

甘肃北山大山头南花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义

王磊, 杨建国, 王小红, 齐琦, 谢燮

(国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法, 首次获得大山头南出露的片麻状花岗闪长岩的 $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $(386 \pm 6)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.06$), 代表该岩体的成岩年龄, 即大山头南花岗闪长岩岩体形成于中泥盆世。于此同时, 首次获得了花岗闪长岩中部分继承锆石的年龄为 $(885 \pm 20)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.18$), 该年龄是新元古代构造热事件的反映。该岩体成岩年龄介于其北侧的大山头超镁铁岩体 $(397 \pm 4)\text{Ma}$ 和大山头南超镁铁岩体 $(374 \pm 3)\text{Ma}$ 之间, 结合研究区地质构造背景及前人研究成果, 认为中晚泥盆世期间不仅有中酸性岩浆侵位, 同时沿大断裂带也有部分镁铁-超镁铁岩侵位, 中酸性岩体与镁铁-超镁铁岩体可能具有类似的地质背景, 即它们均形成于后造山或同造山晚期阶段。

关键词:大山头南花岗闪长岩; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 甘肃北山

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2017)04-0041-10

SHRIMP Zircon U-Pb Age of the Dashantounan Granodiorite in from Beishan Mountains in Gansu Province and its Signification

WANG Lei, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, Qi Qi, Xie Xie

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an
Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Using the SHRIMP zircon U-Pb dating methods, the diagenesis age of the Dashantounan granodiorite has been obtained for the first time. The obtained $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ weighted average age is $(386 \pm 6)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.06$), standing for the Dashantounan granodiorite was formed in middle Devonian. At the same time, the inherited zircon age has been obtained for the first time, and the yielded age is $(885 \pm 20)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.18$), which serves as a reflection of the Neoproterozoic tectonic-thermal event. The diagenetic age between the age of Dashantou rock mass $(397 \pm 4)\text{Ma}$ and the ones of Dashantounan rock mass $(374 \pm 3)\text{Ma}$. After analyzing the previous research achievements, it's believed that the magmatic intrusion in the Middle-late Devonian not only include intermediate-acidic magmas, but also include basic-ultrabasic magma in the studying area. The intermediate-acidic and basic-ultrabasic magma might be formed in the same geological

收稿日期: 2017-06-01; 修回日期: 2017-07-18

基金项目: 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”(DD20160009)和“祁连成矿带肃南—大柴旦地区地质矿产调查”(DD20160012)联合资助

作者简介: 王磊(1985-), 男, 工程师, 主要从事金属矿产成矿规律及找矿预测工作。E-mail: tleiwang@163.com

background, that is, they might be formed in a post-orogenic extensional setting or a late-stage of syn-orogenic setting.

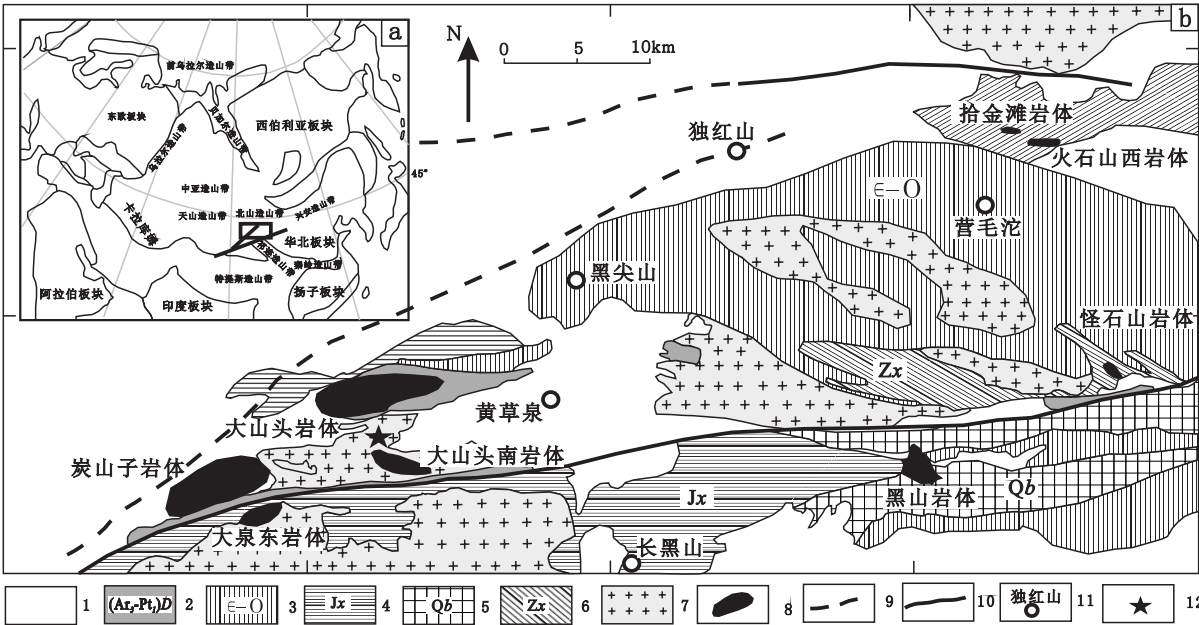
Keywords: Dashantounan granodiorite; zircon SHRIMP U – P b dating; Beishan in Gansu

北山造山带位于中亚造山带最南缘,为多期岛弧、蛇绿混杂岩拼贴而成的增生型造山带(丁嘉鑫等,2015)(图 1),其西邻东天山,东接阿拉善,以阿尔金和星星峡走滑断裂为界,位于一个构造楔形区内(李舫等,2009;龚全胜等,2002,2003;左国朝等,1990)。区内构造岩浆活动强烈,发育大量的岩浆岩类,是研究中亚造山带的一个关键部位。其研究成果对深入认识古亚洲洋消减闭合过程,增生造山作用及构造演化具有重要的指示作用。研究区位于北山西南部,柳园镇北部,构造上隶属于敦煌地块北缘,位于红柳河-火石山-牛圈子早古生代蛇绿混杂岩带南缘(李舫等,2009)。区内从超基性岩至中酸性侵入岩均有出露。前期对该区超基性杂岩体进行了相关研究,获得研究区部分超镁铁岩体的成岩年龄,显示超镁铁岩体主要侵位于中晚泥盆世(杨建国等,2012,2016;王磊等,2015a,2015b;谢燮等,2015a),对于位于大山头和大山头南之间的中酸性

侵入岩无年龄数据,其与超镁铁岩体之间关系如何,形成时代问题的解决对该区地质构造背景演化具有重要的意义。本次在对该区中酸性岩体进行调查的基础上,对位于大山头超基性杂岩体与大山头南超基性杂岩体之间的中酸性岩体进行了锆石 U – Pb 定年研究,并探讨该中酸性岩体的形成时代及其大地构造背景。

1 区域地质概况

区内出露地层岩性主要有敦煌群(Ar_3-Pt_1)D 黑云二长混合岩、黑云斜长片麻岩加石英岩、片岩,蓟县系(Jx)平头山组大理岩、灰岩、大理岩化灰岩,新元古界青白口系(Qb)含燧石条带灰岩和震旦系(Zx)米黄色大理岩,下古生界寒武系(ϵ)双鹰山组和西双鹰山组石英砂岩、变质石英砂岩、硅质岩、碳硅质岩,奥陶系(O)罗雅楚山组砂岩等。区内断裂



1. 新生界;2. 敦煌群;3. 寒武系—奥陶系;4. 蓟县系;5. 青白口系;6. 志留系;7. 中酸性花岗岩类;8. 基性-超基性杂岩体;9. 推测断裂;10. 断裂;11. 地名;12. 采样位置

图 1 (a)北山造山带位置(据毛启贵等,2010)及(b)甘肃北山大山头地区地质简图(据李舫等,2009,2011 修编)

Fig. 1 (a)Location of the Beishan fold belt(MAO Qigui et al. ,2010)and (b)sketch geological map of the Dashantou area in Beishanmoutains,Gansu province(Modified after LI Shan et al. , 2009, 2011)

主要有火石山断裂、狼山-北大泉断裂、庙庙井断裂。火石山断裂呈近东西向,位于研究区最北部,在火石山一带发育有基性-超基性杂岩,以镁质超基性岩为主。狼山-北大泉断裂北东向呈北东向,该断裂及其次级断裂对炭山子岩体及大山头岩体具有控制作用。庙庙井断裂位于研究区最南部,其西端与狼山-北大泉断裂相交,对大泉东岩体具有控制作用。基性-超基性岩体主要分布于火石山、怪石山、黑山、大山头、大泉东等地区,均分布于断裂两侧,且均以铁质超基性岩为主,目前在黑山、怪石山、大山头、大山头南岩体发现了不同程度的铜镍矿化(王磊等,2015c;谢燮等,2013,2015b;王小红等,2014)。大山头岩体呈东西带状分布,长约13 km,宽约4 km,主要有橄榄苏长辉长岩、辉长岩组成,在其核心部位基性程度稍高,以橄榄辉石岩、辉石橄榄岩为主,在岩体的橄榄辉石岩及辉石橄榄岩中已发现铜镍矿体。大山头南(三个井)岩体呈东西带状分布,东西长约2.5 km,南北宽约0.3 km,面积相对较小,基性程度相对大山头岩体较高,以蛇纹岩、辉橄岩、橄榄辉石岩为主,在其岩体边部,渐变为辉长岩,大山头南岩体也显示有良好的铜镍矿化(王磊等,2015a)。

2 岩体和测年样品特征

大山头南中酸性岩体主要分布于大山头南至罗雅楚山南一带,受断裂控制而呈东西向向北突出的弧形分布,长轴与区域构造线方向一致,中部荒草滩一带被第四系覆盖,为一岩基。主要岩石类型为花岗闪长岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母花岗岩,受后期构造挤压,局部呈弱片麻状构造。黑云母花岗岩、黑云母花岗闪长岩占主体,呈中粗粒粒状结构,块状构造。在罗雅楚山南,岩体南北两侧与围岩均呈断层接触,接触面较破碎,但相对平整。在大山头南一带,岩体与地层为交代混合接触,无明显的接触面,边缘含围岩残留体较多,推测其剥蚀不深。岩体侵入于一套浅变质岩中,岩性以云母石英片岩、云母石英变粒岩为主,均发生强烈的混合岩化作用,形成混合岩化带。北部主要形成混合英闪岩、条痕状二长混合岩等,南带主要形成条纹状斜长混合岩,与辉长岩接触部位有少许混染作用^①。在岩体西端两侧约

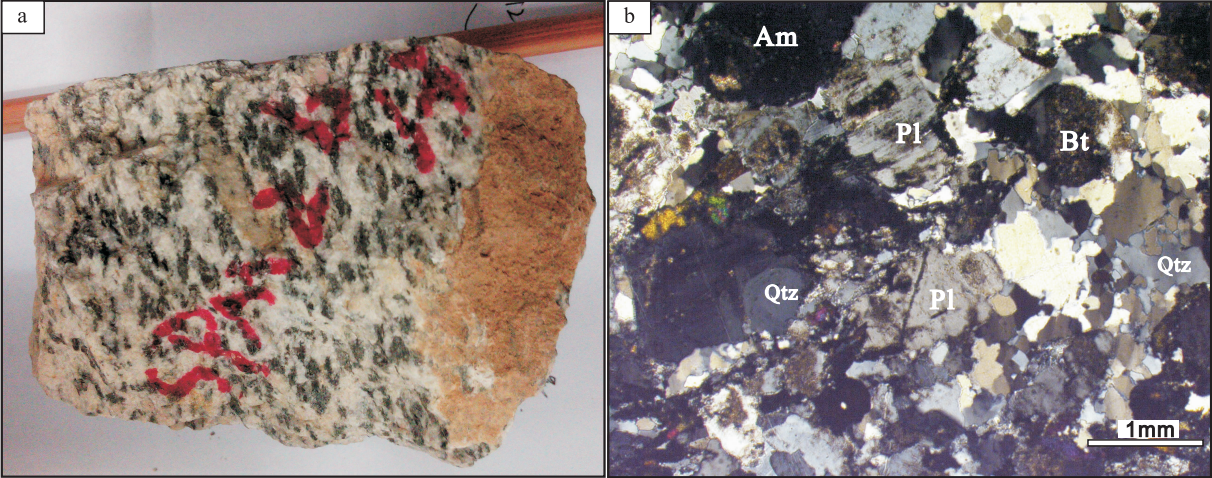
1 km 处分别有 2 处基性-超基性岩岩体出露,北部为大山头岩体,南部为大山头南(又名三个井)岩体,由于岩石风化破碎,地表被碎石覆盖,岩体与这 2 处基性-超基性岩体接触关系不清。本次对位于大山头和大山头南岩体之间的中酸性岩体进行了采样,采样位置见图 1。

所采样品位于三个井和大山头岩体之间(图 1),岩石为弱片麻状构造,粒状变晶结构,主要由斜长石(60%左右)、石英(25%)、角闪石(3%)、黑云母(10%)及少量碱性长石组成,副矿物有榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石等。次生蚀变矿物有绢云母、绿泥石。斜长石矿物晶体形态呈板状,少量呈拉长粒状,晶体中环带结构普遍发育,并常在环带中心发生次生蚀变。矿物晶体常沿长轴方向微具方向性分布。碱性长石种属为微斜长石,晶体细小,含量较少,为钾交代形成。暗色矿物黑云母和角闪石呈不连续细条带集合体,具方向性分布,形成弱片麻状构造。磷灰石、榍石、磁铁矿多呈粒状零星分布(图 2)。

3 测试方法和结果

由于锆石广泛存在于各类岩石中,富含 U 和 Th,低普通 Pb 以及非常高的矿物稳定性,使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最常用和最有效的方法之一(吴元保等,2004)。锆石挑选是在河北省区域地质矿产研究所由专业技术人员在无污染条件下,经过手工破碎、淘洗、磁选、重液分离选出的,并在双目镜下认真挑选。锆石制靶和阴极发光(CL)及反射透射照是在中国地质科学院地质研究所离子探针中心完成。锆石离子探针分析样品的制备按照宋彪等(2002)提出的方法进行。样品分析在北京离子探针中心的 SHRIMP II 离子探针上完成,数据处理按 WILLIAMS IS(1998)程序进行。衰变常数使用 STEIGER(1977)等推荐值,普通铅用直接测定的²⁰⁴Pb 校正。因为年轻锆石(<1 000 Ma)中放射成因²⁰⁷Pb 量较少,分析中容易产生较大的误差,所以对年轻锆石(<1 000 Ma)均使用其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,对较老锆石(>1 000 Ma)使用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄。给出数据均为同一测点连续 5 次分析的平均值,误差为 1 σ ,最终年龄的加权平均值的

①甘肃地质矿产局. 1:20 万红柳园幅区域地质测量报告,1967.



Pl. 斜长石; Qtz. 石英; Am. 角闪石; Bt. 黑云母
图 2 (a)手标本宏观照片和(b)显微镜下照片

Fig. 2 (a)Macroscopic and (b)Microscopic photographs of Rock Specimen

误差则为 2σ (表 1)。

阴极发光图像可以显示锆石表明部分微量元素的含量和/或晶格缺陷的差异,一般锆石中 U、REE 和 Th 等微量元素含量越高,锆石阴极发光的强度越弱(HANCHAR J M et al. , 1993, 1995; CROFU F et al. , 2003; RUBATTO D et al. , 2000; 吴元保等, 2004)。因此,阴极发光成为锆石内部结构研究中最常用和最有效的方法之一。本次所采样品部分锆石特征见图 3。锆石呈半自形到自形晶,柱状构造,粒径 $150\sim 250\text{ }\mu\text{m}$,长宽比一般在 2 左右。部分锆石振荡环带清晰,环带较窄,说明其形成温度

相对较低(吴元保等, 2004)。部分锆石具有明显的核(1、2、5),锆石核部呈黑色,说明其 U、REE 和 Th 等微量元素含量较高,为继承锆石。本次利用离子探针分析技术对原生锆石和少量继承锆石进行了测试分析,测试结果见图 4。结果显示,9 个原生锆石加权平均年龄为 $(386\pm 6)\text{ Ma}$ (MSWD=1.06),3 个继承锆石加权平均年龄为 $(885\pm 20)\text{ Ma}$ (MSWD=1.18)。即该岩体成岩年龄为 $(386\pm 6)\text{ Ma}$ (MSWD=1.06),其中捕掳了 $(885\pm 20)\text{ Ma}$ 左右的继承锆石。继承锆石年龄的获得对该岩体岩浆来源具有一定的指示意义。

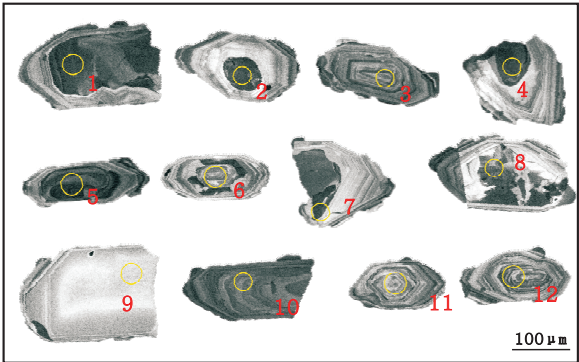


图 3 甘肃北山大山头南花岗闪长岩样品锆石
阴极发光图像及分析点位置图

Fig. 3 CL images and the analyzed location of the
zircon of the granodiorite in Dashantounan area,
Beishanmoutains, Gansu province

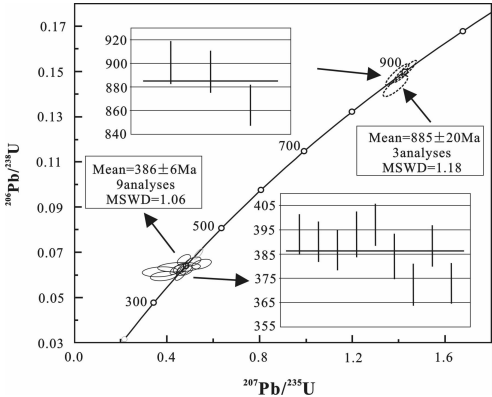


图 4 大山头南花岗闪长岩锆石 U - Pb 年龄图

Fig. 4 Distribution histogram and Concordia diagram
showing age data from SHRIMP zircon U - Pb dating of
Dashantounan granodiorite, Beishanmoutains, Gansu province

表 1 甘肃北山大山头南花岗闪长岩 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果表

Tab. 1 SHRIMP Zircon U-Pb isotope dating of the Dashantouman intrusion in Beishan, Gansu province

测点	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* (10 ⁻⁶)	年 龄(±1σ)				比 值						误差相 关系数	
						²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ¹	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ²	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ³	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ¹	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ¹	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U		± %
12WT-2-1	0.01	652	233	0.37	84.1	901 ±18	901 ±19	903 ±19	901 ±15	851 ±20	0.069 07	0.75	1.428	2.3	0.149 9	2.2	0.945
12WT-2-2	0.01	774	516	0.69	98.8	893 ±18	894 ±18	896 ±19	871 ±22	858 ±19	0.068 09	1.0	1.395	2.4	0.148 5	2.1	0.897
12WT-2-3	0.22	335	244	0.75	18.2	393.2 ±8.3	394.1 ±8.4	397.0 ±9.3	311 ±79	362 ±11	0.052 6	3.4	0.456	4.1	0.062 9	2.2	0.532
12WT-2-4	382.55	554	198	0.37	61.5	-2 930 ±3 100	781 ±18	825 ±17	5 380 ±290	—	1.11	21	-56	87	-0.36	85	0.971
12WT-2-5	0.67	948	115	0.13	118	865 ±17	862 ±18	885 ±18	930 ±30	-336 ±75	0.070 1	1.4	1.386	2.6	0.143 5	2.1	0.826
12WT-2-6	0.72	412	336	0.84	22.0	386.7 ±8.1	386.0 ±8.2	443 ±11	441 ±99	—	0.055 7	4.5	0.475	5.0	0.061 8	2.2	0.438
12WT-2-7	0.24	206	32	0.16	11.2	393.1 ±9.3	393.4 ±9.4	403.2 ±9.6	369 ±54	-39 ±15	0.053 9	2.4	0.468	3.4	0.062 9	2.4	0.716
12WT-2-8	2.12	586	388	0.68	32.7	397.0 ±8.5	398.4 ±8.7	450 ±10	275 ±300	-85 ±52	0.051 8	13	0.453	13	0.063 5	2.2	0.165
12WT-2-9	1.19	85	50	0.61	4.54	384.0 ±9.2	388.9 ±9.1	426 ±10	-118 ±330	-50 ±33	0.043 9	14	0.371	14	0.061 4	2.5	0.179
12WT-2-10	0.62	120	72	0.62	6.18	372.4 ±8.5	375.6 ±8.5	411.4 ±9.9	50 ±220	—	0.047 0	9.4	0.386	9.6	0.059 5	2.3	0.244
12WT-2-11	0.69	198	128	0.67	10.6	388.3 ±8.4	389.8 ±8.5	433 ±10	252 ±70	-26.8 ±8.3	0.051 3	3.0	0.439	3.8	0.062 1	2.2	0.590
12WT-2-12	0.15	392	303	0.80	20.1	373.0 ±8.2	372.2 ±8.3	422 ±11	444 ±52	-4.3 ±3.7	0.055 8	2.3	0.458	3.2	0.059 6	2.3	0.698

注:1. 以实测²⁰⁴Pb校正的普通 Pb; 2. 假设²⁰⁶Pb/²³⁸U_{-208Pb/²³²Th}年龄一致的普通 Pb; 3. 假设²⁰⁶Pb/²³⁸U_{-208Pb/²³²Th}年龄一致校正的普通 Pb; Pb_c和 Pb* 分别指普通 Pb 和放射成因 Pb。

4 讨论

北山造山带的构造演化经历了新元古代古陆块裂解、古生代岛弧和大陆弧的形成和弧陆碰撞等多个阶段,最终碰撞拼合,进入陆内演化阶段,并可能持续到泥盆纪或晚二叠纪(姜洪颖等,2013;ZUO et al. ,1991; AOET et al. ,2010,2012; XIAO et al. , 2010; SU et al. , 2011a)。北山南部构造带位于敦煌地块与北山北带地质体之间,榴辉岩、片麻岩与大量花岗岩、基性-超基性岩共存反映北山南带是一个重要的构造区域(叶晓峰等,2013;LIU X C ; 梅华林等,1998)。本次获得了大山头南花岗闪长岩岩体中锆石加权平均年龄为(386±6)Ma,代表岩体的侵入年龄,为中泥盆世。近年来,关于甘肃北山研究区及邻区的基性-超基性岩类、花岗岩类的形成时代,许多学者先后利用锆石 SHRIMP U-Pb 法和 LA-ICP-MS U-Pb 法对典型岩体进行了详细研究,获得了一些测年数据(表 2),年龄主要介于 358~397 Ma。例如,位于其北部的大山头基性岩-超基性杂岩体成岩年龄为 397 Ma(谢燮等,2015),南部的大山头南超基性岩杂岩体(又名三个井岩体)成岩年龄为 374 Ma(王磊等,2015),其东部的黑山基性-超基性杂岩体成岩年龄为 375 Ma(杨建国等,2012)。前

人对该时期的中酸性侵入岩和基性-超基性岩的岩浆来源及地质背景进行了大量研究(李舫等,2009, 2011;王立社等,2009;XIE w et al. , 2013;王磊等, 2015;谢燮等,2015)。XIE w 等(2013)认为黑山岩体的原始岩浆是由活动大陆边缘的交代地幔形成,并且与俯冲板片拆离,软流圈地幔上涌有关;王磊等(2015)认为大山头南岩体形成于活动大陆边缘或(被动)大陆边缘裂谷背景下,由于俯冲板块的拆离作用造成软流圈部分熔融上涌,形成高镁玄武质原生岩浆。李舫等(2009)指出形成于 415 Ma 左右的双峰山 A 型花岗岩为后造山伸展背景下的岩浆产物;李舫等(2011)指出形成于 397 Ma 的辉铜山岩体形成于后造山环境或同造山晚期阶段,在被动拉张环境下,幔源岩浆底侵使上覆年轻地壳部分熔融形成。王立社等(2009)指出红柳河-牛圈子断裂北缘哈尔根头口布中泥盆世 A 型花岗岩(388 Ma)可能产于构造挤压向构造伸展的转折阶段。区域上泥盆纪辉铜山—墩墩山一带发育的山前火山-磨拉石坳陷带,反映了处于造山后期环境(左国朝等,1995;何世平等,2005;李舫等,2011)。笔者考虑到大山头南中酸性岩体所在的区域地质背景、岩体构造特征及前人研究成果,认为该岩体形成于后造山环境或同造山晚期,在拉张环境下,幔源岩浆底侵使上覆年轻地壳物质部分熔融形成。

表 2 甘肃北山大山头及邻区岩浆岩成岩年龄表				
Tab. 2 The diageneticage of the magmatite in Dashantou and adjacentarea, Beishanmoutains, Gansu province				
岩体名称	岩石类型	测试方法	成岩年龄(Ma)	资料来源
黑山岩体	辉长岩	ID-TIMS	366.6±0.6	颜伟等,2013
黑山岩体	辉长岩	ID-TIMS	356.40±0.6	XIE et al. , 2012
黑山岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	374.6±5.2	杨建国等,2012
黑山岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	358±5	XIE et al. , 2012
怪石山岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	358.6±3.9	杨建国等,2015
大山头岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	359.3±5.7	闫海卿等,2012
大山头岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	396.7±3.8	谢燮等,2015
大山头南岩体	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	374.3±3	王磊等,2015
双峰山岩体	花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	415±3	李舫等,2009
辉铜山北岩体	二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	397±7	赵泽辉等,2007
拾金坡岩体	似斑状二长花岗岩	Rb-Sr	389±17	安国堡,2007
辉铜山北岩体	钾长花岗岩	Rb-Sr	350±17	安国堡,2007
拾金坡岩体	似斑状二长花岗岩	锆石 U-Pb	380±40	田永志,1993

此外,大山头南花岗闪长岩岩体中部分锆石具有明显的核部,对其年龄也进行了分析,获得3个继承锆石年龄为 (885 ± 20) Ma,为晚青白口世,属晋宁运动时期。北山地区在太古宙主要经历了古陆核形成、早—中元古代褶皱增生、初始陆壳开始形成(左国朝等,1990;龚全胜等,2002,2003;何世平等,2005)几个阶段。前人指出中元古代可能是柳园地区重要的地壳生长时期(梅华林等,1999;杨经绥等,2006;于海峰等,1999;王静永,2008)。随后,研究人员在柳园及东天山地区发现了新元古代的榴辉岩、辉长岩、斜长花岗岩、花岗片麻岩等(梅华林等,1999;叶晓峰等,2013;秦克章等,2002;于海峰等,1999),显示新元古代早期陆块(地块)的汇聚、拼合作用。叶晓峰等(2013)对柳园地区新元古代花岗质片麻岩 (902 ± 5) Ma进行了研究分析,指出这些花岗岩可能具有古老地壳物质熔融再与新生幔源物质混合的成因,认为其形成是 Rodinia 超大陆汇聚的响应。本次发现大山头南花岗闪长岩中新元古代的继承锆石,也是当时地质事件的一种反映。查明这一时期的构造岩石组合,对中国西部新元古代超大陆格局的再造具有重要意义(秦克章等,2002)。

5 结论

(1)采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法,首次获得大山头南出露的片麻状花岗闪长岩中的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 (386 ± 6) Ma ($\text{MSWD}=1.06$),代表该岩体的形成年龄,即大山头南花岗闪长岩岩形成于中泥盆世,其与南北两侧发育的超基性岩岩体年龄相差不大,具有相同的地质构造背景。

(2)首次获得了大山头南花岗闪长岩中3个继承锆石的加权平均年龄为 (885 ± 20) Ma,是新元古代构造热事件的反映。

(3)结合研究区地质演化背景及前人研究成果,认为大山头南花岗闪长岩岩体形成于后造山环境或同造山晚期的拉张环境下。

致谢:感谢北京离子探针中心在本次 SHRIMP 锆石测年工作给予的支持与帮助!对审稿人提出的宝贵意见表示衷心感谢。

参考文献(References):

- 安国堡. 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, 2007, 16(3): 19-25.
- AN Guobao. Characteristics of Shijinpao granites and their relationship to gold metallogenesis in the Beishan-moutains, Northwestern Gansu [J]. Gansu Geology, 2007, 16(3): 19-25.
- 丁嘉鑫, 韩春明, 肖文交, 等. 北山造山带花牛山岛弧东段钨矿床成矿时代和成矿动力学过程[J]. 岩石学报, 2015, 31(2): 594-616.
- DING Jiaxin, HAN Chunming, XIAO Wenjiao, et al. Geochemistry and U-Pb geochronology of tungsten deposit of Huaniushan island arc in the Beishan Orogenic Belt, and its geodynamic background [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(2): 594-616.
- 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 Hailin, et al. The type and basic characteristics of Beishan orogenic belt, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(3): 28-34.
- 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 北山造山带大地构造相及构造演化[J]. 西北地质, 2003, 36(1): 11-17.
- GONG Quansheng, LIU Mingqiang, LIANG Minghong, et al. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2003, 36(1): 11-17.
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. 西北地质, 2005, 38(3): 6-15.
- HE Shiping, ZHOU Huiwu, REN Bingchen, et al. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China [J]. Northwestern Geology, 2005, 38(3): 6-15.
- 姜洪颖, 贺振宇, 宗克清, 等. 北山造山带南缘北山杂岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 3949-3967.
- JIANG Hongying, HE Zhenyu, ZONG Keqing, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic studies on the Beishan complex in the southern Beishan orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(11): 3949-3967.
- 颜伟, 宋谢炎, 邓宇峰, 等. 甘肃黑山铜镍硫化物含矿岩体的地质特征及橄榄石成因探讨[J]. 岩石学报, 2013, 29

- (10):3487-3502.
- XIE Wei, SONG Xieyan, DENG Yufeng, et al. Geology and olivine geochemistry of the Heishan Ni - Cu - (PGE) sulfide deposit, Gansu, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10): 3487-3502.
- 李舫,王涛,童英,等. 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[J]. *岩石学报*, 2011, 27(10):3055-3070.
- LI Shan, WANG Tao, TONG Ying, et al. Zircon U - Pb age, origin and its tectonic significances of Huitongshan Devonian K - feldspar granites from Beishan orogeny, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 3055-3070.
- 李舫,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 Mineralogica*, 2009, 28(5): 407-422.
- 毛启贵,肖文交,韩春明,等. 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*, 2010, 26(2): 584-596.
- MAO Qigui, XIAO Wenjiao, HAN Chunming, et al. Discovery of middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan area, Beishan Mountains, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 584-596.
- 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, 18(1):14-17.
- MEI Hualin, LI Huimin, LU Songnian, et al. The age and origin of the Liyuangranitoid, northwestern Gansu[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1999, 18(1):14-17.
- 梅华林,于海峰,陆松年,等. 甘肃敦煌太古宙英云闪长岩:单颗粒锆石 U - Pb 年龄和 Nd 同位素[J]. *前寒武纪研究进展*, 1998, 21(2):41-45.
- MEI Hualin, YU Haifeng, LU Songnian, et al. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu province: Age from the U - Pb single zircon and Nd isotope[J]. *Progress in Precambrian Research*, 1998, 21(2): 41-45.
- 秦克章,方同辉,王书来,等. 东天山古生代板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 302-308.
- QIN Kezhang, FANG Tonghui, WANG Shulai, et al. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan mountains, NW - China[J]. *Xinjiang Geology*, 2002, 20(4):302-308.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等. 锆石 SHRIMP 样品制作、年龄、测定及有关现象讨论[J]. *地质评论*, 2002, 48(增刊): 26-30.
- SONG Biao, ZHANG Yuhai, WAN Yusheng, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 2002, 48(suppl.): 26-30.
- 田永志. 甘肃北山拾金坡岩体特征及含金性研究[J]. *西安地质学院学报*, 1993, 15(4):62-69.
- TIAN Yongzhi. Study on the feature and auriferous potentiality of Shijinpo rock body in Beishan Mountain, Gansu province[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1993, 15(4):62-69.
- 王静永. 甘肃北山南带峡东地区敦煌岩群中花岗质正片麻岩的确认及其意义[J]. *甘肃地质*, 2008, 17(3):22-26.
- WANG Jingyong. Identification of granitic orthogneiss of Dunhuang rock group in Xiadong area of Gansu province and its significance[J]. *Gansu Geology*, 2008, 17(3): 22-26.
- 王磊,杨建国,王小红,等. 甘肃北山大山头南基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U - Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2015a, 34(5):697-709.
- WANG Lei, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. Zircon SHRIMP U - Pb age and its significance of Dashantouan basic-ultrabasic intrusion complex in Beishan mountains, Gansu province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2015a, 34(5): 697-709.
- 王磊,杨建国,王小红,等. 甘肃北山营毛沱地区花岗岩类 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015b, 34(3):583-591.
- WANG Lei, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. LA - ICP - MS zircon U - Pb dating of Yingmaotuo granitic rocks and its geological implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015b, 34(3): 583-591.
- 王立社,杨建国,王育习,等. 甘肃北山营毛沱地区公婆泉群中玄武岩同位素定年及其地质意义[J]. *地球学报*, 2009, 30(3):363-368.
- WANG Lishe, YANG Jianguo, WANG Yuxi, et al. Isotopic dating of basalt from Gongpoquan group in Yingmaotuo area of the Beishan Mountain, Gansu province, and

- its geological significance[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(3): 363-368.
- 吴元保, 郑永飞. 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*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U - Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 谢燮, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山红柳沟基性-超基性岩体岩石成因及成矿条件[J]. *现代地质*, 2015a, 29(6): 1259-1270.
- XIE Xie, YANG Jianguo, WANG Xiaohong, et al. The petrogenesis and mineralization of the Hongliugou mafic-ultramafic rock in Beishan, Gansu province[J]. *Geoscience*, 2015a, 29(6): 1259-1270.
- 闫海卿, 赵焕强, 丁瑞颖, 等. 甘肃北山大山头基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄及其地质意义[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 216-228.
- YANG Haiqing, ZHAO Huanqiang, DING Ruiying, et al. Zircon SHRIMP U - Pb dating of the Dashantou basic complex and its geological significance in Beishan area, Gansu province[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 216-228.
- 杨建国, 王磊, 王小红, 等. 甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U - Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(2/3): 448-454.
- YANG Jianguo, WANG Lei, WANG Xiaohong, et al. Zircon SHRIMP U - Pb dating of Heishan mafic-ultramafic complex in the Beishan area of Gansu province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3): 448-454.
- 杨建国, 王磊, 谢燮, 等. 甘肃北山怪石山铜镍矿化基性-超基性杂岩体锆石 SHRIMP U - Pb 同位素定年及其意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(1): 98-108.
- YANG Jianguo, WANG Lei, XIE Xie, et al. SHRIMP zircon U - Pb age and its significance of Guaishishan mafic-ultramafic complex in Beishan Mountains, Gansu province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(1): 98-108.
- 杨经绥, 吴才来, 陈松永, 等. 甘肃北山地区榴辉岩的变质年龄: 来自锆石的 U - Pb 同位素定年证据[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 317-325.
- YANG Jingsui, WU Cailai, CHEN Songnian, et al. Neoproterozoic eclogitic metamorphic age of the Beishan eclogite of Gansu, China: Evidence from SHRIMP U - Pb isotope dating[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 317-325.
- 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.
- 于海峰, 陆松年, 梅华林, 等. 中国西部新元古代榴辉岩-花岗岩带和深层次韧性剪切带特征及其大陆再造意义[J]. *岩石学报*, 1999, 15(4): 532-538.
- YU Haifeng, LU Songnian, MEI Hualin, et al. Characteristics of Neoproterozoic eclogite-granite zones and deep level ductile shear zone in western China and their significance for continental reconstruction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(4): 532-538.
- 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 Sinica*, 2007, 23(8): 1847-1860.
- 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.
- 左国朝, 刘春燕, 白万成, 等. 北山泥盆纪碰撞造山火山-磨拉石地质构造及地球化学特征[J]. *甘肃地质学报*, 1995, 4(1): 35-43.
- ZUO Guochao, LIU Chunyan, BAI Wancheng, et al. Volcano-Molasse geological structure and geochemical signature in Devonian period collision orogenic in Beishan, Gansu-Inmongolia[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1995, 4(1): 35-43.
- AO S J, XIAO W J, HAN C M, et al. Cambrian to Early Silurian ophiolite and accretionary processes in the Beishan collage, NW China: Implications for the architecture of the southern Altaids [J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(4): 606 - 625.

- AO S J, XIAO W J, HAN C M, et al. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids [J]. *Gondwana Research*, 2010, 18: 466-478.
- CROFU F, HANCHAR J M, HOSKIN P W O. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53: 469-495.
- HANCHAR J M, MILLER C F. Zircon zonation patterns as revealed by cathodeluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. *Chemical Geology*, 1993, 110: 1-13.
- HANCHAR J M, RUDNICK R L. Revealing hidden structures: the application of cathodeluminescence and back-scattered electron imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths [J]. *Lithos*, 1995, 36/3-4: 289-303.
- LIU X C, CHEN B L, JAHN B, et al. Early paleozoic eclogites from Beishan (NW China) and their bearing on the tectonic evolution of the southern central Asian orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 42 (4): 715-731.
- RUBATTO D, GEBAUER D. Use of cathodoluminescence for U - Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps [J]. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2000, 373-400.
- STEIGER R H, JDGER E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo-and cos-mochronology [J]. *Earth Planet Scielett*, 1977, 36 (3): 359-362.
- SU B X, QIN K Z, SAKYI P A, et al. U - Pb ages and Hf - O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tentonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume [J]. *Gondwana Research*, 2011a, 20 (2-3): 516 - 531.
- WILLIAMS I S. U - Th - Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks III WC, Ridley WI (eds.). *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* [J]. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 7: 1-35.
- XIAO W j, MAO Q G, WINDLEY B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishanorogenic collage [J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(10): 1553-1594.
- XIEW, SONG X Y, DENG Y F, et al. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic ultramafic intrusion at the sonthern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 2012, 144 -145.
- ZUO G C, ZHANG S L, HE G Q, et al. Plate tectonic characteristics during the Early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian border region, China [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188 (3-4): 385-392.