

doi: 10.12029/gc20170509

陈佩嘉, 戴朝成, 黄成, 王新亮. 2017. 乌拉山地区古元古代S型花岗岩岩石地球化学、锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. 中国地质, 44(5): 959-973.

Chen Peijia, Dai Chaocheng, Huang Cheng, Wang Xinliang. 2017. Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of the Paleoproterozoic S-type granite in Wulashan region and its geological significance[J]. Geology in China, 44(5): 959-973(in Chinese with English abstract).

# 乌拉山地区古元古代S型花岗岩岩石地球化学、锆石U-Pb年代学及其地质意义

陈佩嘉<sup>1</sup> 戴朝成<sup>1</sup> 黄成<sup>2</sup> 王新亮<sup>2</sup>

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌330000; 2. 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古呼和浩特010000)

**摘要:** 华北克拉通北缘乌拉山地区发育有大量的古元古代花岗岩, 以诺尔音S型花岗岩为代表, 本文对诺尔音花岗岩进行详细研究, 结果表明: 诺尔音花岗岩具有高硅( $w(\text{SiO}_2)=70.03\% \sim 75.43\%$ )、高铝( $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=13.04\% \sim 14.87\%$ )、富钾( $w(\text{K}_2\text{O})=5.36\% \sim 6.58\%$ )的特征, 其较低的铁镁质量比 $\text{Mg}^\# < 10$ 和较高铝饱和度 $\text{A}/\text{CNK}=1.03 \sim 1.21$ , 属于典型的过铝质花岗岩, 岩石轻稀土富集, 且轻重稀土强烈分馏( $\text{La}_N/\text{Yb}_N=22.3 \sim 300.5$ ), 配分模式表现为右倾型, 具有明显的铕负异常( $\delta\text{Eu}=0.16 \sim 0.55$ ), 微量元素原始地幔标准化蛛网图显示, 岩石富集K、Rb、Th、Pb, 亏损Sr、Ba、Nb、Ta、P、Ti; 诺尔音花岗岩与乌拉山地区古元古代孔兹岩系具有相似的主微量地球化学特征, 推断其为古元古代阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞背景下, 孔兹岩系深熔作用的产物。LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $(1891 \pm 14)\text{Ma}$ 和 $(1863 \pm 17)\text{Ma}$ , 代表诺尔音S型花岗岩的结晶年龄, 与区域内孔兹岩带记录的岩浆-变质事件相吻合。

**关键词:** 乌拉山; 孔兹岩带; 诺尔音S型花岗岩; 古元古代; 地球化学

中图分类号: P588.12 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)05-0959-15

## Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of the Paleoproterozoic S-type granite in Wulashan region and its geological significance

CHEN Peijia<sup>1</sup>, DAI Chaocheng<sup>1</sup>, HUANG Cheng<sup>2</sup>, WANG Xinliang<sup>2</sup>

(1. College of Geosciences, East China Institute of Technology, Nanchang, 330013, Jiangxi, China; 2. Geology and Mineral Exploration Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Wulashan area, located in the north part of the North China craton, has well-developed Paleoproterozoic granites, with the Nueryin S-type granites as the typical one. The investigation of Nueryin granites shows that the granites have high  $\text{SiO}_2$  ( $w(\text{SiO}_2)=70.03\% \sim 75.43\%$ ), high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=13.04\% \sim 14.87\%$ ), and high  $\text{K}_2\text{O}$  values ( $w(\text{K}_2\text{O})=5.36\% \sim 6.58\%$ ), low  $\text{Mg}^\# (< 10)$

收稿日期: 2016-10-09; 改回日期: 2017-10-19

基金项目: 东华理工大学研究生创新基金(YC2017-S277)、国家青年科学基金项目(41402085)和国土资源部大兴安岭成矿带南段地质矿产调查项目(1212011120718)联合资助。

作者简介: 陈佩嘉, 男, 1993年生, 硕士生, 地质学专业, 主要从事岩石学方面研究; E-mail: a5733327@live.com。

通讯作者: 戴朝成, 男, 1980年生, 博士, 讲师, 主要从事地层学研究; E-mail: daichaocheng@qq.com。

and high A/CNK values, indicating that they belong to peraluminous S-type granites. They are enriched in LREE with significant differentiation between LREE and HREE ( $La_N/Yb_N=22.3-300.5$ ), and REE patterns of the samples are of right-oblique type, with strong negative Eu anomalies ( $\delta Eu=0.16-0.55$ ). The primitive mantle-normalized trace element diagrams show enrichment of K, Rb, Th, Pb and depletion of Sr, Ba, Nb, Ta, P, Ti. The Nueryin granites have similar geochemical characteristics to the Paleoproterozoic khondalites in Wulashan area and, and the reason is probably that Nueryin granites were generated by the khondalites anatexis while the Yinshan blocks and Ordos blocks experienced collision in Paleoproterozoic. The LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Nueryin granites are  $1891\pm 14$  Ma and  $1863\pm 17$  Ma, which represent the crystallization age of the Nueryin S-type granites, and the age is also contemporaneous with magmatic-metamorphic events in Khondalite belt.

**Key words:** Wulashan; khondalite belt; Nuerying S-type granite; Paleoproterozoic; geochemistry

**About the first author:** CHEN Peijia, male, born in 1993, master candidate, engages in the study of petrology; E-mail: a5733327@live.com.

**About the corresponding author:** DAI Chaocheng, male, born in 1980, lecturer, doctor, engages in the study of stratigraphy; E-mail: daichaocheng@qq.com.

**Fund support:** Supported by East China University of Technology Postgraduate Innovation Fund (No. YC2017-S277), National Youth Science Foundation Project (No. 41402085) and the Ministry of Land and Resources, Geological and Mineral Survey Project for Southern Section of Da Hinggan Mountains Metallogenic Belt (No. 1212011120718)

## 1 引 言

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,有着38.5亿年的演化历史(Song et al.,1996),保存着大量较完整的前寒武纪岩石和演化记录。Zhao et al.(2002,2005)认为华北克拉通基底是由西部陆块、东部陆块和中部陆块三个主要构造单元组成,且西部陆块分为北部阴山陆块和南部鄂尔多斯陆块,在古元古代(约1.95 Ga)俯冲碰撞形成孔兹岩带。近年来,许多研究者对华北陆块北缘的孔兹岩带的岩石地层、组合特征、构造变形、变质演化及年代学特征进行了大量的研究工作,并取得了大量的研究进展(Condie et al., 1992;刘喜山等, 1992; 李江海等, 1999; 杨振升等, 2000,2003; Zhai et al. 2000,2003; Wan et al. 2005,2006,2013; 刘守偈等,2007; 毕明丽等,2008; 董春艳等, 2009; 赵国春, 2009; 赵越等, 2010; 翟明国, 2011; Zhao et al.2010, Yin et al.2011; Dong et al., 2014; 马铭株等, 2015)。研究表明,近东西向分布的孔兹岩带沿着集宁—大青山—乌拉山—千里山—贺兰山一线分布,主要由基性麻粒岩、孔兹岩系、TTG片麻岩和不同性质的花岗岩组成;远离中部带的孔兹岩系(大青山、乌拉山、千里山及贺兰山)在古元古代(2.0~1.9 Ga)都经历了一期近等温降压(ITD)顺时针P-T演化轨迹的麻粒岩相的变质作用,东部集宁地区则经历了两期的麻粒岩相

变质作用(徐仲元等,2002;蔡佳,2013;刘建辉,2013)。前人的工作主要集中在孔兹岩系的岩石学、岩相学、地球化学、同位年代学及其构造意义的研究,而构造带中的花岗岩研究较为薄弱,孔兹岩带中分布的花岗岩被认为是阴山陆块与鄂尔多斯陆块拼合过程中,孔兹岩系部分熔融形成的S型花岗岩(钟长汀等,2006,李正辉等,2013;刘金科等,2016),花岗质岩石作为地壳最主要的岩石之一,对其进行岩石学和地球化学分析,能为我们理解孔兹岩系的构造演化和变质演化提供依据。

对于华北克拉通北缘中段的乌拉山而言,出露于乌拉山西部诺尔音高勒一带的S型花岗岩,此前少有学者进行系统性的研究,因此本文选取诺尔音高勒地区的花岗岩作为研究对象,对其岩石学、地球化学及锆石U-Pb年代学进行综合研究,分析它们的形成原因、形成时代及记录的构造事件,探讨孔兹岩系的源岩性质,为本区早期地壳构造-岩浆演化提供依据。

## 2 区域地质概况

研究区乌拉山位于华北克拉通北缘中段的孔兹岩带中,其北侧为阴山陆块,南侧为鄂尔多斯陆块(图1a)。乌拉山早前寒武纪变质基底主要由新太古代乌拉山岩群变质表壳岩、新太古代变质深成岩(TTG片麻岩)及古元古代孔兹岩系组成,其中侵

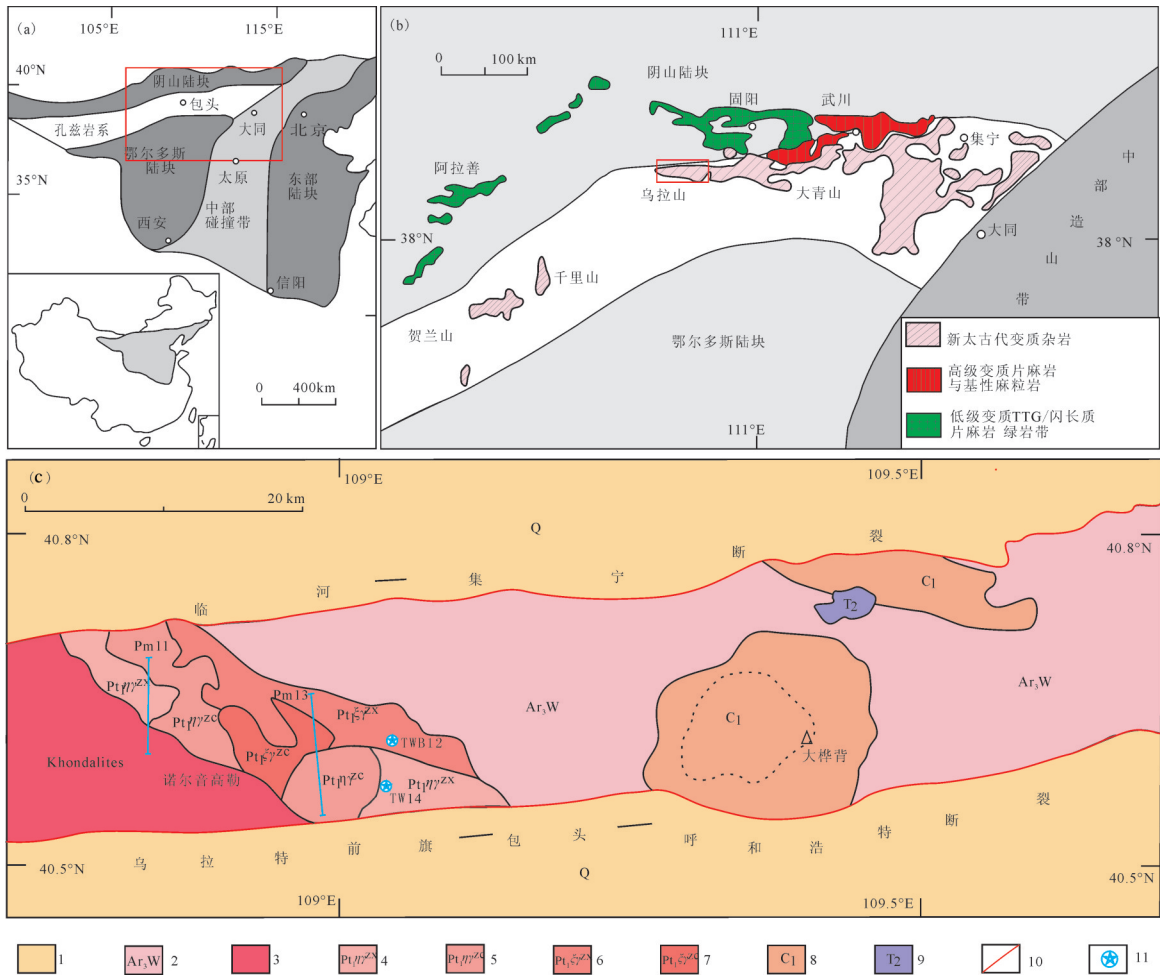


图1 乌拉山地区在华北克拉通的分布和构造位置图(a,b,据 Zhao et al. 2005)和乌拉山西部地质简图及采样位置(c,据刘涛涛等,2016)

1—第四系;2—新太古代乌拉山岩群;3—古元古代孔兹岩系;4—中粗粒二长花岗岩;5—中细粒二长花岗岩;6—中细粒正长花岗岩;7—中粗粒正长花岗岩;8—古生代花岗岩;9—中生代花岗岩;10—断层;11—采样位置

Fig. 1 Distribution of Wulashan in North China Craton (a,b, modified after Zhao et al., 2005) and geological sketch map of the west of Wulashan area and sampling locations (c, modified after Liu et al., 2016)

1—Quaternary; 2— Neoproterozoic Wulashan rock group; 3— Paleoproterozoic khondalites; 4— Middle–fine grained syenite granite; 5— Middle–coarse grained syenite granite; 6— Middle–fine grained monzonitic granite; 7— Middle coarse grained monzonitic granite; 8— Paleozoic granite; 9— Mesozoic granite; 10— Fault; 11— Sampling location

入了大量的花岗岩体和基性岩脉。

新太古代变质深成岩的主要岩性为紫苏花岗质片麻岩和石英闪长质片麻岩。新太古代乌拉山岩群呈近东西向带状广泛分布;经历了复杂的变形变质作用,变质程度达到高角闪-麻粒岩相,分为角闪片麻岩岩组、黑云片麻岩岩组、榴云片麻岩岩组、石榴浅粒岩岩组及大理岩岩组。榴云片麻岩岩组、石榴浅粒岩岩组及大理岩岩组组成区内的孔兹岩系,岩性为一套富铝片麻岩、石榴黑云变粒岩、石榴浅粒岩及大理岩,其原岩为泥质岩、泥质粉砂岩、碎

屑岩、碳酸盐岩,以及少量中酸性火山岩。

古元古代侵入岩在诺尔音高勒地区分布广泛,在区域上呈北西-南东向展布,面积约190 km<sup>2</sup>,这些花岗质岩石主要呈岩体产出,与围岩接触关系明显(图2c),在岩体中分布有大量的乌拉山岩群、孔兹岩系残留体(图2a),分为苏布尔盖单元、达拉盖单元、脑木混霍校单元和诺尔音单元,此次研究以出露面积最大的诺尔音岩体为对象,根据其岩性、结构和侵入关系将诺尔音岩体分为:①肉红色中细粒二长花岗岩(Pt<sub>1</sub>γ<sup>γ\*</sup>);②肉红色中粗粒二长花岗

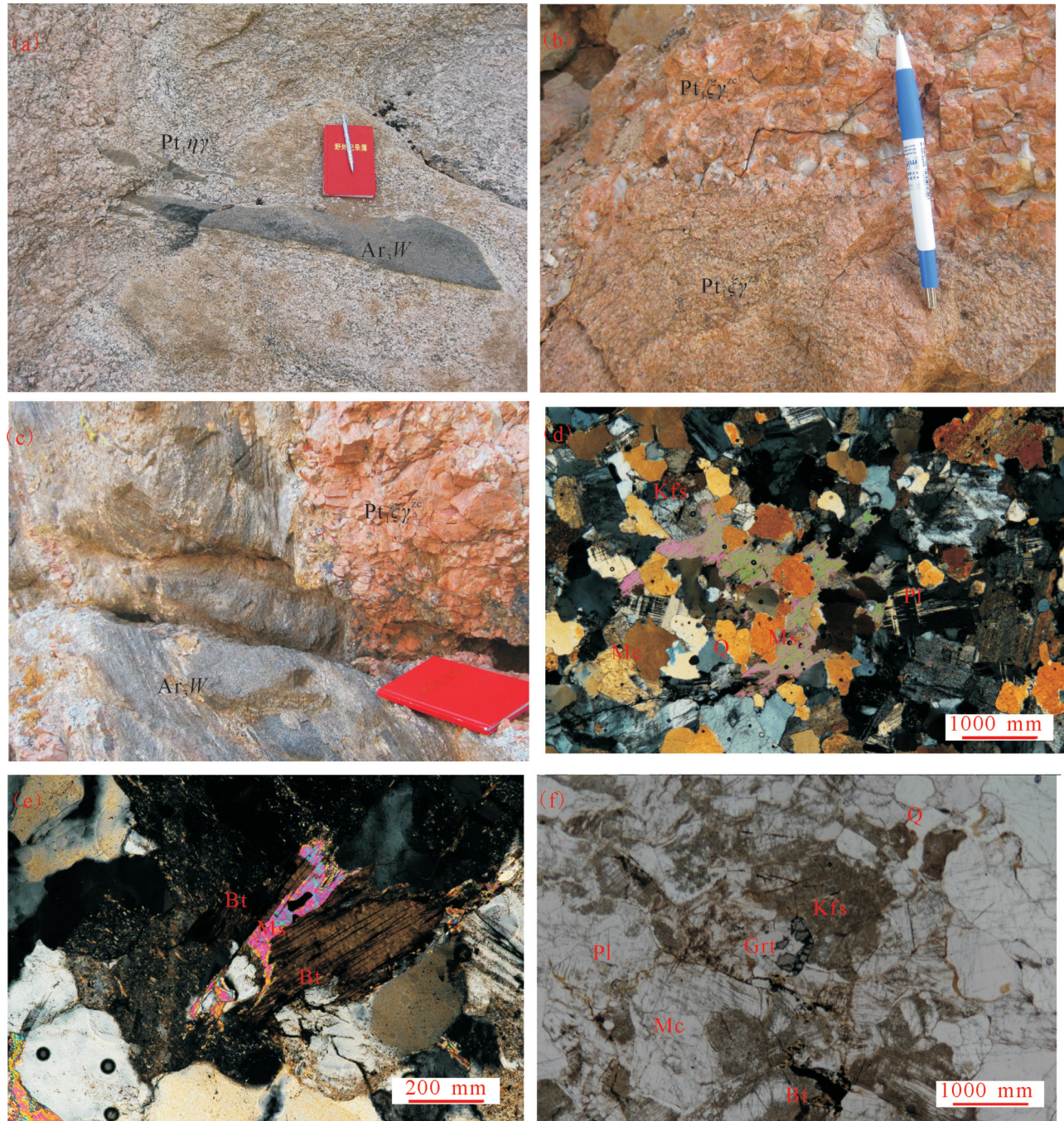


图2 诺尔音花岗岩野外地质特征(a-c)及镜下特征(d-f;d,e为正交偏光,f为单偏光)  
 a—花岗岩中的残留体;b—Pt,ξγ<sup>cc</sup>与Pt,ξγ<sup>n</sup>侵入界线明显;c—Pt,ξγ<sup>cc</sup>侵入到乌拉山岩群中;d—含白云母二长花岗岩,e—自形的黑云母中包含的他形的白云母;f—含石榴子石二长花岗岩,钾长石黏土化强烈。岩石代号同图1,矿物代号:Mc—微斜长石;Ms—白云母;Bt—黑云母;Grt—石榴子石;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Q—石英

Fig. 2 Geological features in the field (a-c) and photographs of mineral features (d-f) from Nueryin granite  
 a-The residual body in granite; b-The obvious intrusive boundary between Pt,ξγ<sup>cc</sup> and Pt,ξγ<sup>n</sup>; c- Pt,ξγ<sup>cc</sup> that invaded into the Wulashan rock group;  
 d- The muscovite-bearing monzogranite,cross-polarized light; e- Euhedral muscovite included in automorphic biotite,cross-polarized light;  
 f- Garnet-bearing monzogranite, and the K-feldspar with strong clay alteration, plane-polarized light. Rock code in Fig. 2 as for Fig. 1, Mineral code in Fig. 2: Mc- Microcline, Ms-Muscovite; Bt-Biotite;Grt-Garnet; Kfs- K-feldspar; Pl- Plagioclase; Q-Quartz

岩( $Pt_i\eta\gamma^e$ );③肉红色中细粒正长花岗岩( $Pt_i\xi\gamma^e$ );④肉红色中粗粒正长花岗岩( $Pt_i\xi\gamma^e$ )。

### 3 岩相学特征

本文采集的样品为肉红色中细粒二长花岗岩(P1160, P1168, P1172), 肉红色中细粒正长花岗岩(TWS13-2, PM1315, PM1323, PM1341)和肉红色中粗粒正长花岗岩(PM1348, PM1363, TWB12)进行了主微量地球化学和LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学分析, 采样位置见图1c。

肉红色中细粒二长花岗岩( $Pt_i\eta\gamma^e$ )由钾长石、斜长石、石英, 少量黑云母和白云母组成。钾长石为条纹长石和微斜长石, 比较干净, 多呈1~3.5 mm, 半自形粒状, 发育显微条纹构造和格子双晶, 黏土化强烈, 表面脏杂, 含量35%~40%;斜长石1~3.5 mm, 半自形粒状, 发育聚片双晶,  $An=23$ , 轻度绢云母化, 含量30%~35%;石英0.5~2 mm, 他形粒状, 含量约25%;黑云母0.5~1 mm, 鳞片状, 浅黄-深棕褐色, 多数绿泥石化, 含量很少。其中P1160中可见有片状白云母, 含量约3%(图2d)。

肉红色中细粒正长花岗岩( $Pt_i\xi\gamma^e$ )由钾长石、斜长石、石英, 少量黑云母组成。钾长石为条纹长石和微斜长石, 比较干净, 多呈0.5~1.5 mm, 半自形粒状, 少数1.5~2 mm, 发育显微正条纹结构和格子状双晶, 含量40%~50%;斜长石粒径0.5~1.5 mm, 半自形粒状, 发育聚片双晶,  $An=24$ , 含量20%~25%;石英粒径为0.5~1.5 mm, 他形粒状, 含量20%~25%;黑云母含量1%~5%。

肉红色中粗粒正长花岗岩( $Pt_i\xi\gamma^e$ )由钾长石、斜长石、石英, 少量石榴子石和黑云母组成。长石均已强烈黏土化而表面脏杂, 其中钾长石为微斜长石和正长石, 半自形粒状, 粒径2~8 mm, 含量60%~70%;斜长石半自形粒状, 粒径2~6 mm, 少数1~2 mm, 轻度绢云母化, 含量10%~15%;石英呈他形粒状, 粒径2~5 mm, 含量20%~25%, 黑云母呈自形片状-鳞片状, 含量为1%~5%。在PM1363B1中可见有正极高突起的石榴子石, 正交偏光下全消光, 石榴子石粒径<0.3 mm, 含量约2%(图2f)。

### 4 分析方法

本文样品的主量元素、稀土元素和微量元素测

试由核工业北京地质研究院分析测试研究所完成, 其中全岩主量元素采用XRF分析, 主量元素分析精度优于3%。稀土和微量元素采用ICP-MS进行分析, 稀土元素和微量元素分析精度优于5%, 实验过程见相关文献(刘晔等, 2007)。

同位素年代学样品TW14(109°01'44.8"E. 40°40'44.8"N)和TWB12(109°05'18.0"E. 40°41'15.8"N)的处理、锆石挑选及制靶均由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司承担, 锆石U-Pb年龄于国土资源部天津地质矿产研究所采用激光烧蚀-电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS法)测定, 所用等离子体质谱仪为Thermo Fisher公司制造的Neptune, 采用193 nm激光器对锆石进行剥蚀, 斑束直径为35  $\mu\text{m}$ , 采用He作为剥蚀物质的载气, 锆石TEMORA作为年龄外标, 元素含量用NIST612作为外标标定。锆石测定点的Pb同位素比值、U-Pb表面年龄和U-Th-Pb含量采用ICPMSDataCal程序(Liu et al. 2010, 2010b)和Isoplot程序(Luding, 2003)进行数据处理及作图, 采用 $^{208}\text{Pb}$ 校正法对普通铅进行校正。

## 5 分析结果

### 5.1 主微量元素地球化学特征

诺尔音花岗岩主量元素分析结果见表1, 诺尔音花岗岩具有高硅( $w(\text{SiO}_2)$ 为70.03%~75.43%)、高铝( $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为13.04%~14.87%)、富钾( $w(\text{K}_2\text{O})=5.36\%\sim 6.58\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为0.31~0.62)的特征, 且相对高碱( $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为7.94%~10.19%)和弱过铝质( $A/\text{CNK}=1.03\sim 1.21$ )。 $\text{SiO}_2$ 含量由二长花岗岩(平均71.81%)至正长花岗岩(平均73.57%)逐渐增加, 表明正长花岗岩较二长花岗岩具更高的演化程度。在( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )- $\text{SiO}_2$ 图解(TAS图解)中, 大部分落在亚碱性系列(图3a);在A/CNK-A/NK图解中(图3b), 有5个样品位于强过铝质范围内, 其余投在了弱过铝质范围内, 总体反映出S型花岗岩特征。

岩石稀土元素含量见表1, 稀土元素配分曲线整体表现为轻稀土富集, 重稀土亏损的右倾型, 且轻重稀土分馏明显( $\text{La}_N/\text{Yb}_N$ 为22.3~300.5)。稀土元素含量较高, 总和 $\Sigma\text{REE}$ 为 $202.2\times 10^{-6}\sim 783.5\times 10^{-6}$ 。 $\delta\text{Eu}$ 均小于1, 显示明显Eu的负异常(图4b), 表现为花岗岩的结晶作用发育, 其中肉红色中细粒二长花岗岩的 $\delta\text{Eu}$ 为0.52~0.58, 肉红色中粗粒正长花岗岩 $\delta\text{Eu}$ 为

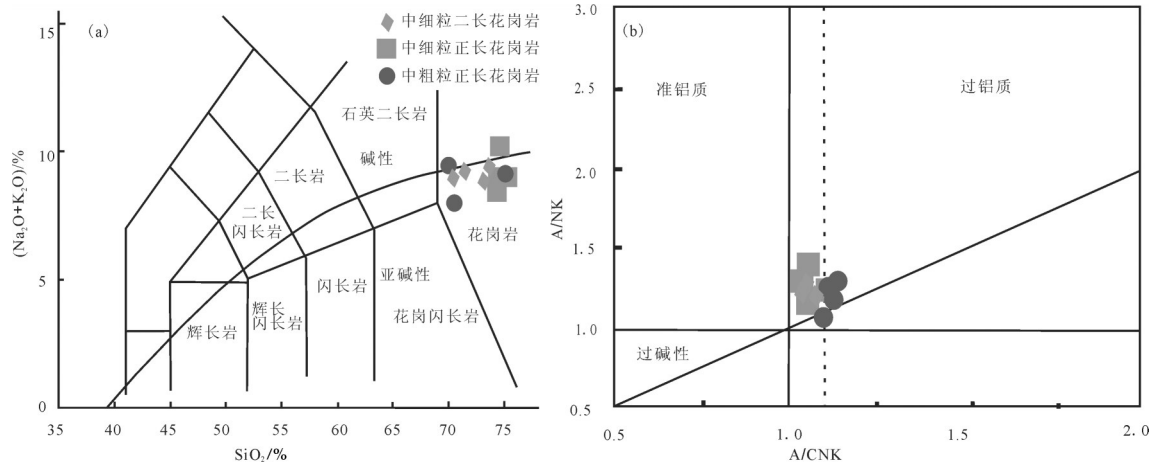


图3 诺尔音花岗岩的TAS图解(a, 据 Middlemost et al., 1994)和A/CNK-A/NK图解(b, 据 Maniar et al., 1989)  
Fig.3 TAS diagram (a, modified after Middlemost et al., 1994), and plot of A/CNK versus A/NK (b modified after Maniar et al., 1989) for Nueryin granite in Wulashan

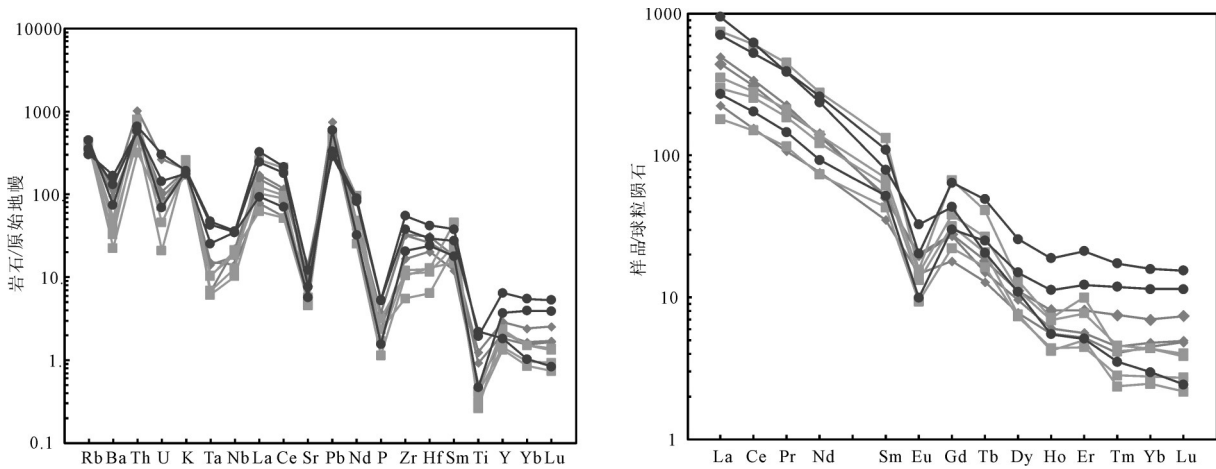


图4 乌拉山诺尔音花岗岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Sun et al., 1989 图例同图3)

Fig.4 Primitive mantle-normalized trace element diagrams and chondrite-normalized REE patterns for Nueryin granite in Wulashan (normalization value after Sun et al., 1989, and symbols in Fig 4 as for Fig 3)

0.16~0.30, 肉红色中粗粒正长花岗岩  $\delta\text{Eu}$  为 0.24~0.55, 表明正长花岗岩的演化程度较二长花岗岩高。诺尔音花岗岩微量元素含量(表1)中, Rb/Sr 的比值为 0.75~2.79, K/Rb 的比值为 165~252, Rb/Ba 比值为 0.60~1.58。从微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图4a)看出诺尔音岩体微量元素原始地幔标准化显示出富集K、Rb、Th、Pb等元素, 亏损Sr、Ba、Nb、Ta、P、Ti等元素。

## 5.2 锆石U-Pb年龄

### 5.2.1 TWB12的锆石U-Pb年龄

样品 TWB12 岩性为中细粒正长花岗岩。定年

锆石多为自形-半自形长柱状, 部分短柱状, 粒径长 100~380  $\mu\text{m}$ , 长宽比例 3:1~1:1, 在阴极发光(CL)图像中, 锆石具有明显的震荡环带(图5a), 多数颗粒为自形晶, 锆石的表面形态及其内部特征表明其为岩浆成因。

利用 LA-ICP-MS 测定锆石分析获得 29 个点的年龄, 对于大于 1 Ga 锆石一般采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 锆石 U-Pb 定年分析结果见表 2。锆石 Th/U 比值除 TWB12.19 点外, 其他 Th/U 比值均 > 0.1, 具典型岩浆锆石特征。大多数锆石所获得的同位素年龄在谐和曲线上及其附近(图 5c), 除 TWB12.5、23、

表1 乌拉山古元古代花岗岩主量元素(%)与微量元素( $10^{-6}$ )分析结果  
 Table 1 Content of major elements (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) for granites in Wulashan

样品号	P1160	P1168	P1172	TWS13-2	PM1315B1	PM1323B1	PM1341B1	PM1348B1	PM1363B1	TWB12GS
	中细粒二长花岗岩			中细粒正长花岗岩				中粗粒正长花岗岩		
SiO <sub>2</sub>	70.59	71.39	73.46	75.43	74.68	74.77	74.42	70.54	75.14	70.03
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.20	0.11	0.06	0.07	0.09	0.09	0.42	0.10	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.37	14.26	13.61	13.50	13.22	13.36	14.12	14.33	13.04	14.87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.95	2.69	2.32	1.06	1.12	1.52	1.19	3.43	1.71	3.08
MnO	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02
MgO	0.56	0.35	0.25	0.12	0.19	0.12	0.08	0.25	0.17	0.65
CaO	0.98	1.10	0.80	0.24	0.22	0.45	0.62	0.99	0.54	0.62
Na <sub>2</sub> O	3.16	3.31	3.11	2.39	2.44	2.67	3.22	2.58	3.25	3.60
K <sub>2</sub> O	6.01	5.93	5.77	6.58	7.75	6.30	5.17	5.36	5.75	5.86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.08	0.05	0.04	0.05	0.07	0.03	0.11	0.03	0.11
LOI	0.94	0.63	0.47	0.57	0.15	0.61	1.02	1.92	0.14	0.66
Total	99.94	99.98	99.99	100.00	99.90	99.99	99.98	99.98	99.90	99.98
Li	7.62	7.55	5.96	2.40	1.51	2.71	4.66	4.10	3.94	8.32
Be	1.98	2.38	2.13	1.31	0.89	1.04	1.74	2.63	2.75	1.52
Sc	2.46	3.07	2.41	1.81	1.42	2.05	2.43	5.72	2.16	2.03
V	20.50	15.60	12.80	3.84	0.79	1.76	1.28	27.60	3.67	28.60
Cr	8.49	6.57	7.65	1.65	0.80	1.83	1.57	5.90	3.38	5.10
Co	2.70	2.13	1.51	0.88	0.62	0.90	0.75	2.96	0.92	3.68
Ni	2.50	2.05	2.21	1.53	0.57	1.08	1.13	2.20	1.45	2.94
Cu	6.99	12.80	7.00	4.37	2.22	3.81	3.80	8.01	3.89	8.53
Zn	45	65	27	19	16	24	26	56	18	40
Ga	20	22	20	20	17	20	21	25	21	25
Rb	230	245	236	266	270	233	250	223	289	193
Sr	292	212	192	121	97	114	111	162	121	259
Y	13.20	9.47	8.38	9.98	6.06	10.70	6.52	29.40	17.00	8.32
Nb	13	16	10	9	7	13	15	25	25	26
Cs	0.55	0.73	0.96	0.52	0.38	0.41	0.62	0.97	1.19	0.39
Ba	915	811	664	361	299	229	158	916	517	1779
Ta	0.58	0.28	0.62	0.28	0.25	0.43	0.42	1.04	1.75	1.93
Pb	29.20	53.10	44.90	29.80	38.90	33.10	36.80	23.30	42.00	20.50
Th	49	87	43	68	39	51	27	49	56	51
U	2.25	5.58	1.90	1.55	0.44	0.96	1.51	3.02	6.39	1.47
Zr	362	364	186	135	62	122	117	616	232	431
Hf	8.03	9.64	6.27	3.88	1.99	3.57	4.00	13.00	7.44	9.16
La	105	118	53	178	71	84	43	168	64	225
Ce	190	208	95	372	157	172	92	322	125	382
Pr	19	22	10	43	18	20	11	37	14	37
Nd	66	64	36	130	57	65	34	122	44	111
Sm	7.69	8.01	5.38	20.30	9.47	10.60	6.59	16.90	7.97	12.20
Eu	1.17	1.13	0.85	0.91	0.77	0.86	0.54	1.18	0.58	1.89
Gd	5.74	5.59	3.71	13.80	6.53	7.87	4.57	13.20	6.21	8.90
Tb	0.68	0.56	0.48	1.54	0.78	1.00	0.61	1.84	0.94	0.77
Dy	2.83	2.44	1.98	3.34	1.93	2.85	1.86	6.56	3.81	2.78
Ho	0.46	0.34	0.31	0.41	0.24	0.39	0.25	1.07	0.64	0.31
Er	1.34	0.93	0.86	1.65	0.82	1.28	0.74	3.51	2.03	0.85
Tm	0.19	0.12	0.10	0.11	0.06	0.12	0.07	0.44	0.30	0.09
Yb	1.19	0.82	0.76	0.74	0.42	0.74	0.47	2.70	1.95	0.51
Lu	0.19	0.13	0.12	0.10	0.06	0.10	0.07	0.39	0.29	0.06
$\theta/^\circ\text{C}$	862	862	799	771	710	762	759	917	819	877
$\delta \text{Eu}$	0.54	0.52	0.58	0.17	0.30	0.29	0.30	0.24	0.25	0.55
Rb/Sr	0.79	1.16	1.23	2.20	2.79	2.04	2.25	1.38	2.39	0.75
Rb/Ba	0.25	0.30	0.36	0.74	0.90	1.02	1.58	0.24	0.56	0.11

注:  $\theta$ 为锆石饱和温度(据 Watson, 1983)。

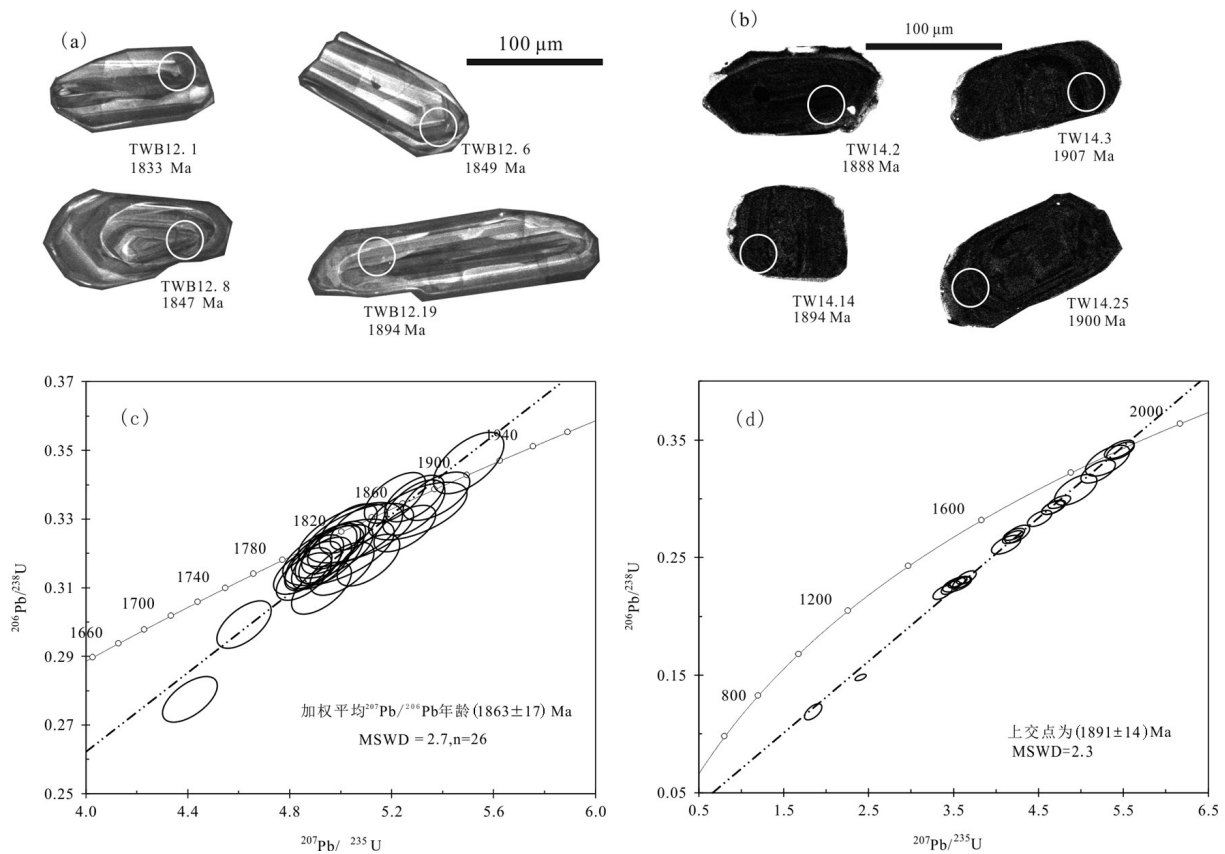


图5 乌拉山诺尔音花岗岩锆石阴极发光图像(a,b)及锆石U-Pb年龄谐和图(c,d)  
Fig. 5 CL images (a, b) and U-Pb concordia diagrams of zircons from Nuoyin granite in Wulashan

29这3个点外,其余26个点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $(1863\pm 17)\text{ Ma}$ ( $\text{MSWD}=2.7$ ),这个年龄代表了乌拉山诺尔音岩体中的正长花岗岩的侵位年龄。

### 5.2.2 TW14的锆石U-Pb年龄

TW14样品岩性为中细粒二长花岗岩。定年锆石多为自形-半自形短柱状,部分长柱状,

粒径长 $100\sim 220\text{ }\mu\text{m}$ ,长宽比例 $1.8:1\sim 1:1$ ,由于锆石中的U含量过高,阴极发光(CL)图像呈现暗黑色,但仍具有较清晰的岩浆型震荡环带(图5b),表明其为岩浆成因。

利用LA-ICP-MS测定锆石分析获得25个点的年龄,锆石U-Pb定年分析结果见表3。锆石Th/U比值多数 $> 0.1$ ,但TW14.7、15、19、20、21、25的Th/U比值 $< 0.1$ ,可能是Th、U扩散系数不同导致,其CL图像呈明显的震荡环带表明仍为岩浆锆石。在U-Pb年龄谐和图中(图5d),多数锆石点有明显放射成因的铅丢失,分析结果大多在谐和曲线下

方,有少数锆石点(TW14.14,15,25)位于谐和曲线上。将这些年龄数据拟合成一条等时线,获得上交点年龄为 $(1891\pm 14)\text{ Ma}$ ,与谐和曲线上的3个锆石点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $(1895\pm 12)\text{ Ma}$ 一致,代表了二长花岗岩的侵位年龄。

## 6 讨论

### 6.1 诺尔音花岗岩的源区性质

研究区花岗岩 $A/\text{CNK}=1.03\sim 1.21$ ,平均1.1,为弱过铝质-强过铝质岩石,且高Si、Al、K,低Na、Mn和 $\text{Mg}^\#(\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO})$ 与 $\text{Mg}^\#(\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO})$ 等地球化学特征,显示出S型花岗岩特征。诺尔音岩体微量元素原始地幔标准化图解显示出花岗岩富集K、Rb、Th、Pb等元素,而亏损如Sr、Ba、Nb、Ta等元素,显示出岩浆的原岩为陆壳物质(李小明等,2002)。样品中Rb含量 $193\times 10^{-6}\sim 289\times 10^{-6}$ ,除TWB12样品外,其余均高于花岗岩的平均值( $\text{Rb}=200\times 10^{-6}$ ), $\text{Sr}=96\times 10^{-6}\sim$



表2 正长花岗岩样品TWB12 LA-ICP-MS 锆石U-Pb 定年数据  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for sample TWB12

样品 TWB12	含量/ $10^{-6}$		同位素比值										同位素年龄/Ma		
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	
1	194	581	0.3198	4.9423	0.1121	0.0009	0.0436	0.0001	0.705	0.0158	0.0001	19	1810	1833	15
2	179	545	0.3164	4.892	0.1121	0.0009	0.0537	0.0004	0.5218	0.0238	0.0004	16	1801	1834	15
3	101	304	0.3214	4.9626	0.112	0.001	0.0522	0.0003	0.5283	0.003	0.0003	17	1813	1832	16
4	296	966	0.2993	4.6205	0.112	0.001	0.0487	0.0003	0.4213	0.0174	0.0003	16	1753	1832	15
5	264	803	0.3272	5.2523	0.1164	0.001	0.0449	0.0003	0.314	0.0024	0.0003	16	1861	2033	15
6	173	513	0.3203	4.9916	0.113	0.0013	0.0738	0.0056	0.4483	0.031	0.001	22	1818	1849	20
7	135	391	0.3224	4.9843	0.1121	0.0009	0.0453	0.0001	0.8612	0.0125	0.0001	16	1817	1834	15
8	181	441	0.3259	5.0755	0.1129	0.0013	0.0699	0.0009	1.5601	0.0096	0.0009	20	1832	1847	21
9	201	621	0.3255	5.039	0.1123	0.0012	0.0819	0.0059	0.1401	0.001	0.001	21	1826	1837	19
10	183	536	0.3206	4.9676	0.1124	0.0011	0.067	0.0018	0.5538	0.0158	0.001	18	1814	1838	17
11	207	596	0.3272	5.029	0.1115	0.0009	0.0719	0.0002	0.5066	0.0127	0.0002	16	1824	1823	15
12	181	532	0.3324	5.3027	0.1157	0.0012	0.0713	0.0033	0.2958	0.0029	0.0029	19	1869	1921	18
13	145	423	0.3175	4.8965	0.1118	0.001	0.0612	0.0001	0.68	0.0059	0.0001	18	1802	1830	16
14	207	619	0.3276	5.0704	0.1122	0.0009	0.0668	0.0001	0.3271	0.0006	0.0001	15	1831	1836	15
15	202	633	0.3149	4.8516	0.1118	0.0009	0.0561	0.0008	0.3286	0.0035	0.0008	15	1794	1828	15
16	236	657	0.3133	4.8557	0.1124	0.001	0.0549	0.0003	1.1941	0.0279	0.0003	16	1795	1839	15
17	153	445	0.3362	5.213	0.1125	0.001	0.0568	0.0002	0.3835	0.0048	0.0002	17	1855	1840	15
18	183	573	0.2775	4.4085	0.1152	0.001	0.0615	0.0002	0.9612	0.0176	0.0002	15	1714	1903	16
19	140	428	0.3334	5.2875	0.115	0.001	0.0712	0.0002	0.0628	0.0007	0.0002	18	1867	1894	16
20	181	569	0.3195	4.9632	0.1127	0.001	0.0725	0.0003	0.1627	0.0006	0.0003	20	1813	1843	16
21	231	638	0.3172	4.9254	0.1126	0.001	0.0645	0.0003	1.0129	0.0163	0.0003	17	1807	1842	16
22	172	511	0.3359	5.2886	0.1142	0.001	0.0675	0.0005	0.2086	0.0021	0.0005	15	1867	1867	15
23	123	303	0.376	7.7013	0.1486	0.0014	0.1089	0.0013	0.3296	0.003	0.0013	20	2197	2329	16
24	148	430	0.3367	5.3751	0.1158	0.0011	0.074	0.0014	0.2944	0.0059	0.0014	16	1881	1925	16
25	128	368	0.3463	5.5019	0.1152	0.001	0.0506	0.0004	0.2905	0.0043	0.0004	20	1901	1916	15
26	227	681	0.3099	4.9251	0.1153	0.001	0.0822	0.0004	0.4665	0.0112	0.0004	17	1807	1920	15
27	204	552	0.3181	5.1088	0.1165	0.001	0.0896	0.0001	0.7873	0.0066	0.0001	17	1838	1938	15
28	180	571	0.3156	5.0051	0.115	0.001	0.0919	0.0004	0.1413	0.0006	0.0004	18	1820	1951	16
29	182	362	0.4402	10.0045	0.1648	0.0014	0.0967	0.0006	0.6955	0.0046	0.0006	20	2435	2506	14

表3 二长花岗岩样品TW14 LA-ICP-MS 锆石U-Pb 定年数据  
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for sample TW14

样品 TW14	含量/10 <sup>-6</sup>		同位素比值										表面年龄/Ma			
	Pb	U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1σ	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ
1	526	2360	0.2204	3.3719	0.111	0.0012	0.0422	0.0001	0.2959	0.0012	1284	14	1498	21	1816	20
2	507	1781	0.2834	4.5139	0.1155	0.0013	0.1018	0.0005	0.1218	0.0002	1609	16	1734	23	1888	20
3	133	414	0.3233	5.203	0.1167	0.0022	0.0826	0.001	0.1383	0.0023	1806	22	1853	30	1907	34
4	549	2450	0.2222	3.383	0.1104	0.0013	0.0575	0.0001	0.2105	0.0001	1293	10	1500	17	1806	21
5	415	1811	0.2287	3.5374	0.1122	0.0013	0.0637	0.0004	0.1591	0.0016	1328	10	1536	18	1835	21
6	602	2536	0.2329	3.6504	0.1137	0.0013	0.0612	0.0008	0.2359	0.0051	1350	13	1561	20	1859	20
7	353	1771	0.2044	3.1077	0.1103	0.0012	0.0352	0.0003	0.0967	0.0019	1199	10	1435	18	1804	21
8	349	1189	0.2925	4.6698	0.1158	0.0013	0.0676	0.0003	0.1809	0.0031	1654	14	1762	21	1892	20
9	348	2273	0.148	2.4062	0.1179	0.0013	0.0174	0.0002	0.6433	0.0076	890	7	1244	14	1925	20
10	555	2391	0.2288	3.5934	0.1139	0.0013	0.0559	0.0005	0.2328	0.0024	1328	11	1548	18	1863	20
11	155	537	0.2926	4.6808	0.1116	0.0013	0.0414	0.0007	0.169	0.0011	1654	14	1764	22	1896	21
12	375	1160	0.3076	4.9386	0.1164	0.0013	0.0879	0.0003	0.3336	0.0036	1729	30	1809	37	1902	20
13	344	2792	0.1188	1.845	0.1126	0.0014	0.0416	0.0004	0.2388	0.0006	724	17	1062	24	1842	22
14	419	1271	0.3325	5.3133	0.1159	0.0013	0.0749	0.0004	0.1287	0.0024	1850	30	1871	37	1894	20
15	193	579	0.3422	5.4532	0.1156	0.0013	0.0469	0.0024	0.0681	0.0007	1897	18	1893	25	1889	21
16	319	1197	0.2608	4.1198	0.1146	0.0013	0.071	0.0005	0.2321	0.0011	1494	19	1658	28	1873	21
17	378	1362	0.2675	4.1972	0.1138	0.0013	0.0768	0.0002	0.293	0.0012	1528	13	1673	20	1861	20
18	441	1903	0.2293	3.5591	0.1126	0.0013	0.0493	0.0001	0.2536	0.0006	1331	10	1540	18	1841	20
19	342	1171	0.2972	4.748	0.1159	0.0013	0.0848	0.0002	0.0628	0.0004	1677	13	1776	20	1894	20
20	582	2167	0.2699	4.2505	0.1142	0.0013	0.0924	0.0012	0.098	0.0004	1540	18	1684	24	1867	20
21	235	1309	0.1837	2.5435	0.1004	0.0011	0.0661	0.0003	0.0745	0.0003	1087	10	1285	17	1632	21
22	40	175	0.2273	3.5441	0.1131	0.0019	0.0344	0.0006	0.3084	0.0015	1320	16	1537	30	1849	31
23	558	2493	0.2244	3.4657	0.112	0.0012	0.0501	0.0004	0.1802	0.0003	1305	14	1519	20	1832	20
24	194	723	0.2697	4.2124	0.1133	0.0013	0.0573	0.0004	0.1633	0.0002	1539	12	1676	20	1853	21
25	298	874	0.3408	5.4659	0.1163	0.0013	0.1261	0.0006	0.0999	0.0007	1890	17	1895	23	1900	20

$292 \times 10^{-6}$ , 平均  $168 \times 10^{-6}$ ,  $Ba=158 \times 10^{-6} \sim 1179 \times 10^{-6}$ , 平均  $605 \times 10^{-6}$ , 与花岗岩平均值( $Sr=300 \times 10^{-6}$ ,  $Ba=830 \times 10^{-6}$ )相比较低, 表明诺尔音花岗岩经历了结晶分离作用, 且正长花岗岩的  $Sr$ 、 $Ba$  值比二长花岗岩低, 表明正长花岗岩经历了更为完全的结晶分离作用。

Barbarin(1999)将  $A/CNK \geq 1$  的过铝质花岗岩细分为含白云母过铝花岗岩类(MPG)和含堇青石过铝花岗岩类(CPG), 两种花岗岩都定位在岩石圈汇聚地壳加厚的地方, 二者主要来源于陆壳物质。在MPG中以出现大量原生白云母和富铝矿物(如石榴子石)为特征, 贫黑云母和残留体, 而CPG中出现大量堇青石为特征, 富含黑云母和残留体, 贫白云母。研究区的花岗岩相对富含黑云母贫白云母、石榴子石, 且内部有大量片麻岩残留体, 计算得到较高的全岩锆石饱和温度( $759 \sim 876^\circ\text{C}$ ), 显示出其为CPG。而岩石中未发现堇青石, 可能与岩体形成的深度有关( $\geq 25 \text{ km}$ )(Green, 1976)。

不同性质的源岩形成了不同构造环境中的过铝质花岗岩。判别过铝质花岗岩的形成环境则需要判别其形成的源岩性质。对于判别过铝质花岗岩的源岩性质, 斜长石是一个很好的指示矿物, 泥质岩和杂砂岩在熔融过程中形成的熔体会差别, 泥质源岩会相比富黏土贫斜长石( $< 5\%$ ), 表明他们

形成于成熟的大陆地台环境, 而杂砂岩则富斜长石( $> 5\%$ )贫黏土, 表明他们形成于未成熟的板块边缘(岛弧或大陆弧)的海槽或海沟俯冲带。一般地, 以  $CaO/Na_2O=0.3$  为界,  $CaO/Na_2O < 0.3$  表明原岩为泥质岩石的局部熔融, 同时岩石  $Rb/Sr$  比值  $> 0.1$  和  $Rb/Ba$  比值  $> 0.3$ , 反之若  $CaO/Na_2O > 0.3$  表明原岩为杂砂岩的局部熔融, 其  $Rb/Sr$  和  $Rb/Ba$  比值较低(Barbarin, 1999; 邓晋福等, 2004, 肖庆辉等, 2002)。乌拉山过铝质S型花岗岩的  $CaO/Na_2O$  比值  $< 0.3$ ,  $Rb/Sr$  比值  $> 0.1$  和大部分  $Rb/Ba$  比值  $> 0.3$ , 结合  $C/MF-A/FM$  图解(图6a), 显示其应为泥质岩石夹部分杂砂岩局部熔融而形成, 所得结果相同。而前人工作和区域地质研究表明古元古代孔兹岩系的原岩是一套泥质岩、泥质粉砂岩夹碎屑岩和少量中酸性火山岩。且结合二者的主量元素特征, 如  $K_2O$  含量大于  $Na_2O$ 、 $CaO$  整体含量低, 并结合微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线图可看出二者具有相似的地球化学特征。

### 6.2 诺尔音花岗岩的形成温度和形成机制

过铝质花岗岩的  $Al_2O_3/TiO_2$  比值能为岩浆形成的温度提供重要的标志, 因为  $Al_2O_3/TiO_2$  比值主要依赖于温度, 温度升高会使含钛矿物(如黑云母、钛铁矿)发生分解,  $TiO_2$  进入熔浆引起  $Al_2O_3/TiO_2$  升

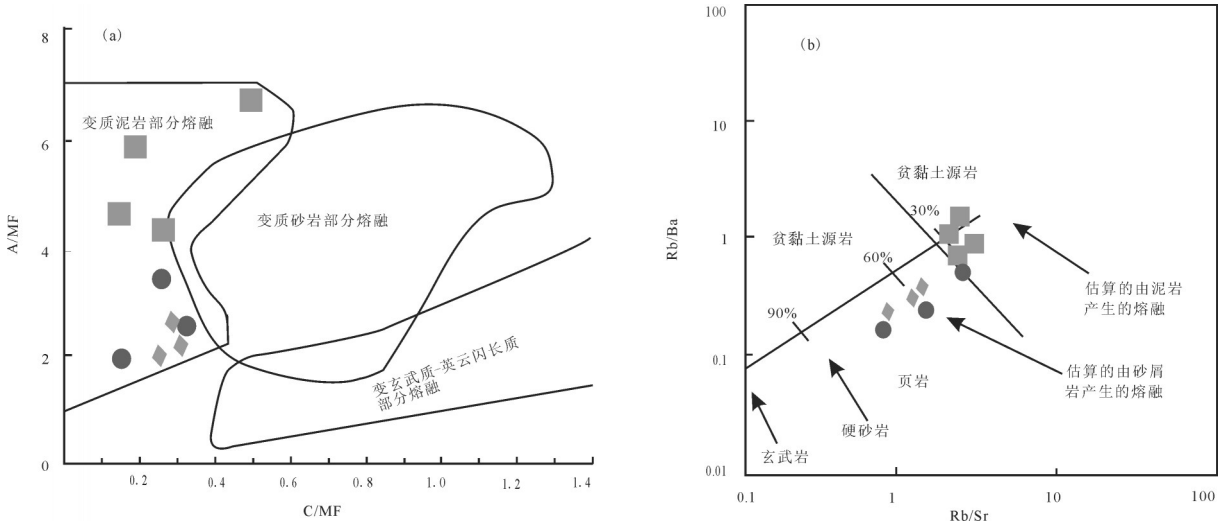


图6 乌拉山诺尔音花岗岩物源判别图

a— $C/MF-A/FM$  图解(据 Alter et al. 2000); b— $Rb/Sr-Rb/Ba$  图解(据肖庆辉等, 2002)

图例同图3

Fig.6 Source discrimination diagrams for Nuoyeryn granite in Wulashan

a—Diagram of  $C/MF-A/FM$  (modified after Alter et al., 2000); b—Diagram of  $Rb/Sr-Rb/Ba$  (modified after Xiao et al., 2002), symbols in Fig. 6 as for Fig. 3

高。其中,当  $Al_2O_3/TiO_2 > 100$ , 表明形成温度为低温 ( $825^{\circ}C \sim 900^{\circ}C$ ), 当  $Al_2O_3/TiO_2 < 100$ , 表明形成温度为高温 ( $900^{\circ}C \sim 950^{\circ}C$ ) (肖庆辉等, 2002), 诺尔音花岗岩中二长花岗岩多数  $Al_2O_3/TiO_2 < 100$ , 较正长花岗岩比值  $Al_2O_3/TiO_2$  低, 表明其有更高的形成温度。诺尔音花岗岩具有较高的 Rb 和较低 Y、Yb、Nb 的含量, 在 Pearce (Pearce et al. 1984) 的 Nb-Y 图解中 (图 7a), 诺尔音岩体所有数据均投入同碰撞花岗岩区, 在 Nb-(Yb+Ta)、Rb-(Y+Nb) 图解中 (图 7b, c), 投于同构造花岗岩区, 表现其为挤压的环境。利用锆饱和温度计计算所得的温度是  $759 \sim 876^{\circ}C$  (表 1), 这个温度与前人对乌拉山一大青山地区古元古代孔兹岩系进入麻粒岩相计算的变质峰期温度  $840 \sim 860^{\circ}C$  (蔡佳等, 2013) 大体相当。可能原因是在同碰撞期地壳增厚不明显 ( $< 50 km$ ), 在后碰撞阶段 (仍为同构造, 岩体中的片麻状构造说明其为挤压环境) 发生岩石圈的拆沉作用和随后的软流圈上涌或玄武质岩浆底侵 (孔兹岩系中侵入的基性岩脉), 深部岩浆的高温使孔兹岩系发生深熔作用, 形成了诺尔音岩体的过铝质花岗岩 (Barbarin, 1999; 肖庆辉等, 2002; 柏道远等, 2004)。Douc et al. (1996) 认为, 底侵的玄武质岩浆与陆壳的相互作用不仅会导致热量的传递, 同样也会促进化学成分的交流, 但根据泥质岩熔体和玄武岩的混合模拟结果, 诺尔音花岗岩更靠近泥质岩组分端元 (图 6b), 表明诺尔音花岗岩的形成可能与地幔物质无关系, 结合其微量元素中贫 Nb、Ta 的特征, 乌拉山地区诺尔音岩体的过铝质 S 型花岗岩, 推断其为古元古代鄂尔多斯陆块与阴山陆块碰撞的背景下, 孔兹岩系发生深熔

作用形成的产物。

### 6.3 构造意义

位于孔兹岩带中段的乌拉山广泛分布有麻粒岩相的新太古代石英闪长质片麻岩和紫苏花岗质片麻岩, 这套 TTG 片麻岩被认为是形成于活动大陆边缘岛弧环境玄武质地壳的部分熔融, 暗示乌拉山地区在此阶段有主动大陆边缘的弧陆增生作用 (Sylvester, 1998), 从碎屑锆石年龄分布在  $2.3 \sim 1.9 Ga$  (Zhao et al. 2002) 表明华北克拉通北缘的一套原岩为泥质岩、泥质粉砂岩、碎屑岩、碳酸盐岩的孔兹岩系属于古元古代的产物, 表明鄂尔多斯陆块在这个时期具有一个稳定、被动型大陆边缘。随着大洋的闭合, 在  $2.0 \sim 1.9 Ga$  南部的鄂尔多斯陆块向北部的阴山陆块俯冲碰撞拼合, 随后由于重力均衡作用, 板块快速折返或伸展作用引起的区域内的麻粒岩相变质作用和表壳岩系的深熔作用。本文诺尔音地区 S 型花岗岩形成于同碰撞的构造环境, 形成时代为  $(1891 \pm 14) Ma$  和  $(1863 \pm 17) Ma$  与古元古代孔兹岩系中变质锆石的  $1.93 \sim 1.8 Ga$  变质年龄 (李三忠等, 2015) 吻合。

## 7 结 论

(1) 诺尔音花岗岩分为: ①肉红色中细粒二长花岗岩 ( $Pt_1 \eta \gamma^a$ ); ②肉红色中粗粒二长花岗岩 ( $Pt_1 \eta \gamma^b$ ); ③肉红色中细粒正长花岗岩 ( $Pt_1 \xi \gamma^a$ ); ④肉红色中粗粒正长花岗岩 ( $Pt_1 \xi \gamma^b$ )。正长花岗岩较二长花岗岩具有更高的演化特征, 诺尔音古元古代花岗岩具有高硅、高铝、富碱、较低的  $Mg^{\#}$  和较高铝饱和指数的地球化学特征, 具典型的过铝质 S 型花

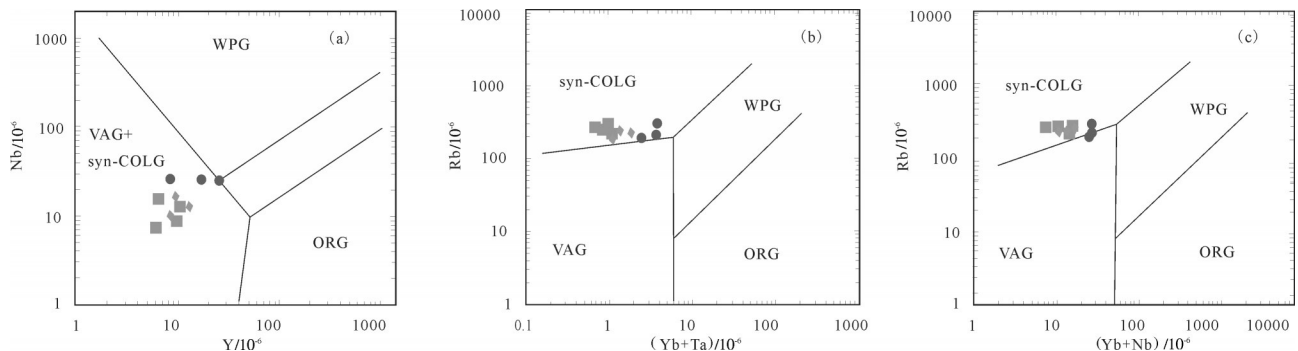


图 7 乌拉山诺尔音花岗岩的微量元素环境判别图解 (据 Pearce et al., 1984) (图例同图 3)

ORG—洋中脊花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn—COLG—同碰撞花岗岩

Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams of Nueryin granite in Wulashan, symbols in Fig. 7 as for Fig. 3  
ORG—Ocean ridge granite; VAG—Volcanic arc granite; WPG—Within plate granite; syn—COLG—syn—Collision granite

岗岩特征。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $(1891 \pm 14)$  Ma 和  $(1863 \pm 17)$  Ma, 代表了乌拉山诺尔音花岗岩中二长花岗岩和正长花岗岩的侵位年龄为古元古代。

(3) 结合地球化学特征和源岩判别, 诺尔音花岗岩可能为古元古代孔兹岩系同碰撞背景下发生深熔作用的产物。

## References

- Alther R, Holl A Hegner E, Langer C and Kreuzer H. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50:51-73
- Bai Daoyuan, Chen Bihe, Zhongxiang, Jia Peng-yuan, Xiong Xiong. 2014. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of Indosinian Wutuan pluton in southwestern Hunan Province[J]. *Geology in China*, 41(6): 2002-2018(in Chinese with English abstract).
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3), 605-626.
- Bi Mingli, Lu Laijun, Zhao Qingying, Liu Zhenghong. 2008. Geochemical characteristics and protoliths of the marble rock group of the khondalite series in the Daqing Mountains, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 35(4): 639-647(in Chinese with English abstract).
- Cai Jia, Liu Pinghua, Liu Fulai, Liu Jianhui, Wang Fang and Shi Jianrong. 2013. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of Al-rich gneisses in the Shiguai area, Daqingshan-Wulashan metamorphic complex belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 437-461(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, Hu Huan, Zhang Wenlan, Gao Jianfeng. 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 293-307 (in Chinese with English abstract).
- Condie KC, Boryta MD, Liu Jinzhong, Qian Xianglin. 1992. The origin of khondalites: Geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton[J]. *Precamb Research*, 59(3/4): 207-223.
- Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, Mo Xuanxue, Yu Bingsong, Lai Xingzuo, Chen Hongwei. 2004. Petrogenesis, tectonic setting and mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 33-49(in Chinese).
- Dong Chunyan, Liu Dunyi, Wan Yusheng, Xu Zhongyuan, Wang Wei, Xie Hangqiang. 2009. Hf isotope composition and REE pattern of zircons from Early Precambrian metamorphic rocks in the Daqing Mountains, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 55(4): 509-518 (in Chinese with English abstract).
- Dong Chunyan, Wan Yusheng, Simon A Wilde, Xu Zhongyuan, Ma Mingzhu, Xie Hangqiang, Liu Dunyi. 2014. Earliest Paleoproterozoic supracrustal rocks in the North China Craton recognized from the Daqingshan area of the Khondalite Belt: Constraints on craton evolution[J]. *Gondwana Research*. 25(4): 1535-1553
- Douce A E P, BEARD J S. 1996. Effects of  $P, f(O_2)$  and Mg/Fe ratio on dehydration melting of model metagreywackes[J]. *Journal of Petrology*, 37(5): 999-1024.
- Green Th. 1976. Experimental generation of cordierite-orgarnet-bearing granitic liquids from a pelitic composition[J]. *Geology*, 4(2): 85-88.
- Li Jianghai, Qian Xiangling, Liu Shuwen. 1999. Geochemical characteristics of khondalite series in the middle of North China craton and its significance of continental craton[J]. *Science in China (Series D)*, 29(3):193-203(in Chinese).
- Li Sanzhong, Li Xiyao, Dai Liming, Li Xing, Zhang Zhen, Zhao Shujuan, Guo lingli, Zhao Guochun, Zhang Guowei. 2015. Precambrian geodynamics( VI): Formation of North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*. 22(6): 077-096 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jianhui, Liu Fulai, Ding Zhengjiang, Chen Junqiang, Liu Pinghua, Shi Jianrong, Cai Jia and Wang Fang. 2013. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and their petrogenesis of Early Paleoproterozoic granitoid gneisses in Ulashan area, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2) : 485-500(in Chinese with English abstract)
- Liu Jinke, Zhang Daohan, Wei Junhao, Fu Lebing, Tan Jun, Wang Dazhao, Shi Haipeng, Wang Yilong. 2016. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Paleoproterozoic S-type granite in the northern part of Helanshan and its geological significance[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(1): 187-197(in Chinese with English abstract)
- Liu Shoujie, Li Jianghai. Review of ultrahigh-temperature (UHT) metamorphism study: a case from North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3): 131-137(in Chinese with English abstract).
- Liu Taotao, Dai Chaocheng, Wang Xinliang. 2016. Geochemical characteristics and protolith formation of Al-rich gneisses in Wulashan Area, Central Inner Mongolia[J]. *Science Technology and Engineering*, 16(30): 17-27(in Chinese with English abstract).
- Liu Xishan, Jin Wei, Li Shuxun. 1992. Low-pressure metamorphism of granulite facies in an early proterozoic orogenic event in central Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 66(3):244-256(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing and Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust

- recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1&2): 537-571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu., Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan and Chen Haihong, 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- Li Zhenghui, Liu Xiaoming, Dong Yunpeng and Xiao Zhibin. 2013. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Paleoproterozoic syn-collisional granites in Helanshan region and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2405-2415(in Chinese with English abstract).
- Liu Ye, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu, Diwu Chunrong, Yuan Honglin, Gao Shan. 2007. Evaluation of accuracy and long term stability of Determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (5): 1203-1210
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1-70.
- Ma Mingzhu. 2015. Early Precambrian geological evolution of several typical areas in western North China Craton: Geology, SHRIMP zircon dating and geochemistry[D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 1-140(in Chinese with English abstract).
- Ma Mingzhu, Dong Chunyan, Xu Zhongyuan, Xie Shiwen, Liu Dunyi, Wan Yusheng. 2015. Anatexis of Early Paleoproterozoic garnet-biotite gneisses (Daqingshan supracrustal rocks) in Daqingshan, Inner Mongolia: Geology, zircon geochronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (6):1535-1548(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids Geological[J]. *Society of America Bulletin*, 101:635-643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37: 215-224.
- Pearce J A, Harris B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 25(4): 956-983.
- Song Biao, Nutman A P, Liu Dunyi, Wu Jiashan. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China[J]. *Precambrian Research*, 78(1): 79-94.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*, London: Geological Society Special Publications, 42: 313-345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1/4): 29-44.
- Wan Yusheng, Liu Dunyi. Song Biao. Wu Jiashan. Yang Chonghui. Zhang Zongqing. Geng Yuansheng. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 563-575.
- Wan Yusheng, Song Biao, Liu Dunyi, Simon A wilde, Wu Jiashan, Shi Yuruo, Yin Xiaoyan, Zhou Hongying. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. *Precambrian Research*, 149(3-4):249-271.
- Wan Yusheng, Xu Zhongyuan, Dong Chunyan, Allen Nutman, Ma Mingzhu, Xie Hangqiang, Liu Shoujie, Liu Dunyi, Wang Huicu, Cu Hang. 2013. Episodic Paleoproterozoic (~2.45 Ga, ~1.95 Ga and ~1.85 Ga) mafic magmatism and associated high temperature metamorphism in the Daqingshan area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock Ge[J]. *Precambrian Research*. 224:71-93.
- Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295-304.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. The ways of investigation on granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-88(in Chinese with English).
- Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Yang Zhensheng. 2002. The strata texture of khondalite in daqingshan area, inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth science edition)*, 32(4): 313-318 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhensheng, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong. 2000. Khondalite event and Archean crust structure evolution[J]. *Progress in precambrian research*, 23(4): 206-212. (in Chinese).
- Yang Zhensheng, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Peng Xiangdong. 2003. Consideration and practice of the construction of litho stratigraphic systems in high-grade metamorphic terrains-A case study in the Daqingshan-Wulashan area[J]. *Geology in China*, 30 (4): 343-351. (in Chinese with English abstract).
- Yin Changqing, Zhao Gguochun, Guo Jinghui, Sun Min, Xia Xiaoping, Zhou Xiwen, Liu Chaohui. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of zircons of the Helanshan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton[J]. *Lithos*, 122(1-2):25-38.
- Zhai Mingguo, Bian Aiguo, Zhao Taiping. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-archaeon and its breakup during late Paleoproterozoic and Mesoproterozoic[J]. *Sci. China (D)*, 43 (suppl.):219-232.
- Zhai Mingguo, Liu Wenjun. 2003. Paleoproterozoic tectonic history of North China craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 122(1/4):193-199.

- Zhai Mingguo. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review[J]. *Sci. China (Earth Sci.)*, 54: 1110-1120(in Chinese).
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A. 2002. Basement tectonic features of the North China craton and early Proterozoic flattening[J]. *Science in China(SeriesD)*, 32 (7): 538-549
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136: 177-202.
- Zhao Guochun. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):1772- 1792(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Wilde S A, Guo Jinghui. 2010. Single zircon gains record two Palaeoproterozoic collisional event in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 177 (3/4), 266-276.
- Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, Liu JianMin, Hu Jianmin, Liu Jian, Pei Junling. 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 37(4): 900- 915(in Chinese with English abstract).
- Zhong Changting, Deng Jinfu, WanYusheng, Mao Deban and Li Hui-min. 2007. Magma recording of Paleoproterozoic orogeny in central segment of northern margin of North China Craton: Geochemical characteristics and zircon SHRIMP dating of S-type granitoids[J]. *Geochimica*. 47(1): 586- 598(in Chinese with English abstract).
- 李三忠, 李玺瑶, 戴黎明, 刘鑫, 张臻, 赵淑娟, 郭玲莉, 赵国春, 张国伟. 2015. 前寒武纪地球动力学(VI): 华北克拉通形成[J]. *地学前缘*, 22(6): 77-96.
- 刘建辉, 刘福来, 丁正江, 陈军强, 刘平华, 施建荣, 蔡佳, 王舫. 2013. 乌拉山地区早古元古代花岗质片麻岩的锆石U-Pb年代学、地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 29 (2) : 485-500.
- 李江海, 钱祥麟, 刘树文. 1999. 华北克拉通中部孔兹岩系的地球化学特征及其大陆克拉通化意义[J]. *中国科学(D辑)*, 29(3):193-203.
- 刘金科, 张道涵, 魏俊浩付乐兵, 谭俊, 王大钊, 施海鹏, 王艺龙. 2016. 贺兰山北段古元古代S型花岗岩岩石地球化学、锆石U-Pb年代学及其地质意义[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(1): 187-197.
- 刘守偈, 李江海. 2007. 超高温变质作用:以华北内蒙古土贵乌拉地区为例[J]. *地学前缘*, 14(3):132-137.
- 刘涛涛, 戴朝成, 王新亮. 2016. 内蒙古中部乌拉山地区富铝片麻岩的地球化学特征和原岩建造[J]. *科学技术与工程*, 16(30):17-27.
- 刘喜山, 金巍, 李树勋. 1992. 内蒙古中部早元古代造山事件中麻粒岩相低压变质作用[J]. *地质学报*. 66(3):244-256.
- 刘晔, 柳小明, 胡兆初, 第五春荣, 袁洪林, 高山. 2007. ICP-MS测定地质样品中37个元素的准确度和长期稳定性分析[J]. *岩石学报*, 23(5): 1203-1210
- 马铭株. 2015. 华北克拉通西部典型地区早前寒武纪地质演化——地质、SHRIMP年代学及地球化学研究[D]. 中国地质科学院, 1-140.
- 马铭株, 董春艳, 徐仲元, 谢士稳, 刘敦一, 万渝生. 2015. 内蒙古大青山地区古元古代早期榴云片麻岩(大青山表壳岩)深熔作用:地质、锆石年代学和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 31(6): 1535-1548.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 洪大卫, 莫宣学, 卢欣祥, 李志昌, 汪雄武, 马昌前, 吴福元, 罗照华, 王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社, 1-88.
- 徐仲元, 刘正宏, 杨振升. 2002. 内蒙古大青山地区孔兹岩系的地层结构[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 32(4): 313-318.
- 杨振升, 徐仲元, 刘正宏, 彭向东. 2003. 高级变质区岩石地层系统建立的思考与实践——以内蒙古大青山—乌拉山地区为例[J]. *中国地质*, 30(4): 343-351.
- 杨振升, 徐仲元, 刘正宏. 2000. 孔兹岩系事件与太古宙构造演化[J]. *前寒武纪研究进展*, 23(4): 206-212.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学:(地质科学)*, 41(8):1037-1046.
- 赵国春, 孙敏, Wilde SA. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. *中国科学(D辑)*, 32 (7) : 538-549.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. *岩石学报*, 25 (8): 1772-1792.
- 赵越, 陈斌, 张拴宏, 刘建民, 胡健民, 刘健, 裴军令. 2010. 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*, 37(4): 900-915.
- 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 毛德宝, 李惠民. 2007. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录:S型花岗岩地球化学特征及锆石SHRIMP年龄[J]. *地球化学*, 36(6), 586-598.

## 附中文参考文献

- 柏道远, 陈必河, 钟响, 贾朋远, 熊雄. 2014. 湘西南印支期五团岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄、地球化学特征及形成背景[J]. *中国地质*, 41(6): 2002-2018.
- 毕明丽, 路来君, 赵庆英, 刘正宏. 2008. 内蒙古大青山地区孔兹岩系中大理岩岩组的地球化学特征及原岩建造[J]. *中国地质*, 35(4): 639-647.
- 蔡佳, 刘平华, 刘福来, 刘建辉, 王舫, 施建荣. 2013. 大青山—乌拉山变质杂岩带石拐地区富铝片麻岩成因矿物学与变质演化[J]. *岩石学报*, 29(2): 437-461.
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 胡欢, 张文兰, 高剑锋. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J]. *高校地质学报*, 8(3): 293-307.
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 莫宣学, 于炳松, 赖兴运, 谌宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社, 33-49.
- 董春艳, 刘敦一, 万渝生, 徐仲元, 王伟, 颀颀强. 2009. 内蒙古大青山地区早前寒武纪变质岩的锆石Hf同位素组成和稀土模式[J]. *地质论评*, 55(4): 509-518.
- 李正辉, 柳小明, 董云鹏, 肖志斌. 2013. 贺兰山古元古代同碰撞花岗岩地球化学、锆石U-Pb年代及其地质意义[J]. *岩石学报*, 029(07):2405-2415.