

甘肃北山明舒井岩体形成年龄、地球化学特征及其地质意义*

李小菲^{1,2} 张成立^{1**} 李雷^{1,2} 包志安¹ 张帮禄^{1,3} 魏强¹

LI XiaoFei^{1,2}, ZHANG ChengLi^{1**}, LI Lei^{1,2}, BAO ZhiAn¹, ZHANG BangLu^{1,3} and WEI Qiang¹

1. 大陆动力学国家重点实验室 西北大学地质系 西安 710069

2. 西北有色地质研究院 西安 710054

3. 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Northwest Geological Institute of Nonferrous Metals, Xi'an 710054, China

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2014-01-01 收稿, 2015-05-14 改回.

Li XF, Zhang CL, Li L, Bao ZA, Zhang BL and Wei Q. 2015. Formation age, geochemical characteristics of the Mingshujing pluton in Beishan area of Gansu Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2521 – 2538

Abstract Mingshujing pluton in Beishan area is a multiple intrusion composed of the gabbro, diorite and granite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields the ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of 442.9 ± 1.2Ma for gabbro, 437.0 ± 2.3Ma for diorite and 435.9 ± 2.2Ma for granite, respectively, being interpreted as their formation ages. The gabbro is calc-alkaline and enriched in CaO, FeO^T and MgO, as well as the LREE and LILE, poor HFSE with a positive Pb and negative Nb, Ta, Ti, Zr and P anomalies. They have moderate (⁸⁶Sr/⁸⁷Sr)_i (0.705892), high radioactive Pb and low ε_{Nd}(t) (0.1). Their ε_{Hf}(t) values range from -7.1 to +8.3. Both of the diorite and granite are the metaluminous calc-alkaline, and relatively enriched in Na₂O, low CaO, FeO^T and MgO. They also show an enrichment of LREE and LILE as well as poor HFSE with evident negative Nb, Ta, Sr, P and Ti and positive Pb anomalies. They have moderate to high (⁸⁶Sr/⁸⁷Sr)_i (0.705951 ~ 0.706196), low ε_{Nd}(t) (-0.2 ~ -0.1), and positive ε_{Hf}(t) (-1.1 ~ +12.0), displaying a geochemical affinity of magmatic rocks formed in subduction zone. In addition, their variable Hf and much similar Sr-Nd-Pb isotopic compositions suggest that they were resulted from the mixing between crust- and mantle-derived magmas. In which, the crustal magma was formed by the partial melting of Neoproterozoic crust materials, whereas the mantle-derived magma was derived from a mantle modified by the continental crust and the fluids dehydrated from subducted oceanic crust. Subsequently, Mingshujing pluton was a complex intrusions composed of gabbros and granitoids evolved from crustal magma mixed by mantle-derived magmas by the fractional crystallization, representing an important tectono-magmatism related to oceanic slab subduction from the Upper Ordovician to the Late Middle-Silurian in the southern area of Beishan Mountain.

Key words Zircon U-Pb age; Petrochemistry; Sr-Nd-Pb-Hf isotopic composition; Subduction setting; Beishan Mountain

摘要 北山明舒井岩体为一由辉长岩、闪长岩和花岗岩构成的岩浆杂岩体。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分别获得辉长岩 442.9 ± 1.2Ma、闪长岩 437.0 ± 2.3Ma、花岗岩 435.9 ± 2.2Ma 的形成年龄。其中 辉长岩为富钙、高铁和镁的钙碱性岩 相对富集 LREE 和 LILE、贫化 HFSE、亏损 Nb、Ta、Ti、Zr 和 P、Pb 正异常、具中等偏高的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.705892)、高放射性成因 Pb、低 ε_{Nd}(t) (0.1)、锆石 ε_{Hf}(t) 变化大 (-7.1 ~ +8.3)。闪长岩和花岗岩富钠、低钙、铁和镁, 为准铝质钙碱性岩; 它们富集 LREE 和 LILE、亏损 HFSE、Nb、Ta 及 Sr、P、Ti 明显负异常; 也显示中等偏高的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.705951 ~ 0.706196) 和高放射性成因 Pb、

* 本文受中国地质调查局项目(1212011220649、12120113042200)资助。

第一作者简介: 李小菲, 女, 1986 年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: mamawo.good@163.com

** 通讯作者: 张成立, 男, 1956 年生, 博士生导师, 从事岩石大地构造研究, E-mail: clzhang@nwu.edu.cn

低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-0.2 \sim -0.1$) ,但锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 明显偏正 ($-1.1 \sim +12.0$) 。不同岩类的地球化学特征及其相对一致的 Sr-Nd-Pb 同位素及明显不同的锆石 Hf 同位素 指示它们形成于板块消减带构造环境 ,为源自受流体交代和陆壳物质改造的幔源岩浆与新生代陆壳物质部分熔融的岩浆混合和分离结晶演化的产物 ,代表北山南部早古生代晚奥陶世-早志留世晚期与大洋俯冲消减作用有关的构造岩浆事件。

关键词 锆石 U-Pb 年龄; 岩石地球化学; Sr-Nd-Pb-Hf 同位素; 俯冲消减环境; 北山

中图法分类号 P588.12; P597.3

中亚造山带是全球范围内一条重要的显生宙增生造山带(Jahn *et al.*, 2004a; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009, 2010, 2013; Xiao and Santosh, 2014) ,突出特点是发育大量与新生陆壳密切相关的花岗岩类(Jahn *et al.*, 2000a, b, 2004b; Hong *et al.*, 2004) 。作为该巨型造山带重要组成部分的北山构造带,处于西伯利亚板块、塔里木板块和华北板块交汇部位,并发育大量古生代不同期次的花岗岩类侵入体。前人已对这些花岗岩开展了一定的年代学和成因研究,继在北部地区确定一批晚古生代花岗岩后(李伍平等, 2001; 范洪海等, 2005; 刘明强, 2007; 王立社等, 2009; 董英等, 2010; 张文等, 2010, 2011; 刘雪敏等, 2010; Lei *et al.*, 2011; 郑荣国等, 2012) ,又陆续在北山南部的柳园地区识别出一些早-中古生代花岗岩体,并对这些花岗岩的地质与岩石地球化学特征及其成因开展了详细研究,取得了重要成果(安国堡, 2007; 赵泽辉等, 2007; 毛启贵等, 2010; 李舫等, 2009, 2011; 吕新彪等, 2012; Liu *et al.*, 2011; Mao *et al.*, 2012) 。然而,这些研究少有与这些花岗岩体同期产出的基性侵入体的对比和综合研究。本文选择北山西南部柳园地区辉铜山以西的明舒井岩体,分别对其中的辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩和花岗岩开展详细的岩相学、岩石地球化学及锆石 U-Pb 定年和 Hf 以及全岩 Sr-Nd-Pb 同位素示踪研究,探讨它们的形成时代、源区特征、成因机制和形成构造环境,进而为北山造山带早古生代构造演化过程提供证据。

1 区域地质概况

北山构造带呈一楔状位于蒙古、甘肃和新疆交界地区,其西以星星峡断裂与东天山构造带分割,东以阿尔金断裂与阿拉善地块相接,南由疏勒河断裂所围限,大地构造位置隶属哈萨克斯坦地块(图 1) 。该构造带由南向北依次发育石板井-小黄山、白云山-月牙山-洗肠井、红柳园-牛圈子和辉铜山-帐房山-大奇山等四个蛇绿岩带,均由一些镁铁质-超镁铁质岩和细粒碎屑岩构成(左国朝等, 2003) 。其中,以北部红石山-黑鹰山蛇绿岩带和南部辉铜山-大奇山蛇绿岩带为界,将北山构造带分割为北部西伯利亚板块、中部哈萨克斯坦板块以及南部的塔里木板块(张新虎等, 2005) 。北山西南部的柳园地区位于红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带和柳园-帐房山-大奇山蛇绿岩带之间,区内广泛出露奥陶-志留系和石炭-二叠系地层,局部零星发育前寒武系中-深变质火山沉积岩,它们一同被后期大量花岗岩基或岩株和一些小基性岩脉

侵入(图 1) 。其中,柳园镇西南部的明舒井岩体是该区较大和有代表性的一个由辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩以及花岗岩构成的岩浆杂岩体(图 1) 。

2 岩体地质与岩石学特征

明舒井岩体出露于柳园镇西南辉铜山以西,面积约 450 km² ,东西向呈一透镜状侵入于元古代基底岩系中,北部被晚古生代花岗岩体侵入,西部多被第四系覆盖(图 1) 。岩体主要由闪长岩构成,局部出露小辉长岩体,与闪长岩多呈过渡接触关系,并在闪长岩与辉长岩接触处常有直径由十余厘米到数十米不等的辉长闪长岩透镜体产出,同时辉长闪长岩内或其边缘发育长石斑晶,相应的岩石色率有所降低,成分演变为闪长质(图 2a) 。此外,该岩体中部和东部还有一些花岗岩体侵入。其中,岩体东部的黑云母花岗岩被确定为埃达克岩(毛启贵等, 2010) 而归为侵入其中的一个小花岗岩体(图 1) 。

明舒井闪长岩和花岗岩具弱的片麻状构造,以半自形粒状结构为主。其中,闪长岩为石英闪长岩,由斜长石($An = 30$, 45%)、石英(15%~20%)、角闪石(25%)、黑云母(5%)及钾长石(5%)构成,副矿物有锆石、榍石和磁铁矿等,部分长石发生少量钠黝帘石和绢云母化(图 2b) 。花岗岩具中粒似斑状结构,主要矿物为:石英(25%~30%)、钾长石(40%)、斜长石(25%)和黑云母(5%) ,副矿物有榍石、锆石、磁铁矿等,其中长石矿物发生高岭土化和绢云母化(图 2c) 。辉长岩及辉长闪长岩定向构造较弱,均呈块状构造,其中辉长岩以辉长结构为主,部分具辉长辉绿结构,主要矿物成分为基性斜长石($An = 50$, 55%) ,聚片双晶发育,少数发生帘石化,暗色矿物有角闪石(28%~32%)、黑云母(5%~8%)及辉石(5%~10%) ,辉石部分被角闪石包绕,或已转变为角闪石呈辉石假象产出(图 2d) ,副矿物有锆石、磷灰石和磁铁矿等(图 2d) 。辉长闪长岩具半自形粒状结构(图 2e) ,主要矿物成分为斜长石($An = 45$, 60%) ,聚片双晶发育,暗色矿物有角闪石(20%~25%)、黑云母(5%~10%)及辉石(3%~5%) ,副矿物有锆石、磷灰石和磁铁矿等,其中磷灰石多呈针状,显示岩浆淬冷条件的结构特征(图 2f) 。

3 测试方法

锆石单矿物分离由河北省廊坊市区地质实验室完成。

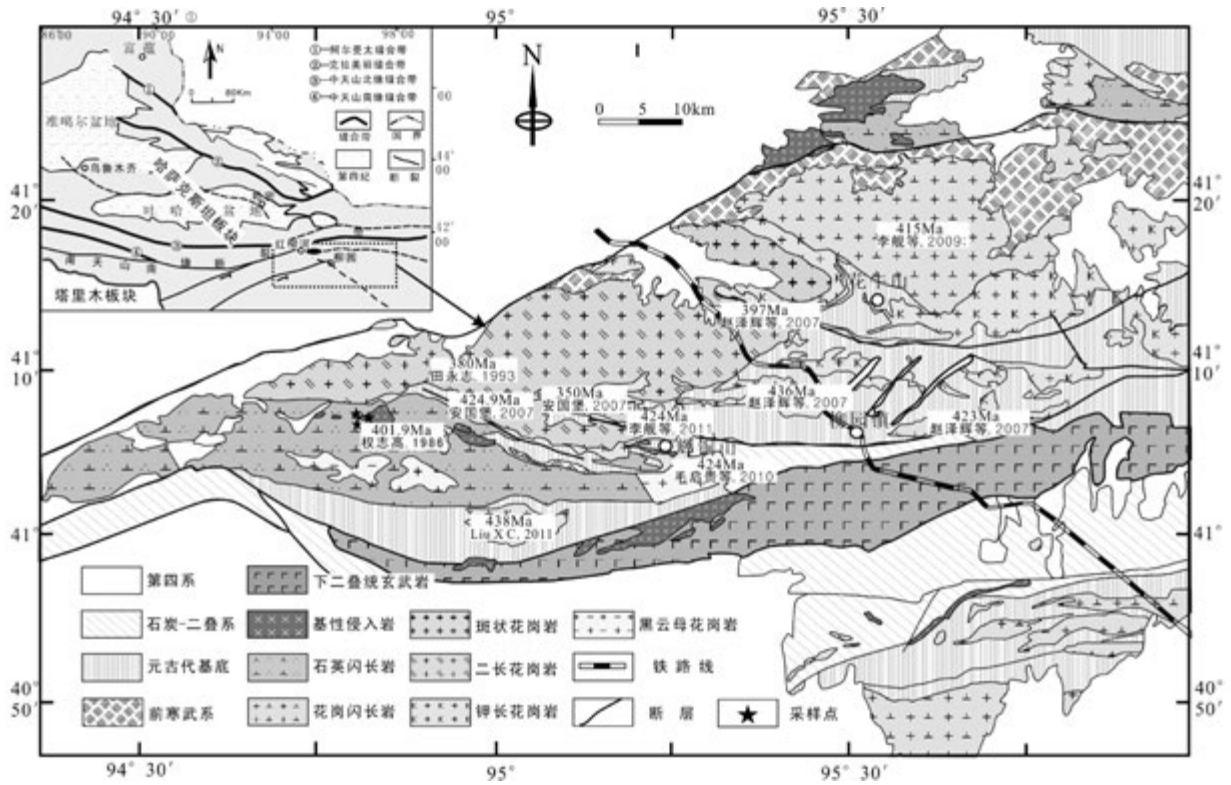


图1 北山柳园地区地质简图(据王洪亮等, 2007; 李舫等, 2011 修编)

Fig.1 Geological map of Liuyuan area in Beishan (modified after Wang *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2011)

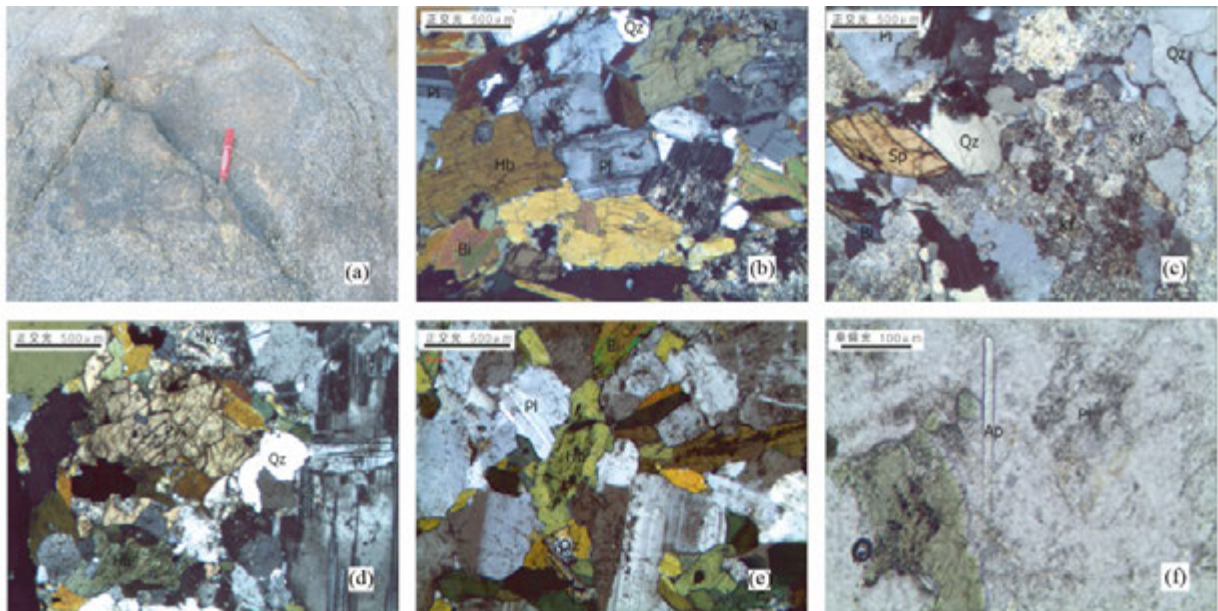


图2 明舒井岩体野外 (a) 及显微照片 (b-f)

(a) 辉长闪长岩野外照片; (b) 闪长岩; (c) 花岗岩; (d) 辉长岩; (e、f) 辉长闪长岩

Fig.2 Field photograph (a) and photomicrographs (b-f) of variety rocks from the Mingshujing pluton

锆石样品的制靶、阴极发光 (CL) 分析、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素测定均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石阴极发光图像分析,在该实验室美国

FEI 公司生产的场发射扫描电镜附属的英国 Gatan 公司的 Mono CL3 + 系统上进行。锆石定年在配有 193nm 激光器的 Agilen 7500a ICP-MS 上,用 91500 标准锆石外部校正法进行

锆石原位 U-Pb 年龄测定。测试过程以 NIST610 硅玻璃标准优化仪器,所用激光频率为 10Hz,强度为 80mJ,激光束斑直径为 30 μ m,具体详细分析方法见 Yuan *et al.* (2004) 的描述。用²⁹Si 作中间校准,NIST610 做参考物计算获得²⁹Si、²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 以及 U、Th 和 Pb 的含量。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 和²⁰⁸Pb/²³²Th 比值用 GLITTER 4.0 程序计算,并用锆石 91500 进行校正。此后,采用 ISOPLOT 3.0(Ludwig, 2003) 获得锆石 U-Pb 年龄及其协和图。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在同一实验室通过 Nu Plasma HR(Wrexham, UK) 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS) 测试完成,所用的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,其由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102Excimer 激光器(工作物质 ArF,波长 193nm) 和该公司光学系统组成。激光剥蚀以 He 为剥蚀物质的载气,所用激光斑束直径为 44 μ m,频率为 10Hz,激光能量 90mJ,每个分析点的气体背景采集时间为 30s,信号采集时间为 40s。锆石 Lu-Hf 同位素测试时,用¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0.02669 和¹⁷⁶Yb/¹⁷²Yb = 0.5886(Chu *et al.*, 2002) 进行同量异位干扰校正计算,以锆石 91500、MON-1 和 GJ-1 作外标测定样品的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算时,采用的¹⁷⁶Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001), 现今球粒陨石和亏损地幔的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 分别为 0.0332、0.282772 和 0.0384、0.28325(Blichert and Albarède, 1997), Hf 亏损地幔二阶段模式年龄(t_{DM2}) 的计算,分别用上地壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0093 和 $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$ (Vervoort and Blichert-Toft, 1999) 获得。

全岩岩石样品的主量元素、微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素分析采用碱熔玻璃片法在日本理学 RIX2100X 荧光光谱仪进行,以 BCR-2 和 GBW07105 为标样进行质量监控,分析误差优于 5%。微量元素分析采用 Teflon 高压溶样后,用 ICP-MS(Agilent7500a) 测定,以 AGV-1、BCR-2、G2 和 RGM-1 国际标样监控,Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Hf、Ta 和 REE(除 Hf 和 Lu) 等元素分析误差低于 5%,其它元素相对误差在 5%~15% 之间。Sr-Nd-Pb 同位素同位素分离在该实验室同位素超净实验室完成,其中 Rb-Sr 同位素化学分离用 AG50W-8(200~400mesh) 阳离子交换树脂进行元素分离,Sm-Nd 用 HDEHP 树脂进行 Sm 和 Nd 的元素分离,用 AG1-8(200~400mesh) 阴离子交换树脂方法进行 Pb 同位素分离。所有同位素组成均在同一实验室经英国 Nu Instruments 公司 Nu Plasma 多接收等离子体质谱仪(MC-ICPMS) 采用静态模式(Static mode) 接收方式分析测试。Sr 测试中,仪器用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 按照指数法则进行内部校正,质量监控样品采用 NBS987,全流程过程本底 < 20pg。Nd 测试分析用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 按照指数法则进行内部校正,质量监控样品用 JNdi-01,全流程过程本底 < 20pg。Pb 测试分析用

NBS 997 Tl 溶液进行内部校正,用²⁰⁵Tl/²⁰³Tl = 2.3872 校正仪器的质量分馏,用 NBS 981 进行外部校正。质量监控样品用 NBS 981,全流程过程本底 < 50pg。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

对明舒井花岗岩、闪长岩、辉长岩及发育于闪长岩中透镜状辉长闪长岩进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测定,结果见表 1。花岗岩中的锆石具较好柱形晶,发育密集振荡生长环带(图 3a),Th/U = 0.3~1.2,为典型岩浆成因锆石。27 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化于 430~439Ma 之间,其加权平均年龄为 $436 \pm 2 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.14),代表该花岗岩体的结晶年龄(图 4a)。与花岗岩锆石相比,闪长岩和辉长岩的锆石为较粗的柱状晶,发育面状、宽缓不规则带状环带(图 3b, c),它们的 Th/U 分别为 0.1~1.1 和 0.4~1.0,这种较宽和不规则的结构是较高温条件下锆石结晶的结果(吴元保和郑永飞,2004)。闪长岩锆石 30 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 $437 \pm 2 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.04);辉长岩 21 个点获得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 $443 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.09),分别代表二岩体的形成年龄(图 4b, c)。然而,在辉长闪长岩中出现了两类锆石,一类锆石结构与辉长岩中锆石结构十分类似,为环带结构不明显的锆石(图 3d),其 15 个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 $449 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.97),略高于但接近辉长岩结晶年龄的记录(图 4d),显然代表了基性岩浆锆石冷凝结晶的年龄,是幔源基性岩浆上侵活动的记录。另一类锆石具有类似于花岗岩中密集生长环带结构(图 3),其 7 粒锆石测得的²⁰⁶Pb/²³⁸U 变化于 446~419Ma 之间,加权平均年龄为 $426 \pm 7 \text{ Ma}$ (MSWD = 12)(图 4d),不但接近于该岩体花岗岩和闪长岩的结晶年龄,而且与岩体东部黑云母花岗岩形成年龄($424 \pm 4 \text{ Ma}$) 在误差范围一致(毛启贵等,2010),这表明,此类锆石可能是基性与中酸性岩浆发生有限混合过程中,由中酸性岩浆冷凝结晶出的锆石混入的结果,反映的仍是中酸性岩浆冷凝结晶的年龄。

4.2 锆石 Lu-Hf 同位素组成

对已测定的 4 件锆石靶中所测年龄点之上(较大粒度者)或附近(较小粒度者)(图 3)进行了 Lu-Hf 同位素测试分析,结果列于表 2。测试结果表明,大多数锆石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf < 0.002,¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf < 0.03,因此¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 可以代表其形成时的初始值。花岗岩中锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282476~0.282753,根据该样品所获岩体形成年龄(436Ma) 计算所得 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 以正值为主,变化于 -1.1~+8.6 之间,相应的二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2}) 为 788~1282Ma。闪长岩锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282631~0.282859,按其形成年龄(437Ma) 计算的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 也为正值(4.5~12), $t_{\text{DM2}} = 611~999 \text{ Ma}$ 。辉长岩 21 粒锆石测点的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282312~0.282732,依其形

表1 明舒井岩体锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 Zircon U-Pb data of the Mingshujing pluton

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)				
	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$
明舒井花岗岩														
XJ11-143-01	385	589	0.7	0.0582	0.0018	0.5610	0.0144	0.0699	0.0009	538	33	452	9	435
XJ11-143-02	445	760	0.6	0.0592	0.0016	0.5675	0.0122	0.0695	0.0009	575	25	456	8	433
XJ11-143-03	689	974	0.7	0.0563	0.0039	0.5346	0.0362	0.0689	0.0011	462	158	435	24	430
XJ11-143-04	274	380	0.7	0.0563	0.0016	0.5471	0.0122	0.0704	0.0009	465	27	443	8	439
XJ11-143-05	415	628	0.7	0.0590	0.0017	0.5698	0.0133	0.0700	0.0009	567	29	458	9	436
XJ11-143-06	312	428	0.7	0.0575	0.0017	0.5555	0.0130	0.0701	0.0009	510	29	449	9	437
XJ11-143-07	241	317	0.8	0.0588	0.0021	0.5683	0.0177	0.0701	0.0010	561	43	457	11	437
XJ11-143-08	151	219	0.7	0.0543	0.0024	0.5254	0.0213	0.0701	0.0011	384	63	429	14	437
XJ11-143-09	467	694	0.7	0.0560	0.0015	0.5439	0.0113	0.0705	0.0009	450	24	441	7	439
XJ11-143-10	338	505	0.7	0.0589	0.0016	0.5708	0.0126	0.0702	0.0009	564	26	458	8	438
XJ11-143-11	239	309	0.8	0.0583	0.0019	0.5649	0.0156	0.0702	0.0010	542	36	455	10	437
XJ11-143-12	307	455	0.7	0.0573	0.0018	0.5521	0.0141	0.0699	0.0009	502	33	446	9	436
XJ11-143-13	493	555	0.9	0.0598	0.0022	0.5729	0.0180	0.0695	0.0010	596	43	460	12	433
XJ11-143-14	228	301	0.8	0.0575	0.0018	0.5550	0.0149	0.0700	0.0010	510	35	448	10	436
XJ11-143-15	866	728	1.2	0.0577	0.0016	0.5566	0.0117	0.0700	0.0009	516	25	449	8	436
XJ11-143-16	604	1948	0.3	0.0576	0.0017	0.5584	0.0136	0.0703	0.0009	515	31	450	9	438
XJ11-143-17	198	280	0.7	0.0582	0.0025	0.5621	0.0218	0.0700	0.0011	538	57	453	14	436
XJ11-143-18	484	670	0.7	0.0548	0.0036	0.5244	0.0335	0.0694	0.0010	406	151	428	22	432
XJ11-143-19	284	317	0.9	0.0563	0.0018	0.5448	0.0147	0.0701	0.0010	466	36	442	10	437
XJ11-143-20	415	677	0.6	0.0578	0.0015	0.5598	0.0116	0.0703	0.0009	521	24	451	8	438
XJ11-143-21	124	187	0.7	0.0601	0.0028	0.5821	0.0249	0.0702	0.0012	608	64	466	16	437
XJ11-143-22	182	301	0.6	0.0556	0.0018	0.5363	0.0153	0.0700	0.0010	434	39	436	10	436
XJ11-143-23	485	426	1.1	0.0573	0.0017	0.5538	0.0137	0.0700	0.0009	504	31	447	9	436
XJ11-143-24	326	361	0.9	0.0567	0.0017	0.5457	0.0132	0.0697	0.0009	481	31	442	9	434
XJ11-143-25	997	1766	0.6	0.0607	0.0016	0.5827	0.0115	0.0696	0.0009	627	22	466	7	434
XJ11-143-26	422	583	0.7	0.0565	0.0016	0.5469	0.0122	0.0701	0.0009	473	27	443	8	437
XJ11-143-27	650	830	0.8	0.0615	0.0015	0.5920	0.0106	0.0698	0.0009	657	19	472	7	435
明舒井闪长岩														
XJ11-140-01	45	92	0.5	0.0562	0.0034	0.5488	0.0312	0.0708	0.0013	461	92	444	20	441
XJ11-140-02	191	226	0.8	0.0520	0.0026	0.4950	0.0234	0.0690	0.0012	285	78	408	16	430
XJ11-140-03	139	270	0.5	0.0541	0.0019	0.5000	0.0153	0.0671	0.0009	374	44	412	10	418
XJ11-140-04	197	235	0.8	0.0553	0.0022	0.5303	0.0187	0.0695	0.0010	426	52	432	12	433
XJ11-140-05	125	203	0.6	0.0524	0.0024	0.5118	0.0215	0.0708	0.0011	303	67	420	14	441
XJ11-140-06	678	651	1.0	0.0545	0.0023	0.5141	0.0200	0.0684	0.0011	393	60	421	13	426
XJ11-140-07	189	260	0.7	0.0524	0.0019	0.5132	0.0165	0.0710	0.0010	305	47	421	11	442
XJ11-140-08	61	107	0.6	0.0541	0.0032	0.5303	0.0296	0.0711	0.0013	376	92	432	20	443
XJ11-140-09	404	402	1.0	0.0551	0.0022	0.5347	0.0192	0.0704	0.0011	417	53	435	13	438
XJ11-140-10	484	538	0.9	0.0547	0.0016	0.5340	0.0133	0.0709	0.0010	399	32	434	9	441
XJ11-140-11	134	252	0.5	0.0519	0.0022	0.4842	0.0192	0.0677	0.0010	280	62	401	13	422
XJ11-140-12	182	257	0.7	0.0546	0.0020	0.5335	0.0172	0.0709	0.0010	394	47	434	11	442
XJ11-140-13	352	425	0.8	0.0541	0.0016	0.5278	0.0127	0.0708	0.0010	375	31	430	8	441
XJ11-140-14	92	191	0.5	0.0539	0.0027	0.5255	0.0245	0.0707	0.0012	368	75	429	16	440
XJ11-140-15	78	156	0.5	0.0588	0.0032	0.5690	0.0290	0.0702	0.0013	559	79	457	19	437
XJ11-140-16	38	192	0.2	0.0554	0.0031	0.5366	0.0286	0.0702	0.0013	430	86	436	19	438
XJ11-140-17	141	285	0.5	0.0533	0.0022	0.5190	0.0197	0.0706	0.0011	343	58	424	13	440
XJ11-140-18	418	406	1.0	0.0545	0.0016	0.5327	0.0126	0.0709	0.0010	393	30	434	8	441
XJ11-140-19	104	176	0.6	0.0551	0.0020	0.5299	0.0171	0.0698	0.0010	415	46	432	11	435
XJ11-140-20	48	475	0.1	0.0564	0.0023	0.5440	0.0199	0.0700	0.0011	467	54	441	13	436
XJ11-140-21	110	186	0.6	0.0560	0.0025	0.5494	0.0224	0.0712	0.0011	451	62	445	15	443
XJ11-140-22	930	858	1.1	0.0559	0.0018	0.5339	0.0151	0.0693	0.0010	448	38	434	10	432
XJ11-140-23	603	540	1.1	0.0548	0.0016	0.5336	0.0132	0.0707	0.0010	402	31	434	9	440

续表 1

Continued Table 1

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)				
	Th	U		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$
XJ11-140-24	118	150	0.8	0.0560	0.0025	0.5497	0.0223	0.0712	0.0011	452	61	445	15	443
XJ11-140-25	604	601	1.0	0.0566	0.0016	0.5527	0.0129	0.0708	0.0010	475	28	447	8	441
XJ11-140-26	693	675	1.0	0.0558	0.0015	0.5398	0.0119	0.0702	0.0010	443	26	438	8	437
XJ11-140-27	50	87	0.6	0.0497	0.0064	0.4776	0.0610	0.0697	0.0014	181	275	396	42	434
XJ11-140-28	90	185	0.5	0.0522	0.0030	0.5126	0.0279	0.0712	0.0013	292	91	420	19	444
XJ11-140-29	79	148	0.5	0.0594	0.0030	0.5803	0.0268	0.0708	0.0012	582	70	465	17	441
XJ11-140-30	160	185	0.9	0.0602	0.0030	0.5891	0.0275	0.0709	0.0012	611	71	470	18	442
明舒井辉长岩														
XJ11-139-01	188	250	0.8	0.0563	0.0012	0.5499	0.0106	0.0709	0.0005	465	44	445	7	441
XJ11-139-02	155	227	0.7	0.0562	0.0010	0.5484	0.0095	0.0708	0.0004	461	41	444	6	441
XJ11-139-03	153	256	0.6	0.0577	0.0010	0.5634	0.0099	0.0709	0.0005	520	44	454	6	442
XJ11-139-04	255	326	0.8	0.0567	0.0010	0.5596	0.0097	0.0714	0.0004	480	37	451	6	445
XJ11-139-05	120	253	0.5	0.0569	0.0011	0.5592	0.0099	0.0715	0.0005	487	36	451	6	445
XJ11-139-06	259	331	0.8	0.0560	0.0012	0.5506	0.0125	0.0715	0.0009	454	46	445	8	445
XJ11-139-07	169	238	0.7	0.0560	0.0010	0.5510	0.0100	0.0716	0.0007	454	41	446	7	446
XJ11-139-08	95	223	0.4	0.0561	0.0010	0.5431	0.0098	0.0704	0.0005	454	41	440	6	438
XJ11-139-09	115	244	0.5	0.0565	0.0010	0.5572	0.0097	0.0717	0.0006	472	44	450	6	446
XJ11-139-10	185	322	0.6	0.0578	0.0009	0.5872	0.0093	0.0717	0.0004	524	33	494	6	488
XJ11-139-11	144	192	0.8	0.0560	0.0012	0.5424	0.0112	0.0704	0.0004	454	46	440	7	438
XJ11-139-12	189	285	0.7	0.0562	0.0009	0.5506	0.0081	0.0713	0.0005	461	32	445	5	444
XJ11-139-13	244	415	0.6	0.0546	0.0008	0.5318	0.0071	0.0708	0.0004	394	31	433	5	441
XJ11-139-14	213	283	0.8	0.0552	0.0009	0.5393	0.0097	0.0706	0.0005	433	35	438	6	440
XJ11-139-15	354	625	0.6	0.0541	0.0006	0.5320	0.0059	0.0711	0.0003	376	24	433	4	443
XJ11-139-16	844	819	1.0	0.0556	0.0007	0.5384	0.0057	0.0703	0.0005	439	28	437	4	438
XJ11-139-17	243	452	0.5	0.0564	0.0008	0.5579	0.0078	0.0717	0.0004	478	31	450	5	446
XJ11-139-18	44	106	0.4	0.0564	0.0014	0.5543	0.0129	0.0718	0.0007	478	56	448	8	447
XJ11-139-19	360	394	0.9	0.0568	0.0009	0.5600	0.0093	0.0714	0.0005	487	32	452	6	444
XJ11-139-20	179	258	0.7	0.0560	0.0010	0.5558	0.0096	0.0719	0.0004	454	44	449	6	448
XJ11-139-21	246	324	0.8	0.0588	0.0010	0.5782	0.0097	0.0715	0.0005	567	37	463	6	445
明舒井辉长闪长岩														
XJ11-150-01	33	214	0.2	0.0558	0.0012	0.5528	0.0113	0.0716	0.0004	456	51	447	7	446
XJ11-150-02	234	414	0.6	0.0543	0.0008	0.4981	0.0073	0.0664	0.0004	389	33	410	5	414
XJ11-150-03	16594	5396	3.1	0.0566	0.0006	0.5688	0.0059	0.0727	0.0004	476	22	457	4	453
XJ11-150-04	310	641	0.5	0.0562	0.0013	0.5538	0.0134	0.0713	0.0005	461	58	448	9	444
XJ11-150-05	525	852	0.6	0.0554	0.0007	0.5197	0.0066	0.0679	0.0003	428	30	425	4	423
XJ11-150-06	2967	2035	1.5	0.0562	0.0008	0.5367	0.0071	0.0690	0.0004	461	34	436	5	430
XJ11-150-07	226	603	0.4	0.0557	0.0008	0.5517	0.0090	0.0717	0.0006	439	33	446	6	446
XJ11-150-08	9908	3765	2.6	0.0560	0.0006	0.5643	0.0062	0.0728	0.0005	454	22	454	4	453
XJ11-150-09	2504	2125	1.2	0.0578	0.0006	0.5742	0.0058	0.0720	0.0005	520	22	461	4	448
XJ11-150-10	129	324	0.4	0.0561	0.0009	0.5594	0.0086	0.0723	0.0005	457	40	451	6	450
XJ11-150-11	162	403	0.4	0.0560	0.0008	0.5311	0.0073	0.0686	0.0003	454	31	433	5	428
XJ11-150-12	171	458	0.4	0.0559	0.0007	0.5577	0.0073	0.0722	0.0004	456	28	450	5	450
XJ11-150-13	1531	948	1.6	0.0601	0.0007	0.5513	0.0067	0.0725	0.0003	606	21	478	4	451
XJ11-150-14	248	641	0.4	0.0560	0.0006	0.5525	0.0062	0.0716	0.0006	454	22	447	4	445
XJ11-150-15	2439	1173	2.1	0.0582	0.0005	0.5826	0.0061	0.0722	0.0003	600	25	485	4	473
XJ11-150-16	392	637	0.6	0.0565	0.0007	0.5622	0.0082	0.0719	0.0004	472	30	453	5	448
XJ11-150-17	190	406	0.5	0.0565	0.0009	0.5604	0.0089	0.0720	0.0005	472	35	452	6	448
XJ11-150-18	209	487	0.4	0.0556	0.0009	0.5384	0.0093	0.0701	0.0004	435	37	437	6	437
XJ11-150-19	847	881	1.0	0.0548	0.0008	0.5454	0.0079	0.0721	0.0004	467	33	442	5	449
XJ11-150-20	636	1044	0.6	0.0563	0.0008	0.5220	0.0074	0.0672	0.0003	465	31	427	5	419
XJ11-150-21	270	523	0.5	0.0560	0.0009	0.5367	0.0084	0.0694	0.0004	454	35	436	6	433
XJ11-150-22	448	677	0.7	0.0547	0.0007	0.5457	0.0081	0.0721	0.0005	467	30	442	5	449

表2 明舒井岩体锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Mingshujing pluton

测点号	Age(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	2σ	t _{DM1} (Ma)	f _{Lu/Hf}	t _{DM2} (Ma)
明舒井花岗岩											
XJ11-143-01	435	0.028701	0.001157	0.282482	0.000020	-10.3	-1.0	0.7	1093	-0.97	1276
XJ11-143-03	430	0.021816	0.000876	0.282653	0.000010	-4.2	5.0	0.4	846	-0.97	965
XJ11-143-04	439	0.016104	0.000643	0.282656	0.000010	-4.1	5.4	0.3	835	-0.98	952
XJ11-143-05	436	0.008310	0.000393	0.282636	0.000011	-4.8	4.7	0.4	858	-0.99	987
XJ11-143-06	437	0.026856	0.001055	0.282720	0.000014	-1.8	7.5	0.5	754	-0.97	844
XJ11-143-08	437	0.014619	0.000588	0.282640	0.000008	-4.7	4.8	0.3	857	-0.98	982
XJ11-143-09	439	0.017964	0.000743	0.282669	0.000013	-3.7	5.8	0.5	820	-0.98	932
XJ11-143-10	438	0.019310	0.000766	0.282632	0.000015	-5.0	4.5	0.5	873	-0.98	999
XJ11-143-11	437	0.026792	0.001065	0.282675	0.000013	-3.4	5.9	0.5	818	-0.97	926
XJ11-143-12	436	0.016435	0.000665	0.282695	0.000011	-2.7	6.7	0.4	781	-0.98	883
XJ11-143-13	433	0.019553	0.000765	0.282684	0.000010	-3.1	6.2	0.3	799	-0.98	906
XJ11-143-14	436	0.019812	0.000771	0.282665	0.000010	-3.8	5.6	0.4	825	-0.98	939
XJ11-143-15	436	0.029602	0.001125	0.282735	0.000013	-1.3	8.0	0.5	735	-0.97	819
XJ11-143-16	438	0.032565	0.001383	0.282734	0.000010	-1.3	7.9	0.4	741	-0.96	823
XJ11-143-17	436	0.023941	0.000935	0.282701	0.000009	-2.5	6.8	0.3	779	-0.97	877
XJ11-143-18	432	0.025371	0.001012	0.282678	0.000008	-3.3	5.9	0.3	813	-0.97	921
XJ11-143-19	437	0.021522	0.000840	0.282650	0.000011	-4.3	5.1	0.4	849	-0.97	968
XJ11-143-20	438	0.018852	0.000761	0.282648	0.000009	-4.4	5.0	0.3	850	-0.98	970
XJ11-143-21	437	0.028076	0.001205	0.282739	0.000010	-1.2	8.1	0.4	731	-0.96	812
XJ11-143-22	436	0.016909	0.000682	0.282682	0.000015	-3.2	6.2	0.5	801	-0.98	908
XJ11-143-23	436	0.022315	0.000863	0.282476	0.000111	-10.5	-1.1	3.9	1093	-0.97	1282
XJ11-143-24	434	0.018359	0.000753	0.282666	0.000009	-3.8	5.6	0.3	824	-0.98	939
XJ11-143-25	434	0.025226	0.001050	0.282692	0.000012	-2.8	6.4	0.4	793	-0.97	895
XJ11-143-26	437	0.035045	0.001344	0.282753	0.000009	-0.7	8.6	0.3	713	-0.96	788
XJ11-143-27	435	0.036488	0.001423	0.282744	0.000011	-1.0	8.2	0.4	727	-0.96	806
明舒井闪长岩											
XJ11-140-01	441	0.005260	0.000244	0.282670	0.000009	-3.6	6.0	0.3	807	-0.99	921
XJ11-140-02	430	0.018303	0.000809	0.282719	0.000011	-1.9	7.4	0.4	751	-0.98	844
XJ11-140-04	433	0.010480	0.000470	0.282638	0.000015	-4.7	4.7	0.5	856	-0.99	984
XJ11-140-05	441	0.014540	0.000668	0.282631	0.000007	-5.0	4.5	0.3	871	-0.98	997
XJ11-140-07	442	0.023907	0.001050	0.282684	0.000009	-3.1	6.3	0.3	806	-0.97	908
XJ11-140-08	443	0.007828	0.000361	0.282657	0.000012	-4.1	5.6	0.4	828	-0.99	945
XJ11-140-09	438	0.056836	0.002344	0.282859	0.000008	3.1	12.0	0.3	578	-0.93	611
XJ11-140-10	441	0.038100	0.001635	0.282755	0.000014	-0.6	8.6	0.5	716	-0.95	788
XJ11-140-12	442	0.031657	0.001382	0.282712	0.000010	-2.1	7.2	0.4	772	-0.96	861
XJ11-140-13	441	0.033623	0.001416	0.282744	0.000010	-1.0	8.3	0.4	727	-0.96	805
XJ11-140-14	440	0.021029	0.000914	0.282657	0.000010	-4.1	5.4	0.4	840	-0.97	955
XJ11-140-15	437	0.009067	0.000424	0.282643	0.000013	-4.6	4.9	0.5	849	-0.99	974
XJ11-140-16	438	0.002954	0.000147	0.282640	0.000011	-4.7	4.9	0.4	847	-1.00	975
XJ11-140-17	440	0.016985	0.000750	0.282641	0.000009	-4.6	4.8	0.3	859	-0.98	981
XJ11-140-18	441	0.031989	0.001362	0.282717	0.000015	-1.9	7.4	0.5	765	-0.96	853
XJ11-140-19	435	0.007159	0.000352	0.282633	0.000010	-4.9	4.6	0.4	861	-0.99	991
XJ11-140-21	443	0.019159	0.000852	0.282673	0.000008	-3.5	6.0	0.3	816	-0.97	923
XJ11-140-22	432	0.048907	0.002073	0.282801	0.000011	1.0	10.0	0.4	657	-0.94	713
XJ11-140-23	440	0.014587	0.000679	0.282644	0.000016	-4.5	5.0	0.6	853	-0.98	975
XJ11-140-24	443	0.013189	0.000561	0.282686	0.000014	-3.0	6.6	0.5	792	-0.98	896

续表 2

Continued Table 2

测点号	Age(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$
XJ11-140-25	441	0.041231	0.001778	0.282836	0.000012	2.3	11.5	0.4	601	-0.95	642
XJ11-140-26	437	0.033252	0.001451	0.282754	0.000010	-0.6	8.6	0.4	714	-0.96	788
XJ11-140-28	444	0.015425	0.000702	0.282646	0.000013	-4.4	5.1	0.5	850	-0.98	970
XJ11-140-29	441	0.015034	0.000693	0.282697	0.000012	-2.6	6.9	0.4	779	-0.98	879
明舒井辉长岩											
XJ11-139-01	441	0.016588	0.000741	0.282526	0.000016	-8.7	0.8	0.6	1021	-0.98	1760
XJ11-139-02	441	0.019384	0.000874	0.282530	0.000009	-8.6	-0.2	0.3	1063	-0.97	1852
XJ11-139-03	442	0.021790	0.000941	0.282510	0.000011	-9.3	5.1	0.4	861	-0.97	1375
XJ11-139-04	445	0.019004	0.000852	0.282498	0.000012	-9.7	2.6	0.4	952	-0.97	1601
XJ11-139-05	445	0.035712	0.001546	0.282654	0.000016	-4.2	-1.0	0.6	1096	-0.95	1923
XJ11-139-05	446	0.018436	0.000806	0.282474	0.000011	-10.5	3.4	0.4	923	-0.98	1084
XJ11-139-06	445	0.015891	0.000709	0.282575	0.000011	-7.0	8.3	0.4	722	-0.98	1529
XJ11-139-07	446	0.019479	0.000869	0.282598	0.000015	-6.1	1.0	0.5	1019	-0.97	2098
XJ11-139-08	438	0.004631	0.000205	0.282732	0.000016	-1.4	-3.0	0.6	1169	-0.99	1746
XJ11-139-09	446	0.018310	0.000762	0.282699	0.000018	-2.6	7.0	0.6	780	-0.98	1759
XJ11-139-10	488	0.017758	0.000830	0.282422	0.000010	-12.4	1.2	0.4	1049	-0.98	2189
XJ11-139-11	438	0.031389	0.001379	0.282397	0.000015	-13.3	-4.0	0.5	1221	-0.96	1551
XJ11-139-12	444	0.018911	0.000831	0.282591	0.000012	-6.4	3.1	0.4	932	-0.97	1713
XJ11-139-13	441	0.022968	0.000949	0.282543	0.000028	-8.1	1.3	1.0	1003	-0.97	2474
XJ11-139-14	440	0.047656	0.002011	0.282312	0.000015	-16.3	-7.2	0.5	1365	-0.94	1829
XJ11-139-15	443	0.018943	0.000870	0.282505	0.000017	-9.4	0.0	0.6	1054	-0.97	1712
XJ11-139-16	438	0.013558	0.000607	0.282541	0.000011	-8.2	1.3	0.4	996	-0.98	1205
XJ11-139-17	446	0.017649	0.000781	0.282417	0.000018	-12.6	-3.0	0.6	1175	-0.98	1459
XJ11-139-18	447	0.012361	0.000571	0.282617	0.000011	-5.5	4.2	0.4	890	-0.98	2009
XJ11-139-19	444	0.019839	0.000891	0.282448	0.000013	-11.5	-2.0	0.4	1135	-0.97	1513
XJ11-139-20	448	0.007755	0.000352	0.282598	0.000013	-6.2	3.6	0.5	911	-0.99	1326
XJ11-139-21	445	0.011568	0.000533	0.282659	0.000018	-4.0	5.7	0.7	830	-0.98	2105
明舒井辉长闪长岩											
XJ11-150-01	446	0.003525	0.000190	0.282537	0.000015	-8.3	1.4	0.5	991	-0.99	1705
XJ11-150-02	414	0.009857	0.000401	0.282569	0.000015	-7.2	1.8	0.5	953	-0.99	1652
XJ11-150-03	453	0.008994	0.000404	0.282278	0.000010	-17.5	-7.7	0.3	1113	-0.99	1979
XJ11-150-04	444	0.009575	0.000446	0.282454	0.000017	-11.3	-1.6	0.6	948	-0.99	1608
XJ11-150-05	423	0.024405	0.001076	0.282584	0.000015	-6.6	2.4	0.5	1242	-0.97	2235
XJ11-150-06	430	0.043773	0.001599	0.282388	0.000014	-13.6	-4.6	0.5	1159	-0.95	2065
XJ11-150-07	446	0.016983	0.000815	0.282429	0.000011	-12.1	-2.6	0.4	1617	-0.98	2939
XJ11-150-08	453	0.087019	0.003062	0.282168	0.000015	-21.4	-12.3	0.5	1434	-0.91	2637
XJ11-150-09	448	0.044472	0.001675	0.282254	0.000015	-18.3	-9.0	0.5	1095	-0.95	1926
XJ11-150-10	450	0.012681	0.000516	0.282469	0.000013	-10.7	-1.0	0.4	991	-0.98	1720
XJ11-150-11	428	0.008994	0.000404	0.282541	0.000009	-8.2	1.6	0.3	1049	-0.99	1813
XJ11-150-12	450	0.016219	0.000728	0.282506	0.000010	-9.4	0.2	0.3	1537	-0.98	2957
XJ11-150-13	451	0.003525	0.000190	0.282139	0.000011	-22.4	-12.6	0.4	835	-0.99	1341
XJ11-150-14	445	0.009857	0.000401	0.282653	0.000013	-4.2	5.5	0.5	1718	-0.99	3327
XJ11-150-15	473	0.009575	0.000446	0.282015	0.000018	-26.8	-17.1	0.6	1046	-0.99	1796
XJ11-150-16	448	0.024405	0.001076	0.282515	0.000025	-9.1	0.4	0.9	1012	-0.97	1702
XJ11-150-17	448	0.043773	0.001599	0.282549	0.000015	-7.9	1.5	0.5	1053	-0.95	1836
XJ11-150-18	437	0.016983	0.000815	0.282504	0.000014	-9.5	0.1	0.5	1074	-0.98	1784
XJ11-150-19	449	0.087019	0.003062	0.282535	0.000018	-8.4	0.6	0.6	1540	-0.91	2890
XJ11-150-20	419	0.016219	0.000728	0.282506	0.000009	-9.4	0.2	0.3	799	-0.98	1250
XJ11-150-21	433	0.044472	0.001675	0.282180	0.000013	-20.9	-11.6	0.4	1354	-0.95	2522
XJ11-150-22	449	0.012681	0.000516	0.282681	0.000014	-3.2	6.5	0.5	1048	-0.98	1851

表3 明舒井岩体主量(wt%)及微量($\times 10^{-6}$)元素结果Table 3 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) element data of the Mingshujing pluton

样品号	XJ11-137	XJ11-146	XJ11-138	XJ11-142	XJ11-149	XJ11-150	XJ11-144	XJ11-139	XJ11-141	XJ11-152
岩性	花岗岩	闪长岩				辉长闪长岩		辉长岩		
SiO ₂	70.06	62.06	59.07	58.25	57.42	56.01	56.54	47.50	49.71	47.82
TiO ₂	0.33	0.74	0.68	0.98	0.98	0.96	1.03	1.38	1.43	1.27
Al ₂ O ₃	14.80	17.03	18.40	17.50	17.01	15.72	17.43	19.02	17.71	18.62
FeO ^T	2.55	5.71	5.74	6.90	7.00	8.24	7.67	10.8	9.80	10.02
MnO	0.03	0.08	0.08	0.11	0.09	0.12	0.12	0.14	0.14	0.13
MgO	0.99	2.21	2.46	2.63	3.77	4.74	3.22	5.22	6.07	5.80
CaO	2.12	5.29	5.13	5.52	6.32	7.32	6.27	9.08	7.26	9.09
Na ₂ O	3.25	4.04	4.07	3.65	3.91	3.43	3.53	3.33	3.67	3.40
K ₂ O	4.78	1.74	2.94	2.87	1.53	1.36	2.19	1.40	2.39	1.59
P ₂ O ₅	0.10	0.24	0.23	0.34	0.28	0.52	0.33	0.38	0.43	0.35
LOI	1.04	0.72	1.12	1.31	1.57	1.55	1.81	1.74	1.33	1.34
Total	100.09	99.87	99.95	100.11	99.85	99.94	100.07	99.97	99.92	99.37
σ	2.38	1.75	3.06	2.79	2.05	1.76	2.42	4.94	5.49	5.22
Mg [#]	47.1	47.0	49.6	46.7	55.3	56.9	49.0	52.7	58.7	57.0
ANK	1.41	2.00	1.86	1.92	2.10	2.21	2.12	2.72	2.05	2.54
ANCK	1.03	0.94	1.86	0.91	0.87	0.77	0.89	0.81	0.81	0.78
V	37.9	95.2	94.6	125	154	164	162	236	210	247
Cr	10.6	21.1	29.1	9.9	52.1	64.0	10.8	51.7	136	94.1
Co	90.2	65.6	58.8	60.5	56.1	57.7	52.2	46.1	46.6	50.7
Ni	5.91	11.8	13.9	10.4	32.8	35.1	14.9	38.4	86.5	54.4
Cu	3.34	31.1	24.8	20.6	25.6	6.3	28.9	67.2	32.4	79.2
Zn	30.5	61.5	65.5	77.6	86.5	88.5	84.6	97.1	125.6	89.3
Ga	15.1	20.7	20.8	20.3	23.4	21.8	20.6	23.7	26.4	23.8
Rb	98.4	67.2	86.4	102	48.6	36.5	71.3	42.3	94.9	47.4
Sr	457	693	780	614	735	652	641	837	669	819
Y	14.1	17.2	15.8	21.9	15.7	17.4	20.7	24.7	22.5	24.1
Zr	141	239	240	157	212	263	132	122	166	111
Nb	9.66	10.31	9.57	12.9	11.4	6.8	11.7	9.94	16.3	9.05
Cs	0.95	2.27	2.20	3.44	1.15	0.76	2.26	1.44	3.46	2.82
Ba	1200	573	1418	802	517	357	786	591	693	524
La	37.7	75.4	24.0	34.3	36.6	15.6	31.9	24.5	29.8	19.1
Ce	65.2	120	49.4	67.8	72.6	37.7	63.5	57.7	69.9	49.9
Pr	6.88	12.0	5.97	8.34	8.35	5.46	7.72	7.84	9.11	6.83
Nd	22.9	38.5	22.7	32.2	31.9	24.7	29.9	32.5	37.4	29.6
Sm	3.88	5.57	4.30	6.20	5.66	5.53	5.80	6.61	7.35	6.24
Eu	0.88	1.34	1.20	1.60	1.43	1.36	1.53	1.83	1.62	1.69
Gd	3.21	4.43	3.65	5.29	4.40	4.69	4.99	5.80	5.97	5.51
Tb	0.44	0.59	0.50	0.73	0.57	0.65	0.69	0.81	0.80	0.77
Dy	2.48	3.21	2.85	4.10	3.08	3.50	3.90	4.63	4.30	4.43
Ho	0.48	0.60	0.56	0.78	0.55	0.64	0.73	0.89	0.78	0.84
Er	1.37	1.69	1.59	2.18	1.44	1.69	2.02	2.46	2.08	2.28
Tm	0.21	0.24	0.23	0.31	0.20	0.23	0.28	0.34	0.29	0.32
Yb	1.38	1.50	1.51	1.97	1.24	1.41	1.78	2.10	1.76	2.01
Lu	0.20	0.23	0.23	0.30	0.18	0.22	0.27	0.31	0.25	0.28
Hf	4.09	5.91	6.12	4.33	5.18	6.66	3.53	3.24	4.22	2.86
Ta	1.32	0.91	0.71	0.88	0.60	0.32	0.77	0.47	0.76	0.42
Pb	21.8	10.4	13.7	15.2	11.4	9.70	15.9	8.57	11.0	8.10
Th	23.1	21.2	6.54	11.7	8.56	2.83	9.72	0.97	6.20	0.88
U	2.64	2.04	2.00	2.90	2.11	1.32	1.87	0.45	2.30	0.52
Σ REE	147	119	148	103	166	155	265	168	171	130
(La/Yb) _N	18.4	10.7	7.88	7.45	11.7	12.1	33.8	19.9	11.4	6.41
(La/Sm) _N	6.11	3.52	2.33	1.77	3.48	3.46	8.51	4.06	2.55	1.93
(Gd/Lu) _N	1.96	1.97	2.30	2.71	2.18	2.27	2.45	3.06	2.94	2.43
δ Eu	0.74	0.90	0.89	0.79	0.83	0.85	0.80	0.84	0.73	0.86

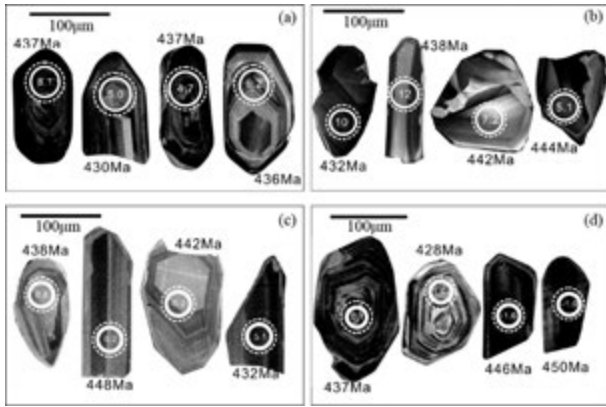


图3 明舒井岩体不同岩石锆石 CL 图像
(a) 花岗岩; (b) 闪长岩; (c) 辉长岩; (d) 辉长闪长岩. 图中小圈为锆石 U-Pb 年龄测定, 大圈为锆石 Hf 同位素测点, 圈中数值为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig.3 Cathodoluminescence images of zircons from variety rocks in the Mingshujing pluton

Small circle represent the spots for the zircon U-Pb ages, large circles the spots for the Hf isotope and numbers for the values of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

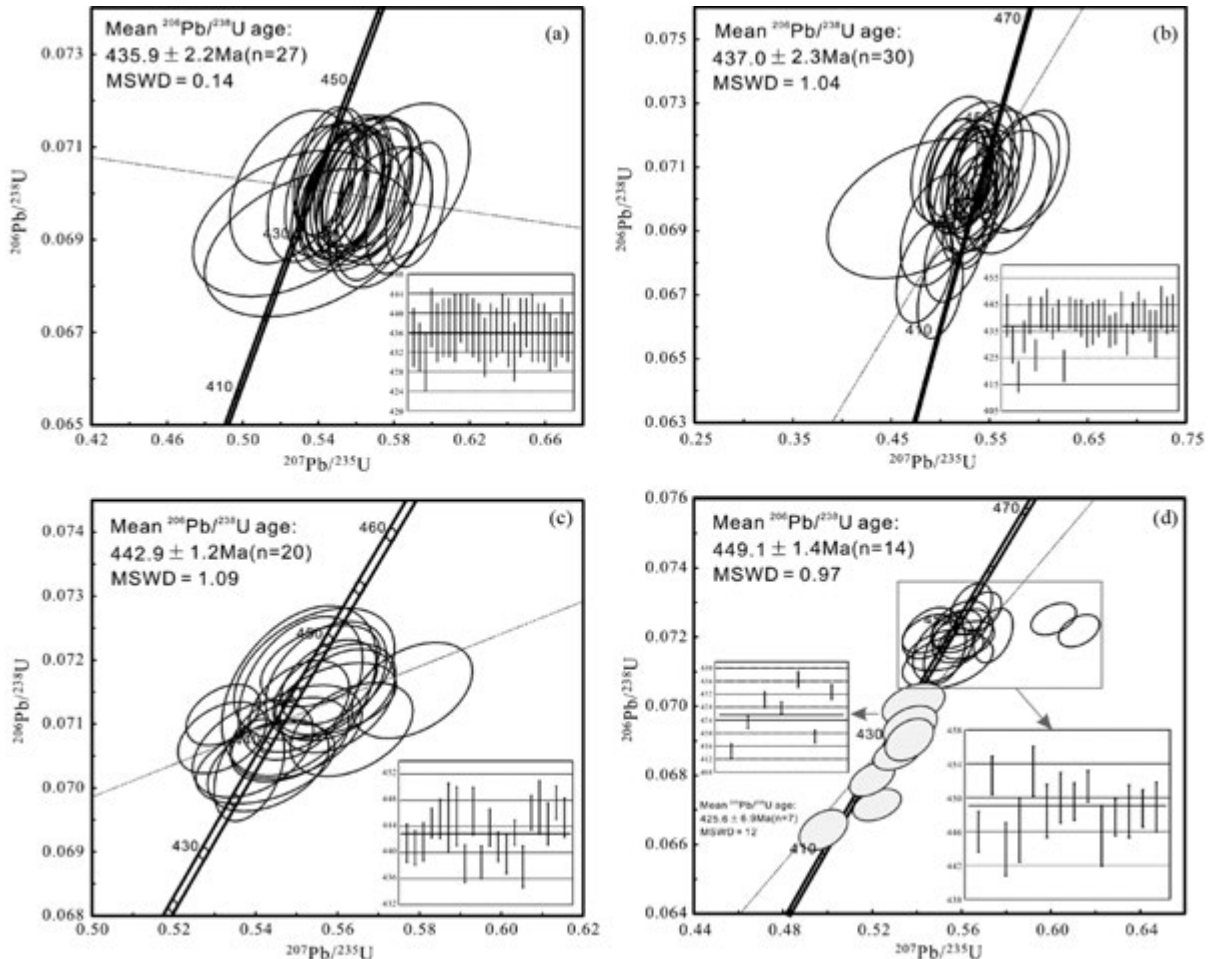


图4 明舒井岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams for the Mingshujing pluton

成年龄计算所得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 既有正值也存在负值, 变化于 $-7.1 \sim +8.3$ 。同样的, 辉长闪长岩的 Lu-Hf 同位素组成也出现很大的变化范围, 22 粒锆石测得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 $0.282015 \sim 0.282681$ 之间, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-12.6 \sim +6.5$ 之间。

4.3 元素地球化学

明舒井岩体不同岩石类型 10 件样品的主量和微量元素分析结果列于表 3 在 TAS 分类图解中, 它们分布在辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩和花岗岩的变化范围内(图 5), 与岩相学观察结果一致, 显示了较宽的岩石成分和多样的岩石类型。其中, 该岩体主体的闪长岩的硅含量变化大 ($\text{SiO}_2 = 57.42\% \sim 62.06\%$), 高 Al_2O_3 ($17.49\% \sim 18.40\%$)、富钠 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.27 \sim 2.56$), $\text{Mg}^\# = 46.7 \sim 55.3$, $A/\text{CNK} = 0.87 \sim 0.96$, $\sigma = 1.75 \sim 3.06$, 为准铝质钙碱性岩类。花岗岩高 SiO_2 (70.06%)、 Al_2O_3 (14.80%), 富钾 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.68$), 低 CaO (2.12%)、 MgO ($\text{Mg}^\# = 47.1$) 和 FeO^T (2.55%), $A/\text{CNK} = 1.03$, $\sigma = 2.38$, 为弱过铝质高钾钙碱性

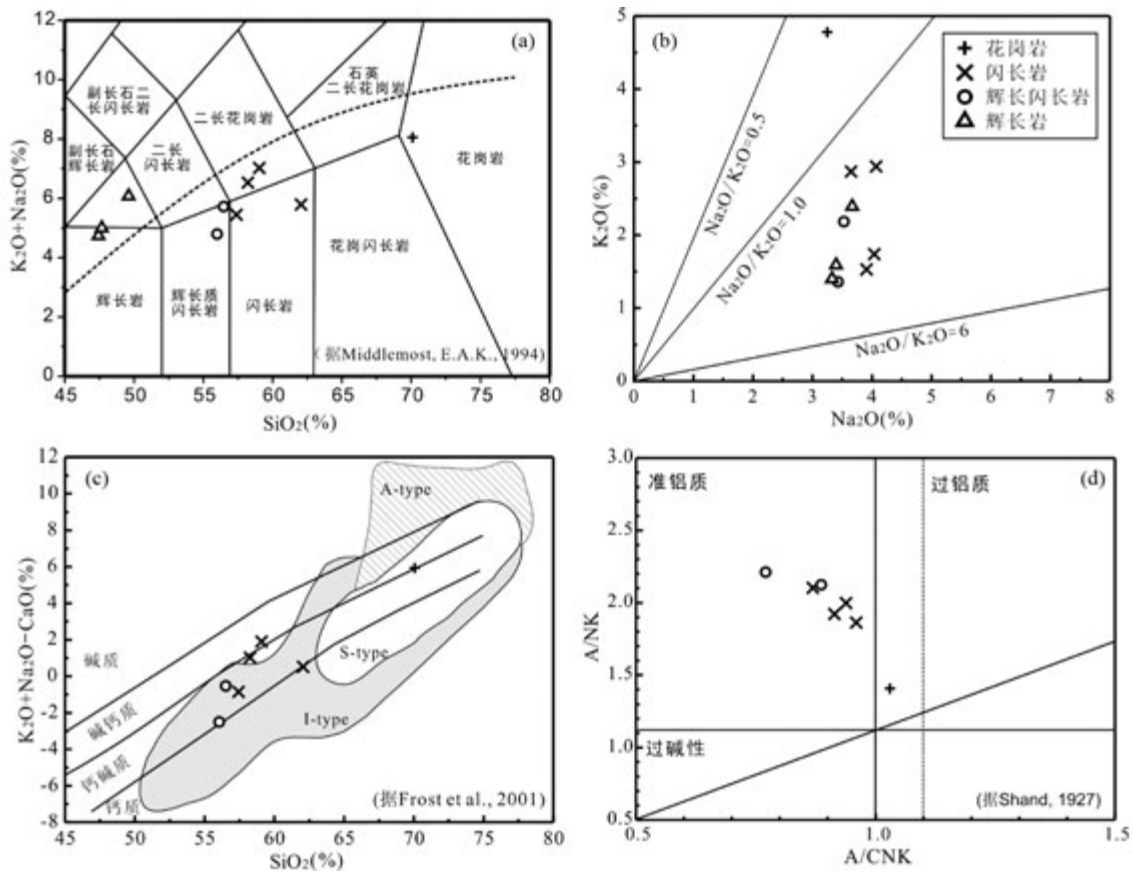


图5 明舒井岩体化学分类图解

(a) TAS 图解(据 Middlemost, 1994); (b) K_2O vs. Na_2O 图解; (c) $K_2O + Na_2O - CaO$ vs. SiO_2 图解(据 Frost *et al.*, 2001); (d) ANK-ANCK 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig.5 Chemical classification of the Mingshujing pluton

(a) TAS diagram (after Middlemost, 1994); (b) K_2O vs. Na_2O diagram; (c) $K_2O + Na_2O - CaO$ vs. SiO_2 diagram (after Frost *et al.*, 2001); (d) ANK-ANCK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989)

花岗岩。辉长岩的 $SiO_2 = 47.77\% \sim 49.69\%$, 富钠 ($Na_2O/K_2O = 1.54 \sim 2.38$)、高 $CaO (7.26\% \sim 9.09\%)$ 和 $FeO^T (7.67\% \sim 10.76\%)$, $Mg^{\#} = 49.0 \sim 58.7$, 与其它岩石相比相对高碱 ($K_2O + Na_2O = 4.73\% \sim 6.06\%$), $\sigma = 4.94 \sim 5.49$ 。辉长闪长岩除略高的 SiO_2 和低碱外, 其它特征与辉长岩基本相同, 也富钠、高镁和铁。总体上, 该岩体成分变化范围宽, 与富钠的准铝质或弱过铝质钙碱性岩石系列(图5)的I型花岗岩类的成分特征相一致(Chappell and White, 1974)。

4.4 稀土元素和微量元素

闪长岩的稀土总量中等, $\sum REE = 103.3 \times 10^{-6} \sim 166.3 \times 10^{-6}$, 平均为 134.1×10^{-6} , 轻重稀土分馏较弱 ($La/Yb)_N = 7.45 \sim 11.42$), 弱负异常 ($\delta Eu = 0.79 \sim 0.90$), 显示右倾弱负异常的稀土模式(图6a)。花岗岩的 $\sum REE = 147.1 \times 10^{-6}$ ($La/Yb)_N = 18.4$, $\delta Eu = 0.74$, 具略强的轻重稀土分馏和中等负异常的右倾稀土谱型(图6a)。辉长岩与辉长闪长岩的稀土特征十分一致, 均呈现了右倾弱负异常的稀土

模式(图6c)。但与辉长岩相比, 辉长闪长岩的稀土总量变化大 ($\sum REE = 155.0 \times 10^{-6} \sim 265.2 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分馏变化较大。所有不同岩石原始地幔标准化微量元素蛛网图比较类似的表现, 富集 Rb、Ba、Th、K 等 LILE、贫 HFSE、亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等(图6b, d), 与活动陆缘岛弧区岩浆产物地球化学特征一致(Pearce *et al.*, 1984; Marjorie, 1989)。此外, 岩石均明显富集 Pb, 这种富集 Pb、亏损 Nb 的特征反映岩体形成过程与大陆地壳物质有很大的亲缘性, 与岛弧环境密切相关。

4.5 Sr-Nd-Pb 同位素

表4中列出了明舒井岩体不同岩类的 Sr-Nd-Pb 同位素结果。根据对应岩石获得的岩体形成年龄计算, 分别得到闪长岩的 ($^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.705951 \sim 0.706171$, $\epsilon_{Nd}(t) = -1.5 \sim -0.1$, 二阶段 Nd 模式年龄 (t_{DM2}) 介于 1183 ~ 1259 Ma 之间, 花岗岩的 ($^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.706196$, $\epsilon_{Nd}(t) = -0.2$, $t_{DM2} = 1191 Ma$ 。辉长岩的 ($^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.705892$, $\epsilon_{Nd}(t) = 0.1$, 辉

表4 明舒井岩体 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Mingshujing pluton

样品号	XJ11-437	XJ11-438	XJ11-442	XJ11-439	XJ11-450
岩性	花岗岩	闪长岩		辉长岩	辉长闪长岩
Age(Ma)	436	437		443	449
Rb($\times 10^{-6}$)	98.35	86.36	102.3	42.27	94.86
Sr($\times 10^{-6}$)	457.3	780.2	614.4	837.2	668.7
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.622386	0.320265	0.481955	0.146057	0.410495
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.710061	0.708165	0.708951	0.706814	0.708802
2σ	0.000019	0.000014	0.000017	0.000013	0.000014
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.706196	0.706162	0.705937	0.705892	0.706194
Sm($\times 10^{-6}$)	3.876	4.299	6.201	6.610	7.352
Nd($\times 10^{-6}$)	22.90	22.72	32.15	32.49	37.43
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.102330	0.114384	0.116592	0.122992	0.118737
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512360	0.512329	0.512406	0.512431	0.512403
2σ	0.000004	0.000004	0.000003	0.000009	0.000005
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-0.2	-1.5	-0.1	0.1	-0.2
$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	1089.8	1271.9	1178.9	1221.7	1211.9
$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	1191.2	1295.5	1182.8		
Pb	21.8	13.7	15.2	8.57	11.0
Th	23.1	6.54	11.7	0.97	6.20
U	2.64	2.00	2.90	0.45	2.30
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.931	18.822	19.124	18.361	19.182
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.636	15.632	15.651	15.608	15.652
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	39.652	38.829	39.106	38.235	38.888
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	18.380	18.161	18.252	18.126	18.213
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	15.606	15.595	15.603	15.595	15.598
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	38.101	38.134	37.972	38.071	38.046

注: 计算参数为 $\lambda^{87}\text{Rb} = 1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$, $\lambda^{147}\text{Sm} = 6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$, $\lambda^{238}\text{U} = 1.55125 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $\lambda^{235}\text{U} = 9.8485 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, $\lambda^{232}\text{Th} = 0.49475 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$ (Steger and Jager, 1977). 同位素初始值计算所用参数为: $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.0847$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ (Hart, 1984)

长闪长岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.706176$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.2$ 。不难看出, 所有岩石具有十分一致的 Sr-Nd 同位素组成, 均表现为中等偏高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 接近于 0。模式年龄为中新元古代, 说明花岗岩类的源区主要来自中新元古代陆壳物质。同样, 三类岩石 Pb 同位素也十分一致, 以高放射性成因 Pb 为特征。其中, 花岗岩的 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.380$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.606$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.101$; 闪长岩的 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.165 \sim 18.256$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.596 \sim 15.603$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.977 \sim 38.137$; 辉长岩的 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.126$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.595$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.071$; 辉长闪长岩的 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.207$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.598$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.040$ 。

5 讨论

5.1 岩体形成时代及其成因

明舒井岩体辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩以及花岗岩分别获得 $443 \pm 1\text{Ma}$ (MSWD = 1.09)、 $449 \pm 1\text{Ma}$ (MSWD = 0.97)、 $437 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD = 1.04) 和 $436 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD =

0.14) 的形成年龄。毛启贵等 (2010) 在该岩体东部黑云母花岗岩获得了 $424 \pm 4\text{Ma}$ 的形成年龄, 该岩体北部地区也先后确定出一些形成于 $440 \sim 423\text{Ma}$ 的花岗岩体 (李伍平等, 2001; 安国堡, 2007; 赵泽辉等, 2007; 毛启贵等, 2010; Liu *et al.*, 2011; Mao *et al.*, 2012) 表明北山南部柳园地区在晚奥陶世-中志留世期间存在一次广泛的花岗岩浆活动, 并在 $449 \sim 442\text{Ma}$ 的晚奥陶世, 首先发生基性岩浆的侵入, 其后在 $440 \sim 424\text{Ma}$ 的早、中志留世出现以花岗岩类岩浆为主的岩浆活动。

岩体地质研究揭示, 明舒井岩体以闪长岩为主体, 在不同地段出露小规模辉长岩和花岗岩体, 而且辉长岩与闪长岩存在巨大的体积差, 邻区也未发现同期大规模辉长岩体。由于幔源岩浆经结晶分离作用演化后形成的花岗岩体十分有限 (Wager and Brown, 1967), 因此作为明舒井岩体主体的中酸性岩类显然不能由其中幔源岩浆形成辉长岩演化所能形成。另一方面, 该岩体中的辉长岩多被闪长岩包裹, 二者之间呈渐变过渡关系, 岩石成分由辉长岩渐变为辉长闪长岩 (图 2a), 在辉长闪长岩中发育快速冷凝条件下结晶的针状磷灰石矿物等岩浆混合的结构 (图 2f), 指示存在岩浆混合作

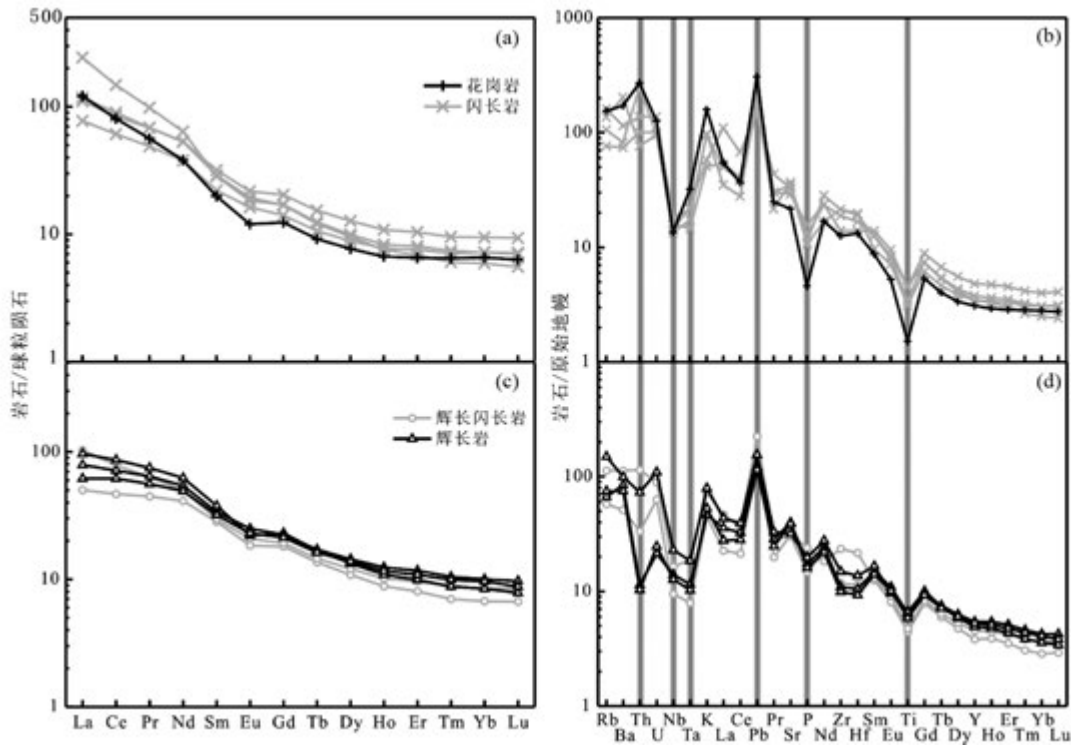


图6 明舒井岩体稀土(a, c, 球粒陨石值据 Boynton, 1984) 及微量(b, d, 原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989) 元素图解

Fig.6 Rare earth (a, c, chondrite values after Boynton, 1984) and trace (b, d, primitive mantle values after Sun and McDonough, 1989) element spidergrams of the Mingshujing pluton

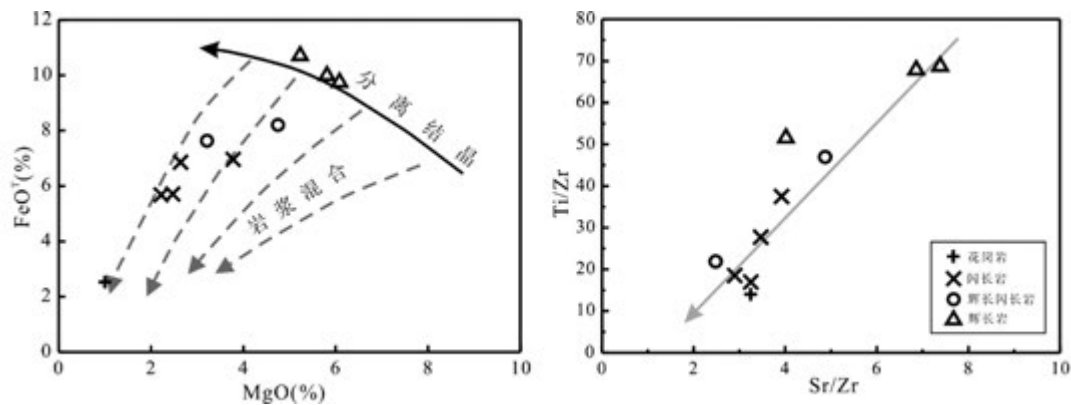


图7 明舒井岩体 MgO-FeO^T (a) 和 Sr/Zr-Ti/Zr (b) 图解(据 Zorpe *et al.*, 1989)

Fig.7 MgO-FeO^T (a) and Sr/Zr-Ti/Zr (b) diagrams for the Mingshujing pluton (after Zorpe *et al.*, 1989)

用。此外, 岩体中不同类型岩石主微量元素协变关系也呈现了二元岩浆混合的演变趋势(图7), 也证明该岩体为不同源区岩浆侵入过程混合的产物。

明舒井锆石 U-Pb 定年研究及野外地质观察结果揭示, 辉长岩岩浆活动明显早于花岗岩类的岩浆活动, 出现于晚奥陶世。它们富集轻稀土, 具弱负异常的右倾 REE 模式, 微量元素相对富集 LILE、亏损 HFSE, 正的 Pb 异常和 Nb、Ta、Ti、Zr、P 明显负异常(图6), 显示活动陆缘洋壳俯冲消减带

岩浆活动的地球化学特征(Marjorie, 1989)。同位素组成上, 辉长岩具中等偏高的(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.705892)、ε_{Nd}(t) 接近于球粒陨石值(+0.1) 在 ε_{Nd}(t) - (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 图中落在球粒陨石演化线附近(图8a)。然而, 辉长岩及辉长闪长岩锆石的 ε_{Hf}(t) 变化范围很大(-12.6 ~ +8.3), 且随锆石年龄减小, ε_{Hf}(t) 由负向正演变至闪长岩和花岗岩的 ε_{Hf}(t) 值范围(图8b)。通常, 单一源区的岩浆是不会发生强烈的同位素分馏使其比值出现如此大的变化。因此, 明舒井辉长岩锆石

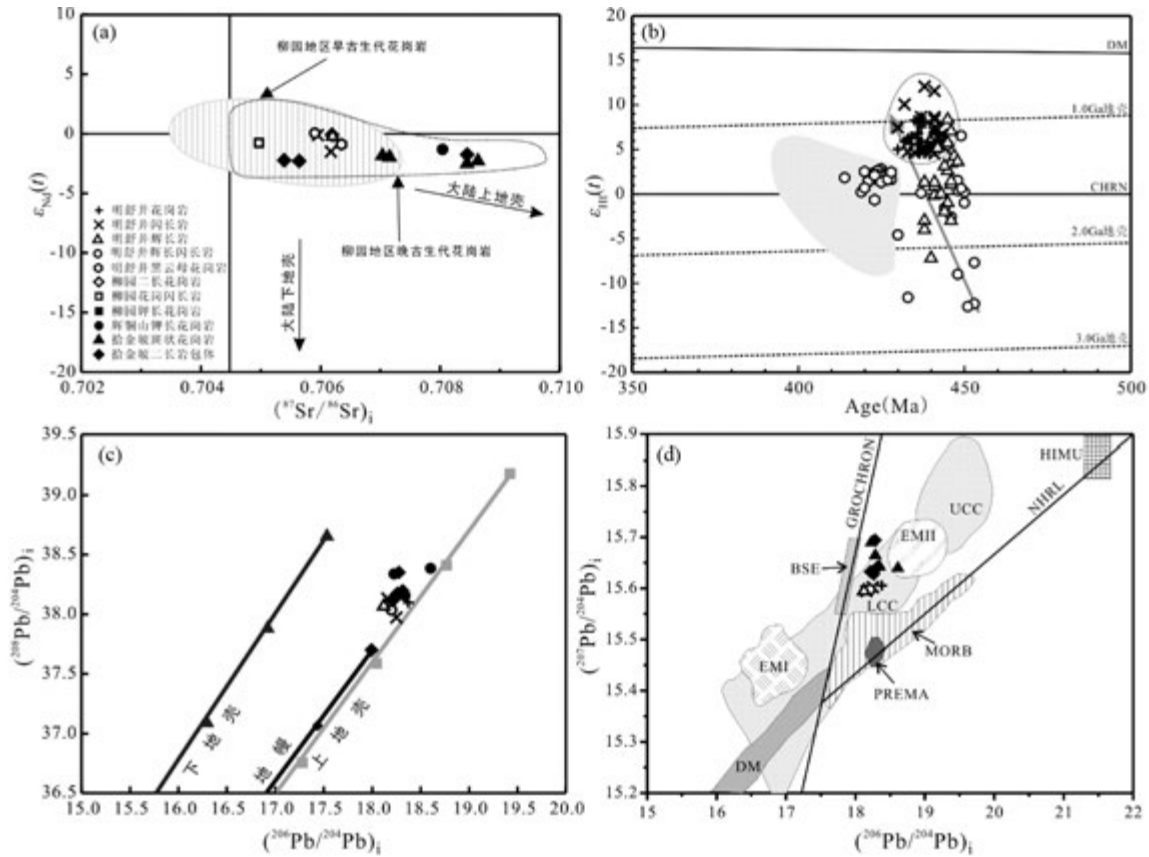


图8 明舒井岩体 Sr-Nd-Pb 同位素图解

$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图(上地壳, 下地壳及地幔演化线据 Zartman and Dos , 1981); $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图(据 Rollinson , 1993)

Fig. 8 Sr-Nd-Pb diagrams of the Mingshujing pluton

$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ isotopic correlation diagram (upper crust , lower crustal and mantle evolution curves are from Zartman and Doe , 1981); $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ isotopic correlation diagram (after Rollinson , 1993)

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 由负向正值大范围的规律性演变, 指示该辉长岩体形成过程曾经历了不同源区岩浆的混合作用。另一方面, 该辉长岩高放射性成因 Pb、具明显 Pb 正异常, 在 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 及 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解中, 落在北半球参考线右侧 EM II 地幔端元附近(图 8d) 接近于大陆上地壳物质的区域(图 8c, d), 指示它们源自一个经历了大洋地壳俯冲过程流体作用和大陆上地壳/或大陆沉积物及蚀变洋壳再循环改造的地幔(李曙光, 1994; Dostal *et al.* , 1998; Hofmann , 2003; 陈骏和王鹤年, 2004)。

明舒井岩体的闪长岩和花岗岩的同位素组成高度一致, 以较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、高放射成因 Pb、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 略偏负为特征(表 4)。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 及 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图解中落在与辉长岩大致相同的区域(图 8)。它们的元素地球化学特征也十分一致, 均富钠、低钙和低铁镁, 属准铝质钙碱性岩系, 稀土和原始地幔标准化图谱呈现了一定的轻重稀土分馏、具中等或弱负异常右倾 REE 模式, LILE 相对富集、HFSE 亏损、Nb、

Ta 及 Sr、P、Ti 明显负异常, 类似于活动陆缘消减带岩浆活动有关的 I 型花岗岩的地球化学特征(Pearce *et al.* , 1984)。但花岗岩较闪长岩富 SiO_2 (70.06%)、高钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.68$)、贫 CaO (2.16%)、中等负异常的 Eu、Sr 和 Ba, 明显的 Ti、P 负异常(图 6a, b), 说明该花岗岩是由闪长岩经历了钛铁氧化物、磷灰石和少量斜长石分离结晶演化后的产物。然而, 与辉长岩明显不同, 闪长岩和花岗岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值并相对集中, 分别为 $+4.5 \sim +12.0$ 和 $-1.1 \sim +8.6$ (表 4、图 8b), 对应的锆石 t_{DM2} 分别介于 611 ~ 999Ma 和 788 ~ 1282Ma (表 1、图 9a, b)。由于花岗岩是大陆地壳物质部分熔融的产物, 正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表源自新生地壳的部分熔融, 偏负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值则指示是古老地壳物质部分熔融的产物, 与其对应的锆石 Hf 同位素模式年龄则代表了原岩物质从亏损地幔抽取的时间(吴福元等, 2007; Belousova *et al.* , 2010; Kröner *et al.* , 2014)。因此, 明舒井中酸性岩类锆石 Hf 同位素与辉长岩锆石 Hf 同位素的明显不同表明, 花岗岩类与辉长岩类非为同一源区岩浆演化的产物, 而是由新元古代早期

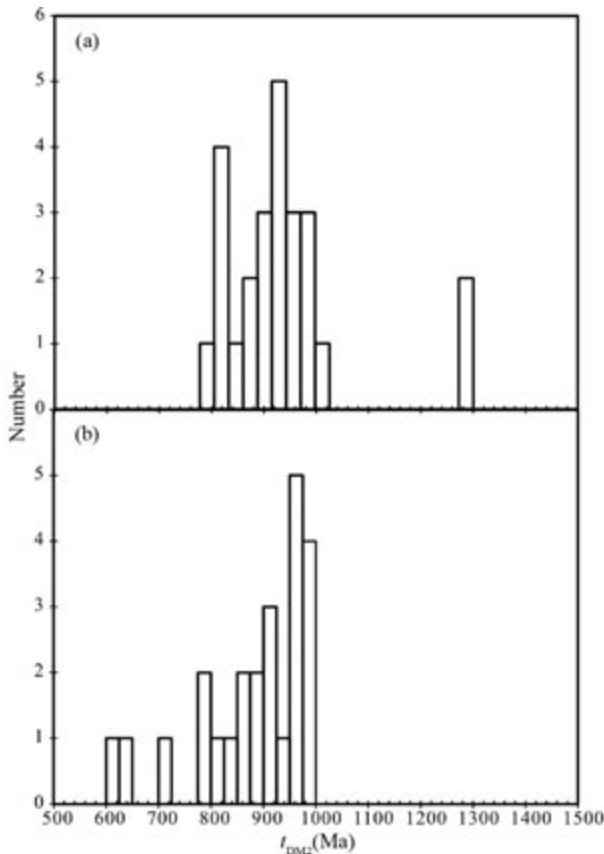


图9 明舒井岩体锆石模式年龄直方图

(a) 花岗岩; (b) 闪长岩

Fig. 9 t_{DM2} histograms of the Mingshujing pluton

(a) granite; (b) diorite

的新生地壳物质熔融所形成。

综上所述,明舒井岩体形成过程可合理的解释为:晚奥陶世北山南部柳园地区大洋地壳俯冲消减发生洋片脱水,析出的流体进入地幔楔引发部分熔融,产生基性岩浆底侵于下地壳(Nakamura and Iwamori, 2009)上侵形成辉长岩。由于上侵的基性岩浆携带的热使下地壳增温,又诱发区内新元古代新生地壳物质部分熔融产生中酸性岩浆。此后,中酸性岩浆与早期基性岩浆不同程度发生混合,有限混合的岩浆结晶形成辉长闪长岩,这种有限混合后的岩浆形成的岩石冷凝结晶的锆石仍记录了二端元岩浆的属性,从而出现较大范围的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值。此后,随着岩浆混合作用的进一步进行,便形成了明舒井岩体主体的石英闪长岩及由其发生分离结晶演化出的花岗岩。由于岩浆混合过程Sr-Nd-Pb同位素交换作用较化学成分的交流更易发生(Lesher, 1990),因此,强烈的岩浆混合作用也造成了明舒井不同岩类Sr-Nd-Pb同位素高度的均一化。

5.2 形成环境及其地质意义

北山柳园地区明舒井岩体辉长岩类形成于449~442Ma

的晚奥陶世,其后在435Ma左右的早志留世形成闪长岩和花岗岩类。与此相对应,该区还出现451Ma的富Nb玄武岩、442Ma的英安岩(Mao *et al.*, 2012)、436Ma的高钾钙碱性钾长花岗岩(赵泽辉等, 2007)和424Ma的埃达克质花岗岩(毛启贵等, 2010; Mao *et al.*, 2012)。这种由富Nb玄武岩、英安岩及辉长岩、闪长岩和花岗岩(包括埃达克质花岗岩)等构成的岩石组合与岛弧及大陆边缘弧火成岩组合(邓晋福等, 2007)一致。同时,该期明舒井岩体富钠,属钙碱性岩系,呈现轻重稀土中度分馏,具弱负异常的右倾REE模式,富集LILE、亏损HFSE, Pb正异常和Nb、Ta、Ti、Zr、P负异常(图6),具活动陆缘洋壳俯冲消减带岛弧岩浆作用的地球化学特征(Marjorie, 1989)。同位素组成上,明舒井辉长岩具中等 $\varepsilon_{Nd}(t)$ (0.1),中等偏高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.705892)和高放射成因Pb,而锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 出现负值(-12.6),与起源于有大陆地壳物质加入和流体作用改造的软流圈地幔源区岩浆产物特征一致,这被认为是大洋板片俯冲深度达到榴辉岩相变质后,含水矿物脱水释放流体进入楔形地幔区流体交代地幔,同时俯冲板片还携带了大陆沉积物再循环进入地幔发生部分熔融的结果(Dostal *et al.*, 1998)。柳园地区451Ma的富Nb玄武岩(Mao *et al.*, 2012)和其南部465Ma古堡泉榴辉岩(Liu *et al.*, 2011)的确定,也佐证了中奥陶世晚期已发生洋壳的俯冲消减作用。而代表洋壳俯冲的榴辉岩锆石核部获得的886Ma的年龄与其围岩副片麻岩900Ma的变质年龄相近(Liu *et al.*, 2011),指示它们曾一同经历了新元古代变质事件的改造。同时,围岩片麻岩中记录了一次1450Ma的岩浆事件,暗示俯冲岩片中混入了古老地壳物质。由此,明舒井辉长岩正的Pb异常(图6)和中等偏高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$,高放射成因Pb(表4)及负的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ (表2、图8),正是板片俯冲发生榴辉岩相变质,板片脱水流体进入地幔源区发生流体交代作用,同时古老地壳物质也随消减板片被带入地幔源区后发生部分熔融,形成基性岩浆底侵于下地壳。随后,由于这些底侵和侵入下地壳的幔源岩浆携带的大量热,使得年轻地壳物质(为新元古代岛弧建造或增生楔物质)热扰动而发生部分熔融,形成闪长质岩浆并与先期辉长岩发生混合后又发生结晶分离作用,最终演化形成花岗岩,成为大洋俯冲消减带岩浆活动的物质记录,这一环境的中酸性岩体也出现于其北部红柳河地区(李伍平等, 2001)。因此,柳园地区465~435Ma期间的与俯冲带相关的岛弧区侵入体以及同期富Nb玄武岩、英安岩和榴辉岩共同证明,北山南部在中奥陶世晚期洋壳俯冲消减作用已经开始,并一直持续到早志留世晚期。与此对应,该区大量438~375Ma花岗岩体,无定向、均一块状构造,以近圆形大岩基或岩株侵入于早古生代地层和明舒井岩体中(图1),指示了非挤压环境侵位的结果。岩石类型以准铝及过铝质后碰撞高钾钙碱性花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩(赵泽辉等, 2007; Liu *et al.*, 2011)为主,同时出现I-A过渡型(李舫等, 2011)及A型花岗岩(李舫等, 2009),与后造山/后碰撞阶段高钾钙碱性岩浆岩组

合一致 (Bonin *et al.*, 1998; Barbarin, 1999; 肖庆辉等, 2002; 邓晋福等, 2007)。这标志着志留纪晚期北山南部大洋俯冲消减已消失殆尽, 大洋盆地闭合后转入弧陆碰撞构造阶段, 并于早泥盆世演化为后碰撞晚期阶段。

6 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果揭示, 明舒井岩体是在 450 ~ 435Ma 的由基性和中酸性岩浆活动形成的辉长岩和闪长岩及花岗岩类杂岩体。其中, 辉长岩富钙、高铁、镁, 富轻稀土及 LILE、贫 HFSE, 亏损 Nb、Ta、Ti、Zr 和 P、Pb 正异常; 闪长岩和花岗岩富钠, 低钙、低铁、镁, 为准铝质钙碱性岩系, 它们富集 LREE 和 LILE、HFSE 亏损, Nb、Ta 及 Sr、P、Ti 明显负异常, 与消减带构造岩浆作用地球化学特征一致, 代表北山南部早古生代晚奥陶世 ~ 早志留世晚期与大洋俯冲消减作用有关的构造岩浆事件。

(2) 明舒井岩体的辉长岩来源于受消减组分和流体作用改造的地幔部分熔融, 由此形成的幔源岩浆底侵下地壳, 诱发区内新元古代新生地壳物质部分熔融产生中酸性岩浆。此后, 中酸性岩浆与早期基性岩浆不同程度混合形成辉长闪长岩, 随着岩浆混合作用的进一步增强和演化, 形成了明舒井岩体主体的石英闪长岩和由其发生分离结晶演化后的花岗岩。

References

- An GB. 2007. Characteristics of Shijinpao granites and their relationship to gold metallogenesis in the Beishan Mountains, northwestern Gansu. *Gansu Geology*, 16(3): 19–25 (in Chinese with English abstract)
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605–626
- Belousova EA, Kostitsyn YA, Griffin WL, Begg GC, O'Reilly SY and Pearson NJ. 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*, 119(3–4): 457–466
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258
- Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45(1–4): 45–70
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174
- Chen J and Wan HN. 2004. *Geochemistry*. Beijing: Science Press, 141–171 (in Chinese)
- Chu NC, Taylor RN and Chavagnac V *et al.* 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567–1574
- Defant MJ, Xu JF, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakite: Some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129–142 (in English with Chinese abstract)
- Deng JF, Xiao QH, Su SG, Liu C, Zhao GC, Wu ZX and Liu Y. 2007. Igneous petro-tectonic assemblages and tectonic setting: A discussion. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 392–402 (in Chinese with English abstract)
- Dostal J, Coisens B and Dupuy C. 1998. The incompatible element characteristics of an ancient subducted sedimentary component in ocean island basalts from French Polynesia. *J. Petrol.*, 39(5): 937–952
- Fan HH, Min MZ, Chen J and Ji RE. 2005. Isotopic geochemical characteristics of Yemaquan granitic intrusions in Beishan area, Gansu Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(S1): 78–83 (in Chinese with English abstract)
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048
- Hart SR. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309(5971): 753–757
- Hofmann AW. 2003. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. New York: Elsevier, 2: 61–101
- Hong DW, Zhang JS, Wang T, Wang SG and Xie XL. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 799–813
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82–92
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000b. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences*, 91(1–2): 181–193
- Jahn BM, Windley B, Natal' in B and Dobretsov N. 2004a. Phanerozoic continental growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599–603
- Jahn BM, Capdevila R, Liu DY, Vernon A and Badarch G. 2004b. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: Geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 629–653
- Kröner A, Kovach V, Belousova E *et al.* 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the central Asian orogenic belt. *Gondwana Research*, 25(1): 103–125
- Lei RX, Wu CZ, Gu LX, Zhang ZZ, Chi GX and Jiang YH. 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 Altai. *Gondwana Research*, 20(2–3): 582–593
- Leshner CE. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing. *Nature*, 344(6263): 235–237
- Li S, Wang T, Tong Y, Hong DW and Ouyang ZX. 2009. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan areas of Beishan, NW China, and its implications to tectonic evolution. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 407–422 (in Chinese with English abstract)
- Li S, Wang T, Tong Y, Wang YB, Hong DW and Ouyang ZX. 2011. Zircon U-Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K-feldspar granites from Beishan orogen, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3055–3070 (in Chinese with English abstract)
- Li SG. 1994. Implications of ϵ_{Nd} -La/Nb, Ba/Nb, Nb/Th diagrams to mantle heterogeneity: Classification of island arc basalts and decomposition of EM II component. *Geochimica*, 23(2): 105–114 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Wang T, Li JB *et al.* 2001. The U-Pb age of zircon from Late Caledonian granitoids in Hongliuhe area, east Tianshan Mountains, Northwest China and its geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 231–235 (in Chinese with English abstract)
- Liu MQ. 2007. Geochemical characteristics and geological significance of

- adakitic granitoids in Hongshishan area of the Beishan orogenic belt, Gansu Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 232 – 238 (in Chinese with English abstract)
- Liu XM, Chen YL, Li DP, Wang Z and Liu JB. 2010. The U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in the metadiabase and gneissic granite, Beishan orogenic belt, Inner Mongolia, China and its significance. *Geological Bulletin of China*, 29(4): 518 – 529 (in Chinese with English abstract)
- Liu XM, Chen BL, Jahn BM, Wu GG and Liu YS. 2011. Early Paleozoic (ca. 465Ma) eclogites from Beishan (NW China) and their bearing on the tectonic evolution of the southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4): 715 – 731
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 12: 1 – 70
- Lü XB, Zhu J, Cao XF, Chen C, Wu CM and Hu QC. 2012. Magmatism and its metallogenetic effects during the Paleozoic-Triassic continental crustal construction in the Liuyuan area, South Beishan, NW China. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 119 – 127 (in Chinese with English abstract)
- Marjorie W. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman Inc., 153 – 226
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635 – 643
- Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Zhang JN, Ao SJ and Li JL. 2010. Discovery of Middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan area, Beishan Mountain, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 584 – 596 (in Chinese with English abstract)
- Mao QH, Xiao WJ, Fang TH, Wang JB, Han CM, Sun M and Yuan C. 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. *Gondwana Research*, 22(2): 534 – 553
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37(3–4): 215 – 224
- Nakamura H and Iwamori H. 2009. Contribution of slab-fluid in arc magmas beneath the Japan arcs. *Gondwana Research*, 16(3–4): 431 – 445
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace-element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic-rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 – 983
- Rollinson HR. 1993. *Using Geological Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Person Education Limited, 215 – 265
- Scherer E, Münker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683 – 687
- Sterger RH and Jager E. 1977. Subcommittee on geochronology convention on the use of decay: Constants in geochronology and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 359 – 362
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313 – 345
- Tong Y, Wang T, Hong DW, Han BF, Zhang JJ, Shi XJ and Wang C. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619 – 641 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 533 – 556
- Wager LR and Brown GM. 1967. *Layered Igneous Rocks*. San Francisco: Freeman WH & Co., 150 – 203
- Wang HL, Xu XY, Wang SP, Chen JL et al. 2007. 1:1000000 Geological Map of Tianshan in China and Adjacent Region. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Wang LS, Yang JG, Xie CL, Lei YX, Wang YX, Chao HX, Yang PF, Qi YL and Jin SL. 2009. Geochronology and geochemistry of Haergentoukoubu granites in the Beishan area, Gansu, China and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 377 – 387 (in Chinese with English abstract)
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kroner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31 – 47
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Guo S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554 – 1569
- Xiao QH, Deng JF and Ma DQ. 2002. *Thinking and Method of Studies on the Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 12 – 52 (in Chinese)
- Xiao WJ, Windley BF, Yuan C, Sun M, Han CM, Lin SF, Chen HL, Yan QR, Liu DY, Qin KZ, Li JL and Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids. *American Journal of Science*, 309(3): 221 – 270
- Xiao WJ, Mao QG, Windley BF, Qu JF, Zhang JE, Ao SJ, Guo QQ, Cleven NR, Lin SF, Shan YH and Li JL. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553 – 1594
- Xiao WJ, Windley BF, Allen MB and Han CM. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316 – 1341
- Xiao WJ and Santosh M. 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth. *Gondwana Research*, 25(4): 1429 – 1444
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353 – 370
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics: The model. *Tectonophysics*, 75(1–2): 135 – 162
- Zhang W, Wu TR, He YK, Feng JC and Zheng RG. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Xijianquanzi alkali rich potassium-high granites in Beishan, Gansu Province, and their tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 719 – 731 (in Chinese with English abstract)
- Zhang W, Feng JC, Zheng RG, Wu TR, Luo HL, He YK and Jing X. 2011. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the granites from the south of Yin'aoxia and their tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1649 – 1661 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XH, Liu JH, Xu JL, Niu HB and Zhao YQ. 2005. Second study on plate tectonics in Gansu Province. *Acta Geologica Gansu*, 14(2): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Guo ZJ and Wang Y. 2007. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the granitoids from Liuyuan area, Beishan, Gansu Province, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1847 – 1860 (in Chinese with English abstract)
- Zheng RG, Wu TR, Zhang W, Xu C and Meng QP. 2012. Early Devonian tectono-magmatic events in the Middle Beishan, Gansu Province: Evidence from chronology and geochemistry of Gongpoquan granite. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(4): 603 – 616 (in Chinese with English abstract)
- Zorpi MJ, Coulon C, Orsini JB and Cocirca C. 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157(4): 315 – 329
- Zuo GC, Liu YK and Liu CY. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region. *Acta Geologica Gansu*, 12(1): 1 – 15 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 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. 甘肃地质, 16(3): 19-25
- 陈骏, 王鹤年. 2004. 地球化学. 北京: 科学出版社, 141-171
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 吴宗絮, 刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论. 高校地质学报, 13(3): 392-402
- 范洪海, 阎茂中, 陈佳, 季瑞利. 2005. 甘肃北山野马泉岩体同位素地球化学特征. 地球学报, 26(增刊): 78-83
- 李舫, 王涛, 童英, 洪大卫, 欧阳志侠. 2009. 北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造演化意义. 岩石矿物学杂志, 28(5): 407-422
- 李舫, 王涛, 童英, 彦斌, 洪大卫, 欧阳志侠. 2011. 北山辉铜山泥盆纪钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、成因及构造意义. 岩石学报, 27(10): 3055-3070
- 李曙光. 1994. ϵ_{Nd} -La/Nb、Ba/Nb、Nb/Th 图对地幔不均一性研究的意义——岛弧火山岩分类及 EM II 端元的分解. 地球化学, 23(2): 105-114
- 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锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球学报, 22(3): 231-235
- 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. 岩石矿物学杂志, 26(3): 232-238
- 刘雪敏, 陈岳龙, 李大鹏, 王忠, 刘金宝. 2010. 内蒙古北山造山带变辉绿岩和片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义. 地质通报, 29(4): 518-529
- 吕新彪, 朱江, 曹晓峰, 陈超, 吴春明, 胡庆成. 2012. 北山南部柳园地区古生代-早中生代大陆地壳增生过程中的岩浆活动与成矿效应. 地质科技情报, 31(5): 119-127
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 张继恩, 敖松坚, 李继亮. 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. 岩石学报, 26(2): 584-596
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619-641
- 王洪亮, 徐学义, 王世平, 陈隽璐等. 2007. 中国天山及邻区 1: 1000000 万地质图. 北京: 地质出版社
- 王立社, 杨建国, 谢春林, 雷永孝, 王育习, 曹红霞, 杨鹏飞, 齐亚林, 金拴联. 2009. 甘肃北山火山石哈尔根头口布花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报, 83(3): 377-387
- 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. 岩石学报, 23(2): 185-220
- 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. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 12-52
- 张文, 吴泰然, 贺元凯, 冯继承, 郑荣国. 2010. 甘肃北山西洞泉子富碱高钾花岗岩体的锆石 LA-ICP-MS 定年及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 29(6): 719-731
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 吴泰然, 罗红玲, 贺元凯, 荆旭. 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. 岩石学报, 27(6): 1649-1661
- 张新虎, 刘建宏, 徐家乐, 徐家乐, 牛洪斌, 赵延庆. 2005. 再论甘肃省的板块构造. 甘肃地质学报, 14(2): 1-10
- 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. 岩石学报, 23(8): 1847-1860
- 郑荣国, 吴泰然, 张文, 徐操, 孟庆鹏. 2012. 甘肃北山中带早泥盆世的构造-岩浆作用: 来自公婆泉花岗岩体年代学和地球化学证据. 北京大学学报(自然科学版), 48(4): 603-616
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化. 甘肃地质学报, 12(1): 1-15