

# Formation Mechanism and Geotectonic Environment of the Bijigou Vanadium-Titanium Magnetite Deposit in the Northern Margin of the Yangtze Block

Mingwei Wang<sup>1</sup>, Li Jia<sup>2</sup>, Pengpeng Zheng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Provincial Mineral Resources Survey and Evaluation Center, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>No. 5 Gold Geological Party, CAPF, Xi'an Shaanxi

Email: 15929905398@qq.com

Received: Nov. 5<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 16<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 27<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

The Bijigou large vanadium-titanium magnetite deposit is located at the northern margin of the Yangtze block. Although a large number of studies have been carried out on the typical rock mass in the complex, there are still differences in the Neoproterozoic tectonic setting in the northern margin of the Yangtze block. In this paper, the field magma of the Bijigou rock ore body was identified by studying the field output characteristics and scale of the Bijigou pile-crystal complex, the combination of lithofacies and zoning, and the geochemical characteristics of the main trace and rare earth elements. Nature and mineral of the deposit provide more information for the search for similar deposits in the northern margin of the Yangtze. Bijigou gabbro has the characteristics of basalt series, silicon-depleted, aluminum-rich, calcium, medium iron and magnesium, low-potassium, sodium, and the normalized curve of rare earth element chondrite shows a gentle form of "right-dip". The REE patterns show positive Eu anomaly and light rare earth elements (LREE) enrichment relative to heavy rare earth elements (HREE); trace element spider network shows enrichment of large ion lithophile element (LILE), loss of Nb, Ta, zirconium, lanthanum and other high field strength elements (HFSE), Th, uranium negative anomalies and Sr positive anomalies. It shows that the rock mass experienced obvious crystallization differentiation during the magma evolution, showing the geochemical characteristics like the continental marginal arc. During the Neoproterozoic (~760 Ma), the oceanic crust subducted beneath the Yangtze plate, resulting in the intrusion of the basaltic magma from the depleted mantle. The early olivine and plagioclase crystals form a lower ultra-mafic porphyry facies belt with higher basicity. The remaining magma formed a central and upper lithofacies zone through stable crystallization differentiation, and is rich in crystallization differentiation process. The residual magma containing iron, titanium and V is gradually enriched to form vanadium-titanium magnetite ore body. The ore-forming process of the Bijigou layered basic complex is controlled by separation and crystallization.

## Keywords

North Margin of the Yangtze Block, Bijigou Vanadium-Titanium Magnetite, Geochemical

# 扬子北缘毕机沟钒钛磁铁矿床形成机制及大地构造环境

王明卫<sup>1</sup>, 贾 力<sup>2</sup>, 郑鹏鹏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>陕西省矿产资源调查评审指导中心, 陕西 西安

<sup>2</sup>长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安

<sup>3</sup>中国人民武装警察部队黄金第五支队, 陕西 西安

Email: 15929905398@qq.com

收稿日期: 2018年11月5日; 录用日期: 2018年11月16日; 发布日期: 2018年11月27日

## 摘要

毕机沟大型钒钛磁铁矿床位于扬子陆块北缘, 前人虽然对该杂岩带中典型岩体进行了大量研究, 但对于扬子陆块北缘新元古代时期构造环境仍存在分歧。本文主要通过研究毕机沟堆晶杂岩体的野外产出特征及规模, 岩相组合及分带特征和全岩主微量及稀土元素地球化学特征, 查明了毕机沟岩矿体母岩浆性质和矿床成因, 并为扬子北缘寻找类似矿床提供更多信息。毕机沟辉长岩具有拉斑玄武岩系列特征, 贫Si, 富Al、Ca, 中等的Fe和Mg, 低K、Na, 在稀土元素球粒陨石标准化曲线显示出“右倾型”的平缓形式, Eu正异常, 轻稀土略富集重稀土相对亏损; 微量元素蛛网图中显示出富集大离子亲石元素(LILE), 亏损Nb、Ta、Zr、Hf等高场强元素(HFSE), Th、U负异常以及Sr正异常特征。说明该岩体在岩浆演化过程中经历了明显的结晶分异作用, 显示出了大陆边缘弧的地球化学特征。新元古代时期(~760 Ma), 洋壳向扬子板块之下俯冲, 导致源于亏损地幔的拉斑玄武质岩浆上侵。早期的橄榄石和斜长石堆晶作用形成基性程度较高的下部超镁铁质岩相带, 剩余岩浆经过稳定的结晶分异作用形成中部和上部岩相带, 在结晶分异过程中富含Fe、Ti、V的残余岩浆逐步富集形成钒钛磁铁矿体, 毕机沟层状基性杂岩体成矿过程受分离结晶作用控制。

## 关键词

扬子陆块北缘, 毕机沟钒钛磁铁矿, 地球化学特征, 岩浆演化, 新元古代

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

岩浆型铁矿床是我国铁矿资源重要的来源之一。这类矿床与幔源岩浆活动密切相关, 因常伴生V、Ti等有用金属组分, 通常把这类铁矿床称为钒钛磁铁矿矿床, 其储量占全国总储量11.6%。按成矿方式的不同可进一步将其划分为: 岩浆晚期分异型铁矿床和岩浆晚期贯入型铁矿床, 前者的典型矿床以我国

四川省攀西地区的“攀枝花式”铁矿床为代表；后者的典型矿床以“大庙式”铁矿床为代表。对于与镁铁-超镁铁侵入岩有关的钒钛磁铁矿床的成矿机理及构造背景研究有利于丰富该类型矿床的成矿理论和在实际生产中的指导作用。

扬子地块北缘汉南杂岩带岩性较为复杂，按照基性程度可分为两类岩浆岩组合：基性-超基性深成侵入岩和作为汉南杂岩主体的各类花岗质岩石，前者以西乡地区的望江山辉长岩群、毕机沟岩体、大汉山辉长岩体为代表；花岗质岩石包括英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)组合和二长花岗岩和钾长花岗岩。其中毕机沟岩体为该带中规模最大，而且是唯一赋存有钒钛磁铁矿化的镁铁-超镁铁质岩体。扬子北缘新元古代的构造环境目前还存在争论：1) 俯冲环境，岩体母岩浆为富水的弧岩浆[1][2][3]；2) 地幔柱环境，岩体母岩浆为无水的苦橄质岩浆[4][5]。因此，讨论地幔来源的毕机沟岩体及其赋存钒钛磁铁矿床的母岩浆性质对探讨岩浆作用与铁钛氧化物矿化之间的关系非常重要，并可对成矿规律进行一定启示。

## 2. 地质背景

扬子陆块北缘汉南杂岩带东北部的毕机沟镁铁-超镁铁质岩体中赋存有中-大型钒钛磁铁矿床。该岩体位于扬子板块北缘汉南~米仓山隆起区，也称汉南-米仓山构造带，其向北以凸出的洋县-金水边界断裂紧邻南秦岭造山带，东临大巴山弧形推覆构造带，西部以龙门山断裂带与松潘-甘孜地块相隔，南部为四川盆地。

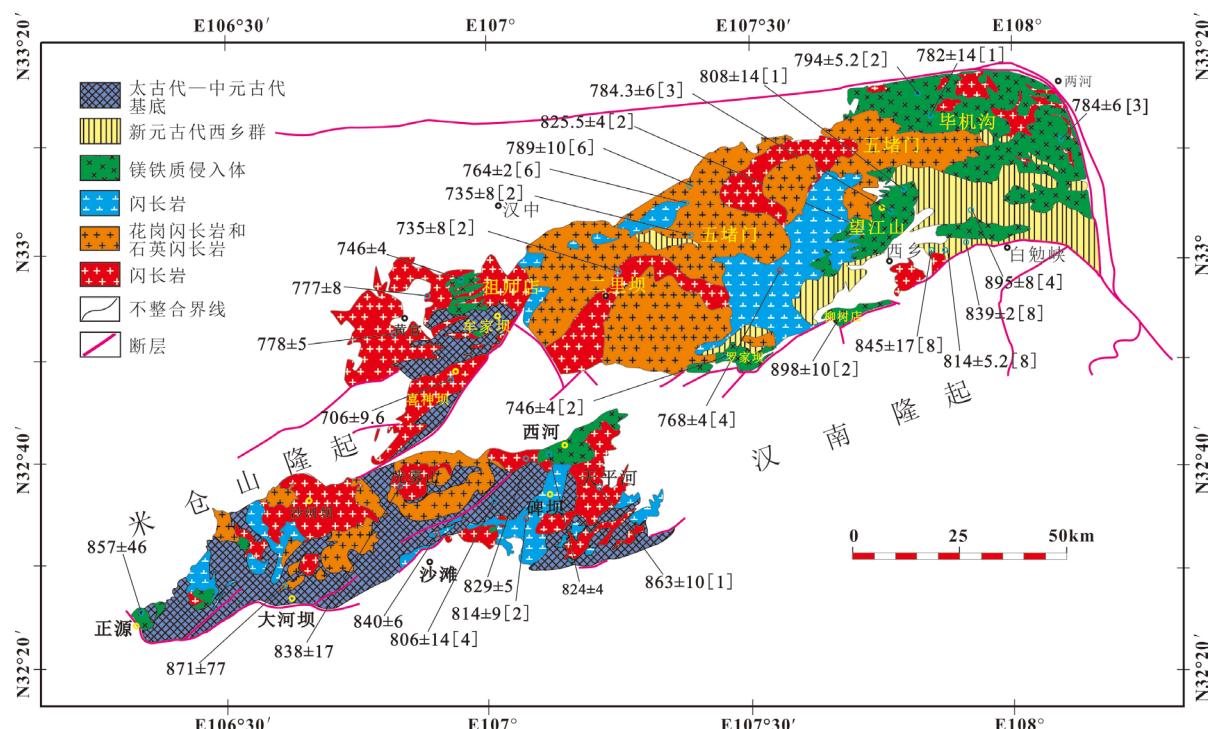
扬子陆块北缘在晚中元古代-新元古代经历了大规模的地壳增生和活化作用[5][6]，记录了大量新元古代岩浆活动事件，前人围绕扬子陆块北缘中-新元古代岩浆岩的形成时代、构造背景及大地构造归属问题进行了大量研究，取得了很多成果。部分学者认为侵入活动主要分为三期：第一期主要形成辉长辉绿岩，具有垂直结晶分异的特征，代表岩体有毕机沟、望江山、碑坝、大汉山等辉长岩体；第二期形成具有Adakite特征的TTG岩体，构成了汉南杂岩的主体；第三期为钾长、二长花岗岩，主要出露于喜神坝断裂两侧、南郑及西乡地区[7]。部分学者认为扬子陆块北缘新元古代岩浆活动可大致分为两个活动高峰期，一期发生在830~795 Ma，另一期发生在780~745 Ma[8]。

汉南杂岩带中岩体呈北东向带状分布，区域矿产主要与区内呈韵律层产出的铁镁质杂岩体有关，形成陕西省岩浆分异型磁铁矿成矿带。对汉南基性杂岩中层状镁铁岩体的矿产评价显示它们均不同程度地有铬、铜镍(钴)、钒钛磁铁矿和磷灰石的矿化，其中毕机沟岩体赋存中-大型钒钛磁铁矿床；城山八宝台岩体中的超镁铁岩体底部有铬磁铁矿化；而望江山岩体自下而上不同层位出现铜镍(钴)-钛磁铁矿-磷灰石矿化，与层状基性杂岩随岩浆结晶分异，金属氧化物(Cr、Fe、V、Ti)和金属硫化物(Cu、Ni、Pt)成矿系列吻合。前人通过锆石U-Pb定年得到毕机沟岩体的形成时代为 $782 \pm 10$  Ma[1]，而且[2]得到毕机沟杂岩体 $\epsilon Hf_{(t)}$ 值为 $+4.9 \sim +10.0$ ，显示其源区为相对亏损的地幔源区，苏犁[5]对毕机沟不同层位7个样品进行了Nd同位素分析，获得了 $^{147}Sm/^{147}Nd$ 比值范围为0.1176~0.1946，以 $t = 782$  Ma计算得到 $\epsilon Nd_{(t)}$ 为 $+3.4 \sim +5.1$ ，同样表明其来源于亏损地幔。然而前人对毕机沟的成矿机制尚不清楚，本次研究通过详细的矿床地质、岩相学和全岩地球化学特征探讨了毕机沟岩体的成岩和成矿机制。

## 3. 岩体地质特征

### 3.1. 岩体岩相分带

毕机沟含钒钛磁铁矿基性-超基性层状堆晶杂岩体位于汉南杂岩带的东北部，侵位于西乡群火山岩-沉积岩系，该层状基性堆晶杂岩体长约50 km，宽约6~12 km，出露面积大于300 km<sup>2</sup>，是汉南基性杂岩带中出露规模最大的基性岩体。该层状堆晶杂岩体整体呈岩盆状产出，杂岩体东南缘和西南缘不同程度被后期的花岗岩、花岗片麻岩所蚕食，或被第三系红色砾岩覆盖(图1)。



**Figure 1.** Neoproterozoic mafic-ultramafic intrusions and felsic plutons in the Hannan Complex in the northern margin of the Yangtze Block

**图 1. 扬子陆块北缘汉南杂岩带新元古代侵入体分布图**

毕机沟岩体具有明显岩相分带性和韵律旋回特征，但其内部火成层序已被成岩后的褶皱作用复杂化，使杂岩体形成一系列的背行和向形构造，其中有周家砭向形、石家坡向形和钻天梁背形等，使原生堆晶层理和矿层发生倾斜。前人[9] [10] [11]对该杂岩体进行了岩相带和韵律层的划分，层状基性杂岩体总厚度约 5 km，自下而上依次划分为：

下部斜长橄榄岩带(I)出露于桑溪沟北童家山隆起的核部和汉江河谷两侧的八宝山、高家山地区，主要岩石类型有斜长橄榄岩、橄长岩、橄榄辉长岩和少量纯橄榄岩、橄榄岩、含长橄榄岩、斜长岩、辉石岩。

中下部辉长岩相带(II)出露于漆树沟及其以南地区，主体由富含斜长石的中粗粒辉长岩组成。该岩带由辉石和基性斜长石的相对含量变化反映的成分韵律层序和辉长岩矿物粒度变化反映的粒序层理普遍发育，表现出韵律层状堆晶杂岩体的典型特征。

中上部异剥辉长岩相带(III)出露于毕机沟、周家砭、崔家坪、钻天梁、杏树林及以南地区。该岩带以异剥辉长岩、辉长岩为主，由上到下划分出四个韵律单元，每个韵律单元由底部的苏长辉长岩、橄榄辉长岩和含磁铁矿、钛铁矿等金属矿物的异剥辉长岩向上渐变为中粗粒浅色辉长岩，且有矿物粒度变化构成的韵律层理极为发育。

上部闪长岩相带(IV)主要出露于杂岩体顶部边缘的黑沟、石家坡及东沟河一带，主要由含角闪辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩及少量石英闪长岩、含矿异剥辉长岩等组成，各岩相之间呈渐变接触关系。

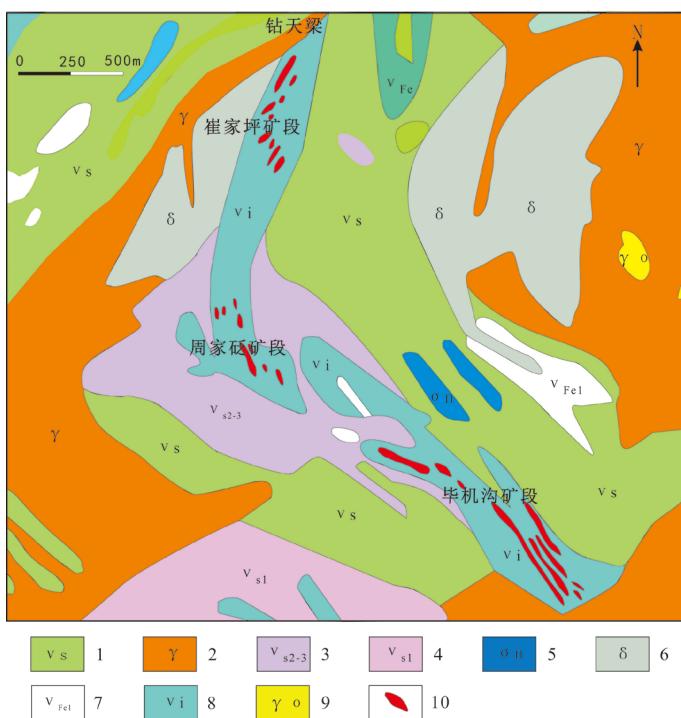
### 3.2. 矿体地质特征

毕机沟含矿基性岩体中岩相分带性对矿体的控制表现为矿体皆赋存于暗色中-细粒辉长岩中，中粗粒浅色辉长岩为矿体近矿围岩；岩体的韵律旋回特性对矿体的控制作用主要表现为：中上部异剥辉长岩相带(III)每个韵律旋回底部或下部都是富矿体的聚集部位，或表现出强烈的矿化现象，并以细粒异剥辉长

岩中富集程度最高，形成三个具有工业品位的钒钛磁铁矿带。

根据矿区内地质特征，其在空间上形成一个弧形矿化带（图2）。矿化带北起钻天梁，向南西经崔家坪、周家砭，止于毕机沟邓家院子，为一弧顶指向正西，向内倾斜的弧形矿化带。弧形矿化带主要由超基性—基性岩构成，由下向上出露岩性依次为橄榄岩、浅色辉长岩、含磁铁矿化暗色辉长岩、角闪辉长岩。南翼岩相较基性，北翼偏酸性，顶部岩相变化频繁，且更偏基性。该矿化带内、外侧（东、西部）分别为后期花岗岩，呈岩枝、岩脉产出。由于受到成矿后的构造和后期岩脉的侵入破坏，不仅使矿体产生上下移位，也有水平错动，致使断层上下同层的矿体产生构造错断现象。

矿化带总长5400米，根据矿体分布部位及产状可分为四个矿段（图2）：①钻天梁矿段：矿化带地表出露长度700m，宽约80m，已知由3个主要矿体组成；矿体规模小，品位较低，为超贫钒钛磁铁矿体，所以矿床地质平面简图中没有标出；②崔家坪矿段：矿化带地表出露长度1100m，宽30~174m，由3个主要矿体组成；③周家砭矿段：矿化带地表出露长度600m，平均宽300m，由3个主要矿体组成；④毕机沟矿段：矿化带地表延续出露长度1654m，最宽536m，最窄68m，东宽西窄，主要由12个矿体组成。



1-蚀变辉长岩；2-花岗岩；3-中细粒辉长岩；4-粗粒辉长岩；5-橄榄岩；6-闪长岩；7-矿化辉长岩；8-异剥辉长岩；9-斜长花岗岩；10-磁铁矿体

**Figure 2.** Sketch map of the Bijigou deposit showing three main ore-blocks  
**图2.** 毕机沟矿床平面地质简图

#### 4. 岩相学特征

毕机沟钒钛磁铁矿区出露岩性以辉长岩为主，占矿区90%。根据浅、暗色矿物相对含量可将其分为浅色辉长岩（斜长石含量 $\geq 60\%$ ）和暗色辉长岩（斜长石含量 $< 60\%$ ）。暗色辉长岩一般呈中细粒结构，其含矿性好，铁矿体均赋存于该岩性中；浅色辉长岩一般呈中粗粒结构，其不含矿或含矿差，多为矿体围岩。

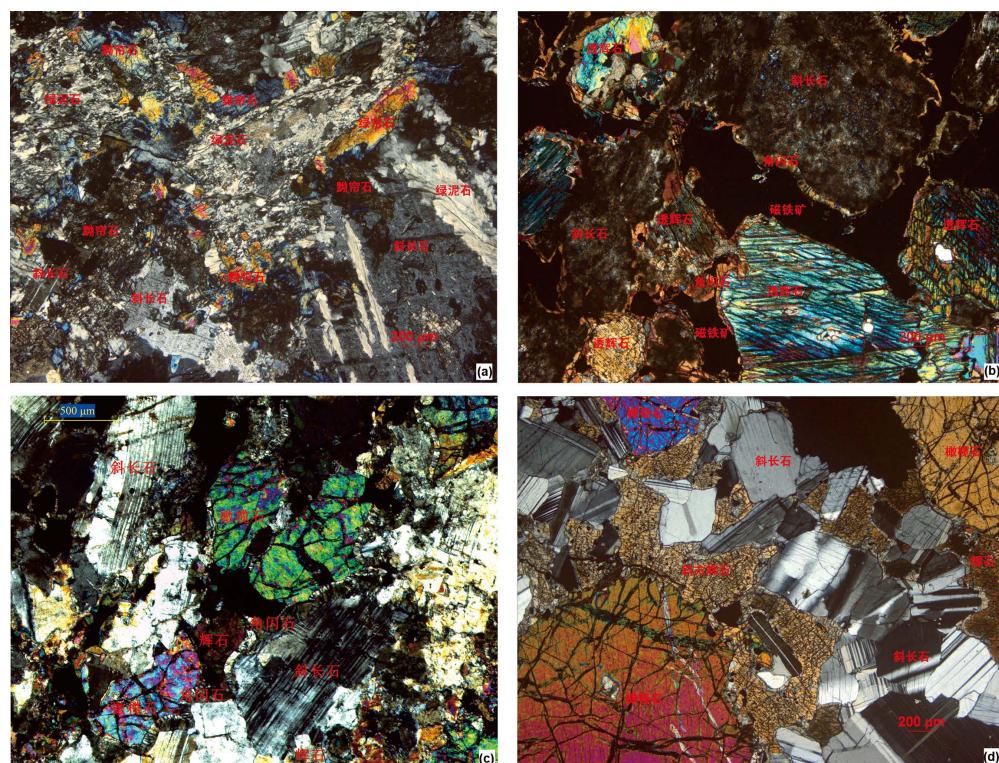
**浅色辉长岩：**自形-半自形粒状结构、辉长结构，块状构造。斜长石含量60%~78%，呈板状或柱状，粒径多在2~8mm之间；有非常强烈的绿帘石化、绢云母化、高岭土化，局部可见残余斜长石，常可见

聚片双晶和卡式复合双晶，矿物轮廓局部不清晰但也隐约可见，与透闪石混杂一体，岩石中分布不均匀(图3(a))。绿泥石10%~30%，片状、纤维片状、放射状，具异常干涉色，片径0.12~1 mm，多呈片状集合体，可能为辉石退变为角闪石，角闪石次变成绿泥石。白云母2%，细片状，分布于斜长石颗粒中。少量磷灰石及磁铁矿。

**暗色(磁铁矿化)辉长岩：**辉石40%~60%，它形粒状-半自形柱状，常蚀变为角闪石、透闪石及绿泥石等，局部见细密的柱状裂理，粒径0.2~5 mm不等，分布较为均匀。斜长石20%~40%，半自形板状，具黝帘石化、少量绿泥石化、绢云母化，呈蚀变矿物的集合体，粒径0.5~4 mm，和辉石、磁铁矿接触处常见角闪石反应边。磁铁矿4%~15%，它形-半自形粒状，粒径0.2~1 mm，和钛铁矿一起不规则呈团块状，均匀的分布于透辉石、斜长石粒间，呈填隙结构，少量呈细粒集合体(图3(b))。钛铁矿2%~8%，它形粒状-半自形板状，粒径0.2~1 mm，和磁铁矿一起呈团块状，部分呈细板条状分布于磁铁矿晶体中，均匀分布于透辉石、斜长石粒间。

**橄榄辉长岩：**辉长结构，块状构造。辉石含量20%~40%，以单斜辉石为主，呈它形-半自形短柱状或粒状，发生较强次生蚀变；斜长石含量30%~50%，呈半自形-自形板柱状，发生较弱的高岭土化、黝帘石化及绢云母化(图3(c))；橄榄石含量5%~10%，常被其他矿物包裹形成包橄结构，后期发生不同程度的伊丁石化；磁铁矿含量约5%。

**橄长岩：**半自形粒状结构，块状构造。橄榄石10%~55%，半自形粒状，溶蚀浑圆状，粒径1 mm~4 mm×7 mm，沿裂纹及边部常发生蛇纹石化，边部常有斜方辉石反应边。斜长石10%~35%，强烈土化，粒度0.2~1.1 mm。辉石5%~26%，它形粒状-半自形柱状，粒径0.1 mm×0.2 mm~1 mm×2 mm，粒状、集合体将橄榄石包裹(图3(d))。磁铁矿2%~6%，微细粒集合体，为橄榄石蚀变时析出的。



**Figure 3.** Petrographic characteristics of samples from the Bijigou intrusion  
**图3.** 毕机沟岩体岩相学特征

## 5. 分析方法

全岩主量元素和微量元素分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。主量元素分析过程中先对样品进行烧失量计算, 熔融制成玻璃片后, 使用日本岛津 1800 型 X 荧光光谱仪测定, 分析误差一般小于 2%; 在微量元素含量分析过程中将 500 mg 粉末样品放置于特氟龙杯中, 再加入 1.0 ml 的纯 HF 和 1.5 ml 纯 HNO<sub>3</sub>, 在 190°C 条件下加热 48 小时进行溶解。微量元素分析采用 Thermo-X7 型 ICP-MS, 大多数微量元素分析精度优于 10%。

## 6. 分析结果

### 6.1. 主量元素

毕机沟层状杂岩体全岩主量元素化学分析原始数据见表 1, 由于造岩矿物橄榄石、辉石、斜长石等普遍发生蚀变作用, 导致原始数据烧失量较大, 平均为 3.67%, 所以先对表中主量元素化学成分进行了 100%无水标准化之后, 再进行地球化学数据分析及地球化学投图等工作(图 4)。

斜长橄榄岩和部分橄长岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 40.83%~42.92%, 平均为 41.84%; TiO<sub>2</sub> 含量为 0.06%~0.17%, 平均为 0.11%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 1.30%~21.22%, 平均为 9.16%; FeO 含量为 7.39%~13.94%, 平均为 11.43%; MnO 含量为 0.10%~0.28%, 平均为 0.17%; MgO 含量为 14.88%~40.16%, 平均为 30.77; CaO 含量为 0.85%~10.68%, 平均为 4.34%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 0.00%~0.02%, 平均含量为 0.01%; Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 含量为含量为 0.03%~1.67%, 平均为 0.61%; 其中 Na<sub>2</sub>O 含量为 0.01%~0.75%, 平均为 0.27%; 总体显示出低 Na 贫 Ca、Ti, 富 Mg 的地球化学特征。m/f = 3.43~4.97 为铁质超基性岩[12], Mg<sup>#</sup> 为 0.77~0.83, 平均为 0.81。

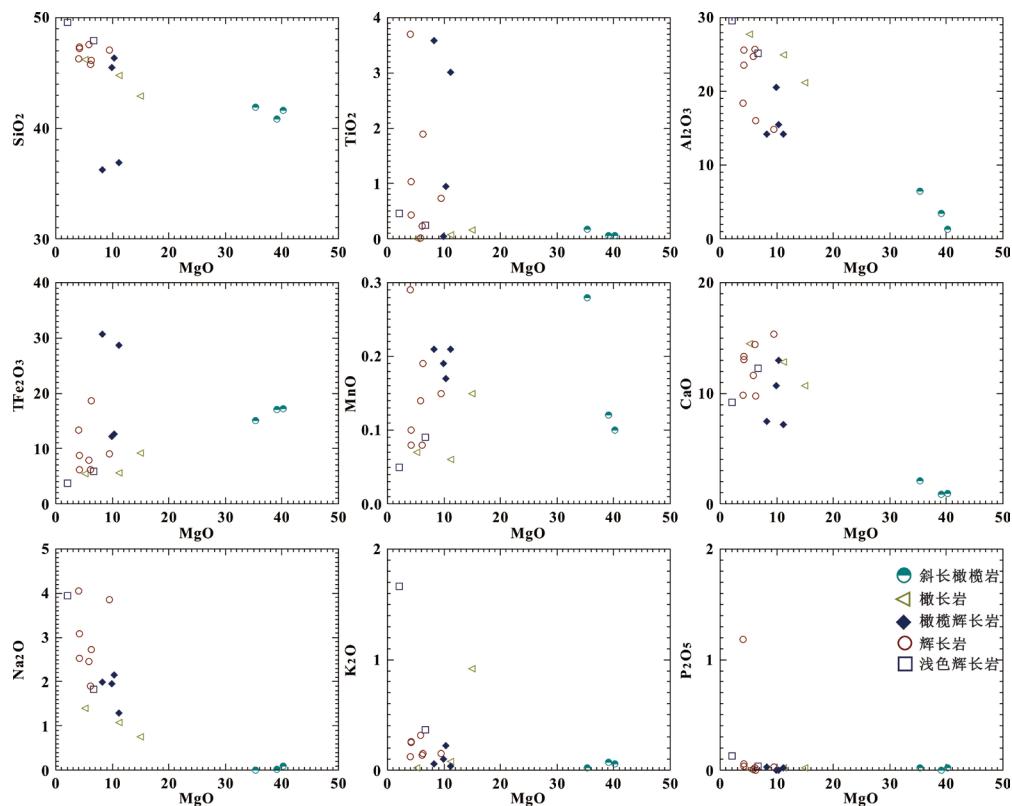


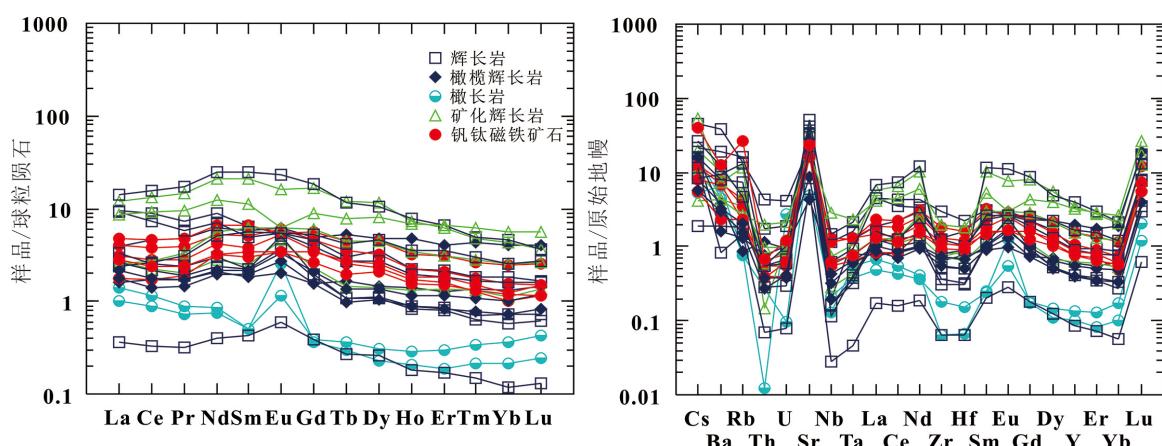
Figure 4. Hark variation diagram of samples from the Bijigou intrusion (wt%)

图 4. 毕机沟岩体样品哈克变异图(单位 wt.%)

## 6.2. 微量元素

毕机沟岩体球粒陨石标准化配分模式图(图 5)显示, 该岩体所有样品的配分曲线均呈现“右倾型”的平缓形式, 全岩稀土元素总量较低,  $\Sigma \text{REE}$  变化于  $1.06 \times 10^{-6} \sim 52.43 \times 10^{-6}$  之间, 平均为  $15.03 \times 10^{-6}$ , 平均为球粒陨石的 0.32~15.92 倍, 且轻稀土(LREE)轻微富集、重稀土(HREE)相对轻微亏损, LREE/HREE 比值介于 1.63~7.64 之间, 与洋脊堆晶辉长岩相比, 毕机沟辉长岩在岩浆演化过程中发生过显著的结晶分异。另外轻稀土富集, 重稀土元素配分曲线相对平坦, 是汇聚板块边缘岩浆岩共有的特征[13]。 $(\text{La/Yb})_N = 0.95 \sim 6.59$ ,  $(\text{La/Sm})_N = 0.41 \sim 2.77$ ,  $(\text{Gd/Yb})_N = 1.05 \sim 4.09$ , 轻重稀土分异较明显, 而轻、重稀土内部分馏则相对较弱。 $\delta \text{Eu} = 0.62 \sim 5.96$ , 平均为 1.70, 除个别样品外大部分样品表现出明显的正 Eu 异常特征, Eu 异常主要受控于斜长石, 多数稀土元素呈+3 价, 只有 Eu 可呈+2 价, 而+2 价 Eu 比  $\text{REE}^{3+}$  更容易被斜长石所容纳, 这与毕机沟岩体早期发生斜长石和橄榄石堆晶的岩石学认识相一致。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5)中, 毕机沟基性杂岩体显示出了富集大离子亲石元素(LILE), 如 Cs、Ba、Rb、Sr 等, 亏损高场强元素(HFSE), 如 Nb、Ta、Zr、Hf 等, Th、U 表现出明显的负异常, 具有岛弧玄武岩的地球化学特征。Nb 和 Ta 通常可以讨论岩浆成因, 该岩体 Nb 的含量范围为  $0.02 \times 10^{-6} \sim 1.87 \times 10^{-6}$ , 平均为  $0.45 \times 10^{-6}$ ; Ta 含量为  $0.00 \times 10^{-6} \sim 0.08 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $0.03 \times 10^{-6}$ , 低于原始地幔 Nb ( $0.713 \times 10^{-6}$ )、Ta ( $0.041 \times 10^{-6}$ ) 的含量,  $\text{Nb/Ta} = 4.20 \sim 22.14$ , 平均为 11.85, 介于原始地幔( $\text{Nb/Ta} = 17.84$ )和平均地壳( $\text{Nb/Ta} = 11$ )之间, Nb/Ta 比值变化范围较大, 说明该岩体成岩的复杂性和多阶段性, 不同阶段的岩浆演化过程中可能遭受了不同程度的地壳混染或者源区存在俯冲的洋壳物质, 因为地壳物质具有亏损 Nb、Ta、Sr 的特征。而该岩体具有明显的 Sr 正异常特征, 因为在玄武岩熔体体系中斜长石和熔体之间的分配系数为 1.83, 说明 Sr 主要受控于斜长石结晶, 而岩体辉长岩为斜长石堆晶, 所以 Sr 的正异常与斜长石的堆晶作用相关。



**Figure 5.** The REE pattern and the trace element spider diagram of rocks from the Bijigou intrusion. (The standard value of chondrite from [14]; the primitive mantle value from [15])

**图 5.** 毕机沟岩体稀土元素配分模式图与微量元素蛛网图。(球粒陨石标准化值据[14]; 原始地幔标准化值据[15])

## 7. 讨论

### 7.1. 母岩浆性质及大地构造环境

野外地质观察表明毕机沟岩体是一个以多种辉长岩为主, 具有三个垂直岩相分带多种岩石类型的镁铁-超镁铁质杂岩体。通常来讲, 来自于不同源区的岩浆岩具有特定的地球化学特征和同位素组成, 因此可以通过地球化学和同位素组成来探讨岩浆岩母岩浆性质和产出的构造环境。

**Table 1.** Analysis results of major and trace elements of samples from the Bijigou intrusion  
**表 1. 毕机沟岩体主量和微量元素分析结果**

样品编号	BJG-1	BJG-2	BJG-5	BJG-17	BJG-18	BJG-19	BJG-21	BJG-4	BJG-6	B-93	B-95	
岩性	浅色蚀变辉长岩				辉长岩				橄榄辉长岩			
SiO <sub>2</sub>	47.47	45.45	44.35	44.91	45.76	45.06	45.04	34.80	35.88	46.82	38.81	
TiO <sub>2</sub>	0.44	0.24	0.22	3.59	1.01	0.41	0.71	3.45	2.93	0.37	0.39	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.28	23.92	24.94	17.81	22.79	24.37	14.20	13.68	13.84	11.59	5.37	
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.60	5.55	5.97	13.03	8.51	5.82	8.68	29.47	27.87	9.10	17.36	
MnO	0.05	0.09	0.08	0.28	0.10	0.08	0.14	0.20	0.20	0.15	0.20	
MgO	1.93	6.38	5.91	3.90	4.09	3.97	9.12	7.91	10.85	16.16	31.92	
CaO	8.79	11.65	13.99	9.58	12.68	12.71	14.68	7.14	6.95	14.20	3.57	
Na <sub>2</sub> O	3.78	1.74	1.85	3.93	2.44	2.93	3.68	1.91	1.26	0.87	0.32	
K <sub>2</sub> O	1.59	0.35	0.14	0.12	0.24	0.25	0.14	0.06	0.04	0.04	0.04	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.04	0.02	1.15	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	
LOI	4.19	4.05	2.01	0.98	2.00	3.66	2.76	0.82	0.00	0.19	1.64	
Total	100.24	99.46	99.48	99.28	99.68	99.30	99.18	99.47	99.84	99.52	99.62	
Li	0.02	18.34	3.87	2.51	0.45	5.13	3.17	2.41	3.79	4.56	4.41	
Be	0.38	0.28	0.13	0.23	0.02	0.15	0.20	0.18	0.03	0.10	0.05	
Sc	2.54	11.73	13.48	44.95	2.50	8.27	69.12	28.76	22.20	22.00	53.00	
V	125.16	72.19	108.35	146.23	37.41	139.03	351.03	2124.66	1761.12	103.00	153.00	
Cr	318.29	143.97	193.78	6.02	61.12	161.61	627.10	169.80	147.41	367.00	1081.00	
Co	14.26	42.12	44.99	17.94	2.83	20.35	43.55	122.42	134.15	58.00	70.00	
Ni	37.00	98.78	73.98	3.52	10.01	85.17	82.01	126.69	136.11	156.00	147.00	
Cu	14.40	2.94	30.57	4.78	5.22	28.60	87.34	116.41	115.08	39.00	49.00	
Zn	26.90	42.33	34.06	112.34	4.90	34.16	48.37	141.42	139.69	54.00	56.00	
Ga	13.30	17.10	16.88	25.06	2.05	19.07	14.24	24.55	21.89	13.60	8.39	
Rb	8.05	9.80	4.38	2.82	0.87	8.02	1.08	1.21	0.93	9.53	0.52	
Sr	450.67	658.90	680.74	1012.63	120.04	822.34	367.83	423.90	430.21	369.00	174.00	
Y	3.98	3.92	1.76	16.75	0.36	1.73	7.09	2.40	1.71	9.15	8.63	
Zr	31.87	13.31	3.19	5.52	0.68	3.79	8.40	7.59	5.85	17.01	13.80	
Nb	0.76	0.41	0.08	0.96	0.02	0.11	0.11	0.28	0.21	0.49	0.13	
Cs	0.93	0.44	0.34	0.57	0.24	0.17	0.04	0.35	0.12	0.17	0.32	
Ba	254.33	126.34	53.07	80.52	5.37	63.50	12.30	21.52	19.67	25.30	10.80	
Hf	0.64	0.29	0.09	0.15	0.02	0.09	0.26	0.19	0.14	0.46	0.22	
Ta	0.06	0.03	0.02	0.08	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03	
Pb	1.69	1.99	0.59	0.21	0.06	0.58	0.70	0.23	0.19	2.44	0.91	
Th	0.34	0.14	0.02	0.04	0.01	0.04	0.04	0.03	0.02	0.09	0.06	

**Continued**

U	0.09	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
La	2.92	2.88	0.81	4.44	0.11	1.03	0.75	0.66	0.55	1.21	0.49
Ce	7.14	5.92	1.72	12.47	0.27	2.08	2.12	1.44	1.16	3.77	1.40
Pr	0.90	0.72	0.23	2.11	0.04	0.29	0.38	0.21	0.18	0.59	0.21
Nd	5.29	4.20	1.44	15.02	0.24	1.78	3.03	1.28	1.19	3.68	1.24
Sm	1.25	0.96	0.43	4.76	0.08	0.44	1.09	0.42	0.38	1.14	0.36
Eu	0.40	0.40	0.27	1.70	0.04	0.37	0.40	0.24	0.20	0.45	0.15
Gd	1.21	1.02	0.48	4.82	0.10	0.51	1.37	0.54	0.41	1.26	0.40
Tb	0.14	0.13	0.05	0.55	0.01	0.05	0.20	0.06	0.05	0.25	0.08
Dy	1.14	0.88	0.36	3.36	0.09	0.35	1.51	0.44	0.34	1.53	0.47
Ho	0.16	0.14	0.06	0.57	0.01	0.06	0.26	0.08	0.06	0.34	0.10
Er	0.45	0.39	0.18	1.41	0.04	0.17	0.73	0.24	0.17	0.85	0.27
Tm	0.06	0.05	0.02	0.16	0.00	0.02	0.10	0.04	0.03	0.14	0.04
Yb	0.38	0.34	0.15	0.95	0.03	0.12	0.53	0.21	0.15	0.84	0.28
Lu	0.05	0.05	0.02	0.12	0.00	0.02	0.09	0.04	0.03	0.13	0.05
$\Sigma$ REE	21.52	18.07	6.23	52.43	1.06	7.30	12.56	5.91	4.88	16.18	5.54
LREE	17.92	15.07	4.90	40.49	0.78	6.01	7.77	4.26	3.65	10.84	3.85
HREE	3.60	3.00	1.33	11.93	0.28	1.30	4.78	1.65	1.23	5.34	1.69
LREE/HREE	4.98	5.02	3.68	3.39	2.79	4.63	1.63	2.58	2.96	2.03	2.28
$\delta$ Eu	1.01	1.24	1.79	1.08	1.46	2.41	1.01	1.56	1.56	1.15	1.21
(La/Yb)N	5.19	5.71	3.64	3.15	3.05	5.80	0.95	2.13	2.48	0.97	1.18
(La/Sm)N	1.47	1.89	1.18	0.59	0.86	1.47	0.43	0.99	0.92	0.67	0.86
(Gd/Yb)N	2.57	2.42	2.59	4.09	3.22	3.40	2.09	2.08	2.19	1.21	1.15
样品编号	B-171	B-210	BJG-12	BJG-15	BJG-16	BJG-20	BJG-3	BJG-8	BJG-10	BJG-13	BJG-14
岩性	橄榄岩			磁铁矿化辉长岩				钒钛磁铁矿石			
SiO <sub>2</sub>	41.50	35.10	37.66	39.17	40.15	38.80	27.10	28.38	32.07	28.20	27.39
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.04	4.59	3.26	3.34	3.51	6.60	5.16	5.11	7.19	7.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.85	6.59	11.59	15.51	13.57	8.94	10.56	13.14	11.82	12.19	12.19
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.07	15.11	19.78	25.63	22.41	26.22	41.34	36.93	34.38	39.33	40.12
MnO	0.08	0.11	0.30	0.21	0.23	0.26	0.24	0.18	0.22	0.27	0.29
MgO	14.25	29.91	6.92	6.25	6.30	7.91	5.30	3.94	4.72	3.64	3.53
CaO	10.03	2.69	11.97	7.40	8.91	11.22	6.98	7.84	8.26	6.40	5.96
Na <sub>2</sub> O	1.40	0.17	2.68	1.76	2.32	1.13	0.87	2.07	1.42	1.98	1.64
K <sub>2</sub> O	0.03	0.03	0.11	0.14	0.27	0.08	0.06	0.52	0.10	0.09	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	2.71	0.03	0.08	0.02	0.02	0.02	0.06	0.14	0.12
LOI	4.46	10.04	1.48	0.53	2.01	1.54	1.06	1.16	1.08	0.09	0.03

**Continued**

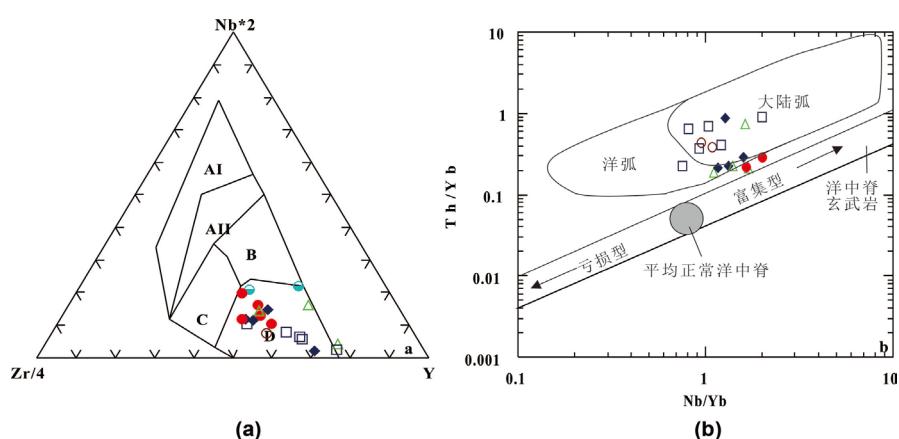
	TOTAL	99.70	99.80	99.79	99.89	99.59	99.63	100.13	99.34	99.24	99.52	99.32
Li	5.39	6.99	4.85	7.91	7.70	1.77	2.41	16.07	8.31	4.58	8.00	
Be	0.06	0.03	0.08	0.18	0.34	0.23	0.10	0.13	0.13	0.21	0.15	
Sc	3.00	7.00	55.78	29.78	53.94	80.46	43.28	38.66	44.62	36.49	32.65	
V	9.00	25.00	453.13	1522.55	1033.49	1473.78	2727.9 <sub>4</sub>	2976.73	2283.06	1928.96	1915.15	
Cr	255.00	1296.00	1.34	29.69	4.75	14.63	9.95	8.88	13.63	4.29	24.43	
Co	65.00	135.00	25.02	91.42	55.37	84.97	130.28	131.57	105.16	92.91	89.77	
Ni	443.00	1004.00	24.25	60.34	3.75	19.03	9.19	34.68	34.41	2.11	15.42	
Cu	29.00	10.00	23.85	125.86	12.66	124.96	56.89	126.24	116.66	21.95	18.18	
Zn	27.00	47.00	139.80	145.10	148.27	155.67	280.58	173.44	191.78	352.60	370.11	
Ga	10.30	3.88	20.21	24.04	22.40	21.75	29.14	30.26	28.27	31.11	31.95	
Rb	0.46	0.50	2.09	3.13	7.00	1.57	1.39	15.63	2.55	1.33	2.11	
Sr	402.00	97.00	627.76	654.48	793.16	343.93	315.39	459.35	447.76	507.75	533.09	
Y	0.43	0.59	15.42	2.66	6.72	14.03	3.80	3.28	6.60	4.59	3.32	
Zr	0.69	1.91	8.63	7.73	7.64	20.86	9.76	11.72	18.98	13.49	11.76	
Nb	0.08	0.14	0.49	0.39	0.19	1.87	0.36	0.41	0.85	0.76	0.77	
Cs	0.34	0.11	0.21	0.42	1.13	0.09	0.12	0.83	0.25	0.17	0.26	
Ba	29.40	42.30	28.63	66.86	48.23	28.57	15.32	84.65	46.83	45.65	51.60	
Hf	0.02	0.04	0.22	0.18	0.25	0.51	0.26	0.29	0.46	0.34	0.29	
Ta	0.02	0.01	0.04	0.03	0.02	0.08	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	
Pb	0.55	6.99	0.22	0.52	0.38	0.41	0.20	0.90	0.39	0.33	0.26	
Th	<0.05	0.00	0.08	0.05	0.01	0.16	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	
U	0.00	0.06	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	
La	0.44	0.31	3.75	0.84	0.80	2.65	0.54	0.86	1.49	1.24	0.95	
Ce	0.92	0.72	10.73	1.82	2.19	7.51	1.38	1.93	3.71	3.03	2.28	
Pr	0.11	0.09	1.79	0.25	0.40	1.17	0.23	0.29	0.58	0.47	0.35	
Nd	0.51	0.45	12.59	1.70	3.35	7.37	1.92	1.91	3.96	3.16	2.50	
Sm	0.10	0.10	4.14	0.48	1.22	2.19	0.66	0.59	1.29	0.99	0.74	
Eu	0.19	0.09	1.18	0.34	0.46	0.46	0.25	0.26	0.40	0.45	0.38	
Gd	0.10	0.10	4.29	0.59	1.56	2.32	0.89	0.68	1.46	1.21	0.93	
Tb	0.01	0.02	0.56	0.07	0.21	0.37	0.13	0.09	0.21	0.17	0.12	
Dy	0.07	0.10	3.73	0.46	1.46	2.64	0.83	0.68	1.44	1.02	0.75	
Ho	0.02	0.02	0.52	0.10	0.24	0.49	0.13	0.11	0.23	0.16	0.12	
Er	0.04	0.06	1.32	0.28	0.64	1.39	0.39	0.32	0.66	0.43	0.33	
Tm	0.01	0.01	0.15	0.04	0.09	0.20	0.05	0.04	0.09	0.06	0.04	
Yb	0.05	0.08	0.91	0.23	0.53	1.18	0.26	0.25	0.51	0.32	0.21	

**Continued**

	Lu	0.01	0.01	0.12	0.04	0.08	0.18	0.05	0.04	0.08	0.05	0.04
$\Sigma$ REE	2.57	2.16	45.78	7.25	13.24	30.11	7.71	8.05	16.11	12.75	9.75	
LREE	2.27	1.76	34.18	5.43	8.42	21.35	4.99	5.84	11.43	9.34	7.21	
HREE	0.30	0.40	11.60	1.81	4.82	8.76	2.73	2.22	4.67	3.42	2.54	
LREE/HREE	7.64	4.39	2.95	2.99	1.75	2.44	1.83	2.64	2.45	2.73	2.83	
$\delta$ Eu	5.96	2.64	0.86	1.95	1.02	0.62	0.99	1.24	0.90	1.24	1.41	
(La/Yb)N	6.59	2.71	2.78	2.47	1.02	1.51	1.41	2.32	1.97	2.61	3.06	
(La/Sm)N	2.77	1.97	0.57	1.10	0.41	0.76	0.51	0.92	0.73	0.79	0.81	
(Gd/Yb)N	1.70	1.05	3.80	2.07	2.38	1.59	2.76	2.19	2.31	3.05	3.56	

注: 1) 表中常量元素单位为( $10^{-2}$ )，微量元素单位为( $10^{-6}$ )；2) B-93、B-95、B-171、B-210 四个样品数据引自[5]。

毕机沟辉长岩类样品具有高 Al(14.22%~29.54%，平均为 21.63%)、贫 Ti(平均为 1.10%)和 P(平均值为 0.14%)的特点，明显不同于典型的板内裂谷玄武岩( $TiO_2 > 2\%$ ,  $P_{2O_5} > 0.3\%$ )，而与大陆边缘弧或者岛弧成因的岩石类似( $Al_2O_3 > 17\%$ ,  $TiO_2 < 1.2\%$ )。另外该类样品具有  $SiO_2$  含量较低(36.25%~49.59%)，变化范围大； $CaO$  含量较高(7.14%~15.35%)；碱含量较低( $Na_2O + K_2O$  平均值为 2.64%)的特征， $Mg^{\#}$ 介于 0.36~0.81 之间，平均为 0.58，略小于原生玄武岩浆的镁值 0.65~0.73，属于拉斑系列岩石。从岩体稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图来看，毕机沟岩体各类岩石样品稀土和微量元素配分形式相似或相近，说明其来自同一地幔源区，为同源岩浆演化的产物。该岩体所有样品的配分曲线均呈现“右倾型”的平缓形式，全岩稀土元素总量较低，轻稀土(LREE)富集、重稀土(HREE)相对亏损，而轻稀土富集，重稀土元素配分曲线相对平坦，是板块汇聚边缘岩浆岩共有的特征[13]。微量元素蛛网图显示富集大离子亲石元素(Ba、Rb、Sr 等)，亏损高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf 等)的特点以及 Nb、Ta 的负异常均显示毕机沟岩体具有大陆边缘弧的地球化学特征。在 Nb-Zr-Y (图 6(a))三角图解中，各类岩石样品点基本落在了 N 型 MORB 和火山弧玄武岩区域，而在 Nb/Yb-Th/Yb (图 6(b))对数判别图解中，毕机沟岩体各类岩石样品点大部分位于大陆岩浆弧范围，说明毕机沟岩体的形成与活动大陆边缘或岛弧构造背景相关，这也与微量元素蛛网图中富集 LILE 和亏损 HFSE 的特征相吻合。



Nb-Zr-Y 构造环境(据[16])判别图解(a); Nb/Yb-Th/Yb (据[17])构造环境判别图解(b)。AI-板内碱性玄武岩；AII-板内碱性玄武岩与板内拉斑玄武岩；B-E型 MORB；C-板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩；D-N型 MORB 和火山弧玄武岩。

**Figure 6.** Tectonic discrimination diagrams for samples from the Bijigou intrusion  
**图 6.** 毕机沟岩体大地构造判别图解

综上，形成毕机沟杂岩体的原始岩浆为岩石圈地幔部分熔融形成的拉斑玄武质岩浆，在相对稳定环境经深部岩浆房初步分异并多次脉动侵位于较浅处西乡群中，再经原地结晶分异堆积形成毕机沟层状岩体，并且岩浆在上升侵入地壳过程当中受到地壳物质的混染。

## 7.2. 成因机制

毕机沟钒钛磁铁矿体受基性岩浆分异形成的暗色韵律层控制，在暗色韵律带内分异出的磁铁矿富集形成工业矿体，主要以块状磁铁矿矿石为主，后期经多次岩浆活动、蚀变等，使橄榄石、辉石等暗色矿物发生强烈蚀变形成蛇纹石等蚀变矿物，同时析出磁铁矿，大部分磁铁矿沿岩石裂隙分布，形成以磁铁矿为主的磁铁矿条、线、带，还有部分磁铁矿呈浸染状分布于暗色带内，形成浸染状磁铁矿矿石。毕机沟钒钛磁铁矿矿化受岩相控制也较为密切，区内钒钛磁铁矿化主要赋存于含铁高的紫苏异剥-异剥辉长岩或透辉辉长岩中，浸染状构造矿石受岩相控制更为明显。

西乡一带为一开阔复背斜，长轴走向北东，并向北东倾伏。毕机沟矿床就位于该复背斜北东倾伏端童家山-崔家坪，岩浆沿复式穹窿构造侵入的北东翼部，由于受后期花岗岩侵入而残缺不全。具多中心、多轴等复式构造特征，其中心及主轴位于童家山-崔家坪一带，轴向北东，并向北东倾伏。轴部为橄榄岩、橄长岩、辉长岩，个别轴部伴有浅色粗粒辉长岩。外侧为暗色蚀变辉长岩、异剥辉长岩、中细粒辉长岩或闪长岩等，两岩体产状较陡，一般在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。该穹窿构造与成矿关系密切，控制了岩相分带和矿体形态。

毕机沟矿床成矿过程可总结为：在新元古代时期( $\sim 760$  Ma)，洋壳向扬子板块之下俯冲，导致源于亏损地幔的拉斑玄武质岩浆侵入到地壳之中，并伴随与消减俯冲板片脱水物质混合，沿深部断裂带上升侵位于西乡群火山岩中，由于压力的释放，矿物结晶温度降低，经过早期的橄榄石和斜长石堆晶作用形成基性程度较高的下部超镁铁质岩相带，剩余岩浆经过稳定的结晶分异作用形成中部和上部岩相带，在结晶分异过程中富含 Fe、Ti、V 的残余岩浆逐步富集形成毕机沟钒钛磁铁矿床，毕机沟层状基性杂岩体成矿过程以分离结晶作用为主。

## 8. 结论

毕机沟辉长岩具有拉斑玄武岩系列特征，贫 Si，富 Al、Ca，低 K、Na，在稀土元素球粒陨石标准化曲线显示出“右倾型”的平缓形式，Eu 正异常，轻稀土略富集重稀土相对亏损；微量元素蛛网图中显示出富集大离子亲石元素，亏损高场强元素，说明在该岩体在岩浆演化过程中经历明显的结晶分异，显示出了大陆边缘弧的地球化学特征。因此该岩体和矿床形成于活动大陆边缘弧环境，而不是与 Rodinia 超大陆裂解有关的地幔柱环境。毕机沟层状基性杂岩体成矿过程以分离结晶作用为主，母岩浆由于早期的分离结晶作用逐渐富 Fe-Ti-V 而形成铁矿体。

## 参考文献

- [1] Zhou, M.F., Kennedy, A.K., Sun, M., et al. (2002) Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, **110**, 611-618. <https://doi.org/10.1086/341762>
- [2] Zhao, J.H. and Zhou, M.F. (2009) Secular Evolution of the Neoproterozoic Lithospheric Mantle underneath the Northern Margin of the Yangtze Block South China. *Lithos*, **107**, 152-168. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.09.017>
- [3] Wang, M., Nebel, O. and Wang, C.Y. (2016) The Flaw in the Crustal ‘Zircon Archive’: Mixed Hf Isotope Signatures Record Progressive Contamination of Late-Stage Liquid in Mafic-Ultramafic Layered Intrusions. *Journal of Petrology*, **57**, 27-52. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv072>
- [4] Ling, W.L., Gao, S., Zhang, B.R., Li, H.M., Liu, Y. and Cheng, J.P. (2003) Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Northwestern Yangtze Craton, South China: Implications for Amalgamation and Break-Up of the Rodinia Supercontinent.

- nent. *Precambrian Research*, **122**, 111-140. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00222-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00222-X)
- [5] 苏犁. 中国中西部几个新元古代镁铁、超镁铁岩体研究及对 Rodinia 超大陆裂解事件的制约[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2004.
- [6] Li, X.H., Li, Z.X., Sinclair, J.A., Li, W.X. and Carter, G. (2006) Revisiting the “Yanbian Terrane”: Implications for Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Western Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, **151**, 14-30. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.07.009>
- [7] 张宏飞, 骆庭川, 张本仁. 北秦岭灰池子花岗岩基成岩物质来源探讨[J]. 矿物岩石, 1994, 14(1): 67-73.
- [8] Li, X.H., Li, Z.X., Ge, W., Zhou, H. and Li, W. (2003) Neoproterozoic Granitoids in South China: Crustal Melting above a Mantle Plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, **122**, 45-83. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00207-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00207-3)
- [9] 巩志超, 黄廷弼, 任有祥, 杨星, 张世龙. 陕南洋县 - 西乡 - 南郑一带含铁基性岩体地质矿化特征及今后找矿意见[J]. 西北地质, 1975(4): 3-18.
- [10] 苏犁. 新疆巴楚瓦吉里塔格金伯利岩矿物中岩浆包裹体研究[J]. 西北地质科学, 1991(32): 33-46.
- [11] 李行, 陆瑶. 一种新类型的层状岩体[C]//中国地质科学院地质研究所文集. 北京: 中国地质学会: 65-78.
- [12] 吴利仁. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性[J]. 地质科学, 1963(1): 29.
- [13] 姜常义, 穆艳梅, 赵晓宁, 白开寅, 张虹波. 塔里木板块北缘活动陆缘型侵入岩带的岩石学与地球化学[J]. 中国区域地质, 2001, 20(2): 158-163.
- [14] Boyton, W.V. (1984) Cosmochemistry of the Rare Earth Studies: Meteorite Studies. In: Henderson, P., Ed., *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam, 63-114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- [15] McDonough, W.F. and Sun, S.S. (1995) Chemical Evolution of the Mantle. *Chemical Geology*, **123**, 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- [16] Meschede, M. (1986) A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb, Zr, Y Diagram. *Chemical Geology*, **56**, 207-218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5)
- [17] Pearce, J.A. and Peate, D.W. (1995) Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review Earth & Planetary Science Letter*, **23**, 251-285. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>



#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)