

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.165>



大兴安岭早白垩世伸展作用:内蒙古乌拉盖球状岩地球化学及锆石 U-Pb 定年的限制

汪岩, 钱程*, 庞雪娇, 马永非, 张立东, 杨雅军, 钟辉

中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034

摘要: 大兴安岭火山岩带中南部乌拉盖地区新发现的球状岩石除因其漂亮的构造被人们关注外, 其地球化学特征及锆石 U-Pb 定年对于探讨东北地区大兴安岭演化历史也具有重要意义. 在详细的野外地质调查基础上, 通过对内蒙古乌拉盖球状岩及其主岩地球化学及 Sr-Nd 同位素特征等进行综合研究, 探讨其源区性质及形成机制. 研究表明: 乌拉盖球状岩及其主岩具有富硅 ($\text{SiO}_2=75.35\% \sim 76.21\%$)、富碱 ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.30\% \sim 7.45\%$) 和低铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3=9.82\% \sim 11.30\%$)、镁值 ($\text{Mg}^\# = 4.52 \sim 14.47$)、铬 ($\text{Cr}=14.5 \times 10^{-6} \sim 22.5 \times 10^{-6}$)、镍 ($\text{Ni}=1.84 \times 10^{-6} \sim 3.97 \times 10^{-6}$), 指示其物质来源于地壳. 微量元素和稀土元素具后造山火山岩特征: Rb、Th、K 等大离子亲石元素和 Nb、Ta、Zr、HREE 等高场强元素明显富集, N-MORB 标准化图解中 Nb 负异常不明显, 轻重稀土元素分异明显, LREE/HREE=5.21~6.70. 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.705 9~0.713 7) 高于现代大洋 MORB (0.702 29~0.703 34), 也显示壳源特征; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512 456~0.512 528) 则低于现代大洋 MORB (0.512 99~0.513 30), ϵ_{Nd} 值为 +4.8~+6.2, 又表现亏损地幔的信息. 研究认为, 乌拉盖球状岩及其主岩岩浆来源于下地壳, 且有亏损地幔物质的参与. Sr、Ba、Eu 亏损强烈, 反映了明显分离结晶作用的存在, 岩石形成于板内稳定的构造环境; 主量元素及微量元素图解又表现出后造山 A 型花岗岩特征. 年代学研究显示, 球状岩没有得到很好的年代学数据, 其可能具低温富流体的特征、新生结晶锆石偏少, 大量的捕获锆石或其他难溶矿物可能为球状岩球粒的生长提供物质基础; 球状岩主岩文象花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 成岩年龄为 142.2 ± 2.7 Ma, 侵入球状岩的辉绿岩脉年龄平均为 140.5 Ma, 主岩的围岩正长斑岩获得锆石 LA-ICP-MS U-Pb 成岩年龄为 349.5 ± 3.4 Ma, 综合判断球状岩的成岩时代为早白垩世早期 (~141 Ma). 综合研究表明, 乌拉盖地区球状岩石及其主岩形成机制与大兴安岭火山岩带晚期岩浆活动有关, 主要受控于白垩世早期蒙古-鄂霍茨克洋闭合后造山伸展体制下的构造背景, 是大兴安岭大规模区域伸展作用、岩浆底侵的产物.

关键词: 球状岩; 同位素年代学; 地球化学; 区域伸展; 大兴安岭; 乌拉盖; 内蒙古.

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2021)04-1447-20

收稿日期: 2020-03-13

Early Cretaceous Extension of Great Xing' an Range: Constraints from Geochemistry and Zircon U-Pb Ages of Orbicular Rocks in Uragai Area, Inner Mongolia, China

Wang Yan, Qian Cheng*, Pang Xuejiao, Ma Yongfei, Zhang Lidong, Yang Yajun, Zhong Hui

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: In addition to its beautiful structure, the newly discovered orbicular rocks in the central and southern parts of the Great

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20190039, DD20160048, DD20190372).

作者简介: 汪岩 (1968-), 男, 教授级高工, 从事区域地质与火成岩研究工作. ORCID: 0000-0003-4119-2064. E-mail: wy68413@163.com

* 通讯作者: 钱程, ORCID: 0000-0002-1626-1737. E-mail: qch1985123@163.com

引用格式: 汪岩, 钱程, 庞雪娇, 等, 2021. 大兴安岭早白垩世伸展作用: 内蒙古乌拉盖球状岩地球化学及锆石 U-Pb 定年的限制. 地球科学, 46 (4): 1447-1466.

Xing'an volcanic belt in the Uragai region are of great importance to the exploration of the subduction history of the Great Xing'an Range in the NE China. On the basis of detailed field geological survey, in this paper it makes a comprehensive study on the geochemistry and Sr-Nd isotope characteristics of the orbicular rocks and its host rocks in Uragai area, Inner Mongolia, and discusses its magmatic source and formation mechanism. The analysis results show that the Uragai orbicular rock and its host rocks have high silica ($\text{SiO}_2=75.35\%-76.21\%$) and alkali ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.30\%-7.45\%$), but low aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3=9.82\%-11.30\%$), $\text{Mg}^\#$ value ($\text{Mg}^\#=4.52-14.47$), chromium ($\text{Cr}=14.5\times 10^{-6}-22.5\times 10^{-6}$), and nickel ($\text{Ni}=1.84\times 10^{-6}-3.97\times 10^{-6}$), indicating a crustal magmatic source. Trace and rare earth elements (REEs) show post-orogenic volcanic rock features: obviously enriched in large ion lithophile elements (LILEs, e.g., Rb, Th, K, LREE) and high field strength elements (HFSEs, e.g., Nb, Ta, Zr, HREE). The Nb negative anomaly is not obvious in N-MORB standardized diagram, with significant differentiation between light rare earth elements (LREE) and heavy rare earth elements (HREE) ($\text{LREE}/\text{HREE}=5.21-6.70$). The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.705 9–0.713 7) is higher than the MORB of modern ocean (0.702 29–0.703 34), which also suggests a crustal source. However, the $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512 456–0.512 528) was lower than the value of modern oceans (0.512 99–0.513 30), and with ϵ_{Nd} value from +4.8 to +6.2, which shows depleted mantle signature. Study shows that the magmatic source of Uragai orbicular rock and its host rocks originated from the lower crust, and with participation of depleted mantle material. The obviously depleted Sr, Ba and Eu suggest the fractional crystallization course, and the rocks formed in a stable in-plate tectonic environment. Major and trace element diagrams also show the post-orogenic A-type granite features. The study shows that the orbicular rocks have few reliable geological ages, probably resulted from sufficient low temperature fluids which blocked the crystallization course. The abundant trapped zircons or other refractory minerals may provide a material basis for the formation of orbicular rocks. The zircon LA-ICP-MS U-Pb age of graphic granite in the main face of the orbicular rocks is 142.2 ± 2.7 Ma, and the average age of diabase dikes in the orbicular rocks is 140.5 Ma, and the zircon LA-ICP-MS U-Pb age obtained from orthophyre, which is surrounding rocks of the main face of the orbicular rocks, is 349.5 ± 3.4 Ma, These age information restricted the formation age of orbicular rocks at Early Cretaceous ($141\text{ Ma}\pm$), its host rocks is Early Carboniferous, which is totally different with host rocks of orbicular rocks in and abroad. Comprehensive research shows that the formation mechanism of orbicular rock and its host rocks in Uragai area is related to late stage magmatic activity in the Great Xing'an volcanic belt, largely controlled by the post-orogenic extension tectonic setting of the Mongol-Okhotsk Ocean in the Early Cretaceous, and it is a product of the large-scale regional extension and strong magmatic underplating in the Great Xing'an Range.

Key words: orbicular rock; isotope chronology; geochemistry; regional extension; Great Xing'an Range; Uragai area; Inner Mongolia.

0 引言

大兴安岭位于中亚造山带东段 (Jahn *et al.*, 2000), 前人也称兴蒙造山带东段 (徐备等, 2014), 呈 NNE 向纵贯整个东北地区西部. 大兴安岭的演化历史和隆升机制, 不仅受到古亚洲构造域的影响, 还可能受到蒙古-鄂霍茨克构造域的叠加以及古太平洋构造域的改造, 一直是国内外众多学者关注和研究的热点 (李锦轶等, 2004; 许文良等, 2019).

而作为大兴安岭的重要组成部分——中生代火山岩带是中国东部 3 条重要的火山岩带之一, 也是中国东北地区分布的最大的火山岩带, 位于古生代古亚洲构造域与中生代环太平洋构造域、蒙古-鄂霍茨克构造域的强烈叠加、复合、转换部位, 构造演化复杂, 成矿地质条件优越. 大兴安岭火山岩带规模巨大且岩石类型多样, 近年来引起了学者们的高度关注, 对其形成时代、形成机制及构造背景等的研究和讨论已取

得了很大的进展. 目前主要有以下 4 种观点: ① 大兴安岭火山岩的形成时代主要为早白垩世和晚侏罗世 (Wang *et al.*, 2006; 杨晓平等, 2019); ② 地幔柱岩浆成因, 火山岩的形成背景可能与地幔柱上涌造成的上覆岩石圈伸展环境有关 (林强等, 2003); ③ 与蒙古-鄂霍茨克洋闭合的造山后伸展作用有关 (张连昌等, 2008; 许文良等, 2019); ④ 与古太平洋板块作用有关 (孙德有等, 1994; 杨晓平等, 2019), 也有学者认为该区处于古亚洲构造域向古太平洋构造域的过渡阶段, 是蒙古-鄂霍茨克洋闭合和古太平洋板块俯冲共同作用的结果 (张连昌等, 2007). 这一系列不同的认识表明大兴安岭中生代火山岩具有十分复杂的成因机制, 是当前地学研究中的一个前沿课题. 近年, 笔者研究团队 (大兴安岭成矿带突泉-翁牛特地区地质矿产调查项目组) 在大兴安岭西南坡乌拉盖地区发现中国第 4 例球状岩石 (汪岩等, 2017). 岩体主要岩石类型为球状流纹斑岩, 其漂亮的构造及独特的形成过程

引起人们广泛关注;地球化学特征表现出明显的“A型花岗岩”特征.一般认为A型花岗岩主要形成于造山后伸展作用阶段(Eby,1992),从而使A型花岗岩可以提供该类环境中岩浆对地壳的形成和演化过程作用等信息(Turner *et al.*,1992),并能成为判断造山作用结束时间的重要岩石学标志.该岩体的发现无疑为研究大兴安岭地区燕山早期岩浆活动和中生代构造体制转换提供了难得的研究对象.

本文拟通过对该岩体岩石地球化学和同位素

年代学的研究,探讨其源区的性质,并希望能获得一些燕山期壳幔作用的信息.

1 岩体地质

乌拉盖球状岩体位于内蒙古自治区东乌珠穆沁旗乌拉盖苏木一带(图1),构造上处于大兴安岭火山岩带西南坡、乌拉盖—索伦NE向火山岩—侵入岩亚带上(图1,沈阳地质调查中心,2019,大兴安岭成矿带突泉—翁牛特地区地质矿产调查;沈阳地

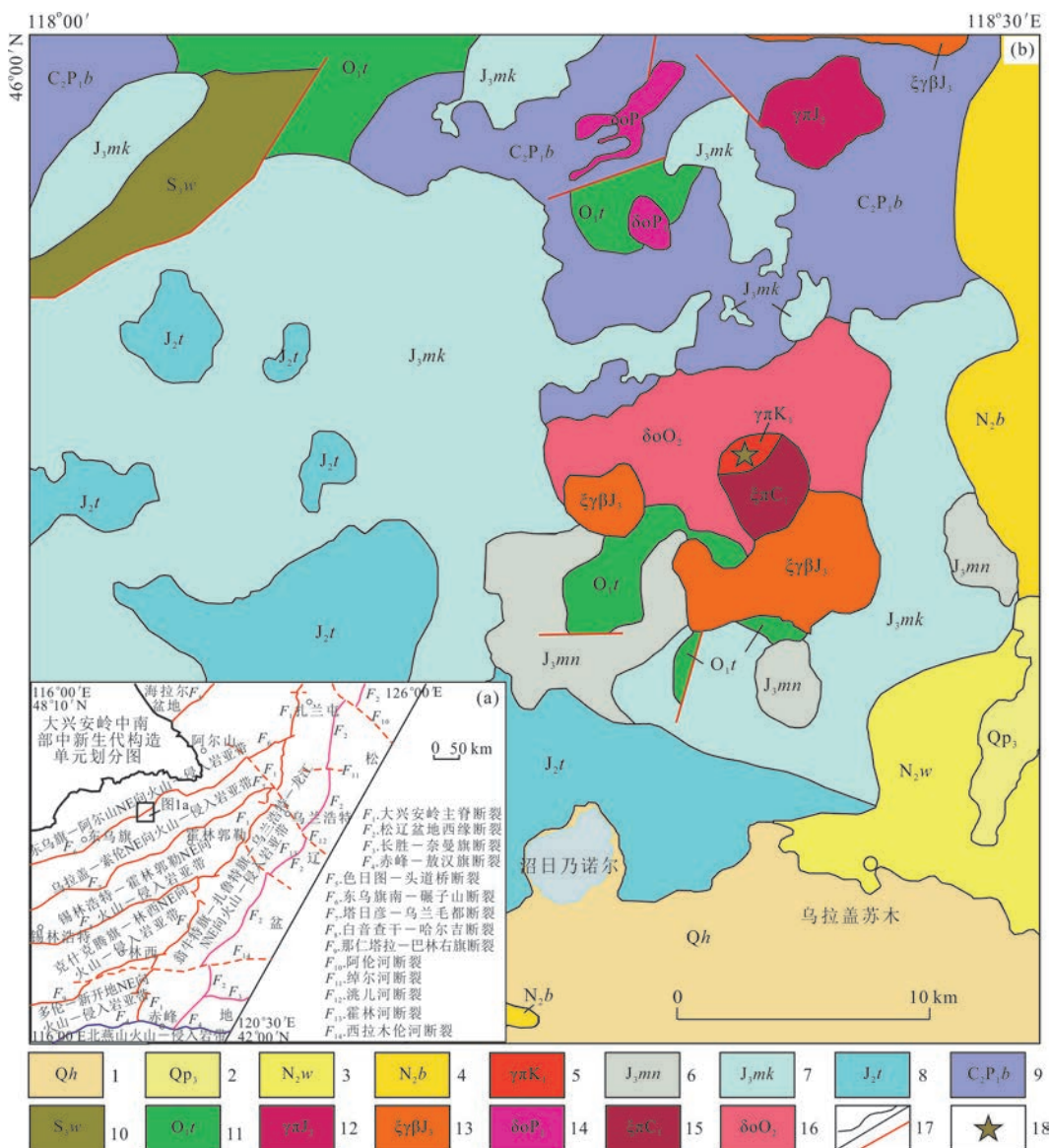


图1 乌拉盖苏木一带大地构造位置及区域地质略图(据汪岩等,2017修改)

Fig.1 Geological sketch map of Urugai sumu area, showing the position of the exposed orbicular rocks

1. 全新统; 2. 上更新世; 3. 上新统五岔沟组; 4. 上新统百岔河组; 5. 早白垩世文象花岗岩; 6. 上侏罗统玛尼吐组; 7. 上侏罗统满克头鄂博组; 8. 中侏罗统塔木兰沟组; 9. 上石炭统-下二叠统宝力高庙组; 10. 上志留统卧都河组; 11. 下奥陶统铜山组; 12. 晚侏罗世花岗岩斑岩; 13. 晚侏罗世少斑状正长岩; 14. 早二叠世石英闪长岩; 15. 早石炭世正长斑岩; 16. 中奥陶世石英闪长岩; 17. 地质界线/推测断层; 18. 球状岩产出位置

质调查中心, 2019. 大兴安岭成矿带突泉—翁牛特地区基础地质综合研究与片区总结). 露头呈南北向断续延伸约 100 m, 宽约 50 m. 关于球状岩石, 世界上报道的仅 100 余处; 我国目前仅有 3 处报道: 浙江石角超镁铁质球状岩石(周新民等, 1990)、河北滦平球状闪长岩(马芳等, 2004a, 2004b, 2004c)及湖北黄陵球状花岗闪长岩(魏运许等, 2015). 乌拉盖球状岩石岩性为流纹斑岩(图 2a~2d), 岩体侵入主岩微细粒文象花岗岩(图 2e), 球状流纹斑岩一侧见冷凝边, 微细粒文象花岗岩一侧具烘烤边(图 2f); 同时, 球状岩体中发育辉绿岩脉. 主岩微细粒文象花岗岩侵入早石炭世正长斑岩.

该岩体宏观上的最大特征是球状构造发育, 在流纹斑岩岩石中不均匀地分布着大量球体. 球体密

集处, 其含量可达 80% 以上, 由无壳层球粒碱性流纹斑岩、单壳层球状碱性流纹斑岩和多壳层球状碱性流纹斑岩组成(图 2a~2d). 球状体的成因为富含气水热液的碱性结晶岩石在半塑性状态下运移、堆叠形成, 球状体中矿物成分生长顺序由内向外; 球间基质多见显微文象嵌晶结构, 表现出岩浆接近地表的快速冷凝特征. ①无壳层球粒碱性流纹斑岩(图 3a), 球粒体由暗色纤维及长英质隐晶集合体组成, 球粒无核心; 球间基质由长英质隐晶集合体或嵌有较自形长柱状碱性长石微晶的文象体组成. ②单壳层球状碱性流纹斑岩(图 3b), 球体由暗色纤维及长英质隐晶集合体组成, 具薄外壳, 外壳由长柱状、针柱状碱性闪石沿球状体切线方向环绕所致, 球状体核心由隐晶暗色矿物及长英质成分组成; 球间基质



图 2 乌拉盖球状岩等野外宏观照片

Fig. 2 Field outcrop photos of the orbicular rocks in Uragai area

a. 浅绿色单壳层球状流纹斑岩; b. 灰绿色多壳层大球状流纹斑岩; c. 肉红色微细粒文象花岗岩; d. 灰绿色多壳层流纹斑岩; e. 灰绿色多壳层扁豆状流纹斑岩; f. 球状流纹斑岩侵入微细粒文象花岗岩

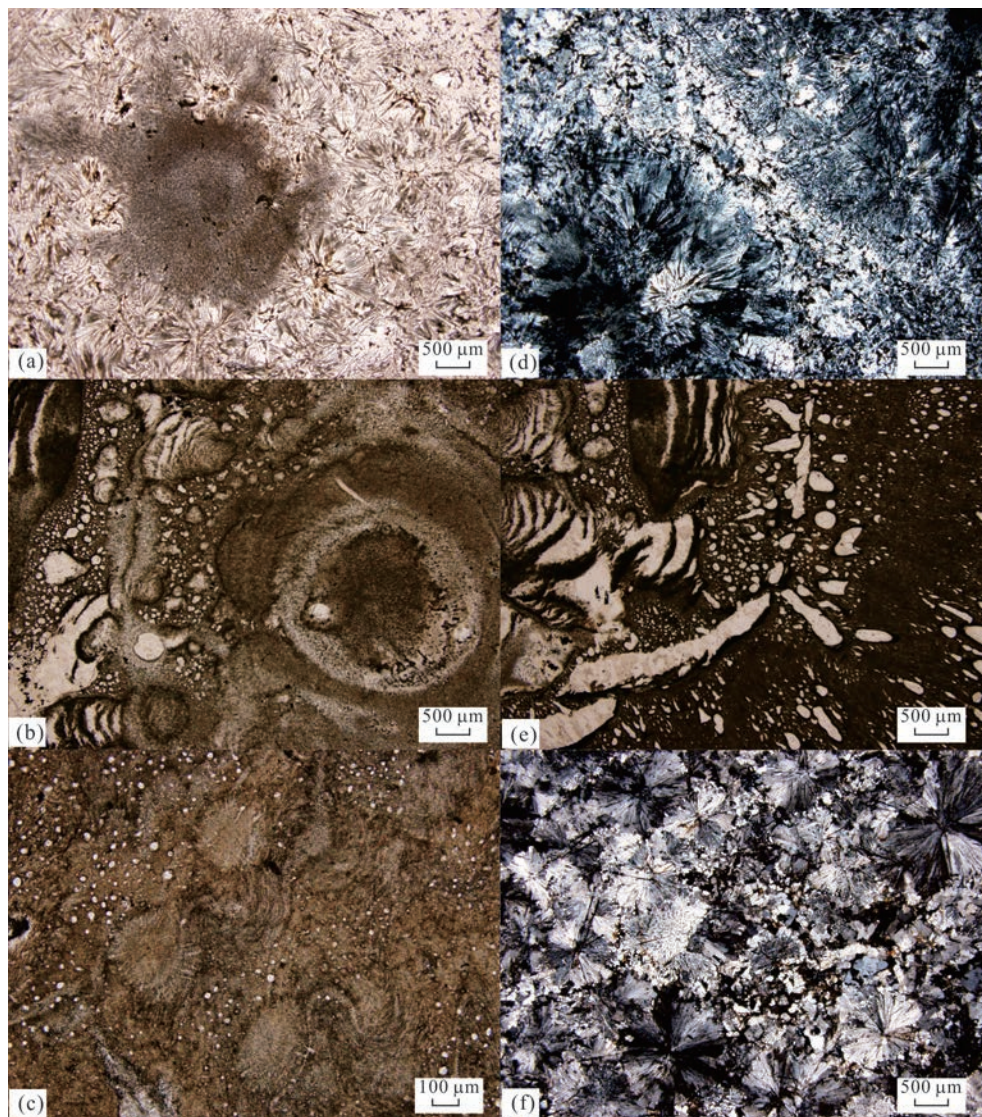


图3 乌拉盖球状岩等显微镜下照片

Fig. 3 Micro-section photos of the orbicular rocks in Uragai area

a. 球状体和外壳, 外壳由长柱状、针状碱性闪石环绕; b. 球状体的单、薄壳层及球状基质特征; c. 球状体内部层呈明显圈层构造及3个亚层特征; d. 球状体中部层叠瓦式、雨滴状等气孔杏仁体; e. 球状体外部层云朵状长英质隐晶集合体上点缀放射状杏仁体, 球状体外部层长英质成分不均匀分布呈现的圈层; f. 球粒微细粒文象花岗岩

为碱性流纹斑岩. ③多壳层球状碱性流纹斑岩(图3c~图3e), 球状体内部主要成分为长英质隐晶成分及暗色矿物集合体, 圈层构造明显, 核心层和中间层局部含气孔, 气孔中充填粒状石英及针柱状、放射状角闪石, 外层较厚, 出现大量针柱状角闪石; 球间基质为碱性流纹斑岩. ④边部相球粒微细粒文象花岗岩(图3f), 球粒与球间基质界线较清晰, 球粒近圆状, 内呈放射状; 球间基质呈文象结构或文象嵌晶结构.

2 分析方法

球状岩石和主岩样品采自内蒙古东乌珠穆沁旗乌拉盖苏木北西约15 km山坡处(图1). 在宏观观察基础上, 挑选新鲜全岩样品磨碎至200目和80~120目, 分别用于主量元素、微量元素、稀土元素、Sr-Nd同位素分析和锆石U-Pb定年. 主量元素、微量元素和稀土元素分析由国土资源部东北矿产资源监督检测中心分析完成. 主量元素用X射线荧光光谱(XRF)方法完成(其中FeO分析采用的是重铬酸钾容量法), 精度为1%~5%; 微量元素和稀土元

素用 ICP 质谱方法分析完成,精度一般优于 10%。

Sr-Nd 同位素由核工业北京地质研究院分析完成。全岩 Sr-Nd 同位素由 VG354 多接收质谱仪测定,吸取适量全岩粉末样品于 Teflon 罐中,根据已获得的 Sr 和 Nd 含量加入适量的 $^{87}\text{Rb}-^{84}\text{Sr}$ 和 $^{149}\text{Sm}-^{150}\text{Nd}$ 混合稀释剂,再滴入一定量纯化的 HClO_3 和 HF ,在电热板上加热一周使其充分溶解,利用离子交换树脂分离后,再由 VG354 多接收质谱仪测试。Sr 同位素比值以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行校正质量分馏,得到标样 NBS-987 的组成为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710224\pm 0.000008(2\sigma)$,实验全流程本底为 $10\sim 20\text{ ng}$;Nd 同位素比值以 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,获得标样 La Jolla 的同位素组成为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511864\pm 0(2\sigma)$,实验全流程本底为 $50\sim 70\text{ pg}$ 。详细的 Rb-Sr、Sm-Nd 样品制备、质谱测定方法及各类标样测定分析见王银喜等(2007)。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、TDM、TDM2 计算过程中,取 $\lambda(^{87}\text{Rb})=1.42\times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$, $\lambda(^{147}\text{Sm})=6.54\times 10^{-12}\text{ a}^{-1}$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2137$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.51315$ (Jahn *et al.*,1999)。

锆石 U-Pb 定年样品碎样和锆石挑选由河北省廊坊市区域地质调查所实验室完成。首先用水将样品表面清洗并晾干、粉碎至 $80\sim 120$ 目,然后经过用水粗淘、强磁分选、电磁分选和用酒精细淘之后,在双目镜下人工挑选出晶形和透明度较好,无裂痕和包裹体的锆石颗粒;由中国地质科学院地质所大陆动力学实验室完成锆石与标样环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光,然后对其进行反射光(用于察看锆石表面是否存在裂纹)、透射光(用于察看锆石内部是否存在包裹体)和阴极发光(CL)(用于察看锆石内部结构特征)图像的采集。测试分析在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学实验室完成,锆石 U-Pb 定年工作所用的 MC-ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司最新一代 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪。采用的激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193nm。激光剥蚀所用斑束直径为 $32\text{ }\mu\text{m}$,频率为 10 Hz ,能量密度为 $2.5\text{ J}/\text{cm}^2$,以 He 为载气。结合锆石反射、透射照片,避开锆石内部裂隙和包裹体。实验标样为 91500, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值误差为 $\pm 1\sigma$ 。详细实验测试过程可参见(Hou *et al.*,2009)。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*,2010),测量过程中

绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}>1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄计算与谐和图的绘制均采用国际标准程序 Isoplot(ver 3.0)(Ludwing,2003)完成。

3 分析结果

主量元素、微量元素及稀土元素的分析结果列于表 1, Sr、Nd 同位素分析结果见表 2。

3.1 主量元素

从表 1 中可以看出,球状岩石和主岩均具有高硅($\text{SiO}_2=75.35\%\sim 76.21\%$)、富碱(全碱含量 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.15\%\sim 8.48\%$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.87\sim 2.25$),贫铝($\text{Al}_2\text{O}_3=9.82\%\sim 11.30\%$)、镁($\text{MgO}=0.097\%\sim 0.35\%$)、钙($\text{CaO}=0.26\%\sim 0.43\%$)、磷($\text{P}_2\text{O}_5=0.033\%\sim 0.056\%$)等特征;较高的分异指数($\text{DI}=90.23\sim 92.86$)和偏低的镁值($\text{Mg}^\# =4.52\sim 14.47$)说明岩浆的分异演化程度较高。在 TAS 图解上(图 4a),分布于亚碱性系列的花岗岩区域;在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解上(图 4b),分布于高钾钙碱性系列区;含铝指数 A/CNK 为 $0.86\sim 1.06$,基本为过铝质—弱过铝质系列岩石(图 5)。在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 和 $\text{SiO}_2-\text{FeO}^\text{T}/(\text{FeO}^\text{T}+\text{MgO})$ 图解中均落入 A 型花岗岩区(图 6)。

3.2 稀土元素

球状岩石和主岩稀土元素总量($\sum\text{REE}$)较高,介于 $143.87\times 10^{-6}\sim 320.48\times 10^{-6}$,轻、重稀土元素分馏显著($\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=1.58\sim 5.64$),且主要是轻稀土元素的分馏($\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}=1.63\sim 2.67$),重稀土元素分馏较弱或基本无分馏($\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=0.69\sim 1.45$);铕负异常显著($\delta\text{Eu}=0.14\sim 0.38$),铈正异常较明显($\delta\text{Ce}=0.89\sim 3.12$,多 >1);在稀土元素球粒陨石标准化曲线图中(图 7a),样品表现为略右倾“海鸥”型,显示 A 型花岗岩的特征。

3.3 微量元素

在微量元素方面(图 7b),相对富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素和 Zr、Hf 元素,亏损高场强元素 Nb、P、Ti 和 Ba、Sr 等元素。 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}=939\times 10^{-6}\sim 1370\times 10^{-6}$ ($>350\times 10^{-6}$), $10000\text{ Ga}/\text{Al}=3.71\sim 6.78$ (>2.6 ,据杨庆坤等,2018),显示 A 型花岗岩微量元素的特征,在花岗岩成因判别图解中(图 8),所有样品点均落入 A 型花岗岩区域。

表 1 乌拉盖球状岩等主量元素、稀土及微量元素质量分数

Table 1 Contents of major, trace elements and REE for the orbicular rocks in Uragai area

| 序号 | 送样号 | 岩性 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | 烧失量 | 总和 | Na ₂ O+K ₂ O | K ₂ O / Na ₂ O |
|----|----------|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | D16073b | 球状流纹斑岩 | 76.18 | 0.24 | 10.11 | 2.94 | 1.12 | 0.094 | 0.350 | 0.41 | 2.59 | 4.46 | 0.056 | 0.90 | 99.45 | 7.15 | 1.72 |
| 2 | D16081b1 | 球状碱性流纹斑岩 | 76.06 | 0.24 | 10.27 | 2.06 | 1.80 | 0.130 | 0.099 | 0.40 | 3.73 | 4.71 | 0.033 | 0.40 | 99.92 | 8.48 | 1.26 |
| 3 | D16081b2 | 球状碱性流纹斑岩 | 75.69 | 0.25 | 10.33 | 2.00 | 1.89 | 0.120 | 0.097 | 0.43 | 3.62 | 4.68 | 0.038 | 0.48 | 99.61 | 8.37 | 1.29 |
| 4 | D16081b3 | 球粒文象花岗岩 | 76.00 | 0.25 | 10.24 | 3.64 | 0.45 | 0.160 | 0.350 | 0.29 | 3.06 | 4.68 | 0.040 | 1.18 | 100.35 | 7.81 | 1.53 |
| 5 | D16081b4 | 球粒文象花岗岩 | 76.05 | 0.25 | 10.41 | 3.50 | 0.67 | 0.067 | 0.230 | 0.28 | 2.76 | 4.45 | 0.053 | 1.14 | 99.86 | 7.30 | 1.61 |
| 6 | D16074b | 石英微晶正长岩 | 76.21 | 0.19 | 11.30 | 2.50 | 0.68 | 0.066 | 0.170 | 0.84 | 4.00 | 3.47 | 0.054 | 0.71 | 100.19 | 7.51 | 0.87 |
| 7 | D16071b1 | 微细粒文象花岗岩 | 75.43 | 0.28 | 9.95 | 4.78 | 0.63 | 0.140 | 0.210 | 0.34 | 2.18 | 4.90 | 0.047 | 1.22 | 100.11 | 7.16 | 2.25 |
| 8 | D16071b2 | 微细粒文象花岗岩 | 75.35 | 0.27 | 9.82 | 5.14 | 0.45 | 0.160 | 0.170 | 0.26 | 2.34 | 5.04 | 0.043 | 0.86 | 99.90 | 7.45 | 2.15 |

| 序号 | A/CNK | Mg [±] | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | ∑REELREE/HREE | δEu | |
|----|-------|-----------------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|------|
| 1 | 1.03 | 14.33 | 24.4 | 87.1 | 7.92 | 33.4 | 6.86 | 0.77 | 6.50 | 1.20 | 6.89 | 1.48 | 3.81 | 0.65 | 4.13 | 0.60 | 40.5 | 185.71 | 6.35 | 0.35 |
| 2 | 0.86 | 4.65 | 44.3 | 95.9 | 14.20 | 59.8 | 12.20 | 1.13 | 11.20 | 2.05 | 11.70 | 2.48 | 6.50 | 1.14 | 7.34 | 1.09 | 66.7 | 271.03 | 5.23 | 0.29 |
| 3 | 0.88 | 4.52 | 30.6 | 67.6 | 9.87 | 41.3 | 8.27 | 0.77 | 7.37 | 1.33 | 7.40 | 1.55 | 4.04 | 0.71 | 4.65 | 0.69 | 40.5 | 186.15 | 5.71 | 0.30 |
| 4 | 0.96 | 14.47 | 16.9 | 143.0 | 6.83 | 28.2 | 6.52 | 0.81 | 6.39 | 1.50 | 9.24 | 2.30 | 6.28 | 1.14 | 7.25 | 1.01 | 56.8 | 237.37 | 5.76 | 0.38 |
| 5 | 1.06 | 9.78 | 11.0 | 84.4 | 4.38 | 17.7 | 3.95 | 0.49 | 3.88 | 0.91 | 5.95 | 1.41 | 3.89 | 0.71 | 4.55 | 0.65 | 37.6 | 143.87 | 5.55 | 0.38 |
| 6 | 0.95 | 9.46 | 53.4 | 131.0 | 16.00 | 64.8 | 12.6 | 1.06 | 11.50 | 2.02 | 11.4 | 2.30 | 5.97 | 1.07 | 6.40 | 0.96 | 59.3 | 320.48 | 6.70 | 0.26 |
| 7 | 1.05 | 7.12 | 20.4 | 86.6 | 7.29 | 29.4 | 6.27 | 0.30 | 5.78 | 1.21 | 7.67 | 1.69 | 4.57 | 0.83 | 5.30 | 0.77 | 44.7 | 178.08 | 5.40 | 0.15 |
| 8 | 1.00 | 5.69 | 33.8 | 117.0 | 12.00 | 48.7 | 10.20 | 0.45 | 9.22 | 1.91 | 11.70 | 2.55 | 6.85 | 1.23 | 8.03 | 1.15 | 67.2 | 264.79 | 5.21 | 0.14 |

| 序号 | δCe (La/Yb) _N | (La/Sm) _N | Ba | Ga | Nb | Rb | Sr | V | Zr | Hf | Ta | Li | Sc | Co | Cr | Ni | Th | U | Be | |
|----|--------------------------|----------------------|------|--------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 1 | 1.46 | 3.99 | 2.24 | 601.00 | 22.3 | 31.5 | 103.0 | 74.4 | 10.60 | 799 | 6.69 | 2.14 | 7.38 | 2.07 | 1.36 | 21.2 | 1.84 | 8.18 | 1.85 | 1.50 |
| 2 | 0.89 | 4.08 | 2.29 | 8.54 | 25.7 | 31.1 | 121.0 | 46.1 | 10.10 | 799 | 10.7 | 1.24 | 12.30 | 2.35 | 2.72 | 22.5 | 3.15 | 10.80 | 2.59 | 3.07 |
| 3 | 0.91 | 4.45 | 2.33 | 20.80 | 26.7 | 30.6 | 122.0 | 50.0 | 7.67 | 800 | 7.41 | 2.78 | 9.87 | 1.68 | 2.66 | 15.6 | 2.28 | 7.57 | 1.74 | 2.11 |
| 4 | 3.12 | 1.58 | 1.63 | 196.00 | 24.1 | 29.7 | 103.0 | 36.4 | 10.20 | 785 | 9.79 | 1.51 | 28.10 | 3.06 | 2.28 | 17.9 | 3.97 | 13.80 | 3.65 | 3.37 |
| 5 | 2.85 | 1.63 | 1.75 | 160.00 | 26.6 | 30.6 | 106.0 | 30.7 | 13.50 | 804 | 7.17 | 1.32 | 18.70 | 2.04 | 1.44 | 16.7 | 2.79 | 9.13 | 2.32 | 2.15 |
| 6 | 1.04 | 5.64 | 2.67 | 52.20 | 22.3 | 35.2 | 87.1 | 104 | 9.23 | 887 | 14.10 | 1.56 | 7.91 | 7.18 | 3.68 | 14.5 | 3.51 | 11.80 | 3.64 | 4.83 |
| 7 | 1.66 | 2.60 | 2.05 | 116.00 | 34.2 | 38.5 | 159.0 | 27.4 | 11.70 | 1200 | 7.35 | 1.87 | 8.20 | 1.70 | 1.05 | 19.5 | 1.88 | 8.82 | 2.08 | 3.42 |
| 8 | 1.36 | 2.84 | 2.09 | 109.00 | 35.6 | 34.7 | 158.0 | 28.3 | 10.90 | 1100 | 9.99 | 2.33 | 8.64 | 2.30 | 2.23 | 15.8 | 1.98 | 12.50 | 2.88 | 5.19 |

注:主量元素质量分数单位为%;微量元素质量分数单位为10⁻⁶。

表 2 乌拉盖球状岩等 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions of the orbicular rocks in Uragai area

| 序号 | 送样号 | Rb (10 ⁻⁶) | Sr (10 ⁻⁶) | ⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr | ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr | Sm (10 ⁻⁶) | Nd (10 ⁻⁶) | ¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd | ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd | (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i | ε _{Nd} | T _{DM} |
|----|----------|------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------|-----------------|
| 1 | D16081b1 | 121 | 46.1 | 7.41 | 0.742 69 | 12.2 | 59.8 | 0.128 22 | 0.512 79 | 0.707 8 | 5.9 | 644 |
| 2 | D16081b2 | 122 | 50.0 | 6.89 | 0.738 96 | 8.27 | 41.3 | 0.125 85 | 0.512 80 | 0.706 5 | 6.2 | 609 |
| 3 | D16081b3 | 103 | 36.4 | 7.99 | 0.743 55 | 6.52 | 28.2 | 0.145 32 | 0.512 77 | 0.705 9 | 4.8 | 848 |
| 4 | D16081b4 | 106 | 30.7 | 9.75 | 0.752 27 | 3.95 | 17.7 | 0.140 26 | 0.512 77 | 0.706 4 | 5.0 | 783 |
| 5 | D16071b1 | 159 | 27.4 | 16.39 | 0.789 44 | 6.27 | 29.4 | 0.134 04 | 0.512 77 | 0.712 3 | 5.1 | 739 |
| 6 | D16071b2 | 158 | 28.3 | 15.77 | 0.787 91 | 10.20 | 48.7 | 0.131 64 | 0.512 79 | 0.713 7 | 5.7 | 671 |

注:各样品岩性同表1。

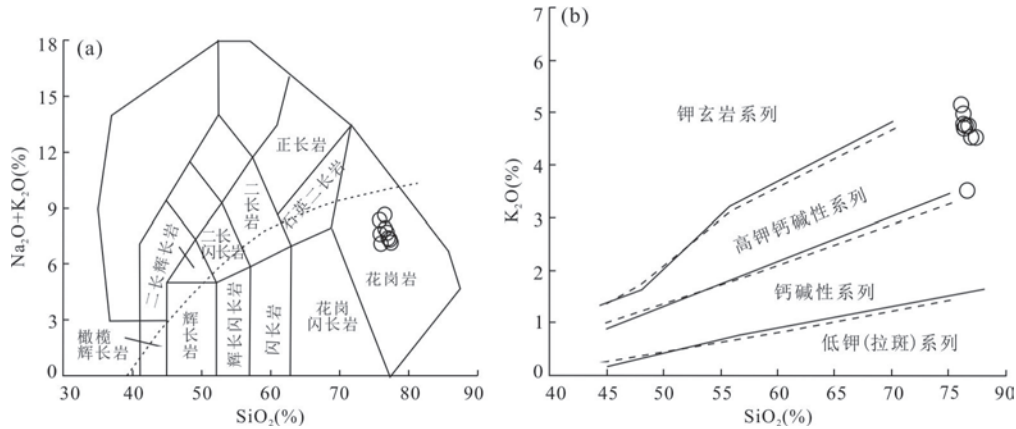


图4 乌拉盖球状岩等(Na₂O+K₂O)-SiO₂和K₂O-SiO₂图解

Fig.4 Plot of total alkali vs. SiO₂(TAS) (a) and plot of SiO₂ vs. K₂O (b) for the orbicular rocks in Uragai area

底图a据 Wilson(1989),底图b据 Rickwood(1989)

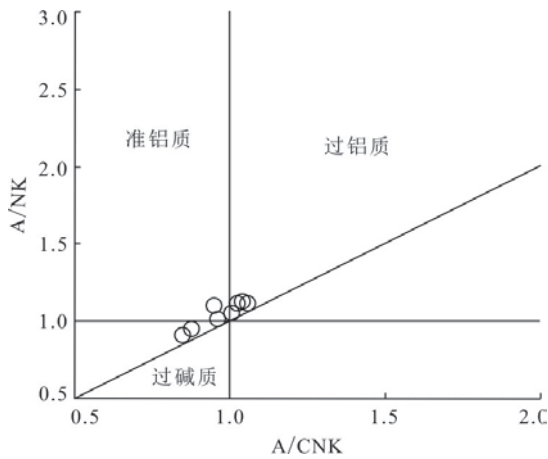


图5 乌拉盖球状岩等 A/NK-A/CNK 图解

Fig.5 Plot of A/CNK vs. A/NK for the orbicular rocks in Uragai area

底图据 Maniar and Piccoli(1989)

3.4 Sr-Nd 同位素

表 2 列出了球状岩和主岩的 Sr-Nd 同位素组成,由表可见 Sr、Nd 同位素组成均一性明显, ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 介于 6.89~16.39, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 介于 0.738 96~0.789 44; ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 介于 0.128 22~0.145 32, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 介于 0.512 77~0.512 80. 根据围岩年龄 142.2 Ma 计算得出的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 介于 0.705 9~0.713 7, ε_{Nd}(t) 介于 4.8~6.2, 二阶段模式年龄 T_{DM} 介于 609~848 Ma.

3.5 锆石 U-Pb 定年

3.5.1 球状岩和主岩锆石 U-Pb 定年 在球状岩和主岩中各采集 1 个定年样品,进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试,分析结果见表 3. 主岩微细粒文象花岗岩(D16071b1)共测点 20 个,其中有 3 个

数据点为前寒武纪数据,均偏离谐和曲线;其他 17 个点为显生宙数据,有 4 个点偏离谐和曲线,其他 13 点全部落到谐和曲线上. 测点所在锆石环带发育(图 9),为岩浆锆石. ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布上存在以下特征(图 10):① 6 个点年龄零散分布于(194.7±4.8)~(442.8±12.6) Ma 之间;② 7 个测点年龄集中分布于(137.3±3.2)~(148.4±4.0) Ma,加权平均年龄为 142.2±2.7 Ma, MSWD=1.07. 指示岩石的成岩年龄为早白垩世(142.2±2.7 Ma),并捕获有大量晚古生代一早中生代岩浆作用形成的锆石.

球状碱性流纹斑岩(D16081b1)没有得到很好的年龄谐和数据. 共测点 17 个,有 2 个数据为前寒武纪数据,均偏离谐和曲线,其他 15 个显生宙数据,有 2 个点偏离曲线,其他 13 点全部落到曲线上,测点所在锆石环带发育,边界溶蚀. ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布于(181.9±4.7)~(471±10) Ma,分布上具 4 个峰,分别为:(181.9±4.7)~(205.1±5.2) Ma、(241.9±5)~(248.3±6.1) Ma、272.7±6.9 Ma、(426.5±7.3)~(471±10) Ma,推测 4 个峰期年龄全部代表成岩中岩浆捕获锆石年龄;另外,在侵入球状岩石的辉绿岩脉中获得锆石年龄 140.5 Ma(大兴安岭成矿带突泉一翁牛特地质矿产调查项目成果,未发表). 综合判断,球状岩石成岩时代应为微细粒文象花岗岩和辉绿岩脉年龄之间,推测为 141 Ma 左右,为早白垩世早期.

3.5.2 球状岩主岩的围岩锆石 U-Pb 定年 在球状岩主岩的围岩正长斑岩中采集 1 个定年样品,进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试,分析结果见表 4. 正长斑岩(D16070b1)共测点 30 个:其中有 4

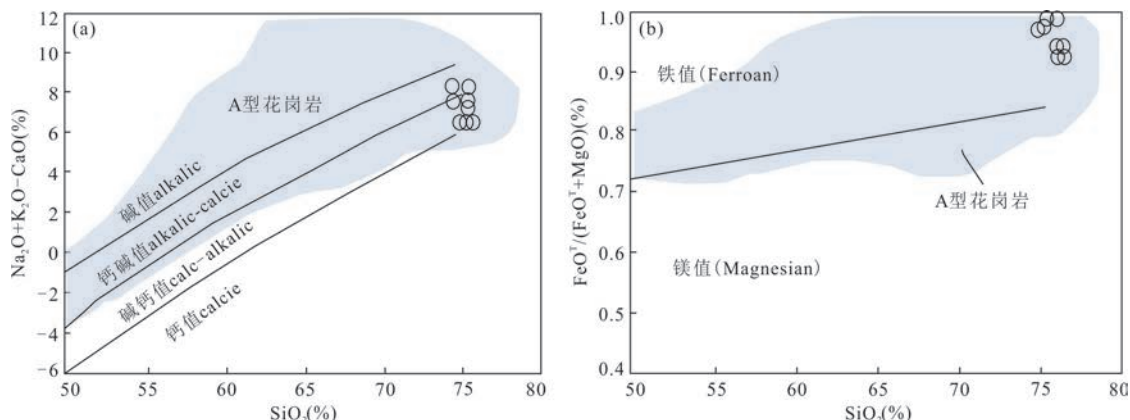


图 6 乌拉盖球状岩等(Na₂O+K₂O—CaO)—SiO₂和(FeO^T/(FeO^T+MgO)—SiO₂)判别图解

Fig.6 Plot of SiO₂ vs. (Na₂O+K₂O—CaO) and SiO₂ vs. FeO^T/(FeO^T+MgO) for the orbicular rocks in Uragai area
底图据 Frost *et al.* (2001)

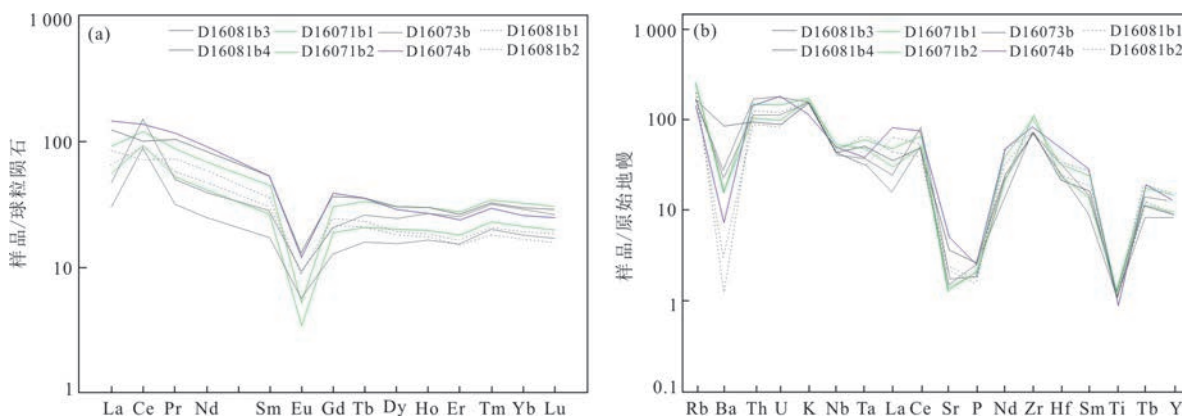


图 7 乌拉盖球状岩等稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the orbicular rocks in Uragai area

球粒陨石和原始地幔标准值均据 Sun and McDonough (1989)

个数据点为中生代数据,偏离谐和曲线;其他 26 个点为古生代数据,有 1 个点偏离谐和曲线,其他 25 个点全部落到谐和曲线上.谐和曲线测点所在锆石环带发育(图 11),为岩浆锆石年龄.²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布上存在以下特征(图 12):① 3 个点年龄集中分布于(126.6±2.3)~(130.4±4.2) Ma 之间,1 个点为 223.5±5.0 Ma,测点所在锆石色泽光亮干净,双锥柱状及环带非常清晰,应为后期岩浆热事件年龄(图 11);② 1 个数据为前志留纪数据,年龄为 430.6±9.6 Ma,测点所在锆石环带不发育,代表成岩中岩浆捕获锆石年龄;③ 25 个测点年龄集中分布于(342.7±6.3)~(360.0±9.4) Ma,加权平均年龄为 349.5±3.4 Ma,MSWD=0.30,指示围岩正长斑岩成岩年龄为早石炭世.

4 讨论

4.1 源区性质

4.1.1 主微量元素制约 乌拉盖球状岩及主岩富硅(SiO₂=75.35%~76.21%)、富碱(K₂O+Na₂O=7.30%~7.45%)和偏低的镁值(Mg[#]=4.52~14.47)、Cr(14.5×10⁻⁶~22.5×10⁻⁶)、Co(1.05×10⁻⁶~3.68×10⁻⁶)、Ni(1.84×10⁻⁶~3.97×10⁻⁶),表明它们不可能为幔源玄武质岩浆直接结晶分异的产物.乌拉盖球状岩的Rb/Sr、Ti/Y和Ti/Zr的比值分别为0.84~5.80、19.22~39.89、1.29~1.91,均位于壳源岩浆范围内(Rb/Sr>0.5、Ti/Y<100、Ti/Zr<20 (Pearce *et al.*, 1984; Tischendorf and Paalchen, 1985; Wilson, 1989),指示其物质来源于地壳;所有样品都表现出负 Nb 异常,其他高场强元素

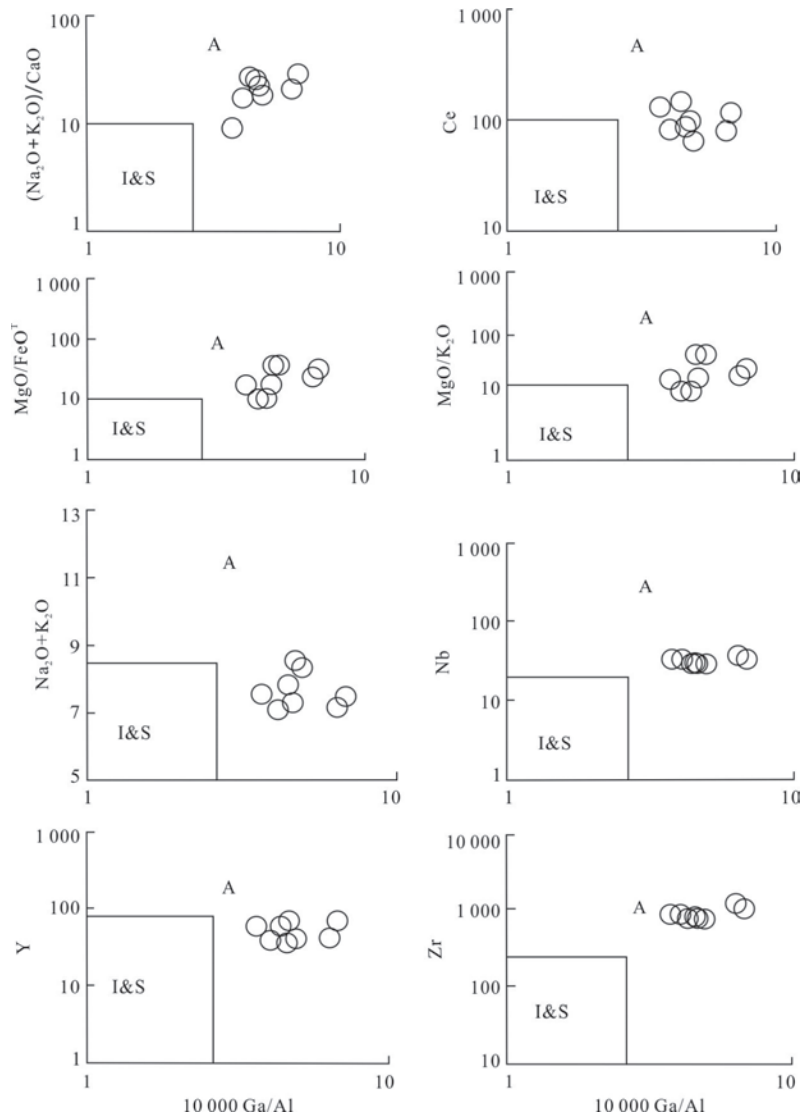


图 8 乌拉盖球状岩等岩石类型判别图解(底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig.8 The discriminant diagrams for rock types of the orbicular rocks in Uragai area (diagrams after Whalen *et al.*, 1987)

相对亏损,这是与俯冲有关的岩石特征,也见于以岛弧物质为物源的壳源花岗岩中(李佐臣等,2013).球状岩等Sr含量偏低($27.4 \times 10^{-6} \sim 104 \times 10^{-6}$)、Yb含量偏高($4.13 \times 10^{-6} \sim 8.03 \times 10^{-6}$),具有低Sr、高Yb型花岗岩特征,暗示了岩浆形成的压力小于0.8 GPa、地壳厚度则小于30 km(张旗等,2010);另外,绝大多数A型花岗岩形成于相对高温、水不饱和以及完全熔融(不含残留体)的岩浆(Whalen *et al.*, 1987),球状岩的CIPW标准矿物Q-Ab-Or图解(图13)显示,其成岩温度大于800 °C、压力小于0.5 GPa.一般认为幔源岩浆的底侵所带来的热量是地壳部分熔融的关键(吴福元等,2007).综上所述,乌拉盖球状岩及主岩岩浆源区应为下地壳物质,可能为幔源岩浆底侵作用致使下地壳发生部分熔融的

产物.

4.1.2 Sr-Nd 同位素制约 乌拉盖球状岩及主岩具有较高的锶初始比值($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7059 \sim 0.7137$,平均0.7088),明显高于大兴安岭地区中生代花岗岩的锶初始比值(平均0.7053,沈阳地质调查中心,2013,大兴安岭成矿带北段基础地质综合研究成果报告),与我国华南、华北两大板块中生代花岗岩各同位素省的锶同位素初始值较一致(两者分别为0.7073~0.7188和0.7073~0.7096(张理刚,1995)),表现出明显的壳源特征;另外,锶同位素含量出现一定区间的变化,可能与壳幔物质的混染程度有关(Chung *et al.*, 1997).乌拉盖球状岩的单阶段Nd模式年龄 T_{DM} 介于609~848 Ma,这与大兴安岭地区花岗岩的单阶段Nd模式年龄 T_{DM} 为500~

表 3 乌拉盖球状岩中微细粒文象花岗岩(D16071b1)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 3 Analysis of LA-ICP-MS U-Pb analysis of graphic granite zircons(D16071b1) in Uragai orbicular rocks

| 测试 编号 | Pb (10 ⁻⁶) | Th | U | Th/ U | 同位素比值 | | | | | | 同位素年龄(Ma) | | | | | |
|----------|---------------------------|-------|-------|----------|---|---------|--|---------|--|---------|---|-------|--|-------|--|-------|
| | | | | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | |
| | | | | | 1σ | 1σ | 1σ | 1σ | 1σ | 1σ | 1σ | 1σ | | | | |
| 1 | 51.6 | 337.9 | 371.3 | 0.91 | 0.048 3 | 0.001 3 | 0.149 0 | 0.005 2 | 0.022 4 | 0.000 5 | 122.3 | 47.2 | 141.1 | 4.6 | 142.7 | 3.2 |
| 2 | 12.0 | 78.0 | 73.6 | 1.06 | 0.049 4 | 0.002 6 | 0.155 5 | 0.008 2 | 0.022 9 | 0.000 8 | 168.6 | 122.1 | 146.7 | 7.2 | 145.9 | 5.0 |
| 3 | 53.1 | 209.9 | 189.6 | 1.11 | 0.051 7 | 0.001 5 | 0.262 3 | 0.010 1 | 0.036 7 | 0.000 9 | 272.3 | 61.1 | 236.6 | 8.1 | 232.5 | 5.4 |
| 4 | 52.5 | 20.4 | 4.0 | 5.04 | 0.823 7 | 0.021 0 | 31.719 7 | 6.590 2 | 0.280 3 | 0.058 4 | 0 | 0 | 3 541.6 | 204.6 | 1 593.0 | 293.9 |
| 5 | 126.0 | 264.3 | 240.6 | 1.10 | 0.054 9 | 0.001 0 | 0.538 1 | 0.018 0 | 0.071 0 | 0.002 0 | 409.3 | 38.9 | 437.2 | 11.9 | 442.4 | 11.9 |
| 6 | 10.6 | 66.6 | 78.8 | 0.84 | 0.048 1 | 0.002 3 | 0.149 4 | 0.007 8 | 0.022 5 | 0.000 7 | 105.6 | 111.1 | 141.3 | 6.9 | 143.6 | 4.4 |
| 7 | 14.8 | 94.0 | 82.0 | 1.15 | 0.051 1 | 0.002 4 | 0.163 9 | 0.007 5 | 0.023 3 | 0.000 6 | 255.6 | 111.1 | 154.1 | 6.6 | 148.4 | 4.0 |
| 8 | 87.0 | 413.3 | 519.9 | 0.80 | 0.048 8 | 0.000 9 | 0.206 2 | 0.005 8 | 0.030 7 | 0.000 8 | 200.1 | 50.0 | 190.4 | 4.9 | 194.7 | 4.8 |
| 9 | 30.5 | 59.1 | 134.9 | 0.44 | 0.055 2 | 0.001 3 | 0.540 9 | 0.019 4 | 0.071 1 | 0.002 1 | 416.7 | -47.2 | 439.0 | 12.8 | 442.8 | 12.6 |
| 10 | 21.4 | 141.2 | 173.3 | 0.81 | 0.049 1 | 0.002 1 | 0.147 7 | 0.006 9 | 0.021 8 | 0.000 5 | 150.1 | 91.7 | 139.8 | 6.1 | 139.3 | 3.4 |
| 11 | 53.4 | 354.5 | 356.7 | 0.99 | 0.047 8 | 0.001 2 | 0.148 2 | 0.005 0 | 0.022 5 | 0.000 6 | 87.1 | 41.7 | 140.4 | 4.4 | 143.4 | 3.8 |
| 12 | 42.7 | 258.4 | 242.8 | 1.06 | 0.067 8 | 0.003 8 | 0.201 0 | 0.011 5 | 0.021 5 | 0.000 5 | 862.7 | 102.8 | 186.0 | 9.8 | 137.3 | 3.2 |
| 13 | 35.7 | 98.2 | 220.2 | 0.45 | 0.052 5 | 0.001 4 | 0.343 2 | 0.011 2 | 0.047 5 | 0.001 2 | 305.6 | 61.1 | 299.6 | 8.5 | 298.9 | 7.7 |
| 14 | 40.1 | 125.6 | 194.6 | 0.65 | 0.059 8 | 0.001 4 | 0.331 5 | 0.010 6 | 0.040 2 | 0.001 0 | 598.2 | 41.7 | 290.7 | 8.1 | 253.8 | 6.2 |
| 15 | 126.0 | 41.4 | 67.8 | 0.61 | 0.158 7 | 0.002 1 | 9.174 5 | 0.235 0 | 0.419 2 | 0.010 3 | 2 442.6 | 22.2 | 2 355.6 | 23.9 | 2 256.7 | 47.0 |
| 16 | 100.0 | 268.3 | 250.7 | 1.07 | 0.080 3 | 0.003 9 | 0.524 7 | 0.034 2 | 0.047 1 | 0.001 2 | 1 205.6 | 94.4 | 428.3 | 22.8 | 296.9 | 7.3 |
| 17 | 67.0 | 228.8 | 307.1 | 0.75 | 0.052 9 | 0.001 3 | 0.285 3 | 0.007 9 | 0.039 1 | 0.000 7 | 327.8 | 55.5 | 254.8 | 6.2 | 247.0 | 4.4 |
| 18 | 278.0 | 133.7 | 136.9 | 0.98 | 0.203 2 | 0.058 9 | 4.014 4 | 1.599 3 | 0.113 6 | 0.014 5 | 2 853.7 | 474.1 | 1 637.1 | 323.9 | 693.5 | 84.2 |
| 19 | 94.0 | 179.9 | 185.6 | 0.97 | 0.065 8 | 0.001 3 | 0.691 9 | 0.019 1 | 0.076 3 | 0.001 6 | 798.2 | 44.4 | 534.0 | 11.5 | 473.8 | 9.6 |
| 20 | 36.6 | 103.6 | 122.7 | 0.84 | 0.064 3 | 0.006 4 | 0.419 9 | 0.049 2 | 0.046 9 | 0.001 2 | 750.0 | 211.1 | 356.0 | 35.2 | 295.7 | 7.5 |

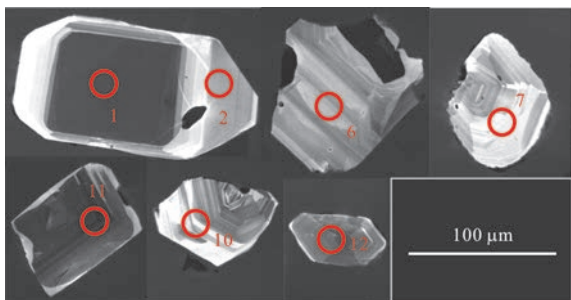


图 9 微细粒文象花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig.9 Cathodoluminescence images of analyzed zircon from the graphic granite

1 000 Ma(沈阳地质调查中心,2013,大兴安岭成矿带北段基础地质综合研究成果报告)较一致,其 T_{DM} 不仅比较年轻而且相对比较集中,在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{Nd}$ 关系图解中(图 14)落入晚中生代大兴安岭中基性火山岩附近,这反映出大兴安岭地区火成岩源岩同位素的均一性.乌拉盖球状岩及主岩的 ϵ_{Nd} 为 4.8~6.2,显示亏损地幔信息,又与大兴安岭大部分中生代火成岩的 ϵ_{Nd} 大于 0(沈阳地质调查中心,2013,大兴安岭成矿带北段基础地质综合研究成果

报告)一致,暗示年轻地壳组分在火成岩形成中的重要贡献且有亏损地幔物质的参与;同时 T_{DM} 值明显高于球状岩成岩年龄值,揭示出其岩浆源区有新元古代幔源物质的加入,这也说明大兴安岭地区区域上在显生宙发生了强烈的地壳增生作用或大陆地壳生长(范蔚茗等,2008).

4.2 岩浆过程

乌拉盖球状岩及主岩全岩主量元素与 SiO_2 的线性关系较差,尤其是对岩浆分异作用敏感的某些微量元素(Cr、La、Yb、Nb、Th等)也几乎没有线性相关,指示岩浆并不是由简单的部分熔融或结晶分异作用而形成.微量元素 Sr、Ba 等强烈亏损(图 6b),反映了有强烈分异的分离结晶作用存在;La-La/Sm 协变图解(图 15)也显示分离结晶作用趋势明显.

在显微镜下观察,乌拉盖球状岩中的球间基质多见显微文象嵌晶结构、显微嵌晶结构、雏晶结构等,球状体外层矿物结晶程度明显好于内层,核部或为隐晶质团块体,表现出岩浆接近地表快速冷凝的浅成至超浅成岩石特征.同时球内和壳层的碱性

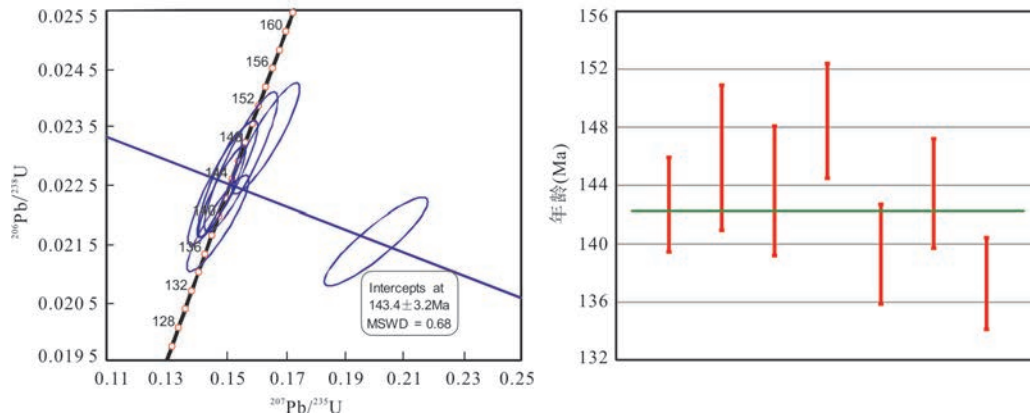


图10 微细粒文象花岗岩锆石U-Pb谐和曲线

Fig.10 LA-ICP-MS U-Pb age concordia diagram and weighted average ages from the graphic granite

表4 乌拉盖球状岩围岩正长斑岩(D16070b1)锆石LA-ICP-MS U-Pb分析结果

Table 4 Analysis of LA-ICP-MS U-Pb analysis of orthophyre zircons (D16071b1) in the main rock of Uragai orbicular rocks

| 测试 编号 | Pb Th U | | | Th/U | 同位素比值 | | | | | | 同位素年龄(Ma) | | | | | |
|----------|---------------------|-------|-------|---------|---|---------|--|---------|--|---------|---|-------|--|------|--|------|
| | (10 ⁻⁶) | | | | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | 1σ | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | 1σ | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | 1σ |
| 1 | 53.2 | 138.0 | 241.8 | 0.570 5 | 0.053 1 | 0.001 1 | 0.409 8 | 0.011 8 | 0.056 0 | 0.001 3 | 331.5 | 44.4 | 348.8 | 8.6 | 351.2 | 8.2 |
| 2 | 8.4 | 35.4 | 43.9 | 0.807 5 | 0.050 9 | 0.002 6 | 0.247 5 | 0.013 6 | 0.035 3 | 0.000 8 | 235.3 | 122.2 | 224.5 | 11.1 | 223.5 | 5.0 |
| 3 | 38.1 | 100.5 | 178.1 | 0.564 3 | 0.053 8 | 0.001 1 | 0.405 1 | 0.010 6 | 0.054 6 | 0.001 0 | 361.2 | 63.9 | 345.3 | 7.7 | 342.7 | 6.3 |
| 4 | 73.0 | 188.1 | 268.1 | 0.701 6 | 0.054 3 | 0.001 0 | 0.420 2 | 0.012 3 | 0.056 1 | 0.001 3 | 383.4 | 44.4 | 356.2 | 8.8 | 351.8 | 8.1 |
| 5 | 48.8 | 120.6 | 221.6 | 0.544 3 | 0.053 3 | 0.000 9 | 0.422 8 | 0.014 3 | 0.057 4 | 0.001 5 | 342.7 | 52.8 | 358.1 | 10.3 | 360.0 | 9.4 |
| 6 | 28.1 | 203.4 | 243.1 | 0.836 7 | 0.051 1 | 0.001 6 | 0.140 7 | 0.005 0 | 0.020 0 | 0.000 5 | 255.6 | 169.4 | 133.6 | 4.4 | 127.5 | 3.0 |
| 7 | 95.0 | 204.1 | 238.6 | 0.855 7 | 0.056 4 | 0.001 0 | 0.537 0 | 0.014 6 | 0.069 1 | 0.001 6 | 477.8 | 38.9 | 436.5 | 9.7 | 430.6 | 9.6 |
| 8 | 41.3 | 107.0 | 189.8 | 0.563 7 | 0.053 3 | 0.001 2 | 0.403 8 | 0.012 3 | 0.054 9 | 0.001 3 | 342.7 | 63.9 | 344.4 | 8.9 | 344.8 | 8.0 |
| 9 | 38.4 | 95.4 | 188.4 | 0.506 2 | 0.054 7 | 0.001 2 | 0.416 8 | 0.014 7 | 0.055 2 | 0.001 7 | 466.7 | 50.0 | 353.7 | 10.5 | 346.6 | 10.3 |
| 10 | 59.0 | 145.2 | 214.7 | 0.676 3 | 0.055 8 | 0.001 3 | 0.427 5 | 0.018 2 | 0.055 5 | 0.001 6 | 442.6 | 50.0 | 361.4 | 13.0 | 348.0 | 9.8 |
| 11 | 50.7 | 131.0 | 223.3 | 0.586 4 | 0.053 4 | 0.001 0 | 0.406 5 | 0.012 1 | 0.055 2 | 0.001 4 | 346.4 | 44.4 | 346.3 | 8.8 | 346.3 | 8.8 |
| 12 | 44.1 | 114.2 | 188.3 | 0.606 5 | 0.053 2 | 0.001 1 | 0.404 8 | 0.011 7 | 0.055 2 | 0.001 3 | 344.5 | 50.0 | 345.1 | 8.5 | 346.2 | 7.7 |
| 13 | 64.0 | 164.1 | 257.9 | 0.636 2 | 0.055 0 | 0.001 1 | 0.418 0 | 0.011 3 | 0.055 1 | 0.001 2 | 413.0 | 44.4 | 354.6 | 8.1 | 345.9 | 7.6 |
| 14 | 31.5 | 79.1 | 166.1 | 0.476 6 | 0.053 5 | 0.001 0 | 0.406 9 | 0.010 7 | 0.055 2 | 0.001 1 | 350.1 | 30.6 | 346.7 | 7.8 | 346.3 | 6.9 |
| 15 | 27.5 | 198.7 | 234.3 | 0.848 1 | 0.047 6 | 0.001 6 | 0.134 1 | 0.005 7 | 0.020 4 | 0.000 7 | 79.7 | 77.8 | 127.7 | 5.2 | 130.4 | 4.2 |
| 16 | 79.0 | 208.2 | 312.7 | 0.665 7 | 0.054 4 | 0.001 1 | 0.413 3 | 0.013 2 | 0.055 1 | 0.001 1 | 387.1 | 141.7 | 351.2 | 9.5 | 345.5 | 6.8 |
| 17 | 42.3 | 111.4 | 203.6 | 0.547 3 | 0.053 7 | 0.001 0 | 0.408 3 | 0.010 7 | 0.055 1 | 0.001 2 | 366.7 | 38.9 | 347.6 | 7.8 | 345.8 | 7.1 |
| 18 | 46.9 | 120.3 | 213.5 | 0.563 7 | 0.052 9 | 0.001 0 | 0.413 3 | 0.012 8 | 0.056 7 | 0.001 5 | 324.1 | 58.3 | 351.2 | 9.3 | 355.5 | 9.4 |
| 19 | 77.0 | 200.5 | 278.2 | 0.702 4 | 0.057 6 | 0.001 3 | 0.440 0 | 0.016 2 | 0.055 3 | 0.001 3 | 516.7 | 50.0 | 370.2 | 11.5 | 346.7 | 8.1 |
| 20 | 38.3 | 100.6 | 177.5 | 0.567 0 | 0.054 0 | 0.001 3 | 0.413 9 | 0.013 0 | 0.055 6 | 0.001 4 | 372.3 | 55.5 | 351.7 | 9.4 | 348.5 | 8.5 |
| 21 | 29.3 | 74.6 | 154.0 | 0.484 4 | 0.053 8 | 0.001 3 | 0.411 1 | 0.011 6 | 0.055 4 | 0.001 2 | 361.2 | 69.4 | 349.7 | 8.4 | 347.9 | 7.3 |
| 22 | 40.4 | 300.8 | 431.8 | 0.696 4 | 0.048 4 | 0.001 1 | 0.132 6 | 0.003 6 | 0.019 8 | 0.000 4 | 120.5 | 55.6 | 126.4 | 3.2 | 126.6 | 2.3 |
| 23 | 42.7 | 109.3 | 202.0 | 0.541 1 | 0.052 8 | 0.001 2 | 0.411 5 | 0.013 5 | 0.056 5 | 0.001 5 | 320.4 | 55.6 | 350.0 | 9.8 | 354.3 | 9.0 |
| 24 | 108.0 | 307.1 | 322.1 | 0.953 5 | 0.053 2 | 0.000 9 | 0.401 7 | 0.009 8 | 0.054 7 | 0.001 0 | 344.5 | 38.9 | 342.9 | 7.2 | 343.5 | 6.4 |
| 25 | 53.8 | 136.7 | 231.2 | 0.591 2 | 0.055 3 | 0.001 2 | 0.424 5 | 0.013 0 | 0.055 6 | 0.001 1 | 433.4 | 44.4 | 359.3 | 9.3 | 348.9 | 7.0 |
| 26 | 63.0 | 165.0 | 262.6 | 0.628 1 | 0.052 9 | 0.001 0 | 0.411 2 | 0.010 7 | 0.056 3 | 0.001 2 | 327.8 | 30.6 | 349.8 | 7.8 | 353.2 | 7.6 |
| 27 | 40.1 | 103.4 | 183.7 | 0.562 8 | 0.053 3 | 0.001 3 | 0.412 5 | 0.014 5 | 0.056 1 | 0.001 3 | 342.7 | 63.9 | 350.7 | 10.4 | 351.6 | 8.2 |
| 28 | 34.2 | 83.1 | 165.2 | 0.502 9 | 0.053 6 | 0.001 2 | 0.421 9 | 0.013 5 | 0.057 1 | 0.001 6 | 353.8 | 41.7 | 357.4 | 9.7 | 358.1 | 9.8 |
| 29 | 35.8 | 86.9 | 178.5 | 0.486 9 | 0.055 0 | 0.001 3 | 0.428 9 | 0.015 8 | 0.056 4 | 0.001 3 | 413.0 | 50.0 | 362.4 | 11.3 | 353.9 | 7.7 |
| 30 | 36.0 | 91.6 | 187.7 | 0.488 1 | 0.052 6 | 0.001 1 | 0.409 5 | 0.011 5 | 0.056 4 | 0.001 3 | 322.3 | 44.4 | 348.5 | 8.3 | 353.6 | 7.8 |

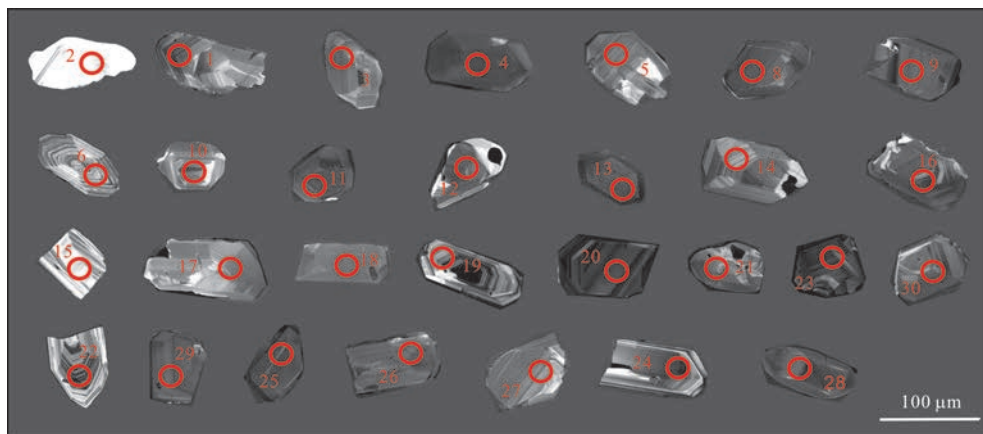


图 11 正长斑岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig.11 Cathodoluminescence images of analyzed zircon from the orthopyre

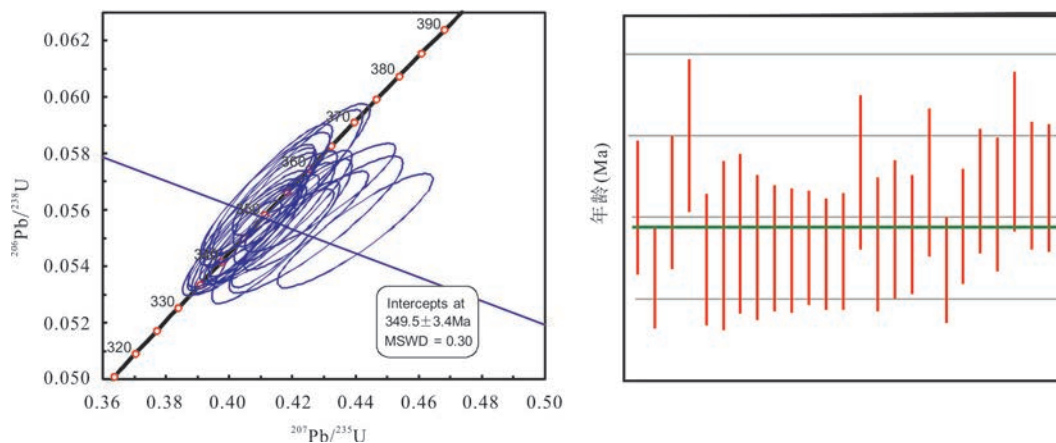


图 12 正长斑岩锆石 U-Pb 谐和曲线

Fig.12 LA-ICP-MS U-Pb age concordia diagram and weighted average ages from the orthopyre

闪石特征可能反映岩浆作用晚期富含气水热液熔浆的结晶作用;球状体中可见碱性长石交代斜长石特征,其内文象体中可见石英带状消光,又表现出交代作用特点(马芳等,2004a, 2004b, 2004c).

综合上述,乌拉盖球状岩及主岩初始岩浆应为下地壳部分熔融形成(吴福元等,2007),在熔融初期有少量亏损地幔物质的加入,之后岩浆在上侵就位过程中经历了强烈的分离结晶作用和晚期富含气水热液岩浆的介入,与阿根廷西北塞拉贝拉斯科中部的球状花岗岩富含大量挥发分特征相似(Pablo and Toselli, 2009). 岩浆活动过程中捕获了大量古生代—早中生代岩浆锆石,球状岩是岩浆活动晚期作用的结果,其可能具低温富流体的特征、新生结晶锆石较少,大量的捕获锆石或其他难溶矿物可能为球状岩球粒的形成提供基础.

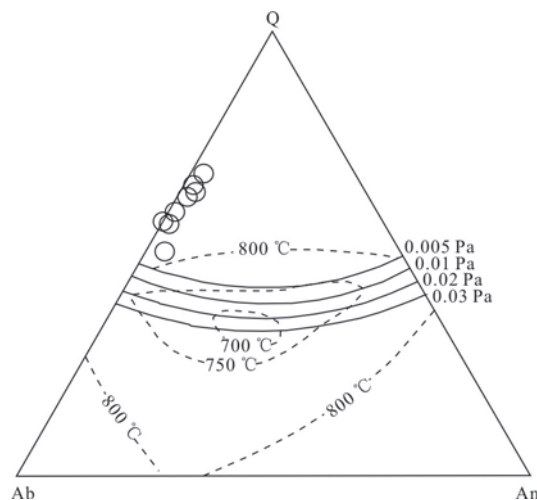
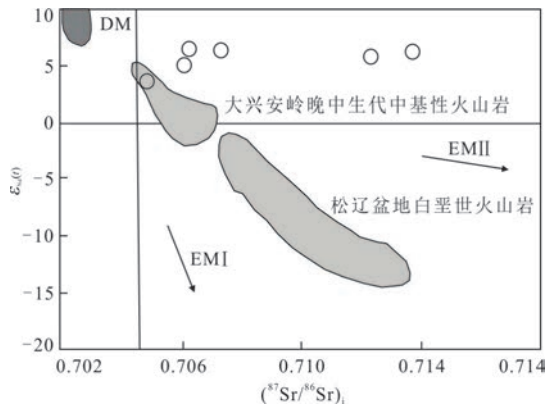


图 13 乌拉盖球状岩 Q–Ab–Or 判别图解

Fig.13 Q–Ab–Or diagram for the orbicular basalts 底图据 Huang and Wyllie(1975)

图 14 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \epsilon_{\text{Nd}}$ 关系图解Fig.14 Diagram of $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ vs. ϵ_{Nd}

底图据 Zhou *et al.* (2008); DM、EMI 和 EMII 数据引自 Zindler and Hart (1986); 大兴安岭火山岩数据引自 Ying *et al.* (2010); 松辽盆地火山岩数据引自 Li *et al.* (2012)

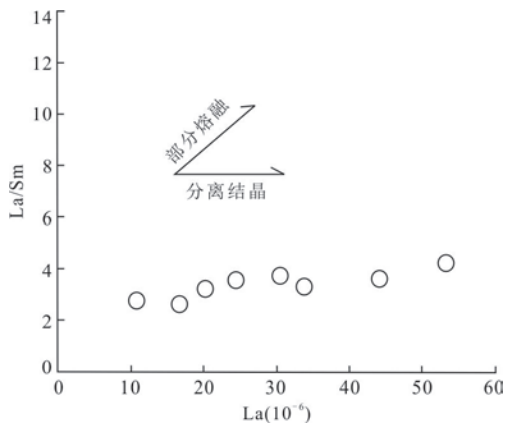


图 15 La/Sm—La 关系图解(底图据王中刚等, 1989)

Fig.15 Diagram of La vs. La/Sm (diagram after Wang *et al.*, 1989)

4.3 对大兴安岭伸展作用的启示

关于大兴安岭隆升机制的研究,一直是众多学者关注讨论的热点.最早李四光(1973)和黄汲清等(1981)认为大兴安岭是水平挤压体制下的产物,张振法(1997)认为大兴安岭是松辽板块和蒙古古板块挤压碰撞产生的,之后又有学者提出包括大兴安岭在内的滨太平洋造山岩石圈的去根作用与大洋板块向中国大陆下的俯冲作用有生成联系(邓晋福等,1996).

随着大兴安岭中生代岩浆演化的深入研究,邵济安等(2007)又提出了大兴安岭为陆内伸展造山的隆升机制,周新华等(2009)提出大兴安岭地区中生代的岩浆作用与蒙古—鄂霍茨克洋闭合有关.另外, Wang *et al.* (2012a)认为整个东北亚地区的大量伸展构造,是蒙古—鄂霍茨克构造带闭合碰撞造

山,使得地壳加厚导致的大规模区域性由西北向东南的伸展垮塌造成的.特别近年,有关大兴安岭陆内伸展机制的研究又取得明显进展,在大兴安岭北段科洛、嘎拉山等地识别出多处伸展滑脱构造(刘勃然等,2016;梁琛岳等,2018),指出大兴安岭地区的伸展构造应该是区域伸展作用的产物,随着大规模伸展作用,大兴安岭地区发生强烈的岩浆底侵,导致大兴安岭快速隆升,从而使其两侧分别形成向 SE 和 NW 方向滑脱的伸展构造.

中生代以来,大兴安岭地区岩浆活动强烈,形成了中国大陆东部中生代“花岗岩海”(吴福元等,2000).对于大兴安岭地区岩浆活动构造背景认识,主要集中于侏罗纪受到蒙古—鄂霍茨克造山作用影响及白垩纪以来受到太平洋板块俯冲运动影响而产生的侧向逃逸与地壳加厚作用等构造演化(李锦轶等,2004),中国东北中生代伸展构造(邵济安等,2007)等.特别近年来,对于蒙古—鄂霍茨克构造域的作用和贡献,越来越多地得到了同行学者的认可.蒙古—鄂霍茨克洋具有自西向东剪刀式闭合的特点,西部可能于晚三叠世开始闭合,东部可能于晚侏罗世—早白垩世完成闭合(徐美君等,2013),同时古太平洋板块也在早—中侏罗世已经开始向欧亚大陆东部边缘俯冲,此时欧亚大陆也开始受到古太平洋构造体系的影响(徐美君等,2013).但是西太平洋构造域中生代对东北亚大陆影响的空间范围主要在松辽盆地及以东地区,而蒙古—鄂霍茨克构造域影响的空间范围主要在松辽盆地以西及华北地块北缘(赵越等,2006);中侏罗世晚期—早白垩世早期又为古太平洋板块俯冲的间歇期(Xu *et al.*, 2013).综合上述分析表明,乌拉盖地区新发现的球状岩是板内后造山伸展环境的重要证据,进一步揭示大兴安岭地区在早白垩世已经处于蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的拉张构造背景.因此,本文认为蒙古—鄂霍茨克洋的闭合是控制大兴安岭早白垩世岩石圈减薄最主要的动力学机制.

从大兴安岭中生代壳幔混熔的岩浆来看,中生代在软流圈隆起背景下地壳底部存在大面积的底侵作用,包括来自上地幔部分熔融产生的玄武质岩浆添加到下地壳,也包括 Furlong 所称的“幔源地壳物质”(Furlong and Fountain, 1986)添加到下地壳底部,这一过程称之为大陆地壳底侵作用.下地壳被熔融的壳源物质与上地幔渗入的幔源物质以不同的比例混合在一起,存在于下地壳底部的岩浆池

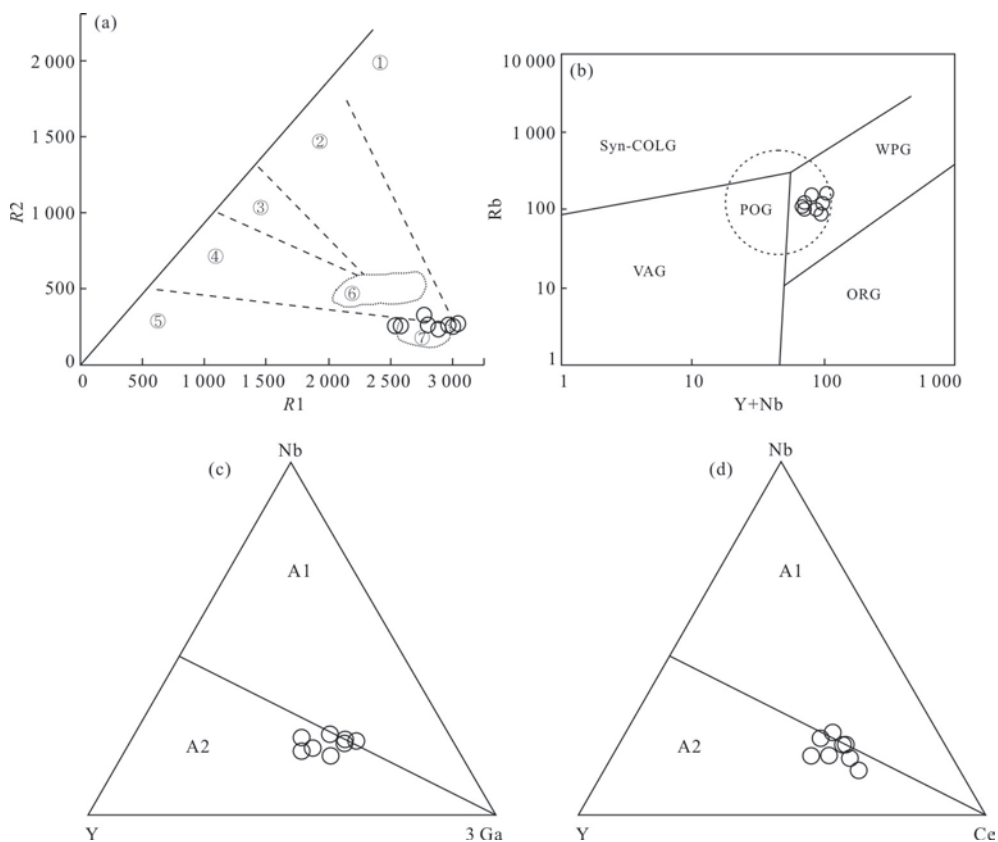


图 16 R1-R2(a)、Rb-(Y+Nb)(b)、Nb-Y-3Ga(c)和 Nb-Y-Ce(d)构造环境判别图解

Fig.16 R1-R2(a), Rb-(Y+Nb)(b), Nb-Y-3Ga (c) and Nb-Y-Ce (d) tectonic discriminant diagrams

图 a 底图据 Batchelor and Bowden(1985), 图 b 底图据 Pearce *et al.*(1984), 图 c 和图 d 底图据 Eby(1992). ①地幔斜长花岗岩;②板块碰撞前花岗岩;③板块碰撞后隆起期花岗岩;④晚造山期花岗岩;⑤非造山区花岗岩;⑥同碰撞花岗岩;⑦造山期后 A 型花岗岩. Syn-COLG. 同碰撞花岗岩;VAG.火山弧花岗岩;WPG.板内花岗岩;POG.后造山花岗岩;ORG.洋中脊花岗岩;A1.非造山 A 型花岗岩;A2.后造山 A 型花岗岩

中,从这里或从这里派生的岩浆房中供给的岩浆成为晚中生代岩浆活动的主要来源.正是上述底侵作用使大兴安岭的地壳经历了一个垂向增生的过程,再加上陆内造山模式中不可忽视的均衡作用的影响,使得晚中生代大兴安岭隆起成山.

而乌拉盖球状岩等岩石地球化学特征显示,其具有钾质 A 型花岗岩特征,标准矿物 CIPW 投图结果显示成岩温度大于 800 °C,指示具有 A 型花岗岩高温的特征.在主量元素 R1-R2 构造环境判别图解(图 16a)中表现为后造山拉张环境的特征;在微量元素构造环境判别图解 Rb-(Y+Nb)、Nb-Y-3Ga、Nb-Y-Ce 中(图 16b~16d),球状岩分别落入板内 POG(后造山花岗岩)范围和 A2(造山期后 A 型花岗岩)范围;在 10 000Ga/Al-R1 图解(图 17)中,也均落入 PA(后造山 A 型花岗岩)范围.可见,乌拉盖球状岩等具板内后造山花岗岩特征,形成于板内伸展拉张构造背景.

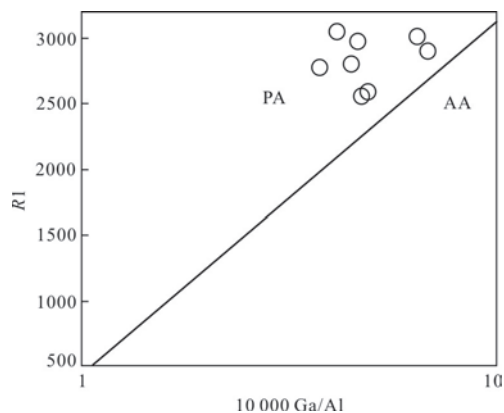


图 17 R1-Ga/Al 构造环境判别图解(底图据 Eby, 1992)
Fig.17 R1-Ga/Al tectonic discriminant diagram(diagram after Eby, 1992)

PA.后造山 A 型花岗岩;AA.非造山 A 型花岗岩

综合以上所述,笔者认为乌拉盖球状岩的成因应与蒙古-鄂霍茨克洋闭合晚期后造山作用导致的岩石圈伸展有关.在蒙古-鄂霍茨克洋闭合晚

期,软流圈的上涌将导致下地壳发生较高温熔融 (Annen *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2012b),同时亏损地幔组分渗入,混熔岩浆上升,经过强烈的分异演化,特殊的构造背景之下(汪岩等,2017),乌拉盖球状岩就位.但古太平洋板块俯冲后撤导致的弧后伸展背景环境是否与乌拉盖球状岩的就位有关,也是我们进一步思考的问题关键.

5 结论

(1) 乌拉盖球状岩具有富硅、富碱和低铝、镁值、铬、镍等特征,初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高于现代大洋 MORB,壳源特征明显.

(2) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值低于现代大洋 MORB, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 >0 ,又表现亏损地幔的信息.研究后认为,乌拉盖球状岩岩浆来源于下地壳,且有亏损地幔物质的参与.

(3) 微量元素明显富集 Rb、Th、K、REE 等大离子亲石元素和 Nb、Ta、Zr、HREE 等高场强元素,高场强元素 Sr、Ba、Eu 亏损强烈,表现出后造山 A 型花岗岩特征.

(4) 球状岩石没有获得较好的年龄数据,据其主岩微细粒文象花岗岩和侵入其中的辉绿岩脉年龄 142.2 Ma 和 140.5 Ma,推测球状岩石侵位年龄也为早白垩世早期(141 Ma 左右).

(5) 综合研究表明,乌拉盖地区球状岩石形成机制与大兴安岭火山岩带晚期岩浆活动有关,主要受控于早白垩世早期蒙古—鄂霍茨克洋闭合造山后伸展体制下的构造背景.

致谢:野外调研工作及文章成文过程中得到沈阳地质调查中心邢德和教授级高工悉心指导;匿名审稿专家提出许多衷恳的意见,在此一并表示感谢.

References

Annen, C., Blundy, J.D., Sparks, R.S.J., 2006. The Genesis of Intermediate and Silicic Magmas in Deep Crustal Hot Zones. *Journal of Petrology*, 47(3): 505–539. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egi084>

Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48(1–4):43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)

Chung, S. L., Cheng, H., Jahn, B. M., et al., 1997. Major and Trace Element, and Sr–Nd Isotope Constraints on the Origin of Paleogene Volcanism in South China Prior

to the South China Sea Opening. *Lithos*, 40(2–4): 203–220. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(97\)00028-5](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(97)00028-5)

Deng, J.F., Zhao, H.L., Mo, X.X., et al., 1996. China Continental Root Structure: The Key of Continental Dynamics. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).

Eby, G.N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641–644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0641:csotat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0641:csotat>2.3.co;2)

Fan, W.M., Guo, F., Gao, X.F., et al., 2008. Sr–Nd Isotope Mapping of Mesozoic Igneous Rocks in NE China: Constraints on Tectonic Framework and Crustal Growth. *Geochimica*, 37(4): 361–372(in Chinese with English abstract).

Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/ptrology/42.11.2033>

Furlong, K.P., Fountain, D.M., 1986. Continental Crustal Underplating: Thermal Consideration and Seismic-Petrologic Consequences. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 91(B8): 8285–8294. <https://doi.org/10.1029/jb091ib08p08285>

Hou, K.J., Li, Y.H., Tian, Y.R., 2009. In Situ U–Pb Zircon Dating Using Laser Ablation–Multiion Counting(LA–MC–ICP–MS). *Mineral Deposits*, 28(4):481–492.

Huang, J.Q., Ren, J.S., Jiang, C.F., et al., 1981. China Tectonics and Evolution. Science Press, Beijing (in Chinese).

Huang, W.L., Wyllie, P.J., 1975. Melting Reactions in the System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--KAlSi}_3\text{O}_8\text{--SiO}_2$ to 35 Kilobars, Dry and with Excess Water. *The Journal of Geology*, 83(6): 737–748. <https://doi.org/10.1086/628165>

Jahn, B. M., Griffin, W. L., Windley, B., 2000. Continental Growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328(1–2): VII–X. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00174-8](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00174-8)

Jahn, B.M., Wu, F.Y., Lo, C.H., et al., 1999. Crust–Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr–Nd Isotopic Evidence from Post–Collisional Mafic–Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1–2): 119–146. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00197-1)

Li, J.Y., Mo, S.G., He, Z.J., et al., 2004. The Timing of Crustal Sinistral Strike–Slip Movement in the Northern Great Khing’ an Ranges and Its Constraint on Recon-

- struction of the Crustal Tectonic Evolution of NE China and Adjacent Areas since the Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 157–168(in Chinese with English abstract).
- Li, S.G., 1973. Introduction to Geomechanics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Li, S.Q., Chen, F.K., Siebel, W., et al., 2012. Late Mesozoic Tectonic Evolution of the Songliao Basin, NE China: Evidence from Detrital Zircon Ages and Sr-Nd Isotopes. *Gondwana Research*, 22(3–4): 943–955.
- Li, Z.C., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating, Geochemistry of the Mishuling Intrusion in Western Qinling and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2617–2634(in Chinese with English abstract).
- Liang, C.Y., Liu, Y.J., Li, Y., et al., 2018. The Extensional Uplift Style of North Part of the Da Hinggan Mountains: Evidences from Ductile Deformation Zone of Keluo-Galashan. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (10):2873–2900 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Q., Ge, W.C., Cao, L., et al., 2003. Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in Da Hinggan Ling: The Bimodal Volcanic Rocks. *Geochimica*, 32(3): 208–222(in Chinese with English abstract).
- Liu, B.R., Li, W., Zhang, S.Z., et al., 2016. Extensional Detachment, Northern Great Xing'an Ranges, NE China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46 (5): 1440–1448(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Zong, K.Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Ludwing, K.R., 2003. User's Manual for ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, Berkeley*, 4:74.
- Ma, F., Mu, Z.G., Liu, Y.L., 2004a. Geochronology and Geologic Significance of the Orbicular Dioritic Rocks in Luanping, Hebei Province. *Geological Review*, 50(4): 360–364(in Chinese with English abstract).
- Ma, F., Mu, Z.G., Liu, Y.L., et al., 2004b. Geochemistry and Source Nature of the Orbicular Dioritic Rocks in Luanping, Hebei Province. *Geochimica*, 33(6): 593–601(in Chinese with English abstract).
- Ma, F., Mu, Z.G., Liu, Y.L., 2004c. Petrography Characteristics of the Orbicular Dioritic Rock in Luanping, Hebei Province and the Discussion of the Genesis of Orbicular Structure. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1424–1432 (in Chinese with English abstract).
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of American Bulletin*, 101 (5): 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- Pablo, G., Toselli, A.J., 2009. Petrology and Geochemistry of the Orbicular Granitoid of Sierra de Velasco (NW Argentina) and Implications for the Origin of Orbicular Rocks. *Geological Magazine*, 147 (3): 451–468. <https://doi.org/10.1017/s0016756809990707>
- 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. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22 (4): 247–263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Shao, J.A., Zhang, L.Q., Mu, B.L., 2007. Uplifting and Geodynamic in Da Hinggan Mountain. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sun, D.Y., Xu, W.L., Zhou, Y., 1994. Formation Mechanism of Mesozoic Volcanic Rock in the Great Xing'an Range. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 13(3): 162–164(in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication*, 42 (1): 313–345.
- Tischendorf, G., Paelchen, W., 1985. Zur Klassifikation von Granitoiden/Classification of Granitoids. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*, 13(5): 615–627.
- Turner, S.P., Foden, J.D., Morrison, R.S., 1992. Derivation of Some A-Type Magmas by Fractionation of Basaltic Magma: An Example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151–179. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90029-x](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90029-x)
- Wang, Y., Qian, C., Zhong, H., et al., 2017. The Discovery of Orbicular Acid Hypabyssal Rocks in Wulagaisumu Area of Inner Mongolia and Their Petrographic Characteristics. *Geological Bulletin of China*, 36(2): 321–330(in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Zhou, X.H., Zhang, L.C., et al., 2006. Late Mesozoic Volcanism in the Great Xing'an Range(NE China) :

- Timing and Implications for the Dynamic Setting of NE Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1–2): 179–198. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.007>
- Wang, Q., Li, X.H., Jia, X.H., et al., 2012a. Late Early Cretaceous Adakitic Granitoids and Associated Magnesian and Potassium-Rich Mafic Enclaves and Dikes in the Tunchang-Fengmu Area, Hainan Province (South China): Partial Melting of Lower Crust and Mantle, and Magma Hybridization. *Chemical Geology*, 328(11): 222–243. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.029>
- Wang, T., Guo, L., Zheng, Y.D., et al., 2012b. Timing and Processes of Late Mesozoic Mid-Lower-Crustal Extension in Continental NE Asia and Implications for the Tectonic Setting of the Destruction of the North China Craton: Mainly Constrained by Zircon U-Pb Ages from Metamorphic Core Complexes. *Lithos*, 154: 315–345. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.020>
- Wang, Y.X., Gu, L.X., Zhang, Z.Z., et al., 2007. Sr-Nd-Pb Isotope Geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou Group in Eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1749–1755(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.G., Yu, X.Y., Zhao, Z.H., 1989. Geochemistry of Rare Earth Elements. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wei, Y.X., Zhao, X.M., Yang, J.X., et al., 2015. The Discovery of Orbicular Granodiorite and Its Petrographic Characteristics in Huangling, Hubei. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1541–1549(in Chinese with English abstract).
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrology: A Global Tectonic Approach. Unwin Hyman, London.
- Wu, F.Y., Li, X.H., Yang, J.H., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238(in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Sun, D.Y., Li, H.M., et al., 2000. Zircon U-Pb Ages of the Basement Rocks beneath the Songliao Basin, NE China. *Chinese Science Bulletin*, 45(6): 656–660(in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q.Z., et al., 2014. Preliminary Study on the Pre-Mesozoic Tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841–1857(in Chinese with English abstract).
- Xu, M.J., Xu, W.L., Wang, F., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of the Early Jurassic Granitoids in the Central Lesser Xing'an Range, NE China and Its Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 354–368(in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Sun, C.Y., Tang, J., et al., 2019. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt. *Earth Science*, 44 (5): 1620–1640(in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Pei, F.P., Wang, F., et al., 2013. Spatial-Temporal Relationships of Mesozoic Volcanic Rocks in NE China: Constraints on Tectonic Over-Printing and Transformations between Multiple Tectonic Regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167–193. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.04.003>
- Yang, Q.K., Guo, F.S., Yu, Y.S., et al., 2018. Genesis of Alkali-Feldspar Granite at Dawangshan Tungsten Polymetallic Ore Concentration Area in Central Jiangxi Province: Constraints from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry. *Geological Journal of China Universities*, 24 (6): 856–871(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.P., Jiang, B., Yang, Y.J., 2019. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Great Xing'an Range Area. *Earth Science*, 44 (10): 3237–3251(in Chinese with English abstract).
- Ying, J.F., Zhou, X.H., Zhang, L.C., et al., 2010. Geochronological and Geochemical Investigation of the Late Mesozoic Volcanic Rocks from the Northern Great Xing'an Range and Their Tectonic Implications. *International Journal of Earth Sciences*, 99(2): 357–378. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0395-z>
- Zhang, L.G., 1995. Geology of Lithospheric Block in East Asia—Isotope Geochemistry and Dynamics of Upper Mantle, Basement and Granite. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, L.C., Chen, Z.G., Zhou, X.H., et al., 2007. Characteristics of Deep Sources and Tectonic-Magmatic Evolution of the Early Cretaceous Volcanics in Genhe Area, Da-Hinggan Mountains: Constraints of Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Geochemistries. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (11): 2823–2835 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.C., Ying, J.F., Chen, Z.G., et al., 2008. Age and Tectonic Setting of Triassic Basic Volcanic Rocks in Southern Da Hinggan Range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 911–920(in Chinese with English abstract).

- Zhang, Q., Jin, W.J., Li, C.D., et al., 2010. Revisiting the New Classification of Granitic Rocks Based on Whole-Rock Sr and Yb Contents: Index. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985–1015(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.F., 1997. A Preliminary Discussion on the Mechanism of Songliao Large-Size Allochthon and Dahingganling Uplift. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 21(2): 91–98(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Song, B., Zhang, S.H., et al., 2006. Geochronology of the Inherited Zircons from Jurassic Nandaling Basalt of the Western Hills of Beijing, North China: Its Implications. *Earth Science Frontiers*, 13 (2): 184–190 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M.F., Arndt, N.T., Malpas, J., et al., 2008. Two Magma Series and Associated Ore Deposit Types in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Lithos*, 103(3/4): 352–368. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.10.006>
- Zhou, X.H., Ying, J.F., Zhang, L.C., et al., 2009. The Petrogenesis of Late Mesozoic Volcanic Rock and the Contributions from Ancient Micro-Continents: Constraints from the Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopic Systematics. *Earth Science*, 34(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., Zhu, Y.H., Chen, J.G., 1990. The Discovery of Orbicular Ultramafic Rocks and Its Genesis Research. *Chinese Science Bulletin*, 35(8): 604–606(in Chinese).
- Zindler, A., Hart, S., 1986. Chemical Geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493–571. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.002425>
- ### 附中文参考文献
- 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等,1996.中国大陆根—柱构造:大陆动力学的钥匙.北京:地质出版社.
- 范蔚茗,郭峰,高晓峰,等,2008.东北地区中生代火成岩Sr-Nd同位素区划及其大地构造意义.地球化学,37(4): 361–372.
- 黄汲清,任继舜,姜春发,等,1981.中国大地构造及其演化.北京:科学出版社.
- 李锦轶,莫申国,和政军,等,2004.大兴安岭北段地壳左行走滑运动的时代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约.地学前缘,11(3): 157–168.
- 李四光,1973.地质力学概论.北京:科学出版社
- 李佐臣,裴先治,李瑞保,等,2013.西秦岭糜署岭花岗岩体年代学、地球化学特征及其构造意义.岩石学报,29(8): 2617–2634.
- 梁琛岳,刘永江,李伟,等,2018.大兴安岭北段伸展隆升样式:来自科洛—嘎拉山韧性变形带的证据.岩石学报,34(10):2873–2900.
- 林强,葛文春,曹林,等,2003.大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征.地球化学,32(3): 208–222.
- 刘勃然,李伟,张守志,等,2016.大兴安岭北段伸展构造.吉林大学学报(地球科学版),46(5): 1440–1448.
- 马芳,穆治国,刘玉琳,2004a.河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义.地质论评,50(4): 360–364.
- 马芳,穆治国,刘玉琳,等,2004b.河北滦平球状闪长岩石地球化学特征与源区性质探讨.地球化学,33(6): 593–601.
- 马芳,穆治国,刘玉琳,2004c.滦平球状闪长岩岩相学特征和球状构造成因探讨.岩石学报,20(6):1424–1432.
- 邵济安,张履桥,牟保垒,2007.大兴安岭的隆起与地球动力学背景.北京:地质出版社
- 孙德有,许文良,周燕,1994.大兴安岭中生代火山岩的形成机制.矿物岩石地球化学通报,13(3): 162–164.
- 汪岩,钱程,钟辉,等,2017.内蒙古乌拉盖苏木球状酸性浅成岩的发现及其岩相学特征.地质通报,36(2): 321–330.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,等,2007.东天山晚石炭世大石头群流纹Sr-Nd-Pb同位素地球化学研究.岩石学报,23(7): 1749–1755.
- 王中刚,于学元,赵振华,1989.稀土元素地球化学.北京:科学出版社.
- 魏运许,赵小明,杨金香,等,2015.湖北黄陵球状花岗闪长岩的发现及其岩相学特征.地质通报,34(8):1541–1549.
- 吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6): 1217–1238.
- 吴福元,孙德有,李惠民,等,2000.松辽盆地基底岩石的锆石U-Pb年龄.科学通报,45(6): 656–660.
- 徐备,赵盼,鲍庆中,等,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.
- 徐美君,许文良,王枫,等,2013.小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义.岩石学报,29(2): 354–368.
- 许文良,孙晨阳,唐杰,等,2019.兴蒙造山带的基底属性与构造演化.地球科学,44(5): 1620–1640.
- 杨庆坤,郭福生,于玉帅,等,2018.赣中大王山钨多金属矿床中碱长花岗岩成因:来自LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学、岩石地球化学的制约.高校地质学报,24(6): 856–871.
- 杨晓平,江斌,杨雅军,2019.大兴安岭早白垩世火山岩的时空分布特征.地球科学,44(10):3237–3251.
- 张理刚,1995.东亚岩石圈块体地质—上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学.北京,科学出版社.
- 张连昌,陈志广,周新华,等,2007.大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造—岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf

同位素地球化学制约. 岩石学报, 23(11):2823—2835.

张连昌, 英基丰, 陈志广, 等, 2008. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境. 岩石学报, 24(4): 911—920.

张旗, 金惟俊, 李承东, 等, 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志. 岩石学报, 26(4): 985—1015.

张振法, 1997. 松辽大型移置体和大兴安岭隆起机制探讨. 物探与化探, 21(2): 91—98.

赵越, 宋彪, 张拴宏, 等, 2006. 北京西山侏罗纪南大岭组玄武岩的继承年代学及其含义. 地学前缘, 13(2):184—190.

周新华, 英基丰, 张连昌, 等, 2009. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约. 地球科学, 34(1): 1—10.

周新民, 朱云鹤, 陈建国, 1990. 超镁铁球状岩的发现及其成因研究. 科学通报, 35(8): 604—606.

《地球科学》

2021年5月 第46卷 第5期 要目预告

皖南蛇绿岩伏川铬铁矿床成因: 铬铁矿母岩浆证据..... 刘 婷等

抚顺盆地中一晚始新世古植被与古气候..... 韦 一等

辽东五龙金矿周缘早白垩世花岗岩体侵位深度及其地质意义..... 李建锋等

从反射地震剖面认识龙门山断裂带彭灌杂岩深部结构..... 于明羽等

龙门山中北段印支晚期构造活动: 来自构造解析及碎屑锆石年代学的证据..... 沈 桐等

北祁连水洞峡蛇绿岩形成时代与构造环境..... 郭 晶等

中扬子地块宜昌斜坡白垩系陆内挤压盆地的断一坳结构..... 刘晓峰等

巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物的光释光年代及其水文学意义..... 姜高磊等

珠江口盆地番禺 A 油田珠江组“顶钙”发育特征、成因与分布模式..... 张青青等