



厄瓜多尔 Beroen 金银矿床 硫铅同位素地球化学

席振^{1,2}, 高光明^{1,2}, 马德成³, 罗晗^{1,2}

- (1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
3. 新疆有色地质勘查局 701 队, 昌吉 831100)

摘要: Beroen 位于厄瓜多尔西南大洋增生地体和原生大陆地体拼接缝合带的东侧。基于矿区围岩和主要硫化物的硫铅同位素特征进行分析。除磁黄铁矿外, 其他硫化物平均 $\delta^{34}\text{S}$ 为 0.1‰, 来源于深部岩浆来源硫, 并有结晶基底还原硫的贡献。围岩及硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.605~19.147, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.621~15.694, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.378~38.967, 放射性成因的异常铅, 经历 3 个阶段, 中晚白垩纪前在地幔中为均质的非放射成因铅; 始新世时期, 富集地幔岩浆源形成, 并在浅地壳同化吸收 Chaucha 和 Macuchi 基底岩石的放射性铅; 在中新世矿床形成时, 与浅地壳层岩浆房的热液系统有关的成矿流体淋滤围岩的放射成因铅, 在矿石矿物中更加富集地壳铅成分。同时, Chaucha 成矿区矿床的矿石矿物铅同位素组成比围岩和中安第斯矿床更富集放射成因铅, 这与厄瓜多尔南部中晚第三世大量中小型体积侵入体侵入位有密切关系。

关键词: 铅硫同位素; 成矿物质来源; 淋滤; 吸收; Beroen 金银矿; 厄瓜多尔西南部

中图分类号: P597

文献标志码: A

厄瓜多尔安第斯是沿南美大陆西部边缘延伸山链的一部分。其矿业发展集中在过去的 20 年中, 许多国际和厄瓜多尔国家公司加大矿业勘查活动, 发现大批中新世及更老的斑岩相关矿床。按照成矿时代的不同, 厄瓜多尔南部成矿带可分为两个截然分布的金属成矿带^[1-5]。其中中新世金属成矿带发育自秘鲁中部, 沿安第斯山脉向北延伸到厄瓜多尔和哥伦比亚, 发育许多世界级的铜和金矿床^[3,5-6]。该带矿化类型主要有斑岩铜-钼-金(如 Junin, Chaucha, Gaby-Papa Grande^[1]), 高硫型(如 Quimsacocha^[2,7]), 中硫型(如 Portovelo-Zaruma^[8]), 和低硫型(如 Beroen^[9])热液金、银矿床。虽然有些矿床有很长的开采历史(Portovelo-Zaruma 金矿开采始于古 Inca 时期(15 世纪)), 但许多厄瓜多尔的中新世成矿带上的矿床在目前基本都处于勘探阶段。

厄瓜多尔地壳由不同的大陆源地体(Chaucha, Tahuin, Loja)和大洋源地体(Macuchi, Alao, Salado)组成, 这些地体单元从晚侏罗到始新世一直发展增生至亚马逊克拉通。根据基本地形和主要地质单元, 厄瓜

多尔可分为西部平缓 Costa 弧前增生平原, 东部 Oriente 前陆盆地, 及两者之间西科迪勒拉, 内安第斯地槽和东科迪勒拉山链组成^[10]。Beroen 矿床是一个赋存在火山岩地层中的低硫型(绢云母-冰长石型)浅成低温热液矿床^[9]。位于外来白垩纪到始新世的 Macuchi 大洋地体和原地 Chaucha 陆壳地体的接触部位, 靠近两者之间北北东方向 CPP(Calacali-Pallatanga-Pujili)断层带的南部延伸 Bulubulu 断层^[9], 如图 1(a)所示。同位素地球化学可以对成矿物质来源进行有效示踪, 其中硫同位素能表征成矿时的物化条件。而铅同位素除受到放射性衰变和混合作用影响外, 不会在物理、化学和生物作用过程中发生变化^[11]。黄铁矿、闪锌矿等硫化物中基本不含有 U、Th 等放射成因铅的母体放射元素, 硫化物一旦结晶, 其铅同位素比值基本不变^[12]。基于同一矿床、不同矿床硫铅同位素对比, 可以发现矿床形成背景的差异, 从差异入手, 探讨成矿背景物化条件的变化, 进而推断矿床形成的大地构造背景、地球动力学等的演化, 对区域的地质演化历史和矿床

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40827002, 41204054); 中南大学庄胜矿业研究院秘鲁-厄瓜多尔地质调查项目及 International Minerals Corporation 联合资助

收稿日期: 2015-06-27; **修订日期:** 2015-10-18

通信作者: 高光明, 教授; 电话: 13707485443; E-mail: gmgao134@qq.com

发现有重要推进作用^[3-6, 10-14]。本文作者在显微镜下研究和矿石矿物及围岩的硫铅同位素分析基础上,深入探讨 Beroen 矿床的物质来源,建立成矿模式。

1 地质背景

1.1 矿区地质

Azuay 省 Beroen 矿床位于厄瓜多尔第三纪岩浆弧中 Chaucha 岩基和 Saraguro 群火山岩层的接触部位。Beroen 南侧约 8 km 为 Chaucha 斑岩铜钼矿床。区域上发育大面积的渐新世-中新世 Saraguro 群中酸性熔岩,凝灰岩层,有后期 Chaucha 岩基侵位。该岩基主要位于矿床西侧和南侧,超过数百平方公里大小。为多期多次侵入体,其中较晚期的闪长岩、花岗斑岩侵位到早期的花岗闪长岩到英云闪长岩组合中,岩基中

侵入岩的锆石 U-Pb 年龄从 (35.77 ± 0.05) Ma, 15.3~14.8 Ma, 到 (9.79 ± 0.03) Ma^[15-17](见图 1)。区域主构造为北北东向安第斯山链构造,叠加多期北东向,北西和东西向构造。

矿区 Saraguro 群火山岩是 Beroen 矿床的赋矿围岩。以安山岩,安山质火山砾凝灰岩为主,绿色到浅绿色。安山质火山砾凝灰岩表现出弱浮石排列,可能因为压实作用或弱拼接作用,矿体北部的 San Luis 凝灰岩具有明显的拼接叶片状,整齐排列的浮石形成,这可能就是成岩过程中岩石作用引起。矿区侵入岩分布在矿体北部和南西部,其中北部以闪长岩、花岗闪长斑岩为主,南西部则发育英云闪长岩、花岗闪长岩。南西部距离矿体较近的花岗闪长岩偶尔有斜长石斑晶,常绿泥石化,可观察到角岩化。在钻孔中可见英云闪长岩角砾(如 BC33 钻孔),为晚期火山活动和铲状断层捕获残留。受 Bulubulu 缝合带影响,矿区构造以

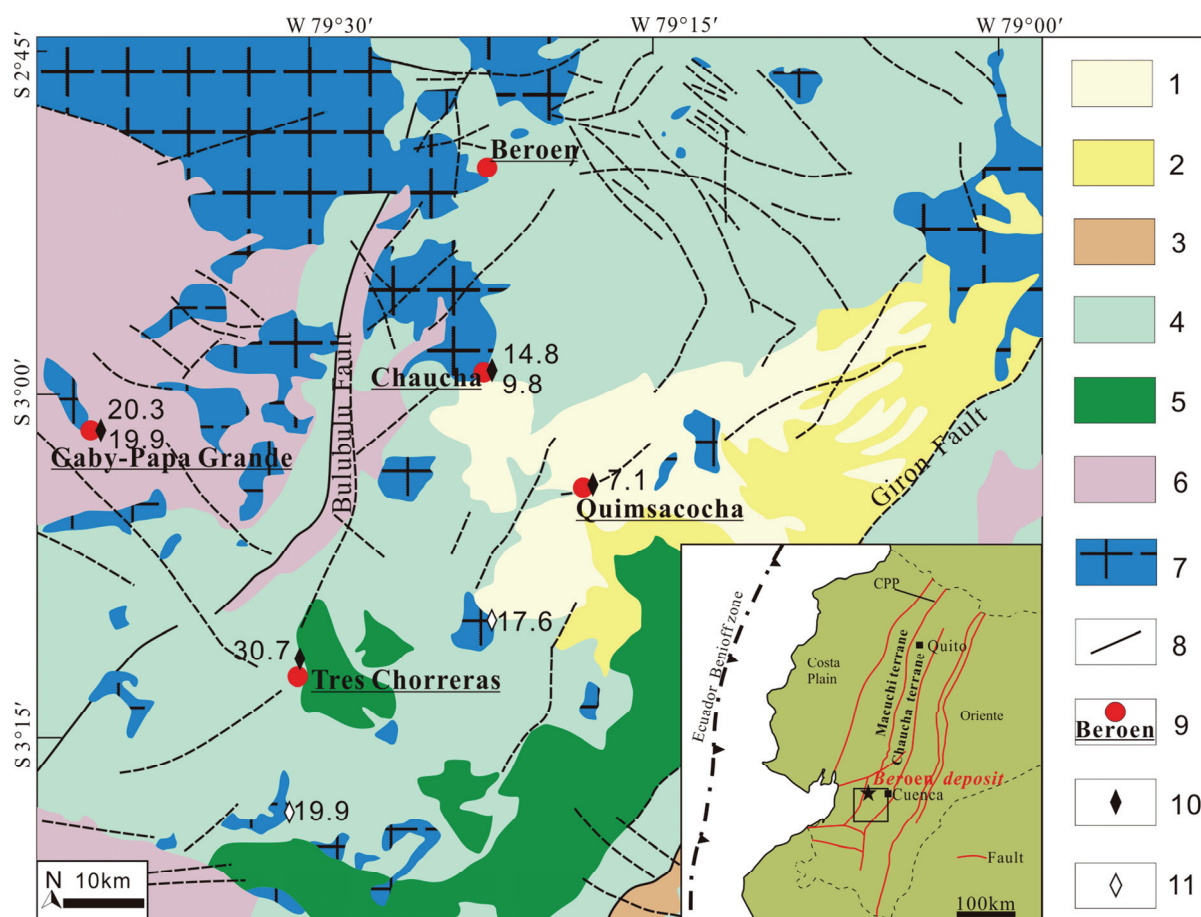


图1 Chaucha 地区地质图及大地构造位置图^[9-10, 15-17]: 晚中新世-现代: 1—火山岩, 2—火山碎屑岩, 3—沉积岩; 渐新世-中新世: 4—火山岩, 5—火山碎屑岩; 6—中生代火山岩; 7—第三纪闪长岩、花岗闪长岩、花岗斑岩; 8—断层或推测断层; 9—金属矿床; 侵入体年龄(Ma): 10—U-Pb 锆石; 11—K-Ar 锆石裂变径迹定年

Fig. 1 Geological map and its geotectonic location of the Chaucha area^[9-10, 15-17]: Late Miocene to recent: 1—Volcanic; 2—Volcaniclastic; 3—Sedimentary; Oligocene to mie-Miocene: 4—Volcanic; 5—Volcaniclastic; 6—Mesozoic volcanic; 7—Tertiary intrusive; 8—Fault or inferred fault; 9—Mineral deposit; Intrusive age (in Ma): 10—U-Pb zircon; 11—K-Ar zircon fission track

北东为主,且有右旋作用特征,在矿区脉体和沟谷发育中有所体现。还有一组东西向构造存在,表现为岩层边界、节理、褶皱等, Saraguro 火山岩层在矿区北部向北倾,在矿区南部向南倾,形成一个宽广东西向的褶皱构造,其轴部位于 Alejandra Sur 区域。在主矿体部位,有后期北西向、北东向铲状断层破坏矿体,使矿体部分被剥蚀(见图 2)。

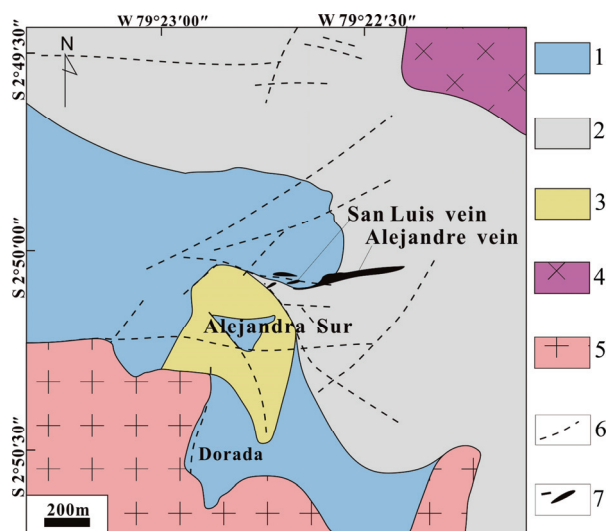


图 2 Beroen 矿区地质图: 1—火山砾凝灰岩; 2—安山岩; 3—第四系混杂堆积物; 4—花岗闪长斑岩; 5—英云闪长岩; 6—断层; 7—矿脉

Fig. 2 Geological sketch map of Beroen deposit: 1—Lapilli tuff; 2—Andesite; 3—Colluvium; 4—Granodioritic porphyry; 5—Tonalite; 6—Fault; 7—Ore veins

1.2 矿床地质特征

矿区矿体包括 Alejandra 矿脉和 San Luis 矿脉。Alejandra 矿脉呈脉状、网脉状和厚板状发育,走向北东约 70°,倾向南东,倾角浅部较陡为 70°~80°,深部变缓为 60°~70°。矿体赋存于石英脉和热液角砾岩中,走向延伸 500 m,倾向控制垂深为 270 m,矿体厚度大小不一,厚度为 0.3~27.9 m,平均厚度约 10 m。在 Alejandra 脉的角砾岩中发育有超高品质金矿体。矿脉经历多个热液阶段,形成壳状、纹层状石英,并大多发育热液角砾岩化,可能重叠构造角砾岩。有叶片状角砾岩中的空洞局部内衬壳状石英和冰长石,形成鸡冠状构造。壳层状石英中黑色条带金品位较高,包含可见的红银矿(淡红银矿-深红银矿)及银金矿。

San Luis 矿脉位于 Alejandra 脉北边,产于 Alejandra 北东向断层下盘,全部为隐伏矿体,赋存于石英脉和热液角砾岩中,受北东向断裂带控制,呈脉状、网脉状和板状,可分为几个小矿体,总体走向北

东约 70°,走向延伸 370 m,倾向南东,倾角较缓为 50°~60°,控制标高为 3700~3900 m,控制垂深为 200 m,矿体厚度不均匀,为 0.5~10.0 m;品位与 Alejandra 的接近。

矿区矿石可分为石英脉型和热液角砾岩型。矿化与硅化、绢云母化蚀变关系最为密切,主要的矿石矿物包括自然金、银金矿、黄铁矿、毒砂、深红银矿等,脉石矿物主要有石英、伊利石、方解石、绿泥石、白云母、电气石和绿帘石等。金主要以银金矿和自然金形式存在,大部分为显微金,赋存在石英、黄铁矿等矿物附近,或被黄铁矿、磁黄铁矿等包裹,见矿石矿物显微镜照片(见图 3)。

2 实验结果

2.1 样品采集与分析

研究样品采自矿区地表和钻孔岩心中,进行了矿石矿物的显微镜下研究和围岩全岩及硫化物的铅同位素测试工作。对于硫化物单矿物,在矿石和围岩粉碎、清洗、干燥后,双目镜下挑选黄铁矿、方铅矿、磁黄铁矿单矿物,纯度大于 98%。样品镜下研究和同位素测试委托日内瓦大学矿物学院(Geneva University, Department of Mineralogy)进行。使用 MAT-251 同位素质谱仪测定硫同位素,以 V-CDT 国际标准,分析精度 $\pm 0.02\%$ 。使用 Thermo-Fisher 公司生产的 Triton TI 型表面热电离质谱仪(TIMS)测量铅和铋同位素比值。样品和铅同位素国际标准样(SRM981)在相近温度条件(约 1220 °C)、相近离子流强度下测量。所有样品的铅同位素比值通过监控的国际标样 SRM981 进行了质量分馏校正,分析相对误差小于 0.05%^[17-18]。

2.2 硫、铅同位素组成特征

矿石样品中,4 个黄铁矿取自网脉状和硅化矿体中,方铅矿取自硅化矿脉中,磁黄铁矿取自蚀变熔岩中浸染状的磁黄铁矿。

硫同位素中黄铁矿、方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布较集中,变化范围-0.27‰~0.38‰,磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 偏离较远,为-2.32‰,与黄铁矿、方铅矿相差很大^[18-19]。矿区主要硫化物和围岩铅同位素组成如表 1 和 2 所列。英云闪长岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.017\sim 19.132$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.621\sim 15.694$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.715\sim 38.941$; Saraguro 火山岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.660\sim 19.147$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.625\sim 15.692$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.442\sim 38.939$ 。矿石硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=19.041\sim 19.139$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.664\sim 15.690$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.715\sim 38.941$ 。

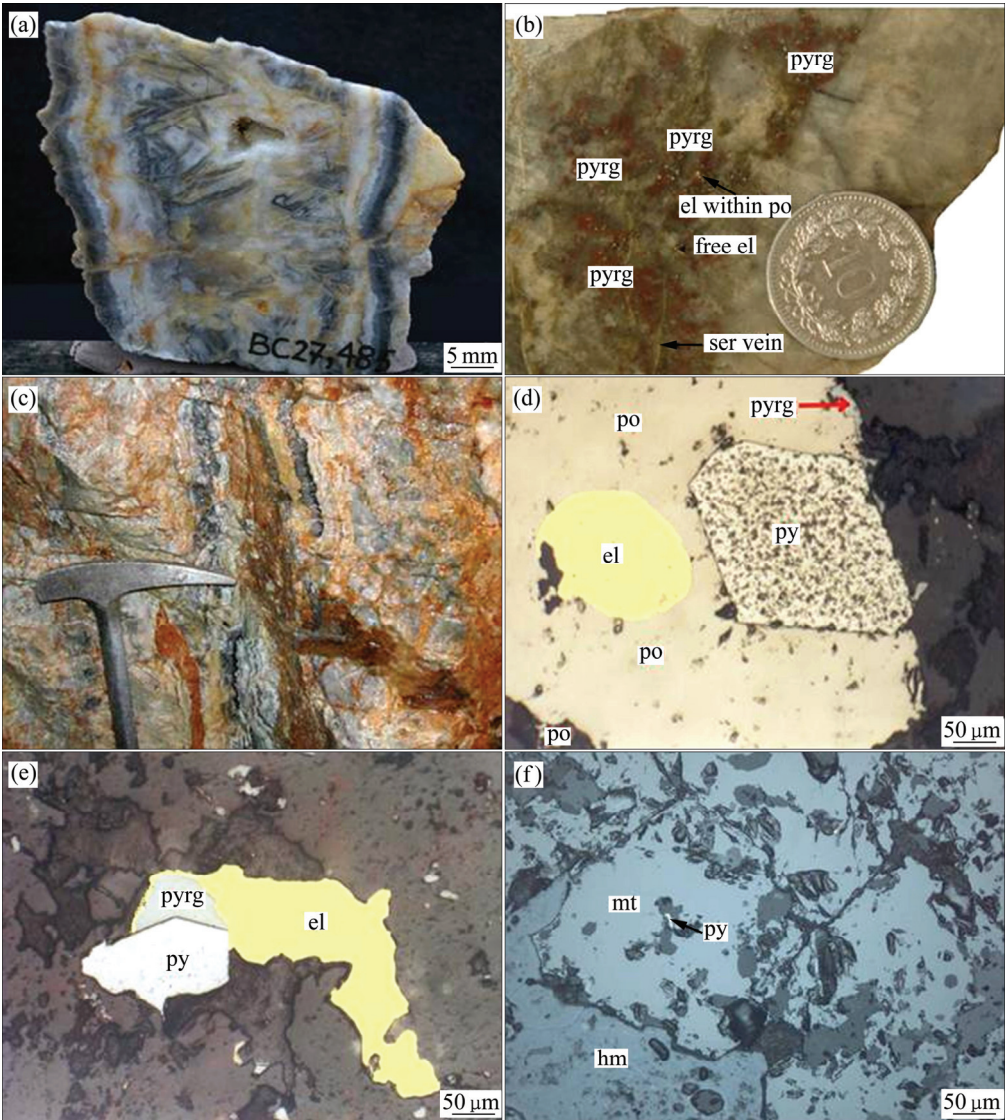


图 3 Beroen 矿床典型矿石野外及镜下特征: (a) 石英交代叶片状碳酸盐及壳状结构; (b) 硅化角砾岩中发育大量浸染状深红银矿(pyrg), 磁黄铁矿(po), 黄铁矿(py)和银金矿(el); (c) 壳状石英冰长石矿脉; (d) 银金矿(el), 黄铁矿(py), 磁黄铁矿(po)集合被深红银矿(pyrg)穿过; (e) 黄铁矿(py)和深红银矿(pyrg)与银金矿(el)接触; (f) 较晚形成的磁铁矿(mt)和赤铁矿(hm)包含早期黄铁矿(py)

Fig. 3 Field and microscopic photos of typical ore associations in Beroen gold-silver deposit: (a) Replacement texture with quartz pseudo morphing bladed carbonates and crustiform texture made up of white and black quartz bands; (b) Disseminated pyrraryrite(pyrg), pyrrhotite(po), pyrite(py), and electrum(el) in silicification breccia; (c) Crustiform-banded quartz+adularia vein textures; (d) Electrum(el), pyrite(py), pyrrhotite(po) assemblage crosscutted by pyrraryrite(pyrg); (e) Spatial relationship between pyrite(py), pyrraryrite(pyrg) and electrum(el); (f) Pyrite(py) mainly within magnetite(mt) and hematite(hm) association

表 1 Beroen 矿床矿石硫铅同位素组成

Table 1 S and Pb isotope composition of ore minerals from Beroen deposit								
Sample No.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\%$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	ω	Th/U	Model age/Ma
TB084	Pyrrhotite	-2.32	19.139	15.675	38.951	35.46	3.59	-275
TB098	Galena	-0.27	19.106	15.689	38.966	35.80	3.62	-231
TB099	Galena	-0.05	19.099	15.689	38.963	35.82	3.62	-226
TB114	Pyrite	0.13	19.104	15.690	38.967	35.82	3.62	-228
TB140	Pyrite	0.38	19.103	15.676	38.920	35.53	3.60	-247
TB141	Pyrite	0.17	19.041	15.664	38.865	35.52	3.61	-217
TB143	Pyrite	0.14	19.079	15.668	38.890	35.46	3.60	-240

表 2 Beroen 矿床围岩全岩铅同位素组成

Table 2 Pb isotope composition of wall rocks from Beroen deposit

Sample No.	Lithology	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
TB003	Tonalite	19.053	15.651	38.815
TB004	Tonalite	19.026	15.621	38.715
TB005	Tonalite	19.026	15.636	38.749
TB007	Tonalite	19.132	15.652	38.889
TB008	Tonalite	19.064	15.694	38.941
TB009	Tonalite	19.126	15.655	38.901
TB010	Tonalite	19.017	15.653	38.800
TB072	Granodioritic porphyry	18.605	15.630	38.378
TB011	Tuff	19.043	15.631	38.760
TB012	Tuff	19.053	15.652	38.869
TB015	Andesite	19.115	15.662	38.898
TB018	Tuff	19.147	15.656	38.935
TB018B	Tuff	19.106	15.641	38.885
TB019	Tuff	19.130	15.659	38.939
TB022	Andesite	19.063	15.652	38.840
TB026	Andesite	18.942	15.664	38.763
TB062	Andesite	18.888	15.673	38.740
TB070	Andesite	18.753	15.661	38.592
TB106	Andesite	19.006	15.674	38.837
TB108	Andesite	18.660	15.636	38.442
TB119	Andesite	19.085	15.692	38.933
TB120	Andesite	18.691	15.625	38.452

38.865~38.967。围岩全岩样的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围较广(18.605~19.147)。花岗闪长斑岩具有最低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值(18.605)，英云闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值接近(19.017~19.125)，而火山岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围较大(18.660~19.147)。火山岩中的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值比侵入岩中的比值高，更加富含放射性 ^{207}Pb 。矿石铅同位素组成波动小于 1%。在考虑误差的情况下，硫化物铅同位素组成基本重叠。

3 讨论

3.1 成矿物质来源

3.1.1 硫同位素

热液硫化物的硫同位素组成是源区物质的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成、氧逸度、pH、离子强度和温度的函数。当 $f\text{O}_2$ 较

低时，流体中硫主要以 HS^- 、 S^{2-} 形式存在，所沉淀的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 与整个流体 $\delta^{34}\text{S}$ 近似。当 $f\text{O}_2$ 较高， SO_4^{2-} 大量存在并沉淀富含 $\delta^{34}\text{S}$ 的硫酸盐，导致成矿流体 $\delta^{34}\text{S}$ 亏损，沉淀的黄铁矿等硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较低，低于整个体系 $\delta^{34}\text{S}$ [20~21]。Beroen 矿区未见重晶石、明矾石、石膏等主要硫酸盐矿物，因此，矿区硫化物的 S 同位素可以近似代表成矿流体总硫同位素组成。但本矿床热液硫化物富集 $\delta^{34}\text{S}$ 的顺序为黄铁矿 > 方铅矿 > 磁黄铁矿，不符合同一物理化学体系不同矿物相硫同位素热力学分馏达到平衡时的大小顺序，这可能是 Beroen 矿床成矿流体硫同位素未达到分馏平衡，也可能是由于所测量的取自蚀变熔岩中的磁黄铁矿单矿物与矿体中的黄铁矿、方铅矿形成的物理化学条件不同，矿物结晶所处的流体环境和演化阶段差异所造成 [22]。黄铁矿和方铅矿的硫同位素可能更接近矿床形成时候的流体硫同位素值。4 个黄铁矿和 2 个方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.27‰ 到 0.38‰ (均值为 0.083‰)，变化范围窄小，具塔式结构，初始流体系统的 $\delta^{34}\text{S}$ 大部分源于岩浆硫 ($\delta^{34}\text{S}=0\sim0.2\%$)，并且有有机硫 ($\delta^{34}\text{S}$ 为较低负值) 的混合 [12, 23]。而磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -2.32‰ 基本为有机来源硫，可能为热液淋滤 Chaucha 陆源块体古生代变质结晶基底中黑色页岩得到，在矿区角砾岩中能见到有黑色页岩的角砾存在。

Beroen 矿化绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法定年得到成矿年龄 18.91 Ma，而西南科迪勒拉在 19 Ma 左右具有一次明显的挤压或扭压应力格局的转换过程，引起地幔岩浆活动，促使岩浆流体的活跃运动，可认为矿区成矿流体的硫同位素主要为深部岩浆来源 [17, 23~24] (见表 3)。磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 -2.32‰ 的存在，说明矿区成矿流体形成运移过程中，深部变质结晶基底可能也贡献了部分硫源，揭示成矿流体的多来源性。

3.1.2 铅同位素

矿区硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围都较小，计算的 ω 值为 35.46~35.82，与正常铅 ω 值 (35.55 ± 0.59) 相差很小 [14, 21, 28]。具有较高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (19.04~19.139) 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15.664~15.689) 的值，并且 Th/U 值介于 3.59~3.62，低于中国大陆平均 Th/U 值 (4.20 ± 0.13) 和其他大陆 Th/U 值 (3.81 ± 0.11) [13]。硫化物计算模式年龄均为负值。因此， μ 值的计算也是无意义的，Beroen 金银矿床内矿石铅非单阶段正常铅，富集放射成因异常铅，铅同位素演化比较复杂。

在 Beroen 矿床的矿石和围岩的铅同位素 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 模式和构造环境图解中 (见图 4 和 5)，Beroen 矿床围岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 表现出两种不同的变化

趋势,一方面有一组岩石具有最低的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,包括有矿区北部花岗闪长斑岩和部分安山岩。另一方面,有一组岩石具有最高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,包括英云闪长岩和凝灰岩、部分安山岩。因而,花岗闪长斑岩和部分安山岩与英云闪长岩与另外部分安山岩、凝灰

岩铅的来源稍有不同,或者形成时代不同,或者源铅中含放射元素 Th 和 U 的含量不均衡,这从另一方面也说明 Saraguro 群形成于长期的火山弧活动(见表 3)。就 Beroen 矿床硫化物和围岩的铅同位素组成对比其 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,硫化物中铅同位素组成的放射性成因

表 3 Chaucha 区岩/矿石同位素年代学数据

Table 3 Geochronology data of Chaucha area

Deposit	Sample No.	Lithology	Mineral	Method	Age/Ma	Ref.
Beroen	TB003	Tonalite	Zircon	U-Pb	15.70±0.08	[18]
	TB072	Granodioritic porphyry	Zircon	U-Pb	35.77±0.06	
	E07003	Biotite granodiorite	Zircon	U-Pb	14.84±0.43	[15]
	MP-23	Tonalite	Zircon	U-Pb	35.77±0.19	[19]
	MP-26	Tonalite	Zircon	U-Pb	36.03±0.19	
	MP-01	Tuff	Zircon	U-Pb	33.09±0.20	
	MP-44	Tuff	Zircon	U-Pb	33.82±0.24	
	MP-32	Tuff	Zircon	U-Pb	37.35±0.30	
	MP-02	Andecite	Zircon	U-Pb	33.99±0.59	
Chaucha	TB143	Ore	Sericite	$^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$	18.91±0.49	[18]
	E07006		Molybdenite	Re-Os	9.92±0.04	[15]
	E06175		Molybdenite	Re-Os	9.54±0.05	
	E07002		Biotite	$^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$	10.6±0.3	
Gaby-Papa Grande	E05075		Molybdenite	Re-Os	20.54±0.8	
Tres Chorreras	E07010		Molybdenite	Re-Os	12.93±0.05	
	E07012				12.75±0.06	
Quimsacocha	E05103		Alunite	$^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$	9.5±0.5	

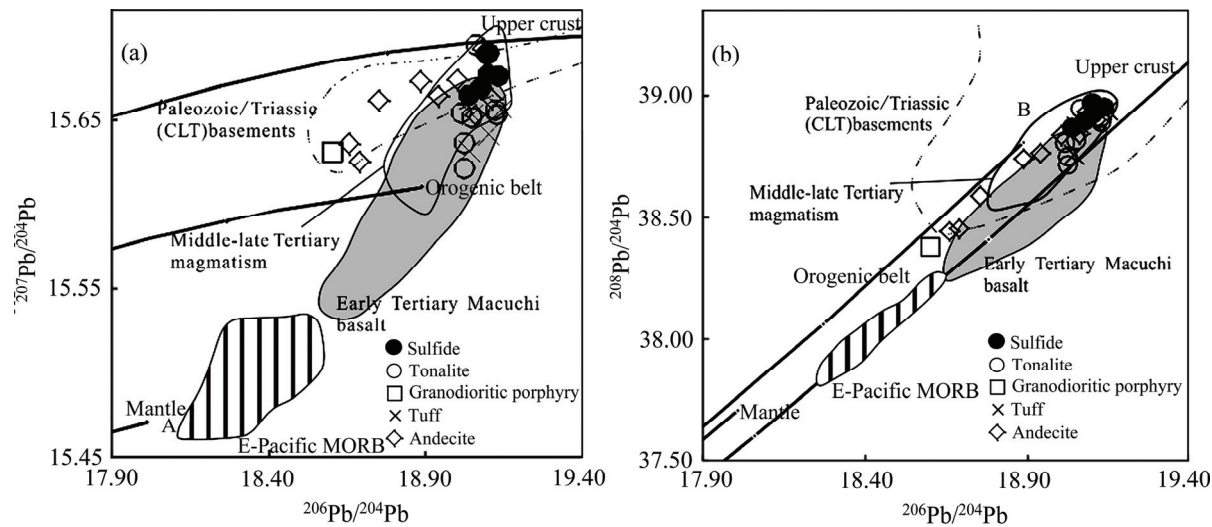


图 4 矿区 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图^[25-27]

Fig. 4 Diagram showing evolutionary tectonic setting for $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of lead isotope from the Beroen deposit^[25-27]

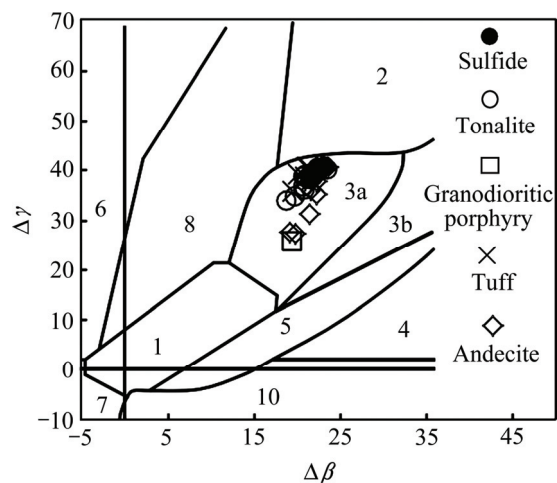


图 5 Beroen 矿 区 铅 同 位 素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成 因 分 类 图 解^[13]: 1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合俯冲带铅(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积铅; 5—海底热水铅; 6—中深变质铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

Fig. 5 Plot of $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ of Pb isotope from Beroen deposit^[13]: 1—Mantle source; 2—Upper crust source; 3—Subduction source composed of upper crust and mantle (3a—Magmatism; 3b—Sedimentation); 4—Chemical sedimentary source; 5—Subocean hydrothermal sedimentary source; 6 — Mesometamorphism source; 7—Hypometamorphism lower crust source; 8—Orogenic belt source; 9—Upper crust source in ancient shale area; 10—Retrograde metamorphism source

表 4 Chaucha 区 矿 床 硫 化 物 及 围 岩 的 铅 同 位 素 组 成

Table 4 Pb isotope composition of sulfide and wall rock of deposits in Chaucha area

Sample No.	Mineral	Deposit	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Ref.
	Pyrite	Chaucha	18.962	15.647	38.738	[9]
	Chalcopyrite	Gaby-Papa Grande	18.966	15.632	38.733	
	Pyrite	Tres Chorreras	18.959	15.660	38.845	
	Pyrite	Quimsacocha	18.999	15.657	38.804	
Pb801	Pyrite	Chaucha	18.755	15.643	38.575	[27]
E94039, E06166	Volcanics	Chaucha	18.982–19.189	15.637–15.590	38.749–39.026	[9, 17, 27]
E07002, E07005 et al.	Intrusive		18.968–19.032	15.617–15.677	38.667–38.885	
E05070, E05078 et al.	Intrusive	Gaby-Papa Grande	18.679–19.043	15.587–15.642	38.436–38.731	[17]
E07013	Volcanics	Tres Chorreras	19.038	15.664	38.858	
E05102, E06020 et al.	Volcanics	Quimsacocha	18.917–18.999	15.582–15.650	38.630–38.783	

注: 对岩石测试分为淋滤部分测试铅和剩余部分测试铅同位素组成, 剩余测试铅代表一般铅, 淋滤部分测试铅偏向代表放射成因铅组成, 本研究中取剩余测试铅部分。

Note: Lead isotope of rocks analyzed separate leachate and residue fractions. Residue can better represent common lead, whereas leachate represents radiogenic lead. This work uses residue lead isotope value.

铅比英云闪长岩和花岗闪长斑岩含量都多, 但与赋矿的 Saraguro 火山岩中放射性成因铅分布相比, 大部分是重叠的。但以 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值来说, 矿石矿物的铅同位素组成比花岗闪长斑岩和大部分火山岩中铅同位素更加具有放射性, 但与英云闪长岩和一些火山岩中铅同位素放射性相似。基本可以确定, 矿床硫化物的铅来源与围岩的铅来源是相同的, 但围岩成岩年龄与矿床成矿年龄不同, 及围岩中铀钍含量的不均衡性造成硫化物与围岩铅同位素组成的小幅差距。

另外, 厄瓜多尔地壳是由多个地体拼接组成, Beroen 矿床位于 Chaucha 大陆源与 Macuchi 大洋岛弧地体的接触部位, 靠近地体拼接缝合带。Chaucha 地体是南美板块和中美板块在三叠纪分离的时候, 分裂出的向南美板块呈边缘双俯冲的一个大陆板块分段。白垩纪时期, Chaucha 地体发生拆离作用, 不断向东移动, 逐渐与南美板块西缘拼接, 同时洋内岛弧分离出 Macuchi 大洋地体, 由于大洋地体的浮力相对较大, 在 Nazca 板块俯冲时, Macuchi 拼接到南美板块边缘, 成为现在厄瓜多尔的组合地壳(见图 7)^[27]。从构造环境图解中可以看到, 矿石与围岩的铅同位素组成均投影于板块俯冲活动形成的中-晚第三纪岩浆弧范围内, 且与古生代/三叠纪 CLT(Chaucha-Loja-Tahuin)基底、早第三纪 Macuchi 玄武岩的铅同位素组成大部分重叠(见图 4), 均位于上地壳和造山带演化曲线内。结合

$\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解,无论是 Beroen 矿床矿石的铅同位素,还是始新世围岩,中新世侵入体的铅同位素,其来源都具有岩浆作用形成的上地壳与地幔混合的俯冲带铅特征,可认为 Beroen 矿区的铅同位素组成是富集地幔岩浆在浅地壳部位同化吸收最多达 19% 的地壳岩石铅形成的岩浆源铅,含有 Macuchi 晚白垩世大洋地体基底铅,也有 Chaucha 三叠纪-白垩纪变质混合地壳铅^[27]。

3.1.3 同区域其他矿床对比

Beroen、Chaucha、Gaby-Papa Grande、Tres Chorreras 和 Quimsacocha 矿床分别是斑岩型及与斑岩相关的热液型矿床,成矿时间集中在中新世。成矿位置均在 Chaucha 和 Macuchi 地体缝合带附近^[9]。矿床岩浆岩围岩基本是中晚第三纪时期形成,铅同位素大部分较为集中,也有分散分布。较为不均匀,且没有与地体铅同位素组成完全一致。部分重叠西科迪勒拉角闪岩变质岩和西科迪勒拉大洋台地单元内。说明岩浆岩形成中经历了不同来源外来铅的混入。对比火山岩与侵入体的铅同位素组成,前者与古生代-三叠纪 Chaucha 基底铅的范围重叠度高,后者与 Macuchi 玄武岩铅同位素重叠度高,前者中 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 普遍比后者中的高。从表 3 和图 1 中看到,火山岩形成于始新世到渐新世,侵入体多形成于中晚中新世时期。在厄瓜多尔南部,在中中新世时期,俯冲板片开始变平坦,这导致了南美板块下楔形地幔的加速熔融,含大量非放射成因铅的熔融物快速上升地表,这可能是中晚中新世后侵入体含有较低的放射性成因铅的原因^[17, 29]。

矿床的硫化物铅同位素分布较为集中,在围岩的铅同位素范围内,且都在地体基底铅组成的范围内,主要位于 Chaucha 古生代到三叠纪基底铅组成和 Macuchi 早第三世玄武岩的铅组成重叠区范围(见图 6)。反映出成矿热液活化淋滤基底岩石铅的特征。同时,Chaucha 区的矿床硫化物比围岩具有更高的放射成因铅含量。CHIRADIA 等^[27]对比了厄瓜多尔南部所有矿床与中安第斯区域的铅同位素组成,厄瓜多尔中晚第三纪矿床更加富集 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$,即更加富集地壳铅。除了南部厄瓜多尔与中安第斯具有相似的地壳厚度和富集地幔岩浆的特点,这可能是厄瓜多尔矿床的成矿流体再次活化淋滤已存 Saraguro 围岩铅的原因,也与厄瓜多尔南部与成矿有关的第三纪大量岩浆侵入体体积普遍小有关。小体积的母源岩浆侵位到浅地壳层同化吸收地壳铅成分,量比小,所以地壳铅含量较高。

3.2 成矿模式

综上,结合矿区的地质背景,Beroen 矿床硫化物铅的形成,至少经历 3 个阶段:晚白垩纪时期,原始大陆 Chaucha 地体和新生 Macuchi 大洋地体碰撞,含非放射成因铅的富集俯冲作用带来的深海沉积物 MORB 型地幔形成。并且 Ecuador 下部的三叠纪地幔铀衰变不能解释第三纪岩浆的幔壳混合趋势中的幔源端元的高 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,推测三叠纪后有高 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 成分物质混染到厄瓜多尔下地幔^[30];在始新世时期,

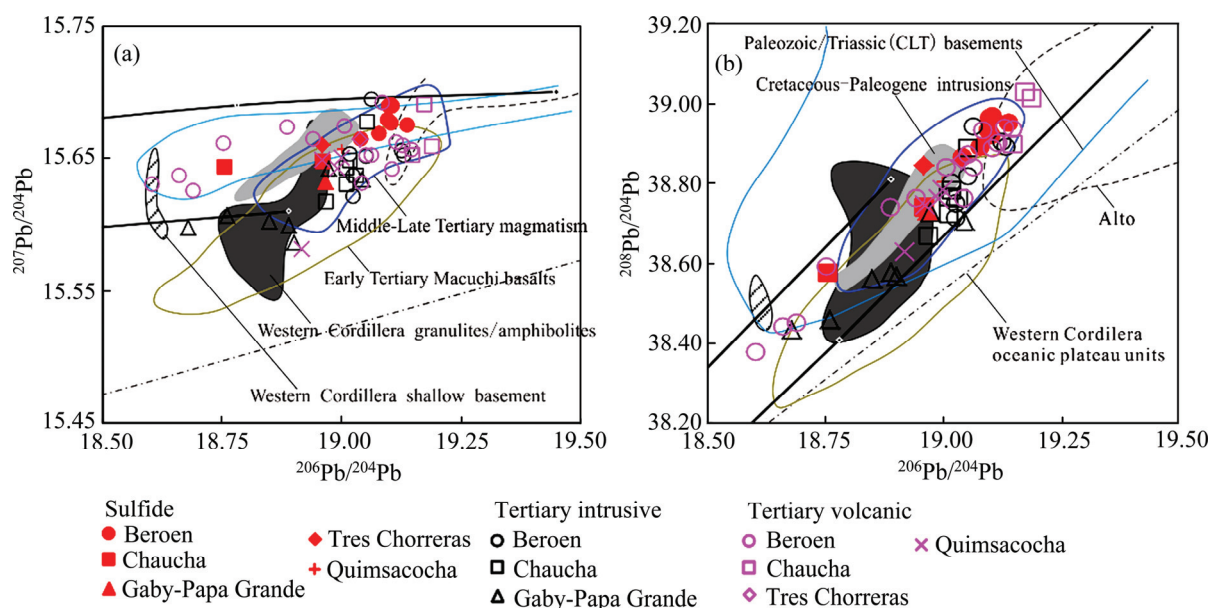


图 6 Chaucha 区域主要矿床及其围岩铅同位素构造环境演化图^[15, 22, 24](数据来源见表 1、2 和表 4)

Fig. 6 Diagram showing evolutionary tectonic setting for $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of lead isotope from deposits and its host rocks of Chaucha area^[15, 22, 24] (Data are listed in Table 1, 2 and 4)

南美板块西侧受到扭压和拉伸动力作用的不断转换活动, 富集地幔岩浆源形成, 在上升到地表过程中, 与具有高放射成因铅端元的 Chaucha 基底岩石混合, 在浅地壳 ($< 20 \text{ km}$) 发生斜长石为主的 AFC 过程 (Assimilation-fraction-crystallization), 同时同化吸收基底岩石的放射性铅和锶形成大面积岩浆岩, 如 Beoren 矿床的 Saraguro 群。该岩浆活动为许多斑岩矿床和热液贵金属矿床的成矿提供了物质和动力来源^[9]。在中新世时期, 小体积富集地幔岩浆侵位过程中, 同化吸收基底岩石中的地壳铅成分, 上升到浅地表, 侵位岩浆房形成的热液系统再次活化萃取已存在围岩的放射成因铅, 导致经过不同的地壳层的, 地壳铅逐渐富集到最终的矿石矿物铅中(见图 4 和 7)。

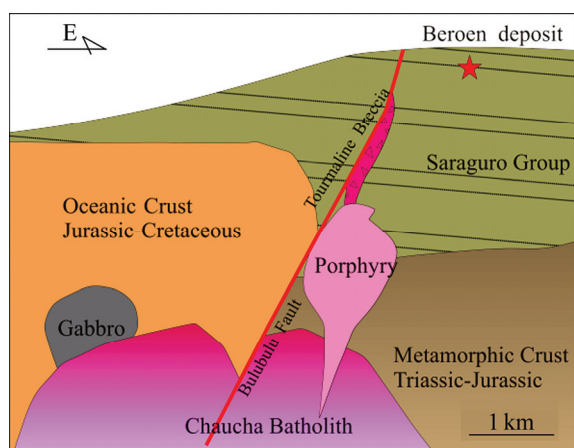


图 7 Beroen 矿床成矿模式图

Fig. 7 Hypothetic genetic model of Beroen deposit

4 结论

1) 硫化物黄铁矿、方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 分布较集中, 变化范围 $-0.27\% \sim -0.38\%$, 平均 0.1% , 磁黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 偏离较远, 为 -2.32% , 成矿流体中硫是主要是幔源岩浆成因硫, 并有结晶基底生物还原硫的贡献。

2) Beroen 矿床硫化物及其围岩铅的来源是上地壳与地幔混合的俯冲带铅。硫化物铅同位素至少经历 3 个阶段: 在晚白垩纪时期, 原始大陆 Chaucha 地体和新生 Macuchi 大洋地体碰撞, 含非放射成因铅的富集俯冲作用带来的深海沉积物地幔形成; 在始新世时期, 富集地幔岩浆源在浅地壳同化吸收 Chaucha 和 Macuchi 基底岩石的放射性铅形成大面积岩浆岩; 在中新世矿床形成时, 与浅地壳层岩浆房的热液系统有关的成矿流体再次活化淋滤围岩的放射成因铅成分, 地壳铅逐渐富集到最终的矿石矿物铅中。

3) Chaucha 区域矿床的火山岩和侵入体的铅同位素分别与古生代-三叠纪 CLT 基底和早第三世 Macuchi 玄武岩铅同位素范围重叠, 说明不同时期岩浆弧对地壳铅不同程度的淋滤和吸收作用。硫化物的铅同位素普遍比围岩具有更高的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 强调了厄瓜多尔南部特殊的中晚第三世中小体积岩浆侵入体相对于地壳铅的同化吸收作用, 由于富集地幔岩浆侵入体体量小, 放射成因铅含量相对比较高。

致谢:

野外工作期间得到中南大学彭恩生, International Minerals Corporation 公司 CALVOPÍÑA Miguel、MORA Alonso 等同志的大力支持, 测试工作由 BINELI BETSI Thierry 博士在日内瓦大学完成, 在此向上述单位及个人表示诚挚的谢意!

REFERENCES

- [1] PRODEMINCA. Evaluation of mining districts of Ecuador-Epithermal deposits in the Andes (in Spanish edition)[M]. Ecuador: UCP ProdeMinca Proyecto MEM BIRF 36-55 EC, 2000: 13-193.
- [2] PRODEMINCA. Evaluation of mining districts of Ecuador-Porphyry and epi-mesothermal deposits with related intrusions in Cordillera occidental and Real (in Spanish edition)[M]. Ecuador: UCP ProdeMinca Proyecto MEM BIRF 36-55 EC, 2000: 1-291.
- [3] SILLITOE R H, PERELLÓ J. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery[J]. Econ Geol 100th Anniversary Volume, 2005: 845-890.
- [4] CHIARADIA M, VALLANCEJ J, FONTBOTÉ L, STEIN H, SCHALTEGGER U, CODER J, RICHARDS J, VALLENEUVE M, GENDALL I. U-Pb, Re-Os, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Nambija Au-skarn and Pangui porphyry Cu deposits, Ecuador: Implications for the Jurassic metallogenic belt of the Northern Andes[J]. Mineral Deposita, 2009, 44: 371-387.
- [5] SILLITOE R H. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes[J]. J South Am Earth Sci, 1988: 89-108.
- [6] NOBLE D C, MCKEE E H. The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru[J]. SEG Special Publ, 1999, 7: 155-193.
- [7] BEATE B, MONZIER M, SPIKINGS R, COTTON J, SILVA J, BOURDON E, EISSEN J P. Mio-Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: The Quimsacocha volcanic center[J]. Earth Planet Sci Lett, 2001, 192: 561-570.
- [8] SPENCER R M, MONTENEGRO J L, GAIBOR A, PEREZ E P, MANTILLA G, VIERA F, SPENCER C E. The Portovelo-

- Zaruma mining camp, SW Ecuador: porphyry and epithermal environments[J]. SEG Newsletter, 2002, 49: 8–14.
- [9] CHIARADIA M, FONTBOTÉ L, BEATE B. Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39: 204–222.
- [10] LITHERLAND M, ASPDEN J A, JEMIELITA R A. The metamorphic belts of Ecuador[M]. Keyworth, U.K., British Geological Survey, Overseas Memoir 11. BGS, 1994: 1–147.
- [11] 张 良, 刘 跃, 李瑞红, 黄 涛, 张瑞忠, 陈炳翰, 李金奎. 胶东大尹格庄金矿床铅同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2468–2480.
- ZHANG Liang, LIU Yue, LI Rui-hong, HUANG Tao, ZHANG Rui-zhong, CHEN Bing-han, LI Jin-kui. Lead isotope geochemistry of Dayingezhuang gold deposit, Jiao Peninsula, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2468–2480.
- [12] 张 静, 杨 艳, 胡海珠, 王志光, 李国平, 李忠烈. 河南银洞沟造山型银矿床碳硫铅同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2833–2842.
- ZHANG Jing, YANG Yan, HU Hai-zhu, WANG Zhi-guang, LI Guo-ping, LI Zhong-lie. C-S-Pb isotope geochemistry of the Yindonggou orogenic type silver deposit in Henan province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2833–2842.
- [13] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟. 地质科学中同位素体系理论与应用: 兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 216–226.
- ZHU Bing-quan, LI Xian-hua, DAI Tong-mo. Isotope system theory and application to the earth sciences: On crust-mantle evolution of continent of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 216–226.
- [14] 张 静, 杨 艳, 鲁颖淮. 河南围山城金银成矿带铅同位素地球化学及矿床成因[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 444–454.
- ZHANG Jing, YANG Yan, LU Ying-huai. Lead isotope geochemistry of the Weishancheng gold-silver ore belt, Henan Province, China: Implications for ore genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 444–454.
- [15] SCHÜTTE P, CHIARADIA M, BEATE B. Geodynamic controls on Tertiary arc magmatism in Ecuador: Constraints from U-Pb zircon geochronology of Oligocene-Miocene intrusions and regional age distribution trends[J]. Tectonophysics, 2010, 489: 159–176.
- [16] SCHÜTTE P, CHIARADIA M, BARRA F, VILLAGÓMEZ D, BEATE B. Metallogenic features of Miocene porphyry Cu and porphyry-related mineral deposits in Ecuador revealed by Re-Os, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and U-Pb geochronology[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47: 383–410.
- [17] SCHÜTTE P, CHIARADIA M, BEATE B. Petrogenetic evolution of arc magmatism associated with late Oligocene to late Miocene porphyry-related ore deposits in Ecuador[J]. Economic Geology, 2010, 105: 1243–1270.
- [18] BINELI B T. The low-sulfidation Au-Ag deposit of Rio Blanco (Beroen): Geology, mineralogy, geochronology (U-Pb and Ar-Ar) and isotope (S, Pb, Sr) geochemistry[M]. Ecuador: Université de Genève, 2007: 6–86.
- [19] PONCE M. Geochronology and geochemistry of igneous rocks hosting the low-sulfidation gold-silver deposit of Río Blanco (Beroen) (Ecuador)[M]. Ecuador: Université de Genève, 2011: 1–20.
- [20] OHMOTO H. Systematics of sulfide and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67: 551–578.
- [21] 戴塔根, 尹学朗, 张德贤. 喀拉通克铜镍矿成岩成矿模式[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2567–2573.
- DAI Ta-gen, YIN Xue-lang, ZHANG De-xian. Diagenetic and metallogenic model of Kalatongke Cu-Ni deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2567–2573.
- [22] 陕 亮, 郑有业, 许荣科, 曹 亮, 张雨莲, 连永牢, 李闰华. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. 地质与资源, 2009, 18(3): 197–203.
- SHAN Liang, ZEHGNG You-ye, XU Rong-ke, CAO Liang, ZHANG Yu-lian, LIAN Yong-la, LI Yan-hua. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis[J]. Geology and Resources, 2009, 18(3): 197–203.
- [23] 薛 静, 戴塔根, 付松武, 马国秋, 黄伟盟. 广西玄武盘龙铅锌矿喷流沉积成矿作用: 稀土元素和硫同位素证据[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 394–403.
- XUE Jing, DAI Ta-gen, FU Song-wu, MA Guo-qiu, HUANG Wei-meng. SEDEX origin of the Panlong lead-zinc deposit, Wuxuan, Guangxi: REE and S isotope evidences[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(3): 394–403.
- [24] HUNGERBÜHLER D, STEINMANN M, WINKLER W, SEWARD D, EGÜEZ A, PETERSON D E, HGLG U, HAMMER C. Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 57: 75–124.
- [25] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbo tectonics-the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135–162.
- [26] UNRUH D M, TATSUMOTO M. Lead isotopic composition and uranium, thorium, and lead concentrations in sediments and basalts from the Nazca plate[J]. Deep Sea Drilling Project Initial Reports, 1976, 34: 341–347.
- [27] CHIARADIA M, FONTBOTÉ L, PALADINES A. Metal sources in mineral deposits and crustal rocks of Ecuador (1°N – 4°S): A lead isotope synthesis[J]. Economic Geology, 2004, 99: 1085–1106.
- [28] 雷源保, 赖建清, 王雄军, 苏生顺, 王守良, 陶诗龙. 虎头崖多金属矿床成矿物质来源及演化[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2117–2128.
- LEI Yuan-bao, LAI Jian-qing, WANG Xiong-jun, SU Sheng-shun, WANG Shou-liang, TAO Shi-long. Origin and evolution of ore-forming material of Hutouya polymetallic deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014,

- 24(8): 2117–2128.
- [29] 曹明坚, 秦克章, 李继亮. 平坦俯冲及其成矿效应的研究进展、实例分析与展望[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3727–3748.
CAO Ming-jian, QIN Ke-zhang, LI Ji-liang. Research progress on the flat subduction and its metallogenic effect, two cases analysis and some prospects[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3727–3748.
- [30] CHIARADIA M, FONTBOTÉ L. Lead isotope systematics of Late Cretaceous-Tertiary Andean arc magmas and associated ores between 8°N and 40°S: Evidence for latitudinal mantle heterogeneity beneath the Andes[J]. Terra Nova, 2002, 14: 337–342.

Lead and sulfur isotope geochemistry of Ecuadorian Beroen gold-silver deposit

XI Zhen^{1,2}, GAO Guang-ming^{1,2}, MA De-cheng³, LUO Han^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China;

3. No.701 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Changji 831100, China)

Abstract: Ecuadorian Beroen deposit locates east of the suture zone of Chaucha continental terrane with Macuchi oceanic terrane. The Pb and S isotope compositions of main sulfides and wall rocks were studied. Excluding the pyrrhotite, $\delta^{34}\text{S}$ value average is 0.1‰, suggesting that a mantle magmatic sulfur source, with the contribution of a basement biology reductive condition sulfur source. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is 18.605–19.147, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is 15.621–15.694, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is 38.378–38.967. At first, before later Cretaceous, there is the nonradiogenic lead in mantle; then on Oligocene, enriched mantle-derived magmas ascend to the lower crust, and interact with the basement rock of Macuchi and Chaucha terranes assimilating radiogenic lead; on Miocene, the ore fluids derive from the hydrothermal systems of shallow crustal magma chambers, also react and leach the radiogenic lead from wall rocks. Also the mineral deposits in Chaucha area have significantly higher $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values than that of their wall rocks and the central Andean lead province. This can be due to small volumes of parental magma emplaced at shallow crustal levels.

Key words: lead and sulfur isotope; ore-forming material origin; leach; assimilate; Beroen gold-silver deposit; Ecuadorian Southwest

Foundation item: Projects(40827002, 41204054) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project supported by Geological Survey Projects of Institute of Zhuangsheng Mining, Central South University and International Minerals Corporation

Received date: 2015-06-27; **Accepted date:** 2015-10-18

Corresponding author: GAO Guang-ming; Tel: +86-13707485443; E-mail: gmgao134@qq.com

(编辑 王 超)