

文章编号 1258-7106 (2008) 04-0474-09

内蒙古羊蹄子山-磨石山锐钛矿矿床斜长角闪岩类的岩石学和地球化学特征^{*}

李大新, 赵一鸣, 王佩华, 丰成友

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 内蒙古羊蹄子山-磨石山是本项目组近几年来发现和勘查研究的一个以锐钛矿为主的沉积变质型钛矿床, 是钛矿床的一个新的成因类型。矿体产于中元古代二道凹群变质岩[(1 751 ± 8) Ma] 中, 其围岩为石英绢云片岩、绢云石英片岩、变质(粉)砂岩和斜长角闪岩等。矿石实际上是富含锐钛矿等钛矿物和直闪石、黑云母的变质石英(粉)砂岩和片岩。斜长角闪岩是矿体的重要围岩之一, 多呈似层状、透镜状产出, 与矿体在时、空、成因上有密切关系。按矿物组合特征, 斜长角闪岩可分为角闪岩、斜长角闪岩和斜长岩等 3 类。恢复其原岩, 大致相当于苦橄玄武岩、玄武岩、玄武安山岩和粗面质安山岩。岩石化学和微量元素地球化学特征表明, 它们主要属于活动大陆边缘岛弧和洋脊过渡带的拉班玄武岩类, 而且岩石分异演化较彻底。矿体和斜长角闪岩都是海底基性火山活动的产物, 后又遭受了区域变质作用。

关键词 地球化学 岩石学 斜长角闪岩 锐钛矿矿床 羊蹄子山-磨石山 内蒙古

中图分类号: P618.47

文献标志码: A

Petrology and geochemical characteristics of amphibolites in Yangtizishan-Moshishan anatase ore deposit, Inner Mongolia

LI DaXing, ZHAO YiMing, WANG PeiHua and FENG ChengYou

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract

The Yangtizishan-Moshishan sedimentary metamorphosed titanium ore deposit, discovered and explored by the authors in recent years, is of an anatase-dominated new genetic type. Ore bodies occur in metamorphic rocks of Middle Proterozoic Erdaowa Group (1 751 ± 8 Ma), consisting of sericite-quartz schist, metamorphic quartz sandstone (siltstone), and amphibolite. The ores are actually anatase-bearing metamorphosed sandstone (siltstone) or schist. According to their mineral associations, three types of amphibolites may be recognized, i. e., amphibolite, plagioclase-amphibolite, and plagioclasite. Recovery of the amphibolites reveals that the initial rocks are picrite-basalt, basalt, basaltic andesite, and trachyte andesite. Petrochemical and trace element geochemical data suggest that the tectonic setting of these rocks belongs to the island arc or the transitional belt between island arc and oceanic ridge. There exists rather thorough differentiation of the rocks. Anatase ore and amphibolites were all produced by oceanic volcanism, but later subjected to regional metamorphism of the intermediate degree.

Key word: geochemistry, petrology, amphibolites, anatase ore deposit, Yangtizishan-Moshishan, Inner Mongolia

^{*} 本文得到国家自然科学基金(40773038)、内蒙古自治区地质勘查项目(05-1-TK01)及中国地质科学院矿产资源研究所的共同资助

第一作者简介 李大新,男,1952 年生,副研究员,主要从事金属矿床地质、地球化学研究。

收稿日期 2008-05-07; 改回日期 2008-06-16。许德煊编辑。

内蒙古羊蹄子山-磨石山是本项目组近几年来发现和勘查研究的一个以锐钛矿为主的沉积变质型矿床,是钛矿床的一个新的成因类型。该矿床的含矿岩石虽为变质石英(粉)砂岩和片岩,但钻孔揭示其围岩中有大量斜长角闪岩类岩石产出,后者与矿体在时、空、成因上有着十分密切的关系。因此,研究斜长角闪岩类的岩石学、岩石化学和微量元素地球化学特征,探讨其生成的构造环境及与成矿的关系,就显得非常重要。

1 矿床地质简况

羊蹄子山-磨石山矿床位于内蒙古正蓝旗西约 25 km 处,是本项目组在 2004 年底发现的。通过几年来的预查、普查评价和研究,已证实其为一大型以锐钛矿为主的新类型钛矿床,其中,富矿占有一定比例(赵一鸣等,2006,2008)。

在大地构造上,该矿区位于华北地台北缘内蒙古地轴中东段侏罗纪火山盆地的局部隆起区。

其矿体呈似层状、透镜状产于中元古代二道凹群变质岩系[(1 751 ± 8) Ma]中(李大新等,2008)。矿体的围岩主要为绢云石英片岩、石英绢云片岩、变质石英(粉)砂岩和斜长角闪岩类。矿体与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 NNW(350°左右)倾的单斜构造,倾角一般为 55°~70°,局部有倒转现象。在矿区中部和西南部有燕山晚期花岗岩[(118 ± 3) Ma]呈岩株状侵入(李大新等,2008),使矿体局部遭受热液改造。

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,以含锐钛矿为主。富矿石中含有一定量的直闪石、黑云母和石榴子石等含铁硅酸盐矿物,局部含较多的赤铁矿,其 TiO_2 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与以石英为主的条纹(含浸染状钛矿物)相间所组成。经热液改造后,富矿石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。贫矿石中的锐钛矿大多呈浸染状不均匀分布,部分呈条痕状,其品位($w(\text{TiO}_2)$)一般为 1.2%~3%。

作为重要围岩的斜长角闪岩,其中不含锐钛矿和金红石,仅含少量钛铁矿,局部含有榍石。因此,

斜长角闪岩未能构成矿体。

2 样品测试

样品的测试,除 MS-11 和 YC-17 号样品由国家岩矿测试中心完成外,其余样品都由核工业北京地质研究院分析测试中心完成。

样品的硅酸盐岩石化学分析,用 X 射线荧光光谱法测定其主、次元素,测试仪器的型号是飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪。样品的微量元素和稀土元素测定用的是 DV/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(JCP-MS)法,测试仪器的型号为 Finnigan MAT 的 HR-ICP-MS(Element I)质谱仪。

3 斜长角闪岩类岩石的分布和规模

斜长角闪岩类岩石在羊蹄子山-磨石山矿区的二道凹群变质岩地层中分布较广,在各岩性组均有产出,呈似层状、透镜状,是矿体的重要围岩之一。其中,以磨石山矿带矿体的上、下盘内最发育,部分已成为矿体的夹层(图 1)。该类岩石与矿体及其他围岩总体上呈整合接触关系,局部呈不整合接触。

从规模上看,以羊蹄子山南坡的斜长角闪岩类最大,其长度超过 1 km,厚约 50~60 m,其余的斜长角闪岩类,厚度大多介于 1~2 m 至 20 m 之间。在磨石山 7 线 ZK701 孔和 9 线 ZK901 孔中,斜长角闪岩多达 10 层;在 4 线 ZK402 孔和 0 线 ZK002 孔中,各有 8 层;在 8 线 ZK6 孔中,也有 6 层。由此可见,这类岩石在磨石山矿带分布之广和出现频率之高。

4 岩石分类和岩石学特征

在羊蹄子山-磨石山矿区内,斜长角闪岩类的岩性多种多样,归纳起来,大致可分为 3 类,即斜长角闪岩,角闪(黑云)斜长岩和角闪岩,以斜长角闪岩为主。

斜长角闪岩或斜长角闪片岩 岩石外表为绿灰色,致密块状构造,部分为片状构造,粒状变晶结构(图 2A 和 2B)。主要由角闪石和斜长石组成,角闪石含量一般大于 60%,斜长石为 20%~35%,含少量石英和黑云母。副矿物有钛铁矿、榍石和磷灰石。常有晚期方解石细脉穿插。

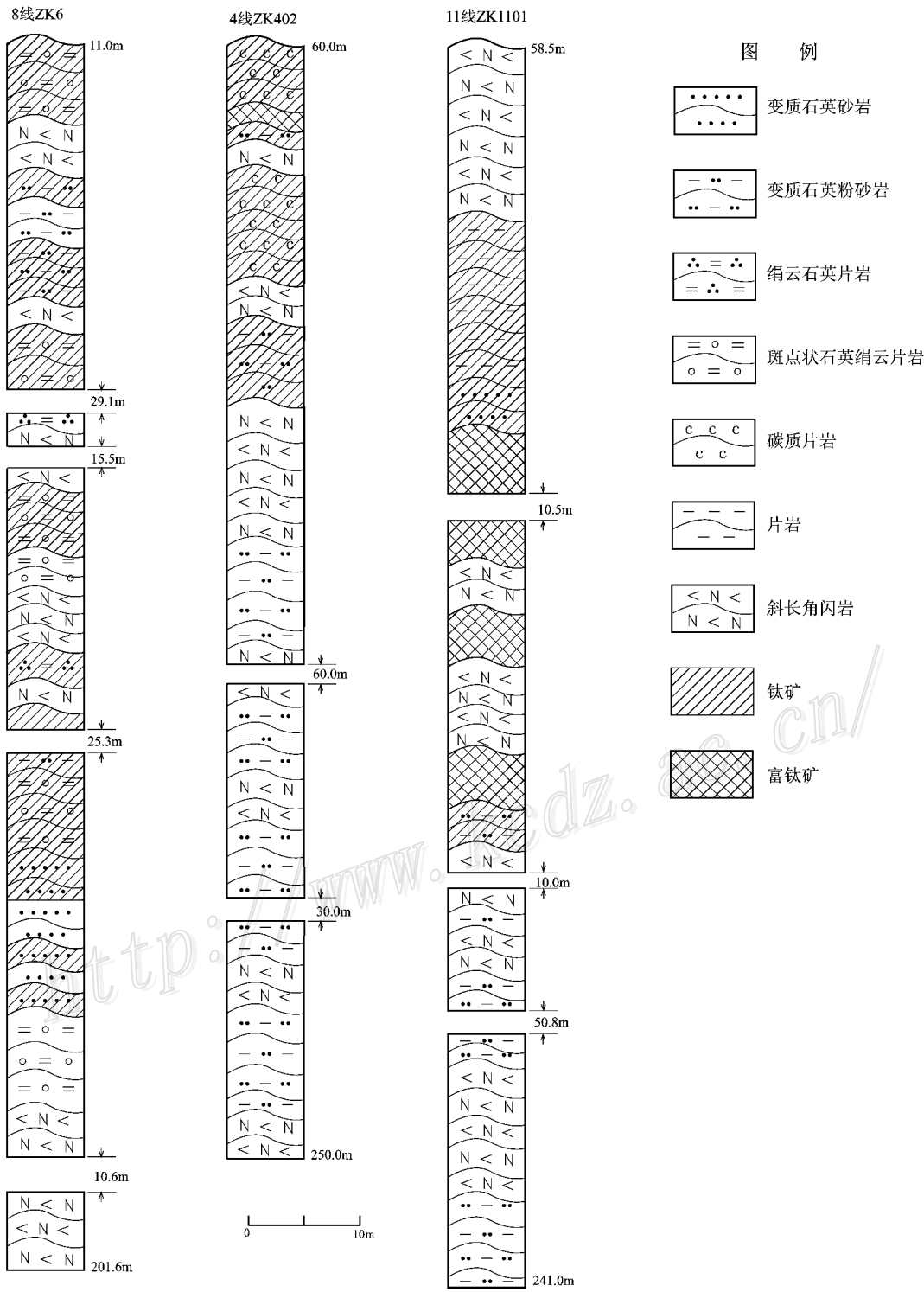


图 1 磨石山矿带反映斜长角闪岩类产出的钻孔地质柱状图

Fig. 1 Geological columns of drill holes, showing modes of occurrences of amphibolites in Moshishan ore belt

角闪斜长(片)岩或黑云斜长(片)岩 岩石外表为浅绿灰色,致密块状构造,片状构造(图 2C 和 2D) 常见于厚层角闪斜长岩的边缘部位,有时可见变余 斑状结构。矿物成分以斜长石为主,其含量可达 60%~90%,含一定量(10%~25%)角闪石或黑云 母,有少量石英以及微量榍石、钛铁矿、磷灰石。晚

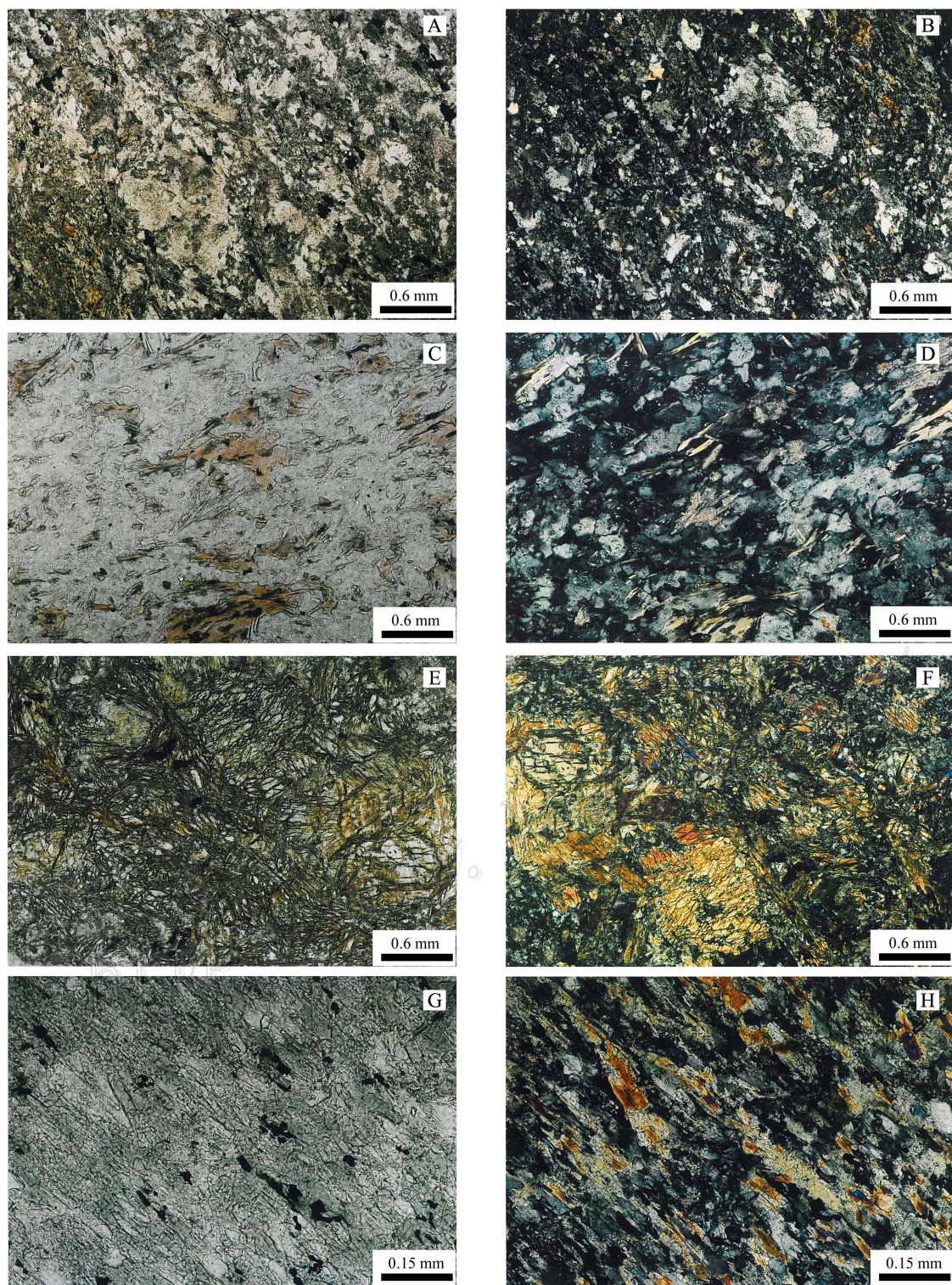


图 2 羊蹄子山-磨石山矿区斜长角闪岩类的显微照片

- A. 斜长角闪岩(单偏光), 白色为斜长石, 浅棕色为角闪石, 黑色为钛铁矿; B. 斜长角闪岩(正交偏光); C. 黑云斜长岩(单偏光), 白色为斜长石, 棕色和无色片状矿物为黑云母, 黑色为钛铁矿; D. 黑云斜长岩(正交偏光); E. 角闪岩(单偏光); F. 角闪岩(正交偏光); G. 角闪片岩(单偏光), 黑色为钛铁矿; H. 角闪片岩(正交偏光)

Fig. 2 Microphotographs of amphibolite from Yangtizishan-Moshishan ore district

- A. Plagioclase amphibolite (plainlight), white is plagioclase, brown is amphibole, black is ilmenite; B. Plagioclase amphibolite (crossed polars); C. Biotite plagioclase (plainlight), white is plagioclase, brown and colourless schistose mineral is biotite, black is ilmenite; D. Biotite plagioclase (crossed polars); E. Amphibolite (plainlight); F. Amphibolite (crossed polars); G. Amphibole-schist (plainlight), black is ilmenite; H. Amphibole-schist (crossed polars)

表 1 羊蹄子山-磨石山矿区斜长角闪岩类地球化学分析数据
Table 1 Geochemical data of amphibolites in Yangtizishan-Moshishan ore district

	K1-7	K2-9	K2-18	K6-3	K6-9	K6-11	K6-30	K6-31	MS-11	002-38	1101-22	YC-16	YC-17
	角闪石	斜长角闪岩	黑云斜长岩	角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	角闪斜长岩	斜长角闪岩	蚀变斜长角闪岩	斜长角闪岩	角闪斜长岩	角闪斜长岩
	$w(B)/\%$												
SiO ₂	43.95	45.84	52.83	44.32	42.29	50.95	46.79	47.77	49.14	51.00	39.65	59.90	60.52
TiO ₂	1.54	1.04	1.13	0.63	0.37	1.04	0.76	1.13	1.09	1.04	1.23	0.90	0.88
Al ₂ O ₃	14.38	14.29	19.04	16.46	14.07	13.28	13.77	13.19	14.50	17.71	13.74	15.16	15.22
Fe ₂ O ₃	14.31	5.07	1.60	3.92	3.60	3.74	3.41	4.16	2.11	1.80	3.48	3.43	2.56
FeO	2.14	6.99	4.45	5.58	6.85	7.12	6.10	8.14	9.16	5.29	10.71	3.02	3.63
MnO	0.28	0.18	0.14	0.17	0.22	0.23	0.20	0.19	0.20	0.17	0.36	0.14	0.12
MgO	7.27	9.66	3.32	7.22	7.40	7.00	11.79	7.15	7.55	2.57	7.78	3.56	3.19
CaO	10.75	7.42	4.09	10.10	11.16	9.33	8.59	9.72	10.57	7.49	8.85	4.61	3.31
Na ₂ O	1.93	2.70	1.61	1.17	1.47	2.01	1.14	2.12	2.22	0.18	0.45	3.26	3.04
K ₂ O	0.26	0.35	2.42	1.31	1.05	0.44	1.22	0.78	0.43	3.25	1.16	2.12	3.47
P ₂ O ₅	0.06	0.09	0.31	0.06	0.04	0.11	0.08	0.09	0.09	0.07	0.14	0.32	0.30
烧失量	2.18	5.10	8.30	7.94	10.26	2.86	4.82	4.04	1.70	8.28	10.40	2.66	2.86
总和	99.05	98.73	99.24	98.88	98.78	98.11	98.67	98.48	98.76	98.85	97.95	99.08	99.10
	$w(B)/10^{-6}$												
V	421	301	155	208	208	328	221	319	326	190	380	113	117
Cr	48.3	264	21.7	370	330	173	938	109	143	78.6	105	132	92.7
Co	57.4	47.8	25.6	44.9	49.9	50.2	53.8	50.5	43.3	29.2	47.9	18.9	18.1
Ni	55.4	80.5	12.7	169	95.0	75.7	362	60.5	68.8	35.4	71.7	28.6	24.1
Cu	22.0	100	31.7	49.4	41.2	131	33.1	36.0	113	182	101	298.9	35.2
Zn	150	116	115	148	126	128	147	192	88.5	77.3	129	124	97.0
Pb	7.38	6.13	23.5	9.94	19.1	5.49	7.56	7.82	5.50	34.5	5.12	18.9	28.8
Ga	18.5	16.2	21.4	13.1	11.3	16.4	14.5	18.2	13.5	24.8	19.3	19.4	17.4
Rb	11.5	31.6	189	116	133	37.4	173	65	21.2	201	131	84.3	165
Sr	81.9	140	57.9	117	101	117	96.5	148	102	59.7	79.4	430	302
Zr	86.5	84.2	338	28.2	13.7	61.6	61.6	53.7		162	43.6	269	
Nb	5.08	2.67	17.6	3.15	2.20	5.78	6.16	4.80	1.84	15.9	89.6	15.9	17.4
Ta	0.448	0.170	0.810	2.18	0.363	0.368	0.608	0.640	0.16	1.31	0.68	1.27	1.31
Ba	20.9	68.4	190	178	83.9	104	253	258	49.8	390	64.0	769	849
Y	41.0	23.8	17.9	15.6	9.07	22.9	17.8	25.3	24.0	32.0	29.1	17.5	16.2
W	0.45	2.43	5.40	6.55	25.7	5.42	5.93	7.61	0.47	5.57	6.17	3.94	2.83
La	9.44	4.34	40.0	3.78	2.11	9.19	9.40	7.85	2.36	38.1	11.4	38.4	36.8
Ce	21.0	9.88	76.5	8.24	3.98	18.8	18.4	18.1	6.42	88.6	22.9	73.7	73.7
Pr	3.34	1.62	9.33	1.33	0.614	2.63	2.46	2.42	1.19	10.3	3.23	8.64	8.51
Nd	15.0	7.70	32.7	6.26	2.58	10.5	9.96	10.4	6.81	37.7	13.4	30.4	32.7
Sm	4.78	2.43	5.55	1.96	0.789	2.76	2.51	2.82	2.53	7.80	3.48	5.48	5.72
Eu	1.69	0.843	1.37	0.640	0.417	0.882	0.658	0.897	0.86	1.65	1.14	1.38	1.50
Gd	7.10	3.77	4.80	2.66	1.20	3.80	3.13	3.93	2.77	6.77	3.85	5.00	4.83
Tb	1.27	0.694	0.653	0.462	0.229	0.671	0.542	0.725	0.62	1.09	0.778	0.652	0.62
Dy	7.76	4.32	3.27	2.71	1.50	3.96	3.20	4.45	4.11	6.41	5.04	3.33	3.10
Ho	1.57	0.941	0.676	0.594	0.325	0.853	0.683	0.973	0.86	1.32	1.17	0.636	0.58
Er	4.14	2.71	1.87	1.71	0.962	2.56	1.94	2.87	2.73	3.64	3.36	1.79	1.67
Tm	0.525	0.387	0.260	0.237	0.147	0.386	0.280	0.399	0.38	0.537	0.502	0.237	0.22
Yb	3.11	2.44	1.67	1.53	1.06	2.38	1.75	2.63	2.53	3.49	3.35	1.52	1.42
Lu	0.417	0.369	0.244	0.227	0.160	0.357	0.276	0.388	0.38	0.512	0.508	0.217	0.22
ΣREE	81.742	42.444	178.893	32.340	16.073	59.729	55.189	58.852	34.550	207.919	74.108	171.382	171.590

测试单位及测试者：核工业北京地质研究院分析测试中心夏晨光、张彦辉。

T—Tholeiite series ; C—Calc-alkaline series

带(岛弧及活动大陆边缘区)火山岩; C区,为A区和B区火山岩派生的碱性岩。图中的 σ 值为里特曼的组合指数, $\sigma = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$; τ 为戈蒂里指数, $\tau = (Al_2O_3 - Na_2O) / TiO_2$ 。如果把羊蹄子山-磨石山矿区斜长角闪岩类样品的化学成分投影到 $\log \sigma$ - $\log \tau$ 图上, 可以看出, 大部分点落在岛弧及活动大陆边缘带(B区), 有相当一部分点落在由火山岩派生的碱性岩区(C区)内(图5)。

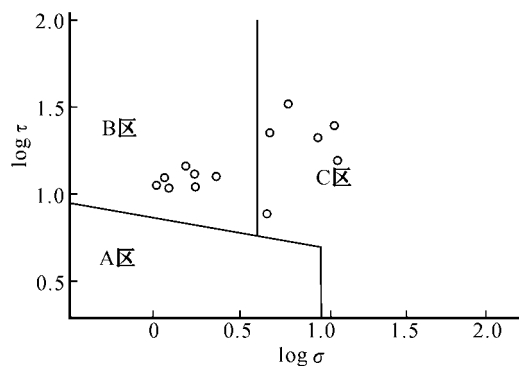


图5 里特曼-戈蒂里图(据 Rittmann, 1973)

A—板内稳定区火山岩 B—大陆边缘消减带火山岩;
C—A、B区演化的碱性火山岩

Fig. 5 $\log \sigma$ - $\log \tau$ diagram (after Rittmann, 1973)

A—Volcanic rocks in intraplate stable area B—Volcanic rocks in attenuated belt C—Alkaline volcanic rocks evolved in A and B areas

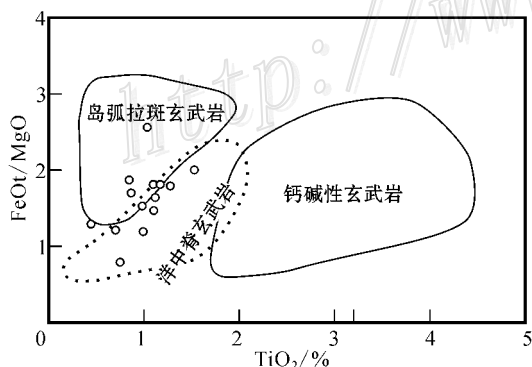


图6 TiO_2 -(FeO/MgO)图(据 Pearce et al., 1973)

Fig. 6 TiO_2 -(FeO/MgO) diagram
(after Pearce et al., 1973)

在 TiO_2 -(FeO/MgO) 图(图6)中, 大部分样品落在岛弧拉斑玄武岩与洋中脊玄武岩的过渡区, 部分样品落在岛弧拉斑玄武岩和洋中脊玄武岩区。同样, 在 Zr - TiO_2 判别图(图7)中, 大多数样品具有洋中脊与岛弧拉斑玄武岩的过渡特征, 只有少数点落

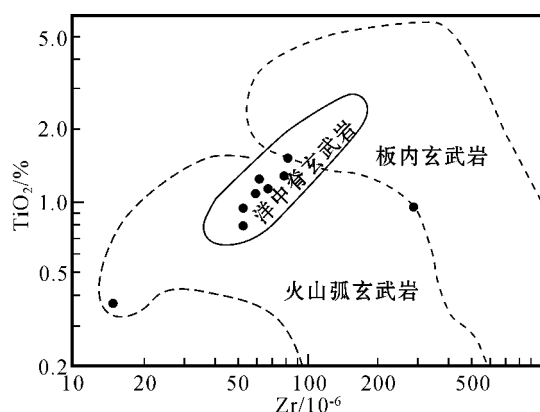


图7 Zr - TiO_2 图(据 Pearce et al., 1973)

Fig. 7 Discrimination diagram for basalts based upon Zr - TiO_2 variation (after Pearce et al., 1973)

在岛弧拉斑玄武岩区。这与形成河南西峡地区含金红石角闪片岩的构造环境有明显差别, 后者处于板内火山岩区(张银波, 1996)。

据该矿区诸样品的稀土元素分析资料, 按岩石稀土元素总量的不同, 可将样品分为3类: 第1类的稀土元素总量较低, $\Sigma REE = (16.073 \sim 42.444) \times 10^{-6}$ 第2类的 ΣREE 中等, 为 $(55.189 \sim 81.742) \times 10^{-6}$ 第3类的 ΣREE 较高, 达 $(171.382 \sim 207.919) \times 10^{-6}$ 。这3类岩石的稀土元素总量特征, 大致与超基性的苦橄玄武岩、基性的玄武岩类和中(基)偏碱性的玄武安山岩、粗面质安山岩相对应, 同样反映了不同岩性的稀土元素分馏特点。

这3类岩石的稀土元素分配模式(图8)也不一样: 第1类的稀土元素曲线分布平稳 第2类的稀土元素曲线总的分布也较平稳, 但轻稀土元素稍有富集 第3类的稀土元素分布曲线向右倾斜, 轻稀土元素明显富集, 并出现 Eu 负异常。

6 讨论和小结

综上所述, 羊蹄子山-磨石山矿区斜长角闪岩类的岩石学和岩石化学的主要特点是:

(1) 岩石类型复杂多样, 岩石分异演化较彻底, 已知有关变质岩类的岩性有斜长角闪岩(占多数)、角闪或黑云斜长岩和角闪岩等。根据岩石化学特征恢复其原岩, 大致相当于玄武岩、苦橄玄武岩、玄武安山岩和粗面质安山岩及凝灰岩, 以玄武岩为主, 属于超基性岩类的苦橄玄武岩占有一定比例。

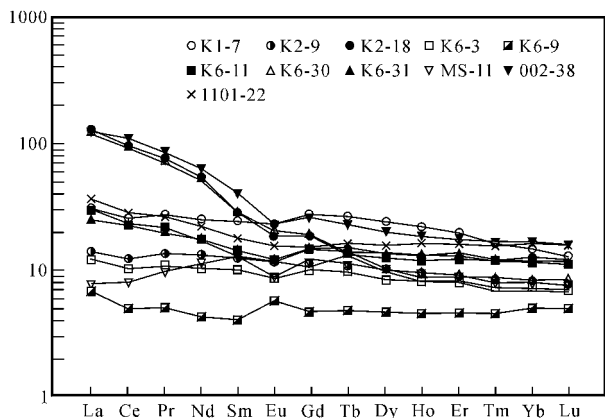


图 8 羊蹄子山-磨石山矿区斜长角闪岩类
稀土元素分配模式

(样品号所对应的岩石名称见表 1)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of plagioclase amphibolite from Yangtizishan-Moshishan ore district

上述岩性组合的特点和与铁矿关系密切的中基性、中性、中酸性侵入岩或相应的火山岩类的特点,有明显的差别(程裕淇等,1978;杨昌明,1986;赵一鸣等,1991,2004)。

钛矿床(包括钛铁矿矿床和金红石矿床)的有关岩浆岩主要是基性岩类,部分为超镁铁质岩或碱性岩(Force,1991;赵一鸣等,2008)。东秦岭地区的角闪岩型金红石矿床和苏鲁地区的榴辉岩型金红石矿床,其含矿岩石的原岩大多为基性岩类(程振香,1990;徐少康等,1998;黄建平等,2002)或板内玄武岩(邱检生等,2006)。山西代县碾子沟金红石矿床的含矿岩石为蚀变辉石岩和橄榄辉石岩,经热液蚀变后变为阳起透闪石岩和直闪石岩(沈永和等,1986)。因此,羊蹄子山-磨石山矿区斜长角闪岩的原岩岩性大致与山西碾子沟金红石矿床的基性超基性岩类可以对比,但也有一定差别,主要是本区内有关岩石的岩性更复杂,分异更彻底。

(2) 虽然羊蹄子山-磨石山矿区的含矿岩石是变质(粉)砂岩和片岩,斜长角闪岩类仅是矿体的主要围岩之一,但锐钛矿(金红石)的微量元素地球化学(Cr-Nb)揭示,其投影点均落在 Zack 等(2004)Cr-Nb相关图的变质镁铁质岩区,这进一步说明成矿与镁铁质岩不但在空间上紧密相关,而且有密切的成因联系(赵一鸣等,2008)。

(3) 斜长角闪岩类的岩石化学和微量元素地球化学特征,都表明其生成构造环境是岛弧或岛弧与大洋的过渡地区。这与矿区目前所处大地构造位置

——华北地台最北缘的情况是吻合的。

(4) 在羊蹄子山-磨石山矿区的斜长角闪岩类中,钛矿物主要呈钛铁矿形式存在,局部有榍石,而未见有金红石或锐钛矿,而且岩石的 TiO_2 含量不太高,介于 0.37%~1.54%之间(表 1)。这与东秦岭地区一些矿床中含矿(金红石)岩石本身就是角闪岩类(张银波,1996;徐少康等,1997),有明显的区别。东秦岭地区斜长角闪岩类的生成地质环境和压力是中偏高;榴辉岩中大量金红石的存在,反映了其高温、超高压的生成条件(黄建平等,2002)。本矿区在海底火山喷发沉积时形成了以含锐钛矿为主的矿体,说明其形成温度和压力都较低。巴西 Tapira 等碱性岩风化型钛矿床中大量锐钛矿的出现,就是最好的例证(Turner,1986)。以基性岩为主的火山岩类在海底喷发沉积时,虽然温度较高,但压力较低,只能形成钛铁矿。随后发生的中级区域变质作用,也未能使基性火山岩中的钛铁矿转变为金红石。

References

- Cheng Y Q, Zhao Y M and Lu S N. 1978. Some main type-groups of iron ore deposits of China[J]. Acta Geologica Sinica, 52(4):253-268 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Z X. 1990. Basic characteristics of the Donghai eclogite type rutile deposit in Jiangsu province[J]. Mineral Deposits, 9(1):86-90 (in Chinese with English abstract).
- He T X, Lu Z L, Li S X and Lan Y Q. 1988. Metamorphic petrology [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-236 (in Chinese).
- Huang J P, Ma D S, Liu C and Wang H. 2002. Rutile deposit in eclogite of ultra-high pressure metamorphic belt in the northeast of Jiangsu Province and ore genesis[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 38(4):514-524 (in Chinese with English abstract).
- Force E R. 1991. Geology of titanium-mineral deposits[J]. Geol. Soc. Am. Spec. Paper, 259:1-112.
- Irvine T N and Baragat W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Can. J. Earth Sci., 8:528-548.
- LeBas M J, LeMaitre R W, Streckeisen A, Zanettin B and IUGS Sub-commission on the Systematics of Igneous Rocks. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. J. Petrol., 27, part 3:745-750.
- 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 Yangtizishan-Moshishan anatase deposit, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 27(4): (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. Earth Planet Sci. Lett., 19:290-300.

- Qiu J S, Wang R C, Jiang S Y, Hu J, Zhang X I and Ni P. 2006. Geochemical comparison between high-Ti and low-Ti eclogites from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drill Project and its implications for rutile mineralization [J]. *Acta Petologica Sinica*, 22 (7): 1875-1882 (in Chinese with English abstract).
- Rittmann A. 1973. Stable mineral assemblages of igneous rocks [M]. Heidelberg: Springer. 1-262.
- Shen Y H (Chief editor). 1986. Geology and mineral resources of the Shanxi Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-247 (in Chinese).
- Turner R. 1986. Brazilian titanium [J]. *Engineering and Mining Journal*, 197: 40-42.
- Wang P, Pan Z L and Weng L B. 1982. Systematic mineralogy, vol. I [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-666 (in Chinese).
- Xu S K, Li B Y, Zhou X X and Liu Z S. 1998. Genetic types, geochemical property and distribution laws of rutile deposits in the east Qinling of China [J]. *Henan Geology*, 16 (4): 241-250 (in Chinese with English abstract).
- Yang C M. 1986. The relationship between Precambrian iron ore deposits of Luanxian district eastern Hebei and volcano-eruptive sedimentary cycle [J]. *Earth Science*, 11 (1): 51-59 (in Chinese with English abstract).
- Zack T, von Eynatten H and Kronz A. 2004. Rutile geochemistry and its potential use in qualitative provenance studies [J]. *Sedimentary Geology*, 171: 37-58.
- Zhang Y B. 1996. Rock types of rutile-bearing layers in Xixia district, Henan, with constraint on their genetic conditions [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 18 (1): 39-46 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, Li D X and Jiang C J. 1990. Skarn deposits of China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-354 (in Chinese).
- 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, Li D X, Chen W M, Feng C Y and Sun W H. 2006. Yangtishan 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, Li D X, Wu L S, Cheng W M, Feng C Y, Wang P H and Gao X D. 2008. Geology and geochemistry of Yangtishan-Moshishan anatase ore deposit in Zhenglanqi County, Inner Mongolia: A summary of exploration and investigation work [J]. *Mineral Deposits*, 27 (4): 425-448 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程裕淇, 赵一鸣, 陆松年. 1978. 中国几组主要铁矿类型 [J]. *地质学报*, 52 (4): 25 (2): 113-122.
- 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.
- 贺同兴, 卢良兆, 李树勋, 兰玉琦. 1988. 变质岩岩石学 [M]. 北京: 地质出版社. 1-236.
- 黄建平, 马东升, 刘聪, 王辉. 2002. 苏北超高压变质带榴辉岩型金红石矿床及其成因 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 38 (4): 514-524.
- 李大新, 赵一鸣, 丰成友, 吴良士, 陈文明. 2008. 内蒙古羊蹄子山-磨石山锐钛矿床中元古界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):
- 邱检生, 王汝成, 蒋少涌, 胡建, 张晓琳, 倪培. 2006. 中国大陆科学钻探主孔高钛与低钛榴辉岩地球化学特征对比及其对金红石成矿的指示意义 [J]. *岩石学报*, 22 (7): 1875-1882.
- 沈永和 (主编). 1986. 山西省地质矿产资源 [M]. 北京: 地质出版社. 1-247.
- 王濮, 潘兆礼, 翁玲宝. 1982. 系统矿物学 (上册) [M]. 北京: 地质出版社. 1-666.
- 徐少康, 李博均, 周希贤, 刘振山. 1998. 东秦岭金红石矿床成因类型、地球化学特征和分布规律 [J]. *河南地质*, 16 (4): 241-250.
- 杨昌明. 1996. 冀东滦县地区前寒武纪铁床和火山喷发沉积旋回之间的关系 [J]. *地球科学*, 11 (1): 51-59.
- 张银波. 1996. 河南省西峡地区金红石含矿地层岩石组合特征及其形成环境 [J]. *化工矿产地质*, 18 (1): 39-46.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 蒋崇俊. 1990. 中国夕卡岩矿床 [M]. 北京: 地质出版社. 1-354.
- 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, 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, 吴良士, 陈文明, 丰成友, 王佩华, 高学东. 2008. 内蒙古正蓝旗羊蹄子山——磨石山锐钛矿地质与地球化学勘查和研究工作总结 [J]. *矿床地质*, 27 (4): 425-448.