

大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的成因 ——地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约

周 漪¹, 葛文春¹, 王清海²

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 吉林大学 东北亚国际地学研究的教学中心, 吉林 长春 130026)

摘要: 大兴安岭中部中生代花岗岩成因和构造背景的确定对讨论该地区及东北地区中生代构造-岩浆演化具有重要意义。乌兰浩特地区中生代花岗岩详细的岩石地球化学及 Hf、Nd 同位素的研究表明: 研究区中晚三叠世查干岩体是 A₂ 型花岗岩; 早中侏罗世景阳岩体为 I 型花岗岩, 而大石寨岩体是具有特殊稀土元素四分组效应的花岗岩; 早白垩世花岗岩体可根据其 Sr 含量划分为高 Sr 和低 Sr 两类, 它们具有相同或相似的源岩组成, 但其起源深度不同。其中高 Sr 型花岗岩类似于 C 型埃达克质花岗岩, 起源于压力较高的下地壳, 而低 Sr 型及永和屯花岗岩则是起源于压力较低的中地壳的高分异 I 型花岗岩。全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素特征及前人的研究结果显示, 乌兰浩特地区花岗岩类岩石的源区主要为显生宙新增生的年轻地壳物质, 并有老的地壳物质的贡献, 并且随着花岗岩侵位时间的逐渐变新, 锆石的 ε_{Hf}(t) 值逐渐减小, 认为地幔上涌导致岩浆底侵以及老地壳物质的折返是造成下地壳源岩组成复杂的原因。

关键词: 乌兰浩特, 花岗岩, 地球化学, 岩石成因, Sr-Nd-Hf 同位素, 大兴安岭

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0901-23

Petrogenesis of Mesozoic granite in Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains: constraints from geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope

ZHOU Yi¹, GE Wen-chun¹ and WANG Qing-hai²

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. International Center for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Petrogenesis and tectonic setting of Mesozoic granites in central Da Hinggan Mountains constitute the key to investigating the tectonic and magmatic evolution of Northeast China. Systematical studies of petrology, geochemistry and Sr-Nd and Lu-Hf isotopes of the granites in Wulanhaote-Suolun region indicate that the Middle-Late Triassic Chagan granite is of A₂ type. The Early-Middle Jurassic Jingyang granite is an I-type granite and the Dashizhai granite is a very special kind of granite which shows tetrad REE patterns. On the basis of the Sr values, the Early Cretaceous granites can be divided into two types, i. e., the high-Sr type and the low-Sr type. The two types of granites possess the same or similar magmatic sources but originated in different depths. The high-Sr type granite is similar to C-type adakitic granite which originated from the higher pressure of the lower crust, while the low-Sr type and Yonghetun granite are highly fractionated I-type granites derived from the middle crust of lower pressure. Considering Sr-Nd-Hf isotopic data of granites in the Wulanhaote-Suolun region and the results of previous studies, the authors suggest that crustal growth of the study area

收稿日期: 2011-05-27; 修订日期: 2011-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90814003)

作者简介: 周 漪 (1986-), 男, 硕士研究生, 地球化学专业, E-mail: bvcc1986@foxmail.com; 通讯作者: 葛文春 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 岩石学专业, E-mail: gewenchun@jlu.edu.cn

occurred in the Phanerozoic. As indicated by the high positive zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ and $\epsilon\text{Nd}(t)$ values and the new young two-stage model age of each of the five intrusions, their magmatic sources must have mainly consisted of new crustal materials during the accretion in Phanerozoic, with the addition of some old crust components. And along with the variation of the emplacement time of the granites gradually towards newness, the $\epsilon\text{Hf}(t)$ values of the zircon change to lowness. The authors consider that magmatic underplating and exhumation of the old crust caused by the mantle upwelling were responsible for the complicatedness of the compositions of the lower crustal source rock.

Key words: Wulanhaote; granites; geochemistry; petrogenesis; Sr-Nd-Hf isotope; Da Hinggan Mountains

大兴安岭位于兴蒙造山带的东段,该区中生代花岗岩广泛分布,与松辽盆地东部的张广才岭-小兴安岭花岗岩共同构成了中国大陆东部中生代“花岗岩海”(吴福元等,1999),这些花岗岩的成因类型和源区特征为讨论兴蒙造山带构造演化提供了重要依据。近年来,大量高精度的锆石 U-Pb 年代学资料(孙德有等,2000,2001,2004,2005;张艳斌等,2002,2004;苗来成等,2003;葛文春,2005a,2005b;Wu *et al.*,2011)表明,东北地区显生宙花岗岩以中生代为主,其年代学格架初步确定。随着东北地区大量正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值花岗岩的发现,显生宙地壳的增生作用成为研究热点问题之一。前人对该区花岗岩进行了大量的研究并取得了一系列的成果(吴福元等,1999;Chen *et al.*,2000;林强等,2004;Liu *et al.*,2005;葛文春等,2007),但目前尚缺乏对中生代花岗岩的系统研究。葛文春等(2005b)对乌兰浩特地区花岗岩类的形成时限及其构造意义进行了较为详细的研究,认为这些花岗岩形成于中生代,并主要集中于中晚三叠世、早中侏罗世和早白垩世 3 个阶段。本文在前人研究基础上,通过对大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的地球化学特征和 Sr-Nd-Hf 同位素的研究,结合已发表的资料,讨论了乌兰浩特花岗岩类的成因类型、源区性质及其对地壳增生的意义,这对探讨兴蒙造山带的构造演化和东北地区中生代花岗岩成因及构造格架的研究具有重要意义。

1 地质背景与岩体地质

前人根据两条缝合带(塔源-喜桂图断裂和贺根山-黑河断裂)将兴蒙造山带东段划分成 3 个块体:额尔古纳地块、兴安地块和松嫩地块。大兴安岭中部的乌兰浩特地区位于兴蒙造山带东段的兴安地块与松嫩地块晚古生代拼合带附近(图 1),研究区以贺根山-嫩江-黑河缝合带为界,北部地区发育早古生

代地层,南部地区的乌兰浩特一带普遍缺失早古生代地层。区内二叠纪地层较发育,其中下二叠统为海相沉积碎屑岩,夹中酸性火山岩及火山碎屑岩,可划分为青风山组、大石寨组和吴家屯组;上二叠统林西组主要出露于北部索伦镇一带(内蒙古自治区地质矿产局,1991)。

研究区内主要出露晚古生代大石寨组、中生代火山岩及一系列特征不同的花岗岩体。其中大石寨组火山岩广泛分布于内蒙古中、东部地区,夹持在贺根山缝合带、索伦山-西拉木伦河和嫩江缝合带之间,是内蒙古东部大兴安岭地区出露面积最广的火山岩地层,为一套经过低级变质作用改造的浅海相火山-沉积岩系(吕志成等,2002);中生代火山岩主要为早白垩世的流纹岩和玄武安山岩(葛文春等,1999)。花岗岩主要由花岗闪长岩、正长花岗岩、碱长花岗岩及二长花岗岩-花岗斑岩组成,代表性的岩体有查干岩体、景阳岩体、大石寨岩体、青山岩体、永和屯岩体、索伦镇岩体(图 1)。葛文春等(2005b)采用激光 ICP-MS 技术对该地区花岗岩进行锆石 U-Pb 年龄测定的结果表明,中晚三叠世查干岩体侵位结晶年龄为 235~225 Ma,早中侏罗世景阳岩体和大石寨岩体侵位结晶年龄为 182~175 Ma,早白垩世青山岩体、索伦镇岩体及永和屯岩体侵位结晶年龄为 140~125 Ma,表明大兴安岭中部乌兰浩特-索伦地区的中生代花岗岩为不同时期 3 次构造岩浆活动的产物。上述岩体的详细岩石学特征见葛文春等(2005b)。

2 分析方法

主量元素、微量元素和 Nd 同位素分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。主量元素在 Rigaku RIX 型荧光光谱仪(XRF)上进行,采用 36 个标样建立工作曲线的方法,使主量元素的分析精度优于 2%~5%。

微量元素的分析采用 PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。仪器工作参数 RF 功率为 1 175 W,雾化器氩气流速为 0.83 L/min,等离子体氩气流速为 15 L/min,辅助氩气流速为 1.2 L/min,透镜电压为自动聚焦,质量扫描方式为峰跳,每个质量积分时间 100 ms。测量采用自动进样方式,以外标准校正方法进行。Nd 同位素分析采用 HF + HNO₃ 混合酸溶解,用阳离子交换技术进行分离,分离本底在同位素测量误差范围之内。同位素比值的测定在电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)上进行,分析精度优于 0.002%。国际标样 La Jolla 和 BCR-2

的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测定平均值分别为 0.511 859 ± 6 (2σ)和 0.512 637 ± 3(2σ)。

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年(葛文春, 2005b)的基础上,进行了锆石微区 Hf 同位素测定工作。锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)上进行,激光束斑直径为 63 μm,激光脉冲宽度为 15 ns,试验中采用 He 气作为剥蚀物质载气。εHf(t)和模式年龄计算中,二阶段模式年龄采用平均地壳的 fcc = 0.548 (Veevers et al., 2005)进行计算。

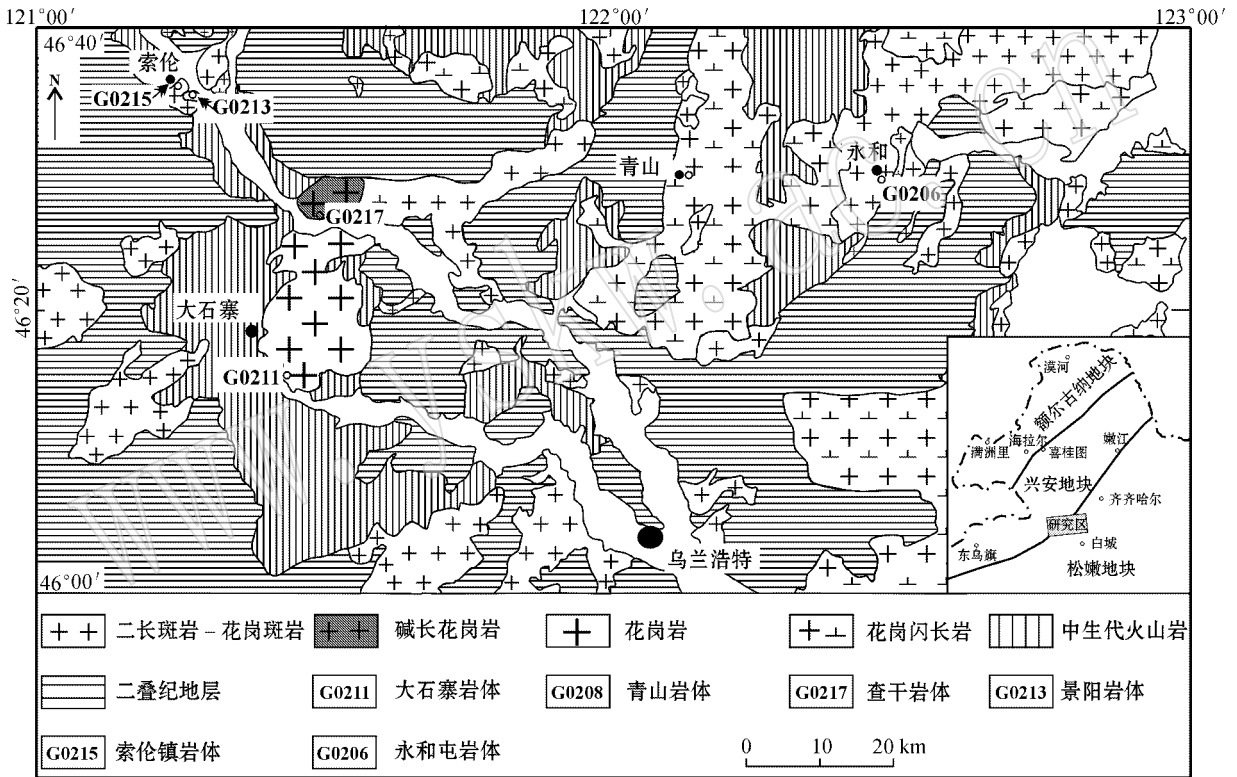


图 1 乌兰浩特地区区域地质图

Fig. 1 Simplified geological map of Wulanhaote region in central Da Hinggan Mountains

3 地球化学特征

3.1 主量元素

各花岗岩体的主量元素分析结果见表 1,系列判别图解见图 2 和图 3。

查干花岗岩体 SiO₂ 含量平均为 74.5%, K₂O + Na₂O 平均为 8.9%, CaO 平均为 0.77%, MgO 平均为 0.18%, A/CNK 为 1.0 ± ,为弱过铝质,属于高钾

钙碱性系列。

景阳岩体的 SiO₂ 含量为 72% ~ 75%, Al₂O₃ 含量为 12% ~ 15%, K₂O 含量除 1 个样品为 2.5% 外,其余均大于 3.15%, Na₂O 含量平均为 4.3%, 相对富钠。A/CNK 值为 0.91 ~ 1.12, 1 个样品的值达到 1.22, 可能是岩浆分异所致。为准铝质-过铝质,属于钙碱性系列。

大石寨岩体的 SiO₂ 含量为 75% ~ 77%, K₂O 含量 4.23% ~ 5.19%, 平均含量 4.7%, Na₂O 含量

表1 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)成分

| 岩体 样品号 | 查干岩体 | | 景阳岩体 | | | | | | 大石寨岩体 | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | G0217-1 | G0217-2 | G0213-1 | G0213-2 | G0213-3 | G0213-4 | G0213-5 | G0213-6 | G0211-1 | G0211-2 | G0211-3 | G0211-4 |
| SiO ₂ | 74.57 | 74.48 | 72.05 | 72.32 | 71.21 | 72.67 | 73.03 | 75.31 | 76.81 | 75.94 | 77.78 | 76.94 |
| TiO ₂ | 0.21 | 0.20 | 0.28 | 0.29 | 0.32 | 0.26 | 0.30 | 0.17 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.03 |
| Al ₂ O ₃ | 13.82 | 13.84 | 15.61 | 13.57 | 15.48 | 14.09 | 12.94 | 12.20 | 11.88 | 13.02 | 12.05 | 11.74 |
| Fe ₂ O ₃ ^t | 2.00 | 1.93 | 2.02 | 2.04 | 2.31 | 1.84 | 2.13 | 1.28 | 0.80 | 0.83 | 0.84 | 1.17 |
| MnO | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.08 | 0.10 | 0.07 | 0.09 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.03 |
| MgO | 0.17 | 0.19 | 0.64 | 0.73 | 0.73 | 0.64 | 0.72 | 0.39 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 |
| CaO | 0.75 | 0.79 | 1.78 | 1.99 | 1.69 | 1.85 | 1.89 | 1.51 | 0.50 | 0.47 | 0.59 | 0.50 |
| Na ₂ O | 3.94 | 4.08 | 4.18 | 4.78 | 4.38 | 4.26 | 4.58 | 4.00 | 3.67 | 3.67 | 3.71 | 3.05 |
| K ₂ O | 4.96 | 4.84 | 2.50 | 3.14 | 3.26 | 3.26 | 3.15 | 3.54 | 4.58 | 4.97 | 4.23 | 5.19 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.04 | 0.11 | 0.13 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 0.08 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.02 |
| LOI | 0.62 | 0.86 | 1.01 | 0.81 | 0.56 | 0.76 | 0.69 | 0.81 | 0.82 | 0.64 | 0.85 | 0.88 |
| Total | 100.52 | 100.42 | 100.25 | 99.87 | 100.18 | 99.05 | 99.63 | 99.34 | 99.17 | 99.65 | 100.15 | 99.58 |
| K ₂ O+Na ₂ O | 8.90 | 8.92 | 6.68 | 7.92 | 7.64 | 7.52 | 7.73 | 7.54 | 8.25 | 8.64 | 7.94 | 8.24 |
| A/CNK | 1.04 | 1.03 | 1.22 | 0.91 | 1.12 | 1.01 | 0.90 | 0.93 | 1.00 | 1.06 | 1.02 | 1.02 |
| A/NK | 1.17 | 1.16 | 1.63 | 1.20 | 1.44 | 1.34 | 1.18 | 1.17 | 1.08 | 1.14 | 1.13 | 1.10 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 0.80 | 0.84 | 1.67 | 1.53 | 1.34 | 1.31 | 1.45 | 1.13 | 0.80 | 0.74 | 0.88 | 0.59 |
| (Na ₂ O+K ₂ O)/CaO | 11.85 | 11.32 | 3.75 | 3.99 | 4.52 | 4.07 | 4.10 | 4.99 | 16.66 | 18.38 | 13.37 | 16.33 |
| Ga/A($\times 10^4$) | 3.31 | 3.40 | 2.21 | 2.77 | 2.31 | 2.34 | 2.70 | 2.32 | 5.06 | 5.03 | 5.37 | 6.70 |
| La | 46.91 | 46.47 | 13.37 | 12.15 | 14.03 | 11.95 | 13.80 | 9.33 | 19.85 | 19.63 | 21.86 | 12.26 |
| Ce | 103.80 | 102.90 | 28.00 | 25.74 | 29.20 | 25.20 | 28.80 | 19.33 | 55.31 | 55.66 | 60.75 | 34.59 |
| Pr | 13.61 | 13.55 | 3.57 | 3.11 | 3.74 | 3.19 | 3.67 | 2.44 | 8.24 | 7.98 | 9.32 | 5.33 |
| Nd | 48.40 | 46.77 | 12.39 | 10.81 | 12.95 | 10.66 | 12.63 | 8.05 | 32.99 | 32.37 | 36.07 | 19.32 |
| Sm | 10.53 | 10.55 | 2.58 | 2.31 | 2.72 | 2.19 | 2.57 | 1.65 | 11.80 | 10.80 | 12.52 | 6.94 |
| Eu | 0.39 | 0.40 | 0.56 | 0.50 | 0.54 | 0.51 | 0.56 | 0.39 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.01 |
| Gd | 9.75 | 9.60 | 2.22 | 2.10 | 2.40 | 1.85 | 2.24 | 1.36 | 14.35 | 14.51 | 16.01 | 9.56 |
| Tb | 1.69 | 1.70 | 0.36 | 0.31 | 0.39 | 0.30 | 0.37 | 0.21 | 2.69 | 2.79 | 3.30 | 2.15 |
| Dy | 10.22 | 10.33 | 2.27 | 1.86 | 2.31 | 1.83 | 2.21 | 1.40 | 17.89 | 19.84 | 22.46 | 15.69 |
| Ho | 2.07 | 2.09 | 0.46 | 0.36 | 0.44 | 0.36 | 0.42 | 0.28 | 3.66 | 4.33 | 4.78 | 3.58 |
| Er | 5.67 | 5.68 | 1.34 | 1.01 | 1.35 | 1.00 | 1.18 | 0.77 | 10.30 | 12.68 | 13.74 | 11.93 |
| Tm | 0.86 | 0.90 | 0.21 | 0.17 | 0.21 | 0.16 | 0.18 | 0.13 | 1.85 | 2.23 | 2.38 | 2.32 |
| Yb | 5.55 | 6.02 | 1.51 | 1.10 | 1.53 | 1.08 | 1.38 | 0.90 | 13.30 | 16.06 | 15.93 | 18.43 |
| Lu | 0.88 | 0.98 | 0.25 | 0.17 | 0.25 | 0.19 | 0.22 | 0.16 | 2.07 | 2.47 | 2.61 | 3.14 |
| ΣREE | 259.45 | 256.96 | 68.85 | 61.53 | 71.81 | 60.28 | 70.00 | 46.23 | 192.28 | 198.92 | 219.16 | 142.11 |
| LHREE/HREE | 6.10 | 5.91 | 7.02 | 7.72 | 7.12 | 7.93 | 7.57 | 7.91 | 1.94 | 1.69 | 1.73 | 1.17 |
| (La/Yb) _N | 6.06 | 5.54 | 6.35 | 7.93 | 6.59 | 7.97 | 7.19 | 7.41 | 1.07 | 0.88 | 0.98 | 0.48 |
| δEu | 0.11 | 0.12 | 0.70 | 0.68 | 0.63 | 0.76 | 0.70 | 0.76 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| Co | 2.03 | 1.80 | 3.90 | 3.42 | 4.03 | 3.68 | 4.08 | 2.23 | 0.76 | 0.77 | 0.80 | 0.85 |
| Ga | 24.24 | 24.91 | 18.28 | 19.87 | 18.94 | 17.48 | 18.49 | 14.97 | 31.83 | 34.68 | 34.23 | 41.64 |
| Rb | 151.20 | 158.50 | 67.60 | 76.86 | 78.01 | 69.63 | 67.67 | 66.46 | 359.60 | 493.60 | 387.80 | 553.70 |
| Sr | 49.28 | 60.70 | 260.60 | 267.30 | 258.30 | 267.60 | 260.60 | 227.60 | 13.14 | 7.14 | 13.95 | 10.61 |
| Y | 52.87 | 52.66 | 12.74 | 11.72 | 13.58 | 10.03 | 12.16 | 7.55 | 106.10 | 128.30 | 139.90 | 122.90 |
| Zr | 348.50 | 332.80 | 107.00 | 101.50 | 110.20 | 95.22 | 106.40 | 76.25 | 134.50 | 138.00 | 133.00 | 157.10 |
| Nb | 18.51 | 19.51 | 12.44 | 9.05 | 13.45 | 5.81 | 7.78 | 3.78 | 30.80 | 41.13 | 26.72 | 53.43 |
| Hf | 9.68 | 9.83 | 3.06 | 2.50 | 2.87 | 2.45 | 2.81 | 2.10 | 7.69 | 7.52 | 7.29 | 12.27 |
| Ba | 146.70 | 162.30 | 411.70 | 504.00 | 591.90 | 531.40 | 576.80 | 646.90 | 16.57 | 11.46 | 10.39 | 12.48 |
| Ta | 1.44 | 1.84 | 0.71 | 0.61 | 0.74 | 0.47 | 1.19 | 0.38 | 3.53 | 5.83 | 3.90 | 13.07 |
| Th | 14.00 | 16.98 | 5.71 | 4.71 | 5.58 | 4.43 | 5.12 | 3.80 | 35.56 | 35.75 | 34.33 | 42.06 |
| U | 2.13 | 3.51 | 1.19 | 1.81 | 1.26 | 0.95 | 0.75 | 1.10 | 12.31 | 7.26 | 6.77 | 21.59 |
| Ba/Rb | 0.97 | 1.02 | 6.09 | 6.56 | 7.59 | 7.63 | 8.52 | 9.73 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 0.02 |
| Rb/Sr | 3.07 | 2.61 | 0.26 | 0.29 | 0.30 | 0.26 | 0.26 | 0.29 | 27.37 | 69.15 | 27.80 | 52.19 |
| Sr/Y | 0.93 | 1.15 | 20.46 | 22.81 | 19.02 | 26.68 | 21.43 | 30.13 | 0.12 | 0.06 | 0.10 | 0.09 |
| Zr/Hf | 36.01 | 33.87 | 35.02 | 40.54 | 38.41 | 38.94 | 37.82 | 36.33 | 17.49 | 18.35 | 18.24 | 12.80 |
| Sm/Nd | 0.22 | 0.23 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.36 | 0.33 | 0.35 | 0.36 |
| Nb/Ta | 12.85 | 10.61 | 17.65 | 14.91 | 18.22 | 12.26 | 6.52 | 9.89 | 8.73 | 7.05 | 6.86 | 4.09 |
| Zr+Ce+Y+Nb | 523.68 | 507.87 | 160.18 | 148.01 | 166.43 | 136.26 | 155.14 | 106.91 | 326.71 | 363.09 | 360.37 | 368.02 |

续表 1
Continued Table 1

| 岩体 样品号 | 青山岩体 | | 索伦镇岩体 | | | | | | 永和屯岩体 | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | G0208-1 | G0208-3 | G0215-1 | G0215-2 | G0215-3 | G0215-4 | G0215-5 | G0215-7 | G0206-1 | G0206-2 |
| SiO ₂ | 71.22 | 71.23 | 76.52 | 74.16 | 73.96 | 74.60 | 72.89 | 74.52 | 63.71 | 73.46 |
| TiO ₂ | 0.29 | 0.34 | 0.16 | 0.18 | 0.17 | 0.18 | 0.24 | 0.19 | 0.63 | 0.14 |
| Al ₂ O ₃ | 15.30 | 15.12 | 12.80 | 13.33 | 13.76 | 13.83 | 14.72 | 13.48 | 16.54 | 13.71 |
| Fe ₂ O ₃ ¹ | 1.97 | 2.34 | 1.41 | 1.61 | 1.57 | 1.65 | 1.91 | 1.68 | 4.50 | 1.74 |
| MnO | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.03 |
| MgO | 0.54 | 0.70 | 0.11 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.48 | 0.13 | 1.52 | 0.11 |
| CaO | 1.94 | 2.01 | 0.04 | 0.55 | 0.53 | 0.24 | 1.52 | 0.11 | 3.99 | 0.64 |
| Na ₂ O | 4.13 | 3.81 | 3.54 | 3.77 | 3.62 | 3.60 | 3.89 | 3.66 | 3.84 | 3.96 |
| K ₂ O | 3.43 | 3.30 | 5.04 | 5.20 | 4.92 | 5.02 | 4.49 | 5.09 | 2.93 | 4.53 |
| P ₂ O ₅ | 0.16 | 0.09 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.08 | 0.02 | 0.15 | 0.01 |
| LOI | 0.95 | 0.81 | 0.77 | 0.62 | 0.72 | 0.50 | 0.15 | 0.74 | 1.91 | 1.39 |
| Total | 99.95 | 99.80 | 100.45 | 99.62 | 99.44 | 99.79 | 100.28 | 99.66 | 99.81 | 99.72 |
| K ₂ O + Na ₂ O | 7.56 | 7.11 | 8.58 | 8.97 | 8.54 | 8.62 | 8.39 | 8.75 | 6.77 | 8.49 |
| A/CNK | 1.09 | 1.12 | 1.13 | 1.04 | 1.12 | 1.17 | 1.05 | 1.15 | 0.99 | 1.09 |
| A/NK | 1.46 | 1.54 | 1.13 | 1.13 | 1.22 | 1.22 | 1.30 | 1.17 | 1.74 | 1.20 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.20 | 1.15 | 0.70 | 0.73 | 0.74 | 0.72 | 0.87 | 0.72 | 1.31 | 0.87 |
| (Na ₂ O + K ₂ O)/CaO | 3.89 | 3.53 | 214.50 | 16.31 | 16.11 | 35.92 | 5.53 | 79.55 | 1.70 | 13.22 |
| Ga/Al (×10 ⁴) | 2.41 | 2.61 | 2.36 | 1.93 | 2.33 | 2.41 | 2.07 | 2.41 | 2.20 | 2.51 |
| La | 15.01 | 15.16 | 33.37 | 41.62 | 37.26 | 39.80 | 26.80 | 32.67 | 23.79 | 33.08 |
| Ce | 30.16 | 32.86 | 68.17 | 96.54 | 80.38 | 83.97 | 52.27 | 72.60 | 50.29 | 65.86 |
| Pr | 4.04 | 4.12 | 9.15 | 12.30 | 10.26 | 10.87 | 6.42 | 8.52 | 6.40 | 8.07 |
| Nd | 14.92 | 15.42 | 29.99 | 45.06 | 35.17 | 35.95 | 20.97 | 30.19 | 24.41 | 28.83 |
| Sm | 2.85 | 2.72 | 5.33 | 8.83 | 6.47 | 6.78 | 3.63 | 5.63 | 4.65 | 5.28 |
| Eu | 0.69 | 0.62 | 0.27 | 0.46 | 0.36 | 0.37 | 0.49 | 0.38 | 1.11 | 0.41 |
| Gd | 2.01 | 1.90 | 3.41 | 6.99 | 4.89 | 4.79 | 2.58 | 4.04 | 4.01 | 4.30 |
| Tb | 0.28 | 0.27 | 0.58 | 1.14 | 0.79 | 0.84 | 0.41 | 0.65 | 0.60 | 0.69 |
| Dy | 1.41 | 1.37 | 3.40 | 6.92 | 4.78 | 4.75 | 2.32 | 3.96 | 3.59 | 4.13 |
| Ho | 0.24 | 0.25 | 0.68 | 1.38 | 0.96 | 0.94 | 0.49 | 0.78 | 0.72 | 0.82 |
| Er | 0.59 | 0.67 | 1.90 | 3.98 | 2.68 | 2.71 | 1.43 | 2.17 | 2.03 | 2.35 |
| Tm | 0.08 | 0.09 | 0.30 | 0.66 | 0.44 | 0.43 | 0.23 | 0.35 | 0.30 | 0.36 |
| Yb | 0.49 | 0.59 | 2.12 | 4.59 | 2.97 | 2.96 | 1.68 | 2.56 | 2.02 | 2.56 |
| Lu | 0.07 | 0.09 | 0.35 | 0.75 | 0.50 | 0.48 | 0.28 | 0.40 | 0.32 | 0.39 |
| ΣREE | 72.77 | 76.05 | 158.66 | 230.46 | 187.41 | 195.15 | 119.70 | 164.49 | 123.91 | 156.73 |
| LHfE/HREE | 13.09 | 13.54 | 11.49 | 7.76 | 9.43 | 9.94 | 11.76 | 10.07 | 8.15 | 9.08 |
| (La/Yb) _N | 22.20 | 18.53 | 11.29 | 6.50 | 9.01 | 9.66 | 11.44 | 9.17 | 8.44 | 9.25 |
| δEu | 0.83 | 0.79 | 0.18 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.46 | 0.23 | 0.77 | 0.25 |
| Co | 3.10 | 4.47 | 1.68 | 1.09 | 1.29 | 1.43 | 2.59 | 1.21 | 10.20 | 0.75 |
| Ga | 19.54 | 20.88 | 16.00 | 13.63 | 16.95 | 17.65 | 16.11 | 17.21 | 19.24 | 18.25 |
| Rb | 81.97 | 91.16 | 187.70 | 150.70 | 188.10 | 188.10 | 159.40 | 175.70 | 75.92 | 110.70 |
| Sr | 577.20 | 508.30 | 34.55 | 43.19 | 53.90 | 48.61 | 174.80 | 62.14 | 550.00 | 94.29 |
| Y | 6.50 | 7.43 | 17.92 | 22.31 | 25.55 | 25.42 | 13.74 | 22.09 | 19.76 | 22.05 |
| Zr | 111.00 | 124.20 | 170.70 | 190.00 | 235.60 | 240.70 | 191.60 | 225.00 | 221.20 | 198.70 |
| Nb | 3.74 | 4.81 | 8.49 | 10.93 | 9.46 | 9.50 | 8.36 | 9.55 | 29.58 | 10.05 |
| Hf | 3.01 | 3.36 | 4.74 | 9.56 | 6.70 | 6.65 | 4.74 | 5.99 | 6.12 | 5.77 |
| Ba | 921.80 | 606.50 | 237.80 | 403.60 | 383.20 | 354.20 | 761.30 | 411.50 | 911.20 | 1288.80 |
| Ta | 0.30 | 0.47 | 0.82 | 1.41 | 0.95 | 0.93 | 0.80 | 0.64 | 1.87 | 0.74 |
| Th | 5.33 | 7.30 | 14.94 | 29.93 | 22.21 | 19.95 | 15.03 | 16.85 | 6.04 | 9.83 |
| U | 0.58 | 1.25 | 2.80 | 4.68 | 2.91 | 2.14 | 2.80 | 3.73 | 1.51 | 2.17 |
| Ba/Rb | 11.25 | 6.65 | 1.27 | 2.68 | 2.04 | 1.88 | 4.78 | 2.34 | 12.00 | 11.64 |
| Rb/Sr | 0.14 | 0.18 | 5.43 | 3.49 | 3.49 | 3.87 | 0.91 | 2.83 | 0.14 | 1.17 |
| Sr/Y | 88.79 | 68.46 | 1.93 | 1.94 | 2.11 | 1.91 | 12.72 | 2.81 | 27.83 | 4.28 |
| Zr/Hf | 36.93 | 37.00 | 36.01 | 19.87 | 35.16 | 36.21 | 40.41 | 37.59 | 36.12 | 34.45 |
| Sm/Nd | 0.19 | 0.18 | 0.18 | 0.20 | 0.18 | 0.19 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.18 |
| Nb/Ta | 12.49 | 10.32 | 10.35 | 7.74 | 9.96 | 10.24 | 10.44 | 14.86 | 15.83 | 13.65 |
| Zr + Ce + Y + Nb | 151.40 | 169.29 | 265.28 | 319.78 | 350.99 | 359.59 | 265.97 | 329.24 | 320.83 | 296.66 |

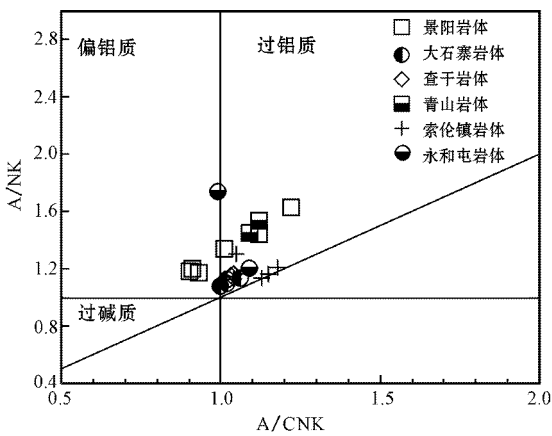


图 2 乌兰浩特地区花岗岩 A/NK - A/CNK 图解
Fig. 2 Plot of molar ratios A/NK versus A/CNK for Mesozoic granites in Wulanhaote region

3.05%~3.71%, 平均含量 3.52%, 相对富钾而贫钠, 并且铁、镁、钙、钛、磷的含量都很低, A/CNK 值为 1.00~1.06, 为弱过铝质, 属于高钾钙碱性系列。

青山岩体、索伦镇岩体和永和屯岩体以黑云母花岗岩闪长岩、黑云母碱长花岗岩和花岗斑岩为主, SiO₂ 含量在 71%~76%, 有 1 个样品含量为 63.71%, Al₂O₃ 含量为 11.8%~16.5%, A/CNK 主要为 0.99~1.10, 个别样品 A/CNK 值 > 1.10, 为准铝质-过铝质, 属于高钾钙碱性系列。按 Sr 含量 > 400 × 10⁻⁶ 为高 Sr 型花岗岩、Sr 含量 < 400 × 10⁻⁶ 为低 Sr 型花岗岩的划分标准, 本区青山岩体花岗岩类似于高 Sr 型, 索伦镇岩体花岗岩类似于低 Sr 型(图 4a), 然而永和屯岩体中 Sr 的含量与其他两岩体不一致, 它既不属于高 Sr 花岗岩, 也不属于低 Sr 花岗

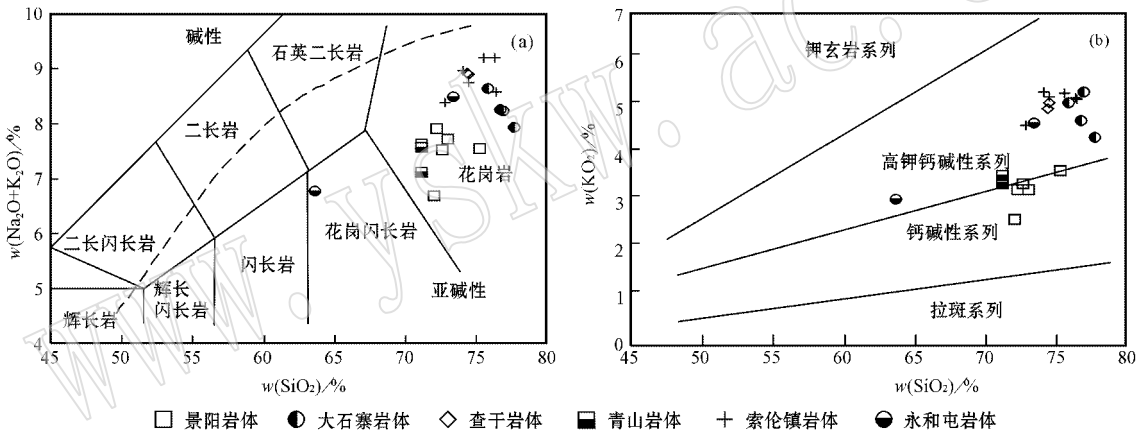


图 3 乌兰浩特地区花岗岩 TAS 和 K₂O - SiO₂ 图解

Fig. 3 TAS (a) and K₂O - SiO₂ (b) diagrams for Mesozoic granites in Wulanhaote region

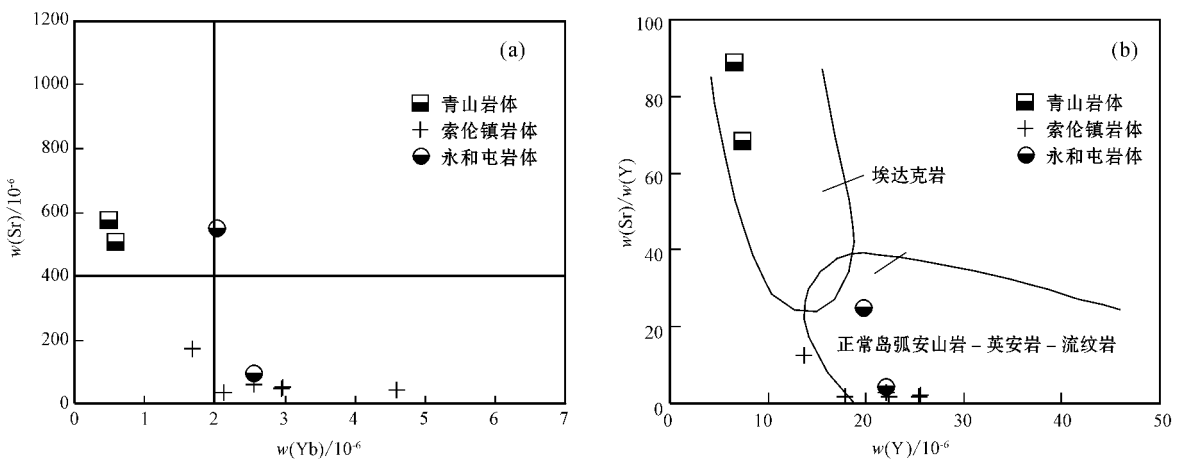


图 4 早白垩世 3 类岩体花岗岩岩石 Sr - Yb 和 Sr/Y - Y 图解

Fig. 4 Sr - Yb (a) and Sr/Y - Y (b) diagrams for Early Cretaceous granite in Wulanhaote region

岩,具有一定的特殊性,野外可见岩浆混合的迹象。

3.2 稀土及微量元素

查干岩体稀土元素含量高, $\Sigma\text{REE} = (257.9 \sim 60.3) \times 10^{-6}$, 较富 LREE (La/Yb)_N = 7.72~8.45, 具有明显的负 δEu 异常, 在稀土元素球粒陨石标准化图(图 5a)中, 呈右倾海鸥型; 微量元素 Zr ($322 \times 10^{-6} \sim 348 \times 10^{-6}$)、Nb ($18 \times 10^{-6} \sim 19 \times 10^{-6}$)、Ce ($102.9 \times 10^{-6} \sim 103.8 \times 10^{-6}$)、Sr ($49 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$) 和 Ba ($146 \times 10^{-6} \sim 162 \times 10^{-6}$) 含量高, 并且 $\text{Zr} > 250 \times 10^{-6}$, $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \times 10^{-6}$, 在微量元素原始地幔标准化图解(图 5b)中, Ba、Sr、Ti 及 Nb 和 Ta 明显亏损, 而富集 Rb、Th 和 Zr, 表现出 A 型花岗岩的典型地球化学特征。

景阳岩体稀土元素 $\Sigma\text{REE} = 104.3 \times 10^{-6} \sim 277.3 \times 10^{-6}$ (La/Yb)_N 大多为 6.34~7.93, 在稀土元素配分模式图中(图 5c), 轻稀土元素向右微倾, 轻重稀土元素分馏不明显, δEu 显示出弱的负异常。在微量元素的原始地幔标准化图解(图 5d)上, 明显富集大离子亲石元素(Rb、Th、K 等), 并亏损高场强元素(Nb、Ta、P 等)。

大石寨岩体稀土元素含量高, 轻重稀土元素分馏不明显, 有强烈的 δEu 负异常, 稀土元素配分曲线呈 V 字形(图 5c)。从稀土元素组成和分布特征看, 大石寨岩体具有与千里山、巴尔哲和东清花岗岩类似的 M 型稀土元素四分组效应(图 6)。相对亏损 Ba、Sr、Ti、P, 而富集 Rb 和 Y(图 5d)。岩体 Rb 含量高, Sr、Ba 含量低, Ba/Rb 比值较低(0.03), Rb/Sr 比值较高(44.1), 表明岩浆经过强烈演化和分异。

青山岩体富集 LREE, 亏损 HREE (La/Yb)_N = 18.53~22.20, 呈右倾的稀土元素分配模式, δEu 负异常不明显(图 5e), 富集 Sr、K、Zr、Hf, 亏损 Nb、Ta、P、Ti(图 5f)。索伦镇岩体稀土总量较低, $\Sigma\text{REE} = (120.0 \sim 231.2) \times 10^{-6}$, 富集 LREE, 亏损 HREE, (La/Yb)_N = 9.06~15.94, 呈右倾的稀土元素分配模式, 明显 δEu 负异常(图 5g), 富集 Th、K、Zr、Hf, 亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、P、Ti(图 5h)。青山岩体与索伦镇岩体的稀土元素特征和部分微量元素的亏损和富集程度均表现出明显的差异。永和屯岩体中的 1 个样品(G0206-1)富集 LREE, 亏损 HREE, 呈右倾型稀土元素分配模式, 具有弱的 δEu 负异常(图 5g), 富集 Ba、Sr、K、Zr、Hf, 亏损 P、Ti(图 5h); 另 1 个样品(G0206-2)具有和索伦镇岩体类似的稀土元素分配模式, 具有明显的 Eu 负异常, 富集 Ba、K、Zr、Hf, 亏

损 Sr、Nb、Ta、P、Ti(图 5h)。

4 全岩的 Sr-Nd 和锆石的 Hf 同位素特征

4.1 全岩的 Sr-Nd 同位素特征

花岗岩中全岩的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2。由表 2 可知, 查干岩体 I_{Sr} 值为 0.701 2~0.702 4, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 +5.51~+5.93, 二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 521~555 Ma; 景阳岩体 I_{Sr} 值为 0.702 8~0.703 8, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 +4.55~+5.32, 二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 521~588 Ma; 大石寨岩体 I_{Sr} 值较高, 为 0.715 6~0.745 3, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 +5.69~+6.02, 二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 463~482 Ma, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值为 0.04~0.06, 数值不合理; 青山岩体 I_{Sr} 值为 0.704 5~0.704 7, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 +2.73~+2.88, 二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 692~704 Ma; 索伦镇岩体 I_{Sr} 值为 0.701 9~0.704 9, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 +3.12~+3.40, 二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 641~665 Ma; 永和屯岩体 I_{Sr} 值为 0.704 4~0.705 0, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 为 +2.11~+2.89, 二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 685~749 Ma。由此可见, 早白垩世花岗岩具有相似的 Sr-Nd 同位素特征。

4.2 锆石的 Hf 同位素特征

锆石的 Hf 同位素测试结果见表 3 和图 7, 各岩体 Hf 同位素特征分述如下。

(1) 查干岩体 样品 G02017-1 分析了 19 个点, 其中 18 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 906~0.283 064, 加权平均值为 $0.282 974 \pm 0.000 021$ (2σ , $n=18$) ϵHf (230 Ma) 范围为 +6.62~+14.75, 加权平均值为 +11.27 \pm 0.86。二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 变化范围 318~748 Ma ($n=18$), 平均为 536 Ma。样品 G02017-2 分析了 20 个点, 20 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围在 0.282 911~0.282 983, 加权平均值为 $0.282 957 \pm 0.000 008$ (2σ , $n=20$), ϵHf (230 Ma) 范围在 +9.69~+12.27, 加权平均值为 +11.29 \pm 0.30。二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 变化范围 493~631 Ma ($n=20$), 平均为 540 Ma(图 7a、7b)。

(2) 景阳岩体 样品 G02013-4 共分析了 20 个点, 其中 17 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围在 0.282 934~0.283 032, 加权平均值为 $0.282 990 \pm 0.000 012$ (2σ , $n=17$) ϵHf (175 Ma) 范围在 +9.37~+12.74, 加权平均值为 +11.31 \pm 0.42。二阶段 Hf 模式年龄

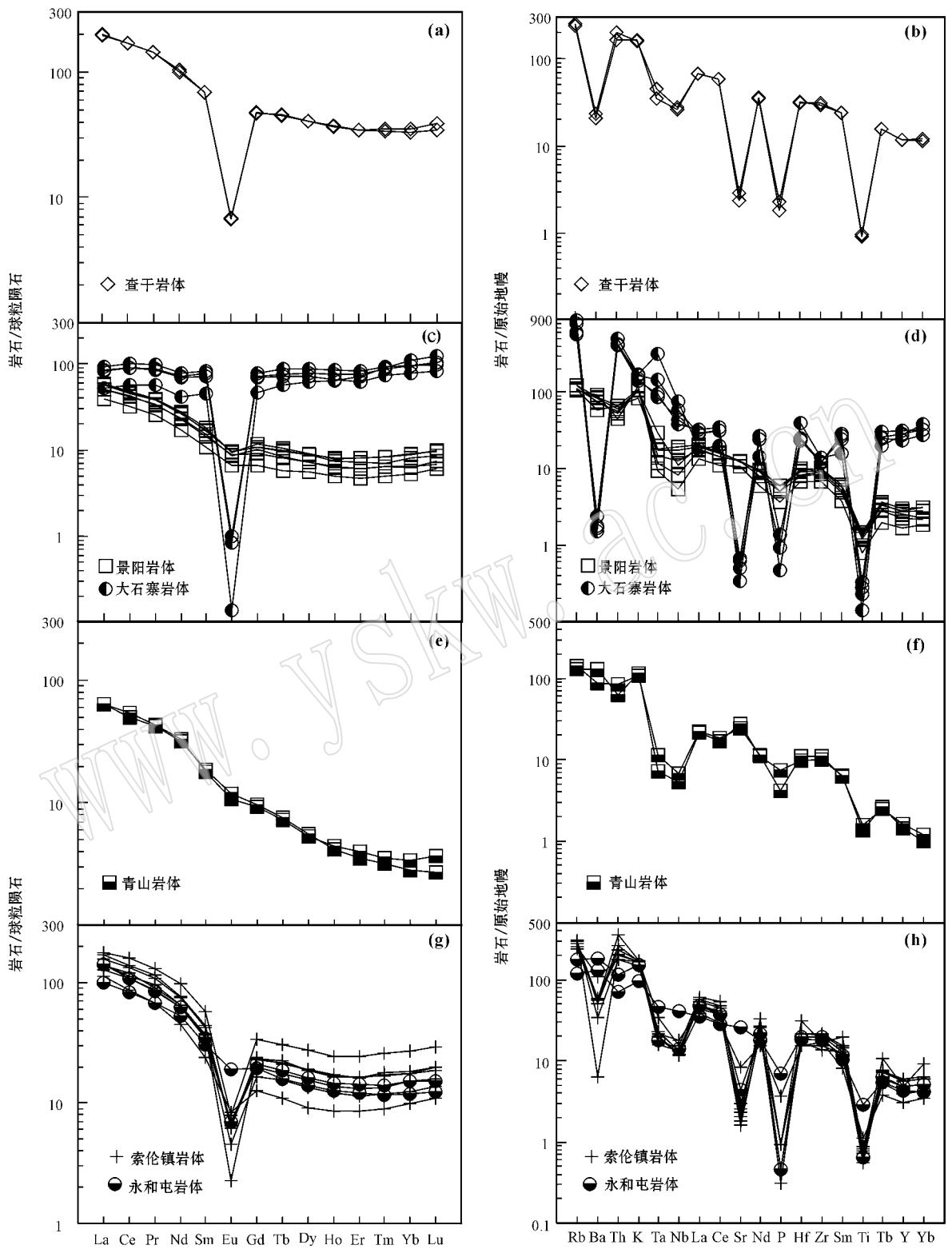


图5 乌兰浩特花岗岩的稀土、微量元素图解

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagrams (a, c, e, g) and primitive mantle-normalized incompatible element spidergrams (b, d, f, h) of Wulanhaote granites

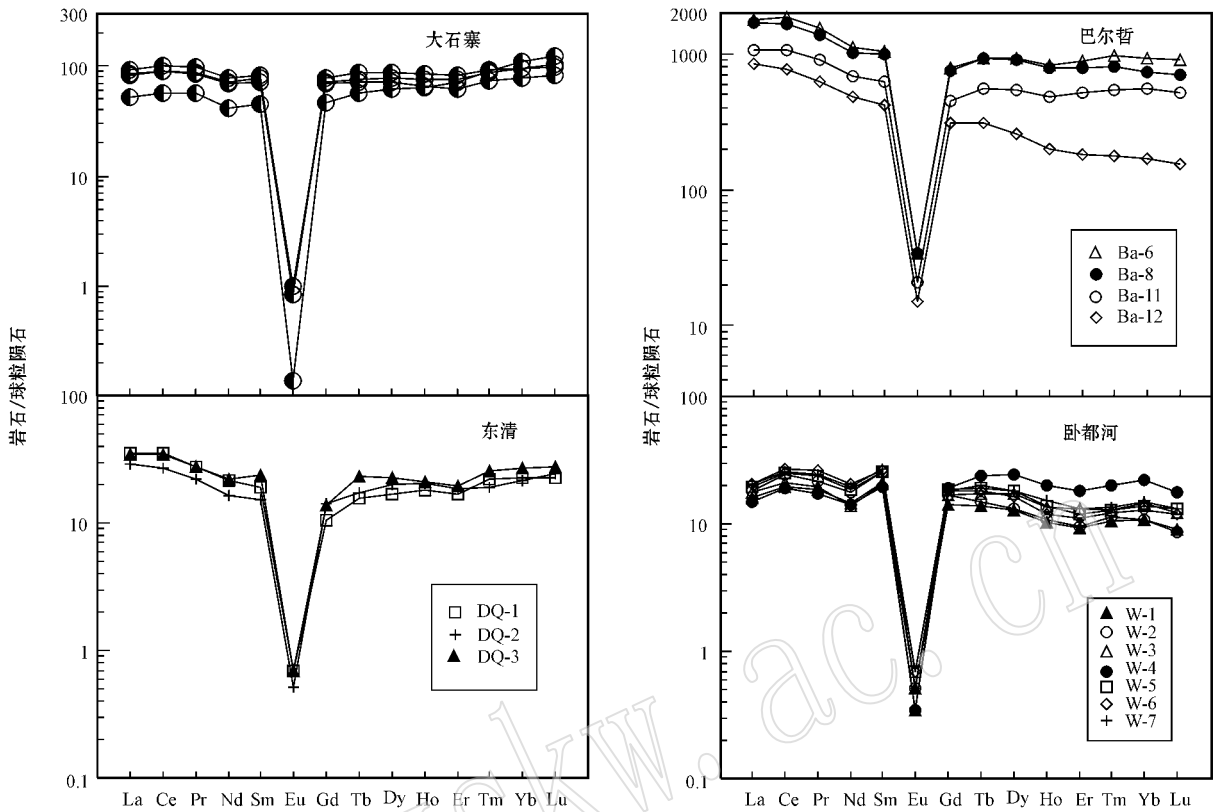


图6 乌兰浩特地区大石寨岩体和已知具有稀土元素四分组效应岩体的对比 (据 Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004)
 Fig. 6 Dashizhai granites in comparison with the known rock with REE tetrad effect (after Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004)

表2 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 2 Sr-Nd isotopic compositions of Mesozoic granite in Wulanhaote region of central Da Hinggan Mountains

| 样品号 | $w_B/10^{-6}$ | | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | 2σ | I_{sr} | $w_B/10^{-6}$ | | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | 2σ | t/Ma | $\epsilon\text{Nd}(t)$ | $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ |
|---------|---------------|-------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------------|---------------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|---------------|------------------------|---------------------------|
| | Rb | Sr | | | | | Sm | Nd | | | | | | |
| 查干岩体 | | | | | | | | | | | | | | |
| G0217-1 | 141.8 | 49.06 | 8.384 | 0.729 840 | 14 | 0.702 4 | 10.588 | 47.251 | 0.135 5 | 0.512 828 | 8 | 230 | 5.51 | -0.31 |
| G0217-2 | 148.8 | 57.47 | 7.506 | 0.725 763 | 12 | 0.701 2 | 10.026 | 45.516 | 0.133 2 | 0.512 846 | 8 | 230 | 5.93 | -0.32 |
| 景阳岩体 | | | | | | | | | | | | | | |
| G0213-2 | 67.34 | 257.8 | 0.756 | 0.705 332 | 13 | 0.703 5 | 2.283 | 11.428 | 0.120 8 | 0.512 826 | 10 | 175 | 5.37 | -0.39 |
| G0213-4 | 89.3 | 245.7 | 1.052 | 0.705 401 | 14 | 0.702 8 | 2.065 | 10.21 | 0.123 3 | 0.512 787 | 9 | 175 | 4.55 | -0.37 |
| G0213-5 | 64.43 | 245.3 | 0.761 | 0.705 667 | 11 | 0.703 8 | 2.495 | 12.342 | 0.122 3 | 0.512 786 | 10 | 175 | 4.55 | -0.38 |
| 大石寨岩体 | | | | | | | | | | | | | | |
| G0211-2 | 501.1 | 7 | 218.300 | 1.258 800 | 3 | 0.7156 | 10.352 | 30.697 | 0.204 0 | 0.512 955 | 8 | 175 | 6.02 | 0.04 |
| G0211-3 | 349.6 | 14.5 | 73.550 | 0.928 319 | 14 | 0.745 3 | 12.143 | 35.105 | 0.209 2 | 0.512 944 | 8 | 175 | 5.69 | 0.06 |
| 青山岩体 | | | | | | | | | | | | | | |
| G0208-1 | 81.97 | 577.2 | 0.411 | 0.705 251 | 10 | 0.704 5 | 2.85 | 14.92 | 0.115 5 | 0.512 706 | 11 | 135 | 2.73 | -0.41 |
| G0208-3 | 91.16 | 508.3 | 0.519 | 0.705 670 | 13 | 0.704 7 | 2.723 | 15.42 | 0.106 7 | 0.512 706 | 12 | 135 | 2.88 | -0.46 |
| 索伦镇岩体 | | | | | | | | | | | | | | |
| G0215-1 | 183.9 | 31.86 | 16.740 | 0.731 600 | 14 | 0.701 9 | 5.228 | 29.348 | 0.107 8 | 0.512 725 | 8 | 125 | 3.12 | -0.45 |
| G0215-4 | 172.9 | 45.19 | 11.090 | 0.723 744 | 13 | 0.704 0 | 6.51 | 35.141 | 0.112 0 | 0.512 743 | 8 | 125 | 3.40 | -0.43 |
| G0215-5 | 148.4 | 193.4 | 2.221 | 0.708 803 | 16 | 0.704 9 | 3.514 | 20.388 | 0.104 2 | 0.512 736 | 8 | 125 | 3.39 | -0.47 |
| 永和屯岩体 | | | | | | | | | | | | | | |
| G0206-1 | 75.92 | 550 | 0.399 | 0.705 707 | 14 | 0.705 0 | 4.648 | 24.41 | 0.115 1 | 0.512 718 | 13 | 128 | 2.89 | -0.41 |
| G0206-2 | 110.7 | 94.29 | 3.398 | 0.710 589 | 10 | 0.704 4 | 5.277 | 28.83 | 0.110 6 | 0.512 674 | 14 | 128 | 2.11 | -0.44 |

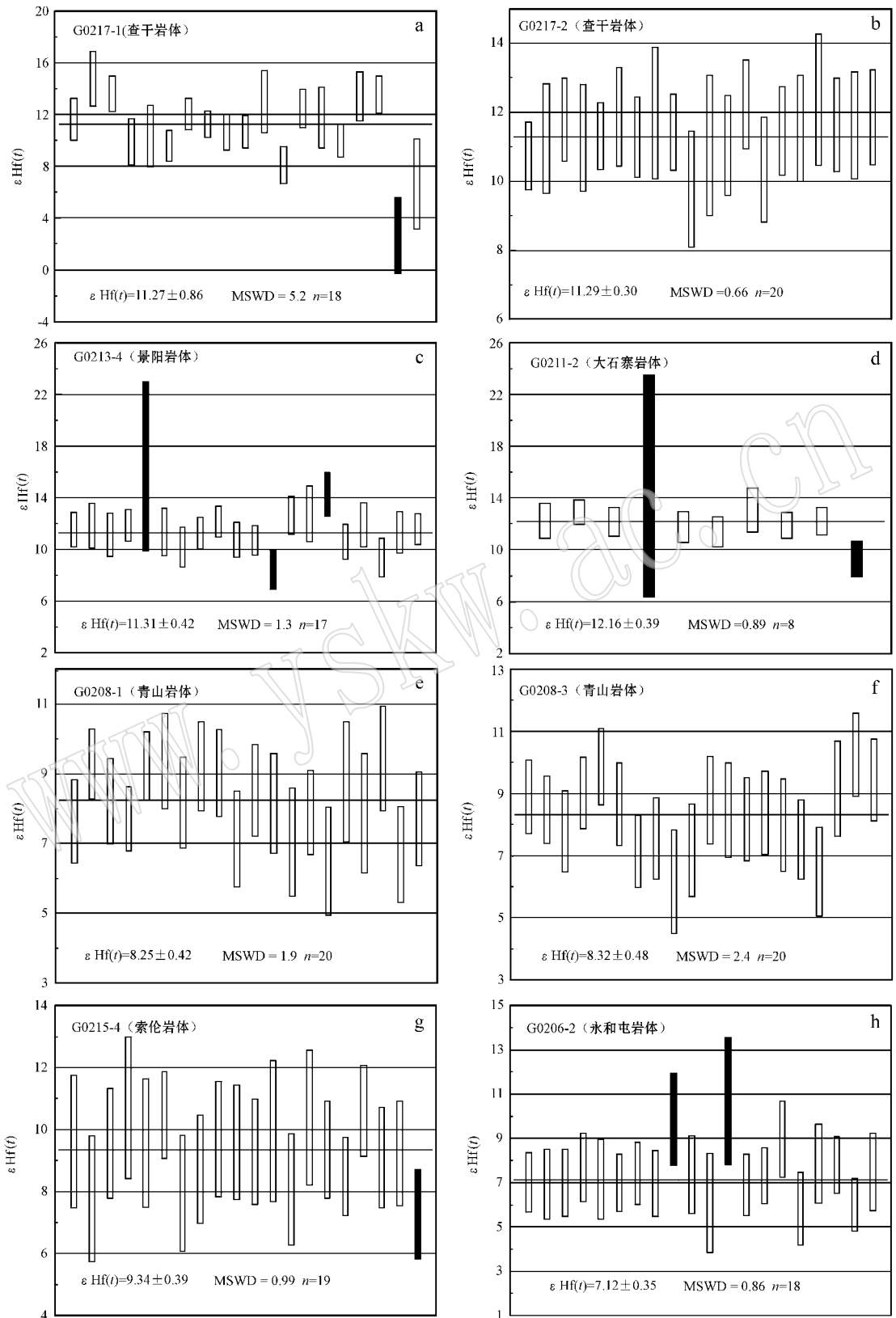


图7 乌兰浩特花岗岩体的 Hf 同位素组成

Fig. 7 Zircon Hf isotopic features of Mesozoic granites in Wulanhaote region

图中实心柱为用 ISOPIOT (3.0) 加权平均时未参加统计的数据

Black solid cylinder is the ISOPIOT (3.0) calculated sample of weighted average rejected point

表 3 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic granites in Wulanhaote region of central Da Hinggan Mountains

| 测点号 | t/Ma | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}_{(\text{corr})}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{(\text{corr})}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(\text{corr})}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma_m$ | $\epsilon\text{Hf}(t)$ | 2σ | $t_{\text{DMIC(Hf)}}/\text{Ma}$ | $t_{\text{DMIC(Hf)}}/\text{Ma}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|---------------|---------------|---|---|---|-----------------------------------|-------------|------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| G0217-1(查干岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 230 | 0.313 575 | 0.009 355 | 0.282 996 | 0.282 998 | 0.000 023 | 11.63 | 0.8 | 463 | 519 | -0.72 |
| 2 | 230 | 0.144 696 | 0.004 217 | 0.283 062 | 0.283 064 | 0.000 030 | 14.75 | 1.1 | 291 | 319 | -0.87 |
| 3 | 230 | 0.117 082 | 0.003 778 | 0.283 028 | 0.283 030 | 0.000 019 | 13.59 | 0.7 | 340 | 393 | -0.89 |
| 4 | 230 | 0.394 671 | 0.011 944 | 0.282 958 | 0.282 960 | 0.000 025 | 9.87 | 0.9 | 585 | 632 | -0.64 |
| 5 | 230 | 0.106 000 | 0.003 549 | 0.282 934 | 0.282 936 | 0.000 033 | 10.33 | 1.2 | 480 | 602 | -0.89 |
| 6 | 230 | 0.162 343 | 0.004 903 | 0.282 919 | 0.282 921 | 0.000 017 | 9.58 | 0.6 | 524 | 650 | -0.85 |
| 7 | 230 | 0.148 320 | 0.004 355 | 0.282 986 | 0.282 988 | 0.000 017 | 12.03 | 0.6 | 411 | 493 | -0.87 |
| 8 | 230 | 0.153 160 | 0.004 565 | 0.282 965 | 0.282 967 | 0.000 015 | 11.24 | 0.5 | 447 | 544 | -0.86 |
| 9 | 230 | 0.171 782 | 0.005 561 | 0.282 950 | 0.282 952 | 0.000 019 | 10.57 | 0.7 | 484 | 587 | -0.83 |
| 10 | 230 | 0.144 828 | 0.004 429 | 0.282 947 | 0.282 949 | 0.000 018 | 10.63 | 0.6 | 473 | 583 | -0.87 |
| 11 | 230 | 0.444 117 | 0.013 307 | 0.283 052 | 0.283 054 | 0.000 034 | 12.99 | 1.2 | 418 | 432 | -0.60 |
| 12 | 230 | 0.405 159 | 0.011 717 | 0.282 905 | 0.282 907 | 0.000 021 | 8.05 | 0.7 | 684 | 748 | -0.65 |
| 13 | 230 | 0.148 376 | 0.004 906 | 0.283 000 | 0.283 002 | 0.000 021 | 12.46 | 0.7 | 395 | 466 | -0.85 |
| 14 | 230 | 0.223 604 | 0.006 821 | 0.282 988 | 0.282 990 | 0.000 033 | 11.73 | 1.2 | 439 | 512 | -0.79 |
| 15 | 230 | 0.231 433 | 0.006 859 | 0.282 938 | 0.282 940 | 0.000 018 | 9.97 | 0.6 | 524 | 626 | -0.79 |
| 16 | 230 | 0.118 126 | 0.003 202 | 0.283 019 | 0.283 021 | 0.000 027 | 13.38 | 0.9 | 347 | 406 | -0.90 |
| 17 | 230 | 0.121 943 | 0.003 732 | 0.283 025 | 0.283 027 | 0.000 020 | 13.52 | 0.7 | 343 | 397 | -0.89 |
| 18 | 230 | 0.524 076 | 0.015 467 | 0.282 767 | 0.282 769 | 0.000 042 | 2.60 | 1.5 | 1 112 | 1 095 | -0.53 |
| 19 | 125 | 0.369 610 | 0.010 325 | 0.282 904 | 0.282 906 | 0.000 049 | 6.63 | 1.7 | 653 | 758 | -0.69 |
| G0217-2(查干岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 230 | 0.054 302 | 0.001 922 | 0.282 955 | 0.282 938 | 0.000 014 | 10.64 | 0.5 | 456 | 582 | -0.94 |
| 2 | 230 | 0.130 308 | 0.004 512 | 0.282 981 | 0.282 964 | 0.000 022 | 11.16 | 0.8 | 451 | 49 | -0.86 |
| 3 | 230 | 0.054 967 | 0.001 910 | 0.282 985 | 0.282 968 | 0.000 017 | 11.69 | 0.6 | 413 | 515 | -0.94 |
| 4 | 230 | 0.011 425 | 0.000 485 | 0.282 964 | 0.282 947 | 0.000 022 | 11.17 | 0.8 | 427 | 548 | -0.99 |
| 5 | 230 | 0.019 342 | 0.000 717 | 0.282 967 | 0.282 950 | 0.000 014 | 11.23 | 0.5 | 426 | 544 | -0.98 |
| 6 | 230 | 0.128 913 | 0.004 195 | 0.282 997 | 0.282 980 | 0.000 020 | 11.78 | 0.7 | 421 | 509 | -0.87 |
| 7 | 230 | 0.071 581 | 0.002 407 | 0.282 973 | 0.282 956 | 0.000 016 | 11.19 | 0.6 | 436 | 547 | -0.93 |
| 8 | 230 | 0.025 974 | 0.001 020 | 0.282 987 | 0.282 970 | 0.000 027 | 11.89 | 1.0 | 401 | 502 | -0.97 |
| 9 | 230 | 0.033 312 | 0.001 158 | 0.282 972 | 0.282 955 | 0.000 015 | 11.33 | 0.5 | 424 | 538 | -0.97 |
| 10 | 230 | 0.060 663 | 0.001 984 | 0.282 929 | 0.282 912 | 0.000 024 | 9.69 | 0.8 | 496 | 643 | -0.94 |
| 11 | 230 | 0.048 836 | 0.001 791 | 0.282 963 | 0.282 946 | 0.000 029 | 10.95 | 1.0 | 443 | 563 | -0.95 |
| 12 | 230 | 0.053 314 | 0.001 796 | 0.282 964 | 0.282 947 | 0.000 021 | 10.95 | 0.7 | 443 | 562 | -0.95 |
| 13 | 230 | 0.050 666 | 0.001 705 | 0.282 997 | 0.282 980 | 0.000 018 | 12.14 | 0.6 | 394 | 486 | -0.95 |
| 14 | 230 | 0.039 109 | 0.001 369 | 0.282 942 | 0.282 925 | 0.000 021 | 10.26 | 0.8 | 469 | 607 | -0.96 |
| 15 | 230 | 0.070 997 | 0.002 279 | 0.282 977 | 0.282 960 | 0.000 018 | 11.37 | 0.6 | 428 | 536 | -0.93 |
| 16 | 230 | 0.071 469 | 0.002 305 | 0.282 980 | 0.282 963 | 0.000 022 | 11.44 | 0.8 | 425 | 531 | -0.93 |
| 17 | 230 | 0.044 808 | 0.001 663 | 0.283 000 | 0.282 983 | 0.000 027 | 12.28 | 0.9 | 388 | 477 | -0.95 |
| 18 | 230 | 0.065 160 | 0.002 133 | 0.282 982 | 0.282 965 | 0.000 019 | 11.55 | 0.7 | 420 | 524 | -0.94 |
| 19 | 230 | 0.047 912 | 0.001 829 | 0.282 980 | 0.282 963 | 0.000 022 | 11.54 | 0.8 | 419 | 525 | -0.94 |
| 20 | 230 | 0.073 003 | 0.002 441 | 0.282 989 | 0.282 972 | 0.000 019 | 11.77 | 0.7 | 412 | 510 | -0.93 |
| G0213-4(景阳岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 175 | 0.037 572 | 0.001 375 | 0.282 992 | 0.282 994 | 0.000 018 | 11.52 | 0.7 | 370 | 483 | -0.96 |
| 2 | 175 | 0.075 370 | 0.002 828 | 0.283 004 | 0.283 006 | 0.000 025 | 11.81 | 0.9 | 366 | 465 | -0.91 |
| 3 | 175 | 0.044 638 | 0.001 580 | 0.282 981 | 0.282 983 | 0.000 024 | 11.12 | 0.8 | 387 | 509 | -0.95 |
| 4 | 175 | 0.055 432 | 0.001 886 | 0.283 003 | 0.283 005 | 0.000 018 | 11.86 | 0.6 | 359 | 461 | -0.94 |
| 5 | 175 | 0.049 089 | 0.001 883 | 0.283 132 | 0.283 134 | 0.000 092 | 16.42 | 3.3 | 170 | 168 | -0.94 |
| 6 | 175 | 0.040 319 | 0.001 584 | 0.282 987 | 0.282 989 | 0.000 026 | 11.34 | 0.9 | 379 | 495 | -0.95 |
| 7 | 175 | 0.042 908 | 0.001 617 | 0.282 954 | 0.282 956 | 0.000 022 | 10.17 | 0.8 | 427 | 570 | -0.95 |
| 8 | 175 | 0.075 887 | 0.002 417 | 0.282 988 | 0.282 990 | 0.000 017 | 11.27 | 0.6 | 386 | 499 | -0.93 |
| 9 | 175 | 0.049 024 | 0.001 739 | 0.283 011 | 0.283 013 | 0.000 017 | 12.16 | 0.6 | 346 | 442 | -0.95 |

续表 3-1
Continued Table 3-1

| 测点号 | t/Ma | $\frac{^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}$ | $2\sigma_m$ | $\epsilon\text{Hf}(t)$ | 2σ | $t_{\text{DMX Hf}}/\text{Ma}$ | $t_{\text{DMX Lu}}/\text{Ma}$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ | |
|----------------|---------------|---|---|---|-------------|------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------|
| G0213-4(景阳岩体) | | | | | | | | | | | |
| 10 | 175 | 0.074 766 | 0.002 643 | 0.282 974 | 0.282 976 | 0.000 019 | 10.76 | 0.7 | 409 | 532 | -0.92 |
| 11 | 175 | 0.068 055 | 0.002 390 | 0.282 972 | 0.282 974 | 0.000 016 | 10.71 | 0.6 | 410 | 535 | -0.93 |
| 12 | 175 | 0.053 781 | 0.001 928 | 0.282 906 | 0.282 908 | 0.000 022 | 8.44 | 0.8 | 500 | 681 | -0.94 |
| 13 | 175 | 0.065 044 | 0.002 327 | 0.283 027 | 0.283 029 | 0.000 021 | 12.65 | 0.7 | 328 | 411 | -0.93 |
| 14 | 175 | 0.064 179 | 0.002 543 | 0.283 030 | 0.283 032 | 0.000 031 | 12.73 | 1.1 | 326 | 406 | -0.92 |
| 15 | 175 | 0.057 206 | 0.002 001 | 0.283 071 | 0.283 073 | 0.000 024 | 14.27 | 0.8 | 260 | 307 | -0.94 |
| 16 | 175 | 0.063 745 | 0.002 326 | 0.282 968 | 0.282 970 | 0.000 019 | 10.56 | 0.7 | 415 | 545 | -0.93 |
| 17 | 175 | 0.066 206 | 0.002 463 | 0.283 006 | 0.283 008 | 0.000 024 | 11.91 | 0.9 | 360 | 458 | -0.93 |
| 18 | 175 | 0.045 539 | 0.001 684 | 0.282 932 | 0.282 934 | 0.000 021 | 9.37 | 0.7 | 460 | 621 | -0.95 |
| 19 | 175 | 0.029 665 | 0.001 200 | 0.282 985 | 0.282 987 | 0.000 022 | 11.30 | 0.8 | 378 | 497 | -0.96 |
| 20 | 175 | 0.046 365 | 0.001 666 | 0.282 994 | 0.282 996 | 0.000 017 | 11.58 | 0.6 | 369 | 479 | -0.95 |
| G0211-2(大石寨岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 175 | 0.189 667 | 0.005 925 | 0.282 993 | 0.283 029 | 0.000 019 | 12.24 | 0.7 | 364 | 437 | -0.82 |
| 2 | 175 | 0.086 138 | 0.002 867 | 0.283 001 | 0.283 037 | 0.000 013 | 12.88 | 0.5 | 321 | 396 | -0.91 |
| 3 | 175 | 0.185 491 | 0.005 853 | 0.282 989 | 0.283 025 | 0.000 016 | 12.11 | 0.6 | 370 | 446 | -0.82 |
| 4 | 175 | 0.135 013 | 0.003 991 | 0.283 062 | 0.283 098 | 0.000 121 | 14.90 | 4.3 | 237 | 266 | -0.88 |
| 5 | 175 | 0.124 076 | 0.004 033 | 0.282 972 | 0.283 008 | 0.000 017 | 11.72 | 0.6 | 376 | 470 | -0.88 |
| 6 | 175 | 0.102 546 | 0.003 604 | 0.282 960 | 0.282 997 | 0.000 016 | 11.37 | 0.6 | 389 | 493 | -0.89 |
| 7 | 175 | 0.061 199 | 0.002 140 | 0.283 003 | 0.283 039 | 0.000 024 | 13.05 | 0.9 | 310 | 385 | -0.94 |
| 8 | 175 | 0.118 821 | 0.004 204 | 0.282 977 | 0.283 013 | 0.000 014 | 11.87 | 0.5 | 371 | 461 | -0.87 |
| 9 | 175 | 0.101 437 | 0.003 559 | 0.282 983 | 0.283 019 | 0.000 015 | 12.18 | 0.5 | 354 | 441 | -0.89 |
| 10 | 175 | 0.171 454 | 0.005 443 | 0.282 907 | 0.282 944 | 0.000 020 | 9.28 | 0.7 | 496 | 627 | -0.84 |
| G0208-1(青山岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 135 | 0.02 3142 | 0.000 963 | 0.282 904 | 0.282 906 | 0.000 017 | 7.63 | 0.6 | 490 | 702 | -0.97 |
| 2 | 135 | 0.015 406 | 0.000 644 | 0.282 950 | 0.282 952 | 0.000 014 | 9.28 | 0.5 | 421 | 596 | -0.98 |
| 3 | 135 | 0.028 832 | 0.001 124 | 0.282 921 | 0.282 923 | 0.000 017 | 8.20 | 0.6 | 468 | 665 | -0.97 |
| 4 | 135 | 0.015 610 | 0.000 623 | 0.282 905 | 0.282 907 | 0.000 013 | 7.69 | 0.5 | 484 | 698 | -0.98 |
| 5 | 135 | 0.017 376 | 0.000 726 | 0.282 949 | 0.282 951 | 0.000 014 | 9.22 | 0.5 | 424 | 600 | -0.98 |
| 6 | 135 | 0.009 871 | 0.000 358 | 0.282 951 | 0.282 953 | 0.000 019 | 9.34 | 0.7 | 416 | 592 | -0.99 |
| 7 | 135 | 0.021 711 | 0.000 859 | 0.282 919 | 0.282 921 | 0.000 018 | 8.17 | 0.6 | 467 | 667 | -0.97 |
| 8 | 135 | 0.020 607 | 0.000 868 | 0.282 948 | 0.282 950 | 0.000 018 | 9.20 | 0.6 | 426 | 601 | -0.97 |
| 9 | 135 | 0.015 449 | 0.000 617 | 0.282 943 | 0.282 945 | 0.000 018 | 9.01 | 0.6 | 432 | 613 | -0.98 |
| 10 | 135 | 0.018 787 | 0.000 766 | 0.282 890 | 0.282 892 | 0.000 019 | 7.12 | 0.7 | 508 | 734 | -0.98 |
| 11 | 135 | 0.017 367 | 0.000 681 | 0.282 929 | 0.282 931 | 0.000 019 | 8.53 | 0.7 | 451 | 644 | -0.98 |
| 12 | 135 | 0.023 975 | 0.000 973 | 0.282 919 | 0.282 921 | 0.000 020 | 8.14 | 0.7 | 470 | 669 | -0.97 |
| 13 | 135 | 0.023 016 | 0.000 842 | 0.282 887 | 0.282 889 | 0.000 022 | 7.02 | 0.8 | 513 | 741 | -0.97 |
| 14 | 135 | 0.019 384 | 0.000 733 | 0.282 911 | 0.282 913 | 0.000 017 | 7.88 | 0.6 | 478 | 686 | -0.98 |
| 15 | 135 | 0.017 495 | 0.000 562 | 0.282 871 | 0.282 873 | 0.000 022 | 6.48 | 0.8 | 532 | 776 | -0.98 |
| 16 | 135 | 0.023 210 | 0.000 824 | 0.282 936 | 0.282 938 | 0.000 024 | 8.76 | 0.9 | 444 | 630 | -0.98 |
| 17 | 135 | 0.034 290 | 0.001 031 | 0.282 911 | 0.282 913 | 0.000 024 | 7.86 | 0.9 | 481 | 687 | -0.97 |
| 18 | 135 | 0.024 445 | 0.000 757 | 0.282 955 | 0.282 957 | 0.000 021 | 9.43 | 0.8 | 416 | 587 | -0.98 |
| 19 | 135 | 0.022 353 | 0.000 726 | 0.282 877 | 0.282 879 | 0.000 019 | 6.67 | 0.7 | 526 | 763 | -0.98 |
| 20 | 135 | 0.009 891 | 0.000 293 | 0.282 905 | 0.282 907 | 0.000 019 | 7.70 | 0.7 | 481 | 697 | -0.99 |
| G0208-2(青山岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 135 | 0.023 497 | 0.000 863 | 0.282 939 | 0.282 941 | 0.000 017 | 8.88 | 0.6 | 439 | 622 | -0.97 |
| 2 | 135 | 0.021 247 | 0.000 836 | 0.282 928 | 0.282 930 | 0.000 015 | 8.47 | 0.5 | 455 | 648 | -0.97 |
| 3 | 135 | 0.025 877 | 0.001 038 | 0.282 909 | 0.282 911 | 0.000 018 | 7.77 | 0.7 | 485 | 693 | -0.97 |
| 4 | 135 | 0.020 084 | 0.000 747 | 0.282 943 | 0.282 945 | 0.000 016 | 9.01 | 0.6 | 433 | 614 | -0.98 |
| 5 | 135 | 0.013 396 | 0.000 492 | 0.282 966 | 0.282 968 | 0.000 017 | 9.85 | 0.6 | 397 | 559 | -0.99 |
| 6 | 135 | 0.024 741 | 0.000 836 | 0.282 933 | 0.282 935 | 0.000 019 | 8.64 | 0.7 | 448 | 637 | -0.97 |
| 7 | 135 | 0.019 826 | 0.000 743 | 0.282 890 | 0.282 892 | 0.000 016 | 7.14 | 0.6 | 507 | 733 | -0.98 |
| 8 | 135 | 0.019 845 | 0.000 777 | 0.282 901 | 0.282 903 | 0.000 018 | 7.54 | 0.7 | 492 | 707 | -0.98 |
| 9 | 135 | 0.019 861 | 0.000 777 | 0.282 862 | 0.282 864 | 0.000 024 | 6.15 | 0.8 | 547 | 797 | -0.98 |

续表 3-2
Continued Table 3-2

| 测点号 | t/Ma | $\frac{^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}$ | $\frac{^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}$ | $\frac{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr}}}{^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}}$ | $2\sigma_m$ | $\epsilon\text{Hf}(t)$ | 2σ | $t_{\text{DM}(Hf)}/\text{Ma}$ | $t_{\text{DM}(Hf)}/\text{Ma}$ | $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ | |
|----------------|---------------|---|---|---|-------------|------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------|
| G0208-3(青山岩体) | | | | | | | | | | | |
| 10 | 135 | 0.020 518 | 0.000 699 | 0.282 890 | 0.282 892 | 0.000 021 | 7.16 | 0.7 | 506 | 732 | -0.98 |
| 11 | 135 | 0.028 181 | 0.000 914 | 0.282 936 | 0.282 938 | 0.000 020 | 8.77 | 0.7 | 444 | 629 | -0.97 |
| 12 | 135 | 0.017 985 | 0.000 582 | 0.282 927 | 0.282 929 | 0.000 021 | 8.46 | 0.8 | 453 | 649 | -0.98 |
| 13 | 135 | 0.028 881 | 0.000 948 | 0.282 919 | 0.282 921 | 0.000 019 | 8.16 | 0.7 | 469 | 668 | -0.97 |
| 14 | 135 | 0.020 711 | 0.000 745 | 0.282 924 | 0.282 926 | 0.000 019 | 8.35 | 0.7 | 459 | 656 | -0.98 |
| 15 | 135 | 0.022 664 | 0.000 727 | 0.282 913 | 0.282 915 | 0.000 021 | 7.97 | 0.7 | 474 | 680 | -0.98 |
| 16 | 135 | 0.019 203 | 0.000 686 | 0.282 900 | 0.282 902 | 0.000 018 | 7.50 | 0.6 | 492 | 710 | -0.98 |
| 17 | 135 | 0.025 330 | 0.000 803 | 0.282 994 | 0.282 996 | 0.000 021 | 6.47 | 0.7 | 361 | 776 | -0.98 |
| 18 | 135 | 0.021 417 | 0.000 694 | 0.282 951 | 0.282 953 | 0.000 023 | 9.15 | 0.8 | 421 | 604 | -0.98 |
| 19 | 135 | 0.065 777 | 0.001 803 | 0.282 957 | 0.282 959 | 0.000 024 | 10.23 | 0.8 | 424 | 535 | -0.95 |
| 20 | 135 | 0.021 322 | 0.000 771 | 0.282 955 | 0.282 957 | 0.000 019 | 9.42 | 0.7 | 416 | 587 | -0.98 |
| G0215-4(索伦镇岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 125 | 0.060 119 | 0.001 689 | 0.282 968 | 0.282 970 | 0.000 030 | 9.60 | 1.1 | 408 | 568 | -0.95 |
| 2 | 125 | 0.034 063 | 0.000 936 | 0.282 914 | 0.282 916 | 0.000 029 | 7.76 | 1.0 | 476 | 686 | -0.97 |
| 3 | 125 | 0.026 854 | 0.000 710 | 0.282 964 | 0.282 966 | 0.000 025 | 9.55 | 0.9 | 402 | 571 | -0.98 |
| 4 | 125 | 0.118 039 | 0.002 346 | 0.283 000 | 0.283 002 | 0.000 032 | 10.70 | 1.1 | 367 | 497 | -0.93 |
| 5 | 125 | 0.066 972 | 0.001 497 | 0.282 966 | 0.282 968 | 0.000 029 | 9.56 | 1.0 | 408 | 570 | -0.95 |
| 6 | 125 | 0.023 127 | 0.000 890 | 0.282 990 | 0.282 992 | 0.000 020 | 10.46 | 0.7 | 367 | 513 | -0.97 |
| 7 | 125 | 0.025 987 | 0.000 769 | 0.282 919 | 0.282 921 | 0.000 027 | 7.93 | 0.9 | 467 | 675 | -0.98 |
| 8 | 125 | 0.031 436 | 0.000 990 | 0.282 941 | 0.282 943 | 0.000 025 | 8.72 | 0.9 | 438 | 624 | -0.97 |
| 9 | 125 | 0.048 519 | 0.001 138 | 0.282 969 | 0.282 971 | 0.000 026 | 9.69 | 0.9 | 400 | 562 | -0.97 |
| 10 | 125 | 0.031 936 | 0.000 830 | 0.282 965 | 0.282 967 | 0.000 026 | 9.59 | 0.9 | 402 | 569 | -0.97 |
| 11 | 125 | 0.050 156 | 0.001 512 | 0.282 958 | 0.282 960 | 0.000 024 | 9.28 | 0.9 | 419 | 588 | -0.95 |
| 12 | 125 | 0.053 225 | 0.001 232 | 0.282 977 | 0.282 979 | 0.000 032 | 9.95 | 1.1 | 390 | 545 | -0.96 |
| 13 | 125 | 0.034 946 | 0.000 815 | 0.282 922 | 0.282 924 | 0.000 025 | 8.05 | 0.9 | 463 | 667 | -0.98 |
| 14 | 125 | 0.066 662 | 0.001 958 | 0.282 991 | 0.282 993 | 0.000 031 | 10.39 | 1.1 | 377 | 517 | -0.94 |
| 15 | 125 | 0.034 131 | 0.000 895 | 0.282 959 | 0.282 961 | 0.000 022 | 9.35 | 0.8 | 412 | 584 | -0.97 |
| 16 | 125 | 0.028 155 | 0.000 907 | 0.282 934 | 0.282 936 | 0.000 018 | 8.47 | 0.6 | 447 | 640 | -0.97 |
| 17 | 125 | 0.025 330 | 0.000 803 | 0.282 994 | 0.282 996 | 0.000 021 | 10.60 | 0.7 | 361 | 504 | -0.98 |
| 18 | 125 | 0.021 417 | 0.000 694 | 0.282 951 | 0.282 953 | 0.000 023 | 9.08 | 0.8 | 421 | 601 | -0.98 |
| 19 | 125 | 0.065 777 | 0.001 803 | 0.282 957 | 0.282 959 | 0.000 024 | 9.22 | 0.8 | 424 | 592 | -0.95 |
| 20 | 125 | 0.028 453 | 0.000 926 | 0.282 900 | 0.282 902 | 0.000 021 | 7.26 | 0.7 | 496 | 718 | -0.97 |
| G0206-2(永和屯岩体) | | | | | | | | | | | |
| 1 | 130 | 0.059 313 | 0.002 177 | 0.282 893 | 0.282 895 | 0.000 019 | 7.01 | 0.7 | 523 | 738 | -0.93 |
| 2 | 130 | 0.044 786 | 0.001 586 | 0.282 889 | 0.282 891 | 0.000 022 | 6.92 | 0.8 | 521 | 744 | -0.95 |
| 3 | 130 | 0.040 314 | 0.001 531 | 0.282 890 | 0.282 892 | 0.000 021 | 6.98 | 0.8 | 518 | 740 | -0.95 |
| 4 | 130 | 0.067 498 | 0.002 365 | 0.282 913 | 0.282 915 | 0.000 022 | 7.69 | 0.8 | 497 | 694 | -0.93 |
| 5 | 130 | 0.046 959 | 0.001 591 | 0.282 895 | 0.282 897 | 0.000 025 | 7.15 | 0.9 | 511 | 729 | -0.95 |
| 6 | 130 | 0.055 454 | 0.002 071 | 0.282 892 | 0.282 894 | 0.000 018 | 6.99 | 0.6 | 523 | 739 | -0.94 |
| 7 | 130 | 0.047 255 | 0.001 637 | 0.282 903 | 0.282 905 | 0.000 020 | 7.40 | 0.7 | 501 | 713 | -0.95 |
| 8 | 130 | 0.041 644 | 0.001 427 | 0.282 889 | 0.282 891 | 0.000 021 | 6.95 | 0.7 | 518 | 742 | -0.96 |
| 9 | 130 | 0.040 782 | 0.001 424 | 0.282 972 | 0.282 974 | 0.000 029 | 9.86 | 1.0 | 399 | 555 | -0.96 |
| 10 | 130 | 0.038 936 | 0.001 351 | 0.282 900 | 0.282 902 | 0.000 025 | 7.35 | 0.9 | 501 | 716 | -0.96 |
| 11 | 130 | 0.041 609 | 0.001 573 | 0.282 865 | 0.282 867 | 0.000 032 | 6.07 | 1.1 | 555 | 798 | -0.95 |
| 12 | 130 | 0.042 143 | 0.001 344 | 0.282 995 | 0.282 997 | 0.000 041 | 10.68 | 1.4 | 366 | 502 | -0.96 |
| 13 | 130 | 0.039 726 | 0.001 465 | 0.282 888 | 0.282 890 | 0.000 020 | 6.90 | 0.7 | 520 | 745 | -0.96 |
| 14 | 130 | 0.045 335 | 0.001 713 | 0.282 900 | 0.282 902 | 0.000 018 | 7.31 | 0.6 | 506 | 719 | -0.95 |
| 15 | 130 | 0.031 635 | 0.001 170 | 0.282 945 | 0.282 947 | 0.000 024 | 8.95 | 0.9 | 434 | 613 | -0.96 |
| 16 | 130 | 0.041 709 | 0.001 606 | 0.282 858 | 0.282 860 | 0.000 023 | 5.82 | 0.8 | 565 | 814 | -0.95 |
| 17 | 130 | 0.071 090 | 0.002 358 | 0.282 917 | 0.282 919 | 0.000 025 | 7.86 | 0.9 | 490 | 683 | -0.93 |
| 18 | 130 | 0.025 041 | 0.000 966 | 0.282 911 | 0.282 913 | 0.000 018 | 7.77 | 0.6 | 480 | 689 | -0.97 |
| 19 | 130 | 0.055 700 | 0.002 106 | 0.282 864 | 0.282 866 | 0.000 017 | 5.98 | 0.6 | 565 | 804 | -0.94 |
| 20 | 130 | 0.071 318 | 0.002 464 | 0.282 907 | 0.282 909 | 0.000 025 | 7.49 | 0.9 | 506 | 707 | -0.93 |

(t_{DM2})变化范围 405~621 Ma($n=17$),平均为 494 Ma(图 7c)。

(3)大石寨岩体 样品 G0211-2 分析了 10 个点,其中 8 个样品 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围在 0.282 997~0.283 029,加权平均值为 0.283 020 ± 0.000 011 ($2\sigma, n=8$)。εHf(175 Ma)范围在 +9.27~+13.05,加权平均值为 +12.16 ± 0.45。二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})变化范围 384~470 Ma($n=8$),平均为 441 Ma(图 7d)。

(4)青山岩体 样品 G0208-1 分析了 20 个点,20 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围在 0.282 873~0.282 957,加权平均值为 0.282 923 ± 0.000 012 ($2\sigma, n=20$)。εHf(130 Ma)值变化范围在 +6.47~+9.40,加权平均值为 +8.25 ± 0.42。二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})显示相对较老的年龄,变化范围 586~775 Ma($n=20$),平均为 667 Ma。样品 G0208-3 分析了 20 个点,20 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围在 0.282 864~0.282 979,加权平均值为 0.282 925 ± 0.000 014 ($2\sigma, n=20$)。εHf(130 Ma)范围在 +6.14~+10.22,加权平均值为 +8.32 ± 0.48。二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})同样显示相对较老的年龄,变化范围 535~796 Ma($n=20$),平均为 661 Ma。上述两个样品显示出比较一致的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值、εHf(130 Ma)和二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2}) (图 7e、7f)。

(5)索伦镇岩体 样品 G0215-4 分析了 20 个点,其中 19 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值较高,范围在 0.282 916~0.283 002,加权平均值为 0.282 961 ± 0.000 011 ($2\sigma, n=19$)。εHf(125 Ma)范围在 +7.76~+10.69,加权平均值为 +9.34 ± 0.39。二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})变化范围 497~685 Ma($n=19$),平均为 582 Ma(图 7g)。

(6)永和屯岩体 样品 G0206-2 分析了 20 个点,其中 18 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值范围在 0.282 860~0.282 947,加权平均值为 0.282 897 ± 0.000 010 ($2\sigma, n=18$)。εHf(130 Ma)范围在 +5.82~+8.95,加权平均值为 +7.12 ± 0.35。二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})变化范围 683~814 Ma($n=18$),平均为 729 Ma(图 7h)。

5 讨论

5.1 成因类型厘定

研究区内出露多个花岗岩体,确定其成因类型

不仅可以反映岩浆源区性质,而且还可以作为岩浆形成构造环境的一种判别标志。花岗岩成因类型目前普遍接受的划分方案是将其划分成 I 型、S 型、A 型和 M 型 4 种类型,它们之间具有比较明显的差异,角闪石、堇青石和碱性暗色矿物的出现以及 Ga/Al 比值图解等被认为是判别花岗岩成因类型的有效标志或工具(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990; Wu *et al.*, 2002; 林强等, 2004; 吴福元等, 2007; 邱检生等, 2005, 2008),但个别情况下,如何准确划分出高分异条件下的 I 型花岗岩和 A 型花岗岩,需结合多方面的特征对其进行讨论。

查干岩体为角闪碱长花岗岩,其 SiO_2 含量平均为 74.5%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 平均为 8.9%, CaO 平均为 0.77%, MgO 平均为 0.18%, A/CNK 在 ~1.0, 为弱过铝质。稀土元素含量高,轻重稀土元素分馏不明显,δEu 负异常明显,相对亏损 Ba、Sr、Ti 及 Nb 和 Ta,而富集 Rb、Th 和 Zr,表现出 A 型花岗岩的典型地球化学特征(吴福元等, 1997)(图 8)。进一步判别表明其属于 A_2 型,即属后造山 A 型花岗岩(图 9)。

景阳岩体为黑云母花岗闪长岩,相对富钠而贫钾,属于钙碱性系列。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 大多为 6.34~7.93,轻重稀土元素分馏不明显,δEu 显示出弱的负异常。亏损高场强元素 Ti、P、Nb、Ta,明显富集 K,为典型的 I 型花岗岩。

大石寨岩体为黑云母花岗岩,相对富钾而贫钠, A/CNK 在 1.0~1.06,为弱过铝质,属于高钾钙碱性系列,具有高 SiO_2 含量(>70%),高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 比值,常量元素参数和 Ga/Al、Zr、Nb、Ce、Y、(Zr + Nb + Ce + Y)等微量元素参数做出的判别图解均位于 A 型花岗岩区域(图 8),并具有低 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO 含量。大石寨岩体具有与千里山、巴尔哲和东清花岗岩类似的 M 型稀土元素四分组效应(图 6),轻重稀土分馏不明显,有强烈的 Eu 负异常,微量元素特征显示相对亏损 Ba、Sr、Ti、P,而富集 Rb 和 Y,岩石化学特征显示类似于 A 型花岗岩,但由于大石寨岩体具有四分组特征,元素行为发生很大的变化。研究表明,目前还没有可靠的办法来确定此类花岗岩的成因类型(Wu *et al.*, 2004; Monecke *et al.*, 2007; 吴福元等, 2007),所以暂认为大石寨岩体是具有特殊的稀土元素四分组效应的花岗岩。

青山岩体类似高 Sr 花岗岩,具有埃达克质岩石的特征,但与典型的埃达克岩相比, K_2O 含量(3.81%

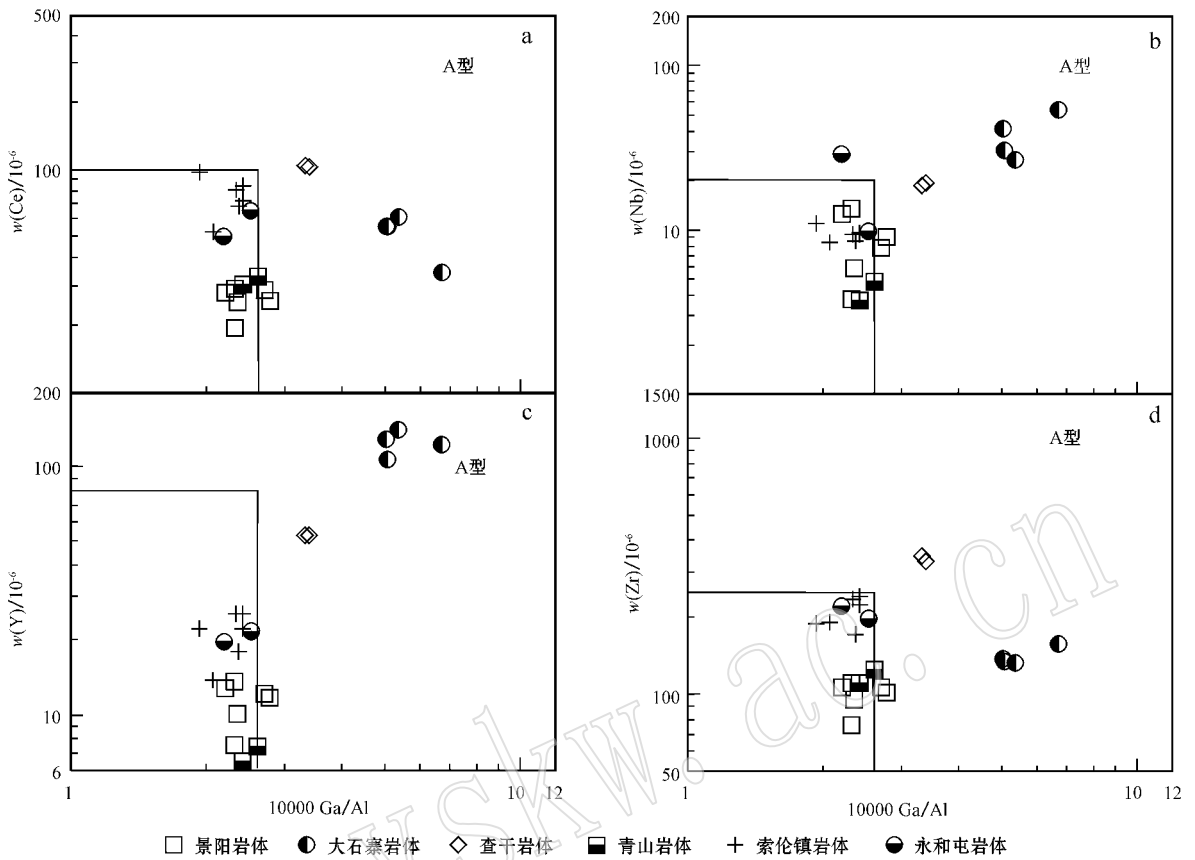


图 8 乌兰浩特地区花岗岩岩石成因图解

Fig. 8 Ce - 10 000 Ga/Al (a), Nb - 10 000 Ga/Al (b), Y - 10 000 Ga/Al (c) and Zr - 10 000 Ga/Al (d) diagrams for Mesozoic granites in Wulanhaote region

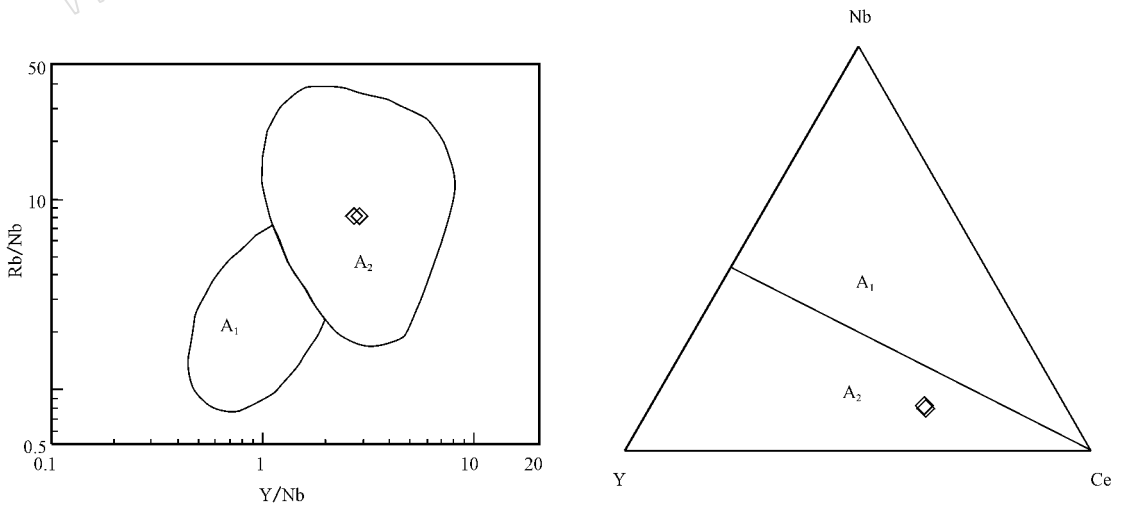


图 9 查干岩体 A 型花岗岩判别图解

Fig. 9 Rb/Nb - Y/Nb and Nb - Y - Ce plots for Chagan granites

~4.13%)比洋壳物质部分熔融形成的埃达克岩平均 K₂O 含量 (~ 1.72%) 高, Mg[#] 较低 (0.19 ~

0.20), 其 I_{Sr} 值为 0.705 2 ~ 0.705 6。由此可见, 本区的高 Sr 型花岗岩的地球化学特征与俯冲板片熔

融的典型埃达克质岩石存在一定差别,而与增厚下地壳熔融成因的 C 型埃达克岩相似(张旗等, 2001, 2008),表明本区的高 Sr 型花岗岩是一类具有 C 型埃达克岩性质的花岗岩。

索伦镇岩体的主量、稀土及微量元素均具有明显的高分异的特征,在稀土元素球粒陨石分布模式图和微量元素原始地幔蛛网图上显示具有典型 A 型花岗岩的特征,但其化学组成特征明显不同于 A 型花岗岩,主要表现在: FeO^*/MgO 比值较低,小于 Whalen 等(1987)提出的 $\text{FeO}^*/\text{MgO} > 10$ 的标准; Zr、Nb、Ce、Y 的含量均低,且 Ga/Al 比值均较典型 A 型花岗岩下限值 2.6(Whalen *et al.*, 1987)偏低,投图均落入 I 型花岗岩区域。在区分 A 型花岗岩和高分异的 I 型花岗岩的 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - 10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 图解(图 10)上,索伦镇岩体大部分都落入分异型 I 型花岗岩附近区域,表明索伦镇岩体(低 Sr 花岗岩)应属于高分异的 I 型花岗岩。

永和屯岩体样品(G0206-1)属于二长闪长斑岩,其轻重稀土元素分馏不明显,且具有弱的负 Eu 异常,同时亏损高场强元素 Ti、P、Nb、Ta,明显富集 K,经历了岩浆混合,为普通的 I 型花岗岩;样品(G0206-2)具有和索伦镇岩体类似的稀土及微量元素,在 $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}) - 10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ 图解(图 10)上也落入分异型 I 型花岗岩区域,笔者认为其也应该为高分异的 I 型花岗岩。

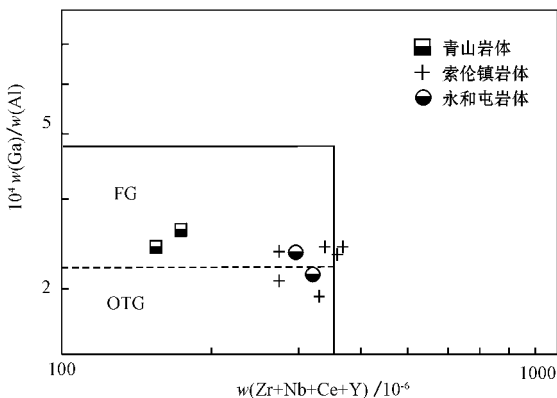


图 10 乌兰浩特地区花岗岩 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al} - (\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ 图解

Fig. 10 $10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$ versus $(\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y})$ diagram for Mesozoic granites in Wulanhaote region
FG—分异型 I 型花岗岩; OTG—I、S、M 型花岗岩
FG—field for fractionated I-type granitoids; OTG—field for I-, S- and M-type granitoids

5.2 岩浆源区特征

本次研究的乌兰浩特地区的花岗岩,位于兴安地块和松嫩地块晚古生代拼合带附近,对应的 Hf 同位素具有正高的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和年轻的二阶段 Hf 模式年龄(除了青山岩体和永和屯岩体年龄小于 0.8 Ga,其余均小于 0.6 Ga),在 $\epsilon\text{Hf}(t) - t$ 图解(图 11b)上,数据都落在球粒陨石演化线之上,靠近亏损地幔演化线,并远离球粒陨石演化线且相对集中分布, Nd 同位素具有高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值,低的 I_{Sr} 值,在 $\epsilon\text{Nd}(t) - I_{\text{Sr}}$ 图解(图 11a)上数据投影点全部位于 II 象限(不包括大石寨岩体 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} > 0$ 数值),表明乌兰浩特中生代花岗岩体的源岩具有初生地壳的性质,而显生宙是显著的大陆地壳生长时期。这一结果不仅与兴安地块上中生代岩浆岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成特征基本一致(张兴洲等, 2006; 隋振民等, 2007, 2009),同时也与松嫩地块上中生代岩浆岩及晚古生代火山岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成特征基本一致(Wu *et al.*, 2003; 高妍, 2008; 陈井胜, 2009),因此笔者认为区域上兴安地块与松嫩地块地壳增生具有相似性。

前人研究认为乌兰浩特花岗岩类岩石可以由岩浆混合、同化混染或 AFC 过程以及下地壳的熔融形成。岩浆混合会产生闪长质的微粒包体,然而除了永和屯岩体在野外见到岩浆混合的迹象外,其余岩体都没有见到岩浆混合的迹象,因此岩浆混合不是乌兰浩特地区花岗岩形成的主要机制。就同化混染或 AFC 过程而言,部分学者认为松嫩地块和兴安地块不存在大规模前寒武纪结晶基底(Wu *et al.*, 2003; 施光海等, 2004),根据葛文春等(2005b)在大石寨岩体中获得的具有 ~800 Ma 年龄的捕获锆石显示简单的岩浆型环带,而其余锆石都是岩浆成因锆石的特点,说明乌兰浩特花岗岩类岩石并未同化混染围岩。而且随着越来越多的地壳岩石被同化,岩浆的 I_{Sr} 值升高而 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值降低并趋于分散(DePaolo, 1981),青山岩体具有最高的 I_{Sr} 值和最低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值,两套数据并不解耦,说明岩浆上升过程中的同化混染或 AFC 过程也不是成岩的主要机制。综上,乌兰浩特地区花岗岩应该是从下地壳岩石中熔融而成的。

在 Guo 等(2010)对东北地区中生代火成岩的 Sr-Nd-Pb 同位素填图上,研究区正好落在林西-霍林河高 Nd 带上。中晚三叠世查干岩体和早中侏罗世景阳岩体和大石寨岩体具有相似的 Sr-Nd 同位素组

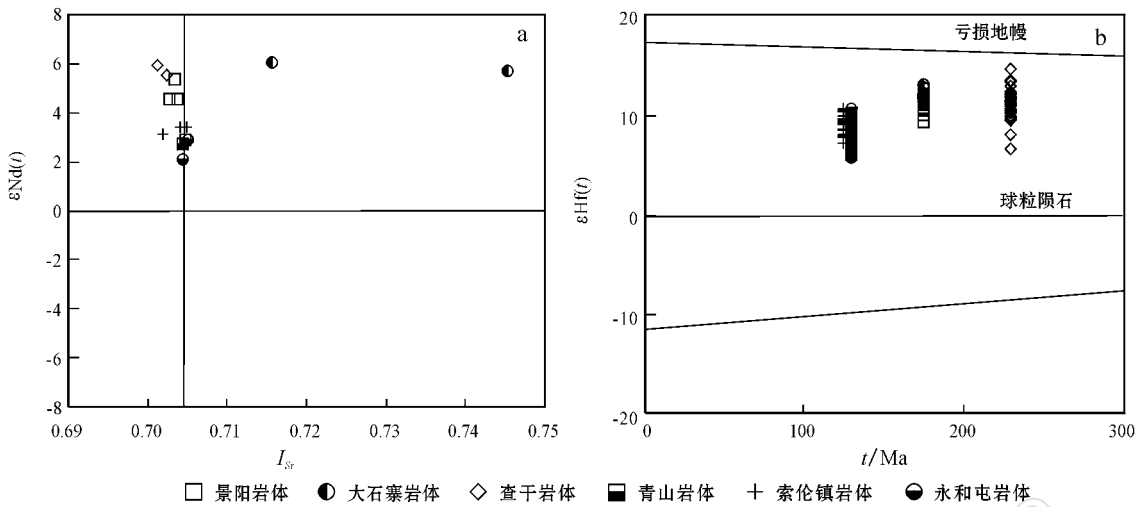


图 11 乌兰浩特地区花岗岩 $\epsilon Nd(t) - I_{Sr}$ 和 $\epsilon Hf(t) - t$ 图解

Fig. 11 $\epsilon Nd(t) - I_{Sr}$ and $\epsilon Hf(t) - t$ diagrams for Mesozoic granites in Wulanhaote region

成,然而由于大石寨岩体 I_{Sr} 值变化较大,其样品结果并不合理(图 11a),这可能与大石寨花岗岩体受到流体作用影响有关,其低的 Sr 含量和高的 Rb/Sr 比值使得年龄对 I_{Sr} 值的校正十分敏感,在这种情况下,岩石的 Sr 同位素组成往往不具有明确的成岩意义,而 Nd 同位素由于其强的抗扰动性则能有效地示踪岩浆源区性质,为此,本文仅对其 Nd 同位素组成进行对比。由表 2 所列数据可看出,大石寨岩体的 Nd 同位素组成相对均一, $\epsilon Nd(t) = +5.69 \sim +6.02$,与查干岩体、同时代景阳岩体和区内时代相近的马安子岩体[$t = 147 \text{ Ma}$, $\epsilon Nd(t) = +4.0 \sim +5.5$, Liu *et al.*, 2005]不存在明显差别,说明其岩浆源区相似。早白垩世花岗岩 Sr-Nd 同位素虽然同样具有相似的同位素组成,显示其源区存在相似性(表 2,图 11a),但索伦镇岩体 I_{Sr} 值为 $0.7019 \sim 0.7049$, $\epsilon Nd(t)$ 值为 $+3.12 \sim +3.4$,与其同时期的青山岩体与永和屯岩体则表现出相对高的 I_{Sr} ($0.7044 \sim 0.7050$) 和低的 $\epsilon Nd(t)$ 值($+2.11 \sim +2.89$) (图 11a)。

乌兰浩特地区的花岗岩类显示低的 I_{Sr} 初始比值和高的正 $\epsilon Nd(t)$ 值,表明岩浆起源于亏损地幔,但 $\epsilon Nd(t)$ 值却低于产生大洋中脊玄武岩的亏损地幔值,这种现象可能有以下几种不同的解释:第 1 种解释是源自亏损地幔的岩浆上升过程中受到老地壳物质的同化混染或 AFC 过程,第 2 种解释是来自亏损程度较低的地幔,第 3 种解释是中下地壳两种不同的物质在源区熔融混合形成。对于第 1 种解释,

根据之前讨论是不成立的,第 2 种解释则与已有资料不符,从区域上大石寨组玄武岩的 Nd 同位素资料来看,地幔亏损程度不低(郭锋等, 2009)。因此,中下地壳两种不同的物质在源区熔融混合很可能是造成这种 $\epsilon Nd(t)$ 和 I_{Sr} 异常关系的主要原因,而区内花岗岩的地球化学特征应是其源区性质的反映。

这种可能性也得到 Hf 同位素的支持(表 3)。前人研究认为一般具有正 $\epsilon Hf(t)$ 值的花岗质岩石来自亏损地幔或新增生的年轻地壳物质的部分熔融,而本区大面积的花岗质岩石应来源于地壳岩石的部分熔融。从 Hf 同位素看,查干岩体与景阳和大石寨岩体同样具有一致性,都具有高 $\epsilon Hf(t)$ 和年轻的 t_{DM2} (平均 $\sim 0.50 \text{ Ga}$)。但从图 11b 可以看出,查干岩体不同锆石颗粒显示很大的 Hf 同位素变化范围,这么大的锆石 Hf 同位素变化表明岩体的源区不太可能是单一的(Yang *et al.*, 2007)。同时早白垩世花岗岩 Hf 同位素显示,索伦镇岩体 $\epsilon Hf(t)$ 加权平均值为 $\sim +9.34$,二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})平均为 0.58 Ga ,而青山岩体与永和屯岩体则显示低 $\epsilon Hf(t)$ 值($+5.82 \sim +10.68$) ,较老的二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})平均为 0.70 Ga ,并且锆石 Hf 同位素也显示较大的变化幅度,这种特征同样说明源区可能存在不同物质熔融混合作用。

关于乌兰浩特地区花岗岩类源区的源岩组成,一方面,根据之前对乌兰浩特花岗岩类 Sr-Nd-Hf 同位素分析,区内花岗岩需要大量的新生的地壳物质;另一方面,区内花岗岩具有比幔源岩石低的放射性

成因 Nd 和 Hf, 所以区内花岗岩还需要具有低放射性成因 Nd 和 Hf 的老地壳物质。结合区域构造及岩石组成, 笔者认为乌兰浩特地区花岗岩类岩石及其源岩可能来源于地壳中两种初生组分: 中下地壳老的物质以及新近底侵的镁铁质岩石。这一认识与 Guo 等 (2009) 在研究邻区霍林河地区高 Nd 英安-流纹岩成因时的结论一致, 可能暗示林西-霍林河这条高 Nd 带存在一致成因模式。

笔者选择区域上具有很低放射性成因 Nd、Hf 和高放射性 Sr 的片岩 (Zhu *et al.*, 2001) 代表中下地壳老的物质, 具有低的放射性成因 Sr 和高的放射性成因的 Nd 和 Hf, 并且显示一定的 Nb、Ta 亏损的大石寨玄武岩作为新近底侵的镁铁质岩石。以区域上大石寨玄武岩 [$Sr = 318 \times 10^{-6}$, $I_{Sr} = 0.7032$, $Nd = 24 \times 10^{-6}$, $\epsilon Nd(t) = +9.3$] 和中下地壳片岩 [$Sr = 90 \times 10^{-6}$, $I_{Sr} = 0.713$, $Nd = 21 \times 10^{-6}$, $\epsilon Nd(t) = -8.0$] 中的 Sr-Nd 同位素 (郭锋等, 2009; Zhu *et al.*, 2001) 作端元, 模拟了乌兰浩特地区花岗岩类岩石的熔融源区特征。

熔融源区模拟结果 (图 12) 显示, 乌兰浩特地区中晚三叠世和早中侏罗世花岗岩所需老的中下地壳物质比例为 20%~30%, 而早白垩世花岗岩所需要老的中下地壳物质比例为 30%~40%, 并且早白垩世花岗岩在 Sr-Nd-Hf 同位素上整体显示比中晚三叠世和早中侏罗世花岗岩具有高放射性成因的 Sr 和低放射性成因 Nd、Hf, 这可能与熔融源区受到中下地壳物质改造程度较高有关。来自年代学的资料显示 (Fan *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2002; 张艳斌等, 2004; Wu *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2011), 东北地区从早二叠世、晚三叠世到早侏罗世都有花岗岩类岩石侵位, 早白垩世达到高峰。乌兰浩特地区花岗岩类岩石随着侵位年龄的逐渐年轻, 源区老的中下地壳物质比例明显增加 (图 12), 同时锆石的 $\epsilon Hf(t)$ 值明显降低 (图 11b), 反映这些花岗岩的岩浆熔融源区老的中下地壳物质组分贡献逐渐增多而年轻的地壳组分的贡献逐渐减少, 或者说乌兰浩特地区在早白垩世岩浆活动高峰期地壳的增生规模有限或是不明显, 这可能与研究区在侏罗纪先受到古太平洋俯冲 (Maruyama, 1997; Wu *et al.*, 2007a) 随后发生折沉作用有着密切的关系 (Wu *et al.*, 2007b; Zhang *et al.*, 2010), 俯冲导致地壳加厚, 折沉导致地幔上隆和镁铁质岩浆底侵, 更多的下地壳物质折返发生熔融, 造成下地壳源区急剧变化。

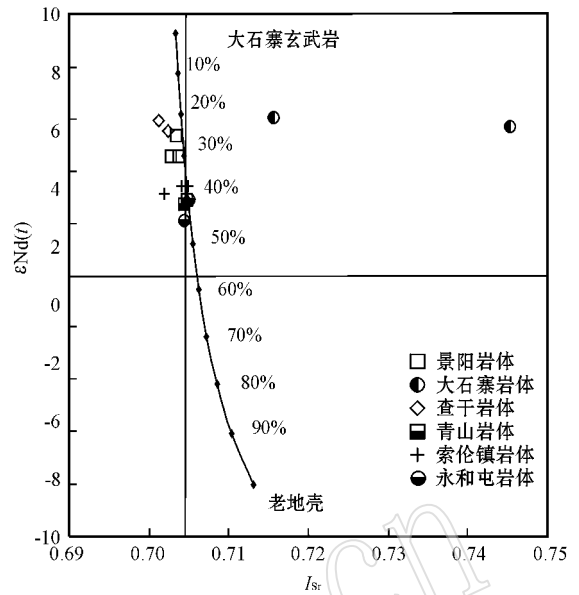


图 12 乌兰浩特地区花岗岩岩浆熔融源区模拟结果
Fig. 12 Isotopic modeling results of granites in Wulanhaote region

综上所述, 虽然由于端元组分的不确定性, 图 12 的模拟结果并不具有明确的地质意义, 但是它们对乌兰浩特地区花岗岩类岩石的源岩做出了约束。乌兰浩特地区花岗岩类岩石的源岩主要为显生宙底侵的镁铁质岩石, 并有一定程度老的中下地壳物质的贡献, 即源岩以新近底侵的镁铁质岩石为主, 其次是老的中下地壳物质, 而乌兰浩特地区花岗岩类岩石的成因主要是由于熔融源区差异造成的。

5.3 花岗岩的岩石成因及成岩过程的地球化学制约

A 型花岗岩的成因一直是争论的焦点。早期研究认为富 F 麻粒岩相下地壳部分熔融可以形成 A 型花岗岩 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987), 稍后又提出岩浆混合、残留体再熔融、幔源碱性基性岩浆和 I 型花岗岩浆分异、下地壳火成岩部分熔融和俯冲洋壳部分熔融等多种成因模式 (Collins *et al.*, 1982; Edy, 1992; King *et al.*, 1997)。但 Bonin (2007) 综合现有地质证据后认为, A 型花岗岩更有可能是幔源的碱性基性岩-中性岩分异演化而来。笔者认为研究 A 型花岗岩成因, 应该结合其物质来源、岩浆的演化等多方面因素。查干花岗岩具有 A 型花岗岩的地球化学和矿物学、岩石学特征, 其 Y 相对于 Nb 更富集, 属于 Eby (1990, 1992) 划定的 A₂ 型花岗岩, 岩体显示出低 I_{Sr} 、高 $\epsilon Nd(t)$ 和 $\epsilon Hf(t)$ 的特征 (图 11), 其中 Nd 同位素的特征与张广才岭

地区中生代 A 型花岗岩比较一致(吴福元等,1999;孙德等有等,2005)。这种同位素特点可能暗示其岩浆应该起源于下地壳火成岩的部分熔融。并且前人研究也表明 A₂ 型花岗岩主要来自火成岩地壳部分熔融(Eby,1992)因此,查干岩体的岩浆应来源于下地壳基性火成岩的部分熔融,并且该基性火成岩源岩应是从地幔分离不久的年轻地壳,然而岩体富 K₂O,暗示其可能的岩浆源区物质为中下地壳富 K₂O、贫水的玄武质岩石,而富 Al₂O₃ 的特征也表明岩石成因可能与地壳有关。

从主量元素看大石寨岩体和景阳岩体的 SiO₂ 质量分数有较大的变化范围(71.21%~77.48%),主量元素间具有明显的线性变化关系(图略),可以确定形成两个岩体的岩浆在上侵和固结过程中发生了分离结晶作用,但景阳 I 型花岗岩与大石寨四分组花岗岩的成分变异线不连续,缺乏明显的连续演化趋势,表明花岗岩浆可能并不是同源岩浆演化产物。同时大石寨岩体具有特殊的稀土元素四分组效应,前人研究认为其可能是由于岩浆结晶晚期流体与熔体的相互作用造成的(赵振华等,1992,1999;王一先等,1997;Jahn *et al.*,2001)。但从本文的数据来看,岩体与同时期的景阳岩体具有 Zr/Hf、Nb/Ta 的明显解耦,并且初始 Sr 同位素变化很大,其可能的原因是在地壳开放体系中,流体对 Sr 同位素明显的改造作用导致两个样品明显离群,这种现象说明有流体参与作用。所以笔者解释大石寨岩体和同时期的景阳岩体 I 型花岗岩都是下地壳物质部分熔融形成的岩浆后经过分离结晶作用的结果,而大石寨岩体则可能与晚期的流体作用有密切联系。

早白垩世花岗岩,其中青山岩体划分为高 Sr 花岗岩,而索伦镇岩体为低 Sr 花岗岩。高 Sr 花岗岩是具有 C 型埃达克岩性质的花岗岩,其主量及微量元素特征显示其与高压条件下基性火成岩熔体有相似的特征,高 SiO₂、Al₂O₃ 相对富 Na₂O,贫 MgO,高 Sr 低 Y 和 HREE。而低 Sr 花岗岩为高分异的 I 型花岗岩,其明显富硅,富碱,贫钙、镁、铁,并具有 Sr、Ba、P、Ti、Nb、Eu 等元素的明显亏损,充分说明岩体经历了高程度的分异演化。永和屯岩体既不属于高 Sr 花岗岩,也不属于低 Sr 花岗岩,样品(G0206-1)弱 Eu 负异常以及明显亏损 P、Ti 等特征反映其形成可能与分离结晶作用有关,样品(G0206-2)具有类似于低 Sr 花岗岩特征,说明岩体可能也经历了高程度的分异演化。

对早白垩世花岗岩源岩讨论可知,如果仅以经历老的地壳物质与从亏损幔源新增壳源混合的物质直接结晶,难以解释现今观察到的索伦镇岩体全岩主量元素和微量元素等地球化学特征:岩体富硅、明显亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 和 Eu 等地球化学特征(图 5h),指示其母岩浆经历了显著的分离结晶作用。将早白垩世花岗岩在分离结晶模拟矢量图和 (La/Yb)_N-La 变异图解(图 13a)上进行投图(永和屯岩体数据单一,未投图),发现高 Sr 花岗岩并没有出现良好的线性关系,而低 Sr 花岗岩显示出比较好的线性关系。从分离结晶模拟矢量图(图 13b、13c)中低 Sr 花岗岩的分布来看,其 Sr、Eu、Ba 具有明显负异常,应该是受斜长石和钾长石分离结晶的制约,而稀土元素的变异则主要受到榍石等副矿物的分离结晶的控制(图 13a),并且岩体微量元素显示 Ti 的负异常,应主要受含钛矿物和金红石等分离结晶的影响。由于金红石对 Nb、Ta 有高的分配系数,所以其分离结晶作用可能是岩体 Nb、Ta 负异常的主要原因。

高 Sr 和低 Sr 两类花岗岩具有相似的主量元素含量和比较一致的主量元素变异演化趋势,并且锆石 Hf 同位素特征说明它们应具有相似的源区物质组成,基本排除了两类花岗岩起源于性质和成分完全不同的岩浆的可能性。然而两类花岗岩具有不同的 Sr-SiO₂ 变异演化趋势(图 14),表明低 Sr 花岗岩不可能为高 Sr 花岗岩分异演化的产物,两类花岗岩不是同一岩浆演化的产物。低 Sr 型花岗岩的地球化学特征说明其形成在相对低的压力下(<1 GPa),而高 Sr 花岗岩具有类似 C 型埃达克岩的特征,说明其形成于相对高的压力下(张旗等,2005;肖龙等,2004),即镁铁质岩石在大于 1.2 GPa 的压力下,由于斜长石不稳定而转变为石榴石,岩石部分熔融形成的熔体具有埃达克岩的地球化学性质,并暗示白垩纪乌兰浩特地区可能还存在着加厚的地壳。因此,笔者认为高 Sr 花岗岩形成于较高压力的下地壳,而低 Sr 花岗岩则可能形成于较低压力的中地壳。

永和屯岩体样品(G0206-2)主量及稀土元素含量及变异趋势显示高分异 I 型花岗岩特征,这说明可能与其同时代的低 Sr 花岗岩源岩具有一定的亲缘性,笔者认为永和屯岩体与其同时代的低 Sr 花岗岩具有相似的形成过程,而样品(G0206-1)应该是后期岩浆混合作用的结果。

综上所述,早白垩世花岗岩岩浆的源区组成类

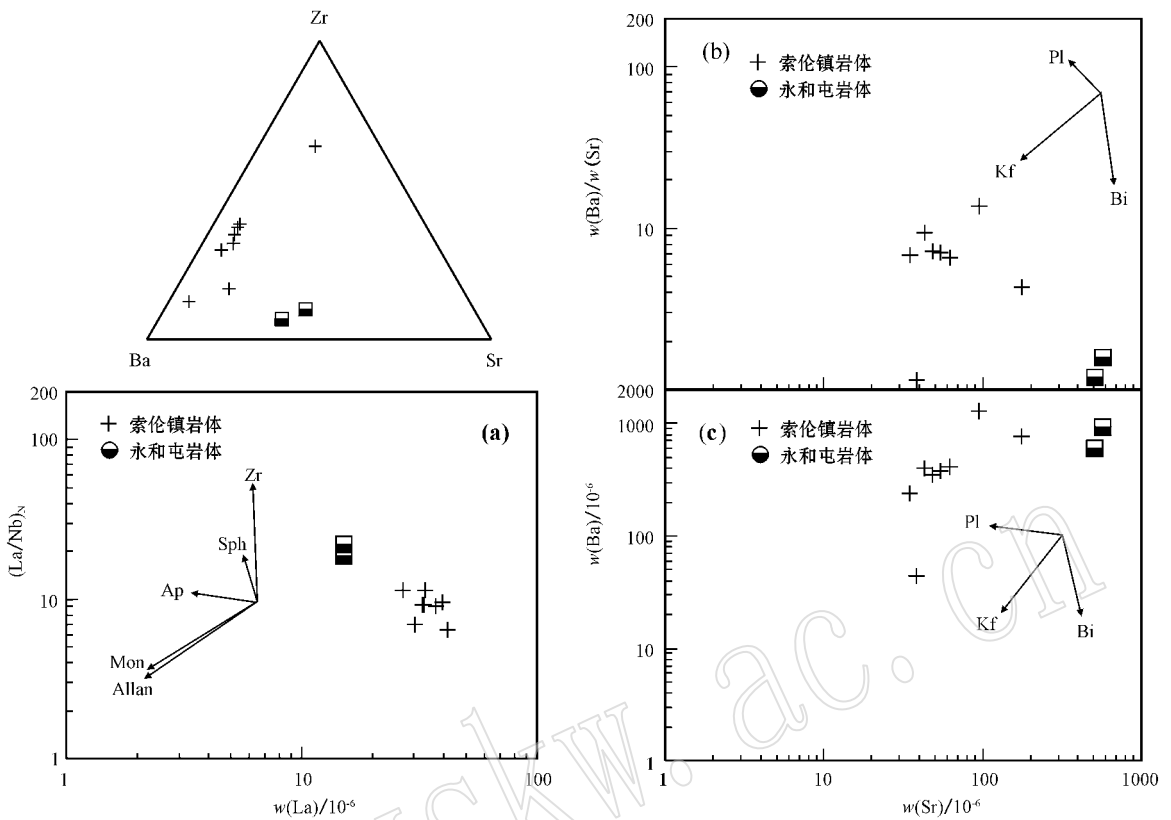


图 13 早白垩世花岗岩 Sr - Ba, Sr - Sr/Ba 和 $(La/Yb)_N - La$ 关系图及分离结晶趋势
 Fig. 13 Sr - Ba, Sr - Sr/Ba and $(La/Yb)_N - La$ diagrams for Early Cretaceous granites

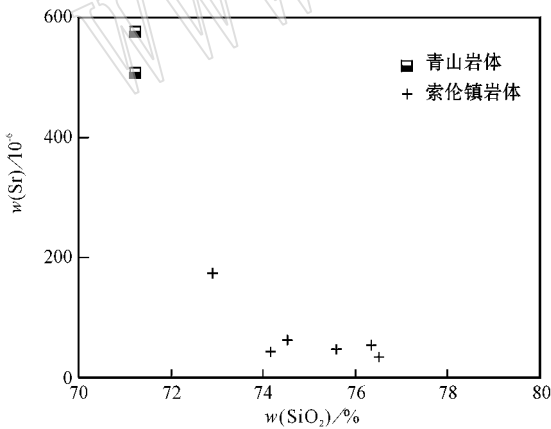


图 14 早白垩世花岗岩 Sr - SiO₂ 关系图
 Fig. 14 Sr - SiO₂ diagram for Early Cretaceous granites

过程中经历了高程度分离结晶作用形成的,这一模式较好地解释了目前所观测到的岩体的地球化学特征。

6 结论

(1) 乌兰浩特地区花岗岩体中查干岩体为 A₂ 型花岗岩, 景阳岩体为 I 型花岗岩, 大石寨岩体是具有四分组效应的花岗岩。

(2) 早白垩世花岗岩划分为高 Sr 型花岗岩和低 Sr 型花岗岩。高 Sr 型花岗岩类似于 C 型埃达克质的花岗岩, 暗示早白垩世该区曾存在一个加厚的地壳; 低 Sr 型和永和屯岩体为高分异的 I 型花岗岩。此外, 通过对两类花岗岩的地球化学特征、全岩的 Sr-Nd 和锆石的 Hf 同位素研究发现, 它们是起源于不同深度的岩浆上升、就位结晶形成的两类具有不同地球化学特征的花岗岩。

(3) 乌兰浩特中生代花岗岩体的源岩具有初生地壳的性质, 其岩石学和地球化学成分主要取决于源区源岩的性质, 对比区域上全岩 Sr-Nd 和锆石的

似, 但起源深度不同, 不是同一岩浆演化的产物。一种可能的解释是在早白垩世, 地壳中不同深度的岩石部分熔融, 形成不同类型的花岗岩岩浆。早期侵位高 Sr 型花岗岩应该是深部地壳部分熔融形成埃达克质岩浆的产物; 永和屯岩体和晚期侵位的低 Sr 花岗岩则应是从浅部起源的岩浆在上升、就位结晶

Hf 同位素特征并结合本文数据,认为松嫩地块和兴安地块增生时间大体上一致,显生宙是显著的大陆地壳生长时期。

致谢 非常感谢周长勇和张吉衡在锆石 U-Pb 及 Hf 同位素分析测试中给予的重要帮助及指导。

References

- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97: 1~29.
- Collins M D, Jones D & Schofield G M. 1982. Reclassification of 'Corynebacterium haemolyticum' (MacLean, Liebow & Rosenberg) in the genus *Arcanobacterium* gen. nov. as *Arcanobacterium haemolyticum* nom. rev., comb. nov. [J]. *J. Gen. Microbiol.*, 128: 1279~1281.
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. 2000. Two contrasting paleozoic-magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 328: 157~182.
- Chen Jingsheng. 2009. The Genesis of Volcanic Rocks of Yingcheng Group in Southern Songliao Basin [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effect of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53: 189~202.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. *Lithos*, 26: 115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 20: 641.
- Fan W M, Guo F, Wang Y J, et al. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121: 115~135.
- Gao Yan. 2008. Chronology and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in Southeastern Songliao Basin (Master. Dissertation) [D]. Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, et al. 1999. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalt in Da Hinggan Ling: Evidence of the mantle-crust interaction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 396~407 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, et al. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts, northeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423~440 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. 2005a. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of Da Hinggan Range [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 50: 2097~2105.
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. 2005b. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhao region, central Da Hinggan Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749~762 (in Chinese with English abstract).
- Guo F, Fan W M, Gao X, et al. 2010. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth [J]. *Lithos*, 120: 563~568.
- Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, et al. 2009. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia [J]. *Science in China (Series D)*, 52(7): 940~951 (in Chinese with English abstract).
- Guo F, Fan W M, Li C W, et al. 2009. Early Cretaceous highly positive (Nd) felsic volcanic rocks from the Hinggan Mountains, NE China: origin and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1395~1411.
- Hong D W, Zhang J S, Wang T, et al. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Asian Earth Sci.*, 28: 627~630.
- Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Inner Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~725 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, et al. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China [J]. *Lithos*, 59: 171~198.
- King P L, White A J R, Chappell B W, et al. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia [J]. *J. Petrol.*, 38(3): 371~391.
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, et al. 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 403~412 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Siebel W, Li X J, et al. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: constraints on basaltic underplating [J]. *Chemical Geology*, 219: 5~35.
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, et al. 2002. The Petrological and geochemical and petrogenesis significance of spilite from lower Permian Dashizhai Group in middle section of Da Hinggan Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 212~222 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present [J]. *The Island Arc*, 6: 121~142.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Zhang Fuqin, et al. 2003. SHRIMP zircon geochronology and its implications on the Xinkailing-Keluo complex, Northwestern of lesser Xing'an Range [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2315~2322 (in Chinese).
- Monecke T, Dulski P and Kenpe U. 2007. Origin of convex tereads in rare earth element patterns of hydrothermally altered siliceous igneous rocks from the Zinnwald Sn-W deposit, Germany [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 335~353.
- Qiu Jiansheng, Hu Jian, Wang Xiaolei, et al. 2005. The Baishigang pluton in Heyuan, Guangdong Province: A highly fractionated I-type granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 503~514 (in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Qiu Jiansheng , Xiao Er , Hu Jian , *et al.* 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province Constrains from zircon U-Pb geochronology , geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24(11): 2 468 ~ 2 484 (in Chinese with English abstract).
- Shi Guanghai , Miao Laicheng , Zhang Fuqin , *et al.* 2004. The age and its district tectonic implications on the Xilinhaote A- type granites , Inner Mongolia[J]. *Chinese Science Bulletin* , 49(4): 384 ~ 389(in Chinese).
- Sui Zhenmin , Ge Wenchun , Wu Fuyuan , *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages , geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of Da Hinggan Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 21(3): 461 ~ 480 (in Chinese with English abstract).
- Sui Zhenmin , Ge Wenchun , Xu Xuechun , *et al.* 2009. Characteristics and geological implications of the Late Paleozoic post-orogenic Shierzhan granite in the Great Xing 'an Range[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 25(10): 2 679 ~ 2 686(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan and Gao Shan. 2004. LA-ICPMS zircon U-Pb age of the Qingshui pluton in the east Xiao Hinggan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 25(2): 213 ~ 218(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Gao Shan , *et al.* 2005. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic the central Jilin Province , and their constraints on the structural pattern of Eastern Jilin-Heilongjiang Area , China[J]. *Earth Science Frontiers* , 12(2): 263 ~ 275(in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Li Huimin , *et al.* 2000. Emplacement age of the postorogenic A-type granites in Northwestern Lesser Xing 'an Ranges and its relationship to the eastward extension of Suolunshan-Hengshan-Zhalaithe collisional suture zone[J]. *Chin. Sci. Bull.* , 45 (20): 2 217 ~ 2 222(in Chinese).
- Sun Deyou , Wu Fuyuan , Li Qiang , *et al.* 2001. Petrogenesis and crustmantle interaction of early Yanshanian Baishishan pluton in Zhangguancai Reng[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 17(2): 227 ~ 235 (in Chinese with English abstract).
- Veivers J J , Saeed A , Belousova E A , *et al.* 2005. U-Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational of the Yilgarn craton[J]. *Earth Sci. Rev.* , 68 : 245 ~ 279.
- Wang P J , Liu Z J , Wang S X , *et al.* 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating of the volcanic rocks in the Songliao basin , NE China : constraints on stratigraphy and basin dynamics[J]. *International Journal of Earth Sciences* , 91 : 331 ~ 440.
- Wang Yixian and Zhao Zhenhua. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr superlarge deposit[J]. *Geochimica* , 26(1): 24 ~ 35(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B , Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites : geochemical characteristics , discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 95 : 407 ~ 419.
- Wu F Y , Han R H , Yang J H , *et al.* 2007b. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology* , 238 : 232 ~ 248.
- Wu Fuyuan , Jahn B M and Lin Qiang. 1997. On the isotopic characteristics of the post-orogenic granite in orogenic belt of Northern China and their implications for crustal growth[J]. *Chinese Science Bulletin* , 42(20): 2 188 ~ 2 192(in Chinese).
- Wu Fuyuan , Li Xianhua , Yang Jinhui , *et al.* 2007. Discussions on petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 23(6): 1 217 ~ 1 238(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y , Jahn B M , Wilde S A , *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II) : Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic[J]. *Lithos* , 67 : 191 ~ 204.
- Wu F Y , Lin J Q , Wilde S A , *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 233 : 103 ~ 119.
- Wu F Y , Sun D Y , Ge W C , *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 41 : 1 ~ 30.
- Wu F Y , Sun D Y , Jahn B M , *et al.* 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns[J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 23 : 731 ~ 744.
- Wu F Y , Sun D Y , Li H M , *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China : age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chem. Geol.* , 187 : 143 ~ 173.
- Wu Fuyuan , Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 15(2): 181 ~ 189(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y , Yang J H , Lo C H , *et al.* 2007a. The Jiamusi Massif : a Jurassic accretionary terrane along the western Pacific margin of NE China[J]. *The Island Arc* , 16 : 156 ~ 172.
- Xiao Long , Rapp P R and Xu Jifeng. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 20(2): 219 ~ 228(in Chinese with English abstract).
- Yang J H , Wu F Y , Wilde S A , *et al.* 2007. Tracing magma mixing in granite genesis : in situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons [J]. *Min. Petrol. Chem. Geol.* , 247 : 100 ~ 118.
- Zhang J H , Gao S , Ge W C , *et al.* 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xingan Range , northeastern China : Implications for subduction-induced delamination[J]. *Chemical Geology* , 276 : 144 ~ 165.
- Zhang Qi , Li Chengdong , Wang Yan , *et al.* 2005. Mesozoic high-Sr and low-Yb granitoids in eastern China : comparison and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 21(6): 1 527 ~ 1 537(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi , Qian Qing , Wang Erqi , *et al.* 2001. An east China Plateau in mid-late Yanshanian period : Implication from adakites[J]. *Chinese Journal of Geology* , 36(2): 248 ~ 255(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi , Wang Yan , Xiong Xiaolin , *et al.* 2008. Adakite and Granite : Challenge and Opportunity[M]. Beijing : China Land Press Publishing House , 1 ~ 344(in Chinese).
- Zhang Xingzhou , Yang Baojun , Wu Fuyuan , *et al.* 2006. The litho-

- sphere structure in the Hingmong-Jihei (Hinggan-Mongolia-Jilin-Helongjiang) region , northeastern China[J]. *Geology in China* , 33 (4): 816~823(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanbin , Wu Fuyuan , Sun Deyou , *et al.* 2002. Single grain zircon U-Pb age the " Earcynain " Miantian granites and Zhongping hypersthene diorite in the Yanbian Area[J]. *Geological Review* , 48 (4): 424~429(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanbin , Wu Fuyuan , Zhai Mingguo , *et al.* 2004. The tectonic attributes of the Helong block and the eastern block erline of the north margin of North China[J]. *Sciencein China(D)* , 34(9): 475~481(in Chinese).
- Zhao Zhenhua , Masuda A and Shabanni M B. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites[J]. *Geochimica* , 21(3): 221~233(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua , Xiong Xiaolin and Han Xiaodong. 1999. REE tetrad effect of granite formation mechanism[J]. *Science in China(Series D)* , 29(4): 331~338(in Chinese).
- Zhu Y F , Sun S H , Gu L B , *et al.* 2001. Permian volcanism in the Monogolian orogenic zone , northeast China : geochemistry , magma sources and petrogenesis[J]. *Geological Magazine* , 138 : 101~115.
- ### 附中文参考文献
- 陈井胜. 2009. 松辽盆地南部营城组火山岩的成因(硕士学位论文) [D]. 长春 : 吉林大学地球科学学院.
- 高 妍. 2008. 松辽盆地东南缘中生代火山岩的年代学和地球化学特征(硕士学位论文) [D]. 吉林大学.
- 葛文春 林 强 孙德有 , 等. 1999. 壳幔相互作用 : 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学证据[J]. *岩石学报* , 15(3): 396~407.
- 葛文春 隋振民 吴福元 , 等. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *岩石学报* , 23 (2): 423~440.
- 葛文春 吴福元 周长勇 , 等. 2005a. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约[J]. *科学通报* , 50 : 1 239~1 246.
- 葛文春 吴福元 周长勇 , 等. 2005b. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石学报* , 21 (3): 749~760.
- 郭 锋 范蔚茗 李超文 , 等. 2009. 早古生代古亚洲洋俯冲作用 : 来自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据[J]. *中国科学 D 辑(地球科学)* , 39 : 569~579.
- 林 强 葛文春 吴福元 , 等. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. *岩石学报* , 20(3): 403~412.
- 吕志成 段国正 郝立波 , 等. 2002. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨[J]. *岩石学报* , 18 (2): 212~222.
- 苗来成 范蔚茗 张福勤 , 等. 2003. 小兴安岭西北部新开岭-科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. *科学通报* , 45(22): 2 315~2 323.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京 : 地质出版社.
- 邱检生 胡 建 王孝磊 , 等. 2005. 广东河源白石英岩体 : 一个高分异的 I 型花岗岩[J]. *地质学报* , 79(4): 503~514.
- 邱检生 肖 娥 胡 建 , 等. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因 : 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报* , 024(11): 2 468~2 484.
- 施光海 苗来成 张福勤 , 等. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义[J]. *科学通报* , 49(4): 384~389.
- 隋振民 葛文春 吴福元 , 等. 2007. 大兴安岭北部侏罗纪花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. *岩石学报* , 23 (02): 461~480.
- 隋振民 葛文春 徐学纯 , 等. 2009. 大兴安岭十二站晚古生代后造山花岗岩的特征及其地质意义[J]. *岩石学报* , 25(10): 2 679~2 686.
- 孙德有 吴福元 高 山 , 等. 2005. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世二期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. *地学前缘* , 12(2): 263~275.
- 孙德有 吴福元 高 山. 2004. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定[J]. *地球学报* , 25(2): 213~218.
- 孙德有 吴福元 李惠民 , 等. 2000. 小兴安岭西北部后造山 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎鲁特碰撞拼合带东延的关系[J]. *科学通报* , 45(20): 2 217~2 222.
- 孙德有 吴福元 林 强 , 等. 2001. 张广才岭燕山早期白石山岩体的成因与壳幔相互作用[J]. *岩石学报* , 17 : 213~218.
- 王一先 赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铍铍矿床地球化学和成因[J]. *地球化学* , 26(1): 24~35.
- 吴福元 李献华 杨进辉 , 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报* , 23(6): 1 217~1 238.
- 吴福元 林 强 江博明. 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长的意义[J]. *科学通报* , 42(20): 2 188~2 192.
- 吴福元 孙德有 林 强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报* , 15(2): 181~189.
- 肖 龙 Rapp R P 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约[J]. *岩石学报* , 20(2): 219~225.
- 张 旗 李承东 王 焰 , 等. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 型花岗岩 : 对比及其地质意义[J]. *岩石学报* , 21(6): 1 527~1 537.
- 张 旗 钱 青 王二七 , 等. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原 : 埃达克岩的启示[J]. *地质科学* , 36(2): 248~255.
- 张 旗 王 焰 熊小林 , 等. 2008. 埃达克岩和花岗岩 : 挑战与机遇 [M]. 北京 : 中国大地出版社 , 1~344.
- 张兴洲 杨宝俊 吴福元 , 等. 2006. 中国兴蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征[J]. *中国地质* , 33(4): 816~823.
- 张艳斌 吴福元 孙德有 , 等. 2002. 延边“早海西期”棉田花岗岩体和仲坪紫苏辉石闪长岩的单顺粒锆石 U-Pb 定年[J]. *地质论评* , 48 (4): 424~429.
- 张艳斌 吴福元 翟明国 , 等. 2004. 和龙地块的构造属性与华北地台北缘东段边界[J]. *中国科学(D 辑)* , 34(9): 795~806.
- 赵振华 增田彰正 夏巴尼 M B. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. *地球化学* , 21(3): 221~233.
- 赵振华 熊小林 韩小东. 1999. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨[J]. *中国科学 D 辑* , 29(4): 331~338.