

doi: [10.12097/gbc.2022.02.028](https://doi.org/10.12097/gbc.2022.02.028)

甘肃北山南部早古生代古亚洲洋俯冲作用：来自明舒井埃达克质侵入体锆石 U-Pb 年龄及地球化学的证据

王红杰^{1,2}, 白建科³, 赵海波^{3*}, 程龙⁴, 朱黎宽¹, 郭峰¹

WANG Hongjie^{1,2}, BAI Jianke³, ZHAO Haibo^{3*}, CHENG Long⁴, ZHU Likuan¹, GUO Feng¹

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所/自然资源部高纯石英资源开发利用工程技术创新中心, 河南 郑州 450006;

2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;

3. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000;

4. 陕西地矿研究院有限公司, 陕西 咸阳 712000

1. Zhengzhou Institutes of Multipurpose Utilization of Mineral Resouse, China Academy of Geological Sciences/High Purity Quartz Resource Development and Utilization Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, Henan, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

3. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Xi'ning 810000, Qinghai, China;

4. Academe of Regional Geological Survey and Mineral Resources Exploration of Shaanxi, Xianyang 712000, Shaanxi, China

摘要: 甘肃北山南部具有重要的构造位置与复杂的构造演化历史, 制约着北山造山带大地构造归属研究。北山明舒井埃达克质侵入体位于南部辉铜山以西地区, 岩性主要为二长花岗岩、正长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等。对明舒井侵入体中的二长花岗岩、正长花岗岩和花岗闪长岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 定年结果分别为 423.4 ± 3.4 Ma、 425.4 ± 2.3 Ma 和 437.8 ± 3.5 Ma。岩石 SiO_2 含量多数大于 56% (55.53%~64.42%), Al_2O_3 大于 15% (15.1%~17.79%), MgO 多数小于 3%, 全部小于 6% (2.07%~3.5%), Y 和 Yb 含量均较低, 同时轻稀土元素富集, Eu 异常不明显, Sr 含量较高, 具有与埃达克岩相似的特征。综合区域地质背景, 认为北山南部志留纪埃达克质侵入岩形成于活动大陆边缘火山弧环境, 可能是志留纪古亚洲洋向北消减俯冲背景下岩浆作用的产物, 同时发生了大规模的地壳增生。明舒井埃达克质侵入岩体的识别为北山造山带早古生代构造演化提供了重要依据。

关键词: 埃达克质侵入岩; 早古生代; 俯冲作用; 锆石 U-Pb 年龄; 甘肃北山; 地质调查工程

中图分类号: P534.5; P597^{+.3} 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)02/03-0376-14

Wang H J, Bai J K, Zhao H B, Cheng L, Zhu L K, Guo F. Early Paleozoic Paleo-Asian Ocean subduction in the southern Beishan, Gansu: Evidence of zircon U-Pb age and geochemical records from Mingshujing adakitic pluton. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 376-389

Abstract: The southern Beishan has an important tectonic position and a complex tectonic evolution history, which restricts the research on the tectonic attribution of the Beishan orogenic belt. The Mingshujing adakitic pluton is located in the south of Beishan,

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-06-15

资助项目: 中国地质调查局项目《天山-北山成矿带那拉提-营毛沱地区地质矿产调查(中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所)》(编号: DD20179211)、《东天山昌吉-双沟山地区区域地质调查(中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所)》(编号: DD20190067)、《非金属矿产资源节约与综合利用调查》(编号: DD20230038)

作者简介: 王红杰(1990-), 男, 助理研究员, 从事区域地质调查和造山带研究。E-mail: cugbhongjie@163.com

* 通信作者: 赵海波(1986-), 男, 副研究员, 从事区域地质矿产调查与研究。E-mail: tiger_zhaohb@163.com

Gansu, to the west of Huitong Mountain, and the lithology is mainly adamellite, syenogranite, granodiorite, quartz diorite, etc. The LA-ICP-MS ages of the adamellite, syenogranite, granodiorite zircons of the Mingshujing adakitic pluton are 423.4 ± 3.4 Ma, 425.4 ± 2.3 Ma and 437.8 ± 3.5 Ma, respectively, which represent the crystallization age of the pluton. The content of SiO_2 is mostly higher than 56% (55.53% ~ 64.42%), Al_2O_3 is larger than 15% (15.1% ~ 17.79%), MgO is mostly less than 3%, and all are less than 6% (2.07% ~ 3.5%). The content of Y and Yb is relatively low. At the same time, no Eu anomaly or only weak negative Eu anomaly can be observed, REE distribution patterns show strong REE segregation and belong to the type of enriched LREE, and there exist very prominent negative Nb anomaly and positive Sr anomaly in the trace element spidergram. The petrogeochemistry has similar characteristics to that of adakite. Based on the regional geological background, it is believed that the Silurian adakitic pluton in the southern Beishan were formed in the volcanic arc environment of the active continent margin, and which may be the products of the northward subducting magmatism of the Silurian paleo-Asian oceanic crust in Beishan Mountains, at the same time, there was a massive continental accretion. The identification of adakitic pluton in the Mingshujing provides an important basis for the early Paleozoic tectonic evolution of the Beishan Orogenic Belt.

Key words: adakitic pluton; Early Paleozoic; subduction; zircon U-Pb age; Beishan, Gansu Province; geological survey engineering

中亚造山带是世界上典型的增生型造山带, 经历了俯冲、增生、碰撞等一系列复杂过程, 也是显生宙以来全球最大的造山带和大陆地壳生长最显著的地区之一(辛后田等, 2020)。该带由多期增生和碰撞造山事件发展而来, 形成了如土屋-延东铜矿、西南天山金-铜-钼-钨矿床等世界级矿床(Safonova et al., 2011)。北山造山带位于中亚造山带南缘及华北板块、塔里木板块的交汇部位, 是研究中亚造山带造山作用和演化的关键部位之一(Xiao et al., 2010)。北山造山带广泛发育古生代不同期次的花岗岩类侵入体, 且类型众多, 为揭示中亚造山带构造演化提供了重要信息(许伟等, 2019; 闫涛等, 2020; 黄博涛等, 2021; 王红杰等, 2021; 白荣龙等, 2022)。近年来, 对于北山造山带物质组成、构造-岩浆活动的研究取得了许多进展, 约束了古亚洲洋在北山地区的构造演化过程(李伍平等, 2001; 范洪海等, 2005; 何世平等, 2005; 刘明强等, 2007; 杨合群等, 2008; 张文等, 2010, 2011; Lei et al. 2011; 李向民等, 2011; 王磊等, 2015; 王国强等, 2015, 2016;)。但重要的构造位置、复杂的构造格局与演化历史, 导致对北山造山带大地构造归属的认识仍然存在争议。前人将北山南部明舒井地区侵入体笼统地归于海西期, 导致北山造山带古生代侵入体构造属性及演化过程认识存在分歧。部分学者认为, 晚志留世北山古生代洋盆已经俯冲消亡, 并开始碰撞造山, 晚古生代进入后碰撞或陆内演化阶段(左国朝等, 2003; 何世平等, 2005; 徐学义等, 2008; 杨合群等, 2008; Xiao et al., 2013; 牛亚卓等, 2014); 也有学者认为, 北山地区晚古生代仍处于俯冲-增生阶段, 并有晚古生代活动陆缘构造-岩

浆活动的记录(Mao et al., 2012; 王疆涛等, 2016; 赵海波等, 2019)。

本文依托 1 : 5 万北山幅(K46E018018)区域地质调查项目, 针对北山造山带早古生代构造演化问题, 选择甘肃北山南部明舒井埃达克质侵入体进行详细的岩相学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 测年研究, 结合区域地质资料, 分析其侵位时代、形成机制和构造背景, 为北山地区早古生代构造演化和地球动力学背景提供科学依据。

1 区域地质概况

北山造山带位于中亚造山带南缘(图 1-a), 经历了古亚洲洋古生代长期而复杂的俯冲-消减过程, 是由不同构造单元及构造块体(包括洋壳块体、岛弧、微地块、沉积变质块体、增生杂岩块体等)组成的典型增生型造山带(左国朝等, 2003; 何世平等, 2005; 杨合群等, 2008)。研究区位于敦煌地块北侧, 大泉深大断裂南侧(图 1-b)。区内出露地层较简单, 主要为新太古界—古元古界敦煌岩群、蓼县系平头山组、下石炭统红柳园组(图 1-c), 其中敦煌岩群为一套经受多期次变形变质作用改造和重组的复杂地质体, 岩性以混合岩、角闪岩、斜长角闪岩和片麻岩为主, 是研究区前震旦系古老陆壳基底, 可划分为上、下 2 个岩组, 下岩组为一套深变质岩, 包括混合岩、混合片麻岩、斜长角闪片麻岩夹石英片岩; 上岩组为中薄层条带状蛇纹石化大理岩夹斜长角闪岩、大理岩、石英岩。平头山组主要岩性组合为白云岩、大理岩夹少量绢云母绿泥千枚岩, 为浅滨海相碳酸盐岩沉积, 可划分为上、中、下 3 个岩组, 中、下岩组均为浅

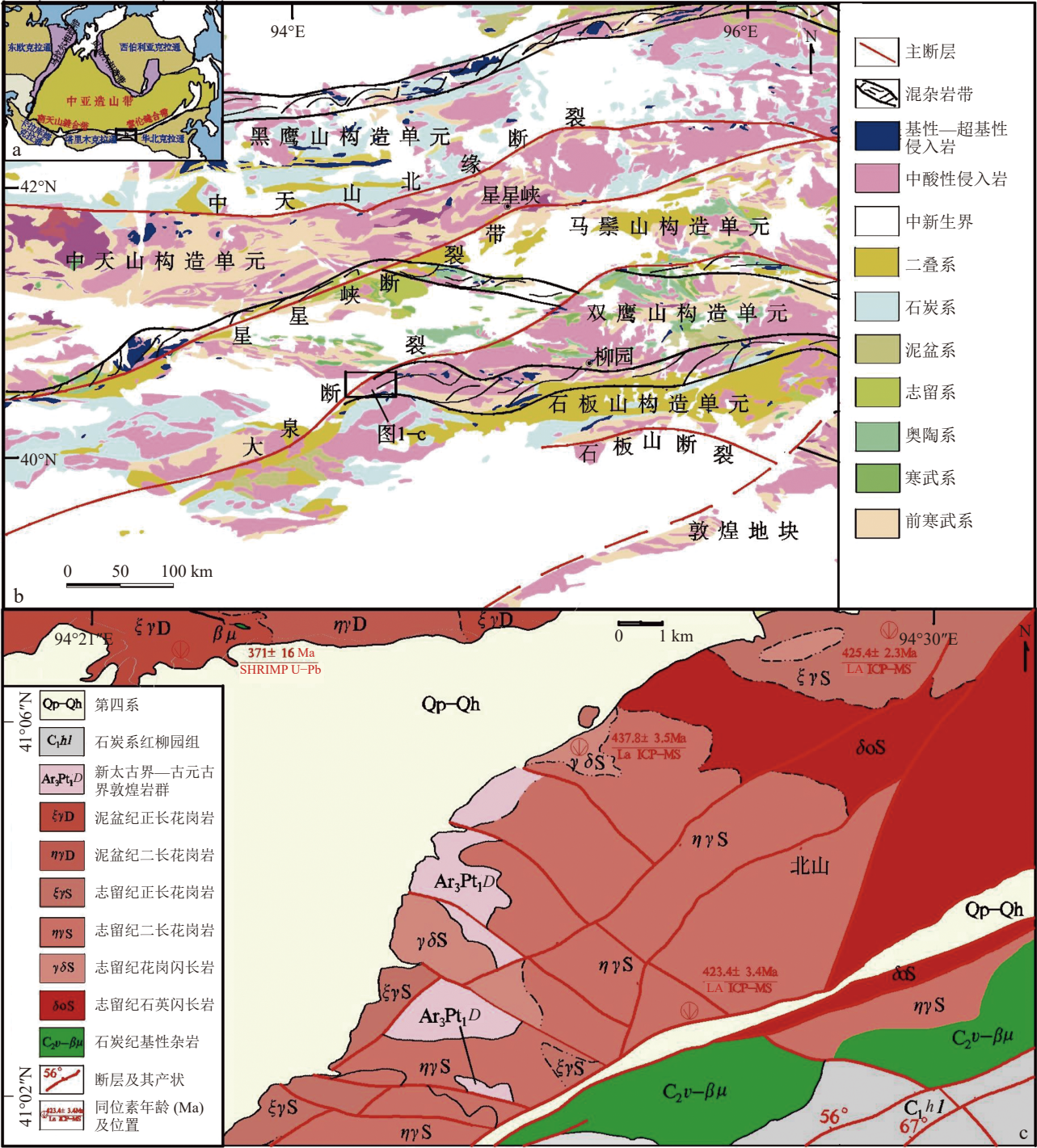


图 1 中亚造山带大地构造简图(a, 据 Xiao et al., 2010 修改)、北山造山带及邻区构造纲要图(b, 据李向民等, 2016 修改)与研究区地质图(c, 据赵海波等, 2019 修改)

Fig. 1 The tectonic sketch of the Central Asian Orogenic Belt (a), the structural outline map of Beishan orogenic belt and adjacent areas (b), and geological map of the study area(c)

海相碳酸盐岩建造; 上岩组可分为 3 个岩性段, 第一岩性段以浅海、滨海相碎屑岩为主, 第二岩性段以千枚岩、板岩为主, 第三岩性段为碳酸盐岩和中基性火山熔岩。红柳园组主要由砂岩、砾岩、大理岩、灰

岩、安山玢岩和凝灰质熔岩组成, 属于北山地区裂谷盆地演化阶段的产物(李向民等, 2016)。

甘肃北山南部明舒井埃达克质侵入体出露于柳园镇西南辉铜山以西, 面积约 450 km², 呈 EW 向透

镜体状侵入敦煌岩群中(图 1-c)。岩体受库米什-红柳河逆冲剪切带控制较强,局部被断层斜切,与围岩呈不规则港湾状侵入接触关系。附近围岩受岩浆活动影响发生了明显的热变质作用,岩体边部颜色较深,暗色矿物含量多,表明岩体和围岩之间有强烈的同化混染现象,片理化强烈。1:25 万雅满苏幅区域地质调查报告显示,该岩体属于新太古界北山杂岩或晚志留世—早泥盆世侵入岩体(曹福根等, 2012),岩性主要为正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩,野外露头上各岩性为渐变过渡关系,未见到明显的接触界线,可能是由于其源岩熔融程度存在差异所致。

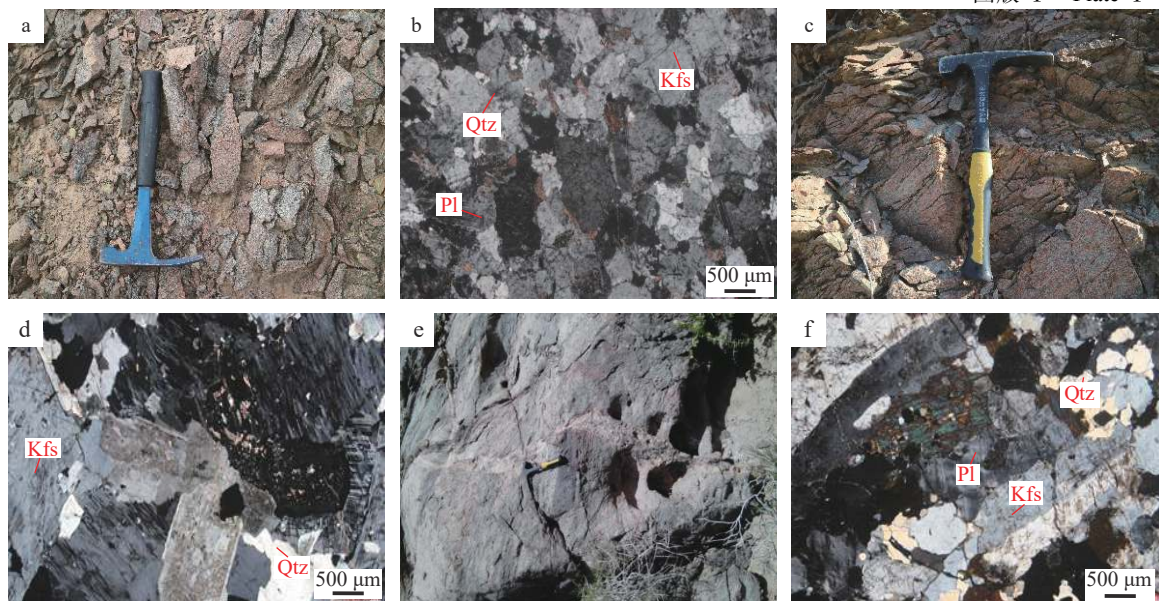
2 岩相学特征

二长花岗岩风化面呈浅紫红色,新鲜面呈浅肉红色,中细粒结构,块状构造(图版 I-a),内部见闪长质包体。对标本(编号 PM011-7Bb)进行显微镜下观察(图版 I-b),主要矿物成分为斜长石(25%~30%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%~30%)、黑云母(3%~10%)。斜长石呈半自形板状,粒径 0.5~2.0 mm,个别大于 2.0 mm,杂乱分布,具不同程度粘土化、绢云母化、黝帘石化,零星可见绿帘石化,与钾长石接触部位可见交代蠕虫结构,多见环带结构,聚片双晶发育,由于切面及蚀变原因,长石牌号无法测

得。钾长石呈半自形板状,主要为微斜长石,晶内格子双晶发育,粒径 0.8~2.0 mm,个别大于 2.0 mm,星散分布,具轻微高岭土化,零星可见绢云母化,部分粒内嵌布半自形板状斜长石,局部交代斜长石。石英呈他形粒状,粒径以 0.2~1.2 mm 为主,杂乱分布,粒内具轻微波状消光。角闪石呈半自形柱状,粒径为 0.2~0.5 mm,零星分布,多色性明显,Ng'=绿色, Np'=浅黄绿色,局部具绿泥石化,零星可见绿帘石化。黑云母呈片状,片径大小 0.1~1.0 mm,星散分布,多色性明显,Ng'=黄褐色, Np'=浅黄褐色,局部具轻微绿泥石化。副矿物有不透明矿物、磷灰石、锆石,次生矿物有粘土、绢云母、黝帘石、绿帘石、绿泥石。

正长花岗岩野外露头呈肉红色,中粒结构,块状构造(图版 I-c)。对标本(编号 D0600-19Bb)进行显微镜下观察(图版 I-d),岩石主要矿物成分为钾长石(约 50%)、斜长石(20%~25%)、石英(约 20%),暗色矿物以黑云母为主,角闪石假象次之,含量 5%~10%。钾长石为正条纹长石、微斜条纹长石,呈半自形板状,杂乱分布,粒径 2~5 mm,少量 0.35~2 mm,不均匀高岭土化,粒内及边缘嵌布斜长石等颗粒,交代斜长石。斜长石呈半自形板状,杂乱分布,粒径 0.3~2 mm,少量 2~2.5 mm,不均匀高岭土化、绢云母化、绿帘石化,少量碳酸盐化,隐约可见环带构造,与钾长石接触边缘可见净边结构、蠕虫结构。石英呈他形粒状,杂乱分布,粒径 0.2~3.5 mm,粒内轻

图版 I Plate I



a.二长花岗岩野外宏观特征;b.二长花岗岩正交偏光显微镜镜下特征(+)10×2;c.正长花岗岩野外宏观特征;d.正长花岗岩中粒花岗岩结构镜下特征(+)10×2;e.花岗闪长岩野外宏观特征;f.花岗闪长岩镜下特征(+)10×2。Qtz—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石

微波状、带状消光。黑云母呈片状—鳞片状,星散分布,大小为 0.2~1.5 mm,多绿泥石化,少量褐铁矿化、碳酸盐化等,多呈假象,少量残留,局部见曲折现象。角闪石呈自形—半自形柱状,零星分布,粒径 0.2~1.2 mm,被绿泥石、黑云母交代,呈假象。副矿物有不透明矿物、锆石、榍石、磷灰石,次生矿物有绢云母、高岭土、绿泥石、绿帘石、碳酸盐、黑云母。

花岗闪长岩新鲜面呈灰白色,中细粒结构,块状构造(图版 I-e),显微镜下观察(图版 I-f),主要矿物成分为斜长石(约 50%)、钾长石(20%~25%)、石英(约 15%)、角闪石(5%~10%)和黑云母(约 5%)。斜长石呈半自形板状,杂乱分布,粒径以 2~5 mm 为主,0.3~2 mm 次之,具不均匀绢云母化、黝帘石化等,多数表面显脏,有的隐约见环带结构,局部被钾长石片状、蠕虫状交代,由于蚀变较强,聚片双晶不发育,长石牌号无法测得。钾长石呈近半自形板状,为微斜长石,杂乱分布,粒径 2~5 mm,部分 0.4~2 mm,轻微高岭土化,格子双晶发育,交代斜长石,有的粒内见斜长石包体。石英呈他形粒状以集合体充填于长石间,粒间齿状镶嵌,粒径 0.2~1.4 mm,粒内具波状消光。角闪石呈半自形柱粒状,星散分布,粒径部分 0.3~2 mm,部分 2~4 mm,多色性明显:Ng'=褐绿色,Np'=浅黄绿色,局部被石英穿孔状交代。黑云母呈叶片状,星散分布,片径为 0.2~1.2 mm,多被绿泥石及少量绿帘石等交代呈假象,少量残留,局部见晶体弯曲现象。可见黑云斜长变粒岩捕虏体,局部见碳酸盐、钾长石填充微裂纹。副矿物有不透明矿物、磷灰石、榍石、褐帘石,次生矿物有绢云母、黝帘石、高岭土、绿泥石、绿帘石、碳酸盐。

3 测试方法

3.1 样品采集

本次样品采集依托野外实测地质剖面和野外地质路线,采集 1 件二长花岗岩锆石 U-Pb 测年样品(PM011-2,坐标:北纬 41°02'6.37"、东经 94°25'36.35")、1 件正长花岗岩锆石 U-Pb 测年样品(D0600-19,坐标:北纬 41°06'16.96"、东经 94°29'2.4")和 1 件花岗闪长岩锆石 U-Pb 测年样品(D3782-1,坐标:北纬 41°5'48.83"、东经 94°26'52.8"),并采集 5 件二长花岗岩地球化学样品、5 件花岗闪长岩地球化学样品和 5 件石英闪长岩地球化学样品(图 1-c)。

3.2 分析方法

锆石单矿物分选、制靶照相及阴极发光(CL)工作由河北省区域地质调查研究所测试中心完成,锆石 U-Pb 测年在中国地质调查局西安地质调查中心同位素实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。实验过程首先根据锆石阴极发光、透射光和反射光特征,选择合适的区域进行激光剥蚀,采用 Nist610、91500 外标和 PLV 内标控制的方法,每隔 6 个数据点用 PLV 标样校正。采用软件 Glitter 对分析数据进行处理,锆石 U-Pb 年龄谐和图和 MSWD 的计算均采用 Isoplot(Ludwig, 2003; 吴元保等, 2004; 李艳广等, 2023)。

全岩主量、微量和稀土元素测试在西北有色地质研究院测试中心完成,主量元素采用 XRF 法,测试流程包括烧失量计算、玻璃熔融法制样和 X 射线荧光光谱仪测定。稀土和微量元素采用 Thermo-X7 电感耦合等离子体质谱仪,分析精度和准确度优于 10%(刘颖等, 1996)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

对明舒井埃达克质侵入体二长花岗岩(PM011-2)、正长花岗岩(D0600-19)和花岗闪长岩(D3782-1)进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,测试结果见表 1。

二长花岗岩(PM011-2)锆石 CL 图像显示,所有锆石均发育清晰的生长韵律或振荡环带结构,个别锆石(01、02、04、12、18)能见到核边结构,呈长柱状或短柱状自形晶,锆石长度为 110~180 μm ,其长宽比大部分介于 1.6~2.3 之间,表现出岩浆锆石的典型特征(图 2-a)。对二长花岗岩具有代表性的 25 粒锆石进行测试,获得 22 个有效点,其中 8 个测点谐和度较高且年龄较集中,U 含量为 327×10^{-6} ~ 1078×10^{-6} ,Th 含量 27×10^{-6} ~ 724×10^{-6} ,Th/U 值均大于 0.1,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 423.4 ± 3.4 Ma(MSWD=0.77),代表了锆石结晶年龄,即二长花岗岩的形成年龄(图 3-a)。另外,有部分锆石年龄偏大,年龄为 438~506 Ma,也落在谐和线上,是捕获的较老的岩浆锆石。02、12、16、19 和 20 号锆石的测试年龄偏年轻,分布于 358~406 Ma 之间,可能与岩浆后期发生的蚀变作用或近期内锆石中铅丢失有关。

正长花岗岩(D0600-19)锆石 CL 图像显示,所有锆石均发育清晰的生长韵律或振荡环带结构,呈长

表 1 明舒井埃达克质侵入体岩体锆石 U-Th-Pb 分析数据

Table 1 U-Th-Pb isotopic data of zircons from the Mingshujing adakitic pluton

测点 编号	含量/ 10 ⁻⁶		Th/U	同位素比值								年龄/Ma					谐和 度	
	U	Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ			
二长花岗岩PM011-2TW																		
01	612	338	0.55	0.0551	0.0012	0.5163	0.0108	0.0681	0.0008	0.0218	0.0003	416	27	423	7	424	5	0.998
02	680	358	0.53	0.0608	0.0047	0.5079	0.0385	0.0607	0.0013	0.0202	0.0009	631	126	417	26	380	8	1.097
03	925	505	0.55	0.0551	0.0019	0.5200	0.0165	0.0685	0.0008	0.0214	0.0002	415	77	425	11	427	5	0.995
04	477	223	0.47	0.0548	0.0013	0.5418	0.0127	0.0717	0.0008	0.0219	0.0004	405	32	440	8	447	5	0.984
05	703	391	0.56	0.0559	0.0011	0.5615	0.0110	0.0729	0.0008	0.0247	0.0003	449	25	453	7	454	5	0.998
06	728	311	0.43	0.0548	0.0011	0.5221	0.0104	0.0692	0.0008	0.0209	0.0003	404	26	427	7	431	5	0.991
07	245	27	0.11	0.0558	0.0020	0.5181	0.0179	0.0675	0.0009	0.0227	0.0011	443	54	424	12	421	5	1.007
08	717	368	0.51	0.0597	0.0013	0.6707	0.0137	0.0816	0.0009	0.0271	0.0004	592	26	521	8	506	5	1.030
09	429	200	0.47	0.0562	0.0015	0.5456	0.0137	0.0705	0.0008	0.0233	0.0004	459	36	442	9	439	5	1.007
10	665	331	0.50	0.0577	0.0027	0.5369	0.0240	0.0676	0.0010	0.0247	0.0007	518	72	436	16	421	6	1.036
11	630	392	0.62	0.0564	0.0013	0.5223	0.0116	0.0673	0.0007	0.0216	0.0003	467	30	427	8	420	4	1.017
12	787	393	0.50	0.0556	0.0013	0.4973	0.0111	0.0650	0.0007	0.0201	0.0003	435	30	410	8	406	4	1.010
13	515	246	0.48	0.0584	0.0019	0.6114	0.0190	0.0760	0.0009	0.0248	0.0005	546	46	484	12	472	6	1.025
14	540	261	0.48	0.0576	0.0014	0.5729	0.0132	0.0722	0.0008	0.0231	0.0004	515	31	460	9	449	5	1.024
15	485	238	0.49	0.0561	0.0023	0.5465	0.0213	0.0707	0.0009	0.0220	0.0002	456	93	443	14	440	5	1.007
16	505	283	0.56	0.0679	0.0065	0.5349	0.0498	0.0572	0.0015	0.0193	0.0011	867	149	435	33	358	9	1.215
17	561	271	0.48	0.0550	0.0025	0.5080	0.0223	0.0671	0.0009	0.0209	0.0002	410	105	417	15	418	5	0.998
18	802	440	0.55	0.0579	0.0012	0.5612	0.0114	0.0703	0.0008	0.0217	0.0003	527	26	452	7	438	5	1.032
19	873	468	0.54	0.0548	0.0022	0.4841	0.0188	0.0640	0.0008	0.0200	0.0002	406	93	401	13	400	5	1.003
20	1050	724	0.69	0.0555	0.0027	0.4686	0.0219	0.0613	0.0008	0.0191	0.0002	431	110	390	15	383	5	1.018
21	1078	709	0.66	0.0639	0.0042	0.6203	0.0399	0.0705	0.0014	0.0206	0.0008	737	103	490	25	439	8	1.116
22	555	264	0.47	0.0601	0.0015	0.5663	0.0136	0.0684	0.0008	0.0216	0.0004	609	33	456	9	426	5	1.070
23	536	320	0.60	0.0582	0.0014	0.5740	0.0135	0.0716	0.0008	0.0229	0.0003	539	32	461	9	446	5	1.034
24	615	349	0.57	0.0675	0.0064	0.6580	0.0603	0.0707	0.0019	0.0234	0.0013	854	147	513	37	441	11	1.163
25	327	166	0.51	0.0578	0.0024	0.5967	0.0238	0.0750	0.0010	0.0239	0.0006	521	63	475	15	466	6	1.019
正长花岗岩D0600-19TW																		
1	290	147	0.51	0.0540	0.0016	0.5149	0.0162	0.0691	0.0009	0.4038	0.0229	369	67	422	11	430	5	1.021
2	413	238	0.58	0.0528	0.0013	0.5021	0.0119	0.0690	0.0009	0.5598	0.0225	320	56	413	8	430	6	1.041
3	275	135	0.49	0.0836	0.0041	0.8424	0.0527	0.0712	0.0011	0.2515	0.0341	1283	96	620	29	443	7	0.714
4	371	194	0.52	0.0551	0.0014	0.5168	0.0133	0.0680	0.0007	0.3999	0.0220	413	59	423	9	424	4	1.003
5	391	201	0.51	0.0534	0.0014	0.5029	0.0119	0.0685	0.0009	0.5466	0.0222	343	90	414	8	427	5	1.033
6	388	238	0.61	0.0553	0.0013	0.5268	0.0140	0.0688	0.0009	0.4911	0.0223	433	52	430	9	429	5	0.999
7	413	266	0.65	0.0566	0.0015	0.5348	0.0135	0.0685	0.0006	0.3594	0.0222	480	92	435	9	427	4	0.982
8	767	669	0.87	0.0552	0.0012	0.5194	0.0108	0.0684	0.0008	0.5865	0.0213	417	55	425	7	427	5	1.005
9	368	236	0.64	0.0555	0.0014	0.5240	0.0134	0.0684	0.0008	0.4588	0.0211	432	54	428	9	427	5	0.997
10	490	303	0.62	0.0518	0.0012	0.4877	0.0113	0.0686	0.0010	0.6221	0.0212	276	54	403	8	428	6	1.060
11	423	261	0.62	0.0592	0.0030	0.5613	0.0340	0.0679	0.0009	0.2177	0.0233	572	109	452	22	423	5	0.936
12	391	208	0.53	0.0526	0.0013	0.4942	0.0135	0.0680	0.0009	0.4611	0.0214	322	57	408	9	424	5	1.039
13	411	237	0.58	0.0537	0.0014	0.5057	0.0133	0.0684	0.0008	0.4456	0.0216	367	57	416	9	426	5	1.026
14	600	530	0.88	0.0559	0.0011	0.5222	0.0104	0.0678	0.0008	0.6073	0.0221	456	17	427	7	423	5	0.991
15	345	187	0.54	0.0535	0.0014	0.4995	0.0118	0.0680	0.0009	0.5518	0.0227	354	55	411	8	424	5	1.031
16	313	181	0.58	0.0575	0.0019	0.5385	0.0177	0.0679	0.0008	0.3383	0.0224	509	75	437	12	424	5	0.968
17	700	448	0.64	0.0683	0.0025	0.6680	0.0310	0.0695	0.0010	0.3054	0.0262	880	-123	520	19	433	6	0.834

续表 1

测点 编号	含量/ 10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值								年龄/Ma						谐和 度
	U	Th	Pb		1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
18	571	334	0.58	0.0566	0.0011	0.5295	0.0113	0.0677	0.0008	0.5362	0.0220	476	44	431	8	422	5	0.979	
19	362	209	0.58	0.0538	0.0014	0.5035	0.0117	0.0681	0.0008	0.5142	0.0226	361	57	414	8	425	5	1.026	
20	342	193	0.57	0.0560	0.0015	0.5169	0.0130	0.0671	0.0008	0.4932	0.0230	450	57	423	9	419	5	0.989	
花岗岩闪长岩D3782-1TW																			
1	290	226	0.78	0.0553	0.0019	0.5233	0.0175	0.0687	0.0010	0.0224	0.0004	422	48	427	12	428	6	1.00	
2	198	124	0.62	0.0554	0.0022	0.5373	0.0214	0.0703	0.0011	0.0221	0.0005	429	60	437	14	438	7	1.00	
3	218	144	0.66	0.0557	0.0023	0.5367	0.0215	0.0699	0.0011	0.0239	0.0005	440	61	436	14	435	7	1.00	
4	154	97	0.63	0.0555	0.0029	0.5379	0.0275	0.0703	0.0012	0.0241	0.0006	430	83	437	18	438	7	1.00	
5	310	161	0.52	0.0553	0.0019	0.5253	0.0181	0.0689	0.0010	0.0233	0.0005	424	50	429	12	429	6	1.00	
6	284	173	0.61	0.0543	0.0025	0.5316	0.0238	0.0710	0.0012	0.0235	0.0006	382	71	433	16	442	7	0.98	
7	284	183	0.64	0.0562	0.0031	0.5327	0.0285	0.0686	0.0013	0.0239	0.0007	461	86	434	19	428	8	1.01	
8	307	183	0.60	0.0550	0.0024	0.5327	0.0227	0.0702	0.0011	0.0242	0.0006	411	66	434	15	437	7	0.99	
9	303	191	0.63	0.0551	0.0021	0.5276	0.0196	0.0693	0.0011	0.0216	0.0005	418	55	430	13	432	6	1.00	
10	271	170	0.63	0.0549	0.0023	0.5298	0.0217	0.0699	0.0011	0.0225	0.0005	407	63	432	14	436	7	0.99	
11	281	162	0.58	0.0537	0.0023	0.5324	0.0226	0.0718	0.0012	0.0257	0.0006	357	67	433	15	447	7	0.97	
12	264	153	0.58	0.0536	0.0026	0.5312	0.0257	0.0718	0.0012	0.0212	0.0006	353	78	433	17	447	7	0.97	
13	305	247	0.81	0.0547	0.0023	0.5296	0.0219	0.0700	0.0011	0.0222	0.0005	400	64	432	15	436	7	0.99	
14	348	213	0.61	0.0551	0.0022	0.5445	0.0219	0.0715	0.0011	0.0231	0.0005	415	61	441	14	445	7	0.99	
15	303	246	0.81	0.0550	0.0025	0.5452	0.0240	0.0717	0.0012	0.0229	0.0005	412	69	442	16	446	7	0.99	
16	416	222	0.53	0.0556	0.0028	0.5262	0.0262	0.0685	0.0012	0.0233	0.0007	435	80	429	17	427	7	1.00	
17	288	172	0.60	0.0555	0.0031	0.5208	0.0288	0.0678	0.0013	0.0233	0.0007	433	90	426	19	423	8	1.01	
18	227	112	0.49	0.0564	0.0042	0.5825	0.0423	0.0747	0.0016	0.0242	0.0011	467	123	466	27	464	10	1.00	
19	468	273	0.58	0.0555	0.0022	0.5643	0.0222	0.0735	0.0011	0.0223	0.0005	433	60	454	14	457	7	0.99	
20	507	311	0.61	0.0553	0.0022	0.5403	0.0212	0.0706	0.0011	0.0242	0.0005	424	60	439	14	440	7	1.00	
21	480	317	0.66	0.0549	0.0025	0.5225	0.0239	0.0688	0.0011	0.0202	0.0005	406	73	427	16	429	7	1.00	
22	427	279	0.65	0.0548	0.0025	0.5319	0.0243	0.0701	0.0011	0.0248	0.0006	405	73	433	16	437	7	0.99	
23	535	403	0.75	0.0561	0.0022	0.5458	0.0216	0.0703	0.0011	0.0208	0.0005	456	60	442	14	438	7	1.01	
24	558	391	0.70	0.0546	0.0022	0.5374	0.0216	0.0710	0.0011	0.0196	0.0005	397	62	437	14	442	7	0.99	
25	599	398	0.66	0.0545	0.0022	0.5290	0.0216	0.0701	0.0011	0.0210	0.0005	393	64	431	14	437	7	0.99	

柱状或短柱状自形锆晶, 长度为 80~130 μm, 其长宽比大部分介于 1.2~2.2 之间, 表现出岩浆锆石的典型特征(图 2-b)。对二长花岗岩具有代表性的 20 粒锆石进行测试, 其中产生 18 个有效点, 2 个测试点锆石谐和度在 0.90~1.1 之外, U 含量为 274.94×10⁻⁶~766.97×10⁻⁶, Th 含量 134.74×10⁻⁶~668.98×10⁻⁶, Th/U 值均大于 0.1(0.51~0.88), 具有岩浆锆石成因(表 1), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 425.4±2.3 Ma(MSWD=0.35), 代表了锆石结晶年龄, 即正长花岗岩的形成年龄(图 3-b)。

花岗闪长岩(D3782-1)锆石 CL 图像显示, 所有锆石均发育清晰的生长韵律或振荡环带结构, 部分样品具有明显的增生边, 反映了样品形成之后受到

一定程度的变质作用, 锆石呈长柱状或短柱状自形锆晶, 长度为 100~180 μm, 其长宽比大部分介于 1.2~2 之间, 表现出岩浆锆石成因的典型特征(图 2-c)。本次对花岗闪长岩具有代表性的 25 粒锆石进行测试, 获得 25 个有效点, U 含量为 154×10⁻⁶~599×10⁻⁶, Th 含量为 97×10⁻⁶~403×10⁻⁶, Th/U 值均大于 0.1, 锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 423.4±3.4 Ma(MSWD=1.5), 代表了锆石结晶年龄, 即花岗闪长岩的形成年龄(图 3-c)。

4.2 地球化学特征

本次对明舒井埃达克质侵入体二长花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩进行了地球化学分析, 结果见表 2。

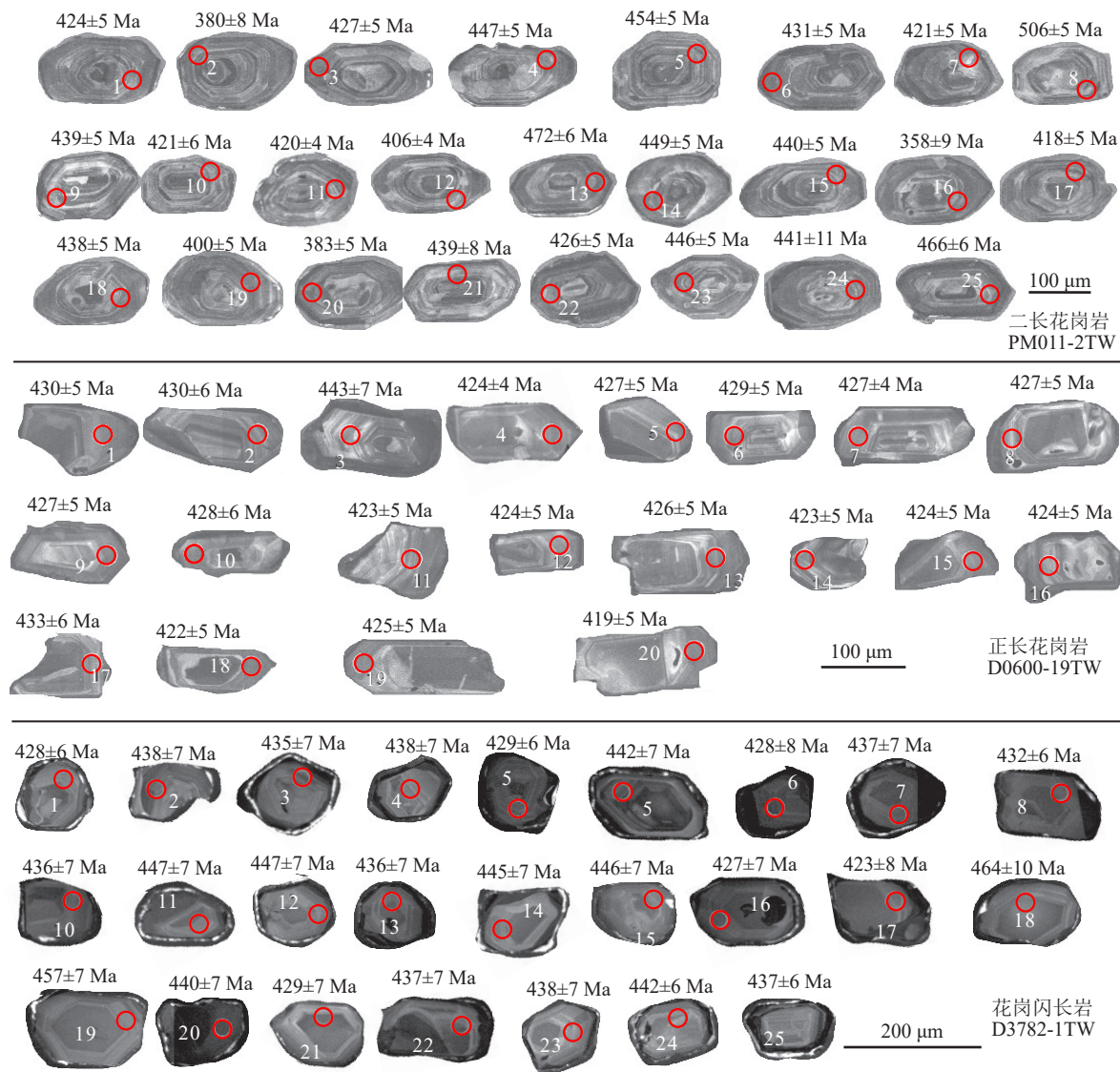


图 2 明舒井埃达克质侵入体锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 2 Zircon CL images and their ages of the Mingshujing adakitic pluton

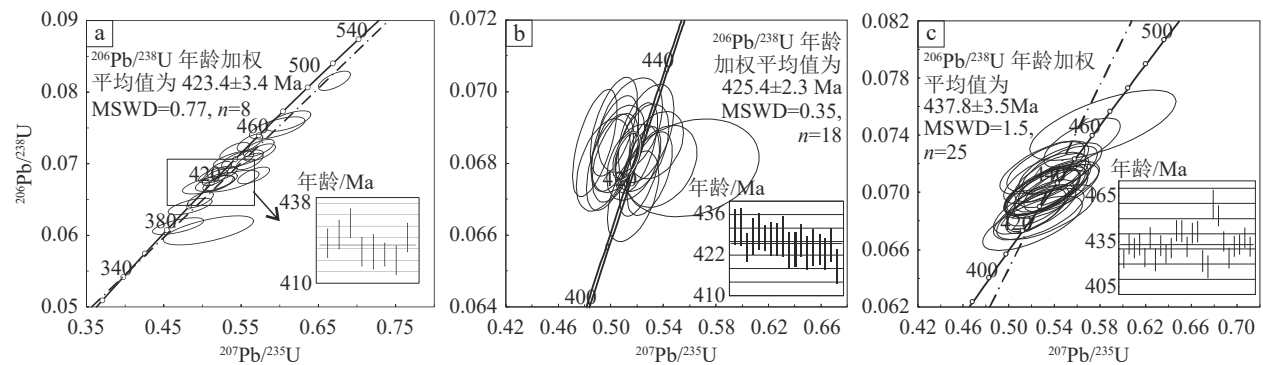


图 3 明舒井埃达克质侵入体锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均值图

Fig. 3 Diagrams of U-Pb concordia and weighted average ages of zircons from the Mingshujing adakitic pluton

a—二长花岗岩; b—正长花岗岩; c—花岗闪长岩

表 2 明舒井埃达克质侵入体花岗岩体全岩主量、微量和稀土元素分析结果
Table 2 Major, trace elements and REE data of the Mingshujing adakitic pluton

元素	二长花岗岩					石英闪长岩					花岗闪长岩			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
SiO ₂	64.42	59.62	62.10	62.08	61.06	56.07	59.99	55.53	58.91	55.75	58.83	63.44	58.98	63.52
TiO ₂	0.62	0.70	0.72	0.68	0.63	0.96	0.85	1.14	0.88	1.16	0.87	0.69	0.98	0.76
Al ₂ O ₃	15.10	17.76	15.64	15.88	16.37	17.35	16.75	17.44	17.16	17.68	17.79	15.51	16.51	15.86
Fe ₂ O ₃	5.23	5.81	5.62	5.68	6.00	7.68	6.63	8.70	6.81	8.22	6.52	5.70	7.33	5.50
FeO	2.88	3.57	3.25	3.44	3.81	4.57	3.86	4.70	3.86	4.47	3.52	3.22	4.44	3.25
MnO	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.12	0.10	0.11	0.10	0.13	0.10	0.08	0.13	0.10
MgO	2.30	2.46	2.86	2.68	2.37	3.50	2.92	3.08	2.90	3.20	2.40	2.07	3.45	2.28
CaO	4.55	5.18	5.16	4.94	5.21	6.14	5.61	5.99	5.83	6.60	4.95	3.84	4.83	3.54
Na ₂ O	3.26	4.29	3.42	3.41	3.73	4.26	3.82	4.11	3.61	3.96	3.37	3.23	3.58	3.57
K ₂ O	2.36	1.57	2.45	2.63	2.50	1.95	2.11	2.19	2.17	1.62	3.11	3.47	2.61	3.60
P ₂ O ₅	0.14	0.17	0.16	0.16	0.15	0.25	0.21	0.32	0.23	0.32	0.22	0.15	0.23	0.17
σ	1.47	2.07	1.80	1.91	2.15	2.95	2.07	3.17	2.10	2.44	2.65	2.20	2.40	2.51
A/NK	1.91	2.03	1.89	1.88	1.85	1.90	1.95	1.91	2.07	2.14	2.00	1.71	1.89	1.62
A/CNK	0.93	0.98	0.89	0.91	0.89	0.86	0.89	0.87	0.91	0.87	0.99	0.97	0.94	0.98
Mg [#]	0.35	0.33	0.38	0.36	0.31	0.35	0.35	0.31	0.34	0.32	0.31	0.31	0.36	0.33
Rb	116.17	95.07	126.60	122.24	104.14	107.12	106.35	117.06	80.44	72.00	146.80	133.93	112.62	140.02
Sr	568.33	670.85	574.97	595.41	695.45	617.02	696.92	759.68	661.56	648.08	534.31	426.16	527.80	451.20
Ba	683.30	315.26	662.42	767.25	997.48	357.37	839.12	581.67	771.51	525.98	733.03	678.99	521.87	690.63
Th	14.05	12.79	8.17	6.40	14.54	10.69	9.80	15.51	10.41	6.45	14.22	28.14	11.67	19.63
U	2.92	2.97	3.54	3.00	3.18	3.19	2.66	6.99	3.55	1.59	6.50	3.94	2.12	4.54
Nb	9.16	11.32	11.78	11.36	9.68	11.89	9.10	16.28	8.42	8.45	11.11	11.39	9.53	10.24
Ta	0.98	1.12	1.32	1.27	1.02	1.00	0.71	1.41	0.71	0.65	0.89	0.98	0.80	1.18
Zr	142.02	162.63	110.66	116.62	125.02	114.00	112.46	169.30	219.12	89.04	156.18	191.69	130.67	151.85
Hf	4.17	4.04	3.70	3.53	3.28	3.29	3.39	4.42	5.01	2.36	4.09	4.83	3.12	4.21
Co	12.84	12.31	17.76	16.80	14.29	25.66	23.07	24.36	19.05	21.19	14.83	13.69	17.81	12.96
Ni	19.90	19.22	26.50	27.37	20.55	34.46	30.66	20.97	15.12	13.86	12.50	20.32	20.65	15.97
V	75.74	89.77	124.11	117.78	99.97	189.51	156.70	186.19	148.89	169.22	123.62	105.11	141.09	104.70
Sc	14.35	11.77	15.01	15.79	11.88	19.85	14.95	17.70	16.08	17.28	13.02	11.22	15.47	11.05
Ga	24.06	25.52	25.55	25.34	25.62	28.46	25.35	30.03	22.24	22.53	24.11	22.71	23.05	22.51
La	38.90	33.93	22.24	20.15	38.20	25.98	26.67	31.47	25.19	27.57	31.33	36.87	27.75	28.68
Ce	68.44	80.99	61.67	46.80	85.79	66.09	96.89	76.01	57.41	60.12	62.35	73.80	60.98	62.26
Pr	8.14	7.94	7.67	6.81	8.13	7.98	6.80	9.38	6.43	7.07	7.78	9.09	7.35	7.76
Nd	24.94	26.98	28.96	26.41	27.60	29.59	24.32	35.09	23.24	26.72	27.34	31.79	26.73	28.09
Sm	4.23	4.57	5.77	5.55	5.02	6.14	4.72	6.95	4.51	5.16	5.35	5.60	5.34	5.23
Eu	1.41	1.44	1.73	1.71	1.85	1.65	1.95	2.17	1.67	1.73	1.95	1.59	1.85	1.63
Gd	4.33	4.60	5.64	5.22	4.98	5.89	4.75	6.67	4.47	5.11	5.12	5.51	5.25	5.25
Tb	0.60	0.66	0.93	0.85	0.73	0.92	0.69	1.03	0.66	0.75	0.80	0.87	0.83	0.84
Dy	2.89	3.05	4.58	4.12	3.55	4.70	3.36	5.01	3.33	3.62	3.85	4.20	4.28	4.24
Ho	0.62	0.64	0.97	0.87	0.73	1.00	0.70	1.06	0.69	0.76	0.84	0.90	0.93	0.92
Er	1.70	1.79	2.65	2.41	2.12	2.90	2.10	2.95	1.88	2.03	2.35	2.52	2.57	2.53
Tm	0.26	0.26	0.41	0.35	0.29	0.42	0.28	0.44	0.27	0.30	0.34	0.38	0.38	0.39
Yb	1.52	1.47	2.47	2.21	1.91	2.63	1.75	2.83	1.67	1.69	2.24	2.53	2.39	2.45
Lu	0.29	0.28	0.41	0.36	0.36	0.45	0.33	0.51	0.32	0.30	0.42	0.45	0.44	0.45

续表 2

元素	二长花岗岩					石英闪长岩					花岗闪长岩			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
Y	15.77	15.48	24.29	21.20	18.49	24.96	17.26	24.98	16.35	18.16	18.41	20.76	20.55	20.65
ΣREE	158.27	168.60	146.09	123.82	181.28	156.34	175.31	181.57	131.74	142.95	152.05	176.08	147.05	150.73
ΣLREE	146.06	155.86	128.04	107.43	166.60	137.43	161.36	161.07	118.46	128.39	136.09	158.74	129.99	133.65
ΣHREE	12.21	12.74	18.05	16.39	14.69	18.91	13.96	20.50	13.29	14.56	15.96	17.34	17.06	17.07
LREE/HREE	11.97	12.24	7.09	6.55	11.34	7.27	11.56	7.86	8.92	8.82	8.53	9.15	7.62	7.83
δEu	1.00	0.95	0.92	0.95	1.12	0.83	1.25	0.96	1.13	1.02	1.12	0.86	1.05	0.94
(La/Sm) _N	5.78	4.67	2.43	2.28	4.78	2.66	3.56	2.85	3.52	3.36	3.69	4.14	3.27	3.45
(La/Yb) _N	17.24	15.58	6.07	6.15	13.46	6.66	10.30	7.49	10.16	10.98	9.43	9.84	7.84	7.91
(Sm/Nd) _N	0.52	0.52	0.61	0.65	0.56	0.64	0.60	0.61	0.60	0.59	0.60	0.54	0.61	0.57
(Gd/Yb) _N	2.30	2.53	1.84	1.91	2.10	1.81	2.20	1.90	2.16	2.43	1.84	1.76	1.77	1.73

注: 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

二长花岗岩样品 SiO_2 含量为 59.62%~64.42%, Al_2O_3 含量为 15.1%~17.76%, CaO 含量为 4.55%~5.21%, MgO 含量为 2.3%~2.86%, 富碱(Na_2O 含量在 3.26%~4.29% 之间, K_2O 含量为 1.57%~2.63%, 碱含量偏高($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5.62\%\sim6.23\%$)), 钠质($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.29\sim2.74$), TiO_2 含量为 0.62%~0.72%。 σ 值在 1.47~2.15 之间, 小于 3.3, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.31~0.38。岩石的铝饱和指数 A/CNK ($\text{A}/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 摩尔比) 为 0.89~0.93, 属准铝质岩石(图 4)。在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5)中, 表现为钙碱性—高钾钙碱性系列岩石。

石英闪长岩样品 SiO_2 含量为 55.53%~59.99%, Al_2O_3 含量为 16.75%~17.68%, CaO 含量为 5.61%~

6.6%, MgO 含量为 2.9%~3.5%, 富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5.57\%\sim6.3\%$), Na_2O 含量为 3.61%~4.26%, K_2O 含量为 1.62%~2.19%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.66~2.44, 为钠质, TiO_2 含量为 0.88%~1.16%, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.31~0.35。岩石的铝饱和指数 A/CNK 为 0.86~0.91, 在 A/CNK - A/NK 图解(图 4)中, 全部落入准铝质区间。 σ 值在 2.07~3.17 之间, 小于 3.3, 在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5)中, 表现为钙碱性—高钾钙碱性系列岩石。

花岗闪长岩样品 SiO_2 含量为 56.83%~64.21%, Al_2O_3 含量为 15.53%~17.79%, CaO 含量为 3.52%~4.95%, MgO 含量为 2.07%~3.45%, 富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.19\%\sim7.17\%$), Na_2O 含量为 3.23%~3.59%, K_2O 含量为 2.61%~3.6%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 0.93~

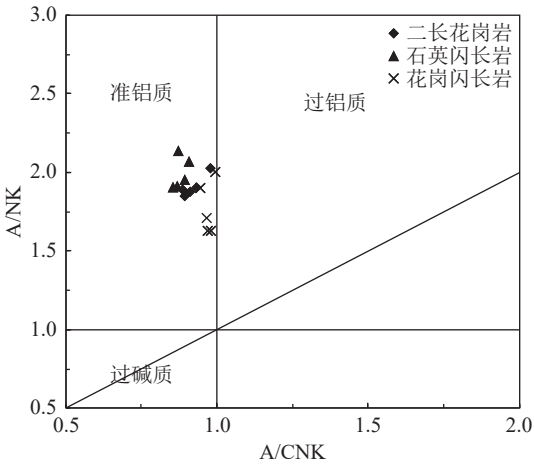


图 4 明舒井埃达克质侵入岩 A/CNK - A/NK 图解(Maniar et al., 1989)

Fig. 4 Diagram of A/CNK - A/NK for the Mingshujing adakitic pluton

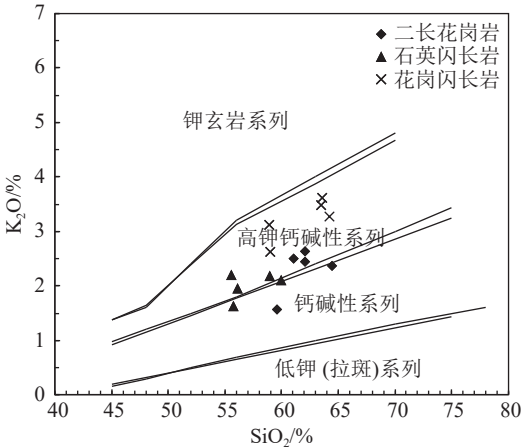


图 5 明舒井埃达克质侵入岩岩石 SiO_2 - K_2O 图解(Peccerillo et al., 1976; Middlemost et al., 1985)

Fig. 5 Diagram of SiO_2 - K_2O for the Mingshujing adakitic pluton

1.37, TiO_2 含量为 0.69% ~ 0.98%, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.31 ~ 0.36。岩石的铝饱和指数 A/CNK 为 0.94 ~ 0.99, 在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 图解(图 4)中, 全部表现为准铝质区间。 σ 值在 2.2 ~ 2.65 之间, 小于 3.3, 在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 5)中, 全部落入高钾钙碱性系列岩石。

明舒井埃达克质侵入体中二长花岗岩、石英闪长岩及花岗闪长岩具有相似的稀土和微量元素含量特征(表 2), 其稀土元素总量(ΣREE)介于 123.82×10^{-6} ~ 181.57×10^{-6} 之间, 偏低; 轻稀土元素和重稀土元素比值($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)介于 6.55 ~ 12.24 之间, 属轻稀土元素富集型; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 6.07 ~ 17.24, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 2.28 ~ 5.78, $(\text{Ga}/\text{Yb})_N$ 值为 1.73 ~ 2.30, 说明轻、重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素富集且分异明显, 而重稀土元素亏损且分异不显著。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈右倾型(图 6), 轻、重稀土元素分馏明显。 δEu 值为 0.83 ~ 1.25, 说明具轻微的 Eu 异常, 表明岩浆演化过程中斜长石没有发生明显的分离结晶或堆晶作用。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7)中, 样品均富集大离子亲石元素 Rb、Th, 亏损 Nb、Ti。

5 讨论

5.1 形成时代

北山造山带广泛发育古生代不同期次和不同类型的花岗岩类侵入体, 是揭示中亚造山带构造演化的重要窗口。准确认识北山南部明舒井地区侵入岩时代, 对解决该地区构造演化分歧具有重要意义。

1 : 20 万方山口幅区域地质调查报告显示, 明舒

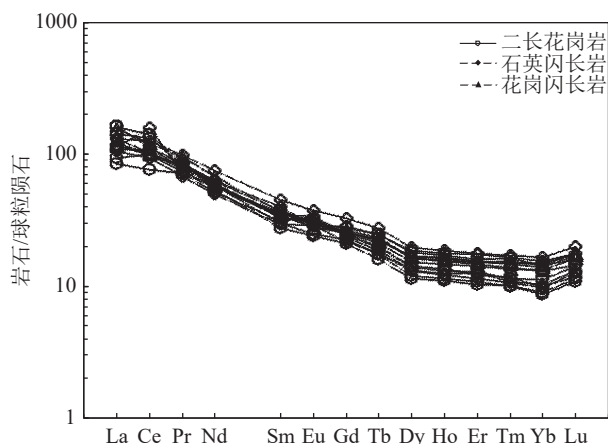


图 6 样品球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of the samples

井埃达克质侵入体形成时代为华力西期中期(甘肃省地矿局区测二队, 1973), 1 : 25 万雅满苏镇幅区域地质调查工作显示, 明舒井埃达克质侵入体中石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果为 415 ± 3 Ma(曹福根等, 2012)。本次在明舒井埃达克质侵入体获得二长花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄较接近, 其中二长花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 423.4 ± 3.4 Ma, 正长花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 425.4 ± 2.3 Ma, 花岗闪长岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 437.8 ± 3.5 Ma, 年龄区间在 437 ~ 423 Ma 之间。甘肃北山南部地区也先后确定出一些形成于 440 ~ 423 Ma 的花岗岩体(李伍平等, 2001; 安国堡, 2007; 赵泽辉等, 2007; 毛启贵等, 2010; Mao et al., 2012), 表明北山南部地区在晚奥陶世—中志留世存在一次广泛的花岗质岩浆活动, 早期以花岗闪长岩为主, 晚期以二长花岗岩和正长花岗岩为主。

综上所述, 明舒井埃达克质侵入体年龄介于 437 ~ 415 Ma 之间, 形成时代为志留纪。

5.2 岩石成因

埃达克岩是一套具有特定岩石地球化学特征的钙碱性中酸性岩(Marc et al., 2002), 其岩石地球化学特征表现为: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, 富铝($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$), 富钠, MgO 通常小于 3%(极少大于 6%), Y 和 Yb 含量较低($Y \leq 18 \times 10^{-6}$, $Yb \leq 19 \times 10^{-6}$), Sr 含量较高(一般大于 400×10^{-6}), 轻稀土元素富集, Eu 异常不明显。本次研究结果表明, 志留纪明舒井侵入体中二长花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩与埃达克岩化学成分

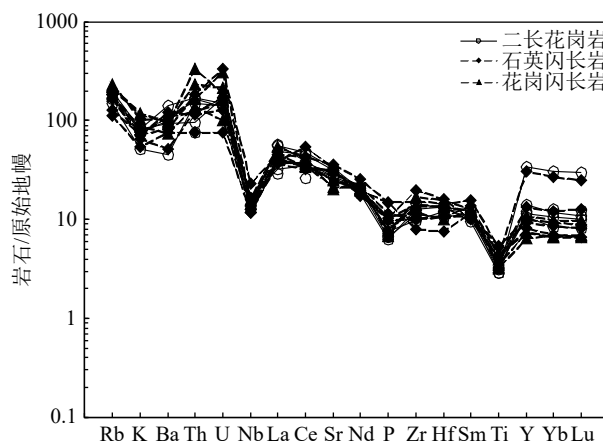


图 7 样品原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Marc et al., 1990)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element diagrams of the samples

十分相似。

近年来的研究认为,埃达克岩不仅可以由俯冲的洋壳在榴辉岩相条件下熔融形成(Kay et al., 1999),而且可能来自于下地壳熔融而不是与俯冲板片相关,这可能是下地壳熔融出现在玄武质岩浆底侵下地壳时形成埃达克岩,也有可能是在大陆地壳很厚的区域,下地壳变成榴辉岩,在拆离并下沉到地幔过程中,下地壳下部或拆沉的下地壳上部与热的地幔接触,造成下地壳熔融和埃达克岩的形成(Atherton et al., 1993; Simon M et al., 1994; Paterno R et al., 1999; Robert et al., 1999; Kay et al., 1999; Kay et al., 2002; 张旗等, 2002; Marc et al., 2002)。通过明舒井埃达克质侵入体中二长花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩岩石地球化学研究对比认为,明舒井志留纪埃达克质侵入体属于俯冲洋壳的镁铁质部分熔融形成的依据如下:①样品 SiO_2 含量多数大于 56%, Al_2O_3 全部大于 15%, MgO 多数小于 3%, 全部小于 6%, Y 和 Yb 含量均较低,同时轻稀土元素富集, Eu 异常不明显, Sr 含量较高,与俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩化学成分相似(Marc et al., 2002);②增厚下地壳镁铁质熔融形成的埃达克岩往往具有高钾、富碱、低铝特征(Kay et al., 1999),这与本文样品的地球化学特征不一致;③样品亏损 Nb 和重稀土元素, Eu 异常不明显, Sr 含量较高,表明其源区中斜长石已经消失,石榴子石是重要的残留相,可能与源岩在榴辉岩相条件下的部分熔融有关(Robert et al., 1999);④在埃达克岩与玄武岩实验熔体的 SiO_2 - MgO 图解(图 8)中,二长花岗岩和花岗闪长岩样品

点全部落入洋壳板片熔融形成的埃达克岩区域。

Rapp et al. (1999)通过实验证明,板片熔融形成的原始埃达克岩浆在穿过地幔楔的过程中,由于受到橄榄岩的强烈混染作用, MgO 含量或 $\text{Mg}^\#$ 及过渡元素迅速升高,但 SiO_2 含量降低。本次研究样品具有较高的 MgO 含量和过渡元素(Ni、Co、Sc、V 等),说明明舒井埃达克质熔体在穿过地幔楔过程中受到了地幔橄榄岩的强烈混染作用。

5.3 构造意义

Pearce et al. (1984)将花岗岩按照侵入位置分为洋脊花岗岩、火山弧花岗岩、同碰撞花岗岩和板内花岗岩 4 类。在 SiO_2 -Yb 图解(图 9-a)中,样品点落入洋脊花岗岩、火山弧花岗岩、同碰撞花岗岩区域;在 SiO_2 -Rb 图解(图 9-b)中,样品点表现出火山弧花岗

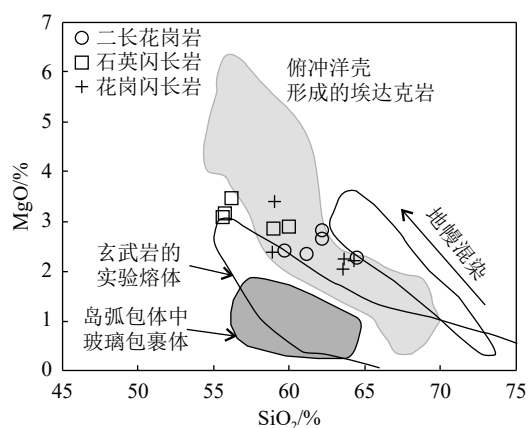


图 8 埃达克岩与玄武岩实验熔体 SiO_2 - MgO 图解(底图据 Atherton et al., 1993)

Fig. 8 SiO_2 - MgO statistical illustration of experimental melts of adakite and basalt

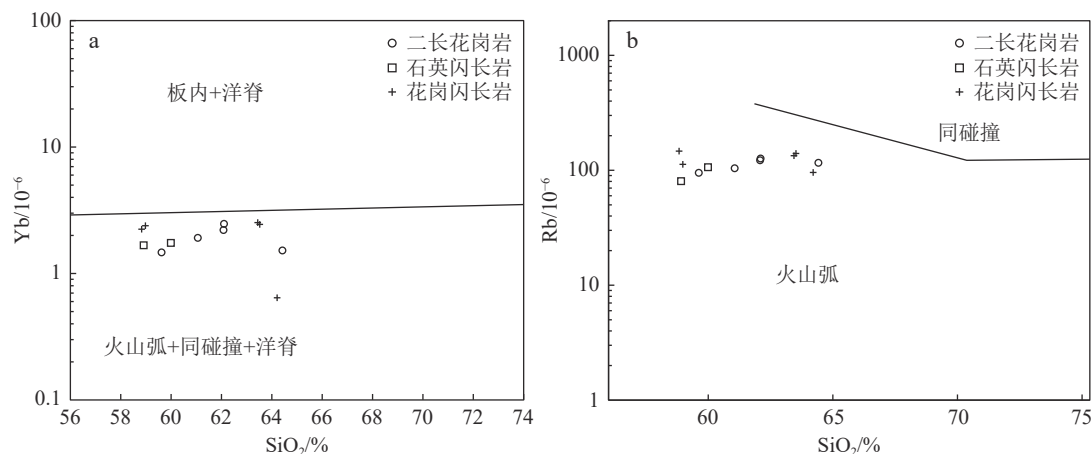


图 9 明舒井埃达克质侵入岩构造环境判别图(底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 9 Discrimination diagrams of tectonic environment for the Mingshujing adakitic pluton

岩特征。由于样品具有低 SiO_2 、富 Al_2O_3 特征,且出露面积较大,与洋脊花岗岩特征明显不同(Pearce et al., 1984),岩石具有钙碱性系列特征,表现为火山弧花岗岩特征。综上认为,北山南部明舒井志留纪埃达克质侵入岩形成于活动大陆边缘火山弧环境。

北山地区位于西伯利亚板块、塔里木板块和哈萨克斯坦板块三大板块结合部位,大地构造位置十分特殊,研究区位于北山造山带南部陆缘活动带上,区域上属于早古生代花牛山岛弧带的组成部分,位于红柳河-玉石山-牛圈子蛇绿构造混杂岩带南侧。从区域构造背景看,北山造山带南部地区广泛出露 431~427 Ma 的花岗岩类,前人认为该阶段处于塔里木板块和哈萨克斯坦板块之间的古大洋俯冲阶段(Mao et al., 2012; 王疆涛等, 2016; 赵海波等, 2019)。赵泽辉等(2007)报道花牛山岛弧带上辉铜山东钾长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 436 ± 9 Ma,但认为北山地区古生代早期的构造环境目前仍存在较多争议。例如,毛启贵等(2010)在北山柳园地区发现志留纪埃达克质片麻状花岗闪长岩,认为其为热的洋壳向花牛山岛弧地体俯冲过程中熔融形成的,这与本次研究的明舒井埃达克质侵入岩表现一致。明舒井埃达克质侵入体特征说明,北山地区志留纪古亚洲洋存在俯冲作用,而且发生了大规模的地壳增生,俯冲板片在榴辉岩相条件下部分熔融,形成原始埃达克质岩浆,熔体在穿过地幔楔过程中受到地幔橄榄岩的强烈混染作用,形成明舒井志留纪埃达克质侵入体。

区域上代表早古生代洋壳残余的奥陶纪—志留纪残片分布在岩体北侧,结合区域上发育的奥陶纪—石炭纪岩浆活动的时空分布也呈现自北向南的演化趋势,认为该区岩岩浆前锋带的演化具有向南逐渐迁移的特点。因此,明舒井埃达克质侵入岩可能是北山地区志留纪古亚洲洋向北消减俯冲下岩浆作用的产物,同时发生了大规模的地壳增生。

6 结 论

(1)甘肃北山南部明舒井埃达克质侵入体侵位时间为 437~423 Ma,北山南部地区在晚奥陶世—中志留世存在一次广泛的花岗质岩浆活动,早期以花岗闪长岩为主,晚期以二长花岗岩和正长花岗岩为主。

(2)明舒井埃达克质侵入体中二长花岗岩、石英闪长岩和花岗闪长岩 SiO_2 多数大于 56%, Al_2O_3 全

部大于 15%, MgO 多数小于 3%, 全部小于 6%, Y 和 Yb 含量均较低,同时轻稀土元素富集, Eu 异常不明显, Sr 含量较高,与埃达克岩化学成分相似。

(3)明舒井埃达克质侵入体是由俯冲板片在榴辉岩相条件下部分熔融形成原始埃达克质岩浆,然后熔体在穿过地幔楔过程中受到地幔橄榄岩的强烈混染作用而成。

(4)明舒井志留纪埃达克质侵入体形成于活动大陆边缘火山弧环境,可能是北山地区志留纪古亚洲洋向北消减俯冲下岩浆作用的产物,同时发生了大规模的地壳增生。

致谢:感谢陕西地矿研究院有限公司郭雪峰、刘松柏、许小飞高级工程师和青海大学任二峰教授及中国地质调查局西安地质调查中心靳梦琪博士、李艳广高级工程师等在野外和测试工作中的帮助,感谢审稿专家在论文评审过程中给予的宝贵意见。

参考文献

- Atherton M, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362: 144-146.
- Kay R W, Ramos V A, Marquez M. 1999. Evidence in Cerro-Pampa volcanic-rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South-America[J]. *Journal of Geology*, 101: 703-714.
- Kay R W, Suzanne M K. 2002. Andean Adakites: Three Ways To Make Them[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 303-311.
- Lei R X, Wu C Z, Gu L X, et al. 2011. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope of the Xingxingxia granodiorite from the Central Tianshan zone (NW China): Implications for the tectonic evolution of the southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 20(2/3): 582-593.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley: 1-39.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Mao Q G, Xiao W J, Fang T H, et al. 2012. Late Ordovician to Early Devonian adakites and Nb-enriched basalts in the Liuyuan area, Beishan, NW China: Implications for early Paleozoic slab-melting and crustal growth in the Southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 534-553.
- Marc J D, Xu J F, Pavel K, et al. 2002. Adakites: Some variations on a theme[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129-142.
- Marc D, Mark S D. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662-665.
- Middlemost E A K. 1985. Magmas and magmatic rocks[M]. London: Longman: 1-266.
- Paterno R, Castillo, Philip E, et al. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of

- adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33–51.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58(1): 63–81.
- Robert P R, Bruce W, Calvin F. 1999. Miller. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites[J]. *Precambrian Research*, 51(1/4): 1–25.
- Safonova I, Seltmann E, Kröner A, et al. 2011. A new concept of continental construction in the Central Asian Orogenic Belt: (Compared to actualistic examples from the Western Pacific)[J]. *Episodes*, 34(3): 186–196.
- Simon M P, Tracy R, Alan B T. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1): 227–244.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. 42(1): 315–345.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. 2010. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage[J]. *American Journal of Science*, 310(10): 1553–1594.
- Xiao W J, Safonova I. 2013. International Field Trip and Workshop“ Beishan Orogen in NW China: accretionary tectonics, magmatism, eclogite and granulite complexes” [J]. *Episodes*, 36(4): 295–297.
- 安国堡. 2007. 甘肃北山拾金坡花岗岩特征及其与金成矿的关系[J]. *甘肃地质*, 16(3): 19–25.
- 白荣龙, 虎金荣, 赵甫峰, 等. 2022. 北山造山带红柳河槽—跃进山地区石炭纪花岗岩成因及构造岩浆演化研究[J]. *岩石学报*, 38(3): 713–742.
- 曹福根, 王敦科, 董富荣, 等. 2012. 新疆 1: 25 万雅满苏镇幅 (K46C003003 幅) 区域地质调查报告[R]. 甘肃省地质调查院.
- 范洪海, 闵茂中, 陈佳, 等. 2005. 甘肃北山野马泉岩体同位素地球化学特征[J]. *地球学报*, 26(z1): 78–83.
- 甘肃省地矿局区测二队. 1973. 1: 20 万方山口幅区域地质测量报告[R].
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. *西北地质*, 38(3): 6–14.
- 黄博涛, 王国强, 卜涛, 等. 2021. 甘肃北山野马大泉志留纪花岗岩的成因和构造意义[J]. *地球科学*, 46(11): 3993–4005.
- 李伍平, 王涛, 李金宝, 等. 2001. 东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩类岩石锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 22(3): 231–235.
- 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 2011. 甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组和墩墩山群 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 测年及其意义[J]. *地质通报*, 30(10): 1501–1507.
- 李向民, 张战武, 王国强, 等. 2016. 北山成矿带地质矿产图[M]. 西安: 西安地图出版社.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. 2023. LA–ICP–MS U–Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 56(4): 274–282.
- 刘明强. 2007. 甘肃北山造山带红石山地区埃达克质花岗岩类的发现及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(3): 232–238.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP–MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*, 6: 552–558.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 2010. 北山柳园地区中志留世埃达克质花岗岩类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(2): 584–596.
- 牛亚卓, 卢进才, 魏建设, 等. 2014. 甘蒙北山地区下石炭统绿条山组时代修正及其构造意义[J]. *地质论评*, 60(3): 567–574.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2016. 甘蒙北山志留纪公婆泉群火山岩的地球化学及其对岩石成因和构造环境的制约[J]. *地质学报*, 90(10): 2603–2619.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2015. 甘肃北山墩墩山一带泥盆系三个井组与墩墩山群火山岩地球化学特征及形成环境[J]. *地质论评*, 61(z1): 730–732.
- 王红杰, 郭峰, 冯乃琦, 等. 2021. 甘肃北山新元古代侵入岩的厘定及其对北山盆地演化格局的制约[J]. *中国地质调查*, 8(5): 84–94.
- 王疆涛, 董云鹏, 曾忠诚, 等. 2016. 北山造山带南部黄草滩岩体年代学、地球化学及地质意义[J]. *现代地质*, 30(5): 937–949.
- 王磊, 杨建国, 王小红, 等. 2015. 甘肃北山营毛沱地区花岗岩类 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 583–591.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U–Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 16: 1589–1604.
- 辛后田, 牛文超, 田健, 等. 2020. 内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化[J]. *地质通报*, 39(9): 1297–1316.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮. 2008. 中国西北部地质概论——秦岭祁连山地区[M]. 北京: 科学出版社: 1–347.
- 许伟, 徐学义, 卢进才, 等. 2019. 北山野马井地区泥盆纪富钾酸性岩浆岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 44(8): 2775–2793.
- 闫涛, 辛后田, 卫彦升, 等. 2020. 对内蒙古北山造山带洋陆转换认识的新思考——来自大红山南泥盆纪弧花岗岩的证据[J]. *地质通报*, 39(9): 1341–1366.
- 杨合群, 理应, 李文明, 等. 2008. 北山成矿构造背景概论[J]. *西北地质*, 41(1): 22–27.
- 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. *地质通报*, 21(7): 431–4350.
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 等. 2011. 甘肃北山音凹峡南花岗岩体的锆石 LA–ICP–MS 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 27(6): 1649–1661.
- 张文, 吴泰然, 贺元凯, 等. 2010. 甘肃北山西涧泉子富碱高钾花岗岩体的锆石 LA–ICP–MS 定年及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 719–731.
- 赵海波, 王红杰, 程龙, 等. 2019. 甘肃北山 1: 5 万北山幅等 3 幅区域地质调查报告[R]. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所.
- 赵泽辉, 郭召杰, 王毅. 2007. 甘肃北山柳园地区花岗岩类的年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 23(8): 1847–1860.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. *甘肃地质学报*, 2(1): 1–15.