

内蒙古苏右旗毕力赫金矿区安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、元素地球化学特征及其形成的构造环境^{*}

卿敏¹ 唐明国¹ 葛良胜¹ 韩先菊¹ 冯建兵² 袁士松¹ 赵玉锁¹

QING Min¹, TANG MingGuo¹, GE LiangSheng¹, HAN XianJu¹, FENG JianBing², YUAN ShiSong¹ and ZHAO YuSuo¹

1. 武警黄金地质研究所, 廊坊 065000

2. 苏尼特金曦黄金矿业有限责任公司, 赛汉塔拉 026000

1. Gold Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, China

2. Sonite Jinxi Gold Mining Co. Ltd., Saihantala 026000, China

2011-07-27 收稿, 2011-10-27 改回.

Qing M, Tang MG, Ge LS, Han XJ, Feng JB, Yuan SS and Zhao YS. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry of andesite in Bilihe goldfield, Suniteyouqi, Inner Mongolia and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2):514–524

Abstract The Bilihe large-scale porphyry gold deposit locates in the Early Paleozoic accretionary orogenic belt of the northern margin of North China Craton. The lithology in Bilihe goldfield was the set of volcanic rocks which include andesite, dacite and rhyolite. The andesite belongs to sub-alkaline, high-K calc-alkaline series, with higher content of MgO (2.05% ~ 10.29%), low FeO^T/MgO ratio and the content of TiO₂ (0.21% ~ 0.85%) and with high content of Cr (44×10^{-6} ~ 473×10^{-6}), Ni (19.3×10^{-6} ~ 249.4×10^{-6}), depleted Nb, Ta, Ti, P, absence or minor of Eu/Eu^{*} anomalies, which collectively indicated the andesite with the characteristics of volcanic rocks of typical Andean-type active continental margin. The weighted average ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of andesite and andesitic tuff were 281 ± 4.3 Ma and 281 ± 12 Ma (the Early Permian), by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating respectively, and consistent with the crystallization age (279 Ma) of granodiorite porphyry that related to gold mineralization and ore-forming age (272 Ma), which indicated that diagenesis-metallogenesis of mining area was associated with collisional orogeny between the North China plate and the Siberian plate in the Late Paleozoic, and suggesting that it had the great potential to find Late Paleozoic epithermal-porphyry type gold (copper) deposits in northern margin of the North China Craton. U-Pb ages of the ancient inherited zircons presents in the volcanic rocks and intrusive rocks associated with mineralization were 1.8 Ga, 2.0 Ga and 2.4 Ga, implying that the mining area was presence of ancient basement of the North China Craton, and as a major factor in generating gold mineralization.

Key words Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; Element geochemical characteristics; Andesite; Active continental margin; Bilihe gold deposit

摘 要 毕力赫大型斑岩型金矿位于华北克拉通北缘早古生代增生造山带。矿区出露一套岩性为安山岩-英安岩-流纹岩的火山岩组合,安山岩属于亚碱性、高钾钙碱性系列,具有较高的 MgO 含量(2.05% ~ 10.29%),低的 FeO^T/MgO 比值和 TiO₂ 含量(0.21% ~ 0.85%);Cr (44×10^{-6} ~ 473×10^{-6})、Ni (19.3×10^{-6} ~ 249.4×10^{-6})含量高,亏损 Nb、Ta、Ti、P,无或弱的 Eu/Eu^{*} 异常,具有安底斯型活动大陆边缘火山岩特征。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得安山岩和安山质凝灰岩成岩年龄分别为 281 ± 4.3 Ma 和 281 ± 12 Ma,为早二叠世,这与毕力赫金矿成矿年代以及成矿有关的花岗闪长斑岩结晶年龄一致,表明了矿区成岩-成矿作用与晚古生代华北板块与西伯利亚板块之间俯冲-造山作用有关,指示华北克拉通北缘寻找晚古生代浅成低温-斑岩型金(铜)矿具有巨大潜力。火山岩以及与成矿相关侵入岩出现 U-Pb 年龄为 1.8 Ga、2.0 Ga 和 2.4 Ga 的古老继承性锆石,暗示矿区存在华北克拉通基底,古老变质基底岩石可能是制约本区金矿成矿主要因素之一。

关键词 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年;元素地球化学特征;安山岩;活动大陆边缘;毕力赫金矿
中图法分类号 P588.144; P597.3

^{*} 本文受国家危机矿山接替资源找矿项目(200715011、20089925)资助。

第一作者简介: 第一作者简介:卿敏,男,1967年生,博士,高级工程师,矿物、岩石和矿床学专业,E-mail:qm.hxj@163.com

毕力赫金矿位于内蒙古自治区苏尼特右旗境内,是内蒙古 103 地质队 1989 年发现,毕力赫金矿(1993^①)和内蒙古自治区第四地质勘查院(1998^②)探明的一个小型浅成低温热液型金矿床。2007 年,武警黄金地质研究所与金曦公司联合在矿区开展国家危机矿山接替资源勘查,发现了大型斑岩型金矿体(卿敏等,2008^③;葛良胜等,2009),这在华北克拉通北缘尚属首次,具有重要的理论研究和找矿示范意义。为了深入探讨该金矿形成的地球动力学环境,对矿区安山岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学和元素地球化学特征研究,本文是其中部分研究成果。

1 地质背景

毕力赫金矿区位于中亚造山带中东段,华北克拉通北缘(康保-赤峰)断裂带与温都尔庙-西拉木伦断裂带夹持的加里东增生造山带内(图 1)。矿田位于都仁乌力吉-巴彦得力格火山盆地的东南部,受 NE 向深大断裂控制,位于 NE 向的盆岭构造隆起与凹陷边界部位。

矿区多被第四系覆盖,局部基岩裸露区出露一套中酸性火山-沉积岩系,可划分为两个岩性段,下部中(基)性火山岩及其碎屑岩岩性段,主要分布于矿区西北部 22 号脉-毕力赫村一带,是毕力赫矿区 I 矿带、22 号脉的主要赋矿地层,II 矿带 NW 部位发育。上部(中)酸性火山岩及其碎屑岩岩性段,大面积分布于矿区西南部 and 北东部。控制矿床(体)产出的构造主要为 NW-NNW 向,其次为 NE 向和近 EW 向、SN 向。其中 NW、NE 向断裂具有等间距分布规律,断裂交会部位是次火山岩及与其相关的斑岩型矿体产出有利部位,构成“菱形格子”状“结点”控岩、控矿模式(卿敏等,2011a)。除前述的火山岩外,矿田内的岩浆侵入活动也很强烈,地表大面积出露钾长花岗岩, I 矿带坑道以及 II 矿带露采和钻孔工程揭露地表 100m 以下分布着以花岗闪长斑岩-二长花岗斑岩为主的含金次火山侵入杂岩体,稍晚期的二长花岗斑岩沿稍早期花岗闪长斑岩核心侵入。矿床蚀变空间分带规律明显,以次火山杂岩体为中心,从深部到浅部、从中心到边部,呈环带状围绕含矿岩体分布,即弱蚀变二长花岗斑岩→钾硅酸盐蚀变带→钾硅酸盐蚀变带与+石英-绢云母化叠合带(局部发育)→石英-绢云母化带+中高级泥化带→高岭土化带、蛋白石化带(保存不好,残留)。金属矿化蚀变总体不强,但也存在一定分带性,黄铁矿(褐铁矿)化主要在中上部石英-绢云母化带发育,而磁铁矿化以及黄铜矿化主要在深部钾化带发育。金矿体产于花岗闪长斑岩与围岩火山碎屑岩内外接触带、尤其是内接触带,该部位也正是钾化与绢云母化(黄铁绢英岩化)蚀变复合部位。花岗闪长斑岩体是成矿地质体,岩体锆石 LA-ICP-MS 年龄 279Ma(另文发表),与金矿成矿时代 272Ma(卿敏等,2011b)属于同一构造-岩浆-成矿事件。已有的研究成果表明,矿区浅成侵入岩与金矿体具有密切的时间、空间和成因关系(卿敏等,2010^④)。

矿田范围内目前已查明四种矿化类型:石英脉型(如 22、26 号矿体)、构造蚀变岩型(I 矿带 III、V 号矿体)、爆破角砾岩型(22 号矿体小竖井旁侧低品位矿体)、斑岩型(II 矿带 1 号矿体),其中前三种受断裂构造、角砾岩筒(脉)等火山机构及相关构造控制,属于(次)火山热液型金矿;最后一种矿化类型,则受次火山杂岩体控制,属典型的斑岩型矿化类型。

主矿体为 II 矿带 1 号矿体,属于斑岩型。该矿体储量占整个矿区储量的 99%。矿体呈 NW 方向展布,控制长约 500m,NE 向最宽处约 300m(0 线),最窄处(40 线)约 40m。剖面上矿体形态变化较大,于 3-4 线最厚,总体呈透镜体状。矿体埋深 16~300m。矿体品位中心高,上下及边部逐渐变贫,矿床平均品位 2.64×10^{-6} ,在矿体核心部位圈出一个 EW 长 140m,SN 宽 100m,平均厚 22.6m,平均品位 15.03×10^{-6} 的富矿体(卿敏等,2011^⑤)。矿石为贫硫化物石英网脉蚀变岩型金矿,矿石中的金属矿物总量多小于 2%。金属矿物比较单一,主要为黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、褐铁矿、辉钼矿、自然金。微量矿物有磁黄铁矿、赤铁矿、斑铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、自然铜、方铅矿、闪锌矿和毒砂等。非金属矿物主要为斜长石、石英、钾长石,其次为绢云母、黑云母、白云母、绿泥石、绿帘石、黝帘石、碳酸盐矿物、电气石、高岭土、粘土矿物等。含金矿物多为自然金,多产于石英细-网脉中,细微粒,高纯度,成色平均超过 990。

2 年代学样品采样位置及样品特征

本文对矿区火山岩进行了详细的野外工作,观测了火山岩的剖面特征。野外露头观察及镜下鉴定结果表明,矿区下部岩性段主要包括安山岩、玄武安山质,安山质晶屑岩屑熔结凝灰岩、火山角砾岩等;上部岩性段主要包括灰白色英安岩、流纹岩、高硅流纹岩,灰红色流纹质晶屑岩屑凝灰岩、灰白色熔结凝灰岩、青灰色流纹质凝灰熔岩等。本次工作采集了矿区安山岩及其碎屑岩样品作为研究对象,所采样品均无明显的变质、变形现象,尽可能避开蚀变,不含或少含杏仁体、气孔,尽量能够代表新鲜原岩的特征。

用于锆石年代学测试的样品 09WJ-I-001 岩性为安山质晶屑、岩屑熔结凝灰岩,采自 22 号脉北西段东侧。岩石表

- ① 毕力赫金矿. 1993. 内蒙古自治区苏尼特右旗毕力赫金矿勘探地质报告
- ② 内蒙古自治区第四地质矿产勘查开发院. 1998. 内蒙古自治区苏尼特右旗毕力赫金矿增储(详查)地质报告
- ③ 卿敏,庞继尧,葛良胜等. 2008. 内蒙古自治区苏尼特右旗毕力赫矿区 II 矿带 15-40 线岩金矿详查报告(武警黄金地质研究所)
- ④ 卿敏,唐明国,葛良胜等. 2010. 晋东北-内蒙古中部地区火山岩型金多金属矿床成矿规律总结研究中期成果总结(一)(内蒙古毕力赫金矿,武警黄金地质研究所)
- ⑤ 卿敏,郭砚田,唐明国等. 2011. 内蒙古自治区苏尼特右旗金曦金矿接替资源勘查报告(武警黄金地质研究所)

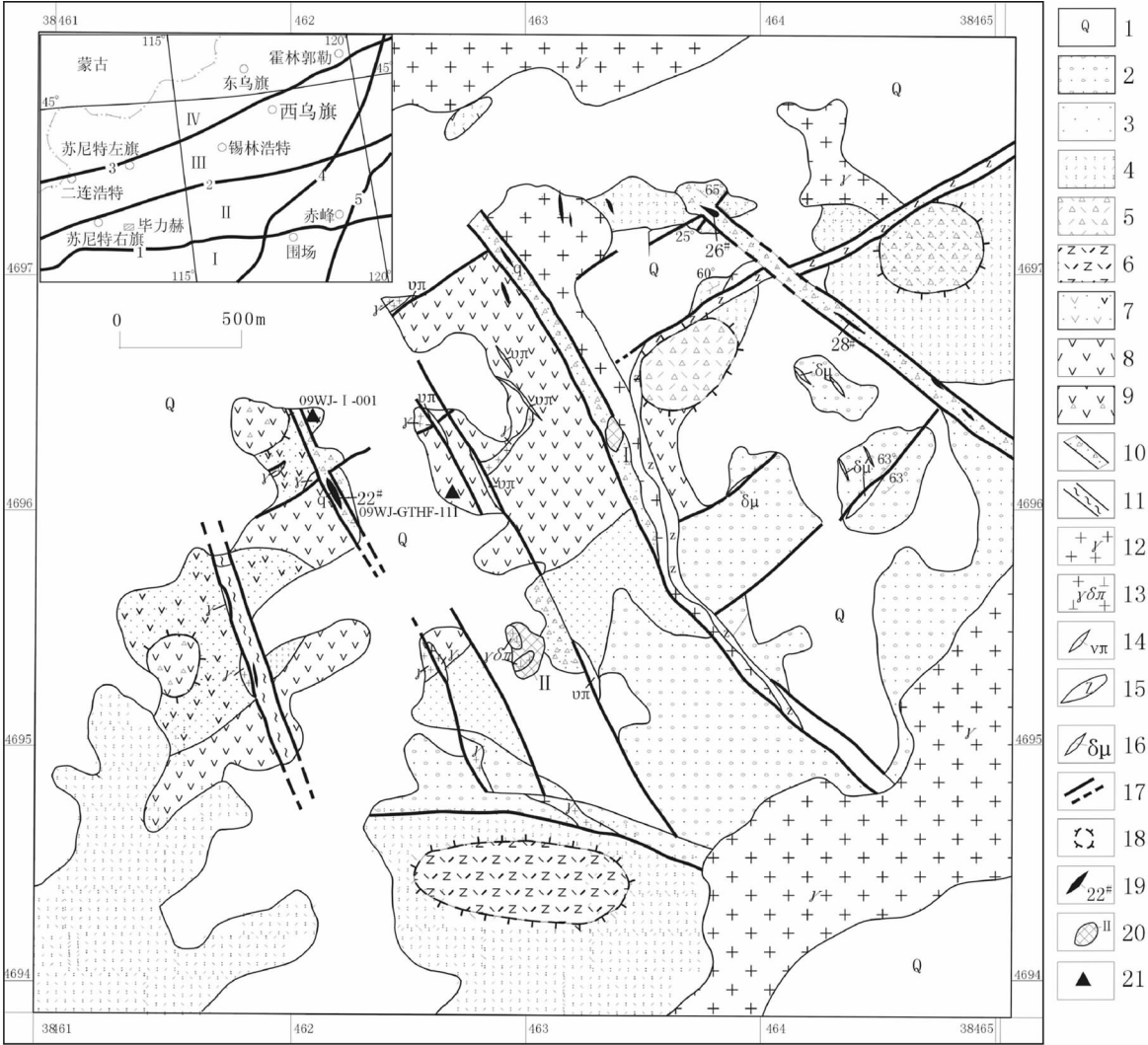


图1 毕力赫金矿区地质简图(区域构造图据任纪舜等,1999)

1-第四系;2-含砾长石石英砂岩;3-沉凝灰岩、凝灰质砂岩;4-流纹质凝灰岩夹流纹岩;5-流纹质角砾岩;6-霏细斑岩;7-安山质凝灰岩夹安山岩;8-安山岩、英安岩;9-玄武安山质-安山质角砾岩;10-构造角砾岩;11-强片理化带;12-钾长花岗斑岩;13-花岗闪长斑岩;14-霏细(细晶)岩脉;15-流纹斑岩;16-辉绿岩脉;17-断裂、推测断裂;18-(推测)火山活动中心;19-石英脉型矿(化)体及编号;20-构造破碎带蚀变岩型/斑岩蚀变岩型矿体及编号;21-U-Pb 年龄样品采样点. 小图中:1-华北克拉通北缘断裂;2-西拉木伦河断裂;3-二连-贺根山断裂;4-大兴安岭主脊断裂;5-嫩江断裂;I-华北克拉通;II-华北克拉通北缘早古生代增生造山带;III-大兴安岭南段晚古生代增生造山带;IV-大兴安岭北段晚古生代增生造山带

Fig.1 Simplified geological map of the Bilihe goldfield (regional tectonic map after Ren *et al.* , 1999)

面呈红褐色,新鲜面灰黑色,熔结凝灰、碎屑结构,块状构造,局部发育气孔。晶屑含量5%,主要为长石和石英,自形-半自形,粒度0.1~0.3mm,有的被熔蚀成港湾状;其次为暗色矿物黑云母、角闪石,角闪石多呈黑云母的假象。碎屑主要为同成分的安山质凝灰岩,粒度1.2~1.8mm,呈棱角状、长条状,磨圆不好。基质呈隐晶质-细晶质结构,主要矿物成分为微晶斜长石,以及暗色矿物辉石、角闪石和黑云母。副矿物主要为磁铁矿、电气石。

样品09WJ-GTHF-111岩性为安山岩,采自II矿带北西段。岩石风化面黄褐-红褐色,新鲜面灰绿色、灰黑色,斑状-

似斑状结构,致密块状构造。斑晶为斜长石,少量石英、角闪石;斜长石斑晶粒度0.1~1.8mm,半自形-他形板柱状,聚片双晶发育,部分被碳酸盐矿物交代。基质为隐晶质霏细结构,由长英质微晶和褐铁矿组成,发生弱的碳酸盐化、褐铁矿化。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

3.1 分析方法

用于锆石年代学测试的样品首先粉碎至80~100目,使

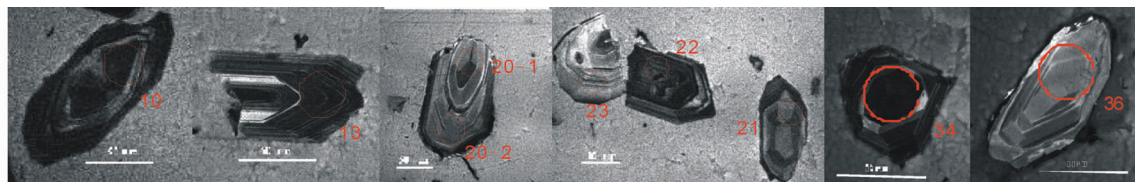


图 2 09WJ-I-001 样品中代表性锆石阴极发光图像

测点序号同表 1

Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images of representative analyzed zircons from sample 09WJ-I-001

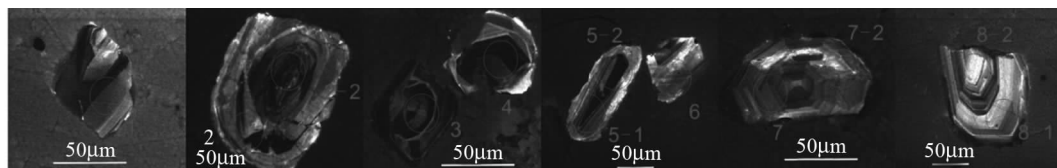


图 3 09WJ-GTHF-111 样品中代表性锆石阴极发光图像

测点序号同表 2

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative analyzed zircons from sample 09WJ-GTHF-111

用摇床对岩石粉末进行淘洗获得重砂矿物,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。单颗粒锆石挑选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。

将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行反射光和透射光照相。锆石的阴极发光 (CL) 显微分析在中国科学技术大学物质结构中心实验室完成,测试仪器为装在场发射扫描电子显微镜 (Sirion200 FEI) 上的 Gatan 阴极发光仪 (MonoCL3+),分析电压为 10kV,电流为 240 μ A。锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为 Elan DRC II 型四极杆质谱仪和 GeoLas Pro 193 μ m 型激光剥蚀系统,激光器为 193nm ArF 准分子激光器。采用 He 作为剥蚀物质的载气。激光剥蚀斑束直径为 30 μ m,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μ m。锆石年龄计算采用标准锆石 91500 作为外标,TEM 作为内标,29Si 作为内标元素进行校正。采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式 (peak jumping),每完成 4~5 个未知样品点测定,插入 1 个标准样品点测定。在 10 个锆石样品分析点前后各测 2 次 TEM。测试结果通过 LaDating@Zrn.xls ver 1.0 软件计算得出,并按照 Andersen (2002) 的 ComPbCon[#] 32151 程序对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 ISOPLOT 软件完成。

3.2 分析结果

根据阴极发光图像 (图 2、图 3) 和锆石镜下的特征,选取晶形完好 (部分锆石破碎由于碎样所致)、自形程度高、颗粒较大、透明度和色泽度好、具有明显震荡环带的锆石进行剥

蚀测试。

样品 09WJ-I-001 所有的锆石多具有震荡环带,均为岩浆锆石,大体可分为两组:第一组锆石在显微镜下为自形-半自形,长短轴比为 1.5 左右,阴极发光显示为深灰色,占多数,如图 2 中 10、13、21 等测点锆石;第二组锆石显微镜下整体呈浑圆状、大小混杂,阴极发光为灰白色,如图 2 中 23、34、36 等测点锆石。选择 36 颗锆石的 39 个剥蚀点进行测试,获得 39 组数据 (表 1)。锆石 Th、U 含量分别为 $2.32 \times 10^{-6} \sim 61.2 \times 10^{-6}$ 和 $9.54 \times 10^{-6} \sim 196.3 \times 10^{-6}$, Th/U 值比较均一,变化在 0.22~0.49,属于岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002)。大部分样品测点数据集中在谐和线附近 (图 4a),但部分测点数据 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄值偏大,可能与锆石破碎,锆石中包裹体发育致使普通铅丢失缘故,造成 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 不谐和。根据测试结果,分为两组年龄峰值,与镜下观测分组相一致,第一组锆石 24 个锆石测点 (剔除离散度大、偏离谐和线较远的 5 个测点数据) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化在 $263 \pm 6\text{Ma} \sim 300 \pm 8\text{Ma}$,为主要年龄峰值,加权平均年龄为 $281 \pm 4.3\text{Ma}$ (MSWD = 3.2) (图 4b);第二组锆石属于次要年龄峰值,10 个锆石测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化在 $417 \pm 13\text{Ma} \sim 493 \pm 9\text{Ma}$,加权平均年龄为 $451 \pm 17\text{Ma}$ (MSWD = 8.9) (图 4c)。

样品 09WJ-GTHF-111 锆石大多数样品的边部均有岩浆振荡环带,少数样品具继承核 (如 2-2 号点)。各个测点 Th/U 值比较均一,变化在 0.21~0.88,属典型的岩浆成因锆石。12 个测点数据均分布在谐和线附近,数据质量比较高 (图 5、表 2)。主要年龄峰值 (8 个测点) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $264 \pm 8\text{Ma} \sim 309 \pm 8\text{Ma}$,加权平均年龄为 $281 \pm 12\text{Ma}$ (MSWD = 5.2)。测点 1、3 的锆石细小,破碎,环带不清楚, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $1910 \pm 23\text{Ma}$ 、 $1981 \pm 18\text{Ma}$,两者较为接近,为继

表 1 毕力赫金矿区 09WJ-I-001 安山质熔结凝灰岩锆石的 LA-ICPMS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyzing results for the andesitic ignimbrite from sample 09WJ-I-001 in Bilihe goldfield

| 测点号 | 含量(× 10 ⁻⁶) | | | Th/U | 同位素比值 | | | | 同位素年龄(Ma) | | | | | | | |
|------|--------------------------|-------------------|------------------|------|--------------------------------------|---------|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|-----|-------------------------------------|----|-----|----|-----|
| | Pb [*] | ²³² Th | ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | | | |
| | | | | | 1σ | 1σ | | | 1σ | 1σ | | | | | | |
| 1 | 1.37 | 11.47 | 30.97 | 0.37 | 0.0526 | 0.00237 | 0.31862 | 0.04428 | 0.00097 | 312 | 107 | 281 | 16 | 279 | 6 | 99 |
| 2 | 4.83 | 30.95 | 105.84 | 0.29 | 0.06395 | 0.00192 | 0.38084 | 0.04405 | 0.0009 | 740 | 57 | 328 | 13 | 278 | 6 | 83 |
| 3 | 1.54 | 8.22 | 32.68 | 0.25 | 0.04955 | 0.00189 | 0.31794 | 0.04765 | 0.00095 | 174 | 87 | 280 | 13 | 300 | 6 | 93 |
| 4 | 1.28 | 6.09 | 26.75 | 0.23 | 0.06529 | 0.00223 | 0.41962 | 0.04723 | 0.00126 | 784 | 77 | 356 | 17 | 298 | 8 | 82 |
| 5 | 0.96 | 6.05 | 20.62 | 0.29 | 0.05293 | 0.00284 | 0.32582 | 0.042377 | 0.00105 | 326 | 113 | 286 | 18 | 293 | 6 | 98 |
| 6 | 3.11 | 30.83 | 64.62 | 0.48 | 0.05081 | 0.00144 | 0.31189 | 0.04522 | 0.0008 | 232 | 63 | 276 | 10 | 285 | 5 | 97 |
| 7 | 1.21 | 7.17 | 26.34 | 0.27 | 0.07509 | 0.00224 | 0.44537 | 0.04469 | 0.00089 | 1071 | 62 | 374 | 15 | 282 | 6 | 72 |
| 8 | 5.44 | 36.52 | 103.70 | 0.35 | 0.11041 | 0.00235 | 0.67703 | 0.04368 | 0.00082 | 1806 | 39 | 525 | 15 | 276 | 5 | 38 |
| 9 | 1.23 | 5.18 | 17.43 | 0.30 | 0.13923 | 0.00513 | 1.02891 | 0.05411 | 0.00182 | 2218 | 59 | 718 | 33 | 340 | 11 | 29 |
| 10 | 3.34 | 25.05 | 70.03 | 0.36 | 0.06199 | 0.00195 | 0.38354 | 0.04501 | 0.00075 | 674 | 64 | 330 | 13 | 284 | 5 | 85 |
| 11 | 11.31 | 61.20 | 196.33 | 0.31 | 0.21191 | 0.00544 | 1.07264 | 0.03696 | 0.00077 | 2920 | 38 | 740 | 22 | 234 | 5 | -4 |
| 12 | 4.00 | 19.52 | 86.03 | 0.23 | 0.06015 | 0.00189 | 0.37479 | 0.04578 | 0.00079 | 609 | 68 | 323 | 13 | 289 | 5 | 89 |
| 13 | 6.21 | 46.70 | 131.14 | 0.36 | 0.05746 | 0.00134 | 0.35755 | 0.04481 | 0.00076 | 509 | 49 | 310 | 10 | 283 | 5 | 91 |
| 15 | 0.58 | 3.92 | 11.20 | 0.35 | 0.09107 | 0.00452 | 0.5773 | 0.04721 | 0.00145 | 1448 | 79 | 463 | 28 | 297 | 9 | 56 |
| 16 | 5.30 | 24.86 | 112.05 | 0.22 | 0.07441 | 0.00221 | 0.44633 | 0.04369 | 0.00081 | 1052 | 58 | 375 | 14 | 276 | 5 | 70 |
| 17 | 0.51 | 2.89 | 10.11 | 0.29 | 0.0693 | 0.00323 | 0.4547 | 0.04769 | 0.00138 | 908 | 91 | 381 | 22 | 300 | 8 | 76 |
| 18 | 0.43 | 2.32 | 9.54 | 0.24 | 0.05543 | 0.00452 | 0.36013 | 0.04586 | 0.00139 | 430 | 183 | 312 | 29 | 289 | 9 | 92 |
| 19 | 4.12 | 33.82 | 88.63 | 0.38 | 0.08671 | 0.00499 | 0.46983 | 0.04076 | 0.00096 | 1354 | 111 | 391 | 25 | 258 | 6 | 59 |
| 20-1 | 1.96 | 11.19 | 26.33 | 0.42 | 0.05318 | 0.00175 | 0.52823 | 0.07287 | 0.00141 | 336 | 68 | 431 | 17 | 453 | 8 | 95 |
| 20-2 | 2.89 | 11.84 | 38.57 | 0.31 | 0.05555 | 0.00141 | 0.56772 | 0.07345 | 0.00124 | 434 | 59 | 457 | 14 | 457 | 7 | 100 |
| 21 | 0.97 | 5.93 | 21.28 | 0.28 | 0.05173 | 0.00262 | 0.32335 | 0.04468 | 0.00096 | 274 | 105 | 284 | 17 | 282 | 6 | 99 |
| 22 | 4.28 | 17.69 | 81.91 | 0.22 | 0.06293 | 0.00219 | 0.45065 | 0.05147 | 0.001 | 706 | 73 | 378 | 16 | 324 | 6 | 85 |
| 23 | 1.59 | 8.68 | 20.91 | 0.42 | 0.05512 | 0.00177 | 0.55404 | 0.07346 | 0.0014 | 417 | 73 | 448 | 17 | 457 | 8 | 98 |
| 24-1 | 1.93 | 14.37 | 42.03 | 0.34 | 0.07903 | 0.00295 | 0.4469 | 0.04157 | 0.001 | 1173 | 70 | 375 | 18 | 263 | 6 | 65 |
| 24-2 | 1.82 | 13.51 | 38.28 | 0.35 | 0.05727 | 0.00296 | 0.35643 | 0.04635 | 0.00115 | 502 | 117 | 310 | 19 | 292 | 7 | 94 |
| 25 | 4.92 | 34.08 | 104.17 | 0.33 | 0.08334 | 0.00241 | 0.49965 | 0.04252 | 0.00082 | 1277 | 55 | 411 | 15 | 268 | 5 | 58 |
| 26 | 0.75 | 5.52 | 14.13 | 0.39 | 0.10206 | 0.00541 | 0.6597 | 0.04694 | 0.0013 | 1662 | 100 | 514 | 31 | 296 | 8 | 46 |
| 26-2 | 1.17 | 6.31 | 24.67 | 0.26 | 0.09388 | 0.00433 | 0.57071 | 0.04458 | 0.0011 | 1506 | 85 | 458 | 25 | 281 | 7 | 52 |
| 27 | 4.31 | 30.23 | 92.14 | 0.33 | 0.0697 | 0.00161 | 0.42712 | 0.04388 | 0.00098 | 919 | 51 | 361 | 12 | 277 | 6 | 74 |
| 28 | 2.21 | 12.48 | 27.23 | 0.46 | 0.07405 | 0.00229 | 0.73662 | 0.07342 | 0.00136 | 1043 | 57 | 560 | 20 | 457 | 8 | 80 |
| 29 | 1.58 | 8.32 | 19.30 | 0.43 | 0.06127 | 0.00217 | 0.61717 | 0.07468 | 0.00153 | 649 | 77 | 488 | 20 | 464 | 9 | 95 |
| 30-1 | 2.07 | 10.70 | 23.54 | 0.45 | 0.07553 | 0.0021 | 0.82835 | 0.07941 | 0.00151 | 1083 | 54 | 613 | 20 | 493 | 9 | 78 |
| 30-2 | 1.29 | 6.42 | 14.94 | 0.43 | 0.05939 | 0.00206 | 0.6434 | 0.07939 | 0.00164 | 581 | 76 | 504 | 21 | 492 | 10 | 98 |
| 31 | 4.36 | 23.99 | 58.99 | 0.41 | 0.10909 | 0.00205 | 0.9213 | 0.06681 | 0.00222 | 1784 | 30 | 663 | 20 | 417 | 13 | 54 |
| 32 | 5.79 | 38.05 | 127.30 | 0.30 | 0.12361 | 0.00219 | 0.64484 | 0.03774 | 0.00052 | 2009 | 28 | 505 | 12 | 239 | 3 | 28 |
| 33 | 4.56 | 44.62 | 99.95 | 0.45 | 0.05367 | 0.00113 | 0.32508 | 0.04371 | 0.00045 | 357 | 44 | 286 | 7 | 276 | 3 | 96 |
| 34 | 5.29 | 36.24 | 73.35 | 0.49 | 0.06112 | 0.00128 | 0.5846 | 0.0676 | 0.00093 | 643 | 45 | 467 | 12 | 422 | 6 | 90 |
| 35 | 3.97 | 21.51 | 52.31 | 0.41 | 0.07167 | 0.00198 | 0.68716 | 0.07043 | 0.00121 | 976 | 51 | 531 | 17 | 439 | 7 | 81 |
| 36 | 2.58 | 13.09 | 36.56 | 0.36 | 0.06526 | 0.00165 | 0.58103 | 0.06681 | 0.00162 | 783 | 51 | 465 | 17 | 417 | 10 | 89 |

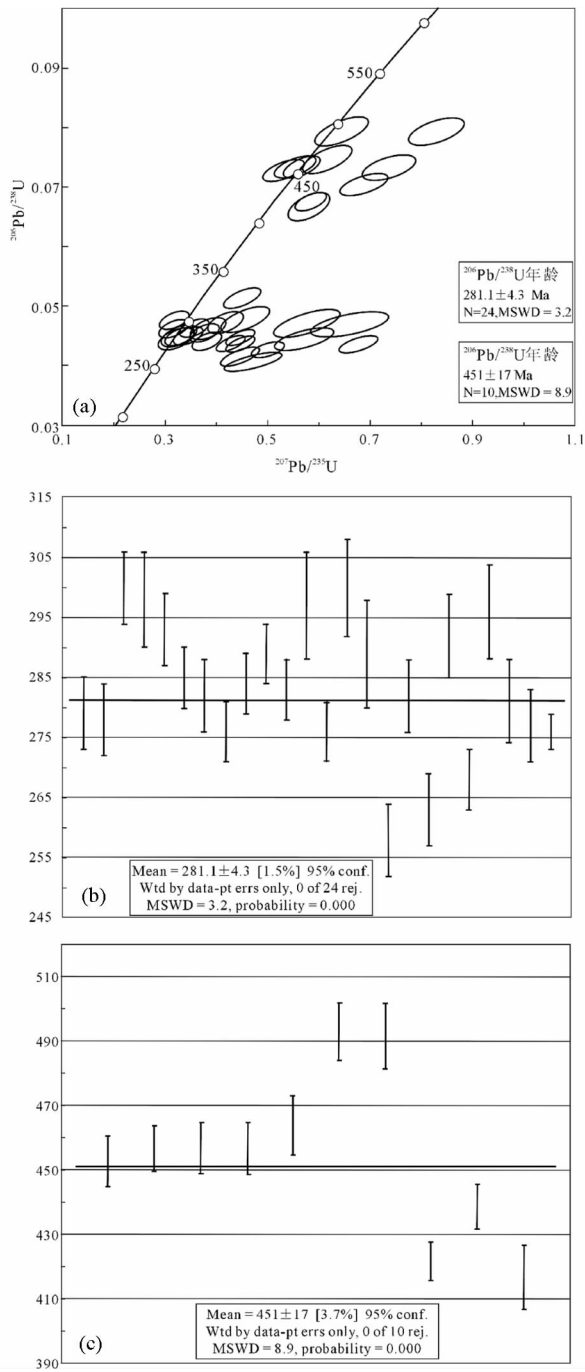


图4 毕力赫金矿区安山质熔结凝灰岩 09WJ- I -001 样品 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 谐和图(a)和模式年龄分布图(b, c)
Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram (a) and histograms (b, c) of weighted average ages of andesitic ignimbrite sample 09WJ- I -001 from Bilihe goldfield

承锆石年龄。2-2 号测点位于锆石核部,该测点年龄为 2368 ± 22Ma,代表了继承锆石年龄,2 号测点位于 2-2 号测点同颗粒锆石边部,该测点 1356 ± 134Ma 年龄可能代表混合年龄。

表 2 毕力赫金矿区 09WJ-C7HF-111 安山岩锆石的 LA-ICPMS U-Pb 分析结果

| Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyzing results for the andesite from sample 09WJ-GTHF-111 in Bilile goldfield | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|-------------------|------------------|------|---|---------|--|---------|--|---------|--|-----|--------|----|------|----|----|
| 测点号 | 含量(×10 ⁻⁶) | | | Th/U | 同位素比值 | | | | 同位素年龄(Ma) | | | | | | | | |
| | Pb * | ²³² Th | ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | con. % | | | | |
| 1 | 16.12 | 9.93 | 48.26 | 0.21 | 0.11697 | 0.00161 | 5.29556 | 0.1156 | 0.32809 | 0.00319 | 1910 | 23 | 1868 | 19 | 1829 | 15 | 98 |
| 2 | 4.57 | 5.07 | 22.36 | 0.23 | 0.08678 | 0.00639 | 1.95576 | 0.18438 | 0.16345 | 0.00421 | 1356 | 134 | 1100 | 63 | 976 | 23 | 88 |
| 2-2 | 6.78 | 18.46 | 28.79 | 0.64 | 0.15193 | 0.00206 | 3.99437 | 0.10628 | 0.1909 | 0.00323 | 2368 | 22 | 1633 | 22 | 1126 | 17 | 63 |
| 3 | 23.26 | 11.13 | 57.50 | 0.19 | 0.12165 | 0.0012 | 6.57843 | 0.10856 | 0.39295 | 0.00319 | 1981 | 18 | 2056 | 15 | 2137 | 15 | 96 |
| 4 | 2.52 | 21.79 | 50.28 | 0.43 | 0.11297 | 0.00525 | 0.68639 | 0.04297 | 0.04365 | 0.00082 | 1848 | 78 | 531 | 26 | 275 | 5 | 36 |
| 5-1 | 0.55 | 7.93 | 9.56 | 0.83 | 0.09245 | 0.00614 | 0.63591 | 0.05537 | 0.04879 | 0.00117 | 1477 | 107 | 500 | 34 | 307 | 7 | 52 |
| 5-2 | 0.58 | 9.20 | 10.42 | 0.88 | 0.05217 | 0.00374 | 0.32567 | 0.0309 | 0.04577 | 0.00123 | 293 | 149 | 286 | 24 | 288 | 8 | 99 |
| 6 | 0.64 | 6.12 | 11.85 | 0.52 | 0.06292 | 0.00352 | 0.40144 | 0.0312 | 0.04903 | 0.00125 | 706 | 124 | 343 | 23 | 309 | 8 | 90 |
| 7 | 1.03 | 13.28 | 21.40 | 0.62 | 0.05498 | 0.00322 | 0.33157 | 0.02568 | 0.04291 | 0.00094 | 412 | 129 | 291 | 20 | 271 | 6 | 93 |
| 7-2 | 0.88 | 11.05 | 18.18 | 0.61 | 0.07171 | 0.0041 | 0.41584 | 0.03412 | 0.04184 | 0.00122 | 978 | 107 | 353 | 24 | 264 | 8 | 71 |
| 8-1 | 1.36 | 19.60 | 26.63 | 0.74 | 0.05666 | 0.00197 | 0.3338 | 0.01625 | 0.04388 | 0.00072 | 478 | 72 | 292 | 12 | 277 | 4 | 95 |
| 8-2 | 0.61 | 7.11 | 12.55 | 0.57 | 0.05807 | 0.00442 | 0.34229 | 0.03463 | 0.04405 | 0.00128 | 533 | 157 | 299 | 26 | 278 | 8 | 93 |

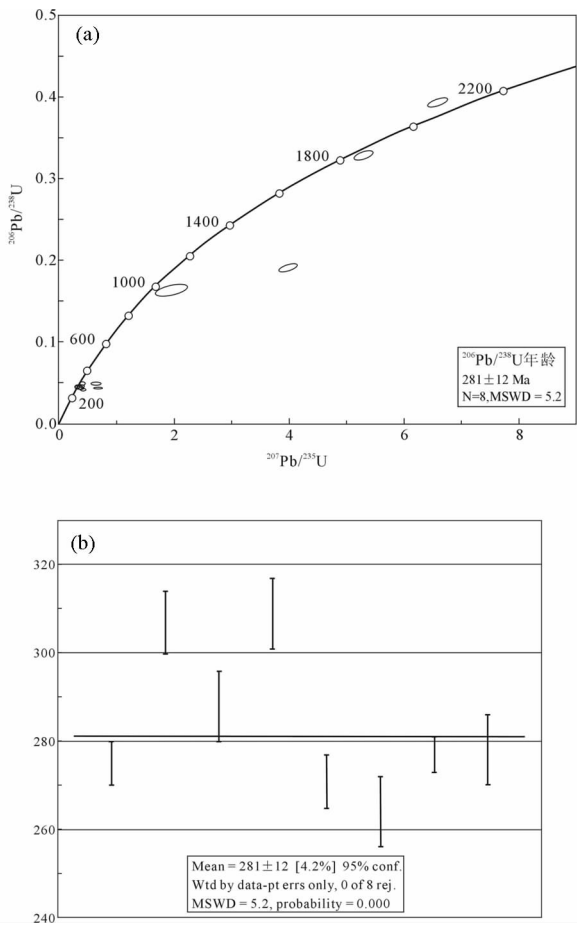


图5 毕力赫金矿区安山岩 09WJ-GTHF-111 样品 LA-ICPMS U-Pb 谐和图(a)和模式年龄分布图(b)

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram (a) and histograms (b) of weighted average ages of andesite sample 09WJ-GTHF-111 from Bilihe goldfield

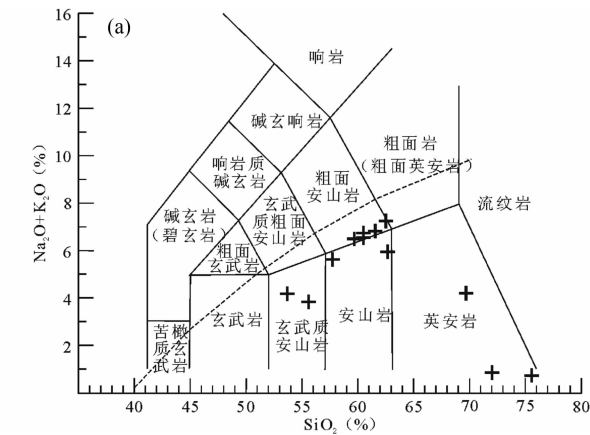


图6 毕力赫金矿区安山岩 TAS (a)和 SiO₂-K₂O(b)图解

Fig. 6 TAS (a) and SiO₂-K₂O (b) diagrams of andesite in the Bilihe goldfield

4 元素地球化学特征

本次对矿区 4 件安山岩样品进行了全岩岩石地球化学分析、微量元素和稀土元素分析,同时收集了部分安山岩岩石化学测试成果,数据见表 3、表 4 和表 5。

安山岩 SiO₂ 含量在 53.1% ~ 62.12%, 平均为 56.71%; 全碱含量 3.67% ~ 6.65%, 平均 5.19%, 一般 Na₂O > K₂O; 全铁含量 4.8% ~ 7.36%, Fe₂O₃ > FeO; MgO 含量较高 (2.05% ~ 10.29%), FeO^T/MgO 比值多小于 1; TiO₂ 含量较低 (0.21% ~ 0.85%)。岩石化学类型为正常系列-SiO₂ 过饱和和系列。岩石 Rittmann 指数 1.88 ~ 2.56, Wright 碱度率变化在 1.13 ~ 2.69。安山岩在 TAS 图解中细分为玄武安山岩、安山岩、粗面安山岩和英安岩,位于亚碱性范畴(图 6a),中钾-高钾钙碱性火山岩系列(HKCA)(图 6b)。

安山岩稀土元素含量 $123.6 \times 10^{-6} \sim 129.3 \times 10^{-6}$, 变化范围小。其中 LREE 均值 95.5×10^{-6} , La/Sm 比值 6.7, 分馏程度较好。HREE 均值 11.2×10^{-6} , (Gd/Yb)_N 比值 2.0, 分异不明显。稀土配分曲线一致性较好, 曲线右倾, LREE/HREE 比值 8.6, (Ce/Yb)_N 显著大于 1, 轻稀土富集型; (La/Yb)_N 比值 10.5, 轻重稀土元素分馏明显(图 7a)。无或弱的 Eu 异常 (Eu/Eu* 为 0.81 ~ 1.38) 和 Ce 异常 (Ce/Ce* 为 0.86 ~ 0.97)。

安山岩相对富集 K, Rb, Ba, Sr 等大离子亲石元素, 轻稀土元素 La、Ce, 高场强元素 U、Th、Hf、Zr, 微量元素原始地幔标准化图解中具有比较明显的正异常(图 7b), 含量比下地壳丰度(Taylor and McLennan, 1985)高, 但比上地壳元素丰度(Taylor and McLennan, 1985)要低; 亏损重稀土元素, Nb、Ta、Ti、P 明显负异常, 含量接近或低于下地壳丰度。过渡组元素 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn 含量比上地壳高, 但低于下地壳含量。

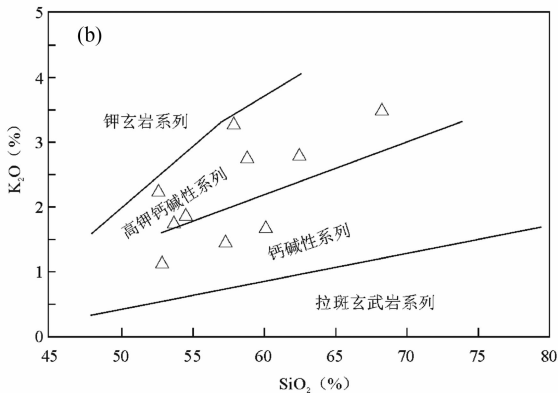


表 3 毕力赫金矿区安山岩岩石化学成分 (wt%)

Table 3 Major element compositions (wt%) of the andesites in Bilihe goldfield

| 序号 | 样品号 | 岩石名称 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | H ₂ O | 灼减 | 总计 |
|----|---------------|---------|------------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------|--------|
| 1 | 09WJ-Ⅱ-006* | 安山岩(硅化) | 70.8 | 0.75 | 15.3 | 1.69 | 3.34 | 0.02 | 3.29 | 1.25 | 0.53 | 0.25 | 0.16 | | 1.5 | |
| 2 | 09WJ-Ⅱ-003 | 辉石安山岩 | 54.9 | 0.85 | 14.4 | 1.68 | 4.64 | 0.12 | 6.69 | 7.84 | 1.9 | 1.77 | 0.18 | | 4.4 | |
| 3 | 09WJ-GTHF-113 | 安山岩 | 53.1 | 0.83 | 14.7 | 1.95 | 5.17 | 0.1 | 4.24 | 6.88 | 2.87 | 1.1 | 0.21 | | 8.1 | |
| 4 | 09WJ-Ⅱ-007 | 安山岩 | 60.8 | 0.63 | 14.9 | 2.13 | 2.67 | 0.11 | 2.05 | 4.21 | 4.89 | 1.76 | 0.12 | | 5.1 | |
| 5 | S8 | 玄武安山岩 | 53.7 | 0.21 | 13.86 | 1.37 | 5.99 | 0.14 | 10.29 | 7.25 | 2.14 | 1.77 | 0.25 | 3.17 | 3.58 | 100.55 |
| 6 | S9 | 玄武安山岩 | 56.92 | 0.29 | 15.45 | 1.24 | 3.8 | 0.12 | 5.95 | 6.36 | 2.22 | 3.26 | 0.39 | 0.31 | 3.54 | 102.34 |
| 7 | S14 | 玄武安山岩 | 53.15 | 0.34 | 14.73 | 1.45 | 5.29 | 0.14 | 8.52 | 6.47 | 2.36 | 2.22 | 0.44 | 2.45 | 4.54 | 99.55 |
| 8 | S15 | 粗面安山岩 | 57.06 | 0.34 | 15.78 | 2.94 | 3.3 | 0.06 | 7.20 | 2.68 | 4.81 | 1.34 | 0.45 | 3.84 | 4.03 | 100.99 |
| 9 | S16 | 粗面安山岩 | 58.88 | 0.31 | 15.95 | 2.6 | 2.56 | 0.08 | 4.50 | 5.35 | 3.60 | 2.88 | 0.39 | 2.10 | 2.92 | 100.02 |
| 10 | S10 | 蚀变安山岩 | 61.90 | 0.24 | 13.99 | 0.85 | 2.64 | 0.09 | 7.23 | 5.13 | 2.88 | 2.94 | 0.66 | 1.29 | 1.93 | 100.48 |
| 11 | S12 | 英安岩 | 68.12 | 0.18 | 15.74 | 3.57 | 2.07 | 0.04 | 2.57 | 0.89 | 0.41 | 3.54 | 0.24 | 1.78 | 2.74 | 100.11 |

注:序号 1-4 为本次结果,测试单位:(Intertek)上海天祥质量技术服务有限公司;测试条件说明:仪器型号:XRF,XR80L,检出限 0.01%;序号 5-11 据毕力赫金矿,1993,原中国人民武装警察部队黄金第十一支队实验室测试;* :09WJ-Ⅱ-006 样品遭受比较强烈的以硅化为主的蚀变

表 4 毕力赫金矿区安山岩稀土元素组成 (×10⁻⁶) 及特征参数

Table 4 Rare earth element compositions (×10⁻⁶) of the andesites and its characteristic parameters in Bilihe goldfield

| 序号 | 岩石名称 | 样品号 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y |
|----|-------|---------------|------|-------|------|---------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| 1 | 蚀变安山岩 | 09WJ-Ⅱ-006 | 20.4 | 40.7 | 4.7 | 19.5 | 3.8 | 0.9 | 2.8 | 0.6 | 3.2 | 0.7 | 2.5 | 0.4 | 1.8 | 0.3 | 21.3 |
| 2 | 安山岩 | 09WJ-GTHF-113 | 24.7 | 45.5 | 5.5 | 20.4 | 3.5 | 1.5 | 3.0 | 0.6 | 2.4 | 0.6 | 1.8 | 0.3 | 1.2 | 0.3 | 18.0 |
| 3 | 辉石安山岩 | 09WJ-Ⅱ-003 | 23.8 | 41.0 | 5.0 | 20.3 | 3.7 | 1.2 | 3.3 | 0.6 | 2.8 | 0.7 | 2.0 | 0.3 | 1.5 | 0.3 | 19.0 |
| 4 | 安山岩 | 09WJ-Ⅱ-007 | 25.0 | 43.6 | 4.7 | 18.5 | 3.1 | 1.1 | 2.8 | 0.5 | 2.4 | 0.7 | 2.1 | 0.3 | 1.7 | 0.3 | 18.8 |
| 序号 | ΣREE | LREE | HREE | LR/HR | Gd-Y | LR/Gd-Y | δEu | δCe | La/Sm | La/Yb | Ce/Yb | Eu/Sm | Sm/Nd | (La/Yb) _N | (Ce/Yb) _N | (Sm/Eu) _N | |
| 1 | 123.6 | 90 | 12.3 | 7.32 | 33.6 | 2.68 | 0.81 | 0.97 | 5.37 | 11.33 | 22.61 | 0.24 | 0.19 | 7.64 | 5.85 | 1.59 | |
| 2 | 125.5 | 95 | 11.5 | 8.26 | 30.5 | 3.11 | 1.03 | 0.86 | 6.43 | 15.87 | 27.33 | 0.32 | 0.18 | 10.69 | 7.07 | 1.16 | |
| 3 | 129.3 | 101 | 10.2 | 9.91 | 28.2 | 3.59 | 1.38 | 0.9 | 7.06 | 20.58 | 37.92 | 0.43 | 0.17 | 13.88 | 9.81 | 0.88 | |
| 4 | 125.6 | 96 | 10.8 | 8.89 | 29.6 | 3.24 | 1.12 | 0.91 | 8.06 | 14.71 | 25.65 | 0.35 | 0.17 | 9.92 | 6.64 | 1.06 | |

注:由上海天祥质量技术服务有限公司北京分公司分析;测试方法:MS70/MS;仪器型号:Agilent 7500a

表 5 毕力赫矿区安山岩微量元素组成 (×10⁻⁶)

Table 5 Trace element compositions (×10⁻⁶) of the andesites in Bilihe goldfield

| 序号 | 岩石名称 | 样品号 | K(wt%) | Rb | Sr | Ba | U | Th | Nb | Ta | Zr | Hf | Ga |
|----|-------|---------------|--------|------|---------|-----|------|------|---------|-----|-----|-----|----|
| 1 | 安山岩 | 09WJ-GTHF-113 | 1.00 | 45.6 | 287 | 133 | 1.28 | 5.15 | 9 | 0.3 | 142 | 3.7 | 19 |
| 2 | 辉石安山岩 | 09WJ-Ⅱ-003 | 1.66 | 51.1 | 448 | 568 | 2.25 | 6.82 | 7 | 0.1 | 165 | 4.2 | 19 |
| 3 | 安山岩 | 09WJ-Ⅱ-007 | 1.62 | 65.9 | 236 | 492 | 1.85 | 9.23 | 6 | 0.1 | 159 | 4.2 | 17 |
| 4 | 上部地壳 | UC | 2.8 | 112 | 350 | 550 | 2.8 | 10.7 | 25 | 2.2 | 190 | 5.8 | 17 |
| 5 | 下部地壳 | LC | 0.28 | 5.3 | 230 | 150 | 0.28 | 1.06 | 6 | 0.6 | 70 | 2.1 | 18 |
| 序号 | 岩石名称 | 样品号 | Y | Sc | Ti(wt%) | V | Cr | Mn | Fe(wt%) | Co | Ni | Cu | Zn |
| 1 | 安山岩 | 09WJ-GTHF-113 | 18 | 20 | 0.4 | 150 | 473 | 764 | 5.80 | 28 | 151 | 8 | 38 |
| 2 | 辉石安山岩 | 09WJ-Ⅱ-003 | 19 | 21 | 0.5 | 144 | 459 | 958 | 5.26 | 35 | 249 | 53 | 86 |
| 3 | 安山岩 | 09WJ-Ⅱ-007 | 19 | 13 | 0.2 | 126 | 44 | 861 | 3.80 | 14 | 19 | 25 | 26 |
| 4 | 上部地壳 | UC | 22 | 11 | 0.3 | 60 | 35 | 600 | 3.5 | 10 | 20 | 25 | 71 |
| 5 | 下部地壳 | LC | 19 | 36 | 0.6 | 285 | 235 | 1670 | 8.24 | 35 | 135 | 90 | 83 |

注:由上海天祥质量技术服务有限公司北京分公司分析;测试方法:Ba,Co,Cu,Ga,Mn,Ni,Rb,Sc,Sr,V,Zn,U 用 MS50/ICP-MS 测试,仪器型号 Agilent 7500a,其他元素用 MS70/MS,仪器型号 Agilent 7500a. 上部地壳和下部地壳元素含量据 Taylor and McLennan(1985)

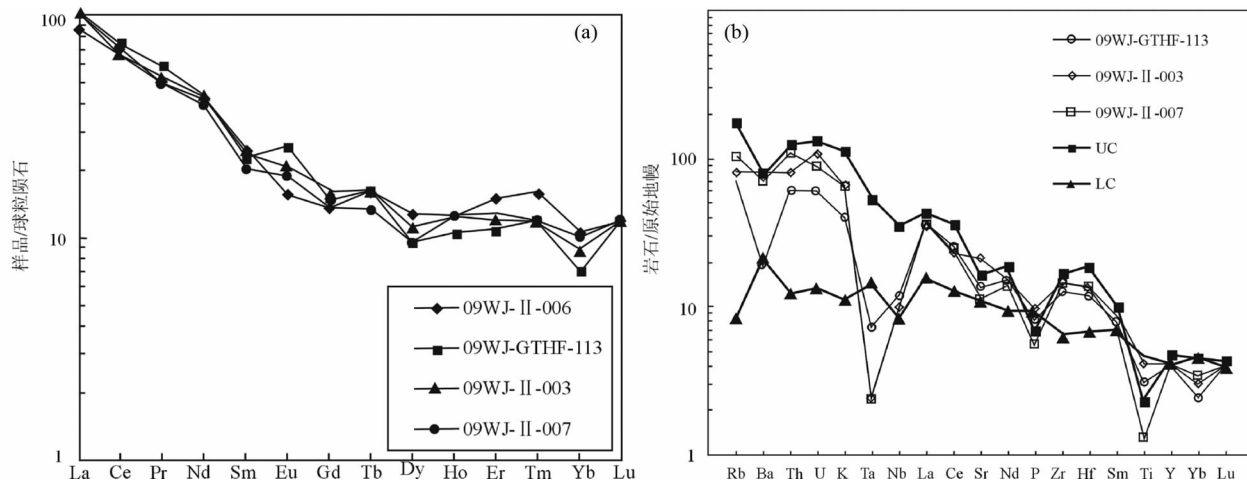


图7 毕力赫金矿区安山岩稀土元素球粒陨石标准化配图(a, 准值据 Sun and McDonough, 1989)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准值据 Sun, 1982; Saunders *et al.*, 1988)

图中样品号见表4和表5

Fig. 7 The chondrite-normalized rare earth element patterns plot (a, normalized values after Sun and McDonough, 1989) and primitive mantle-normalized multi-element plot (b, normalized values after Sun, 1982; Saunders *et al.*, 1984)

5 讨论

5.1 形成时代

出露于矿区的一套中酸性火山-碎屑岩类, 1:20 万镶黄旗幅区域地质调查报告将其划归侏罗系多伦组(J_3d)和三道沟组(J_3s) (内蒙古自治区地质局, 1976^①); 阿达嘎幅和古尔班陶勒盖大队幅 1:5 万区域地质测量报告将矿区地层划归侏罗系玛尼吐组(J_3m)和白音高老组(J_3b), 认为是中生代陆内火山裂(断)陷盆地的产物, 其形成与东部太平洋板块中生代以来向西的俯冲有关; 将矿区地表大面积分布的钾长花岗岩划归早白垩世加布尔敖包单元(K_1J) (内蒙古自治区第一区域地质研究院七分队, 1995^②)。本次开展的矿区安山质熔结凝灰岩和安山岩锆石 LA-ICP-MS 测量, 分别获得 281.1 ± 4.3 Ma 和 281.1 ± 12 Ma 的成岩年龄, 为早二叠世。矿区上部流纹岩锆石 LA-ICP-MS 年龄为 269 ± 4.2 Ma (郝百武, 2011)。最新研究成果(卿敏等, 2011^③), 毕力赫矿区 II 矿带含矿花岗闪长斑岩体侵入于火山岩及其碎屑岩中, 其结晶年龄为 279.9 ± 6.8 Ma (MSWD = 2.3, $n = 19$); 地表大面积分布的不含矿钾长花岗岩斑岩锆石 LA-ICP-MS 年龄 260.3 ± 5.8 Ma (MSWD = 0.37, $n = 13$), 也局限在晚古生代末期。再者, 岩体和地层作为含矿地质体和容矿围岩遭受矿化蚀变, 矿化期辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 272.7 ± 1.6 Ma (卿敏等, 2011b)。这些系统证据进一步证实矿区火山岩形成于早二叠世。

本次火山岩中出现继承性古老锆石, 年龄值分别为 451 Ma 和 2.0 Ga、2.4 Ga 三个集中值。此外, 矿区含矿花岗闪长斑岩也出现较多的古老锆石, 年龄分别为 1873 ± 34 Ma

(MSWD = 2.0, $n = 14$) 和 2485 ± 56 Ma (MSWD = 1.3, $n = 5$) (卿敏等, 未发表资料)。1800 Ma、2000 Ma 和 2500 Ma 这些年龄值和华北克拉通实际的地质背景相吻合, 与华北克拉通陆壳演化重要的构造-热事件发生的时代相吻合 (Zhai *et al.*, 2000, 2005; Zhao *et al.*, 2001; Zhai and Liu, 2003; 翟明国, 2004; 胡波等, 2009), 推测区域存在华北克拉通前寒武纪结晶基底, 火山岩源岩部分来源于古老的华北克拉通源区, 或者深部岩浆遭受较多古老地壳源的混染。

5.2 岩石基本属性及构造环境暗示

毕力赫金矿区火山岩为安山岩、英安岩和流纹岩及其碎屑岩组合, 相关的侵入岩主要为花岗闪长斑岩-二长花岗斑岩, 是活动大陆边缘弧环境的火成岩组合 (邓晋福等, 2007)。矿区安山岩 MgO 含量高, FeO^T/MgO 比值低, Cr ($44 \times 10^{-6} \sim 473 \times 10^{-6}$)、Ni ($19.3 \times 10^{-6} \sim 249.4 \times 10^{-6}$) 含量高, 类似于高镁安山岩 (Polat and Kerrich, 2001; Tatsumi, 2001), 与岛弧型安山岩特征类似 (Defant and Drummond, 1993)。但与典型埃达克岩石相比, Sr 含量 ($236 \times 10^{-6} \sim 286 \times 10^{-6}$) 相对较低, 而 Y 含量相对较高 ($18 \times 10^{-6} \sim 21.3 \times 10^{-6}$), Sr/Y 值 (5 ~ 15) 偏低。

① 内蒙古自治区地质局. 1976. 镶黄旗幅 (K-49-X VIII) 1/20 万区域地质调查报告

② 内蒙古自治区第一区域地质研究院七分队. 1995. 内蒙古自治区苏尼特右旗阿达嘎 (11-49-59-丁) 和古尔班陶勒盖大队 (11-49-60-丙) 1/5 万区域地质测量 (内部资料)

③ 卿敏, 唐明国, 葛良胜等. 2011. 晋东北-内蒙古中部地区火山岩型金多金属矿床成矿规律总结研究典型矿床研究报告 (内蒙古毕力赫金矿, 武警黄金地质研究所)

岩石化学成分是反映板块构造环境的一个重要标志。矿区安山岩里特曼 (Rittmann) 指数 (σ) 以及赖特 (Wright) 碱度率 (AR) 指示岩石属于亚碱性系列、钙碱性系列。安山岩 Al_2O_3 - K_2O - TiO_2 图解 (赵崇贺, 1989) 和 $\log\sigma$ - $\log\sigma^*$ (里特曼-戈蒂里) 图解位于闭合边缘的岛弧、活动陆缘、造山带环境 (图略)。闭合边缘的火山岩与消减带有关, 常见的大地构造环境是活动陆缘和岛弧火山岩, 根据岩石化学成分中 SiO_2 、 (FeO) 、 K_2O 含量偏高等特点, 推测本区火山岩形成于活动大陆边缘环境。

安山岩稀土元素总量明显低于地壳中性岩 (196×10^{-6}), La/Yb 值变化在 14.71 ~ 20.58, Sc/Ni 值变化在 0.08 ~ 0.67, 具安底斯型 (活动大陆边缘) 安山岩特征 (Wilson, 1989)。在 Wood (1980) 提出的 Th-Hf-Ta 图解中投点属于火山弧玄武岩范畴 (图略), 根据 Hf/Th 值小于 3, 进一步判定为活动大陆边缘钙碱性系列火山岩。

安山岩类大离子亲石元素 K、Rb、Ba、Sr 含量比下地壳丰度 (Taylor and McLennan, 1985) 高, 但比上地壳元素丰度 (Taylor and McLennan, 1985) 要低; 高场强元素中 Nb、Ta 含量接近或低于下地壳丰度; U、Th、Hf、Zr 含量比上地壳略低, 但比下地壳含量高; 过渡组元素 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn 含量比上地壳高, 但低于下地壳含量。基于研究区具有早古生代弧增生杂岩相对较薄的基底, 安山岩类可能来源于受交代的地幔楔熔融, 并受到较多壳源物质混染。

5.3 动力学与成矿意义

矿区火山岩岩石组合、安山岩元素地球化学特征, 以及火山岩锆石 LA-ICP-MS 年龄测定, 促使我们对矿区原来一些基础地质问题进行重新认识, 原来认为属于燕山期火山-次火山岩浆活动产物应为早二叠世安底斯型活动陆缘火山活动产物。毕力赫金矿区晚古生代构造-火山-次火山岩浆活动以及成矿事件的重新厘定, 为华北板块北部晚古生代汇聚板块构造体系提供了新证据, 进一步论证了晚古生代由于华北板块与西伯利亚板块之间俯冲-碰撞造山形成的岩浆弧一直延续到本区, 与之相关的岩浆-流体成矿系统广泛发育 (陈衍景, 2000; Bazhenov *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2003, 2004; Chen *et al.*, 2007; 陈衍景等, 2009; 鲁颖淮等, 2009)。

矿床和矿集区是特定地质过程中物质循环和元素富集的结果, 特定的构造背景有利于形成特定类型的矿床 (Kerrick *et al.*, 2000), 矿床类型矿床可以作为探针反演地球动力学背景 (陈衍景等, 2008)。毕力赫晚古生代大型斑岩型金矿发现破解了华北克拉通北缘作为典型的晚古生代弧构造-岩浆环境却没有典型的大型浅成低温-斑岩型金 (铜) 矿床发现这一长期困扰人们的科学谜题。从整个中亚成矿带来看, 北疆地区的相关成矿作用主要发生在石炭纪-二叠纪, 即 340 ~ 250Ma (陈衍景, 2002)。毕力赫金矿区晚古生代成岩-成矿事件厘定, 为在华北克拉通北缘中段、中东段寻找同类型矿床提供了范例, 也说明整个中亚成矿带成岩-成矿的

一致性, 暗示中亚成矿带中东段具有寻找与晚古生代活动大陆边缘火山-岩浆作用有关的金-多金属矿床巨大潜力。

6 结论

(1) 毕力赫金矿区安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明矿区火山岩形成时限为 $281.1 \pm 4.3\text{Ma} \sim 269 \pm 4.2\text{Ma}$, 为晚古生代 (早二叠世) 岩浆活动产物。

(2) 安山岩及相关侵入岩中发现大量 450Ma、1.8Ga、2.0Ga 和 2.4Ga 的多期次继承性锆石 U-Pb 年龄, 指示区域存在华北克拉通基底, 古老基底岩石可能和区域金矿形成具有重要意义。

(3) 矿区火山岩岩石组合、安山岩元素地球化学特征指示为安底斯型活动陆缘环境, 其形成与晚古生代华北板块与西伯利亚板块之间俯冲-碰撞造山作用有关。

(4) 矿区晚古生代成岩-成矿事件厘定, 显示在华北板块北缘寻找晚古生代岛弧-大陆边缘环境中浅成低温-斑岩型矿床的巨大潜力。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59 ~ 79
- Bazhenov ML, Collins AQ, Degtyarev KE, Levashova NM, Mokolaichuk AV, Pavlov VE and van der Voo R. 2003. Paleozoic northward drift of the North Tien Shan (Central Asia) as revealed by Ordovician and Carboniferous paleomagnetism. *Tectonophysics*, 366: 113 ~ 141
- Belousova EA, Griffin WL, Reilly SY and Fisher NL. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 143: 602 ~ 622
- Chen YJ. 2000. Progress in the study of central Asia-type orogenesis-metallogenesis in Northwest China. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 17 ~ 22 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2002. Several important problems in study of regional metallogenesis in China: Its relationship to continental collision. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 319 ~ 328 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31: 139 ~ 169
- Chen YJ, Xiao WJ and Zhang JJ. 2008. Ore-system as a geodynamic probe. *Geology in China*, 35(6): 1059 ~ 1073 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Zhai MG and Jiang SY. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica sinica*, 25(11): 2695 ~ 2726 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Xiao QH, Su SG, Liu C, Zhao GC, Wu ZX and Liu Y. 2007. Igneous petroectonic assemblages and tectonic settings: A discussion. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 392 ~ 402 (in Chinese with English abstract)
- Defant MJ and Drummond MS. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21(6): 547 ~ 550
- Ge LS, Qing M, Yuan SS, Tang MG and Xing JB. 2009. Prospecting process of Bilihe large-sized gold deposit in Inner Mongolia and its revelatory significance. *Mineral Deposits*, 28(4): 390 ~ 402 (in

Chinese with English abstract)

- Hao BW. 2011. The Study of the tectonic-magmatic evolution and gold mineralization in Hadamiao area, Inner Mongolia. Ph. D. Dissertation. Kunming: Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English summary)
- Hu B, Zhai MG, Guo JH, Peng P, Liu F and Liu S. 2009. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Huade Group in the northern margin of the North China Craton and its tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (1): 193 – 211 (in Chinese with English abstract)
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S and Jia YF. 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (Series D)*, 43 (Suppl.): 1 – 68
- Lu YH, Li WB and Lai Y. 2009. Time and tectonic setting of hosting porphyry of the Hadamiao gold deposit in Xianghuangqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (10): 2615 – 2620 (in Chinese with English abstract)
- Polat A and Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basaltandesites, and adakites from Late-Archean 2.7Ga Wawa greenstone belts, Superior Provinces Canada: Implications for Late Archean subduction zone petrogenetic processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 36 – 52
- Qing M, Zhang WZ, Tang MG, Ge LS and Han XJ. 2011a. Structural system and its ore-controlling of the Bilihe goldfield in Sunite You City, Inner Mongolia. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 566 – 574 (in Chinese with English abstract)
- Qing M, Ge LS, Tang MG, Qu WJ, Yuan SS and Zhao YS. 2011b. Molybdenite Re-Os isotope age of Bilihe Large-size porphyry gold deposit in Sunid right banner of Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 30(1): 11 – 20 (in Chinese with English abstract)
- Ren JS, Niu BG and Liu ZG. 1999. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 85 – 93 (in Chinese with English abstract)
- Saunders AD, Norry MJ and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: Trace element constraints. *J. Petrol.*, Special Lithosphere Issue, 425 – 445
- Sun SS. 1982. Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 179 – 192
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 42: 313 – 345
- Tatsumi Y. 2001. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction: Generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, Southwest Japan. *Geology*, 29(4): 323 – 326
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 57 – 72
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. Springer, 1 – 466
- Wood DA. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50: 11 – 30
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069 – 1089
- Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ *et al.* 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. *American Journal of Science*, 304: 370 – 395
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic. *Science in China (Series D)*, 43: 219 – 232
- Zhai MG and Liu WJ. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 122: 183 – 199
- Zhai MG. 2004. 2.1 ~ 1.7Ga geological event group and its geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (6): 1343 – 1354 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Palaeoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 547 – 561
- Zhao CH. 1989. The ATK diagram of basic-intermediate volcanic rocks and tectonic environment. *Geological Science and Technology Information*, 8(4): 1 – 5 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archaean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, Structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45 – 73

附中文参考文献

- 陈衍景. 2000. 中国西北地区中亚型造山-成矿作用的研究意义和进展. *高校地质学报*, 6(1): 17 – 22
- 陈衍景. 2002. 中国区域成矿研究的若干问题及其陆陆碰撞的关系. *地学前缘*, 9(4): 319 – 328
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针. *中国地质*, 35(6): 1059 – 1073
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. *岩石学报*, 25(11): 2695 – 2726
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 吴宗絮, 刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论. *高校地质学报*, 13(3): 392 – 402
- 葛良胜, 卿敏, 袁士松, 唐明国, 邢俊兵. 2009. 内蒙古毕力赫大型金矿勘查突破过程及启示意义. *矿床地质*, 28(4): 390 – 402
- 郝百武. 2011. 内蒙古哈达庙地区构造-岩浆演化与金成矿作用研究. 博士学位论文. 昆明: 昆明理工大学
- 胡波, 翟明国, 郭敬辉, 彭澎, 刘富, 刘爽. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义. *岩石学报*, 25(1): 193 – 211
- 鲁颖淮, 李文博, 赖勇. 2009. 内蒙古镶黄旗哈达庙金矿床含矿斑岩体形成时代和成矿构造背景. *岩石学报*, 25(10): 2615 – 2620
- 卿敏, 张文钊, 唐明国, 葛良胜, 韩先菊. 2011a. 内蒙古自治区苏尼特右旗毕力赫金矿田构造系统及其控矿规律. *大地构造与成矿学*, 35(4): 566 – 574
- 卿敏, 葛良胜, 唐明国, 屈文俊, 袁士松, 赵玉锁. 2011b. 内蒙古苏尼特右旗毕力赫大型斑岩型金矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *矿床地质*, 30(1): 11 – 20
- 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞-叠覆造山和多旋回缝合作用. *地学前缘*, 6(3): 85 – 93
- 翟明国. 2004. 华北克拉通 2100 ~ 1700Ma 地质事件群的分解和构造意义探讨. *岩石学报*, 20(6): 1343 – 1354
- 赵崇贺. 1989. 中基性火山岩成分的 ATK 图解与构造环境. *地质科技情报*, 8(4): 1 – 5