

# 新疆东准噶尔恰库尔图地区二叠纪双峰式火山岩地质地球化学特征及构造意义

汤贺军<sup>1,2)</sup>, 孟贵祥<sup>1,2)</sup>, 杨岳清<sup>1,2)</sup>, 邓震<sup>1,2)</sup>, 严加永<sup>1,2)</sup>, 祁光<sup>1,2)</sup>, 薛融晖<sup>1,2)</sup>

1) 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京, 100037;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京, 100037

**内容提要:**新疆东准噶尔乌伦古河两岸发育大量的二叠纪火山岩地层, 其中卡拉岗组区域上以中酸性火山岩为主, 局部以双峰式火山岩为主。本文以恰库尔图地区卡拉岗组双峰式火山岩——流纹岩和玄武岩为研究对象, 进行了岩石学、年代学、地球化学等研究。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 结果表明, 流纹岩和玄武岩的年龄分别为  $279.5 \pm 1.4$  Ma 和  $280.4 \pm 1.3$  Ma, 说明卡拉岗组双峰式火山岩的形成时代为早二叠世。恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩具有较高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ , 低  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ , 稀土配分图呈右倾 Eu 亏损的燕式分布, 在微量元素标准化图上显示出 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 的亏损; 玄武岩样品具有铈的轻微负异常, 相对富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta, 并表现出 Ti 的亏损; 流纹岩龄锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 +15.3, 模式年龄  $T_{\text{DM1}}(305 \text{ Ma})$  和  $T_{\text{DM2}}(\text{cc})(320 \text{ Ma})$  与其形成年龄 (279.5 Ma) 相近, 这表明其源区物质主要为新生地壳, 是壳源岩石重熔作用的产物。本区双峰式火山岩的两个端元并非同源, 流纹岩是幔源岩浆与壳源熔体混合作用的结果。恰库尔图地区在早二叠纪前准噶尔洋已完全闭合, 处于后碰撞拉张体制, 双峰式火山岩为后碰撞伸展构造环境的产物, 准噶尔盆地古老的前寒武纪结晶基底存在的可能性说明该区具有良好的油气勘探潜力。

**关键词:** 双峰式火山岩; 地球化学; 构造意义; 东准噶尔

东准噶尔地处边疆北部, 矿产资源非常丰富, 特别是石炭纪—二叠纪被公认为是本区洋—陆转换和成岩、成矿的关键时期(肖序常等, 1992; 何国琦等, 1994; 李锦轶等, 1999, 2000; 韩春明等, 2006; 赵振华等, 2007)。东准噶尔地区广泛发育泥盆纪、石炭纪为主的地层, 局部地区也出现二叠纪(张元元等, 2009; 李涤等, 2013)。韩宝福等认为准噶尔与相邻的阿尔泰和北天山等块体最晚在晚石炭世期间就已经完成了碰撞和拼贴(Han Baofu et al., 2006)。那么东准噶尔石炭—二叠纪火山岩究竟形成于岛弧环境(龙晓平等, 2006; 张峰等, 2014)还是后碰撞伸展环境(吴小奇等, 2009; 张元元等, 2009; 李涤等, 2013; Li Di et al., 2014)还是与地幔柱相关的二叠纪大火山岩省或者陆内裂谷(张招崇等, 2007), 至今仍存在不同认识。

恰库尔图的这套含双峰式火山岩的地层在 20

世纪 80 年代以前曾划归上石炭统, 但从 2011 年 1 : 25 万富蕴幅区调报告将其归到下一中二叠统, 对本区二叠系地层进行了详细的工作。主要成果为哈尔加乌组以中基性火山岩为主, 卡拉岗组以中酸性火山岩为主, 两套地层均可见少量双峰式火山岩, 但是面积都不大, 并发现了珍珠岩和松脂岩矿。

本文选取恰库尔图地区卡拉岗组双峰式火山岩中玄武岩和流纹岩作为研究对象, 通过对其锆石 LA-ICP-MS 年代学、岩石学、地球化学和 Hf 同位素研究, 讨论东准噶尔恰库尔图地区晚古生代晚期构造环境, 结合前人的研究成果, 试图厘定和探讨早二叠世构造属性, 为限定准噶尔洋的闭合时间、揭示东准噶尔的构造演化提供依据。

## 1 地质背景

准噶尔盆地夹持于西伯利亚板块和塔里木板块

注: 本文为新疆地勘基金项目“新疆青河县哈腊苏一带 1 : 5 万综合物探普查”(编号: A15-1-LQ10)、“新疆富蕴县恰库图一带铜镍铁多金属矿调查评价”(编号: A16-2-LQ06)和中国地质调查局项目“准噶尔成矿带浅覆盖区铜多金属地质矿产调查”(编号: DD20160007)成果。

收稿日期: 2018-01-11; 改回日期: 2018-06-14; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.007

作者简介: 汤贺军, 男, 1987 年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事矿产资源勘查及矿床地球化学研究。Email: tanghejungeo@163.com。通讯作者: 孟贵祥, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 主要从事矿产资源勘查和研究工作。Email: mgxlw@126.com。

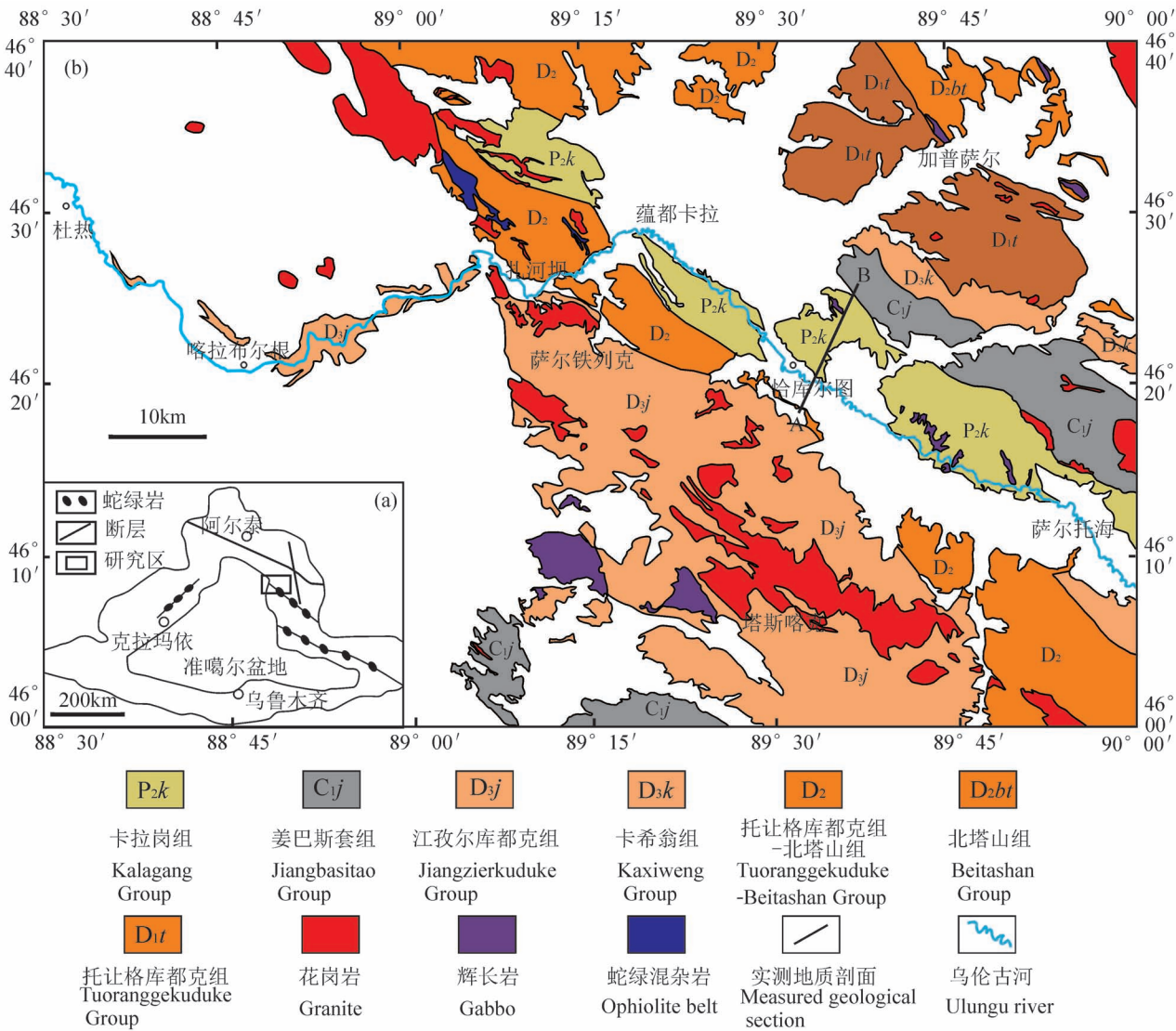


图 1 北疆构造单元划分图 (a) (据张峰等,2014, 修改) 及东准噶尔盆地北缘地区地质简图 (b) (据新疆维吾尔自治区地质局<sup>①</sup>)

Fig. 1 Tectonic subdivision of North Xinjiang (a) (modified from Zhang Feng et al., 2014&) and simplified geological map of the northern margin of East Junggar Basin (b) (modified from Xinjiang Geological Survey<sup>①</sup>)

之间(图 1),是中亚造山带的一个重要组成部分(Coleman,1989)。在盆地出露有多条不同时代的蛇绿岩带,反映准噶尔板块经历了复杂的消减增生和地体拼贴历史(李锦轶等,1990;李锦轶,1995;Xiao Wenjiao et al.,2003)。恰库尔图位于准噶尔板块东北缘,额尔齐斯断裂以南,阿尔曼太、卡拉麦里早古生代褶皱带内(何国琦等,1994)。早古生代之前,准噶尔板块东北部属于中朝—塔里木板块的一部分,自早奥陶世之后,逐渐与阿尔泰板块分离形成古亚洲洋,陆续发生俯冲、碰撞和增生作用,早泥盆世之后开始闭合,至早石炭世末期,古亚洲洋完全闭

合,准噶尔地区进入后碰撞造山演化阶段,后碰撞深成岩浆活动强烈(李锦轶,2004;Sun Min et al.,2009)。古生代火山岩在东准噶尔地区出露广泛(梅厚钧等,1994),而在恰库尔图地区出露的主要地层为下泥盆统托让格库都克组( $D_1t$ )、中泥盆统蕴都喀拉组( $D_2y$ )、上泥盆统卡希翁组( $D_3k$ )和江孜尔库都克组( $D_3j$ )、下石炭统姜巴斯套组( $C_1j$ ),二叠统卡拉岗组( $P_2k$ ),火山岩类十分发育。

卡拉岗组分布于扎河坝—恰库尔图—萨尔托海一线,沿乌伦古河两岸宽带状北西向展布,不整合于姜巴斯套组之上,上未见顶或被古近系不整合覆盖。

卡拉岗组以中酸性火山岩发育为特征,岩石新鲜蚀变弱,色调杂。主要为杂色霏细岩、英安岩、安山岩、角砾状流纹岩、流纹质火山角砾岩、中酸性熔结凝灰岩、玻屑凝灰岩等,常见球粒、球泡流纹岩—霏细岩、珍珠岩、黑耀岩、松脂岩等本组特征岩性,局部也见少量玄武岩夹层。恰库尔图地区内本组出露厚度 810 km,但由于后期剥蚀并不完整。

2 样品采集位置及特征

本次在恰库尔图一带进行实测地质剖面中发现(图 2),在恰库尔图镇乌伦古河北岸的中卡拉岗组发育一套基性岩和酸性火山岩组合,呈互层分布,为典型的双峰式火山岩组合,镜下鉴定为玄武岩和流纹岩。

剖面北北东走向,长约 18 km。剖面位置穿越了卡拉岗组,玄武岩和流纹岩分层明显,界限清晰可见(图 3a、b),流纹岩的分布面积大于玄武岩,两类岩石均未变质,后期的构造及热液改造也极弱。地层受区域性挤压,多发育褶皱和劈理构造(图 3e)。玄武岩的岩性较为简单,基本为钙碱性的拉斑玄武岩。流纹岩的岩性非常复杂,部分流纹岩玻璃质较为发育,形成松脂岩(图 3c);有的流纹岩球粒珍珠、石泡较为发育,形成珍珠岩(图 3d)。中二叠统卡拉岗组不整合于下姜巴斯套组之上,后者主要为一套灰色暗紫灰色凝灰质砂岩、凝灰质砾岩、凝灰岩、火山灰凝灰岩,中细粒砂岩等。

研究样品采自恰库尔图镇乌伦古河北岸的卡拉岗组火山岩,流纹岩及玄武岩年龄样品采集坐标分别为 46°22′52. 2″,89°40′11. 6″、46°24′09. 5″,89°36′25. 1″,全岩分析样采集位置为 46°22′15. 6″,89°35′24. 4″为起点的剖面,具体采集位置见图 2,主要为黑色(杏仁状)玄武岩、流纹岩、珍珠岩(石泡流纹岩)、菊花状重结晶流纹岩、松脂岩。流纹岩多呈浅黄色、灰白色,具斑状结构、块状构造,斑晶为钾长石,主体为具球粒结构的钾硅酸盐锥晶,具有典型的流纹构造,外围多有环边,后期有较强褐铁矿化和微晶石英组成的脉体蚀变,基质由隐晶质和长石石英微晶各自组成条带,相间排列成流纹构造,遇到斑晶则绕过,长石多发生了绢云母化(图 4a、d、f)。此外,薄片中也发育明显的微裂隙,穿切着早期形成石英和长石颗粒,显示了后期构造运动对该流纹岩体的改造作用。另外,部分样品镜下具有珍珠构造,呈玻基少斑结构,斑晶为石英、钾长石,基质由淡黄褐色的火山玻璃组成,并且具有清晰的珍珠裂理(图 4b、d、g),这种珍珠岩是火山喷发过程中急剧冷却条件下的酸性岩。少量样品的镜下视野中未见到斑晶,基质由细小的长英质和少量的玻璃质组成,呈现霏细结构(图 4e、h)。玄武岩多为黑色,具有斑状结构,块状构造,斑晶主要为斜长石、辉石,晚期有硅质对斜长石、辉石替代性交代,基质中褐铁矿化磁铁矿较多,基质中长石为短柱状,岩石中镁铁质矿物多发生绿泥石化(图 4j、l);部分发育杏仁结构、气孔构造的

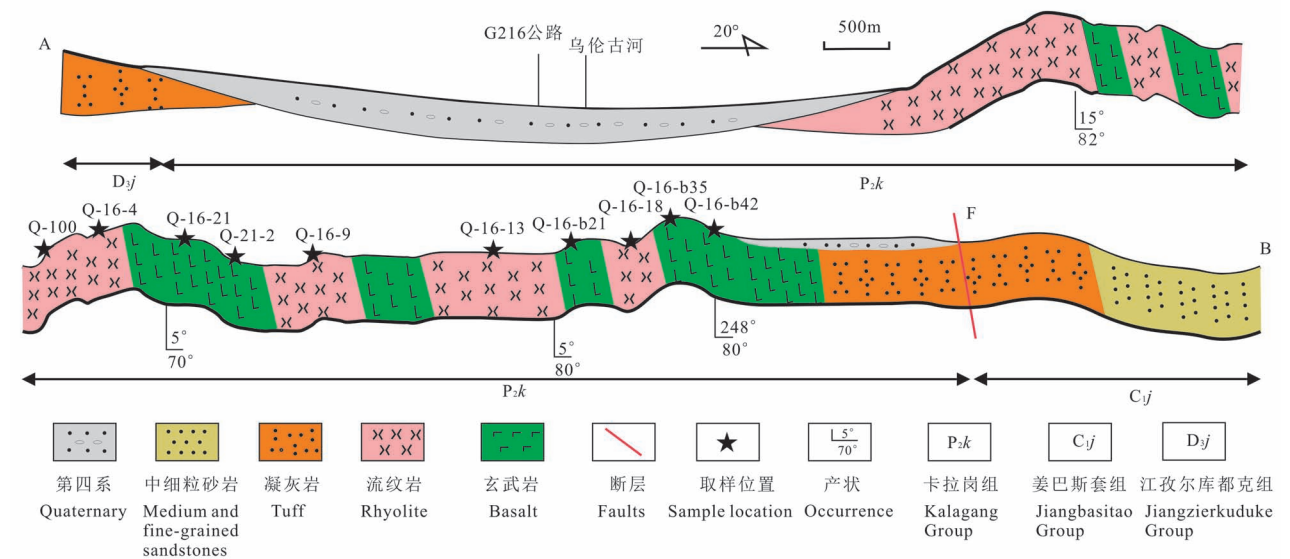


图 2 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区二叠纪卡拉岗组 L2650 实测地质剖面图

Fig. 2 The L2650 Measured geological section of the Permian Kalagan Formation in the Qiakuertu area, northern margin of the Jungar Basin

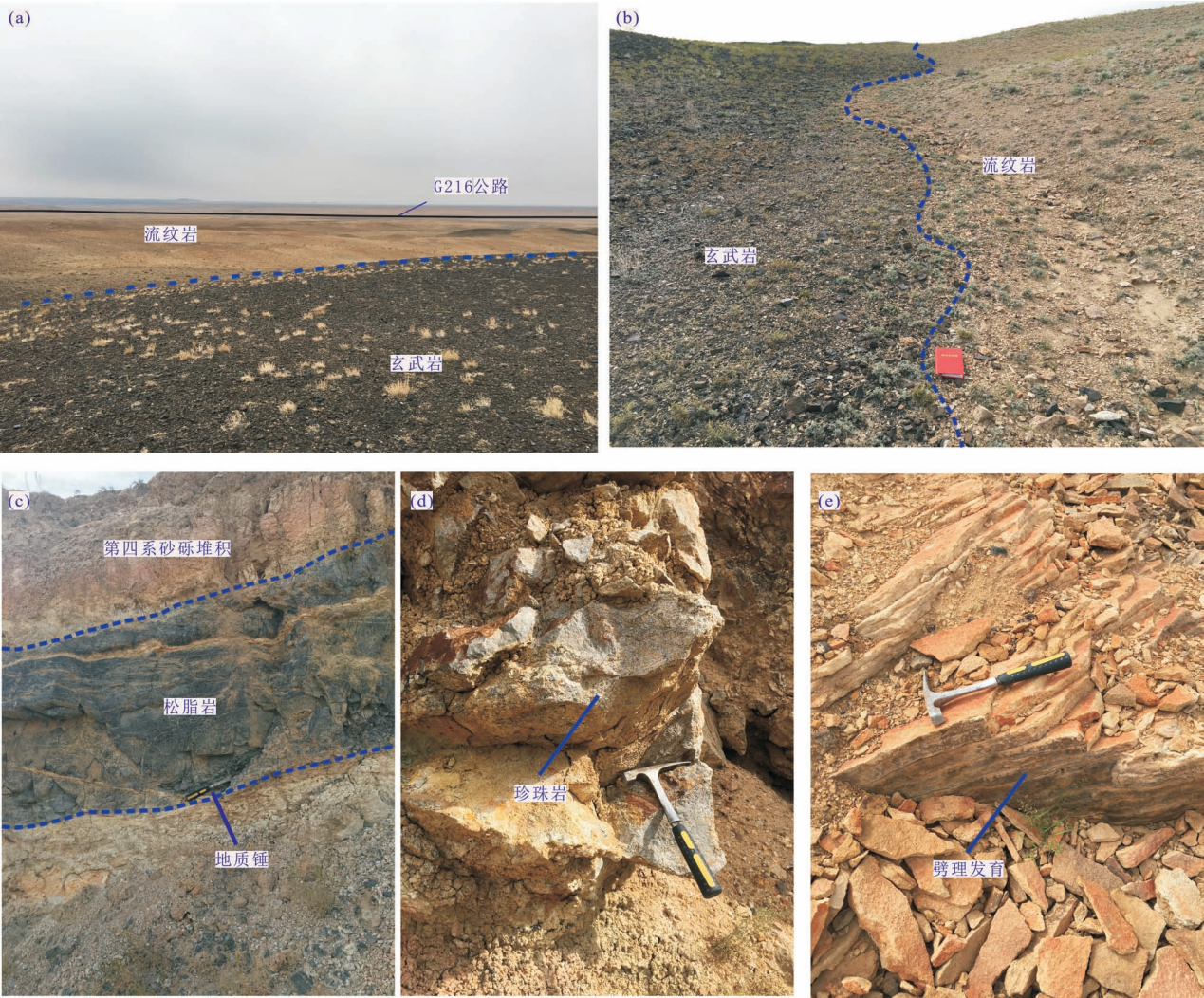


图 3 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组地层宏观特征  
Fig. 3 Macroscopic stratigraphic characteristics in the Kalagang Formation  
in Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

玄武岩,杏仁体为石英,大小多数在 0.5~2cm(图 4c、k)。

3 样品分析方法

对岩石样品进行详细手标本和偏光显微镜观察,挑选较为新鲜、杏仁体较少的样品进行主微量元素分析。全岩主量、微量元素分析测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素测试采用熔片法 X-射线荧光光谱法(XRF)分析,主要氧化物的分析相对误差小于 2%,微量和稀土元素采用等离子质谱法(ICPMS),分析相对误差低于 5%~10%。用于定年的锆石由河北省廊坊市区域地质调查院挑选,先将约 10 kg 样品破碎过筛,通过淘洗、

磁选和使用重液等物理方法初步分选出锆石,然后在双目显微镜下挑纯(100 颗左右)并将 40 颗代表性锆石制成环氧树脂样品靶,磨蚀和抛光样品靶使锆石出露。

本次锆石 U-Pb 同位素定年及 Hf 同位素利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 New Wave UP213,ICP-MS 为布鲁克 M90。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 Y 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 15 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5~10 个样品点,分析 2 次 91500。本次测试剥蚀光斑直径

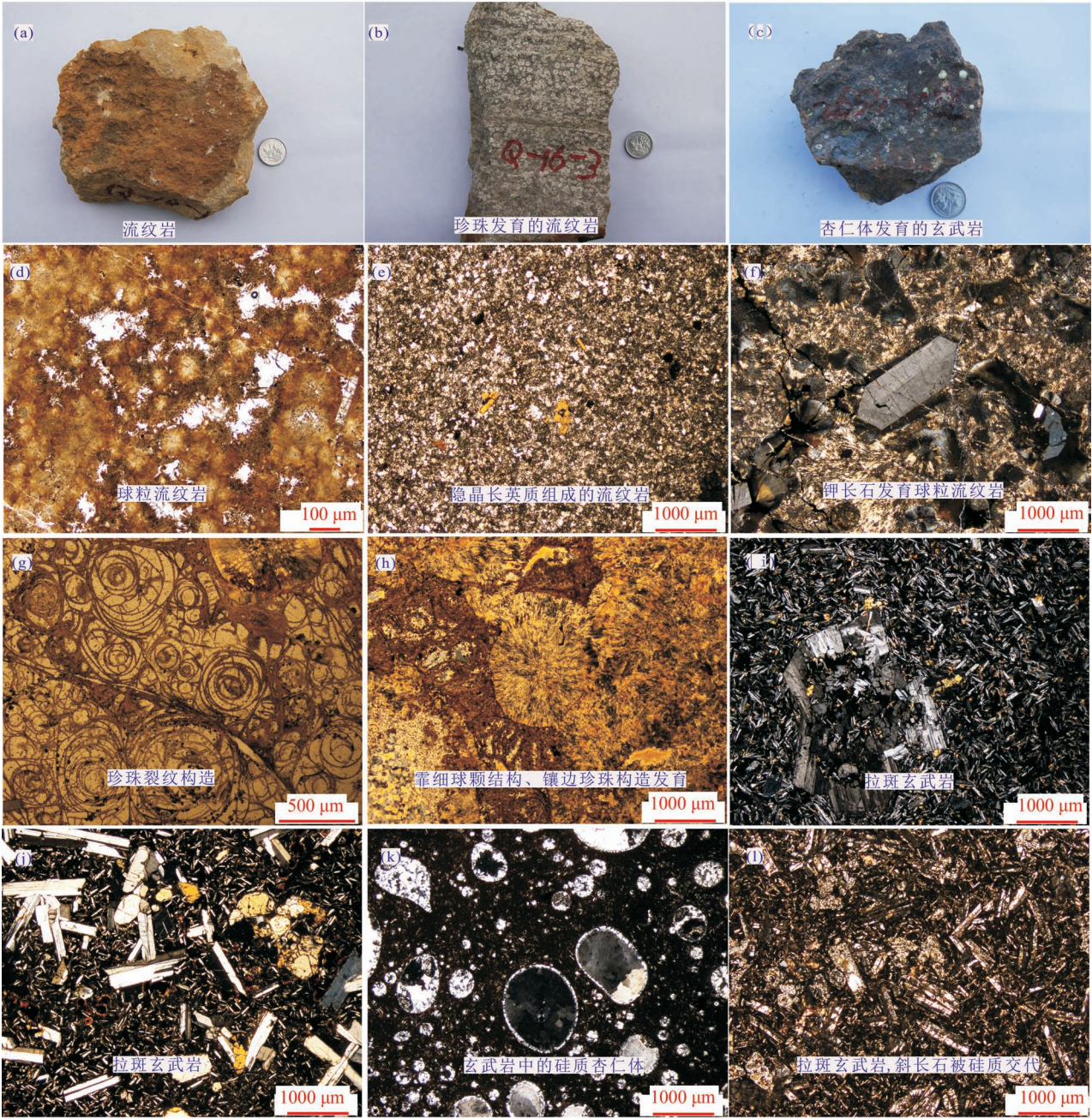


图 4 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩及玄武岩岩石学特征

Fig. 4 The petrological characteristics of rhyolite and basalt in the Kalagang Group from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

根据实际情况选择 30  $\mu\text{m}$ 。锆石年龄谐和图用 Isoplot3.0 程序获得。Hf 同位素测定时使用锆石标样 GJ1 作为参考物质,测点位置与 U-Pb 年龄相同或尽可能接近。

4 样品分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

通过透射光、反射光以及阴极发光对比研究 (图 5),分别对流纹岩(样品号 Q-100,图 4a)和玄武岩(样品号 L2650-b21,图 4c)样品进行了锆石 LA-ICP-MS 分析,样品采集位置见图 2。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果列于表 1。

从流纹岩样品中挑选出来的锆石绝大部分呈长

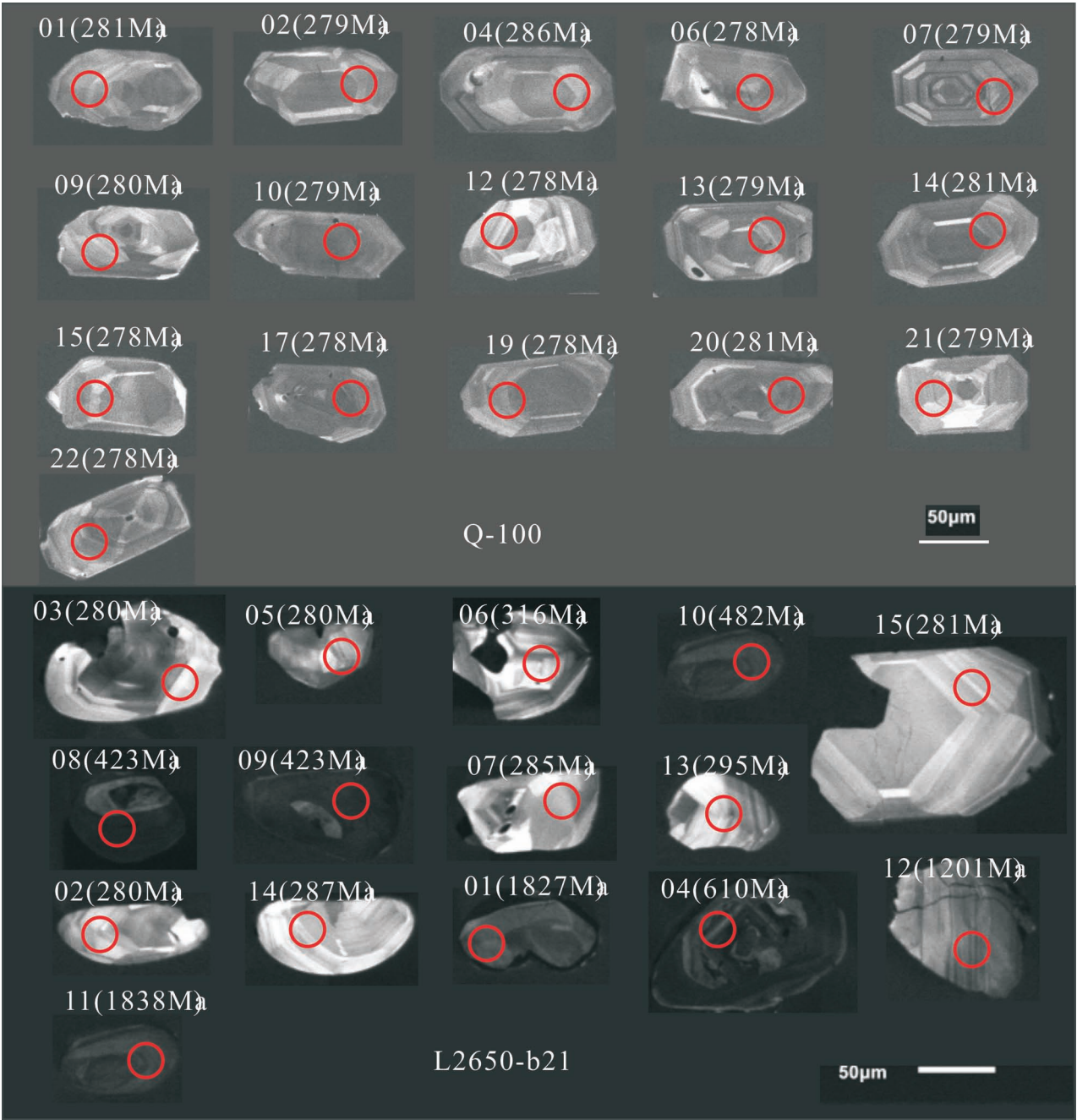


图 5 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩及玄武岩锆石 CL 图  
Fig. 5 Zircon CL images of representative samples from rhyolite and basalt  
in Qiakuertu area,northern margin of the Junggar Basin

柱状,粒径在 50~100 μm,长宽比多数为 2 : 1~3 : 1,晶形为半自形、自形,晶面整洁光滑。在阴极发照片上,大多数锆石发育较清晰的韵律环带结构,显示岩浆锆石的特点。U 和 Th 含量变化范围分别为  $124.6\times 10^{-6} \sim 269.5\times 10^{-6}$  和  $49.8\times 10^{-6} \sim 135.8\times 10^{-6}$ ,锆石 Th/U 值在 0.38~0.5,属于岩浆成因的锆石。在 U-Pb 谐和图上,数据投影点落在谐和线上

及附近(图 6),锆石颗粒的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄值集中分布于 279.5 Ma 附近,加权平均值为 279.5±1.4 Ma,解释为火山岩的喷发年龄,形成于早二叠世。

玄武岩锆石大部分锆石晶型较好,多为短柱及等粒状(长宽比在 1~2),粒径为 30~100 μm,并显示明显内部构造及典型的岩浆结晶环带。锆石的 CL 图像按颜色深浅及透明程度可分为两种,一种为

表 1 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区流纹岩、玄武岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analysis result of rhyolite and basalt from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

| 测点号                                              | 元素含量( $\times 10^{-6}$ ) |       |       | Th/U | 同位素比值                                   |                                        |                                        |           | 同位素年龄 (Ma)                             |           |                                         |           |      |           | 谐和度 (%) |    |    |
|--------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-----------|------|-----------|---------|----|----|
|                                                  | Pb                       | Th    | U     |      | $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ | $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ | $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ |           | $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ |           | $n(^{206}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ |           |      |           |         |    |    |
|                                                  |                          |       |       |      |                                         |                                        | 测值                                     | $1\sigma$ | 测值                                     | $1\sigma$ | 测值                                      | $1\sigma$ | 测值   | $1\sigma$ |         |    |    |
|                                                  |                          |       |       |      |                                         |                                        |                                        |           |                                        |           |                                         |           |      |           |         |    |    |
| 恰库尔图镇乌伦古河北岸卡拉岗组流纹岩, 位置为 46°22'52.2", 89°40'11.6" |                          |       |       |      |                                         |                                        |                                        |           |                                        |           |                                         |           |      |           |         |    |    |
| Q-100-01                                         | 8.2                      | 73.7  | 161.6 | 0.46 | 0.0532                                  | 0.0014                                 | 0.3265                                 | 0.0085    | 0.0445                                 | 0.0005    | 257                                     | 74        | 276  | 8         | 281     | 3  | 99 |
| Q-100-02                                         | 11                       | 96.9  | 213.4 | 0.45 | 0.0543                                  | 0.0013                                 | 0.3307                                 | 0.008     | 0.0443                                 | 0.0005    | 333                                     | 75        | 276  | 7         | 279     | 3  | 99 |
| Q-100-04                                         | 14.5                     | 135.9 | 269.5 | 0.5  | 0.0546                                  | 0.0012                                 | 0.3422                                 | 0.0077    | 0.0454                                 | 0.0004    | 261                                     | 58        | 278  | 6         | 286     | 3  | 99 |
| Q-100-06                                         | 9.4                      | 75.2  | 182.2 | 0.41 | 0.0527                                  | 0.0011                                 | 0.3182                                 | 0.0063    | 0.0441                                 | 0.0004    | 333                                     | 54        | 277  | 6         | 278     | 3  | 99 |
| Q-100-07                                         | 8.4                      | 64.8  | 161.8 | 0.4  | 0.0522                                  | 0.0012                                 | 0.3186                                 | 0.0073    | 0.0443                                 | 0.0004    | 300                                     | 52        | 281  | 6         | 279     | 3  | 99 |
| Q-100-09                                         | 11.4                     | 96.6  | 225.3 | 0.43 | 0.0544                                  | 0.0012                                 | 0.3347                                 | 0.008     | 0.0445                                 | 0.0005    | 317                                     | 16        | 281  | 5         | 281     | 3  | 99 |
| Q-100-10                                         | 9.8                      | 82.3  | 189.2 | 0.44 | 0.0528                                  | 0.0012                                 | 0.321                                  | 0.007     | 0.0442                                 | 0.0004    | 332                                     | 55        | 284  | 5         | 279     | 2  | 98 |
| Q-100-12                                         | 9.4                      | 80.6  | 181.4 | 0.44 | 0.0517                                  | 0.0012                                 | 0.3131                                 | 0.0071    | 0.0441                                 | 0.0005    | 250                                     | 44        | 275  | 5         | 278     | 3  | 98 |
| Q-100-13                                         | 6.9                      | 57.2  | 131.2 | 0.44 | 0.0514                                  | 0.0012                                 | 0.3148                                 | 0.0075    | 0.0443                                 | 0.0004    | 228                                     | 69        | 276  | 7         | 279     | 3  | 98 |
| Q-100-14                                         | 6.4                      | 49.9  | 124.7 | 0.4  | 0.0507                                  | 0.0014                                 | 0.3119                                 | 0.0091    | 0.0446                                 | 0.0005    | 320                                     | 19        | 283  | 5         | 281     | 3  | 98 |
| Q-100-15                                         | 12.2                     | 105.2 | 234.3 | 0.45 | 0.0512                                  | 0.0011                                 | 0.3106                                 | 0.0064    | 0.0441                                 | 0.0004    | 339                                     | 57        | 287  | 6         | 278     | 3  | 97 |
| Q-100-17                                         | 10.9                     | 94.3  | 207.3 | 0.45 | 0.053                                   | 0.0012                                 | 0.3221                                 | 0.007     | 0.0441                                 | 0.0004    | 383                                     | 54        | 290  | 6         | 278     | 2  | 96 |
| Q-100-19                                         | 9.4                      | 70.2  | 187.1 | 0.38 | 0.0516                                  | 0.0016                                 | 0.3124                                 | 0.0091    | 0.044                                  | 0.0005    | 376                                     | 59        | 290  | 7         | 278     | 3  | 95 |
| Q-100-20                                         | 13                       | 121.2 | 245.2 | 0.49 | 0.0546                                  | 0.0013                                 | 0.3367                                 | 0.0085    | 0.0446                                 | 0.0005    | 394                                     | 56        | 295  | 6         | 281     | 3  | 95 |
| Q-100-21                                         | 11.1                     | 98.5  | 206.6 | 0.48 | 0.0514                                  | 0.0017                                 | 0.3129                                 | 0.0099    | 0.0442                                 | 0.0005    | 387                                     | 45        | 293  | 6         | 279     | 3  | 95 |
| Q-100-22                                         | 11.7                     | 106.7 | 223.1 | 0.48 | 0.0541                                  | 0.0014                                 | 0.3304                                 | 0.0088    | 0.0441                                 | 0.0004    | 394                                     | 55        | 299  | 6         | 279     | 3  | 95 |
| 恰库尔图镇乌伦古河北岸卡拉岗组玄武岩, 位置为 46°24'09.5", 89°36'25.1  |                          |       |       |      |                                         |                                        |                                        |           |                                        |           |                                         |           |      |           |         |    |    |
| L2650-B21-05                                     | 9.3                      | 95.2  | 163.2 | 0.58 | 0.0541                                  | 0.0013                                 | 0.3208                                 | 0.0080    | 0.0444                                 | 0.0004    | 315                                     | 40        | 283  | 6         | 280     | 2  | 96 |
| L2650-B21-02                                     | 5.8                      | 59.4  | 101.2 | 0.59 | 0.0527                                  | 0.0014                                 | 0.3286                                 | 0.0123    | 0.0445                                 | 0.0008    | 370                                     | 53        | 288  | 9         | 280     | 3  | 99 |
| L2650-B21-03                                     | 4.6                      | 46.1  | 82.6  | 0.56 | 0.0540                                  | 0.0019                                 | 0.3306                                 | 0.0075    | 0.0444                                 | 0.0004    | 375                                     | 36        | 290  | 6         | 280     | 5  | 97 |
| L2650-B21-15                                     | 4.5                      | 31.3  | 85.2  | 0.37 | 0.0520                                  | 0.0016                                 | 0.3167                                 | 0.0098    | 0.0445                                 | 0.0006    | 284                                     | 48        | 279  | 8         | 281     | 3  | 99 |
| L2650-B21-07                                     | 4.5                      | 39.5  | 78.6  | 0.50 | 0.0609                                  | 0.0017                                 | 0.3768                                 | 0.0103    | 0.0452                                 | 0.0004    | 267                                     | 115       | 280  | 12        | 285     | 3  | 86 |
| L2650-B21-14                                     | 3.6                      | 26.4  | 65.2  | 0.41 | 0.0558                                  | 0.0020                                 | 0.3434                                 | 0.0118    | 0.0456                                 | 0.0007    | 443                                     | 51        | 300  | 9         | 287     | 4  | 95 |
| L2650-B21-13                                     | 7.2                      | 75.5  | 119.2 | 0.63 | 0.0607                                  | 0.0018                                 | 0.3986                                 | 0.0154    | 0.0469                                 | 0.0005    | 307                                     | 169       | 294  | 18        | 295     | 3  | 85 |
| L2650-B21-06                                     | 6.4                      | 58.1  | 89.1  | 0.65 | 0.0959                                  | 0.0035                                 | 0.6784                                 | 0.0282    | 0.0502                                 | 0.0006    | 351                                     | 237       | 304  | 27        | 316     | 3  | 50 |
| L2650-B21-08                                     | 56.0                     | 7.5   | 766.2 | 0.01 | 0.0553                                  | 0.0006                                 | 0.5190                                 | 0.0061    | 0.0679                                 | 0.0005    | 423                                     | 14        | 424  | 4         | 423     | 3  | 99 |
| L2650-B21-09                                     | 56.7                     | 6.9   | 768.8 | 0.01 | 0.0564                                  | 0.0006                                 | 0.5294                                 | 0.0057    | 0.0679                                 | 0.0005    | 469                                     | 28        | 431  | 4         | 423     | 3  | 98 |
| L2650-B21-10                                     | 70.4                     | 61.8  | 828.4 | 0.07 | 0.0619                                  | 0.0007                                 | 0.6699                                 | 0.0130    | 0.0777                                 | 0.0010    | 597                                     | 52        | 502  | 8         | 482     | 6  | 92 |
| L2650-B21-04                                     | 82.0                     | 133.5 | 646.9 | 0.21 | 0.0872                                  | 0.0010                                 | 1.1962                                 | 0.0149    | 0.0992                                 | 0.0008    | 1364                                    | 13        | 799  | 7         | 610     | 4  | 73 |
| L2650-B21-12                                     | 59.1                     | 188.9 | 207.4 | 0.91 | 0.0807                                  | 0.0009                                 | 2.2842                                 | 0.0269    | 0.2049                                 | 0.0014    | 1213                                    | 13        | 1207 | 8         | 1202    | 7  | 99 |
| L2650-B21-01                                     | 138.2                    | 192.8 | 314.7 | 0.61 | 0.1117                                  | 0.0010                                 | 5.0643                                 | 0.0515    | 0.3277                                 | 0.0023    | 1828                                    | 9         | 1830 | 9         | 1827    | 11 | 99 |
| L2650-B21-11                                     | 74.9                     | 10.2  | 197.3 | 0.05 | 0.1154                                  | 0.0012                                 | 5.2650                                 | 0.0691    | 0.3299                                 | 0.0028    | 1885                                    | 12        | 1863 | 11        | 1838    | 14 | 98 |

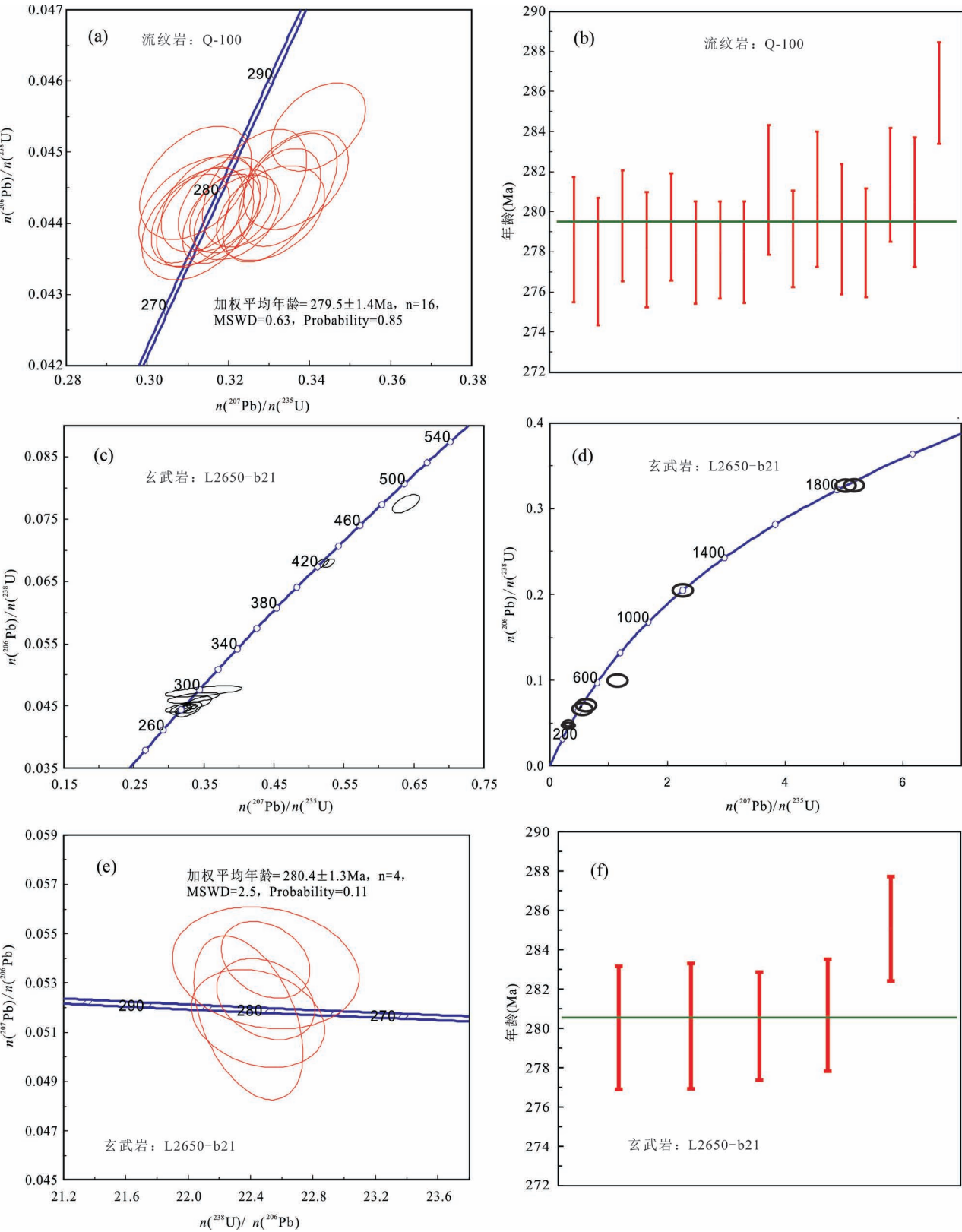


图 6 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩及玄武岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄协和图  
Fig. 6 U-Pb concordia and weighted age diagrams of zircons LA-ICP-MS zircon date from rhyolite and basalt  
in the Kalagang Group from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

透明锆石,这类锆石颜色较浅,8 个样品的测点 Th 含量变化为  $26.4\times10^{-6}\sim95.2\times10^{-6}$ ,U 含量变化为  $65.2\times10^{-6}\sim163.2\times10^{-6}$ ,Pb 含量较低,为  $3.6\times10^{-6}\sim9.3\times10^{-6}$ ;另一种为不透明锆石,这类锆石颜色较深,7 个样品的测点 Th 含量变化为  $7.5\times10^{-6}\sim192.8\times10^{-6}$ ,U 含量变化为  $197.3\times10^{-6}\sim828.4\times10^{-6}$ ,Pb 含量较高,为  $56\times10^{-6}\sim138.2\times10^{-6}$ ,约为浅色锆石 Pb 含量的 10 倍。

所有锆石 Th/U 值范围为 0.01~0.91,多数大于 0.4(表 1),且 Th、U 之间有良好的正相关关系,进一步表明为岩浆成因锆石。对玄武岩进行 LA-

ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,得到的同位素年龄为主要集中在 280 Ma 左右,有部分点落在了 420 Ma、480 Ma、610 Ma、1201 Ma 以及 1800 Ma,可能为捕获的早期锆石,剔除捕获的早期锆石,得到的年龄为  $280.4\pm1.3$  Ma,代表了本区玄武岩形成时代,与流纹岩较接近。

4.2 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析测试 U-Pb 定年锆石的相同部位进行,其初始 Hf 同位素比值通过用相对应的锆石年龄进行校正。研究区流纹岩 Hf 同位素测试结果见表 2。

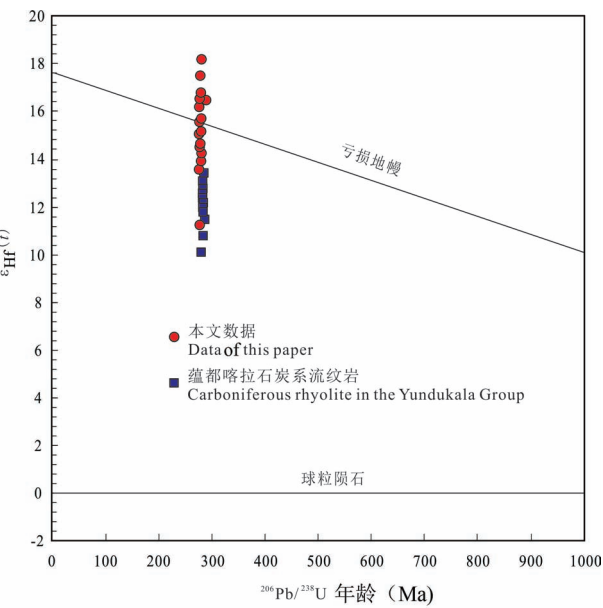
表 2 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区流纹岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

| 点号      | 年龄<br>(Ma) | $\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$ | $\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$ | $\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$ | 2σ       | $\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ | 2σ  | T <sub>DM1</sub><br>(Ma) | T <sub>DM2(CC)</sub><br>(Ma) | f <sub>Lu/Hf</sub> |
|---------|------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|------------------------------|------------------------------|-----|--------------------------|------------------------------|--------------------|
| Q100-1  | 280.6      | 0.043518                                        | 0.001594                                        | 0.283008                                        | 0.000021 | 8.3                          | 14.2                         | 0.7 | 351                      | 391                          | -0.95              |
| Q100-2  | 279.1      | 0.043076                                        | 0.001577                                        | 0.282989                                        | 0.000022 | 7.7                          | 13.5                         | 0.8 | 378                      | 435                          | -0.95              |
| Q100-4  | 285.9      | 0.033546                                        | 0.001249                                        | 0.283067                                        | 0.000019 | 10.4                         | 16.5                         | 0.7 | 263                      | 250                          | -0.96              |
| Q100-6  | 278.0      | 0.04192                                         | 0.001575                                        | 0.283034                                        | 0.000022 | 9.3                          | 15.1                         | 0.8 | 313                      | 333                          | -0.95              |
| Q100-7  | 279.2      | 0.050114                                        | 0.001842                                        | 0.283002                                        | 0.000026 | 8.1                          | 13.9                         | 0.9 | 362                      | 409                          | -0.94              |
| Q100-9  | 280.5      | 0.039774                                        | 0.00147                                         | 0.283048                                        | 0.000022 | 9.8                          | 15.7                         | 0.8 | 292                      | 299                          | -0.96              |
| Q100-10 | 278.6      | 0.047296                                        | 0.001738                                        | 0.282925                                        | 0.000018 | 5.4                          | 11.2                         | 0.6 | 473                      | 583                          | -0.95              |
| Q100-12 | 278.1      | 0.144944                                        | 0.002587                                        | 0.283079                                        | 0.000025 | 10.9                         | 16.5                         | 0.9 | 255                      | 243                          | -0.92              |
| Q100-13 | 279.3      | 0.174945                                        | 0.003067                                        | 0.283089                                        | 0.000027 | 11.2                         | 16.8                         | 1.0 | 244                      | 225                          | -0.91              |
| Q100-14 | 281.1      | 0.105709                                        | 0.00193                                         | 0.283121                                        | 0.001575 | 12.3                         | 18.2                         | 0.9 | 189                      | 138                          | -0.94              |
| Q100-15 | 278.0      | 0.1735                                          | 0.003014                                        | 0.283028                                        | 0.001842 | 9.1                          | 14.6                         | 1.0 | 335                      | 364                          | -0.91              |
| Q100-17 | 278.1      | 0.182013                                        | 0.003294                                        | 0.283075                                        | 0.00147  | 10.7                         | 16.2                         | 1.0 | 266                      | 260                          | -0.90              |
| Q100-19 | 277.5      | 0.167168                                        | 0.002968                                        | 0.283024                                        | 0.001738 | 8.9                          | 14.5                         | 0.8 | 341                      | 373                          | -0.91              |
| Q100-20 | 281.3      | 0.142642                                        | 0.002478                                        | 0.283039                                        | 0.000025 | 9.4                          | 15.2                         | 0.9 | 314                      | 331                          | -0.93              |
| Q100-21 | 278.6      | 0.110063                                        | 0.00207                                         | 0.283051                                        | 0.000028 | 9.9                          | 15.6                         | 1.0 | 293                      | 300                          | -0.94              |
| Q100-22 | 278.5      | 0.101406                                        | 0.001809                                        | 0.283103                                        | 0.000028 | 11.7                         | 17.5                         | 1.0 | 215                      | 179                          | -0.95              |

注:表中各参数计算公式及所取常数如下(参见黄道袁等,2016):

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{\left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} - \left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\text{DM1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}} \right\}$$
$$T_{\text{DM2CC}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) \cdot \frac{f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}}{f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}}; \quad f_{\text{Lu/Hf}} = \frac{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s}{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$$

其中: $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.865\times10^{-11}/\text{a}$  (Schere et al., 2001);  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s$  和  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s$  为样品测量值;  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} = 0.0332\pm0.0002$ ,  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} = 0.282772\pm0.000029$  (Blichert-Toft et al., 1997);  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.0384$ ,  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.28325$  (Griffin et al., 2000);  $\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}} = 0.015$ ;  $f_{\text{CC}} = \frac{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}}}{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$ ;  $f_{\text{S}} = f_{\text{Lu/Hf}}$ ;  $f_{\text{DM}} = \frac{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[ \frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$ ;  $t$  为锆石结晶年龄。



恰库尔图流纹岩锆石具有低的 Lu/Hf 值, 为 0.001249~0.003294, 均值 0.002141, 大部分小于 0.002, 表明锆石在形成后具有极低量的放射性成因 Hf 积累。锆石的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化较大, 为 0.282925~0.283121 和 +11.2~+18.2, 相应地, 它们

图 7 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩的锆石 Hf 同位素组成

Fig. 7 zircon Lu-Hf isotopes composition of the rhyolite from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

每个锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  根据样品各自的年龄计算; 蕴都喀拉石炭系流纹岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  数据来自李涤等, 2013

The  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  of each zircon is calculated according to the respective ages of the samples. The data of the  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  from Carboniferous rhyolite in the Yun Kara area are derived from Li Di et al. 2013&

的模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  和  $T_{\text{DM2}}(\text{cc})$  也都在较大范围内变化, 为 189~473 Ma 和 138~583 Ma, 其中较高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的 10 个点投点位于亏损地幔演化线之上, 最低  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  (+11.2) 的颗粒 (Q-100-10) 呈纹层状, 与其他颗粒相比, 其岩浆环带结构最不清晰 (图 3)。恰库尔图流纹岩龄锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 +15.3, 模式年龄  $T_{\text{DM1}}$  (305 Ma) 和  $T_{\text{DM2}}(\text{cc})$  (320 Ma) 与其形成年龄 (279.5 Ma) 相近, 这表明其源区物质主要为新生地壳, 是壳源岩石重熔作用的产物。

在 Hf 同位素组成图解上 (图 7), 恰库尔图地区流纹岩与卡拉麦里石炭系流纹岩落在了一致的区域, 高于蕴都喀拉卡拉岗组流纹岩, 说明恰库尔图地

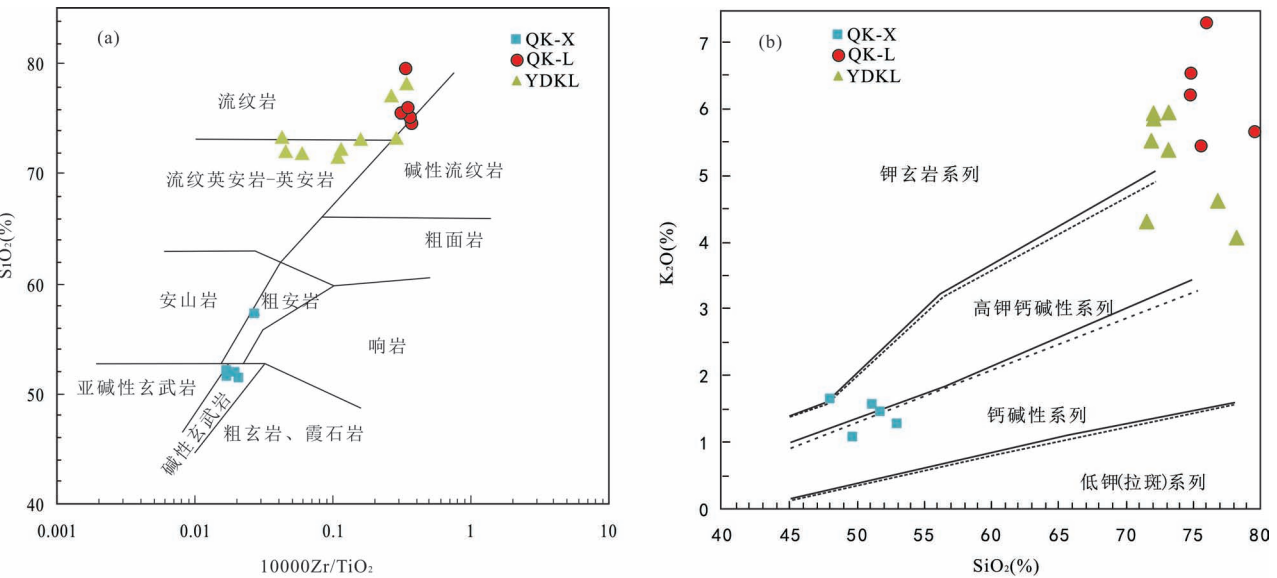


图 8 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩、玄武岩 10000Zr/TiO<sub>2</sub>—SiO<sub>2</sub>(a) 与 SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O 图解(b) (参见邓晋福等, 2015b)

Fig. 8 10000Zr/TiO<sub>2</sub>—SiO<sub>2</sub> (a) and SiO<sub>2</sub>—K<sub>2</sub>O(b) diagrams of rhyolite and basalt in the Kalagang group from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin(reference to Deng Jinfu et al., 2015b&)

QK-L—恰库尔图流纹岩 (本文数据); QK-X—恰库尔图玄武岩 (本文数据); YDKL—蕴都卡拉流纹岩 (数据引自李涤等, 2013)

QK-L—Rhyolite in Qiakuertu (Data in this paper); QK-X—Basalt in Qiakuertu (Data in this paper); YDKL—Rhyolite in Yundukala (From Li Di, 2013&)

区流纹岩有部分亏损地幔物质的加入。

4.3 主微量元素特征

用于主量、微量及稀土元素分析的卡拉岗组双峰式火山岩为流纹岩和玄武岩,样品采自恰库尔图镇乌伦古河北岸(图 1、图 2)。分析结果列于表 3。

恰库尔图卡拉岗组火山岩 SiO<sub>2</sub> 含量变化于 74.74%~79.6%和 51.61%~52.09%(其中 L2650-b1 为 57.11%),在中性岩的范围出现的明显的间断,在图解中,样品位于流纹岩和玄武岩区域,在成分上显示了双峰式火山岩的特点。

流纹岩具有高硅高钾的特点,SiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O 含量分别为 74.74%~79.6%和 5.49%~8.29%,Na<sub>2</sub>O 为 0.92~3.41%。流纹岩中的 K<sub>2</sub>O 含量大于 Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值为 1.81~7.82,K<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub> 图解中(图 8),玄武岩样品落在了钾玄岩系列区域,其中 Q-16-18 样品 K<sub>2</sub>O 含量最高,为 8.29%,镜下观察样品中

含有较多自形的歪长石。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 10.21%~12.65%,MgO 含量为 0.06%~0.25%,CaO 含量为 0.11%~0.24%,显示为低 Al、Ca、Mg 的岩石系列。

玄武岩样品 SiO<sub>2</sub> 含量为 51.61%~52.09%,其中 L2650-b1 为 57.11%,可能是由于样品杏仁体发育,在碎样过程中混入石英杏仁体缘故。在 Zr/TiO<sub>2</sub>—SiO<sub>2</sub> 图解(图 8)中,均落入玄武岩、粗安岩区域。TiO<sub>2</sub> 含量除 L2650-b1 为 1.1%外,其他含量普遍较高,在 2.09%~2.14%,明显不同于岛弧玄武岩(0.84%)和洋中脊玄武岩(1.5%),而与板内玄武岩(>2%)相似。K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 含量分别为 1.09%~1.66%和 3.79%~4.27%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值为 0.26~0.46,K<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub> 图解中(图 8),玄武岩样品落在了钙碱性、高钾钙碱系列区域;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高,为 15.72%~16.04%。Mg<sup>#</sup> 总体介于 41.9~54.7(平均

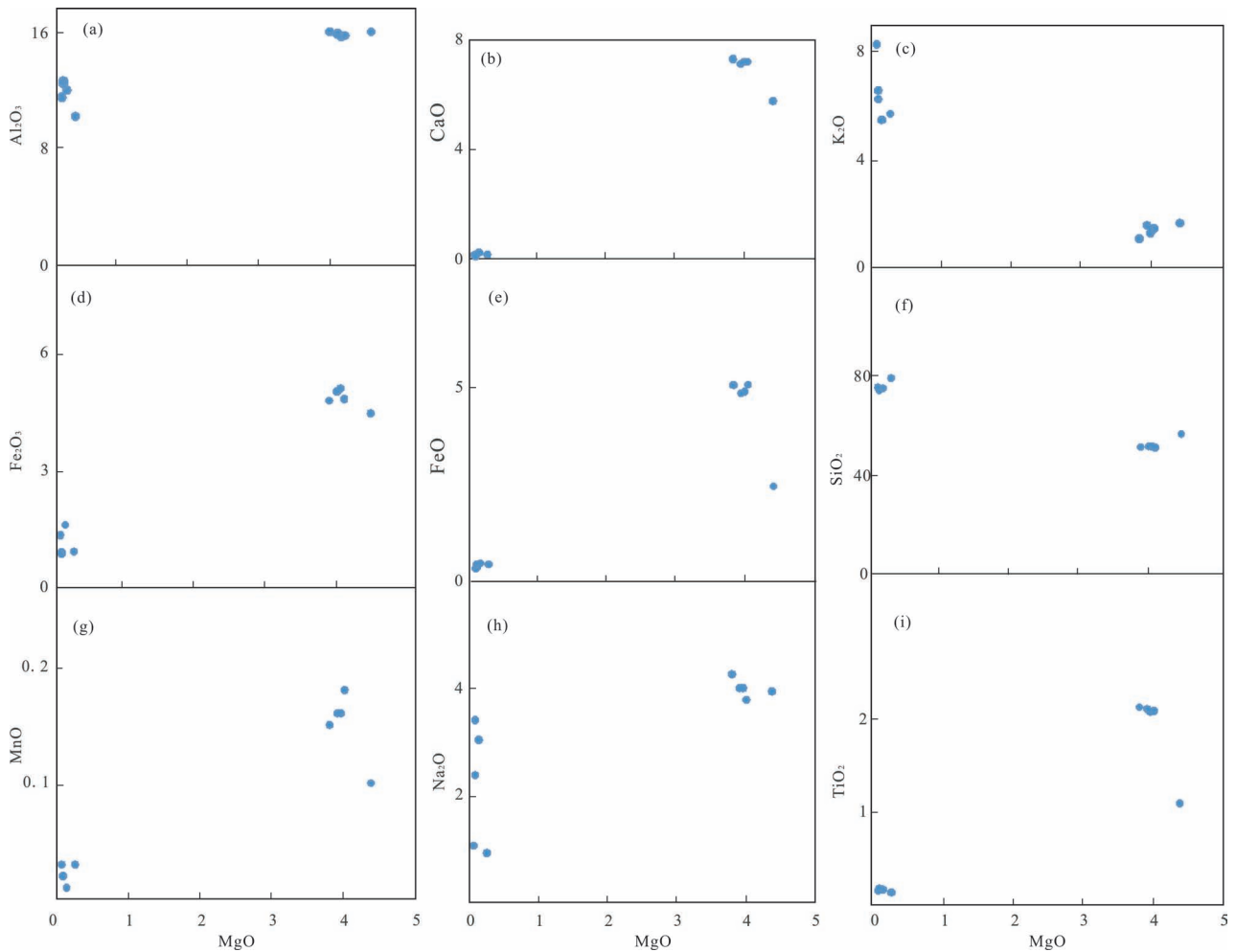


图 9 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩、玄武岩哈克图解(a)——(i)

Fig. 9 Harker diagram(a)~(i) of rhyolite and basalt in the Kalagang group from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

表 3 准噶尔北缘恰库尔图地区流纹岩、玄武岩主量元素(%)、微量元素( $\times 10^{-6}$ )和稀土元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果

Table 3 Major(%), trace ( $\times 10^{-6}$ ) and rear earth elements ( $\times 10^{-6}$ ) compositions of rhyolite and basalt in the Kalagang Group from Qiakuertu area, northern margin of the Junggar Basin

| 样品号                            | Q-100  | Q-16-4 | Q-16-9 | L2650-b1 | Q-16-18 | L2650-b42 | Q-16-21-1 | L-2650-b21 | Q-16-21-2 | L-2650-b35 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|----------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| 岩石类型                           | 流纹岩    |        |        |          |         | 玄武岩       |           |            |           |            |
| SiO <sub>2</sub>               | 75.46  | 74.85  | 74.74  | 79.6     | 75.84   | 51.99     | 51.61     | 57.11      | 52.09     | 51.88      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.17   | 0.18   | 0.18   | 0.14     | 0.16    | 2.09      | 2.1       | 1.1        | 2.12      | 2.14       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.01  | 12.5   | 12.65  | 10.21    | 11.54   | 15.72     | 15.79     | 16.04      | 15.9      | 16.03      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.61   | 0.87   | 0.91   | 0.93     | 1.35    | 5.09      | 4.82      | 4.45       | 5.01      | 4.78       |
| FeO                            | 0.48   | 0.38   | 0.45   | 0.45     | 0.34    | 4.9       | 5.08      | 2.46       | 4.86      | 5.07       |
| MnO                            | 0.01   | 0.02   | 0.02   | 0.03     | 0.03    | 0.16      | 0.18      | 0.1        | 0.16      | 0.15       |
| MgO                            | 0.13   | 0.08   | 0.08   | 0.25     | 0.06    | 3.96      | 4.01      | 4.38       | 3.91      | 3.8        |
| CaO                            | 0.24   | 0.13   | 0.11   | 0.17     | 0.15    | 7.19      | 7.19      | 5.76       | 7.12      | 7.29       |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.04   | 2.38   | 3.41   | 0.92     | 1.06    | 4.01      | 3.79      | 3.95       | 4.01      | 4.27       |
| K <sub>2</sub> O               | 5.49   | 6.58   | 6.26   | 5.72     | 8.29    | 1.29      | 1.46      | 1.66       | 1.58      | 1.09       |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.01     | 0.02    | 0.88      | 0.9       | 0.48       | 1.1       | 1.08       |
| 烧失                             | 1.04   | 1.15   | 0.76   | 1.12     | 0.79    | 1.58      | 1.53      | 1.64       | 1.41      | 1.68       |
| CO <sub>2</sub>                | 0.17   | 0.17   | 0.17   | 0.17     | 0.17    | 0.09      | 0.17      | 0.17       | 0.17      | 0.17       |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 1.15   | 1.2    | 0.66   | 1.16     | 1.1     | 1.75      | 1.95      | 2.22       | 1.98      | 2.06       |
| 总量                             | 101.01 | 100.5  | 100.42 | 100.88   | 100.9   | 100.7     | 100.58    | 101.52     | 101.42    | 101.49     |
| Li                             | 17.6   | 40.4   | 40.9   | 22.1     | 15.5    | 12.1      | 12.8      | 14.5       | 12.7      | 21.8       |
| Be                             | 5.75   | 6.8    | 7.64   | 4.63     | 5.91    | 2.02      | 2.07      | 1.8        | 2.19      | 2.25       |
| Cr                             | 0.81   | 0.95   | 1.46   | 1.09     | 1.42    | 51.5      | 52.5      | 101        | 48.6      | 49.1       |
| Mn                             | 32.3   | 83.6   | 74.5   | 211      | 196     | 1265      | 1423      | 843        | 1340      | 1169       |
| Co                             | 0.17   | 0.21   | 0.14   | 0.36     | 0.35    | 27.4      | 28        | 23.6       | 28.3      | 27.2       |
| Ni                             | 0.18   | 0.46   | 0.32   | 0.35     | 0.53    | 26.2      | 26.8      | 53.6       | 28.1      | 26.2       |
| Cu                             | 3.31   | 4.35   | 4.53   | 6.39     | 5.95    | 47.8      | 38.5      | 34.9       | 29.1      | 26.7       |
| Zn                             | 61.1   | 43.8   | 56.5   | 59.8     | 50.3    | 132       | 145       | 96.9       | 118       | 116        |
| Ga                             | 20.6   | 20.4   | 19.5   | 16.6     | 19.5    | 20        | 20.2      | 18.4       | 20.3      | 20.2       |
| Rb                             | 142    | 136    | 133    | 164      | 181     | 40.2      | 33.8      | 28.3       | 35        | 51.4       |
| Sr                             | 9.05   | 13.9   | 11.7   | 17.5     | 13.8    | 744       | 697       | 575        | 683       | 759        |
| Mo                             | 0.45   | 1.4    | 2.07   | 4.73     | 1.25    | 2.04      | 1.94      | 1.75       | 1.92      | 1.96       |
| Cd                             | 0.05   | 0.09   | 0.11   | 0.1      | 0.06    | 0.16      | 0.22      | 0.07       | 0.15      | 0.1        |
| In                             | 0.11   | 0.12   | 0.13   | 3.5      | 0.1     | 0.09      | 0.09      | 0.07       | 0.11      | 0.11       |
| Cs                             | 2.45   | 3.75   | 2.59   | 75.8     | 2.44    | 5.39      | 3.23      | 2.09       | 3.17      | 10         |
| Ba                             | 10.1   | 32.1   | 8.37   | 0.79     | 122     | 626       | 658       | 679        | 582       | 766        |
| Tl                             | 0.45   | 0.39   | 0.4    | 23       | 0.49    | 0.17      | 0.13      | 0.14       | 0.11      | 0.38       |
| Pb                             | 21     | 14.4   | 23.8   | 1.77     | 24.6    | 7.15      | 8.46      | 9.86       | 7.49      | 8.13       |
| Th                             | 13.4   | 12.7   | 13.5   | 11.9     | 13.6    | 1.9       | 2.11      | 3.81       | 2.07      | 1.94       |
| U                              | 4.36   | 5.14   | 5.84   | 4.26     | 4.54    | 0.9       | 0.87      | 1.82       | 0.8       | 0.71       |
| Nb                             | 37     | 43.5   | 41     | 33.2     | 36.8    | 19.6      | 19.8      | 14.1       | 21.1      | 21.1       |
| Ta                             | 2.7    | 2.79   | 2.75   | 2.26     | 2.58    | 1.24      | 1.34      | 0.78       | 1.18      | 1.2        |
| Zr                             | 531    | 656    | 662    | 466      | 556     | 388       | 392       | 295        | 389       | 389        |
| Hf                             | 16.2   | 21.9   | 19.1   | 14.3     | 16.4    | 8.31      | 8.47      | 7.05       | 8.54      | 8.54       |
| Sn                             | 7.34   | 7.36   | 6.37   | 6.24     | 6.83    | 2.03      | 1.96      | 1.81       | 2.02      | 2.27       |
| Sb                             | 2.18   | 2.67   | 1.83   | 3.06     | 0.59    | 0.06      | 0.06      | 0.09       | 0.08      | 0.08       |
| Ti                             | 900    | 989    | 962    | 796      | 890     | 13418     | 13540     | 6507       | 12971     | 13125      |
| W                              | 0.63   | 2.79   | 2.67   | 1.55     | 1       | 1.05      | 0.37      | 0.39       | 0.29      | 0.3        |
| As                             | 7.97   | 42.4   | 182    | 5.46     | 9.52    | 2.46      | 3.53      | 2.39       | 4.03      | 3.27       |
| V                              | 0.46   | 7.02   | 16.7   | 4.29     | 2.08    | 234       | 235       | 136        | 239       | 239        |
| La                             | 31.5   | 59.6   | 94.6   | 68.1     | 76.6    | 40.2      | 41.1      | 33.9       | 40.2      | 39.9       |
| Ce                             | 68.1   | 115    | 185    | 143      | 149     | 88        | 90.7      | 66         | 90.3      | 90.3       |
| Pr                             | 9.11   | 15.3   | 23.8   | 16.9     | 19.7    | 11.9      | 12.3      | 8.5        | 11.7      | 11.7       |
| Nd                             | 33     | 52.1   | 82.5   | 57.4     | 68      | 49        | 49.4      | 36.2       | 50.4      | 53.8       |
| Sm                             | 7.64   | 10.4   | 15.8   | 11.3     | 13.5    | 10.1      | 10.2      | 6.76       | 10.6      | 10.3       |

| 样品号  | Q-100 | Q-16-4 | Q-16-9 | L2650-b1 | Q-16-18 | L2650-b42 | Q-16-21-1 | L-2650-b21 | Q-16-21-2 | L-2650-b35 |
|------|-------|--------|--------|----------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|
| 岩石类型 | 流纹岩   |        |        |          |         | 玄武岩       |           |            |           |            |
| Eu   | 0.26  | 0.35   | 0.43   | 0.37     | 0.4     | 2.89      | 2.93      | 1.74       | 2.88      | 3.04       |
| Gd   | 7.89  | 9.55   | 12.6   | 9.46     | 11.3    | 9.61      | 9.82      | 6.56       | 9.78      | 9.89       |
| Tb   | 1.83  | 2.08   | 2.42   | 1.86     | 2.26    | 1.55      | 1.61      | 0.99       | 1.54      | 1.49       |
| Dy   | 11.5  | 12.7   | 13.7   | 11.2     | 13.2    | 8.35      | 8.67      | 5.71       | 8.84      | 8.96       |
| Ho   | 2.49  | 2.67   | 2.83   | 2.35     | 2.74    | 1.69      | 1.74      | 1.04       | 1.66      | 1.57       |
| Er   | 7.66  | 8.02   | 8.24   | 7.06     | 8.18    | 4.74      | 4.81      | 2.98       | 4.58      | 4.58       |
| Tm   | 1.18  | 1.22   | 1.21   | 1.11     | 1.25    | 0.66      | 0.68      | 0.46       | 0.73      | 0.73       |
| Yb   | 7.69  | 8.03   | 7.92   | 7.54     | 8.28    | 4.34      | 4.46      | 2.8        | 4.28      | 4.2        |
| Lu   | 1.18  | 1.2    | 1.19   | 1.14     | 1.28    | 0.66      | 0.67      | 0.45       | 0.69      | 0.66       |
| Sc   | 3.99  | 4.98   | 4.84   | 4.48     | 3.87    | 22.9      | 22.7      | 17.6       | 24.9      | 24.8       |
| Y    | 61.5  | 64.9   | 71.4   | 59.2     | 70.6    | 43.3      | 43.6      | 30.2       | 45        | 44.5       |

为 45.1), 大于 40, 说明玄武岩浆系列为幔源。

在哈克图解中(图 9), 恰库尔图流纹岩和玄武岩的 MgO 含量与其 SiO<sub>2</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub>、FeO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 等主要氧化物相关性不明显, 且具有明显间断, 可能不是同一岩浆源的岩浆岩在演化的过程中分离结晶的产物, 反映了它们可能不是来自于同一物源区。

恰库尔图流纹岩稀土元素总量(∑REE)变化较大, 介于 191.03×10<sup>-6</sup>~452.24×10<sup>-6</sup>, 平均为 331.2×10<sup>-6</sup>, 富集轻稀土元素。轻重稀土分异明显, (La/Yb)<sub>N</sub> 介于 2.94~8.97, LREE/HREE 为 3.61~8.02; 具有强烈的 Eu 负异常(δEu=0.09~0.11), Ce 异常不明显(δCe=0.91~1)。在球粒陨石标准化图解上, 具有右倾负斜率稀土配分模式。玄武岩稀土元素总量变化于 174.09×10<sup>-6</sup>~241.12×10<sup>-6</sup>, 平均为 225.2×10<sup>-6</sup>, 稀土元素总量小于流纹岩。轻重稀土分馏明显, 富集轻稀土, (La/Yb)<sub>N</sub> 介于 6.61~8.68, LREE/HREE 为 6.37~7.29; 具有轻微的 Eu 的负异常(δEu=0.79~0.91), Ce 异常不明显(δCe=0.93~1.01)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 10), 基性火山岩与酸性火山岩在微量元素地球化学方面的具有明显的差异, 反映了两者可能缺乏成因联系(图 10)。流纹岩微量元素原始地幔标准化蛛网图显示岩石亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、P、Ti, 且 Ba、Sr、Ti、P 谷深, 与玄武岩明显不同, 玄武岩不相容元素 Rb、Ba、K、P 等相对富集, Th、U、Nb、Ta、Sr、Ti 相对亏损。这与许多大陆拉斑玄武岩特征一致, 并表明其玄武岩浆可能受到一定程度的地壳混染(李昌年, 1992)。

5 讨论

5.1 形成时代

本区二叠纪火山岩地层以往在东西准噶尔 1:20 万区调中多划入中—上石炭统。1980 年新疆第一区调大队、中国地质科学院地质所在西准噶尔哈尔加乌(喀尔交)一带哈尔加乌组、卡拉岗组发现大量 *Angaropteridium—Zamiopteris* 植物化石组合(窦亚伟等, 1985), 系统撰文研究认为时代为早二叠世。嗣后, 本区带包括东准噶尔该套火山岩在综合研究和编图成果中大多归入下—中二叠统, 近年部分同位素成果也倾向于该套火山岩为下—中二叠统, 一些学者分别对东准噶尔不同地区的卡拉岗组火山岩进行了锆石 U-Pb 精确定年工作, 张元元等(2009)采样点位于扎河坝地区卡拉岗组(原巴塔玛依内山组)的流纹岩, 获得锆石加权平均年龄为 275.6±2.8 Ma, 并以此将该套火山岩重新划归为二叠纪乌拉尔世末期; 李振生等(2016)对蕴都卡拉东卡拉岗组(原巴塔玛依内山组)的安山岩进行年代学研究, 得到安山岩锆石 U-Pb 年龄为 273±5 Ma, 并据此认为原卡拉岗组地层属于二叠系乌拉尔统。李淦等(2013)采样点位于蕴都喀拉地区卡拉岗组(原巴塔玛依内山组)的流纹岩, 三个流纹岩的锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄分别为 276±3 Ma、276.2±3.1 Ma、279.8±2.5 Ma, 认为流纹岩属于早二叠世岩浆活动的产物。

本次研究对恰库尔图卡拉岗组流纹岩及玄武岩定年, 得到流纹岩的锆石 U-Pb 年龄为 279.5±1.4 Ma, 为早二叠世; 玄武岩的年龄从新到老依次为 280.4±1.3 Ma、423 Ma、482 Ma、610 Ma、1201 Ma 以及 1823 Ma, 依次出现了早二叠世、中志留世、晚奥陶世以及前寒武纪锆石年龄, 说明恰库尔图地区卡拉岗组火山岩的物源可能有部分来自于前寒武纪变质岩。玄武岩锆石最年轻的年龄 280.4±1.3 Ma 代

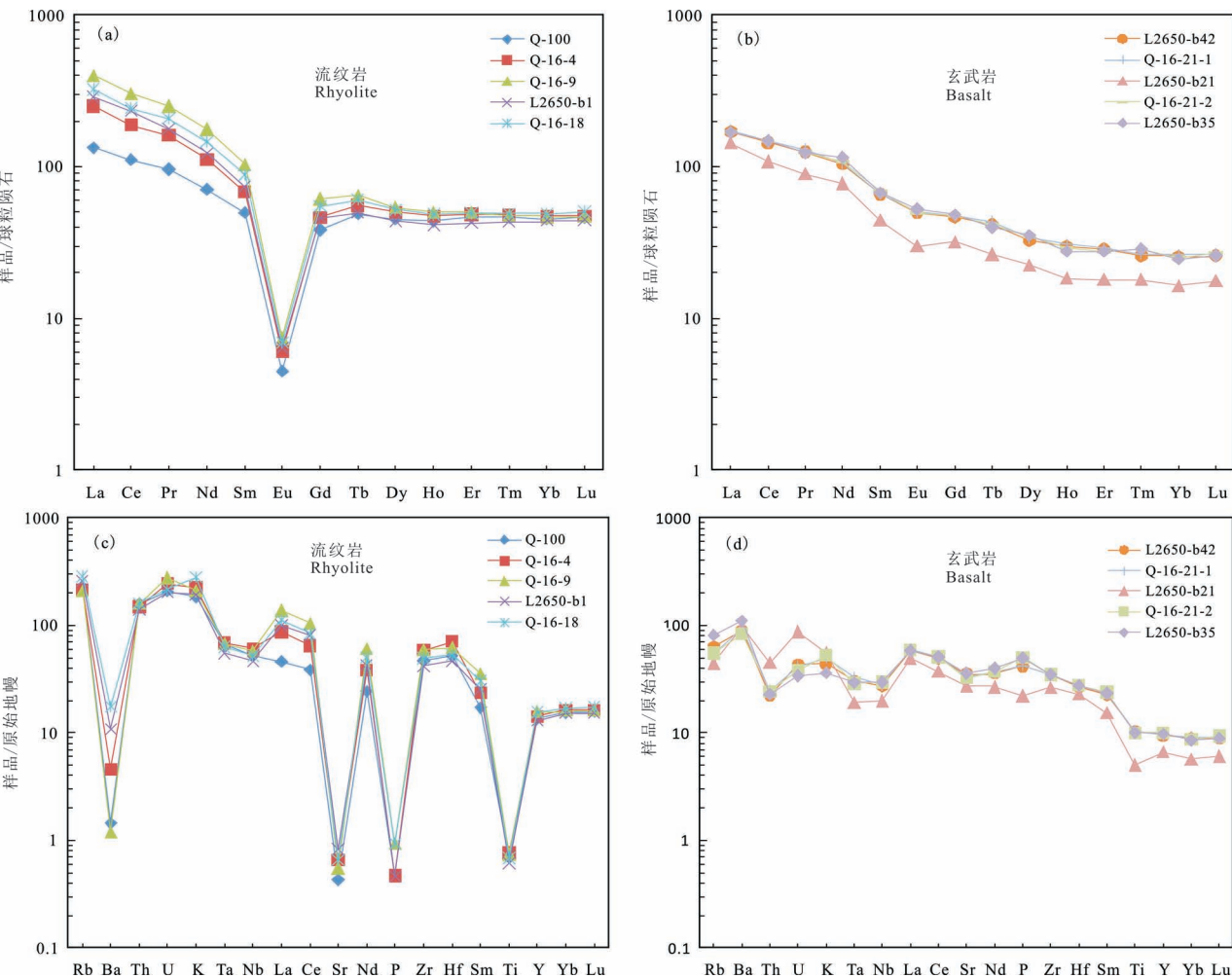


图 10 准噶尔盆地恰库尔图地区卡拉岗组流纹岩、玄武岩稀土元素球粒陨石标准化图(a)、(b)和微量元素原始地幔标准化图(c)、(d) (据 Sun and McDougough, 1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns(a) , (b) and primitive mantle-normalized trace element spider(c) ,(d) diagrams for rhyolite and basalt in the Kalagang Group from Qiakuertu area ,northern margin of the Junggar Basin ( After Sun and McDougough , 1989)

表了其形时代。

根据本文及前人研究,卡拉岗组火山岩具明显壳—幔混合源特征,东准噶尔地区二叠纪火山岩中存有大量捕获的早期岩浆结晶锆石以及区域上存有二叠纪以来准噶尔洋盆残余洋壳。纵观区域上卡拉岗组火山岩年龄发现,恰库尔图、蕴都卡拉、扎河坝地区卡拉岗组地层火山岩年龄集中在 270~280 Ma,为二叠系乌拉尔统。

5.2 岩石类型及成因

恰库尔图卡拉岗组流纹岩具有较高的 SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O、FeO<sup>T</sup>、FeO<sup>T</sup>/MgO,低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 和 MgO,表现在稀土配分图上为呈 Eu 亏损的燕式分布,在微量元素标准化图上显示出 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti

的亏损,表明源区矿物相中有斜长石、磷灰石、角闪石、钛铁矿残留。此外,流纹岩锆石的 εHf(t) 为 +11.2~+18.2,在 Hf 同位素图解中,有部分点落入了幔源区域,模式年龄 T<sub>DM1</sub>(305 Ma)和 T<sub>DM2</sub>(cc)(320 Ma)与其形成年龄(279.5 Ma)接近,这表明其源区物质主要为新生地壳,是壳源岩石重熔作用的产物。

恰库尔图地区卡拉岗组玄武岩的稀土和微量元素以及同位素特征表明了所有玄武岩具有共同的岩浆源区,玄武岩样品具有中等的 Mg<sup>#</sup> 值(41.9~54.7),且绝大多数样品具有轻微的负铕异常(δEu = 0.79~0.91),表明这些玄武岩可能是原始岩浆经历了一定程度分异作用后的产物。玄武岩样品中大

离子亲石元素相对富集,高场强元素 Nb、Ta 相对亏损,并表现出 Ti 的亏损。尽管 Nb、Ta、Ti 的相对亏损是岛弧岩浆的典型特征,但是具有该特征的岩浆却可以出现在多种构造环境中(赵振华等,2007)。

卡拉岗组玄武岩发育的气孔杏仁构造以及流纹岩颜色呈现出的浅红色及沿走向延伸不远均说明该组火山岩形成于陆相环境;另外,稀土元素球粒陨石标准化曲线没有明显的负 Ce 异常也与陆相火山岩的特点一致。玄武岩的  $\text{TiO}_2$  含量除 L2650-b1 为 1.1% 外,其他含量普遍较高,在 2.09%~2.14%,明显不同于岛弧玄武岩 (0.84%) 和洋中脊玄武岩 (1.5%),而与板内玄武岩 (>2%) 相似。

双峰式火山岩按流纹岩与玄武岩的同源关系有两种成因认识:一种是流纹岩和玄武岩可分别来自

不同的母岩浆,二者在空间上的共生可能是地幔部分熔融形成的热的基性岩浆侵入到地壳使地壳岩石发生部分熔融,从而产生酸性岩浆;另一种流纹岩和玄武岩具有共同的幔源母岩浆,流纹岩是经玄武岩浆分离结晶作用形成的,其中只有少量或根本没有陆壳物质的加入。从野外宏观及地质剖面看,恰库尔图地区流纹岩的分布面积大于玄武岩,另外从区域 1:5 万重力资料来看,恰库尔图地区卡拉岗组低重力异常明显多于高重力异常区域,进而说明流纹岩的产出要多于玄武岩。微量元素显示,流纹岩具有强烈的 Eu 负异常,岩石亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、P、Ti,而玄武岩具有轻微的 Eu 的负异常,不相容元素 Rb、Ba、K、P 等相对富集,Th、U、Nb、Ta、Sr、Ti 相对亏损,与流纹岩明显不同,说明流纹岩和玄武岩可分别来

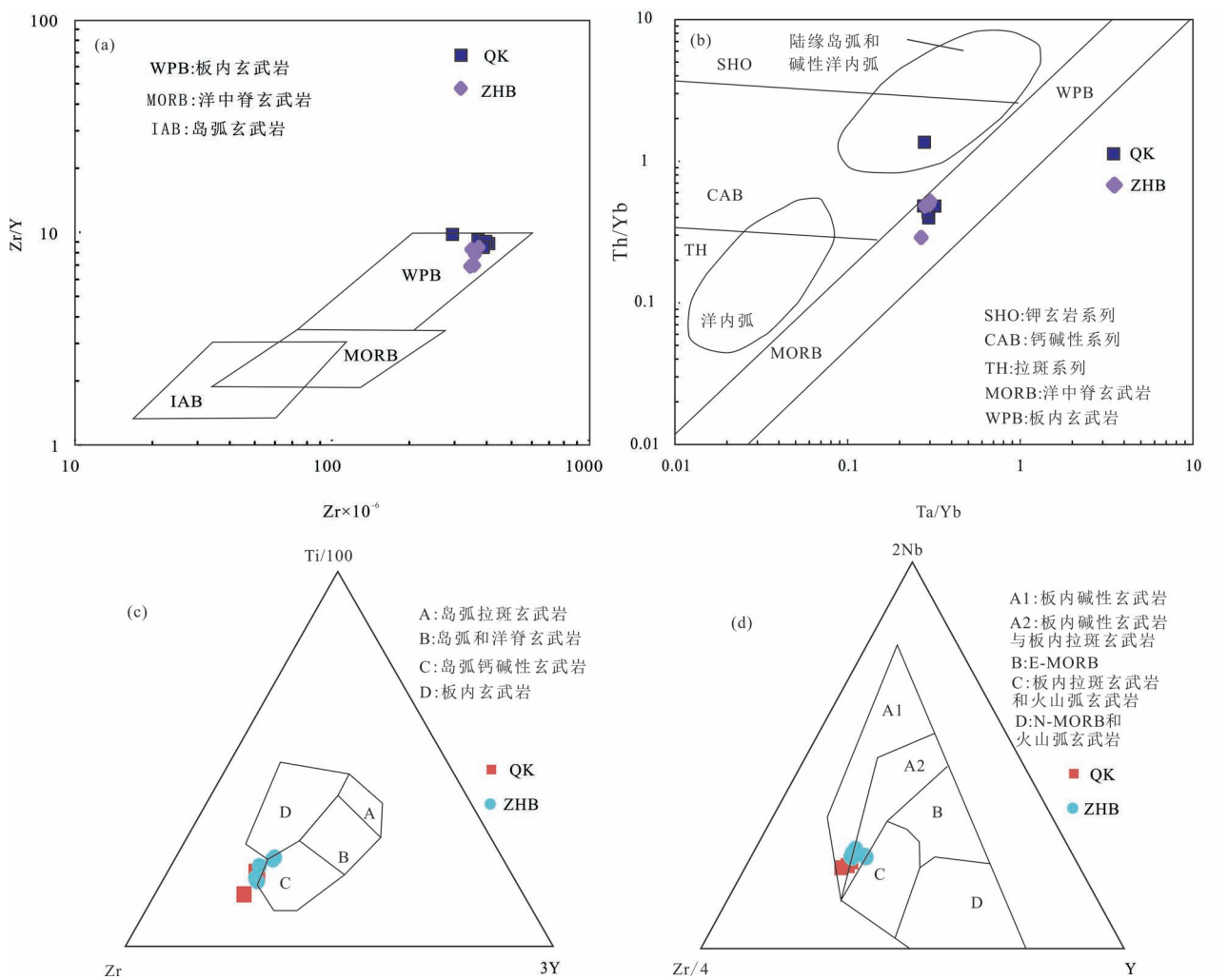


图 11 准噶尔盆地北缘卡拉岗组玄武岩构造判别图解(参见邓晋福等,2015b)

Fig.11 Structural discriminant diagrams for basalt in the Kalagang Group from northern margin of the Junggar Basin (reference to Deng Jinfu et al., 2015b& QK—恰库尔图;ZHB—扎河坝(数据引自张元元等,2009)

QK—Qiakuertu area;ZHB—Zhaheba area(From Zhang Yuanyuan et al.,2009&)

自不同的母岩浆。

综上所述,本区的双峰式火山岩的两个端元并非同源,流纹岩是地幔部分熔融形成的热的基性岩浆侵入到地壳,使下地壳物质的部分熔融与玄武质物质的混合,并在上升过程中分离结晶,即所谓的(AFC)模式。

5.3 构造意义探讨

前人对卡拉岗组火山岩也开展了一些研究,岩石学和地球化学也表现出与本文相似的特征,但对卡拉岗组火山岩形成的构造环境的认识却存在着分歧,多数学者倾向形成于造山后伸展环境(张元元等,2009,2010;李涤等,2012, 2013),也有部分认为形成于火山弧环境及弧后盆地环境的认识(龙晓平等,2006,张峰等,2014)。

双峰式火山岩的形成与地壳构造运动有关,常被作为板块裂解后造山带由挤压转向拉张的重要标志,通常认为产于大陆裂谷环境。近年来的研究发现,双峰式火山岩可以产于地球动力学特征明显不同的环境,钱青等(1999)根据双峰式火山岩的岩石组合和微量元素、同位素性质将双峰式火山岩分为两大类和六种环境,包括大陆裂谷环境、大陆减薄环境、碰撞后伸展环境、洋内岛弧环境、活动大陆边缘环境、弧后扩张的初期阶段。

在  $Zr-Zr/Y$  判别图解中(图 11a),本区玄武岩与扎河坝玄武岩样品均落在板内玄武岩内;在  $Ta/$

$Yb-Th/Yb$  图解中(图 11b)恰库尔图 4 个样品及扎河坝玄武岩落在了板内玄武岩区,一个样品落在了岛弧区域。在  $Ti/100-Zr-3Y$  及  $2Nb-Y-Zr/4$  三角图解中,恰库尔图和扎河坝玄武岩落在了岛弧及板内玄武岩区域。这些均表明区内玄武岩并非典型的板内玄武岩,也不是典型的火山弧玄武岩。

区域上,刘家远等(1999)最早对乌伦古河流域恰库尔图、扎河坝地区的碱性花岗岩进行了研究,其锆石 U-Pb 年龄为 314~323 Ma,并认为形成于后碰撞伸展构造背景,代表着东准噶尔造山作用的结束;韩宝福等(2006)、童英等(2010)在恰库尔图南的碱性花岗岩获得碱性花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 311~314 Ma,并认为其形成于后碰撞环境,是中亚造山带中显生宙陆壳生长作用的产物。另外,一些学者对恰库尔图西部二台地区的侵入岩(童英等,2010;李宗怀等,2004;唐红峰等,2007)以及恰库尔图东部蕴都喀拉地区的火山岩(李涤等,2013;张元元等,2015;李振生等,2016)进行了研究,得到其锆石年龄为分别为 279~299 Ma、273~279 Ma(表 4),认定其形成于后碰撞伸展环境。东准噶尔北缘火山岩形成的时代基本上属于整个准噶尔后碰撞深成岩浆活动的范围(340~265 Ma)。因此,我们结合前人主要认识成果,依据本次对恰库尔图地区双峰式火山岩地球化学特征及野外宏观特征的调查研究,认为恰库尔图地区火山岩的形成过程与晚古生代后碰

表 4 准噶尔盆地北缘恰库尔图地区火山岩及侵入岩年龄

Table 4 Age of intrusive and volcanic rocks from Qiakuertu area,northern margin of the Junggar Basin

| 地层、区域   | 样品位置  | 岩性      | 年龄 (Ma)   | 测试方法      | 形成构造环境 | 资料来源      |
|---------|-------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
| 二叠系卡拉岗组 | 扎河坝煤矿 | 流纹岩     | 275.6±2.8 | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 张元元等,2009 |
| 二叠系卡拉岗组 | 蕴都喀拉  | 流纹岩     | 279.8±2.5 | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 李涤等,2013  |
| 二叠系卡拉岗组 | 蕴都喀拉  | 流纹岩     | 276±3     | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 李涤等,2013  |
| 二叠系卡拉岗组 | 蕴都喀拉  | 流纹岩     | 276.2±3.1 | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 李涤等,2013  |
| 二叠系卡拉岗组 | 蕴都喀拉  | 安山岩     | 273±5     | LA-ICP-MS | 后碰撞伸展  | 李振生等,2016 |
| 二叠系卡拉岗组 | 恰库尔图北 | 流纹岩     | 279.5±1.4 | LA-ICP-MS | 后碰撞伸展  | 本文        |
| 二叠系卡拉岗组 | 恰库尔图北 | 玄武岩     | 280.4±1.3 | LA-ICP-MS | 后碰撞伸展  | 本文        |
| 恰库尔图    | 恰库尔图南 | 碱性花岗岩   | 312±5     | SHRIMP    | 后碰撞    | 韩宝福等,2006 |
| 恰库尔图    | 恰库尔图南 | 碱性花岗岩   | 311.2±2.5 | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 童英等,2010  |
| 恰库尔图    | 恰库尔图南 | 碱性花岗岩   | 314.2±5.2 | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 童英等,2010  |
| 恰库尔图    | 塔斯喀克  | 正长花岗岩   | 323       | LA-ICP-MS | 后碰撞伸展  | 刘家远等,1999 |
| 二台      | 二台北   | 晶洞碱性花岗岩 | 279±3     | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 童英等,2010  |
| 二台      | 二台北   | 花岗闪长岩   | 299±9     | SHRIMP    | 后碰撞伸展  | 李宗怀等,2004 |
| 二台      | 二台西   | 碱长花岗岩   | 282±2     | LA-ICP-MS | 后碰撞    | 唐红峰等,2007 |
| 二台      | 二台西   | 碱长花岗岩   | 282±5     | SHRIMP    | 后碰撞    | 唐红峰等,2007 |
| 扎河坝     | 萨尔铁列克 | 碱性花岗岩   | 320±2     | LA-ICP-MS | 后碰撞伸展  | 刘家远等,1999 |
| 扎河坝     | 赛尔铁列克 | 碱性花岗岩   | 314±2     | LA-ICP-MS | 后碰撞伸展  | 刘家远等,1999 |

撞幔源特征的花岗岩侵位相关,形成于后碰撞伸展的构造背景。

综上所述,本区双峰式火山岩的存在说明恰库尔图地区在二叠纪时期处于后碰撞拉张构造背景,从而有力地证明恰库尔图地区在早二叠纪时准噶尔洋已完全闭合,处于后碰撞拉张体制,导致软流圈地幔物质上涌底侵,发生部分熔融,并导致岩石圈强烈伸展,促使区域性的伸展裂陷,双峰式火山岩为后碰撞伸展构造环境的产物。与碰撞作用有关的裂谷是重要的一类含油气盆地(陈发景,1984),恰库尔图地区玄武岩样品中出现古老锆石,时代从古元古代到新元古代,表明该火成岩样品所穿越的盆地基底可能为古老的前寒武纪结晶基底,近期在东准噶尔外围盆地—坳陷地区发现了多处油气显示,证实了该区具有良好的油气勘探潜力。

## 6 结论

(1)东准噶尔北缘恰库尔图地区卡拉岗组双峰式火山岩流纹岩的年龄为  $279.5 \pm 1.4$  Ma,玄武岩的锆石 U-Pb 年龄有多组,数量最多也最年轻一组锆石的谐和年龄为  $280.4 \pm 1.3$  Ma,说明该卡拉岗组双峰式火山岩的形成时代为早二叠世;玄武岩中还捕获有志留纪、奥陶纪及前寒武纪的锆石,推测所研究玄武岩穿越的基底可能与古老的残余洋壳和岛弧地体组成有关;

(2)恰库尔图卡拉岗组流纹岩具有较高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{FeO}_T$ ,低  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ ,稀土配分图上呈 Eu 亏损的燕式分布,在微量元素标准化图上显示出 Ba、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 的亏损;玄武岩样品具有中等的  $\text{Mg}^\#$  值,具有轻微的负锶异常,大离子亲石元素相对富集,高场强元素 Nb、Ta 相对亏损,并表现出 Ti 的亏损;流纹岩龄锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 +15.3,模式年龄  $T_{\text{DM1}}(305 \text{ Ma})$  和  $T_{\text{DM2}}(\text{cc})(320 \text{ Ma})$  与其形成年龄(279.5 Ma)相近,表明它们的源区物质主要为新生地壳。本区双峰式火山岩的两个端元并非同源,流纹岩是幔源岩浆与壳源熔体混合作用的结果。

(3)根据本区火山岩地球化学特征,恰库尔图地区在早二叠世时处于后碰撞拉张构造体制,双峰式火山岩为板内后碰撞伸展构造环境的产物,准噶尔盆地古老的前寒武纪结晶基底存在的可能性说明该区具有良好的油气勘探潜力。

**致谢:**感谢中国地质科学院地质研究所童英研究员和另一位匿名审稿人对文章提出的建设性意

见;感谢新疆地矿局二区调大队李成文高级工程师的野外指导。

## 注 释 / Note

① 新疆维吾尔自治区地质局.1971.1:20 万恰库尔特图幅区域地质矿产报告。

## 参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈发景.1984.裂谷构造的形成、演化和油气分布(下).地质科技情报,4:93~98.
- 邓晋福,冯艳芳,狄永军,刘翠,肖庆辉,苏尚国,赵国春,孟斐,马帅,姚图.2015a.岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换.地质论评,61(3):473~484.
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新,戴蒙.2015b.关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议.地质论评,61(4):717~734.
- 窦亚伟,孙结华.1985.新疆北部哈尔加乌组 and 卡拉岗组的地质时代.地质论评,31(6):489~494.
- 韩宝福,季建清,宋彪,陈立辉,张磊.2006.新疆准噶尔晚上古生代陆壳垂向生长—后碰撞深成岩浆活动的时限(I).岩石学报,22(50):1077~1088.
- 韩春明,肖文交,崔彬,毛启贵,张继恩,敖松坚.2006.新疆北部晚上古生代铜矿地板主要类型和地质特征.地质学报,80(1):74~89.
- 何国琦,李茂松,刘德权,唐延龄,周汝洪.1994.中国新疆古生代地壳演化以及成矿.乌鲁木齐:新疆人民出版社:1~437.
- 黄道袁,万渝生,张德会,董春艳,赵元艺.2016.华北克拉通南缘下汤地区古元古代构造热事件——地球化学特征、锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Hf 同位素研究.地质论评,62(6):1439~1461.
- 李涤,何登发,樊春,唐勇,阳孝法,常秋生,袁航.2012.准噶尔盆地克拉克美丽气田石炭系玄武岩的地球化学特征以及构造意义.岩石学报,28(3):981~992.
- 李涤,何登发,樊春,向奎,金露英.2013.东准噶尔早二叠世后碰撞岩浆活动:蕴都卡拉流纹岩 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约.岩石学报,29(1):317~337.
- 李锦铁,肖序常,汤耀庆,赵民,朱宝清,冯益民.1990.新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚上古生代板块构造的基本特征.地质评论,36(4):305~316.
- 李锦铁.1995.新疆东准噶尔蛇绿岩性基本特征和其侵位历史.岩石学报,11(增刊):73~84.
- 李锦铁,肖序常.1999.对新疆地壳结构与构造演化几个问题性简要评述.地质科学,34(4):405~419.
- 李锦铁,肖序常,陈文.2000.准噶尔盆地东部的前晚奥陶世陆壳基底——来自盆地东北缘老君庙变质岩性证据.中国区域地质,19(3):297~302.
- 李锦铁.2004.新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变.地质论评,50(3):304~322.
- 李振生,聂峰,田晓莉,石永红,牛浩,王创.2016.东准噶尔构造带晚古生代地层时代的厘定及其对区域构造演化意义.地质学报,90(3):569~588.
- 李宗怀,韩宝福,宋彪.2004.新疆东准噶尔二台北花岗岩体和包体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.岩石学报,20(5):1263~1270.
- 刘家远,喻享祥,吴郭泉.1999.新疆东准噶尔两类碱性花岗岩及其地

质意义.矿物岩石地球化学通报,18(2):89~94.

龙晓平,孙敏,袁超,肖文交,陈汉林,赵永久,蔡克大,李继亮.2006.东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约.岩石学报,22(1):31~40.

梅厚钧,杨学昌,李荪蓉.1994.新疆北部火山岩及其与成矿的关系.新疆地质,12(1):16~26.

钱青,王焰.1999.不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征.地质地球化学,27(4):29~32.

苏玉平,唐红峰,刘丛强,侯广顺,梁莉莉.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.

唐红峰,屈文俊,苏玉平,侯广顺,杜安道,丛峰.2007.新疆萨惹什克锡矿与萨碱性 A 型花岗岩成因关系的年代学制约.岩石学报,23(8):1889~1897.

童英,王涛,洪大卫,韩宝福,张建军,史兴俊,王超.2010.北疆及邻区石炭—二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义.岩石矿物学杂志,29(6):619~64.

吴小奇,刘德良,魏国齐,李剑,李振生.2009.准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系火山岩地球化学特征以及其构造环境.岩石学报,25(1):55~33.

肖文交,韩春明,袁超,陈汉林,孙敏,林寿发,厉子龙,毛启贵,张继恩,孙枢,李继亮.2006.新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造—成矿作用:对古亚洲洋构造地区南部大地构造演化的制约.岩石学报,22(5):1062~1076.

肖序常,汤耀庆,冯益民.1992.新疆北部以及其邻区大地构造.北京:地质出版社:1~169

张峰,徐涛,范俊杰,潘爱军,王斌,朝银银.2014.东准噶尔石炭系巴塔玛依内山组火山岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄及其构造意义.地球化学,(3):301~316.

张元元,郭召杰,刘畅,许文骞.2007.新疆阿尔泰东部新生代玄武岩的地球化学特征与地质意义.岩石学报,23(7):1730~1738.

张元元,陈石,郭召杰,方世虎.2009.东准噶尔扎河坝地区古生代晚期火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年以及其地质意义.岩石学报,25(3):506~514.

张元元,郭召杰.2010.准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据以及其东、西准噶尔蛇绿岩性对比研究.岩石学报,26(2):421~430.

张招崇,周刚,同升好,陈柏林,贺永康,柴凤梅,张立新.2007.阿尔泰山南缘晚古生代火山岩性地质地球化学特征以及其对构造演化启示.地质学报,81(3):344~358.

赵振华,熊小林,王强,白正华,乔玉楼.2007.新疆北部晚上古生代的底侵作用——来自橄榄玄粗岩石与埃达克岩石的证据.地质学报,81(5):606~619.

Blichert-Toft and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle—crust system: Earth Planet Science Letter, 148:243~258.

Chen faJing.1984&.Formation, evolution and hydrocarbon distribution of rift structures (II). Geological Science and Technology Information, 4:93~98.

Coleman R G. 1989. Continental growth of Northwest China. Tectonics,8(3):621~635.

Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo,Meng Fei, Yao Tu.2015a&.Magmatic arc and ocean—continent transition: discussion. Geological Review, 61(3):473~484.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo,Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng.2015b&.On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion. Geological Review,61(4):717~734.

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A granitoids type: Ptoegenteic and tectonic implications. Geology,20(7):641~644.

Grifin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson S E, O Reilly S Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon Chemistry and Magma Genesis, SE China: In-situ analysisof Hf isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. Lithos, 61:237~269.

Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui and Zhang Lei. 2006&. Late Paleozonic 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.

Han Chunming, Xiao Wenjiao, Cui Bin, Mao Qigui, Zhang Jien and Ao Songjiang. 2006&. Major types and characteristics of Late Paleozoic copper deposits in North Xinjiang, Northwest China. Acta Geologica Sinica, 80(1):74~89.

He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 1994&. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. Urumuqi: Xinjiang Peoples Publishing House; Hongkong: Educational and Cultural Press LTD.: 1~437.

Huang Daomao, Wang Yusheng, Zhang Dehui, Dong Chunyan, Zhao Yuanzhi. 2016&. Paleoproterozoic tectono-thermal events in the Xiatang area, Lushan County, south margin of China craton——evidence from geochemical features, zircon SHRIMP dating and Hf isotopic analysis. Geological Review, 62(6):1439~1461.

Li Di, He Dengfa, Santosh M, Tang Jieyun. 2014. Petrogenesis of Late Paleozoic volcanics from the Zhaheba depression, east Junggar: insights into collisional event in an accretionary orogen of Central Asia. Lithos, 184~187:167~193.

Li Di, He Dengfa, Tang Yong, Fan Chun, Kong Yuhua. 2012&. Genesis of Early Carboniferous volcanic rocks of the Dinan uplift in Junggar Basin: Constraints to the closure time of Kalamaili ocean. Acta Petrologica Sinica, 28(8):2340~2354.

Li Di, He Dengfa, Fan Chun, Xiang Kui, Jin Luying. 2013&. Early Permian post collisional magmatic events, East Junggar: Constraints from zircon SHRIMP U—Pb age, geochemistry and Hf isotope of rhyolite in the Yundukala area. Acta Petrologica Sinica, 29(1):317~337.

Li Jinyi, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Zhao Min, Zhu Baoqing, feng Yimin. 1990&. Main characteristics of Late Paleozoic plate tectonics in the southern part of east Junggar, Xinjiang. Geological Review, 36(4):305~316.

Li Jinyi.1995&. Main characteristics and emplacement progresses of the east Junggar ophiolites, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 11(Suppl. ):73~84.

Li Jinyi, Xiao Xuchang. 1999&. Brief reviews some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. Scientia Geologica Sinica, 34(4):405~419.

Li Jinyi, Xiao Xuchang, Chen Wen. 2000&. Late Ordovician continental basement of the eastern Junggar basin in Xinjiang. NW China: Evidence from the Laojunmiao metamorphic complex on the northeast basin margin. Regional Geology of China, 19(3):297~302.

Li Jinyi. 2004&. Late NeoProterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. Geological Review, 50(3):304~322.

Li Zhensheng, Nie Feng, Tian Xiaoli. 2016. Redefinition of formation age of Late Paleozoic strata in the eastern Junggar tectonic zone and its implications for evolution of regional geological structure. Acta Geologica Sinica, 90(3):569~588.

Li Zonghai, Han Baofu, Song Biao.2004&. Shrimp zircon U-Pb dating of

the Ertaipei granodiorite and its enclaves from eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (5): 1263~1270.

Liu Jiayuan, Yu Hengxiang, Wu Guoquan. 1999. Alkali granites and tin deposits of the Kalamali area, northern Xinjiang. *Geological Exploration For Non-Ferrous Metals*, 6(3): 129~135.

Long Xiaoping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao. 2006. Genesis of carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar: Consistan on the closure of the Junggar ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (1): 40.

Mei Houjun, Yang Xuechang and Li Sunrong. 1994. Volacanic rocks of Northwest Xinjiang and their relationship with mineralization. *Xinjiang Geology*, 12 (1): 16~26.

Qian Qing, Wang Yan. 1999. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings. *Geology—Geochemistry*, 27(4): 29~32.

Sun Min, Long Xiaoping, Cai Keda, Jiang Yingde, Wang Buyun, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Wu Fuyuan. 2009. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1345~1358.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systems of oceanic basalts: Implications formal composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J. eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.

Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, Hou Guangshun, Liang Lili. 2006. The determination and a preliminar study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Mineralogia*, 25(3): 175~184.

Su Yuping, Zheng Jianping, Zhao Junhong, Tang Huayun, Ma Qiang, Lin Xiangyang. 2012. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: Implication for a tectonic transition. *Gondwana Research*, 22 (3~4): 1009~1029.

Tang Hongfeng, Qu Wenjun, Su Yuping. 2007. Genetic connection of Areshike tin deposit with the alkaline A-type granites of Sabei body in Xinjiang: Constraint from isotopic ages. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1989~1997.

Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, Han Baofu, Zhang Jianjun, Shi Xingjun, Wang Chao. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous—Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619~641.

Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Wei Guoqi, Li Jian, Li Zhensheng. 2009. Geochemical charactrestics and teconic settings of Carboniferous Volcanic rocks from Ludong—Wucuiwan area, Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, (1): 55~66.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China Termination of the central Alian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Yan Quanren, Qin Kezhang, Chen Hanlin, Yuan Chao, Sun Min, Li Jiliang, Sun Shu. 2006. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the north Xinjiang area, China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 32~37.

Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, Zhu Baoqing, Li Jinyi, Zhao Min. 1992. Tectonic evolution of northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House.

Zhang Feng, Xu Tao, Fan Junjie, Pan Aijun, Wang Bin, Zhao Yinyin. 2014. Whole rock Sm-Nd isochron age of volcanic rocks Carboniferous in the eastern Junggar and its tectonic significance. *Geochemica*, 43(3): 301~316.

Zhang Yuanyuan, Chen Shi, Guo Zhaojie, Fang Shihu. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the latest Paleozoic volcanic rocks in Zhaheba area, eastern Junggar and its geologic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (3): 506~514.

Zhang Yuanyuan, Guo Zhaojie. 2010. New constraints on formation ages of ophiolites in northern Junggar and comparative study on their connection. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 421~430.

Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, Zhou Gang, He Yongkang, Chai Fengmei, He Lixin, Wan Yusheng. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of east Jungaar, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 51 (8): 952~962.

Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, Bai Zhenghua and Qiao Yulou. 2007. Underplating during Late Paleozoic in North Xinjiang: Evidence from Shoshonitic series volcanic rocks and adakies. *Acta Geologica Sinica*, 81 (5): 606~619.

Geological and Geochemical Features of the Permian Bimodal Volcanic Rocks in the Qiakurtu Area, Eastern Junggar Basin, Xinjiang, and Their Tectonic Significance

TANG Hejun<sup>1,2)</sup>, MENG Guixiang<sup>1,2)</sup>, YANG Yueqing<sup>1,2)</sup>, DENG Zhen<sup>1,2)</sup>, YAN Jiayong<sup>1,2)</sup>, QI Guang<sup>1,2)</sup>, XUE Ronghui<sup>1,2)</sup>

- 1) China Deep Exploration Center—SinoProbe Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;
- 2) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

**Objectives:** There were large scale volcanic rocks strata of Permian in East Junggar Basin, Xinjiang. the Kalagang Group is mainly intermediate acid volcanic rocks, local bimodal volcanic rocks. This artical based on Kalagang Group bimodal volcanic rocks——rhyolite and basalt, to discusses the Late Paleozoic tectonic setting in

the Qatukatu area, Eastern Junggar Basin. Combining with the previous research results, attempts to determine and explore the Early Permian tectonic settings provide the basis for defining the closure time of the Junggar Ocean and revealing the tectonic evolution of East Junggar Basin.

**Methods:** This artical based on Kalagang Group bimodal volcanic rocks——rhyolite and basalt,to research the petrology, geochronology, geochemistry.

**Results:** Zircon LA-ICP-MS U-Pb results showed that the rhyolite and basalt ages were 279.5 and 280.4 Ma, indicating the formation age of the volcanic rocks of Kalagang Group producted in the early permian. The rhyolites have high SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO and low MgO.The REE distribution map shows a “Yan style” distribution and Eu is a negative anomaly.The elment of Ba, Nb, Ta, Sr, P and Ti are loss shown on the trace elemental normalization map.The basalt samples have a slight negative anomaly of Eu, enrich large ion lithophile elements, depletion of high field strength elements Nb,Ta, and loss of Ti; the average value of  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  of rhyolite zircons is +15.3,  $T_{\text{DM1}}(305\text{ Ma})$  and  $T_{\text{DM2}}(\text{cc})(320\text{ Ma})$  ages are similar to their formation age(279.5 Ma).

**Conclusions:** The bimodal volcanics in this area are not homologous, rhyolite is the result of the mixing of the mantle magma and the melt crustal source. The Qiakuertu region was completely closed before the Early Permian, and was in post-collision tensioning and bimodal volcanic rocks were the product of post-collision extensional tectonic setting.The possibility of the existence of the old Precambrian crystalline basement in the Junggar basin indicates that the area has good potential for oil and gas exploration.

**Keywords:** bimodal volcanic rocks;geochemistry;geological significance;east Junggar Basin

**Acknowledgments:** This research is supported by Xinjiang Geological Exploration Fund Project;Survey of 1 : 50000 Comprehensive Geophysical Prospecting in Halasu, Qinghe County, Xinjiang (No. A15-1-LQ10) and China Geological Survey Project;Survey on Copper Polymetallic Geology and Mineral Resources in Shallow Cover Area of Junggar Metallogenic Belt (No.DD20160007). Thank the anonymous reviewers for their constructive comments on this research

**First author:** TANG Hejun, male, born in 1987, master graduate, assistant researcher, engaged in basic geology survey and comprehensive research work. Email: 03206125@163.com

**Corresponding author:** MENG Guixiang, male, researcher, engaged in basic geology survey and comprehensive research work. Email: mgxlw@126.com

Manuscript received on: 2018-01-11; Accepted on: 2018-06-14; Edited by: ZHANG Yuxu

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2018.06.007

《地质论评》和《地质学报》再创佳绩

2018 年 11 月 1 日,中国科学技术信息研究所在北京国际会议中心举行“中国科技论文统计结果发布会”,会上公布了中国科技论文与引文数据库收录的中国大陆中文科技期刊的综合评价排名,《地质论评》和《地质学报》再创佳绩。

《地质论评》经过多项指标综合评定及同行专家评议推荐,继续被收录为“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊);8 篇文章入选“中国精品科技期刊顶尖学术论文”(即“领跑者 5000 论文”)。《地质论评》2017 年度总被引文频次为 3285,核心影响因子为 2.354,综合评价总分为 66.0,在地质类科技期刊中,分别位列第五、第一和第三位。

《地质学报》获得了“2017 年百种中国杰出学术期刊”称

号;经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐,继续被收录为“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊);6 篇文章入选“中国精品科技期刊顶尖学术论文”(即“领跑者 5000 论文”)。《地质学报》2017 年度总被引文频次为 6162,核心影响因子为 2.253,综合评价总分 75.4,在地质类科技期刊中,分别位列第二、第二和第一位。

**LIU Zhiqiang: Geological Review and Acta Geological Sinica Made New Achievements**

(刘志强 供稿)