

doi: 10.12029/gc20190508

徐盛林, 陈宣华, 李廷栋, 丁伟翠, 史建杰, 李冰, 马飞宙. 2019. 西准噶尔地区洋陆转换时代: 来自锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素的约束[J]. 中国地质, 46(5): 1061-1078.

Xu Shenglin, Chen Xuanhua, Li Tingdong, Ding Weicui, Shi Jianjie, Li Bing, Ma Feizhou. 2019. Time of the ocean-continent transition in West Junggar: Constraints from zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition[J]. Geology in China, 46(5): 1061-1078(in Chinese with English abstract).

西准噶尔地区洋陆转换时代: 来自锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素的约束

徐盛林^{1,2}, 陈宣华¹, 李廷栋^{1,2}, 丁伟翠^{1,2}, 史建杰¹, 李冰¹, 马飞宙^{1,3}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要: 中亚造山带西部的西准噶尔地区是古生代洋陆构造转换最显著的地区之一, 但是关于该地区洋陆转换的具体时间和地壳演化至今仍存在诸多争议。本文以西准噶尔地区的庙尔沟岩体及其西北侧新发现的柱状节理流纹岩为研究对象, 通过锆石 U-Pb 定年的方法, 判断庙尔沟岩体的年龄为 302.8~308.8 Ma, 柱状节理流纹岩的年龄为 303.6~294.5 Ma。锆石 Lu-Hf 同位素测试结果显示, 庙尔沟岩体和柱状节理流纹岩都具有相似的高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和高正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 具有亏损地幔的源区属性, 可能来源于下地壳底部残余洋壳或火山岛弧等新生地壳发生部分熔融。结合区域地质资料 and 前人研究成果, 将西准噶尔地区由大洋俯冲向陆内环境转变的时间限定为晚石炭—早二叠世, 其基底可能是以新元古代晚期—晚古生代形成的年轻洋壳和岛弧为主, 不存在古老的结晶基底。

关键词: 西准噶尔; 洋陆转换; 庙尔沟岩体; 柱状节理流纹岩; 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Lu-Hf 同位素; 深地勘查工程
中图分类号: P597; P542 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019) 05-1061-18

Time of the ocean-continent transition in West Junggar: Constraints from zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition

XU Shenglin^{1,2}, CHEN Xuanhua¹, LI Tingdong^{1,2}, DING Weicui^{1,2},
SHI Jianjie¹, LI Bing¹, MA Feizhou^{1,3}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The West Junggar area of the western Central Asian Orogenic Belt is one of the most typical regions related to transition from the ocean to the continent in the late Paleozoic. It is still controversial about the specific time of ocean-continent transition and the continental growth of the West Junggar area at present. This paper reports zircon U-Pb age and zircon Lu-Hf isotope analytical

收稿日期: 2019-04-18; 改回日期: 2019-08-26

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160083、DD20190011、DD20160344-05)、中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAGS-YWF201706)和国家重点研发计划项目(2018YFC0603700)联合资助。

作者简介: 徐盛林, 男, 1991 年生, 博士, 构造地质学专业, 从事构造地质学、岩石地球化学研究工作; E-mail: xushenglindizhi@163.com。

通讯作者: 陈宣华, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事深地探测研究; E-mail: xhchen@cags.ac.cn。

results from the Miaoergou batholith and the newly discovered columnar jointed rhyolites on the northwest side of the Miaoergou batholith, West Junggar area. The zircon U–Pb ages indicate that the Miaoergou granitoids were formed at 302.8–308.8 Ma and the columnar jointed rhyolites were formed at 303.6–294.5 Ma, which indicates that the specific time of ocean–mainland transformation of the West Junggar area is limited to the Late Carboniferous–Early Permian. The zircon Lu–Hf isotope analytical results show that the Miaoergou granitoids and rhyolites have some similar characteristics in $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values. High $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values, similar to features of depleted mantle in nature, suggest that they resulted from partial melting of juvenile crust. Integrating regional geological data and previous research, the authors have reached the conclusion that the basement of West Junggar area was composed of juvenile oceanic crust and island arc which grew from late Neoproterozoic to late Paleozoic, with no old crystalline basement.

Key words: West Junggar; ocean–continent transition; Miaoergou batholith; columnar jointed rhyolites; zircon U–Pb dating; zircon Lu–Hf isotopic composition; deep exploration engineering

About the first author: XU Shenglin, male, born in 1991, doctor, majors in structural geology, engages in research on tectonics and geochemistry; E–mail: xushenglindizhi@163.com.

About the corresponding author: CHEN Xuanhua, male, born in 1967, professor, supervisor of doctor candidates, engages in deep earth exploration; E–mail: xhchen@cags.ac.cn.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program(No. DD20160083, DD20160344– 05 and DD20190011), Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes (No. CAGS–YWF201706) and National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC0603701).

1 引 言

中亚造山带是塔里木克拉通、华北克拉通和西伯利亚克拉通之间的巨型缝合带(图 1a),是全球改造最显著的造山带之一(申萍等, 2009; Xiao et al., 2009; Chen et al., 2015; Yu et al., 2018)。中亚造山带内发育多期次、多类型的岩石,有超基性岩、基性岩、花岗岩类及火山岩,构造–岩浆活动在古生代非常复杂(田亚洲等, 2005; 韩宝福等, 2006; 陈宣华等, 2009, 2011; 黄鹏辉等, 2016; Zhang et al., 2017; Sun et al., 2018)。中国新疆西北部的西准噶尔地区位于中亚造山带西部(图 1a),是晚古生代发生洋陆转换的典型地区之一,处于古生代哈萨克斯坦微板块与准噶尔洋之间俯冲、拼贴和洋陆转换的关键部位,构造变形复杂多样(陈宣华等, 2015; 靳松等, 2016; 刘阁等, 2018),也是中亚造山带西部非常重要的构造–岩浆带(Xiao et al., 2008; 陈宣华等, 2011; Shen et al., 2013a, 2013b; Chen et al., 2014; 杨屹等, 2015; Ding et al., 2019; Xu et al., 2019)。

前人在西准噶尔地区进行了大量研究,成果相当丰富,但是关于晚古生代构造演化存在众多不同见解,尤其是准噶尔洋板块的俯冲极性和洋陆转换的过程、时间等仍存在诸多争论。韩宝福等(2006)

认为西准噶尔地区洋盆在晚石炭世之前就已经闭合,晚石炭世–二叠纪(340–275 Ma)已经进入后造山演化阶段。亦有其他学者认为西准噶尔地区在晚石炭世仍然保留有洋盆(刘希军等, 2009; Tang et al., 2010a, 2010b; Geng et al., 2011)。史建杰等(2017)认为西准噶尔地区发育的柱状节理流纹岩是该地区晚石炭世洋陆转换的重要标志,但是缺乏充分的年龄证据。

因此,针对上述存在的问题,本文主要通过对比西准噶尔地区的庙尔沟岩体及其西北侧发育的柱状节理流纹岩的U–Pb年代学和Lu–Hf同位素特征研究,充分限定了洋陆转换的时代,分析了岩石的源区属性及其大地构造背景,为西准噶尔地区晚古生代构造演化提供新的重要证据。

2 区域地质背景

西准噶尔构造系是巴尔喀什马蹄形造山带向东延伸的部分,区域上表现为夹持在近东西向额尔齐斯走滑断裂(Laurent–Charvet et al., 2002)、成吉斯–准噶尔断裂和天山断裂系统之间的一个北东–南西走向的地块,是中亚造山带西部的核心区域之一。区内以大型左行走滑(简称“西准系”,陈宣华等, 2009, 2011, 2015)和右行走滑断裂为主,左行走

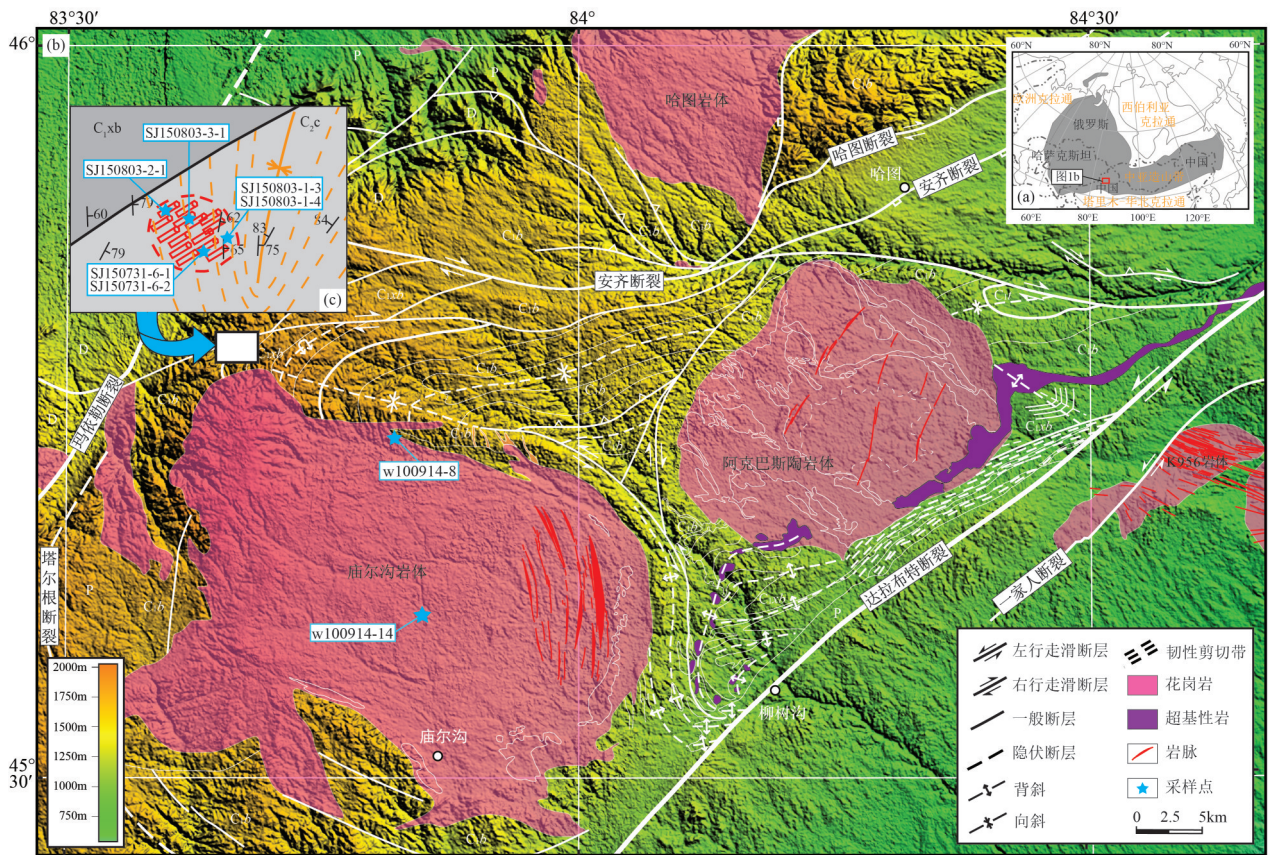


图1 西准噶尔地区地质构造与采样位置图

Fig. 1 Geological structure sketch map showing sampling locations in the West Junggar

滑断裂主要由3条北东-南西走向的区域大型主干断裂和众多规模较小的次级断裂构成,右行走滑断裂主要为成吉斯-准噶尔断裂和扎娄勒山-拉巴山断裂等大型断裂。

西准噶尔地区分布有早古生代以来的沉积地层,以古生界为主,主要包含两个构造层:(1)早古生代变质地体,主要由蛇绿混杂堆积和复理石建造组成,经受了强烈的韧性剪切变形和变质作用;(2)晚古生代巨厚的火山-碎屑沉积建造(Ma et al., 2017)。石炭系出露最广泛,为一套巨厚的半深海-大陆坡相火山-碎屑沉积建造(向坤鹏等, 2013; 陈宣华等, 2015)。早二叠世陆相火山喷发之后,准噶尔盆地开始拗陷,并从晚二叠世开始接受内陆盆地沉积,区内二叠系分布较为局限,主要在乌尔禾、达拉布特和塔尔巴哈台地区。

西准噶尔地区岩浆岩出露广泛,从超基性岩至酸性岩均有分布,以花岗岩类为主,超基性岩次之,酸性流纹岩仅零星可见(宋会侠, 2007)。区内广泛

发育的晚古生代晚期花岗岩类侵入岩可分为两类:中酸性中小型斑岩体和花岗岩类岩基,沿玛依勒山、克拉玛依等断裂发育有组成蛇绿岩套的超基性岩,区内还存在伸展环境下的基性岩墙群和超浅相的中酸性岩脉等。

3 庙尔沟岩体及柱状节理流纹岩特征

庙尔沟岩体位于新疆托里县庙尔沟镇,处在西准噶尔地区的东南部,夹在达拉布特断裂、塔尔根断裂、玛依勒断裂和安齐断裂之间,是西准噶尔地区内大型岩体之一(图1b),分布面积达700 km²,属于海西晚期花岗岩类岩基,为A2型花岗岩,形成于后造山伸展的构造环境中(韩宝福等, 2006; 黄鹏辉等, 2016)。岩体侵入石炭纪海相地层中,被塔尔根环状断裂环绕,受断裂控制,整体呈圆状,以碱长花岗岩为主(图2a),部分地区可见花岗闪长岩(图2b)。由岩体内部到外部可分为浅肉红色中-粗粒斑状黑云母花岗岩相、肉红色中粒碱长花岗岩相和

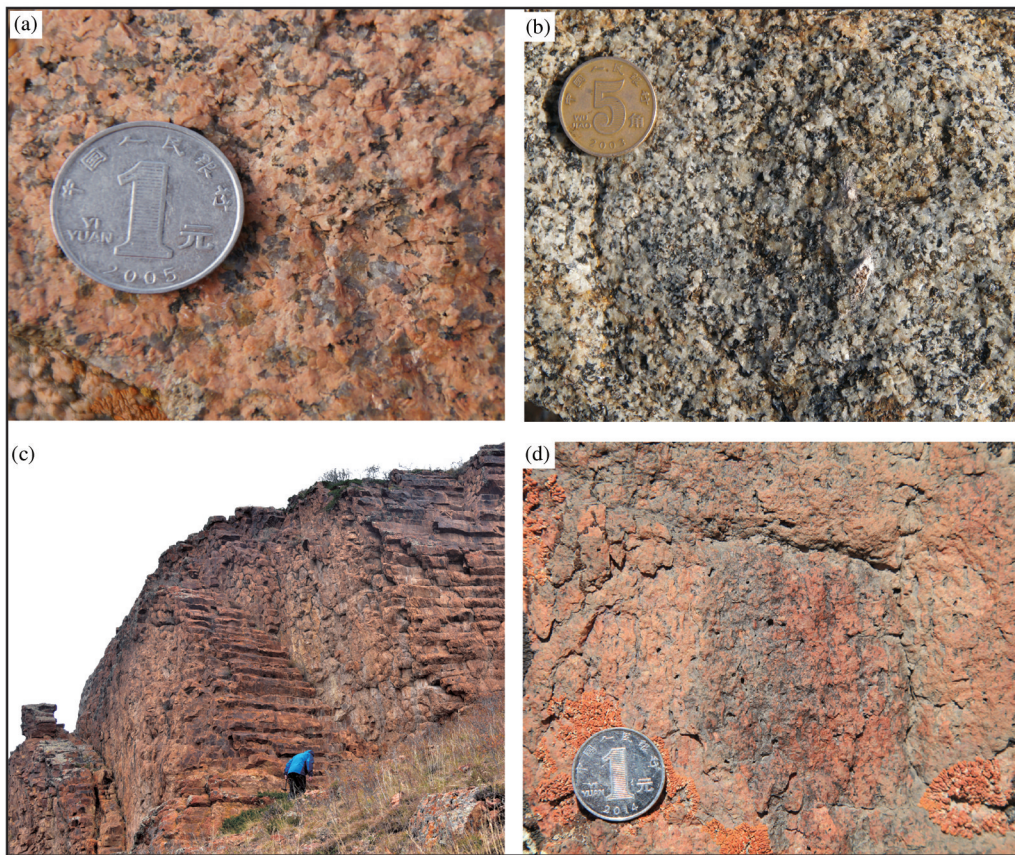


图2 庙尔沟岩体与柱状节理流纹岩野外产出特征

a—庙尔沟岩体碱长花岗岩;b—庙尔沟岩体花岗闪长岩;c—柱状节理流纹岩整体特征;d—流纹岩流纹构造

Fig. 2 Outcrop photos of Miaoergou batholith and columnar jointed rhyolite

a—Miaoergou alkali feldspar granite;b—Miaoergou granodiorite;c—Outcrop features of columnar jointed rhyolite;d—Fluidal structure

肉红色细粒碱长花岗岩相。

新发现的柱状节理流纹岩出露于西准噶尔地区的庙尔沟岩体西北侧(图1c),位置与庙尔沟岩体相近,两者之间是石炭系海相陆缘碎屑岩-火山岩地层。流纹岩发育在褶皱变形的下石炭统包古图组(C_{1b})之上,周围为上石炭统成吉思汗山组地层(C_{2c}),大致形成时代应为成吉思汗组地层形成之后,具体年龄见流纹岩锆石U-Pb测年结果。包古图组为一套深灰色凝灰岩,夹安山玢岩、玄武岩、硅质岩和少量砂岩,属海相火山岩沉积组合;成吉思汗山组地层为一套含砾岩、砂岩、砂砾岩、凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩组合,偶夹玄武岩、硅质岩,属于一套大陆边缘相火山碎屑岩组合。柱状节理流纹岩柱长整体大于5 m,呈四方柱、五方柱和六方柱产出,主要为六方柱,柱体的横截面呈四边形、五边形和六边形等多边形(图2c),流纹岩的柱状节理与其层面垂直产出,上部具有柱状节理构造,底部则为

流纹构造(图2d)。柱状节理流纹岩的产状整体倾向南东,倾角约55°,与上石炭统成吉思汗山组地层产状较为一致,可以反映出流纹岩与石炭统共同发生褶皱变形,可能与达拉布特断裂在二叠纪以来的左行走滑导致的阿克巴斯陶岩体与庙尔沟岩体相向旋转、哈图岩体向南挤压的构造变形有关,与西准噶尔地区晚古生代以来的构造变形一致。

4 样品制备与测试

4.1 样品采集

本次研究对庙尔沟花岗岩及柱状节理流纹岩等典型样品进行了系统采集,其中庙尔沟花岗岩类样品2件:岩体北缘花岗闪长岩编号为W100914-8-1,岩体中部碱长花岗岩编号为W100914-14-1,具体采样位置见图1b。共采集柱状节理流纹岩样品6件:从底部发育流纹构造的岩体开始,地层由老到新的顺序依次采集,编号分别为SJ150803-2-1、SJ150803-3-

1、SJ150731-6-1、SJ150731-6-2、SJ150803-1-3、SJ150803-1-4、具体采样位置见图1c。

4.2 样品制备

将样品粉碎,筛选出纯度较高的锆石,人工在双目镜下挑选晶形较好的锆石颗粒制靶,使用环氧树脂固定,将锆石表面抛光,露出锆石核部,样品在测定之前用体积百分比为3%的HNO₃清洗样品表面,除去样品表面的污染物,然后进行阴极发光和背散射电子相分析,使用JSM6510型扫描电子显微镜完成锆石样品的阴极发光成像(图3),圈出透明、晶型较好、具生长环带、无裂隙和无包体的锆石点位,为锆石U-Pb和Lu-Hf同位素测试准备。

4.3 测试分析

4.3.1 锆石U-Pb测试

LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb定年在中国地质

科学院矿产资源研究所激光等离子质谱实验室完成,采用Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及配套的Newwave UP213激光剥蚀系统进行定年实验。分析前用锆石GJ-1标样进行仪器调试,定年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量测试以锆石M127为外标进行校正。为保证实验精确度,每5个样品插入一组国际标准锆石91500和锆石标样GJ-1进行校正,并通过测量1个锆石标样Plesovice来观察仪器运行状态。采用ICPMSDataCal程序对数据进行处理,剔除样品中差异较大的点,最终实验得到的锆石U-Pb数据见表1。在Isoplot 4.15程序上完成锆石年龄谐和图(图4)的绘制。

4.3.2 锆石Lu-Hf同位素测试

在样品完成锆石U-Pb定年测试的基础上,在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行了锆石

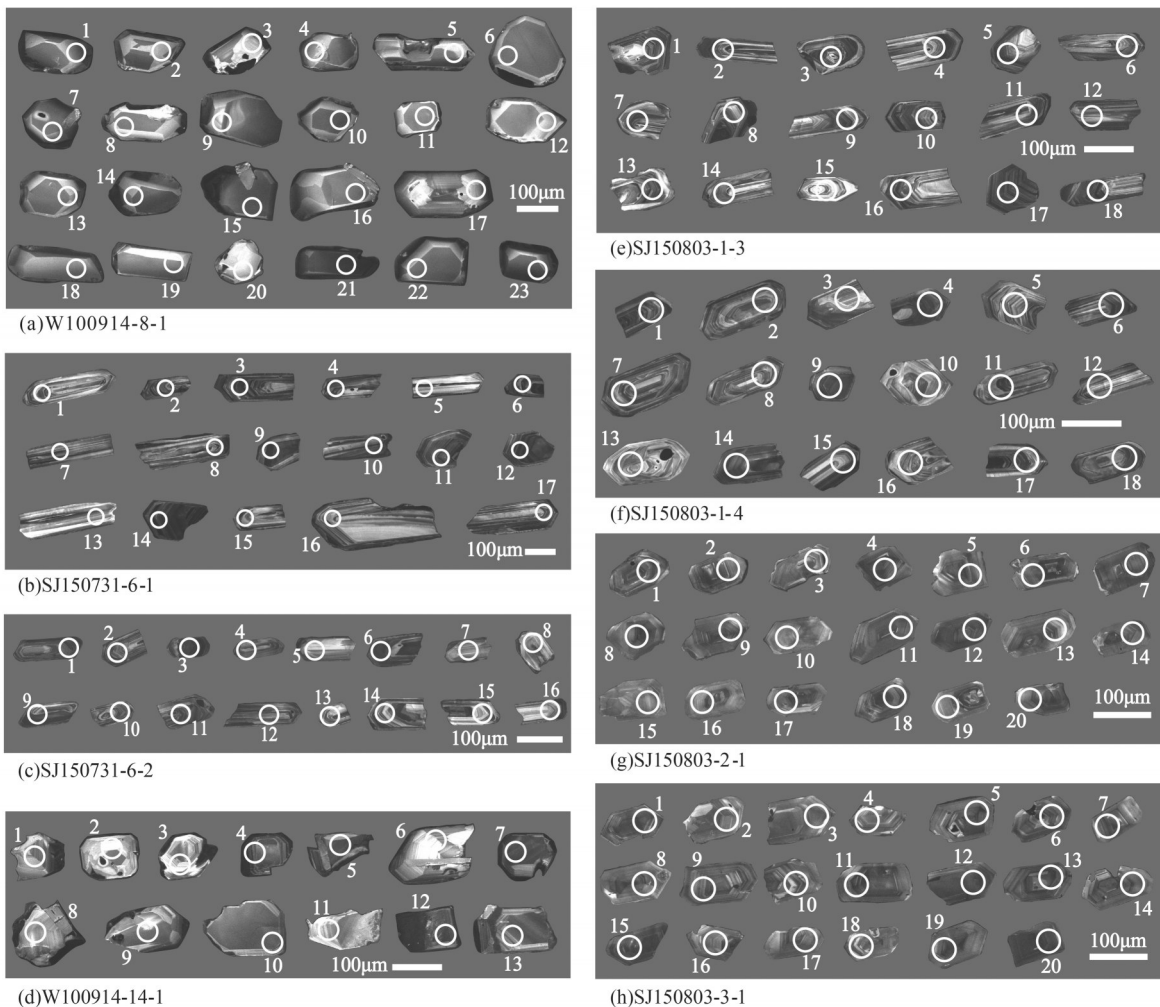


图3 庙尔沟花岗岩和流纹岩锆石CL图像
Fig. 3 Zircon CL images of Miaoergou granitoids and rhyolites

Lu-Hf同位素分析测试,其中锆石Lu-Hf同位素测点位置与U-Pb定年测点位置为同一锆石颗粒内的同一岩浆生长环带上。激光剥蚀系统是193 nm准分子激光剥蚀系统(RESOLUTION M-50, ASI),频率为5 Hz,束斑为43 μm ,载气为高纯氦气。Lu-Hf同位素分析采用多接收等离子体质谱(Nu Plas Ma II MC-ICPMS)。在分析过程中,国际标准锆石样品91500和Mud Tank作为监控样品,每8个样品插入一组国际标样,数据采集模式为TRA模式,积分时间为0.2 s,背景采集时间为30 s,样品积分时间为50 s,吹扫时间为40 s。具体测试步骤和方法见Bao et al.(2017)。详细测试结果见表2。

5 锆石年代学分析结果

5.1 锆石形态及内部结构

5.1.1 庙尔沟花岗岩类

2个花岗岩类样品的锆石阴极发光(CL)图像(图3a, 3b)显示两者整体上都是典型的岩浆锆石,局部特征存在差别。W100914-8-1样品中锆石无色透明,边界清晰,结晶较好,呈粒状或短柱状,粒径为100~200 μm ,大小较均匀,长宽比为2:1~1:1,具宽缓的不规则的生长环带结构,具典型的岩浆锆石特征。W100914-14-1样品中锆石无色透明,边界清晰,结晶较好,呈粒状或短柱状,粒径在100~150 μm ,大小均匀,长宽比为1:1~1.5:1,呈明暗条纹状,具较窄的平行生长环带结构,具有典型的岩浆锆石特征。

5.1.2 流纹岩

6个流纹岩样品的锆石阴极发光(CL)图像(图3c~h)显示锆石整体上具有相似的特征,无色透明,边界清晰,结晶较好,呈柱状,粒径在50~100 μm ,大小较均匀,长宽比为1.5:1~3:1,呈明暗条纹状,发育较窄的生长环带结构,具有典型的岩浆锆石特征。

5.2 锆石U-Pb定年

5.2.1 庙尔沟花岗岩类

样品W100914-8-1的U和Th的含量变化范围分别为 56.81×10^{-6} ~ 156.85×10^{-6} 和 29.99×10^{-6} ~ 104.81×10^{-6} ,Th/U比值为0.37~0.76,23个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄平均值为 (308.8 ± 2.6) Ma($n=23$,MSWD=0.29;图4a)。

样品W100914-14-1的U和Th的含量变化范

围分别为 79.98×10^{-6} ~ 220.17×10^{-6} 和 37.91×10^{-6} ~ 113.35×10^{-6} ,Th/U比值为0.37~0.73,13个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (302.6 ± 2.9) Ma($n=13$,MSWD=0.38;图4b)。

实验结果显示,2个花岗岩样品的U、Th含量中等,Th/U比值均在岩浆锆石的范围内(Hoskin et al., 2000; Belousova et al., 2002)。

5.2.2 流纹岩

样品SJ150731-6-1的U和Th的含量变化范围分别为 128.58×10^{-6} ~ 451.89×10^{-6} 和 75.69×10^{-6} ~ 183.14×10^{-6} ,Th/U比值为0.24~0.59,17个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (295.0 ± 1.9) Ma($n=17$,MSWD=0.34;图4c)。

样品SJ150731-6-2的U和Th的含量变化范围分别为 75.40×10^{-6} ~ 551.17×10^{-6} 和 29.97×10^{-6} ~ 200.08×10^{-6} ,Th/U比值为0.30~0.53,16个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (310.97 ± 1.9) Ma($n=16$,MSWD=0.39;图4d)。

样品SJ150803-1-3的U和Th的含量变化范围分别为 94.06×10^{-6} ~ 749.15×10^{-6} 和 37.01×10^{-6} ~ 199.78×10^{-6} ,Th/U比值为0.26~0.59,18个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (297.7 ± 1.6) Ma($n=18$,MSWD=0.37;图4e)。

样品SJ150803-1-4的U和Th的含量变化范围分别为 54.04×10^{-6} ~ 479.58×10^{-6} 和 19.76×10^{-6} ~ 228.77×10^{-6} ,Th/U比值为0.29~0.65,18个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (294.5 ± 1.9) Ma($n=18$,MSWD=0.14;图4f)。

样品SJ150803-2-1的U和Th的含量变化范围分别为 126.56×10^{-6} ~ 338.26×10^{-6} 和 $(53.52 \sim 257.75) \times 10^{-6}$,Th/U比值为0.42~0.90,20个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (303.6 ± 1.7) Ma($n=20$,MSWD=0.53;图4g)。

样品SJ150803-3-1的U和Th的含量变化范围分别为 135.60×10^{-6} ~ 374.29×10^{-6} 和 60.62×10^{-6} ~ 254.56×10^{-6} ,Th/U比值为0.38~0.84,20个分析点的年龄数据落在谐和线及附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (301.5 ± 1.9) Ma($n=20$,MSWD=0.23;图4h)。

实验结果显示,6个流纹岩样品的U、Th含量中等,Th/U比值均在岩浆锆石的范围内(Hoskin et al., 2000; Belousova et al., 2002)。

表1 庙尔沟花岗岩类与流纹岩LA-MC-ICP-MS U-Pb同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of Miaogou granitoids and rhyolites

测点	Pb/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	Rho	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	谐和/%
				/10 ⁻²	/10 ⁻³	/10 ⁻²	/10 ⁻³	/10 ⁻²	/10 ⁻³			/Ma	/Ma			
W100914-8-1																
1	4.16	42	77	5.9	7.09	38	39	4.88	1.39	0.2767	0.5377	568.55	262.93	307.33	8.52	93
2	4.69	48	86	5.57	4.1	37.61	26.1	4.92	1.13	0.3305	0.5596	442.64	132.39	309.55	6.93	95
3	3.04	30	57	5.51	6.67	37.41	45.6	4.87	2.17	0.3649	0.5278	416.72	306.44	306.63	13.31	94
4	5.21	49	93	5.66	3.56	38.22	22.1	5.04	0.87	0.2991	0.5243	475.97	138.87	317.11	5.35	96
5	5.28	36	98	5.63	9.06	37.26	58.2	4.95	1.91	0.2466	0.3689	464.86	362.92	311.43	11.71	96
6	4.74	45	88	5.78	3.79	37.89	23.6	4.84	1.17	0.3857	0.5183	524.11	144.43	304.92	7.16	93
7	4.33	48	79	5.77	4.65	38.1	30.8	4.82	1.22	0.314	0.6063	516.71	177.76	303.35	7.52	92
8	3.7	40	66	5.76	3.65	38.09	22.4	4.87	0.96	0.3359	0.6158	516.71	140.72	306.6	5.92	93
9	3.72	36	67	5.6	4.49	37.56	29.4	4.96	1.46	0.3765	0.5414	450.05	179.61	311.77	8.97	96
10	6.2	75	109	5.48	3.08	36.57	20	4.9	0.75	0.2808	0.6861	466.71	95.36	308.15	4.61	97
11	6.53	86	113	5.6	3.94	37.68	26.1	4.94	0.94	0.2748	0.7585	453.75	155.54	310.87	5.77	95
12	3.64	35	66	5.6	5.77	37.13	36.6	4.87	1.7	0.3556	0.5289	453.75	229.6	306.44	10.48	95
13	3.93	41	71	5.57	4.92	36.88	31.5	4.94	1.24	0.2946	0.5749	438.94	200.9	311.08	7.63	97
14	5.76	70	104	5.68	3.29	37.01	20	4.83	0.8	0.306	0.6722	483.38	129.61	304.29	4.92	95
15	6.69	82	118	5.37	3.71	35.85	23.6	4.93	0.92	0.2854	0.6917	366.72	155.54	309.91	5.67	99
16	5.55	74	98	5.74	4.93	37.98	31.3	4.89	0.78	0.1939	0.753	509.3	190.72	307.49	4.79	93
17	4	41	74	5.55	5.52	36.47	33.4	4.98	1.21	0.2656	0.5463	431.53	224.04	313.19	7.44	99
18	5.13	61	91	5.66	3.69	37.55	22	4.97	0.79	0.2701	0.6742	475.97	144.43	312.77	4.84	96
19	5.41	73	98	5.92	5.54	38.67	32.2	4.87	1.21	0.2985	0.7467	575.96	200.9	306.48	7.43	92
20	2.99	31	56	6.04	5.71	38.69	31.1	4.92	1.15	0.2914	0.5551	616.69	205.53	309.57	7.07	92
21	8.34	105	157	5.49	2.68	36.49	17.8	4.86	0.72	0.3038	0.6682	409.31	113.88	306.13	4.42	96
22	4.93	54	93	5.54	4.85	36.05	26.7	4.88	0.9	0.2492	0.5764	427.83	196.27	306.86	5.54	98
23	4.12	54	75	5.53	6.05	37.17	37.6	4.93	1.46	0.2922	0.7214	433.38	241.63	310.15	8.96	96
W100914-14-1																
1	4.36	38	80	5.54	4.07	35.51	26.3	4.68	1.03	0.2951	0.474	427.83	162.95	295.02	6.31	95
2	6.6	44	119	5.67	7.29	37.22	47.7	4.83	1.29	0.2089	0.3703	479.67	287	303.75	7.94	94
3	5.24	43	95	5.71	3.37	36.31	20.3	4.74	0.9	0.3393	0.4503	494.49	126.84	298.36	5.52	94
4	12.88	113	220	5.69	7.07	36.78	44	4.78	1.39	0.2436	0.5148	487.08	277.74	300.86	8.57	94
5	9.13	80	162	5.84	2.96	37.76	18.2	4.78	0.68	0.296	0.4929	542.63	111.1	300.83	4.2	92
6	3.12	20	55	6.1	9.19	36.39	42	4.73	2.68	0.4911	0.374	638.91	362.01	297.72	16.48	94
7	7.63	69	131	5.83	2.62	38.25	16.7	4.82	0.68	0.3223	0.5274	542.63	98.13	303.28	4.16	91
8	6.54	77	106	5.81	4.83	37.86	28.6	4.84	0.92	0.2512	0.7299	531.52	183.31	304.7	5.65	93
9	4.79	45	80	5.51	5.42	36.9	39.9	4.87	1.31	0.248	0.558	413.01	215.71	306.78	8.02	96
10	6.27	47	109	5.59	2.63	36.49	16.6	4.8	0.8	0.3671	0.4329	450.05	105.55	302.5	4.94	95
11	6.12	52	105	5.37	2.98	35.66	18.9	4.8	0.66	0.2611	0.4979	366.72	125.91	302.36	4.08	97
12	15.6	112	270	5.57	2.15	37.28	13.6	4.89	0.66	0.3682	0.4138	442.64	85.18	307.9	4.05	95
13	5.65	38	100	5.49	4.11	34.67	20.7	4.79	0.93	0.3255	0.3831	409.31	168.5	301.85	5.72	99
SJ150731-6-1																
1	13.54	96	277	5.29	0.77	34.15	5.82	4.69	0.52	0.6509	0.3451	324.13	26.85	295.24	3.2	98
2	13.49	98	273	5.31	0.9	34.5	6.84	4.72	0.69	0.7338	0.3613	344.5	38.89	297.24	4.23	98
3	22.16	148	439	5.38	0.73	35.3	6.51	4.76	0.6	0.6786	0.3375	361.17	29.63	299.73	3.67	97
4	15.66	80	321	5.33	1.33	34.32	9.56	4.69	1.16	0.8868	0.2489	338.95	55.55	295.5	7.13	98
5	15.35	125	299	5.31	1.06	34.48	9.35	4.71	0.87	0.6808	0.4177	331.54	44.44	296.56	5.35	98
6	20.34	183	385	5.33	0.85	34.58	5.36	4.71	0.53	0.7265	0.4757	342.65	41.66	296.82	3.27	98
7	12.58	123	236	5.38	1.19	34.73	7.91	4.69	0.58	0.5424	0.522	364.87	45.37	295.14	3.56	97
8	22.62	125	452	5.2	0.79	33.73	6.73	4.7	0.64	0.683	0.2769	287.1	33.33	296	3.94	99

续表 1

测点	Pb/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb /10 ⁻²	1σ /10 ⁻³	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U /10 ⁻²	1σ /10 ⁻³	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U /10 ⁻²	1σ /10 ⁻³	Rho	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb /Ma	1σ /Ma	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U /Ma	1σ /Ma	谐和/%
9	15.01	117	287	5.31	1.08	34.76	8.59	4.74	0.58	0.4986	0.4077	331.54	46.29	298.78	3.6	98
10	16.95	112	335	5.2	0.84	33.22	5.76	4.65	0.57	0.7066	0.3348	283.4	32.41	292.67	3.51	99
11	18.55	130	359	5.34	0.84	34.53	7.3	4.69	0.72	0.7265	0.3632	346.35	39.81	295.6	4.44	98
12	7.13	76	129	5.26	1.86	34.33	12.52	4.75	0.75	0.4342	0.5887	309.32	81.47	298.92	4.62	99
13	13.63	138	254	5.21	1.37	33.49	8.82	4.68	0.74	0.6035	0.5428	300.06	59.25	294.81	4.58	99
14	10.96	77	211	5.22	0.89	33.41	5.91	4.66	0.5	0.6044	0.3652	294.51	38.89	293.35	3.07	99
15	13.16	99	253	5.43	1.52	34.63	9.33	4.63	0.66	0.5255	0.3926	387.09	67.59	291.98	4.04	96
16	13.1	98	249	5.41	1.76	34.7	8.98	4.68	0.87	0.7192	0.3927	375.98	76.85	294.99	5.37	97
17	11.98	80	228	5.18	1.51	33.86	10.58	4.75	0.82	0.5499	0.3502	275.99	66.66	298.94	5.02	99
SJ150731-6-2																
1	21.61	137	392	5.32	1.55	36.58	9.84	5	0.68	0.5075	0.3507	344.5	66.66	314.27	4.19	99
2	15	96	272	5.3	1.97	36.51	12.83	5	0.67	0.3784	0.3514	327.84	83.33	314.58	4.08	99
3	22.72	200	396	5.26	0.99	36.32	8.63	5.01	1.26	0.6	0.5051	322.28	10.19	315.24	7.71	99
4	13.45	93	242	5.34	1.24	36.42	7.97	4.97	0.8	0.7391	0.3837	346.35	51.85	312.68	4.94	99
5	4.19	30	75	5.25	2.04	35.98	15.51	4.96	0.68	0.3192	0.3975	305.62	87.03	312.14	4.19	99
6	20.39	152	363	5.33	0.8	36.57	6.66	4.98	0.67	0.7399	0.4184	342.65	33.33	313.15	4.12	98
7	5.76	42	103	5.28	1.61	36.12	13.12	4.95	0.79	0.4367	0.4099	320.43	65.74	311.69	4.83	99
8	11.44	73	211	5.31	0.96	36.31	7.7	4.97	0.63	0.6008	0.3481	331.54	36.11	312.47	3.89	99
9	14.79	83	275	5.39	1.01	36.66	7.48	4.95	0.57	0.569	0.3019	364.87	42.59	311.16	3.52	98
10	19.9	148	361	5.37	1.78	36.23	13.71	4.89	0.62	0.3347	0.4109	366.72	74.07	307.72	3.81	98
11	4.42	36	78	5.41	1.89	36.49	12.83	4.9	0.58	0.3351	0.4653	375.98	79.62	308.1	3.54	97
12	13.03	93	237	5.39	1.49	36.33	11.66	4.88	0.55	0.3487	0.394	368.57	62.96	306.99	3.35	97
13	29.67	176	551	5.27	1.02	35.47	5.66	4.9	0.64	0.822	0.3192	322.28	16.67	308.3	3.95	99
14	9.84	65	180	5.41	1.2	36.63	8.88	4.92	0.53	0.4487	0.3635	372.28	56.48	309.35	3.29	97
15	8.78	49	163	5.38	1.06	36.6	7.86	4.93	0.53	0.5007	0.3022	364.87	44.44	310.39	3.26	98
16	12.6	117	220	5.33	1.26	36.35	9.1	4.95	0.62	0.4985	0.5293	342.65	53.7	311.24	3.79	98
SJ150803-1-3																
1	22.53	175	424	5.43	0.94	35.11	7.64	4.69	0.72	0.702	0.4122	383.39	38.89	295.6	4.42	96
2	33.07	194	641	5.34	0.77	34.97	8.03	4.75	0.81	0.7398	0.3027	342.65	26.85	298.95	4.96	98
3	17.85	121	349	5.34	1.21	34.45	9.13	4.68	0.73	0.5854	0.3471	346.35	50	294.57	4.47	97
4	38.78	200	749	5.44	1.23	36.03	8.23	4.81	0.62	0.5628	0.2667	387.09	45.37	302.71	3.8	96
5	4.92	38	94	5.31	1.29	34.55	9.67	4.72	0.71	0.5377	0.3994	344.5	53.7	297.13	4.37	98
6	16.54	133	317	5.39	0.83	35.16	6.73	4.72	0.51	0.5674	0.4189	368.57	67.59	297.55	3.16	97
7	26.7	166	522	5.24	0.59	34.62	5.25	4.8	0.63	0.8648	0.3181	301.91	25.92	302.41	3.88	99
8	12.52	103	239	5.18	0.85	33.85	6.81	4.73	0.57	0.594	0.4311	279.69	41.66	297.98	3.48	99
9	18.97	125	371	5.34	0.69	34.95	5.52	4.75	0.54	0.7212	0.3381	346.35	29.63	298.89	3.33	98
10	15.07	80	286	5.21	0.99	33.72	8.31	4.68	0.58	0.4992	0.2786	300.06	37.96	295.11	3.55	99
11	14.59	150	257	5.39	2.04	34.85	10.26	4.7	0.82	0.5953	0.5828	368.57	85.18	296.19	5.07	97
12	11.62	88	211	5.2	1.5	33.87	9.57	4.72	0.53	0.3989	0.415	287.1	66.66	297.58	3.28	99
13	18.05	152	325	5.44	0.86	35.15	5.49	4.69	0.46	0.6257	0.468	387.09	39.81	295.26	2.82	96
14	5.46	37	102	5.38	1.4	34.95	10.1	4.71	0.61	0.4463	0.3626	361.17	57.4	296.91	3.74	97
15	22.28	125	421	5.25	0.81	34.18	5.42	4.72	0.41	0.5443	0.2962	309.32	35.18	297.4	2.51	99
16	13.25	71	250	5.27	0.78	34.58	5.4	4.76	0.48	0.6506	0.2829	316.73	33.33	299.91	2.98	99
17	15.78	123	291	5.37	1.13	34.77	7.22	4.7	0.66	0.6801	0.4225	366.72	78.7	296.17	4.09	97
18	5.23	40	96	5.32	1.32	34.66	8.82	4.74	0.58	0.4793	0.4159	344.5	55.55	298.48	3.56	98
SJ150803-1-4																
1	5.95	53	115	5.39	1.22	34.72	10.21	4.67	0.87	0.6354	0.4569	368.57	50	294.13	5.37	97

续表1

测点	Pb/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ / 10^{-2}	1σ / 10^{-3}	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ / 10^{-2}	1σ / 10^{-3}	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ / 10^{-2}	1σ / 10^{-3}	Rho	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ /Ma	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ /Ma	1σ	谐和/%
2	4.03	39	76	5.41	2.3	35.47	16.54	4.75	0.73	0.3309	0.5106	375.98	100.92	299.06	4.51	96
3	13.29	90	265	5.23	1.15	33.48	6.54	4.65	0.6	0.6585	0.3381	301.91	50	293.24	3.69	99
4	14.1	86	280	5.41	0.85	34.91	6.88	4.68	0.53	0.5801	0.3053	375.98	35.18	294.59	3.29	96
5	24.62	180	480	5.39	0.67	34.84	4.58	4.69	0.57	0.9241	0.375	368.57	27.78	295.66	3.51	97
6	16.9	111	330	5.37	0.94	34.88	10.41	4.71	0.87	0.6207	0.336	366.72	38.89	296.59	5.37	97
7	13.26	85	260	5.26	0.82	33.76	6.64	4.65	0.62	0.673	0.3253	322.28	35.18	292.96	3.79	99
8	19.5	229	354	5.27	0.74	34	6.09	4.68	0.54	0.6494	0.6457	322.28	31.48	294.62	3.35	99
9	13.4	82	261	5.27	0.85	34.18	7.66	4.71	0.86	0.82	0.3126	316.73	37.04	296.41	5.32	99
10	23.91	186	463	5.44	1.31	34.48	12.14	4.6	1.44	0.8897	0.4026	387.09	55.55	290.19	8.89	96
11	2.84	20	54	5.39	1.69	34.7	11.63	4.68	0.8	0.5105	0.3656	364.87	70.36	294.96	4.93	97
12	18.92	140	358	5.38	0.87	34.34	6.13	4.66	0.94	0.6	0.3905	361.17	37.04	293.67	5.78	97
13	18.19	121	349	5.32	0.9	34.4	6.93	4.7	0.85	0.8974	0.3479	338.95	38.89	296.03	5.23	98
14	19.5	110	377	5.32	0.82	34.34	6.94	4.69	0.77	0.8134	0.2921	338.95	35.18	295.19	4.74	98
15	6.15	40	119	5.45	1.34	34.87	8.54	4.65	0.58	0.5068	0.3344	390.79	55.55	292.96	3.55	96
16	15.92	95	311	5.32	0.78	34.32	6.33	4.68	0.6	0.6939	0.304	338.95	33.33	294.6	3.69	98
17	13.59	87	262	5.41	0.88	34.83	6.27	4.67	0.45	0.5351	0.3338	375.98	32.41	294.11	2.77	96
18	18.63	159	348	5.37	1.26	34.49	6.74	4.66	0.62	0.6852	0.4555	361.17	53.7	293.44	3.84	97
SJ150803-2-1																
1	10.97	97	198	5.26	1.12	35.54	9.26	4.89	0.83	0.6546	0.4895	322.28	48.14	307.92	5.13	99
2	10.4	95	187	5.21	0.92	35.22	8.11	4.9	0.77	0.6852	0.5086	300.06	37.96	308.23	4.75	99
3	8.26	78	150	5.48	2.11	36.32	13.14	4.83	0.91	0.5195	0.5173	466.71	82.4	303.81	5.58	96
4	7.98	67	149	5.43	1.79	35.99	12.54	4.8	0.69	0.412	0.4522	383.39	74.07	302.29	4.24	96
5	11.52	149	197	5.15	1.2	34.96	8.67	4.93	0.64	0.5212	0.7583	261.18	58.33	310.14	3.91	98
6	12.14	151	211	5.31	1.04	35.41	8.53	4.84	0.84	0.7224	0.7182	331.54	44.44	304.51	5.18	98
7	11.93	130	214	5.25	1.52	35.38	10.36	4.89	0.61	0.4268	0.6053	309.32	66.66	307.58	3.75	99
8	10.88	124	195	5.48	1.07	36.29	8.04	4.8	0.6	0.5619	0.636	466.71	44.44	302.37	3.68	96
9	17.27	258	289	5.25	0.78	35.09	6.88	4.84	0.6	0.6307	0.8915	305.62	33.33	304.76	3.68	99
10	6.62	54	127	5.44	1.2	36.12	8.72	4.82	0.67	0.5727	0.4229	390.79	50	303.42	4.1	96
11	13.35	132	250	5.37	0.83	35.55	5.63	4.81	0.52	0.6815	0.5265	366.72	35.18	302.9	3.2	98
12	8.5	78	161	5.38	1.03	35.35	6.54	4.78	0.53	0.6034	0.4851	361.17	74.99	301.02	3.28	97
13	18.52	213	338	5.32	0.8	35.45	6.47	4.83	0.51	0.5808	0.6304	344.5	33.33	304.26	3.15	98
14	7.49	61	143	5.24	1.41	34.57	9.09	4.79	0.52	0.4153	0.4249	301.91	61.11	301.69	3.22	99
15	8.19	73	154	5.44	1.29	35.51	8.9	4.74	0.57	0.479	0.4748	387.09	53.7	298.73	3.5	96
16	11.76	134	210	5.44	1.17	35.94	7.92	4.8	0.53	0.4995	0.6368	387.09	45.37	302.08	3.25	96
17	7.8	72	146	5.23	1.18	34.56	9.08	4.79	0.65	0.5145	0.4952	298.21	47.22	301.84	3.98	99
18	9.92	86	182	5.35	0.98	35.75	6.4	4.86	0.61	0.6986	0.4751	350.06	40.74	305.66	3.73	98
19	8.13	64	151	5.33	0.88	35.48	6.78	4.83	0.51	0.5572	0.4256	342.65	43.52	303.94	3.16	98
20	13.37	149	235	5.52	1.79	36.4	16.74	4.77	0.84	0.3846	0.6364	420.42	76.85	300.31	5.19	95
SJ150803-3-1																
1	12.07	127	212	5.46	0.99	36.05	7.37	4.79	0.55	0.567	0.5997	398.2	40.74	301.31	3.41	96
2	10.49	110	183	5.41	1.1	36.12	9.43	4.82	0.59	0.4716	0.602	375.98	44.44	303.46	3.65	96
3	10.29	112	180	5.31	1	35.17	7.37	4.8	0.55	0.5451	0.6212	331.54	37.96	302.3	3.37	98
4	10.61	105	192	5.26	1.36	34.64	9.23	4.78	0.47	0.3701	0.5498	309.32	59.25	300.78	2.9	99
5	7.36	66	136	5.46	1.43	35.77	8.91	4.76	0.55	0.4679	0.486	394.5	54.63	299.78	3.41	96
6	17.88	255	304	5.34	0.76	34.78	6.51	4.74	0.89	0.6	0.8381	346.35	26.85	298.75	5.5	98
7	9.27	87	166	5.28	2.69	35.38	13.65	4.9	1.15	0.6085	0.5242	316.73	116.65	308.65	7.07	99
8	8.91	85	163	5.47	1.66	35.74	11.8	4.74	0.75	0.4759	0.5203	398.2	68.51	298.6	4.59	96
9	8.28	61	155	5.37	1.59	35.92	12.85	4.86	1.09	0.6301	0.3932	366.72	66.66	305.63	6.72	98
10	8.19	61	156	5.29	2.19	34.74	14.99	4.77	1.16	0.5648	0.3888	324.13	89.81	300.25	7.15	99
11	12.37	114	228	5.26	0.91	34.93	6.32	4.83	0.71	0.8062	0.502	309.32	8.33	304.31	4.34	99
12	8.06	67	152	5.51	1.87	36.32	13.25	4.78	0.72	0.4123	0.4407	416.72	80.55	300.68	4.42	95
13	15.46	198	273	5.18	1.27	33.92	8.7	4.76	0.69	0.5676	0.7241	275.99	57.4	299.43	4.26	99
14	16.93	202	302	5.31	0.87	35.13	7.65	4.8	0.84	0.806	0.671	331.54	37.03	301.96	5.18	98
15	11.87	135	213	5.38	1.04	35.5	7.75	4.79	0.71	0.6788	0.6371	361.17	74.99	301.79	4.37	97
16	11.6	99	215	5.58	2.16	36.37	14.18	4.73	1	0.5399	0.4589	455.6	80.55	297.91	6.13	94
17	9.3	92	170	5.49	1.48	36.17	8.22	4.81	0.73	0.6645	0.5425	405.61	59.26	303	4.47	96
18	9.41	97	172	5.31	1.53	35.21	10.6	4.81	0.57	0.3941	0.5613	331.54	64.81	302.87	3.51	98
19	20.62	232	374	5.34	0.88	35.3	6.49	4.79	0.56	0.6309	0.6198	346.35	37.03	301.74	3.42	98
20	14.92	199	265	5.6	1.49	36.64	10.97	4.74	0.93	0.6534	0.749	450.05	59.26	298.78	5.71	94

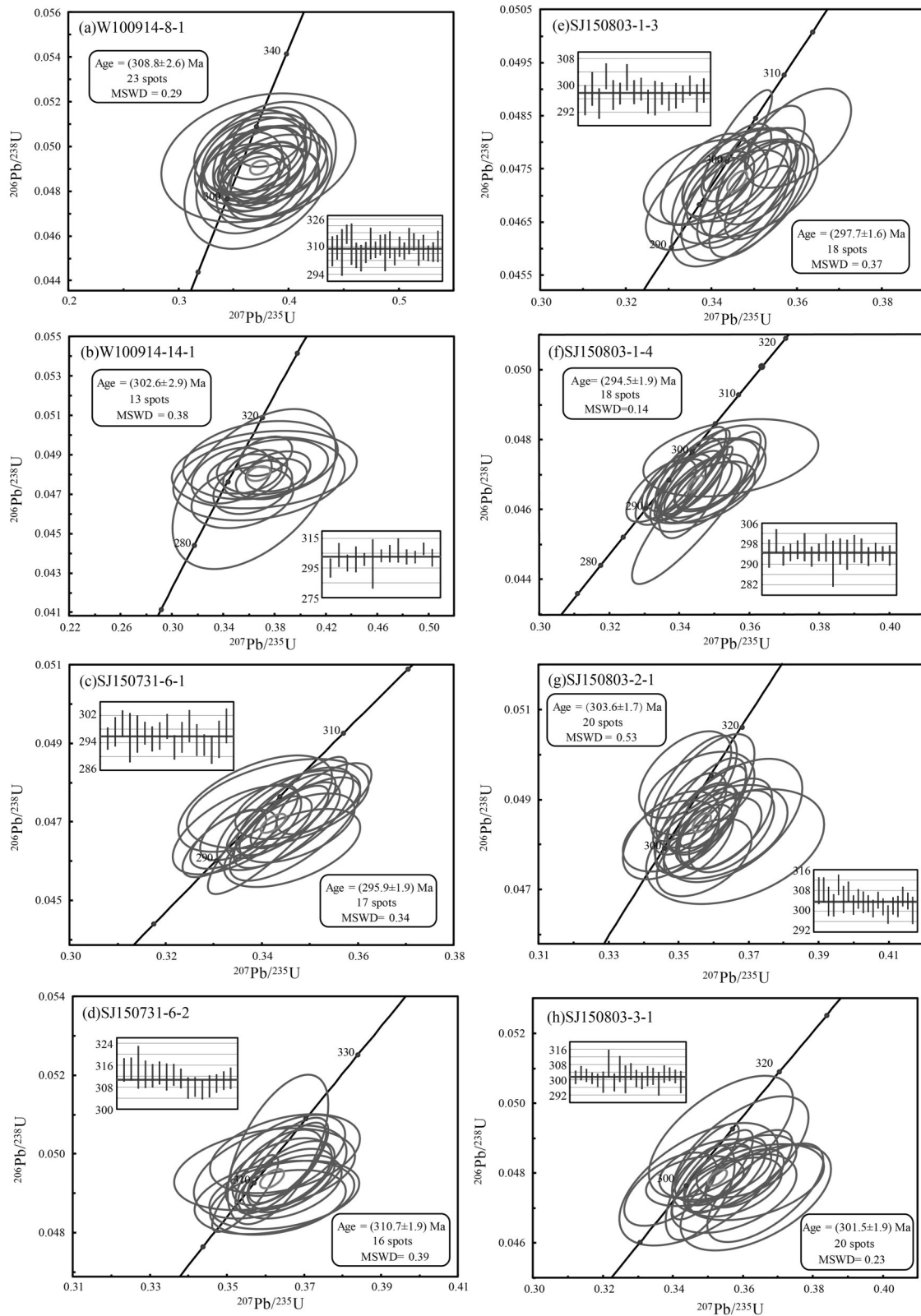


图4 庙尔沟花岗岩类和流纹岩U-Pb测年谐和图
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of Miaoergou granitoids and rhyolites

表2 庙尔沟花岗岩类与流纹岩Lu-Hf同位素分析结果

Table 2 Lu-Hf isotopic analytical results of Miaoergou granitoids and rhyolites

测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t/Ma	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}	2σ	T_{DM}^{c}	T_{DM2}	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
W100914-8-1														
2	0.028622	0.000964	0.000001	0.283008	0.000025	309.6	14.9	0.9	346	36	368	367	58	-0.971
4	0.037712	0.001247	0.000007	0.282986	0.000027	317.1	14.3	1	380	39	417	416	62	-0.962
5	0.015239	0.000528	0.000005	0.282956	0.000027	311.4	13.2	1	414	38	479	477	62	-0.984
6	0.025625	0.000864	0.000001	0.283004	0.000026	304.9	14.7	0.9	350	37	377	377	60	-0.974
9	0.021032	0.000721	0.000002	0.28294	0.000024	311.8	12.7	0.9	439	34	517	516	55	-0.978
10	0.039887	0.001297	0.000002	0.282948	0.000026	308.2	12.8	0.9	434	37	508	506	58	-0.961
12	0.058726	0.00195	0.000039	0.282954	0.000032	306.4	12.8	1.1	434	47	505	504	73	-0.941
13	0.03589	0.001172	0.000008	0.283057	0.00003	311.1	16.7	1.1	277	43	256	257	69	-0.965
14	0.032279	0.001068	0.000006	0.283018	0.000023	304.3	15.2	0.8	332	33	348	348	53	-0.968
15	0.050917	0.001677	0.000034	0.282986	0.000027	309.9	14.1	0.9	383	38	425	424	60	-0.949
16	0.043668	0.001433	0.000015	0.28297	0.000028	307.5	13.5	1	404	41	461	459	64	-0.957
17	0.017458	0.000605	0.000001	0.282897	0.00003	313.2	11.2	1	499	42	614	611	67	-0.982
18	0.037928	0.001224	0.000002	0.28291	0.000025	312.8	11.5	0.9	488	36	592	589	57	-0.963
22	0.03825	0.001268	0.000012	0.283044	0.000025	306.9	16.1	0.9	297	36	291	291	56	-0.962
23	0.033073	0.001091	0.000005	0.283035	0.000027	310.2	15.9	0.9	308	38	306	306	61	-0.967
W100914-14-1														
1	0.048991	0.00168	0.000006	0.28297	0.00004	295	13.2	1.4	407	57	471	470	90	-0.949
2	0.021948	0.000751	0.000006	0.282947	0.000027	303.7	12.7	1	430	38	508	506	61	-0.977
3	0.063912	0.002212	0.000008	0.282893	0.000032	298.4	10.4	1.1	526	47	653	650	73	-0.933
4	0.081956	0.002642	0.000001	0.282969	0.000029	300.9	13.1	1	419	44	482	480	67	-0.92
5	0.044799	0.001353	0.000031	0.283005	0.000028	300.8	14.6	1	353	40	384	383	64	-0.959
6	0.052718	0.00171	0.000004	0.282934	0.000032	297.7	12	1.1	459	46	552	549	73	-0.948
7	0.045039	0.001432	0.000005	0.282992	0.000022	303.3	14.2	0.8	372	31	412	411	49	-0.957
8	0.04977	0.001619	0.000027	0.282902	0.00003	304.7	11	1.1	505	44	621	618	69	-0.951
9	0.030993	0.001036	0.000001	0.283045	0.000029	306.8	16.2	1	293	41	284	284	66	-0.969
10	0.043913	0.001425	0.000006	0.283056	0.000027	302.5	16.4	0.9	281	38	268	268	60	-0.957
11	0.031465	0.001055	0.000004	0.283017	0.000024	302.4	15.1	0.9	333	35	352	352	55	-0.968
12	0.040102	0.001299	0.000012	0.282959	0.000024	307.9	13.1	0.9	419	35	484	483	55	-0.961
13	0.048938	0.001616	0.000015	0.282969	0.00003	301.8	13.3	1.1	408	43	469	468	67	-0.951
SJ150731-6-1														
1	0.051766	0.001666	0.000001	0.282983	0.000023	295.2	13.6	0.8	387	33	441	439	52	-0.95
2	0.053587	0.001802	0.000002	0.282996	0.000035	297.2	14.1	1.2	371	51	413	412	80	-0.946
3	0.04954	0.001617	0.000011	0.282987	0.000021	299.7	13.9	0.7	382	30	430	429	47	-0.951
4	0.051665	0.00178	0.000004	0.283023	0.00002	295.5	15	0.7	331	30	352	351	46	-0.946
6	0.052133	0.001765	0.000013	0.282985	0.000024	296.8	13.7	0.8	386	34	437	436	54	-0.947
7	0.078316	0.002627	0.000051	0.282993	0.00003	295.1	13.8	1.1	383	45	431	430	68	-0.921
8	0.056666	0.001858	0.000006	0.282983	0.00002	296	13.6	0.7	390	29	444	443	45	-0.944
9	0.062201	0.00208	0.000023	0.282988	0.000024	298.8	13.8	0.8	385	35	433	432	54	-0.937
10	0.039619	0.001318	0.000001	0.282926	0.000021	292.7	11.6	0.8	466	30	568	566	48	-0.96
11	0.084699	0.002736	0.000022	0.28303	0.000033	295.6	15.1	1.2	329	50	347	347	76	-0.918
12	0.045081	0.001525	0.000005	0.282978	0.000031	298.9	13.6	1.1	394	44	449	448	69	-0.954
14	0.042006	0.001387	0.000049	0.282945	0.000021	293.3	12.3	0.7	439	29	525	523	46	-0.958
15	0.048682	0.001658	0.000006	0.28295	0.000023	292	12.4	0.8	435	33	518	516	52	-0.95
16	0.087158	0.002782	0.000037	0.282994	0.000022	295	13.8	0.8	384	33	432	430	50	-0.916
17	0.05821	0.001918	0.000029	0.283008	0.000021	298.9	14.6	0.7	354	30	385	384	47	-0.942
SJ150731-6-2														
1	0.037014	0.001245	0.000007	0.282941	0.000021	314.3	12.6	0.7	443	29	520	518	46	-0.963
2	0.038358	0.001316	0.000006	0.283006	0.000022	314.6	14.9	0.8	351	32	373	373	51	-0.96
3	0.055322	0.001809	0.000006	0.283015	0.000022	315.2	15.2	0.8	343	32	359	358	49	-0.946
5	0.034669	0.001161	0.000011	0.282958	0.000022	312.1	13.2	0.8	418	32	482	481	51	-0.965
6	0.070563	0.002318	0.000033	0.283012	0.000022	313.1	14.9	0.8	352	33	373	372	51	-0.93

续表2

测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}	2σ	T_{DM}^{C}	T_{DM2}	2σ	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
7	0.049214	0.001646	0.000013	0.283004	0.000036	311.7	14.7	1.3	357	52	383	383	82	-0.95
8	0.049898	0.001634	0.000009	0.282933	0.000024	312.5	12.2	0.8	459	34	544	542	54	-0.951
9	0.057272	0.001867	0.000004	0.283042	0.000018	311.2	16	0.6	304	26	300	300	41	-0.944
10	0.0566	0.00189	0.000015	0.282961	0.000032	307.7	13.1	1.1	423	47	489	487	73	-0.943
11	0.036077	0.001251	0.000011	0.283001	0.000035	308.1	14.6	1.2	358	50	388	387	80	-0.962
13	0.046189	0.001582	0.00001	0.282992	0.000022	308.3	14.2	0.8	374	31	413	412	49	-0.952
14	0.046462	0.001575	0.000007	0.28295	0.000018	309.4	12.8	0.6	434	26	507	505	41	-0.953
15	0.053333	0.001757	0.000012	0.282973	0.00002	310.4	13.6	0.7	404	29	457	456	45	-0.947
16	0.053742	0.001776	0.000034	0.283021	0.00002	311.2	15.3	0.7	334	29	347	347	45	-0.947
SJ150803-1-3														
1	0.057633	0.001876	0.000007	0.28303	0.000021	295.6	15.3	0.7	321	30	336	335	47	-0.943
2	0.055872	0.001854	0.000021	0.282931	0.000021	298.9	11.8	0.7	466	31	560	558	48	-0.944
3	0.060298	0.001995	0.000008	0.282934	0.000024	294.6	11.8	0.8	463	35	558	556	54	-0.94
4	0.052794	0.001776	0.000027	0.283001	0.000022	302.7	14.4	0.8	363	33	397	396	51	-0.947
5	0.032885	0.001117	0.000004	0.28301	0.000022	297.1	14.7	0.8	344	32	372	372	51	-0.966
6	0.047578	0.001595	0.000008	0.282959	0.000023	297.6	12.8	0.8	423	33	495	493	51	-0.952
7	0.045701	0.001522	0.000012	0.282991	0.000019	302.4	14.1	0.7	376	27	418	417	43	-0.954
8	0.041616	0.001385	0.000003	0.283001	0.00002	298	14.4	0.7	359	28	395	394	45	-0.958
9	0.050547	0.001674	0.000001	0.283013	0.000022	298.9	14.8	0.8	345	31	372	371	49	-0.95
10	0.050737	0.001681	0.000001	0.283032	0.000018	295.1	15.3	0.6	318	27	331	330	42	-0.949
11	0.0637	0.002112	0.000017	0.283043	0.000022	296.2	15.7	0.8	305	33	310	310	51	-0.936
12	0.050542	0.001691	0.00001	0.283046	0.00002	297.6	15.9	0.7	297	29	297	297	46	-0.949
14	0.046419	0.001545	0.000005	0.282994	0.00002	296.9	14.1	0.7	371	29	415	414	46	-0.953
17	0.048068	0.001606	0.000023	0.283008	0.000024	296.2	14.5	0.8	351	34	383	382	54	-0.952
18	0.040292	0.001386	0.000006	0.283031	0.000027	298.5	15.5	1	316	39	327	326	62	-0.958
SJ150803-1-4														
1	0.044009	0.001465	0.00001	0.282962	0.000025	294.1	12.9	0.9	416	35	487	485	56	-0.956
2	0.05715	0.001895	0.00001	0.282916	0.000029	299.1	11.3	1	488	42	595	593	66	-0.943
3	0.047691	0.001597	0.000011	0.282974	0.00002	293.2	13.3	0.7	400	29	462	460	46	-0.952
4	0.058987	0.001822	0.000019	0.282975	0.000024	294.6	13.3	0.8	401	34	462	461	54	-0.945
6	0.063183	0.002055	0.000026	0.283015	0.000025	296.6	14.7	0.9	346	36	373	372	56	-0.938
7	0.069445	0.002123	0.00003	0.283025	0.000027	293	15	1	331	40	353	352	62	-0.936
8	0.049474	0.001639	0.000006	0.283062	0.00002	294.6	16.4	0.7	273	28	260	260	44	-0.951
9	0.052353	0.001723	0.000004	0.282953	0.000027	296.4	12.6	1	431	39	509	507	61	-0.948
14	0.056054	0.001847	0.00001	0.28301	0.000019	295.2	14.6	0.7	350	28	382	381	43	-0.944
15	0.061395	0.002051	0.000012	0.283007	0.000024	293	14.4	0.9	357	36	393	392	55	-0.938
16	0.058366	0.001901	0.000004	0.28303	0.000028	294.6	15.3	1	321	40	336	336	63	-0.943
17	0.070973	0.002058	0.000007	0.283007	0.000023	294.1	14.4	0.8	357	34	392	391	52	-0.938
18	0.055751	0.001864	0.00001	0.283059	0.000022	293.4	16.2	0.8	280	33	272	272	51	-0.944
SJ150803-2-1														
1	0.076503	0.002428	0.000005	0.282888	0.000034	307.9	10.4	1.2	536	50	660	657	77	-0.927

续表2

测点	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	t/Ma	ε _{Hf} (t)	2σ	T _{DM1}	2σ	T _{DM} ^C	T _{DM2}	2σ	f _{Lu/Hf}
3	0.062749	0.002011	0.000011	0.282931	0.000033	303.8	11.9	1.2	467	48	559	557	75	-0.939
6	0.094612	0.002995	0.000033	0.282889	0.000033	304.5	10.2	1.2	544	50	668	665	75	-0.91
10	0.074595	0.00232	0.000013	0.282986	0.000039	303.4	13.8	1.4	390	57	438	437	88	-0.93
12	0.04291	0.001382	0.000002	0.282886	0.000032	301	10.4	1.1	524	45	655	652	72	-0.958
13	0.084044	0.002643	0.000004	0.282878	0.00003	304.3	9.9	1.1	554	45	687	684	69	-0.92
14	0.05088	0.001665	0.000012	0.282904	0.000032	301.7	11	1.1	502	46	618	615	71	-0.95
15	0.073568	0.002367	0.000005	0.283017	0.000031	298.7	14.8	1.1	346	46	372	371	71	-0.929
16	0.067123	0.00216	0.000023	0.28297	0.000032	302.1	13.2	1.1	412	46	473	471	71	-0.935
17	0.086947	0.002748	0.000014	0.282992	0.000033	301.8	13.9	1.2	387	48	432	431	74	-0.917
18	0.043297	0.001426	0.000005	0.282972	0.00003	305.7	13.5	1	401	43	457	455	67	-0.957
20	0.078059	0.002451	0.000024	0.283002	0.000036	300.3	14.3	1.3	368	53	405	404	82	-0.926
SJ150803-3-1														
1	0.070885	0.002271	0.000012	0.282924	0.000039	301.3	11.5	1.4	482	57	581	578	88	-0.932
2	0.056709	0.001835	0.000004	0.282946	0.00003	303.5	12.5	1.1	444	44	524	522	68	-0.945
3	0.060377	0.001917	0.000006	0.282935	0.00003	302.3	12	1	460	43	550	548	67	-0.942
4	0.063909	0.002038	0.00001	0.282936	0.000033	300.8	12	1.2	460	48	549	547	75	-0.939
6	0.056038	0.001812	0.000002	0.282997	0.000035	298.7	14.2	1.3	369	51	409	408	80	-0.945
8	0.087903	0.002836	0.000005	0.282866	0.000035	298.6	9.3	1.2	575	52	720	717	78	-0.915
11	0.05775	0.001831	0.000013	0.282921	0.00003	304.3	11.6	1.1	480	44	580	577	68	-0.945
14	0.085895	0.002727	0.000013	0.282959	0.000037	302	12.7	1.3	436	56	507	505	85	-0.918
15	0.070418	0.002251	0.000019	0.28306	0.000033	301.8	16.4	1.2	280	48	268	269	74	-0.932
16	0.056863	0.001798	0.000006	0.282884	0.000025	297.9	10.2	0.9	533	36	668	664	56	-0.946
17	0.043055	0.001415	0.000003	0.283008	0.000036	303	14.7	1.3	349	52	377	376	82	-0.957
19	0.063315	0.002003	0.000003	0.282921	0.000034	301.7	11.5	1.2	482	50	583	581	77	-0.94

注:锆石Lu-Hf测点序号与U-Pb定年测点序号对应。

5.3 锆石Lu-Hf同位素特征

从表2结果显示庙尔沟花岗岩和流纹岩样品的锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf值均小于或略大于0.002,说明样品中的锆石在形成后具有极低的放射性成因Hf积累,实验结果的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值可以代表锆石结晶形成时岩浆中的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值(吴福元等,2007)。

5.3.1 庙尔沟花岗岩类

样品W100914-8-1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.282897~0.283057,ε_{Hf}(t)分布于11.2~16.7的范围内,加权平均值为14.0±0.9(MSWD=6.7, n=15),对应的单阶模式年龄T_{DM1}为277~499 Ma,二阶模式年龄T_{DM2}为257~611 Ma,加权平均值为(428±58) Ma(MSWD=12, n=15)。

样品W100914-14-1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.282893~0.283056,ε_{Hf}(t)分布于10.4~16.4的范围内,加权平均

值为13.7±1.1(MSWD=13, n=13),对应的单阶模式年龄T_{DM1}为281~526 Ma,二阶模式年龄T_{DM2}为268~650 Ma,加权平均值为(443±67) Ma(MSWD=12, n=13)。

5.3.2 流纹岩

样品SJ150731-6-1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.282926~0.283030,ε_{Hf}(t)分布于11.6~15.1的范围内,加权平均值为13.6±0.54(MSWD=5.6, n=15),对应的单阶模式年龄T_{DM1}为329~466 Ma,二阶模式年龄T_{DM2}为347~566 Ma,加权平均值为(444±34) Ma(MSWD=5.4, n=15)。

样品SJ150731-6-2的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.282923~0.283042,ε_{Hf}(t)分布于12.2~16.0的范围内,加权平均值为14.1±0.72(MSWD=9.9, n=14),对应的单阶模式年龄T_{DM1}为304~459 Ma,二阶模式年

龄 T_{DM2} 为 300~542 Ma, 加权平均值为 (421 ± 46) Ma (MSWD=9.8, $n=14$)。

样品 SJ150803-1-3 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282931~0.283046, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分布于 11.8~15.9 的范围内, 加权平均值为 14.4 ± 0.69 (MSWD=10.8, $n=15$), 对应的单阶模式年龄 T_{DM1} 为 297~466 Ma, 二阶模式年龄 T_{DM2} 为 297~558 Ma, 加权平均值为 (395 ± 44) Ma (MSWD=10.8, $n=15$)。

样品 SJ150803-1-4 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282916~0.283062, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分布于 11.3~16.4 的范围内, 加权平均值为 14.3 ± 0.86 (MSWD=11.7, $n=13$), 对应的单阶模式年龄 T_{DM1} 为 273~488 Ma, 二阶模式年龄 T_{DM2} 为 260~593 Ma, 加权平均值为 (395 ± 55) Ma (MSWD=11.7, $n=13$)。

样品 SJ150803-2-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282878~0.283017, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分布于 9.9~14.8 的范围内, 加权平均值为 12.2 ± 1.2 (MSWD=9.9, $n=12$), 对应的单阶模式年龄 T_{DM1} 为 346~554 Ma, 二阶模式年龄 T_{DM2} 为 371~684 Ma, 加权平均值为 (536 ± 74) Ma (MSWD=10.0, $n=12$)。

样品 SJ150803-3-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282866~0.283060, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分布于 9.3~16.4 的范围内, 加权平均值为 12.2 ± 1.2 (MSWD=11.5, $n=12$), 对应的单阶模式年龄 T_{DM1} 为 280~575 Ma, 二阶模式年龄 T_{DM2} 为 269~717 Ma, 加权平均值为 (535 ± 78) Ma (NSWD=11.3, $n=12$)。

Lu-Hf 同位素特征显示, 虽然庙尔沟岩体与流纹岩的 Hf 同位素测试结果存在略微的差别, 但是整体表现较一致, 都有很高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值、正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和年轻的模式年龄。

6 讨 论

6.1 源区性质

通常导致正的高 Hf 同位素特征的原因可能存在于以下 3 种情况:

(1) 与高级变质作用有关。高级变质作用可以使锆石发生重结晶, 引起锆石中 Hf 的变化, 导致 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值升高, 显示出类似于新生地壳的高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 特征 (吴福元等, 2007)。但是根据野外实际调查情况, 流纹岩出露区域未发现变质岩石的存在, 流纹岩样品的显微镜下特征亦未出现变质现

象。而且, 流纹岩中锆石 CL 照片, 清楚地显示为岩浆锆石的特点, 未出现增生加大边, 可以排除高级变质作用导致的高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值现象。

(2) 来源于亏损地幔的直接结晶分异 (吴福元等, 2007)。大量的玄武岩浆可以直接结晶分异出少量的花岗岩类岩浆, 但是流纹岩区域并未发现有大面积的基性和超基性岩, 而是以庙尔沟岩体等花岗岩类岩基为主。已有的岩石地球化学资料显示, 庙尔沟岩体和流纹岩存在明显的 Nb 亏损现象, 具有高硅、低镁、高钾钙碱性、准铝质-弱过铝质的特征, 为典型的 A 型花岗岩 (黄鹏辉等, 2016; 史建杰等, 2017), 可以排除幔源岩浆直接结晶分异的成因。

(3) 来源于新生地壳的部分熔融。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值不会随岩浆结晶分异和部分熔融发生变化, 庙尔沟岩体和流纹岩的正高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值具有明显的不均一性, 说明可能存在具放射成因 Hf 的幔源和较少放射成因 Hf 的壳源物质的相互作用。在 Hf 同位素特征图解 (图 5) 中, 样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围较大, 主体偏离亏损地幔线, 说明岩石源区以新生地壳发生部分熔融为主。在具有正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗岩中, 如果 Hf 的模式年龄等于或接近其结晶年龄, 说明直接来源于亏损地幔; 如果 Hf 的模式年龄略大于其结晶年龄, 说明来自新生地壳发生部分熔融; 如果 Hf 的模式年龄远大于其结晶年龄, 说明来自古老地壳的部分熔融 (吴福元等, 2007)。岩体的 $T_{DM2}=256\sim 717$ Ma, 时间跨度较大, 主要集中在 300~600 Ma 内, 主峰值出现在约 397 Ma, 同时考虑到实验误差的存在, 除了少部分锆石以外, 大部分锆石的 T_{DM2} 值略大于其 U-Pb 年龄, 也说明岩石源区以新生地壳发生部分熔融为主。结合所处的大地构造环境 (黄鹏辉等, 2016; 史建杰等, 2017), 认为庙尔沟岩体和流纹岩均来源于早古生代以来的由亏损地幔形成的新生地壳 (洋壳和火山岛弧) 发生部分熔融。

6.2 洋陆转换时限

庙尔沟岩体锆石 U-Pb 定年结果显示, 锆石的结晶年龄相对集中, 岩体形成时代为 302.8~308.8 Ma, 属晚石炭世的酸性岩浆岩。流纹岩锆石 U-Pb 定年结果表明, 从底部流纹岩开始, 往上发育厚层状的柱状节理流纹岩, 记录了从 303.6 Ma 到 294.5 Ma 的晚石炭世一早二叠世酸性火山岩浆活动。其

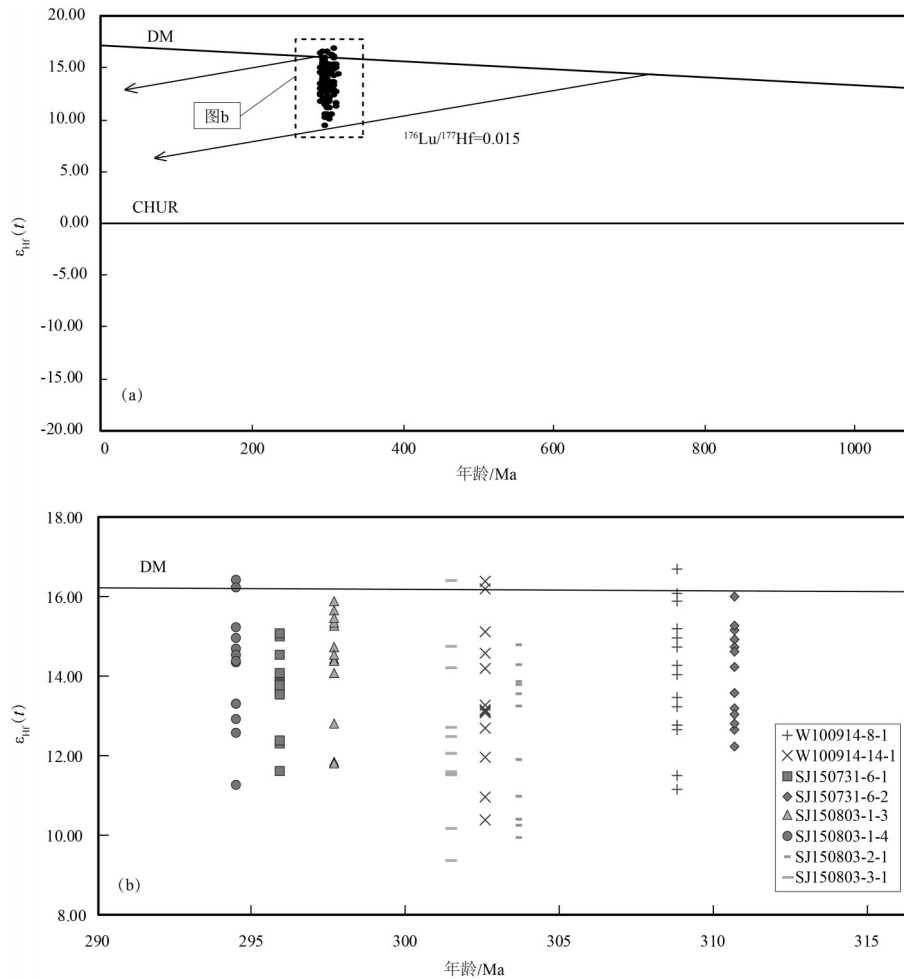


图5 庙尔沟花岗岩类与流纹岩锆石Hf同位素特征
Fig. 5 Zircon Hf isotopic features of Miaoergou granitoids and rhyolites

中,处于层序中段的SJ150731-6-2流纹岩样品给出的锆石U-Pb年龄为310.7 Ma,远远大于同一采样点位置上的SJ150731-6-1样品中锆石U-Pb年龄(295.9 Ma),可能反映了与流纹岩同源的庙尔沟岩体早期岩浆活动的继承锆石年龄。因此,除了SJ150731-6-2之外,其余的流纹岩样品具有大致正常的层序特征,相对庙尔沟岩体较年轻。岩石地球化学特征显示庙尔沟岩体和流纹岩都具有俯冲带岩浆特征,流纹岩处在庙尔沟岩体岩浆演化的末端,为后造山伸展作用的产物(黄鹏辉等, 2016; 史建杰等, 2017)。与西太平洋洋陆构造转换带发育的特有的柱状节理流纹岩类似,新发现的柱状节理流纹岩也处于相似的大陆边缘环境,说明西准噶尔地区柱状节理流纹岩形成时期正处于由大洋向大陆构造转换的后造山伸展阶段(图6, 史建杰等,

2017; Xu et al., 2019)。因此,柱状节理流纹岩的锆石U-Pb年龄可以将西准噶尔地区洋陆转换的时间限定在303.6~294.5 Ma的晚石炭—早二叠世。

6.3 构造演化制约

结合庙尔沟岩体和流纹岩的年代学、Lu-Hf同位素特征、岩石地球化学特征(黄鹏辉等, 2016; 史建杰等, 2017)与区域地质背景,认为西准噶尔地区是由年轻洋壳-岛弧与亏损地幔共同作用形成的古生代地壳,没有古老的结晶基底。锆石U-Pb定年和Hf同位素特征是目前研究地壳生长和演化最有效的工具之一,其模式年龄可以很好地反映地壳的生长时间,为地壳演化提供重要信息(吴福元等, 2007; 第五春荣, 2013)。庙尔沟岩体与流纹岩的 $T_{DM2}=256\sim 717$ Ma,时间跨度较大,主要集中在300~600 Ma内,主峰值出现在约397 Ma(图7)。二阶模

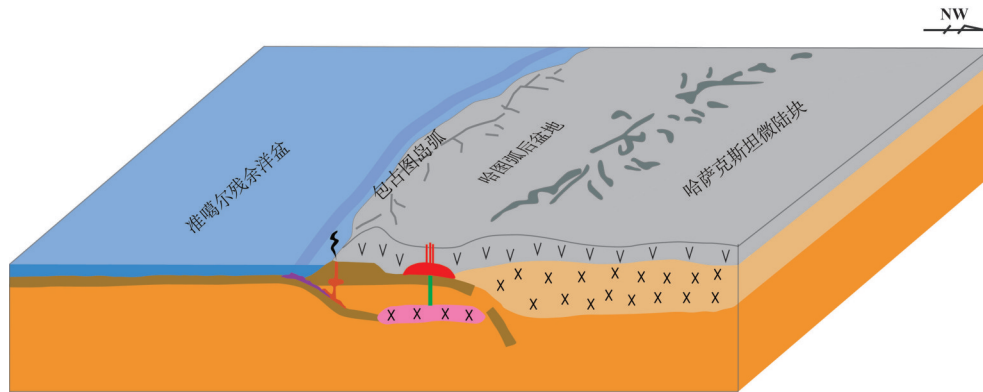


图6 西准噶尔晚石炭—早二叠世构造背景模式图

Fig. 6 Schematic diagram of the tectonic settings in the West Junggar area during Late Carboniferous and Early Permian

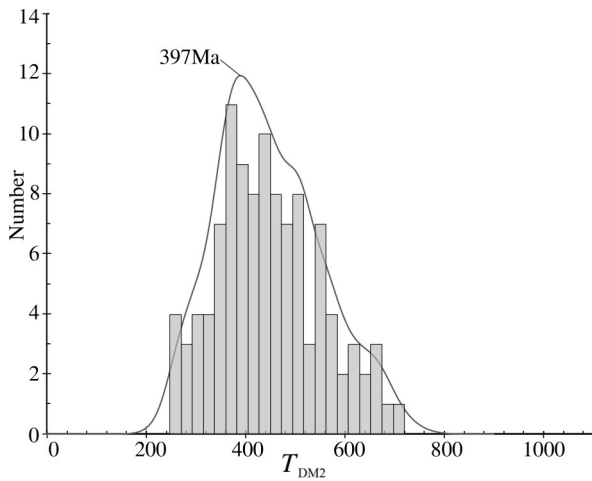


图7 二阶模式年龄(Ma)分布图解

Fig. 7 Distribution of two-stage Hf model ages (Ma)

式年龄代表源区物质加入地壳以来所经历的时间,对于基性洋壳而言,洋壳的形成年龄与亏损地幔分异出玄武质岩浆的时间(二阶模式年龄)相当。结合西准噶尔地区晚古生代大地构造背景,庙尔沟花岗岩和流纹岩较大时间跨度的二阶模式年龄特征表明,具有亏损地幔属性的源区物质(洋壳和岛弧)可能在新元古代晚期已经开始形成,指示准噶尔洋的最初形成时间可能发生在新元古代晚期,甚至更早,洋盆一直持续到晚石炭—早二叠世。二阶模式年龄的主峰值出现在约397 Ma,说明可能存在一期显著的构造—热事件使准噶尔洋的演化出现重大转折,但是关于其真正代表的意义,则有必要结合更多、更详实的地质资料和研究成果,进行更加深入的探讨。

7 结论

(1)通过对庙尔沟岩体及其西北侧发育的柱状节理流纹岩进行锆石U-Pb定年,判断庙尔沟岩体的年龄为302.8~308.8 Ma,形成于晚石炭世;柱状节理流纹岩的年龄为303.6~294.5 Ma,形成于晚石炭世—早二叠世,将西准噶尔地区洋陆转换的时间限定为晚石炭世—早二叠世。

(2)流纹岩Lu-Hf同位素特征表明庙尔沟岩体和流纹岩均具有亏损地幔的性质,主要来源于准噶尔洋的年轻洋壳和岛弧的部分熔融,没有古老结晶基底的混入。

(3)锆石Hf同位素的二阶模式年龄显示,准噶尔洋的最初形成时间可能是新元古代晚期,洋盆一直持续到晚石炭—早二叠世的洋陆构造转换期。

致谢: 本文在撰写过程中,与王增振和陈泓旭博士进行了有益探讨,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此致以诚挚的感谢!

References

- Bao Z A, Chen L, Zong C L, Yuan H L, Chen K Y, Dai M N. 2017. Development of pressed sulfide powder tablets for in situ sulfur and lead isotope measurement using LA-MC-ICP-MS[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 421: 255-262.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5): 602-622.
- Chen Xuanhua, Chen Zhengle, Yang Nong. 2009. Study on regional mineralizations and ore-field structures: Building of mineralizing

- tectonic systems[J]. *Journal of Geomechanics*, 15(1):1–19 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xuanhua, Yang Nong, Ye Baoying, Wang Zhihong, Chen Zhengle. 2011. Tectonic system and its Control on Metallogenesis in western Junggar as part of the Central Asia multi-core metallogenic system[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 325–338 (in Chinese with English abstract).
- Chen X H, Seitmuratova E, Wang Z H, Chen Z L, Han S Q, Li Y, Yang Y, Ye B Y, Shi W. 2014. SHRIMP U–Pb and Ar–Ar geochronology of major porphyry and skarn Cu deposits in the Balkhash metallogenic belt, Central Asia, and geological implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(2): 723–740.
- Chen Xuanhua, Nie Lanshi, Ding Weicui, Wang Xueqiu, Wang Zhihong, Ye Baoying. 2015. The relationship between strike-slip tectonic system and geochemical anomalies in the West Junggar, northwestern China and its implication for mineral exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2):371–387 (in Chinese with English abstract).
- Chen X H, Wang Z H, Chen Z L, Seitmuratova E, Han S Q, Zhou Q, Ye B Y. 2015. SHRIMP U–Pb, Ar–Ar and fission-track geochronology of W–Mo deposits in the Balkhash Metallogenic Belt (Kazakhstan): Central Asia, and the geological implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110(2): 19–32.
- Ding W C, Li T D, Chen X H, Chen J P, Xu S L, Zhang Y P, Li B, Yang Q. 2019. Intra-Continental deformation and tectonic evolution of the west Junggar Orogenic Belt, Central Asia: Evidence from remote sensing and structural geological analyses[J]. *Geoscience Frontiers*. DOI: 10.1016/j.gsf.2019.08.001.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Gao Jianfeng, Fan Longgang. 2013. Early Precambrian tectonothermal events of the North China Craton: Constraints from in situ detrital zircon U–Pb, Hf and O isotopic compositions in Tietonggou Formation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(28/29): 3760–3770 (in Chinese).
- Geng H Y, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J. 2011. Geochemical and geochronological study of Early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 854–866.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Zhang Lei. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077–1086 (in Chinese with English abstract).
- Huang Penghui, Chen Xuanhua, Wang Zhihong, Ye Baoying, Li Xuezhi, Yang Yi. 2016. Late Paleozoic granitic magmatism in west Junggar metallogenic belt (Xinjiang), Central Asia, and its tectonic implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(1): 145–160 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O, Blöck L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of prothite igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439.
- Jin Song, Rong Guilin, Zhang Zhaoyi, Li Tiangang, Peng Zhaohui, Wu Li'ang. 2016. Geochemical characteristics and zircon U–Pb ages of the Kuoyitasi complex body from Mayileshan area in western Junggar, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 43(1): 99–110 (in Chinese with English abstract).
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu Liangshu, Ma Ruishi, Lu Huafu. 2002. Paleozoic late collisional strike-slip formations in Tianshan and Altay, Eastern Xinjiang, NW China[J]. *Terra Nova*, 14(4): 249–256.
- Liu Ge, She Jianzhong, Yang Wenlong, Wang Qinjun, Jia Jian, Di Xiaochen. 2018. Zircon U–Pb chronology and geochemistry of the Kalagang Formation volcanic rocks in Bayindala area, West Junggar, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 45(6): 1241–1250 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xijun, Xu Jifeng, Wang Shuqing, Hou Qingye, Bai Zhenghua, Lei Min. 2009. Geochemistry and dating of E–MORB type mafic rocks from Dalabute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1373–1389 (in Chinese with English abstract).
- Ma X P, Zhang M Q, Zong P, Zhang Y B, Lü D. 2017. Temporal and spatial distribution of the Late Devonian (Famennian) strata in the northwestern border of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 1413–1437.
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Liu Tiebing, Zhang Rui, Wang Jingbin, Zhang Yunxiao, Meng Lei, Wang Lijuan, Wang Jiang. 2009. Host-rocks and alteration characters of the Baogutu porphyry copper–molybdenum deposit in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 777–792 (in Chinese with English abstract).
- Shen P, Pan H D, Xiao W J, Chen X H, Seitmuratova E, Shen Y C. 2013a. Two geodynamic–metallogenic events in the Balkhash (Kazakhstan) and the west Junggar (China): Carboniferous porphyry Cu and Permian greisen W–Mo mineralization[J]. *International Geology Review*, 55(13): 1660–1687.
- Shen P, Pan H D, Xiao W J, Li X H, Dai H W, Zhu H P. 2013b. Early Carboniferous intra-oceanic arc and back-arc basin system in the West Junggar, NW China[J]. *International Geology Review*, 55(16): 1991–2007.
- Shi Jianjie, Chen Xuanhua, Ding Weicui, Li Bing. 2017. Late Paleozoic Ocean–continent transition in west Junggar, Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous rhyolites[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(1): 150–160 (in Chinese with English abstract).
- Song Huixia, Liu Yulin, Qu Wenjun, Song Biao, Zhang Rui, Cheng Yong. 2007. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1981–1988 (in Chinese with English abstract).
- Sun T, Qian Z Z, Thakurta J, Yang S H, Xu G, Duan J, Gao B, Wang J. 2018. Geochemical and petrological studies on the Early Carboniferous Sidingheishan mafic–ultramafic intrusion in the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 92(3): 952–971.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, Li Z X, Zhao Z H, Jia X H, Jiang Z

- Q. 2010a. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the West Junggar region, northern Xinjiang (west China) [J]. *Chemical Geology*, 277(3/4): 281–300.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, Sun M, Li Z X, Zhao Z H, Sun W D, Jia X H, Jiang Z Q. 2010b. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu–Dabate area, northwestern Tianshan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting[J]. *Lithos*, 119(3/4): 393–411.
- Tian Yazhou, Yang Jingsui. 2015. The genesis of peridotite in Darbute ophiolite within west Junggar basin, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 42(5): 1379–1403 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Pengkun, Li Yongjun, Yang Yang, Wang Ran, Yang Gaoxue, Sun Yong, Wang Junnian. 2015. Geochemistry of volcanic rocks from the malasu formation of early devonian in the west of Ur Kashgar Mountain, Western Junggar, and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 534–544 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2/4): 102–117.
- Xiao W J, Kusky T. 2009. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts: Introduction[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 167–169.
- Xu S L, Chen X H, Li T D, Shi J J, Ding W C, Li B, Huang P H, Zhang Y P, Zhang Y Y, Ma F Z. 2019. The Late Carboniferous–Early Permian ocean–continent transition in the west Junggar, Central Asian Orogenic Belt: Constraints from Columnar jointed rhyolite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 265–282.
- Yang Yi, Chen Xuanhua, Chen Zhengle, Han Shuqin, Seitmuratova Eleonora, Wang Zhihong, Shi Wei, Ye Baoying. 2015. The latest granitic intrusive magmatism and thermal evolution in the Late Paleozoic Balkhash Metallogenic Belt (Kazakhstan), Central Asia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 304–314 (in Chinese with English abstract).
- Yu M J, Wang J B, Mao Q G, Fang T H, Zhang R. 2018. Ore-forming fluid and mineral source of the Hongshi copper deposit in the Kalatage area, East Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(5): 1769–1783.
- Zhang P, Wang G C, Li Y T, Zhang S Y, Peng C, Zhao H W, Zha Y H. 2017. Emplacement mechanism of the Akebasitao pluton: Implications for regional tectonic evolution of west Junggar, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 91(3): 857–874.

附中文参考文献

- 陈宣华, 陈正乐, 杨农. 2009. 区域成矿与矿田构造研究——构建成矿构造体系[J]. *地质力学学报*, 15(1): 1–19.
- 陈宣华, 杨农, 叶宝莹, 王志宏, 陈正乐. 2011. 中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 35(3): 325–338.
- 陈宣华, 聂兰仕, 丁伟翠, 王学求, 王志宏, 叶宝莹. 2015. 西准噶尔走滑断裂系元素分布特征及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 31(2): 371–387.
- 第五春荣, 孙勇, 高剑峰, 樊龙刚. 2013. 华北克拉通早前寒武纪构造–热事件性质探索: 铁铜沟组石英岩中碎屑锆石 U–Pb–Hf–O 同位素组成[J]. *科学通报*, 58(28/29): 2946–2957.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 22(5): 1077–1086.
- 黄鹏辉, 陈宣华, 王志宏, 叶宝莹, 李学智, 杨屹. 2016. 西准噶尔成矿带晚古生代花岗岩类岩浆活动及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 40(1): 145–160.
- 靳松, 荣桂林, 张兆祯, 李天刚, 彭朝晖, 吴立昂. 2016. 新疆西准噶尔玛依勒山地区阔依塔斯杂岩体地球化学特征及锆石 U–Pb 年龄[J]. *中国地质*, 43(1): 99–110.
- 刘阁, 舍建忠, 杨文龙, 王庆军, 贾健, 邸晓辰. 2018. 西准噶尔巴音达拉地区卡拉岗组火山岩锆石 U–Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. *中国地质*, 45(6): 1241–1250.
- 刘希军, 许继峰, 王树庆, 侯青叶, 白正华, 雷敏. 2009. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E–MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(6): 1373–1389.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 张锐, 王京彬, 张云孝, 孟磊, 王丽娟, 汪疆. 2009. 新疆古图斑岩型铜铅矿床容矿岩石及蚀变特征[J]. *岩石学报*, 25(4): 777–792.
- 史建杰, 陈宣华, 丁伟翠, 李冰. 2017. 中亚造山带西准噶尔晚古生代洋陆转换与构造演化——来自晚石炭世流纹岩的证据[J]. *地质力学学报*, 23(1): 150–160.
- 宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 宋彪, 张锐, 成勇. 2007. 新疆古图斑岩铜矿床地质特征[J]. *岩石学报*, 23(8): 1981–1988.
- 田亚洲, 杨经绥. 2015. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩地幔橄榄岩成因[J]. *中国地质*, 42(5): 1379–1403.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2): 185–220.
- 向坤鹏, 李永军, 杨洋, 王冉, 杨高学, 孙勇, 王军年. 2015. 新疆吾尔喀什尔地区晚泥盆世铁列克提组火山岩 LAICP–MS 锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 31(2): 534–544.
- 杨屹, 陈宣华, 陈正乐, 韩淑琴, SEITMURATOVA Eleonora, 王志宏, 施炜, 叶宝莹. 2015. 中亚巴尔喀什成矿带晚古生代最晚期岩浆侵入事件及其热演化历史[J]. *岩石学报*, 32(2): 304–314.