

北山南部玻基纯橄岩的发现及其岩石学和地球化学特征

赵振明, 计文化, 李文明

西安地质矿产研究所, 西安, 710054

内容提要: 北山南部地区, 二叠纪闪长岩岩体的西北部, 发现玻基纯橄岩 [Vitric Dunite; Meimechite, Меймечит; 中文亦有音译为麦美奇岩] 和蚀变玻基纯橄岩。①玻基纯橄岩样品呈致密块状, 浅灰绿色, 表面可见清楚的粒状斑晶矿物和黑色胶结物, 具发丝一样的小条带。蚀变玻基纯橄岩样品呈致密块状, 深黑色, 局部具细小条带。显微镜下, 前者主要矿物橄榄石为斑状结构; 后者主要矿物橄榄石多蚀变为蛇纹石, 表现为变余斑状结构, 斑晶是蛇纹石化的橄榄石假像。基质均为玻璃质结构。②X 射线衍射分析表明: 橄榄石为镁橄榄石 [forsterite, $(\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.2}) (\text{SiO}_4)$], 蛇纹石为利蛇纹石 { lizardite, $(\text{Mg}, \text{Al})_3 [(\text{Si}, \text{Fe})_2\text{O}_5] (\text{OH})_4$ }。③电子探针检测, 磁铁矿呈细条纹状, 基质矿物有绿泥石、绿帘石、黝帘石、角闪石、钛铁矿、褐铁矿、镍黄铁矿、斜长石、尖晶石、金云母等。④样品岩石化学分析, 主元素氧化物的含量分别为, SiO_2 为 36.40%~37.29%, Al_2O_3 为 2.61%~4.70%, TiO_2 为 0.058%~0.22%, MgO 为 33.30%~35.36%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 为 10.51%~12.89%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 0.03%~0.14%, 为超铁镁质超基性喷出岩。 $\text{Mg}^\#$ 为 83.5~86.5, δSr 为 1.14~4.61, Sr/Y 为 5.70~42.74。稀土元素 ΣREE 为 2.18~9.71, δEu 为 0.68~2.43, La/Yb 为 0.90~10.00。微量元素和稀土元素具有原始地幔的岩石化学特征。⑤原始岩浆可能经历了结晶分异过程, 并可能在裂谷构造环境形成。⑥本文发现的玻基纯橄岩, 类似于典型的西伯利亚麦美奇河流域和勘察加半岛的低钛“麦美奇岩”。玻基纯橄岩在该地区的发现, 为该地区岩浆的形成和演化研究及铜镍矿的找矿和勘探工作, 提供了重要的岩石学依据。

关键词: 北山南部; 超铁镁质; 玻基纯橄岩 (麦美奇岩); 岩石学; 地球化学

玻基纯橄岩 (Vitric Dunite; Meimechite, Меймечит), 邱家骧 (1985) 主编的《岩浆岩岩石学》定义为“据音译又称麦美奇岩, 它首次在苏联 (现俄罗斯) 西伯利亚地台的麦美奇河流域发现和描述。岩石为玻基斑状结构, 橄榄石是唯一的晶体, 其他为黑色火山玻璃, 有时在玻璃基质中有少量含钛普通辉石微晶, 化学成分上 SiO_2 含量约 20%~38%。”

俞惠隆 (1980) 详细地介绍了湖北大洪山地区发现的玻基纯橄岩的岩石、矿物及岩石化学特征, 并认为这种岩石可能是“岩浆呈流态的固体—液体状态的情况下, …在低压和封闭环境较差的条件下, 经过多次喷溢—蠕动的结果。”到目前为止, 这是最完整的一篇关于玻基纯橄岩 (麦美奇岩) 的中文文献。姜常义等 (2004) 在塔里木盆地西北部二叠纪

超铁镁岩的岩石胶结物中, 依据 Le Bas (2000) 的分类方案 (“麦美奇岩” $\text{SiO}_2 < 52\%$, $\text{MgO} > 18\%$, $\text{TiO}_2 > 1\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 2\%$), 确认出 4 件“麦美奇岩”样品, 并测定了其钕 (Nd)、锶 (Sr)、铅 (Pb) 同位素, 认为这种岩浆来源于核幔边界, 不足之处是没有提供“麦美奇岩”完整的岩石矿物显微照片。随后, 姜常义等 (2007) 在云南二叠纪火山岩中发现疑是“麦美奇岩”的两件样品。

国外除过在西伯利亚地区发现“麦美奇岩”外, Baragar 等 (2001) 在其论文中介绍了, 出露在大西洋拉布拉多海槽 (Labrador Trough) 加拿大魁北克省 Castignon Lake 地区的一种岩石, 岩石的成分类似典型的西伯利亚“麦美奇岩”。

关于玻基纯橄岩 (麦美奇岩) 的成因, 国外研究

注: 本文为中国地质调查局“天山—北山成矿带那拉提—营毛沱地区地质矿产调查”项目 (编号: 121201011000150002), 中国地质调查局“新疆若羌白山地区 1 : 50000 K46E019015、K46E019016、K46E020014、K46E020015 四幅地质矿产综合调查”项目 (编号: 12120115021501) 的成果。

收稿日期: 2018-03-09; 改回日期: 2018-07-06; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.002

作者简介: 赵振明, 男, 1965 年生。副研究员。主要从事构造、环境和矿产等方面的研究工作。Email: xazhenming@163.com; zhenming@cgs.cn。

者得出的主要结论有:

(1)岩石形成的地质过程与来源:西伯利亚原始的“麦美奇岩”岩浆是在岩石圈方辉橄榄岩(harzburgites)熔融过程中产生(Kogarkoa and

Ryabchikov,2000),与溢流火山岩幕相关的溢流玄武岩(Carlson et al., 2006)和金伯利岩有关(Sobolev et al., 2009)。

(2)岩石中 CaO 的含量与地幔源岩浆深度的关

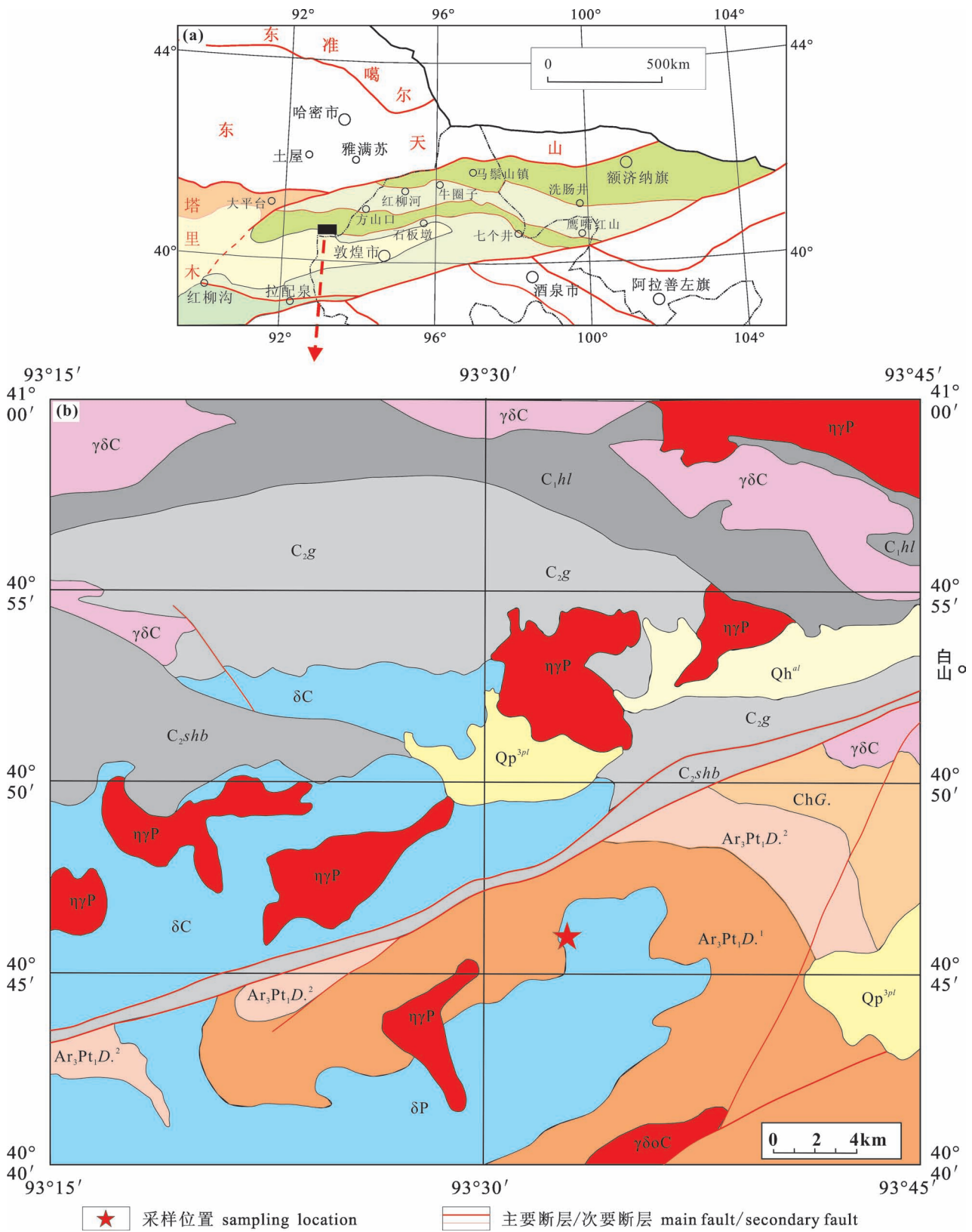


图 1 北山南部玻基纯橄岩位置图(a) 和地质图(b)

Fig. 1 The position (a) and geological map (b) of the meimechite in southern Beishan Moutains

根据 1 : 250000 玉门关幅(K46C004003)建造构造图和最新相关区域地质资料编绘。Qh^{al}—全新统冲积物;Qp₃^{pl}—晚更新统洪积物;δP—二叠纪闪长岩;ηγP—二叠纪二长花岗岩;γδC—石炭纪花岗闪长岩;γδoC—石炭纪英云闪长岩;δC—石炭纪闪长岩;C₂g—上石炭统干泉组基性火山岩,灰岩,砂岩;C₂shb—上石炭统石板山组碎屑岩、片岩;C₁hl—下石炭统红柳园组变质砂岩、灰岩、板岩;ChG.—长城系古铜井岩群片岩,局部见少量变质火山岩;Ar₃Pt₁D.²—敦煌岩群上岩组片麻岩、黑云母石英片岩;Ar₃Pt₁D.¹—敦煌岩群下岩组混合岩、角闪岩、片麻岩

Based on “1 : 250000 Yumenguan Formation and Tectonic Map” and the latest relevant regional geological data. Qh^{al}— Holocene modern alluvial deposits; Qp₃^{pl}— Late Pleistocene pluvial deposit; δP — Permian diorite; ηγP — Permian monzonitic granite; γδC — Carboniferous granodiorite; γδoC — Carboniferous tonalite; δC — Carboniferous diorite; C₂g — basic volcanic rocks, limestone, sandstone of the upper Carboniferous Ganquan group; C₂shb — clastic rocks, schist of the upper Carboniferous Shibanshan group; C₁hl — metamorphic sandstones, limestones, slates of the Lower Carboniferous Hongliuyuan group; ChG. — mica schist and a small amount of metamorphic volcanic rocks of Changchengian Gudongjing Formation; Ar₃Pt₁D.²— gneiss, biotite quartz schist of Dunhuang Formation upper group; Ar₃Pt₁D.¹— migmatite, amphibolite and gneiss of Dunhuang Formation lower group

系:富钙系列起源于较浅的地幔源岩浆,贫钙系列来源于深部地幔岩浆(Rass, 2008)。

(3)形成的温度压力条件:热力学模型表明,西伯利亚的“麦美奇岩”与瓦努阿图的与岛弧相关的苦橄岩和俄罗斯乌拉尔的橄榄辉玄岩(ankaramite,一种比玄武岩更富铁镁的基性岩)相比较,“麦美奇岩”形成的温度压力条件更高(Kamenetsky et al., 2015)。

(4)岩石中钛元素的含量在不同的地质时期有所变化:①西伯利亚地台二叠纪—三叠纪,②俄罗斯普里莫尔斯科(Primorye)早石炭世,③勘察加(Kamchatka)晚石炭世,这三个地方的“麦美奇岩”—苦橄岩,作为超铁镁质—铁镁质岩石,都是高镁(MgO 可高达 44%),第一组岩石具有典型的高钛与低硅、铝特征,第二、三组岩石含有较高的硅和铝,此外,堪察加地区的“麦美奇岩”钛含量最低(Vasil’ev and Gora, 2016)小于 1%(Koloskov et al., 2009)。

笔者等 2016 年在北山南部,甘肃省敦煌市西北地区的二叠纪闪长岩岩体的边部,首次发现典型的蚀变超铁镁质玻基纯橄岩,2017 年补采样品时又发现未蚀变的超铁镁质玻基纯橄岩。本文详细论述该岩石的野外产出地质特征,以及室内完整的岩相学鉴定和矿物、全岩化学分析结果,确定该岩石应为玻基纯橄岩,从而为该地区岩浆的形成和演化研究,以及铜镍矿的找矿和勘探工作提供进一步的岩石学依据。

按习惯,岩石中文名称一般不用音译,故后文中一般用“玻基纯橄岩”称呼该岩石。

1 区域概况

研究区位于新疆哈密市雅满苏镇西南约 170 km 处,向东南有便道约 220 km 可到达敦煌。出露地层由老到新主要为(图 1):新太古界—古元古界敦煌岩群下岩组(Ar₃Pt₁D.¹),上岩组(Ar₃Pt₁D.²),上岩组与下岩组为整合接触关系,与上覆长城系古铜井岩群(ChG.)为角度不整合接触。长城系古铜井岩群,与石炭纪地层及二叠纪地层为断层接触,遭受多期变质作用,变质程度低。石炭纪地层包括,下石炭统红柳园组(C₁hl),上石炭统石板山组(C₂shb),上石炭统干泉组(C₂g)。第四纪地层,更新统山前洪积物(Qp₃^{pl}),全新统冲积物(Qh^{al})。石炭纪侵入岩为花岗闪长岩(γδC)、英云闪长岩(γδoC)、闪长岩(δC)。二叠纪侵入岩为二长花岗岩(ηγP),闪长岩(δP)。

研究采样的地方位于新疆与甘肃交界处海拔 2017 m 的白山山峰的西南地段,一个面积约为 100 km²的侵入岩岩体,该岩体以东北—西南方向展布,长约 30 km,宽约 3~4 km。岩体的西部和北部是古老的敦煌岩群,南部和东部以断层分别与红柳河群(P₁₋₂H)、石板山组(C₂shb)地层接触。在行政区划方面,研究点属于新疆巴音郭楞蒙古自治州(即库尔勒地区)的若羌县。

该岩体在《新疆维吾尔自治区区域地质志》(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993)上所附《中华人民共和国新疆维吾尔自治区地质图(1 : 500 000)》和《中华人民共和国新疆维吾尔自治区岩浆岩图(1 : 2 000 000)》两张图件中均标为“βμ₄³”,即华力西

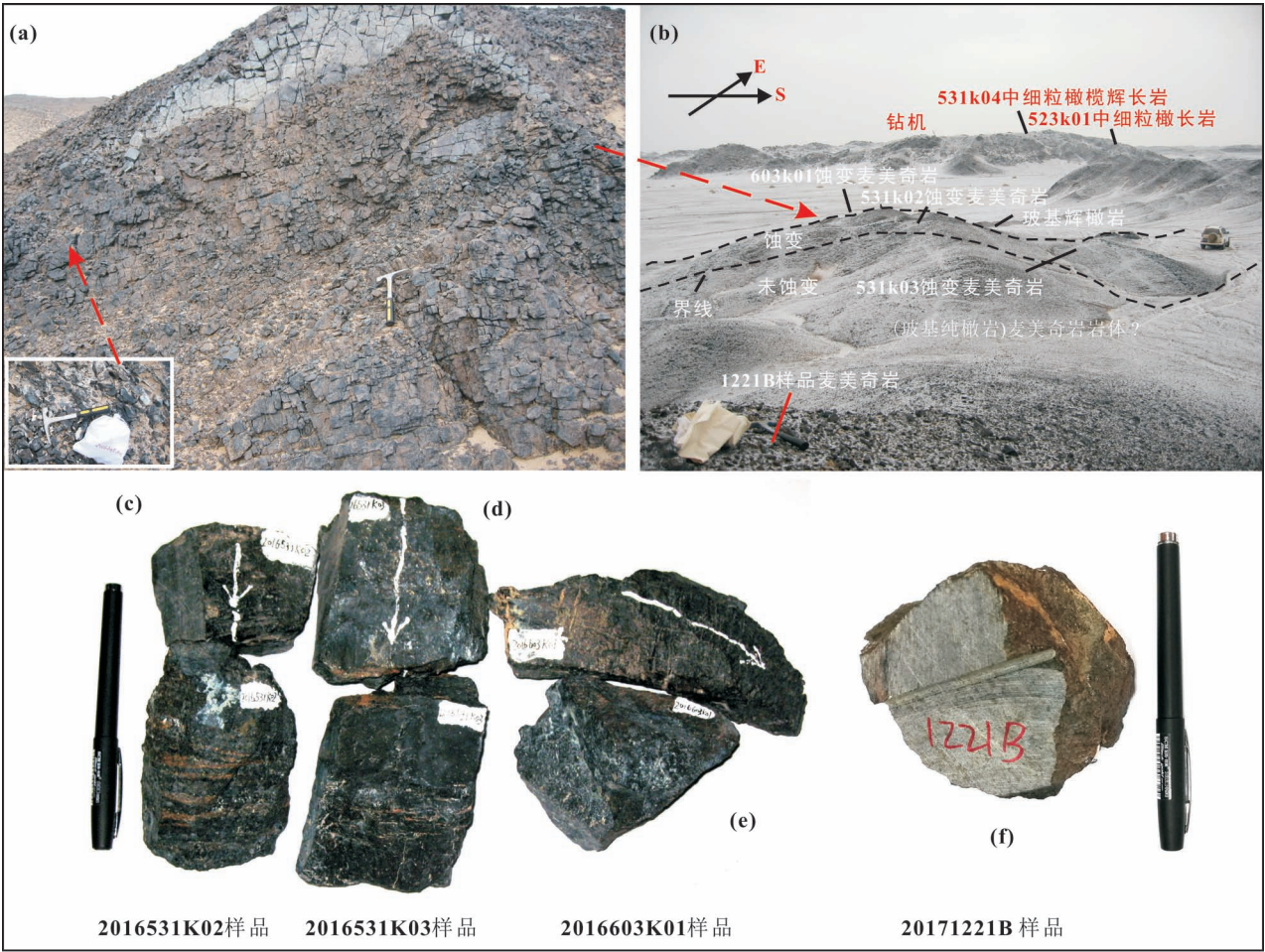


图 2 北山南部玻基纯橄岩采样位置及样品照片

Fig. 2 The sampling position and the photos of the Meimechite in southern Beishan Mountain

(b) 图中, 地表白色为 2017 年 12 月 20 日夜下的雪

In fig. (b), The white on the ground was snow snowed in night of Dec. 20, 2017

晚期(二叠纪)辉绿岩,岩体边部标有“ γ_4^3 ”华力西晚期(二叠纪)花岗岩小岩体。这一巨大侵入岩岩体,根据新的区域地质资料确定为二叠纪闪长岩(δP)(图 1)。从野外地质工作来看,该岩体内除具有大量的闪长岩、辉绿岩之外,还具有辉橄岩、橄长岩、辉长岩等,其岩石组合极其复杂。

2 岩石产出地质特征

样品采集的地点位于二叠纪闪长岩岩体内部的西北部(图 1),本文 4 件样品和临近样品的位置坐标和室内显微镜薄片命名见表 1,是正在勘探铜镍矿的西边地方(图 2 b)。2016603K01 样品野外采样位置是第四系沉积物与岩石出露处,照片见图 2a,为地表样品。该样品向西 10m 为 2016531K02 样品,再向西 24 m 为 2016531K03 样品,再向西约

170 m,即 2016603K01 样品向西 204 m,采集 20171221B 样品(图 2b)左下角样品袋处。前三件样品为蚀变的玻基纯橄岩,第四件样品为玻基纯橄岩。

前三件样品的照片见图 2c—e。2016531K02 样品与 2016531K03 样品为工程揭露地表以下的新鲜样品。采样地方具有辉绿岩脉(图 2a 上)。第四件样品照片见图 2f。

蚀变玻基纯橄岩样品呈致密块状,深黑色,具弱磁性,小刀能刻动。2016603K01 样品表面具细小条带,风化面具有类似灰岩的“刀砍纹”。敲开后,新鲜面具玻璃质,敲开后的裂隙面为铁质褐红色。2016531K02 样品与 2016531K03 样品敲开后的新鲜面具两种情况,一种为无条带,呈致密块状,深黑色,局部显示浅蓝灰色;另一种具浅褐色条带,条带相互

平行,不连续,宽 1~3 mm 不等。垂直条带方向敲开的新鲜面可见粒状斑晶及其胶结物。岩相薄片和电子探针片磨制都垂直条带方向。

未蚀变 20171221B 玻基纯橄岩样品呈致密块状,总体为浅灰绿色,局部为浅褐色,具弱磁性,小刀能刻动。样品表面风化面,可见清楚的粒状斑晶矿物和黑色胶结物,肉眼可见斑晶矿物大小多为 0.5~2.0 mm,最大为 4.0 mm。具发丝一样的小条带。

3 岩相学特征

3.1 显微镜薄片的鉴定结果

3.1.1 蚀变玻基纯橄岩

3 件蚀变样品岩相学显微镜薄片鉴定,照片见图 3、4。蛇纹石为灰白色,橄榄石干涉色呈一级黄红、浅蓝、深蓝色。磁铁矿沿着矿物斑晶的边部或中心无规律分布,呈小条带或团块状。

2016531k02 样品为块状构造,岩石的矿物成分由橄榄石与火山玻璃组成,显微镜下呈变余斑状结构,基质为玻璃结构。斑晶矿物为橄榄石,含量达 75%,呈粒状,粒径大小一般 0.6~2.5 mm,橄榄石斑晶全部次生蚀变,被纤维蛇纹石交代,但保留了橄榄石圆粒状假像。基质为火山玻璃,由于含量小于斑晶,故呈填隙状产出,火山玻璃已脱玻化被细小粘土矿物皂石类等交代。岩石相当于纯橄岩的喷出相。铁质主要为橄榄石蛇纹石化过程中析出的铁质。根据镜下特征命名为蚀变(蛇纹石化、皂石化)玻基纯橄岩。

2016531k03 样品呈定向构造,变余斑状结构,基质为玻璃结构。岩石中斑晶为橄榄石,含量达 75%~80%,橄榄石呈圆粒状,粒径大小一般 0.6~

2.5 mm,斑晶具定向性分布,已全部次生蚀变,主要被纤维蛇纹石交代,其次被水镁石交代,但呈橄榄石假像。蛇纹石化、水镁石化过程中析出铁质,有时聚集成条带状集合体。由于玻璃质含量较少,故呈填隙状产出,现已脱玻化被细小蛇纹石或粘土矿物绿脱石、皂石等交代。岩石相当于纯橄岩的喷出相,应定名为蚀变玻基纯橄岩。

2016603k01 样品呈块状构造,斑状结构,基质为玻璃结构。岩石中斑晶由橄榄石组成,含量约占 75%,斑晶粒径大小一般 0.6~2.5 mm,大部分次生蚀变,被纤维蛇纹石交代,但呈橄榄石假像,有少量橄榄石残留体,呈交代残留结构。由于基质火山玻璃含量少于橄榄石斑晶,故火山玻璃常呈填隙状产出,但已脱玻化被细小蛇纹石或粘土矿物交代。岩石在蛇纹石化过程中析出铁质,它们常呈细小条带状聚集体产出。少量金属矿物多呈熔蚀似浑圆状,粒径大小在 0.05~0.15 mm,零星分布。按显微镜下特征,岩石应定名为蚀变(蛇纹石化)玻基纯橄岩。

3.1.2 玻基纯橄岩

1 件未蚀变 20171221B 样品岩相学显微镜薄片鉴定照片见(图 5),样品呈块状构造,玻基斑状结构。岩石中斑晶含量约占 65%。斑晶矿物成分由橄榄石组成。矿物晶体呈园粒状,粒径大小一般 0.5~4.0 mm,多沿晶体边缘或裂隙产出蛇纹石化或被闪石交代。岩石中的基质为火山玻璃,已脱玻化,多被绿泥石交代。岩石为纯橄岩喷出相,即玻基斑状纯橄岩。另外,岩石中有少量金属矿物,晶体呈粒状,粒径大小 0.05~0.30 mm,可能为磁铁矿化铬铁矿,零星分布。岩石有糜棱化条带,裂隙被方解石充

表 1 北山南部玻基纯橄岩等样品采样位置和室内命名

Table 1 The position and the name of the Meimechite and the other samples from the southern Beishan Mountain						
序号	样品编号	采样时间	样品位置	高程 (m)	室内薄片鉴定命名	备注
01	2016523k01	20160523	N40°45'42.9" E 93°32'58.4"	1344	中细粒橄长岩	临近样品
02	2016527k01	20160527	N40°44'42.6" E 93°31'33.6"	1300	中细粒橄长岩	临近样品
03	2016528k01	20160528	N40°43'45.0" E 93°32'23.6"	1284	中细粒橄榄辉长岩	临近样品
04	2016531k01	20160531	N40°45'57.8" E 93°32'50.4"	1352	中细粒蚀变辉橄岩	临近样品
05	2016531k02	20160531	N40°45'54.5" E 93°32'50.7"	1349	蚀变玻基纯橄岩	本文样品
06	2016531k03	20160531	N40°45'54.3" E 93°32'49.4"	1349	蚀变玻基纯橄岩	本文样品
07	2016531k04	20160531	N40°45'45.7" E 93°33'03.7"	1365	中细粒橄榄辉长岩	临近样品
08	2016603k01	20160603	N40°45'54.4" E 93°32'51.3"	1318	蚀变玻基纯橄岩	本文样品
09	2016531k02-1	20171221	531k02 南 20m	1343	玻基辉橄岩	标本具辉石条带
10	20171221B	20171221	N40°45'52.7" E 93°32'43.6"	1352	玻基纯橄岩	本文样品

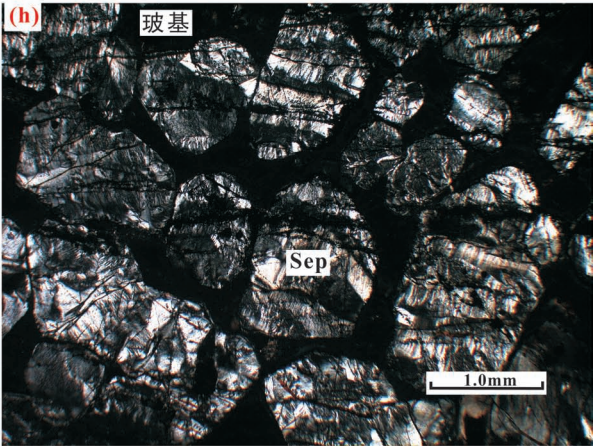
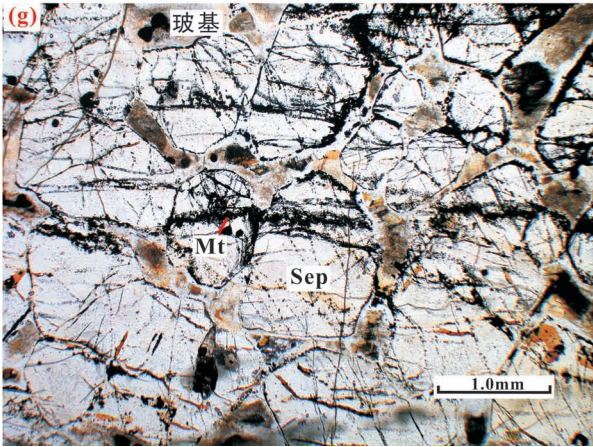
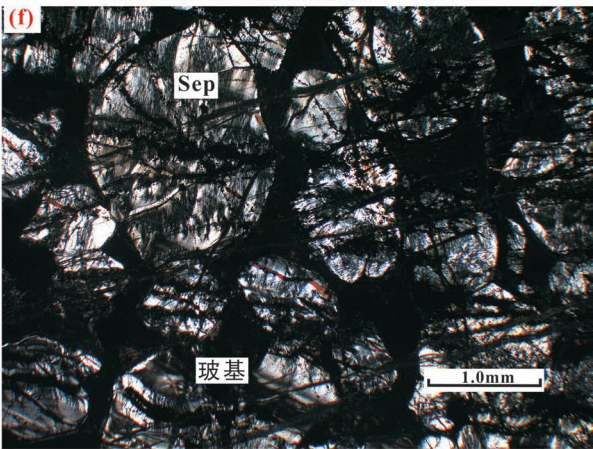
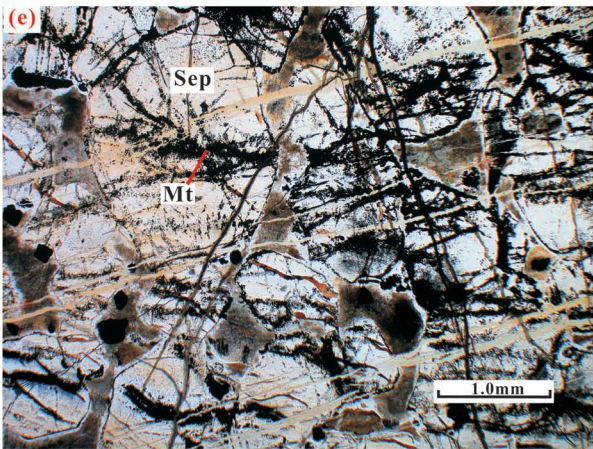
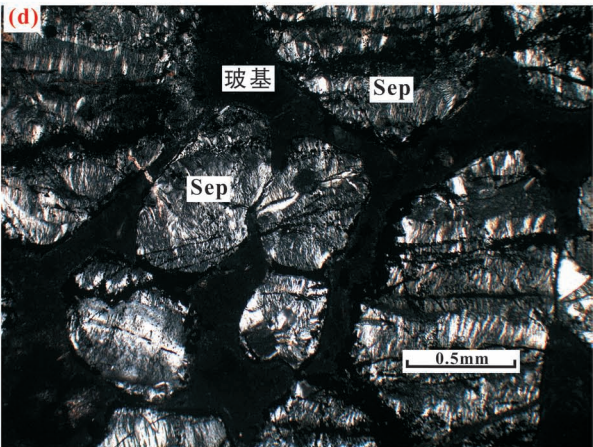
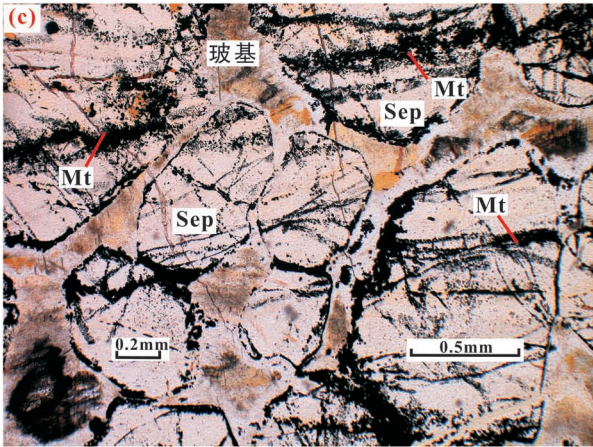
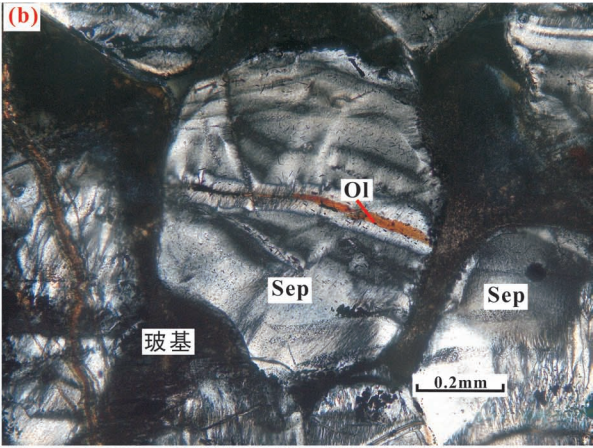
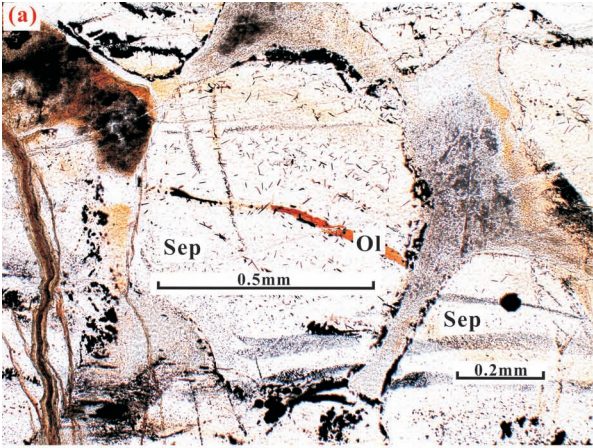


图 3 北山南部蚀变玻基纯橄岩(样品 2016531k02)的橄榄石斑晶和玻璃质基质
Fig. 3 The Olivine phenocrysts and vitreous of alteration Meimechite (sample 2016531k02)
from the southern Beishan Mountain
左:单偏光(—),右:正交光(+)。Ol—橄榄石; Sep—蛇纹石; Mt—磁铁矿
Left: monopolarized light (—), Right: cross-polarized light (+). Ol—olivine; Sep—serpentine; Mt—magnetite

填。岩石应定名为玻基纯橄岩。

3.2 本文玻基纯橄岩与西伯利亚“麦美奇岩”
矿物斑晶的对比

经对比,本研究发现的中国北山地区玻基纯橄岩的显微照片(图 6 b)与西伯利亚典型“麦美奇岩”(图 6 a,据 Kogarkoa and Ryabchikov, 2000; 注:原图无线段比例尺; 现线段比例尺为笔者据原图所标注的放大倍数计算后所加)一样,橄榄石是唯一的斑晶,它们均镶嵌在玻璃质基底上,橄榄石斑晶几乎全部蛇纹石化。斑晶粒径为 0.5 mm 左右,未蚀变的或重结晶的橄榄石斑晶局部干涉色呈一级黄红。

4 X 射线衍射分析结果

4.1 X 射线衍射分析方法

实验在西安地质矿产研究所实验室 X 射线衍射仪上进行,型号 D/max-2500,编号 SX-65。检测依据 DS-2613201-04。实验条件:电压 40 kV,电流 200 mA,靶: Cu,石墨单色器滤波。物相分析方法: JCPDS,定量分析方法:基本强度对比法,基本公式: $X=I_x/I_{\text{样品}}$,环境条件:室温 26℃,湿度 48%。

4.2 X 衍射分析结果

实验先对对三件蚀变玻基纯橄岩样品,进行 X 射线衍射分析,时间 2016 年 8 月。补采的样品未蚀变的玻基纯橄岩样品于 2018 年 5 月,进行 X 射线衍射分析。

衍射分析结果,样品具有 10 种矿物(表 2),橄榄石、蛇纹石、绿泥石、角闪石、方解石、磁铁矿、普通

辉石、高岭石、白云石、滑石。橄榄石、蛇纹石是本文样品的主要组成部分,含量很高。

2016531K02 样品具有 5 种矿物,镁橄榄石 [forsterite, ($Mg_{1.8}Fe_{0.2}$) (SiO_4)]、利蛇纹石 [lizardite, (Mg,Al)₃((Si,Fe)₂ O_5) (OH)₄]、斜绿泥石 [clinocllore, (Mg,Fe)₅(Si,Al)₄ O_{10} (OH)₈]、磁铁矿 (magnetite, $Fe^{+2}Fe_2^{+3}O_4$)、普通辉石 [augite, $Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$]。

2016531K03 样品具有 4 种矿物,镁橄榄石、利蛇纹石、磁铁矿、方解石 (calcite, $CaCO_3$)。

2016603K01 样品具有 4 种矿物,镁橄榄石、利蛇纹石、镁铁闪石 [cummingtonite, $Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$]、高岭石 [kaolinite, $Al_4(OH)_8(Si_4O_{10})$]。

20171221B 样品具有 7 种矿物,镁橄榄石、利蛇纹石、斜绿泥石、镁铁闪石、磁铁矿、白云石 [dolomite, $CaMg(CO_3)_2$]、滑石 [talc, $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$]。

5 电子探针检测分析

5.1 电子探针检测分析方法与仪器

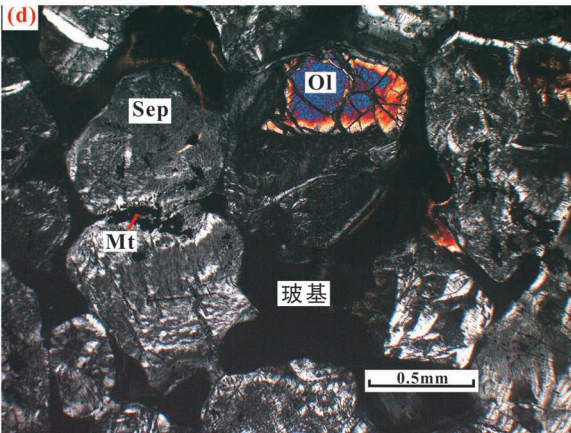
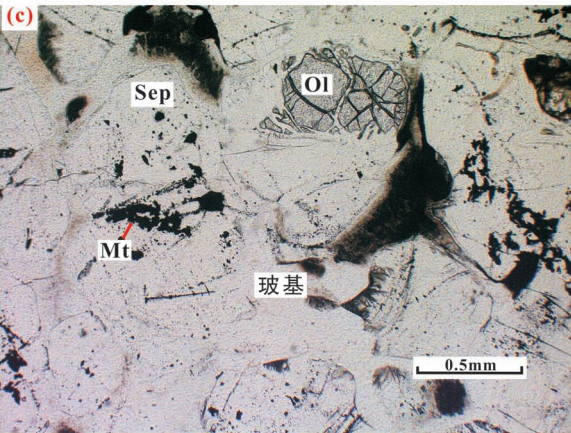
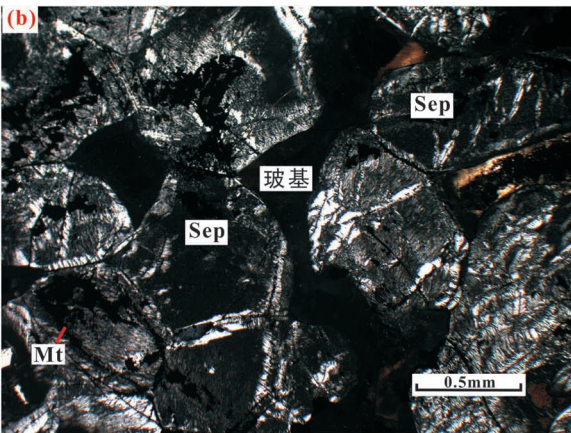
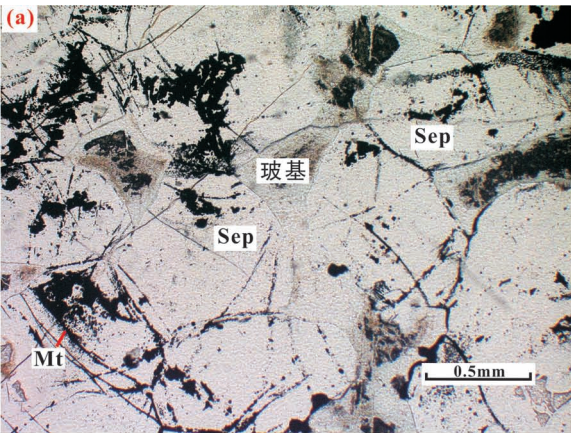
本次研究重点对 3 件蚀变玻基纯橄岩进行电子探针检测分析。实验在西安地质矿产研究所实验室电子探针检测室 JEOL JXA-8230 仪器上进行。BSE 或 COMPO 为背散射电子图像,SEI 为二次电子图像(形貌,本文未附),X:放大倍数,WD:电子束到样品距离,误差:±2%。各种实验参数如下:电压: 15 kV

表 2 北山南部玻基纯橄岩 X 射线衍射分析结果

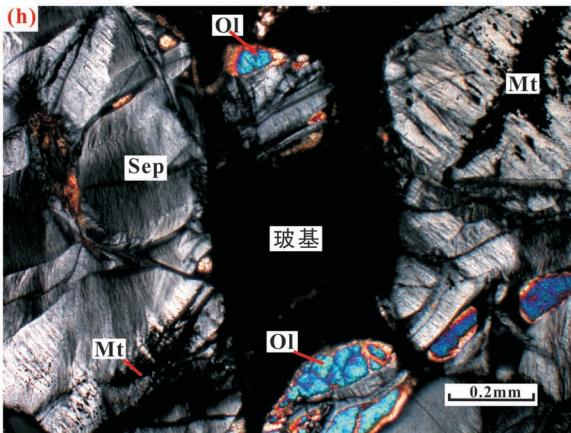
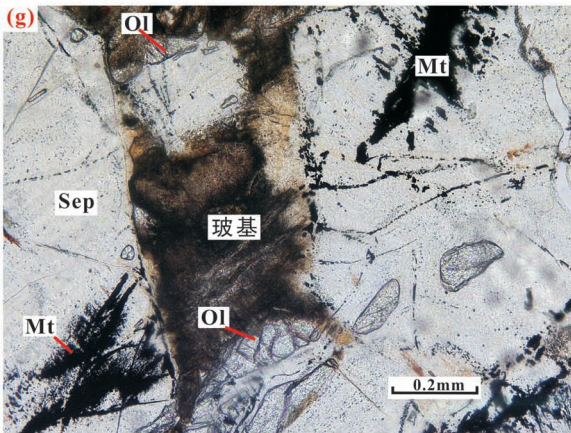
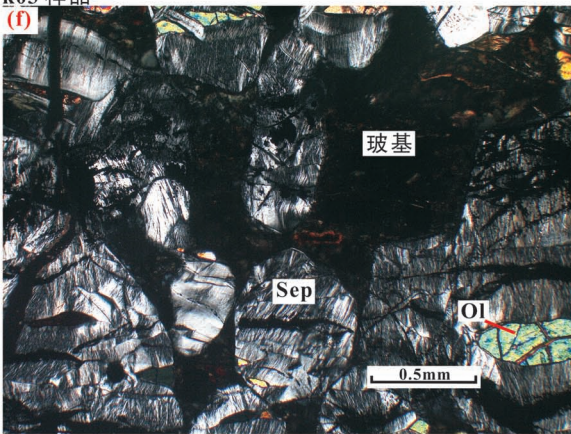
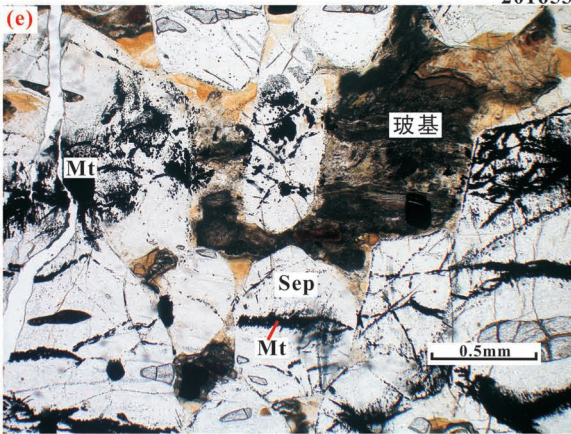
Table 2 Results of X-ray diffraction analysis for the Meimechite in the southern Beishan Mountain (%)

样品编号	矿物含量(%)									
	橄榄石	蛇纹石	绿泥石	角闪石	磁铁矿	方解石	普通辉石	高岭石	白云石	滑石
	镁橄榄石	利蛇纹石	斜绿泥石	镁铁闪石						
2016531K02	1	88	2	—	6	—	3	—	—	—
2016531K03	8	84	—	—	4	4	—	—	—	—
2016603K01	4	92	—	1	—	—	—	3	—	—
20171221B	12	42	25	5	4	—	—	—	7	5

注:实验在西安地质矿产研究所实验室 X 射线衍射仪 D/max-2500 完成。时间:2016 年 8 月,2018 年 5 月。



2016531k03 样品



2016603k01 样品

图 4 北山南部蚀变玻基纯橄岩(样品 2016531k02 和 2016531k03) 的橄榄石斑晶和玻璃质基质
Fig. 4 The Olivine phenocrysts and vitreous of alteration Meimechite (samples 2016531k02 and 2016531k03)
from the southern Beishan Mountain

左：单偏光(—),右:正交光(+)。Ol—橄榄石; Sep—蛇纹石; Mt—磁铁矿

Left: monopolarized light (—), Right: cross-polarized light (+). Ol—olivine; Sep—serpentine; Mt—magnetite

(硅酸盐),20 kV(硫化物),电流: 10 nA,束斑: 1~5 μm。检出角: 40°,校正: ZAF,标样: 中国 GSB,美国 SPI,日本 GEOL。温度: 22℃,湿度: 56%,标准: GB/T15074-2008, GB/T15617-2002, GB/T15246-2002。日期: 2017 年 4 月 11~12 日,17 日(每张照片右下角为检测日期)。

5.2 分析结果

电子探针检测,图像见图 7、8,检测结果数据见

表 3。三个样品电子探针检测 76 点,共 14 种矿物。

橄榄石 (olivine, Ol) 6、蛇纹石 (serpentine, Sep) 17、绿泥石 (chlorite, Chl) 21、绿帘石 (epidote, Ep) 9、黝帘石 (zoisite, Zo) 1、角闪石 (hornblende, Hb) 3、钛铁矿 (ilmenite, Il) 2、磁铁矿 (magnetite, Mt) 3、褐铁矿 (limonite, Lm) 2、镍黄铁矿 (pentlandite, Pn) 1、斜长石 (plagioclase, Pl) 6、尖晶石 (spinel, Spi) 3、葡萄石 (prehnite, Pre) 1、金云母 (phlogopite, Phl) 1。

表 3 北山南部蚀变玻基纯橄岩样品电子探针检测结果

Table 3 The results of electron probe of altered meimechite samples from the southern Beishan Mountain

	样品 2016531K02										
	Point1 绿帘石	Point2 绿泥石	Point3 绿泥石	Point4 蛇纹石	Point5 蛇纹石	Point6 蛇纹石	Point7 绿帘石	Point12 绿泥石	Point13 绿泥石	Point14 角闪石	Point15 角闪石
SiO ₂	34.19	34.53	35.18	41.26	40.93	41.61	33.53	31.86	33.49	43.89	45.17
TiO ₂	0.00	0.01	0.06	0.00	0.06	0.02	0.03	0.00	0.00	3.00	2.70
Al ₂ O ₃	18.32	13.10	10.93	1.34	1.54	1.02	18.20	15.85	16.43	13.70	12.71
FeO	11.79	9.17	16.01	1.69	1.69	1.71	13.84	14.99	12.41	5.45	5.09
MnO	0.81	0.31	0.13	0.05	0.04	0.01	0.77	0.29	0.18	0.12	0.08
MgO	5.50	28.10	23.48	38.22	37.72	38.50	7.05	22.62	21.15	15.63	17.07
CaO	23.02	0.18	0.20	0.03	0.01	0.02	19.47	0.61	3.09	11.69	11.56
Na ₂ O	0.04	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.03	0.06	2.50	2.40
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.24	0.19
NiO	0.00	0.00	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.14
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.18	0.02	0.00	0.13	0.03	0.07	0.04	1.13	0.98
V ₂ O ₃	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.08	0.20
总量	93.73	85.42	86.42	82.63	82.02	83.02	92.93	86.35	86.90	97.47	98.29

	样品 2016531K02										
	Point16 绿泥石	Point17 绿泥石	Point18 绿泥石	Point19 钛铁矿	Point20 尖晶石	Point21 绿帘石	Point22 绿帘石	Point23 绿帘石	Point24 绿泥石	Point29 绿泥石	Point30 绿泥石
SiO ₂	34.22	32.38	32.82	0.04	0.05	35.39	35.93	37.55	20.84	34.72	33.89
TiO ₂	0.09	0.04	0.06	53.14	1.05	0.06	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	16.71	16.10	16.36	0.03	21.38	21.45	21.33	22.65	25.93	12.25	12.78
FeO	12.18	13.59	12.61	44.02	32.82	3.34	7.64	0.81	38.68	5.35	5.89
MnO	0.23	0.24	0.22	2.60	0.50	0.96	0.91	0.72	2.67	0.17	0.13
MgO	20.72	22.57	20.75	0.84	8.53	1.06	1.38	0.01	0.21	31.39	31.03
CaO	3.46	1.39	3.43	—	—	31.06	30.01	36.00	0.45	0.13	0.13
Na ₂ O	0.04	0.12	0.06	0.03	0.00	0.04	0.04	0.03	0.04	0.00	0.04
K ₂ O	0.04	0.03	0.01	—	—	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
NiO	0.00	0.00	0.00	—	—	0.08	0.06	0.00	0.01	0.00	0.06
Cr ₂ O ₃	0.04	0.09	0.10	0.68	35.19	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	—	—	0.00	0.00	0.04	0.06	0.10	0.00
总量	87.73	86.55	86.42	101.38	99.52	93.46	97.32	97.84	88.90	84.18	83.97

	样品 2016531K02										
	Point31 绿泥石	Point32 绿泥石	Point33 绿泥石	Point34 绿帘石	Point35 绿泥石	Point40 角闪石	Point42 绿泥石	Point43 蛇纹石	Point46 金云母		Point44 镍黄铁矿
SiO ₂	34.13	34.05	28.91	37.76	33.45	44.50	27.32	41.81	40.07	Se	0.01
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	1.89	0.00	0.07	2.31	Ni	34.05
Al ₂ O ₃	13.16	12.98	25.73	22.94	11.64	13.38	11.56	1.77	17.09	Bi	0.14
FeO	5.42	5.37	1.98	4.19	19.49	5.26	39.61	2.37	4.08	S	33.04
MnO	0.09	0.12	0.59	1.51	0.32	0.12	0.50	0.08	0.02	Ag	0.02
MgO	30.75	31.40	26.87	1.20	22.43	16.89	7.92	37.23	21.71	Fe	30.08
CaO	0.13	0.05	0.22	29.30	0.01	11.55	0.03	0.08	0.06	Co	2.50
Na ₂ O	0.03	0.00	0.08	0.04	0.01	3.00	0.00	0.03	0.37		
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.11	0.00	0.02	7.68		
NiO	0.03	0.10	0.00	0.03	0.05	0.13	0.09	0.15	0.07		
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	1.20	0.14	0.12	0.20		
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.11	0.03	0.00	0.10		
总量	83.74	84.08	84.46	97.08	87.43	98.14	87.20	83.73	93.76		99.84
	样品 2016531K03										
	Point1 绿泥石	Point2 蛇纹石	Point3 蛇纹石(脉)	Point4 蛇纹石	Point5 蛇纹石	Point6 磁铁矿	Point7 褐铁矿	Point8 磁铁矿	Point9 褐铁矿	Point10 钛铁矿	Point11 斜长石
SiO ₂	35.74	40.76	36.40	35.89	42.23	0.61	6.78	0.09	6.89	0.07	54.69
TiO ₂	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.10	54.26	0.08
Al ₂ O ₃	12.29	3.09	5.17	7.23	1.43	0.02	0.50	0.02	0.77	0.00	29.92
FeO	5.87	3.05	21.66	19.36	2.26	89.04	73.40	92.13	72.25	38.45	0.18
MnO	0.17	0.03	0.27	0.40	0.06	0.25	1.13	0.15	1.03	4.43	0.00
MgO	31.12	36.73	22.38	22.74	38.09	0.14	1.02	0.06	1.27	4.21	0.00
CaO	0.11	0.04	0.06	0.25	0.03	—	—	—	—	—	11.44
Na ₂ O	0.01	0.02	0.02	0.06	0.02	0.10	0.16	0.00	0.28	0.10	4.80
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	—	—	—	—	—	0.10
NiO	0.11	0.07	0.24	0.66	0.17	—	—	—	—	—	0.00
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.10	0.01	0.00	0.10	0.89	0.08	0.52	0.21	0.05
V ₂ O ₃	0.00	0.03	0.05	0.01	0.00	—	—	—	—	—	0.00
总量	85.46	83.87	86.36	86.62	84.32	90.26	83.90	92.53	83.11	101.73	101.26
	样品 2016531K03									样品 2016603K01	
	Point12 斜长石	Point13 蛇纹石	Point14 绿泥石	Point15 蛇纹石	Point16 绿泥石	Point17 斜长石	Point18 蛇纹石	Point20 蛇纹石	Point21 蛇纹石	Point1 橄榄石	Point2 蛇纹石
SiO ₂	54.85	35.48	33.98	35.65	34.93	53.74	35.14	35.19	35.74	40.99	41.21
TiO ₂	0.06	0.02	0.03	0.02	0.03	0.05	0.00	0.07	0.05	0.04	0.03
Al ₂ O ₃	29.83	9.60	12.51	10.78	12.32	30.41	12.31	7.19	6.55	0.00	1.50
FeO	0.16	2.86	6.53	4.18	5.17	0.14	3.92	22.19	21.57	12.66	1.82
MnO	0.00	0.04	0.16	0.10	0.16	0.07	0.10	0.54	0.36	0.22	0.01
MgO	0.02	34.30	30.95	33.20	31.85	0.00	32.68	21.05	22.37	45.09	38.38
CaO	11.62	0.01	0.02	0.02	0.07	11.92	0.09	0.05	0.07	0.01	0.03
Na ₂ O	4.76	0.02	0.05	0.02	0.00	4.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
K ₂ O	0.10	0.01	0.09	0.01	0.07	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.01	0.07	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.10	0.19	0.12	0.03
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.05	0.02	0.00	0.03	0.00	0.08	0.04	0.00	0.02
V ₂ O ₃	0.04	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03
总量	101.46	82.44	84.37	84.00	84.72	100.44	84.25	86.47	86.96	99.13	83.06
	样品 2016603K01										
	Point3 葡萄石	Point4 橄榄石	Point5 绿泥石	Point6 绿泥石	Point7 尖晶石	Point8 尖晶石	Point9 磁铁矿	Point11 橄榄石	Point12 绿帘石	Point13 斜长石	Point14 橄榄石
SiO ₂	33.87	40.65	34.33	29.92	0.00	0.00	0.55	41.08	37.24	51.44	40.04
TiO ₂	0.06	0.02	0.07	0.03	0.97	1.86	0.02	0.08	0.07	0.03	0.07

	样品 2016603K01										
	Point3 葡萄石	Point4 橄榄石	Point5 绿泥石	Point6 绿泥石	Point7 尖晶石	Point8 尖晶石	Point9 磁铁矿	Point11 橄榄石	Point12 绿帘石	Point13 斜长石	Point14 橄榄石
Al ₂ O ₃	16.93	0.11	12.71	20.79	22.05	15.44	0.00	0.00	20.65	31.65	0.01
FeO	6.88	27.64	8.52	13.73	33.82	39.58	93.07	12.93	4.07	0.20	12.75
MnO	0.72	0.18	0.27	0.70	0.36	0.30	0.12	0.21	2.79	0.07	0.19
MgO	0.21	19.15	27.31	21.60	8.41	6.63	0.30	44.88	0.04	0.00	46.26
CaO	34.72	1.07	0.39	1.30	—	—	—	0.01	33.11	13.66	0.00
Na ₂ O	0.02	0.22	0.03	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	3.27	0.01
K ₂ O	0.01	0.31	0.03	0.00	—	—	—	0.00	0.00	0.04	0.00
NiO	0.00	0.35	0.00	0.00	—	—	—	0.18	0.00	0.06	0.24
Cr ₂ O ₃	0.00	1.14	0.00	0.03	33.73	34.25	0.44	0.04	0.02	0.02	0.00
V ₂ O ₃	0.00	0.09	0.08	0.02	—	—	—	0.00	0.00	0.00	0.13
总量	93.42	90.93	83.74	88.12	99.38	98.07	94.50	99.41	97.99	100.44	99.70

	样品 2016603K01										
	Point15 橄榄石	Point16 蛇纹石	Point17 绿泥石	Point18 斜长石	Point19 蛇纹石	Point20 橄榄石	Point21 绿帘石	Point22 黝帘石	Point23 斜长石	Point24 绿帘石	Point25 蛇纹石
SiO ₂	40.34	40.86	25.64	51.71	33.89	39.87	34.78	35.21	50.35	34.53	40.51
TiO ₂	0.00	0.07	0.00	0.08	0.08	0.03	0.00	0.05	0.02	0.07	0.06
Al ₂ O ₃	0.00	1.52	20.96	30.57	10.63	0.00	14.43	22.26	32.51	16.56	1.66
FeO	12.89	1.63	32.05	0.22	7.11	13.34	10.21	1.29	0.10	11.76	2.30
MnO	0.23	0.02	3.69	0.01	0.31	0.16	0.93	1.08	0.02	0.76	0.02
MgO	46.52	38.57	5.54	0.00	29.91	46.21	0.56	0.00	0.01	1.34	38.52
CaO	0.00	0.05	0.60	12.81	0.53	0.01	34.54	35.90	14.20	32.75	0.01
Na ₂ O	0.00	0.00	0.05	4.20	0.04	0.00	0.00	0.00	3.27	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00
NiO	0.21	0.14	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.05	0.01	0.00	0.10
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.00	0.03	0.02	0.06	0.05	0.06	0.00	0.03	0.11
V ₂ O ₃	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
总量	100.21	82.90	88.59	99.65	82.59	99.91	95.50	95.91	100.53	97.82	83.29

注：检测分析在西安地质矿产研究所实验室电子探针 JEOL JXA-8230 仪器上完成,时间:2017 年 4 月。
表中 FeO 的百分含量为 FeO+Fe₂O₃之和的百分含量。电子探针无法检测氢氧根 (OH⁻)、碳氢、有机物,蛇纹石的分子通式为 A₃Si₂O₅(OH)₄, A=Mg、Fe²⁺、Ni,绿泥石分子通式为 M₃₋₆[(Si,Al)₄O₁₀](OH)₈, M=Mg、Fe²⁺、Ni、Mn、Li、Al、Fe³⁺、Cr,绿帘石分子式为 Ca₂(Al,Fe)₃[SiO₄][Si₂O₇]O(OH),黝帘石分子式为 Ca₂AlAl₂[SiO₄][Si₂O₇]O(OH),褐铁矿分子式为 FeO(OH)·nH₂O,金云母分子式为 KMg₃[AlSi₃O₁₀](F,OH)₂,分子中含氢氧根,因此,上述矿物总量偏低。检测结果显示为 0.00,表示含量低于检出限。表中“—”为检测未列出项目。

第一个样品检测点为,蛇纹石 4、绿泥石 15、绿帘石 6、角闪石 3、镍黄铁矿 1、钛铁矿 1、尖晶石 1、金云母 1,共 32 个点。

第二个样品检查点为,蛇纹石 9、绿泥石 3、斜长石 3、磁铁矿 2、褐铁矿 2、钛铁矿 1,共 20 个点。

第三个样品检测点为,橄榄石 6、蛇纹石 4、绿泥石 3、绿帘石 3、黝帘石 1、斜长石 3、磁铁矿 1、尖晶石 2、葡萄石 1,共 24 个点。

此外,还有多个具图像,没有给出数据,明显可以确定矿物的检测点。

上述 X 射线衍射分析结果 10 种矿物,橄榄石,蛇纹石,绿泥石,角闪石,磁铁矿,方解石 (calcite, Cal),普通辉石 (augite, Aug),高岭石 (kaolinite, Kl),白云石 (dolomite, Do)、滑石 (Talc, Tc)。综合

两种检测结果,本文样品检测出 19 种矿物。

5.3 主要矿物

主要矿物为少量蚀变残留的橄榄石和蛇纹石。点号见图 7、8。

橄榄石 (olivine), 共检测 6 个点。第三个 2016603K01 样品 P1、P4、P11、P15、P20 五个点,在蛇纹石的中心或边部蚀变残留的橄榄石矿物的局部部分,P14 是基质与蛇纹石接触部位残留的橄榄石小矿物。

蛇纹石 (serpentine), 共检测 17 个点,矿物结构具有 5 种特征。

(1) 矿物比较完整,与基质接触,中心没有橄榄石残留晶体, 2016531K02 样品 P4、P5、P6, 2016531K03 样品 P2、P5,这样的蛇纹石占绝大多

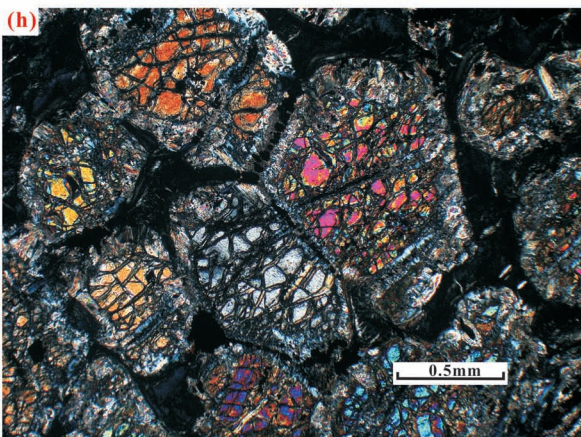
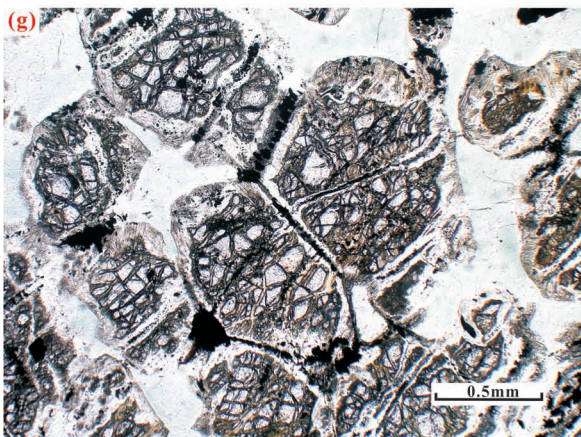
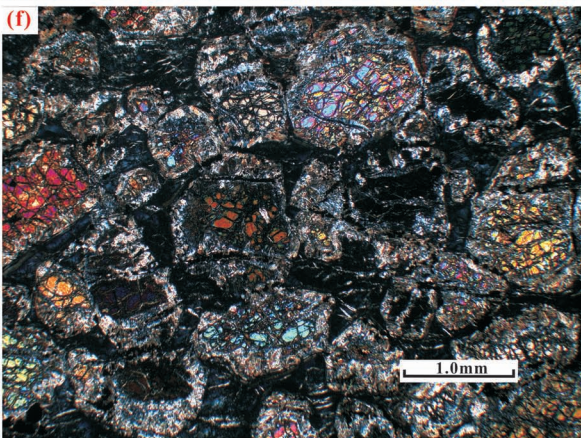
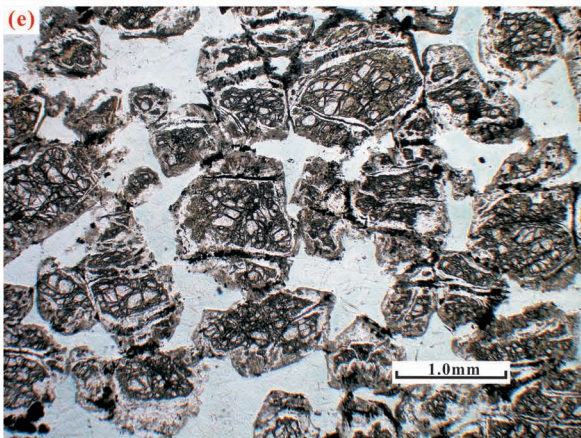
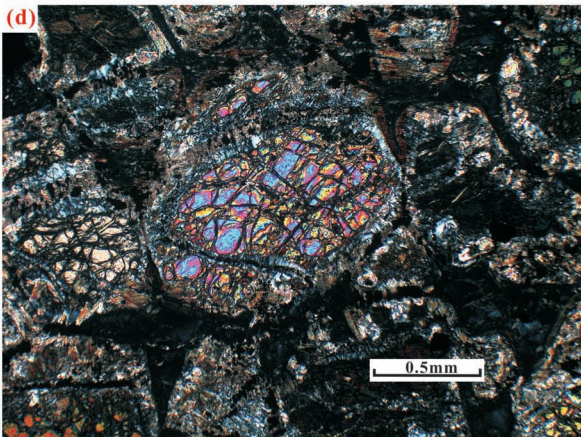
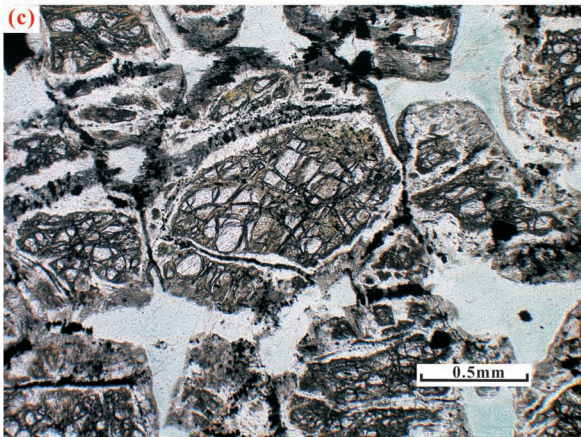
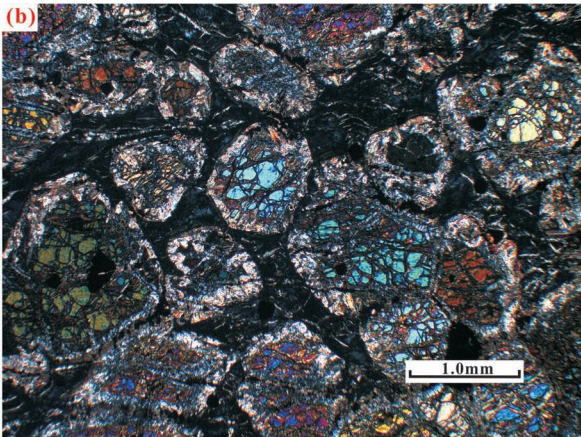
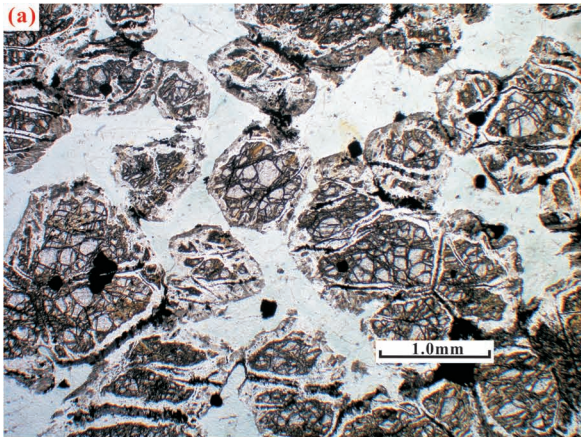


图 5 北山南部玻基纯橄岩(样品 20171221B)的橄榄石斑晶和玻质基质

Fig. 5 The Olivine phenocrysts and vitreous of Meimechite (sample 20171221B) from the southern Beishan Mountain
左:单偏光(—),右:正交光(+)
Left: monopolarized light(—), Right: cross-polarized light(+)

数,这种情况是显微镜鉴定观察的主要特征,是玻基纯橄岩显微镜鉴定方面的重要证据,电子探针进一步证明这一点。

(2) 大的蛇纹石集合体中残留橄榄石小矿物,2016603K01 样品 P2、P16、P25。这也是显微镜下,另一个主要的特征。P16 点,虚线勾画出蚀变之前一个很大的橄榄石斑晶的原始轮廓,蚀变后斑晶内部一部分为橄榄石,一部分为蛇纹石,为橄榄石斑晶的假像。

(3) 与含矿基质接触,2016531K02 样品 P43。
(4) 蛇纹石细脉、小矿物,2016531K03 样品 P3、P4、P13、P15、P18,2016603K01 样品 P19。蛇纹

石小矿物周围 P4、P13、P15、P18,还是玻基物质。
(5) 可能在脱玻化过程中产生的蛇纹石羽状细脉,2016531K03 样品 P20、P21。
磁铁矿(magnetite),矿物特征与显微镜薄片照片的情况一样。

6 岩石化学分析结果

6.1 岩石化学分析方法

检测单位,西安地质矿产研究所实验室。主量元素检测方法:常规方法(FeO 容量法,灼失量和 H₂O⁺为重量法),X 荧光光谱法。微量与稀土元素检测方法:等离子体质谱仪 ICP-MS 方法。Mg[#] = 100×

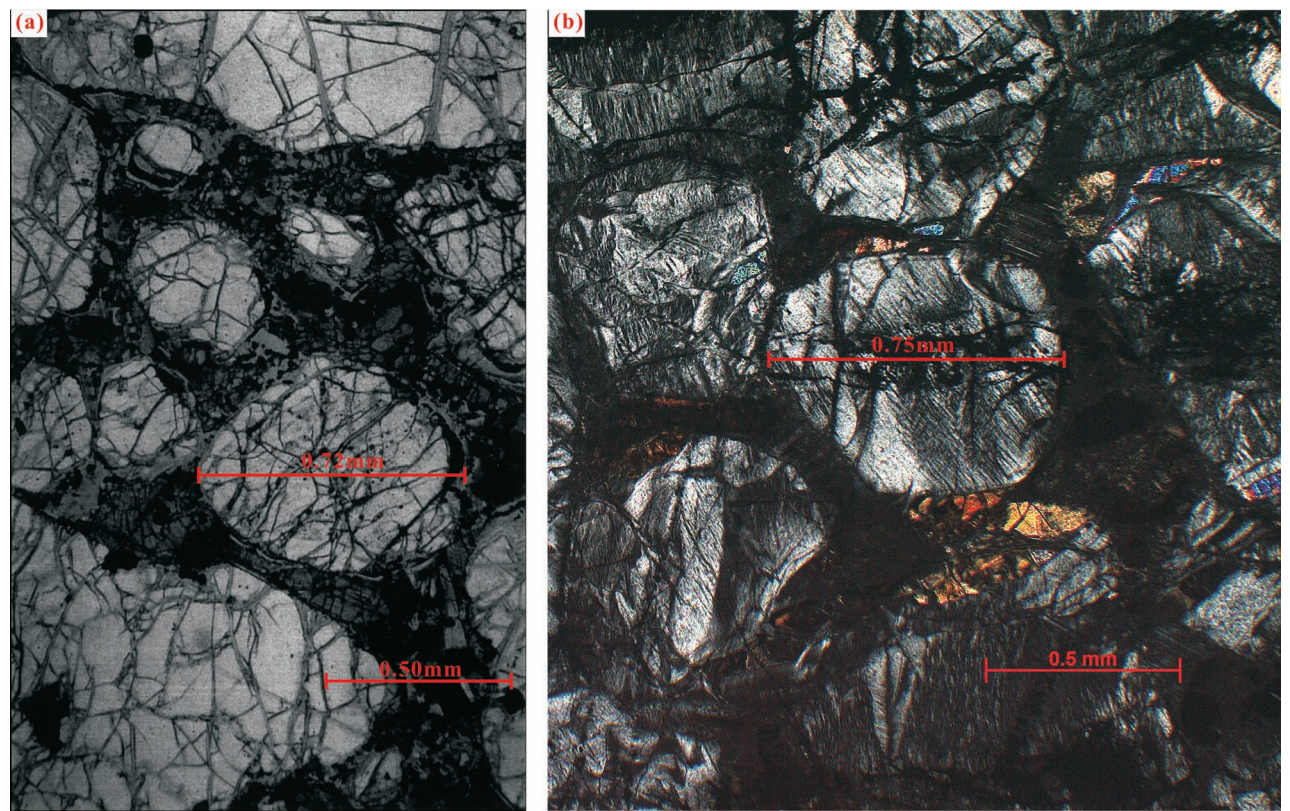
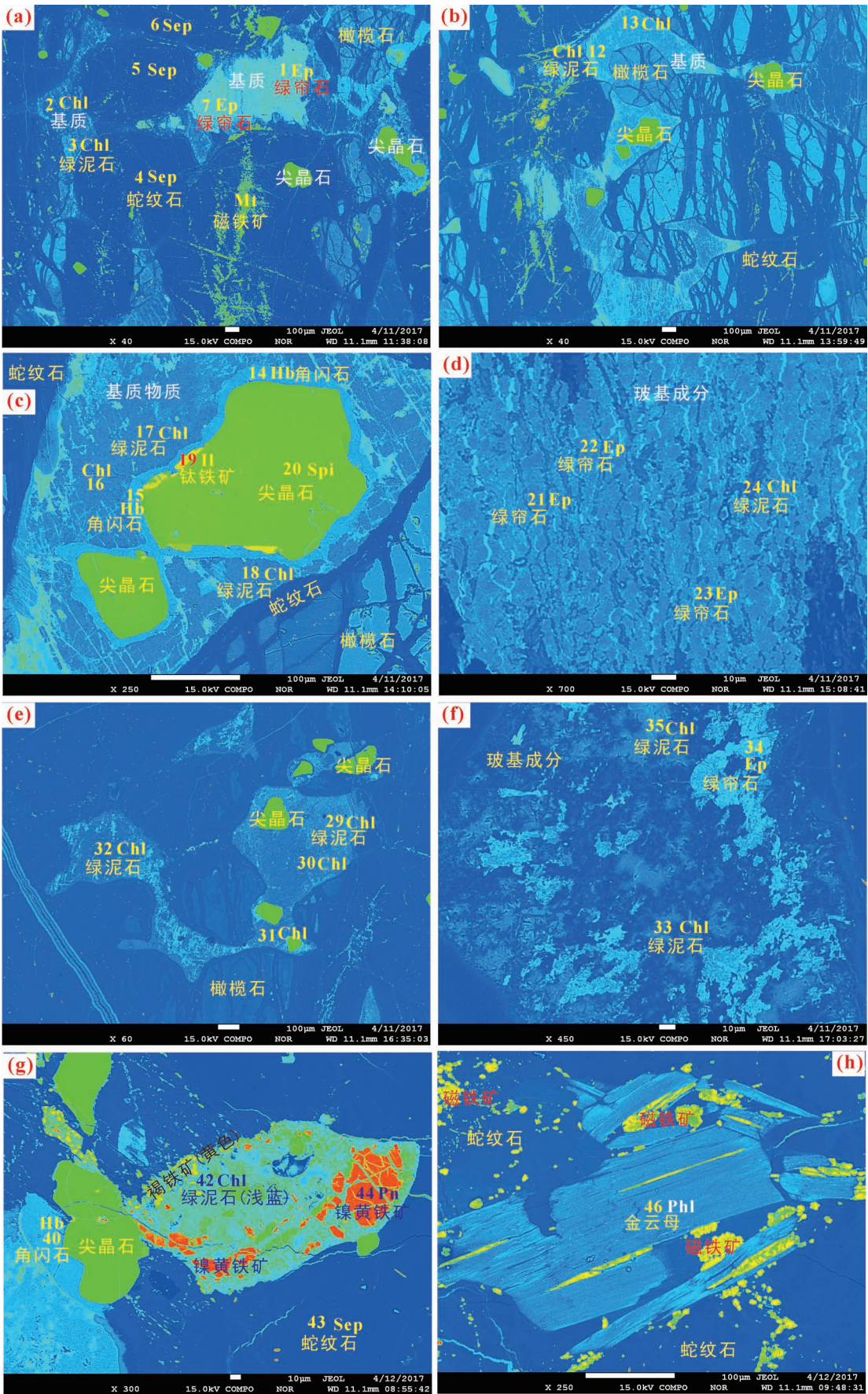


图 6 西伯利亚“麦美奇岩”(左)(引自 Kogarkoa and Ryabchikov, 2000)与
中国北山玻基纯橄岩(样品 2016603K01)(右)显微照片对比

Fig. 6 Comparison of the microscopic photos of the Meimechite in Maimecha—Kotui Province, Siberia, Russia (a, from Kogarkoa and Ryabchikov, 2000)and the Meimechite in Beishan Mountain, Xinjiang, China (b)
左(a) 单偏光(—),右(b) 正交偏光(+)
Left: monopolarized light(—), Right: cross-polarized light(+)



2016531K02麦美奇岩

图 7 北山南部蚀变玻基纯橄岩(样品 2016531K02)电子探针背散射图像

Fig. 7 The electron probe backscattering images (COMPO) of alteration meimechite (sample 2016531K02) from the southern Beishan Mountain

Sep—蛇纹石;Chl—绿泥石;Ep—绿帘石;Hb—角闪石;Pn—镍黄铁矿;Il—钛铁矿;Spi—尖晶石;Phl—金云母

Sep—serpentine;Chl—chlorite;Ep—epidote;Hb—hornblende;Pn—pentlandite;Il—ilmenite;Spi—spinel;Phl—phlogopite

$$n(\text{Mg}^{2+})/[n(\text{Mg}^{2+})+n(\text{TFe}^{2+})]$$

对 2016531K02 样品, 2016531K03 样品, 2016603K01 样品, 进行岩石化学分析。先对 2016531K02 样品和 2016531K03 样品, 与其他类岩石 7 件样品共 9 件样品, 进行岩石化学分析, 实验室对这两个样品的编号为: C170090005 和 C170090006。然后, 取 2016531K02 样品和 2016531K03 样品两个样品的正样, 编号 531K02 样品, 531K03 样品, 2016603K01 样品及其正样 603K01 样品, 共 4 件样品, 进行第二次岩石化学分析, 实验室编号为: C170190001 ~ C170190004。第三次岩石化学分析, 对 20171221B 样品和其他 4 件样品(这 4 件样品本文不涉及)共 5 件样品进行岩石化学分析, 该样品实验室编号为: C180100005。

在实验室分析过程中, 有多个“密码标准样品”以保证分析数据的可靠性, 岩石化学分析结果, 数据见表 4。

6.2 岩石化学分析结果

蚀变样品从两组数据对比来看, 主元素氧化物数据非常理想, 绝大多数数据几乎完全一样。稀土元素 2016531K02 样品(C170090005), 531K02 样品(C170190001)的个别元素误差较大, 然后, 对这两个样品的微量和稀土元素进行内检, 结果, 前者校对了 Ba 和 Nb 两个元素, 后者使用内检结果数据。

3 件蚀变样品, 主元素氧化物的含量分别为, SiO₂ 为 36.40%~37.29%, Al₂O₃ 为 2.61%~4.70%, TiO₂ 为 0.058%~0.22%, MgO 为 33.30%~34.65%, Fe₂O₃+FeO 为 10.51%~12.89%, Na₂O+K₂O 为 0.03%~0.07%, 为超铁镁质超基性喷出岩。其他岩石化学指标 Mg[#] 为 83.5~86.5, δSr 为 1.14~4.61, Sr/Y 为 5.70~36.83。稀土元素 ΣREE 为 2.18~9.71, δEu 为 0.68~2.43, La/Yb 为 0.90~4.47。

未蚀变 20171221B 样品, 主元素氧化物的含量为, SiO₂ 为 36.069%, Al₂O₃ 为 4.63%, TiO₂ 为 0.071%, MgO 为 35.36%, Fe₂O₃+FeO 为 11.16%, Na₂O+K₂O 为 0.14%,。其他岩石化学指标 Mg[#] 为 85.7, δSr 为 2.58, Sr/Y 为 42.74。稀土元素 ΣREE 为 5.24, δEu 为 2.05, La/Yb 为 10.00。该样品与上

述 3 件样品比较, 其 MgO、Na₂O+K₂O、Sr/Y 和 La/Yb 略偏高。

西伯利亚“麦美奇岩”岩脉(dyke)样品的 Mg[#] 为 79~86, 熔岩(lava) Mg[#] 为 81~87 (Arndt et al., 1995)。仅从这一方面比较, 本文研究的玻基纯橄岩, 可能为熔岩, 野外的特征也反映这种情况。

蚀变样品, 在原始地幔微量元素标准化曲线图中(图 9a), Nb 正常, Ta、Sr 明显富集, Rb 元素, 后 3 组数据中亏损。前 4 组数据其他元素比值接近 1, 后 2 组数据部分元素小于 1。在原始地幔稀土元素标准化曲线图中(图 9b), Eu 元素表现出, 正常、微显亏损、富集的三种情况, 其他元素比值接近 1。微量元素和稀土元素总体显示出原始地幔的元素特征。

未蚀变样品, 在原始地幔微量元素标准化曲线图中(图 9cd), Nb、Sr、Eu 明显富集, 稀土曲线表现出轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型曲线。反映岩浆可能经历了结晶分异过程。

6.3 岩石构造环境

按照超铁镁质岩石判断本文岩石的形成环境, 由于钛元素总体比较低, 在相关构造图中显示不明显, 所以, 按照玄武岩构造环境判别图(图 10), 3 件蚀变玻基纯橄岩分别投点到 B 区、C 区和 E 区。而未蚀变玻基纯橄岩投点到 C 区外的下面, 见图 10a, C 区外的右下面, 见图 10b。

本文研究的岩石具有板内玄武岩的构造特征。如果这种情况具有一定的可信性, 那么, 在古老的敦煌地块中, 形成裂谷, 由地幔岩浆上涌, 形成一个巨大的晚古生代地幔岩浆岩体, 在岩体的某个部位形成超铁镁质超基性岩的火山岩小岩体, 似乎也可以解释本文研究的这种特殊的又极其罕见的火山岩。具体的构造环境的确认, 还需要研究工作的深入, 依据大量的岩石化学数据, 再来进一步探讨。

7 讨论

7.1 斑晶(phenocrysts)和基质(matrix)

斑晶, 本文发现的玻基纯橄岩, 主要斑晶矿物为橄榄石、蛇纹石, X 衍射分析橄榄石为“镁橄榄石”,

图 8 北山南部蚀变玻基纯橄岩样品 2016531K03 (a)—(e) 和样品 2016603K01 (f)—(h) 电子探针背散射图像 (COMPO)

Fig. 8 The electron probe backscattering images (COMPO) of alteration meimechite sample 2016531K03 (a)—(e) and sample 2016603K01 (f)—(h) from the southern Beishan Mountain

Ol—橄榄石; Sep—蛇纹石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Zo—黝帘石; Pl—斜长石;
Mt—磁铁矿; Lm—褐铁矿; Il—钛铁矿; Spi—尖晶石; Pre—葡萄石

Ol— olivine; Sep— serpentine; Chl— chlorite; Ep— epidote; Zo— zoisite; Pl— plagioclase;
Mt— magnetite; Lm— limonite; Il— ilmenite; Spi— spinel; Pre— prehnite

蛇纹石为“利蛇纹石”。斑晶矿物特征与西伯利亚麦美奇河,典型的“麦美奇岩”矿物特征是一样的(图 6)。这是重要的证据。对于玻基纯橄岩和苦橄岩,无论是熔岩还是岩脉,重要的方面是橄榄石斑晶的大小和含量,粒径 (Grain size) 通常较大,平均值为 4~5 mm (Arndt et al., 1995)。本文蛇纹石化的斑

晶粒径大小为 0.6~2.5 mm,比较小,未蚀变的玻基纯橄岩橄榄石斑晶为 0.5~4.0 mm,这可能与岩浆形成的温度压力或蚀变过程有关。

基质物质分为玻璃 (vitreous)、微晶和粒状 (microcrystalline and granular minerals) 三种。

玻璃质,笔者专门对玻璃质物质进行电子探针

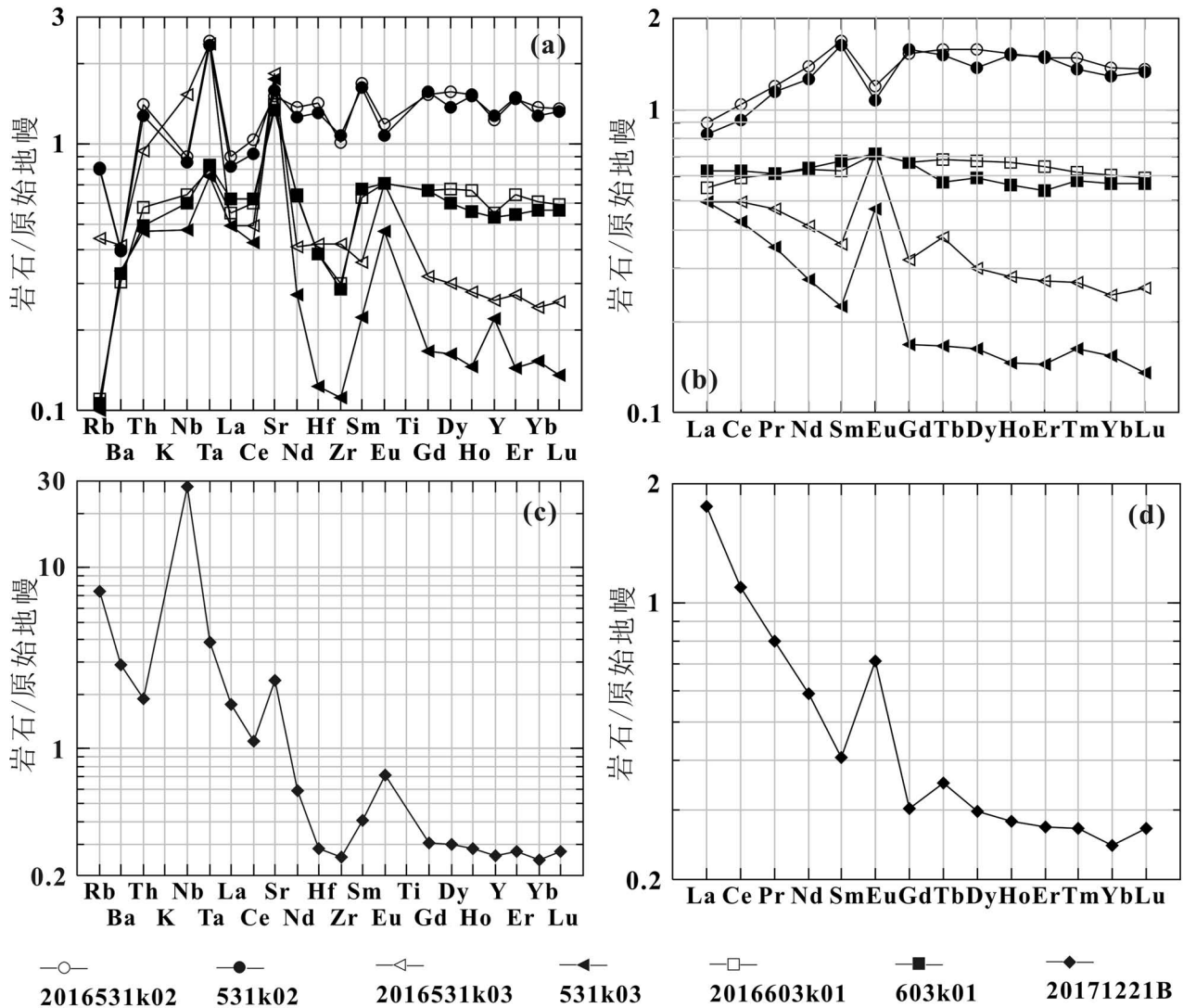


图 9 北山南部蚀变玻基纯橄岩微量元素和稀土元素标准化图

Fig. 9 Normalized traces elements spider and REE elements patterns of the meimechite from the southern Beishan Mountain

表 4 北山南部玻基纯橄岩样品主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果
Table 4 Major(%) and trace elements($\times 10^{-6}$) data of the meimechite samples
from the southern Beishan Mountain

样品	2016531K02		2016531K03		2016603K01		20171221B
实验室 编号	C17009 0005	C17019 0001	C17009 0006	C17019 0002	C17019 0003	C17019 0004	C18010 0005
SiO ₂	37.15	37.29	36.40	36.74	37.16	37.08	36.06
TiO ₂	0.22	0.22	0.058	0.059	0.14	0.14	0.071
Al ₂ O ₃	2.61	2.61	4.64	4.70	3.91	3.90	4.63
Fe ₂ O ₃	10.30	10.18	7.61	7.52	7.93	7.88	5.16
FeO	2.59	2.59	2.90	3.00	2.89	2.93	6.00
MnO	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15
MgO	33.35	33.30	34.65	34.57	33.99	33.93	35.36
CaO	1.88	1.84	1.44	1.44	1.62	1.62	1.82
Na ₂ O	0.040	0.040	0.010	0.010	0.040	0.040	0.020
K ₂ O	0.020	0.030	0.020	0.020	0.030	0.030	0.12
P ₂ O ₅	0.019	0.019	0.014	0.014	0.016	0.016	0.010
烧失	11.12	11.23	11.50	11.24	11.60	11.75	10.05
H ₂ O ⁺	10.80	7.90	10.64	6.58	8.46	8.31	7.71
总量	99.43	99.49	99.37	99.44	99.47	99.46	99.45
Mg [#]	83.5	83.6	86.5	86.4	85.9	85.9	85.7
Na ₂ O/K ₂ O	2.00	1.33	0.50	0.50	1.33	1.33	0.17
Na ₂ O+K ₂ O	0.060	0.070	0.030	0.030	0.070	0.070	0.140
Cr	2520	2592	2590	2860	2790	2990	2640
Ni	1160	1117.50	1300	1380	1330	1320	1240
Co	116	111.7	118	126	122	122	118
Sc	18.2	18.96	6.74	2.89	5.42	5.14	8.04
V	71.4	70.04	32.1	27.4	44.7	47.3	32.3
Rb	0.52	0.51	0.28	0.064	0.070	0.068	4.68
Ba	2.792	2.787	2.93	2.34	2.11	2.27	20.2
Sr	32.0	33.51	39.0	37.2	29.6	28.4	50.0
Ta	0.10	0.096	0.097	0.031	0.033	0.034	0.16
Nb	0.64	0.61	1.09	0.34	0.46	0.43	20.0
Hf	0.44	0.404	0.13	0.038	0.12	0.12	0.087
Zr	11.4	12.11	4.70	1.26	3.36	3.20	2.86
Y	5.61	5.779	1.18	1.01	2.50	2.42	1.17
U	5.11	5.005	0.34	0.38	1.34	1.36	0.080
Th	0.12	0.108	0.080	0.040	0.049	0.042	0.16
δSr	1.14	1.32	3.72	4.61	2.08	1.94	2.58
Sr/Y	5.70	5.80	33.05	36.83	11.84	11.74	42.74
La	0.62	0.568	0.34	0.34	0.38	0.43	1.20
Ce	1.85	1.641	0.88	0.76	1.06	1.11	1.95
Pr	0.33	0.315	0.13	0.097	0.17	0.17	0.22
Nd	1.87	1.711	0.56	0.37	0.86	0.87	0.80
Sm	0.75	0.724	0.16	0.10	0.28	0.30	0.18
Eu	0.20	0.18	0.12	0.079	0.12	0.12	0.12
Gd	0.91	0.936	0.19	0.10	0.40	0.40	0.18
Tb	0.17	0.163	0.041	0.018	0.074	0.062	0.038
Dy	1.16	1.016	0.22	0.12	0.50	0.44	0.22
Ho	0.25	0.247	0.046	0.024	0.11	0.092	0.046
Er	0.71	0.72	0.13	0.069	0.31	0.26	0.13
Tm	0.11	0.101	0.020	0.012	0.046	0.043	0.020
Yb	0.68	0.632	0.12	0.076	0.30	0.28	0.12
Lu	0.10	0.098	0.019	0.010	0.044	0.042	0.020
ΣREE	9.71	9.05	2.98	2.18	4.65	4.62	5.24
δEu	0.75	0.68	2.14	2.43	1.11	1.08	2.05
La/Yb	0.91	0.90	2.83	4.47	1.27	1.54	10.00

注:岩石化学分析于 2017 年 5 月、2018 年 4 月在西安地质矿产研究所实验室完成。

检测。玻璃质脱玻化被细小蛇纹石交代(图 8c, d), 这样的蛇纹石集合体大小远远小于蛇纹石化橄榄石斑晶假像。在(图 8e)中, 像羽毛一样的矿物, 也是玻基物质脱玻化作用过程产生的蛇纹石。

在玻基中共检测绿泥石 21 个点, 绿帘石 9 个点, 黝帘石 1 个点, 共 31 个点(图 7; 图 8; 表 2)。关于玻基脱玻化的物质组成, 邱家骧(1985)主编的《岩浆岩岩石学》中论述为, “基性玻璃脱玻后为隐晶质结构, 析出的高价氧化铁, 加上暗色矿物变为绿泥石、绿帘石、蛇纹石等次生矿物, 使岩石呈紫红、褐紫、暗绿等色。”所以, 这两种矿物绿泥石、绿帘石是玻璃质在脱玻化后产生的矿物。

西伯利亚“麦美奇岩”玻基中, 这样的橄榄石或蛇纹石主要特征为较小的粒状(smaller grains), 绿泥石矿物也出现在玻基中由玻璃质蚀变脱玻化而成(Arndt et al., 1995)。

微晶和粒状矿物, 电子探针检测到的基质中的矿物还有角闪石, 钛铁矿, 磁铁矿, 褐铁矿, 镍黄铁矿, 斜长石, 尖晶石, 葡萄石, 金云母 9 种。

北京大学地质系岩矿教研室(1979)编《光性矿物学》“在高温条件下, 伊利石(水白云母)或蒙脱石可产生尖晶石, 在大约 850℃时可生成尖晶石, 同伊利石共生; 当温度在 1100~1200℃, 粒径增大; 继续升温到 1300℃则分解为碱性玻璃。”邱家骧(1985)认为, 脱玻化作用还可以形成球粒, “其成分是辉石、斜长石微晶组成。”岩浆期后矿物, 橄榄石变成蛇纹石, “斜长石的钠黝帘石化矿物。”

本文样品基质中的尖晶石、

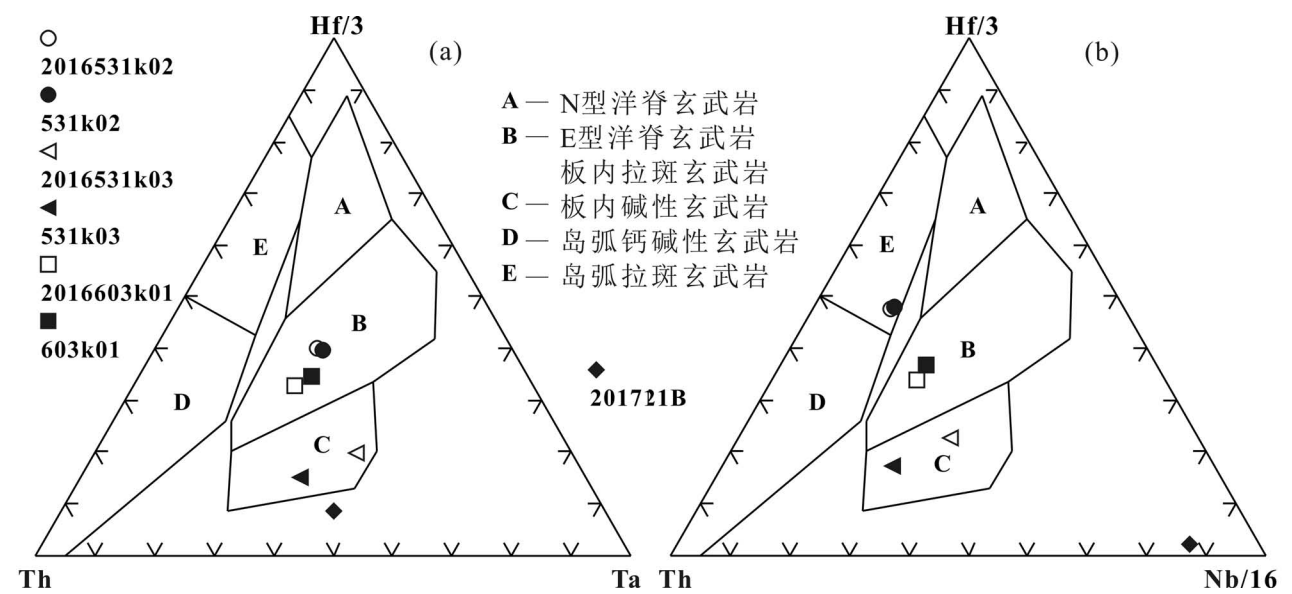


图 10 北山南部蚀变玻基纯橄岩构造环境判别图解 (底图据 Wood, 1980)

Fig. 10 Tectonic setting determinatina diagrams (after Wood, 1980) of the meimechite from the southern Beishan Mountain

斜长石可能是原生矿物,也可能是在脱玻化作用下产生的矿物,角闪石沿着尖晶石周边分布(图 7c, g),可能由尖晶石蚀变形成。与斜长石接触的矿物绿帘石、黝帘石(图 8g, h)可能由斜长石形成。磁铁矿和褐铁矿应该是在蚀变过程中析出矿物,钛铁矿和镍黄铁矿可能是基质中原生的矿物。其他两种矿物,葡萄石,金云母的形成,本文暂不作讨论。

7.2 岩石化学成分 (Chemical compositions)

按照 Le Maitre 等 (1989) 对高镁 (“High-Mg”) 火山岩的分类和系统命名,中国国家标准 (GB/T 17412.1—1998)《岩石分类和命名方案 火成岩岩石分类和命名方案》完整引用 Le Maitre 等 (1989) 的方案,即,科马提岩 (komatiite) ($MgO > 18\%$; $30\% < SiO_2 < 52\%$; $Na_2O + K_2O < 1\%$; and $TiO_2 < 1\%$), “麦美奇岩” (meimechite) ($MgO > 18\%$; $30\% < SiO_2 < 52\%$; $Na_2O + K_2O < 1\%$; and $TiO_2 > 1\%$)。

Le Bas (2000) 论文中 IUGS (International Union of Geological Sciences) 对高镁火山岩“新的”分类和系统命名,把上述这两类火山岩中的 $Na_2O + K_2O < 1\%$ 修正为 “ $Na_2O + K_2O < 2\%$ ”,其他指标没有变化。邓晋福等 (2015) 详细介绍了高镁火山岩类苦橄岩、科马提岩、“麦美奇岩”和高镁安山岩的岩石化学特征。

按照上述分类方案,本文的岩石为科马提岩,而不是“麦美奇岩”。Kerr and Arndt (2001) 对 Le Bas (2000) 新的分类方案,提出不同的看法,认为应强

调构造特征,尤其 $MgO > 18\%$ 的科马提岩与苦橄岩,科马提岩最重要的构造特征 (textural features) 是 “鬣刺结构” (spinfex texture),而苦橄岩没有。

Le Bas (2001) 在答复 Kerr and Arndt (2001) 论文中,认为 IUGS 岩石分类,只是岩石化学分类原则,对分类进行了概述,而不是细节,在岩石化学领域中意义重大 (which in this case was significant)。并认为 “对火成岩的化学分析应附加岩相学描述,使读者能够评估促成火成岩形成的过程。” (that chemical analyses of igneous rocks should be accompanied by a petrographic description that allows the reader to assess the processes that contributed to its formation.) 并引用哲学的观点 “如果专业可以应对花岗岩与花岗岩,也应该能够应对科马提岩与科马提岩” (If the profession can cope with “granites and granites”, it should be able to cope with “komatiites and komatiites”).。

国内岩石学专业人员,以及 Le Bas 本人也认为科马提岩主要为前寒武纪 (Precambrian) 的火山岩,并且具有 “鬣刺结构”。

关于这一问题,墨西哥国立自治大学 (Universidad Nacional Autónoma de México), Verma 教授在其的论文中 (Verma et al, 2016) 研究认为,四种高镁岩石,科马提岩、“麦美奇岩”、苦橄岩和玻基安山岩 (komatiite, meimechite, picrite, and boninite),对于新鲜岩石适合 IUGS 分类表,但是,对

于蚀变火成岩 (but for altered igneous rocks) 这一分类表不适用,要做数据校正,他们首次专门发明了一种软件来校正蚀变岩石的岩石化学数据。笔者等专门发电子邮件请教了 Verma 教授,他建议笔者等注册他们的网站,上传数据进行校对。

科马提岩本身具有其独特的特征,芬兰拉普兰 (Finnish Lapland) 古元古代的科马提岩岩石化学数据明显与本文的数据不同 (Hanski et al., 2001),太古宙科马提岩有其独特铂族元素的特征 (Fiorentini et al., 2011),南非太古宙的科马提岩可能具有地壳熔融 (critical melting) 的岩石成因,岩石化学数据特征,也与本文不同 (Robin-Popieul et al., 2012)。所以,本文发现的岩石,不能简单地因为一项岩石化学数据, $TiO_2 < 1\%$ 就确定为科马提岩。笔者认为本文的岩石应为玻基纯橄岩,即“麦美奇岩”。

7.3 烧失量 (LOI, loss-on-ignition)

本文蚀变玻基纯橄岩烧失量平均值为 11.41%,未蚀变样品为 10.05% (表 5),比较高。湖北大洪山地区玻基纯橄岩烧失量高达 12.73%、

12.32%,西伯利亚“麦美奇岩”岩筒烧失量,水的含量为 10.09%,加拿大昂加瓦半岛玻基纯橄岩烧失量 ($H_2O^+ + CO_2$) 为 13.05% (表 5);塔里木盆地西北部二叠纪玻基纯橄岩烧失量 ($H_2O^+ + CO_2$) 为 7.18% ~ 8.81% (姜常义等,2004),这种超基性岩本身可能具有较高的结晶水。

Arndt 等 (1995) 论文中,西伯利亚“麦美奇岩”岩脉 (dyke) 样品的烧失量 ($H_2O^+ + CO_2$) 为 3.54% ~ 6.84%;熔岩 (lava) 烧失量为 4.26% ~ 12.20%,并研究认为在大多数样品中,次生相 (Alteration) 是含水的 (hydrous)。Elkins-Tanton 等 (2007) 专门对这种情况研究认为水和二氧化碳含量较高,与这类岩石形成时的温度压力、蚀变过程和岩浆来源深度有关。

对于这类岩石所获得的岩石化学数据,仅仅因为具有较高的烧失量而不能使用,显然是不对的。一种处理的方法是,如 Baragar 等 (2001) (表 5),把烧失量按照 10 种氧化物各自的百分含量分配到每一种氧化物中。第二种方法,可能要应用 Verma 教

表 5 北山南部玻基纯橄岩与其他地区玻基纯橄岩 (“麦美奇岩”) 样品主量元素 (%) 数据对比

Table 5 Major elements (%) comporison of the meimechite in the southern Beishna Mountain and those in in other areas

北山南部		Meimecha —Kotuj(俄)		加拿大昂 加瓦半岛	湖北大洪山		Meimecha —Kotuj(俄) “麦美奇岩”					
	蚀变玻基 纯橄岩	玻基 纯橄岩	岩脉	熔岩	麦美奇岩	玻基 纯橄岩	玻基 纯橄岩	麦美奇岩	贯入	喷发	岩脉	岩筒
样品数	3	1	5	15	4	1	1	1	1	1	1	1
SiO ₂	36.97	36.06	40.74	41.39	32.92	36.22	36.17	36.76	38.45	37.47	41.47	39.24
TiO ₂	0.14	0.071	2.00	1.93	3.11	2.61	2.01	1.24	1.23	1.30	0.27	0.27
Cr ₂ O ₃	—		—	—	—	0.08	0.15	0.31	0.31	—	—	0.16
Al ₂ O ₃	3.73	4.63	2.55	2.34	2.91	6.79	5.37	2.27	1.56	2.43	5.38	4.02
Fe ₂ O ₃	8.57	5.16			7.74	3.81	5.62	7.35	6.34	7.06	3.67	5.49
FeO	2.82	6.00	(12.74)	(12.88)	9.34	2.70	4.75	5.37	6.48	5.87	6.98	3.62
MnO	0.14	0.15	0.20	0.19	0.33	0.16	0.12	0.15	0.06	0.13	0.20	0.15
MgO	33.97	35.36	35.94	36.04	21.23	33.39	26.57	33.24	35.84	32.45	27.08	31.08
NiO	—		—	—	—	0.06	0.13	—	—	—	—	—
CaO	1.64	1.82	5.30	4.69	7.55	0.81	5.23	4.10	4.01	4.90	4.85	3.47
Na ₂ O	0.03	0.02	0.04	0.05	0.07	0.17	0.42	0.69	0.18	0.19	0.24	0.09
K ₂ O	0.03	0.12	0.40	0.21	0.40	0.04	0.11	0.40	0.05	0.09	0.11	0.14
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.27	0.25	0.72	0.67	0.88	0.19	0.15	0.16	0.21	
烧失量	11.41	10.05	(5.95)	(7.88)	13.05	12.73	12.32					
烧失量	H ₂ O ⁺	8.78	7.71		5.91	12.59	8.47	7.20	5.34	7.91	9.92	10.09
	CO ₂	2.63	2.34		7.14	0.14	3.85	0.71				
总量	99.44	99.45	100.18	99.97	99.37	100.24	99.85	99.89	100.00	99.96	100.38	97.82
资料来源	本文样品 平均值	本文样品	Baragar et al., 2001				俞惠隆,1980					

授 (Verma et al., 2016) 团队专门发明的软件来校对这类岩石的岩石化学数据。第三种方法,保留从实验室获得的原始岩石化学数据不变。

7.4 低钛数据

本文蚀变玻基纯橄岩 TiO_2 的含量是 0.058% ~ 0.22% (表 4), 平均值是 0.14% (表 5), 未蚀变玻基纯橄岩 TiO_2 的含量是 0.071% (表 4、5), 小于 1%。到目前为止,公开发表的文献,有没有低钛的“麦美奇岩”岩呢? 答案是肯定的。西伯利亚的“麦美奇岩”根据 Kogarko and Ryabchikov (2000) 的文献, Ghk-27 样品 SiO_2 为 42.15%, TiO_2 为 0.70%, MgO 为 28.00%, Fe_2O_3 (+FeO) 为 12.33%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 0.80%。

俞惠隆 (1980) 在 Le Maitre 等 (1989) 的岩石化学分类方案正式发表之前,翻译 1972 年发表的俄文文献,引用的“麦美奇岩”,勘察加多尔巴钦地区“麦美奇岩”(岩脉) TiO_2 为 0.27%, 勘察加奥什尔诺夫地区“麦美奇岩”(岩筒) TiO_2 为 0.27% (表 5)。Vasil'ev and Gora (2016) 最新的研究认为勘察加晚石炭世的“麦美奇岩”—苦橄岩,与西伯利亚地台和俄罗斯普里莫尔斯克比较, TiO_2 最低。其 TiO_2 数值小于 1% (Koloskov et al., 2009)。

Arndt 等 (1995) 认为“麦美奇岩”的野外特征 (field characteristics) 也以岩脉的形式出现在“麦美奇岩”熔岩或侵入岩岩体的边部,其厚度从几厘米到大约 2 m 不等,可沿着走向延伸数十米。

本文样品从野外情况来看,样品 2016531K02 向北边约 100 m,为蚀变辉橄岩 (样品 2016531K01) (表 1) 为侵入岩,东边为样品 2016603K01,向东约 200 m 为橄长岩 (样品 2016523K01),向东约 590 m 为橄榄辉长岩 (样品 2016531K04)。该样品西边 24m 处为样品 2016531K03。

从最东边的样品 2016603K01 蚀变玻基纯橄岩向西约 204m,变为样品 20171221B 未蚀变玻基纯橄岩,向西可能延伸到上文巨大岩体的边部,向南 1~2 km 据野外岩石样品 (X 衍射分析,蛇纹石 86%, 闪石 9%, 本文不涉及),标本明显可见斑晶矿物和玻基,可能仍为这种岩石。

所以,本文重点研究的玻基纯橄岩代表的岩石范围,参考上文 $\text{Mg}^\#$ 数值,很可能为熔岩。随着工作的深入,可能将会从研究地方解体出一个超铁镁质超基性小岩体。

8 结论

北山南部地区,二叠纪闪长岩岩体的西北部,发

现超铁镁质玻基纯橄岩 [Vitric Dunite; Meimechite, Меймечит; 中文亦有音译为麦美奇岩]。玻基纯橄岩样品呈致密块状,浅灰绿色;蚀变玻基纯橄岩样品呈致密块状,深黑色。显微镜下,前者主要矿物橄榄石为斑状结构,后者主要矿物橄榄石多蚀变为蛇纹石,为变余斑状结构。基质均为玻璃质结构。X 射线衍射分析,橄榄石为镁橄榄石,蛇纹石为利蛇纹石。电子探针检测基质矿物有绿泥石、绿帘石、黝帘石、角闪石、钛铁矿、褐铁矿、镍黄铁矿、斜长石、尖晶石、金云母等。岩石化学组成, SiO_2 为 36.40% ~ 37.29%, Al_2O_3 为 2.61% ~ 4.70%, TiO_2 为 0.058% ~ 0.22%, MgO 为 33.30% ~ 35.36%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 为 10.51% ~ 12.89%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 0.03% ~ 0.14%, 为超铁镁质超基性喷出岩。微量元素和稀土元素总体显示出原始地幔的元素特征。研究认为: ① 玻基纯橄岩原始岩浆可能经历了结晶分异过程, ② 并可能在裂谷构造环境形成。③ 本文发现的玻基纯橄岩,类似典型的西伯利亚麦美奇河流域和勘察加半岛的低钛“麦美奇岩”。④ 玻基纯橄岩在该地区的发现,为该地区岩浆的形成与演化的研究和铜镍矿的找矿与勘探工作,提供了重要的岩石学依据。

致谢: 本文显微镜薄片鉴定工作由西安地质矿产研究所叶芳研究员完成,李行研究员、夏林圻研究员给予了一定的指导;叶美芳高级工程师、周宁超工程师完成电子探针分析工作;野外工作得到孙吉明工程师,及新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队李军高级工程师和张伟工程师的协助。两位审稿专家和编辑部章雨旭研究员为本文提出了重要的修改建议,笔者等在此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

北京大学地质系岩矿教研室编. 1979. 光性矿物学. 北京: 地质出版社: 1~473.

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.

姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 唐冬梅, 张蓬勃, 朱士飞. 2007. 云南宾川—永胜—丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质. 岩石学报, 23(4): 777~792.

姜常义, 张蓬勃, 卢登荣, 白开寅. 2004. 新疆塔里木板块西部瓦吉里塔格地区二叠纪超镁铁岩的岩石成因与岩浆源区. 岩石学报, 20(6): 1433~1444.

邱家骧. 1985. 岩浆岩岩石学. 北京: 地质出版社: 1~340.

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社: 1~841.

俞惠隆. 1980. 湖北大洪山地区的玻基纯橄岩. 地质论评, 26(1): 77

~81.

- Arndt N, Lehnert K, Vasil'ev Y. 1995. Meimechites; highly magnesian lithosphere-contaminated alkaline magmas from deep subcontinental mantle. *Lithos*, 34 : 41~59.
- Baragar W R A, Mader U, LeCheminant G M. 2001. Paleoproterozoic carbonatitic ultrabasic volcanic rocks (meimechites?) of Cape Smith Belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38: 1313~1334. doi: 10.1139/cjes-38-9-1313.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House; 1~841.
- Carlson R W, Czamanske G, Fedorenko V, Ilupin I. 2006. A Comparison of Siberian Meimechites and Kimberlites: Implications for the Source of High-Mg Alkaline Magmas and Flood Basalts, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7(11): Q11014; doi: 10.1029/2006GC001342
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion. *Geological Review*, 61(4): 717~734.
- Department of Geology, Peking University; The Teaching and Research Group of Petrology and Mineralogy, 1979. *Optical Mineralogy*. Beijing: Geological publishing House; 1~473.
- Elkins-Tanton L T, Draper D S, Agee C B, Jewell J, Thorpe A, Hess P C. 2007. The last lavas erupted during the main phase of the Siberian flood volcanic province: results from experimental petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 191~209. doi: 10.1007/s00410-006-0140-1
- Fiorentini M L, Barnes S J, Maier W D, Burnham O M, Heggie G. 2011. Global Variability in the Platinum-group Element Contents of Komatiites, *Journal of Petrology*, 52(1): 83~112. doi: https://doi.org/10.1093/petrology/egq074
- Hanski E, Huhma H, Rastas P, Kamenetsky V S. 2001. The Palaeoproterozoic komatiite—picrite association of Finnish Lapland, *Journal of Petrology*, 42: 855~876. https://doi.org/10.1093/petrology/42.5.855
- Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, Jiang Hanbing, Tang Dongmei, Zhang Pengbo, Zhu Shifei. 2007. Petrogenesis and source characteristics of low-Ti basalts and picrites at Binchuan—Yongsheng—Lijiang region, Yunnan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 777~792.
- Jiang Changyi, Zhang Pengbo, Lu Dengrong, Bai Kaiyin. 2004. Petrogenesis and magma source of the ultramafic rocks at Wajilaitag region, western Tarim Plate in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1433~1444.
- Kamenetsky V S, Park J W, Mungall J E, Pushkarev E V, Ivanov A V, Kamenetsky M B, Yaxley G M. 2015. Crystallization of platinum-group minerals from silicate melts: Evidence from Cr-spinel - hosted inclusions in volcanic rocks. *Geology*, 43(10): 903~906. doi: 10.1130/G37052.1
- Kerr A C and Arndt N T. 2001. A note on the IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. *Journal of Petrology*, 42: 2169~2171.
- Kogarko L N and Ryabchikov I D. 2000. Geochemical evidence for meimechite magma generation in the subcontinental lithosphere of Polar Siberia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 195~203. doi: 10.1016/S1367-9120(99)00041-3
- Koloskov V A, Flerov G B, Kovalenko D V. 2009. Late Cretaceous - Paleocene Magmatic Complexes of Central Kamchatka: Geological Settings and Compositional Features. *Russian Journal of Pacific Geology*, 3(4): 319~337. doi: 10.1134/S1819714009040022
- Le Bas M J. 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. *Journal of Petrology*, 41: 1467~1470.
- Le Bas M J. 2001. Reply to comment by Kerr and Arndt. *Journal of Petrology*, 42: 2173~2174.
- Le maitre R W, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J, Le Bas M J, Sabine P A, Schmidt R, Sorenson H, Streckeisen A, Wooley A R, Zanettin B. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell Scientific; 1~193.
- Qiu Jiaxiang. 1985. *Magmatic Petrology*. Beijing: Geological Publishing House; 1~473.
- Rass I T. 2008. Melilite-Bearing and Melilite-Free Rock Series in Carbonatite Complexes; Derivatives From Separate Primitive Melts. *The Canadian Mineralogist*. 46: 951~969. doi: 10.3749/canmin.46.4.951
- Robin-Popieul C C M, Arndt N T, Chauvel C, Byerly G R, Sobolev A V, Wilson A. 2012. A new model for Barberton komatiites: deep critical melting with high melt retention. *Journal of Petrology*, 53: 2191~2229. doi: 10.1093/petrology/egs042
- Sobolev A V, Sobolev S V, Kuzmin D V, Malitch K N, Petrunin A G. 2009. Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites. *Russian Geology and Geophysics*, 50: 999~1033. doi: 10.1016/j.rgg.2009.11.00
- Vasil'ev Yu R and Gora M P. 2016. Nature of Voluminous Meimechite - Picrite Associations in Siberia and Other Regions, *Doklady Earth Sciences*, 468: 469~472. doi: 10.1134/S1028334X1605010X
- Verma S P, Rivera-Gomez M A, Diaz-Gonzalez L, Quiroz-Ruiz A. 2016. Log-ratio transformed major element based multidimensional classification for altered High-Mg igneous rocks, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17: 4955~4972, doi: 10.1002/2016GC006652
- Yu huilong. 1980. Vitric Dunite in Dahongshan area, Hubei, China. *Geological Review*, 26(1): 77~81.

Discovery of Vitric Dunite (Meimechite) in Southern Beishan Mountain, and Its Petrological and Geochemical Characteristics

ZHAO Zhenming, JI Wenhua, LI Wenming

Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, 710054

Objectives: The ultramafic vitric dunite, that is meimechite, also known as a igneous rock, rarely appear all over the world, has been found in Permian diorite (δP) for the first time in southern Beishan Mountain, China. The vitric dunite sample shows as dense mass and celandine green with weakly magnetism, and has clear granular

porphyry minerals and black cement with small hair-like bands on the surface. While, the alteration vitric dunite samples show as dense mass and deep darker black with weakly magnetism and small vein material. However, the petrology and geochemistry of this important rock, as well as the formation of the environment, are not well understood. Based on a lot of results of lab identification, testing, analysis, we focus on the every characteristics and formation mechanism of this rock.

Methods: Laboratory, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources. ① Microscopical identification and Mineral porphyry contrast. ② X-ray diffraction analysis in D/max-2500 instrument. ③ The detection of electron probe in JEOL JXA-8230 instrument and equipment. ④ Petrochemical analysis: FeO analysis use volumetric method, LOI and H_2O^+ analysis use gravimetric method, the other main elements analysis use Xrf-Xrd Spectrometry, Trace elements and REE elements analysis use Plasma Mass Spectrometer ICP-MS method. ⑤ Trace elements and REE elements standardization, tectonic environment discrimination.

Results: ① Under the microscopical identification, the main minerals of the vitric dunite, they contain only large phenocrysts of olivine, are porphyritic texture. Yet not, the alteration rock, the main minerals, they contain abundant large phenocrysts of olivine and serpentine, are blastoporphyrict texture. The phenocrysts are serpentinized olivine illusion. Groundmass of the each sort is glass structure. ② Results of X-ray diffraction analysis, olivine is forsterite $[(\text{Mg}_{1.8}\text{Fe}_{0.2})(\text{SiO}_4)]$, serpentine is lizardite $\{(\text{Mg}, \text{Al})_3[(\text{Si}, \text{Fe})_2\text{O}_5](\text{OH})_4\}$. ③ By the detection of electron probe, the meimechite samples comprise of these minerals. Serpentinized veins show as deep colour across the main phenocrysts and the matrix, Larger bright fine stripe magnetites are found in the olivine, while the fine-grained groundmass contains chlorite, epidote, zoisite, hornblende, ilmenite, limonite, pentlandite, plagioclase, spinel, phlogopite, and serpentinized glass, besides the main minerals olivine and serpentine. ④ Chemical compositions data on the rock from this area are reported. They are low in SiO_2 (36.40% ~ 37.29%) and Al_2O_3 (2.61% ~ 4.70%) and TiO_2 (0.058% ~ 0.22%) and $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (0.03% ~ 0.14%); Relatively, high in MgO (33.30% ~ 35.36%) and $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ (10.51% ~ 12.89%). It is a especial ultramafic extrusive rock. $\text{Mg}^\# = 83.5 \sim 86.5$, $\delta\text{Sr} = 1.14 \sim 4.61$, $\text{Sr}/\text{Y} = 5.70 \sim 42.74$. $\sum \text{REE} = 2.18 \sim 9.71$, $\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 2.43$, $\text{La}/\text{Yb} = 0.90 \sim 10.00$. Trace elements and REE elements have the lithologic characteristics of the primitive mantle.

Conclusions: ① The original magma may undergo the process of crystallization and differentiation, and also, which is supposed to be formed in the rift valley tectonic environment. ② We propose that the rocks are compositionally similar to type Siberian meimechites and closely resemble the “Meimechite” - low in TiO_2 eruptives of Meimechite from Maimecha—Kotui Province and Kamchatka peninsula. The finding of the rocks in this region, has extremely important significance for the study of the formation and evolution of magma, and the prospecting and exploration of copper and nickel ore deposit.

Keywords: southern Beishan Mountain region; ultramafic; vitric dunite; meimechite; petrology; geochemistry

Acknowledgements: This study was supported by the Geological Survey of China (No. 121201011000150002 and 12120115021501). We appreciate Prof. YE Fang (83 years old) for identification of microscopes about this volcanic rock, Prof. LI Hang (83 years old) and Prof. XIA Linqi (76 years old) for help with us. We thank senior engineer YE Meifang, engineer ZHOU Ningchao for lab work. We work in the field with the help of engineer SUN Jiming who is our institute, and with the help of senior engineer LI Jun and engineer ZHANG Wei who are the Sixth Geological Team, Xinjiang Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development. Also, we are very grateful to the two reviewers and editor Prof. ZHANG Yuxu for giving us a lot of good suggestions on this paper.

First author: ZHAO Zhenming, male, born in 1965, vice prof., mainly engaged in tectonic, environment and mineral resources research in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau and China orogenic. Email: xazzhenming@163.com, zzhenming@cgs.cn

Manuscript received on: 2018-03-09; Accepted on: 2018-07-06; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.05.002