

文章编号:0258-7106(2005)04-0349-12

新疆尾亚钒钛磁铁矿*

——一个岩浆分异-贯入-热液型复成因矿床

王玉往^{1,2},王京彬^{1,2},王莉娟^{1,2},秦全新³,彭晓明³,惠卫东³

(1 北京矿产地质研究所,北京 100012; 2 中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室,北京 100101; 3 新疆有色地质勘查局 704 地质队,新疆 哈密 839000)

摘要 由于特殊的矿化组合与大地构造环境,尾亚地区向来为研究东天山地区的地质学家所重视,然而关于尾亚矿床本身的研究尚不多见,本文试图对该矿床的地质特征和成因做一初步剖析,以期抛砖引玉,弥补东天山地区矿床研究的空缺。在详细的野外地质工作基础上,系统归纳整理了该矿床的地质特征,通过对矿石特征的研究,厘定了矿床的 3 个主要矿化阶段:岩浆结晶分凝阶段(形成似层状、浸染状和块状矿石)、贯入阶段(形成贯入式块状矿石)和岩浆热液阶段(形成伟晶状矿石)。对含矿岩石和矿石矿物进行了地球化学研究,计算出成矿的物理化学条件。含矿辉长岩的成岩温度为 1 296~1 009 ℃,压力为 296 MPa 左右,氧逸度为 $10^{-5.62} \sim 10^{-7.43}$;成矿温度(硫化物)为 571~449 ℃,硫逸度为 $10^{-19.35} \sim 10^{-19.77}$ 。该矿床属于与碱性超镁铁质-镁铁质杂岩有关的岩浆型矿床;矿床形成以岩浆分凝和贯入式为主,晚期出现少量岩浆热液作用,为一岩浆分异-贯入-热液型复成因矿床。

关键词 地质学;碱性辉长岩;钒钛磁铁矿;岩浆分异-贯入;岩浆热液;尾亚**中图分类号**: P618.31;P618.47;P618.61**文献标识码**: A

尾亚矿床位于新疆哈密市东南 145 km,尾亚火车站南 1 km 处。新疆有色地质勘查局 704 地质队于 20 世纪 60 年代初发现了该矿床并进行了勘探,提交铁矿石 1.088×10^4 t、 TiO_2 81×10^4 t、 V_2O_5 $2.301.5$ t^①,为一中型规模的钒钛磁铁矿矿床。现在,新疆有色 704 地质队正在开采,日产矿石 1 000 t。

目前,国内外对岩浆型钒钛磁铁矿矿床[如南非的布什维尔德(Bushveld)矿床,中国的攀枝花矿床]的研究已相当深入,特别是对矿床成因类型的研究已基本定型,并对其形成机制进行了详细深入的讨论。如元绍枚等(1982)将中国钒钛磁铁矿矿床分为岩浆晚期分异型、岩浆晚期分异-贯入型、变质型和风化残积砂矿型 4 种;后来,也有人认为攀西地区的这类矿床属岩浆早期矿床(卢记仁等,1988a;1988b)。由于特殊的矿化组合与大地构造环境,尾亚地区历来为研究东天山地区的地质学家所重视,然而,有关尾亚矿床的研究并不多见,仅对其做过简

单的成因归类,如 1:20 万区域地质调查报告,将该矿床定为晚期岩浆矿床^②。本文系统归纳整理了该矿床的地质特征,并试图对其成因做一粗浅探讨,以期弥补东天山地区矿床研究的空缺,并为从事该区构造和其他地质研究的学者提供参考和借鉴。

1 区域地质背景

尾亚矿床地处东天山造山带的东段。东天山地区在大地构造位置上处于古亚洲洋南缘,是西伯利亚板块和塔里木板块的聚合地区。本区晚古生代构造格架从北向南依次为:吐哈地块,康古尔塔格造山带,阿奇山地块,中天山(星星峡-旱山)地块和红柳河造山带(李锦轶等,2002)。尾亚矿区即位于中天山地块(也称中天山古陆)(图 1),也就是塔里木古板块的裂解部分。

区内主干断裂为东西向展布,次为北东东向。

* 本文由国家重点基础研究项目(编号:2001CB409806)资助

第一作者简介 王玉往,男,1965 年生,教授,主要从事矿床地质及矿产资源方面的研究工作。E-mail: yuwangw@hotmail.com。

收稿日期 2004-07-23;改回日期 2004-12-20。许德焕编辑。

① 新疆有色地质勘查局 704 地质队,1994. 新疆哈密尾亚钒钛磁铁矿可行性研究报告。(内部资料)。

② 新疆区测队,1966. 1:20 万(沙泉子幅)矿产图说明书。(内部资料)。

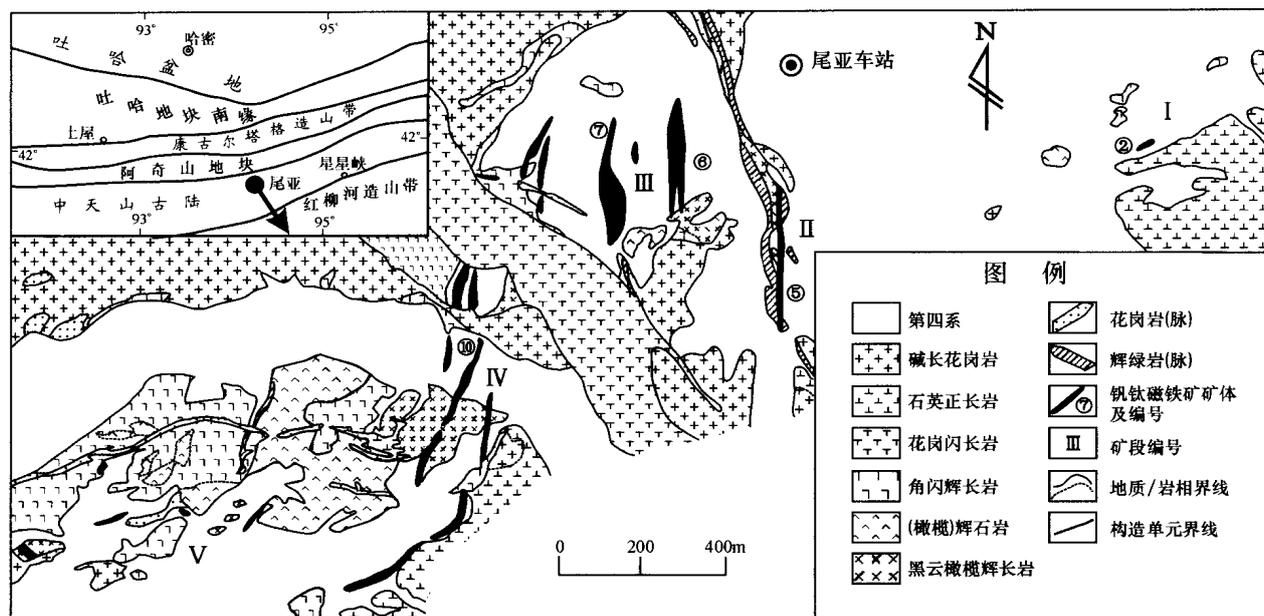


图1 尾亚矿区地质简图(据1:20万区域地质调查资料^①,略有修改)

Fig.1 Geological sketch map of the Weiya ore deposit (modified from 1:200,000 regional geological surveying report)

从北到南依次为:康古尔塔格-黄山深断裂,苦水断裂,阿齐克库都克-沙泉子断裂,卡瓦布拉克断裂,尖山子断裂和星星峡断裂等。除中生界白垩系、三叠系缺失外,中元古界至新生界皆有出露。前寒武纪地层及下古生界主要分布在阿齐克库都克-沙泉子断裂以南地段(中天山古陆内),总体上为一套变质碳酸盐岩-碎屑岩地层。泥盆系主要分布于康古尔塔格-黄山断裂以北(吐哈地块南缘),由一套岛弧系火山-碎屑岩组成。石炭系大部分出露于阿齐克库都克-沙泉子断裂以北地带,总体上为一套滨、浅海相火山-沉积岩系,但分属不同的构造沉积相区。康古尔塔格韧性剪切带内的石炭系普遍经历了强烈的构造变形。二叠系分布于中天山古陆的两侧,各段的岩性及岩相差异较大。岩浆岩以海西期最为发育,种类丰富,既有与铜镍矿化关系密切的基性-超基性岩,又有与铜(金、钼)矿化有关的花岗闪长岩、花岗闪长斑岩,还有与金银矿化密切相关的花岗岩类。自北向南有一系列成矿带:早二叠世黄山-镜儿泉Cu-Ni矿带,早二叠世石英滩-西凤山Au-Ag矿带,早石炭世阿齐山-雅满苏Fe-Cu矿带,库姆塔格(-尾亚)晚二叠世(早期)Fe-Ag-多金属矿带。由于区内仅产有一个钽钛磁铁矿型矿床(尾亚),因而,在以往的文

献中很少将其明确划出。秦克章等(2003)在东天山矿化亚带划分中,依据构造带展布与矿化组合,明确划分出卡瓦布拉克-尾亚-马庄山铬铂铁金铜镍钨矿化亚带,尾亚钽钛磁铁矿床即产于其中。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

尾亚矿区位于沙泉子断裂的南侧,尾亚环形复式岩株的北部,是尾亚超单元(外环)的一部分。该超单元从早到晚由碱性辉长岩、石英二长闪长岩、石英正长岩、碱长花岗岩和斑状钾长花岗岩5个单元组成。其中,碱性辉长岩的全岩Rb-Sr等时线年龄为 (270.67 ± 30.70) Ma,石英正长岩中锆石、磷灰石的U-Pb等时线年龄为246.21 Ma,为早二叠世侵入产物(李嵩龄等,2002)。

整个矿区全为侵入岩浆岩所占据,尾亚超单元中的诸单元均可见及,其中的碱性辉长岩单元为含矿岩类,并可分为角闪辉长岩、橄榄辉石岩、黑云母辉长斜长岩等岩相,此外,尚有细晶花岗岩脉、辉绿岩脉等侵入(图1)。

尾亚矿区范围内,除第四系外,并无其他地层出

① 新疆区测队,1966,1:20万(沙泉子幅)矿产图说明书。(内部资料)。

露。矿区外围的西北部出露有下石炭统卡拉火火山组,为一套岛弧型钙碱性中酸性火山岩;南部(主要在尾亚复式岩株的东、西、南面)为元古界、太古界变质岩类。

矿区内构造简单,未见明显的断层和褶皱。但受环形岩株的影响,矿区外围发育环形断裂和近南北向断裂,矿区内的岩脉主要受其影响而呈南北向和北北西向延伸。

2.2 矿体

尾亚矿床可分为 5 个矿段(图 1),分布在 NE-SW 向长 3.3 km、宽 0.25~0.8 km 的范围内。矿体皆产于碱性辉长岩类岩体中。所有的矿体均大致平行于含矿围岩的走向,倾向东或东南,倾角 30~55°,在空间上呈雁行状排列。共探明 23 个工业矿体,其中,主要矿体有 ⑤、⑥、⑦、⑩号(见图 1),占探明储量的 70%以上,矿体特征见表 1。

矿体分浸染状和贯入式脉状 2 种。前者与围岩为渐变关系,形状多呈大的透镜体或相互平行的薄条状体,由浸染状一致密块状矿石组成。后者可呈脉状、舌状穿入前者或围岩中,界线清楚,使矿体呈现不规则的脉状、网脉状,有时在破碎的浸染状矿体中呈胶结物(图 2A-2D),在接触边部粒度明显变细,形成冷凝边。显然,贯入式矿体的形成晚于浸染状矿体。

2.3 矿石

尾亚矿床的矿石有致密块状和浸染状 2 种。

块状矿石多产于贯入式矿体,一般为灰黑色的块状(图 2D),具海绵陨铁结构,钛铁矿和磁铁矿呈粒状集合体,橄榄石、辉石、基性斜长石等被其包裹而形成筛状。

浸染状矿石为该矿床的主要矿石类型,构成主要矿体。又可分为 3 种:

(1) 一般均匀浸染的中-细粒矿石(图 2E)。矿物粒度为 0.5~3 mm,多为 1~2 mm,矿石矿物为磁铁矿和钛铁矿,占 10~30%,有时有微量赤铁矿和黄铁矿。脉石矿物有辉石(以普通辉石为主,有少量透辉石)、基性斜长石、黑云母、角闪石(图 2F),还含少量或微量橄榄石、磷灰石、尖晶石等。因其脉石矿物与含矿围岩的矿物种类一致,故也可称之为含矿(橄榄)辉长岩、含矿辉长斜长岩等。矿石结构也与岩浆岩结构相一致,如辉长结构、含长结构、包橄结构、反应边结构等,并经常出现黑云母(有时为辉石)的包铁结构(黑云母或辉石包裹磁铁矿、钛铁矿的圆粒而呈现筛状)、蠕虫结构(赤铁矿、钛铁矿在辉石中呈蠕虫或文象状)、珠滴状(矿石矿物呈水滴状在辉石等脉石矿物中近定向排列)等。

(2) 似层状矿石(图 2G)。由稠密浸染一块状的钛铁矿层与稀疏浸染一含矿基性岩构成条带或韵律层。前者具有块状矿石的特征,粒度略细;后者具一般浸染状矿石的特征,粒度略粗。两者呈 0.5~3 cm 厚的条带交替成层,构成特征的韵律层构造。

(3) 伟晶状矿石(图 2H)。在 ②号和 ⑩号矿体

表 1 尾亚矿床矿体特征

Table 1 Orebody characteristics of the Weiya deposit

矿段(矿体数)	矿体规模/m			矿体产状/°		矿石类型
	长	厚	延伸	倾向	倾角	
I(4)	120~750	3~5	130	155	50~56	浸染状为主
II(2)	300	25~26	>200	75	5~55	浸染状
III(6)	100~300	13~25	80~180	87	30~53	浸染状
IV(4)	50~350	3~5.5	>135	105	30~40	致密块状为主
V(7)	20~70	2.5	7~60	变化较大		多为浸染状
主要矿体						
⑤号	300	38	>100	75	50~55	稀疏浸染状
⑥号	240	41	180	90	40	稀疏浸染状
⑦号	320	24	80~110	90	40	稀疏浸染状
⑩号	350	7	200	120	30~40	稠密浸染-块状

注:该表据内部资料^{①②}整理而成。

① 新疆有色 704 地质队, 1994. 新疆哈密尾亚钒钛磁铁矿可行性研究报告.(内部资料).

② 新疆区测队, 1966. 1:20 万(沙泉子幅)矿产图说明书.(内部资料).

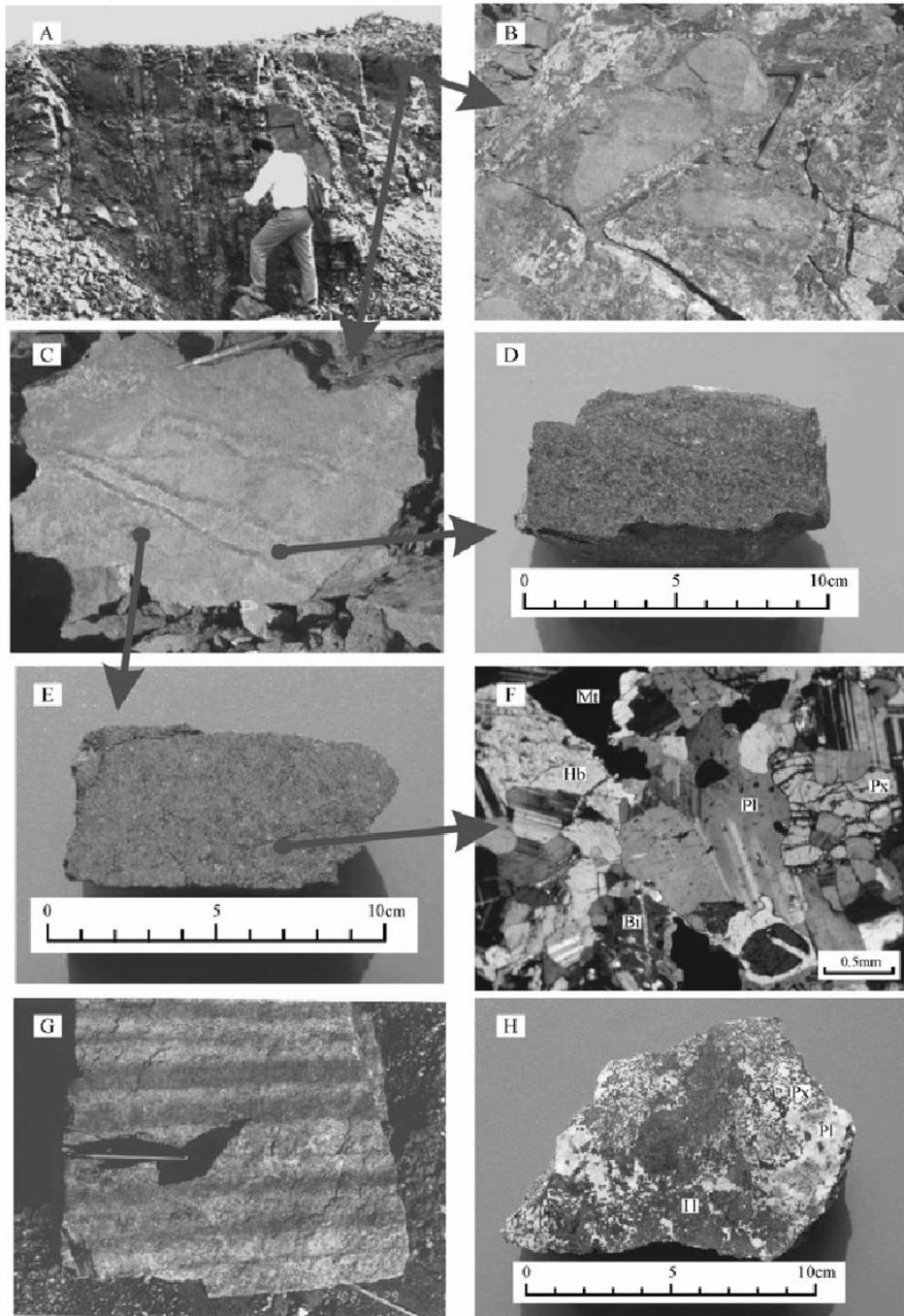


图2 尾亚矿床矿体和矿石照片

照片 A~F 为 ①号矿体露天采坑,灰黑色为贯入式矿体(矿石),褐红色为浸染状矿体(矿石),箭头指示后次照片拍摄时相应的大致位置。A—贯入式矿体在浸染状矿体中呈脉状、网脉状;B—浸染状矿体呈破碎角砾状被贯入式矿体胶结;C—贯入式矿体呈脉状、舌状穿入浸染状矿体中;D—贯入式(块状)矿石;E—浸染状矿石;F—浸染状矿石的镜下结构(Mt—磁铁矿,Pl—斜长石,Hb—角闪石,Bi—黑云母,Px—辉石);G—从 ②号矿体采出的似层状矿石,灰黑色条带为高品位钛铁矿层,灰白色条带为含钛铁矿的辉长斜长岩;H—从 ②号矿体采出的伟晶状矿石,斜长石(Pl)、辉石(Px)、钛铁矿(Il)皆呈伟晶状

Fig. 2 Photographs of orebodies and ores in the Weiya deposit

Photographs A~F are from open pit of the orebody ①, the dark gray part is injection orebody/ ore and the brown part is disseminated orebody/ ore, the arrows show the positions of the next pictures. A—Injection ore vein/ network vein in disseminated orebody; B—Breccia of disseminated ore cemented by injection ore; C—Injection ore penetrating disseminated ore in vein/ tongue form; D—Injection ore (massive ore); E—Disseminated ore; F—micro-structure of disseminated ore (Mt—magnetite, Pl—plagioclase, Hb—hornblende, Bi—biotite, Px—pyroxene); G—signifies stratoid ore from the orebody ②, with the dark gray banding being high-grade ilmenite layer and the light gray banding being ilmenite-bearing gabbro-anorthosite; H—denotes pegmatitic ore from the orebody ②, with plagioclase (Pl), pyroxene (Px) and ilmenite (Il) all assuming pegmatitic form

中较为常见,与一般浸染状矿石的区别在于:矿物粒度大,通常大于 1 cm,最大可达 5 cm,多为自形;色浅,即斜长石含量较高;硫化物含量明显增高,可达 5%以上,局部可达 20%,以磁黄铁矿、黄铁矿为主,偶有黄铜矿和镍黄铁矿。在矿体中,该种矿石一般呈团块状、囊包状,有时也呈不规则脉状,可含有贯入式块状矿石的角砾,因此,可能是最晚成矿阶段的产物。

综上所述,该矿床可分为 3 个矿化阶段:岩浆结晶分凝阶段(形成似层状、浸染状和块状矿体或矿石)、贯入阶段(形成贯入式块状矿体或矿石)和岩浆热液阶段(形成伟晶状矿石)。

3 样品采集及分析方法

本次工作进行了一系列地球化学测试工作。

在尾亚矿床的⑩号、⑦号和②号矿体的采坑内系统采集了较新鲜的矿石样品。在对 20 余件光薄片显微镜观察研究的基础上,选出磨片质量较好、粒度较大的颗粒进行了电子探针成分分析。对具代表性的块状矿石、一般浸染状矿石、伟晶状矿石,在双目镜下人工挑选出主要金属矿物钛铁矿和磁铁矿及部分硫化物,用超声波中温清洗后,烘干研磨至 200 目。8 个岩石样品分别采自②号、⑦号和⑩号矿体的采坑及竖井,岩石较为新鲜,风化和蚀变较弱。

矿石矿物的主元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室 SHIMADZU “EPMA-1500”电子探针仪器上完成,加速电压为 15 kV,检测限为 0.05%~0.1%。

矿石矿物和 8 个含矿岩石粉末样(200 目),由核工业北京三院实验室采用 In 内标溶液 ICP-MS 法完成,分析精度为 3%,检测限为 0.002×10^{-6} (La) ~ 0.02×10^{-6} (Ce)。

岩石的硅酸盐成分由国家地质调查局物化探研究所分析,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 TFe_2O_3 (TFe_2O_3 为 Fe_2O 与 FeO 的和量,用 Fe_2O_3 形式表示)(检测限为 0.1%),以及 MnO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、 TiO_2 (检测限为 0.01%)用融片法在 X 射线荧光仪上进行分析, CO_2 (检测限为 0.1%)用电位法, H_2O^+ 和 H_2O^- (检测限为 0.1%)用重量法, FeO (检测限为 0.1%)用容量法分别完成。

2 个硫同位素样品在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室用 Delta-S 质谱仪测试, σ 值

分别为 0.000‰~0.006‰。

4 矿石矿物成分及含矿岩石特征

4.1 矿石矿物成分

尾亚矿床矿石矿物(氧化物和硫化物)的电子探针分析结果见表 2 和表 3,微量元素分析结果见表 4。

该矿床矿石中的磁铁矿属含钒钛的磁铁矿,其 2 个样品的($100 \times \text{V}_2\text{O}_5 / \text{TFeO}$)及($100 \times \text{TiO}_2 / \text{TFeO}$)值分别为 2.20、1.67 和 1.37、1.37,比火山沉积(变质)型铁矿床相应的值高 2~3 个数量级,而与一般岩浆型矿床相当 [TiO_2 平均为 2.319%~10.22%, V_2O_5 为 0.10%~0.78%(徐国风等,1979)]。

表 2 尾亚矿床矿石矿物(氧化物)
电子探针分析结果 ($w_B/\%$)

Table 2 EPMA composition of oxide minerals
from the Weiya deposit ($w_B/\%$)

	磁铁矿		钛铁矿	
	W2728-5	W2728-5	W2728-5	W2728-5
TiO ₂	2.01	1.55	53.00	51.93
TFeO	91.27	92.76	46.11	46.05
CoO	0.10	0.15	0.02	0.06
NiO	0.02	0.00	0.02	0.00
Cr ₂ O ₃	0.07	0.07	0.01	0.02
V ₂ O ₅	1.25	1.27	0.29	0.33
MnO	0.08	0.07	1.03	0.92
CuO	0.00	0.00	0.00	0.00
总和	94.80	95.87	100.48	99.31

注:TFeO 为 Fe_2O_3 与 FeO 的和量用 FeO 形式表示。

表 3 尾亚矿床矿石矿物(硫化物)
电子探针分析结果 ($w_B/\%$)

Table 3 EPMA composition of sulfide minerals
from the Weiya deposit ($w_B/\%$)

	黄铁矿	黄铜矿	磁黄铁矿				
	W2728-14	W2728-14	W2728-5	W2728-5	W2728-14	W2728-14	
S	53.56	34.94	38.73	39.15	39.08	39.48	39.30
As	0.38	0.23	0.50	0.55	0.54	0.53	0.46
Fe	46.23	30.20	61.22	59.36	59.09	59.55	59.69
Co	0.01	0.04	0.10	0.17	0.18	0.21	0.21
Ni	0.00	0.00	0.20	0.16	0.10	0.16	0.11
Cu	0.00	33.30	0.00	0.01	0.00	0.08	0.02
Ag	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04
Au	0.10	0.12	0.07	0.01	0.14	0.00	0.16
总和	100.28	98.86	100.82	99.41	99.13	100.03	99.99

表4 尾亚矿床矿石矿物稀土元素及微量元素分析结果 ($\mu\text{g}/10^{-6}$)
Table 4 REE and trace elements composition of ore minerals from the Weiya deposit ($\mu\text{g}/10^{-6}$)

	钛铁矿				磁铁矿			磁黄铁矿	黄铁矿
	浸染状		致密块状		浸染状	致密块状		浸染状	伟晶状
	W2728-1	W2729-11	W2728-2	W2728-5	W2729-11	W2728-2	W2728-5	W2728-14	W2729-10
稀土元素									
La	4.162	0.680	3.715	0.604	0.998	11.634	0.497	0.773	3.788
Ce	10.910	1.425	9.646	1.341	2.285	31.282	1.162	1.645	8.618
Pr	1.512	0.175	1.369	0.181	0.300	4.466	0.150	0.195	1.048
Nd	7.392	0.731	6.648	0.838	1.353	21.746	0.692	0.794	4.187
Sm	1.723	0.245	1.612	0.255	0.330	4.905	0.173	0.162	0.873
Eu	0.714	0.090	0.656	0.095	0.163	2.146	0.076	0.074	0.377
Gd	1.619	0.167	1.442	0.195	0.347	4.706	0.161	0.156	0.865
Tb	0.210	0.026	0.198	0.029	0.052	0.660	0.026	0.023	0.139
Dy	1.029	0.150	0.966	0.164	0.316	3.233	0.135	0.108	0.803
Ho	0.195	0.032	0.183	0.036	0.063	0.605	0.029	0.024	0.179
Er	0.516	0.123	0.509	0.123	0.185	1.519	0.079	0.057	0.550
Tm	0.064	0.027	0.065	0.026	0.027	0.169	0.010	0.008	0.082
Yb	0.552	0.371	0.526	0.329	0.194	0.972	0.088	0.053	0.572
Lu	0.097	0.085	0.099	0.076	0.028	0.133	0.013	0.007	0.087
Y	5.034	0.823	4.633	0.877	1.661	15.665	0.706	0.581	4.719
微量元素									
Li	0.163	0.255	1.094	0.425	0.756	2.392	0.675	0.695	0.385
Be	0.014	0.013	0.013	0.015	0.035	0.068	0.018	0.018	0.081
Nb	188.575	197.411	201.425	213.074	3.419	12.953	2.538	0.386	0.764
Ta	23.556	21.473	26.270	23.659	0.445	1.767	0.530	0.234	0.137
Zr	512.801	573.565	480.775	416.906	33.496	43.502	22.450	5.264	94.596
Hf	10.530	11.058	10.011	9.507	1.076	1.257	0.866	0.120	1.701
Th	0.369	0.178	0.282	0.084	0.227	0.865	0.077	0.069	1.110
U	0.131	0.087	0.367	0.046	0.224	0.457	0.044	0.061	0.454
Rb	0.692	0.368	0.817	0.459	0.773	2.016	0.323	0.332	0.485
Sr	8.192	7.502	12.230	8.297	13.319	36.902	6.334	6.543	14.394
Ba	13.914	10.907	19.150	12.679	28.338	42.956	10.517	6.570	15.393
Cs	0.034	0.030	0.124	0.051	0.062	0.232	0.037	0.117	0.052
Tl	0.012	0.008	0.014	0.007	0.018	0.021	0.008	0.043	0.357
Ga	2.693	2.537	2.698	2.831	73.883	63.419	68.219	4.899	1.194
Pb	2.297	4.550	2.544	2.147	5.464	5.177	2.469	6.574	30.233
Bi	0.018	0.034	0.016	0.015	0.053	0.024	0.016	0.420	6.277
Sb	0.430	0.252	0.332	0.217	0.374	0.258	0.269	0.116	4.745
Cd	0.082	0.102	0.116	0.095	0.151	0.126	0.191	0.082	0.143
W	4.831	5.304	4.722	2.425	0.259	0.483	0.159	0.769	0.376
Sn	2.086	2.499	3.343	2.160	2.975	3.220	5.046	0.334	0.217
Mo	1.439	1.410	1.471	0.749	2.833	2.129	1.700	4.556	2.929

其钛铁矿为富钛型, TiO_2/FeO 分子比为 1.01 ~ 1.03, 含微量 MnO 、 V_2O_5 。

黄铁矿含 As 较低(0.38%), 属温度较高的黄铁矿, 其他微量元素含量低[多低于电子探针的检出限(0.1%)], 较纯净, 计算的分子式为 $\text{Fe}_{0.99}(\text{S}_{1.99}, \text{As}_{0.01})_2$, 接近理论值。

黄铜矿中均含一定量的 As(0.2% ~ 0.3%), Fe 和 Cu 的含量均较低, 基本不含 Co、Ni, 计算的分子

式为 $\text{Cu}_{0.96}\text{Fe}_{0.99}(\text{S}_{1.99}, \text{As}_{0.01})_2$ 。

磁黄铁矿含 As 较高, 并含微量的 Co、Ni 和 Au, 计算的分子式为 $\text{Fe}_{0.86-0.91}(\text{S}_{0.99-1.00}, \text{As}_{0-0.01})$ 。据 Lusk 等推算, 含 Fe(原子百分数) > 47.2% 的磁黄铁矿为六方磁黄铁矿(Lusk, 1993), 尾亚矿床中磁黄铁矿的 Fe 原子百分数为 46.11% ~ 47.56%, 有 1 件样品大于 47.2%, 属过渡类型的磁黄铁矿。

该矿床矿石矿物的稀土元素总量为 $3.286 \times$

$10^{-6} \sim 88.172 \times 10^{-6}$, 变化较大, 在不同矿物和不同类型矿石中, 其含量分布似无一定的选择性。轻重稀土元素分馏程度较低。轻重稀土元素比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 为 3.40 ~ 8.40, 在不同矿物和不同类型矿石中也无一定规律性。所有样品均具正铕异常, δEu 为 1.29 ~ 1.46。

从矿物的稀土元素配分模式(图 3)看, 不同矿物的曲线形态各不相同: 钛铁矿呈相对平缓的曲线, 重稀土元素部分略向下弯曲; 磁铁矿较之略陡倾, 略平直; 黄铁矿的曲线最陡倾, 特别是轻稀土元素部分最为明显, 其 $(\text{La}/\text{Sm})_N > 2.7$ [钛铁矿和磁铁矿的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 均小于 2.0]。⑦号矿体浸染状矿石(W2728-1)中的钛铁矿和脉状(致密块状)矿石(W2728-2)中的钛铁矿, 其稀土元素配分曲线极为相似(图 3a), 表

明具有相同的地球化学特征, 可能是同源岩浆分异的结果。②号矿体(W2729-11)和⑩号矿体(W2728-5)中的钛铁矿和磁铁矿均具有极为相似的稀土元素配分模式(图 3a, 3b), 表明它们亦具同源性。

对于同一种矿物, 特别是氧化物, 其微量元素含量在不同类型矿石中的差别并不大, 这亦说明浸染状矿石与块状矿石为同源分异的产物。但对于不同种类矿物, 其微量元素含量则明显不同: Nb、Ta、Zr、Hf、W 在钛铁矿中明显富集, 磁铁矿中次之, 硫化物中最低; 磁铁矿中则较富集 Ga、Rb、Sr、Ba; 硫化物中较为富集 Be、Tl、Pb、Bi、Sb、Mo 等。值得注意的是, 伟晶状矿石(W2729-10)中 Be、Sb、Bi、Th、U、Tl 等, 比其他样品中高 2 倍以上至一个数量级, 这些元素多为气成作用形成, 与伟晶岩化作用密切相关。

4.2 含矿岩石特征

4.2.1 岩石类型

尾亚矿床的直接容矿岩石为碱性辉长岩类, 包括角闪辉长岩、橄榄辉石岩、黑云母辉长斜长岩等。区内还出露有石英正长岩、花岗闪长岩、碱长花岗岩等, 它们与碱性辉长岩类为同源岩浆分异的产物, 因此也是含矿岩石种类。主要岩石类型的岩石学特征如下:

碱性辉长岩类 分布于该矿床的各矿段内, 矿体与其密切相伴。岩石为深灰绿色、墨绿色, 块状构造, 中-粗粒辉长结构。主要由(钛)普通辉石、普通角闪石、基性斜长石(中长石—培长石)和黑云母组成, 含少量橄榄石、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、锆石, 有时可出现霞石。由于矿物含量的变化, 可出现暗色辉长岩、橄榄辉长岩、角闪辉长岩、橄榄辉石岩、霞辉岩等岩性。值得注意的是, 矿体下盘常见伟晶状辉长岩, 呈囊包状或不规则脉状产于角闪辉长岩中, 其矿物组成与角闪辉长岩相似, 但矿物粒度较粗, 一般为 1 ~ 15 mm, 斜长石和角闪石、辉石常呈束状、放射状排列。

石英正长岩 主要分布于 I 矿段和 IV 矿段的南部; 在 II 矿段内, 多呈脉状穿于含矿辉长岩中。岩石为灰白-肉红色, 块状构造, 有时亦可出现伟晶状构造, 中粗粒结构。岩石成分以钾长石(主要为条纹长石)为主, 次为酸性斜长石(钠长石—更长石)、石英、普通角闪石、黑云母等, 有时出现普通辉石, 含少量或微量磷灰石、锆石、磁铁矿等。

花岗闪长岩 呈岩墙状分布于 III、IV 矿段之间。岩石为灰绿色、中-细粒结构, 块状构造。主要矿物

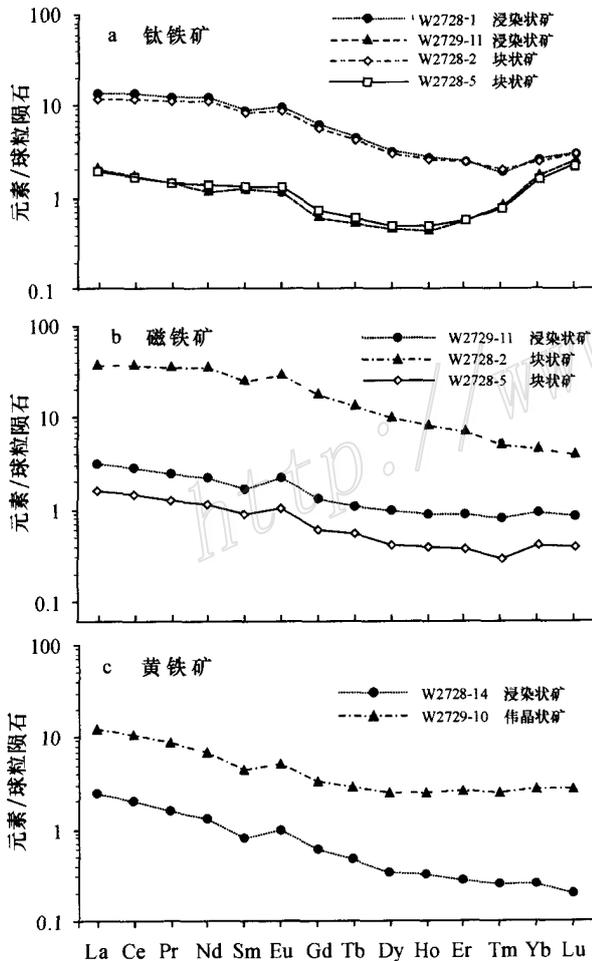


图 3 尾亚矿床矿石矿物稀土元素配分模式
图内样品号与表 4 中的一致

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of ore minerals from the Weiya deposit
Sample number as for Table 4

为钾长石(微斜长石为主)、斜长石(更长石—中长石)、石英、普通角闪石和黑云母,可含少量普通辉石。长石占 2/3 左右,钾长石和斜长石互为消长。

碱长花岗岩类 主要分布于矿区西部和西北部,在中部亦有小岩枝产出。岩石为浅灰白-肉红色,中粗粒似斑状-斑状结构,块状构造。与辉长岩接触时可同化或混染辉长岩。主要矿物为微斜条纹长石、酸性斜长石(钠长石—更长石)、石英,以及少量黑云母、角闪石、锆石、磷灰石、磁铁矿等。当长石成分主要为斜长石时,可变为斜长花岗岩(如 III 矿段的 ⑦号矿体附近)。

4.2.2 含矿岩石的化学成分特征

区内主要岩石类型的化学成分和稀土元素成分如表 5 所示。

该区的辉长岩类属富碱性系列的镁铁质-超镁铁质岩类。其中的含矿辉长岩除 TiO_2 含量较高外,还具有富 FeO、富碱,特别是富钠的特点。其 $TFeO/MgO$ 均大于 2.0, m/f 均小于 1.0,属富铁质超镁铁质岩类。而且,其氧化系数较低, Fe_2O_3/FeO 值在 0.47~0.67 之间,均小于 1。

区内的中酸性岩类显示出与含矿岩系一致的特征,均属碱性系列。正长岩类,无论是岩体,还是岩

表 5 尾亚矿床有关岩石的化学成分

Table 5 Chemical composition of rocks from the Weiya deposit

	含矿辉长岩				正长岩脉		正长岩	花岗岩
	②号矿体采坑	⑦号矿体竖井			⑩号矿体采坑		⑩号矿体地表	⑩号矿体竖井
	w2729-1	w3827-2	w3827-3	w3827-5	w2728-9	w2728-11	w2728-16	w2728-12
$w_B/10^{-2}$								
SiO ₂	36.80	48.04	43.95	35.26	63.12	65.85	62.22	69.73
TiO ₂	5.17	2.50	4.23	4.45	0.78	0.57	0.97	0.28
Al ₂ O ₃	10.80	16.39	14.28	2.97	16.18	16.12	15.49	14.58
Fe ₂ O ₃	11.36	4.45	5.81	10.19	4.12	2.25	3.58	0.53
FeO	16.98	6.95	9.04	21.60	2.59	2.15	3.94	1.25
MnO	0.21	0.16	0.19	0.37	0.09	0.06	0.17	0.03
MgO	10.20	4.61	5.85	13.81	0.77	0.66	0.97	1.18
CaO	4.59	9.13	9.49	6.54	2.07	2.17	2.58	1.87
Na ₂ O	2.14	4.04	3.20	0.74	4.56	5.22	4.53	2.75
K ₂ O	0.51	0.96	0.65	0.35	5.59	4.50	5.04	6.62
P ₂ O ₅	0.31	2.02	2.02	2.90	0.15	0.12	0.37	0.06
CO ₂	0.41	0.15	0.15	0.14	0.33	0.57	0.36	0.28
H ₂ O ⁺	0.39	0.57	0.68	0.97	0.32	0.27	0.48	0.43
H ₂ O ⁻		0.12	0.17	0.12				
Loss		0.12	0.06	-1.14				
总和	99.87	100.21	99.77	99.27	100.67	100.51	100.70	99.59
$w_B/10^{-6}$								
V	793.5	136.0	266.0	428.0				
La	13.36				27.26	37.56	38.88	34.18
Ce	31.06				61.59	72.37	88.75	63.53
Pr	4.01				6.81	8.23	11.01	6.58
Nd	17.55				27.04	30.66	44.68	23.57
Sm	3.90				5.62	6.21	9.14	4.80
Eu	2.33				4.99	4.24	6.59	0.93
Gd	4.45				5.86	6.14	9.73	4.93
Tb	0.59				0.88	0.93	1.37	0.81
Dy	3.31				4.98	5.33	7.97	4.93
Ho	0.63				1.00	1.12	1.55	1.03
Er	1.85				2.92	3.38	4.57	3.20
Tm	0.25				0.43	0.47	0.64	0.48
Yb	1.58				2.73	3.29	4.12	3.16
Lu	0.23				0.41	0.48	0.61	0.47

脉,均接近普通的正长岩类,其碱金属含量略高, $K_2O \approx Na_2O$,里特曼指数 σ 值为 4.14 ~ 5.12;岩石相对富 Mg,而 Al 含量略低。花岗岩的里特曼指数 σ 值为 3.29,同样属于富碱的碱性花岗岩,其 $K_2O > Na_2O$ 。

该区岩石的稀土元素总量变化较大,总体上,含矿辉长岩及正长岩的稀土元素总量较高,稀土元素配分曲线相似(图 4),向右倾斜,均具正铈异常,表明为同源分异的产物。花岗岩的稀土元素总量属正常,稀土元素配分曲线具典型的 I 型花岗岩特征;其稀土元素特征与辉长岩及正长岩明显不同,可能与主岩浆演化晚期有附加相岩浆侵入有关(李嵩龄等,2002)。

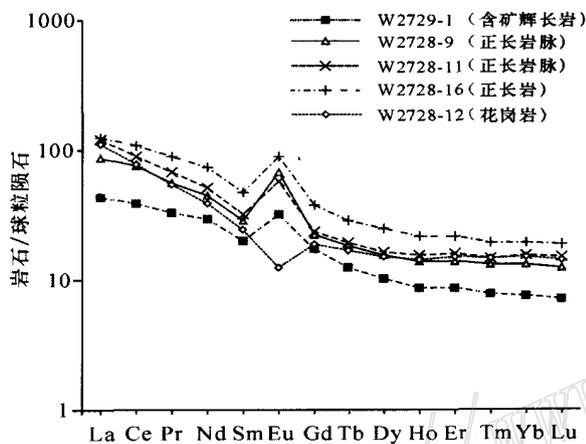


图 4 尾亚矿区相关岩石的稀土元素配分模式
图内样品号与表 5 的一致

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of rocks from the Weiya deposit
Sample number as for Table 5

5 讨论及结论

5.1 硫同位素特征

该矿床 2 件硫同位素样品的 $\delta^{34}S$ 值分别为:①号矿体浸染状矿石中的磁黄铁矿,为 5.357‰;②号矿体伟晶状矿石中的黄铁矿,为 6.669‰。均偏离零值较远,显示出与矿床母岩(镁铁质-超镁铁质岩)不一致的特点,反映出有部分硫可能来源于蒸发岩或地层。

5.2 成岩成矿物理化学条件

5.2.1 温度

依据含矿岩石的化学成分(表 5),采用 $K_{yt} \text{Ta} \text{Lih}$

法(邱家骧等,1991)计算得:含矿辉长岩中橄榄石的结晶温度为 1136 ~ 1296 °C [用其他方法(夏林圻,1981)计算的结果约为 1297 °C],斜长石的结晶温度为 1009 ~ 1189 °C;区内正长岩类的结晶温度为 1214 ~ 1243 °C,花岗岩为 1241 °C。

根据 Co 在不同矿物对之间的分配与温度的计算公式(李承德等,1996),以及该矿床内硫化物的成分(表 3),计算得其平衡时矿物对的成矿温度:黄铜矿-磁黄铁矿对为 552 ~ 571 °C,黄铁矿-磁黄铁矿对为 449 ~ 473 °C。

5.2.2 压力

前人根据角闪石的成分,计算得尾亚超单元形成时的压力为 296 MPa,推算其形成深度约为 9 ~ 10 km(李嵩龄等,2000)。

5.2.3 氧逸度

根据上述成岩温度(用结晶较晚的斜长石温度为代表)和压力,用莫宣学(1984)提出的氧逸度计算方法,计算得成岩时的氧逸度 $\lg f(O_2)$ 分别为:含矿辉长岩 - 5.62 ~ - 7.43,正长岩类 - 4.07 ~ - 5.37,花岗岩 - 6.71。

5.2.4 硫逸度

根据对缺位磁黄铁矿中晶格硫与硫蒸气之间建立的平衡关系计算(Toulmin et al.,1964),成矿后期硫化物形成时的硫逸度 $\lg f(S_2)$ 为 - 19.35 ~ - 19.77。

5.3 与同类矿床的对比

与其他钛铁矿床一样,尾亚矿床以富碱性辉长岩为主要含矿岩石,这类岩石一般富含角闪石和黑云母等富羟基矿物,即岩浆具富水特征。与同类岩浆型钒钛磁铁矿矿床相比,尾亚矿床又具有以下明显特点:

(1) 含矿岩体为小型岩株,其出露总面积不足 1 km²。虽出现部分似层状矿石,但岩体总体分异较弱,未出现大规模层状分异的韵律层。国内外典型的含钒钛磁铁矿岩体一般为几十至上百平方公里的大型层状(杂)岩体,如大庙大于 88 km²^①,红格大于 100 km²(卢记仁等,1980),攀枝花为 38 km²(王正允,1982),南非的布什维尔德(Bushveld)杂岩体则达 66000 km²(Wilemes,1989)。

(2) 相应的成岩成矿年龄较新,为早二叠世晚期。该类含矿岩体似乎有年龄越老,岩体规模越大

① 王述平,1978.关于钒钛磁铁矿的类型、成因和找矿方面的问题.见:富铁矿找矿理论和方法汇编(内部资料)。

的特点,如南非的布什维尔杂岩体、大庙岩体均为元古代,攀西地区的岩体亦形成于海西晚期。

(3) 多期多阶段成矿特征明显(见前文所述)。

(4) 矿床为贫 Cr、贫 P 型,目前尚未发现含 Cr 矿物,磷灰石含量亦较低,与南非、攀枝花和大庙地区的这类矿床明显不同。

(5) 与攀西地区(卢记仁等,1988)相比,尾亚矿床含矿辉长岩的成岩温度与之相当(攀西地区为 $1\ 049 \sim 1\ 160\ ^\circ\text{C}$),但氧逸度较低(攀西地区为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$), $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值亦较低(攀西地区为 $0.53 \sim 0.70$),反映出其岩浆状态处于相对较弱的氧化环境,是较晚阶段结晶的产物。

5.4 总结与结论

尾亚矿床的地质特征可概括为:

(1) 矿床产于塔里木地块北缘裂解的中天山古陆(太古界—元古界基底);

(2) 矿床的含矿岩系为早二叠世侵入的尾亚超单元一套有成因联系的富碱性岩系,其中直接与成矿有关的为碱性辉长岩类,可分为角闪辉长岩、橄榄辉石岩、黑云母辉长斜长岩等岩相;

(3) 矿体有辉长岩类中的浸染状矿体和贯入式脉状矿体 2 种;

(4) 矿石类型有浸染状和致密块状 2 种,浸染状矿石又可分为均匀浸染的中、细粒矿石、似层状矿石和伟晶状矿石等。

(5) 主要矿石矿物为含钒钛的磁铁矿和富钛的钛铁矿,含少量黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物;

(6) 不同类型矿石中矿石矿物的稀土元素配分特征呈现良好的一致性,反映出它们是同源分异的产物;

(7) 矿床可分 3 个矿化阶段:岩浆结晶分凝阶段(形成似层状、浸染状和块状矿体或矿石)、贯入阶段(形成贯入式块状矿体或矿石)和岩浆热液阶段(形成伟晶状矿石)。

(8) 矿床中磁铁矿的成分和矿体特征表明,该矿床无疑应属岩浆型矿床,但其硫同位素数据反映出有部分硫为同化围岩来源;

(9) 含矿辉长岩的成岩温度为 $1\ 296 \sim 1\ 009\ ^\circ\text{C}$,压力为 296 MPa 左右,氧逸度为 $10^{-5.62} \sim 10^{-7.43}$;成矿温度(硫化物)为 $571 \sim 449\ ^\circ\text{C}$,硫逸度为 $10^{-19.35} \sim 10^{-19.77}$ 。

综上所述,尾亚矿床应属与碱性镁铁质-超镁铁质杂岩有关的岩浆型矿床,其形成以岩浆分凝和贯

入式为主,晚期出现少量岩浆热液作用。

该矿床的形成与北疆地区后碰撞构造-成矿演化密切相关。北疆地区在晚泥盆世至早石炭世完成板块碰撞拼合后进入后碰撞阶段,经历了早石炭世伸展-晚石炭世挤压及早二叠世伸展-晚二叠世挤压两个伸展-挤压旋回。在早二叠世晚期,该区发生伸展作用,在中天山古陆块南部、红柳河造山带,发生大面积裂谷性质的火山喷发(形成北山裂谷)。在古陆内部,于岩浆演化晚期逐渐演化出富碱的镁铁质-超镁铁质岩浆,沿伸展作用产生的断裂上升,在地壳深部形成岩浆房,并逐步分凝形成分层,含钛铁矿的辉长岩位于岩浆房上部,在有利构造条件下先期抽出,形成浸染状矿石;随着伸展作用的发展,继续产生张裂隙,使底部的富钛铁矿浆上侵,穿插和胶结早期的含矿辉长岩而形成贯入式矿体。由于岩浆本身富含挥发组分,或岩浆上升过程中同化围岩,在演化后期,挥发分大量聚集,在温度较低时形成伟晶状矿石。

致谢 感谢新疆有色地质勘查局 704 地质队李洪亮矿长、赵洪礼工程师、尾亚矿山和尾亚项目组对本项工作的大力协助和支持;感谢北京矿产地质研究院方同辉博士、中国科学院地质与地球物理研究所程春博士参加了部分野外工作。

Reference

- Li C D, Mu J L, Zhu G Q, et al. 1996. Metallogeny and metallogenetic rule of shallow-enriched orebodies in the Huangshan metallogenetic belt, Hami, Xinjiang[M]. Chengdu: Chengdu Sci. & Tech. Univ. Press. 1 ~ 204 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Wang K Z, Li W Q, et al. 2002. Tectonic evolution since the Late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Xinjiang Geology, 20(4): 295 ~ 301 (in Chinese with English abstract).
- Li S L, Dong F R and Feng X C. 2000. Geochemical feature and diagenetic conditions of the Weiya composite stocks in eastern section of the Tianshan orogen, China[A]. In: Wang F T chief ed. Proceedings of the Fourth Term Tianshan Geology and Mineral Resources Symposium[C]. Urumchi: Xinjiang Peoples Press. 483 ~ 497 (in Chinese).
- Li S L, Li W Q, Feng X C, et al. 2002. Age of formation of the Weiya composite stocks in Eastern Tianshan Mts[J]. Xinjiang Geology, 20(4): 357 ~ 359 (in Chinese with English abstract).
- Lu J R, Zhang C X, Gu G X, et al. 1980. The distribution and state of chrome in the Hongge layered vanadium-bearing titanomagnetite deposit in Sichuan Province[J]. Bull. Inst. Geol. Min. Res., Chinese

- Acad. Geol. Sci., 1(1): 1 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Lu J R, Zhang C X, Zhang G D, et al. 1988a. Genetic type of V-Ti magnetite deposit in Panzhihua-Xichang area[J]. Mineral Deposits, 7(1): 1 ~ 13 (in Chinese with English abstract).
- Lu J R, Zhang G D, Zhang C X, et al. 1988b. A genetic model for layered intrusions and vanadic titanomagnetite deposit in Panzhihua-Xichang area[J]. Mineral Deposits, 7(2): 3 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Lusk J, Scott S D and Ford C E. 1993. Phase relations in the Fe-Zn-S system to 5 kbars and temperatures between 325 °C and 150 °C[J]. Econ. Geol., 88(8): 1880 ~ 1903.
- Mo X X. 1982. Partial molar volume of oxide component in magma and its lithological significance[J]. Geoscience, (1): 31 ~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Qi S M and Tang X X. 1982. A general survey of the vanadium-bearing titanomagnetite deposits in China[J]. Bull. Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci., (1): 73 ~ 77 (in Chinese).
- Qin K Z, Peng X M, San J Z, et al. 2003. Types of major ore deposits, division of metallogenic belts in Eastern Tianshan, and discrimination of potential prospects of Cu, Au, Ni mineralization[J]. Xinjiang Geology, 21(2): 143 ~ 150 (in Chinese with English abstract).
- Qiu J X and Lin J Q. 1991. Petrochemistry[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 276 (in Chinese).
- Toulmin P and Barton P B. 1964. A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 28(5): 641 ~ 671.
- Wang Z Y. 1982. Petrological characteristics and genesis of the Panzhihua V-Ti magnetite-bearing layered gabbro rockbody in Sichuan Province[J]. Minerals and Rocks, (1): 49 ~ 64 (in Chinese).
- Wilemes J. 1989. The geology of the Bushveld Igneous Complex, the largest repository of magmatic ore deposits in the world[J]. Econ. Geol., 84(4): 966.
- Xia L Q. 1981. Olivine geothermometer[J]. Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci., 1(1): 73 ~ 82 (in Chinese with English abstract).
- Xu G F and Shao J L. 1979. Typomorphic characteristic of magnetite and its actual significance[J]. Geology and Prospecting, (3): 30 ~ 37 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 李承德, 慕纪录, 竺国强, 等. 1996. 新疆哈密黄山成矿带浅富矿成因与成矿规律[M]. 成都: 成都科技大学出版社. 1 ~ 204.
- 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 等. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查[J]. 新疆地质, 20(4): 295 ~ 301.
- 李嵩龄, 董富荣, 冯新昌. 2000. 中国天山造山带东段尾亚复式岩株地球化学特征及成岩条件初探[A]. 见: 王福同主编, 第四届天山地质矿产资源学术讨论会论文集[C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 483 ~ 497.
- 李嵩龄, 李文铅, 冯新昌, 等. 2002. 东天山尾亚复式岩株形成时代讨论[J]. 新疆地质, 20(4): 357 ~ 359.
- 卢记仁, 张承信, 顾光先, 等. 1980. 四川红格层状钒钛磁铁矿床的分布和状态[J]. 中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊, 1(1): 1 ~ 17.
- 卢记仁, 张承信, 张光第, 等. 1988a. 攀西地区钒钛磁铁矿床的成因类型[J]. 矿床地质, 7(1): 1 ~ 13.
- 卢记仁, 张光第, 张承信, 等. 1988b. 攀西层状岩体及钒钛磁铁矿床成因模式[J]. 矿床地质, 7(2): 3 ~ 11.
- 莫宣学. 1982. 岩浆中氧化物组分的偏摩尔体积及其岩石学意义[J]. 地球科学, (1): 31 ~ 42.
- 元绍枚, 唐兴信. 1982. 中国钒钛铁矿概况[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 第1号: 73 ~ 77.
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 等. 2003. 东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选[J]. 新疆地质, 21(2): 143 ~ 150.
- 邱家骧, 林景任. 1991. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 276.
- 王正允. 1982. 四川攀枝花含钒钛磁铁矿层状辉长岩体的岩石学特征及其成因初探[J]. 矿物岩石, (1): 49 ~ 64.
- 夏林圻. 1981. 橄榄石地质温度计[J]. 中国地质科学院院报西安地质矿产研究所分刊, 2(1): 73 ~ 82.
- 徐国风, 邵洁莲. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, (3): 30 ~ 37.

**Weiya vanadium-bearing titanomagnetite deposit in Xinjiang:
A polygenetic magmatic differentiation-magmatic injection-
magmatic hydrothermal deposit**

WANG Yu-wang^{1,2}, WANG Jing-bin^{1,2}, WANG Li-juan^{1,2}, QIN Quan-xin³,
PENG Xiao-ming³ and HUI Wei-dong³

(1 Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2 Key Laboratory of Mineral Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3 No.704 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Exploration for Nonferrous Metals, Hami 839000, Xinjiang, China)

Abstract

Host rocks of the Weiya V-Ti-magnetite deposit in Xinjiang are characterized by a set of Early Permian alkali-rich rock series called Weiya super-unit, and the direct ore-bearing rock is alkali gabbro. There are two ore types in the deposit, namely disseminated ore and massive ore. The disseminated ore may contain medium- to fine-grained homogeneous disseminated ore, stratoid ore and pegmatitic ore. REE patterns of ore minerals from different ore types show good consistency, suggesting that they are congenetic products. The pegmatitic ore type is obviously enriched with sulfide minerals, and has high contents of Be, Sb, Bi, Th, U, and Tl. Three ore-forming stages are recognized, i.e., the magmatic crystallization-differentiation stage, forming stratoid, disseminated and massive orebodies or ores; the magmatic injection stage, forming injected massive orebodies or ores; and the magmatic hydrothermal stage, forming pegmatitic ores. Diagenetic temperature, pressure and oxygen fugacity of ore-bearing gabbros are 1 296 ~ 1 009 °C, 296 MPa, and $10^{-5.62} \sim 10^{-7.43}$ Pa respectively, and ore-forming temperature and sulfur fugacity of sulfides are 571 ~ 449 °C and $10^{-19.35} \sim 10^{-19.77}$ Pa respectively. The Weiya deposit is a magmatic deposit related to alkali ultramafic-mafic complex. The ore-forming process is predominantly magmatic crystallization-differentiation and injection, with partial magmatic hydrothermal activity occurring at the late stage. Hence, this deposit is a polygenetic magmatic differentiation-magmatic injection-magmatic hydrothermal deposit.

Key words: geology, alkali gabbro, V-Ti-magnetite deposit, magmatic differentiation, magmatic injection, magmatic hydrothermal fluid, Weiya