

内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义

曾俊杰^{1,2}, 郑有业¹, 齐建宏^{1,2}, 代芳华¹, 张刚阳¹, 庞迎春¹, 武彬¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃兰州 730050

摘要: 内蒙古固阳地区西营子花岗岩体属于钙碱性系列, 具有岛弧花岗岩的特征. 其岩石地球化学具有与 adakite 岩相似的特征. 这些岩石的 SiO_2 含量均大于 56% (57.28%~66.63%), Al_2O_3 含量均大于 15% (15.93%~18.04%), MgO 含量为 1.14%~3.47%, 富钠、贫钾, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 在 1.16~1.97 之间, Sr 含量高 (446~582 $\mu\text{g/g}$), 均大于 400 $\mu\text{g/g}$, Sr/Y 比值为 31.32~103.74, 大于 20~40, 低 Y (5.61~17.4 $\mu\text{g/g}$, 小于 18 $\mu\text{g/g}$) 和 Yb (0.42~2.06 $\mu\text{g/g}$, 仅 1 个样品大于 1.9 $\mu\text{g/g}$), 具弱 Eu 正异常, 无明显的 Eu 负异常; 稀土元素分异强烈, 属轻稀土元素富集型; Sr 具明显的正异常而 Nb 的负异常亦较为明显. 利用激光等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 对固阳地区埃达克质花岗岩中的锆石进行了 U-Pb 定年, 其同位素年龄为 $281.9 \pm 3.1 \text{ Ma}$ (MSWD=3.3), 形成于早二叠世. 该地区埃达克岩的发现, 为古亚洲洋的闭合时限提供了新的线索, 对研究中亚造山带晚古生代构造演化、地球动力学特征具有十分重要的意义, 为解决内蒙古及古亚洲洋研究中长期争论的地质问题提供了年代学和地球化学制约.

关键词: 埃达克质岩; 花岗岩类; 古亚洲洋; LA-ICP-MS; 固阳地区.

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2008)06-0755-09

收稿日期: 2008-04-20

Foundation and Geological Significance of Adakitic Granite at Guyang of Inner Mongolia

ZENG Jun-jie^{1,2}, ZHENG You-ye¹, QI Jian-hong^{1,2}, DAI Fang-hua¹,
ZHANG Gang-yang¹, PANG Ying-chun¹, WU Bin¹

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

2. Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China

Abstract: Xiyingsi granite-body in Guyang area, Inner Mongolia, belongs to calc-alkaline series, bearing the characteristics of island arc affinity. Its petrological geochemistry characteristics are almost similar to those of adakite: SiO_2 content >56% on average (57.28%~66.63%); Al_2O_3 >15% (15.93%~18.04%); MgO =1.14%~3.47%, enriched in Na and depleted in K; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ =1.16~1.97; Sr content (446~582 $\mu\text{g/g}$) >400 $\mu\text{g/g}$ on average and Sr/Y ratio =31.32~103.74, >20~40; low Y content (5.61~17.4 $\mu\text{g/g}$, less than 18 $\mu\text{g/g}$); low Yb (0.42~2.06 $\mu\text{g/g}$, only one sample's Yb content >1.9 $\mu\text{g/g}$); with small positive Eu anomaly and without significantly negative Eu anomaly; REE has a strong differentiation, which belongs to the strong LREE enrichment type; Sr has obvious positive anomaly, while Nb has significant negative anomaly. The laser-plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) was used for the zircon U-Pb dating of adakitic granite in Guyang area and the isotope age was obtained to be $281.9 \pm 3.1 \text{ Ma}$ (MSWD=3.3), indicating an Early Permian activity. The discovery of adakite in this region provides new clues on the closure time of Paleo-Asian Ocean, and is of great significance to the study of Central Asia Late Paleozoic orogenic belt's tectonic evolution and geodynamics characteristics. It also provides geological and geochemical constraints on resolving the long-term debates on the Inner Mongolia and Paleo-Asian Ocean.

Key words: adakitic rock; granite; Paleo-Asian Ocean; LA-ICP-MS; Guyang area.

埃达克岩(adakite)自 1978 年被提出以来,其研究一直是地学界关注的前沿课题(Defant and Drummond, 1990; 张旗等, 2002, 2003, 2004; 郑有业等, 2004). 埃达克岩不是指某一种具体的岩石,而是具有特定地球化学性质的一套中酸性火成岩组合的术语. 其地球化学标志是: $SiO_2 \geq 56\%$ 、高铝($Al_2O_3 \geq 15\%$)、 $MgO < 3\%$ (极少 $> 6\%$)、贫 Y 和 Yb($Y \leq 18 \mu g/g$, $Yb \leq 1.9 \mu g/g$)、高 Sr($Sr > 400 \mu g/g$)、LREE 富集, Eu 正异常(无明显负异常). 主要矿物组合为:斜长石+石英+角闪石±黑云母,副矿物为磷灰石、锆石、榍石及钛磁铁矿等(Defant and Drummond, 1990, 1993; Kay and Kay, 2002).

近年来研究资料表明,在华北板块北缘增生带包尔汉图—布龙山—白乃庙—林西—巴林右旗一线存在的古岛弧带(唐克东和张允平, 1991),是古亚洲

洋洋壳向华北板块俯冲的证据. 火山岛弧的出现,标志着古洋壳由拉张环境转变为洋壳俯冲的挤压环境. 前人对侵入该岛弧带的火山岩进行了一系列的同位素定年研究,以期为古亚洲洋的俯冲提供时间限制. 许立权等(2003)认为在内蒙古中部古亚洲洋在中奥陶世(472 Ma)就已经出现消减事件,而在早志留世(427 Ma)仍存在洋壳消减事件. 陶继雄等(2005)对内蒙古白云鄂博北部巴特敖包、查干呼绍一带的埃达克岩进行研究获得 9 组锆石 U-Pb 同位素年龄值范围在 345.06~552.67 Ma 间,为大洋板块消减事件的年龄. 构造环境判别证明它们是在岛弧环境下形成的,为早古生代期间南蒙古洋板块向宝音图微陆块发生强烈斜向俯冲,古洋壳板块发生部分熔融、消减而形成的产物. 笔者在内蒙古固阳地区(图 1)发现了具有埃达克岩特征的华力西期花岗

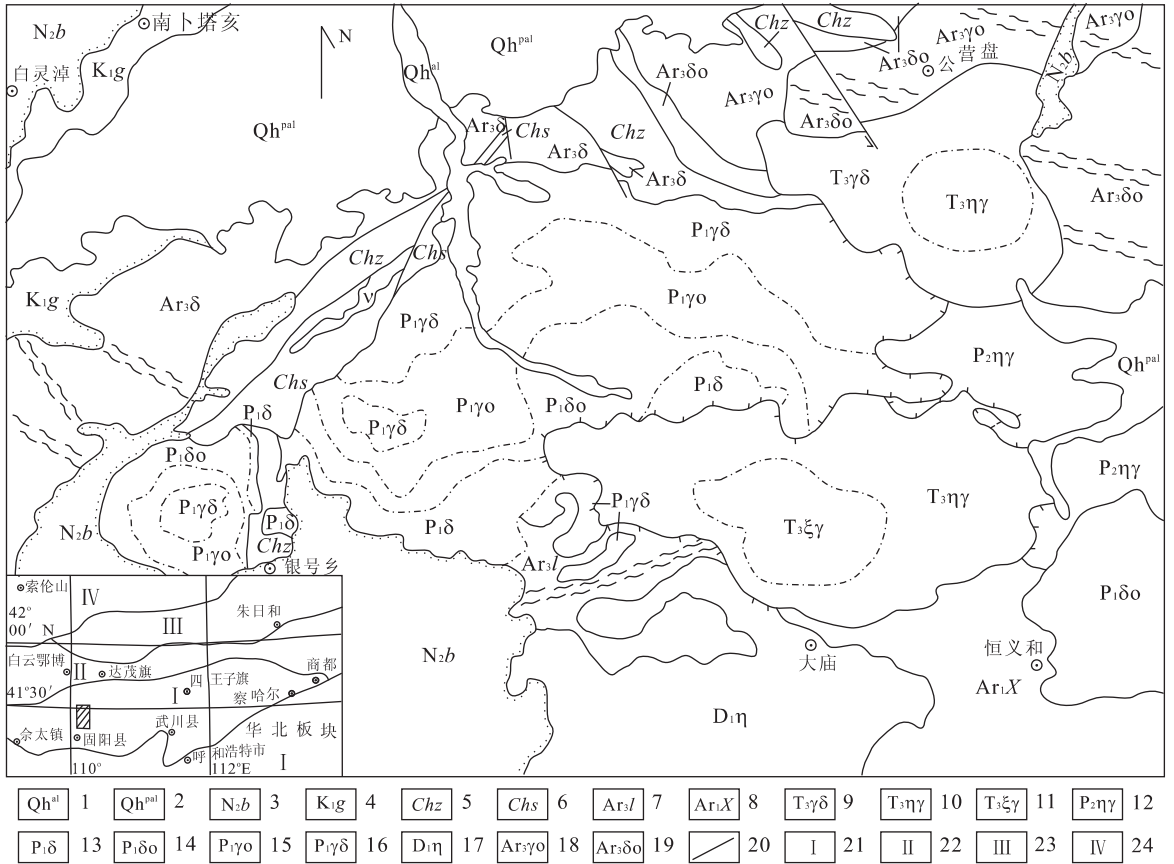


图 1 内蒙古固阳地区地质简图

Fig. 1 Sketch map showing the geological characteristics of Guyang area in Inner Mongolia

1. 第四系冲积物; 2. 第四系洪积物; 3. 新近系宝格达乌拉组; 4. 白垩系固阳组; 5. 渣尔泰山群增隆昌组; 6. 渣尔泰山群书记沟组; 7. 新太古界色尔腾山岩群柳树沟岩组; 8. 古太古界兴和岩群; 9. 晚三叠世花岗闪长岩; 10. 晚三叠世二长花岗岩; 11. 晚三叠世二长花岗岩; 12. 晚二叠世二长花岗岩; 13. 早二叠世闪长岩; 14. 早二叠世石英闪长岩; 15. 早二叠世英云闪长岩; 16. 早二叠世花岗闪长岩; 17. 早泥盆世角闪二长岩; 18. 新太古界片麻状英云闪长岩; 19. 新太古界片麻状石英闪长岩; 20. 区域性断裂; 21. 华北板块北缘; 22. 白云鄂博凹陷带; 23. 包尔汗—温都尔庙褶皱带; 24. 索伦山—西拉木伦河褶皱带断裂

岩,这一发现对研究中亚造山带晚古生代构造演化、地球动力学特征具有十分重要的意义。

1 区域地质背景及岩体地质

研究区位于内蒙古自治区中部的包头市固阳县境内,大地构造位置属华北地块北缘隆起带、大青山复式背斜的北翼,其在晚古生代晚期与北部的华北陆块北缘增生带的地质演化有着紧密的关系。区内大地构造演化划分为基底形成和构造岩浆活动改造两个大的构造演化阶段,总体上以前寒武纪基底和大规模出露岩浆岩为特色,出露的地层主要有古太古界兴和岩群(Ar_1X)、新太古界色尔腾山岩群柳树沟岩组(Ar_3l)、中元古界渣尔泰山群书记沟组(Chs)、中元古界渣尔泰山群增隆昌组(Chz)、中生界白垩系固阳组(K_1g)及新生界新近纪宝格达乌拉组(N_2b)。研究区处在白云鄂博—渣尔泰山构造岩浆岩区内,岩体分布较广,除二叠纪侵入岩外,还有泥盆纪、三叠纪侵入岩(图 1)。

西营子岩体位于研究区南五塔—西营子一带,呈北西、北东向带状展布,出露面积约 181 km²,侵入于中元古界渣尔泰山群,被三叠纪岩体侵入。本次区域地质调查工作按同源岩浆演化理论,从早到晚依次划分为闪长岩($P_1\delta$)、石英闪长岩($P_1\delta_0$)、英云闪长岩($P_1\gamma_0$)、花岗闪长岩($P_1\gamma\delta$),各单元间均为脉动接触。岩石的主要矿物为斜长石、石英、少量黑云母、钾长石、角闪石,副矿物包括磷灰石、锆石、榍石等。各单元均含有数量不等的暗色包体(角闪岩及闪长质包体),与寄主岩界线清晰,包体的分布呈现一定的规律性:早期单元中包体数量多且定向性明显,晚期单元包体数量减少且定向性减弱,同时,在早期单元内还含有少量围岩捕虏体。

2 埃达克岩的地球化学特征

研究区埃达克质花岗岩的主量元素、微量和稀土元素分析结果见表 1 和图 2、3、4。

分析结果表明,所有样品的 SiO_2 含量为 57.28%~66.63%,均大于 56%; Al_2O_3 含量为 15.93%~18.04%,均大于 15%; MgO 含量为 1.14%~3.47%(2 个样品大于 3%);富钠、贫钾, Na_2O/K_2O 在 1.16~1.97 之间,属钠质系列; $Mg^\#$

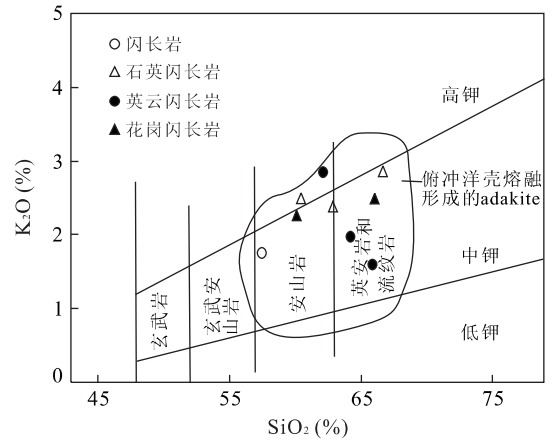


图 2 SiO_2-K_2O 图解

Fig. 2 Diagram of SiO_2-K_2O

为 0.36~0.53;里特曼指数(σ)=1.29~2.24,碱度率(AR)=1.48~1.94,铝饱和指数(A/CNK)=1.43~1.62,岩石属钙碱性系列,为偏铝—过铝质岩石。在 SiO_2-K_2O 图解中(图 2),全部样品投点均落入中钾钙碱性区,与 Defant and Droumond(1990, 1993)、Drummond *et al.* (1996) 所定义的俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克质岩石的化学成分一致。稀土元素特征显示出低的 $\sum REE$ 为 90.79~141.06; $\sum Ce/\sum Y$ 为 7.36~16.02,属强烈 LREE 富集型, HREE 亏损; $Yb=0.42\sim 2.06$ (仅 1 个样品大于 1.9); $(La/Yb)_N$ 为 6.13~36.42 (平均 17.53),多大于 10, La/Yb 为 9.30~55.29 (平均 20.25); δEu 为 0.88~1.24,稀土元素球粒陨石标准化图解(图 3a)上显示出强烈的稀土元素分异,具弱 Eu 正异常,无明显的 Eu 负异常。在微量元素特征上显示出 Sr 含量高($Sr=446\sim 582 \mu g/g$),均大于 400 $\mu g/g$; $Y=5.61\sim 17.4 \mu g/g$,平均 11.35 $\mu g/g$,小于 18 $\mu g/g$; $Sr/Y=31.32\sim 103.74$,大于 20~40,在微量元素比值蛛网图(图 3b)上, Sr 具明显的正异常而 Nb 的负异常亦较为明显,在 $(La/Yb)_N-Yb_N$ 和 $Sr/Y-Y$ 图解(图 4)上,样品均落入埃达克质岩区域,并靠近经典岛弧岩石区域。

$Mg^\#$ 的大小可以反映基性岩熔融产物是否受到地幔物质的混染,是判断埃达克岩源区的一个重要参数。由下地壳铁镁质岩石直接部分熔融所形成的岩浆,其 $Mg^\#$ 值一般不会大于 0.40, MORB 部分熔融产生的熔体的 $Mg^\#$ 值也不会超过 0.45,而固阳地区埃达克质花岗岩的 $Mg^\#$ 多大于 0.40,高于典型岛弧钙碱中酸性火成岩的 $Mg^\#$ (平均为 0.36)

表 1 固阳地区埃达克质花岗岩的主量元素(%)、微量和稀土元素(10^{-6})分析及有关参数Table 1 Bulk (%), trace and rare earth element (10^{-6}) compositions of adakitic granites in Guyang area

| 岩石类型 | 中细粒 闪长岩 | 中细粒石 英闪长岩 | 中细粒石 英闪长岩 | 中细粒石 英闪长岩 | 中细粒英 云闪长岩 | 中细粒英 云闪长岩 | 中细粒英 云闪长岩 | 中细粒花 岗闪长岩 | 中细粒花 岗闪长岩 | adakite |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------|
| 样品代号 | PM603 YQ29-1 | PM401 YQ22-1 | PM501 YQ4-1 | PM501 YQ7-1 | PM401P YQ11-1 | M501 YQ21-1 | PM603 YQ13-1 | PM310 YQ6-1 | PM501 YQ26-1 | |
| SiO ₂ | 57.28 | 60.39 | 62.83 | 66.63 | 65.85 | 64.22 | 62.06 | 60.05 | 66.02 | ≥56 |
| TiO ₂ | 0.64 | 0.65 | 0.54 | 0.39 | 0.46 | 0.7 | 0.58 | 0.67 | 0.56 | |
| Al ₂ O ₃ | 18.04 | 16.45 | 16.65 | 15.93 | 16.21 | 16.99 | 16.51 | 17.42 | 16.58 | ≥15 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.33 | 1.76 | 2.12 | 1.18 | 1.4 | 1.71 | 1.67 | 1.81 | 1.14 | |
| FeO | 4.8 | 3.8 | 3.35 | 2.8 | 2.8 | 2.95 | 3.3 | 4.1 | 2.7 | |
| MnO | 0.15 | 0.09 | 0.1 | 0.08 | 0.06 | 0.05 | 0.08 | 0.09 | 0.05 | |
| MgO | 3.47 | 3.39 | 2.32 | 1.53 | 2.08 | 1.26 | 2.87 | 2.87 | 1.14 | <3 |
| CaO | 6.82 | 5.3 | 4.71 | 3.84 | 4.55 | 4.61 | 4.83 | 5.63 | 4.05 | |
| Na ₂ O | 3.02 | 3.55 | 3.21 | 3.4 | 3.79 | 3.96 | 3.59 | 3.35 | 3.83 | |
| K ₂ O | 1.82 | 2.66 | 2.44 | 2.94 | 1.64 | 2.01 | 2.94 | 2.42 | 2.49 | |
| P ₂ O ₅ | 0.22 | 0.25 | 0.18 | 0.14 | 0.18 | 0.23 | 0.21 | 0.22 | 0.19 | |
| H ₂ O _p | 1.08 | 1.34 | 1.2 | 0.83 | 0.72 | 1.03 | 0.98 | 0.97 | 0.92 | |
| CO ₂ | 0.08 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.1 | 0.08 | |
| LOI | 0.68 | 0.86 | 0.85 | 0.47 | 0.26 | 0.73 | 0.77 | 0.55 | 0.65 | |
| Total | 100.43 | 100.55 | 100.58 | 100.22 | 100.04 | 100.51 | 100.45 | 100.25 | 100.4 | |
| Ba | 665 | 1304 | 886 | 957 | 622 | 729 | 1318 | 1096 | 775 | |
| Rb | 40.5 | 64.7 | 61.3 | 74 | 41 | 48.8 | 72.8 | 61.5 | 62.6 | |
| Sr | 545 | 566 | 472 | 446 | 575 | 582 | 513 | 494 | 527 | >400 |
| Y | 17.4 | 12.05 | 14.6 | 11.9 | 6.83 | 5.61 | 12.48 | 15.65 | 5.61 | ≤18 |
| Zr | 95.9 | 135 | 130 | 109 | 99.4 | 148 | 130 | 148 | 129 | |
| Nb | 4.8 | 6.9 | 5.1 | 5.9 | 4.3 | 7.1 | 6.9 | 5.9 | 7.2 | |
| Th | 4.5 | 5.7 | 5.2 | 7.9 | 4.3 | 4.9 | 5.9 | 4.2 | 5.6 | |
| Ga | 18.9 | 18.2 | 17.2 | 16.2 | 16.6 | 20.4 | 18.3 | 18.7 | 21.6 | |
| Ni | 9.3 | 29.3 | 9.1 | 6.4 | 13.5 | 7.9 | 22.3 | 13.8 | 7.3 | |
| V | 142 | 115 | 85.4 | 51.9 | 77.4 | 38 | 96.9 | 121 | 32 | |
| Cr | 22.6 | 69.9 | 14.8 | 10.1 | 25 | 5.3 | 51.2 | 28.5 | 6.1 | |
| Hf | 2.8 | 4.7 | 4.3 | 3.7 | 3.8 | 5.1 | 4.6 | 4.7 | 4.4 | |
| Cs | 0.97 | 2.6 | 1.8 | 2.2 | 0.86 | 1.9 | 2.5 | 1.2 | 2 | |
| Sc | 19.5 | 14.1 | 11.6 | 7.5 | 7.5 | 2.9 | 11.9 | 15.2 | 3.2 | |
| Ta | 0.33 | 0.42 | 0.4 | 0.49 | 0.23 | 0.54 | 0.45 | 0.36 | 0.57 | |
| Co | 18.9 | 17.9 | 13.7 | 8.8 | 12.1 | 9.8 | 15.4 | 17.7 | 8.8 | |
| Be | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.6 | |
| U | 0.59 | 1.4 | 0.54 | 0.99 | 0.38 | 0.98 | 0.96 | 0.63 | 1.2 | |
| La | 19.16 | 33.81 | 21.12 | 24.58 | 21.99 | 23.22 | 29.6 | 23.4 | 23.66 | |
| Ce | 45.44 | 58.23 | 43.55 | 48.52 | 43.17 | 53.06 | 55.35 | 46.75 | 44.41 | |
| Pr | 5.35 | 7.43 | 5.02 | 5.36 | 4.14 | 6.54 | 7.37 | 6.15 | 6.09 | |
| Nd | 20.12 | 25.63 | 18.61 | 17.85 | 13.01 | 25.11 | 25.46 | 21.78 | 21.63 | |
| Sm | 3.95 | 4.48 | 3.87 | 3.11 | 2.25 | 5.03 | 4.63 | 4.18 | 4.4 | |
| Eu | 1.26 | 1.38 | 1.08 | 0.91 | 0.84 | 1.45 | 1.23 | 1.15 | 1.26 | |
| Gd | 3.57 | 3.61 | 3.25 | 2.56 | 1.79 | 3.66 | 3.46 | 3.65 | 3.14 | |
| Tb | 0.57 | 0.51 | 0.52 | 0.4 | 0.26 | 0.4 | 0.5 | 0.57 | 0.35 | |
| Dy | 3.39 | 2.62 | 2.96 | 2.2 | 1.39 | 1.7 | 2.67 | 3.14 | 1.52 | |
| Ho | 0.69 | 0.51 | 0.6 | 0.44 | 0.28 | 0.25 | 0.51 | 0.64 | 0.25 | |
| Er | 2.02 | 1.26 | 1.66 | 1.22 | 0.74 | 0.57 | 1.35 | 1.71 | 0.59 | |
| Tm | 0.32 | 0.2 | 0.27 | 0.2 | 0.12 | 0.08 | 0.21 | 0.27 | 0.09 | |
| Yb | 2.06 | 1.2 | 1.7 | 1.29 | 0.7 | 0.42 | 1.31 | 1.71 | 0.5 | ≤1.9 |
| Lu | 0.33 | 0.19 | 0.27 | 0.2 | 0.11 | 0.06 | 0.2 | 0.26 | 0.08 | |
| ∑REE | 108.23 | 141.06 | 104.48 | 108.84 | 90.79 | 121.55 | 133.85 | 115.36 | 107.97 | |
| ∑Ce/∑Y | 7.36 | 12.97 | 8.30 | 11.79 | 15.84 | 16.02 | 12.11 | 8.65 | 15.56 | |
| δEu | 1.01 | 1.02 | 0.91 | 0.96 | 1.24 | 0.99 | 0.90 | 0.88 | 0.99 | |
| Sr/Y | 31.32 | 46.97 | 32.33 | 37.48 | 84.19 | 103.74 | 41.11 | 31.57 | 93.94 | >20—40 |
| (La/Yb) _N | 6.13 | 18.56 | 8.18 | 12.55 | 20.69 | 36.42 | 14.88 | 9.01 | 31.37 | >10 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.66 | 1.33 | 1.32 | 1.16 | 2.31 | 1.97 | 1.22 | 1.38 | 1.54 | |
| Mg [#] | 0.48 | 0.53 | 0.44 | 0.42 | 0.48 | 0.44 | 0.52 | 0.47 | 0.36 | |
| σ | 1.64 | 2.22 | 1.61 | 1.7 | 1.29 | 1.68 | 2.24 | 1.95 | 1.74 | |
| AR | 1.48 | 1.8 | 1.72 | 1.94 | 1.71 | 1.76 | 1.88 | 1.67 | 1.88 | |
| A/CNK | 1.55 | 1.43 | 1.61 | 1.56 | 1.62 | 1.61 | 1.45 | 1.53 | 1.6 | |

注:样品测试由国土资源部武汉矿产资源监督检测中心分析。

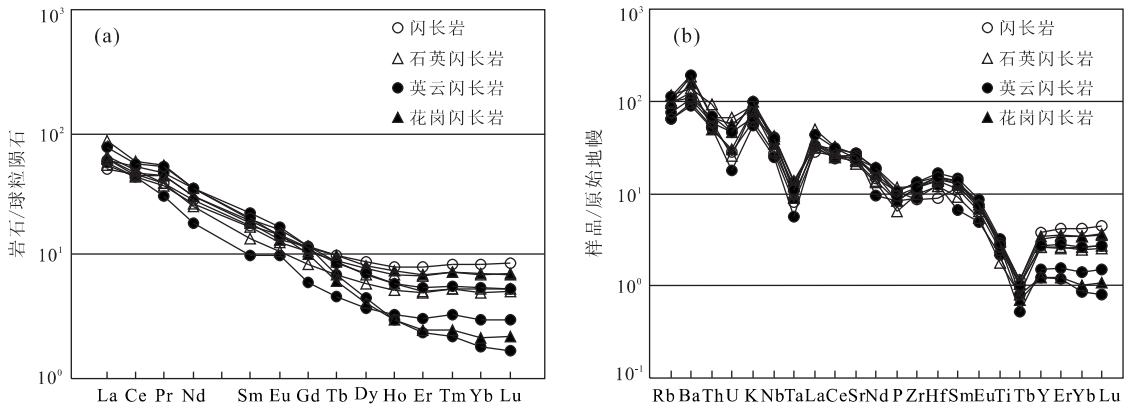


图 3 花岗岩类稀土元素的配分曲线(a)和微量元素比值蛛网图(b)

Fig. 3 Diagrams showing the chondrite-normalized REE patterns (a) and trace elements spidergram (b) of granites

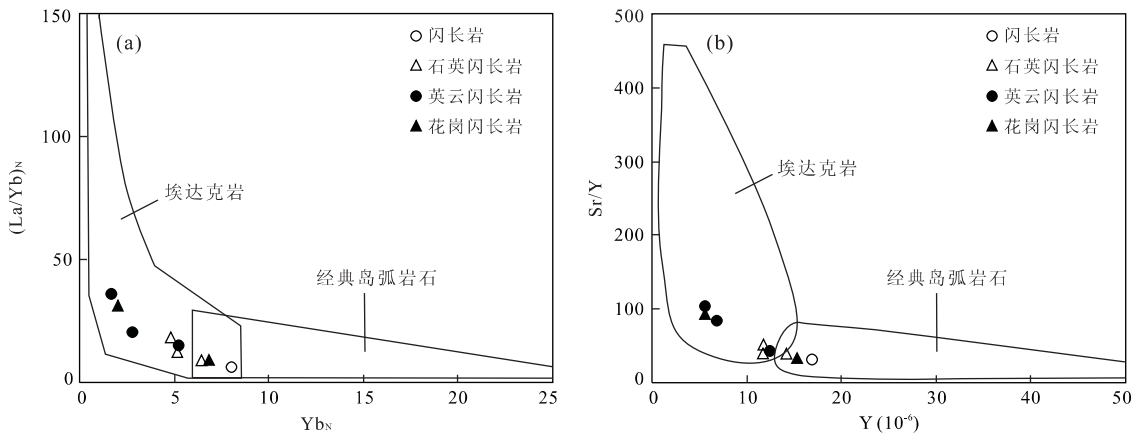


图 4 固阳地区花岗岩类的 $(La/Yb)_N$ - Yb_N 和 Sr/Y - Y 图解(肖庆辉等, 2002)

Fig. 4 $(La/Yb)_N$ - Yb_N and Sr/Y - Y diagrams of granites in Guyang area

和下地壳熔融形成的埃达克岩的 $Mg^\#$ (平均小于 0.50), 表明由俯冲洋壳板片 MORB 岩石部分熔融形成的原始埃达克质岩浆熔体, 在上侵过程中可能与地幔楔物质发生了明显的相互作用, 导致这些岩石的 MgO 含量增高, 这是加厚下地壳基性岩石直接部分熔融所形成的产物所不具备的特征。

从岩石地球化学特征可以看出, 固阳地区的花岗岩类基本符合典型埃达克质岩的地球化学特征, 同时也具有岛弧花岗岩类的地球化学特征, 即具有高场强元素 Nb 的亏损和大离子亲石元素的富集; Y 的亏损以及高的 Sr/Y 比值说明这些花岗质岩石的源区部分熔融的残留物应为榴辉岩(肖庆辉等, 2002)。

3 锆石年代学

锆石样品采自西营子岩体中细粒石英闪长岩,

原样重 15 kg, 在室内经无污染碎样后用淘盘进行重矿物富集, 然后在双目显微镜下进行人工挑选, 对选好的锆石晶体先进行阴极发光照相, 作为原位 U-Pb 同位素测量时位置选择的依据。

锆石分选在中国地质大学(武汉)选矿实验室完成。在测试之前, 先进行透射、反射光拍照以及阴极发光(CL)照相。锆石 U-Pb 同位素分析在地质过程与矿产资源国家重点实验室用标准测定程序条件进行, 采用激光剥蚀(LA)一等离子体质谱(ICP-MS)进行测量。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年依据 Horn *et al.* (2000)提出的分析方法, Ballard *et al.* (2001)对这个方法的流程进行过详细的叙述。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化, 采用哈佛大学国际标准锆石 91500 作为外部校正。样品的同位素比

表 2 固阳地区埃达克质花岗岩锆石 LA-ICP-MS 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb analytical data of zircon from the adakitic granites in Guyang area

| 样号 | 含量 (10^{-6}) | | | 同位素比值 | | | | 年龄 (Ma) | | | |
|--------|------------------|--------|------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
| | Th | U | Th/U | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ |
| N04-1 | 99.76 | 152.45 | 0.65 | 0.336 75 | 0.007 39 | 0.044 9 | 0.000 47 | 295 | 6 | 283 | 3 |
| N04-2 | 102.67 | 149.27 | 0.69 | 0.348 09 | 0.007 59 | 0.043 27 | 0.000 46 | 303 | 6 | 273 | 3 |
| N04-3 | 102.41 | 151.9 | 0.67 | 0.331 9 | 0.007 19 | 0.044 44 | 0.000 47 | 291 | 5 | 280 | 3 |
| N04-4 | 80.9 | 136.69 | 0.59 | 0.333 24 | 0.012 26 | 0.045 08 | 0.000 54 | 292 | 9 | 284 | 3 |
| N04-5 | 61.33 | 98.3 | 0.62 | 0.308 99 | 0.009 34 | 0.043 24 | 0.000 49 | 273 | 7 | 273 | 3 |
| N04-6 | 103.03 | 159.16 | 0.65 | 0.325 89 | 0.010 81 | 0.045 18 | 0.000 51 | 286 | 8 | 285 | 3 |
| N04-7 | 196.5 | 249.25 | 0.79 | 0.320 57 | 0.006 51 | 0.044 25 | 0.000 46 | 282 | 5 | 279 | 3 |
| N04-8 | 66.98 | 92.96 | 0.72 | 0.328 28 | 0.009 78 | 0.045 47 | 0.000 51 | 288 | 7 | 287 | 3 |
| N04-9 | 94.32 | 128.51 | 0.73 | 0.330 45 | 0.008 10 | 0.044 73 | 0.000 48 | 290 | 6 | 282 | 3 |
| N04-10 | 88.6 | 125.65 | 0.71 | 0.354 83 | 0.009 38 | 0.044 98 | 0.000 50 | 308 | 7 | 284 | 3 |
| N04-11 | 137.94 | 181.31 | 0.76 | 0.337 51 | 0.006 99 | 0.045 7 | 0.000 48 | 295 | 5 | 288 | 3 |
| N04-12 | 109.1 | 130.82 | 0.83 | 0.354 5 | 0.008 81 | 0.046 13 | 0.000 50 | 308 | 7 | 291 | 3 |
| N04-13 | 117.67 | 159.23 | 0.74 | 0.341 3 | 0.008 38 | 0.044 89 | 0.000 49 | 298 | 6 | 283 | 3 |
| N04-14 | 129.3 | 166.53 | 0.78 | 0.312 5 | 0.011 57 | 0.043 66 | 0.000 51 | 276 | 9 | 275 | 3 |

测试单位:中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室; σ 为测年误差的绝对值。

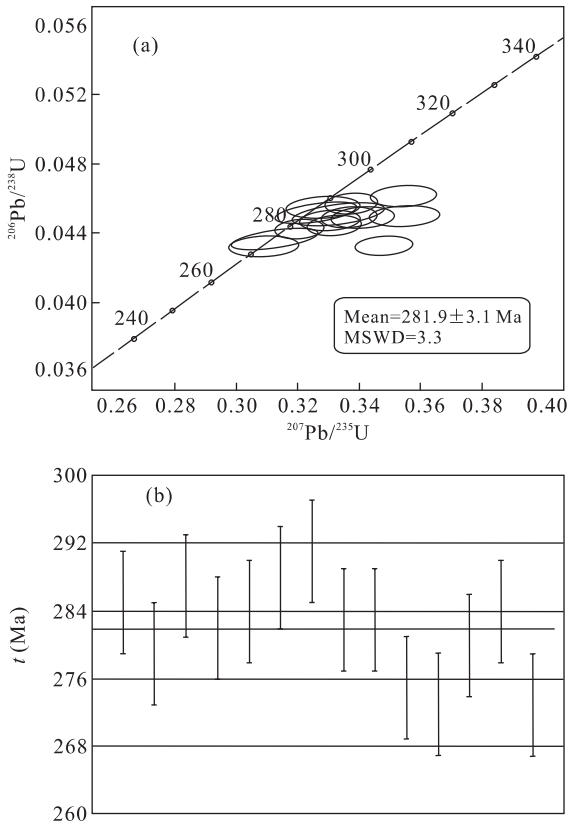


图 5 固阳地区埃达克质花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)及年龄分布图(b)

Fig. 5 U-Pb concordia diagram for zircons from the adakitic granites in Guyang area (a) and weighted average diagram of U-Pb isotopic age (b)

值计算采用 GLITTER(ver4.0 Macquarie University)程序,年龄计算采用国际标准程序 Isoplot (ver 2.49),实验采用的激光束斑直径为 $30\ \mu\text{m}$ 。实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响。

样品(PM401YQ22-1)中选取的锆石大多为浅黄色—无色透明短柱状、等粒状和不规则状晶体,自形程度较好,粒度多介于 $10\sim 180\ \mu\text{m}$ 之间。阴极发光图像(CL)表现为大多数锆石具有典型的岩浆韵律环带和条带结构。锆石 U-Pb 分析测试数据见表 2,共分析了 14 个点。所测锆石的 Th 和 U 含量分别介于 $61.33\times 10^{-6}\sim 196.5\times 10^{-6}$ 之间(多数在 $88.6\times 10^{-6}\sim 137.94\times 10^{-6}$)和 $92.96\times 10^{-6}\sim 249.25\times 10^{-6}$ 之间(多数在 $125.65\times 10^{-6}\sim 166.53\times 10^{-6}$),具有很好的正相关性;锆石颗粒的 Th/U 比值具有稳定的范围,Th/U 比值均大于 0.1,介于 0.59~0.83 之间,显示出所有测年锆石颗粒应为岩浆结晶的产物。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄图上(图 5),所有测点均分布在谐和线附近。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $273\pm 3\sim 291\pm 3$ Ma 之间,加权平均年龄为 281.9 ± 3.1 Ma (MSWD=3.3),代表了中细粒石英闪长岩的成岩年龄。

4 讨论及结论

古亚洲洋的最后封闭与造山作用时期,迄今尚有分歧意见,但一般多承认本区历经早古生代末的

构造运动与变形—变质作用,以及晚古生代的火山—沉积作用与构造变动,到晚二叠世末,全区已完成陆缘、陆间类型为主的褶皱反转和隆升剥蚀的全部造山过程和构造演化阶段,从而与华北地块拼联一体,共同成为古亚洲或古欧亚大陆的组成部分。

任收麦和黄宝春(2002)认为:在内蒙古中段西伯利亚和华北板块闭合的时间为晚泥盆世—早二叠世,位置沿索伦—贺根山一带;古生代期间在华北—塔里木板块与西伯利亚板块之间存在着宽度超过 4 000 km 的大洋(内蒙古洋),它是乌拉尔—蒙古—鄂霍茨克洋的一部分,这个洋盆在晚古生代消失,中生代初封闭成陆,最终成为巨大的向南突出的弧形造山带。王荃等(1991)依据广泛的对比,确定在早元古代华北与西伯利亚原为一整体,经过晚元古代的裂谷作用二者分裂,并在其间形成了真正的大洋,到二叠纪晚期,因古洋壳不断消减,华北与西伯利亚两大板块沿林西—苏尼特右旗一线再次拼合。Hsu *et al.* (1991)认为内蒙造山带是由洋—陆、陆—陆相互作用形成,并指出陆—陆碰撞发生在二叠纪。Sengor *et al.* (1993)、Sengor and Natalin (1996)、Chen *et al.* (2000)、陈斌等(2001)也都认为碰撞发生在晚二叠世。陶继雄等(2003)认为:华北板块与西伯利亚板块在早二叠世时尚未拼接,研究区以北的满都拉地区,早二叠世时还仍然是大洋板块的范围,晚古生代两大板块的汇聚造山作用,在华北板块北缘形成多条岩浆岩带。固阳地区埃达克质花岗岩类的识别,即是早二叠世早期存在弧陆碰撞的证据,为俯冲的玄武质洋壳(MORB)板片熔融的产物。

埃达克岩最初是指由俯冲的洋壳在榴辉岩相条件下熔融形成的(Defant and Drummond, 1990),但经过十多年的研究认为,年轻的热的俯冲消减洋壳并不是唯一产生埃达克岩的地质过程,非岛弧环境下的加厚下地壳镁铁质岩石的部分熔融(Drummond *et al.*, 1996; 张旗等, 2001a, 2001b; Kay and Kay, 2002)、玄武质岩浆 AFC 演化(Castillo *et al.*, 1999)、拆沉的下地壳熔融(Xu *et al.*, 2002)也可形成埃达克岩。根据本文资料,笔者认为固阳地区埃达克质花岗岩类很可能是由俯冲的玄武质洋壳(MORB)板片熔融形成的,其主要依据如下:

(1)西营子岩体的岩石和地球化学特征类似于由俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩(Defant and Drummond, 1990; 王焰等, 2000; 张旗等, 2001a, 2001b),与俯冲有关的埃达克岩主要为钙碱性系

列, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ (Martin, 1999); 而由增厚的玄武质下地壳熔融形成的埃达克岩主要为高钾钙碱性系列,具较低的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, 而本区埃达克岩主要属于钙碱性系列,可能为消减的 MORB 部分熔融形成的。

(2)西营子岩体富 Al、Sr 和 LREE, 亏损 HREE, 具弱 Eu 正异常, 无明显的 Eu 负异常以及具明显的正 Sr 异常, 贫 Y 和 Yb, 均与典型的埃达克岩(Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)相似, 表明在埃达克岩熔融的源区中斜长石已经不稳定, 几乎全部进入岩浆, 熔融残留相主要由石榴石+辉石+角闪石组成(榴辉岩或角闪榴辉岩)。

利用激光等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 定年, 其同位素年龄为 281.9 ± 3.1 Ma (MSWD=3.3), 固阳地区埃达克质花岗岩属于华北板块北缘晚古生代的岩浆增生带, 是华北板块对古亚洲洋俯冲作用的响应。因此, 固阳地区埃达克质花岗岩的确定, 表明早二叠世可能是古亚洲洋发生俯冲削减的重要时期。

该地区埃达克岩的发现, 对古亚洲洋的闭合时限提供了新的线索, 对研究中亚造山带晚古生代构造演化、地球动力学特征具有十分重要的意义, 为解决内蒙古及古亚洲洋研究中长期争论的地质问题提供了年代学和地球化学制约。

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192: 59—79.
- Ballard, J. R., Palin, J. M., Williams, I. S., et al., 2001. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquibambilla copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. *Geology*, 29: 383—386.
- Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 33—51.
- Chen, B., Jahn, B. M., Wilde, S., et al., 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157—182.
- Chen, B., Zhao, G. C., Simon, W., 2001. Isotopic ages and tectonic significance of subduction and collision related granitoids from southern Suzuoqi, Inner Mongolia. *Geological Review*, 47(4): 361—367 (in Chinese with English abstract).

- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662—665.
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547—550.
- Drummond, M. S., Defant, M. J., Kepezhinskas, P. K., 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite adakite magmas. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth. Sci.*, 87: 205—215.
- Horn, I., Rudnick, R. L., McDonough, W. E., 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation ICP-MS: Application to U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 164: 81—301.
- Hsu, K. J., Wang, Q. C., Li, L., 1991. Geological evolution of the Neimonides; A working hypothesis. *Eclogae. Geol. Helv.*, 84: 1—31.
- Kay, R. W., Kay, S. M., 2002. Andean adakites: Three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 303—311.
- Martin, H., 1999. Adakitic magmas; Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411—429.
- Ren, S. M., Huang, B. C., 2002. Preliminary study on post-Late Paleozoic kinematics of the main blocks of the Paleo-Asian ocean. *Progress in Geophysics*, 17(1): 113—120 (in Chinese with English abstract).
- Sengor, A. M. C., Natalin, B. A., 1996. Paleotectonics of Asia; Fragments of a synthesis. In: Yin, A., Harrison, T. M., Eds. *The tectonic evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 486—641.
- Sengor, A. M. C., Natalin, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299—307.
- Tang, K. D., Zhang, Y. P., 1991. Tectonic evolution of suture belt in Inner Mongolia. In: Xiao, X. C., Tang, Y. Q., eds., *Tectonic evolution of huge complex suture belt in the southern Central-Asian orogenic belts*. Scientific and Technical Press of Beijing, Beijing, 30—54 (in Chinese).
- Tao, J. X., Bai, L. B., Bao, Y. W. L. J., et al., 2003. Rock Record of Permian subducting orogenic process in Mandala, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 26(4): 241—249 (in Chinese with English abstract).
- Tao, J. X., Xu, L. Q., He, F., et al., 2005. Petrological evidence for subduction of the Early Paleozoic oceanic crust in Bartobo, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 28(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Liu, X. Y., Li, J. Y., 1991. Plate Tectonics Between Cathaysia and Angaraland in China. Peking Univ. Publ. House, Beijing, 1—151 (in Chinese).
- Wang, Y., Zhang, Q., Qian, Q., 2000. Adakite; Geochemical characteristics and tectonic significances. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251—256 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. S., et al., 2002. The ways of investigation on granitoids. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China; Partial melting of delaminated lower continental crust. *Geology*, 30: 1111—1114.
- Xu, L. Q., Deng, J. F., Chen, Z. Y., et al., 2003. The identification of Ordovician adakites and its signification in northern Damao, Inner Mongolia. *Geoscience*, 17(4): 428—434 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Liu, W., et al., 2002. Adakite; Its characteristics and implications. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431—435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001a. The characteristics and tectonic-metallogenics significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., et al., 2001b. An east China plateau in Mid-Late Yanshanian period; Implication from adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 248—255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Wang, Y. L., et al., 2003. On the relationship between adakite and its tectonic setting. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 101—108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Xu, J. F., Wang, Y., et al., 2004. Diversity of adakite. *Geological Bulletin of China*, 23(9—10): 959—965 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Xue, Y. X., Cheng, L. J., et al., 2004. Finding, characteristics and significances of Qulong superlarge porphyry copper (Molybdenum) deposit, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 103—108 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈斌, 赵国春, Simon, W., 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. *地质论评*, 47(4): 361—367.
- 任收麦, 黄宝春, 2002. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探. *地球物理学进展*, 17(1): 113—

120.

唐克东,张允平,1991. 内蒙古缝合带的构造演化. 见:肖序常,汤耀庆主编. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化. 北京:北京科学技术出版社,30—54.

陶继雄,白立兵,宝音乌力吉,等,2003. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录. 地质调查与研究,26(4):241—249.

陶继雄,许立权,贺锋,等,2005. 内蒙古巴特敖包地区早古生代洋壳消减的岩石证据. 地质调查与研究,28(1):1—8.

王荃,刘雪亚,李锦轶,1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造. 北京:北京大学出版社,1—151.

王焰,张旗,钱青,2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义. 地质科学,35(2):251—256.

肖庆辉,邓晋福,马大钊,等,2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社.

许立权,邓晋福,陈志勇,等,2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义. 现代地质,17(4):428—434.

张旗,王焰,刘伟,等,2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报,21(7):431—435.

张旗,王焰,钱青,等,2001a. 中国东部燕山期埃达克岩的构造—成矿意义. 岩石学报,17(2):236—244.

张旗,钱青,王二七,等,2001b. 燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示. 地质科学,36(2):248—255.

张旗,王焰,王元龙,等,2003. 埃达克岩与构造环境. 大地构造与成矿学,27(2):101—108.

张旗,许继峰,王焰,等,2004. 埃达克岩的多样性. 地质通报,23(9—10):959—965.

郑有业,薛迎喜,程力军,等,2004. 西藏驱龙超大型斑岩铜(钼)矿床:发现、特征及意义. 地球科学——中国地质大学学报,29(1):103—108.

热烈祝贺《地球科学》(英文版)进入国际著名检索系统 SCIE

根据美国汤姆森科技信息集团科学信息研究所(Thomson ISI)的正式通知和 ISI 网查询,《地球科学》(英文版)(Journal of China University of Geosciences, ISSN:1002—0705)已经被列入美国《科学引文索引(扩展库)》(SCIE)来源期刊,2007 年第 18 卷第 1 期开始正式收录.

《地球科学》(英文版)创刊于 1990 年,十几年来,在中国地质大学学校领导的大力支持下,学报编辑部坚持按照国际期刊规范办刊,坚定不移地走国际化、专业化的道路,报道中国地球科学领域前瞻性的研究成果和最新发现,该刊的学术质量稳步上升.

尤其是 1999 年以来,《地球科学》编辑部确立了进入 SCI 的奋斗目标,为了提高期刊质量,严格按照 SCI 选刊、评估标准办刊,并且采取了一系列措施:2003 年改革了编委会,增加了 17 名国际编委,2004—2006 年聘请了英国语言学博士 Paul Richard Weldon 来编辑部工作,2005 年 9 月与国际著名出版公司 ELSEVIER 签订了合作出版、发行英文版电子版的协议;2006 年起由国际著名出版集团 ELSEVIER 独家海外发行英文版电子版,扩大了英文版的国际知名度. 2007 年 6 月 28 日期盼已久的美国汤姆森公司发来喜讯:《地球科学》(英文版)2007 年起正式被 SCIE 收录.

八年来,《地球科学》编辑部在中国地质大学学校和编委会的正确领导下,主编王亨君教授率领的《地球科学》团队求真务实,开拓创新,在选题策划、编辑人才培养、网站建设和国际化发展等方面付出了艰辛的努力,取得了一次又一次的成绩,为繁荣科技出版和地球科学事业做出了应有贡献.

今后《地球科学》编辑部将要承担着更大的压力和挑战,要不断与时俱进,开拓创新,为争创国际一流科技期刊而努力奋斗.