

苏-查萤石矿区钾长花岗岩锆石 SHRIMP 年龄 及其地质意义

聂凤军, 许东青, 江思宏, 胡 朋

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘 要: 内蒙古苏-查萤石矿区是全球范围内最大的单一萤石矿区。萤石矿体大多呈似层状和透镜体状在下二叠统火山-沉积岩地层内产出, 并且与显生宙花岗岩类侵入岩体具有密切时空分布关系, 其中部分矿体直接出现在敖包吐花岗岩株中。本次研究主要对敖包吐岩株钾长花岗岩进行了锆石 SHRIMP 铀-铅同位素年龄测定, 所获同位素年龄值为 (138 ± 4) Ma, MSWD 值为 2.3, 属中生代燕山期。根据上述同位素年代学数值, 同时结合其他地质与地球化学证据, 可以推测, 中生代时期, 受古板块内部构造应力调整作用影响, 苏-查萤石矿区及东西两侧曾发生过强烈构造-岩浆活动, 并且形成有敖包吐花岗岩株及相关的萤石矿床。中生代燕山期花岗岩类岩浆活动不仅为萤石矿床的形成提供了物质、动力和热力来源, 而且是成矿流体对流循环的“发动机”。对比分析结果表明, 敖包吐岩体的形成时间与华北陆台中东段许多含矿花岗岩体的成岩时代大体相似, 它们很可能是地壳演化特定阶段混源(壳、幔源)岩浆活动的产物。

关键词: 钾长花岗岩; 锆石 SHRIMP 年龄; 敖包吐岩株; 苏-查萤石矿区; 内蒙古

中图分类号: P597.1; P578.31 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)06-803-09

Zircon SHRIMP U-Pb Dating of K-Feldspar Granite Samples from the Aobaotu Granite Stock in the Su-Cha (Sumoqagan Obo) Fluorite Ore District, Inner Mongolia

NIE Feng-jun, XU Dong-qing, JIANG Si-hong, HU Peng

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Located on the northern margin of the North China continental massif, the Su-Cha (Sumoqagan Obo) fluorite ore district is the largest independent fluorite ore district in the world. Fluorite mineralization occurs in both Late Paleozoic volcano-sedimentary sequences of the Xilimiao Group and Mesozoic granitoid intrusions. Among these granitoid intrusions, the Aobaotu granitoid stock shows an intimate spatial relationship with the fluorite deposits. It intruded into Lower Permian volcano-sedimentary rocks of the Xilimiao Group, with an outcrop of 66 km². The stock consists mainly of K-feldspar granite in the central facies and marginal facies porphyry-like granites. Petrology, geochemistry and isotopic geology of the Aobaotu stock are similar to those of Paleozoic and Mesozoic granitoid intrusions, with positive Nd (t) values existent within the Da Hinggan Mountains-Mongolia orogenic belt. A fresh K feldspar granite sample from the Aobaotu granitoid stock was selected for SHRIMP U-Pb age dating. The zircon grains separated from the fresh K-feldspar granite sample give a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 138 ± 4 Ma, with a MSWD value of 3.2. Based on this zircon SHRIMP U-Pb age and combined with other geological evidence, it is suggested that the Aobaotu granitoid stock and its related fluorite deposits were formed within a reformed rift basin located along the collision zone of the North China continental massif and Siberian platform. The Aobaotu granitoid stock was probably a product of Mesozoic Yanshanian tectonic-

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40573025)和国家科技支撑课题(编号: 2007 BAB 25 B02)资助。

收稿日期: 2009-01-15; 改回日期: 2009-11-24。

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。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68999033, 010-68999042。E-mail: nfjj@mx.cei.gov.cn。

magmatic activities, and played an important role in the ore-forming process of the Su-Cha fluorite deposit. The rock-forming materials of the Aobaotu granitoid stock were derived from a mixed source composed of mantle- and crust-related components.

Key words: K-feldspar granite; zircon SHRIMP U-Pb dating; Aobaotu stock; Su-Cha (Sumoqagan Obo) fluorite ore district; Inner Mongolia

苏-查(苏莫查干敖包)矿区是20世纪80年代末期,我国地质工作者在内蒙古中部发现和圈定的一处特大型萤石矿区。该萤石矿区位于内蒙古四子王旗卫境苏木北部,北距中蒙边境25 km,东到集(宁)一二(连浩特)铁路线120 km,南到呼和浩特286 km。系统的地质勘查结果表明,该萤石矿区主要由苏-查、敖包吐和贵勒斯太3处大中型矿床构成,萤石(CaF_2)储量可达 2500×10^4 t, CaF_2 含量为22%~86%,平均值78%,是迄今为止在全球范围内找到的最大规模单一萤石矿化集中区(李士勤,1985;王万昌等,1986;中国矿床发现史—内蒙古卷编委会,1996;聂凤军等,2008a)。苏-查萤石矿区及其外围元古界—古生界地层出露广泛、构造形迹复杂、岩浆岩发育和各类矿床(点)星罗棋布,它不仅是华北陆台北缘金属成矿带的组成部分,而且是了解北方(兴蒙)造山带构造演化历史的窗口,因此,苏-查萤石矿区及外围的基础地质调查、找矿勘查工作和成矿理论研究历来为国内外地质学家所关注。

苏-查萤石矿区及外围各种成因类型和不同产出规模的花岗岩类侵入岩分布广泛,占全部岩层(体)出露面积30%左右。主要岩石类型有钾长花岗岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩和伟晶花岗岩,其形成时间可从早古生代一直延续到中生代晚期。需要提及的是,尽管各主要萤石矿体大都呈层状、似层状和透镜体状在下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层中产出,但是它们均与花岗岩类侵入岩体具有密切的空间分布关系,其中部分矿体直接出现在敖包吐花岗岩株内部。与萤石矿床有关的花岗岩是什么时候形成的?其在萤石矿床形成过程中发挥了什么样的作用?成岩(矿)物质究竟来自何处?一直都是人们所讨论的“热点”问题。

笔者在野外地质调查、岩相学、矿物学和地球化学研究的基础上,对苏-查萤石矿区敖包吐花岗岩株钾长花岗岩进行了锆石 SHRIMP 铀-铅年龄测定,基本上查明了该岩株的成岩时代及其与萤石矿床的成因联系,初步阐述了成岩物质来源和岩株形成过程。上述研究成果不仅极大地丰富了苏-查萤石矿区的成矿理论研究内容,而且为寻找隐伏萤石矿床提供了科学依据。

1 成矿地质环境

从大地构造位置上看,苏-查萤石矿区位于华北陆台与西伯利亚板块汇聚带,其北侧2 km和1 km处分别是艾力格庙-锡林浩特前寒武纪中间地块和两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;聂凤军等,2008a;许东青等,2008a)。苏-查萤石矿区及外围出露的地层主要有前寒武系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和上白垩统沉积岩以及第四系沉积物(内蒙古—02地质队,1987)。艾力格庙群变质岩为艾力格庙—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(图1),岩石类型有大理岩、砂岩、千枚岩和石英岩,厚度为1100 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,为主要的含矿层位,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、灰岩和砂岩(图1)。上侏罗统查干诺尔组火山岩零星分布在苏-查矿区的南部和西部一带,与下二叠统西里庙群火山-沉积岩呈角度不整合接触关系,主要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。上白垩统沉积岩地层主分布在苏-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。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。

苏-查萤石矿区及外围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,并且呈岩株和岩群状侵入到前寒武系艾力格庙群变质岩、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(聂凤军等,2008a;许东青等,2008a,2008b)。在所有上述侵入岩体中,敖包吐花岗岩株主要由钾长花岗岩和似斑状花岗岩组成,并且与萤石矿体具有密切空间分布关系。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敖包吐花岗岩株之中。

从构造形迹上看,下二叠统西里庙群火山-沉

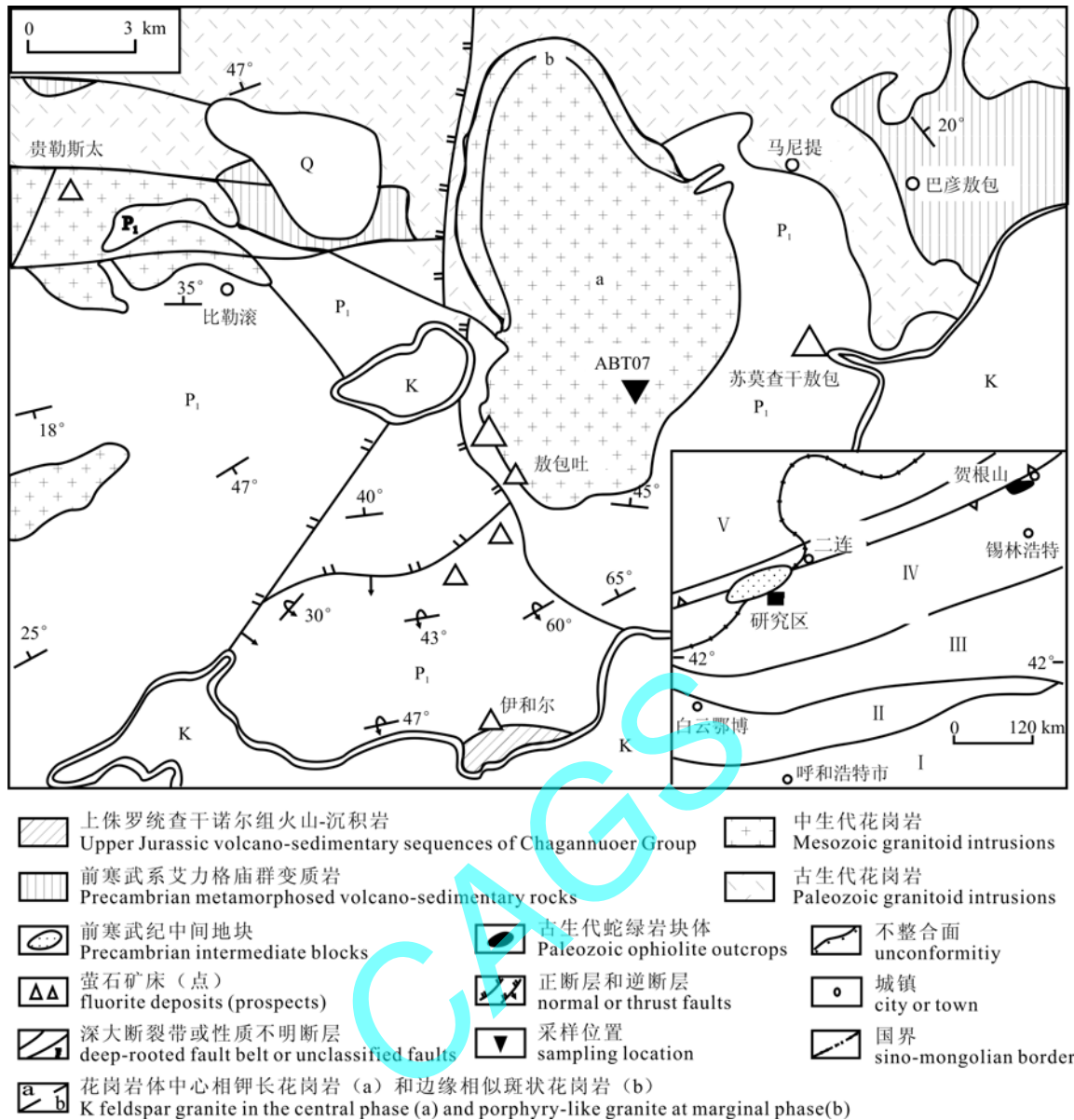


图 1 内蒙古苏-查萤石矿区地质略图(据内蒙古一〇二地质队, 1987; 聂凤军等, 2008a 资料改编)

Fig. 1 Simplified geological map of the Su-Cha fluorite ore district, Inner Mongolia (modified from No.102 Geological Party of Inner Mongolia, 1987 and Nie et al., 2008)

华北陆块: -古元古代—太古代结晶基底; -中、新元古代古大陆边缘; -白乃庙—温都尔庙前寒武纪—早古生代构造—岩浆岩带; -二连浩特—贺根山古生代构造—岩浆岩带; 西伯利亚板块; -阿巴嘎旗—东乌珠穆沁旗古生代构造—岩浆岩带。

Q-第四系沉积物; K-白垩系沉积岩; P₁-下二叠统西里庙群火山—沉积岩

North China continental massif: -Paleo-Proterozoic-Archean crystalline basement; -Mesoproterozoic-Neoproterozoic continental margin; -Precambrian-Early Paleozoic tectono-magmatic belt of Bainaimiao-Odor Sum; -Paleozoic tectono-magmatic belt of Erenhot-Hegen Mountain, Siberian Plate; -Late Paleozoic tectono-magmatic belt of Abag Banner-Dong Ujimqin Banner. Q-Quaternary; K-Cretaceous sedimentary rocks; P₁-Lower Permian volcano-sedimentary rocks of Xilimiao Group

积岩地层中各种产出规模和不同方向的褶曲构造十分明显, 具有以下 3 个特点: 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;

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; 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, 其形成作用发生在海西期(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 许东青等,

2008b)。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, 还是在敖包吐花岗岩岩株中, 断裂破碎带分布广泛, 其中以 NE 向压扭性和张扭性断层, 近 EW 向和近 SN 向逆推断层或平移断层最发育, 并且与萤石矿体具有密切空间分布关系(内蒙古一〇二地质队, 1987; 聂凤军等, 2008a; 许东青等, 2008a, 2008b)。

2 样品的岩石学特征、分选与分析过程

2.1 样品的岩石学特征

本次研究所用锆石颗粒主要取自敖包吐花岗岩体。敖包吐岩体呈椭圆形岩株侵入到下二叠统西里庙群火山-沉积地层, 出露面积为 66 km²。敖包吐岩株与萤石矿体具有密切的空间分布关系, 其内部产出一系列萤石脉或石英-萤石脉, 西南侧和东部分别与敖包吐和苏-查大型萤石矿床毗邻。

敖包吐岩株呈近 SN 向展布, 向外侧倾斜, 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、石榴石、透辉石、符山石和方柱石亦常可见及(李士勤, 1985; 王万昌等, 1986; 聂凤军等, 2008a)。

整个敖包吐花岗岩株, 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, 占整个岩株体积的 5/6, 相比之下, 后者为似斑状花岗岩, 所占面积较小, 二者呈渐变过渡关系(图 1)。本次同位素年代测定样品主要取自钾长花岗岩, 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, 粒径为 3~5 mm, 占全部造岩矿物含量的 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 20%~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, 向深部有逐渐变薄和尖灭的现象, 体积占整个岩基的 1/6。似斑状花岗岩样品呈灰白色—浅肉红色, 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, 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 20%~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。

聂凤军等(2008a)和许东青等(2008b)曾对敖包吐花岗岩株的全岩样品进行过主元素、微量元素和稀元素分析, 并且认为该岩株在元素地球化学方面存在有以下几个特点: 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(K₂O+Na₂O), 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; 一般来讲, 敖包吐花岗岩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, 二者在铷和钡含量上存在有较明显的差别。另外, 所有敖包吐花岗岩株全岩样品均以贫钽、铌和锆为特征;

敖包吐花岗岩株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, 边缘相似斑状花岗岩稀土元素含量(ΣREE)、LREE/HREE 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 值和 δEu 值分别小于 180 × 10⁻⁶、8 和 0.35。中心相和边缘相花岗岩类样品在微量和稀土元素含量方面为什么会存在如此大的差别呢? 究其原因, 很可能与下述几个因素有关: 后者的地壳混染程度明显高于前者; 后者所包含的早期岩层(体)残块数量明显大于前者; 后者交代蚀变岩的种类和产出规模明显多于和大于前者; 后者的结晶分异程度明显低于前者(聂凤军等, 2008a; 许东青等, 2008b)。

2.2 样品的分选与分析过程

如前所述, 用于锆石分选的样品 ABT07 采自敖包吐岩株中心相钾长花岗岩。锆石的分选过程如下: 将 15 kg 左右的样品破碎至 2 cm³ 大小, 并且将其放入直径为 20 cm 的不锈钢钵中。将不锈钢钵放入 XZW100 型振动磨样机(1.1/0.75 kw)中研磨 3~5 s, 此后, 将样品取出, 并且过 0.4 mm 孔径的筛, 上述过程反复进行到所有样品全部通过 0.4 mm 孔径筛。用清水除去样品的粉尘, 并且采用铝制工具淘洗富集重矿物。采用磁选和电磁选技术获取非电磁性矿物, 再淘洗获取锆石精矿。最后借助双目镜挑选出完整、透明和干净(无裂隙和无包体)的锆石颗粒。将所选锆石样品与标准样品固定在直径为 25 mm 的环氧树脂靶上, 并且将其研磨一半暴露出锆石的中心部分。此后, 将锆石靶进行镀金, 同时拍摄阴极发光(CL)图像(图 2)。锆石铀、钍和铅同位素分析在北京离子探针中心的 SHRIMP 上按照标准测定完成, 详细的分析原理和分析流程可参见石玉若等(2007)、宋彪等(2002)和 Williams 等(1987)的文献。分析数据是采用 Squid 和 Isoplot (Ludwig, 2001, 2003) 计算机软件处理的, 衰变常数采用 Steiger 等(1997)的推荐值。表 1 中所列分析数据均为同一测点连续 5 次分析结果的平均值, 单个数据点的误差为 1σ。鉴于花

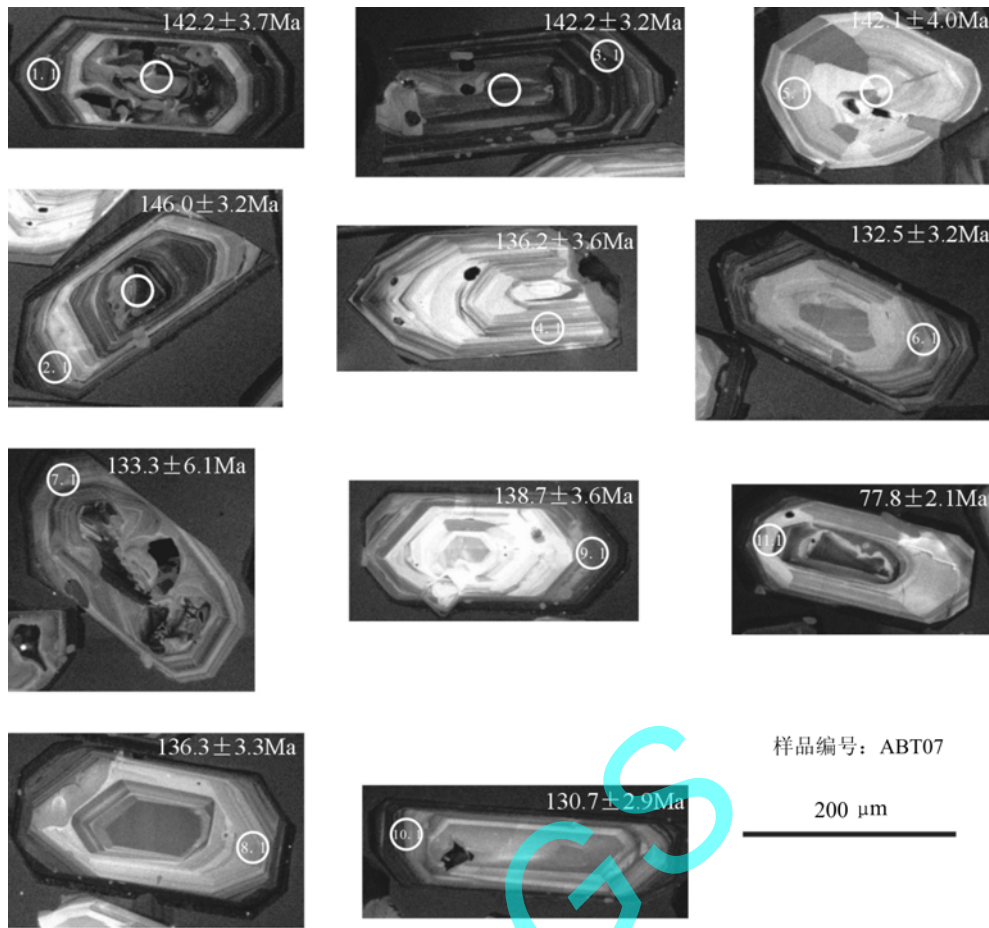


图 2 内蒙古苏-查萤石矿区敖包吐岩株新鲜钾长花岗岩锆石阴极发光图象

Fig. 2 Cathodoluminescence images showing the morphology of zircon grains in fresh K-feldspar granite samples from the Aobaotu granitoid stock within the Su-Cha fluorite ore district, Inner Mongolia

表 1 内蒙古苏-查萤石矿区敖包吐岩株钾长花岗岩锆石 SHRIMP 铀-铅年龄分析结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb age data of the K feldspar granite from the Aobaotu granitoid stock occurring within the Su-Cha fluorite district, Inner Mongolia

分析点号	²⁰⁶ Pb _c /%	²⁰⁶ Pb* /×10 ⁻⁶	Th /×10 ⁻⁶	U /×10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* ±1σ /%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U ±1σ /%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U ±1σ /%	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U ±1σ /Ma
1.1	0.82	40.2	748	2083	0.359	0.0514±2.9	0.1579±3.9	0.02230±2.6	142.2±3.7
2.1	0.71	34.9	618	1764	0.350	0.0479±2.7	0.1513±3.5	0.02290±2.2	146.0±3.2
3.1	0.35	50.6	546	2632	0.207	0.0497±2.0	0.1530±3.0	0.02231±2.2	142.2±3.2
4.1	1.60	3.86	129	207	0.623	0.0458±8.8	0.1350±9.2	0.02136±2.7	136.2±3.6
5.1	3.88	3.74	142	188	0.755	0.0308±30	0.0950±30	0.02229±2.9	142.1±4.0
6.1	1.19	10.7	160	592	0.270	0.0478±8.6	0.1370±9.0	0.02077±2.5	132.5±3.2
7.1	1.35	26.5	518	1457	0.356	0.0531±4.2	0.1530±6.3	0.02090±4.6	133.3±6.1
8.1	0.85	5.06	115	273	0.421	0.0428±7.8	0.1260±8.2	0.02137±2.5	136.3±3.3
9.1	1.10	10.4	144	549	0.262	0.0464±5.8	0.1391±6.4	0.02174±2.6	138.7±3.6
10.1	1.05	30.9	730	1736	0.421	0.0502±4.1	0.1417±4.7	0.02048±2.2	130.7±2.9
11.1	12.82	68.2	2337	5722	0.408	0.0474±14	0.0790±15	0.01214±2.7	77.8±2.1

²⁰⁶Pb_c-为普通铅; ²⁰⁶Pb*—为放射性铅; ²⁰⁷Pb* /²⁰⁶Pb*、²⁰⁷Pb* /²³⁵U 和 ²⁰⁶Pb* /²³⁸U 值的误差为相对误差。

花岗岩样品形成时代较年轻, 故将锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测年数据平均值看作为其形成时间, 其置信度为 95%。

3 分析结果

阴极发光图显示, 新鲜钾长花岗岩锆石颗粒大小不一, 变化范围为 $98\ \mu\text{m} \times 213\ \mu\text{m}$ 到 $120\ \mu\text{m} \times 297\ \mu\text{m}$, 平均值为 $110\ \mu\text{m} \times 258\ \mu\text{m}$, 长宽比值为 1:1 到 4:1, 平均值为 2:1。所测锆石颗粒大多呈长柱状自形晶, 老核和新壳结构特征明显。尽管各个锆石颗粒中老核的几何形态和体积大小存在有一定的差别, 但是其与新壳的边界十分清晰。鉴于老核与新壳的铀和钍含量各不相同, 因此, 它们的阴极发光图像的黑白程度也不一样。需要指出的是, 无论是在锆石颗粒的中心部位, 还是其边缘地带均可观察到清晰的韵律环带结构, 暗示了此类锆石很可能是一种岩浆成因锆石(Pidgeon et al., 1998; Gerhard et al., 1999; Claesson et al., 2000; Hoskin et al., 2000)。

在所有锆石颗粒的分析数据中, 除 1 个分析点(表 1 和图 2 中分析点编号为 11.1)外, 其余 10 个分析点的铀和钍含量变化范围分别为 $(188\sim 2632) \times 10^{-6}$, 平均值为 1148×10^{-6} 和 $(115\sim 748) \times 10^{-6}$, 平均值为 385×10^{-6} 。除了个别样品分析点的数据外, 大多数分析点的铀和钍含量存在一定的正相关关系。与前述 10 个锆石分析点的数据相比, 第 11.1 号分析点的铀和钍含量分别为 5722×10^{-6} 和 2337×10^{-6} , 分别是其余分析点的 2~30 倍和 3~20 倍。所有 10 个锆石分析点的 Th/U 值变化范围为 0.21~0.76, 平均值为 0.42。前人研究结果表明, 岩浆成因和变质重结晶锆石的 Th/U 值分别大于 0.5 和小于 0.1, 而介于 0.1~0.5 者则反映了成岩期后流体对锆石颗粒的影响(Paterson et al., 1992; Pidgeon et al., 1998)。根据上述论点, 同时结合敖包吐岩株的最新研究资料数据(聂凤军等, 2008a; 许东青等, 2008b), 可以推测, 尽管敖包吐花岗岩株的大部分锆石颗粒属岩浆成因, 但是部分颗粒可能遭受到一定程度热液流体活动影响(Paterson et al., 1992; Gerhard et al., 1999; Hoskin et al., 2000)。

在所有锆石颗粒的 11 个分析点数据中, 10 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值比较相近, 其变化范围为 130.7~146.0 Ma, 平均值为 138.0 Ma。从整体上看, 锆石颗粒分析点的年龄值大体可以划分为 3 组, 其中第一组的年龄值分别为 $(142.1 \pm 4.0)\text{Ma}$ 、 $(142.2 \pm 3.2)\text{Ma}$ 、 $(142.2 \pm 3.7)\text{Ma}$ 和 $(146.0 \pm 3.2)\text{Ma}$; 第二组的年龄值分别为 $(136.3 \pm 3.3)\text{Ma}$ 、 $(138.7 \pm 3.6)\text{Ma}$ 和 $(136.2 \pm 3.6)\text{Ma}$; 第三组的年龄值分别为 (130.7 ± 2.9)

Ma、 $(132.5 \pm 3.2)\text{Ma}$ 和 $(133.3 \pm 6.1)\text{Ma}$ 。一般来讲, 自锆石颗粒中心部位经过渡地段到边缘地带, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值存在有从老到新的变化趋势。在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 一致曲线图上(图 3), 除 1 个分析点年龄值较低外, 其余 10 个分析点的数据呈群簇状分布在谐和线上及其附近, 加权平均年龄值为 $(138 \pm 4)\text{Ma}$ 。根据这样的分析结果, 同时结合其他地质证据(聂凤军等, 2008a; 许东青等, 2008b), 不难看到, 敖包吐岩株是中生代燕山期构造-岩浆活动的产物。从表 1 和图 2 看到, 在所有 11 个锆石分析点数据中, 有 1 个分析点(编号为 11.1)与其他分析点存在有较明显的差别, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $(77.8 \pm 2.1)\text{Ma}$, 明显低于其他分析点的年龄值。考虑到这个分析点位于锆石颗粒的最外侧, 同时又具有较高的铀(5722×10^{-6})和钍(2337×10^{-6})含量, 可以认为, 该分析点较低的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值可能与下述两方面因素有关: 成岩期后, 流体与锆石边缘发生过某种形式的水-岩反应; 受某种地质作用影响, 锆石边缘部位铀和钍含量曾进行过大幅度调整。

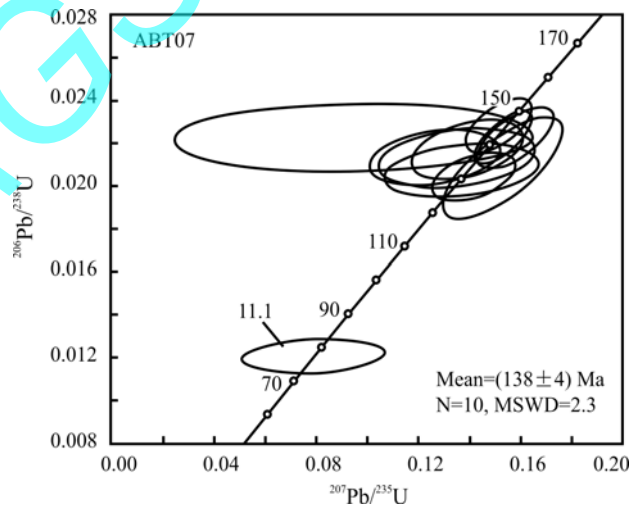


图 3 内蒙古苏-查萤石矿区敖包吐岩株新鲜钾长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图

Fig. 3 Zircon SHRIMP U-Pb concordia plots for fresh K-feldspar granite samples from the Aobaotu granitoid stock within the Su-Cha fluorite ore district, Inner Mongolia

4 讨论

4.1 成岩时代

王荃等(1991)认为, 早石炭世到早二叠世, 华北陆台与西伯利亚板块沿二连浩特-贺根山一线碰撞拼合为一整体。两大古陆块的对接作用是自西向东, 在不同地质时期和各个构造阶段是逐步进行的, 最终的“焊接”时间为早二叠世早期。早二叠世中、

晚期,在两大古陆块对接拼合为一个整体后,受区域构造应力大幅度调整作用影响,古板块缝合线两侧裂陷作用强烈,并且在苏莫查干敖包—西里庙—二道井—林西一带形成一条近 EW 向断续分布的裂陷槽(Zhang et al., 1989; 邵济安等, 2002)。另外一种意见则认为,华北陆台北侧的晚古生代海槽实际上就是一条规模宏大的断陷槽,下二叠统西里庙群和其他下、中和上二叠统火山-沉积岩均是上述断陷槽的组成部分(陈琦等, 1992; 徐备等, 1997)。无论是哪种学术观点,他们均承认,在二叠纪时期,苏-查萤石矿区及外围曾发生过一定规模的张裂构造作用,并且诱发中酸性岩浆活动,下二叠统西里庙群火山-沉积岩地层中的流纹岩即是此期构造-岩浆活动的产物。

区域地质调查结果表明,尽管苏-查萤石矿区范围内前寒武系变质岩、下二叠统和上侏罗统火山-沉积岩分布广泛,并且以产出厚度较大和岩石类型齐全为特征,但是迄今为止尚未在该区找到任何中二叠统到中侏罗统的火山岩或沉积岩地层(聂凤军等, 2008a; 许东青等, 2008b; 内蒙古-0 二地质队, 1987)。根据各时代地层单元的时空分布特点,可以推测,中二叠世到中侏罗世,苏-查萤石矿区及外围可能一直处于隆升剥蚀状态,未接受到任何形式的沉积物堆积。晚侏罗世早期,受古大陆内部深大断裂再次活化的影响,研究区再次发生强烈的中酸性岩浆活动,上侏罗统查干诺尔组火山-沉积岩和早白垩世花岗岩类侵入岩体的存在就是最好的例证。需要提及的是,在所有花岗岩类侵入岩体中,敖包吐花岗岩类以产出规模较大、岩相分带简单和含矿性较好为特点。本次同位素年代学研究过程中,对敖包吐岩株钾长花岗岩全岩样品中的锆石进行了 SHRIMP 铀-铅同位素分析。在所有锆石颗粒的 11 个分析点中,其中 10 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值分别为(138±4)Ma, MSWD 值为 2.3。尽管受到分析误差和测定位置以及锆石颗粒铀和钍含量均匀程度等诸多因素影响,这 10 个锆石颗粒的各个分析值均存在有一定的差异,但是它们均在数据的统计误差范围之内,属中生代燕山期(早白垩世)构造-岩浆活动的产物。敖包吐岩株的同位素年代数据再次印证了苏-查萤石矿区早白垩世酸性岩浆活动的存在。另外,在锆石颗粒的所有 11 个分析点中,1 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为(77.8±2.1)Ma,明显低于其他 10 个分析点的同类值((130.7±7.9)Ma 到 (146.0±3.2)Ma)。为什么上述这个分析点的年龄如此

之低呢?究其原因,很可能与成岩期后水-岩反应作用有关。热液流体活动可能导致锆石颗粒边缘地段铀和钍含量骤增,同时造成 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值明显降低。上述推测的依据主要是,苏-查萤石矿区旁侧及外围白垩纪中酸性火山岩盆地分布广泛,并且明显受 NE 向深大断裂控制,其中部分流纹质凝灰岩和细砂岩铀和钍含量明显高于同类岩石的丰度,并且也是附近地浸式铀矿床成矿物质主要来源(四子王旗国土资源, 2005)。

4.2 成岩作用

聂凤军等(2008a)和许东青等(2008b)曾对苏-查萤石矿区敖包吐岩株进行过系统的岩相学、地球化学和同位素研究,并且获取大量有关岩石成因的信息。详细的对比分析结果表明,无论是在产出环境和岩相学特征方面,还是在元素(主元素、微量元素和稀土元素)地球化学方面,敖包吐花岗岩类完全与兴蒙造山带正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩相似(洪大卫等, 2000)。

根据敖包吐花岗岩类锆石 SHRIMP 铀-铅年龄值,对该岩体钍同位素数据进行了数值计算。3 件代表性钾长花岗岩样品的 Nd(138 Ma)值分别为 0.26、0.77 和 5.73。钍同位素的这种组成特点至少反映出下述 3 方面的问题:成岩物质的钍同位素组成并非十分均匀;古陆壳物质对酸性岩浆产生过一定的混染作用;成岩物质来自壳、幔混合源,其中幔源组分在成岩物质中占有一定比例。洪大卫等(2000)曾注意到兴蒙造山带(含苏-查萤石矿区)显生宙花岗岩以具有正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为特征,并且认为花岗岩的形成与以幔源为主年轻洋壳的部分熔融作用有关。尽管敖包吐岩株与这些正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩在地理位置上并不完全一样,但是它们在钍同位素体系演化过程存在有许多可对比之处,特别是导致 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值升高或降低的影响因素。根据 3 件花岗岩样品的钍同位素特征,可以推测,敖包吐岩株的形成过程大体经历以下 3 个阶段:138 Ma 之前,亏损地幔源洋壳与陆壳物质发生物理或化学混合作用;受中生代燕山期强烈构造作用影响,混合物质发生部分熔融,并且形成一定量的酸性岩浆;酸性岩浆沿特定构造部位侵位到地表,并且形成大面积分布的花岗岩。

最新研究结果表明,苏-查地区萤石矿床绢云母和伊利石样品的钾-氩同位素年龄值分别为(141.5±1.2)Ma 和(137.6±1.1)Ma(聂凤军等, 2008b),与敖包吐岩株钾长花岗岩锆石 SHRIMP 铀-铅同位素年龄值((138±4)Ma)大体一致,反映了高钾花岗岩类岩

浆活动与萤石成矿作用具有密切成因联系。

5 结论

(1) 苏-查萤石矿区敖包吐花岗岩株主要由中心相钾长花岗岩和边缘相似斑状花岗岩组成,前者锆石 SHRIMP 铀-铅年龄为 $(138 \pm 4)\text{Ma}$, MSWD 值为 2.3。根据上述同位素年龄数据,同时结合其他地质证据,可以推测,敖包吐岩株是中生代燕山期构造-岩浆活动的产物;

(2) 根据钾长花岗岩的 SHRIMP 铀-铅年龄数据,同时结合全岩样品钨同位素证据,可以推测,在张裂构造体制下,壳、幔物质通过混合、熔融、同化、储集和均一化作用可产生一定规模的酸性岩浆,并且沿特定构造部位侵入到古生界或中生界火山-沉积岩地层中,同时形成大面积分布的花岗岩;

(3) 中酸性岩浆活动不仅为萤石矿床的形成提供了物质和流体来源,同时也是萤石成矿作用的“发动机”。此外,成岩(矿)后期热流液体与岩株的水-岩反应可造成部分锆石颗粒边缘铀和钍含量骤增,同时导致 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值降低。

致谢:野外地质调查和采样过程中得到中国神舟矿业股份有限公司于晓静和徐学明的帮助,锆石 SHRIMP 铀-铅分析得到北京离子探针中心万渝生和高华的支持,中国地质科学院矿产资源研究所金属矿床研究室部分同事的建设性修改意见对本文水平的提高起到了重要作用。对于上述各位地质同行,笔者在此一并致以衷心的感谢!

参考文献:

- 陈琦,仇甘霖,杜玉申,薛林福,周和平. 1992. 白乃庙—温都尔庙区域构造及华北板块北缘构造演化[J]. 长春地质学院学报, 22(增刊): 119-129.
- 洪大卫,王试光,谢锡林,张季生. 2000. 兴蒙造山带正(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.
- 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-0二地质队. 1987. 内蒙古自治区四子王旗苏莫干敖包萤石矿床初步勘查报告[R]. 内蒙古自治区地质矿产局内部资料, 1-70.
- 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.
- 聂凤军,许东青,江思宏,刘妍. 2008a. 内蒙古苏莫干敖包特大型萤石矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 27(1): 1-13.
- 聂凤军,许东青,江思宏,刘妍. 2008b. 内蒙古苏-查萤石矿床成矿时间的厘定—绢云母和伊利石钾-氩同位素证据[R]. 国家自然科学基金项目(编号:40573025)年度工作小结, 1-12.
- 邵济安,洪大卫,张履桥. 2002. 内蒙古火成岩 Sm-Nd 同位素特

征及成因[J]. 地质通报, 21(12): 817-822.

- 石玉若,刘敦一,张旗,简平,张福勤,苗来成,张履桥. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP 铀-铅年龄及其区域构造意义[J]. 地质通报, 26(2): 183-189.
- 四子王旗国土资源局. 2005. 四子王旗矿产资源图及说明书[R]. 四子王旗国土资源局内部调研报告, 1-10.
- 宋彪,张玉海,万渝生,简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作, 年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊.): 26-30
- 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, 199-202.
- 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
- 徐备,陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. 中国科学(D 辑), 27(3): 227-232.
- 许东青,聂凤军,江思宏,张万益,钱明平. 2008b. 内蒙古苏莫查干地区燕山期过铝质花岗岩研究[J]. 岩石矿物学杂志, 27(2): 89-100.
- 许东青,聂凤军,刘妍,张万益,云飞,张天俊,林日亮,吕旭光. 2008a. 内蒙古敖包吐萤石矿床的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学特征[J]. 矿床地质, 27(5): 543-558.
- 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, 1-279.

References:

- CHEN Qi, QIU Gan-lin, DU Yu-shen, XUE Lin-fu, ZHOU He-pin. 1992. Evolution of Bainaimiao-Wenduermiao regional structure and Paleo-plate tectonics in the Northern margin of North China plate [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 22(supp.): 119-129(in Chinese).
- CLAESSON S, VETRIN V, BAYANOVA T. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia: a record of geological evolution from the Archean to the Paleozoic [J]. Lithos, 51: 95-108.
- Editorial Committee of Discovery History of Mineral Deposits. 1996. The Discovery History of Mineral Deposits of China-Volume of Inner Mongolian Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 199-202 (in Chinese).
- GERHARD V, ROLF S, DIETER G. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite to granulite facies zircon: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. Contrib. Mineral Petrol., 134: 404.
- HONG Da-wei, WANG Shi-guang, XIE Xi-lin, ZHANG Ji-sheng. 2000. Genesis of positive (Nd, t) granitoids in the Da Hinggan Mts. -Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 7(2): 441-456 (in Chinese with English abstract).
- HOSKIN P W O, BLACK L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. Journal of Metamorphic Geology, 18: 423-439.
- Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Resources (IMBGMR). 1991. Regional Geology of Inner Mongolian Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-725 (in Chinese with English abstract).

- LI Shi-qin. 1985. The super-large fluorite deposit formed by volcanism [J]. *Geology and Exploration*, 21(1): 30-31 (in Chinese).
- LUDWIG K R. 2001. Squid 1.02: A User Manual [M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 219.
- LUDWIG K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication, 4: 25-32.
- NIE Feng-jun, XU Dong-qin, JIANG Si-hong, LIU Yan. 2008a. Geological features and origin of the Sumoqagan Obo super-large independent fluorite, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 27 (1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, XU Dong-qing, JIANG Si-hong, LIU Yan. 2008b. The ore-forming time of the Su-Cha super-large fluorite deposit, Inner Mongolia--K-Ar isotopic evidences from sericite and illite separates [R]. *Annual Report of the Nature Science Foundation of China* (No. 40573025), 1-12 (in Chinese).
- PATERSON B A, STEPHENS W E, ROGERS G. 1992. The nature of zircon inheritance in two granite plutons [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*, 83: 459-471.
- PIDGEON R T, NEMCHIN A A, HITCHEN G J. 1998. Internal structures of zircon from Archean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132: 288-299.
- SHAO Ji-an, HONG Da-wei, ZHANG Lü-qiao. 2002. Genesis and Sm-Nd isotopic Characteristics of igneous rocks in Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 817-822 (in Chinese with English abstract).
- SHI Yu-ruo, LIU Dun-yi, ZHANG Qi, JIAN Ping, ZHANG Fu-qin, MIAO Lai-cheng, ZHANG Lv-qiao. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia, China and its tectonic implication [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183-189 (in Chinese with English abstract).
- Siziwang Qi (county) Bureau of Land and Resources. 2005. Map of mineral resources and its explanatory note [R]. 1-10 (in Chinese).
- SONG Biao, ZHANG Yu-hai, WAN Yu-sheng, JIAN Ping. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating [J]. *Geological Review*, 48 (supp.): 26-30 (in Chinese with English abstract).
- STEIGER R H, JAGER E. 1997. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology [J]. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 36: 359-362.
- WANG Quan, LIU Xue-ya, LI Jinyi. 1991. Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China [M]. Beijing: Peking Univ. Publ. House, 74-91 (in Chinese with English abstract).
- WANG Wan-chang, YANG Bao-shan, ZHANG Shao-ping. 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).
- WILLIAMS I S, CLAESSESSON S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 97: 205-217.
- XIAO Wen-jiao, WINDLEY B F, HAO Jie, 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): 8-20.
- XU Bei, CHEN Bin. 1997. Structure and its evolution of Mid-Paleozoic orogenic belt in between North China and Siberian plates, northern Inner Mongolia [J]. *Science in China (Series D)*, 27(3): 227-232.
- XU Dong-qing, NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHANG Wan-yi, QIAN Ming-ping. 2008b. Yanshanian peraluminous granite in the Sumochagan district, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 89-100 (in Chinese with English abstract).
- XU Dong-qing, NIE Feng-jun, LIU Yan, ZHANG Wan-yi, YUN Fei, ZHANG Tian-jun, LIN Ri-liang, Lü Xu-guang. 2008a. Sr, Nd and Pb isotopic geochemistry of fluorite separates from the Obotu fluorite deposit, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 27 (5): 543-558 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yun-ping, TANG Ke-dong. 1989. Pre-Jurassic tectonic evolution of intercontinental region and the suture zone between the North China and Siberian platforms [J]. *Journal of Southeast Asian Earth sciences*, 3(1-4): 47-55.