

文章编号 10258-7106 (2008) 04-0459-07

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体^{*}

赵一鸣¹ 李大新¹ 吴良士¹ 马 润² 陈文明¹ ,
王佩华¹ 高学东¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 内蒙古地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要 内蒙古正蓝旗羊蹄子山-磨石山钛矿床有两种不同类型的锐钛矿富矿体,即产于北部磨石山矿带的沉积变质型锐钛矿富矿体和产于南部羊蹄子山矿段的热液改造型锐钛矿富矿体。两类富矿体在矿体规模、形态、矿石结构构造特征、矿石矿物共生组合、矿石化学成分、锐钛矿粒度和成矿时代及成矿机理等方面,都存在较明显的差异。沉积变质型锐钛矿富矿体呈层状、似层状产出,矿石具有明显的细条纹状构造,由以石英为主的条纹和以锐钛矿、金红石、钛铁矿、直闪石(±黑云母、石榴子石)为主的条纹互层组成,矿石品位(TiO_2)为 5.0%~15.46%,平均值为 8.64%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 含量中等(6.99%~15.61%),锐钛矿颗粒细小(0.01~0.1 mm),形成于元古宙($1\,751 \pm 8$) Ma)二道凹群变质岩系中。热液改造型锐钛矿富矿体呈透镜状,规模相对较小;矿石具有块状、网脉状、细脉浸染状构造,共生矿物除锐钛矿、金红石、钛铁矿、石英外,常有较多的叶片状赤铁矿,局部有直闪石、黑云母和石榴子石,锐钛矿粒度较大(0.05~0.2 mm,少数可达 0.5 mm),且分布不均匀,是在元古宙沉积变质富锐钛矿变质石英砂岩的基础上,经燕山晚期(118 ± 3) Ma)花岗岩侵入,遭受热液改造而成。

关键词 :地质学;锐钛矿富矿体;成因类型;沉积变质型;热液改造型;羊蹄子山;磨石山;内蒙古

中图分类号 :P618.47

文献标志码 :A

Two different genetic types of anatase-dominated rich ores in Yangtizishan-Moshishan titanium deposit and their metallogenic characteristics

ZHAO YiMing¹, LI DaXin¹, WU LiangShi¹, MA Run², CHEN WenMing¹,
WANG PeiHua¹ and GAO XueDong¹

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2 Institute of Geological Survey of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract

Based upon forms of ore bodies, structures, mineral paragenesis of ores, ore composition and granularity of anatase, the authors identified two different genetic types of anatase-dominated rich ores in the Yangtizishan titanium deposit, i. e., the metamorphosed sedimentary type occurring in the Moshishan ore belt and the hydrothermal reformation type occurring in the Yangtizishan ore belt. The former anatase-dominated rich ore type was formed in Proterozoic ($1\,751 \pm 8$) Ma, and the latter was reformed by hydrothermalism of granite in the Late Yanshanian stage (118 ± 3) Ma. The metamorphosed sedimentary anatase-dominated rich ore bodies have

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(40773038)、内蒙古自治区地勘项目(05-1-TK01)和中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(K0714-1、K0714-3)的联合资助

第一作者简介 赵一鸣,男,1934年生,研究员,长期从事金属矿床地质地球化学研究。

收稿日期 2007-12-25;改回日期 2008-03-25。李德先编辑。

bedded form and the ores have perthitic structure comprising chiefly interbedded quartz perthite and anatase (rutile + ilmenite, anthophyllite, \pm biotite) perthite. Ore grade (TiO_2) of these ores are 5.0% ~ 15.46%, averaging 8.64%, with medium content of $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ being 6.99% ~ 15.61%. The sizes of anatase grains are very small (0.01 ~ 0.1 mm). The ore bodies of hydrothermal reformed anatase-dominated rich ores are in the lenticular form. The ores have massive, stockwork or veinlet-disseminated structure with relict perthitic structure. The main associated minerals of ores are anatase, rutile, hematite, ilmenite, and quartz, with locally anthophyllite, biotite and garnet. These ores contain TiO_2 from 4.29% to 10.20% with an average of 5.94%, and have more $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ contents (14.07% ~ 38.88%, locally 62.36%). The sizes of anatase grains in the rich ores (0.05 ~ 0.2 mm, with a few as large as 0.5 mm) are larger than those in the former ore type. The distribution of the anatase assemblage of this ore type is uneven.

Key words: geology, anatase rich ore, genetic type, metamorphosed sedimentary type, hydrothermal reformation type, Yangtizishan, Moshishan, Inner Mongolia

金红石及其同质多象锐钛矿属于中国严重短缺矿种,主要用于生产高纯度钛白粉和提炼金属钛,国内需求量很大。目前中国高档金红石型钛白粉几乎完全依赖进口,且价格昂贵,已被列入中国严重依赖国外资源的 14 种战略储备矿种之一。

内蒙古正蓝旗羊蹄子山-磨石山钛矿床于 2004 年底发现,根据本项目组前期预查评价和研究,已初步确定该矿床是一个具有一定量锐钛矿富矿石的新类型钛矿床(赵一鸣等,2006)。矿区中除含大量锐钛矿贫矿体外,还存在两种不同成因类型的锐钛矿富矿体,即沉积变质型锐钛矿富矿体和热液改造型锐钛矿富矿体。前者产于矿区北部的磨石山矿带,后者产于矿区南部的羊蹄子山矿带(见李大新等,2008 图 1)。

两类不同成因的锐钛矿富矿体在矿体形态、特征和规模、矿石结构构造、矿物共生组合、矿石品位、锐钛矿粒度以及成矿时代等方面,都有较明显的差异,反映了它们不同的生成条件和方式。

1 成矿地质背景简述

矿区位于内蒙地轴的北缘和内蒙华力西褶皱带的南缘,是中生代火山岩分布区的局部结晶基底隆起地段。

1.1 控矿地层

含矿变质岩系属于中元古代($1\,751 \pm 8$) Ma。根据对矿区 1:1 万地质草图的填制,可将二道凹群变质岩自下而上大致划分为 5 个岩性组:

第一岩性组:大理岩(结晶灰岩)角闪斜长岩-片岩组,由两层结晶灰岩(大理岩)一层角闪斜长岩和

厚层绢云石英片岩组成,厚度大于 300 m;

第二岩性组(下部含矿岩组):片岩夹薄层石英岩和钛铁(锐钛矿)石英岩组,由绢云石英片岩夹薄层石英岩和钛铁(锐钛矿)石英岩(第一主矿层)组成,总厚度 150 ~ 240 m;

第三岩性组:厚层石英岩和变质粉砂岩组,由厚层白色石英岩、变质粉砂岩夹钛铁矿化层组成,厚约 100 ~ 180 m;

第四岩性组:片岩组,主要由绢云石英片岩组成,上部有一层斑点状含石榴子石石英绢云片岩,总厚度大于 1 000 m;

第五岩性组(上部含矿岩组):含锐钛矿变质石英砂岩和片岩夹斜长角闪岩,底部有一层条纹状锐钛矿富矿,厚 2 ~ 11 m;上部有一层炭质片岩,总厚度 120 ~ 180 m;

第六岩性组:上部片岩组,片岩夹斜长角闪岩,厚度大于 150 m。

上述变质岩的主要矿物组合特征,大致相当于程裕淇等(1963)有关变质相分类中的绿片岩相。

上侏罗统火山岩系不整合于二道凹群变质岩之上,其岩性主要为流纹岩、含岩屑晶屑流纹岩、英安岩和酸性凝灰岩等,主要分布于矿区的西北部、西部和南部。

1.2 构造

区内二道凹群含矿变质岩的走向为 NEE,总的倾向 330 ~ 350°,倾角 40 ~ 80°,局部陡立,甚至向南陡倾。含矿变质岩系常被 NNE 向或 NNW 向断裂所错断(见李大新等,2008 图 1)。

1.3 侵入岩

矿区的侵入岩主要为燕山期黑云母花岗岩,呈

不规则岩株侵入于二道凹群变质岩中,主要分布于矿区的东北部和西部(见李大新等,2008 图 1)。SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究表明,花岗岩岩浆结晶年龄为 (118 ± 3) Ma,属燕山晚期产物。

岩石呈中粒或中粗粒结构,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,但黑云母大部分已遭白云母化和绿泥石化蚀变。副矿物为微量锆石、磷灰石和磁铁矿。在岩体边缘,局部可见石英脉或萤石脉穿插于花岗岩的内外接触带,对羊蹄子山矿带的沉积变质钛铁石英岩起到后期热液改造作用。

2 两类富矿体地质特征对比

2.1 矿体产状及规模对比

沉积变质型锐钛矿富矿体位于矿区北部的磨石山矿带,呈层状、似层状产出。从现有地表探槽工程控制的情况看,可分为 2 个矿体,即东部矿体和西部矿体。东部矿体走向 NEE,倾向 NNW,倾角 $50 \sim 70^\circ$,长约 500 余米,厚 $2.5 \sim 7.8$ m。西部矿体走向以 NEE 为主,倾向亦为 NNW,局部近直立,长约 600 m,厚 $4.2 \sim 11.2$ m。在东部矿体和西部矿体之间有一个长约 400 m 左右的空白区,浮土覆盖较厚,因无工程控制,地表或深部矿体是否相连,尚不清楚。矿体下盘围岩为斑点状含石榴子石(铁铝-锰铝榴石)或红柱石的石英绢云片岩,厚度约 $80 \sim 225$ m,矿体上盘为斑点状石英绢云片岩和变质石英砂岩(上部含矿岩组)互层,并夹有数层斜长角闪岩。在变质石英砂岩和片岩中普遍有锐钛矿(钛铁矿)矿化,常构成较大厚度的锐钛矿矿体, TiO_2 平均含量为 2.36%。

热液改造型锐钛矿富矿体位于南部的羊蹄子山矿带,主要呈透镜状产出,由 3 个矿体组成,规模相对较小。矿体走向亦为 NEE,倾向 NNW,但倾角都较陡,其中西部 2 个矿体的倾角近直立,东部矿体倾向 NNW,倾角 $50 \sim 70^\circ$ 。矿体长 $100 \sim 500$ m,厚 $1 \sim 10$ m。矿体下盘的围岩为绢云石英片岩,夹多层薄层($2 \sim 3$ m)石英岩,矿体上盘围岩主要为绢云石英片岩,夹有少量含锐钛矿(钛铁矿)石英岩。总厚度 $150 \sim 240$ m。

2.2 矿石结构构造特征对比

沉积变质型锐钛矿富矿石一般具有细粒花岗变晶结构,细条纹状构造,由以锐钛矿、金红石、钛铁矿为主的条纹(痕)或直闪石(\pm 黑云母)条纹和以石英

为主的条纹互层组成。条纹的宽度很小,仅 $0.1 \sim 0.5$ mm,其中锐钛矿、金红石和钛铁矿集合体构成的条纹(痕)宽度仅 $0.1 \sim 0.3$ mm,而以石英为主的条纹则较宽一些($1.0 \sim 1.5$ mm)。锐钛矿、金红石和钛铁矿约占矿石总体积的 $5\% \sim 15\%$ 。上述韵律性细纹状构造反映了矿石较典型的沉积变质形成机理(程裕淇,1994a)。

热液改造型锐钛矿富矿体的构造主要为块状、细网脉状和细脉浸染状,由赤铁矿、锐钛矿、金红石、钛铁矿和石英组成的细脉交代钛铁石英岩组成。矿体局部还保留有未被完全交代的细条纹状钛铁矿(锐钛矿)石英岩。但矿石的上述构造特征一般只能在显微镜下才能见到。地表所见到的黑褐色块状“含铁”石英岩,常被误认为铁矿石。

2.3 矿物共生组合的特征对比

沉积变质型锐钛矿富矿体的矿物组成主要有石英、锐钛矿、金红石、钛铁矿、直闪石、黑云母,局部有石榴子石,常含微量锆石,偶有少量萤石、电气石。锐钛矿(金红石)和钛铁矿的体积比约为 $3:2 \sim 5:1$,局部为 $1:1$ 或 $>5:1$ 。石英是最重要的脉石矿物,粒径约为 $0.1 \sim 0.2$ mm 的石英呈粒状集合体。直闪石是这类富钛矿石的主要伴生含铁矿物,呈针状、放射状集合体,大致沿层理分布,含量一般在 $5\% \sim 20\%$ 之间。在地表,直闪石常被氧化成褐铁矿。

热液改造型锐钛矿富矿的矿物组成主要有石英、锐钛矿、金红石、赤铁矿、褐铁矿、钛铁矿,局部有直闪石、石榴子石或黑云母。赤铁矿的大量出现是该类锐钛矿富矿的主要特征之一,常呈小叶片状集合体组成网脉或团块,并可交代早期的石榴子石。锐钛矿经常与其紧密共生,但分布不均匀,局部集中成不规则集合体。

2.4 矿石品位的差异

沉积变质型锐钛矿富矿石的品位($w(\text{TiO}_2)$)一般为 $5.0\% \sim 15.46\%$,平均值为 8.64% ,比国内已知原生金红石矿石的品位高 $2 \sim 4$ 倍(表 1); Fe_2O_3 含量在 $3.53\% \sim 17.70\%$ 之间,平均值为 8.64% , FeO 含量在 $0.15\% \sim 5.56\%$ 之间,平均值为 2.45% 。磨石山矿石的 TiO_2 -($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)相关关系图显示, TiO_2 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 的含量大致呈正相关关系(图 1)。这是由于矿石中铁的含量高低主要决定于伴生的钛铁矿、直闪石、黑云母和铁铝榴石等含铁矿物的多少,而这些富铁矿物又往往与锐钛矿的含量呈正相关关系的缘故。

表 1 两类不同成因类型锐钛矿富矿石品位及国内已知金红石原生矿品位对比

Table 1 Comparison between rich-anatase grade of two different genetic types and with domestic already known rutile deposits

矿区名称	矿石品位[$w(\text{TiO}_2)/\%$]	平均品位/ $\%$	规模	成因类型	资料来源
内蒙古正蓝旗磨石山	5.0~15.46	8.64	中型*	沉积变质型	本文
内蒙古正蓝旗羊蹄子山	4.29~10.2	5.94	中型	热液改造型	本文
山西代县碾子沟	1.92~2.2	1.97	大型	变质超基性岩型	山西地质局 211 队 ^① ,1977
河南方城柏树岗		1.88	大型	变质基性岩型	河南地矿局二队 ^② ,1988
湖北枣阳大阜山	1.83~2.80	2.45	大型	变质基性岩型	湖北地矿局八队 ^③ ,1991
江苏新沂县毛北	1.5~3.5	2.0	大型	变质榴辉岩型	江苏地矿局地研所 ^④ ,1989
安徽岳西太湖	1.04~3.53	1.7	中型	变质榴辉岩型	安徽地矿局 311 队 ^⑤ ,1990
河南西峡八庙	1.64~3.56	2.44	大型	变质基性岩型	化工部河南地质队 ^⑥ ,1995
山东日照虎山		1.7	中型	变质榴辉岩型	化工部泰安地勘院 ^⑦ ,1997

* 通过 2007 年的普查,矿区内锐钛矿贫矿属大型

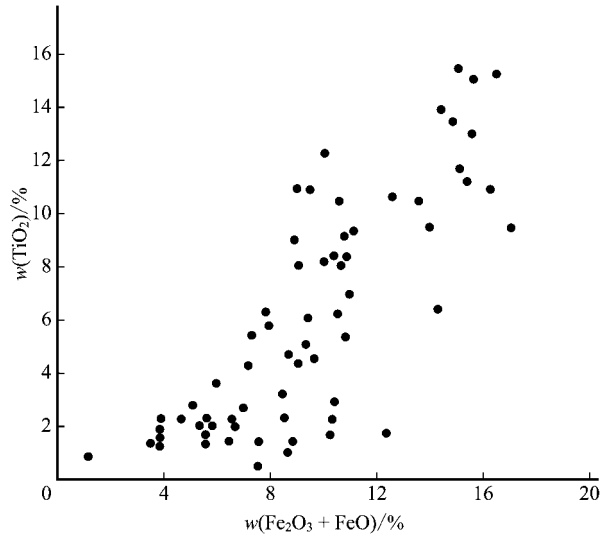


图 1 沉积变质型锐钛矿富矿石 TiO_2 -($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)相关关系图

Fig. 1 Relationship between TiO_2 and ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$) for anatase rich ores of metamorphosed sedimentary type

热液改造型锐钛矿富矿石的品位($w(\text{TiO}_2)$)比沉积变质型锐钛矿富矿石稍低,为 4.29%~10.2%,平均值为 5.94%。由于矿石伴生较多的叶片状赤铁矿集合体,导致($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)的含量升高,主要在 14.07%~38.88%之间,个别样品可达 62.36%,成为含钛富赤铁矿。这类锐钛矿富矿石的 TiO_2 和 Fe_2O_3

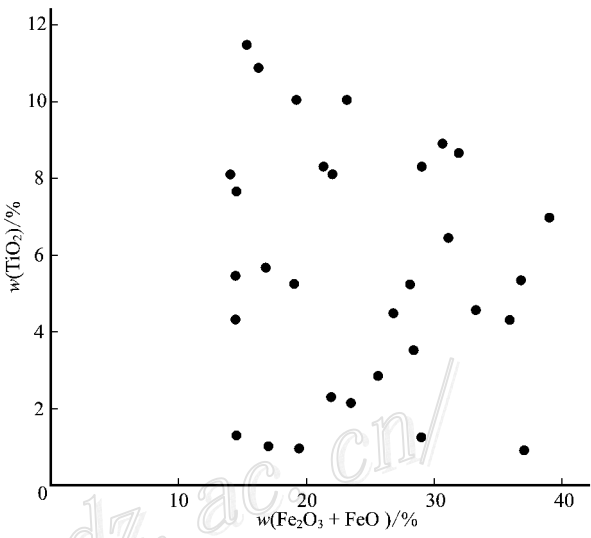


图 2 热液改造型锐钛矿富矿 TiO_2 -($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)相关关系图

Fig. 2 Relationship between TiO_2 and ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$) for anatase rich ore of hydrothermal reformation type

+FeO 含量之间未显示明显的相关性(图 2)。

2.5 锐钛矿及其伴生钛铁矿的粒度特征对比

沉积变质型锐钛矿富矿石中,锐钛矿的粒度较细,大部分为半自形粒状集合体(图 3a、b),单颗粒大小介于 0.01~0.1 mm 之间,局部可达 0.05~0.1 mm,自形较好,呈柱状。锐钛矿集合体主要呈细纹

① 山西地质局 211 地质队. 1997. 山西省代县碾子沟金红石矿初步勘探地质报告.
② 河南地矿局第二地质调查队. 1988. 河南省方城县柏树岗金红石矿区详细普查地质报告.
③ 湖北地矿局第八地质大队. 1991. 湖北枣阳市大阜山金红石矿详勘储量报告.
④ 江苏地矿局地质矿产研究所. 1989. 江苏省新沂县蒋马-东海县毛北地区原生金红石矿普查报告.
⑤ 安徽地矿局 311 地质队. 1990. 安徽省岳西、潜山太湖地区榴辉岩型金红石矿调查地质报告.
⑥ 化学工业部地质公司河南地勘大队. 1995. 河南省西峡县八庙金红石矿区寨子沟矿段详查地质报告.
⑦ 化学工业部泰安地勘院. 1997. 山东省日照市虎山金红石矿普查报告.

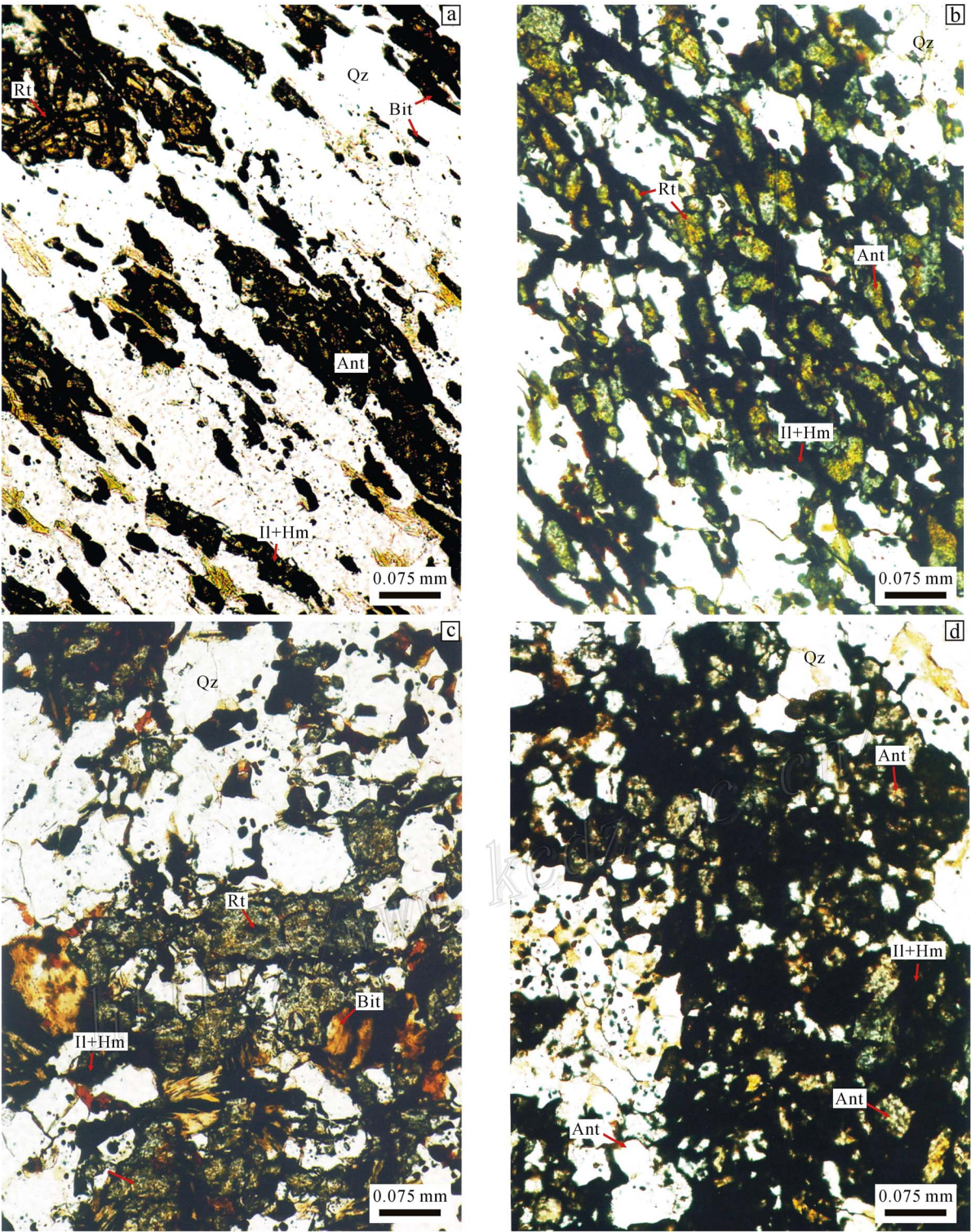


图 3 两类锐钛矿富矿单偏光镜下照片

a 和 b. 磨石山沉积变质型锐钛矿富矿；c 和 d. 羊蹄子山热液改造型锐钛矿富矿
Ant—锐钛矿；Bit—黑云母；Qz—石英；Il—钛铁矿；Rt—金红石；Hm—赤铁矿

Fig. 3 Photomicrographs of two types of anatase rich ore

a & b. Anatase rich ore of metamorphic sedimentary type from the Moshishan ore belt; c & d. Anatase rich ore of hydrothermal reformed type from the Yangtizi ore belt. Ant—Anatase; Bit—Biotite; Qz—Quartz; Il—Ilmenite; Rt—Rutile; Hm—Hematite

状或细条痕状。

热液改造型锐钛矿富矿石中,锐钛矿的粒度相对较大,一般为0.05~0.2 mm,少数可达0.5 mm(图3c、d)。锐钛矿集合体呈不规则状,且分布不均匀。

应该指出,无论是磨石山的沉积变质型,还是羊蹄子山的热液改造型,锐钛矿富矿石的粒度明显比山西代县碾子沟变质超基性岩型金红石的粒度(0.1~0.75 mm)要细得多(徐少康,2001)。这可能会给今后的选矿利用带来困难。

两种成因类型锐钛矿富矿地质特征总结于表2。

3 两类富矿的成矿机理和成矿时代特征

两类锐钛矿富矿在地质特征上的差异,反映出两者在成矿机理(形成方式)上有很大的不同。

3.1 沉积变质型富矿体的成矿机理和成矿时代

该类型矿体呈层状、似层状产出,与变质围岩呈明显的整合关系。矿体形态和沉积变质型铁矿体十分相似,只是规模较小而已,大致相当于中小型沉积变质型铁矿,说明其形成于大陆边缘的一个较小的海盆地中(沈其韩,1998;赵一鸣等,2006)。矿石的细条纹状构造和微细粒结构特征,反映其原生沉积的特征(程裕淇等,1994b),而且可能主要是化学沉积。海水深度应大于200 m,因为只有在此深度以下才能使海底沉积的细纹矿石层理免遭上部海浪的破坏(Clein,2005)。深部钻孔揭示了矿层上、下盘有大

量斜长角闪岩、角闪岩和角闪斜长岩层,厚度2~20余米不等,恢复其原岩应为中基性火山岩类。这说明矿质来源可能与海底中基性火山喷发活动有关。将磨石山富矿中锐钛矿和金红石的微量元素Cr和Nb投到Zack等(2004)的Cr-Nb相关图解中,发现锐钛矿和金红石成分的原岩分区恰恰落在变质镁铁质岩区,而不是在变质粉砂岩区,这就是很好的证明。Forc(1991)所阐述的国外许多金红石矿或钛铁矿矿床,大多与基性斜长岩类有关,如墨西哥的Pluma Hidalgo,挪威的Tellnes和美国纽约州的Sanford Lake等。事实上,国内外许多榴辉岩型金红石矿的原岩也均为基性侵入岩类。对磨石山富矿层的碎屑锆石的SHRIMP U-Pb年龄测试结果表明,沉积变质型锐钛矿富矿生成的年代为(1 751±8)Ma,大致相当于中元古代。

3.2 热液改造型富矿体的成矿机理和成矿时代

该类型矿体呈透镜状、似层状,既受原始沉积变质的钛铁石英岩层控制,又遭受后期张性断裂的叠加,有利于与花岗岩有关的热液进行改造。矿石的块状、网脉状、细脉浸染状构造和相对较粗的锐钛矿粒度和不均匀分布特征,说明它是热液交代(充填)作用的产物。被交代的原岩应为沉积变质的钛铁(锐钛矿)石英岩。因为在未被完全交代的残留矿石中尚能见到条纹状钛铁(锐钛矿)石英岩矿石。花岗岩中锆石SHRIMP U-Pb年龄的测定结果为(118±3)Ma,说明热液改造的时间应在燕山晚期。

表2 两种不同成因类型的锐钛矿富体矿特征对比
Table 2 Comparision between rich-anatase grade of two different genetic types

	沉积变质型富矿体	热液改造型富矿体
产地	正蓝旗磨石山	正蓝旗羊蹄子山
矿体形状	似层状、层状	透镜状
矿体规模	中型	中型
矿物共生组合	锐钛矿、金红石、钛铁矿、石英、直闪石、±黑云母、±石榴石	锐钛矿、金红石、赤铁矿、褐铁矿、钛铁矿、石英、±直闪石、±石榴石、±黑云母
矿石构造	条纹状、条痕状	细脉浸染状、网脉状、块状、条纹状
矿石品位	TiO ₂ 5.0%~15.46%,平均8.64%;Fe ₂ O ₃ 3.53%~17.70%,平均8.97%;FeO 0.15%~5.56%,平均2.45%	TiO ₂ 3.85%~10.2%,平均5.81%;Fe ₂ O ₃ 11.01%~38.71%,平均21.25%;FeO 0.1%~9.19%,平均2.02%
锐钛矿粒度	较细小,一般为0.01~0.1 mm,大多数为半自形集合体,少数为自形粒状,锐钛矿集合体呈细纹状或细条痕状	相对较大,一般0.05~0.2 mm,少数可达0.5 mm。集合体呈不规则状,且分布不均匀
成矿时代和成矿机理	形成于元古宙((1 751±8)Ma),是沉积变质的原生锐钛矿富矿,成矿物质来源与海底中基性火山活动有关	形成于燕山晚期((118±3)Ma),是由于花岗岩的侵入有关热液时,原有沉积变质钛铁(金红石)石英岩进行改造而成的锐钛矿富矿

4 小 结

内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床是一个新的钛矿类型, 有两种不同成因类型的锐钛矿富矿体, 即磨石山的沉积变质型和羊蹄子山的热液改造型。它们在矿体形态、规模、矿物共生组合、矿石结构构造、矿石化学成分、锐钛矿粒度、成矿时代和成矿机理等方面都有较明显的不同。

磨石山沉积变质型中型锐钛矿富矿体形成于元古宙($1\,751 \pm 8$) Ma, 成矿物质来源与海底中基性火山活动有关。矿体呈似层状、层状, 矿石构造为条纹状、条痕状, 矿物组合为锐钛矿、金红石、钛铁矿、石英、直闪石, 偶见黑云母和石榴子石。锐钛矿颗粒细小, 一般 $0.01 \sim 0.1$ mm, 大多数为半自形集合体。矿石品位($\alpha(\text{TiO}_2)$)为 $5.0\% \sim 15.46\%$, 平均为 8.64% 。

羊蹄子山热液改造型小型锐钛矿富矿体形成于燕山晚期(118 ± 3) Ma, 是由于花岗岩的侵入有关热液时, 原有沉积变质钛铁(金红石)石英岩进行改造形成。矿体呈透镜状, 矿石构造为细脉浸染、网脉状、块状、条纹状, 矿物组合为锐钛矿、金红石、赤铁矿、褐铁矿、钛铁矿、石英, 偶见直闪石、黑云母和石榴石。锐钛矿颗粒细小, 一般 $0.05 \sim 0.2$ mm, 集合体呈不规则状, 且分布不均匀。矿石品位为 $3.85\% \sim 10.2\%$, 平均为 5.81% 。

References

- Cheng Y Q, Sheng Q H, Liu G H and Wang Z J. 1963. Some fundamental problems and research methods of metamorphic rocks[M]. Beijing: Chinese Industrial Pub. House. 1-199 (in Chinese).
- Cheng Y Q. 1994a. An introduction to regional geology of China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-517 (in Chinese).
- Cheng Y Q, Zhao Y M and Lin W W. 1994b. Iron ore deposits of China [A]. In: Song S H, ed. Mineral deposits of China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 386-479 (in Chinese with English abstract).
- Clein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFS) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, meta-

morphism, geochemistry and origin [J]. American Mineralogist, 90(10): 1473-1499.

- Force E. 1991. Geology of titanium-mineral deposits[J]. Geol. Soc. Am. Spec., 259: 1-112.
- Shen Q H. 1998. Geological characteristics and forming geological setting of Early Precambrian banded itabirite in the North China platform[A]. In: Cheng Y Q, ed. Early Precambrian geological research collected Works in North China platform[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-30 (in Chinese).
- Xu S K. 2001. Occurrence and granularity of natural rutile from main rutile deposits in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 23(2): 101-103 (in Chinese with English abstract).
- Zack T, Von Eynatten H and Kronz A. 2004. Geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies[J]. Sedimentary Geology, 171: 37-58.
- Zhao Y M, Li D X, Chen W M, Feng C Y and Sun W H. 2006. Yangtishan metamorphosed sedimentary titanium deposit: Discovery of new type of titanium deposit[J]. Mineral Deposits, 25(2): 113-122 (in Chinese with English abstract).
- Li D X, Zhao Y M, Feng C Y, Wu L S and Chen W M. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Mesoproterozoic anatase-rich ore beds and granite in the Yangtishan-Moshishan anatase deposit, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 27(4): 449-458 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程裕淇, 沈淇韩, 刘国惠, 王泽九. 1963. 变质岩的一些基本问题和工作方法[M]. 北京: 中国工业出版社. 1-19.
- 程裕淇. 1994a. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社. 1-517.
- 程裕淇, 赵一鸣, 林文蔚. 1994b. 中国铁矿床[A]. 见: 宋叔和主编. 中国矿床(中册)[M]. 北京: 地质出版社. 386-479.
- 沈其韩. 1998. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景[A]. 见: 程裕淇主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集[C]. 北京: 地质出版社. 1-30.
- 徐少康. 2001. 我国主要金红石矿床金红石自然颗粒产状及粒度特征[J]. 化工矿产地质, 23(2): 101-103.
- 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——一个新的钛矿床类型的发现[J]. 矿床地质, 25(2): 113-122.
- 李大新, 赵一鸣, 丰成友, 吴良士, 陈文明. 2008. 内蒙古羊蹄子山-磨石山锐钛矿床富矿层和花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 27(4): 449-458.