内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄、地球化学特征及地质意义

Pre-pub. on line: www. geojournals.cn/georev

达朝元[1)]，巫建华[2)]，杨东光[2)]，郭恒飞[1)]，牛子良[1)]，祝洪涛[1)]，周舰[1)]，于兵[1)]

1)核工业二四三大队，内蒙古赤峰，024000；
2)东华理工大学核资源与环境国家重点实验室，南昌，330013

内容提要：南窝铺铀矿床位于西拉木伦缝合带以南、康宝—围场—赤峰断裂带（华北北缘断裂带的一部分）以北的白乃庙加里东期岛弧带和华北古板块北缘海西期俯冲—碰撞带，属沽源—红山子铀成矿带北东段红山子—广兴铀成矿亚带的一个铀矿床，铀矿体赋存在额里图组安山岩—英安岩—流纹岩组合中。该组合中的英安岩SHRIMP锆石$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$加权平均年龄为268.1±2.5 Ma（N=15，MSWD=0.85），结合安山质角砾凝灰岩的锆石U-Pb年龄为277.1±0.9 Ma，指示额里图组安山岩—英安岩—流纹岩的地质时代属早二叠世（乌拉尔世）—中二叠世（瓜德鲁普世）早期；英安岩SiO_2=65.49%～68.23%，K_2O=1.83%～2.56%，Na_2O=4.13%～5.01%，(K_2O+Na_2O)=5.96%～7.47%，K_2O/Na_2O=0.43～0.59，($FeO+Fe_2O_3$)=3.13%～4.63%，MgO=1.25%～1.79%，在TAS图解上落入亚碱性系列英安岩区，在FAM图解上落入钙碱性系列范围，在SiO_2—K_2O图解上落入中钾钙碱性系列范围，在Na_2O—K_2O图解上落入I型花岗岩区；Al_2O_3=15.74%～16.77%，CaO=2.87%～3.59%，A/CNK=0.95～1.12（平均为1.04，<1.1），标准矿物刚玉（C）的含量为0～1.74%，平均为0.96%，指示源岩为I型岩浆岩；英安岩稀土元素总量低，富集轻稀土，Eu无明显负异常，$\Sigma REE=76.5\times10^{-6}\sim95.4\times10^{-6}$，$(La/Yb)_N$=4.97～12.5（平均8.95），δEu=0.80～1.13（平均0.94），稀土配分模式为右倾型，与安第斯型钙碱性系列火山岩基本一致。英安岩明显富集大离子亲石元素Rb、Th、U、K、Sr等和亏损高场强元素Nb、Ta、P、Ti等，微量元素蛛网图与安第斯型钙碱性系列火山岩的形式一致，在Ce—SiO_2、Al_2O_3—Ga图解上均落入I型花岗岩区，在Ta—Yb、Nb—Y构造环境判别图解上落入火山弧花岗岩区域（VAG）及同碰撞花岗岩（syn-COLG）交界处，在Rb—（Y+Nb）、Rb—（Yb+Ta）构造环境判别图解上落入火山弧花岗岩区域（VAG），指示英安岩形成于俯冲作用下的岛弧环境。南窝铺铀矿床英安岩地质时代、岩石系列和形成构造环境的确定，不仅证实了早二叠世—中二叠世早期额里图组是红山子—广兴铀成矿亚带一个新的赋矿层位，而且揭示了岛弧型安山岩—英安岩—流纹岩组合也赋存有与火山岩有关的热液型铀矿，为深入开展热液型铀矿成矿理论的研究和进一步扩大铀矿勘查范围提供了新的基础资料。

关键词：英安岩；下二叠统—中二叠统；额里图组；内蒙古赤峰南窝铺铀矿床

南窝铺铀矿床位于沽源—红山子铀成矿带北东段的红山子—广兴铀成矿亚带，铀矿体赋存在额里图组安山岩—英安岩—流纹岩组合中。大致以康宝—围场—赤峰断裂带（华北北缘断裂带的一部分）为界，沽源—红山子铀成矿带可分为北东段的红山子—广兴铀成矿亚带和西南段的沽源—丰宁铀成矿亚带，与火山岩有关的热液型铀矿床的赋矿火山岩在红山子—广兴铀成矿亚带曾被归于晚侏罗世满克头鄂博组、玛尼吐组和白音高老组，而在沽源—丰宁铀成矿亚带被归于早白垩世张家口组，虽然两个成矿亚带的赋矿火山岩被归于不同的岩石地层单位，但它们的岩石组合和地质时代长期被认为是晚侏罗世流纹岩—粗面岩组合（河北省地质矿产局，1996；内蒙古自治区地质矿产局，1996）。近十年来，随着基础地质研究的不断深入和铀矿勘查工作的持续开展，现已查明这两个成矿亚带的赋矿火山岩不仅岩石组合不同，而且地质时代也不一致。红山子—广兴铀成矿亚带与火山岩有关的热液型铀矿床

注：本文为中国核工业地质局铀矿地质勘查项目（编号：202001）、国家自然科学基金资助项目（编号：41372071）和中国核工业集团公司项目（编号：中核地计［2008］74）的成果。

收稿日期：2020-07-03；改回日期：2020-12-26；网络首发：2021-02-20；责任编辑：黄道袤、章雨旭。Doi：10.16509/j.georeview.2021.02.＊

作者简介：达朝元，男，1985年生，工程师，主要从事铀多金属地质勘查工作；Email：15049668414@163.com。通讯作者：巫建华，男，1960年生，博士，教授，主要从事铀矿地质和火山地质研究；Email：jhwu@ecit.cn。

的赋矿火山岩主要属于晚侏罗世新民组高钾钙碱性流纹岩—碱性流纹岩组合，流纹岩具有 A 型流纹岩的特征，是板内拉张构造环境下正常厚度地壳的年轻下地壳部分熔融的产物(巫建华等，2013，2016，2017a，2017b；彭啟辉，2015；解开瑞等，2016；黎伟等，2017；姜山等，2018)；而沽源—丰宁铀成矿亚带的赋矿火山岩主要属于早白垩世张家口组高钾钙碱性流纹岩—碱性粗面岩组合，流纹岩和粗面岩分别具有 A 型流纹岩和高压型粗面岩的地球化学特征，分别是板内拉张构造环境下地壳中上部和底部部分熔融的产物(邓晋福等，2000；巫建华等，2014，2015，2017b，2017c；夏应冰等，2016；张雅菲等，2016；林天发等，2019)。同时，在红山子—广兴铀成矿亚带参照红山子铀矿床、在沽源—丰宁铀成矿亚带参照张麻井铀矿床开展铀矿勘查工作，取得了较好的找矿效果，并在红山子—广兴铀成矿亚带不整合于新民组高钾钙碱性流纹岩—碱性流纹岩组合之下的额里图组安山岩—英安岩—流纹岩组合中发现了南窝铺铀矿床和众多铀矿点、铀异常点(祝洪涛等，2014；纪宏伟，2015；黎伟等，2017；巫建华等，2017b)。然而，对赋存南窝铺铀矿床和众多铀矿点、铀异常点的额里图组安山岩—英安岩—流纹岩组合却缺乏系统的年代学和地球化学研究，制约了红山子—广兴铀成矿亚带铀矿勘查的开展和铀成矿理论的完善。本文以南窝铺铀矿床赋矿安山岩—英安岩—流纹岩组合中的英安岩为研究对象，通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和主、微量元素研究，查明其地质时代、岩石系列和形成的构造环境，并对其地质意义进行探讨。

1 区域地质背景

红山子—广兴铀成矿亚带位于西拉木伦河—长春缝合带以南、康宝—围场—赤峰—开原断裂带以北的华北古板块北缘，加里东构造阶段属白乃庙岛弧带—温都尔庙—翁牛特旗增生杂岩带，海西构造阶段属华北古板块北缘俯冲岛弧带，印支构造阶段早期属华北古板块北缘碰撞带，印支构造阶段晚期晚三叠世华北古板块北缘伸展带(图 1a)。寒武纪—志留纪末期，华北克拉通北部被动大陆边缘与白乃庙岛弧带之间为宽广的洋盆(赵越等，2010；徐备等，2014)，白乃庙岛弧带发育火山沉积岩系(Jian Ping et al.，2008；张维等，2008；李锦轶，2009)，主要由绿片岩相—低角闪岩相变质沉积岩、火山岩和侵入岩组成(Zhang Shuanhong et al.，2014)；晚志留世—早泥盆世，古亚洲洋向南俯冲，白乃庙岛弧北侧发育温都尔庙—翁牛特旗增生杂岩带、南侧以弧—陆软碰撞的方式拼贴在华北克拉通北缘，并形成了西别河组磨拉石或类磨拉石组合(许立权等，2003；王平，2005；Chen Xiuqin and Boucot，2007；张允平等，2010)。泥盆纪期间，在华北北缘发育有与弧—陆碰撞后伸展有关的碱性杂岩及双峰式火山岩(Zhang Qiqi et al.，2018)。海西构造阶段，古亚洲洋继续向南俯冲，华北古板块北缘发育一系列与安第斯型大陆边缘弧相关的石炭纪—二叠纪岩浆岩(江小均等，2011；Zhang Shuanhong et al.，2016)和火山岩(曹花花等，2012；曹代勇等，2014；董晓杰等，2016；彭斌等，2016；王月古，2018；崔玉良等，2019)。集宁北部商都县西井子镇一带早—中二叠世(267～272 Ma)苏吉组酸性火山岩和赤峰北部朝阳沟村早二叠世流纹岩具有安第斯型活动大陆边缘火山岩的地球化学特征(董晓杰等，2016；崔玉良等，2019)，赤峰铭山隆起带早二叠世额里图组安山岩形成的构造环境为火山弧(彭斌等，2016)，赤峰翁牛特旗早二叠世流纹岩、安山岩和流纹质—英安质凝灰岩形成于与俯冲带有关的岛弧或活动大陆边缘的构造环境(曹代勇等，2014)，吉林中部早二叠世大河深组流纹岩—英安岩—粗面英安岩组合显示活动大陆边缘的构造背景，延吉地区早二叠世关门咀子组玄武安山岩形成于岛弧构造环境(曹花花等，2012)。印支—燕山构造阶段，古亚洲洋关闭，华北古板块与西伯利亚古板块最后沿阴山—燕山造山带一线拼贴，形成狼山蛇绿混杂岩(吕洪波等，2018)。中生代晚期，红山子—广兴铀成矿亚带受太平洋板块向北西俯冲的影响，该区域进入后碰撞造山系统，由挤压构造体制进入伸展造山构造体制，侏罗纪、白垩纪岩浆活动强烈(孟恩等，2011；许文良等，2013；Tang Jie et al.，2015)，形成了晚侏罗世早期新民组火山岩岩系、侵入岩和早白垩世侵入岩(巫建华等，2013，2016，2017a；解开瑞等，2016；姜山等，2018；王常东等，2019；祝洪涛等，2019，2020)。古亚洲洋构造成矿域与环太平洋构造成矿域的叠加、复合和转换，使研究区成矿地质条件优越，有色金属、稀有金属矿产集中分布(苏美霞等，2020)。

2 矿床地质特征

南窝铺铀矿床位于红山子—托河复式岩体隆起带南东侧，矿床受大兴永—南窝铺断裂控制，矿区内出露的地层主要为下二叠统—中二叠统额里图组、中二叠统于家北沟组、上侏罗统新民组和中新统汉

诺坝组(图 1b)。额里图组为一套陆相火山岩、沉积碎屑岩,下部为长石砂岩、砂岩、粉砂质页岩、粉砂岩,上部为灰—灰褐色英安岩、紫色、灰—灰褐色安山岩、安山质凝灰角砾岩、紫红—褐色熔结凝灰岩、流纹岩、沉凝灰岩夹长石砂岩;于家北沟组为一套海陆交互相岩石组合,岩性主要为黄绿色凝灰质砂砾岩、砂岩、凝灰岩、安山岩。新民组为一套高钾钙碱性流纹岩—碱性流纹岩组合,主要有流纹岩、流纹斑岩、流纹质熔结凝灰岩、流纹质凝灰岩和火山角砾岩组成,流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 156～158 Ma(巫建华等,2013,2017a;解开瑞等,2016;姜山等,2018)。中新统汉诺坝组为玄武岩。侵入岩主要由广兴海西期花岗闪长岩和红山子—托河燕山期复式岩体组成。广兴花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 263.3±2.5 Ma(江小均等,2011);红山子复式岩体粗粒碱长花岗岩和斑状黑云母花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 154±1 Ma 和 151±1 Ma,细粒黑云母碱长花岗岩和花岗斑岩的 LA-

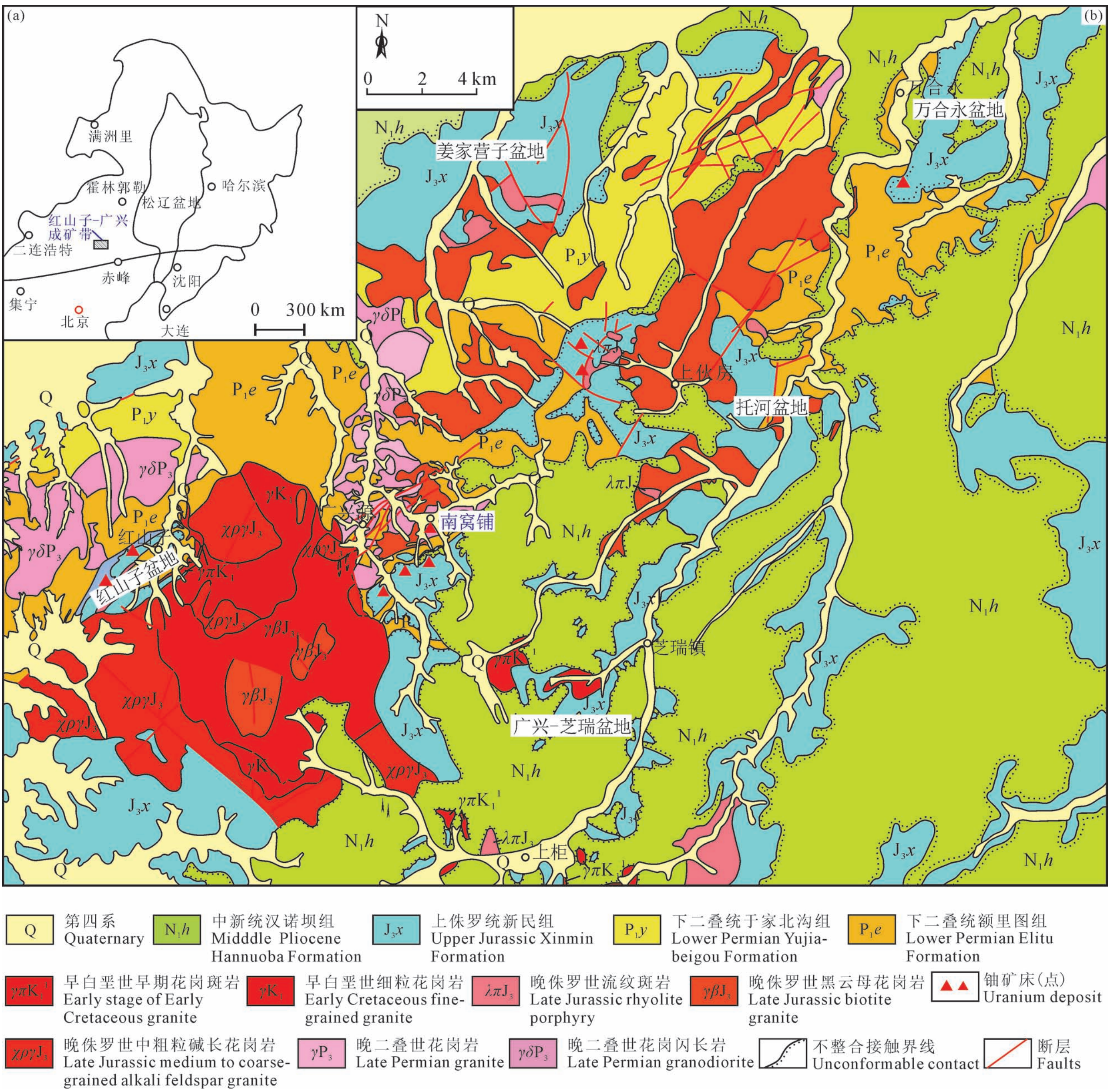

图 1 内蒙古赤峰红山子—广兴铀成矿亚带大地构造位置(a,据丁辉等,2016 修改)和地质简图(b,据祝洪涛等,2019 修改)

Fig. 1 Tectonic location map (a, modified from Ding Hui et al., 2016&) and geological map (b, modified from Zhu Hongtao et al., 2019&) of the Hongshanzi—Guangxing uranium metallogenic subzone, Chifeng area, Inner Mongolia

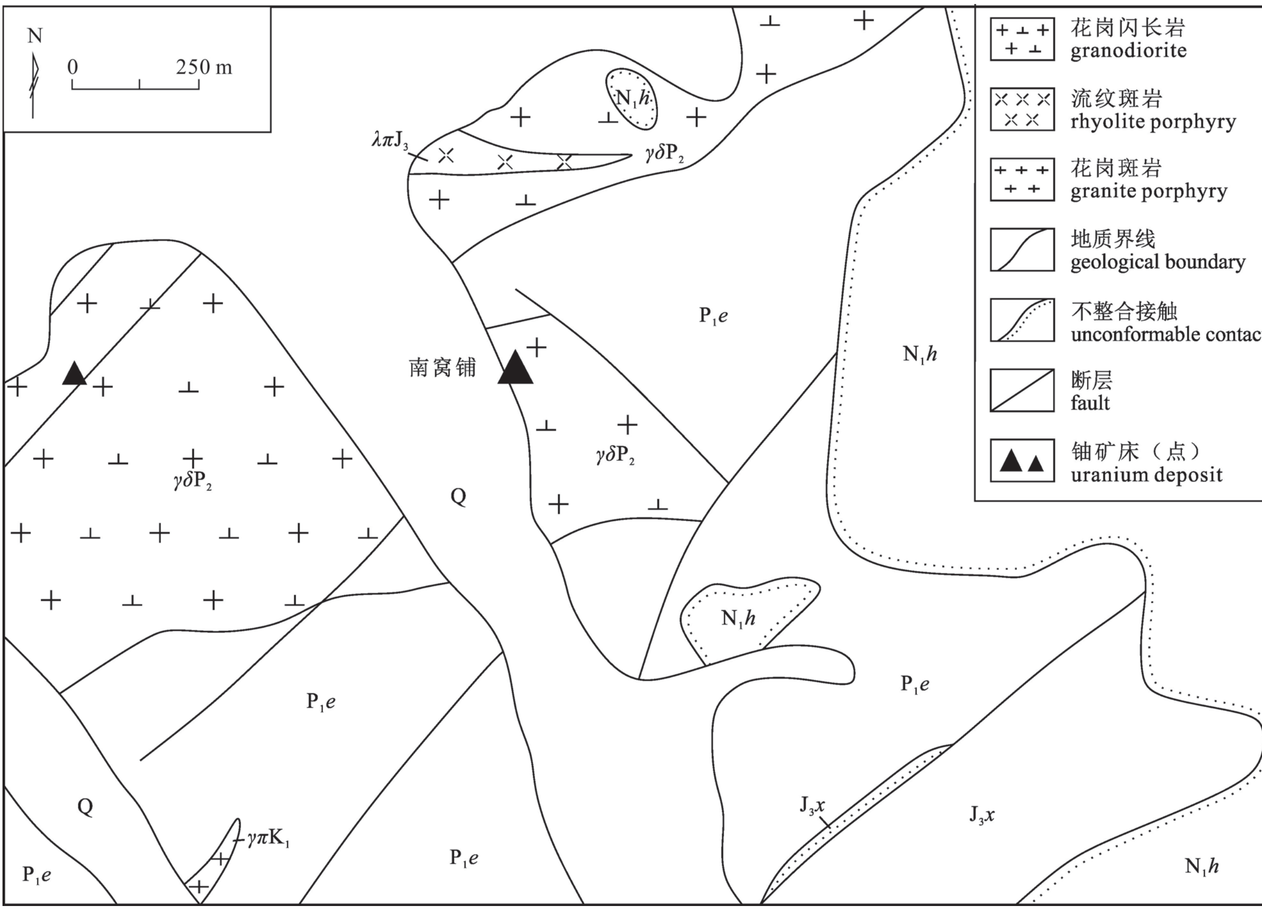

图 2 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

Q—第四系；N_1h—中新统汉诺坝组；J_3x—上侏罗统新民组；P_1e—下二叠统额里图组；$\gamma\pi K_1$—早白垩世花岗斑岩；$\lambda\pi J_3$—晚侏罗世流纹斑岩；$\gamma\delta P_2$—中二叠世花岗闪长岩 Q—Quaternary; N_1h—Pliocene Hannuoba Formation; J_3x—Upper Jurassic Xinmin Formation; P_1e—Lower Permian Elitu Formation; $\gamma\pi K_1$—Early Cretaceous granite porphyry; $\lambda\pi J_3$—Late Jurassic rhyolite porphyry; $\gamma\delta P_2$—Middle Permian granodiorite

ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 132±2 Ma 和 133±1 Ma(祝洪涛等,2019)；侵入红山子盆地新民组的花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 134.8±0.9 Ma (丁辉等,2016)。

南窝铺铀矿床矿体产于断裂带 0~100 m 范围内,赋存在额里图组和海西期花岗闪长岩中(图 2),矿体长 100~230 m、沿倾向方向延伸 50~160 m,形态多呈透镜状,部分为似层状,产状 150°~170°∠70°,平面上侧列,剖面上斜列,向南西侧伏,侧伏角 20°左右。在 25 号矿点新发现的 4 个工业铀矿孔(ZK25-1、ZK25-3、ZK25-5、ZKNW5-1)和 1 个矿化孔(ZKNW4-1)赋存在额里图组英安质晶屑凝灰岩、英安岩(图 3a)中；ZK11-27 钻孔在孔深 110~410 m 范围内揭露到工业铀矿化、铀矿化和铀异常段赋存在花岗闪长岩中(图 3b)。

3 岩相学特征

本次研究的英安岩样品取自南窝铺铀矿床的 ZK25-3 钻孔 113.5~116.5 m 处,岩石呈灰白色、浅灰色,块状构造(图 4a),斑状结构,斑晶由斜长石、少量钾长石和石英、暗色矿物假像构成,大小一般 0.25~2.0 mm,杂乱分布。其中斜长石呈近半自形板状,隐约可见聚片双晶,部分见绢云母化、碳酸盐化和黝帘石化,表面很“脏”,局部可见聚斑；钾长石呈近半自形板状,表面裂纹发育,部分被高岭石、碳酸盐交代；石英呈他形粒状,含量较少；暗色矿物呈他形粒状,被铁质、绿帘石交代呈假像(图 4b)。基质主要由长英质、不透明矿物和少量玻璃质构成包含霏细结构,大小一般 0.03~0.1 mm,界线清楚,基质中不透明矿物和玻璃质星散状分布。

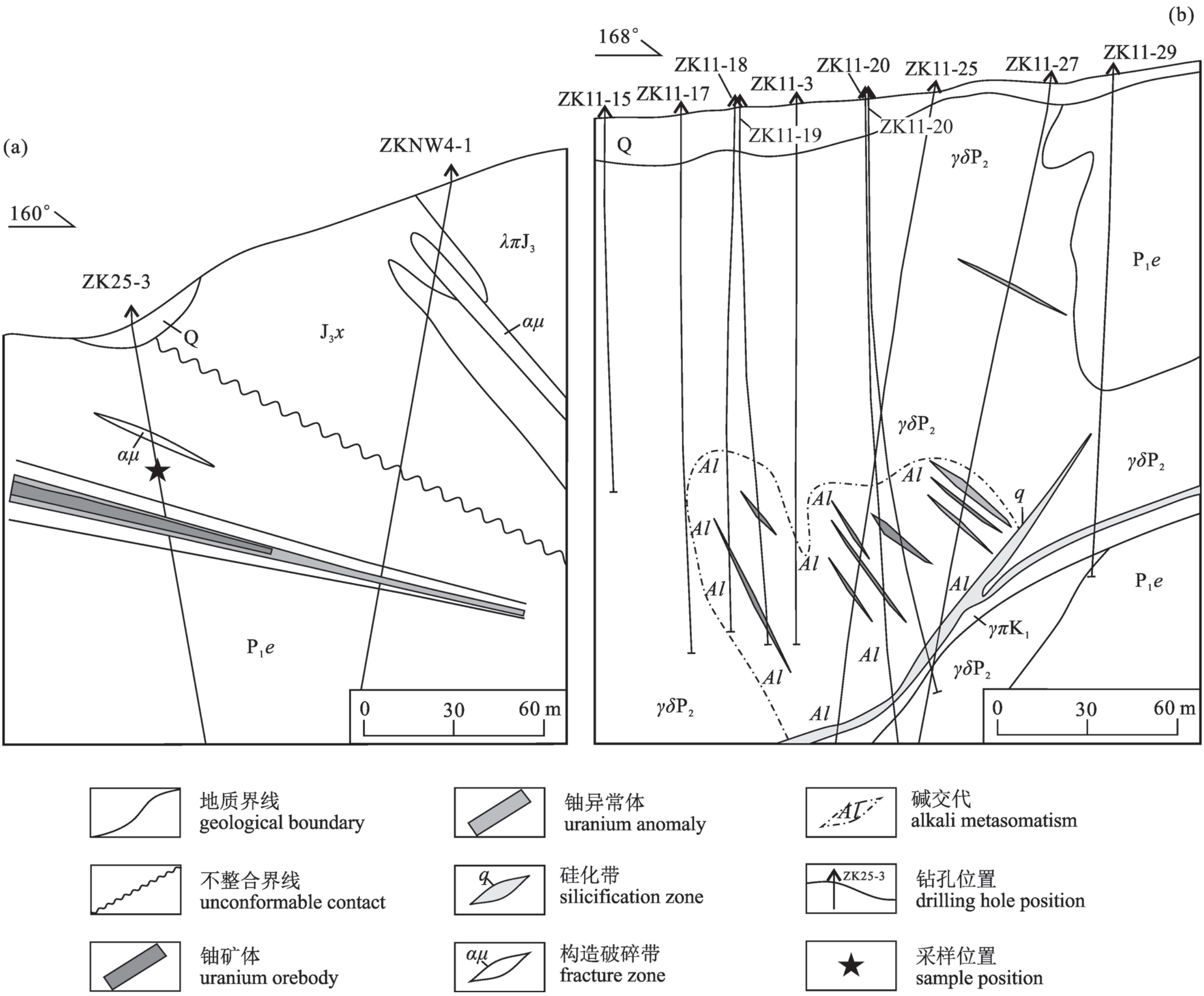

图 3 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床 NW4（a）、11 号线（b）剖面图

Fig. 3 The Profiles of NW4 (a) and the Line 11 (b) of the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

Q—第四系；J_3x—上侏罗统新民组；P_1e—下二叠统额里图组；$\gamma\pi K_1$—早白垩世花岗斑岩；$\lambda\pi J_3$—晚侏罗世流纹斑岩；$\gamma\delta P_2$—中二叠世花岗闪长岩 Q—Quaternary; J_3x—Upper Jurassic Xinmin Fromation; P_1e—Lower Permian Elitu Fromation; $\gamma\pi K_1$—Early Cretaceous granite porphyry; $\lambda\pi J_3$—Late Jurassic rhyolite porphyry; $\gamma\delta P_2$—Middle Permian granodiorite

英安岩遭受到蚀变影响大多数发生绿泥石、绿帘石化，但 2 组节理夹角仍明显保留，边缘暗化边发育明显，主要为石英、磁铁矿等矿物环绕；黑云母斑晶呈半自形板状，多色性明显，溶蚀较强发育暗化边，粒径长度集中于 0.3~0.5 mm。基质约占 83%，多为隐晶质或蚀变成石英、长石微晶、磁铁矿等，玻璃质大多发生脱玻化成隐晶质或石英、长石微晶。

4　分析方法

4.1　SHRIMP 锆石 U-Pb 分析

锆石挑选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成，火山岩样品取 10 kg，破碎至 80~120 目，洗去粉尘，经淘洗除去轻矿物，保留重矿物，再用永久磁铁除去磁铁矿等强磁性矿物，经重液分选除去比重小于锆石的矿物，最后在双目镜下人工精选出锆石晶体。将挑选好的锆石与标准锆石 Temora（年龄为 417 Ma）一起粘贴，制成环氧树脂样品靶。干燥后，打磨、抛光使锆石中心部分暴露，然后进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。反射光、透射光和阴极发光显微照相在中国地质科学院矿产资源研究所完成，锆石 SHRIMP U-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP-Ⅱ上完成。年龄测试前，利用反射光、透射光显微照片选择无裂纹、无包裹体、表面洁净的晶体，利用阴极发光照片选择具有明显环带结构的

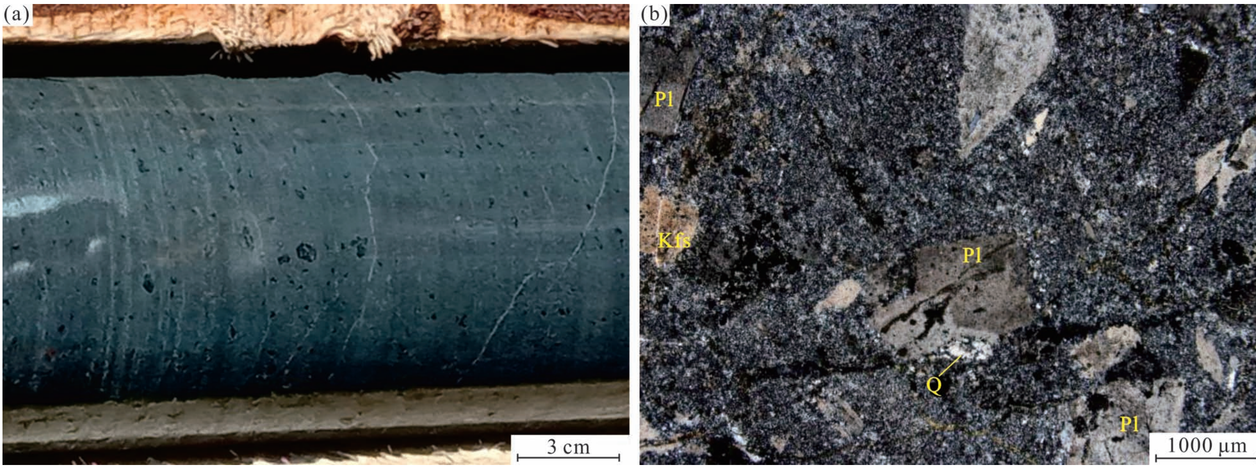

图 4 内蒙古赤峰地区南窝铺铀矿床英安岩(a)钻孔照片和(b)镜下照片

Fig. 4 (a) Borehole photographs and (b) microscopic photographsof dacite in Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Q—石英

Pl—plagioclase;Kfs—K-feldspar;Q—quartz

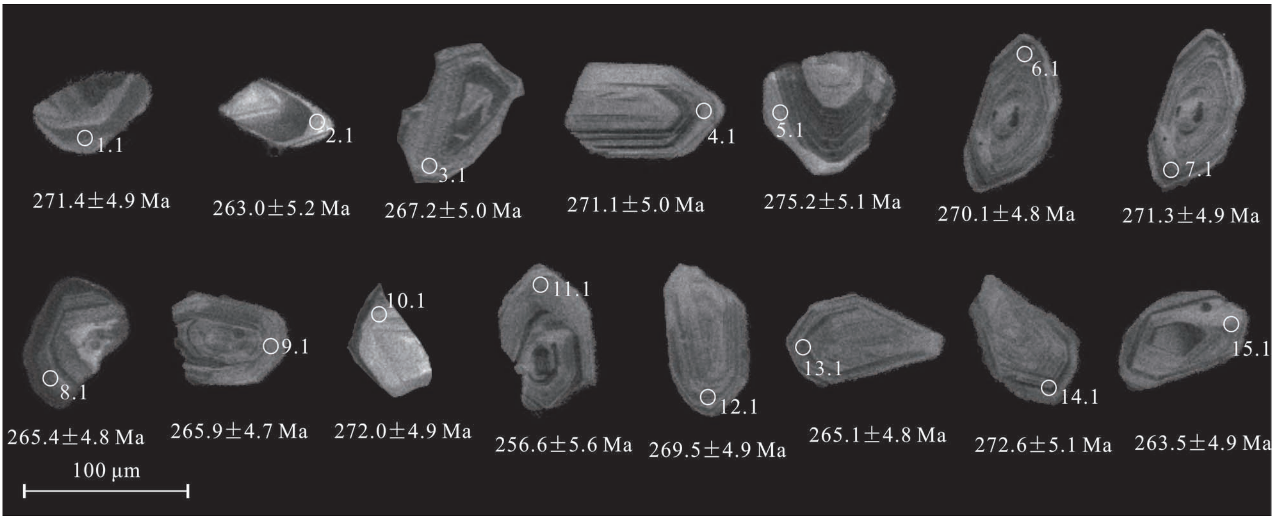

图 5 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩锆石阴极发光图像、SHRIMP 分析点位及 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 年龄值

Fig. 5 Cathodoluminescence photos, SHRIMP analytical spots and corresponding $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ ages of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

岩浆成因锆石。待测锆石挑选之后,随机对待测锆石进行年龄测试。详细的分析流程和原理参见宋彪等(2002),数据处理、年龄计算采用 Ludwig 博士编写的 SQUID1.0 及 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2003)。南窝铺铀矿床英安岩样品的 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果列于表 1。

4.2 主量元素和微量元素分析

本文岩石薄片的制备和碎样委托河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,通过显微镜下鉴定之后确定全岩地球化学分析样品。主、微量元素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。主量元素分析测试采用化学分析法(CA)和 X 射线荧光光谱法(XRF)。化学分析法主要分析氧化亚铁的含量,X 射线荧光光谱法在 AxiosmAX X 射线荧光光谱仪上完成,测试前的样片制作可参见周万蓬(2015),实验过程中,X 射线管电压为 50 kV,电流为 50 mA,元素分析相对误差小于 5%,检测方法和依据参照 GB/T 14506.14-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 14 部分:氧化亚铁量测定》,GB/T 14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 28

表 1 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Analytical results of SHRIMP zircons U-Pb isotopes of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Monglia

测点号	$^{206}Pb_c$ (%)	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值							同位素年龄(Ma)				不谐和度 (%)
		Pb^*	Th	U		$n(^{207}Pb^*)/n(^{206}Pb^*)$		$n(^{207}Pb^*)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb^*)/n(^{238}U)$		误差相关系数	$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		
						测值	±%	测值	±%	测值	±%		测值	1σ	测值	1σ	
英安岩、南窝铺，NWP301																	
1.1	–	7.00	143	190	0.78	0.05330	3.5	0.3160	3.9	0.04300	1.8	0.4657	271.5	±5.6	342	±79	21
2.1	1.33	5.62	102	155	0.68	0.04609	8.8	0.2646	9.1	0.04164	2.0	0.2235	265.6	±5.8	2	±210	−10540
3.1	1.22	6.05	120	164	0.75	0.04438	8.1	0.2590	8.4	0.04233	1.9	0.2281	268.7	±5.7	-90	±200	398
4.1	0.74	6.96	115	187	0.63	0.04696	6.7	0.2781	6.9	0.04295	1.9	0.2699	271.5	±5.5	47	±160	−474
5.1	0.21	8.47	175	226	0.80	0.05292	3.0	0.3182	3.5	0.04361	1.9	0.5390	274.8	±5.9	325	±68	15
6.1	0.33	9.27	224	251	0.92	0.04977	7.1	0.2936	7.3	0.04279	1.8	0.2510	269.7	±5.6	184	±160	−47
7.1	0.32	7.99	184	216	0.88	0.05250	6.0	0.3111	6.3	0.04298	1.8	0.2932	270.6	±5.7	307	±140	12
8.1	0.40	5.80	84	160	0.55	0.05450	4.1	0.3158	4.5	0.04203	1.9	0.4127	265	±5.3	392	±92	32
9.1	0.52	7.59	144	209	0.71	0.04876	4.2	0.2831	4.6	0.04210	1.8	0.3924	266.4	±5.3	136	±99	−95
10.1	–	6.23	106	169	0.65	0.05578	2.9	0.3315	3.5	0.04310	1.8	0.5299	271.4	±5.5	444	±66	39
11.1	2.14	2.87	37	81	0.47	0.03874	19.9	0.2169	20	0.04061	2.2	0.1111	257.8	±5.7	−434	±520	159
12.1	0.70	7.49	151	203	0.77	0.04737	7.2	0.2788	7.4	0.04269	1.8	0.2495	271.8	±5.5	68	±170	−298
13.1	0.30	5.71	91	158	0.59	0.05371	3.6	0.3109	4.1	0.04198	1.9	0.4564	264.8	±5.4	359	±82	26
14.1	0.49	5.03	86	135	0.66	0.04796	5.3	0.2856	5.6	0.04319	1.9	0.3400	276.4	±6.0	98	±120	−180
15.1	0.58	5.33	96	148	0.67	0.04994	4.4	0.2873	4.8	0.04172	1.9	0.3912	265.5	±5.5	192	±100	−37

注：$^{206}Pb_c$ 和 $^{206}Pb^*$ 分别表示普通铅和放射性成因铅；普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正；误差为 1σ。

部分：16 个主次成分量测定》，岩石矿物分析《第四版 16.20 灼烧减量的测定》。微量元素分析测试采用电感耦合等离子质谱法（ICP-MS），样品溶液的配置过程可参见周万蓬（2015），分析测试是在 NexION 300D 等离子体质谱仪上完成，工作温度控制在 20℃，相对湿度保持在 27%，当微量元素含量小于 10 μg/g 时，测试相对误差小于 10%，当微量元素含量大于 10 μg/g 时，测试相对误差小于 5%，测试方法和依据参照 GB/T 14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分：44 个元素量测定》。南窝铺铀矿床英安岩样品的主量元素和微量元素分析结果及有关参数列于表 2。

5　分析结果

5.1　锆石 U-Pb 年龄

样品 NWP301 的锆石颗粒长度约 100～150 μm，长宽比为 1.5～2.0，自形短柱状或双锥状，阴极发光图像显示锆石多具有清晰的韵律环带结构（图 5），为典型岩浆结晶锆石的内部结构。NWP301 样品的 U 含量较高，介于 81×10^{-6} ～ 251×10^{-6} 之间，Th/U 比值在 0.47～0.92 之间，大于 0.4，具有典型的岩浆锆石成分特征（Belousova et al.，2002；Rubatto，2002），15 个分析点的 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 年龄数据在 256.6～275.2 Ma 之间，在 U-Pb 谐和图（图 6）上集中分布，加权平均年龄为 268.1±2.5 Ma，MSWD=0.85，代表了火山岩的形成年龄。

5.2　地球化学特征

5.2.1　蚀变影响

南窝铺铀矿床处火山岩系发育，热液蚀变强烈，在挑选了新鲜的岩石样品后，为保证能够有效地利用样品元素特征进行岩石分类、成因探讨（Rollinson，1993），首先以样品烧失量（LOI）为横坐标做 Harker 图解（图 7）评估岩浆演化和岩石形成过程中热液蚀变对元素

表 2 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩主量元素(%)、微量元素($\times10^{-6}$)和稀土元素($\times10^{-6}$)分析结果及有关参数

Table 2 Major elements (%), trace elements ($\times10^{-6}$) and rear earth element ($\times10^{-6}$) composition of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

点号	NWP 101	NWP 102	NWP 103	NWP 301	NWP 303	NWP 304	NWP 305
SiO_2	65.17	65.24	64.16	65.74	65.61	65.10	65.82
TiO_2	0.65	0.58	0.61	0.52	0.49	0.67	0.65
Al_2O_3	15.96	16.13	16.77	15.89	16.37	16.05	15.74
Fe_2O_3	3.25	3.70	2.49	2.39	2.75	2.39	1.42
FeO	1.59	1.35	1.39	1.24	1.66	1.94	1.79
MnO	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05
MgO	1.60	1.49	1.79	1.25	1.53	1.46	1.59
CaO	2.97	2.87	3.17	3.59	3.08	3.15	3.19
Na_2O	4.29	4.19	4.57	4.56	4.37	4.33	4.91
K_2O	2.43	2.45	2.51	1.94	2.06	2.37	2.40
P_2O_5	0.17	0.16	0.16	0.15	0.18	0.19	0.16
烧失量	2.66	2.54	2.06	2.27	2.57	2.14	2.01
总量	100.8	100.7	99.7	99.6	100.7	99.8	99.7
K_2O+Na_2O	6.90	6.80	7.23	6.66	6.60	6.85	7.47
K_2O/Na_2O	0.57	0.59	0.55	0.43	0.47	0.55	0.49
Fe_2O_3+FeO	4.63	4.79	3.71	3.46	4.24	4.17	3.13
A/CNK	1.06	1.09	1.05	0.98	1.09	1.04	0.95
刚玉(C)	1.22	1.74	1.07	0.04	1.74	0.93	0
t_{Zr}(℃)	814	809	789	815	820	807	812
La	19.8	17.6	19	14.7	21.2	13.9	14.9
Ce	37.9	40.2	45.1	27.7	36.8	26.9	30.5
Pr	4.58	4.03	4.45	3.58	4.00	3.53	3.83
Nd	15.2	12.83	14.36	15.3	14.1	15.7	16.7
Sm	2.79	2.73	3.00	3.24	2.45	3.65	3.65
Eu	0.96	0.81	0.90	0.94	0.87	0.86	0.93
Gd	3.19	2.47	2.75	2.94	2.16	3.58	3.29
Tb	0.47	0.39	0.44	0.56	0.38	0.72	0.63
Dy	2.63	1.95	2.29	3.17	2.14	4.21	3.63
Ho	0.53	0.39	0.46	0.65	0.45	0.46	0.45

点号	NWP 101	NWP 102	NWP 103	NWP 301	NWP 303	NWP 304	NWP 305
Er	1.21	0.91	1.12	1.78	1.34	1.24	1.03
Tm	0.22	0.14	0.17	0.12	0.25	0.20	0.15
Yb	1.16	0.95	1.24	2.00	1.67	1.42	1.16
Lu	0.18	0.12	0.16	0.19	0.15	0.15	0.10
ΣREE	90.8	85.5	95.4	76.9	88.0	76.5	80.9
ΣLREE	81.2	78.2	86.8	65.5	79.4	64.5	70.5
ΣHREE	9.59	7.32	8.63	11.4	8.53	12.0	10.4
ΣL/ΣH	8.47	10.7	10.1	5.74	9.31	5.39	6.76
$(La/Yb)_N$	11.5	12.5	10.4	4.97	8.58	6.61	8.68
$(La/Sm)_N$	4.47	4.06	3.99	2.86	5.45	2.40	2.57
$(Gd/Yb)_N$	2.23	2.11	1.80	1.19	1.05	2.04	2.30
δEu	0.98	0.94	0.94	0.91	1.13	0.72	0.80
Rb	55.5	71.3	58.6	63.6	48.0	55.9	63.5
Sr	507	270	517	339	310	634	549
Ba	472	537	571	522	554	1364	504
Th	4.83	4.45	4.80	6.83	7.48	5.33	5.06
U	0.97	0.95	1.20	0.75	1.80	0.70	1.40
Nb	8.86	5.39	5.40	4.69	6.06	4.19	4.87
Ta	0.60	0.40	0.40	0.29	0.49	0.24	0.28
Zr	154	143	119	154	157	142	166
Hf	4.70	4.30	4.00	5.99	5.28	4.54	4.26
V	49.4	59.6	47.8	58.0	55.6	51.0	54.0
Ga	18.1	17.9	16.0	18.1	13.6	12.6	13.1
Y	13.8	8.46	10.78	17.2	13.7	25.0	21.6
Cr	64.7	50.9	21.8	48.9	46.3	52.5	49.5
Co	15.3	11.7	10.8	16.6	15.1	18.3	14.9
Ni	53.6	29.0	14.8	18.23	14.4	18.64	17.6
Th/Ta	8.05	11.1	12.0	23.3	15.4	22.2	17.8
Ta/Yb	0.52	0.42	0.32	0.15	0.29	0.17	0.24

注：$t_{Zr}/℃ = T_{Zr}/K - 273.15 = \frac{12900}{2.95+0.85M+\ln\frac{496000}{Zr_{melt}/10^{-6}}} - 273.15$；$M$ 为全岩 $\frac{n(Na)+n(K)+2n(Ca)}{n(Al)\cdot n(Si)}$，计算中令 $n(Si)+n(Al)+n(Fe)+n(Mg)+n(Ca)+n(Na)+n(K)+n(P)=1$；$Zr_{melt}$ 为熔体中 Zr 含量(Watson et al., 1983；参见熊双才等,2019；张征峰等,2011)。

特别是活动性强的元素的影响,排除受影响较大的元素。通常被认为活动性差的元素(Si、Ti、Fe),样品随蚀变程度升高它们基本能保持含量稳定,Cr、Ni均与 LOI 之间没有明显相关性,表明这些元素受热液活动的影响比较小;通常认为碱金属、碱土金属元素(Na、K、Al、Mg)和大离子亲石元素(Rb、Sr、Ba、Pb、U 等)具有极高的活动性,而高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、REE 等)活动性很低(Humphris and Thompson, 1978),样品除大离子亲石元素存在一个异常点表现出了一定的活动性(经查证为 NWP304 样品 Ba 含量高达 1364×10^{-6} 所导致)外,其它整体保持稳定,说明样品基本没有受热液蚀变的影响,能够代表岩石的地球化学特征。

5.2.2 主量元素

南窝铺铀矿床英安岩 SiO_2 = 65.49% ~ 65.82%, K_2O = 1.94% ~ 2.51%, Na_2O = 4.19% ~ 4.91%, (K_2O+Na_2O) = 6.60% ~ 7.47%, K_2O/Na_2O = 0.43 ~ 0.59, 在 TAS 图解(图 8a)上落入亚碱性系列英安岩范围内,在 SiO_2—K_2O(图 8b)上落入钙碱性系列范围内;($FeO+Fe_2O_3$) = 3.13% ~ 4.79%, MgO = 1.25% ~ 1.79%, TiO_2 = 0.49% ~ 0.67%, 在 AFM 图解(图 9a)上落入钙碱性系列范围内; Al_2O_3 = 15.74% ~

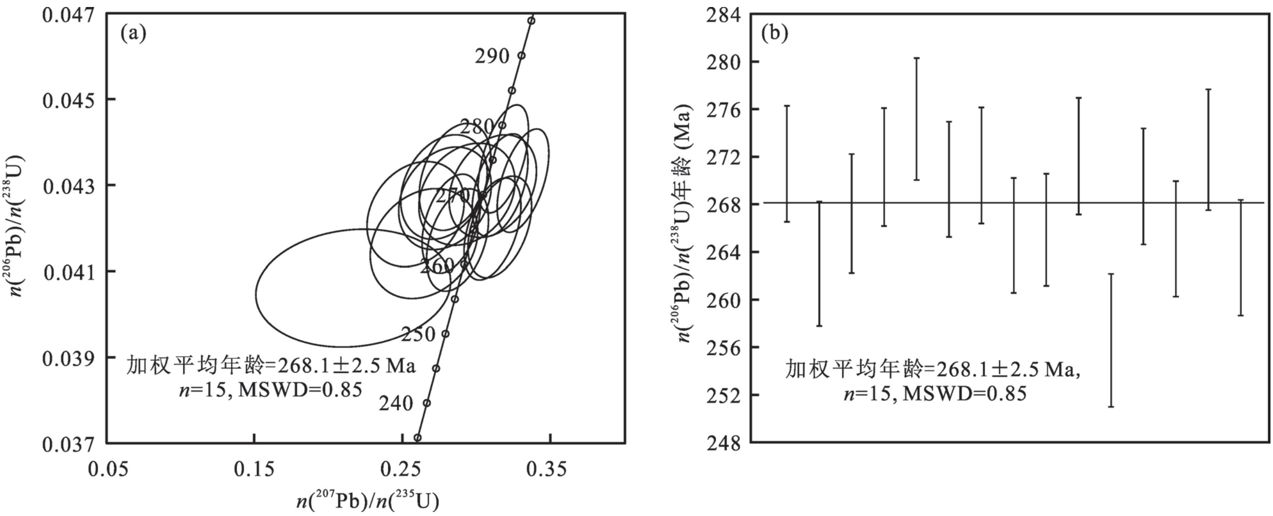

图 6 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 U-Pb age concordia diagram of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

16.77%，CaO = 2.87% ~ 3.59%，A/CNK = 0.95 ~ 1.09(平均 1.04，<1.1)，标准矿物刚玉(C)含量为 0 ~1.74%，平均值为 0.96%，具有 I 型英安岩的特征；MnO 含量为 0.04%~0.05%，P_2O_5 含量为 0.15%~0.19%。

5.2.3　微量元素

南窝铺铀矿床英安岩稀土元素总量较低，$\sum REE=76.5\times10^{-6}\sim95.4\times10^{-6}$(平均 85.9×10^{-6})，配分模式呈轻稀土富集右倾型，轻重稀土分馏明显 $(La/Yb)_N=4.97\sim12.52$(平均 8.95)，存在微弱的 Eu 异常 δEu = 0.72 ~ 1.13(平均 0.94)。球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图(图 10a)上显示铕不亏损的右倾轻稀土富集特征，与安第斯型钙碱性系列基本一致。原始地幔标准化蛛网图上，英安岩富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、K、Sr 和强烈亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti(图 10b)，原始地幔标准化配分模式与安第斯型钙碱性系列岩石特点基本一致。

6　地质意义

6.1　地质时代

本次研究的南窝铺铀矿床英安岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 268.1±2.5 Ma，结合安山质角砾凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 277.1±9 Ma(纪宏伟，2015)，指示南窝铺铀矿床赋矿安山岩—英安岩—流纹岩组合形成于 268~277 Ma，与红山子—广兴铀成矿亚带东部盔甲山一带额里图组角闪安山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(274±2 Ma；彭斌等，2016)一致，为将赋矿安山岩—英安岩—流纹岩组合归入额里图组提供了年代学证据。根据 2018/08 版《国际年代地层表》(樊隽轩等，2018)，上二叠统(乐平统)—中二叠统(瓜德鲁普统)、中二叠统(瓜德鲁普统)—下二叠统(乌拉尔统)和二叠系—石炭系的界线分别定为 259.1±0.5 Ma、272.95±0.11 Ma 和 298.9±0.15 Ma，指示南窝铺铀矿床赋矿安山岩—英安岩—流纹岩组合的地质时代为早二叠世—中二叠世早期。

南窝铺铀矿床赋矿英安岩的年龄确定，不仅为红山子—广兴铀成矿亚带晚侏罗世新民组流纹岩—碱性流纹岩组合之下还存在早二叠世—中二叠世早期额里图组赋矿火山岩系提供了年代学证据，而且该赋矿层位明显低于中国东部与火山岩有关的热液型的赋矿层位(巫建华等，2017b)，是中国东部与火山岩有关的热液型铀矿新的赋矿层位。

6.2　岩石类型

南窝铺铀矿床英安岩的 SiO_2 含量为 64.16%~66.66%，$Na_2O>3.2\%$，K_2O/Na_2O 值小于 1，铝饱和指数 A/CNK $\left[\frac{n(Al_2O_3)}{n(CaO)+n(Na_2O)+n(K_2O)}\right]$ 小于 1.1，说明岩石属于准铝质—弱过铝质 I 型火山岩。在 K_2O—Na_2O(图 9b)中，样品投点也落在 I 型花岗岩区。南窝铺铀矿床英安岩的锆石饱和温度为 789℃~827℃，平均为 812℃，明显低于红山子盆地 A 型流纹岩(951℃~988℃，巫建华等，2016)的锆石

饱和温度,也低于 A 型花岗岩平均温度 833℃(刘昌实等,2003),也接近高分异的 I 型花岗岩平均温度 781℃(King et al. ,1997)。南窝铺铀矿床英安岩的 A/CNK 比值小于 1.1,属准铝质—弱过铝质花岗岩类(高栋等,2018),P_2O_5 含量很低且随着 SiO_2 含量增高而降低,呈负相关关系,具有 I 型花岗岩特征(Wolf et al,1994;Chappell,1999;李子昊,2018)。在 SiO_2—Ce 和 Al_2O_3—Ga 图解(图 11)中落入 I 型花岗岩范围,明显不同于红山子—广兴铀成矿亚带(以红山子盆地为代表)新民组 A 型流纹岩,相比其他地区额里图组流纹岩,均为 I 型花岗岩(崔玉良等,2019)。可见,南窝铺铀矿床额里图组英安岩具有 I 型花岗岩特征,为有别于新民组 A 型流纹岩一类新的赋矿围岩类型。

6.3 构造环境

在微量元素 Yb—Ta、Y—Nb、Rb—Y + Nb 和

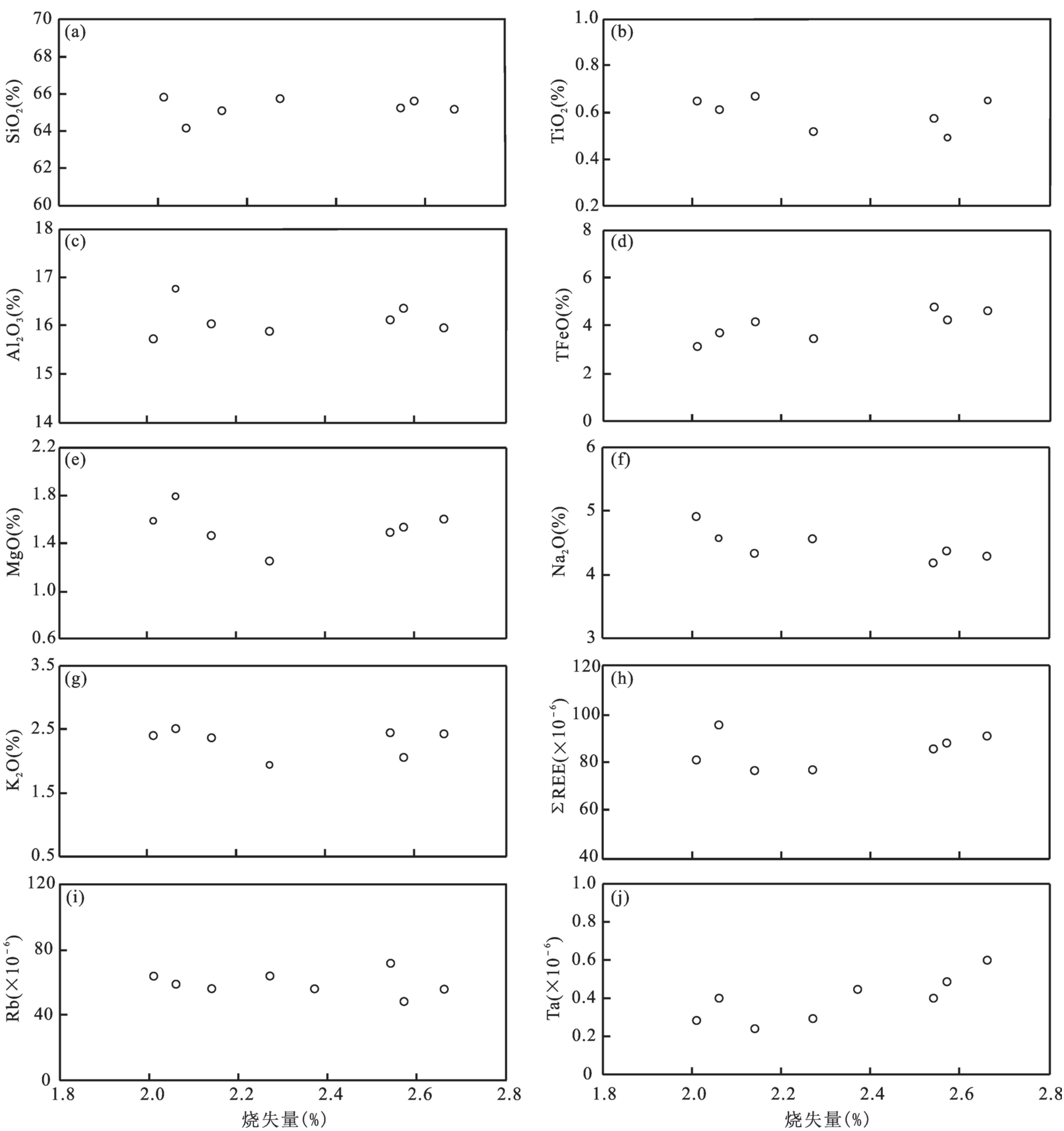

图 7 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩烧失量—主微量元素协变图解

Fig. 7 Bivariate diagrams of LOI—elements of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

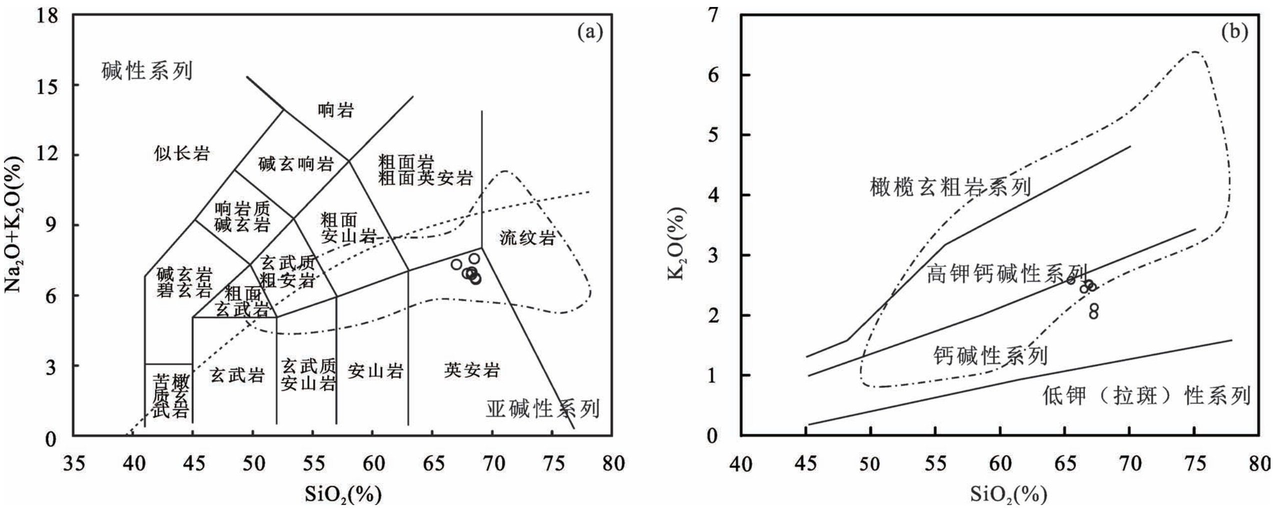

图 8 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩岩石分类判别图解(虚线范围代表其他地区额里图组火山岩,数据来源:曹代勇等,2014;董晓杰等,2016;彭斌等,2016;崔玉良等,2019)。(a)TAS 图解(底图据 Middlemost,1994);(b)SiO_2—K_2O 图解(底图据 Rollison,1993)

Fig. 8 Rock classification and discrimination diagrams of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia (The dashed area is the literature data of the Elitu Formation from other areas, data sources: Cao Daiyong et al., 2014&; Dong Xiaojie et al., 2016&; Peng Bin et al., 2016&; Cui Yuliang et al., 2019&). (a) TAS diagram (after Middlemost, 1994); (b) SiO_2—K_2O diagram (after Rollison, 1993)

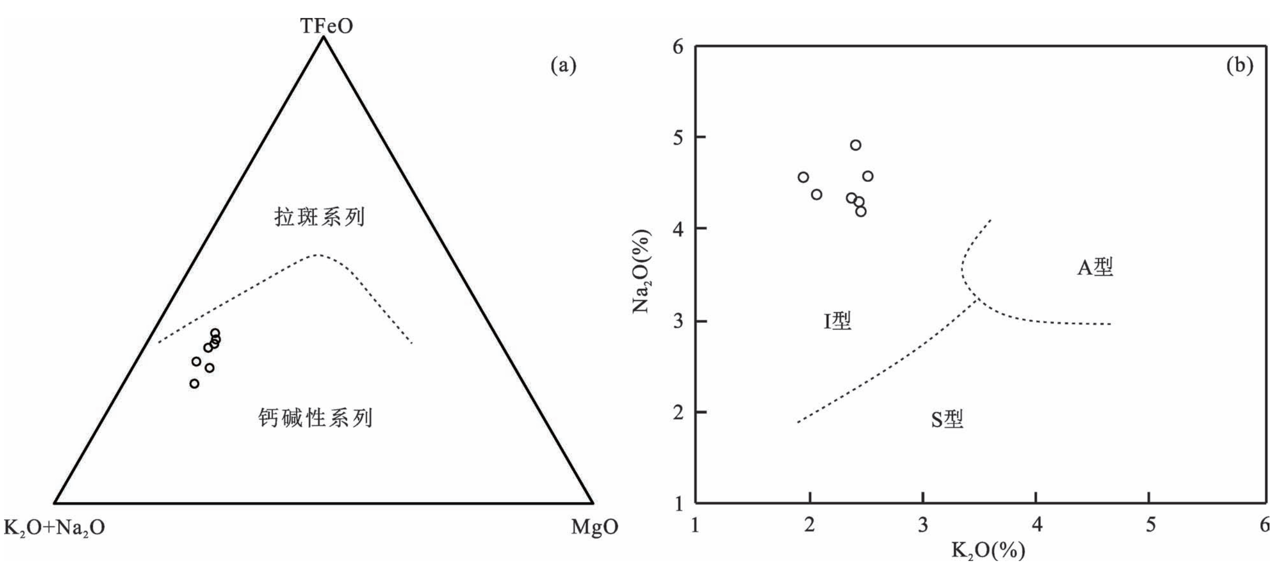

图 9 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩 AFM 图解(a,底图据 Irvine et al.,1971)和 Na_2O—K_2O 图解(b,底图据 Middlemost,1986)

Fig. 9 Diagrams of AFM (a, after Irvine et al., 1971) and Na_2O—K_2O (b, after Middlemost, 1986) of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia

Rb—Yb+Ta 构造环境判别图解中(图 12),南窝铺铀矿床的英安岩均投影于火山弧花岗岩区,反映其形成于活动大陆边缘环境。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图和微量元素原始地幔标准化配分模式图(图 10)上英安岩显示与安第斯型钙碱性系列基本一致的特征。因此,南窝铺铀矿床的英安岩可

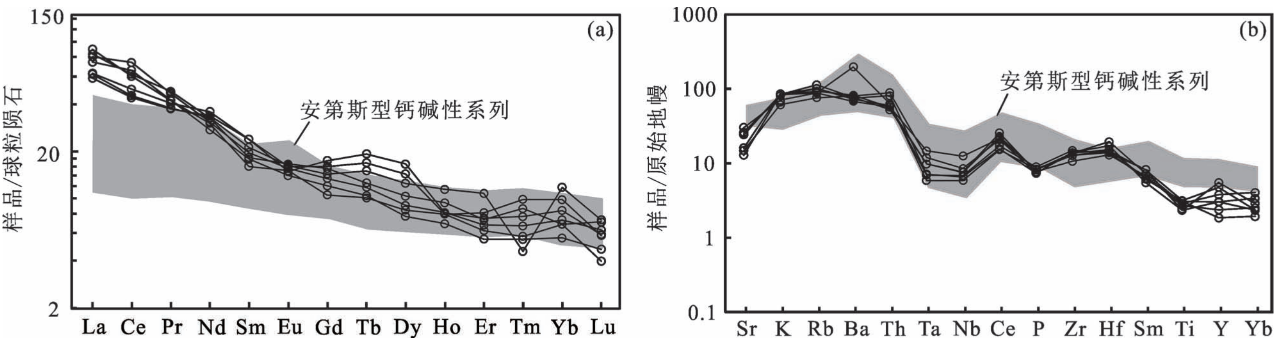

图 10 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(标准化值据 Sun and McDonough,1989;安第斯型钙碱性系列数值据 Gutiérrez,2005)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and Primitive mantle-normalized spidergram (b) of dacite from the Nanwopu uranium deposit (Normalizing values from Sun and McDonough, 1989; Andean-type calcium-alkaline series data from Gutiérrez, 2005)

能为安第斯型活动大陆边缘火山弧的产物,与华北古板块北缘集宁北部商都县西井子镇一带早—中二叠世(267~272 Ma)苏吉组酸性火山岩(董晓杰等,2016)、赤峰北部朝阳沟村早二叠世流纹岩(崔玉良等,2019)、赤峰铭山隆起带早二叠世额里图组安山岩(彭斌等,2016)、赤峰翁牛特旗早二叠世流纹岩—安山岩—流纹质—英安质凝灰岩组合(曹代勇等,2014)、吉林中部早二叠世大河深组流纹岩—英安岩—粗面英安岩组合和延吉地区早二叠世关门咀子组玄武安山岩形成的构造环境一致(曹花花等,2012;Yu Qian et al. ,2014)。

南窝铺铀矿床赋矿英安岩是安第斯型活动大陆边缘火山弧的产物,不仅与红山子—广兴铀成矿亚带晚侏罗世新民组板内拉张环境下的流纹岩—碱性流纹岩组合(巫建华等,2013,2016,2017a,2017b;彭啟辉,2015;解开瑞等,2016;黎伟等,2017;姜山等,2018)、沽源—丰宁铀成矿亚带早白垩世张家口组板内拉张环境下的流纹岩—粗面岩组合(巫建华等,2014,2015,2017c;张雅菲等,2016;夏应冰等,2016;林天发等,2019)不同,而且与中国东部赣杭铀成矿带早白垩世武夷群板内拉张环境下的流纹岩—粗面岩组合(刘飞宇等,2009;巫建华等,2011,

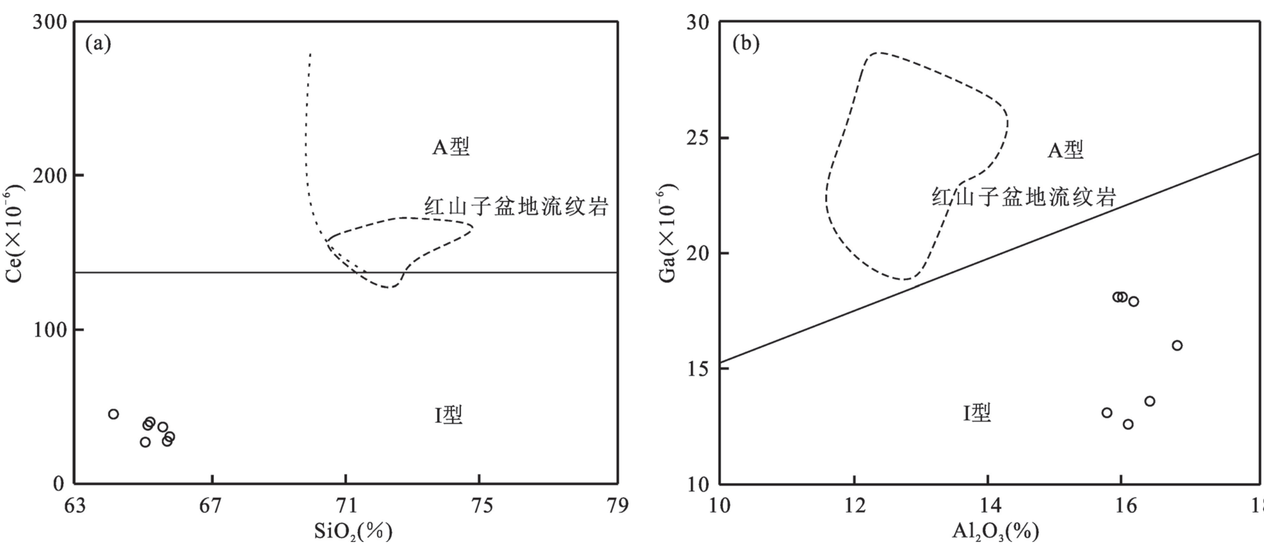

图 11 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩 SiO_2—Ce 图(a)和 Al_2O_3—Ga 图(b)
(红山子盆地流纹岩数据来源:巫建华等,2016)

Fig. 11 SiO_2—Ce(a) and Al_2O_3—Ga(b) diagrams of dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia (Data of the Hongshanzi basin rhyolite are from Wu Jianhua et al. ,2016&)

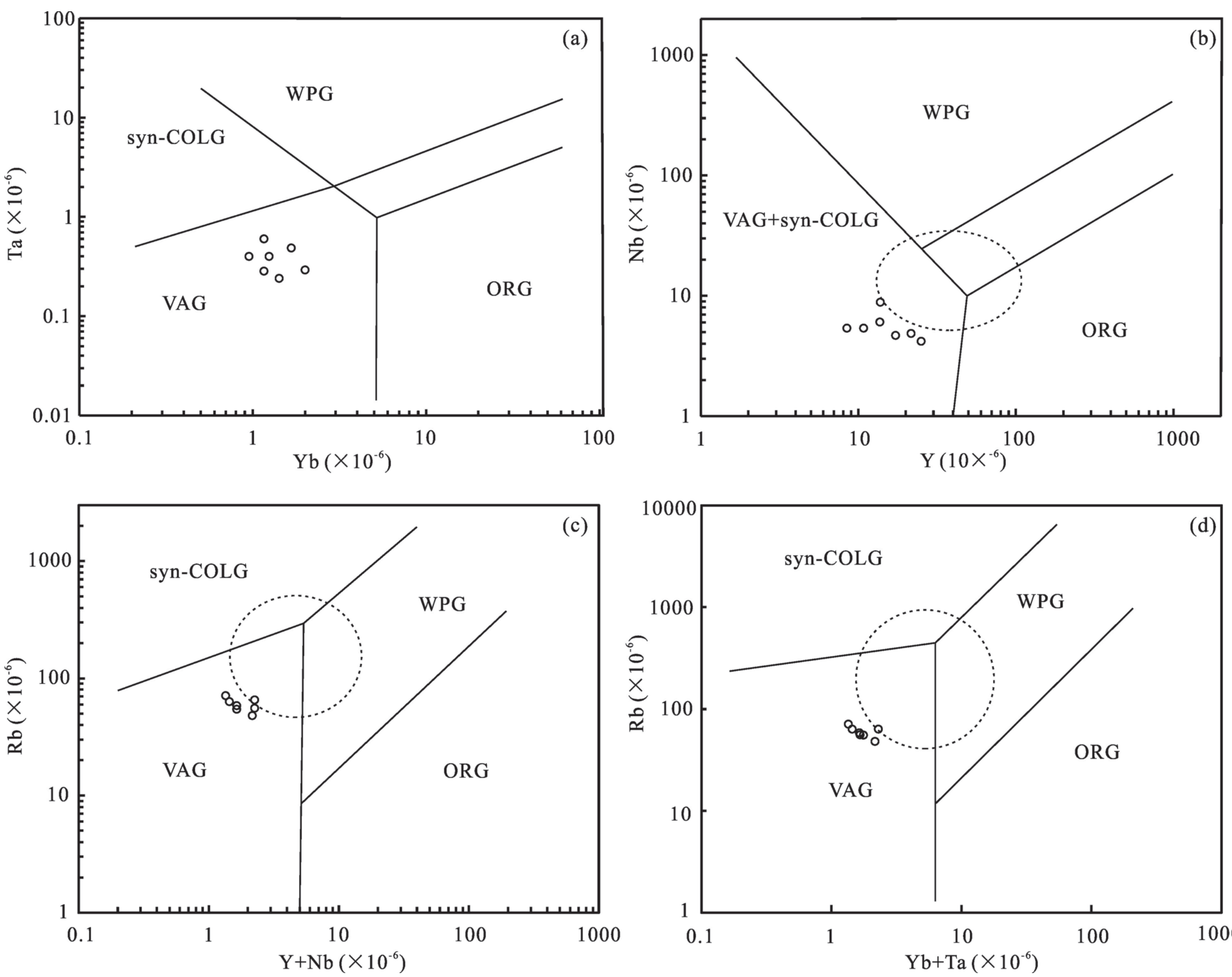

图 12 内蒙古赤峰南窝铺铀矿床英安岩构造环境判别图解

(底图据 Pearce et al. ,1984;Roser et al. ,1986;Murray,1994;Gorton et al. ,2000)

Fig. 12 Discrimination diagrams of tectonic environment for dacite from the Nanwopu uranium deposit, Chifeng area, Inner Mongolia (after Pearce et al. ,1984;Roser et al. ,1986;Murray,1994;Gorton et al. ,2000)

2017b;韦昌袭,2019)、武夷山铀成矿带早侏罗世余田群板内拉张环境下的流纹岩—玄武岩组合(冀春雨等,2011;项媛馨等,2012)、晚白垩世兴宁群大量流纹岩—少量玄武岩组合(巫建华等,2017b;劳玉军等,2018)不同,是中国东部与火山岩有关的热液型铀矿一类新的构造环境下的赋矿火山岩组合。

7　结论

(1)南窝铺铀矿床赋矿围岩英安岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 268.1±2.5 Ma,结合前人安山质角砾凝灰岩 277.1±0.9 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,限定额里图组安山岩—英安岩—流纹岩组合的时代为早二叠世,与中国东部中生代与火山岩有关的热液型铀矿赋矿围岩地质时代不同,为新的赋矿层位;

(2)南窝铺铀矿床额里图组英安岩为钙碱性系列,属于 I 型火山岩,具有明显不同于红山子—广兴铀成矿亚带下侏罗统新民组流纹岩的地球化学特征,其明显富集 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素;

(3)南窝铺铀矿床额里图组英安岩为活动大陆边缘火山弧的产物,相比已知的中国东部与火山岩有关的热液型铀矿床中生代赋矿围岩,其构造环境明显不同。

致谢:文章出版过程中得到匿名审稿专家和本刊编辑宝贵的修改意见,在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese

with English abstract; the literature whose publishing year following by a "#" is in Chinese without English abstract)
曹代勇,赵发,刘登,刘新华,杨荣丰. 2014. 内蒙古翁牛特旗早二叠世火山岩地球化学特征及构造意义. 湖南科技大学学报(自然科学版),29(3):37~43.
曹花花,许文良,裴福萍,郭鹏远,王枫. 2012. 华北板块北缘东段二叠纪的构造属性:来自火山岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学的制约. 岩石学报,28(9):2733~2750.
崔玉良,渠宏杰,陈英富,王森. 2019. 华北克拉通北缘与陆缘弧相关的早二叠世流纹岩—锆石 U-Pb 定年及地球化学证据. 地质论评,65(6):1299~1315.
邓晋福,赵国春,赵海玲,罗照华,戴圣潜,李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程. 地质论评,46(1):41~48.
丁辉,巫建华,祝洪涛,吴仁贵,余达淦. 2016. 大兴安岭南部红山子盆地花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 东华理工大学学报(自然科学版),39(1):1~9.
董晓杰,王挽琼,沙茜,张金凤. 2016. 华北克拉通北缘中段二叠纪苏吉火山岩及其形成机制. 岩石学报,32(9):2765~2779.
樊隽轩,李超,侯旭东. 2018.《国际年代地层表》(2018/08 版). 地层学杂志,42(4):365~370.
高栋,吴才来,郜源红,张昕,陈红杰,郭文峰,吴迪,郑坤. 2018. 南阿尔金玉苏普阿勒克塔格花岗岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学,11:3812~3828.
河北省地质矿产局. 1996. 河北省岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社:1~146.
冀春雨, 巫建华. 2011. 江西南部余田群长英质火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 东华理工大学学报,33(2): 131~138.
纪宏伟. 2015. 内蒙古克什克腾旗红山子铀钼矿床成矿作用研究. 导师:李子颖. 北京:核工业北京地质研究院博士学位论文:1~144.
姜山,巫建华,王常东,祝洪涛,赵博,刘洋. 2018. 大兴安岭南端托河盆地流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 高校地质学报,24(6):896~906.
江小均,柳永清,彭楠,石玉若,许欢,魏文通,刘增校,赵华平,姚宝钢. 2011. 内蒙古克什克腾旗广兴源复式岩体 SHRIMP U-Pb 定年及地质意义讨论. 地质学报,85(1):114~128.
劳玉军,巫建华,徐勋胜. 2018. 粤北长塘盆地晚白垩世早期流纹岩的成因:地球化学和 Sr—Nd—Pb—Hf—O 同位素制约. 岩矿测试,35:558~567.
黎伟,祝洪涛,巫建华,吴仁贵,张海龙,赵博,王常东. 2017. 内蒙古红山子—广兴铀矿田控矿因素探讨和找矿靶区优选. 东华理工大学学报(自然科学版),40(2):115~125.
李锦轶. 2009. 中国大陆地质历史的旋回与阶段. 中国地质,36(3):504~514.
李子昊. 2017. 内蒙古车家营子地区晚侏罗—早白至世侵入岩地球化学特征及地质意义. 导师:赵庆英. 长春: 吉林大学硕士学位论文:1~68.
林天发,巫建华,郭佳磊,牛子良,达元朝,周舰. 2019. 冀北窟窿山流纹斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. 地质论评,65(3):713~728.
刘昌实,陈小明,陈培荣,王汝成,胡欢. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因. 高校地质学报,9(4):573~591.
刘飞宇,巫建华,刘帅. 2009. 赣杭带早白垩世粗面岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义. 东华理工大学学报(自然科学版),32(4):330~335.
吕洪波,冯雪东,王俊,朱晓青,董晓朋,张海春,章雨旭. 2018. 狼山发现蛇绿混杂岩——华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据. 地质论评,64(4):777~805.
孟恩,许文良,杨德彬,邱昆峰,李长华,祝洪涛. 2011. 满洲里地区灵泉盆地中生代火山岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 岩石学报,27(4):1209~1226.
内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社,1~344.
彭斌,王国祺,刘乐,杨勇,刘峰. 2016. 内蒙古赤峰地区二叠纪火山岩的发现及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报,35(6):1329~1340.
彭啟辉. 2015. 赤峰下马架—刘家营子流纹岩年代学与地球化学特征. 导师:吴仁贵. 南昌:东华理工大学硕士学位论文:1~69.
宋彪,张玉海,万渝生,简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品制作年龄测定、及有关现象讨论. 地质论评,48(S1):26~30.
苏美霞,杨波,吴艳君,颜萍,孟晓玲. 2020. 大兴安岭中南段构造岩浆岩带深部地质成矿作用. 地质论评,66(5):1321~1333.
韦昌袭. 2019. 江西东乡盆地粗面岩年代学、地球化学及岩石成因. 导师:巫建华. 南昌:东华理工大学硕士学位论文:1~81.
王常东,巫建华,张海龙,祝洪涛,杨东光,张韶华. 2019. 红山子复式岩体早白垩世细粒黑云母碱长花岗岩和花岗斑岩的地球化学特征及地质意义. 地球化学,48(4):356~369.
王平. 2005. 内蒙古达茂旗巴特敖包地区的西别河剖面与西别河组. 吉林大学学报(地球科学版),35(4):409~414.
王月古. 2018. 华北板块北缘早二叠世火山岩的构造意义:以四子王旗地区为例. 导师:周志广. 北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文:1~51.
巫建华,项媛馨,刘帅. 2011. 江西南部武夷群及其地质时代. 地层学杂志,35(2):200~208.
巫建华,武珺,祝洪涛,郭国林,吴仁贵,刘帅,余大淦. 2013. 大兴安岭红山子盆地火山岩系岩石地层对比. 高校地质学报,19(3):472~483.
巫建华,解开瑞,吴仁贵,郭国林,刘帅. 2014. 中国东部中生代流纹岩—粗面岩组合与热液型铀矿研究新进展. 地球科学进展,29(12):1372~1382.
巫建华,丁辉,牛子良,吴仁贵,祝民强,郭国林,刘帅,余达淦. 2015. 河北沽源张麻井铀—钼矿床围岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 矿床地质,34(4):757~768.
巫建华,解开瑞,祝洪涛,吴仁贵,刘帅. 2016. 大兴安岭南端红山子盆地晚侏罗世早期流纹岩的成因:地球化学和 Sr—Nd—Pb 同位素制约. 吉林大学学报(地球科学版),46(6):1724~1739.
巫建华,郭佳磊,祝洪涛,吴仁贵,刘帅. 2017a. 内蒙古东南缘芝瑞盆地流纹斑岩年代学、地球化学特征及地质意义. 高校地质学报,23(3):383~396.
巫建华,郭国林,郭佳磊,张旗,吴仁贵,余大淦. 2017b. 中国东部中生代岩浆岩的时空分布及其与热液型铀矿的关系. 岩石学报,33(5):1591~1614.
巫建华,张婧妍,姜山,解开瑞,郭国林,吴仁贵. 2017c. 冀北沽源铀矿田粗面岩年代学、地球化学特征及岩石成因. 地球化学,46(3):105~122.
夏应冰,巫建华,姜山,吴仁贵,刘帅. 2016. 冀北大滩盆地粗面岩的年代学、地球化学特征及成因研究. 高校地质学报,22(4):608~620.
项媛馨,巫建华. 2012. 赣南龙南地区余田群玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报,31(5):716~725.
解开瑞,巫建华,祝洪涛,吴仁贵,刘帅. 2016. 大兴安岭南端芝瑞盆地流纹岩年代学、地球化学及岩石成因. 地球化学,45(3):249~267.
熊双才,张征峰,李广,刘润泽,华叙登,赵富庄,周鹏飞,李关禄.

2019. 东准噶尔老爷庙地区碱性花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及其地质意义. 地质论评,65(1):221~231.
徐备,赵盼,鲍庆中,周永恒,王炎阳,罗志文. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. 岩石学报,30(7):1841~1857.
许立权,邓晋福,陈志勇,陶继雄. 2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义. 现代地质,17(4):428~434.
许文良,王枫,裴福萍,孟恩,唐杰,徐美君,王伟. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约. 岩石学报,29(2):339~353.
张允平,苏养正,李景春. 2010. 内蒙古中部地区晚志留世西别河组的区域构造学意义. 地质通报,29(11):1599~1605.
张维,简平. 2008. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质学报,82(6):778~787.
张雅菲,巫建华,姜山,刘玄,吴仁贵,刘帅,郭国林. 2016. 冀北大滩盆地铀(钼)成矿流纹岩—花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学及 Sr-Nd 同位素特征. 岩石学报,32(1):193~211.
张征峰,熊双才,范香莲. 2021. 东准噶尔木炭窑地区同造山花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及地质意义. 地质论评,67(1):231~241.
赵越,陈斌,张拴宏,刘建民,胡健民,刘健,裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质,37(4):900~915.
周万蓬. 2015. 相山地区岩浆演化及其对铀成矿作用的制约. 导师:范洪海. 北京:核工业北京地质研究院博士学位论文:1~160.
祝洪涛,李继木,赵博,王常东. 2014. 大兴安岭红山子盆地铀矿勘查新进展及其找矿意义. 东华理工大学学报(自然科学版),37(4):360~366.
祝洪涛,吴仁贵,姜山,吴建华,刘洋,赵博,王常东. 2019. 内蒙古红山子复式岩体地质时代的厘定及其地质意义. 岩石矿物学杂志,38(4):453~464.
祝洪涛,巫建华,郭恒飞,杨东光,王良玉,吴仁贵. 2020. 内蒙古东部红山子复式岩体晚侏罗世黑云母花岗岩的地球化学特征及地质意义. 地质论评,66(3):765~785.
Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon:Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143:602~622.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province. 1996**#**. Stratigraphy (lithostratic) of Hebei Province. Wuhan: China Universitg of Geosciences Press, 1~146
Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1996 **#**. Stratigraphy (lithostratic) of Nei Mongol Autonomous Region. Wuhan: China Universitg of Geosciences Press, 1~344
Cao Daiyong, Zhao Fa, Liu Deng, Liu Xinhua, Yang Rongfeng. 2014**&**. Geochemical characteristics and tectonic implications of the early Permian volcanic rocks from Ongniud Banner, Inner Mongolia. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 29 (3):37~43.
Cao Huahua, Xu Wenliang, Pei Fuping, Guo Pengyuan, Wang Feng. 2012**&**. Permian tectonic evolution of the eastern section of the northern margin of the North China Plate: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the volcanic rocks. Acta Petrologica Sinica, 28 (9): 2733~2750.
Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46 (3): 535~551.
Chen Xiuqin, Boucot A J. 2007. Late Silurian brachiopods from Darha Mumingan joint banner, Inner Mongolia. Geobios, 40 (1): 61~74.
Cui Yuliang, Qu Hongjie, Chen Yingfu, Wang Sen. 2019**&**. Early Permian rhyolite related to the continental marginal arc on the northern margin of the North China Craton—Evidence of zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. Geological Review, 65 (6): 1299~1314.
Deng Jinfu, Zhao Guochun, Zhao Hailin, Luo Zhaohua, Dai Shengqian, Li Kaiming. 2000**&**. Yanshanian igneous petrotectonic assemblage and orogenic——deep processes in East China. Geological Review, 46 (1): 41~48.
Ding Hui, Wu Jianhua, Zhu Hongtao, Wu Rengui, Yu Dajin. 2016**&**. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry characteristics of granite-porphyrys from Hongshanzi basin and its geological significance in south Great Hingan Range. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 39 (1): 1~9.
Dong Xiaojie, Wang Wanqiong, Sha Qian, Zhang Jinfeng. 2016**&**. Suzy volcanic rocks in the northern margin of the North China Craton and its formation mechanism. Acta Petrologica Sinica, 32(9): 2765~2779.
Fan Juanxiu, Li Chao, Hou Xudong. 2018**&**. The international chronostratigraphic chart (2018/08). Journal of stratigraphy, 42 (4): 365~370.
Gao Dong, Wu Cailai, Gao Yuanhong, Zhang Xin, Chen Hongjie, Guo Wenfeng, Wu Di, Zheng Kun. 2019**&**. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry of the Yusupuleke granite pluton in south Altyn and its geological implications. Earth Science, 11: 3812~3828.
Gorton M P, Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. Canadian Mineralogist 38: 1065~1073.
Gutiérrez F. 2005. The Hudson volcano and surrounding monogenetic centres (Chilean Patagonia): An example of volcanism associated with ridge—trench collision environment. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 145: 207~233.
Humphris S E, Thompson G. 1978. Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 42(1): 127~136.
Irvine T N, Baragar W R. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Journal of Earth Sciences, 8: 523~548.
Ji Chunyu, Wu Jianhua. 2011**&**. The SHRIMP zircon U-Pb dating of felsic volcanic rocks and its geological significance from Yutian Group in southern Jiangxi. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 33 (2): 131~138.
Ji Hongwei. 2015**&**. Metallogensis of Guyuan—Hongshanzi U-Mo depsoit, Inner Mongolia. Supervisor: Li Ziying. Beijing: Dissertation submitted to Beijing Research Institute of Uranium Geology for master degree: 1~144.
Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, Windley B F, Shi Yuruo, Zhang Fuqin, Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Wei, Zhang Qi, Zhang Liqiao, Ren Jishun. 2008. 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. Lithos, 101 (3): 233~259.
Jiang Sshan, Wu Jianhua, Wang Changdong, Zhu Hongtao, Zhao Bo, Liu Yang. 2018**&**. Geochronology, geochemical characteristics, and geological significance of the rhyolite from Tuohe basin in Chifeng. Geological Journal of China Universities, 24 (6): 896~906.
Jiang Xiaojun, Liu Yongqing, Peng Nan, Shi Yuruo, Xu Huan, Wei

Wentong, ,Liu Zengxiao, Zhao Huaping, Yao Baogang. 2011&. Geochemistry and SHRIMP U-Pb dating of the Guangxingyuan composite pluton in Hexigten Qi, Inner Mongolia and its geological implication. Acta Geologica Sinica, 85 (1): 114~128.

King P L, White A J R, Chappel B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of alumious A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia. Journal of Petrology, 38: 371~391.

Lao Yujun, Wu Jianhua, Xu Xusheng. 2016&. Petrogenesis of the Late Cretaceous Rhyolites in the Changtang basin, northern Guangdong: Constraints from geochemistry and Sr—Nd—Pb—Hf—O isotopes. Rock and Mineral Analysis, 35(5): 558~567.

Li Wei, Zhu Hongtao, Wu Jianhua, Wu Rengui, Zhang Hailong, Zhao Bo, Wang Changdong. 2017&. Discussion on ore controlling factors and the validation of optimal prospecting target area in Hongshanzi—Guangxing uranium ore-field Inner Mongolia. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 40(2): 115~125.

Li Jinyi. 2009&. Cycles and stages of geological history of China Mainland. Geology in China, 36 (3): 504~514.

Li Zihao. 2017&. Geochemical characteristics and geological significance of Late Jurassic—Early Creaceous intrusive rocks in Chejiayingzi region, Inner Mongolia. Supervisor: Zhao Qingying. Chang Chun: Dissertation submitted to Jilin University for master degree: 1~68.

Lin Tianfa, Wu Jianhua, Guo Guolin, Niu Ziliang, Da Chaoyuan, Zhou Jian. 2019&. Zircon SHRIMP U-Pb ages, geochemical characteristics of the Kulongshan rhyolitic porphyry in northern Hebei and their geological significances. Geological Review, 65 (3): 713~728.

Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003&. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A type rock suites. Geological Journal of China Universities, 9 (4): 573~591.

Liu Feiyu, Wu Jianhua, Liu Shuai. 2009&. Early Cretaceous zircon SHRIMP U-Pb age of the trachyte and its significance of the Gan—hang Belt. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 32 (4): 330~335.

Lv Hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Dong Xiaopeng, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018&. Ophiolitic mélanges found in mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China Craton and Central Asian Orogenic Belt. Geological Review, 64 (4): 777~805.

Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3. 00, A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication: 1~70.

Meng En, Xu Wenliang, Yang Dedin, Qiu Kuifeng, Li Changhua, Zhu Hongtao. 2011&. Zircon U-Pb chronology geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Lingquan Basin in Manzhouli area, and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 27 (4): 1209~1226.

Middlemost E A K. 1986. Magmas and magmatic rocks: An introduction to Igneous Petrology. London: Longman Scientific and Technical: 1~26.

Middlemost E A G. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth Science Review, 37: 215~224.

Murray R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications. Sedimentary Geology, 90(3): 213~232.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956~983.

Peng Bin, Wang Guoqi, Liu Le, Yang Yong, Liu Feng. 2016&. Recognition of the Early Permian volcanic rocks and its geological significance in Chifeng region of Inner Mongolia. Acta Metallurgica Sinica, 35(6): 1329~1340.

Peng Qigui. 2015&. Geochronological and geochemical characteristics of rhyolite in Xiamajin—Liujiayingzi, Chifeng. Supervisor: Wu Rengui. Nanchang: Dissertation submitted to East China University of Technology for master degree: 1~69.

Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Singapor: Longman Scientific and Technical: 1~352.

Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone—mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio. The Journal of Geology, 94(5): 635~650.

Rubatto, D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chemical Geology, 84(1~2): 123~138.

Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002&. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48(S): 26~30.

Su Meixia, Yang Bo, Wu Yanjun, Yan Ping, Meng Xiaolin. 2020&. Deep mineralization processes in the central—south Great Hinggan magmatic belt. Geological Review, 66(5): 1321~1333.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geological Society of London Special Publications, 42: 313~345.

Tang Jie, Xu Wwenliang, Wang Feng, Zhang Shuo, Li Yu. 2015. Geochronology, geochemistry, and deformation history of Late Jurassic—Early Cretaceous intrusive rocks in the Erguna massif, NE China: Constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of the Mongol—Okhotsk orogenic belt. Tectonophysics, 658: 91~110.

Wei Changxi. 2019&. Constraints from chronology and geochemistry of trachyte of Wuyi Group in Dongxiang basin, Jiangxi province. Supervisor: Wu Rengui. Nanchang: Dissertation submitted to East China University of Technology for master degree: 1~81.

Wang Changdong, Wu Jianhua, Zhang Hailong, Zhu Hongtao, Yang Dongguang, Zhang Shaohua. 2019&. Geochemical features and geological implication of Early Cretaceous fine-grained biotite alkali-feldspar granite and granite porphyry in the Hongshanzi compound granitic body. Geochimica, 48(4): 356~369.

Wang Ping. 2005&. The Xibiehe section and Xibiehe Formation of the Bateaobao area in Darhan mumingan joint banner, Inner Mongolia. Journal of Jilin University (Earth Science edition), 35(4): 409~0415.

Wang Yuegu. 2018&. The tectonic significance of the Early Permian volcanic rocks in the north margin of the North China block: A case study in Siziwang Banner area. Supervisor: Zhou zhiguang. Beijing: Dissertation submitted to China University of Geosciences (Beijing) for master degree: 1~51.

Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms. Geochim Cosmochim Acta, 58(19): 4127~4145.

Wu Jianhua, Xiang Yuanxin, Liu Shuai. 2011&. Wuyi Group of southern Jiangxi and its geological age. Journal of Stratigraphy, 35 (2): 200~208.

Wu Jianhua, Wu Jun, Zhu Hongtao, Guo Guolin, Wu Rengui, Liu Shuai, Yu Dagan. 2013&. Lithostratigraphical correlation of the volcanic rock series in Hongshanzi basin in Great Hingan Range. Geological Journal of China Universities, 19(3): 472~483.

Wu Jianhua, Xie Kairui, Wu Rengui, Guo Guolin, Liu Shuai. 2014&.

The new progress in the study of Mesozoic rhyolite—trachyte assemblage and hydrothermal-type uranium mineralization in Eastern China. Advances in Earth Science, , 29(12): 1372~1382.

Wu JianHua, Ding Hui, Niu Ziliang, Wu Rengui, Zhu Minqiang, Guo Guolin, Liu Shuai, Yu Dagan. 2015&. SHRIMP zircon U-Pb dating of country rock in Zhangmajing U-Mo deposit in Guyuan, Hebei Province, and its geological significance. Mineral Deposits, 34(4): 757~768.

Wu Jianhua, Xie Kairui, Zhu Hongtao, Wu Rengui, Liu Shuai. 2016&. Petrogenesis of rhyolite from Hongshanzi basin in southern Greater Xing´an Range: Elements and Sr—Nd—Pb isotope constraints. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(6): 1724~1739.

Wu Jianhua, Guo Jialei, Zhu Hongtao, Wu Rengui, Liu Shuai. 2017a&. Geochronology, geochemical characteristics and its geological significances of the rhyolite porphyry in Zhirui basin, Southeastern Inner Mongolia Autonomous Region. Geological Journal of China Universities, 23 (3): 383~396.

Wu Jianhua, Guo Guolin, Guo Jialei, Zhang Qi, Wu Rengui, Yu Dagan. 2017b&. Spatial—temporal distribution of Mesozoic igneous rock and their relationship with hydrothermal uranium deposits in eastern China. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1591~1614.

Wu Jianhua, Zhang Jingyan, Jiang Shan, Xie Kairui, Guo Guolin, Wu Rengui. 2017c&. Geochronology, geochemical characteristics and petrogenesis of trachytes in the Guyuan uranium ore field, northern Hebei province. Geochimica, 46 (3): 105~122.

Xia Yingbing, Wu Jianhua, Jiang Shan, Wu Rengui, Liu Shuai. 2016&. Geochronology, geochemical characteristics, and genesis of trachyte in Datan basin, Northern Hebei. Geological Journal of China Universities, 22 (4): 608~620.

Xiang Yuanxin, Wu Jianhua. 2012. SHRIMP zircon U-Pb age of Yutian Group basalts in Longnan area of southern Jiangxi Province and its geological significance. Geological Bulletin of China, 31(5): 716~725.

Xie Kairui, Wu Jianhua, Zhu Hongtao, Wu Rengui, Liu Shuai. 2016&. Petrogenesis of early Late Jurassic rhyolites from the Zhirui Basin in southern Daxing' an Range: Their chronologic and geochemical constrains. Geochimica, 45(6): 249~267.

Xiong Shuangcai, Zhang Zhengfeng, Li Guang, Liu Runze, Hua Xudeng, Zhao Fuzhuang, Zhao Pengfei, Li Guanlu. 2019&. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of alkali− granites in Laoyemiao area, Eastern Junggar, and geological significance. Geological Review, 65(1): 221~231.

Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Wang Yanyan, Luo Zhiwen. 2014&. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing—Meng Orogenic Belt (XMOB). Acta Petrologica Sinica, 30 (7): 1841~1857.

Xu Liquan, Deng Jinfu, Chen Zhiyong, Tao Jixiong. 2003&. The identification of Ordovician adakites and its signification in northern Damao, Inner Mongolia. Geosciences, 17(4): 428~434.

Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, Meng En, Tang Jie, Xu Rongjun, Wang Wei. 2013&. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations. Acta Petrologica Sinica, 29 (2): 339~353.

Yu Qian, Ge Wenchun, Yang Hao, Zhao Guochun, Zhang Yanlong, Su Li. 2014. Petrogenesis of late Paleozoic volcanic rocks from the Daheshen Formation in central Jilin Province, NE China, and its tectonic implications: Constraints from geochronology, geochemistry and Sr—Nd—Hf isotopes. Lithos, 192~195: 116~131.

Zhang Qiqi, Zhang Shuanghong, Zhao Yue, Liu Jianmin. 2018. Devonian alkaline magmatic belt along the northern margin of the North China Block: Petrogenesis and tectonic implications. Lithos, 302~303: 496~518.

Zhang Shuanghong, Zhao Yue, Ye Hao, Liu Jianmin, Hu Zhaochu. 2014. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt. Geological Society of America Bulletin, 126 (9~10): 1275~1300.

Zhang Shuanghong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Zhaochu. 2016. Different sources involved in generation of continental arc volcanism: The Carboniferous—Permian volcanic rocks in the northern margin of the North China block. Lithos, 240~243: 382~401.

Zhang Wei, Jian Ping. 2008&. SHRIMP dating of Early Paleozoic granites from North Damaoqi, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 82 (6): 778~787.

Zhang Yunping, Su Yangzheng, Li Jingchun. 2010&. Regional tectonics significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in central Inner Mongolia, China. Geological Bulletin of China, 29(11): 1599~1605.

Zhang Yafei, Wu Jianhua, Jiang Shan, Liu Xuan, Wu Rengui, Liu Shuai, Guo Gguolin. 2016&. SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the uranium (molybdenum)-related rhyolite and granitic porphyry, Datan, northern Heibei. Acta Petrologica Sinica, 32(1): 193~211.

Zhang Zhengfeng, Xiong Shuangcai, Fan Xianglian. 2021&. Zircon U-Pb dating, geochemistry and geological significance of synorogenic-granite in Mutanyao area, eastern Junggar. Geological Review, 67 (1): 231−241.

Zhao Yue, Chen Bin, Zhang Shuanhong, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Liu Jian, Pei Junling. 2010&. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas. Geology in China, 37(4): 900~915.

Zhou Wanpeng. 2015&. The magmatic evolution in Xiangshan area and its important role in the uranium mineralization. Supervisor: Fan Honghai. Beijing: Dissertation submitted to Beijing Research Institute of Uranium Geology for doctordegree: 1~160.

Zhu Hongtao, Li Jimu, Zhao Bo, Wang Changdong. 2014&. Exploration progress of Hongshanzi basin in Daxinganling and its prospecting significance. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 37(4): 360~366.

Zhu Hongtao, Wu Rengui, Jiang Shan, Wu Jianhua, Liu Yang, Zhao Bo, Wang Changdong. 2019&. The definition and geological significance of Hongshanzi complex rock in Inner Mongolia. Acta Petrologica Et Mineralogica, 38 (4): 453~464.

Zhu Hongtao, Wu Jianhua, Tang Dawei, Guo Hengfei, Yang Dongguang, Wang Liangyu, Wu Rengui. 2020&. Geochemistry of Late Jurassic biotite granite in the Hongshanzi area, Hexigten Banner, Inner Mongolia, and its geological implications. Geological Review, 66(3): 765~785.

SHRIMP zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and tectonic significance of dacite from the Nanwopu Uranium Deposit, Chifeng, Inner Mongolia

DA Chaoyuan[1)], WU Jianhua[2)], YANG Dongguang[2)], GUO Hengfei[1)], NIU Ziliang[1)], ZHU Hongtao[1)], ZHOU Jian[1)], YU Bing[1)]

1). *No.* 243 *Geological Party*, *China National Nuclear Cooperation*, *Chifeng*, 024006;

2). *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment*, *East China University of Technology*, *Nanchang*, 330013

Objectives: The Nanwopu uranium deposit is located in the northeastern section of the Guyuan—Hongshanzi uranium metallogenic belt. Dacite, which belongs to Elitu Formation, is the direct surrounding rock of the Nanwopu uranium deposit. The aim of this paper is to investigate the petrogenesis and tectonic significance of this rock suite.

Methods: Detailed geological survey, SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock major and trace elements were carried out on the Nanwopu dacite in this paper.

Results: The SHRIMP zircon U-Pb dating of the Nanwopu dacite is 268. 1±2. 5 Ma, it can be ascertained that the dacites are the products of Early Permian magmatic activities. The whole-rock geochemical analyses show that the Nanwopu dacite lie in middle K calc-alkaline fields, the Aluminium saturation index show the metaluminInous and weak peraluminous features, integrated with enrichments of LREE and LILE (Rb, Ba, Th, K), depletions of Nb, Ta, P and Ti and Eu negative anomaly, belongs to I-type granites, suggesting plate subduction-related geochemical affinities.

Conclusions: Combined with the regional studies, the above geochemical signatures indicate that the Nanwopu dacite was formed in the volcanic arc tectonic environment on the active continental margin of the Hercynian tectonic stage (north margin of North China Craton). This is inconsistent with the tectonic environment drew from the other Mesozoic uranium deposits related to volcanic rocks in eastern China. The Lower Permian Erlitu Formation is favorable for the occurrence of uranium mineralization in eastern China.

Keywords: dacite; Lower—Middle Permian; Elitu Formation; uranium mineralization; geological significance

Acknowledgements: This research was financially supported by the uranium mineral exploaration project of the China National Nuclear Bureau (No. 202001); National Natural Science Foundation of China (No. 41372071) and Research project of China National Nuclear Cooperation (No. [2008]74).

First author: DA Chaoyuan, male, born in 1985, master, engineer, mainly engaged in uranium polymetallic ore exploration; Email: 15049668414@163. com

Corresponding author: WU Jianhua, male, born in 1960, doctor, professor, mainly engaged in uranium geology and volcanic geology; Email: jhwu@ecut. edu. cn

Manuscript received on: 2020-07-03; Accepted on: 2020-12-26; Network published on: 2021-02-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 02. * * * **Edited by**: HUANG Daomao, ZHANG Yuxue