

# 塔里木盆地东北部新元古代花岗质 岩浆活动及地质意义

罗金海,车自成,张小莉,韩伟,张国锋,年秀清

大陆动力学国家重点实验室(西北大学),西北大学地质学系,西安,710069

**内容提要:**库车坳陷东部侵入于元古宇基底变质岩中的黑云母二长花岗岩属于高钾钙碱性岩系,岩石具有富硅( $\text{SiO}_2 = 75.77\% \sim 77.79\%$ )、高碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.90\% \sim 7.95\%$ )、富钾( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.21 \sim 1.98$ )、低  $\text{TiO}_2$  ( $0.06\% \sim 0.13\%$ , 平均  $0.08\%$ ) 和准铝质(铝饱和指数  $\text{A}/\text{CNK} = 0.92 \sim 1.15$ , 平均  $1.07$ ) 的特点。岩石明显富集 Rb、Th、K、Nd、Hf、Zr、Tb、Y 和 Yb, 亏损 Ba、U、Nb、Ta、Sr、P、Sm、Ti 等元素, 具有明显的负 Eu 异常( $\delta\text{Eu} = 0.06 \sim 0.11$ , 平均  $0.10$ )。地球化学特征表明该花岗岩起源于中-下地壳的部分熔融。对花岗岩进行的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素地质年代学研究, 获得了  $646.5 \pm 3.9$  Ma 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄, 说明花岗岩形成于早震旦世, 而不是以前认为的石炭纪。结合区域地质资料分析认为, 这次岩浆事件是塔里木地块基底在 Rodinia 超大陆裂解过程中的产物。

**关键词:**塔里木盆地;库车坳陷东部;石炭纪;花岗岩;新元古代;Rodinia 超大陆裂解作用

在塔里木盆地库车坳陷东部轮台县阳霞镇阳霞煤矿一带的吐格尔明背斜核部出露的元古宇基底地层中发育灰白色花岗岩侵入体(图1), 1:20万科克铁克幅地质图<sup>①</sup>根据南天山地区的区域对比资料将该花岗岩标定为石炭纪( $\gamma_4^{2c}$ )。此后, 虽然许多研究者对南天山出露的花岗岩开展过大量的地球化学和同位素地质年代学研究, 但是未曾见到对库车坳陷东部阳霞煤矿一带出露的花岗岩进行过相应的研究。事实上, 把库车坳陷东部基底地层中花岗岩的时代与南天山造山带中花岗岩的时代进行对比是不合适的, 因为二者形成的构造环境显著不同, 库车坳陷东部基底中的花岗岩形成于地块内部, 而南天山造山带中的晚古生代花岗岩主要形成于同碰撞或后碰撞造山环境。已有资料表明, 库车坳陷所在的塔北隆起可能是库鲁克塔格断隆的西向延伸, 本文对库车坳陷东部基底中出露的浅色花岗岩地球化学、年代学研究, 进一步说明早震旦世的塔北地区有一次超大陆裂解事件的发生。

## 1 地质背景与样品特征

塔里木盆地奠基在古老的塔里木克拉通地块之

上, 其太古宇-新元古界变质基底在盆地东北部的库鲁克塔格地区大范围出露地表, 塔北隆起可能是库鲁克塔格向西北方向的自然延伸(图1)。在库鲁克塔格地区, 下南华统贝义西组( $\text{N}_1b$ )大陆裂谷型碎屑岩-火山岩建造角度不整合覆盖在青白口系北塞纳尔塔格组( $\text{Q}_2b$ )变质岩之上(高振家等, 1984; 李锦轶, 2004; 何金有等, 2007), 该角度不整合是塔里木地块结束克拉通化进程的标志。在库鲁克塔格太古宇-新元古界基底地层中发育新元古代晚期的岩浆岩(孙宝生等, 2007; 罗新荣等, 2007; 徐备等, 2008)。库车坳陷位于塔北隆起北部, 一般认为它具有与库鲁克塔格类似的前寒武系结晶基底, 但是目前并未对其前寒武系基底开展过直接研究, 对其前寒武纪地质演化的认识主要都是通过间接的对比得到的。

本文的花岗岩样品采自阳霞煤矿西北部塔克麻扎花岗岩露头区, 采样点坐标  $84^\circ 26' 1.32''\text{E}$ 、 $42^\circ 7' 37.38''\text{N}$ 。花岗岩体呈岩株状产出, 岩体的围岩是元古宇灰绿色绿泥绢云母石英片岩, 片岩变形比较强烈, 发育较多的小型褶皱。花岗岩体与围岩的接触带比较清晰, 接触带内片岩的片理面上大量发育粒径约 1 mm 的铁铝榴石。

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40972141)资助成果。

收稿日期:2010-10-08;改回日期:2011-01-07;责任编辑:周健。

作者简介:罗金海,男,1967年生。教授,主要从事区域构造研究。通讯地址:710069,陕西省西安市太白北路229号,西北大学地质学系;Email:luojh@mwu.edu.cn。

DOI:CNKI:11-1951/P.20110330.1626.098 网络出版时间:2011-3-30 16:26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110330.1626.098.html>

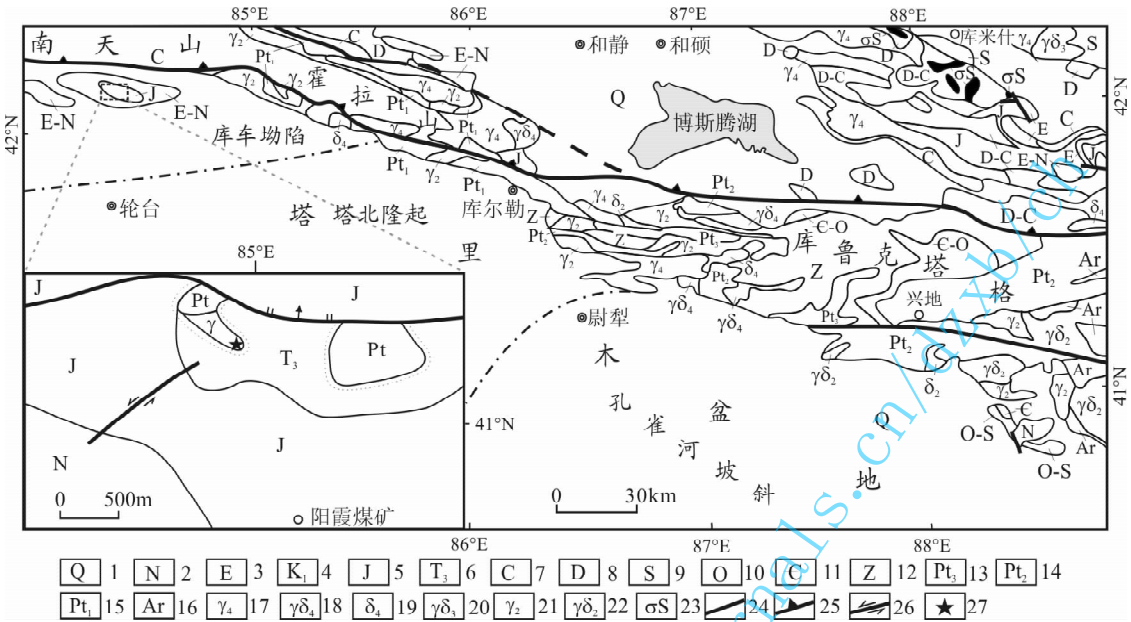


图 1 库车坳陷东部及塔里木盆地东北部简化地质图

Fig. 1 Simplified geological map of the eastern part of the Kuche depression and its adjacent areas

- 1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—下白垩统;5—侏罗系;6—上三叠统;7—石炭系;8—泥盆系;9—志留系;10—奥陶系;11—寒武系;12—震旦系;13—新元古界;14—中元古界;15—古元古界;16—太古宇;17—晚古生代花岗岩;18—晚古生代花岗闪长岩;19—晚古生代闪长岩;20—早古生代花岗闪长岩;21—元古宙花岗岩;22—元古宙花岗闪长岩;23—志留纪蛇绿岩-蛇绿混杂岩;24—断层;25—南天山南缘逆冲断层;26—平行断层;27—采样位置
- 1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Paleogene; 4—Lower Cretaceous; 5—Jurassic; 6—Upper Triassic; 7—Carboniferous; 8—Devonian; 9—Silurian; 10—Ordovician; 11—Cambrian; 12—Sinian; 13—Neoproterozoic; 14—Mesoproterozoic; 15—Paleoproterozoic; 16—Archean; 17—Late Paleozoic granite; 18—Late Paleozoic granodiorite; 19—Late Paleozoic diorite; 20—Early Paleozoic grandiorite; 21—Proterozoic granite; 22—Proterozoic granodiorite; 23—Silurian ophiolite-ophiolite melange; 24—fault; 25—thrust in the southern margin of the South Tianshan orogenic belt; 26—strike-slip fault; 27—location of the samples

花岗岩体露头长约 30 m,宽 2~3 m,呈灰白色,中一粗粒结构,块状构造,主要矿物为:钾长石 40%~45%、斜长石 35%、石英 20%、黑云母 5%,副矿物有锆石、磁铁矿和榍石等,属于黑云母二长花岗岩。岩石蚀变微弱,仅黑云母局部有轻微绿泥石化。

2 地球化学与同位素地质年代学分析方法

全岩的主量和微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素分析在日本理学 RIX2100 X 荧光光谱仪(XRF)上测定,元素分析误差小于 5%。微量和稀土元素分析在美国 Perkin Elmer 公司 Elan 6100DRC 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上进行,分析精度误差一般小于 5%。

从花岗岩样品(样品号 08KC11)中分选出锆石,在双目镜下挑出无色透明无裂痕的颗粒,用环氧树脂固定并抛光至锆石颗粒一半出露,然后进行阴极发光(CL)内部结构及 LA-ICP-MS 原位微量元素

和同位素分析测试。锆石的 CL 照相和 U-Pb 定年及微量元素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。CL 发光仪为加载于扫描电镜上的英国 Gatan 公司的 Mono CL3+型阴极荧光探头。锆石的 U-Pb 同位素组成利用西北大学大陆动力学国家重点实验室的四极杆 ICP-MS Elan6100DRC 进行测定。激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,分析采用激光束斑直径为 30 μm,激光脉冲为 10 Hz,能量为 32~36 mJ。

3 花岗岩的地球化学特征

阳霞煤矿花岗岩的主量与微量元素测试结果见表 1。该花岗岩的常量元素在 SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 图解上表现为亚碱性特征,在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解上主要表现为高钾钙碱性特征(图 2)。岩石的里特曼指数 σ=0.77~1.92(平均 1.52),属强钙碱性岩系。岩石的 SiO<sub>2</sub> 介于 75.77%~77.79%(平均 76.82%),Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 含量较高(6.90%~7.95%,平均

7.14%),富钾( $K_2O/Na_2O=1.21\sim1.98$ ), $TiO_2$ 含量极低( $0.06\%\sim0.13\%$ ,平均 $0.08\%$ ), $MgO$ 含量较低( $0.09\%\sim0.35\%$ ,平均 $0.19\%$ ),低钙( $CaO=0.17\%\sim2.13\%$ ,平均 $0.47\%$ ),贫铁( $Fe_2O_3^T=0.59\%\sim1.94\%$ ,平均 $1.08\%$ )。 $Al_2O_3=12.14\%\sim13.53\%$ (平均 $12.78\%$ ),铝饱和指数 $A/CNK=0.92\sim1.15$ (平均 $1.07$ ),属于弱过铝质花岗岩。

阳霞煤矿花岗岩的稀土含量较低, $\Sigma REE$ 为

表 1 库车坳陷东部阳霞煤矿花岗岩主量元素(%)和微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析数据表

Table 1 Major element (%) and trace element ( $\times 10^{-6}$ ) compositions of granites in the Yangxia coal mine in eastern Kuche depression

| 样品                   | 08KC01 | 08KC02 | 08KC03 | 08KC04 | 08KC05 | 08KC06 | 08KC07 | 08KC08 | 08KC09 | 08KC10 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $SiO_2$              | 75.77  | 77.66  | 76.00  | 76.96  | 77.55  | 77.34  | 77.77  | 74.79  | 77.74  | 76.58  |
| $TiO_2$              | 0.13   | 0.08   | 0.11   | 0.09   | 0.09   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   |
| $Al_2O_3$            | 13.53  | 12.17  | 13.47  | 12.76  | 12.76  | 13.00  | 12.73  | 12.14  | 12.86  | 12.35  |
| $Fe_2O_3^T$          | 1.27   | 1.40   | 1.05   | 0.98   | 0.88   | 0.90   | 0.59   | 1.94   | 0.78   | 0.97   |
| $MnO$                | <0.01  | 0.02   | <0.01  | 0.01   | 0.01   | <0.01  | <0.01  | 0.02   | <0.01  | 0.01   |
| $MgO$                | 0.21   | 0.16   | 0.16   | 0.15   | 0.14   | 0.19   | 0.09   | 0.35   | 0.16   | 0.27   |
| $CaO$                | 0.21   | 0.33   | 0.21   | 0.30   | 0.28   | 0.20   | 0.22   | 2.13   | 0.17   | 0.62   |
| $Na_2O$              | 3.21   | 2.62   | 3.59   | 2.53   | 2.68   | 2.43   | 3.25   | 1.66   | 2.51   | 3.05   |
| $K_2O$               | 4.43   | 4.52   | 4.36   | 4.37   | 4.33   | 4.72   | 4.65   | 3.28   | 4.88   | 4.34   |
| $P_2O_5$             | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.02   |
| 烧失量                  | 1.43   | 1.43   | 1.14   | 1.67   | 1.47   | 1.36   | 1.01   | 3.82   | 1.14   | 1.66   |
| 总量                   | 100.23 | 100.43 | 100.13 | 99.84  | 100.21 | 100.21 | 100.39 | 100.21 | 100.31 | 99.93  |
| A/CNK                | 1.13   | 1.04   | 1.08   | 1.14   | 1.13   | 1.15   | 1.02   | 0.92   | 1.11   | 0.97   |
| $\sigma$             | 1.78   | 1.47   | 1.92   | 1.40   | 1.42   | 1.49   | 1.79   | 0.77   | 1.57   | 1.63   |
| Rb                   | 193    | 139    | 183    | 145    | 141    | 190    | 166    | 127    | 192    | 139    |
| Ga                   | 22.2   | 16.7   | 22.4   | 16.4   | 16.1   | 18.4   | 20.2   | 17.8   | 17.9   | 20.6   |
| Sr                   | 50.0   | 42.7   | 54.3   | 36.1   | 36.6   | 34.1   | 30.9   | 40.2   | 34.7   | 46.4   |
| Y                    | 36.5   | 35.4   | 47.1   | 47.8   | 48.6   | 55.0   | 78.6   | 80.4   | 57.0   | 75.2   |
| Zr                   | 206    | 178    | 199    | 158    | 166    | 126    | 141    | 132    | 138    | 138    |
| Nb                   | 20.6   | 12.0   | 19.4   | 11.9   | 12.6   | 6.82   | 16.1   | 15.6   | 4.37   | 15.1   |
| Cs                   | 7.81   | 4.32   | 7.67   | 3.81   | 3.41   | 7.55   | 3.78   | 6.34   | 6.42   | 4.46   |
| Ba                   | 482    | 340    | 444    | 292    | 278    | 232    | 208    | 370    | 244    | 244    |
| Hf                   | 6.08   | 5.51   | 6.24   | 5.47   | 5.62   | 4.86   | 5.91   | 5.14   | 5.17   | 5.59   |
| Ta                   | 1.49   | 0.99   | 1.40   | 0.76   | 0.77   | 0.66   | 1.58   | 1.35   | 0.56   | 1.32   |
| Pb                   | 9.12   | 27.0   | 10.00  | 25.8   | 31.1   | 8.45   | 10.3   | 22.9   | 9.94   | 12.4   |
| Th                   | 14.5   | 15.4   | 16.6   | 16.2   | 16.2   | 16.4   | 20.3   | 17.3   | 17.3   | 20.6   |
| U                    | 2.54   | 2.52   | 2.37   | 2.34   | 2.43   | 2.13   | 2.50   | 2.94   | 2.14   | 2.98   |
| La                   | 25.4   | 39.8   | 22.4   | 21.9   | 15.4   | 8.53   | 11.4   | 24.9   | 6.58   | 21.2   |
| Ce                   | 57.0   | 81.6   | 43.3   | 48.6   | 35.2   | 28.0   | 20.5   | 53.7   | 25.6   | 44.5   |
| Pr                   | 6.77   | 9.25   | 5.58   | 5.19   | 3.49   | 2.27   | 2.85   | 6.73   | 1.87   | 5.06   |
| Nd                   | 28.1   | 36.0   | 23.2   | 20.3   | 13.5   | 9.44   | 12.1   | 28.6   | 7.95   | 21.1   |
| Sm                   | 8.02   | 7.84   | 6.83   | 4.96   | 3.51   | 3.17   | 4.32   | 8.73   | 2.85   | 6.62   |
| Eu                   | 0.24   | 0.29   | 0.23   | 0.19   | 0.16   | 0.13   | 0.12   | 0.31   | 0.12   | 0.17   |
| Gd                   | 8.23   | 7.65   | 7.70   | 6.06   | 5.16   | 5.16   | 7.47   | 11.1   | 5.10   | 8.97   |
| Tb                   | 1.31   | 1.17   | 1.38   | 1.21   | 1.14   | 1.28   | 1.84   | 2.21   | 1.29   | 1.87   |
| Dy                   | 7.51   | 6.79   | 8.76   | 8.17   | 8.08   | 9.41   | 13.4   | 14.3   | 9.49   | 12.6   |
| Ho                   | 1.51   | 1.38   | 1.85   | 1.80   | 1.82   | 2.15   | 3.02   | 3.04   | 2.20   | 2.80   |
| Er                   | 4.01   | 3.68   | 5.02   | 4.85   | 4.97   | 5.84   | 8.27   | 8.12   | 5.97   | 7.66   |
| Tm                   | 0.59   | 0.54   | 0.74   | 0.70   | 0.72   | 0.84   | 1.21   | 1.17   | 0.86   | 1.13   |
| Yb                   | 3.77   | 3.36   | 4.69   | 4.35   | 4.54   | 5.10   | 7.49   | 7.27   | 5.22   | 7.14   |
| Lu                   | 0.53   | 0.48   | 0.65   | 0.61   | 0.63   | 0.69   | 1.02   | 0.99   | 0.71   | 0.99   |
| $\Sigma REE$         | 153.02 | 199.82 | 132.32 | 128.95 | 98.31  | 82.06  | 94.92  | 171.14 | 75.82  | 141.81 |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 4.55   | 7.99   | 3.23   | 3.40   | 2.29   | 1.13   | 1.02   | 2.31   | 0.85   | 2.00   |
| $\delta Eu$          | 0.09   | 0.11   | 0.10   | 0.11   | 0.11   | 0.09   | 0.06   | 0.10   | 1.10   | 0.07   |

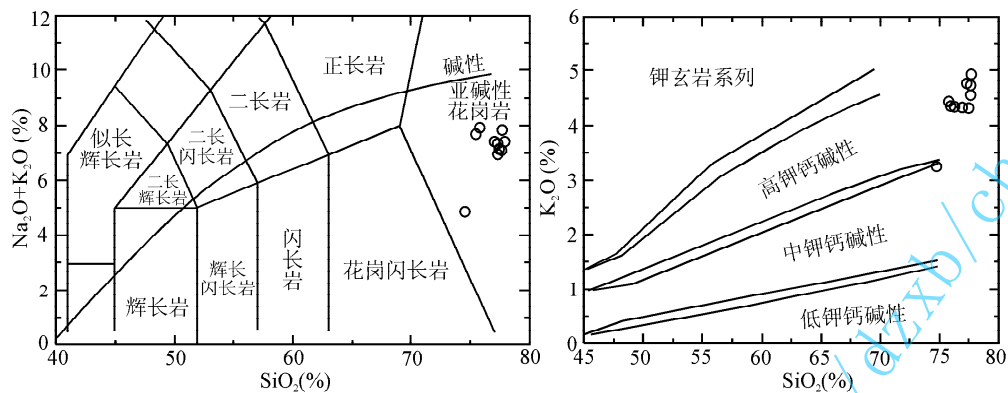


图 2 阳霞煤矿花岗岩  $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  图解(据 Irvine 等,1971;Middlemost,1994)和  $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$  图解(底图据 Rickwood,1989)

Fig. 2  $\text{SiO}_2\text{--(Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O)}$  diagram (after Irvine et al., 1971; Middlemost, 1994) and  $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$  diagram (after Rickwood, 1989) for granites near the Yangxia coal mine

$75.82 \times 10^{-6} \sim 199.82 \times 10^{-6}$  (平均  $127.82 \times 10^{-6}$ ),轻稀土略微富集 $[(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.85 \sim 7.99$ ,平均 2.88],具有明显的负 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.06 \sim 0.11$ ,平均 0.10)(图 3)。在原始地幔标准化蛛网图上(图 4),阳霞花岗岩明显富集 Rb、Th、K、Nd、Hf、Zr、Tb、Y 和 Yb,亏损 Ba、U、Nb、Ta、Sr、P、Sm、Ti 等。

4 锆石 U-Pb 的 LA-ICP-MS 测试结果分析

阳霞煤矿黑云母二长花岗岩中的锆石呈短柱状自形,具有岩浆锆石特有的韵律环带结构,个别晶体

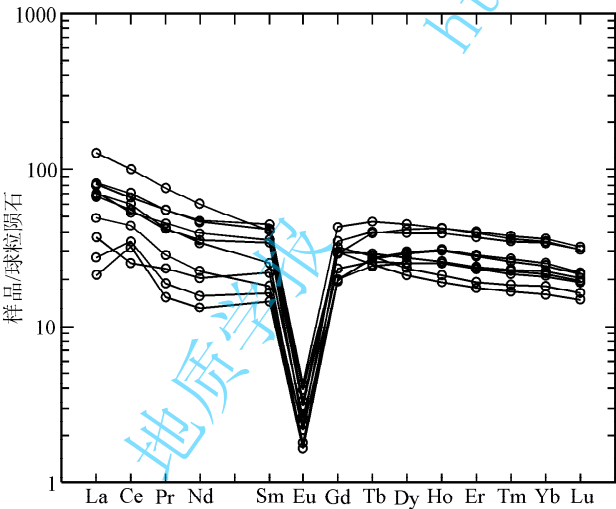


图 3 阳霞煤矿花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(球粒陨石数据值据 Boynton,1984)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE-patterns diagram for granites near the Yangxia coal mine (chondrite data from Boynton, 1984)

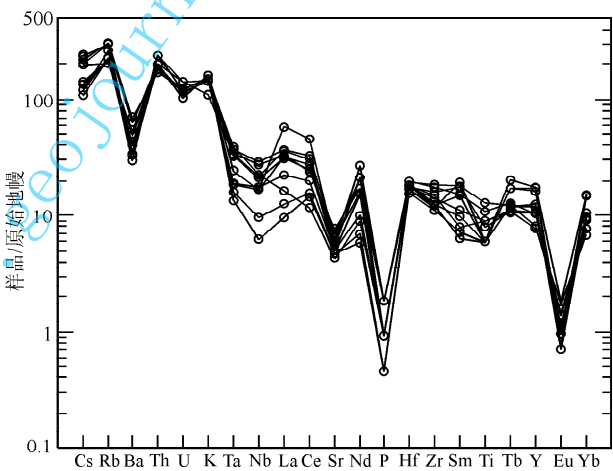


图 4 阳霞煤矿花岗岩微量元素原始地幔标准化图解(原始地幔数据值据 Sun 等,1989)

Fig. 4 Primitive-mantle normalized spider diagram for granites near the Yangxia coal mine (primitive mantle data from Sun et al., 1989)

的晶面上有熔蚀凹坑(图 5)。对 15 颗锆石的 25 个测点进行了激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)U-Pb 同位素定年分析,分析结果列于表 2。对应测点的 Th/U 值为 0.70~5.74,大于变质成因锆石的 Th/U 值(0.002~0.320,Rubatto,2002),也具有岩浆成因锆石的特点。在 25 个测点中,5 个测点的年龄数据因偏离谐和线较多而舍去,其余 20 个测点的年龄数据都落在谐和线附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于  $604.9 \pm 7.99 \text{ Ma}$  与  $657.8 \pm 6.56 \text{ Ma}$  之间,加权平均年龄为  $646.5 \pm 3.9 \text{ Ma}$ (图 6)。此外,锆石基本无核,中间部位与边部测点的年龄基本一致,说明锆石是在同一次岩浆事件中结晶的。



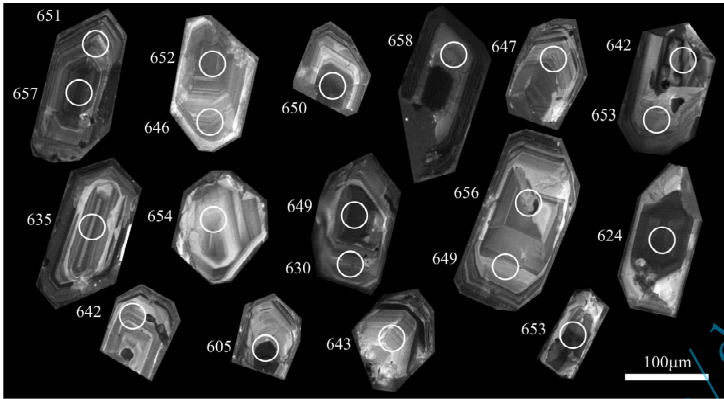


图 5 阳霞煤矿黑云母二长花岗岩中锆石的阴极发光(CL)图像(圆圈为测点位置;数字为测点年龄, Ma)  
Fig. 5 CL images of zircons from the granites near the Yangxia coal mine (circles represent location of the measuring points, numbers represent ages, Ma)

表 2 库车坳陷东部阳霞煤矿花岗岩锆石的 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果  
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircon from granites in the Yangxia coal mine in eastern Kuche depression

| 测点<br>( $\times 10^{-6}$ ) | Pb*<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $^{232}\text{Th}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $^{238}\text{U}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | Th/U | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |            | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ |            | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ |            | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |            | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ |            | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ |            |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
|                            |                             |                                           |                                          |      | 比值                                | 1 $\sigma$ | 比值                               | 1 $\sigma$ | 比值                               | 1 $\sigma$ | 年龄<br>(Ma)                        | 1 $\sigma$ | 年龄<br>(Ma)                       | 1 $\sigma$ | 年龄<br>(Ma)                       | 1 $\sigma$ |
| 01                         | 56.67                       | 384.71                                    | 434.49                                   | 0.89 | 0.06206                           | 0.00129    | 0.90954                          | 0.01114    | 0.1063                           | 0.00114    | 676.1                             | 43.66      | 656.8                            | 5.92       | 651.2                            | 6.62       |
| 02                         | 57.31                       | 445.47                                    | 441.92                                   | 1.01 | 0.06559                           | 0.0014     | 0.97005                          | 0.01285    | 0.10726                          | 0.00116    | 793.4                             | 44.14      | 688.5                            | 6.62       | 656.8                            | 6.74       |
| 03                         | 18.57                       | 111.76                                    | 133.91                                   | 0.83 | 0.06217                           | 0.00154    | 0.9118                           | 0.01652    | 0.10636                          | 0.00121    | 680.1                             | 52.08      | 658                              | 8.77       | 651.6                            | 7.04       |
| 04                         | 36.68                       | 274.66                                    | 261.86                                   | 1.05 | 0.06412                           | 0.00146    | 0.93183                          | 0.01428    | 0.10539                          | 0.00117    | 745.7                             | 47.44      | 668.6                            | 7.51       | 645.9                            | 6.8        |
| 06                         | 169.82                      | 1880.83                                   | 1473.35                                  | 1.28 | 0.06666                           | 0.00253    | 0.97497                          | 0.03272    | 0.10608                          | 0.00151    | 827                               | 77.37      | 691                              | 16.82      | 649.9                            | 8.81       |
| 09                         | 66.75                       | 366.89                                    | 499.75                                   | 0.73 | 0.06291                           | 0.00127    | 0.93199                          | 0.01042    | 0.10744                          | 0.00113    | 705.2                             | 42.3       | 668.7                            | 5.48       | 657.8                            | 6.56       |
| 10                         | 20.18                       | 108.78                                    | 145.69                                   | 0.75 | 0.06357                           | 0.00136    | 0.9249                           | 0.01214    | 0.10551                          | 0.00113    | 727.3                             | 44.6       | 664.9                            | 6.4        | 646.6                            | 6.56       |
| 12                         | 37.34                       | 1802.21                                   | 313.75                                   | 5.74 | 0.06348                           | 0.00162    | 0.91715                          | 0.01735    | 0.10476                          | 0.00119    | 724.5                             | 53.14      | 660.9                            | 9.19       | 642.3                            | 6.95       |
| 13                         | 23.92                       | 128.01                                    | 176.87                                   | 0.72 | 0.06163                           | 0.0013     | 0.90714                          | 0.01146    | 0.10674                          | 0.00113    | 661.2                             | 44.51      | 655.5                            | 6.1        | 653.8                            | 6.55       |
| 14                         | 25.63                       | 168.00                                    | 181.06                                   | 0.93 | 0.05907                           | 0.00128    | 0.84372                          | 0.01151    | 0.10357                          | 0.00109    | 569.9                             | 46.54      | 621.2                            | 6.34       | 635.3                            | 6.39       |
| 15                         | 14.48                       | 91.41                                     | 112.18                                   | 0.81 | 0.06408                           | 0.00292    | 0.94414                          | 0.0391     | 0.10684                          | 0.00174    | 744.3                             | 93.47      | 675                              | 20.42      | 654.3                            | 10.16      |
| 16                         | 92.56                       | 809.51                                    | 615.87                                   | 1.31 | 0.06295                           | 0.00127    | 0.89117                          | 0.00977    | 0.10265                          | 0.00106    | 706.5                             | 42.2       | 647                              | 5.24       | 629.9                            | 6.2        |
| 17                         | 24.58                       | 142.66                                    | 181.07                                   | 0.79 | 0.06275                           | 0.00136    | 0.9168                           | 0.01246    | 0.10594                          | 0.00112    | 699.8                             | 45.58      | 660.7                            | 6.6        | 649.1                            | 6.54       |
| 18                         | 32.31                       | 266.64                                    | 205.61                                   | 1.30 | 0.06695                           | 0.00159    | 0.97785                          | 0.01607    | 0.1059                           | 0.00116    | 836.3                             | 48.56      | 692.5                            | 8.25       | 648.9                            | 6.77       |
| 19                         | 23.69                       | 152.00                                    | 163.33                                   | 0.93 | 0.06293                           | 0.00137    | 0.92987                          | 0.01274    | 0.10715                          | 0.00114    | 705.7                             | 45.72      | 667.6                            | 6.7        | 656.2                            | 6.61       |
| 20                         | 162.47                      | 1254.17                                   | 1163.64                                  | 1.08 | 0.06084                           | 0.00122    | 0.85302                          | 0.00919    | 0.10166                          | 0.00104    | 633.6                             | 42.55      | 626.3                            | 5.03       | 624.1                            | 6.11       |
| 21                         | 26.53                       | 180.18                                    | 208.33                                   | 0.86 | 0.06204                           | 0.0014     | 0.89593                          | 0.01329    | 0.1047                           | 0.00112    | 675.6                             | 47.56      | 649.5                            | 7.12       | 641.9                            | 6.52       |
| 22                         | 69.09                       | 691.55                                    | 633.79                                   | 1.09 | 0.06229                           | 0.00238    | 0.84504                          | 0.02841    | 0.09837                          | 0.00136    | 683.9                             | 79.42      | 621.9                            | 15.63      | 604.9                            | 7.99       |
| 23                         | 12.37                       | 61.65                                     | 88.64                                    | 0.70 | 0.06837                           | 0.00151    | 0.98963                          | 0.01393    | 0.10495                          | 0.00111    | 879.9                             | 45.05      | 698.5                            | 7.11       | 643.3                            | 6.49       |
| 25                         | 42.05                       | 295.98                                    | 281.38                                   | 1.05 | 0.06732                           | 0.0017     | 0.99021                          | 0.01821    | 0.10665                          | 0.00119    | 847.7                             | 51.5       | 698.8                            | 9.29       | 653.2                            | 6.95       |

注:表中 Pb\* 表示放射成因 Pb。

5 讨论

5.1 阳霞煤矿花岗岩的源区特点

阳霞煤矿黑云母二长花岗岩具有高钾、低钙、弱过铝质钙碱性花岗岩的特点,这种花岗岩一般形成于碰撞事件主峰期后的张弛阶段或从挤压体制向拉张体制转变的过程中(Barbarin,1999)。

阳霞煤矿花岗岩富集大离子亲石元素 K、Rb 和

高场强元素 Th、Zr、Hf,亏损大离子亲石元素 Ba、Sr、U 和高场强元素 Nb、Ta、P,不同于岛弧岩浆岩的地球化学特点。阳霞煤矿花岗岩的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  含量变化非常小,说明不存在明显的分离结晶过程; $\text{K/Rb}$  为 190.89~270.46, $>150$ ,表明岩浆分异或水热作用不明显(Dostal et al.,2000)。此外, $\text{La/Sm-La}$  图解(图 7)也显示阳霞煤矿花岗岩由原岩的部分熔融形成,没有经历明显的分离结晶作用。阳

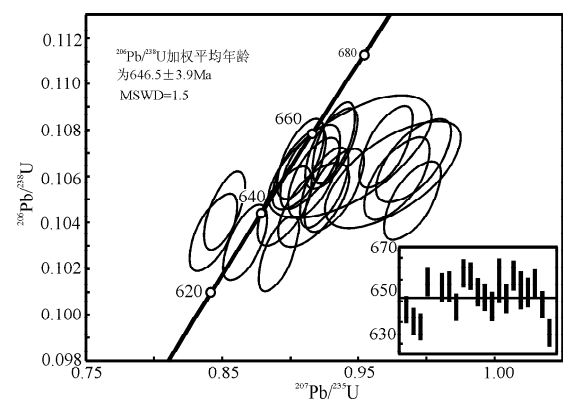


图 6 阳霞煤矿二长花岗岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(样品 08KC11)

Fig. 6 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram from the granites near the Yangxia coal mine

霞煤矿花岗岩低 Sr 含量( $30.9 \times 10^{-6} \sim 54.3 \times 10^{-6}$ )和明显的 Eu 负异常说明源区在熔融过程中有斜长石残留,指示了其在低的含水条件下发生了熔融(Tepper et al., 1993)。

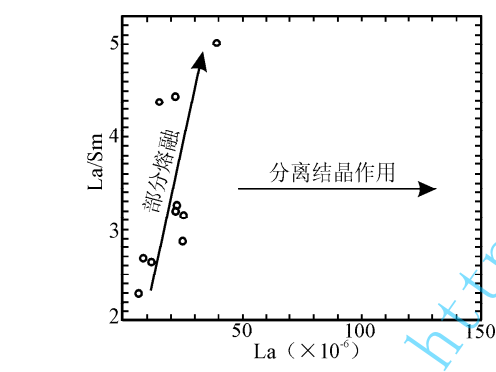


图 7 阳霞煤矿花岗岩 La-La/Sm(底图据 Allegre 等,1978)

Fig. 7 La-La/Sm diagram of granites near the Yangxia coal mine (after Allegre et al., 1978)

阳霞煤矿花岗岩的稀土总量较低(平均  $127.82 \times 10^{-6}$ ),接近玄武岩的平均稀土含量。高钾花岗岩的富碱和过铝质特征是富角闪石源区深熔产生的深源花岗岩的典型特征(Whitney, 1988)。阳霞煤矿花岗岩的 Th/U 值(平均 6.91)和 La/Yb 值(平均 4.27)分别与下地壳的 Th/U 值( $\sim 6.00$ )和 La/Yb 值(5.3, Rudnick et al., 2003)最接近;K/U 值(平均 14903.43)和 Rb/Cs 值(平均 32.03)分别接近中地壳 K/U 值(15607)和 Rb/Cs 值(30, Rudnick et al., 2003);Nb/Ta (平均 12.30)接近于地壳平均值(12.4, Rudnick et al., 2003),以上均说明阳霞煤矿花岗岩源于中下地壳。该花岗岩在蛛网图上显示的

Nb-Ta 槽、P 和 Ti 亏损、Zr 富集特点也指示其壳源成因。轻微向右倾斜的稀土配分模式和强烈的 Eu 负异常反映该花岗岩具有地壳重熔型花岗岩(S 型花岗岩)的特点。该花岗岩的高的  $K_2O/Na_2O$  和低的 Sr/Ba 值(0.10~0.19)指示该岩石是变质杂砂岩或中性岩浆岩在无水条件下部分熔融的产物(Harris et al., 1992),由于该花岗岩不具有强过铝质特征(A/CNK 为 0.95~1.15),其原岩不可能是变质杂砂岩。因此,可以推断阳霞煤矿花岗岩可能是下地壳中性岩石部分熔融的产物。

贾承造(2004)对采自塔里木盆地塔参 1 井的 3 件花岗闪长岩进行的  $^{40}Ar/^{39}Ar$  测年得到了 744~790 Ma,其  $\epsilon_{Nd} = -4.4 \sim -9.5$ ,初始  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.705756 \sim 0.706666$ ,较高的初始  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值说明其壳源成因。虽然贾承造(2004)对花岗闪长岩的定年方法与本文不同,所测得的年龄值也比本文的年龄值偏大,但都属于新元古代晚期,从侧面说明本文的花岗岩具有壳源特征。

5.2 塔里木地块基底在青白口纪固结之后南华纪—震旦纪期间强烈的伸展作用

库鲁克塔格地区和柯坪隆起的南华系与下伏青白口系之间为角度不整合接触;在柯坪隆起的乌什县尤尔美那克剖面上,上南华统尤尔美那克组(Nh<sub>2</sub>y)大陆冰川成因的冰碛岩和冰水沉积砂岩以高角度不整合于下伏青白口系—南华系巧恩布拉克组[(Qb—Nh)<sub>q</sub>]浊积岩之上;在阿克苏市肖尔布拉克剖面上,上震旦统苏盖特布拉克组(Z<sub>2</sub>s)紫红色陆源碎屑岩角度不整合于长城—蓟县系阿克苏群含蓝片岩的变质岩系之上(贾承造等,2004)。这都说明,库鲁克塔格—塔北—柯坪隆起,从南华纪开始进入沉积盖层的发育阶段。在库鲁克塔格地区,下南华统贝义西组(Nh<sub>1</sub>b)大陆裂谷型碎屑岩-火山岩建造角度不整合覆盖在青白口系北塞纳尔塔格组(Qb<sub>2</sub>b)变质岩之上(高振家等,1984;李锦轶,2004;何金有等,2007),标志塔里木地区大面积裂陷活动的开始。本文对库车坳陷东部阳霞煤矿一带花岗岩的同位素地质年代学研究结果表明,库车坳陷东部地区在  $646.5 \pm 3.9$  Ma 发生过强烈的酸性岩浆活动,阳霞煤矿附近花岗岩在 Rb-(Y+Nb)图解上主体落入板内花岗岩区(包括内陆环状杂岩和地堑、减薄陆壳、大洋岛屿等次级环境),少量落入火山弧花岗岩区(图 8)。由于震旦纪—早寒武世是天山古生代洋盆开启的初期阶段(夏林圻等,2002),区域上不存在板块俯冲环境,所以阳霞煤矿附近的花岗岩应

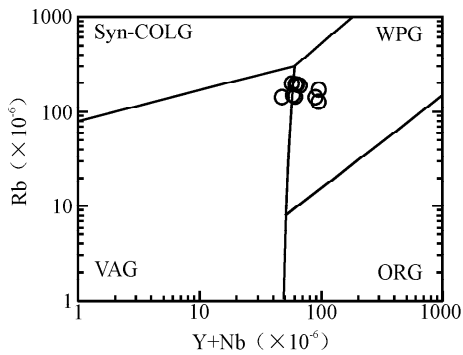


图 8 阳霞煤矿花岗岩 Rb-(Y+Nb)图解  
(底图据 Pearce 等, 1984)

Fig. 8 Rb-Y+Nb diagram of granites near the Yangxia coal mine (after Pearce et al., 1984)

Syn-COLG—同碰撞花岗岩;WPG—板内花岗岩;  
VAG—火山弧花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩  
syn-COLG—syn-collisional granites;  
WPG—within-plate granites; VAG—volcanic arc granites;  
ORG—ocean ridge granites

该形成于板内裂解的构造环境。

阳霞煤矿花岗岩与围岩的接触关系清晰,接触带内没有见到明显的构造变形,说明岩体很可能是在伸展环境下侵位的。阳霞煤矿花岗岩与典型的 A 型花岗岩之间具有显著的岩石学和地球化学差异。典型的 A 型花岗岩的矿物组成中通常含黑云母和(或)碱性角闪石,常见钠质辉石(Whalen et al., 1987),但是阳霞煤矿花岗岩中未见角闪石和钠质辉石。阳霞煤矿花岗岩中 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、MnO、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Sr、Th、U、Zr、Nb、Y、Ce、Ga 的含量与 Whalen 等(1987)给出的典型 A 型花岗岩相应的平均含量相差较大,Ga/Al 值也相差较大。因此,阳霞煤矿花岗岩不属于典型的 A 型花岗岩,不太可能形成于碰撞造山后的伸展环境。

阳霞煤矿花岗岩出露面积小,岩石类型相对单一,但是在库鲁克塔格隆起发育同时代的具有双峰式特征的岩浆岩,这从侧面说明阳霞煤矿的花岗岩很可能形成于大陆裂谷环境。在库鲁克塔格,西山布拉克组( $\epsilon_{1x}$ )与水泉组( $Z_2s$ )发育碱性玄武岩,扎摩克提组( $Z_1z$ )发育碱性玄武岩和拉斑玄武岩,贝义西组( $Nh_1b$ )的英安岩、英安质细火山角砾岩、石英角斑岩与震旦系其他各组中基性火山岩构成明显的双峰式火山岩组合(高长林等,2004),它们形成于大陆伸展构造环境(姜常义等,2000;夏林圻等,2002)。塔里木盆地东北缘新元古界内部的多期不整合界面表明塔里木盆地东北缘在南华纪—奥陶纪处于克拉

通内坳拉槽阶段(孙晓猛等,2007)。

虽然本文对阳霞煤矿花岗岩的研究结果说明该地区在  $646.5 \pm 3.9$  Ma 处于强烈的伸展构造背景,但是区域上的研究资料表明,这次伸展作用很可能始于南华纪,是 Rodinia 超大陆裂解作用的一部分。库鲁克塔格断隆南侧且干布拉克碳酸岩杂岩体的 Sm-Nd 等时线年龄为  $802 \pm 52$  Ma(孙宝生等,2007),说明该地区的塔里木地块基底在完成克拉通化之后不久就开始受到强烈的岩浆作用改造。塔中隆起塔参 1 井前寒武纪基底花岗闪长岩的形成年龄为  $757.4 \text{ Ma} \pm 6.2 \text{ Ma}$ (锆石 SHRIMP U-Pb 法)(邬光辉等,2009),库鲁克塔格地区下南华统贝义西组( $Nh_1b$ )顶部火山岩的定年结果为  $732 \pm 7$  Ma(锆石 SHRIMP 法)(徐备等,2008),再结合库鲁克塔格地区扎摩克提组( $Z_1z$ )、水泉组( $Z_2s$ )和西山布拉克组( $\epsilon_{1x}$ )的火山岩说明,塔里木地块东北部从南华纪开始的强烈的伸展作用可能持续到了早寒武世,是 Rodinia 超大陆裂解作用的一部分,阳霞煤矿花岗岩就是这次裂解作用的产物。

## 6 结论

- (1)库车坳陷东部阳霞煤矿附近侵入于元古宇中的花岗岩形成于  $646.5 \pm 3.9$  Ma,而不是此前认为的石炭纪( $\gamma_4^c$ )。
- (2)阳霞煤矿附近的新元古代花岗岩起源于中—下地壳的部分熔融作用,该岩浆事件与塔里木地块基底受到的强烈的伸展作用有关,伸展作用是 Rodinia 超大陆裂解作用的一部分。

## 注 释

① 新疆地质局区测队. 1969. 中华人民共和国地质图克铁克幅(K-45-XI II)(1:20 万)。

## 参 考 文 献

高长林,叶德燎,黄泽光. 2004. 塔里木库鲁克塔格古原洋裂谷与地幔柱. 石油实验地质,26(2):161~168.

高振家,朱诚顺. 1984. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1~151.

何金有,徐备,孟祥英,寇晓威,刘兵,王宇,米合. 2007. 新疆库鲁克塔格地区新元古代层序地层学研究及对比. 岩石学报,23(7):1645~1654.

贾承造. 2004. 塔里木盆地板块构造与大陆动力学. 见:贾承造主编. 塔里木盆地石油地质与勘探丛书(卷一). 北京:石油工业出版社,14~15.

贾承造,张师本,吴绍祖. 2004. 塔里木盆地及周边地层(下册). 北京:科学出版社,117~118.

姜常义,白开寅,黑爱芝,赵晓宁,张虹波. 2000. 库鲁克塔格地区火山岩的岩浆过程与源区组成. 岩石矿物学杂志,19(1):8~18.

- 李锦轶. 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): 304~317.
- 罗新荣, 石福品, 樊卫东, 罗新涛. 2007. 新疆库鲁克塔格新元古代花岗岩年龄和地球化学. 资源调查与环境, 28(4): 235~241.
- 孙宝生, 黄建华. 2007. 新疆且干布拉克超基性岩-碳酸盐岩杂岩体 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 23(7): 1611~1616.
- 孙晓猛, 郝福江, 程日辉, 刘鹏举, 王璞, 孙庆春. 2007. 塔里木盆地东北缘盖层不整合序列及其构造演化. 吉林大学学报(地球科学版), 37(3): 450~457.
- 邹光辉, 张承泽, 汪海, 刘玉魁, 李建军. 2009. 塔里木盆地中部塔参 1 井花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 地质通报, 28(5): 568~571.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据. 地质通报, 21(2): 55~62.
- 徐备, 寇晓威, 宋彪, 卫巍, 王宇. 2008. 塔里木板块上元古界火山岩定年及其对新元古代冰期时代的制约. 岩石学报, 24(12): 2857~2862.
- Allegre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic process. Earth and Planetary Science Letters, 38: 1~25.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46: 605~626.
- Boynton W W. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P, ed. Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry 2. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Dostal J, Chatterjee A K. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton Nova Scotia (Canada). Chem. Geol., 163: 207~218.
- Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modelling of pelitederived granites. Contrib. Mineral. Petrol., 110: 46~56.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canad. J. Earth. Sci., 8: 523~548.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in magma-igneous rock system. Earth Sci. Rev., 37: 215~224.
- Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J. Petrol., 25: 956~983.
- Richwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22: 247~263.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chemical Geology, 184: 123~138.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L, eds. The Crust. Treatise on Geochemistry, 3. Oxford: Elsevier Pergamon, 1~64.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of ocean basalt: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Tepper J H, Nelson B K, Bergantz G W, Irving A J. 1993. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc-alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity. Contrib. Mineral. Petrol., 113: 333~351.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407~419.
- Whitney J A. 1988. The origin of granite: the role and source of water in the evolution of granitic magmas. Geological Society of America Bulletin, 100: 1886~1897.

## Neo-proterozoic Granitoid Magmatism in the Kuqe Depression of Northeastern Tarim Basin and Its Significance

LUO Jinhai, CHE Zicheng, ZHANG Xiaoli, HAN Wei, ZHANG Guofeng, NIAN Xiuqing

*State Key Laboratory of Continental Dynamics (Northwest University),*

*Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069*

### Abstract

Biotite adamellite intruding in the Proterozoic metamorphic basement of the eastern part of the Kuqe depression belongs to K-high calc-alkaline igneous rock. It is characterized by SiO<sub>2</sub>-rich, alkaline-rich, K-high, low-TiO<sub>2</sub> and metaluminous rock with A/CNK=0.92~1.15. The adamellite is enriched in elements such as Rb, Th, K, Nd, Zr, Y and Tb, and depleted in elements such as Ba, U, Nb, Ta, Sr, P, Sm, and Ti, with distinct negative Eu anomaly ( $\delta\text{Eu}=0.06\sim0.11$ ). Geochemical features of the granitoid rocks reveal its derivation from partial melting of middle-lower crust. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating on the magmatic genetic zircon yields an age of  $646.5\pm3.9$  Ma, representing the emplacement age of the granites. Combined with regional tectonic analysis, it is concluded that the Neo-proterozoic magmatism is resulted from the response of basement of Tarim craton to the Rodinia splitting.

**Key words:** Tarim basin; eastern part of Kuqe depression; Carboniferous; Neo-proterozoic; Rodinia splitting