

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.03.05

引用格式: 郝书清,贾士影,戎秀伟. 兴安地块南段乌兰复合岩体年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国地质调查,2022,9(3): 40-51. (Hao S Q, Jia S Y, Rong X W. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Wulan composite pluton in the southern Xing'an block[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(3): 40-51.)

# 兴安地块南段乌兰复合岩体年代学、地球化学及其地质意义

郝书清<sup>1</sup>, 贾士影<sup>2</sup>, 戎秀伟<sup>1</sup>

(1. 山西省第三地质工程勘察院有限公司, 山西 晋中 030620; 2. 山西省自然资源事业发展中心, 山西 太原 030024)

**摘要:** 兴蒙造山带北缘晚古生代的构造格局,尤其是洋盆的闭合时限一直存在争议,兴安地块南的乌兰复合岩体为解决这一问题提供了一个良好的研究窗口。对乌兰复合岩体进行了锆石 U-Pb 测年与地球化学特征研究,确定了其形成时代与岩石成因,进而揭示了区域构造背景。乌兰复合岩体由细粒二长花岗岩和斑状二长花岗岩组成,前者构成了岩体的主体,成岩年龄为  $(312 \pm 2)$  Ma,形成时代为晚石炭世早期。地球化学特征显示:细粒二长花岗岩和斑状二长花岗岩均具有全碱含量中等、富钾、过铝质的特征,为高钾钙碱性系列的高分异 S 型花岗岩,且细粒二长花岗岩的稀土含量偏低,负 Eu 异常更明显,显示了更高的分异演化特征;细粒二长花岗岩和斑状二长花岗岩均富集大离子亲石元素(Rb、Th 及 K),显著亏损 Ba、Sr、Ti 等元素,弱亏损 Ta、Nb 等元素,具有相似的微量元素与稀土元素分布特征,指示二者来自于同一源区。乌兰复合岩体的形成与古亚洲洋的演化有关,形成于洋盆闭合后的造山晚期伸展环境。

**关键词:** 乌兰复合岩体; S 型花岗岩; 地球化学; 兴安地块; 古亚洲洋

**中图分类号:** P588.12; P597

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8706(2022)03-0040-12

## 0 引言

兴蒙造山带位于巨型中亚造山带东段,夹于华北克拉通与西伯利亚克拉通之间,其形成与古亚洲洋的演化密切相关<sup>[1-2]</sup>。古亚洲洋演化主要发生在古生代,期间经历了一系列俯冲、碰撞、拼贴、垮塌等地质过程;中生代期间又叠加了蒙古-鄂霍茨克洋与古太平洋构造体系的影响,最终形成了目前的构造格局<sup>[3-5]</sup>。兴蒙造山带也因漫长而复杂的构造演化史,成为研究造山带演化的“天然实验室”。

近年来,古亚洲洋演化的研究热点多集中在洋盆闭合位置及闭合时限上。西拉木伦-索伦-长春缝合带是兴蒙造山带与华北克拉通的拼合位置,

通常也被认为是古亚洲洋的最终闭合位置<sup>[3,6-7]</sup>。此外,造山带北缘的二连-贺根山-黑河-嫩江缝合带是兴安、松嫩两大地块的分界线<sup>[5]</sup>,一些学者对该缝合带从黑河-嫩江段向西延伸提出了不同认识,认为造山带北缘的最终封闭位置为二连南-乌兰浩特-黑河-嫩江一线<sup>[2-3]</sup>。古亚洲洋的闭合时限仍然存在争议,主要包括泥盆纪-早石炭世<sup>[1-2,7]</sup>、晚石炭世-晚三叠世<sup>[3,5]</sup>等,2种时限的区别在于对造山带晚古生代构造背景的解释不同,即晚古生代是否存在俯冲作用。

兴蒙造山带北缘晚古生代岩浆的活动强烈,保留了大量岩浆作用的地质证据。形成于晚古生代早期(325~309 Ma)的奥长花岗岩-闪长岩说明洋盆此时并未闭合,而是处于有限的俯冲消减阶段<sup>[8-11]</sup>;晚古生代晚期(301~271 Ma)发育的碱性

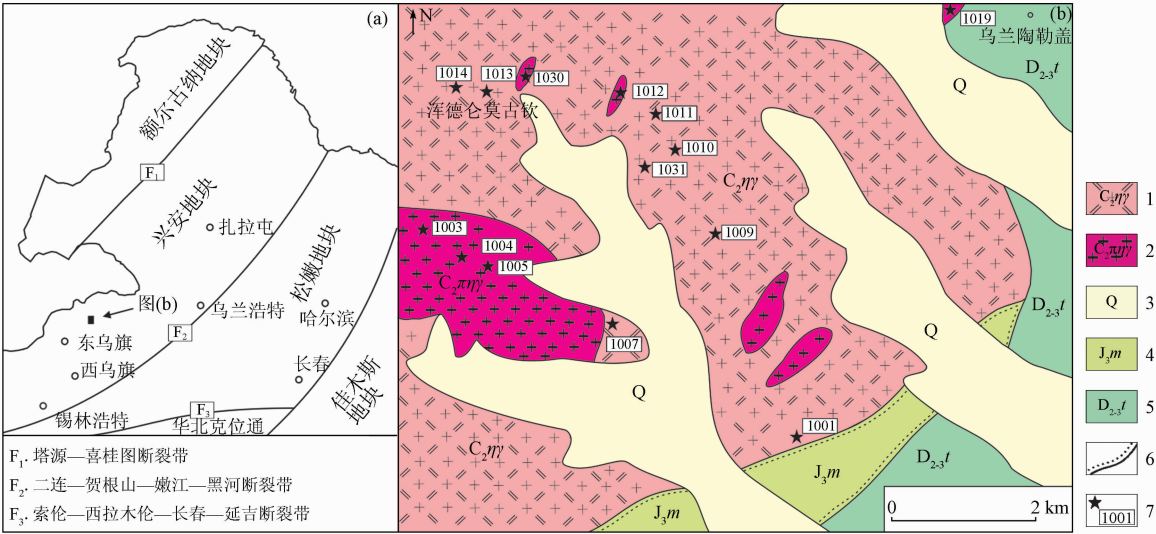
岩浆岩带广泛分布,说明区域上整体为伸展环境<sup>[12-15]</sup>。因此,造山带北缘晚古生代存在有限俯冲和大规模伸展2种构造背景,该时期也是洋陆转换的关键时期。其中奥长花岗岩-闪长岩类与早石炭世蛇绿岩的发育<sup>[3]</sup>均说明该时期洋盆并未闭合。由于前人对洋盆闭合时限的认识不同<sup>[1-7]</sup>,晚古生代二连-贺根山洋盆是古亚洲洋残余(分支洋盆),还是古亚洲洋闭合后新打开的时空规模有限的陆内洋盆;形成于伸展背景的碱性岩浆岩带是陆内裂谷,还是造山后环境的产物等问题均存在争议,进而制约了对造山带北缘晚古生代构造背景的解释。

本文以兴安地块南段晚石炭世乌兰复合岩体为研究对象,开展了详细的地球化学分析与锆石 U-Pb 年代学研究,分析其岩石成因与构造背景,以期为

兴蒙造山带北缘兴安地块晚古生代岩浆作用提供年代学资料,为约束古亚洲洋闭合时限提供新依据。

1 地质背景

研究区位于内蒙古中北部的中蒙边境一带,行政区划上隶属于内蒙古东乌珠穆沁旗,处于城镇北东方向约 140 km。大地构造属性上,研究区位于兴安地块的南段,区内晚古生代岩浆活动强烈,出露地层相对有限,主要为少量泥盆系、侏罗系及支沟中的第四系冲洪积。其中泥盆系为塔尔巴格特组,岩性组合简单,以黄绿色细砂岩、粉砂岩为主,具轻微变质现象;侏罗系为玛尼吐组,岩性以灰紫色、灰黑色玄武岩为主,为一套偏中基性火山岩,覆盖于泥盆系与晚古生代侵入岩之上(图 1)。



1. 细粒二长花岗岩; 2. 斑状二长花岗岩; 3. 第四系; 4. 侏罗玛尼吐组; 5. 泥盆系塔尔巴格特组; 6. 角度不整合界线; 7. 采样位置及编号。

图 1 兴蒙造山带东段大地构造略图(a)与乌兰复合岩体地质图(b)<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Tectonic sketch of the eastern Xingmeng Orogenic Belt (a) and simplified geological map of the Wulan composite pluton (b)<sup>[3]</sup>

研究区内晚古生代侵入岩出露广泛,主要分布于乌兰陶勒盖-浑德伦莫古钦高地附近,命名为乌兰复合岩体。该岩体在区域上呈 NE 向分布,在该图幅内的出露面积约 26 km<sup>2</sup>,东侧大部分被晚中生代火山岩与第四系覆盖。该岩体由晚期的细粒二长花岗岩和早期的斑状二长花岗岩组成,细粒二长花岗岩规模较大,构成了岩体的主体(图 2(a))。2 种岩性除岩石结构存在差异外,其余特征基本相同。其中斑状二长花岗岩流动构造较为发育,地表呈明显凸起的球形风化地貌,宏观

上可见多处不规则状捕虏体分布于主体岩体之中(图 2(b)),说明其形成时代早于细粒二长花岗岩,二者之间接触界线截然,为典型的侵入接触关系。2 种岩性特征如下。

细粒二长花岗岩(图 2(a), 2(c))呈浅红色,细粒花岗结构,块状构造,矿物粒度总体上为 0.1 ~ 2.5 mm。主要矿物包括斜长石(30 %),半自形板状,轻微绢云母化、高岭土化;钾长石(30 %),半自形板状-它形粒状;石英(25 %),它形粒状;黑云母(5 %),片状,沿节理缝多被白云母交代。此外,还

含有少量白云母(5 %,片状)、石榴子石(2 %,粒状)等富铝矿物。

斑状二长花岗岩(图 2(b), 2(d))呈浅灰色, 似斑状, 基质为微细粒花岗结构, 块状构造, 斑晶粒径 3 ~ 8 mm。主要矿物以斜长石、石英为主, 其中斜长石(15 %), 自形 - 半自形板状, 高岭土化、绢

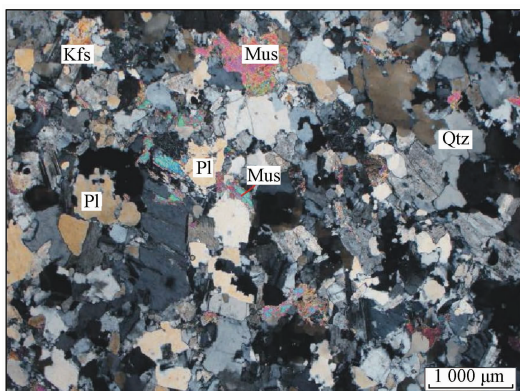
云母化及白云母化蚀变明显; 石英(5 %), 它形粒状分布。基质粒径 0.2 ~ 2 mm, 成分由斜长石(35 %, 半自形板状)、钾长石(25 %, 半自形板状 - 它形粒状)、石英(15 %, 它形粒状)及黑云母(5 %, 棕褐色片状)组成。此外, 个别样品中可见少量条纹结构发育的钾长石斑晶(5% ~ 10%)。



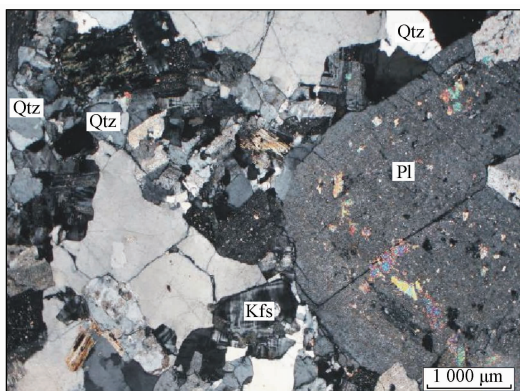
(a) 细粒二长花岗岩野外特征



(b) 斑状二长花岗岩野外特征



(c) 细粒二长花岗岩显微特征



(d) 斑状二长花岗岩显微特征

Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Qtz. 石英; Mus. 白云母。

图 2 乌兰复合岩体的野外露头及镜下显微照片

Fig. 2 Photographs of outcrops and micrographs of the Wulan composite pluton

## 2 样品采集及分析测试

本研究从乌兰复合岩体中心至边部开展了系统的主量元素与微量元素测试, 选取蚀变较轻或基本无蚀变的新鲜基岩采集样品, 尽量避开 2 种岩性的接触位置, 采样位置见图 1。共采集 14 件样品, 其中细粒二长花岗岩 8 件, 斑状二长花岗岩 6 件, 样品测试分析在武汉综合岩矿测试中心完成。

本研究对乌兰岩体中的细粒二长花岗岩(样品 1013 号, 图 1(b))进行了锆石 U - Pb 测年。

首先对样品进行破碎、淘洗、分离等粗选步骤, 然后进行制样、照相和测试分析, 其中锆石粗选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 后期制样等工作在西北大学大陆动力学实验室完成。在双目镜下挑选出透明、无裂痕、晶形发育较好的锆石颗粒, 用环氧树脂固定在 PVC 环上进行固化、抛光至露出锆石的核部, 完成制样过程。CL 阴极发光照相采用的电子束仪器为 XL30 型; 同位素测试采用 Agilent 7500a 型 ICP - MS 和 Geo-Las 200M 激光剥蚀仪, 其中激光剥蚀斑束直径约 30  $\mu\text{m}$ , 剥蚀深度约 20 ~ 40  $\mu\text{m}$ , 具体测试步骤见参考文献[16]。数据处理使用 ICPMS - DataCal 软

件完成,协和图制作使用 Isoplot 3.00 软件完成<sup>[17]</sup>。

3 年代学特征

年龄测试样品的阴极发光图像 (CL) 显示,锆石多为浅黄色,晶形单一,以短柱状为主,个别点边部呈棱角状,自形程度较差,整体上颗粒细小,粒径约 50 ~ 120 μm,长宽比 1.5:1 ~ 2.5:1,大部分锆石

隐约可见较窄的环带结构,个别边部溶蚀结构明显 (图 3)。测试结果见表 1,其中 Th/U 比为 0.09 ~ 0.69,平均值为 0.33,除测点 11 外均大于 0.1,为岩浆锆石成因<sup>[18]</sup>。共获得 19 个有效测点,其中除测点 1 略微偏离谐和曲线外,其余测点均位于谐和曲线上,19 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权年龄平均值为 (312 ± 2) Ma (图 4,表 1),代表了乌兰复合岩体的侵位结晶年龄,形成时代为晚石炭世早期。

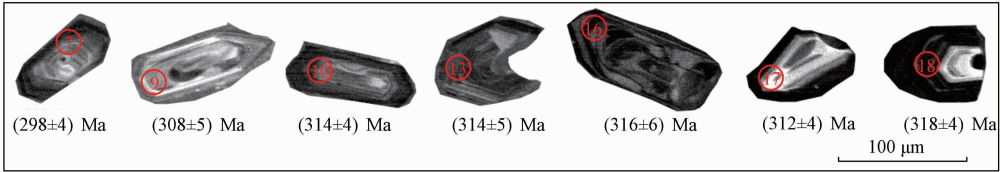


图 3 乌兰复合岩体锆石 CL 阴极发光图像及年龄值

Fig.3 CL images and ages of zircon from the Wulan composite pluton

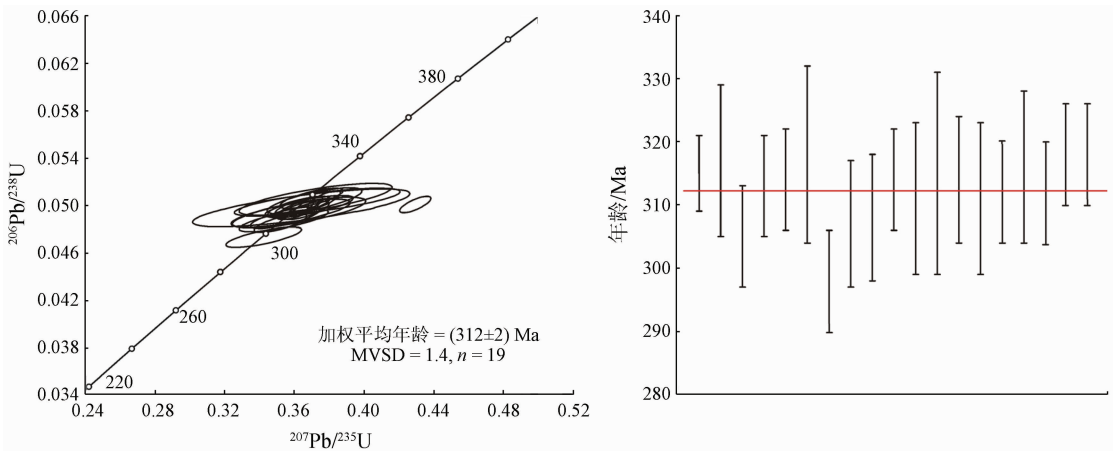


图 4 乌兰复合岩体锆石 U - Pb 年龄谐和图 (左) 和加权平均年龄 (右)

Fig.4 U - Pb concordia diagram (left) and weighted average age (right) of the Wulan composite pluton

表 1 乌兰复合岩体锆石 U - Pb 测年结果

Tab.1 U - Pb isotopic data of zircon from the Wulan composite pluton

| 测点号 | 含量/10 <sup>-6</sup> |     |     | Th/U | 同位素比值及误差                                |         |                                        |         |                                        |         | 年龄及误差/Ma                               |    |
|-----|---------------------|-----|-----|------|-----------------------------------------|---------|----------------------------------------|---------|----------------------------------------|---------|----------------------------------------|----|
|     | Pb                  | Th  | U   |      | <sup>207</sup> Pb/<br><sup>206</sup> Pb | 1σ      | <sup>207</sup> Pb/<br><sup>235</sup> U | 1σ      | <sup>206</sup> Pb/<br><sup>238</sup> U | 1σ      | <sup>206</sup> Pb/<br><sup>238</sup> U | 1σ |
| 1   | 41                  | 91  | 736 | 0.12 | 0.062 2                                 | 0.001 5 | 0.429 5                                | 0.007 3 | 0.050 1                                | 0.000 6 | 315                                    | 3  |
| 2   | 6                   | 35  | 110 | 0.32 | 0.053 5                                 | 0.003 4 | 0.371 5                                | 0.022 2 | 0.050 4                                | 0.000 9 | 317                                    | 6  |
| 3   | 25                  | 136 | 456 | 0.30 | 0.052 6                                 | 0.002 1 | 0.352 1                                | 0.012 4 | 0.048 5                                | 0.000 6 | 305                                    | 4  |
| 4   | 23                  | 238 | 381 | 0.62 | 0.052 6                                 | 0.001 5 | 0.360 5                                | 0.008 5 | 0.049 7                                | 0.000 6 | 313                                    | 4  |
| 5   | 24                  | 263 | 380 | 0.69 | 0.052 7                                 | 0.001 9 | 0.362 7                                | 0.011 3 | 0.049 9                                | 0.000 6 | 314                                    | 4  |
| 6   | 27                  | 144 | 490 | 0.29 | 0.053 4                                 | 0.005 3 | 0.372 2                                | 0.035 9 | 0.050 5                                | 0.001 1 | 318                                    | 7  |
| 7   | 12                  | 72  | 215 | 0.34 | 0.052 5                                 | 0.002 9 | 0.342 4                                | 0.017 8 | 0.047 3                                | 0.000 7 | 298                                    | 4  |
| 8   | 13                  | 65  | 246 | 0.27 | 0.052 6                                 | 0.003 3 | 0.353 9                                | 0.021 0 | 0.048 8                                | 0.000 8 | 307                                    | 5  |
| 9   | 15                  | 111 | 255 | 0.44 | 0.052 5                                 | 0.002 6 | 0.354 8                                | 0.016 4 | 0.049 0                                | 0.000 7 | 308                                    | 5  |
| 10  | 19                  | 120 | 338 | 0.36 | 0.052 7                                 | 0.002 3 | 0.362 6                                | 0.014 6 | 0.049 9                                | 0.000 7 | 314                                    | 4  |
| 11  | 34                  | 60  | 644 | 0.09 | 0.053 2                                 | 0.004 8 | 0.362 7                                | 0.031 3 | 0.049 4                                | 0.001 1 | 311                                    | 6  |
| 12  | 42                  | 240 | 719 | 0.33 | 0.053 1                                 | 0.009 3 | 0.366 1                                | 0.063 6 | 0.050 0                                | 0.001 2 | 315                                    | 8  |

| (续表) |               |     |     |      |                                           |           |                                          |           |                                          |           |                                          |           |
|------|---------------|-----|-----|------|-------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|------------------------------------------|-----------|
| 测点号  | 含量/ $10^{-6}$ |     |     | Th/U | 同位素比值及误差                                  |           |                                          |           |                                          |           | 年龄及误差/Ma                                 |           |
|      | Pb            | Th  | U   |      | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | $1\sigma$ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | $1\sigma$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $1\sigma$ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | $1\sigma$ |
| 13   | 22            | 146 | 385 | 0.38 | 0.053 5                                   | 0.003 2   | 0.368 4                                  | 0.020 7   | 0.049 9                                  | 0.000 8   | 314                                      | 5         |
| 14   | 23            | 147 | 423 | 0.35 | 0.052 6                                   | 0.004 3   | 0.357 8                                  | 0.028 0   | 0.049 4                                  | 0.001 0   | 311                                      | 6         |
| 15   | 23            | 191 | 388 | 0.49 | 0.052 9                                   | 0.001 7   | 0.362 0                                  | 0.009 7   | 0.049 6                                  | 0.000 6   | 312                                      | 4         |
| 16   | 24            | 53  | 436 | 0.12 | 0.053 8                                   | 0.005 7   | 0.373 1                                  | 0.038 9   | 0.050 3                                  | 0.001 0   | 316                                      | 6         |
| 17   | 19            | 87  | 339 | 0.26 | 0.053 6                                   | 0.001 8   | 0.367 0                                  | 0.010 7   | 0.049 6                                  | 0.000 6   | 312                                      | 4         |
| 18   | 25            | 82  | 456 | 0.18 | 0.054 1                                   | 0.001 4   | 0.377 1                                  | 0.007 6   | 0.050 5                                  | 0.000 6   | 318                                      | 4         |
| 19   | 12            | 64  | 204 | 0.31 | 0.053 0                                   | 0.002 3   | 0.369 8                                  | 0.014 9   | 0.050 6                                  | 0.000 7   | 318                                      | 4         |

4 地球化学特征

4.1 主量元素特征

    乌兰复合岩体的主量元素、微量元素以及稀土元素的测试结果见表 2。

    细粒二长花岗岩具有较高的 SiO<sub>2</sub> 含量,在 TAS 图解上较集中地落在了亚碱性系列的花岗岩区间(图 5(a)),同时又具有较低的 TiO<sub>2</sub>、CaO、MgO 及

FeO<sup>T</sup> 含量,结合分异指数高的特点,说明其为高分异花岗岩;其中 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 含量为 7.13% ~8.45%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值为 0.74 ~1.59,大部分大于 1,在 SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O 图解上大部分样品位于高钾钙碱性区,个别位于钙碱性区(图 5(b)); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量偏低,铝饱和指数 A/CNK 为 1.13 ~1.28,在 A/CNK - A/NK 图解上位于过铝质区间(图 5(c))。总体上,细粒二长花岗岩具有全碱含量中等、富钾、过铝质的特征。

表 2  乌兰复合岩体主量元素、微量元素和稀土元素含量及特征参数

| Tab.2 Content and characteristic parameters of major, trace elements and REE from the Wulan composite pluton |                  |                  |                                |      |      |      |                   |                  |                               |      |                  |                           |                                         |                                        |       |      |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|------------------|---------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------|------|-------|
| 样品<br>编号                                                                                                     | 主量元素含量/%         |                  |                                |      |      |      |                   |                  |                               |      |                  | 特征参数                      |                                         |                                        |       |      |       |
|                                                                                                              | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 烧失量  | FeO <sup>T</sup> | FeO <sup>T</sup> /<br>MgO | K <sub>2</sub> O +<br>Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O/<br>Na <sub>2</sub> O | A/CNK | NK/A | DI    |
| 1011                                                                                                         | 76.99            | 0.07             | 13.25                          | 0.01 | 0.13 | 0.34 | 3.56              | 4.86             | 0.11                          | 0.79 | 0.15             | 1.15                      | 8.42                                    | 1.37                                   | 1.13  | 0.84 | 96.29 |
| 1010                                                                                                         | 75.47            | 0.03             | 14.22                          | 0.04 | 0.15 | 0.18 | 3.48              | 4.81             | 0.12                          | 1.04 | 0.61             | 4.07                      | 8.29                                    | 1.39                                   | 1.26  | 0.77 | 94.90 |
| 1013                                                                                                         | 76.52            | 0.05             | 13.21                          | 0.01 | 0.14 | 0.24 | 3.26              | 5.16             | 0.18                          | 0.88 | 0.51             | 3.64                      | 8.42                                    | 1.59                                   | 1.16  | 0.83 | 96.23 |
| 1014                                                                                                         | 77.83            | 0.03             | 13.22                          | 0.01 | 0.15 | 0.31 | 4.09              | 3.04             | 0.11                          | 0.84 | 0.48             | 3.20                      | 7.13                                    | 0.74                                   | 1.25  | 0.76 | 94.92 |
| 1031                                                                                                         | 76.58            | 0.04             | 13.35                          | 0.01 | 0.08 | 0.21 | 3.75              | 4.70             | 0.07                          | 1.04 | 0.29             | 3.63                      | 8.45                                    | 1.25                                   | 1.15  | 0.84 | 96.73 |
| 1007                                                                                                         | 76.21            | 0.05             | 13.76                          | 0.02 | 0.20 | 0.43 | 3.92              | 3.99             | 0.13                          | 0.96 | 0.43             | 2.15                      | 7.91                                    | 1.02                                   | 1.19  | 0.78 | 94.55 |
| 1009                                                                                                         | 76.76            | 0.04             | 13.65                          | 0.01 | 0.14 | 0.15 | 3.78              | 4.44             | 0.11                          | 0.67 | 0.26             | 1.86                      | 8.22                                    | 1.18                                   | 1.21  | 0.81 | 94.41 |
| 1001                                                                                                         | 75.86            | 0.04             | 14.25                          | 0.02 | 0.15 | 0.19 | 3.67              | 4.42             | 0.12                          | 1.15 | 0.38             | 2.53                      | 8.09                                    | 1.20                                   | 1.28  | 0.76 | 95.16 |
| 1019                                                                                                         | 74.55            | 0.15             | 13.15                          | 0.06 | 0.20 | 0.42 | 4.01              | 4.26             | 0.07                          | 1.11 | 1.98             | 9.90                      | 8.27                                    | 1.06                                   | 1.10  | 0.85 | 93.42 |
| 1005                                                                                                         | 75.43            | 0.15             | 14.06                          | 0.01 | 0.24 | 0.21 | 3.36              | 5.29             | 0.10                          | 1.17 | 0.28             | 1.17                      | 8.65                                    | 1.56                                   | 1.21  | 0.80 | 95.57 |
| 1004                                                                                                         | 73.70            | 0.18             | 14.73                          | 0.01 | 0.19 | 0.36 | 3.89              | 4.63             | 0.12                          | 1.40 | 0.98             | 5.16                      | 8.52                                    | 1.19                                   | 1.22  | 0.78 | 93.69 |
| 1003                                                                                                         | 74.15            | 0.15             | 14.11                          | 0.04 | 0.35 | 0.55 | 3.41              | 4.84             | 0.11                          | 1.14 | 1.33             | 3.80                      | 8.25                                    | 1.43                                   | 1.19  | 0.77 | 92.32 |
| 1012                                                                                                         | 73.93            | 0.20             | 13.93                          | 0.03 | 0.46 | 0.81 | 3.20              | 4.90             | 0.11                          | 0.98 | 1.55             | 3.37                      | 8.10                                    | 1.54                                   | 1.16  | 0.76 | 90.44 |
| 1030                                                                                                         | 70.14            | 0.39             | 14.91                          | 0.07 | 0.78 | 1.60 | 3.47              | 4.14             | 0.14                          | 1.45 | 2.99             | 3.85                      | 7.61                                    | 1.19                                   | 1.14  | 0.68 | 83.21 |

| 样品<br>编号 | 稀土元素含量/ $10^{-6}$ |       |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      | 特征参数 |      |      |        |        |
|----------|-------------------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|--------|
|          | La                | Ce    | Pr   | Nd    | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y    | ΣREE   | LREE   |
| 1011     | 1.65              | 3.56  | 0.48 | 1.89  | 0.7  | 0.03 | 0.84 | 0.20 | 1.43 | 0.28 | 0.89 | 0.21 | 1.63 | 0.25 | 8.2  | 14.03  | 7.58   |
| 1010     | 2.19              | 5.03  | 0.64 | 2.37  | 0.8  | 0.05 | 0.91 | 0.22 | 1.51 | 0.29 | 0.92 | 0.22 | 1.59 | 0.25 | 7.9  | 16.97  | 10.23  |
| 1013     | 2.49              | 6.42  | 0.97 | 3.62  | 1.37 | 0.07 | 1.38 | 0.30 | 1.89 | 0.36 | 1.11 | 0.26 | 1.95 | 0.29 | 10.1 | 22.47  | 13.50  |
| 1014     | 3.79              | 8.21  | 1.05 | 3.69  | 1.25 | 0.07 | 1.42 | 0.31 | 2.10 | 0.42 | 1.32 | 0.27 | 2.08 | 0.31 | 11.3 | 26.30  | 16.74  |
| 1031     | 2.28              | 6.18  | 0.93 | 3.92  | 1.05 | 0.08 | 1.48 | 0.36 | 2.46 | 0.57 | 1.60 | 0.26 | 1.85 | 0.31 | 11.1 | 23.32  | 13.31  |
| 1007     | 4.27              | 5.61  | 1.75 | 8.11  | 2.39 | 0.35 | 2.63 | 0.48 | 3.18 | 0.61 | 1.94 | 0.38 | 2.84 | 0.43 | 17.4 | 34.98  | 19.74  |
| 1009     | 2.77              | 6.26  | 0.91 | 3.67  | 1.19 | 0.09 | 1.32 | 0.31 | 2.08 | 0.42 | 1.39 | 0.31 | 2.34 | 0.37 | 12.0 | 23.43  | 13.61  |
| 1001     | 4.51              | 9.21  | 1.17 | 4.63  | 1.25 | 0.12 | 1.40 | 0.30 | 1.97 | 0.38 | 1.22 | 0.27 | 2.02 | 0.31 | 10.8 | 28.75  | 19.52  |
| 1019     | 19.60             | 68.30 | 6.19 | 23.70 | 5.94 | 0.69 | 5.64 | 1.07 | 7.00 | 1.48 | 4.81 | 0.79 | 5.40 | 0.81 | 35.4 | 151.42 | 117.79 |
| 1005     | 11.00             | 21.60 | 3.55 | 14.00 | 3.75 | 0.54 | 4.07 | 0.82 | 5.38 | 1.11 | 3.55 | 0.61 | 4.33 | 0.65 | 33.1 | 74.96  | 50.15  |
| 1004     | 29.70             | 60.30 | 7.91 | 29.40 | 6.29 | 0.84 | 5.84 | 0.98 | 5.96 | 1.16 | 3.60 | 0.58 | 4.03 | 0.59 | 33.1 | 157.18 | 127.31 |
| 1003     | 22.30             | 45.90 | 6.03 | 22.40 | 4.91 | 0.63 | 4.56 | 0.83 | 4.87 | 1.00 | 3.03 | 0.50 | 3.33 | 0.49 | 27.7 | 120.78 | 96.63  |
| 1012     | 14.60             | 31.20 | 4.05 | 15.10 | 3.89 | 0.52 | 4.13 | 0.81 | 5.32 | 1.09 | 3.47 | 0.57 | 4.07 | 0.61 | 30.1 | 89.44  | 64.95  |
| 1030     | 29.80             | 60.50 | 7.67 | 29.80 | 6.52 | 0.96 | 6.32 | 1.19 | 6.65 | 1.31 | 3.95 | 0.68 | 4.24 | 0.61 | 37.0 | 160.19 | 127.77 |

(续表)

| 样品<br>编号 | 特征参数  |               |                          |                          |                          |      | 微量元素含量/ $10^{-6}$ |     |       |       |      |       |       |      |       |       | 特征参数 |  |
|----------|-------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------|-------------------|-----|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|--|
|          | HREE  | LREE/<br>HREE | (La/<br>Yb) <sub>N</sub> | (La/<br>Sm) <sub>N</sub> | (Gd/<br>Yb) <sub>N</sub> | δEu  | Sr                | Rb  | Ba    | Th    | Ta   | Nb    | Zr    | Hf   | Nb/Ta | Rb/Sr |      |  |
| 1011     | 4.57  | 1.45          | 0.73                     | 1.52                     | 0.43                     | 0.11 | 14.5              | 193 | 1.2   | 2.14  | 2.29 | 7.28  | 18.4  | 0.61 | 3.2   | 13.3  |      |  |
| 1010     | 4.91  | 1.88          | 0.99                     | 1.76                     | 0.47                     | 0.18 | 14.3              | 224 | 2.0   | 3.01  | 2.31 | 4.72  | 23.5  | 0.78 | 2.0   | 15.7  |      |  |
| 1013     | 6.73  | 1.98          | 0.92                     | 1.17                     | 0.59                     | 0.14 | 13.6              | 230 | 0.9   | 5.54  | 1.95 | 7.66  | 34.0  | 1.13 | 3.9   | 16.9  |      |  |
| 1014     | 7.16  | 2.19          | 1.31                     | 1.96                     | 0.56                     | 0.16 | 15.8              | 154 | 21.3  | 3.25  | 1.36 | 3.95  | 29.3  | 0.98 | 2.9   | 9.7   |      |  |
| 1031     | 7.85  | 1.63          | 0.88                     | 1.40                     | 0.66                     | 0.18 | 10.7              | 185 | 23.5  | 2.84  | 3.14 | 8.02  | 25.0  | 1.59 | 2.6   | 17.3  |      |  |
| 1007     | 11.97 | 1.80          | 1.08                     | 1.15                     | 0.77                     | 0.42 | 14.7              | 266 | 27.8  | 4.07  | 3.00 | 7.33  | 33.2  | 1.11 | 2.4   | 18.1  |      |  |
| 1009     | 7.11  | 1.74          | 0.85                     | 1.50                     | 0.47                     | 0.22 | 15.6              | 218 | 58.1  | 2.60  | 2.49 | 6.54  | 35.3  | 1.18 | 2.6   | 14.0  |      |  |
| 1001     | 6.91  | 2.66          | 1.60                     | 2.33                     | 0.57                     | 0.28 | 18.5              | 210 | 55.5  | 3.24  | 3.37 | 9.01  | 24.8  | 0.83 | 2.7   | 11.4  |      |  |
| 1019     | 27.42 | 4.61          | 2.60                     | 2.13                     | 0.86                     | 0.36 | 47.4              | 131 | 439.0 | 14.50 | 1.55 | 14.10 | 193.0 | 6.44 | 9.1   | 2.8   |      |  |
| 1005     | 19.83 | 2.65          | 1.82                     | 1.89                     | 0.78                     | 0.42 | 40.0              | 213 | 136.0 | 7.58  | 1.89 | 8.46  | 74.4  | 2.48 | 4.5   | 5.3   |      |  |
| 1004     | 25.25 | 5.91          | 5.29                     | 3.05                     | 1.20                     | 0.42 | 62.9              | 175 | 488.0 | 10.60 | 1.75 | 10.80 | 140.0 | 4.66 | 6.2   | 2.8   |      |  |
| 1003     | 20.33 | 5.49          | 4.80                     | 2.93                     | 1.13                     | 0.40 | 52.3              | 178 | 419.0 | 7.54  | 1.56 | 8.23  | 91.9  | 3.06 | 5.3   | 3.4   |      |  |
| 1012     | 19.80 | 3.46          | 2.57                     | 2.42                     | 0.84                     | 0.39 | 71.4              | 161 | 213.9 | 9.67  | 1.05 | 6.27  | 99.6  | 3.32 | 6.0   | 2.3   |      |  |
| 1030     | 27.58 | 5.42          | 5.04                     | 2.95                     | 1.23                     | 0.45 | 126.0             | 156 | 381.0 | 11.30 | 1.37 | 9.58  | 180.0 | 6.37 | 7.0   | 1.2   |      |  |

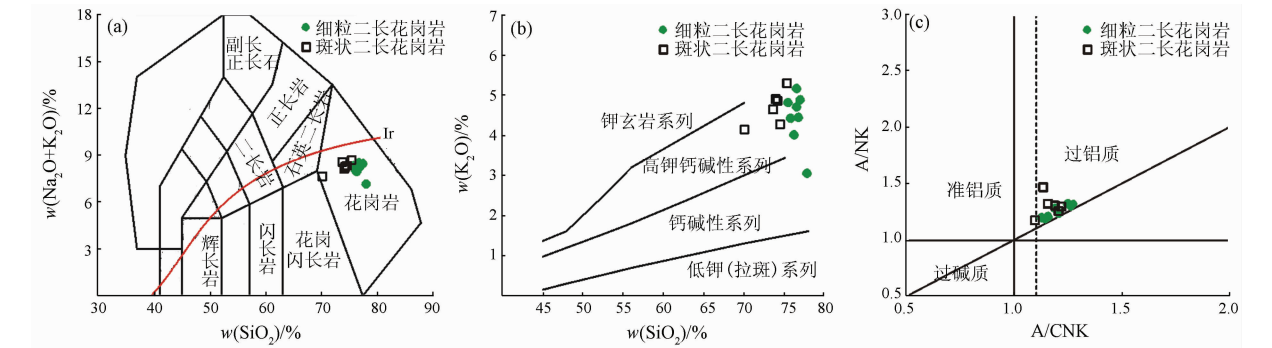


图5 乌兰复合岩体 TAS 图解 (a)、 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  图解 (b) 及  $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$  图解 (c) <sup>[19-21]</sup>

Fig.5 TAS classification (a),  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  (b) and  $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$  (c) diagrams of the Wulan composite pluton <sup>[19-21]</sup>

斑状二长花岗岩的  $\text{SiO}_2$  含量略低于细粒二长花岗岩,在 TAS 图解上大部分样品落在了亚碱性系列的花岗岩区,个别落在了花岗岩区与花岗闪长岩区的分界线上(图 5(a)),与细粒二长花岗岩相比,其  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  及  $\text{FeO}^{\text{T}}$  含量略微偏高,分异指数偏低;在  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$  图解上样品均位于高钾钙碱性区(图 5(b));  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量偏低,样品在  $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$  图解上均位于过铝质区间(图 5(c))。总体

上,斑状二长花岗岩与细粒二长花岗岩具有相似的地球化学特征,同样具有全碱含量中等、富钾、过铝质的特点,但斑状二长花岗岩的分异程度略微偏低。

#### 4.2 稀土元素和微量元素特征

细粒二长花岗岩和斑状二长花岗岩的  $\Sigma\text{REE}$  偏低,较高的  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  说明轻稀土相对重稀土元素发生了一定程度的分馏(图 6),而轻稀土右倾,重稀土近乎平整的曲线特征说明轻、重

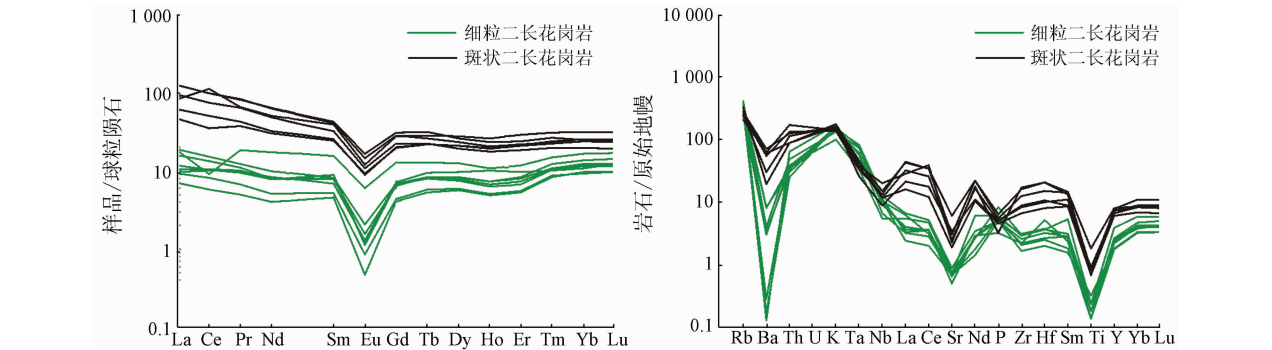


图6 乌兰复合岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式(左)及原始地幔标准化蛛网图(右) <sup>[22]</sup>

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern (left) and primitive mantle-normalized spider diagrams (right) of the Wulan composite pluton <sup>[22]</sup>

稀土元素之间分馏不明显,其中细粒二长花岗岩的重稀土轻微上扬,具轻微的 M 型四分组效应(图 6); 2 种岩性样品表现出明显的负 Eu 异常,其中细粒二长花岗岩负 Eu 异常更明显。

在原始地幔标准化蛛网图上(图 6),样品的 Rb、Th、K 等大离子亲石元素富集, Ba、Sr、Ti 等元素明显亏损, Ta、Nb 等元素弱负异常。

5 讨论

5.1 岩体年代与成因

在兴安地块及邻侧晚古生代岩浆活动发育,主要为晚古生代早期(325 ~ 309 Ma)的奥长花岗岩-闪长岩类<sup>[8-11]</sup>与晚古生代晚期(301 ~ 271 Ma)的碱性岩浆岩<sup>[12-15]</sup>,上述年代学数据基本勾勒出了造山带北缘晚古生代岩浆岩的演化过程。

乌兰复合岩体的主体岩性为细粒二长花岗岩,其锆石 U-Pb 测年结果显示:锆石图像上具有较窄的环带结构,且 Th/U 值为 0.09 ~ 0.69,平均值 0.33,具有明显的岩浆成因特点。加权平均年龄为 (312 ± 2) Ma,说明乌兰岩体形成于晚石炭世早期,即造山带北缘晚古生代岩浆活动的早期。

乌兰岩体由斑状二长花岗岩和细粒二长花岗

岩组成,主要矿物包括钾长石、斜长石、石英及少量的黑云母,均具有高硅、高分异指数、高 Rb/Sr 值、低 Nb/Ta 值的特征,且轻重稀土元素比值偏小,指示其经历了强烈的结晶分异过程,为高分异花岗岩。其中细粒二长花岗岩与斑状二长花岗岩相比,内部普遍可见白云母,具有更显著的负 Eu 异常,稀土总量明显偏低,同时具有轻微的 M 型四分组效应特征(图 6),表现出更强的分异演化特征,甚至经历了后期热液流体的交代作用<sup>[23-24]</sup>。由于与高分异 I 型、S 型以及 A 型花岗岩的地球化学特征相似,对乌兰复合岩体岩石成因的识别较为困难,需结合各种特征因素综合判定。

乌兰复合岩体的以下特点不同于 A 型花岗岩:

①Zr 含量低于 A 型花岗岩的下限( $250 \times 10^{-6}$ )<sup>[25]</sup>,在  $(Zr + Nb + Ce + Y) - (FeO^T/MgO)$  图解上均落在了 I 型和 S 型花岗岩区域(图 7(a)),而区别于 A 型花岗岩;

② $FeO^T/MgO$  整体较低,不同于富铁贫镁特征的 A 型花岗岩( $FeO^T/MgO > 10$ )<sup>[25]</sup>;

③碱铝指数  $NK/A$  略低于 A 型花岗岩( $NK/A > 0.85$ )<sup>[25]</sup>。此外,大部分样品位于高分异钙碱性区,显示了高分异演化的特征,也明显不同于具有碱性特征的 A 型花岗岩(图 7(b))。因此,可以排除乌兰复合岩体为 A 型花岗岩。

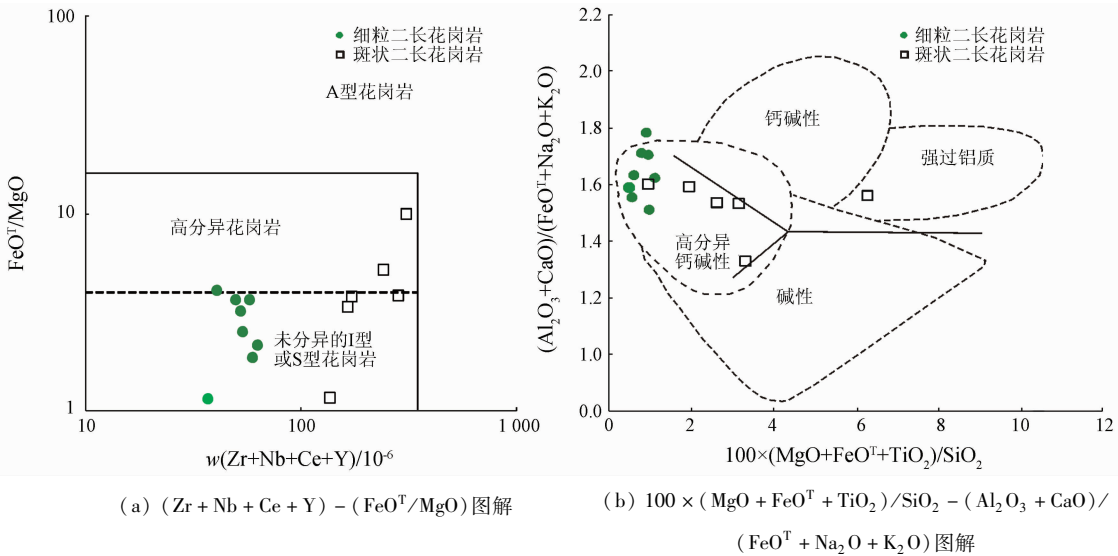


图 7 乌兰复合岩体岩石成因图解<sup>[25-26]</sup>

Fig. 7 Petrogenetic diagrams of the Wulan composite pluton<sup>[25-26]</sup>

乌兰复合岩体的大部分样品在  $SiO_2 - K_2O$  图解上位于高钾钙碱性区(图 5(b)),在  $A/CNK - A/NK$  图解上位于过铝质区(图 5(c)),属于高钾钙碱性的过铝质花岗岩。按照  $A/CNK = 1.1$  的标准应属于 S 型花岗岩,但该指标一般用于区分未经强烈分异的花岗岩,而花岗岩在强烈分异过程中钙含量

会变得极低,同时  $A/CNK$  值偏大<sup>[27]</sup>,因此还需综合其他特征进一步判定其成因类型。结合岩体化学特征:① $P_2O_5$  含量普遍大于高分异 I 型花岗岩 ( $w(P_2O_5) < 0.05\%$ ),而与高分异 S 型花岗岩接近 ( $w(P_2O_5)$  均值为  $0.14\%$ )<sup>[28-29]</sup>,且样品在  $SiO_2 - P_2O_5$  关系图上并未表现出类似 I 型花岗岩的负相关性,而与呈正相关或相关性不明显的 S 型花岗岩的特征相似(图 8(a));②富集 Rb、Th 及 K 等大离子亲石元素,强烈亏损 Ba、Sr、Ti、Ta、Nb 等元素,具

有明显的陆壳性质,Rb/Sr 值明显大于 I 型花岗岩 ( $Rb/Sr < 0.9$ ),而与 S 型花岗岩接近 ( $Rb/Sr > 0.9$ )<sup>[30]</sup>;③Th、Y 元素含量偏低,这与富 Th、Y 矿物首先会在过铝质岩浆岩演化的早期阶段结晶出来的特征吻合,在 Rb - Y 关系图与 Rb - Th 关系图上也均表现出了 S 型花岗岩的演化趋势(图 8(b), (c))。此外,岩体中普遍含有 S 型花岗岩中常见的白云母、石榴石等富铝矿物。因此,本文把乌兰岩体分类为高分异 S 型花岗岩。

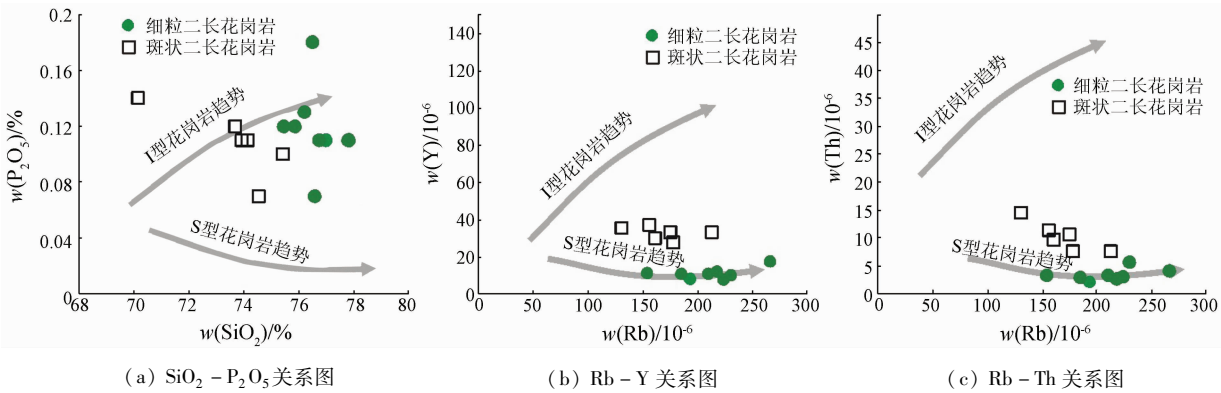


图 8 乌兰复合岩体选择性元素地球化学散点图<sup>[28-29]</sup>

Fig. 8 Selected geochemical plots of the Wulan composite pluton<sup>[28-29]</sup>

乌兰复合岩体在形成过程中主要受部分熔融因素的控制(图 9(a)),并经历了一定程度的结晶分异。其中主体岩性为细粒二长花岗岩,其内部普遍含有白云母、石榴石等富铝矿物,可能与岩体高分异演化过程中斜长石、角闪石、黑云母等矿物的强烈分

离结晶有关,该过程导致岩体向富铝方向演化,形成富铝质岩石<sup>[27]</sup>;Ba、Sr、Eu 元素的亏损(图 6(a), (b))可能与钾长石、斜长石的分离结晶有关(图 9(b));稀土总量较低可能和磷灰石、独居石、褐帘石等副矿物的强烈分离结晶作用有关(图 9(c))。

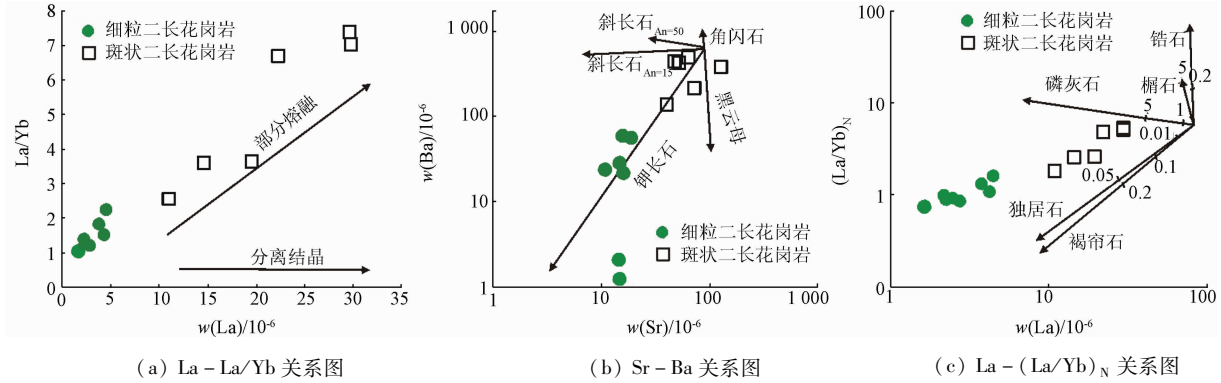


图 9 乌兰复合岩体熔融与矿物分离结晶图解<sup>[31-32]</sup>

Fig. 9 Melting and fractional crystallization diagrams of the Wulan composite pluton<sup>[31-32]</sup>

5.2 地质意义

兴蒙造山带对中国的影响范围主要集中在东北地区 and 内蒙古中东部,其中在东北地区形成了额尔古纳、兴安、松嫩等微陆块相间分布的特征<sup>[6]</sup>。

研究表明,额尔古纳、兴安地块以塔源—喜桂图断裂为界,闭合于早古生代早期<sup>[2-3]</sup>;兴安、松嫩地块以二连—贺根山—黑河—嫩江缝合带<sup>[5]</sup>或二连南—乌兰浩特—黑河—嫩江一线<sup>[2-3]</sup>为界,闭合于

晚古生代<sup>[3]</sup>。乌兰复合岩体位于兴安地块南段,为晚石炭世早期岩浆作用的产物,结合其形成时代,与中生代期间的蒙古—鄂霍茨克洋、古太平洋构造体系并无直接联系,而应与古亚洲洋的演化密切相关,具体为与兴安、松嫩地块的块体拼合活动有关<sup>[33]</sup>。兴安、松嫩地块之间的拼合碰撞时间,可以从两者之间的二连—贺根山—黑河—嫩江缝合带上的晚古生代岩浆作用性质得到答案。

研究表明,沿二连—贺根山—黑河—嫩江缝合带晚古生代早期岩体(闪长岩—奥长花岗岩类)广泛分布。例如,缝合带的西南段(二连—贺根山段),西乌旗北东的马尼塔花岗闪长岩年龄为 $(315.7 \pm 1) \text{ Ma}$ <sup>[8]</sup>,东乌旗北西的扎拉嘎闪长岩年龄为 $(319.8 \pm 0.9) \text{ Ma}$ <sup>[9]</sup>,西乌旗南的达其浑迪石英闪长岩年龄为 $(322 \sim 325) \text{ Ma}$ <sup>[10]</sup>,西乌旗东的白音奥舒奥长花岗岩年龄为 $(309.6 \pm 1.2) \text{ Ma}$ <sup>[11]</sup>;缝合带中段,全胜林场的正长花岗岩年龄为 $(322 \pm 1) \text{ Ma}$ <sup>[33]</sup>;缝合带的东北段(黑河—嫩江段)正达山花岗闪长岩年龄为 $(319 \pm 3) \text{ Ma}$ <sup>[34]</sup>。上述岩体负 Eu 异常不显著,属于或接近于埃达克岩,具有明显的俯冲成因特点,共同构成了造山带北缘的早石炭世晚期—晚石炭世早期岩浆弧,其空间分布及年代学数据说明:兴蒙造山带北缘在晚古生代早期发生了明显的向北

俯冲过程,兴安、松嫩地块之间约在 325 ~ 309 Ma 发生碰撞,形成了二连—贺根山—黑河—嫩江缝合带<sup>[3]</sup>,在晚古生代晚期(301 ~ 271 Ma)进入了造山后伸展阶段,表现为大规模的碱性岩浆岩沿缝合带两侧出露。

乌兰岩体由细粒二长花岗岩、斑状二长花岗岩组成,其中主体岩性细粒二长花岗岩的锆石 U—Pb 年龄为  $312 \pm 2 \text{ Ma}$ ,与上述岩浆活动的时代基本一致。2 种岩性为高分异的钙碱性 S 型花岗岩,其中细粒二长花岗岩分异程度更高,明显不同于上述岩体的岩石类型,其形成可能与伸展体制环境密切相关。样品在 Yb + Ta—Rb 图解上位于数种(火山弧、板内、同碰撞)构造环境分界线的汇聚处,即后碰撞区(图 10(a)),但后碰撞区涉及的环境相当广泛。结合样品在  $R_1 - R_2$  构造图解上的分布(图 10(b))并未落在造山后 A 型花岗岩区域,而是均较集中地落在了造山晚期和造山后 A 型花岗岩区的分界线附近,因此岩体应是 2 种构造体制转折时期的产物。在  $\text{SiO}_2 - \lg[\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$  图解上样品均匀落在了伸展背景的引张型区(图 10(c)),说明乌兰复合岩体的形成与古亚洲洋的演化有关,形成于洋盆闭合后的造山晚期伸展环境,进而说明在  $(312 \pm 2) \text{ Ma}$  时研究区洋盆已经闭合。

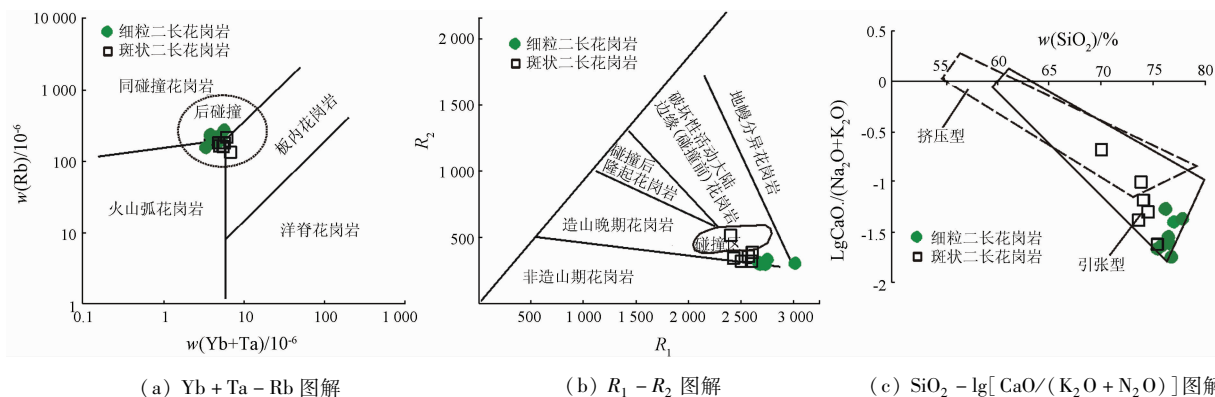


图 10 乌兰复合岩体构造环境判别图解<sup>[35-37]</sup>

Fig. 10 Tectonic environment discrimination diagrams of the Wulan composite pluton<sup>[35-37]</sup>

## 6 结论

(1) 乌兰复合岩体由细粒二长花岗岩、斑状二长花岗岩 2 种岩性组成,前者构成了岩体主体,成岩年龄为  $(312 \pm 2) \text{ Ma}$ ,形成于晚石炭世早期。

(2) 2 种岩性均具有全碱含量中等、富钾、过铝

质的特征,为高钾钙碱性系列的高分异 S 型花岗岩,且主体岩性细粒二长花岗岩分异演化程度更高。

(3) 2 种岩性均富集 Rb、Th 及 K 等大离子亲石元素,明显亏损 Ba、Sr、Ti 等元素,弱亏损 Ta、Nb 等元素,具有相似的微量元素与稀土元素分布特征,指示两者来自于同一源区。

(4) 乌兰岩体的成因与古亚洲洋的演化有关,

形成于洋盆闭合后的造山晚期伸展环境。

## 参考文献(References):

- [1] 徐备,王志伟,张立杨,等. 兴安陆内造山带[J]. 岩石学报, 2018,34(10):2819–2844.
- Xu B, Wang Z W, Zhang L Y, et al. The Xing–Meng intracontinent orogenic belt[J]. *Acta Petrol Sin*, 2018, 34(10):2819–2844.
- [2] 徐备,赵盼,鲍庆中,等. 兴安造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报, 2014,30(7):1841–1857.
- Xu B, Zhao P, Bao Q Z, et al. Preliminary study on the pre–Mesozoic tectonic unit division of the Xing–Meng Orogenic Belt (XMOB)[J]. *Acta Petrol Sin*, 2014, 30(7):1841–1857.
- [3] 许文良,孙晨阳,唐杰,等. 兴安造山带的基底属性与构造演化过程[J]. 地球科学, 2019,44(5):1620–1646.
- Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. Basement nature and tectonic evolution of the Xing’an–Mongolian orogenic belt[J]. *Earth Sci*, 2019, 44(5):1620–1646.
- [4] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6):1069.
- [5] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China[J]. *J Asian Earth Sci*, 2011, 41(1):1–30.
- [6] 许文良,王枫,裴福萍,等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 2013,29(2):339–353.
- Xu W L, Wang F, Pei F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore–forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. *Acta Petrol Sin*, 2013, 29(2):339–353.
- [7] 张晋瑞,魏春景,初航. 兴安造山带构造演化的新模式:来自内蒙古中部四期不同类型变质作用的证据[J]. 岩石学报, 2018,34(10):2857–2872.
- Zhang J R, Wei C J, Chu H. New model for the tectonic evolution of Xing’an–Inner Mongolia Orogenic belt: Evidence from four different phases of metamorphism in central Inner Mongolia[J]. *Acta Petrol Sin*, 2018, 34(10):2857–2872.
- [8] 王帅,李英杰,王金芳,等. 内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J]. 地质通报, 2021,40(1):82–94.
- Wang S, Li Y J, Wang J F, et al. Discovery of Late Carboniferous adakite in Manita, Inner Mongolia, and its constraints on intra–oceanic subduction in eastern Paleo–Asian Ocean[J]. *Geol Bull China*, 2021, 40(1):82–94.
- [9] 李敏,李敏,程银行,等. 内蒙古东乌旗晚古生代闪长岩、二长花岗岩年代学特征及岩石成因[J]. 中国地质, 2016,43(2):380–394.
- Li M, Li M, Cheng Y H, et al. Chronology and petrogenesis of the diorite and monzonitic granite in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geol China*, 2016, 43(1):380–394.
- [10] 刘建峰,迟效国,张兴洲,等. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2009, 83(3):365–376.
- Liu J F, Chi X G, Zhang X Z, et al. Geochemical characteristic of Carboniferous quartz–diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Acta Geol Sin*, 2009, 83(3):365–376.
- [11] 王金芳,李英杰,李红阳,等. 贺根山缝合带白音舒奥长花岗岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 2019,65(4):857–872.
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. Zircon U–Pb ages and geochemical characteristics of Baiyinhushu trondhjemite in Hegenshan suture zone and their tectonic implications[J]. *Geol Rev*, 2019, 65(4):857–872.
- [12] 王树庆,胡晓佳,赵华雷,等. 内蒙古京格斯台晚石炭世碱性花岗岩年代学及地球化学特征——岩石成因及对构造演化的约束[J]. 地质学报, 2017,91(7):1467–1482.
- Wang S Q, Hu X J, Zhao H L, et al. Geochronology and geochemistry of Late Carboniferous Jinggesitai alkaline granites, Inner Mongolia: Petrogenesis and implications for tectonic evolution[J]. *Acta Geol Sin*, 2017, 91(7):1467–1482.
- [13] 程银行,李艳锋,李敏,等. 内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时代、成因及地质意义[J]. 地质学报, 2014,88(11):2086–2096.
- Cheng Y H, Li Y F, Li M, et al. Geochronology and petrogenesis of the alkaline pluton, in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. *Acta Geol Sin*, 2014, 88(11):2086–2096.
- [14] 洪大卫,黄怀曾,肖宜君,等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 1994,68(3):219–230.
- Hong D W, Huang H Z, Xiao Y J, et al. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. *Acta Geol Sin*, 1994, 68(3):219–230.
- [15] 童英,洪大卫,王涛,等. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. 地球学报, 2010,31(3):395–412.
- Tong Y, Hong D W, Wang T, et al. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino–Mongolian Border and its tectonic and metallogenic implications[J]. *Acta Geoscient Sin*, 2010, 31(3):395–412.
- [16] 张超,吴新伟,刘永江,等. 大兴安岭中段早二叠世 A 型花岗岩成因及对扎兰屯地区构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2020,36(4):1091–1106.
- Zhang C, Wu X W, Liu Y J, et al. Genesis of Early Permian A–type granites in the middle of the Great Xing’an Range and constraints on tectonic evolution of the Zhalantun area[J]. *Acta Petrol Sin*, 2020, 36(4):1091–1106.
- [17] Ludwig K R. Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, 2003(4):1–70.
- [18] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004,49(16):1589–1604.

- Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U – Pb age[J]. *Chin Sci Bull*, 2004, 49(15): 1589 – 1604.
- [19] Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, et al. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* [J]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 33 – 39.
- [20] Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 1980, 13(1): 97 – 108.
- [21] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *GSA Bull*, 1989, 101(5): 635 – 643.
- [22] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geol Soc London Spec Publicat*, 1989, 42(1): 313 – 345.
- [23] 张天福, 郭硕, 辛后田, 等. 大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn – (Li – Rb – Nb – Ta) 多金属成矿作用的制约[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 248 – 267.
- Zhang T F, Guo S, Xin H T, et al. Petrogenesis and magmatic evolution of highly fractionated granite and their constraints on Sn – (Li – Rb – Nb – Ta) mineralization in the Weilasituo deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing' an Range, China[J]. *Earth Sci*, 2019, 44(1): 248 – 267.
- [24] 舒徐洁, 陈志洪, 朱延辉, 等. 赣南兴国东固高分异花岗岩成因及地质意义[J]. *地质论评*, 2018, 64(1): 108 – 126.
- Shu X J, Chen Z H, Zhu Y H, et al. Genesis of Donggu highly fractionated granites, Xingguo, southern Jiangxi, and its geological significance[J]. *Geol Rev*, 2018, 64(1): 108 – 126.
- [25] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A – type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407 – 419.
- [26] Sylvester P J. Post – collisional alkaline granites [J]. *J Geol*, 1989, 97(3): 261 – 280.
- [27] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(7): 745 – 765.
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, et al. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Sci China Earth Sci*, 2017, 47(7): 745 – 765.
- [28] Chappell B W. Aluminium saturation in I – and S – type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535 – 551.
- [29] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(9): 981 – 992.
- Li X H, Li W X, Li Z X. Re – discussion on genetic types and tectonic significance of Early Yanshan granites in Nanling[J]. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(9): 981 – 992.
- [30] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. *岩石学报*, 1993, 9(1): 44 – 54.
- Wang D Z, Liu C S, Shen W Z, et al. The contrast between tonglu I – Type and Xiangshan S – Type clastoporphyritic lava[J]. *Acta Petrol Sin*, 1993, 9(1): 44 – 54.
- [31] Allègre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1978, 38(1): 1 – 25.
- [32] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I – type granites in NE China (I). Geochronology and petrogenesis[J]. *Lithos*, 2003, 66(3/4): 241 – 273.
- [33] 崔芳华, 郑常青, 徐学纯, 等. 大兴安岭全胜林场地区晚石炭世岩浆活动研究: 对兴安地块与松嫩地块拼合时间的限定[J]. *地质学报*, 2013, 87(9): 1247 – 1263.
- Cui F H, Zheng C Q, Xu X C, et al. Late Carboniferous magmatic activities in the Quanshenglinchang area, great Xing' an range: Constrains on the timing of amalgamation between Xing' an and Songnen Massifs[J]. *Acta Geol Sin*, 2013, 87(9): 1247 – 1263.
- [34] 张彦龙, 葛文春, 高妍, 等. 龙镇地区花岗岩锆石 U – Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1059 – 1073.
- Zhang Y L, Ge W C, Gao Y, et al. Zircon U – Pb ages and Hf isotopes of granites in Longzhen area and their geological implications[J]. *Acta Petrol Sin*, 2010, 26(4): 1059 – 1073.
- [35] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *J Petrol*, 1984, 25(4): 956 – 983.
- [36] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chem Geol*, 1985, 48(1/2/3/4): 43 – 55.
- [37] Brown G C, Nordin G L. An epizootic model of an insect – fungal pathogen system[J]. *Bull Mathemat Biol*, 1982, 44(5): 731 – 739.

## Geochronology, geochemistry and geological significance of the Wulan composite pluton in the southern Xing' an block

HAO Shuqing<sup>1</sup>, JIA Shiyong<sup>2</sup>, RONG Xiuwei<sup>1</sup>

(1. Shanxi Third Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd, Shanxi Jinzhong 030620, China;

2. Natural Resources Development Center of Shanxi Province, Shanxi Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** There are some existing debates about the Late Paleozoic tectonic framework of the northern margin of the Xing' an – Mongolian orogenic belt, especially the final closing time of oceanic basin. Wulan composite Pluton

in the southern Xing'an block provides a good medium to address this problem. In this paper, the Zircon LA - ICP - MS U - Pb ages and geochemical characteristics of Wulan composite Pluton were studied to determine its formation epoch and petrogenesis, and to reveal the regional tectonic setting. Wulan composite Pluton is composed of fine grained monzogranite and porphyritic monzogranite, the former constitutes the main body of the rock mass, with the diagenetic age of  $(312 \pm 2)$  Ma, which was formed in early Late Carboniferous. Geochemical analyses indicates that both of the fine grained monzogranite and porphyritic monzogranite have the characteristics of medium total alkali content, rich in K and peraluminous, belonging to highly fractionated S - type granite of high - K calc - alkaline series. The total REE contents of main rock mass of fine grained monzogranite are relatively low, with obvious negative Eu anomalies, showing high differential evolution character. Both the fine grained monzogranite and porphyritic monzogranite are rich in large ion lithophylic elements (Rb, Th and K), and obviously depleted in Ba, Sr and Ti, with slightly depleted in Ta and Nb. These two types of rocks have characteristics of similar trace and rare earth elements distribution, indicating that they come from the same source region. The formation of the rock mass is related to the evolution of the ancient Asian ocean and was formed in the late orogenic extensional environment after the oceanic basin was closed.

**Keywords:** Wulan composite pluton; S - type granite; geochemistry; Xing'an Block; Paleo - Asian Ocean  
(责任编辑: 魏昊明)