

新疆东天山哈尔里克二叠纪奥莫尔塔格碱性花岗岩特征、成因及构造意义

陈希节¹, 张奎华², 张关龙², 周 健²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学重点实验室, 北京 100037; 2. 中国石化股份胜利油田分公司勘探开发研究院 西部分院, 山东 东营 257045)

摘要: 新疆哈尔里克山东段发育的奥莫尔塔格碱性花岗岩岩体侵位于小铺东花岗岩中, 岩体岩性较为均一, 呈紫红色, 含有典型的碱性镁铁矿物镁钠铁闪石和霓石, 副矿物有锆石、钛铁矿以及萤石等。化学成分上, 该岩体富硅、碱、铁, 贫钙、镁, 低铝, 富 Rb、Th、Cs、U、Zr, 贫 Ba、Sr、P、Ti 等, Nb、Ta、Hf 和 Ga 等元素的含量也较高, 10^4 Ga/Al 值变化于 3.41~3.65 之间。稀土元素总量较高, 配分模式右倾, 并具有明显的 Eu 负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.30 \sim 0.33$); 具有较高的锆饱和温度 ($940 \sim 952^\circ\text{C}$, 平均为 947°C)。锆石 LA-ICP-MS 定年测得代表性样品的 U-Pb 年龄为 $288.9 \pm 1.6 \text{ Ma}$, 表明该岩体属于早二叠世岩浆活动的产物。奥莫尔塔格碱性花岗岩具有偏高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+8.7 \sim +12.5$) 和较年轻的单阶段模式年龄 ($600 \sim 430 \text{ Ma}$), 并以具较高的 Y/Nb 值 ($2.92 \sim 3.17$) 特征类似于 A2 型花岗岩。结合区域构造背景和岩体的地球化学特征分析, 认为奥莫尔塔格 A2 型碱性花岗岩是新生地壳发生部分熔融形成相当于英云闪长岩、花岗闪长岩等钙碱性的岩石后, 它们作为源岩发生再次部分熔融的产物。

关键词: 碱性花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 岩石成因; 后碰撞; 东天山

中图分类号: P588.121; P597⁺.3; P588.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2016)06-0929-18

Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of the Permian Omoertage alkaline granites in Harlik area, Xinjiang

CHEN Xi-jie¹, ZHANG Kui-hua², ZHANG Guan-long² and ZHOU Jian²

(1. Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China;
2. West Branch of Exploration and Development Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield, Dongying 257045, China)

Abstract: Located in the east segment of Harlik, the Omoertage alkaline intrusion (OMTG) was emplaced in Xiaopudong calc-alkaline granitic pluton during the Late Paleozoic. The purplish red OMTG alkaline granites exhibit uniform micrographic texture and contain typical alkaline ferromagnesian minerals such as arfvedsonite and aegirine and accessory minerals like zircon, ilmenite and fluorite. Geochemically, the alkaline granites are rich in silicon, alkalis, iron, and poor in calcium and magnesium, and show enrichment of Rb, Cs, Th, U and Zr and depletion of Ba, Sr, P and Ti. They also have relatively high concentrations of Nb, Ta, Hf, Ga, and display high (10^4 Ga/Al) values (3.41~3.65) and strong Eu depletions ($\delta \text{Eu} = 0.30 \sim 0.33$). Zircon saturation temperatures of OMTG alkaline granites vary from 940 to 952°C , which is in agreement with the characteristics of typical A-type granite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yielded a mean age of $288.9 \pm 1.6 \text{ Ma}$, indicating that the alkaline intrusion was formed during the Early Permian. The OMTG granites have high $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($+8.7 \sim +12.5$) and young one-stage Hf model ages ($600 \sim 430 \text{ Ma}$). The alkaline granites also show higher

收稿日期: 2016-07-10; 接受日期: 2016-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41403029); 中国博士后科学基金会资助项目(2014M550082); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160022)

作者简介: 陈希节(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 岩石大地构造专业, E-mail: chenxijie@cags.ac.cn。

Y/Nb ratios (2.92~3.17), suggesting that they belong to the A2 type granite. An integrated study of the tectonic setting and geochemical characteristics show that the OMTG A2-type granite experienced fractional crystallization by the alkaline magma which was produced by the partial melting of Neoproterozoic-Early Paleozoic juvenile crust induced by slab break-off after post-collision events.

Key words: alkaline granites; zircon U-Pb dating; geochemistry; petrogenesis; post-collisional; East Tianshan Mountains

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41403029); China Postdoctoral Science Foundation (2014M550082); China Geological Survey Project (DD20160022)

东天山造山带处于西伯利亚和塔里木两大板块之间(马瑞士等, 1997; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2008), 以晚古生代新陆壳增生和小陆块汇聚为特征并发育有强烈的构造、岩浆活动和丰富多样的矿产资源(Jahn *et al.*, 2000; Charvet *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009a, 2009b), 自北向南分别为克拉麦里-哈尔里克岛弧带、吐哈地块、觉罗塔格岛弧带、中天山地块及南天山岛弧带(Charvet *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2008; 雷如雄等, 2013)(图 1)。克拉麦里-哈尔里克岛弧带位于哈萨克斯坦板块东南部, 其北侧的库兰卡孜干造山带为西伯利亚板块南缘的晚古生代岛弧, 两者之间的克拉麦里-麦钦乌拉断裂带和沿此带分布的蛇绿岩套代表着晚石炭世碰撞带(马瑞士等, 1997; 韩宝福等, 2006)。在

东准克拉麦里-哈尔里克岛弧带广泛发育大量的具有正的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值的显生宙碱性花岗岩(王中刚, 1994; Han *et al.*, 1997; 苏玉平等, 2006), 表明幔源物质在其形成过程中起关键作用, 与福建沿海和东北地区以及澳大利亚等地的显生宙 A 型花岗岩形成鲜明对比(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2002; Qiu *et al.*, 2004; 肖娥等, 2007; 邱检生等, 2011)。

A 型花岗岩的概念最早由 Loiselle 和 Wones (1979) 提出, 其最初的定义是同时强调其碱性(alkaline)、无水(anhydrous)和非造山作用(anorogenic)的特征。Whalen 等(1987) 针对岩石学特征及识别标志提出以 Ga/Al 值为基础的地球化学图解, 将 A 型

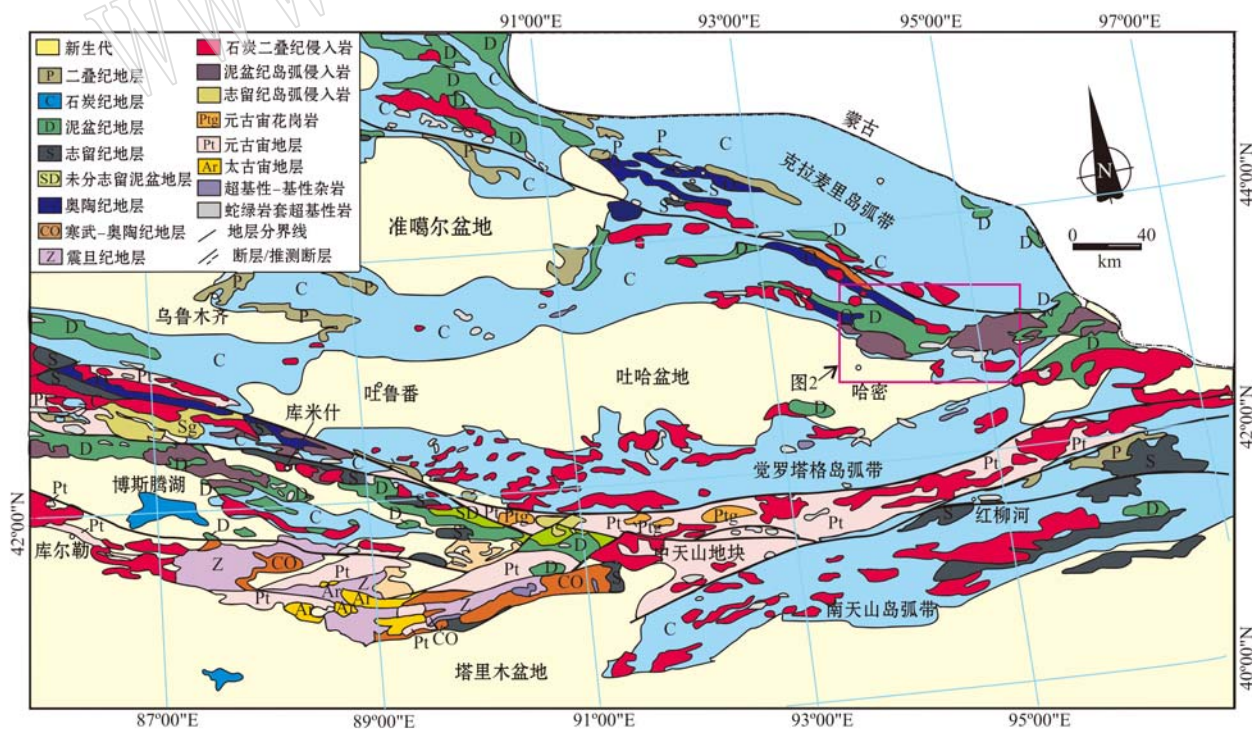


图 1 新疆北部及其邻区构造框架图(Xiao *et al.*, 2004)

Fig. 1 Sketch geological map of northern Xinjiang and adjacent areas (after Xiao *et al.*, 2004)

花岗岩与 I、S、M 型花岗岩区别开来。而 Eby(1992) 在其基础上区分出 A1 和 A2 两种构造环境的 A 型花岗岩, 它们的元素组成和形成构造环境不同, 其中 A1 型具低 SiO_2 含量、高 ALK 和 NK/A 值, 相对富氯低氟, 具较低的 Y/Nb 值(具有 OIB 源区特征)(刘昌实等, 2003), 发育于大陆裂谷或板内岩浆活动过程中; 而 A2 型具有较高的 SiO_2 含量, 相对贫氯富氟, 具高的 Ga/Al 和 Y/Nb 值(具 IAB 源区特征)(刘昌实等, 2003), 形成环境既可以与非造山岩浆活动有关, 也可以形成于后碰撞环境。在 IUGS 火成岩命名分类小组提出的 QAPF 分类图解(Le Maitre *et al.*, 1989)中, 碱性花岗岩与碱长花岗岩处在同一位置, 但常含有碱性镁铁质矿物, 如钠铁闪石和霓石, 同时在元素化学成分上以富硅、富碱及低铝为特征。

克拉麦里-哈尔里克碱性花岗岩带全长 500 km, 是新疆已知最长的、碱性花岗岩体最多同时也是成矿作用最好的一条碱性岩带, 不仅有像苏吉泉这样的铝质 A 型花岗岩(苏玉平等, 2006), 也发育以萨北(唐红峰等, 2007)、黄羊山(苏玉平等, 2008)、乌伦古(Han *et al.*, 1997)为代表的大规模碱性花岗岩体。Han 等(1997)将乌伦古碱性花岗岩体划分为含碱性角闪石和碱性辉石的过碱系列(300 Ma)和以碱性花岗岩和碱性二长花岗岩为主的铝质系列(270 Ma), 并认为过碱系列花岗岩是由于亏损地幔发生高度的分异作用形成的。苏玉平等(2008)等认为黄羊山碱性花岗岩(305 Ma)可能是源于花岗闪长质岩浆的分异结晶; 刘家远等(1996)提出“地幔物质活动+脱水的硅铝质源岩部分熔融+花岗质岩浆分异+引张环境”的复合模式来解释乌伦古碱性花岗岩的成因; 顾连兴等(1990)则认为哈尔里克碱性花岗岩可能是由于先存花岗岩受到后期碱交代作用形成的。虽然最近十几年来对克拉麦里-哈尔里克碱性花岗岩带的研究取得较多进展, 但主要集中在阿尔泰南缘和东、西准噶尔地区, 对于东天山哈尔里克地区的碱性花岗岩研究相对较弱。汪传胜等(2009a)通过对奥莫尔塔格碱性花岗岩(287 Ma)的研究认为其可能由石英正长岩经分离结晶作用演化形成, 而黄伟(2014)认为哈尔里克地区石城子、沁城、巴里坤以及下马崖碱性岩体(320~289 Ma)形成于后碰撞伸展背景下的幔源岩浆底侵作用。目前对于哈尔里克地区的碱性花岗岩形成时代以及碱性岩浆作用的成因机制仍

存在较大分歧(顾连兴等, 1990; Han *et al.*, 1997; 汪传胜等, 2009a; 黄伟, 2014)。

在哈尔里克地区, 新疆区调队(1984)在 1:20 万区域地质调查中发现沁城、下马崖、八大石等多处碱性花岗岩体。本文拟通过对东天山克拉麦里-哈尔里克碱性花岗岩带东段的奥莫尔塔格二叠纪碱性花岗岩进行详细的岩石学、矿物学、全岩主微量元素和锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究, 并结合区域碱性花岗岩以及其他晚古生代岩浆作用, 深入剖析其地球化学性质、岩浆源区特征, 以期为进一步探讨东天山晚古生代岩浆作用及构造环境提供进一步的岩石学证据。

1 岩体地质及岩相学特征

奥莫尔塔格碱性花岗岩出露在东天山伊吾县下马崖乡东南 10 km 处(图 2), 构造上位于北天山哈尔里克岛弧北缘, 出露面积约 15 km², 在地表呈“C”形, 侵位于东天山早二叠世小铺东花岗岩体(296 Ma)中(汪传胜等, 2009a)。两者大部分接触关系不清, 局部呈侵位接触, 而小铺东岩体则侵位于中下奥陶统荒草坡群、下泥盆统大南湖组(D_1d)和下石炭统居里能组(C_{1j})火山岩及变沉积岩中。奥莫尔塔格碱性花岗岩岩性均一, 未发生明显变形。从野外露头 and 手标本上看, 碱性花岗岩呈灰白色到紫红色, 具有细-中粒花岗结构, 块状构造。碱性花岗岩中的矿物组分有碱性长石(~55%)、石英(~25%)和碱性暗色矿物(~15%)等, 副矿物主要有榍石、锆石、萤石和钛铁矿等。碱性长石主要为条纹长石, 部分发生钠黝帘石化、高岭土化和氧化铁等蚀变作用, 致使手标本呈紫红色。石英呈他形粒状, 大部分边缘平滑, 波状消光, 与碱性长石相互交生发育(图 3a)。暗色矿物主要为碱性角闪石、霓石和少量黑云母, 电子探针暗色矿物成分测定(表 1)显示长柱状碱性角闪石以镁钠铁闪石为主, 呈半自形-他形, 具有显著的墨蓝色多色性(图 3b); 霓石也多呈半自形-他形, 粒径为 0.5~1.0 mm, 镜下呈绿色, 辉石式解理清晰可见, 且常见霓石被镁钠铁闪石交代的现象(图 3a); 黑云母属于铁质黑云母。碱性铁镁矿物大多呈不规则状镶嵌于碱性长石和石英的间隙中, 指示它们为晚期结晶的产物。

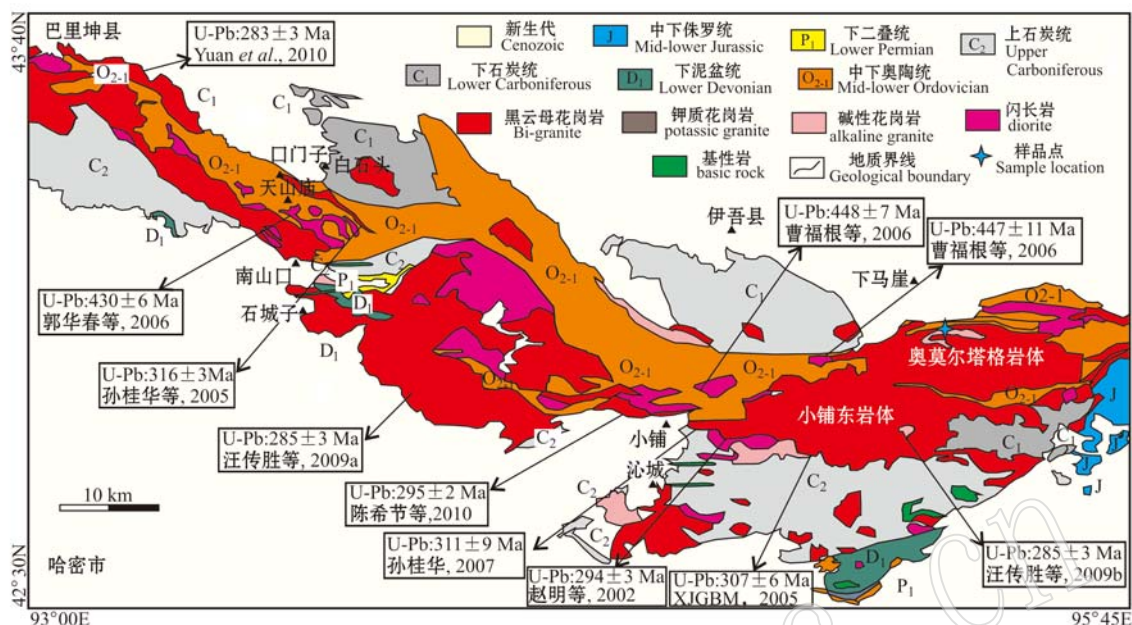


图 2 东天山哈尔里克地区的岩浆岩分布图[据孙桂华(2007)修改]

Fig. 2 The distribution of igneous rocks in Harlik area, East Tianshan Mountains (modified after Sun Guihua, 2007)

2 测试方法

本次选取奥莫尔塔格碱性花岗岩样品进行了详细的岩石学、矿物学、全岩主微量元素和锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素测试分析,具体采样位置示于图 2。

碱性暗色矿物的电子探针成分测定在中国地质科学院地质研究所采用 JEOLJXA 8100 型电子探针仪完成,矿物定量分析的电子探针工作条件为:加速

电压 15.0 kV,束电流 10^{-8} A,束斑直径 10 μm 。采用美国国家标准局的普通角闪石作为标样,所有测试数据都进行 ZAF 处理。

全岩地球化学分析前先经岩相学观察与鉴定,以选出新鲜、均匀且具代表性的样品,然后进行破碎、研磨至 200 目以上。前期物理处理由廊坊地质调查院完成。全岩主量元素和微量元素含量测定在武汉上谱分析测试中心利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,而 SiO_2 含量、水含量以及烧失量则采用湿化学法测定;用于 ICP-MS 分析的样品处理流程

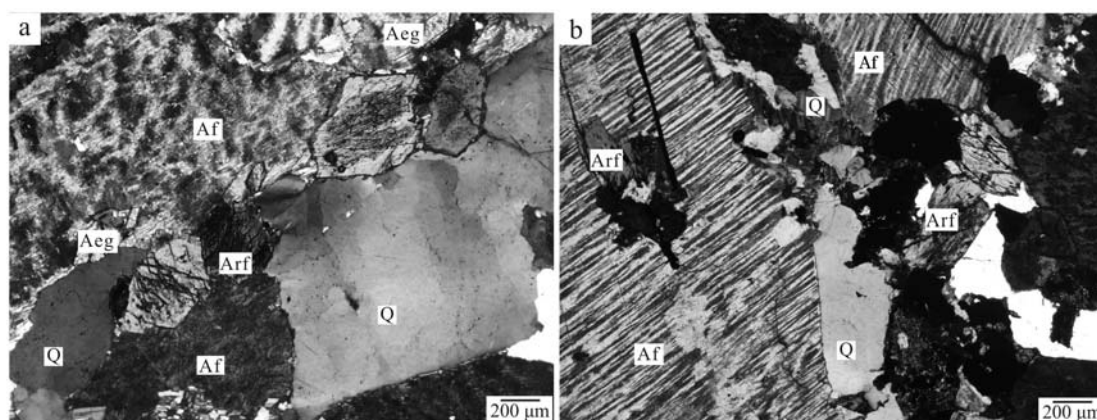


图 3 奥莫尔塔格碱性花岗岩正交镜下显微照片

Fig. 3 Representative microphotographs of OMTG alkaline granite (crossed nicols)

Q—石英; Af—碱性长石; Arf—镁钠铁闪石; Aeg—霓石

Q—quartz; Af—alkali feldspar; Arf—arfvedsonite; Aeg—aegirine

如下:将 200 目样品置于 105℃ 烘箱中烘干 12 h;准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;先后依次缓慢加入 1 mL 高纯硝酸和 1 mL 高纯氢氟酸;将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 24 h 以上;待溶样弹冷却,开盖后置于 140℃ 电热板上蒸干,然后加入 1 mL HNO₃ 并再次蒸干(确保溶样弹壁无液体);加入 1 mL 高纯硝酸、1 mL MQ 水(去离子水)和 1 mL 内标 In(浓度为 1×10^{-6}),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190℃ 烘箱中加热 12 h 以上;将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2% HNO₃ 稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。

对锆石 U-Pb 年龄测定样品,在避免污染的要求下,对全岩样品进行破碎、淘洗和磁选以及重液分离,筛选出锆石精样;在此基础上,挑选出表面平整光洁,具不同长宽比例、不同柱锥面特征和颜色的锆石颗粒。将挑选出的锆石颗粒用环氧树脂胶结,待固结后精磨至锆石颗粒核部露出,抛光成样品靶以待测试。测定前采用装有阴极荧光探头的扫描电镜对抛光后的锆石样品进行阴极发光(CL)图像拍摄,以了解被测锆石内部的结构,并以此作为锆石年龄测定选取分析点位的依据。锆石 U-Pb 年龄测定和 Hf 同位素分析在中国地质科学院地质研究所进行,采用与 Agilent 7500s ICP-MS 连接起来的 New Wave 213 nm 激光系统取样。激光束斑直径为 30 μm ,频率为 5 Hz。样品经剥蚀后,由 He 气作为载气,再和 Ar 气混合后进入 ICP-MS 进行分析。U-Pb 分馏根据澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 608 ± 5 Ma, Jackson *et al.*, 2004) 来校正,采用锆石标样 Mud Tank (732 ± 5 Ma, Black and Gulson, 1978) 作为内标以控制分析精度。每个测试流程的开始和结尾均分别测 2 个 GJ 标样,另外测试 1 个 MT 标样,其间一般夹 10 个待测样品点。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 的计数由 Glitter (ver. 4.1.4) 获得。详细的分析方法和流程类似于 Griffin 等(2004) 和 Jackson 等(2004)。由于 ^{204}Pb 的信号极低,并且载气中 ^{204}Hg 有干扰,该方法不能直接精确测得其含量,因此使用嵌入 Excel 的 ComPbCorr# 3-15G 程序(Andersen, 2002)来进行铅校正。年龄谱和图用 Isoplot 程序(ver. 21 49, Ludwig, 2001)获得。

在锆石 U-Pb 年龄分析的基础上,对样品进行锆石微区 Hf 同位素分析。激光束斑为 35 μm ,采用 He 气作为剥蚀物质载气。本次实验的锆石标样 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,314 \pm 20$,与目前用溶液法

获得数值在误差范围内相一致(Woodhead *et al.*, 2004)。详细的实验操作流程和原理可以参见相关方面的文献(Wu *et al.*, 2006)。

3 分析结果

3.1 矿物化学

本次选取代表性的碱性暗色矿物进行了电子探针矿物成分分析,结果分别列于表 1 和表 2。由表中数据可以看出,奥莫尔塔格碱性花岗岩中暗色矿物主要为镁钠铁闪石和霓石。相对普通角闪石,镁钠铁闪石更富硅($\text{SiO}_2 = 52.18\% \sim 53.90\%$)、富铁($\text{FeO}_t = 17.37\% \sim 21.96\%$)、富镁($\text{MgO} = 8.53\% \sim 11.73\%$),根据角闪石分类命名方案(Leake *et al.*, 1997),该角闪石均属于镁钠铁闪石(表 1);霓石则富硅($\text{SiO}_2 = 51.97\% \sim 53.55\%$)、富铁($\text{FeO}_t = 27.98\% \sim 28.89\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O} = 8.43\% \sim 12.37\%$)(表 2)。

3.2 元素地球化学

3.2.1 主量元素特征

碱性花岗岩的 SiO_2 含量在 $74.91\% \sim 76.30\%$ 之间,平均为 75.58% 。全碱含量较高, ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) = $8.47\% \sim 9.37\%$,富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.03 \sim 1.25$),低铝(Al_2O_3 平均为 11.89%),烧失量较低($\text{LOI} = 0.24\% \sim 0.38\%$),显著富铁, $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO}) = 0.92 \sim 0.94$ 。 TiO_2 、 CaO 、 MgO 的含量较低($\text{TiO}_2 = 0.23\% \sim 0.27\%$, $\text{CaO} = 0.08\% \sim 0.13\%$, $\text{MgO} = 0.09\% \sim 0.13\%$)(表 3)。在 TAS 图解上,投影于碱性和亚碱性花岗岩边界区域(图 4a),A/CNK 和 A/NK 值分别为 $0.93 \sim 1.01$ 和 $0.95 \sim 1.02$,属于过碱准铝质系列(图 4b)。在 Dall' Agnol 和 Oliveira (2007) 提出的钙碱性、还原型 A 型和氧化型 A 型花岗岩判别图解上,所有样品均落在还原型 A 型花岗岩区域(图 5)。锆石饱和温度变化于 $940 \sim 952^\circ\text{C}$ 之间,平均为 947°C (Watson and Harrison, 1984),明显高于 I 型和 S 型花岗岩的锆石饱和温度,符合过碱性 A 型花岗岩锆石饱和温度高的特征(刘昌实等,2003)。上述特征表明,本区碱性花岗岩与典型的碱性花岗岩一样,具有高硅、高碱、富铁、低镁、低钙和高的锆石饱和温度的特征。

3.2.2 稀土及微量元素特征

碱性花岗岩的稀土元素含量较高,稀土元素总量在 $216.57 \times 10^{-6} \sim 272.76 \times 10^{-6}$,平均 247.2×10^{-6} ,

表 1 奥莫尔塔格碱性花岗岩镁钠铁闪石电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 EPMA results of arfvedsonite from OMTG alkaline granites in Yiwu, East Tianshan Mountains

测点	7	8	9	10	11	12	15	16	20	21	22
SiO ₂	53.51	52.72	53.10	53.24	53.40	52.24	52.18	53.90	53.39	53.26	52.81
TiO ₂	0.51	0.55	0.53	0.28	0.75	0.69	0.40	0.35	0.46	0.49	0.36
Al ₂ O ₃	1.13	1.45	1.60	1.54	1.76	1.45	1.17	1.40	1.44	1.33	1.24
FeO ^{tot}	21.32	20.17	21.62	19.74	17.37	17.87	21.61	20.76	21.15	21.74	21.96
MnO	1.56	1.73	1.58	1.56	1.84	1.63	1.72	1.55	1.55	1.56	1.69
MgO	8.91	9.86	9.23	10.49	11.73	11.37	8.53	9.56	9.60	9.09	9.02
CaO	1.44	2.85	1.60	1.96	2.66	4.55	3.51	1.73	1.85	1.43	1.61
Na ₂ O	7.73	7.21	7.20	6.94	6.89	6.91	7.44	7.23	6.85	7.41	7.22
K ₂ O	1.32	1.30	1.26	1.26	1.02	0.99	1.24	1.26	1.41	1.33	1.32
Cr ₂ O ₃	—	—	0.04	0.03	—	0.03	0.03	—	—	0.01	—
NiO	0.00	—	0.02	—	—	0.02	—	—	0.04	—	—
Total	97.42	97.84	97.77	97.05	97.42	97.74	97.83	97.76	97.72	97.65	97.23
Si ⁴⁺	7.97	7.86	7.90	7.90	7.86	7.77	7.88	7.95	7.91	7.92	7.91
Ti ⁴⁺	0.06	0.06	0.06	0.03	0.08	0.08	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04
Al ³⁺	0.20	0.25	0.28	0.27	0.31	0.25	0.21	0.24	0.25	0.23	0.22
Fe ²⁺	1.95	2.04	2.05	1.77	1.72	1.90	2.36	1.80	1.91	1.99	2.04
Fe ³⁺	0.71	0.47	0.64	0.68	0.42	0.33	0.37	0.76	0.71	0.71	0.71
Mn ²⁺	0.20	0.22	0.20	0.20	0.23	0.21	0.22	0.19	0.19	0.20	0.21
Mg ²⁺	1.98	2.19	2.05	2.32	2.57	2.52	1.92	2.10	2.12	2.01	2.01
Ca ²⁺	0.23	0.46	0.25	0.31	0.42	0.72	0.57	0.27	0.29	0.23	0.26
Na ⁺	2.23	2.08	2.08	2.00	1.97	1.99	2.18	2.07	1.97	2.14	2.10
K ⁺	0.25	0.25	0.24	0.24	0.19	0.19	0.24	0.24	0.27	0.25	0.25

注: FeO^{tot}为全铁,角闪石分子式中离子系数以 23 个氧原子计算,其中镁钠铁闪石的 Fe³⁺和 Fe²⁺按 Schumacher(1997)方法计算。

表 2 奥莫尔塔格碱性花岗岩霓石电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 2 EPMA results of aegirine from OMTG alkaline granites in Yiwu, East Tianshan Mountains

测点	6	4	5	13	14	17	18	19	25	27	28
SiO ₂	53.55	53.11	53.55	53.08	53.08	52.49	52.51	52.42	52.17	51.98	51.97
TiO ₂	0.06	0.12	0.06	0.30	0.29	0.34	0.41	0.44	0.16	0.24	0.32
Al ₂ O ₃	0.53	0.38	0.53	0.33	0.32	0.31	0.34	0.33	0.34	0.38	0.35
FeO ^{tot}	28.89	27.98	28.89	28.65	28.57	28.57	28.64	28.79	28.23	28.40	28.34
MnO	0.49	0.26	0.49	0.48	0.52	0.65	0.64	0.55	0.65	0.95	0.76
MgO	3.20	0.99	3.20	0.38	0.38	0.59	0.64	0.44	0.85	1.19	1.05
CaO	2.48	2.57	2.48	1.96	1.90	2.65	2.67	2.02	3.07	4.11	4.01
Na ₂ O	8.43	11.85	8.43	12.37	12.34	11.76	11.48	12.08	11.77	10.67	10.92
K ₂ O	0.08	0.03	0.08	—	0.01	0.01	0.00	0.02	—	—	0.02
Cr ₂ O ₃	0.02	0.21	—	—	0.02	—	—	—	0.00	0.01	0.01
NiO	0.03	0.02	—	—	—	—	—	0.01	—	—	—
Total	97.74	97.51	97.70	97.54	97.43	97.39	97.32	97.09	97.23	97.95	97.74
Si ⁴⁺	8.17	8.04	8.00	8.05	8.06	8.09	8.09	8.01	8.06	8.08	8.01
Ti ⁴⁺	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04
Al ³⁺	0.10	0.07	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07
全 Fe	3.68	3.68	3.75	3.77	3.76	3.77	3.78	3.81	3.74	3.74	3.74
Mn ²⁺	0.06	0.03	0.06	0.06	0.07	0.09	0.09	0.07	0.09	0.13	0.10
Mg ²⁺	0.73	0.23	0.74	0.09	0.09	0.14	0.15	0.10	0.20	0.28	0.25
Ca ²⁺	0.41	0.43	0.41	0.33	0.32	0.45	0.45	0.34	0.52	0.69	0.68
Na ⁺	2.49	3.61	2.53	3.77	3.77	3.60	3.52	3.71	3.61	3.26	3.34
K ⁺	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注: FeO^{tot}为全铁,霓石分子式中离子系数以 23 个氧原子计算。

表 3 奥莫尔塔格碱性花岗岩主量元素测试结果 $w_B/\%$
Table 3 Major element compositions of OMTG alkaline granites of Yiwu, East Tianshan Mountains

样号	TS8-1	TS8-2	TS8-3	TS8-4
SiO ₂	76.17	76.30	74.91	74.95
TiO ₂	0.23	0.23	0.27	0.27
Al ₂ O ₃	11.83	11.48	12.14	12.11
FeO	1.38	1.36	1.50	1.52
MnO	0.05	0.05	0.08	0.08
MgO	0.10	0.09	0.13	0.13
CaO	0.10	0.08	0.13	0.11
Na ₂ O	3.86	3.79	4.56	4.60
K ₂ O	4.82	4.68	4.70	4.77
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.03
H ₂ O ⁺	0.00	0.00	0.04	0.00
LOI	0.34	0.24	0.38	0.32
Total	98.90	98.33	98.87	98.88
K ₂ O/Na ₂ O	1.25	1.24	1.03	1.04
Fe/Fe + Mg	0.94	0.94	0.92	0.92
ALK	8.68	8.47	9.25	9.37
A/CNK	1.01	1.00	0.95	0.93
A/NK	1.02	1.01	0.96	0.95
A.R.	6.33	6.48	7.13	7.57
t/℃	940	949	952	948

富集轻稀土元素,轻重稀土元素比值(LREE/HREE)变化于 5.24~6.20 之间,平均为 5.69;(La/Yb)_N 平均为 4.98,其中轻稀土元素分馏程度较重稀土元素明显,(La/Sm)_N 和 (Gd/Lu)_N 分别为 1.64~2.04 和 1.76~2.11(表 4);Eu 明显亏损,δEu=0.30~0.33,表明岩石经历了强烈的斜长石结晶分异作用。稀土元素配分图显示出向右倾斜的“V”形曲线(图 6a)。

微量元素组成上,奥莫尔塔格碱性花岗岩富 Rb、Cs、Th、U,贫 Sr、Ba、Sc(图 6b),其 Rb/Sr、Rb/Ba 值较高,分别为 2.98~10.43 和 3.45~5.55。此外,P、Ti 等不相容元素也显示出亏损的特征,指示岩体经历了高程度的分离结晶作用,分离结晶矿物主要为斜长石、磷灰石和钛铁矿等。与典型碱性花岗岩的特征一样,奥莫尔塔格碱性花岗岩富含高场强元素 Nb、Zr、Y、Ga 等,这些元素明显高于同地区的非碱性花岗岩类中的含量。同时具有较高的 Ga/Al 值,10⁴ Ga/Al 值在 3.41~3.65 之间,平均 3.58,而该地区非碱性岩的相应值在 0.85~2.41 之间,平均

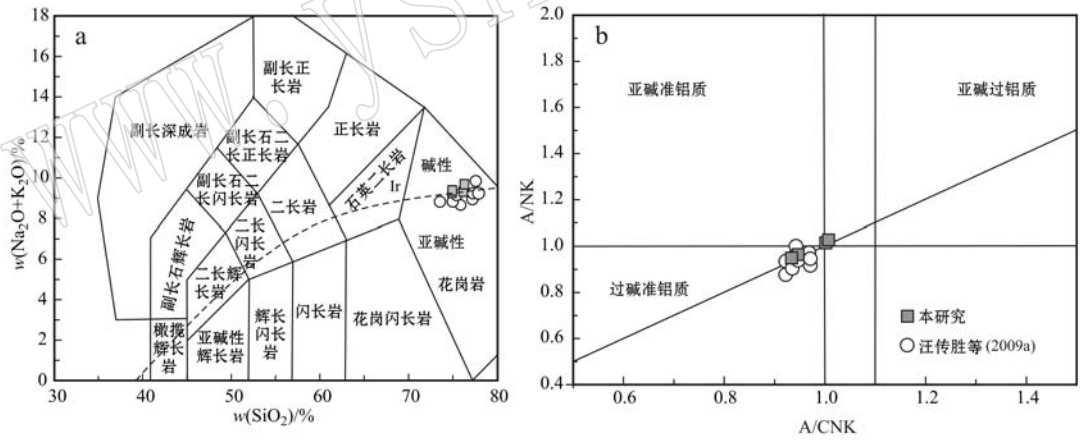


图 4 奥莫尔塔格碱性花岗岩 TAS 图(a, 据 Middlemost, 1994)和 A/NK - A/CNK 关系图(b, 据 Maniar 和 Piccoli, 1989)
Fig. 4 TAS diagrams (a, after Middlemost, 1994) and A/CNK-A/NK plot (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of OMTG alkaline granite in Yiwu, East Tianshan Mountains

为 1.66,两者明显不同(汪传胜等,2009b)。在不相容元素蛛网图(图 6b)上,碱性花岗岩的曲线呈右倾斜,具有明显的 Ba、Sr、P、Ti 负异常,与典型的非造山花岗岩的曲线形态一致,与哈尔里克地区早二叠世石英碱性正长岩和小铺东高钾钙碱性岩体的岩石化学、微量元素及稀土元素特征较为相近(图 6),只是总量上较钙碱性岩体较大,表现出同源岩浆特征。

在 Whalen 等(1987)提出的以 Ga/Al 值为基础的多种判别图上,奥莫尔塔格碱性岩体投影于 A 型花岗岩区域(图 7)。在 Eby(1992)提出的 Y - Ce - Nb 和 3 Ga - Y - Nb 的三角判别图解中,样品均投影在 A2 型花岗岩区域(图 8a、8b);同时在 Y/Nb - Ce/Nb 和 Y/Nb - Rb/Nb 的分类图解中(图 8c、8d),4 个样品也投影在 A2 型花岗岩区域。

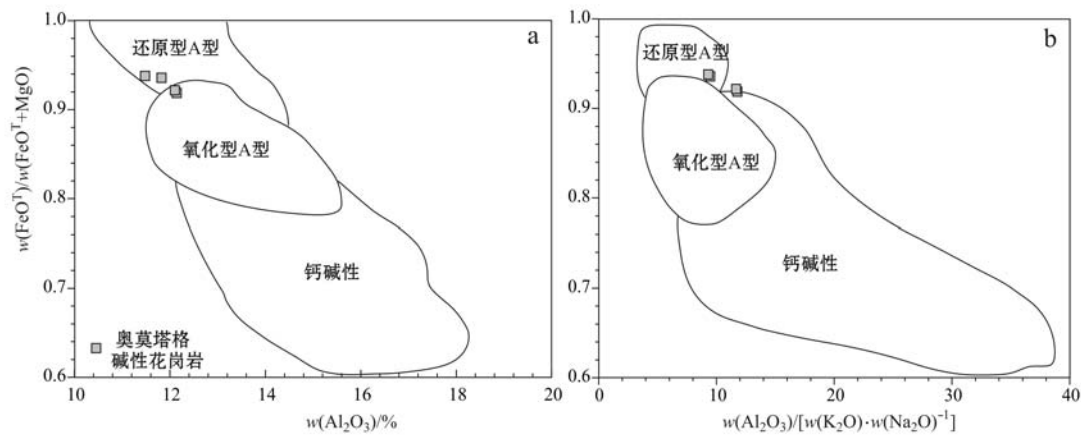


图 5 奥莫尔塔格碱性花岗岩 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Na}_2\text{O}^{-1})$ 关系图
(底图据 Dall’Agnol and Oliveira, 2007)

Fig. 5 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$ versus Al_2O_3 and $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Na}_2\text{O}^{-1})$ diagrams of the OMTG alkaline granite (after Dall’Agnol and Oliveira, 2007)

表 4 奥莫尔塔格碱性花岗岩微量元素测试结果

$w_{\text{B}}/10^{-6}$

Table 4 Trace element compositions of OMTG alkaline granites in Yiwu, East Tianshan Mountains

样号	TS8-1	TS8-2	TS8-3	TS8-4	样号	TS8-1	TS8-2	TS8-3	TS8-4
Li	1.60	1.57	21.74	21.86	Dy	8.65	8.87	12.60	12.50
Be	3.63	4.08	3.47	3.64	Ho	1.57	1.70	2.32	2.28
Sc	4.55	4.49	4.48	4.45	Er	4.54	4.70	6.21	6.14
V	6.52	6.78	6.82	6.54	Tm	0.66	0.66	0.88	0.87
Cr	0.83	0.69	0.53	0.43	K	39 991	38 874	39 003	39 614
Co	0.18	0.16	0.25	0.19	Al	62 588	60 764	64 264	64 066
Ni	1.09	0.92	0.95	0.80	P	135.93	147.82	137.12	150.28
Cu	1.37	1.43	1.06	0.97	Yb	4.20	4.43	5.59	5.54
Zn	48.64	48.11	60.21	59.17	Lu	0.65	0.67	0.81	0.80
Ga	21.37	22.10	23.47	23.13	Hf	9.74	10.47	11.41	11.29
Rb	111.65	114.23	112.58	112.29	Ta	0.96	0.94	1.21	1.17
Sr	37.42	37.87	10.79	10.77	Pb	20.47	20.87	10.04	9.97
Y	42.49	44.06	63.10	62.83	Th	10.40	10.82	13.70	13.97
Zr	448.89	481.97	525.59	511.79	U	1.93	1.96	3.31	3.36
Nb	14.55	14.98	19.89	19.82	ΣREE	216.57	227.98	272.76	271.56
Sn	3.98	3.92	4.21	4.28	LR/HR	6.05	6.20	5.27	5.24
Cs	0.99	1.04	1.14	1.13	Rb/Sr	2.98	3.02	10.43	10.43
Ba	32.38	32.37	20.54	20.22	Rb/Ba	3.45	3.53	5.48	5.55
La	33.08	34.95	38.28	38.42	Y/Nb	2.92	2.94	3.17	3.17
Ce	86.09	90.83	99.38	98.84	Ce/Nb	5.91	6.06	5.00	4.99
Pr	11.7	12.5	15.3	15.4	Rb/Nb	7.67	7.62	5.66	5.67
Nd	43.6	46.2	60.2	59.4	(La/Yb) _N	5.31	5.31	4.61	4.67
Sm	10.4	10.8	14.7	14.7	(La/Sm) _N	2.01	2.04	1.64	1.65
Eu	0.99	1.09	1.39	1.37	(Gd/Lu) _N	1.78	1.76	2.05	2.11
Gd	8.97	9.16	13.00	13.20	δEu	0.31	0.33	0.31	0.30
Tb	1.47	1.50	2.15	2.11	10 ⁴ Ga/Al	3.41	3.64	3.65	3.61

$\text{Eu}^* = (\text{Sm}_{\text{N}} \times \text{Gd}_{\text{N}})^{1/2}$; N 表示已球粒陨石标准化(Sun and McDonough, 1989)。

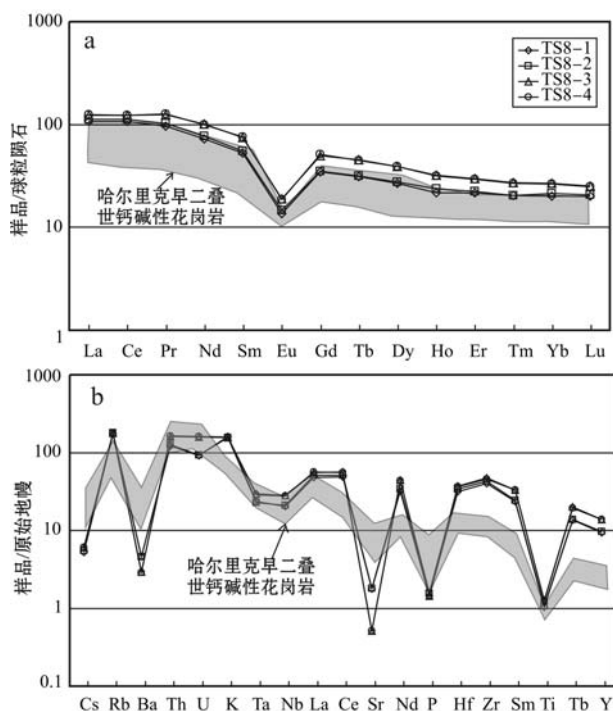


图 6 奥莫尔塔格碱性花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化配分曲线图(b)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE (a) and primitive-mantle-normalized trace element patterns (b) for OMTG alkaline granite in Yiwu, East Tianshan Mountains
球粒陨石据 Boynton (1984); 原始地幔数据据 Sun 和 McDonough (1989), 哈尔里克早二叠世钙碱性花岗岩数据据汪传胜等(2009b)和未刊出数据

Chondrite values after Boynton, 1984; primitive mantle after Sun and McDonough, 1989; Early Permian calc-alkaline granites data from Harlik after Wang Chuansheng *et al.*, 2009b and unpublished data

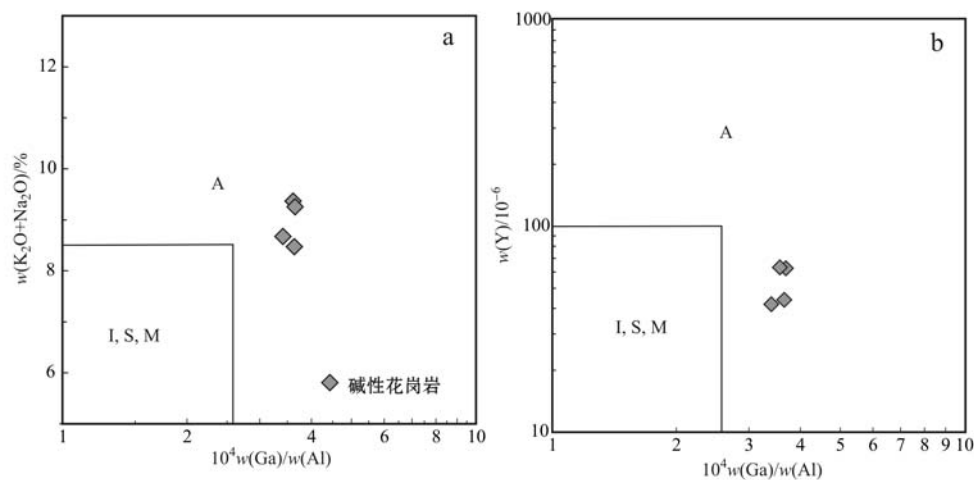


图 7 奥莫尔塔格碱性花岗岩 $K_2O + Na_2O - 10^4 Ga/Al$ 和 $Y - 10^4 Ga/Al$ 分类图(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 7 $K_2O + Na_2O - 10^4 Ga/Al$ and $Y - 10^4 Ga/Al$ diagrams of the Omoertage alkaline granite (after Whalen *et al.*, 1987)

3.3 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成

选取奥莫尔塔格碱性花岗岩(TS8-1)进行锆石 U-Pb 年龄测定。被测锆石多为无色透明-半透明,柱状或长柱状,晶体自形程度较好(图 9),颗粒较大,长度多为 $100 \sim 300 \mu m$,宽为 $50 \sim 150 \mu m$,长宽比为 $2:1 \sim 3:1$ 。

表 5 列出了碱性花岗岩的锆石 U-Pb 同位素定年结果,图 10 为谐和年龄图。本次对碱性花岗岩共测定了 25 个锆石点,所测锆石点的 Th/U 值均较高,变化于 $0.94 \sim 2.70$ (均在 0.4 以上),与典型岩浆锆石具有高 Th/U 值特征一致(Wu and Zheng, 2004)。锆石颗粒 CL 图像显示较为清晰的韵律环带,说明被测锆石为典型的岩浆锆石,且没有发生明显的 Pb 丢失,因此所获得的年龄可以代表岩体的侵位年龄。本次测定的 25 个锆石点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄分布在 $324 \sim 283 Ma$ 之间,变化幅度较小(表 4),由其中的 22 个锆石数据计算的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 $288.9 \pm 1.6 Ma$ (MSWD = 0.93)(去除误差较大的 TS8-1-4 和 TS8-1-9 和 TS8-1-19),结果精确度较高,说明其属于早二叠世岩浆活动产物。

对前面已做 U-Pb 定年的样品进行系统的 Hf 同位素组成测定,表 6 列出了测试结果及根据年龄计算的有关参数。对于已做锆石年龄测定的样品点,其 Hf 同位素参数计算采用本次所获年龄,对于未测锆石年龄的样品点,Hf 同位素参数计算采用平均年龄。由表中数据可看出,碱性花岗岩的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值

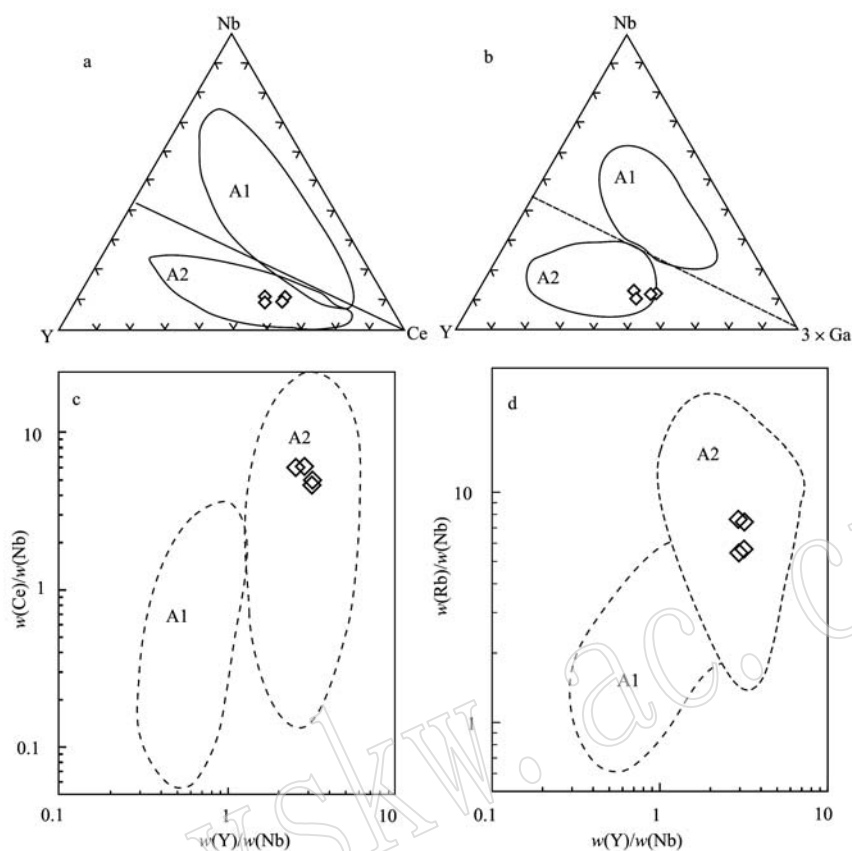


图 8 奥莫尔塔格碱性花岗岩 Nb-Y-Ce、Nb-Y-Ga 三角图解以及 Ce/Nb-Y/Nb 和 Rb/Nb-Y/Nb 关系图 (据 Eby, 1992)

Fig. 8 Nb-Y-Ce and Nb-Y-Ga triangular diagrams, Ce/Nb-Y/Nb and Rb/Nb-Y/Nb binary diagrams of the OMTG alkaline granites (after Eby, 1992)

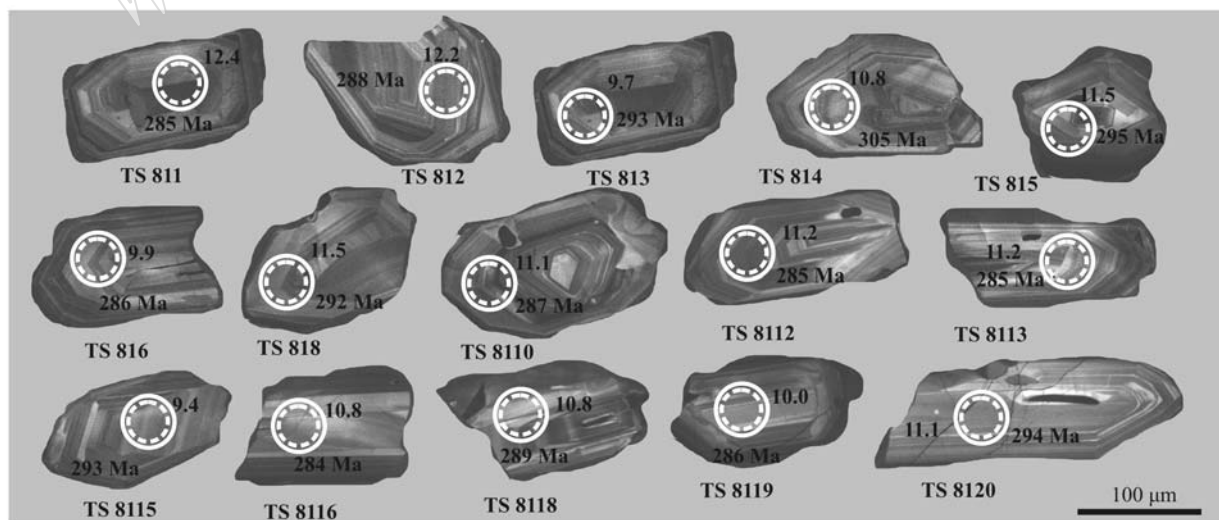


图 9 奥莫尔塔格碱性花岗岩测年锆石的阴极发光图像

Fig. 9 Cathodoluminescence (CL) images showing results of U-Pb dating and $\epsilon\text{Hf}(t)$ values of representative zircons of OMTG alkaline granite in Yiwu, East Tianshan Mountains

实线为 U-Pb 测点位置, 虚线为 Lu-Hf 测点位置

Solid line circle denotes the position of U-Pb dating, dash line circle denotes the position of Lu-Hf analysis

表 5 奥莫尔塔格碱性花岗岩(TS8-1)La-ICP MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 5 LA-ICP-MS zircons U-Pb dating results of OMTG alkaline granite (TS8-1) in Yiwu, East Tianshan Mountains													
样号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\delta$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\delta$
TS8-1-1	157	143	1.10	0.051 92	0.001 66	0.334 87	0.010 13	0.046 78	0.000 52	283	8	285	3
TS8-1-2	211	158	1.33	0.052 60	0.001 67	0.343 43	0.010 30	0.047 37	0.000 54	290	8	288	3
TS8-1-3	81	71	1.14	0.053 81	0.002 65	0.357 10	0.016 81	0.048 14	0.000 70	300	13	293	4
TS8-1-4	221	92	2.40	0.056 41	0.001 98	0.389 40	0.012 97	0.050 06	0.000 59	304	9	305	4
TS8-1-5	313	226	1.39	0.052 44	0.002 65	0.350 17	0.016 77	0.048 44	0.000 84	295	13	295	5
TS8-1-6	85	55	1.56	0.055 01	0.003 37	0.368 08	0.021 73	0.048 54	0.000 81	288	16	286	5
TS8-1-7	203	154	1.32	0.052 72	0.001 58	0.347 43	0.009 76	0.047 81	0.000 51	293	7	291	3
TS8-1-8	200	80	2.49	0.051 44	0.002 19	0.339 81	0.013 83	0.047 92	0.000 60	287	10	292	4
TS8-1-9	367	148	2.47	0.116 65	0.006 19	0.829 17	0.039 98	0.051 56	0.001 19	613	22	324	7
TS8-1-10	66	62	1.07	0.051 88	0.003 47	0.336 77	0.021 54	0.047 09	0.000 91	285	16	287	6
TS8-1-11	1 405	521	2.70	0.053 26	0.001 27	0.344 92	0.007 41	0.046 98	0.000 45	291	6	286	3
TS8-1-12	66	70	0.94	0.053 35	0.002 39	0.344 80	0.014 76	0.046 89	0.000 63	291	11	285	4
TS8-1-13	72	60	1.20	0.057 20	0.004 84	0.369 49	0.029 86	0.046 87	0.001 20	289	22	285	7
TS8-1-14	113	107	1.05	0.052 71	0.001 82	0.348 47	0.011 42	0.047 96	0.000 55	294	9	292	3
TS8-1-15	159	136	1.17	0.052 31	0.001 73	0.347 52	0.010 84	0.048 19	0.000 55	293	8	293	3
TS8-1-16	244	164	1.49	0.053 21	0.001 44	0.342 51	0.008 64	0.046 70	0.000 47	289	7	284	3
TS8-1-17	104	51	2.07	0.053 86	0.003 32	0.348 23	0.020 67	0.046 91	0.000 82	293	16	286	5
TS8-1-18	120	98	1.22	0.053 17	0.001 86	0.348 55	0.011 53	0.047 55	0.000 56	294	9	289	3
TS8-1-19	129	63	2.04	0.064 73	0.008 34	0.405 34	0.049 65	0.045 43	0.001 91	316	36	286	12
TS8-1-20	695	427	1.63	0.052 92	0.001 97	0.352 82	0.012 32	0.048 36	0.000 67	287	9	294	4
TS8-1-21	107	103	1.04	0.053 71	0.002 02	0.356 10	0.012 69	0.048 10	0.000 59	289	10	283	4
TS8-1-22	179	144	1.25	0.053 40	0.002 30	0.351 35	0.014 31	0.047 73	0.000 70	296	11	291	4
TS8-1-23	258	205	1.26	0.055 37	0.002 65	0.355 25	0.016 13	0.046 54	0.000 76	289	12	293	5
TS8-1-24	112	97	1.16	0.053 58	0.001 96	0.353 68	0.012 24	0.047 88	0.000 58	287	9	291	4
TS8-1-25	111	94	1.18	0.054 11	0.002 23	0.362 18	0.014 14	0.048 55	0.000 66	294	11	286	4

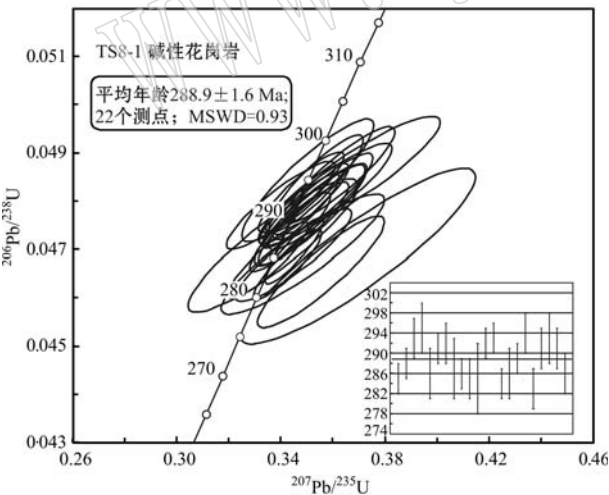


图 10 奥莫尔塔格碱性花岗岩的 U-Pb 年龄协和图
Fig. 10 U-Pb concordia diagrams of zircons from OMTG alkaline granite in Yiwu, East Tianshan Mountains

为0.282 845~0.283 093, 经年龄校正的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化于+8.7~+12.5 之间, 对应的单阶段模式年龄约为 600~430 Ma。在花岗岩侵位年龄 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解(图 11)上, 所有的分析点均投在 1.0 Ga 地壳演

化线和亏损地幔演化线之间, 显示这些锆石与亏损地幔来源的岩浆锆石的特征相似, 表明奥莫尔塔格碱性花岗岩的源岩来自初生地壳。

4 讨论

4.1 岩体成因探讨

尽管由于技术手段的不断革新, 对碱性花岗岩的研究已经取得很大进展, 但对其形成机制仍存在不少争论, 概括起来有 4 种: ① 先存花岗岩受到碱交代蚀变(Taylor, 1980; 顾连兴等, 1990); ② 玄武质岩浆直接分离结晶作用(Turner *et al.*, 1992; Han *et al.*, 1997); ③ 早期已抽取熔体的下地壳发生再次部分熔融(Clemens *et al.*, 1986; Landenberger and Collins, 1996); ④ 英云闪长质-花岗闪长质源岩的部分熔融(Creaser *et al.*, 1991; 忻建刚等, 1995)。由于碱性花岗岩成因机制很复杂, 在不同构造背景可能会有较大差异, 但不管属于哪种模式, 最关键的是能解释碱性花岗岩特殊的岩石学以及地球化学特征。

表 6 奥莫尔塔格碱性花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Table 6 Zircon Hf isotopic compositions of the OMIG alkaline granite in Yiwu, East Tianshan Mountains

点号	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	εHf(<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} /Ma	<i>t</i> _{2DM} /Ma	<i>f</i> _{Lu/Hf}
TS8-1-01	0.067 356	0.001 797	0.282 953	0.000 023	12.4	433.9	515.8	-0.95
TS8-1-02	0.111 265	0.002 918	0.282 953	0.000 024	12.2	447.7	529.7	-0.91
TS8-1-03	0.131 549	0.003 594	0.282 887	0.000 029	9.7	556.1	686.5	-0.89
TS8-1-04	0.085 431	0.002 293	0.282 910	0.000 023	10.8	502.9	619.3	-0.93
TS8-1-05	0.169 711	0.004 388	0.282 940	0.000 024	11.5	486.3	576.0	-0.87
TS8-1-06	0.150 417	0.003 984	0.282 894	0.000 026	9.9	551.2	674.8	-0.88
TS8-1-07	0.138 221	0.003 547	0.282 857	0.000 024	8.7	600.7	753.4	-0.89
TS8-1-08	0.060 351	0.001 578	0.282 927	0.000 025	11.5	468.3	571.3	-0.95
TS8-1-09	0.114 912	0.003 062	0.282 862	0.000 024	8.9	586.1	737.8	-0.91
TS8-1-10	0.108 875	0.002 924	0.282 922	0.000 025	11.1	493.4	599.0	-0.91
TS8-1-11	0.088 874	0.002 412	0.282 926	0.000 024	11.3	480.3	583.4	-0.93
TS8-1-12	0.117 307	0.003 145	0.282 925	0.000 024	11.2	491.5	594.2	-0.91
TS8-1-13	0.101 994	0.002 795	0.282 895	0.000 026	10.2	532.5	659.7	-0.92
TS8-1-14	0.121 390	0.003 226	0.282 870	0.000 026	9.2	576.3	721.0	-0.90
TS8-1-15	0.145 686	0.003 850	0.282 879	0.000 023	9.4	572.7	708.0	-0.88
TS8-1-16	0.178 136	0.004 613	0.282 923	0.000 026	10.8	516.1	617.0	-0.86
TS8-1-17	0.066 207	0.001 788	0.282 913	0.000 021	11.0	490.8	604.8	-0.95
TS8-1-18	0.119 903	0.003 185	0.282 915	0.000 024	10.8	507.6	618.1	-0.90
TS8-1-19	0.091 859	0.002 572	0.282 889	0.000 023	10.0	538.3	670.8	-0.92
TS8-1-20	0.097 836	0.002 669	0.282 921	0.000 024	11.1	491.7	598.6	-0.92
TS8-1-21	0.124 660	0.003 381	0.282 938	0.000 025	11.6	475.3	567.9	-0.90
TS8-1-22	0.038 971	0.001 190	0.282 845	0.000 019	8.7	580.8	753.1	-0.96
TS8-1-23	0.095 144	0.002 585	0.282 940	0.000 024	11.8	462.8	555.2	-0.92
TS8-1-24	0.167 590	0.004 257	0.283 093	0.000 027	11.9	446.2	486.6	-0.87
TS8-1-25	0.086 040	0.002 334	0.282 928	0.000 023	11.4	476.4	578.0	-0.93
TS8-1-26	0.174 792	0.004 501	0.282 905	0.000 028	10.2	543.7	658.1	-0.86
TS8-1-27	0.185 197	0.004 824	0.282 950	0.000 025	11.7	477.3	559.3	-0.85
TS8-1-28	0.069 820	0.001 865	0.282 851	0.000 022	8.8	581.8	746.4	-0.94
TS8-1-29	0.082 966	0.002 488	0.282 961	0.000 022	12.5	430.4	506.1	-0.93
TS8-1-30	0.120 458	0.003 250	0.282 929	0.000 024	11.3	487.7	587.6	-0.90

锆石 Hf 同位素特征值计算所用的参数为：¹⁷⁶Lu 衰变参数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}$ (Söderlund *et al.*, 2004), 球粒陨石(CHUR)的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.033 2, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 772 (Blichert-Toft and Albarede, 1997), 亏损地幔(DM)的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.038 4, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283 25 (Blichert-Toft and Albarede, 1997); 大陆平均地壳(CC)的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.015 (Griffin *et al.*, 2002)。

首先,碱交代蚀变作用不符合奥莫尔塔格碱性花岗岩的特征,野外露头观察以及镜下矿物学特征均无法证明碱交代蚀变作用的发生,并且从野外产出看,该碱性花岗岩侵位于钙碱性花岗岩体正中间而非边部,这也不符合蚀变交代作用模式。其次, Han 等(1997)采用幔源基性岩浆高度分异来解释新疆北部高 εNd(*t*)值的 A 型花岗岩,但玄武岩浆直接结晶分异只能形成少量的花岗岩,而研究区野外可见大范围的碱性花岗岩分布,并缺少伴生的基性岩和闪长岩等,邻近区域的基性岩大多形成于这些碱性花岗岩之后(280 Ma)(Zhang *et al.*, 2009b),无法构成该期碱性花岗岩的源岩,另外蛛网图中的 Nb 的亏损也无法用幔源岩浆的结晶分异来解释。

Clemens 等(1986)认为可能是早期已抽取熔体的麻粒岩相下地壳发生再次部分熔融,这虽然能很好解释 A 型花岗岩比 I 型花岗岩贫水且更晚形成等特征,但 Creaser 等(1991)认为麻粒岩相的下地壳发生部分熔融会形成含角闪石、单斜辉石以及石榴石等残留体,这些残留体再次熔融很难形成富硅富碱的花岗质熔体(Jung *et al.*, 2000),往往形成类似于澳大利亚 Lachlan 褶皱带的铝质 A 型花岗岩(King *et al.*, 1997)。在碱性花岗岩分类图(图 9)上,该碱性花岗岩属于 A2 型花岗岩(后造山型),Eby (1992)认为 A2 型花岗岩可能来自于大陆地壳,主要与大陆边缘地壳伸展作用或陆内剪切作用产生的拉张环境有关。由此可见,奥莫尔塔格碱性花岗岩可能是亏

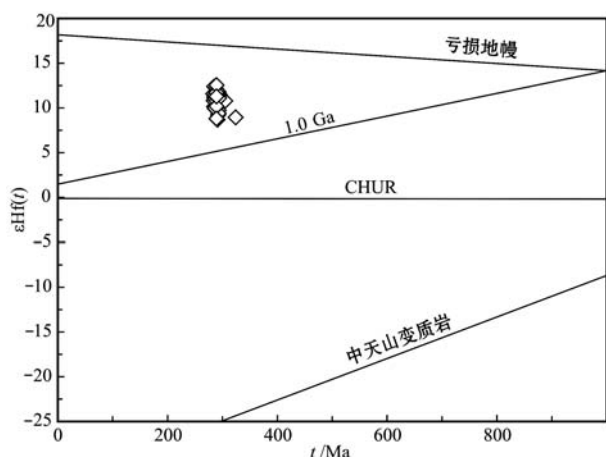


图 11 奥莫尔塔格碱性花岗岩的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解

Fig. 11 Variation of zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t diagram of OMTG alkaline granite in Yiwu, East Tianshan Mountains

损地幔物质在地壳演化一段时间后形成的新生地壳的部分熔融产物。

忻建刚等(1995)以东准噶尔北部地区的碱性花岗岩为例,在 Creaser 等(1991)基础上提出淮北碱性花岗岩可能的成因模式为:岩石圈地幔经部分熔融后产生玄武岩质岩浆,经岩浆分异作用后形成花岗闪长质等钙碱性岩石,它们作为源岩发生再次部分熔融形成碱性花岗岩岩浆,碱性岩浆经分离结晶作用产生碱性花岗岩。根据矿物学、地球化学以及 Hf 同位素特征[$\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $+8.7 \sim +12.5$]对比,奥莫尔塔格碱性花岗岩可能与淮北碱性花岗岩具有类似的成因机制,主要证据如下:① 奥莫尔塔格碱性花岗岩具有高的 Rb/Sr、Rb/Ba 值及较低的 Ti 和 P 含量、 δEu 值,说明岩浆发生过较强的长石和磷灰石以及钛铁矿分离结晶作用,这些矿物的结晶分离将分别导致熔体中 Sr、Ba、Eu 以及 P 和 Ti 的亏损。玄武质岩浆经过较强的分异作用形成钙碱性岩浆,碱性岩浆则继承钙碱性岩浆的特点,并再次分离结晶形成碱性花岗岩。② 奥莫尔塔格碱性花岗岩的镁钠铁闪石、黑云母等含水铁镁矿物在镜下充填在长石、石英颗粒之间,说明它们都是在岩浆结晶的晚期形成的,表明碱性岩浆具有“干岩浆”的特点(忻建刚等,1995),全岩化学分析结果也显示其水含量极低(0.04%)。因此,奥莫尔塔格碱性花岗岩应是钙碱性岩浆发生脱水后熔体分异的产物,具有“无水”的特点。③ 奥莫尔塔格碱性花岗岩中含有萤石,表明其 F 的含量较高,依据 Creaser 等(1991)和忻建刚

等(1995)的观点,在花岗闪长岩等钙碱性岩石发生部分熔融时,负电性很强的 F 元素能以共价键形式与高场强元素形成络合物进入熔体相中,这也导致碱性花岗岩中的 F、Cl 等卤族元素和高场强元素富集(刘昌实等,2003)。④ 运用锆石饱和温度计得到奥莫尔塔格碱性花岗岩的锆石饱和温度为 $940 \sim 952^\circ\text{C}$ (表 2),平均 947°C ,明显高于 S 型花岗岩锆石饱和温度的平均值(764°C , King *et al.*, 1997)和 I 型花岗岩的平均值(791°C , King *et al.*, 1997),比较接近过碱性 A 型花岗岩的锆石饱和温度(883°C , 刘昌实等,2003),说明奥莫尔塔格岩体侵位结晶的温度较高,因此富含高场强元素如 Zr、Nb、Y、Ga 和 REE 等,因为随着温度的升高,锆石和磷灰石的溶解度将提高(Watson and Harrison, 1984)。

4.2 构造意义讨论

新疆地区记录有大量的碱性花岗岩岩浆活动,在国家 305 项目执行过程中,在东准噶尔地区发现与碱性花岗岩有关的锡矿(毕承思等,1992),引起各方对碱性花岗岩的关注(刘家远等,1996;赵振华等,1996;韩宝福等,1998)。空间上,碱性花岗岩主要沿着阿尔泰山南缘-东准乌伦古-克拉麦里断裂带分布。刘家远等(1996)认为东准地区存在 3 条大的断裂带,把碱性花岗岩由北向南依次划分为布尔根富碱花岗岩带(北带)、乌伦古富碱花岗岩带(中带)和克拉麦里富碱花岗岩带(南带)。忻建刚等(1995)则认为东准北带的碱性花岗岩属于 A1 型,不同于中带和南带的后造山环境的 A2 型。根据本文的研究结果,奥莫尔塔格碱性花岗岩属于 A2 型,并且矿物组合及同位素地球化学特征与南带的克拉麦里碱性花岗岩比较相似,这也说明奥莫尔塔格碱性岩体属于克拉麦里碱性岩带南延的一部分。根据已发表的年代学结果,发现除了北带阿尔泰山地区存在少量的晚泥盆世碱性花岗岩外(Shen *et al.*, 2011),东准地区和东天山地区的碱性花岗岩主要集中在晚石炭—早二叠世期间(刘家远等,1996;苏玉平等,2006;韩宝福等,2006;汪传胜等,2009b;Shen *et al.*, 2011),这也显示了该区域整体性的后碰撞伸展特征。Liégeois 等(1998)认为后碰撞阶段处于构造体制转变期,标志后碰撞阶段趋于结束,预示将进入板内环境,A2 型花岗岩的出现可作为造山带崩塌的标志(邓晋福等,1999),所以哈尔里克奥莫尔塔格碱性花岗岩可以作为该期碰撞造山过程结束的标志。

在志留纪—石炭纪($440 \sim 310 \text{ Ma}$),哈尔里克山

曾发生大规模中酸性岛弧岩浆活动(孙桂华等, 2005; 郭华春等, 2006; 曹福根等, 2006; Yuan *et al.*, 2010)。该地区最晚的海相沉积作用的结束时间也为晚石炭世(汪传胜等, 2009a)。而小铺东、南山口和八大石等高钾钙碱性花岗岩体(296 Ma, 赵明等, 2002; 汪传胜等, 2009b; 陈希节等, 2010)侵位于强烈褶皱变形的石炭系围岩, 而本身未发生变形, 说明该花岗岩体是主碰撞和区域变形之后的产物(汪传胜等, 2009a), 也即东天山的碰撞时间应该在晚石炭世—早二叠世期间。同时, 东天山哈尔里克地区发育有 297 Ma 的含 MMEs 高钾钙碱性的 I 型花岗岩, 野外可见基性岩墙切割高钾钙碱性岩体, 而 289 Ma 的碱性花岗岩岩体又切割基性岩墙(汪传胜, 2009a), 由此构成空间上密切共生、侵位时间上较为接近的 I-A 型复合杂岩体。钙碱性的 I 型花岗岩和 A 型花岗岩在岩浆成因上具有趋同性, 该种特殊的侵入岩组合也被称为后碰撞初始拉张的标志(Gu *et al.*, 1999), 指示应力相对松弛的地壳减薄构造背景。在加拿大纽芬兰的阿帕拉契亚造山带和法国的阿尔卑斯造山带等地, 后碰撞的碱性花岗岩紧随钙碱性花岗岩发生侵位(Paquette *et al.*, 2003; Whalen *et al.*, 2006), 这两处碱性花岗岩形成于碰撞后的伸展—挤压的转换期, 奥莫尔塔格碱性花岗岩可能形成于相似的构造阶段。除此之外, 在博格达—哈尔里克地区, 早二叠世(295 Ma)还发育有双峰式火山(Chen *et al.*, 2011), 这种由双峰式火山岩(喷出岩)和 I-A 型复合杂岩体以及基性岩墙群(侵入岩)构成的特殊岩石组合被称为后碰撞伸展构造岩浆组合(王德滋等, 2007)。

晚石炭—早二叠世期间为弧陆碰撞晚期, 从哈尔里克地区具有高钾钙碱性 I 型花岗岩特征的小铺东岩体到奥莫尔塔格 A 型花岗岩, 岩浆作用从强烈挤压的主碰撞期逐渐向陆内伸展后碰撞期演化, 标志东天山在 297 Ma 期间进入后碰撞阶段, 由于俯冲板片发生断离, 热的软流圈地幔则逐渐发生上涌, 并且引起热异常以及岩石圈的部分熔融和交代作用(Gerya *et al.*, 2004)。岩石圈的上涌逐渐使地壳发生区域性伸展, 引起各种伸展背景下的岩浆作用, 由新生地壳发生部分熔融形成的钙碱性岩浆经高度分异作用后, 形成 A 型花岗岩浆沿薄弱带上涌侵位于钙碱性岩体之中。与上述碰撞作用相对应, 从早二叠世开始, 博格达山前发生强烈的逆掩推覆或走滑剪切, 导致构造载荷压陷作用, 形成巨厚的红色磨拉

石堆积盆地(Shu *et al.*, 2011), 至三叠纪海西期大陆碰撞对东天山构造的持续影响已经逐步减弱(雷如雄等, 2013), 之后再无大规模岩浆活动, 代表着造山事件的终结和准平原化的开始。

5 结论

(1) 奥莫尔塔格碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄为 288.9 ± 1.6 Ma, 属于早二叠世岩浆活动产物。

(2) 奥莫尔塔格碱性花岗岩在矿物组成上含有镁钠铁闪石及霓石, 副矿物中出现萤石; 在化学成分上具有高硅、高碱、富铁、低钙、低镁、高 Ga/Al 值及富含高场强元素和较高的锆饱和温度的特征, 属于典型的过碱性 A 型花岗岩。

(3) 奥莫尔塔格碱性花岗岩具有偏高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+8.7 \sim +12.5$)和偏低的单阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}} = 600 \sim 430$ Ma), 指示幔源组分对该碱性花岗岩体的形成具有重要贡献。结合其地球化学特征分析, 认为奥莫尔塔格碱性花岗岩是新生地壳发生部分熔融形成相当于英云闪长岩、花岗闪长岩等钙碱性的岩石, 它们作为源岩发生再次部分熔融的产物。

(4) 奥莫尔塔格碱性花岗岩具有较高的 Y/Nb 值, 可归为 A2 型花岗岩, 可以作为该期碰撞造山过程结束的标志。

致谢 主微量测试、锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 分析以及电子探针(EPMA)分析过程中分别得到武汉上谱分析测试中心和中国地质科学院地质研究所王铮工程师、戎合工程师的大力帮助, 审稿专家以及编委会认真评阅本文, 并提出许多宝贵意见, 在此深表谢意。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Bi Chengsi, Shen Xiangyuan and Xu Qingsheng. 1992. New discovery of Hercynian A-type granite related Sn ore deposit in China[J]. *Science in China Series B-Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences*, 22(6): 632~638(in Chinese with English abstract).
- Black L P and Gulson B L. 1978. The age of the mud tank carbonatite, strangel ways range, northern territory[J]. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3(3): 227~232.

- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1): 243~258.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. Amsterdam: Elsevier, 1~510.
- Cao Fugen, Tu Qijun, Zhang Xiaomei, *et al.* 2006. Preliminary determination of the Early Paleozoic magmatic arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China-Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating of granite bodies in the Tashuihe area[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 923~927(in Chinese with English abstract).
- Charvet J, Shu Liangshu and Laurent-Charvet S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates[J]. *Episodes*, 30(3): 162~186.
- Chen Xijie and Shu Liangshu. 2010. Features of the post-collisional tectono-magmatism and geochronological evidence in the Harlik Mt., Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3 057~3 064(in Chinese with English abstract).
- Chen Xijie, Shu Liangshu and Santosh M. 2011. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the Eastern Tianshan Belt, Northwest China: new insights from geochemistry, geochronology and petrology of bimodal volcanic rocks[J]. *Lithos*, 127(3): 581~598.
- Clemens J D, Holloway J R and White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints[J]. *American Mineralogist*, 71(3~4): 317~324.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 80(2): 189~200.
- Creaser R A, Price R C and Wormald R J. 1991. A-type granites revisited: assessment of a residual-source model[J]. *Geology*, 19(2): 163~166.
- Dall'Agnol R and de Oliveira D C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites[J]. *Lithos*, 93(3): 215~233.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 1999. Igneous petro-tectonic assemblage and crust-mantle metallogenic system[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 259~270(in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petro-genetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641.
- Gerya T V, Yuen D A and Maresch W V. 2004. Thermomechanical modelling of slab detachment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(1): 101~116.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, *et al.* 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3): 231~282.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237~269.
- Gu Lianxing, Chu Qiang, Hu Shouxi, *et al.* 1990. Characteristics and Genesis of Kelameili-Harlik Alkaline Granite Belt in Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2, 47~55(in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Chu Qiang, *et al.* 1999. Pre-collision granites and post-collision intrusive assemblage of the Kelameili-Harlik orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 316~329.
- Guo Huachun, Zhong Li and Li Liquan. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of quartz diorite in the Koumenzi area, Harlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 928~931(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang, *et al.* 1998. Post-collisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in north Xinjiang[J]. *Geological Review*, (4): 396~404(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 077~1 086(in Chinese with English abstract).
- Han B F, Wang S G, Jahn B M, *et al.* 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 138(s 3~4): 135~159.
- Huang Wei. 2014. Geochronology, Geochemistry and Origin of Carboniferous-Permian Alkali Granites in Eastern Tianshan, Hami, NW China[D]. China University of Geosciences (Beijing), 1~79(in Chinese).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1): 47~69.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23(2): 82~92.

- Jung S, Hoernes S and Mezger K. 2000. Geochronology and petrogenesis of Pan-African, syn-tectonic, S-type and post-tectonic A-type granite (Namibia): products of melting of crustal sources, fractional crystallization and wall rock entrainment[J]. *Lithos*, 50(4): 259~287.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Landenberger B and Collins W J. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 145~170.
- Le Maitre R W B, Dudek P, Keller A, *et al.* 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[M]. International Union of Geological Sciences.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*, 61(2): 295~321.
- Lei Ruxiong, Wu Changzhi, Zhang Zunzhong, *et al.* 2013. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the Yamansubei pluton in eastern Tianshan, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2 653~2 664(in Chinese with English abstract).
- Liégeois J P. 1998. Some words on the post-collisional magmatism[J]. *Lithos*, 45: 15~18.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, *et al.* 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites[J]. *Geological journal of China Universities*, 9(4): 573~591(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiayuan and Yuan Kuirong. 1996. A discussion on the genesis and tectonic setting of alkali granites in the Ulungur alkali-rich granite belt, Xinjiang[J]. *Geological Journal of China Universities*, (3): 257~272(in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7): 468.
- Ludwig K R. 2001. Isoplot/Ex 2.49, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA. Special Publication 1a.
- Ma Ruishi, Shu Liangshu and Sun Jiaqi. 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of East Tianshan Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~202(in Chinese).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3): 215~224.
- Paquette J L, Ménot R P, Pin C, *et al.* 2003. Episodic and short-lived granitic pulses in a post-collisional setting: evidence from precise U-Pb zircon dating through a crustal cross-section in Corsica[J]. *Chemical Geology*, 198(1): 1~20.
- Qiu Jiansheng, Liu Liang and Li Zhen. 2011. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of quartz syenite from Wanghaigang pluton in Huangyan County, Zhejiang Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1 557~1 572(in Chinese with English abstract).
- Qiu J S, Wang D Z, McInnes B I A, *et al.* 2004. Two subgroups of A-type granites in the coastal area of Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 389: 227~236.
- Schumacher J C. 1997. The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles[J]. *Mineralogical Magazine*, 61: 312~321.
- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang, Wang Qiang, *et al.* 2011. Late Devonian-Early Permian A-type granites in the southern Altay Range, Northwest China: Petrogenesis and implications for tectonic setting of "A2-type" granites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 986~1 007.
- Shu L S, Wang B, Zhu W B, *et al.* 2011. Timing of initiation of extension in the Tianshan, based on structural, geochemical and geochronological analyses of bimodal volcanism and olistostrome in the Bogda Shan (NW China)[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 100(7): 1 647~1 663.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3): 311~324.
- Su Yuping, Tang Hongfeng and Cong Feng. 2008. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Huangyangshan alkaline granite body in East Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 117~126(in Chinese with English abstract).
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Chongqiang, *et al.* 2006. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 175~184(in Chinese with English abstract).
- Sun Guihua. 2007. Structural Deformation and Tectonic Evolution of

- Harlik Mountain, in Xinjiang Since the Paleozoic[D]. Chinese Academy Geological Sciences, 1~237(in Chinese).
- Sun Guihua, Li Jinyi, Gao Liming, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of a dioritic pluton in the Harlik mountain, Eastern Xinjiang, and its tectonic implication[J]. *Geological Review*, 51(4): 463~469(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Tang Hongfeng, Qu Wenjun, Su Yuping, *et al.* 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabai body in Xinjiang: constraint from isotopic ages[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1 989~1 997(in Chinese with English abstract).
- Taylor H P. 1980. The effects of assimilation of country rocks by magmas on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in igneous rocks[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 47(2): 243~254.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151~179.
- Wang Chuansheng, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, *et al.* 2009a. Petrogenesis and tectonic implications of the Permian alkaline granites and quartz-syenite assemblage in Harlik Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3 182~3 196(in Chinese with English abstract).
- Wang Chuansheng, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, *et al.* 2009b. Petrogenesis and geological implications of the Permian high-K calc-alkaline granites in Harlik Mountains of eastern Tianshan, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 499~1 511(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi and Shu Liangshu. 2007. On granitic tectono-magmatic assemblages[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 362~370(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang. 1994. Genetic type and relation to metallogenesis of Northern Xinjiang granite[J]. *Xinjiang Geology*, (1): 9~15(in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1984. Accessory minerals and the geochemical evolution of crustal magmatic systems: a summary and prospectus of experimental approaches[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35(1~3): 19~30.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Whalen J B, Mcnicoll V J, Staal C R V, *et al.* 2006. Spatial, temporal and geochemical characteristics of Silurian collision-zone magmatism, Newfoundland Appalachians: An example of a rapidly evolving magmatic system related to slab break-off[J]. *Lithos*, 89(3~4): 377~404.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(12): 31~47.
- Woodhead J, Hergt J, Shelley M, *et al.* 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation[J]. *Chemical Geology*, 209(1): 121~135.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1~2): 143~173.
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1 554~1 569.
- Wu Y B, Zheng Y F, Zhao Z F, *et al.* 2006. U-Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(14): 3 743~3 761.
- Xiao E, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang province: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 431~1 440(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of Central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304: 370~395.
- Xiao W, Han C, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2~4): 102~117.
- Xinjiang Regional Survey Party. 1984. *Geology of Granites in Tianshan Mountains*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 22~180(in Chinese).
- Xin Jiangang, Yuan Kuirong, Liu Jiayuan, *et al.* 1995. The alkali granites, genesis and tectonic significance of northern part of East Junggar, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 19(3): 214~226(in Chinese with English abstract).
- Yuan C, Sun M, Wilde S, *et al.* 2010. Post-collisional plutons in the Balikun area, East Chinese Tianshan: evolving magmatism in response to extension and slab break-off[J]. *Lithos*, 119(3): 269~288.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Chai Fengmei, *et al.* 2009b. Geo-

- chemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, northern Xinjiang, NW China: Implications for the genesis of the magmatic Ni-Cu sulfide deposit[J]. *Economic Geology*, 104(2): 185~203.
- Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Kusky T M, *et al.* 2009a. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang: Implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 201~215.
- Zhao Ming, Shu Liangshu, Zhu Wenbin, *et al.* 2002. Zircon U-Pb dating of the rocks from the harlik metamorphic belt in Eastern Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 379~383(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Wang Zhonggang, Zou Tianren, *et al.* 1996. A discussion on petrogenesis of Ulugu alkali-rich granite[J]. *Geochimica*, 25(3): 205~220(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 毕承思, 沈湘元, 徐庆生. 1992. 我国与海西期 A 型花岗岩有关锡矿床的新发现[J]. *中国科学: B 辑*, (6): 632~638.
- 曹福根, 涂其军, 张晓梅, 等. 2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据[J]. *地质通报*, 25(8): 923~927.
- 陈希节, 舒良树. 2010. 新疆哈尔里克山后碰撞期构造-岩浆活动特征及年代学证据[J]. *岩石学报*, 26(10): 3 057~3 064.
- 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 1999. 火成岩构造组合与壳幔成矿系统[J]. *地学前缘*, 6(2): 259~270.
- 顾连兴, 储强, 胡受奚, 等. 1990. 新疆克拉美丽-哈尔里克碱性花岗岩带地质特征及成因[M]. *新疆地质科学*. 北京: 地质出版社, 2, 47~55.
- 郭华春, 钟莉, 李丽群. 2006. 哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地质通报*, 25(8): 928~931.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸, 等. 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长[J]. *地质论评*, (4): 396~404.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 077~1 086.
- 黄伟. 2014. 东天山哈密地区石炭-二叠纪碱性花岗岩年代学、地球化学及成因[D]. 中国地质大学(北京), 1~79.
- 雷如雄, 吴昌志, 张遵忠, 等. 2013. 东天山雅满苏北岩体的年代学、地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29(8): 2 653~2 664.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. *高校地质学报*, 9(4): 573~591.
- 刘家远, 袁奎荣. 1996. 新疆乌伦古富碱花岗岩带碱性花岗岩成因及其形成构造环境[J]. *高校地质学报*, (3): 257~272.
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1~202.
- 邱检生, 刘亮, 李真. 2011. 浙江黄岩望海岗石英正长岩的锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学及其对岩石成因的制约[J]. *岩石学报*, 27(6): 1 557~1 572.
- 苏玉平, 唐红峰, 丛峰. 2008. 新疆东准噶尔黄羊山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因[J]. *矿物学报*, 28(2): 117~126.
- 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 等. 2006. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(3): 175~184.
- 孙桂华. 2007. 新疆哈尔里克山古生代以来构造变形及构造演化[D]. 中国地质科学院, 1~237.
- 孙桂华, 李锦轶, 高立明, 等. 2005. 新疆东部哈尔里克山闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质论评*, 51(4): 463~469.
- 唐红峰, 屈文俊, 苏玉平, 等. 2007. 新疆萨惹什克锡矿与萨北碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约[J]. *岩石学报*, 23(8): 1 989~1 997.
- 汪传胜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 2009a. 新疆哈尔里克山二叠纪碱性花岗岩-石英正长岩组合的成因及其构造意义[J]. *岩石学报*, 25(12): 3 182~3 196.
- 汪传胜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 2009b. 东天山哈尔里克山区二叠纪高钾钙碱性花岗岩成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 25(6): 1 499~1 511.
- 王德滋, 舒良树. 2007. 花岗岩构造岩组组合[J]. *高校地质学报*, 13(3): 362~370.
- 王中刚. 1994. 新疆北部花岗岩类成因类型及其与成矿的关系[J]. *新疆地质*, (1): 9~15.
- 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 等. 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 431~1 440.
- 忻建刚, 袁奎荣, 刘家远. 1995. 新疆东准噶尔北部碱性花岗岩的特征、成因及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 19(3): 214~226.
- 新疆区调队. 1984. 天山花岗岩地质[M]. 北京: 地质出版社, 22~180.
- 赵明, 舒良树, 朱文斌, 等. 2002. 东疆哈尔里克变质带的 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 76(3): 379~383.
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 1996. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨[J]. *地球化学*, 25(3): 205~220.