

文章编号: 0258-7106(2008)04-0449-10

内蒙古羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床富矿层和花岗岩 锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义*

李大新, 赵一鸣, 丰成友, 吴良士, 陈文明

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 在详细地质勘查和岩石学研究的基础上, 选取了矿区北部磨石山矿带元古宙沉积变质型富锐钛矿矿层和南部羊蹄子山矿带西段与热液改造型富矿体接触的花岗岩体中的锆石, 分别进行了较系统的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年研究。结果显示, 富矿层的火山-沉积变质岩系中锆石存在 2 540~1 158 Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄) 的年龄谱范围, 具有 1 751 Ma、1 859 Ma 和 2 525 Ma 3 个主要年龄峰, 其中以 1 751 Ma 左右的岩浆事件最为强烈, 可能代表了海底火山热液喷气或喷流作用形成的锆石年龄或与之有关的成矿年龄; 1 158 Ma 的数据点为锆石增生事件年龄, 可能记录了含矿岩系遭受低角闪岩相或绿片岩相的变质事件或与之有关的变质成矿作用年龄, 由此确定火山-沉积岩的沉积作用应发生于 1 751 Ma 时代为中元古代, 是华北地台北缘结晶基底最早的沉积盖层, 而非前人认为的古元古界上部二道凹群; 其他几组较老年龄的碎屑锆石是沉积物源区的或由强烈的海底火山喷发作用从深部结晶基底带来的, 它们主要表现为岩浆事件。花岗岩体的侵位(或结晶)年龄为 118 Ma, 属燕山晚期产物, 代表了羊蹄子山矿带西段局部遭受后期热液改造的成矿期年龄。

关键词 地球化学, 锆石 SHRIMP 年龄, 富矿层和花岗岩, 锐钛矿, 羊蹄子山-磨石山, 内蒙古
中图分类号: P618.47; P597+.3 **文献标志码**: A

SHRIMP U-Pb zircon dating of Mesoproterozoic anatase-rich ore beds and granite in Yangtizishan-Moshishan anatase deposit, Inner Mongolia, and its geological significance

LI DaXin, ZHAO YiMing, FENG ChengYou, WU LiangShi and CHEN WenMing
(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Based on detailed geological reconnaissance and petrological research, the authors selected zircons from a Mesoproterozoic metamorphosed sedimentary type anatase-rich ore bed in the Moshishan ore belt within the northern part of the ore district and a granite body at the contact zone between the granite and a hydrothermally modified type ore shoot in the western segment of the Yangtizishan ore belt within the southern part of the ore district for relatively systematic SHRIMP U-Pb zircon dating. Some conclusions have thus been reached: Zircons in the metamorphosed volcanic-sedimentary sequence of the anatase-rich ore bed have a relatively wide age spectrum of 2 540~1 158 Ma (^{207}Pb - ^{206}Pb age) with three main age peaks, i. e., 1 751, 1 859 and 2 525 Ma. The ^{207}Pb - ^{206}Pb weighted mean age of 16 analyzed spots for the 1 688~1 784 age group is 1 751 Ma, which might represent the age of zircons formed by submarine volcanic-hydrothermal exhalation or related mineralization age. A 1 158 Ma data point signifies the age of the zircon overgrowth event, which might have recorded a low amphibolite facies or greenschist facies metamorphic event that the mineralized rock sequence underwent or its related

* 本文得到国家自然科学基金(40773038)内蒙古自治区地勘项目(05-1-TK01)和中国地质科学院矿产资源所资金(K0714-3)的联合资助
第一作者简介: 李大新, 男, 1952年生, 副研究员, 长期从事金属矿床地质、地球化学研究。
收稿日期: 2008-03-10; 改回日期: 2008-06-10。张绮玲编辑。

metamorphic mineralization age. It may thus be ascertained that the sedimentation of sedimentary rocks in the study area took place between 1 751 and 1 158 Ma, indicating a Mesoproterozoic age. These rocks are therefore the earliest sedimentary cover of the crystalline basement on the northern margin of the North China platform, rather than the upper Paleoproterozoic Erdao'ao Group as thought previously. Other groups of detrital zircons with older ages were derived from sediment source regions or brought up from the deep-seated crystalline basement by strong submarine volcanic eruption, as is manifested chiefly by magmatic events. The granite body has an emplacement (or crystallization) age of 118 Ma, indicating a late Yanshanian product and representing the age of the metallogenic epoch when the western segment of the Yangtizishan ore belt locally underwent the late-stage hydrothermal reformation.

Key words: geochemistry, SHRIMP zircon age, rich ore bed and granite, anatase, Yangtizishan-Moshishan, Inner Mongolia

内蒙古正蓝旗羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床是近年来发现、勘查和研究的、以锐钛矿为主的大型沉积变质型矿床,是钛矿床的一个新的、独特的成因类型(赵一鸣等 2006 2008b)。现已初步查明,羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床形成于中元古代华北地台北缘,与海底喷流-沉积成矿作用有关,含矿岩系中的锐钛矿等矿物的微量元素地球化学揭示它与矿体的主要围岩之斜长角闪岩类基性火山熔岩具有亲缘性(李大新等 2008b),这与矿区所处的大地构造位置——中元古代华北古大陆北缘开始裂解的情况是吻合的(沈保丰等 2006)。矿床矿石中钛(铁)氧化物以锐钛矿为主,次为金红石和钛铁矿,也反映其形成于海底与基性火山活动有关的热液沉积的地质环境,在区域变质及后期的岩浆活动阶段,有一部分锐钛矿转变为金红石,局部又遭受后期热液改造,但由于温度、压力不够高,致使大部分锐钛矿得以保存下来(赵一鸣等 2008c)。本文是在对矿区详细的地质勘查和岩石学研究的基础上,选取了产于矿区北部磨石山矿带元古宙沉积变质型富锐钛矿矿层内和南部羊蹄子山矿带西段与热液改造型富矿体接触的花岗岩体中的锆石,分别进行了较系统的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定,这不仅为进一步揭示和探讨矿床成因、形成时代以及研究华北地台北缘地壳演化提供了精确的年代学资料,同时对在区域上寻找该类型的钛矿床也具有重要的地质意义。

1 地质背景

该矿床位于内蒙古正蓝旗西约 25 km 处,大地构造位置位于华北地台北缘内蒙地轴中东段中生代火山盆地的局部隆起区,地台北缘东西向的高家窑-乌拉特后旗-化德-赤峰深大断裂带从矿区南部通过。

区域内出露地层主要是新太古界乌拉山群、元古宙二道凹群、上石炭统阿木山组、下二叠统三面井组、上侏罗统、下白垩统、第三系及第四系。区内岩浆侵入活动强烈,岩体出露面积占全区的 20%,主要为华力西晚期的花岗岩类及燕山期的花岗岩、花岗闪长岩类。

矿区出露地层以一套海相火山-沉积岩类的浅变质岩系(绿片岩相)为主,其次为上侏罗统火山岩(图 1)。根据岩性组合和矿化特点,矿区变质岩系自下而上大致可划分为 6 个岩性组:

第 1 岩性组:结晶灰岩(大理岩)、斜长角闪岩(片岩)和绢云石英片岩;

第 2 岩性组:绢云石英片岩夹薄层石英岩、碳质片岩和条纹状锐钛矿-金红石-钛铁矿石英岩(羊蹄子山矿带);

第 3 岩性组:厚层白色石英岩、变质石英砂岩;

第 4 岩性组:绢云石英片岩、石榴绢云石英片岩夹薄层石英岩、碳质片岩;

第 5 岩性组:条纹状锐钛矿-钛铁矿-金红石石英岩或变质粉砂岩夹薄层绢云石英片岩、透镜状斜长角闪岩(片岩)和碳质片岩(磨石山矿带);

第 6 岩性组:绢云石英片岩夹薄层斜长角闪岩(片岩)。

2 矿床地质概况

矿体呈层状、似层状产于上述变质岩系中。矿体的围岩主要为绢云石英片岩、石英绢云片岩、变质石英砂岩和斜长角闪岩类。矿体和围岩呈整合接触关系。共有 2 个矿带:北部的磨石山矿带和南部的羊蹄子山矿带,两地相隔约 2 km。

矿区构造总体上是一个向北北西(350°左右)倾

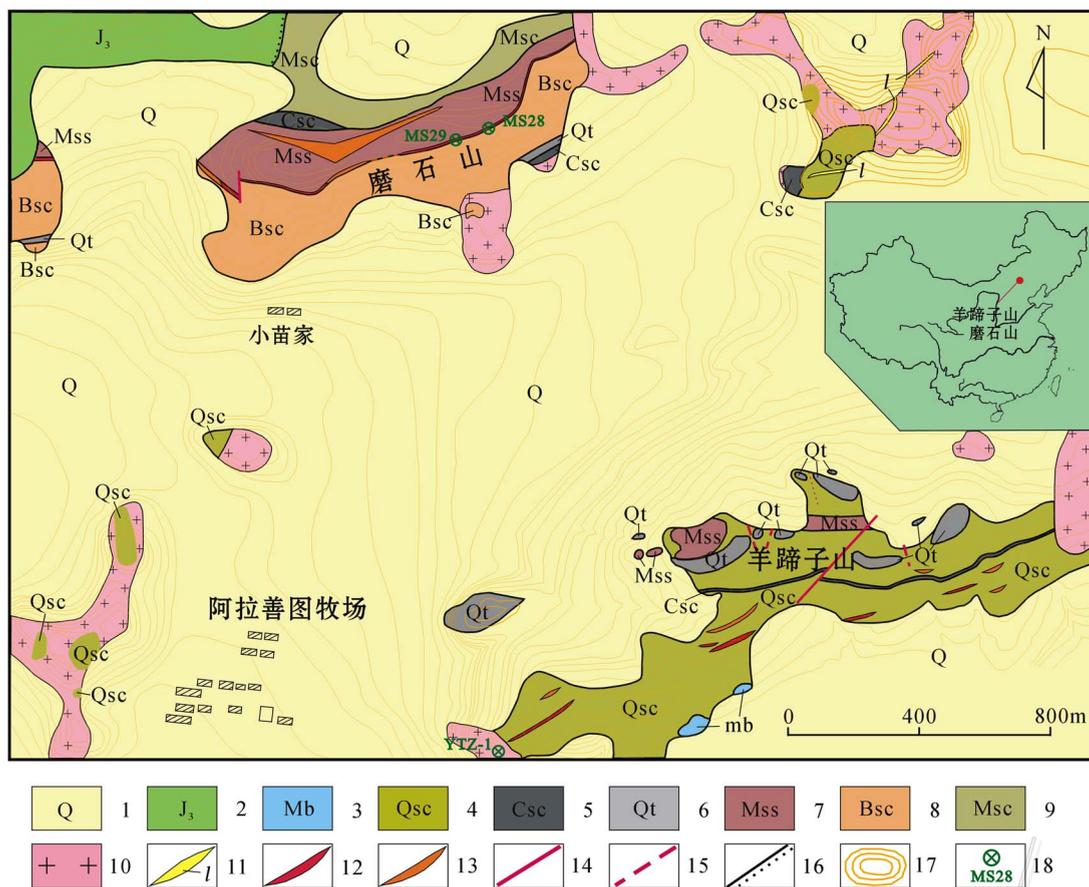


图 1 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床地质图

1—第四系;2—上侏罗统火山岩;3—大理岩;4—绢云石英片岩;5—碳质片岩;6—石英岩;7—含锐钛矿变质粉砂岩和片岩;8—斑点状石英绢云片岩;9—绢云石英片岩夹斜长角闪岩(片岩);10—花岗岩;11—长英岩脉;12—富矿体;13—贫矿体;14—断层;15—推测断层;16—不整合界面;17—等高线;18—取样位置及编号

Fig. 1 Geological map of the Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit

1—Quaternary;2—Volcanic rocks of Upper Jurassic;3—Marble;4—Sericite quartz schist;5—Carbonaceous schist;6—Quartzite;7—Anatase-bearing metasilstone and schist;8—Garnet-bearing quartz sericite schist;9—Sericite quartz schist with amphibolite;10—Granite;11—Aplite;12—Rich ore body;13—Lean ore body;14—Fault;15—Inferred fault;16—Unconformity;17—Contour line;18—Sampling site and its serial number

的单斜层, 倾角一般为 55~70°, 但局部有倒转现象。在矿区中部和西南部有燕山晚期花岗岩呈岩株状侵入, 使矿体局部遭到热液改造。

矿石实际上是含不同数量锐钛矿、金红石和钛铁矿的变质石英砂岩、变质石英粉砂岩和片岩, 富矿中含一定量的直闪石、黑云母、石榴子石等含铁硅酸盐矿物, 局部含较多的赤铁矿, 其 TiO₂ 含量为 3%~15.46%。富矿石呈细纹状构造, 由以锐钛矿为主的条纹和以石英为主的条纹(含浸染状钛矿物)相间组成。经热液改造后, 富矿的构造变为网脉状和细脉浸染状, 并含较多的叶片状赤铁矿。贫矿中的锐钛矿大多呈浸染状不均匀地分布, 部分呈条痕状, 矿石品位($w(\text{TiO}_2)$)一般为 1.2%~3%。

3 样品采集

锆石 SHRIMP U-Pb 测年样品分别取自沉积变质型富锐钛矿矿层和与热液改造型富矿体接触的花岗岩体中。在沉积变质型富锐钛矿矿层样品中, 编号为 MS28 的样品产自矿区北部磨石山矿带地表 8 勘探线 2 号探槽处(图 1), 编号为 MS29 的样品采自地表 P1 剖面线 3 号探槽处, 其岩性均为同一层富含锐钛矿的变质石英粉砂岩和片岩(TiO₂ 含量 3%~15%), 一般呈细纹状构造, 由以石英为主的条纹(伴生浸染状钛矿物)和以锐钛矿为主的条纹互相交替, 脉石矿物石英含量一般在 60%~75%之间, 其次是

直闪石、黑云母、绢云母和绿泥石,局部有锰铝-铁铝榴石,还有微量锆石、电气石、萤石和磷灰石等。钛矿物除锐钛矿外,还经常伴生一定量的金红石和钛铁矿。上述钛矿物粒径一般为0.01~0.1 mm,石英等脉石矿物粒径通常为0.1~1 mm。岩石具有变余(粉)砂结构和鳞片粒状变晶结构、变余细条纹构造或片状构造。编号为YTZ-1的花岗岩体样品采自羊蹄子山矿带西段地表,距21勘探线YZK1钻孔西约30 m处(图1)。岩石呈中粒或中细粒结构,其边缘相则渐变为细粒结构。主要组成矿物有石英、条纹长石、酸性斜长石和黑云母(或白云母),但大部分黑云母已遭白云母化和绿泥石化,并呈其假象析出部分铁质(赤铁矿),副矿物为微量锆石、磷灰石和磁铁矿。条纹长石有时和石英一起构成文象结构。

4 锆石 U-Pb SHRIMP 定年

先将采自富锐钛矿层中的2件样品(MS28、MS29)和花岗岩体内的1件样品(YTZ-1)进行粉碎、淘选、重磁分离,在双目镜下分别挑选出矿层内的150颗锆石和花岗岩中的80颗锆石用环氧树脂浇铸制靶,并打磨至锆石颗粒中心暴露,抛光后,进行透射光、反射光和阴极发光显微照相。样品的制靶、阴极发光照相和SHRIMP U-Pb年龄测定均在中国地质科学院离子探针实验室完成,详细的分析流程及原理参见Compston等(1984;1992)和宋彪等(2002)。Pb/U比值采用标准锆石TEM(年龄为417 Ma,Black et al., 2003)进行同位素分馏校正,U含量则用标准锆石SL-13(年龄为527 Ma,U含量 238×10^{-6})校正。普通铅含量用实测的 ^{204}Pb 校正,单个数据点的绝对误差为 1σ 。数据处理和U-Pb谐和图的绘制采用SQUID程序(Ludiwig, 2002a)和ISO-PLOT程序(Ludiwig, 2002b),年龄平均值误差为95%置信度误差。

4.1 富锐钛矿层的锆石特征及 U-Pb 年龄

在富锐钛矿层(MS28、MS29)中选出的锆石主要有2类:第一类以半自形-自形细长柱状为主,局部具不同程度的圆化,一般为浅米色,少量呈无色,粒度在100~200 μm 之间;第二类以浑圆粒状或次圆短柱状为主,颗粒相对较粗大,普遍在150~300 μm 之间。阴极荧光图像(图2)显示,虽然两类锆石都具振荡生长环带结构,但环带结构特征和阴极荧光亮度显示有一定的差异。前者环带层数稀而模糊

不清,对称程度较差,阴极荧光较弱;后者环带清晰,通常层数多而带宽,具较高的对称性和相对明亮的阴极荧光。SHRIMP测年结果(表1)表明,这两类锆石的U含量分别为 $57 \times 10^{-6} \sim 547 \times 10^{-6}$ 和 $97 \times 10^{-6} \sim 773 \times 10^{-6}$,Th含量为 $45 \times 10^{-6} \sim 299 \times 10^{-6}$ 和 $58 \times 10^{-6} \sim 226 \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.29~1.27和0.10~0.87(90%以上都大于0.2),其含量变化范围大。上述锆石特征表明它们大多是结晶形成的,具多来源的特点,前者可能是海底火山热液喷气或喷流作用形成的新生锆石,后者为典型的碎屑锆石,个别锆石的暗色增生壳部分还记录了遭受变质构造事件的年龄信息。

随机测定了32颗锆石的43个分析点(表1),有11颗锆石同时测定了核部和边部。从表1及 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和图(图3)和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄直方图(图4)可以清楚地看出,虽然磨石山矿带富锐钛矿层中锆石年龄存在1 158~2 540 Ma之间一个较宽的变化范围,呈现出十分复杂的格局,但依据锆石的年龄测定结果、内部结构(包括阴极发光图像)和外部形态特征及成因类型等综合分析,大体上可以分出4个年龄组和3个主要年龄峰(1 751 Ma、1 859 Ma和2 525 Ma)。

第一组 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为1 658~1 784 Ma,共由17个测点(1.1、4.1、4.2、6.1、7.1、12.1、14.1、14.2、15.1、15.2、16.1、21.1、23.1、5、6、10和13)构成,位于一致曲线的中偏下部,除测点6.1为很不谐和年龄而没有纳入计算外,16个测点获得的谐和年龄为 $(1 751.1 \pm 7.7)\text{Ma}$,MSWD=1.12,Th/U比值高(0.29~1.27)。在阴极荧光图像上,这些锆石普遍呈半自形-自形细长柱状,锆石的测定点位置大多数显示有较模糊的和对称程度较差的岩浆韵律环带特征,属前述第一类锆石。对该年龄区段16个测点的13颗锆石统计(占测定锆石的41%),延长系数 $\geq 2 \sim 3$ 的锆石约占80%以上,延长系数1~2之间的则不足20%。因此,1 751 Ma记录了羊蹄子山-磨石山锐钛矿床的火山-沉积岩存在着一次很强烈的岩浆事件,可能代表了本区海底火山热液喷气或喷流作用中新生锆石的结晶年龄或成矿年龄。

第二组(1 805~1 871 Ma)和第三组(1 900~2 070 Ma)年龄数据分别由8个测点组成,两者位于一致曲线的中部和中偏上部。前者测点(2.1、2.2、8.1、8.2、9.1、13.1、7和8) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为 $(1 859 \pm 8)\text{Ma}$,MSWD=0.38,除有1个测



图 2 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床富矿层锆石的阴极发光图像及测点位置

Fig. 2 Cathodoluminescence images and spot sites of zircons from anatase-rich strata of the Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit

点外, Th/U 比值较高(0.24~0.81); 后者(5.1、5.5、18.1、20.1、22.1、3、4 和 9) Th/U 比值变化于 0.10~0.78 之间。第四组(2 513~2 540 Ma) 年龄数据由 3 个测点(3.1、3.2、19.1) 组成, 位于一致曲线的上部, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值为(2 525 ± 9) Ma, MSWD=2.5, Th/U 比值变化于 0.54~0.87 之间。这 3 个年龄组的锆石尽管在阴极发光图像上显示出内部均具有清晰的多层岩浆韵律环带特征, 但形态上以浑圆粒状或次圆短柱状为主, 其颗粒度相对较粗大, 19 个测点的 14 颗锆石, 延长系数几乎都在 1~2 之间, 明显不同于前述第一年龄组的海底火山热液喷气或喷流作用中形成的新生锆石, 它们应该

是来自古陆剥蚀区或由强烈的海底火山喷发作用从深部结晶基底带来的碎屑锆石。

值得提出的是, 样品中有一个测点(12) 获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为(1 158 ± 61) Ma 的最小年龄, 其具有高 U 含量(321×10^{-6}) 和低 Th/U 比值(0.13) 的特点。结合对应的阴极发光图像(见图 2 最后一行照片 4), 发现其测点位于锆石边部的增生壳部位, 相对核部几乎不显岩浆环带特征, 呈较暗(浅)色, 该部位应是变质重结晶的产物, 依据本区含矿岩系曾遭受过区域低角闪岩相或绿片岩相变质作用, 判断 1 158 Ma 应代表区域变质事件的年龄。其他几个较小年龄的测点数据虽然也投在谐和线及直方图上

表 1 富锐钛矿层(MS28、MS29)锆石 SHRIMP U-Pb 定年分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data of zircons from anatase-inriched strata

样品编号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\text{U}/10^{-6}$	$\text{Th}/10^{-6}$	Th/U	$^{206}\text{Pb}/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma
						测值	相对误差/%	测值	相对误差/%		
MS28-1.1	0.13	202	128	0.65	53.7	4.52	1.3	0.3086	0.7	1734 ± 12	1736 ± 19
MS28-2.1	0.09	272	64	0.24	76.4	5.14	1.1	0.3271	0.7	1824 ± 10	1863 ± 16
MS28-2.2	0.02	699	67	0.10	200.2	5.23	0.7	0.3336	0.6	1856 ± 9	1858 ± 6
MS28-3.1	0.05	267	226	0.87	110.7	11.12	0.8	0.4830	0.7	2540 ± 14	2527 ± 7
MS28-3.2	0.01	200	104	0.54	78.7	10.44	0.9	0.4575	0.8	2429 ± 16	2513 ± 7
MS28-4.1	0.04	547	200	0.38	143.7	4.48	0.7	0.3056	0.6	1719 ± 9	1736 ± 8
MS28-4.2	0.45	57	45	0.82	14.6	4.45	2.3	0.2959	1.2	1671 ± 18	1784 ± 35
MS28-5.1	0.05	630	63	0.10	186.4	5.64	0.8	0.3444	0.6	1908 ± 10	1939 ± 8
MS28-5.2	0.05	510	86	0.17	142.6	5.23	0.8	0.3253	0.7	1816 ± 10	1905 ± 7
MS28-6.1	0.15	248	144	0.60	60.6	3.98	1.1	0.2835	0.7	1609 ± 10	1658 ± 15
MS28-6.2	0.16	100	55	0.57	24.0	3.79	1.8	0.2793	1.0	1588 ± 15	1592 ± 28
MS28-7.1	0.15	170	94	0.57	44.4	4.54	1.2	0.3030	0.8	1706 ± 12	1766 ± 16
MS28-8.1	0.19	202	78	0.40	56.1	5.02	1.2	0.3228	0.8	1803 ± 13	1844 ± 16
MS28-8.2	0.05	449	122	0.28	128.5	5.22	0.9	0.3327	0.7	1852 ± 11	1861 ± 9
MS28-7.2	0.22	1445	159	0.11	227.3	2.44	0.8	0.1827	0.6	1082 ± 6	1560 ± 10
MS28-9.1	0.07	278	102	0.38	79.4	5.20	1.0	0.3315	0.7	1846 ± 12	1860 ± 11
MS28-10.1	0.46	66	81	1.27	14.7	3.60	2.3	0.2579	1.2	1488 ± 16	1618 ± 35
MS28-11.1	0.17	884	1238	1.45	153.1	2.34	1.1	0.2013	0.6	1182 ± 7	1302 ± 17
MS28-12.1	0.20	115	141	1.27	31.2	4.70	1.5	0.3158	1.0	1769 ± 15	1766 ± 22
MS28-13.1	0.16	190	68	0.37	55.8	5.38	1.3	0.3408	0.9	1891 ± 14	1871 ± 18
MS28-14.1	0.15	325	216	0.69	84.3	4.47	1.0	0.3015	0.8	1699 ± 11	1759 ± 13
MS28-14.2	0.23	115	101	0.92	29.0	4.33	1.5	0.2940	0.9	1662 ± 13	1744 ± 21
MS28-15.1	0.17	158	91	0.59	37.6	4.08	1.3	0.2764	0.9	1573 ± 13	1720 ± 23
MS28-15.2	0.03	285	140	0.51	75.9	4.62	0.9	0.3103	0.7	1742 ± 10	1765 ± 10
MS28-16.1	0.49	102	103	1.04	23.4	3.77	2.4	0.2644	1.0	1512 ± 13	1688 ± 41
MS28-17.1	0.07	93	40	0.44	17.7	2.60	2.0	0.2223	1.1	1294 ± 13	1314 ± 33
MS28-18.1	0.03	97	58	0.62	25.1	5.02	1.4	0.3020	1.0	1701 ± 14	1964 ± 18
MS28-19.1	0.04	117	80	0.71	47.8	11.04	1.0	0.4762	0.9	2511 ± 18	2540 ± 10
MS28-20.1	0.08	119	78	0.68	33.6	5.28	1.7	0.3295	1.5	1836 ± 24	1900 ± 15
MS28-21.1	0.17	204	57	0.29	52.6	4.39	1.4	0.2992	1.0	1687 ± 15	1737 ± 17
MS28-22.1	0.10	169	67	0.41	48.3	5.34	1.1	0.3321	0.8	1849 ± 12	1904 ± 15
MS28-23.1	0.03	258	111	0.44	63.7	4.22	0.9	0.2870	0.7	1627 ± 10	1742 ± 11
MS29-3	0.27	207	143	0.72	64.6	6.08	1.6	0.3630	1.0	1996 ± 17	1979 ± 23
MS29-4	0.51	132	99	0.78	45.1	6.87	1.8	0.3966	1.1	2154 ± 19	2038 ± 25
MS29-5	0.14	399	299	0.77	109.0	4.73	1.3	0.3178	0.8	1779 ± 13	1766 ± 18
MS29-6	0.35	204	74	0.38	54.3	4.70	1.7	0.3090	1.0	1736 ± 16	1781 ± 25
MS29-7	0.49	156	103	0.68	42.8	4.83	3.0	0.3173	1.1	1777 ± 18	1805 ± 51
MS29-8	0.41	165	129	0.81	47.8	5.29	1.9	0.3359	1.0	1867 ± 16	1868 ± 30
MS29-9	0.08	773	152	0.20	249.9	6.63	0.8	0.3759	0.6	2057 ± 11	2070 ± 9
MS29-10	0.39	133	111	0.86	34.3	4.43	2.1	0.2981	1.1	1682 ± 16	1763 ± 32
MS29-11	0.23	190	256	1.39	39.7	2.89	1.9	0.2426	1.0	1400 ± 12	1348 ± 32
MS29-12	0.37	321	41	0.13	50.1	1.96	4.2	0.1812	2.8	1074 ± 28	1158 ± 61
MS29-13	0.25	251	123	0.51	64.5	4.46	2.5	0.2982	0.9	1682 ± 13	1775 ± 43

(图 3、图 4), 但与第一组的 1 751 Ma 年龄峰值存在巨大的差距, 它们明显偏小, 主要原因可能是后期变质作用改造引起放射成因铅丢失, 且这些数据多偏离谐和线或年龄很不谐和, 因此在计算谐和年龄时, 这几个年龄没有被纳入。

4.2 花岗岩的锆石特征及 U-Pb 年龄

矿区南部羊蹄子山矿带西段中粗粒黑云母花岗岩中的锆石大多数均呈自形-半自形短柱状(图 5), 锆石晶体通常为无色, 少数呈浅米色, 颗粒大小一般在 150~300 μm 之间, 振荡环带发育, 有的呈密集环

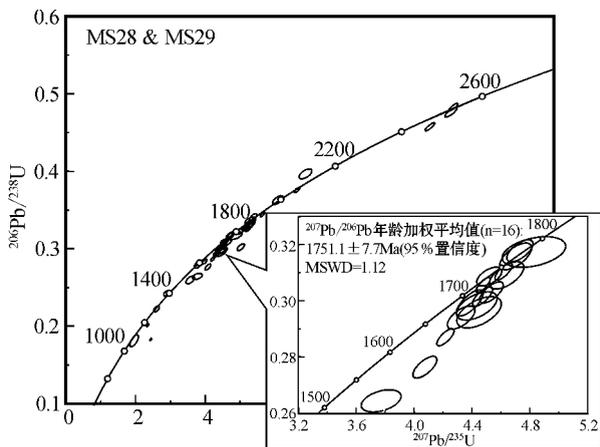


图 3 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床富矿层锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 U-Pb age concordia diagram of zircons from the anatase-enriched strata of the Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit

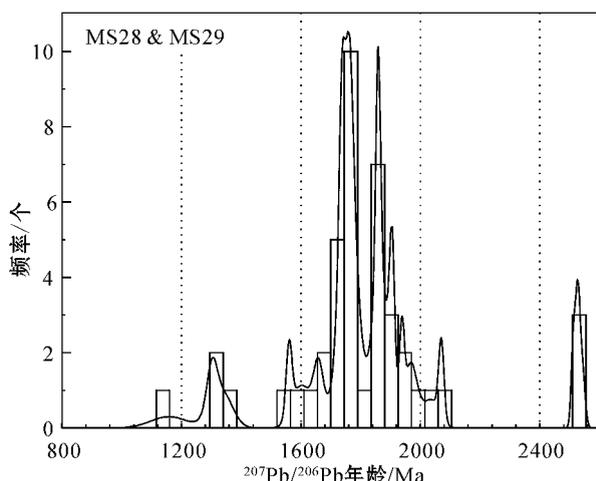


图 4 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床富矿层锆石年龄直方图

Fig. 4 U-Pb age histogram of zircons from the anatase-enriched strata of the Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit

表 2 花岗岩(YTZ-1) 锆石 SHRIMP U-Pb 定年分析结果

Table 2 SHRIMP U-Pb data of zircons from the granite

样品编号	²⁰⁶ Pbc/%	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁶ Pb ⁺ / 10 ⁻⁶	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma
						测值	相对误差/%	测值	相对误差/%	
YTZ-1-1	1.44	215	155	0.75	3.40	0.13	11	0.0182	2.0	116.1 ± 2.3
YTZ-1-2	1.76	121	62	0.52	2.05	0.13	18	0.0193	2.3	123.1 ± 2.8
YTZ-1-3	1.00	182	104	0.59	2.78	0.13	12	0.0176	2.1	112.7 ± 2.3
YTZ-1-4	2.95	120	61	0.53	2.04	0.14	15	0.0192	2.2	122.7 ± 2.7
YTZ-1-5	1.76	159	111	0.72	2.44	0.16	16	0.0176	2.3	112.2 ± 2.6
YTZ-1-6	0.34	7616	1729	0.23	238	0.25	1.5	0.0362	0.6	229.3 ± 1.3
YTZ-1-7	4.36	91	72	0.82	1.55	0.13	35	0.0190	3.1	121.4 ± 3.7
YTZ-1-8	1.84	272	218	0.83	4.35	0.11	16	0.0183	1.6	116.7 ± 1.9
YTZ-1-9	1.32	90	59	0.68	1.40	0.17	13	0.0179	3.1	114.3 ± 3.5
YTZ-1-10	4.28	137	70	0.53	2.35	0.18	23	0.0192	2.7	122.4 ± 3.2
YTZ-1-11	0.78	182	98	0.56	2.98	0.12	11	0.0189	1.7	120.7 ± 2.1
YTZ-1-12	1.09	833	239	0.30	29.90	0.31	5	0.0420	0.7	261.5 ± 1.9

带。在阴极荧光图像上大多数颗粒往往显示出核部、幔部和边部,部分颗粒呈现出被熔蚀的现象。该花岗岩中共测定了 11 个锆石颗粒的 12 个分析点,有 1 颗锆石测定了其中部和边部。12 个 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果列于表 2 和图 5、图 6 中,其中 10 个年龄数据主要集中于 112.2~123.1 Ma, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为(117.8 ± 2.9) Ma, MSWD = 2.58, Th/U 比值为 0.52~0.83 在阴极荧光图像上显示出测点部位具有岩浆环带特征,因此(117.8 ± 2.9) Ma 应该代表花岗岩的结晶或侵位年龄,反映了花岗岩的形成时代为早白垩世(燕山晚期)。

12 颗花岗岩锆石中还测得(229.3 ± 1.3) Ma 和(261.5 ± 1.9) Ma 两个独立年龄值(图 6,测点 6 和

12),其具有高 U 含量(7 616 × 10⁻⁶和 833 × 10⁻⁶)和较低的 Th/U 比值(0.23 和 0.30),在阴极发光图像中呈暗黑色,环带模糊不清或几乎不显。笔者认为这类锆石可能是晚古生代和早中生代时期构造岩浆活动形成的锆石,应属于花岗岩内残留锆石或捕虏晶锆石。

5 讨论

5.1 含矿岩系的成矿成岩时代与归属

羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床产于华北地台北缘的内蒙地轴中东段南缘中生代火山盆地的局部隆起区,矿区发育一套与华北地台北缘大陆裂解有关

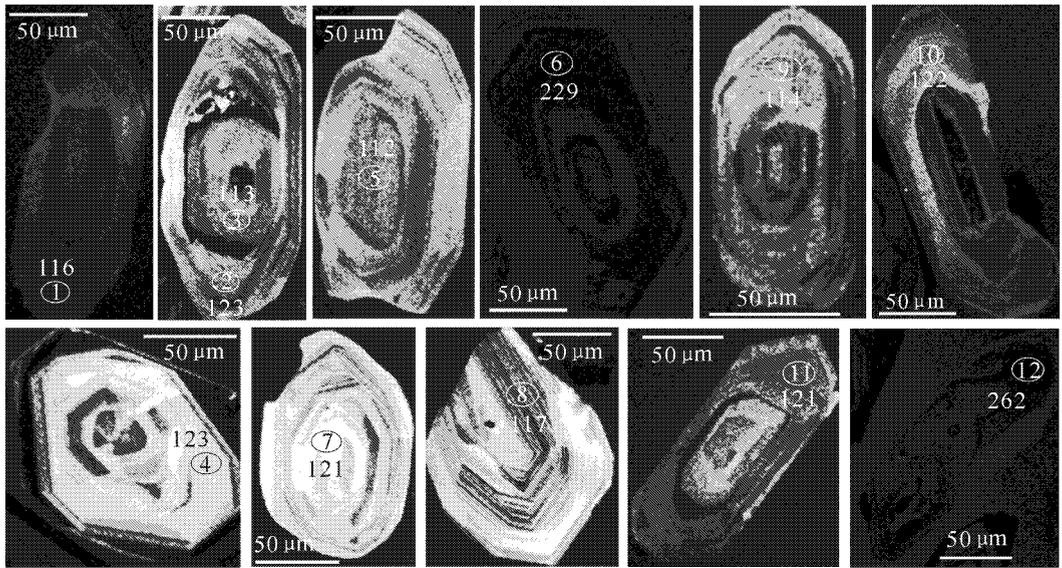


图5 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床花岗岩锆石的阴极荧光图像、测点位置及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄

Fig. 5 Cathodoluminescence images and spot sites of zircons from the granite in the Yangtizishang-Moshishan anatase ore deposit

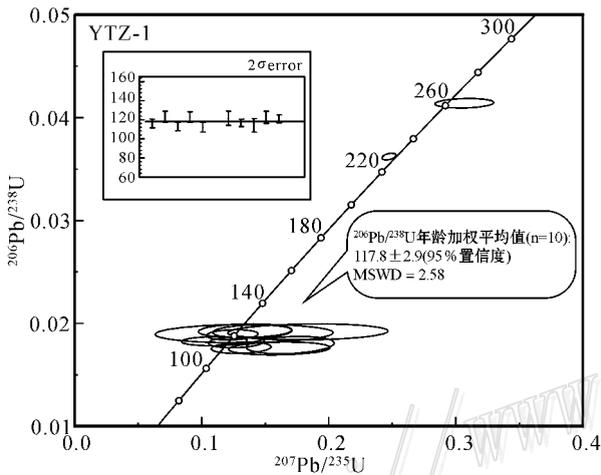


图6 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb age concordia diagram of zircons from the granite in the Yangtizishang-Moshishan anatase ore deposit

的火山-沉积岩系,其中沉积变质型富锐钛矿地层呈层状、似层状与围岩整合产出。对于区内这套含钛矿变质岩系地层的划分与对比,原锡林郭勒盟地质队^①(1961)将其划为太古界桑干群;后来1:20万区调时^②(1974)根据区域对比,认为该套以片岩为主的变质岩系可与大青山一带对比,故将其时代暂定为

新太古界二道凹群;以后,内蒙古自治区区域地质志(1991)又将二道凹群时代改为古元古界上部,但均无准确的定年数据。笔者根据近年来对羊蹄子山-磨石山地区这套含矿变质岩系的对比研究及锆石 SHRIMP U-Pb 定年测定,认为本区该套地层明显不同于区域西侧的二道凹群(如铁山村、车道沟等地),其依据为:一是该套地层变质程度相对较浅,其中碎屑岩石具清晰的变余粉砂结构和变余细条纹构造(残存的韵律构造),而二道凹群内常见的变粒岩或片麻岩在本区地层中未见;二是该套地层出现与海底基性火山活动有关的热液沉积环境下形成的锐钛矿矿化(赵一鸣等,2008a),但二道凹群矿化以含有条带状磁铁矿矿层为特征,说明两类矿化的原始沉积环境和金属物质来源是不一样的;三是本次对矿区含矿火山-沉积变质岩系中的锆石进行 SHRIMP U-Pb 定年,测得与海底火山热液喷气或喷流作用有关的成矿年龄为(1 751.1 ± 7.7) Ma,并依据该成矿年龄与变质锆石年龄之间存在的时空差,可以确定本区含矿火山-沉积岩应形成于 1 751 Ma,时代为中元古代,而非前人认为的古元古界上部二道凹群。

与邻区白乃庙群火山岩的 1 114~1 146 Ma 锆石 U-Pb 年龄(聂风军等,1993)和(1 124 ± 57) Ma 的 Sm-Nd 等时线年龄(Nie et al., 1999),以及温都尔庙

① 锡林郭勒盟地质队,1961. 锡盟多伦-太仆寺旗一带地质普查总结报告. 内部资料.

② 内蒙古地质局区域地质测量队,1974. 1:20万正蓝旗幅区域地质调查报告. 内部资料.

群的(807±49) Ma Sm-Nd 等时线年龄(Nie et al., 1994)对比,另外,它们的岩性差异极大。可知两者分别属中元古代蓟县纪晚期和新元古代青白口纪晚期,而本区出露的这套火山-沉积岩系的时限则相当于中元古代长城纪。

有意义的是,矿区海底火山喷流作用的时间与区域东南部燕辽裂陷槽中产出的大庙斜长杂岩体(大庙式钽钛磁铁矿床)侵位年龄完全一致,该斜长杂岩体的 Sm-Nd 等时线年龄为(1 753±239) Ma 和 Rb-Sr 等时线年龄为(1 686±193) Ma(解广轰等, 1988),⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为(1 656.0±6.5) Ma(胡世玲等, 1990),似乎表明了两者存在一定的时空关系。

5.2 含矿岩系的变质成矿作用时代

由于矿区含矿岩系曾遭受区域低角闪岩相或绿片岩相变质,本次研究获得的变质年龄为 1 158 Ma,应代表矿区变质构造事件或变质成矿作用时代。因在区域变质阶段过程中,有一部分原生沉积的锐钛矿已转变为金红石,但由于温压条件不够大,致使大部分锐钛矿得以保存下来(赵一鸣等, 2008a),保留的韵律性细纹状构造反映了矿石较典型的沉积变质作用形成机理(程裕淇等, 1994)。

5.3 矿区花岗岩形成时代及热液改造作用

矿区出露的中细粒黑云母花岗岩体形成时代在正蓝旗幅 1:20 万区域地质调查报告^①中划归为燕山早期岩体,但本次研究测得 SHRIMP 锆石 U-Pb 的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(117.8±2.9) Ma,形成时代应为早白垩世(燕山晚期),代表了后期热液改造的成矿期年龄,与笔者野外实际观察完全相符。羊蹄子山矿带西段花岗岩外接触带局部形成的热液改造型锐钛矿富矿石中的钛和铁主要是就地取材的,而不是从花岗岩中带来的(赵一鸣等, 2008b)。

6 结 论

(1) 羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床火山-沉积变质岩系富矿层中的锆石年龄范围在 1 158~2 540 Ma 之间,其中 1 751 Ma 岩浆事件可能代表了与海底火山热液喷气或喷流作用有关的成矿年龄,矿区含矿火山-沉积岩形成于 1 751,时代为中元古代,是华

北地台北缘结晶基底最早的沉积盖层,而非前人认为的古元古界上部二道凹群。

(2) 矿区含矿岩系曾遭受区域低角闪岩相和绿片岩相变质,变质年龄为 1 158 Ma,代表了矿区变质构造事件年龄或变质成矿作用时代。

(3) 1 805~1 871 Ma、1 900~2 070 Ma 和 2 513~2 540 Ma 的碎屑锆石年龄,与本区变质结晶基底的地层时代基本一致,也与前人对内蒙古地区古元古宙和太古宙变质岩由 Rb-Sr 全岩等时线年龄和 U-Pb 年龄方法测定的 1 880~2 070 Ma 和 2 400~2 650 Ma 两个区间的统计年龄数据(内蒙古自治区区域地质志, 1991)十分吻合,应代表物源区年龄信息,也就是说这些碎屑锆石是来自结晶基底的解释更为合理。

(4) 矿区花岗岩体的侵位(或结晶)年龄为 118 Ma,属燕山晚期产物,代表了羊蹄子山矿带西段局部遭受热液改造期的成矿年龄。

志 谢 杜利林和杨志青协助进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定,张巧大进行了样品制靶,王彦斌和杜利林在年龄数据探讨时给予了大力支持,内蒙古自治区正蓝旗国土资源局赵建设主任对本项研究的开展和进行曾给予热情帮助。在此,作者对他们的辛勤劳动一并表示衷心感谢!

References

- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Kosch R J and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chem. Geol., 200: 155-170.
- Cheng Y Q. 1994. An introduction to regional geology of China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-517 (in Chinese).
- Compston W, Williams I S and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe[J]. J. Geophysical Research, 89(Supp.) 325-534.
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zhang Z C and Ma G G. 1992. Zircon age U-Pb age for the Early Cambrian timescale[J]. London: Journal of Geological Society, 149: 171-184.
- Li D X, Zhao Y M, Wang B H and Feng C Y. 2008a. Petrology and geochemical characteristics of amphibolites in the Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 27(4): 474-482 (in Chinese with English abstract).

① 内蒙古地质局区域地质测量队. 1974. 1:20 万正蓝旗幅区域地质调查报告. 内部资料.

- Ludiwig K R. 2002a. SQUID 1. 02 :A user's manual[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication No.2.
- Ludiwig K R. 2002b. Isoplot/Ex Version 2002 : A geochronological toolkit for micosoft excel[M]. Berkeley Geochronology center Spec. Pub.
- Nie F J and Ame Blorlykke. 1999. Nd and Sr isotope constrains on the age and origin of Proterzoin metamafic volcanic roks in the Bainat-miao districe , southcentral Inner Mongolia , China[J]. Continental Dynamics , 4(1): 1-14.
- Nie F J , Pei R F , Wu L S and Zhang H T. 1993. Magmatic activity and metallogeny of the Bainaimiao district , Inner Mongolia , People's Republic of China[M]. Beijing : Beijing Science and Technology Press. 1-23(in Chinese).
- Nie F J , Pei R F and Wu L S. 1994. Sm-Nd isotopic study on metavolcano-sedimentary rokes of Wenduermiao group , Inner Mongolia , PR[J]. Chinese Science Bulletin , 39(16):1368-1371.
- Shen B F , Zhai A M , Chen W M , Yang C L , Hu X D , Cao X L and Gong X H. 2006. The Precambrian mineralization of China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-32(in Chinese).
- Song B , Zhang Y H , Wan Y S and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. Geological Review , 48 (Supp.) : 26-30(in Chinese).
- Zhao Y M , Li D X , Chen W M , Feng C Y and Sun W H. 2006. Yangtizishan metamorphosed sedimentary titanium deposit : Discovery of new genetic type of titanium deposit[J]. Mineral Deposits , 25(2): 113-122(in Chinese with English abstracts).
- Zhao Y M , Li D X , Han J Y and Yu J. 2008a. Mineralogical characteristics of anatase , rutile , and ilmenite of Yangtizashan-Moshishan titanium ore deposit , Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits , 27(4): 466-473(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M , Li D X , Wu L S , Ma R , Chen W M , Wang P H and Gao X D. 2008b. Two different genetic types of anatase-dominated rich ores in Yangtizishan-Moshishan titanium deposit and their metallogenic characteristics[J]. Mineral Deposits , 27(4): 474-482(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京 : 地质出版社. 1-517.
- 胡世玲,王松山,桑海清. 1990. 大庙斜长岩同位素地质年龄、稀土地球化学及其地质意义[J]. 地质科学, (4): 332-343.
- 李大新,赵一鸣,王佩华,丰成友. 2008a. 内蒙古羊蹄子山-磨石山锐钛矿床斜长角闪岩类的岩石学和地球化学特征[J]. 矿床地质, 27(4):
- 解广轰,王俊文. 1988. 大庙斜长岩体侵位年龄之初步研究[J]. 地球化学, (1): 13-17.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京 地质出版社. 27-29.
- 聂风军,裴荣富,吴良士,张洪涛. 1993. 内蒙古白乃庙地区岩浆活动与金属成矿作用[M]. 北京 北京科学技术出版社. 1-239.
- 沈保丰,翟安民,陈文明,杨春亮,胡小蝶,糙秀兰,宫晓华. 2006. 中国前寒武纪成矿作用[M]. 北京 地质出版社. 1-322.
- 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.
- 赵一鸣,李大新,陈文明,丰成友,孙文泓. 2006. 内蒙古羊蹄子山沉积变质型钛矿床: 一个新钛矿床类型的发现[J]. 矿床地质, 25(2): 113-122.
- 赵一鸣,李大新,韩景仪,余 静. 2008a. 内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床锐钛矿、金红石和钛铁矿的矿物学特征[J]. 矿床地质, 27(4): 466-473.
- 赵一鸣,李大新,吴良士,马 润,陈文明,王佩华,高学东. 2008b. 内蒙古正蓝旗羊蹄子山磨石山钛矿区两种不同成因类型的锐钛矿富矿[J]. 矿床地质, 27(4): 474-482.