

东准噶尔卡拉麦里断裂以南幔源底侵体、“钉合花岗岩体”的发现及其地质意义*

田健^{1,2} 廖群安^{1**} 樊光明¹ 聂小妹³ 胡朝斌¹ 王富明¹ 陈帅¹ 吴魏伟¹

TIAN Jian^{1,2}, LIAO QunAn^{1**}, FAN GuangMing¹, NIE XiaoMei³, HU ChaoBin¹, WANG FuMing¹, CHEN Shuai¹ and WU WeiWei¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074

2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2015-10-06 收稿, 2016-01-01 改回.

Tian J, Liao QA, Fan GM, Nie XM, Hu CB, Wang FM, Chen S and Wu WW. 2016. Mantle underplated pluton and stitching granite pluton from south side of the Karamaili fault in eastern Junggar: Geochronological, geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on their petrogenesis and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6):1715–1730

Abstract Dishuiquan-Xumuban intrusions containing K-feldspar granite pluton and visible smaller hornblende-gabbro pluton are located in the south side of the Karamaili fault in Fuyun County, Xinjiang, which shows a characteristic of NWW zonal distribution. The K-feldspar granite pluton is made of K-feldspar granite porphyry and K-feldspar granite, whose characteristics is similar with A-type granite, such as high SiO₂ content (71.07% ~ 76.71%), K₂O > Na₂O (average of 1.10). The hornblende-gabbro pluton is surging K-feldspar granite pluton, quartz diorite is visible in the magma mixing zone. According to intrusion regional geology, the bimodal rock associations and R₂-R₁ diagram, we can find that a Dishuiquan intrusion is formed in intra-continent extension environment and the granite pluton is a stitching body. LA-ICPMS zircon U-Pb age shows that the K-feldspar granite ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages is 321 ± 2Ma and hornblende-gabbro is 319 ± 3Ma, so the ocean basin of Karamaili has been closed before the early stage Late Carboniferous (321Ma). Isotope and trace element shows that K-feldspar granites are characterized of the young crust, however hornblende-gabbro source is composed of depleted asthenosphere mantle and wedge metasomatised by subducting slab. Even more important, hornblende-gabbros represent underplating magmas of granites from Late Carboniferous. The similar ε_{Nd}(t) and obvious magma mixing between gabbro and granite indicate that Dishuiquan K-feldspar granite pluton is not from high differentiation of underplating magmas or partial melting of hornblende-gabbros, which most probably be from the young crust overhead the underplated hornblende-gabbro pluton. The conclusion is consistent with research achievements from granites in the north of Karamaili by some scholars. The finding of underplated hornblende-gabbro pluton in the early stage of Late Carboniferous provides a reliable geological basis for underplating of post-collision granitoids in Kalamaili.

Key words Eastern Junggar; Karamaili; K-feldspar granites; Hornblende-gabbros; Intra-continental extension; Genesis of rocks; Underplating

摘要 新疆富蕴县滴水泉-畜牧办侵入体出露于卡拉麦里断裂以南,呈北西西向带状分布,以碱长花岗岩体为主,也可见规模较小的角闪辉长岩体。碱长花岗岩体的岩石组合为碱长花岗斑岩+碱长花岗岩,高硅(SiO₂ = 71.07% ~ 76.71%),富碱(Na₂O + K₂O = 7.41% ~ 9.07%),K₂O > Na₂O(平均为 1.10),显示出 A 型花岗岩的特点。角闪辉长岩体涌动侵入于碱长花岗岩体之中,二者接触带附近发育浆混性质的石英闪长岩。辉长岩+花岗岩的双峰式岩石组合、构造判别图解 R₂-R₁ 及区域地

* 本文受中国地质调查局计划项目(1212011120508)资助。

第一作者简介:田健,男,1987年生,硕士,从事区域地质调查工作及岩石学方面的研究,E-mail: 243293305@qq.com

** 通讯作者:廖群安,男,1959年生,教授,主要从事岩石学及岩石地球化学研究,E-mail: qanliao@cug.edu.cn

质背景指示滴水泉侵入体形成于陆内伸展环境,且花岗岩体具有“钉合岩体”的作用,穿插了卡拉麦里蛇绿岩带。结合岩体的 LA-ICP-MS 锆石年龄(碱长花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $321 \pm 2\text{Ma}$,角闪辉长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $319 \pm 3\text{Ma}$)可知,卡拉麦里洋盆在晚石炭世早期(321Ma)之前已经闭合。同位素及微量元素特征显示,碱长花岗岩为年轻地壳部分熔融的产物,而角闪辉长岩则来源于亏损的软流圈地幔及俯冲交代的地幔楔物质,代表了同期花岗岩的底侵岩浆演化的产物。辉长岩与花岗岩相似的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值及明显的岩浆混合作用表明该区的花岗岩体并非来源于底侵岩浆的高度分异或底侵体的部分熔融,而最可能为底侵体之上的年轻地壳的部分熔融,这一结论与最近一些学者研究的断裂以北的花岗岩体成因机制相同。晚石炭世早期幔源底侵体的发现,为卡拉麦里地区后碰撞花岗岩类的幔源底侵作用提供了可靠的地质依据。

关键词 东准噶尔;卡拉麦里;碱长花岗岩;角闪辉长岩;后碰撞;岩石成因;底侵作用

中图法分类号 P588.121; P588.124; P597.3

1 引言

卡拉麦里造山带位于东准噶尔东北缘,北西西向的蛇绿混杂岩带断续分布其中(图 1a)。区内出露广泛的晚古生代后碰撞岩浆岩,大面积分布的花岗岩体成为研究花岗岩成因及后碰撞岩浆演化的理想载体(韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006, 2008; Su *et al.*, 2007; 李月臣等, 2007; 唐红峰等, 2007; 林锦富等, 2007; 闫存兴等, 2008; 杨高等, 2008, 2009; 李永军等, 2009; 郭芳放等, 2010; Yang *et al.*, 2011; 韩宇捷等, 2012)。但是,对于这些花岗岩体的成因却存在较大的争议。Han *et al.* (1997) 及韩宝福等(1998)认为花岗岩可能来自底侵的幔源岩浆高度分异;一些学者则认为花岗岩形成同期底侵体的部分熔融也可能形成这些花岗岩类(Wu *et al.*, 2002; 吴福元等, 2007);还有一些学者认为幔源底侵岩浆之上的年轻地壳最可能为这些花岗岩的源区(Coleman, 1989; 洪大卫, 2000; Chen and Jahn, 2004; 苏玉平等, 2008; 郭芳放等, 2010)。所以,卡拉麦里地区花岗岩的成因还需要更多可靠的证据。

对于后造山巨量花岗岩的出现,一般认为与岩石圈拆沉之后的岩浆底侵作用有关(杨坤光和杨巍然, 1997),一些学者在研究东昆仑造山带岩浆岩时,发现了与后碰撞花岗岩同时代的幔源底侵体,论证了岩浆底侵作用的重要性(郭正府等, 1998; 罗照华等, 2002; 刘成东等, 2004; 莫宣学等, 2007)。在卡拉麦里地区,许多学者也认为大面积的花岗岩与幔源岩浆的底侵有关(吴福元等, 1999; 洪大卫, 2000; Chen and Jahn, 2004),但是区域内报道的幔源岩浆活动主要为岩浆混合成因的包体,年龄集中在 $300 \sim 286\text{Ma}$ (杨高等, 2008, 2009, 2010),与后碰撞花岗岩类同时代的幔源底侵体尚未见报道,缺少直接的地质证据证明底侵作用的存在。

本文通过对卡拉麦里断裂以南的碱长花岗岩体、角闪辉长岩体的岩石类型、锆石年代学、地球化学及同位素的详细研究,阐述了各岩体之间的相互关系,“钉合花岗岩体”的岩相学及地球化学特征表明卡拉麦里洋盆在晚石炭世早期(321Ma)之前已经闭合,底侵体角闪辉长岩的发现则为卡拉麦里地区底侵作用的认识提供了可靠的地质证据。通过对

滴水泉-畜牧办花岗岩类成因机制的研究,结合断裂以北后碰撞花岗岩成因的认识,较肯定地表明卡拉麦里地区后碰撞花岗岩类为幔源底侵体之上的年轻地壳的部分熔融,并非来源于底侵的幔源岩浆。

2 岩体地质及岩相学特征

2.1 岩体地质概况

侵入体出露于卡拉麦里断裂以南的五彩城景区的北侧,地理中心坐标为东经 $88^{\circ}57'$,北纬 $45^{\circ}15'$,呈北西西向带状分布于滴水泉-畜牧办,穿插了卡拉麦里蛇绿混杂岩带(图 1b)。侵入体主要由碱长花岗岩体组成,也可见规模较小的角闪辉长岩体,碱长花岗岩体出露面积达 30km^2 ,角闪辉长岩体出露面积约 5km^2 ,实测剖面 PM021(图 2)、PM024、PM055 及锆石采样点如图 1b。

碱长花岗岩体为该侵入体的主要组成部分,岩体东北缘侵入于下石炭统姜巴斯套组,接触带附近的细-粉砂岩围岩发育角岩化,粗粒的长石砂岩、含砾砂岩则主要表现为绿帘石化蚀变,岩体的内接触带可见下石炭统姜巴斯套组砂岩的顶垂体,显示出典型的侵入接触关系;西南边界侵入于下石炭统的松喀尔苏组或中泥盆统北塔山组;东南缘与中泥盆统北塔山组呈明显的侵入关系,在花岗岩中出现安山质捕虏体(图 3d),局部接触关系被卡拉麦里断裂或滴水泉断裂破坏。岩体主要由碱长花岗岩-碱长花岗岩斑岩组成,内部相带变化明显,边缘相由细粒碱长花岗岩和花岗岩斑岩组成,中心相为中-粗粒碱长花岗岩、文象花岗岩;碱长花岗岩斑岩可出现在碱长花岗岩的边缘相,也可呈独立的岩脉产出。

角闪辉长岩体在畜牧办及野马站地区呈岩滴分布(图 1b),侵入于下石炭统的姜巴斯套组,为长轴北西向展布的椭圆形形态,岩性单一。

角闪辉长岩(图 3b)与碱长花岗岩(图 3a)呈滑动侵入接触,接触带钾化蚀变明显,见大量的钾长石交代斑晶,岩浆混合现象明显,两者接触界线呈弯曲状,接触带岩性为石英闪长岩(图 3c),宽度在 $20 \sim 300\text{cm}$ 之间。

2.2 岩相学特征

据实测矿物含量的 Q-A-P 分类(图 4),滴水泉-畜牧办岩

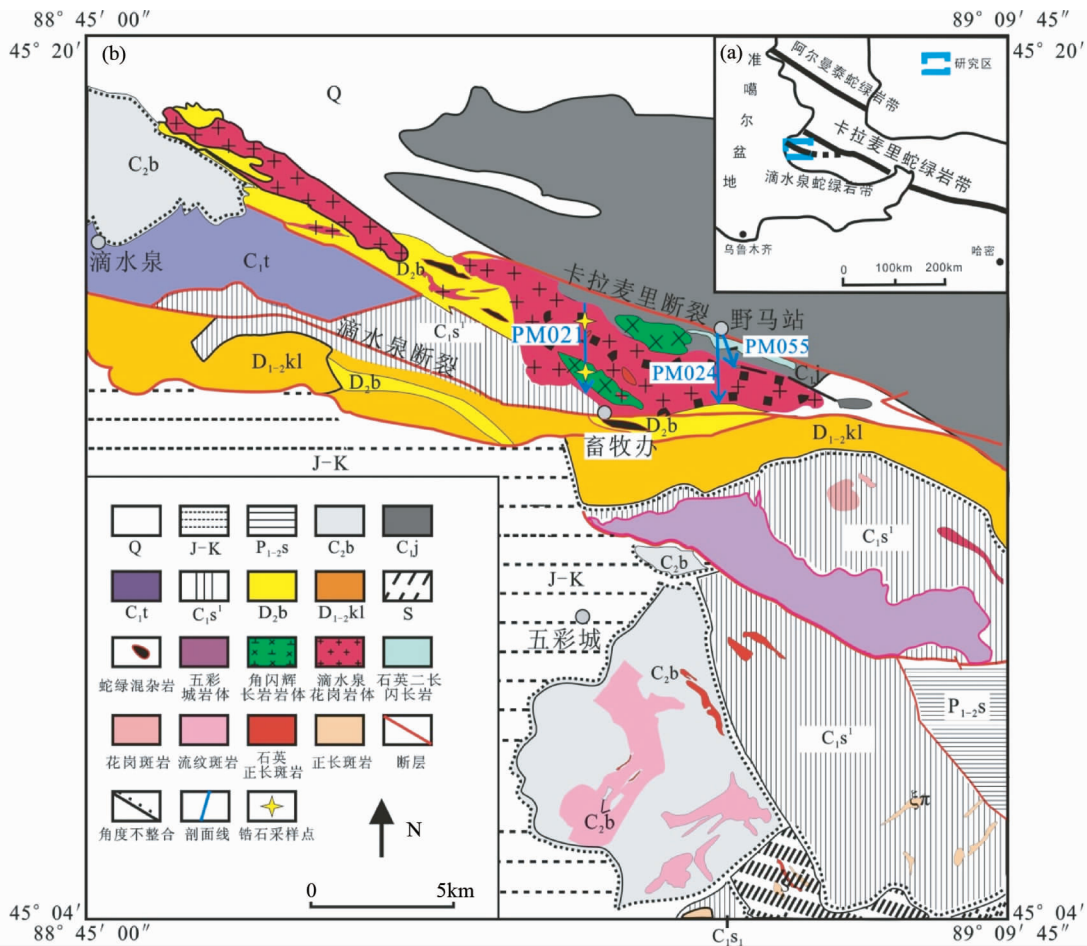


图1 北疆地区构造纲要图(a,据 Chen and Jahn, 2004; Yang *et al.*, 2011, 略修改)和滴水泉-畜牧办地质图(据樊光明等, 2014^①)

Q:第四系;J-K:侏罗系-白垩系;P_{1-2s}:二叠系胜利沟组;C_{2b}:上石炭统巴塔玛依内山组;C_j:下石炭统姜巴斯套组;C_{1t}:下石炭统塔木岗组;C_{1s¹}:下石炭统松尔苏组第一段;D_{2b}:中泥盆统北塔山组;D_{1-2k}:泥盆系卡拉麦里组;S:志留系

Fig. 1 Tectonic outline of the North Xinjiang (a, modified after Chen and Jahn, 2004; Yang *et al.*, 2011) and geological map of Dishuiquan region, showing the location of intrusions (b)

体的主体岩石单元为碱长花岗岩和角闪辉长岩,可见少量的碱长花岗斑岩、石英闪长岩及其他类型的浅成岩脉(图1b)。

碱长花岗斑岩:为碱长花岗岩体的边缘相或呈独立的岩脉产出,斑状结构(图5a),斑晶由碱性长石、石英、斜长石及黑云母组成,含量约10%;基质主要由长英质颗粒组成,显微晶质结构或隐晶质结构,局部可见石英与碱性长石组成的文象结构,约占90%。斑晶碱性长石为半自形-他形,粒径为0.2~1.5mm,以条纹长石为主,可见少量具格子双晶的微斜长石或简单双晶的正长石,弱高岭土化,约占5%~7%;斑晶石英为他形,熔蚀呈港湾状,粒径为0.2~1mm,大部分颗粒被长英质基质围绕,形成似球粒结构,约占2%~3%;斑晶斜长石呈自形柱状,粒径在0.2×0.5~0.3×0.7mm之间,聚片

双晶发育,含量1%左右;斑晶黑云母为半自形片状,粒径约为0.2×1或0.1×0.5mm,部分已蚀变为绿泥石,约占0.5%。此外,还含少量锆石、磷灰石、磁铁矿等副矿物。

碱长花岗岩:为碱长花岗岩体的主体岩性,代表了岩浆混合作用的酸性端元,半自形粒状结构(图5b),主要由石英(20%~35%)、碱性长石(50%~65%)、斜长石(5%~20%)和少量的黑云母(5%)组成。石英呈他形,熔蚀呈港湾状,粒径为0.2~2.5mm;碱性长石呈他形,粒径为0.2~4mm,以条纹长石为主,条纹呈纺锤状,弱高岭土化;斜长石为半自形-自形柱状,粒径在0.2×0.5~0.4×1mm之间,聚片双晶发育,弱绢云母化;黑云母:浅黄色-深褐色的多色性,半自形板状,粒度在0.2×0.5~0.3×1mm之间,部分已蚀

① 樊光明等. 2014. 卡拉麦里1:5万区域地质调查报告

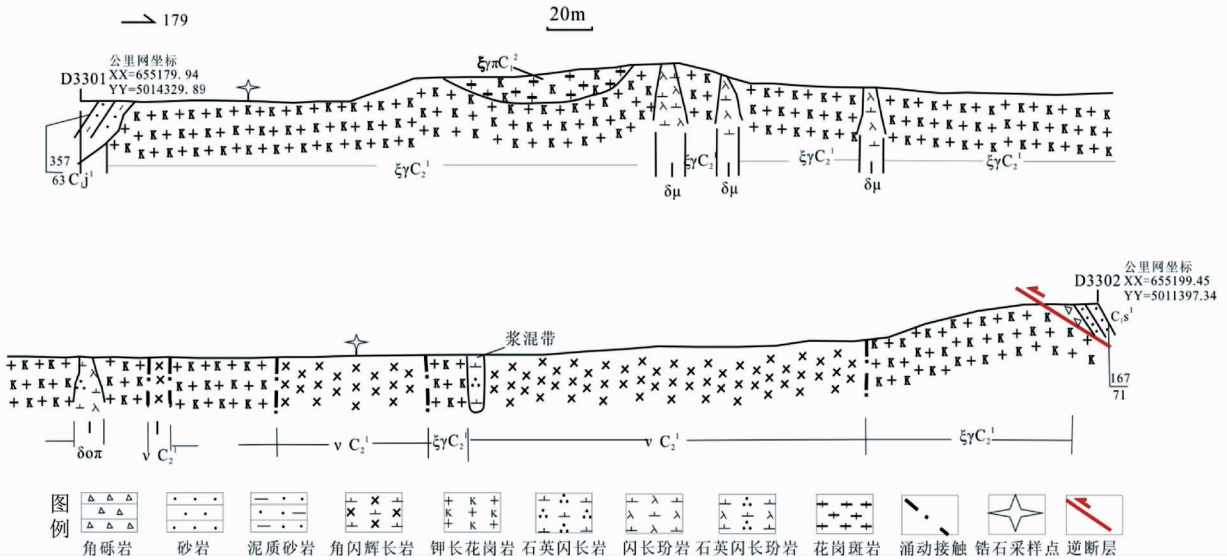


图2 滴水泉一带晚石炭世侵入岩实测剖面 (PM021)

Fig. 2 A geological section (PM021) for the Late Carboniferous intrusions of Dishuiquan

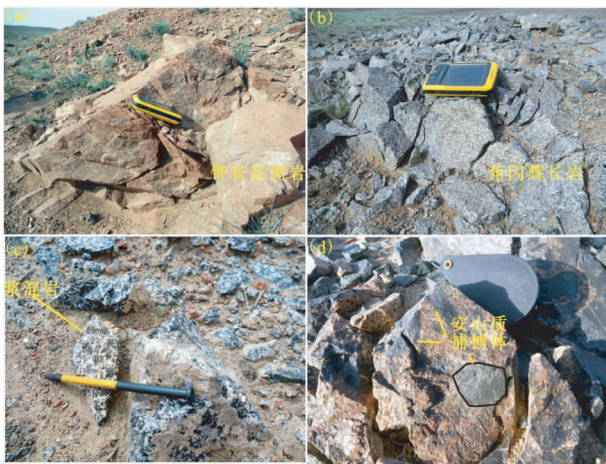


图3 滴水泉-畜牧办侵入岩野外露头照片
(a) 碱长花岗岩; (b) 角闪辉长岩; (c) 碱长花岗岩与角闪辉长岩的混合及浆混岩; (d) 碱长花岗岩中安山质捕掳体

Fig. 3 Outcrop photos of Dishuiquan intrusive rocks

变为磁铁矿。显微文象结构十分发育,部分样品为文象花岗岩(图5c),岩体靠近断层附近可见碎裂化细粒碱长花岗岩。副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿等。

角闪辉长岩:为角闪辉长岩体的主体岩性,代表了岩浆混合作用的基性端元,辉长辉绿结构,(图5d),主要由斜长石(50%~60%)、角闪石(30%~40%)和辉石(5%)组成,含有少量钾长石和石英(<5%),斜长石为自形长柱状,粒径普遍在0.2×0.5~0.4×1mm之间,聚片双晶及卡纳复合双晶发育,弱绢云母化;角闪石为浅黄色-暗绿色的多色性,半自形,多数颗粒呈长柱状,粒径在0.2×0.5~0.5×1.2mm之间,少数呈菱形,粒径在0.3×0.4~0.4×0.5mm之间,在角

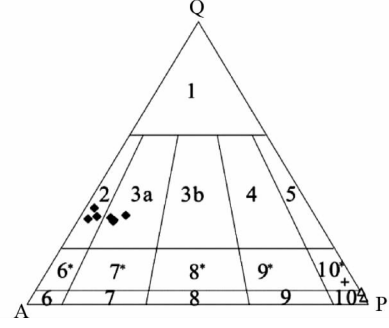


图4 滴水泉-畜牧办侵入岩 Q-A-P 分类图解 (底图据 Streckeisen and Le Maitre, 1979)

碱长花岗斑岩样品未参与投点

Fig. 4 Q-A-P classification diagram for the Dishuiquan intrusive rocks (after Streckeisen and Le Maitre, 1979)

闪石周围可见磁铁矿等细小晶体,形成反应边结构,发育简单双晶,部分已蚀变为绿泥石及绿帘石;辉石为半自形短柱状,正高突起,粒径为0.2~0.5mm;石英呈他形充填在其他矿物之间,粒径为0.2~0.3mm;副矿物为锆石、磷灰石等。虽然岩石中辉石含量较少,但其色率(暗色矿物含量较高)和化学成分(SiO₂<53%)已经达到基性岩的标准,因此本文把它归到辉长岩类。

石英闪长岩:分布于花岗岩与角闪辉长岩接触带附近,不等粒结构,斑杂构造(图5e),其矿物组成为斜长石(60%)、角闪石(25%)、辉石(5%)、石英(5%)、碱性长石(4%)及副矿物磁铁矿、锆石等(1%)。斜长石呈自形长柱状,粒径普遍在0.2×0.5~0.4×1mm之间,聚片双晶及卡纳复合双晶发育,可见斜长石具有溶蚀核心的环带结构(图5f),环带核部与边缘之间存在明显的界线,表面多见弱绢云

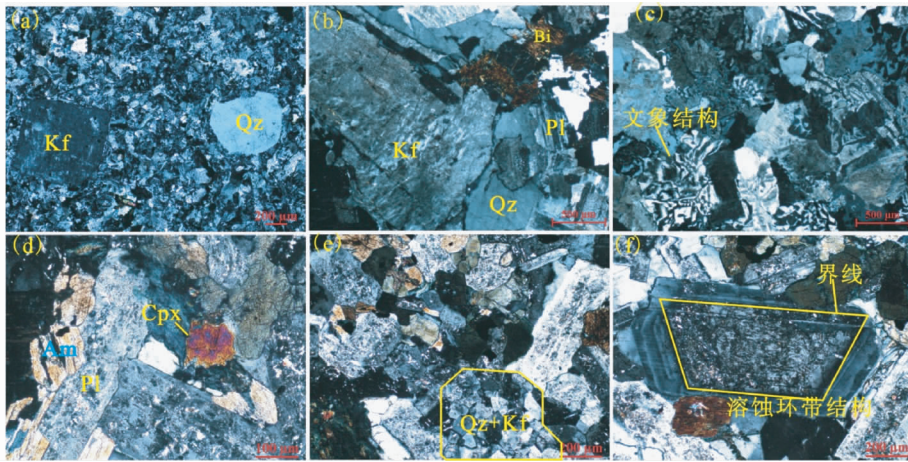


图5 滴水泉-畜牧办侵入体不同岩石单元的岩相学特征

(a) 碱长花岗岩; (b) 碱长花岗岩; (c) 文象花岗岩; (d) 角闪辉长岩; (e) 石英闪长岩的斑杂构造; (f) 石英闪长岩中斜长石溶蚀环带. Am-角闪石; Bi-黑云母; Cpx-单斜辉石; Kf-碱性长石; Pl-斜长石; Qz-石英

Fig. 5 Photomicrographs of Dishuiquan intrusive rocks, showing the typical textures

母化;角闪石呈浅黄色-暗绿色的多色性,半自形,多数呈长柱状,粒径为 $0.2 \times 0.5 \sim 0.3 \times 0.8\text{mm}$,少数呈菱形,粒径在 $0.3 \times 0.3 \sim 0.5 \times 0.5\text{mm}$ 之间,部分已蚀变为绿泥石及绿帘石;辉石为半自形,短柱状,正高突起,粒径为 $0.2 \sim 0.5\text{mm}$;碱性长石呈半自形,粒径在 $0.2 \times 0.5\text{mm}$ 左右,发育简单双晶;石英呈他形,熔蚀呈港湾状,粒径为 $0.2 \sim 0.5\text{mm}$,局部石英、碱性长石集中分布(图5e)。

3 分析方法

3.1 锆石测年

样品无污染碎样和锆石的挑选工作是在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成的。将挑选出的锆石粘贴制成环氧树脂样品靶,经过打磨抛光使锆石露出中心后进行透射光、反射光和阴极发光(CL)显微照相。锆石U-Pb同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用LA-ICP-MS分析完成的。实验过程采用Nist610、GJ-1外标和91500内标控制的方法,每隔5~6个数据点分别用两个91500标样校正。采用软件ICPMSDataCal对分析数据进行离线处理,以 ^{29}Si 作为内标校正锆石微量元素,详细的仪器操作过程和定年数据处理方法见Liu *et al.* (2008, 2010a, b),测试结果见表1。锆石U-Pb年龄谱和图的绘制和MSWD的计算均采用Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)。

3.2 全岩化学成分

样品去除风化面,将新鲜的样品分别装好、标号,主量元素、微量元素、稀土元素测试由湖北省地质实验研究所完成,其中主量元素中的氧化物测定采用X荧光光谱a系数测定

法, H_2O^+ 的测定采用重量法, CO_2 的测定采用非水滴定法,分析精度小于1%(H_2O^+ 和 CO_2 除外);微量元素、稀土元素测试则通过电感耦合等离子质谱仪完成,测试结果见表2。

3.3 Sr、Nd同位素

样品经风干后细碎过20目筛,再用玛瑙研钵磨至200目以下,供同位素分析测试。全岩Sr-Nd同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用MAT-261热电离同位素质谱仪进行测量,仪器的准确度通过标样NBS987和La Jolla国际标样进行监测,Sr同位素的质量分馏用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ 校正,Nd同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721900$ 校正,详细流程见Gao *et al.* (2004),测试结果见表3。

4 分析结果

4.1 锆石测年

本文对两个主要的岩石单元(碱长花岗岩(21-2-1)、角闪辉长岩(21-17-1))进行了锆石测年分析,2个样品的锆石均呈柱状的自形晶,长 $50 \sim 200\mu\text{m}$,长宽比为 $1:1 \sim 3:1$ 。阴极发光图像可见清晰生长环带, $\text{Th}/\text{U} > 0.1$,显示岩浆成因锆石的特征(图6a、表1)(Hoskin and Black, 2000; 吴元保和郑永飞, 2004)。由于岩体的锆石年龄小于1000Ma,故采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

碱长花岗岩共16个测点的谐合度较高($> 85\%$),其中5号与13号测点打在锆石的继承核位置,年龄较大,代表了早期的岩浆活动,未参与花岗岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄计算。其余14个测点均打在锆石生长环带上,Th和U含量分别为 $74.4 \times 10^{-6} \sim 576 \times 10^{-6}$ 和 $160 \times 10^{-6} \sim 580 \times$

表1 滴水泉碱长花岗岩与角闪辉长岩锆石 U-Pb 定年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of Dishuiquan granite and hornblende-gabbro

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		谐和度
					Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	Age (Ma)	1sigma	
021-2-1-01	79.7	2535	1135	2.23	0.1907	0.0085	1.2126	0.0565	0.046	0.0015	441.0	18.8	5%
021-2-1-02	23.6	212	384	0.55	0.0566	0.0023	0.4184	0.0167	0.0516	0.0007	324.3	4.1	91%
021-2-1-03	9.50	74.4	160	0.47	0.0532	0.0029	0.3745	0.0191	0.0518	0.0009	325.3	5.3	99%
021-2-1-04	74.0	2037	1482	1.37	0.1612	0.0108	0.6599	0.0421	0.0311	0.0008	197.6	5.1	10%
021-2-1-05	18.5	157	259	0.60	0.0587	0.0028	0.4794	0.0225	0.0581	0.0008	363.8	4.6	91%
021-2-1-06	25.1	237	404	0.59	0.056	0.0027	0.4117	0.0174	0.0523	0.0007	328.4	4.3	93%
021-2-1-07	23.3	196	231	0.85	0.161	0.0155	2.1722	0.2801	0.0708	0.0031	289.8	9.0	9%
021-2-1-08	36.6	350	580	0.6	0.061	0.0024	0.4322	0.0146	0.051	0.0006	320.7	3.9	87%
021-2-1-09	25.8	221	426	0.52	0.0544	0.0021	0.3823	0.0131	0.0506	0.0006	318.1	3.6	96%
021-2-1-10	26.3	298	416	0.72	0.0537	0.002	0.3771	0.0129	0.0504	0.0006	317.0	3.4	97%
021-2-1-11	45.4	604	731	0.83	0.0617	0.0021	0.4286	0.0159	0.0495	0.0006	311.3	3.9	80%
021-2-1-12	33.1	368	546	0.67	0.0899	0.0194	0.5007	0.0514	0.0463	0.0007	292.0	4.1	65%
021-2-1-13	21.2	148	196	0.75	0.0578	0.0022	0.6912	0.0265	0.0862	0.0011	533.1	6.6	99%
021-2-1-14	24.1	252	399	0.63	0.07	0.0108	0.4258	0.0349	0.0485	0.0007	305.5	4.3	81%
021-2-1-15	27.6	271	449	0.60	0.0523	0.0018	0.3665	0.0127	0.0505	0.0005	317.6	3.4	99%
021-2-1-16	32.7	328	504	0.65	0.0578	0.0016	0.4134	0.0113	0.0518	0.0006	325.4	3.4	92%
021-2-1-17	18.5	197	304	0.65	0.0648	0.0031	0.4422	0.0204	0.0494	0.0007	311.0	4.3	82%
021-2-1-18	24.5	305	379	0.81	0.0696	0.0037	0.526	0.0371	0.0523	0.0011	328.6	6.5	73%
021-2-1-19	22.5	213	364	0.58	0.0514	0.0017	0.3699	0.012	0.0519	0.0006	326.0	3.4	97%
021-2-1-20	43.2	667	666	1.00	0.0687	0.0021	0.4761	0.0138	0.0506	0.0008	318.2	5.2	78%
021-2-1-21	31.1	296	493	0.6	0.0534	0.0015	0.3831	0.0115	0.0513	0.0004	322.6	2.7	97%
021-2-1-22	24.3	169	375	0.45	0.0591	0.0015	0.4401	0.0126	0.0532	0.0005	334.3	3.0	80%
021-2-1-23	30.3	323	501	0.64	0.0697	0.0022	0.481	0.0169	0.0494	0.0005	310.7	3.0	75%
021-2-1-24	13.7	116	230	0.51	0.0563	0.0025	0.3961	0.0177	0.0504	0.0006	317.2	3.8	93%
021-2-1-25	38.1	576	542	1.06	0.0579	0.0015	0.4036	0.01	0.0503	0.0005	316.6	2.9	91%
021-2-1-26	24.7	240	399	0.60	0.0596	0.0019	0.3991	0.0106	0.0488	0.0006	307.4	3.4	79%
021-2-1-27	37.4	374	569	0.66	0.0521	0.0011	0.3769	0.0104	0.0513	0.0005	322.7	3.2	99%
021-2-1-28	31.4	435	476	0.91	0.0554	0.0015	0.401	0.0134	0.0505	0.0006	317.6	3.7	92%
021-17-1-01	40.8	537	595	0.90	0.0527	0.0016	0.3637	0.0109	0.0497	0.0005	312.7	3.0	99%
021-17-1-02	31.4	393	444	0.88	0.0586	0.0020	0.4073	0.0137	0.0501	0.0005	315.1	3.2	90%
021-17-1-03	5.59	39.4	92.2	0.43	0.0559	0.0034	0.3880	0.0234	0.0505	0.0010	317.5	5.8	95%
021-17-1-04	58.3	935	777	1.20	0.0545	0.0016	0.3903	0.0120	0.0513	0.0005	322.6	3.2	96%
021-17-1-05	12.2	126	193	0.65	0.0543	0.0028	0.3737	0.0195	0.0498	0.0007	313.1	4.5	97%
021-17-1-06	58.2	819	839	0.98	0.0558	0.0018	0.3859	0.0129	0.0496	0.0005	311.9	3.3	93%
021-17-1-07	43.4	547	618	0.89	0.0546	0.0019	0.3894	0.0138	0.0513	0.0006	322.3	3.8	96%
021-17-1-08	36.8	494	527	0.94	0.0535	0.0016	0.3739	0.0113	0.0504	0.0005	316.8	3.2	98%
021-17-1-09	48.9	655	702	0.93	0.0509	0.0014	0.3594	0.0103	0.0506	0.0005	318.2	2.9	97%
021-17-1-10	75.5	1598	902	1.77	0.0503	0.0012	0.3545	0.0088	0.0506	0.0004	318.2	2.4	96%
021-17-1-11	7.28	42.7	104	0.41	0.1100	0.0067	0.8591	0.0694	0.0538	0.0014	337.9	8.4	39%
021-17-1-12	22.0	231	325	0.71	0.0554	0.0024	0.3791	0.0173	0.0494	0.0005	310.8	3.1	95%
021-17-1-13	55.7	863	777	1.11	0.0580	0.0013	0.4097	0.0104	0.0504	0.0005	316.9	3.1	90%
021-17-1-14	24.8	282	373	0.76	0.0554	0.0021	0.3862	0.0144	0.0508	0.0005	319.2	3.1	96%
021-17-1-15	16.6	157	233	0.68	0.0979	0.0048	0.7210	0.0366	0.0523	0.0007	328.4	4.1	49%
021-17-1-16	77.4	1531	926	1.65	0.0528	0.0011	0.3804	0.0080	0.0515	0.0004	323.6	2.2	98%
021-17-1-17	70.4	1199	893	1.34	0.0542	0.0011	0.3952	0.0087	0.0519	0.0004	326.5	2.2	96%
021-17-1-18	37.8	482	548	0.88	0.0578	0.0017	0.4114	0.0134	0.0509	0.0005	319.8	3.2	91%
021-17-1-19	51.9	827	676	1.22	0.0537	0.0014	0.3936	0.0110	0.0523	0.0005	328.7	2.8	97%
021-17-1-20	52.7	797	743	1.07	0.0509	0.0012	0.3585	0.0093	0.0508	0.0005	319.4	2.9	97%

表2 滴水全一带侵入岩的全岩主量元素(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)数据Table 2 Whole-rock major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of Dishuiquan intrusive rocks

样品号	021-2-1	021-3-1	021-8-1	021-11-1	021-16-1	024-5-1	024-6-1	024-11-1	024-15-1	055-13-1	021-14-1	021-17-1	021-17-3
岩性	细粒碱 长花岗岩	碱长花 岗斑岩	文象碱 长花岗岩	中粒碱 长花岗岩	中-细粒碱 长花岗岩	细粒碱 长花岗岩	细-中粒碱 长花岗岩	碱长花 岗斑岩	中-细粒碱 长花岗岩	碎裂化碱 长花岗岩	角闪辉长岩		石英闪 长岩
SiO ₂	74.03	71.07	76.71	75.48	75.69	72.52	75.58	75.34	73.67	75.85	52.81	52.66	56.09
TiO ₂	0.19	0.39	0.10	0.14	0.15	0.23	0.12	0.13	0.23	0.11	1.34	1.32	1.67
Al ₂ O ₃	13.10	13.65	12.49	13.01	12.73	14.13	12.94	12.94	13.56	12.72	17.06	16.94	16.76
Fe ₂ O ₃	0.93	0.87	0.91	1.09	0.74	0.47	0.92	0.59	0.74	0.86	2.61	2.65	2.65
FeO	0.52	1.73	0.25	0.28	0.48	1.41	0.38	0.77	0.95	0.48	5.18	5.15	5.38
MnO	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.14	0.15	0.15
MgO	0.26	1.10	0.12	0.12	0.17	0.71	0.11	0.16	0.42	0.12	5.34	5.39	3.19
CaO	0.87	0.93	0.33	0.47	0.71	1.92	0.31	0.69	0.99	0.40	8.66	8.39	6.17
Na ₂ O	4.21	4.08	4.01	4.35	3.98	3.69	4.27	3.81	4.12	4.47	3.32	3.64	4.06
K ₂ O	4.86	4.65	4.55	4.42	4.66	3.72	4.77	4.94	4.32	4.23	1.00	1.19	1.74
P ₂ O ₅	0.06	0.07	0.02	0.03	0.02	0.07	0.02	0.02	0.05	0.02	0.32	0.31	0.34
H ₂ O ⁺	0.45	1.12	0.25	0.39	0.31	0.78	0.36	0.37	0.64	0.39	1.85	1.82	1.53
CO ₂	0.33	0.11	0.09	0.07	0.17	0.14	0.05	0.05	0.12	0.04	0.17	0.19	0.09
烧失量	0.72	1.02	0.29	0.41	0.49	0.74	0.37	0.34	0.65	0.30	1.49	1.52	1.08
La	34.0	25.1	25.7	28.5	24.8	26.0	18.5	25.8	23.3	12.44	18.6	20.5	23.2
Ce	57.8	58.0	65.9	63.4	50.8	47.9	41.9	54.9	52.8	31.59	39.7	43.8	52.3
Pr	6.38	6.09	5.93	6.87	5.65	5.94	4.54	6.27	5.43	3.36	5.57	5.99	6.95
Nd	22.3	22.6	21.8	26.6	20.9	22.6	17.8	23.2	20.6	13.59	24.7	26.0	30.7
Sm	3.80	4.60	4.58	5.38	4.27	4.49	4.09	4.86	4.29	3.56	5.62	5.84	6.99
Eu	0.532	0.907	0.332	0.524	0.487	0.803	0.423	0.439	0.730	0.31	1.78	1.83	2.06
Gd	3.59	4.54	4.34	5.16	4.27	4.12	4.33	5.08	4.12	3.89	5.40	5.84	6.96
Tb	0.609	0.798	0.832	0.953	0.795	0.696	0.878	0.934	0.731	0.78	0.919	0.957	1.20
Dy	3.54	4.75	5.29	5.60	4.84	4.07	5.49	5.88	4.43	5.16	5.33	5.52	6.78
Ho	0.755	1.01	1.09	1.14	1.01	0.828	1.17	1.27	0.932	1.08	1.08	1.12	1.35
Er	2.30	3.04	3.42	3.51	3.07	2.49	3.58	3.90	2.74	3.53	2.93	3.07	3.77
Tm	0.385	0.507	0.584	0.575	0.527	0.412	0.601	0.667	0.464	0.57	0.447	0.473	0.576
Yb	2.61	3.40	3.87	3.78	3.45	2.83	3.94	4.41	3.08	4.13	2.77	2.86	3.48
Lu	0.401	0.538	0.605	0.600	0.550	0.455	0.611	0.691	0.484	0.63	0.417	0.437	0.518
Y	21.0	27.6	30.7	32.0	28.4	22.7	32.6	35.0	25.9	31.81	27.9	27.6	35.2
ΣREE	160	164	175	185	154	146	140	173	150	116	143	152	182
Be	2.76	1.44	3.55	3.49	2.81	1.98	3.19	3.61	2.45	4.22	1.13	1.14	1.51
Ni	1.54	13.4	2.45	1.49	1.75	3.41	0.92	1.94	2.69	1.20	36.9	35.5	10.0
Sc	2.29	6.65	3.64	4.50	3.68	5.59	4.29	4.28	4.48	3.95	27.2	27.5	21.2
V	7.97	37.9	5.93	8.87	12.2	28.0	5.44	7.04	14.6	4.4	193	182	185
Pb	15.2	12.1	17.9	15.2	16.3	18.9	20.5	12.3	15.3	14.52	4.08	3.80	5.54
Cr	16.6	25.1	11.3	11.6	8.60	23.1	17.5	19.3	18.7	5.9	113	106	24.4
Co	1.19	6.05	1.23	0.77	1.37	3.32	0.58	1.27	2.37	0.69	29.3	27.9	22.2
Rb	132	131	136	124	120	110	141	147	133	118.3	20.0	28.3	42.7
Cs	2.78	2.20	2.86	2.19	1.63	4.05	3.20	1.65	4.15	2.10	1.78	1.31	1.47
Ta	0.99	0.91	1.39	1.13	1.00	0.85	1.30	1.11	0.92	0.89	0.62	0.45	0.97
Nb	9.23	8.53	13.1	11.4	9.85	7.33	11.4	9.84	7.79	9.86	7.59	7.15	10.8
Hf	5.71	6.14	4.42	5.87	5.64	4.20	5.98	5.09	5.15	6.3	4.43	4.28	7.78
Zr	171	197	133	176	169	132	179	153	154	178	133	129	233
Th	11.1	12.2	12.1	11.4	14.7	12.2	10.9	15.5	12.5	12.35	2.23	1.94	3.67
U	1.92	3.38	1.83	2.39	2.70	2.27	2.29	4.34	2.25	3.06	0.60	0.57	0.91
Ba	330	493	236	328	370	549	326	261	403	343.8	329	318	304
Sr	77.2	132	40.0	44.7	60.1	169	33.5	77.5	103	44.3	503	521	406
Ga	14.1	16.2	17.6	17.7	15.8	17.0	18.8	19.2	18.2	17.89	21.4	20.5	21.8
FeO ^T	1.36	2.51	1.07	1.26	1.15	1.83	1.21	1.30	1.62	1.25	7.53	7.53	7.76
Fe ₂ O ₃ ^T	1.51	2.79	1.19	1.40	1.27	2.04	1.34	1.45	1.80	1.39	8.37	8.37	8.63
K ₂ O/Na ₂ O	1.15	1.14	1.13	1.02	1.17	1.01	1.12	1.30	1.05	0.95	0.30	0.33	0.43
A/CNK	0.95	1.02	1.03	1.02	0.99	1.04	1.01	1.01	1.02	1.00	0.77	0.75	0.85
A/NK	1.08	1.16	1.08	1.09	1.10	1.40	1.06	1.11	1.18	1.07	2.61	2.33	1.96
Mg [#]	28.7	47.9	19.1	16.6	23.7	44.8	16.0	20.5	35.3	16.7	59.8	60.0	46.3

注: Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + TFe²⁺); A/CNK = 摩尔 Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O); A/NK = 摩尔 Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O)

表 3 滴水泉-畜牧办侵入体 Sr、Nd 同位素数据

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of Dishuiquan granites

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)
021-17-1	28.3	521	0.15729	0.70431	0.7036	5.84
021-2-1	124	44.7	8.03273	0.73276	0.6961	5.38
055-13-1	118.3	44.3	7.73268	0.73367	0.6984	3.56
样品号	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM1}}^{\text{Nd}}$ (Ga)	$t_{\text{DM2}}^{\text{Nd}}$ (Ga)
021-17-1	26.0	0.13626	0.51279	5.4		
021-2-1	26.6	0.12270	0.51277	5.5	0.65	0.63
055-13-1	13.59	0.15892	0.51286	5.9	0.81	0.60

注: $t = 320\text{Ma}$. 同位素校正公式: $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{样品}} + ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(e^{\lambda t} - 1)$, $\lambda_{\text{Rb-Sr}} = 1.42 \times 10^{-11} \cdot \text{a}^{-1}$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}(t)} - 1] \times 10^4$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}(t)} = 0.512638 - 0.1967 \times (e^{\lambda t} - 1)$. $\lambda_{\text{Sm-Nd}} = 6.54 \times 10^{-12} \cdot \text{a}^{-1}$; 单阶段 Nd 模式年龄 (t_{DM1}) 与两阶段 Nd 模式年龄 (t_{DM2}) 的计算公式见 Li *et al.* (2003)

10^{-6} , Th/U 比值范围为 0.47 ~ 1.06 (表 1), 位于谐和线上及谐和线附近, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $321 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD = 1.2) (图 6b), 代表了花岗岩浆的结晶年龄。

角闪辉长岩共 16 个测点谐合度较高 (> 90%), Th 和 U 含量分别为 $39.4 \times 10^{-6} \sim 1598 \times 10^{-6}$ 和 $92.2 \times 10^{-6} \sim 926 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.43 ~ 1.77 (表 1), 16 个测点全部位于谐和线上及其附近, 数据质量较高, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $319 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD = 3.0) (图 6c), 代表了辉长质岩浆的结晶年龄。

综上所述, 碱长花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $321 \pm 2\text{Ma}$, 角闪辉长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $319 \pm 3\text{Ma}$, 两者的锆石年龄在误差范围内基本一致, 与野外观察到的涌动接触关系吻合。按照最新的国际地质年表关于早石炭世与晚石炭世的界线划分 (Gradstein *et al.*, 2012), 该侵入体形成于晚石炭世早期。

4.2 岩石地球化学

碱长花岗岩体 SiO_2 含量为 71.07% ~ 76.71%, 全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 为 7.41% ~ 9.07%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 从 0.95 变化到 1.30, 平均为 1.10。在 SiO_2 - K_2O 图中 (图 7a), 所有样品的投点均落在高钾钙碱性系列区, 铝饱和指数小于 1.1 ($A/\text{CNK} = 0.95 \sim 1.04$), 为准铝质-弱过铝质 (图 7b), 低镁 (MgO 含量为 0.11% ~ 1.10%)、低钛 (TiO_2 含量为 0.10% ~ 0.39%)。角闪辉长岩 SiO_2 含量为 52.66% ~ 52.81%, MgO 为 5.34% ~ 5.39%, FeO^T 为 7.53%, 铁镁含量较高与岩相学中暗色矿物含量较高吻合, 而且岩石中 $\text{Mg}^\#$ 为 60, 接近但低于原生玄武质岩浆成分 ($\text{Mg}^\# = 65$), 反映了幔源岩浆分异演化的特点。全碱含量为 4.32% ~ 4.83%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 3.06 ~ 3.32), SiO_2 - K_2O 图中 (图 7a), 岩石总体为中钾钙碱性系列。岩浆混合的石英闪长岩的 SiO_2 含量为 56.09%, 较角闪辉长岩的 MgO 含量偏低 (3.19%)、全碱含量偏高 (5.80%), 化学成分介于角闪辉长岩与碱长花岗岩之

间, 岩石系列与角闪辉长岩一致, 为中钾钙碱性。

微量元素原始地幔标准化蛛网图上 (图 8a), 碱长花岗岩体的所有样品均具相似的分布型式, 富集 Rb、K、Pb, 不的亏损 Ba、P、Ti, 与黄羊山后碰撞花岗岩的特点类似。Ti 的负异常主要为钛铁矿或者金红石的分离结晶, P 的负异常主要受磷灰石分离的影响, Ba 的负异常则反映了斜长石的分离结晶。角闪辉长岩表现出与花岗岩类不同的分配型式, 大离子亲石元素 (LILE) K、Sr、Ba 明显富集, 高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Th、Zr、Ti 相对亏损。石英闪长岩的微量元素配分曲线与角闪辉长岩的基本一致, 但其 Rb 的富集又显示出与花岗岩类似的特征。

稀土元素球粒陨石标准化图上, 碱长花岗岩体的所有样品配分型式一致 (图 8b), 具 LREE 略富集的右倾配分型式。 $\Sigma\text{REE} = 116.4 \times 10^{-6} \sim 184.6 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.16 \sim 9.35$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.97 \sim 5.57$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.78 \sim 1.45$, 表明轻、重稀土分馏程度弱-中等, 轻稀土内部元素之间分馏相对较弱、重稀土内部几乎无分馏。弱-中等的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.23 \sim 0.73$), 可能反映了斜长石的分离结晶作用。角闪辉长岩 ΣREE 含量较高 ($143 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$), $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.82 \sim 5.15$, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 2.14 \sim 2.26$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.61 \sim 1.69$, 表明轻、重稀土分馏程度相对较强, 轻稀土、重稀土内部元素之间的分馏程度较弱, 无铕异常 ($\delta\text{Eu} = 0.96 \sim 0.99$), 呈轻稀土元素 (LREE) 略富集、重稀土元素 (HREE) 比较平坦的右倾型配分模式。角闪辉长岩较高的 ΣREE ($143 \times 10^{-6} \sim 152 \times 10^{-6}$) 及较大的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值 (4.82 ~ 5.15) 反映了源区可能有俯冲板片的参与 (徐夕生和邱检生, 2010)。石英闪长岩的稀土元素配分型式与角闪辉长岩的基本一致。

4.3 Sr-Nd 同位素

同位素数据表明 (表 3), 角闪辉长岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.7036, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +5.4$, 显示出亏损地幔的特征。碱长花岗

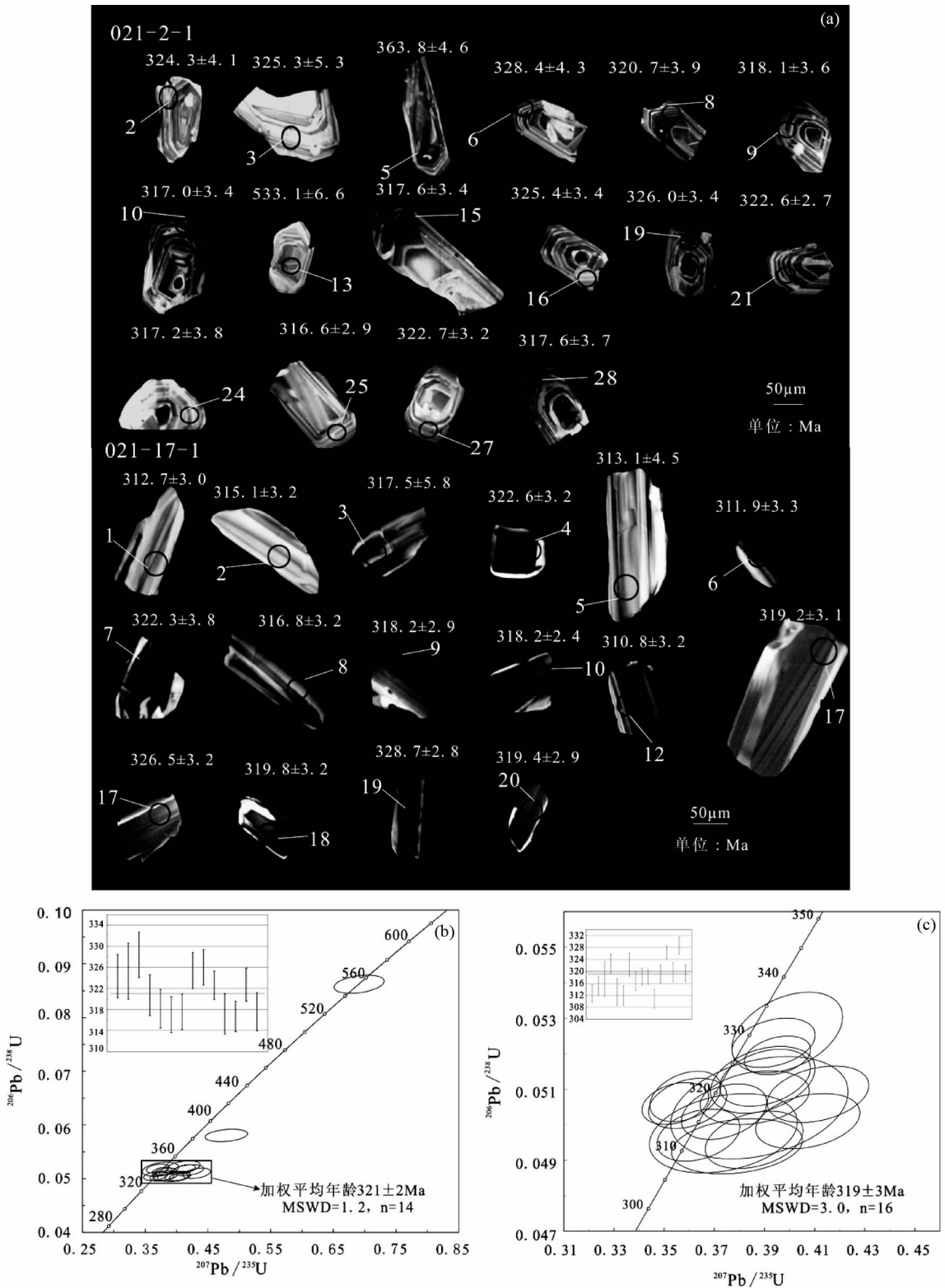


图6 五彩城碱长花岗岩及角闪辉长岩的锆石 CL 图像(a)、锆石 U-Pb 年龄谐和图(b, 花岗岩样品 21-2-1; c, 角闪辉长岩样品 21-17-1)

Fig. 6 Cathodoluminescence images of zircons from Dishuiquan granite and hornblende-gabbro (a), zircon U-Pb concordia and weighted mean plots for granite (Sample 21-2-1) (b) and hornblende-gabbro (Sample 21-17-1) (c)

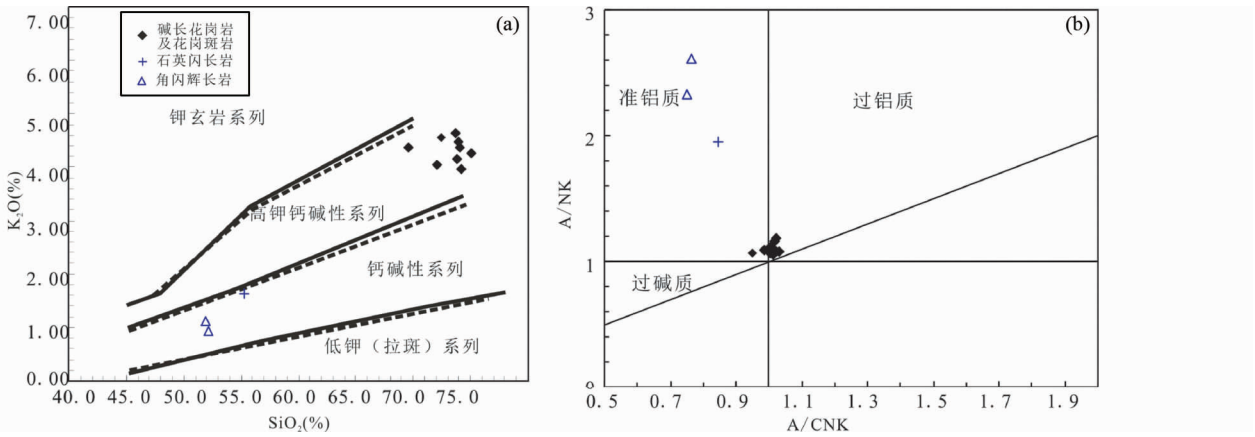


图7 K_2O-SiO_2 图解 (a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976) 和 $A/NK-A/CNK$ 图解 (b, 据 Shand, 1927)

Fig. 7 K_2O vs. SiO_2 diagram (a, Peccerillo and Taylor, 1976) and A/NK vs. A/CNK diagram (b, after Shand, 1927)

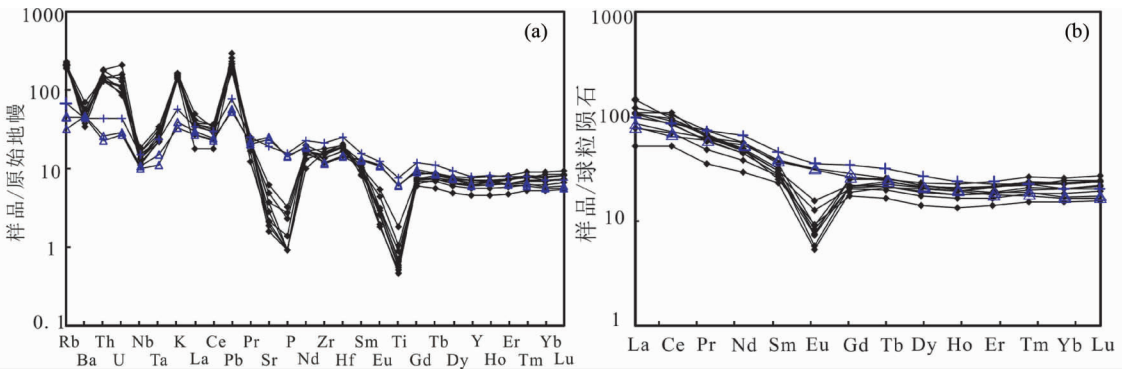


图8 滴水泉-畜牧办侵入岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Dishuiquan intrusive rocks (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

岩 Rb/Sr 偏大, 导致 $I_{Sr} < 0.7000$, 因此其实际应用意义不大 (Han *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2002), 而正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值及年轻的 Nd 模式年龄 (表 3), 则反映了年轻地壳部分熔融的特征。

5 讨论

5.1 滴水泉-畜牧办花岗岩体的成因类型

滴水泉-畜牧办花岗岩体铝饱和指数 (A/CNK) < 1.1 , 且没有出现富铝的硅酸盐矿物, 因此并不具有 S 型花岗岩的特点。岩石高硅 (71.07% ~ 76.71%)、富碱 (7.41% ~ 9.07%, 平均值为 8.61%)、 K_2O/Na_2O 平均值为 1.10 且 Na_2O 含量较高 (平均值为 4.10%), 富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素, 强烈亏损 Ba、Ti、P 等元素, 显示出 A 型花岗岩的特点。($Na_2O + K_2O - CaO$)- SiO_2 (图 9a) 及 $FeO^T/(FeO^T + MgO) - SiO_2$ (图 9b) 图解中样品点也落在 A 型花岗岩的区域内。但其

P_2O_5 与 SiO_2 较好的负相关性, CIPW 标准矿物计算中 C 分子 < 1 , 又显示出 I 型花岗岩的特点 (Chappell and White, 1974; Chappell, 1999)。在岩石成因划分 $FeO^T/MgO-10000Ga/Al$ (图 9c) 和 $(Na_2O + K_2O)/CaO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ (图 9d) 图解中, 大多数样品落在 I 型与 A 型花岗岩的界线附近, 所以, 滴水泉-畜牧办碱长花岗岩具有 I 型-A 型过渡的特点。

5.2 岩石成因

角闪辉长岩正的 ε_{Nd} 值 (+5.4)、低的 I_{Sr} 值 ($^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.70359$, 表明岩浆源自亏损的软流圈地幔源区 (图 10a), 尽管 $\varepsilon_{Nd} - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解中样品点落在 OIB 范围内, 但是辉长岩明显的 Nb 和 Ta 的负异常及岩体规模较小排除了地幔柱成因的可能 (Wilson, 1989; 徐夕生和邱检生, 2010)。在大多数情况下, 由于俯冲板片的脱水和部分熔融产生的对上覆地幔的交代作用会导致岩石圈地幔在同位素方面具有富集型特征, 而且来自消减板片流体/熔体交代改

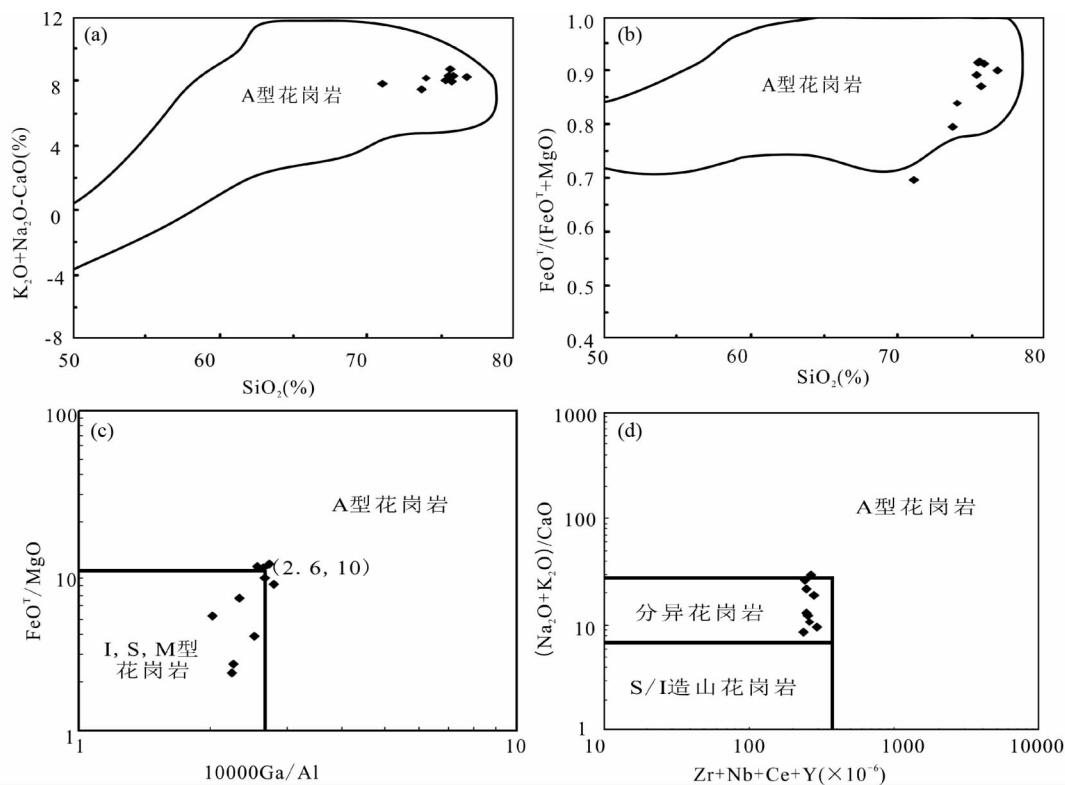


图9 滴水泉-畜牧办花岗岩类的岩石成因判别

(a) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$; (b) $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$ (Frost *et al.*, 2001; Frost and Frost, 2011); (c) $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} - 10000\text{Ga}/\text{Al}$ (Whalen *et al.*, 1987); (d) $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ (Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 9 Discrimination diagrams for the Dishuiquan intrusive rocks

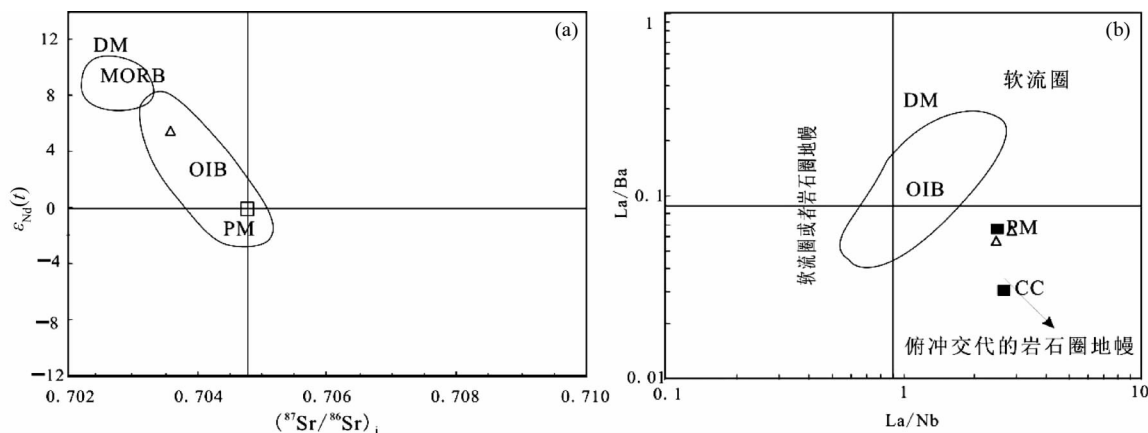


图10 滴水泉-畜牧办角闪辉长岩的源区特征

(a) $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解; (b) $\text{La}/\text{Ba} - \text{La}/\text{Nb}$ 图解

Fig. 10 Source characters of the Dishuiquan hornblende-gabbro sample

造地幔楔的过程也会导致岩浆体系具有俯冲相关的部分地球化学特征 (Pearce *et al.*, 1990; Turner *et al.*, 1992)。由于 La、Ba、Nb 具有相近的分配系数, 分离结晶作用不会影响岩浆中 La/Nb、La/Ba 比值, 而且岩浆演化过程中未见同化混染现象 (锆石年龄集中, 未见捕获锆石, 且野外也未见围岩捕掳

体), 因此, 这些元素对比值的显著不同可以指示源区特征 (Saunders *et al.*, 1992; Woodhead *et al.*, 2001)。La/Ba-La/Nb 的关系 (图 10b) 显示岩浆源区存在俯冲板片的交代改造, 大离子亲石元素 (LILE) K、Sr、Ba 明显富集, 高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Th、Zr、Ti 相对亏损的特点也与板片熔融的特

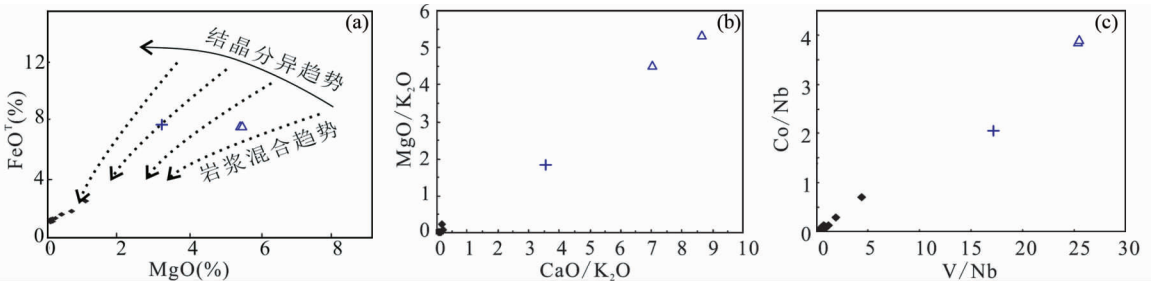


图 11 滴水泉-畜牧办花岗岩与辉长岩的岩浆混合作用的判别图解

(a) $\text{FeO}^{\text{T}}\text{-MgO}$ (Zorpi *et al.*, 1989); (b) $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O}\text{-CaO}/\text{K}_2\text{O}$; (c) $\text{Co}/\text{Nb}\text{-V}/\text{Nb}$

Fig. 11 Discrimination diagrams of selected element for magma mixing of the Dishuiquan granite and hornblende-gabbro

征一致。所以,角闪辉长岩体源于亏损的软流圈地幔的部分熔融,同时受到交代的地幔楔物质的影响。

碱长花岗岩正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(表 3)反映了岩浆源区具有幔源属性。对于具有正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的花岗岩类的岩石成因,主要有以下三种观点:(1)底侵的幔源岩浆高度分异(Han *et al.*, 1997; 韩宝福等, 1998);(2)花岗岩形成同期的底侵体(Wu *et al.*, 2002; 吴福元等, 2007);(3)幔源底侵岩浆之上的年轻地壳的部分熔融(Coleman, 1989; 洪大卫, 2000; Wu *et al.*, 2002; Chen and Jahn, 2004; 吴福元等, 2007; 苏玉平等, 2008; 郭芳放等, 2010)。

虽然不同学者对这些具有幔源属性的花岗岩类的源区来源存在异议,但大多数地质学家认为巨量花岗岩的产出与岩浆底侵作用有着密切的关系(Chen and Jahn, 2004; 吴福元等, 1999; 洪大卫, 2002; 杨高等, 2008, 2009, 2010)。地球物理资料也表明了卡拉麦里地区幔源底侵体的存在(Chen and Jahn, 2004),但是到目前为止并未发现真正的幔源底侵体,更多的研究为岩浆混合成因的包体(杨高等, 2008, 2009, 2010)。

莫宣学等(2007)指出底侵作用产生的镁铁质火成岩,应在区域上具有普遍性和近同时性,并与区域岩浆混合作用有密切关系;金振民和高山(1996)、刘和甫等(2000)认为底侵作用常发生在大陆裂谷环境中,可能伴随着双峰式火山岩的产出。滴水泉-畜牧办侵入体形成于主碰撞之后的陆内环境,碱长花岗岩与辉长岩时代一致,岩浆混合作用明显,与辉长岩+花岗岩相对应的晚石炭世早期双峰式火山岩(朱志新等, 2005; 汪帮耀等, 2011)极为发育,同时代的岩浆混合包体也十分常见(杨高等, 2008, 2009, 2010),这些特征均显示卡拉麦里地区在晚石炭世存在一次明显的玄武质岩浆底侵过程。最为重要的是,角闪辉长岩源于亏损的软流圈地幔,微量元素具有交代的地幔楔物质的特点表明了辉长质岩浆起源于岩石圈根部。所以,角闪辉长岩代表了底侵的幔源岩浆。晚石炭世早期底侵体的发现,为卡拉麦里地区后碰撞花岗岩类的幔源底侵作用提供了可靠的地质依据。

那么,滴水泉-畜牧办花岗岩类是来自底侵的幔源岩浆还是底侵体之上的年轻地壳呢?首先,我们试想,如果花岗

岩类源于底侵的幔源岩浆或幔源底侵体,那么花岗岩与辉长岩应具有同源岩浆分异演化的特点。但是 20~300cm 宽的岩浆混合带以及出露的具有浆混性质的石英闪长岩,体现了岩浆混合的特点; $\text{FeO}^{\text{T}}\text{-MgO}$ 图解(图 11a)显示出碱长花岗岩体与角闪辉长岩体为岩浆混合趋势,而不是岩浆结晶分异趋势;同分母图解 $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O}\text{-CaO}/\text{K}_2\text{O}$ 及 $\text{Co}/\text{Nb}\text{-V}/\text{Nb}$ 的线性关系(图 11b, c)表明两者之间并非同源岩浆分异(周珣若, 1994),因为同源岩浆演化这些地球化学图解多为折线(Kwon *et al.*, 1989; 周珣若, 1994; 中国科学院地球化学研究所, 1998);同位素方面,花岗岩与辉长岩具有相近的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,也反映了两种不同岩浆混合的特点。所以,滴水泉-畜牧办花岗岩类并不是源于底侵的幔源岩浆或者同期的底侵体。因此,花岗岩最可能的来源为底侵体之上的年轻地壳,这一认识与花岗岩具有年轻的 Nd 模式年龄的特点相符。

在卡拉麦里地区,笔者之前对五彩城岩体的研究也得到了同样的认识,即五彩城花岗岩来源于幔源岩浆之上的年轻地壳,壳幔混合形成了石英二长闪长岩等浆混岩(田健等, 2015)。与卡拉麦里断裂以南相比,断裂以北后碰撞花岗岩的研究更为广泛。Su *et al.* (2007)、苏玉平等(2008)及郭芳放等(2010)对卡拉麦里断裂以北的黄羊山岩体的研究表明其花岗岩来自于年轻洋壳的部分熔融;杨高等(2008, 2010)对库布苏南岩体的研究同样表明其花岗岩来源于地底的幔源岩浆之上的地壳熔融,壳幔混合形成了闪长质包体。所以,卡拉麦里地区大面积的年轻地壳(可能为洋壳)的部分熔融产生了广泛的花岗岩类。

5.3 构造岩浆演化

在花岗岩类形成环境的 $\text{Rb}\text{-(Y+Nb)}$ 判别图(图 12)中,五彩城花岗岩投点在火山弧与板内的分界线附近的火山弧一侧 Pearce (1996) 补充圈定的后碰撞花岗岩叠加区域内,显示了其形成于主碰撞之后,表明卡拉麦里地区晚石炭世已经进入了陆内伸展环境。这一认识得到卡拉麦里断裂以北大规模 A 型花岗岩的呼应,即包括库布苏、黄羊山、老鸦泉、苏吉泉、萨北、贝勒库都克等岩体的花岗岩锆石年龄集中在 287~314Ma(韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006, 2008; Su *et*

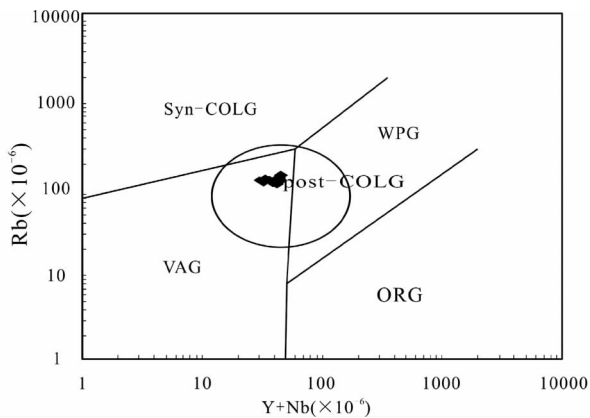


图 12 滴水泉-畜牧办花岗岩类构造判别图(据 Pearce *et al.*, 1984)

ORG-大洋脊花岗岩; WPG-板内花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; Syn-COLG-同碰撞花岗岩; post-COLG-后碰撞花岗岩

Fig. 12 Tectonic setting determinant diagram of the Dishuiquan granitic rocks (after Pearce *et al.*, 1984)

al., 2007; 李月臣等, 2007; 唐红峰等, 2007; 林锦富等, 2007; 闫存兴等, 2008; 杨高等, 2008, 2009; 李永军等, 2009; Yang *et al.*, 2011; 韩宇捷等, 2012)。与前人的研究相比,滴水泉-畜牧办花岗岩体是目前在卡拉麦里地区报道的年龄较老的花岗岩年龄,其后碰撞的构造属性为卡拉麦里造山带后碰撞阶段的时间演化提供了有力的证据。

有意义的是,滴水泉-畜牧办花岗岩体穿插了卡拉麦里蛇绿岩,在花岗岩的两侧(图 1b)均有蛇绿岩套中的超基性岩、基性岩出露。因此,滴水泉-畜牧办花岗岩体具有“钉合岩体”的作用,限定了卡拉麦里有限洋盆闭合时间的上限,表明卡拉麦里有限洋盆闭合的时间早于 321Ma。这一结论与最近一些学者的研究成果一致(吴润江等, 2009; 韩宝福等, 2010; 黄岗等, 2012; 吴琪等, 2012; Zhang *et al.*, 2013; 田健等, 2015)。

综上所述,卡拉麦里地区广泛分布的晚古生代侵入岩的形成过程可归纳为:洋盆闭合、陆陆碰撞之后,岩石圈发生减薄(可能发生拆沉作用),软流圈物质上涌,幔源岩浆底侵至年轻地壳之下,年轻地壳发生部分熔融形成了规模巨大的花岗岩类,同时,亏损的软流圈地幔(源区可能受到俯冲板片交代)的部分熔融形成辉长岩,幔源岩浆与壳源岩浆的混合形成了浆混岩(石英闪长岩等)或闪长质包体。

6 结论

(1) 岩相学、地球化学特征显示滴水泉-畜牧办碱长花岗岩为 I-A 型过渡的钙碱性花岗岩类。

(2) 滴水泉-畜牧办花岗岩类源自幔源岩浆底侵体之上的年轻地壳的部分熔融,角闪辉长岩则为亏损的软流圈地幔

的部分熔融,同时受到俯冲板片的交代。滴水泉-畜牧办晚石炭世早期幔源底侵体(角闪辉长岩)的发现为卡拉麦里地区岩浆底侵作用提供了可靠的地质依据。

(3) 滴水泉-畜牧办花岗岩体具有“钉合岩体”的作用,卡拉麦里有限洋盆在晚石炭世早期(321Ma)之前已经闭合。

致谢 文章撰写得到了张雄华教授的指导及帮助;锆石 U-Pb 年龄及 Rb、Sr 同位素分析得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜和周炼等老师的帮助;在此一并表示诚挚的感谢。

References

- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 - 174
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535 - 551
- Chen B and Jahn BM. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 691 - 703
- Coleman RG. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8(3): 621 - 635
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033 - 2048
- Frost CD and Frost BR. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology*, 52(1): 39 - 53
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(7019): 892 - 897
- Gradstein FM, Ogg JG, Schmitz M *et al.* 2012. *The Geologic Time Scale 2012, 2-Volume Sheet*. Amsterdam: Elsevier
- Guo FF, Jiang CY, Lu RH *et al.* 2010. Petrogenesis of the Huangyangshan alkali granites in Kalamaili area, northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2357 - 2373 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZF, Deng JF, Xu ZQ *et al.* 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the eastern Kunlun Mountains of northwestern China. *Geoscience*, 12(3): 344 - 352 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Wang SG, Jahn BM *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. *Chemical Geology*, 138(3 - 4): 135 - 159
- Han BF, He GQ, Wang SG *et al.* 1998. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in North Xinjiang. *Geological Review*, 44(4): 396 - 406 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Ji JQ, Song B *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077 - 1086 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Guo ZJ and He GQ. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2233 - 2246 (in Chinese with English abstract)
- Han YJ, Tang HF and Gan L. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Laoyaquan A-type granites in East Junggar, North Xinjiang, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 32(2): 193 - 199 (in Chinese with English abstract)

- Hong DW, Wang SG, Xie XL *et al.* 2000. Genesis of positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia orogenic belt and growth continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441–456 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439
- Huang G, Niu GZ, Wang XL *et al.* 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1267–1278 (in Chinese with English abstract)
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1998. Higher Geochemistry. Beijing: Science Press, 174–188 (in Chinese)
- Jin ZM and Gao S. 1996. Underplating and its geodynamical significances for the evolution of crust-mantle boundary. *Geological Science and Technology Information*, 15(2): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- Kwon ST, Tilton GR, Coleman RG *et al.* 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 719–727
- Li XH, Li ZX, Ge WC *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? *Precambrian Research*, 122(1–4): 45–83
- Li YC, Yang FQ, Zhao CS *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Beilekuduk pluton in Xinjiang and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2483–2492 (in Chinese with English abstract)
- Li YJ, Yang GX, Wu HE *et al.* 2009. The determination of Beilekuduke aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1): 17–25 (in Chinese with English abstract)
- Lin JF, Yu HX, Yu XQ *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological implication of the Sabei alkali-rich granite from eastern Junggar of Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1876–1884 (in Chinese with English abstract)
- Liu CD, Mo XX, Luo ZH *et al.* 2004. Mixing events between the crust- and mantle-derived magmas in eastern Kunlun; Evidence from zircon SHRIMP II chronology. *Chinese Science Bulletin*, 49(8): 828–834
- Liu HF, Liang HS, Li XQ *et al.* 2000. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 477–486 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Liu YS, Gao S, Hu ZC *et al.* 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Ludwig KR. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication, 25–32
- Luo ZH, Ke S, Cao YQ *et al.* 2002. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292–297 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Luo ZH, Deng JF *et al.* 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414 (in Chinese with English abstract)
- Pearce J. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pearce JA, Bender JF, De Long SE *et al.* 1990. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(1–2): 189–222
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Saunders AD, Storey M, Kent RW *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: Storey BC, Alabaster T and Pankhurst RJ (eds.). *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. Geological Society, London, Special Publication, 68(1): 41–60
- Shand SJ. 1927. *The Eruptive Rocks*. New York: Wiley & Sons
- Streckeisen A and Le Maitre RWA. 1979. A chemical approximation to the model QAPF classification of igneous rocks. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, 136: 169–206
- Su YP, Tang HF, Liu CQ *et al.* 2006. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 175–184 (in Chinese with English abstract)
- Su YP, Tang HF, Sylvester PJ *et al.* 2007. Petrogenesis of Karamaili alkaline A-type granites from East Junggar, Xinjiang (NW China) and their relationship with tin mineralization. *Geochemical Journal*, 41(5): 341–357
- Su YP, Tang HF and Cong F. 2008. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Huangyangshan alkaline granite body in East Junggar, Xinjiang. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 117–126 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tang HF, Qu WJ, Su YP *et al.* 2007. Genetic connection of Sareshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: Constraint from isotopic ages. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1989–1997 (in Chinese with English abstract)
- Tian J, Liao QA, Fan GM *et al.* 2015. The discovery and tectonic implication of Early Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1471–1484 (in Chinese with English abstract)
- Turner S, Sandiford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on “postorogenic” magmatism. *Geology*, 20(10): 931–934
- Wang BY, Jiang CY, Li YJ *et al.* 2011. Geochemical characteristics and tectonic implications of Karamaili Jiangbasitao Formation volcanic rock in Xinjiang. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(3): 237–245 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 1–466
- Woodhead JD, Hergt JM, Davidson JP *et al.* 2001. Hafnium isotope evidence for ‘conservative’ element mobility during subduction zone processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 331–346
- Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181–189 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Li HM *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173
- Wu FY, Li XH, Yang JH *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu RJ, Zhang YY, Tan JY *et al.* 2009. The characteristics of different structure layers and tectonic implications since Late Paleozoic in Kalamaili area, Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 102–109 (in Chinese with English abstract)
- Wu Q, Qu X, Chang GH *et al.* 2012. Geochronology of the Hongliuxia

- ductile shear zone and its constraint on the closure time of the Junggar Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2331–2339 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xu XS and Qiu JS. 2010. *Igneous Petrology*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Yan CX, Yang GX, Li YJ *et al.* 2008. Petrochemistry feature and tectonic significance of the Kubusunan granitic rock mass in East Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 26(3): 220–224 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Si GH *et al.* 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Kubusunan granodiorite in the Kalamaili area, eastern Junggar, Xinjiang. *Geology in China*, 35(5): 849–858 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Wu HE *et al.* 2009. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili area in eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3197–3207 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Si GH *et al.* 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Kubusunan granodiorite and the enclaves from Kalamaili area in eastern Junggar, Xinjiang, and its geological implications. *Earth Science*, 35(4): 597–610 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Wu HG *et al.* 2011. Geochronological and geochemical constrains on petrogenesis of the Huangyangshan A-type granite from the East Junggar, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(3): 722–736
- Yang KG and Yang WR. 1997. Post-collision orogeny process and origin of huge quantity granites in orogenic belt. *Geological Science and Technology Information*, 16(4): 16–22 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YY, Pe-Piper G, Piper DJW *et al.* 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, North Xinjiang, and its implications; Evidence from molasse deposits. *Geological Society of America Bulletin*, 125(5–6): 932–944
- Zhou XR. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids. *Earth Science Frontiers*, 1(1–2): 87–97 (in Chinese with English abstract)
- Zorpi MJ, Coulon C, Orsini JB *et al.* 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157(4): 315–329
- Zhu ZX, Li SZ and Li SL. 2005. The characteristics of sedimentary system-continental facies volcano in Late Carboniferous Batamayineishan Formation, Zhifang region, East Junggar. *Xinjiang Geology*, 23(1): 14–18 (in Chinese)
- 田健, 廖群安, 樊光明等. 2015. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. *岩石学报*, 31(5): 1471–1484
- 汪帮耀, 姜常义, 李永军等. 2011. 新疆卡拉麦里姜巴斯套组火山岩地球化学特征与构造意义. *地球科学与环境学报*, 33(3): 237–245
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. *岩石学报*, 15(2): 181–189
- 吴福元, 李献华, 杨进辉等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238
- 吴琪, 屈迅, 常国虎等. 2012. 红柳峡韧性剪切带形成时代及其对准噶尔洋盆闭合时限的约束. *岩石学报*, 28(8): 2331–2339
- 吴润江, 张元元, 谭佳奕等. 2009. 新疆卡拉麦里地区晚古生代以来不同构造层特征及大地构造意义. *地学前缘*, 16(3): 102–109
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589–1604
- 徐夕生, 邱检生. 2010. *火成岩岩石学*. 北京: 科学出版社
- 闫存兴, 杨高学, 李永军等. 2008. 东准库布苏南岩体岩石化学特征及其地质意义. *新疆地质*, 26(3): 220–224
- 杨高学, 李永军, 司国辉等. 2008. 东准库布苏南岩体 LA-ICP-MS 的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441–456
- 黄岗, 牛广智, 王新录等. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限: 来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据. *地质通报*, 31(8): 1267–1278
- 金振民, 高山. 1996. 底侵作用 (underplating) 及其壳-幔演化动力学意义. *地质科技情报*, 15(2): 1–7
- 李月臣, 杨富全, 赵财胜等. 2007. 新疆贝勒库都克岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 23(10): 2483–2492
- 李永军, 杨高学, 吴宏恩等. 2009. 东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义. *岩石矿物学杂志*, 28(1): 17–25
- 林锦富, 喻亨祥, 余心起等. 2007. 新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. *岩石学报*, 23(8): 1876–1884
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华等. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. *科学通报*, 49(6): 596–602
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清等. 2000. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. *地学前缘*, 7(4): 477–486
- 罗照华, 柯珊, 曹永清等. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. *地质通报*, 21(6): 292–297
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. *高校地质学报*, 13(3): 403–414
- 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. *岩石矿物学杂志*, 25(3): 175–184
- 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. *矿物学报*, 28(2): 117–126
- 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. *岩石学报*, 23(8): 1989–1997

附中文参考文献

- 郭芳放, 姜常义, 卢荣辉等. 2010. 新疆北部卡拉麦里地区黄羊山碱性花岗岩的岩石成因. *岩石学报*, 26(8): 2357–2373
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴等. 1998. 青藏东昆仑晚古生代末-中生代中酸性火成岩与陆内造山过程. *现代地质*, 12(3): 344–352
- 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. *地质论评*, 44(4): 396–406
- 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. *岩石学报*, 22(5): 1077–1086
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钉合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. *岩石学报*, 26(8): 2233–2246
- 韩宇捷, 唐红峰, 甘林. 2012. 新疆东准噶尔老泉岩体的锆石 U-Pb 年龄和地球化学组成. *矿物学报*, 32(2): 193–199
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林等. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩

- 锆石 U-Pb 测年. 中国地质, 35(5): 849-858
- 杨高学, 李永军, 吴宏恩等. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区黄羊山花岗岩和包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. 岩石学报, 25(12): 3197-3207
- 杨高学, 李永军, 司国辉等. 2010. 东准库布苏南岩体和包体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. 地球科学, 35(4): 597-610
- 杨坤光, 杨巍然. 1997. 碰撞后的造山过程及造山带巨量花岗岩的成因. 地质科技情报, 16(4): 16-22
- 中国科学院地球化学研究所. 1998. 高等地球化学. 北京: 科学出版社, 174-188
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用. 地学前缘, 1(1-2): 87-97
- 朱志新, 李少贞, 李嵩龄. 2005. 东准噶尔纸房地区晚石炭世巴塔玛依内山组陆相火山-沉积体系特征. 新疆地质, 23(1): 14-18