

墨西哥弗雷斯尼洛(Fresnillo)银矿床地质特征

苏杭, 聂凤军

SU Hang, NIE Fengjun

中国地质科学院矿产资源研究所/国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

MLR key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China

摘要: 弗雷斯尼洛贱金属-银矿床由交代的柱状、席状和浸染状硫化物矿体, 以及赋存于白垩纪海相沉积岩和火山岩中的脉状矿体组成。该矿床以石英二长岩岩株为中心呈带状分布, 离岩株越近越富集贱金属, 但Ag的含量却越亏损。靠近该岩株的围岩发生了硅化和钙质硅化蚀变作用, 局部被硫化物交代。而脉状矿体的围岩由远及近依次呈现出钾化、绢英岩化、泥化和青磐岩化蚀变。柱状、席状矿体和深部矿脉中的石英和方解石均一温度范围为240~350℃, 浅部矿脉中的石英、方解石和闪锌矿的温度范围为140~275℃。柱状、席状和脉状矿床中的S同位素分析显示, 方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于-4.1‰~-8.0‰之间, 而闪锌矿介于-2.0‰~-5.0‰之间。S同位素差异的出现可能与成矿流体pH值的轻微变化或氧逸度的增加有关。

关键词: 弗雷斯尼洛; 银矿床; 流体包裹体; S同位素; 成矿期次

中图分类号: P618.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2015)06-1057-08

Su H, Nie F J. Geological features of the Fresnillo Ag deposit in Mexico. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(6): 1057-1064

Abstract: The Fresnillo base metal-silver ore deposit consists of replacement chimney and manto orebodies, disseminated sulfide orebodies, and vein orebodies hosted mainly in Cretaceous marine sedimentary and volcanic rocks. The deposit exhibits southeastward zoned distribution away from a small quartz monzonite stock, and shows increasing silver content and decreasing base metal values with the distance from the stock. Wall rocks adjacent to the stock exhibit silicification and calc-silicate alteration that have been partially replaced by the sulfide minerals. Wall rocks of the vein orebodies exhibit potassic, phyllic, argillic, and propylitic alteration with increasing distance from the orebodies. Homogenization temperatures of quartz, calcite and sphalerite in chimney, manto, and deep vein orebodies range from 240°C to 350°C, while their homogenization temperatures in shallow and distal vein orebodies are between 140°C and 275°C. Galena $\delta^{34}\text{S}$ values from all orebodies at Fresnillo vary between -4.1‰ and -8.0‰, while sphalerite $\delta^{34}\text{S}$ values range between -2.0‰ and -5.0‰. The contrasting $\delta^{34}\text{S}$ values between galena and sphalerite might have resulted from a slight variation in ore fluid pH (as indicated by the wall rock alteration assemblages) or by increased $\log f_{\text{O}_2}$.

Key words: Fresnillo; Ag deposit; fluid inclusion; sulfur isotope; mineralization epochs

弗雷斯尼洛(Fresnillo)位于西马德雷山脉(Sierra Madre Occidental)和东马德雷山脉(Sierra Madre Oriental)之间的墨西哥高原(Mexican plateau)上(图1)。采矿区地处弗雷斯尼洛市中南—西南部的峡谷中, 海拔2100m。矿床主要由脉状、柱状、席状和少量的浸染状矿体组成。矿区可以分成3个区域:

①矿区东南部靠近Cerro Populo地区, 主要有富Ag矿脉、Santa Elena和Santo Nino矿脉; ②矿区中部的Cerro Proano区域具有不同走向的网状矿脉; ③矿区西北部的Fortuna地区, 主要有席状、柱状和浸染状硫化矿床, 以及一个小的斑岩石英二长岩岩株(图2)。Cerro Proano区域的矿床发现于1554年, 是

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2015-05-09

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212010811029, 1212011220911)

作者简介: 苏杭(1989-), 男, 在读硕士生, 矿床学专业。E-mail: 63297704@qq.com

通讯作者: 聂凤军(1956-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床地质和地球化学研究。E-mail: nfj@cei.gov.cn

采矿区中最早发现的矿床。在接下来的几个世纪中, 弗雷斯尼洛矿床产出银 10000t, 金 19t, 铜 70000t, 而铅和锌的产量则各超过 700000t^[2-7]。

墨西哥贵金属-贱金属成矿省分布于从索洛拉省(Sonora)、奇瓦瓦州(Chihuahua)到瓦哈卡州(Oaxaca)的中西部地区, 类似的矿床在加利福尼亚半岛(Baja California)也有分布。这个矿化带是美国落基山脉(Rocky Mountains)矿化带的延伸。成矿省的前寒武纪基底出露于索洛拉省和奇瓦瓦州^[8-9]。在成矿区域内, 矿床的分布规律为: 墨西哥西海岸出露有块状硫化物矿床, 脉状矿床则分布于中西部, 而以碳酸盐岩为主岩的交代型矿石则分布于东部^[1]。沿着西马德雷山脉(图1), 约1km厚的古新世-渐新世(63~32Ma)安山质火山岩不整合覆盖在变形的白垩纪老地层上^[10-11]。局部区域, 中性熔岩和白垩纪灰岩互为夹层, 并且层序被古近纪以前的侵入体穿插^[12]。拉拉米造山运动(Laramide orogeny)产生了大量的侵入体、浅成岩株和岩墙。在古新世-渐新世期间, 少量的长英质到中性组分的岩株诱发了含贱金属的矿化流体侵入到先存的岩石中, 尤其是那些高钙岩石或者碳酸盐岩^[1]。一层较年轻的火山层序主要含有流纹质火山灰或凝灰岩, 不整合覆盖在上述岩石上。这一钙碱性岩套

约1km厚, 形成于渐新世(32~19Ma)^[13]。贵金属矿体集中在白垩纪海洋沉积岩和火山岩中, 而贱金属矿体则多出露于白垩纪岩石和火山岩下部^[14]。隆起和断块运动是主要的构造控矿活动。构造走向基本为NW向, 局部为SN向、EW向及NE向。新近纪-第四纪橄榄石玄武岩普遍存在, 随机分布在该区。

1 区域地质

NW向的弗雷斯尼洛断层切过整个弗雷斯尼洛区域。该区域上的大多数矿床位于弗雷斯尼洛断层附近(图2)。

1.1 地层单位

Proano 群: Valdecanas 组, 含有灰绿色不成熟的砂岩和灰色或黑色页岩薄层交互层。化石证据暗示, 该层年代为白垩纪。

Plateros 组: 下部为钙质和炭质页岩, 向上逐渐变为不成熟的砂岩。该组岩层的中部和西北部含有不同类型的矿体(表1)。

Chilitos 组: 含有绿色-灰绿色安山质流状角砾岩和枕状熔岩, 局部与凝灰岩、泥灰岩和页岩互层。de Cserna 推测^[3,15], 该组形成于晚三叠世, 而 Santo Nino 矿脉的围岩是相似的安山质流状角砾

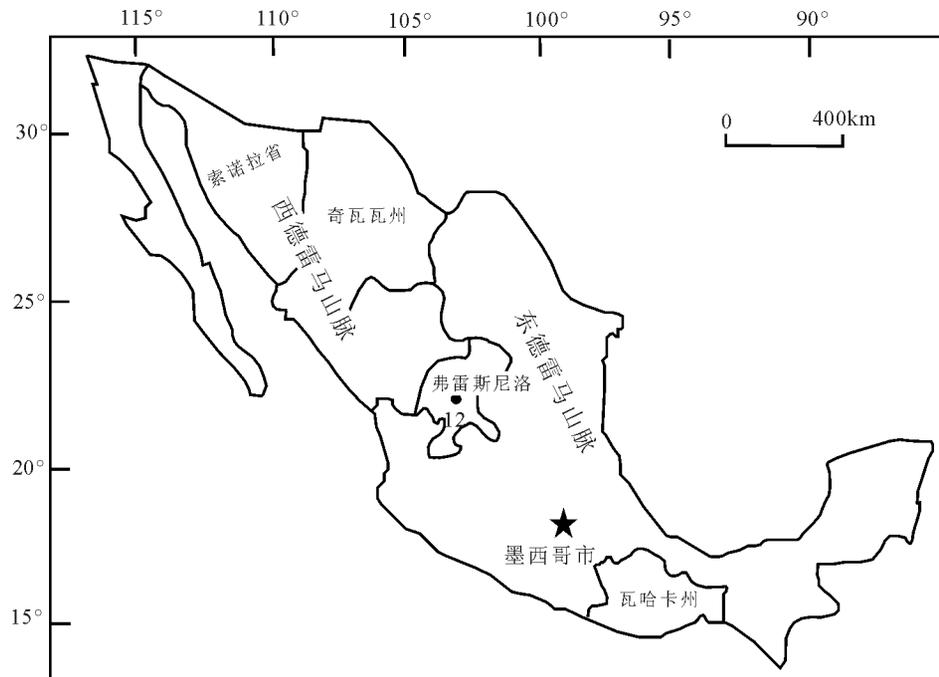


图1 弗雷斯尼洛地区在墨西哥的位置^[1]

Fig. 1 Index map of Mexico, showing the location of Fresnillo

表 1 弗雷斯尼洛区域地层概况^[1]
Table 1 Stratigraphy of the Fresnillo area

代	纪	世	层位	厚度
新生代	第四纪	全新世		1~20m
		更新世		
	新近纪— 古近纪	上新世	玄武岩	30m
		中新世		
		渐新世	流纹质岩石	500m
		始新世	Fresnillo 组	400m
中生代	白垩纪	晚白垩世	Caracol 组	
			Cerro Gordo 组	300m
			Fortuna 灰岩	500m
		早白垩世	Chilitos 灰岩	200m
			Platero 组	300m
			Valdecanas 组	700m

岩,年龄较轻^[3,15]。该矿脉附近的熔岩露头未见枕状构造。Macdonald 等^[16-17]认为,Chilitos 组覆盖在 Plateros 组之上,而古生物学研究表明该组形成于早白垩世。

Fortuna 灰岩和 Cerro Gordo 灰岩:前者由 500m 厚的层状灰黑色碳酸盐岩组成,后者由 300m 厚的岩石组成^[15]。两组岩石呈过渡接触关系(表 1)。

Fresnillo 组:与墨西哥普遍存在的古近纪陆源砾岩相似^[18]。岩石中碎屑物质的物理特征暗示它们被搬运的距离较短。在该组上部,局部产出有中性组分的凝灰岩。

1.2 岩浆侵入体

一个柱状石英二长斑岩岩株出露于采矿区的深部位置,在地表只出露一小部分岩体。该岩体的 K-Ar 年龄为 31.6Ma 和 32.4Ma^[19]。该岩体含有多达 20% 的石英斑晶。在采区中大多数岩株露头发生了强烈的青磐岩化或泥化。岩石中含有 25% 的斜长石和角闪石斑晶。基质由细粒矿物组成。

安山岩岩墙:岩墙平均 1m 厚,出露于-270m 和-425m 位置,靠近 General Shaft 东南部,侵入到 Valdecanas 组中(图 2)。

流纹岩岩墙:流纹岩岩墙出露于采矿区的不同位置,成分上与上覆的火山灰-凝灰岩相似。

1.3 火山岩

除了安山质流状角砾岩和枕状熔岩以外,只有少量其他类型的火山岩出露在采矿区中部。其中以古近纪安山质凝灰岩和流纹质火山灰-流状凝灰岩为主,它们含有石英和透长石斑晶。流纹质岩石硅化严重。少量的新近纪-第四纪的含橄榄石玄武岩可能是该区最年轻的岩石。

2 矿床地质

在采矿区的西北端,2 个主要的层控矿床出现在 Valdecanas 组中。这些席状矿体在空间上与石英二长岩岩株有关。上部(Upper mantos)和下部(Lower mantos)席状矿体分别有 5m 和 12m 厚。其他一些席状矿体则位于褶皱的顶部,距离岩株约 0.5km,围岩矿物蚀变成斧石、绿泥石、石英和粘土^[20]。

石英二长岩岩株侵入到白垩纪 Proano 群下部,诱发了岩体附近沉积岩岩层砂岩化,矿物组合为斧石+钙铁辉石+铁铝榴石+钙铝榴石±透闪石±阳起石。在上、下 2 层席状矿体中,这些硅酸盐已局部被交代成磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、白铁矿和毒砂。在席状矿体和相关的矿脉中含有硫银铋矿、块硫银铋矿、砷黝铜矿、共生的方铅矿和硫银铋矿^[15]。

弗雷斯尼洛柱状矿体是穿切地层呈圆柱状交代型的硫化物矿体,围绕着石英二长岩岩株的边缘出现,和席状矿体有着相同的钙硅酸盐矿物组合,并且都被晚期硫化物交代。在 1963—1985 年之间,席状和柱状矿体共产出 212×10⁴t 银(品位 67g/t, Pb(2.6%), Zn(5.0%)和 Cu(0.12%))^[21]。

在采矿区的中部产出有多条矿脉,尤其是在 Cerro Proano 的下部(图 2)。这些矿脉产状较陡,倾向朝南,靠近地表的部分出现很多分叉并且产状变缓^[22]。在 Fortuna Shaft 和 Cerro Proano 之间的矿脉(图 2)深部主要富集贱金属,但在-385m 以上的部分逐渐富集 Ag,而贱金属含量逐渐减少。矿脉较深的部分含有贱金属的品位和柱状、席状矿体相似,而 Ag 的品位则高于它们。在 Fortuna shaft 的东南侧,较浅的矿脉更富集 Ag,而贱金属的品位很低^[1]。因此,可将 Fresnillo 区域的矿脉分为 2 类^[22]: ①Fortuna 和 Cerro Proano 深部的富贱金属矿脉;②Cerro Populo 和 Cerro Proano 浅部的富银矿脉。野外观察发现,富 Ag 矿脉局部穿切富贱金属矿脉^[23],

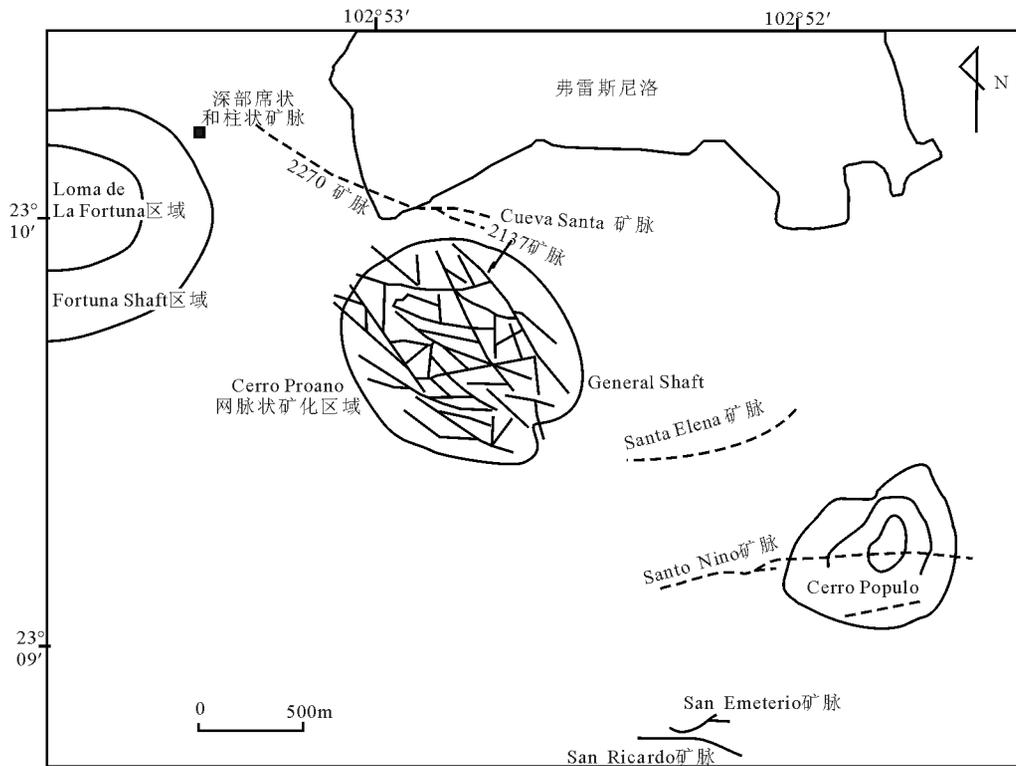


图2 弗雷尼洛地区已发现的矿床类型及位置^[1]

Fig. 2 Index map of the Fresnillo district, showing the types of ore deposits found in the district

后者走向北西,而前者为东西向。

1975年,位于General shaft东南部的Santa Elena, Santo Nino和San Ricardo 3个富银矿脉被发现(图2)。Santa Elena和Santo Nino矿脉走向NE 85°~76°,倾向为63°~76°。Santo Nino矿脉平均宽度为2.8m, Ag的平均品位为776g/t。Santa Elena矿脉平均宽度为2.2m, Ag平均品位为407g/t^[21]。San Ricardo矿脉走向NW80°。在3个主要的矿化脉构造区域之间,有一些稍小的互相平行的矿脉产出。富银矿脉之间垂直距离不超过400m,而富贱金属矿脉之间垂直距离则达到900m远。富银矿脉的矿物组合主要为深红银矿,以及少量的螺状硫银矿、淡红银矿、辉锑银矿、硫锑铜银矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿。脉石矿物主要为石英、黄铁矿、方解石、绢云母、高岭石、蒙脱石、绿泥石和冰长石。

3 热液蚀变

靠近Santa Elena和Santo Nino矿脉的赋矿围岩形成了狭窄的、不规则的热液蚀变带。在远离主脉的细脉附近则没有明显的蚀变^[1]。

交代蚀变作用:广泛出现在矿区中,并且形成了方解石、绿帘石和绿泥石。在蚀变矿物组合中也可见少量的蒙脱石、高岭石及黄铁矿,这主要取决于蚀变强度和主岩成分。在靠近矿脉的地方存在交代蚀变岩石,其他蚀变类型并没有出现。在成矿事件中,Chilitos组中的安山质流状角砾岩与蚀变作用的关系比Plateros组上部的杂砂岩更密切。安山质岩石的岩浆后期蚀变作用很小,但是靠近矿脉的地方蚀变作用明显增强。安山岩的原岩组构被保存下来,并且可以看见残余的普通辉石、角闪石和斜长石斑晶。斜长石被交代成了绿帘石和方解石,而镁铁矿物则被交代成了绿泥石、绿帘石和磁铁矿。楣石、磷灰石、锆石等副矿物则没有受到影响。富银矿脉穿切的Plateros组页岩中没有出现蚀变矿物组合,而不成熟的砂岩中则发生了中等程度的交代蚀变作用。

泥质蚀变:这种类型的蚀变作用形成了高岭石和蒙脱石,黄铁矿及少量的埃洛石、绢云母、绿泥石和绿帘石。由于泥质矿物颜色较浅,所以可以明显地看到安山质流状角砾岩发生了泥质蚀变作用。斜长石被

替代形成了丰富的粘土矿物高岭石,而交代矿物组合或镁铁质矿物则被替代形成了蒙脱石。泥质蚀变作用不仅影响了安山岩也影响了 Plateros 组的杂砂岩和页岩,导致石英重结晶。

千枚岩化蚀变:基本的矿物组合是绢云母和黄铁矿,以及少量的伊利石、高岭石和蒙脱石。在富钾长石的原岩中,这种蚀变更加明显,例如 Plateros 组中的不成熟砂岩。在富 Ag 矿脉侵入的砂岩中,靠近矿脉的地方有千枚岩化作用发生,0.01~1m 宽。流纹质火山灰-流状角砾岩中没有产出任何矿脉,但是 Cerro del Cristo 东南侧的流纹质岩石明显发生了热液蚀变。这些凝灰岩发生了绢英岩化和千枚岩化,说明矿化事件晚于上层火山混杂岩侵入的时间。

在 Fortuna 区域产出有石英二长岩岩株、席状矿体和一些柱状矿体。与柱状或席状矿床密切相关的石英二长岩中的斜长石发生了强烈的绿帘石化,并且伴随有次生的钠长石产生。镁铁质矿物完全被绿泥石、磁铁矿和少量的粘土矿物取代。在蚀变的石英二长岩中有浸染状的黄铁矿产出。与岩株接触的 Valdecanas 组页岩呈现出强烈的硅化,其矿物组成几乎全部是石英,局部有硅酸盐-方解石-黄铁矿细脉穿切。在距离岩株 10~15m 处的沉积岩岩石残余层理和原始的矿物组合清晰可见,并且硅化作用明显减弱,但是岩石被条带状钙铁辉石和斧石交代,偶见硫化物。硅化带下面的杂砂岩发育不规则的铁铝榴石-钙铝榴石带,被后期的绿泥石和阳起石替代。

4 蚀变与矿化关系

Fresnillo 区域蚀变作用和矿化过程可分为 4 个阶段:①石英二长岩的侵入导致钙硅酸盐矿物组合的形成;②热液流体的产生,伴随着局部钙硅酸盐被含水矿物组合取代,并且断层附近的围岩发生了钾化和青磐岩化;③在柱状、席状和脉状矿体中硫酸盐-硫盐-脉石矿物沉淀,并且在矿脉和网状矿脉附近围岩同时发生了泥化和千枚岩化蚀变作用;④晚期方解石和少量萤石沉淀^[1]。

图 3 总结了柱状、席状和脉状矿体中围岩蚀变和热液矿化过程的相关关系。富 Ag 矿脉和富贱金属矿脉尽管具有不同比例的矿石矿物和脉石矿物,但是有着几乎一致的围岩蚀变和热液矿化相关关

系^[23]。大多数硫化物形成的先后顺序相对清楚。在席状和柱状矿体中,闪锌矿通过出溶作用形成磁黄铁矿和黄铜矿。相对于席状和柱状矿体,脉状矿体中的闪锌矿具有低 FeS 含量,也暗示了出溶作用的发生^[20]。通过矿相学研究,硫盐矿物在各矿化阶段普遍存在。Gemmell 等^[24]和 Simmons 等^[25]也对富银矿脉进行了简要的矿物学描述。这些研究说明,靠近石英二长岩岩株的柱状、席状矿体的地方及主矿脉深部发育更高的 Cu-贱金属品位。在接近地表或者远离岩株的地方,矿脉具有较低的贱金属含量和更高品位的 Ag。

5 流体包裹体研究

石英、方解石和闪锌矿中的流体包裹体为气液两相包裹体,直径不到 15 μm。相关流体包裹体数据如图 4 所示。

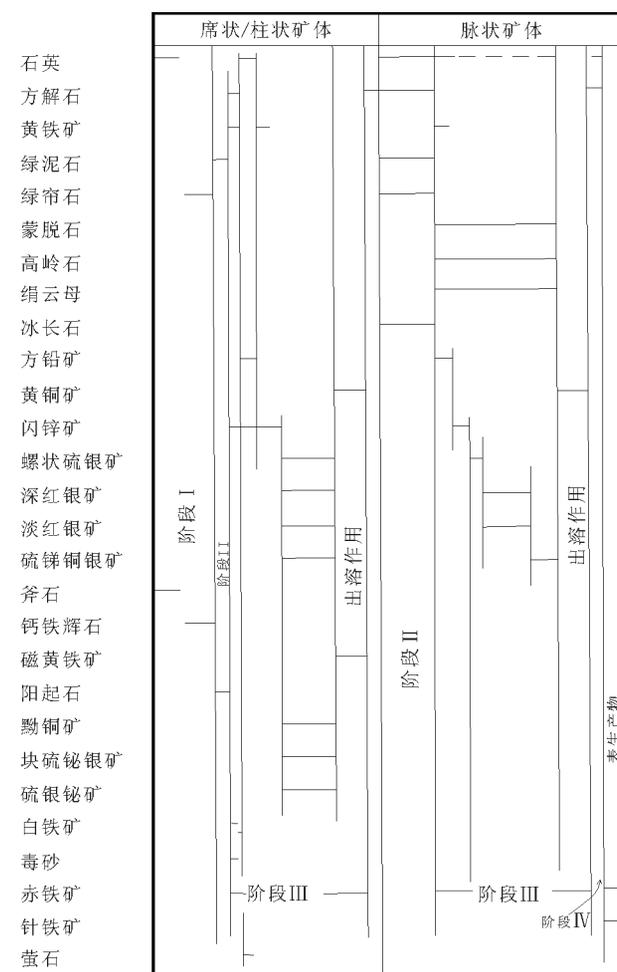


图 3 弗雷斯尼诺区域矿石矿物和蚀变过程关系

Fig. 3 Paragenetic diagram of alterations and ore minerals

Fortuna shaft 区域 Cueva Santa 席状和柱状矿体中的石英和方解石的流体包裹体均一温度为 230~370℃, 而 2137 矿脉深部的石英和方解石的流体包裹体均一温度为 297~419℃^[26]。靠近石英二长岩岩株的深部席状矿体和 Cueva Santa 浅部席状矿体中石英的流体包裹体均一温度为 206~383℃(±5℃)^[3,27]。但是上述石英的包裹体形成于单阶段还是多阶段结晶过程尚不明确。Cueva Santa 席状矿体中石英中的流体包裹体均一温度为 200~400℃。并没有证据表明深部产出的柱状、席状和脉状矿体的成矿流体在成矿过程中发生了沸腾作用^[9]。Cueva Santa 席状矿体中的小细脉分离出的石英单晶体具有连续的生长环带, 而其中的包裹体均一温度范围为 211~317℃^[20]。很明显, 这是由于较热的成矿流体多次注入成矿系统才导致了包裹体均一温度的大范围变化。

在 2137 脉中-920m 和-270m 处, 脉状石英的流体包裹体均一温度分别为 245~320℃和 140~280℃^[1]。Cueva Santa 脉中石英的流体包裹体均一温度为 220~383℃^[20]。而 Cueva Santa 矿脉中-425m 处矿化阶段形成的石英中的流体包裹体均一温度为 290±10℃^[9]。Santo Nino 矿脉中石英、方解石和闪锌矿中的流体包裹体均一温度范围为 180~260℃^[25], 说明 Santo Nino 中的石英是在矿化阶段形成的^[3]。

柱状矿体石英中的包裹体盐度为 4%~7.5%, 上层席状矿体(Upper manto)中为 12%^[26]。柱状和席状矿体盐度分别为 3%和 3%~5%; 2137 矿脉的盐度为 5%~12%^[4,27]。富 Ag 的 Santo Nino 矿脉中石英和方解石的盐度小于 1.1%^[1], 而 Santo Nino 矿脉中闪锌矿的流体包裹体盐度为 8.5%~12%^[25]。这些相互矛盾的盐度值暗示了多期次高盐度流体对闪锌矿沉淀的影响。Chico^[23]和 Simmons^[28]认为, 在现今地表下 350~400m 的富 Ag 矿脉中流体包裹体盐度发生了突变, 这可能与强烈的沸腾作用有关。

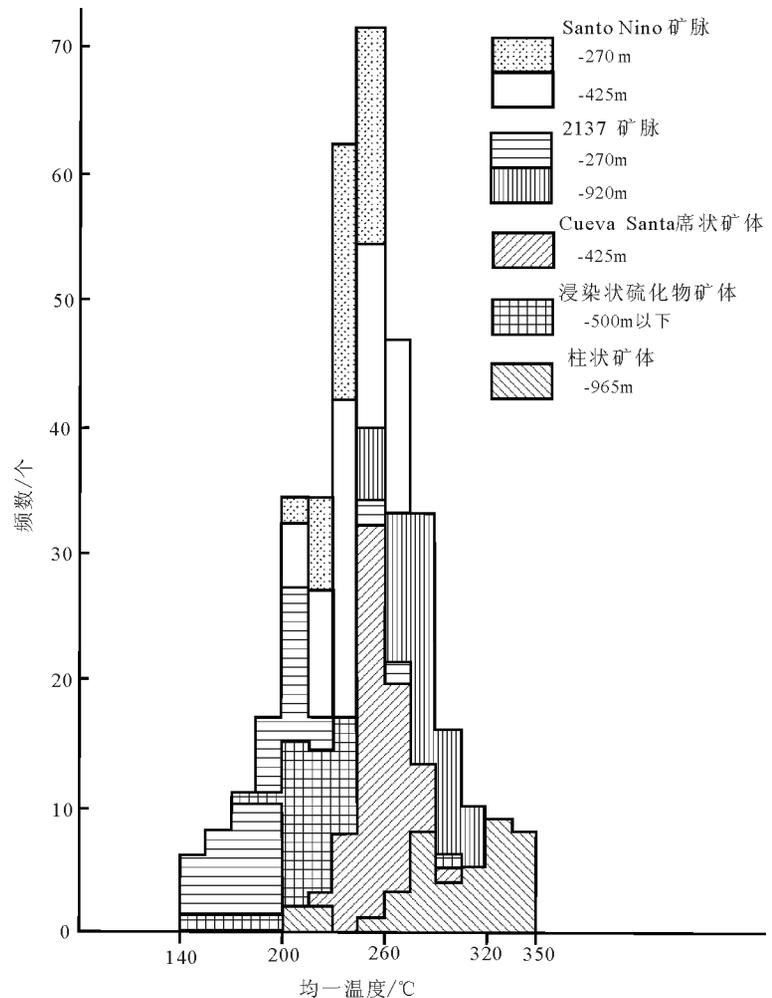


图 4 弗雷斯尼洛采矿区不同类型矿体流体包裹体均一温度^[1]

Fig. 4 Fluid inclusion filling temperatures of different orebody types of the Fresnillo mining area

6 S 和 Pb 同位素证据

前人对柱状、席状和脉状硫化物中的 S 同位素已有报道^[26-27]。硫的成因具有不同的结论。在采矿区的垂直和侧翼区域, 柱状、席状矿体与脉状矿体中的方铅矿和闪锌矿的 S 同位素明显是一致的(图 5)。对闪锌矿-方铅矿系统计算的 2137 矿脉的温度为 203℃, Cueva Santa 席状矿体的温度为 225℃, 而 2912 柱状矿体的温度为 270℃。这些温度略微低于流体包裹体均一温度。根据这些稳定同位素数据和流体包裹体均一温度, 计算得出的 S 同位素组成为 $-3.0 \pm 0.4\%$ ^[1]。虽然 Gonzalez 等^[27]计算出了相似的同位素组成, 但是他们认为是席状矿体中的同沉

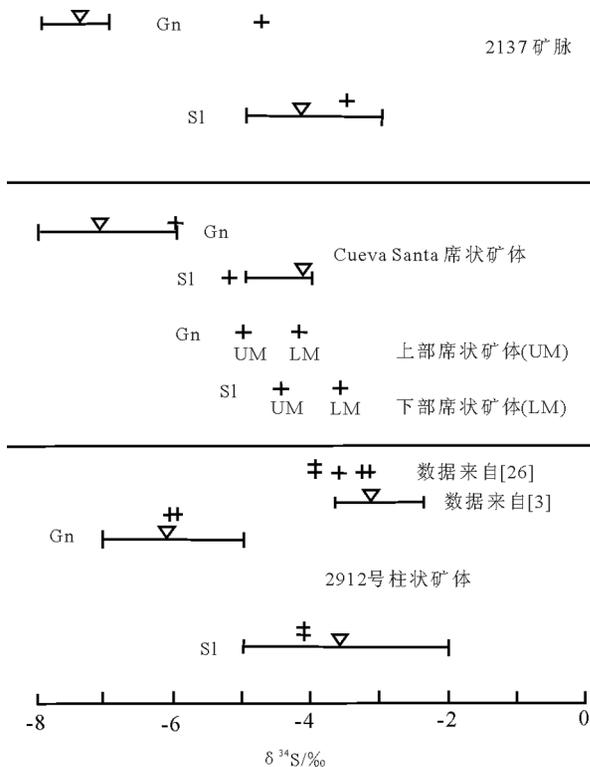


图5 2137矿脉、Cueva Santa、Upper和Lower席状矿体及2912柱状矿体中方铅矿和闪锌矿中S同位素组成^[1]

Fig. 5 Sulfur isotope analyses of galena and sphalerite from No. 2137 vein, Cueva
Gn—方铅矿; Sf—闪锌矿

积硫化物再活化后在矿脉中重新沉淀形成的。由于石英二长岩岩株岩浆硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 $3\text{‰}\sim 6\text{‰}$, 因此认为S来源于生物成因^[27]。关于矿脉中所有贱金属和Ag来源于页岩和杂砂岩中的同沉积席状矿体的猜想^[27]几乎是不可能的, 在席状矿体中并没有证据表明成矿金属发生了淋滤。事实上, 在席状矿体中钙质硅酸盐矿物已经被硫化物替代^[16], 而柱状矿体形成于石英二长岩岩株的侵位过程中^[26]。

上述岩浆S同位素组分(例如, 0‰)很容易被获得。矿石流体中的氧逸度或pH值的增加将导致 ^{34}S 的亏损, 此外流体中硫化物的沉淀也将呈现出 ^{34}S 的亏损^[29]。Fresnillo区域的围岩矿物蚀变组合暗示, 矿石流体中pH值发生了很小的变化, 但是赤铁矿和紫色石英的产出暗示了矿石流体氧化作用的增强。在Fresnillo区域所有矿床类型中的方铅矿和闪锌矿具有相似的同位素组成, 说明它们具有相似的成因。因此, 初始的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值应为 0‰ 。Pb同

位素分析说明, 在Fresnillo区域中所有矿石类型的铅来源于相同的源区^[1,9,15]。Macdonald等^[16]认为, 形成Fresnillo区域中方铅矿的岩浆中铅来源于前寒武纪基底。

7 讨论

弗雷斯尼洛区域的矿床包括高温的柱状、席状和脉状贱金属矿床及低温浅层热液矿床。流体包裹体证据暗示, 矿石和脉石矿物的沉淀与一个高盐度和低盐度流体混合的成矿流体系统有关。席状和柱状矿体矿物流体包裹体具有高的盐度^[26]。在Cueva Santa柱状矿体中, 与黄铁矿和磁黄铁矿相关的闪锌矿中的FeS含量为 19.69% ^[20]。通过闪锌矿压力计算, 成矿流体系统的全压力约为 0.73kbar 。在席状和柱状矿体形成过程中, 硫化物逐渐替代了钙质硅酸盐矿物^[16,20,26], 导致流体包裹体的均一温度需要校正约 70℃ 。因此, 在静压条件下, 柱状、席状和脉状矿体深部形成于 $305\sim 415\text{℃}$, 而稍年轻的富银矿脉的形成温度则低于 320℃ 。柱状、席状和深部脉状矿体石英、方解石中的流体包裹体没有证据显示发生过沸腾作用^[1,20,23,26], 然而富贵金属矿脉- 400m 以上部分的流体包裹体显示发生了沸腾作用^[23,28]。因此, 富Ag矿脉中流体包裹体均一温度不需要进行压力校正。通过 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 系统中两相边界关系计算, 沸腾作用发生在古地表以下 350m 的位置^[25]。Pb和S同位素数据支持铅和硫来源于深部地壳和岩浆。因此, 该区域矿床形成于岩浆热液系统。

8 结论

(1) 弗雷斯尼洛矿床由交代的柱状、席状和浸染状硫化物矿体, 以及赋存于白垩纪海相沉积岩和火山岩中的脉状矿体组成。

(2) 石英、方解石和闪锌矿中的流体包裹体分为液相和气液两相。柱状、席状和深部矿脉中石英和方解石的均一温度范围为 $240\sim 350\text{℃}$, 而浅部矿脉中石英、方解石和闪锌矿的温度范围为 $140\sim 275\text{℃}$ 。

(3) 柱状、席状和脉状矿床中S同位素分析显示, 方铅矿相对于闪锌矿亏损 ^{34}S 。弗雷斯尼洛地区所有矿床的方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-4.1\text{‰}\sim -8.0\text{‰}$ 之间, 而闪锌矿介于 $-2.0\text{‰}\sim -5.0\text{‰}$ 之间。利用流体包裹体均一温度计算的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值为 $-3.0\pm 0.4\text{‰}$ 。这样

的组分可能与成矿流体pH值轻微变化(正如围岩蚀变组合所暗示的那样)或者氧逸度的增加有关。

(4)矿石和脉石矿物中的生长环带具有波动的温度和盐度,深部壳源区的铅及岩浆成因的硫暗示成矿流体来源于岩浆水和大气水。

参考文献

- [1]Ruvalcaba-Ruiz D C, Thompson T B. Ore deposits at the Fresnillo Mine, Zacatecas, Mexico[J]. *Econ. Geol.*, 1988, 83: 1583-1596.
- [2]Koch G S, Link R E. Geometry of metal distribution in five veins of the Fresnillo mine, Zacatecas, Mexico[M]. U.S. Bur. Mines Rept. Inv., 1967: 1-64.
- [3]Ruvalcaba-Ruiz D C. Geology, alteration and fluid inclusions of the Santa Elena and Santo Nino fissure vein deposits in Fresnillo, Mexico[D]. Unpub. M.S. thesis, Colorado State Univ., 1980: 1-86.
- [4]Gonzalez Partida E. Estudio microtermometrico del Distrito Minero de Fresnillo, Zacatecas[J]. *Geomimet*, 1984, 130: 17-21.
- [5]Jamie J W, Stuart F S, Barry S. How metalliferous brines line Mexican epithermal veins with silver[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2057.
- [6]Moncada D, Mutchler S, Nieto A, et al. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 114: 20-35.
- [7]Adriana P, Andrew W. Macfarlane. Lead isotope studies of the Guerrero composite terrane, west-central Mexico: implications for ore genesis[J]. *Miner. Deposita.*, 2014, 49: 101-117.
- [8]de Cserna Z. Mexico-geotectonics and mineral deposits[J]. *Geol. Soc. New Mexico Spec. Pub.*, 1976, 6: 18-38.
- [9]Cumming G L, Kesler S E, Krstic D. Isotopic composition of lead in Mexican mineral deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1979, 74: 1395-1407.
- [10]McDowell F W, Keizer R P. Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 1977, 88: 1479-1487.
- [11]Nils L, Harald B, Matthias H, et al. Paleocurrent direction measurements in a volcanic setting by means of anisotropy of magnetic susceptibility: A case study from the Lower Miocene Tepoztlán Formation(Transmexican Volcanic Belt, Central Mexico)[J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 290: 1-14.
- [12]Clark K F, Dow R R, Knowing R D. Fissure-vein deposits related to continental volcanic and subvolcanic terranes in Sierra Madre Occidental province, Mexico[J]. *Nevada Bur. Mines Geology Rept.*, 1979, 33: 189-201.
- [13]Clark K F, Foster C T, Damon P E. Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 1982, 93: 533-544.
- [14]Wisser E. The epithermal precious metal province of northwest Mexico[J]. *Nevada Bur. Mines Geology Rept.*, 1966, 13: 63-92.
- [15]de Cserna Z. Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico[J]. *Geol. Soc. America Bull.*, 1976, 87: 1191-1199.
- [16]Macdonald A J, Kreczmer M J, Kesler S E. Vein, manto, and chimney mineralization at the Fresnillo silver-lead-zinc mine, Mexico[J]. *Canadian Jour. Earth Sci.*, 1986, 23: 1603-1614.
- [17]Cantú Chapa C M. Una nueva localidad del Cretácico inferior en Mexico[J]. *Rev. Inst. Mexicano Petróleo*, 1974, 6: 1-515.
- [18]Edwards J D. Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico[M]. U. S. Geol. Survey Prof. Paper 264H, 1955: 153-185.
- [19]Lang B, Steinitz G, Sawkins F J, et al. K-Ar age studies in the Fresnillo silver district, Zacatecas, Mexico[J]. *Econ. Geol.*, 1988, 83: 1642-1646.
- [20]Macdonald A J. Geology and geochemistry of the Cueva Santa manto, Fresnillo mine, Zacatecas, Mexico[D]. Unpub. M.Sc. thesis, Univ. Toronto, 1978: 129.
- [21]García M E, Esteban L R, Leopoldo G G. Fresnillo. Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers-Soc[M]. *Econ. Geologists Spec. Pub.*, 1986, 1: 73-93.
- [22]Stone J B, McCarthy J C. Mineral and metal variations in the veins of Fresnillo, Zacatecas, Mexico[J]. *Am. Inst. Mining Metall. Petroleum Engineers Trans*, 1942, 178: 91-106.
- [23]Chico E. Mineralogy, paragenesis, and fluid inclusion studies in three veins of the Fresnillo mining district; Zacatecas, Mexico[D]. Unpub. M.S. thesis, Dartmouth College, 1986: 115.
- [24]Gemmell J B, Birnie R W, Zantop H. Sulphosalt geochemistry of the Santo Nino Ag-Pb-Zn vein, Fresnillo district, Mexico[C]//*Geol. Soc. America Abstracts with Programs*, 1986, 18: 611.
- [25]Simmons S F, Sawkins F J. Physio-chemical nature of the mineralizing solutions of the St. Nino vein, Fresnillo, Zacatecas, Mexico[C]//*Geol. Soc. America Abstracts with Programs*, 1986, 18: 751.
- [26]Kreczmer M J. The geology and geochemistry of the Fortuna mineralization, Fresnillo, Zacatecas, Mexico[D]. M. Sc. Thesis, Univ. Toronto, 1977: 1-155.
- [27]Gonzalez Partida E, Arnold M, Acosta Ayala E. Analisis metalogenetico preliminary del distrito minero de Fresnillo, Zacatecas sobre la base de 50 medidas isotopicas $\delta^{34}\text{S}\%$ [J]. *Geomimet*, 1984, 129: 27-34.
- [28]Simmons S F. Physio-chemical nature of mineralizing solutions for the St. Nino vein: Results from fluid inclusion, hydrogen, oxygens in the Fresnillo district, Zacatecas, Mexico[D]. Unpub. Ph.D. dissert, Univ. Minnesota, 1986: 204.
- [29]Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1972, 67: 551-578.