https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.177



内蒙古巴尔哲稀有稀土矿区新发现的碱性流纹岩岩 石成因及其地质意义

淡凯波1,张道涵^{2,3*},栾钰薇²,宋崇宇^{2,4},于 淼⁵,刘常伟⁶

1. 洛阳栾川钼业集团股份有限公司,河南栾川 471000

2. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

4. 中国地质调查发展研究中心,北京100037

5. 北京市地质灾害防治研究所,北京100120

6. 内蒙古赤峰地质矿产勘查开发有限责任公司,内蒙古赤峰 024005

摘 要:为查明在內蒙古巴尔哲超大型稀有稀土金属矿区新发现的碱性流纹岩岩石成因,及其与碱性花岗岩成矿岩体、以及邻 区阿里乌拉碱性流纹岩的成因联系,开展了锆石U-Pb定年、矿物学和全岩地球化学研究.结果表明,巴尔哲碱性流纹岩喷发年龄 为124.4±1.6 Ma,明显年轻于阿里乌拉碱性流纹岩(141 Ma),代表了大兴安岭中南段早白垩世新一期碱性火山岩活动.巴尔哲 和阿里乌拉碱性流纹岩具有较高的SiO₂、碱金属、TFe₂O₃、F和较低的Al₂O₃含量,均归属于钠闪碱流岩.两者均富集轻稀土元素 (LREE)和Nb、Ta、Zr、Hf等高场强元素(HFSE),含有较高的Rb、Th、U和极低的Ba、Sr含量.另外,两者具有相同的全岩Nd同 位素组成, ε_{Nd}(*t*)值分别为1.6和1.7~1.8.因此,巴尔哲和阿里乌拉碱性流纹岩均为新生地壳部分熔融的产物.巴尔哲碱性流纹岩 与碱性花岗岩成矿岩体形成时代和同位素组成均一致,应属同一岩浆体系不同演化阶段的产物.鉴于火山岩出露范围更广,碱性 火山岩可以作为深部稀有稀土金属矿床的重要地质找矿标志,并指出阿里乌拉地区具有该类金属矿产较好的找矿潜力. 关键词:巴尔哲;阿里乌拉;稀有稀土金属矿床;碱性火山岩;大兴安岭;矿床学.

中图分类号: P617 **文章编号:** 1000-2383(2024)04-1324-15 **收稿日期:** 2023-04-05

Petrogenesis and Geological Significance of Newly Discovered Alkaline Rhyolite in Baerzhe Rare Metal Deposit, Inner Mongolia

Dan Kaibo¹, Zhang Daohan^{2,3*}, Luan Yuwei², Song Chongyu^{2,4}, Yu Miao⁵, Liu Changwei⁶

1. Luoyang Luanchuan Molybdenum Industry Group Co., Ltd., Luanchuan 471000, China

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. China Geological Survey Development Research Center, Beijing 100037, China

5. Beijing Institute of Geological Hazard Prevention, Beijing 100120, China

6. The Inner Mongolia Chifeng Geological Mineral Exploration and Development Co., Ltd., Chifeng 024005, China

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 42072093).

作者简介:淡凯波(1997一),男,地质工程师,从事矿产普查与勘探工作.ORCID:0009-0003-0005-1633. E-mail: KDan@tfm.cmoc.com * 通讯作者:张道涵,E-mail: zhangdh@cug.edu.cn

引用格式:淡凯波,张道涵,栾钰薇,宋崇宇,于森,刘常伟,2024.内蒙古巴尔哲稀有稀土矿区新发现的碱性流纹岩岩石成因及其地质意义. 地球科学,49(4):1324-1338.

Citation: Dan Kaibo, Zhang Daohan, Luan Yuwei, Song Chongyu, Yu Miao, Liu Changwei, 2024. Petrogenesis and Geological Significance of Newly Discovered Alkaline Rhyolite in Baerzhe Rare Metal Deposit, Inner Mongolia. *Earth Science*, 49(4):1324-1338.

Abstract: To decipher the petrogenesis of the newly discovered alkaline rhyolite in the Baerzhe giant rare metal deposit in Inner Mongolia, and its genetic relationship with the ore-related peralkaline granite and Aliwula alkaline rhyolite from the adjacent area, in this research it carried out high spatial resolution LA-SF-ICP-MS zircon U-Pb dating, mineralogical and whole - rock geochemical studies. The results show that the eruption age of the Baerzhe alkaline rhyolite is 124.4 ± 1.6 Ma, which is obviously younger than that of the Aliwula alkaline rhyolite(141 Ma), which represents a new stage of alkaline volcanic activity in the middle-southern section of the Great Xing' an Range during the Early Cretaceous. The Baerzhe and Aliwula alkaline rhyolites have high SiO₂, alkali metals, TFe₂O₃, F and low Al₂O₃ contents, and belong to comendites. Both are rich in light rare earth elements (LREE) and high field strength elements (HFSE) such as Nb, Ta, Zr, and Hf, and contain high Rb, Th, U and extremely low Ba and Sr contents. In addition, both have the same whole-rock Nd isotopic composition, with $\varepsilon_{Nd}(t)$ values of 1.6 and 1.7–1.8, respectively. Therefore, both Baerzhe and Aliwula alkaline rhyolites are the products of partial melting of the juvenile lower crust. The Baerzhe alkaline rhyolite and ore-related peralkaline granite have the same formation age and isotope composition, and are different products of same, evolving magmatic system. Given the wider exposure range of volcanic rocks, alkaline volcanic rocks can be used as an important geological prospecting indicator for the underlying rare metal deposits, and it is pointed out that Aliwula area has a good prospecting potential for such deposits.

Key words: Baerzhe; Aliwula; rare metal deposit; alkaline volcanic rock; Great Xing'an Range; ore deposit geology.

巴尔哲矿床是我国最大的碱性花岗岩型稀有 稀土矿床,其中锆(Zr)和稀土(REE)的储量分别约 为280万吨和100万吨,达超大型矿床规模(王一先 和赵振华, 1997; Wu et al., 2021). 矿体主要产在 早白垩世碱性花岗岩体(123~125 Ma; Yang et al., 2014, 2017; Qiu et al., 2019) 顶部及其晚期 分异的伟晶岩内,主要矿石矿物为锆石、兴安石、氟 碳铈矿、烧绿石等(王一先和赵振华, 1997;杨武斌 等,2009).国内学者已对其成矿岩体岩石成因和成 矿机制进行了大量的研究,普遍认为成矿岩浆经历 了以结晶分异为主导的岩浆演化过程,对成矿金属 富集具有重要贡献(王一先和赵振华, 1997; Jahn et al., 2001;杨武斌等, 2011a; Sun et al., 2013; Yang et al., 2014; Su et al., 2021; Wu et al., 2021).因此,探讨碱性花岗岩岩浆体系演化过程,对 深入认识稀有稀土金属富集成矿作用具有重要 意义.

第4期

近年来,王建国等(2013)在巴尔哲矿区北东东 方向约12km处的阿里乌拉地区早白垩世白音高老 组地层内,发现了一套碱性流纹岩夹层.全岩地球 化学和锆石Lu-Hf同位素揭示,碱性流纹岩可能为 古俯冲洋壳部分熔融的产物,被认为与巴尔哲碱性 花岗岩可能为同一期碱性岩浆作用(王建国等, 2013;王建国,2014).但其锆石U-Pb年龄揭示,阿 里乌拉碱性流纹岩的喷发年龄为141 Ma(王建国 等,2013),远早于巴尔哲岩体的侵位年龄(121~ 124 Ma; Yang et al., 2014; Qiu et al., 2019).那么, 阿里乌拉碱性流纹岩与巴尔哲碱性花岗岩究竟是 否属于同一期碱性花岗质岩浆作用,两者是否有成 因联系,有待进一步深入研究.

最近,笔者在巴尔哲矿区内新发现了碱性流纹 岩,野外产状与阿里乌拉碱性流纹岩相似,均产在 白音高老组内,并以夹层的形式产出.该流纹岩是 否与阿里乌拉碱性流纹岩同期,其与巴尔哲碱性花 岗岩是否有成因关系,也有待进一步查明.针对上 述问题,本文采用中国科学院地质与地球物理研究 所新近开发的高空间分辨率LA-SF-ICP-MS 锆石 U-Pb定年技术(Wu et al., 2020),在精确限定流纹 岩喷发年龄的基础上,开展全岩主微量元素、Nd 同 位素和碱性角闪石主微量元素等系统研究.结果表 明,巴尔哲碱性流纹岩喷发时代和地球化学特征明 显有别于阿里乌拉碱性流纹岩,但与巴尔哲成矿岩 体同源同期,即早白垩世区内存在两期碱性花岗质 岩浆作用.

1 地质背景与样品信息

巴尔哲矿床地处大兴安岭中南段(图 1a~1b), 区域出露的基底岩石包括新太古代片麻岩和片岩, 其原岩为一套基性、中酸性火山岩;早元古界宝音 图群为一套低绿片岩相一低角闪岩相变质的产物, 以石英片岩为主,原岩为一套滨一浅海相陆源碎屑 及泥质砂岩,局部夹中基性火山岩及碳酸盐岩(张 梅,2011).中生代时期,受蒙古一鄂霍茨克洋和古 太平洋俯冲的叠加影响(Wu et al., 2011),区域上 发育大量晚中生代中酸性火山岩、I型和A型花岗 岩(Wu et al., 2002, 2003a, 2003b; Zhang et al., 2010; 许文良等, 2013; 唐杰等, 2018),其中部分



- 图1 中国东北地区构造纲要图(a);大兴安岭中南段晚中生代火山岩分布图(b);巴尔哲矿区地质简图(c);阿里乌拉地质简图(d)
- Fig.1 Tectonic subdivisions of Northeast China (a); distribution of Late Mesozoic volcanic rocks in the central and southern sections of the Great Xing' an Range (b); simplified geological map of the Baerzhe deposit (c); simplified geological map of the Aliwula area (d)

图 a 据 Wu et al. (2011)修改;图 b 据 Zhang et al. (2010)修改;图 c 据 Yang et al. (2020)修改;图 d 据王建国等(2013)修改.F0.蒙古一鄂霍茨 克缝合带;F1.塔源一喜桂图断裂;F2.贺根山一黑河断裂;F3.索伦一西拉穆伦一长春断裂;F4.赤峰一开源断裂;F5.伊通一伊兰断裂;F6.敦 化一米山断裂;F7.牡丹江断裂;NCC.华北克拉通

1327

早白垩世碱性花岗岩伴有稀有稀土金属矿化,形成 巴尔哲等矿床(Jahn et al., 2001).

巴尔哲矿床位于通辽市扎鲁特旗境内,矿区出 露早白垩世白音高老组和梅勒图组火山岩地层(图 1c).碱性花岗岩呈岩株状侵入于白音高老组地层 中.按照岩性和矿化程度,矿区内碱性花岗岩分为 801和802两个岩体,其中801为碱性花岗岩,为Zr-Nb-REE成矿岩体,而802为斑状碱性花岗岩,局部 发育硅化、钠化等蚀变,显示Nb、Y矿化(杨武斌 等,2011b).新发现的碱性流纹岩位于802岩体上覆 的白音高老组盖层内,以夹层形式、呈近东西向产 出,地表露头长约5m,宽约2m(图1c).因植被覆盖 影响,具体延伸走向并不明确.碱性流纹岩手标本 呈青灰色(图2a),呈聚斑状结构,聚晶主要为由碱 性长石、碱性角闪石和石英等矿物组成(图2b),直 径约2~5mm.其中,碱性长石呈斑状,大小约为 0.5~1.0 cm;石英呈粒状,大小约为1~5 mm;碱性 角闪石呈柱状,大小约为1 mm(图2c).基质为细晶 质,主要由细小的石英、碱性角闪石和长石组成.基 质中的碱性角闪石呈自形针状或长柱状,粒径普遍 小于10 μm;在聚晶周围常显示明显的定向性,表现 出流线构造的特点(图2d).因出露范围较小,笔者 仅采集1件碱性流纹岩样品(BEZ101)用于本次 研究.

阿里乌拉碱性流纹岩位于科右中旗阿里乌拉 山东南侧,产出于白音高老组凝灰岩、凝灰质砂岩 中,地表出露范围相对较大,南北长约1.5 km,东西 宽约1.0 km(王建国等,2013;图1d).地层倾向 57°,倾角69°.碱性流纹岩手标本呈青灰色,具斑状 结构和流纹构造,局部可见与安山岩互层(图2f).与 巴尔哲碱性流纹岩相似,阿里乌拉碱性流纹岩中的 聚晶也主要由碱性长石、石英、碱性角闪石等矿物



图 2 碱性流纹岩手标本及镜下照片

Fig. 2 Photos of hand specimens of alkaline rhyolite and related microphotographs

a.巴尔哲碱性流纹岩手标本;b.巴尔哲碱性流纹岩镜下聚晶结构(透射光);c.巴尔哲尔碱性流纹岩中碱性角闪石斑晶背散射(BSE)图像; d.巴尔哲碱性流纹岩基质针状碱性角闪石流纹结构;e.巴尔哲碱性流纹岩石英斑晶中的氟化物包裹体(透射光);f.阿里乌拉碱性流纹岩 与安山岩互层;g.阿里乌拉碱性流纹岩镜下聚晶结构(透射光);h.阿里乌拉碱性流纹岩针状碱性角闪石(反射光).缩写;M-Amp.基质碱 性角闪石;Pth.条纹长石;Amp.碱性角闪石斑晶/聚晶;Qtz.石英;Fl.氟化物 组成(图 2g),基质主要由细小的针状碱性角闪石 (图 2h)、石英和碱性长石等矿物组成,偶见霓石.锆 石 U-Pb年龄揭示,阿里乌拉碱性流纹岩喷发年龄 为141±1 Ma(王建国等,2013).本次研究共采集 该流纹岩样品3件,编号分别为ALWL01、AL-WL03和ALWL04.

2 分析方法

锆石的挑选和制靶均在广州拓岩检测技术有 限公司完成,阴极发光(CL)图像拍摄在武汉上谱分 析科技有限责任公司(WSSAT)完成.高空间分辨 率LA-SF-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在中国科学院地 质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室 完成,激光剥蚀系统由 GeolasHD 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 Element XR HR-ICP-MS 质谱仪组 成,详细的实验过程和校准技术参考 Wu et al. (2020).分析采用激光束斑 10 μm,频率 5 Hz,能量 密度约3.0 J/cm². 激光剥蚀过程中采用氦气作为载 气,以提高烧蚀气溶胶的传输效率.标样为锆石 91500,期间共分析10个点,平均年龄1063± 12 Ma, 与推荐年龄(1 062±1 Ma; Wiedenbeck et al., 1995)一致.新开发的锆石标样 SA01 作为监 控样,共分析10个点,平均年龄533.4±5.1 Ma,与 推荐年龄(535.1±0.3 Ma; Huang et al., 2020)在误 差范围内一致.对分析数据的离线处理采用软件 Glitter完成;锆石U-Pb年龄谐和图绘制和加权平 均年龄计算采用 Isoplot 完成.

全岩主微量元素测试在广州澳实分析检测有限公司完成.经处理的样品采用 x 射线荧光法 (XRF)在装有四硼酸钠的玻璃盘中进行主量元素 的分析,分析精度优于±2%.氟分别用 KOH 熔合 和离子选择电极分析,检测限为 20×10⁻⁶.对于微量 元素的分析,经一系列处理的溶液样品,使用 Agilent 7700x 四极 ICP-MS 分析微量元素浓度,分析精 度在 10% 以内.

全岩 Nd 同位素分析在 WSSAT 利用美国 Thermo Fisher Scientific 公司的MC-ICP-MS(Neptune Plus)分析完成,测试内精度(2SE)为 0.000 005~0.000 025(0.01‰~0.05‰, 2RSE),测 试准确度优于 0.000 025(~0.05‰).Nd 同位素分析 标样为 GSB(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 推荐值为 0.512 438± 0.000 006; Li *et al.*, 2017a),监控样为 BCR-2 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 推荐值为 0.512 638±000 015; Weis *et al.*, 2006)和 RGM-2 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 推荐值为 0.512 803±0.000 010; Li *et al.*, 2012).测试期间共分析 2个监控样,所获得的结果分别为 0.512 638±0.000 005和 0.512 803±0.000 050,与推荐值一致.

碱性角闪石主微量元素含量测试均在WSSAT 完成.主量元素测试利用电子探针JEOLJXA-8230 分析,分析条件采用15 kV加速电压、15 nA电流和 10 μm 束斑.采用天然和合成材料作为标样,所有数 据均采用ZAF校正程序进行校正.由于基质中碱性 角闪石粒径过小(≤10 μm),所以仅对碱性角闪石 聚晶样品进行了微量元素分析.分析采用激光剥蚀 系 统 为 GeoLasHD,等离子体质谱仪为 Agilent 7900,激光能量 80 mJ,频率 6 Hz,激光束斑直径 24 μm,数据处理采用ICPMSDataCal,具体分析条 件及流程详见文献Liu *et al.*(2008).

3 结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

巴尔哲碱性流纹岩中的锆石主要呈无色至淡 黄色,整体颗粒偏小,长约50~100 µm,长宽比约为 1:1~3:1.大部分锆石具半自形、自形结构,呈长柱 状、短柱状.阴极发光图像显示(图3a),这些锆石内 部结构较为复杂,大部分锆石具核边结构.其中,部 分锆石核部震荡环带明显,少部分锆石核部呈扇形 分医或呈溶蚀状;部分锆石边部阴极发光强度较 强,并具震荡环带结构,而部分锆石边部阴极发光 较弱或无发光性,整体较均一.这些内部结构复杂 的特点,暗示锆石多来源的可能(Corfu, 2003; 吴元 保和郑永飞, 2004).

本次研究选取了25颗锆石,共分析25个点.所 获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄范围变化极大,介于123~ 1764 Ma(附表1).这些年龄可以分为两组,一组为 180~1764 Ma,另一组为123~128 Ma(图3b~3c). 其中第1组均为锆石核部或震荡环带明显的锆石边 部年龄,而且这些年龄明显大于围岩白音高老组喷 发年龄(145~129 Ma;杨雅军等,2022;Tang et al.,2022),表明这些年龄应代表继承或捕获锆石的 年龄.而第2组年龄变化范围较小,主要来自阴极发 光强度较弱或极弱、且内部结构均一的锆石边部或 独立锆石.另外,这些年龄Th/U比为0.34~5.59,大 于0.1,显示岩浆成因的特征.因此,这些锆石应直 接形成于碱性流纹岩岩浆,它们的年龄可以代表其 喷发年龄.其中,7个年龄数据点的谐和度较高,给



图 3 部分锆石阴极发光图像(a);所有测试锆石样品 U-Pb 年龄谐和图(b);较高谐和度数据点的 U-Pb 年龄与加权平均年龄图(c)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons (a); U-Pb concordia diagram of all examined zircons (b); U-Pb concordia diagram of zircons with higher concordance (c)





出的加权平均年龄为 124.4±1.6 Ma (MSWD= 0.09).因此,巴尔哲碱性流纹岩的喷发年龄应为 124.4±1.6 Ma.

3.2 全岩地球化学

巴尔哲碱性流纹岩具有富 SiO₂(75.7%)、碱金 属(Na₂O+K₂O=8.02%)、TFe₂O₃(4.32%)和 F (680×10⁻⁶)、贫 CaO(0.11%)的特征(附表 2).在火 山岩 TAS 图解中(图4a),巴尔哲碱性流纹岩属亚碱 性流纹岩.其Al₂O₃含量相对较低,对应的过碱性指 数[(N₂O+K₂O)/Al₂O₃摩尔比]为1.04.按照碱性火 山岩划分方案,巴尔哲碱性流纹岩归属于钠闪碱流 岩(图4b).微量元素组成上,碱性流纹岩整体富集 轻稀土元素(LREE;471×10⁻⁶)和Nb、Ta、Zr、Hf等 高场强元素(HFSE),亏损Ti元素,显示一定程度





图 a 据 Le Bas et al. (1986)修改;图 b 据 Macdonald (1974)修改. 阿里乌拉碱性流纹岩已发表数据引自王建国等(2013)

的轻重稀土分馏[(La/Yb)_N=4.5].碱性流纹岩具有 较高的 Rb、Th、U和极低的 Ba、Sr含量, Rb/Sr 比为 65,具有明显的 Eu负异常(Eu/Eu*=0.019).在稀土 元素配分模式图(图 5a)和微量元素蛛网图(图 5b) 中,巴尔哲碱性流纹岩与 801 超溶相碱性花岗岩表 现出相似的特点.

与巴尔哲碱性流纹岩相似,阿里乌拉碱性流纹 岩也具有高 SiO₂、Na₂O、K₂O、TFe₂O₃和 F、低 Al₂O₃ (10.32%~10.62%)和 CaO(0.05%~0.11%)的特 点(附表2).其过碱性指数为1.00~1.04,也可划分 为钠闪碱流岩(图4b). 微量元素组成上, 阿里乌拉 碱性流纹岩在稀土元素配分模式图和蛛网图中表 现出与巴尔哲流纹岩相同的特征,但其稀土元素 (REE; $602 \sim 790 \times 10^{-6}$ 、 577×10^{-6})和HFSE (Nb、 Ta、Zr、Hf和Th等)含量整体高于后者.相比巴尔哲 碱性流纹岩,其Rb含量更高,而Ba和Sr含量更低, Rb/Sr比高达126.此外,Eu负异常程度(Eu/Eu*= 0.20~0.24) 略低于巴尔哲流纹岩. 除 Ce 和 Zr 元素 外,本文数据与已发表的阿里乌拉碱性流纹岩全岩 组成(王建国等, 2013)一致.前人发表的全岩数据 明显富集Ce和Zr元素(图5b),可能与锆石局部不 均一分布有关(Shao et al., 2015).

3.3 全岩 Nd 同位素

巴尔哲碱性流纹岩¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd为0.51267, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd为0.134081,相应的 e_{Nd}(*t*)值为1.6(*t*= 124 Ma),二阶段模式年龄*T*_{DM2}为786 Ma(图6,表 2).阿里乌拉碱性流纹岩¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd为0.512681~ 0.512699,¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd为0.149020~0.150618,





Fig. 6 Whole-rock $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. two-stage model age (T_{DM2}) diagram

巴尔哲花岗岩 Nd 同位素数据引自 Jahn et al. (2001)、Yang et al. (2017)和 Su et al. (2021);贺根山蛇绿岩 Nd 同位素数据引自 Miao et al. (2008);早白垩世幔源玄武岩数据引自 Yang et al. (2017);产自新生地壳的花岗岩数据引自 Wu et al. (2003b)

 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为1.7~1.8(*t*=141 Ma),二阶段模式年龄 T_{DM2} 为782~795 Ma,与巴尔哲碱性流纹岩基本一致(图 6).

3.4 碱性角闪石成分

巴尔哲碱性流纹岩聚晶中的碱性角闪石整体 以高SiO₂(50.1%~51.6%)、Na₂O(4.78%~ 6.16%)、FeO(35.5%~36.7%)、F(0.13%~ 0.31%),低CaO(0.47%~2.95%)和Al₂O₃(0.46%~ 0.83%)为特征(图7,附表3).利用最新的角闪石公 式计算方法(Li et al., 2020),这些碱性角闪石应归 属于铁质蓝透闪石和钠闪石.而基质碱性角闪石也



Fig. 7 Variations of major element compositions of alkali amphiboles from alkaline rhyolite 巴尔哲 801碱性花岗岩中的碱性角闪石数据引自 Su et al. (2021)和 Wu et al. (2021)



图 8 碱性角闪石球粒陨石标准化稀土模式配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 8 Chondrite-normalized rare-earth element pattern (a), and primitive mantle-normalized trace element spidergram (b) of alkali amphiboles

巴尔哲花岗岩碱性角闪石数据引自 Yang et al. (2020)和 Wu et al. (2021); 球粒陨石和原始地幔值引自 Sun and McDonough (1989)

展现出相似的主量元素特征,也归属于铁质蓝透闪石和钠闪石,但整体具有更高的F含量(0.22%~0.88%,表3).在球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图中(图8a),碱性角闪石聚晶富集HREE元素,亏损LREE,具有较低的(La/Yb)_N(0.01~0.57),表现出明显的Eu负异常(Eu/Eu*=0~0.04).在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图8b),碱性角闪石聚晶明显富集Th、Nb、Ta、Zr、Hf等高场强元素和Rb、Pb等元素,亏损Ba、U、Sr和Eu等元素.

与巴尔哲碱性角闪石聚晶相比,阿里乌拉碱性流纹岩中碱性角闪石聚晶整体表出相近的主量元 素特征,但其SiO₂(47.7%~51.5%)和CaO (0.26%~3.04%)变化范围略大,Na₂O(5.71%~ 7.65%)、Al₂O₃(0.65%~1.64%)和F(0.64%~ 2.00%)含量更高,而FeO含量较低(33.5%~ 35.7%)(附表3).这些碱性角闪石可细分为钠铁闪 石、铁质红闪石和钠闪石.相比碱性角闪石聚晶,基 质碱性角闪石SiO₂(50.8%~51.6%)、Na₂O $(6.07\% \sim 7.48\%)$ 和F(1.29%~2.04%)含量整体偏高,而FeO(32.7%~33.8%)、CaO(0.04%~1.18%)和Al₂O₃(0.44%~0.91%)含量则整体较低(图7).基质碱性角闪石也可进一步分为钠铁闪石、铁质红闪石和钠闪石.阿里乌拉碱性角闪石聚晶也显示HREE、Rb、Th、Nb、Ta、Pb、Zr、Hf等元素富集,而Ba、U、Sr、Eu等元素亏损的特征(附表4),具有较低的Eu/Eu*(0.02~0.04).但相比巴尔哲碱性角闪石,阿里乌拉碱性角闪石聚晶明显更加富集LREE,其(La/Yb)_N(0.37~1.18)也较高(图8a).

4 讨论

4.1 新一期碱性流纹岩活动

巴尔哲和阿里乌拉碱性流纹岩具有相同的矿物组成和全岩Nd同位素组成(图6),暗示两者可能 具有相同的源区.但在全岩微量元素组成上,前者 REE和HFSE含量整体低于后者(图5).另外,相比 阿里乌拉碱性角闪石成分,巴尔哲碱性角闪石整体 具有较低的Na₂O和F含量(图7a,7f),LREE、Nb、 Zr和Hf等不相容元素含量也明显较低,而其Ta元 素含量却较高(图8b).这些证据表明,两者演化过 程和演化程度均有明显差异.此外,巴尔哲碱性流 纹岩喷发年龄为124.4±1.6 Ma,明显年轻于阿里乌 拉碱性流纹岩的年龄(141±1 Ma; 王建国等, 2013)(图9).两者相差近16 Ma,远远超过年龄误 差范围.因此,这些证据表明,巴尔哲和阿里乌拉碱 性流纹岩应代表了两期碱性岩浆活动的产物.

Tang et al. (2022)最近对大兴安岭地区大量晚 中生代火山岩高精度U-Pb年龄进行梳理和统计发现,大兴安岭中南段火山岩的喷发可以分为4个阶段:165~160 Ma, 165~150 Ma, 145~135 Ma和 135~125 Ma (图 10).如图 10所示,巴尔哲和阿里 乌拉碱性流纹岩的喷发年龄分别对应早白垩世的 两期火山岩活动峰期.在动力学背景上,这两期火 山岩活动很可能分别与古太平洋板片回撤和岩石 圈减薄等过程有关(Tang et al., 2022).所以,继阿 里乌拉碱性流纹岩喷发之后,巴尔哲碱性流纹岩代 表了大兴安岭中南段新发现另一期早白垩世碱性 流纹岩活动.

4.2 碱性流纹岩成因

关于碱性流纹岩的成因,目前主要有两种观 点:(1)可通过碱性玄武岩高度结晶分异而形成 (Civetta *et al.*, 1998; White *et al.*, 2009);(2)可通 过含碱金属的挥发分诱发陆壳部分熔融而来(Macdonald *et al.*, 1987; Black *et al.*, 1997; Avanzinelli *et al.*, 2004).巴尔哲和阿里乌拉碱性流纹岩均具有 较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(1.6~1.8)和较年轻的 T_{DM2} (782~ 795 Ma),可以直接排除古老地壳作为源区的可能 (图 6).然而,该同位素组成特征与区内同期幔源玄 武岩和产自新生地壳的花岗岩同位素组成接近(图 6).因此,岩石圈地幔和新生地壳都有可能是两地碱



图 9 巴尔哲 801 岩体、碱性流纹岩与阿里乌拉碱性流纹岩锆石年龄对比

Fig. 9 Comparison of zircon ages of Baerzhe 801 pluton and alkaline rhyolite, and of Aliwula alkaline rhyolite 巴尔哲 801碱性花岗岩年龄引自Yang *et al.* (2013, 2020)和丘志力等(2014);阿里乌拉碱性流纹岩年龄引自王建国等(2013)



图 10 大兴安岭晚中生代火山岩喷发年龄统计(据 Tang et al. (2022)修改)

Fig. 10 Statistical diagram of the eruption ages of Late Mesozoic volcanic rocks from the Great Xing' an Range (modified after Tang *et al.* (2022))

性流纹岩的潜在源区.

对于前者,幔源岩浆通过结晶分异演化至碱性 花岗质岩浆阶段,必然经历以橄榄石、辉石和斜长 石为主的结晶过程(Vasyukova and Williams-Jones, 2020). 而对于这些结晶相, Nb和Th的分配 系数近乎一致,而Ta和U的分配系数也类似(Niu and Batiza, 1997).因此, Nb/Th和Ta/U比值在岩 浆演化过程中几乎保持不变,因而可以用于示踪源 区性质(Niu and Batiza, 1997; Shao et al., 2015). 本文采用 Niu and Batiza (1997)基于此原理确定的 Nb* (= (Nb/Th) $_{\#_{\rm H}}/(Nb/Th) _{\rm ghubb}$) 和 Ta* (= (Ta/U)_{#晶}/(Ta/U)_{原始地幔})两个地球化学参数,来判 断碱性流纹岩的源区性质(图11).巴尔哲和阿里乌 拉碱性流纹岩均具有较低的 Nb* (0.36~0.47) 和 Ta*(0.43~0.53),明显低于原始地幔和幔源相关熔 体,而靠近大陆地壳一侧,与大兴安岭地区新生地 壳来源的花岗岩相近(图11).因此,巴尔哲和阿里 乌拉碱性流纹岩的源区应主要为新生地壳.结合上 文提及的动力学背景,两者可能分别是古太平洋板 片回撤和岩石圈地幔减薄引起的软流圈地幔上涌, 导致新生地壳部分熔融的产物.

需要指出的是,王建国等(2013)基于锆石较亏 损的Hf同位素组成认为阿里乌拉碱性流纹岩的源 区可能为遭受蚀变的古俯冲洋壳.鉴于锆石极低 δ¹⁸O组成的特征,蚀变洋壳也被认为是巴尔哲801 碱性花岗岩的重要源区(Yang *et al.*, 2017).其实, 这一源区性质与本文提出的新生地壳并不矛盾,因





Fig. 11 Nb* vs. Ta* diagram of Baerzhe and Aliwula alkaline rhvolites

为后者的形成可能与洋壳熔融有关.自晚古生代开 始,大兴安岭区域构造岩浆演化主要受控于蒙古一 鄂霍茨克洋南向持续俯冲作用的影响,并产生了少 量晚古生代和大量中生代的岩浆岩(许文良等, 2019; Tang et al., 2022).同位素研究揭示,这些岩 浆岩均来自较年轻的源区,代表了区域一次重要陆 壳生长事件(Wu et al., 2003b; Jahn, 2004).有关汇 聚板块边缘陆壳生长模式最新研究结果表明,俯冲 板片在角闪石相变质条件下部分熔融产生的熔体, 可上侵至在上覆陆壳底部形成新生地壳(Niu et al., 2013; Huang et al., 2014; 马超等, 2019).因 此,新生地壳后续熔融产生的岩浆可以继承蚀变俯 冲洋壳的特征,如低δ¹⁸O的特点.

相比巴尔哲流纹岩,阿里乌拉碱性流纹岩全岩 稀土含量更高,具有更高的 Rb 和更低的 Ba和 Sr含 量,表明阿里乌拉演化程度更高,经历了更多的长 石结晶分异.另外,两者碱性角闪石在 LREE 含量 的显著差异(图 8a),可能暗示聚晶形成的过程中两 个体系经历的结晶相也有差别.巴尔哲碱性流纹岩 在聚晶形成阶段,可能经历了富 LREE 矿物(相)的 结晶,如氟化物(图 2e).这也可以解释,在源区相同 的情况下,巴尔哲碱性流纹岩及其碱性角闪石 F含 量整体偏低的原因.

据 Niu and Batiza (1997)修改. 原始地幔与各类玄武岩数据引自 Sun and McDonough (1989);各类地壳组成引自 Rudnick and Gao (2003);产自新生地壳的花岗岩数据引自 Li *et al.* (2017b, 2018); LCC.大陆下地壳;UCC.大陆上地壳;BCC.整个大陆地壳;PM. 原 始地幔;OIB.洋岛玄武岩;MORB.洋中脊玄武岩

4.3 与巴尔哲 801碱性花岗岩的成因联系

本文获得的巴尔哲碱性流纹岩锆石高精度U-Pb年龄为124.4±1.6 Ma,与巴尔哲成矿岩体成岩 年龄(123~125 Ma; 丘志力等, 2014; Yang et al., 2014, 2017; Qiu et al., 2019)在误差范围内一致. 碱性流纹岩 Nd同位素组成也与801碱性花岗岩一 致(图6),进一步表明两者源区也相同,与前人提出 新生地壳为巴尔哲成矿岩体源区(Su et al., 2021) 的认识吻合.另外,两者全岩稀土元素配分模式以 及部分微量元素富集和亏损的特征也十分一致(图 5).因此,巴尔哲碱性流纹岩和801碱性花岗岩应属 同一岩浆体系不同演化阶段的产物.

巴尔哲碱性流纹岩以夹层的形式产自白音高 老组地层内,而后者又被801碱性花岗岩体侵入.基 于这一野外产出关系,可以确定碱性流纹岩的喷发 略早于801碱性花岗岩的侵位.另一方面,碱性流纹 岩稀土和Rb、Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf等不相容元素 (图5)、以及挥发分下元素含量(330×10⁻⁶~1490× 10⁻⁶ vs. 2 300×10⁻⁶~43 400×10⁻⁶; Su *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2021),也整体低于801碱性花岗 岩.而且,碱性流纹岩中聚晶和基质碱性角闪石的 Al₂O₃、Na₂O和F含量也整体低于801碱性花岗岩中 碱性角闪石组成(图7).因此,全岩组成和碱性角闪 石矿物成分也进一步印证碱性流纹岩的形成早于 801碱性花岗岩.

基于碱性流纹岩与801碱性花岗岩体形成的先 后关系、以及其内部出现的碱性角闪石一碱性长 石一石英聚晶,可以初步推断巴尔哲碱性花岗质岩 浆体系的演化过程:(1)在碱性流纹岩喷发前,巴尔 哲矿区深部即已形成碱性花岗岩质岩浆房,并在岩 浆房底部形成由碱性角闪石、碱性长石、石英等矿 物组成的堆晶;(2)随着区域构造背景逐步伸展和 深部基性岩浆侵位,诱发了碱性流纹岩的喷发;(3) 碱性花岗岩质岩浆房随后继续演化,先后形成超溶 相和过渡相岩浆,并依次侵位(Wu et al., 2021),形 成巴尔哲成矿岩体.

4.4 对区域稀有稀土金属成矿的启示

与巴尔哲类似,在加拿大 Strange Lake (Boily and Williams-Jones, 1994; Siegel *et al.*, 2017)、蒙 古 Khaldzan-Buregtey (Kovalenko *et al.*, 1995)、纳 米比亚 Amis (Schmitt *et al.*, 2000)以及我国碾子山 (秦锦华, 2017)等碱性花岗岩体顶部或附近均有发 现同期的碱性火山岩,其中前3个岩体均伴生稀有 稀土金属成矿.但这些碱性火山岩与碱性花岗岩体 的成因联系,却鲜有关注.本文通过对巴尔哲碱性 流纹岩的研究表明,碱性角闪石火山岩与碱性花岗 岩体属同一岩浆体系,并且其喷发时间略早于碱性 花岗岩体的侵位时间.因此,结合其被碱性花岗岩 体后期侵位的关系,这些碱性火山岩可以作为深部 可能存在碱性花岗岩体、或碱性花岗岩体保存完整 的重要参考依据.另一方面,相比碱性花岗岩体,碱 性流纹岩出露范围更大,因此,可以作为寻找碱性 花岗岩型稀有稀土金属矿床的重要地质标志.

如前文所述,阿里乌拉与巴尔哲碱性流纹岩并 非同一期碱性火山岩,表明区内可能存在140 Ma左 右的另一期碱性花岗岩质岩浆作用.前人在阿里乌 拉地区开展的初步研究工作表明,该地区除碱性流 纹岩外,还可见碱性角闪石花岗斑岩脉发育(王建 国等,2013;王建国,2014).该特征与蒙古 Khaldzan-Buregtey的矿床地质十分相似,该矿区内 可见碱性流纹岩和花岗斑岩脉被晚期成矿的碱性 花岗岩体侵入的现象(Kovalenko *et al.*,1995).结合 阿里乌拉碱性流纹岩和花岗斑岩脉局部发育钠化 蚀变现象(王建国,2014),表明深部极有可能存在 提供热液流体的碱性花岗岩体.鉴于部分碱性流纹 岩和花岗斑岩样品 REE、Nb、Y元素含量已达工业 品位(王建国,2014),可以推测阿里乌拉深部具有 非常好的稀有稀土金属找矿潜力.

5 结论

基于对大兴安岭中南段巴尔哲矿区及邻区出 露的碱性流纹岩开展年代学、全岩地球化学和矿物 学研究,主要得出如下结论:

(1)巴尔哲矿区新发现的碱性流纹岩的喷发年 龄为124.4±1.6 Ma,为大兴安岭中南段早白垩世新 一期碱性火山岩活动.

(2)巴尔哲和阿里乌拉碱性流纹岩可能分别为 古太平洋板片回撤和岩石圈地幔减薄引起的软流 圈地幔上涌,导致新生地壳部分熔融的产物.

(3)巴尔哲碱性流纹岩与801碱性花岗岩成矿 岩体属于同一岩浆体系不同演化阶段的产物,其中 碱性流纹岩的喷发略早于801碱性花岗岩体的 侵位.

(4)碱性火山岩可以作为深部稀有稀土金属矿 床的重要地质找矿标志,并指出阿里乌拉碱性火山 岩深部具有较好的稀有稀土金属矿找矿潜力. 附表见本刊官网(http://www.earth-science.net). 致谢:非常感谢两位匿名审稿人对本文进行了 细致评阅,并提出了非常中肯和指导性的建议!

References

- Avanzinelli, R., Bindi, L., Menchetti, S., et al., 2004. Crystallisation and Genesis of Peralkaline Magmas from Pantelleria Volcano, Italy: An Integrated Petrological and Crystal-Chemical Study. *Lithos*, 73(1/2): 41-69. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.10.007
- Black, S., MacDonald, R., Kelly, M. R., 1997. Crustal Origin for Peralkaline Rhyolites from Kenya: Evidence from U-Series Disequilibria and Th-Isotopes. *Journal of Petrology*, 38(2): 277-297. https://doi. org/10.1093/ petroj/38.2.277
- Boily, M., Williams-Jones, A. E., 1994. The Role of Magmatic and Hydrothermal Processes in the Chemical Evolution of the Strange Lake Plutonic Complex, Québec-Labrador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118(1): 33-47. https://doi.org/10.1007/BF00310609
- Civetta, L., D'Antonio, M., Orsi, G., et al., 1998. The Geochemistry of Volcanic Rocks from Pantelleria Island, Sicily Channel: Petrogenesis and Characteristics of the Mantle Source Region. *Journal of Petrology*, 39(8): 1453-1491. https://doi.org/10.1093/petroj/39.8.1453
- Corfu, F., 2003. Atlas of Zircon Textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 469-500. https://doi. org/10.2113/0530469
- Huang, C., Wang, H., Yang, J. H., et al., 2020. SA01-A Proposed Zircon Reference Material for Microbeam U-Pb Age and Hf-O Isotopic Determination. *Geostandards* and Geoanalytical Research, 44(1): 103-123. https:// doi.org/10.1111/ggr.12307
- Huang, H., Niu, Y. L., Nowell, G., et al., 2014. Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibetan Plateau: Implications for Continental Crust Growth through Syn-Collisional Felsic Magmatism. *Chemical Geology*, 370: 1–18. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.01.010
- Jahn, B. M., 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 73-100. https://doi. org/10.1144/GSL. SP.2004.226.01.05
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Capdevila, R., et al., 2001. Highly Evolved Juvenile Granites with Tetrad REE Patterns: The Woduhe and Baerzhe Granites from the Great

Xing' an Mountains in NE China. *Lithos*, 59(4): 171-198. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00066-4

- Kovalenko, V. I., Tsaryeva, G. M., Goreglyad, A. V., et al., 1995. The Peralkaline Granite-Related Khaldzan-Buregtey Rare Metal (Zr, Nb, REE) Deposit, Western Mongolia. *Economic Geology*, 90(3): 530-547. https:// doi.org/10.2113/gsecongeo.90.3.530
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali–Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750. https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745
- Li, C. F., Li, X. H., Li, Q. L., et al., 2012. Rapid and Precise Determination of Sr and Nd Isotopic Ratios in Geological Samples from the Same Filament Loading by Thermal Ionization Mass Spectrometry Employing a Single-Step Separation Scheme. *Analytica Chimica Acta*, 727(10): 54-60. https://doi. org/10.1016/j. aca.2012.03.040
- Li, J., Tang, S. H., Zhu, X. K., et al., 2017a. Production and Certification of the Reference Material GSB 04– 3258–2015 as a ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd Isotope Ratio Reference. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 41(2): 255– 262. https://doi.org/10.1111/ggr.12151
- Li, Y., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2017b. Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic–Early Mesozoic Igneous Rocks of the Erguna Massif, NE China: Implications for the Early Evolution of the Mongol–Okhotsk Tectonic Regime. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 205–224. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.12.005
- Li, X. Y., Zhang, C., Behrens, H., et al., 2020. Calculating Amphibole Formula from Electron Microprobe Analysis Data Using a Machine Learning Method Based on Principal Components Regression. *Lithos*, 362/363: 105469. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105469
- Li, Y., Xu, W. L., Tang, J., et al., 2018. Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Intrusive Rocks in the Xing an Massif of NE China: Implications for the Evolution and Spatial Extent of the Mongol–Okhotsk Tectonic Regime. *Lithos*, 304/305/306/307: 57-73. https://doi. org/10.1016/j.lithos.2018.02.001
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. Chemical Geology, 257(1/2): 34-43. https://doi.org/ 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Ma, C., Tang, Y.J., Ying, J.F., 2019. Magmatism in Subduction Zones and Growth of Continental Crust. *Earth*

Science, 44(4): 1128–1142 (in Chinese with English abstract).

- MacDonald, R., 1974. Nomenclature and Petrochemistry of the Peralkaline Over Saturated Extrusive Rocks. Bulletin of Volcanologique, 38(2): 498-516. https://doi. org/10.1007/BF02596896
- MacDonald, R., Davies, G. R., Bliss, C. M., et al., 1987.
 Geochemistry of High-Silica Peralkaline Rhyolites, Naivasha, Kenya Rift Valley. *Journal of Petrology*, 28
 (6): 979-1008. https://doi. org/10.1093/petrology/ 28.6.979
- Miao, L. C., Fan, W. M., Liu, D. Y., et al., 2008. Geochronology and Geochemistry of the Hegenshan Ophiolitic Complex: Implications for Late-Stage Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. Journal of Asian Earth Sciences, 32(5-6): 348-370. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.11.005
- Niu, Y., Batiza, R., 1997. Trace Element Evidence from Seamounts for Recycled Oceanic Crust in the Eastern Pacific Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(3/4): 471-483. https://doi. org/10.1016/s0012-821x(97)00048-4
- Niu, Y. L., Zhao, Z. D., Zhu, D. C., et al., 2013. Continental Collision Zones are Primary Sites for Net Continental Crust Growth—A Testable Hypothesis. *Earth-Science Reviews*, 127: 96–110. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.004
- Qin, J.H., 2017. The Character and Geological Significance of the Nianzishan Miarolitic Alkaline Granite in Qiqihar City, Heilongjiang Province (Dissertation). China University of Geoscience, Beijing, 14-15(in Chinese with English abstract).
- Qiu, K. F., Yu, H. C., Wu, M. Q., et al., 2019. Discrete Zr and REE Mineralization of the Baerzhe Rare-Metal Deposit, China. American Mineralogist, 104(10): 1487-1502. https://doi.org/10.2138/am-2019-6890
- Qiu, Z.L., Liang, D.Y., Wang, Y.F., et al., 2014. Zircon REE, Trace Element Characteristics and U-Pb Chronology in the Baerzhe Alkaline Granite: Implications to the Petrological Genesis and Mineralization. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1757-1768 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D., Turekian, K.K., eds., Treatise on Geochemistry 3. Elsevier-Pergamon, Oxford.
- Schmitt, A. K., Emmermann, R., Trumbull, R. B., et al., 2000. Petrogenesis and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology of the

Brandberg Complex, Namibia: Evidence for a Major Mantle Contribution in Metaluminous and Peralkaline Granites. *Journal of Petrology*, 41(8): 1207-1239. https://doi.org/10.1093/petrology/41.8.1207

- Shao, F. L., Niu, Y. L., Regelous, M., et al., 2015. Petrogenesis of Peralkaline Rhyolites in an Intra-Plate Setting: Glass House Mountains, Southeast Queensland, Australia. *Lithos*, 216/217: 196-210. https://doi.org/ 10.1016/j.lithos.2014.12.015
- Siegel, K., Williams-Jones, A. E., Stevenson, R., 2017. A Nd- and O-Isotope Study of the REE-Rich Peralkaline Strange Lake Granite: Implications for Mesoproterozoic A-Type Magmatism in the Core Zone (NE-Canada). Contributions to Mineralogy and Petrology, 172(7): 54. https://doi.org/10.1007/s00410-017-1373-x
- Su, H. M., Jiang, S. Y., Zhu, X. Y., et al., 2021. Magmatic-Hydrothermal Processes and Controls on Rare-Metal Enrichment of the Baerzhe Peralkaline Granitic Pluton, Inner Mongolia, Northeastern China. Ore Geology Reviews, 131: 103984. https://doi.org/ 10.1016/j.oregeorev.2021.103984
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Soci*ety, London, Special Publications, 42(1): 313-345. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Sun, Y., Lai, Y., Chen, J., et al., 2013. Rare Earth and Rare Metal Elements Mobility and Mineralization during Magmatic and Fluid Evolution in Alkaline Granite System: Evidence from Fluid and Melt Inclusions in Baerzhe Granite, China. *Resource Geology*, 63(3): 239– 261. https://doi.org/10.1111/rge.12007
- Tang, J., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2022. Temporal Variations in the Geochemistry of Mesozoic Mafic– Intermediate Volcanic Rocks in the Northern Great Xing'an Range, Northeast China, and Implications for Deep Lithospheric Mantle Processes. *Lithos*, 422/423: 106721. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106721
- Tang, J., Xu, W.L., Wang, F., et al., 2018. Subduction History of the Paleo-Pacific Slab beneath Eurasian Continent: Mesozoic-Paleogene Magmatic Records in Northeast Asia. Scientia Sinica (Terrae), 48(5): 549-583 (in Chinese).
- Vasyukova, O. V., Williams-Jones, A. E., 2020. Partial Melting, Fractional Crystallisation, Liquid Immiscibility and Hydrothermal Mobilisation—A 'Recipe' for the Formation of Economic A-Type Granite-Hosted HFSE Deposits. Lithos, 356/357: 105300. https://doi.org/

10.1016/j.lithos.2019.105300

- Wang, J.G., 2014. Petrogenesis and Mineralization Implication of the Alkali-Rhyolites in Keyouzhongqi, the Southern Da Hinggan MTS., China (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Wang, J.G., He, Z.Y., Xu, W.L., 2013. Petrogenesis of Riebeckite Rhyolites in the Southern Great Hinggan Mts.: Geohronological and Geochemical Evidence. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 853-863 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.X., Zhao, Z.H., 1997. Geochemistry and Origin of the Baerzhe REE Nb-Be-Zr Superlarge Deposit. *Geochimica*, 26(1): 25-26, 28, 30-36 (in Chinese with English abstract).
- Weis, D., Kieffer, B., Maerschalk, C., et al., 2006. High-Precision Isotopic Characterization of USGS Reference Materials by TIMS and MC-ICP-MS. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 7(8): Q08006. https://doi.org/ 10.1029/2006GC001283
- White, J. C., Parker, D. F., Ren, M. H., 2009. The Origin of Trachyte and Pantellerite from Pantelleria, Italy: Insights from Major Element, Trace Element, and Thermodynamic Modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179(1/2): 33-55. https://doi. org/10.1016/j.jvolgeores.2008.10.007
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1-23. https://doi. org/10.1111/j. 1751-908x.1995.tb00147.x
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003a. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (I): Geochronology and Petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00222-0
- Wu, F. Y., Jahn, B. M., Wilde, S. A., et al., 2003b. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China (II): Isotopic Geochemistry and Implications for Crustal Growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3/4): 191-204. https://doi. org/10.1016/S0024-4937(03)00015-X
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. Journal of Asian Earth Sciences, 41(1): 1-30. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.014
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on Their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1/2): 143-173. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00018-9

- Wu, M. Q., Samson, I. M., Qiu, K. F., et al., 2021. Concentration Mechanisms of Rare Earth Element-Nb-Zr-Be Mineralization in the Baerzhe Deposit, Northeast China: Insights from Textural and Chemical Features of Amphibole and Rare Metal Minerals. *Economic Geolo*gy, 116(3): 651-679. https://doi.org/10.5382/econgeo.4789
- Wu, S. T., Yang, M., Yang, Y. H., et al., 2020. Improved In Situ Zircon U-Pb Dating at High Spatial Resolution (5-16 Mm) by Laser Ablation-Single Collector-Sector Field-ICP-MS Using Jet Sample and X Skimmer Cones. International Journal of Mass Spectrometry, 456: 116394. https://doi. org/10.1016/j. ijms.2020.116394
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genetic Mineralogy of Zircon and Its Constraints on U-Pb Age Interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese).
- 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): 1620-1646(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, F., Pei, F. P., et al., 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(in Chinese with English abstract).
- Yang, W. B., Niu, H. C., Hollings, P., et al., 2017. The Role of Recycled Oceanic Crust in the Generation of Alkaline A-Type Granites. *Journal of Geophysical Research* (*Solid Earth*), 122(12): 9775-9783. https://doi. org/10.1002/2017JB014921
- Yang, W. B., Niu, H. C., Li, N. B., et al., 2020. Enrichment of REE and HFSE during the Magmatic-Hydrothermal Evolution of the Baerzhe Alkaline Granite, NE China: Implications for Rare Metal Mineralization. *Lithos*, 358/359: 105411. https://doi. org/ 10.1016/j.lithos.2020.105411
- Yang, W. B., Niu, H. C., Shan, Q., et al., 2014. Geochemistry of Magmatic and Hydrothermal Zircon from the Highly Evolved Baerzhe Alkaline Granite: Implications for Zr-REE-Nb Mineralization. *Mineralium Deposita*, 49(4): 451-470. https://doi.org/10.1007/s00126-013-0504-1
- Yang, W. B., Niu, H. C., Sun, W. D., et al., 2013. Isotopic Evidence for Continental Ice Sheet in Mid-Latitude Region in the Supergreenhouse Early Cretaceous. *Scientific Reports*, 3: 2732. https://doi. org/10.1038/

srep02732

- Yang, W. B., Niu, H. C., Shan, Q., et al., 2009. Ore-Forming Mechanism of the Baerzhe Super-Large Rare and Rare Earth Elements Deposit. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 2924-2932(in Chinese with English abstract).
- Yang, W.B., Su, W.C., Liao, S.P., et al., 2011a. Melt and Melt-Fluid Inclusions in the Baerzhe Alkaline Granite: Information of the Magmatic-Hydrothermal Transition. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1493-1499(in Chinese with English abstract).
- Yang, W.B., Shan, Q., Zhao, Z.H., et al., 2011b. Petrogenic and Metallogenic Action of the Alkaline Granitoids in Baerzhe Area: A Comparison between Mineralized and Barren Plutons. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1689-1704(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.J., Yang, X.P., Jiang, B., et al., 2022. Spatio-Temporal Distribution of Mesozoic Volcanic Strata in the Great Xing' an Range: Response to the Subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean and Paleo-Pacific Ocean. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 115-131(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Gao, S., Ge, W. C., et al., 2010. Geochronology of the Mesozoic Volcanic Rocks in the Great Xing' an Range, Northeastern China: Implications for Subduction-Induced Delamination. *Chemical Geology*, 276(3/4): 144-165. https://doi.org/10.1016/j. chemgeo.2010.05.013
- Zhang, M., 2011. Study on the Metallogenic System of Copper-Polymetallic Deposits in the Middle-Southern Part of Da Hinggan Mountains, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

马超,汤艳杰,英基丰,2019.俯冲带岩浆作用与大陆地壳

生长.地球科学,44(4):1128-1142.

- 秦锦华,2017.黑龙江齐齐哈尔碾子山晶洞碱性花岗岩体特 征及其地质意义(硕士学位论文).北京:中国地质大学 (北京),14-15.
- 丘志力,梁冬云,王艳芬,等,2014.巴尔哲碱性花岗岩锆石 稀土微量元素、U-Pb年龄及其成岩成矿指示.岩石学 报,30(6):1757-1768.
- 唐杰,许文良,王枫,等,2018.古太平洋板块在欧亚大陆下 的俯冲历史:东北亚陆缘中生代一古近纪岩浆记录.中 国科学:地球科学,48(5):549-583.
- 王建国,2014.大兴安岭南部科右中旗碱性流纹岩的岩石成 因及成矿意义(博士学位论文).长春:吉林大学.
- 王建国,和钟铧,徐文良,2013.大兴安岭南部碱性流纹岩的 岩石成因:年代学和地球化学证据.岩石学报,29(3): 853-863.
- 王一先,赵振华,1997.巴尔哲超大型稀土铌铍锆矿床地球 化学和成因.地球化学,26(1):25-26,28,30-36.
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报,49(16):1589-1604.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等, 2019. 兴蒙造山带的基底属性与 构造演化过程. 地球科学, 44(5): 1620-1646.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 等, 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.
- 杨武斌,牛贺才,单强,等,2009.巴尔哲超大型稀有稀土矿 床成矿机制研究.岩石学报,25(11):2924-2932.
- 杨武斌,苏文超,廖思平,等,2011a.巴尔哲碱性花岗岩中 的熔体和熔体-流体包裹体:岩浆-热液过渡的信息. 岩石学报,27(5):1493-1499.
- 杨武斌,单强,赵振华,等,2011b.巴尔哲地区碱性花岗岩 的成岩和成矿作用:矿化和未矿化岩体的比较.吉林大 学学报(地球科学版),41(6):1689-1704.
- 杨雅军,杨晓平,江斌,等,2022.大兴安岭中生代火山岩地 层时空分布与蒙古一鄂霍茨克洋、古太平洋板块俯冲作 用响应.地学前缘,29(2):115-131.
- 张梅,2011.大兴安岭中南段铜多金属矿床成矿系统研究 (博士学位论文).北京:中国地质大学(北京).