



中祁连大白石头沟钛铁矿床地质特征与成因探讨

魏本赞, 卢辉雄, 汪 冰, 张 恩

核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002

摘 要: 大白石头沟地区位于中祁连托莱南山北缘, 大地构造位置处于中祁连岩弧带, 成矿区带属于加里东期钨、稀有金属、铜(钛、锑、金)成矿带。钛磁铁矿化体主要产于古元古代托赖岩群片麻岩段、中元古代湟中群磨石沟组片岩段和石英岩段内, 矿化体受岩性控制明显, 并具多期成矿的特点。通过对钛矿物的岩相观察、电子探针成分分析及人工重砂分析, 厘定了钛矿物以钛磁铁矿为主, 含少量钛铁矿和微量金红石等。通过深入研究钛磁铁矿成矿地质特征及赋存状态, 认为: 1) 矿化类型属于火山喷流-沉积型; 2) 伟晶岩体不是成矿物质来源, 成矿物质最大可能来源于火山喷发带来的富钛质超基性-基性火山岩, 且为早期分离结晶后堆晶而成。经大量文献资料查证, 在中祁连大白石头沟地区发现钛磁铁矿化体尚属首次, 因此本研究成果可为后续的勘查及相关工作提供理论依据。

关键词: 钛磁铁矿; 稀有金属; 赋存状态; 矿床成因; 中祁连

GEOLOGY AND GENESIS OF DABAISHITOUYOU TITANIUM MAGNETITE DEPOSIT IN MIDDLE QILIAN MOUNTAINS

WEI Ben-zan, LU Hui-xiong, WANG Bing, ZHANG En

Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, CNNC, Shijiazhuang 050002, China

Abstract: The Dabaishitougou area in the northern margin of Tuolai South Mountain in middle Qilian Mountains, tectonically located in the mid-Qilian magmatic arc belt, belongs to the Caledonian W, rare metals, Cu (Ti, Sb, Au) metallogenic belt. The titanium magnetite mineralized bodies, obviously controlled by lithology and characterized by multistage mineralization, are mainly occurred in the gneiss member of Palaeoproterozoic Tuolai Group and the schist and quartzite members of Moshigou Formation of Mesoproterozoic Huangzhong Group. With petrographic observation, electron probe microanalysis (EPMA) and artificial heavy concentrate analysis, it is determined that the titanium minerals are dominated by titanium magnetite with minor ilmenite and trace rutile. The source of titanium minerals is discussed based on the in-depth study of metallogenic characteristics and occurrence state of titanium magnetite deposit. It is considered that the mineralization is of volcanic exhalation-sedimentary type, proving that the ore-forming materials are most likely from Ti-rich basic-ultrabasic volcanic rocks brought by volcanic eruption formed after the early fractional crystallization and accumulation rather than from the pegmatite body. It is the first time that titanium magnetite bodies have been found in Dabaishitougou area of middle Qilian Mountains through verification of documents. Thus the study results can provide a theoretical basis for follow-up exploration.

Key words: titanium magnetite; rare metal; occurrence state; deposit genesis; middle Qilian Mountains

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-28. 编辑: 李兰英.

基金项目: 青海省国土资源厅项目“青海省天峻县大白石头沟一带钛铁多金属矿预查”(青国土资矿[2014]26号).

作者简介: 魏本赞 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 现主要从事固体矿产勘查及研究工作, 通信地址 河北省石家庄市学府路 11 号, E-mail/ 524473847@qq.com

0 引言

钛(Ti)是地壳中分布最广和丰度高(6.32×10^{-3})的元素之一^[1]。目前,国内主要利用的有钛铁矿(FeTiO_3)、金红石(TiO_2)和钛磁铁矿 $[(\text{Fe},\text{Ti})_3\text{O}_4]$ 。国内钛矿床类型主要有 3 种^[2]: 1)变质基性岩(榴辉石)中含金红石原生矿床; 2)与基性岩有关的伴共生钼、钛磁铁矿床; 3)金红石内陆砂矿床。

大白石头沟钛磁铁矿位于中祁连托莱南山北缘(图 1)。2012 年,在中祁连托莱南山北缘大白石头地区发现了 3 处航空磁异常。经航磁异常查证,发现航磁异常由磁铁矿化所引起,并伴有钛矿化^①。该地区钛矿物组分、赋存状态、矿床成因、钛磁铁矿物质来源等问题一直存在争议^[3-15],制约着该地区地质矿产勘查进度与相关研究工作。

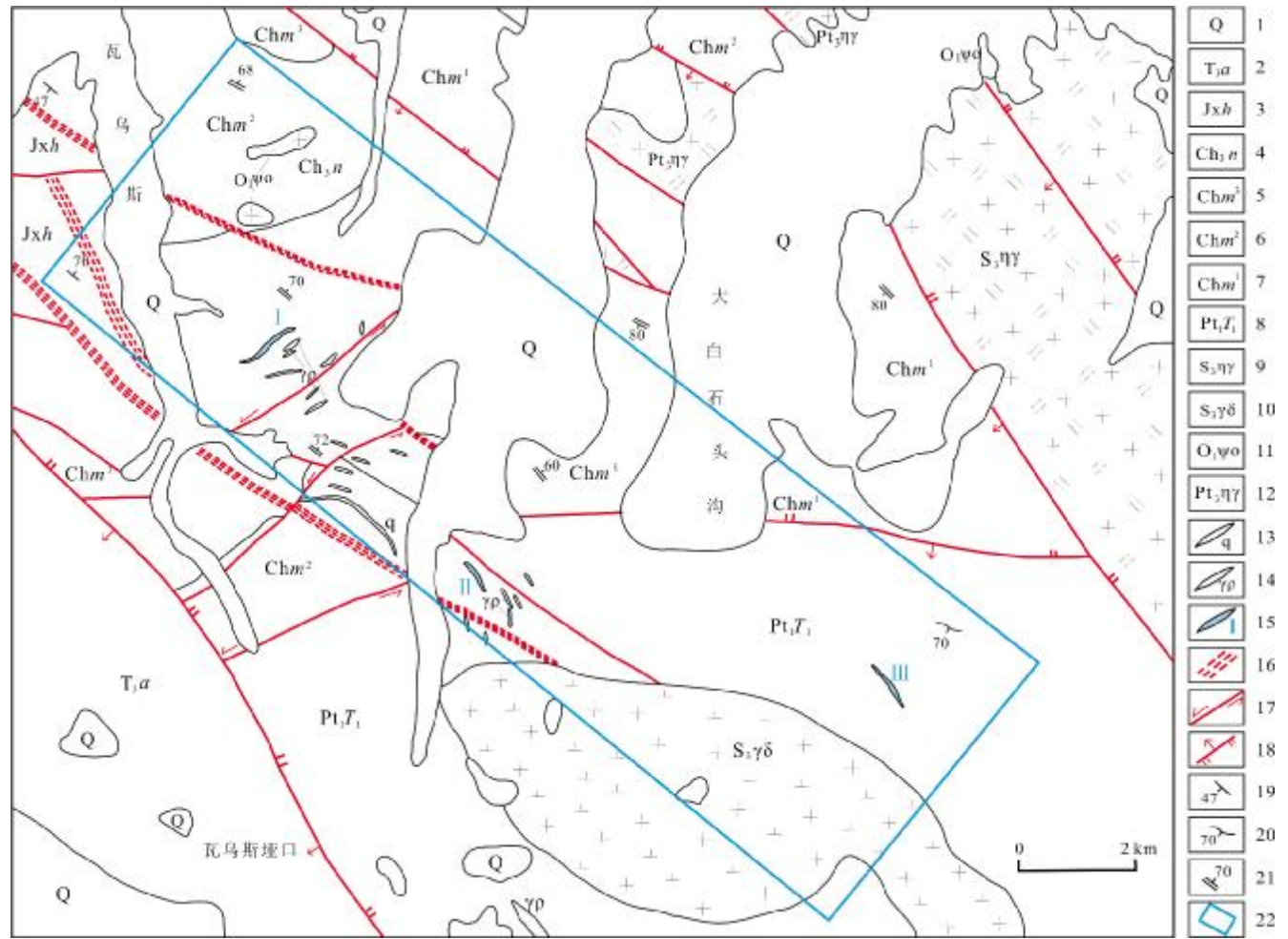


图 1 祁连县大白石头沟地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Dabaishitougou area in Qilian County

1—第四系(Quaternary); 2—三叠系阿塔寺组(Triassic Atasi fm.); 3—蓟县系花儿地组(Jixianian Huardi fm.); 4—长城系南白水河组(Mesoproterozoic Nanbaishuihe fm.); 5—长城系磨石沟组碳酸盐岩段(carbonate rock mem. of Moshigou fm., Changchengian); 6—磨石沟组石英岩段(quartzite mem. of Moshigou fm.); 7—磨石沟组片岩段(schist mem. of Moshigou fm.); 8—古元古界托赖岩群片麻岩组(gneiss fm. of Tuolai gr., Paleoproterozoic); 9—晚志留世二长花岗岩(Late Silurian monzogranite); 10—晚志留世花岗闪长岩(Late Silurian granodiorite); 11—早奥陶世角闪岩(Early Ordovician hornblendite); 12—新元古代二长花岗岩(Neoproterozoic monzogranite); 13—石英脉(quartz vein); 14—花岗伟晶岩脉(granite pegmatite dike); 15—矿化体及编号(mineralized body and number); 16—韧性断层(ductile fault); 17—平移断层(strike-slip fault); 18—逆断层(reverse fault); 19—地层产状(formation occurrence); 20—片麻理产状(gneissosity occurrence); 21—片理产状(schistosity occurrence); 22—研究区(study area)

①伍显红. 青海省天峻县大白石头沟一带 1:5 万航磁异常查证报告. 2014.

笔者在详细分析大白石头沟地区矿产地质特征的基础上,通过钛矿物岩相观察、电子探针及人工重砂等分析手段,厘定了钛矿物赋存状态、矿石结构、化学组分及矿物含量等矿物学特征,初步探讨钛磁矿物质来源及成矿模式,以期为后续的勘查及研究工作提供理论依据。

1 矿区地质背景

1.1 大地构造位置

大白石头沟地区大地构造位置位于秦祁昆造山系中祁连微陆块,三级构造单元属中祁连岩浆弧带;成矿区带属于中祁连加里东期钨、稀有金属、铜、钛、锑、金成矿带。

1.2 地层

研究区属祁连-北秦岭地层分区中祁连地层小区(图1)。区内东部出露古元古界托赖岩群(Pt_1T),西部出露中元古界长城系湟中群磨石沟组(Chm)片岩段(Chm^1)和石英岩段(Chm^2)。托赖岩群分为片麻岩组(Pt_1T_1)和片岩组(Pt_1T_2),该地层岩石中普遍出现石榴石、微斜长石、褐色黑云母、角闪石、石英、白云母等变质矿物,其变质程度为低角闪岩相,原岩为一套成熟度较高的基性火山岩、泥砂质碎屑岩类。中元古界长城系湟中群磨石沟组主要分布于研究区西北部,出露片岩段(Chm^1)、石英岩段(Chm^2)及碳酸盐岩段(Chm^3)。磨石沟组受区域低温动力变质作用的影响,岩石中普遍具有石榴石、黑云母、白云母、绿色角闪石、斜长石、石英等变质矿物,其变质程度为高绿片岩相。岩石中出现绿泥石、绢云母、石英等变质矿物,原岩为一套泥岩、长石石英砂岩、石英砂岩夹灰岩及基性火山岩建造。

1.3 构造

区内北西向韧-脆性构造极为发育,主要发育3组断裂构造,分别为NW向、近E-W向和NE向断裂。其中,NW向韧性剪切构造为主体构造,伴随北西向韧性剪切构造发育浅层次的脆性断裂构造。该期构造形成时期较早,后期活动特征较明显,且多具左行压扭性特征。矿化体与NW向韧-脆性构造密切相关,构造对矿化体具有明显的控制和改造作用。

1.4 侵入岩

区内侵入岩发育,主要为伟晶岩脉,呈脉状、团块

状,分布范围较广,侵入时期主要有新元古代、奥陶纪、志留纪和泥盆纪。

火山活动起始于古元古代,终止于奥陶纪。火山岩以不同产状赋存于各时代地层中,特别在古元古界托赖岩群、中元古界长城系磨石沟组及下奥陶统阴沟群中均发育海相喷发的中基性火山岩,岩性主要为玄武岩、玄武质角砾熔岩、凝灰岩,多见枕状构造,海相喷发特征明显。

2 矿床地质及矿石特征

2.1 矿化体地质特征

区内共发现3条钛矿化体(I、II、III),分别产于古元古界托赖岩群片麻岩段、中元古界湟中群磨石沟组片岩岩段和石英岩段。

I号钛矿化体:产于中元古界长城系湟中群磨石沟组片岩岩段(图2),呈北东向条带状展布,长度600 m,宽度4~9 m,产状与地层产状基本一致。矿化

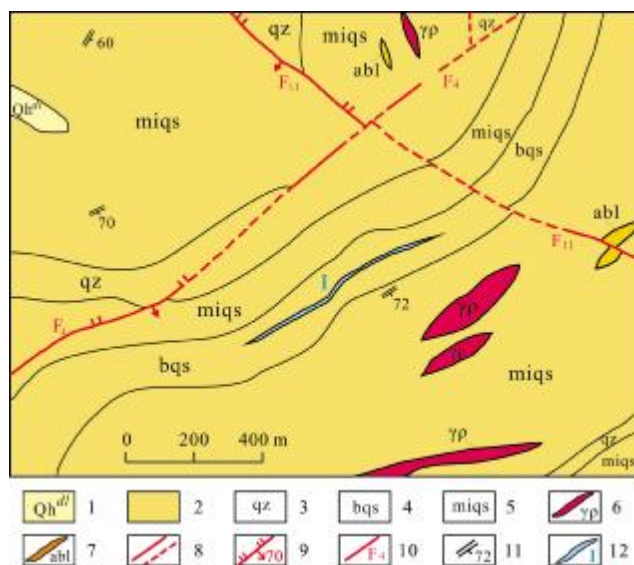


图2 I号钛矿化地段地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of No. I titanium mineralization
1—全新统坡积物 (Holocene slope wash); 2—长城系磨石沟组片岩段 (schist mem. of Moshigou fm., Changchengian); 3—石英岩 (quartzite); 4—黑云母石英片岩 (biotite quartz schist); 5—二云母石英片岩 (two-mica quartz schist); 6—花岗伟晶岩 (granite pegmatite); 7—斜长角闪岩 (amphibolite); 8—实测及推断断层 (surveyed and inferred faults); 9—逆断层 (reverse fault); 10—断层编号 (fault number); 11—片理产状 (schistosity occurrence); 12—矿化体及编号 (mineralized body and number)

体围岩为黑云石英片岩,矿化体长约600 m,厚度3.90~9.85 m,平均厚度6.50 m; TFe 品位为 8.45×10^{-2} ~ 16.0×10^{-2} ,平均品位 12.24×10^{-2} ; TiO_2 品位为 1.65×10^{-2} ~ 4.75×10^{-2} ,平均品位 3.12×10^{-2} 。

Ⅱ号钛矿化体:产于古元古界托赖岩群片麻岩段,出露岩性主要为斜长片麻岩,夹黑云斜长片麻岩,矿化体与地层产状一致,产状为 $244^\circ \angle 82^\circ$ 。矿化体呈层状北西向展布,控制长度300 m,厚度3.10~10.56 m,平均厚度6.57 m; TFe 品位为 10.25×10^{-2} ~ 13.7×10^{-2} ,平均品位 11.33×10^{-2} ; TiO_2 品位为 1.55×10^{-2} ~ 2.9×10^{-2} ,平均品位 1.98×10^{-2} 。

Ⅲ号钛矿化体:产于中元古界长城系湟中群磨石沟组石英岩段黑云石英片岩中,矿化体与围岩岩层产

状稳定,倾向南西,倾角 $71^\circ \sim 74^\circ$ 。矿化体呈北西向展布,长度100 m,宽2 m,矿化体产状为 $197^\circ \angle 74^\circ$,与地层产状一致。TFe 平均品位为 11.39×10^{-2} ; TiO_2 平均品位为 2.11×10^{-2} 。

2.2 矿石特征研究

钛矿床类型复杂多样,为准确厘定钛矿物赋存状态、矿石结构、化学组分及矿物含量等特征,先后运用了岩相观察、化探分析、电子探针及人工重砂等分析手段。研究表明,该地区钛矿化富集以钛磁铁矿为主,并含少量的钛铁矿和微量金红石等(图3)。

2.2.1 矿相显微分析

黑云母石英片岩:灰黑色,鳞片粒状变晶结构,片状构造。岩石主要矿物成分为石英、黑云母,其次含少

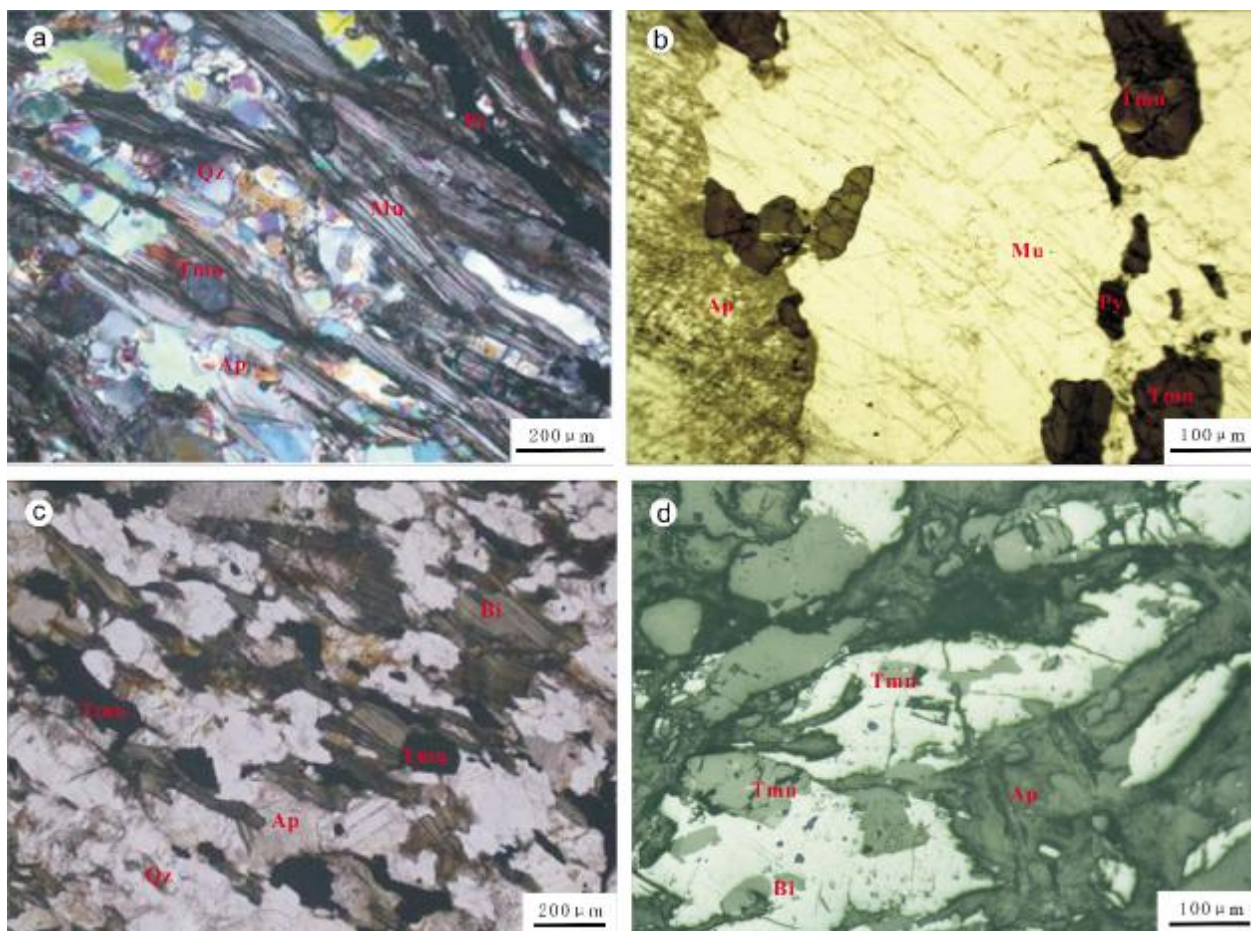


图3 钛磁铁矿矿石显微照片

Fig. 3 Microphotographs of titanium magnetite ores

a—黑云石英片岩(薄片, $\times 50$) (thin section of biotite quartz schist); b—黑云石英片岩(光片,单偏光, $\times 100$) (polished section of biotite quartz schist); c—黑云斜长片麻岩(薄片, $\times 50$) (thin section of biotite plagiogneiss); d—黑云斜长片麻岩(光片,反射光, $\times 100$) (polished section of biotite plagiogneiss); Qz—石英(quartz); Ap—斜长石(plagioclase); Bi—黑云母(biotite); Mu—白云母(muscovite); Tmn—钛铁氧矿物(titanium ferrite mineral); Py—黄铁矿(pyrite)

量白云母和金属矿物(图 3a)。金属矿物(包括铁质粉末等)含量 1%~9%(图 3b),多呈他形—不规则粒状,有些呈粉末状集合体,主要呈零星散状或定向条带状分布于岩石中。

黑云母斜长片麻岩:其特征与斜长片麻岩差异不大,但黑云母等暗色矿物含量明显增多。岩石多为灰黑色、黑色,鳞片粒状变晶结构,片麻状构造(图 3c)。主要矿物成分为石英、斜长石、黑云母,其次含少量白云母、角闪石和金属矿物,副矿物有石榴石。金属矿物含量不足 3%(图 3d),个别标本可达 7%,以磁铁矿为主;石榴石含量一般在 1%~5%之间,多为晶簇,大小一般在 2~5 mm,多呈浅褐红色,应为铁铝榴石。

通过岩相观察,镜下可以确定矿石中含有少量的黄铁矿、磁铁矿,而磁铁矿、含钛磁铁矿在镜下特征相似而难以区分。为进一步确定钛矿物的赋存状态,需借助矿物电子探针分析及人工重砂分析等技术手段,分析对象为与矿床成因关系密切的黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿等。

2.2.2 电子探针成分分析

矿石电子探针分析结果见表 1。从表中可知,矿石

各样品测点成分平均值:FeO 77.78%, SiO₂ 0.07%, TiO₂ 11%, Al₂O₃ 0.09%, MnO 0.37%, CaO 0.07%;除 FeO、TiO₂ 外,其他元素含量甚微。研究区矿石中 FeO、TiO₂ 的含量与磁铁矿中的含量呈正相关关系,与 Al₂O₃ 呈负相关关系。据资料显示,钛铁矿的 MgO 含量比磁铁矿的高,而 Al₂O₃ 含量比磁铁矿的低,矿物在结晶时,Mg 趋向于钛铁矿,而 Al 趋向于磁铁矿。大石头沟钛磁铁矿存在 Mg 低 Al 高的特点,钛磁铁矿化学式为 (Fe,Ti)₃O₄,其 TiO₂ 的理论含量为 12%~16%。表 1 中样品测点 TiO₂ 成分平均值与钛磁铁矿的理论化学成分基本一致,间接地印证了钛矿物主要是钛磁铁矿。

研究区内钛磁铁矿中 TiO₂ 含量较高,与内蒙古羊蹄子山钛矿床类似^[16]。TiO₂ 变化范围较大,其含量与形成的温度、压力密切相关,反映了钛磁铁矿成矿的复杂性。大石头沟钛磁铁矿化体中普遍出现了副矿物铁铝榴石,副矿物的出现也印证了矿床变质成因的特点^[17]。

2.2.3 人工重砂分析

通过人工重砂分析了研究区内矿石中矿物类型、含量及占比情况(表 2)。矿石类型以钛磁铁矿为主

表 1 钛磁铁矿石电子探针分析数据
Table 1 EPMA results of titanium magnetite ores

测点	Na ₂ O	MgO	FeO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	CaO	NiO	V ₂ O ₃	总量
1	/	/	77.81	/	0.05	0.03	/	0.02	12.07	0.06	0.10	/	0.41	90.55
2	/	/	76.01	/	0.05	0.05	0.07	/	14.18	0.71	0.07	/	0.33	91.47
3	/	/	74.96	/	0.04	0.06	0.10	/	12.66	0.27	0.04	/	0.27	88.4
4	/	0.02	80.14	0.19	0.19	0.17	0.21	0.05	7.02	0.06	0.04	/	0.23	88.32
5	/	/	79.97	/	0.10	0.02	/	/	10.18	0.75	0.09	/	0.24	91.35
平均值	/	/	77.78	/	0.09	0.07	0.08	/	11.22	0.37	0.07	/	0.03	90.02

中国地质大学(北京)国家重点实验室测定。含量单位:%。

表 2 钛磁铁矿人工重砂分析结果表
Table 2 Artificial heavy concentrate results of titanium magnetite ores

矿石类型	质量	金红石		钛铁矿		钛磁铁矿		其余	
		质量	百分比	质量	百分比	质量	百分比	质量	百分比
矿石	208 000	<1	<0.01	6 794	0.654	59 334	5.706	2 013 870	93.64
矿石	208 000	/	/	1 600	0.154	86 020	8.272	1 992 380	91.574
矿石	1 940 000	/	/	6 516	0.672	80 460	8.294	1 853 024	91.034

核工业地质分析测试研究中心测定。质量单位:mg。

(5.70%~8.29%), 次为钛铁矿(0.15%~0.67%), 金红石矿微量。钛磁铁矿与钛铁矿共生, 呈半自形—自形粒状集合体填充在脉石矿物颗粒之间, 金属光泽, 高硬度, 粒径 0.01~0.40 mm。

3 成因探讨

3.1 钛矿物来源

目前, 针对钛矿物质形成许多学者提出了不同观点, 主要有以下 2 种: 1) 钛磁铁矿是岩浆晚期结晶的产物^[18-19]; 2) 钛磁铁矿是磁铁矿早期分离结晶后堆晶形成, 即来自早期超基性—基性富钛质火山岩^[20]。

大白石头沟地区钛矿化体周边均发育大量规模不等的伟晶岩脉, 这一特点引起了学者们对伟晶岩脉是否提供矿源的思考。依据 1:5 000 岩石地球化学调查资料, 对区内各类岩石的地球化学特征进行统计分析。比较各类岩石中 Ti 元素的含量, 在花岗伟晶岩中, Ti 元素含量为 $1\ 327 \times 10^{-6}$, 显著低于全区背景值 ($3\ 958.2 \times 10^{-6}$), 但略低于花岗岩(维氏, 1962)的平均含量; 在角闪石岩中, Ti 元素含量为 $6\ 669 \times 10^{-6}$, 显著高于全区背景值, 但略低于基性岩(维氏, 1962)的平均含量; 其他岩石中, Ti 元素含量均相差不大, 与全区背景值相接近, 也与地壳岩石的丰度基本一致。因此, 钛矿物来自花岗岩体(或伟晶岩)观点基本排除。

结合矿区地质背景、矿化体特征、矿石特征等, 笔者认为该区钛磁铁矿成矿物质主要来源于超基性—基性富钛质火山岩, 即火山活动中, 钛矿物经过了分离—结晶过程, 遇到氧化还原障, 堆晶沉淀富集成矿。依据如下。

1) 区域上火山岩主要分布在古元古界托赖岩群、长城系磨石沟组及下奥陶统阴沟群等地层, 这些地层中均可见有海相喷发的中基性火山岩。火山喷发韵律多, 岩相可分为喷溢、爆发和沉积相。岩石类型极为复杂, 主要岩性有枕状玄武岩、蚀变玄武岩、石英拉斑玄武岩、玄武质角砾熔岩、玄武安山岩、玻基安山岩、蚀变辉石安山岩、玻基安山岩、基性晶屑岩屑角砾凝灰岩、沉晶屑岩屑凝灰岩。岩石富含 Ti、Fe 等元素, 且普遍经历了构造改造、变形变质。

2) 钛矿物富集不局限于某个地层, 在不同时代的地层中均可见, 且在部分岩组中出现 Ti、Fe 元素的富集。例如, 早奥陶世阴沟群火山岩组是中祁连蛇绿混

杂岩带中海相火山岩型多金属矿重要的含矿岩系, 该群中发现了多处火山喷流—沉积型铁矿床、矿点, 且 Ti、Fe、Co、Mn、V 等元素呈高背景或偏高态势。

3) 区内多数地层 Ti、Fe 等元素呈高背景值, 并在局部地段富集成矿, 矿化体具似层状、透镜状特点, 符合“火山喷流—沉积”型矿床特征。

3.2 成矿模式

根据火山喷流—沉积的成矿理论, 其喷流系统主要有管道相、近喷口喷流沉积岩相、远离喷口正常沉积岩相等。

研究区古构造环境主要为岛弧作用模式, 成矿作用主要与海底火山—热液活动相关, 主矿体形成于火山喷发间歇期, 并处在岛弧/弧后盆地或克拉通内部裂谷带中。随着中祁连大洋裂谷的形成, 来自海洋底部富含 Ti、Fe 流体沿着喷发管道上升, 并在运移过程中不断演化为高浓度的成矿流体, 这些流体显示出以地幔流体为主, 混有少量大气降水, 通常以多阶段形式在剪切带内交代—沉淀成矿。其次, 在区域变质作用下, 富 Ti、Fe 成矿流体进一步发生富集作用; 接着, 在晚奥陶世区域构造—岩浆作用下, Ti、Fe 成矿元素再一次变质富集而形成低品位的钛磁铁矿化体; 最后, 经过多期断裂构造的改造作用, 形成了矿化体似层状、透镜状特点(图 4)。

4 结论

(1) 钛磁铁矿化体主要产于古元古界托赖岩群片麻岩、中元古代湟中群磨石沟组片岩和石英岩中, 受岩性控制明显。

(2) 通过岩相观察、电子探针及人工重砂等分析手段, 厘定了矿石矿物以钛磁铁矿为主, 含少量钛铁矿和微量金红石等。

(3) 根据钛磁铁矿成矿地质特征及赋存状态, 印证了伟晶岩体不是成矿物质的物源体, 成矿物质主要源于火山喷发带来的富钛质超基性—基性火山; 矿化类型属于火山喷流—沉积型。

(4) 笔者查阅了大量的地质勘查资料与文献, 钛磁铁矿在中祁连托莱南山大白石头沟地区富集成矿尚属首次。因此, 本研究成果可为后续的勘查及相关工作提供理论依据。

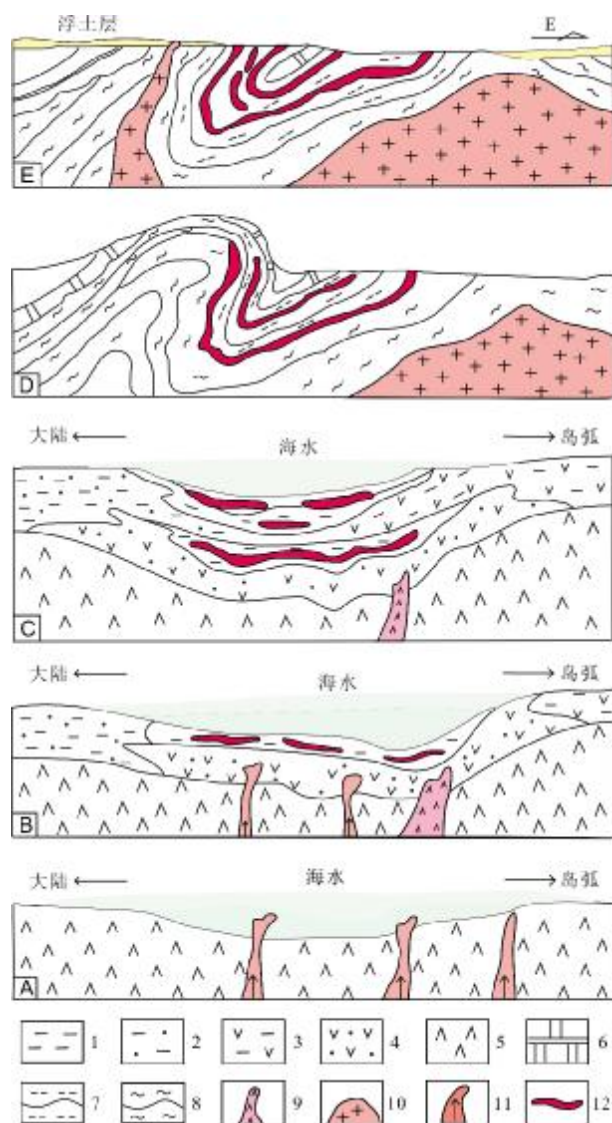


图4 大石头沟火山喷流-沉积型钛磁铁矿形成演化模式图
(据文献[21])

Fig. 4 Metallogenic model of volcanic exhalation-sedimentary titanium magnetite deposit in Dabaishitougou area
(From Reference [21])

1—泥岩(mudstone); 2—陆源杂砂岩(terrigenous greywacke); 3—火山成因的杂砂岩(volcanogenic greywacke); 4—中酸性火山岩(acid-intermediate volcanic rock); 5—中基性火山岩、火山碎屑岩(intermediate-basic volcanic/pyroclastic rock); 6—大理岩(marble); 7—黑云母片岩(biotite schist); 8—片麻岩(gneiss); 9—次火山岩(subvolcanic rock); 10—混合花岗岩(migmatitic granite); 11—火山流体活动(volcanic fluid activity); 12—钛矿化体(titanium mineralized body)

参考文献(References):

[1]吴贤,张健.中国的钛资源分布及特点[J].钛工业进展,2006,23

(6): 8-12.

Wu X, Zhang J. Geographical distribution and characteristics of titanium resources in China[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23 (6): 8-12.

[2]丁建华,张勇,李立兴,等.中国钛矿成矿地质特征与资源潜力评价[J].中国地质,2020,47(3): 627-644.

Ding J H, Zhang Y, Li L X, et al. Metallogenic geological characteristics and titanium resources potential in China[J]. Geology in China, 2020, 47(3): 627-644.

[3]胡毅,廖颖颖,张明胜,等.四川攀西红格钒钛磁铁矿床地质特征及找矿预测地质模型[J].矿产与地质,2020,34(4): 655-661.

Hu Y, Liao R Y Z, Zhang M S, et al. Geological characteristics and exploration prediction model of Hongge vanadium-titanium magnetite deposit in Panxi, Sichuan Province [J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(4): 655-661.

[4]罗金华,邱克辉,张佩聪,等.红格钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的矿物学特征研究[J].矿物岩石,2013,33(3): 1-6.

Luo J H, Qiu K H, Zhang P C, et al. Studies of mineralogical characteristics of titano-magnetite in Hongge vanadium titano-magnetite [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2013, 33(3): 1-6.

[5]刘林,高建利,尚小社.陕西铁佛寺钛磁铁矿地质特征及找矿前景[J].矿产勘查,2012,3(5): 638-643.

Liu L, Gao J L, Shang X S. Geological characteristics of Tiefsi titanium-magnetite deposit and prospecting potential, Shaanxi [J]. Mineral Exploration, 2012, 3(5): 638-643.

[6]张腾蛟,李佑国,张月姣,等.川西盐边县红格钒钛磁铁矿中镍钴硫化物的铂族元素地球化学特征[J].地质论评,2017,63(4): 1050-1063.

Zhang T J, Li Y G, Zhang Y J, et al. PGE geochemical characteristics of massive sulfide in V-Ti magnetite at Hongge area, Yanbian County, western Sichuan[J]. Geological Review, 2017, 63(4): 1050-1063.

[7]杨欢,冶玉花,王登科.变质岩中金红石研究综述[J].四川地质学报,2013,33(1): 120-125.

Yang H, Ye Y H, Wang D K. On rutile in metamorphic rocks[J]. Acta Geologica Sichuan, 2013, 33(1): 120-125.

[8]徐少康.我国金红石矿床成因类型及成矿区带[J].化工矿产地质,2001,23(1): 11-18.

Xu S K. Genetic types of mineralizing provinces of rutile deposits in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 2001, 23(1): 11-18.

[9]张志彬,黄菲,刘开君,等.攀枝花钒钛磁铁矿中纳-微米尖晶石的出溶序次及其成因机制[J].地球科学,2018,43(5): 1635-1649.

Zhang Z B, Huang F, Liu K J, et al. Sequence and genetic mechanism of nano-micron spinel exsolution from Panzhihua V-Ti magnetite deposit[J]. Earth Science, 2018, 43(5): 1635-1649.

[10]郑文勤,邓宇峰,宋谢炎,等.攀枝花钒钛磁铁矿成分特征及其成因意义[J].岩石学报,2014,30(5): 1432-1442.

Zheng W Q, Deng Y F, Song X Y, et al. Composition and genetic

- significance of the ilmenite of the Panzhihua intrusion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(5): 1432-1442.
- [11] 郭道军, 于海军, 王雪, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿地质特征与成矿远景[J]. *四川地质学报*, 2014, 34(4): 523-528.
- Guo D J, Yu H J, Wang X, et al. Geological features and prospecting potential of the Panzhihua vanadic titanomagnetite deposit [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2014, 34(4): 523-528.
- [12] 张晓琪, 张加飞, 宋谢炎, 等. 斜长石和橄榄石成分对四川攀枝花钒钛磁铁矿床成因的指示意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3675-3688.
- Zhang X Q, Zhang J F, Song X Y, et al. Implications of compositions of plagioclase and olivine on the formation of the Panzhihua V-Ti magnetite deposit, Sichuan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3675-3688.
- [13] 赵一鸣, 李大新, 韩景仪, 等. 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[J]. *矿床地质*, 2008, 27(4): 466-473.
- Zhao Y M, Li D X, Han J Y, et al. Mineralogical characteristics of anatase, rutile and ilmenite in Yangtizashan-Moshishan titanium ore deposit, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(4): 466-473.
- [14] 郭涛, 林明明, 郭勇明, 等. 新疆若羌县沙河湾钛磁铁矿地质特征及找矿意义[J]. *西北地质*, 2016, 49(3): 99-106.
- Guo T, Lin M M, Guo Y M, et al. Geological characteristics and prospecting significance of Shahewan titanium magnetite deposit in Ruoqiang county, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(3): 99-106.
- [15] 邵建波, 李景光, 王洪涛, 等. 吉林白山五道羊岔新太古代大型钒钛磁铁矿床地质特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 463-483.
- Shao J B, Li J G, Wang H T, et al. Geological characteristics and zircon U-Pb age of the Wudaoyangcha Neoarchean vanadic titanomagnetite deposit in Baishan, Jilin Province [J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 463-483.
- [16] 赵一鸣, 李大新, 陈文明, 等. 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*, 2006, 25(2): 113-122.
- Zhao Y M, Li D X, Chen W M, et al. Yangtizishan metamorphosed sedimentary titanium deposit: Discovery of new genetic type of titanium deposit [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(2): 113-122.
- [17] 赵一鸣, 李大新, 吴良士, 等. 内蒙古磨石山沉积变质型锐钛矿床: 一个大型新类型钛矿床的发现、勘查和研究[J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1350-1366.
- Zhao Y M, Li D X, Wu L S, et al. Moshishan metamorphosed sedimentary anatase deposit: Discovery, exploration, and study of a new genetic type large titanium deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1350-1366.
- [18] 杨合群, 苏犁, 宋述光, 等. 论陕西毕机沟钒钛磁铁矿床成因[J]. *地质与勘探*, 2013, 49(6): 1036-1045.
- Yang H Q, Su L, Song S G, et al. On genesis of the Bijigou V-Ti magnetite deposit in Shaanxi Province [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(6): 1036-1045.
- [19] 李洪奎, 于学峰, 杨永波. 山东莒县棋山钛铁矿地质特征及成因探讨[J]. *地质学报*, 2010, 84(7): 1041-1048.
- Li H K, Yu X F, Yang Y B. Geological characteristics and origin of the Qishan ilmenite deposit in Shandong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(7): 1041-1048.
- [20] 邢长明, 王焰, 张传林. 塔里木大火成岩省皮羌层状岩体的矿物结晶顺序和钒钛磁铁矿矿石成因探讨[J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 285-298.
- Xing C M, Wang Y, Zhang C L. Crystallization sequence and origin of the Fe-Ti-V oxide ores from the Piqiang layered intrusion in the Tarim large igneous province, NW China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 285-298.
- [21] 翟裕生, 姚书振, 蔡克勤. 矿床学[M]. 3版. 北京: 地质出版社, 2011: 329-330.
- Zhai Y S, Yao S Z, Cai K Q. *Mineral deposits* [M]. 3rd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 329-330.

(上接第 515 页/Continued from Page 515)

- [23] 赵军, 葛翠萍, 商磊, 等. 农田黑土有机质和全量氮磷钾不同尺度空间变异分析[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(3): 280-284.
- Zhao J, Ge C P, Shang L, et al. Analysis for spatial heterogeneity of soil organic content and total nutrients in black soil crop area with different scales [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2007, 23(3): 280-284.
- [24] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. *地理科学*, 2018, 38(7): 1032-1041.
- Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [25] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 15.
- Chen H M. *Environmental soil science* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 15. (in Chinese)