



# 锡铁山喷流沉积矿床卤水与海水的相互作用

祝新友<sup>1)</sup>, 邓吉牛<sup>2)</sup>, 王京彬<sup>1)</sup>, 林龙军<sup>1)</sup>, 樊俊昌<sup>2)</sup>, 孙淑秋<sup>2)</sup>

1) 北京矿产地质研究所, 北京, 100012; 2) 西部矿业股份有限公司, 西宁, 810000

**内容提要:**锡铁山大型铅锌矿床发育有完好的喷流沉积系统, 赋矿地层产状倒转。与成矿关系密切的大理岩延长约 2km, 延深约 1km, 往深部厚度增大, 至代表管道相的网脉状蚀变岩, 厚度迅速减薄、尖灭。角砾状非层状铅锌矿体赋存于紧邻网脉状蚀变岩的厚层状大理岩中, 条带状层状矿体赋存于外侧条带状大理岩的下盘。对锡铁山矿床两条典型剖面系统的地质地球化学研究表明, 近喷口相大理岩与远离喷口相大理岩相比, 具有相似的变化规律。以反映远端沉积的剖面为例, 自下往上, 条带状矿体→条带状大理岩→块状大理岩,  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、Sr、B、Tl 以及  $MgO/(CaO + MgO)$ 、 $Na_2O/(Na_2O + K_2O)$  比值等逐渐降低, Sr/Rb、Sr/Ba 比值等迅速降低, REE 总量降低, 分异增强, Eu 异常减弱, Ce 异常更加明显;  $\delta^{18}O_{SMOW} = 10.1\text{‰} \sim 12.5\text{‰}$ , 向上增高,  $\delta^{13}C_{V-PDB} = -0.9\text{‰} \sim 0.2\text{‰}$ ; 大理岩  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7113 \sim 0.7148$ , 低于矿石方解石的 0.7146 ~ 0.7147, 高于同时期的正常海相灰岩。综合这些地质地球化学特征, 锡铁山矿床的容矿大理岩明显不同于正常海相沉积碳酸盐岩, 而是介于喷流卤水与海水特征之间, 上部的大理岩中有更多的海水参与。以 Sr 同位素数据计算出本区大理岩来自海水的组分约占 1/3, 来自卤水的组分约占 2/3, 大理岩总体上仍主要分布于喷口附近, 更多地受到卤水的影响。通过大理岩的地质地球化学研究揭示出, 矿床中发育有两条同生断层, 一条沿以网脉状蚀变带代表的管道相分布, 另一条分布于 25 线附近, 共同制约着大理岩与成矿物质的堆积。锡铁山矿床可能存在着规模巨大的层状矿体, 其分布范围可能超越一直作为重要找矿评价标志的大理岩。

**关键词:** 铅锌矿; 大理岩; SEDEX; 喷流沉积矿床; 稀土元素; 锶同位素; 青海

锡铁山铅锌矿床位于青海省海西州大柴旦镇, 产于柴达木地块北缘早古生代裂陷的火山—沉积岩系中。自 1956 年发现以来, 开展了大量的地质勘探和研究工作, 至 2004 年, 已累计探明铅锌资源量 (C + D) 500 余万吨, 是中国最大规模的铅锌矿床之一。矿床成因类型为海底喷流沉积型 (SEDEX) (邓达文等, 2003; 邓吉牛, 1999a; 汪劲草等, 2000)。长期以来, 作为锡铁山矿床主要找矿评价标志的大理岩一直被认为是正常海相沉积岩 (邓吉牛, 1999b; 邬介人等, 1987; 邓达文等, 2003), 这套大理岩也作为区域上滩涧山群 a 岩组上段的标志层位。已探明的硫化物矿体几乎都与大理岩密切相关, 或产于大理岩中, 或产于大理岩边部。碳酸盐岩多形成于正常海相沉积, 在很多 SEDEX 矿床中也或多或少地存在与喷流作用有关的碳酸盐岩或碳酸盐矿物, 这些碳酸盐岩普遍富含 Mg 质与 Fe 质, 形成白云石、白云岩或铁白云石 (岩) 等。近年来, 通过对古巴 Castella-

nos (Valdes-Nodarse, 1998)、加拿大 Sullivan (Lydon et al., 2000) 等矿床碳酸盐岩的地球化学研究, 揭示出喷流卤水与海水相互作用影响的过程。对锡铁山容矿大理岩的深入研究有助于深化成矿规律的认识和深部的探矿, 拓展找矿空间, 对研究喷流作用过程中海水与卤水的相互作用过程均具有重要的意义。

## 1 区域地质与矿床地质特征

赋含锡铁山铅锌矿体的上奥陶统滩涧山群呈北西向断续分布于柴达木盆地北缘 (图 1), 为一套以绿片岩为主的早古生代祁连—柴达木间分裂的洋盆—岛弧火山沉积岩系 (张德全等, 2005), 并经其后的俯冲与碰撞作用形成的浅变质岩系, 其中发育有以基性为主的火山碎屑岩和火山岩, 其单颗粒锆石 U-Pb 年龄 486Ma (赵风清等, 2003)。北东侧分布的中—新元古界达肯大板群, 向南仰冲于滩涧山群之上, 沿着接触断层附近, 在整个柴达木盆地北

注: 本文为国家科技部科技攻关项目 (编号 2003BA612A-07) 和国家自然科学基金资助项目 (批准号 40672061) 的成果。

收稿日期: 2006-03-10; 改回日期: 2006-08-16; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 祝新友, 男, 1965 年生。教授级高级工程师, 主要从事矿床地质与勘查研究。通讯地址: 100012, 北京朝阳区安外北苑地质研究所; 电话: 010-84927641; Email: zhuxinyou@tom.com。

缘,断续分布有早古生代深度俯冲—回返形成的榴辉岩等超高压变质岩石,构成柴北缘超高压变质带(杨经绥等,2003;吴才来等,2004;宋述光等,2004)。西南侧为新生代覆盖,在滩涧山群之上,发育有泥盆系—石炭系(D—C)的紫色砾岩。

矿区容矿的滩涧山群自下至上(北东—南西)分3套,包括下部火山岩系(a—b层),紫红色砂岩层(c层)以及上部火山岩系(d层)。这三部分具有一定独立性的演化特点,形成于不同的构造环境,以断层关系相接触。其中,滩涧山群 a 岩组( $O_3tj^a$ )下部火山碎屑岩互层段( $O_3tj^{a-1}$ )主要岩性为灰绿色—深灰绿色斜长角闪片岩、浅灰绿色变英安质凝灰岩,夹少量薄层大理岩。上部正常沉积岩段( $O_3tj^{a-2}$ )主要岩性为灰黑色—深灰色含炭绿泥石英绢云片岩、白色薄层—中厚层块状大理岩。滩涧山群 b 岩组( $O_3tj^b$ )为中基性火山碎屑岩,主要岩性为深灰绿

色、灰绿色含钙质条带斜长绿泥片岩、石英绢云片岩、绢云石英片岩等。在该层位中,矿床深部存在硅化、钠长石化及粘土化等蚀变。滩涧山群 c 岩组( $O_3tj^c$ )紫红色砂岩段,主要岩性为紫红色粉砂岩—细砂岩,夹灰绿色粉砂岩—细砂岩和少量砾岩。滩涧山群 d 岩组( $O_3tj^d$ )以中基性火山碎屑岩为主夹部分熔岩、少量薄层大理岩,厚度巨大。锡铁山矿床铅锌矿体赋存于滩涧山群 a-2 层沉积岩段中,围岩为大理岩和绢云石英片岩,随地层倾向南西,总体产状大致为  $240^\circ \angle 70^\circ$ 。在柴达木北缘地区,该层位的大理岩仅局部小规模见于锡铁山等少数地区,区域上并不存在稳定的碳酸盐岩层。

锡铁山矿床已发现的铅锌矿体主要赋存于大理岩中或在大理岩边部,硫化矿体可按照产状、结构构造等地质特点大体分为非层状矿体与层状矿体两类。非层状矿体分布于西北侧深部的厚层块状大理

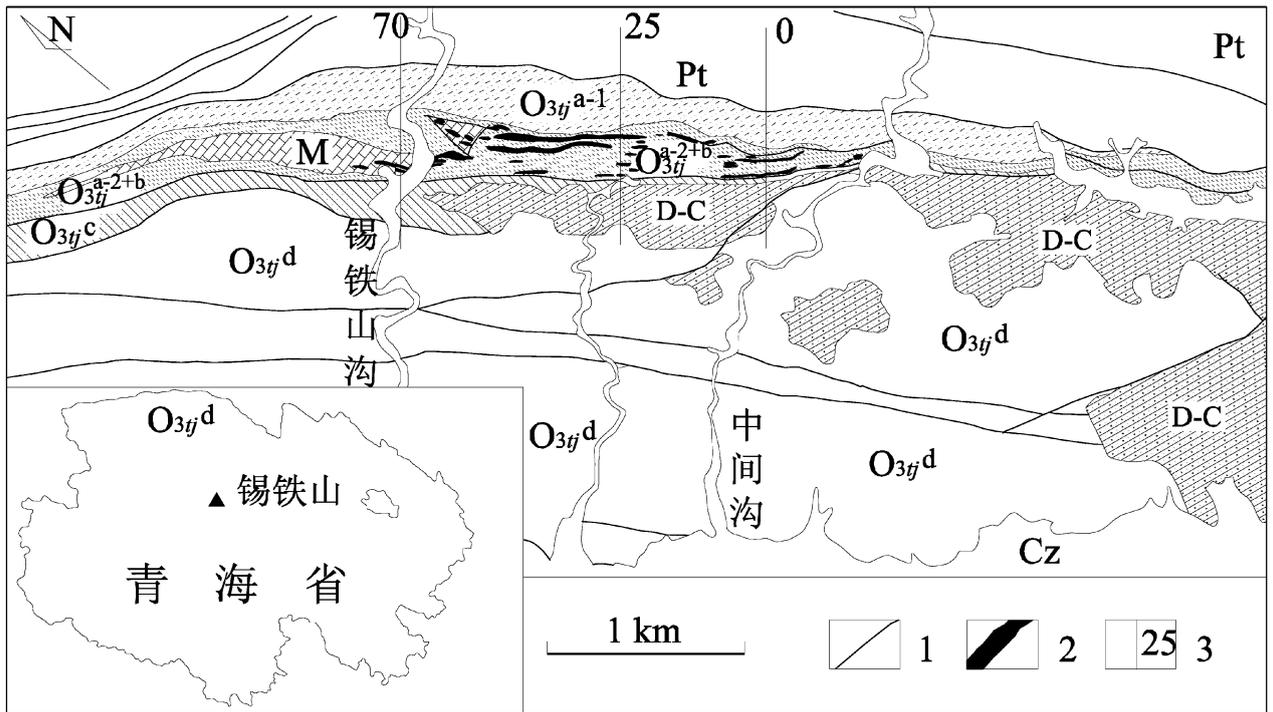


图 1 锡铁山矿床地表地质简图(据锡铁山矿床勘探报告 1: 10000 地质图<sup>①</sup>简化)

Fig. 1 Sketch geological map of the Xitishan area (Simplified from the 1: 10000 Geological Map in "the Exploration Report of the Xitishan Deposit"<sup>①</sup>)

Cz—新生代盖层;D—C—泥盆系—石炭系阿木尼克组紫红色砾岩;上奥陶统滩涧山群:  $O_3tj^d$ —d 岩组中—基性火山碎屑岩,  $O_3tj^c$ —c 岩组紫红色砂岩;  $O_3tj^{a-2+b}$ —a-2 岩组沉积岩与 b 岩组火山碎屑岩;M—大理岩;  $O_3tj^{a-1}$ —a-1 岩组火山沉积岩;Pt—元古宇达肯大板群变质岩;1—断层;2—铅锌矿体(铁帽);3—勘探线及编号

1—Cenozoic. D—C—red conglomerate. Devonian—Carboniferous Armunike Formation. Upper Ordovician Tanjianshan Group;  $O_3tj^d$ —basic—intermediate volcanic—clastic rocks, the d—Member;  $O_3tj^c$ —purple sandstone, c—Member;  $O_3tj^{a-2+b}$ —sedimentary rocks of the a-2—Member and volcanic rocks of the b—Member; M—marble;  $O_3tj^{a-1}$ —volcanic—sedimentary rocks, the a-1—Member. Pt—Proterozoic metamorphic rocks, Dakendaban Group. 1—fault;2—lead—zinc ore-body; 3—exploring line

岩中,层状矿体分布于南东侧浅部的条带状大理岩下盘,二者间的界线是相对的。研究表明非层状矿体是喷流沉积系统近喷口相未喷出部分形成的矿石(祝新友等,2005a,b),而层状矿体是远离喷口由卤水沉积的产物。原生矿体中,硫化物矿物除主要矿物闪锌矿、方铅矿、黄铁矿外,还见有磁黄铁矿、脆硫锑铅矿、黝铜矿、白铁矿及金、银矿物等,脉石矿物为方解石,局部有少量的石英和绢云母等。

网脉状蚀变带分布于矿区深部,主要岩性为石英钠长石岩,延长 > 2km,宽 > 300m,与厚层大理岩及非层状矿体一同向东南方向侧伏。大量的地质地球化学研究揭示石英更长石岩是一种交代岩,具有网脉状蚀变特征,代表着喷流沉积系统的管道相特点。根据地层、容矿大理岩与矿体的关系以及喷流沉积系统的恢复,锡铁山容矿地层 a—b 岩段产状倒转。在下文中,我们以恢复原始产状后的正常层序论述和讨论。

## 2 锡铁山矿床大理岩地质特征

锡铁山矿床容矿大理岩分布于滩涧山群 a-2 岩组中,与滩涧山群总体产状一致,地表 NW—SE 向断续出露长约 3500m,空间分布与铅锌矿关系密切,铅锌矿位于大理岩中或其下盘(原始下状,下同)。在锡铁山沟(约 65 线)以西出露宽达 200m,向南东方向逐渐变薄,在无名沟—中间沟之间尖灭,中间沟—断层沟段零星出现。不同中段坑道地质平面所揭示的大理岩分布较为完整(图 2),与绿片岩整合产出,厚度变化大,宽 50 ~ 150m,长 1800m,向两侧尖灭。

以 2942 中段为例(图 2),大体以 25 线为界,大理岩分为两部分:西北部,大理岩厚度大,宽 100 ~ 150m。以厚层块状为主,白色,常见有弱—中等发育的条带,条带成分主要是白云母,含量 < 5%。大理岩多显碎裂状,尤其是矿体附近。其中赋含的矿体均呈不规则状、非层状与大理岩呈不整合接触,矿体中普遍发育有热水角砾岩,结晶颗粒粗大,呈明显的热液成矿特点。大理岩与矿体间以角砾状、碎裂状迅速过渡,块状大理岩—碎裂状大理岩—角砾状矿体—块状矿体。局部见有菱锰矿(在地表锡铁山沟以西见有氧化锰银矿化)。

东南部,大理岩厚度小,一般宽 < 50m,向深部宽度增大。大理岩呈条纹条带状,条带为细粒白云母,也有部分有机质条纹,硫化物主要是细粒黄铁矿,靠近层状矿体旁侧的大理岩中条带状黄铁矿含量迅速增多。东南部地区的硫化物矿体呈层状(图 2),矿体中发育有由黄铁矿、闪锌矿、方铅矿及方解石相间而成的条带状构造,与条带状大理岩整合接触。条带状矿体位于大理岩的下盘(原始产状,容矿地层倒转),与下盘的绿片岩整合接触,其间分布有条纹条带状的深灰色钙质绢云片岩。

大理岩延深大,控制延深 > 1000m,在延深方向上(横剖面)的特点与平面特点相似,总体呈楔形状,浅部薄,深部厚,在往深部达到一最大厚度后,在网脉状蚀变带附近迅速向更深部尖灭(图 3)。浅部大理岩以条纹条带状为主,共生条带状矿体,深部大理岩为厚层状、角砾状,与非层状铅锌矿体共生。

本文重点选择两条剖面开展工作,其中 25 勘探线钻孔(ZK4425-11)下部为强烈蚀变的绿片岩和网

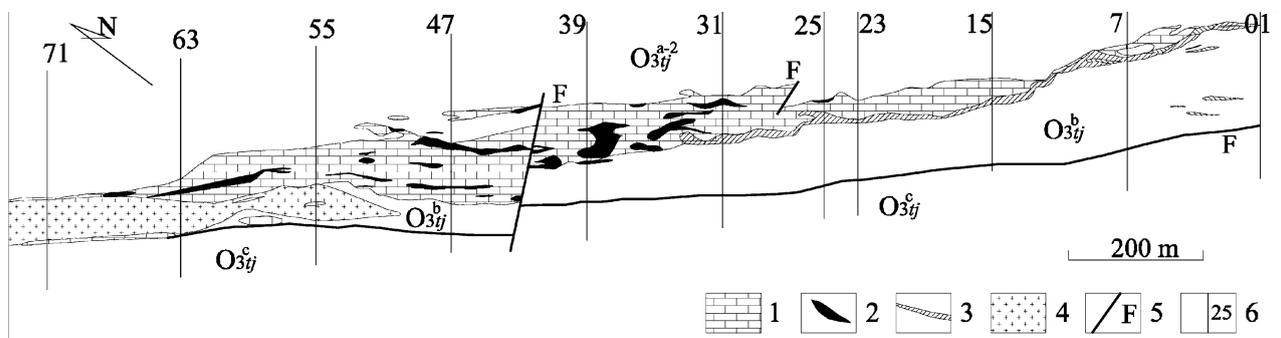


图 2 锡铁山矿床 2942 中段地质平面图(据西部矿业公司锡铁山矿床 2942 中段 1/500 地质图简化)

Fig. 2 Geological map of 2942m level, Xitishan lead-zinc deposit (Simplified from "the 1: 500

Geological Map of the 2942 Plane, the Xitishan Deposit" made by the Western Mining Co. Ltd.

1 - 大理岩; 2 - 非层状铅锌矿体; 3 - 条带状层状铅锌矿体; 4 - 网脉状蚀变岩(石英钠长石岩); 5 - 断层; 6 - 勘探线及编号; 其他同图 1  
1 - marble; 2 - unbedded lead-zinc ore-body; 3 - bedded ore-body; 4 - stockwork rock (quartz-albite rock); 5 - fault; 6 - exploring line; others same to those in Fig. 1

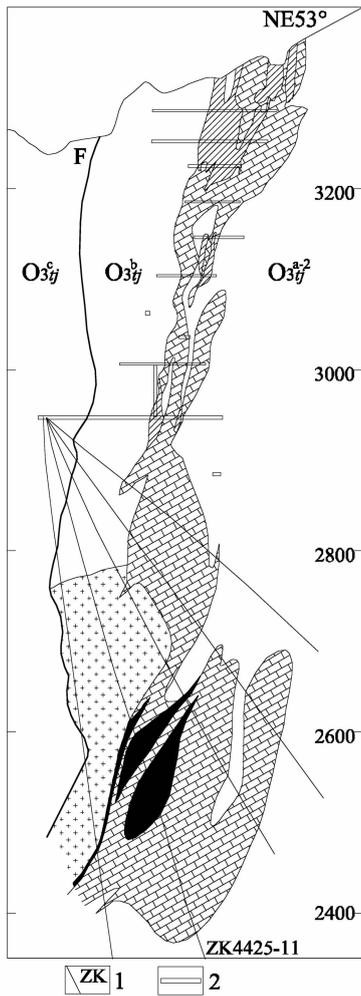


图 3 锡铁山矿床 25 线剖面示意图

Fig. 3 Geological section of 25 exploring line  
纵向数据为海拔高程(m)。8—坑道;9—钻孔;  
10—断层;余同图 2

The longitudinal numbers are sea-level elevation(m);  
1—drill; 2—tunnel; others the same to those in Fig. 2

脉状蚀变岩(钻孔中为浅部,图 3),与滩涧山群 c 岩组(紫红色砂岩)断层接触;上部大理岩(钻孔中为深部)厚 > 100m,呈白色,厚层块状,含多层非层状

表 1 锡铁山矿床大理岩的化学成分及比值统计

Table 1 The chemical composition of the marble in the Xitietan deposit

位置	样品数	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Zn	Pb	Cu	As	Sb	Ag	Rb
4425-11	9	0.71	0.63	0.13	0.10	31	15	8.9	2.4	0.2	0.1	6.5
2942-23	12	0.78	1.29	0.11	0.01	578	104	8.0	21.3	1.5	1.4	6.0
	样品数	Sr	Ba	B	Tl	W	Sn	Bi	Mo	Cd	Co/Ni	Zn/Pb
4425-11	9	177.7	33.6	6.4	0.1	0.38	0.75	0.06	0.63	0.18	0.16	2.40
2942-23	12	197.3	24.2	8.4	0.2	1.25	1.41	0.15	0.50	7.35	0.23	6.32
	样品数	Zn/Cu	Zn/Cd	Pb/Ag	Sr/Rb	Sr/Ba	δEu	δCe	CaO	MgO	ΣREE	La/Yb
4425-11	9	4.89	176.08	154.59	34.67	6.16	1.28	0.81	49.61	0.49	14.10	6.65
2942-23	12	55.49	85.72	97.79	55.74	10.62	1.34	0.85	47.85	0.55	19.61	8.41

注:含量单位 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 为%,其他为(×10<sup>-6</sup>)。

粗晶铅锌矿体,与矿体接触部位发育角砾状或碎裂状构造。其中网脉状蚀变带即石英钠长岩代表着喷流沉积系统管道相,而大理岩则是近喷口相沉积。2942 中段 23 线坑道剖面(图 2,下简称 2942-23),矿体呈层状,发育条带状构造,与围岩整合接触,矿体与滩涧山群 c 岩组(紫红色砂岩)间的绿泥石英片岩未遭蚀变,与矿体接触部位有一层灰黑色富含黄铁矿、炭质、钙质的千枚岩。矿体上盘(NE 方向)为大理岩,厚约 40m,分别呈深灰色条纹状(含黄铁矿约 5%,富含炭质)、灰白色条纹状、条带状、弱条带状、白色厚层块状。该剖面代表远端沉积相。

锡铁山矿床矿体的分布与大理岩关系密切,大理岩连续延长约 2km,延深约 1km。以大理岩水平宽度所作的纵投影图如图 4。由于地层及矿体倾角陡,大理岩的水平宽度的变化规律可大体代表其厚度的变化,图 4 可近似反映原始喷流沉积过程中的水平图解。大理岩分布于网脉状蚀变带的外侧(浅部),由浅往深厚度有增大趋势,至网脉状蚀变带,大理岩厚度迅速减小、尖灭。网脉状蚀变带的长轴延展方向代表着主同生断裂的大体位置(F1),在 25 线附近,两侧大理岩有明显的差异,其间大理岩厚度薄,推测存在一条次级同生断层(F2)。

不同类型矿体、网脉状蚀变岩以及大理岩具有“三位一体”的分布特点,大规模发育网脉状蚀变时大理岩厚度迅速减小,粗晶的非层状铅锌矿体往往分布于厚层大理岩中,距离网脉状蚀变带也较近;细粒条带状的层状铅锌矿体见于纵投影图(图 4)的右上部,相伴的条带状大理岩厚度小,或没有大理岩。

### 3 大理岩的地球化学

#### 3.1 常量与微量元素地球化学

多条横穿大理岩与矿体的剖面具有共同的地球化学特点,随大理岩从条带状向上部层位变为厚层

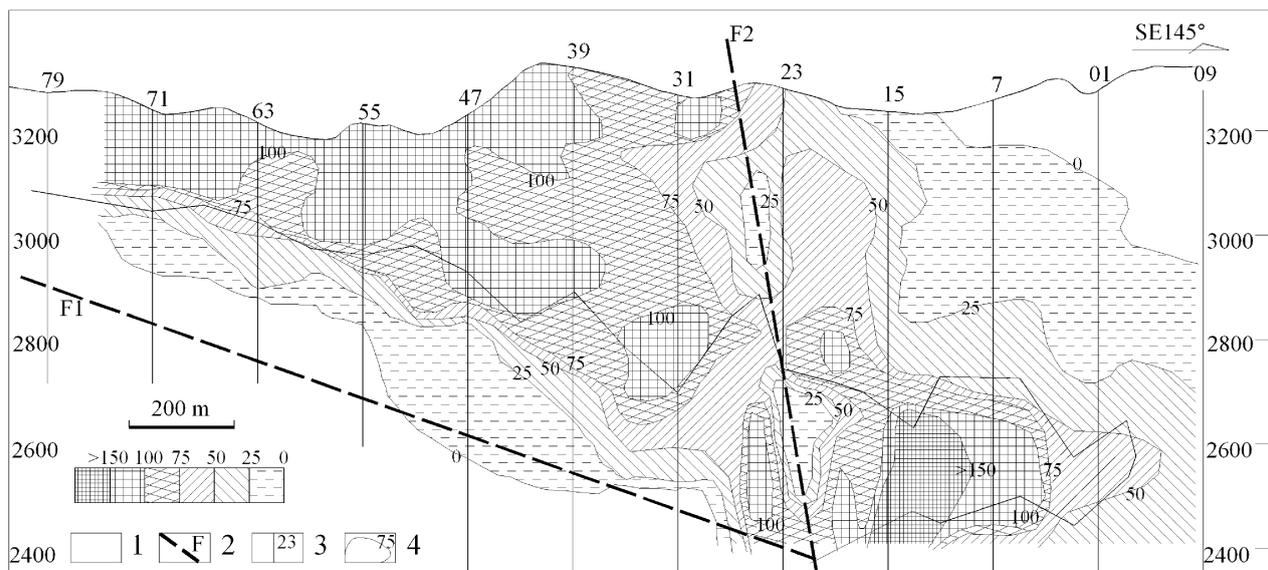


图4 锡铁山矿床大理岩宽度变化的纵投影图

Fig. 4 Longitudinal projecting section, the marble width and stockwork rock

(根据锡铁山矿床 03~83 线勘探线剖面图数据统计,资料截止至 2005 年 4 月。生长断层的位置是推断的,网脉蚀变带的下界未控。纵坐标为海拔高程,单位 m,横坐标以勘探线位置表示,比例尺同纵坐标)。1—网脉状蚀变带;2—同生断层;3—勘探线及编号;4—大理岩等宽度线(m)

(Statistics of the marble width in line 03~83, data cited till April 2005. The position of grow fault is deduced, and the lower boundary of the stockwork not restricted. The longitudinal numbers are sea-level elevation(m); the horizontal numbers at the top are No. s of exploration line; 1—stockwork alteration belt; 2—synsedimentary fault; 3—exploring line and its No.; 4—isowidth line of the marble(meter)

块状, CaO 含量增高, MgO 降低。反映碎屑物质含量的  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$  以及  $Na_2O$ 、 $K_2O$  在下部层位大理岩中明显高, 上部降低。大理岩中, 剖面底部  $MgO/(CaO + MgO)$ 、 $Na_2O/(Na_2O + K_2O)$  比值较高, 向上减小, 显示出碳酸盐岩中白云质的成分在剖面下部相对高, 富含钠质。以盐酸溶样分析的结果也揭示出完全相似的情况。

大理岩的 Sr 含量向剖面上部增高, Ba 在大理岩的底部尤其是矿体附近有明显的增高, 往上部逐渐降低, Rb 与 K 间有强的线性关系 ( $r = 0.8512$ ), 分布于大理岩的底部, 由此引起剖面自下而上 Sr/Rb、Sr/Ba 比值上升。

Tl、B 是反映热液作用与海底喷流作用的重要的指示元素, 所有剖面均反映出网脉状蚀变带高于大理岩, 层状矿体附近高, 大理岩底部较上部层位高, 在层状铅锌矿体下部及网脉状蚀变岩中见有少量电气石。Co/Ni 比值的变化特点与此相同, 往上比值变小, 但 2942-23 剖面中, 中部的条带状大理岩 Co/Ni 比值最低, 矿体及上部块状大理岩较高。

近喷口与远喷口的大理岩化学成分有明显的差异, 如表 1, 反映近喷口相的 ZK4425-11 钻孔剖面大理岩以白色块状为主, 杂质及微量元素含量相对低,

只有反映近管道相网脉状蚀变带及旁侧某些元素及比值较高, 如  $Na_2O$ 、Ba 以及 Zn/Cd、Pb/Ag 比值。而远离喷口的条带状大理岩中  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、Zn、Pb、As、Sb、Ag、Sr、B、Tl、W、Sn、Bi、Cd 和 Co/Ni、Zn/Pb、Zn/Cu、Sr/Rb、Sr/Ba、MgO、 $\Sigma REE$ 、La/Yb 比值均有明显增高, 一方面反映出远端大理岩中含有较高量的泥质条纹条带和较多的硫化物, 含矿卤水对大理岩有较强烈的影响。详细分析结果如表 2。

### 3.2 稀土元素 (REE)

全岩稀土分析结果如表 3, 以盐酸溶样的分析结果与全岩分析结果相似。由于受到其中所含硅酸盐矿物的影响, 富含硅质的岩石具有明显的高稀土总量和较强烈的分异, 但大体趋势仍较明显。反映近喷口相的 ZK4425-11 剖面, 层位下部的网脉状蚀变带稀土总量高, 分异强, 有强的 Eu 负异常 (图 5a-1)。层位上部的块状大理岩稀土含量低, 分异弱, 且上、下部层位大理岩 REE 特点较为一致, 有弱 Eu 正异常。反映远离喷口的 2942-23 坑道剖面, 条带状铅锌矿体稀土含量低, 下部层位的条带状大理岩稀土含量高, 分异强烈, Eu 正异常明显 (图 5b-2), 层位顶部的块状大理岩稀土总量有所提高 (图 5b-3), Eu 异常不明显。大理岩的  $\delta Ce$  值自下往

表 2 锡铁山矿床剖面 2942-23 及钻孔 ZK4425-11 中大理岩造岩元素和微量元素成分表

Table 2 Major and trace elements concentration of marble from the Section 2942-23 and the Drill ZK4425-11, Xitieshan lead—zinc deposit

序号	委托号	特征	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Zn	Pb	Cu	As	Sb	Ag	Rb	Sr	Ba	W	Sn	Bi	Mo	B	Tl	Cd
1	XK-33	条带状	1.96	4.15	40.31	0.87	0.11	0.02	3396	574.5	17.35	74.00	7.70	7.50	6.02	170.90	26.46	2.95	4.30	0.19	0.90	8.70	0.26	42.19
2	XK-34	条带状	2.16	1.68	44.66	0.73	0.43	0.02	248	19.5	4.95	12.00	0.60	0.61	22.21	245.10	76.72	1.81	1.42	0.08	0.74	16.60	0.43	3.28
3	XK-35	条带状	2.61	5.24	37.01	0.91	0.22	0.03	1592	423.6	9.55	70.00	5.90	5.19	11.57	187.20	37.01	5.07	4.18	0.17	0.55	10.73	0.32	18.47
4	XK-36	条带状	0.20	0.49	49.34	0.49	0.00	0.01	58	7.6	10.89	5.40	0.20	0.16	1.73	231.10	13.31	0.31	0.74	0.10	0.28	6.83	0.05	0.70
5	XK-37	条带状	0.23	0.41	50.66	0.68	0.03	0.01	34	11.2	15.08	4.60	0.40	0.26	2.91	190.30	17.95	0.27	0.65	0.10	0.29	8.25	0.06	0.58
6	XK-38	条带状	0.46	0.32	51.00	0.27	0.16	0.01	45	38.3	5.59	3.70	0.20	0.13	7.33	183.50	25.70	0.38	0.96	0.10	0.88	5.92	0.09	0.69
7	XK-39	条带状	0.17	0.24	53.42	0.25	0.04	0.00	40	27.4	3.56	4.10	0.20	0.11	2.65	171.80	14.28	0.31	0.58	0.10	0.28	6.12	0.09	0.60
8	XK-40	条带状	0.20	1.20	48.77	0.89	0.02	0.02	1136	43.3	8.43	42.00	1.20	1.45	1.55	187.40	9.64	2.04	1.12	0.10	0.59	11.59	0.09	17.32
9	XK-41	块状	0.33	0.48	52.73	0.29	0.06	0.00	100	25.3	3.92	14.00	0.40	0.37	3.46	161.70	13.82	0.49	0.87	0.10	0.30	6.73	0.09	1.25
10	XK-42	块状	0.35	0.52	52.32	0.46	0.05	0.01	209	37.0	4.32	9.80	0.50	0.50	3.56	180.10	16.14	0.41	0.77	0.10	0.43	6.02	0.09	2.51
11	XK-43	块状	0.39	0.44	49.42	0.33	0.09	0.01	64	21.9	4.07	11.00	0.20	0.15	4.53	176.20	17.62	0.69	0.73	0.06	0.40	7.64	0.09	0.46
12	XK-44	块状	0.35	0.31	50.85	0.52	0.08	0.01	20	15.7	8.20	5.10	0.20	0.54	4.22	282.10	21.24	0.30	0.64	0.55	0.39	5.71	0.09	0.14
13	XK-54	块状	0.62	1.13	49.48	0.73	0.09	0.09	43	37.0	7.42	5.40	0.20	0.16	3.28	171.50	26.71	1.04	1.15	0.06	0.40	7.52	0.09	0.19
14	XK-56	块状	0.84	1.19	48.18	0.64	0.10	0.11	33	11.9	4.08	2.10	0.20	0.09	4.20	150.00	25.92	0.26	0.88	0.05	0.65	6.73	0.10	0.18
15	XK-57	块状	0.24	0.75	51.08	0.60	0.06	0.05	23	15.5	4.60	1.30	0.20	0.09	2.04	133.70	13.05	0.24	0.93	0.05	0.43	6.73	0.06	0.16
16	XK-58	块状	1.13	0.72	50.05	0.58	0.16	0.23	17	7.4	5.12	2.50	0.20	0.10	8.02	160.40	41.41	0.34	0.69	0.05	1.15	6.43	0.10	0.09
17	XK-59	块状	0.57	0.54	51.57	0.67	0.17	0.06	20	9.6	29.38	3.50	0.20	0.09	6.53	236.20	37.27	0.23	0.60	0.05	0.54	5.53	0.06	0.14
18	XK-60	块状	0.98	0.45	52.21	0.40	0.22	0.09	26	8.8	7.93	3.40	0.20	0.06	10.91	175.10	52.93	0.49	0.62	0.05	0.56	7.92	0.09	0.15
19	XK-61	块状	0.37	0.30	52.56	0.43	0.11	0.02	35	9.8	3.97	1.60	0.20	0.11	5.86	231.40	27.81	0.26	0.60	0.06	0.89	6.23	0.06	0.16
20	XK-62	块状	0.59	0.21	52.41	0.19	0.08	0.12	51	16.5	8.84	1.10	0.20	0.08	4.79	151.50	19.13	0.24	0.62	0.06	0.54	5.23	0.06	0.29
21	XK-63	块状	1.05	0.39	51.39	0.33	0.21	0.09	29	13.9	9.11	1.00	0.20	0.06	12.38	189.10	58.50	0.30	0.65	0.06	0.54	4.93	0.08	0.21

样品序号 1~12 取自坑道 2942 中段 23 勘探线;13~21 取自钻孔 ZK4425-11。含量单位:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 为%,其他元素为  $\times 10^{-6}$ 。CaO、MgO 为盐酸溶样分析结果,其余为全岩粉末分析结果。分析单位:西北有色地质测试中心,分析方法 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Zn 为 ICP-AES,相对误差分别为 3.0%、3.0%、2.5%、3.0%、7.8%;其他元素为 ICP-MS,相对误差 <15%。统计样品全岩 CaO + MgO >40%。

表3 锡铁山矿床不同剖面岩石和矿石 REE 分析结果

Table 3 Rear earth elements data of the wall rocks and ores in the Xitishan lead—zinc deposit

位置	样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	La/Yb	δEu	δCe
2942中段23线坑道	XK-30	含炭方解石绢云千枚岩	35.50	76.46	8.24	29.23	5.72	1.29	6.07	0.95	5.59	1.06	3.10	0.52	3.15	0.47	177.34	7.64	0.71	1.03
	XK-31	灰黑色炭质绢云方解石千枚岩	23.25	51.49	5.72	19.05	3.43	0.63	3.16	0.42	2.17	0.38	1.09	0.19	1.22	0.20	112.39	12.89	0.61	1.04
	XK-32	条带状铅锌矿石(富黄铁矿)	1.32	2.80	0.36	1.25	0.27	0.06	0.28	0.10	0.29	0.05	0.16	0.10	0.17	0.10	7.32	5.33	0.72	0.96
	XK-33	条纹状矿化大理岩	7.17	13.78	1.70	6.10	1.24	0.47	1.29	0.22	1.24	0.24	0.72	0.12	0.74	0.11	35.13	6.60	1.20	0.91
	XK-34	条带状大理岩	12.42	23.79	2.83	10.23	2.02	0.50	2.10	0.34	2.04	0.38	1.07	0.17	0.94	0.14	58.97	8.91	0.78	0.92
	XK-35	条带状大理岩	10.89	21.04	2.68	9.39	1.79	0.60	1.85	0.30	1.70	0.31	0.90	0.15	0.94	0.15	52.69	7.84	1.07	0.90
	XK-36	条带状大理岩	2.84	4.74	0.61	2.11	0.41	0.18	0.42	0.07	0.36	0.07	0.18	0.10	0.16	0.15	12.38	11.82	1.39	0.82
	XK-37	条带状大理岩	2.10	3.52	0.48	1.65	0.35	0.15	0.34	0.06	0.32	0.06	0.18	0.10	0.15	0.15	9.60	9.36	1.43	0.80
	XK-38	条带状大理岩	2.38	4.36	0.57	1.89	0.34	0.10	0.31	0.04	0.23	0.04	0.12	0.10	0.13	0.15	10.76	12.84	1.00	0.87
	XK-39	厚层状白色弱条带状大理岩	1.63	2.35	0.34	0.98	0.19	0.12	0.20	0.03	0.17	0.03	0.10	0.10	0.10	0.15	6.50	11.41	2.04	0.72
	XK-40	厚层状白色块状大理岩	4.10	7.36	0.96	3.57	0.86	0.88	1.16	0.22	1.39	0.31	1.04	0.18	1.19	0.21	23.43	2.33	2.86	0.86
	XK-41	厚层状白色块状大理岩	1.83	3.20	0.44	1.45	0.28	0.10	0.30	0.10	0.26	0.05	0.15	0.10	0.14	0.10	8.48	8.99	1.05	0.83
	XK-42	厚层状白色块状大理岩	3.00	5.57	0.74	2.64	0.54	0.19	0.55	0.09	0.47	0.08	0.21	0.10	0.16	0.10	14.43	12.56	1.15	0.87
	XK-43	厚层状白色块状大理岩	2.63	5.08	0.71	2.48	0.57	0.16	0.61	0.10	0.56	0.10	0.27	0.10	0.23	0.10	13.70	7.83	0.89	0.87
XK-44	厚层状白色块状大理岩	2.51	4.40	0.59	2.22	0.52	0.20	0.61	0.11	0.68	0.13	0.37	0.06	0.31	0.10	12.81	5.40	1.18	0.83	
ZK4425;11钻孔	XK-48	强硅化绿泥石英片岩	9.44	20.07	2.56	9.90	2.47	0.64	3.01	0.58	3.51	0.69	2.08	0.35	2.13	0.33	57.76	3.00	0.76	0.96
	XK-49	强硅化绿泥方解石石英片岩	16.92	35.53	4.37	16.51	3.77	0.94	4.09	0.70	4.22	0.81	2.45	0.42	2.65	0.43	93.82	4.32	0.78	0.96
	XK-50	灰白色网脉状蚀变岩	17.05	41.81	5.19	18.73	4.06	0.73	4.19	0.79	4.84	0.93	2.91	0.51	3.24	0.55	105.54	3.56	0.57	1.05
	XK-51	灰白色网脉状蚀变岩	14.63	35.98	4.39	15.69	3.33	0.51	3.00	0.48	2.72	0.50	1.52	0.27	1.80	0.28	85.10	5.51	0.51	1.06
	XK-52	灰白色网脉状蚀变岩	28.64	69.07	7.72	27.34	5.36	0.77	4.79	0.74	4.23	0.74	2.17	0.38	2.20	0.30	154.46	8.83	0.49	1.09
	XK-53	灰—浅灰绿色网脉状蚀变岩	22.33	51.79	6.21	22.42	4.40	0.74	4.06	0.66	3.62	0.65	1.97	0.35	2.20	0.33	121.74	6.89	0.56	1.03
	XK-54	角砾状大理岩	3.93	7.51	0.98	3.50	0.75	0.40	0.75	0.11	0.62	0.11	0.31	0.10	0.29	0.10	19.47	9.21	1.73	0.89
	XK-55	灰白色网脉状蚀变岩	24.53	57.02	6.68	23.87	5.36	0.80	5.09	0.91	5.18	0.92	2.69	0.48	2.89	0.42	136.85	5.75	0.49	1.04
	XK-56	白色块状大理岩	2.77	4.99	0.66	2.32	0.50	0.18	0.64	0.12	0.69	0.14	0.41	0.07	0.41	0.06	13.95	4.61	1.02	0.85
	XK-57	白色块状大理岩	2.06	3.48	0.49	1.72	0.34	0.19	0.38	0.06	0.34	0.07	0.22	0.07	0.22	0.06	9.72	6.22	1.73	0.80
	XK-58	灰白色块状大理岩	3.93	6.61	0.92	3.52	0.79	0.28	0.83	0.13	0.79	0.15	0.45	0.07	0.44	0.06	18.98	6.09	1.14	0.80
	XK-59	灰白—白色块状大理岩	2.72	5.06	0.68	2.51	0.47	0.15	0.49	0.07	0.42	0.07	0.21	0.07	0.20	0.06	13.18	9.14	1.00	0.86
	XK-60	灰白色块状大理岩	4.51	6.97	0.98	3.60	0.78	0.28	0.87	0.15	0.87	0.17	0.52	0.07	0.50	0.06	20.35	6.11	1.10	0.76
	XK-61	灰白色块状大理岩	2.66	3.26	0.56	1.95	0.41	0.19	0.49	0.08	0.50	0.10	0.30	0.07	0.28	0.06	10.92	6.51	1.34	0.61
	XK-62	白色块状大理岩	2.86	4.98	0.67	2.19	0.43	0.18	0.45	0.07	0.41	0.08	0.24	0.07	0.23	0.06	12.92	8.35	1.30	0.83
XK-63	白色块状大理岩	4.34	7.93	1.03	3.58	0.74	0.27	0.70	0.10	0.59	0.11	0.31	0.07	0.33	0.05	20.16	8.88	1.21	0.87	

注:样品由西北有色地质分析测试中心 2005 年分析。分析方法 ICP-MS,检出限  $0.1 \times 10^{-6}$ ,相对误差 10%,盐酸溶样。

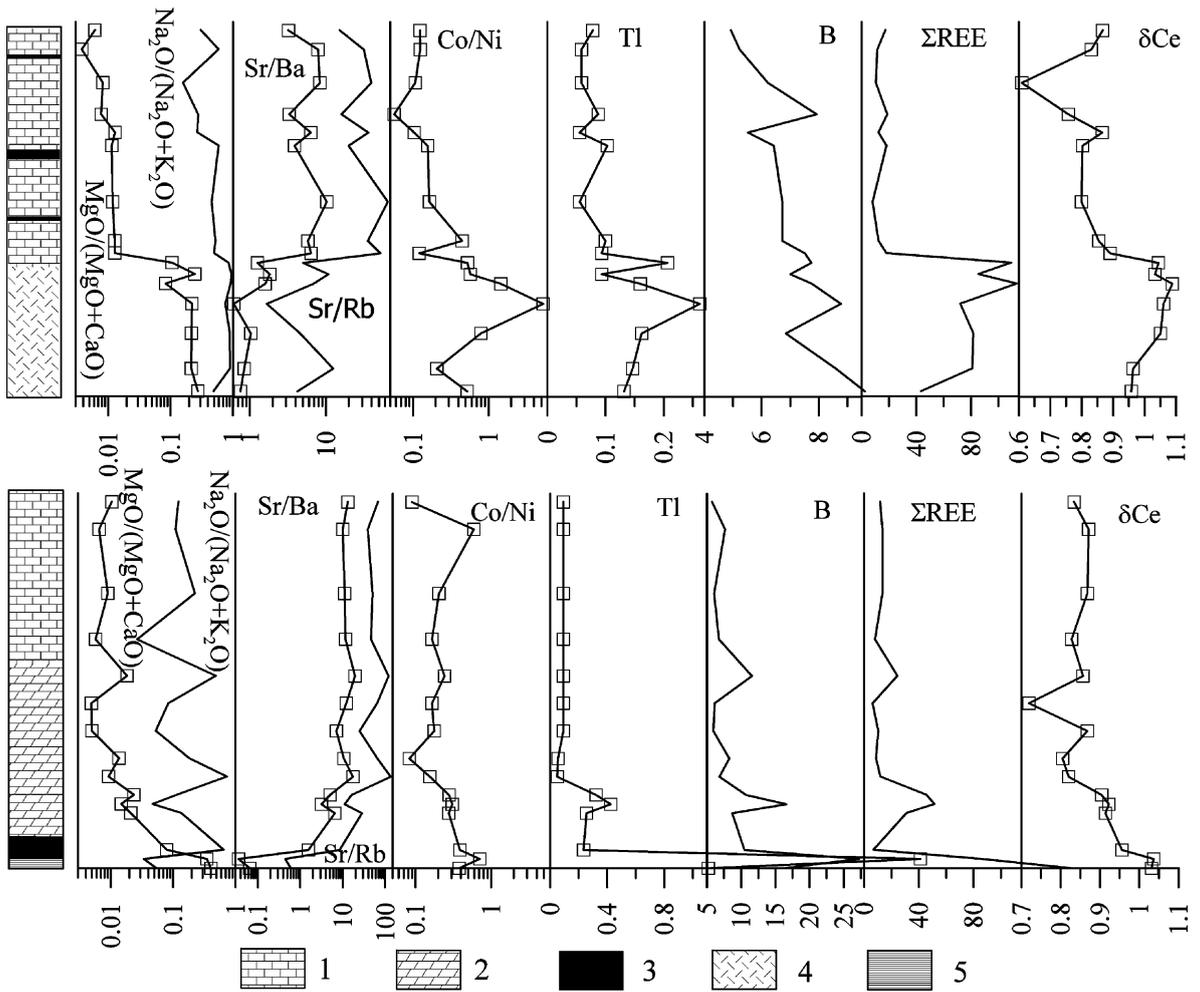


图 5 横穿大理岩的地球化学剖面

Fig. 5 Geochemical section map of ZK4425-11 and 2942-23

MgO/(MgO + CaO)值与 ΣREE 为盐酸溶样分析结果,其余为全岩粉末分析结果。分析单位:西北有色地质测试中心,分析方法 ICP-MS,元素含量单位(μg/g)。上图:25 勘探线 Zk4425-11 钻孔,由于岩层发生倒转,图中所示与图 3 中的上下位置倒置,钻孔剖面长 360m;铅锌矿体全部为非层状矿。下图:2942 中段 23 勘探线坑道剖面(2942-23),上部为北东侧,下部为南西侧,剖面长 40m;铅锌矿体为层状矿,整合产出。1—白色块状大理岩;2—灰白色条带状大理岩;3—铅锌矿体(ZK4425-11 为块状矿;2942-23 为条带状矿);4—网脉状蚀变岩;5—绢云石英片岩

Analysis method; ICP-MS, Tl, B, REE in (10 - 6). Upper: the section of ZK4425-11, the position is contrary to that in Figure 3 because of converse of the strata, length = 360m, the ore body is of irregular shape. Down: the section of pit 2942-23, length = 40m, ore body is of bedded. 1—white massive marble; 2—grey banded marble; 3—lead—zinc ore-bodies (massive ore in ZK4425-11 and banded ore in 2942-23); 4—stockwork rock; 5—sericite—quartz schist

上层位逐渐降低,矿体及网脉状蚀变岩最高(图 4), 2942-23 剖面的块状大理岩最低。

### 3.3 C、O 同位素地球化学

对 2942 中段 23 线层状铅锌矿体上部条带状大理岩和块状大理岩所做的 C、O 同位素分析结果如表 4,分析对象为大理岩。样品 XK-33、XK-34、XK-36、XK-44 距条带状(层状)矿体为 0.5m、2m、5m 和 34m。δ<sup>18</sup>O = 10.1‰ ~ 12.5‰, δ<sup>13</sup>C = - 0.9‰ ~

0.2‰。随着远离矿体,即由下部层位→上部层位,大理岩由条带状→块状,δ<sup>18</sup>O 值逐渐减小,δ<sup>13</sup>C 的变化较复杂,条带状大理岩最高。

### 3.4 Sr 同位素地球化学

矿石中方解石 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.7146 ~ 0.7147 (表 4),与锡铁山矿床矿石中流体包裹体测定的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值接近,大理岩 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.7113 ~ 0.7148。除样品 XK-31 外,反映较远端沉积的厚层块状大理岩

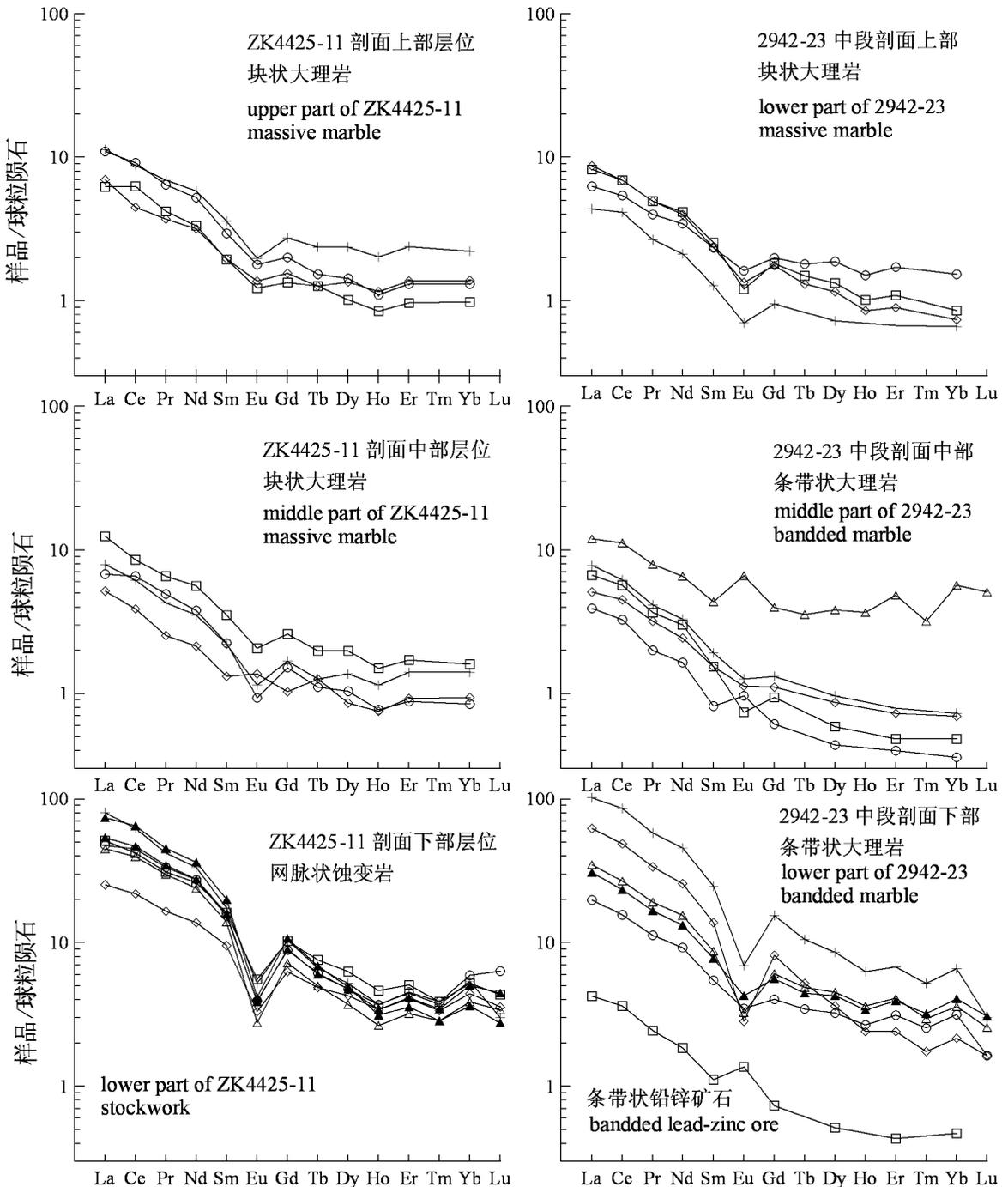


图6 锡铁山矿床大理岩、蚀变岩及矿石 REE 分布图解

Fig. 6 The REE pattern of the marble, stockwork rock and ore in the Xitieshan deposit

用于标准化的球粒陨石值引自 Boynton(1984)

The data of chondrite from Boynton(1984)

(2942-23 剖面)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值低于紧邻网脉状蚀变带的厚层块状大理岩(ZK4425-11 剖面)。两条剖面变化特点不同,2942-23 剖面层位自下而上,千枚岩→条带状矿体→条带状大理岩→厚层块状大理岩, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值逐渐降低,紧邻矿体的样品明显较高。ZK4425-11 剖面变化规律性较差。

## 4 讨论

### 4.1 碳酸盐岩形成于海底喷流作用,是喷流卤水与海水共同作用的产物

碳酸盐岩广泛出现于海相喷流沉积系统中,其中大部分为正常海相沉积,如秦岭型铅锌矿床矿体

下盘为富含生物碎屑的灰岩(王集磊等,1996),McArthur River,Mount Isa 铅锌矿的围岩中也有大量的沉积碳酸盐岩(Chapman et al.,2004;Perkins,1997)。越来越多的研究也发现,SEDEX 系统中存在有大量的与喷流作用有关的碳酸盐矿物或碳酸盐岩,主要是白云岩(石)、铁白云石等,常与硅质岩、电气石岩等喷流沉积岩共生(韩发等,1999)。如厂坝—李家沟(祝新友等,2005a;Ma et al.,2004)下盘的厚层白云岩、洛坝矿床中的铁白云石(祝新友等,2005b)、狼山地区(彭润民,2001)的东升庙、炭窑口、霍各乞矿床中的白云岩、酒西盆地(郑荣才等,2003)、长江中下游铜陵地区与块状硫化物相伴的白云岩(曾普胜等,2004;顾连兴等,1986)等等。Cooke 等(2000)将 SEDEX 矿床分为 McArthur 型矿床和 Selwyn(Sullivan)型矿床,前者含大量碳酸盐岩,在含碳酸盐岩较少的 Sullivan,矿体中主要脉石矿物仍为方解石(Lydon,2000)。

锡铁山矿床反映近喷口与远喷口的剖面,二者间具有相似的元素、同位素变化规律,一方面显示喷口附近与远端的大理岩沉积具有连续性和相互的关联性,另一方面也反映出目前研究的剖面距离喷口都不是很远,代表远端沉积的剖面 2942-23(23 线)与代表近源沉积的剖面 ZK4425-11(25 线)相距仅几百米。同时,这种变化的规律性与国内外一些 SEDEX 体系中的变化特点相似。

Whitehead 等(1996)、Davis 等(1998)对古巴 Castellanos 铜铅锌矿床研究时发现,自矿体往上,碳酸盐矿物中  $MgO/(CaO + MgO)$  逐渐减小,Sr 含量增加。B 是重要的喷流沉积的指示元素,很多 SEDEX 铅锌矿床中矿体附近分布有电气石,在 Sullivan 矿床中,管道相角砾岩中含有大规模的电气石(Lydon et al.,2000;Jiang Shaoyong,2000)。锡铁山矿床大理岩的 B 含量向上部减少,反映了喷流作用强度在逐渐减弱,网脉状蚀变岩中 B 含量最高,也进一步证明其反映喷流系统管道相的特点。

Large 等(1998,2000)对层状矿床地球化学异常的研究,发现穿过层状矿体存在明显的 Zn—Pb—Tl 的异常。Tl 是热流及喷流卤水的指示元素,不仅矿体、网脉状蚀变岩有明显高的 Tl,在层状矿体上侧条带状大理岩中存在较宽的 Tl 异常。不过,近喷口剖面 ZK4425-11 上部的块状大理岩中虽然发育有多条厚层的非层状矿体,但矿体两侧并未发现明显的 Tl 异常,其他元素的异常也不明显。说明非层状矿体形成时并未发育广泛的交代、渗滤,是喷流沉积期靠近喷口附近未喷出海底的富含矿物质的热液充填沉淀形成的。

正常沉积碳酸盐岩之 REE 分布主要受海水 REE 组成影响,正常海水稀土含量较低(De Baar 等,1985)、并有强的负 Ce 异常、Eu 异常不明显,而热液含有较高含量的 REE(Michard,1989,

表 4 锡铁山矿床 Sr、C、O 同位素组成

Table 4 The Strontium, Carbon, and Oxygen isotope composition, Xitieshan deposit

序号	样号	取样位置	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ (‰)
1	XK-31	2942 中段 23 线	灰黑色炭质绢云方解石千枚岩	0.797776 ± 0.000085		
2	XK-32	2942 中段 23 线	块状铅锌矿石(富黄铁矿)	0.716960 ± 0.000054		
3	XK-33	2942 中段 23 线	条带状矿化大理岩	0.712438 ± 0.000060	-0.9	12.5
4	XK-34	2942 中段 23 线	条带状大理岩	0.712762 ± 0.000054	0.2	12.2
5	XK-36	2942 中段 23 线	条带状大理岩	0.713269 ± 0.000067	0.2	11.6
6	XK-38	2942 中段 23 线	条带状大理岩	0.711308 ± 0.000071		
7	XK-41	2942 中段 23 线	厚层状白色块状大理岩	0.712382 ± 0.000094		
8	XK-44	2942 中段 23 线	厚层状白色块状大理岩	0.711814 ± 0.000057	-0.2	10.1
9	XK-51	ZK4425-11	灰白色强网脉状硅化蚀变岩	0.713608 ± 0.000043		
10	XK-53	ZK4425-11	灰—浅灰绿色网脉状蚀变岩	0.717233 ± 0.000056		
11	XK-57	ZK4425-11	白色块状大理岩	0.711849 ± 0.000051		
12	XK-61	ZK4425-11	灰白色块状大理岩	0.712316 ± 0.000051		
13	XK-63	ZK4425-11	白色块状大理岩	0.715207 ± 0.000225		
14	TXK-16	ZK4425-11	块状铅锌矿石,方解石	0.714627 ± 0.000064		
15	TXK-17	3002 中段 9 线	块状铅锌矿石,方解石	0.714784 ± 0.000101		

注: Sr 同位素由核工业地质研究院测试中心 2005 年测定,分析仪器: ISOPROBE-P(GV instrument Ltd. UK); C、O 同位素由中国地质科学院矿产资源研究所 2005 年测定,分析采用磷酸法,质谱仪为 MAT-253,绝对误差低于 0.2‰。1~13 号样品 Sr 同位素测定对象为全岩粉末, HCl(2M) 溶样; 14~15 号样品测定对象为方解石单矿物,磷酸法。

Klinkhammer et al., 1994), Ce 异常不明显, 常有正的 Eu 异常、La/Lu > 1。碳酸盐矿物有强烈的富 LREE 作用,  $\left(\frac{\text{La}}{\text{Lu}}\right)_{\text{碳酸盐}} > \left(\frac{\text{La}}{\text{Lu}}\right)_{\text{溶液}}$  (Wood, 1990), 并在一定程度上掩盖了海水或热液的 Eu 异常状况, 使碳酸盐岩之 REE 或多或少地具有 Eu 负异常。锡铁山矿床大理岩自下部层位向上, 稀土总量降低, 分异减弱, 负 Ce 异常变强, 正 Eu 异常减弱, 都反映出卤水与海水的交换作用。下部层位条带状大理岩强烈受喷流卤水的影响, 上部块状大理岩更多地反映出海水的特点。

奥陶纪正常沉积的海相灰岩  $\delta^{18}\text{O} = 25\%$  (Veizer et al., 1999), 锡铁山矿床矿体中石英的  $\delta^{18}\text{O} = 14.0\% \sim 15.38\%$ , 大理岩  $\delta^{18}\text{O}$  远低于正常沉积碳酸盐岩的水平,  $\delta^{13}\text{C}$  与正常海洋  $\text{HCO}_3^-$  相当, 但仍低于正常海相碳酸盐岩。C、O 同位素的特点与加拿大 Sullivan 矿床相似, 在 Sullivan 横穿层状矿体的剖面中, 自下而上, 方解石  $\delta^{18}\text{O}$  值由 15.2‰ 降至 13‰,  $\delta^{13}\text{C}$  由 -8‰ 变至 -7‰ (Taylor et al., 2000); 锡铁山矿床大理岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值也介于正常海相沉积碳酸盐岩与含矿热液之间。早古生代正常沉积碳酸盐岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值约为 0.708 (Veizer et al., 1999), 塔里木盆地中晚奥陶世的正常海相沉积的碳酸盐岩为 0.7082 ~ 0.7083,  $\delta^{18}\text{O} = 23\% \sim 25\%$  (江茂生等, 2002; 鲍志东等, 1998), 张德会等<sup>⑨</sup>系统测定了锡铁山矿床矿石中不同矿物的流体包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值, 30 件样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7147 \sim 0.7684$ , 与大多数热液矿床相似, 平均值为 0.7202, 其中石英的流体包裹体平均值为 0.7153。

常量元素、微量元素、REE 以及 C、O、Sr 稳定同位素的研究均反映出锡铁山容矿大理岩非正常海相沉积的产物, 也不完全同于卤水沉积, 而是卤水与海水共同作用的产物, 一部分物质来自卤水, 一部分来自海水。若以粗晶铅锌矿石中方解石平均  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7147$  代表卤水端元, 以附近塔里木盆地奥陶纪正常沉积碳酸盐岩平均  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7082$  代表海水端元, 计算出锡铁山矿床大理岩来自海水的组分约占 32%, 来自卤水的组分约占 68%。大理岩从下至上, 海水的影响逐渐增强, 喷流作用强度逐渐减弱。

#### 4.2 大理岩的分布特点及喷流沉积系统

锡铁山矿床发育着较为完整的海底喷流沉积系统, 网脉状蚀变带形成于卤水的强烈交代作用, 代表着巨大规模的管道相, 分布于旁侧的大理岩是喷口附近喷流卤水与海水相互作用的产物。目前揭露出

的大理岩全部分布于网脉状蚀变带的一侧(浅部, 图4), 厚度向远处减薄, 在近处的块状大理岩中赋存有非层状铅锌矿体, 层状矿体见于外侧较远处。这些特点非常相似于加拿大 Sullivan 铅锌矿床, 在 Sullivan 矿床中脉石矿物主要是方解石, 缺乏正常沉积的碳酸盐岩 (Lydon et al., 2000)。因此, 沿网脉状蚀变带存在着一条延长超过 2km 的同生断层 (F1), 大理岩分布的一侧(浅部)代表着下降盘。25 线附近两侧大理岩、矿体等发生显著的变化, 显示这一地带可能存在一条规模相对小的同生断层 (图4)。

锡铁山矿床大理岩的形成与喷流卤水作用有关, 大规模的大理岩、网脉状蚀变带的存在反映出该区曾经存在巨大规模的喷流沉积系统。目前发现的铅锌矿体主要是非层状的, 占锡铁山矿床已探明铅锌矿量的 3/4 以上, 分布于喷口附近。这明显不同于世界大多数的大型 SEDEX 铅锌矿床, 这些矿床中, 不发育或发育弱的管道相系统 (Sangster, 2002), 铅锌矿体全部或主要是条纹条带状结构的层状矿体。这也进而反映出锡铁山地区仍然具有巨大的找矿潜力, 下一步的找矿目标是发育有条纹条带状结构的层状铅锌矿体, 其主体可能超出大理岩分布的地区。2005 年底, 在锡铁山矿床东南部的 03 勘探线深部大理岩尖灭部位, 钻探发现了穿矿厚度近 200m 的层状铅锌矿体, 已经显示出巨大的找矿潜力。同时, 在东南侧 (7~25 线) 深部厚层大理岩 (块状) 发育的地区 (图4) 仍具有一定寻找非层状块状铅锌矿体的潜力。

## 5 结论

锡铁山矿床发育有相对完整的喷流沉积系统, 大理岩是喷流作用的产物, 是喷流卤水与海口相互作用影响的结果。对锡铁山矿床大理岩的地质地球化学研究揭示出, 随着距离管道相 (网脉状蚀变带) 增加, 大理岩规模、结构、地球化学特点均发生一系列的变化, 这与自下而上的变化特点相一致, 海水参与的程度逐渐加强。粗略计算表明, 大理岩主要受喷流卤水的影响, 来自海水的部分约占 1/3, 大理岩总体上仍主要分布于喷口附近。

锡铁山喷流沉积系统的研究表明, 容矿的滩润山群 a—b 岩组整体存在倒转, 以网脉状蚀变带代表的管道相反映的主同生断层长度超过 2km, 同时也存在另一方向上的同生断层, 共同制约着大理岩与成矿物质的堆积。锡铁山矿床可能存在着规模巨大

的层状矿体,其分布范围可能超越一直作为重要找矿评价标志的大理岩。

**致谢:**在锡铁山矿床野外工作期间,李能强先生提供了大量的现场资料,在室内研究过程中,得到了梅友松先生的多方指点,作者对此表示诚挚感谢。

## 注 释

① 西部矿业股份有限公司. 2003. 青海省海西州锡铁山铅锌矿床 3062 米中段以下矿产资源储量报告。

② 张德会,周肃,王团华. 2004. 锡铁山铅锌矿床成矿年龄及流体包裹体地球化学研究(科研报告)。

## 参 考 文 献 / References

鲍志东,朱井泉. 1998. 塔里木盆地奥陶系层序地球化学研究. 地质科技情报,17(4): 43~47.

邓达文,孔华,奚小双. 2003. 青海锡铁山热水沉积型铅锌矿床的地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报,22(4): 310~313.

邓吉牛. 1999a. 世纪我国金属矿山地质找矿预测新概念探讨. 全国矿山地质及 21 世纪可持续发展会议. 中国地质学会 80 周年学术文集. 北京:地质出版社,681~685.

邓吉牛, 1999b, 青海锡铁山矿区褶皱构造及其找矿预测. 有色金属矿产与勘查, 8(5): 283~288.

顾连兴,徐克勤. 1986. 论长江中、下游中石炭世海底块状硫化物矿床. 地质学报,60(2):176~188

韩发,孙海田. 1999. Sedex 型矿床成矿系统. 地学前缘,6(1):139~150.

江茂生,朱井泉,陈代钊,张任枯,乔广生. 2002. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应. 中国科学(D 辑),32(1):36~42

马国良,祁思敬,李英. 1998. 厂坝铅锌矿床中钠长石岩的成因探讨. 地质地球化学,26(2): 29~34.

彭润民,翟裕生. 2004. 内蒙古狼山—渣尔泰山中元古代被动陆缘热水喷流成矿特征. 地学前缘,11(1):257~268.

宋述光,张立飞, Niu Y, 宋彪,刘墩一. 2004. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲. 地质通报,33(9~10): 918~925.

汪劲草,彭恩生,孙振家. 2000. 青海锡铁山铅锌矿床喷流沉积后的构造再造过程. 大地构造与成矿学,24(2): 163~169.

王集磊,何伯娜,李健中,何典仁. 1996. 中国秦岭型铅锌矿床. 北京:地质出版社,92~96.

吴才来,杨经绥,许志琴, Wooden J L, Ireland T, 李海兵, 史仁灯, 孟繁聪, 陈松永, Persing H, Meibom A. 2004. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗质岩浆作. 地质学报,78(5): 659~674.

郭介人,任秉琛,张莓,高栋丞,赵统,张汉文,宋志高,张群力. 1987. 青海锡铁山块状硫化物矿床的类型及地质特征. 见:中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊,20 号. 西安:陕西科学技术出版社,1~70.

杨经绥,张建新,孟繁聪,史仁灯,吴才来,许志琴,李海兵,陈松永. 2003. 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. 地学前缘,10(3): 291~314.

曾普胜,蒙义峰,杨竹森,裴荣富,王训诚. 2004. 安徽铜陵矿集区与块状硫化物矿床有关的热液沉积岩. 矿床地质,23(3): 334~343.

张德全,王富春,李大新,丰成友,余宏全,李进文. 2005. 柴北缘地区的两类块状硫化物矿床—I, 锡铁山式 SEDEX 型铅锌矿床. 矿床地质,24(5):471~480.

赵风清,郭进京,李怀坤. 2003 青海锡铁山地区滩间山群的地质特征及同位素年代学. 地质通报,22(1): 28~31.

郑荣才,王成善,朱利东. 2003. 酒西盆地首例湖相“白烟型”喷流岩——热水沉积白云岩的发现及其意义. 成都理工大学学报(自然科学版),30(1): 1~8.

祝新友,汪东波,卫治国,邱小平,王瑞廷. 2005a. 西成地区碳酸盐岩的 REE 特征及厂坝矿床白云岩的成因. 矿床地质,24(6):613~620.

祝新友,汪东波,卫治国. 2005b. 甘肃洛坝铅锌矿床的构造控矿作用. 地质与勘探,41(6):38~41.

Chapman L H. 2004. Geology and mineralization styles of the George Fisher Zn—Pb—Ag deposit, Mount Isa, Australia. Econ. Geol., 99: 233~255.

Cooke D R, Bull S W, Large R R. 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb—Zn (sedex) deposits. Econ. Geol., 95(1): 1~17.

Davis J F, Prevec S A, Whitehead R E, Jackson S E. 1998. Variations in REE and Sr-isotope chemistry of carbonate gangue, Castellanos Zn—Pb deposit, Cuba. Chem. Geol., vol.144, p.99~119.

De Baar J W, Brewer P G, Bacon M P. 1985. Anomalies in rare earth distribution in seawater; Gd and Tb; Geochim. Cosmochim. Acta, 49:1961~1969.

Jiang Shaoyong, Palmer M R, Slack J F, Yang J H, Shaw D R. 2000. Trace element and rare earth element geochemistry of tourmalinites and related rocks and ores from the Sullivan Deposit and vicinity, southeastern British Columbia. In: Lydon J W, ed. The Geological Environment of the Sullivan Deposit, British Columbia. Special Publication 1. 482~495.

Klinkhammer G P, Eldrefield H, Edmond J M, Mitra A. 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges. Geochim. Cosmochim. Acta, 58: 5105~5113.

Large R R, McGoldrick P J. 1998. Lithogeochemical halos and geochemical vectors to stratiform sediment hosted Zn—Pb—Ag deposits, 1. Lady Loretta Deposit, Queensland. J. Geochem. Explor., 63: 37~56.

Large R R, McGoldrick P J. 2000. Lithogeochemical halos and geochemical vectors to stratiform sediment hosted Zn—Pb—Ag deposits——Part 2. Hyc deposit, McArthur River, Northern Territory. J. Geochem. Explor., 68: 105~126.

Lydon J W, Paakki J J, Anderson H E, Reardon N C. 2000. An overview of the geology and geochemistry of the Sullivan Deposit. In: Lydon J W, ed. The Geological Environment of the Sullivan Deposit, British Columbia. Special Publication I, 505~522.

Ma Guoliang, Beaudoin G, Qi Sijing, Li Ying. 2004. Geology and geochemistry of the Changba SEDEX Pb—Zn deposit, Qinling orogenic belt, China. Mineralium Deposita, 39: 380~395.

Michard A. 1989. Rare earth element systematic in hydrothermal fluids. Geochim. Cosmochim. Acta, 53: 745~750.

Perkins W G. 1997. Mount Isa lead—zinc orebodies; replacement lodes in a zoned syndeformational copper—lead—zinc system? Ore Geology Review, 12(2): 61~111.

Sangster D F. 2002. The role of dense brines in the formation of vent-distal sedimentary—exhalative (SEDEX) lead—zinc deposits——field and laboratory evidence. Mineral Deposita, 37: 149~157.

Taylor B E, Turner R J W, Leitch C H B, Watanabe D H, Lydon J W. 2000. Isotopic stratigraphy of carbonate in wall rocks and bedded ores, Sullivan Pb—Zn—Ag mine, British Columbia. In: Lydon J

- W, ed. The Geological Environment of the Sullivan Deposit, British Columbia. Special Publication I, 673 ~ 695.
- Valdes-Nodarse E L. 1998. Pb—Zn “SEDEX” deposits and their copper stockwork roots, western Cuba. *Mineralium Deposita*, 33: 560 ~ 567.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebneith S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G and Strauss H. 1999.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161 (1 ~ 3): 59 ~ 88
- Whitehead R E, Davies J F, Valdes-Nodarse E L, Diaz C A. 1996. Mineralogical and Chemical variations. Castellanos Shale-hosted Zn—Pb—Ba deposit, northwestern Cuba. *Econ. Geol.*, 91: 713 ~ 722.
- Wood S A. 1990. The aqueous geochemistry of rare earth elements and yttrium. 2. Theoretical prediction of speciation in hydrothermal solutions to 350°C at saturation vapor pressure. *Chem. Geol.*, 88: 99 ~ 125.

## Study on Marble of the Xitieshan Lead—Zinc SEDEX Deposit, Qinghai Province: Interaction between Exhaled Brine and Seawater

ZHU Xinyou<sup>1)</sup>, DENG Jiniu<sup>2)</sup>, WANG Jingbin<sup>1)</sup>, LIN Longjun<sup>1)</sup>, FAN Junchang<sup>2)</sup>, SUN Shuqiu<sup>2)</sup>

1) *Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing, 100012;*

2) *Western Mining Co. Ltd., Xining, 810000*

### Abstract

Xitieshan lead—zinc deposit is located in north margin of the Qaidam basin, Qinghai Province, originally contained about 50 million tones of ore with a grade of 8% Zn, 10% Pb. It formed in a rift basin at the Ordovician period. The marble distributes about 2km of length in NW—SE and 1km of depth. The orebody can be divided into two main types: unbedded and bedded ores. The unbedded ore-body occurred discordantly in thick marble that formed in exhalation sedimentation, which contributes more than 3/4 of known lead—zinc reserves, and consists dominantly of massive, coarse galena, sphalerite, pyrite and gangue minerals, and abundant hydrothermal eruption and vent breccias. The bedded ore-body occurred near concordant banded marble. An exhalation—sediment system has been found in the deposit, including feeder channel-stockwork altered rock, vent-proximal-unbedded ore-body, thick marble and vent-distal face-banded bedded ore-body with banded marble. The two sections reflecting vent-proximal and distal are studied. From base of the marble upward, the contents of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Sr, B, Tl and  $\text{MgO}/(\text{CaO} + \text{MgO})$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  determined by ICP-MS analysis decrease slightly, Sr/Rb and Sr/Ba ratio increases significantly. REE contents,  $\delta\text{Eu}$  and  $\delta\text{Ce}$  of marble decrease in the upper part of the section.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 10.1\text{‰} \sim 12.5\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -0.9\text{‰} \sim 0.2\text{‰}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7113 \sim 0.7148$ , and all three at the both sections lie between that for Ordovician marine sedimentary carbonate and that of hydrothermal fluid estimated from calcite of ore,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7146 \sim 0.7147$ . The studies of geology and geochemistry suggest that the marble of the deposit is a result of the interaction of exhalation hydrothermal (brine) fluid with seawater, more seawater takes part in the reaction in the upper part of the section, and more brine in the lower part. The calculations or the ratio of seawater(Ordovician) and hydrothermal fluid in the forming of carbonate gangue, based on the Sr-isotope of the marble, show that mixtures containing about 2/3 hydrothermal fluid during the deposition, which suggested that the deposit found is only part of the SEDEX system of vent proximal. The ore-forming was influenced mainly by hydrothermal fluid(brine) and less seawater. Two grow faults are recognized, one occurred along the stockwork, and the other in about line 25. They restricted the sediment of sulfide and marble(or carbonate). It suggested that there are giant reserve of bedded lead—zinc deposits having not been explored, some of the deposit (lead—zinc ore bodies) distributes a large area exceeds marble.

**Key words:** lead—zinc deposit; marble; sedex; REE; Sr-isotope; Qinghai Province

