

甘肃北山小西弓南早泥盆世—晚志留世糜棱岩化 石英闪长岩体年代学、地球化学特征及其地质意义

梁国冰¹, 丁仁平², 李佐臣^{1,3}, 李瑞保^{1,3}, 王盟^{1,3}, 陈有忻^{1,3}, 裴先治^{1,3}

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;
3. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为深化对敦煌地块构造演化的认识, 了解小西弓剪切带蚀变岩型金矿成矿前的构造变形历史, 选取位于小西弓金矿南侧的糜棱岩化石英闪长岩体进行了 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年代学、地球化学研究。共分析测试了 24 个点, 锆石的 Th 含量为 $46.5 \times 10^{-6} \sim 266.4 \times 10^{-6}$, U 含量为 $196.3 \times 10^{-6} \sim 496.3 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.24~0.53, 取得 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄值为 (411.3 ± 5.8) Ma (MSWD = 2.7), 形成时代为早泥盆世。SiO₂ 含量为 57.88%~58.26%, TiO₂ 含量为 0.81%~0.86%, σ 值在 1.38~1.56 之间变化, 碱指数 NK/A 为 0.4~0.41, 属钙碱性岩石, 铝饱和度 A/CNK 值 0.95~0.98, 属次铝质岩系, 具 I 型花岗岩特征。弱负 Eu 异常, ΣREE 为 $73.85 \times 10^{-6} \sim 160.37 \times 10^{-6}$, 中等偏低含量, ΣLREE/ΣHREE 为 8.3~11.25, HREE 相对亏损。微量元素 Ba、Sr、Zr 含量较高, Rb、Th、U 含量较低。构造环境为火山弧环境, 认为是敦煌地块早古生代—晚古生代早期对北山造山带俯冲、碰撞过程的响应。精确定年值的获得, 进一步确认该地区俯冲碰撞阶段延续到了早泥盆世。

关键词: 甘肃北山地区; 早泥盆世; 石英闪长岩; LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年代学; 地球化学特征
中图分类号: P597; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2017)01-0249-12

Geochronology and Geochemistry of Early Devonian-Late Silurian Mylonitized Quartz Diorites from the Southern Xiaoxigong in the Beishan Aere of Gansu Province and Their Geologic Implications

LIANG Guobing¹, DING Sapeng², LI Zuochen^{1,3}, LI Ruibao^{1,3},
WANG Meng^{1,3}, CHEN Youxin^{1,3}, PEI Xianzhi^{1,3}

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Gansu Geological Survey Institute, Lanzhou 730030, Gansu, China; 3. Key Laboratory for
the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits,
MLR, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to deepen the understanding about the tectonic evolution of Dunhuang land mass, and to understand the tectonic deformation history of the alteration rock type gold deposit in Xiaoxigong shear zone before the mineralization, the mylonitized quartz diorite body from the south side of Xiaoxigong gold deposit have been selected to carry out the LA - ICP - MS zircon U

收稿日期: 2016-11-27, 修回日期: 2016-12-05

基金项目: 中国地质调查局综合研究项目“西北地区地质系列图件编制与综合研究-甘肃省区域地质志新编”(12120113013500)

作者简介: 梁国冰(1992-), 男, 长安大学在读硕士研究生, 主要从事构造地质学研究工作。E-mail: 550684104@qq.com。

-Pb chronology and geochemical studies. In this paper, 24 zircons have been analyzed totally, their Th and U contents range from 46.5×10^{-6} to 266.4×10^{-6} and from 196.3×10^{-6} to 496.3×10^{-6} , respectively, their Th/U ratios vary from 0.24 to 0.53, and their LA-ICP-MS U-Pb ages are (411.3 ± 5.8) Ma (MSWD = 2.7), with the formation age of early Devonian. The SiO₂ and TiO₂ contents of these mylonitized quartz diorites vary from 57.88% to 58.26% and from 0.81% to 0.86% respectively, their σ values range from 1.38 to 1.56, their alkali indexes (NK/A) change from 0.4 to 0.41, showing the features of calc-alkaline rocks. Their aluminum saturations (A/CNK) vary from 0.95 to 0.98, belonging to the subaluminous rock series, with I-type granite characteristics. These mylonitized quartz diorites have weak Eu anomalies, their ΣREE range from 73.85×10^{-6} to 160.37×10^{-6} , with moderate low ΣREE content. Their ΣLREE/ΣHREE ratios change from 8.3 to 11.25, with the relative loss of HREE. The contents of Ba, Sr and Zr are higher, while the contents of Rb, Th and U are lower. The tectonic setting for these mylonitized quartz diorites is the volcanic arc environment, which is considered as the response of the Dunhuang block the subducted and collised with the Beishan orogenic belt during the Early Paleozoic to Early Late Mesozoic. The obtained dating data suggests that the subduction collision was lasted to the Early Devonian in this area.

Keywords: Beishan Gansu; Early Devonian; quartz diorite; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemical characteristics

甘肃北山地区构造位置独特,中酸性侵入岩极为发育(梁明宏等,2014)对侵入岩形成环境的研究是探讨该区构造演化问题的重要依据。前人对北山地区侵入岩的地球化学和同位素特征做了较多系统研究,并探讨了构造属性、岩浆源区性质及大地构造演化等问题(杨合群等,2009;朱江等,2015;赵泽辉等,2007;王国强等,2014;刘明强等,2006;赵志雄等,2015;贺振宇等,2015;李舢等,2009;梅华林等,1999;叶晓峰等,2013)。然而,对同一时代花岗岩构造属性的认识却不尽相同。例如,对北山地区广泛分布的晚古生代花岗岩类,有人认为是同碰撞属性(江思宏等,2006),也有人认为是后碰撞属性(张文等,2010)。北山南带的大地构造归属和音凹峡晚古生代蛇绿岩带的存在与否也有较大争议,有塔里木板块的北缘(左国朝等,1990;龚全胜等,2002)、哈萨克斯坦板块的南缘(张新虎等,1993)、弧后盆地(李锦轶等,2009)、多旋回裂谷(刘明强等,1999)等认识,统一认识尚未形成。因此,对该区域侵入岩体的年代学、地球化学、同位素年代学及形成环境、岩浆成因等问题进行深入研究,对北山南带及敦煌地块的构造演化认识都具有十分重要的意义。本次研究选择北山地区小西弓南糜棱岩化石英闪长岩体,通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年和岩

石地球化学研究,探讨桥湾-小西弓-旧井一带变形侵入岩体的就位时代及形成的大地构造环境,为北山造山带早古生代俯冲、碰撞造山过程和晚古生代多旋回裂谷演化提供依据。

1 区域地质背景和岩体地质特征

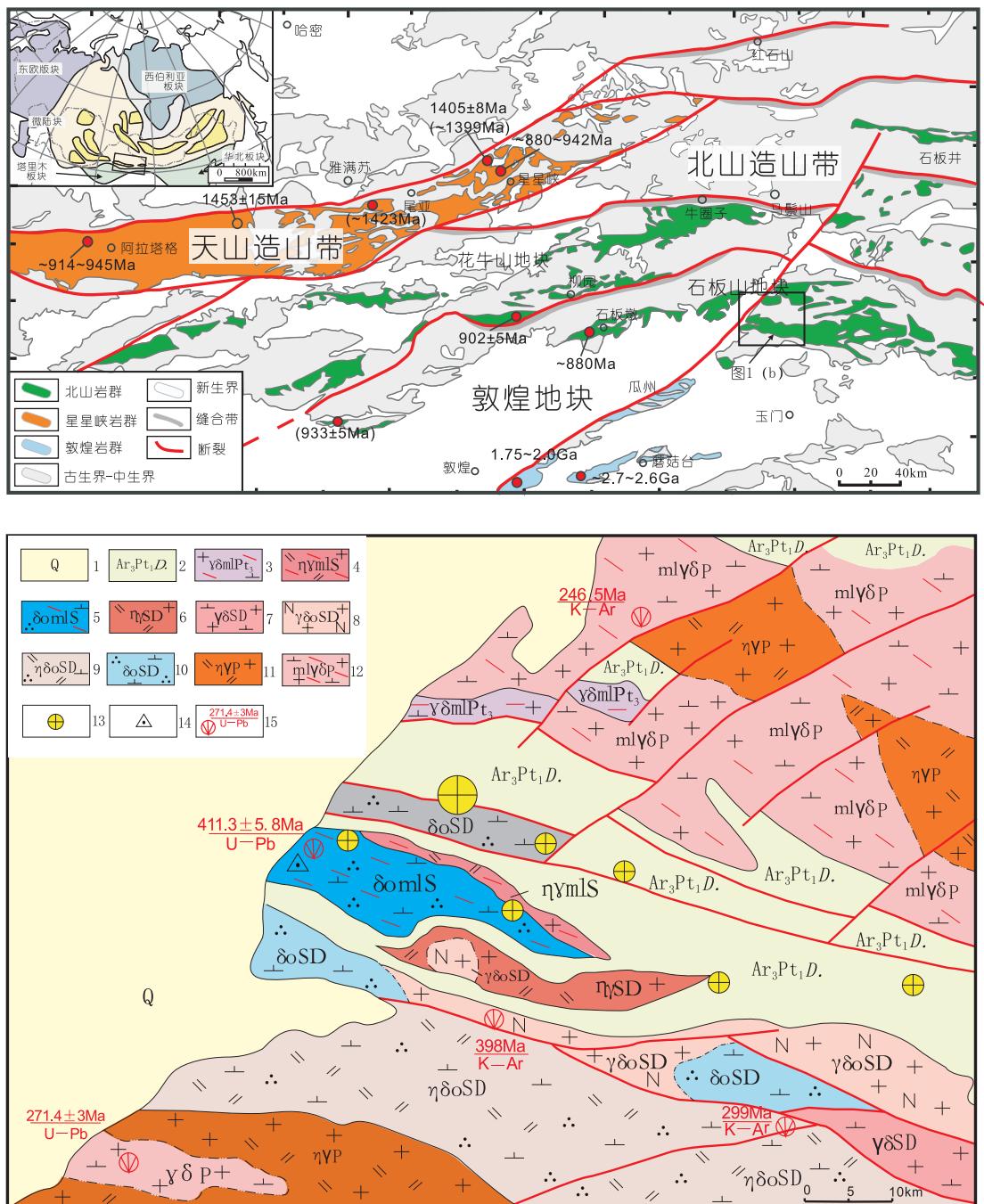
1.1 区域地质背景

研究区地处青藏高原东北缘,大地构造区划属塔里木板块敦煌地块(图 1a),南有著名的疏勒河隐伏断裂带,北与红柳园-帐房山褶皱带为邻(张新虎等,2013),区域上以新太古代-中元古代结晶基底和长城纪变质基底岩系大面积发育为特色,晚古生代多旋回裂谷火山-沉积建造及中新生代沉积建造为上覆盖层,中酸性侵入岩体大量分布(梁明宏等,2014)。区内出露地层主要为新太古代-中元古代敦煌岩群,为一套经受了强烈变形变质作用改造、总体无序、内部无序的非史密斯地层。有少量中元古代长城纪铅炉子沟群火山岩系、蔚县纪平头山组碳酸盐岩、青白口纪野马街组细碎屑岩出露。

岩浆作用以多种类型侵入岩混杂产出为特点,不同时代、不同类型、不同程度变形变质侵入岩的混杂是该区最为突出的特点。不同层次的岩浆混合及强

烈的构造移置、构造混杂、变形变质，破坏了原生的时空序列，从而使岩浆岩面貌更为复杂多样。敦煌岩群中发育伸展构造体制的褶叠层构造、变形岩体中发育

的多期次韧性剪切变形(王云斌等,2004)、近东西向压性断裂带及北西向走滑断层共同构成了研究区复杂的构造格局(图 1b)。



- 第四系;2. 新太古-古元古代敦煌岩群;3. 新元古代花岗闪长质麻棱岩;4. 晚志留世-早泥盆世麻棱岩化花岗闪长岩;5. 晚志留世-早泥盆世麻棱岩化石英闪长岩(本次重点研究岩体);6. 泥盆纪二长花岗岩;7. 泥盆纪花岗闪长岩;8. 泥盆纪英云闪长岩;9. 泥盆纪石英二长闪长岩;10. 泥盆纪石英闪长岩;11. 二叠纪二长花岗岩;12. 二叠纪麻棱岩化花岗闪长岩;

13. 金矿(床)点;14. 采样位置;15. 前人同位素年龄及分析方法

图 1 (a) 北山和邻区区域地质略图及(b)小西弓南地质简图

区内侵入岩极为发育,中新元古代花岗闪长质糜棱岩(1 311Ma 和 1 229Ma)呈透镜状、长透镜状侵入敦煌岩群中,以变形强烈、发育石英拔丝构造和长石旋转碎斑为常见特点。晚志留世—早泥盆世糜棱岩化石英闪长岩是本次研究的侵入体,前人所获年龄(420.2 Ma),区内共见3个侵入体,岩体平面形态呈长条状、不规则岩枝状、透镜状,其北部为糜棱岩化二长花岗岩,呈长条状侵入敦煌岩群,与糜棱岩化石英闪长岩构造面理接触,以片岩捕虏体较发育、变形强烈、发育旋斑及剪切褶皱为特点。泥盆纪侵入岩见花岗闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩和石英二长闪长岩(398Ma/K-Ar 和 415Ma/U-Pb),以发育大量中基性岩脉为特点,普遍含数量不等的异源包体,包体形态及产出特点充分反映了浆混成因的特点;二叠纪二长花岗岩、花岗闪长岩、糜棱岩化石英闪长岩(225~281Ma/U-Pb 和 244~273Ma/K-Ar)分布在研究区北部和南部,2种岩性渐变-突变接触,界面明显,有混染和岩枝穿插,仅在研究区北部花岗闪长岩中出现弱-中等程度剪切变形。

研究区金矿(床)点众多,北部的小西弓中型金矿是影响力较大的剪切带蚀变岩型金矿床,为区域典型矿床,所建立的找矿模型在北山造山带具有较高的使用价值。

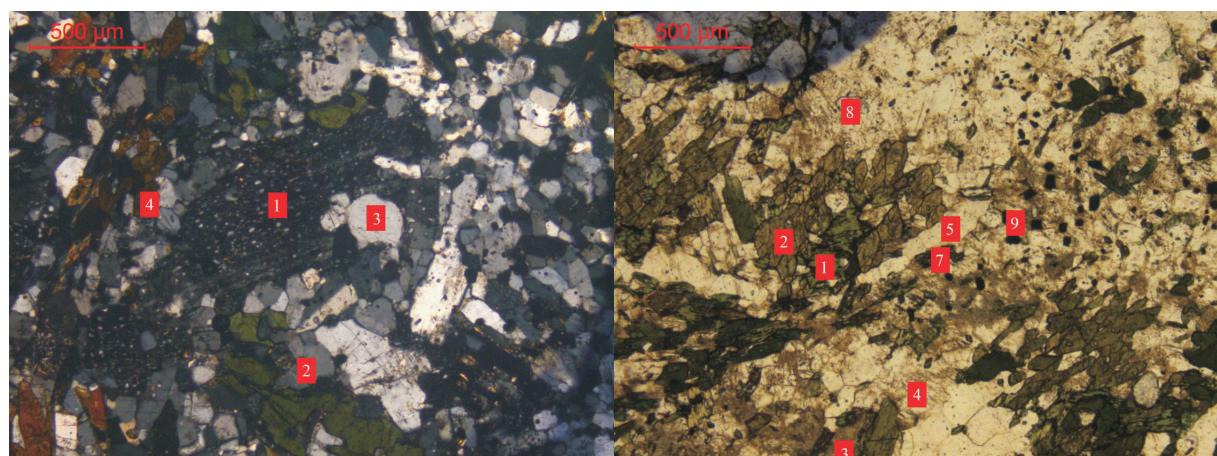
1.2 岩体地质特征和岩体岩石学特征

所研究的糜棱岩化石英闪长岩体与小西弓剪切带蚀变岩型金矿空间关系密切。岩体形态呈一左行

的旋斑状,面积为37.4km²,侵入于敦煌岩群中。与细粒糜棱岩化花岗闪长岩和细粒-中细粒糜棱岩化二长花岗岩呈构造面理接触,韧性剪切变形强烈,构造改造使岩体呈杂岩体的外貌产出。糜棱面理与变质地层片理一同卷入变形。糜棱面理主体产状为195°~225°/45°~70°。

岩体主岩性为糜棱岩化细粒黑云母石英闪长岩。镜下具糜棱结构,碎斑含量<50%,粒径为0.1~0.7mm,个别5mm;斜长石含量为47%~70%,An=31,属中长石;钾长石含量为>1%~15%,石英含量为>10%~18%,黑云母含量为5%~29%,角闪石含量为0~18%,变形和重结晶强烈,见细粒化,石英拔丝构造,矿物发生定向排列和旋转。

本次研究选择了弱变形域基本无变形的岩石,采集薄片样品4个(图2a、图2b)。镜下岩石呈中细粒混染结构。斜长石含量约为45%,粒径为0.4~3mm,其中早期斜长石含量为15%,多蚀变为绢云母和黝帘石,隐约可见双晶;晚期斜长石含量为30%,为钠长石,部分发生绢云母化和泥化;角闪石含量约为34%,粒径为0.35~3mm,其中早期角闪石含量为7%~8%,多蚀变为绿泥石;晚期角闪石含量为26%~27%,常聚集呈斑杂状,为碱性角闪石;石英含量约为14%,粒径为0.26~1.5mm。副矿物含量为7%~8%,其中金属矿物含量为4%~5%,磷灰石含量为1%,榍石含量为1%~2%。



(a)1. 斜长石包含小颗粒石英;2. 斜长石;3. 石英;4. 角闪石;(b)1. 早期绿泥石化角闪石;2. 晚期角闪石;3. 早期斜长石;4. 晚期斜长石;5. 石英;6. 楔石;7. 磷灰石;8. 金属矿物

图2 (a)石英闪长岩 50×正交偏光及(b)50×单偏光镜下照片

Fig. 2 (a)The microscopic micrograph of Quartz diorite 50× perpendicular polarized light and (b)50× polarized light

2 样品采集和分析方法

同位素及岩石地球化学样品采自小西弓南晚志留世—早泥盆世糜棱岩化石英闪长岩体中,采样点地理坐标为:东经 $96^{\circ}45'30''$,北纬 $40^{\circ}48'42.5''$ 。岩性为细粒-中细粒糜棱岩化石英闪长岩。野外采集新鲜样品10kg,在实验室将其粉碎至80~100目,按常规方法分选,在双目镜下挑选晶形完好、无包裹体、透明度好、粒度大的单颗粒锆石作为测定对象。将待测锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明DEVCON环氧树脂固定,固结后抛磨至粒径的大约1/2,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石阴极发光(CL)显微图像研究,照相和制靶在北京锆年领航科技有限公司完成。

LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素组成分析测试在中国地质调查局西安地质调查中心测试中心微区分析实验室激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成。具体U-Pb同位素分析方法:将样品管放入1%稀硝酸中,将废液管夹到蠕动泵上,进行等离子体点火,点燃后稳定半个小时。用 $1\mu\text{g/L}$ 的等离子体质谱仪调试溶液调试仪器到最佳状态,用P/A调谐溶液对U、Pb同位素的脉冲信号和模拟信号进行调谐。然后将进样系统换成固体进样系

统,用NIST610标准样品对质谱参数进行进一步调谐。采用 $32\mu\text{m}$ 的激光束斑直径、 6.0J/cm^2 的激光能量密度和9Hz的激光频率,激光取样过程采用20s的背景采集时间、40s的剥蚀取样时间和10s的样品池冲洗时间,剥落的样品由高纯氦气(1.100L/min)带入ICP-MS;同位素 ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{208}Pb 和 ^{232}Th 采用20ms, ^{238}U 采用10ms, ^{207}Pb 采用30ms的积分时间;采用锆石标样91500作为外标进行U-Pb同位素分馏效应和质量歧视的校正计算,Plesovice锆石标样作为监控盲样来监视测试过程的稳定性;保证每5个样品点至少插一组标样。应用Glitter计算程序计算锆石的表面年龄及标准偏差,同时,应用Glitter对测试过程中产生的元素分馏和质量歧视进行校正。应用Isoplot计算程序对锆石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在谐和图上进行投图,并计算年龄谐和测点的加权平均年龄值(Weighted Average,基于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)。

3 锆石特征和定年结果

3.1 锆石特征

挑选出的锆石为自形晶,呈透明-半透明长柱状、短柱状及浑圆状,粒径介于80~200 μm 之间,晶体长宽比为2:1~3:1。在阴极发光图像(CL)上(图3),

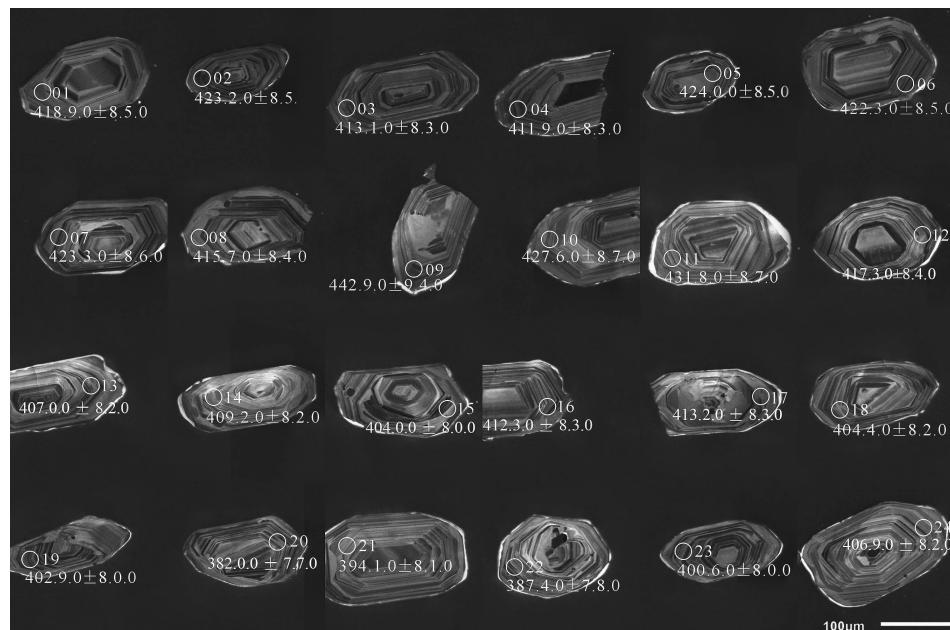


图3 小西弓南糜棱岩化石英闪长岩锆石CL图像和年龄值图

Fig. 3 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of single zircon of Mylonitized quartz diorite in the Southern Xiaoxigong

大部分锆石内部结构清晰,可见到岩浆锆石典型的生长韵律环带及明暗相间的条带结构,属于岩浆结晶的产物。打点位置多在锆石的边部和过渡地带。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

表 1 是样品测试得到的同位素比值和年龄数据,共分析测试了 24 个点。锆石的 Th 含量为 $46.5 \times 10^{-6} \sim 266.4 \times 10^{-6}$, U 含量为 $196.3 \times 10^{-6} \sim$

496.3×10^{-6} , Th/U 值为 $0.24 \sim 0.53$, 均大于 0.1, 表明这些锆石为岩浆锆石。

锆石 U-Pb 年龄较为集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $405.5 \sim 417.1\text{ Ma}$ 之间(图 4a、表 1)。大多数测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好,有效点为 24 个。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(411.3 \pm 5.8)\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=2.7$, 图 4b), 代表糜棱岩化石英闪长岩的结晶年龄,表明岩体侵位时代为早泥盆世。

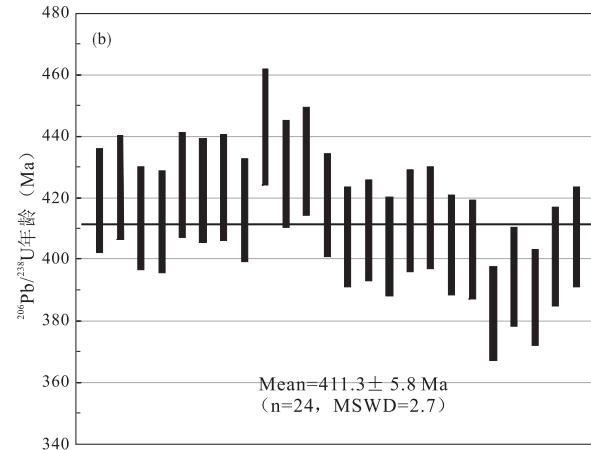
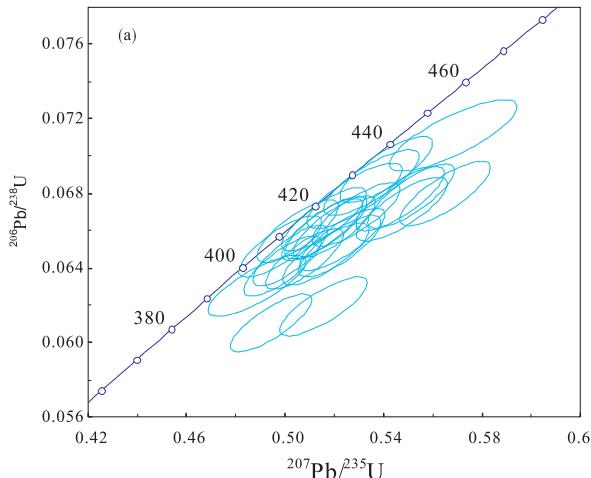


图 4 小西弓南糜棱岩化石英闪长岩锆石 U-Pb 图

Fig. 4 (a) Zircon U-Pb concordia diagram and (b) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age plot for the mylonitized quartz diorite from the southern Xiaoxigong

4 岩体地球化学特征

在小西弓南采集 4 件样品用于主量元素和微量元素分析测试。样品磨碎至 200 目后,在中国地质调查局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行主量元素和微量元素分析测试。主量元素采用 X-射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试;微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品,采用 ICP-MS(Element II)进行分析测试。

4.1 主量元素特征

岩体主量元素分析数据及特征值见表 2。该岩体 SiO_2 含量介于 $57.88\% \sim 58.26\%$, 略低于北山区石英闪长岩含量(修群业, 1999), TiO_2 含量介于 $0.81\% \sim 0.86\%$, 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) $4.74 \sim 5.04$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $0.22 \sim 0.31$, σ 值在 $1.38 \sim 1.56$ 之间变化, 碱指数 NK/A 为 $0.40 \sim 0.41$, 属钙碱性岩石, 铝饱和度 A/CNK $0.95 \sim 0.98$, 属次铝质岩系,

具 I 型花岗岩特征, 碱度率 AR 偏低, 值介于 $1.47 \sim 1.51$ 之间, ACF 成因类型判别图解上(图 5a), 样品偏向 I 型花岗岩一侧。在 $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解上(图 5b), 样品均落入亚碱性区域。

4.2 微量元素特征

稀土元素特征见表 2。在稀土元素球粒陨石标准化图上(图 6a), 曲线形态呈较平坦的右倾型, δEu 为 $0.41 \sim 0.58$, 4 个样均为弱负 Eu 异常, 重稀土元素 Gd-Lu 曲线有弱的正异常, ΣREE 为 $73.85 \times 10^{-6} \sim 160.37 \times 10^{-6}$, 属中等偏低含量, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 $8.30 \sim 11.25$, HREE 相对亏损, $(\text{La/Yb})_N$ 为 $11.81 \sim 20.44$, 属轻稀土富集型, 反映地壳物质部分熔融程度较高的特点。

微量元素分析数据见表 2, 分析结果表明 Ba、Sr、Zr 含量较高, Rb、Th、U 含量较低, 在洋中脊花岗岩标准化蛛网图上(图 6b), Rb、Th、大离子亲石元素富集, Ta、Hf 高场强元素明显亏损, 曲线右倾明显。Th/Ta 值较高, 为 $2.6 \sim 15.8$ 。

表1 小西弓南糜棱岩化石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果表

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analysis of the mylonitized quartz diorite from the southern Xiaoxigong

测点 编号	元素含量(10^{-6})			同位素比值						同位素年龄(Ma)						
	^{232}Th	^{238}U	^{206}Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	108.9	280.3	77.4	0.39	0.0591	0.0016	0.5474	0.0150	0.0672	0.0014	572.4	58.2	443.3	9.9	418.9	8.5
2	183.2	437.3	122.1	0.42	0.0589	0.0015	0.5511	0.0143	0.0679	0.0014	564.1	55.3	445.7	9.4	423.2	8.5
3	255.9	487.3	132.7	0.53	0.0566	0.0015	0.5166	0.0136	0.0662	0.0014	476.5	57.0	422.9	9.1	413.1	8.3
4	120.6	351.0	95.4	0.34	0.0555	0.0015	0.5051	0.0136	0.0660	0.0014	433.8	58.0	415.1	9.2	411.9	8.3
5	129.1	297.2	83.2	0.43	0.0603	0.0016	0.5649	0.0150	0.0680	0.0014	613.6	56.0	454.7	9.7	424.0	8.5
6	173.8	400.9	111.8	0.43	0.0586	0.0016	0.5466	0.0146	0.0677	0.0014	551.2	57.1	442.8	9.6	422.3	8.5
7	102.9	242.3	67.8	0.42	0.0565	0.0017	0.5282	0.0158	0.0679	0.0014	469.8	65.1	430.6	10.5	423.3	8.6
8	140.8	373.2	102.5	0.38	0.0562	0.0015	0.5158	0.0139	0.0666	0.0014	458.6	59.1	422.3	9.3	415.7	8.4
9	55.2	176.6	51.8	0.31	0.0580	0.0022	0.5683	0.0211	0.0711	0.0016	528.7	80.1	456.9	13.7	442.9	9.4
10	62.6	214.8	60.8	0.29	0.0566	0.0017	0.5350	0.0159	0.0686	0.0014	475.1	64.5	435.1	10.5	427.6	8.7
11	123.4	336.3	96.2	0.37	0.0567	0.0016	0.5410	0.0154	0.0693	0.0015	477.6	61.7	439.1	10.2	431.8	8.7
12	134.6	344.4	95.2	0.39	0.0574	0.0016	0.5288	0.0145	0.0669	0.0014	505.5	59.6	431.0	9.7	417.3	8.4
13	231.7	488.9	131.8	0.47	0.0581	0.0015	0.5221	0.0137	0.0652	0.0014	534.2	56.7	426.6	9.1	407.0	8.2
14	106.0	291.1	78.9	0.36	0.0579	0.0016	0.5232	0.0142	0.0655	0.0014	526.8	58.4	427.3	9.4	409.2	8.2
15	266.4	609.2	163.0	0.44	0.0563	0.0014	0.5020	0.0123	0.0647	0.0013	464.3	53.6	413.0	8.3	404.0	8.0
16	192.7	426.2	116.5	0.45	0.0566	0.0015	0.5150	0.0134	0.0661	0.0014	474.0	56.7	421.8	9.0	412.3	8.3
17	159.1	402.6	110.3	0.40	0.0570	0.0015	0.5199	0.0137	0.0662	0.0014	490.6	57.3	425.1	9.1	413.2	8.3
18	128.2	313.9	84.2	0.41	0.0579	0.0016	0.5165	0.0144	0.0647	0.0014	525.3	60.0	422.8	9.6	404.4	8.2
19	226.6	496.3	132.7	0.46	0.0571	0.0015	0.5078	0.0129	0.0645	0.0013	496.1	55.5	417.0	8.7	402.9	8.0
20	128.8	323.7	81.9	0.40	0.0587	0.0016	0.4943	0.0135	0.0611	0.0013	557.6	58.6	407.8	9.2	382.0	7.7
21	46.5	196.3	51.3	0.24	0.0562	0.0019	0.4886	0.0162	0.0631	0.0013	460.6	72.5	403.9	11.1	394.1	8.1
22	79.5	222.5	57.2	0.36	0.0604	0.0017	0.5156	0.0145	0.0619	0.0013	617.9	59.8	422.2	9.7	387.4	7.8
23	191.1	463.7	123.4	0.41	0.0565	0.0015	0.4989	0.0128	0.0641	0.0013	470.2	56.2	411.0	8.7	400.6	8.0
24	119.8	311.2	84.2	0.39	0.0555	0.0015	0.4981	0.0137	0.0652	0.0014	430.8	59.9	410.4	9.3	406.9	8.2

表 2 甘肃小西弓南早泥盆世石英闪长岩主要元素(%)、稀土及微量元素(10^{-6})组成表
Tab. 2 Major(%) ,Rare earth and trace(10^{-6})elements concentration for the mylonitized quartz diorite from the southern Xiaoxigong

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	总量
xx01	58.26	0.82	17.90	6.58	0.10	2.71	6.00	3.91	0.86	0.22	1.40
xx02	58.18	0.81	17.96	6.88	0.10	2.85	6.38	3.74	0.91	0.22	1.21
xx03	57.88	0.84	17.98	6.53	0.10	2.62	6.32	3.74	0.99	0.23	1.35
xx04	57.97	0.86	18.00	6.70	0.10	2.78	6.32	3.75	1.18	0.23	1.40
样品	里特曼指数	固结指数	碱度率	铝饱和度	碱指数	长英指数	镁铁指数	全碱	K ₂ O/	MgO/	
xx01	1.43	19.27	1.50	0.98	0.41	44.29	70.83	4.90	0.22	0.46	
xx02	1.38	19.82	1.47	0.96	0.40	42.16	70.71	4.74	0.24	0.46	
xx03	1.43	18.88	1.48	0.96	0.40	42.81	71.37	4.86	0.26	0.45	
xx04	1.56	19.29	1.51	0.95	0.41	43.82	70.68	5.04	0.31	0.46	
样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
xx01	29.35	65.83	6.68	26.31	4.58	1.03	4.01	0.38	2.59	0.48	1.32
xx02	34.20	71.45	7.62	29.37	5.31	1.17	4.29	0.42	2.76	0.53	1.53
xx03	12.52	32.22	3.33	14.97	2.96	0.67	2.34	0.32	2.02	0.39	1.05
xx04	16.64	40.32	4.38	19.43	4.03	0.94	4.03	0.37	2.63	0.51	1.40
样品	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	δEu	δCe	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N
xx01	1.03	0.19	16.5	144.0	133.79	10.21	13.10	0.41	1.71	20.44	4.13
xx02	1.26	0.22	18.3	160.4	149.12	11.25	13.25	0.41	1.60	19.47	4.16
xx03	0.76	0.13	9.35	73.85	66.68	7.16	9.31	0.45	1.92	11.82	2.73
xx04	1.01	0.18	14.7	96.07	85.74	10.33	8.30	0.48	1.88	11.81	2.66
样品	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf	Be	Co
xx01	67.1	381.1	7.5	1.0	0.5	12.3	856.8	161.3	4.0	1.6	11.6
xx02	73.7	411.7	7.9	0.9	0.5	11.9	882.6	133.2	3.3	1.6	12.7
xx03	11.6	353.4	1.3	1.2	0.5	11.7	742.6	132.2	3.3	1.6	10.9
xx04	31.5	439.0	2.5	0.9	0.7	13.4	830.9	201.0	4.9	1.6	11.7
样品	Cr	V	Sc	Li	Cs	Ga	In	Cu	Pb	Zn	Bi
xx01	13.1	159.3	7.8	2.8	1.9	25.1	0.1	7.9	13.1	98.2	0.0
xx02	15.1	166.3	10.4	4.7	2.6	27.9	0.1	7.9	13.0	104.0	0.0
xx03	11.0	153.8	2.3	3.0	0.7	23.5	0.1	8.4	13.1	91.2	0.0
xx04	11.8	163.3	4.1	4.0	1.1	25.4	0.1	5.8	12.9	100.7	0.0

$\sigma = (\text{Na}_2\text{O}) \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{Si}_2\text{O} - 4\text{Si})$, $\text{SI} = \text{MgO} \times 100 / (\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, $\text{AR} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$, $\text{CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$, $\text{NK/A} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{FL} = 100 \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{Na}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO})$, $\text{MF} = 100 \times (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$, $\Sigma \text{LREE} = \text{La} + \text{Ce} + \text{Nd}_\text{N}$, $\Sigma \text{HREE} = \text{Gd} + \text{Tb} + \text{Dy} + \text{Ho} + \text{Er} + \text{Tm} + \text{Yb} + \text{Lu}$, $\Sigma \text{REE} = \Sigma \text{LREE} + \Sigma \text{HREE}$, $\delta \text{Eu} = \text{Eu}_\text{N} \times 2 / (\text{Sm}_\text{N} + \text{Nd}_\text{N})$, $\delta \text{Ce} = \text{Ce}_\text{N} / (\text{La}_\text{N} + \text{Pr}_\text{N}) \times 0.5$ 。

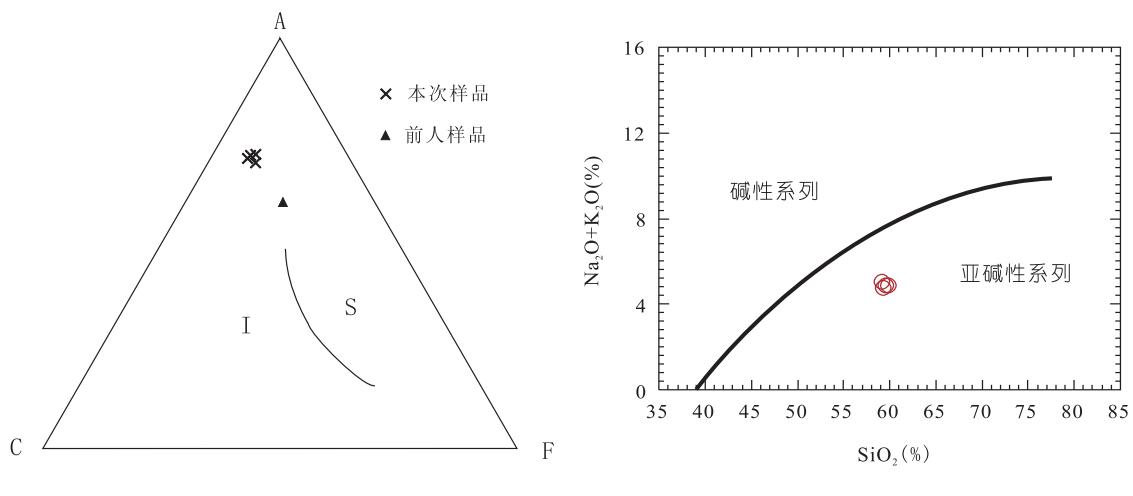
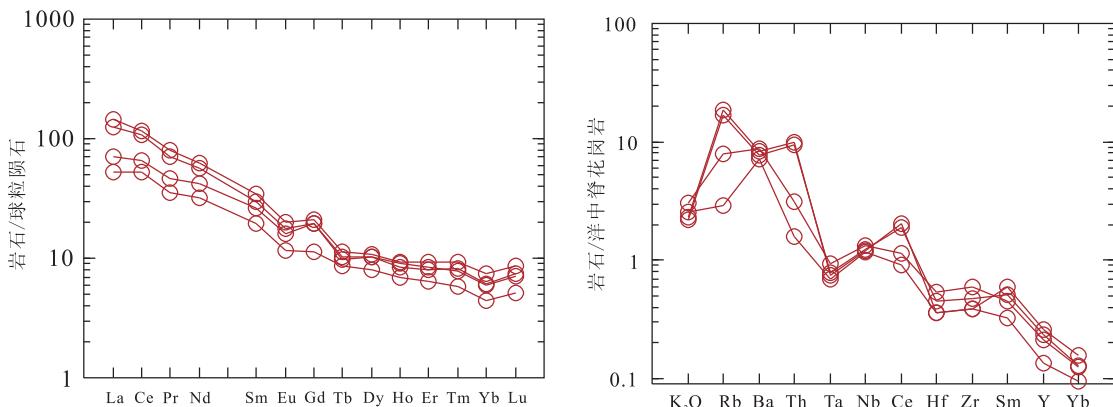
A. $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$; C. $\text{CaO} - 3.3 \times \text{P}_2\text{O}_5$; F. $\text{MgO} + \text{FeO} + \text{MnO}$ 图 5 (a)花岗岩类型 ACF 图解及 (b) SiO_2 – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解Fig. 5 (a) ACF diagrams for type and (b) SiO_2 – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ of granite

图 6 (a)稀土元素球粒陨石标准化图(球粒陨石标准化值据 SUN and McDONOUGH, 1989)和(b)微量元素蛛网图(洋脊花岗岩标准化值据 PEARCE 等, 1983)

Fig. 6 (a) REE chondrite-normalized distribution pattern(After SUN and McDONOUGH, 1989) and (b) Trace element spider diagram(After PEARCE et al., 1983)

5 形成环境及讨论

原1:25万玉门镇幅(梁明宏等,2005)曾在糜棱岩化石英闪长岩中采获(420.2 ± 0.9)Ma锆石U-Pb年龄。本次在该岩体中选择无变形蚀变石英闪长岩,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(411.3 ± 5.8)Ma,代表岩体的结晶年龄。两次采样分析结果相近,岩体侵位时代定为晚志留世-早泥盆世。

区域上新元古代、寒武纪、晚志留世-早泥盆世、泥盆纪、二叠纪中酸性侵入岩发育。前人对北山南带侵入岩研究形成了大量的文献和认识,其中桥湾

北角闪正长花岗岩(303.7 ± 2.4 Ma/锆石LA-ICP-MS)是北山南带后碰撞过程岩浆活动的产物(冯继承等,2012);金塔县碱凹井二长花岗岩和正长花岗岩(302 Ma/锆石U-Pb)形成于后碰撞伸展阶段(蒲万峰等,2015);音凹峡南花岗岩体(281.7 ± 2.9 Ma/锆石LA-ICP-MS)形成于早二叠世后碰撞伸展体制下,为后碰撞裂谷伸展阶段产物(张文等,2011)。总体倾向性认为:敦煌地块和北山南部的早古生代岩浆活动与俯冲-碰撞事件有关,在主碰撞期之后的后碰撞阶段,持续的板块汇聚导致大陆内部的逆冲、变形以及岩层的横向逃逸,岩石圈的堆叠和俯冲板片的断离引起了大量的岩浆活动(贺振

宇等,2014)。

作为本次研究主体的早古生代晚期-晚古生代早期石英闪长岩-二长花岗岩侵入体,以变形变质和岩浆混合作用强烈为特点,发育 2 个世代的矿物,早期矿物被晚期矿物混染、交代,后期动力变质和热扰动明显。岩体的就位是板块俯冲、碰撞过程在研究区的响应,这可以从岩石地球化学特点得到证实。A/CNK 值 0.95~0.98,具 I 型花岗岩特征,稀土元素特征反映地壳物质部分熔融程度较高。洋脊花岗岩标准化蛛网图上(图 6b),曲线形态与火山弧花岗岩最为接近。深成岩 $R_1 - R_2$ 构造环境判别图上(图 7)样品落入板块碰撞前区域。 $Rb - (Yb + Nb)$ 和 $Rb - (Yb + Ta)$ 图上(图 8),样品均落入火山弧花岗岩区。结合岩体形成时代和整体构造演化,该岩体应属火山弧型花岗岩,为陆缘弧岩浆作用的产物。

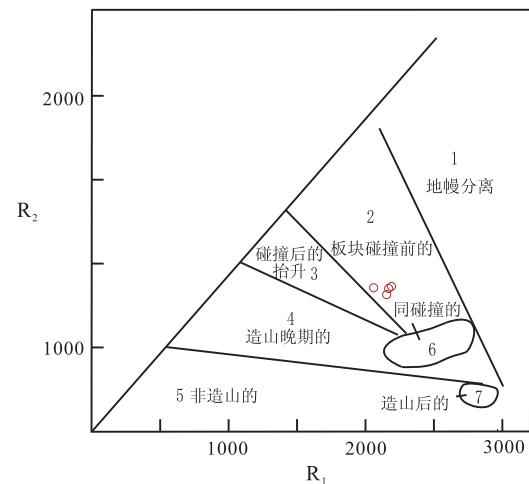


图 7 深成岩 $R_1 - R_2$ 构造环境判别图(R. A. Batchelor 等,1985)

Fig. 7 $R_1 - R_2$ tectonic discrimination diagrams of plutonite (R. A. Batchelor et al., 1985)

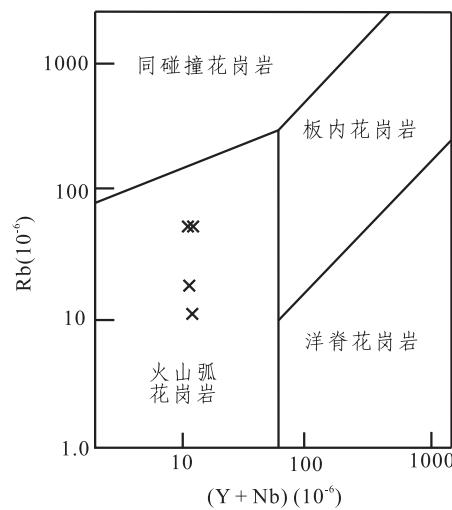
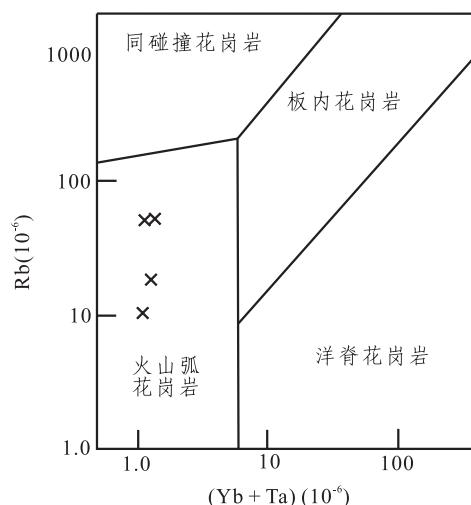


图 8 (a) 不同类型花岗岩的 $Rb - (Yb + Ta)$ 和 (b) $Rb - (Yb + Nb)$ 图解(据 PEARCE 等,1984)

Fig. 8 (a) $Rb - (Yb + Ta)$ and (b) $Rb - (Yb + Nb)$ diagrams for different types of granite(After PEARCE et al,1984)

6 结论

(1) 小西弓金矿南部强糜棱岩化石英闪长岩体与二长花岗质糜棱岩呈构造面理接触。同位素 LA-ICP-MS 镓石年龄值为 (411.3 ± 5.8) Ma, 时代为早泥盆世-晚志留世。

(2) 石英闪长岩的岩石地球化学特征属钙碱性、次铝质岩系,具 I 型花岗岩特征。构造环境为火山弧环境。是敦煌地块早古生代晚期-晚古生代早期对北山造山带俯冲、碰撞过程的响应。

参考文献(References) :

- 梁明宏,张新虎,刘建宏,等. 甘肃侵入岩及岩石构造组合[J]. 甘肃地质,2014,23 (3):1-8.
LIANG Minghong, ZHANG Xinhua, LIU Jianhong, et al. Intrusive Rock and Petrologic and Tectonic Assemblage in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 2014,23(3):1-8.
- 杨合群,李英,李文明,等. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性[J]. 地球学报,2009,30(5):627-633.
YANG Hequn, LI Ying, LI Wenming, et al. Spatial Variation Regularity and Ore Potential of S-type and I-type Granites in the Beishan Mountain[J]. Acta Geoscientica Sinica

- ca, 2009, 30(5): 627-633.
- 朱江, 吕新彪, 彭三国, 等. 甘肃北山小西弓金矿区石英正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征 [J]. 地质通报, 2015, 34(8): 1460-1469.
- ZHU Jiang, LÜ Xinbiao, PENG Sanguo, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the quartz syenite porphyry in the Xiaoxigong gold deposit and their geological implications [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(8): 1460-1469.
- 赵泽辉, 郭召杰, 王毅. 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, 2007, 23(8): 1847-1860.
- ZHAO Zehui, GUO Zhaojie, WANG Yi. Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of The Granitoids from Liuyuan Area, Beishan, Gansu Province, northwest China [J]. Acta Petrologica, 2007, 23(8): 1847-1860.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 甘肃北山红石山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学研究及构造意义 [J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1685-1694.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Zircon U-Pb chronological study of the Hongshishan ophiolite in the Beishan area and their tectonic significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1685-1694.
- 刘明强, 王建军, 代文军. 甘肃北山红石山地区马鞍山北花岗岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 岩石矿物杂志, 2006, 25(6): 473-479.
- LIU Mingqiang, WANG Jianjun, DAI Wenjun. The U-Pb age of single-grained zircon from Maanshanbei granite in Hongshishan area of the Beishan orogenic belt, Gansu Province [J]. Acta Petrologica et Minerogica, 2006, 25(6): 473-479.
- 赵志雄, 贾元琴, 许海, 等. 北山交叉沟石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 年龄及构造意义 [J]. 地质学报, 2015, 89(7): 1210-1218.
- ZHAO Zhixiong, JIA Yuanqin, XU Hai, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite from the Jiaochagou Area in Beishan Orogenic Belt, Inner Mongolia, and Its Tectonic Significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(7): 1210-1218.
- 贺振宇, 孙立新, 毛玲娟, 等. 北山造山带南部片麻岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素: 中元古代的岩浆作用与地壳生长 [J]. 科学通报, 2015, 60(4): 389-399.
- HE Zhenyu, SUN Lixin, MAO Lingjuan, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneiss and granodiorite from the southern Beishan orogenic collage: Mesoproterozoic magmatism and crustal growth [J]. Science China Press, 2015, 60(4): 389-399.
- 李舢, 王涛, 童英, 等. 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 [J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 407-422.
- LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, et al. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution [J]. Acta Petrologica et Minerogica, 2009, 28(5): 407-422.
- 梅华林, 李惠民, 陆松年, 等. 甘肃柳园地区花岗质岩石时代及成因 [J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 1(18): 14-17.
- MEI Hualin, LI Huimin, LU Songnian, et al. The Age and Origin of the Liuyuan Granitoid, Northwestern Gansu [J]. Acta Petrologica et Minerogica, 1999, 1(18): 14-17.
- 叶晓峰, 宗克清, 张泽明, 等. 北山造山带南缘柳园地区新元古代花岗岩的地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质通报, 2013, 32(2-3): 307-317.
- YE Xiaofeng, ZONG Keqing, ZHANG Zeming, et al. Geochemistry of Neoproterozoic granite in Liuyuan area of southern Beishan orogenic belt and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2-3): 307-317.
- 江思宏, 聂凤军. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约 [J]. 地质学报, 2006, 80(6): 826-842.
- JIANG Sihong, NIE Fengjun. Nd-Isotope Constraints on Origin of Granitoids in Beishan Mountain Area [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(6): 826-842.
- 张文, 吴泰然, 冯继承, 等. 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, 2010, 29(6): 719-737.
- ZHANG Wen, WU Taiyan, HE Yuankai, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Xijianquanzi alkali-rich potassium-high granites in Beishan, Gansu Province, and their tectonic significance [J]. Acta Petrologica et Minerogica, 2010, 29(6): 719-737.
- 左国朝, 何国琦, 李红诚, 等. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- ZUO Guochao, HE Guoqi, LI Hongcheng, et al. Plate tectonics and ore formation in the Beishan Region [M]. Beijing: Peking University Press, 1990.
- 龚全胜, 刘明强, 李海林, 等. 甘肃北山造山带类型及基本特征 [J]. 西北地质, 2002, 35(3): 28-34.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LI Hailing, et al. The type and basic characteristics of Beishan orogenic belt, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(3): 28-34.
- 张新虎, 刘建宏, 徐家乐, 等. 再论甘肃省的板块构造 [J].

- 甘肃地质学报,2005,14(2):1-10.
- ZHANG Xinhua, LIU Jianhong, XU Jiale, et al. Second study on plate tectonics in Gansu province [J]. *Acta Geologica Gansu*, 2005, 14(2): 1-10.
- 李锦轶,杨天南,李亚萍,等.东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束[J].地质通报,2009,28(12):1817-1826.
- LI Jinyi, YANG Tiannan, LI Yaping, et al. Elogical features of the Karamaili faulting belt, eastern Junggar region, Xinjiang, China and its constraints on the reconstruction of Late Paleozoic ocean-continental framework of the Central Asian region [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1817-1826.
- 刘明强,龚全胜,梁明宏.甘肃北山地区音凹峡多旋回裂谷带[J].甘肃地质学报,1999,8(2):15-22.
- LIU Ming qiang, GONG Quan sheng, LIANG Ming hong. Yinwaxia Polycyclic Rift zone in Beishan area in Gansu Province[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1999, 8(2): 15-22.
- 张新虎,刘建宏,梁明宏,等.甘肃省区域成矿及找矿[M].北京:地质出版社,2013:297-303.
- ZHANG Xinhua, LIU Jianhong, LIANG Minghong, et al. Regional mineralization and prospecting, Gansu Province [M]. Beijing: Geology Press, 2013:297-303.
- 梁明宏,霍勤知,李海林.1:25万玉门镇幅区调修测主要进展及成果[J].中国地质调查,2014,1(2):7-14.
- LIANG Minghong, HUO Qinzhi, LI Hailin. Main Progress and Achievements in Supplemental Regional Geological Survey of 1: 250 000 Yumenzheng Sheet [J]. *Geological Survey of China*, 2014, 1(2): 7-14.
- 王云斌,梁明宏,霍勤知,等.利用变形花岗岩体中的长石矿物进行有限应变测量初探[J].西北地质,2004,37(1):19-24.
- WANG Yunbin, LIANG Minghong, HUO Qinzhi, et al. The study of the limit deformation measurement with deformation feldspar in granite areas [J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(1): 19-24.
- 殷勇.甘肃北山花岗岩与金矿成矿作用[J].甘肃地质,2011,20(4):26-34.
- YIN Yong. Gold Metallogenesis and Granite in Beishan Region of Gansu Province [J]. *Gansu Geology*, 2011, 20 (4):26-34.
- 杨建国,谢春林,王小红,等.甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J].地质通报,2012,31(2/3):422-438.
- YANG Jianguo, XIE Chunlin, WAN Xiaohong, et al. Basic tectonic framework and features of metallogenic series in Beishan area, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3): 422-438.
- 陈柏林,吴淦国,杨农,等.甘肃北山白墩子-小西弓韧性剪切带及其控矿作用[J].地质力学学报,2007,2(13):99-109.
- CHEN Bailin, WU Ganguo, YANG Nong, et al. Baidunzi-Xiaoxigong Ductile Shear Zone and Its Ore-controlling Effect in the Southern Beishan area, Gansu [J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 2(13): 99-109.
- 修群业.甘肃北山地区花岗岩类地球化学特征及大地构造意义[J].前寒武纪研究进展,1999,1(22):31-39.
- JIU Qunye. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of The Granitoids in Beishan Area, Gansu Province[J]. *Progress In Precambrian Research*, 1999, 1 (22):31-39.
- 梁明宏,霍勤知,王云斌,等.甘肃1:25万玉门镇幅区域地质调查报告[R].2005.
- LIANG Minghong, HUO Qinzhi, WANG Yunbin, et al. Regional Geological Investigation of 1: 250 000 Yumen site in Gansu Province[R]. 2005.
- 冯继承,张文,吴泰然,等.甘肃北山桥湾北花岗岩体的年代学、地球化学及其地质意义[J].北京大学学报(自然科学版),2012,30(1):61-70.
- FENG Jicheng, ZHANG Wen, WU Tairan, et al. Geochronology and Geochemistry of Granite Pluton in the North of Qiaowan, Beishan Mountain, Gansu Province, China, and Its Geological Significance [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 30(1): 61-70.
- 蒲万峰,严镜,汪宏涛,等.甘肃金塔县碱凹井岩体岩石地球化学特征及构造环境分析[J].新疆地质,2015,33(2):263-269.
- PU Wanfeng, YAN Jing, WANG Hongtao, et al. Tectonic Setting and Geochemical Characteristics of the Jianaojing Pluton in Jinta County, Gansu [J]. *Xinjiang Geology*, 2015, 33(2):263-269.
- 张文,冯继承,郑荣国,等.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,2011,27(6):1649-1661.
- ZHANG Wen, FENG Jicheng, ZHENG Rongguo, et al. LA - ICP MS zircon U - Pb ages of the granites from the south of Yin'aoxia and their tectonic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 27(6): 1649-1661.
- 贺振宇,宗克清,姜洪颖,等.北山造山带南部早古生代构造演化:来自花岗岩的约束[J].岩石学报,2014,30(8):2324-2338.
- HE Zhenyu, ZONG Keqing, JIANG Hongying, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the southern Beishan orogenic collage: Insights from the granitoids [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2324-2338.