文章编号:0258-7106(2008)04-0466-08

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*

赵一鸣,李大新,韩景仪,余 静
(中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037)

摘 要 羊蹄子山-磨石山钛矿床的钛矿物主要为锐钛矿、金红石和钛铁矿。锐钛矿化学成分的特点是 FeO 含量明显比金红石要低;主要 X 光粉晶谱线为 3.518(100)、2.377(14)和 1.667(11);晶胞参数 a(Å)=3.786,c(Å)=9.513;拉曼光谱谱线(cm^{-1})为 516、395、195 和 143。金红石的主要 X 光粉晶谱线为 3.250(100)、1.688(40)和 2.488(29);晶胞参数为 a(Å)=4.595,c(Å)=2.962;拉曼光谱谱线(cm^{-1})为 610 和 446。钛铁矿的成分特点是富锰贫镁,与攀西地区岩浆型钒钛磁铁矿矿床中的钛铁矿正好相反。所有上述钛(铁)氧化物矿物学特征,进一步说明该矿床是在中元古代在海底与基性火山活动有关的热水沉积后经区域变质和局部又遭受后期热液改造而成。

关键词 地质学;矿物学特征;锐钛矿;金红石;钛铁矿;羊蹄子山-磨石山;内蒙古
中图分类号:P618.47;P578.4$^+$7 **文献标志码**:A

Mineralogical characteristics of anatase, rutile and ilmenite in Yangtizashan-Moshishan titanium ore deposit, Inner Mongolia

ZHAO YiMing, LI DaXin, HAN JingYi and YU Jing
(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract

The Yangtizishan-Moshishan metamorphosed sedimentary titanium ore deposit, discovered and explored by the authors in recent years, is of an anatase-predominated new-genetic type. Chemical composition of anatase shows obviously lower contents of FeO than that of rutile. The anatase has main X-ray spectral lines of 3.518 (100), 2.377 (14), and 1.667(11), and cell parameters a(Å)=3.786 and c(Å)=9.513. Raman spectra of the anatase include strong bands at wavenumbers (cm^{-1}) 516, 395, 195 and 143. The associated rutile shows major X-ray spectral lines of 3.250 (100), 1.688 (40) and 2.488 (29), and has cell parameters a(Å)=4.595 and c(Å)=2.962. Their Raman spectra include strong bands at wavenumbers (cm^{-1}) 610 and 446. Electron microprobe analyses of the associated ilmenite show higher contents of MnO and lower MgO, while ilmenite occurring in the vanadium-titanium-magnetite ore deposits of magmatic type in Panzihua and Hongge has higher MgO contents and lower MnO contents. Mineralogical characteristics of all titanium (iron) oxide minerals further suggest that this titanium ore deposit was formed in a Precambrian marine hydrothermal sedimentary environment, and was genetically related to the marine basic volcanism but later subjected to intermediate regional metamorphism.

Key words: geology, mineralogical characteristics, anatase, rutile, ilmenite, Yangtizishan-Moshishan, Inner Mongolia

* 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 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 2008-02-10;改回日期 2008-05-08。张绮玲编辑。

http://www.kcdz.ac.cn/

内蒙古羊蹄子山-磨石山钛矿床是笔者近年来发现、勘查和研究的一个沉积变质型钛矿床，是一个新的钛矿床成因类型。随着研究工作的深入，发现原来被认为是金红石中的大部分应属于锐钛矿，从而使该矿床成为以锐钛矿为主的、更具特色的新类型钛矿床。这一认识的飞跃是在详细研究钛的氧化物矿物学后取得的。本文重点论述了锐钛矿、金红石和钛铁矿的矿物学特征。

1 矿床地质简况

羊蹄子山-磨石山钛矿床位于内蒙古正蓝旗西约 25 km 处。在大地构造上，矿床地处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。

矿体呈似层状、透镜状产于中元古代〔(1 751 ± 8) Ma〕二道凹群变质岩系中。赋矿围岩为绢云石英片岩、石英绢云片岩、变质石英(粉)砂岩、斜长角闪岩和角闪岩。矿体和围岩呈整合接触关系。矿区内有 2 个含矿层位，即南部的羊蹄子山矿带和北部的磨石山矿带，两地相距约 2 km。

矿区构造总体上是一个向北北西(约 350°)倾的单斜层，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〔(118 ± 3) Ma〕花岗岩呈岩株状侵入，使矿体局部遭到热液改造(赵一鸣等，2006)。

矿石主要分 2 类：以锐钛矿为主的富矿石(TiO_2 含量 3%～15%)和贫矿石(TiO_2 含量 1.2%～3%)。富矿石一般呈细纹状构造，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相间组成。钛矿物除锐钛矿外，还经常伴生一定量金红石和钛铁矿。经热液改造后的富矿石中还有叶片状赤铁矿(镜铁矿)出现，矿石构造变为网脉状或细脉浸染状。矿石中的脉石矿物主要为石英，含量一般在 60%～75%之间，其次是铁直闪石、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。在贫矿石中，钛矿物也以锐钛矿为主，伴生少量金红石和钛铁矿，但它们大多呈浸染状或条痕状不均匀地分布，脉石矿物与富矿相同。

2 样品分析方法和实验条件

对钛矿物主要采用以下 3 种分析方法。

电子探针分析，在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成。仪器型号：JEOL JXA 8800R EPMA；实验条件：加速电压 20 kV，束流 2×10^{-8}A，电子束斑直径 1 μm，测试精度 0.0n%～0.n%。

X 射线衍射分析，在中国地质科学院矿产资源研究所 X 光实验室完成，采用的衍射仪为 Bruker D8 Advance Diffractometer，X 光源为铜靶/40 kV/4mA；探测器是锂漂移硅固体探测器；狭缝：DS = SS = 1 mm，RS = 0.2 mm；连续扫描，扫描速度：2°/s，采样间隔 0.01°。

激光拉曼光谱测试，在中国地质科学院地质研究所拉曼光谱实验室进行，采用 RM1000 仪器，光栅连续扩展扫描方式，激光器波长 514 nm，分辨为 1 cm^{-1}；光栅 18 001/nm，狭缝 100 μm，扫描时间：10 s。

3 钛(铁)氧化物特征分述

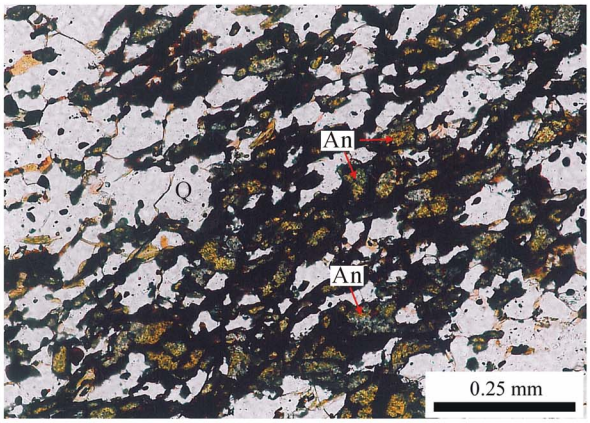
3.1 锐钛矿

锐钛矿的化学组成是 TiO_2，是金红石的同质多象，四方晶系。羊蹄子山和磨石山的锐钛矿由于矿物颗度太细(0.01～0.1 mm)，在手标本和放大镜下，无法辨认矿物，只能在较高倍的偏光显微镜下才能识别，开始误认为是金红石，电子探针分析的结果显示 TiO_2 含量多大于 98%。随着研究工作的深入，该矿物的 X 光粉晶衍射分析结果和拉曼光谱谱线均提示有大量锐钛矿的存在。笔者对探针片中颗粒较大的“金红石”在高倍显微镜下作系统细致的光性(光率体)测定，进一步证实有相当部分颗粒为一轴晶负光性，属锐钛矿，但还有一部分颗粒为一轴晶正光性，是金红石。

锐钛矿在单偏光下为褐色、黄褐色或棕色，双折射率高，与金红石无法区别，但它为一轴晶负光性，以此可与金红石相区分。绝大多数锐钛矿呈半自形粒状晶，且常组成细纹状、小透镜状集合体(照片 1、2、3)；少数呈星散状晶体(照片 4)分布于变质石英砂岩或片岩中。只有少数晶体自形程度稍好，在高倍偏光显微镜下依稀能看出其锥状晶体的切面。

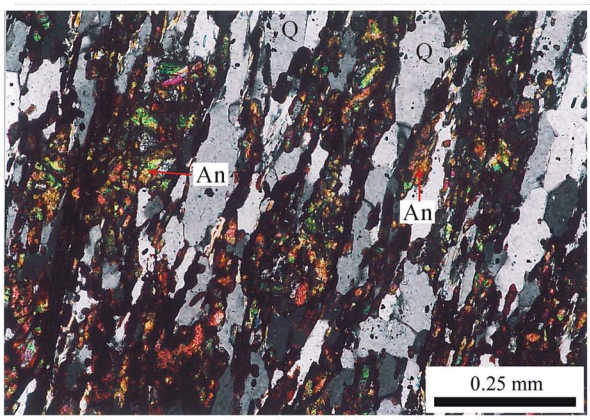
锐钛矿的化学成分与金红石类似(表 1、2)，TiO_2 含量多在 98%～99%之间，稍有不同的是：锐钛矿的 FeO 含量低(大多数<0.4%)。

X 光粉晶分析的样品是选矿后锐钛矿和金红石较富集的混合物，其中锐钛矿主要粉晶谱线为：3.518(100)，2.3773(14)，1.6671(11)，1.6999(8)；



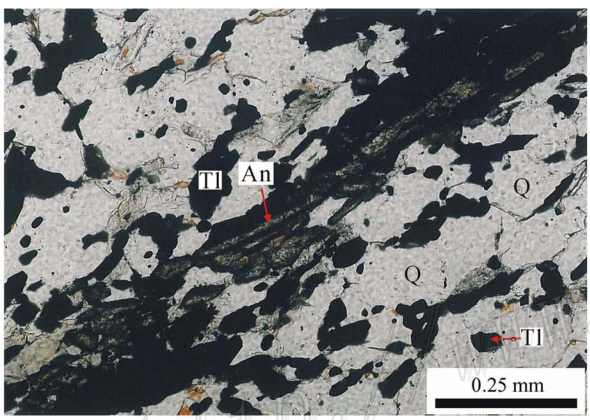
照片 1 锐钛矿富矿：An—锐钛矿；黑色矿物为钛铁矿；Q—石英。单偏光

Photo 1 Anatase rich ore: An—anatase, Q—quartz, plainlight



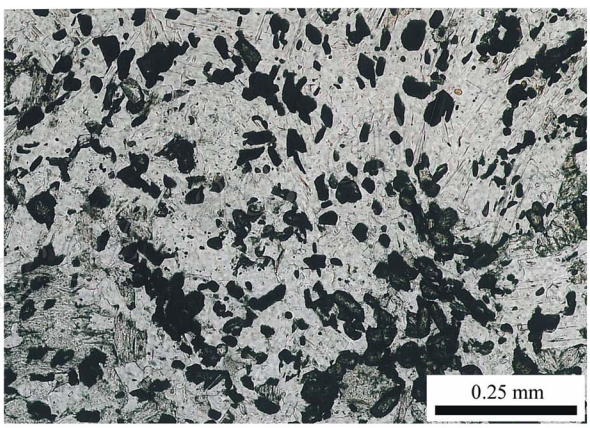
照片 2 锐钛矿富矿：An—锐钛矿，为红棕色矿物；黑色矿物为钛铁矿；Q—石英。正交偏光

Photo 2 Anatase rich ore: An—anatase, black-ilmenite, Q—quartz, crossed polars



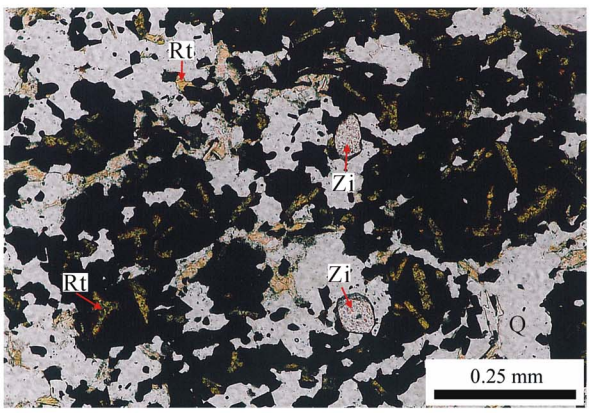
照片 3 钛铁矿-锐钛矿富矿：An—锐钛矿；Tl—钛铁矿；Q—石英。单偏光

Photo 3 Ilmenite-anatase rich ore: An—anatase, Tl—ilmenite, Q—quartz, plainlight



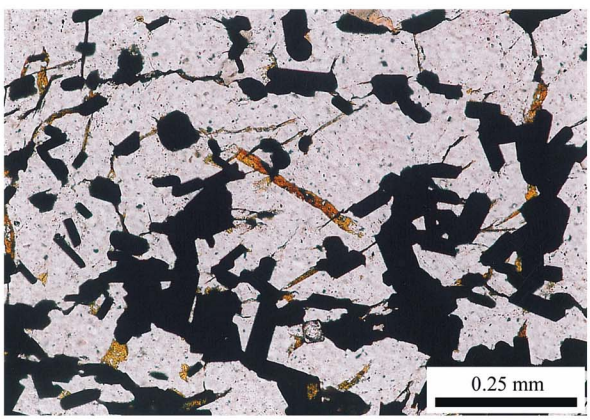
照片 4 浸染状锐钛矿（褐色）贫矿：黑色矿物为钛铁矿，浅黄色的为绢云母，石英呈白色。单偏光

Photo 4 Disseminated anatase (brown) lean ore: black-ilmonite, pale yellow-sericite, white-quartz, plainlight



照片 5 金红石富矿：棕色柱状为金红石；黑色矿物为赤铁矿和钛铁矿；Q—石英；Zi—锆石。单偏光

Photo 5 Rutile (brown columnar) rich ore: black-hematite and ilimenite, Q—quartz, Zi—zircon, plainlight



照片 6 钛铁矿（黑色板状）矿石：石英呈白色，突起高者为锆石。单偏光

Photo 6 Ilmenite (black platy) ore: white-quartz, white convex small grains-zircon, plainlight

与锐钛矿的粉晶衍射标准数据十分接近(表 3)。计算所得的矿物晶胞参数为：a(Å) = 3.78589，c(Å) = 9.51301，也和标准数据近似(表 4)。

锐钛矿拉曼光谱分析图中的谱线(cm^{-1})主要为 516 (517)，395(396)，195(196)和 143(144)，见图 1。

3.2　金红石

金红石的化学组成也是 TiO_2，它和锐钛矿、板钛矿是同质异象，四方晶系。在单偏光下矿物为褐色、棕色、甚至黑色，一轴晶正光性，柱状晶(照片 5)，常和锐钛矿、钛铁矿伴生，粒度与锐钛矿相似。电子探针分析结果，TiO_2 含量大于 98%。但与锐钛矿不同的是金红的 FeO 含量稍高(表 2)，一般 > 0.37% (0.37% ~ 1.64%)。

X 光粉晶衍射分析结果，其主要粉晶谱线为：3.2498 (100)，1.6878 (40)，2.4876 (29)，2.1876 (16)；与金红石的粉晶衍射标准数据十分接近(图 1，表 5)。计算所得的矿物晶胞参数为：a(Å) = 4.59469，c(Å) = 2.96171，也与标准数据相近。金红石拉曼光谱分析图中的谱线(cm^{-1})主要为：608 ~ 611，445 ~ 447，138 ~ 146；与锐钛矿的谱线完全不同(图 2)。

表 1　羊蹄子山-磨石山矿区锐钛矿电子探针代表性分析结果〔w(B)/%〕

Table 1　Representative electron microprobe analyses of anatase from the Yangtizishan-Moshishan deposit〔w(B)/%〕

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	总和
Ti-10	0.63	98.63	0.27	0.05	0.22	0.00	0.03	0.04	0.02	0.09	99.98
YT-41-3	0.06	99.10	0.01	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	99.29
YT26-4-2	0.06	98.89	0.00	0.02	0.20	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	99.20
YT26-4-3	0.01	98.70	0.07	0.11	0.24	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	99.19
MS-9	0.04	98.61	0.01	0.04	0.09	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	98.84
MS-27	0.07	98.37	0.03	0.10	0.19	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	98.79
MS-29	0.18	98.14	0.02	0.06	0.05	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	98.47
C14-2-1	0.04	98.53	0.02	0.45	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.20
19-1	0.06	98.64	0.09	0.21	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.19
C9-2	0.06	99.14	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.30
C12-4	0.65	98.46	0.13	0.08	0.14	0.02	0.00	0.25	0.01	0.01	99.75
K1-6-1	0.09	99.05	0.01	0.02	0.24	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	99.42
K6-12	0.01	98.79	0.03	0.07	0.17	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	99.13

注：FeO* 为全铁。

表 2　羊蹄子山-磨石山矿区金红石电子探针代表性分析结果〔w(B)/%〕

Table 2　Representative electron microprobe analyses of rutiles in the Yangtizishan-Moshishan deposit〔w(B)/%〕

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	总和
Ti-1	0.27	98.49	0.02	0.02	0.46	0.02	0.01	0.06	0.04	0.02	99.41
YT41-1	0.11	98.10	0.04	0.09	0.52	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	98.87
YT41-2	0.03	99.42	0.03	0.02	0.37	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	99.88
YT26-4-1	0.10	98.19	0.00	0.18	0.63	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	99.19
II-1-1	0.53	99.41	0.03	0.06	0.50	0.03	0.03	0.06	0.06	0.00	100.71
II-1-2	0.05	99.61	0.02	0.01	0.45	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	100.19
MS-10	0.04	98.06	0.01	0.19	0.58	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	98.93
K1-6-2	0.08	98.57	0.03	0.08	0.43	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	99.21
C14-2-1	0.10	98.70	0.02	0.05	0.45	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	99.36
C14-2-2	0.06	98.86	0.00	0.13	0.60	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	99.67
K6-17	0.35	97.27	0.30	0.00	1.40	0.04	0.01	0.05	0.26	0.03	99.71
C9-2-1	0.56	97.42	0.44	0.04	1.64	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	100.15
C9-2-2	0.82	97.68	0.23	0.03	0.79	0.03	0.04	0.02	0.00	0.01	99.65

注：FeO* 为全铁。

http://www.kcdz.ac.cn

表 3 锐钛矿的 X 射线粉晶衍射数据

Table 3 X-ray powder diffraction data of anatase

MTC-2			锐钛矿的标准数据*		
d(Å)	I/I_0	$h\ k\ l$	d(Å)	I/I_0	$h\ k\ l$
3.5180	100	1 0 1	3.5200	100	1 0 1
2.4300	6	1 0 3	2.4310	10	1 0 3
2.3773	14	0 0 4	2.3780	20	0 0 4
2.3322	4	1 1 2	2.3320	10	1 1 2
1.8927	21	2 0 0	1.8920	35	2 0 0
1.6999	8	1 0 5	1.6999	20	1 0 5
1.6671	11	2 1 1	1.6665	20	2 1 1
1.4937	2	2 1 3	1.4930	4	2 1 3
1.4810	11	2 0 4	1.4808	14	2 0 4
1.3636	3	1 1 6	1.3641	6	1 1 6
1.3388	2	2 2 0	1.3378	6	2 2 0
1.2648	4	2 1 5	1.2649	10	2 1 5
1.2510	2	3 0 1	1.2509	4	3 0 1
1.1665	1	2 2 4	1.1664	6	2 2 4
1.1612	1	3 1 2	1.1608	4	3 1 2

* 标准数据为 JCPDS：21-1272。

表 4 锐钛矿和金红石的晶胞参数

Table 4 The lattice parameters for anatase and rutile

	锐钛矿 MTC2-1	锐钛矿 标准数据	金红石 MTC2-2	金红石 标准数据
a(Å)	3.7859	3.785	4.5947	4.589
c(Å)	9.5130	9.513	2.9617	2.954
资料来源	本文	JCPDS 21-1273	本文	JCPDS 73-1765

表 5 金红石的 X 射线粉晶衍射数据

Table 5 X-ray powder diffraction data of rutile

金红石的标准数据*			MTC-2	
d(Å)	I/I_0	$h\ k\ l$	d(Å)	I/I_0
3.2449	100	1 1 0	3.2498	100
2.4838	46	1 0 1	2.4876	29
2.2945	6	2 0 0	2.2969	8
2.1844	17	1 1 1	2.1876	16
2.0522	5	2 1 0	2.0545	6
1.6854	45	2 1 1	1.6878	40
1.6224	14	2 2 0	1.6250	13
1.4770	6	0 0 2	1.4808	7
1.4511	6	3 1 0	1.4529	7
1.3583	13	3 0 1	1.3608	12
1.3442	7	1 1 2	1.3465	4
1.0922	4	2 2 2	1.0939	3

* 标准数据为 JCPDS：73-1765。

3.3 钛铁矿

钛铁矿($TiFeO_3$)是锐钛矿和金红石经常伴生的钛铁氧化物。它在矿石中的含量一般为1/6～1/3，局部少于 1/10 或大于 1/2。钛铁矿的晶形多为半自形粒状、厚板状(照片 6)，粒径与锐钛矿、金红石的粒径相似，大多为 0.02 ～ 0.1 mm。电子探针分析结果：$w(TiO_2)$ 52.22%～56.72%，$w(FeO)$ 40.17%～45.87%，$w(MnO)$ 1.36%～5.38%，其

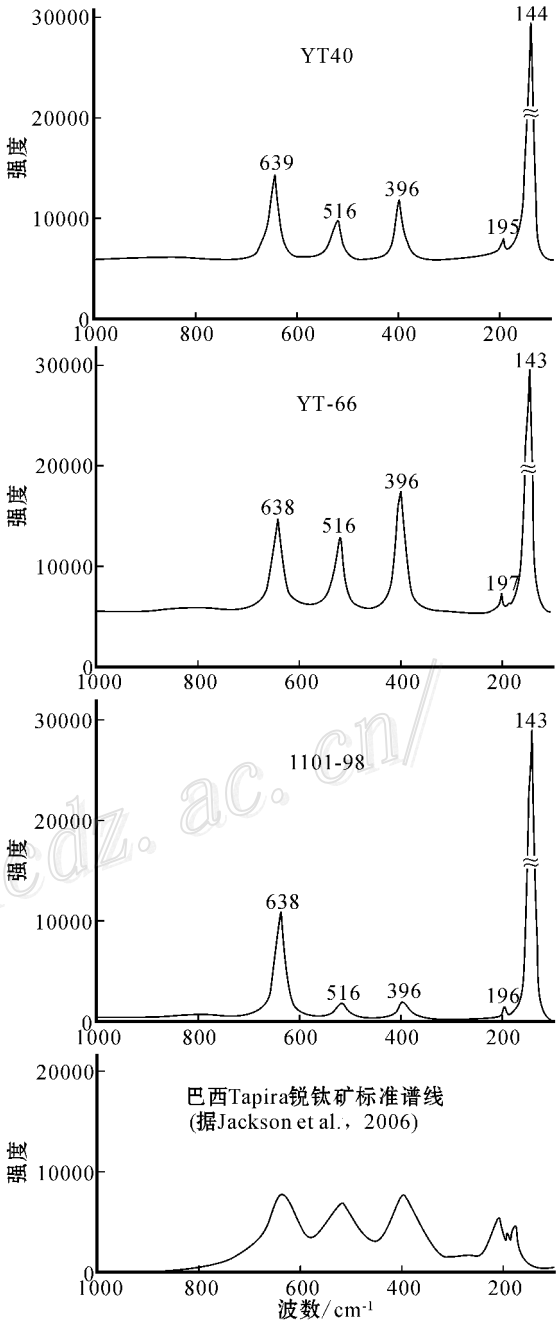


图 1 羊蹄子山-磨石山矿区锐钛矿拉曼光谱谱线图(YT40，YT66 和 1101-98 为样品号)

Fig. 1 Raman spectra of anatases from the Yangtizishan-Moshishan deposit (YT40, YT66 and 1101-98 are sample numbers)

http://www.kcdz.ac.cn/

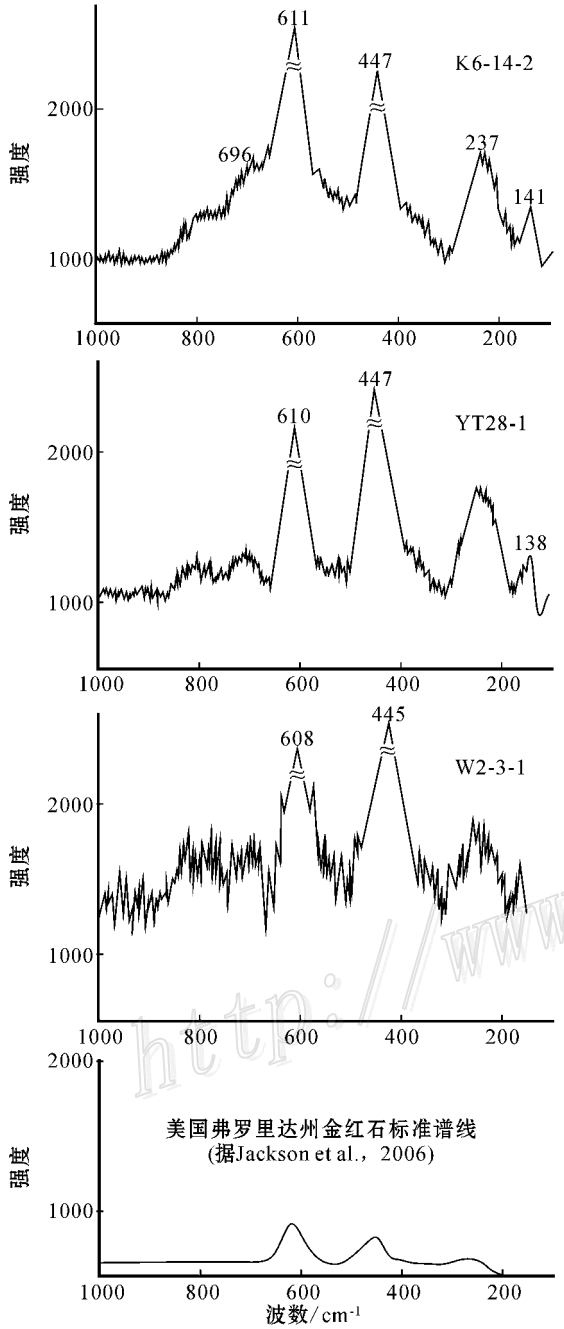


图 2　羊蹄子山-磨石山矿区金红石拉曼光谱谱线图
(K6-14-2,YT28-1 和 W2-3-1 为样品号)

Fig. 2　Raman specta of rutile from the Yangtizishan-Moshishan deposit(K6-14-2, YT28-1 and W2-3-1 are sample numbers)

他组分含量都很低(表 6)。

如果把本矿区钛铁矿的分析结果和攀西地区攀枝花、红格等岩浆型钒钛磁铁矿矿石中钛铁矿的成分❶作对比,两者之间有较大差别,主要表现为攀西地区岩浆型钒钛磁铁矿中的钛铁矿富镁贫锰,MgO 的含量可高达 1.15%～8.35%,而羊蹄子山-磨石山矿区的钛铁矿富锰贫镁(图 3),MgO 含量只有 0～0.5%,说明它们生成环境不一样,前者是基性、超基性岩分异作用的产物;而后者虽也与海底基性火山岩类有成因联系,但是在海底热水沉积后又经区域变质作用。

4　讨　论

在金红石、锐钛矿、板钛矿 3 个同质异象矿物中,金红石在自然界分布较广,而锐钛矿比较少见,这也说明了由金红石、板钛矿至锐钛矿,结构的稳定性是递减的(王濮等,1982)。所以,金红石矿床在世界上均有一定的分布(Force, 1991;赵一鸣,2008);但以前发现的锐钛矿矿床只有在巴西 Tapira 等矿区,它是富含钙钛矿和榍石的碱性辉石岩经深度化作用交代而成(Turner, 1986)。

金红石一般是在高温高压条件下生成的,所以在变质程度很高的榴辉岩型矿床中钛的氧化物主要是金红石,钛铁矿很少见(Force, 1991;程振香,1990)。锐钛矿则是在较低温的条件下生成(Венчелл et al.,1953),碱性岩风化型的巴西 Tapira 超大型锐钛矿矿床就是例证。内蒙古羊蹄子山-磨

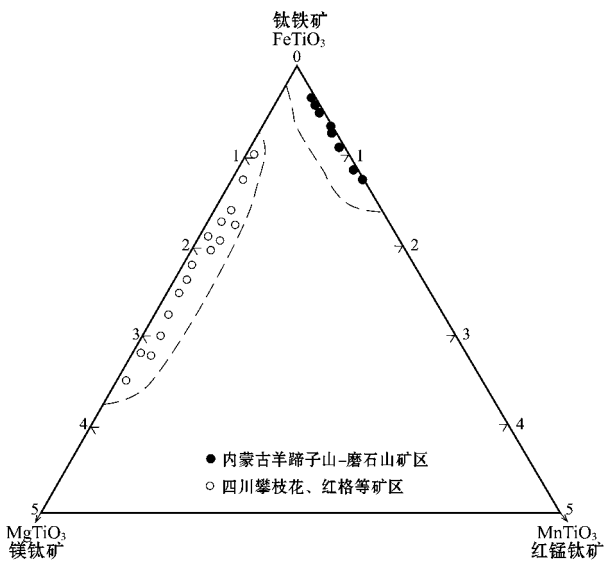


图 3　钛铁矿的成分三角图

Fig. 3　Compositional triangular diagram of the ilmenites

❶ 四川省地质局攀枝花地质综合研究队、中国地质科学院矿床地质研究所. 1980. 攀枝花-西昌地区钒钛磁铁矿共生矿物成分研究报告.

表 6 钛铁矿代表性电子探针分析〔w(B)/%〕

Table 6 Representative electron microprobe analyses of ilmenites〔w(B)/%〕

	Ti-1	Ti4-2	Ti-5	Ti6-1	Ti7-2	Ti9-2	II-1	Ti-4	K1-8
SiO_2	0.06	0.02	0.51	0.08	0.06	0.04	0.10	0.00	0.03
TiO_2	56.72	53.48	53.23	53.57	54.00	53.65	54.28	54.56	53.34
Al_2O_3	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02
Cr_2O_3	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	0.10	0.04	0.00
FeO*	40.17	41.14	44.95	41.23	40.87	42.71	43.91	41.70	45.87
MnO	2.86	4.97	1.54	5.38	4.04	3.22	1.48	3.14	1.36
MgO	0.00	0.02	0.03	0.00	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Na_2O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.02	0.00
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总和	99.86	99.95	100.29	100.30	99.04	99.67	99.91	99.48	100.63
氧原子为 3 时的阳离子系数									
Si	0.002	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.000	0.001
Ti	1.053	1.012	1.008	1.009	1.023	1.015	1.018	1.032	1.004
Al	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000
Fe	0.829	0.868	0.947	0.864	0.861	0.898	0.916	0.868	0.960
Mn	0.060	0.106	0.033	0.114	0.086	0.069	0.031	0.066	0.029
Mg	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总和	1.946	1.987	1.987	1.989	1.975	1.985	1.976	1.967	1.995

注：FeO* 为全铁。

石山钛矿床中大量锐钛矿的生成，说明在中元古代海底海水温度比现代海水温度要高，大约在 70～80℃之间(Rebert et al.，2006)。但只形成锐钛矿。现代洋中脊黑烟囱热液喷口上方海水的温度，也不过 400℃左右(Rona 等，1989)，侯增谦等(2003)报导，冲绳海槽 Jade 区高温黑烟囱流体温度范围为 300～400℃，通常稳定在 350℃长达数年之久。即使是具备上述水温条件，也尚未达到大量金红石生成的温度环境。

人工合成试验表明，锐钛矿向金红石相转变的温度是 700～800℃ (Wetchakun et al.，2008)。由此推断，本区二道凹群中等(偏低)区域变质作用的温度均未能达到足以使锐钛矿转变为金红石的条件。因此，锐钛矿的主要部分，特别是锐钛矿条纹和小透镜体中的锐钛矿集合体仍得以保存下来。区域变质作用只能使部分锐钛矿转变为金红石，其中有少数锐钛矿虽已被金红石交代，使其晶形变为长柱状，光性也为一轴晶正，但拉曼光谱分析揭示其结构尚未完全变化，保留下锐钛矿的结构。与此相反，东秦岭地区的金红石矿产出的岩石是斜长角闪岩和角闪岩类，苏鲁地区超高压变质带中的含金红石榴辉岩，它们的原岩主要是基性侵入岩或火山岩，其生成温度很高。这和羊蹄子山-磨石山以锐钛矿为主的钛矿床的生成环境完全不同。

5 结 语

(1) 羊蹄子山-磨石山钛矿床矿石中钛(铁)氧化物矿物主要为锐钛矿，次为金红石和钛铁矿，脉石矿物以石英为主，含少量黑云母，直闪石和绿泥石、绢云母、石榴子石等。

(2) 锐钛矿以其 FeO 含量低于 0.37%区别于金红石；重要粉晶谱线为 3.518(100)、2.377(14)、1.667(11)；晶胞参数 a(Å)=3.786，c(Å)=9.513，拉曼光谱谱线(cm^{-1})为 516、395、195 和 143。

(3) 金红石的 FeO 含量高于 0.37%(0.37%～1.40%)，主要粉晶谱线为 3.520(100)、1.688(40)和 2.488(29)；晶胞参数为：a(Å)=4.595，c(Å)=2.962；拉曼光谱谱线(cm^{-1})为 610 和 446。

(4) 钛铁矿的最大特点是富锰贫镁，攀西地区岩浆型钒钛磁铁矿床中的钛铁矿是富镁贫锰，说明两者生成条件不同。

http://www.kcdz.ac.cn

(5) 矿区内大量锐钛矿的出现，主要反映在中元古代在海底与基性火山活动有关的热水沉积的地质环境，在区域变质阶段，有一部分锐钛矿转变为金红石，但由于温度、压力条件不够，致使大部分锐钛矿得以保存下来。

志 谢 王裕先研究员提供了选矿所得相对较纯的金红石-锐钛矿精矿，为矿物 X 光粉晶衍射分析创造了有利条件；电子探针光薄片磨制由于长富同志完成，拉曼光谱分析由中国地质科学院地质研究所闫玲同志协助完成，显微照相由沙俊生同志协助完成，作者对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

References

Cheng Z X. 1990. Basic characteristics of the Donghai eclogite type rutile deposit in Jiagnsu province [J]. Mineral Deposits, 9(1): 86-90.

Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1962. Rock-forming Minerals. Vol. 5. Non-silicates[M]. Longmans. 371p.

Hou Z Q, Han F, Xia L Q, Zhang Q L, Qu X M, Li Z Q, Bie F L, Wang L Q, Yu J J and Tang S H. 2003. Hydrothermal systems and metallogeny on the modern and ancient sea-floor—Case study on some VMS deposits [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-423 (in Chinese with English abstract).

Jackson J C, Horton J W, Chou I M, and Belkin E. 2006. A shock-induced polymorph of anatase and rutile from the Chesapeake Bay impact structure, Virginia, U. S. A[J]. American Mineralogist, 91: 604-608.

Rebert F and Chaussidon M. 2006. A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts[J]. Nature, 443: 969-972.

Rona P A, Klinkhammer G, Nelsen T A, Trefry J H and Elderfield H. 1996. Black smokers, massive fulfides and vent biota at the Mid-Atlantic Ridge [J]. Nature, 321: 33-37.

Turner R. 1986. Brazilian titanium[J]. Engineering and Mining Journel, 187: 40-42.

Wetchakun N and Phanichphant S. 2008. Effect of temperature on the degree of anatase-rutile transformation in titanium dioxide nanoparticles synthesized by the modified sol-gel method [J]. Current Applied Physics, 8: 343-346.

Wang P, Pan Z L and Weng L B. 1982. Systematic Mineralogy [M]. Beijing: Geol Pub. House. 408-573(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 abstract).

Zhao Y M. 2008. Genetic types, distribution, and geological characteristics of rutile deposits [J]. Mineral Deposits, 27 (4): 520-530(in Chinese with English abstract).

Винчелл А Н, Винчелл Г. 1953. Оптическая Минералогия [M]. Москва: Иэд. Иностранной. Литературы. 1-530.

附中文参考文献

程振香. 1990. 江苏东海榴辉岩型金红石矿床基本特征[J]. 矿床地质, 9(1): 86-90.

侯增谦, 韩 发, 夏林圻, 张绮玲, 曲晓明, 李振清, 别风雷, 王立全, 余金杰, 唐绍华. 2003. 现代与古代海底热水成矿作用——以若干火山成因块状硫化物矿床为例[M]. 北京 地质出版社. 1-423.

王 濮, 潘兆橹, 翁玲宝, 等. 1982. 系统矿物学[M]. 北京 地质出版社, 408-573.

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, 35(2): 113-122.

赵一鸣. 2008. 金红石矿床的类型、分布及其主要地质特征[J]. 矿床地质, 27(4): 520-530.

http://www.kcdz.ac.cn/