

文章编号 10258-7106 (2008) 01-0001-13

内蒙古苏莫查干敖包特大型萤石矿床地质特征及成因^{*}

聂凤军, 许东青, 江思宏, 刘妍

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 苏莫查干敖包矿床是迄今为止在全球范围内找到的最大规模单一萤石矿床。萤石矿体大多呈层状、似层状和透镜状沿下二叠统碳泥质板岩(夹灰岩透镜体)与流纹质火山岩接触带分布,并且与中生代花岗岩类侵入岩体具有密切的空间分布关系。流纹质火山岩和花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄值分别为 (276 ± 10) Ma 和 (138 ± 4) Ma, 它们分别是海西晚期和燕山中期酸性岩浆活动的产物。萤石矿体主要由 4 种类型矿石所构成,即石英-萤石型、石英-硫化物-萤石型、萤石-石英型和方解石-石英-萤石型。矿物组分有萤石、石英(蛋白石、玉髓)、方解石、绢云母和绿泥石,个别样品中有磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂和锡石。围岩蚀变自矿体中心向外分别为绢云母化、硅化、碳酸盐化和高岭石化。钼、锶和铅同位素分析结果表明,萤石矿床是多期次和多阶段岩浆热液活动的产物,成矿作用分别发生在海西晚期和燕山中期,并以后者为主。海西晚期富碱质酸性岩浆喷发活动为层纹状和条带状矿体以及矿源层的形成创造了有利条件。相比之下,燕山中期花岗质岩浆侵入活动不仅为细晶质、伟晶质和角砾状矿体的形成提供了物质、动力和热力来源,而且是成矿流体对流循环的“发动机”。苏莫查干敖包矿床属于与花岗岩类深成侵入岩体有关的热液型萤石矿床,成岩(矿)物质来自壳-幔混合源,其中壳源组分占有绝对优势。

关键词 地质学 萤石矿化 地质特征 矿床成因 苏莫查干敖包 内蒙古

中图分类号: P619.21⁺5

文献标识码: A

Geological features and origin of Sumoqagan Obo superlarge independent fluorite deposit, Inner Mongolia

NIE FengJun, XU DongQin, JIANG SiHong and LIU Yan

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The Sumoqagan Obo deposit, located on the northern margin of the North China Craton, is the largest independent fluorite deposit in the world. Exploratory drilling has defined reserves in excess of 20 million tons of CaF_2 with a mean grade of 78%. Fluorite mineralization occurs mainly along the contact zones between Lower Permian carbonaceous-argillaceous slate and rhyolite of Xilimiao Group in stratiform, stratoid and lenticular forms, but is spatially and temporally associated with the Mesozoic Yanshanian Weijing granitoid batholith. The batholith, dated at (138 ± 4) Ma (Zircon SHRIMP), consists mainly of K feldspar granite in the central phase and porphyritic granite in the marginal phase. It intruded into Lower Permian volcano-sedimentary sequences of the Xilimiao Group along the deep-rooted fault zone on the northern margin of the North China Craton. Four major styles of fluorite mineralization have been identified based on mineral assemblages: ① Quartz-fluorite ore:

^{*} 本研究得到国家自然科学基金项目(编号 40573025)资助

第一作者简介 聂凤军,男,1956 年生,研究员,博士生导师,从事金属矿床地球化学研究。Tel: (010)68999033, (010)68999042; E-mail: nffj@mx.cei.gov.cn

收稿日期 2007-06-25; 改回日期 2007-11-19。张绮玲编辑。

It is mainly distributed in the central part of the deposit, and occurs on the surface or at a depth less than 100 m. The ore consists of fluorite and quartz, with a certain amount of chlorite, calcite, sericite, opal and pyrite. The CaF_2 content varies from 77% to 99%, with an average value of 95%; ② Quartz-sulfide-fluorite ore: It is mainly located in the southwestern part of the deposit and has a buried depth of more than 100 m. The ore comprises mainly fluorite, quartz and pyrite together with a certain amount of chalcopyrite, sphalerite, pyrrhotite, arsenopyrite, cassiterite, chlorite, calcite and sericite. The CaF_2 content varies from 30% to 70%, with an average value of 56%; ③ Calcite-quartz-fluorite ore: It is mainly distributed in the central-southern part of the deposit, and has a buried depth ranging from 30 m to 100 m. The ore consists mainly of fluorite, calcite and quartz, with a certain amount of chlorite, calcite, sericite, opal and pyrite. The CaF_2 content varies from 40% to 77%, with an average value of 55%; ④ Fluorite-quartz ore: It is mainly located in the central part of the deposit, and occurs on the surface. The ore is composed mainly of quartz and fluorite, with a certain amount of chlorite, calcite, kaolinite, opal, chalcedony, and pyrite. The CaF_2 content varies from 40% to 85%, with an average value of 62%. The minable part of the deposit can be traced along the strike for 2900 m, and down dip for 600 to 800 m (up to 1200 m), ranging from 0.5 to 22 m in thickness. $\delta^{34}\text{S}$ values of the pyrite separates from the fluorite ores range from -8.63‰ to -6.75‰ , with an average of -7.52‰ . All these data are plotted in the range between the $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite separates from the Yanshanian granitoid batholith and Early Permian carbonaceous-argillaceous slate. $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ values of the fluorite ores vary from -4.61 to -4.07 with an average of -4.34 . All these data are also plotted in the range between the $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ value fields of the K-feldspar granite and carbonaceous-argillaceous slate. In addition, the fluorite ores have a similar $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ value to porphyritic granite and ancient continent. Fluorite ores are characterized by high radiogenic lead isotopic composition similar to that of Early Permian carbonaceous-argillaceous slate and Yanshanian granitoid batholith. These overlapping lead isotopic data of fluorite ore, slate and granite are interpreted as being indicative of mixing between lead from the Yanshanian granitoid magmatism and lead from the Precambrian metamorphic basement and/or Permian sedimentary rocks. The combined isotope data and petrological observations indicate that the metallogenic processes of the Sumoqagan Obo deposit can be divided into two stages: ① Late Hercynian preparatory stage (also called ground preparation) and ② Middle Yanshanian main ore-forming stage. The deposit was formed from the mixing of magmatic fluids with meteoric water. The deposit is therefore believed to be a product of Mesozoic Yanshanian granitoid magma emplacement caused by coeval re-working of these deep-rooted faults occurring along the northern margin of the North China Craton.

Key words: geology, fluorite mineralization, geological feature, ore genesis, Sumoqagan Obo, Inner Mongolia

苏莫查干敖包(以下简称苏-查)萤石矿床位于内蒙古四子王旗卫境苏木境内,北距中蒙边境 25 km,东距集(宁)-二(连浩特)铁路线的二连浩特车站 120 km,南距四子王旗政府所在地——乌兰花镇 210 km。地理坐标为东经 $110^{\circ}14'16'' \sim 111^{\circ}17'31''$, 北纬 $43^{\circ}06'27'' \sim 43^{\circ}08'49''$ (图 1)。

早在 20 世纪 70 年代中期,原内蒙古第一区域地质测量队在中蒙边境地区开展 1:20 万区域地质调查时,于苏莫查干敖包和敖包吐发现萤石矿化露头,并且对其进行了追踪检查。1980 年至 1986 年期

间,原内蒙古地质矿产局 102 地质队采用地质和钻(坑、槽)探手段分别对主要矿化地段进行过地质普查、详细勘查和勘探评价,基本上查明了主要萤石矿体的分布范围、几何形态和产出规模,并提交了相应的文字报告。钻(坑、槽)探结果表明,该矿床的萤石(CaF_2)储量为 1915 万吨, CaF_2 含量为 22%~86%,平均值为 78%,是迄今为止在全球范围内找到的最大规模单一萤石矿床(中国矿床发现史·内蒙古卷编委会,1996;汪万昌等,1986;李士勤,1985)^①。需要指出的是,苏-查矿床位于白云鄂博-二连浩特稀土、

① 内蒙古 102 地质队. 1987. 内蒙古自治区四子王旗苏莫查干敖包萤石矿床初步勘查报告. 内蒙古地质矿产局内部资料. 1~70.

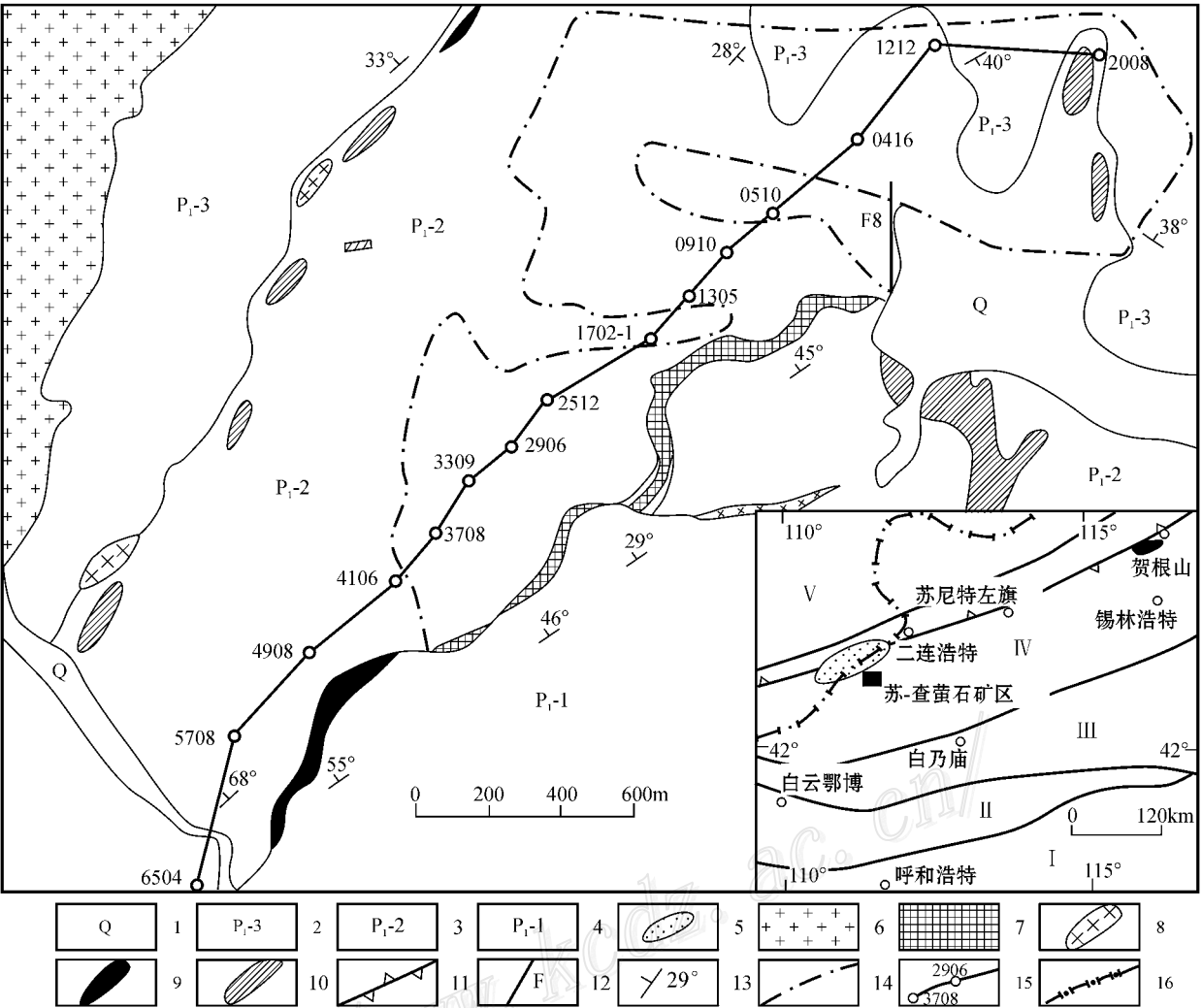


图 1 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿床地质略图(根据洪大卫等,1994 和内蒙古 102 地质队 1987 年资料改编)

华北陆台：Ⅰ—古元古代—太古代结晶基底；Ⅱ—中、新元古代古大陆边缘；Ⅲ—白乃庙-温都尔庙前寒武纪—早古生代构造-岩浆岩带；Ⅳ—二连浩特-贺根山古生代构造-岩浆岩带；Ⅴ—阿巴嘎旗-东乌珠穆沁旗古生代构造-岩浆岩带。1—第四系；下二叠统西里庙群火山-沉积岩；2—片理化流纹岩(或斑岩)；3—碳泥质板岩夹灰岩透镜体；4—流纹岩夹碳泥质板岩；5—艾力格庙前寒武纪中间地块；6—燕山期似斑状花岗岩；7—萤石矿体露头；8—镁铁质岩脉；9—砂岩；10—灰岩；11—古板块缝合带；12—断层；13—地层产状；14—根据钻孔数据所圈定的矿体边缘；15—矿床纵剖面位置(见图 2)；16—国界

Fig. 1 Simplified geological map of the Sumoqagan Obo fluorite deposit, Inner Mongolia (after Hong et al., 1994 and No. 102 Geological Party of Inner Mongolia, 1987)

North China Craton : Ⅰ—Paleo-Proterozoic to Archean crystalline basement ; Ⅱ—Mid-Proterozoic to Neoproterozoic continental margin ; Ⅲ—Precambrian to Early Paleozoic tectono-magmatic belt of Bainaimiao-Odor Sum ; Ⅳ—Erenhot-Hegenshan Paleozoic tectono-magmatic belt ; Siberian Plate : Ⅴ—Late Paleozoic tectono-magmatic belt of Abag Qi-Dong Ujimqin Qi. 1—Quaternary ; Lower Permian volcano-seimentary rocks of Xilimiao Group ; 2—Foliated rhyolite (porphyritic rhyolite) ; 3—Carbonaceous and argillaceous slate intercalated with limestone lenses ; 4—Rhyolite intercalated with argillaceous slate ; 5—Precambrian intermediate block ; 6—Yanshanian porphyritic granite ; 7—Mafic intrusive dyke ; 8—Outcrop of fluorite body ; 9—Skarn ; 10—Limestone ; 11—Suture zone of continental plates ; 12—Fault ; 13—Attitude of strata ; 14—Fluorite body boundary defined by systematic drilling ; 15—Location of the longitudinal geological section of the fluorite deposit ; 16—National boundaries

铁、金和萤石成矿带的东北端,为中亚巨型成矿带的重要组成部分。成矿区及外围,古生代和中生代地层分布广泛,岩浆岩发育,构造形迹复杂,大、中型萤石矿床星罗棋布,因此,该区不仅是探讨大规模萤石成矿作用的理想地区,而且是认识华北陆台北缘岩石圈演化历史的关键部位。

笔者在前人找矿勘查工作基础上,对苏查矿区花岗岩类侵入岩、容矿围岩和萤石矿体地质特征进行了总结,对代表性岩(体)层开展了同位素年代测定,对代表性岩(矿)石样品进行了同位素分析,探讨了萤石矿床的产出环境、物质来源和形成过程,建立了综合性成矿模式和找矿模型,为寻找隐伏萤石矿床(体)提供了理论依据。

1 成矿地质环境

从大地构造位置上看,苏查矿床位于华北陆台与西伯利亚板块汇聚带,其北侧 2 km 和 15 km 处分别是艾力格庙-锡林浩特前寒武纪中间地块和 2 大构造单元的分界线——二连浩特-贺根山深大断裂(图 1)(内蒙古自治区地质矿产局,1991;王荃等,1991;Xiao et al., 2003)。苏查矿床及外围出露的地层主要有新元古界艾力格庙群变质沉积岩、下二叠统西里庙群火山-沉积岩、上侏罗统查干诺尔组火山岩、上白垩统沉积岩和第四系沉积物^①。艾力格庙群变质岩地层为艾力格庙-锡林浩特中间地块的组成部分,主要出露在苏查矿区北侧的巴彦敖包和阿拉坦特一带,岩石类型有大理岩、砂岩、千枚岩和石英岩,厚度为 1 100 m。下二叠统西里庙群火山-沉积岩主要分布在苏查矿区的中部、南部和西南部,占全区岩(体)层出露面积的 60% 左右,厚度 6 000 m。这套岩层由 4 个岩性组构成,其中的第 2 岩性组(P₁-1)和第 4 岩性组(P₁-2)为主要含矿层位。岩石类型有流纹岩、凝灰岩、凝灰熔岩、角砾岩、碳泥质板岩、千枚岩、大理岩和砂岩,碳泥质板岩(含灰岩透镜体)和流纹岩分别构成萤石矿体的顶、底板(图 1)。流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为(276 ± 10)Ma^②,其形成时代为海西晚期。上侏罗统查干诺尔组火山岩零星分布在苏查矿区的南部和西南部一带,占全区岩(体)层出露面积的 5% 左右。岩石类型有晶屑凝灰岩、熔结火山角砾岩和凝灰质含砾砂岩,与下二叠统西里庙群火山-沉积岩呈角度不整合接触关系,岩层厚度 1 500 m。上白垩统沉积岩地层主要分布在苏查矿区东南部,主要岩石类型有含砾

砂岩、砂砾岩、泥岩和含砾泥岩,岩层厚度 150 m。第四系冲、洪积物分布在矿区低洼处和沟谷中,由砂土和砾石构成,厚度一般为 7~10 m。

苏查萤石矿区及外围,各个地质时代、不同产出规模和各种几何形态的中酸性侵入岩体分布广泛,并且呈岩基、岩株和岩群状分别侵入到新元古界艾力格庙群变质岩、下二叠统西里庙群火山-沉积岩和上侏罗统查干诺尔组火山岩地层中^③。在所有上述侵入岩体中,卫境花岗岩体地处苏查矿床的西部和西北侧,主要由钾长花岗岩、似斑状花岗岩和细粒花岗岩组成,前两者与萤石矿体具有密切的空间分布关系。除此之外,石英脉、闪长玢岩脉和辉绿玢岩脉分布广泛,一部分侵位于下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层,另外一部分则穿插到卫境花岗岩体之中。根据各类岩脉(体)与萤石矿体的空间分布关系,可以推测绝大多数长英质岩脉的形成时间晚于卫境花岗岩体。

从构造形迹上看,下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层中规模和走向各不相同的褶曲构造十分明显,其产出特点可概述为:①由 4 个短轴背斜和 3 个短轴向斜构成,属苏查束状褶皱群的一部分;②各个褶皱的轴线方向为 NE 向和 NNE 向,与区域构造线方向一致;③厚大的萤石矿体大多在背斜轴部地层由陡变缓处产出;④沿各岩性段接触部位,褶曲的几何形态和变化幅度大体相似,形成于海西期。与各类褶曲构造相比,无论是在下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层内,还是在卫境花岗岩体中,断裂破碎带分布广泛,其中以 NE 向压扭性和张扭性逆断层(F₁、F₂),近东西向(F₅、F₆)和近南北向(F₇、F₈)张扭性逆断层或平移断层最发育,并且与萤石矿体关系密切。每条断裂破碎带多由 3 条以上裂隙带、断层和节理带所构成,长度变化范围为 2.5~6 km,宽度为几米到数百米。

野外地质调查和室内综合性研究表明,尽管大多数褶皱和断裂构造为成矿流体运移和卸载创造了有利空间条件,但是少数几条断层对矿体具有明显的破坏作用,因此,与岩浆活动一样,构造作用也是导致成矿物质富集或分散的重要地质因素之一。

① 内蒙古 102 地质队. 1987. 内蒙古自治区四子王旗苏莫查干敖包萤石矿床初步勘查报告. 内蒙古地质矿产局内部资料. 1~70.

② 聂凤军,江思宏,许东青. 2008. 内蒙古西里庙地区流纹岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 地球学报,待刊稿.

2 含矿花岗岩类侵入岩

卫境岩体呈岩基状侵位于下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层,其东南侧与苏-查萤石矿床毗邻,出露面积 130 km²。根据地球物理测量数据,卫境岩基的主体类似一个矩形块体。

该岩基呈 NE 向展布,向东南方向倾斜,倾角为 20~46°。沿岩体与围岩接触带,长英质角岩、角岩化凝灰岩、红柱石板岩和钙质砂卡岩分布广泛,局部地段见有磁铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿和锡石集合体。另外,红柱石、石榴子石、透辉石、符山石和方柱石亦常见(王万昌等,1986;李士勤,1985)^①。

整个卫境花岗岩基从中心到边部,大体可划分为中心相和边缘相,前者为钾长花岗岩,后者为似斑状花岗岩,两者呈渐变过渡关系。中心相钾长花岗岩是卫境岩基的主体,占整个岩体体积的 5/6。代表性全岩样品呈灰白色-浅肉红色,中粗粒和似斑状结构,块状构造。斑晶主要有钾长石、斜长石和石英,粒径变化范围为 3~5 mm,占造岩矿物含量的 15%~25%。基质矿物有钾长石(条纹长石、正长石、微斜长石)、斜长石(更长石、钠长石)、石英和黑云母,粒径为 0.3~0.5 mm,含量为 65%~70%。在所有的基质矿物中,钾长石占全部基质矿物含量的 50%~55%,斜长石为 15%~20%,石英为 25%~30% 和黑云母 1%~2%,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。相比之下,边缘相似斑状花岗岩环绕岩基分布,出露宽度为几十米到百余米,向深部有变薄和尖灭现象,占整个岩基的 1/6。代表性似斑状花岗岩样品呈灰白色-浅肉红色,为似斑状结构、细粒花岗结构,块状构造。斑晶主要有斜长石、钾长石和石英,粒径为 2~5 mm,占造岩矿物含量的 20%~30%,其中斜长石含量明显高于钾长石。基质矿物有斜长石(更长石)、钾长石(条纹长石和微斜长石)和石英以及少量黑云母,粒径为 0.2~0.5 mm,含量为 55%~65%。在所有的基质矿物中,斜长石占全部基质矿物含量的 50%~55%,钾长石为 15%~20%,石英为 25%~30% 和黑云母 1%~2%,副矿物有磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿和褐帘石。一般来

讲,苏-查萤石矿区及外围许多花岗岩类侵入岩均是中生代构造-岩浆活动的产物,其中卫境岩基边缘相似斑状花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 $(138 \pm 4) \text{ Ma}$,其形成时代为早白垩世^②。

聂凤军等(2008)^②曾对卫境花岗岩类侵入岩体代表性全岩样品进行过主元素、微量元素和稀土元素分析,并且认为该岩基在元素地球化学方面存在以下特点:①与中国花岗岩或二云母花岗岩平均值相比,无论是边缘相似斑状花岗岩,还是中心相钾长花岗岩,它们均以相对富硅和碱质组分($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$),而相对亏损钙、铁和镁质组分为特征,属富碱质钙-碱性火成岩;②尽管卫境花岗岩代表性全岩样品均以贫钽、铌和锆为特征,但是边缘相和中心相花岗岩类样品在铷和钡含量上存在较明显的差别^③。一般来讲,边缘相似斑状花岗岩以富钡和贫铷为特点,其含量分别大于 1500×10^{-6} 和小于 80×10^{-6} ,相比之下,中心相钾长花岗岩以贫钡和富铷为特征,其含量分别小于 500×10^{-6} 和大于 150×10^{-6} ;③卫境花岗岩代表性全岩样品的稀土元素分布型式全部为右倾斜曲线,并且具有一定的铈负异常。一般来讲,边缘相花岗岩稀土元素含量(ΣREE)、 LREE/HREE 比值和 δEu 值分别大于 260×10^{-6} 、12 和 0.60。相比之下,中心相钾长花岗岩稀土元素含量(ΣREE)、 LREE/HREE 比值和 δEu 值分别小于 180×10^{-6} 、8 和 0.35。从卫境花岗岩体代表性全岩样品主元素、微量元素和稀土元素地球化学特征不难看出,边缘相似斑状花岗岩和中心相钾长花岗岩是同源岩浆不同演化阶段的产物。

3 矿体地质特征

3.1 矿体特征

苏-查地区萤石矿化呈层状和似层状沿下二叠统西里庙群流纹质火山岩与碳泥质板岩(含灰岩透镜体)接触带产出。尽管含矿岩层总体上呈北东方向展布,但是局部地段为不规则状反‘S’型和‘V’字型(王万昌等,1986;李士勤,1985)^①(图 1 和图 2)。整个矿化带的长度为 4 500 m,宽度为 300~600 m。鉴于萤石矿体的产出规模和几何形态完全受岩体-

① 内蒙古 102 地质队. 1987. 内蒙古自治区四子王旗苏莫查干敖包萤石矿床初步勘查报告. 内蒙古地质矿产局内部资料. 1~70.

② 聂凤军,江思宏,许东青. 2008. 内蒙古西里庙地区流纹岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 地球学报,待刊稿.

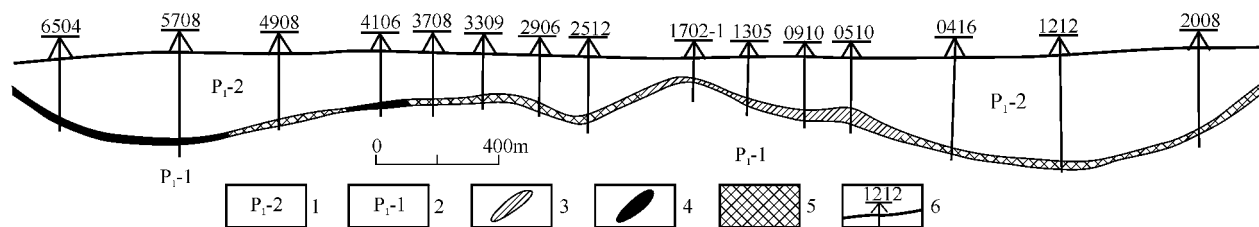


图2 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿床纵向剖面图(根据内蒙古102地质队1987年资料改编)

1—碳泥质板岩夹结晶灰岩 2—流纹岩 3—大理岩透镜体 4—砂卡岩 5—萤石矿体 6—钻孔及编号(平面位置见图1)

Fig. 2 Simplified longitudinal geological section of the Sumoqagan Obo fluorite deposit, Inner Mongolia (after No. 2 Geological Party of Inner Mongolia)

Lower Permian volcano-sedimentary rocks of the Xilimiao Group: 1—Carbonaceous and argillaceous slate intercalated with crystalline limestone; 2—Rhyolite (porphyritic rhyolite); 3—Marble lens; 4—Skarn; 5—Fluorite body; 6—Drilling hole and its serial number (for location see Fig. 1)

地层接触带或层间破碎带控制,因此,无论是在走向上,还是沿倾向上,萤石矿体均呈舒缓波状,并且以连续性好和品位稳定为特征。除了少量含萤石大理岩透镜体外,整条矿化带实际上就是一个完整的矿体,总体上向北西方向($310^{\circ}\sim 330^{\circ}$)倾斜,倾角为 $20^{\circ}\sim 55^{\circ}$,与区域构造线方向大体一致。系统的钻(坑、槽)探结果表明,具有工业价值萤石矿体的长度为2 900 m,厚度为0.5~22 m,平均值5.6 m,倾斜延深为600~800 m,最大值为1 200 m;垂直深度为300~460 m,最大值为588 m。

根据中国萤石矿床勘探规范^①,可将苏查矿床自上而下分为上贫矿带(CaF_2 含量大于30%和小于65%),富矿带(CaF_2 含量大于或等于65%)和下贫矿带(CaF_2 含量大于30%和小于65%)。各条贫、富矿带地质特征为:①上贫矿带,位于1号到37号勘探线之间,长度为744 m,厚度为1.2~6.8 m,平均值为2.2 m; CaF_2 含量为22.49%~50.57%,平均值为37.02%;②富矿带,分布在1号和37号勘探线之间,长度为1 150 m,厚度为1.31~9.59 m,平均值为4.49 m。 CaF_2 含量为75.70%~86.20%,平均值为80.39%;③下贫矿带,出现在5号到25号勘探线之间,长度为1 050 m,厚度为1.96~7.57 m,平均值为2.60 m。 CaF_2 含量为26.36%~51.19%,平均值为44.26%。整个苏查矿床各条贫、富矿带(体)的倾斜延伸变化范围为700~800 m,平均值为760 m,垂直深度为350~450 m,平均值420 m;已探明的 CaF_2 储量为1 915万t, CaF_2 含量变化范围为22%~86%,平均值为78%。

3.2 矿石类型

详细的岩(矿)相学和矿物学研究结果表明,苏-

查矿床的矿石类型主要有石英-萤石型、石英-硫化物-萤石型、方解石-石英-萤石型和萤石-石英型,其中以石英-萤石型矿石为主。各类矿石基本特征简述如下:①石英-萤石型,分布在矿区中部,在地表到地下100 m处产出,由糖粒状、条带状和伟晶状萤石、石英和方解石构成。单矿物粒径变化范围为0.01~0.64 mm,萤石含量为80%~99%(CaF_2 含量为77%~99.05%,平均值95.68%),平均值为92.34%。石英为1%~20%,平均值16%,方解石和其他矿物组分为1%~5%,平均值3%;②石英-硫化物-萤石型,分布在矿区西南部,埋藏深度大于100 m,由萤石、石英和硫化物所构成。萤石含量为60%~80%(CaF_2 含量为30%~70%,平均值56%),平均值72%,黄铁矿为30%~40%,平均值36%,石英为5%~10%,平均值6%,黄铜矿为2%~10%,平均值4%,闪锌矿为2%~10%,平均值为5%,磁黄铁矿为5%~20%,平均值16%,少量毒砂,局部地段见有铜多金属硫化物块体;③方解石-石英-萤石型,分布在矿区中南部,出现在地表到地下30 m处,由方解石、石英和萤石组成。萤石含量为65%~80%(CaF_2 含量为40%~77%,平均值55%),平均值72%,方解石为10%~60%,平均值30%,石英为5%~25%,平均值17%;④萤石-石英型,分布在矿区中部,出现在地表处,由石英和萤石组成。萤石含量为30%~70%,平均值48%,石英为8%~30%,平均值18%,局部地段见有含萤石的铁锰硅质岩或石英脉团块。

3.3 代表性矿石

根据结构构造特征,可将苏查矿床的萤石矿石

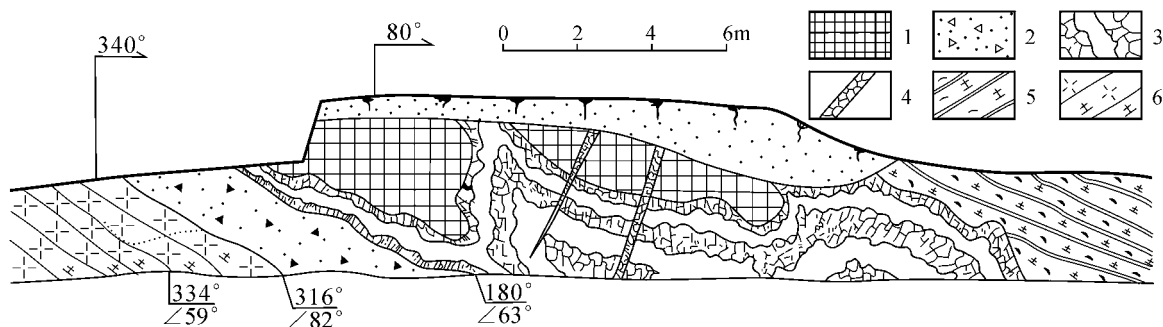


图 3 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿床各主要矿石类型的空间分布关系

1—细晶质块状萤石矿石 2—角砾状萤石矿石 3—条带状萤石矿石 4—束状萤石矿脉 5—碳泥质板岩 6—流纹岩

Fig. 3 Spatial relationships of the major types of fluorite ores in Sumoqagan Obo, Inner Mongolia

1—Fine-grained massive type fluorite ore ; 2—Breccia type fluorite ore ; 3—Banded type fluorite ore ; 4—Sheaf fluorite ore ; 5— Carbonaceous and argillaceous slate ; 6—Rhyolite

划分为纹层状、糖粒状、条带状、伟晶状、角砾状、环带状、梳状、蜂窝状、晶簇状、皮壳状和葡萄状,其中糖粒状(细晶团块)萤石矿石以分布范围广、产出规模大和 CaF_2 含量高为特征。代表性矿石的空间分布关系见图 3。由图 3 可知 ① 纹层状矿石,此类矿石大都在糖粒状(细晶团块状)矿层内呈残留块体产出,为黄灰色和黑灰色,微细粒(0.1~0.3 mm)变晶结构和残留纹层状构造。矿石主要由萤石(70%)、黄铁矿(20%)和方解石(10%)组成;② 糖粒状(细晶块状)矿石,此类矿石大都沿流纹质火山岩与灰岩接触带产出,为灰白色和黄褐色,交代残余(余)结构和块状构造。矿石中萤石含量大于 95%,泥质、硅质和铁质物含量为 3%~5%,所有矿物均很细小,粒径为 0.01~0.06 mm;③ 伟晶质矿石,此类矿石呈脉状穿插于糖粒状矿石层或呈条带状出现在同一矿层的周缘,同时亦可呈孤岛状块体出现在纹层状矿石层中。矿石呈乳白色、淡绿色,粗晶至伟晶结构,块状构造。矿石中萤石含量为 90%~98%,平均值 96%,为苏查矿区 CaF_2 含量最高的矿石;④ 条带状矿石,此类矿石呈脉状出现在糖粒状矿石层内或呈团块状分布在角砾状矿石层中。矿石为灰白色和黑灰色,交代残余结构,条带状或条纹状构造。乳白色和黑灰色含萤石泥质条带相间排列,后者常常被前者所切割或交代。无论是乳白色条带,还是黑灰色条纹,其宽度变化范围为 0.5~1.2 cm,并且均以富含萤石为特征,两者的 CaF_2 含量分别为 99.05% 和 94.95%;⑤ 角砾状矿石,此类矿石多沿断层破碎带分布,其中以矿体顶、底板围岩附近和大理岩透镜体周缘最发育。矿石为灰白色、黄褐色、灰褐色和杂

色,交代残余结构、交代充填结构,角砾状构造。角砾为不规则状和棱角状糖粒状萤石矿石、伟晶质萤石矿石、碳泥质板岩、流纹岩、结晶灰岩、砂卡岩和硅质岩,角砾大小一般为 3~5 cm,大者为 10 cm。胶结物有泥砂质、硅铁质、碳酸盐和萤石集合体,粒径为 0.01~1 cm。需要提及的是,除少量样品的 CaF_2 含量可达到 65% 外,大部分样品均为低品位矿石;⑥ 混合伟晶质矿石。大多沿构造裂隙带或在糖粒状矿石层的孔洞或洞穴内产出,并且以晶体完整、晶簇粗大、色泽亮丽和形态多样为特点。矿石结构有粗晶状、伟晶状、自形粒状和交代残余(缕)结构,构造有梳状、环带状、晶簇状、骨架状、钟乳状和葡萄状。与其他类型矿石相比,此类矿石的最大特点是 CaF_2 含量高和产出规模小;⑦ 泥砂质矿石,此类矿石多呈不规则状脉或团块穿插在糖粒状、伟晶状、条带状和角砾状矿石层中,为晚期成矿流体活动的产物。矿石为灰白色、浅紫色和黄褐色,交代残余结构,层纹状和块状构造,由显微粒状(细晶质)萤石、钙泥质和硅铁质物所构成。萤石含量为 70%~90%,平均值为 80%。

3.4 矿石组分及形成顺序

系统的野外地质调查和详细的室内综合性研究表明,苏查矿床萤石矿石的主要矿物组分有萤石、石英、蛋白石、玉髓、方解石、绢云母、绿泥石、高岭石、磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂和锡石。受容矿围岩岩性组合不同和蚀变强度高低不一影响,各类萤石矿石无论是在矿物组合和含量上,还是在结构构造方面均存在较明显的差别。尽管在同一矿体的不同部位可能会出现具有同种矿物

组合的萤石矿石,但是同一部位也会同时产出有几种具有不同矿物种类或含量的萤石矿石,暗示了成矿作用的多期性和复杂性。

绢云母化、硅化、碳酸盐化和高岭石化是苏-查矿区常见的几种热液蚀变。① 绢云母化,代表性蚀变岩呈不规则条带状、团块状和脉状在矿体底板流纹质火山岩地层中产出,具体表现形式是各类长英质矿物为绢云母集合体所取代;② 硅化,代表性蚀变岩呈不规则条带状和团块状在矿体底板流纹质火山岩和顶板大理岩透镜体中产出,局部地段沿花岗岩类侵入岩与碳泥质板岩接触带产出,具体表现形式为粗晶状石英集合体、细粒蛋白石和玉髓团块;③ 碳酸盐化,代表性蚀变岩呈不规则团块状或透镜体沿构造裂隙带分布或在萤石矿体的孔穴中产出,并且以分布范围有限和产出规模较小为特征,具体表现形式为粗晶(伟晶)状、柱状或放射状集合体;④ 高岭石化,代表性蚀变岩呈不规则条带状或团块状在矿体底板流纹质火山岩和顶板碳泥质板岩中产出,其中后者以强度高和分布广为特征。一般来讲,高岭石化的发育程度与矿体厚度和断裂带的宽度呈正相关关系。

根据矿体围岩的热液蚀变特征和各种类型矿石的空间分布关系,苏-查矿床主要萤石矿石的形成顺序(从早到晚)依次为纹层状矿石→糖粒(细晶状)状矿石→角砾状矿石→条带状矿石→混合伟晶质矿石→单一伟晶质矿石→泥砂质矿石。

4 矿床地球化学

4.1 硫同位素

苏-查萤石矿区范围内下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层中代表性硫化物样品硫同位素分析结果表明,碳泥质板岩和流纹岩各 3 件黄铁矿样品, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围分别为 $-10.35\text{‰} \sim -12.06\text{‰}$ (平均值为 -11.26‰) 和 $-1.86\text{‰} \sim -2.97\text{‰}$ (平均值为 -2.56‰),其中碳泥质板岩硫化物以明显富集 ^{32}S 为特征。燕山期花岗岩基边缘相似斑状花岗岩 3 件黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $0.64\text{‰} \sim 1.45\text{‰}$,平均值为 1.03‰ ,以相对富集 ^{34}S 为特点。与前述碳泥质板岩、流纹岩和花岗岩黄铁矿样品相比,含硫化物萤石脉中 3 件黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-8.61\text{‰} \sim -6.75\text{‰}$,平均值为 -7.52‰ 。对于萤石脉中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值来讲,无论其变化范围,还是

平均值,它们均介于下二叠统西里庙群碳泥质板岩与燕山期花岗岩硫化物样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值之间,因此,含矿流体中的硫具有多来源特点。综合性对比分析结果表明,苏-查萤石矿区燕山期花岗岩黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值完全可以与岩浆热液成因硫化物相对比(Bohlke et al., 1988; Taylor, 1987)。相比之下,下二叠统西里庙群碳泥质板岩中的黄铁矿则很可能是封闭海盆地中生物活动产物(Taylor, 1987)。考虑到萤石脉中黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显高于碳泥质板岩和流纹岩,而低于花岗岩黄铁矿样品,可以推测岩浆热液流体对碳泥质板岩和流纹岩的淋滤萃取作用是导致萤石脉中硫化物沉淀的主要原因。

4.2 钕同位素

本次研究过程中,对苏-查萤石矿区代表性火山-沉积岩(碳泥质板岩和流纹岩),花岗岩和萤石矿石样品进行了钕-钕同位素分析,所有 15 件岩(矿)石样品钕-钕同位素分析结果及特征比值列于表 1。下二叠统西里庙群碳泥质板岩和流纹岩各 3 件全岩样品 Sm/Nd 比值变化范围分别为 $0.13 \sim 0.16$ (平均值为 0.14) 和 $0.14 \sim 0.16$ (平均值 0.15)。如若将 276 Ma 看作是火山-沉积岩的形成时间,那么计算所获得的 $\epsilon_{\text{Nd}}(276 \text{ Ma})$ 值变化范围分别为 $-4.06 \sim -0.97$ (平均值 -2.56) 和 $0.67 \sim 2.40$ (平均值 1.46)。无论是碳泥质板岩,还是流纹岩样品,它们的 $\epsilon_{\text{Nd}}(276 \text{ Ma})$ 值分别高于同时期古大陆壳 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(DePaolo, 1988; 1981),低于同时期亏损地幔 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图 4a)。与碳泥质板岩样品相比,所有流纹岩样品均以具有正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为特征,反映了其所含的深源物质明显高于同时期形成的碳泥质板岩(图 4a)。

与前述下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层相比,4 件花岗岩样品(边缘相似斑状花岗岩和中心相钾长花岗岩各 2 件样品)和 5 件萤石矿石样品的 Sm/Nd 比值变化范围分别为 $0.13 \sim 0.16$ (平均值 0.15) 和 $0.08 \sim 0.26$ (平均值 0.18)。如若将 138 Ma 看作是中性岩浆上侵时间和萤石矿床的主成矿期,那么 2 件钾长花岗岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值分别为 0.77 和 5.73 ,平均值 3.25 。2 件似斑状花岗岩样品和 5 件萤石矿石样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值变化范围分别为 $-4.61 \sim -4.07$ (平均值 -4.34) 和 $-6.33 \sim -4.29$ (平均值 -5.19)。与 2 件钾长花岗岩样品相比,似斑状花岗岩和萤石矿石样品均以具有较大的负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为特点,大部分数据投绘在靠近古大陆壳 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值演化线一侧,暗示它们所含的壳源物质

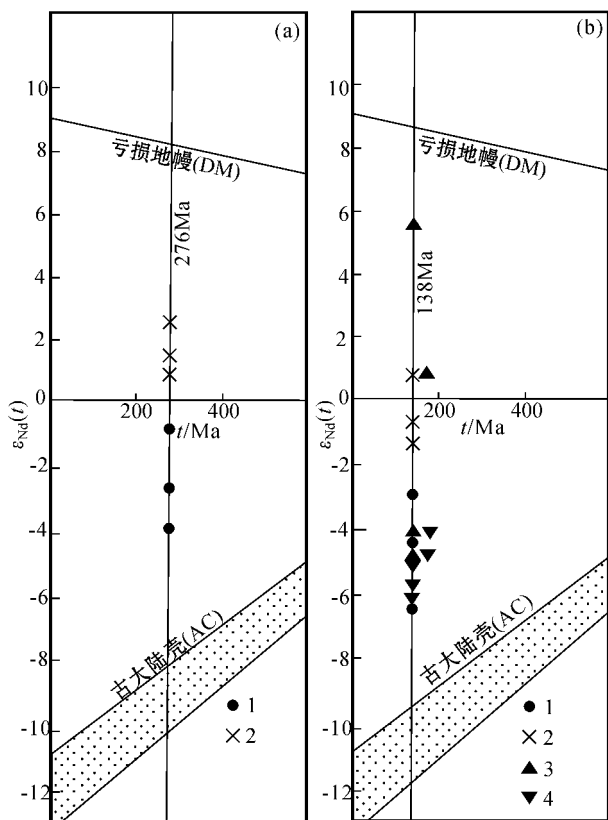


图 4 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿床沉积岩、火山岩、花岗岩和萤石矿石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值随时间(t)演化图

a. 276 Ma 时各类岩(矿)石样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值; b. 138 Ma 时各类岩(矿)石样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。亏损地幔(DM)和古大陆壳(AC) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 演化线引自 DePaolo(1988)

1—板岩 2—流纹岩 3—花岗岩 4—萤石矿石

Fig. 4 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus time (t , Ma) plot for slate, rhyolite, granite and fluorite ores from the Sumoqagan Obo fluorite deposit, Inner Mongolia

a. shows values of $\epsilon_{\text{Nd}}(276 \text{ Ma})$; b. shows values of $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ evolution curves of the depleted mantle (DM) and ancient continent from DePaolo (1988)

1—Slate; 2—Rhyolite; 3—Granite; 4—Fluorite ores

组分要明显高于前述流纹岩和钾长花岗岩(图 4b)。

在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值对时间(t)的图(图 4)中,2 件钾长花岗岩和所有流纹岩样品均以具有正(或较小)的负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为特征,并且明显大于碳泥质板岩、似斑状花岗岩和萤石矿石样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。另外,钾长花岗岩的钕同位素特征完全可与兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩相对比(洪大卫等,2000),个别样品(GLS10)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值为 5.73,明显高于其他所测岩(矿)石样品。碳泥质板岩样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值变化范围较大,个别样品(ABT04)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值为 -

6.34,明显低于其他所测岩(矿)石样品。所有似斑状花岗岩和萤石矿石样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值均投绘在碳泥质板岩与钾长花岗岩数据点之间,其中部分数据完全重叠在一起。上述钕同位素特征表明,花岗岩、碳泥质板岩和流纹岩与萤石矿石具有密切成因联系。萤石矿床的成矿物质来自壳、幔混合源,其中壳源物质组分占有绝对优势。

4.3 铅同位素

苏查萤石矿区 4 件碳泥质板岩和 5 件流纹岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.596~19.064 (平均值为 18.753) 和 18.573~19.150 (平均值为 18.738); $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为 15.524~15.653 (平均值为 15.564) 和 15.552~15.575 (平均值为 15.567); $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别为 38.371~38.839 (平均值为 38.514) 和 38.384~39.054 (平均值为 38.633)(表 2)。根据 Doe 和 Stacey(1974)的参数对碳泥质板岩和流纹岩样品进行了单阶段模式年龄值计算,所获结果均为负值, μ 值变化范围分别为 9.3~9.7 和 9.4~9.5。8 件花岗岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.114~18.762,平均值为 18.582; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.516~15.598,平均值为 15.549; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.311~38.666,平均值 38.514。对 8 件花岗岩样品的单阶段模式年龄计算,除 1 件样品为 212 Ma 外,其他样品均为负值, μ 值为 9.2~9.5。与前述碳泥质板岩、流纹岩和花岗岩样品相比,5 件萤石矿石样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.230~18.704,平均值 18.459; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.487~15.566,平均值为 15.530; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 38.321~38.643,平均值为 38.518。5 件样品中的 2 件样品单阶段模式年龄值分别为 83 Ma 和 123 Ma,其他 3 件样品均为负值, μ 值为 9.1~9.4。碳泥质板岩、流纹岩、花岗岩和萤石矿石无论是在铅同位素比值上,还是在单阶段模式年龄值和 μ 值上均存在有许多相似之处,各类岩(矿)石样品之间不存在明显的分界线。岩(矿)石样品铅同位素数据狭小的分布范围和较高的重叠特征反映了它们具有相同或相似的物质来源和形成过程(Zartman et al.,1988)(图 5)。

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中(图 5a),所有碳泥质板岩、流纹岩、花岗岩和萤石矿石样品铅同位素数据全部投在造山带与地幔铅演化线之间的一个狭窄的范围内。与地幔铅演化线相比,除个别数据点外,绝大多数数据点均在靠近地壳铅演化线的一侧。

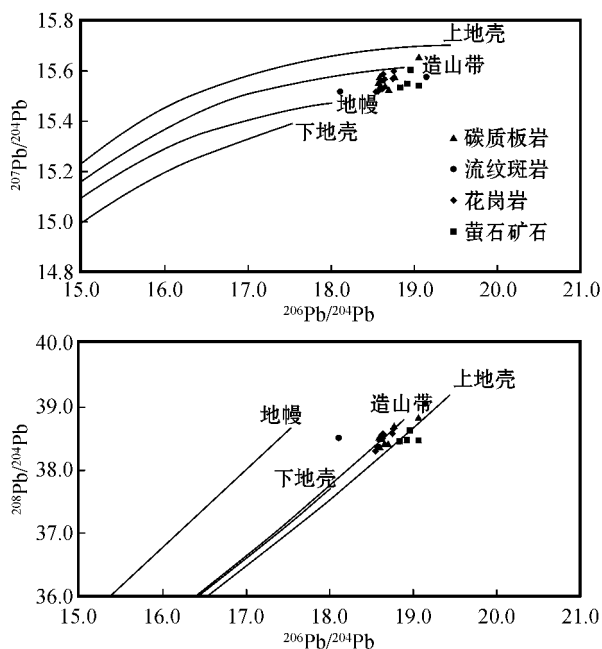


图 5 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿床沉积岩、火山岩、花岗岩和萤石矿石 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) 图

Fig. 5 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) diagrams of slate, rhyolite, granite and fluorite ores

在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中(图 5b), 所测岩(矿)石样品都在造山带铅演化线上及其两侧十分有限的区域内, 同样反映了成岩(矿)物质的源区特点。苏查萤石矿区碳泥质板岩、流纹岩、花岗岩和萤石矿石的铅同位素组成特征揭示了 2 个信息, 其一, 该区成岩(矿)物质来源大体相似, 主要来自以壳源组分为主的壳、幔混合源; 其二, 流纹岩、花岗岩和萤石矿石的形成作用与壳、幔源岩浆活动有关。

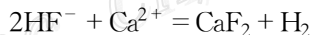
5 萤石矿床成因讨论与初步结论

5.1 海西晚期火山-沉积岩的成岩作用

华北陆台北缘经历过前寒武纪、加里东期和海西期构造旋回, 与之相对应的是华北陆台与西伯利亚板块的长时期和多阶段俯冲与碰撞, 进而形成广泛分布的中酸性火成岩和极为复杂的构造形迹(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 王荃等, 1991; Xiao

et al., 2003)^①。

海西晚期的造山运动致使本区遭受到 NS 向挤压和 EW 向拉张构造作用影响, 从而在古大陆边缘形成一系列规模大小不等的裂陷盆地和隆起带。在苏查到西里庙一带的裂陷盆地内, 强烈的中酸性火山喷溢活动不仅可以形成下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层中的流纹岩层, 同时也产出有少量纹层状或条带状萤石堆积体(李士勤, 1985)^②。前人研究结果表明, 苏查地区海西晚期火山喷发作用一方面产生大量含 CO_2 、 H_2 、 F 、 Cl 、 CH_4 、 HF 和 SiF_4 的气体, 另一方面形成含钠、钾、钙、铜、铅、锌和铁离子的火山热液(王万昌等, 1986)。受海水承压作用影响, 大部分 CO_2 、 F 、 HF 和 SiF_4 在热水溶液中呈络合物形式运移, 并且对先期火山-沉积岩地层中的有用组分进行淋滤与萃取。在远离火山喷发中心的洼地内, 热液流体中的碳酸根离子与钙结合形成碳酸盐类矿物集合体, 与此同时, HF^- 或 F^- 与钙发生化学反应, 进而沉淀形成纹层状或条带状萤石集合体, 其化学反应式分别为:



应该说, 萤石成矿作用是海西晚期火山喷发活动的延续和发展, 同时, 纹层状和条带状萤石矿(化)体或含萤石火山-沉积岩地层的存在为燕山期大规模萤石成矿作用的发生奠定了良好的物质基础和提供了最有利的成矿条件。

如前所述, 代表性火山岩样品 ϵ_{Nd} (276 Ma) 值全部为正值, 变化范围为 0.67~2.40, 平均值为 1.46。相比之下, 代表性沉积岩样品的 ϵ_{Nd} (276 Ma) 值全部为负值, 变化范围为 -4.06~-0.97, 平均值为 -2.56。上述钕同位素特征表明, 无论是火山岩, 还是沉积岩, 其成岩物质均来自壳、幔混合源, 其中火山岩所含的幔源物质组分明显多于沉积岩的。

5.2 燕山期花岗岩类成岩作用

苏查萤石矿区花岗岩类侵入岩体岩相学和全岩样品同位素(钕和铅)分析结果表明, 侏罗纪晚期到白垩纪早期区域构造应力场的大幅度调整可导致侏罗纪深大断裂发生不同程度活化, 并且诱发大规模中酸性岩浆活动(洪大卫等, 1994; 2000)。受二连

① 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 2006. 中蒙边境中东段我国一侧(北山和二连-东乌旗地区)铜金银矿床成矿规律与找矿方向(编号: 1212010561603-1). 中国地质科学院矿产资源研究所内部科研报告. 789 页.

② 内蒙古 102 地质队. 1987 内蒙古自治区四子王旗苏莫查干敖包萤石矿床初步勘查报告. 内蒙古地质矿产局内部资料. 1~70.

表 1 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿区火山岩、沉积岩、花岗岩和矿石样品钐同位素分析结果及特征比值

Table 1 Sm-Nd isotopic analyses and characteristic ratios of volcano-sedimentary rocks, granite and ores within the Sumoqagan Obo mineralized district, Inner Mongolia

岩(矿)石名称	样品编号	Sm/(ug/g)	Nd/(ug/g)	Sm/Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (276 Ma)	ε _{Nd} (138 Ma)	ε _{Nd} (0 Ma)
碳泥质板岩	CGA07	3.63	22.78	0.16	0.0965	0.5123	45	-2.65	-4.42	-6.18
	ABT04	0.09	0.71	0.13	0.0623	0.5122	45	-4.06	-6.43	-8.79
	CGA12	2.27	15.9	0.14	0.0864	0.5124	46	-0.97	-2.92	-4.86
流纹岩	CGA25	8.8	62.33	0.14	0.0853	0.5125	45	0.67	-1.29	-3.26
	CGA24	8.1	56.86	0.14	0.0861	0.5125	22	1.30	-0.65	-2.59
	CGA16	5.3	32.56	0.16	0.0981	0.5126	6	2.40	0.66	-1.07
钾长花岗岩	GLS10	3.65	22.63	0.16	0.0974	0.5128	19		5.73	3.98
	ABT07	2.4	17.16	0.14	0.0845	0.5126	16		0.77	-1.21
似斑状花岗岩	GLS09	4.57	28.31	0.16	0.0977	0.5123	4		-4.07	-5.81
	GLS06	5.27	41.91	0.13	0.0760	0.5123	5		-4.61	-2.48
萤石矿石	CGA04	0.11	1.36	0.08	0.0480	0.5123	22		-4.29	-6.90
	ABT04-2	0.21	1.14	0.18	0.1112	0.5123	9		-4.74	-6.24
	CGA20	0.19	1.06	0.18	0.1096	0.5123	12		-5.02	-6.55
	CGA21-2	0.24	1.10	0.22	0.1297	0.5123	19		-5.59	-6.77
	GLS02	0.23	0.87	0.26	0.1617	0.5123	20		-6.33	-6.94

所有同位素分析均在北京核工业地质研究院同位素实验室完成。

表 2 内蒙苏莫查干敖包地区火山-沉积岩、花岗岩和萤石矿石铅同位素组成

Table 2 Lead isotopic composition and relative ratios of the volcano-sedimentary rocks, granite and ores within the Sumoqagan Obo mineralized district, Inner Mongolia

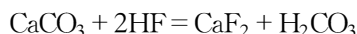
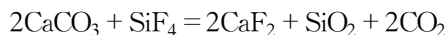
测定对象及样品编号	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	模式年龄/Ma	μ
碳泥质板岩					
CGA07	18.596	15.540	38.371	-117	9.3
CGA12	18.698	15.524	38.421	-237	9.3
CGA11	19.064	15.653	38.839	-222	9.7
CGA23	18.655	15.539	38.424	-167	9.3
流纹岩					
CGA25	18.573	15.552	38.384	-71	9.4
CGA24	18.608	15.561	38.504	-78	9.4
CGA16	18.589	15.574	38.522	-34	9.5
CGA26	18.770	15.575	38.701	-174	9.5
ABT03	19.150	15.575	39.054	-478	9.4
花岗岩					
GLS05	18.571	15.518	38.384	-149	9.2
GLS06	18.627	15.529	38.499	-168	9.3
GLS07	18.653	15.566	38.562	-102	9.4
GLS08	18.632	15.586	38.586	-40	9.5
GLS09	18.750	15.569	38.586	-172	9.4
GLS10	18.548	15.516	38.311	-135	9.2
GLS11	18.762	15.598	38.666	-114	9.5
ABT07	18.114	15.517	38.520	212	9.3
萤石矿石					
CGA51	18.230	15.518	38.321	123	9.3
CGA53	18.351	15.543	38.526	83	9.4
CGA55	18.560	15.536	38.477	-98	9.3
CGA56	18.704	15.566	38.625	-142	9.4
CGA57	18.452	15.487	38.643	-126	9.1

浩特-贺根山近东西向深大断裂(部分学者将其看作为华北陆台与西伯利亚板块的缝合线)活动影响,深源岩浆上涌导致地壳内热流值骤然升高,进而导致部分前寒武纪中间地块或下二叠统西里庙群火山-沉积岩发生深熔或重熔作用,并且产生一定规模的花岗质熔浆。这种兼具壳和幔源钕同位素特征的岩浆可通过上侵定位和结晶分异作用形成大面积分布的花岗岩类侵入岩体。尽管钾长花岗岩与似斑状花岗岩具有密切的时空分布关系,但是两者在成岩物质来源上明显不同,2件钾长花岗岩全岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值分别为 5.73 和 0.77,并且与兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩相类似,成岩岩浆含有一定量的幔源物质组分(洪大卫等,2000)。相比之下,2件似斑状花岗岩全岩样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值均为较小的负值(-4.61 和 -4.07),明显低于前述钾长花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值,与古大陆壳 $\epsilon_{\text{Nd}}(138 \text{ Ma})$ 值相近。根据上述钕同位素特征,可以推测花岗岩的形成过程大体如下:① 亏损地幔源物质与陆壳物质在 138 Ma 前发生物理或化学混合作用;② 受燕山期陆内构造作用影响,混合物质发生部分熔融,并且形成中酸性岩浆;③ 这种中酸性岩浆沿特定的构造部位上侵定位,并且与陆壳物质再次发生混合(染)作用;④ 花岗岩体边缘相(似斑状花岗岩)所含的陆壳组分明显高于中心相(钾长花岗岩)。另外,根据花岗岩类侵入岩体与萤石矿床的时空分布关系,可以推测花岗岩类岩浆活动不仅为萤石矿床的形成作用提供了物质和流体来源,而且是成矿流体对流循环的“发动机”。

5.3 萤石成矿作用

系统的野外地质调查和详细的岩(矿)相学研究结果表明,苏-查萤石矿床的形成过程主要由早、晚 2 个阶段构成,即海西晚期(276 Ma)火山-喷发沉积阶段和燕山中期岩浆热液阶段。根据野外地质证据、岩(矿)相学资料 and 同位素数据,笔者认为苏-查萤石矿床是不同来源和不同期次含矿热液活动的产物,矿石中的古大陆壳物质组分要远远多于幔源(或深源)物质组分。① 海西晚期火山-喷发沉积阶段:海西晚期,华北陆台北缘中西段苏-查到西里庙一带有一系列规模大小不等和产出形态各异的裂陷盆地。各裂陷盆地内的火山喷发和沉积作用不仅形成有下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层,而且还产出有纹层状和条带状萤石集合体以及富萤石块体(矿胚)。研究结果表明,随着海底火山喷发活动的进行,一方

面,挥发性组分(如 CO_2 、 H_2 、F、Cl、HF 和 SiF_4)和成矿元素(Ca、Na、K、Ca、Pb、Zn 和 Fe)随火山碎屑、火山灰和喷气进入海水或直接沉淀下来,进而造成氟和钙的初步富集;另一方面,火山活动亦可导致区域地热梯度不断增高和热泉活动加剧,并且构成海水与围岩的对流循环。在上述地质作用过程中, HF^- 和 F^- 与 Ca^{2+} 发生化学反应,进而形成纹层状或条带状萤石矿体;② 燕山中期岩浆热液阶段:燕山中期,区域性深大断裂的活化作用可诱发一定规模的中酸性岩浆活动。当深熔花岗质岩浆沿着有利构造部位上侵时,岩浆体系自身的结晶分异作用可促使大量挥发性组分 CO_2 、F、Cl、 H_2O 及 SiO_2 和 K_2O 等在岩浆房顶部或旁侧发生富集,进而形成富挥发性组分的花岗岩体。在构造薄弱地带,富挥发性组分流体可沿特定构造部位运移,并且对下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层中的有用组分进行淋滤、萃取。在萤石成矿作用的早期阶段,含氟离子或氟络合物的热水溶液可通过岩(体)层粒间孔隙或原生冷凝微细裂隙进行扩散与运移,进而在构造有利地段形成微细粒和浸染状萤石和含萤石石英脉。鉴于该阶段没有明显大气降水混入,因此,其元素地球化学特征和同位素组成与岩浆水相似(Taylor,1987)。随着成矿作用时间的推移和成矿体系的开放,大气降水和变质流体将会不断参与到成矿热液体系中来,并且与以岩浆水为主的含矿流体混合,进而形成混源型热液流体,由此所形成的萤石矿石,其元素地球化学特征和钕同位素组成与下二叠统西里庙群沉积岩的相似。另外,含氟混源热液流体对早期火山-沉积岩地层和萤石矿(化)体进行过不同程度的交代改造作用,水-岩反应主要表现在以下 3 个方面:其一,混源流体与地层或矿化体中的钙质发生化学反应,进而形成萤石集合体,化学反应式如下:



其二,沉积岩地层中大量镁铁质矿物解体,释放出来的金属元素可与混源流体中的挥发性组分结合,进而形成萤石、黄铁矿、黄铜矿、绢云母和绿泥石;其三,受混源流体对早期萤石矿(化)体改造作用影响,许多微细粒萤石晶体发生明显次生长大现象,局部地段形成伟晶状集合体。在萤石成矿作用的晚期阶段,随着成矿流体中钙与氟的大量析出,成矿体系温度和压力的进一步降低,残余热水溶液在构造有利

地段形成一些骨架状、葡萄状、钟乳状和瘤状萤石集合体。在此之后,含钙、硅、铁和锰的热液流体在萤石矿体裂隙面或在孔穴壁上形成方解石晶簇(脉)、石英晶簇和铁锰质细脉。

苏查萤石矿床形成之后长期裸露地表,遭受风化剥蚀。同时受晚期构造运动影响,部分萤石矿体破碎严重,进一步增加了找矿与开采工作的难度。

综上所述,苏查萤石矿床是与燕山期花岗岩类侵入岩体有关的中温热液萤石矿床。苏查到西里庙一带燕山期花岗岩类侵入岩分布广泛,并且与萤石矿点具有密切的时空关系,是进行萤石矿床找矿勘查的有利地段。

References

- Bohlke J K, Coveney R M Jr, Rye R O and Barnes I. 1988. Stable isotope investigation of gold quartz veins at the Oriental mine, Al-leghany district, California. U. S. Geological Survey Open-File Report, 88-279, 1-24.
- DePaolo D J. 1981. Nd in the Colorado Front Range and implications for crust formation and mantle evolution in the Proterozoic [J]. Nature, 291: 193-196.
- DePaolo D J. 1988. Neodymium isotope geochemistry. An introduction [A]. Minerals and rocks [M]. Berlin/Heidelberg/New York: Springer. 20: 1-187.
- Doe B R and Stacey J S. 1974. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: a review [J]. Econ. Geol., 67: 757-767.
- Editorial Committee of Discovery History of Mineral Deposits for the volume of Inner Mongolian Autonomous Region. 1996. The discovery history of mineral deposits of China-volume of Inner Mongolian Autonomous Region [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 199-202 (in Chinese).
- Hong D W, Wang S G, Xie X L and Zhang J S. 2000. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. Earth Science Frontiers, 7 (2): 441-456 (in Chinese with English abstract).
- Hong D W, Huang H Z, Xiao Y J, Xu H M and Jin M Y. 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 68(3): 219-230.
- Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Resources (IMBGMR). 1991. Regional geology of Inner Mongolian Autonomous Region [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-725 (in Chinese with English abstract).
- Li S Q. 1985. The super-large fluorite deposit formed by volcanism [J]. Geology and Exploration, 21 (1): 30-31 (in Chinese).
- Taylor B E. 1987. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluid [J]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook, 13: 337-445.
- Wang Q, Liu X Y and Li J Y. 1991. Plate tectonics between Cathaysia and Angaraland in China [M]. Beijing: Peking Univ. Pub. House. 74-91 (in Chinese with English abstract).
- Wang W C, Yang B S and Zhang S P. 1986. Discussion on geological feature and metallogeny of the fluorite deposits occurring within the Sumoqagan Obo-Xilimiao district [J]. Journal of Inner Mongolian Geology, (1): 20-30 (in Chinese).
- Xiao W J, Windley B F, Hao J and Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. Tectonics, 22 (6): 8-1-8-20.
- Zartman R E and Haines S M. 1988. The plumbotectonic model for Pb isotope systematics among major terrestrial reservoirs-a case for bi-directional transport [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52: 1327-1339.

附中文参考文献

- 洪大卫,王试光,谢锡林,张季生. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. 地学前缘, 7(2): 441-456.
- 洪大卫,黄怀曾,肖宜君,徐海明,靳满元. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义 [J]. 地质学报, 68(3): 219-230.
- 李士勤. 1985. 火山作用形成的特大型沉积萤石矿床 [J]. 地质与勘探, 21(1): 30-31.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古区域地质志 [M]. 中华人民共和国地质矿产部专报(一)区域地质, 第 25 号. 北京: 地质出版社. 1-725.
- 王 荃,刘雪亚,李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造 [M]. 北京: 北京大学出版社. 74-91.
- 王万昌,杨宝善,张绍平. 1986. 苏莫查干敖包-西力庙萤石矿床地质特征及成矿地质作用探讨 [J]. 内蒙古地质, (1): 20-30.
- 《中国矿床发现史·内蒙古卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史—内蒙古卷 [M]. 北京: 地质出版社. 199-202.