8	16.9	2.4	19.8	2.2	0.2	115.5	89.4	16.4	0.2	0.1	0	12.3	0.9	2.3
	0.6	0.2	0.6	0.5	0	1 192.6	12.8	1 151.6	1.0	15.0	151.0	5.4	118.0	27.9	1.9	20.0	2.2	0.2	87.8	105.7	17.5	0.2	0.1	0	4.3	0.7	3.4
	0.7	0.1	0.5	0.6	0	1 283.7	5.9	1 371.7	0.9	16.9	136.7	21.0	103.8	26.5	2.1	19.8	2.0	0.2	106.5	88.7	16.8	0.2	0.1	0	8.7	0.6	2.8
	0.7	0.1	0.7	0.7	0	1 327.0	4.7	989.0	1.1	7.4	152.5	6.8	108.0	32.7	1.8	20.4	2.0	0.2	86.7	115.0	16.8	0.1	0.1	0	3.0	0.4	3.7

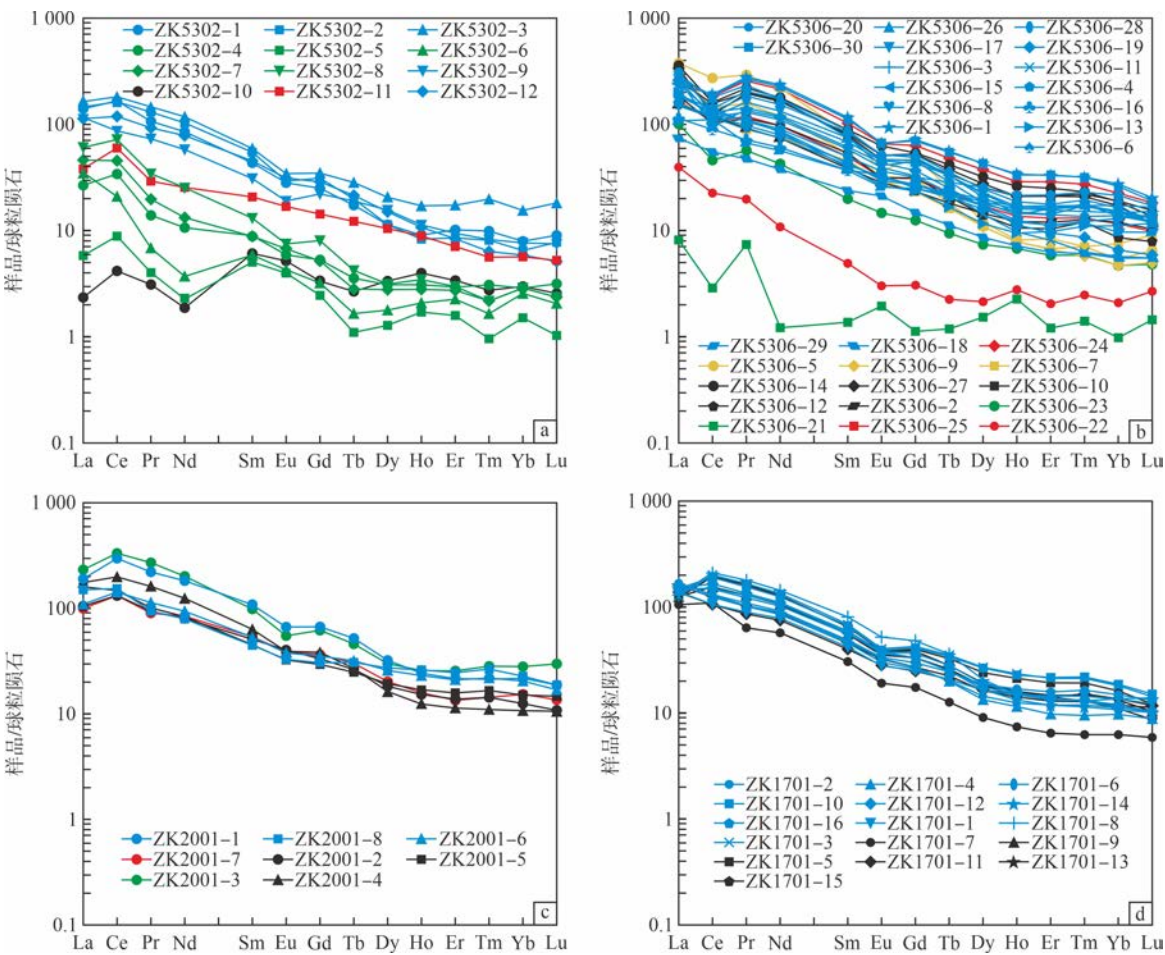


图3 白土金铅矿床主要岩矿石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(球粒陨石数据引自文献[35])

Fig.3 Chondrite normalized partitioning model for rare earth elements in main rocks and ores of Baitu Au-Pb Deposit

富集程度较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.1~5.7, 平均值为 3.3, 重稀土元素富集程度较低;大理岩样品长仅 1.96 m, 其稀土元素总量 8.6×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 1.8, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.8, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为较平坦的轻稀土富集右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 2.5, 轻稀土元素富集程度一般; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.8, 重稀土元素富集程度较低;石英正长岩样品稀土元素总量为 $173.5 \times 10^{-6} \sim 417.6 \times 10^{-6}$, 平均值为 282.0×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 14.2~23.5, 平均值为 19.1; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 21.1~70.0, 平均值为 52.5。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素严重富集的右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 3.5~5.9, 平均值为 4.7, 轻稀土元素富集程度较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 3.1~9.0, 平均值为 5.2, 重稀土元素富集程度较低。蚀变(碎裂)岩稀土元素总量为 $174.5 \times 10^{-6} \sim 334.8 \times 10^{-6}$, 平均值为 261.1×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 9.6~19.1, 平均值为 11.9; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 12.8~52.5, 平均值为 23.2。稀土元素球粒陨石

标准化配分曲线表现为轻稀土元素明显富集的右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 3.2~4.7, 平均值为 3.9, 轻稀土富集程度较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.0~6.4, 平均值为 4.0, 重稀土元素富集程度较低。(方铅矿化)白云岩稀土元素总量为 $6.5 \times 10^{-6} \sim 187.2 \times 10^{-6}$, 平均值为 78.8×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 4.3~13.8, 平均值为 9.9; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 8.3~21.4, 平均值为 15.8。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素明显富集的右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 3.4~8.0, 平均值为 5.6, 轻稀土元素富集程度较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.1~2.7, 平均值为 2.0, 重稀土元素富集程度一般。

钻孔 ZK2001 孔深 321.50 m, 全孔无明显矿化, 岩性为(杏仁状)安山岩、蚀变碎裂岩、(蚀变碎裂)大理岩、构造角砾岩、蚀变碎裂(玄武)安山岩。安山岩稀土元素总量为 $209.1 \times 10^{-6} \sim 387.1 \times 10^{-6}$, 平均值为 245.3×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 7.4~10.6, 平均值为 8.6; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 5.3~8.7, 平均值为 6.8。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素富集的右倾模式, 发生蚀变的

安山岩稀土元素总量较新鲜安山岩低,且配分曲线更为平坦,反映成矿作用过程中的热液蚀变作用对安山岩中稀土元素有带出作用, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.8 ~ 3.4,平均值为 2.3,轻稀土元素富集程度较低; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.3 ~ 3.1,平均值为 2.1,重稀土元素富集程度较低;构造岩(蚀变碎裂岩、构造角砾岩)稀土元素总量为 $180.9 \times 10^{-6} \sim 266.2 \times 10^{-6}$,平均值为 228.8×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 8.8 ~ 13.8,平均值为 11.4, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 8.4 ~ 16.3,平均值为 12.2;稀土配分曲线表现为轻稀土元素明显富集的右倾模式,轻、重稀土元素分异程度较安山岩略高, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 2.1 ~ 3.5,平均值为 2.9,轻稀土元素富集程度相对较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.0 ~ 3.6,平均值为 2.7,重稀土元素富集程度较低。(蚀变碎裂)大理岩长仅 15.24 m,其稀土元素总量为 430.1×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 11.7, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 8.3。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素富集的右倾模式,稀土元素配分曲线平坦, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 2.4,轻稀土元素富集程度较低, $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 2.2,重稀土元素富集程度较低。

钻孔 ZK1701 孔深 484.35 m,全孔无明显矿化。岩性为(杏仁状)安山岩、蚀变碎裂岩、构造角砾岩,未能揭露大理岩。安山岩稀土元素总量为 $167.8 \times 10^{-6} \sim 282.4 \times 10^{-6}$,平均值为 223.3×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 9.2 ~ 12.8,平均值为 10.8; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 7.1 ~ 17.3,平均值为 11.8;稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素明显富集的右倾模式,蚀变安山岩稀土元素总量较新鲜安山岩略低,配分曲线更为平坦, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.6 ~ 3.6,平均值为 2.7,轻稀土元素富集程度相对较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.9 ~ 3.6,平均值为 2.5,重稀土元素富集程度较低。构造岩(蚀变碎裂岩、构造角砾岩)稀土元素总量为 $139.8 \times 10^{-6} \sim 259.0 \times 10^{-6}$,平均值为 204.5×10^{-6} ; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 9.1 ~ 14.1,平均值为 11.1; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 7.6 ~ 16.9,平均值为 11.7;稀土元素球粒陨石标准化配分曲线表现为轻稀土元素明显富集的右倾模式, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为 1.9 ~ 3.5,平均值为 2.8,轻稀土元素富集程度相对较高; $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 1.8 ~ 3.5,平均值为 2.6,重稀土元素富集程度较低。

通过对以上 4 个钻孔不同岩性进行梳理,发现不同岩性稀土元素总量呈现如下规律:① $w(\text{REE})_{\text{大理岩}} >$

$w(\text{REE})_{\text{石英正长岩}} > w(\text{REE})_{\text{安山岩}} > w(\text{REE})_{\text{构造岩}}$; ② $w(\text{REE})_{\text{安山岩}} > w(\text{REE})_{\text{蚀变安山岩}} > w(\text{REE})_{\text{矿化安山岩}}$; ③ $w(\text{REE})_{\text{大理岩}} > w(\text{REE})_{\text{白云岩}} > w(\text{REE})_{\text{矿化白云岩}} > w(\text{REE})_{\text{石英脉}}$;④蚀变矿化程度越强,稀土元素总量越低。以上规律说明,构造蚀变活动对稀土元素有一定迁移作用,体现了热液成矿特征^[13];安山岩 δEu 值普遍为 0.7 ~ 1.0,呈弱负异常,仅少量矿化安山岩 δEu 值为 0.9 ~ 1.1,呈弱正异常, δCe 值为 0.9 ~ 1.4,呈弱正异常,而矿化蚀变安山岩 δCe 值为 0.5 ~ 1.0,呈明显负异常。

构造岩(蚀变岩、蚀变碎裂岩) δEu 值普遍在 0.7 ~ 1.0,呈弱负异常; δCe 值为 1.0 ~ 1.4,呈弱正异常;但钻孔 ZK5306 揭露的蚀变碎裂岩 δCe 值为 0.5 ~ 1.0,表现出弱负异常,这可能与原岩岩性或成矿作用有关。大理岩 δEu 值为 0.7 ~ 1.1,多呈弱负异常, δCe 值为 1.0 ~ 1.8,多呈弱正异常。(方铅矿化)白云岩 δEu 值为 0.8 ~ 1.6,正、负异常均存在,可能与方铅矿化的不均匀分布有直接关系; δCe 值为 0.6 ~ 0.8,呈明显负异常。石英正长岩 δEu 值为 0.6 ~ 0.9,呈弱负异常; δCe 值为 0.6 ~ 0.9,呈弱负异常。石英脉 δEu 值为 1.1,异常不明显, δCe 值为 1.5,呈明显正异常。综上,蚀变安山岩、构造岩、大理岩等岩石的 Eu 异常影响不明显,而矿化则使 Eu 呈现出明显的负异常;蚀变使安山岩、构造岩、大理岩等岩石的 Ce 异常明显, δCe 值变小,由正异常逐渐演化成负异常,矿化则使 Ce 负异常进一步加大。金矿石、铅锌矿石中也普遍存在 Eu、Ce 的弱负异常,常被认为是热液交代所致,或成矿热液为富 Cl^- 的还原性流体^[28-33],故白土金铅矿床的热液交代和变质交代作用普遍发育是产生 Eu、Ce 弱负异常的原因^[34-35]。石英脉 Eu 异常不明显,Ce 呈现出明显正异常,可能是矿化晚阶段产物。石英正长岩 δEu 值为 0.6 ~ 0.9, δCe 值为 0.6 ~ 0.9,均呈现明显负异常,可能为成矿热液的母岩,与成矿关系密切。

4.2 微量元素特征及对矿床成因的指示

白土金铅矿床微量元素相关系数显示,主成矿元素 Pb 与 W、Cd、Ag 相关性最高,Zn 与 Cd、Ag 相关性最高;主成矿元素 Au、Pb、Zn 总体表现出与 Cd、W、Ag 具有较好的正相关关系,但三者之间的相关性并不明显(见图 4)。说明 Au、Pb 成矿可能有着独立性,这与地质勘查过程中金矿体与铅矿体常异体共生的特征相吻合。Cd 与 Au 成矿的关系变化较大,但一般呈正相关关系,多是内生金矿床的重要指示元素。

	Au	Ag	As	Sb	Hg	Ba	Cu	Mn	Mo	Pb	V	W	Zn	Li	Be	Ga	Ge	Se	Rb	Zr	Nd	Cd	In	Te	Cs	Tl	Hf	
Au	1.0	0	0.2	0	-0.1	0	0.2	0.1	0.4	0	-0.2	0.4	0	-0.3	-0.2	-0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	
Ag		1.0	0.2	0.1	0.5	-0.5	0.4	0.1	0.2	0.3	-0.5	0.1	0.4	-0.4	-0.4	-0.7	-0.6	-0.1	-0.4	-0.2	-0.5	0.6	0	0.3	-0.2	-0.4	-0.4	
As			1.0	0.2	0.4	0	0.2	-0.1	0.4	-0.1	-0.3	0.2	0.3	-0.3	0	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.1	0.3	-0.1	0.1	0.1	0	-0.1	
Sb				1.0	0.1	0.1	0	0	0.1	-0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	-0.2	0	0	0	-0.1	0	0	0.1	0	1.2	0	-0.1	0	
Hg					1.0	-0.3	0.1	0	0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.4	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.5	-0.1	0.3	0	-0.2	-0.2	
Ba						1.0	-0.1	0.2	-0.4	-0.3	0.4	-0.4	0	0.3	0.6	0.7	0.7	0.1	0.5	0.4	0.7	-0.3	0.3	0	0.4	0.5	0.5	
Cu							1.0	0.8	0.2	0.1	-0.1	0.1	0.3	-0.1	0	0	-0.1	0	0	-0.1	-0.1	0.1	0.2	0.7	0.2	0.1	0	-0.1
Mn								1.0	-0.2	0.1	0.2	-0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	-0.1	0.3	0	0.8	0.2	0.2	0.2	0	
Mo									1.0	0	-0.3	0.7	0.2	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	
Pb										1.0	-0.3	0.5	0	-0.3	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	0.3	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	
V											1.0	-0.5	-0.1	0.7	0.4	0.7	0.6	0.2	0.4	0.1	0.5	-0.3	0.2	-0.1	0.3	0.2	0.2	
W												1.0	0	-0.4	-0.3	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.4	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	
Zn													1.0	-0.4	0.1	-0.4	-0.4	0.2	0	0	0.1	0.8	0	0.2	0.4	0	0	
Li														1.0	0.2	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	-0.3	0	-0.1	0.2	0	0.4	
Be															1.0	0.8	0.7	0.2	0.6	0.6	0.6	-0.2	0.3	0.1	0.6	0.6	0.6	
Ga																1.0	0.9	0.4	0.8	0.5	0.7	-0.4	0.3	0	0.6	0.7	0.6	
Ge																	1.0	0.4	0.8	0.5	0.7	-0.4	0.5	0	0.6	0.7	0.6	
Se																		1.0	0.4	0.2	0.4	0	0	0.2	0.4	0.3	0.3	
Rb																			1.0	0.5	0.5	-0.1	0.3	-0.1	0.5	0.8	0.5	
Zr																				1.0	0.5	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.9	
Nd																					1.0	-0.2	0.3	0	0.5	0.3	0.6	
Cd																						1.0	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.2	
In																							1.0	0.2	0.2	0.3	0.2	
Te																								1.0	0.1	0	0.2	
Cs																									1.0	0.5	0.4	
Tl																										1.0	0.4	
Hf																											1.0	

图 4 白土金铅矿床微量元素相关系数图

Fig.4 Correlation coefficient diagram for microelements in Baitu Au - Pb Deposit

钻孔 ZK1701、ZK2001 均未见明显矿化,岩性以安山岩为主,仅有 1 件样品岩性为大理岩,二者的微量元素表现出相似特征(见图 5):As、Cu、Ge、Cd、Te 表现出明显负异常;Ag、Sb、Pb、W、Zn、In、Cs 表现出明显正异常,其余元素异常不明显。安山岩经构造蚀变后,Pb、W 出现明显富集。安山岩、大理岩作为矿体的主要围岩,与华北陆块相比,成矿元素 Ag、Sb、Pb、W、Zn 呈富集状态,为铅锌成矿提供了高背景值,蚀变后的安山岩 Pb、W 呈现出明显富集现象,暗示热液流体本身携带 Pb、W 成矿元素或对安山岩原有的成矿元素通过热液交代形成一定的富集^[36]。

钻孔 ZK5302 见明显矿化,岩性有安山岩、大理岩、构造岩、石英脉,部分岩石存在明显的矿化蚀变。不同岩性微量元素含量特征显示,除个别元素外,大多元素相对华北陆块的异常表现出一致性,具体为 As、Cu、Li、Ge、Cd、Te 表现出明显亏损;Ag、Sb、Pb、W、In 表现出明显富集。在异常强度上,不同岩性存在差异,构造岩、大理岩、石英脉与安山岩类相比,富集或亏损强度较强,且异常强度依次加强,值得注意的是,Cs、Tl、Hf 表现出明显的异常。钻孔 ZK5306 见明显矿化,岩性有安山岩、白云岩、构造岩、石英正长岩。其中,白云岩存在明显矿化。不同岩性微量元素含量特征显示,多数元素表现出一致性,具体为 As、Cu、Li、Ge、Cd、Te 相对华北陆块表现出明显亏损;Ag、Sb、Hg、Mo、Pb、W、Be、In、Cs、Tl 相对华北陆块表现出明显富集,富集或亏损强度较强,从安山岩、构造岩、石英正长岩、白云岩依次加强;说明成矿与龙家园

组碳酸盐岩关系密切,可能为成矿提供大部分成矿物质,而石英正长岩或石英脉作为成矿热液载体为成矿提供一定的物质来源和主要热动力^[37-38]。

5 结 论

1)构造蚀变活动对稀土元素有一定迁移作用,矿化蚀变岩石稀土总量明显降低;蚀变使安山岩、构造岩、大理岩的 Eu 异常影响不明显,而矿化则使其 Eu 呈现明显负异常;蚀变使安山岩、构造岩、大理岩的 Ce 异常明显,Ce 由正异常逐渐演化成负异常,矿化则使 Ce 负异常进一步加大,体现了白土金铅矿床热液交代和变质交代作用普遍发育的特点。

2)石英脉 Eu 异常不明显,Ce 呈现出明显正异常,可能是矿化晚阶段产物。石英正长岩 Eu、Ce 均呈现明显负异常,可能为成矿热液的母岩,与成矿关系密切。

3)安山岩、大理岩作为矿体的主要赋矿围岩,与华北陆块相比,成矿元素 Ag、Sb、Pb、W、Zn 呈富集状态,为铅成矿提供了高背景值,蚀变安山岩 Pb、W 呈现明显富集现象,暗示热液流体携带 Pb、W 成矿元素或对安山岩中成矿元素经热液交代后有富集作用。构造岩、石英脉、石英正长岩、(大理)白云岩与安山岩类相比,微量元素富集或亏损强度较大,且异常强度依次加强,说明成矿与龙家园组大理岩、白云岩关系密切,可能为成矿提供大部分成矿物质,而石英正长岩或石英脉作为成矿热液载体为成矿提供一定的物质来源和主要热动力。

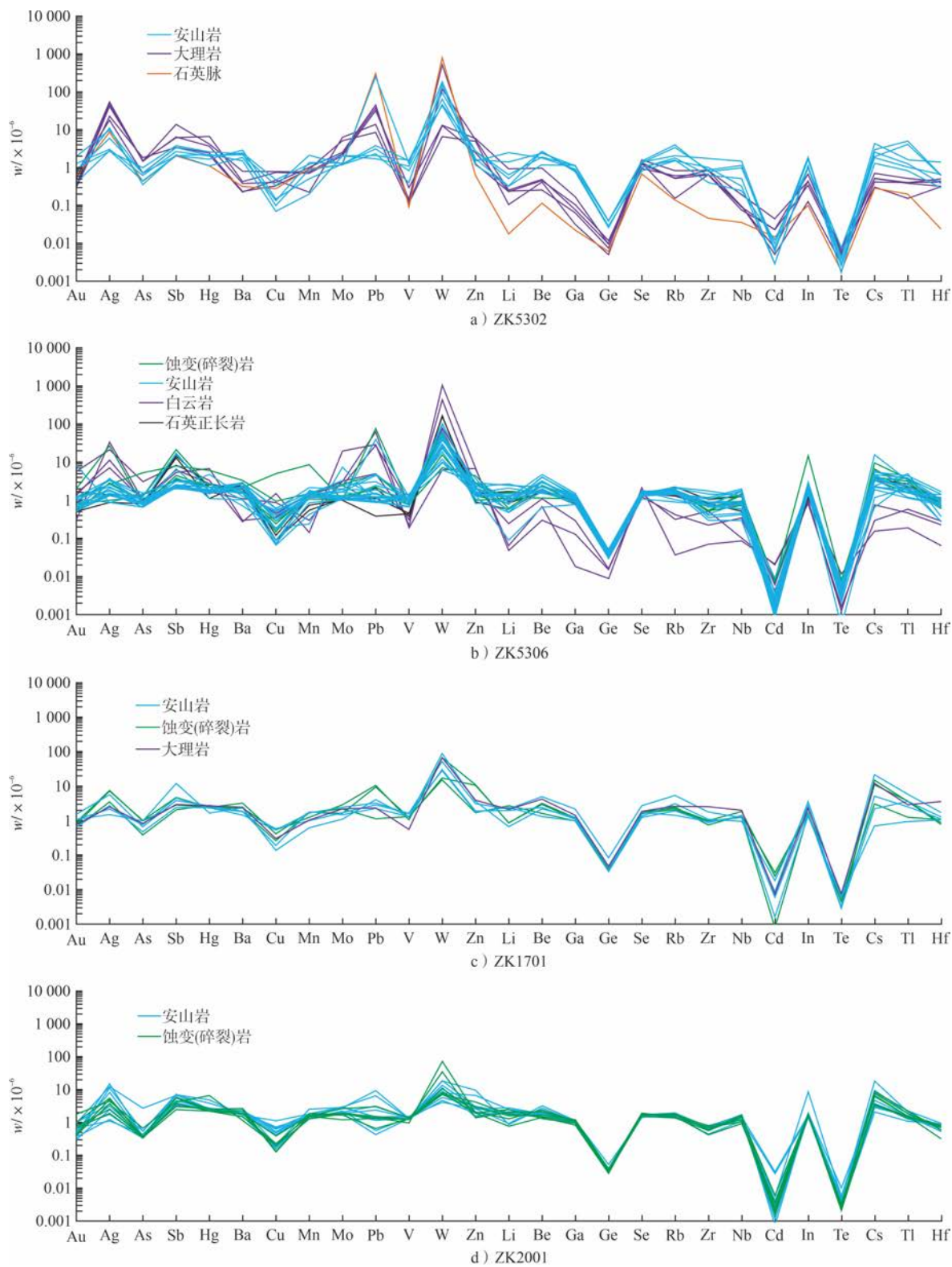


图5 白土金铅矿床主要岩石矿石微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig.5 Primitive mantle normalized cobweb diagram for microelements in main rocks and ores of Baitu Au-Pb Deposit

【参考文献】

[1] 燕长海,宋要武,刘国印,等.河南栾川杨树凹一百炉沟 MVT 铅锌矿带地质特征[J].地质调查与研究,2004,27(4):249-254.

[2] 吕文德,孙卫志,王喜恒,等.河南省栾川赤土店地区银铅锌成矿地质条件及找矿前景[J].前寒武纪研究进展,2002,25(3/4):165-169.

[3] 王长明,张寿庭,邓军,等.河南冷水北沟铅锌矿地质地球化学特征及成因探讨[J].矿床地质,2007,26(2):175-183.

[4] 唐利,张寿庭,曹华文,等.河南栾川三道沟铅锌银矿床成矿流体地球化学特征[J].现代地质,2014,28(2):359-368.

[5] 严海麒,裴玉华,宋要武,等.河南栾川西沟层状铅-锌-银矿床地质特征及成因探讨[J].矿产与地质,2007,21(3):245-250.

[6] 曹华文,张寿庭,郑略,等.河南栾川矿集区中鱼库(铅)锌矿床闪锌矿微量元素地球化学特征[J].矿物岩石,2014,34(3):50-59.

[7] 祁进平,陈衍景,倪培,等.河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[J].岩石学报,2007,23(9):2119-2130.

[8] 段士刚,薛春纪,刘国印,等.河南栾川百炉沟铅锌矿床地质、流体包裹体和稳定同位素地球化学[J].矿床地质,2010,29(5):

- 810–826.
- [9] 张旭晃. 河南栾川三道沟铅锌矿同位素地球化学特征及成因分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
 - [10] 曹华文, 裴秋明, 张寿庭, 等. 河南栾川三道沟铅锌银矿床方解石地球化学特征及 Sm–Nd 年龄研究[J]. 地球化学, 2016, 45(2): 144–154.
 - [11] 付治国, 瓮纪昌, 燕长海, 等. 东秦岭冷水北沟铅锌银矿床同位素地球化学特征[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 34–39.
 - [12] 段士刚, 薛春纪, 冯启伟, 等. 豫西南赤土店铅锌矿床地质、流体包裹体和 S、Pb 同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 427–441.
 - [13] 陈晶源, 王长明, 贺昕宇, 等. 河南瓦房铅锌矿床地质、流体包裹体和稳定同位素特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(5): 1383–1404.
 - [14] 曹华文, 裴秋明, 张寿庭, 等. 豫西栾川中鱼库(铅)矿床闪锌矿 Rb–Sr 年龄及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 528–538.
 - [15] 高阳, 何玉州, 李红超. 河南嵩县土地庙沟铅锌矿床有关的花岗岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 测年和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2019, 55(3): 685–700.
 - [16] 刘国印, 燕长海, 宋要武, 等. 河南栾川赤土店铅锌矿床特征及成因探讨[J]. 地质调查与研究, 2007, 30(4): 263–270.
 - [17] 马留锁, 杨光忠, 王博文, 等. 豫西卢氏县田家坪铅锌矿床地质特征及成因[J]. 黄金, 2021, 42(5): 13–17.
 - [18] 徐刚, 张有, 方荣, 等. 河南省熊耳山地区金矿床类型及控矿因素分析[J]. 黄金, 2013, 34(2): 25–31.
 - [19] 张明亮, 梁海彬, 轩慎英. 河南省熊耳山地区金及多金属远景分析[J]. 矿床地质, 2008, 27(增刊1): 177–181.
 - [20] 燕长海, 刘国印, 宋锋, 等. 河南马超营—独树一带银铅锌成矿地质条件及找矿前景[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 305–310.
 - [21] 王俊德, 王春帅, 王博文, 等. 豫西熊耳山白土金矿床地质特征及成因[J]. 矿产与地质, 2020, 34(2): 189–194.
 - [22] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
 - [23] 刘红樱, 胡受爻, 周顺之. 豫西马超营断裂带的控岩控矿作用研究[J]. 矿床地质, 1998, 17(1): 71–82.
 - [24] 胡受爻, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿(以东秦岭—桐柏为例)[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988.
 - [25] 燕建设, 王铭生, 杨建朝, 等. 豫西马超营断裂带的构造演化及其与金等成矿的关系[J]. 中国区域地质, 2000, 19(2): 166–171.
 - [26] 张灯堂, 冯建之, 李磊, 等. 华北克拉通南缘后大陆碰撞背景下的岩石圈演化及金、钼成矿规律探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(2): 300–314.
 - [27] 王小涛, 梁新辉, 常嘉毅, 等. 河南栾川县白土铅矿床地质特征及成因[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(3): 39–44.
 - [28] 代文军, 陈耀宇. 甘肃枣子沟金矿床稀土元素地球化学特征[J]. 黄金, 2013, 34(9): 23–29.
 - [29] 毛晓冬, 黄思静. 广东长坑—富湾金银矿床微量元素及稀土元素地球化学[J]. 成都理工大学学报, 2002, 29(4): 410–417.
 - [30] 庞奖励, 裴瑜卓. 二道沟金矿床中的稀土元素地球化学特征[J]. 中国稀土学报, 1996, 14(2): 97–102.
 - [31] 谭威, 韩润生, 王雷, 等. 滇西北北衙金多金属矿床稀土元素地球化学[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(1): 113–128.
 - [32] 王恩德, 门业凯, 贾三石, 等. 胶东郭城金矿床稀土元素地球化学特征及其对成矿的指示意义[J]. 稀土, 2014, 35(3): 6–12.
 - [33] 张苏坤, 刘耀文, 汪江河, 等. 熊耳山上官金矿床稀土元素特征及对金矿物质来源的指示意义[J]. 地球学报, 2020, 41(6): 938–948.
 - [34] 肖光富, 武禄川. 河南卢氏官坡—五里川锑矿带稀土元素特征及与成矿的关系[J]. 黄金, 2014, 35(9): 24–29.
 - [35] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
 - [36] 息朝庄, 杨涛, 夏浩东, 等. 湘东北黄金洞金矿床微量元素、稀土元素特征及其地质意义[J]. 黄金, 2018, 39(2): 17–21.
 - [37] 王俊德, 汤立伟, 杜庆安, 等. 福建吉花金银矿床地质特征及含矿蚀变带元素迁移对区域成矿的启示[J]. 黄金, 2024, 45(3): 55–66.
 - [38] 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 451–459.

Indicative significance of rare earth and microelement characteristics to the genesis of Baitu Au–Pb Deposit in Western Henan

Cai Huanhua^{1,2}, Zhang Sukun^{1,2,3}, Liu Yugang^{1,2}, Yao Xiaodong^{1,2}, Wang Junde^{1,2}, Wang Xiaotao^{1,2}, Cheng Beilei^{1,2}

(1. No. 1 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan;

2. Key Laboratory of Au–Ag–Polymetallic Deposit Series and Deep-seated Metallogenic Prognosis of Henan Province;

3. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology)

Abstract: Baitu Au–Pb Deposit is located at the intersection of the Kangshan–Shanggong Fault and Machaoying Fault on the southern margin of the North China Craton. The Au, Ag, and Pb ore bodies are in heterogeneous coexistence. They mainly occur in secondary fault zones in carbonate rocks in a vein-like and layered manner. This paper conducted rare earth and microelement tests on the main rocks. The characteristics of rare earth elements indicate widespread development of hydrothermal and metamorphic metasomatism. The specific characteristics are: ① $w(\text{REE}_{\text{marble}}) > w(\text{REE}_{\text{quartz syenite}}) > w(\text{REE}_{\text{andesite}}) > w(\text{REE}_{\text{tectonic rock}}) > w(\text{REE}_{\text{mineralized dolomite}}) > w(\text{REE}_{\text{mineralized quartz vein}})$, showing a feature of the greater the degree of alteration mineralization, the lower the total rare earth content; ② The rare earth distribution curve shows that with mineralization, slope increases, enrichment degree of light rare earth decreases, and enrichment degree of heavy rare earth increases; ③ The influence of alteration on Eu element anomalies in rocks such as andesite tectonic rock and marble is not significant, while mineralization results in a significant negative anomaly of Eu element. Additionally, the alteration has a significant impact on Ce element anomalies in andesite, tectonic rock, and marble, causing the Ce element to evolve gradually from positive anomalies to negative anomalies. Mineralization further increases the degree of negative anomalies in Ce elements. Comparing the microelements of the main rocks and ores with that of the North China continental crust, it was found that andesite and marble are the main host rocks, and the ore-forming elements Ag, Sb, Pb, W, and Zn are enriched, providing high background value for lead mineralization. After alteration, Pb and W elements in andesite show obvious enrichment, suggesting that the hydrothermal fluid itself carries Pb and W ore-forming elements or has a hydrothermal metasomatic enrichment effect on the ore-forming elements in the wall rocks; In terms of anomalous intensity, tectonic rocks, quartz veins, quartz syenites, and (marble) dolomite have higher enrichment or depletion intensity compared to andesite rocks, and the anomalous intensity is sequentially strengthened, indicating a close relationship between the source of ore-forming matters and the carbonate rocks of Longjiayuan Formation. In summary, the genesis of Baitu Au–Pb Deposit is generally dominated by magmatic hydrothermal filling and metasomatism, but it is superimposed with later continental volcanic sedimentary transformation.

Keywords: Western Henan; Baitu Au–Pb Deposit; rare earth elements; microelements; deposit genesis; alteration