

# 北山造山带南部早古生代构造演化:来自花岗岩的约束\*

贺振宇<sup>1</sup> 宗克清<sup>2</sup> 姜洪颖<sup>1,3</sup> 向华<sup>1</sup> 张泽明<sup>1</sup>

HE ZhenYu<sup>1</sup>, ZONG KeQing<sup>2</sup>, JIANG HongYing<sup>1,3</sup>, XIANG Hua<sup>1</sup> and ZHANG ZeMing<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所,大陆构造与动力学国家重点实验室,北京 100037

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2014-02-02 收稿,2014-05-04 改回.

He ZY, Zong KQ, Jiang HY, Xiang H and Zhang ZM. 2014. Early Paleozoic tectonic evolution of the southern Beishan orogenic collage: Insights from the granitoids. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8):2324–2338

**Abstract** The Beishan orogenic collage represents a major part of the southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB), which is a tectonically significant region between the Tianshan orogen and the Solonker Suture Zone. It would provide important clues for examining the accretionary orogenic processes of the CAOB and the final closure event of the Paleo-Asian Ocean. In this work, we present LA-ICP-MS U-Pb zircon dating, LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotopic and geochemical results for the Early Paleozoic granites from the Qiaowan and Jinta areas in the southern Beishan and to revisit their tectonic setting and the Early Paleozoic tectonic evolution of the southern Beishan. The Qiaowan granite in the Baidunzi-Qiaowan shear zone is variously deformed, consisting of quartz, K-feldspar, plagioclase ( $An = 21 \sim 27$ ), biotite and amphibole. Biotite grains are compositionally similar and have relatively low  $TiO_2$  contents, and amphibole is blue-green with compositions of ferro-pargasite. The Jinta syenogranite is not deformed, medium- to fine-grained, consists of quartz, K-feldspar, plagioclase and biotite. Plagioclase exhibits oscillatory zoning. The Qiaowan mylonitic granite and Jinta syenogranite have a similar age of  $\sim 430$ Ma, with two-stage zircon Hf model ages of 2.14  $\sim$  2.37Ga and 1.32  $\sim$  1.72Ga, respectively. The inherited zircon cores in them exhibit Hf isotope compositions similar to those of the Neoproterozoic granitic gneisses in the southern Beishan. Both the Qiaowan mylonitic granite and Jinta syenogranite show high  $SiO_2$  (between 73.18% and 75.00%) and weakly peraluminous, they are enriched in Rb, U and K, and depleted in Ba, Nb, Ta, Sr, P and Ti, which can be compared with other Early Paleozoic syenogranites from the southern Beishan. They are suggested to derive from a Paleoproterozoic-Mesoproterozoic crustal source in the southern Beishan, while the Jinta syenogranite also has a depleted mantle or new crust contribution, indicating that the basement rocks of the Shibanshan block in the southern Beishan do not resemble those of the Dunhuang block. We suggest, in accordance with the studies of the Early Paleozoic HP granulite in the Dunhuang block, that the Early Paleozoic magmatism in the southern Beishan is the result of the collision and continued convergence between the Dunhuang and Shibanshan blocks, and that the Beishan orogenic collage underwent Early Paleozoic accretionary and collisional orogenic processes involved microcontinents within the orogen and the surrounding cratons.

**Key words** Early Paleozoic granites; Shibanshan block; Dunhuang block; Collisional orogeny; Beishan orogenic collage

**摘要** 北山造山带是中亚造山带的重要组成部分,处于天山造山带和索仑缝合带之间的关键构造位置,对认识中亚造山带的构造演化和古亚洲洋的最终闭合具有重要意义。本文选择北山造山带南部早古生代桥湾糜棱岩化花岗岩和金塔钾长花

\* 本文受中国地质调查局百名青年地质英才培养计划项目(QNYC2-2012-21)、国家自然科学基金创新研究群体项目(41221061)和中国地质调查局工作项目(12120114057401、12120114079801)联合资助。

第一作者简介:贺振宇,男,1976年生,博士,副研究员,岩石学专业,E-mail: ahhzy@163.com

花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素和地球化学研究。结果表明,桥湾糜棱岩化花岗岩和金塔钾长花岗岩均形成于 ~430Ma, 岩浆结晶锆石的二阶段 Hf 模式年龄分别为 2.14 ~ 2.37Ga 和 1.32 ~ 1.72Ga。样品中含有少量继承锆石, 继承锆石的 Hf 同位素特征与北山南部新元古代花岗岩质麻岩类似。在地球化学组成上, 两者均具有高的 SiO<sub>2</sub> 含量(73.18% ~ 75.00%), 弱过铝质, 富集 Rb、U、K 等元素, 亏损 Ba、Nb、Ta、和 Sr、P、Ti 等元素的特点, 类似于北山南部其它早古生代钾长花岗岩。它们的岩浆均起源于北山南部古老地壳基底的部分熔融, 金塔钾长花岗岩可能还有幔源岩浆或新生地壳的贡献。这同时也暗示了北山南部石板山地块与敦煌地块具有显著不同的地壳基底组成。结合敦煌地块早古生代高压麻粒岩的研究结果, 我们认为北山南部早古生代岩浆活动可能与敦煌地块向北山南部石板山地块的碰撞、俯冲作用有关, 反映了中亚造山带南缘的北山造山带在早古生代经历了造山带中微陆块与周缘克拉通碰撞拼贴的造山事件。

**关键词** 早古生代花岗岩; 石板山地块; 敦煌地块; 碰撞造山; 北山造山带

**中图法分类号** P588.121; P597.3

## 1 引言

增生型造山带以其显著的地壳生长和持续的俯冲与增生作用而区别于其它碰撞造山带和陆内造山带 (Cawood *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2010a; Ge *et al.*, 2014)。增生型造山带形成于俯冲大陆边缘, 由增生楔、岩浆弧、洋岛、海山, 以及蛇绿混杂岩等组成, 通常含有一些古老微陆块, 例如环太平洋的阿拉斯加、菲律宾、印尼和日本等是现代典型的增生造山带 (Cawood *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2010a; Wilhem *et al.*, 2012)。

中亚造山带位于东欧板块、西伯利亚板块、塔里木板块和华北板块之间, 是世界上最大的增生型造山带之一 (Şengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000, 2004; Windley *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2009, 2010a; Wilhem *et al.*, 2012)。北山造山带位于中亚造山带的南缘, 天山造山带和

索仑缝合带之间的关键构造位置, 南北分别与蒙古造山带和敦煌地块 (塔里木克拉通) 相邻 (图 1)。北山造山带经历了早古生代至早中生代长期的多阶段、复杂的俯冲-拼贴历史, 对认识中亚造山带的构造演化和古亚洲洋的最终闭合具有重要意义 (Xiao *et al.*, 2010b; Song *et al.*, 2013a, b; Cleven *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2014)。

北山造山带的北部是由多个洋内岛弧拼贴形成的复杂增生系统 (公婆泉复合岛弧) (Xiao *et al.*, 2010b; Cleven *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2013a; Tian *et al.*, 2014), 南部主要涉及了古老微陆块 (花牛山地块和石板山地块) 之间的俯冲-碰撞作用 (Liu *et al.*, 2011; Qu *et al.*, 2011)。北山造山带南缘的石板山地块曾经被认为是敦煌地块的古生代活动大陆边缘 (Xiao *et al.*, 2010b; Cleven *et al.*, 2013)。但是, 最近的研究显示, 石板山地块具有古元古代晚期-中元古代的地壳基底, 而与敦煌地块的太古代-古元古代的地壳基底存在明显区别 (He *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Zong *et*

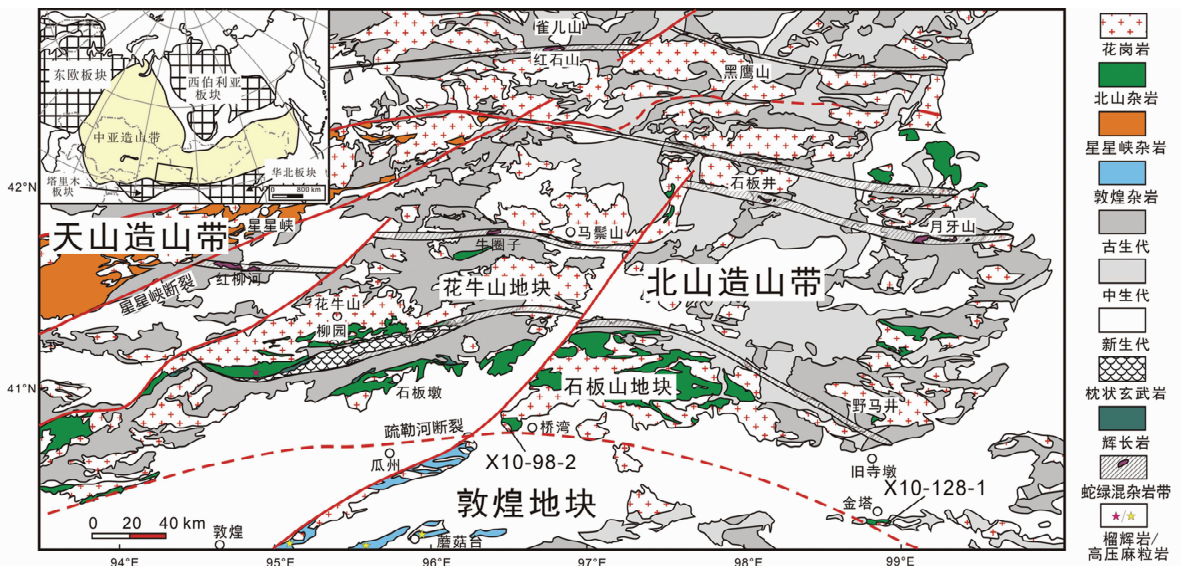


图 1 北山造山带地质简图, 左上角插图为中亚造山带构造简图 (据刘雪亚和王荃, 1995; Xiao *et al.*, 2010b; Song *et al.*, 2013b 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Beishan orogenic collage, inset figure showing a simplified tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt (modified after Liu and Wang, 1995; Xiao *et al.*, 2010b; Song *et al.*, 2013b)

al., 2013), 可能是一个独立的微陆块(姜洪颖等, 2013)。此外, 敦煌地块早古生代高压麻粒岩等高级变质岩的变质作用 *P-T-t* 研究显示敦煌地块经历了早古生代的大陆碰撞与俯冲事件(孟繁聪等, 2011; Zong et al., 2012; He et al., 2014; 彭涛等, 2014)。同时, 在敦煌地块和北山南部(石板山地块和花牛山地块)还广泛发育了早古生代岩浆活动产物, 例如: 党河水库 ~440Ma 埃达克质花岗岩(张志诚等, 2009)、柳园地区 ~436Ma 钾长花岗岩(赵泽辉等, 2007)、~424Ma 埃达克质岩(Mao et al., 2012)、~415Ma A 型花岗岩(李舫等, 2009); 以及金塔红脊山 ~437Ma 花岗岩等(张新虎等, 2008)。这些岩浆作用记录也反映了中亚造山带南缘的北山造山带与敦煌地块经历了重要的早古生代构造事件。

但是, 目前对这些早古生代花岗岩形成的构造背景还缺乏精确的认识, 存在多种不同观点。例如: 认为与早古生代红柳河缝合带或阿尔金北缘红柳沟-拉配泉缝合带所代表的俯冲碰撞事件有关(张志诚等, 2009), 与红柳河地区古大洋俯冲板片断离有关(赵泽辉等, 2007), 形成于由同造山挤压环境向后造山伸展环境的转化阶段(李舫等, 2009), 或者与花牛山岛弧下的俯冲洋壳熔融有关(Mao et al., 2012)等等。本文选择北山造山带南部桥湾和金塔等地的早古生代花岗岩, 开展系统的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和岩石地球化学研究, 并结合前人已有的早古生代花岗岩的研究资料, 以期重新审视北山造山带南部早古生代花岗岩的形成构造背景, 及其对北山造山带南部早古生代构造演化的制约。

## 2 地质背景

塔里木克拉通是中亚造山带的周缘陆块之一, 位于中亚造山带的南部边缘, 其中心为中-新生代的巨厚沉积, 前寒武纪基底岩石在周缘隆起区断续出露, 包括阿尔金山-敦煌隆起区、铁克里克隆起区、柯坪隆起区、以及库鲁克塔格隆起区(董富荣等, 2001; Lu et al., 2008; Xu et al., 2013; He et al., 2013; Zhang et al., 2013)。其中, 东南缘的阿尔金山-敦煌隆起区位于北山、阿尔金山和阿尔金断裂之间, 呈三角形的块体, 被称为敦煌地块。敦煌地块的地壳基底主要由新太古代的 TTG 片麻岩和表壳岩组成。TTG 片麻岩主要出露在阿克塔什塔格、石包城、榆林水库等地, 形成时代集中于 2.5 ~ 2.7Ga(梅华林等, 1998; Zhang et al., 2013; Zong et al., 2013), 但阿克塔什塔格地区的 TTG 岩石形成于 ~2.8Ga(Lu et al., 2008)。新太古代表壳岩普遍被归为敦煌群或米兰群(Lu et al., 2008; 刘永顺等, 2009)。在三危山和党河水库一带还发育有古元古代多期次(~2.0Ga、~1.85Ga和~1.75Ga)岩浆活动(He et al., 2013)。系统的锆石 Hf 同位素研究显示敦煌地块可能存在 3.4 ~ 3.3Ga 的古老地壳, 并经历了新太古代的地壳生长和古老地壳的再造事件, 以及古元古代中期(~2.0Ga)的地壳增生、古元古代晚期的地壳再造事件(He et al., 2013; Zong et al., 2013;

Zhang et al., 2013)。在敦煌地块的石包城和蘑菇台等地还分别出露有古元古代(~1.85Ga; Zhang et al., 2012)和早古生代(440 ~ 430Ma; Zong et al., 2012; He et al., 2014)高压麻粒岩。蘑菇台高压麻粒岩呈透镜体状或层状分布于其围岩片麻岩、片岩和钙硅酸岩中(Zong et al., 2012; He et al., 2014)。三危山观音沟早古生代石榴斜长角闪片麻岩整体表现为似层状或透镜状, 宽度约 5 ~ 8m, 夹持于花岗岩体中(彭涛等, 2014)。此外, 党河水库等地还发育有早古生代花岗岩质岩石(张志诚等, 2009)。这些研究显示敦煌地块经历了早古生代的造山事件。

北山造山带是东天山造山带的东延部分, 向东部于弱水走滑断裂被巴丹吉林沙漠掩盖, 向南与敦煌地块相邻, 向北可以延伸到蒙古增生造山带(图 1; 刘雪亚和王荃, 1995; Xiao et al., 2010b)。北山造山带的形成涉及了多个微陆块、岛弧、洋壳和增生杂岩等的多期次俯冲和碰撞拼贴作用(Xiao et al., 2010b; Song et al., 2013a, b; Cleven et al., 2013; Tian et al., 2014)。北山造山带的北部是由多个洋内岛弧拼贴形成的复杂增生系统, 包括双鹰山、马鬃山、黑鹰山、旱山等岛弧, 在古生代晚期拼贴形成公婆泉复合岛弧(Xiao et al., 2010b; Cleven et al., 2013; Song et al., 2013a, b)。北山造山带南部主要涉及了古老微陆块(花牛山地块和石板山地块)之间的俯冲-碰撞作用(Liu et al., 2011; Qu et al., 2011)。该地区韧性剪切作用十分发育, 主要有古堡泉-柳园韧性剪切带和白墩子-桥湾韧性剪切带, 出现一系列糜棱岩化岩石和糜棱岩等(梅华林等, 1997; 陈柏林等, 2007; 蔡志慧等, 2012)。石板山地块位于柳园混杂岩带以南(图 1), 广泛发育中-新元古代花岗质片麻岩(姜洪颖等, 2013; 及作者未发表资料)。锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究表明, 石板山地块的地壳基底不同于敦煌地块的太古代-古元古代的地壳基底, 并不是敦煌地块的一部分, 可能为独立的微陆块(姜洪颖等, 2013)。花牛山地块位于柳园混杂岩带以北, 红柳河-牛圈子-月牙山蛇绿混杂岩带以南(图 1), 广泛出露新元古代眼球状片麻岩(梅华林等, 1999; 叶晓峰等, 2013)。在花牛山地块南部, 榴辉岩呈透镜状分布于新元古代早期的眼球状片麻岩和含蓝晶石副片麻岩中(梅华林等, 1998; 杨经绥等, 2006; Qu et al., 2011; Liu et al., 2011), 榴辉岩相变质和角闪岩相退变质年龄分别为 ~465Ma(Liu et al., 2011)和 ~430Ma(Qu et al., 2011)。榴辉岩的原岩形成时代为 ~900Ma, 并且经历了与眼球状片麻岩同期的构造事件(Liu et al., 2011), 反映了榴辉岩相变质发生在大陆俯冲环境, 可能代表了花牛山地块和石板山地块之间的俯冲-碰撞事件(Liu et al., 2011)。

## 3 分析方法

矿物化学成分测定在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室电子探针室完成, 所用电子探

针型号为 JEOL JXA-8100。工作条件为:加速电压 15kV,加速电流 20nA,束斑直径为 5 $\mu\text{m}$ 。全岩主量元素成分在国家地质实验测试中心用 Rigaku-3080 型 XRF 测定。微量元素成分在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 Agilent 7500a ICP-MS 测定。

锆石分选采用重砂方法完成。CL 图像分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心 Hitachi S2250-N 扫描电镜上完成。锆石 U-Pb 年龄测定和同时进行的微量元素成分分析在南京大学成矿作用国家重点实验室完成。ICP-MS 型号为 Agilent 7500a 型,激光剥蚀系统为 New Wave 公司 UP213 固体激光剥蚀系统。熔蚀孔径为 30~40 $\mu\text{m}$ ,剥蚀时间为 60s。质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1。微量元素分析结果采用 NIST 610 为外标进行校准。详细的仪器条件和实验步骤参见 He *et al.* (2010)。校正后的结果用 Isoplot 程序 (ver. 2.49, Ludwig, 2001) 完成年龄计算和谐和图的绘制。

样品 X10-98-2 和 X10-128-1 的锆石 Hf 同位素分析分别在中国科学院地质与地球物理所和中国地质科学院矿产资源研究所完成。两个实验室所用仪器均为 Finnigan Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 和 193nm GeoLas 2005 激光取样系统。分析时激光束直径 44~60 $\mu\text{m}$ ,激光脉冲频率为 8Hz。用锆石国际标样 91500 和 GJ-1 作外标。在计算 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 和  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  值时, $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数采用  $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$  (Scherer *et al.*, 2001),  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  的计算采用 Bouvier *et al.* (2008) 推荐的球粒陨石 Hf 同位素值, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$ , $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$ 。Hf 模式年龄计算中,亏损地幔  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  现在值采用 0.28325, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  为 0.0384,两阶段模式年龄采用平均地壳的 ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>c</sub> = 0.015 (Griffin *et al.*, 2000) 进行计算。详细的实验步骤和  $^{176}\text{Yb}$  干扰的校正方法参见 Wu *et al.* (2006)。

## 4 样品与岩相学特征

桥湾花岗岩位于瓜州县桥湾以西约 10km,西距双塔水库约 20km。该岩体位于北山南部白墩子-桥湾剪切构造带中。白墩子-桥湾韧性剪切带是北山最南部的一条韧性剪切带,紧临敦煌地块北缘,西起白墩子以西,经白墩子、石板墩、潘家井、西涧泉至小西弓,长约 220km,南北宽约 15~40km,总体呈近东西向延伸。在强应变带内由石英等矿物构成的拉伸线理极为发育,部分地区可见一系列小规模 a 型褶皱,出现多种成分的糜棱岩,如花岗质糜棱岩、绢云石英糜棱岩、绿泥钠长糜棱岩等,以及不同规模的透镜状石英脉 (梅华林等,1997;陈柏林等,2007)。本文所研究的早古生代桥湾花岗岩受到不同程度的变形改造,包括糜棱岩化花岗岩 (图 2a) 和花岗质糜棱岩 (图 2d) 等。糜棱岩化花岗岩呈片麻状构造,可见少量长英质脉体平行片麻理方向分布 (图 2a),细粒状石英和黑云母、角闪石、绿帘石等定向排列,长石和石英

斑晶边缘可见明显的碎粒化现象 (图 2b)。花岗质糜棱岩中长石呈眼球状和透镜状碎斑,基质中细小的黑云母和丝带状石英呈强烈的塑性流动构造 (图 2d)。

糜棱岩化花岗岩 (样品 X10-98-2) 主要矿物组成为石英 (35%),钾长石 (30%),斜长石 (15%),黑云母 (10%),角闪石 (5%),以及少量绿帘石、褐帘石等。钾长石具高且较为一致的 Or 端元组成 (Or = 87~93; 表 1),其边缘可见由斜长石和蠕虫状石英交生形成的蠕英石 (myrmekite)。样品中斜长石主要为更长石 (An = 21~27); 黑云母成分较为一致, Fe/(Fe + Mg) = 0.73~0.74, 具有较低的 Ti 含量 (2.15%~2.52%)。角闪石在单偏光下呈蓝绿色 (图 2c), 具明显多色性, 较富含 Al 和 Fe, 根据化学成分可归为铁韭闪石 (Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>) = 0.21~0.22; Si = 6.16~6.21 apfu)。

金塔早古生代钾长花岗岩 (样品 X10-128-1) 位于金塔县以南约 5km, 岩体侵入围岩黑云斜长片麻岩 (北山杂岩) 中, 未见变形, 呈灰白色, 中细粒结构, 主要矿物组成为石英 (30%)、钾长石 (40%)、斜长石 (15%)、黑云母 (5%), 副矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石等 (图 2f)。斜长石韵律环带发育, 可见石英与碱性长石同结作用形成的花斑结构。岩石有轻微蚀变, 表现为少量黑云母的绿泥石化和斜长石的绢云母化。

## 5 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素

### 5.1 桥湾糜棱岩化花岗岩

桥湾糜棱岩化花岗岩定年样品 X10-98-2 采样点 GPS 坐标为 40°35.1'N, 96°35.6'E。锆石长度约 300~350 $\mu\text{m}$ , 无色, 呈次圆状的晶体表面。CL 图像显示出明显的核边结构, 普遍具有窄的、CL 发光较强、结构均一的边部和振荡环带发育的核部, 少量锆石具有更内部的继承核 (图 3a)。共进行了 21 个点的 U-Pb 年龄和微量元素分析, 其中 5 个分析点位于锆石边部, 15 个分析点位于具振荡环带的锆石核部, 1 个分析点位于内部的继承核。

分析结果显示 (表 2、表 3), 振荡环带发育的核部具有较高的 Th ( $28.5 \times 10^{-6} \sim 278 \times 10^{-6}$ )、U ( $50.3 \times 10^{-6} \sim 499 \times 10^{-6}$ ) 含量和 Th/U 比值 (0.49~0.83), 稀土元素配分曲线显示出明显的 Ce 正异常、Eu 负异常以及重稀土富集的特点 (图 4b), 为典型岩浆锆石的特征。分析结果较为一致, 除两个稍微偏离谐和线外, 其余 13 个分析点均位于谐和线上 (图 4a),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $433 \pm 4 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ; MSWD = 0.14)。1 个位于继承核部的分析点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $985 \pm 14 \text{ Ma}$ 。

5 个位于边部的分析点具有明显低于核部的 Th ( $0.03 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-6}$ )、U ( $3.2 \times 10^{-6} \sim 48.7 \times 10^{-6}$ ) 含量和 Th/U 值 (0.01~0.05, 0.29), 稀土配分曲线显示较低的稀土元素、尤其是重稀土元素含量 (图 4b)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $406 \pm 23 \text{ Ma} \sim 465 \pm 60 \text{ Ma}$ , 年龄误差值较大 (图 4a)。另外, CL 发光

表1 桥湾糜棱岩化花岗岩代表性矿物化学成分分析结果(wt%)

Table 1 Representative mineral compositions of the Qiaowan mylonitic granite (wt%)

分析点	7	15	17	5	6	14	13	1	2	11	3	4	9	10
矿物	Kfs	Kfs	Kfs	Pl	Pl	Pl	Ep	Bt	Bt	Bt	Amp	Amp	Amp	Amp
SiO <sub>2</sub>	63.99	65.42	65.08	62.74	62.83	60.60	37.34	35.51	35.20	35.46	39.06	39.34	39.23	39.25
TiO <sub>2</sub>					0.00		0.11	2.44	2.52	2.15	0.66	0.53	0.36	0.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.51	18.26	18.51	23.35	23.12	24.41	22.26	16.14	16.15	16.39	13.22	13.01	14.14	13.80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01		0.01	0.03	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.06	0.00	0.02	0.02	
FeO	0.05	0.04	0.02	0.04	0.06	0.02	12.49	26.67	26.37	26.08	26.41	26.49	25.68	25.83
MnO	0.01		0.04		0.02		0.34	0.49	0.48	0.46	0.74	0.74	0.72	0.72
NiO			0.04	0.03	0.00	0.03				0.02		0.01		
MgO				0.01	0.03	0.02	0.01	5.24	5.13	5.48	3.84	3.63	3.65	3.72
CaO	0.00	0.00	0.04	4.31	4.30	5.69	23.26		0.02	0.02	10.77	10.96	10.98	11.08
Na <sub>2</sub> O	0.72	0.74	1.01	9.01	9.08	8.20	0.04	0.13	0.17	0.13	1.10	1.22	1.20	1.18
K <sub>2</sub> O	15.88	15.65	15.36	0.07	0.13	0.14	0.05	9.11	8.94	9.53	1.94	1.62	1.53	1.48
Total	99.17	100.11	100.10	99.58	99.59	99.14	95.95	95.81	95.06	95.78	97.07	97.57	97.51	97.48
氧原子	8	8	8	8	8	8	12.5	11	11	11	23	23	23	23
Si	2.98	3.01	3.00	2.78	2.79	2.71	3.00	2.79	2.79	2.79	6.16	6.21	6.16	6.17
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.14	0.15	0.13	0.08	0.06	0.04	0.05
Al	1.02	0.99	1.00	1.22	1.21	1.29	2.11	1.50	1.51	1.52	2.46	2.42	2.62	2.56
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>							0.85				0.34	0.33	0.29	0.35
Fe <sup>2+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1.76	1.75	1.72	3.15	3.17	3.08	3.04
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.03	0.10	0.10	0.10	0.10
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.61	0.64	0.90	0.85	0.85	0.87
Ca	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.27	2.00	0.00	0.00	0.00	1.82	1.85	1.85	1.87
Na	0.07	0.07	0.09	0.78	0.78	0.71	0.01	0.02	0.03	0.02	0.34	0.37	0.37	0.36
K	0.94	0.92	0.90	0.00	0.01	0.01	0.01	0.91	0.90	0.96	0.39	0.33	0.31	0.30
Total	5.01	4.99	5.00	4.99	5.00	5.00	8.03	7.78	7.77	7.81	15.73	15.70	15.67	15.66
Ab	6	7	9	79	79	72					Mg/(Mg + Fe <sup>2+</sup> )	0.22	0.21	0.22
An	0	0	0	21	21	27								
Or	94	93	91	0	1	1								

注:Fe<sup>3+</sup> 估算依据 Droop (1987)

较强的锆石边部明显切穿其内部的生长环带,且沿边-核边界发育窄的、不连续的 CL 较暗区域(图 3a)(富集 U 和 Y; Rubatto and Gebauer, 2000),类似于部分重结晶锆石(Hoskin and Black, 2000; He *et al.*, 2013),这反映了锆石边部可能受到糜棱岩化过程中变质流体的淋滤或溶蚀作用,造成微量元素扩散、及部分 Pb 丢失,从而形成锆石边部均一的结构、低的 Th、U 含量和 Th/U 值,以及较大的年龄误差(Wayne and Sinha, 1988; Geisler *et al.*, 2007)。但是由于 U-Pb 同位素体系没有完全重置,因而锆石边部年龄并不能给出可靠的糜棱岩化作用的年代。

对样品中锆石进行了 14 个点的 Hf 同位素分析(表 4),其中 13 个分析点位于年龄为 ~433Ma 的核部,其初始 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值变化于 0.282078 ~ 0.282181,相应的  $\epsilon_{\text{HF}}(t)$  值为 -15.4 ~ -11.8,加权平均为 -13.3 ± 0.7,  $t_{\text{DM2}}$  模式年龄为 2.14 ~ 2.37Ga。1 个分析点位于年龄较老的继承锆石核,初始 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值为 0.282148,  $\epsilon_{\text{HF}}(t)$  值为 -0.5,  $t_{\text{DM2}}$  模式年龄为 1.87Ga。

## 5.2 金塔钾长花岗岩

金塔钾长花岗岩的定年样品(X10-128-1)的 GPS 坐标为 39°53.5'N, 98°53.4'E。样品中锆石呈浅黄色、透明-半透明、自形长柱状颗粒。锆石 CL 图像显示发育清晰的振荡环带,但 CL 发光较弱,暗示它们为岩浆结晶锆石且富集 U 和 Y 等元素(Rubatto and Gebauer, 2000)。部分锆石含有形态不一的继承核,与边部界线截然,CL 发光较边部亮(图 3b)。

共进行了 21 个点的 U-Pb 年龄和微量元素分析,其中 5 个分析点位于继承的锆石核部。16 个岩浆结晶锆石分析点具有高的、且变化范围大的 Th( $63.5 \times 10^{-6} \sim 1145 \times 10^{-6}$ )、U( $362 \times 10^{-6} \sim 1764 \times 10^{-6}$ )含量和 Th/U 比值(0.08 ~ 1.05)(表 2),稀土元素配分曲线显示出明显的 Ce 正异常、Eu 负异常以及重稀土富集的特点(表 3、图 4d),具有典型岩浆锆石的特征。部分分析点异常的轻稀土元素含量与锆石中存在较多磷灰石等包裹体有关。年龄分析结果总体上较为一致,但部分锆石具有较差的谐和度(图 4c),可能与高 U

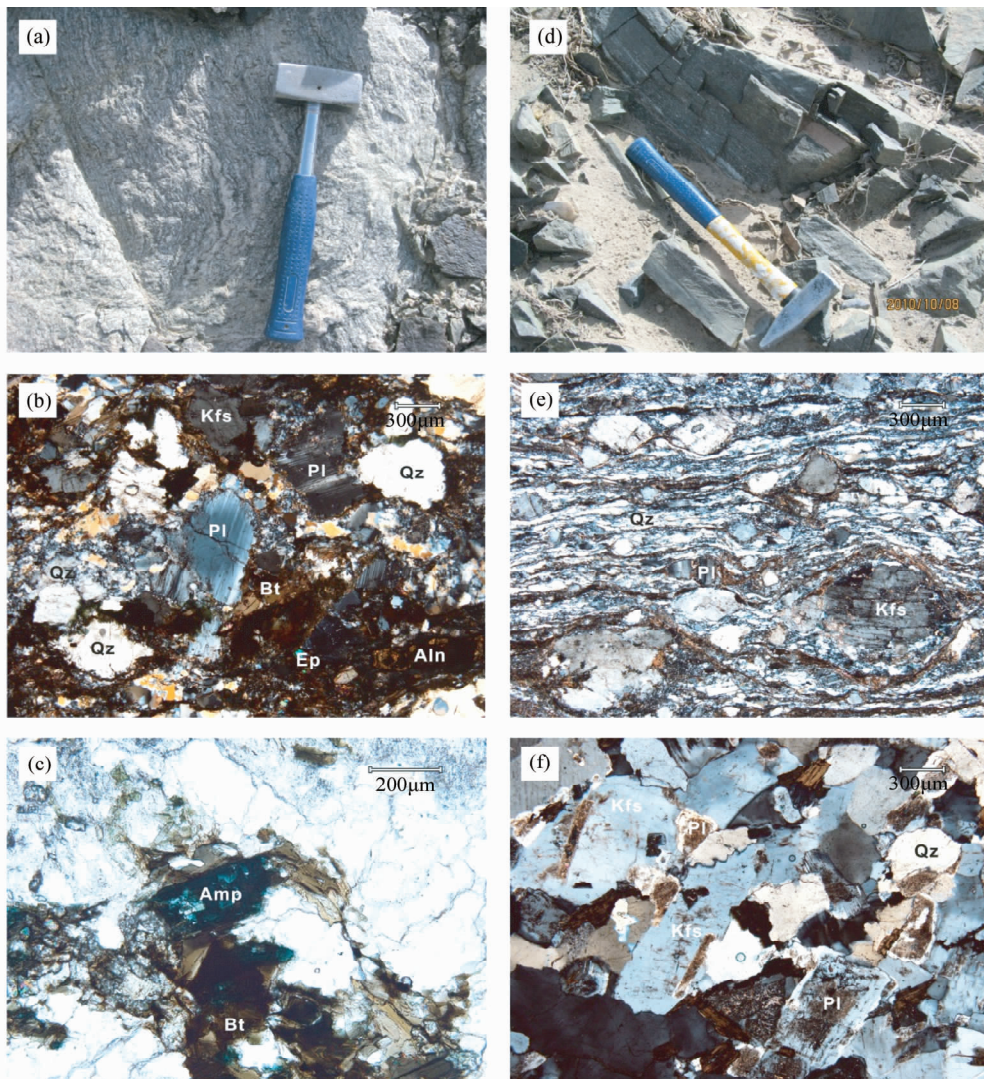


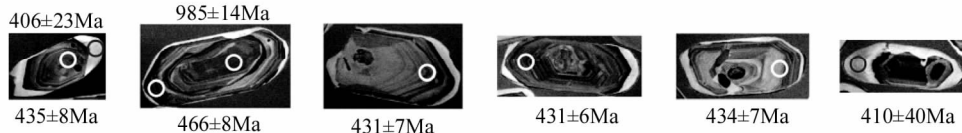
图2 研究样品的野外和显微照片

(a-c)-桥湾糜棱岩化花岗岩(样品 X10-98-2); (d, e)-桥湾花岗质糜棱岩; (f)-金塔钾长花岗岩. 矿物缩写: Aln-褐帘石; Amp-角闪石; Bt-黑云母; Ep-绿帘石; Kfs-钾长石; Qz-石英; Pl-斜长石

Fig.2 Field and micrographic photos of the studied samples

(a-c)-Qiaowan mylonitic granite (sample X10-98-2); (d, e)-Qiaowan granitic mylonite; (f)-photomicrograph of the Jinta syenogranite. Aln-Allanite; Amp-amphibole; Bt-biotite; Ep-epidote; Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Qz-quartz

(a) X10-98-2



(b) X10-128-2

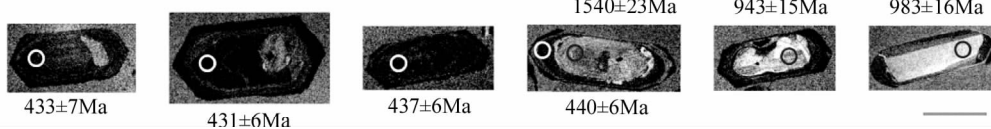


图3 代表性锆石 CL 图像

圆圈表示年龄测点, 标尺长度为 100 $\mu$ m

Fig.3 CL images of representative zircons with circles denoting U-Pb analysis spot

The scale bars are 100 $\mu$ m

表2 北山南部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 同位素定年结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of the Early Paleozoic granites from the southern Beishan

测点号	Th		U		Th/U		Th/ <sup>235</sup> U		Th/ <sup>206</sup> Pb		U-Pb 同位素比值		207Pb/ <sup>206</sup> Pb		208Pb/ <sup>232</sup> Th		206Pb/ <sup>238</sup> U		207Pb/ <sup>235</sup> U		208Pb/ <sup>232</sup> Th	
	( $\times 10^{-6}$ )								$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$		$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
X10-98-2-01	225	389	0.58	0.05556	0.00174	0.53270	0.02774	0.06893	0.00109	0.02017	0.00262	435	88	434	18	430	7	404	52			
X10-98-2-03	167	272	0.61	0.05789	0.00284	0.55705	0.03705	0.06981	0.00141	0.02076	0.00310	526	111	450	24	435	8	415	61			
X10-98-2-04	153	216	0.71	0.05447	0.00195	0.52618	0.02934	0.06885	0.00116	0.02048	0.00231	391	95	429	20	429	7	410	46			
X10-98-2-05	271	325	0.83	0.07760	0.00465	0.79497	0.06015	0.07458	0.00192	0.01985	0.00382	1137	110	594	34	464	12	397	76			
X10-98-2-07	168	307	0.55	0.05605	0.00258	0.53412	0.03454	0.06989	0.00140	0.01729	0.00259	454	108	435	23	435	8	346	51			
X10-98-2-09	278	499	0.66	0.06318	0.00219	0.62461	0.03536	0.07497	0.00134	0.02040	0.00297	714	90	493	22	466	8	408	59			
X10-98-2-10	183	284	0.65	0.05414	0.00168	0.51125	0.02702	0.06941	0.00112	0.01880	0.00238	377	90	419	18	433	7	376	47			
X10-98-2-11	130	208	0.62	0.05410	0.00211	0.52477	0.03048	0.06996	0.00123	0.01923	0.00289	375	99	428	20	436	7	385	57			
X10-98-2-12	28.5	50.3	0.57	0.07162	0.00482	0.50916	0.04043	0.06965	0.00164	0.02128	0.00330	975	124	418	27	434	10	426	65			
X10-98-2-14	97.3	156	0.62	0.05706	0.00220	0.53760	0.03082	0.06907	0.00119	0.01907	0.00218	494	96	437	20	431	7	382	43			
X10-98-2-15	137	226	0.61	0.05703	0.00168	0.55263	0.02837	0.07029	0.00109	0.02015	0.00228	493	86	447	19	438	7	403	45			
X10-98-2-16	54.8	84.1	0.65	0.05693	0.00343	0.52031	0.03865	0.06933	0.00146	0.02007	0.00253	489	127	425	26	432	9	402	50			
X10-98-2-17	237	471	0.60	0.05544	0.00150	0.54053	0.02725	0.06918	0.00107	0.02174	0.00287	430	85	439	18	431	6	435	57			
X10-98-2-18	180	265	0.68	0.05520	0.00192	0.52860	0.02939	0.06961	0.00118	0.02184	0.00329	420	94	431	20	434	7	437	65			
X10-98-2-22	94.6	182	0.52	0.05713	0.00248	0.54259	0.03260	0.06996	0.00127	0.02062	0.00373	497	100	440	21	436	8	413	74			
X10-98-2-08	190	384	0.49	0.07222	0.00186	1.66780	0.08590	0.16508	0.00262	0.04262	0.00574	992	79	996	33	985	14	844	111			
X10-98-2-02	0.27	9.70	0.03	0.06161	0.01727	0.58192	0.16764	0.06769	0.00348	0.15498	0.06399	661	508	466	108	422	21	2912	1120			
X10-98-2-18	0.03	3.47	0.01	0.00439	0.05344	0.05163	0.62850	0.07480	0.00994	0.42186	0.04957	1372	611	588	122	406	23	385	137			
X10-98-2-20	0.94	3.20	0.29	0.12062	0.04590	1.09092	0.40025	0.06560	0.00662	0.01879	0.01181	1965	880	749	194	410	40	376	234			
X10-98-2-21	2.40	48.7	0.05	0.04605	0.00505	0.41566	0.04454	0.06547	0.00154	0.05823	0.03629	780	40	493	13	433	7	1277	529			
X10-128-1-01	105	574	0.18	0.06516	0.00222	0.62513	0.02057	0.06954	0.00122	0.06524	0.02787	780	40	493	13	433	7	1277	529			
X10-128-1-02	690	1001	0.69	0.07275	0.00150	0.69771	0.01390	0.06957	0.00095	0.04171	0.01054	1007	20	537	8	434	6	826	205			
X10-128-1-04	281	828	0.34	0.06044	0.00152	0.56709	0.01375	0.06806	0.00095	0.03714	0.00999	619	29	456	9	424	6	737	195			
X10-128-1-07	63.5	807	0.08	0.08302	0.00206	0.80787	0.01929	0.07059	0.00102	0.12785	0.03313	1270	25	601	11	440	6	2432	594			
X10-128-1-08	424	824	0.51	0.06450	0.00171	0.62305	0.01584	0.07007	0.00100	0.03356	0.00820	758	30	492	10	437	6	667	160			
X10-128-1-09	539	970	0.56	0.05839	0.00200	0.58166	0.01905	0.07225	0.00116	0.02884	0.00810	544	44	466	12	450	7	575	159			
X10-128-1-10	255	552	0.46	0.06792	0.00280	0.66327	0.02604	0.07083	0.00122	0.02817	0.00837	866	53	517	16	441	7	562	165			
X10-128-1-11	619	993	0.62	0.06059	0.00170	0.58386	0.01585	0.06990	0.00108	0.02654	0.00630	625	33	467	10	436	7	529	124			
X10-128-1-12	353	697	0.51	0.06513	0.00255	0.62319	0.02354	0.06936	0.00128	0.02741	0.00864	779	49	492	15	432	8	547	170			
X10-128-1-14	170	762	0.22	0.06108	0.00147	0.59031	0.01364	0.07009	0.00100	0.02715	0.00420	642	26	471	9	437	6	541	83			
X10-128-1-15	1145	1643	0.70	0.06115	0.00166	0.58987	0.01542	0.06995	0.00109	0.02498	0.00473	645	31	471	10	436	7	499	93			
X10-128-1-16	511	1082	0.47	0.13999	0.00408	1.34342	0.03707	0.06961	0.00113	0.05187	0.01205	2227	26	865	16	434	7	1022	232			
X10-128-1-17	110	1014	0.11	0.05897	0.00151	0.56990	0.01402	0.07009	0.00100	0.02745	0.00486	566	30	458	9	437	6	547	96			
X10-128-1-18	378	762	1.05	0.06927	0.00265	0.66685	0.02428	0.06982	0.00126	0.02170	0.00416	907	46	519	15	435	8	434	82			
X10-128-1-19	637	1764	0.36	0.05673	0.00130	0.54045	0.01190	0.06910	0.00098	0.02197	0.00365	481	25	439	8	431	6	439	72			
X10-128-1-21	311	1275	0.24	0.08313	0.00243	0.94449	0.02628	0.08240	0.00127	0.05344	0.01212	1272	31	675	14	510	8	1052	233			
X10-128-1-03	71.3	121	0.59	0.07521	0.00255	1.63318	0.05308	0.15750	0.00268	0.08721	0.02391	1074	38	983	20	943	15	1690	445			
X10-128-1-05	32.3	64.6	0.50	0.07170	0.00289	1.62902	0.06306	0.16481	0.00288	0.08496	0.02218	977	50	981	24	983	16	1648	413			
X10-128-1-06	103	227	0.45	0.09379	0.00229	2.56789	0.06029	0.19858	0.00294	0.07869	0.01883	1504	23	1292	17	1168	16	1531	353			
X10-128-1-13	64.4	204	0.32	0.06974	0.00170	1.34535	0.03156	0.13992	0.00199	0.04599	0.00635	921	26	866	14	844	11	909	123			
X10-128-1-20	61.5	74.6	0.82	0.07105	0.00313	1.52795	0.06446	0.15596	0.00293	0.05271	0.01053	959	56	942	26	934	16	1038	202			

注: X10-98-2 最后 5 行为锆石边部分析点; X10-128-1 最后 5 行为继承锆石核部分析点

表3 北山南部早古生代花岗岩锆石稀土元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )Table 3 Zircon REE compositions of the Early Paleozoic granites from the southern Beishan ( $\times 10^{-6}$ )

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
X10-98-2-01		7.98	0.06	1.00	2.14	0.30	11.8	4.91	62.8	27.6	126	29.4	286	53.8	
X10-98-2-03		13.7		0.75	2.65	0.29	15.8	5.97	80.2	31.3	147	31.9	297	56.0	
X10-98-2-04		10.4	0.09	1.09	2.53	0.53	15.5	5.72	73.2	27.9	129	27.7	254	48.0	
X10-98-2-05	0.11	9.77		0.90	4.04	0.47	20.8	7.27	93.2	34.8	160	34.0	326	58.7	
X10-98-2-07	0.05	10.2		0.72	2.44	0.38	16.6	5.52	74.0	30.6	135	31.5	278	54.1	
X10-98-2-09	3.03	19.7	1.32	5.80	3.88	0.35	17.9	6.33	89.3	34.4	172	39.1	369	72.2	
X10-98-2-10		10.9	0.07	0.96	2.94	0.36	20.5	6.95	92.5	33.9	160	35.3	321	60.9	
X10-98-2-11		9.91		1.14	2.26	0.47	15.1	5.31	68.3	26.2	125	29.3	248	47.6	
X10-98-2-12	0.07	2.35		0.40	0.97	0.24	7.03	2.15	30.7	11.1	54.7	12.5	112	23.2	
X10-98-2-14		9.29		1.13	1.8	0.41	12.6	5.08	64.1	24.9	109	23.9	228	42.8	
X10-98-2-15		8.90		0.68	2.62	0.44	14.7	5.71	74.7	29.9	129	27.7	263	49.6	
X10-98-2-16		6.50		0.67	1.99	0.41	12.3	4.44	54.3	21.1	97.1	20.5	195	38.2	
X10-98-2-17	0.28	8.78	0.14	1.15	2.15	0.24	13.1	5.43	69.7	30.2	146	32.9	321	63.6	
X10-98-2-19		12.2	0.06	0.82	2.53	0.32	14.3	5.75	74.2	30.3	135	30.4	293	57.0	
X10-98-2-22		7.18		0.52	1.31	0.29	11.3	4.21	54.5	22.1	98.35	20.9	206	40.3	
X10-98-2-08	32.7	83.3	10.0	50.8	13.5	0.54	23.1	5.64	69.2	24.9	117	26.1	253	45.2	
X10-98-2-02								0.71	0.27	5.39	2.59	13.1	2.78	25.6	4.61
X10-98-2-06	0.32	1.35	0.19	0.99	0.76	0.09	2.11	0.33	3.24	0.88	3.40	0.60	4.43	1.07	
X10-98-2-18			0.07						0.07	0.56	0.43	4.09	1.33	18.9	4.99
X10-98-2-20	0.21	1.65	0.13	0.75	0.56		1.07	0.29	1.97	0.95	6.32	2.45	37.2	10.3	
X10-98-2-21	0.94	15.0	0.51	3.50	2.22	0.63	9.14	1.42	9.04	3.32	12.1	2.31	24.7	4.90	
X10-128-1-01	0.20	2.78	0.12	1.72	5.28	0.59	25.3	8.58	88.5	27.3	106	20.4	176	32.0	
X10-128-1-02	236	561	34.1	120	43.4	2.66	82.0	24.7	229	69.7	270	52.5	465	79.5	
X10-128-1-04	1.46	22.8	1.46	9.34	9.26	1.65	33.8	10.6	110	35.9	137	26.3	224	39.9	
X10-128-1-07	6.16	24.8	4.92	25.5	14.4	1.06	27.8	8.25	87.6	29.3	130	30.0	332	71.4	
X10-128-1-08	19.7	61.3	5.88	28.3	11.9	0.71	32.5	9.15	97.1	33.8	142	28.6	264	49.2	
X10-128-1-09	0.38	21.5	0.44	5.41	9.34	0.87	38.5	12.3	135	46.8	195	40.6	358	66.9	
X10-128-1-10	21.6	70.2	9.75	47.9	23.3	0.96	45.1	12.5	102	30.8	121	24.8	232	43.3	
X10-128-1-11	19.1	77.1	7.50	41.2	21.8	1.41	60.6	17.6	178	59.2	245	48.6	448	80.8	
X10-128-1-12	0.81	16.3	0.82	7.05	8.16	0.40	27.1	8.69	91.3	32.2	132	27.7	250	48.4	
X10-128-1-14	2.32	22.8	2.40	13.8	11.1	0.83	35.2	10.2	100	31.1	120	23.9	213	38.8	
X10-128-1-15	6.33	64.4	4.00	25.9	25.0	1.77	80.2	25.0	257	84.9	342	67.1	607	106	
X10-128-1-16	24.4	104	16.7	88.7	50.5	3.52	82.7	23.5	204	54.0	194	36.5	321	46.7	
X10-128-1-17	0.66	7.21	0.53	2.69	3.13	0.14	19.2	8.22	88.3	25.9	93.0	16.8	142	23.5	
X10-128-1-18	2.86	65.6	2.84	18.6	20.0	1.74	55.1	15.6	142	44.5	171	32.5	278	49.7	
X10-128-1-19	1.69	23.4	2.13	11.6	11.7	0.65	40.9	13.9	153	54.3	227	47.0	433	75.1	
X10-128-1-21	10.7	113	10.2	56.2	39.0	3.25	80.8	25.8	252	72.6	287	56.9	511	80.9	
X10-128-1-03	0.19	3.35	0.31	2.96	5.16	0.19	24.9	9.02	113	46.4	216	44.9	431	84.3	
X10-128-1-05	0.40	2.41	0.36	2.22	3.74	0.29	14.1	5.29	60.4	23.2	101	21.2	203	39.9	
X10-128-1-06	24.8	90.1	8.57	40.5	9.76	0.59	22.5	6.95	88.8	34.3	161	35.2	346	68.3	
X10-128-1-13	0.10	1.76	0.06	0.99	3.65		23.8	9.66	126	50.5	230	49.0	470	87.2	
X10-128-1-20		2.62	0.14	2.96	4.31	0.35	22.2	6.83	80.3	29.8	132	27.5	262	47.8	

注: X10-98-2 最后 5 行为锆石边部分析点; X10-128-1 最后 5 行为继承锆石核部分析点

锆石的退晶化作用导致的 Pb 丢失有关 (Geisler *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2012)。13 个成群分布的分析点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $435 \pm 4\text{Ma}$  ( $2\sigma$ ; MSWD = 0.81), 代表了金塔钾长花岗岩的结晶年龄。锆石 Hf 同位素分析结果显示了较大的变化范围 (表 4), 初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282370 ~ 0.282549, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-5.0 \sim 1.4$ , 平均为  $-2.3 \pm 1.0$ ,  $t_{\text{DM2}}$  模式年龄为  $1.32 \sim 1.72\text{Ga}$ 。

5 个位于继承核部的分析点具有较高的 Th/U 值 (0.32 ~ 0.82), 稀土配分曲线显示较明显的 Ce 正异常、Eu 负异常以及重稀土富集的特点 (图 4d), 暗示了它们为岩浆成因锆石 (Rubatto and Gebauer, 2000)。年龄分析结果为  $934 \pm 16\text{Ma} \sim 1504 \pm 23\text{Ma}$  ( $> 1.0\text{Ga}$  的锆石采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄,  $< 1.0\text{Ga}$  的锆石采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄)。这些继承锆石的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值变化于 0.282175 ~ 0.282290,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为



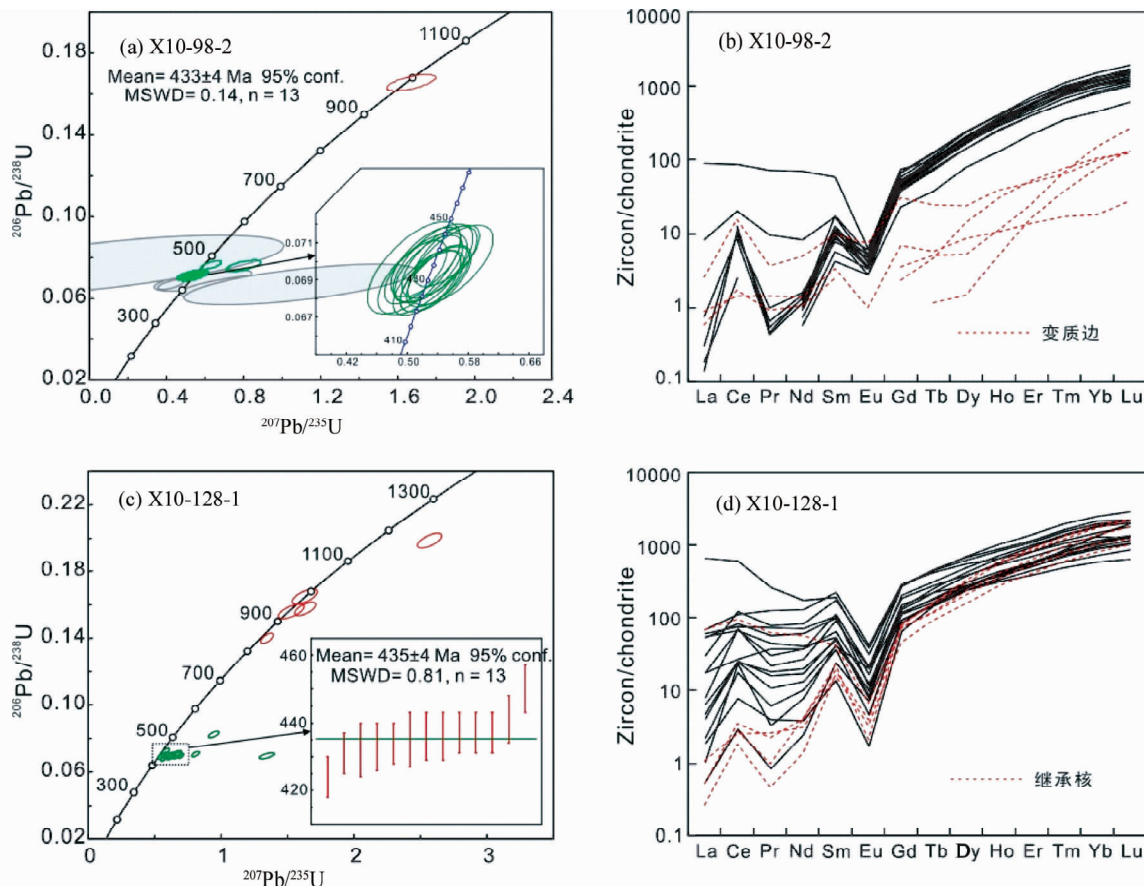


图4 锆石 U-Pb 谐和曲线图解和稀土元素配分曲线

(a, b)-桥湾糜棱岩化花岗岩; (c, d)-金塔钾长花岗岩

Fig.4 U-Pb concordia diagrams and chondrite-normalized REE patterns of zircon

(a, b)-Qiaowan mylonitic granite; (c, d)-Jinta syenogranite

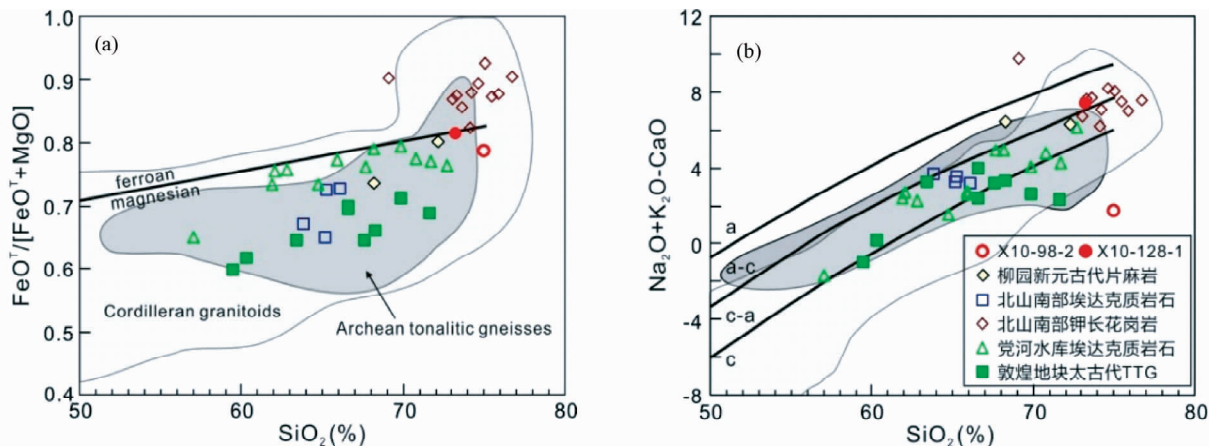


图5 花岗岩化学分类图解

(a)- $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$  和  $\text{SiO}_2$ ; (b)- $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$  和  $\text{SiO}_2$ . 敦煌地块太古代 TTG 引自 Zhang *et al.* (2013) 和 Zong *et al.* (2013); 党河水库埃达克质花岗岩引自张志诚等(2009); 北山南部新元古代花岗岩片麻岩引自叶晓峰等(2013); 北山南部埃达克质岩石引自 Mao *et al.* (2012); 北山南部钾长花岗岩引自赵泽辉等(2007) 和李舳等(2009); 分类图解及图中科迪勒拉花岗岩和太古代 TTG 范围据 Frost *et al.* (2001); ferroan-铁质花岗岩; magnesian-镁质花岗岩; a-碱性; a-c-碱钙性; c-a-钙碱性; c-钙性

Fig.5 Geochemical classification diagrams for granitoids

(a)- $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO})$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram; (b)- $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram. The data of Archean TTG gneisses from the Dunhuang block are after Zhang *et al.* (2013) and Zong *et al.* (2013), adakitic granites near the Danghe Reservoir after Zhang *et al.* (2009), Neoproterozoic granitic gneisses from the southern Beishan after Ye *et al.* (2013), Early Paleozoic adakites from the southern Beishan after Mao *et al.* (2012), syenogranite from the southern Beishan after Zhao *et al.* (2007) and Li *et al.* (2009). The classification and the regions of Cordilleran granitoids and Archean tonalitic gneisses are after Frost *et al.* (2001). ferroan-ferroan granitoids; magnesian-magnesian granitoids; a, alkalic; a-c, alkali-calcic; c-a, calc-alkalic; c, calcic

表4 北山南部早古生代花岗岩的锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Zircon Hf isotope compositions of the Early Paleozoic granites from the southern Beishan

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
X10-98-2-01	433	0.282114	0.000016	0.000732	0.017517	0.282109	-14.3	0.5	1.59	2.30
X10-98-2-03	433	0.282118	0.000016	0.000966	0.025012	0.282110	-14.3	0.5	1.60	2.30
X10-98-2-04	433	0.282155	0.000016	0.000943	0.024924	0.282148	-12.9	0.6	1.54	2.22
X10-98-2-07	433	0.282176	0.000016	0.000946	0.024770	0.282168	-12.2	0.6	1.52	2.17
X10-98-2-10	433	0.282155	0.000018	0.001144	0.030000	0.282146	-13.0	0.6	1.55	2.22
X10-98-2-11	433	0.282174	0.000016	0.000925	0.023765	0.282167	-12.2	0.6	1.52	2.18
X10-98-2-12	433	0.282125	0.000019	0.000774	0.020695	0.282119	-13.9	0.7	1.58	2.28
X10-98-2-14	433	0.282185	0.000016	0.000539	0.013991	0.282181	-11.8	0.6	1.49	2.14
X10-98-2-15	433	0.282135	0.000016	0.000742	0.019419	0.282129	-13.6	0.6	1.56	2.26
X10-98-2-16	433	0.282089	0.000018	0.000879	0.023142	0.282082	-15.2	0.6	1.63	2.36
X10-98-2-17	433	0.282177	0.000015	0.001102	0.029042	0.282168	-12.2	0.5	1.52	2.17
X10-98-2-19	433	0.282179	0.000016	0.000895	0.023332	0.282171	-12.1	0.6	1.51	2.16
X10-98-2-22	433	0.282087	0.000016	0.001084	0.029235	0.282078	-15.4	0.5	1.65	2.37
X10-98-2-08	985	0.282165	0.000016	0.000897	0.024180	0.282148	-0.5	0.6	1.53	1.87
X10-128-1-01	435	0.282495	0.000015	0.000589	0.028614	0.282490	-0.8	0.5	1.06	1.45
X10-128-1-02	435	0.282444	0.000016	0.001280	0.062022	0.282433	-2.8	0.6	1.15	1.58
X10-128-1-04	435	0.282556	0.000015	0.000772	0.035880	0.282549	1.4	0.5	0.98	1.32
X10-128-1-08	435	0.282461	0.000014	0.001167	0.053186	0.282451	-2.1	0.5	1.12	1.54
X10-128-1-09	435	0.282444	0.000017	0.001543	0.069227	0.282431	-2.8	0.6	1.16	1.58
X10-128-1-10	435	0.282431	0.000020	0.001251	0.053633	0.282421	-3.2	0.7	1.17	1.61
X10-128-1-11	435	0.282379	0.000017	0.001122	0.050544	0.282370	-5.0	0.6	1.24	1.72
X10-128-1-12	435	0.282462	0.000015	0.000844	0.039983	0.282455	-2.0	0.5	1.11	1.53
X10-128-1-14	435	0.282470	0.000015	0.000485	0.022421	0.282466	-1.6	0.5	1.09	1.51
X10-128-1-15	435	0.282487	0.000018	0.001461	0.064348	0.282475	-1.3	0.6	1.10	1.49
X10-128-1-16	435	0.282539	0.000027	0.002560	0.119535	0.282518	0.2	0.9	1.05	1.39
X10-128-1-17	435	0.282408	0.000013	0.000715	0.032265	0.282402	-3.9	0.5	1.18	1.65
X10-128-1-18	435	0.282394	0.000015	0.001024	0.048535	0.282386	-4.4	0.5	1.21	1.69
X10-128-1-19	435	0.282421	0.000017	0.001650	0.073749	0.282407	-3.7	0.6	1.20	1.64
X10-128-1-21	435	0.282514	0.000017	0.002726	0.133527	0.282491	-0.7	0.6	1.10	1.45
X10-128-1-03	943	0.282309	0.000014	0.001086	0.049938	0.282290	3.6	0.5	1.33	1.58
X10-128-1-05	983	0.282241	0.000015	0.001069	0.048079	0.282222	2.1	0.5	1.43	1.71
X10-128-1-06	1504	0.282215	0.000014	0.000864	0.038584	0.282190	12.8	0.5	1.46	1.43
X10-128-1-13	844	0.282279	0.000015	0.001607	0.071393	0.282253	0.0	0.5	1.40	1.73
X10-128-1-20	934	0.282192	0.000016	0.001013	0.046215	0.282175	-0.7	0.6	1.50	1.85

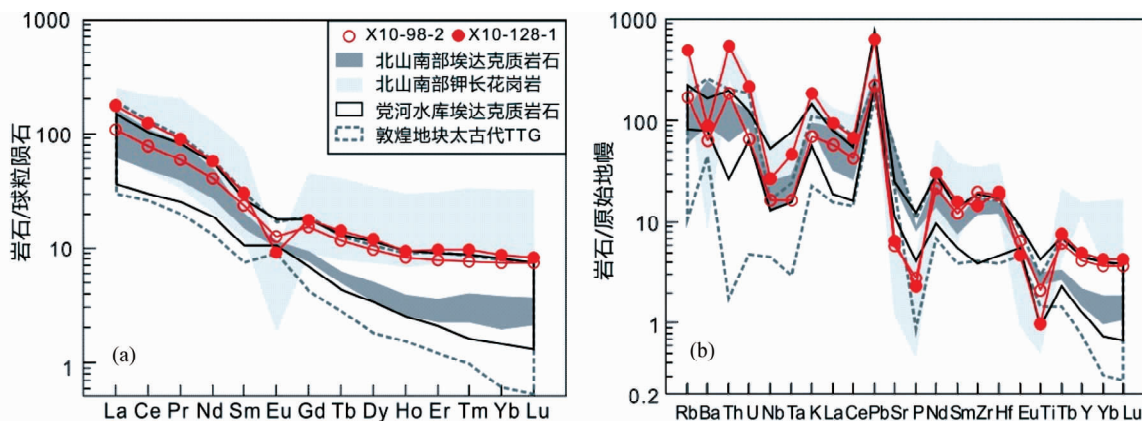


图6 稀土元素配分图(a, 球粒陨石标准值据 Taylor and McLennan, 1985) 和微量元素蛛网图(b, 原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989)

数据来源同图5

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a, chondrite values after Taylor and McLennan, 1985) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b, primitive mantle values after Sun and McDonough, 1989)

The data sources are same as those of Fig. 5

表5 北山南部早古生代花岗岩的主量元素 (wt%) 和微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果Table 5 Major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) element composition of the Early Paleozoic granites from the southern Beishan

样品号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sup>T</sup>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total	A/CNK	Fe*
X10-98-2	75.00	0.45	12.26	3.10	0.05	0.84	2.90	2.60	2.03	0.06	0.89	100.18	1.04	0.79
X10-128-1	73.18	0.21	13.85	1.40	0.03	0.32	1.10	3.14	5.37	0.05	0.51	99.16	1.07	0.81
样品号	Cr	Ni	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
X10-98-2	12.1	4.60	15.0	105	123	18.8	219	11.5	431	5.72	0.66	15.4	15.5	1.35
X10-128-1	5.40	1.50	21.3	302	136	22.2	163	18.6	602	5.98	1.88	43.3	45.2	4.43
样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
X10-98-2	39.0	73.4	8.02	29.0	5.34	1.08	4.58	0.66	3.66	0.68	1.90	0.26	1.79	0.27
X10-128-1	63.6	117	12.2	40.5	6.92	0.78	5.27	0.81	4.47	0.78	2.37	0.34	2.09	0.31

注: A/CNK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/[CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O] (mol%); Fe\* = FeO<sup>T</sup>/[FeO<sup>T</sup> + MgO]

-0.7 ~ 12.8, 相应的  $t_{DM2}$  模式年龄为 1.43 ~ 1.85Ga (表 4)。

## 6 地球化学特征

桥湾糜棱岩化花岗岩 (样品 X10-98-2) 和金塔钾长花岗岩 (样品 X10-128-1) 代表性样品的主量元素和微量元素分析结果列于表 5, 并与敦煌地块和北山南部其它同时代花岗岩一并示于图 5 和图 6。桥湾糜棱岩化花岗岩和金塔钾长花岗岩均具有高的 SiO<sub>2</sub> 含量 (73.18% ~ 75.00%) 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 (12.26% ~ 13.85%), 铝饱和指数 (A/CNK) 为 1.04 ~ 1.07, 为弱过铝质。具有较低的 Fe 指数 (0.79 ~ 0.81; Frost *et al.*, 2001), 在分类图解上为镁质花岗岩。并且与北山南部新元古代花岗质片麻岩和其它早古生代钾长花岗岩一并分布在科迪勒拉花岗岩的区域内 (图 5a; Frost *et al.*, 2001)。金塔钾长花岗岩与桥湾糜棱岩化花岗岩相比, 具有高的 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 含量, 低的 CaO 含量, 因此具有高的钙碱指数, 与北山南部其它早古生代钾长花岗岩同属碱钙性, 而桥湾糜棱岩化花岗岩为钙性 (图 5b)。

桥湾糜棱岩化花岗岩和金塔钾长花岗岩均具有分异的稀土元素配分曲线, 轻稀土相对重稀土富集, Eu 异常明显, 类似于北山南部其它早古生代钾长花岗岩 (图 6a)。在微量元素蛛网图上, 显示出明显富集 Rb、U、K 等元素, 亏损 Ba、Nb、Ta、和 Sr、P、Ti 等元素的特点, 具有与北山南部其它早古生代钾长花岗岩一致的分布形式 (图 6b)。而北山南部埃达克质岩具有明显亏损重稀土元素, 无 Eu 异常, 高 Sr/Y 比值 (57 ~ 177) 的特点 (Mao *et al.*, 2012)。

## 7 讨论

### 7.1 岩浆起源及对北山造山带地壳基底的制约

前已述及, 在敦煌地块和北山南部的石板山地块、花牛山地块广泛发育早古生代的岩浆活动产物。敦煌地块作为塔里木克拉通的一部分, 具有主要由新太古代 TTG 片麻岩构成的地壳基底。前人对 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素研究表明敦煌地块存在新太古代的地壳新生和古老地壳再造事件

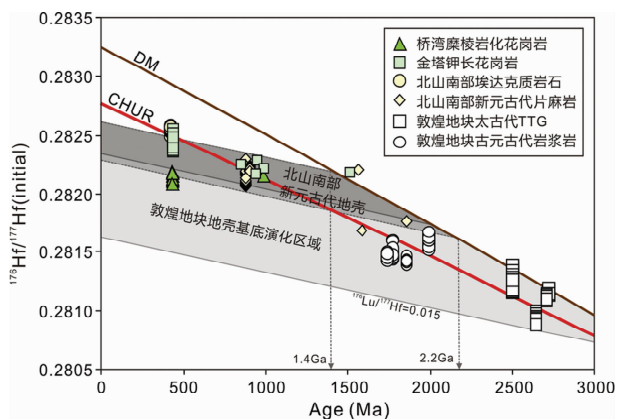


图7 锆石 Hf 同位素演化图解

敦煌地块古元古代岩浆岩引自 He *et al.* (2013); 敦煌地块太古代 TTG 引自 Zhang *et al.* (2013) 和 Zong *et al.* (2013); 北山南部新元古代片麻岩引自姜洪颖等 (2013) 和叶晓峰等 (2013); 北山南部埃达克质岩引自 Mao *et al.* (2012)

Fig. 7 Zircon Hf isotopic evolution diagram

The Hf isotopic data of Paleoproterozoic magmatic rocks from the Dunhuang block are after He *et al.* (2013), Archean TTG gneisses from the Dunhuang block after Zhang *et al.* (2013) and Zong *et al.* (2013), Neoproterozoic gneisses from the southern Beishan after Jiang *et al.* (2013) and Ye *et al.* (2013), Early Paleozoic adakites from the southern Beishan after Mao *et al.* (2012)

(图 7; Zong *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。敦煌地块早古生代党河水库花岗岩, 具有类似太古代 TTG 片麻岩的主量和微量元素特征 (图 5、图 6), 反映其岩浆来自敦煌地块下地壳岩石的部分熔融 (张志诚等, 2009)。

在北山造山带中广泛分布大量高级变质岩, 以往被认为是造山带的前寒武纪基底, 分别来自西伯利亚板块或塔里木克拉通 (刘雪亚和王荃, 1995; 左国朝和何国琦, 1990)。最近, Song *et al.* (2013a, b) 对北山北部马鬃山地区原认为的前寒武纪基底岩石, 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年证实它们其实形成于古生代。目前, 北山地区具有可靠年龄的前寒武纪岩石为出露在其南部的中-新元古代花岗质片麻岩 (梅华林等, 1999; 叶晓峰等, 2013; 姜洪颖等, 2013; 及作者未发

表资料)。北山南部花牛山地块上广泛出露的眼球状片麻岩与石板山地块花岗质片麻岩的原岩形成时代基本一致(880~900Ma),同时它们具有类似的锆石 Hf 同位素组成( $t_{DM2}$  分别为 1.62~2.13Ga 和 1.73~1.90Ga),反映了这两个古老陆块可能具有统一的来源或前寒武纪构造-热事件历史,并且表明北山南部可能存在古元古代晚期-中元古代的地壳基底(图7;叶晓峰等,2013;姜洪颖等,2013)。

桥湾糜棱岩化花岗岩的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282078~0.282181, $t_{DM2}$  模式年龄为 2.14~2.37Ga,在锆石 Hf 同位素演化图解上(图7),位于敦煌地块与北山南部地壳基底演化区域的交界位置。但是,样品中继承锆石(~985Ma)的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282148, $t_{DM2}$  模式年龄为 1.87Ga,与北山南部新元古代花岗质片麻岩的锆石 Hf 同位素特征非常一致。此外,虽然其模式年龄稍老于北山南部新元古代花岗质片麻岩所限定的地壳基底时代,但是仍明显年轻于敦煌地块的太古代地壳基底。因此,桥湾糜棱岩化花岗岩的岩浆应来自北山南部古老地壳基底的再造。这同时也暗示了北山南部可能存在更古老的古元古代早期地壳。此外,桥湾糜棱岩化花岗岩与其它同时代北山南部花岗岩具有类似的主量和微量元素特征,(图5、图6),暗示了它们具有类似的岩浆源区,即起源于北山南部古老地壳基底的部分熔融。

金塔钾长花岗岩的锆石 Hf 同位素组成显示了较大的变化范围,初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 0.282370~0.282549, $t_{DM2}$  模式年龄为 1.32~1.72Ga。在锆石 Hf 同位素演化图解上(图7),主要位于北山南部新元古代花岗质片麻岩所限定的地壳基底范围,但部分样品位于其上方,并显示了正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值,类似于北山南部埃达克质岩的锆石 Hf 同位素特征(Mao *et al.*, 2012)。此外,样品中继承锆石(934~1504Ma)均位于北山南部新元古代花岗质片麻岩所限定的地壳基底范围,具有与北山南部新元古代花岗质片麻岩一致的锆石 Hf 同位素组成(图7)。因此,金塔钾长花岗岩的岩浆也是起源于北山南部古老地壳基底的部分熔融,但很可能有幔源岩浆或碰撞造山之前的洋壳俯冲阶段新生地壳物质的贡献。

北山造山带中古老微陆块的构造归属,尤其是与敦煌地块(塔里木克拉通)的关系是北山大地构造研究中最有争议的问题之一。主要观点包括:石板山蛇绿混杂岩带以南归属塔里木克拉通(左国朝和何国琦,1990;左国朝等,2003);以柳园混杂岩带为界,以南归属塔里木克拉通(刘雪亚和王荃,1995;梅华林等,1997);分布在疏勒河断裂以北的“北山杂岩”与敦煌地块的基底在变质程度和时代上差异明显,是不同地质时期的产物(李志琛,1994)。桥湾糜棱岩化花岗岩和金塔钾长花岗岩位于北山造山带的南部边缘,如上所述,它们的岩浆来自北山南部古元古代-中元古代地壳基底的再造,而不是起源于敦煌地块太古代的地壳基底。因此,与通过北山南部石板山地块新元古代花岗质片麻岩的研究结论一致(姜洪颖等,2013),本文进一步确认了北山南部石板山地块并不是敦煌地块的一部分,而是北山南部独立的微陆

块,且两者大致沿疏勒河断裂为界(图1;李志琛,1994)。但是,北山南部古老微陆块(石板山地块、花牛山地块)的详细起源,以及与中亚造山带其他周缘克拉通的关系,还有待于进一步揭示。

## 7.2 北山造山带南部早古生代构造演化意义

敦煌地块早古生代高级变质岩的岩相学和  $P$ - $T$ - $t$  轨迹揭示了敦煌地块经历了早古生代的碰撞、俯冲和折返的构造演化过程(Zong *et al.*, 2012; He *et al.*, 2014; 彭涛等, 2014)。敦煌地块蘑菇台高压麻粒岩,峰期变质矿物组合为石榴石(边)+单斜辉石+斜长石+角闪石+金红石+石英,退变麻粒岩发育很好的白眼圈构造(红色石榴石被白色的斜长石和角闪石冠状体环绕)。相平衡模拟显示高压麻粒岩经历了顺时针的变质作用  $P$ - $T$ - $t$  轨迹,峰期温压条件为 760~800°C 和 14~16kbar。锆石 U-Pb 年代学揭示高压麻粒岩相峰期变质年龄为 ~431Ma,角闪岩相退变质时代为 ~403Ma,暗示了较慢的折返速率(约 0.8km/Myr)(Zong *et al.*, 2012; He *et al.*, 2014)。三危山观音沟地区的石榴斜长角闪片麻岩,变质峰期矿物组合由石榴石变斑晶和基质矿物(角闪石+斜长石+石英±单斜辉石)组成,形成温度为 630~670°C,压力为 9~12kbar,记录了顺时针的变质作用  $P$ - $T$  轨迹,其中退变质阶段具有近等温降压的特征(彭涛等,2014)。

本文研究的桥湾花岗岩和金塔钾长花岗岩的形成时代为 ~430Ma,与敦煌地块高压麻粒相变质的峰期变质年龄一致。此外,在敦煌地块和北山南部还广泛发育了其它同时代的岩浆活动产物,如:党水库埃达克质花岗岩(张志诚等,2009)、柳园地区钾长花岗岩(赵泽辉等,2007;李舫等,2009)、埃达克质岩(Mao *et al.*, 2012),以及金塔红脊山花岗岩等(张新虎等,2008)。如前所述,这些花岗岩的岩浆主要来自敦煌地块或北山南部古老地壳基底的再造,或者有幔源岩浆或新生地壳物质的贡献。因此,结合上述敦煌地块早古生代变质作用的证据,我们认为敦煌地块和北山南部的早古生代岩浆活动可能与敦煌地块向北山南部石板山地块的碰撞-俯冲事件有关。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和变形,以及岩层的横向逃逸,岩石圈的堆叠和俯冲板片的断离能够引起大量的岩浆活动。岩浆通常来自地壳深熔作用以及造山带亏损或富集的岩石圈地幔,具有钙碱性到高钾钙碱性的特征(Bonin *et al.*, 1998; Bonin, 2004)。敦煌地块和北山南部的早古生代变质-岩浆事件,反映了位于中亚造山带南缘的北山造山带在早古生代经历了造山带中微陆块(石板山地块)与周缘克拉通(塔里木)碰撞拼贴的造山事件(Cawood *et al.*, 2009)。同时,也表明了敦煌地块与北山的碰撞事件并不代表古亚洲洋的最终闭合,因为在北山北部具有更晚(晚二叠世)的碰撞闭合时间(Cleven *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2013a, b; Tian *et al.*, 2014)。

## 8 主要认识

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明,北山南部桥湾花岗岩和金塔钾长花岗岩均形成于~430Ma。地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成显示,它们的岩浆起源于北山南部古老地壳基底的部分熔融,金塔钾长花岗岩还可能幔源岩浆或新生下地壳物质的贡献。

(2) 花岗岩的岩浆结晶锆石及其继承锆石的 Hf 同位素组成,反映了北山南部石板山地块可能具有古元古代-中元古代的地壳基底,而与敦煌地块的前寒武纪地壳演化历史存在显著区别,并不是敦煌地块的一部分,两者大致以疏勒河断裂为界。

(3) 北山南部早古生代岩浆活动可能与敦煌地块向北山南部石板山地块的碰撞-俯冲造山事件有关,是后碰撞阶段岩浆活动的产物。北山造山带在早古生代经历了造山带中微陆块与周缘克拉通碰撞拼贴的造山事件。

**致谢** 感谢许志琴院士在工作中给予的指导、张建新研究员和曲军峰副研究员对本文提出了十分有益的修改意见。

## References

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

Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. *Lithos*, 78(1-2): 1-24

Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 48-57

Cai ZH, Xu ZQ, He BZ and Wang RR. 2012. Age and tectonic evolution of ductile shear zones in the eastern Tianshan-Beishan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 803-809 (in Chinese with English abstract)

Cawood PA, Kröner A, Collins WJ, Kusky TM, Mooney WD and Windley BF. 2009. Accretionary orogens through Earth history. Geological Society, London, Special Publications, 318(1): 1-36

Chen BL, Wu GG, Yang N, Ye DJ, Shu B and Liu XC. 2007. Baidunzi-Xiaoxugong ductile shear zone and its ore-controlling effect in the southern Beishan area, Gansu. *Journal of Geomechanics*, 13(2): 99-109 (in Chinese with English abstract)

Cleven NR, Lin S and Xiao W. 2013. The Hongliuhe fold-and-thrust belt: Evidence of terminal collision and suture-reactivation after the Early Permian in the Beishan orogenic collage, Northwest China. *Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2013.12.004

Dong FR, Li SL and Feng XC. 2001. Features of lithologic association of Archean metamorphic rocks in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 19(4): 251-255 (in Chinese with English abstract)

Droop GTR. 1987. A general equation for estimating Fe<sup>3+</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51(361): 431-435

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

Ge RF, Zhu WB, Wilde SA, He JW, Cui X, Wang X and Bihai Z. 2014. Neoproterozoic to Paleozoic long-lived accretionary orogeny in the northern Tarim Craton. *Tectonics*, 33(3): 302-329

Geisler T, Pidgeon R, Van Bronswijk W and Kurtz R. 2002. Transport of uranium, thorium, and lead in metamict zircon under low-temperature hydrothermal conditions. *Chemical Geology*, 191(1-3): 141-154

Geisler T, Schaltegger U and Tomaschek F. 2007. Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts. *Elements*, 3(1): 43-50

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Achterbergh E, O'Reilly SY, and Shee SR. 2000. The Hf-isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147

He ZY, Xu XS, Zou HB, Wang XD and Yu Y. 2010. Geochronology, petrogenesis and metallogeny of Piaotang granites in the tungsten deposit region of South China. *Geochemical Journal*, 44(4): 299-313

He ZY, Zhang ZM, Zong KQ and Dong X. 2013. Paleoproterozoic crustal evolution of the Tarim Craton: Constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes of meta-igneous rocks from Korla and Dunhuang. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 54-70

He ZY, Zhang ZM, Zong KQ, Xiang H and Klemd R. 2014. Metamorphic P-T-t evolution of mafic HP granulites in the northeastern segment of the Tarim Craton (Dunhuang block): Evidence for Early Paleozoic continental subduction. *Lithos*, 196: 1-13

Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423-439

Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82-92

Jahn BM, Windley B, Natal' in B and Dobretsov N. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599-603

Jiang HY, He ZY, Zong KQ, Zhang ZM and Zhao ZD. 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic studies on the Beishan complex in the southern Beishan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3949-3967 (in Chinese with English abstract)

Li S, Wang T, Tong Y, Hong DW, Ouyang ZX. 2009. Identification of the Early Devonian Shuangfengshan A-type granites in Liuyuan area of Beishan and its implications to tectonic evolution. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 407-422 (in Chinese with English abstract)

Li ZC. 1994. New speculation of the age of the metamorphic rock series of the Dunhuang massif. *Regional Geology of China*, 1(2): 131-134 (in Chinese with English abstract)

Liu XC, 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

Liu XY and Wang Q. 1995. Tectonics of orogenic belts in Beishan MTS, western China and their evolution. *Geoscience Research*, 28: 7-48 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Yu HF, Xin HT, Lu SN, Xiu QY and Li Q. 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430-1438 (in Chinese with English abstract)

Lu SN, Li HK, Zhang CL and Niu GH. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 160(1-2): 94-107

Ludwig KR. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, No. 1a, 55

Mao QG, 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 Altaiids. *Gondwana Research*, 22(2): 534–553
- Mei HL, Yu HF, Li T and Zuo GC. 1997. Preliminary litho-tectonic framework of Early Precambrian rocks in Dunhuang-Beishan area, Gansu, West China. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 47–54 (in Chinese with English abstract)
- Mei HL, Yu HF, Lu SN, Li HM, Li Q, Lin YX and Zuo YC. 1998. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu Province: Age from the U-Pb single zircon and Nd isotope. *Progress in Precambrian Research*, 21(2): 41–45 (in Chinese with English abstract)
- Mei HL, Li HM, Lu SN, Yu HF, Zuo YC and Li Q. 1999. The age and origin of the Liuyuan granitoid, northwestern Gansu. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(1): 14–17 (in Chinese with English abstract)
- Meng FC, Zhang JX, Xiang ZQ, Yu SY and Li JP. 2011. Evolution and formation of the Dunhuang Group in NE Tarim basin, NW China: Evidence from detrital-zircon geochronology and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 59–76 (in Chinese with English abstract)
- Peng T, Wang H, Chen HX, Meng J, Lu JS, Wang GD and Wu CM. 2014. Preliminary report on the metamorphic evolution of the Guanyingou amphibolites, Dunhuang Metamorphic Complex, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 503–511 (in Chinese with English abstract)
- Qu JF, Xiao WJ, Windley BF, Han CM, Mao QG, Ao SJ and Zhang JE. 2011. Ordovician eclogites from the Chinese Beishan: Implications for the tectonic evolution of the southern Altaiids. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(8): 803–820
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps. In: Pagel M, Barbin V, Blance P and Ohnenstetter D (eds.). *Cathodoluminescence in Geosciences*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 373–400
- Scherer E, Münker C and Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683–687
- Şengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaiid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 209–307
- Song DF, Xiao WJ, Han CM, Tian ZH and Wang ZM. 2013a. Provenance of metasedimentary rocks from the Beishan orogenic collage, southern Altaiids: Constraints from detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data. *Gondwana Research*, 24(3–4): 1127–1151
- Song DF, Xiao WJ, Han CM, Li JL, Qu JF, Guo QQ, Lin LN and Wang ZM. 2013b. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, southern Altaiids: Insights from zircon U-Pb and Hf isotopic data of high-grade complexes. *Precambrian Research*, 227: 368–388
- Sun M, Yuan C, Xiao W, Long X, Xia X, Zhao G, Lin S, Wu F and Kröner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Paleozoic. *Chemical Geology*, 247(3–4): 352–383
- 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 Publications, 42(1): 313–345
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 328
- Tian ZH, Xiao WJ, Windley BF, Lin L, Han CM, Zhang JE, Wan B, Ao SJ, Song DF and Feng JY. 2014. Structure, age, and tectonic development of the Huoshishan-Niujuanzi ophiolitic mélange, Beishan, southernmost Altaiids. *Gondwana Research*, 25(2): 820–841
- Wayne DM and Sinha AK. 1988. Physical and chemical response of zircons to deformation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(1): 109–121
- Wilhelm C, Windley BF and Stampfli GM. 2012. The Altaiids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. *Earth-Science Reviews*, 113(3–4): 303–341
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kröner 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, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaiids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189–1217
- Xiao WJ, Huang BC, Han CM, Sun S and Li JL. 2010a. A review of the western part of the Altaiids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Research*, 18(2–3): 253–273
- Xiao WJ, Mao QG, Windley BF, Han CM, Qu JF, Zhang JE, Ao SJ, Guo QQ, Cleven NR, Lin SF, Shan YH and Li JL. 2010b. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553–1594
- Xu XS, Zhang M, Zhu KY, Chen XM and He ZY. 2012. Reverse age zonation of zircon formed by metamictisation and hydrothermal fluid leaching. *Lithos*, 150: 256–267
- Xu ZQ, He BZ, Zhang CL, Zhang JX, Wang ZM and Cai ZH. 2013. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: New geochronological evidence from deep drilling samples. *Precambrian Research*, 235: 150–162
- Yang JS, Wu CL, Chen SY, Shi RD, Zhang JX, Meng FC, Zuo GC, Wu HQ and Constantinovskaya E. 2006. Neoproterozoic eclogitic metamorphic age of the Beishan eclogite of Gansu, China: Evidence from SHRIMP U-Pb isotope dating. *Geology in China*, 33(2): 317–325 (in Chinese with English abstract)
- Ye XF, Zong KQ, Zhang ZM, He ZY, Liu YS, Hu ZC and Wang W. 2013. Geochemistry of Neoproterozoic granite in Liuyuan area of southern Beishan orogenic belt and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 32(2–3): 307–317 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Gong J and Yu S. 2012. 1. 85Ga HP granulite-facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China: Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites. *Journal of the Geological Society*, 169: 511–514
- Zhang JX, Yu SY, Gong JH, Li HK and Hou KJ. 2013. The latest Neoproterozoic-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses. *Precambrian Research*, 226: 21–42
- Zhang XH, Su L, Cui XJ, Ding SH, Zhang JG and Chen L. 2008. Metallogenic epoch and mechanism of the tungsten ore in Yushan, Beishan orogenic belt, Gansu. *Chinese Science Bulletin*, 53(8): 1222–1230
- Zhang ZC, Guo ZJ, Zou GQ, Feng ZS and Li JF. 2009. Geochemical characteristics and SHRIMP U-Pb age of zircons from the Danghe reservoir TTG in Dunhuang, Gansu Province, and its significations. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 495–505 (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)
- Zong KQ, Zhang ZM, He ZY, Hu ZC, Santosh M, Liu YS and Wang W. 2012. Early Paleozoic high-pressure granulites from the Dunhuang block, northeastern Tarim Craton: Constraints on continental collision in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(8): 753–768

- Zong KQ, Liu YS, Zhang ZM, He ZY, Hu ZC, Guo JL and Chen K. 2013. The generation and evolution of Archean continental crust in the Dunhuang block, northeastern Tarim craton, northwestern China. *Precambrian Research*, 235: 251–263
- Zuo GC and He GY. 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan area. *Chinese Journal of Geology*, (4): 305–314 (in Chinese with English abstract)
- 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
- 蔡志慧, 许志琴, 何碧竹, 王瑞瑞. 2012. 东天山-北山造山带中大型韧性剪切带属性及形成演化时限与过程. *岩石学报*, 28(6): 1875–1895
- 陈柏林, 吴淦国, 杨农, 叶得金, 舒斌, 刘晓春. 2007. 甘肃北山白墩子-小西弓韧性剪切带及其控矿作用. *地质力学学报*, 13(2): 99–109
- 董富荣, 李嵩龄, 冯新昌. 2001. 新疆太古宙变质岩系岩石组合特征. *新疆地质*, 19(4): 251–255
- 姜洪颖, 贺振宇, 宗克清, 张泽明, 赵志丹. 2013. 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. *岩石学报*, 29(11): 3949–3967
- 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
- 李志琛. 1994. 敦煌地块变质岩系时代新认识. *中国区域地质*, 1(2): 131–134
- 刘雪亚, 王荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化. *地质研究*, 28: 7–48
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430–1438
- 梅华林, 于海峰, 李铨, 左国朝. 1997. 甘肃敦煌-北山早前寒武纪岩石组合-构造初步框架. *前寒武纪研究进展*, 20(4): 47–54
- 梅华林, 于海峰, 陆松年, 李惠民, 李铨, 林源贤, 左义成. 1998. 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. *前寒武纪研究进展*, 21(2): 41–45
- 梅华林, 李惠民, 陆松年, 于海峰, 左义成, 李铨. 1999. 甘肃柳园地区花岗岩岩石时代及成因. *岩石矿物学杂志*, 18(1): 14–17
- 孟繁聪, 张建新, 相振群, 于胜尧, 李金平. 2011. 塔里木盆地东北缘敦煌群的形成和演化: 锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素证据. *岩石学报*, 27(1): 59–76
- 彭涛, 王浩, 陈泓旭, 孟洁, 卢俊生, 王国栋, 吴春明. 2014. 甘肃敦煌观音沟地区变质作用初步研究. *岩石学报*, 30(2): 503–511
- 杨经绥, 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 张建新, 孟繁聪, 左国朝, 吴汉泉, Constantinovskaya E. 2006. 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. *中国地质*, 33(2): 317–325
- 叶晓峰, 宗克清, 张泽明, 贺振宇, 刘勇胜, 胡兆初, 王伟. 2013. 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. *地质通报*, 32(2–3): 307–317
- 张新虎, 苏犁, 崔学军, 丁书鸿, 赵建国, 陈莉. 2008. 甘肃北山造山带玉山钨矿成岩成矿时代及成矿机制. *科学通报*, 53(9): 1077–1084
- 张志诚, 郭召杰, 邹冠群, 冯志硕, 李建锋. 2009. 甘肃敦煌党河水库 TTG 地球化学特征, 锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. *岩石学报*, 25(3): 495–505
- 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
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征. *地质科学*, (4): 305–314
- 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