

锡铁山 SEDEX 铅锌矿床成矿物质来源研究 ——铅同位素地球化学证据

祝新友^{1,2} 王莉娟^{1,2} 朱谷昌^{1,2} 邓吉牛³ 樊俊昌³ 张 强³

(1.北京矿产地质研究院,北京 100012;2.有色金属矿产地质调查中心,北京 100012;

3.西部矿业有限责任公司,青海 西宁 810000)

摘要:青海锡铁山超大型铅锌矿床产于柴达木盆地北缘早古生代造山带中,发育一套完整的喷流沉积系统,包括管道相、近喷口相与远喷口相以及喷流沉积岩等。对不同对象中硫化物系统的铅同位素测定研究表明,锡铁山矿床铅同位素组成总体较集中,可细分为两组,均呈线性分布;大部分的样品,包括非层状矿、网脉状石英钠长岩、代表供给系统的脉体、基性岩等,以及绝大部分的层状矿体,组成一组,线性回归方程为 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})=1.254(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})-7.296$,相关系数 0.997。分布于铅锌矿体及大理岩上盘的含浸染状黄铁矿化的炭质片岩、一个层状矿体样品组成一组,线性回归方程为 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})=0.123(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})+13.347$,相关系数 0.902。两条直线交点的同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.253$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.590$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.370$ 。结合成矿模型的研究认为,矿床的铅同位素具有造山带与上地壳混合来源的特点,显示喷流成矿过程中铅及成矿金属物质主要由喷流卤水提供,少量物质来自海水;在喷流系统的远端或喷流活动的间歇期,前寒武纪变质岩也可能提供了少量物质。而层状矿体与非层状矿体经历了相同的演化历史,均形成于喷流沉积过程中,非层状矿体属未喷出海底的热液矿体,而不是后期改造的结果。断层沟地区的矿化是后期改造重新定位的,铅同位素组成在改造过程中得到进一步的均一化。

关键词:锡铁山铅锌矿;喷流沉积型;铅同位素;成矿物质来源;青海省

中图分类号:P611

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2010)06-1682-08

锡铁山矿床位于青海省海西州大柴旦行委,累计探明铅锌金属储量 500 余万 t,是中国最大规模的铅锌矿床之一,矿床类型为喷流沉积型(SEDEX)。20 世纪 80 年代曾开展过稳定同位素地球化学研究^[1],由于对矿床成矿系统认识的局限以及铅同位素数据测定精度较低,矿床铅同位素的研究处于初始阶段。近年来的矿床地质地球化学研究基本建立起锡铁山矿床喷流沉积矿床的模型^[2],逐渐恢复出喷流卤水与海水相互作用的成矿作用机制。新测定的一批铅同位素数据显示出良好的线性分布,反映出成矿物质多来源性质,这些特点在很多 SEDEX 或块状硫化物型(VHMS)铅锌(铜)矿床中均有表

现^[3-5],但以往未引起足够的重视,或将其解释为分析测定误差。本文的研究正是基于上述成矿模型,探讨 SEDEX 矿床铅同位素特征以及喷流成矿作用过程中不同物质来源的相互关系,其多来源的特点可能是 SEDEX(VHMS)矿床所共有的。

1 地质概况

锡铁山矿床产于柴达木地块北缘早古生代造山带,该造山带开始于晋宁运动后祁连南缘的陆缘裂开^[6],中晚奥陶世以代表岛弧环境^[7]的中基性钙碱性火山岩为主,尤其以中性岩发育为特征,反映了板块俯冲的闭合环境,俯冲作用的继续形成了柴北缘著

收稿日期:2009-11-19;**改回日期:**2010-05-31

基金项目:全国危机矿山接替资源找矿项目“青海省大柴旦行委锡铁山铅锌矿矿产预测”(200663063)与国家科技支撑计划项目(2006BAB01A06)及国家自然科学基金项目(40672061)联合资助。

作者简介:祝新友,男,1965 年生,教授级高级工程师,长期从事矿产地质与勘查研究;E-mail:zhuxinyou@gmail.com。

①青海省有色第八地质队,青海省大柴旦锡铁山矿区铅锌矿综合研究报告,1984。

名的超高压变质带^[7-9]。锡铁山矿区区分前寒武纪达肯大板群变质岩与滩间山群的 F1 断裂属该俯冲带的一部分,沿 F1 发生强烈的片理化。容矿地层为奥陶系滩涧山群(*O_{3m}*) 中基性火山-沉积岩系(图 1)。传统上将锡铁山地区的滩涧山群分为 a-b、c、d 4 个岩组、3 套火山沉积岩系,三者间为断层接触。a-b 层为一套含中基性火山物质的碎屑沉积岩,局部夹少量的玄武安山岩或安山玄武岩。铅锌矿体赋于中部的 a-2 层,为一套富含炭质、钙质的泥质沉积岩,即石英绢云母片岩、炭质绢云母片岩等,夹大理岩。大理岩主体为喷流沉积岩,厚层不规则透镜状顺层产出,长>2500 m。锡铁山矿床本区的硫化物矿体划分为层状与非层状、少量脉状,非层状矿体呈厚大的不规则状穿插于大理岩中,粗晶、块状矿,富含热水角砾;非层状矿体中见有一处蚀变的基性脉岩,其中含浸染状黄铁矿。层状矿体分布于喷流系统外侧,于大理岩的边部(下盘)或大理岩尖灭后的片岩中,整合产出,有条带条纹构造。网脉状石英钠长岩分布于非层状矿体及厚层大理岩的下方,长>2000 m,宽>300 m,与两侧片岩呈交代状,其中发育大量的热水角砾岩,网脉状结构,代表沿同生长断裂发育的管道相。在厚层大理岩中靠近非层状矿体的下方,局部发育一些垂直大理岩层理生长的脉状矿化,裂隙无错动,脉体中发育热水角砾,脉体与非层状矿相连,代表非层状矿的供给系统。主要矿物组合为黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿,少量白铁矿、毒砂等,脉石

矿物为方解石,在条纹状矿石中含自形柱状石英。

含矿地层倾向 SW220°±,倾角 60°±,层序整体倒转,本文中所用产状叙述均以恢复后的原始产状而言。

断层沟地区位于锡铁山矿区东南部,含矿层由于靠近区域断裂 F1,受到沿断裂自 NE 向 SW 仰冲的影响,地层层序再一次倒转,强烈片理化,沉积面理(S0)全部为片理(S2)取代。由于含矿系统自锡铁山本区向东南方向的侧伏,至断层沟地区已具有很大的埋深,近地表一带并未出现喷流沉积形成的硫化物矿体(化)。现发现的矿体及矿化均产于绢云片岩及片理化的层状石英钠长岩中,层位与锡铁山矿区含矿层完全一致,但矿体受片理控制,形成于后期改造作用。由于 F1 断裂代表了奥陶纪末柴北缘裂陷闭合时的强烈逆冲,因此,断层沟地区的脉状矿化也很可能形成于这一时期。

有关锡铁山矿床详细的地质特征介绍,可参考祝新友等^[2,10-12]、Wang 等^[13]、郭介人等^[1]。

2 铅同位素分析

2.1 分析样品

铅同位素样品取自锡铁山喷流沉积系统的各部分,为避免近地表矿石强烈氧化的影响,样品主要取自 2942、2882 和 2822 中段坑道,以及钻孔岩石。取样对象包括非层状矿体、层状矿体、上盘含浸染状矿化的炭质片岩、网脉状蚀变石英钠长岩、代表供给

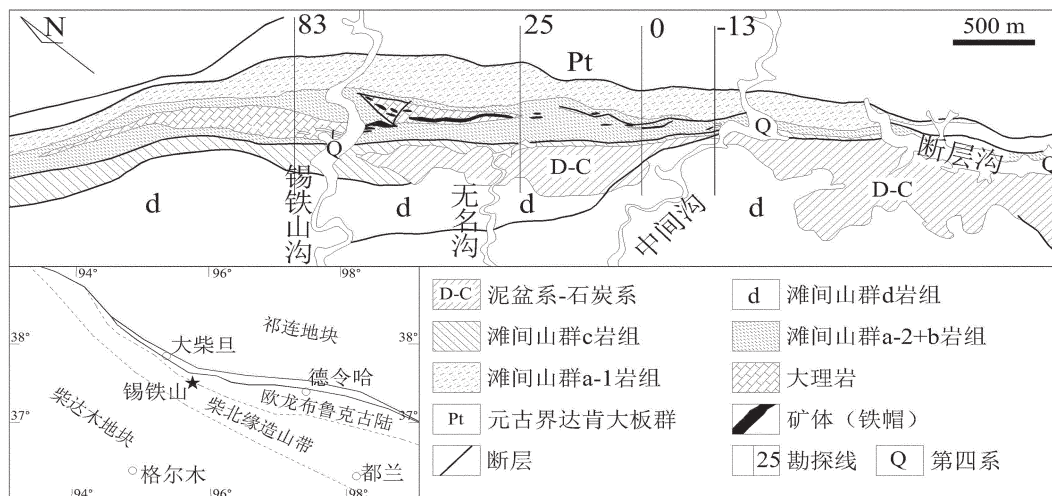


图 1 锡铁山矿床地表地质简图(据矿山地质图修改)
Fig.1 Sketch geological map of the Xitieshan ore deposit

带的脉状矿化以及断层沟地区的部分样品，基本可以代表锡铁山矿区各类地质体的铅同位素特点。

2.2 分析方法及分析结果

样品经单矿物分离获得纯的硫化物单矿物（纯度>98%）。测定方法依 GB/T17672-1999《岩石中铅锶钨同位素测定方法》，测定仪器 ISOPROBE-T 热电离质谱仪，铅同位素比值误差以 2σ 计，除样品 TX-145 之 $2\sigma=0.007\sim0.021$ 外，其他样品 $2\sigma<0.009$ ，大部分样品 $2\sigma<0.003$ 。

共分析铅同位素样品 30 件，分析结果如表 1。铅同位素组成总体上较为集中，分布范围： $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.204\sim18.658$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.556\sim15.791$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.272\sim39.042$ ；大部分样品集中分布于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.234\sim18.277$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.579\sim15.632$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.360\sim38.541$ 。按传统的划分方法，属于普通铅的范畴。

铅同位素计算使用参数引自 [14]： $\lambda_1=0.155125\times10^{-9}\text{a}^{-1}$ ， $\lambda_2=0.98485\times10^{-9}\text{a}^{-1}$ ，地球年龄值 $4.43\times10^{-9}\text{a}$ ， $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0=9.307$ ， $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0=10.294$ ， $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.88$ 。

3 讨 论

3.1 锡铁山矿床铅同位素组成特点

前人在锡铁山矿床共测定方铅矿铅同位素样品 11 件^[1]，认为矿床铅同位素具有普通铅的特点。

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\sim^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅同位素演化图解中，锡铁山矿床的铅同位素样品大部分分布集中，少量样品分散。样品 μ 值=9.42~10.21，单阶段年龄介于 37~400 Ma（图 2），其中矿石的单阶段年龄为 260~400 Ma，略低于地层的年龄值，矿区滩间山群火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄 486 Ma^[15]。大多数 SEDEX 或 VHMS 矿床，矿石普通铅年龄与地层年龄或成矿年龄接近。

矿石铅同位素组成与取样位置关系不大，整个矿区无明显的铅同位素分带现象。在 2882 中段 09 线，石英绢云片岩中发育多层层状铅锌矿体。自下而上，4 件样品中的铅同位素组成较为均一， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 15.579、15.556、15.791、15.586，无明显的变化规律，即铅同位素组成无系统性的变化，组成接近。这说明，在喷流成矿过程中，铅同位素组成稳定，成矿物质的来源未发生显著的变化。

断层沟地区的 3 个样品铅同位素组成集中，且

均位于交点 C 附近（图 3）。

详细的铅同位素图解（图 3-A,B）显示出锡铁山矿床矿石、围岩的铅同位素组成特点并不完全相同，明显分为两组，沿两条线性分布。大部分的样品，包括非层状矿、网脉状石英钠长岩、代表供给系统的脉体、基性岩等，以及绝大部分的层状矿体，组成一组，呈线性分布，编号 1。分布于铅锌矿体及大理岩上盘的含浸染状黄铁矿化的炭质片岩、一个层状矿体样品组成一组，编号 2。

沿 2 号回归线分布的样品包括全部的炭质片岩和 1 件层状条带状铅锌矿石。炭质片岩主要分布于矿体或大理岩的上盘（NE 盘），含浸染状分布的细粒自形晶黄铁矿，其中喷流沉积现象不明显。除黄铁矿外，无其他硫化物，也无蚀变。5 件炭质片岩样品的相关系数为 0.902，相关性较高。炭质片岩样品的回归方程为：

$$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})=0.123(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})+13.347$$

其 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\sim^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 也呈线性分布特点，回归方程为：

$$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})=1.580(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})+9.535$$

沿 1 号回归线分布的样品，富硫化物，无放射性成因铅的加入，不同类型的矿化分布于该直线上，显示网脉带、供给脉体、非层状矿体等具有相同的铅同位素来源。层状矿体中有 1 个样品处于 2 号回归线上，该样品位于 2942 中段 17 线层状矿体底部，紧邻灰黑色石英绢云片岩，矿石呈条带状。扣除该样品后的层状矿体，以及其他矿体、网脉状石英钠长岩等共 19 件样品， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\sim^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 间相关系数为 0.977，其线性回归方程为：

$$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})=1.254(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})-7.296$$

$$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}\sim^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \text{ 的回归方程为：}$$

$$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})=4.051(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})-35.542$$

样品分布的范围远大于分析误差，且回归直线 1 的斜率>1，可排除因 ^{204}Pb 分析误差导致的结果。因此，这种线性的分布特点可能代表了不同 μ 值源区物质的混合结果。

两条回归线的交汇点 C 的铅同位素组成为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.253$ ， $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.590$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.370$ 。交点的单阶段年龄为 269 Ma， $\mu=9.462$ 。这一交点代表喷流过程中平均的铅同位素组成，或者代表了主要来源物质的铅同位素平均组成。其 μ 值与北祁连造山带的白银厂铜多金属矿床 $\mu=9.51^{[4]}$

表 1 青海省锡铁山铅锌矿床硫化物硫同位素分析结果
Table 1 Lead isotope composition of the Xitishan Pb-Zn deposit

序号	编号	岩性	结构构造	矿物组合	产状	取样位置	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	误差
1	XT-113	改造的石英钠长岩	浸染状	Py+Sp+Ga	脉状	断层沟3100平巷	黄铁矿 [*]	18.245	0.001	15.588	0.001	38.404	0.003
2	XT-115	方铅矿 [*] 闪锌矿 [*] 矿石	块状,粗粒	Py+Sp+Ga	脉状	断层沟3100平巷	方铅矿 [*]	18.238	0.001	15.599	0.001	38.413	0.003
3	XT-164	块状铅锌矿石	块状	Sp+Ga+Py	脉状	断层沟K1矿石堆	黄铁矿 [*]	18.235	0.001	15.604	0.001	38.427	0.003
4	XT-121	蚀变岩中的残留矿	残留条带	Py+Sp	层状矿 [*]	ZK44007-16	方铅矿 [*]	18.311	0.001	15.663	0.001	38.635	0.003
5	XT-125	黑色闪锌矿 [*] 矿石	粗晶块状	Sp	层状矿 [*]	ZK44007-16	闪锌矿 [*]	18.272	0.001	15.601	0.001	38.437	0.003
6	XT-131	条带状闪锌矿 [*] 矿石	条带状	Sp	层状矿 [*]	ZK44007-16	闪锌矿 [*]	18.267	0.001	15.61	0.001	38.471	0.003
7	XT-138	闪锌矿 [*] 矿石	条带状	Sp+Py	层状矿 [*]	ZK440011-13	黄铁矿 [*]	18.245	0.001	15.579	0.001	38.356	0.002
8	XT-144	块状条带状矿石	条带状、块状	Py+Sp+Ga	层状矿 [*]	2942中段25线	方铅矿 [*]	18.277	0.001	15.622	0.001	38.494	0.002
9	XT-145	块状条带状矿石	条带状	Py+Sp+Ga	层状矿 [*]	2942中段25线	方铅矿 [*]	18.354	0.007	15.713	0.009	38.804	0.021
10	XT-156	黄铁矿 [*] 闪锌矿 [*] 矿石	块状	Py+Sp	层状矿 [*]	2822中段09线	黄铁矿 [*]	18.257	0.001	15.579	0.001	38.375	0.003
11	XT-157	条带状黄铁矿 [*] 矿石	条带状	Py+Sp	层状矿 [*]	2822中段09线	黄铁矿 [*]	18.205	0.001	15.556	0.001	38.272	0.001
12	XT-158	含炭绢云片岩	浸染状、条带状	Py	层状矿 [*]	2822中段09线	黄铁矿 [*]	18.403	0.003	15.791	0.004	39.042	0.009
13	XT-160	黄铁矿 [*] 化绢云片岩	浸染状、条带状	Py	层状矿 [*]	2822中段09线	黄铁矿 [*]	18.234	0.001	15.586	0.001	38.378	0.002
14	BXK-88	黄铁矿 [*] 闪锌矿 [*] 矿石	条带状、块状	Py+Sp	层状矿 [*]	2942中段17线	方铅矿 [*]	18.49	0.001	15.612	0.001	38.667	0.003
15	TXK-16	粗晶矿石	块状矿 [*]	Sp+Py+Ga	层状矿 [*]	ZK4425-11, 445m	方铅矿 [*]	18.258	0.001	15.593	0.001	38.405	0.002
16	XT-161	灰黑色矿化炭质片岩	浸染状	Py+Sp	层状矿 [*]	2822中段10线	黄铁矿 [*]	18.204	0.001	15.566	0.001	38.302	0.002
17	XT-149	粗晶硫化物矿石	块状	Py+Sp+Ga	非层状矿 [*]	2882中段51线	方铅矿 [*]	18.263	0.001	15.602	0.001	38.433	0.002
18	XT-150	方铅矿 [*] 闪锌矿 [*] 矿石	块状,粗晶	Py+Sp+Ga	非层状矿 [*]	2822中段31线	方铅矿 [*]	18.321	0.003	15.674	0.003	38.671	0.008
19	BXK-31	黄铁矿 [*] 闪锌矿 [*] 矿石	块状,角砾状	Sp+Py	非层状矿 [*]	3002中段67线	黄铁矿 [*]	18.256	0.001	15.587	0.001	38.389	0.003
20	XT-109	方铅矿 [*] 闪锌矿 [*] 矿石	粗粒	Sp+Ga	非层状矿 [*]	2882中段31线S	方铅矿 [*]	18.292	0.002	15.632	0.002	38.541	0.006
21	XT-162	基性脉岩?	Py细脉浸染状	Py	有蚀变	2822中段23线	黄铁矿 [*]	18.273	0.001	15.618	0.001	38.481	0.003
22	XT-153	脉状矿石	脉状,角砾状	Py+Sp+Ga	下盘供给带	2822中段31线	方铅矿 [*]	18.319	0.004	15.668	0.005	38.649	0.013
23	XT-163	脉状矿石	角砾状,脉状	Py+Sp+Ga	下盘供给带	2822中段29线	方铅矿 [*]	18.303	0.002	15.657	0.001	38.605	0.004
24	XT-159	石英钠长岩	含浸染状黄铁矿 [*]	Py	蚀变不均匀	2822中段09线	黄铁矿 [*]	18.253	0.002	15.624	0.003	38.515	0.006
25	BXK-50	硅化石英钠长岩	网脉状	Cp+Py+Sp	交代过渡状	ZK4405-17, 260m	黄铁矿 [*]	18.262	0.001	15.595	0.001	38.415	0.002
26	XT-155	含黄铁矿绢云片岩	细粒浸染状	Py	片岩	2822中段07线	黄铁矿 [*]	18.237	0.002	15.605	0.002	38.43	0.006
27	XT-151	黄铁矿 [*] 含炭绢云片岩	细粒浸染状	Py	炭质片岩	2822中段31线	黄铁矿 [*]	18.27	0.001	15.586	0.001	38.392	0.003
28	XT-152	黄铁矿 [*] 含英绢云片岩	细粒浸染状	Py	炭质片岩	2822中段31线	黄铁矿 [*]	18.353	0.003	15.603	0.003	38.478	0.007
29	XT-154	黑色含矿炭质片岩	细粒浸染状	Py	炭质片岩	2822中段27线	黄铁矿 [*]	18.658	0.001	15.641	0.001	39.041	0.002
30	TXK-14	炭质绢云石英片岩	细粒浸染状	Py	炭质片岩	3002中段35线	黄铁矿 [*]	18.247	0.001	15.579	0.001	38.36	0.002

测试单位:北京核工业地质测试中心,2008;Py-黄铁矿,Sp-闪锌矿,Ga-方铅矿,Cp-黄铜矿。

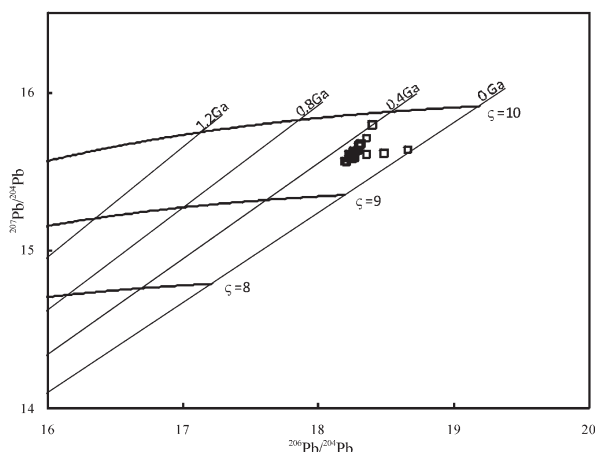


图2 锡铁山矿床基于铅同位素演化的
 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

Fig.2 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram

大体相当。

2号回归线以炭质片岩为代表,以交点C为起点,向放射性成因铅的方向偏移。以前述的回归方程,如果按照上交点年龄为0,则与 $\mu=9.527$ 的演化线相交的下交点年龄为1998 Ma;如果以上交点年龄为269 Ma,则与 μ 值为9.462的演化线相交的下交点年龄值为1860 Ma。这一年龄值与矿区东北侧广泛分布的古元古界达克达板群岩年龄大体相仿,但由于图3中缺乏较老的年龄样品的支撑,这种可能性还需要得到其他方面研究的支持。

对锡铁山矿床数百件岩石样品微量元素的统计

发现(另文详述),炭质片岩中U、Th含量较其他样品略高,含量一般 $3\times 10^{-6}\sim 4\times 10^{-6}$,最高含量达 11×10^{-6} ,石英钠长岩等样品一般为 $1\times 10^{-6}\sim 2\times 10^{-6}$ 。而片岩样品中Pb的含量一般 $>100\times 10^{-6}$ 。因此,片岩中的放射性成因铅含量的迅速增加,形成线性分布规律,主要还不是后期岩石中放射性衰变的结果。

3.2 基于Zartman与Doe铅同位素演化的物质来源解释

在Zartman与Doe的铅同位素演化图解中(图3-A),锡铁山矿床的铅同位素组成相对复杂,分布范围覆盖造山带与上地壳区域,但主要分布区尤其是两线交汇点位于造山带生长线附近,这与容矿的滩间山群及柴北缘构造环境与地质演化背景一致,锡铁山属柴北缘早古生代造山带。沿1号回归线的样品,虽然具有造山带来源,但显然有一部分物质的来源落入上地壳区间。样品的良好线性分布特征支持两种来源物质混合的可能性,一种是具有造山带来源的,另一种是具有上地壳来源的。

针对Sullivan铅锌矿床类似的铅同位素线性分布特点,Beaudoin的解释是来自造山带与来自上地壳的两端元铅来源的混合结果^[7],但未给出具体的说明。

沿2号回归线分布的样品来源与造山带有关。炭质片岩中直接的喷流迹象不明显,是喷流间歇期的沉积,其上部、下部层位中均存在火山活动,成岩物质代表造山带的特征。2号回归线反映的古元古代年龄可能显示成岩过程中有前寒武纪物质的参与。近年来柴北缘超高压变质带的研究^[7]发现,滩间

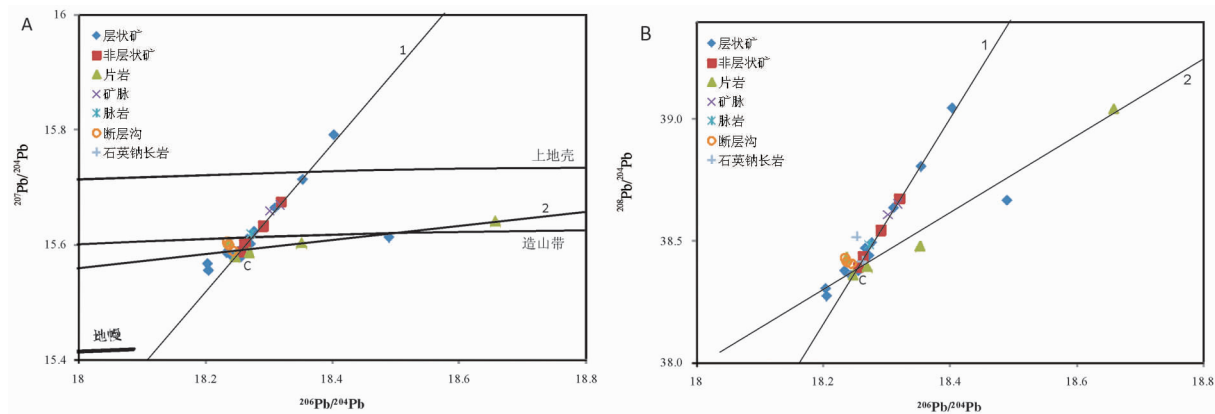


图3 锡铁山矿床铅同位素图解

(A中的演化曲线参考自Zartman and Doe等^[16])

Fig.3 Lead isotope diagram of the Xitishan ore deposit
(model curves from the Plumbotectonics model^[16])

山群 a-b 岩组更多的呈现出岛弧火山沉积岩的特点,而不是开阔的大洋,其深部可能存在早前寒武纪的变质基底,同时,锡铁山矿床以 F1 岩石圈断裂与前寒武纪紧邻,中奥陶世时期,这些相距可能不太遥远的大陆物质可能在炭质片岩中提供部分沉积物质。

3.3 成矿物质来源

通常情况下,喷流沉积矿床(SEDEX)或块状硫化物矿床(VHMS)多具有普通铅的特点,矿床中铅同位素组成范围较小。但这些普通铅大多具多阶段演化特性^[18],铅同位素呈线性分布,一些古老的块状硫化物矿床由于后期改造作用出现平缓的多阶段铅的混合线,如辽宁红透山铜矿^[19];而更多的矿床,其线性斜率往往高于由 ^{204}Pb 测量误差引起的误差线,如内蒙霍各乞^[5]、甘肃厂坝^[20-21]、澳大利亚的一些大型 SEDEX 铅锌矿^[22]、加拿大 Sullivan 铅锌矿床^[23]等。

就 1 号回归线上的样品而言,大多数样品集中于点 C 附近,落在造山带演化线附近(图 3-A),显示主要成矿物质来源的相对均一;分散的样品向高 μ 值区间移动。最集中分布的是断层沟矿段的样品,其次是非层状矿和脉状矿,层状矿石不仅有一个样品落入 2 号回归线上,在 1 号回归线上的分布也较分散。

这些高度线性相关的样品显示两种不同铅同位素组成的来源物质的混合,一种以交点 C 为代表,具有造山带特点,主要是非层状矿、下部供给脉带、网脉状石英钠长岩等,金属成矿物质具有深部来源,并与火山沉积岩大体一致,提供了成矿金属物质的大部分。这其中也包括直接由深部岩浆提供的部分物质,石英钠长岩流体包裹体研究已发现大量直接来自岩浆的流体参与成矿的证据^[13]。另一种在 1 号回归线的上端,富含放射性的端元,具有上地壳特点,提供了少量的成矿金属物质。

锡铁山容矿大理岩的研究已经揭示,大理岩原始物质是喷流沉积的产物,沉积物质来自喷流卤水与海水,二者的混合促进了碳酸盐的沉淀,早期(下部)主要来自卤水,晚期卤水的贡献更大^[11]。硫同位素的研究也支持硫主要来自海水碳酸盐的还原^[24]。以此进一步推断,代表上地壳铅同位素组成的铅很可能来源于海水,即喷流作用过程中海水提供了少量的铅或金属成矿物质。

非层状矿、下部供给脉带、网脉状石英钠长岩等未喷出部分铅同位素组成相对集中,并接近交点 C 的铅同位素组成,这些地质体未受到海水的直接影

响,海水只是通过在喷流系统的循环作用^[25]部分地贡献了成矿物质。层状矿远离喷口,直接与海水接触,海水可能更多地参与并提供金属物质,从而改变其铅同位素组成,造成铅同位素组成相对分散,部分样品落入上地壳区间。

直至近期,锡铁山矿床一直被作为是典型的沉积改造型矿床^[26],非层状铅锌矿体产于大理岩中,占锡铁山矿床铅锌探明储量 3/4 以上。铅同位素结果表明,非层状铅锌矿体以及近喷口相与绝大部分层状矿体样品的铅同位素组成分布于同一混合铅直线上,具有高度相关性,虽然分布范围有所差异,但特点相同。说明这些地质体中的铅及金属物质具有相似的成矿物质来源,和相同的演化历史,层状矿体中有少量外来物质的加入。非层状矿体、层状矿体以及网脉状蚀变岩、代表供给带的脉状矿体等,均形成于喷流沉积过程中。非层状矿体虽具有后成热液穿插的地质特点,应属形成于海底表面以下的部分,而不是后期改造的结果。

断层沟矿区的铅锌矿化产于滩间山群 a-2 岩组中,与锡铁山矿床本区的含矿层位一致。铅锌矿体呈脉状,受 S2 控制。硫化物铅同位素组成高度均一,且分布于交点 C 附近。这说明铅同位素来源与锡铁山矿区一致,即金属物质来源于含矿层或含矿层中的早先形成的矿化富集,但演化上有所差异。断层沟的铅同位素经历了后期的均一化作用,即后期改造。

4 结 论

(1)锡铁山矿床铅同位素样品依其组成与分布规律大体可分为两组,非层状矿、网脉状石英钠长岩、代表供给系统的脉体、基性岩等,以及绝大部分的层状矿体为一组,具有混合铅的特点;另一组以炭质片岩为代表,包括少量的层状铅锌矿体,富含放射性成因铅。

(2)锡铁山矿床的铅同位素具有造山带与上地壳混合来源的特点,显示喷流成矿过程中铅及成矿金属物质主要来自滩间山群及相关岩石,由喷流卤水提供,少量物质来自海水,即海水循环淋滤了岩石中的金属物质,同时海水也提供了部分来源;在喷流系统的远端或喷流沉积作用的间歇期,前寒武纪变质岩也可能提供了少量物质。

(3)非层状矿体以及网脉状石英钠长岩与层状矿体具有一致的铅同位素组成,而且更加均一。铅同

位素的研究支持非层状矿体属喷流沉积系统的一部分,形成于喷流沉积过程中,属未喷出海底的热液矿体,而不是后期改造的结果。

(4)断层沟地区铅同位素组成范围集中,与两回归线交点的同位素组成非常接近。代表后期改造的产物,铅同位素组成在改造过程中得到进一步的均一化。

参考文献(References):

[1] 郭介人, 任秉琛, 张莓. 青海锡铁山块状硫化物矿床的类型及地质特征[J]. 西安地质矿产研究所所刊, 1987, 20: 1-70.
Wu Jieren, Ren Binchen, Zhang Mei. The type and geology characteristic of Xitieshan massive sulfide deposit, Qinghai [J]. Publication of Institute of Geology and Mineral, 1987, 20:1-70(in Chinese).

[2] 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 等. 锡铁山矿床的找矿潜力与找矿方向[J]. 地质与勘探, 2006, 42(3):18-23.
Zhu Xinyou, Deng Jiniu , Wang Jingbin , et al. The exhalation-sedimentary system of Xitieshan lead-zinc deposit, Qinhai Province [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(3):18-23 (in Chinese with English abstract).

[3] 王登红. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿硫、铅同位素地球化学[J]. 地球化学, 1996, 25(6):582-589.
Wang Denhong. Sulfur and lead isotopic geochemistry of the Ashele volcanogenic massive sulfide deposit, Xinjiang, China[J]. Geochimica, 1996, 25(6):582-589(in Chinese with English abstract).

[4] 王焰, 张旗, 许荣华, 等. 北祁连白银矿田火山成因块状硫化物矿床成矿金属来源讨论[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4):46-50.
Wang Yan, Zhang Qi, Xu Ronghua, et al. A discussion on the metalsource of Baiyin volcanic hosted massive deposit from north Qilian mountains [J]. Geological Science and Technoloty Information, 2001, 20(4):46-50(in Chinese with English abstract).

[5] Zhu Xiaoqing, Zhang Qian, He Yuliang, et al. Lead isotopic composition and lead source of the Huogeqi Cu-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (4):528-539.

[6] 邱家骥, 杨巍然, 夏卫华. 南祁连早古生代海相火山岩及铜、多金属矿床成矿条件及找矿方向[C]// 夏林圻等主编. 祁连山及邻区火山作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1998:111-163.
Qiu Jiaxiang, Yang Weiran, Xia Weihua. Early Paleozoic marine volcanic rocks and the ore forming environment of the copper deposit[C]//Xia Lingqi(ed.). The volcanic rocks and metallogenic of Qilian mountain. Beijing: Geological Publishing House, 1998:111-163(in Chinese with English abstract)

[7] 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 等. 中国西部柴北缘-阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨[J]. 地学前缘, 2003, 10(3):291-314.
Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Meng Fancong, et al. Ultrahigh pressure eclogites of the north qaidam and altun mountains NW China and their Protoliths [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 291-314(in Chinese with English abstract).

[8] 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 柴达木盆地北缘柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2007, 23(8):1861-1875.
Wu Cai lai, Gao Yuanhong, Wu Suoping, et al. Zircon SHRIMP

U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8):1861-1875(in Chinese with English abstract).

[9] 张建新, 孟繁聪, 董国安. 柴达木盆地北缘锡铁山副片麻岩所记录的多期构造热事件[J]. 地质通报, 2007, 26(6):631-638.
Zhang Jianxin, Meng Fancong, Dong Guo'an. Polyphase tectonothermal event recorded in the Xitieshan paragneisses at the northern margin of the Qaidam basin, China [J]. Geologica Bulletin of China, 2007, 26(6): 631-638(in Chinese with English abstract) .

[10] 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 等. 锡铁山矿床两类喷流沉积成因的铅锌矿体研究[J]. 矿床地质, 2006, 25(3):252-262.
Zhu Xinyou, Deng Jinniu , Wang Jinbin , et al. Study of two types of ore bodies in Xitieshan lead-zinc SEDEX deposit, Qinghai Province [J]. Mineral Deposit, 2006, 25 (3):252-262 (in Chinese with English abstract).

[11] 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 等. 锡铁山铅锌矿床网脉状蚀变管道相的识别与研究[J]. 地球化学, 2007, 36(1):37-48.
Zhu Xinyou, Deng Jiniu, Wang Jinbing, et al. Identification and study of stockwork altererd pipe of Xitieshan lead-zinc deposit, Qinghai Province[J]. Geochimica, 2007, 36(1):37-48(in Chinese with English abstract).

[12] 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 等. 锡铁山喷流沉积矿床卤水与海水的相互作用[J]. 地质论评, 2007b 53(1):52-64.
Zhu Xinyou, Deng Jiniu, Wang Jinbing, et al. Study on marble of the Xitieshan lead-zinc SEDEX deposit, Qinghai Province: Interaction between Exhaled Brine and Seawater [J]. Geological Review, 2007, 53(1):52-64(in Chinese with English abstract).

[13] Wang L J, Zhu X Y, Wang J B, et al. Preliminary study of fluid inclusions and mineralization on the Xitieshan sedimentary-exhalative (SEDEX) lead-zinc deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(4):801-807.

[14] Faure G. Principles of Isotope Geology[M]. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York. 1986.

[15] 赵凤清, 郭进京, 李怀坤. 青海锡铁山地区滩间山群的地质特征及同位素年代学[J]. 地质通报, 2003, 22(1):28-31.
Zhao Fengqing, Guo Jinjing, Li Huaikun. Geological characteristics and isotopic age of Tanjianshan group along northern margin of Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(1): 28-31 (in Chinese with English abstract).

[16] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics -the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75:135-162.

[17] Beaudion G. Proterozoic Pb isotope evolution in the belt-Purcell basin: constraints form syngenetic and epigenetic sulfide deposits[J]. Economic Geology, 1997, 92:343-350.

[18] 韩发, 孙海田. Sedex 型矿床成矿系统 [J]. 地学前缘,1999, 6(1): 139-150.
Han Fa, Sun Haitian. Metallogenic system of SEDEX Deposits:a review[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1):139-150(in Chinese with English abstract).

[19] 张森, 赵东方, 吕广俊, 等. 辽宁红透山铜锌矿床地质特征及成因浅析[J]. 地质与资源, 2007, 16(3):173-182.
Zhang Sen, Zhao Dongfang, Lv Guangjun, et al. Geology and genesis of the Hongtoushan copper-zinc deposit in Liaoning Province [J]. Geology and Resources, 2007, 16 (3):173-182(in

- Chinese with English abstract).
- [20] Ma Guoliang, Beaudoin G, Qi Sijing, et al. Geology and geochemistry of the Changba SEDEX Pb–Zn deposit, Qinling orogenic belt, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39:380–395.
- [21] 俞中辉, 祝新友, 童随友, 等. 西成地区铅–锌矿、金矿硫铅同位素特征及成矿关系的研究[J]. *矿产与地质*, 2008, 22(3):196–203.
- Yu Zhonghui, Zhu Xinyou, Tong Suiyou, et al. Study on characteristics of S, Pb isotopes of the Pb–Zn deposits, Au deposits in Xicheng area and their metallogenic relationship [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2008, 22 (3):196–203 (in Chinese with English abstract).
- [22] Chapman L H. Geology and mineralization styles of the George Fisher Zn–Pb–Ag deposit, Mount Isa, Australia [J]. *Economic Geology*, 2004, 99:233–255.
- [23] Beaudoin G. The lead isotope composition of the Sullivan deposit [C]//Lydon J W (ed). *The Geological Environment of the Sullivan Deposit*, British Columbia, Special Publication 1. 2000:574–581.
- [24] 祝新友, 王莉娟, 朱谷昌, 等. 青海锡铁山铅锌矿床硫同位素地球化学研究——深源与海水硫的混合 [J]. *岩石学报*, 2010, 26 (3):657–666.
- Zhu Xinyou, Wang Lijuan, Zhu Guochang, et al. Characteristics of sulfur isotope geochemistry of Xitieshan lead–zinc deposit, Qinghai: The mixing of sulfurs from hydrothermal and seawater[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (3):657–666 (in Chinese with English abstract).
- [25] Yang K, Scott S D. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea–floor hydrothermal system [J]. *Nature*, 1996, 383 (6659): 420–423.
- [26] 邓达文, 孔华, 奚小双. 青海锡铁山热水沉积型铅锌矿床的地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(4):310–313.
- Deng Dawen, Kong Hua, Xi Xiaoshuang. Geochemistry of the Hydrothermal Sedimentary Xitieshan Pb–Zn Deposit, Qinghai Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(4): 310–313(in Chinese with English abstract).

The genesis of the Xitieshan SEDEX lead–zinc deposit in Qinghai Province: lead isotope evidence

ZHU Xin-you¹, WANG Li-juan¹, ZHU Gu-chang¹,
DEN Jie-niu², FAN Jun-chang², ZHANG Qiang²

(1. *Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100012, China*; 2. *China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China*; 3. *West Non-ferrous Metals Resource Mining Co., Ltd., Xining 831000, China*)

Abstract: The Xitieshan superlarge Pb–Zn deposit is located in the north margin of Qaidam basin, Qinghai Province, and originally contained about 50 million tons of ore with the grade of 8% Zn and 10% Pb. It was formed in a rift basin in the Ordovician period. It has been recognized that there is a complete exhalation sedimentary system that includes breccias pipe–stockwork, non–bedded and bedded ores and marble from exhalation sediments. Pb isotope compositions of sulfides can be divided into two groups, one consists of most of the samples and includes most of the bedded ore and all of the non–bedded ore, pipe breccias and veins in marble under the non–bedded ore. They assume a linear array characterized by $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) = 1.254(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) - 7.296$ with the regression coefficient of 0.977 ($n=19$). The other group includes carbonaceous schist occurring above the marble and non–bedded ore and pyrite from bedded ore, and assumes a linear array of $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) = 0.123(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}) + 13.347$ with the regression coefficient of 0.902 ($n=5$). The Pb isotope composition of the intersection point of the two arrays is $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.253$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.590$, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.370$. A study of Pb isotope geochemistry suggests that the first array, consisting of most of the ore samples, represents a two–component mixing line in which the less radiogenic component can be identified as orogenic lead reservoir probably coming from Tianjianshan Group through the exhalation brine. The radiogenic end–member can be identified as upper crust lead reservoir probably derived from seawater. The lead and the ore–forming metals mainly came from the exhalative brine during the sedimentary–exhalative metallization, with a small amount derived from the seawater. Precambrian metamorphic rocks might also have contributed a little material in the distal vents of the exhalative system or during the intermission of exhalation. The bedded ore body and the non–bedded ore body, which endured the same geological evolution, were all formed during the exhalative sedimentation. Instead of being generated from the late reformation, the non–bedded ore body was probably hydrothermal ore body without experiencing submarine eruption. The mineralization in Duancenggou was relocated along the schistosity in the late reformation, and the lead isotope was further homogenized.

Key words: Qinghai Province; lead–zinc deposit; SEDEX; lead isotope; ore forming model; source of ore material

About the first author: ZHU Xin-you, male, born in 1965, senior engineer, engages in the study of lead–zinc mineral deposits and metallogenic prediction; E-mail: zhuainyou@gmail.com.