

蒙古国博洛大型金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及地质意义

侯万荣^{1,2)}, 聂凤军¹⁾, 江思宏¹⁾, 白大明¹⁾, 刘 妍¹⁾, 云 飞¹⁾, 刘翼飞¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 中国人民武装警察部队黄金第一总队, 黑龙江哈尔滨 150086

摘 要: 本文首次对博洛金矿床容矿围岩—博洛黑云母花岗岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定, 获得两组年龄 441.9 ± 6.6 Ma 和 452.2 ± 3.9 Ma, 表明博洛花岗岩杂岩体应属于早古生代晚期岩浆活动的产物。其主量元素特征表现为高硅($\text{SiO}_2 = 75.90 \times 10^{-2} \sim 76.43 \times 10^{-2}$)、富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.52 \sim 1.72$)、富碱($(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 8.03 \times 10^{-2} \sim 8.22 \times 10^{-2}$)、碱度率 $\text{AR} = 3.99 \sim 4.13$ 、低钙($\text{CaO} = 0.77 \times 10^{-2} \sim 0.97 \times 10^{-2}$)、弱过铝质($\text{A}/\text{CNK} = 1.02 \sim 1.05$)的特点; 稀土元素 $\Sigma\text{REE} = (160.56 \sim 91.28) \times 10^{-6}$, $\delta\text{Eu} = 0.19 \sim 0.41$, 稀土元素分布型式为具有明显负铕异常“燕型”曲线。微量元素除 P、Ti 相对原始地幔略有亏损外, 其它微量元素都表现出不同程度富集, 蛛网图曲线总体为右倾的趋势。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70986 \sim 0.70891$, 说明其岩浆来源应主要是壳源, 但受到幔源物质的混染; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.512138 \sim 0.512115$, 平均 0.512127, $\varepsilon_{\text{Nd}(t)}$ 变化在 $+1.4 \sim +1.2$, 平均 $+1.3$, 为正值, 具有幔源的特点。这些特征表明博洛黑云母花岗岩为壳幔相互作用的产物, 并有新生地幔物质加入, 产于造山后环境。博洛金矿床的形成时代为早侏罗世, 博洛花岗岩杂岩体仅为金矿床的容矿围岩, 为矿床提供容矿空间, 与金矿床成因关系不密切。

关键词: 花岗岩; SHRIMP 锆石 U-Pb 测年; Sr-Nd 同位素; 博洛金矿床; 蒙古国

中图分类号: P584; P597; P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-3021(2010)03-331-12

SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Ore-bearing Granite in the Boroo Large-size Gold Deposit, Mongolia and Its Geological Significance

HOU Wan-rong^{1,2)}, NIE Feng-jun¹⁾, JIANG Si-hong¹⁾, BAI Da-ming¹⁾, LIU Yan¹⁾, YUN Fei¹⁾, LIU Yi-fei¹⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2) No. 1 Gold General Party of CAPF, Harbin, Heilongjiang 150086, China

Abstract: The SHRIMP U-Pb age dating results of zircons obtained for the first time from biotite granite of Boroo complex in the Boroo large-size gold orefield suggest that this region experienced the late Paleozoic tectono-magmatic activity. Two groups of ages were obtained, i.e., 441.9 ± 6.6 Ma and 452.2 ± 3.9 Ma, indicating Late Ordovician. The major elements of Boroo biotite granite are characterized by high silica ($\text{SiO}_2 = 76.43 \sim 75.90\%$), rich potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.72 \sim 1.52$), rich alkaline ($(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) = 8.03 \sim 8.22\%$), alkali-degree rate $\text{AR} = 3.99 \sim 4.13$, low calcium ($\text{CaO} = 0.77\% \sim 0.97\%$), low magnesium ($\text{MgO} = 0.15\% \sim 0.16\%$), low phosphorus ($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.02\% \sim 0.05\%$), and quasi-aluminous to weak peraluminous nature ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.39\% \sim 12.74\%$, and $\text{A}/\text{CNK} = 1.02 \sim 1.05$). Rittmann index $\sigma = 1.93 \sim 2.05$, implying calc-alkaline nature. In comparison with the A-type granite, their average chemical compositions are similar to each other; nevertheless, the average chemical composition of Boroo biotite granite is obviously different from that of S-type granite and standard granite. In the K_2O - SiO_2 diagram, the rock samples fall into the range of high-K calc-alkaline series. Geochemical characteristics of rare earth elements are $\Sigma\text{REE} = (160.56 \sim 91.28) \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 7.72 \sim 5.01$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 9.49 \sim 5.99$, $\delta\text{Eu} = 0.19 \sim 0.41$,

本文由国家科技支撑课题(编号: 2007BAB25B02)和地质调查项目(编号: 1212010911029)联合资助。

收稿日期: 2010-04-28; 改回日期: 2010-06-11。

第一作者简介: 侯万荣, 男, 1968 年生。高级工程师, 在读博士。从事矿产勘查及矿床地质研究。E-mail: wanrong_01@sina.com。

and $\delta\text{Ce} = 0.82 \sim 0.79$. REE distribution patterns demonstrate a significant negative Eu anomaly and a "swallow-type" shape. Except for P and Ti which are relatively slightly depleted relative to the primitive mantle, trace elements show enrichment in different degrees. Trace element spider diagrams exhibit the depletion of Nb, Ta, Sr, Ba, P, Ti, U, and the enrichment of Rb, Th, Pb. The right-inclination trend characteristics of spider diagram curves suggest that the content of trace elements and their compatibility are simultaneously decreasing and that the rocks have experienced crystallization differentiation of magmatic evolution. According to Zhang Qi's (2008) granite classification, Boroo granite is of the Nanling type; in combination with REE and trace element spider diagrams, Boroo granite should be a product of post-orogenic extensional setting. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of Boroo biotite granite = $0.70986 \sim 0.70891$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of modern oceanic basalts = $0.702 \sim 0.706$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ average value of continental crust is 0.719 , and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value of Boroo granite is in the range of $0.706 \sim 0.719$, indicating that the magma source of Boroo granite should have been mainly of crust-derivation, partly with contamination of mantle-derived materials. $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.512138 \sim 0.512115$, with an average of 0.512127 , and $\epsilon\text{Nd}(t)$ values range from 1.2 to 1.4 , with an average of 1.3 , showing positive values with characteristics of mantle source. Nd isotope two-stage model ages $T_{2DM} = 1070 \sim 1094\text{Ma}$, with an average of 1082Ma , indicating that the source rocks of Boroo granite complex might have been products of Tuva-Mongolia massif in the late period of Middle Proterozoic. In the $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram, the Boroo granite falls in Quadrant I. All these features indicate that the source rocks of Boroo biotite granite are possessed of both continental crust-derivation and the involvement of mantle-derived materials. Boroo granite was produced by crust-mantle interaction and the participation of new substances derived from the mantle and formed in a post-orogenic environment. Regional extension led to crust thinning, mantle uplifting and asthenospheric upwelling. Decompression resulted in mantle melting and the formation of basalt magma, whereas basaltic underplating gave rise to lower crust melting and the formation of granite. The concentrations of such elements as gold, silver, copper and zinc in Boroo biotite granite are lower than their respective Clark values except for lead, whose concentration is slightly higher than the Clark value. The ore-forming age of the Boroo gold deposit should be early Jurassic, indicating that Boroo granite complex only served as ore-bearing wall rocks of the Boroo gold deposit and provided ore-bearing space. The formation of the Boroo gold deposit was irrelevant to the formation of Boroo granite complex.

Key words: granite; SHRIMP zircon U-Pb dating; Sr-Nd isotope; Boroo gold deposit; Mongolia

博洛金矿床位于蒙古中北部北肯特金矿带内(图1), 蒙古首都乌兰巴托北西方向约110公里。该矿床为蒙古北部最大的金矿床, 目前探获黄金储量36吨(Cluer et al., 2005; 肖伟等, 2010, 图版II-1~4)。该矿床除进行了基本的勘查工作外, 科研工作开展较少, 相关文献也很少(Cluer et al., 2005; Goldfarb et al., 2001), 基于这一现状, 本文对金矿区容矿围岩—博洛杂岩中的黑云母花岗岩成岩时代、主量和微量元素及Sr-Nd同位素地球化学做了较深入研究, 进而探讨区内赋矿围岩花岗岩与金成矿作用之间的关系、花岗岩的成因和北蒙古的构造演化。

1 矿区地质概况

博洛金矿床位于蒙古中北部色楞格省巴彦高勒庙, 矿床中心地理位置坐标: 东经 $106^{\circ}11'33''$; 北纬 $48^{\circ}44'38''$ (肖伟等, 2010)。区内出露地层主要为寒武—奥陶系哈拉组浊积岩序列页岩, 粉砂岩和细砂岩, 岩石发生强烈褶皱, 并遭受了低绿片岩相区域变质作用, 在花岗岩侵入接触边缘局部地段叠加了接触变质(钠长石—绿帘石—角闪岩相)作用。岩浆岩主要为博洛杂岩花岗岩类(图2)。另外, 大量的闪长岩脉和细晶岩脉侵入到花岗岩和变质沉积岩中, 岩脉宽度

几厘米到几米, 沿N-NW向垂直断裂带分布。矿区构造主要为博洛断裂带, 为一近水平的构造带, 为博洛矿区主要控矿构造, 断层微向北西倾斜, 为大型逆冲断层或拆离断层, 与起主导作用的区域左旋走滑断裂有关, 区内还发育一系列高角度N-NNW走向断裂, 并为岩脉所充填(Cluer et al., 2005)。

金矿体主要产于博洛近水平断裂带内, 矿体在带内呈透镜状、层状、脉状, 主要为石英脉、细小的石英脉及蚀变岩, 大多沿近水平, 少量沿近垂直排列的张性裂隙产出(图2)。整个矿化带(金异常 $\geq 100\text{ppb}$)长度超过2500米, 宽度100米, 局部厚度达400米。主要容矿围岩为花岗岩, 闪长岩和变质沉积岩, 矿石矿物组合主要分为两种类型, 含金硫化物组合和含金石英脉, 含金硫化物包括金—黄铁矿—毒砂—石英组合和金—石英—绢云母—黄铁矿—碳酸盐组合(Cluer et al., 2005), 矿石中金属矿物主要有黄铁矿、毒砂, 次为黄铜矿、黝铜矿、方铅矿和褐铁矿等, 脉石矿物主要有石英、绢云母、钠长石、绿帘石、方解石、铁白云石等。主要蚀变类型有硅化、绢云母化、青盘岩矿化、碳酸盐化、局部可见钠长石化等, 蚀变分带明显, 以石英—绢云母—黄铁矿蚀

变为中心, 蚀变强度向外降低, 逐渐变为一个更大范围的青磐岩化的蚀变晕圈。金矿化常常与强烈的石英绢云母化蚀变相伴。

2 博洛花岗杂岩地质及岩相学特征

花岗岩类(博洛杂岩体)主要分布在博洛(Boroo)矿区中南部和北部地区, 与寒武-奥陶系哈拉组沉积岩序列页岩, 粉砂岩和细砂岩呈侵入接触关系, 局部可见断层接触。在矿区范围内主要位于近水平的博洛断层下盘, 在断层内强烈破碎蚀变, 为金矿的赋矿围岩, 主要岩性有斜长花岗岩、钾长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗闪长岩、浅色花岗岩等。岩体呈灰白-浅肉红色, 岩石以块状构造为主, 花岗结构、碎裂结构, 主要矿物成分为斜长石, 钾长石, 石

英, 黑云母。斜长石多呈自形-半自形板状, 钾长石呈自形-半自形板状, 具卡式双晶, 多呈它形粗晶, 显微条纹构造发育, 常半包嵌斜长石和石英等。石英呈它形粒状。黑云母呈叶片状弯曲、或折曲叶片状。矿物粒度以 2-5 mm 中粒为主, 部分 5-8 mm。副矿物锆石、金红石一般包裹在黑云母中。岩石破碎蚀变明显, 可见新生的钠长石交代钾长石的现象, 斜长石绢云母化、高岭土化非常普遍。

3 样品采集与分析方法

黑云母花岗岩样品均采自矿区中部 3 号采坑(坐标 E106°11'33"; N48°44'38")。锆石的分选在廊坊科大矿物分选公司完成, 对采集的样品通过破碎、淘洗和重液分离, 初步分选出锆石。然后进行电磁分

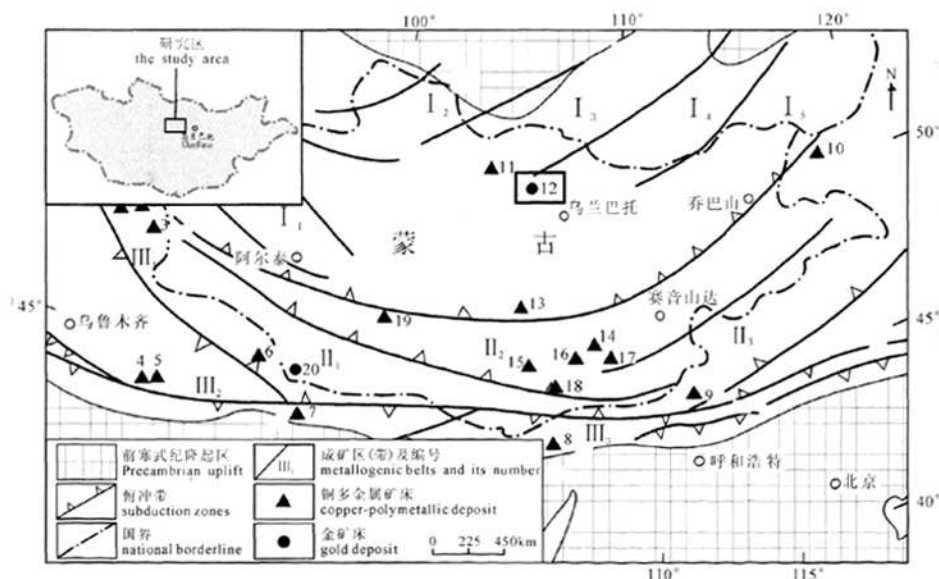


图 1 博洛金矿床位置简图(底图据吴震寰等, 1993)

Fig. 1 Sketch tectonic location map of the Boroo gold deposit, Mongolia (base map after Wu et al., 1993)

主要金属成矿带: I₁-巴彦洪戈尔成矿带; I₂-鄂尔浑-色楞格成矿带; I₃-北肯特成矿带; I₄-肯特成矿带; I₅-南克鲁伦成矿带; II₁-南蒙古成矿带; II₂-曼塔赫-查干苏布尔加成矿带; II₃-南戈壁-努库塔达成矿带; III₁-阿尔泰成矿带; III₂-东天山-北山成矿带; III₃-狼山-白云鄂博成矿带

Main metallogenic belts: I₁-Bayanhongor metallogenic belt; I₂-Orkhon-selenge metallogenic belt; I₃-northern Kent metallogenic belt; I₄-Kent metallogenic belt; I₅-southern Kerulen metallogenic belt; II₁-southern Mongolia metallogenic belt; II₂-Mantah-Tsagaan suvarga metallogenic belt; II₃-south gobi-Nukuteda metallogenic belt; III₁-Altay metallogenic belt; III₂-East Tianshan-Beishan metallogenic belt; III₃-Langshan-Bayan Obo metallogenic belt;

代表性金属矿床: 1-索尔库都克铜镍矿; 2-喀拉通克铜镍矿; 3-哈拉苏铜矿; 4-延东铜镍矿; 5-土屋铜镍矿; 6-蒙古铜矿;

7-公婆泉铜矿; 8-霍格气铜铁铅锌矿; 9-白乃庙铜金矿; 10-乌奴格吐山铜镍矿; 11-额尔登特铜-钼矿; 12-博洛金矿; 13-胡勒德铜矿; 14-曼达赫铜矿; 15-嘎顺铜矿; 16-苏廷铜(金)矿; 17-查干苏布尔加铜(钼)矿; 18-欧玉陶勒盖铜(金)矿; 19-白山铜矿; 20-塔林金矿
Typical metal deposits: 1-Suokerduke copper-molybdenum deposit; 2-Karatongke copper-nickel deposit; 3-Harasu copper deposit; 4-Yandong copper-molybdenum deposit; 5-Tuwu copper-molybdenum deposit; 6-Mengxi copper deposit; 7-Gongpoquan copper deposit; 8-Huogeqi copper-polymetallic deposit; 9-Bainaimiao copper-gold deposit; 10-Wunugetushan copper-molybdenum deposit; 11-Erdenet copper-molybdenum deposit; 12-Boroo gold deposit; 13-Huled copper deposit; 14-Mandah copper deposit; 15-Gashuun copper deposit; 16-Shuteen copper-gold deposit; 17-Tsagaan Suvarga copper-molybdenum deposit; 18-Oyu Tolgoi copper-gold deposit; 19-White Hill copper deposit; 20-Tallinn gold deposit

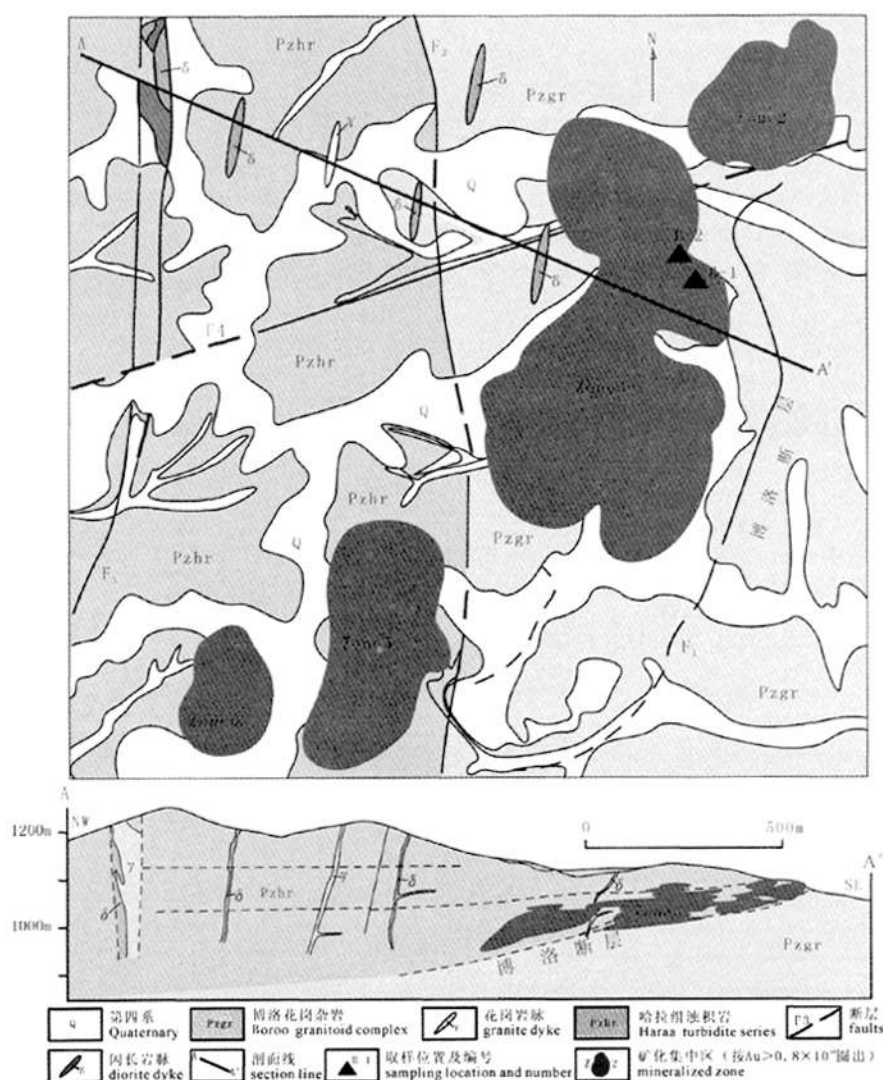


图2 蒙古国博洛金矿区地质简图
Fig. 2 Geological sketch map of the Boroo gold deposit, Mongolia

离,分为无磁、电磁和强磁等不同部分,最后对锆石进行手工挑纯。将所选锆石样品与标准样品(TEM)固定在直径为25 mm的环氧树脂靶上,并且将其研磨一半暴露出锆石的中心部分,对待测锆石和标准锆石样品进行镀金,然后进行光学照相和拍摄阴极发光(CL)图像(图3)。锆石铀、钍和铅同位素分析在北京离子探针中心的 SHRIMP II 上按照标准测定完成,详细的分析原理和分析流程可参见宋彪等(2002)、石玉若等(2007)的文献。分析数据是采用 Squid 和 Isoplot(Ludwig, 2003, 2001)计算机软件处理的,衰变常数采用 ^{204}Pb 方法(Steiger and Jager, 1997; Compston et al., 1984)。

主量、微量和稀土元素在中国地质科学院国家

地质实验测试中心完成。主量元素采用 XRF 法在 X 荧光光谱仪(3080E)上测定。稀土元素和除 Sr、Ba 之外的微量元素采用 ICP-MS 测定。Sr、Ba 采用 (IRIS)ICP-AES 法测定。

Sr-Nd 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。Sm 和 Nd 的分离使用常规的两次离子交换技术,质谱分析使用 7 个接收器的 Finnigan MAT-62 质量分光计, Sr 用静态模式而 Nd 用动态模式。Nd 同位素比值测定以 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行标准化,对 La Jolla 测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511554 \pm 7(2\sigma, n=8)$; Sr 同位素比值测定采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行质量分馏校正, Sr 同位素标准为 NBS607, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=1.20035 \pm 1(2\sigma, n=6)$ 。实验室

全流程本底: Rb、Sr 为 10^{-10} ~ 10^{-11} g, Sm、Nd 为 10^{-11} ~ 10^{-12} g。详细的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 化学制备, 质谱测定方法以及各类标准样品测定结果可见有关报道(王银喜等, 1988)。

4 分析结果

4.1 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

因相对年轻锆石中放射成因 ^{207}Pb 量较少, 因此对年轻锆石均使用其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测年数据加权平均值被认为是锆石的形成时间。博洛黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测试结果列于表 1, 所列分析数据均为同一测点连续 5 次分析结果的平均值, 单个数据点的误差为 1σ 。其一致曲线图绘于图 4, 测点及年龄在图 3 中标出。

样品 B-1 锆石 18 个分析点的 U 含量变化范围 $(158\sim3113) \times 10^{-6}$, 平均值为 1093×10^{-6} , Th 含量 $(84\sim1475) \times 10^{-6}$, 平均值为 533×10^{-6} , Th/U 值变化范围 0.30~0.84, 平均值为 0.54。全部 18 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化范围 386.5~465.7Ma, 平均值为 434.2Ma。其中有 11 个构成一个相关锆石组, 呈群簇状分布在谐和线上及其附近, 其加权平均年龄为 $(441.9 \pm 6.6)\text{Ma}$, MSWD=2.2。其余有 2 个点分别给出了 $(465.7 \pm 7.1)\text{Ma}$ 和 $(462.0 \pm 7.9)\text{Ma}$ 最大的年龄(图 3 中 B-1 的 1.1、18.1), 该年龄可解释为捕获或继承锆石的年龄, 另外 5 个点分别给出了 $(386.5 \pm 5.6)\text{Ma}$ ~ $(420.7 \pm 6.1)\text{Ma}$ 的较年轻的年龄(图 3

中 B-1 的 4.1、9.1、11.1、12.1、15.1), 认为可能发生过放射成因铅丢失。主锆石组的平均年龄 $(441.9 \pm 6.6)\text{Ma}$ 被解释为花岗岩的结晶年龄。

样品 B-2 锆石 15 个分析点的 U 含量变化范围 $(258\sim767) \times 10^{-6}$, 平均值为 436×10^{-6} , Th 含量 $(139\sim382) \times 10^{-6}$, 平均值为 244×10^{-6} , Th/U 值变化范围 0.39~0.97, 平均值为 0.59。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化范围为 439.4~468.3 Ma, 平均值为 452.8 Ma。在这 15 个分析点中, 2 个分析点的年龄分别为 $(468.3 \pm 7.6)\text{Ma}$ (图 3 中 B-2 的 2.1)和 $(471.2 \pm 8.1)\text{Ma}$ (图 3 中 B-2 的 11.1); 其余 13 个分析点年龄分别为 $(457.9 \pm 7.6)\text{Ma}$ ~ $(439.4 \pm 7.1)\text{Ma}$, 平均值为 $(452.8 \pm 7.6)\text{Ma}$ 。尽管锆石颗粒各分析点的年龄值分布范围存在有一定重叠性, 但所有分析点数据呈群簇状分布在谐和线上及其附近, 加权平均值为 $(452.2 \pm 3.9)\text{Ma}$, MSWD=1.4, 被解释为蚀变黑云母花岗岩的结晶年龄。

因此整个博洛花岗岩杂岩体应属于早古生代晚期岩浆活动的产物, 岩浆演化持续活动时间比较长。

4.2 元素地球化学

博洛黑云母花岗岩的主要元素分析结果见表 2, SiO_2 变化范围 76.43×10^{-2} ~ 75.90×10^{-2} , 全碱质组分 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 含量为 8.03×10^{-2} ~ 8.22×10^{-2} ; 碱度率 AR 变化范围 2.63~2.81, 平均值为 2.72, 小于 A 型花岗岩平均碱度率 4.18, 高于 S 型(2.22), 略低于平均

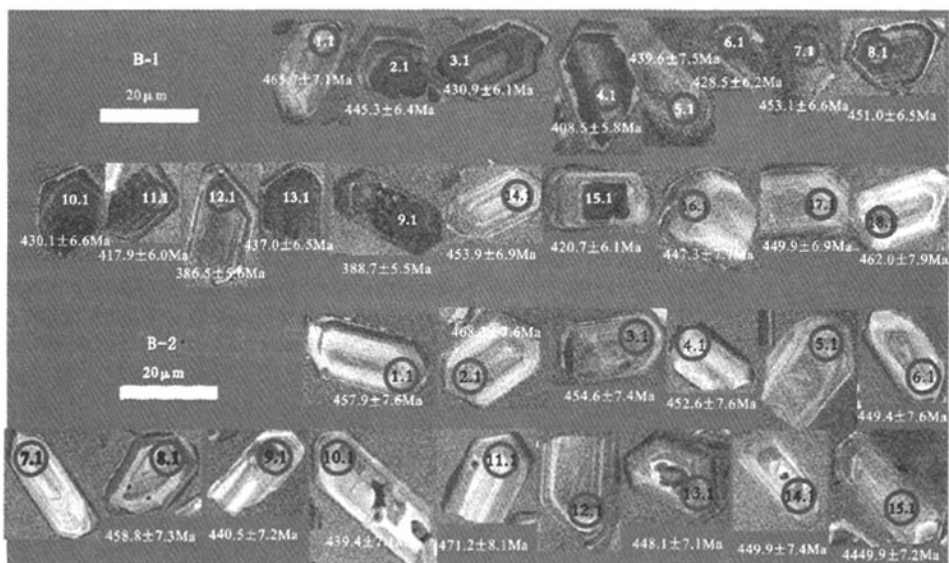


图 3 蒙古国博洛金矿区黑云母花岗岩(B-1)和蚀变黑云母花岗岩(B-2)锆石阴极发光图像
Fig. 3 CL images showing the external and internal structures of zircon grains in biotite granite(B-1) and altered biotite granite(B-2) samples from the Boroo gold deposit, Mongolia

表 1 博洛金矿区花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果
Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb results of granite samples from the Boroo gold deposit

测点	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$ $\pm 1\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^*$ $\pm 1\sigma(\%)$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ $\pm 1\sigma(\%)$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma(\%)$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age(Ma)
黑云母花岗岩(B-1)										
1.1	0.61	331	228	0.71	21.5	13.35 ± 1.6	0.0561 ± 3.4	0.579 ± 3.7	0.0749 ± 1.6	465.7 ± 7.1
2.1	0.84	970	573	0.61	60.1	13.98 ± 1.5	0.0562 ± 2.2	0.554 ± 2.6	0.0715 ± 1.5	445.3 ± 6.4
3.1	1.55	1525	820	0.56	92.0	14.46 ± 1.5	0.0596 ± 2.6	0.568 ± 3.0	0.0691 ± 1.5	430.9 ± 6.1
4.1	0.18	1220	636	0.54	68.7	15.29 ± 1.5	0.05566 ± 1.4	0.502 ± 2.0	0.06542 ± 1.5	408.5 ± 5.8
5.1	0.56	441	193	0.45	26.9	14.17 ± 1.8	0.0563 ± 4.3	0.548 ± 4.6	0.0706 ± 1.8	439.6 ± 7.5
6.1	0.25	983	486	0.51	58.2	14.55 ± 1.5	0.05682 ± 1.5	0.539 ± 2.1	0.0687 ± 1.5	428.5 ± 6.2
7.1	0.37	638	364	0.59	40.0	13.73 ± 1.5	0.0549 ± 1.9	0.551 ± 2.5	0.0728 ± 1.5	453.1 ± 6.6
8.1	0.14	1025	401	0.40	63.9	13.80 ± 1.5	0.05600 ± 1.2	0.559 ± 1.9	0.0725 ± 1.5	451.0 ± 6.5
9.1	3.39	3113	1475	0.49	172	16.09 ± 1.5	0.0701 ± 2.9	0.600 ± 3.2	0.06215 ± 1.5	388.7 ± 5.5
10.1	2.62	1639	676	0.43	99.8	14.50 ± 1.6	0.0620 ± 3.9	0.590 ± 4.2	0.0690 ± 1.6	430.1 ± 6.6
11.1	3.83	1907	839	0.45	114	14.93 ± 1.5	0.0687 ± 5.7	0.634 ± 5.9	0.06698 ± 1.5	417.9 ± 6.0
12.1	0.21	1768	512	0.30	94.0	16.18 ± 1.5	0.05445 ± 1.1	0.4639 ± 1.9	0.06179 ± 1.5	386.5 ± 5.6
13.1	5.40	1984	923	0.48	126	14.26 ± 1.5	0.0733 ± 7.6	0.709 ± 7.8	0.0701 ± 1.5	437.0 ± 6.5
14.1	0.24	365	225	0.64	22.9	13.71 ± 1.6	0.0565 ± 2.1	0.569 ± 2.6	0.0730 ± 1.6	453.9 ± 6.9
15.1	0.66	919	745	0.84	53.6	14.83 ± 1.5	0.0565 ± 2.2	0.526 ± 2.7	0.0674 ± 1.5	420.7 ± 6.1
16.1	1.42	158	84	0.55	9.87	13.92 ± 1.8	0.0580 ± 7.1	0.575 ± 7.3	0.0718 ± 1.8	447.3 ± 7.7
17.1	0.53	320	193	0.62	20.0	13.83 ± 1.6	0.0587 ± 3.0	0.585 ± 3.4	0.0723 ± 1.6	449.9 ± 6.9
18.1	0.23	375	217	0.60	24.0	13.46 ± 1.8	0.0581 ± 2.6	0.596 ± 3.2	0.0743 ± 1.8	462.0 ± 7.9
蚀变黑云母花岗岩(B-2)										
1.1	0.83	287	149	0.54	18.3	13.58 ± 1.7	0.0552 ± 4.3	0.560 ± 4.6	0.0736 ± 1.7	457.9 ± 7.6
2.1	0.19	379	261	0.71	24.6	13.27 ± 1.7	0.0550 ± 1.9	0.572 ± 2.5	0.0754 ± 1.7	468.3 ± 7.6
3.1	0.95	420	199	0.49	26.6	13.69 ± 1.7	0.0563 ± 3.2	0.568 ± 3.7	0.0731 ± 1.7	454.6 ± 7.4
4.1	1.43	326	155	0.49	20.6	13.75 ± 1.7	0.0543 ± 5.6	0.545 ± 5.9	0.0727 ± 1.7	452.6 ± 7.6
5.1	3.23	341	163	0.49	22.3	13.59 ± 2.1	0.0562 ± 1.1	0.570 ± 1.1	0.0736 ± 2.1	457.7 ± 9.3
6.1	0.72	248	139	0.58	15.5	13.85 ± 1.7	0.0571 ± 4.8	0.568 ± 5.1	0.0722 ± 1.7	449.4 ± 7.6
7.1	1.03	258	179	0.72	16.3	13.75 ± 1.7	0.0567 ± 4.2	0.569 ± 4.6	0.0727 ± 1.7	452.5 ± 7.6
8.1	1.13	620	367	0.61	39.7	13.56 ± 1.6	0.0550 ± 3.1	0.559 ± 3.5	0.0738 ± 1.6	458.8 ± 7.3
9.1	0.58	374	353	0.97	22.9	14.14 ± 1.7	0.0558 ± 3.0	0.544 ± 3.5	0.0707 ± 1.7	440.5 ± 7.2
10.1	0.90	483	376	0.80	29.5	14.18 ± 1.7	0.0557 ± 3.1	0.542 ± 3.6	0.0705 ± 1.7	439.4 ± 7.1
11.1	0.67	453	206	0.47	29.7	13.19 ± 1.8	0.0565 ± 3.4	0.590 ± 3.8	0.0758 ± 1.8	471.2 ± 8.1
12.1	0.56	699	382	0.56	43.2	13.98 ± 1.7	0.0543 ± 2.3	0.535 ± 2.9	0.0716 ± 1.7	445.5 ± 7.3
13.1	0.34	767	291	0.39	47.6	13.89 ± 1.6	0.05492 ± 1.8	0.545 ± 2.4	0.0720 ± 1.6	448.1 ± 7.1
14.1	0.70	462	221	0.49	28.9	13.83 ± 1.7	0.0552 ± 4.0	0.550 ± 4.4	0.0723 ± 1.7	449.9 ± 7.4
15.1	0.54	423	219	0.53	26.1	13.99 ± 1.7	0.0545 ± 2.9	0.537 ± 3.4	0.0715 ± 1.7	444.9 ± 7.2

注: $^{206}\text{Pb}_c$ 为普通铅; $^{206}\text{Pb}^*$ 为放射性铅。分析单位: 北京离子探针分析中心。

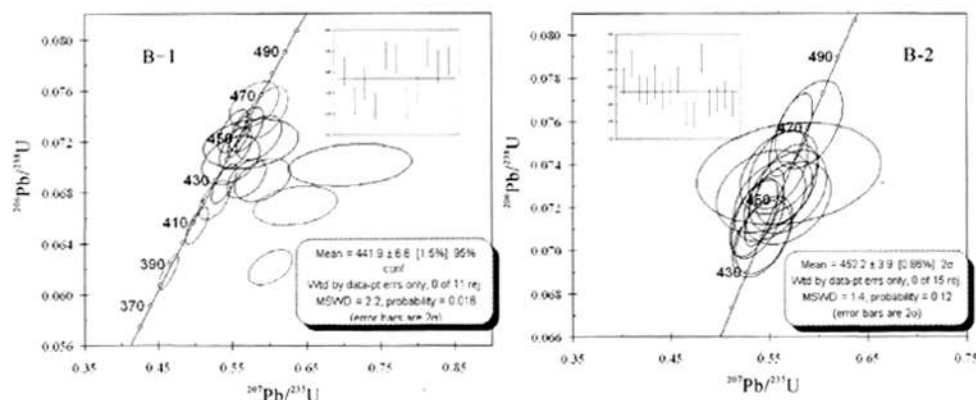


图 4 蒙古国博洛金矿区黑云母花岗岩(B-1)和蚀变黑云母花岗岩(B-2)锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图
Fig. 4 Zircon SHRIMP U-Pb concordia plots for biotite granite (B-1) and altered biotite granite (B-2) samples from the Boroo gold deposit, Mongolia

表 2 蒙古国博洛矿区花岗岩主量元素(%)和稀土及微量元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 2 Content of major (%), rare earth and trace elements ($\times 10^{-6}$) in ore-bearing granite of the Boroo gold deposit

主量元素																
样号	B-1		B-2		平均值		S 型平均值		A 型平均值		标准平均值					
SiO ₂	76.43		75.90		76.17		71.44		76.02		71.27					
TiO ₂	0.13		0.14		0.14		0.43		0.26		0.25					
Al ₂ O ₃	12.39		12.74		12.57		14.21		12.40		14.25					
Fe ₂ O ₃	0.21		0.57		0.39		0.71		1.06		1.24					
FeO	0.94		0.72		0.83		2.93		1.22		1.62					
MnO	0.02		0.02		0.02		0.06		0.06		0.08					
MgO	0.15		0.16		0.16		1.59		0.20		0.80					
CaO	0.77		0.97		0.87		2.21		0.70		1.62					
Na ₂ O	2.95		3.26		3.11		2.33		3.45		3.79					
K ₂ O	5.08		4.96		5.02		3.90		4.59		4.03					
P ₂ O ₅	0.02		0.03		0.03		0.14		0.05		0.16					
LOI	0.66		0.61		0.64		0.00		0.00		0.89					
Total	99.75		100.08		99.92		99.95		100.01		100.00					
分异指数(DI)	93.22		92.81		93.02		77.15		92.54		85.47					
A/CNK	1.05		1.02		1.04		1.18		1.04		1.05					
SI	1.61		1.65		1.63		13.87		1.90		6.97					
AR	2.63		2.81		2.72		2.22		4.18		2.94					
σ	1.92		2.05		1.99		1.36		1.96		2.15					
R1	2846.00		2714.00		2780.00		2910.00		2697.00		2397.00					
R2	336.00		364.00		350.00		594.00		328.00		497.00					
稀土和微量元素																
样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE
B-1	36.5	60.4	8.17	30.9	5.81	0.36	5.68	0.77	4.62	0.95	2.81	0.41	2.76	0.42	25.1	160.6
B-2	20.2	31.6	4.35	16.4	3.09	0.46	3.83	0.61	4.02	0.88	2.68	0.38	2.42	0.36	24.2	91.28
样号	L/H	La _N /Yb _N	δ Eu	Rb	Ba	Th	Ta	Nb	Zr	Hf	U	Cu	Pb	Zn	Au	Ag
B-1	7.72	9.49	0.19	95.4	287	20.9	0.45	3.76	160	4.62	1.34	6.22	26.7	14.6	1.32	0.04
B-2	5.01	5.99	0.41	97.5	419	16.4	0.36	3.46	142	4.43	0.95	3.28	22.7	24	0.67	0.04

注: 分异指数(DI)= $Qz+Or+Ab+Ne+Lc+Kp$; 固结指数(SI)= $MgO \times 100 / (MgO+FeO+F_2O_3+Na_2O+K_2O)(Wt\%)$; 碱度率(AR)= $[Al_2O_3+CaO+(Na_2O+K_2O)]/[Al_2O_3+CaO-(Na_2O+K_2O)](Wt\%)$, 在 $K_2O/Na_2O=1-2.5$ 时, (K_2O+Na_2O) 用 $2Na_2O$ 计算; 里特曼指数 $\sigma=(Na_2O+K_2O)^2/(SiO_2-43)$; $R1=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$; $R2=6Ca+2Mg+Al$; B-1 博洛黑云母花岗岩; B-2 博洛蚀变黑云母花岗岩; S 型和 A 型花岗岩为其平均化学成分, 引自马鸿文, 1992; 标准平均花岗岩化学成分引自聂凤军等, 2002.

花岗岩(2.94%)的碱度率(马鸿文, 1992); K_2O/Na_2O 比值为 1.72~1.52, 平均值为 1.62, 与 S 型花岗岩平均值(1.67)相近(马鸿文, 1992), 高于 A 型(1.33)和标准花岗岩(1.06)(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); 全铁质(Fe_2O_3+FeO)组分为 $1.15 \times 10^{-2} \sim 1.29 \times 10^{-2}$, 平均值 1.22×10^{-2} , 显著低于 S 型花岗岩(3.64×10^{-2})和标准花岗岩(2.86×10^{-2}), 也低于 A 型花岗岩平均值(2.28×10^{-2})(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); CaO 含量为 $0.77 \times 10^{-2} \sim 0.97 \times 10^{-2}$, 平均值为 0.87×10^{-2} , 略高于 A 型花岗岩平均值(0.70×10^{-2}), 显著低于 S 型花岗岩(2.21×10^{-2})和标准花岗岩(1.62×10^{-2})平均值(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); MgO 含量为 $0.15 \times 10^{-2} \sim 0.16 \times 10^{-2}$, 平均值 0.16×10^{-2} , 略低于

A 型花岗岩(0.20%)平均值, 显著低于 S 型(1.59%)和标准花岗岩(0.80%)的平均值(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); Al_2O_3 变化范围 $12.39 \times 10^{-2} \sim 12.74 \times 10^{-2}$, 平均值为 12.57×10^{-2} , 与 A 型花岗岩(12.40×10^{-2})接近, 低于 S 型(14.21×10^{-2})和标准(14.25×10^{-2})花岗岩的平均值(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); 且 A/CNK 值在 1.02~1.05 之间, 平均值为 1.04, 与 A 型花岗岩(1.04)和标准花岗岩(1.05)相同, 准铝到弱过铝, 低于 S 型(1.18)花岗岩(马鸿文, 1992); P_2O_5 含量在 $0.02 \times 10^{-2} \sim 0.03 \times 10^{-2}$ 之间变化, 与 A 型花岗岩(0.05×10^{-2})相近, 而远低于 S 型(0.14×10^{-2})和标准平均花岗岩(0.16%)含量(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); 分异指数 DI 为 92.68~93.12, 平均 93.02, 与

A 型花岗岩(92.54)相近, 而与 S 型(77.15)和标准平均花岗岩(85.47)相差较大(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); 固结指数 SI 为 1.61~1.65, 平均 1.63, 岩浆分离结晶程度高, 分异好, 略小于 A 型花岗岩(1.90), 显著不同于 S 型(13.87)标准平均花岗岩(6.97)(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002); 里特曼指数 σ 在 1.93~2.05 之间, 平均 1.99, 与 A 型花岗岩(1.96)相近, 与 S 型(1.36)和标准花岗岩(2.15)不同(马鸿文, 1992; 聂凤军等, 2002), 均在 1.8~3 之间, 为钙碱性, 在 K_2O-SiO_2 图解中岩石样品落入高钾钙碱性系列范围(图 5)。通过对比, 博洛花岗岩杂岩与 A 型花岗岩相似, 具有高硅、富钾、富碱、弱过铝质的特点。

博洛黑云母花岗岩的稀土和微量元素分析结果见表 2, 稀土元素含量(ΣREE)变化范围为 $(91.28 \sim 160.56) \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值变化范围为 7.72~5.01, $(La/Yb)_N$ 比值为 9.49~5.99, δEu 值为 0.19~0.41, δCe 值为 0.82~0.79。稀土元素分布型式(图 6)一致向右倾斜, 微弱的铈负异常, 明显铕负异常, 表明斜长石从岩浆中结晶分离。这些特征可与壳幔型花岗岩相类比。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6)上可以看出, 除了 P、Ti 相对原始地幔略有亏损外, 其它

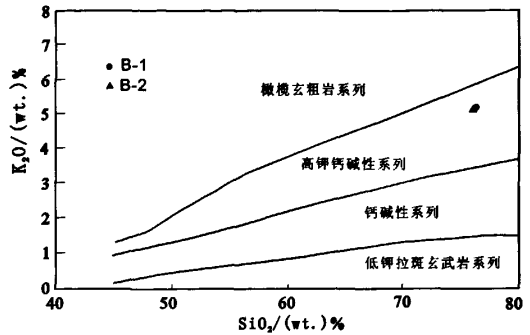


图 5 博洛花岗岩 $K_2O\%$ 对 $SiO_2\%$ 判别图解(引自 Peccerillo and Taylor, 1976)
Fig. 5 $K_2O\%$ versus $SiO_2\%$ diagram of Boroo granites (after Peccerillo and Taylor, 1976)

微量元素都表现出不同程度富集, 像 Rb、Th、K、Pb 为原始地幔含量的 100 多倍。相对来说, 表现出贫 Nb、Ta、Sr、P、Ti 和 U, 而富集 Rb、Th、Pb 的特点。Sr 亏损指示斜长石分离结晶, 因为 Sr 相容于斜长石; Nb、Ta 亏损与岩浆熔融的残留相中有金红石的出现有关; Ti 贫化表示岩浆物质有地壳物质参与, 因为 Ti 不易进入熔体而残留在源区; P、U 亏损反映岩浆幔源的一些特点; Rb、Th、Pb 一般在熔体中富集, 反映出壳源的特征。总之, 这些特征指示花

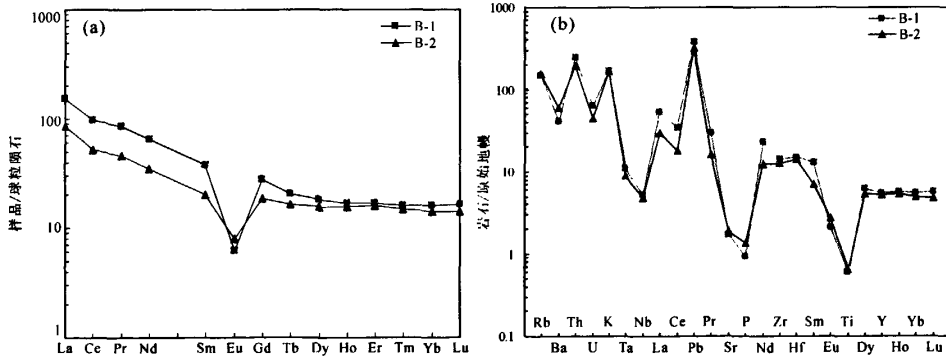


图 6 博洛花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解(a)(标准化数据引自 Sun 等, 1989)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(原始地幔标准化数据引自 McDonough 等, 1992)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE plot(a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams(b) for granites from Boroo district, Mongolia (chondrite data after Sun et al., 1989; primitive mantle-normalized data after McDonough et al., 1992)
图中样品号同表 3(serial number of samples as for Table 3)

表 3 博洛金矿区花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成
Table 3 Sr-Nd isotope composition of granite in the Boroo gold deposit

样号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$\epsilon Sr(0)$	$\epsilon Sr(t)$	$f_{Rb/Sr}$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)
B-1	98.8	42.4	6.739	0.752283	678.3	83.6	80.49	0.70986	5.22
B-2	104	39.5	7.585	0.75777	756.1	70.2	90.72	0.70891	2.73
样号	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\epsilon Nd(0)$	$\epsilon Nd(t)$	$f_{Sm/Nd}$	T_{DM}	T_{2DM}	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$
B-1	38.2	0.0826	0.512377	-5.1	1.4	-0.58	901	1070	0.512138
B-2	18.8	0.0877	0.512375	-5.1	1.2	-0.55	940	1094	0.512115

花岗岩的源岩既有陆壳的特点, 又由幔源物质的参与。蛛网图曲线总体为右倾的趋势反映微量元素含量与其相容程度呈同步降低的趋势, 也暗示岩浆经历了结晶分异的演化作用。

博洛花岗岩的 Sr 含量在 $36.5 \times 10^{-6} \sim 39.70 \times 10^{-6}$, Yb 含量在 $2.76 \times 10^{-6} \sim 2.42 \times 10^{-6}$, 属于张旗等 (2008a) 所划分的 V 类花岗岩, 结合稀土配分模式曲线具有“燕式”分布和微量元素蛛网图显示贫 Ba、P、Ti 以及 Eu 显著亏损的特点, 充分反映了博洛花岗岩为伸展环境和地壳减薄的产物。

4.3 Sr-Nd 同位素地球化学

黑云母花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成见表 3。同位素是岩浆源区性质很好的示踪剂。由于在地幔部分熔融时, Nd 和 Rb 比 Sm 和 Sr 更趋向于进入熔体, 而在地壳物质中, Nd 和 Rb 比 Sm 和 Sr 更为富集。如果花岗岩的熔融源岩以地壳物质为主, 则这些花岗岩应有较低的 Sm/Nd 值和初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值及较高的 Rb/Sr 值和初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值, 反之, 如果源岩中有地幔物质的参与, 则这些花岗岩 Sm/Nd 值和初始 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值相应较高, 而 Rb/Sr 值和初始 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值相应较小。花岗岩样品的钨模式年龄, 是该花岗岩样品从亏损地幔均一库中分离出来以后在地壳中的平均存留年龄, 样品中新生地幔物质的加入, 必然导致钨模式年龄的减小 (洪大卫等, 2000)。我们分别以 442Ma 和 452Ma 作为花岗岩的形成年龄, 计算了上述花岗岩的相关同位素比值 (表 3)。博洛金矿区花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70986 \sim 0.70891$, 平均 0.70938。近年来的研究还证实, I 型花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比小于 0.707, 而 S 型花岗岩则大于 0.707。所以博洛花岗岩偏向于 S 型, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.512138 \sim 0.512115$, $\epsilon_{Nd}(t)$ 变化在 1.4~1.2, 钨同位素两阶段模式年龄 $T_{2DM} = 1070 \sim 1094\text{Ma}$, 说明花岗岩源岩为中元古代晚期图瓦-蒙古地块的产物, 在 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 关系图 (图 7) 上, 博洛花岗岩投点均落于第 I 象限, 因此博洛花岗岩杂岩为壳幔相互作用的结果。

5 讨论

5.1 花岗岩与金成矿作用

上述博洛金矿区黑云母花岗岩两组年龄 $441.9 \pm 6.6\text{Ma}$ 和 $452.2 \pm 3.9\text{Ma}$, 反映博洛花岗岩杂岩体应属于早古生代晚期岩浆活动的产物。前人分别对博洛金矿床的蚀变矿物钾长石和绢云母进行了 Ar-Ar 年龄测定, 时间跨度范围从 208 Ma 至 178 Ma, 成矿年龄在晚三叠世至早侏罗世。在博洛金矿附近加苏尔特 (Gatsuurt) 金矿床测得蚀变矿物 Ar-Ar 平均

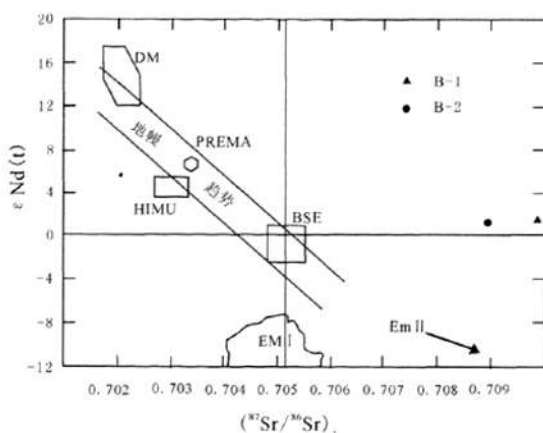


图 7 $\epsilon_{Nd}(t)$ 对 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 同位素相关图解 (底图引自 Zindler 等, 1986)

Fig. 7 $\epsilon_{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ isotope correlation diagram (after Zindler et al., 1986)

DM-亏损地幔; BSE-全硅酸盐地球; EM I 和 EM II-富集地幔; HIMU-高 U/Pb 比值地幔; PREMA-普通地幔; DM-depleted mantle; BSE-All Silicate Earth; EM I and EM II-enriched mantle I and II; HIMU-high U/Pb ratio mantle; PREMA-prevalent mantle

年龄为 178 Ma, 为早侏罗世, 说明博洛地区金矿形成的时期主要为早侏罗世 (J.K. Cluer, et al., 2005)。我们本次对两件花岗岩样品测定 Au 含量分别为 1.32×10^{-9} 和 0.67×10^{-9} , 均小于地壳平均丰度 4×10^{-9} ; 与金伴生的 Ag 含量均为 0.04×10^{-6} , 小于地壳平均丰度 0.08×10^{-6} ; Cu 含量分别为 6.22×10^{-6} 和 3.28×10^{-6} , 而地壳平均丰度为 63×10^{-6} ; Pb 含量分别为 26.70×10^{-6} 和 22.70×10^{-6} , 高于地壳平均丰度 13×10^{-6} ; Zn 含量分别为 14.6×10^{-6} 和 24×10^{-6} , 低于地壳平均丰度 94×10^{-6} (黎彤, 1976), 从以上分析可以看出, 岩体与成矿时代相差较大, 而且岩体中成矿元素含量很低, 除 Pb 略高于克拉克值以外, 其它元素均低于克拉克值。所以博洛矿区黑云母花岗岩仅是作为金矿体的赋矿围岩, 为后来金矿的形成提供容矿空间, 而博洛地区金矿的形成是在博洛花岗岩杂岩形成以后很长时间形成的。

5.2 博洛花岗岩成因及其形成环境

博洛黑云母花岗岩主量元素具有高硅、富钾、富碱、弱过铝质的特点, 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中岩石样品落入高钾钙碱性系列范围 (图 5)。稀土元素具明显的铈负异常, 配分模式呈一致向右倾斜的曲线 (图 6), 与上地壳稀土配分曲线相似。微量元素表现出贫 Nb、Ta、Sr、P、Ti 等 HFSE 元素, 而富集 Rb、Th、Pb 等 LILE 元素的特点, 具有岛弧玄武岩微量元素分布的特点。同位素具有明显偏高的 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 值,

$\epsilon_{Nd}(t)$ 为正值, 在 $\epsilon_{Nd}(t)$ 对 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 同位素相关图解上(图 7), 黑云母花岗岩样品投影点均落在第一象限, 说明岩体在成岩过程中有较多幔源组分参与或为初生地壳派生的产物, 即壳幔相互作用对岩石形成具有重要贡献。壳幔混合源成因的两种钙碱性偏铝质花岗岩之间化学成分的差异, 直接反映两种不同的侵位构造环境, 富钾混染花岗岩类是在碰撞事件之后松弛阶段由于幔源岩浆注入原陆壳而产生的, 指示由挤压状态向拉伸状态的转变。而贫钾的混染花岗岩类则是在陆壳较薄的俯冲带之上产生并侵位的(战明国, 1998)。而博洛黑云母花岗岩富钾, 也表明是后碰撞构造岩浆活动产物。在 R1-R2 构造判别图解中(图 8), 博洛花岗岩岩石样品投点在同碰撞花岗岩和造山期后花岗岩范围之间。在博洛花岗岩的 $Rb \times 10^{-6}$ 对 $(Y+Nb) \times 10^{-6}$ 和 $Rb \times 10^{-6}$ 对 $(Yb+Ta) \times 10^{-6}$ 图解(图 9)上投点到火山弧花岗岩区之上靠近板内。花岗岩和同碰撞花岗岩。这些都表明博洛花岗岩杂岩形成于同碰撞向后造山构造体制转换过渡的伸展大地构造环境背景之下, 伸展构造和幔源基性岩浆的底侵很可能是形成区内花岗岩的两个最主要的动力机制。

5.3 区域地质演化与成矿作用

蒙古北部由多个陆块拼合而成, 这些小的陆块在几次开合运动中逐渐拼贴到西伯利亚古陆的东南边缘。在新元古代早期, 发生了晋宁运动(830 Ma), 西伯利亚古陆和华北-塔里木古陆合为一体, 构成大华夏超大陆, 是罗迪尼亚超大陆的一部分(王鸿祯等, 2006; 聂凤军等, 2004; 刘雪亚等, 1995), 新元古代中-晚期, 晋宁运动(830 Ma)以后, 超大陆发生裂解, 进而形成离散大陆和大洋并存的局面, 分成

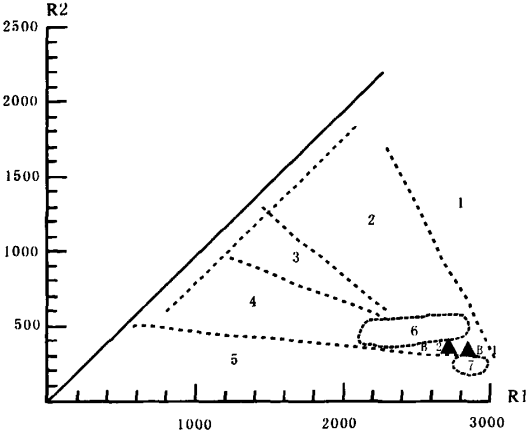


图 8 博洛花岗岩 R1-R2 构造环境判别图解(引自 Batchelor 等, 1985)

Fig. 8 R1 versus R2 discrimination diagrams showing tectonic settings of Boroo granites (after Batchelor et al., 1985)
1—地幔分异产物; 2—板块碰撞前的; 3—碰撞后的抬升; 4—造山晚期的; 5—非造山的; 6—同碰撞期的; 7—造山期后的
1-mantle differentiation products; 2-pre-collision; 3-post-collision uplift; 4-late orogeny; 5-non-orogeny; 6-syn-collision; 7-post-orogenic period

南北两个不同的古陆块, 之间出现了一个广阔的大洋盆地, 即所谓的古蒙古洋, 古蒙古洋中间还散布着一些小的古陆块, 如哈萨克斯坦古陆块、图瓦-蒙古地块、蒙古-阿尔泰地块、扎布汗地块、布提尔地块、查干乌勒地块、胡达克乌勒地块、额尔古纳地块等(王鸿祯等, 2006), 大约在 510 Ma 发生了萨拉伊尔运动, 古蒙古洋北部的小陆块向西伯利亚古陆挤压拼贴和对接, 形成萨拉伊尔褶皱造山带, 在蒙古北部形成如巴彦戈尔萨拉伊尔、吉达萨拉伊尔褶皱带以及北肯特山褶皱带, 引起博洛附近的哈拉小

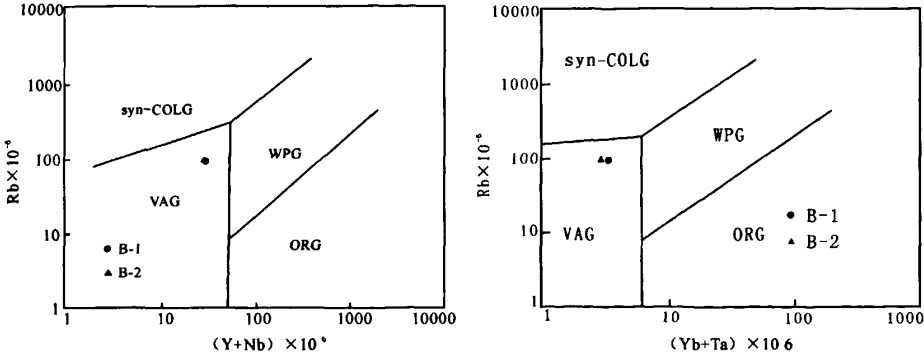


图 9 博洛花岗岩的 $Rb \times 10^{-6}$ 对 $(Y+Nb) \times 10^{-6}$ 和 $Rb \times 10^{-6}$ 对 $(Yb+Ta) \times 10^{-6}$ 图解(引自 Pearce et al., 1984)
Fig. 9 Rb versus $(Y+Nb)$ and Rb versus $(Yb+Ta)$ discriminant diagram for granites from Boroo district, Mongolia (after Pearce et al., 1984)
ORG-洋脊花岗岩, WPG-板内花岗岩, VAG-火山弧花岗岩, COLG-同碰撞花岗岩
ORG-oceanic ridge granite, WPG-intraplate granite, VAG-volcanic arc granite, syn-COLG-syn-collision granite

洋盆关闭, 蒙古中部著名的巴彦洪戈尔蛇绿岩带也是在此次运动中形成的, 萨拉伊尔运动一直持续到晚寒武世, 随后在奥陶纪, 构造体制由挤压向拉伸环境转变, 导致地幔底侵与上部地壳混合, 并熔融上部地壳, 引发大规模的岩浆活动, 博洛杂岩就是在这种挤压向拉伸转变的环境中形成的, 在志留纪晚期(400 Ma)发生了著名的加里东运动, 形成了戈壁-阿尔泰-曼达尔戈壁这一广阔的东西向造山带, 构成早古生代北蒙古古大陆的南界, 也引发大规模加里东同碰撞花岗岩的形成, 随后, 泥盆纪和石炭纪浅水碳酸盐和陆源沉积证明这个时期较小回返式盆地发育; 最终, 地体裂开, 受到二叠纪长英质深成-火山杂岩体的侵入, 大约在 210 Ma 发生了印支运动, 在早侏罗世, 蒙古地块和西伯利亚地台之间的蒙古-鄂霍茨克洋自西向东呈剪刀式关闭, 并挤压造山, 一直延续到中、晚侏罗世, 是在南北向挤压作用下产生的, 经历了逆冲推覆、褶皱和岩浆活动(莫中国, 2005), 随着蒙古-鄂霍茨克洋的关闭而产生一系列金矿床包括乌兰巴托东南部的宗莫德(Dzuunmod)金矿, 乌兰巴托西北部的博洛金矿和宗哈拉金矿。随着蒙古-鄂霍茨克洋关闭, 古亚洲洋完全闭合, 各个古陆块完成最终碰撞拼贴, 侏罗纪以后, 整个蒙古进入陆内演化阶段。

6 结论

(1) 博洛金矿床容矿围岩黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 两组年龄为(441.9±6.6)Ma 和(452.2±3.9)Ma, 为晚奥陶世, 博洛花岗杂岩应属于早古生代晚期岩浆活动的产物。

(2) 黑云母花岗岩表现为高硅、富钾、富碱、弱过铝质的特点, 里特曼指数 $\sigma=1.93\sim2.05$, 为钙碱性, 具有 A 型花岗岩的特点; 稀土元素分布型式具有明显负铈异常向右倾斜的曲线; 微量元素蛛网图表现出贫 Nb、Ta、Sr、P、Ti 和 U, 而富集 Rb、Th、Pb 的特点。

(3) 博洛黑云母花岗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.70986~0.70891, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i = 0.512138~0.512115, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ = 1.4~1.2, 为正值, 钕同位素两阶段模式年龄 $T_{2\text{DM}}=1070\sim1094$ Ma, 博洛花岗岩为壳幔相互作用的产物, 产于造山后环境。

(4) 博洛杂岩形成于萨拉伊尔运动之后, 构造体制由挤压向伸展环境转变, 导致地幔底侵与上部地壳混合, 并熔融上部地壳, 引发大规模的岩浆活动; 而博洛金矿床形成于早侏罗世, 与蒙古-鄂霍茨克洋的关闭有关, 随着蒙古-鄂霍茨克洋的关闭产

生推覆断层、岩浆和成矿热液的活动, 而形成一系列的矿床, 包括宗莫德(Dzuunmod)金矿、博洛金矿和宗哈拉金矿。博洛黑云母花岗岩中成矿元素除了铅略高于克拉克值以外, 金、银、铜、锌含量均低于克拉克值, 表明博洛杂岩仅仅作为金矿床的容矿围岩, 为矿床提供容矿空间, 与金矿床成因关系不密切。

致谢: 中国地质科学院矿产资源研究所杨岳清研究员、丰成友研究员审阅了本文, 并提出了宝贵意见, 在此表示感谢。

参考文献:

- 洪大卫, 王试光, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴蒙造山带正 ε (Nd, t) 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 7(2): 441-456.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 3: 167-174.
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化[J]. 地学研究, 28: 37-48.
- 马鸿文. 1992. 花岗岩成因类型的判别分析[J]. 岩石学报, 8(4): 341-350.
- 莫中国, 韩美莲, 李锦轶. 2005. 蒙古-鄂霍茨克造山带组成及造山过程[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 24(3): 50-53.
- 聂凤军, 江思宏, 张义, 刘妍, 胡朋. 2004. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J]. 矿床地质, 23(2): 176-189.
- 聂凤军, 江思宏, 赵省民, 白大明, 刘妍, 赵月明, 王新亮, 苏新旭. 2002. 内蒙古流沙山金(铜)矿床地质特征及矿床类型的划分[J]. 地质地球化学, 30(1): 1-7.
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 张履桥. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区二叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP 铀-铅年龄及其区域构造意义[J]. 地质通报, 26(2): 183-189.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 刘敦一. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作, 年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊.): 26-30.
- 王鸿祯, 何国瑞, 张世红. 2006. 中国与蒙古之地质[J]. 地学前缘, 13(6): 1-13.
- 王银喜, 杨杰东, 陶仙聪, 李惠民. 1988. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法研究及其应用[J]. 南京大学学报(自然科学版), 21(2): 297-308.
- 吴振寰, 郭统旦, 唐昌韩. 1993. 中国周边国家地质与矿产[M]. 北京: 中国地质大学出版社. 1-248.
- 肖伟, 王义天, 江思宏, 侯万荣. 2010. 南蒙古及邻区地质矿产简图及地形地貌特点[J]. 地球学报, 31(3): 473-484.
- 战明国. 1998. 花岗岩类分类与定位机制研究动向和进展[J]. 中国区域地质, 17(2): 182-188.
- 张旗, 王焰, 潘国强, 李承东, 金惟俊. 2008b. 花岗岩源区问题—关于花岗岩研究的思考之四[J]. 岩石学报, 24(6): 1193-1204.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 李承东. 2008a. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别[J]. 地质通报, 27(1): 1-18.

References:

- BATCHELOR R A and BOWDEN P. 1985. Petrogenetic interpre-

- tation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chem. Geol.*, 48: 43-55.
- CLUER J K, KOTLYAR B, GANTSETSEG O, TOGTOKH D, WOOD G and ULLRICH T. 2005. Geology of the Boroo gold deposit, Northern Mongolia[J]. SEG-IGOD Guidbook Series 11: CERCAMS/NHM Longon, 105-117.
- COMPSTON W, WILLIAMS I S, MAYER C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a Sensitive High Resolution Ion Microprobe, Proc. XIV Lunar Planetary Science Conference[J]. *J. Geophys. Res.*, 89(supp.): B525-534.
- GOLDFARB R J, GROVE D I, GARDOLL S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore Geology Review*, 18: 1-75.
- HONG Da-wei, WANG Shi-guang, XIE Xi-lin, ZHANG Ji-sheng. 2000. Genesis of positive $\epsilon(\text{Nd}, t)$ granitoids in the DA HINGGAN Mts.-MONGOLIA orogenic belt and growth continental crust[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441-456(in Chinese with English abstract).
- LI Tung. 1976. Chemical element abundances in the earth and it's major shells [J]. *Geochimica*, 3: 167-174.
- LIU Xue-ya, WANG Quan. 1995. Tectonics of the orogenic belts in Beishan Mt., western China and their evolution[J]. *Geological Research*, 28: 37-48(in Chinese with English abstract).
- LUDWIG K R. 2001. Squid 1.02: A user manual[M]. Berkely: Berkeley Geochronological Center Special Publication, 1-219.
- LUDWIG K R. 2003. User's manual for isoplot 3.0, a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkely: Berkely Geochronological Center Special Publication, 4: 25-32.
- MA Hong-wen. 1992. Discrimination of genetic types of granitoid rocks[J]. 8(4): 341-350(in Chinese with English abstract).
- MO Shen-guo, HAN Mei-lian, LI Jin-yi. 2005. Compositions and Orogenic Processes of Mongolia-Okhotsk Orogen[J]. *Journal of Shangdong University of Science and Technology(Natural Science)*, 24(3): 50-53(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHANG Yi, LIU Yan and HU Peng. 2004. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring areas[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 176-189(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHAO Xing-min, BAI Da-ming, LIU Yan, ZHAO Yue-ming, WANG Xin-liang, SU Xin-xu. 2002. Geological features and metallogenic type of the Liushashan gold(molybdenum) deposit in Ejina Prefecture, Western Inner Mongolia[J]. *Geology-geochemistry*, 30(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A C. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretations of granitic rocks[J]. *J. Petrol.*, 25. Part 4: 956-983.
- PECCERILLO R, TAYLOR S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 50: 63-81.
- SHI Yu-ruo, LIU Dun-yi, ZHANG Qi, JIAN Ping, ZHANG Fu-qin, MIAO Lai-cheng, ZHANG Lv-qiao. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia, China, and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183-189(in Chinese with English abstract).
- SONG Biao, ZHANG Yu-hai, WAN Yu-sheng, LIU Dun-yi. 2002. SHRIMP zircon samples of target production, determination of age and the phenomenon of discussion[J]. *Geological Review*, 48(supplement.): 26-30(in Chinese with English abstract).
- STEIGER R H, JAGER E. 1997. Subcommittee on geochronology: Convention or the use of decay constants in geo- and cosmochronology[J]. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 36: 359-362.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Sander AD, Norry MJ(ed.). *Magmatism in the Ocean Basins*[M]. Geological Society of London Special Publication, 42: 313-345.
- WANG Hong-zhen, HE Guo-qi, ZHANG Shi-hong. 2006. The geology of China and Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 1-13(in Chinese with English abstract).
- WANG Yin-xi, YANG Jie-dong, TAO Xian-cong, LI Hui-min. 1988. A study of the Sm-Nd method for fossil mineral rock and its application[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 21(2): 297-308(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-huan, WU Tong-dan, TANG Chang-han. 1993. *Geology and Mineral Resources of China's neighboring countries*[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1-248.
- XIAO Wei, WANG Yi-tian, JIANG Si-hong, HOU Wan-rong. 2010. Explanatory Notes for the Simplified Geology and Mineral Resource Map and Typical Geographical and Topographic Features of Southern Mongolian and Its Neighboring Areas[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 473-484(in Chinese with English caption).
- ZHANG Ming-guo. 1998. Trend and progress in the study of the classification and emplacement mechanism of granitoids[J]. 17(2): 182-188.
- ZHANG Qi, WANG Yuan-long, JIN Wei-jun, JIA Xiu-qin, LI Cheng-dong. 2008a. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 1-18.
- ZHANG Qi, WANG Yan, PAN Guo-qiang, LI Cheng-dong, JIN Wei-jun. 2008b. Sources of granites: some crucial questions on granite study(4)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1193-1204(in Chinese with English abstract).
- ZINDLER A, HART S R. 1986. Chemical geodynamics[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 495-571.