

文章编号: 1006-6616 (2017) 03-0397-14

内蒙古乌拉特后旗乌兰敖包地区二叠纪中-基性火山岩地球化学、年代学、Hf 同位素特征及其地质意义

郭 硕, 滕学建, 刘 洋, 滕 飞, 何 鹏, 王文龙, 田 健, 段霄龙

(中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

摘 要: 内蒙古乌拉特后旗乌兰敖包地区中-基性火山岩位于华北陆块北缘西段, 野外出露岩性主要为灰黑色-深灰绿色玄武岩、深灰绿色玄武安山岩和灰绿色安山岩等。岩石样品中 SiO_2 含量 49.33 ~ 65.84%, Na_2O 含量 0.53 ~ 5.49%, K_2O 平均值为 0.25 ~ 6.40%, 属于钙碱性系列; 由基性到中性岩石中稀土总量呈增加趋势, 轻稀土元素富集程度增加, δEu 负异常逐渐明显; 微量元素显示火山岩普遍具有不同程度的 Ta、Nb 亏损, U、Ba、K 等大离子亲石元素富集特征, 具有俯冲带弧岩浆岩的特征。火山岩中岩浆锆石 U-Pb 测年结果为 $285.0 \pm 2.3 \text{ Ma}$ 和 $265.0 \pm 1.5 \text{ Ma}$, 表明其形成时代为早-中二叠世; 火山岩与下伏地层接触关系及捕获锆石的年龄特征指示, 乌兰敖包地区火山岩形成在华北陆块北缘之上。锆石 Hf 同位素信息指示岩浆起源于受俯冲板块影响的亏损地幔, 岩浆上升过程中加入了壳源物质。

关键词: 兴蒙造山带; 中-基性火山岩; 二叠纪; 地球化学; 大陆边缘弧

中图分类号: P531 P597.3

文献标识码: A

0 引言

兴蒙造山带位于西伯利亚板块与华北板块之间, 其经历了较完整的俯冲、增生造山、碰撞以及碰撞之后的板内构造活动。兴蒙造山带地质演化历史一直被众多学者所关注, 尤其对华北板块与西伯利亚板块之间的古亚洲洋的演化更为重视, 但对其演化历史和最终的闭合时间存在较大分歧^[1-4]。学者们从岩浆岩、地层、构造、古地磁等不同角度提出: (1) 晚古生代早期中晚泥盆世到早石炭世, 在华北陆块北缘存在较多的不整合面, 标志着古亚洲洋的消亡、板块碰撞^[3, 5], 到了晚石炭世末期华北陆块北缘已转入板内环境^[6-9]; 到早二叠世, 华北陆块北缘存在堆晶辉长岩^[10]、碱性花岗岩^[11-13]及后碰撞双峰式火山岩^[14], 这些岩浆岩是在伸展体制下形成, 与俯冲无关^[4, 15-17]; 中二叠世开始裂解形成近东西向分布的有限洋盆,

晚二叠世一早三叠世之后, 有限洋盆最终闭合^[18, 19]; (2) 在早古生代晚寒武世一晚奥陶世时期古亚洲洋南部靠近华北板块一侧存在洋内俯冲, 形成岛弧岩浆岩带^[20, 21], 晚志留世一早泥盆世发生弧-陆(微陆块)碰撞^[22], 之后中晚泥盆世为弧-陆碰撞后的伸展阶段^[23], 到石炭纪一早二叠世在华北陆块北缘形成广泛的大陆边缘弧^[24-28]或大洋岛弧^[29, 30], 最终在二叠纪晚期才最终闭合^[28, 31]。

出现这种分歧的重要原因在于西伯利亚板块和华北板块之间存在多个微陆块, 洋-陆作用复杂, 同时华北陆块北缘岩浆岩分布时空范围广, 具有后碰撞及板内构造活动和岩浆作用的叠加, 且同一岩石地球化学特征的岩体的形成背景具有多解性。本文通过对兴蒙造山带西部地区早二叠世中-基性火山岩岩石学、地球化学及同位素的研究, 并结合前人资料, 探讨岩石形成的地质背景, 为恢复该区古构造环境提供有益资料。

收稿日期: 2016-10-26

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120113056300, 121201006000160902)

作者简介: 郭硕 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域地质及岩石地球化学研究。E-mail: shuoguo89@sina.com

1 研究区地质概况

研究区位于内蒙古乌拉特后旗西北部乌兰敖包地区。大地构造位置位于华北陆块北缘西段，兴蒙造山带西部，东侧为狼山西缘断裂（吉兰泰断裂），北侧为恩格尔乌苏断裂，南部为查干楚鲁断裂（巴丹吉林断裂），区内广泛发育二叠纪火山岩（见图1）。中元古代宝音图陆块完成了由华北地块边缘裂解、重新拼贴在华北地块边缘的构造演化^[32]；到早古生代奥陶—志留纪，在研究区内

发生一期造山拼合事件，形成了岩石组合以石英闪长岩、花岗闪长岩以及白云母二长花岗岩为主的岩浆岩带，反映了一次早古生代时期存在的微陆块碰撞^[33]；晚古生代，区内构造应力场由拉张向挤压环境转变，形成了岩石组合以石英闪长岩、花岗闪长岩以及二长花岗岩为主的岩浆岩带；三叠纪时期，区域构造应力场转向为伸展构造体制，形成了大规模的偏碱性—钙碱性二长花岗岩侵入；中生代研究区内继承了印支期的构造格局，构造应力场仍以南北向的伸展变形为主，形成了大规模的断陷盆地。

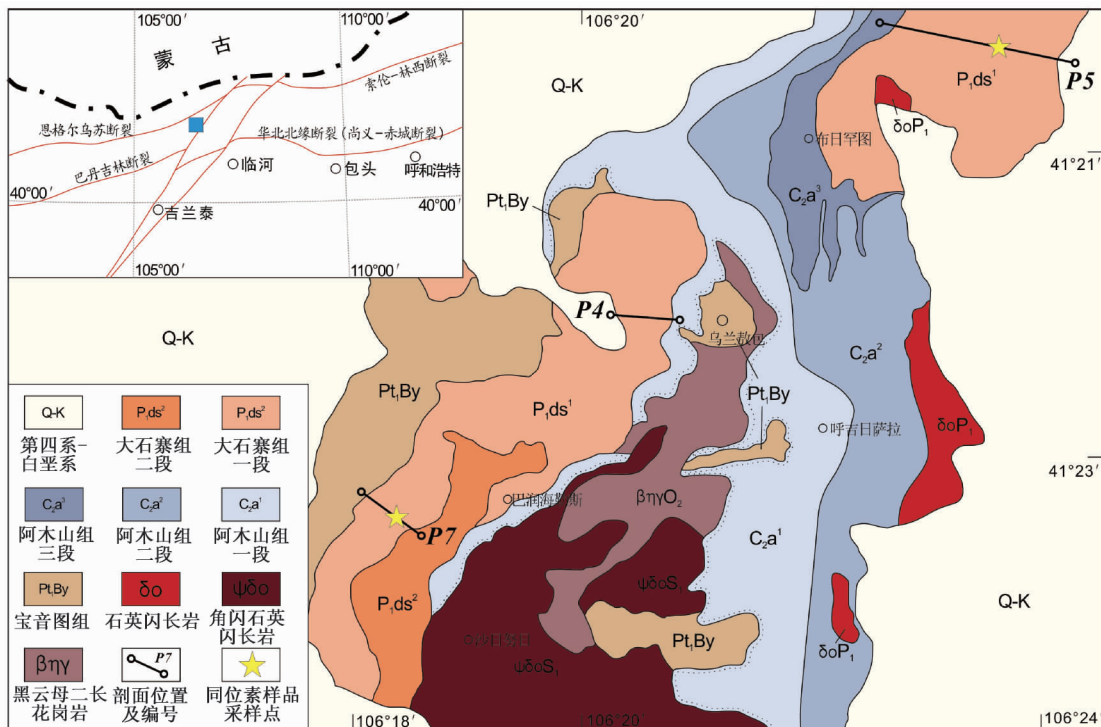


图1 乌兰敖包地区构造位置及区域地质略图^[33]

Fig. 1 Simplified geological map of tectonic location and regional geology in Wulanaobao area

二叠纪中—基性火山岩发育在大石寨组中。作者通过1:5万区域地质调查，对该组进行了详细的研究。大石寨组整体呈近北东向展布，出露面积约18 km²，其喷发不整合在阿木山组和宝音图群之上，顶部与乌兰素海组呈角度不整合接触或被第四系覆盖（见图1），火山喷发中心呈串珠状分布，具由北东向南西迁移的特征，岩浆性质由基性向中性演化。研究区东北处的大石寨组（P5剖面）下部以灰白色细砾岩、紫色—深灰色中薄层长石石英中砂岩为主，可见少量的火山角砾岩（见图2b），火山角砾可见玄武质火山岩角砾、宝音图群大理岩角砾、灰岩角砾和花岗岩角砾等，

灰绿色致密块状安山岩，向上为火山活动间歇期，岩性以紫红色厚层细砾岩、中层岩屑长石中砂岩、薄层长石岩屑细砂岩夹薄层粉砂岩为主；上部以喷发—溢流相玄武安山岩和少量的安山岩为主，从上述火山的特征来看，该处火山活动是以基性岩浆活动为主，早期的火山活动多以爆发—溢流的形式，伴随大量正常碎屑岩沉积，晚期以喷溢方式为主；研究区西南处的大石寨组（P4、P7剖面）下部可见少量的灰黄色细砂质砾岩，向上可见灰褐色安山质火山集块岩、灰色安山质含角砾晶屑凝灰岩、灰绿色气孔杏仁状安山岩、灰黄色英安质晶屑凝灰岩和灰黄色块状英安岩；上部以

灰绿色气孔杏仁状玄武安山岩、褐红色块状玄武安山岩、红褐色块状安山岩和少量的灰黄色气孔状英安岩, 从上述特征来看该处火山活动是以中性岩浆活动为主, 早期火山活动以爆发-溢流的形式为主, 晚期以喷溢方式为主。

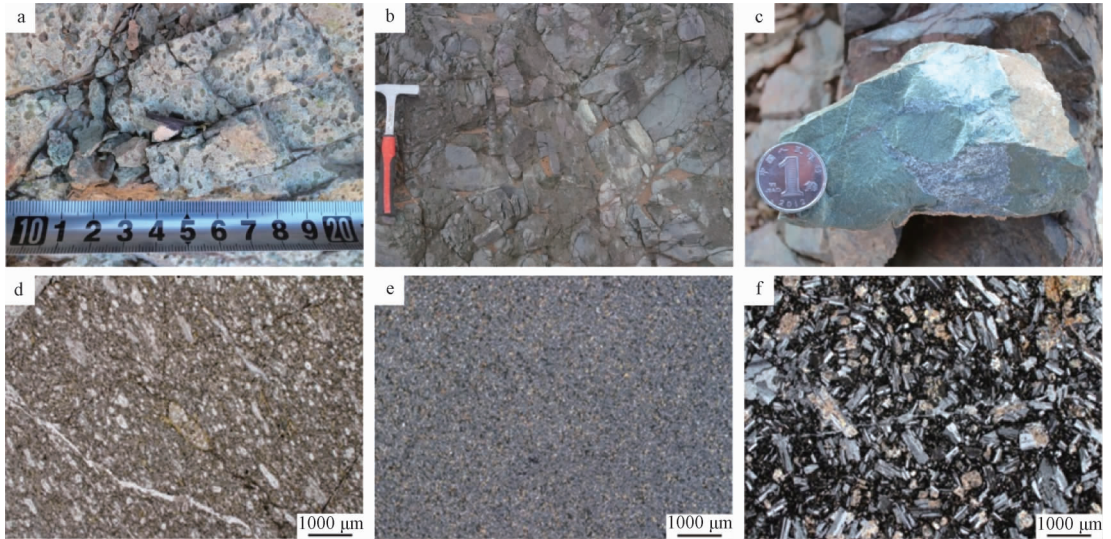
2 样品特征及实验方法

本文选取了 P4、P5、P7 等三条剖面进行了详细的观察。观察研究表明, 剖面上出露的岩性以玄武岩、玄武安山岩、安山岩及相应的火山碎屑岩为主 (结合岩石地球化学数据定名)。

玄武岩呈深灰绿色、灰绿色, 多呈少斑一无斑结构, 基质为间粒结构、间粒-间隐结构, 块状构造、气孔杏仁状构造 (见图 2a、2d)。斑晶由

斜长石和少量暗色矿物假象构成, 杂乱分布, 粒度 1~2 mm; 呈半自形板状, 绿帘石化、局部碳酸盐化。基质由斜长石、辉石构成, 粒度 0.1~0.4 mm; 斜长石呈半自形板状、少量板条状, 杂乱或半定向分布, 绿帘石化明显、局部碳酸盐化、绢云母化等; 辉石呈半自形-它形晶, 多填隙状分布斜长石间, 次闪石化, 局部绿帘石化、少碳酸盐化。岩石内杏仁体, 定向分布, 填充次生石英、碳酸盐、绿泥石等。

玄武安山岩呈灰绿色、浅灰色, 斑晶极少, 基质多为间隐结构, 块状构造 (见图 2c、2e)。斑晶由斜长石组成, 分布不规则, 粒度 0.7~1.9 mm, 半自形板状, 绿帘石化明显。基质多数已脱玻化, 被绿帘石、碳酸盐等不均匀交代。



a—气孔杏仁状玄武岩; b—火山角砾岩 (玄武质角砾); c—玄武安山岩; d—玄武岩 (单偏光), 气孔杏仁状构造, 少斑结构; e—玄武安山岩间隐结构 (正交偏光); f—安山岩多斑结构 (正交偏光)

图 2 早二叠世火山岩野外及镜下特征

Fig. 2 Field and microscopic characteristics of the lower Permian volcanic rocks

安山岩呈浅灰绿色、浅灰色, 多数呈多斑晶结构, 基质为交织结构, 块状构造、气孔杏仁状构造 (见图 2f)。斑晶主要由斜长石组成, 偶见辉石、角闪石和少量的钾长石; 斜长石大小 0.3~1.5 mm, 呈半自形板状, 具弱绢云母化、高岭土化, 局部碳酸盐化。基质由斜长石、石英、暗色矿物假象组成。斜长石呈细板条状, 略显定向分布, 具弱绢云母化、高岭土化, 局部碳酸盐化。石英呈它形粒状, 填隙状分布。暗色矿物呈微晶状, 分布于斜长石间, 被绿泥石、碳酸盐交代, 呈假象。岩内见硅质、绿帘石、绿泥石等充填的

不规则状杏仁体, 星散状分布, 大小 0.5~2.5 mm 不等。

在剖面 P4、P5、P7 上选取了 13 件岩石样品进行了岩石化学全分析, 2 件进行了锆石挑选、制靶并进行 LA-ICP-MS 锆石测年和 Lu-Hf 同位素测试。其中岩石化学全分析由天津地质矿产研究所实验测试中心完成, 锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成, 制靶由北京铅年领航科技有限公司完成, U-Pb 及 Lu-Hf 同位素测试由天津地质矿产研究所实验测试中心完成。

3 地球化学特征

表1为岩石全分析数据。按照TAS图解分类(见图3a),将研究区的中基性火山岩分为三类:分别是玄武岩、玄武安山岩和安山岩。岩石中SiO₂变化较连续,含量分布在49.33~65.84%之

间;TiO₂在不同样品之间含量变化明显,与SiO₂呈负相关,其在玄武岩中含量最高,平均值为1.51%,玄武安山岩中次之为1.37%,安山岩中含量最少为0.77%;Al₂O₃在不同样品之间含量变化不明显,含量平均为16.7%,具有弱富Al的特点;MgO与SiO₂呈负相关,在玄武岩中含量最高为6.56%,玄武安山岩中次之为5.42%,安山岩

表1 乌兰敖包火山岩主量元素、微量元素及稀土元素分析结果

Table 1 Analysis results of major elements, trace elements and rare earth elements of the volcanic rocks in Wulanaobao area

| 送样号 | P4-33-1 | P4-37-1 | P4-40-1 | P4-41-1 | P4-64-1 | P4-65-1 | P5-1-1 | P5-5-1 | P5-26-1 | P5-41-1 | P7-11-1 | P7-38-1 | P7-40-1 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 样品名称 | 玄武岩 | 玄武岩 | 安山岩 | 玄武岩 | 安山岩 | 安山岩 | 玄武岩 | 玄武安山岩 | 安山岩 | 安山岩 | 安山岩 | 玄武安山岩 | 玄武安山岩 |
| SiO ₂ | 47.90 | 49.88 | 58.41 | 49.52 | 58.92 | 60.16 | 50.13 | 52.32 | 58.69 | 64.08 | 56.43 | 54.28 | 54.82 |
| TiO ₂ | 1.06 | 1.72 | 0.82 | 1.59 | 0.80 | 0.82 | 1.52 | 1.39 | 0.86 | 0.67 | 0.53 | 1.30 | 1.31 |
| Al ₂ O ₃ | 16.26 | 15.11 | 16.83 | 15.27 | 16.77 | 17.12 | 17.57 | 19.96 | 16.39 | 15.35 | 11.77 | 16.79 | 16.55 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.01 | 5.71 | 2.41 | 7.91 | 2.32 | 4.83 | 3.20 | 4.88 | 2.75 | 2.32 | 2.62 | 3.39 | 4.43 |
| FeO | 5.52 | 5.55 | 3.34 | 2.30 | 2.98 | 0.68 | 5.36 | 2.37 | 2.97 | 1.77 | 0.89 | 3.51 | 2.65 |
| MgO | 7.95 | 5.92 | 4.38 | 4.32 | 3.24 | 2.09 | 7.38 | 4.53 | 4.52 | 2.54 | 6.69 | 5.69 | 5.66 |
| MnO | 0.16 | 0.15 | 0.09 | 0.14 | 0.08 | 0.06 | 0.14 | 0.10 | 0.11 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.10 |
| CaO | 11.21 | 9.56 | 4.23 | 11.98 | 8.03 | 7.97 | 8.28 | 6.87 | 5.39 | 3.67 | 11.02 | 7.08 | 8.51 |
| Na ₂ O | 2.23 | 3.62 | 5.35 | 4.92 | 2.80 | 2.90 | 3.20 | 3.82 | 2.91 | 4.93 | 0.51 | 3.21 | 2.67 |
| K ₂ O | 0.69 | 0.23 | 1.39 | 0.25 | 1.26 | 1.30 | 0.28 | 2.06 | 2.21 | 1.77 | 6.20 | 1.44 | 0.30 |
| P ₂ O ₅ | 0.12 | 0.22 | 0.26 | 0.22 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.13 | 0.20 | 0.15 | 0.09 | 0.42 | 0.41 |
| LOI | 2.09 | 1.52 | 1.91 | 1.13 | 2.1 | 1.62 | 1.95 | 1.09 | 2.47 | 2.28 | 2.91 | 2.24 | 2.14 |
| Total | 99.2 | 99.21 | 99.43 | 99.56 | 99.49 | 99.73 | 99.21 | 99.53 | 99.47 | 99.6 | 99.73 | 99.43 | 99.54 |
| Cu | 69.3 | 79.4 | 28.5 | 45.3 | 23.6 | 22.1 | 62.5 | 30.3 | 23.4 | 49.7 | 7.73 | 26.9 | 51.4 |
| Pb | 9.39 | 3.72 | 7.49 | 6.26 | 17.1 | 23.7 | 8.42 | 7.86 | 11.9 | 14.4 | 27.9 | 11.2 | 16.4 |
| Zn | 64 | 88.2 | 61.2 | 74.7 | 64.6 | 61.2 | 71.8 | 69.2 | 59.5 | 57 | 54.5 | 77.9 | 72.3 |
| Cr | 129 | 81.8 | 85.8 | 52.2 | 118 | 141 | 278 | 118 | 214 | 87.9 | 47.8 | 201 | 197 |
| Ni | 80.9 | 39.2 | 73.8 | 38 | 25.4 | 23.5 | 140 | 44.1 | 94 | 50.1 | 16.9 | 67.9 | 67.1 |
| Co | 46.8 | 42.8 | 19.9 | 41.1 | 18.8 | 17 | 41.2 | 24.7 | 22.2 | 14.3 | 7.18 | 23.4 | 23.2 |
| Li | 33.2 | 41.6 | 55 | 72.7 | 25.8 | 49.9 | 17.7 | 13.6 | 30 | 20.1 | 23.4 | 28.2 | 32.4 |
| Rb | 24 | 11.5 | 39.4 | 12.5 | 39.2 | 42.7 | 10.8 | 82.3 | 60.6 | 61.7 | 202 | 30.3 | 6.3 |
| Cs | 2.66 | 5.22 | 4.15 | 7.09 | 2.16 | 4.64 | 0.79 | 2.72 | 2.99 | 1.95 | 7.56 | 4.32 | 2.24 |
| Sr | 384 | 261 | 400 | 162 | 676 | 676 | 332 | 389 | 326 | 561 | 191 | 920 | 862 |
| Ba | 720 | 745 | 399 | 129 | 498 | 681 | 120 | 196 | 368 | 283 | 704 | 554 | 311 |
| V | 229 | 267 | 114 | 246 | 119 | 116 | 147 | 134 | 79.3 | 61.4 | 50.8 | 118 | 108 |
| Sc | 43 | 37.6 | 20.2 | 39.6 | 18 | 21.1 | 30 | 26.5 | 21.2 | 20.6 | 12.9 | 20.6 | 21.2 |
| Nb | 7.15 | 14.8 | 7.32 | 14.3 | 5.85 | 5.96 | 3.74 | 4.16 | 7.38 | 8.15 | 9.98 | 9.35 | 8.99 |
| Ta | 0.47 | 0.98 | 0.46 | 0.88 | 0.44 | 0.41 | 0.29 | 0.34 | 0.61 | 0.67 | 0.7 | 0.66 | 0.59 |
| Zr | 63.2 | 121 | 151 | 92.9 | 135 | 137 | 162 | 156 | 204 | 179 | 218 | 254 | 246 |
| Hf | 1.82 | 3.29 | 3.76 | 2.54 | 3.82 | 3.64 | 3.87 | 4.1 | 5 | 4.65 | 6.12 | 5.94 | 5.49 |
| Ga | 16.4 | 17.1 | 17.8 | 14.4 | 18.2 | 19.6 | 18.9 | 20.8 | 18.5 | 20.3 | 14.1 | 19.4 | 19.8 |
| U | 0.29 | 0.56 | 1.35 | 1.84 | 1.46 | 1.69 | 0.62 | 0.66 | 1.58 | 1.92 | 2.93 | 1.41 | 1.24 |
| Th | 0.87 | 1.82 | 3.8 | 1.59 | 5.54 | 5.52 | 1.61 | 1.92 | 5.79 | 7.21 | 9.01 | 5.46 | 5.01 |
| La | 7.71 | 14.4 | 22.9 | 12.3 | 22.2 | 23.1 | 11.1 | 10.3 | 21.3 | 29.1 | 33 | 27.8 | 27.5 |
| Ce | 17.2 | 31 | 48.3 | 26.6 | 46.4 | 48.4 | 28.7 | 25.4 | 46.4 | 61.2 | 67.7 | 61.2 | 60.4 |
| Pr | 2.36 | 4.1 | 5.57 | 3.44 | 5.59 | 5.65 | 4.1 | 3.77 | 5.59 | 7.47 | 8.4 | 7.76 | 7.62 |
| Nd | 10.7 | 18 | 21.5 | 14.8 | 21.6 | 21.7 | 18.5 | 17.4 | 22.2 | 27.9 | 31.9 | 31.8 | 31 |
| Sm | 2.92 | 4.49 | 3.86 | 3.56 | 4.15 | 4.15 | 4.68 | 4.49 | 4.75 | 4.76 | 5.94 | 6.41 | 6.09 |
| Eu | 1.15 | 1.55 | 1.07 | 1.12 | 1.12 | 1.18 | 1.46 | 1.44 | 1.33 | 1.18 | 1.06 | 1.78 | 1.71 |
| Gd | 3 | 4.56 | 3.31 | 3.46 | 3.58 | 3.67 | 4.29 | 4.21 | 4.33 | 3.74 | 5.33 | 5.58 | 5.3 |
| Tb | 0.6 | 0.91 | 0.51 | 0.68 | 0.58 | 0.55 | 0.85 | 0.84 | 0.75 | 0.51 | 0.87 | 0.91 | 0.87 |
| Dy | 3.78 | 5.5 | 2.63 | 4.35 | 3.02 | 2.96 | 5.15 | 5.14 | 4.34 | 2.43 | 5.06 | 4.96 | 4.79 |
| Ho | 0.76 | 1.1 | 0.49 | 0.88 | 0.57 | 0.56 | 1.01 | 1.02 | 0.84 | 0.45 | 1 | 0.95 | 0.9 |
| Er | 2.12 | 3.08 | 1.41 | 2.51 | 1.6 | 1.56 | 2.81 | 2.9 | 2.41 | 1.33 | 3.01 | 2.64 | 2.52 |
| Tm | 0.31 | 0.46 | 0.2 | 0.37 | 0.23 | 0.22 | 0.42 | 0.42 | 0.35 | 0.18 | 0.46 | 0.38 | 0.36 |
| Yb | 1.92 | 2.82 | 1.25 | 2.29 | 1.44 | 1.41 | 2.61 | 2.67 | 2.21 | 1.13 | 2.96 | 2.35 | 2.23 |
| Lu | 0.29 | 0.43 | 0.19 | 0.34 | 0.22 | 0.21 | 0.4 | 0.4 | 0.35 | 0.17 | 0.46 | 0.36 | 0.34 |
| Y | 20.6 | 28.9 | 14 | 23.5 | 15.4 | 15.9 | 29 | 27.2 | 24.6 | 12.8 | 30.9 | 25.2 | 25.5 |

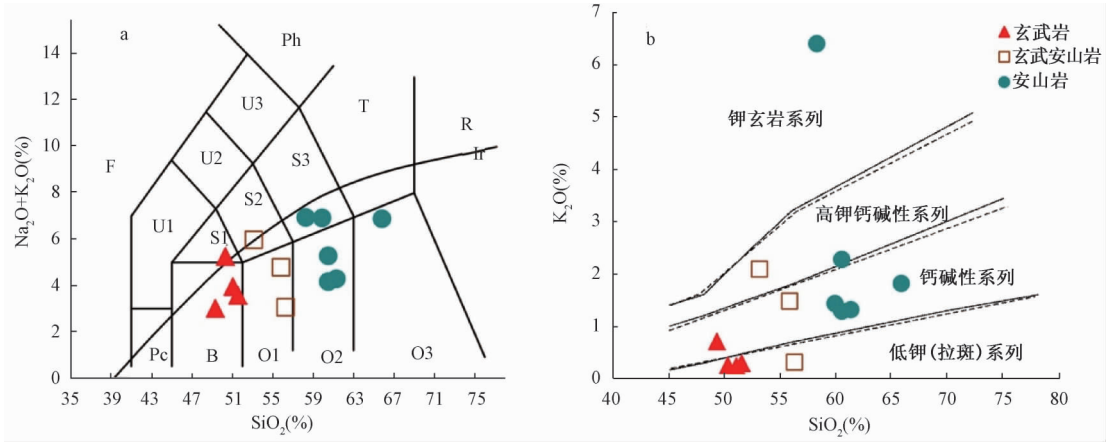


图3 乌兰敖包火山岩 $K_2O + Na_2O - SiO_2$ 图解 (a) 和 $K_2O - SiO_2$ 图解 (b) (底图据^[34])

Fig. 3 Diagrams of $K_2O + Na_2O - SiO_2$ (a) and $K_2O - SiO_2$ (b) of the volcanic rocks in Wulanaobao area

中最少 4.02%；CaO 与 SiO_2 呈负相关，在玄武岩中含量最高为 10.51%，玄武安山岩中次之为 7.67%，安山岩中最少 6.90%； Na_2O 在不同岩性之间变化不明显，分布在 0.53 ~ 5.49% 之间，平均值为 3.39%； K_2O 与 SiO_2 呈正相关，在玄武岩中平均含量较低 0.37%，玄武安山岩中为 1.30%，安山岩中为 2.42%。在 $SiO_2 - K_2O$ 图解中多数样品落于钙碱性系列，4 个样品落入低钾系列，1 个样品落入高钾系列（见图 3b）。

研究区火山岩的稀土元素特征差异较大（图 4d-f）。玄武岩中稀土总量变化较小，在 54.82 ~ 92.40 ppm 之间，平均为 77.5 ppm，在配分模式图中曲线略微右倾，LREE/HREE 值在 3.29 ~ 4.15 之间， La_N/Yb_N 值在 2.88 ~ 3.85 之间， δEu 异常不明显；玄武安山岩中稀土总量变化范围较大，在 80.4 ~ 154.88 ppm 之间，平均值为 128.97 ppm，配分模式图中曲线右倾程度大于玄武岩，LREE/HREE 值在 3.57 ~ 7.76 之间， La_N/Yb_N 值在 2.77 ~ 8.85 之间， δEu 呈现出弱负异常，平均值为 0.93；安山岩中稀土总量变化较小，在 112.3 ~ 167.15 ppm，平均值为 127.78 ppm，配分模式图中曲线右倾明显，LREE/HREE 值在 6.52 ~ 13.24 之间， La_N/Yb_N 值在 6.91 ~ 18.47 之间， δEu 异常明显，平均值为 0.82。

在微量元素蛛网图中，研究区火山岩具有同源演化的特征，但不同岩石类型之间有一定差异（图 4a-c）。图中玄武岩的曲线整体较平坦，有两件样品具有较强烈的 U、Ba 富集和 Ta、Nb 的弱亏损，K 呈较弱的亏损；玄武安山岩的曲线较一致，Ta、Nb 和 P 呈亏损；安山岩的曲线具有典型的弧

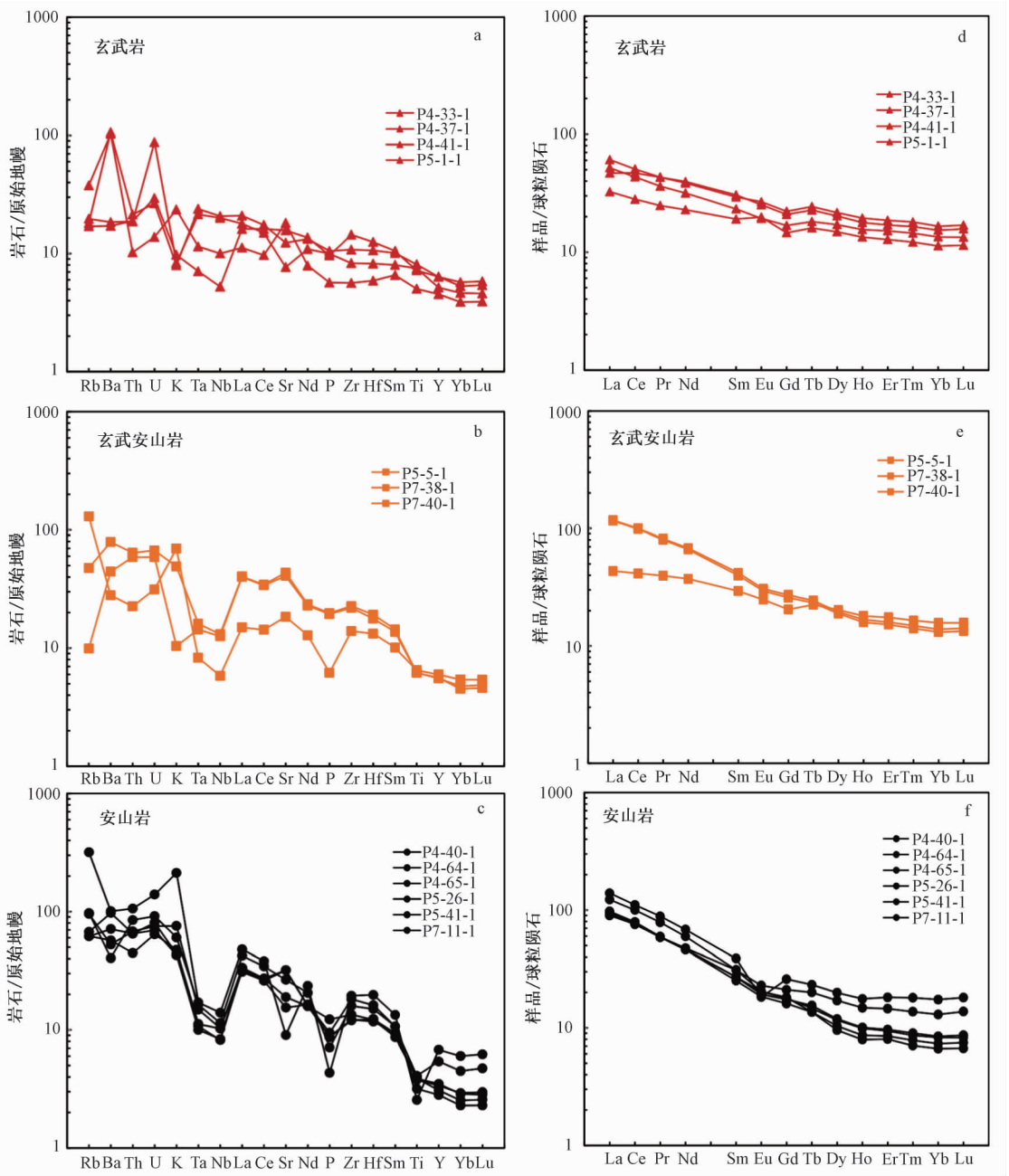
火山岩的特征，Ta、Nb、P 和 Ti 明显亏损，Ba、K 具有弱富集特征。

4 年代学及 Hf 同位素特征

研究区的玄武岩中矿物颗粒细小、结晶程度差，岩石中锆石难以挑选，所以选择玄武安山岩（P7-38-1）和安山岩（P5-48-1）挑选锆石，并以此代表该套火山岩的形成时代分析结果见表 2。

P5-48-1 为灰绿色块状安山岩，采自那仁宝力格幅苏海音高勒东约 1 km 处，锆石整体形态不一致，锆石 CL 图像亮度不一致，形态多数呈不规则状，内部环带较不清晰，部分可见继承核；少数呈半自形短柱状，内部可见板状岩浆振荡环带或扇形结构，为典型中-基性岩浆锆石（见图 5）。该样品测试结果较复杂，其中 2424 Ma、1337 Ma 以及 ± 463 Ma 的锆石具有明显的熔蚀边，个别锆石粒度较大，具有酸性岩浆锆石的特征，该部分锆石应为从围岩中捕获；237 Ma、253 Ma、264 Ma 年龄孤立且唯一，可能受后期地质作用影响，同位素体系发生变化； ± 280 Ma 的年龄较为集中，锆石发育板状岩浆振荡环带，个别具有扇形结构，整体粒度较细小，具有中-基性岩浆锆石的特征，其加权平均年龄为 285.0 ± 2.3 Ma（图 6），可以代表该安山岩喷出时代。

P7-38-1 为灰绿色块状玄武安山岩，采自那仁宝力格幅达日其格图西北约 2 km 处，锆石整体形态不一致，锆石 CL 图像亮度不一致，形态多数呈不规则状，内部环带较不清晰，部分可见继承核；



a、b、c—火山岩微量元素蛛网图，d、e、f—稀土配分模式图

图4 乌兰敖包火山岩稀土元素及微量元素特征

Fig. 4 Trace elements spiderdiagram (a - c) and rare earth distribution pattern (d - f) of the volcanic rocks in Wulanaobao area

少数呈半自形短柱状，内部可见板状岩浆振荡环带或扇形结构，为典型中-基性岩浆锆石（见图5）。该样品测试结果较复杂，其中2165 Ma、1858 Ma、±465 Ma以及±415 Ma为捕获锆石；156 Ma和205 Ma的锆石可能受后期地质作用影响；±265 Ma的锆石年龄较为集中，锆石细小并具有中-基性岩浆锆石的特征，其加权平均年龄为 265.0 ± 1.5 Ma（见图6），可以代表该玄武安山岩喷出时代。

锆石 Hf 同位素分析结果列于表3，两件样品

Hf 同位素组成不均一。P5-48-1 样品受锆石数量及大小制约，仅获得3个有效结果。结果显示（见图7）2颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值分别为0.282339和0.282481对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-6.5和-3.2，可能代表岩浆源区混有壳源物质；1颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 较高为0.282876，对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为11.1，可能代表幔源物质对岩浆的贡献。P7-38-1 样品测试结果分为2类（见图7）：部分锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值较低，在0.282389~0.282421之

表2 乌兰敖包火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析数据

Table 2 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis data of the volcanic rocks in Wulanaobao area

| 样品号 | 含量 ($\times 10^{-6}$) | | 同位素比值 | | | | | | 年龄 (Ma) | | | | | |
|---------------|-------------------------|------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| | Pb | U | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 σ |
| P5. 48. 1. 1 | 5 | 91 | 0. 0449 | 0. 0005 | 0. 3248 | 0. 0173 | 0. 0524 | 0. 0028 | 283 | 3 | 286 | 15 | 304 | 120 |
| P5. 48. 1. 2 | 7 | 79 | 0. 0753 | 0. 0008 | 0. 5862 | 0. 0092 | 0. 0565 | 0. 0007 | 468 | 5 | 468 | 7 | 470 | 29 |
| P5. 48. 1. 3 | 25 | 575 | 0. 0374 | 0. 0004 | 0. 3468 | 0. 0045 | 0. 0673 | 0. 0008 | 237 | 2 | 302 | 4 | 846 | 23 |
| P5. 48. 1. 4 | 47 | 85 | 0. 4566 | 0. 0054 | 9. 8848 | 0. 1433 | 0. 1570 | 0. 0018 | 2424 | 29 | 2424 | 35 | 2424 | 19 |
| P5. 48. 1. 5 | 51 | 209 | 0. 2304 | 0. 0024 | 2. 7059 | 0. 0505 | 0. 0852 | 0. 0016 | 1337 | 14 | 1330 | 25 | 1319 | 36 |
| P5. 48. 1. 6 | 10 | 190 | 0. 0452 | 0. 0006 | 0. 5302 | 0. 0596 | 0. 0850 | 0. 0097 | 285 | 4 | 432 | 49 | 1315 | 221 |
| P5. 48. 1. 7 | 2 | 24 | 0. 0745 | 0. 0009 | 0. 5860 | 0. 0096 | 0. 0570 | 0. 0007 | 463 | 6 | 468 | 8 | 493 | 28 |
| P5. 48. 1. 8 | 22 | 301 | 0. 0745 | 0. 0007 | 0. 6258 | 0. 0086 | 0. 0609 | 0. 0007 | 463 | 5 | 493 | 7 | 635 | 26 |
| P5. 48. 1. 9 | 21 | 437 | 0. 0451 | 0. 0005 | 0. 4123 | 0. 0218 | 0. 0663 | 0. 0034 | 284 | 3 | 351 | 19 | 817 | 107 |
| P5. 48. 1. 10 | 6 | 110 | 0. 0546 | 0. 0006 | 0. 4024 | 0. 0072 | 0. 0535 | 0. 0009 | 342 | 3 | 343 | 6 | 350 | 37 |
| P5. 48. 1. 11 | 16 | 348 | 0. 0456 | 0. 0005 | 0. 3264 | 0. 0055 | 0. 0519 | 0. 0008 | 287 | 3 | 287 | 5 | 283 | 34 |
| P5. 48. 1. 12 | 20 | 314 | 0. 0633 | 0. 0007 | 0. 4743 | 0. 0079 | 0. 0544 | 0. 0008 | 395 | 4 | 394 | 7 | 386 | 35 |
| P5. 48. 1. 13 | 21 | 260 | 0. 0744 | 0. 0008 | 0. 5765 | 0. 0124 | 0. 0562 | 0. 0011 | 462 | 5 | 462 | 10 | 462 | 44 |
| P5. 48. 1. 14 | 10 | 215 | 0. 0450 | 0. 0005 | 0. 3717 | 0. 0068 | 0. 0599 | 0. 0010 | 284 | 3 | 321 | 6 | 602 | 36 |
| P5. 48. 1. 15 | 28 | 334 | 0. 0746 | 0. 0008 | 0. 6395 | 0. 0099 | 0. 0622 | 0. 0008 | 464 | 5 | 502 | 8 | 680 | 29 |
| P5. 48. 1. 16 | 33 | 736 | 0. 0418 | 0. 0004 | 0. 4249 | 0. 0058 | 0. 0738 | 0. 0009 | 264 | 3 | 360 | 5 | 1035 | 24 |
| P5. 48. 1. 17 | 11 | 222 | 0. 0454 | 0. 0005 | 0. 3257 | 0. 0116 | 0. 0521 | 0. 0018 | 286 | 3 | 286 | 10 | 288 | 79 |
| P5. 48. 1. 18 | 6 | 130 | 0. 0399 | 0. 0008 | 0. 2851 | 0. 0091 | 0. 0518 | 0. 0010 | 253 | 5 | 255 | 8 | 275 | 44 |
| P5. 48. 1. 19 | 18 | 150 | 0. 0890 | 0. 0009 | 5. 4437 | 0. 1236 | 0. 4436 | 0. 0097 | 550 | 6 | 1892 | 43 | 4064 | 33 |
| P5. 48. 1. 20 | 12 | 155 | 0. 0744 | 0. 0009 | 0. 5824 | 0. 0701 | 0. 0568 | 0. 0069 | 463 | 6 | 466 | 56 | 482 | 270 |
| P5. 48. 1. 21 | 3 | 53 | 0. 0454 | 0. 0005 | 0. 3240 | 0. 0055 | 0. 0518 | 0. 0008 | 286 | 3 | 285 | 5 | 277 | 35 |
| P5. 48. 1. 22 | 16 | 214 | 0. 0745 | 0. 0007 | 0. 5782 | 0. 0082 | 0. 0563 | 0. 0007 | 463 | 5 | 463 | 7 | 465 | 28 |
| P5. 48. 1. 23 | 24 | 286 | 0. 0799 | 0. 0009 | 0. 6299 | 0. 0354 | 0. 0572 | 0. 0031 | 495 | 5 | 496 | 28 | 500 | 120 |
| P5. 48. 1. 24 | 9 | 149 | 0. 0596 | 0. 0006 | 0. 4439 | 0. 0062 | 0. 0540 | 0. 0007 | 373 | 4 | 373 | 5 | 371 | 28 |
| P7. 38. 1. 1 | 28 | 435 | 0. 0665 | 0. 0006 | 0. 5067 | 0. 0048 | 0. 0553 | 0. 0004 | 415 | 4 | 416 | 4 | 423 | 17 |
| P7. 38. 1. 2 | 30 | 481 | 0. 0663 | 0. 0006 | 0. 5033 | 0. 0049 | 0. 0551 | 0. 0004 | 414 | 4 | 414 | 4 | 416 | 18 |
| P7. 38. 1. 3 | 30 | 482 | 0. 0668 | 0. 0006 | 0. 5055 | 0. 0070 | 0. 0549 | 0. 0007 | 417 | 4 | 415 | 6 | 408 | 29 |
| P7. 38. 1. 4 | 16 | 374 | 0. 0416 | 0. 0004 | 0. 2952 | 0. 0027 | 0. 0514 | 0. 0005 | 263 | 2 | 263 | 2 | 259 | 21 |
| P7. 38. 1. 5 | 26 | 386 | 0. 0667 | 0. 0005 | 0. 5070 | 0. 0250 | 0. 0552 | 0. 0027 | 416 | 3 | 416 | 21 | 418 | 109 |
| P7. 38. 1. 6 | 5 | 92 | 0. 0423 | 0. 0004 | 0. 3842 | 0. 0035 | 0. 0659 | 0. 0005 | 267 | 2 | 330 | 3 | 802 | 17 |
| P7. 38. 1. 7 | 23 | 371 | 0. 0664 | 0. 0005 | 0. 5121 | 0. 0073 | 0. 0559 | 0. 0008 | 415 | 3 | 420 | 6 | 448 | 30 |
| P7. 38. 1. 8 | 25 | 56 | 0. 3991 | 0. 0029 | 6. 9921 | 0. 0553 | 0. 1271 | 0. 0010 | 2165 | 15 | 2110 | 17 | 2058 | 14 |
| P7. 38. 1. 9 | 187 | 570 | 0. 3341 | 0. 0025 | 5. 2104 | 0. 0646 | 0. 1131 | 0. 0015 | 1858 | 14 | 1854 | 23 | 1850 | 24 |
| P7. 38. 1. 10 | 17 | 207 | 0. 0737 | 0. 0005 | 0. 5721 | 0. 0091 | 0. 0563 | 0. 0009 | 458 | 3 | 459 | 7 | 465 | 35 |
| P7. 38. 1. 11 | 14 | 181 | 0. 0756 | 0. 0005 | 0. 5894 | 0. 0129 | 0. 0565 | 0. 0012 | 470 | 3 | 470 | 10 | 473 | 48 |
| P7. 38. 1. 12 | 11 | 162 | 0. 0666 | 0. 0006 | 0. 5008 | 0. 0032 | 0. 0545 | 0. 0004 | 416 | 3 | 412 | 3 | 392 | 16 |
| P7. 38. 1. 13 | 35 | 566 | 0. 0666 | 0. 0005 | 0. 5189 | 0. 0048 | 0. 0565 | 0. 0005 | 416 | 3 | 424 | 4 | 472 | 18 |
| P7. 38. 1. 14 | 27 | 405 | 0. 0665 | 0. 0006 | 0. 5025 | 0. 0038 | 0. 0548 | 0. 0004 | 415 | 4 | 413 | 3 | 406 | 16 |
| P7. 38. 1. 15 | 38 | 610 | 0. 0662 | 0. 0005 | 0. 5038 | 0. 0046 | 0. 0552 | 0. 0004 | 414 | 3 | 414 | 4 | 419 | 15 |
| P7. 38. 1. 16 | 70 | 1739 | 0. 0416 | 0. 0004 | 0. 3040 | 0. 0021 | 0. 0529 | 0. 0004 | 263 | 3 | 270 | 2 | 326 | 17 |
| P7. 38. 1. 17 | 2 | 50 | 0. 0424 | 0. 0004 | 0. 3035 | 0. 0018 | 0. 0520 | 0. 0003 | 268 | 3 | 269 | 2 | 283 | 14 |
| P7. 38. 1. 18 | 55 | 897 | 0. 0664 | 0. 0005 | 0. 5107 | 0. 0088 | 0. 0558 | 0. 0010 | 414 | 3 | 419 | 7 | 444 | 40 |
| P7. 38. 1. 19 | 11 | 293 | 0. 0416 | 0. 0003 | 0. 3012 | 0. 0061 | 0. 0525 | 0. 0011 | 263 | 2 | 267 | 5 | 306 | 46 |
| P7. 38. 1. 20 | 10 | 230 | 0. 0419 | 0. 0003 | 0. 3075 | 0. 0031 | 0. 0533 | 0. 0006 | 264 | 2 | 272 | 3 | 340 | 25 |
| P7. 38. 1. 21 | 38 | 597 | 0. 0666 | 0. 0005 | 0. 5082 | 0. 0253 | 0. 0554 | 0. 0024 | 416 | 3 | 417 | 21 | 427 | 97 |
| P7. 38. 1. 22 | 15 | 343 | 0. 0425 | 0. 0005 | 0. 3996 | 0. 0164 | 0. 0682 | 0. 0028 | 268 | 3 | 341 | 14 | 873 | 85 |
| P7. 38. 1. 23 | 8 | 276 | 0. 0245 | 0. 0002 | 0. 1704 | 0. 0050 | 0. 0504 | 0. 0015 | 156 | 1 | 160 | 5 | 214 | 68 |
| P7. 38. 1. 24 | 22 | 294 | 0. 0665 | 0. 0005 | 0. 5050 | 0. 0034 | 0. 0550 | 0. 0004 | 415 | 3 | 415 | 3 | 414 | 15 |
| P7. 38. 1. 25 | 6 | 99 | 0. 0664 | 0. 0005 | 0. 5047 | 0. 0051 | 0. 0551 | 0. 0005 | 414 | 3 | 415 | 4 | 417 | 22 |
| P7. 38. 1. 26 | 24 | 611 | 0. 0421 | 0. 0003 | 0. 3240 | 0. 0020 | 0. 0559 | 0. 0003 | 266 | 2 | 285 | 2 | 447 | 14 |
| P7. 38. 1. 27 | 43 | 198 | 0. 2064 | 0. 0015 | 2. 5681 | 0. 0240 | 0. 0902 | 0. 0009 | 1210 | 9 | 1292 | 12 | 1430 | 19 |
| P7. 38. 1. 28 | 29 | 188 | 0. 1318 | 0. 0009 | 1. 2810 | 0. 0337 | 0. 0705 | 0. 0018 | 798 | 6 | 837 | 22 | 943 | 53 |
| P7. 38. 1. 29 | 21 | 656 | 0. 0323 | 0. 0002 | 0. 2353 | 0. 0024 | 0. 0528 | 0. 0005 | 205 | 1 | 215 | 2 | 319 | 23 |
| P7. 38. 1. 30 | 26 | 395 | 0. 0662 | 0. 0005 | 0. 5128 | 0. 0038 | 0. 0562 | 0. 0004 | 413 | 3 | 420 | 3 | 460 | 16 |
| P7. 38. 1. 31 | 31 | 501 | 0. 0666 | 0. 0005 | 0. 5143 | 0. 0034 | 0. 0560 | 0. 0004 | 416 | 3 | 421 | 3 | 453 | 16 |
| P7. 38. 1. 32 | 45 | 1054 | 0. 0419 | 0. 0003 | 0. 3193 | 0. 0074 | 0. 0552 | 0. 0013 | 265 | 2 | 281 | 7 | 422 | 52 |
| P7. 38. 1. 33 | 17 | 372 | 0. 0475 | 0. 0004 | 0. 3715 | 0. 0098 | 0. 0567 | 0. 0009 | 299 | 2 | 321 | 8 | 480 | 35 |
| P7. 38. 1. 34 | 22 | 323 | 0. 0667 | 0. 0012 | 0. 5026 | 0. 0097 | 0. 0547 | 0. 0010 | 416 | 8 | 413 | 8 | 399 | 42 |
| P7. 38. 1. 35 | 11 | 165 | 0. 0672 | 0. 0006 | 0. 5067 | 0. 0037 | 0. 0546 | 0. 0004 | 420 | 3 | 416 | 3 | 398 | 16 |

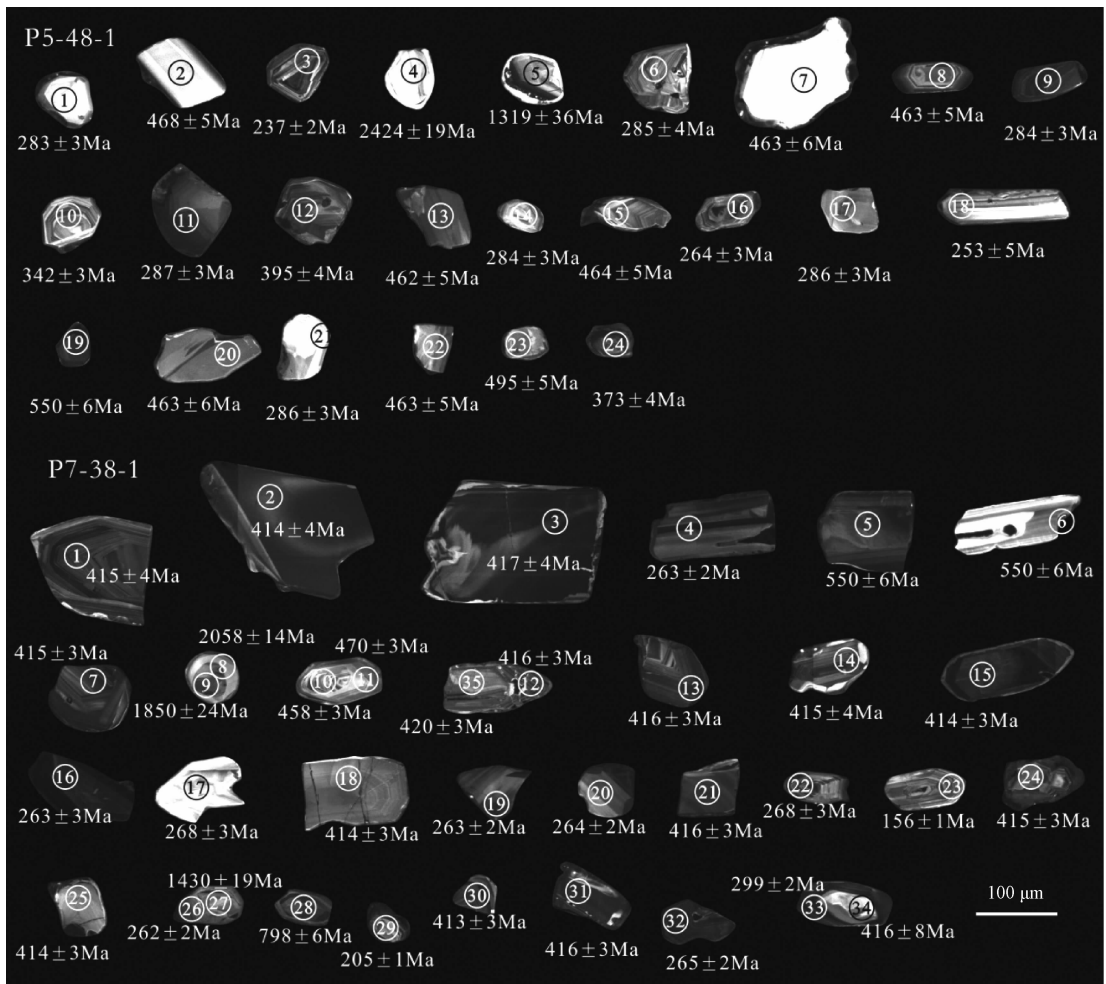


图5 乌兰敖包火山岩锆石 CL 图像

Fig. 5 Zircon CL images of the volcanic rocks in Wulanaobao area

间, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负, 平均值为 -6.0 ; 另一部分 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 初始值较高, 在 $0.282609 \sim 0.282621$ 之间, 对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正, 平均值为 2.9 。

5 讨论

5.1 火山岩形成时代及喷发基底特征

本文中获得的火山岩中安山岩和玄武安山岩中的锆石加权平均年龄分别为 $285.0 \pm 2.3 \text{ Ma}$ 和 $265.0 \pm 1.5 \text{ Ma}$, 代表火山岩的形成时代, 为早一中二叠世。

研究区火山岩位于元古宙宝音图群、石炭系以及奥陶纪-志留纪花岗岩之上, 火山角砾岩中可见上述地层或岩体的角砾。由于基性岩浆中的自生锆石较少, 多捕获锆石, 所以样品中捕获锆石特征对基底也有所反映。样品中捕获的锆石年龄

主要集中在以下几个年龄段: 1) 中元古代以前, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄主要为 1319 Ma 、 1403 Ma 、 1850 Ma 、 2508 Ma 、 2424 Ma , 该年龄段的锆石普遍具有核-幔构造, 且边部圆滑, 具有熔蚀特征。研究区出露的宝音图群沉积年龄下限年龄为 $\sim 1426 \text{ Ma}$ ^[36], 所以上述锆石可能来自宝音图群。而宝音图群为华北陆块的一部分^[36, 37], 并接受了古生代以来的构造-岩浆事件。2) 中奥陶世, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中在 $460 \sim 470 \text{ Ma}$ 之间, 且锆石数量多达 10 个, CL 图像上亮度较均一, 少数具有核幔结构, 多数具有典型酸性岩浆锆石的振荡环带, 可能为捕获岩体的锆石。研究区火山岩附近出露有奥陶纪灰红色片麻状中细粒花岗闪长岩和灰红色片麻状中细粒二长花岗岩, 岩石具有弱片麻状构造, 测得该岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $468.4 \text{ Ma} \pm 1.7 \text{ Ma}$, 且形成于古亚洲洋向华北板块俯冲的背景下。3) 晚志留世-早泥盆世, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集

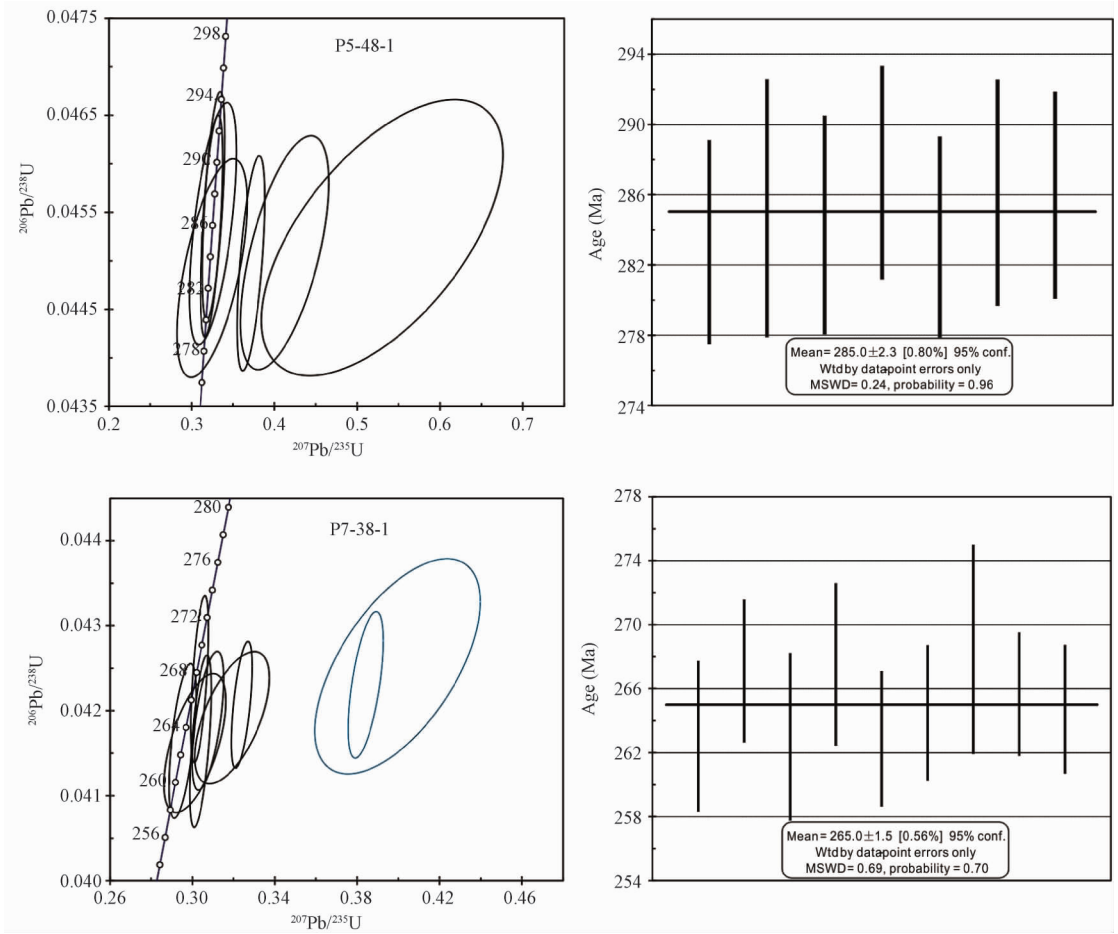


图6 乌兰敖包火山岩锆石 U-Pb 谐和图及加权平均年龄

Fig. 6 Zircon U-Pb Concordia diagram and weighted average age of the volcanic rocks in Wulanaobao area

表3 乌兰敖包火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析数据

Table 3 LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotope analysis data of the volcanic rocks in Wulanaobao area

| 分析号 | t (Ma) | ¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf | ¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf | ¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf | ¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf (i) | 2s | εHf (0) | εHf (t) | t _{DM1} | t _{DM2} | f _{Lu/Hf} |
|---------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------|---------|---------|------------------|------------------|--------------------|
| P7. 38. 1. 1 | 265 | 0. 0006 | 0. 0173 | 0. 282421 | 0. 282389 | 0. 000015 | - 12. 4 | - 6. 7 | 1164 | 1710 | - 0. 98 |
| P7. 38. 1. 2 | 265 | 0. 0012 | 0. 0385 | 0. 282713 | 0. 282652 | 0. 000019 | - 2. 1 | 3. 5 | 769 | 1062 | - 0. 96 |
| P7. 38. 1. 3 | 265 | 0. 0011 | 0. 0326 | 0. 282446 | 0. 282391 | 0. 000015 | - 11. 5 | - 5. 9 | 1143 | 1659 | - 0. 97 |
| P7. 38. 1. 4 | 265 | 0. 0013 | 0. 0378 | 0. 282680 | 0. 282612 | 0. 000023 | - 3. 3 | 2. 3 | 818 | 1138 | - 0. 96 |
| P7. 38. 1. 5 | 265 | 0. 0006 | 0. 0130 | 0. 282426 | 0. 282397 | 0. 000020 | - 12. 2 | - 6. 5 | 1155 | 1697 | - 0. 98 |
| P7. 38. 1. 6 | 265 | 0. 0012 | 0. 0330 | 0. 282481 | 0. 282421 | 0. 000015 | - 10. 3 | - 4. 7 | 1097 | 1582 | - 0. 96 |
| P7. 38. 1. 13 | 265 | 0. 0015 | 0. 0415 | 0. 282686 | 0. 282609 | 0. 000019 | - 3. 1 | 2. 5 | 814 | 1127 | - 0. 95 |
| P7. 38. 1. 14 | 265 | 0. 0016 | 0. 0469 | 0. 282703 | 0. 282621 | 0. 000022 | - 2. 4 | 3. 1 | 791 | 1088 | - 0. 95 |
| P5. 48. 2 | 285 | 0. 0015 | 0. 0443 | 0. 282420 | 0. 282339 | 0. 000015 | - 12. 5 | - 6. 5 | 1192 | 1710 | - 0. 96 |
| P5. 48. 4 | 285 | 0. 0004 | 0. 0145 | 0. 282505 | 0. 282481 | 0. 000014 | - 9. 4 | - 3. 2 | 1042 | 1506 | - 0. 99 |
| P5. 48. 7 | 285 | 0. 0007 | 0. 0185 | 0. 282914 | 0. 282876 | 0. 000028 | 5. 0 | 11. 1 | 476 | 591 | - 0. 98 |

中在 410 ~ 420 Ma 之间, 锆石 CL 图像上亮度较一致, 粒度相当, 内部岩浆振荡环带清晰, 部分具有变质边, 且具有熔蚀特征。类似的, 在火山岩出露附近发现有 413.6 ± 1.8 Ma 的深灰色细粒石英闪长岩^[33] 和 418.0 ± 2.3 Ma 的二云母花岗岩^[38], 该套岩体形成与同碰撞阶段, 反映早古生代末期的华北北缘地壳显著增生, 且该次构造事件规模

巨大, 在达茂旗一白乃庙一带也有响应^[20, 22, 39, 40]。从乌兰敖包地区火山岩与下伏地层接触关系及岩石中捕获的锆石来看, 其喷发基地为华北陆块北缘, 即古亚洲洋与华北板块俯冲带南侧陆壳上。

5.2 岩浆起源、演化与火山岩形成的大地构造环境

玄武质岩浆起源于地幔橄榄岩的部分熔融,

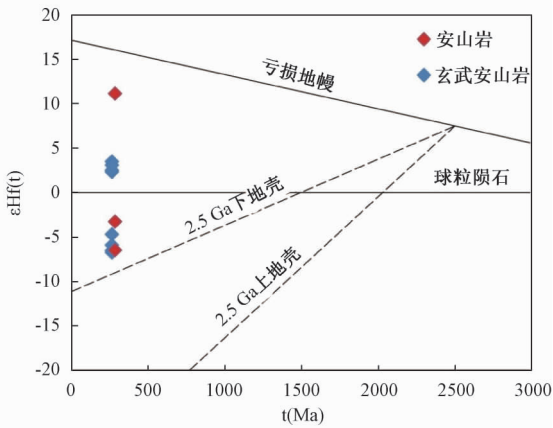


图7 乌兰敖包火山岩岩浆锆 Hf 同位素组成
(底图据^[35])

Fig. 7 Zircon Hf isotope composition of the volcanic magma in Wulanaobao area

但不同构造位置产生的岩浆,其地球化学特征不尽相同。研究区火山岩都具有不同程度的 Ta、Nb 亏损, U、Ba、K 等大离子亲石元素富集,这与同时期来自富集地幔的乌拉特中旗温更地区北七哥陶辉长岩岩体地球化学特征一致^[10],反映其熔融地幔源区受到了来自俯冲板片的改造,具有弧火山岩的特征。锆石 Hf 同位素同样具有示踪功能,且能更好反应岩浆的混合或同化作用^[35],由于 Hf 其特殊的地球化学性质,流体携带 Hf 能力有限,因此 Hf 受到俯冲板片流体交代的影响较小^[41],仍能反映物源的特征。本文中锆石 Hf 同位素明显分为两类,其中一类¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 初始值较高,最高可达 0.282876,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 11.1,虽然测试结果数量上较少,但至少反映其物源有长期亏损的地幔物质的贡献。另一类锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 初始值较低,对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 均为负,则表明其岩浆源区受到过地壳物质的混染或来自于富集型地幔,而锆石测试结果显示岩浆起源于长期亏损 Hf 同位素的地幔,所以¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 初始值较低,表明岩浆源区有地壳物质的贡献。在研究区南侧发现同时代的酸性火山岩,推测壳源物质的贡献方式为岩浆混合。

关于乌兰敖包玄武质岩石形成的构造环境存在如下几种观点:(1)该套玄武岩是在伸展体制下形成^[4, 17, 38]; (2)石炭纪-早二叠世华北陆块北缘存在广泛的大陆边缘弧^[24-26, 28]或大洋岛弧^[29, 30]。造山后伸展体制下的玄武岩以碱性玄武岩居多,且相对富集 HFSE^[42],前人多是依据出现

碱性花岗岩体或双峰式火山岩作为造山后伸展的标志^[38],但是越来越多的研究表明,双峰式火山岩的产出环境不仅限于伸展体制下^[42, 43]而碱性花岗岩也可能形成于俯冲带后撤所导致的伸展及板片断离引起的软流圈上涌。岛弧火山岩多是发育在洋壳或过渡型地壳之上,成分上主体为一套低钾钙碱性玄武岩-安山岩系列。研究区的火山岩发育在华北北缘元古代基底之上,且明显富集 Ba、Rb、Th、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,具有活动大陆边缘火山岩的特点, $\text{TiO}_2 * 10 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} * 10$ 图解(见图 8)中火山岩多数落入岛弧、造山带玄武岩-安山岩区。研究区火山岩比北侧的索伦山 SSZ 型蛇绿岩(299~290 Ma)^[28]略晚,与华北陆块北缘闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩共同构成一个大陆边缘弧。

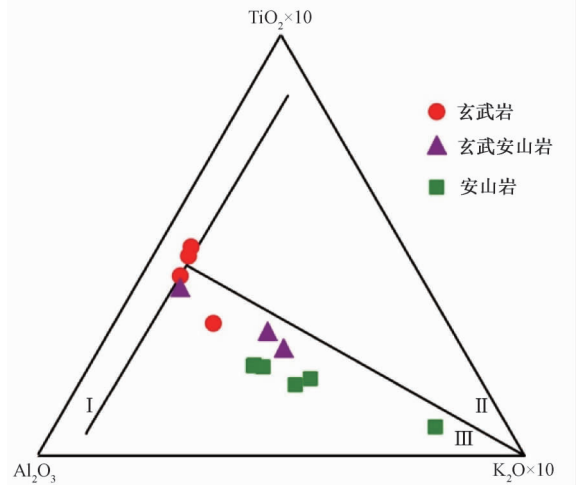


图8 乌兰敖包火山岩 A (Al_2O_3)-T ($\text{TiO}_2 \times 10$)-K ($\text{K}_2\text{O} \times 10$) 图解(底图据^[44])

Fig. 8 The A (Al_2O_3)-T ($\text{TiO}_2 \times 10$)-K ($\text{K}_2\text{O} \times 10$) diagram of the volcanic rocks in Wulanaobao area

5.3 关于古亚洲洋闭合时间的探讨

研究区出露的古生代地层主要为晚石炭世阿木山组和中下二叠统火山岩。阿木山组为一套滨海-浅海的沉积环境,底部为主要为碎屑岩,可见火山岩碎屑,顶部为海相灰岩,存在大量珊瑚化石,沉积构造位置为前陆盆地;中下二叠统火山岩与研究区东侧的早中二叠世(辉长岩)闪长岩-花岗闪长岩侵入体共同构成大陆边缘岩浆弧。恩格尔乌苏地区硅质岩中的放射虫^[45],索伦地区硅质岩中的放射虫^[46],以及在索伦-西拉木伦断裂两侧古生物的研究^[47],均表明二叠纪末期两大板块之间已经基本拼合。古地磁的研究也支持早二叠

世之后西伯利亚板块开始快速向南漂移, 二叠纪末期 (~250 Ma) 和华北地块发生碰撞, 导致索伦缝合带的形成^[48]。关于古亚洲洋最终闭合时间的证据来自岩浆岩最多, 大量研究结果表明华北板块与西伯利亚板块最终闭合时间为二叠纪末—三叠纪初^[26, 49, 50], 而闭合时间不同地区不尽相同, 总体上西侧可能稍早于东侧^[23, 31]。研究区东侧发育有后碰撞环境的二长花岗岩-正长花岗岩岩石组合 (~250 Ma), 这与乌兰敖包地区火山岩 (最小年龄为 265 Ma) 共同限定了古亚洲洋的闭合时间为 265 Ma ~ 250 Ma。

6 结论

(1) 乌兰敖包地区火山岩为一套钙碱性玄武质岩石, 其中安山岩和玄武安山岩中的锆石的加权平均年龄分别为 $285.0 \pm 2.3\text{Ma}$ 和 $265.0 \pm 1.5\text{Ma}$, 为早—中二叠世。

(2) 岩石主、微量地球化学特征及 Hf 同位素特征显示, 研究区火山岩岩浆起源于受俯冲板片改造并长期亏损的地幔, 并在上升过程有地壳物质的加入。

(3) 早中二叠世研究区属于大陆边缘弧环境, 古亚洲洋继续向华北板块俯冲, 并在 265 Ma ~ 250 Ma 之间最终闭合。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98 (6): 1189 ~ 1217.
- [3] 邵济安, 何国琦, 唐克东. 华北北部二叠纪陆壳演化 [J]. *岩石学报*, 2015, 31 (1): 47 ~ 55.
SHAO Ji-an, HE Guo-qi, TANG Ke-dong. The evolution of Permian continental crust in northern part of North China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31 (1): 47 ~ 55.
- [4] 邵济安, 唐克东, 何国琦. 内蒙古早二叠世构造古地理的再造 [J]. *岩石学报*, 2014, 30 (7): 1858 ~ 1866.
SHAO Ji-an, TANG Ke-dong, HE Guo-qi. Early Permian tectono-palaeogeographic reconstruction of Inner Mongolia, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (7): 1858 ~ 1866.
- [5] 徐备, 陈斌. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 1997, 27 (3): 227 ~ 232.
XU Bei, CHEN Bin. Framework and evolution of the middle Paleozoic orogenic belt between Siberian and North China Plates in northern Inner Mongolia [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 40 (5): 463 ~ 469.
- [6] 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 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
WU Kang-lin. Geochemical characteristics and tectonic setting of Late Varisian period in Alashan block [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [7] 党彝, 赵虹, 林广春, 等. 内蒙古西部银根—额济纳旗盆地及邻区二叠纪火山岩的地球化学特征和构造环境 [J]. *地质通报*, 2011, 30 (6): 923 ~ 931.
DANG Ben, ZHAO Hong, LIN Guang-chun, et al. Geochemistry and tectonic setting of Permian volcanic rocks in Yingen-Ejin Banner basin and its neighboring areas, western Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (6): 923 ~ 931.
- [8] 张建军. 华北地块北缘西段巴彦诺尔公—狼山地区二叠纪牙马图岩体岩浆混合成因及其意义探讨 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2012.
ZHANG Jian-jun. Magma mixing origin of Yamatu Granite in Nuoergong-Langshan Area, western margin of North China Craton: In-situ zircon U-Pb, hafnium isotopic, petrology and geochemistry evidences [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [9] 李可, 张志诚, 冯志硕, 等. 内蒙古中部巴彦乌拉地区晚石炭世—早二叠世火山岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2014, 30 (7): 2041 ~ 2054.
LI Ke, ZHANG Zhi-cheng, FENG Zhi-shuo, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its geological significance of the Late-Carboniferous to Early-Permian volcanic rocks in Bayanwula area, the central of Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (7): 2041 ~ 2054.
- [10] 赵磊, 吴泰然, 罗红玲. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (10): 3071 ~ 3082.
ZHAO Lei, WU Tai-ran, LUO Hong-ling. SHRIMP U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbros in Urad Zhongqi area, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (10): 3071 ~ 3082.
- [11] 洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等. 兴安造山带正 ϵ (Nd, t) 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地学前缘*, 2000, 7 (2): 441 ~ 456.
HONG Da-wei, WANG Shi-guang, XIE Xi-lin, et al. Genesis of positive ϵ (Nd, t) granitoids in the Da Hinggan Mts. - Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (2): 441 ~ 456.
- [12] 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 1995, 25 (4):

- 418 ~ 426.
- HONG Da-wei, WANG Shi-guang, HAN Bao-fu, et al. Tectonic environment classification and its identification marks of alkali granite [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25 (4): 418 ~ 426.
- [13] 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 Da-wei, HUANG Huai-zeng, XIAO Yi-jun, et al. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68 (3): 219 ~ 230.
- [14] Zhang X H, Zhang H F, Tang Y J, et al. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249 (3/4): 262 ~ 281.
- [15] 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 乌拉特中旗二叠纪 I 型花岗岩类地球化学特征及构造意义 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2010, 46 (5): 805 ~ 820.
- LUO Hong-ling, WU Tai-ran, ZHAO Lei. Geochemistry and tectonic implications of the Permian I-type granitoids from Urad Zhongqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46 (5): 805 ~ 820.
- [16] 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 华北板块北缘乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义 [J]. *岩石学报*, 2009, 25 (3): 515 ~ 526.
- LUO Hong-ling, WU Tai-ran, ZHAO Lei. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuliangsitai A-type granite on the northern margin of the North China plate and tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (3): 515 ~ 526.
- [17] 罗红玲, 吴泰然, 李毅. 乌拉特中旗克布岩体的地球化学特征及 SHRIMP 定年: 早二叠世华北克拉通底侵作用的证据 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (4): 755 ~ 766.
- LUO Hong-ling, WU Tai-ran, LI Yi. Geochemistry and SHRIMP dating of the Kebu massif from Wulatezhongqi, Inner Mongolia: Evidence for the Early Permian underplating beneath the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (4): 755 ~ 766.
- [18] 张晋瑞, 初航, 魏春景, 等. 内蒙古中部构造混杂带晚古生代 - 早中生代变质基性岩的地球化学特征及其大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 2014, 30 (7): 1935 ~ 1947.
- ZHANG Jin-rui, CHU Hang, WEI Chun-jing, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Late Paleozoic-Early Mesozoic meta-basic rocks in the mélange zones, Central Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (7): 1935 ~ 1947.
- [19] Cao H H, Xu W L, Pei F P, et al. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block [J]. *Lithos*, 2013, 170/171: 191 ~ 207.
- [20] 张维, 简平. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学 [J]. *地质学报*, 2008, 82 (6): 778 ~ 787.
- ZHANG Wei, JIAN Ping. SHRIMP dating of early Paleozoic granites from north Damaoqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (6): 778 ~ 787.
- [21] 陶继雄, 许立权, 贺锋, 等. 内蒙古巴特敖包地区早古生代洋壳消减的岩石证据 [J]. *地质调查与研究*, 2005, 28 (1): 1 ~ 8.
- TAO Ji-xiong, XU Li-quan, HE Feng, et al. Petrological evidence for subduction of the early Paleozoic Oceanic Crust in Bart-Obo, Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28 (1): 1 ~ 8.
- [22] 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.
- [23] 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, 29 (6): 824 ~ 842.
- ZHANG Shuan-hong, ZHAO Yue, LIU Jian-min, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29 (6): 824 ~ 842.
- [24] 刘军, 武广, 李铁刚, 等. 内蒙古镶黄旗哈达庙地区晚古生代中酸性侵入岩的年代学、地球化学、Sr-Nd 同位素组成及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2014, 30 (1): 95 ~ 108.
- LIU Jun, WU Guang, LI Tie-gang, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry, Sr-Nd isotopic analysis of the Late Paleozoic intermediate-acidic intrusive rocks in the Hadamiao area, Xianghuang Banner, Inner Mongolia and its geological significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (1): 95 ~ 108.
- [25] 王挽琼, 徐仲元, 刘正宏, 等. 华北板块北缘中段早中二叠世的构造属性: 来自花岗岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学的制约 [J]. *岩石学报*, 2013, 29 (9): 2987 ~ 3003.
- WANG Wan-qiong, XU Zhong-yuan, LIU Zheng-hong, et al. Early-Middle Permian tectonic evolution of the central-northern margin of the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb ages and geochemistry of the granitoids [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29 (9): 2987 ~ 3003.
- [26] 张维, 简平. 华北北缘固阳二叠纪闪长岩 - 石英闪长岩 - 英云闪长岩套 SHRIMP 年代学 [J]. *中国地质*, 2012, 39 (6): 1593 ~ 1603.
- ZHANG Wei, JIAN Ping. SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite-quartz diorite-tonalite suite in the northern margin of the North China Craton [J]. *Geology in China*, 2012, 39 (6): 1593 ~ 1603.
- [27] 王挽琼, 刘正宏, 王兴安, 等. 内蒙古乌拉特中旗海西期黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2012, 42 (6): 1771 ~ 1782.
- WANG Wan-qiong, LIU Zheng-hong, WANG Xing-an, et al. SHRIMP U-Pb dating of the zircon from the hercynian biotite monzonitic granites in Urad Zhongqi, Inner Mongolia, and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth*

- Science Edition), 2012, 42 (6): 1771 ~ 1782.
- [28] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 2010, 118 (1/2): 169 ~ 190.
- [29] 陶继雄, 白立兵, 宝音乌力吉, 等. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录 [J]. *地质调查与研究*, 2003, 26 (4): 241 ~ 249.
TAO Ji-xiong, BAI Li-bing, BAOYin-wu-li-ji, et al. Rock record of Permian subducting orogenic process in Mandula, Inner Mongolia [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26 (4): 241 ~ 249.
- [30] 王忠. 内蒙古床金庙地区早二叠世火山岩特征 [J]. *内蒙古地质*, 2001, (3): 16 ~ 22.
WANG Zhong. Characteristics of volcanic rocks of Lower Permian in Chuangjinmiao area, Inner Mongolia [J]. *Geology of Inner Mongolia*, 2001, (3): 16 ~ 22.
- [31] 柳长峰, 刘文灿, 周志广. 内蒙古四子王旗地区古生代 - 早中生代侵入岩活动期次、特征及构造背景 [J]. *地质学报*, 2014, 88 (6): 992 ~ 1002.
LIU Chang-feng, LIU Wen-can, ZHOU Zhi-guang. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Paleozoic-Early Mesozoic intrusive in Siziwangqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88 (6): 992 ~ 1002.
- [32] 张臣, 吴泰然. 内蒙古苏左旗南部华北板块北缘中新元古代 - 古生代裂解 - 汇聚事件的地质记录 [J]. *岩石学报*, 2001, 17 (2): 199 ~ 205.
ZHANG Chen, WU Tai-ran. Crack and assembly events of Meso-Neoproterozoic-Palaeozoic continental blocks in the southern area of Suzuoqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17 (2): 199 ~ 205.
- [33] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22 (4): 247 ~ 263.
- [34] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (2): 185 ~ 220.
WU Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (2): 185 ~ 220.
- [35] 孙立新, 赵凤清, 王惠初, 等. 内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U-Pb 年龄及构造意义 [J]. *地质学报*, 2013, 87 (2): 197 ~ 207.
SUN Li-xin, ZHAO Feng-qing, WANG Hui-chu, et al. Zircon U-Pb geochronology of metabase rocks from the Baoyintu Block in the Langshan area, Inner Mongolia, and its tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87 (2): 197 ~ 207.
- [36] 张玉清, 苏宏伟. 内蒙古宝音图岩群变质基性火山岩锆石 U-Pb 年龄及意义 [J]. *前寒武纪研究进展*, 2002, 25 (3/4): 199 ~ 204, 213.
ZHANG Yu-qing, SU Hong-wei. U-Pb single zircon ages of metamorphic basic volcanic rocks of Baoyintu Rock Group in Inner Mongolia [J]. *Progress in Precambrian Research*, 2002, 25 (3/4): 199 ~ 204, 213.
- [37] Wang Z Z, Han B F, Feng L X, et al. Geochronology, geochemistry and origins of the Paleozoic-Triassic plutons in the Langshan area, western Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 337 ~ 351.
- [38] Xu B, Charvet J, Chen Y, et al. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23 (4): 1342 ~ 1364.
- [39] Li Y L, Zhou H W, Brouwer F M, et al. Tectonic significance of the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China: Petrological, geochemical and U-Pb zircon age constraints [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42 (5): 1018 ~ 1029.
- [40] 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 等. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39 (5): 569 ~ 579.
GUO Feng, FAN Wei-ming, LI Chao-wen, et al. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52 (7): 940 ~ 951.
- [41] 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征 [J]. *岩石学报*, 2000, 16 (2): 169 ~ 173.
WANG Yan, QIAN Qing, LIU Liang, et al. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16 (2): 169 ~ 173.
- [42] 郑海飞, 陈斌, 孙楠, 等. 高压下玄武岩浆的不混溶及其对双峰式火山岩的成因意义 [J]. *岩石学报*, 2003, 19 (4): 745 ~ 751.
ZHENG Hai-fei, CHEN Bin, SUN Qiang, et al. Immiscibility of basalt magma at high pressure and its significance to the bimodal volcanic rock [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19 (4): 745 ~ 751.
- [43] 赵崇贺. 中基性火山岩成分的 ATK 图解与构造环境 [J]. *地质科技情报*, 1989, 8 (4): 1 ~ 5.
ZHAO Chong-he. The ATK diagram of basic-intermediate volcanic rocks and tectonic environment [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1989, 8 (4): 1 ~ 5.
- [44] 谢力, 尹海权, 周洪瑞, 等. 内蒙古阿拉善地区恩格尔乌苏缝合带二叠纪放射虫及其地质意义 [J]. *地质通报*, 2014, 33 (5): 691 ~ 697.
XIE Li, YIN Hai-quan, ZHOU Hong-rui, et al. Permian radiolarians from the Engeerwusu suture zone in Alxa area of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33 (5): 691 ~ 697.
- [45] 王惠, 王玉净, 陈志勇, 等. 内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫化石的发现 [J]. *地层学杂志*, 2005, 29 (4): 368 ~ 371.
WANG Hui, WANG Yu-jing, CHEN Zhi-yong, et al. Discovery of the Permian radiolarians from the Bayanaobao area, Inner Mongolia [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29 (4): 368 ~ 371.
- [46] 田树刚, 李子舜, 王峻涛, 等. 内蒙古东部及邻区石炭纪 -

- 二叠纪构造地层格架与形成环境 [J]. 地质通报, 2012, 31 (10): 1554 ~ 1564.
- TIAN Shu-gang, LI Zi-shun, WANG Jun-tao, et al. Carboniferous-Permian tectonic and stratigraphic framework of eastern Inner Mongolia as well as adjacent areas and its formation environment [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31 (10): 1554 ~ 1564.
- [47] 李朋武, 高锐, 管焯, 等. 内蒙古中部索伦 - 林西缝合带封闭时代的古地磁分析 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2006, 36 (5): 744 ~ 758.
- LI Peng-wu, GAO Rui, GUAN Ye, et al. Palaeomagnetic constraints on the final closure time of Solonker-Linxi suture [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36 (5): 744 ~ 758.
- [48] 张维, 简平, 刘敦一, 等. 内蒙古中部达茂旗地区三叠纪花岗岩和钾玄岩的地球化学、年代学和 Hf 同位素特征 [J]. 地质通报, 2010, 29 (6): 821 ~ 832.
- ZHANG Wei, JIAN Ping, LIU Dun-yi, et al. Geochemistry, Geochronology and Hf isotopic compositions of Triassic granodiorite-diorite and shoshonite from the Damaoqi area, central Inner Mongolia, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29 (6): 821 ~ 832.
- [49] 赵磊. 华北板块北缘中段晚古生代镁铁 - 超镁铁岩的岩石地球化学特征及其构造意义 [D]. 北京: 北京大学, 2008.
- ZHAO Lei. Geochemistry and tectonic implications of the late Palaeozoic mafic-ultramafic rocks belt on the middle segment of the northern margin of the North China Plate [D]. Beijing: Peking University, 2008.

GEOCHEMISTRY, CHRONOLOGY AND HF ISOTOPE FEATURES OF THE PERMAIN INTERMEDIATE-BASIC VOLCANIC ROCKS IN WULANAobao AREA, URAD HOUQI, INNER MONGOLIA AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

GUO Shuo, TENG Xue-jian, LIU Yang, TENG Fei, HE Peng, WANG Wen-long, TIAN Jian, DUAN Xiao-long
(Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Wulanaobao intermediate-basic volcanic rocks, distributed in Urad Houqi, Inner Mongolia, are located in the western north margin of the north China block. The outcropped lithologies mainly are grey black-spruce basalt, spruce basaltic andesite and greyish-green andesite. All samples show chemical signatures of calc-alkaline series which are characterized by contents of SiO_2 (49.33 ~ 65.84%), Na_2O (0.53 ~ 5.49%) and K_2O (0.25 ~ 6.40%). From basic to intermediate, the amount of rare earth elements, light rare earth elements enrichment degree and Eu negative anomaly degree show a trend of increase. The trace elements show subduction zone arc magmatite features which are characterized by wide depletion of Ta and Nb, and enrichment of the large ion lithophile elements (U, Ba, K). The zircon U-Pb dating results of the magma from volcanic rocks are $285.0 \pm 2.3\text{Ma}$ and $265.0 \pm 1.5\text{Ma}$, which indicates that the volcanic rocks were formed at the early-middle Permian period. The age characteristics of captured zircons and the contact relations between volcanic rocks and underlying strata suggest that volcanic rocks from Wulanaobao were formed on the crust of the north China block. Zircon Hf isotopic information indicates that the magma was derived from the depleted mantle which was affected by the subducting plate and partly joined with crust-derived material during the rising stage.

Key words: Hinggan-Mongolia orogenic belt; intermediate-basic volcanic rocks; Permian period; geochemistry; continental marginal arc