

内蒙古阿拉善地块北缘沙拉扎山晚石炭世岩体地球化学特征与LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄

杨奇荻¹, 张磊¹, 王涛¹, 史兴俊¹, 张建军^{1,2}, 童英¹, 郭磊¹, 耿建珍³
YANG Qi-di¹, ZHANG Lei¹, WANG Tao¹, SHI Xing-jun¹, ZHANG Jian-jun^{1,2},
TONG Ying¹, GUO Lei¹, GENG Jian-zhen³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国地质大学, 北京 100083; 3. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China*

摘要:采用LA-ICP-MS同位素测定技术,测得内蒙古阿拉善北缘沙拉扎山温都尔毛道黑云母花岗闪长岩锆石U-Pb年龄为 $301\pm 2\text{Ma}$,属于晚石炭世侵入岩。地球化学分析结果显示,该黑云母花岗闪长岩 SiO_2 含量为67.23%~72.57%, K_2O 为1.14%~1.61%, Al_2O_3 为14.92%~17.23%,具有过铝质($A/\text{CNK}=1.06\sim 1.1$)和钙碱性特征。岩石的稀土元素总量较低($38.86\times 10^{-6}\sim 74.39\times 10^{-6}$),轻稀土元素相对富集, Eu总体呈弱异常($\delta\text{Eu}=0.9\sim 1.3$)。在原始地幔标准化图解中,岩石具有大离子亲石元素(Rb、Th、K)富集及高场强元素(Nb、Ta、P、Ti)亏损的特征,显示出I型花岗岩的特点。结合区域地质背景,该黑云母花岗闪长岩可能形成于俯冲背景,是洋壳板片与新生的壳源物质混合形成的产物,表明晚古生代沿着阿拉善地块北缘的俯冲至少始于301Ma。

关键词:阿拉善;沙拉扎山;晚石炭世;岛弧;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄

中图分类号:P534.45; P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2014)06-0776-12

Yang Q D, Zhang L, Wang T, Shi X J, Zhang J J, Tong Y, Guo L, Geng J Z. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Late Carboniferous Shalazhashan pluton on the northern margin of the Alxa Block, Inner Mongolia and their implications. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6):776-787

Abstract: The Wenduermaodao biotite granodiorite pluton is located in Shalazhashan on the northern margin of the Alxa Block. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the pluton yielded an age of $301\pm 2\text{Ma}$, which indicates that the pluton is a Late Carboniferous intrusion. According to the geochemical analysis, the Wenduermaodao pluton has high SiO_2 (67.23%~72.57%), K_2O (1.14%~6.13%) and Al_2O_3 (13.67%~17.29%), suggesting that it is calc-alkaline and peraluminous ($A/\text{CNK}=0.98\sim 1.10$). This intrusion has low REE content ($38.86\times 10^{-6}\sim 74.39\times 10^{-6}$) with a relative enrichment of LREE and weak Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.9\sim 1.3$). The primitive mantle normalized trace element patterns are characterized by the enrichment of the LILE (Rb, Th, K) and depletion of HFSE (Nb, Ta, P, Ti), showing the features of I-type granite. Combined with regional geology, the authors hold that the pluton was emplaced in a subduction setting and derived from mixed sources of oceanic crust and juvenile crust, and the subduction of Paleo Asian plate beneath the northern Alxa Block took place at 301Ma or earlier.

Key words: Alxa; Shalazhashan; Late Carboniferous; island arc; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating

收稿日期:2013-08-15;修订日期:2014-04-08

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212010611803、1212010811033)

作者简介:杨奇荻(1983-),男,在读博士生,构造地质学专业。E-mail: qidiyang@126.com

通讯作者:张磊(1983-),男,博士,助理研究员,从事岩浆岩岩石学和区域大地构造研究。E-mail: windprint@gmail.com

华北地块是世界上最古老的克拉通之一^[1-2],其北缘毗邻天山—兴蒙造山带东段,具体包括燕山、阴山及阿拉善地块北缘,晚古生代—早中生代正是西伯利亚板块与华北板块碰撞拼合的关键阶段^[3-8]。阿拉善地块位于华北板块、塔里木板块和天山—兴蒙造山带的结合部位(图 1-a)。长期以来,许多学者^[9-13]认为阿拉善地块属于华北板块的一部分,但近年来的研究却不断揭示出阿拉善与华北板块有所差别^[14-20]。尽管关于阿拉善地块的大地构造归属还存在一定争议,但大部分学者^[21-28]均认同阿拉善地块和华北板块在石炭纪以来处于同一地球动力学体系。

前人对于华北北缘东段(狼山断裂以东)的岩浆成因、岩浆演化及其与区域构造的关系研究较多,获得了一系列成果^[29-32],但对阿拉善地区(图 1-b)的岩浆岩及岩浆活动研究程度较低,制约了对该区地质历史的深入探讨。本文通过阿拉善地区北部沙拉扎山温都尔毛道黑云母花岗岩闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学结果,探讨其形成时代、成因类型、物源和构造环境,为区域构造演化研究提供依据。

1 区域地质

阿拉善地区北缘主要由雅布赖—巴音诺尔公陆缘区、查干础鲁边缘海盆和宗乃山—沙拉扎山岛弧带 3 个构造单元组成(图 1-b)^[33-34]。王廷印等^[35]认为,宗乃山—沙拉扎山岛弧带是早古生代从阿拉善古陆裂解的基础上发育而来的,同时早期的地质工作也揭示在宗乃山西部有晋宁期闪长岩出露^①。

沙拉扎山位于宗乃山—沙拉扎山岛弧带东段(图 1-b、c),该地区晚古生代—早中生代地层出露较少,主要为晚石炭世阿木山组,下段下部为灰白色、灰绿色长石石英砂岩、粉砂岩和绢云千枚岩,上部为灰绿色绢云石英千枚岩夹细粒砂岩,上段为长石砂岩、长石石英砂岩夹灰岩透镜体,属于浅海相—滨海相沉积剖面结构和岩性,反映出水体变浅的海退过程^[39]。另外,局部地区还出露白垩纪砂岩、砾岩,火山碎屑岩和第四系,但在沙拉扎山地区尚未发现火山岩。早期的地质工作表明,沙拉扎山的侵入岩主要为石炭纪—二叠纪石英闪长岩和花岗闪长岩,二叠纪—三叠纪花岗岩、辉长岩,以及三叠纪—侏罗纪的钾长花岗岩和花岗岩,

其中二叠纪—三叠纪的岩浆侵入作用形成了沙拉扎山大型岩基^②。

温都尔毛道岩体位于沙拉扎山北部温都尔毛道以东(图 1-c),主体为粗粒的黑云母花岗闪长岩,其中可见细粒黑云母花岗闪长岩呈脉体产出,表明后者可能为黑云母花岗岩闪长岩体主成岩期稍后的产物。

粗粒黑云母花岗闪长岩(图 2-a)和细粒黑云母花岗闪长岩(图 2-b)均呈灰白色,花岗结构,块状构造,无矿物的定向排列,由石英(20%~30%)、斜长石(35%~40%)、钾长石(15%~20%)和黑云母(5%~10%)组成,主要矿物颗粒大小前者约为 6mm,后者约为 1mm,还含有少量楣石、磷灰石、锆石等副矿物(图 2-c、d)。

2 岩石地球化学特征

2.1 测试方法

样品的主量和微量元素分析在加拿大温哥华 Acme 分析实验室完成的。主量元素测试首先对样品进行 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 融合和 HNO_3 稀释溶解,选取 0.2g 样品进行 ICP-AES 分析,烧失量根据点火后在 1000℃ 时的重量差别测定。微量元素分析包括 2 个独立的测试,稀土元素和难溶元素的测定先选取样品进行 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 融合和 HNO_3 稀释溶解,再进行 ICP-MS 分析;另外单独选取 0.5g 样品经王水溶解,通过 ICP-MS 分析贵金属和基础金属的含量。

2.2 主量元素地球化学特征

细粒黑云母花岗闪长岩(11LS78—11LS82)和粗粒黑云母花岗闪长岩(11LS83—11LS88)的主量元素见表 1。其中前者 SiO_2 含量为 72.23%~72.57%, Al_2O_3 介于 14.92%~15.18% 之间, MgO 为 0.54%~0.61%, 全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 5.57%~5.66%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.37~0.41, A/CNK 值为 1.07~1.10, 属于过铝质钙碱性系列(图 3、图 4)。后者的 SiO_2 含量为 67.23%~69.28%, 低于前者; Al_2O_3 含量介于 15.95%~17.23% 之间, 高于前者; MgO 含量介于 1.12%~1.31% 之间, 高于前者; 全碱含量为 5.47%~6.12%, 与前者相似; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值范围为 0.29~0.35, 低于前者; A/CNK 值为 1.06~1.07, 基本属于过铝质钙碱性系列(图 3、图 4)。总体来看,该黑云母花岗闪长岩体的主要氧化物,除 K_2O 与

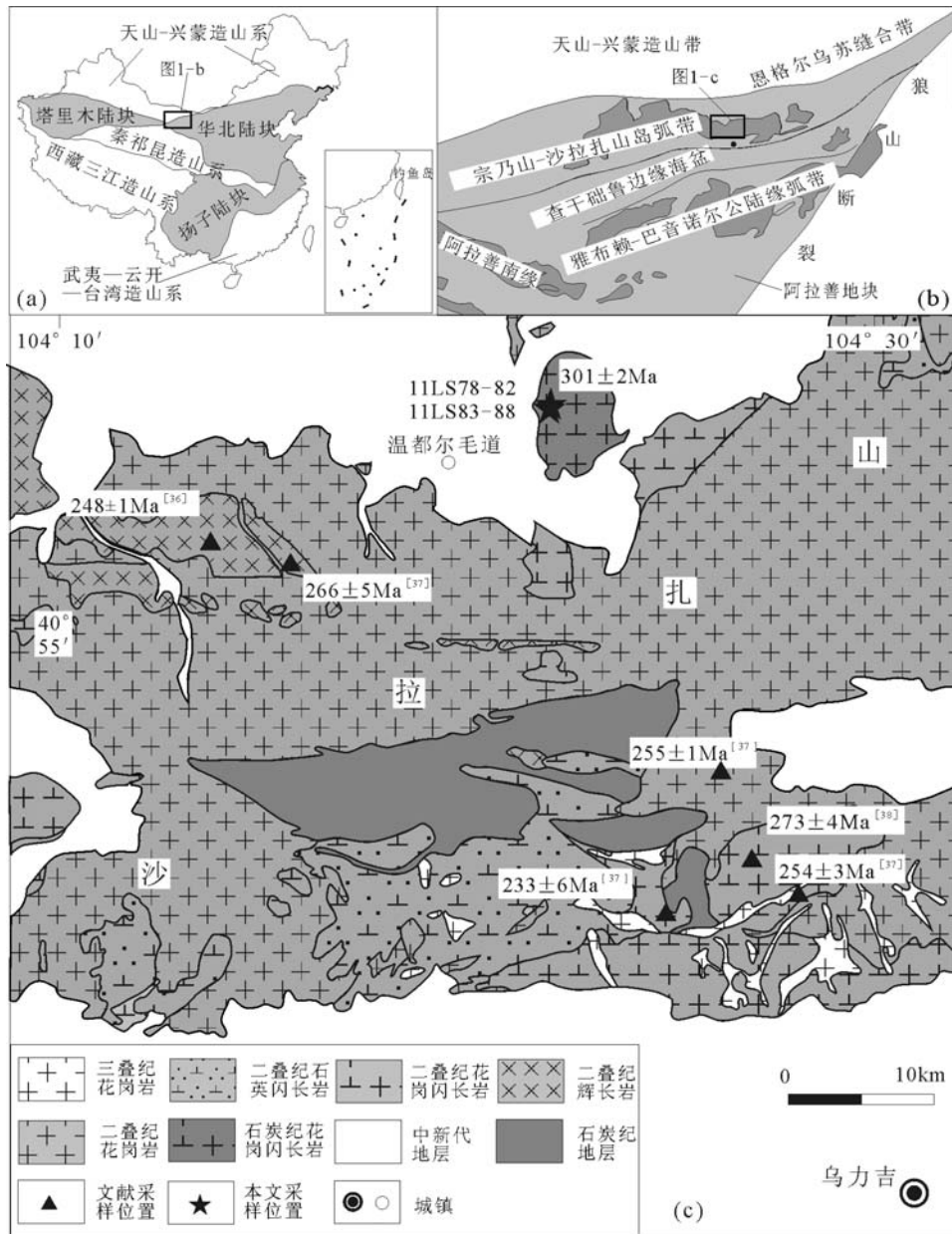


图1 阿拉善北缘沙拉扎山地质简图(据参考文献②修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Shalazhashan on the northern margin of Alxa

SiO₂呈正相关外,其他氧化物如Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、TiO₂和P₂O₅均与SiO₂呈负相关(图5)。

2.3 稀土和微量元素地球化学特征

总体上所有样品具有相似的稀土元素配分模式和微量元素分布型式(数据见表1),其中细粒黑云母花岗闪长岩稀土元素总量(不包括Y)较低($\sum REE=65.77 \times 10^{-6} \sim 73.17 \times 10^{-6}$), (La/Yb)_N值在14.35~

18.65之间,轻稀土元素相对富集(LREE/HREE=12.74~14.33),在球粒陨石稀土元素标准化图解(图6-a)上呈右倾型,基本不具有Eu异常($\delta Eu=1 \sim 1.1$),粗粒黑云母花岗闪长岩稀土元素总量低于前者($\sum REE=44.24 \times 10^{-6} \sim 55.8 \times 10^{-6}$),具有相对较低的(La/Yb)_N值(4.68~12.39),轻稀土元素同样相对富集,只是程度稍弱(LREE/HREE=5.16~9.62),

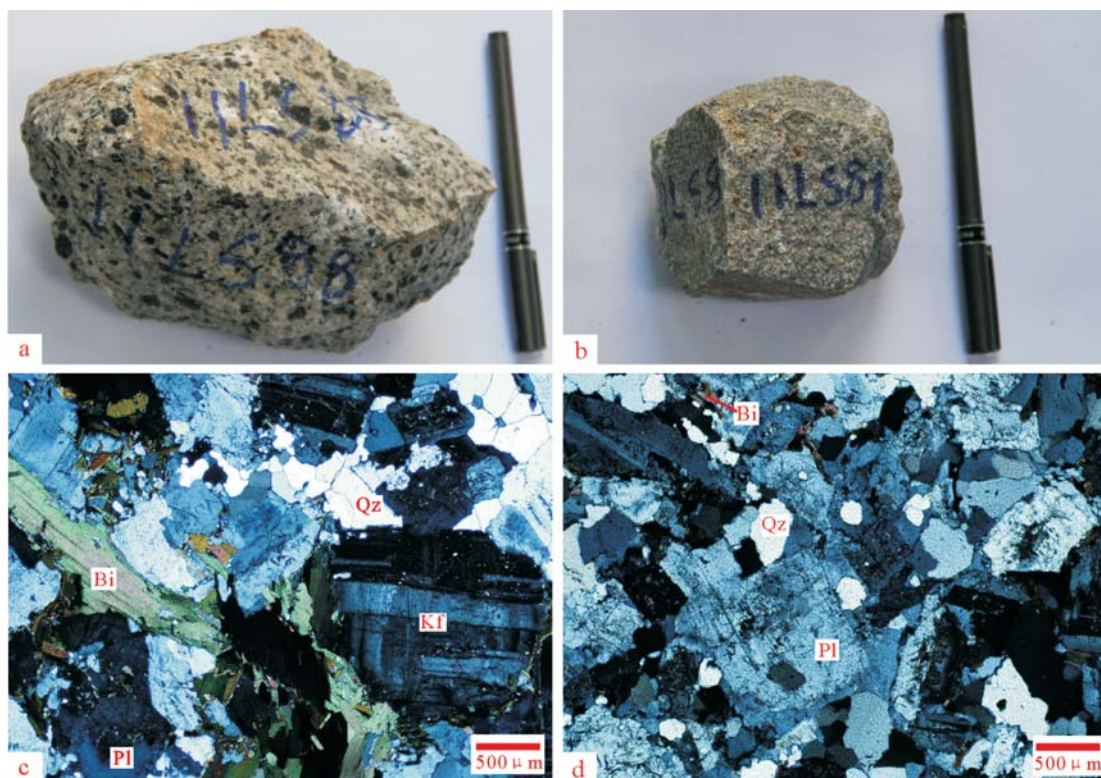


图2 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩手标本及镜下特征(正交偏光)

Fig. 2 Sample and microscopic characteristics of Wenduermaodao biotite granodiorite

a—粗粒黑云母花岗闪长岩手标本;b—细粒黑云母花岗闪长岩手标本;
c—粗粒黑云母花岗闪长岩镜下特征;d—细粒黑云母花岗闪长岩镜下特征。
Qz—石英;Bi—黑云母;Pl—斜长石;Kf—钾长石

在球粒陨石稀土元素标准化图解(图6-b)上呈右倾型,总体显示微弱的Eu正异常(0.9~1.3)。两者在微量元素的原始地幔标准化图解(图6-c、d)上,均表现出富集大离子亲石元素Rb、Th、K,亏损高场强元素Nb、Ta、P、Ti的特点。

3 锆石U-Pb同位素

3.1 分析方法

样品在河北省诚信地质服务公司采用常规方法进行粉碎,并用常规重选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,将其粘贴在环氧树脂表面,待固结后抛磨,使锆石内部充分暴露,然后进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。通过对反射光、透射光和阴极发光图像的观察分析,选择吸收程度均匀的锆石进行测试。锆石U-Pb同位素分析在西北大学教育部大

陆动力学重点实验室的LA-ICP-MS仪器上用标准测定程序进行,采用标准锆石91500作为外标校正,以保证标准和样品的仪器条件完全一致。激光束斑直径为40 μm。实验获得的数据采用Andersen^[42]的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通Pb的影响。所给定的同位素比值和年龄误差(标准偏差)为1σ,详细的实验原理和流程见参考文献[43]。

3.2 分析结果

样品11LS88(粗粒黑云母花岗闪长岩)的测试数据结果见表2。样品锆石CL图像显示的晶体形态较好,呈单锥或双锥状,表现出典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构(图7)。锆石U和Th含量分别为 $65 \times 10^{-6} \sim 288 \times 10^{-6}$ 和 $35 \times 10^{-6} \sim 213 \times 10^{-6}$, Th/U值变化范围为0.4~1.0,且Th、U含量呈现较好的正相关。上述特征表明,这些锆石为典型的岩浆锆石^[44-45]。30个分析点给出基本相同的²⁰⁶Pb/

表1 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩主量和微量元素分析结果

Table 1 Major and trace elements composition of Wenduermaodao biotite granodiorite

| 样号 岩性 | 11LS78 细粒 | 11LS79 黑云 | 11LS80 母花 | 11LS81 岗闪 | 11LS82 长岩 | 11LS83 | 11LS84 | 11LS85 | 11LS86 | 11LS87 | 11LS88 |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 粗粒黑云母花岗闪长岩 | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 72.42 | 72.70 | 72.53 | 72.57 | 72.23 | 67.23 | 69.28 | 68.66 | 69.03 | 67.86 | 67.76 |
| TiO ₂ | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.21 | 0.36 | 0.33 | 0.36 | 0.36 | 0.37 | 0.35 |
| Al ₂ O ₃ | 15.11 | 14.92 | 15.04 | 15.18 | 15.14 | 17.23 | 15.95 | 16.50 | 16.17 | 16.80 | 16.93 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.68 | 1.66 | 1.74 | 1.61 | 1.64 | 2.60 | 2.29 | 2.58 | 2.54 | 2.58 | 2.51 |
| ³ FeO | 1.51 | 1.49 | 1.57 | 1.45 | 1.48 | 2.34 | 2.06 | 2.32 | 2.29 | 2.32 | 2.26 |
| MgO | 0.60 | 0.61 | 0.56 | 0.54 | 0.58 | 1.24 | 1.12 | 1.20 | 1.24 | 1.31 | 1.23 |
| CaO | 2.99 | 2.95 | 3.13 | 3.11 | 3.05 | 3.74 | 3.71 | 3.74 | 3.53 | 3.81 | 4.01 |
| Na ₂ O | 4.01 | 3.96 | 4.07 | 4.10 | 4.12 | 4.66 | 4.23 | 4.38 | 4.25 | 4.43 | 4.55 |
| K ₂ O | 1.56 | 1.61 | 1.52 | 1.5 | 1.54 | 1.46 | 1.24 | 1.25 | 1.41 | 1.56 | 1.14 |
| P ₂ O ₅ | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.09 | 0.10 | 0.11 | 0.09 | 0.10 | 0.10 |
| MnO | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| 烧失量 | 1.30 | 1.20 | 1.10 | 1.00 | 1.30 | 1.20 | 1.60 | 1.10 | 1.20 | 10.00 | 1.30 |
| 总量 | 99.96 | 99.92 | 99.97 | 99.89 | 99.90 | 99.86 | 99.90 | 99.93 | 99.87 | 99.87 | 99.93 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 0.39 | 0.41 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.31 | 0.29 | 0.29 | 0.33 | 0.35 | 0.25 |
| A/CNK | 1.10 | 1.09 | 1.07 | 1.08 | 1.08 | 1.07 | 1.06 | 1.07 | 1.08 | 1.06 | 1.06 |
| A/NK | 1.82 | 1.81 | 1.80 | 1.81 | 1.79 | 1.86 | 1.92 | 1.93 | 1.90 | 1.87 | 1.94 |
| La | 15.4 | 17.2 | 18.2 | 18.4 | 16.7 | 10.5 | 7.3 | 13.3 | 12.0 | 9.6 | 8.0 |
| Ce | 30.4 | 32.9 | 32.3 | 33.8 | 31.1 | 20.7 | 14.8 | 25.5 | 23.1 | 24.0 | 14.4 |
| Pr | 3.19 | 3.33 | 3.58 | 3.50 | 3.40 | 2.39 | 2.27 | 3.25 | 2.82 | 2.22 | 1.92 |
| Nd | 9.8 | 11.8 | 11.8 | 11.2 | 10.8 | 8.7 | 9.8 | 12.0 | 9.8 | 8.2 | 8.0 |
| Sm | 1.71 | 1.95 | 1.87 | 1.83 | 1.96 | 1.58 | 2.25 | 2.18 | 1.89 | 1.76 | 1.52 |
| Eu | 0.56 | 0.60 | 0.62 | 0.61 | 0.64 | 0.65 | 0.64 | 0.67 | 0.67 | 0.59 | 0.60 |
| Gd | 1.50 | 1.56 | 1.60 | 1.48 | 1.55 | 1.57 | 2.03 | 1.82 | 1.61 | 1.49 | 1.32 |
| Tb | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.28 | 0.32 | 0.30 | 0.26 | 0.22 | 0.21 |
| Dy | 1.24 | 1.10 | 1.23 | 1.26 | 1.30 | 1.72 | 1.88 | 1.60 | 1.61 | 1.25 | 1.17 |
| Ho | 0.22 | 0.23 | 0.23 | 0.26 | 0.26 | 0.30 | 0.35 | 0.32 | 0.27 | 0.24 | 0.21 |
| Er | 0.59 | 0.61 | 0.61 | 0.67 | 0.67 | 0.91 | 1.15 | 0.87 | 0.78 | 0.65 | 0.72 |
| Tm | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.10 |
| Yb | 0.72 | 0.78 | 0.70 | 0.92 | 0.82 | 0.88 | 1.12 | 0.77 | 0.76 | 0.77 | 0.57 |
| Lu | 0.13 | 0.14 | 0.12 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.17 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.12 |
| ΣREE | 65.77 | 72.51 | 73.17 | 74.39 | 69.67 | 50.44 | 44.24 | 62.85 | 55.8 | 51.19 | 38.86 |
| LREE | 61.06 | 67.78 | 68.37 | 69.34 | 64.6 | 44.52 | 37.06 | 56.9 | 50.28 | 46.37 | 34.44 |
| HREE | 4.71 | 4.73 | 4.80 | 5.05 | 5.07 | 5.92 | 7.18 | 5.95 | 5.52 | 4.82 | 4.42 |
| LREE/HREE | 12.96 | 14.33 | 14.24 | 13.73 | 12.74 | 7.52 | 5.16 | 9.56 | 9.11 | 9.62 | 7.79 |
| δEu | 1.00 | 1.00 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.20 | 0.90 | 1.00 | 1.10 | 1.10 | 1.30 |
| (La/Yb) _N | 15.34 | 15.82 | 18.65 | 14.35 | 14.61 | 8.56 | 4.68 | 12.39 | 11.33 | 8.94 | 10.07 |
| Rb | 43.2 | 44.2 | 38.1 | 39.8 | 43.4 | 43.3 | 34.0 | 43.6 | 44.8 | 38.5 | 30.4 |
| Sr | 306.6 | 319.8 | 329.7 | 350.6 | 332.4 | 413.0 | 419.0 | 410.3 | 391.3 | 432.7 | 449.8 |
| Y | 6.70 | 7.20 | 6.30 | 7.50 | 7.30 | 8.00 | 10.30 | 8.90 | 7.60 | 7.50 | 6.70 |
| Ba | 364 | 419 | 356 | 364 | 372 | 341 | 259 | 244 | 335 | 296 | 297 |
| Cs | 1.1 | 1.5 | 1.2 | 1.1 | 1.7 | 1.4 | 2.9 | 1.5 | 1.5 | 1.7 | 1.7 |
| Th | 5.5 | 5.6 | 5.3 | 5.4 | 5.4 | 4.7 | 3.6 | 5.4 | 4.7 | 4.1 | 3.4 |
| U | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.7 | 0.7 | 1.1 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.7 |
| Nb | 4.7 | 4.8 | 5.1 | 4.7 | 4.7 | 3.1 | 4.4 | 2.8 | 3.0 | 2.3 | 2.9 |
| Ta | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 |
| Zr | 97.2 | 96.2 | 98.2 | 106.9 | 109.7 | 82.5 | 94.6 | 90.9 | 91.6 | 86.1 | 89.5 |
| Hf | 2.8 | 2.7 | 2.8 | 3.0 | 3.3 | 2.6 | 2.8 | 2.3 | 2.8 | 2.2 | 2.9 |
| Sc | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 4.0 | 5.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| Co | 1.8 | 1.8 | 2.3 | 2.0 | 1.7 | 5.1 | 5.0 | 5.2 | 5.7 | 5.6 | 5.3 |
| Ni | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 4.6 | 3.6 | 4.0 | 4.2 | 4.1 | 4.4 |
| Ga | 13.2 | 13.1 | 13.5 | 14.0 | 13.6 | 16.8 | 15.7 | 16.4 | 16.2 | 16.4 | 16.5 |
| Pb | 1.8 | 2.0 | 1.9 | 1.7 | 2.3 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 0.8 | 1.6 |
| Zn | 25 | 24 | 18 | 16 | 24 | 47 | 37 | 43 | 42 | 39 | 37 |
| Cu | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 1.3 | 1.7 | 1.2 | 1.0 | 0.3 | 3.8 |
| Zr/Hf | 34.71 | 35.63 | 35.07 | 35.63 | 33.24 | 31.73 | 33.79 | 39.52 | 32.71 | 39.14 | 30.86 |
| Nb/Ta | 11.75 | 16.00 | 17.00 | 15.67 | 15.67 | 10.33 | 11.00 | 9.33 | 10.00 | 11.50 | 14.50 |
| La/Nb | 3.28 | 3.58 | 3.57 | 3.91 | 3.55 | 3.39 | 1.66 | 4.75 | 4.00 | 4.17 | 2.76 |

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

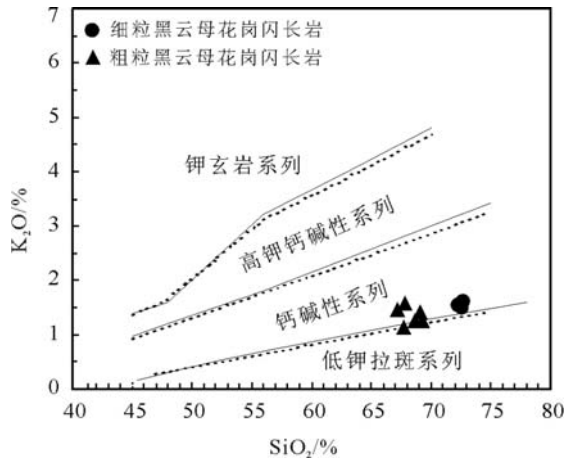


图3 温都尔毛道黑云母花岗岩长岩 SiO₂-K₂O 图解(底图据参考文献[40])

Fig. 3 SiO₂ versus K₂O diagram for Wenduermaodao biotite granodiorite

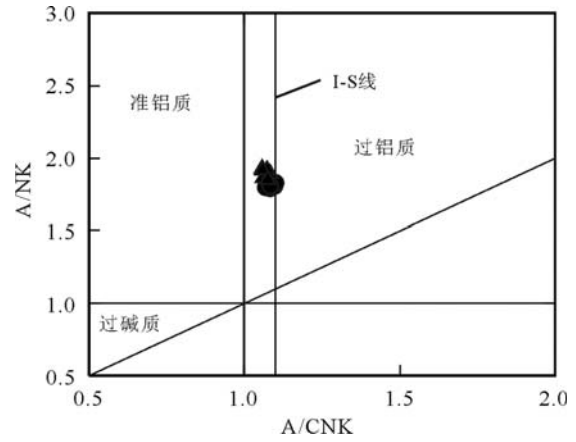


图4 温都尔毛道黑云母花岗岩长岩 A/CNK-A/NK 图解(图例同图3)

Fig. 4 A/CNK versus A/NK diagram for Wenduermaodao biotite granodiorite

表2 温都尔毛道黑云母花岗岩长岩(11LS88)LA-ICP-MS 锆石U-Th-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analytical data of sample 11LS88 from Wenduermaodao biotite granodiorite

| 点号 | 含量/10 ⁻⁶ | | | Th/U | 同位素比值 | | | | 年龄 /Ma | | | | | | | |
|----|---------------------|-----|-----|------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|----|
| | Pb | Th | U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ/10 ⁻⁴ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ/10 ⁻⁴ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ/10 ⁻⁴ | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ |
| 1 | 21 | 35 | 92 | 0.4 | 0.0524 | 31 | 0.0489 | 10 | 0.3535 | 188 | 302 | 129 | 307.9 | 6.3 | 307 | 14 |
| 2 | 30 | 73 | 138 | 0.5 | 0.0520 | 23 | 0.0471 | 9 | 0.3380 | 124 | 287 | 98 | 296.6 | 5.5 | 296 | 9 |
| 3 | 16 | 34 | 65 | 0.5 | 0.0542 | 38 | 0.0481 | 11 | 0.3592 | 230 | 379 | 149 | 302.6 | 6.8 | 312 | 17 |
| 4 | 29 | 57 | 111 | 0.5 | 0.0525 | 28 | 0.0469 | 10 | 0.3397 | 162 | 307 | 119 | 295.5 | 5.9 | 297 | 12 |
| 5 | 21 | 38 | 87 | 0.4 | 0.0521 | 26 | 0.0501 | 10 | 0.3596 | 154 | 289 | 110 | 314.9 | 6.0 | 312 | 12 |
| 6 | 15 | 35 | 68 | 0.5 | 0.0514 | 34 | 0.0468 | 10 | 0.3320 | 202 | 258 | 146 | 295.1 | 6.4 | 291 | 15 |
| 7 | 23 | 46 | 106 | 0.4 | 0.0522 | 28 | 0.0481 | 10 | 0.3463 | 163 | 294 | 118 | 303.0 | 6.0 | 302 | 12 |
| 8 | 23 | 60 | 87 | 0.7 | 0.0504 | 27 | 0.0480 | 10 | 0.3334 | 159 | 212 | 121 | 302.2 | 6.0 | 292 | 12 |
| 9 | 20 | 45 | 84 | 0.5 | 0.0527 | 32 | 0.0493 | 11 | 0.3578 | 193 | 314 | 131 | 310.0 | 6.5 | 311 | 14 |
| 10 | 57 | 147 | 252 | 0.6 | 0.0512 | 21 | 0.0478 | 9 | 0.3381 | 109 | 252 | 91 | 301.2 | 5.4 | 296 | 8 |
| 11 | 35 | 75 | 158 | 0.5 | 0.0538 | 24 | 0.0474 | 9 | 0.3514 | 129 | 362 | 97 | 298.3 | 5.5 | 306 | 10 |
| 12 | 61 | 213 | 267 | 0.8 | 0.0519 | 22 | 0.0464 | 9 | 0.3322 | 111 | 281 | 92 | 292.5 | 5.3 | 291 | 8 |
| 13 | 36 | 82 | 162 | 0.5 | 0.0536 | 25 | 0.0490 | 10 | 0.3623 | 144 | 353 | 103 | 308.6 | 5.9 | 314 | 11 |
| 14 | 44 | 119 | 187 | 0.6 | 0.0528 | 22 | 0.0486 | 9 | 0.3535 | 116 | 320 | 91 | 305.6 | 5.6 | 307 | 9 |
| 15 | 40 | 109 | 152 | 0.7 | 0.0522 | 39 | 0.0471 | 11 | 0.3392 | 234 | 295 | 161 | 296.7 | 6.9 | 297 | 18 |
| 16 | 20 | 65 | 80 | 0.8 | 0.0526 | 36 | 0.0480 | 11 | 0.3480 | 216 | 311 | 147 | 302.2 | 6.7 | 303 | 16 |
| 17 | 21 | 51 | 97 | 0.5 | 0.0508 | 26 | 0.0480 | 10 | 0.3360 | 151 | 232 | 115 | 302.0 | 5.9 | 294 | 11 |
| 18 | 41 | 99 | 172 | 0.6 | 0.0522 | 32 | 0.0457 | 10 | 0.3288 | 180 | 292 | 133 | 288.1 | 6.1 | 289 | 14 |
| 19 | 54 | 179 | 245 | 0.7 | 0.0512 | 23 | 0.0486 | 9 | 0.3436 | 125 | 252 | 98 | 306.0 | 5.7 | 300 | 9 |
| 20 | 55 | 170 | 245 | 0.7 | 0.0524 | 21 | 0.0477 | 9 | 0.3450 | 108 | 305 | 89 | 300.3 | 5.4 | 301 | 8 |
| 21 | 27 | 65 | 131 | 0.5 | 0.0538 | 26 | 0.0458 | 9 | 0.3397 | 141 | 361 | 106 | 288.8 | 5.6 | 297 | 11 |
| 22 | 49 | 122 | 224 | 0.5 | 0.0532 | 22 | 0.0465 | 9 | 0.3413 | 111 | 339 | 90 | 293.0 | 5.3 | 298 | 8 |
| 23 | 63 | 178 | 288 | 0.6 | 0.0523 | 20 | 0.0468 | 9 | 0.3375 | 98 | 298 | 85 | 294.8 | 5.3 | 295 | 7 |
| 24 | 21 | 46 | 88 | 0.5 | 0.0548 | 33 | 0.0475 | 10 | 0.3592 | 197 | 405 | 131 | 299.3 | 6.4 | 312 | 15 |
| 25 | 22 | 42 | 82 | 0.5 | 0.0533 | 37 | 0.0484 | 11 | 0.3557 | 227 | 340 | 150 | 304.8 | 6.8 | 309 | 17 |
| 26 | 33 | 137 | 135 | 1.0 | 0.0655 | 36 | 0.0482 | 10 | 0.4357 | 213 | 792 | 112 | 303.5 | 6.4 | 367 | 15 |
| 27 | 55 | 187 | 240 | 0.8 | 0.0525 | 21 | 0.0490 | 9 | 0.3551 | 108 | 309 | 87 | 308.4 | 5.6 | 309 | 8 |
| 28 | 37 | 123 | 166 | 0.7 | 0.0530 | 24 | 0.0488 | 9 | 0.3565 | 132 | 327 | 98 | 307.1 | 5.8 | 310 | 10 |
| 29 | 31 | 91 | 131 | 0.7 | 0.0573 | 29 | 0.0474 | 10 | 0.3746 | 161 | 504 | 107 | 298.4 | 5.9 | 323 | 12 |
| 30 | 22 | 60 | 96 | 0.6 | 0.0538 | 29 | 0.0486 | 10 | 0.3602 | 170 | 361 | 117 | 305.7 | 6.1 | 312 | 13 |

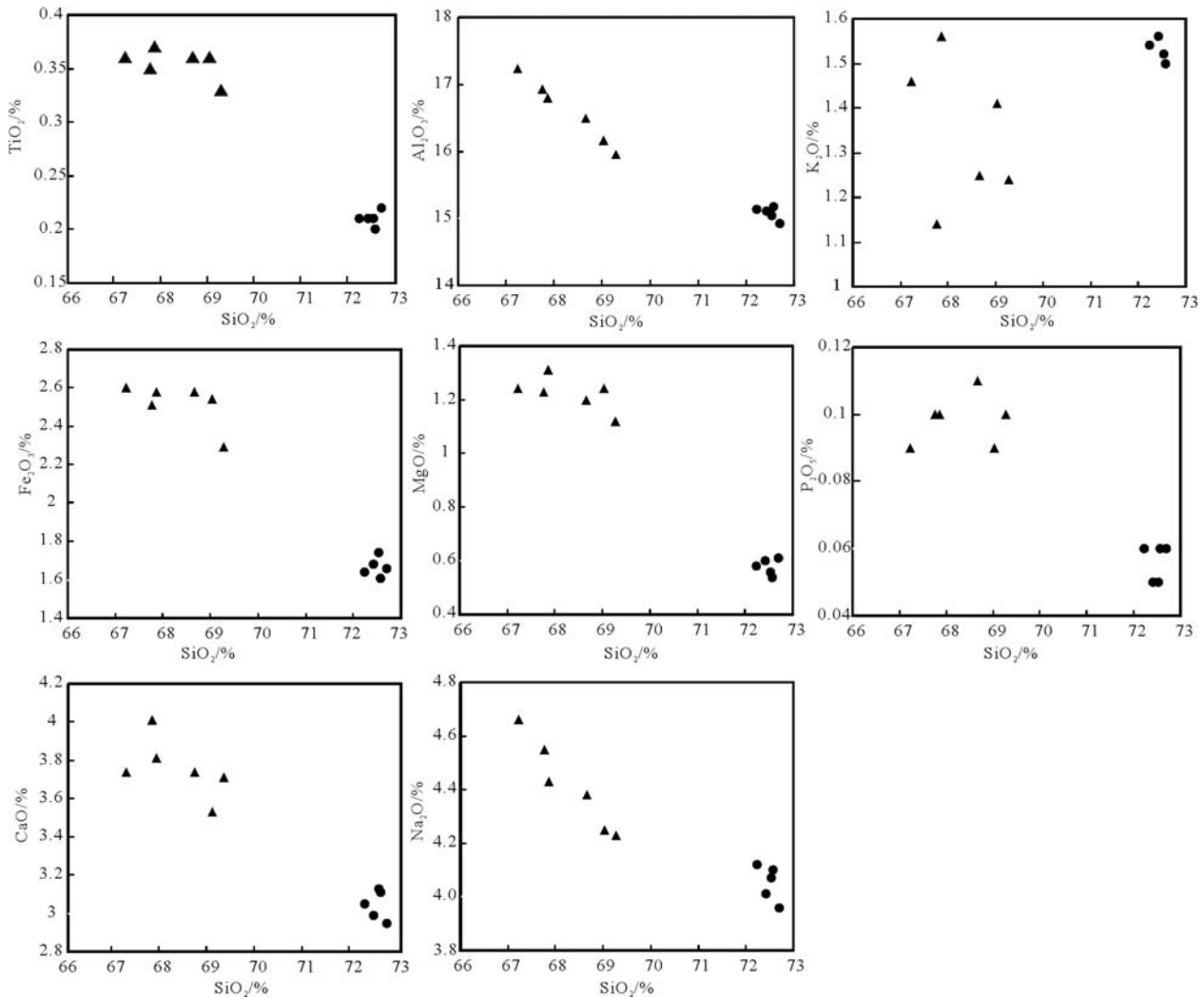


图5 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩哈克图解(图例同图3)

Fig. 5 Variation diagrams of major elements versus SiO_2

^{238}U 年龄, 加权平均值为 $301 \pm 2\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.19$) (图8)。这些测点均位于锆石幔部或边部结晶环带(图7), 故该年龄可以代表锆石的结晶年龄, 进而可以作为该岩体的形成年龄。

4 讨论

4.1 沙拉扎山晚古生代岩浆活动时代

本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测得沙拉扎山黑云母花岗闪长岩结晶年龄为 $301 \pm 2\text{Ma}$, 属于晚石炭世侵入岩。这是首次在宗乃山—沙拉扎山岛弧岩浆带获得精确的晚石炭世花岗岩年龄。虽然王廷印^[35]测得宗乃山—沙拉扎山由火山岩变

质而来的黑云母斜长片麻岩中锆石 U-Pb 年龄为 411Ma , 花岗闪长岩中锆石的 Pb-Pb 等时线年龄为 $357 \pm 81\text{Ma}$, U-Pb 等时线年龄为 352Ma , 但是该文并未给出具体的测试数据, 因此这些年龄有待进一步的检验。

早期的地质工作表明, 沙拉扎山岩体的侵位时代以海西期为主, 存在少量印支期和燕山期花岗岩^②, 侏罗纪花岗岩至今未有相关的报道。李俊建^[37]用 TIMS 颗粒锆石 U-Pb 法测定沙拉扎山主岩体形成于三叠纪 ($233 \sim 207\text{Ma}$), 沙拉扎山呼和沙拉附近花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 $254 \pm 3\text{Ma}$ (图1-c), 沙拉扎山主岩体西北部的辉长岩岩石

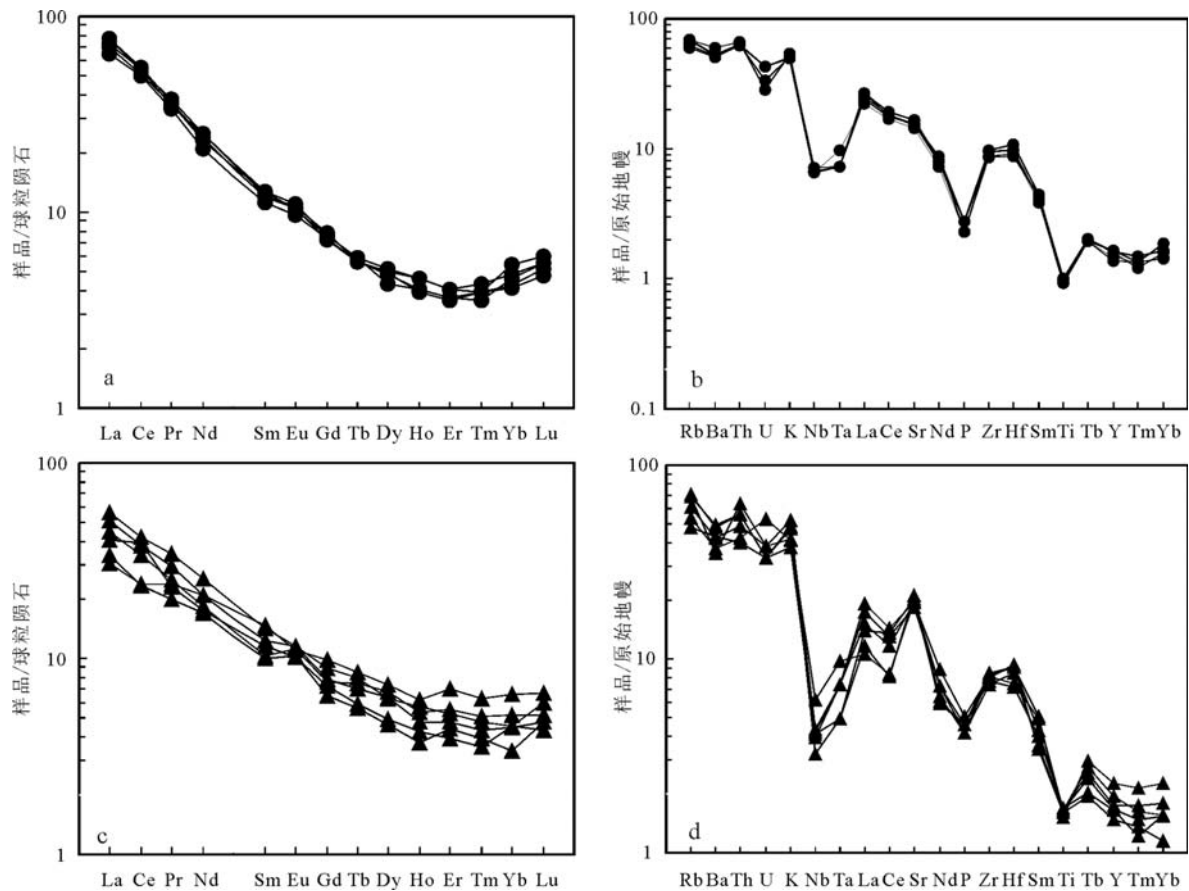


图6 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩稀土元素配分模式图(a、c)和微量元素蛛网图(b、d)
(标准化数据来自参考文献[41],图例同图3)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, c) and primitive-mantle normalized trace element patterns (b, d) of Wenduermaodao biotite granodiorite

锆石 U-Pb 年龄为 266 ± 5 Ma (图 1-c), 形成于中二叠世晚期。王行军^[36]通过锆石 U-Pb 法对该辉长岩体进行重新测年的结果为 248 ± 1 Ma (图 1-c), 属于早三叠世。Zhang^[46]测得沙拉扎山石英二长岩的年龄为 251 ± 2 Ma, 属于晚二叠世末期。仵康林^[38]测得宗乃山—沙拉扎山主岩体形成年龄约为 273 Ma (锆石 U-Pb 法), 属于早二叠世末期, 而在晚二叠世末期 (锆石 U-Pb 年龄为 251 ± 3 Ma) 仍有岩浆活动。冉焱^[47]测定沙拉扎山西部的杭嘎勒二长花岗岩属于晚二叠世 (254 ± 8 Ma)。因此沙拉扎山的主岩体可能形成于早二叠世末期—三叠纪初期。但温都尔毛道黑云母花岗闪长岩的定年结果表明, 沙拉扎山地区晚古生代最早的岩浆活动至少始于 301 Ma (晚石炭世)。

4.2 岩石成因及源区分析

温都尔毛道黑云母花岗闪长岩 A/CNK 值为 1.06~1.1, 小于等于 1.1, 标准矿物计算结果不出现刚玉等富铝矿物, 另外, 也未见白云母、石榴子石等富铝矿物, 因此不可能是 S 型花岗岩。通过 Ga/Al 值图解 (图 9), 样品点落在 I&S 型花岗岩区域, 表明温都尔毛道黑云母花岗闪长岩可能为 I 型花岗岩。图 10 进一步证实了该岩体属于钙碱性系列, 并非碱性或者高分异的 I 型花岗岩。该黑云母花岗闪长岩 P_2O_5 与 SiO_2 呈负相关, Na 含量较高 (3.96%~4.66%), 暗示该岩体具有 I 型花岗岩的特征。因此, 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩应属于钙碱性 I 型花岗岩。另外, P 和 Ti 的亏损说明岩浆经历了磷灰石、榍石、角闪石、黑云母等矿物的分离结晶作用。随着 SiO_2

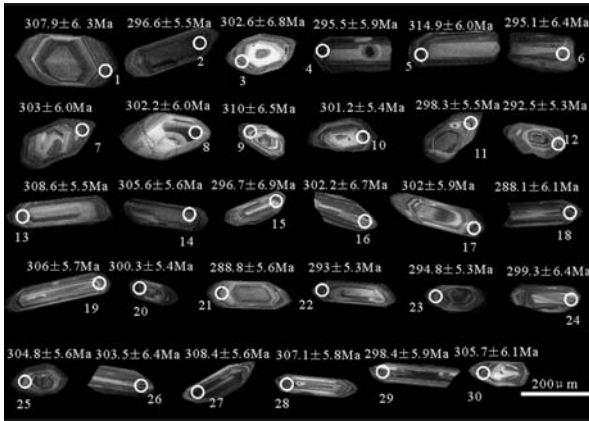


图7 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩样品11LS88的锆石CL图像和²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄

Fig. 7 CL images, analytical spots and corresponding age of ²⁰⁶Pb/²³⁸U of the analyzed zircon for Wenduermaodao biotite granodiorite (samples 11LS88)

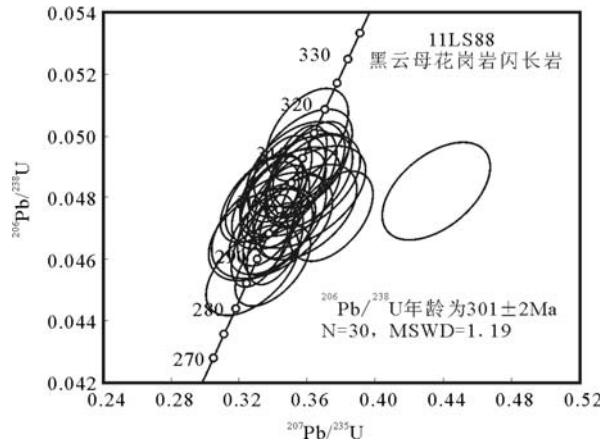


图8 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩(11LS88)锆石U-Pb谐和图

Fig. 8 Zircon U-Pb dating concordia diagrams of Wenduermaodao biotite granodiorite

含量的递增,大多数粗粒和细粒黑云母花岗闪长岩的主量元素含量表现出规律性的变化(图5),表明其为同源钙碱性岩浆先后侵位的产物。

通常认为,幔源岩石Nb/Ta和Zr/Hf值约为17.5和36,而壳源岩石的Nb/Ta和Zr/Hf值约为11和33^[49],温都尔毛道黑云母花岗闪长岩的Nb/Ta和Zr/Hf值分别为9.3~17和30.9~39.5,表明该岩体可能是壳幔物质不均匀混合的产物。华北北缘的晚古生代中酸性岩体中存在相当比例的岩浆混合^[50],张建军等^[51]在巴音诺尔公地区也发现了晚古生代岩浆混合的现象。而温都尔毛道黑云母花岗闪长岩

体中同样出现了基性包体,另外该黑云母花岗闪长岩的(La/Yb)_N值为4.68~15.8,小于20,表明分馏较差,因此具有汇聚性板块边缘环境中花岗岩侵位的特点^[52]。结合该区的地质背景,该黑云母花岗闪长岩可能为俯冲板片物质与新生地壳混合的产物。

4.3 构造背景

温都尔毛道黑云母花岗闪长岩的成因及源区分析与构造环境判别图解(图11)一致表明,沙拉扎山晚石炭世花岗岩可能是俯冲背景下的产物。王廷印等^[34]推测,华北板块北侧的恩格尔乌苏蛇绿岩带所代表的大洋壳向南俯冲作用至少始于早泥盆

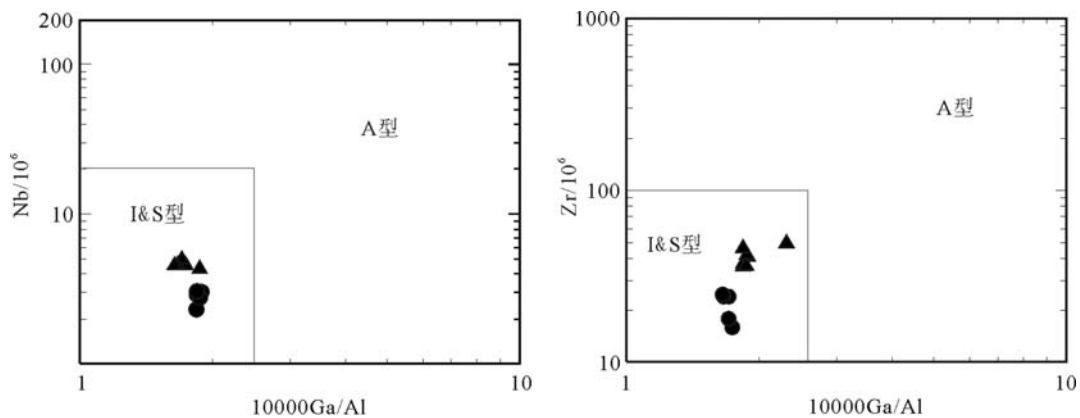


图9 温都尔毛道黑云母花岗闪长岩岩石成因图解(图例同图3)

Fig. 9 10000Ga/Al-Nb and 10000Ga/Al-Zr diagrams for Wenduermaodao biotite granodiorite

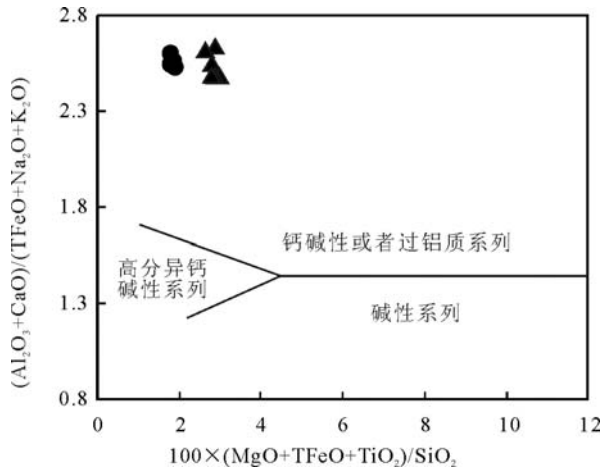


图 10 $100 \times (\text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2) / \text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}) / (\text{TFeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(底图据参考文献[48],图例同图3)
 Fig. 10 $100 \times (\text{MgO} + \text{TFeO} + \text{TiO}_2) / \text{SiO}_2 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}) / (\text{TFeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ diagram

世之前,并于二叠纪末期或稍晚结束。宗乃山—沙拉扎山沟弧—盆体系在这一地质作用过程中形成并消失。史兴俊^[54]和李俊健^[37]在岛弧带南部的雅布赖—巴音诺尔公陆缘弧带(图 1-b)中识别出 1 条晚古生代岩浆活动带,代表性的岩体为弱变形的哈里努登岩体(284±2Ma)、红古尔玉林岩体(295±2Ma)、哈布达山石英斑岩(289.6±5.6Ma)、毕级尔太山花岗岩(289±2.8Ma)、朱拉扎嘎花岗斑岩(280±6Ma)、弱片麻状构造的牙马图花岗岩体(273±1Ma)、弱片麻状构造的迭布斯格花岗岩体

(289±4Ma)等,这些岩体均发育于弧环境。上述证据表明,温都尔毛道黑云母花岗闪长岩可能形成于俯冲背景下的弧环境。

最新的研究认为,阿拉善地块可能在中奥陶世或者早古生代晚期与华北板块拼合在一起^[27,55],因而晚古生代以来阿拉善地块可能与华北地块具有相同的演化过程。张栓宏等^[29]和 Zhang 等^[30,56]对华北北缘晚石炭世—早二叠世的中酸性侵入岩进行过一系列研究,这些岩体的地球化学特征指示陆弧成因,为晚古生代造山过程中活动大陆边缘的岩浆作用产物,如与本文较为接近的波罗诺岩体(302±4Ma^[56])。另外,其他学者也识别出与沙拉扎山黑云母花岗闪长岩同时期的岩体,如赤城海流图花岗岩(299±3Ma^[57])、大青山北石兰哈达石英闪长岩(299±4Ma^[58])和大光顶山(296±4Ma^[59])。因此,进一步表明在 300Ma 左右,阿拉善北缘地区与华北北缘类似,也可能处于活动大陆边缘环境。

值得注意的是,华北地块北缘东段不甚发育与早石炭世晚期—中二叠世侵入岩相对应的火山岩,原因是内蒙古隆起在晚古生代经历了强烈的剥露作用,华北地块北缘大量的早石炭世晚期—中二叠世火山岩被剥蚀^[29],而阿拉善地块北缘也同样缺少晚古生代的岛弧火山岩,只有朱拉扎嘎毛道地区有二叠纪流纹岩出露的报道^[59],进一步证实当时两者处于相同的构造背景下。

综上所述,阿拉善地块北缘与华北北缘东段在

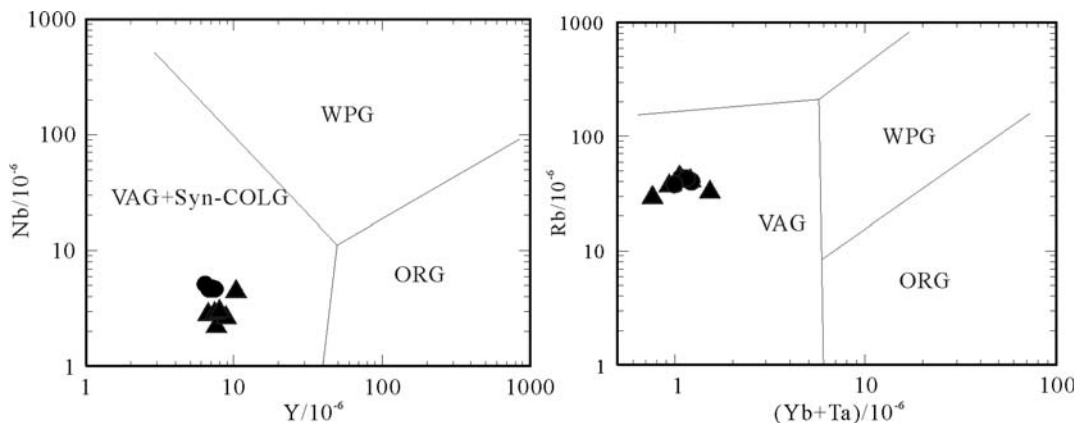


图 11 花岗岩构造环境判别图解(底图据参考文献[53],图例同图3)

Fig. 11 Tectonic setting discrimination diagrams of granites
 VAG—火山弧花岗岩;Syn-COLG—同造山花岗岩;
 WPG—板内花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩

晚古生代以来处于同一地球动力学体系之下,晚石炭世整个华北北缘正接受古亚洲洋的向南俯冲。

5 结 论

(1)阿拉善地块北缘沙拉扎山温都尔毛道黑云母花岗闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为301±2Ma,是沙拉扎山岛弧带目前报道的最古老、最精确的花岗岩年龄。

(2)温都尔毛道黑云母花岗闪长岩属过铝质钙碱性系列,具有典型的I型花岗岩特点。根据地球化学特征及构造背景分析,认为该花岗闪长岩可能来源于俯冲板片与新生地壳的混合物,暗示该时期阿拉善地块北缘与华北地块北缘相似,可能都处于活动陆缘环境。

参考文献

- [1]Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2001, 107(1): 45-73.
- [2]Wilde S A, Zhao G C, Sun M. Development of the North China Craton during the late Archean and its final amalgamation at 1.8 Ga: Some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic supercontinent[J]. Gondwana Research, 2002, 5(1): 85-94.
- [3]Chen B, Jahn B M, Wilde S A, et al. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 157-182.
- [4]Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(3/4): 207-224.
- [5]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.
- [6]Miao L C, Fan W M, Liu D Y, et al. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(5/6): 348-370.
- [7]Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth[J]. Lithos, 2008, 101(3/4): 233-259.
- [8]Xiao W J, Kusky T. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts: Introduction[J]. Gondwana Research, 2009, 16(2): 167-169.
- [9]黄汲清. 黄汲清著作选读(第三卷):地质学及大地构造学[M]. 北京:地质出版社,1992:1-329.
- [10]Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 177-202.
- [11]沈其韩,耿元生,王新社,等. 阿拉善地区前寒武纪斜长角闪岩的岩石学、地球化学、形成环境和年代学[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(1): 21-31.
- [12]任纪舜,姜春发,张正坤,等. 中国大地构造及演化[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [13]任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图及简要说明[M]. 北京:地质出版社,1999:1-50.
- [14]李献华,苏犁,宋彪,等. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 2004, 4(49): 401-402.
- [15]耿元生,王新社,沈其韩,等. 阿拉善地区新元古代晋宁期变形花岗岩的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(4): 412-420.
- [16]耿元生,周喜文. 阿拉善地区新元古代岩浆事件及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 779-795.
- [17]彭润民,翟裕生,王建平,等. 内蒙狼山新元古代酸性火山岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 2010, 26(55): 2611-2620.
- [18]葛肖虹,马文璞,刘俊来,等. 对中国大陆构造格架的讨论[J]. 中国地质, 2009, 26(5): 949-965.
- [19]董国安,杨宏仪,刘敦一,等. 龙首山岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2007, 6(52): 688-697.
- [20]Dan W, Li X H, Guo J, et al. Integrated in situ zircon U-Pb age and Hf-O isotopes for the Helanshan khondalites in North China Craton: Juvenile crustal materials deposited in active or passive continental margin[J]. Precambrian Research, 2011: 143-158.
- [21]张振法,李超英,牛颖智. 阿拉善——敦煌陆块的性质、范围及其构造作用和意义[J]. 内蒙古地质, 1997, (2): 1-14.
- [22]张振法. 论塔里木地台与华北地台的关系[J]. 物探与化探, 1998, 22(5): 384-393.
- [23]任康绪,阎国翰,牟保磊,等. 阿拉善断块富碱侵入岩 Rb-Sr 年龄及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 204-211.
- [24]王廷印,王士政. 华北板块和塔里木板块之关系[J]. 地质学报, 1993, 67(4): 287-300.
- [25]王廷印,高军平,王金荣,等. 内蒙古阿拉善北部地区碰撞期和后造山期岩浆作用[J]. 地质学报, 1998, 72(2): 126-137.
- [26]周良仁,于浦生. 阿拉善台隆同位素年龄数据及其地质意义[J]. 西北地质, 1989, (1): 52-63.
- [27]李锦轶,张进,曲军峰. 华北与阿拉善两个古陆在早古生代晚期拼合——来自宁夏牛首山沉积岩系的证据[J]. 地质评论, 2012, 58(2): 208-214.
- [28]Zhang J, Li J Y, Liu J F, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Middle Ordovician flysch sandstones in the western ordos margin: New constraints on their provenances, and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 42(5): 1030-1047.
- [29]张拴宏,赵越,刘建民,等. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 6(29):

- 824–842.
- [30] Zhang S H, Zhao Y, Kroner A, et al. Early Permian plutons from the northern North China Block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1441–1467.
- [31] Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implications for cratonic lithospheric destruction[J]. *Lithos*, 2012, 155: 1–18.
- [32] Ma X, Chen B, Chen, J F, et al. Zircon SHRIMP U–Pb age, geochemical, Sr–Nd isotopic, and in-situ Hf isotopic data of the Late Carboniferous–Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2013, (56): 126–144.
- [33] 吴泰然, 何国琦. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元划分及各单元的基本特征[J]. *地质学报*, 1993, 67(2): 97–108.
- [34] 王廷印, 张铭杰, 王金荣, 等. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. *地质科学*, 1998, 33(4): 358–394.
- [35] 王廷印, 王金荣, 刘金坤, 等. 宗乃山——沙拉扎山陆壳基底火山弧火成岩组合及地球化学特征[J]. *地球化学*, 1994, 23(增刊): 162–172.
- [36] 王行军. 内蒙古阿拉善地区蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2012.
- [37] 李俊建. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2006.
- [38] 仵康林. 阿拉善地区华力西晚期花岗岩类岩石地球化学特征及其构造意义[M]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [39] 陈高潮, 姜亭, 史冀忠, 等. 内蒙古西部银额盆地及邻区晚古生代海平面变化与沉积响应[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1645–1656.
- [40] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1976, 58(1): 63–81.
- [41] 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.
- [42] Andersen T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [43] Yuan H, Gao S, Liu X, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353–370.
- [44] Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97(2): 205–217.
- [45] Hancher J M, Miller C F. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: implications for interpretation of complex crustal histories[J]. *Chemical Geology*, 1993, 110(1/3): 1–13.
- [46] Zhang W, Wu T R, Feng J C, et al. Time constraints for the closing of the Paleo–Asian Ocean in the Northern Alta Region: Evidence from Wuliji granites[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2013, 56(1): 153–164.
- [47] 冉焱, 张维杰, 刘治博. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世二长花岗岩地球化学特征和 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1565–1575.
- [48] Sylvester P J. Post–collisional alkaline granites[J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97: 261–280.
- [49] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution, 1985.
- [50] 马旭, 陈斌, 陈家富, 等. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义: 岩石学、锆石 U–Pb 年龄、Nd–Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2012, 42(12): 1830–1850.
- [51] 张建军, 王涛, 张招崇, 等. 华北地块北缘西段巴音诺尔公—狼山地区牙马图岩体的岩浆混合成因——岩相学和元素地球化学证据[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 53–66.
- [52] Martin H. Archaean and modern granitoids as indicators of changes in geodynamic processes[J]. *Revista Brasileira de Geociências*, 1987, 17(3/4): 360–365.
- [53] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- [54] 史兴俊, 童英, 王涛, 等. 内蒙古西部阿拉善地区哈里努登花岗岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(5): 662–670.
- [55] 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2912–2934.
- [56] Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a late Palaeozoic active continental margin[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(2): 451–463.
- [57] 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 等. 华北陆块北缘崇礼—赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr–Nd–Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2009, 11(25): 3057–3074.
- [58] 张玉清, 刘俊杰. 内蒙古大青山北前壕石英闪长岩锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *华南地质与矿产*, 2004, (4): 22–27.
- [59] 包创, 陈岳龙, 李大鹏. 阿拉善地块北缘朱拉扎嘎毛道晚二叠世火山岩的发现[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 156–163.
- ① 甘肃省地质局区域地质调查队二分队. 拐子湖南(K–48–25)区域地质调查报告. 1979.
- ② 宁夏地质局区域地质调查队. 乌力吉幅(K–48–27)区域地质调查报告. 1980.