

内蒙古阿拉善地区二叠纪曼德林乌拉岩体年龄、成因及其地质意义

张建军¹, 张磊¹, 王涛^{1,2}, 史兴俊³

ZHANG Jianjun¹, ZHANG Lei¹, WANG Tao^{1,2}, SHI Xingjun³

1. 自然资源部深地动力学重点实验室/中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 北京离子探针中心, 北京 100037;

3. 信阳师范学院城市与环境科学学院, 河南 信阳 464300

1. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources/Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China;

3. School of Urban and Environmental Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464300, He'nan, China

摘要: 内蒙古阿拉善地块北缘及其邻区广泛出露早古生代—早中生代侵入岩, 其时空分布、源区物质组成及成因对研究阿拉善北部地区构造演化乃至整个中亚造山带南缘晚期的演化具有重要意义。曼德林乌拉岩体位于阿拉善地块北部雅布赖—诺尔公—洪古尔玉林带西段, 岩体以二长花岗岩为主, 广泛发育岩浆暗色包体。这些镁铁质包体为岩浆结构, 大多具有塑性外形, 并具有多种不平衡结构和矿物组合, 如斜长石环带、针状磷灰石等。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 曼德林乌拉二长花岗岩年龄为 271 ± 3 Ma, 花岗岩中发育的包体年龄为 271 ± 2 Ma, 表明该岩体形成于二叠纪, 而非之前认为的中生代。二长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-18.4 \sim -10.1$, 相应的二阶段 Hf 模式年龄为 $1.8 \sim 2.3$ Ga; 暗色包体中的 13 颗二叠纪锆石相应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-23.6 \sim -9.1$, 相应的二阶段 Hf 模式年龄为 $1.7 \sim 2.5$ Ga。锆石 Hf 同位素特征表明, 形成花岗岩和镁铁质暗色包体的这 2 种岩浆均来自以古老地壳物质为主的源区, 这与东段诺尔公—红古尔玉林地区的中酸性侵入岩相同。曼德林乌拉岩体花岗质岩和镁铁质暗色包体的岩石学、地球化学及同位素研究表明, 它们可能也具有岩浆混合成因。这为阿拉善地块北缘区域在二叠纪发生广泛的壳幔相互作用提供了进一步证据。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 阿拉善; 岩浆混合

中图分类号: P534.46; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)10-1675-16

Zhang J J, Zhang L, Wang T, Shi X J. Geochemical, age and Hf-in-zircon isotopic characteristics and geological significance of granite and MME from the Mandelinwula pluton, northern Alxa block, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(10):1675-1690

Abstract: Early Paleozoic to Early Mesozoic intrusive rocks are widely distributed in northern Alxa region, Inner Mongolia. The temporal and spatial distribution, magma source components and petrogenesis for these rocks are important for studying the tectonic

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2019-07-07

资助项目: 科技部国家重点研发计划项目《北方东部复合造山成矿系统深部结构与成矿过程》(编号: 2017YFC0601301)和《深地资源勘查开采理论与技术集成》(编号: 2018YFC0603702)、中国地质调查局项目《阿拉善、藏东南等关键地段地壳圈层物质与演变基础地质调查》(编号: DD20190001)、《全国陆域及海区地质图件更新与共享》(编号: DD20190370)、《基础地质学科(岩石)数据库建设与共享应用》(编号: DD20190685)、《地质云系统集成与共享服务》(编号: DD20190397)、国际地学计划项目《Orogenic architecture and crustal growth from accretion to collision》(编号: IGCP 662)和国家自然科学基金项目《中蒙边界亚干地区前寒武纪变质火山岩的岩石学、年代学及其构造意义》(批准号: 41802239)

作者简介: 张建军(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 从事岩浆岩石学和造山带深部结构及演化相关研究。E-mail: jianjunzhang@live.cn

通讯作者: 张磊(1983-), 男, 博士, 副研究员, 从事岩浆岩石学和区域大地构造相关研究。E-mail: leizhang@cags.ac.cn

evolution of northern Alxa, and even for studying the late stage evolution of the southern Central Asian orogenic belt. Mandelinwula pluton, located in the west part of the Yabulai–Nuoergong–Honggueryulin tectonic belt, is mainly composed of granite and monzogranite, and mafic microgranular enclaves (MME). The identified MME has fine-grained textures, sinuous margins and diffuse contacts with the host monzogranites, and various disequilibrium textures and mineral assemblages indicate mingling or mixing processes. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating yielded ages of 271 ± 3 Ma and 271 ± 2 Ma for the monzogranite and MME, respectively, indicating that the Mandelinwula pluton was emplaced in Permian instead of in Early Mesozoic as suggested by previous researchers. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the monzogranite and enclaves show a wide range and significant overlap from -18.4 to -10.1 (with $T_{\text{DM}} 1.8 \sim 2.3$ Ga) and -23.6 to -9.1 (with $T_{\text{DM}} 1.7 \sim 2.5$ Ga), respectively. The source characteristics are similar to those of the intermediate–felsic plutons in the east part of the Yabulai–Nuoergong–Honggueryulin belt of the northern Alxa block. Combined with petrology, geochemistry and Hf–in–zircon isotope studies, the authors propose a plausible magma mixing interpretation for the Mandelinwula monzogranite and MME.

Key words: zircon U–Pb age; Hf isotope; Alxa block; magma mixing

花岗岩的成因研究对认识壳幔相互作用与地壳形成演化和生长十分重要^[1–5]。越来越多的研究发现,与I型花岗岩在时间和空间上伴生的镁铁质岩石(如镁铁质暗色微粒包体)能提供有关花岗质岩浆形成的物源特征、成因等方面的重要信息^[5–10]。内蒙古阿拉善地区大规模的I型花岗岩广泛发育镁铁质暗色包体,有的周围还伴生同期的块状辉长岩体^[5,11–13],这些岩石组合为研究I型花岗岩类成因机制及其区域地壳形成演化提供了窗口。

阿拉善地区是多构造单元的结合部位,构造位置十分关键。阿拉善地区主要由北部的中亚造山带南缘部分和南部的阿拉善地块组成,其中阿拉善地块大体呈倒三角形(图1-a)。阿拉善地区存在2条重要的蛇绿岩带(图1-a),即北部的恩格尔乌苏蛇绿岩带和南部的查干础鲁蛇绿岩带^[14–18]。北部的恩格尔乌苏蛇绿岩带被认为代表了古亚洲洋闭合位置^[19]或板块边界位置^[14–15,18],是中亚造山带与阿拉善地块的界线^[14–15,18–23]。而查干础鲁蛇绿岩带被认为是弧后洋盆闭合的残余^[14,16,18]。然而,新近研究显示,查干础鲁蛇绿岩两侧古生代中酸性侵入岩的全岩Nd同位素和锆石Hf同位素组成特征明显不同,即深部地壳物质组成存在显著差异,可能表明阿拉善地块与北部中亚造山带的界线位于查干础鲁蛇绿岩带附近,而并非恩格尔乌苏蛇绿岩带^[24–30]。依据这2条蛇绿岩带,阿拉善北部地区自北向南被划分为珠斯楞–杭乌拉构造带、宗乃山–沙拉扎山构造带和雅布赖–诺尔公–洪古尔玉林构造带(图1-a)。

阿拉善地块北缘古生代的花岗岩及伴生的镁铁质岩石的成因问题仍未得到圆满解决。虽然近年来众多团队开展了详细的研究,但对阿拉善北部花岗岩的成因及其形成地质背景仍存在明显分歧:少数学者

认为,阿拉善北部地区的花岗岩类主要形成于约280Ma,具有酸性大火成岩省的特点,它们的形成与同时代的塔里木大火成岩省有关^[31];而多数学者认为,阿拉善北部地区晚古生代花岗岩等侵入岩的形成与古洲洋的俯冲闭合活动有关,如形成于活动大陆边缘与俯冲相关的环境^[5,11–13,19,24,31–39]或与洋中脊俯冲有关^[22]。造成以上争议的一个重要原因是不同学者和团队对阿拉善北缘不同地区数据资料的积累程度不同,限制了整体上对于阿拉善地块北缘地区花岗岩及伴生镁铁质岩石的成因及其地质背景的认识。

由于沙漠覆盖严重、交通不便,阿拉善雅布赖–诺尔公–红古尔玉林构造带的西段地区研究程度相对于东段较低。阿拉善雅布赖–诺尔公–红古尔玉林构造带西段的花岗质岩体中同样识别出有镁铁质岩石伴生,为开展阿拉善西部与中东部对比研究提供了重要依据。因而,本文以阿拉善地块北缘西段的曼德林乌拉岩体花岗质岩石及发育的镁铁质暗色包体为研究对象,在野外地质、岩石学工作的基础上,报道新的锆石U–Pb年龄、Hf同位素和地球化学特征,并初步探讨该岩体的岩浆混合成因,为深入了解阿拉善地块花岗岩成因及其演化过程提供新的资料。

1 地质背景

阿拉善地块北缘雅布赖–诺尔公–红古尔玉林构造带位于查干础鲁蛇绿岩带以南,呈近东西向展布(图1)。该构造带前寒武纪各类变质岩广泛出露,由南西向北东近连续分布,主要分布在诺尔公–红古尔玉林构造带东段和巴彦乌拉山地区^[29,40–44]。雅布赖–诺尔公–红古尔玉林构造带基本缺失古生界,仅有少量二叠系酸性火山岩出露。缺失三叠

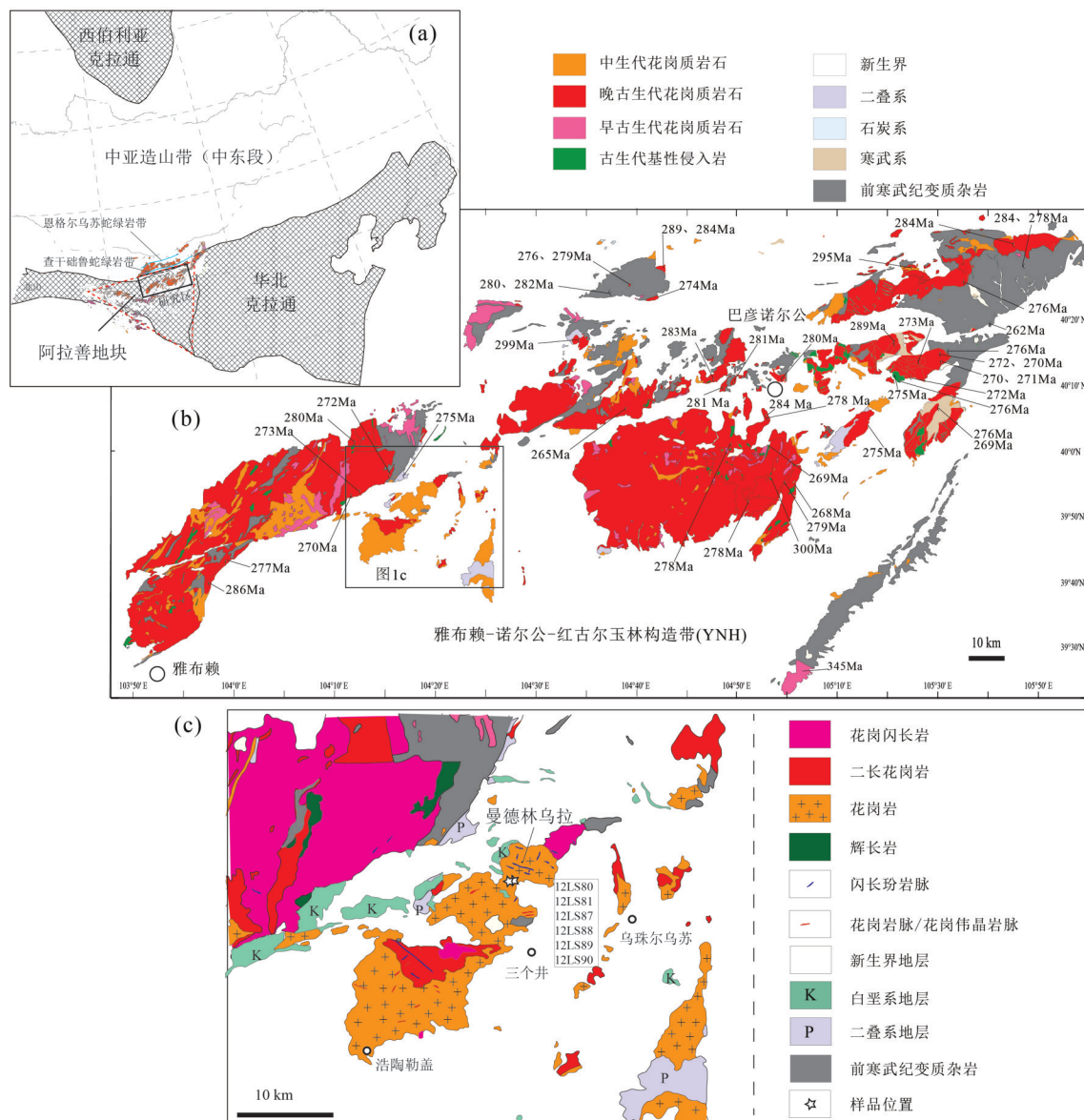


图1 阿拉善地区构造位置示意图(a,据参考文献[5,12,29]修改)、雅布赖-诺尔公-红古尔玉林带地质简图(b)(前人锆石年龄据参考文献[5,11-13,19-25,27,28,31,32,35-39,45-48])和曼德林乌拉岩体出露地区地质图(c)(据参考文献①修改)

Fig. 1 Sketch map showing the location of the Alxa block and the tectonic units of Alxa region (a), geological map of the Yabulai-Nuoergong-Honggueryulin belt (b) and geological map of the Mandelinwula pluton showing the sampling sites of currently studied rocks (c)

系,侏罗系主要分布在雅不赖地区。白垩系在巴丹吉林地区广泛出露,其主要为棕灰色和紫红色的砾岩、粗砂岩,夹含砾砂质泥岩。古近系—新近系发育不全,出露于岩体周边地区,为砂砾岩、棕红色砂泥岩沉积,局部夹灰绿色透镜状砂砾岩。第四系分布十分广泛,但厚度不大,为冲积、洪积和风成砂砾层。

雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带侵入岩分布广

泛,由南西向北东近连续分布,主要是由花岗岩类及其伴生的镁铁质岩石组成的复合岩基,形成时代主要为晚古生代与中生代(图1-b)。早古生代火山岩-侵入岩活动较弱,晚古生代的侵入岩和火山岩广泛发育[5,11-13,22,32,45-48],主体为早二叠世花岗岩类,还有少量辉长岩体。本次选取该带研究程度相对弱的西段地区,对曼德林乌拉岩体的花岗岩、二长花

岗岩、镁铁质暗色微粒包体等具有代表性的侵入岩开展研究。

2 岩体地质与岩石学特征

曼德林乌拉岩体位于雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带西段(图1-b),在孟根布拉格南东约20km处,形态不规则,出露面积约100km²。岩体部分侵入到前寒武系阿拉善群哈乌拉组($AnZh^3$),主要为灰色条带状混合岩、黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长变粒岩等。岩体周围部分地区出露二叠系,为灰色-灰绿色安山质英安斑岩,灰色-褐灰色英安斑岩、流纹英安斑岩,浅红色流纹斑岩、英安岩、流纹质凝灰岩、凝灰熔岩、火山角砾岩等;岩体侵入到二叠系(图1-c),故在1:20万地质图上曼德林乌拉被认为可能是印支期岩浆活动的产物。岩体周围(主要在北侧)出露少量白垩系(图1-c),主要为浅红色含砾砂岩,灰白色砂岩、含砾砂岩、砂砾岩、细砂岩等。岩体周围被新生界覆盖。

曼德林乌拉岩体的岩石类型主要为花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等,野外露头覆盖严重,未发现花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩明显的侵入顺

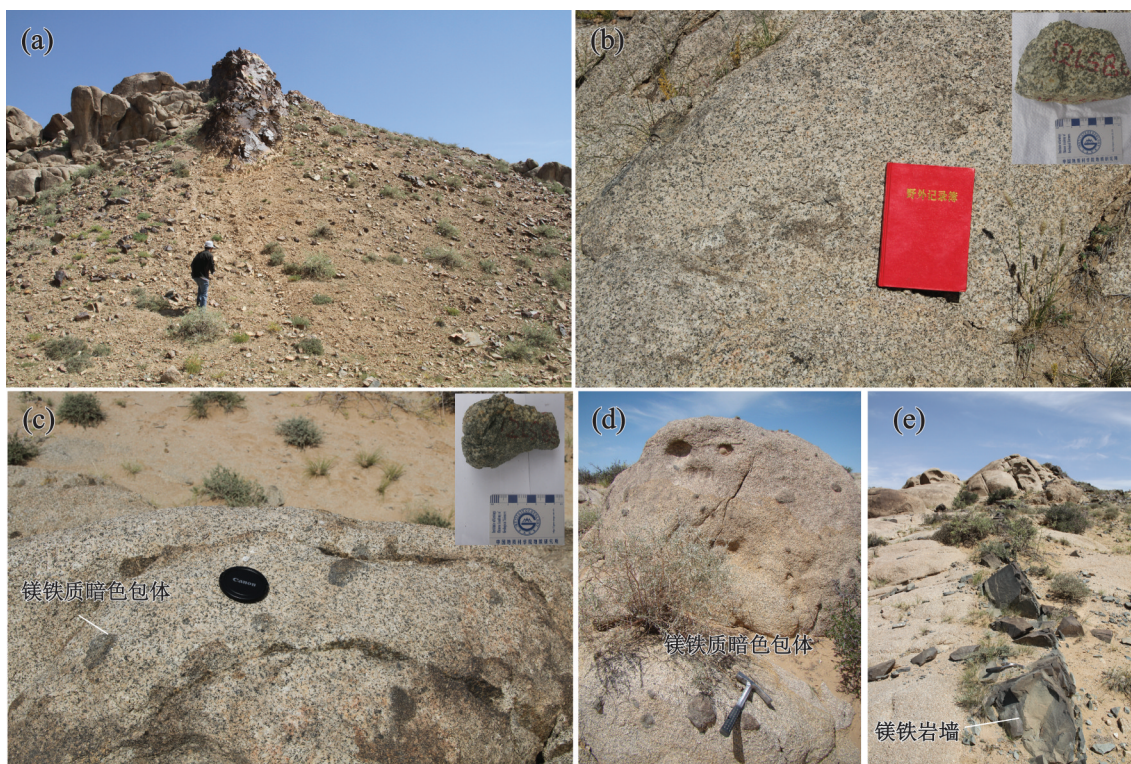
序和分布规律。岩体局部可见灰白色细粒花岗质岩脉和闪长玢岩脉穿插(图版I-e)。在中粒花岗岩和中粗粒二长花岗岩中都发育大量的镁铁质暗色包体(图版I-c、d),包体多为浑圆状,与寄主花岗岩呈渐变接触。有的镁铁质暗色包体中见斜长石捕虏晶,有的包体呈现出分解的形态特征,表现为离包体越近,暗色矿物越多。

花岗岩为中粒花岗岩结构,块状构造,主要矿物包括斜长石(35%~40%)、石英(25%~30%)、钾长石(10%~20%)、角闪石(6%~9%)、黑云母(5%~10%)等,此外,还含有少量的磷灰石、榍石、锆石等副矿物。斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶,有振荡环带发育(图版II-a),磷灰石有针状和短柱状2种类型(图版II-b)。

二长花岗岩呈中粗粒花岗结构。矿物组成为钾长石(约35%)、斜长石(约25%)、石英(约25%)、黑云母(约10%)和角闪石(约5%),副矿物包括榍石、锆石和磷灰石,镜下见明显的斜长石振荡环带(图版II-d)、钾长石的细粒暗色矿物镶边(图版II-e)、针状磷灰石等。

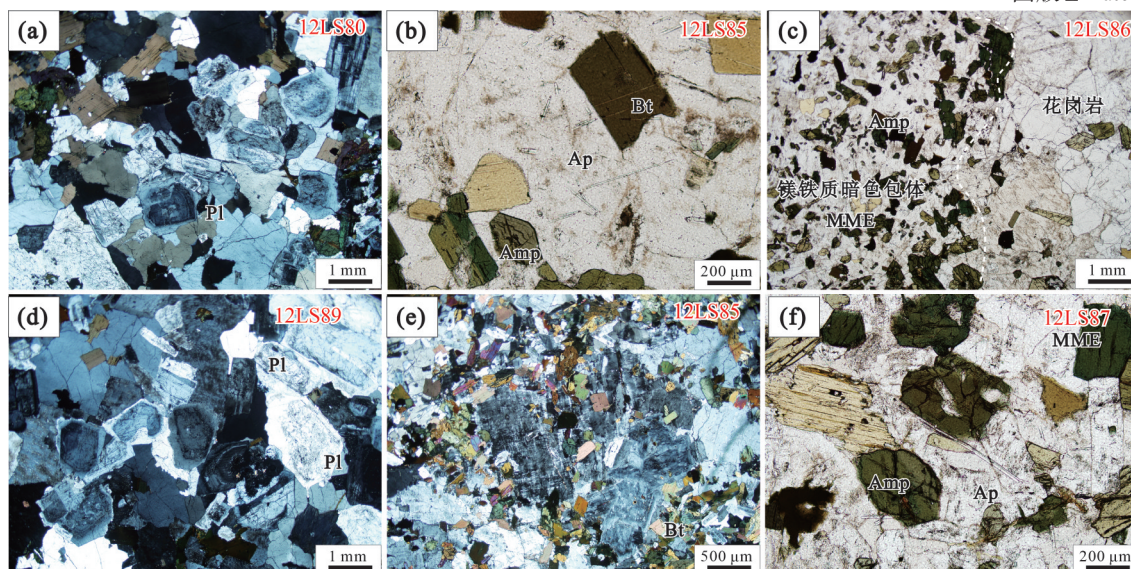
闪长质包体呈灰黑色,具有中粒花岗结构,无

图版 I Plate I



a. 花岗岩野外露头;b. 中粗粒花岗岩样品野外特征;c、d. 花岗岩中广泛发育镁铁质暗色包体, 镁铁质暗色包体与花岗岩呈渐变接触关系,多为浑圆状;e. 镁铁质岩脉穿插到花岗岩中

图版 II Plate II



a、b. 曼德拉乌拉中粒花岗岩发育斜长石环带和针状磷灰石;c. 中粒花岗岩与暗色包体接触处矿物组成明显不同;
d. 中粗粒二长花岗岩中见明显的斜长石环带;e. 钾长石斑晶包裹斜长石细粒度色矿物镶边;
f. 镁铁质暗色包体发育自形的角闪石和针状磷灰石。Pl—斜长石;Amp—角闪石;Bt—黑云母;Qz—石英;Ap—磷灰石

明显变形特征。包体粒度细,主要由暗色矿物角闪石、黑云母和斜长石组成(图版 II-f)。包体与中粒花岗岩接触处的切片(图版 II-c)可见矿物交换现象,磷灰石可见短柱状和针状,并以针状磷灰石居多(图版 II-f)。

3 分析方法

对岩体中的粗粒二长花岗岩和镁铁质暗色包体样品分别进行锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素和全岩地球化学分析。

3.1 锆石 U-Pb 年代学

锆石 U-Pb 年代学分析在中国地质调查局西安地质调查中心微区同位素地球化学实验室完成,所用质谱仪型号为 Agilent7700x 及配套的 GeolasPro 激光剥蚀系统。采用激光束斑直径为 32 μm,激光能量密度为 6.0 J/cm²,激光频率为 9 Hz。激光取样过程采用 20 s 的背景采集时间、40 s 的剥蚀取样时间和 10 s 的样品池冲洗时间,剥落的样品由高纯氦气(1.100 L/min)带入 ICP-MS;同位素 ²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb 和 ²³²Th 采用 20 ms, ²³⁸U 采用 10 ms, ²⁰⁷Pb 采用 30 ms 的积分时间;采用锆石标样 91500 为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应和质量歧视的校正计算,采用 Plesovice 锆石标样为监控盲样监视测试过程的稳定

性,保证每 5 个样品点至少插 1 组标样。数据处理应用 Glitter(ver4.0, Macquarie University^[49]) 程序计算锆石的同位素比值和元素含量;应用 Isoplot 3.75 程序对锆石样品的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄在谐和图上进行投图,并计算 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值。

3.2 Lu-Hf 同位素测定

锆石完成 U-Pb 定年后,在原位用激光剥蚀多接收等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)进行 Lu-Hf 同位素分析,Hf 同位素测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。关于实验仪器和实验过程的详细介绍见参考文献[50-51]。实验过程中的激光束斑直径为 55 μm。为消除 ¹⁷⁶Lu 和 ¹⁷⁶Yb 对 ¹⁷⁶Hf 测定的干扰,实验预设 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu=0.02658 及 ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb=0.796218^[52]。此外,为校正仪器导致的测试偏差,根据实验规程,Yb 同位素比值依照 ¹⁷²Yb/¹⁷³Yb=1.35274 进行校准。标准锆石 GJ-1^[53]被选作实验的标样,试验中得到 GJ-1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282013±0.000080(2σ, n=18)。该结果与 Elhlou 等^[54]实验测得的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值(0.282013±0.000019, 2σ)在误差范围内基本一致。

在进行锆石 Lu-Hf 同位素成分计算时,¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 1.865×10⁻¹¹ a⁻¹^[55], $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的计算采用

Bouvier等^[56]推荐的球粒陨石Hf同位素值: $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 。Hf模式年龄采用现代亏损地幔的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 值0.28325和 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 值0.0384^[57]、平均地壳的 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{c}}$ 值0.0125^[58]进行计算。

3.3 全岩主量和微量元素含量分析

样品的全岩主量、微量元素地球化学分析测试在加拿大ACME实验室完成。详细的样品处理和分析方法为:准确称取0.20g粉末样品,将其与1.50g LiBO_2 助熔剂放置于石墨坩埚内进行充分混合。将样品/助熔剂的混合物于马弗炉中在1050℃下加热15min。提取熔融后的混合物,倒入100mL由去离子水和ACS级纯度硝酸配制的5%浓度的 HNO_3 中。摇晃溶液2h使其充分溶解,取一部分置入聚丙烯分析管内。将标定标样、检验标样和本底空白样加入样品序列。通过电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)进行主要氧化物和Ba、Sc、Cu、Zn和Ni含量的分析。在ICP-MS上进行其他元素及稀土元素含量的分析。对于贵金属的分析,另外单独选取0.50g样品,置于3mL高温的(95℃)王水中进行溶解,通过ICP-MS进行贵金属分析。主要氧化物、微量和稀土元素的检测限分别为0.01%~0.1%、 0.1×10^{-6} ~ 10×10^{-6} 和 0.01×10^{-6} ~ 0.5×10^{-6} 。详细的分析方法与ACME中的LF202组的流程相同,所有的分析偏差均优于3%。

4 分析结果

在本次研究中选取2件样品(12LS80、12LS87)中的锆石用于U-Pb年代学测定和Lu-Hf同位素组成分析,6个样品进行全岩地球化学分析。

4.1 锆石U-Pb测年结果

使用常规的重液浮选和电磁分离方法挑选出锆石颗粒,随后在双目镜下根据颜色、自形程度、形态学、透明度等特征进行初步分类,并挑选出具有代表性的锆石,将其粘贴在环氧树脂表面。固结后抛磨,使锆石内部充分暴露,然后进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。通过对反射光、透射光和阴极发光图像的观察分析,排除多裂纹、多包裹体和抛光不清晰的锆石,选择具有代表性的锆石进行测试。

北部曼德林乌拉附近的中粒花岗岩(12LS80)锆石多为无色透明、晶形完好,呈短柱状或长柱状,锆石颗粒的长轴多在100~250 μm 之间,长宽比变化范围为1:1~2.5:1。CL图像显示,有的锆石核部均匀,边部发育岩浆振荡环带(图2)。上述特征说明,本次新测的锆石为岩浆锆石。对该样品中的22颗锆石进行了25个点的年代学测试。除2个测试点外,大部分测点谐和度较高,落在锆石U-Pb谐和曲线上。Th/U值为0.4~0.8(表1),具有岩浆锆石特征。大多数锆石测点($n=21$)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于268~

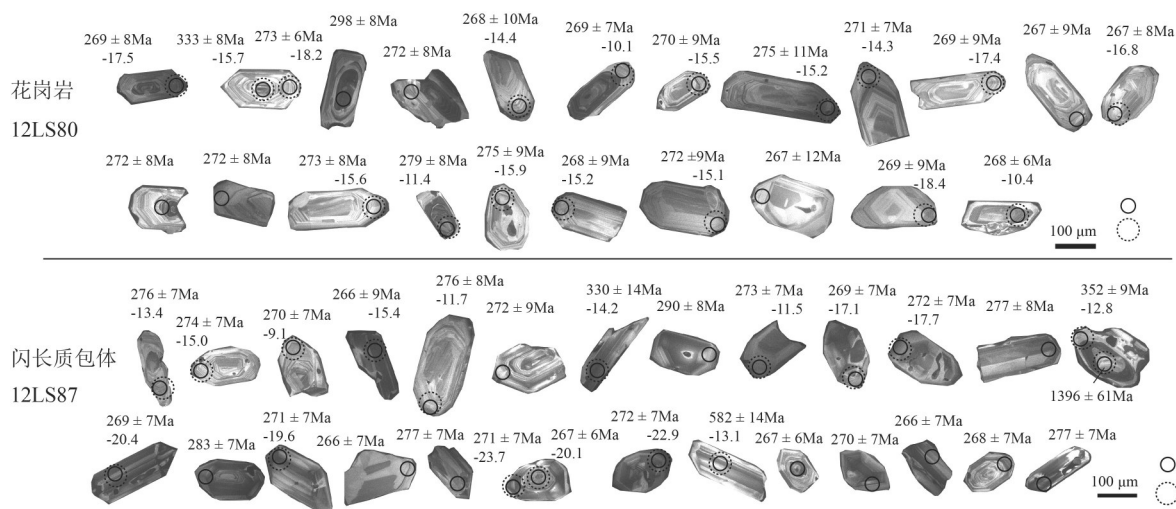


图2 曼德林乌拉岩体花岗岩及镁铁质暗色包体样品锆石阴极发光(CL)图像
(实线圆圈代表年龄测试点,虚线圆圈代表Hf测试点)

Fig. 2 CL images for zircon grains from the currently studied granite and MME of Mandelinqwula pluton

表 1 曼德林乌拉岩体中粒花岗岩及其镁铁质暗色包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 年龄结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic results for representative granites and MME from the Mandelínwula pluton

点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma					
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
花岗岩															
12LS80-01	101	214	0.5	0.04268	0.0013	0.3070	0.0290	0.0522	0.0050	293	205	272	23	269	8
12LS80-02	272	332	0.8	0.04331	0.0010	0.3115	0.0120	0.0522	0.0020	293	83	275	9	273	6
12LS80-03	98	176	0.6	0.05306	0.0013	0.3874	0.0203	0.0530	0.0028	327	114	332	15	333	8
12LS80-04	198	383	0.5	0.04731	0.0013	0.3450	0.0239	0.0529	0.0037	324	151	301	18	298	8
12LS80-05	691	1098	0.6	0.04256	0.0011	0.4412	0.0183	0.0752	0.0031	1074	80	371	13	269	7
12LS80-06	70	137	0.5	0.04312	0.0014	0.3081	0.0303	0.0518	0.0052	278	213	273	24	272	8
12LS80-07	92	180	0.5	0.04241	0.0016	0.3044	0.0388	0.0521	0.0068	288	272	270	30	268	10
12LS80-08	218	416	0.5	0.04263	0.0011	0.3065	0.0157	0.0522	0.0027	293	112	272	12	269	7
12LS80-09	123	211	0.6	0.04279	0.0014	0.3058	0.0323	0.0518	0.0056	278	229	271	25	270	9
12LS80-10	71	142	0.5	0.04354	0.0018	0.3125	0.0466	0.0521	0.0079	288	315	276	36	275	11
12LS80-11	185	332	0.6	0.04299	0.0011	0.3105	0.0143	0.0524	0.0024	302	100	275	11	271	7
12LS80-12	131	223	0.6	0.04263	0.0014	0.3154	0.0324	0.0537	0.0056	356	220	278	25	269	9
12LS80-13	105	191	0.5	0.04233	0.0015	0.3047	0.0343	0.0522	0.0060	295	241	270	27	267	9
12LS80-14	115	208	0.6	0.04515	0.0015	0.5539	0.0466	0.0890	0.0077	1404	157	448	30	285	9
12LS80-15	99	182	0.5	0.04232	0.0013	0.3096	0.0274	0.0531	0.0048	332	191	274	21	267	8
12LS80-16	341	567	0.6	0.04303	0.0012	0.3085	0.0242	0.0520	0.0041	285	171	273	19	272	8
12LS80-17	108	183	0.6	0.04312	0.0012	0.3090	0.0232	0.0520	0.0039	284	164	273	18	272	7
12LS80-18	112	200	0.6	0.04323	0.0012	0.3116	0.0203	0.0523	0.0034	298	142	275	16	273	7
12LS80-19	137	306	0.4	0.0443	0.0013	0.3164	0.0283	0.0518	0.0047	277	194	279	22	279	8
12LS80-20	133	186	0.7	0.0436	0.0014	0.3125	0.0329	0.0520	0.0056	285	227	276	25	275	9
12LS80-21	97	165	0.6	0.04251	0.0016	0.3143	0.0394	0.0536	0.0068	355	265	278	30	268	10
12LS80-22	51	101	0.5	0.04312	0.0015	0.3143	0.0360	0.0529	0.0062	323	245	278	28	272	9
12LS80-23	90	151	0.6	0.04241	0.0020	0.3132	0.0567	0.0536	0.0099	353	371	277	44	268	12
12LS80-24	47	99	0.5	0.04254	0.0014	0.3180	0.0336	0.0542	0.0058	380	225	280	26	269	9
12LS80-25	166	458	0.4	0.04246	0.0010	0.3027	0.0129	0.0517	0.0022	272	93	269	10	268	6
暗色包体															
12LS87-1	113	194	0.6	0.04367	0.0011	0.3116	0.0118	0.0520	0.0017	286	71	275	9	276	7
12LS87-2	117	191	0.6	0.04341	0.0011	0.3110	0.0111	0.0533	0.0016	342	67	275	9	274	7
12LS87-3	108	189	0.6	0.04273	0.0012	0.3126	0.0171	0.0523	0.0023	297	99	276	13	270	7
12LS87-4	258	287	0.9	0.04206	0.0015	0.3100	0.0386	0.0517	0.0052	273	213	274	30	266	9
12LS87-5	84	182	0.5	0.04369	0.0013	0.3118	0.0241	0.0512	0.0032	249	138	276	19	276	8
12LS87-6	130	193	0.7	0.04307	0.0015	0.3070	0.0400	0.0529	0.0056	326	222	272	31	272	9
12LS87-8	112	113	1.0	0.0525	0.0023	0.3999	0.0739	0.0573	0.0081	501	284	342	54	330	14
12LS87-9	185	197	0.9	0.04598	0.0013	0.3321	0.0260	0.0528	0.0033	321	136	291	20	290	8
12LS87-11	63	109	0.6	0.04324	0.0011	0.3094	0.0145	0.0516	0.0020	266	87	274	11	273	7
12LS87-12	207	253	0.8	0.04266	0.0011	0.3136	0.0127	0.0520	0.0018	284	76	277	10	269	7
12LS87-13	257	274	0.9	0.04302	0.0011	0.3112	0.0099	0.0539	0.0015	367	60	275	8	272	7
12LS87-14	112	230	0.5	0.04396	0.0012	0.3175	0.0213	0.0520	0.0028	283	120	280	16	277	8
12LS87-15	91	612	0.1	0.05612	0.0014	0.4152	0.0128	0.0546	0.0014	395	56	353	9	352	9
12LS87-16	82	187	0.4	0.2051	0.0054	2.3293	0.1570	0.0886	0.0029	1396	61	1221	48	1203	29
12LS87-17	283	345	0.8	0.04263	0.0012	0.3144	0.0209	0.0534	0.0029	346	118	275	16	269	7
12LS87-18	282	244	1.2	0.04494	0.0012	0.3305	0.0147	0.0537	0.0020	360	80	290	11	283	7
12LS87-19	1151	702	1.6	0.04292	0.0011	0.3144	0.0082	0.0536	0.0012	355	51	278	6	271	7
12LS87-20	124	279	0.4	0.04217	0.0011	0.3127	0.0121	0.0545	0.0018	392	70	276	9	266	7
12LS87-21	307	314	1.0	0.04391	0.0011	0.3148	0.0129	0.0532	0.0018	339	76	278	10	277	7
12LS87-22	162	232	0.7	0.04291	0.0011	0.3048	0.0143	0.0518	0.0020	275	86	270	11	271	7
12LS87-23	803	604	1.3	0.04225	0.0011	0.3067	0.0084	0.0541	0.0013	374	53	272	7	267	6
12LS87-24	292	263	1.1	0.04304	0.0011	0.3161	0.0117	0.0522	0.0016	293	69	279	9	272	7
12LS87-25	8	456	0.1	0.09453	0.0023	0.7824	0.0184	0.0607	0.0012	629	42	587	11	582	14
12LS87-26	299	661	0.5	0.04232	0.0011	0.3098	0.0093	0.0530	0.0014	329	58	274	7	267	6
12LS87-27	678	565	1.2	0.04283	0.0011	0.3168	0.0098	0.0530	0.0014	330	59	279	8	270	7
12LS87-28	391	404	1.0	0.04208	0.0011	0.3118	0.0113	0.0525	0.0016	308	68	276	9	266	7
12LS87-29	214	334	0.6	0.04249	0.0011	0.3041	0.0110	0.0528	0.0016	320	68	270	9	268	7
12LS87-30	523	508	1.0	0.04388	0.0012	0.3165	0.0173	0.0527	0.0023	315	98	279	13	277	7

注:带删除线数据为不列入年龄加权平均值计算的数据

275Ma 之间,有 2 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 333Ma 和 298Ma,稍老于样品锆石的主体年龄,应为岩体侵位过程中岩浆捕获的早期岩浆事件中形成的锆石(图 3)。21 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $271 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD=0.1),代表了花岗岩侵位年龄。

曼德林乌拉花岗岩中镁铁质暗色包体(12LS87)样品的锆石颗粒较小,多为 $80 \sim 200\mu\text{m}$ 。CL 图像显示较明显的韵律环带结构。样品 12LS87 中的 22 颗锆石均得到了谐和的年龄值(图 3)。Th/U 值为 $0.1 \sim 1.6$,具有岩浆锆石特征。有 4 颗为捕获

锆石,年龄分别为 1396Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 582Ma、352Ma 和 330Ma (图 2)。22 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $271 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD=0.1),与寄主花岗岩(12LS80)的年龄基本一致。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素

对曼德林乌拉岩体北部的中粒花岗岩样品 12LS80 和暗色包体样品 12LS87 进行锆石原位微区 Lu-Hf 同位素分析(表 2)。二长花岗岩和包体中锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别介于 $0.0007529 \sim 0.002126$ 之间和 $0.0007657 \sim 0.003058$ 之间,说明放射性成因的 Hf 含量很低。花岗岩(12LS80)中 15 颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分布范围为 $0.282088 \sim 0.282324$,相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-18.4 \sim -10.1$ (按 $t=271\text{Ma}$ 计算),一阶段 Hf 同位素模式年龄为 $1.3 \sim 1.6\text{Ga}$,二阶段 Hf 模式年龄为 $1.8 \sim 2.3\text{Ga}$ (图 4)。年龄为 333Ma 和 298Ma 的捕获锆石(图 4)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282128 和 0.282079,用各自年龄计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -18.2 和 -16 。

镁铁质暗色包体(样品 12LS87)中 13 颗二叠纪锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.289193 \sim 0.282347$,相应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-23.6 \sim -9.1$ (按 $t=271\text{Ma}$ 计算),一阶段 Hf 同位素模式年龄为 $1.3 \sim 1.9\text{Ga}$,二阶段 Hf 模式年龄为 $1.7 \sim 2.5\text{Ga}$ (图 4)。年龄为 1396Ma、582Ma、352Ma 和 330Ma 的捕获锆石(图 4)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282085、0.282058、0.282196 和 0.282175,用各自年龄计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 $+5.9$ 、 -13.1 、 -12.8 和 -14.2 ,对应二阶段 Hf 模式年龄分别为 1.7Ga 、 2.2Ga 、 2.0Ga 和 2.0Ga 。

4.3 地球化学特征

曼德林乌拉岩体各样品的主量、微量及稀土元素分析测试结果见表 3。曼德林乌拉中粒花岗岩和中粗粒二长花岗岩 SiO_2 元素含量相近(SiO_2 含量变化为 $68.3\% \sim 72.2\%$),全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量为 $6.5\% \sim 7.5\%$,为高钾钙碱性,准铝质系列岩石(图 5)。曼德林乌拉二长花岗岩中发育的镁铁质暗色包体具有较低的 SiO_2 (56.96% 和 57.43%)、较高的 MgO (3.05% 和 3.23%) 和 Fe_2O_3 含量 (7.99% 和 8.95%),在 TAS 图解(图 5)上落入二长岩区域,并且具有准铝质特征。曼德林乌拉二长花岗岩和镁铁质暗色包体样品在 Harker 图解上显出了良好的线性关系, SiO_2 和 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 P_2O_5 呈现明

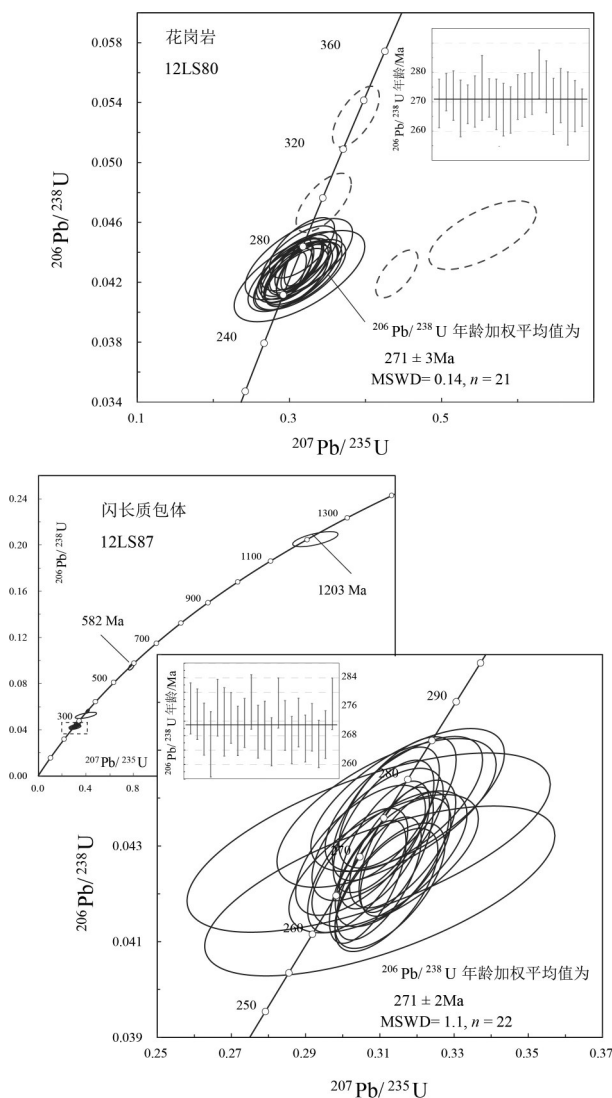


图 3 曼德林乌拉岩体及其镁铁质暗色包体样品锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Diagrams of U-Pb concordia for zircon grains from the currently studied granite and MME from Mandelinwula pluton

表 2 曼德林乌拉岩体花岗岩和暗色包体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of granite and MME from the Mandelinwula pluton

测点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
花岗岩											
12LS80-01	271	0.035959	0.001406	0.282115	0.00003	0.282108	-23.23	-17.53	1618	2195	-0.96
12LS80-02	298	0.029953	0.001159	0.282079	0.00003	0.282072	-24.51	-18.2	1658	2254	-0.97
12LS80-03	333	0.025784	0.001013	0.282129	0.00002	0.282123	-22.75	-15.66	1583	2137	-0.97
12LS80-04	271	0.024158	0.000962	0.282203	0.00003	0.282198	-20.12	-14.35	1477	2015	-0.97
12LS80-05	271	0.037886	0.001512	0.282325	0.00003	0.282317	-15.82	-10.14	1327	1775	-0.95
12LS80-06	271	0.025582	0.001018	0.282172	0.00003	0.282167	-21.22	-15.46	1523	2078	-0.97
12LS80-07	271	0.030077	0.001177	0.282181	0.00003	0.282175	-20.91	-15.18	1517	2062	-0.96
12LS80-08	271	0.023316	0.000959	0.282206	0.00003	0.282201	-20.02	-14.25	1473	2009	-0.97
12LS80-09	271	0.022060	0.000882	0.282117	0.00004	0.282113	-23.16	-17.37	1593	2186	-0.97
12LS80-10	271	0.022063	0.000907	0.282135	0.00003	0.282130	-22.54	-16.75	1570	2152	-0.97
12LS80-11	271	0.018695	0.000753	0.282166	0.00003	0.282162	-21.45	-15.64	1521	2088	-0.98
12LS80-12	271	0.054338	0.002126	0.282292	0.00003	0.282281	-16.97	-11.4	1396	1847	-0.94
12LS80-13	271	0.027351	0.001048	0.282161	0.00003	0.282155	-21.61	-15.86	1540	2100	-0.97
12LS80-14	271	0.022858	0.000883	0.282177	0.00003	0.282173	-21.03	-15.24	1510	2066	-0.97
12LS80-15	271	0.022618	0.000822	0.282181	0.00003	0.282177	-20.89	-15.09	1502	2057	-0.98
12LS80-16	271	0.021927	0.000896	0.282088	0.00003	0.282083	-24.2	-18.41	1635	2246	-0.97
12LS80-17	271	0.027152	0.001013	0.282314	0.00003	0.282309	-16.19	-10.42	1324	1791	-0.97
暗色包体											
12LS87-01	271	0.034046	0.001263	0.282232	0.00004	0.282226	-19.08	-13.36	1448	1959	-0.96
12LS87-02	271	0.029511	0.001099	0.282187	0.00004	0.282181	-20.69	-14.95	1505	2049	-0.97
12LS87-03	271	0.024021	0.000811	0.282351	0.00003	0.282347	-14.9	-9.09	1266	1715	-0.98
12LS87-04	271	0.096860	0.003059	0.282183	0.00003	0.282168	-20.82	-15.42	1593	2075	-0.91
12LS87-05	271	0.021981	0.000766	0.282278	0.00003	0.282274	-17.48	-11.67	1366	1862	-0.98
12LS87-06	330	0.049137	0.001569	0.282175	0.00003	0.282165	-21.11	-14.21	1541	2052	-0.95
12LS87-07	271	0.026684	0.000915	0.282283	0.00003	0.282278	-17.31	-11.53	1365	1854	-0.97
12LS87-08	271	0.051853	0.001690	0.282130	0.00003	0.282122	-22.7	-17.06	1610	2168	-0.95
12LS87-09	271	0.031102	0.001093	0.282110	0.00002	0.282105	-23.4	-17.65	1612	2203	-0.97
12LS87-10	1396	0.023575	0.000816	0.282085	0.00002	0.282063	-24.31	5.95	1636	1744	-0.98
12LS87-11	352	0.022408	0.000835	0.282196	0.00003	0.282191	-20.35	-12.82	1482	1990	-0.97
12LS87-12	271	0.053136	0.001838	0.282038	0.00002	0.282028	-25.97	-20.36	1747	2355	-0.94
12LS87-13	271	0.043279	0.001579	0.282057	0.00002	0.282049	-25.28	-19.62	1708	2314	-0.95
12LS87-14	271	0.066729	0.002402	0.281947	0.00003	0.281934	-29.19	-23.68	1905	2542	-0.93
12LS87-15	271	0.050055	0.001885	0.282046	0.00002	0.282036	-25.69	-20.08	1738	2339	-0.94
12LS87-16	271	0.047634	0.001746	0.281966	0.00002	0.281957	-28.51	-22.88	1844	2498	-0.95
12LS87-17	582	0.048090	0.001821	0.282058	0.00002	0.282038	-25.24	-13.14	1717	2185	-0.95

显的负相关(图6)。

总体而言,曼德林乌拉岩体中的花岗岩和镁铁质暗色包体样品在原始地幔标准化蛛网图解中同样显示出较一致的特征,相对富集大离子亲石元素 K、Rb 等,亏损高场强元素 Ta、Nb、P、Ti 等。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图7)中,这些样品都表现出轻度的轻、重稀土元素分馏($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 1.8~10.7),以及较明显的负 Eu 异常。与雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带东段的部分二叠纪花岗

岩及其中发育的镁铁质暗色包体具有相似的地球化学特征(图7)。

5 讨 论

5.1 岩体形成时代

早期研究^①根据野外地质关系认为,曼德林乌拉岩体部分侵入二叠系中(图1-c),同时又被上白垩统不整合覆盖,因而在1:20万地质图上曼德林乌拉被认为是印支期岩浆活动的产物。近期有学者

表3 曼德林乌拉岩体花岗岩主量、微量和稀土元素含量

Table 3 Major, trace and rare earth elements composition of granites and MME from Mandelinwula pluton

元素	12LS80 中粒花岗岩	12LS81 中粒花岗岩	12LS87 MME	12LS88 MME	12LS89 中粗粒二长花岗岩	12LS90 中粗粒二长花岗岩
SiO ₂	68.3	68.39	57.43	56.96	69.84	72.24
TiO ₂	0.4	0.38	0.74	0.77	0.31	0.26
Al ₂ O ₃	15.03	15.08	16.43	16.7	14.76	13.88
Fe ₂ O ₃	4.03	4.01	7.99	8.95	3.21	2.64
MgO	1.18	1.2	3.05	3.23	0.79	0.67
MnO	0.06	0.07	0.17	0.19	0.06	0.05
CaO	3.33	3.2	5.35	5.46	2.33	2.08
Na ₂ O	3.75	3.61	3.87	4.42	3.46	3.2
K ₂ O	2.83	3.11	3.42	1.94	4.18	4.33
P ₂ O ₅	0.1	0.1	0.18	0.23	0.08	0.07
烧失量	0.8	0.7	1.1	0.9	0.8	0.4
总计	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8
Sc	6	7	17	19	6	5
V	43	41	103	119	25	22
Co	7.4	6.6	16	19	4	3.7
Cu	3.9	1.5	16	29.9	1.5	0.8
Zn	44	42	56	65	37	31
Ga	16.8	15.3	17.9	19.1	16.3	13.9
Rb	99.2	97.3	129.6	105.2	142	137.7
Sr	319	306	303.6	303.9	268.5	253.8
Y	14.1	13	25.7	31.5	13.6	12.6
Zr	143.2	145.3	109.2	163.6	128.2	116.1
Nb	8.4	5.9	7.6	11	5.2	4.2
Cs	3.6	3.7	5.7	10.5	4.5	2.9
Ba	672	700	772	491	1008	1005
La	18.8	19.4	25.6	30.8	9	19.7
Ce	36.5	37.8	63.3	63.8	18.7	34.4
Pr	4.23	4.09	7.77	8.94	2.4	3.76
Nd	13.4	15.2	32.6	32.3	9.8	13.2
Sm	2.89	2.85	5.59	6.94	2.48	2.57
Eu	0.71	0.69	0.89	1.0	0.58	0.59
Gd	2.49	2.5	4.88	6.67	2.44	2.38
Tb	0.39	0.38	0.8	1.02	0.38	0.37
Dy	2.51	2.17	4.75	5.38	2.59	2.19
Ho	0.46	0.48	0.96	1.12	0.49	0.47
Er	1.49	1.31	2.75	3.65	1.54	1.32
Tm	0.2	0.2	0.42	0.52	0.23	0.18
Yb	1.56	1.41	2.88	3.69	1.44	1.40
Lu	0.23	0.21	0.44	0.56	0.24	0.21
Hf	4.1	4.3	3.1	6.6	3.4	3.2
Ta	0.4	0.4	0.5	0.8	0.4	0.3
Pb	2.9	5.6	5.5	3.6	5.6	4.3
Th	8.8	6.2	4.1	5.5	4.8	4.6
U	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶;样品12LS90取样位置为39.89°N、103.75°E,其他样品
 采样位置为39.88°N、103.77°E

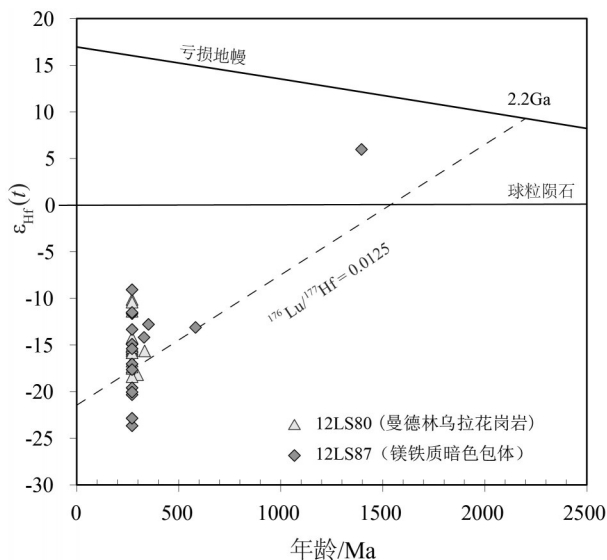


图4 曼德林乌拉岩体样品锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 随年龄变化图解

Fig. 4 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age versus $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of zircons from currently studied granite and MME samples from the Mandelinwula pluton

在曼德林乌拉岩体附近的地区开展工作,认为曼德林乌拉岩体花岗岩可能为中生代三叠纪^[12]。而本文对曼德林乌拉岩体样品锆石的LA-ICP-MS测年结果表明,花岗岩形成时代为 $271 \pm 3\text{Ma}$,相当于中二叠世岩浆活动的产物,属于华里西期。该样品中333Ma的锆石年龄位于锆石核部(图2),可能是早期岩浆事件的继承锆石,可能反映了区域上存在石炭纪的岩浆活动。花岗岩中镁铁质暗色包体的形成年龄为 $271 \pm 2\text{Ma}$,与寄主岩石形成时代基本一致。包体样品中的几颗锆石明显老于花岗岩样品的年龄加权平均值,其中1颗锆石的核部年龄为1396Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄),边部年龄为352Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄),还有1颗核部年龄为582Ma(图2)。这些捕获或继承锆石,从年代学上揭示了可能被“隐藏”的岩浆事件,指示其岩浆源区可能有前寒武纪古老地壳物质贡献或形成镁铁质暗色包体的岩浆在侵位过程中捕获了古老物质。结合雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带岩浆岩已有的年代学资料,曼德林乌拉岩体与雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带东段牙马图岩体等具有相同的岩浆混合成因特征,即岩体岩石类型和镁铁质暗色包体类型相同,花岗岩侵位时代也相同^[5,11-13,25-28,31-39,45-48]。此外,在曼德林

乌拉岩体中识别出的310Ma、582Ma和1396Ma时间段的古老锆石,在雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带东段同样存在^[25]。

因而,本文报道的曼德林乌拉岩体花岗岩及其镁铁质暗色包体的精确锆石年龄为二叠纪(约270Ma),进一步约束了雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带东、西段酸性和中基性岩浆活动具有同时性,集中在280~265Ma^[5]。

5.2 岩石源区特征和成因

曼德林乌拉岩体花岗岩、二长花岗岩样品在薄片下可见角闪石,地球化学和岩相学都显示出I型花岗岩的特征。此外,岩体广泛发育镁铁质暗色包体,并且在寄主岩石和包体的薄片中都可见明显的斜长石振荡环带,具有淬冷结构,如针状磷灰石,交代边、细粒矿物镶边等不平衡矿物组合、结构等岩相学特征,显示其具有岩浆混合成因的岩石学特征。

曼德林乌拉花岗岩及其镁铁质暗色包体锆石均显示负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(分别为 $-18.4 \sim -10.1$ 和 $-23.6 \sim -9.1$)和较老的二阶段模式年龄(分别为1.8~2.3Ga和1.7~2.5Ga),与东段的诺尔公-洪古尔玉林地区二叠纪花岗岩具有相似的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄^[5,11-12,19,22,27,31,39]。它们的锆石Hf同位素特征表明,这些中酸性侵入岩的地壳源区物质组成主要为古老的地壳物质。此外,花岗岩和包体样品的 SiO_2 含量变化较大,且大多数锆石显示较宽的、多个峰值的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围和二阶段Hf模式年龄峰值,暗示地壳源区成分较复杂;或源区存在壳幔混合作用,是壳幔岩浆混合作用的结果。

此外,与雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带东段部分具有岩浆混合成因的岩体相同,曼德林乌拉岩体镁铁质暗色包体与寄主岩石的锆石Hf同位素范围变化较大且基本重合,可能反映中酸性侵入岩与时空上伴生的镁铁质岩石的源区特征相近^[5,11-12,19,22,27,42]。再结合曼德林乌拉岩体花岗岩及其镁铁质暗色包体与雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带东段混合成因的I型花岗岩及其镁铁质暗色包体(闪长质),具有十分相似的岩石学(如薄片尺度上的不平衡结构和矿物组合)和地球化学特征(图5—图7),推测它们具有相同的成因及形成背景。

Zhang等^[5]在对雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带东段牙马图岩体的研究中,结合区域资料综合分析,认为阿拉善地块北部二叠纪花岗岩岩浆混合成

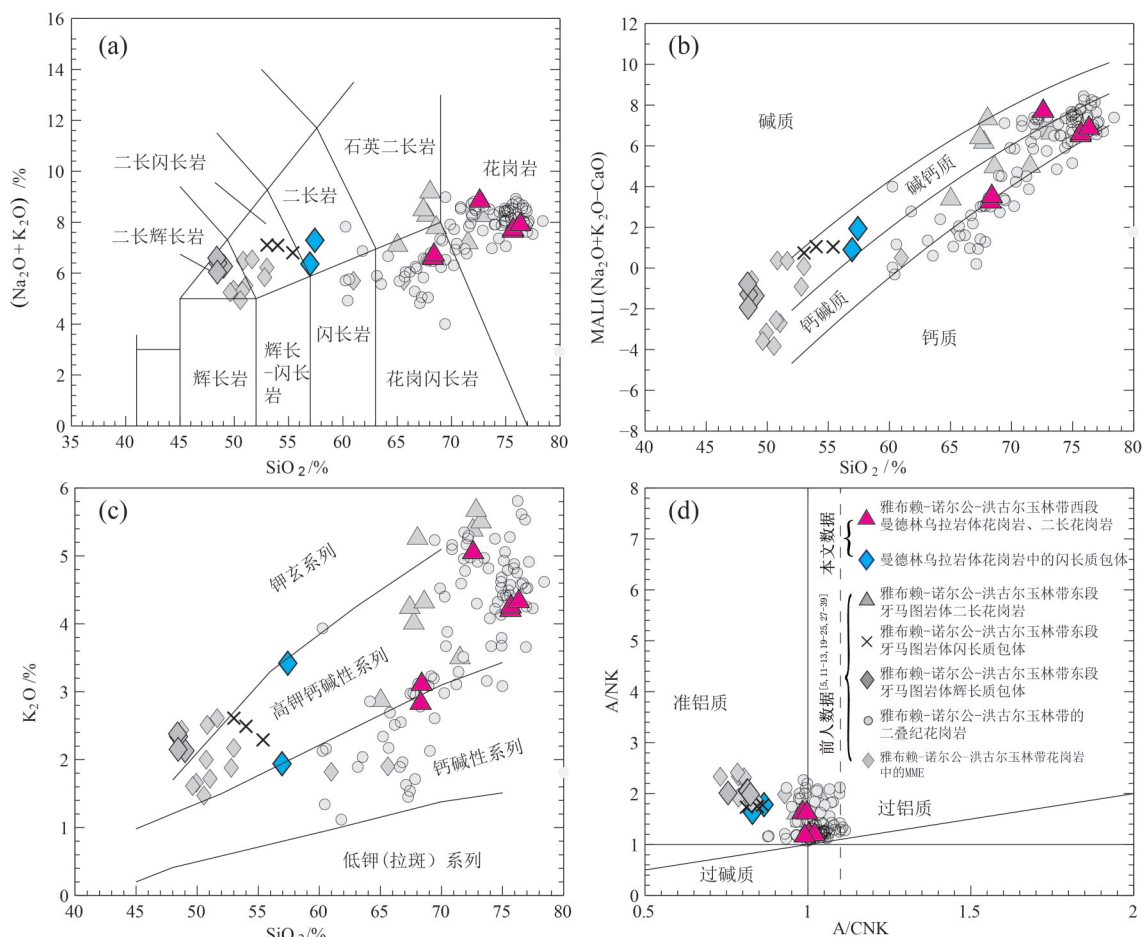


图5 曼德林乌拉岩体及前人雅布赖-诺尔公-红古尔玉林带东段二叠纪花岗岩及镁铁质包体样品
主量元素 TAS 图解(a)^[59]、 SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$)(b)^[60]、 SiO_2 - K_2O 岩石系列判别图(c)^[61]
和 A/CNK-A/NK 铝饱和指数图(d)(背景数据来源见图1-b)

Fig. 5 TAS (a), SiO_2 versus ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$) (b), SiO_2 - K_2O (c) and A/CNK-A/NK (d)

diagrams for the currently studied granitoid rocks from the Mandelwula pluton and previously studied Permian granites and MME from the east part of the Yabulai-Nuoergong-Hongguyulin belt

因可能发生于陆缘俯冲环境,并应用最新的基于实验岩石学、热力学数值模拟等多方面研究支持的花岗质岩浆(I型)的成因模式^[63-68]——“俯冲侵蚀+岩浆夹积作用”(subduction erosion+relamination)新模式,解释了二叠纪(280~265Ma)I型花岗岩及伴生的镁铁质暗色包体和辉长岩体的成因,以及岩浆混合作用现象。该成因机制较合理地解释了在I型花岗岩中识别出的寄主花岗岩及其镁铁质暗色包体具有相似同位素组成时的岩浆混合现象的成因,即由继承了混合源区同位素特征的2种不同岩浆(如从同一安山质母岩浆多元共结分异后产生),经历了从源区到侵位多阶段的混合和混染。这与以往认

为的由不同源区的基性和酸性岩浆混合现象不同。虽然缺少更详细的矿物学工作,但依据目前观察到的现象和掌握的相关数据,初步认为雅布赖-诺尔公-洪古尔玉林带西段曼德林乌拉岩体的成因也可以用该模式解释。

6 结 论

(1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,阿拉善地块北部雅布赖-诺尔公-红古尔玉林构造带西段的曼德林乌拉岩体中粒花岗岩形成年龄为 $271 \pm 3\text{Ma}$,镁铁质暗色包体的形成年龄为 $270 \pm 2\text{Ma}$,均属于二叠纪岩浆活动的产物,不是之前认为的三叠纪。

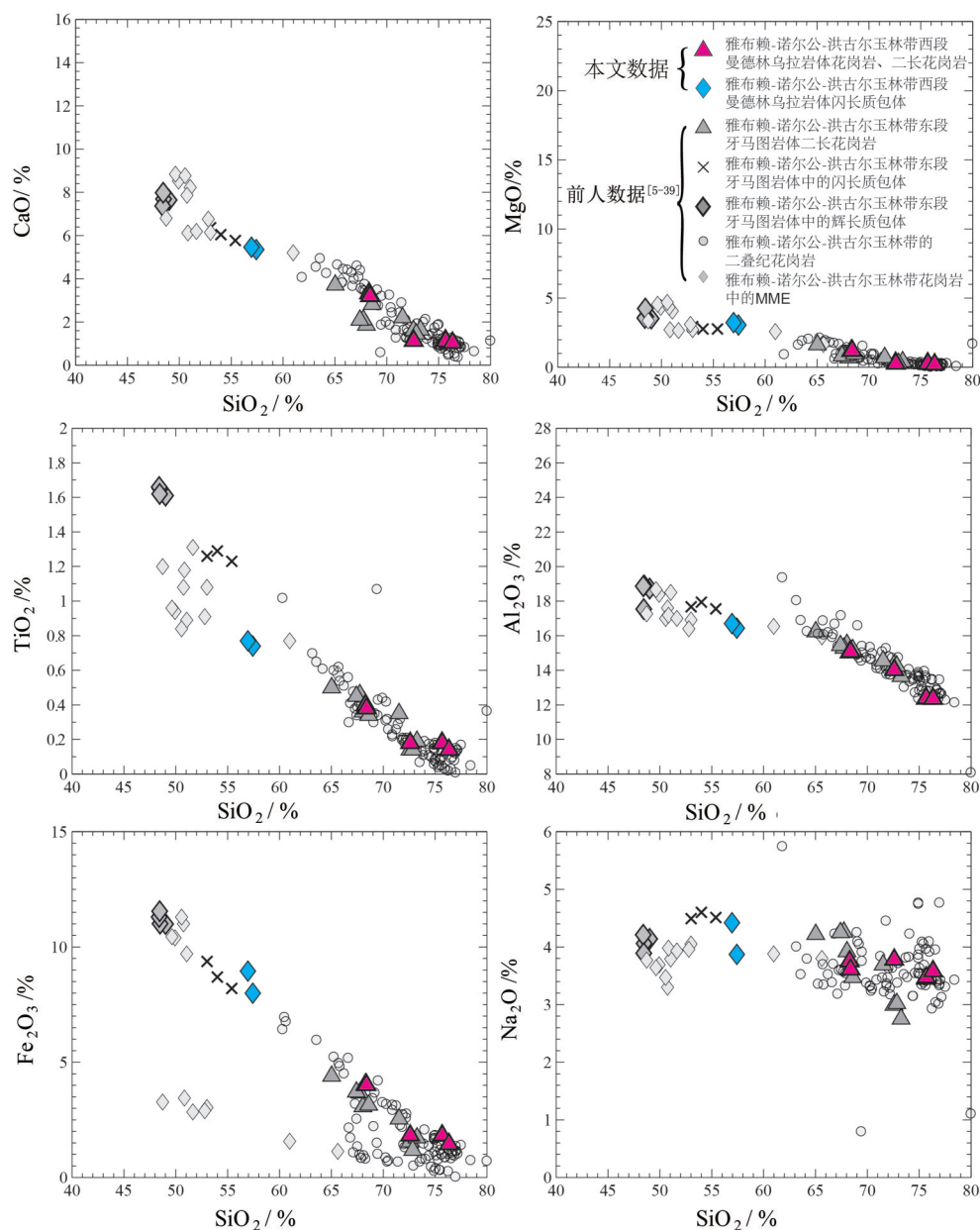


图6 曼德林乌拉岩体及前人雅布赖-诺尔公-红古尔玉林带东段二叠纪花岗岩及镁铁质包体样品 Harker 图解

Fig. 6 Harker diagrams for the currently studied granitoid rocks from the Mandelínwula pluton and previously studied Permian granites and MME from the east part of the Yabulai-Nuoergong-Hongueryulin belt

(2) 曼德林乌拉花岗岩和镁铁质暗色包体都具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(分别为 $-18.4 \sim -10.1$ 和 $-23.6 \sim -9.1$) 和相对古老的二阶段模式年龄(分别为 $1.8 \sim 2.3 \text{ Ga}$ 和 $1.7 \sim 2.5 \text{ Ga}$), 这些同位素特征表明其源区以古老地壳物质为主, 源区具有壳-幔源混合特征。

(3) 结合岩石学、岩相学、年代学和地球化学研究, 曼德林乌拉花岗岩和镁铁质暗色包体与雅布

赖-诺尔公-洪古尔玉林带东段的二叠纪 I 型花岗岩及其发育的镁铁质暗色包体具有相似的特征, 它们可能具有相同的岩浆混合成因。

致谢: 中国地质大学(北京)侯继尧、赵建新硕士在野外工作中给予帮助, 中国地质科学院地质研究所任海东、秦切博士在年代学测试方面提供帮助, 测试分析工作还得到中国地质调查局西安地质

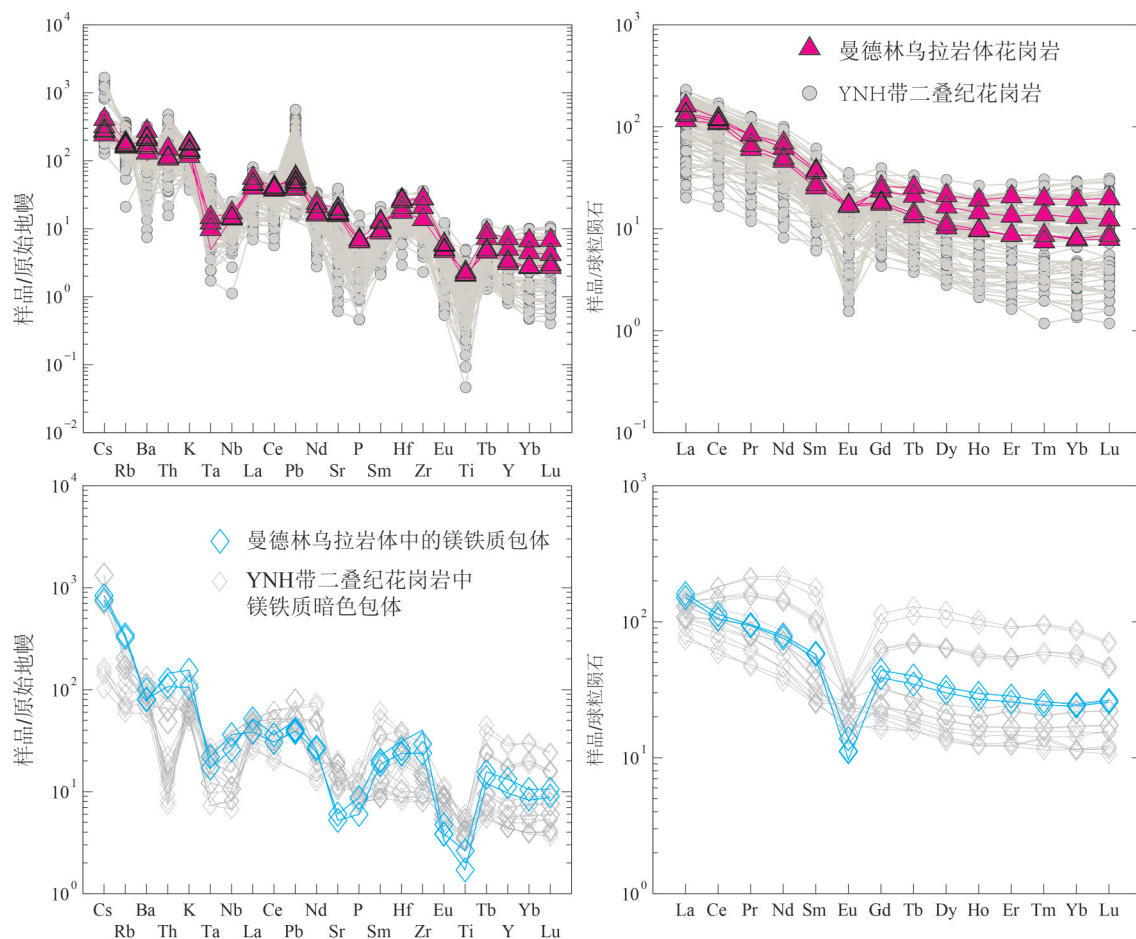


图7 曼德林乌拉岩体花岗岩、镁铁质暗色包体样品微量元素原始地幔标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化配分模式图
(标准化数据据参考文献[62],前人数据来源见图1-b)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized multiple trace element diagrams and chondrite-normalized REE patterns for the currently studied granitoid and MME from the Mandelinwula pluton

调查中心实验室、地科院矿产资源所实验室相关工作人员的帮助,审稿专家提出了宝贵修改意见和建议,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust[J]. Nature, 2000, 408(6813): 669.
- [2] Pitcher W S. The nature and origin of granite (Second edition)[M]. Springer Science & Business Media, London, 1997: 1-401.
- [3] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [4] 王涛, 王晓霞, 郭磊, 等. 花岗岩与大地构造[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1459-1478.
- [5] Zhang J J, Wang T, Castro A, et al. Multiple mixing and hybridization from magma source to final emplacement in the Permian Yamatu pluton, the Northern Alxa Block, China[J]. Journal of Petrology, 2016, 57(5): 933-979.
- [6] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46(3): 605-626.
- [7] Barbarin B. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts[J]. Lithos, 2005, 80(1/4): 155-177.
- [8] Bateman R. The interplay between crystallization, replenishment and hybridization in large felsic magma chambers[J]. Earth-Science Reviews, 1995, 39(1/2): 91-106.
- [9] Castro A. Tonalite-granodiorite suites as cotectic systems: a review of experimental studies with applications to granitoid petrogenesis[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 24: 68-95.
- [10] Jiang D S, Xu X S, Xia Y, et al. Magma mixing in a granite and

- related rock association: Insight from its mineralogical, petrochemical, and “reversed isotope” features[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(3): 2262–2285.
- [11] Dan W, Wang Q, Wang X C, et al. Overlapping Sr – Nd – Hf – O isotopic compositions in Permian mafic enclaves and host granitoids in Alxa Block, NW China: Evidence for crust – mantle interaction and implications for the generation of silicic igneous provinces[J]. *Lithos*, 2015, 230: 133–145.
- [12] Liu Q, Zhao G C, Han Y G, et al. Geochronology and geochemistry of Permian to Early Triassic granitoids in the Alxa Terrane: Constraints on the final closure of the Paleo–Asian Ocean[J]. *Lithosphere*, 2017, 9(4): 665–680.
- [13] 张磊, 史兴俊, 张建军, 等. 内蒙古阿拉善北部陶豪托西圈辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和地球化学特征[J]. *中国区域地质*, 2013, 32(10): 1536–1547.
- [14] 吴泰然, 何国琦. 阿拉善地块北缘的蛇绿混杂岩带及其大地构造意义[J]. *现代地质*, 1992, 6(3): 286–296.
- [15] 吴泰然, 何国琦. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元[J]. *地质学报*, 1993, 67: 97–108.
- [16] 王廷印, 张铭杰, 王金荣, 等. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. *地质科学*, 1998, 33(4): 385–394.
- [17] 王廷印, 吴茂炳. 阿拉善地区华北板块北部陆缘区成矿作用的研究[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1993, 29(4): 252–256.
- [18] 王廷印, 王士政, 王金荣. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带的发现及其构造意义[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1992, 28(2): 194–196.
- [19] Zheng R, Wu T, Zhang W, et al. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altaids: geochronological and geochemical evidences from ophiolites[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(2): 842–858.
- [20] 王金荣, 宋春晖, 高军平, 等. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩的形成机制[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1995, 31: 140–146.
- [21] Dan W, Li X H, Guo J, et al. Paleoproterozoic evolution of the eastern Alxa Block, westernmost North China: evidence from in situ zircon U–Pb dating and Hf–O isotopes[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(4): 838–864.
- [22] Feng J Y, Xiao W J, Windley B, et al. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic – ultramafic rocks from Alxa, China: implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 78: 114–142.
- [23] Liu Q, Zhao G C, Sun M, et al. Early Paleozoic subduction processes of the Paleo–Asian Ocean: Insights from geochronology and geochemistry of Paleozoic plutons in the Alxa Terrane[J]. *Lithos*, 2016, 262: 546–560.
- [24] Shi X J, Wang T, Zhang L, et al. Timing, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic gabbro – granodiorite – granite intrusions in the Shalazhashan of northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2014, 208: 158–177.
- [25] Zhang J J, Wang T, Zhang L, et al. Tracking deep crust by zircon xenocrysts within igneous rocks from the northern Alxa, China: Constraints on the southern boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 108: 150–169.
- [26] 史兴俊, 张磊, 王涛, 等. 阿拉善北部宗乃山地区片麻岩锆石 U–Pb 年龄, Hf 同位素特征及其构造归属探讨[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3518–3536.
- [27] 叶珂, 张磊, 王涛, 等. 阿拉善雅布赖山二叠纪中酸性岩浆岩年代学, 地球化学, 锆石 Hf 同位素特征及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(6): 901–928.
- [28] 霍雨佳, 张磊, 王毛毛, 等. 阿拉善北大山乌布日布特地区晚古生代侵入岩的地球化学、锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2019(待刊).
- [29] 张建新, 官江华. 阿拉善地块性质和归属的再认识[J]. *岩石学报*, 2018, 34(4): 940–962.
- [30] 王毛毛, 张磊, 霍雨佳, 等. 龙首山–北大山北部的属性——来自海森楚鲁片麻岩锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 2019, 38(5): 1–15.
- [31] Dan W, Li X H, Wang Q, et al. An Early Permian (ca. 280Ma) silicic igneous province in the Alxa Block, NW China: A magmatic flare-up triggered by a mantle–plume? [J]. *Lithos*, 2014, 204: 144–158.
- [32] 史兴俊, 童英, 王涛, 等. 内蒙古西部阿拉善地区哈里努登花岗岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(5): 662–670.
- [33] 杨奇获, 张磊, 王涛, 等. 内蒙古阿拉善地块北缘沙拉扎山晚石炭世岩体地球化学特征与 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2014, 33(6): 776–787.
- [34] Chen Y, Wu T R, Gan L S, et al. Provenance of the early to mid–Paleozoic sediments in the northern Alxa area: Implications for tectonic evolution of the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2019, 67: 115–130.
- [35] Song D F, Xiao W J, Collins A S, et al. Final subduction processes of the Paleo–Asian Ocean in the Alxa Tectonic Belt (NW China): Constraints from field and chronological data of Permian arc–related volcano–sedimentary rocks[J]. *Tectonics*, 2018, 37(6): 1658–1687.
- [36] Zhang J, Li J Y, Xiao W X, et al. Kinematics and geochronology of multistage ductile deformation along the eastern Alxa block, NW China: New constraints on the relationship between the North China Plate and the Alxa block[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 57: 38–57.
- [37] Zhang Y, Zhang J, Chen X, et al. Late Palaeozoic tectonic setting of the southern Alxa Block, NW China: constrained by age and composition of diabase[J]. *International Geology Review*, 2017, 59(8): 1028–1046.
- [38] Song D F, Xiao W J, Collins A S, et al. Late Carboniferous–early Permian arc magmatism in the south–western Alxa Tectonic Belt (NW China): Constraints on the late Palaeozoic subduction history

- of the Palaeo-Asian Ocean[J]. Geological Journal, 2018, 54: 1046–1063.
- [39] Shi G Z, Wang H, Liu E T, et al. Sr–Nd–Pb isotope systematics of the Permian volcanic rocks in the northern margin of the Alxa Block (the Shalazhashan Belt) and comparisons with the nearby regions: Implications for a Permian rift setting? [J]. Journal of Geodynamics, 2018, 115: 43–56.
- [40] 耿元生, 王新社, 沈其韩, 等. 内蒙古阿拉善地区前寒武纪变质岩系形成时代的初步研究[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 251–261.
- [41] 耿元生, 周喜文. 阿拉善地区新元古代早期花岗岩的地球化学和锆石 Hf 同位素特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 897–908.
- [42] Dan W, Li X H, Guo J, et al. Paleoproterozoic evolution of the eastern Alxa Block, westernmost North China: evidence from in situ zircon U–Pb dating and Hf–O isotopes[J]. Gondwana Research, 2012, 21(4): 838–864.
- [43] Wu S J, Hu J M, Ren M H, et al. Petrography and zircon U–Pb isotopic study of the Bayanwulashan Complex: constraints on the Paleoproterozoic evolution of the Alxa Block, westernmost North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 94: 226–239.
- [44] Gong J H, Zhang J X, Wang Z Q, et al. Origin of the Alxa Block, western China: New evidence from zircon U–Pb geochronology and Hf isotopes of the Longshoushan Complex[J]. Gondwana Research, 2016, 36: 359–375.
- [45] 耿元生, 周喜文. 阿拉善变质基底中的早二叠世岩浆热事件——来自同位素年代学的证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2667–2685.
- [46] 包创, 陈岳龙, 李大鹏. 阿拉善地块北缘朱拉扎嘎毛道晚二叠世火山岩的发现[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 156–163.
- [47] 邹雷, 刘平华, 田忠华, 等. 东阿拉善地块前寒武纪变质基底中晚古生代变质杂岩: 来自波罗斯坦庙杂岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年的新证据[J]. 地球科学, 2018, 44(4): 1406–1423.
- [48] 党智财, 李俊建, 赵泽霖, 等. 内蒙古阿拉善左旗巴音诺尔公花岗岩体 TIMS 锆石 U–Pb 年龄[J]. 地质通报, 2016, 35(4): 593–598.
- [49] van Achterbergh E, Ryan C, Jackson S, et al. Data reduction software for LA–ICPMS. Laser–Ablation–ICPMS in the earth sciences—principles and applications[J]. Miner. Assoc. Can., 2001, 29: 239–243.
- [50] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 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, 2007, 23(10): 2595–25604.
- [51] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U–Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [52] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, et al. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2002, 17(12): 1567–1574.
- [53] Morel M L, Nebel O, Nebel–Jacobsen Y J, et al. Hafnium isotope characterization of the GJ–1 zircon reference material by solution and laser–ablation MC–ICPMS[J]. Chemical Geology, 2008, 255 (1/2): 231–235.
- [54] Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and isotopic composition of GJ–red zircon standard by laser ablation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement, 2006, 70: A158.
- [55] Scherer E E, Whitehouse M J, Munker C. Zircon as a monitor of crustal growth[J]. Elements, 2007, 3: 19–24.
- [56] Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 273: 48–57.
- [57] Griffin W, Pearson N, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM–MC–ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64: 133–147.
- [58] Chauvel C, Garçon M, Bureau S, et al. Constraints from loess on the Hf–Nd isotopic composition of the upper continental crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 388: 48–58.
- [59] Le Maitre R W. A classification of igneous rocks and glossary of terms (second edition)[M]. Cambridge University Press, 2002.
- [60] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. Journal of petrology, 2001, 42 (11): 2033–2048.
- [61] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635–643.
- [62] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [63] Gerya T V, Yuen D A. Rayleigh–Taylor instabilities from hydration and melting propel ‘cold plumes’ at subduction zones[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 212(1/2): 47–62.
- [64] Gerya T V, Yuen D A, Sevre E O. Dynamical causes for incipient magma chambers above slabs[J]. Geology, 2004, 32(1): 89–92.
- [65] Vogt K, Gerya T V, Castro A. Crustal growth at active continental margins: numerical modeling[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2012, 192: 1–20.
- [66] Vogt K, Castro A, Gerya T V. Numerical modeling of geochemical variations caused by crustal relamination[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013, 14(2): 470–487.
- [67] Castro A, Vogt K, Gerya T V. Generation of new continental crust by sublithospheric silicic–magma relamination in arcs: a test of Taylor’s andesite model[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1554–1566.
- [68] Castro A. Generation of I–type granitic rocks by melting of heterogeneous lower crust: Comment[J]. Geology, 2019, 47(3): e455.
- ① 甘肃省地质局区域地质调查队. 中华人民共和国 1:20 万地质图, 阿贵庙幅(J–48–2). 1978.