

河北都山杂岩体地球化学特征及其地质意义

吴鸣谦¹ 赵国春¹ 高建伟² 王海涛¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083; 2. 国土资源实物地质资料中心,北京 101149)

摘要:都山杂岩体由不同岩性的花岗类岩石组成,主要包括细粒石英二长岩,中细粒黑云母二长花岗岩(中心相)和粗中粒黑云母正长花岗岩。前人的年龄数据表明该杂岩体中不同岩性的岩体是近乎同时就位的。本文通过野外观察岩体接触关系,结合室内研究,认为该杂岩体具有同源岩浆演化的特点,具有高SiO₂(平均值为69.90%),高Al₂O₃(平均值为14.82%),MgO小于3%(平均值为1.09%),高Sr(平均值为917.18 μg/g)低Y(平均值为5.44 μg/g),低Yb(平均值为0.50 μg/g), $(La/Yb)_N > 1$ (平均值为50.95),以及Nb/Ta比值负异常等特点,在埃达克岩Sr/Y-Y和Sr/Yb-Yb判别图中显示为埃达克质岩石。岩石中出现的强烈的Nb-Ta解耦现象很可能是继承源区组分的特点,推测其源区主要成分为华北克拉通内广泛发育的TTG岩套(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩),源区中也存在少量变质玄武岩和变沉积岩。通过对都山杂岩体的地球化学分析,认为强烈的Nb-Ta负异常,高 $(La/Yb)_N$,高Sr以及无明显的负Eu异常说明残留矿物组合应该为角闪石+石榴石±少量斜长石,残留相为角闪榴辉岩相,残留矿物中无金红石,推测其形成时的地壳厚度为50~70 km。按照地壳均衡原理,其反映出的古山脉高度为3000~5000 m。结合区内部分其他岩体的资料,认为西伯利亚板块与中朝古板块碰撞造山作用在中-晚三叠世时期仍在持续,此时的华北克拉通北东缘出现了高耸的山脉。

关键词:都山杂岩体;同源岩浆;埃达克质;华北克拉通北东缘;山脉

中图分类号:P588.12¹ **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)01-0108-14

1 引言

华北克拉通是中国最古老的前寒武纪克拉通之一,区内大面积出露太古宙TTG(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)岩石(岩套),太古宇表壳岩和中生代花岗岩(文中出现的花岗岩泛指中-酸性的花岗岩类岩石)^[1-3](图1)。区内的中生代花岗岩多为高钾钙碱性系列^[1,4-11]。这些花岗岩中因为部分具有高Sr低Yb,低Y,无Eu或具弱的Eu异常,高 $(La/Yb)_N$ 比值以及负HFSE异常等地球化学特征,故区别于典型的高钾钙碱性岩石^[11]。位于河北省青

龙县北西部的都山杂岩体,整体呈椭圆状,长轴沿北东方向展布于都山一带,出露面积约370 km²,呈岩基状产出,是一类具有上述特征的杂岩体。前人的工作确定了该杂岩体的年龄,探讨了其可能的源区,并通过与邻区其他岩体的对比,概括了华北克拉通中生代岩浆活动规律和特征,而关于其本身的岩石学和地球化学特征以及所能指示的地球动力学意义却鲜有报道^[4-12]。罗镇宽等^[12]采用锆石SHRIMP U-Pb法获得的中细粒黑云母二长花岗岩年龄为(223±2) Ma,中国地质大学(北京)地质调查研究院^[1]采用相同方法测得粗中粒黑云母正长花岗

收稿日期:2013-07-13;改回日期:2013-10-24

基金项目:中国地质调查局地质调查工作项目(1212011121072)资助。

作者简介:吴鸣谦,男,1990年生,博士生,矿床地球化学专业;E-mail:aria.wu1990@gmail.com。

通讯作者:赵国春,男,1963年生,副教授,硕士生导师;E-mail:gczhao@cugb.edu.cn。

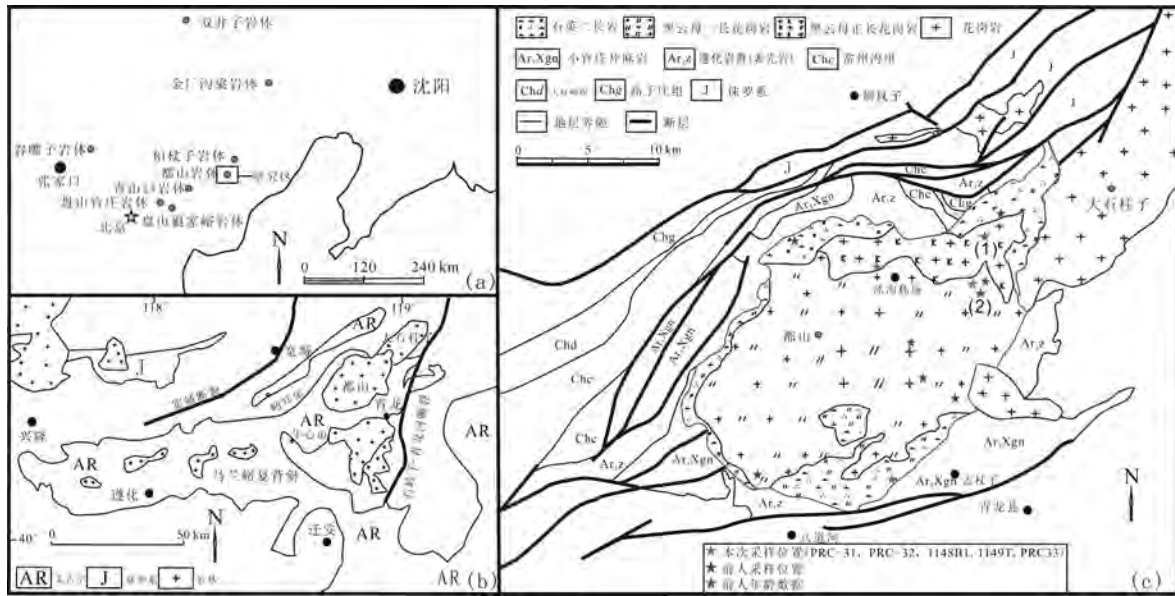


图1 都山杂岩体地质略图(据文献[1-3]修改)

年龄数据来源:(1)粗中粒黑云母正长花岗岩, $(221\pm 4)\text{Ma}^{[1]}$; (2)中细粒黑云母二长花岗岩, $(223\pm 2)\text{Ma}^{[12]}$

Fig.1 Simplified geological map of the study area (modified after References [1-3])

Chronological data: (1)-Coarse-medium-grained biotite syenogranite, $(221\pm 4)\text{Ma}^{[1]}$; (2)-Medium-fine-grained biotite monzogranite, $(223\pm 2)\text{Ma}^{[12]}$

岩的样品年龄为 $(221\pm 4)\text{Ma}$, 由此可以确定都山杂岩体形成于印支期。关于都山杂岩体的源区问题, 则一直存在分歧。王季亮等^[5]认为其属于I-S过渡型花岗岩, 下部地壳变质岩的部分熔融构成其源区, 但没有探讨其具体成分。而刘红涛等^[11]认为中生代华北地区的大量高硅($\text{SiO}_2 > 65\%$)岩石反映了长英质的下地壳源区, 而低硅的岩石($\text{SiO}_2 < 65\%$)则反映了镁铁质的下地壳源区。另一些学者则通过探讨西伯利亚与中朝古板块的碰撞时间, 认为都山等冀北地区晚三叠世岩体具有高钾钙碱性的特征, 可能是碰撞后挤压条件下, 下部地壳部分熔融形成的, 部分源岩为新太古代结晶基底的变质岩^[12-13]。也有学者认为该杂岩体为埃达克质岩体, 由于大量实验岩石学证据表明, 在合适的温压条件下, 基性、中性或者酸性的片麻岩、麻粒岩以及变沉积岩都可以部分熔融形成具有埃达克特征的花岗岩类, 故恢复其岩石源区的性质十分困难, 因此华北地区广泛出露的埃达克岩具有多样的成因^[3, 14-18]。可见, 都山杂岩体的源区问题比较复杂, 具体成分有待进一步商榷。在地球动力学方面, 众多学者^[3, 14-16, 19-20]认为中国东部地区中生代的埃达克岩反映了巨厚地壳的存在, 并以此为证据, 探讨该时期、该地区存在的高原

和/或山脉。

本文以都山杂岩体为研究对象, 着眼其岩石学和地球化学特点, 探讨其源区成分, 并通过收集华北克拉通北东缘其他部分岩体的地球化学和年龄数据, 探讨该杂岩体所处的地球动力学背景并恢复其侵位时的古山脉高度。

2 区域地质特征

都山杂岩体出露于华北克拉通北东缘的太古宙燕辽沉降带马兰峪复背斜内, 是该地区具有代表性的中生代岩体之一。研究区内发育大量断裂, 其中规模较大的有NW侧的宽城断裂和东侧的石岭子—青龙河断裂, 这些断裂整体呈NE-SW向展布, 走向与岩体长轴方向大体一致(图1-b)。该杂岩体边部围岩主要为太古宇遵化岩群(表壳岩), 元古宇常州沟组石英砂岩, 大红峪组石英砂岩及高于庄组白云岩, NE侧侵入于晚古生代大石柱花岗岩体之中(图1-c)。该杂岩体侵位时正处于西伯利亚板块与中朝古板块碰撞造山作用的后碰撞时期^[5, 12-13], 构造背景具有挤压的特点, 其就位后仍受到区域挤压应力作用并形成边部的片麻状构造(图2-a, 图2-b)。

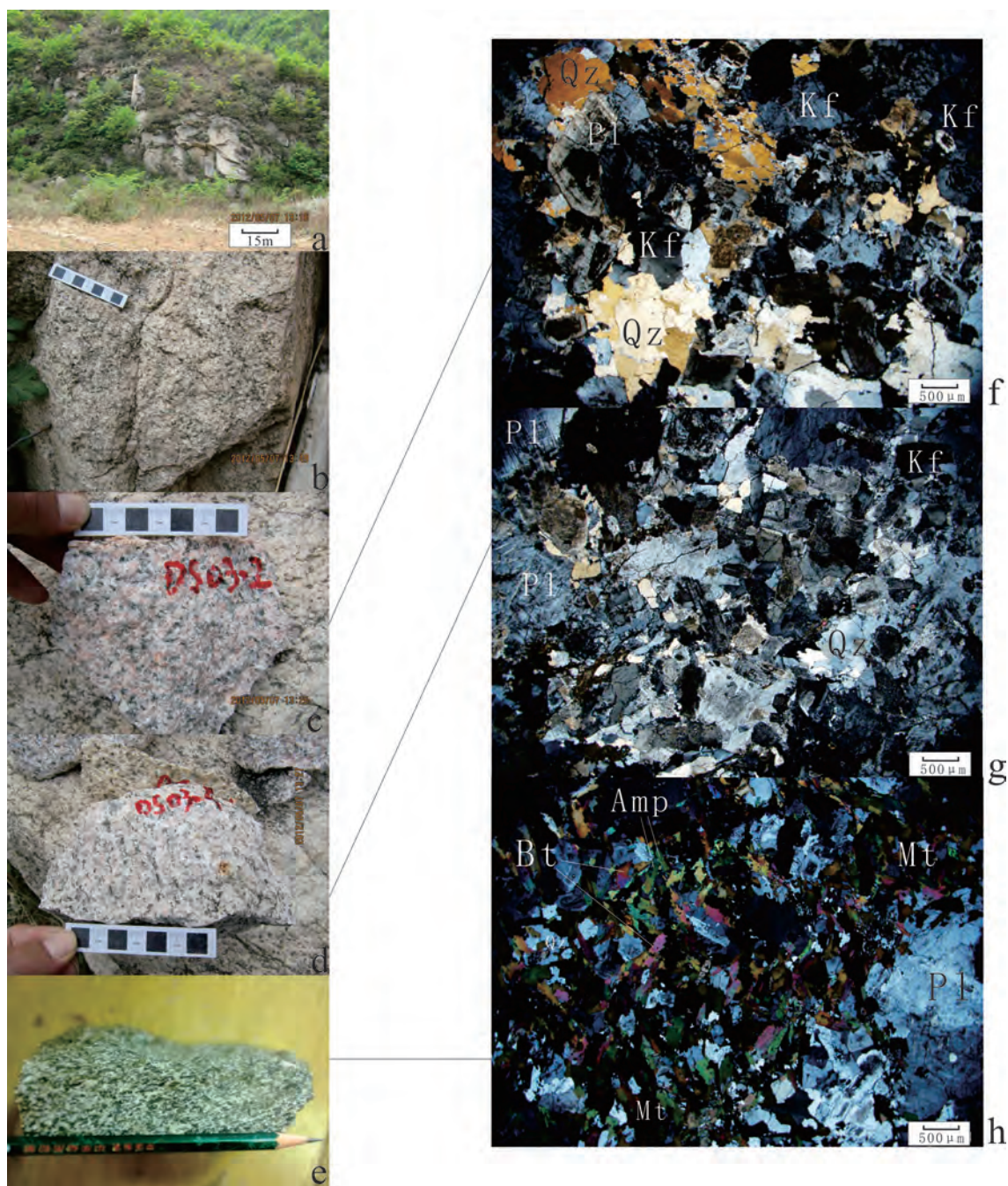


图2 样品野外和镜下照片

a—都山岩体宏观特征;b—岩体边部的片麻状构造;c、f—粗中粒黑云母正长花岗岩;
d、g—中细粒黑云母二长花岗岩;e、h—细粒石英二长岩
Qz—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Amp—角闪石;Bt—黑云母;Mt—磁铁矿

Fig.2 Photos showing the exposure and microscopic characteristics of samples
a—Macroscopic features of Dushan complex; b—Gneissic structures at the edge of Dushan complex; c, f—Coarse-medium-grained biotite syenogranite; d, g—Medium-fine-grained biotite monzogranite; e, h—Fine-grained quartz monzonite
Qz—Quartz; Pl—Plagioclase; Kf—Potash feldspar; Amp—Amphibole; Bt—Biotite; Mt—Magnetite

3 岩石学特征

根据样品岩石学特征,结合侵入岩 TAS 图解(图3),判断都山杂岩体的主要岩性包括:

细粒石英二长岩:出露面积约 50 km²,分布于杂岩体的北西侧边缘部位以及南缘。主要由角闪石、黑云母、斜长石、钾长石、石英以及磁铁矿组成。角闪石含量约 20%,黑云母含量约 20%,钾长石含量 20%左右,斜长石含量约 20%,石英含量约 10%,磁铁矿为粒状结构,含量较高,达到 10%左右(图 2-e、图 2-h)。与相邻的中细粒黑云母二长花岗岩为渐变接触关系。

中细粒黑云母二长花岗岩:出露面积约 280 km²,中细粒花岗结构,块状构造。样品由斜长石、钾长石、石英、黑云母、角闪石等矿物组成。斜长石含量约占总体的 35%,钾长石含量 30%左右,石英含量约 25%,角闪石主要存在于长石和石英的空隙中,含量约占总体的 4%,黑云母含量约为 5%,磁铁矿含量低于 1%。该岩性岩石呈面状分布,构成都山杂岩体的主体相。野外观察时注意到该岩性岩石从边缘到中心显示出粒级由细粒到中粗粒、钾长石含量增加、斜长石含量下降、石英含量逐渐增加的变化特征,代表同源岩浆的连续演化(图 2-d、

图 2-g)。

粗中粒黑云母正长花岗岩:出露面积约为 40 km²,分布在冰沟林场北侧,岩体长轴沿东西向展布。岩石具不等粒结构,块状构造,副矿物为磁铁矿。钾长石含量高于斜长石且粒度变化大,含量约为 30%,石英含量约 35%,斜长石含量占总体的 20%,黑云母含量约为 8%。角闪石含量低于 5%,磁铁矿含量低于 2%。与相邻的中细粒黑云母二长花岗岩(主体相)为渐变接触关系。二者相似的年龄数据表明其与主体相花岗岩近乎同时就位(图 2-c、图 2-f)。

4 地球化学特征

样品的测试全部在天津地质矿产研究所完成,主、微量元素分析分别采用 XRF 和 ICP-MS 方法分析。样品为新鲜的花岗岩,测试之前去除风化面,手工碎至 1~5 mm,并用 mill-Q 水在超声波清洗仪中清洗后烘干,再粉碎至 200 目用于化学分析。样品的加工在无污染的设备中进行,加工流程严格、细致,获得的地球化学数据标准、可靠。表 1 为都山杂岩体样品的地球化学分析结果。

4.1 主量元素特征

粗中粒黑云母正长花岗岩:SiO₂含量为 66.9%~

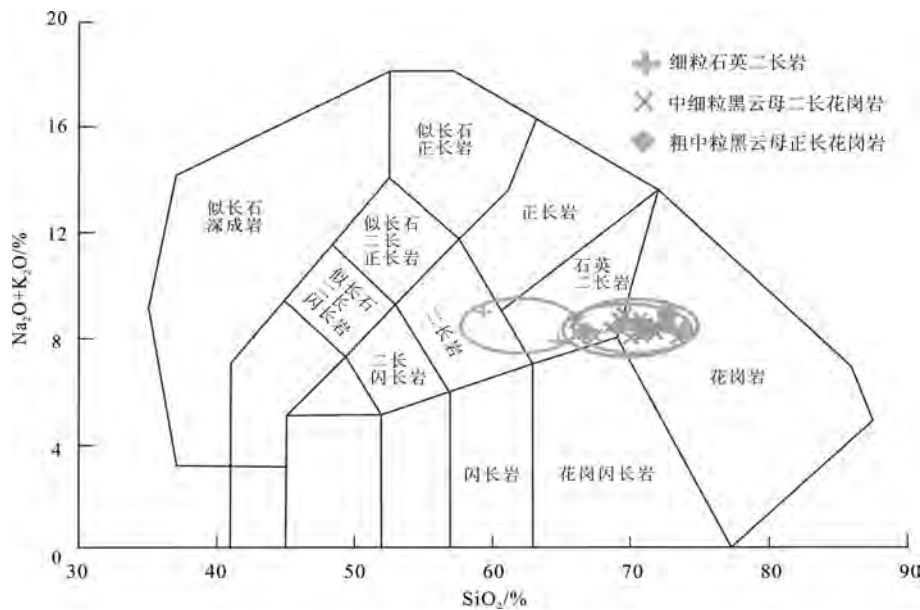


图 3 样品的侵入岩 TAS 图解(据文献[21]修改)

Fig.3 Plots of samples in TAS diagram(modified after Reference [21])

表1 都山杂岩体样品主量(%)、微量和稀土元素($\mu\text{g/g}$)含量
 Table 1 Major and trace element compositions of representative samples from Dushan complex

| 岩性 | 粗中粒黑云母正长花岗岩 | | | | | | | | 中细粒黑云母正长花岗岩 | | | |
|--------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|-------------|-------------|--------|--------|---------|
| | 样品号 | DS-1 | DS-2 | DS-3 | DS-4 | PRC-31* | PRC-32* | 1148 B1* | 1149T* | DS-5 | DS-6 | DS-7 |
| SiO ₂ | 72.68 | 72.58 | 72.62 | 70.36 | 73.86 | 69.37 | 70.97 | 66.90 | 73.44 | 72.60 | 71.60 | 70.02 |
| TiO ₂ | 0.17 | 0.17 | 0.13 | 0.22 | 0.13 | 0.30 | 0.21 | 0.44 | 0.13 | 0.14 | 0.20 | 0.22 |
| Al ₂ O ₃ | 14.09 | 13.93 | 14.35 | 14.84 | 13.58 | 15.11 | 14.68 | 15.07 | 13.82 | 14.34 | 14.62 | 15.38 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.08 | 0.68 | 0.56 | 1.17 | 0.43 | 0.72 | 0.67 | 0.88 | 0.63 | 0.68 | 0.64 | 0.47 |
| FeO | 0.62 | 1.08 | 1.37 | 1.36 | 0.63 | 1.31 | 1.10 | 1.95 | 0.84 | 1.22 | 1.56 | 1.77 |
| MnO | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.02 |
| MgO | 0.52 | 0.68 | 0.60 | 0.73 | 1.13 | 1.08 | 0.81 | 2.09 | 0.38 | 0.47 | 0.75 | 0.73 |
| CaO | 1.32 | 1.52 | 1.28 | 2.04 | 1.32 | 2.22 | 1.65 | 2.94 | 1.11 | 1.39 | 1.64 | 2.08 |
| Na ₂ O | 4.40 | 4.15 | 4.75 | 4.13 | 4.04 | 4.53 | 4.22 | 4.42 | 4.00 | 4.32 | 4.32 | 4.31 |
| K ₂ O | 4.38 | 4.25 | 4.19 | 4.25 | 4.16 | 3.87 | 4.11 | 3.74 | 3.94 | 4.19 | 3.95 | 3.65 |
| P ₂ O ₅ | 0.12 | 0.13 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.13 | 0.12 | 0.26 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.09 |
| LOI | 0.38 | 0.49 | 0.13 | 0.20 | 0.11 | 0.31 | 0.44 | 0.28 | 0.51 | 0.18 | 0.22 | 0.21 |
| TOTAL | 99.87 | 99.77 | 100.26 | 99.44 | 99.76 | 99.55 | 99.49 | 99.50 | 98.88 | 99.75 | 99.78 | 98.95 |
| La | 26.19 | 22.18 | 22.52 | 40.67 | 28.90 | 9.49 | 18.00 | 34.70 | 24.41 | 19.22 | 26.40 | 32.86 |
| Ce | 43.07 | 40.66 | 37.33 | 64.46 | 45.00 | 20.00 | 30.30 | 54.00 | 35.40 | 34.83 | 40.67 | 60.74 |
| Pr | 5.22 | 3.50 | 4.30 | 5.99 | 4.62 | 1.98 | 3.33 | 5.06 | 3.47 | 3.23 | 3.93 | 5.05 |
| Nd | 14.53 | 11.81 | 11.84 | 21.79 | 17.90 | 7.20 | 12.20 | 18.70 | 12.37 | 9.58 | 12.67 | 15.99 |
| Sm | 2.97 | 1.85 | 2.12 | 3.74 | 3.86 | 1.53 | 2.41 | 3.57 | 1.86 | 1.18 | 2.17 | 1.93 |
| Eu | 0.54 | 0.47 | 0.46 | 0.75 | 1.00 | 0.42 | 0.64 | 0.86 | 0.50 | 0.43 | 0.55 | 0.64 |
| Gd | 2.10 | 1.33 | 1.45 | 2.47 | 2.44 | 1.23 | 1.69 | 2.11 | 1.23 | 1.77 | 1.84 | 1.79 |
| Tb | 0.23 | 0.14 | 0.15 | 0.36 | 0.38 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.15 | 0.22 | 0.21 | 0.21 |
| Dy | 1.13 | 0.67 | 0.49 | 1.62 | 2.03 | 1.24 | 1.17 | 1.58 | 0.59 | 0.91 | 0.80 | 0.82 |
| Ho | 0.29 | 0.15 | 0.11 | 0.24 | 0.38 | 0.24 | 0.24 | 0.31 | 0.09 | 0.16 | 0.17 | 0.15 |
| Er | 0.74 | 0.41 | 0.31 | 0.66 | 0.92 | 0.65 | 0.64 | 0.79 | 0.23 | 0.46 | 0.45 | 0.31 |
| Tm | 0.13 | 0.05 | 0.06 | 0.11 | 0.17 | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.03 | 0.08 | 0.08 | 0.06 |
| Yb | 0.72 | 0.37 | 0.31 | 0.70 | 0.49 | 0.41 | 0.41 | 0.55 | 0.22 | 0.42 | 0.49 | 0.33 |
| Lu | 0.12 | 0.05 | 0.06 | 0.11 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.04 | 0.09 | 0.10 | 0.06 |
| ΣREE | 97.98 | 83.64 | 81.51 | 143.67 | 108.15 | 44.75 | 71.37 | 122.71 | 80.59 | 72.58 | 90.53 | 120.94 |
| LREE | 92.52 | 80.47 | 78.57 | 137.40 | 101.28 | 40.62 | 66.88 | 116.89 | 78.01 | 68.47 | 86.39 | 117.21 |
| HREE | 5.46 | 3.17 | 2.94 | 6.27 | 6.88 | 4.12 | 4.49 | 5.82 | 2.58 | 4.11 | 4.14 | 3.73 |
| Rb | 54.30 | 78.50 | 39.80 | 78.60 | 74.10 | 71.10 | 69.70 | 69.40 | 52.10 | 85.00 | 34.20 | 59.20 |
| Sr | 467.00 | 650.40 | 577.20 | 665.20 | 710.30 | 700.70 | 668.70 | 767.60 | 440.70 | 554.90 | 698.60 | 1292.50 |
| Ba | 1266.9 | 2041.2 | 1968.2 | 1773.8 | 1668.9 | 1712.3 | 1702.8 | 1598.7 | 1056.6 | 1908.0 | 2686.6 | 3655.8 |
| Ni | 4.00 | 3.40 | 2.80 | 6.60 | 6.50 | 5.80 | 4.90 | 5.10 | 6.90 | 2.10 | 4.90 | 9.80 |
| Co | 1.54 | 2.40 | 3.00 | 5.60 | 4.10 | 3.60 | 2.90 | 3.30 | 4.40 | 2.05 | 2.83 | 1.40 |
| Cr | 6.00 | 38.40 | 5.80 | 20.20 | 17.40 | 16.80 | 11.40 | 13.30 | 5.20 | 10.10 | 8.50 | 13.10 |
| Zr | 83.80 | 181.80 | 124.60 | 188.80 | 141.30 | 127.80 | 131.80 | 129.80 | 123.20 | 75.50 | 145.30 | 93.00 |
| Hf | | | | 4.80 | 3.80 | 4.00 | 5.20 | 3.80 | 3.80 | | | |
| Nb | 9.80 | 5.10 | 6.80 | 9.10 | 8.20 | 7.10 | 6.30 | 7.00 | 5.80 | 23.90 | 9.40 | 18.10 |
| Ta | 4.80 | 4.30 | 4.60 | 2.20 | 2.30 | 3.40 | 4.20 | 3.90 | 3.50 | 4.90 | 4.50 | 4.20 |
| U | | | | 0.64 | 0.43 | 0.73 | 0.66 | 0.57 | 0.30 | | | |
| Th | 10.30 | 4.00 | 3.30 | 4.50 | 7.50 | 7.30 | 5.80 | 8.20 | 2.00 | 9.80 | 4.20 | 4.70 |
| Y | 7.28 | 4.73 | 2.95 | 6.99 | 4.40 | 3.63 | 3.38 | 4.66 | 2.42 | 4.37 | 4.36 | 3.95 |
| Rb/Sr | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.00 | 0.00 |
| Sr/Ba | 0.40 | 0.30 | 0.30 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.50 | 0.40 | 0.30 | 0.30 | 0.40 |
| Nb/Ta | 2.00 | 1.20 | 1.50 | 4.10 | 3.60 | 2.00 | 1.50 | 1.80 | 1.70 | 4.90 | 2.10 | 4.30 |

续表1

| 岩性 | 中细粒黑云母二长花岗岩 | | | | | | | | | | 细粒石英二长岩 | |
|--------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 样品号 | DS-9 | DS-10 | DS-11 | DS-12 | DS-13 | DS-14 | DS-15 | DS-16 | DS-17 | DS-18 | DS-19 |
| SiO ₂ | 70.78 | 71.76 | 71.78 | 70.92 | 70.72 | 69.26 | 68.54 | 69.56 | 67.42 | 66.08 | 59.24 | 64.57 |
| TiO ₂ | 0.24 | 0.23 | 0.18 | 0.17 | 0.24 | 0.28 | 0.35 | 0.28 | 0.41 | 0.36 | 1.03 | 0.50 |
| Al ₂ O ₃ | 15.48 | 14.33 | 14.95 | 14.87 | 14.81 | 14.57 | 15.28 | 15.09 | 14.88 | 15.50 | 16.72 | 15.35 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.92 | 0.95 | 0.70 | 1.07 | 0.77 | 1.16 | 1.13 | 0.92 | 1.83 | 1.00 | 1.88 | 0.77 |
| FeO | 1.37 | 1.05 | 1.10 | 1.20 | 1.25 | 1.22 | 1.70 | 1.48 | 1.41 | 2.30 | 3.95 | 2.63 |
| MnO | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.10 | 0.04 |
| MgO | 0.68 | 0.68 | 0.36 | 0.81 | 0.67 | 1.12 | 1.32 | 0.97 | 2.37 | 1.96 | 2.57 | 2.62 |
| CaO | 1.73 | 1.49 | 1.59 | 1.94 | 1.39 | 2.20 | 2.29 | 1.88 | 2.60 | 2.73 | 4.51 | 2.96 |
| Na ₂ O | 4.08 | 4.08 | 4.40 | 4.40 | 4.50 | 4.75 | 4.69 | 4.69 | 4.65 | 4.78 | 4.70 | 4.15 |
| K ₂ O | 3.94 | 4.10 | 4.08 | 3.91 | 4.20 | 3.95 | 3.65 | 4.20 | 3.38 | 3.80 | 4.25 | 3.71 |
| P ₂ O ₅ | 0.10 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.10 | 0.21 | 0.14 | 0.10 | 0.20 | 0.19 | 0.35 | 0.29 |
| LOI | 0.54 | 0.51 | 0.46 | 0.14 | 0.59 | 0.50 | 0.41 | 0.36 | 0.60 | 0.59 | 0.40 | 1.28 |
| TOTAL | 99.91 | 99.35 | 99.72 | 99.54 | 99.42 | 99.40 | 99.75 | 99.74 | 99.97 | 99.62 | 99.70 | 99.84 |
| La | 42.94 | 36.22 | 36.38 | 27.50 | 31.68 | 33.13 | 47.27 | 36.31 | 45.30 | 58.70 | 42.26 | 38.10 |
| Ce | 68.50 | 55.13 | 57.46 | 44.41 | 48.12 | 62.55 | 73.74 | 54.19 | 73.15 | 92.58 | 98.83 | 62.90 |
| Pr | 7.31 | 6.06 | 5.79 | 3.47 | 3.79 | 6.81 | 5.64 | 4.50 | 8.36 | 11.84 | 10.74 | 6.89 |
| Nd | 21.80 | 16.22 | 10.13 | 15.31 | 16.65 | 21.74 | 24.10 | 18.73 | 27.50 | 33.41 | 38.67 | 24.00 |
| Sm | 3.26 | 2.73 | 2.66 | 2.45 | 2.02 | 3.95 | 3.67 | 3.11 | 4.92 | 4.79 | 8.02 | 4.87 |
| Eu | 0.79 | 0.61 | 0.68 | 0.58 | 0.60 | 0.77 | 0.94 | 0.68 | 1.00 | 1.23 | 1.48 | 1.11 |
| Gd | 2.21 | 1.78 | 1.95 | 1.51 | 1.92 | 2.48 | 2.48 | 1.97 | 3.12 | 3.56 | 5.36 | 2.85 |
| Tb | 0.27 | 0.24 | 0.27 | 0.23 | 0.22 | 0.28 | 0.31 | 0.23 | 0.38 | 0.44 | 0.67 | 0.43 |
| Dy | 1.20 | 1.01 | 1.11 | 0.96 | 0.85 | 1.07 | 1.47 | 0.93 | 1.54 | 1.94 | 3.74 | 2.22 |
| Ho | 0.14 | 0.15 | 0.10 | 0.11 | 0.16 | 0.21 | 0.26 | 0.17 | 0.26 | 0.25 | 0.53 | 0.41 |
| Er | 0.42 | 0.34 | 0.33 | 0.25 | 0.48 | 0.58 | 0.64 | 0.50 | 0.64 | 0.65 | 1.50 | 0.54 |
| Tm | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.10 | 0.07 | 0.10 | 0.12 | 0.23 | 0.12 |
| Yb | 0.46 | 0.36 | 0.30 | 0.29 | 0.40 | 0.53 | 0.50 | 0.41 | 0.63 | 0.74 | 1.48 | 0.61 |
| Lu | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.11 | 0.09 | 0.06 | 0.12 | 0.11 | 0.24 | 0.09 |
| ΣREE | 149.44 | 120.95 | 117.24 | 97.16 | 107.02 | 134.31 | 161.21 | 121.86 | 167.02 | 210.36 | 213.75 | 145.13 |
| LREE | 144.60 | 116.97 | 113.10 | 93.72 | 102.86 | 128.95 | 155.36 | 117.52 | 160.23 | 202.55 | 200.00 | 137.87 |
| HREE | 4.84 | 3.98 | 4.14 | 3.44 | 4.16 | 5.36 | 5.85 | 4.34 | 6.79 | 7.81 | 13.75 | 7.26 |
| Rb | 61.80 | 70.80 | 59.30 | 67.30 | 87.60 | 37.60 | 51.20 | 56.00 | 37.73 | 44.40 | 102.40 | 86.20 |
| Sr | 747.2 | 687.7 | 819.5 | 879.4 | 827.4 | 1275.9 | 1373.8 | 1263.4 | 1445.5 | 2236.1 | 1197.5 | 1065.2 |
| Ba | 2149.3 | 1874.8 | 2129.1 | 2018.9 | 2074.2 | 2646.6 | 2620.4 | 2384.5 | 2446.3 | 3855.7 | 1663.9 | 2012.5 |
| Ni | 6.30 | 5.00 | 5.60 | 5.30 | 6.50 | 14.40 | 9.40 | 7.20 | 20.00 | 21.70 | 14.50 | 11.20 |
| Co | 5.00 | 4.80 | 4.20 | 4.00 | 1.70 | 6.96 | 3.30 | 2.50 | 7.02 | 6.20 | 11.60 | 12.50 |
| Cr | 11.50 | 10.30 | 10.20 | 6.50 | 28.20 | 19.50 | 20.80 | 15.60 | 42.40 | 56.10 | 38.20 | 29.20 |
| Zr | 186.50 | 165.20 | 161.30 | 140.70 | 123.80 | 49.90 | 160.00 | 142.80 | 136.20 | 191.00 | 267.60 | 104.50 |
| Hf | 3.20 | 3.40 | 3.60 | 4.10 | | | | | | | 3.10 | 2.80 |
| Nb | 5.90 | 8.30 | 6.00 | 7.30 | 11.00 | 10.60 | 14.60 | 11.10 | 14.70 | 14.40 | 13.40 | 9.50 |
| Ta | 2.80 | 3.20 | 2.80 | 1.50 | 4.50 | 4.50 | 4.70 | 4.40 | 4.80 | 4.50 | 3.20 | 4.40 |
| U | 0.40 | 0.40 | 0.30 | 0.87 | | | | | | | 2.20 | 1.72 |
| Th | 4.20 | 3.80 | 5.00 | 5.50 | 8.10 | 6.20 | 6.70 | 6.20 | 10.40 | 8.30 | 14.10 | 11.20 |
| Y | 4.77 | 3.71 | 3.60 | 3.37 | 5.46 | 6.20 | 7.31 | 5.51 | 7.50 | 8.78 | 15.35 | 5.93 |
| Rb/Sr | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | | | | | | 0.10 | 0.10 |
| Sr/Ba | 0.30 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.60 | 0.60 | 0.70 | 0.50 |
| Nb/Ta | 2.10 | 2.60 | 2.10 | 4.90 | 2.40 | 2.40 | 3.10 | 2.50 | 3.10 | 3.20 | 4.20 | 2.20 |

注:*样品为本次实测,其余样品数据引自文献[1]。

73.86%；中细粒黑云母二长花岗岩： SiO_2 含量为66.08%~73.44%；细粒石英二长岩： SiO_2 含量为59.24%~64.57%。 Na_2O 含量普遍高于 K_2O （仅有4个样品 K_2O 含量高于 Na_2O ），平均 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}>1$ 。 Al_2O_3 平均值为14.82%， Na_2O 平均值为4.39%， K_2O 平均值为3.99%。其中，细粒石英二长岩（ Al_2O_3 ：15.35%~16.72%）比粗中粒黑云母正长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩（ Al_2O_3 ：13.58%~15.11%；13.82%~15.50%）更高铝。所有样品均显示出富铝、富钠、富钾的特征，24个样品中仅有1个样品（DS-19）在 SiO_2 - K_2O 图解（图4-a）中落入钾玄岩区域，其余均落入高钾钙碱性区域。A/CNK平均为0.98，超过半数样品落入偏铝质区域（图4-b），且伴随着 SiO_2 含量增加，A/CNK值也升高（图4-c）。A/CNK与 SiO_2 的正相关关系可以说明细粒石英二长岩比粗中粒黑云母正长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩的斜长石牌号更高^[11]，这种特征暗示岩性的变化可能为同源岩浆分异演化所致。

4.2 微量元素特征

样品的微量元素和稀土元素特征总体相似（图5）：富集Ba和Sr，且从低 SiO_2 样品到高 SiO_2 样品，Ba平均含量：1838.2→2393.3→1716.6（ $\mu\text{g}/\text{g}$ ）；Sr平均含量：1131.4→1038.8→650.9（ $\mu\text{g}/\text{g}$ ）；CaO平均含量：3.74→1.86→1.79（%）。在化学性质上，Ba、Sr与Ca的地球化学行为十分接近，可以随Ca一起迁移、分异和富集。在同源岩浆演化系列中，Ca、Ba和Sr往往在早期富集，晚期贫化。鉴于各岩性岩体之间均为渐变接触关系且岩体年龄接近，本文认为都山杂岩体为同源岩浆分异演化形成并近乎同时就位。高Sr和弱的负Eu异常说明源区可能有少量斜长石残留或不残留斜长石；强烈的轻、重稀土元素分馏暗示石榴石是必要的残留矿物^[14-18,23-25]。此外，样品总体亏损稀土元素，在粗中粒黑云母正长花岗岩中 ΣREE 平均为94.30 $\mu\text{g}/\text{g}$ ；中细粒黑云母二长花岗岩中 ΣREE 平均为125.09 $\mu\text{g}/\text{g}$ ；而细粒石英二长岩中的 ΣREE 平均为179.44 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。Ti、Nb、Ta、Zr等高场强元素（HFSE）表现出在演化早期富集，演化晚期略微亏损。尤其是Ti，在演化的早期平均为4590 $\mu\text{g}/\text{g}$ ，中期平均为1470 $\mu\text{g}/\text{g}$ ，而晚期则降低到1327.50 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。在同源岩浆分异演化过程中，没有出现REE以及HFSE的富集，暗示残留相中有REE以及

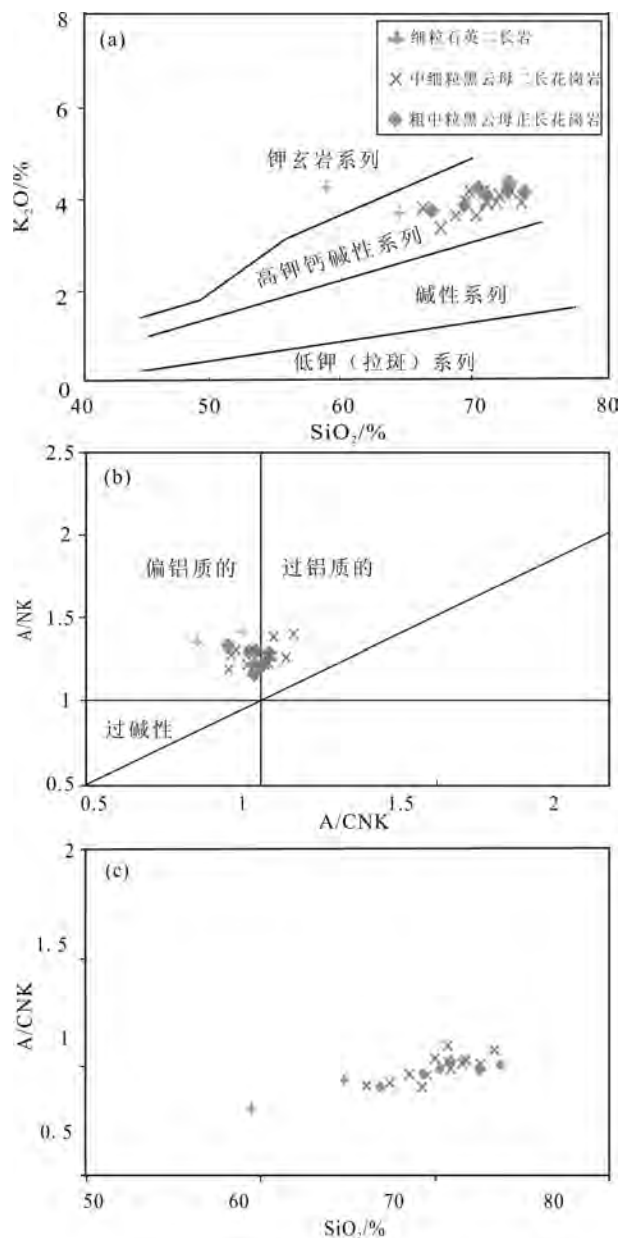


图4 都山杂岩体样品的主要元素特征图解
a— SiO_2 - K_2O ；b—A/CNK-A/NK；c— SiO_2 -A/CNK
Fig.4 Diagrams of major elements characteristics
a— SiO_2 - K_2O ；b—A/CNK-A/NK；c— SiO_2 -A/CNK

及HFSE的重要载体矿物存在。

Castillo^[17-18]系统归纳埃达克质岩石的判别标志包括 $\text{SiO}_2>56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\geq 15\%$ 、 $\text{MgO}<3\%$ 、 $\text{Sr}>300\mu\text{g}/\text{g}$ 、 $\text{Y}<15\mu\text{g}/\text{g}$ 、 $\text{Yb}<1.9\mu\text{g}/\text{g}$ 、低HFSE、 $\text{La}/\text{Yb}>20$ 、无明显负Eu异常等，并认为Y-Sr/Y图解和Yb-Sr/Yb图解是判别埃达克岩的有效图解。由都山杂岩体样品在Y-Sr/Y和Yb-Sr/Yb图解上的投点（图6）

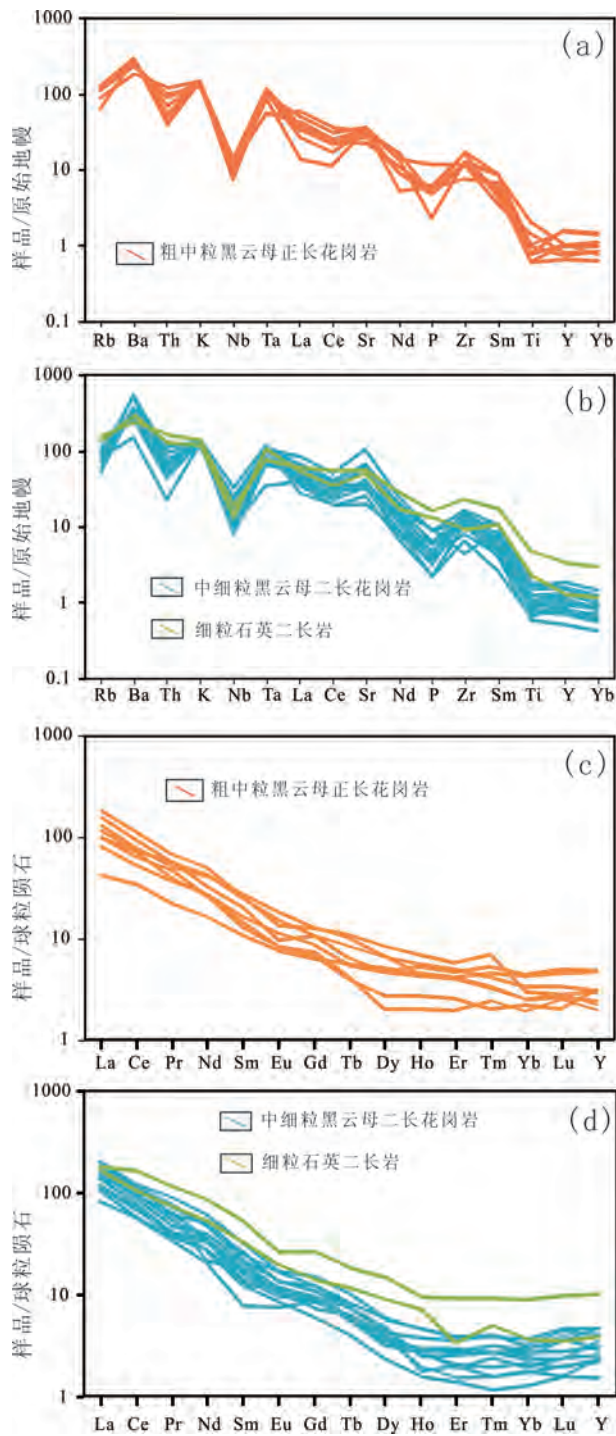


图5 样品的微量元素和稀土元素特征(标准化数值据文献[22])

Fig.5 Normalized characteristics of trace elements and rare earth elements in samples (normalized data after Reference [22])

可见,都山杂岩体为埃达克质杂岩体,这也与前人的判断一致^[3,19-20]。

5 讨论

自从Defant和Drummond^[23]提出埃达克岩是与年轻的尚未冷却的板片熔融有关的一类特殊的岛弧岩浆岩之后,随后的研究表明玄武质岩浆的结晶分异和陆壳混染(AFC)、俯冲板块熔体交代地幔楔熔融的产物以及部分熔融加厚或拆沉的下地壳也可以形成埃达克质的岩石^[3,16-20,23-35]。都山杂岩体不会是玄武质岩浆经历AFC过程形成的,因为岩石中存在大量SiO₂>66%的酸性样品;该杂岩体也不会是俯冲板片熔融或俯冲板片熔体交代地幔楔熔融的产物,因为:(1)王季亮等^[5]测得都山杂岩体(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.7065,与玄武质洋壳的该比值关联性差;(2)样品Mg#平均为46.56,MgO平均为1.09%,暗示岩浆成分与地幔橄榄岩无关^[3,32]; (3)该杂岩体属于高钾钙碱性系列岩石,而与俯冲有关的花岗岩通常是贫钾的;(4)中国东部埃达克岩的形成在时空上与岛弧环境无关^[17,19-20,27-29,33-35]。所以,都山杂岩体最可能的源区是部分熔融的加厚或拆沉下地壳。

5.1 都山杂岩体形成时的温压条件和源区探讨

角闪石和富Ti矿物是非常重要的场强元素和REE的载体矿物^[36]。鉴于样品中普遍出现的ΣREE和Ti等场强元素(HFSE)的亏损,认为源区的残留相内存在这类矿物。金红石、锆石、榍石等均为重要的含Ti相,而在残留相中可能稳定存在的主要矿物相只有金红石或/和角闪石。

Nb、Ta同属场强元素,因具有相同的电价和离子半径,从而具有相似的地球化学性质^[37]。本文的样品中出现了异常低的Nb/Ta比值,平均值仅为2.73,远低于原始地幔的该比值(17.39^[22])。而且,Cr、Ni等元素伴随着岩浆的演化也出现了不同程度的亏损。变质玄武岩的部分熔融实验已经证实,如果金红石在残留相中出现则会导致熔体中Nb与Ta的负异常,且由于在金红石中,D_{Ta}>D_{Nb},故造成熔体中Nb/Ta比值的升高^[14-15],这与样品反映出来的Nb-Ta特征不符;相比于金红石,角闪石的残留则会造成Ti、Cr、Ni在岩浆组分中的亏损,同时导致Nb/Ta比值降低^[32,38-39]。Condie^[32]通过统计大量不同时代的TTG样品的Zr/Sm-Nb/Ta分布特点(图7),认为角闪石在TTG熔体产生的过程中作为残留相存在

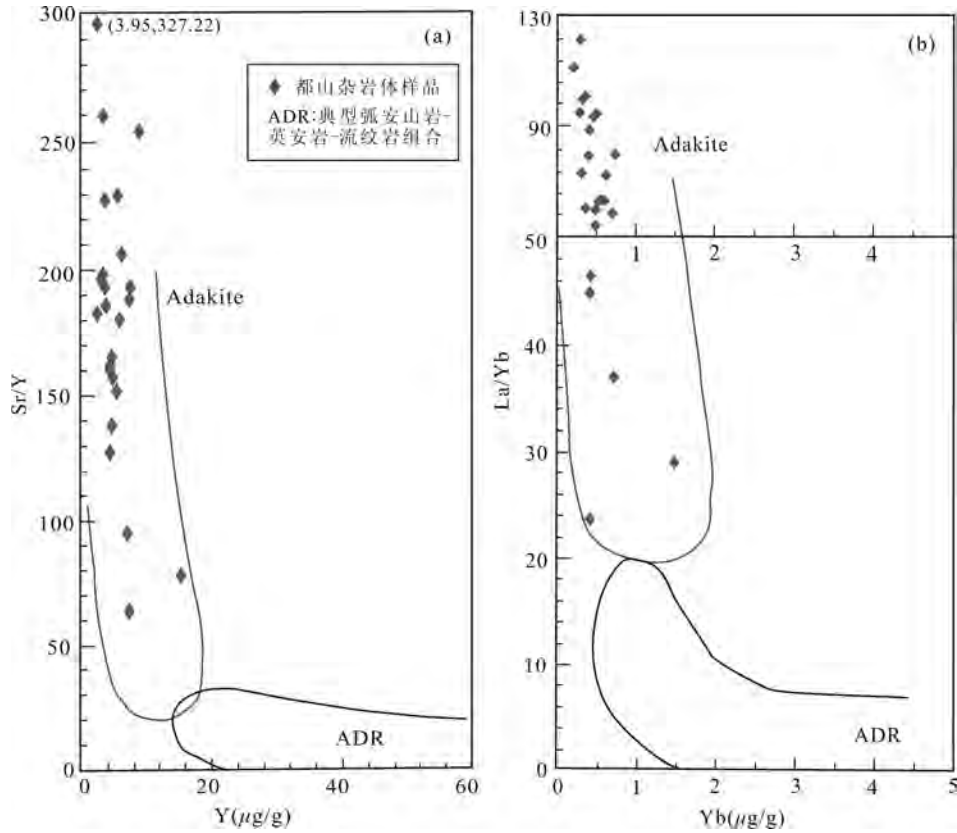


图6 样品的埃达克岩 Sr/Y-Y(a)和 Sr/Yb-Yb(b)判别图解(据文献[18]修改)

Fig.6 Sr/Y-Y(a) and Sr/Yb-Yb(b) discrimination diagram of adakite samples(modified after Reference [18])

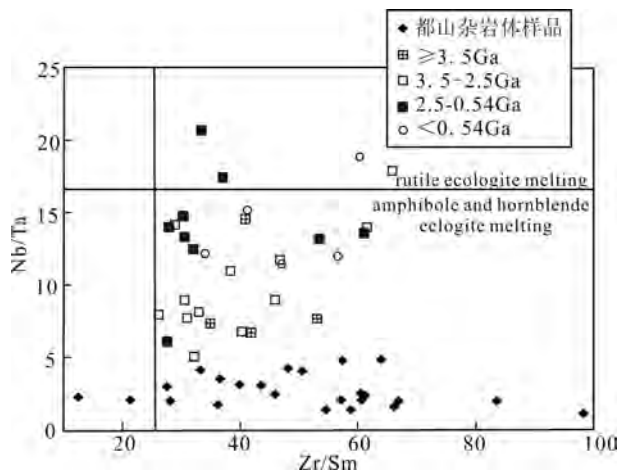


图7 不同时代 TTG Zr/Sm-Nb-Ta 特征图解
(据文献[32]修改)

Fig.7 Characteristics of TTGs of different ages spotted on Zr/Sm-Nb-Ta diagram (modified after Reference [32])

可以解释其 Nb/Ta 比值的负异常。因此,角闪石可能是都山杂岩体源区的必要残留矿物之一,而金红

石应该不存在于残留相中。源区残留矿物组合应该为角闪石+石榴石±少量斜长石。从角闪岩脱水熔融相图中(图8)可以看出,该杂岩体的残留相应更接近角闪榴辉岩相(图8-区5,红色虚线区域),而不是石榴角闪岩相(图8-区3)或榴辉岩相(图8-区6)。其形成深度可能为 50~70 km,温度高于 700°C(图8-区5)。然而角闪石对于 Nb-Ta 分异程度的影响也是有限的,强烈的 Nb-Ta 解耦可能不只是残留相中的角闪石造成的,由图7可见,仅依靠角闪石对 Nb-Ta 分异的影响可能很难达到都山杂岩体这样的 Nb-Ta 分异程度,换言之,该杂岩体特殊的 Nb-Ta 异常暗示其源岩可能具有相同的特点,且都山杂岩体继承了源岩的这一特征。在岩浆的源岩判别图解(图9)中,样品的分布特征显示出源岩成分比较复杂,可能既有 TTG 组分的贡献又有变质玄武岩以及变沉积岩组分的参与。但是,变质玄武岩和变沉积岩组分不具有强烈的 Nb-Ta 解耦特征,只有 TTG 是具有该特点的岩石(岩套)^[32,39],且在研

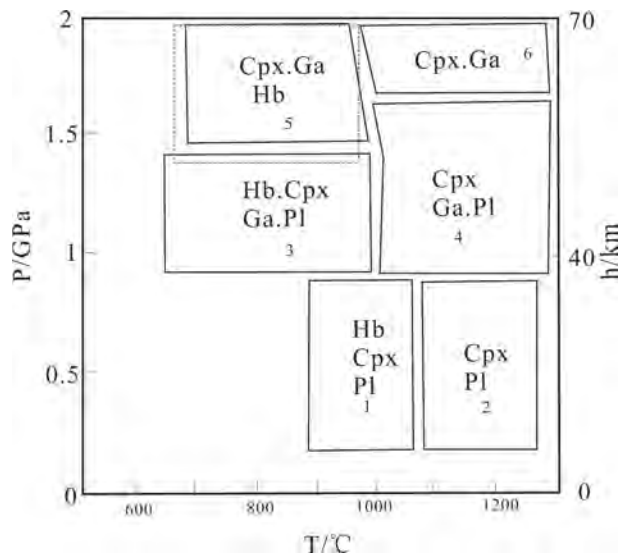


图8 角闪岩脱水熔融实验主要残留矿物组合 (据文献[40],转引自文献[41]修改)

Fig.8 Major residual minerals in amphibolite dehydration experiment(after Reference [40], modified after Reference [41])

究区内大量出露,可以为都山杂岩体这样的大岩基提供充足的源岩。所以,通过对样品Nb、Ta等微量元素的分析,认为都山杂岩体的源岩主要为区内广泛发育的太古宙TTG。

5.2 研究区中三叠世—早侏罗世区域构造演化

张旗等^[3,19-20,33]认为通过花岗岩中Sr, Yb的含量可以判别壳源花岗岩形成时的地壳厚度,并提出在

华北地区大量分布的早中生代埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩形成于加厚地壳的底部,埃达克岩的出露代表当时地壳厚度超过50 km,喜马拉雅型花岗岩指示的地壳厚度略低于埃达克岩在40~50 km之间,而浙闽型花岗岩指示正常地壳厚度。

本文搜集了分布于华北克拉通北东缘的部分中酸性岩体地球化学数据和年龄资料并投点于Yb-Sr图解(图10)中,其中包括:中三叠世双井子花岗岩体样品3件(237 Ma)^[13];中一晚三叠世出露的包括都山杂岩体(投点所用数据为本文数据的平均值)在内的谷嘴子岩体样品1件(236 Ma)、柏杖子岩体样品2件(222 Ma)^[44]、金厂沟梁岩体样品1件(218 Ma)^[45]、盘山官庄岩体样品2件(208 Ma)以及盘山狼家峪岩体样品1件(205 Ma)^[46];早一中侏罗世出露的青山口岩体样品1件(199 Ma)、峪耳崖岩体样品2件(175 Ma)以及牛心山岩体样品1件(172 Ma)^[44]。中一晚三叠世出露的埃达克质岩体指示当时华北克拉通北东缘存在高耸的山脉,中三叠世双井子岩体为喜马拉雅型花岗岩,可以理解为地壳已经加厚,而中一晚侏罗世的一系列岩体为喜马拉雅型和浙闽型花岗岩,可能是巨厚地壳已经开始减薄的标志。所以,时代为中一晚三叠世的一系列埃达克质岩体代表西伯利亚板块和中朝古板块之间的碰撞造山作用达到最强,此时的地壳厚度应该大于50 km,根据地壳均衡原理,此时华北克拉通北东缘的山脉高度在3000~5000 m^[3,19]。因此,该碰撞造山作用应该早于237 Ma,并于220 Ma左右达到最强,

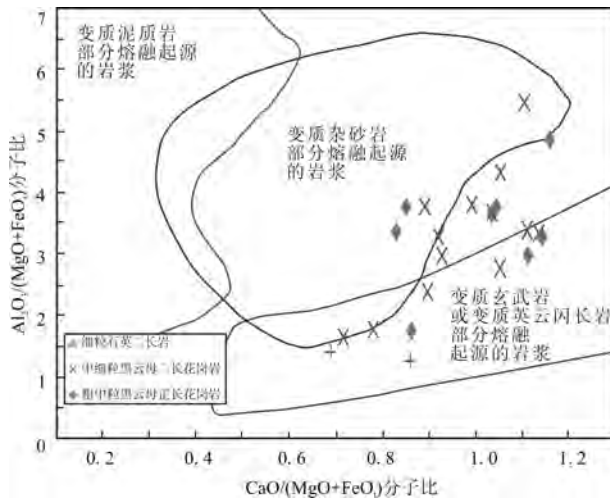


图9 岩浆源区判别图解(据文献[42],转引自文献[43])
Fig.9 Discrimination diagram of sources(after Reference [42], modified after Reference [43])

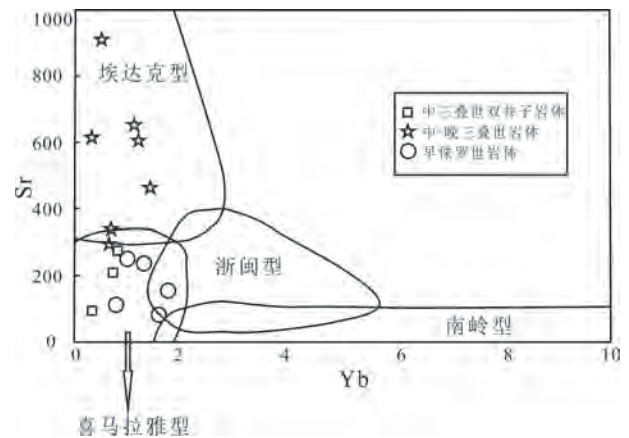


图10 花岗岩Yb-Sr判别图解(据文献[19])
Fig.10 Yb-Sr discrimination diagram of granitic rocks (after Reference [19])

而后地壳减薄并形成了一系列喜马拉雅—浙闽型花岗岩。这一结论与李锦轶等^[13]推测的两板块的碰撞起止时间一致。因此,都山杂岩体等一系列中一晚三叠世岩体代表部分熔融加厚地壳底部而形成的埃达克岩,与下地壳拆沉作用无关。

值得一提的是,部分分布在华北克拉通北东缘的早一中侏罗世岩体(碱厂等岩体)也同样具有埃达克特征^[3]。本文认为华北克拉通北东缘在此时段可能发生了局部的下地壳拆沉事件,而近年来在中国东部地区也报道了一些与下地壳拆沉背景有关的埃达克岩^[27-28]。因此,这类岩体的形成环境可能与下地壳的拆沉事件有关,与本文的结论并不矛盾。

6 结 论

都山杂岩体具有埃达克质岩石的地球化学特征,为同源岩浆分异演化形成并近乎同时就位。该杂岩体的源区成分复杂,既有变长英质(TTG)组分也有变质玄武岩和变沉积岩组分,但通过对样品微量元素特征的研究和探讨,认为都山杂岩体等一系列中一晚三叠世岩体代表西伯利亚板块与中朝古板块的造山运动仍在持续,此时研究区内沿NE-SW向展布高耸的山脉,其高度可能达到3000~5000 m;早一中侏罗世的一系列喜马拉雅—浙闽型花岗岩,代表逐渐趋于正常的地壳厚度。

致谢: 特别感谢张德会教授、吕志成副总工程师以及审稿人在成文过程中提出的重要修改意见。

参考文献(References):

- [1] 中国地质大学(北京)地质调查研究院. 中国地质大学(北京)河北省青龙县1:25万区调报告[M]. 2002.
Institute of Geological Survey in China University of Geosciences (Beijing). China University of Geosciences (Beijing) 1: 250000 Regional Survey Report of Qinglong, Hebei Province[M]. 2002(in Chinese).
- [2] 张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 等. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 864-875.
Zhang Changhou, Wu Ganguo, Xu Debin, et al. Mesozoic tectonic framework and evolution in the central segment of the intraplate Yanshan orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9): 864-875(in Chinese with English abstract).
- [3] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 1-344.
Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, et al. Adakite and Granites: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 2008: 1-344(in Chinese).
- [4] 张德全, 孙桂英. 中国东部花岗岩[M]. 中国地质大学出版社, 1988: 1-311.
Zhang Dequan, Sun Guiying. Granites of Eastern China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988: 1-311(in Chinese).
- [5] 王季亮, 李丙泽, 周德星, 等. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系[M]. 地质出版社, 1994: 1-213.
Wang Jiliang, Li Bingze, Zhou Dexing, et al. Geology of Intermediate-acidic Intrusions of Hebei Province and Its Relation to Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-213(in Chinese).
- [6] 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-856.
Bureau of Geology and Mineral Deposits of Liaoning Province. Regional Geology of Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-856(in Chinese with English abstract).
- [7] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-714.
Bureau of Geology and Mineral Deposits of Hebei Province. Regional Geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-714(in Chinese with English abstract).
- [8] 曲以秀, 柳彬德, 郝淑琴, 等. 燕山地区中生代花岗岩的成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 1997, 12(1): 11-17.
Qu Yixiu, Liu Binde, Hao Shuqin, et al. The genesis of the Mesozoic granites in Yanshan Area[J]. Journal of Mineral Exploration, 1997, 12(1): 11-17(in Chinese with English abstract).
- [9] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(4): 313-318.
Wu Fuyuan, Sun Deyou. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29(4): 313-318(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘凤山, 石准立. 太行山—燕山地区中生代花岗岩生成动力学机制与陆内造山作用[J]. 地球学报——中国地质科学院院报, 1998, 19(1): 12-18.
Liu Fengshan, Shi Zhunli. Dynamic mechanism about generation of Mesozoic granites in Taihangshan—Yanshan and intracontinental orogeny[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1998, 19(1): 12-18(in Chinese with English abstract).
- [11] 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 等. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 257-274.
Liu Hongtao, Sun Shihua, Liu Jianming, et al. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of the Northern China Craton: Geochemistry and features of origin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 257-274(in Chinese with English abstract).

- [12] 罗镇宽, 裘有守, 关康, 等. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. 地球化学, 2003, 32(2): 173-180.
Luo Zhenkuan, Qiu Youshou, Guan Kang, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholith and related granite-porphphy dyke, eastern Hebei Province, China and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2003, 32(2): 173-180(in Chinese with English abstract).
- [13] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 565-582.
Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collision crust derived granite in the East Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean Paleoplates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565-582(in Chinese with English abstract).
- [14] 熊小林, Adam J, Green T H, 等. 变质玄武岩部分熔体微量元素特征及埃达克岩体产生条件[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35: 837-846.
Xiong Xiaolin, Adam J, Green T H, et al. The features of trace elements in partial melting metamorphic basalt and the formation of adakite[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2005, 35: 837-846(in Chinese).
- [15] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339-359.
- [16] Xiao L, Clemens J D. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints[J]. *Lithos*, 2007, 95: 399-414.
- [17] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 257-268.
- [18] Castillo P R. Adakite petrogenesis[J]. *Lithos*, 2012, 134: 304-316.
- [19] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 早中生代的华北北部山脉: 来自花岗岩的证据[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1391-1403.
Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, et al. Mountain range in northern North China during the Early Mesozoic: Evidence from granite[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1391-1403 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代中国东部高原: 证据, 问题和启示[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1404-1430.
Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, et al. The East China Plateau during the late Mesozoic era: Evidence, questions and enlightenment[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1404-1430(in Chinese with English abstract).
- [21] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3): 215-224.
- [22] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [23] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662-665.
- [24] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 2003, 425(6958): 605-609.
- [25] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411-429.
- [26] Dreher S T, Macpherson C G, Pearson D G, et al. Re-Os isotope studies of Mindanao adakites: Implications for sources of metals and melts[J]. *Geology*, 2005, 33(12): 957-960.
- [27] Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust- [J]. *Geology*, 2002, 30(12): 1111-1114.
- [28] Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, et al. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of East China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent[J]. *Geochemical Journal*, 2004, 38(5): 417-434.
- [29] Wang Q, McDermott F, Xu J, et al. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracrustal setting[J]. *Geology*, 2005, 33(6): 465-468.
- [30] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite(TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79(1): 1-24.
- [31] 高山, 章军锋, 许文良, 等. 拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. 科学通报, 2009, 54(14): 1962-1973.
Gao Shan, Zhang Junfeng, Xu Wenliang, et al. Delamination and destruction of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(14): 1962-1973(in Chinese).
- [32] Condie K C. TTGs and adakites: Are they both slab melts?[J]. *Lithos*, 2005, 80(1): 33-44.
- [33] 张旗. 埃达克岩研究的回顾和前瞻[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 32-39.
Zhang Qi. Adakite research: retrospect and prospect[J]. *Geology in China*, 2008, 35(1): 32-39(in Chinese with English abstract).
- [34] 赵越, 陈斌, 张拴宏, 等. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 900-915.
Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, et al. Pre-Yanshanian

- geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 900–915 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张允平, 李景春. 华北及其以北地区晚古生代—早中生代构造格架主体特点[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 916–930.
- Zhang Yunping, Li Jingchun. Tectonic framework and main characteristics of North China and its northward areas in Late Paleozoic–Early Mesozoic period[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 916–930(in Chinese with English abstract).
- [36] 张德会, 张文淮, 许国建. 富F熔体–溶液体系流体地球化学及其成矿效应——研究现状及存在问题[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2): 479–490.
- Zhang Dehui, Zhang Wenhui, Xu Guojian. The ore fluid geochemistry of F-rich silicate melt–hydrous fluid system and its metallogeny—the current status and problems[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 479–490(in Chinese with English abstract).
- [37] 赵振华, 熊小林, 王强, 等. 铌与钽的某些地球化学问题[J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 304–320.
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, et al. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta[J]. *Geochimica*, 2008, 37(4): 304–320(in Chinese with English abstract).
- [38] Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones[J]. *Nature*, 2002, 417(6891): 837–840.
- [39] Kamber B S, Ewart A, Collerson K D, et al. Fluid–mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(1): 38–56.
- [40] Wyllie P J, Wolf M B, Van der Laan S R. Conditions for formation of tonalites and trondhjemites: Magmatic sources and products[J]. *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 1997, 35: 256–266.
- [41] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国. 岩石成因, 构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1–381.
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo. *Genesis of Rocks, Tectonic Settings and Metallogeny*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1–381(in Chinese).
- [42] Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High–potassium, calc–alkaline I–type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald(Germany)[J]. *Lithos*, 2000, 50(1): 51–73.
- [43] 徐夕生, 邱检生. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1–346.
- Xu Xisheng, Qiu Jiansheng. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1–346(in Chinese).
- [44] 苗来成. 华北克拉通北缘花岗岩时空演化及与成矿关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2000: 1–122.
- Miao Laicheng. *Temporal and Spatial Evolution of Granites in the Northern Marginal Zone of the North China and Their Relationships to Gold Mineralization*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2000: 1–122(in Chinese with English abstract).
- [45] 苗来成, 范蔚茗, 翟明国, 等. 金厂沟梁—二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针 U–Pb 年代学及意义[J]. *岩石学报*, 2003, 19(1): 71–80.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Zhai Mingguo, et al. Zircon SHRIMP U–Pb geochronology of the granite intrusions from Jinchanggouliang–Erdaogou gold orefield and its significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 71–80(in Chinese with English abstract).
- [46] 杨富全, 赵越, 曾庆利, 等. 天津蓟县盘山 I 型–A 型复合花岗岩体——区域构造环境转变的记录[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 529–546.
- Yang Fuquan, Zhao Yue, Zeng Qingli, et al. I– and A–type composite granites of the Panshan pluton in Jixian, Tianjin: A record of regional tectonic transformation–[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 529–546(in Chinese with English abstract).

Geochemical characteristics of the Dushan complex and their geological significance

WU Ming-qian¹, ZHAO Guo-chun¹, GAO Jian-wei², WANG Hai-tao¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. China Geological Sample Information Center, Beijing 101149, China)

Abstract: The Dushan complex consists of granitic rocks with different lithologic types, which are fine-grained quartz monzonite, medium-fine-grained biotite monzogranite and coarse-medium-grained biotite syenogranite. Previous chronological data indicate that the emplacements of these rocks were almost synchronous. Through field work and indoor research, the authors have concluded that this complex was a product of comagmatic evolution. Geochemically, the Dushan complex shows high-silica (69.90% on average), high-aluminum (14.82% on average), low-magnesia (1.09% on average), high-strontium (917.18 $\mu\text{g/g}$ on average), low-yttrium (5.44 $\mu\text{g/g}$ on average), low-ytterbium (0.50 $\mu\text{g/g}$ on average), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ higher than 1 (50.95 on average) and negatively abnormal Nb/Ta. Features of plots on the Sr/Y-Y and Sr/Yb-Yb discrimination diagrams show that they are adakitic rocks. Strong Nb-Ta negative anomaly in samples implies that the Dushan complex may inherit the characteristics of protoliths which are possibly TTGs in this region. Although some metabasaltic and metasedimentary components were involved in protoliths, the TTGs might be the most important. Through geochemical analysis, the strong Nb/Ta anomaly, high $(\text{La}/\text{Yb})_N$ and high Sr as well as inconspicuous Eu anomaly indicate that the residual mineral assemblages were amphibole + garnet \pm plagioclase, and the residual phase was amphibole eclogite facies without rutile. The estimated thickness of the crust was 50~70 km, which in turn reflected the height of the paleomountains of 3000~5000 m. In the light of data of other batholiths in the region, the authors have concluded that the orogenesis between Siberia plate and Sino-Korean paleoplate was occurring during mid-late Triassic. At that time, towering mountain chains appeared in the northeast margin of North China Craton.

Key words: Dushan complex; comagmatic evolution; adakitic rocks; northeast margin of North China Craton; mountain chains

About the first author: WU Ming-qian, male, born in 1990, doctor candidate, majors in mineralogy, petrology, ore mineralogy; E-mail: aria.wu1990@gmail.com.

About the corresponding author: ZHAO Guo-chun, male, born in 1963, associate professor, supervisor of master candidates; E-mail: gczhao@cugb.edu.cn.