

· 专题研究 ·

南蒙古东戈壁省石炭纪花岗岩成因 ——锆石 U-Pb 年代学、Sr-Nd-Hf 同位素和地球化学证据

张晓伟, 童英, 赵辉, 王涛, 郭磊

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 地处中亚造山带核心部位的南蒙古东戈壁省广泛出露晚古生代花岗质岩石, 对其开展精确的同位素定年和岩石成因研究对深入认识和理解中亚造山带古生代地壳演化特征具有重要的科学意义。本次研究在扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区新识别出了 2 个早石炭世花岗岩 (337 Ma 和 332 Ma) 和 2 个晚石炭世花岗岩 (320 Ma 和 306 Ma)。早石炭世花岗岩 SiO_2 (76.31% ~ 77.79%) 和 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (8.23% ~ 8.59%) 含量较一致, 而晚石炭世花岗岩 SiO_2 (72.65% ~ 76.22%) 和 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (7.89% ~ 8.67%) 含量变化范围较早石炭世大。两期花岗岩均为弱过铝质 I 型花岗岩, 其中 U、Th、K、Zr、Hf 等元素呈正异常, Sr、Ti 等元素呈负异常。全岩 Sr-Nd 和锆石 Lu-Hf 同位素分析结果表明, 早石炭世花岗岩具有正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.68 ~ +4.09) 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+9.70 ~ +14.90) 值、较年轻的 Nd 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM2}} = 792 \sim 753$ Ma) 和 Hf 同位素二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}}^{\text{c}} = 721 \sim 393$ Ma), 暗示早石炭世花岗岩来源于受地幔作用影响下新生玄武质洋壳的部分熔融, 反映了早石炭世地壳增生作用。与早石炭世花岗岩不同的是, 晚石炭世花岗岩具有更高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+1.17 ~ +5.31) 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+13.68 ~ +15.21) 值, $t_{\text{DM2}} = 984 \sim 636$ Ma, $t_{\text{DM}}^{\text{c}} = 442 \sim 344$ Ma, 说明其物质来源主要是幔源新生地壳物质, 且有少量古老地壳物质参与。综合已有成果, 认为石炭纪花岗岩记录了由早期的洋壳板片回撤导致区域拉张再到后期的碰撞后伸展环境的构造背景转换。

关键词: 南蒙古; 石炭纪; 花岗岩; 锆石 U-Pb 年代; Sr-Nd-Hf 同位素; 岩石成因

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)03-0465-19

Petrogenesis of the Carboniferous granitoid intrusions in Dornogovi Province, Southern Mongolia: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Sr-Nd-Hf isotope and whole-rock geochemistry

ZHANG Xiao-wei, TONG Ying, ZHAO Hui, WANG Tao and GUO Lei

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The late Paleozoic granitic rocks are widely exposed in Dornogovi Province of Southern Mongolia, which is located in the core of the Central Asian orogenic belt. Accurate isotopic dating and petrogenetic studies of the granitic rocks are of great scientific significance for the in-depth understanding of the crustal evolution characteristics of the Central Asian orogenic belt. In this study, two Early Carboniferous granites (337 Ma and 332 Ma) and two Late Carboniferous granites (320 Ma and 306 Ma) were identified in Zamyn-Uud and Ulan Badrach. To be specific, the content of SiO_2 (76.31% to 77.79%) is relatively consistent with that of $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (8.23% to 8.59%) in the Early Carboniferous granites, while the variation range of the content of SiO_2 (72.65% to 76.22%) and $\text{K}_2\text{O} +$

收稿日期: 2020-11-30; 接受日期: 2021-01-29; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研究开发计划资助项目 (2018YFC0603702, 2017YFC0601301); 国家自然科学基金资助项目 (41372077, U1403291); 中国地质调查局资助项目 (DD20190685, DD20160024, DD20160123, DD20160345)

作者简介: 张晓伟 (1989-), 男, 博士研究生, 讲师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zhangxw1016@163.com。

网络首发时间: 2020-02-04; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210204.1442.002.html>

Na₂O (7.89% to 8.67%) in Late Carboniferous granites is higher than that in Early Carboniferous granites. Both Early and Late Carboniferous epochs are characterized by weakly peraluminous I-type granites, of which elements such as U, Th, K, Zr and Hf exhibit positive anomalies, and elements such as Sr and Ti exhibit negative anomalies. Based on an isotopic analysis of whole-rock Sr-Nd and zircon Lu-Hf, the authors detected that the Early Carboniferous granites have positive $\varepsilon\text{Nd}(t)$ (+3.68~+4.09) and $\varepsilon\text{Hf}(t)$ (+9.70~+14.90) values in comparison with young two-stage model age of Nd ($t_{\text{DM}2}=792\sim753$ Ma) and the two-stage model age of Hf isotopes ($t_{\text{DM}}^c=721\sim393$ Ma). The above evidence indicates that the Early Carboniferous granites were partially melted from juvenile basaltic oceanic crust, under the influence of mantle-crust interaction, showing the crust accretion of the Early Carboniferous. Unlike the Early Carboniferous, the granites in Late Carboniferous have higher $\varepsilon\text{Nd}(t)$ (+1.17~+5.31) and $\varepsilon\text{Hf}(t)$ (+13.68~+15.21), Nd model age ($t_{\text{DM}2}=984\sim636$ Ma) and the two-stage model age of Hf isotopes ($t_{\text{DM}}^c=442\sim344$ Ma), demonstrating that the material source was mainly composed of juvenile crustal materials and a small quantity of ancient crustal materials. Based on the existing results, the authors believe that the tectonic background of the Carboniferous granites recorded the transformation of the regional extensional environment caused by slab roll-back of oceanic plates during the late Carboniferous to the post-collision extensional environment in the later period.

Key words: Southern Mongolia; Carboniferous; granites; zircon U-Pb age; Sr-Nd-Hf isotope; petrogenesis

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2018YFC0603702, 2017YFC0601301); National Natural Science Foundation of China (41372077, U1403291); Project of China Geological Survey (DD20190685, DD20160024, DD20160123, DD20160345)

中亚造山带南缘位于蒙古主构造线、华北克拉通、塔里木克拉通之间(图1, Wang *et al.*, 2017),由一系列的造山带(南天山、中天山、北天山、成吉思、斋桑-准格尔、阿尔泰、南蒙古-兴安、内蒙古-吉林、温都尔庙等)、微陆块(伊塞克、喀什伊犁、敦煌地块、锡林浩特等)以及盆地(准格尔、吐哈、松吉辽等)等组成(任纪舜等, 2013)。作为全球显生宙最为典型且面积最大的增生型造山带的一部分,中亚造山带南缘经历了多阶段(陆缘增生、后碰撞和陆内造山作用)、多类型(大洋俯冲、多块体碰撞拼合、后造山拉张)的壳幔相互作用(Khain *et al.*, 2003),因此具有涉及范围广、构造演化长期和复杂等特点(孙立新等, 2013; Xu *et al.*, 2013; Kröner *et al.*, 2014)。

作为中亚造山带南缘大陆地壳的主要组成部分,花岗岩的形成时代、成因机制以及所反映的大地构造环境对于研究不同时代、构造背景下的大面积花岗岩的成因、地壳增生等科学问题尤为重要(吴福元等, 1999; Kovalenko *et al.*, 2004; Wilde *et al.*, 2010; Hawkesworth *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017)。中亚造山带南缘出露花岗岩面积约 4.3×10^5 km²,其中寒武纪、奥陶纪、志留纪、泥盆纪及三叠纪花岗岩类局部发育,而石炭纪-二叠纪花岗岩在造山带南缘呈面上分布,暗示着区域内在晚古生代存在

重大构造体制(洋-陆)的转变。南蒙古地处中亚造山带南缘核心部位,由于受自然条件恶劣、人口较少、交通不便利、经济基础落后等多方面因素的限制,导致南蒙古基础地质研究程度一直较低,缺少原始岩浆岩同位素以及地球化学数据等的报道,因此中亚造山带核心部位的晚古生代地壳生长及其地球动力学演化机制仍然存在争议(Tang and Yan, 1993; Xiao *et al.*, 2003, 2004, 2009, 2010; Windley *et al.*, 2007, 2010; Xu *et al.*, 2013)。为了更好地了解中亚造山带核心部位的地壳演化历史,为成岩背景提供更多证据,本文选取南蒙古东戈壁省境内扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区进行了系统的野外岩石学、室内地质年代学、地球化学和同位素特征研究工作,在此基础上结合区域构造背景,进而探讨中亚造山带关键转折时期岩浆作用演化特征和形成机制。

1 区域地质概况

扎门乌德-乌兰巴德拉赫地处南蒙古东戈壁省境内,距离省会赛音山达市和中国边境口岸二连浩特市均100 km左右。该地区记录了奥陶纪至二叠纪包括岛弧增长、弧后裂解和地体增生等在内的复杂的古亚洲洋演化历史(Badarch *et al.*, 2002;

Windley *et al.*, 2007; Blight *et al.*, 2010)。从构造位置来看,研究区位于二连浩特-贺根山缝合带北侧的 Nuhetdavaa 弧盆和 Enshoo 岛弧(图 1; Badarch and Tomurtogoo, 2001; Badarch *et al.*, 2002)。出露地层时代有前寒武纪、寒武纪、奥陶纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪、侏罗纪、白垩纪、第四纪等,其中石炭纪地层为浅海-陆内复杂环境下的火山-沉积岩建造

(流纹质-安山质-玄武质熔岩、钙质凝灰质火山岩、浅海相杂岩、碎屑岩等),且海相沉积居多;二叠纪地层主要由海陆交互相火山-沉积岩建造组成,且大部分为陆相火山-沉积岩沉积,岩性主要为碱性火山岩、中性火山岩、酸性火山岩以及碎屑岩等(Badarch *et al.*, 2002; Windley *et al.*, 2007; Blight *et al.*, 2010; 刘永江等, 2011; 贾孝新, 2018)。

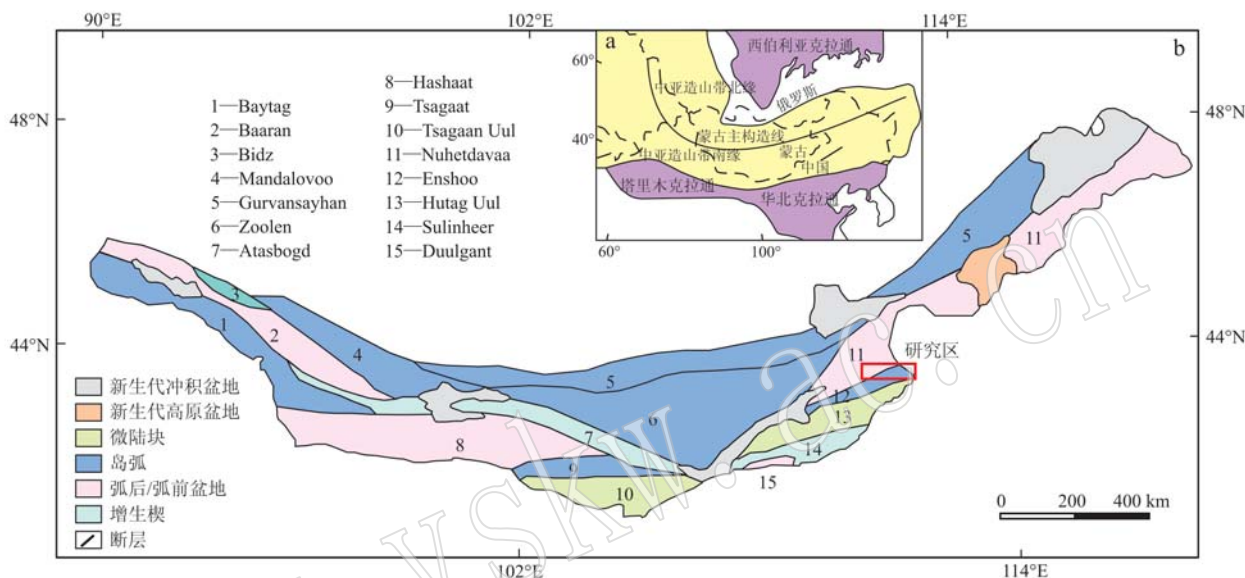


图 1 中亚构造简图[a, 据 Sengör 等(1993)、Xiao 等(2010)修改]和南蒙古大地构造纲要图[b, 据 Badarch 等(2002)修改]

Fig. 1 Structural sketch map of Central Asia (a, modified after Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2010) and tectono-stratigraphic terrane map for Southern Mongolia (b, modified after Badarch *et al.*, 2002)

研究区及邻区岩浆活动强烈,整体呈北北东向展布,侵入岩主要是以岩基、岩株状出露的不同时代中酸性花岗质岩石,少部分为铁镁质岩石,且其中石炭纪-二叠纪中酸性岩浆岩(花岗岩、流纹岩)出露面积最广(Badarch and Orolmaa, 1998; 杨奇获, 2014; Tong *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017)。

2 岩石学及岩相学特征

本文在扎门乌德、乌兰巴德拉赫地区(北部)采集了 3 个岩体的 17 个具有代表性的样品,包括 14 个正长花岗岩和 3 个二长花岗岩样品。4 个花岗岩体的年龄样品坐标分别为 110.43°E、43.89°N(M1498-3.1), 110.42°E、43.88°N(M1498-1.2), 111.37°E、43.70°N(M1288-1.7)和 110.32°E、43.83°N(M1287-5.1)(图 2)。由于南蒙古地区缺乏地名,因此本文对 3 个岩体通过“地区+样本”编号的形式来加以区分。

2.1 Ulaanb-8-3 岩体

Ulaanb-8-3 岩体,位于乌兰巴德拉赫西北约 20 km 处,出露面积约 140 km²,岩体周围出露有泥盆纪、石炭纪、侏罗纪、白垩纪地层,未见出露前寒武纪地层,岩浆岩主要由二叠纪火山岩、花岗岩以及石炭纪花岗岩组成。该岩体主体是中细粒正长花岗岩,有细粒正长花岗岩脉侵入(图 2a),具有中细粒-细粒结构,块状构造,矿物组成主要有石英(30%~35%)、钾长石(~50%)、斜长石(10%~15%)、黑云母(4%~5%)等,锆石、磷灰石是主要副矿物(图 3a、3b)。

2.2 Zamiin-8-1 岩体

Zamiin-8-1 岩体,位于扎门乌德口岸(对面是中国二连浩特市口岸)西 40 km 左右,出露面积约 80 km²,岩体周围出露有前寒武纪、石炭纪和二叠纪地层(图 2b)。该岩体岩性为粗粒二长花岗岩,表面

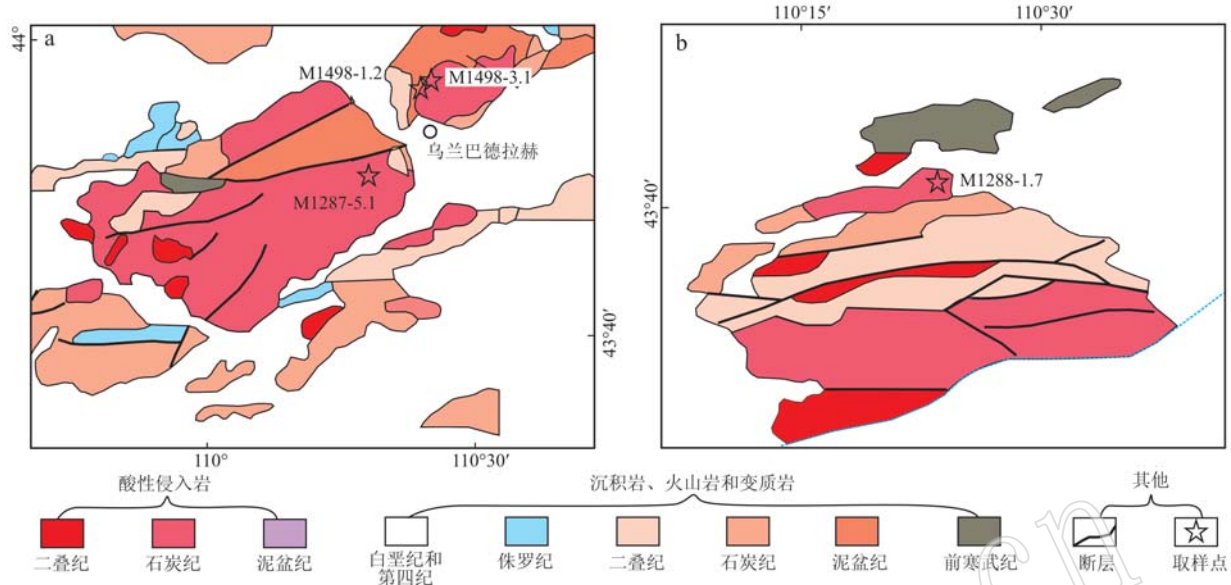


图 2 乌兰巴德拉赫(a)和扎门乌德(b)地区区域地质图[根据 Mineral Resources Authority of Mongolian, Mongolia Academy of Sciences(1998)修改]

Fig. 2 Geological sketch map of Ulan Badrach (a) and Zamyn-Uud area (modified after Mineral Resources Authority of Mongolia, Mongolia Academy of Sciences, 1998)

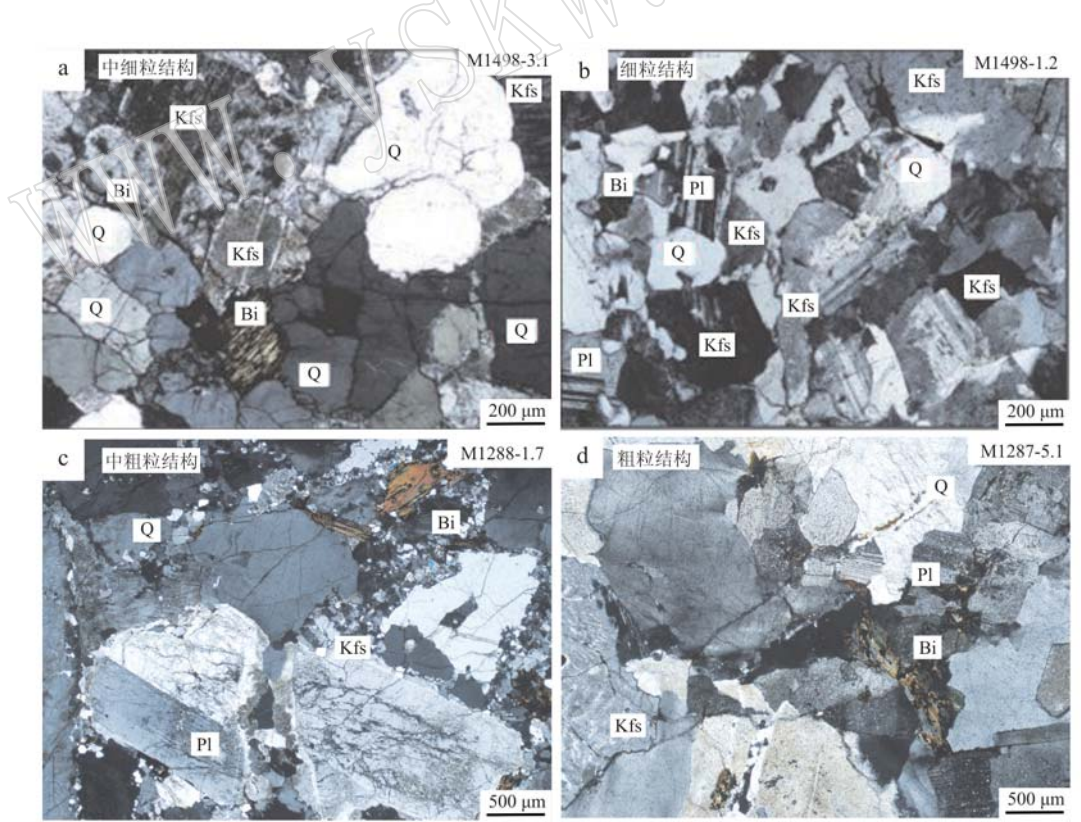


图 3 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩矿物特征显微照片(正交偏光)

Fig. 3 Photomicrographs of the Carboniferous granitoids in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area (crossed nicols)
Q—石英; Pl—斜长石; Hb—角闪石; Bi—黑云母; Kfs—钾长石
Q—quartz; Pl—plagioclase; Hb—hornblende; Bi—biotite; Kfs—K-feldspar

颜色为浅肉红色,具有中粗粒粒状结构,块状构造,矿物组成主要包含石英(25%~30%)、钾长石(20%~35%)、斜长石(20%~35%)、黑云母和角闪石(~5%)等(图3c)。

2.3 Ulaanb-7-5 岩体

Ulaanb-7-5 岩体位于乌兰巴德拉赫西南 30 km 处,出露面积约 500 km²,周围有前寒武纪、泥盆纪、石炭纪和二叠纪地层(图2c)。该岩体岩性为正长花岗岩,表面颜色为浅肉红色,具有粗粒结构,块状构造,矿物组成主要由石英(25%~30%)、正长石(30%~45%)、斜长石(15%~20%)、黑云母和角闪石(1%~5%)等组成(图3d)。

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 年代学分析

用于 U-Pb 定年的锆石,经历粉碎岩石-湿法筛选-磁选等流程,最终在双目显微镜下手工挑选。为了更好地识别内部结构和形态并确保选择好的分析点位,在中国地质科学院矿产资源研究所进行了透反射照片及阴极发光图像(CL)的拍摄。锆石 U-Pb 定年分别在西安地质调查中心和北京离子探针中心进行,采用的测试方法分别为 LA-ICP-MS 和 SHRIMP。所选测试点大小 35 μm,采用 Plešovic 标准锆石 91500 等进行年龄校正,利用 Glitter 软件计算同位素比值和元素浓度,谐和图通过 ISOPLLOT 程序获得(Ludwig, 2003)。

3.2 主量和微量元素分析

本文共对 3 个花岗质岩体的 17 个样品进行了全岩分析工作。全岩化学成分(主量元素和微量元素)在加拿大温哥华 ACME 测试实验室利用 4A-4B 和 1DX 分析程序(方法)进行分析,主量元素使用 X 射线荧光光谱仪(XRF)和耦合等离子体原子发射光谱(ICP-ES),微量元素使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行分析。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素分析

锆石 Lu-Hf 同位素分析测试工作在中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室完成,详细测试方法和步骤参见侯可军等(2007, 2009)。

3.4 Sr-Nd 同位素分析

全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素在合肥中国科学技术大学利用热电离质谱(MAT262)进行同位素分析测试。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr =

0.119 4 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 进行校正。NBS987 标样的平均 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.710 207±14, JNdi-4ul 标样的平均 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值为 0.512 124±11。分析过程的详细描述见 Chen 等(2002, 2007)。

4 测试结果分析

4.1 锆石 U-Pb 年代学特征

(1) Ulaanb-8-3 岩体

正长花岗岩样品(M1498-3.1, 正长花岗岩主体; M1498-1.2, 花岗岩脉)中锆石晶型较好,其形态主要呈长柱状、短柱状或不规则状,岩浆振荡环带发育明显,不具有核-边结构,锆石长轴长度介于 50~250 μm 之间(多为 100~250 μm),长宽比为 1:1~4:1(图4a、4b)。

正长花岗岩(M1498-3.1)样品共测 20 个点,其中 5 个 Pb 异常点予以剔除,其余 15 个点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄范围在 351~328 Ma 之间, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 337.0±4.0 Ma (MSWD=3.0, N=15)。正长花岗岩脉(M1498-1.2)样品共测 20 个点,其中 3 个 Pb 异常点予以剔除,其余 17 个点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 338~326 Ma 之间, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 332.0±2.0 Ma (MSWD=1.0, N=17)。该组年龄均属早石炭世,限制了岩浆作用的时限(表1,图5a、5b)。

(2) Zamiin-8-1 岩体

CL 图像显示, Zamiin-8-1 岩体中二长花岗岩(M1288-1.7)的锆石颗粒呈灰黑色、灰白色,大多数锆石具有明显的核-边结构,核部具有震荡环带,较暗且存在明显的再吸光特征,具岩浆成因特征。样品中锆石颗粒形态多为长柱状,少部分为短柱状,锆石长轴长度为 50~230 μm,长宽比为 1:1 至 3:1(图4c)。该样品中共挑选了 24 个点进行锆石 U-Pb 同位素分析,结果显示它们的谐和度较高, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 321~315 Ma 之间, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 319.8±0.9 Ma (MSWD=1.7, N=24)。该年龄代表了 Zamiin-8-1 岩体的结晶年龄(图5c),说明该岩体形成于晚石炭世。

(3) Ulaanb-7-5 岩体

Ulaanb-7-5 岩体中正长花岗岩(M1287-5.1)样品中锆石多为灰白色短柱状,少数为长柱状或椭球状,长度为 35~180 μm,长宽比为 1:1~2.2:1, CL 图像可见清晰的生长韵律环带,显示岩浆锆石的特征(图4d)。共挑选了 5 个点利用 SHRIMP 法进行了

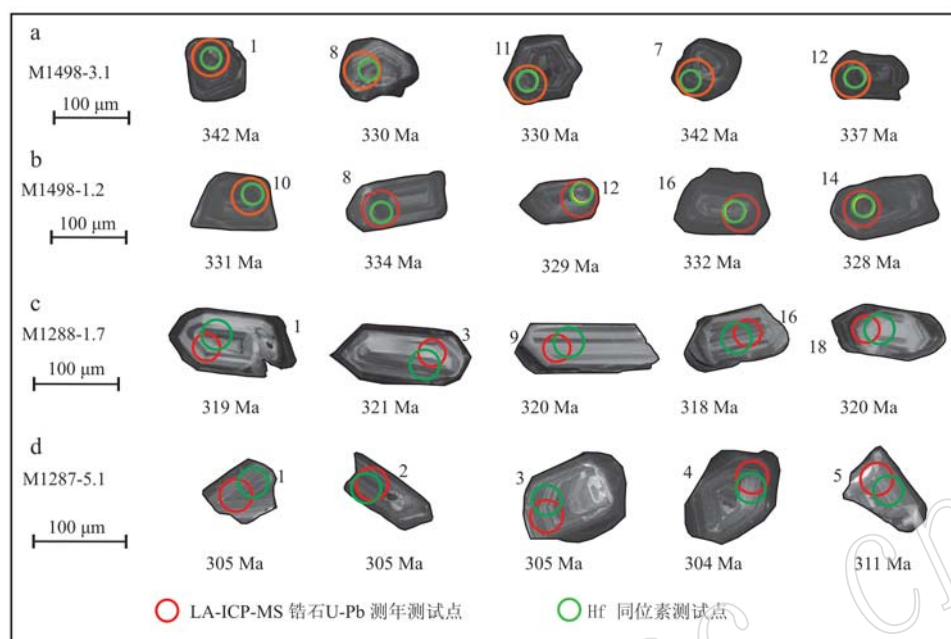


图4 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩锆石阴极发光(CL)影像图

Fig. 4 CL images with $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages for zircons from the Carboniferous granitoids in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area

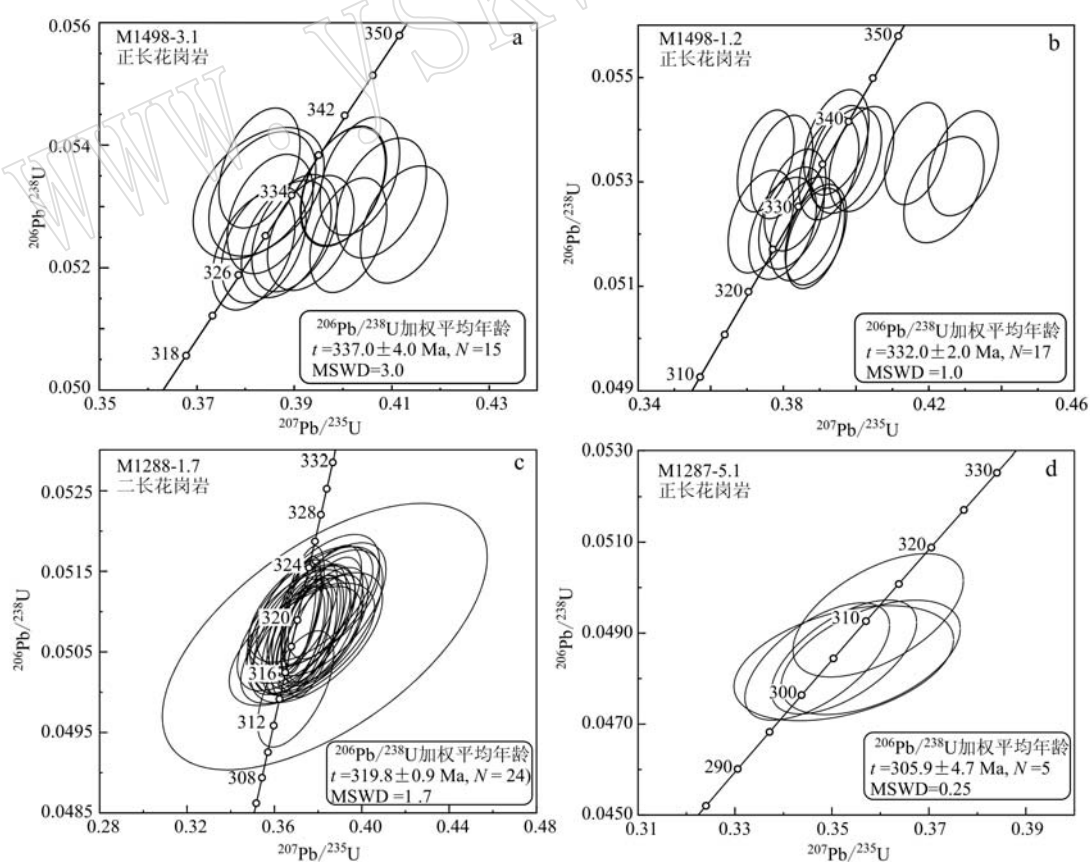


图5 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams for the Carboniferous granitoids in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area

表 1 南蒙古石炭纪花岗岩锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 定年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS and SHRIMP zircon U-Pb data of Carboniferous granites in Southern Mongolia

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
M1498-3.1 正长花岗岩 LA-ICP-MS															
1	619.70	712.30	0.87	0.054 4	0.000 7	0.400 0	0.005 8	0.053 3	0.000 6	388	30	335	4	342	4
2	494.82	596.17	0.83	0.056 8	0.000 8	0.412 6	0.005 9	0.052 7	0.000 6	483	30	331	4	351	4
3	819.53	1 107.47	0.74	0.055 4	0.000 7	0.401 2	0.005 3	0.052 5	0.000 6	428	27	330	4	343	4
4	493.57	587.58	0.84	0.053 8	0.000 8	0.390 1	0.005 8	0.052 6	0.000 6	364	31	330	4	334	4
5	622.40	571.01	1.09	0.052 8	0.000 8	0.385 0	0.005 9	0.052 9	0.000 6	321	33	332	4	331	4
6	485.43	557.97	0.87	0.053 7	0.000 8	0.388 5	0.006 1	0.052 5	0.000 6	359	33	330	4	333	4
7	549.26	669.83	0.82	0.054 4	0.000 7	0.400 0	0.005 7	0.053 3	0.000 6	389	30	335	4	342	4
8	475.01	558.84	0.85	0.053 1	0.000 8	0.383 7	0.005 7	0.052 4	0.000 6	334	32	329	4	330	4
9	480.85	641.13	0.75	0.051 8	0.000 7	0.382 8	0.005 6	0.053 6	0.000 6	275	31	337	4	329	4
10	418.72	523.40	0.80	0.055 7	0.000 8	0.407 9	0.006 1	0.053 1	0.000 6	439	31	334	4	347	4
11	181.63	271.09	0.67	0.052 3	0.001 0	0.383 4	0.007 3	0.053 2	0.000 7	297	42	334	4	330	5
12	281.57	477.24	0.59	0.054 3	0.000 8	0.393 3	0.005 9	0.052 6	0.000 6	382	32	330	4	337	4
13	632.95	822.01	0.77	0.054 7	0.000 7	0.403 6	0.005 5	0.053 5	0.000 6	400	28	336	4	344	4
14	584.67	609.03	0.96	0.053 0	0.000 8	0.381 7	0.005 7	0.052 3	0.000 6	327	32	328	4	328	4
15	158.41	152.32	1.04	0.052 2	0.001 2	0.382 7	0.008 8	0.053 2	0.000 7	293	52	334	4	329	6
M1498-1.2 正长花岗岩 LA-ICP-MS															
1	316.93	406.32	0.78	0.053 8	0.000 8	0.386 1	0.006 3	0.052 1	0.000 7	361	34	332	5	327	4
2	633.88	932.17	0.68	0.054 5	0.000 7	0.401 5	0.005 9	0.053 4	0.000 7	392	30	343	4	336	4
3	1 060.09	1 413.45	0.75	0.053 6	0.000 6	0.395 2	0.005 2	0.053 5	0.000 7	354	26	338	4	336	4
4	369.61	528.02	0.70	0.054 0	0.000 8	0.397 3	0.006 3	0.053 4	0.000 7	369	34	340	5	335	4
5	649.12	649.12	1.00	0.054 3	0.000 7	0.388 9	0.005 6	0.052 0	0.000 6	382	29	334	4	327	4
6	644.69	991.83	0.65	0.056 4	0.000 7	0.416 5	0.005 7	0.053 5	0.000 7	469	27	354	4	336	4
7	398.70	504.68	0.79	0.052 9	0.000 8	0.380 0	0.006 1	0.052 1	0.000 7	325	34	327	4	327	4
8	1 109.44	1 098.46	1.01	0.053 5	0.000 7	0.392 5	0.005 5	0.053 3	0.000 7	348	28	336	4	335	4
9	408.15	647.86	0.63	0.053 2	0.000 7	0.394 6	0.005 9	0.053 8	0.000 7	339	31	338	4	338	4
10	717.09	696.20	1.03	0.052 8	0.000 7	0.383 2	0.005 6	0.052 6	0.000 6	320	30	329	4	331	4
11	775.02	901.19	0.86	0.054 4	0.000 7	0.389 0	0.005 4	0.051 9	0.000 6	386	28	334	4	326	4
12	354.25	513.41	0.69	0.053 0	0.000 8	0.382 4	0.005 9	0.052 3	0.000 7	330	32	329	4	329	4
13	495.61	611.86	0.81	0.051 7	0.000 7	0.379 5	0.005 6	0.053 3	0.000 7	270	31	327	4	335	4
14	585.06	603.15	0.97	0.051 9	0.000 8	0.373 8	0.005 9	0.052 2	0.000 7	281	34	323	4	328	4
15	667.16	509.28	1.31	0.058 4	0.000 8	0.429 6	0.006 5	0.053 4	0.000 7	545	31	363	5	335	4
16	205.27	311.02	0.66	0.058 2	0.001 0	0.424 1	0.007 2	0.052 9	0.000 7	537	36	359	5	332	4
17	923.00	1 198.70	0.77	0.050 9	0.000 6	0.375 1	0.005 1	0.053 4	0.000 6	238	29	323	4	335	4

续表 1
Continued Table 1

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
M1288-1.7 二长花岗岩 LA-ICP-MS															
1	43.40	160.74	0.27	0.053 2	0.001 4	0.372 2	0.010 2	0.050 8	0.000 3	336	61	321	9	319	2
2	76.06	205.56	0.37	0.054 3	0.001 6	0.379 3	0.012 3	0.050 7	0.000 3	383	66	327	11	319	2
3	67.29	177.08	0.38	0.053 9	0.001 6	0.380 0	0.011 5	0.051 1	0.000 3	367	67	327	10	321	2
4	94.02	200.04	0.47	0.053 6	0.001 0	0.369 8	0.007 1	0.050 0	0.000 3	354	43	319	6	315	2
5	88.24	259.52	0.34	0.052 6	0.001 1	0.369 0	0.008 2	0.050 9	0.000 3	310	49	319	7	320	2
6	136.67	333.34	0.41	0.053 7	0.000 8	0.375 7	0.006 0	0.050 7	0.000 3	359	35	324	5	319	2
7	194.37	404.94	0.48	0.054 0	0.000 7	0.377 3	0.004 7	0.050 6	0.000 3	372	27	325	4	318	2
8	147.63	360.07	0.41	0.053 8	0.000 9	0.376 1	0.006 3	0.050 7	0.000 3	362	36	324	5	319	2
9	124.55	345.97	0.36	0.053 9	0.000 9	0.378 0	0.006 1	0.050 8	0.000 3	368	36	326	5	320	2
10	84.66	241.89	0.35	0.054 4	0.001 2	0.381 2	0.008 9	0.050 8	0.000 3	388	51	328	8	319	2
11	129.24	369.25	0.35	0.054 4	0.001 0	0.383 2	0.006 8	0.051 1	0.000 3	386	40	329	6	321	2
12	47.54	148.57	0.32	0.053 4	0.001 9	0.372 6	0.013 6	0.050 6	0.000 3	347	82	322	12	318	2
13	87.57	213.58	0.41	0.053 5	0.001 6	0.376 7	0.011 6	0.051 1	0.000 3	349	69	325	10	321	2
14	114.44	248.77	0.46	0.054 6	0.001 1	0.382 2	0.007 6	0.050 8	0.000 3	396	44	329	7	319	2
15	68.39	162.83	0.42	0.052 7	0.001 5	0.369 0	0.010 6	0.050 8	0.000 3	316	64	319	9	319	2
16	81.23	188.90	0.43	0.053 4	0.001 6	0.372 5	0.011 3	0.050 6	0.000 3	346	68	321	10	318	2
17	107.71	276.17	0.39	0.053 0	0.000 9	0.370 4	0.006 7	0.050 7	0.000 3	328	40	320	6	319	2
18	192.26	447.11	0.43	0.052 8	0.000 6	0.370 4	0.004 7	0.050 9	0.000 3	319	28	320	4	320	2
19	87.80	274.39	0.32	0.054 8	0.002 1	0.383 1	0.030 4	0.050 7	0.000 7	405	84	329	26	319	4
20	26.82	116.61	0.23	0.163 5	0.005 4	1.141 1	0.038 3	0.050 6	0.000 4	2 492	55	773	26	318	2
21	76.84	247.88	0.31	0.054 5	0.001 0	0.382 7	0.007 2	0.050 9	0.000 3	393	42	329	6	320	2
22	17.22	286.93	0.06	0.054 2	0.001 8	0.380 0	0.012 1	0.050 9	0.000 4	379	76	327	10	320	2
23	267.54	546.00	0.49	0.053 0	0.000 6	0.372 9	0.004 0	0.051 1	0.000 3	327	24	322	3	321	2
24	78.17	169.93	0.46	0.053 7	0.001 7	0.378 0	0.012 3	0.051 0	0.000 3	359	72	326	11	321	2
M1287-5.1 正长花岗岩 SHRIMP															
1	173.97	281.62	0.62	0.050 5	2.300 0	0.347 0	2.800 0	0.048 4	1.800 0	236	51	305	5	304	6
2	295.11	529.54	0.56	0.057 1	1.700 0	0.358 0	3.400 0	0.048 5	1.700 0	353	67	305	5	305	6
3	447.82	770.57	0.58	0.055 2	1.400 0	0.352 5	2.800 0	0.048 5	1.700 0	318	51	305	5	304	6
4	199.35	435.81	0.46	0.055 8	1.800 0	0.352 0	4.200 0	0.048 3	1.700 0	324	88	304	5	305	6
5	112.82	208.46	0.54	0.052 1	2.700 0	0.360 0	3.200 0	0.049 4	1.800 0	320	61	311	6	311	6

U-Pb 同位素分析,结果显示 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 311 ~ 304 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 305.9 ± 4.7 Ma (MSWD = 0.25, $N=5$), 代表了岩体的结晶年龄(图 5d), 说明该岩体也形成于晚石炭世, 但稍晚于 Zamiin-8-1 岩体。

4.2 岩石地球化学特征

(1) Ulaanb-8-3 岩体

Ulaanb-8-3 岩体中主岩体和岩脉主量元素含量相似, 变化范围不大, 其特征是 SiO_2 (76.31% ~ 77.79%)、 K_2O (4.40% ~ 4.86%) 含量高, Al_2O_3 (12.03% ~ 12.64%)、 MgO (0.04% ~ 0.08%)、 MnO (0.01% ~ 0.02%)、 P_2O_5 (0.01% ~ 0.06%) 含量低, 其他 CaO (0.05% ~ 0.09%)、 TiO_2 (0.05% ~ 0.09%)、 Na_2O (3.57% ~ 3.83%) 含量一般(表 2)。所有样品在 K_2O - SiO_2 图(图 6a)上均落入高钾钙碱性区域, 且具有弱的过铝质属性(图 6b)。

正长花岗岩中样品中稀土元素总量变化范围较窄 ($\Sigma\text{REE} = 119.36 \times 10^{-6} \sim 180.69 \times 10^{-6}$), 轻重稀土元素分异较弱 [$\text{LREE}/\text{HREE} = 2.52 \sim 5.73$, ($\text{La}/\text{Yb})_N = 1.54 \sim 4.83$], 具有较强的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.07 \sim 0.12$), 在蛛网图上显示 Th、La、Nd、

Zr、Hf 正异常, Ba、Sr、Nb、Ti 等负异常(图 7a、7b)。

(2) Zamiin-8-1 岩体

二长花岗岩样品的主量元素 SiO_2 含量高 (72.65% ~ 76.13%), 相对富碱 ($\text{K}_2\text{O} = 4.38\% \sim 6.13\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.54\% \sim 3.51\%$), 低 P_2O_5 (0.06% ~ 0.11%)、 TiO_2 (0.06% ~ 0.24%)、 MgO (0.16% ~ 0.32%)。样品具有高钾钙碱性、较强的过铝质属性(图 6a、6b)。

二长花岗岩的稀土元素总量较低, 且变化范围较大 ($52.58 \times 10^{-6} \sim 126.40 \times 10^{-6}$), 轻重稀土元素分异不明显 [$\text{LREE}/\text{HREE} = 2.07 \sim 5.30$, ($\text{La}/\text{Yb})_N = 1.36 \sim 4.87$], 具较弱的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.10 \sim 0.47$)。在原始地幔微量元素蛛网图解中, 富集 Th、U、Hf 元素, 亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 元素(图 7c、7d)。

(3) Ulaanb-7-5 岩体

Ulaanb-7-5 正长花岗岩样品中, SiO_2 (74.85% ~ 76.22%)、 Al_2O_3 (12.92% ~ 13.47%)、 Na_2O (3.99% ~ 4.25%)、 K_2O (3.93% ~ 4.30%) 和 CaO (0.31% ~ 0.49%) 含量较高, MnO (~0.04%) 和 MgO (0.35% ~ 0.38%) 含量较低。这些样品具有高钾钙碱性和弱的过铝质属性(图 6a、6b)。

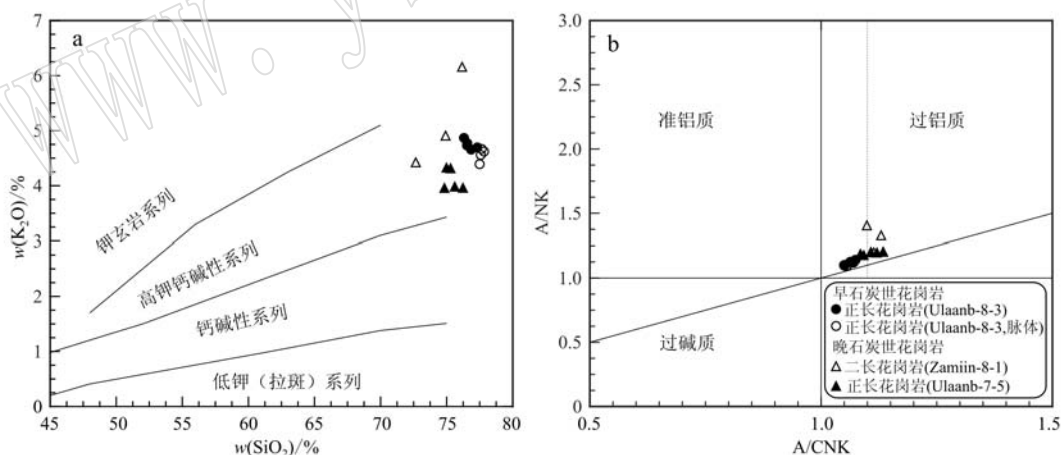


图 6 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩 K_2O - SiO_2 判别图解(a, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 A/NK -

A/CNK 图解(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 K_2O versus SiO_2 diagram (a, after Peccerillo and Taylor, 1976) and A/NK versus A/CNK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of the Carboniferous granitoids in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area

正长花岗岩稀土元素总量为 $77.93 \times 10^{-6} \sim 103.31 \times 10^{-6}$, 从球粒陨石配分模式图中, 可以看出轻重稀土元素分异较弱 [$\text{LREE}/\text{HREE} = 6.39 \sim 7.07$, ($\text{La}/\text{Yb})_N = 5.34 \sim 6.31$], 具弱的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.37 \sim 0.47$)。在微量元素蛛网图解中, 富集 Th、La、Ce、Zr、Hf 元

素, 亏损 Nb、Nd、Ta、P、Ti 等元素(图 7c、7d)。

4.3 锆石 Hf 同位素特征

(1) Ulaanb-8-3 岩体

正长花岗岩(M1498-3.1)和正长花岗岩脉(M1498-1.2)具有一致的 Hf 同位素特征, 当校正到表观

Table 2 The major ($w_R/\%$) and trace element ($w_R/10^{-6}$) compositions of Carboniferous granites in Southern Mongolia

岩性	正长花岗岩								
样品	M1498-3.1	M1498-3.2	M1498-3.3	M1498-3.4	M1498-3.5	M1498-1.1	M1498-1.2	M1498-1.3	M1498-1.5
SiO ₂	76.50	76.85	76.31	77.35	76.53	77.64	77.58	77.79	77.45
TiO ₂	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05
Al ₂ O ₃	12.51	12.29	12.55	12.31	12.64	12.03	12.20	12.10	12.20
Fe ₂ O ₃ ^T	1.16	1.11	1.01	1.15	1.17	0.86	0.88	0.89	0.88
MgO	0.08	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.04
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
CaO	0.35	0.34	0.31	0.26	0.35	0.20	0.26	0.19	0.29
Na ₂ O	3.57	3.59	3.73	3.61	3.62	3.66	3.79	3.71	3.83
K ₂ O	4.74	4.65	4.86	4.70	4.77	4.65	4.54	4.62	4.40
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.06	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LOI	0.80	0.90	0.90	0.30	0.60	0.70	0.50	0.50	0.80
Sum	99.89	99.89	99.90	99.89	99.88	99.90	99.90	99.90	99.91
Ni	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Sc	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ba	147.00	122.00	141.00	115.00	133.00	54.00	57.00	46.00	40.00
Be	7.00	5.00	9.00	4.00	8.00	4.00	6.00	6.00	3.00
Co	0.90	0.70	1.20	1.00	0.80	0.80	0.80	0.90	0.90
Cs	4.20	4.30	4.80	5.00	5.30	10.70	6.70	8.80	8.50
Ga	15.00	15.90	15.50	17.00	15.30	18.10	16.70	16.10	17.40
Hf	4.50	5.00	4.60	5.50	5.60	4.70	4.70	4.20	4.20
Nb	9.30	10.50	12.30	12.60	11.70	13.60	13.80	13.40	11.20
Rb	196.70	200.60	209.30	216.50	198.80	239.90	214.90	209.80	237.70
Sn	3.00	3.00	4.00	3.00	4.00	4.00	4.00	3.00	6.00
Sr	26.50	23.00	25.50	24.20	21.10	25.60	26.80	23.50	15.00
Ta	1.20	1.10	1.40	1.60	1.30	2.00	2.00	1.90	1.50
Th	24.30	29.30	29.40	29.90	30.10	33.00	34.90	29.60	34.90
U	1.80	2.20	2.40	2.00	2.00	2.20	2.60	2.30	2.40
V	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	15.00	8.00	17.00	17.00
W	0.50	0.90	1.70	0.60	0.90	1.20	1.10	1.00	0.50
Zr	119.60	124.50	111.10	133.30	128.40	90.40	93.30	93.20	85.00
Y	35.60	41.90	39.80	50.20	46.40	37.00	51.50	37.80	34.10
La	30.90	24.90	23.40	33.30	36.30	32.10	16.10	26.70	28.70
Ce	63.00	52.20	52.20	69.00	70.40	46.50	38.60	45.50	43.70
Pr	7.02	6.27	6.05	8.27	8.23	10.07	5.20	7.72	8.63
Nd	24.10	22.90	22.00	29.90	28.90	37.80	20.00	29.70	35.60
Sm	4.98	4.94	5.00	6.94	6.14	8.87	5.45	7.47	8.82
Eu	0.24	0.23	0.23	0.24	0.25	0.20	0.12	0.15	0.14
Gd	4.93	5.29	5.04	6.82	6.07	7.33	6.10	6.13	7.42
Tb	0.86	0.98	0.95	1.23	1.10	1.31	1.22	1.13	1.26
Dy	5.53	6.42	6.21	8.16	7.42	7.81	8.21	7.15	7.61
Ho	1.30	1.60	1.56	1.98	1.78	1.61	2.04	1.57	1.62
Er	4.16	5.26	4.86	6.12	5.67	5.10	6.58	4.87	4.92
Tm	0.65	0.82	0.78	1.01	0.89	0.85	1.10	0.85	0.87
Yb	4.59	5.60	5.47	6.66	6.35	6.31	7.49	6.38	6.23
Lu	0.71	0.88	0.88	1.06	0.94	0.92	1.15	0.93	0.90
Mo	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30	0.70	0.90
Cu	1.60	1.30	3.60	2.20	2.50	2.10	12.00	3.60	1.40
Pb	12.50	16.10	14.40	18.40	14.90	13.90	20.50	15.90	13.00
Zn	19.00	16.00	18.00	21.00	26.00	18.00	27.00	21.00	16.00
Ag	0.60	0.40	0.90	0.60	1.00	1.20	0.60	2.10	1.20
Ni	2.00	1.60	1.40	2.10	1.90	9.30	8.30	10.80	11.50
As	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Au	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30	0.40	1.50
Sb	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Bi	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

续表 2
Continued Table 2

岩性 样品	二长花岗岩				正长花岗岩			
	M1288-1.6	M1288-1.7	M1288-1.8	M1287-5.1	M1287-5.2	M1287-5.3	M1287-5.4	M1287-5.5
SiO ₂	72.65	74.87	76.13	75.26	74.85	76.22	74.98	75.61
TiO ₂	0.24	0.16	0.06	0.16	0.19	0.18	0.18	0.18
Al ₂ O ₃	14.72	13.73	12.83	13.47	13.18	12.92	13.33	13.14
Fe ₂ O ₃ ^T	1.45	1.01	1.00	1.16	1.42	1.30	1.42	1.30
MgO	0.32	0.22	0.16	0.35	0.37	0.37	0.38	0.38
MnO	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
CaO	1.58	0.95	0.38	0.43	0.49	0.31	0.41	0.36
Na ₂ O	3.51	3.12	2.54	4.09	4.25	3.99	4.13	4.14
K ₂ O	4.38	4.88	6.13	4.29	3.93	3.93	4.30	3.94
P ₂ O ₅	0.10	0.11	0.06	0.07	0.05	0.04	0.05	0.06
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LOI	0.90	0.80	0.70	0.60	1.10	0.60	0.70	0.80
Sum	99.82	99.88	99.94	99.88	99.88	99.88	99.88	99.89
Ni	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Sc	4.00	4.00	3.00	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Ba	815.00	417.00	61.00	541.00	494.00	492.00	518.00	465.00
Be	2.00	7.00	1.00	4.00	4.00	6.00	1.00	1.00
Co	2.10	1.60	0.70	0.90	1.90	1.60	2.10	2.10
Cs	5.60	11.40	5.30	1.30	1.50	1.60	1.20	1.40
Ga	16.20	15.50	14.10	10.30	11.50	11.90	11.50	12.20
Hf	4.40	4.00	2.00	2.30	3.60	3.50	3.00	2.70
Nb	4.70	3.70	3.50	5.60	8.50	7.50	7.50	7.10
Rb	122.00	171.70	187.90	113.00	111.00	114.40	123.90	110.30
Sn	5.00	7.00	5.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.00
Sr	134.90	75.10	20.20	150.90	138.40	135.70	141.50	134.60
Ta	0.50	0.70	0.50	1.00	1.20	0.80	1.30	1.00
Th	10.20	9.30	6.30	12.00	17.50	15.10	16.30	14.20
U	1.80	2.50	2.60	1.40	1.40	1.30	1.40	1.20
V	16.00	13.00	8.00	15.00	18.00	17.00	18.00	19.00
W	0.80	0.70	0.90	0.70	0.70	0.70	0.70	0.50
Zr	142.40	104.50	40.00	81.40	98.90	87.30	92.90	86.70
Y	31.60	25.20	28.50	17.00	22.00	21.30	21.40	19.60
La	21.30	13.00	6.00	16.30	21.70	22.60	19.90	20.50
Ce	50.10	29.90	16.80	31.80	40.40	40.00	39.00	39.70
Pr	6.00	3.75	2.14	3.53	4.52	4.83	4.43	4.46
Nd	23.00	13.00	7.90	13.60	15.70	18.00	15.40	18.20
Sm	5.14	3.50	2.54	2.29	3.35	3.72	3.17	3.05
Eu	0.80	0.47	0.09	0.35	0.42	0.44	0.43	0.41
Gd	5.32	3.59	3.20	2.30	3.05	3.51	2.76	2.94
Tb	0.85	0.66	0.67	0.38	0.47	0.50	0.46	0.45
Dy	5.47	4.24	4.97	2.38	3.73	3.29	2.94	3.11
Ho	1.14	0.90	1.09	0.57	0.72	0.71	0.61	0.59
Er	3.24	2.64	3.10	1.64	2.10	2.40	2.41	2.00
Tm	0.47	0.40	0.47	0.30	0.40	0.35	0.35	0.31
Yb	3.14	2.72	3.16	2.19	2.62	2.57	2.61	2.45
Lu	0.43	0.39	0.45	0.30	0.39	0.39	0.35	0.36
Mo	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Cu	11.80	9.00	1.20	3.60	1.40	1.70	1.20	1.20
Pb	4.20	3.40	3.60	6.70	7.20	6.50	6.80	6.50
Zn	25.00	19.00	29.00	40.00	31.00	28.00	29.00	28.00
Ag	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Ni	5.40	3.50	1.50	1.20	0.80	1.00	0.70	1.10
As	2.50	3.80	5.50	1.90	1.10	1.30	1.10	0.50
Au	0.50	0.50	1.20	0.50	0.50	0.50	1.10	0.50
Cd	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Sb	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Bi	0.10	0.10	0.30	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

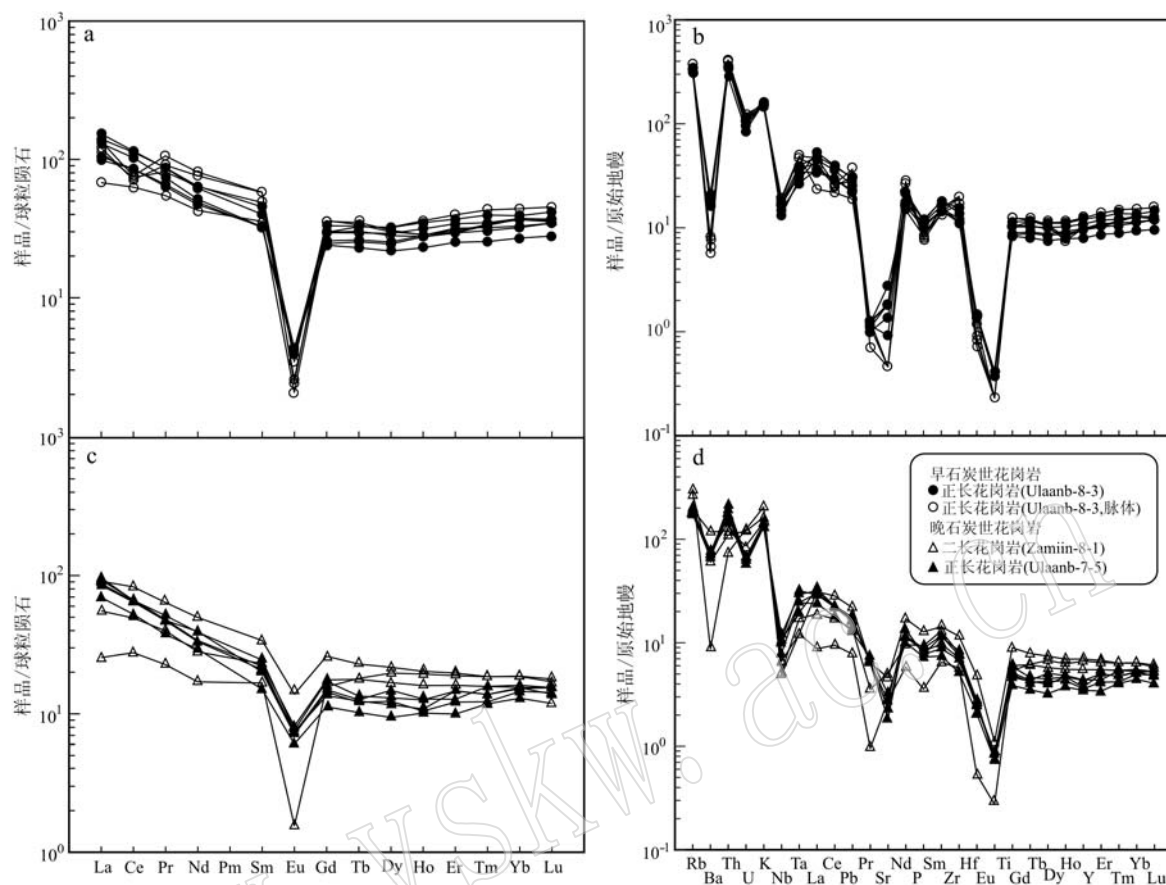


图7 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a、c)和微量元素原始地幔标准化多元蛛网图(b、d)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a and c) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b and d) for the Carboniferous granites

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄时, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 851 ~ 0.282 981, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值介于 9.70 ~ 14.90 之间(平均 12.83), t_{DM}^c 年龄为 721 ~ 393 Ma(平均 524 Ma, 表3)。

(2) ZamiinUud-1 岩体

M1288-1.7 样品中选取了 15 颗具有代表性的锆石进行 Lu-Hf 同位素测试分析工作。当校正到表观 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄时, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 972 ~ 0.283 016, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 13.68 ~ 15.21, 平均 14.49, t_{DM}^c 年龄为 442 ~ 344 Ma, 平均 390 Ma(表3)。

4.4 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素特征

(1) Ulaanb-8-3 岩体

正长花岗岩(M1498-3.1 和 M1498-1.2)的 Sr-Nd 同位素成分组成为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.807 827 ~ 0.814 757) 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.512 668 ~ 0.512 778)。以 337 和 332 Ma 年龄计算初始 Sr-Nd 同位素组成, 初始 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.703 78 ~ 0.703 99, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 3.68 ~ 4.09, 二阶段 Nd 同位素模式年龄为 790 ~ 750

Ma(表4)。

(2) ZamiinUud-1 岩体

二长花岗岩(M1288-1.7)的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.701 71, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 1.17, $t_{\text{DM}2}$ 为 980 Ma; 正长花岗岩(M1287-5.1)根据 U-Pb 定年结果 306 Ma 计算, 得出 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.704 27, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 值为 0.512 516, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值为 5.25, 二阶段 Nd 同位素模式年龄为 640 Ma(表4)。

5 讨论

5.1 成因类型

扎门乌德-乌兰巴德拉赫地区早石炭世花岗岩(正长花岗岩和正长花岗岩脉) A/CNK 值小于 1.1, 富集 K、Th、Nd、Zr、Hf 等元素, 亏损 Ba、Sr、Nb、P、Ti 等元素, 且 Eu 有较强的负异常, 具有分异演化的特征, 这些地球化学特征与 I 型花岗岩特征相似; 晚石炭世花岗岩(正长花岗岩和二长花岗岩)部分数据

表 3 南蒙古石炭纪花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素数据

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic data of Carboniferous granites in Southern Mongolia

样点	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{\text{DM}}^c/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
M1498-3. 1. 1	337	0.138 398	0.002 031	0.282 933	0.282 921	5.70	12.70	465	537	-0.94
M1498-3. 1. 2	337	0.126 861	0.001 912	0.282 978	0.282 966	7.30	14.30	398	432	-0.94
M1498-3. 1. 3	337	0.146 097	0.002 275	0.282 995	0.282 981	7.90	14.80	377	400	-0.93
M1498-3. 1. 4	337	0.084 973	0.001 351	0.282 973	0.282 965	7.10	14.20	399	436	-0.96
M1498-3. 1. 5	337	0.143 229	0.002 124	0.282 989	0.282 975	7.70	14.60	385	411	-0.94
M1498-3. 1. 6	337	0.127 089	0.001 883	0.282 969	0.282 957	7.00	14.00	411	453	-0.94
M1498-3. 1. 7	337	0.122 293	0.001 816	0.282 914	0.282 903	5.00	12.00	489	577	-0.95
M1498-3. 1. 8	337	0.121 082	0.001 965	0.282 900	0.282 888	4.50	11.50	512	611	-0.94
M1498-3. 1. 9	337	0.148 419	0.002 217	0.282 938	0.282 924	5.90	12.80	460	528	-0.93
M1498-3. 1. 10	337	0.189 806	0.003 247	0.282 994	0.282 974	7.90	14.60	388	415	-0.90
M1498-3. 1. 11	337	0.088 045	0.001 398	0.282 964	0.282 955	6.80	13.90	413	458	-0.96
M1498-3. 1. 12	337	0.168 301	0.002 666	0.282 908	0.282 892	4.80	11.60	510	603	-0.92
M1498-3. 1. 13	337	0.078 763	0.001 254	0.282 908	0.282 900	4.80	11.90	491	584	-0.96
M1498-3. 1. 14	337	0.181 245	0.002 717	0.283 001	0.282 983	8.10	14.90	374	393	-0.92
M1498-3. 1. 15	337	0.164 223	0.002 502	0.282 980	0.282 964	7.40	14.20	402	437	-0.92
M1498-3. 1. 16	337	0.078 330	0.001 238	0.282 852	0.282 844	2.80	10.00	572	712	-0.96
M1498-1. 2. 1	332	0.102 438	0.001 691	0.282 922	0.282 912	5.30	12.20	476	560	-0.95
M1498-1. 2. 2	332	0.147 850	0.002 331	0.282 933	0.282 919	5.70	12.50	469	544	-0.93
M1498-1. 2. 3	332	0.153 612	0.002 540	0.282 908	0.282 892	4.80	11.60	509	604	-0.92
M1498-1. 2. 4	332	0.135 012	0.002 260	0.282 935	0.282 921	5.80	12.60	465	539	-0.93
M1498-1. 2. 5	332	0.078 383	0.001 303	0.282 858	0.282 849	3.00	10.00	564	702	-0.96
M1498-1. 2. 6	332	0.107 998	0.001 833	0.282 945	0.282 933	6.10	13.00	446	511	-0.94
M1498-1. 2. 7	332	0.146 342	0.002 259	0.282 964	0.282 950	6.80	13.60	422	472	-0.93
M1498-1. 2. 8	332	0.111 222	0.001 824	0.282 880	0.282 869	3.80	10.70	540	658	-0.95
M1498-1. 2. 9	332	0.159 186	0.002 464	0.282 900	0.282 885	4.50	11.30	520	622	-0.93
M1498-1. 2. 10	332	0.127 879	0.002 061	0.282 954	0.282 941	6.40	13.30	436	494	-0.94
M1498-1. 2. 11	332	0.092 415	0.001 549	0.282 851	0.282 841	2.80	9.70	578	721	-0.95
M1498-1. 2. 12	332	0.124 021	0.001 987	0.282 945	0.282 933	6.10	13.00	447	512	-0.94
M1498-1. 2. 13	332	0.163 689	0.002 518	0.282 963	0.282 948	6.80	13.50	427	478	-0.92
M1498-1. 2. 14	332	0.093 970	0.001 577	0.282 981	0.282 971	7.40	14.30	391	425	-0.95
M1498-1. 2. 15	332	0.165 351	0.002 650	0.282 975	0.282 959	7.20	13.90	411	453	-0.92
M1498-1. 2. 16	332	0.150 355	0.002 645	0.282 959	0.282 943	6.60	13.30	435	490	-0.92
M1288-1. 7-1	320	0.073 216	0.001 525	0.282 996	0.282 987	7.92	14.22	368	408	-0.95
M1288-1. 7-2	320	0.072 752	0.001 504	0.283 001	0.282 993	8.10	14.40	361	396	-0.95
M1288-1. 7-3	320	0.077 447	0.001 629	0.283 020	0.283 011	8.77	15.04	334	354	-0.95
M1288-1. 7-4	320	0.065 545	0.001 456	0.282 996	0.282 988	7.92	14.23	367	407	-0.96
M1288-1. 7-5	320	0.075 266	0.001 645	0.282 985	0.282 976	7.53	13.80	385	435	-0.95
M1288-1. 7-6	320	0.167 799	0.003 446	0.283 031	0.283 012	9.16	15.07	335	352	-0.90
M1288-1. 7-7	320	0.094 327	0.001 993	0.283 025	0.283 014	8.95	15.15	330	347	-0.94
M1288-1. 7-8	320	0.075 913	0.001 655	0.282 991	0.282 982	7.74	14.01	377	421	-0.95
M1288-1. 7-9	320	0.089 063	0.002 047	0.283 027	0.283 016	9.02	15.21	328	344	-0.94
M1288-1. 7-10	320	0.082 418	0.001 726	0.282 982	0.282 972	7.43	13.68	390	442	-0.95
M1288-1. 7-11	320	0.077 991	0.001 638	0.283 013	0.283 004	8.52	14.79	345	370	-0.95
M1288-1. 7-12	320	0.127 649	0.002 606	0.283 027	0.283 012	9.02	15.10	333	351	-0.92
M1288-1. 7-13	320	0.090 516	0.001 964	0.283 001	0.282 990	8.10	14.31	365	402	-0.94
M1288-1. 7-14	320	0.113 614	0.002 320	0.283 009	0.282 996	8.38	14.52	357	388	-0.93
M1288-1. 7-15	320	0.070 331	0.001 482	0.282 986	0.282 978	7.57	13.87	382	430	-0.96

表 4 南蒙古石炭纪花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of Carboniferous granites in Southern Mongolia

样品编号	t/Ma	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	I_{Sr}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	I_{Nd}	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Sm/Nd}}$
M1498-3. 1	337	21.69	0.807 827	0.703 78	0.124 9	0.512 668	0.512 392	3.68	790	-0.36
M1498-1. 2	332	23.44	0.814 757	0.703 99	0.164 7	0.512 778	0.512 420	4.09	750	-0.16
M1288-1. 7	320	6.63	0.731 887	0.701 71	0.162 8	0.512 627	0.512 286	1.17	980	-0.17
M1287-5. 1	306	2.17	0.713 709	0.704 27	0.101 8	0.512 717	0.512 516	5.31	640	-0.48

A/CNK 值大于 1.1,但其具有高钾钙碱性属性, Eu 具有较弱的负异常,不具有 S 型花岗岩特征性矿物(富铝质矿物),仍具有 I 型花岗岩地球化学和矿物学特征,其部分地化数据指标 A/CNK 值大于 1.1,可能是岩浆在上升的过程中有少量古老沉积地壳物质的混染加入所致。

石炭纪花岗岩样品在 $Ga-Al_2O_3$ 图解中,大部分数据均落在 I 型花岗岩区域,只有正长花岗岩脉中 2 个数据落在 A 型花岗岩区域,可能是因为其形成于局部张性环境中,沿断裂呈脉体侵入导致(图 8a)。石炭纪花岗岩 P_2O_5 与 SiO_2 含量呈现负相关, Th、Y 与 Rb 元素呈现正相关关系(图 8b、8c、8d),具有典型的 I 型花岗岩演化趋势(Chappell and White, 1992; 吴福元等, 2007)。据此本文认为扎门乌德-乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩应该为 I 型花岗岩。

5.2 源区物质特征

有关 I 型花岗岩的形成主要有两种认识: ① 地壳的部分熔融与来自幔源的铁镁质岩浆的混合,并伴随结晶分异作用(Castro *et al.*, 1991); ② 受壳幔作用影响下地壳或者洋壳的部分熔融(吴福元等, 2007)。扎门乌德-乌兰巴德拉赫地区早石炭世花岗岩(正长花岗岩和正长花岗岩脉)具有相似的 Hf 同位素特征,表明其源自同一岩浆房,其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 9.70~14.90 之间(平均值为 12.83),靠近亏损地幔演化线,且均位于球粒陨石和亏损地幔之间的区域(图 9b),其 $t_{DM2}(Hf)$ 年龄为 721~393 Ma(平均值为 524 Ma),全岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为 3.68~4.09,二阶段 Nd 同位素模式年龄为 790~750 Ma,表明其源区可能为地幔分异的新生地壳物质(Peter and Roland, 2003)。结合其地球化学特征,说明早石炭世正长花岗岩可能为受地幔作用影响下玄武质洋壳的部分熔

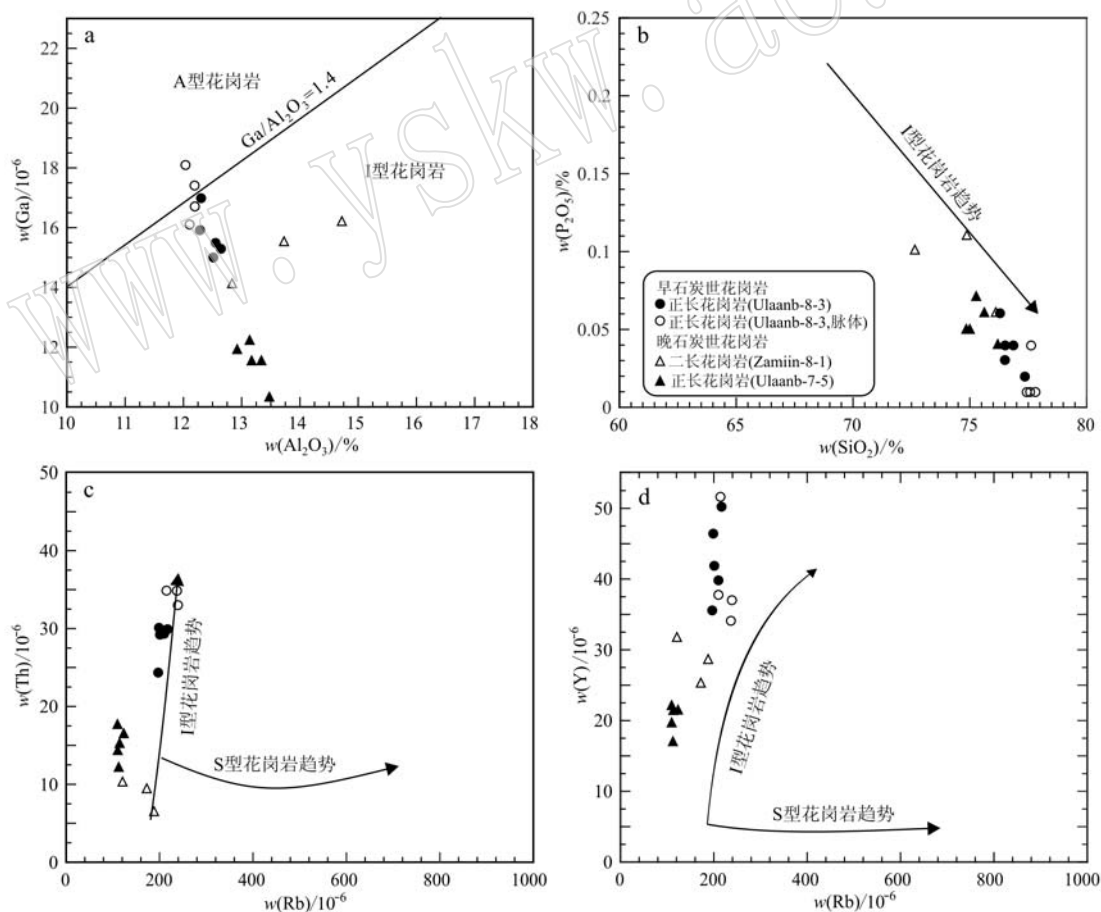


图 8 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩判别图

Fig. 8 Variation diagrams for the Carboniferous granites in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area

I 和 S 型花岗岩趋势线源自 Chappell 和 White (1992)

trends of the I- and S-type granites after Chappell and White (1992)

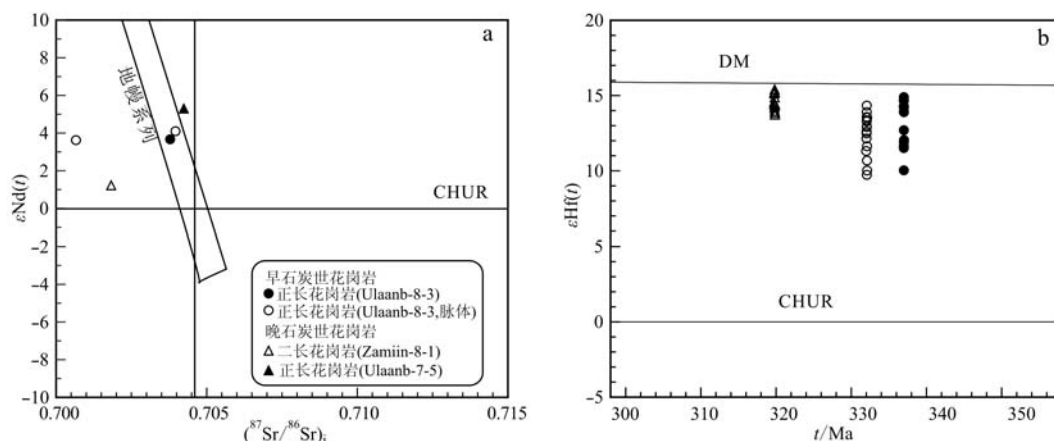


图9 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解(a)和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解(b)

Fig. 9 Plots of $\varepsilon\text{Nd}(t)$ versus ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (a) and $\varepsilon\text{Hf}(t)$ versus t (b) of the Carboniferous granites in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area

融产物,研究区早石炭世地壳发生了增生作用。

晚石炭世花岗岩(正长花岗岩和二长花岗岩), $\varepsilon\text{Nd}(t) > 0$ (1.17~5.25), 且落在亏损地幔源区, 反映了其源区可能主要为俯冲背景下的亏损地幔物质(图9a、10a)。另外其锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 13.68~15.21, 平均值 14.49, 高于早石炭世花岗岩 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值, 也表明其源区主要是地幔分异的新生地壳物质。其 t_{DM}^{c} (Hf) 年龄为 442~344 Ma (平均值为 390 Ma), Nd 二阶段模式年龄为 0.85~0.64 Ga, 大部分 A/CNK 值大于 1.1, 表明其源区有古老地壳物质或者沉积地壳物质的加入, 暗示岩浆(地幔分异的新生地壳物质)在上升过程中, 有少量古老沉积地壳物质加入, 反映了晚石炭世地壳发生了增生和改造作用, 且以增生作用为主(图9b)。

5.3 岩浆构造演化

中亚造山带南缘构造背景争议较大, 其核心问题是古亚洲洋的闭合时间, 代表性观点有两种: ① 志留纪—泥盆纪(早古生代时期)(Tang, 1990; Tang and Yan, 1993; Xu *et al.*, 2015; 庞崇进等, 2016; 徐备等, 2018); ② 二叠纪—三叠纪(晚古生代时期)(Xiao *et al.*, 2003, 2009, 2010; Windley *et al.*, 2007; 李锦轶等, 2009, 2019; 刘建峰等, 2009, 2016; 韩宝福等, 2010; Wang *et al.*, 2017)。而石炭纪作为一个承前启后的关键时期, 厘清其构造环境对于解决古亚洲洋闭合的时间具有重要意义。在(Nb/Zr)_N-Zr 图解上, 扎门乌德-乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩落在俯冲相关区域, 结合区

域地质背景说明其在石炭纪结束之前依然处在俯冲作用构造背景下, 表明古亚洲洋在该时期仍未完全闭合(图10a)。

早石炭世花岗岩在判别图解中(图10b、10c、10d), 落在岛弧或者板内花岗岩区域, 且其与岛弧背景下的花岗岩特征存在明显不同; 其同位素特征(源区主要来自于玄武质洋壳)以及同一岩浆房的细粒正长花岗岩脉在 5 Ma 内沿张开裂隙(断裂)侵入中细粒正长花岗岩主体等特征, 表明其形成于俯冲碰撞环境下的局部拉张。结合岩浆活动时空分布规律, 推断其构造背景可能为俯冲大洋板块的回撤导致局部拉张, 地壳和岩石圈地幔逐渐变薄, 软流圈上涌触发洋壳岩石的部分熔融产生花岗质岩浆(Elsasser, 1971; Garfunkel *et al.*, 1986; Jiang *et al.*, 2006, 2011; Hamilton, 2007)。

晚石炭世早期二长花岗岩(320 Ma)全部落入岛弧区域, 且与区域内存在的泥盆纪-石炭纪岛弧地壳是一致的(Blight *et al.*, 2010), 表明其形成与于岛弧环境; 晚石炭世晚期正长花岗岩(305 Ma)落入后碰撞区域, 同时该区域出露了一条晚石炭世-二叠纪代表后碰撞环境的 A 型花岗岩带(Lamb and Badarch, 2001; Gerel *et al.*, 2005; Jahn *et al.*, 2009; Tong *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2020), 间接表明其形成于后碰撞伸展的构造环境(唐克东等, 1982; 刘建峰, 2009)。上述证据表明石炭纪扎门乌德-乌兰巴德拉赫地区一直处于持续俯冲的构造背景, 区内的花岗岩记录了研究区内早期大洋板块回撤导致的局

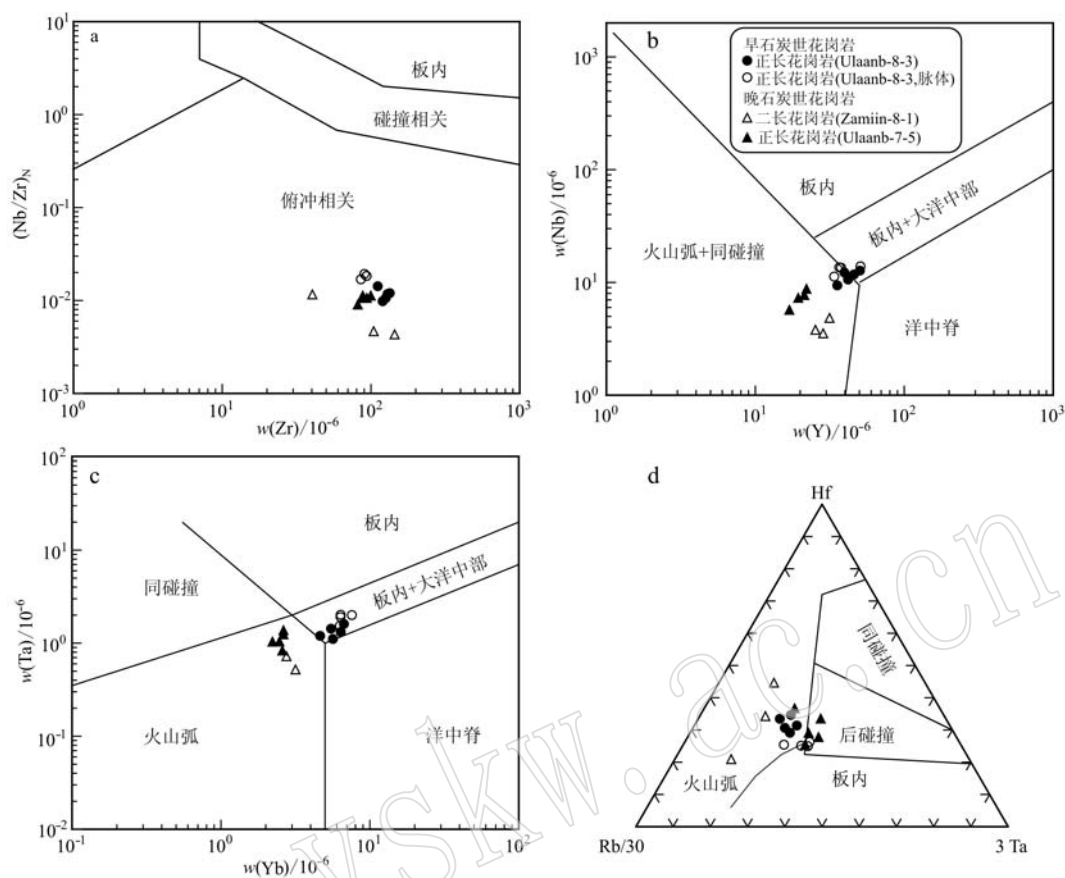


图 10 扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区石炭纪花岗岩构造环境判别图解

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams of Carboniferous granites in Zamyn-Uud and Ulan Badrach area

a— $(\text{Nb}/\text{Zr})_{\text{N}}$ —Zr 图解; b—Nb—Y 图解; c—Ta—Yb 图解 (Pearce *et al.*, 1984); d—Hf—Rb—Ta 图解 (Harris *et al.*, 1987)

a— $(\text{Nb}/\text{Zr})_{\text{N}}$ versus Zr diagram; b—Nb versus Y diagram; c—Ta versus Yb diagram (after Pearce *et al.*, 1984); d—Hf—Rb—Ta diagram (after Harris *et al.*, 1987)

部拉张到晚期后碰撞伸展环境的转变。

6 结论

本文依据野外地质调查、室内镜下观察、Sr-Nd-Hf 同位素和地球化学数据以及区域地质背景资料, 获得以下结论:

(1) 借助于锆石 U-Pb 定年方法, 在南蒙古东戈壁省扎门乌德和乌兰巴德拉赫地区识别出 3 个石炭纪花岗岩体, 其侵位年龄为早石炭世 (337 Ma 和 332 Ma) 和晚石炭世 (320 Ma 和 306 Ma)。

(2) 石炭纪花岗岩均为 I 型花岗岩, 早石炭世花岗岩源区主要是新生洋壳物质, 晚石炭世花岗岩源区以新生地壳物质为主, 岩浆在上升过程中加入少量古老地壳物质; 岩浆作用早石炭世主要是地壳增生作用, 晚石炭世则以地壳增生作用为主、地壳改造

作用为辅。

(3) 研究区石炭纪一直处于俯冲构造背景, 石炭纪花岗岩记录了早期大洋板块回撤导致的局部拉张到晚期后碰撞伸展环境的转变。

致谢 感谢匿名评审人对稿件提出的宝贵意见。

References

- Badarch G and Orolmaa D. 1998. Overview of the geology and tectonic evolution of southern Mongolia[J]. *Mongolia Geosciences*, 10: 10~16.
- Badarch G and Tomurtogoo O. 2001. Tectonostratigraphic Terranes of Mongolia[J]. *Gondwana Research*, 4(2): 143~144.
- Badarch G, Cunningham W D and Windley B F. 2002. A new terrane sub-division for Mongolia; Implications for the Phanerozoic crustal growth

- of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 87~110.
- Bligh J H S, Crowley Q G, Petterson M G, *et al.* 2010. Granites of the Southern Mongolia Carboniferous Arc: New geochronological and geochemical constraints[J]. *Lithos*, 116(1~2): 35~52.
- Castro A, Moreno-Ventas I and Dela-Rosa J D. 1991. H-type (hybrid) granitoids: A proposed revision of the granite-type classification and nomenclature[J]. *Earth Science Reviews*, 31: 237~253.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1~26.
- Chen Fukuan, Satir M, Ji J, *et al.* 2002. Nd-Sr-Pb isotopes of Tengchong Cenozoic volcanic rocks from western Yunnan, China: Evidence for an enriched-mantle source[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 39~45.
- Chen Fukuan, Li XiangHui, Wang XiuLi, *et al.* 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6): 1 179~1 194.
- Elsasser W M. 1971. Sea-floor spreading as thermal convection[J]. *Journal of Geophysical Research*, 76: 1 101~1 112.
- Garfunkel Z, Anderson C A and Schubert G. 1986. Mantle circulation and the lateral migration of subducted slabs[J]. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 91: 7 205~7 223.
- Gerel O, Oyungereel S and Minjin C. 2005. Intrusive magmatism of South Mongolia[A]. Seltmann R, Gerel O and Kirwin D. *Geodynamics and Metallogeny of Mongolia with Special Emphasis on Copper and Gold Deposits*[C]. London: CERCAMS, 1~221.
- Hamilton W. 2007. Driving mechanism and 3-D circulation of plate tectonics[A]. Sears J W, Harms T A and Evenchick C A. *Whence the Mountains? Inquiries into the Evolution of Orogenic Systems: A Volume in Honor of Raymond A*[C]. Geological Society of America, Special Paper 433, 1~25.
- Han Baofu, Zhang Chen, Zhao Lei, *et al.* 2010. A preliminary study of granitoids in western Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 741~749(in Chinese with English abstract).
- Harris R A, Stone D B and Turner D L. 1987. Tectonic implications of paleomagnetic and geochronologic data from the Yukon-Koyukuk province, Alaska[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 99(3): 362~375.
- Hawkesworth C, Cawood P and Dhuime B. 2013. Continental growth and the crustal record[J]. *Tectonophysics*, 609: 651~660.
- Hou Kejun, Li Tinghe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28: 481~492(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zhou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Litvinovsky B A, Zanzilevich A N, *et al.* 2009. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 113: 521~539.
- Jia Xiaoxin. 2018. Temporal and Spatial Evolution of Nd and Hf Isotopes and Composition of Deep Crust in Erlanhot Dongwuqi Granite Belt[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D, *et al.* 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dikes, Southeast China: Implications for a back-arc extension setting[J]. *Geological Magazine*, 143: 457~474.
- Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, *et al.* 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China[J]. *Lithos*, 121: 55~73.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: Geological and isotopic evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605~627.
- Kröner A, Kovach V, Belousov E, *et al.* 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 25(1): 103~125.
- Khain E V, Bibikova E V, Salnikova E B, *et al.* 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: New geochronologic data and palaeotectonic reconstructions[J]. *Precambrian Research*, 1~4: 329~358.
- Lamb M A and Badarch G. 2001. Paleozoic sedimentary basins and volcanic arc systems of southern Mongolia: New geochemical and Paleopacific plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3~4): 207~224.
- Li Jinyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, *et al.* 2009. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian Orogenic Region and its adjacent areas[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 584~605(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhang Jin, Liu Jianfeng, *et al.* 2019. Crustal tectonic framework of China and its formation processes: Constraints from structural deformation[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 678~698(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng. 2009. Late Paleozoic Magmatism and its Constraints on

- Regional Tectonic Evolution in Linxi-Dongwuqi Area, Inner Mongolia [D]. Jilin: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, *et al.* 2009. Geochemical characteristic of Carboniferous quartz-diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Sun Lixin, *et al.* 2016. Zircon U-Pb dating of the Jiujingzi ophiolite in Bairin Left Banner, Inner Mongolia: Constraints on the formation and evolution of the Xar Moron River suture zone [J]. *Geology in China*, 43(6): 1 947~1 962 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Zhang Xingzhou, Chi Xiaoguo, *et al.* 2011. Deformation and tectonic layer division of the Upper Paleozoic in Daxing'anling Area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1 304~1 313 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. California: Berkeley Geochronology Center.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Mineral Resources Authority of Mongolian, Mongolia Academy of Sciences. 1998. Geological Map of Mongolia: Scale 1:1 000 000[M]. Ulaanbaatar, 1~44.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Peter D K and Roland M. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in Zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 327~341.
- Ren Jishun, Niu Baogui, Wang Jun, *et al.* 2013. 1:5 million international geological map of Asia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1: 24~30 (in Chinese with English abstract).
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S, *et al.* 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 209~304.
- Sun Lixin, Ren Bangfang, Zhao Fengqing, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Mesoproterozoic granitic gneiss in Xilinhot Block, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2/3): 327~340 (in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong. 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean craton[J]. *Tectonics*, 9(2): 249~260.
- Tang Kedong, Su Yangzheng and Wang Ying. 1982. Some characteristics of geological development in Eastern ural Mongolia fold area [A]. *Proceedings of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences* [C]. (3): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Tang Kedong and Yan Zhuyun. 1993. Regional metamorphism and tectonic evolution of the Inner Mongolian suture zone [J]. *Journal Metamorphic Geology*, 11: 511~522.
- Tong Ying, Jahn Bor-ming, Wang Tao, *et al.* 2015. Permian alkaline granites in the Erenhot-Hegenshan belt, northern Inner Mongolia, China: Model of generation, time of emplacement and regional tectonic significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(B): 320~336.
- Wang Tao, Tong Ying, Zhang lei, *et al.* 2017. Phanerozoic granitoids in the central and eastern parts of Central Asia and their tectonic significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 368~392.
- Wilde S A, Wu Fuyuan and Zhao Guochun. 2010. The Khanka Block, NE China, and its significance for the evolution of the Central Asian Orogenic Belt and continental accretion [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 338: 117~137.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 164: 31~47.
- Windley B F, Maruyama S and Xiao Wenjiao. 2010. Delamination/thinning of sub-continental lithospheric mantle under eastern China: The role of water and multiple subduction [J]. *American Journal of Science*, 310: 1 250~1 293.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217~1 238 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181~189 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Tectonics*, 22(6): 1~21.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of central Asia [J]. *Geological Society, London*, 161: 339~342.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Huang Baochun, *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[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1 189~1 217.
- Xiao Wenjiao, Huang Baochun, Han Chunming, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens [J]. *Gondwana Research*, 18: 253~273.
- Xu Bei, Charvet J, Chen yan, *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[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 342~1 364.
- Xu Bei, Wang Zhiwei, Zhang Liyang, *et al.* 2018. The Xing-Meng intra-continent orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (10): 2 819~2 844 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zhao Pan, Wang Yanyan, *et al.* 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia orogenic belt (XMOB) in north China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 183~196.
- Xu Guozhan, Deng Changzhou, Li Chenglu, *et al.* 2020. Petrogenesis of Late Carboniferous A-type granites and Early Cretaceous adakites of the Songnen Block, NE China: Implications for the geodynamic evolution of the Paleo-Asian and Paleo-Pacific oceans [J]. *Lithos*, 105 575: 366~367.
- Yang Qidi, Guo Lei, Wang Tao, *et al.* 2014. Geochronology, origin, sources and tectonic settings of Late Mesozoic two-stage granites in the Ganzhuermiao region, central and southern Da Hinggan Range, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1 961~1 981 (in Chinese with English abstract).
- 地壳深部组成[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 584~605.
- 李锦轶, 张进, 刘建峰, 等. 2019. 中国地壳结构构造与形成过程: 来自构造变形的约束[J]. *地质力学学报*, 25(5): 678~698.
- 刘建峰. 2009. 内蒙古林西-东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约[D]. 吉林大学.
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 83(3): 365~376.
- 刘建峰, 李锦轶, 孙立新, 等. 2016. 内蒙古巴林左旗九井子蛇绿岩锆石 U-Pb 定年: 对西拉木伦河缝合带形成演化的约束[J]. *中国地质*, 43(6): 1 947~1 962.
- 刘永江, 张兴洲, 迟效国, 等. 2011. 大兴安岭地区上古生界变形特征及构造层划分[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1 304~1 313.
- 庞崇进, 王选策, 徐备, 等. 2016. 兴蒙造山带造山后伸展的岩浆记录: 来自晚石炭世 N-MORB 型玄武岩的证据[A]. 中国地球科学联合学术年会[C]. 北京.
- 任纪舜, 牛宝贵, 王军, 等. 2013. 1:500 万国际亚洲地质图[J]. *地球学报*, 1: 24~30.
- 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 2013. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. *地质通报*, Z1: 327~340.
- 唐克东, 苏养正, 王莹. 1982. 乌拉尔-蒙古褶皱区东部地质发展的某些特点[A]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集[C]. (3): 1~14.
- 吴福元, 孙德有, 林强, 等. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 2: 3~5.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1 217~1 238.
- 徐备, 王志伟, 张立杨, 等. 2018. 兴蒙陆内造山带[J]. *岩石学报*, 34(10): 2 819~2 844.
- 杨奇荻, 郭磊, 王涛, 等. 2014. 大兴安岭中南段甘珠尔庙地区晚中生代两期花岗岩的时代、成因、物源及其构造背景[J]. *岩石学报*, 30(7): 1 961~1 981.

附中文参考文献

- 韩宝福, 张臣, 赵磊, 等. 2010. 内蒙古西部呼伦陶勒盖地区花岗岩类的初步研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 741~749.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2 595~2 604.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4): 481~492.
- 贾孝新. 2018. 二连浩特-东乌旗花岗岩带 Nd、Hf 同位素时空演变及