

西天山哈拉达拉辉长岩的 Fe-Ti 富集机制及其构造意义*

贺鹏丽^{1,2} 黄小龙^{1**} 李洪颜¹ 李洁^{1,2} 于洋^{1,2} 李武显¹

HE PengLi^{1,2}, HUANG XiaoLong^{1**}, LI HongYan¹, LI Jie^{1,2}, YU Yang^{1,2} and LI WuXian¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

2013-05-01 收稿, 2013-08-15 改回.

He PL, Huang XL, Li HY, Li J, Yu Y and Li WX. 2013. Mechanism of Fe-Ti enrichment in the Haladala gabbros: Implication for the tectonic evolution of the western Tianshan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3457-3472

Abstract The Haladala gabbroic pluton at Tekex is the largest layered mafic-ultramafic intrusion in the northern margin of southwestern Tianshan orogenic belt, and contains abundant Fe-Ti oxides (up to 15%). The rocks were highly fractionated with low Fo (64~75) olivine, low An plagioclase (mostly andesine-labradorite), and low Mg[#] (0.66~0.87) clinopyroxene (salite or augite). Fe-Ti oxides consist mostly of V-Ti-magnetite (TiO₂ = 0.8%~20.6%; V₂O₃ = 0.10%~0.83%) that always coexists with ilmenite or contains exsolution lamellae of ilmenite. The late-crystallizing micas on the periphery of anhedral Fe-Ti oxides are dominant phlogopites and minor biotites, and have relatively high F and Cl contents ("F + Cl" up to 3.14%), indicating a water-poor source. The Haladala gabbros show wide range of major element concentrations (e.g., Mg[#] = 0.48~0.73). The compositional variation of olivine-bearing gabbros was likely caused by fractional crystallization and/or accumulation of olivine and plagioclase, while that of olivine-free gabbros was mostly attributed to plagioclase and Fe-Ti oxides accumulation. Fe-Ti enrichment in the Haladala gabbros is the result of fractional crystallization of primary low oxygen fugacity and water-poor magma. The Haladala gabbros were derived from high degree partial melting of mantle source, which might record the early magmatism of the Tarim mantle plume expressing firstly in the pre-existing lithosphere weakness zones such as the Tianshan orogenic belt.

Key words Gabbro; Magnetite; Ilmenite; Fractional crystallization; Mantle plume; Tianshan orogenic belt

摘要 特克斯哈拉达拉辉长岩体是西南天山出露规模最大的层状基性-超基性侵入杂岩体,其富含 Fe-Ti 氧化物(含量高达 15%)。哈拉达拉辉长岩中的橄榄石具有较低的 Fo 值(64~75),斜长石主要为中-拉长石,单斜辉石相对低 Mg[#](0.66~0.87),属于次透辉石或普通辉石,总体上显示出较高的岩浆演化程度。Fe-Ti 氧化物以钒钛磁铁矿为主(TiO₂ = 0.8%~20.6%; V₂O₃ = 0.10%~0.83%),常与钛铁矿呈矿物对共生或出溶钛铁矿。晚期的云母矿物均围绕他形的 Fe-Ti 氧化物生长,主要为富 MgO 的金云母,少量属于黑云母;大部分云母成分富含 F、Cl(F + Cl 高达 3.14%),指示岩浆形成于贫水环境。哈拉达拉辉长岩体的主量元素成分变化很大(Mg[#] = 0.48~0.73),橄榄辉长岩主要受橄榄石和斜长石的结晶分异/堆晶作用影响,而辉长岩的成分变化主要受控于斜长石和 Fe-Ti 氧化物的堆晶作用。哈拉达拉岩体的 Fe-Ti 氧化物主要为岩浆正常结晶分异作用的结果,该体系具有较低氧逸度、贫水的特点,其地幔源区的熔融程度较高,可能是塔里木地幔柱在天山造山带这一构造薄弱带的早期岩浆活动。

关键词 辉长岩;磁铁矿;钛铁矿;结晶分异;地幔柱;天山造山带

中图法分类号 P588.124

* 本文受国家 973 计划项目(2011CB808906)和国家自然科学基金项目(41130314,91214202)联合资助。

第一作者简介:贺鹏丽,女,1989 年生,博士生,矿物学、岩石学与矿床学专业

** 通讯作者:黄小龙,男,1972 年生,研究员,岩石地球化学专业, E-mail: xlhuang@gig.ac.cn

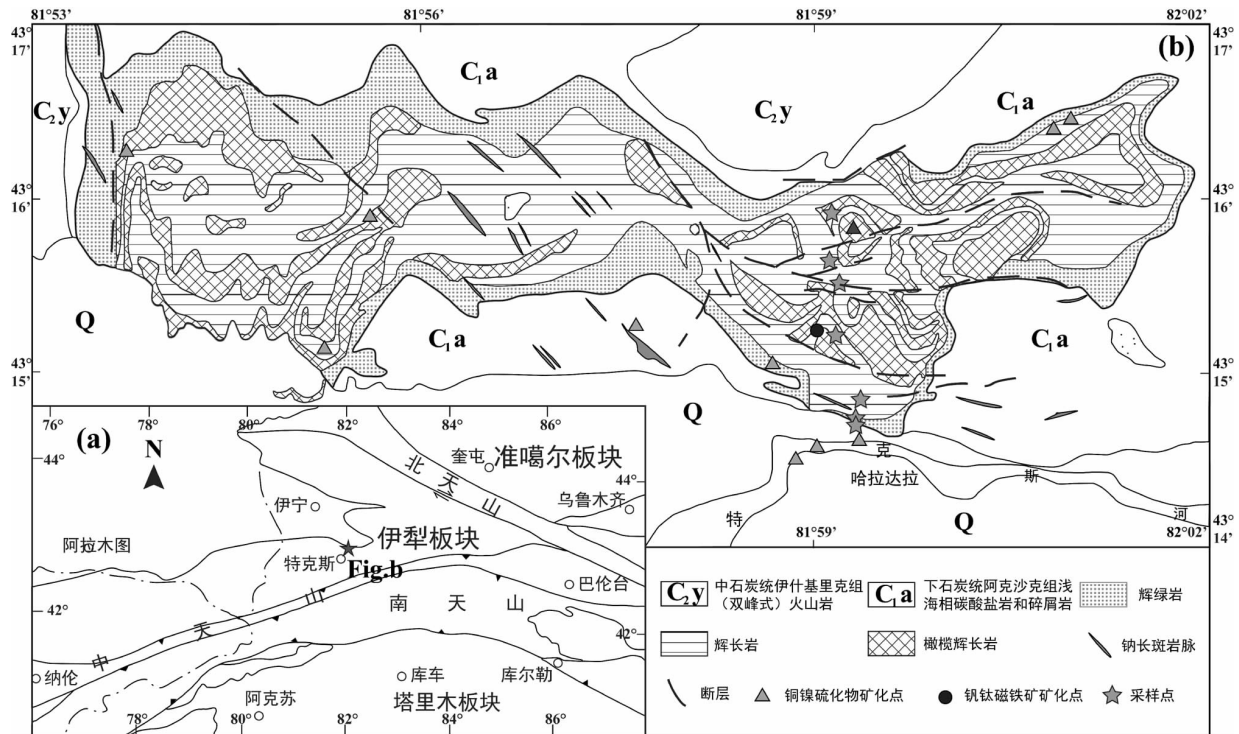


图1 哈拉达拉辉长岩体及邻区地质简图

(a) 西天山构造简图(据 Qian *et al.*, 2009; 龙灵利等 2012); (b) 哈拉达拉辉长岩体地质简图(据高纪璞等, 1991; 龙灵利等 2012)

Fig. 1 Simplified geologic map of the Haladala gabbroic pluton and its adjacent region

(a) -tectonic sketch map of the western Tianshan orogenic belt (modified after Qian *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2012); (b) -the sketch geological map showing the Haladala gabbroic pluton (after Gao *et al.*, 1991; Long *et al.*, 2012)

基性-超基性侵入岩作为地幔部分熔融产物,其形成过程与区域的构造活动紧密相关,揭示其岩石成因机制是研究地幔性质及其演化过程的重要途径。同时,基性-超基性侵入岩也是重要的大型矿产载体,特别是与大火成岩省有关的基性-超基性岩体发育了一些大型-超大型的Cu-Ni-PGE岩浆硫化物矿床和岩浆氧化物矿床(钒钛磁铁矿矿床、铬铁矿矿床)。位于西天山伊犁板块腹地的特克斯哈拉达拉辉长岩体,是西南天山规模最大的基性-超基性层状侵入体(图1)。前人的锆石SIMS U-Pb定年结果显示该岩体形成于中-晚石炭世(306 ± 2Ma ~ 309 ± 2Ma; 龙灵利等, 2012; 薛云兴和朱永峰, 2009; 朱志敏等, 2010)。与哈拉达拉辉长岩体相关的矿化类型丰富,包括钒钛磁铁矿化、铁铜矿化、铜矿化、铜金矿化等(林锦富和邓燕华, 1996)。

近年来已有大量研究探讨哈拉达拉辉长岩的岩石成因机制、成矿类型和相关构造意义(林锦富和邓燕华, 1996; 龙灵利等, 2012; 薛云兴和朱永峰, 2009; 朱志敏等, 2010; 黄秋岳和朱永峰, 2012; 张云孝等, 2000), 已获得成矿类型及其特点的认识, 但已有研究未曾涉及其成矿作用机制, 目前对其具体的成矿作用机制仍不清楚。该岩体具有CuNi-VTiFe复合型矿化的特点(王玉往等, 2010), 但其铜镍矿的规模较小, 而更有利于形成钒钛磁铁矿(龙灵利等, 2012), 可能具有形成攀枝花式V-Ti磁铁矿的成矿远景(林锦富和

邓燕华, 1996), 对区域性的金矿找矿勘探亦有重要意义(黄秋岳和朱永峰, 2012)。同时, 目前对Fe-Ti氧化物矿床的形成机制及过程的认识仍存不确定性, 如对于攀枝花V-Ti磁铁矿的成因存在多种解释(Pang *et al.*, 2008a, b; Ganino *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2012), 可能是岩浆正常结晶分异作用结果(Pang *et al.*, 2008a, b), 或是岩浆不混熔的氧化物熔体结晶产物(Ganino *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2005)。因此, 对哈拉达拉岩体Fe-Ti氧化物成矿作用机制的研究还将有助于正确认识和理解Fe-Ti氧化物矿床的形成机制及过程。另外, 以往的研究对哈拉达拉岩体的岩石成因及其构造背景仍存在不同认识。早期研究认为哈拉达拉辉长岩为来源于地幔部分熔融的基性岩浆活动, 可能与伊犁地块石炭-二叠纪裂谷活动有关(张云孝等, 2000)。由于西天山地区在石炭纪末期处于后碰撞造山阶段, 形成于中-晚石炭世的哈拉达拉岩体可能代表了俯冲碰撞向碰撞后伸展的构造转变阶段的产物(朱志敏等, 2010), 或属于碰撞后伸展阶段的岩浆活动(薛云兴和朱永峰, 2009)。另外, 由于哈拉达拉岩体在构造位置上处于塔里木大火成岩省的区域范围, 其全岩Sr-Nd同位素相对亏损, 并具有CuNi-VTiFe复合型矿化的特征, 因此其形成过程中可能还叠加了塔里木地幔柱活动的影响(龙灵利等, 2012)。但是, 其形成时代明显早于塔里木大火山成岩省的早高峰期(~290Ma; Tian *et al.*,

2010; Yu *et al.*, 2011), 目前对两种构造体系叠加的过程与机制并不清楚。由于地幔柱活动和碰撞后伸展构造引起的地幔岩浆活动具有本质的区别, 可以利用玄武质岩石的岩石学及其地球化学特征反演其地幔源区的性质。所以本文试图通过分析哈拉达拉岩体的岩石学及其矿物学特征, 获取岩浆的温度和氧逸度等物理条件, 揭示该岩体的 Fe-Ti 氧化物富集机制, 限制其岩石成因机制及其构造背景, 为探讨西天山晚古生代造山带与塔里木地幔柱活动之间的相互关系提供信息。

1 地质背景及其样品描述

1.1 区域地质背景

天山构造带及其邻区根据两条晚古生代缝合带(伊犁-中天山北缘缝合带和中天山南缘缝合带; Windley *et al.*, 1990) 分为三个构造单元, 由北向南依次为准噶尔、伊犁-中天山和塔里木板块(图 1a) (Windley *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1992; Gao *et al.*, 1998)。伊犁-中天山板块又沿那拉提北缘断裂带分为伊犁板块和中天山板块(Qian *et al.*, 2009)。伊犁板块发育了前寒武纪结晶基底(Kröner *et al.*, 2007; 高俊等, 2009) 主要为中-新元古代中深变质岩, 以片麻岩、混合岩为主, 夹有少量的角闪片岩和大理岩, 局部地区出露晚古生代火山-沉积岩(朱永峰等, 2006; 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。南天山被认为是塔里木板块北缘在南天山洋闭合时与伊犁中天山碰撞隆起而成(如 Gao *et al.*, 2009; Qian *et al.*, 2009)。

特克斯地区位于伊犁板块南缘, 邻近于那拉提北缘断裂。在研究区主要分布下石炭统大哈拉军山组(李注苍等, 2006) 火山岩和阿克沙克组火山碎屑沉积岩-碳酸盐岩、中石炭统伊什基里克组火山岩和一些二叠系陆相碎屑岩-双峰式火山岩。哈拉达拉岩体位于特克斯县城东北约 15km 处的伊什基里克山(图 1b), 呈东西向展布, 在平面上呈不规则舌状, 东西长约 13km, 南北宽 2~3km, 出露面积约 25km² (高纪璞等, 1991; 张云孝等, 2000)。岩体与围岩之间呈侵入接触关系, 顺层侵入于阿克沙克组与伊什基里克组, 其中阿克沙克组分布于岩体东部、西部和南部, 伊什基里克组分布于岩体的北部。岩体的主要岩石类型有辉长岩、辉绿岩、辉绿辉长岩、橄榄辉长岩和橄长岩, 局部可见纹层状辉石斜长岩和纹层状斜长辉石岩及暗色伟晶辉长岩。岩体还具有分层产出的特点, 在平面上表现岩相分带(图 1b), 内部主要为橄榄辉长岩, 与辉绿辉长岩相间产出; 外部主要为辉长岩, 呈层状产出, 在岩体边部渐变过渡分布着辉绿岩。

1.2 样品的岩石学特征

本文研究的样品的主要岩石类型为橄榄辉长岩和辉长岩, 其岩石学特征描述如下。

橄榄辉长岩 中细粒-中粗粒结构, 发育包橄结构或嵌

晶含长结构等(图 2a, b), 主要由橄榄石(10%~25%)、斜长石(45%~60%)、单斜辉石(25%~40%)、Fe-Ti 氧化物(磁铁矿、钛铁矿)($<5\%$) 和少量云母($<1\%$) 组成(图 2a-c)。橄榄辉长岩具有典型的堆晶结构, 橄榄石和斜长石较自形, 为堆晶矿物(图 2a, b), 而单斜辉石、黑云母以及 Fe-Ti 氧化物为形状不规则的间隙矿物(图 2a-c), 间隙矿物粒度变化范围较大(从 1~3mm 变化至 $>1\text{cm}$), 堆晶间隙矿物所占比例变化大(5%~30%)。橄榄石和斜长石之间常呈相互包裹关系(橄榄石包裹长石的现象如图 2b, c), 表明二者结晶时间相近。一般在 An 牌号较低的斜长石中存在少量的单斜辉石包裹体, 则暗示了单斜辉石的结晶总体上稍晚于斜长石。所研究的橄榄辉长岩样品总体上较为新鲜(图 2a-c), 仅斜长石发生轻微的绢云母化或钠黝帘石化, 在橄榄石边部有少量的蛇纹石化、皂石化或伊丁石化。

辉长岩 主要由斜长石(40%~55%)、单斜辉石(30%~50%)、Fe-Ti 氧化物(磁铁矿+钛铁矿)(1%~5%, 部分样品为 10%~15%) 和少量云母($\leq 1\%$) 组成。不同样品中的 Ti-Fe 氧化物的组成比例变化较大; 总体上, Ti-Fe 氧化物含量较低时一般呈他形充填于辉石和斜长石间隙中, 而含量相对高时($>10\%$) 主要呈半自形、他形粒状(图 2d-f), 并常常与黑云母共生(图 2f)。大部分辉长岩样品具有典型的辉长-辉绿结构, 单斜辉石呈辉长结构与斜长石共生或以辉绿结构的形式充填到斜长石的格架中(图 2e, f); 少量样品中的斜长石为相对自形的堆晶矿物, 单斜辉石(嵌晶含长结构)和磁铁矿、钛铁矿等矿物则呈他形的堆晶间隙矿物。部分辉长岩样品经受过微弱的蚀变, 斜长石主要发生钠黝帘石化或绢云母化, 但单斜辉石相对较新鲜, 局部发生绿泥石化, 黑云母在边部多发生绿泥石化。

2 分析方法

本文的全岩主量元素和矿物成分分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。

全岩主量元素数据采用 Rigaku RIX 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF) 测定, 详细实验方法及流程参见 Li *et al.* (2006), 分析精度优于 1%~5%。

矿物电子探针成分分析及其背散射电子图像采用 JEOL JXA8100 型电子探针仪完成, 定量分析的工作条件为: 加速电压 15kV, 探针电流 $2 \times 10^{-8}\text{A}$, 束斑直径 $1\mu\text{m}$, 采用 ZAF 法校正。定量分析中使用 SPI 的硅酸盐矿物或氧化物作为标样, 绝大部分元素的分析精度为 $\pm 0.01 \sim 0.02\%$ 。

3 分析结果

3.1 全岩主量元素特征

本次研究总共对 14 个样品进行了全岩主量元素分析, 包括 5 个橄榄辉长岩样品和 9 个辉长岩样品(表 1)。橄榄辉

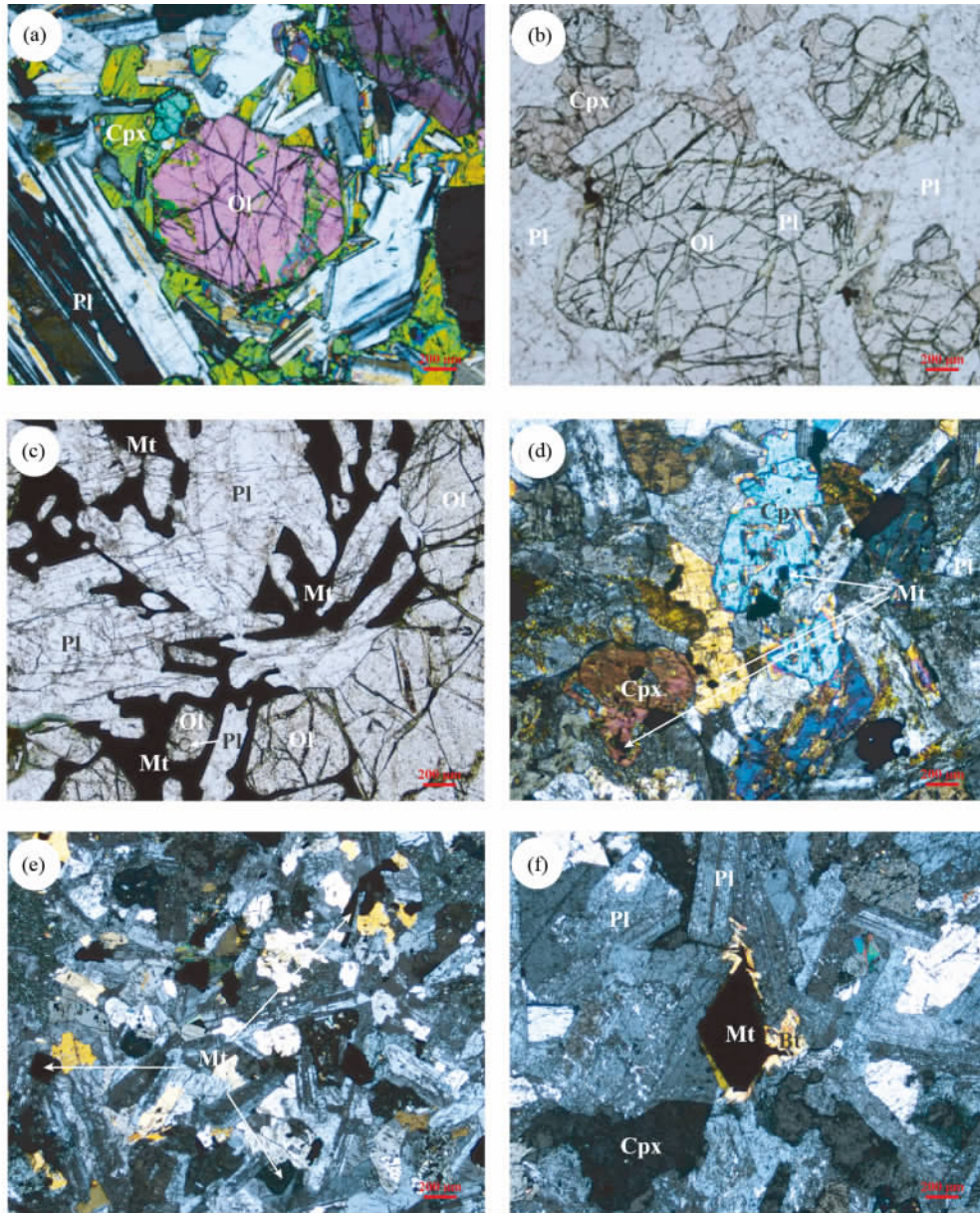


图2 哈拉达拉辉长岩岩相学特征

(a) 橄辉长岩(正交偏光)单斜辉石(Cpx)他形充填于相对自形的橄榄石(Ol)和斜长石(Pl)晶间;(b)橄辉长岩(单偏光)自形的橄榄石中包裹斜长石;(c)橄辉长岩(单偏光)Fe-Ti氧化物(Mt)呈他形充填于斜长石和橄榄石矿物间隙,橄榄石中包裹小颗粒斜长石;(d)辉长岩(正交偏光)单斜辉石包裹Fe-Ti氧化物小颗粒;(e)辉绿结构的辉长岩(正交偏光)Fe-Ti氧化物呈半自形、他形粒状;(f)辉长岩(正交偏光)他形Fe-Ti氧化物被云母(Bt)包裹

Fig. 2 Petrography of the Haladala gabbros

(a) -olivine-bearing gabbro (crossed-polarized light), anhedral clinopyroxenes (Cpx) as interstitial phases between euhedral olivines (Ol) and plagioclases (Pl); (b) -olivine-bearing gabbro (plane-polarized light), plagioclase is enclosed within euhedral olivine; (c) -olivine-bearing gabbro (plane-polarized light), anhedral Fe-Ti oxides (Mt) as interstitial phases between plagioclase and olivines, and a small plagioclase is enclosed within olivine; (d) -olivine-free gabbro (crossed-polarized light), clinopyroxene contains some Fe-Ti oxide inclusions; (e) -ophitic texture in gabbro with subhedral or anhedral Fe-Ti oxides (crossed-polarized light); (f) -olivine-free gabbro (crossed-polarized light), anhedral Fe-Ti oxides are partially surrounded by micas (Bt)

长岩样品具有相对较低的 SiO_2 (45.65% ~ 47.52%)、 TiO_2 (0.57% ~ 0.86%)、 Na_2O (2.05% ~ 2.65%)、 K_2O (0.18% ~ 0.33%) 和变化的 MgO (6.47% ~ 14.59%)、 Al_2O_3 (14.63%

~ 19.83%)、 CaO (8.65% ~ 11.34%)。相对于橄辉长岩样品,辉长岩样品总体上具有较高的 SiO_2 (49.06% ~ 50.55%)、 TiO_2 (0.77% ~ 2.14%)、 CaO (8.82% ~ 15.66%)、

表 1 哈拉达拉辉长岩全岩主量元素分析结果 (wt%)

Table 1 Major element data for the Haladala gabbros (wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg [#]
橄榄辉长岩													
TKS1145	45.65	0.59	14.63	12.15	0.18	14.59	8.65	2.05	0.18	0.08	0.76	53.27	0.73
TKS1147	46.01	0.57	15.74	11.48	0.17	13.72	8.80	2.17	0.19	0.08	0.59	52.94	0.72
TKS1148	46.65	0.72	17.79	10.83	0.16	10.86	9.46	2.40	0.28	0.14	0.22	52.14	0.69
TKS1156	46.72	0.86	17.06	10.59	0.17	10.88	10.40	2.23	0.21	0.09	0.30	51.93	0.69
TKS1158	47.52	0.74	19.83	8.94	0.12	6.47	11.34	2.65	0.33	0.11	1.49	51.29	0.61
辉长岩													
TKS1149	50.18	1.97	14.74	11.93	0.19	5.27	8.82	4.28	0.72	0.13	1.29	47.37	0.49
TKS1150	49.38	2.14	14.26	12.86	0.20	5.40	9.36	3.87	0.79	0.21	1.05	48.00	0.48
TKS1151	50.55	1.84	14.76	11.77	0.18	5.22	9.26	3.61	1.10	0.28	0.96	47.14	0.49
TKS1152	50.50	1.19	14.59	7.86	0.13	6.88	14.74	2.60	0.59	0.08	0.34	47.83	0.66
TKS1153	49.58	1.35	14.90	8.55	0.13	6.52	14.49	2.52	0.71	0.12	0.65	48.59	0.63
TKS1154	49.38	1.47	14.16	9.13	0.14	6.97	14.32	2.42	0.81	0.08	0.63	48.66	0.63
TKS1155	49.77	0.77	16.52	6.70	0.13	7.18	13.41	2.94	0.52	0.05	1.54	49.00	0.70
TKS1157	49.13	1.11	13.08	7.88	0.15	8.60	15.66	2.14	0.40	0.06	1.33	49.30	0.71
TKS1159	49.06	1.18	15.26	8.11	0.15	6.63	14.57	2.78	0.56	0.07	1.14	49.27	0.64

注: Mg[#] = Mg / (0.9Fe^T + Mg); 上角标 T 代表全 Fe 含量

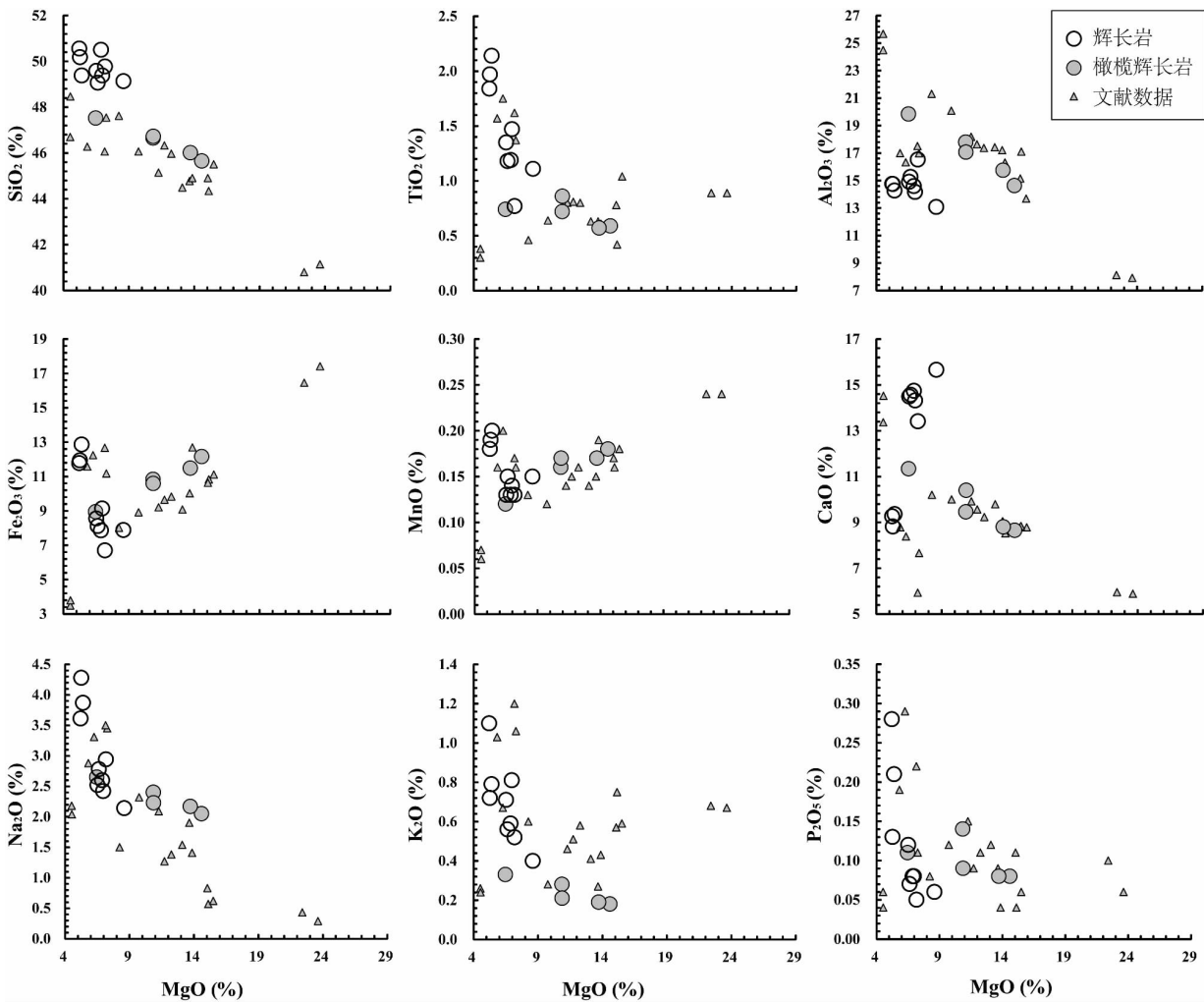


图 3 哈拉达拉辉长岩全岩主量哈克图解 (文献数据来源薛云兴和朱永峰 2009; 朱志敏等 2010)

Fig. 3 Harker diagrams for the Haladala gabbros (literature data after Xue and Zhu ,2009; Zhu et al. ,2010)

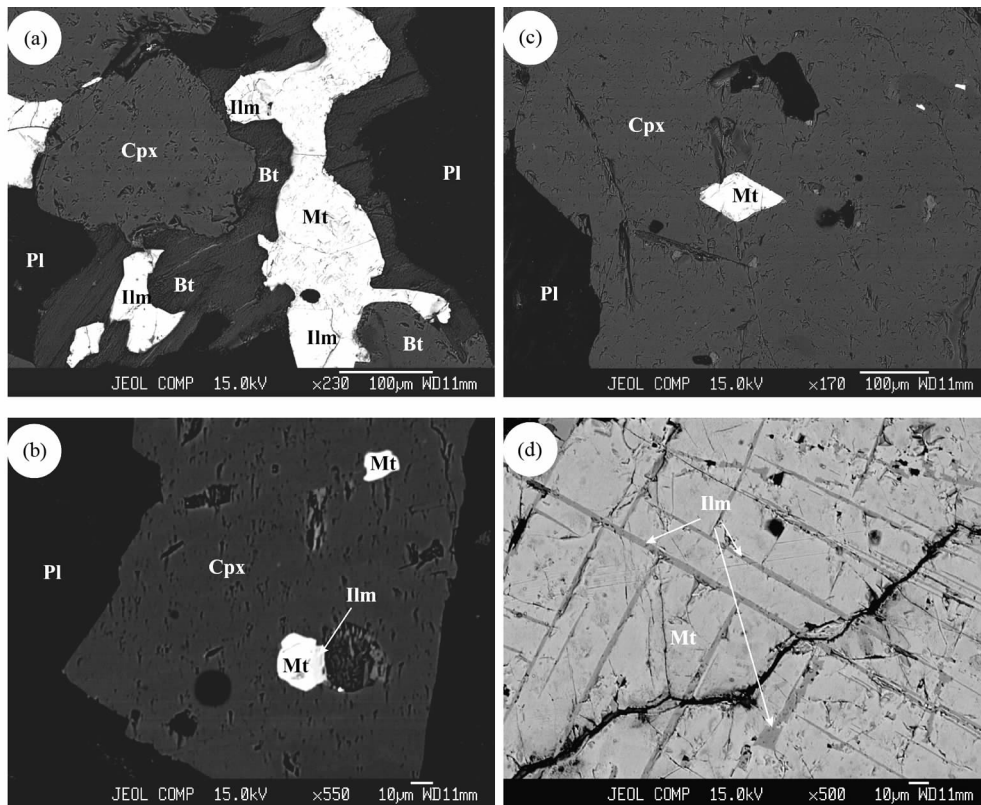


图4 哈拉达拉辉长岩中 Fe-Ti 氧化物背散射电子图像

(a) 他形钛铁矿 (Ilm) 与磁铁矿 (Mt) 共生, 周缘分布云母 (Bt); (b) 自形磁铁矿边部出溶钛铁矿, 被单斜辉石 (Cpx) 包裹; (c) 单斜辉石中包裹自形磁铁矿; (d) 钛磁铁矿出溶钛铁矿叶片

Fig. 4 Back-scattered electron images of Fe-Ti oxides in the Haladala gabbros

(a) anhedral intergrowth of ilmenite (Ilm) and magnetite (Mt) associated with mica on the periphery; (b) euhedral magnetite with ilmenite lamellae is enclosed within clinopyroxene (Cpx); (c) euhedral magnetite is enclosed within clinopyroxene; (d) Ti-magnetite contains ilmenite lamellae

Na_2O (2.14% ~ 4.28%)、 K_2O (0.40% ~ 1.10%) 和略低的 MgO (5.22% ~ 8.60%)、 Al_2O_3 (13.08% ~ 16.52%)。在以 MgO 为横坐标的主量元素 Harker 图解上(图3) 橄辉长岩与辉长岩显示出明显不同的成分变化趋势: 随着 MgO 含量的降低, 橄辉长岩的 Fe_2O_3 、 MnO 含量逐渐降低, CaO 、 Al_2O_3 含量升高, 而辉长岩的相应成分变化趋势相反。但是, 两类样品具有相似的 SiO_2 、 TiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 变化趋势, 均随着 MgO 含量的降低而逐渐升高(图3)。

3.2 电子探针分析结果

本次研究对样品中的橄榄石、单斜辉石、斜长石、Fe-Ti 氧化物和云母等矿物均进行了大量电子探针成分分析, 其代表性结果分别列于表2(橄榄石)、表3(单斜辉石)、表4(磁铁矿和钛铁矿)和表5(云母), 具体的成分特征描述如下。

(1) 橄榄石

橄辉长岩样品中的橄榄石组成比例虽然变化较大, 但各样品以及同一样品的橄榄石成分变化均不大 ($\text{MgO} = 31.8\% \sim 36.9\%$, $\text{FeO} = 23.9\% \sim 31.1\%$), 具有相对较低的 F_o 值 (64.3 ~ 73.3), 在单个样品中橄榄石 F_o 值相对均一

(表2)。另外, 这些橄榄石均具有较低的 NiO (<0.15%)、 MnO (0.31% ~ 0.62%) 和 CaO (0.03% ~ 0.18%)。

(2) 单斜辉石

橄辉长岩和辉长岩样品中的单斜辉石成分变化较大, 两类样品的 $\text{Mg}^\#$ 指数分别介于 0.77 ~ 0.86 和 0.66 ~ 0.87 之间, 端元组成为 $\text{Wo}_{43.1-46.9}\text{En}_{39.4-44.0}\text{Fs}_{10.9-16.2}$ 和 $\text{Wo}_{36.0-48.4}\text{En}_{35.4-44.6}\text{Fs}_{8.1-22.4}$ (表3), 属于次透辉石或普通辉石范畴。这些单斜辉石的 Na_2O 含量总体较低 (0.10% ~ 0.57%), 而 TiO_2 、 Al_2O_3 含量变化大 (0.10% ~ 2.00%, 0.38% ~ 3.82%)。

(3) 斜长石

所研究样品的斜长石成分变化较大 ($\text{An}_{40.5-74.7}\text{Ab}_{24.9-48.8}\text{Or}_{0.3-5.1}$) 属于中长石-培长石范围。其中, 橄辉长岩样品中的斜长石 An 介于 47 ~ 75, 主要集中在 60 ~ 73, 属于拉长石, 少量属于培长石和中长石。辉长岩中的斜长石具有更大的 An 变化范围 (34 ~ 75), 主要集中于 35 ~ 70, 属于中-拉长石。

(4) Fe-Ti 氧化物(磁铁矿和钛铁矿)

所分析的 Fe-Ti 氧化物包括磁铁矿和钛铁矿, 两者常常

表 2 橄榄石代表性电子探针分析结果 (wt%)

Table 2 Representative electron probe analyses of olivines from the Haladala gabbros (wt%)

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO ^T	NiO	MnO	MgO	CaO	P ₂ O ₅	Total	Fo
TKS1145												
1	37.44	0.03	0.01	bdl	25.46	0.07	0.38	36.93	0.07	bdl	100.39	73.30
2	38.29	0.02	0.03	bdl	24.09	0.08	0.41	36.38	0.10	0.01	99.39	72.91
3	38.01	0.03	0.03	0.01	24.79	0.09	0.35	36.50	0.06	0.01	99.87	72.41
4	37.66	0.04	0.01	0.01	26.54	0.06	0.40	34.88	0.15	0.02	99.76	70.08
5	38.29	0.05	0.03	0.10	25.40	0.09	0.38	35.91	0.06	0.02	100.30	71.59
TKS1148												
6	37.19	0.02	0.01	0.01	28.60	0.12	0.48	32.89	0.06	bdl	99.37	67.21
7	37.95	0.03	0.03	0.04	25.19	0.08	0.43	35.09	0.08	0.05	98.97	71.28
8	37.51	0.01	bdl	bdl	26.73	0.13	0.43	34.87	0.05	0.01	99.73	69.92
9	37.22	0.05	0.02	bdl	28.13	0.12	0.45	33.47	0.07	0.01	99.54	67.96
10	38.01	0.05	bdl	0.01	27.14	0.11	0.46	34.86	0.08	bdl	100.70	69.60
TKS1158												
11	36.87	0.04	0.01	0.02	29.53	0.10	0.54	32.69	0.08	0.03	99.90	66.44
12	37.84	bdl	0.02	bdl	28.38	0.09	0.52	33.74	0.05	0.02	100.68	67.94
13	37.10	0.06	0.01	bdl	30.95	0.02	0.52	32.04	0.05	0.01	100.77	64.85
14	37.16	0.05	0.02	0.03	30.83	0.04	0.54	31.80	0.06	0.01	100.53	64.77
15	36.93	0.04	0.02	bdl	30.28	0.07	0.57	32.15	0.04	bdl	100.10	65.42

注: bdl 表示低于电子探针检测限

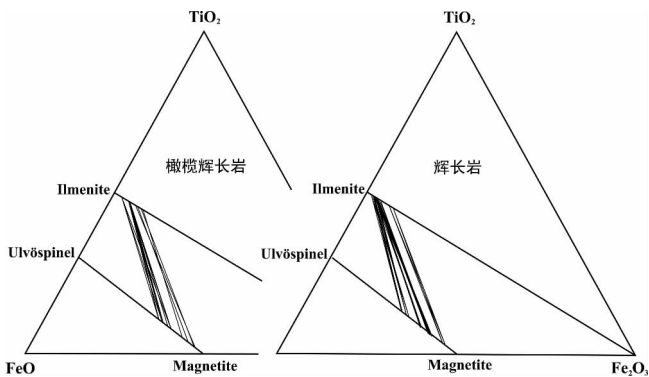


图 5 钛磁铁矿-钛铁矿矿物对成分三角图解

Fig. 5 Compositional ranges of the magnetite-ulvöspinel and ilmenite-hematite solid solutions of the coupled magnetite-ilmenite

相互共生(图 4a, b), 但明显地以磁铁矿的出现占优(图 4)。磁铁矿常出溶钛铁矿, 形成出溶叶片(图 4d)。他形的磁铁矿和钛铁矿边部常共生黑云母矿物(图 2f、图 4a)。

磁铁矿均为含少量 V₂O₃ (0.10% ~ 0.83%) 的钛磁铁矿, 成分变化较大(FeO^T = 50.2% ~ 91.6%; 其中 Fe³⁺/Fe²⁺ = 0.03 ~ 1.93, TiO₂ = 0.8% ~ 20.6%) , 其他成分如 Cr₂O₃、NiO 和 MgO 的含量均较低(表 4)。钛铁矿也具有较大的成分变化范围(TiO₂ = 42% ~ 54%; FeO^T = 36.9% ~ 54.4% , 其中 Fe³⁺/Fe²⁺ = 0 ~ 0.52)。样品中相互共生的磁铁矿与钛铁矿矿物对的成分变化见图 5, 不同岩性样品均落在相同的 Fe₂⁺TiO₄-Fe₃O₄ 和 Fe²⁺TiO₃-Fe₂O₃ 区域上。

(5) 云母

样品中的云母含量非常少, 并且绝大部分围绕 Fe-Ti 氧化物生长, 其成分变化也较大, Mg/Fe 比值为 1.10 ~ 7.60, 大

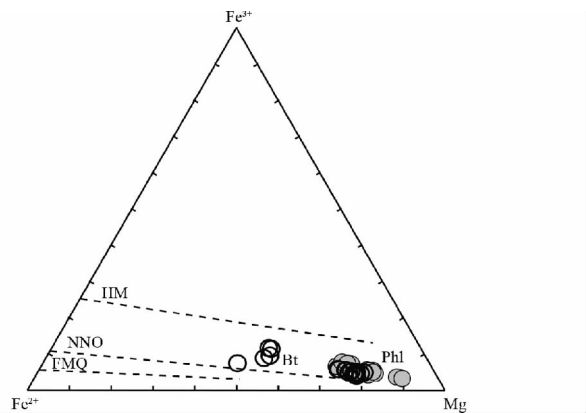


图 6 哈拉达拉辉长岩的云母成分及其氧逸度变化 氧逸度反应线 (HM、NNO、FMQ) 据 Wones and Eugster (1965)

Fig. 6 Oxygen fugacity of the Haladala gabbros estimated by mica compositions

HM trajectory for hematite-magnetite buffer, NNO for nickel-nickel oxide, FMQ for fayalite-magnetite-quartz after Wones and Eugster (1965)

部分大于 2, 主要属于金云母, 少量为黑云母(表 5、图 6)。总体上, 云母矿物具有较高的 TiO₂ (3.48% ~ 7.38%) 和 F、Cl 含量(F = 0.22% ~ 2.45%, Cl = 0.32% ~ 0.98%), F + Cl 含量可高达 3.14%。

4 分离结晶和堆晶作用

所研究的橄榄辉长岩和辉长岩的主量元素含量变化范围很宽, 并且在主量元素 Harker 图解上(图 3) 显示出系统的变化。发生成分变化的主要原因可以是源区的部分熔融程

表 3 单斜辉石代表性电子探针分析结果 (wt%)

Table 3 Representative electron probe analyses of clinopyroxenes from the Haladala gabbros (wt%)

样品号	TKS1145	TKS1148	TKS1156	TKS1158	TKS1149	TKS1150	TKS1151	TKS1151	TKS1151	TKS1151	TKS1152	TKS1153	TKS1153	TKS1154	TKS1157	TKS1157
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17
SiO ₂	50.09	50.81	50.47	50.64	49.81	49.9	48.11	52.54	51.25	51.98	51.32	50.36	49.62	50.33	50.39	52.64
TiO ₂	1.64	1.18	1.04	1.08	1.25	0.98	0.99	0.13	0.19	0.21	0.20	1.08	1.37	1.06	0.98	0.10
Al ₂ O ₃	3.05	2.61	2.92	2.11	3.18	2.48	3.61	0.56	0.58	1.08	0.66	2.94	3.20	2.77	2.68	0.38
FeO ^T	7.99	6.81	7.10	9.78	9.28	9.53	11.76	7.82	13.35	11.34	11.49	8.97	9.40	8.9	9.02	5.24
MnO	0.21	0.18	0.15	0.36	0.21	0.20	0.31	0.32	0.38	0.34	0.32	0.20	0.24	0.22	0.21	0.18
MgO	14.54	15.34	14.97	14.06	13.82	13.70	12.81	14.64	12.43	13.70	12.42	14.05	13.43	13.56	13.93	15.88
CaO	21.22	21.75	21.89	20.78	21.35	21.99	19.42	22.68	20.81	21.49	21.95	21.42	21.65	22.08	21.22	23.4
Na ₂ O	0.44	0.46	0.42	0.41	0.42	0.40	0.51	0.16	0.19	0.27	0.15	0.43	0.44	0.46	0.41	0.10
Total	99.18	99.14	98.96	99.22	99.32	99.18	97.52	98.85	99.18	100.41	98.51	99.45	99.35	99.38	98.84	97.92
Si	1.87	1.89	1.88	1.9	1.87	1.87	1.85	1.97	1.96	1.94	1.96	1.88	1.86	1.88	1.9	1.97
Ti	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.03	0.00
Al	0.13	0.11	0.13	0.09	0.14	0.11	0.16	0.02	0.03	0.05	0.03	0.13	0.14	0.12	0.12	0.02
Fe ³⁺	0.06	0.08	0.08	0.07	0.09	0.12	0.12	0.04	0.06	0.08	0.04	0.08	0.09	0.08	0.06	0.04
Fe ²⁺	0.19	0.13	0.14	0.24	0.2	0.18	0.26	0.21	0.36	0.28	0.33	0.2	0.21	0.2	0.22	0.13
Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.81	0.85	0.83	0.79	0.77	0.77	0.73	0.82	0.71	0.76	0.71	0.78	0.75	0.76	0.78	0.89
Ca	0.85	0.86	0.87	0.84	0.86	0.88	0.8	0.91	0.85	0.86	0.9	0.86	0.87	0.89	0.86	0.94
Na	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
Al ^{IV}	0.13	0.11	0.12	0.09	0.13	0.11	0.15	0.02	0.03	0.05	0.03	0.12	0.14	0.12	0.1	0.02
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
Al _R ^{IV}	6.5	5.69	6.08	4.68	6.68	5.49	7.61	1.25	1.3	2.38	1.49	5.96	6.86	5.78	5.24	0.84
Mg [#]	0.81	0.86	0.86	0.77	0.79	0.81	0.74	0.8	0.66	0.73	0.68	0.79	0.78	0.79	0.78	0.87
Wo	44.35	44.8	45.25	43.14	44.51	46.09	41.62	45.98	43.02	44.56	47.09	44.51	45.24	45.94	44.39	47.27
En	42.27	43.95	43.04	40.62	40.06	39.96	38.18	41.28	35.73	39.5	37.05	40.61	39.04	39.25	40.53	44.63
Fs	13.38	11.24	11.7	16.23	15.43	13.95	20.2	12.73	21.26	15.95	15.86	14.88	15.72	14.81	15.08	8.10

注: Al^{IV}和 Al^{VI}分别代表四次配位和六次配位 Al 的原子数量, Al_R^{IV} (= Al^{IV}/2 × 100%) 代表四次配位 Al 在单斜辉石晶体四次配位原子总量百分比

表 4 磁铁矿与钛铁矿矿物对化学成分 (wt%) 及平衡温度和氧逸度计算结果

Table 4 Calculated temperature and oxygen fugacity data based on the coupled magnetite-ilmenite (wt%) from the Haladala gabbros

样品号	TKS 1145	TKS 1145	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156	TKS 1156
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
钛磁铁矿													
SiO ₂	0.02	1.13	2.73	1.90	0.13	2.73	3.21	0.13	2.73	3.21	0.13	2.73	3.21
TiO ₂	2.71	2.79	9.07	11.21	8.97	10.97	11.48	8.97	10.97	11.48	8.97	10.97	11.48
Al ₂ O ₃	1.18	1.21	2.38	1.31	3.35	1.06	1.26	3.35	1.06	1.26	3.35	1.06	1.26
Cr ₂ O ₃	0.08	0.07	0.16	0.13	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07
V ₂ O ₃	0.21	0.82	0.25	0.29	0.32	0.23	0.20	0.32	0.23	0.20	0.32	0.23	0.20
FeO ^T	89.02	87.97	75.10	76.21	79.59	75.23	73.22	79.59	75.23	73.22	79.59	75.23	73.22
Fe ₂ O ₃	63.32	59.66	40.71	40.57	46.54	39.27	36.55	46.54	39.27	36.55	46.54	39.27	36.55
FeO	32.04	34.29	38.47	39.71	37.71	39.89	40.33	37.71	39.89	40.33	37.71	39.89	40.33
NiO	0.10	0.15	0.07	0.03	0.04	0.06		0.04	0.06	bdl	0.04	0.06	
MnO	0.15	0.05	1.04	2.10	0.72	1.50	1.60	0.72	1.50	1.60	0.72	1.50	1.60
MgO	1.18	0.76	0.13	0.27	0.82	0.18	0.32	0.82	0.18	0.32	0.82	0.18	0.32
CaO	bdl	bdl	2.53	1.36	bdl	2.37	2.55	bdl	2.37	2.55	bdl	2.37	2.55
Na ₂ O	0.04	0.17	bdl	bdl	0.16	0.07	0.12	0.16	0.07	0.12	0.16	0.07	0.12
Total	101.03	101.10	97.54	98.88	98.83	98.41	97.69	98.83	98.41	97.69	98.83	98.41	97.69
X' Usp	7.66	8.47	29.43	33.08	26.89	34.00	36.66	26.89	34.00	36.66	26.89	34.00	36.66
钛铁矿													
SiO ₂	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	bdl	bdl	bdl	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	52.61	49.79	52.71	52.11	50.48	50.48	50.48	51.81	51.81	51.81	52.77	52.77	52.77
Al ₂ O ₃	0.09	0.09	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Cr ₂ O ₃	0.01	0.04	bdl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	bdl	bdl	bdl
V ₂ O ₃	0.03	0.17	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	bdl	bdl	bdl	0.01	0.01	0.01
FeO ^T	39.22	46.17	43.42	43.45	43.77	43.77	43.77	44.29	44.29	44.29	43.32	43.32	43.32
Fe ₂ O ₃	6.19	9.07	4.92	5.08	5.05	5.05	5.05	4.68	4.68	4.68	2.24	2.24	2.24
FeO	33.64	38.01	38.98	38.88	39.22	39.22	39.22	40.08	40.08	40.08	41.31	41.31	41.31
NiO	0.04	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl		0.03	0.03	0.03	bdl	bdl	
MnO	1.09	0.54	0.70	0.63	0.56	0.56	0.56	0.59	0.59	0.59	0.67	0.67	0.67
MgO	7.04	3.52	4.36	4.14	3.16	3.16	3.16	3.32	3.32	3.32	3.10	3.10	3.10
CaO	0.05	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Na ₂ O	0.09	0.06	bdl	bdl	0.03	0.03	0.03	0.15	0.15	0.15	0.06	0.06	0.06
Total	100.91	101.32	101.80	100.98	98.62	98.62	98.62	100.75	100.75	100.75	100.27	100.27	100.27
X' Ilm	92.41	90.28	94.58	94.43	94.51	94.51	94.51	95.02	95.02	95.02	97.58	97.58	97.58
f _{O₂}	-17.03	-15.16	-17.67	-17.24	-17.47	-17.22	-17.08	-18.09	-17.85	-17.72	-23.32	-23.19	-23.11
T(°C)	650	693	687	703	689	703	711	675	688	695	570	575	578
钛磁铁矿													
样品号	TKS 1158	TKS 1158	TKS 1149	TKS 1150	TKS 1150	TKS 1150	TKS 1150	TKS 1151	TKS 1151	TKS 1151	TKS 1152	TKS 1152	TKS 1152
编号	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
钛磁铁矿													
SiO ₂	0.05	0.05	0.09	0.07	0.07	0.06	0.20	0.72	0.72	0.09	0.58	0.58	2.63
TiO ₂	4.28	5.90	9.64	7.12	7.12	7.59	7.77	6.61	6.61	7.02	9.58	9.58	13.76
Al ₂ O ₃	3.12	2.88	2.02	1.80	1.80	1.46	1.53	1.83	1.83	1.62	1.99	1.99	0.42
Cr ₂ O ₃	0.10	0.12	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.02
V ₂ O ₃	0.19	0.18	0.27	0.43	0.43	0.52	0.27	0.31	0.31	0.32	0.26	0.26	0.23
FeO ^T	82.50	81.75	80.79	82.27	82.27	81.88	81.78	83.26	83.26	83.77	79.83	79.83	74.22
Fe ₂ O ₃	55.09	52.63	46.19	50.48	50.48	49.82	49.98	51.07	51.07	51.86	45.18	45.18	34.10
FeO	32.93	34.39	39.23	36.85	36.85	37.05	36.81	37.31	37.31	37.11	39.18	39.18	43.53
NiO		0.08											0.06
MnO	0.22	0.28	0.45	0.25	0.25	0.42	0.98	0.57	0.57	0.22	0.26	0.26	0.03
MgO	1.00	1.02	0.09	0.05	0.05	0.02	0.05	0.10	0.10	0.09	0.45	0.45	0.01
CaO	bdl	bdl	0.06	bdl	bdl	bdl	0.21	bdl	bdl	bdl	0.20	0.20	2.48
Na ₂ O	0.04	0.02	0.11	0.09	0.09	0.03	0.02	0.08	0.08	0.03	0.01	0.01	0.08
Total	97.02	97.55	98.23	97.22	97.22	97.03	97.88	98.63	98.63	98.39	97.75	97.75	97.35
X' Usp	13.11	17.90	28.88	21.65	21.65	22.78	22.40	19.75	19.75	21.01	29.44	29.44	44.63

续表 4

Continued Table 4

样品号	TKS 1158	TKS 1158	TKS 1149	TKS 1150	TKS 1150	TKS 1150	TKS 1150	TKS 1151	TKS 1151	TKS 1151	TKS 1152	TKS 1152	TKS 1152
编号	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
钛铁矿													
SiO ₂	0.07	1.55	0.05	0.02	0.02	0.01	bdl	0.01	0.02	0.02	bdl	0.03	bdl
TiO ₂	49.62	48.30	51.38	50.45	50.45	49.60	50.98	52.13	52.00	51.09	52.03	51.55	51.08
Al ₂ O ₃	0.13	0.88	0.06	0.02	0.06	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.03
Cr ₂ O ₃	0.04	0.04	bdl	0.02	bdl	0.01	bdl	bdl	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl
V ₂ O ₃	0.02	0.02	bdl	bdl	0.03	bdl	0.05	0.02	bdl	0.02	0.03	bdl	bdl
FeO ^T	45.02	44.30	46.57	47.38	47.77	47.20	47.43	46.21	46.38	47.40	42.94	43.26	45.89
Fe ₂ O ₃	7.65	7.33	3.92	4.44	5.17	5.04	4.24	3.13	3.52	4.13	2.25	2.93	2.07
FeO	38.13	37.70	43.05	43.38	43.12	42.67	43.61	43.39	43.22	43.69	40.92	40.62	44.03
NiO		0.06											0.03
MnO	0.57	0.82	0.72	0.67	0.72	0.68	0.58	0.60	0.66	0.58	0.80	0.59	0.69
MgO	3.37	3.80	1.40	0.71	0.88	0.72	0.93	1.63	1.64	0.95	2.85	2.91	0.69
CaO	bdl	bdl	0.01	0.06	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Na ₂ O	0.16	0.08	0.10	bdl	0.01	0.03	0.01	0.07	bdl	0.06	0.04	bdl	0.02
Total	99.76	100.58	100.69	99.77	100.46	98.79	100.42	101.01	101.12	100.58	98.97	98.68	98.64
X' Ilm	91.63	89.62	96.01	95.66	94.87	94.94	95.81	96.84	96.44	95.91	97.59	96.82	97.92
f _{O₂}	-15.70	-15.58	-19.39	-18.83	-17.87	-17.89	-19.13	-21.30	-20.50	-19.40	-23.15	-21.18	-23.62
T(°C)	700	716	648	651	671	673	646	601	616	638	574	611	572
样品号	TKS 1152	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1154	TKS 1157	TKS 1157	TKS 1157	TKS 1157
编号	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
钛磁铁矿													
SiO ₂	2.63	0.06	0.06	0.06	0.06	1.53	1.53	0.08	0.08	1.73	0.22	1.73	0.22
TiO ₂	13.76	13.41	13.41	13.41	13.41	14.41	14.41	12.83	12.83	3.90	3.40	3.90	3.40
Al ₂ O ₃	0.42	2.72	2.72	2.72	2.72	1.74	1.74	2.78	2.78	1.41	1.35	1.41	1.35
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.03	0.04	0.03	0.04
V ₂ O ₃	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.22	0.22	0.21	0.21	0.43	0.45	0.43	0.45
FeO ^T	74.22	75.99	75.99	75.99	75.99	73.15	73.15	76.64	76.64	82.43	85.29	82.43	85.29
Fe ₂ O ₃	34.10	37.51	37.51	37.51	37.51	33.97	33.97	38.86	38.86	53.62	57.82	53.62	57.82
FeO	43.53	42.24	42.24	42.24	42.24	42.58	42.58	41.67	41.67	34.18	33.27	34.18	33.27
NiO	0.06	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06
MnO	0.03	0.41	0.41	0.41	0.41	0.79	0.79	0.51	0.51	0.17	0.18	0.17	0.18
MgO	0.01	0.26	0.26	0.26	0.26	0.85	0.85	0.35	0.35	0.01	0.07	0.01	0.07
CaO	2.48	bdl	bdl	bdl	bdl	0.97	0.97	bdl	bdl	1.61	0.15	1.61	0.15
Na ₂ O	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05	0.05	bdl	bdl	bdl	0.08	bdl	0.08
Total	97.35	97.06	97.06	97.06	97.06	97.25	97.25	97.40	97.40	97.14	97.09	97.14	97.09
X' Usp	44.63	41.25	41.25	41.25	41.25	45.12	45.12	39.22	39.22	12.43	10.23	12.43	10.23
钛铁矿													
SiO ₂	0.03	0.01	bdl	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
TiO ₂	51.10	51.80	52.40	52.06	52.18	52.80	51.46	52.80	51.46	48.59	48.59	48.61	48.61
Al ₂ O ₃	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.05	0.21	0.05	0.21	0.07	0.07	0.06	0.06
Cr ₂ O ₃	0.02	bdl	0.01	0.01	bdl	0.01	0.04	0.01	0.04	bdl	bdl	0.03	0.03
V ₂ O ₃	0.01	0.04	bdl	0.06	0.04	bdl	bdl	bdl	bdl	0.03	0.03	0.07	0.07
FeO ^T	45.62	43.79	43.52	43.66	43.41	42.50	43.34	42.50	43.34	50.44	50.44	48.65	48.65
Fe ₂ O ₃	1.71	2.98	2.09	2.94	2.52	0.93	1.56	0.93	1.56	9.45	9.45	7.68	7.68
FeO	44.08	41.11	41.64	41.01	41.15	41.65	41.93	41.65	41.93	41.94	41.94	41.74	41.74
NiO	bdl	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	bdl	0.02	bdl	bdl	bdl	0.04	0.04
MnO	0.64	0.85	1.96	0.80	0.90	1.77	2.94	1.77	2.94	0.62	0.62	0.77	0.77
MgO	0.71	2.57	1.97	2.82	2.75	2.29	0.80	2.29	0.80	0.65	0.65	0.69	0.69
CaO	bdl	0.04	0.01	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Na ₂ O	0.02	0.02	0.04	0.11	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.04	bdl	bdl
Total	98.35	99.48	100.17	99.89	99.63	99.57	98.99	99.57	98.99	101.41	101.41	99.71	99.71
X' Ilm	98.25	96.89	97.81	96.84	97.30	98.95	98.30	98.95	98.30	90.79	90.79	92.33	92.33
f _{O₂}	-25.19	-20.60	-23.42	-20.69	-21.90	-30.07	-25.65	-30.05	-25.75	-14.91	-15.01	-15.93	-16.03
T(°C)	543	635	576	633	607	464	536	465	532	714	706	691	683

注: bdl 表示低于电子探针检测限; Fe₂O₃ 和 FeO 的质量百分数由电价平衡配位计算得到; X' Usp 和 X' Ilm 分别为钛尖晶石和钛铁矿端元组分百分含量

表 5 云母代表性电子探针分析结果 (wt%)

Table 5 Representative electron probe analyses of micas from the Haladala gabbros (wt%)

样品号 编号	TKS1145						TKS1150			TKS1153		TKS1154	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	39.22	38.96	39.02	38.10	37.81	38.42	37.31	38.16	37.67	35.95	36.05	37.14	37.01
TiO ₂	5.09	5.55	4.97	4.99	5.12	4.59	5.34	5.38	5.75	7.22	7.38	6.29	6.22
Al ₂ O ₃	11.82	12.00	11.73	13.83	13.77	13.45	12.48	12.73	12.90	12.53	13.08	13.75	13.77
Cr ₂ O ₃	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0.01	bdl	0.03
FeO ^T	5.43	5.78	5.14	8.72	9.49	9.35	9.73	10.48	9.59	18.18	17.32	11.33	10.67
Fe ₂ O ₃	1.45	1.55	1.36	1.82	1.81	1.92	1.87	2.04	2.09	3.61	3.79	2.40	2.27
FeO	4.12	4.39	3.92	7.09	7.86	7.62	8.04	8.63	7.71	14.93	13.91	9.17	8.62
NiO	0.02	0.03	0.03	0.01	0.05	0.07	bdl	bdl	bdl	0.01	0.06	0.02	0.04
MnO	0.01	0.04	0.07	0.04	0.01	0.04	0.05	0.07	0.02	0.07	0.11	0.05	0.02
MgO	22.19	21.56	21.93	19.22	18.50	18.52	17.45	17.46	17.64	11.26	11.24	16.12	16.72
CaO	0.04	bdl	bdl	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.14	0.01	0.01	0.06	0.05
Na ₂ O	0.34	0.31	0.35	0.20	0.29	0.24	0.42	0.29	0.30	0.26	0.26	0.54	0.50
K ₂ O	11.18	11.33	11.38	10.86	10.95	10.86	10.78	11.07	10.76	9.91	9.66	10.47	10.44
F	2.14	2.24	2.38	0.46	0.61	0.83	2.45	2.01	1.93	0.27	0.22	0.41	0.47
Cl	0.54	0.43	0.44	0.54	0.59	0.43	0.69	0.88	0.74	0.98	0.91	0.79	0.78
H ₂ O	3.12	3.10	3.00	3.79	3.68	3.61	2.67	2.91	2.96	3.57	3.63	3.69	3.66
F = O	-0.90	-0.94	-1.00	-0.19	-0.26	-0.35	-1.03	-0.85	-0.81	-0.12	-0.09	-0.17	-0.20
Cl = O	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	-0.05	-0.04	-0.06	-0.05	-0.04	-0.04
Total	100.34	100.52	99.55	100.77	100.80	100.26	98.51	100.77	99.76	100.41	100.18	100.68	100.36
Mg	0.55	0.53	0.54	0.48	0.46	0.46	0.43	0.43	0.44	0.28	0.28	0.40	0.41
Fe ^T	0.08	0.08	0.07	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.13	0.25	0.24	0.16	0.15
Mg/Fe ^T	7.29	6.64	7.60	3.93	3.47	3.53	3.20	2.97	3.28	1.10	1.16	2.54	2.79

注: bdl 表示低于电子探针检测限; Fe₂O₃ 和 FeO 的质量百分数由电价平衡配位计算得到

度差异、岩浆结晶分异或岩浆混合(包括地壳混染)作用过程等。

由于辉长岩的原始岩浆由地幔源区部分熔融后上升侵位、途经下地壳并在地壳深部岩浆房聚集冷却结晶,在地壳曾经历了较长时间的演化过程,因此存在地壳物质同化混染作用的可能性。但哈拉达拉辉长岩体的具有相对亏损的 Sr-Nd 同位素特征,即具有较低的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值(0.7039 ~ 0.7053) 和较高的 ε_{Nd}(t) 值(4.0 ~ 8.4) (龙灵利等, 2012), 并具有较为平坦的 REE 配分曲线和微量元素蛛网图(朱志敏等, 2010; 龙灵利等, 2012), 因此不太可能存在明显的地壳物质参与岩浆活动, 地壳混染不是造成其主量元素含量较大变化的主要原因。另外, 在以 MgO 为横坐标的主量元素 Harker 图解上(图 3) 橄辉长岩与辉长岩显示出明显不同的成分变化趋势, 表明它们的成分变化不是由于岩浆混合作用过程造成的。前人研究结果还表明, 哈拉达拉辉长岩体的不同样品之间虽然存在不相容元素丰度的明显差别, 但都具有非常相似的微量元素蛛网图样式以及相似的 REE 配分模式(朱志敏等, 2010; 龙灵利等, 2012), 这表明源区的部分熔融程度的变化也不是形成其成分变化的主要原因。

橄辉长岩随着 MgO 含量降低, 其 MnO、Fe₂O₃^T 含量降低, CaO、Na₂O、K₂O 和 Al₂O₃ 增加, 表明其成分变化主要受控于橄辉石的分离结晶或堆晶作用, 而单斜辉石的结晶分异作用影响较小; 另外, 由于橄辉长岩的 TiO₂ 含量随 MgO 含量

的降低而略具增加, 但总体变化程度很小(图 3), 因此也不存在明显的 Fe-Ti 氧化物的分离结晶作用。辉长岩的 Fe₂O₃、TiO₂ 含量随 MgO 含量的减少而迅速升高, 表明其成分变化明显受控于 Fe-Ti 氧化物如磁铁矿、钛铁矿的大量堆晶, 与岩相学观察所见的部分辉长岩样品具有高达 15% 的 Fe-Ti 氧化物成粒间矿物胶结单斜辉石和斜长石的现象(图 2e) 一致。而辉长岩的 CaO 含量随 MgO 含量的减少而迅速降低, 则辉长岩的成分变化还主要受控于单斜辉石或斜长石的结晶分异作用; 由于辉长岩的岩相学特征显示出存在一定程度的斜长石堆晶作用, 因此推测其成分变化应主要受控于斜长石和 Fe-Ti 氧化物的堆晶作用。

利用主量元素的 Pearce 图解也可以对岩石发生矿物结晶分异或堆晶作用的过程进行有效验证(Russell and Nicholls, 1988; Nicholls, 1988)。本文所研究样品的主量元素 Pearce 图解表明, 橄辉长岩的变化均位于“橄辉石”和“斜长石”结晶分异趋势线之间(图 7a, b), 或与“橄辉石 + 斜长石”结晶分异趋势线一致(图 7c), 暗示了其成分变化可能同时受到了橄辉石和斜长石的分离结晶或堆晶作用影响。由于岩相学特征表明存在橄辉石的堆晶作用, 橄辉石和斜长石之间为相互包裹关系, 表明二者结晶时间相近, 因此可以认为橄辉长岩的化学成分变化应主要受到了橄辉石和斜长石的堆晶作用影响。辉长岩数据趋势在 0.5 × (Mg + Fe) / K 对 Si/K 的图解中落于“斜长石”和“单斜辉石”的结晶分异

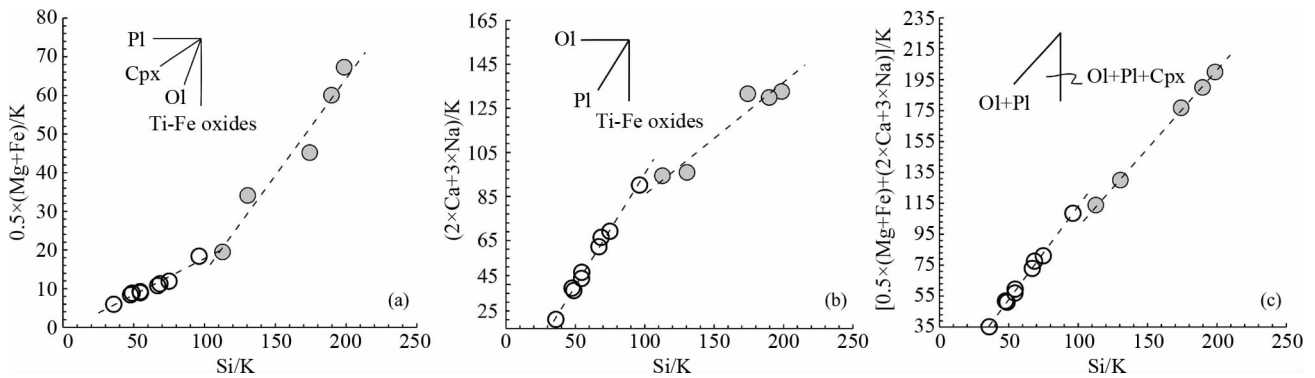


图7 哈拉达拉辉长岩的主量元素 Pearce 图解

Ol、Pl、Cpx 等矿物结晶分异的斜率据 Russell and Nicholls(1988) 和 Nicholls(1988)

Fig. 7 Pearce diagram of major elements for the Haladala gabbros

The Ol, Pl, Cpx fractional trends based on Russell and Nicholls (1988), Nicholls (1988)

趋势线之间(图7a),在 $(2 \times Ca + 3 \times Na) / K$ 对 Si / K 的图解中与“斜长石”的结晶分异趋势线一致(图7b),而在 $[0.5 \times (Mg + Fe) + (2 \times Ca + 3 \times Na)] / K$ 对 Si / K 的图解中近似于“橄榄石+斜长石”的结晶分异趋势线(图7c),表明其化学成分变化应主要受到了斜长石的分离结晶或堆晶作用影响。

综上所述,通过全岩主量元素成分分析结果和岩相学特征所显示的矿物接触关系,可以厘清哈拉达拉辉长岩的主要矿物结晶顺序,即橄榄石最先结晶,之后斜长石与橄榄石一起结晶并发生堆晶作用,然后单斜辉石大量结晶,形成包橄含长结构,随着温度的降低最后结晶出Fe-Ti氧化物和少量的云母矿物等。

5 岩浆演化与Fe-Ti氧化物成矿作用关系

影响玄武质岩浆中Fe-Ti氧化物结晶的因素包括氧逸度、挥发份以及岩浆中的Fe、Ti、Si等元素的浓度(Pang *et al.*, 2008a)。铁玄武质岩浆的熔融实验表明,相对高的氧逸度有利于岩浆中氧化物的结晶(Juster *et al.*, 1989; Toplis and Carroll, 1995)。

哈拉达拉辉长岩岩体中钕钛磁铁矿与钛铁矿共生的现象非常普遍。由于深成侵入岩的冷却速度较慢,本文所观察到的钛磁铁矿出溶钛铁矿现象(图4d)表明两矿物相之间已达平衡,因此可以利用钛铁矿-磁铁矿矿物对计算两相平衡时的温度和氧逸度(ILMAT2.0; Lepage, 2003)。另外,ILMAT(磁铁矿-钛铁矿)矿物对计算方法比较适用于简单的 $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$ 体系(Lepage, 2003);本文研究的样品中还存在橄榄石、辉石等镁铁矿物,因此有可能发生Fe-Ti氧化物与橄榄石或辉石矿物发生Mg-Fe交换反应,从而影响到钛铁矿和磁铁矿的矿物成分,并产生不正确的计算结果。电子探针分析结果表明各样品中的橄榄石成分相近,因此橄榄石与Fe-Ti氧化物之间应该不存在明显的Mg-Fe交换反应;另外,虽然橄榄辉长岩和辉长岩样品中的单斜辉石成分变化较大,

但计算结果显示,两类辉长岩样品的氧逸度、平衡温度的变化范围并无明显差别(氧逸度 $\log f_{O_2}$ 分别为 $-23.32 \sim -15.16$ 和 $-30.07 \sim -14.91$,平衡温度 T 分别为 $570 \sim 716^\circ C$ 和 $464 \sim 714^\circ C$;表4、图8),这表明Fe-Ti氧化物和单斜辉石之间的Mg-Fe交换反应即使存在,对磁铁矿、钛铁矿之间的平衡活度影响也不大,因此该方法适用于本文研究的样品。另外,由云母成分投图获得的氧逸度条件介于NNO-HM之间(图6; Wones and Eugster, 1965),高于Fe-Ti氧化物计算所得的氧逸度值(主要介于NNO-MI之间;图8),这与岩相学特征所显示的云母结晶相对较晚于Fe-Ti氧化物有关。总体上,由云母成分投图(图6)和Fe-Ti氧化物的成分计算(图8)均表明橄榄辉长岩和辉长岩的氧逸度条件相似。Fe-Ti氧化物在不同岩石类型中的结晶形态不同,如在橄榄辉长岩和相对低Fe-Ti氧化物的辉长岩中主要呈粒间胶结的不规则他形,而在含Fe-Ti氧化物较高的辉长岩中则呈半自形、他形粒状,但两种形态的矿物对在钛铁矿-钛尖晶石三角图解中位置相同,则表明其形成机制是相同的。由磁铁矿-钛铁矿矿物对计算得到的是固相线条件下的两矿物发生离子交换平衡时的温度和氧逸度,并不等同于岩浆固相线温度和氧逸度条件。哈拉达拉辉长岩样品中具有钛磁铁矿出溶钛铁矿的现象(图4d),表明原始的磁铁矿-钛尖晶石固溶体在固相线条件下发生了固溶体分离,为一氧逸度增加、温度缓慢下降的过程(Buddington and Lindsley, 1964)。因此,本文由磁铁矿-钛铁矿矿物对计算出来的平衡温度应比实际矿物结晶温度低得多,而计算所得的氧逸度则应该比实际的氧逸度偏高。无论如何,以上结果表明氧逸度变化在整个钕钛磁铁矿、钛铁矿结晶过程中的作用较小。

H_2O 的加入可以使岩浆中硅酸盐矿物结晶温度降低,而对磁铁矿结晶温度的影响较小(Sisson and Grove, 1993),这将促使磁铁矿在岩浆演化过程中不断分离结晶,将不利于岩浆体系的磁铁矿富集。哈拉达拉岩体总体上缺少黑云母、角闪石和磷灰石等中-基性岩石中常见的含水矿物,即使是岩

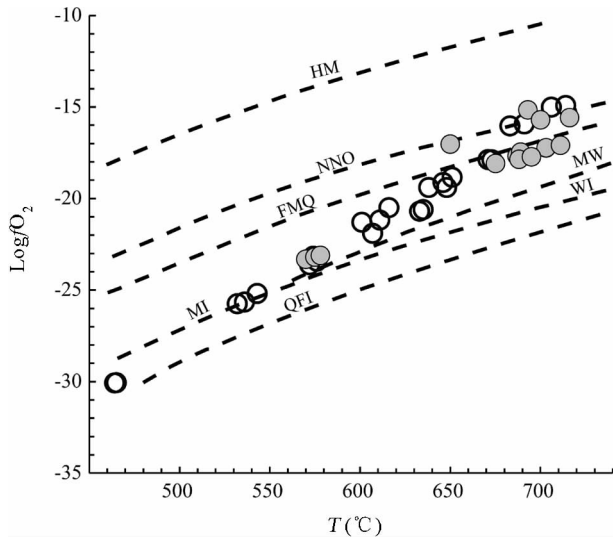


图 8 钛磁铁矿-钛铁矿矿物对计算的温度-氧逸度图解
氧逸度反应线(HM、NNO、FMQ、MW、MI、WI、QFI) 据 Eugster and Wones(1962)

Fig. 8 Oxygen-fugacity and temperature determined for the Haladala gabbros based on magnetite-ilmenite equilibration MW trajectory for magnetite-wüstite buffer , MI for magnetite-Iron , WI for wüstite-iron , QFI for quartz-fayalite-iron after Eugster and Wones (1962)

浆晚期结晶的极少量黑云母,其成分富含 F、Cl 而少 OH(表 5) 表明母岩浆中的 H₂O 含量极少,这可能也是其岩浆演化过程中能够发生钒钛磁铁矿富集的重要原因之一。Fe-Ti 氧化物结晶能力与 FeO 和 TiO₂ 的含量呈正相关,与 SiO₂ 含量呈负相关关系(Thy *et al.*, 2006; Toplis and Carroll, 1995), 橄榄石、单斜辉石、斜长石的分离结晶可以导致残余岩浆富 Fe(Hanski, 1992)。因为哈拉达拉岩体中的橄榄石 Fo 较低(64~75), 岩相学特征及其矿物结晶顺序均显示其总体演化程度较高,表明该岩体中的 Fe-Ti 氧化物的富集应主要归结于玄武质岩浆的正常结晶分异作用过程。在所有样品中均未见玄武质岩浆早期结晶的尖晶石类矿物(如铬铁矿) 则暗示了哈拉达拉岩体的深部可能隐伏有超基性岩石或存在深部岩浆房经历早期镁铁质矿物的分离结晶。

6 天山造山带构造薄弱带与塔里木地幔柱活动关系

早期研究认为哈拉达拉辉长岩的形成与伊犁地块的石炭-二叠纪裂谷活动有关(张云孝等, 2000)。前人对南天山造山带的蛇绿岩、高压变质岩以及后碰撞碱性花岗岩的系列研究限定了南天山洋的闭合时限约为 320Ma(Gao *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2010, 2011; 徐学义等, 2005) 而哈拉达拉岩体的锆石 SIMS U-Pb 定年得到的形成年龄为 306~309Ma(龙灵利等, 2012; 薛云兴和朱永峰, 2009; 朱志敏

等, 2010) 因此一般认为该岩体的形成和伊犁-中天山板块与塔里木板块碰撞、造山后的碰撞伸展过程有关(朱志敏等, 2010), 可能代表了该造山带挤压碰撞向伸展构造环境转变的过渡阶段(朱志敏等, 2010), 代表了后碰撞岩浆活动(薛云兴和朱永峰, 2009), 但最近的研究认为这一后碰撞岩浆活动还叠加了塔里木地幔柱活动的影响(龙灵利等, 2012)。

本文研究表明,哈拉达拉岩体总体上缺少富水矿物,如未出现角闪石、磷灰石等,而极少量出现的黑云母均为最晚期结晶矿物,并且具有富 F、Cl 贫 OH 特征,由磁铁矿-钛铁矿矿物对所获得的氧逸度不高,这些特征均表明该岩体的原始岩浆具有相对低氧逸度和贫水的特征,这与岛弧岩浆明显不同,与碰撞后常见的钾质-超钾质岩浆的特征(如富水、高氧逸度、富钾; Huang *et al.*, 2010) 亦不相同。另外,根据单斜辉石的成分特征如 TiO₂ 和 Al₂O₃ 的成分关系可以进行母岩浆形成环境的制约(Loucks, 1990)。在非造山拉张环境形成的基性岩浆岩(大洋中脊、弧后盆地、大陆裂谷、热点基性岩)中的 Al 主要通过^{VI}Mg^{IV}Si₂ ↔ ^{VI}Ti^{IV}Al₂ 的置换形式进入单斜辉石,而板块汇聚边缘岛弧基性岩浆由于富 H₂O 和 O₂, Al 将主要以^{VI}Mg^{IV}Si ↔ ^{VI}Fe^{3+IV}Al 的置换形式进入单斜辉石(Loucks, 1990)。因此,与裂谷相关的基性岩浆岩中单斜辉石的四次配位阳离子位置的 Al 含量(Al_R^{IV}) 与 TiO₂ 含量的比值将低于岛弧相关基性岩浆岩中的单斜辉石。在相关图解中,哈拉达拉岩体中的单斜辉石很明显地落在裂谷堆晶岩的变化范围(图 9)。以上矿物学特征均表明哈拉达拉岩体的母岩浆不是形成于岛弧或与岛弧环境相关的地幔源区,而代表了裂谷构造环境。

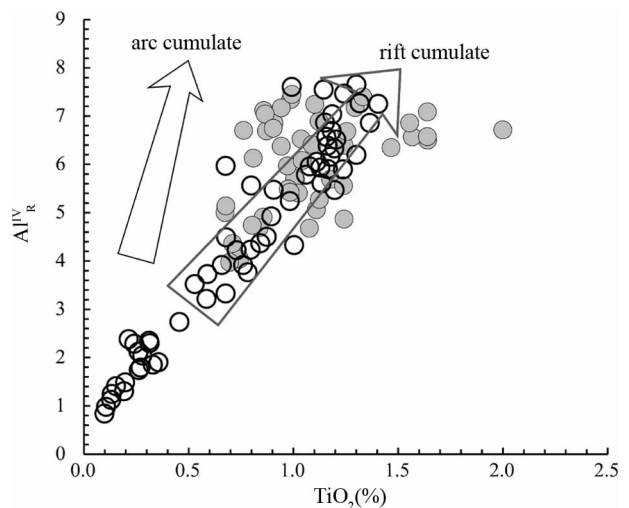


图 9 哈拉达拉辉长岩的单斜辉石 Al_R^{IV} 与 TiO₂ 含量图解
岛弧和裂谷堆晶趋势线来自 Loucks(1990)

Fig. 9 Variation of Al_R^{IV} and TiO₂ in clinopyroxene of the Haladala gabbros

Arc and rift cumulate trends are from Loucks (1990)

碰撞后造山带由于加厚地壳重力垮塌等原因将转变为伸展构造环境, 上地幔因减压发生熔融亦将形成具有裂谷性质的基性岩浆。但由于山根的垮塌将造成大量地壳物质再循环进入地幔, 其地幔源区往往富集地壳组分, 地幔熔融的主要方式为造山带底部的减压熔融, 其熔融比例相对较小, 因此这类造山后的基性岩浆常具有高钾、富集大离子亲石元素的特征 (Bonin, 2004), 并且由于地幔源区还主要继承了早期大洋板块俯冲交代富集的特征, 所产生的岩浆还将具有富水、高氧逸、强 Nb-Ta-Ti 负异常的特点。本文对哈拉达拉的矿物学研究表明其母岩浆贫水、相对低氧逸度; 前人对哈拉达拉辉长岩的地球化学特征研究则表明, 微量元素蛛网图及稀土元素配分图均显示相对平坦的样式, Nb-Ta 负异常较弱, 无明显的 Ti 负异常, 大离子亲石元素并不富集, 岩石相对低钾 (朱志敏等, 2010; 龙灵利等, 2012), 而 Sr-Nd 同位素相对亏损 (龙灵利等, 2012)。这些特征均表明哈拉达拉辉长岩的母岩浆的地幔源区熔融程度较高, 不可能形成于纯粹的后碰撞伸展构造环境。地幔源区经历减压、加热或挥发份加入 (降低固相线温度) 均可能发生熔融形成岩浆 (徐义刚, 2006)。对于哈拉达拉岩体, 少挥发份组分和岩石圈相对厚 (造山带) 表明减压和固相线温度降低均不是其地幔源区发生高程度部分熔融的因素, 而很可能存在异常热 (如地幔柱活动) 促使这一过程发生。

前人研究表明塔里木大火成岩省早期岩浆高峰期约为 ~290Ma (徐义刚等, 2013), 而哈拉达拉岩体所在的南天山造山带为塔里木大火成岩省范围内的构造薄弱带, 是地幔柱活动最易于表现和能够优先表现出来的地区 (Xu *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013), 因此哈拉达拉辉长岩 (306 ± 3 Ma; 朱志敏等, 2010) 很可能是塔里木地幔柱在天山造山带这一构造薄弱带的早期岩浆活动。但是, 对于塔里木地幔柱与南天山碰撞后山根垮塌伸展之间的相互关系, 即是否因为地幔柱活动导致山根垮塌, 还是因为山根垮塌所引起的伸展作用吸引了地幔柱的流动, 则还需要进一步的研究。

致谢 在样品处理和实验过程中得到陈林丽和刘颖高级实验师的大力支持; 两位审稿人对本文提出了宝贵修改意见; 对此一并表示感谢!

References

Allen MB, Windley BF and Zhang C. 1992. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia. *Tectonophysics*, 220(1-4): 89-115

Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78(1-2): 1-24

Buddington AF and Lindsley DH. 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology*, 5(2): 310-357

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 266-580 (in

Chinese)

Eugster HP and Wones DR. 1962. Stability relations of the ferruginous Biotite, Annite. *Journal of Petrology*, 3(1): 82-125

Ganino C, Arndt NT, Zhou MF, Gaillard F and Chauvel C. 2008. Interaction of magma with sedimentary wall rock and magnetite ore genesis in the Panzihua mafic intrusion, SW China. *Mineralium Deposita*, 43(6): 677-694

Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ and He GQ. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287(1-4): 213-231

Gao J, Long LL, Reiner K, Qian Q, Liu DY, Xiong XM, Su W, Liu W, Wang YT and Yang FQ. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1221-1238

Gao J, Qian Q, Long LL, Zhang X, Li JL and Su W. 2009. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804-1816 (in Chinese with English abstract)

Gao J, Klemm R, Qian Q, Zhang X, Li JL, Jiang T and Yang YQ. 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, 499(1-4): 118-131

Gao JP, Li XZ, Yang HQ, Luo YP and Yao WG. 1991. A study on the geological characteristics and ore-finding prospects of Tekes basic body in Xinjiang. *Bull. Xi'an Inst. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci.*, (33): 95-144 (in Chinese with English abstract)

Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3-4): 627-640

Han BF, He GQ, Wang XC and Guo ZJ. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China. *Earth-Science Reviews*, 109(3-4): 74-93

Hanski EJ. 1992. Petrology of the Pechenga ferropicrites and cogenetic, Ni-bearing gabbro-wehrlite intrusions, Kola Peninsula, Russia. *Finland: Geological Survey of Finland Bulletin*, 367

Hou T, Zhang ZC and Pirajno F. 2012. A new metallogenic model of the Panzihua giant V-Ti-iron oxide deposit (Emeishan Large Igneous Province) based on high-Mg olivine-bearing wehrlite and new field evidence. *International Geology Review*, 54(15): 1721-1745

Huang QY and Zhu YF. 2012. Petrology and geochemistry of gabbro and magnetite-pyroxene vein in the Haladala mafic complex, southwestern Tianshan Mts., Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2199-2208 (in Chinese with English abstract)

Huang XL, Niu YL, Xu YG, Chen LL and Yang QJ. 2010. Mineralogical and geochemical constraints on the petrogenesis of post-collisional potassic and ultrapotassic rocks from western Yunnan, SW China. *Journal of Petrology*, 51(8): 1617-1654

Huang XL, Niu YL, Xu YG, Qiu HN, Ma JL and Zhong JW. 2013. Geochronology and geochemistry of Cenozoic basalts from eastern Guangdong, SE China: Constraints on the lithosphere evolution beneath the northern margin of the South China Sea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(3): 437-455

Juster TC, Grove TL and Perfit MR. 1989. Experimental constraints on the generation of FeTi basalts, andesites, and rhyodacites at the Galapagos spreading center, 85° W and 95° W. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94(B7): 9251-9274

Kröner A, Windley BF, Badarch G, Tomurtogoo O, Hegner E, Jahn BM, Gruschka S, Khain EV, Demoux A and Wingate MTD. 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian

- Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield. Geological Society of America Memoirs, 200: 181 - 209
- Lepage LD. 2003. ILMAT: An Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. Computers & Geosciences, 29 (5): 673 - 678
- Li XH, Li ZX, Wingate MT, Chung SL, Liu Y, Lin GC and Li WX. 2006. Geochemistry of the 755Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? Precambrian Research, 146(1-2): 1 - 15
- Li ZC, Li YJ, Li JH, Luan XD and Guo WJ. 2006. Geochemical characteristics of the Dahalajunshan Formation volcanic rocks and their implications on the tectonic setting in Awulale area. Xinjiang Geology, 24(2): 120 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Lin JF and Deng YH. 1996. Characteristics of the magnetite veins in Haladala gabbro massif in Xinjiang and their geological significance. Mineral Resources and Geology, 10(3): 165 - 171 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Wang YW, Tang PZ, Wang LJ, Wang JB and Liao Z. 2012. A debate on the special circumstance of rock forming and ore-forming of Haladala pluton, a mafic-ultramafic complex related to CuNi-VTiFe composite mineralization, in western Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2015 - 2028 (in Chinese with English abstract)
- Loucks RR. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. Geology, 18(4): 346 - 349
- Nicholls J. 1988. The statistics of Pearce element diagrams and the Chayes closure problem. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99(1): 11 - 24
- Pang KN, Li CS, Zhou MF and Ripley EM. 2008a. Abundant Fe-Ti oxide inclusions in olivine from the Panzhihua and Hongge layered intrusions, SW China: Evidence for early saturation of Fe-Ti oxides in ferrobasic magma. Contributions to Mineralogy and Petrology, 156(3): 307 - 321
- Pang KN, Zhou MF, Lindsley D, Zhao D and Malpas J. 2008b. Origin of Fe-Ti oxide ores in mafic intrusions: Evidence from the Panzhihua intrusion, SW China. Journal of Petrology, 49(2): 295 - 313
- Qian Q, Gao J, Klemd R, He G, Song B, Liu D and Xu R. 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China. International Journal of Earth Sciences, 98(3): 551 - 569
- Russell JK and Nicholls J. 1988. Analysis of petrologic hypotheses with Pearce element ratios. Contributions to Mineralogy and Petrology, 99(1): 25 - 35
- Sisson TW and Grove TL. 1993. Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism. Contributions to Mineralogy and Petrology, 113(2): 143 - 166
- Thy P, Leshner CE, Nielsen TFD and Brooks CK. 2006. Experimental constraints on the Skaergaard liquid line of descent. Lithos, 92(1-2): 154 - 180
- Tian W, Campbell IH, Allen CM, Guan P, Pan WQ, Chen MM, Yu HJ and Zhu WP. 2010. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from Northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(3): 407 - 425
- Toplis MJ and Carroll MR. 1995. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase-relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems. Journal of Petrology, 36(5): 1137 - 1170
- Wang YW, Wang JB, Wang LJ, Long LL, Tang PZ, Liao Z and Zhang HQ. 2010. Petrographical and litho-geochemical characteristics of the mafic-ultramafic complex related to CuNi-VTiFe composite mineralization: Taking the North Xinjiang as an example. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 401 - 412 (in Chinese with English abstract)
- Windley BF, Allen MB, Zhang C, Zhao ZY and Wang GR. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan range, Central Asia. Geology, 18(2): 128 - 131
- Wones D and Eugster H. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory, and application. In: American Mineralogist. Washington: Mineralogical Society of America, 50: 1228 - 1272
- Xu XY, Ma ZP, Xia LQ, Wang YB, Li XM, Xia ZC and Wang LS. 2005. SHRIMP dating of plagiogranite from Bayingou ophiolite in the Northern Tianshan Mountains. Geological Review, 51(5): 523 - 527 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG. 2006. Using basalt geochemistry to constrain Mesozoic-Cenozoic evolution of the lithosphere beneath North China Craton. Earth Science Frontiers, 13(2): 93 - 104 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Wei JX, Qiu HN, Zhang HH and Huang XL. 2012. Opening and evolution of the South China Sea constrained by studies on volcanic rocks: Preliminary results and a research design. Chinese Science Bulletin, 57(24): 3150 - 3164
- Xu YG, He B, Luo ZY and Liu HQ. 2013. Study on mantle plume and large igneous provinces in China: An overview and perspectives. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(1): 25 - 39 (in Chinese with English abstract)
- Xue YX and Zhou YF. 2009. Zircon SHRIMP chronology and geochemistry of the Haladala gabbro in southwestern Tianshan Mountains. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1353 - 1363 (in Chinese with English abstract)
- Yu X, Yang SF, Chen HL, Chen ZQ, Li ZL, Batt GE and Li YQ. 2011. Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. Gondwana Research, 20(2-3): 485 - 497
- Zhang YX, Li XD and Zhang J. 2000. Basic pluton and its tectonic setting in Kaladala of West Tianshan Mountains, China. Xinjiang Geology, 18(3): 258 - 263 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Robinson PT, Leshner CM, Keays RR, Zhang CJ and Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China. Journal of Petrology, 46(11): 2253 - 2280
- Zhu YF, Zhou J, Song B, Zhang LF and Guo X. 2006. Age of the "Dahalajunshan" Formation in Xinjiang and its distintegration. Geology in China, 33(3): 487 - 497 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZM, Zhao ZH, Xiong XL and Han JW. 2010. Petrogeochemistry of Late Paleozoic gabbroic rocks from Tekes County in West Tianshan Mountains. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 675 - 690 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 高纪璞, 李先梓, 杨合群, 罗玉鹏, 姚文光. 1991. 新疆特克斯基性岩体地质特征及找矿方向研究. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (33): 95 - 144
- 高俊, 钱青, 龙灵利, 张喜, 李继磊, 苏文. 2009. 西天山的增生造山过程. 地质通报, 28(12): 1804 - 1816
- 黄秋岳, 朱永峰. 2012. 哈拉达拉辉长岩以及其中磁铁矿-辉石脉的岩石学和地球化学研究. 岩石学报, 28(7): 2199 - 2208
- 李注苍, 李永军, 李景宏, 栾新东, 郭文杰. 2006. 西天山阿吾拉勒一带大哈拉军山组火山岩地球化学特征及构造环境分析. 新疆地质, 24(2): 120 - 124
- 林锦富, 邓燕华. 1996. 新疆哈拉达拉辉长岩体中磁铁矿脉特征及

- 其地质意义. 矿产与地质, 10(3): 165-171
- 龙灵利, 王玉往, 唐萍芝, 王莉娟, 王京彬, 廖震. 2012. 西天山 CuNi-VTiFe 复合型矿化镁铁-超镁铁杂岩——哈拉达拉岩体成矿背景特殊性讨论. 岩石学报, 28(7): 2015-2028
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 唐萍芝, 廖震, 张会琼. 2010. CuNi-VTiFe 复合型矿化镁铁-超镁铁杂岩体岩相学及岩石地球化学特征: 以新疆北部为例. 岩石学报, 26(2): 401-412
- 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, 266-580
- 徐学义, 马中平, 夏林圻, 王彦斌, 李向民, 夏祖春, 王立社. 2005. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩锆石 SHRIMP 测年及其意义. 地质论评, 51(5): 523-527
- 徐义刚. 2006. 用玄武岩组成反演中-新生代华北岩石圈的演化. 地学前缘, 13(2): 93-104
- 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 刘海泉. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望. 矿物岩石地球化学通报, 32(1): 25-39
- 薛云兴, 朱永峰. 2009. 西南天山哈拉达拉岩体的锆石 SHRIMP 年代学及地球化学研究. 岩石学报, 25(6): 1353-1363
- 张云孝, 李向东, 张冀. 2000. 西天山喀拉达拉基性岩体及其构造背景. 新疆地质, 18(3): 258-263
- 朱永峰, 周晶, 宋彪, 张立飞, 郭璇. 2006. 新疆"大哈拉军山组"火山岩的形成时代问题及其解决方案. 中国地质, 33(3): 487-497
- 朱志敏, 赵振华, 熊小林, 韩江伟. 2010. 西天山特克斯晚古生代辉长岩岩石地球化学. 岩石矿物学杂志, 29(6): 675-690