

doi:10.3799/dqkx.2017.545

内蒙古朱日和地区早古生代岩浆岩年代学、 地球化学特征及其构造意义

钱筱嫣^{1,2}, 张志诚^{1,2*}, 陈彦^{1,2}, 于海飞^{1,2}, 罗志文^{1,2}, 杨金福^{1,2}

1.北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871

2.北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

摘要:中亚造山带早古生代的构造演化一直存在不同的认识,特别是其俯冲转为碰撞的时限。内蒙古朱日和南部的额尔登陶勒盖地区出露的早古生代岩浆岩,对于限定白乃庙岛弧的延伸方向、岛弧演化和拼贴时间具有重要意义。对额尔登地区出露的火山岩和侵入岩进行了精确的锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 定年、锆石 Lu-Hf 同位素和地球化学分析以确定其时代和成因。研究获得 4 个岩浆岩年龄,1 件英安岩年龄为 434.0 ± 4.4 Ma,2 件花岗岩年龄分别为 432.8 ± 2.6 Ma 和 428.1 ± 1.8 Ma,此 3 件样品形成于早中志留世;另有 1 件流纹岩年龄为 411.8 ± 1.0 Ma,形成于早泥盆世。早中志留世侵入岩为低钾、过铝质钙碱性中酸性岩石,富集 Rb、Th,弱富集 Zr、Hf,明显亏损 Nb、Ta、P、Ti。在稀土配分曲线上,侵入岩均不存在 Eu 的负异常。其中 2 件花岗岩样品的锆石基本为正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-1.19 \sim 11.51, 3.32 \sim 10.28$), T_{DM2} 为 $684 \sim 1493$ Ma 及 $759 \sim 1202$ Ma, 主要来自新生地壳;早中志留世火山岩具有中一低钾、偏铝质—过铝质、钙碱性酸性岩石特征,富集 Rb、Th,弱富集 Zr、Hf,明显亏损 Nb、Ta、P、Ti。在稀土配分曲线上,多数火山岩不存在 Eu 负异常。英安岩中的锆石具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($3.70 \sim 7.94$), T_{DM2} 为 $912 \sim 1183$ Ma, 主要来自新生地壳;而早泥盆世流纹岩 (411 Ma) 存在明显的 Eu 负异常,其锆石具有负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-14.95 \sim -7.07$), T_{DM2} 为 $1.8 \sim 2.3$ Ga, 应为古老地壳再循环的产物,与早中志留世岩浆岩源区明显不同,可能代表构造环境的转变。综合区域地质和前人研究资料表明,早志留世英安岩和花岗岩形成于俯冲岛弧环境,白乃庙岛弧向东可延伸至本区,而早泥盆世流纹岩可能形成于后碰撞环境。

关键词:内蒙古;额尔登陶勒盖;白乃庙;年代学;地球化学;Hf 同位素。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2017)09-1472-23

收稿日期: 2016-12-28

Geochronology and Geochemistry of Early Paleozoic Igneous Rocks in Zhurihe Area, Inner Mongolia and Their Tectonic Significance

Qian Xiaoyan^{1,2}, Zhang Zhicheng^{1,2*}, Chen Yan^{1,2}, Yu Haifei^{1,2}, Luo Zhiwen^{1,2}, Yang Jinfu^{1,2}

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: There are some existing debates about the tectonic history of the Central Asian Orogenic Belt, including the time of collision. New zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb isotopic data, zircon Lu-Hf isotopic data and geochemical data of the volcanic rocks and plutons from the Eerdengtaolegai area are presented to study their formation ages and petrogenesis. Zircon U-Pb ages of 432.8 ± 2.6 Ma, 428.1 ± 1.8 Ma of Silurian granites, 434.0 ± 4.4 Ma of Silurian dacite, 411.8 ± 1.0 Ma of the Devonian rhyolite were obtained. The Silurian plutons are mostly intermediate-acid rocks, and are geochemically low in K contents, peraluminous, and calc-alkaline with enrichment in Rb and Th and depletion in Nb, Ta, P and Ti. They do not have negative Eu anomalies. Two granites from these plutonic rocks have positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-1.19 to 11.51 and 3.32 to 10.28) with T_{MD2} of $684 \sim 1493$ Ma and $759 \sim 1202$ Ma, suggesting that the granites may come from a juvenile continental crust. Geochemically, the

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(No.2013CB429801);中国地质调查局地质大调查项目(No.1212010050503)。

作者简介:钱筱嫣(1992—),女,硕士研究生,主要从事区域大地构造研究。ORCID:0000-0003-3986-2831.E-mail:qxy33033@163.com

* 通讯作者:张志诚,ORCID:0000-0001-6420-2136.E-mail:zczzhang@pku.edu.cn

引用格式:钱筱嫣,张志诚,陈彦,等,2017.内蒙古朱日和地区早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及其构造意义.地球科学,42(9):1472—1494.

Silurian volcanic rocks, all acid rocks, are low to moderate in K content, metaluminous-peraluminous and calc-alkaline with enrichment in Rb, Th and depletion in Nb, Ta, P and Ti. In addition, they do not have negative Eu anomalies. One Silurian dacite has positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value (3.70–7.94) with T_{MD2} of 912–1183 Ma, suggesting that the rocks may come from the juvenile continental crust. The Devonian rhyolite have clear negative Eu anomalies, exhibiting negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (−14.95 to −7.07) with Hf model ages (T_{MD2}) of 1.8–2.3 Ga, indicating considerable contribution of reworked materials from the ancient crust of the North China Craton. Based on our new data and previous studies, the Silurian granites and dacite were likely formed in an arc environment and the Devonian rhyolite developed in a post-collisional environment.

Key words: Inner Mongolia; Eerdengtaolegai; Bainaimiao; geochronology; geochemistry; Hf isotope.

0 引言

中亚造山带位于西伯利亚克拉通以南和华北、塔里木克拉通以北,是世界上显生宙以来地壳生长最显著、规模最大的增生型造山带(Jahn *et al.*, 2004, 2009; Kröner *et al.*, 2007; Rojas-Agramonte *et al.*, 2011; 王树庆等, 2016; Yang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017).中亚造山带内含有蛇绿岩带、岩浆弧、洋岛、海山、大洋高原和前寒武纪微陆块,各微陆块之间经历了复杂的复合对接、叠加的“软碰撞”、“弱造山”的演化,最终形成多块体拼贴增生的复杂构造格局(Xiao *et al.*, 2003, 2009; 李文博, 2007, 2008; 刘金龙等, 2016)。

在中亚造山带东南部地区,索伦缝合带标志华北板块和南蒙古复合地体之间的古亚洲洋最后闭合的位置(Xiao *et al.*, 2003).在空间上以索伦缝合带为界,可分为两条近东西向的南造山带(SOB)和北造山带(NOB)(图1),代表古亚洲洋双向俯冲增生(Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008, 2016; Xu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013).南造山带是中亚造山带与华北克拉通的对接区,关于其俯冲极性、延伸方向和俯冲拼贴过程,前人做了大量研究,但也存在很多争议。1984年,河北地质学院在南造山带典型地区温都尔庙和白乃庙地区建立了一套由北向南的海沟—岛弧—弧后盆地体系(Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014),并认为古亚洲洋在该处由北向南俯冲,得到了后续很多研究的支持(刘敦一等, 2003; Xiao *et al.*, 2003; Jian *et al.*, 2008; 李建锋等, 2010; Xu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013).而有些学者根据华北北缘的被动陆缘沉积,提出俯冲极性是向北的(Zhang *et al.*, 2014).关于白乃庙岛弧的延伸方向,很多学者将图古日格、达茂旗北部巴特敖包、白乃庙、图林凯、正镶白旗、敖汉旗、吉中、延吉连为一线,认为白乃庙岛弧是一条约1800 km的长链岛弧,但是一些地区缺乏

相关岛弧岩体的报道,因此其延伸证据略显不足.特别是在白乃庙以东地区早古生代侵入岩研究较少,也缺乏同时代火山岩的研究,需要精确厘定白乃庙以东的岩浆岩延伸范围.关于白乃庙岛弧与华北克拉通的拼贴时限,之前一些学者认为碰撞发生在440 Ma左右(李建锋等, 2010; Xu *et al.*, 2013),现在很多研究表明碰撞发生在411 Ma左右(Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013),并发现白乃庙岛弧可能存在前寒武纪基底.因此,南造山带与俯冲相关的早古生代岩浆岩的分布范围、岩石类型、成岩机制及构造背景还需要进一步的研究.

在内蒙古朱日和南部的额尔登陶勒盖地区,由于缺乏古生物和同位素年龄的证据,很多地层单元时代并没有很好地厘定,岩浆岩时限判别也存在一定误差,影响了对该区的区域地质演化的认识.例如,先前一些被认为是上石炭统阿木山组的地层和华力西期的岩浆岩(内蒙古自治区区域地质测量队, 1975, 白乃庙幅1:20万区域地质调查报告),可能形成于早古生代(据本文研究).近年来,由于修建道路开挖了采石场,形成了很多新的露头,使得笔者有机会对一些地质问题展开深入研究.额尔登地区原石炭系阿木山组(C_3a)地层处新揭露出来一套火山岩—火山碎屑岩,而谷讨勒铜矿(别鲁乌图西矿)附近原华力西晚期石英闪长岩实为一套酸性侵入岩.本文对该套火山岩和侵入岩进行系统采样,在野外工作和岩相学分析的基础上,对火山岩、侵入岩进行全岩主量元素及微量元素分析,并挑选部分样品进行精确锆石SHRIMP U-Pb和LA-ICP-MS U-Pb定年以及锆石Hf同位素分析,系统研究该地区这套火山岩和侵入岩的成因及构造环境.本研究提供了内蒙古中部朱日和地区古亚洲洋壳早古生代俯冲碰撞事件的地质年代学、岩石成因方面的制约,进一步扩大了白乃庙岛弧的延伸范围,为寻找白乃庙型铜金矿床提供了理论基础.

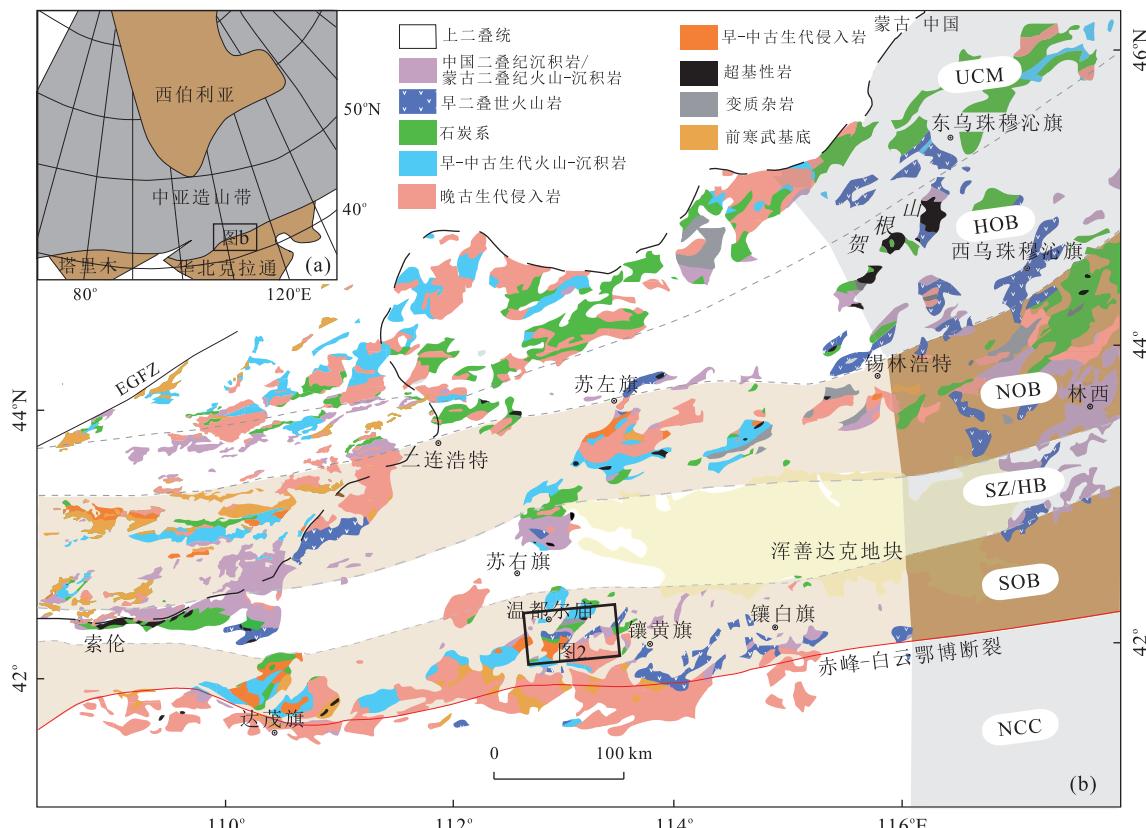


图 1 中亚造山带中国北部—内蒙部分的构造格架(a)和中国北部—蒙古地区构造示意(b)

Fig.1 Tectonic framework of the North China-Mongolian segment of the Central Asian Orogenic Belt (a) and geological sketch of the North China-Mongolia area (b)

图 a 据 Jahn(2004), Zhang *et al.*(2015), Chen *et al.*(2016a); 图 b 据 Chen *et al.*(2016a, 2016b). EGFZ. 东戈壁断裂带; UCM. 乌里雅斯太大陆边缘带; HOB. 二连—贺根山蛇绿岩带; NOB. 北造山带; SZ. 索伦带缝合带, HB. 浑善达克地块; SOB. 南造山带; NCC. 华北克拉通

1 区域地质背景

研究区额尔登地区位于白乃庙铜矿北东部, 朱日和镇南侧。该区位于中亚造山带东段南缘、白乃庙岩浆弧带东部。自北向南岩石单元为早古生代温都尔庙俯冲增生杂岩、早古生代图林凯蛇绿岩带、早古生代白乃庙火山岩和侵入岩、中志留统徐尼乌苏组、上志留统西别河组、中晚二叠世侵入岩(图 2)。

早古生代白乃庙火山岩包括拉斑玄武岩、碱性玄武岩、英安岩、流纹岩, 火山岩的组合(玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩)与岩浆弧相符(Xiao *et al.*, 2003)。早古生代白乃庙侵入岩主要岩石类型有闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、角闪石辉长岩及花岗闪长岩(Xiao *et al.*, 2003; 张维和简平, 2008; 谷丛楠, 2012)。研究区火山岩及侵入岩广泛发育并可分为两期: 早古生代火山岩锆石 U-Pb 年龄为 436~474 Ma(聂凤军等, 1995; 谷丛楠, 2012; Zhang *et al.*, 2013; 柳长峰等, 2014; Li *et al.*, 2015), 早古

生代侵入岩锆石 U-Pb 年龄为 421~454 Ma(童英等, 2010; Hao and Hou, 2012; Zhang *et al.*, 2014; 白新会等, 2015), 指示早古生代岩浆活动主要集中在奥陶纪到志留纪; 晚古生代花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 265.1 ± 1.5 Ma(蒋孝君等, 2013) 及 271 ± 3 Ma(鲁颖淮等, 2009), 指示晚古生代岩浆活动主要集中在早、中二叠世。

早古生代温都尔庙俯冲增生杂岩出露于研究区北部, 从岩性组合上可分为两组, 下部桑达来呼都格组以变质玄武岩为主, 变质程度为绿片岩相; 上部为哈尔哈达组, 由绿泥绢云石英片岩、细晶石英岩、含铁石英岩组成, 温都尔庙铁矿产于哈尔哈达组。温都尔庙群为包含大洋洋洋壳、洋内弧的增生杂岩, 形成于寒武纪—中志留世(刘敦一等, 2003; Jian *et al.*, 2008; 李承东等, 2012)。白乃庙群被认为是中元古或奥陶纪—志留纪的产物, 主要为绿片岩相变质火山—沉积岩序列, 从底部到顶部大致可分为 3 个岩性段。下段以碎屑岩、粉砂岩、砂岩为主; 中段以中基

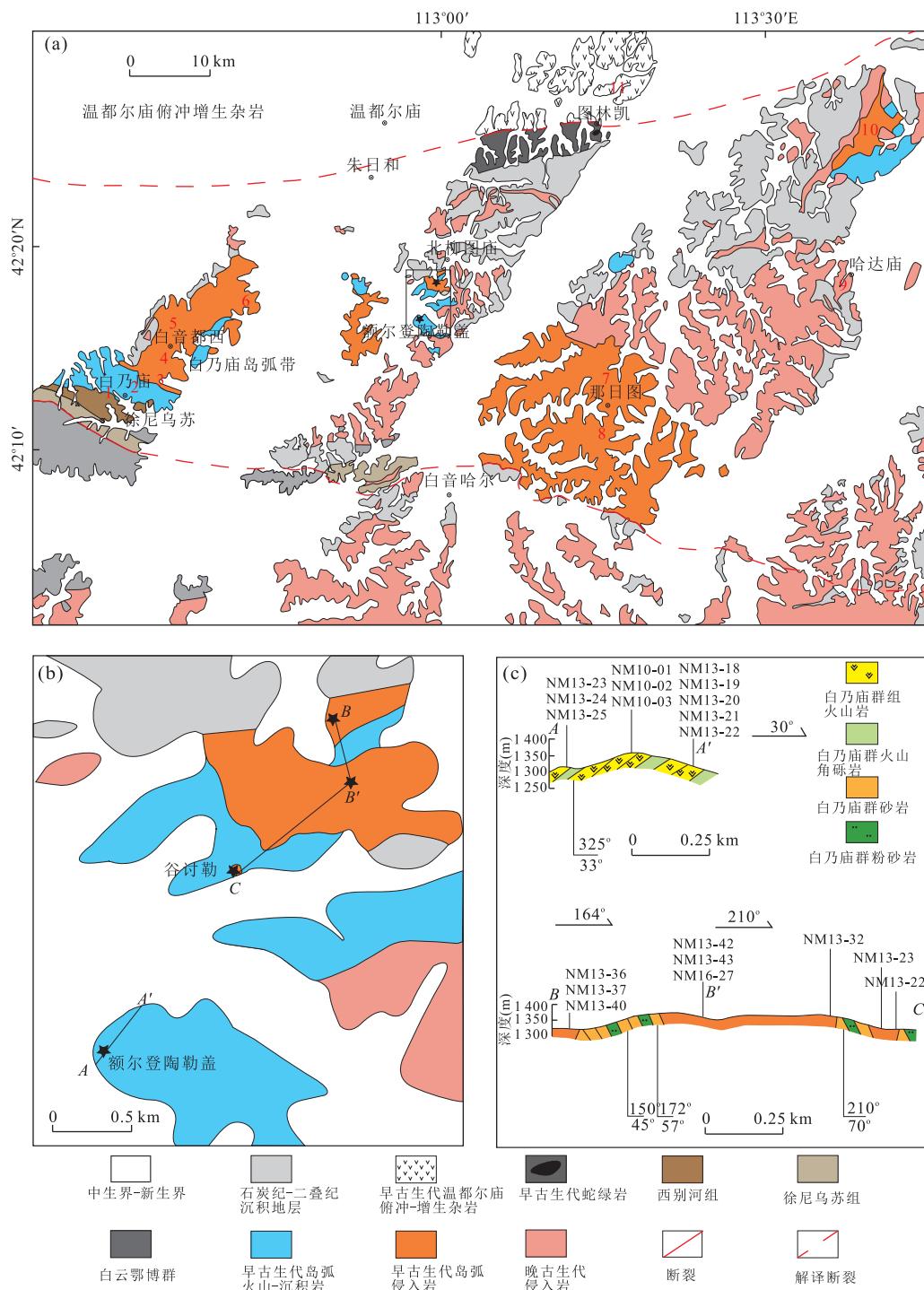


图2 额尔登及邻区地质简图(a)、额尔登详细采样点位置(b)以及额尔登地区剖面图(c)

Fig.2 Geological sketch of the Eerdeng and adjacent areas (a), detailed locations of the Eerdeng area (b) and geological section of the Eerdeng area (c)

图a据Luo et al.(2016)修改,图a中的数字“1,2,...10,11”为年龄数据位置。1.玄武岩 474 ± 7 Ma,英安岩 453 ± 7 Ma,英安岩 436 ± 9 Ma,SHRIMP(据Zhang et al.,2013).变质火山岩 449 ± 3 Ma,LA-ICP-MS(据柳长峰等,2014);2.变质安山岩 450 ± 4 Ma,LA-ICP-MS(据谷丛等,2012);3.石英闪长岩 430 ± 3 Ma,LA-ICP-MS(据Zhang et al.,2014);4.英云闪长岩 421 ± 2 Ma,英云闪长岩 439 ± 5 Ma,LA-ICP-MS(据Zhang et al.,2014);5.片麻状石英闪长岩 454 ± 14 Ma,片麻状石英闪长岩 459 ± 3 Ma,SHRIMP(据童英等,2010);6.英云闪长岩 439 ± 3 Ma,英云闪长岩 432 ± 5 Ma,LA-ICP-MS(据Zhang et al.,2014);7.英云闪长岩 442 ± 2 Ma,SHRIMP(据白新会等,2015);8.石英闪长岩 432 ± 2 Ma,SHRIMP(据白新会等,2015);9.花岗斑岩 271.8 ± 3.3 Ma,LA-ICP-MS(据鲁颖淮等,2009);10.花岗闪长岩 445.6 ± 2.7 Ma,LA-ICP-MS(据Hao and Hou,2012);11.英安岩 458 ± 3 Ma,SHRIMP(据Jian et al.2008)

性火山碎屑岩为主,中下部夹变质砂岩、石英片岩。上段以火山岩为主,夹灰岩和变质砂岩,灰岩呈透镜状出现,变质岩为绢云母泥质粉砂千枚岩、绿片岩等,该段是含铜矿化段。中志留统徐尼乌苏组出露于研究区中部和西部,与下伏白乃庙群为不整合接触,岩性为结晶灰岩、长石石英砂岩、变凝灰岩、变安山岩、千枚岩,顶板结晶灰岩中发育床板珊瑚,具有发育的韵律结构和复理石建造的特征(柳长峰等,2014)。晚志留统末期—早泥盆统早期西别河组出露于研究区西部,是一套粗砂砾岩、杂砂岩夹泥灰岩,富含珊瑚、双壳、苔藓虫、有孔虫等志留纪化石的磨拉石沉积。西别河组不整合覆盖在早古生火山岩、侵入岩和徐尼乌苏组之上(张允平等,2010)。

2 样品描述

在额尔登陶勒盖地区采集 12 件火山岩样品,在谷讨勒地区采集 5 件侵入岩样品,采样点 GPS 位置见表 1。在额尔登地区采石场出露有火山岩—火山角砾岩互层,系统采集的 12 件火山岩样品,9 件为英安岩,2 件粗面岩,1 件流纹岩。英安岩(图 3c,3d)为斑状结构,基质隐晶质结构。斑晶为半自形斜长石(55%)、碱性长石(15%)和石英(30%),基质主要为斜长石和石英,部分斜长石发生绢云母化、绿帘石化,同时存在磷灰石、磁铁矿等副矿物。流纹岩(图 3e)为斑状结构,斑晶为石英(35%)和碱性长石(65%),存在略微定向,基质为(隐晶质)微晶质的长石石英,长石存在绢云母化。粗面岩(图 3f)为斑状结构,斑晶为碱性长石(80%)和斜长石(20%),基质主要为长石和石英,长石存在绿帘石化,部分碱性长石表现为球粒结构。

在谷讨勒地区出露有中酸性侵入岩,侵入原石

表 1 本文采样点 GPS 采样点坐标

Table 1 The GPS data of the samples

样品号	北纬	东经
NM10-01~03	42°16'25.7"	112°58'12.0"
NM13-18~22	42°16'24.6"	112°58'16.9"
NM13-23~25	42°16'19.3"	112°58'04.8"
NM13-33	42°17'33.5"	112°59'15.9"
NM13-36	42°18'17.6"	113°0'0.6"
NM13-37	42°18'13.6"	113°0'5.8"
NM13-40	42°18'13.3"	113°0'6.4"
NM13-42~43	42°17'59.2"	113°0'15.4"

炭系上统阿木山组(C_3a)地层,系统采集 5 件侵入岩样品,分别为 4 件花岗岩和 1 件花岗闪长岩。花岗岩(图 3g)为等粒结构,主要由斜长石(55%)、石英(30%)、碱性长石(15%)组成,副矿物为锆石、磷灰石,晚期经历了绿片岩相变质,石英动态重结晶,导致细粒化。花岗闪长岩(图 3h)为等粒结构,主要由斜长石(45%)、碱性长石(15%)、石英(30%)、角闪石(10%)组成,部分绿泥石化、绿帘石化,绢云母化,石英重结晶导致细粒化。

3 分析方法

3.1 锆石阴极发光图像(CL)和 U-Pb 同位素定年

挑选 3 个样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,分别为 NM13-20 流纹岩, NM13-40 花岗岩和 NM13-42 花岗岩。挑选 NM10-01 英安岩进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年。

锆石分选在河北省廊坊诚信地质技术服务公司完成,在原岩样品破碎后,采用磁法和重液分选。测试前在北京大学电子显微镜实验室,使用 FEI Quanta 200F 扫描电子显微镜进行锆石阴极发光(CL)照相。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析是在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室,应用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)进行 U-Pb 同位素测定。利用 COMPExPro 102 型 ArF 准分子激光剥蚀系统进行锆石剥蚀,以 He 作为载气,激光束直径为 $32 \mu\text{m}$,激光能量密度为 10 J/cm^2 ,频率为 5 Hz。年龄计算时以标准锆石 Plesovice (337 Ma) 为外标进行同位素比值校正,用标准锆石 91500 做监控盲样。同位素比值和元素含量的数据处理用 Glitter 4.4.2 软件,普通 Pb 校正使用 Andersen 2002 程序,加权平均年龄和协和的图绘制使用 ISOPLOT 程序。详细的分析步骤和数据处理方法参照文献(袁洪林等,2003)。

锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定是在中国地质科学院北京离子探针中心完成。采用标准锆石 SL13(591 Ma, Th/U≈0.088)标定所测锆石 U、Th 和 Pb 含量,标准锆石 TEMORA(417 Ma)进行元素间的分馏校正。数据处理、年龄计算和绘图使用 ISOPLOT 程序。详细流程和数据处理参照文献 Compston *et al.*(1992)、李可等(2014)、杨亚楠等(2014)和董增产等(2015)。

3.2 锆石 Hf 同位素测定

选取 NM10-01、NM13-20、NM13-40 及 NM13-42

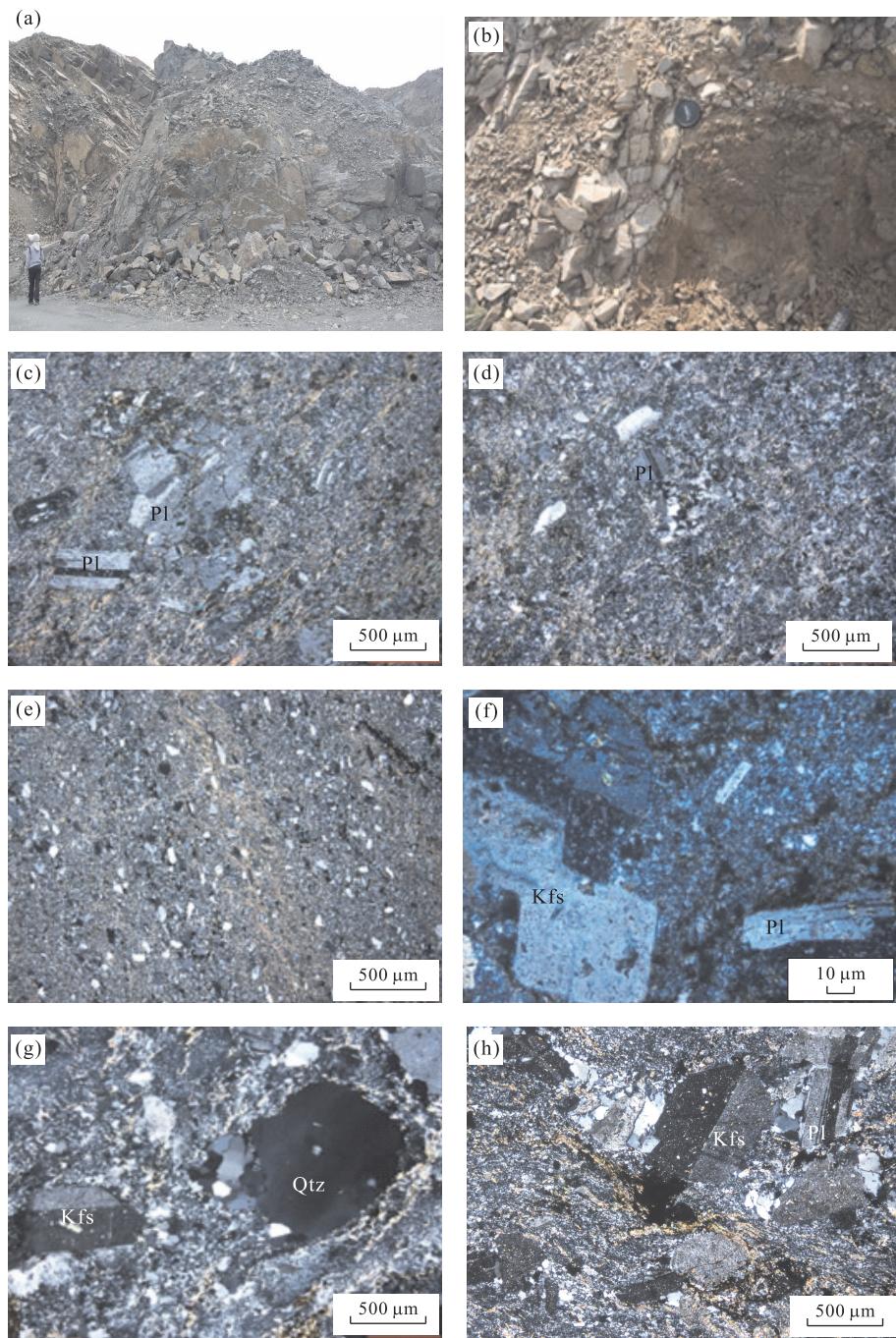


图3 额尔登陶勒盖地区火山岩及谷讨勒地区侵入岩野外特征照片及镜下特征照片

Fig.3 Field photographs and photomicrographs of igneous rocks at the Eerdeng and Taogule areas

a.额尔登地区英安岩;b.谷讨勒地区花岗岩;c.英安岩;d.英安岩;e.流纹岩;f.粗面岩;g.花岗岩;h.花岗闪长岩. Pl.斜长石; Kfs.碱性长石; Qtz.石英

四件样品进行锆石原位 Lu-Hf 同位素测定,分析测试在天津地质矿产研究所的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)上进行。具体测试过程和数据处理方法参照文献吴福元等(2007)和邓正宾(2015)。

3.3 地球化学分析

样品主量元素、微量元素及稀土元素在北京大学

造山带与地壳演化教育部重点实验室进行分析。主量元素采用碱熔法获得均质玻璃体,使用 X 光荧光光谱仪(XRF)进行测定,测量精度在 1% 之内。微量元素和稀土元素采用高压釜酸溶法,应用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定,微量元素和稀土元素的测试精度可达到 5%,Nb、Ta、Zr、Hf 的精度为 10%。详细的仪器配置和实验流程参照邓正宾(2015)。

4 测试结果

4.1 锆石年代学

4.1.1 NM13-40 花岗岩 样品中锆石晶面清晰, 晶体透明, 呈等粒状及短柱状, 锆石的长宽比为 1 : 1~1 : 2, 自形晶。锆石内部普遍发育环带结构(图 4a), 指示岩浆起源。

30 颗锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 2, 锆石 U 的含量为 $88 \times 10^{-6} \sim 689 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $49 \times 10^{-6} \sim 701 \times 10^{-6}$, Th/U 为 0.08~1.01, 大多数数据点大于 0.1, 为岩浆成因锆石(Claesson *et al.*, 2000)。离群的数据点 NM13-40-24(857 ± 8 Ma)可能为捕获锆石。除去谐和度较低的数据点 NM13-40-03(415 ± 13 Ma)、数据点 NM13-40-07(445 ± 7 Ma) 和数据点 NM13-40-28(411 ± 13 Ma), 剩余的 26 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 420 ~ 442 Ma, 均分布在谐和线上(图 5a), 计算获得加权平均年龄为 432.8 ± 2.6 Ma, 代表花岗岩侵位结晶年龄。

4.1.2 NM13-42 花岗岩 样品中锆石呈短柱状及长柱状, 锆石长宽比为 1 : 1~1 : 3, 自形程度较好。大多数锆石内部发育韵律环带, 部分锆石有较“宽”的韵律环带(图 4b), 可能因为岩浆结晶速度快。

30 颗锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 2, 锆石 U 的含量为 $227 \times 10^{-6} \sim 744 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $104 \times 10^{-6} \sim 551 \times 10^{-6}$, Th/U 为 0.44~0.90, 均大于 0.1, 为岩浆成因锆石(Claesson *et al.*, 2000)。除去两个偏离谐和线的数据点 NM13-42-11(439 ± 11 Ma) 和 NM13-42-08(423 ± 7 Ma), 剩余 28 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布为 419~438 Ma, 这些数据点集中分布在谐和线上(图 5b), 计算获得加权平均年龄为 428.1 ± 1.8 Ma, 代表花岗岩侵位结晶年龄。

4.1.3 NM10-01 英安岩 样品中锆石有完好的晶型结构, 呈短柱状及长柱状, 锆石的长宽比为 1 : 1.5~1 : 3, 自形晶。在 CL 图上有同心圆的韵律环带结构(图 4c), 表明为岩浆起源。少部分锆石有较“宽”



图 4 额尔登地区样品锆石阴极发光照片及测年点位

Fig.4 CL images and dating spots of zircons from samples in the Eerdeng area

a.花岗岩 NM13-40;b.花岗岩 NM13-42;c.英安岩样品 NM10-01;d.流纹岩 NM13-20

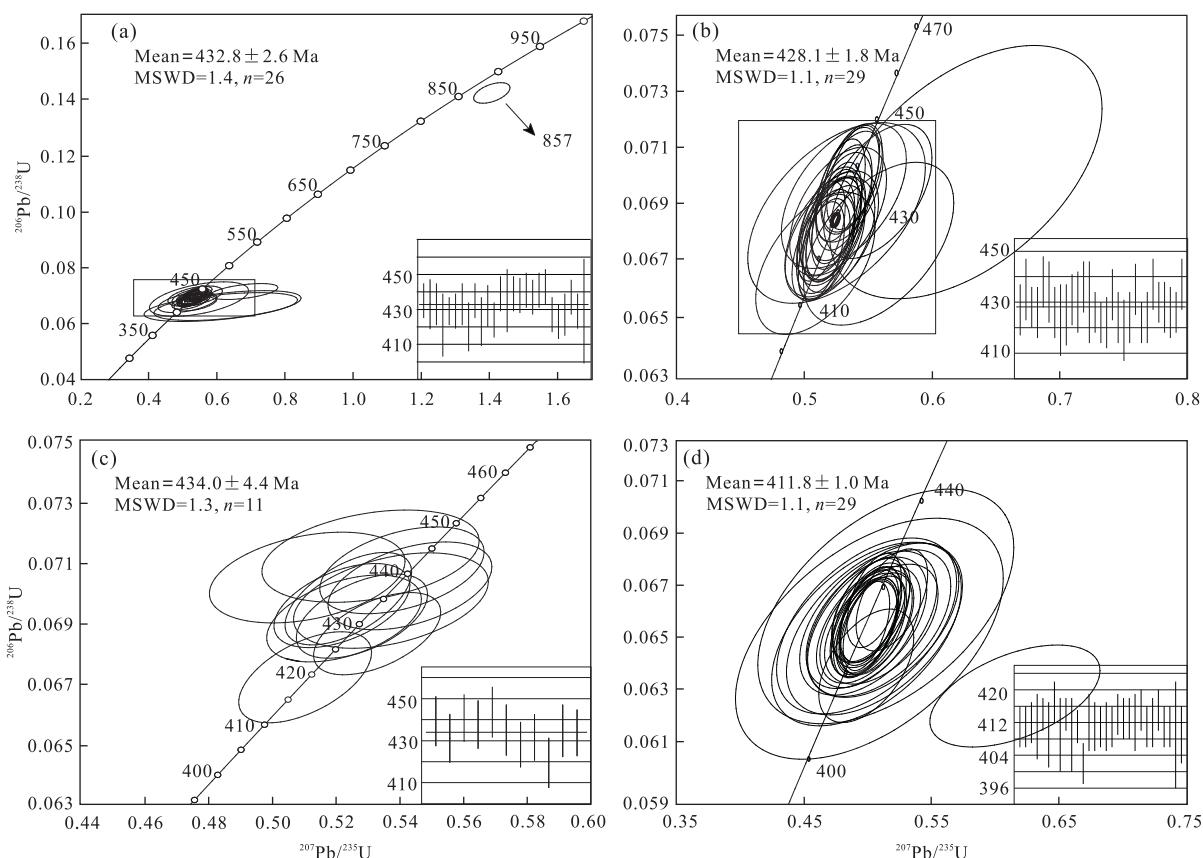


图5 钨石U-Pb年龄谱和图

Fig.5 Zircons U-Pb concordia diagram from samples in the Eerdeng area

a.花岗岩 NM13-40;b.花岗岩 NM13-42;c.英安岩样品 NM10-01;d.流纹岩 NM13-20

表3 额尔登地区英安岩(NM10-01)SHRIMP 钨石U-Pb同位素分析结果

Table 3 SHRIMP U-Pb data for zircons of the dacite (sample NM10-01) from the Eerdeng area

分析点号	$^{206}\text{Pb}/\text{U}$	Th	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	误差 (±%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	误差 (±%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	误差 (±%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	(Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	(1σ)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	(1σ)
	(%)	(10^{-6})	(10^{-6})	(10^{-6})	(10^{-6})		(10^{-6})		(10^{-6})		(10^{-6})					
NM10-01-1.1	0.40	391	244	0.64	23.8	0.0525	3.7	0.0705	1.4	0.51	4.0	439.3	5.9	309	84	
NM10-01-2.1	0.07	537	343	0.66	31.9	0.0548	2.7	0.0692	1.4	0.52	3.1	431.1	5.7	403	61	
NM10-01-3.1	0.19	572	347	0.63	34.8	0.0554	2.9	0.0708	1.3	0.54	3.1	440.7	5.7	429	64	
NM10-01-4.1	0.21	477	400	0.87	28.8	0.0561	2.8	0.0702	1.4	0.54	3.1	437.6	5.7	456	62	
NM10-01-5.1	0.49	374	155	0.43	23.0	0.0541	4.0	0.0712	1.4	0.53	4.2	443.5	6.0	373	90	
NM10-01-6.1	0.09	643	445	0.71	38.6	0.0544	2.0	0.0698	1.4	0.52	2.5	435.1	6.1	388	46	
NM10-01-7.1	0.13	662	582	0.91	39.1	0.0563	2.1	0.0687	1.3	0.53	2.5	428.1	5.4	463	47	
NM10-01-8.1	0.19	752	518	0.71	44.8	0.0553	2.2	0.0692	1.3	0.53	2.6	431.6	5.5	425	49	
NM10-01-9.1	0.13	620	517	0.86	35.9	0.0550	2.3	0.0672	1.5	0.51	2.7	419.4	6.0	414	50	
NM10-01-10.1	0.29	666	522	0.81	40.0	0.0558	3.4	0.0698	1.5	0.54	3.8	434.7	6.2	446	77	
NM10-01-11.1	0.21	623	536	0.89	37.3	0.0544	2.4	0.0696	1.3	0.52	2.7	433.7	5.5	387	53	

注:误差为 1σ ;Pbc和Pb*分别代表普通铅和放射成因铅;假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄结合校正普通铅。

的韵律环带,有可能是因为岩浆结晶速度快,锆石生长比较快。

11颗锆石的离子探针测试结果见表3,锆石U的含量为 $374 \times 10^{-6} \sim 752 \times 10^{-6}$ 、Th含量为 $155 \times 10^{-6} \sim 582 \times 10^{-6}$,Th/U为0.43~0.91,都大于0.1,为岩浆成因锆石(Claesson *et al.*, 2000).11颗锆石

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为419.4~443.5 Ma,年龄测定值很稳定,集中分布在谐和线上(图5c),加权平均年龄为434.0±4.4 Ma。

4.1.4 NM13-20 流纹岩

样品中锆石组成均匀,晶棱、晶面清晰,呈椭圆粒状或者短柱状,锆石的长宽比为1:1.5~1:2,自形晶。在CL图上有清晰的同

T_{DM1} 为 648~935 Ma, T_{DM2} 为 759~1 202 Ma。英安岩 NM10-01 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 628~0.282 748, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 3.70~7.94, T_{DM1} 为 748~924 Ma, T_{DM2} 为 912~1 183 Ma; 流纹岩 NM13-20 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 106~0.282 325, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -14.95~-7.07, T_{DM1} 为 1 315~1 641 Ma, T_{DM2} 为 1 848~2 344 Ma。

4.3 岩石地球化学结果

早古生代火山岩样品及侵入岩样品的全岩地球化学分析结果见表 5。据年龄分析结果,可将早古生代岩浆岩分为早中志留世侵入岩、火山岩,早泥盆世火山岩。

早中志留世侵入岩的 SiO_2 变化较小 (71.31%~77.64%), 均为酸性侵入岩。 K_2O 含量较低 (0.85%~1.93%), Na_2O 含量中等 (2.09%~4.85%), CaO 含量为 0.20%~2.26%, Fe_2O_3^T 含量

为 1.4%~3.0%, MgO 含量较低 (0.51%~1.25%), TiO_2 含量为 0.19%~0.33%, Sr 含量低, Yb 含量高。在 TAS 图解中 (图 6a), 4 件样品投在花岗岩区, 1 件样品投在花岗闪长岩区, 均为亚碱性, 定为早中志留世花岗岩类。里特曼指数 σ 为 0.37~0.98, 均为钙性 (图 6c)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (图 6b) 中, 主要为低 K 钙碱系列, A/CNK 为 1.41~2.73, 为强过铝质 (图 6d)。在 REE 元素标准化模式图上 (图 7a), 显示较弱的 Eu 负异常, δEu 为 0.82~0.96, 表现出 LREE 富集, 为右倾斜曲线 ($\text{La}_N/\text{Yb}_N = 7.39~9.38$), 且轻稀土分馏程度高于重稀土 ($\text{La}_N/\text{Sm}_N = 4.72~5.86$, $\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 1.05~1.21$)。在原始地幔标准化微量元素模式图上 (图 7b), 有一致的演化趋势, 富集 Rb 、 Th , 弱富集 Zr 、 Hf , 明显亏损 Nb 、 Ta 、 P 、 Ti , 轻微亏损 Sr 、 K 。

早中志留世火山岩的 SiO_2 含量变化较大, 为

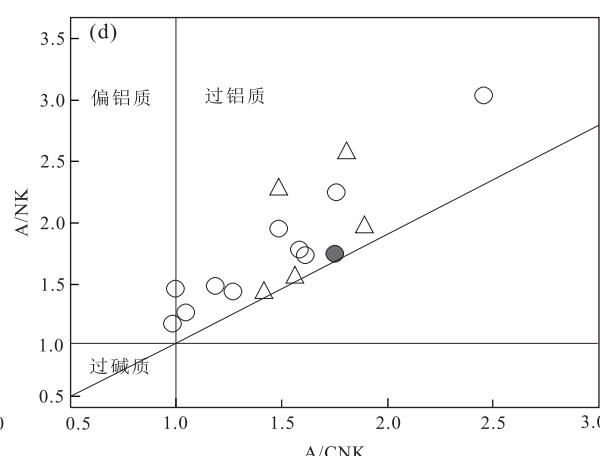
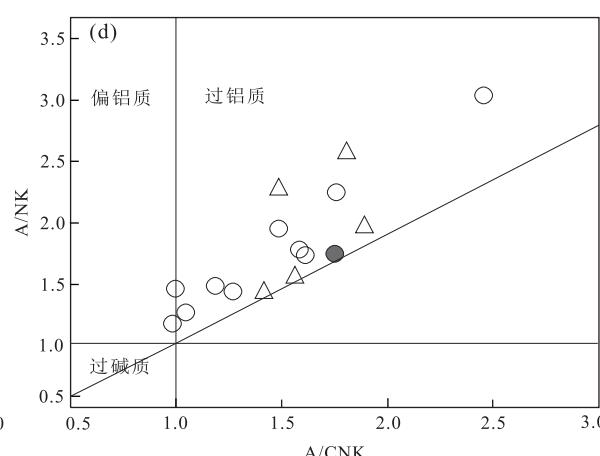
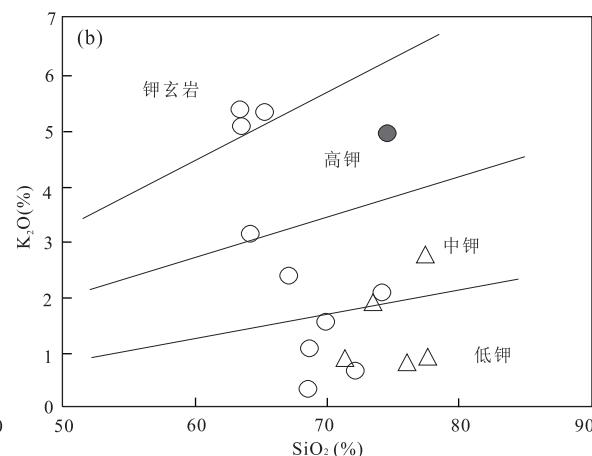
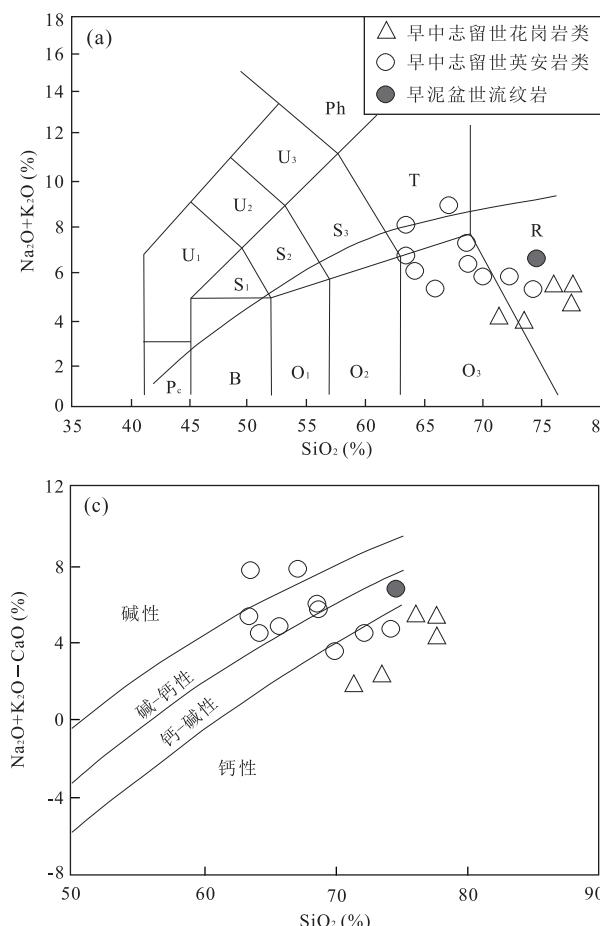


图 6 额尔登陶勒盖和谷讨勒地区岩浆岩的 TAS 图解 (a), $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (b), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 图解 (c) 和 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解 (d)

Fig.6 TAS diagram (a), $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (b), $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ diagram (c) and $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ diagram (d) of igneous rocks in the Eerdengtaolegai and Gutaole areas

图 a 据 MacDonald and Katsura(1964)和 Le Maitre(2002); 图 b 据 Peccerillo and Taylor(1976); 图 c 据 Frost(2001); 图 d 据 Maniar and Piccoli(1989)

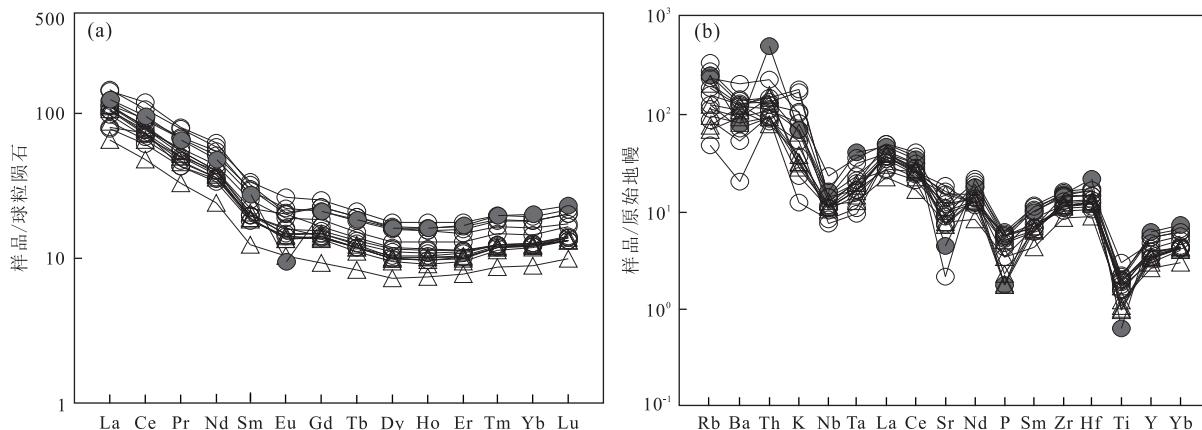


图 7 额尔登陶勒盖和谷讨勒地区岩浆岩的稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) of igneous rocks in the Erdengtaolegai and Gutaole areas

球粒陨石 REE 数据、原始地幔数据 Sun and McDougn(1989), 图例同图 6

63.37%~74.17%, 均属于酸性火山岩。除了两件样品(5.09%~5.40%)外, 剩余火山岩 K_2O 含量集中于(0.38%~3.16%). Na_2O 含量变化较大(0.63%~7.17%), CaO 含量为 0.31%~1.77%, $Fe_2O_3^{T}$ 含量为 2.06%~5.46%, MgO 含量为 0.86%~2.33%, TiO_2 含量为 0.31%~0.62%, Sr 含量低, Yb 含量高。根据 TAS 图解(图 6a), 结合野外及镜下观察, 1 件样品定为粗面岩, 剩余 9 件样品定为英安岩, 多数为亚碱性, 定为早中志留世英安岩。其里特曼指数 σ 为 0.9~3.5, 主要为钙碱性(图 6c). 在 K_2O - SiO_2 图解(图 6b)中, 主要为中一低 K 钙碱系列, 1 件粗面岩和 1 件英安岩样品落入钾玄岩系列范围。 A/CNK 为 0.97~2.82, 为偏铝质到过铝质(图 6d). 在 REE 元素标准化配分图上(图 7a), 数据略有离散, 总体显示较弱的 Eu 负异常, δEu 为 0.76~1.05, LREE 富集, 为右倾斜曲线($La_N/Yb_N = 6.03 \sim 9.26$), 轻稀土分馏程度高于重稀土($La_N/Sm_N = 3.87 \sim 5.63$, $Gd_N/Yb_N = 1.08 \sim 1.41$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b), 有一致的演化趋势, 富集 Rb、Th, 弱富集 Zr、Hf, 明显亏损 Nb、Ta、P、Ti, 轻微亏损 K。

早泥盆世火山岩的 SiO_2 含量为 75.14%, K_2O 含量为 2.07%, Na_2O 含量为 1.94%, CaO 含量为 0.04%, $Fe_2O_3^{T}$ 含量为 1.53%, MgO 含量为 0.81%, TiO_2 含量为 0.12%, Sr 含量低, Yb 含量高。根据 TAS 图解中(图 6a), 结合野外及镜下观察, 仅有 NM13-20 定为流纹岩。里特曼指数 σ 为 0.5, 为钙性(图 6c). 在 K_2O - SiO_2 图解(图 6b)中, 为中 K 系列。 A/CNK 为 2.98, 为强过铝质(图 6d). 在 REE 元

素标准化配分图上(图 7a), 流纹岩(NM13-20)显示出明显的 Eu 负异常, δEu 为 0.39, 显示出 LREE 富集, 为右倾斜曲线($La_N/Yb_N = 6.31$), 轻稀土分馏程度高于重稀土($La_N/Sm_N = 4.60$, $Gd_N/Yb_N = 1.05$)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7b), 与早中志留世火山岩有一致的演化趋势, 更加富集 Th.

5 讨论

5.1 年龄框架

内蒙古自治区地质区域地质测量队根据野外相互关系特征, 将朱日和南部额尔登地区地质体划分为石炭系上统阿木山组(C_3a)变质长石石英砂岩夹硬砂岩地层, 谷讨勒地区出露华力西晚期($\delta\mu_4^{3(4)}$)的石英闪长岩, 华力西晚期的侵入岩侵入石炭系阿木山组地层(内蒙古自治区地质区域地质测量队, 1975, 白乃庙幅 1:20 万区域地质调查报告)。本文通过野外调查和锆石 U-Pb 测年确定侵入岩为早古生代侵入岩, 并非前人认为的华力西晚期的侵入岩, 那么相应地层的沉积年龄也需要精确厘定, 本课题组也做了初步的野外研究, 根据未发表的碎屑岩中最年轻的锆石年龄, 认为这套地层应该属于早古生界白乃庙群。本文获得 NM13-40 花岗岩 432.8 ± 2.6 Ma, NM10-42 花岗岩 428.2 ± 1.8 Ma, NM10-01 英安岩 434.0 ± 4.4 Ma, NM13-20 流纹岩 411.8 ± 1.0 Ma 的锆石结晶年龄, 均为早志留到早泥盆纪岩浆活动的产物。

前人在研究区西部白乃庙地区和研究区东部地

区获得多期早古生代岩浆岩的年龄。巴特敖包地区、图林凯地区和白乃庙北部地区出露一套晚寒武纪—中奥陶世岩浆岩,侵入岩岩性为辉长岩—石英闪长岩—花岗岩,火山岩有玄武岩—流纹岩,年龄分布于500~467 Ma(刘敦一等,2003; Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013; 王兴安, 2014)。前人在巴特敖包地区、图林凯以北、白乃庙地区、太古生庙地区获得大量晚奥陶世—中志留世岩浆岩(459~422 Ma),既有火山岩(安山岩—英安岩)又有侵入岩(闪长岩—英云闪长岩—石英闪长岩—二长花岗岩—奥长花岗岩)(刘敦一等,2003; Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013, 2014; 柳长峰等, 2014; 白新会等, 2015)。Zhang *et al.*(2013)在白乃庙地区,测得弱变形的闪长—花岗闪长岩侵入体年龄为419 Ma,指示区域碰撞事件,测得未变形伟晶岩岩墙年龄(411 Ma),指示了碰撞事件的结束。

本次研究中测得的年龄均可与这些年龄配套,可能指示了早古生代的一期构造热事件。根据本文最新的研究数据,结合前人研究,白乃庙地区早古生代岩浆作用时间为474~411 Ma,持续63 Ma,其中450~430 Ma为岩浆作用的高峰期(Zhang *et al.*, 2014)。

5.2 岩石成因

薄片研究表明,大部分岩石样品新鲜,蚀变程度比较低($LOI < 3.7\%$,主要集中在1.12~2.77),火山岩及侵入岩的地球化学分析可用于指示原始岩浆特征。研究区中,早中志留世花岗岩类及英安岩在REE配分曲线及蛛网图中基本平行,暗示可能具有相似的岩浆源;早泥盆世流纹岩在REE图解中有明显的Eu负异常,可能与斜长石的分离结晶有关。球粒陨石标准化图解中,所有样品均显示LREE富

集,MREE在Dy处略有下降,HREE平坦,说明存在在角闪石的分离结晶。结合低Sr高Yb的特点,有弱的负Eu异常,贫Sr富Yb最可能的解释是源区缺少石榴子石,富斜长石,残留相组合为角闪石+斜长石,同时在相图中处于低压位置(张旗等,2008)。

在 $(La/Yb)_N - \delta Eu$ 变异图解(李兆鼐等,2003)中(图8a),早中志留世花岗岩类和英安岩落在壳幔型酸性岩或者壳幔型酸性岩分界线附近,为壳幔型成因;早泥盆世流纹岩落于壳型酸性岩中,为地壳重熔型成因。早中志留世花岗岩类和英安岩的 $Mg^{\#}$ 为0.36~0.64,明显大于在同等硅含量的条件下玄武岩熔融实验熔体的 $Mg^{\#}$ (小于0.4)(图8b),说明早中志留世花岗岩类和英安岩不是完全的壳源熔体,较高的 $Mg^{\#}$ 指示为壳幔岩浆混合模式。

早中志留世花岗岩类和英安岩样品的 $(Nb/U)_N$ 比值为0.04~0.07,小于1,而 Th/Nb 的比值(0.76~1.47)和 Th/Ta 的比值(8.38~34.16)较高,指示岩浆来自于受俯冲流体影响的地幔源区(Pearce and Peate, 1995; Elliott *et al.*, 1997)。早中志留世花岗岩类和英安岩样品 SiO_2 含量较高,直接由幔源岩浆分离结晶形成的可能较小(张旗等,2008)。本研究测得的早中志留世花岗岩类和英安岩的 La/Nb 为2.7~3.41,明显高于原始地幔 La/Nb 值(0.96)(Sun and McDonough, 1989),同时早中志留世花岗岩类及英安岩具有明显的Nb、Ta的负异常,反映其形成过程中地壳物质的贡献较大。

锆石Lu-Hf同位素结果显示,早中志留世花岗岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为-1.19~11.51及3.32~10.28,对应二阶模式年龄为684~1493 Ma及759~1202 Ma,早中志留世英安岩的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为3.70~7.94,对应二阶

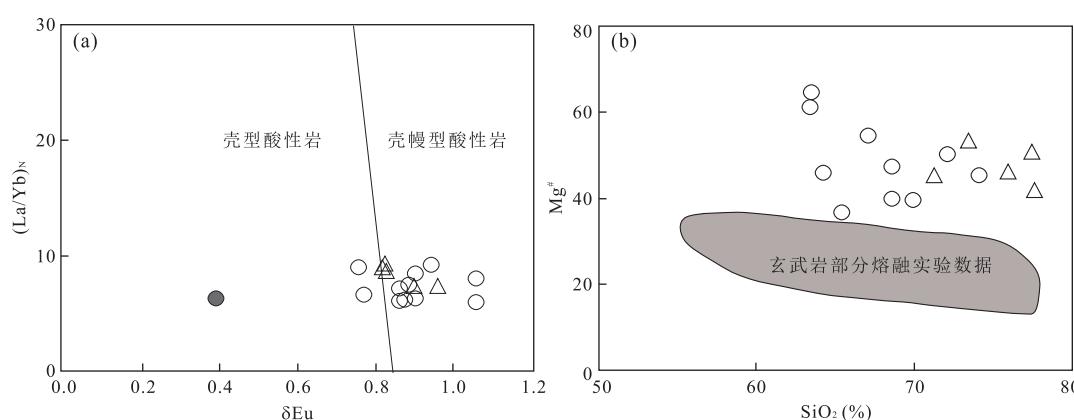


图8 额尔登地区岩浆岩 $(La/Yb)_N - \delta Eu$ 图解(a)和 $Mg^{\#} - SiO_2$ 图解(b)

Fig.8 $(La/Yb)_N - \delta Eu$ (a) and $Mg^{\#} - SiO_2$ (b) diagrams of igneous rocks from the Eerdeng area

图a据李兆鼐(2003);图b据马旭(2012),阴影部分数据据Rapp and Watson(1995),图例同图6

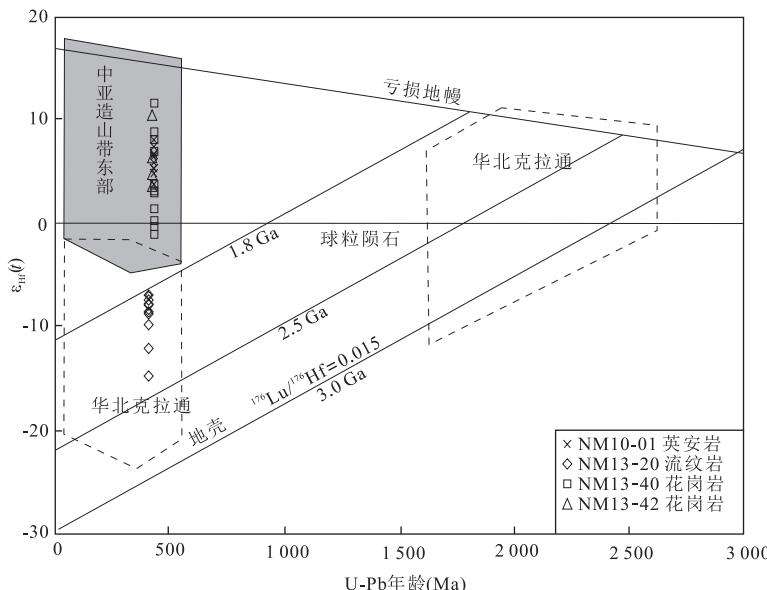
图 9 额尔登地区岩浆岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解

Fig.9 Diagram of zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vs. U-Pb ages for the Early Paleozoic igneous rocks from the Eerdeng area
中亚造山带东部和华北克拉通数据据 Yang et al. (2006)

模式年龄为 912~1183 Ma, 显示出弱富集至弱亏损的特征(图 9), 与兴蒙造山带东段花岗岩类具有的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相近 (Yang et al., 2006), 指示早中志留世花岗岩和英安岩起源于新生地壳的部分熔融, 反映此时有幔源物质进入地壳, 指示了地壳增生事件的发生。锆石 Hf 两阶段模式年龄 T_{DM2} 集中在 684~1493 Ma, 以及弱的富集特征表明有下地壳物质的混入, 推断岩浆弧下可能存在元古宙陆块基底, 笔者称之为白乃庙基底。早泥盆世流纹岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-14.95 \sim -7.07$, 对应二阶模式年龄为 1.8~2.3 Ga, 显示出较强的富集特征, 指示主要为古老地壳来源。结合锆石 Hf 两阶段模式年龄与华北克拉通基底的年龄范围相近, 可能源于华北克拉通基底岩石的部分熔融。Hf 同位素的改变代表岩浆源区发生改变, 与前文地球化学元素成分的变化一致。综上所述, 早中志留世花岗岩类和英安岩样品为壳幔混合成因, 可能的形成过程是受俯冲流体影响的亏损地幔发生熔融, 在幔源岩浆上升过程中在下地壳发生底侵, 白乃庙基底发生部分熔融, 经历 AFC 过程, 侵位形成花岗岩类或者喷出形成英安岩。早泥盆世流纹岩样品为壳源成因, 可能形成于华北克拉通基底岩石的部分熔融。

5.3 构造意义

对于南造山带岩浆活动研究发现, 该地区主要存在早古生代及少量晚古生代早期钙碱性系列岩浆活动(张拴宏等, 2010)。前人在白乃庙已经做了大量

早古生代岩浆岩的地球化学分析和地质年代学的研究, 在白乃庙向东延伸地区早古生代侵入岩研究较少, 也缺乏同时代火山岩的研究。

本文在白乃庙北东部的额尔登地区的早古生代火山岩及侵入岩研究表明, 早中志留世花岗岩及英安岩 LREE 相对于 HREE 富集, 蛛网图中富集 Rb、Th、Zr、Hf, 亏损 Nb、Ta、Ti、P、Sr, 为典型岩浆弧特征 (Kelemen et al., 1993)。据 Nb-Y, Rb-Y + Nb, Rb/Zr-Nb 图解(图 10), 早中志留世花岗岩及英安岩为岛弧构造背景, 为正常弧阶段。本文测得花岗岩及英安岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 $-1.19 \sim 11.51, 3.32 \sim 10.28$ 。谷丛楠(2012)获得的晚奥陶世白乃庙安山岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-1.5 \sim 8.4$, 模式年龄为 633~1119 Ma; 柳长峰等(2014)测得晚奥陶世白乃庙中基性火成岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-0.71 \sim 5.6$, 模式年龄为 1073~1470 Ma; Hao and Hou(2012)测得晚奥陶世毕力赫花岗闪长岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $5.1 \sim 7.1$, 模式年龄为 921~1089 Ma。张华锋等(2009)对白乃庙地区徐尼乌苏地层中的岩脉进行 U-Pb 定年, 获得大量元古代捕获锆石年龄, 集中在 1.26~1.70 Ga。Zhang et al. (2014)获得白乃庙地区 0.60~1.25 Ga 碎屑锆石年龄。结合前人研究表明白乃庙岛弧下面可能存在白乃庙元古代基底。在古亚洲洋早古生代俯冲阶段, 岛弧火成岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要为正值, 表明壳幔混合成因, 以新生地壳为主, 可能存在少量元古代基底和幔源岩浆的贡献。

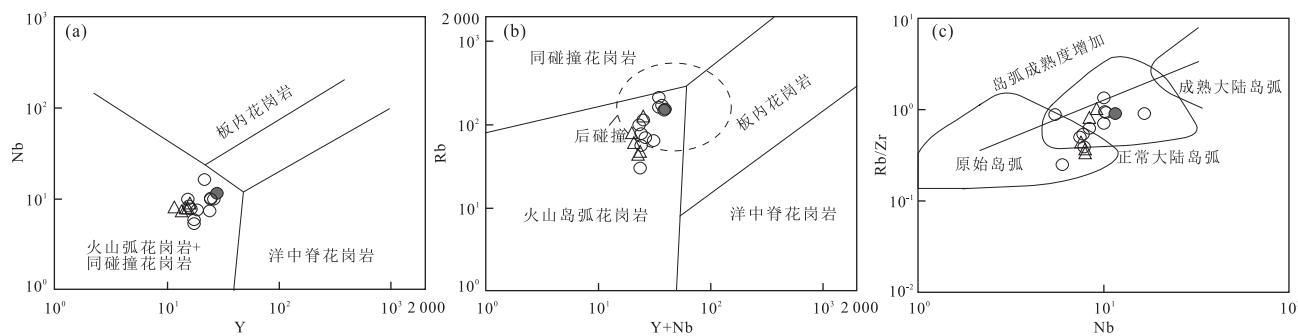


图 10 额尔登地区岩浆岩 Nb-Y 图解(a),Rb-Y+Nb 图解(b) 和 Rb/Zr-Nb 图解(c)

Fig.10 Nb-Y (a), Rb-Y+Nb (b), Rb/Zr-Nb (c) diagrams of igneous rocks from the Eerdeng area

图 a 和图 b 据 Pearce *et al.*(1984), 图 c 据 Brown(1984), 图例同图 6

同早志留世花岗岩及英安岩对比,早泥盆世流纹岩表现出明显的 Eu 负异常。据 Nb-Y, Rb-Y + Nb, Rb/Zr-Nb 图解(图 10),早泥盆世流纹岩为后碰撞构造背景。本文测得早泥盆世流纹岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-14.9 \sim -7.07$, 模式年龄为 $1.8 \sim 2.3$ Ga。对比聂凤军等(1995)测得晚志留世白乃庙花岗闪长斑岩,全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-3.5 \sim -3.2$; Zhang *et al.*(2013)测得白乃庙石英闪长岩年龄为 419 Ma, 全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -4.4 。结合前人的研究成果,显示出晚志留世到早泥盆世的岩浆岩与前述的岛弧火成岩源区具有明显的差别,侧面反映出构造环境的改变,即从俯冲阶段发展到了碰撞后阶段。在碰撞后阶段,本区火成岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值,岩浆岩主要为古老地壳重熔成因,以华北克拉通的部分熔融为主。本文获得的早泥盆世碰撞相关样品的数量有限,前人研究和地质证据可支持晚志留世—早泥盆世碰撞相关事件:(1)根据 Zhang *et al.*(2014),白乃庙地区发现含石榴石副矿物的 S型花岗岩,与 I型花岗岩为同时期岩浆产物;(2)Zhang *et al.*(2013)在白乃庙地区获得弱变形的闪长岩—花岗闪长岩侵入体侵位年龄为 419 Ma,与区域碰撞事件有关,测得未变形的伟晶岩墙侵位年龄为 411 ± 8 Ma,指示早泥盆世期间碰撞事件已经结束,对应为碰撞后阶段;(3)Chen *et al.*(2015)获得宝音图群石榴石角闪岩早泥盆世的变质年龄,通过变质相图分析,认为造山带经历了地壳增厚和折返,指示存在构造热事件;(4)西别河组为晚志留世—早泥盆世的磨拉石沉积建造,不整合覆盖在这套早古生代岩浆岩之上,代表造山阶段的结束;(5)在本研究区南 80 km 处,出露一套以霓辉正长岩为主的碱性花岗岩,其锆石年龄为 409 ± 2 Ma(Zhang *et al.*, 2010), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-27.8 \sim -32.3$,该泥盆纪的碱性岩石形成后碰撞岩浆带,显

示为伸展构造背景特征;(6)Shi *et al.*(2010)在赤峰地区发现一套 A型花岗岩,获得 387 Ma 的锆石年龄,结合具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和较老二阶模式年龄(2 667 Ma),指示华北北缘为碰撞后伸展环境。

经过本项研究工作,证明早中志留世期间白乃庙铜矿东北部的额尔登地区为岩浆弧环境,并重新认识了额尔登地区的地质演化历史。结合 Hao and Hou(2012)及白新会(2015)的研究,可把白乃庙弧区域向东延伸至毕力赫,进一步扩展了岩浆弧的分布范围。另外,白乃庙地区发育白乃庙大型铜金矿床、白乃庙金矿、谷那乌苏铜矿、别鲁乌图铜矿(李文博等,2007, 2008)。Hart *et al.*(2002)和 Zhou(2002)认为内蒙古南部地区及华北北缘金矿多为造山型。扩大和细化白乃庙岩浆弧的范围对于找矿有重要意义。

本文认为额尔登地区早古生代岩浆岩作为白乃庙岛弧带的一部分,形成于俯冲—碰撞的构造环境。早古生代期间白乃庙岛弧带的构造演化过程为:寒武纪末期,古亚洲洋开始向南俯冲,形成具有岛弧拉斑玄武岩特征的中基性岩浆岩,并认为与初始俯冲相关(尚恒胜等,2003; Jian *et al.*, 2008)。奥陶纪—志留世中期,古亚洲洋持续俯冲,形成大量中低钾钙碱性特征的中酸性岩浆岩,为白乃庙岛弧岩浆作用的高峰期(刘敦一等,2003; 尚恒胜等,2003; 李建锋等, 2010; Hao and Hou, 2012; Zhang *et al.*, 2014; 白新会等, 2015)。同时,在白乃庙岛弧后地区,发育中—晚志留世徐尼乌苏组复理石沉积、浑善达克地块与华北克拉通的碰撞(Xu *et al.*, 2013)发生于晚志留世期间(Jian *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2013),导致白乃庙岛弧的弧后盆地的闭合,白乃庙岛弧发生仰冲。随后造山抬升,地壳增厚,剥蚀作用加强,形成不整合覆盖在白乃庙岛弧和徐尼乌苏组之上的西别河组磨拉石沉积。早泥盆期间进入后造山阶段,原岛

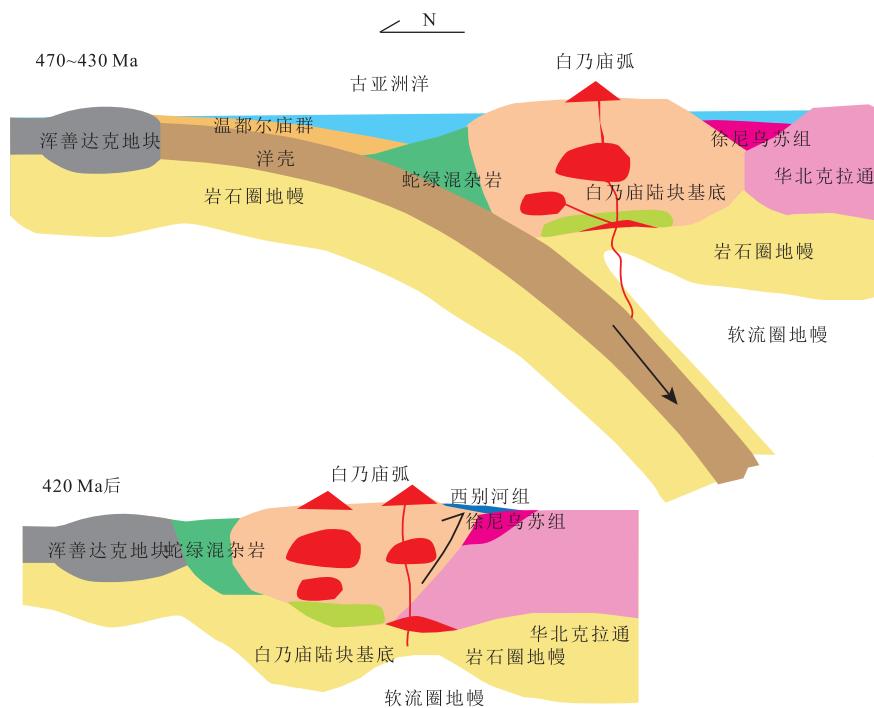


图 11 早古生代白乃庙地区构造演化模式

Fig.11 A cartoon for the Early Paleozoic tectonic evolution of the Bainaimiao area

弧地壳减薄,软流圈上涌发生减压熔融,使华北克拉通基底发生部分熔融,在华北北缘与中亚造山带南缘发育早—中泥盆世碱性岩(Zhang et al., 2009; Shi et al., 2010)。综上所述,白乃庙岛弧带岩浆作用开始于 494~472 Ma, 420~415 Ma 发生浑善达克地块与华北克拉通的碰撞,411 Ma 进入后碰撞阶段,详见图 11。

6 结论

(1) 在该区获得 4 个岩浆岩年龄,其中 2 件花岗岩年龄为 432.8 ± 2.6 Ma 和 428.1 ± 1.8 Ma, 1 件英安岩年龄为 434.0 ± 4.4 Ma, 此 3 件样品形成于早中志留世; 另有 1 件流纹岩年龄为 411.8 ± 1.0 Ma, 形成于早泥盆世,重新厘定了本区的岩浆活动的时限; (2) 早中志留世钙碱性岩浆岩明显亏损 Nb、Ta、Ti, 无 Eu 负异常,是一套岛弧岩浆岩,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 几乎全部为正值,显示以新生地壳部分熔融成因为主; 早泥盆世流纹岩存在明显的 Eu 负异常,锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 全部为负值,应为古老地壳部分熔融再循环的产物,可能代表构造环境的转变; (3) 早志留世英安岩和花岗岩形成于俯冲岛弧环境,白乃庙岛弧可延伸至本研

究区,而早泥盆世流纹岩可能形成于后碰撞环境。

References

- Bai, X. H., Xu, Z. Y., Liu, Z. H., et al., 2015. Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Geological Significance of the Early Silurian Plutons from the Southeastern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 67–79 (in Chinese with English abstract).
- Brown, G. C., Thorpe, R. S., Webb, P. C., 1984. The Geochemical Characteristics of Granitoids in Contrasting Arcs and Comments on Magma Sources. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 413–426. doi: 10.1144/gsjgs.141.3.0413
- Chen, Y., Zhang, Z. C., Li, K., et al., 2016a. Detrital Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes of Permo-Carboniferous Sandstones in Central Inner Mongolia, China: Implications for Provenance and Tectonic Evolution of the Southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 671: 183–201. doi: 10.1016/j.tecto.2016.01.018
- Chen, Y., Zhang, Z. C., Li, K., et al., 2016b. Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopes of Early Paleozoic Arc-Related Volcanic Rocks in Sonid Zuoqi, Inner Mongolia: Implications for the Tectonic Evolution of the Southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 264: 392–404. doi: 10.1016/j.lithos.2016.09.009

- Chen, Y. P., Wei, C. J., Zhang, J. R., et al., 2015. Metamorphism and Zircon U-Pb Dating of Garnet Amphibolite in the Baoyintu Group, Inner Mongolia. *Science Bulletin*, 60(19): 1698–1707. doi:10.1007/s11434-015-0890-0
- Claesson, S., Vetrin, V., Bayanova, T., et al., 2000. U-Pb Zircon Ages from a Devonian Carbonatite Dyke, Kola Peninsula, Russia: A Record of Geological Evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 51(1–2): 95–108. doi:10.1016/s0024-4937(99)00076-6
- Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., et al., 1992. Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time-Scale. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171–184. doi:10.1144/gsjgs.149.2.0171
- Deng, Z. B., 2015. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Guangtoushan Granitoid Rock Suite in South Qinling Tectonic Belt, Central China (Dissertation). Peking University, Beijing, 22 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Z. C., Gu, P. Y., Chen, R. M., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry, and Hf Isotope of Yanchangbeishan Adamellite of Lenghu Area in Qinghai. *Earth Science*, 40(1): 130–144 (in Chinese with English abstract).
- Elliott, R., Sahakian, B. J., Herrod, J. J., et al., 1997. Abnormal Response to Negative Feedback in Unipolar Depression: Evidence for a Diagnosis Specific Impairment. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 63(1): 74–82. doi:10.1136/jnnp.63.1.74
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. doi:10.1093/petrology/42.11.2033
- Gu, C. N., 2012. Zircon Dating and Hf Isotope of Bainaimiao Area Inner Mongolia and Their Geological Implications (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 22 (in Chinese with English abstract).
- Hao, B. W., Hou, Z. Q., 2012. Discovery of the Early Paleozoic Boin Sum-Ordor Sum Island Arc in the Hadamiao Gold Ore District, Inner Mongolia and Its Significance to the Evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(5): 1251–1264. doi:10.1111/j.1755-6724.2012.00745.x
- Hart, C. J., Goldfarb, R. J., Qiu, Y. M., et al., 2002. Gold Deposits of the Northern Margin of the North China Craton: Multiple Late Paleozoic-Mesozoic Mineralizing Events. *Mineralium Deposita*, 37(3): 326–351. doi:10.1007/s00126-001-0239-2
- 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. doi:10.1144/gsl.sp.2004.226.01.05
- Jahn, B. M., Litvinovsky, B. A., Zanvilevich, A. N., et al., 2009. Peralkaline Granitoid Magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: Evolution, Petrogenesis and Tectonic Significance. *Lithos*, 113(3–4): 521–539. doi:10.1016/j.lithos.2009.06.015
- Jian, P., Kröner, A., Shi, Y. R., et al., 2016. Age and Provenance Constraints on Seismically-Determined Crustal Layers beneath the Paleozoic Southern Central Asian Orogen, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 123: 119–141. doi:10.1016/j.jseas.2016.04.001
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 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(3–4): 233–259. doi:10.1016/j.lithos.2007.07.005
- Jiang, X. J., Liu, Z. H., Xu, Z. Y., et al., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Wulanhada Middle Permian Alkali-Feldspar Granites in Xianghuang Banner, Central Inner Mongolia, and Its Geochemical Characteristics. *Geological Bulletin of China*, 32(11): 1760–1768 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen, P. B., Shimizu, N., Dunn, T., 1993. Relative Depletion of Niobium in Some Arc Magmas and the Continental Crust: Partitioning of K, Nb, La and Ce during Melt/Rock Reaction in the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 120(3–4): 111–134. doi:10.1016/0012-821x(93)90234-z
- Kröner, A., Windley, B. F., Badarch, G., et al., 2007. Accretionary Growth and Crust Formation in the Central Asian Orogenic Belt and Comparison with the Arabian-Nubian Shield. *Geological Society of America Memoirs*, 200: 181–209. doi:10.1130/2007.1200(11)
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., et al., 2002. Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge, 33.
- Li, C. D., Ran, H., Zhao, L. G., et al., 2012. LA-MC-ICPMS U-Pb Geochronology of Zircons from the Wenduermiao Group and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3705–3714 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. F., Zhang, Z. C., Han, B. F., 2010. Ar-Ar and Zircon SHRIMP Geochronology of Hornblendite and Diorite in Northern Darhan Muminggan Joint Banner, Inner Mongolia, and its Geological Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 732–740 (in Chinese with English abstract).
- Li, K., Zhang, Z. C., Feng, Z. S., et al., 2014. Zircon Shrimp

- U-Pb Dating and Its Geological Significance of the Late-Carboniferous to Early-Permian Volcanic Rocks in Bayanwula Area, the Central of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2041—2054 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.B., Chen, Y.J., Lai, Y., et al., 2008. Metallogenetic Time and Tectonic Setting of the Bainaimiao Cu-Au Deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 890—898 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.B., Hu, C.S., Zhong, R.C., et al., 2015. U-Pb, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ Geochronology of the Metamorphosed Volcanic Rocks of the Bainaimiao Group in Central Inner Mongolia and Its Implications for Ore Genesis and Geodynamic Setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 251—259. doi:10.1016/j.jseas.2014.06.007
- Li, W. B., Lai, Y., Sun, X. W., et al., 2007. Fluid Inclusion Study of the Bainaimiao Cu-Au Deposit in Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2165—2176 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. N., 2003. Meso-Cenozoic Volcanic Rocks and Their Deep Process in Eastern China. Geological Publishing House, Beijing, 53 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C.F., Liu, W.C., Wang, H.P., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Bainaimiao Metavolcanic Rocks in the Northern Margin of North China Craton. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1273—1287 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D.Y., Jian, P., Zhang, Q., et al., 2003. SHRIMP Dating of Adamites in the Tulingkai Ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic Subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317—327 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.L., Sun, F. Y., Wang, Y. D., et al., 2016. Tectonic Setting of Hadahushu Mafic Intrusion in Urad Zhongqi Area, Inner Mongolia: Implications for Early Subduction History of Paleo-Asian Ocean Plate. *Earth Science*, 41(12): 2019—2030 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y.H., Li, W.B., Lai, Y., 2009. Time and Tectonic Setting of Hosting Porphyry of the Hadamiao Gold Deposit in Xianghuangqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2615—2620 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z.W., Zhang, Z.C., Li, K., et al., 2016. Petrography, Geochemistry, and U-Pb Detrital Zircon Dating of Early Permian Sedimentary Rocks from the North Flank of the North China Craton: Implications for the Late Paleozoic Tectonic Evolution of the Eastern Central Asian Orogenic Belt. *International Geology Review*, 58(7): 787—806. doi:10.1080/00206814.2015.1118646
- Ma, X., Chen, B., Chen, J. F., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Age, Geochemical, Sr-Nd Isotopic, and In-situ Hf Isotopic Data of the Late Carboniferous-Early Permian Plutons in the Northern Margin of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 42(12): 1830—1850 (in Chinese).
- Macdonald, G.A., Katsura, T., 1964. Chemical Composition of Hawaiian Lavas 1. *Journal of Petrology*, 5(1): 82—133. doi:10.1093/petrology/5.1.82
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. doi:10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2
- Nie, F.J., Pei, R.F., Wu, L.S., 1995. Nd- and Sr-Isotope Study on Greenschist and Granodiorite of the Bainaimiao District, Inner Mongolia, China. *Diqu Xuebao (Acta Geoscientica Sinica)*, 1: 36—44 (in Chinese with English abstract).
- 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. doi:10.1093/petrology/25.4.956
- Pearce, J.A., Peate, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251—285. doi:10.1146/annurev.ea.23.050195.001343
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. doi:10.1007/bf00384745
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. doi:10.1093/petrology/36.4.891
- Rojas-Agramonte, Y., Kröner, A., Demoux, A., et al., 2011. Detrital and Xenocrystic Zircon Ages from Neoproterozoic to Palaeozoic Arc Terranes of Mongolia: Significance for the Origin of Crustal Fragments in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 19(3): 751—763. doi:10.1016/j.gr.2010.10.004
- Shang, H.S., Tao, J.X., Baoyin, W.L.J., et al., 2003. The Arc-Basin System and Tectonic Significance of Early Paleozoic in Baiyun'ebo Area Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 26(3): 160—168 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Miao, L. C., et al., 2010. Devonian A-Type Granitic Magmatism on the Northern Margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb Zircon Dating and Hf-Isotopes of the Hongshan Granite at Chifeng, Inner Mongolia, China. *Gondwana Research*, 17

- (4):632—641.doi:10.1016/j.gr.2009.11.011
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tong, Y., Hong, D. W., Wang, T., et al., 2010. Spatial and Temporal Distribution of Granitoids in the Middle Segment of the Sino-Mongolian Border and Its Tectonic and Metallogenetic Implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3):395—412(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Q., Xin, H.T., Hu, X.J., et al., 2016. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Early Paleozoic Wulanaobaotu Intrusive Rocks, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(4):555—569 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.A., 2014. Tectonic Evolution in the Central Segment of the Northern Margin of the North China Plate from Early Paleozoic to Devonian (Dissertation). Jilin University, Jilin, 56 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069.doi: 10.1029/2002tc001484
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Huang, B. C., et al., 2009. End-Permian to Mid-Triassic Termination of the Accretionary Processes of the Southern Altaids: Implications for the Geodynamic Evolution, Phanerozoic Continental Growth, and Metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189—1217. doi: 10.1007/s00531-008-0407-z
- Xu, B., Charvet, J., Chen, Y., et al., 2013. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts in Western Inner Mongolia (China): Framework, Kinematics, Geochronology and Implications for Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4):1342—1364. doi:10.1016/j.gr.2012.05.015
- Yang, J.F., Zhang, Z.C., Chen, Y., et al., 2017. Ages and Origin of Felsic Rocks from the Eastern Erenhot Ophiolitic Complex, Southeastern Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia China. *Journal of Asian Earth Sciences* (in Press).doi:10.1016/j.jseae.2016.12.049
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Shao, J.A., et al., 2006. Constraints on the Timing of Uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246 (3—4):336—352.doi:10.1016/j.epsl.2006.04.029
- Yang, Y.N., Li, Q.L., Liu, Y., et al., 2014. Zircon U-Pb Dating by Secondary Ion Mass Spectrometry. *Earth Science Frontiers*, 21(2):81—92(in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Wu, F.Y., Gao, S., et al., 2003. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and REE of Cenozoic Pluton in NE China. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1511—1520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Zhou, Z. G., Liu, W. C., et al., 2009. Grenville Tectono-Thermal Event Record in the Bainaimiao Area, Inner Mongolia, China: Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Quartz Monzonodiorite Dike. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6):1512—1518(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y.L., Jin, W.J., et al., 2008. Criteria for the Recognition of Pre-, Syn- and Post-Orogenic Granitic Rocks. *Geological Bulletin of China*, 27(1):1—18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Ye, H., et al., 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.doi:10.1130/b31042.1
- Zhang, S.H., Zhao, Y., Liu, J.M., et al., 2010. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic Magmatism in the Northern Margin of the North China Block: A Preliminary Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6):824—842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Jian, P., 2008. SHRIMP Dating of Early Paleozoic Granites from North Damaoqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 778—787 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Jian, P., Kröner, A., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Development of an Early to Mid-Paleozoic Continental Margin Arc in the Southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72:63—74.doi:10.1016/j.jseae.2012.05.025
- Zhang, X., Zhang, H.F., Jiang, N., et al., 2010. Early Devonian Alkaline Intrusive Complex from the Northern North China Craton: A Petrological Monitor of Post-Collisional Tectonics. *Journal of the Geological Society*, 167 (4):717—730.doi:10.1144/0016—76492009—110
- Zhang, Y.P., Su, Y.Z., Li, J.C., 2010. Regional Tectonics Significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in Central Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 29 (11):1599—1605(in Chinese with English abstract).

Zhang, Z.C., Chen, Y., Li, K., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of Permian Bimodal Volcanic Rocks from Central Inner Mongolia, China: Implications for the Late Palaeozoic Tectonic Evolution of the South-Eastern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135: 370–389. doi: 10.1016/j.jseaes.2017.01.012

Zhang, Z.C., Li, K., Li, J.F., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of the Eastern Erenhot Ophiolitic Complex: Implications for the Tectonic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 279–293. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.06.008

Zhou, T. H., Goldfarb, R. J., Phillips, N. G., 2002. Tectonics and Distribution of Gold Deposits in China—An Overview. *Mineralium Deposita*, 37(3): 249–282. doi: 10.1007/s00126-001-0237-4

附中文参考文献

白新会,徐仲元,刘正宏,等,2015.中亚造山带东段南缘早志留世岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义.岩石学报,31(1):67–79.

邓正宾,2015.南秦岭光头山花岗质岩体群的岩石成因及动力学意义(硕士学位论文).北京:北京大学,22.

董增产,辜平阳,陈锐明,等,2015.柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征.地球科学,(1):130–144.

谷从楠,2012.内蒙古白乃庙地区锆石年龄和 Hf 同位素特征及其构造意义(硕士学位论文).北京:中国地质大学,22.

蒋孝君,刘正宏,徐仲元,等,2013.内蒙古镶黄旗乌兰哈达中二叠世碱长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征.地质通报,32(11):1760–1768.

李承东,冉皞,赵利刚,等,2012.温都尔庙群锆石的 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄及构造意义.岩石学报,28(11):3705–3714.

李建锋,张志诚,韩宝福,2010.内蒙古达茂旗北部闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb、角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其地质意义.岩石矿物学杂志,29(6):732–740.

李可,张志诚,冯志硕,等,2014.内蒙古中部巴彦乌拉地区晚石炭世—早二叠世火山岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义.岩石学报,30(7):2041–2054.

李文博,陈衍景,赖勇,等,2008.内蒙古白乃庙铜金矿床的成矿时代和成矿构造背景.岩石学报,24(4):890–898.

李文博,赖勇,孙希文,等,2007.内蒙古白乃庙铜金矿床流体包裹体研究.岩石学报,23(9):2165–2176.

李兆鼐,2003.中国东部中、新生代火成岩及其深部过程.北京:地质出版社,53.

柳长峰,刘文灿,王慧平,等,2014.华北克拉通北缘白乃庙组

变质火山岩锆石定年与岩石地球化学特征.地质学报,88(7):1273–1287.

刘敦一,简平,张旗,等,2003.内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据.地质学报,77(3):317–327.

刘金龙,孙丰月,王英德,等,2016.内蒙古乌拉特中旗哈达呼舒基性岩体形成的构造背景与古亚洲洋的早期俯冲历史.地球科学,41(12):2019–2030.

鲁颖淮,李文博,赖勇,2009.内蒙古镶黄旗哈达庙金矿床含矿斑岩体形成时代和成矿构造背景.岩石学报,25(10):2615–2620.

马旭,陈斌,陈家富,等,2012.华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义:岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据.中国科学:地球科学,42(12),1830–1850.

聂凤军,裴荣富,吴良士,1995.内蒙古白乃庙地区绿片岩和花岗闪长斑岩的钕和锶同位素研究.地球学报,16(1):36–44.

尚恒胜,陶继雄,宝音乌力吉,等,2003.内蒙古白云鄂博地区早古生代弧—盆体系及其构造意义.地质调查与研究,26(3):160–168.

童英,洪大卫,王涛,等,2010.中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义.地球学报,31(3):395–412.

王树庆,辛后田,胡晓佳,等,2016.内蒙古乌兰敖包图早古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(4):555–569.

王兴安,2014.华北板块北缘中段早古生代—泥盆纪构造演化(博士学位论文).长春:吉林大学,56.

吴福元,李献华,郑永飞,等,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185–220.

杨亚楠,李秋立,刘宇,等,2014.离子探针锆石 U-Pb 定年.地学前缘,21(2):81–92.

袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511–1520.

张华锋,周志广,刘文灿,等,2009.内蒙古中部白乃庙地区格林威尔岩浆事件记录:石英二长闪长岩脉锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据.岩石学报,25(6):1512–1518.

张旗,王元龙,金惟俊,等,2008.造山前,造山和造山后花岗岩的识别.地质通报,27(1):1–18.

张拴宏,赵越,刘建民,等,2010.华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景.岩石矿物学杂志,29(6):824–842.

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.