

祝新友, 张志辉, 付旭, 等. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 188–208.
Zhu Xinyou, Zhang Zhihui, Fu Xu, et al. Geological and geochemical characteristics of the Weilasito Sn-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 188–208(in Chinese with English abstract).

内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿 的地质地球化学特征

祝新友^{1,2} 张志辉² 付旭³ 李柏阳³ 王艳丽⁴ 焦守涛⁵ 孙雅琳⁵

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 内蒙古地质勘查有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010010; 4. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:2014年发现的维拉斯托锡锌矿是继20世纪末该矿区铜锌矿之后的重要找矿进展,已控制Sn金属资源量10万t。成矿作用与隐伏花岗岩体有关,该岩体侵入于前寒武纪变质岩中。矿化类型包括岩体顶部的花岗岩型锡锌矿、岩体外侧的石英脉型锡锌矿以及外围的铜锌矿。针对花岗岩、各类矿体开展了岩石学、矿床学、主微量元素地球化学、年代学等研究,初步查明岩浆演化机制、矿床成因及三类矿化的关系。细粒斑状碱长花岗岩La-ICPMS锆石U-Pb年龄(139.5±1.2)Ma(MSWD=3.3)。岩石中发育多级斑晶,结晶(沉淀)顺序为钠长石→石英→钾长石→钠长石→石英、黄玉、锡石、闪锌矿。花岗岩富SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、TFe₂O₃、CaO等,高Rb、Cs、Nb、Ta及W、Mo、Bi、Cu、Zn、In等元素,低Sr、Ba等,钠长石An<0.3,与锡钨多金属矿成矿花岗岩性质相似。岩浆晚期经历了岩浆-热液过渡阶段(浆液过渡态流体),自硅酸盐相中分离出富Si、富F和富S的流体相,分别形成花岗岩型矿石中的石英、黄玉、锡石-闪锌矿囊状体(珠滴),伴随熔融包裹体和熔流包裹体,晚期逐渐、连续地向热液阶段过渡。岩浆-热液过渡阶段在岩体顶部形成花岗岩型锡锌矿,热液阶段在岩体外侧和外围形成石英脉型锡锌矿及铜锌矿、铅锌银矿。这些矿体连同成矿花岗岩共同构成岩浆-热液型锡多金属矿床成矿系统。锡林郭勒—赤峰地区,很多脉状铅锌银矿的成矿作用与酸性侵入岩有关,深部可能存在大规模岩浆-热液型锡(钨)多金属矿。

关键词:锡矿;铅锌银矿;花岗岩型;石英脉型;浆液过渡态流体;成矿机制;成矿系统;内蒙古

中图分类号:P618.44 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)01-0188-21

Geological and geochemical characteristics of the Weilasito Sn-Zn deposit, Inner Mongolia

ZHU Xin-you¹, ZHANG Zhi-hui², FU Xu³, LI Bo-yang³,
WANG Yan-li⁴, JIAO Shou-tao⁵, SUN Ya-lin⁵

(1. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing, 100012, China; 2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

收稿日期:2015-08-31;改回日期:2015-10-28

基金项目:国家科技支撑课题(2011BAB04B08)、国土资源部公益性行业科研专项(201411024)、中国地质调查局工作项目(12120113086300)联合资助。

作者简介:祝新友,男,1965年生,教授级高级工程师,长期从事矿床学研究;E-mail:zhuxinyou@outlook.com。

3. Inner Mongolia Geological Prospecting Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 4. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China; 5. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Weilasito Sn-Zn-Cu deposit is located in Keshiketen, Inner Mongolia, at latitude 44°5'5"N, longitude 117°29'53"E. The mineralization styles include granite-type Sn-Zn at the top of the granite, quartz vein type Sn-Zn ore near the granite, Cu-Zn sulfide vein and Pb-Zn-Ag sulfide vein distal from the granite. Based on petrology, geology and geochemistry of elements and chronology, the authors recognized the granite magma revolution, the origin of the deposit and the relations between the mineralization styles. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of $139.5 \pm 1.2\text{Ma}$ (MSWD = 3.3) for the alkali feldspar granite pluton. There are multilevel phenocrysts in the pluton, and the crystallization sequence is albite-quartz-K-feldspar-albite-quartz-topaz, cassiterite, and sphalerite. The granite rich in SiO_2 and Rb, Cs, Nb, Ta, W, Mo, Bi, Cu, Zn, In etc., poor in Al_2O_3 , TiO_2 , TFe_2O_3 , CaO and Sr, Ba etc., the An value of the albite is lower than 0.3, similar to data of the granite of Sn-W deposits in the Nanling belt. Late magma experienced magmatic-hydrothermal transitional stage as well as gradual continuous evolution to hydrothermal stage. The Si rich, F rich and S rich fluid phases were separated from the magma to form the droplets (pocket) of quartz, topaz, cassiterite-sphalerite respectively in the granite-type Sn-Zn ore. The fluid inclusions are melt, melt-fluid and liquid respectively. The granite-type Sn-Zn ore formed at the top of pluton at the magma-hydrothermal transitional stage, the quartz vein-type Sn-Zn ore occurs at the outer part and the sulfide-vein Cu-Zn, Pb-Zn-Ag ore of the hydrothermal stage occurs distal from the rock body. All of the ores and the plutons comprise the magmatic hydrothermal tin polymetallic metallogenic system. In Xilin Gol-Chifeng area, there are some Pb-Zn-Ag veins (deposits and/or mineralization) related to the acidic intrusive rocks. There probably exist large-sized hydrothermal tin (tungsten) polymetallic deposits in the depth.

Key words: tin deposit; lead-zinc-silver deposit; granite type; quartz vein type; magma-hydrothermal transitional fluid; metallogenic mechanism; metallogenic system; Inner Mongolia

About the first author: ZHU Xin-you, male, born in 1965, engages in the study of mineral deposits; E-mail: zhuxinyou@outlook.com.

Fund support: Supported by Key Projects in the National Science & Technology Pilla(No.2011BAB04B08), Public Welfare Industry Scientific Research Projects of Ministry of Land And Resources (No.201411024), China Geological Survey Program (No.12120113086300).

内蒙古赤峰市克什克腾旗拜仁达坝和维拉斯托铜铅锌银矿床是20世纪末、21世纪初大兴安岭西坡成矿带重要的找矿进展,二者相距约3 km。维拉斯托矿区中心坐标:北纬44°5'5",东经117°29'53"。矿床累计探明金属资源量(332+333)锌37.8万t@4.29%,铜6.6万t@0.79%。勘查过程中,在矿区及北部圈定激电异常多处,发现1#含黑钨矿石英脉。2014年在矿床北侧约1.5 km处通过验证激电异常发现石英脉型和花岗岩型锌锡矿,与隐伏花岗岩密切相关。目前控制锡金属资源量约10万t,锌>10万t,共伴生钼、铷、铜等矿产。

长期以来,大兴安岭南段西坡地区众多铅锌银矿一直被认为与中生代火山-岩浆活动有关^[1-4],同一地区也发现很多锡多金属矿,但锡矿与铅锌银矿的关系尚未被深入认识。对有关矿床的矿床学研究很多^[5-9],但成矿岩体特征知之甚少。维拉斯托等一批发育于酸性岩体顶部的锡矿床成因争议也较大,多认为是“斑岩型”^[10],但明显不同于典型斑岩型

铜、钼矿床。这类矿床的成因类型是什么?与外围脉状(铜)铅锌银矿的关系是什么?维拉斯托锡矿床多种矿化类型的联系、成矿作用与岩浆演化关系的研究,对明确矿床成因类型,揭示大兴安岭地区锡(钨矿)与铅锌(银)矿的关系,探讨花岗岩浆演化、岩浆→热液过程,成矿物质的富集与成矿机制,区域内锡钨多金属矿找矿方面均具有重要地质意义。由于维拉斯托本区的铜锌矿床已开展过较多的研究工作^[5,10-15],本文重点研究新发现的锡矿床,尤其是其中的与花岗岩直接相关的花岗岩型、石英脉型锡矿。

1 维拉斯托锡矿地质特征

研究区位于天山—兴蒙褶皱系华北板块晚古生代增生造山带,锡林浩特中间地块中部;大兴安岭中南段西坡成矿带,黄岗—甘珠尔庙成矿带西侧。区域内主要出露地层包括古元古界宝音图组(Ptby)黑云斜长片麻岩、石英二云片岩、变粒岩等,

即锡林郭勒杂岩。中二叠统大石寨组(P₂d)长石石英砂岩、火山岩及火山凝灰岩,上二叠统林西组(P₃l)细碎屑岩。中侏罗统万宝组(J₃w)泥砂岩夹煤层,上侏罗统满克头鄂博组(J₃m)酸性火山岩。第四系覆盖较严重。矿区近外围侵入岩主要为海西期形成的黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩等,年龄集中于298~320 Ma(锆石SHRIMP U-Pb)^[16]。区域性断裂呈NE向在矿区南部通过。

矿区范围内,主要容矿地层为Pt₁by片麻岩类的变质岩,局部出露少量晚古生代石英闪长岩(图1)。与成矿密切相关的岩体隐伏于锡锌矿区深部,最浅处距地表约400 m,有隐爆角砾岩通向地表,岩脊走向大致为NE20°,与含钨石英脉一致。

1.1 维拉斯托本区矿化特征

维拉斯托本区(图1-b)主要矿化为脉状铜锌矿,沿断裂分布于片麻岩中。控矿断裂呈舒缓波状,断面平直,后期活动强烈。铜锌矿体不连续,透镜状,一般厚度1~2 m,最宽处厚约10 m。产状变化较大,总体近EW走向(图2),北倾,倾角10°~30°。矿体在NE与NW向产状变化处,尤其是NW方向上,厚度变大,品位增高。

矿石以块状为主,部分为浸染状。主要矿石矿

物为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、锡石等,其中,闪锌矿黑色,粗粒。脉石矿物为石英、方解石、萤石。矿体中局部发育成矿期晶洞,直径可达1 m以上,多呈长条形,长轴方向与矿体走向一致。晶洞中矿物主要是粗晶黄铁矿、方铅矿、石英、浅绿色萤石等。矿体附近及矿体中可见似伟晶岩脉、长英质脉等,产状与矿体大体一致。有关维拉斯托本区矿床地质特征,可详见文献[10-16]。

1.2 锡锌矿区矿化特征

锡锌矿区位于矿区北部,距离铜锌矿约1.5 km(图1-b)。大体可划分出含锡锌石英脉、花岗岩型锡锌矿和锡锌矿化花岗岩脉3种矿化类型。

1.2.1 石英脉型锡锌矿体

为主要锡矿化类型,已控制较大规模石英脉型锡锌矿体2条,揭露的小规模石英脉数量众多。石英脉产于片麻岩、石英闪长岩中,与围岩界线截然,总体倾向SE110°,倾角40°左右。东侧的石英脉(1[#])局部开展过地质勘查,钻探控制少量钨、锡资源量,曾有民采。西侧石英脉发现于2014年,规模较大,控制长约800 m,倾向延深约700 m,矿脉厚1 m左右,最大厚度达8 m。石英脉内矿化不均匀,平均含Sn 1%左右(图3)。

主要矿石矿物为锡石、闪锌矿、毒砂,少量方铅

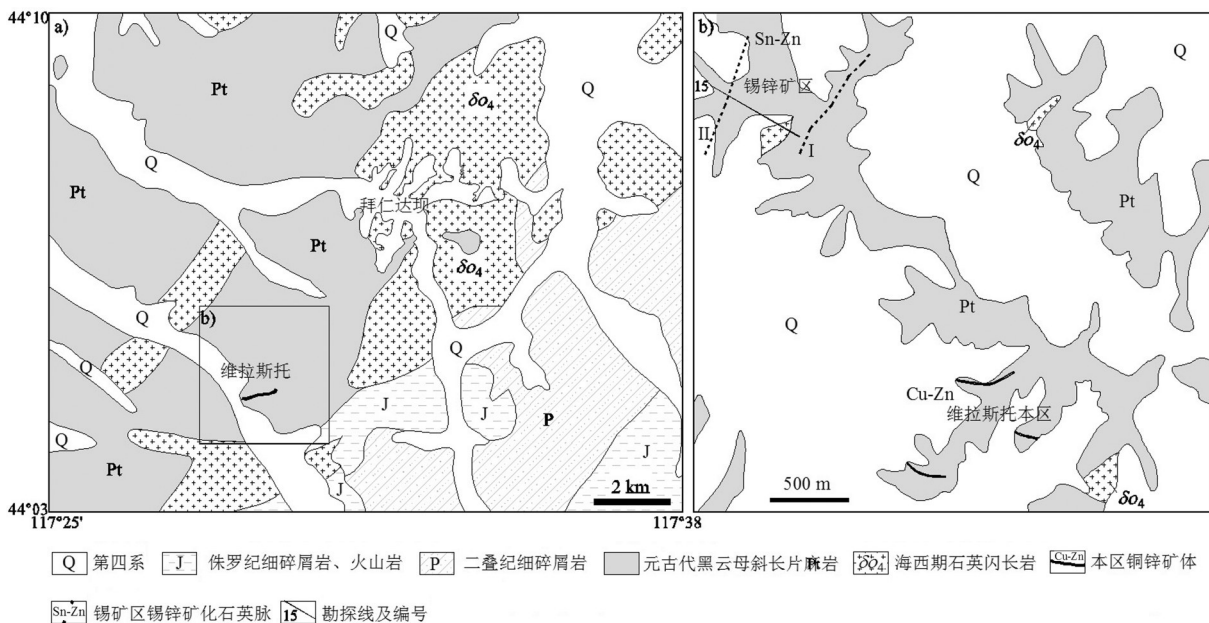


图1 维拉斯托锡多金属矿地质简图
Fig.1 Geological map of the Weilasituo Sn-Zn deposit, Inner Mongolia

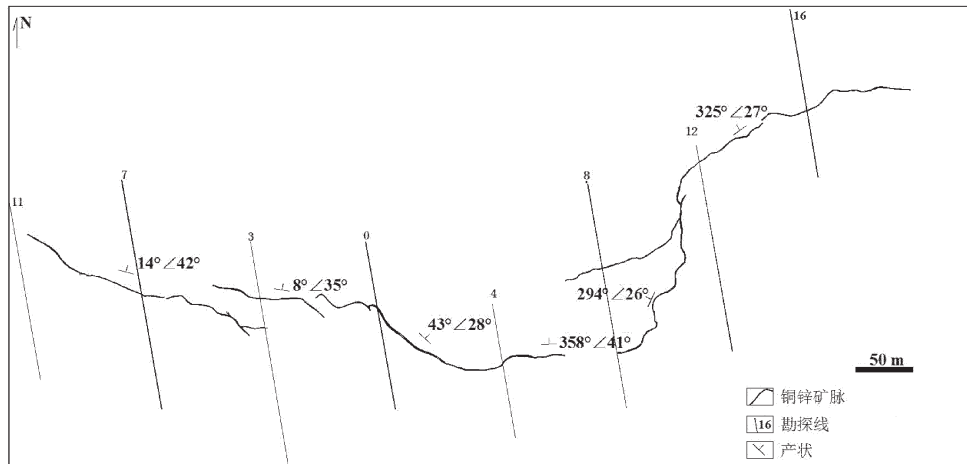


图2 维拉斯托铜锌矿区(本区)1110中段平面简图

Fig.2 Sketch plan view of 1110 level, the Weilasituo Cu-Zn deposit, Inner Mongolia

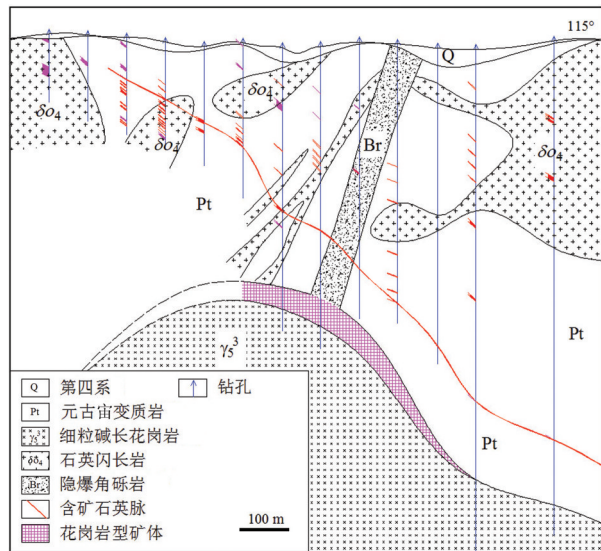


图3 维拉斯托锡锌矿区15线剖面简图

Fig.3 Geological section of the Weilasituo Sn-Zn deposit, Inner Mongolia

矿、黝铜矿、黄铜矿、辉钼矿、针硫锑铅矿等。闪锌矿浅棕色,粗粒,与锡石、毒砂共生,含Fe 2.6%。脉石矿物为石英,少量方解石、萤石、白云母等。方解石与硫化物共生,形成略早于硫化物和锡石。萤石以紫色为主,少量为浅绿色。晶洞普遍,晶洞内常见石英、闪锌矿、方解石、萤石以及毛发状针硫锑铅矿等矿物。

脉体两侧片麻岩发育小范围云英岩化,黑云母全部分解,大量出现白云母和石英、萤石、黄玉等,

有时见有细粒独居石(图4-a)。在部分辉钼矿石英细脉的边部发育钾长石化(图4-b)。

1.2.2 花岗岩型锡锌矿

花岗岩型锡锌矿发育于岩体顶部似伟晶岩之下,呈帽状分布于岩体向上凸出部位,矿体在岩体顶部厚大,两侧减薄,最大厚度>10 m,目前只控制岩体顶部以东部分。矿体属花岗岩的一部分,矿石结构构造与花岗岩基本相同。矿化强度自上而下逐渐减弱,矿体与岩体过渡,下部边界由品位圈定。锡石硫化物在其中不均匀分布,少量浸染状分散于花岗岩中,大部分呈局部集中的不规则珠滴状矿囊,直径0.2~10 cm。珠滴的分布不均匀,总体上部多,向下逐渐减少,珠滴的数量直接影响矿石的品位。主要矿石矿物为锡石、闪锌矿,少量斜方砷铁矿。闪锌矿呈浅黄色—油脂黄色,锡石浅棕色,显微镜下近无色。常见主要由石英、黄玉及锡石硫化物组成的晶洞。有关矿石的结构,将在花岗岩部分作详细说明。

隐爆角砾岩发育于岩体顶部外接触带,呈陡倾筒状,长轴走向NE60°,在地表局部出露宽约10 m,长约20 m。角砾主要是片麻岩,大小不一,棱角分明。胶结物为云英岩,其中发育大量白云母、黄玉和石英,少量萤石。隐爆角砾岩与岩体过渡,在过渡部位,胶结物与岩体性质相近,细粒花岗岩中云母、黄玉增多。岩筒的角砾岩胶结物中白云母、黄玉逐渐增多,岩性转变为云英岩;再往上,出现大片

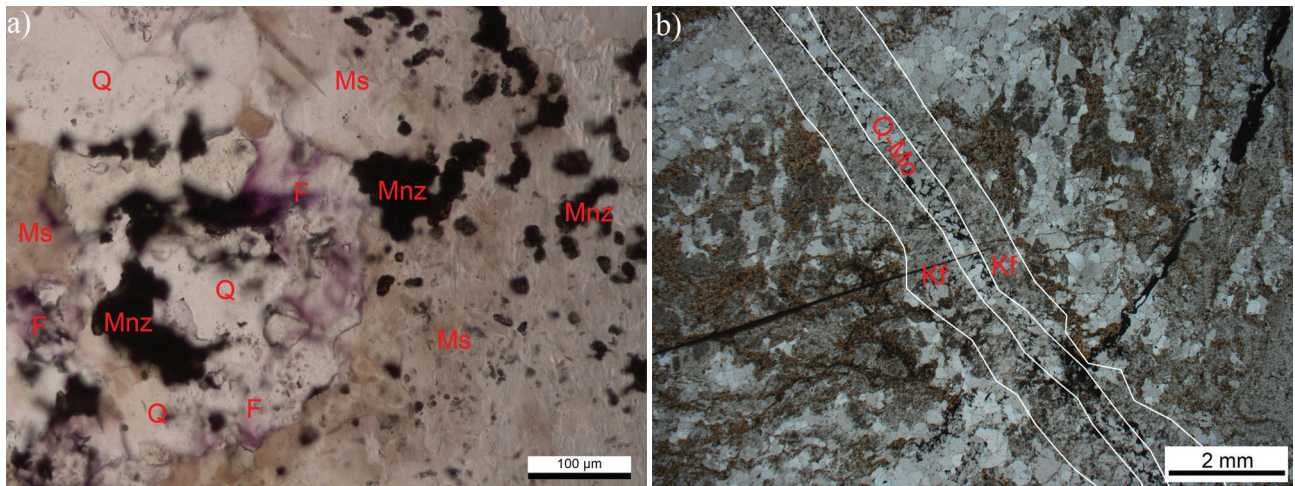


图4 石英脉显微结构

a—石英脉边部云英岩中的独居石(Mnz)与萤石(F)、石英(Q)、白云母(Ms)共生；
b—辉钼矿石英脉两侧的钾长石化，围岩为片麻岩，透射光，单偏光

Fig.4 Microphotograph of quartz vein in the Weilasito Sn-Zn deposit, Inner Mongolia

a- Monazite (Mnz), fluorite (F), quartz (Q), muscovite (Ms) in greisen near the quartz vein; b- K-feldspar alteration of the molybdenite quartz veins, the wall rock is gneiss. light transmission, plainlight

云母。角砾岩的Sn-Zn矿化不均匀，总体品位低。

1.2.3 矿化长英质脉

细粒矿化长英质脉广泛分布于岩体顶部外接触带的变质岩和石英闪长岩中，部分出露地表，是维拉斯托矿床发现的直接标志之一。脉体产状与石英脉一致，厚0.3~2 m，由强烈云英岩化的细粒花岗岩组成，垂向分带明显，下侧为细粒花岗岩结构，上侧呈云英岩结构，富含锡石、闪锌矿等。矿物组合与结构构造特征与花岗岩型矿石相似，热液特点更加明显一些。由于长英质脉与花岗岩型矿石地质特征相似，规模较小，后面将二者综合叙述。

2 花岗岩及花岗岩型矿石的组构特征

2.1 细粒斑状花岗岩

成矿地质体为锡锌矿区的细粒斑状碱长花岗岩，分布于含矿石英脉的下方，接触带产状与石英脉大体平行，走向约为NE20°，东缓西陡。岩体顶部附近分带较明显，自上而下，分别为似伟晶岩、花岗岩型矿石、矿化花岗岩和花岗岩，矿体中的锡锌矿化往下逐渐减少，云母、黄玉、石英含量也逐渐降低，与花岗岩过渡。岩体内局部见流动条带状构造，由长英质与硅质互层构成，富石英、黄玉、白云母，与南岭成矿带钨矿区岩体顶部的一些流动条带

相似。似伟晶岩呈壳状分布于岩体顶部，最大厚4 m，巨晶状，上部为天河石，下部为石英(图5-a)。

花岗岩浅灰白色，因钾长石为富Rb天河石而整体呈浅天蓝色。似斑状结构(图5-b、c)，斑晶包括石英、钾长石、钠长石。斑晶呈多级，粒度差别极大。基质为细粒结晶结构，主要矿物为钠长石、钾长石、石英、黄玉等，不发育暗色矿物。

石英斑晶呈短柱状，边部因熔蚀呈浑圆状。粒度2~8 mm，含量约为40%。石英斑晶内部包含早结晶的细粒钠长石，斑晶边缘含大量细粒半自形钠长石、它形钾长石，沿结晶面生长，构成环带(图5-d)。

钾长石斑晶粒度稍细，粒径1~2 mm，含量30%左右，自形晶为主，多表现为微斜长石，少量条纹长石，包含少量钠长石。钾长石边部发育净化生长边，内部有格子双晶或条纹结构(图5-c)，与石英边部的似文象结构相似。钾长石光轴角(2v)一般在40°~50°，Na₂O含量0.65%~0.73%(表1)，折合Ab值为5~6，主体可能为歪长石-透长石系列。

钠长石，除早阶段包裹于石英、钾长石中的钠长石外，大量钠长石呈细粒状分布于石英、钾长石斑晶之间，粒径0.05~0.5 mm，粒度大体介于斑晶矿物与基质矿物之间，含量20%左右。绝大部分钠长石呈碎屑状他形晶，似乎经历过明显的破碎过程

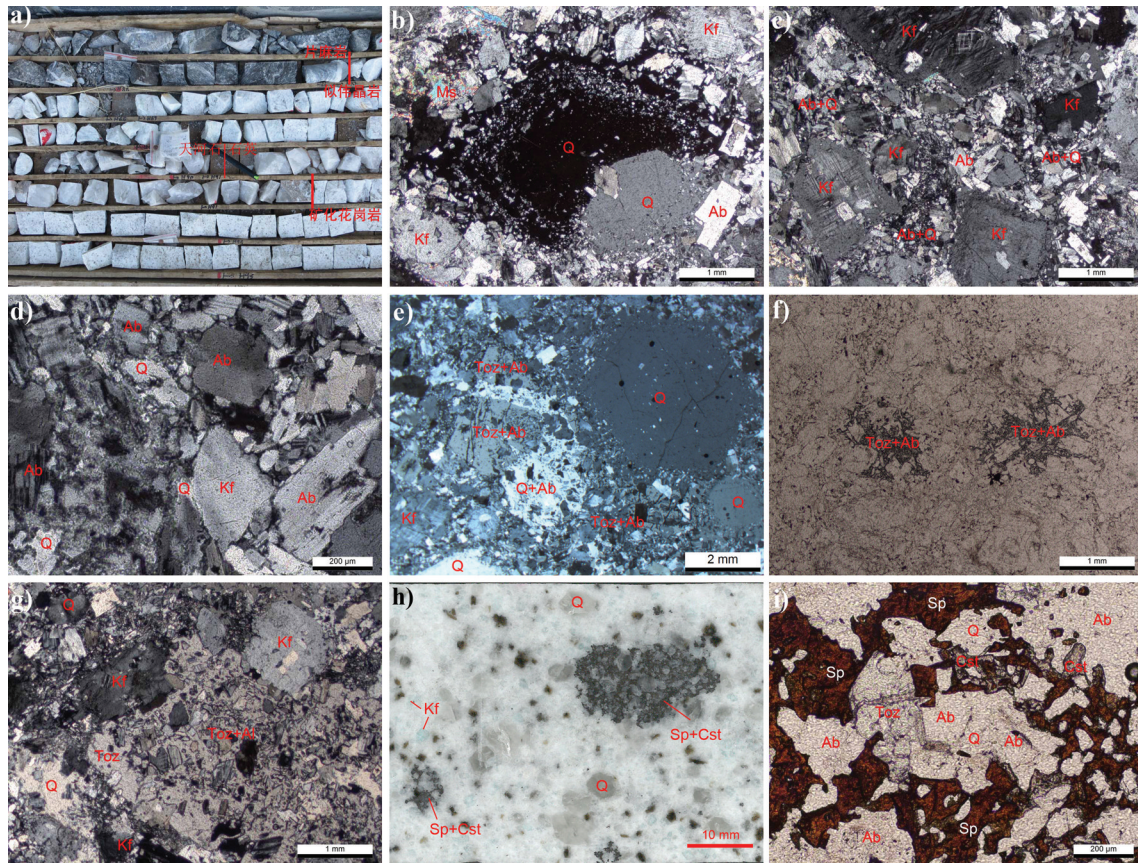


图5 维拉斯托锡锌矿床花岗岩、矿石显微特征

a—IZK1503岩心,自上而下分别为片麻岩、伟晶岩和花岗岩型矿石,伟晶岩上部为天河石,下部为石英;b—似斑状结构,石英(Q)斑晶边部钠长石构成环带;c—钾长石(Kf)斑晶边部发育生长边;d—基质以钠长石(Ab)和石英为主;e—石英珠滴与黄玉珠滴共存,不规则状;f—黄玉(Toz)珠滴;g—黄玉珠滴中包裹大量钠长石、石英,h—岩心照片,锡石(Cst)闪锌矿(Sp)珠滴,石英斑晶自形,天河石呈淡蓝色;i—锡石闪锌矿珠滴内部结构,与黄玉共生,包裹钠长石、石英;b-e:正交偏光,g, i: 单偏光

Fig.5 Micro-texture of the granite and ore in the Weilasito Sn-Zn deposit, Jiangxi Province

a— Drill hole IZK1503, gneiss, pegmatite and granite type ore from top to bottom respectively. The pegmatite consists of upper amazonite and lower part of quartz. b - Porphyritic structure, quartz phenocrysts (Q) with the fine coarse albite ring; c- K-feldspar (Kf) phenocrysts with a crust. d- Quartz and albite (Ab) in matrix; e-Quartz and topaz driplets, irregular shape; f- Topaz (Toz) beadlet; g- Albite and quartz embraced in topaz driplet; h - Core photos, cassiterite (Cst)-sphalerite (Sp) driplets in granite; i- Texture of the cassiterite (Cst)-sphalerite (Sp) driplets, associated with topaz albite and quartz;b-e: Corssed nicols, g, i: Plainlight

(图5-e),与包裹于石英边部的钠长石相似。钠长石中 Na_2O 含量11.25%~11.69%, CaO 0.03%~0.06%, K_2O 0.12%~0.22%(表1), A_n 值<0.3,属于高度富钠的钠长石。

基质包括细粒石英、黄玉、萤石、白云母等,总含量<20%。其中,黄玉、石英分两类,一部分呈微细粒状分布于基质中,另一类局部集中呈不规则状,形成珠滴。

由于基质为细粒结晶质,整体为似斑状结构。岩石中不含斜长石,钠长石 $A_n \ll 5$,该花岗岩确定

为细粒斑状碱长花岗岩。

2.2 花岗岩型矿体中的珠滴结构

花岗岩型矿石的结构构造、矿物组合与花岗岩基本相同,只是其中发育大量闪锌矿、锡石等矿化,黄玉、石英等含量明显增高,少量白云母。花岗岩型矿石中发育三类不规则状珠滴:锡石硫化物珠滴、黄玉珠滴和石英珠滴。三类珠滴紧密相伴出现,在时混在一起,若即若离。珠滴形态不规则,边界明显。结构相似,均为“类花岗结构”,“斑晶”为细粒钠长石、石英,一般为花岗岩的中细粒斑晶,基

表1 维拉斯托矿床花岗岩长石电子探针分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses of the albite in granite of the Vilasito deposit (%)

编号	Na ₂ O	SiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	总量	分子式	An	Or
WLST01	11.31	68.49	0.12	19.47	0.03	99.42	K _{0.01} Na _{0.83} Ca _{0.00} Al _{1.01} Si _{3.03} O ₃	0.17	0.80
	11.25	67.99	0.15	19.86	/	99.25	K _{0.01} Na _{0.83} Ca _{0.00} Al _{1.04} Si _{3.01} O ₃	0.00	1.01
	11.69	68.07	0.16	19.47	0.03	99.42	K _{0.01} Na _{0.87} Ca _{0.00} Al _{1.02} Si _{3.02} O ₃	0.16	1.03
	11.36	67.50	0.19	19.59	0.06	98.70	K _{0.01} Na _{0.85} Ca _{0.00} Al _{1.03} Si _{3.01} O ₃	0.33	1.26
	11.58	67.73	0.22	19.81	0.03	99.37	K _{0.01} Na _{0.86} Ca _{0.00} Al _{1.04} Si _{3.00} O ₃	0.16	1.43
	11.42	68.69	0.19	19.54	/	99.84	K _{0.01} Na _{0.84} Ca _{0.00} Al _{1.01} Si _{3.03} O ₃	0.00	1.26
WLST02-2	0.73	65.17	15.62	18.48	/	100.00	K _{0.92} Na _{0.06} Ca _{0.00} Al _{1.00} Si _{3.00} O ₃	0.00	94.24
WLST02-6	0.65	64.98	15.86	18.07	/	99.56	K _{0.94} Na _{0.05} Ca _{0.00} Al _{0.99} Si _{3.01} O ₃	0.00	94.91

质各不相同。

2.2.1 石英珠滴

数量相对较少,只出现于岩体顶部花岗岩型矿石以及含矿长英质脉中,分布极不均匀,形态不规则,直径一般0.1~1 cm(图5-e)。类花岗结构,基质几乎全部为石英,统一消光,包裹早形成的钠长石、石英等。其中常共生细粒黄玉。这类晚期形态的石英有时与石英斑晶相连,与石英斑晶边部富含钠长石的石英边过渡,显示二者的一致性。

2.2.2 黄玉珠滴

黄玉珠滴分布相对广泛,分布范围大于花岗岩型矿体,但分布不均匀。珠滴直径一般0.1~1 cm(图5-f、5-g)。类花岗结构,基质几乎全部为黄玉,包裹钠长石、石英。

2.2.3 锡石硫化物珠滴

锡石硫化物珠滴最多,直径变化大,一般0.2~2 cm(图5-h、5-i),最大达10 cm。类花岗结构,基质为闪锌矿、锡石以及少量黄玉,包裹长石、石英。闪锌矿占基质含量>70%,浅黄色,半透明,其中含Fe 7.06%~7.93%,Se、Bi含量偏高(表2)。锡石浅棕色,薄片下无

色,含量<10%,分布不均匀。偶见斜方砷铁矿。

在显微尺度下,黄玉、石英、锡石硫化物三类珠滴往往相伴出现。黄玉珠滴分布最广,石英、锡石硫化物珠滴旁常出现黄玉珠滴,但后二者一般不同时出现。

3 矿床地球化学特征

样品取自维拉斯托锡锌矿区的碱长花岗岩体、似伟晶岩。核工业北京地质研究院分析主微量元素,其中主量成分分析方法为X荧光光谱法(固体样),仪器型号为AB104-L X射线荧光光谱仪,执行标准GB/T14506.14-2010;氧化亚铁量测定执行标准GB/T14506.28-2010。微量元素成分分析方法为ICP-MS,王水+HF溶样,执行标准GB/T14506.30-2010。电子探针分析设备为JXA-8100电子探针分析仪,执行标准GB/T 15074-2008。U-Pb单颗粒锆石测年在中国科学院地质与地球物理研究所多接收-电感耦合等离子体质谱实验室(MC-ICP-MS)完成。使用仪器为Neptune多接受电感耦合等离子体质谱仪和COMPex Pro的193 nm激光剥蚀系统。

表2 维拉斯托矿床硫化物矿物电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of sulfide minerals in granite, the Vilasito deposit

序号	样品编号	岩矿石	矿物	As	Se	Fe	S	Pb	Ni	Zn	Co	Bi	总量
1	WLST02-6	花岗岩	闪锌矿	0.06	0.06	7.93	33.43	/	/	58.19	/	/	99.78
2	WLST02-8		闪锌矿	/	0.08	7.06	32.79	/	/	59.58	/	0.24	99.78
3	WLST03-1	石英脉	闪锌矿	0.02	/	2.61	32.41	0.11	0.06	63.65	/	/	98.9
4	WLST03-4		斜方砷铁矿	70.88	/	26.82	0.8	0.19	/	/	0.07	0.11	98.87

WLST02—花岗岩;WLST03—石英脉。

激光束斑直径为44 μm , He为载气。标准锆石为91500, 利用NIST610玻璃标样作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。

3.1 花岗岩主量元素地球化学

主量和部分微量元素组成见表3, 其中南岭花岗岩为南岭矿带31个钨锡矿床成矿花岗岩体的平均值(未发表数据)。

维拉斯托花岗岩 SiO_2 含量为71.47%~73.81, 平均72.51%, Al_2O_3 含量为15.12%~16.42%, 平均15.71%。 CaO 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 MnO 含量低, 平均值分别为0.20%、0.015%、0.30%和0.016%。 Na_2O 、 K_2O 平均值分别为6.46%、3.63%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 1.78。 $\text{FeO}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 0.05~0.23, 平均0.09。

花岗岩型矿石具有更高含量的 SiO_2 、 CaO 、 TFe_2O_3 、 MnO , 和较低含量的 Na_2O 、 K_2O 。

在各类地球化学图解中, 维拉斯托花岗岩及花岗岩型矿石, 富硅(图6-a)、过铝质(图6-b), 为高钾钙碱性系列(图6-c), 演化程度高, 在Rb-Sr-Ba图解中集中于Rb的端元附近(图6-d)。

3.2 微量元素与稀土元素

3.2.1 微量元素与稀土元素地球化学

扣除特高含量值后, 细粒花岗岩中Cu、Pb、Zn、W、Bi、Mo平均值(10^{-6})分别为29.3、64.1、50.1、28.76、7.92、13.55。大离子亲石元素Rb、Sr、Ba、Cs分别为994、6.88和15.96、12.73。高场强元素Nb、Ta、Hf、Th等含量高, 其中Nb、Ta分别为89.26和23.09。 Li/Be 、 Co/Ni 、 Rb/Sr 、 Nb/Ta 、 U/Th 比值分别为0.50、145、66.58、3.87、0.71。

花岗岩型矿石高度富集成矿元素W、Bi、Mo和亲硫元素Cu、Pb、Zn、Co、Ni等, 其中In含量达到 9.66×10^{-6} , 远高于花岗岩。 Li/Be 、 Co/Ni 比值为0.28、28.0, 低于花岗岩; Rb/Sr 、 Nb/Ta 比值分别为264、2.92、1.20, 高于花岗岩。

花岗岩的稀土元素总量 $\Sigma \text{REE} = 33.57$, 显著低于南岭钨矿区成矿花岗岩。球粒陨石标准化曲线见图7, $\text{LREE}/\text{HREE} = 2.09\sim 5.50$, 平均2.98; 负Eu异常强烈, δEu 平均0.03, “四分组效应”明显。花岗岩型矿石和伟晶岩的REE与花岗岩大体相似, $\text{LREE}/\text{HREE} = 5.96、7.94$, $\delta\text{Eu} = 0.07、0.11$ 。

3.2.2 地球化学剖面

对锡锌矿区IZK02306钻孔揭露的花岗岩顶部附

近制作一条地球化学剖面(图8, 只列出了部分元素)。花岗岩的微量元素含量变化较小, 按照变化趋势, 大体分为两段, 深部的花岗岩(图中下阴影部分)微量元素含量稳定, 顶部约40 m的范围内元素含量变化更大一些。自下而上, 含量升高的元素有Cu、Mo、Co、Ni、Ba、Cr、V、Hf; 含量降低的元素有Zn、Cs、Li、Nb、Ta、Y; 无明显变化的元素为W、U、Be。

矿化花岗岩与花岗岩的微量元素变化规律明显不同, 与成矿有关的元素、亲硫元素含量迅速增高, 但一些挥发分有关元素以及与岩浆作用有关的元素, 含量迅速降低, 包括Rb、Sr、Ba、Nb、Ta、Be、Ga等。元素比值能清晰反映出这种不同, 包括Zn/Mo、W/Mo等。

利用矿床勘查工作分析的297件样品数据, 对钻孔IZK01509处理后的地球化学剖面如图9。 Sn 、 Zn 、 Rb 、 Ta 、 Nb 含量跳动性很大, 经滑动平均处理的曲线显示出的规律性与图8相似, 这些元素含量在岩体顶部约400 m范围内向上逐渐增高, 局部 Sn 、 Zn 达工业品位, Rb 的矿化范围更宽, 按0.1%的边界品位要求, 总厚度 >300 m。 Ta 、 Nb 的变化特点相似, 深度范围更大, Ta 在上部的升幅也更明显。似伟晶岩的性质明显不同于花岗岩, 其上部的巨晶钾长石相对低 Sn 、 Zn , 明显高 Ta 、 Nb 、 Rb , 下部的粗晶石英中微量元素含量明显低。

3.3 流体包裹体形态特征

花岗岩及花岗岩型矿石中石英内的流体包裹体特征相似。在石英斑晶中, 流体包裹体类型主要包括熔融包裹体、熔流包裹体和气液包裹体。石英颗粒中央部位为熔融包裹体(图10-a), 液固比(气液部分占包裹体体积比) $<10\%$, 气液部分被挤压在边部; 石英颗粒边部为熔流包裹体(图10-b、10-c)和少量气液包裹体, 与大量细粒钠长石共存, 代表岩浆晚期分异的成矿流体。熔流包裹体个体较大, 直径5~30 μm , 液固比一般在30%~80%, 初步的拉曼光谱分析显示, 固体部分为玻璃质。气液包裹体之气液比较高, 一般在40%~60%。

条带状白云母花岗岩中, 含大量晚期黄玉、石英, 其中的流体包裹体以气液两相包裹体为主, 气液比30%~60%。常见熔流包裹体与之共生, 这些熔流包裹体中固相物含量较低, 占包裹体总体积比一般 $<10\%$ (图10-d)。

表3 内蒙维拉斯托锡多金属矿床花岗岩主量元素含量(氧化物%,微量元素 10^{-6})Table 3 Main and trace element content of granite in the Vilasito tin deposit (oxide /%, trace element/ 10^{-6})

样品号	WLB01	WLB02	WLB05	WLB08	WLB10	WLB13	WLB16	WLB18	WLB22	WLST01	兴蒙	南岭
岩性	伟晶岩	含矿花岗岩	细粒花岗岩							花岗岩		
SiO ₂	93.14	78.08	73.81	72.03	72.13	73.05	71.47	73.51	71.59	72.54	72.73	74.63
TiO ₂	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.25	0.08
Al ₂ O ₃	4.11	13.29	15.12	16.38	15.91	15.46	16.42	14.53	16.17	15.84	14.04	13.10
Fe ₂ O ₃	0.03	0.04	0.04	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.90	0.58
FeO	0.32	0.81	0.13	0.18	0.30	0.17	0.32	0.18	0.44	0.39	0.89	1.31
MnO	0.03	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.11
MgO	0.17	0.49	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.06	0.03	0.05	0.46	0.21
CaO	0.11	0.45	0.14	0.11	0.13	0.08	0.13	0.69	0.10	0.11	1.32	0.87
Na ₂ O	0.08	1.32	5.94	7.48	7.00	6.62	7.16	4.51	6.75	6.18	3.86	3.43
K ₂ O	1.28	0.72	3.78	2.79	3.44	3.73	3.48	3.99	3.75	4.08	4.09	4.66
P ₂ O ₅	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.16	0.05
LOI	0.61	2.59	0.38	0.33	0.34	0.20	0.26	1.87	0.45	0.10		0.95
总量	99.92	97.90	99.43	99.43	99.36	99.42	99.35	99.41	99.35	99.35		99.75
Cu	5.12	2936	5.07	3.81	2.43	2.72	0.72	5.60	1.95	48.4	4.6	29.3
Pb	2.95	4070	31.3	31.8	30.7	32.8	29.5	37.9	36.8	41.1	19	64.1
Zn	126	9727	132	28.4	51.6	56.4	107	49.6	94.5	1698	38	50.1
W	1.04	150	2.65	1.84	2.29	2.15	2.46	1.13	2.69	54.70	0.51	28.76
Bi	0.09	121	0.16	0.12	0.03	0.08	0.15	0.80	10.50	1.23	0.10	7.92
Mo	0.24	0.18	5.03	6.88	23.30	11.60	0.23	0.43	1.50	0.79	0.43	13.55
Cd	0.17	23.2	0.28	0.11	0.15	0.09	0.06	0.11	0.15	4.51	0.06	0.34
Ga	19.2	31.5	67.1	76.8	76.0	70.1	69.4	56.2	71.8	71.4	18	22.3
Co	0.35	0.26	0.32	0.09	0.12	0.12	0.09	0.12	0.05	0.06	2.9	1.46
Ni	0.87	0.94	0.42	0.25	0.30	0.13	0.18	0.25	0.14	0.25	4.0	3.32
Rb	475	344	915	706	956	1155	1117	860	1088	1155	125	600
Sr	2.41	12.3	13.2	11.6	5.16	2.56	2.61	15.30	2.64	1.96	179	30.2
Ba	13.7	14.2	42.3	20.9	11.0	4.8	5.1	36.0	5.3	2.3	461	92.5
Cs	12.4	13.9	11.1	9.0	11.6	12.9	13.5	12.1	16.5	15.2	3.1	34.6
In	0.10	9.66	0.16	0.12	0.15	0.15	0.19	0.08	0.20	4.52		0.22
Tl	1.29	1.42	3.36	2.62	3.51	4.09	3.89	3.38	3.66	3.80	0.62	3.44
Cr	2.11	0.71	1.49	0.64	1.24	0.47	0.95	0.27	0.68	1.57	4.0	4.20
V	3.53	12.4	22.0	3.98	2.47	2.26	2.17	1.61	1.25	19.2	22	5.95
Zr	53.8	75.8	76.1	91.1	94.0	85.7	92.5	66.2	82.6	77.3	141	116
Li	394	867	247	269	422	335	650	273	708	295	16	105
Be	2.13	3.28	5.61	6.64	6.28	6.22	6.88	4.72	6.28	5.42	2.4	22.8
Nb	5.24	5.92	92.6	88.2	90.9	100	106	28.6	91.8	116	11.0	35.6
Ta	1.72	2.03	31.5	20.8	16.3	32.1	22.8	11.4	19.0	30.8	0.92	12.2
Hf	21.0	23.8	20.8	25.8	24.2	21.9	22.1	16.8	19.1	16.7	4.7	7.32
U	2.97	6.16	11.9	12.0	8.69	14.2	13.0	5.4	19.7	13.3	2.13	22.2
Th	4.72	5.14	21.2	18.8	19.3	16.0	16.4	16.0	15.6	14.2	12.8	24.6
Sc	1.63	2.27	1.73	1.47	1.84	2.01	2.33	1.09	2.44	1.89	4.7	5.50
Y	0.86	2.44	1.81	1.30	2.35	3.22	3.50	2.03	4.31	3.27	19.0	51.7
Sb	3.17	46.4	0.80	1.13	0.36	0.39	0.18	1.58	1.13	2.24	0.16	1.20
La	4.72	4.43	4.96	3.50	2.77	3.03	3.90	2.86	3.69	2.92	26	20.0
Ce	14.9	18.1	20.5	14.2	11.2	11.8	15.3	11.6	14.1	11.3	52	42.7
Pr	1.67	2.23	2.50	1.67	1.35	1.44	1.84	1.39	1.71	1.35	5.76	5.52
Nd	5.42	5.92	6.59	4.10	3.52	3.94	4.90	3.58	4.56	3.66	21.20	21.6
Sm	1.21	1.66	2.02	1.24	1.22	1.31	1.66	1.07	1.67	1.28	3.90	7.43
Eu	0.04	0.03	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.72	0.15
Gd	0.59	0.87	0.90	0.65	0.61	0.83	1.00	0.61	1.06	0.74	4.5	7.49
Tb	0.14	0.20	0.20	0.16	0.22	0.27	0.32	0.17	0.37	0.26	0.55	1.79
Dy	0.75	1.13	1.27	0.97	1.28	1.93	2.27	1.22	2.58	1.86	3.70	11.59
Ho	0.10	0.19	0.22	0.18	0.26	0.38	0.43	0.22	0.49	0.35	0.74	2.28
Er	0.42	0.73	0.87	0.85	1.18	1.55	1.69	1.00	2.00	1.47	2.18	7.14
Tm	0.12	0.20	0.26	0.26	0.35	0.43	0.47	0.27	0.54	0.42	0.38	1.30
Yb	1.21	1.80	2.49	2.65	3.32	4.18	4.55	2.65	4.90	3.87	2.20	8.97
Lu	0.19	0.33	0.46	0.48	0.56	0.71	0.73	0.44	0.77	0.62	0.33	1.35
ΣREE	31.48	37.81	43.25	30.93	27.85	31.81	39.06	27.08	38.44	30.10	124.16	139.28
Eu/Eu*	0.11	0.07	0.03	0.08	0.04	0.01	0.01	0.06	0.01	0.02	0.52	0.06

注:WLB01为富石英似伟晶岩;WLB02为矿化细粒斑状花岗岩(含矿花岗岩);WLB05~WLB22为细粒花岗岩。WLST01取自IZK1501,其他样品取自IZK02306。兴蒙花岗岩平均值数据引自文献[17],南岭花岗岩数据为南岭成矿带31个钨矿区成矿花岗岩的平均值(本文未发表数据)。

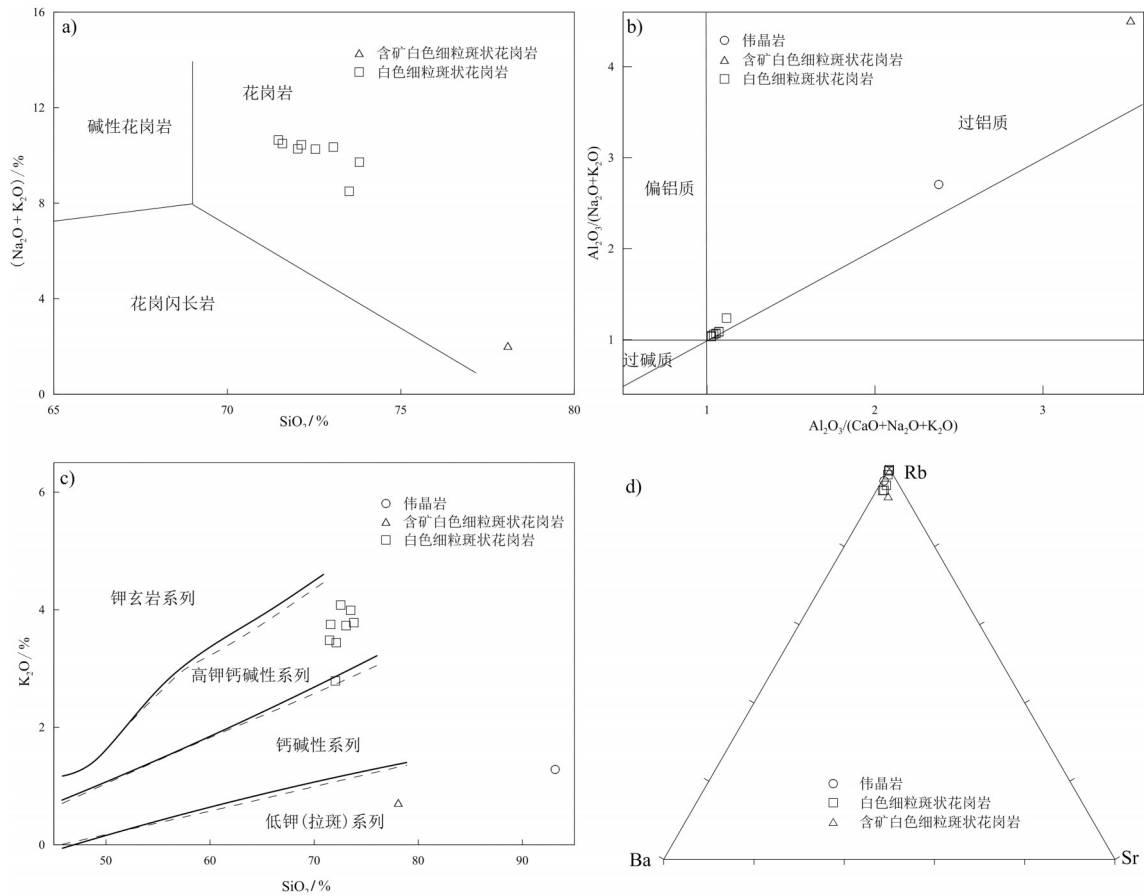


图6 维拉斯托矿床花岗岩及部分矿石主量元素地球化学图解
Fig.6 Geochemical diagram of granite and ore in the Weilasito deposit

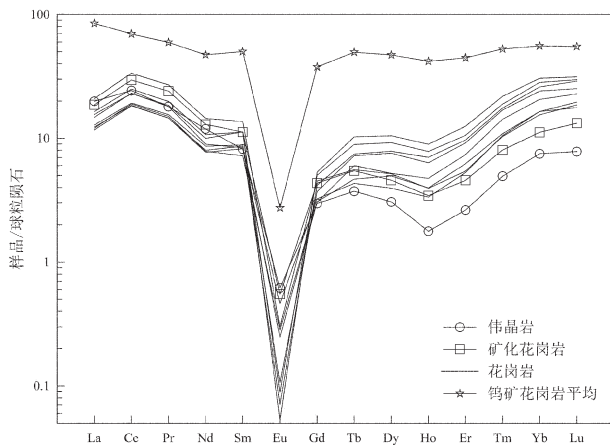


图7 维拉斯托矿床花岗岩及部分矿石REE配分图解
(球粒陨石标准化值引自文献[18])
Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of granite and ore
in the Weilasito deposit
(chondrite values after reference[18])

隐爆角砾岩的胶结物以黄玉、白云母为主,黄玉的包裹体以气液两相包裹体为主,有少量熔流包裹体(图10-e),其中的固体部分为玻璃质。

在锡石闪锌矿石英脉中,只发育气液两相包裹体(图10-f),气液比一般<50%,均一至液相。对8件包体片样品的初步测定,均一温度为195~308°C,盐度1.6~10.7%NaCleqv.,集中于5%~10% NaCleqv.(本文测定)。

维拉斯托本区铜锌矿体,石英或方解石内只发育气液包裹体,主要为富液相包裹体(气液比5%~40%),少量富气相包裹体(气液比60%~90%),均一温度106°C~389°C,盐度为1.23%~9.86%NaCleqv.^[12]。

3.4 同位素年代学分析结果

样品取自维拉斯托锡锌矿区钻孔IZK1501的细粒碱长花岗岩,局部含锡石闪锌矿珠滴。锆石形

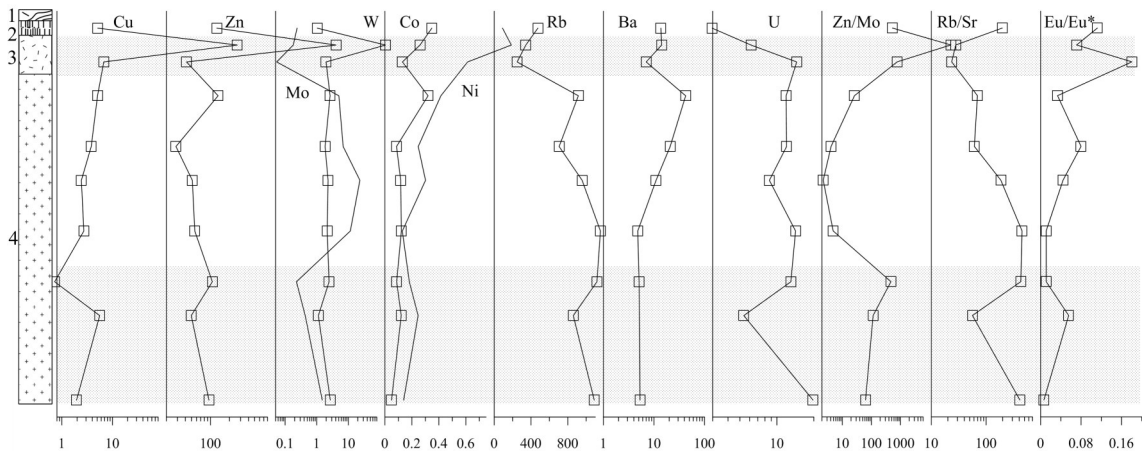


图8 维拉斯托锡矿区钻孔IZK02306岩体顶部地质地球化学剖面图

1—片麻岩; 2—似伟晶岩; 3—矿化细粒斑状花岗岩; 4—细粒斑状花岗岩。剖面位置: IZK02306 钻孔480~590 m处
Fig.8 Geochemical profile of the top part of the granite from drill hole IZK02306, the Vilasito tin deposit

1—Gneiss; 2—Pegmatite; 3—Mineralized fine-grained porphyritic granite; 4—Fine-grained porphyritic granite. Section position: IZK02306 480~590 m

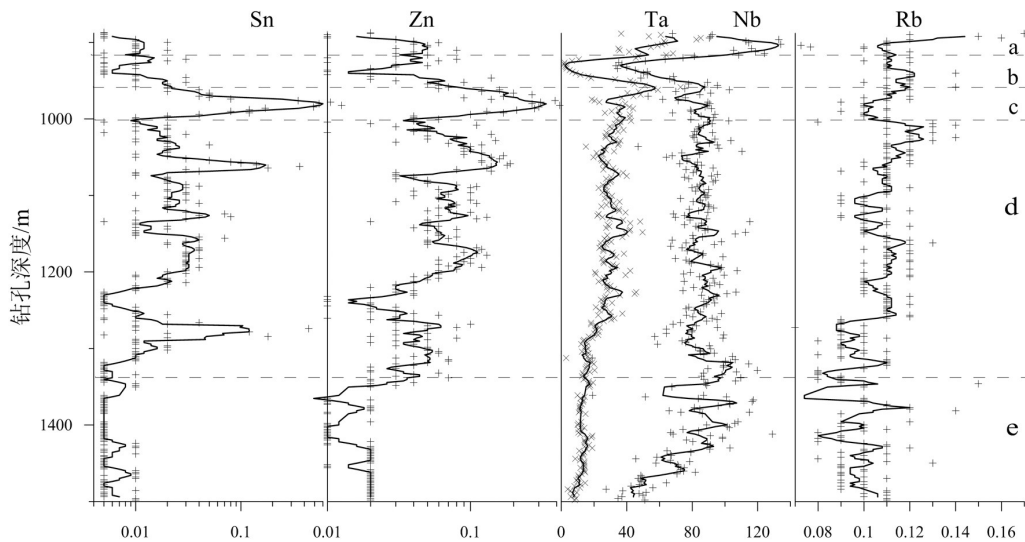


图9 维拉斯托锡矿区钻孔IZK01509岩体顶部地质地球化学剖面图

a—似伟晶岩钾长石; b—似伟晶岩石英; c—矿化细粒斑状花岗岩; d—弱矿化细粒斑状花岗岩; e—细粒斑状花岗岩。
剖面位置: IZK01509 钻孔890~1500 m处, 剖面长度610 m。符号+或×代表样品点, 曲线经滑动平均处理; 分析数据来自矿床勘查资料, 含量单位: Sn、Zn、Rb为%, Ta、Nb为 10^{-6}

Fig. 9 Geochemical profile of the top part of the granite from drill hole IZK01509, the Vilasito tin deposit
a— Pegmatite feldspar; b— Pegmatite quartz. c— Mineralized fine-grained porphyritic granite; d—Weakly mineralized fine-grained porphyritic granite. e— Fine-grained porphyritic granite. Section position: IZK01509 890~1500 m, section length 610 m. The symbol + and × represent the sample points, and the curve is treated by sliding average. Analytical data from mineral exploration project. Content units: Sn, Rb, Zn/%, Nb, Ta/ 10^{-6}

态多为自形、半自形柱状,长宽比1~3, Th/U比值为0.15~0.37,具岩浆锆石性质。锆石中U含量极高,一般在 $16000 \times 10^{-6} \sim 50000 \times 10^{-6}$ (表4)。这种现象常见于高分异花岗岩中,尤其是锡钨多金属矿床有关的成矿花岗岩体中。锆石CL图像偏暗,在单偏光

下锆石透明、干净、晶形及结构完整,显示高U含量对这批锆石的结构并未造成致命破坏。鉴于年龄数据较为集中,且与区域内花岗岩及矿产的成岩成矿年龄基本一致,这些数据仍具有较好的参考价值。具体实验结果参见表4。

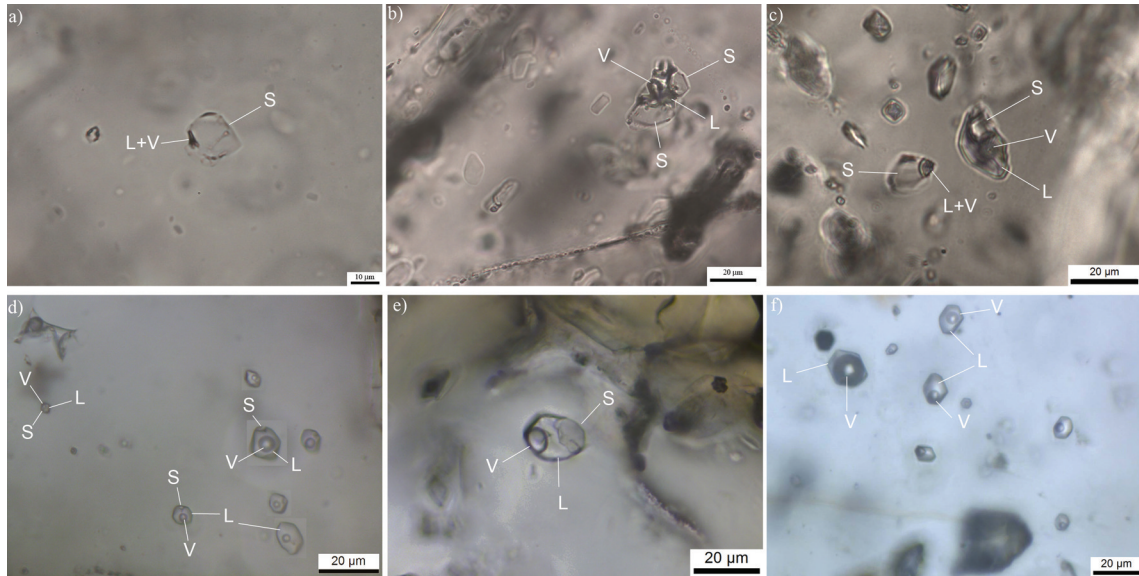


图10 维拉斯托矿床流体包裹体特征

a—熔融包裹体,气液部分呈黑色,石英斑晶内部;b,c—熔流包裹体,部分包裹体中含多个固相物,石英斑晶边部;d—黄玉珠滴中的熔流包裹体和气液包裹体,条带状白云母花岗岩;e—黄玉中的熔流包裹体,隐爆角砾岩胶结物;f—气液包裹体,石英锡石闪锌矿石英脉

Fig. 10 Characteristics of fluid inclusions in the Vilasito deposit

a—Melt inclusions, the black part is liquid, at the core of quartz phenocryst; b, c—Melt—fluid inclusion, some of the inclusions contain multiple solid phase, at the mantle of the quartz phenocrysts; d—Melt—fluid inclusion in topaz droplets, banded muscovite granite; e—Melt—fluid inclusion in topaz, matrix in breccia rock; f—Fluid inclusion of quartz—cassiterite—sphalerite quartz vein

一个锆石点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 分析年龄为 (1141 ± 13) Ma, 代表其中的继承性古老锆石。其余 12 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分布于 138~144 Ma, 加权平均年龄为 (139.5 ± 1.2) Ma (图 11), 若扣除 2 个 144 Ma 的样品, 其他样品的算术平均值为 138.9 Ma。

4 讨论

4.1 成岩成矿年代

大兴安岭南段(西拉木伦河以北, 乌兰浩特以南)发育大量花岗岩浆热液型钼、铜、锡、铅锌、稀有金属矿床, 成矿作用集中于两个时期^[9]: 1) 180~160 Ma, 主要是大兴安岭东坡地区的一些铜多金属矿床, 如莲花山、闹牛山等; 2) 140~130 Ma, 包括 Mo 多金属矿床以及一些锡—铅锌银矿床。其中, 大体沿黄岗梁—甘珠尔庙成矿带, 发育一系列的锡—铅锌银矿床, 如黄岗梁、大井、安乐、毛登, 以及近年来新发现的维拉斯托、白音查干、边家院子等锡多金属矿床, 同时还发育众多的铅锌银矿床, 如拜仁达坝、白音诺、红岭、双尖子山、花敖包特等, 成矿年代主要集中于 135~140 Ma (表 5)。

维拉斯托锡锌矿床花岗岩年龄 $(139.5 \pm 1.2 \text{Ma})$

与维拉斯托本区锡锌矿成矿年代 $(133.4 \pm 1) \text{Ma}$ (白云母, $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$)^[11] 基本一致, 也大体与黄岗梁—甘珠尔庙地区锡—铅锌银矿床成矿时代相对应, 显示出黄岗梁—甘珠尔庙地区于早白垩世早期曾发生过大规模酸性岩浆侵入及相关的锡—铅锌银矿化事件。

大多数锡钨多金属矿形成于伸展构造背景条件下, 与地幔物质的上涌有关^[26]。维拉斯托成矿岩体为碱长花岗岩, 其主微量元素地球化学特征也显示出板内花岗岩的性质。一般认为, 受古太平洋板块俯冲, 在大陆边缘弧后伸展环境下, 大兴安岭地区这些与锡多金属矿有关的成矿花岗岩形成于岩石圈伸展和减薄过程中富集的岩石圈地幔减压部分熔融作用^[27]。

区域内锡—铅锌银矿的年龄, 可能略早于区域钼矿, 二者可能为两次相对独立的成岩成矿事件。虽然钼矿外围也可形成铅锌矿, 但大兴安岭南段西坡地区巨大规模的铅锌银矿(不含金)更可能与深部高演化花岗岩浆以及锡(钨)矿化有关。

4.2 碱长花岗岩的性质与高度分异演化

花岗岩中的长石均为碱性长石, 其中钠长石 $\text{An} < 0.3$, $\text{Or} < 1.5$, 不含斜长石, 按照碱性长石、石英的

表4 内蒙维拉斯托矿区花岗岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of granite in the Weilasito tin-zinc deposit, Inner Mongolia

样品号及 分析点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						年龄/Ma						
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
WLST01-1	107	464	0.23	0.0775	0.0016	2.0713	0.0396	0.1937	0.0024	1135	20	1139	13	1141	13
WLST01-4	3353	16239	0.21	0.0497	0.0007	0.1489	0.0020	0.0217	0.0002	183	15	141	2	139	1
WLST01-6	10479	46819	0.22	0.0628	0.0009	0.1908	0.0025	0.0220	0.0002	323	56	150	3	139	1
WLST01-7	3850	10466	0.37	0.0580	0.0009	0.1749	0.0026	0.0219	0.0002	531	16	164	2	139	1
WLST01-8	6155	31546	0.20	0.0487	0.0005	0.1459	0.0015	0.0217	0.0002	131	11	138	1	139	1
WLST01-9	4030	32771	0.12	0.0648	0.0008	0.2013	0.0024	0.0225	0.0002	179	54	143	3	141	1
WLST01-10	4353	20624	0.21	0.0510	0.0009	0.1518	0.0025	0.0216	0.0002	242	19	144	2	138	1
WLST01-13	5530	27813	0.20	0.0560	0.0006	0.1681	0.0017	0.0218	0.0002	373	41	152	2	138	1
WLST01-15	12597	52701	0.24	0.0494	0.0005	0.1484	0.0014	0.0218	0.0002	169	10	140	1	139	1
WLST01-16	4554	30383	0.15	0.0567	0.0006	0.1773	0.0018	0.0227	0.0002	481	10	166	2	144	1
WLST01-17	9637	34449	0.28	0.0616	0.0008	0.1943	0.0024	0.0229	0.0002	174	63	145	3	144	2
WLST01-19	8630	48078	0.18	0.0503	0.0006	0.1503	0.0017	0.0217	0.0002	209	12	142	1	138	1
WLST01-20	5023	34030	0.15	0.0517	0.0007	0.1557	0.0019	0.0218	0.0002	123	47	138	2	139	1

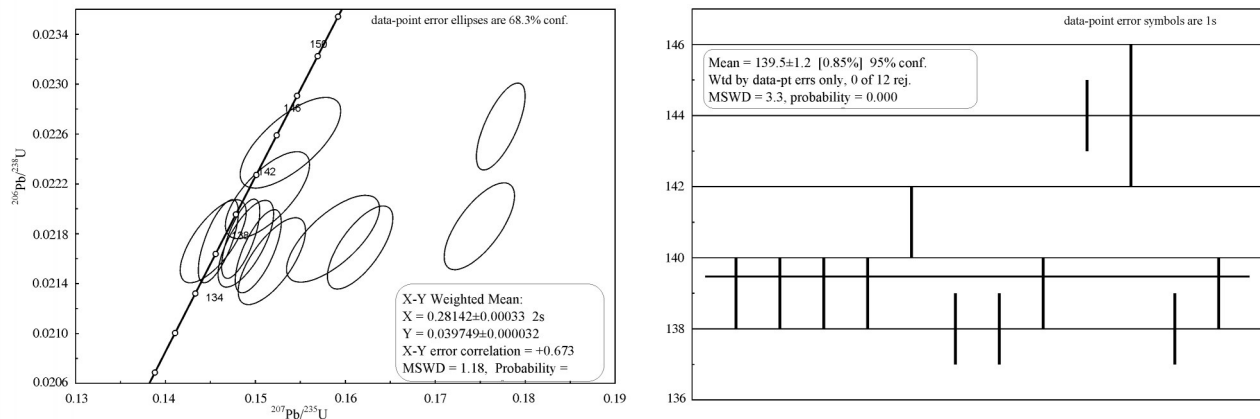


图11 锆石谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄
Fig.11 Zircon concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age

含量关系,维拉斯托的花岗岩岩性为碱长花岗岩,而不是前人认识的石英斑岩^[10]。南岭地区大部分大型锡钨多金属矿床的成矿花岗岩均为碱长花岗岩,斜/钠长石 An 平均值一般在 2~5,广西栗木矿床的成矿岩体钠长石 An 平均值 0.17^[28]。相比之下,维拉斯托的成矿岩体钠长石 An 值与栗木锡矿相似,低于多数钨矿床。

花岗岩发育多级斑晶,石英斑晶粒径 2~8 mm,

钾长石斑晶 1~2 mm,钠长石 0.05~0.5 mm,变化非常大,部分呈斑晶。斑晶占总量的 80%以上,以珠滴结晶(沉淀)的时间点看,岩浆中大部分物质已结晶,属于高度黏稠状态。细粒钠长石斑晶呈碎裂他形状,可能与部分结晶的岩浆流动过程中撞击破碎有关。基质主要是钠长石、黄玉、石英、萤石以及硫化物和锡石等矿物,代表着残留岩浆,其中,除细粒钠长石、萤石外,其他矿物呈中细粒不规则状(部分

表5 黄岗梁—甘珠尔庙地区部分锡—铅锌银矿床成矿(成岩)年代

Table 5 Age of the tin-lead zinc silver deposit in Huanggangliang-Ganzhuermiao area

矿床名称	测试方法	测定对象	年龄值/Ma	资料来源
黄岗锡铁矿	Re-Os	矿石 辉钼矿	135.31±0.85	[19]
	La-ICPMS	花岗岩 锆石	139.96±0.87	[20]
	Re-Os	矿石 辉钼矿	134.9±5.2	[20]
大井银铅锌铜矿	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	矿石 绢云母	138.3	[21]
红岭铅锌矿	Re-Os	矿石 辉钼矿	140.3±3.4	[22]
双尖子山铅锌银矿床	Rb-Sr	矿石 闪锌矿	132.7±3.9	[23]
边家院子铅锌银矿床	La-ICPMS	石英斑岩 锆石	140±1.2	[24]
花敖包特铅锌银矿床	La-ICPMS	石英斑岩 锆石	136±3	[25]
维拉斯托铜锌矿	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	矿石 白云母	133.4±1	[11]
维拉斯托锡锌矿	La-ICPMS	花岗岩 锆石	139.5±1.2	本文

构成珠滴)。受结晶分异的影响,挥发分、水和成矿物质及硫化物残留、富集于晚期岩浆中,最终形成富含成矿物质和挥发份的浆液过渡态流体。矿物总体的结晶(沉淀)顺序为钠长石(包裹于石英斑晶内部)→石英→钾长石→钠长石(基质)→石英、黄玉、锡石、闪锌矿,早期为结晶作用,晚期岩浆-热液阶段部分呈沉淀机制。

相比于兴蒙造山带的花岗岩平均组成^[17],维拉斯托成矿岩体富SiO₂、Al₂O₃,贫CaO、TiO₂、TFe₂O₃、MnO,显著高含量的成矿元素Zn、Pb、W、Bi、Mo等和高场强元素Nb、Ta、Hf、Th等,以及富含挥发分元素Li、Be、Rb、Cs等,In、Tl高而Co、Ni低。稀土元素标准化配分曲线呈“V”字型,LREE/HREE比值低,强烈负Eu异常,“四分组合效应”明显。花岗岩的矿物学、元素地球化学性质与南岭地区锡钨多金属矿的成矿花岗岩相似,也很接近于个旧、大厂等锡矿床的成矿岩体。这些特点都显示花岗岩岩浆经历了高分异演化过程,富挥发分、成矿物质和大部分亲硫元素。

南岭地区锡钨多金属矿花岗岩K₂O/Na₂O比值一般在1.2~1.8(未注明之外,均为本文未发表数据),个旧、大厂的花岗岩与此相当,云南马关锡矿(曼家寨)为1.16。而分布于花岗岩顶部的花岗岩型锡矿、钨钼矿的K₂O/Na₂O比值较低,如栗木为0.76,湘东钨矿、大吉山钨矿之富NbTa岩体为1.21、1.04,巴尔哲为0.93^[29]。维拉斯托的花岗岩K₂O/Na₂O比值为0.37~0.88,平均0.58,显示该花岗岩体较多数锡钨多金属

矿更高的分异水平,或更加富集挥发分。

4.3 岩浆→浆液过渡态流体→含矿热液的连续演化过程

多数锡钨多金属矿的成矿作用经历了岩浆→热液连续演化的过程,近年来,对矽卡岩型、石英脉型钨矿床中这种现象及其对成矿物质富集机制制约的研究进一步深化^[30-31]。维拉斯托的岩浆→热液连续演化的过程更为清晰,岩浆阶段与热液阶段之间,经历岩浆-热液阶段即浆液过渡态流体阶段。岩浆富含黄玉、萤石,常见晶洞,显示岩浆富含挥发分和H₂O。岩体顶部发育由花岗质和云英岩构成的流动条带,说明岩浆已分异出多相。除出现似伟晶岩外,还出现富含流体的硅酸盐相、富含成矿物质的硫化物相,后二者中热液作用特征更为显著。

花岗岩型矿石与花岗岩结构相同,矿物组合相似,但富含挥发分和成矿物质,二者的界线由品位圈定,说明二者密切的成因演化联系。花岗岩型矿石中常见由石英、黄玉、锡石-闪锌矿局部集中形成的囊状体(珠滴),代表着岩浆晚期自硅酸盐相中分离出富Si相、富挥发分(F)相和富S相,均富含大量的H₂O。三者相互独立,相伴出现。这些较晚形成的石英、黄玉与花岗岩基质矿物相对应,也与石英斑晶边部形成的增生边一致,显示残余岩浆富集挥发分、H₂O和成矿物质,最终形成花岗岩型矿石。

主量、微量元素地球化学以及地球化学剖面都反映出花岗岩与花岗岩型矿石,岩浆性质发生的重大变化。相比花岗岩,花岗岩型矿石富SiO₂、CaO、TFe₂O₃、MnO,贫Na₂O、K₂O。强烈富集成矿元素和亲硫元素,高度富含In(9.66×10⁻⁶),已达工业品位,这与很多锡多金属矿床富元素In的特点一致,突出出岩浆晚期成矿元素的聚集迅速加强。花岗岩型矿石的Li/Be、Co/Ni比值低于花岗岩,Rb/Sr、Nb/Ta比值分别为高于花岗岩,与结晶残留岩浆更多聚居于岩体顶部有关,其中更多挥发分或热液作用的影响。在IZK01509钻孔花岗岩顶部400 m范围内(图9之d层),自下而上Nb/Ta比值逐渐降低,这种现象也见于南岭地区高分异花岗岩。由于Ta⁵⁺场强强于Nb⁵⁺,在结晶分异过程中Ta⁵⁺更易保留在熔体相中,Nb/Ta比值会随着岩浆分异逐渐减小^[32]。

流体包裹体特征直接显示出岩浆→热液演化的全过程。花岗岩石英斑晶内部包含早期的钠长

石,流体包裹体以熔融包裹体为主,其中气液相很低,液固比(气液相占包裹体的体积比) $<10\%$ 。在石英斑晶边部以及晚期形成的石英中,流体包裹体主要为熔流包裹体和气液两相包裹体,其中,熔流包裹体富气液相,液固比一般在 $30\% \sim 80\%$,气液包裹体之气液比 $40\% \sim 60\%$ 。岩浆晚期分异的珠滴(黄玉、石英)中流体包裹体以气液两相为主,也含有一些熔流包裹体,其中固相物含量很低(图10-d),此时的成矿流体仍属浆液过渡态流体性质,但以气液成分为主。隐爆角砾岩的黄玉内熔流包裹体较少,以气液两相包裹体为主,浆液过渡态流体以气液为主。隐爆角砾岩与花岗岩过渡,隐爆发生时岩浆并未固结。锡石硫化物石英脉、脉状铜锌矿(维拉斯托本区)、脉状铅锌银矿(拜仁达坝)^[33],流体包裹体只见气液两相包裹体,气液比更低。均代表热液作用的产物,成矿温度也逐渐降低。

4.4 维拉斯托—拜仁达坝地区岩浆热液锡钨多金属矿成矿系统

4.4.1 维拉斯托花岗岩体顶部的锡锌矿床成因

分布于花岗岩体外侧变质岩中的脉状矿床,包括锡锌矿区的锡石硫化物石英脉、维拉斯托本区的脉状铜锌矿床以及拜仁达坝的脉状铅锌银矿床,均属于岩浆热液矿床,与岩浆期后热液作用有关,这一点无争议。但分布于岩体顶部的锡锌矿体,成因争议较大。

目前一线勘查人员及部分研究将维拉斯托锡锌矿区的花岗岩定名为石英斑岩,岩体顶部的矿体被确定为“斑岩型”^[10]。有关“斑岩型”锡矿床的争议很多^[34-38],这些矿床中发育类“斑岩”、角砾岩、锡石石英脉等,矿体可出现于岩体顶部,也可出现于角砾岩或石英脉中。国内的“斑岩型锡矿”以广东银岩锡矿为代表^[39],主要矿体位于岩体顶部,外侧沉积岩围岩中发育石英锡石硫化物脉状矿^[38]。

这些矿床的成矿岩体一般都不是典型的斑岩,其岩石结构主要是似斑状;矿石中基本不发育“斑岩型”矿床特有的“网脉(stockwork)”,也不发育斑岩型矿床典型的蚀变分带和矿化组合;矿体基本上严格局限于岩体顶部花岗岩一侧,一些矿体赋存于角砾岩中,但岩体接触带外侧不发育低品位矿或网脉状矿;有些锡矿床矿体品位较高^[40]。上述现象,与传统斑岩型铜、钼矿床存在明显差异。

国内与维拉斯托锡锌矿床具有相似的地质地球化学特征的有广东银岩锡矿床^[41]、广西栗木锡矿床,通过对这些矿床的研究,笔者将产于岩体顶部岩体一侧的矿体归类于花岗岩型。产于花岗岩顶部的矿体为花岗岩的一部分,矿石呈花岗岩结构,后期蚀变不强烈。矿石中广泛存在熔流包裹体,显示矿床形成于岩浆-热液过渡阶段,而斑岩型铜、钼矿床主要形成于岩浆期后热液。巴尔哲稀有稀土金属矿床也同样形成于岩浆-热液过渡阶段,是富含挥发分熔体固结的产物^[42]。从锡矿、钨矿等更大范围看,一些“斑岩型钨矿”床也应该属于花岗岩型,包括广东红岭、福建行洛坑、江西阳储岭、以及大湖塘的一部分等等。

综合维拉斯托矿田各类型矿化的成矿规律,整体上,这些矿床(矿体)的成因可归属为与酸性岩浆作用有关的岩浆-热液型矿床。

4.4.2 成矿系统

维拉斯托地区发育一套较完整的岩浆-热液成矿系统。成矿地质体为锡锌矿化细粒斑状碱长花岗岩。自岩体向外,逐渐形成花岗岩型、高温热液型锡锌矿、中温热液型钨、铜锌矿和铅锌矿(表6)。

1)花岗岩顶部形成帽状花岗岩型矿(Sn-Zn)。形成于岩浆晚期或热液作用早期的浆液过渡态流体阶段,是花岗岩体的一部分。

2)含矿长英质脉(Sn-Zn)和石英脉型矿(Sn-Zn)。分布于岩体顶部接触带外侧数百米范围内,一般不超过500 m。成矿与花岗岩浆热液作用密切相关,边部发育云英岩化和钾长石化,成矿热液中含残余岩浆组分。长英质脉表现为浆液过渡态流体成因,与石英脉过渡,是介于花岗岩型矿化与石英脉型矿化之间的演化过渡类型。

3)维拉斯托本区的脉状铜锌矿(Cu-Zn)。距离岩体0.5~1.5 km,位于成矿系统外侧。铜锌矿体的矿石富含毒砂、萤石,与花岗岩富As、F相对应。矿体附近发育富挥发分的似伟晶岩脉,显示本区与锡锌矿区密切的成因联系。矿石含锡,深部矿体可能会出现锡锌矿化,甚至与锡锌石英脉过渡。

维拉斯托本区,矿脉受多组断裂控制,包括NE60°、NWW和NE20°等,其中,NE60°与区域构造线一致,NWW可能为其次生构造,NE20°断裂走向与锡锌矿体一致。维拉斯托锡锌矿隐爆角砾岩的走向

表6 维拉斯托锡多金属矿田矿化特征
Table 6 Mineralization characteristics of the Vilasito tin polymetallic orefield

	花岗岩型	锡石硫化物石英脉型	脉状铜锌矿	脉状铅锌银矿
矿体位置	岩体顶部	岩体外侧, <500 m	外侧, <1.5 km	外围, 1~3 km
矿体形态	帽状	脉状	脉状	脉状
矿石结构	花岗结构, 珠滴结构			
	热液交代结构	热液交代结构	热液交代结构	热液交代结构
矿化组合	Sn-Zn	Sn-Zn(W-Cu)	Zn-Cu	Pb-Zn-Ag
矿物组合	Cst, Stn, Sp (Ll, Apy)	Cst, Stn, Sp, Cp, Py, Apy	Apy, Po, Py, Cp, Sp, Gn	Gn, Sp, Py, Cp, Po
	Ab, Toz, Q, F, Ms	Q, Toz, F, Ms, Kf	Q, F, Cal, Ser	Q, Cal, F, Ser
闪锌矿颜色	黄褐色	浅棕色	黑色	深棕色
蚀变	云英岩化	云英岩化	绢云母化, 硅化	硅化
成矿流体	浆液过渡态	热液	热液	热液
	高温, 中低盐度, 富 CO ₂	高温, 中低盐度	中高温, 中低盐度	中低温, 中低盐度

注: Cst—锡石; Stn—黝锡矿; Sp—闪锌矿; Ll—斜方砷铁矿; Apy—毒砂; Cp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Gn—方铅矿; Tn—黝铜矿; Kf—钾长石; Ab—钠长石; Toz—黄玉; Q—石英; F—萤石; Ms—白云母; Cal—方解石; Ser—绢云母。

为NE60°,石英脉的走向为NE20°,与本区铜锌矿大体可对应,应该属于一个总的构造系统的一部分。

4)拜仁达坝的脉状铅锌银矿(Pb-Zn-Ag),距离岩体2~3 km,位于成矿系统的最外围。矿体在深部逐渐转变为铜锌矿(Cu-Zn)为主。在拜仁达坝一带,深部也可能存在相似的成矿地质体(碱长花岗岩体)甚至锡锌矿化。

维拉斯托本区矿化组合为Cu-Zn,但锡矿区的矿化组合为Sn-Zn,这种矿化组合不同于多数岩浆热液矿床及其分带特点,与维拉斯托的成矿岩浆中极度贫Fe有关。维拉斯托花岗岩中 $TFe_2O_3 < 0.19\% \sim 0.51\%$,平均0.32%,无黄铁矿、磁黄铁矿,少见斜方砷铁矿。闪锌矿呈浅黄色-浅棕色,其中含Fe 7.06%~7.93%;斜方砷铁矿的存在以及少见毒砂也显示岩浆中富As、贫Fe。由于岩浆或高温热液条件下形成的铜矿物为黄铜矿、方黄铜矿($CuFe_2S_3$),在极度贫铁的条件下Cu不能沉淀,只能残留于晚期流体中。在石英脉型矿体中,铜矿物含量明显增多,但含量总体较低,Cu<0.1%。主要铜矿物为黝铜矿($Cu_{12}Sb_4S_{13}$),少量黄铜矿;同时出现大量毒砂和部分黄铁矿,显示形成石英脉的热液体系Fe含量已较高。

这种碱长花岗岩岩体顶部的体状矿化和外侧发育的脉状矿化,上脉下体(外脉内体)的结构特点,与南岭地区花岗岩型锡(钨)矿的矿化特征相

似,如广西栗木、福建行洛坑等。在岩体顶部形成花岗岩型矿体,外侧形成含矿石英脉以及一些矿化花岗岩脉(云英岩脉)。包括维拉斯托矿床在内的很多岩浆-热液型锡矿床中常发育较大规模的隐爆角砾岩,显示成矿系统总体的开放性,导致晚期大量外来流体的加入,这一点明显不同于石英脉型钨矿床,后者往往形成于相对封闭的成矿体系^[43]。

4.4.3 成矿机制

成矿物质来源:对硫、铅同位素研究揭示,维拉斯托、拜仁达坝矿床矿石中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值分别为-4.0‰~1.6‰和-0.8‰~2.0‰,硫来自于岩浆;铅部分来自于岩浆,部分由变质岩地层提供^[5]。区域内白音诺尔铅锌矿硫同位素^[44]、铅同位素^[6]的研究也有相似的结论。初步判断维拉斯托矿区成矿物质和流体的来源,成矿物质Cu、Sn、Zn、Pb及挥发分等来自岩浆,成矿流体也主要来自岩浆,晚期或外围的维拉斯托本区铜锌矿床有大气降水的参与。Fe主要来自片麻岩围岩。石英脉两侧围岩发生强烈云英岩化蚀变,引起片麻岩中的黑云母分解,释放黑云母内的Fe并进入热液。随着温度降低,热液中Fe含量增加,在维拉斯托本区的铜锌矿体中形成磁黄铁矿、黄铁矿、铁闪锌矿。

成矿机制(图12):

岩浆演化晚期,花岗岩浆中富S相向顶部的大量聚集,形成大量锡石-闪锌矿珠滴,富集到一定程

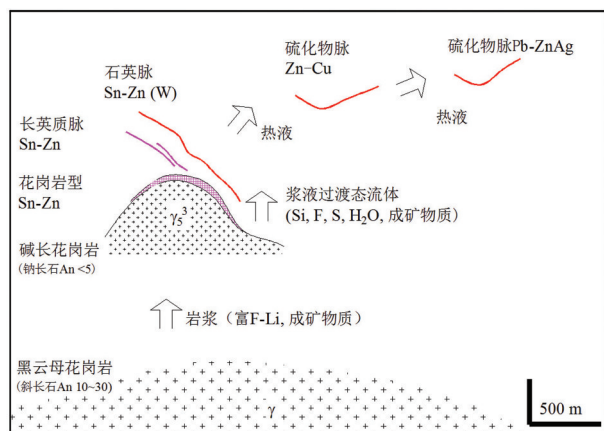


图 12 内蒙维拉斯托矿床成矿系统与成矿演化示意图
Fig.12 Schematic diagram of the metallogenic system and mineralization evolution of the Vilasito deposit in Inner Mongolia

度,形成花岗岩型矿体。

富 Si 相、富 F 相形成的珠滴进一步集中,在花岗岩中局部形成富石英、黄玉、白云母的“粗面质岩石”。这类富挥发分岩浆局部集中,发生隐爆作用形成云英岩型角砾岩筒,胶结物为黄玉、白云母和石英,黄玉中见熔流包裹体。隐爆角砾岩的结构及其与花岗岩的空间关系显示隐爆发生时,岩浆尚未固结,但大部分结晶,流动性差,主要由矿物+岩浆+热液组成,下部以岩浆为主,上部以热液为主。这些富挥发分、成矿物质和 H₂O 的岩浆沿断裂裂隙进入片麻岩,形成一些矿化长英质脉,很多构成锡铍矿体。

Sn 表现出强烈的亲硫性质,锡石与闪锌矿共生,在花岗岩及矿化花岗岩中的富硫化物珠滴中,一般都富含锡石。

在锡石闪锌矿珠滴中只见气液两相包裹体,未发现熔流包裹体。随着温度降低,这种更接近于热液性质的富 S、富 Si 流体离开岩浆,沿岩体外侧断裂分布,形成锡石硫化物石英脉。通过围岩蚀变作用,片麻岩中 Fe 的加入,闪锌矿颜色加深,出现少量黝铜矿。

随着远离岩体,温度降低以及低温水体的加入,围岩蚀变范围加大,围岩中 Fe 大量加入,形成大规模脉状硫化物型锌铜矿体,其中出现大量毒砂、黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿,闪锌矿呈黑色。云英岩

化在花岗岩型矿石中弱,在隐爆角砾岩及锡石硫化物石英脉两侧较强,云英岩化有利于环境 pH 和 f_{O_2} 升高,促进锡石沉淀成矿^[45]。在更外侧的成矿系统边部,中低温阶段,形成脉状铅锌银矿床。

4.5 维拉斯托大型锡矿发现的意义

4.5.1 区域勘查意义

锡矿成矿作用多与酸性侵入岩有关,外围常形成大规模的铅锌银矿床,但一般不发育金矿^[40,46-48]。这一点在南美玻利维亚、秘鲁^[49,46,50]以及中国南岭成矿带表现得淋漓尽致,原因可能与岩浆岩性质及岩浆-热液演化过程有关。

黄岗梁—甘珠尔庙是东蒙重要的铅锌银成矿带,主要矿床如白音诺、红岭(浩布高)、双尖子山、拜仁达坝、维拉斯托、道伦达坝、边家院子、孟恩陶勒盖等,这些矽卡岩型、脉型铜铅锌银矿床中常伴随有锡、钨矿化,以往均将其与燕山晚期火山作用相联系,将大兴安岭南段的一些铅锌银矿床归并为陆相(次)火山热液矿床或浅成低温热液矿床,认为矿化受火山机制控制^[1-4]。同时,这一矿带及其外围地区,已发现大量锡多金属矿床,如大井^[9,51]、黄岗梁^[2,20]、白音查干^[7,52]、安乐^[53]、毛登^[54]等。维拉斯托锡铍矿及其碱长花岗岩的发现,以及针对白音诺、红岭、双尖子山等矿床的研究,笔者认为锡林郭勒—赤峰地区存在区域性岩浆热液型锡钨多金属矿成矿系统,深部可能存在大规模的碱长花岗岩浆活动和锡(钨)多金属矿化,脉状铅锌银矿可能只是成矿系统矿化分带的外围表现。成矿作用与深部酸性侵入岩有关,而可能与火山作用无直接联系。岩浆及热液作用过程有利于 Sn-W 和 Pb-Zn-Ag 的聚集成矿,但不利于 Au 的富集成矿。大兴安岭南段一个以锡矿化为主的“南岭成矿带”正在逐渐揭开面纱。

4.5.2 理论研究意义

维拉斯托矿床锡铍矿的发现也具有重要理论研究意义。岩浆→热液连续演化是锡钨多金属矿的重要机制,但维拉斯托成矿碱长花岗岩中硫化物大量出现于岩浆晚期,这方面的地质资料和研究成果还很少。岩浆多级斑晶的演化、隐爆作用及浆液过渡态流体和热液作用深入认识,对揭示区域岩浆演化规律和成矿作用机制均具有重要的理论价值。

在南岭脉型钨矿床有关的花岗岩中,常见黑钨矿、锡石、闪锌矿等作为副矿物,但含量很低,只有

W、Sn可富集成矿,形成花岗岩型矿床。在维拉斯托矿化的碱长花岗岩中,锡石闪锌矿分散浸染状分布于岩体内,是岩浆高度分异、残留至晚期的产物。锡石闪锌矿在其中的大量聚集,尤其是富硅相、富F相和富S相的液态不混溶,对理解岩浆晚期Sn、W、Pb、Zn等成矿物质自岩浆的分离机制,对建立锡钨多金属矿床酸性岩浆→热液演化过程,均提供了重要的证据。

5 结 论

维拉斯托矿区与成矿作用有关的花岗岩为碱长花岗岩。岩浆侵入年代为 (139.5 ± 1.2) Ma (MSWD = 3.3),属于早白垩世早期,与区域内大规模锡多金属矿成矿时期一致,代表中生代晚期受太平洋板块俯冲影响,板内伸展环境下的岩浆作用。

花岗岩经历了高分异演化,发育多级斑晶,结晶顺序为钠长石→石英→钾长石→钠长石→石英。岩浆作用晚期经历了岩浆-热液连续演化过程,岩浆阶段与热液阶段之间发育岩浆-热液过渡阶段。岩浆晚期自硅酸盐相中分离出富Si、富F和富S的流体相,分别形成花岗岩型矿石中的石英、黄玉、锡石-闪锌矿囊状体(珠滴),伴随大量的熔融包裹体和熔流包裹体,晚期逐渐向热液阶段过渡。花岗岩型矿石形成于岩浆-热液过渡阶段,石英脉型锡钨矿及铜锌矿、铅锌银矿均形成于热液阶段。

维拉斯托矿床分布于花岗岩岩体顶部的矿体成因类型为花岗岩型,外侧分布于变质岩中的脉状矿体为岩浆热液型,二者共同构成岩浆-热液型锡多金属矿床。成矿系统的成矿地质体为斑状碱长花岗岩,经分异作用在岩体顶部形成花岗岩型锡钨矿体,接触带外侧形成锡石硫化物石英脉型锡钨矿体,远离花岗岩,分别形成脉状铜锌矿体和脉状铅锌银矿体。岩体向外,闪锌矿颜色由浅黄→浅棕→黑色变化,与岩浆高度贫Fe有关。

大兴安岭南段尤其是锡林郭勒—赤峰地区存在区域性的岩浆热液型锡钨多金属矿成矿系统,脉状铅锌银矿可能是矽卡岩型、花岗岩型矿化分带在外围的体现,成矿作用与深部酸性侵入岩有关。区域性广泛、大规模铅锌银矿床(点)可能预示深部存在大规模岩浆-热液型锡(钨)多金属矿。维拉斯托锡钨矿的发现,对深入研究岩浆-热液演化过程也

具有重要的理论意义。

参考文献(References):

- [1] 张德全. 大井银铜锡矿体——一个潜火山热液矿床的特征和成因[J]. 火山地质与矿产, 1993, 14(1): 37-47.
Zhang Dequan. The Dajing Ag-Cu-Sn deposit—the characteristics and genesis of an epithermal deposit related to the subvolcanic intrusions [J]. Volcanology & Mineral Resources, 1993, 14 (1): 37-47 (in Chinese with English abstract).
- [2] 白大明, 刘光海. 黄岗梁—乌兰浩特铜多金属成矿带区域综合找矿模式[J]. 物探与化探, 1996, 20(6): 444-454.
Bai Daming, Liu Guanghai. Regional integrated ore - prospecting model for the Huanggangliang - Ulanhot copper - polymetallic ore belt [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1996, 20 (6): 444-454 (in Chinese with English abstract).
- [3] 张永正, 李秀荣, 杨宏智, 等. 大兴安岭东南段铜多金属成矿构造条件[J]. 地质与资源, 2007, 16(1): 38-41.
Zhang Yongzheng, Li Xiurong, Yang Hongzhi, et al. Structural conditions of copper-polymetallic mineralization in the southeast section of Daxinanling mountains [J]. Geology and Resources, 16 (1): 38-41 (in Chinese with English abstract).
- [4] 匡永生, 郑广瑞, 卢民杰, 等. 内蒙古赤峰市双尖子山银多金属矿床的基本特征[J]. 矿床地质, 2014, 33(4): 847-856.
Kuang Yongsheng, Zheng Guangrui, Lu Minjie, et al. Basic characteristics of Shuangjianzishan silver polymetallic deposit in Chifeng City, Inner Mongolia [J]. Mineral Deposits, 33 (4): 847-856 (in Chinese with English abstract).
- [5] 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 等. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究[J]. 矿床地质, 2010, 28(1): 101-112.
Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, et al. Sulfur and lead isotopic compositions of Bairendaba and Weilasituo silver-polymetallic deposits, Inner Mongolia [J]. Mineral Deposits, 2010, 28 (1): 101-112 (in Chinese with English abstract).
- [6] 江思宏, 聂凤军, 白大明, 等. 内蒙古白音诺尔铅锌矿铅同位素研究[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 230-236.
Jiang Sihong, Nie Fengjun, Bai Daming, et al. Study on the lead isotopic features of the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit in Inner Mongolia [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33 (3): 230-236 (in Chinese with English abstract).
- [7] 聂凤军, 温银维, 赵元艺, 等. 内蒙古白音查干银多金属矿化区地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 26(2): 2007, 213-220.
Nie Fengjun, Wen Yingwei, Zhao Yuanyi, et al. Geological features and prospecting directions of Bayanchagan silver polymetallic mineralized area in Xi Ujmqin Banner, central-eastern Inner Mongolia [J]. Mineral Deposits, 26(2): 213-220 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张德全, 雷蕴芬, 罗太阳, 等. 白音诺尔铅锌矿床矿化分带及矿液流

- 向[J]. 矿床地质, 1992, 11(3): 203-212.
- Zhang Dequan, Lei Yunfen, Luo Taiyang, et al. Mineralization zoning and flow direction of ore fluid in the Baiyinnuo lead-zinc deposit [J]. Mineral deposits, 1992, 11 (3): 203-212 (in Chinese with English abstract)
- [9] 廖震, 王玉往, 王京彬, 等. 内蒙古大井锡多金属矿床岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2292-2306.
- Liao Zhen, Wang Yuwang, Wang Jingbin, et al. La-ICP-MS zircon U-Pb dating of dykes of Dajing tin-polymetallic deposit, Inner Mongolia, China, and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2292-2306 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 等. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2373-2385.
- Liu Yifei, Fan Zhiyong, Jiang Hucan, et al. Genesis of the Weilasituo-Bairendaba porphyry-hydrothermal vein type system in Inner Mongolia, China [J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2373-2385 (in Chinese with English abstract).
- [11] 潘小菲, 郭利军, 王硕, 等. 内蒙古维拉斯托铜锌矿床的白云母 Ar/Ar 年龄探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 473-479.
- Pan Xiaofei, Guo Lijun, Wang Shuo, et al. Laser microprobe Ar-Ar dating of biotite from the Weilasituo Cu-Zn polymetallic deposit in Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28 (5): 473-479 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王瑾, 侯青叶, 陈岳龙, 等. 内蒙古维拉斯托铜多金属矿床流体包裹体研究[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 847-856.
- Wang Jin, Hou Qingye, Chen Yuelong, et al. Fluid inclusion study of the weilasituo Cu polymetal deposit in Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2010, 24 (5): 847-856 (in Chinese with English abstract).
- [13] 屈强, 李云刚. 内蒙古维拉斯托铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 西部资源, 2013: 74-86.
- Qu Qiang, Li Yungang. Geological characteristics and genesis of the Vilasituo Zn-Cu deposit, Inner Mongolia [J]. Western Resources, 2013: 74-86 (in Chinese).
- [14] 欧阳荷根. 大兴安岭南段拜仁达坝-维拉斯托银多金属矿床成矿作用及动力学背景[D]. 中国地质大学(北京)博士论文, 2013: 1-178.
- Ouyang Hogan. Metallogenesis of Bairendaba-Weilasituo Silver-Polymetallic Deposit and Its Geodynamic Setting, in the Southern Segment of Great Xing'an Range, NE China [D]. China University of Geosciences (Beijing) Ph. D. Thesis, 2013: 1-178 (in Chinese with English abstract).
- [15] 唐然坤, 吕新彪, 曹晓峰, 等. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝矿床矿石特征及成矿机理[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2014, 39(6): 671-686.
- Tang Rankun, Lv Xinbiao, Cao Xiaofeng, et al. Mineralogy and metallogenic mechanism of Weilasituo and Bairendaba deposits, Inner Mongolia, China [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39 (6): 671-686 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王新宇, 侯青叶, 王瑾, 等. 内蒙古维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 现代地质, 2013, 27(1): 67-78.
- Wang Xinyu, Hou Qingye, Wang Jin, et al. SHRIMP geochronology and Hf isotope of zircons from granitoids of the Weilasituo deposit in Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2013, 27 (1): 67-78 (in Chinese with English abstract).
- [17] 史长义, 鄢明才, 刘崇民, 等. 中国花岗岩类化学元素丰度及特征[J]. 地球化学, 2005, 34(5): 470-482.
- Shi Changyi, Yan Mingcai, Liu Chongmin, et al. Abundances of chemical elements in granitoids of China and their characteristics [J]. Geochemica, 2005, 34 (5): 470-482 (in Chinese with English abstract).
- [18] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120: 223-253.
- [19] 周振华, 吕林素, 冯佳睿, 等. 内蒙古黄岗梁卡岩型锡铁矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(3): 667-679.
- Zhou Zhenhua, Lv Linsu, Feng Jiarui, et al. Molybdenite Re-Os ages of Huanggang skarn Sn-Fe deposit and their geological significance, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (3): 667-679 (in Chinese with English abstract).
- [20] 翟德高, 刘家军, 杨永强, 等. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床成岩、成矿时代与构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(4): 513-523.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Yang Yongqiang, et al. Petrogenetic and metallogenic ages and tectonic setting of the Huanggangliang Fe-Sn deposit, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31 (4): 513-523 (in Chinese with English abstract).
- [21] 毛景文, 周振华, 武广, 等. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 715-729.
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Wu Guang, et al. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas [J]. Mineral Deposits, 2013, 32 (4): 715-729 (in Chinese with English abstract).
- [22] 万多, 李剑锋, 王一存, 等. 内蒙古红岭铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2014, 39(6): 687-695.
- Wan Do, Li Jianfeng, Wang Yicun, et al. Re-Os radiometric dating of molybdenite in Hongling lead-zinc polymetallic deposit, Inner Mongolia, and its significance [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39 (6): 687-695 (in Chinese with English abstract).
- [23] 吴冠斌, 刘建明, 曾庆栋, 等. 内蒙古大兴安岭双尖子山铅锌银矿床成矿年龄[J]. 矿物学报(增刊), 2013, 619.
- Wu Guanbin, Liu Jingmin, Zeng Qingdong. Inner Mongolia

- Daxinganling double top mountain lead zinc silver mineralization age [J]. *Journal of Minerals*, 2013 (supp.): 619 (in Chinese).
- [24] 王喜龙. 内蒙古边家大院铅锌银矿床成矿特征与矿床成因[D]. 中国地质大学(北京)硕士研究生论文, 2014.
Wang Xilong. The Study of the Metallogenic Characteristics and Genesis of the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag Deposit in Inner Mongolia, China [M]. China University of Geosciences (Beijing) 2014 (in Chinese with English abstract).
- [25] 陈永清, 周顶, 郭令芬. 内蒙古花敖包特铅锌银多金属矿床成因探讨: 流体包裹体及硫、铅、氢、氧同位素证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(5): 1478-1491.
Chen Yongqing, Zhou Ding, Guo Lingfen. Genetic Study on the Huaaobaote Pb-Zn-Ag Polymetallic Deposit in Inner Mongolia: Evidence from Fluid Inclusions and S, Pb, H, O Isotopes [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(5): 1478-1491 (in Chinese with English abstract).
- [26] Kontak D J, Clark A H. Genesis of the giant, Bonanza San Rafael lode tin deposit, Peru: origin and significance of pervasive alteration [J]. *Economic Geology*, 2002, 97: 1741-1777.
- [27] 周新华, 英基丰, 张连昌, 等. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2009, 34(1): 1-10.
Zhou Xinhua, Ying Feng, Zhang Lianchang, et al. The petrogenesis of late Mesozoic volcanic rock and the contributions from ancient micro-continent: constraints from the zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic systematics [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34 (1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [28] 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 南岭锡钨多金属矿区碱长花岗岩的厘定及其意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 359-381.
Zhu Xinyou, Wang Jinbing, Wang Yanli, et al. Characteristics of alkali feldspar granite in tungsten (tin) deposits of Nanling region [J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 359-381 (in Chinese with English abstract).
- [29] 杨武斌, 单强, 赵振华, 等. 巴尔哲地区碱性花岗岩的成岩和成矿作用: 矿化和未矿化岩体的比较[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(6): 1689-1704.
Yang Wubin, Shan Qiang, Zhao Zhenhua, et al. Petrogenic and metallogenic action of the alkaline granitoids in Baerzhe area: a comparison between mineralized and barren plutons [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2011, 41(6): 1689-1704 (in Chinese with English abstract).
- [30] 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 浆液过渡态流体在矽卡岩型钨矿成矿过程中的作用——以湖南柿竹园钨锡多金属矿为例[J]. *岩石学报*, 2015, 31(3): 891-905.
Zhu Xinyou, Wang Jinbing, Wang Yanli, et al. The role of magma-hydrothermal transition fluid in the skarn-type tungsten mineralization process: A case study from the Shizhuyuan tungsten and tin polymetallic ore deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(3): 891-905 (in Chinese with English abstract).
- [31] 祝新友, 王艳丽, 程细音等. 湖南瑶岗仙石英脉型钨矿床成矿系统[J]. *矿床地质*, 2015, 34(5): 874-894
Zhu Xinyou, Wang Yanli, Cheng Xiyong, et al. The metallogenic system of quartz vein-type tungsten deposit, Yaogangxian, Hunan Province [J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(5): 874-894 (in Chinese with English abstract)
- [32] Linnen R L. The solubility of Nb-Ta-Zr-Hf-W in granitic melts with Li and Li+F: constraints for mineralization in rare metal granites and pegmatites [J]. *Economic Geology*, 1998, 93(7): 1013-1025.
- [33] 郭利军, 谢玉玲, 侯增谦, 等. 内蒙古拜仁达坝银多金属矿床地质及成矿流体特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(1): 26-36.
Guo Lijun, Xie Yuling, Hou Zengqian, et al. Geology and ore fluid characteristics of the Bairendaba silver polymetallic deposit in Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2009, 28 (1): 26-36 (in Chinese with English abstract).
- [34] Sillitoe R H, Halls C, Grant J N. Porphyry tin deposits in Bolivia [J]. *Economic Geology*, 1975, 70: 913-927.
- [35] Sillitoe R H, Halls C, and Grant J N. Grant Porphyry tin deposits in Bolivia; a reply [J]. *Economic Geology*, 1976, 71: 1065-1067.
- [36] Taylor R G. Porphyry tin deposits in Bolivia: a discussion[J]. *Economic Geology*, 1976, 71: 1064-1065.
- [37] Ren S K, Walshe J L, Paterson R G, Both R A, and Andrew A. Magmatic and hydrothermal history of the porphyry-style deposits of the Ardlethan tin field, New South Wales, Australia [J]. *Economic Geology*, 1995, 90: 1620-1645.
- [38] 沈敢富. 银岩锡矿成岩、成矿机理新探[J]. *地球化学*, 1992, (4): 346-353.
Shen Ganfu. On the petrogenesis and metallogenesis of the Yinyan tin deposit, Guangdong Province [J]. *Geochemica*, 1992, (4): 346-353 (in Chinese with English abstract).
- [39] 关勋凡, 周永清, 肖敬华, 等. 银岩斑岩锡矿——中国锡矿床的一种新类型[J]. *地质学报*, 1985, (2): 155-161.
Guan Xunfan, Zhou Yongqing, Xiao Jinghua, et al. Yinyan porphyry tin deposit—a new type of tin deposits in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1985, (2): 155-161 (in Chinese with English abstract).
- [40] Taylor R G. Geology of tin deposits: Developments [J]. *Economic Geology*, 1979, 11: 1-543.
- [41] 吴之良, 梁树钊, 李中庆. 粤西银岩锡矿的含矿斑岩特征[J]. *中国地质*, 1983, 10(7): 22-23, 12.
Wu Zhiliang, Liang Shuzhao, Li Zhongqing. Characteristics of the ore bearing porphyry rocks, Chinese Guangdong silver tin ore[J]. *Geology in China*, 1983, 10 (7): 22-23, 12 (in Chinese).
- [42] 杨武斌, 牛贺才, 单强, 等. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2924-2932.
Yang Wubin, Niu Hecai, Shan Qiang, et al. Ore-forming

- mechanism of the Baerzhe super- Large rare and rear earth elements deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (11): 2924-2932 (in Chinese with English abstract).
- [43] 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 论石英脉型钨矿成矿系统的相对封闭性——以湖南瑶岗仙脉型钨矿床为例[J]. *地质学报*, 2014, 88 (5): 825-835.
Zhu Xinyou, Wang Jinbing, Wang Yanli, et al. The study on the relatively closed ore-forming system of the tungsten-bearing quartz vein, Yaogangxian deposit, Hunan province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(5): 825-835 (in Chinese with English abstract).
- [44] 曾庆栋, 刘建明, 贾长顺, 等. 白音诺尔铅锌矿沉积喷流成因: 地质和硫同位素证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37 (4): 659-667.
Zeng Qingdong, Liu Jianmin, Jia Changshun, et al. Sedimentary exhalative origin of the Baiyinnuoer zinc-lead deposit, Chifeng, Inner Mongolia: Geological and sulfur isotope evidence [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37 (4): 659-667 (in Chinese with English abstract).
- [45] Halter W E, Williams-Jones A E, Kontak D J. The role of greisenization in cassiterite precipitation at the East Kemptville tin deposit, Nova Scotia [J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 368-385.
- [46] Kelly W C, Turneure F S. Mineralogy, paragenesis and geothermometry of the tin and tungsten deposits of the eastern Andes, Bolivia [J]. *Economic Geology*, 1970, 65: 609-680.
- [47] Turneure, F S. A comparative study of major ore deposits in Bolivia [J]. *Economic Geology*, 1960, 55: 217-254.
- [48] 陈毓川, 王登红. 广西大厂层状花岗质岩石地质、地球化学特征及成因初探[J]. *地质论评*, 1996, 42(6): 523-530.
Chen Yuchuan, Wang Denghong. Geology, geochemistry and genesis of bedded granitic rocks in Dachang, Guangxi [J]. *Geological Review*, 1996, 42 (6): 523-530 (in Chinese with English abstract).
- [49] Herzenberg R. Colloidal tin ore deposits in Oruro and Potosi districts, Bolivia[J]. *Economic Geology*, 1936, 31: 761-766.
- [50] Wagner T, Mlynarczyk M S J, Williams-Jones A E, and Boyce A J. Stable Isotope Constraints on Ore Formation at the San Rafael Tin-Copper Deposit, Southeast Peru [J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 223-248
- [51] 王玉往, 曲丽莉, 王丽娟, 等. 大井锡多金属矿床矿化中心的探讨[J]. *地质与勘探*, 2002, 38(2): 23-27
Wang Yuwang, Qu Lili, Wang Lijuan, et al. Study on the mineralization center of Dajing tin-polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. *Geology and Prospecting*, 2002, 38 (2): 23-27 (in Chinese with English abstract).
- [52] 徐仁廷, 温银维, 刘华忠, 等. 内蒙古白音查干银多金属矿床原生晕评价指标研究[J]. *物探化探计算技术*, 2014, 36(6): 715-722.
Xu Renting, Wen Yingwei, Liu Huazhong, et al. Research of primary halos estimate indicator of Bayanchagan silver polymetallic mine, Inner Mongolia [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 36(6): 715-722 (in Chinese with English abstract).
- [53] 王国政. 内蒙古安乐锡铜矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 1997, 16(3): 260-271.
Wang Guozheng. Geological characteristics and genesis of the Anle tin-copper deposit, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 16(3): 260-271 (in Chinese with English abstract).
- [54] 张巧梅, 翟东兴, 李华. 内蒙古毛登钨锡铜矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿产勘查*, 2013, 4(3): 248-256
Zhang Qiaomei, Zhai Dongxing, Li Hua. Geological characteristics and deposit genesis of Maodeng molybdenum-tin-copper deposit, Inner Mongolia [J]. *Mineral Exploration*, 2013, 4(3): 248-256 (in Chinese with English abstract).