

文章编号: 0258-7106 (2006) 02-0113-10

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*

赵一鸣, 李大新, 陈文明, 丰成友, 孙文泓

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 文章通过对矿床地质特征及矿物成分的研究, 将前人确定的内蒙古羊蹄子山沉积变质型铁矿床更正为沉积变质型钛矿床。并新发现了北部磨石山以金红石为主的富钛矿体。文章还对该矿床的成矿模式进行了总结, 给出了综合找矿标志。与羊蹄子山钛矿床地质特征相似的钛矿床在国内外文献中尚未报道过, 因此认为这是一个新的钛矿床类型, 而且在内蒙古中东部有较大的找矿前景。

关键词 地质学; 钛矿床; 沉积变质型; 新类型; 羊蹄子山; 内蒙古

中图分类号: P618.47

文献标识码: A

Yangtizishan metamorphosed sedimentary titanium deposit: Discovery of new genetic type of titanium deposit

ZHAO Yi Ming, LI Da Xin, CHEN Wen Ming, FENG Cheng You and SUN Wen Hong
(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The Yangtizishan metamorphosed sedimentary titanium deposit in Inner Mongolia belongs to a new genetic type. This deposit was formerly referred to as an iron deposit. Based on field and indoor investigation, the authors hold that it is a metamorphosed sedimentary titanium deposit. The ore bodies occur in Lower Proterozoic Erdaowa Group consisting of sericite-quartz schist in the stratoid and lenticular forms. The ores have perthitic structure comprising chiefly interbedded quartz perthite and ilmenite ($\pm$ rutile) perthite. The ore minerals are mainly ilmenite and rutile and, subordinately, hematite and limonite, while the nonmetallic minerals are chiefly quartz with small amounts of biotite, amphibole (grunerite) and garnet (spessartine-almandine). The ores contain 2.90% ~ 18.14% TiO_2 , 8.04% ~ 23.6% TFe, with very low P and S content. In the course of investigation, the northern Moshishan rutile-dominated rich ore body was discovered by the authors. The genetic model of this deposit is as follows: (1) It was formed in a small oceanic basin under a oxygen-deficient (highly reducing) condition in Early Proterozoic; (2) The ores precipitated in a minimum depth of below 200 m of sea water, being products of purely chemical precipitation; (3) The source of the major components of the titanium ore such as Si, Ti, Fe, and Mn seems to be hydrothermal or exhalative in the deep ocean basin; (4) The ore deposit has suffered regional metamorphism of intermediate degree; (5) In Mesozoic, the deposit was locally subjected to reformation by granitic intrusion.

This type of titanium ore deposit has never been reported in literature and is therefore the first documented

* 本文为内蒙古自治区地勘项目(2005 铁 1-1)资助的成果

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 2005-11-24; 改回日期 2006-02-09。李 岩编辑。

occurrence in the world.

Key words: geology, titanium deposit, metamorphosed sedimentary type, new genetic type, Yangtizishan, Inner Mongolia

羊蹄子山钛矿床位于内蒙古正蓝旗西约 25 km 处。原内蒙古地质局察盟队 1959 年曾进行过检查,认为矿床属产于上太古界二道凹群中的沉积变质铁矿床,铁品位较低,估算铁矿地质储量约 26 万吨^①。内蒙古地质局 101 地质队 1972 年又进一步做过工作,也认为这是一个沉积变质型铁矿床,矿石为赤铁矿石岩^①。2004 年 12 月,笔者应邀对此矿床进行了野外考察,经有关室内研究,发现它不是一个铁矿,而是一个产于古元古代二道凹群变质岩系中的沉积变质型钛矿床,是钛矿床一个新的成因类型,这在世界上是首例,并认为在内蒙古中东部有较大的找矿前景。根据上述新发现和室内初步研究成果,笔者于 2005 年 3 月向内蒙古自治区国土资源厅申请了一个关于对该钛矿床进行预查和研究的科研项目,获批准后开始实施。通过研究,进一步论证了该矿床属沉积变质型钛矿床,是钛矿床的一个新的成因类型;发现并初步圈定了北部磨石山以金红石为主的富钛矿体。

1 矿区地质概况

羊蹄子山钛矿床位于华北地台北缘内蒙古地轴中东部。

1.1 地层

矿区出露地层以古元古代二道凹群为主,其次为上侏罗统火山岩。经对地质剖面(1:2 000)的测制和 1:10 000 地质草图的填制,二道凹群变质岩在矿区范围内自下至上大致可划分为 5 个岩性组(图 1):

第 1 岩性组:由结晶灰岩(大理岩)、斜长角闪片岩和绢云石英片岩组成,厚度大于 500 m;

第 2 岩性组:由绢云石英片岩夹薄层石英岩和条纹状钛铁石英岩(第一主矿层)组成,该岩性组厚约 500 m;

第 3 岩性组:厚层白色石英岩、变质粉砂岩夹钛铁矿化层,厚约 350 m;

第 4 岩性组:绢云石英片岩、石榴绢云石英片岩夹条纹状钛铁矿金红石石英岩(第二主矿层)和变质

粉砂岩,厚度大约 500 m;

第 5 岩性组:厚层白色石英岩,厚度大于 500 m。

上侏罗统火山岩系不整合覆盖于二道凹群变质岩之上,其岩性有流纹岩、英安岩、含岩屑晶屑凝灰岩等,分布于矿区西北部、西部和南部。

1.2 构造

矿区内二道凹群变质岩系 1、2、3、4 岩性组的走向为 NEE 向,总的倾向为 330~350°,倾角 40~80°,局部陡立,甚至向南陡倾。但在矿区东北部马牙子山一带的厚层石英岩则倾向 SSE 140~185°,倾角 45~70°。因此,在矿区北部可能构成一向斜。

在羊蹄子山一带,厚层石英岩、大理岩(结晶灰岩)和矿层常被 EN 向或近 NS 向的断层所错断。

1.3 侵入岩

矿区的侵入岩主要为燕山期黑云母花岗岩,呈不规则岩株状侵入于二道凹群变质岩中,主要分布于矿区中部和西部(图 2)。其中,矿区中部的花岗岩出露面积较大,约 2.3 km²。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(或白云母),但黑云母大部分已发生白云母化和绿泥石化蚀变,并呈其假像,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。在岩体边缘,局部可见萤石脉穿插于花岗岩的内、外接触带,说明岩体富含挥发组分氟。矿区内的脉岩主要为闪长玢岩和细晶岩。

2 矿床地质特征

2.1 矿体

矿区内主要有两个矿带,即位于羊蹄子山的南矿带和位于磨石山的北矿带。前者产于第 2 岩性组,后者则产于第 4 岩性组内(图 2)。

南部羊蹄子山矿带由 6 个矿体组成,走向 NEE,断续延长约 1.8 km。大多数矿体倾向 NNW,倾角 55~85°,个别矿体向南陡倾。单个矿体长 100~600 m,厚 3~10 m。

① 内蒙古自治区区域地质测量队. 1974. 1:20 万区域地质调查报告——正蓝旗幅(矿产部分). 1~42.

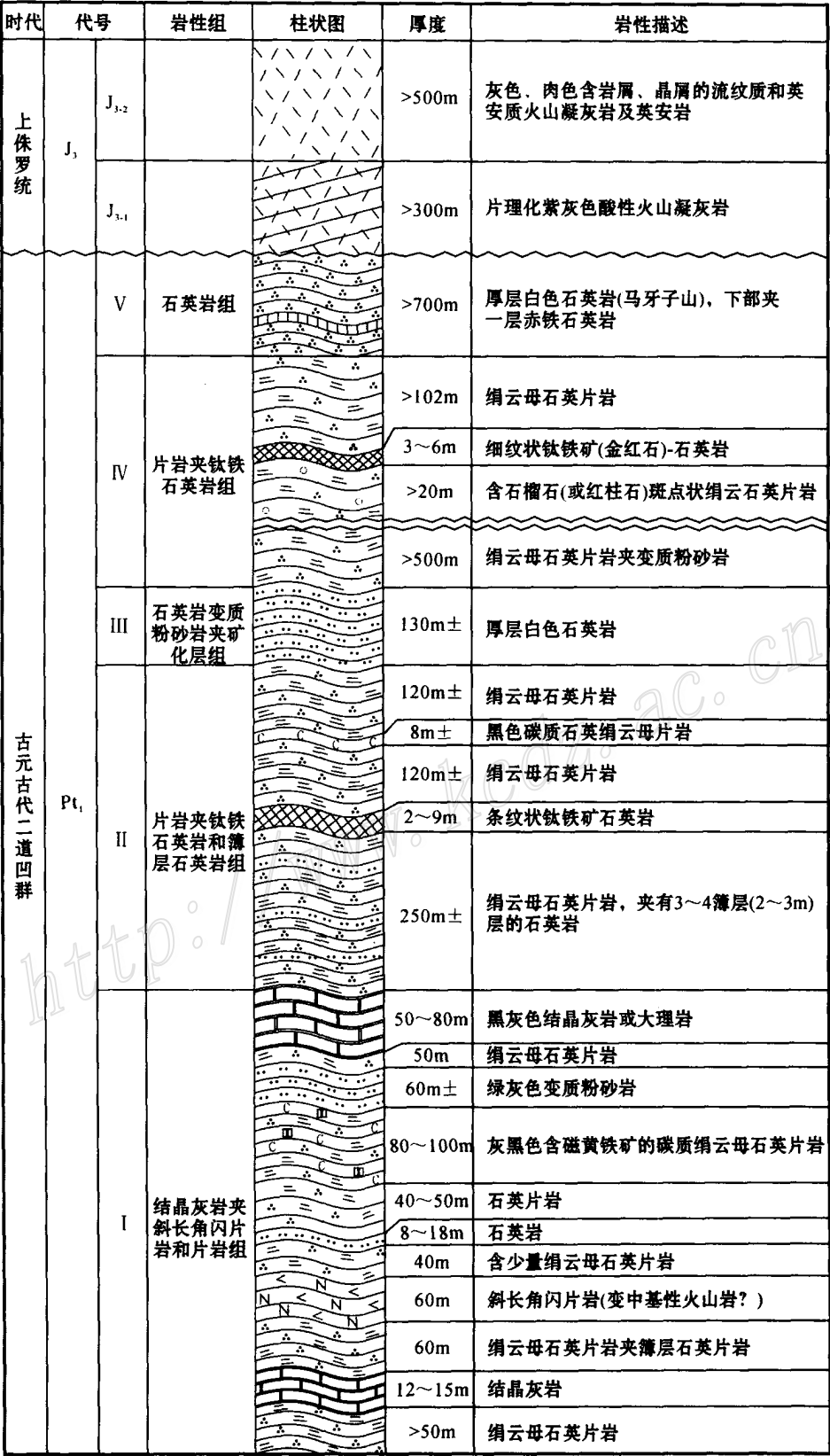


图 1 羊蹄子山钛矿床地层柱状图

Fig. 1 Stratigraphic column of the Yangtizishan titanium deposit

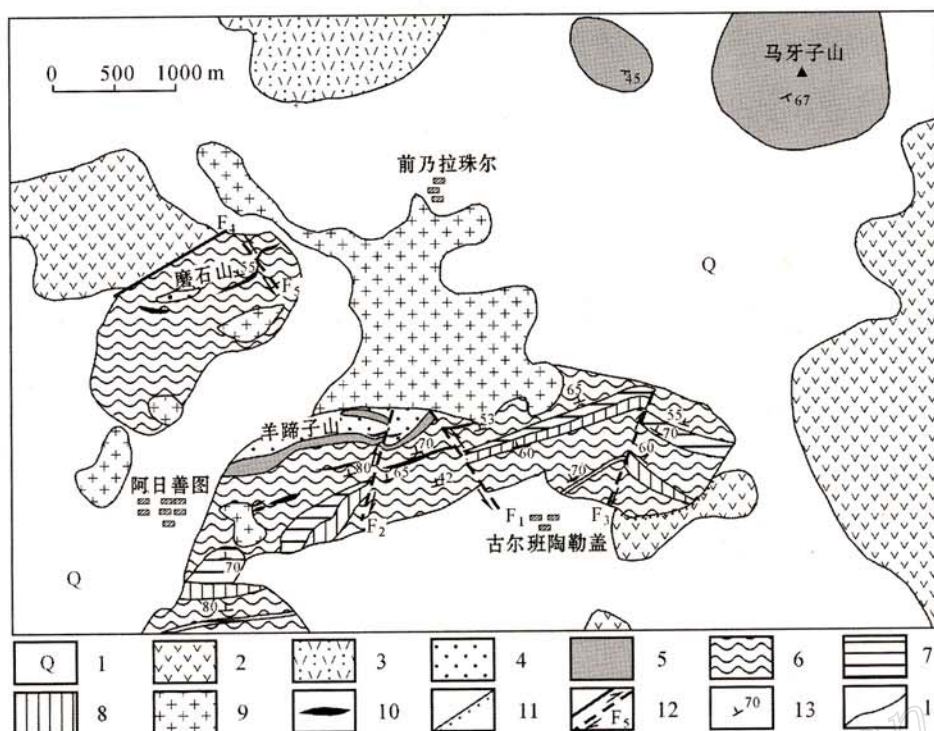


图2 内蒙古羊蹄子山钛矿床地质略图

1—第四系;2—酸性-中酸性火山岩;3—片状凝灰岩;4—变质粉砂岩;5—石英岩;6—片岩;7—大理岩;8—斜长角闪片岩;9—花岗岩;10—矿体;11—不整合面;12—实测和推测断层及编号;13—产状;14—地质界线

Fig. 2 Geological sketch map of the Yangtizishan titanium deposit, Inner Mongolia

1—Quaternary;2—Acidic and intermediate-acidic volcanic rocks;3—Schistose tuff;4—Metasiltstone;5—Quartzite;6—Schist;7—Marble;8—Plagioclase-amphibolite schist;9—Granite;10—Ore body;11—Unconformity;12—Measured/inferred faults and their serial number;13—Attitude;14—Geological boundary

在以往的有关文献资料^①中只圈出了南部羊蹄子山的所谓“铁矿带”。本次研究,新发现了羊蹄子山北部的磨石山以金红石为主的富矿带。该矿带由2个矿体组成,即东部矿体和西部矿体,以东部矿体为主。东部矿体走向 NEE,倾向 NNW,倾角 50~60°,长约 400 m,厚 3~5 m 左右;西部矿体长约 150 m,厚 4~5 m。

无论是南部矿带还是北部矿带,其上下盘围岩均为绢云石英片岩。磨石山以金红石为主的富矿带下盘普遍存在一层含石榴石或红柱石的石英绢云母片岩。

2.2 矿石类型和结构构造特征

矿石的金属矿物主要为钛铁矿,次有金红石、赤铁矿和褐铁矿,局部有较多的石榴石(锰铝-铁铝榴石)和铁闪石以及少量铁直闪石和绢云母。但在磨石山矿带,则以金红石为主。

根据矿石共生矿物成分的差异,可大致划分为 8

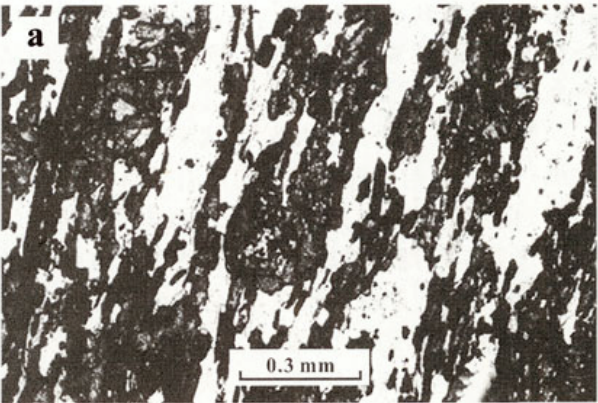
个矿石自然类型,即:钛铁矿-石英型、钛铁矿-黑云母-石英型、钛铁矿-石榴石-石英型、钛铁矿-金红石-黑云母-石英型、钛铁矿-黑云母-石榴石-石英型、钛铁矿-角闪石-石英岩型、钛铁矿-石榴石-角闪石-石英型和褐铁矿-赤铁矿型等。

其中以钛铁矿-石英型和钛铁矿-金红石-黑云母-石英型最重要,钛铁矿-黑云母-石英型、钛铁矿-石榴石-石英型次之,其他类型分布范围相对较小。

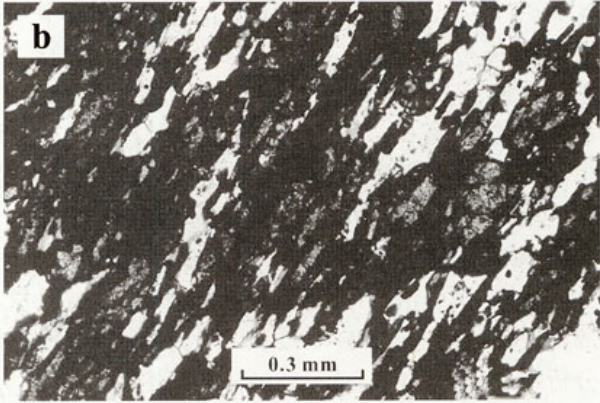
矿石的构造较为复杂,有条纹状、细纹状(图 3a, 3c)、条痕状、细脉浸染状(图 3d)和网脉状(图 3e)等。条纹状和细纹状构造是由石英条纹和钛铁矿或金红石条纹(有时含一定量的黑云母、石榴石和角闪石)相间组成的,条纹宽 0.1~2 mm 不等。矿石结构有半自形板状-晶粒结构、叶片状结构、放射状-球粒状结构和海绵陨铁结构(图 3f)等。

在矿石结构构造中,以条纹状、细纹状构造和半自形板状-晶粒结构为主。它们基本反映了矿石原生

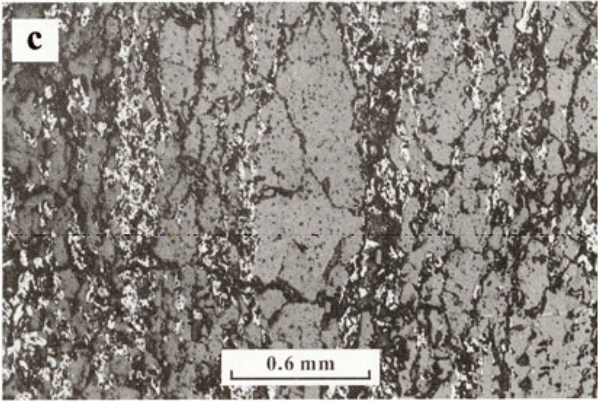
① 内蒙古自治区区域地质测量队. 1974. 1:20 万区域地质调查报告——正蓝旗幅(矿产部分). 1~42.



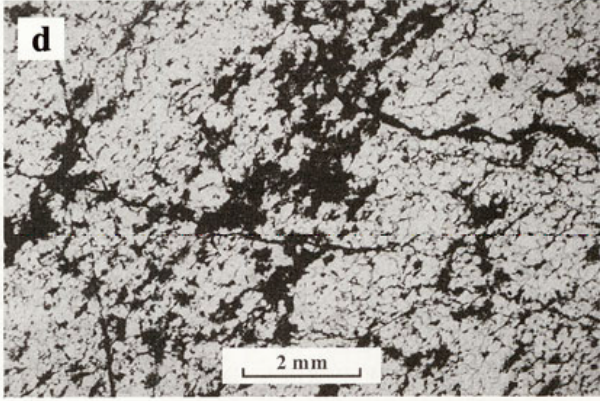
细纹状钛铁矿(黑色)-金红石(深灰)-黑云母-石英(白色)型矿石
单偏光



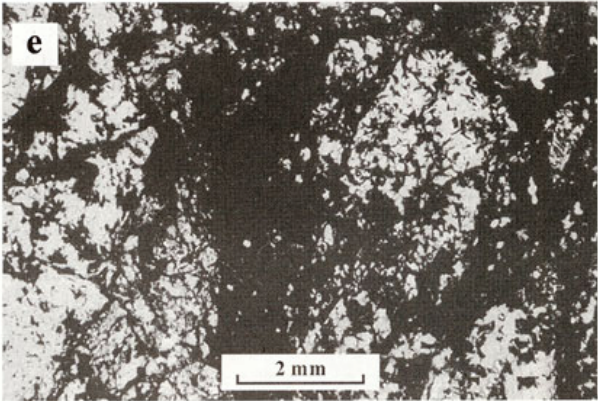
金红石(深灰)和钛铁矿(黑色)在条纹中的连生情况
单偏光



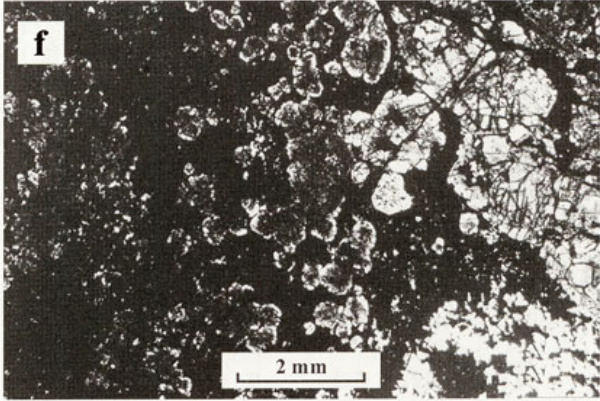
细纹状钛铁矿(白色)-石英型矿石
反光



细脉浸染状钛铁矿-石英型矿石
单偏光



网脉状钛铁矿(黑色)-石英型矿石
单偏光



钛铁矿(黑色)交代石榴石形成海绵陨铁结构
单偏光

图 3 羊蹄子山钛矿床主要矿石显微照片

Fig. 3 Micrographs of major ores from the Yangtizishan titanium deposit

沉积变质的环境。细脉浸染状、网脉状和部分浸染状构造矿石以及具叶片状、放射状-球粒状、海绵陨铁结构的矿石则是后期花岗岩侵入活动造成的热液

改造作用的产物。

上述各类矿石的矿物共生组合、结构构造特征和空间分布情况见表 1。从各类矿石的分布情况看，

钛铁矿-石英型、钛铁矿-石榴石-石英型和钛铁矿-角闪石-石英型和钛铁矿-石榴石-角闪石-石英型矿石主要分布于羊蹄子山矿带;钛铁矿-金红石-黑云母-石英型矿石(富矿)仅分布于北部的磨石山矿带;而褐铁矿-赤铁矿型矿石则分布于羊蹄子山矿带的局部地段和马牙子山南坡硅石采矿场。

2.3 矿石的主要矿物特征

钛铁矿:呈半自形-他形集合体产出,组成条纹、细纹或条痕,部分呈自形板状或叶片状。电子探针分析结果, $w(\text{TiO}_2)$ 53.48%~54.28%, $w(\text{FeO})$ 40.81%~43.91%, $w(\text{MnO})$ 3.22%~5.38%(个别样品为1.48%),其他组分含量都很低(表2)。应当指出,极大部分钛铁矿的粒度较小,一般为0.001~0.05 mm,这可能对选矿造成一定的困难。

金红石:常与钛铁矿连生(图3b),呈他形、半自形粒状集合体,少数呈自形短柱状,粒径也相对较小,大者0.01~0.3 mm;小者仅20~100 μm ,只在高倍电子探针中才能分辨出来。电子探针分析结果,金红石的 $w(\text{TiO}_2)$ 高达99.41%~99.61%(表2)。金红石在磨石山矿带的矿石中普遍发育,它和钛铁矿在矿石中的体积比约3:2~4:1。

赤铁矿:呈细脉或细网脉沿钛矿石裂隙充填交代,并常和褐铁矿共生,在羊蹄子山矿带局部可构成较富的褐铁矿-赤铁矿矿石。

黑云母:是矿石中较常见的脉石矿物,往往呈小叶片状与钛铁矿或钛铁矿-金红石集合体(条纹)紧

密共生。根据电子探针分析,黑云母中 $w(\text{FeO})$ 达21.89%~29.91%, $w(\text{MgO})$ 3.27%~9.29%,应属于铁黑云母。

铁闪石:在矿石中常呈放射状球粒集合体沿条纹方向分布,或与石榴石共生构成石榴石-铁闪石交代岩。前者基本反映了矿石的原生沉积变质生成环境,后者则是后期热液改造作用的产物。在单偏光下,矿物为无色、针状或长柱状,但沿节理常遭后期褐铁矿化而变为浅褐色或棕色。其消光角($C \wedge N_g$)=14~16°。电子探针分析结果,铁闪石的FeO含量很高, $w(\text{FeO})$ 达33.33%~47.36%,而 Al_2O_3 、MgO和CaO则较低, $(\text{Ca} + \text{Na})_{\text{B}} < 1.34$, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}) < 0.30$ (原子系数比),因此,矿物应属铁闪石(Leake et al., 1997)。

石榴石:一般组成条纹、小透镜体,或呈自形、半自形粒状另星分布。在网脉状矿石中,石榴石常被钛铁矿集合体所交代。矿物在正交偏光下未见有光性异常。电子探针分析结果,FeO、 Al_2O_3 和MnO含量均较高,而CaO则较低(表2)。Fe:Al:Mn $\cong$ 3.7:3.9:1.6,矿物属于锰铝-铁铝榴石。

2.4 矿石品位

大量矿石的化学简项分析和化学全分析(表3)结果表明,全矿区矿石的 $w(\text{TiO}_2)$ 为1.47%~18.14%;全铁含量大多较低, $w(\text{TFe})$ 仅6.51%~23.6%。但南、北2个矿带的矿石品位各不相同。南矿带(羊蹄子山)的矿石以钛铁矿为主, $w(\text{TiO}_2)$

表1 羊蹄子山钛矿床矿石类型特征

Table 1 Characteristics of ore types of the Yangtizishan titanium deposit

序号	矿石名称	矿物共生组合	结构构造特征	分布范围
1	钛铁矿-石英型	$\text{Ilm} + \text{Q} \pm \text{Hrb} \pm \text{Bi} \pm \text{Gr} \pm \text{Rt} \pm \text{Ht} \pm \text{Ser}$	条纹状、条痕状、浸染状、网脉状、细脉浸染状、	羊蹄子山矿带2号、5号、6号、7号和4+1号探槽
2	钛铁矿-黑云母-石英型	$\text{Ilm} + \text{Bi} + \text{Q} \pm \text{Lt} \pm \text{Ser} \pm \text{Gr} \pm \text{Hrb} \pm \text{Rt}$	条纹状、条痕状	羊蹄子山矿带5号、6号、7号探槽,磨石山矿带3号探槽及西南坡
3	钛铁矿-石榴石-石英型	$\text{Ilm} + \text{Gr} + \text{Q} \pm \text{Lt} \pm \text{Bi}$	条纹状、网脉状、细脉浸染状	羊蹄子山矿带2号、2+1号和6号探槽
4	钛铁矿-金红石-黑云母-石英型(富矿)	$\text{Ilm} + \text{Rt} + \text{Bi} + \text{Q} \pm \text{Gr} \pm \text{Ser} \pm \text{Hrb}$	细纹状	磨石山矿带1号、2号、3号探槽及其西南部南坡
5	钛铁矿-黑云母-石榴石-石英型	$\text{Ilm} + \text{Bi} + \text{Gr} + \text{Q}$	细纹状、条痕状	羊蹄子山6号探槽和磨石山西部南坡
6	钛铁矿-角闪石-石英型	$\text{Ilm} + \text{Hrb} + \text{Q} \pm \text{Lt} \pm \text{Ht}$	条纹状	羊蹄子山6号探槽和B-B剖面
7	钛铁矿-石榴石-角闪石-石英型	$\text{Ilm} + \text{Gr} + \text{Hrb} + \text{Q} \pm \text{Lt} \pm \text{Ht}$	细脉浸染状	羊蹄子山6号探槽
8	褐铁矿-赤铁矿型	$\text{Lt} + \text{Ht} \pm \text{Q} \pm \text{Bi} \pm \text{Gr} \pm \text{Mt}$	网脉状、团块状	羊蹄子山中部地表3号槽和马牙子山硅石采场

注:Bi—黑云母;Gr—石榴石;Hrb—角闪石;Ht—赤铁矿;Ilm—钛铁矿;Lt—褐铁矿;Mt—磁铁矿;Q—石英;Rt—金红石;Ser—绢云母;
Abbreviations: Bi—biotite; Gr—garnet; Ht—hematite; Ilm—ilmenite; Lt—li manite; Mt—magnetite; Q—quartz; Rt—rutile; Ser—sericite

表 2 内蒙古羊蹄子山钛矿床矿石钛矿物和脉石矿物代表性电子探针分析

Table 2 Representative electron microprobe analyses of titanium minerals and gangue minerals in the ores from the Yangtizishan titanium deposit, Inner Mongolia

成分	Ti-4-2 钛铁矿 ^a	II-1 钛铁矿 ^a	Ti-6-1 钛铁矿 ^a	Ti-7-2 钛铁矿 ^a	Ti-9-2 钛铁矿 ^a	II-1-1 金红石	II-1-2 金红石	Ti-4-2 金红石	Ti-9-7 黑云母	Ti-9-3 锰铝-铁 铝榴石	Ti-9-4 铁闪石
<i>w(B) / %</i>											
SiO ₂	0.02	0.10	0.08	0.06	0.04	0.53	0.05	1.11	37.82	37.49	50.46
TiO ₂	53.48	54.28	53.57	54.00	53.65	99.41	99.61	99.30	1.90	0.16	0.03
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	14.23	20.83	1.34
FeO	41.14	43.91	41.23	40.87	42.71	0.50	0.45	0.20	29.91	27.03	36.39
MnO	4.97	1.48	5.38	4.04	3.22	0.03	0.03	0.00	3.09	11.34	2.07
MgO	0.02	0.02	0.00	0.05	0.02	0.03	0.00	0.01	3.27	0.85	6.47
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.05	0.56	2.03	0.11
Na ₂ O	0.00	0.02	0.01	0.01	0.04	0.06	0.00	0.00	0.09	0.04	0.12
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.74	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.10	0.02	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
总和	99.95	99.91	100.30	99.04	99.67	100.69	100.19	100.70	96.61	99.33	97.00
氧原子数/个											
O	3	3	3	3	3	2	2	2	22	24	23
金属原子系数											
Si	0.000	0.002	0.002	0.002	0.001	0.007	0.001	0.015	5.922	6.123	8.066
Ti	1.012	1.018	1.009	1.023	1.015	0.988	0.996	0.983	0.224	0.020	0.004
Al	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	2.627	3.924	0.126
Fe	0.868	0.916	0.864	0.861	0.898	0.006	0.005	0.002	3.917	3.692	4.867
Mn	0.106	0.031	0.114	0.086	0.069	0.000	0.000	0.000	0.409	1.568	0.281
Mg	0.001	0.007	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	10.763	0.207	1.541
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.941	0.356	0.019
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.013	0.006	0.036
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.146	0.000	0.000
Cr	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总和	1.987	1.976	1.989	1.975	1.985	1.004	1.002	1.001	15.962	15.896	14.940

电子探针分析由中国地质科学院矿产资源研究所余静协助完成;仪器型号:JEOL JXA8800R EPMA;实验条件:电压 20 kV,电流 2×10^{-8} A,电子束斑直径 $1 \mu\text{m}$,测试精度 $0.0\text{n}\% \sim 0.1\text{n}\%$ 。

表 3 内蒙古羊蹄子山钛矿床矿石化学分析

Table 3 Chemical analyses of ores from the Yangtizishan titanium deposit, Inner Mongolia

样号	w(B) / %							
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO
YT-7	65.25	11.56	3.49	12.72	2.50	1.70	0.64	0.38
YT-34	49.66	8.42	3.79	20.42	8.89	4.07	0.99	0.76
YT-39	65.25	10.97	2.24	15.85	0.38	1.79	0.25	0.24
YT-40	61.23	8.27	3.03	21.09	0.20	2.26	0.30	0.38
MS-27	68.35	9.49	3.93	12.63	1.31	0.33	0.62	0.14
MS-28	61.49	15.46	2.52	13.45	2.89	0.64	0.65	0.18
MS-33	75.70	6.18	4.34	8.04	1.13	0.18	0.90	0.32

样号	w(B) / %						合计
	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺	CO ₂	P ₂ O ₅	S	
YT-7	0.04	0.47	1.24	0.20	0.06	0.01	100.26
YT-34	0.02	0.19	3.00	0.12	0.12	0.02	100.47
YT-39	0.09	0.30	2.56	0.20	0.07	0.01	99.70
YT-40	0.03	0.33	2.88	0.20	0.08	0.01	100.29
MS-27	0.01	0.04	2.78	0.38	0.04	0.00	100.05
MS-28	0.08	0.07	2.40	0.29	0.06	0.00	100.18
MS-33	0.02	0.17	2.68	0.55	0.04	0.01	100.26

分析单位:国家地质实验测试中心;分析方法:主要元素用 X 荧光光谱仪(3080E)分析,分析精度 0.01% ;CO₂ 用电位法;H₂O⁺用重量法;FeO 用容量法。

变化较大,从 1.47% 到 18.14%,平均 5.39%。北矿带(磨石山)以金红石为主的矿石 $w(\text{TiO}_2)$ 为 6.06%~15.46%,平均品位高达 10.09%。金红石原生矿的工业品位 $w(\text{TiO}_2)$ 是 1.5%,边界品位仅 1%^①。因此,磨石山矿石已属富钛矿。所有矿石中的硫和磷均不高(表 3)。矿石的微量元素分析表明,V 和 Cr 的含量偏高,分别可达 $(107 \sim 654) \times 10^{-6}$ 和 $(33 \sim 270) \times 10^{-6}$ 。

3 讨论

3.1 矿床成因

笔者认为该钛矿床属于沉积变质成因主要基于以下几点证据:

(1) 矿体呈似层状、透镜状,整合地产于古元古代二道凹群绢云石英片岩中。

(2) 矿石主要呈细条纹状,由以钛铁矿或金红石为主的条纹和石英条纹相间组成,局部有细脉浸染状和网脉状构造。

(3) 矿石金属矿物主要为钛铁矿和金红石,次有赤铁矿和褐铁矿;脉石矿物主要为石英,有少量黑云母、锰铝-铁铝榴石和铁闪石。上述矿物集合体大多呈条纹状分布,钛铁矿板状体长轴和条纹方向一致。

(4) 钛铁矿的化学成分特点是 MnO 含量较高, $w(\text{MnO})$ 大多为 3.22%~5.38%,而 MgO 含量很低, $w(\text{MgO})$ 只有 0~0.05%;岩浆成因钒钛磁铁矿床(如攀枝花、红格、白马和太和等)钛铁矿的 MnO 含量较低, $w(\text{MnO})$ 一般为 0.34%~1.21%,大多小于 1%,MgO 的含量却较高,达 1.15%~8.35%^①。这说明,这类钛铁矿是在海底条件下喷气或热液喷流沉积后经变质而成,和产于基性、超基性岩浆岩中的钒钛铁矿有本质的区别。

综上所述,该矿床可能是以海底喷气或热液喷流沉积的方式形成的,后经中级区域变质作用改造,属沉积变质型钛(铁)矿床,由于燕山期花岗岩的侵入和石英脉穿插,矿体局部地段遭到热液富集改造作用。笔者查阅了 1 000 余份有关钛矿床(物)的文献,发现这类钛矿床不仅在中国是首次发现,在国外文献中也未曾报道过,因此,是一种新的钛矿床类型。

关于钛矿床的成因类型,前苏联矿床学家斯米

尔诺夫(Смирнов,1974;Smirnov et al.,1983)曾作过详细划分,共提出 6 类:

(1) 岩浆型钛铁矿-磁铁矿(钛磁铁矿)矿床:在成因上与辉长岩有关,实例是南乌拉尔库辛斯克矿床。

(2) 冲积-坡积型钛铁矿砂矿床,产地:乌克兰。

(3) 海滨砂矿床:金属矿物主要由钛铁矿、金红石、白钛矿组成,产地:澳大利亚、乌克兰。

(4) 火山沉积型矿床:钛铁矿产于火山凝灰岩和凝灰质砂岩中,产地:前苏联伏龙涅什地区。

(5) 风化型矿床:金属矿物主要由钛铁矿和金红石组成,产地:乌克兰、哈萨克斯坦。

(6) 变质矿床:钛铁矿-磁铁矿产于角闪岩中(原岩为辉长岩),产地:芬兰沃特缅克,乌拉尔。

Evans (1980) 和 Edwards 等(1986)把钛矿床主要分为两类,一类是与斜长岩-辉长岩杂岩伴生的岩浆型钛铁矿矿床,另一类则是金红石砂矿。

沃尔弗松等(Волфсон et al.,1982)把钛矿床划分为以下 5 个成因类型:① 岩浆型;② 风化壳型;③ 砂矿型;④ 火山沉积型;⑤ 变质型。作者认为岩浆型和砂矿型是主要类型,而变质型则是由砂岩型变质而成。

中国地质矿产信息研究院(1996)综合了国内外钛矿床资料后,把钛矿床划分为 5 类:

(1) 岩浆型;

(2) 沉积型:钛铁矿或金红石砂矿;

(3) 风化型:原岩为碱性岩,金属矿物为锐钛矿;

(4) 变质型:原岩为榴辉岩或超镁铁质岩,金红石是主要的金属矿物,产地:意大利;

(5) 热液型:为与浅成花岗岩蚀变系统有关的热液型金红石矿。

刘兰笙等(1996)在编制中国黑色有色金属矿产图集的基础上,把中国钛矿床划分为岩浆型、变质型、风化型和砂矿型 4 个类型。其中岩浆型钛矿床分布于四川攀西及河北大庙等地,是最重要的类型;变质型钛矿床指的是产于早前寒纪变质超基性岩或变质辉长岩中的金红石矿床,矿床实例有山西碾子沟等。

由潘启宇(1999)主编的《内蒙古自治区地质矿产志》中,有关钛矿床的报导较简单,指出自治区范

① 四川省地质局攀枝花地质综合研究队等,1980.攀枝花—西昌地区钒钛磁铁矿共生矿物质成分研究报告。

围内只有几处钛矿点(未上储量平衡表)。它们分布于华力西期地槽褶皱带和华北地台北缘基性岩体中,其成因为岩浆分异型和第四纪砂矿。前者的实例是阿拉善左旗伊克佃钛铁矿。矿体呈透镜状、脉状产于辉长岩中,矿石 $w(\text{TiO}_2)$ 平均 6.2% ~ 8.2%。砂矿的实例是陈巴尔虎旗八大关钛铁矿。矿床成因属残积、淤积和洪积型。

如果把羊蹄子山沉积变质钛矿床和世界上分布广泛的沉积变质铁矿床的主要地质特征作对比,它们之间虽有一定的共同点,如矿体都整合地产于前寒武纪沉积变质岩系中,矿石韵律构造特征显著,脉石矿物都以石英为主,但其区别是明显的。首先,前者矿石主要为条纹状或细纹状,主要组成矿物是钛铁矿和金红石,次为赤铁矿和褐铁矿;其次,矿体围岩主要是片岩,含矿变质岩系中出现较多的厚层石英岩和大理岩(结晶灰岩)。综观国内外沉积变质铁矿床的地质特征,矿石构造主要为条带状,矿石金属矿物成分以磁铁矿或假象赤铁矿为主,而其矿体直接围岩可能有千枚岩、片岩、斜长角闪岩、变粒岩和片麻岩等,含矿变质岩系中很少有厚层石英岩和大理岩出现(程裕淇等,1994;沈承衍等,1995;赵一鸣等,2004;Clein, 2005)。以上对比说明,这两类矿床的原始沉积环境和金属物质来源是不一样的。

综上所述,国内外文献对钛矿床的成因分类中,未见有沉积变质型钛矿床的报道,进一步证明羊蹄子山钛矿床是世界上首例沉积变质型钛矿床。

3.2 成矿模式

根据上述矿床的地质地球化学特征,初步总结出如下成矿模式。

(1) 矿床形成于古元古代一个较狭小的海盆地中,环境缺氧(高度还原)。

(2) 海水深度至少大于 200 m,使海底沉积的细纹状矿石免遭上部海浪的破坏(Clein, 2005);矿石是化学沉积的产物。

(3) 矿石的主要物质如 Si, Ti, Fe 和 Mn 等可能是以热液喷流或喷气的方式进入深部海底的。

(4) 矿床形成后又遭受了中级区域变质作用。

(5) 在中生代,由于花岗岩的侵入,矿体局部遭受了热液改造或破坏。

3.3 综合找矿标志

(1) 控矿地层标志:古元古代二道凹群上部变质岩系——片岩-石英岩-大理岩-斜长角闪片岩组合。

(2) 直接赋矿围岩标志:绢云母石英片岩和石英

绢云母片岩,斑点状含石榴石(红柱石)的出现暗示可能有金红石富钛矿。

(3) 矿石矿物标志:矿石主要具条纹状或细纹状构造,组成钛铁矿石英岩或钛铁矿-金红石石英岩;地表矿石常遭受赤铁矿化和褐铁矿化。

(4) 物探标志:不同物探方法在已知矿体上部的试验表明,由于钛铁矿矿石具弱磁性,高精度磁法和高精度重力法对钛铁矿矿体均有一定的异常反应;但对以金红石为主的富矿体来说,只有高精度重力才有异常反应。

(5) 化探原生晕标志:Ti, Fe, Mn, V, Cr 等元素的组合异常。

3.4 找矿前景

沉积变质铁矿的分布一般具区域性,常成群成带出现,受一定变质地层的控制(程裕淇等,1994;赵一鸣等,2004,2005;Clein, 2005)。羊蹄子山作为沉积变质型钛矿床,其分布可能也会有此规律。控制该类矿床的古元古代二道凹群变质地层在内蒙古中部广泛分布,东起正蓝旗,西至包头附近,长达 500 km,宽约 100 km。据笔者统计,产于其中的“鞍山式”条带状石英磁铁矿(赤铁矿)点多达 72 处。看来,对这些铁矿点需要重新检查、重新认识,以了解其中部分矿点是否有属于钛矿床的可能。因为以往地质队在检查一些铁矿点时,一般只分析矿石的 TFe、S、P、SiO₂ 或 SFe 等组分,TiO₂ 通常不检测。此外,磨石山富钛矿体西部尚未控制,有望扩大。

虽然笔者对羊蹄子山钛矿床的地质特征和矿床成因有了初步认识,但这些认识是初步的,还有不少问题有待进一步研究解决,如矿床形成的古构造环境、矿石的选矿问题和矿床地球化学特征及其与区域上沉积变质型铁矿之间的关系等。对上述问题的研究,不仅对于该矿床的钛资源评价和矿床开发利用的可行性的确定十分重要,也可进一步对在内蒙古中东部(特别是元古宙二道凹群中)寻找该类钛铁矿床的前景指明方向。

致 谢 衷心感谢孙意同志对笔者考察羊蹄子山“铁矿”所作的盛情邀请;王宗起研究员和内蒙古自治区正蓝旗国土资源局史琴局长、赵建设主任对本项研究的开展和进行曾给予了大力支持和热情帮助。国家地质实验测试中心完成了矿区有关各项岩石的化学分析测试;电子探针分析由中国地质科学院矿产资源研究所余静协助完成;于长富同志完

成了全部探针光薄片的磨制;显微照片摄影由沙俊生同志协助完成。笔者对上述同志的大力支持和辛勤劳动表示衷心的感谢!

References

- Cheng Y Q, Zhao Y M and Lin W W. 1994. Iron ore deposits of China [A]. In: Song S H, ed. Mineral deposits of China [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 386 ~ 479 (in Chinese and English).
- Chinese Geological Information Academy. 1996. Overseas mineral resources [M]. Beijing: Seismological Press. 35p (in Chinese).
- Clein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFS) from around the World: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin [J]. American Mineralogist, 90 (10): 1473 ~ 1499.
- Edwards R and Atkinson K. 1986. Ore deposit geology and its influence on mineral exploration [M]. London: Chapman and Hall. 466p.
- Evans A M. 1980. An introduction to ore geology [M]. Translated by Feng Z Y. 1985. Beijing: Beijing University Press. 99 ~ 100 (in Chinese).
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, Birch W D, Gilbert M C, Grice J D, Hawthorne F C, Kato A, Kisch H T, Krivovichev V G, Linthout K, Laird J, Mandadino J A, Maresch M V, Nichel E H, Rock N M S, Schumacher J C, Smith D C, Stephenson N C N, Ungaretti L, Whittaker E J W and Youzhi G. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. Canad. Mineral., 35: 219 ~ 246.
- Liu L S, Xie L Z, Li Y S and Zhang Y X (Chief editor). 1996. Atlas of ferrous and nonferrous metals resources of China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 13 ~ 16 (in Chinese).
- Pan Q Y (Chief editor). 1999. Annals of geological mineral resources of the Inner Mongolia Autonomous Region [M]. Huhehot: Inner Mongolia People Press. 44 ~ 140 (in Chinese).
- Shen C Y, Wang S L, Chen S H and Zhang Z T. 1995. Ferrous metals resources of world [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 168 (in Chinese).
- Smirnov V I, Ginzburg A I, Grigoriev V M and Yakovlev G F. 1983. Studies of mineral deposits [M]. Moscow: Mir Publishers. 288p.
- Zhao Y M and Wu L S (Chief editor). 2004. Metallogeny of the major ore deposits in China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 13 ~ 62 (in Chinese).
- Zhao Y M, Wu L S and Deng S P (Chief editor). 2005. Map of iron ore resources of China and its explanation [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 55 (in Chinese).
- Во льфон Ф И и Дру жинин А В. 1982. Г лъвней шие типы рудных месторождений [M]. 2-е изд. М. Недра. 1 ~ 381 (in Russian).
- Смирнов В И. 1974. Рудные месторождения СССР [M]. Том 1, М. Недра. 221 ~ 236 (in Russian).

附中文参考文献

- 程裕淇, 赵一鸣, 林文蔚. 1994. 中国铁矿床 [A]. 见: 宋叔和, 主编. 中国矿床, 中册 [C]. 北京: 地质出版社. 386 ~ 479.
- Evans A M. 1980. 金属矿床导论 [M]. 冯钟燕, 译. 1985. 北京: 北京大学出版社. 99 ~ 100.
- 刘兰笙, 谢良珍, 李永森, 章雨旭, 主编. 1996. 中国黑色有色金属矿产图集 [M]. 北京: 地质出版社. 13 ~ 16.
- 潘启宇, 主编. 1999. 内蒙古自治区地质矿产志 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社. 44 ~ 140.
- 沈承衍, 王守伦, 陈森煌, 张祯堂. 1995. 世界黑色金属矿产资源 [M]. 北京: 地质出版社. 168 页.
- 赵一鸣, 吴良士, 主编. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社. 13 ~ 62.
- 赵一鸣, 吴良士, 邓颂平, 主编. 2005. 中国铁矿矿产资源图及其说明书 [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 55.
- 中国地质矿产信息院. 1996. 国外矿产资源 [M]. 北京: 地震出版社. 359 页.