

# 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\*

姜洪颖<sup>1,2</sup> 贺振宇<sup>2\*\*</sup> 宗克清<sup>3</sup> 张泽明<sup>2</sup> 赵志丹<sup>1</sup>

JIANG HongYing<sup>1,2</sup>, HE ZhenYu<sup>2\*\*</sup>, ZONG KeQing<sup>3</sup>, ZHANG ZeMing<sup>2</sup> and ZHAO ZhiDan<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

2. 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

3. 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

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

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

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

2013-05-30 收稿, 2013-08-23 改回.

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

**Abstract** Beishan orogenic belt is an important part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). A large number of high-grade metamorphic rocks are widely distributed in several Beishan orogenic tectonic units, which were considered as Precambrian basements and referred to the ‘Beishan complex’. However, their formation ages and tectonic attributions and whether they experienced metamorphism process associated with the orogeny are still unclear. Here, we present zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of Shibandun amphibolite, Baidunzi gneiss and felsic veins from the Shibanshan block, which is located in the southern margin of the Beishan orogenic belt. The results show that both Shibandun amphibolite and Baidunzi gneiss show similar ~880Ma protolith ages and ~295Ma metamorphic ages. The formation age of Baidunzi felsic veins is consistent with the metamorphic age of the gneiss. Furthermore, Baidunzi gneiss and felsic veins also recorded a later metamorphism age of 270~280Ma. The protolith crystallized zircons of Shibandun amphibolite and Baidunzi gneiss exhibit varied initial  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios (0.282063 to 0.282291),  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values (-6.3 to 2.2) and  $t_{\text{DM2}}$  model ages (1.62Ga to 2.14Ga), indicating that their protolith may be originated from a Paleoproterozoic crust with the addition of juvenile crust. Evidently, the Archean crustal basements would not occur in the southern Beishan orogenic belt, namely that the microcontinents in the orogen would not belong to the Dunhuang Block as previously considered. The metamorphic zircons of Shibandun amphibolite and Baidunzi gneiss have significantly higher initial  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios than their protolith counterparts, suggesting that they were formed by new zircon overgrowths in partial melts, rather than recrystallized from the protolith zircons. Therefore, the ~295Ma metamorphic event may represents an anatexis event, which is also supported by the simultaneous felsic veins occurred in the Baidunzi gneiss. We suggest that the ~295Ma anatexis events may be formed in a post-collisional extensional setting.

**Key words** Beishan orogenic belt; Beishan complex; Neoproterozoic; Late Paleozoic anatexis event; Crustal basement

**摘要** 北山造山带是中亚造山带的重要组成部分,大量高级变质岩在北山造山带多个构造单元(地块)中广泛分布,被认为是造山带的前寒武纪基底,以往统称为“北山杂岩”。但是,对这些基底岩石的形成时代、来源与归属,以及是否经历了与造山作用过程相关的变质作用等问题的认识仍不清楚。本文对位于造山带南缘,即石板山地块的石板墩斜长角闪岩、白墩子片

\* 本文受中国地质调查局百名青年地质人才培养计划项目(QNYC2-2012-21)、国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201011034)和中国地质调查局工作项目(1212011085478)联合资助。

第一作者简介:姜洪颖,女,1986年生,硕士生,岩石学专业

\*\* 通讯作者:贺振宇,男,1976年生,博士,副研究员,岩石学专业, E-mail: ahhzy@163.com

麻岩及其中长英质脉体进行了锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究。分析结果表明石板墩斜长角闪岩、白墩子片麻岩都具有 ~880Ma 的原岩结晶年龄和 ~295Ma 的变质作用年龄;白墩子长英质脉体的形成年龄与片麻岩的变质年龄一致,为 ~295Ma。此外,白墩子片麻岩及长英质脉体的锆石还记录了更晚一期 270~280Ma 的变质作用。石板墩斜长角闪岩、白墩子片麻岩中原岩结晶锆石的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282063~0.282291,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -6.3~2.2,  $t_{\text{DM2}}$  分布于 1.62~2.14Ga 之间,表明其原岩的岩浆可能起源于古元古代地壳的部分熔融并有新生物质的贡献。这反映了北山造山带南缘可能并不存在太古代的地壳基底,即北山造山带南缘的石板山地块并不是前人所认为的属于敦煌地块的一部分。石板墩斜长角闪岩、白墩子片麻岩中的变质成因锆石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值明显高于原岩岩浆锆石,反映了它们不是由原岩锆石改造形成,而是熔体中的新生锆石,代表了一次 ~295Ma 的深熔事件。这也得到了白墩子片麻岩中发育同时期长英质脉体的支持。我们认为这一 ~295Ma 的深熔作用事件可能形成于后碰撞的伸展构造环境。

**关键词** 北山造山带;北山杂岩;新元古代;晚古生代深熔事件;基底归属

**中图法分类号** P588.345; P597.3

## 1 引言

北山造山带是中亚造山带的重要组成部分,其位于天山缝合带和索伦缝合带的交接部位(Xiao *et al.*, 2010),由大量构造块体,包括微陆块、岛弧、洋壳和增生杂岩等经多期次俯冲和拼贴作用形成的增生型造山带(Xiao *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2013)。

在北山造山带中广泛分布大量高级变质岩,被认为是造山带的前寒武纪基底(左国朝等,1990;李景春等,1996;魏学平等,2000),以往统称为“北山杂岩”(图 1a),主要由片麻岩、石英片岩、斜长角闪岩、混合岩、变粒岩及大理岩等组成(刘雪亚等,1995;左国朝等,2003)。对这些前寒武纪基底的形成时代、归属及变质作用过程的正确认识,是造山带构造格架划分及演化过程认识的关键问题(Sun *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2013)。目前,对北山造山带的基底归属和构造单元划分存在多种观点,主要包括:(1)以石板井-小黄山蛇绿混杂岩带为界,以北属哈萨克斯坦板块,以南属塔里木板块(左国朝等,1990;Zuo *et al.*, 1991);(2)以红石山-黑鹰山和白山-红柳园-账房山两条深大断裂为界,将北山造山带从北到南分为西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块(刘雪亚等,1995);(3)Xiao *et al.* (2010) 将北山造山带分为 9 个构造单元,其中具有古老微陆块性质的构造单元为黑鹰山-旱山地块,双鹰山-花牛山地块和石板山地块,且将石板山归为敦煌地块的一部分。

存在上述不同认识的主要原因之一是基底岩石已有的年代学研究结果少且准确度低,尤其缺少高精度的锆石 U-Pb 原位定年和 Hf 同位素分析(表 1)。此外,由于造山作用的强烈改造,大多数地层的原有序列遭受破坏,一些古生代的岩体由于经历了高级变质作用而被误认为是前寒武纪基底岩石。例如,魏学平等(2000)通过 Sm-Nd 定年认为马鬃山地区的“北山杂岩”形成于古元古代-新太古代;但是 Song *et al.* (2013)通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年证实它们其实形成于古生代。事实上,目前在整个北山地区具有可靠年龄的前寒武纪岩石仅为新元古代柳园眼球状片麻岩(梅华林

等,1999;叶晓峰等,2013)。

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、弧-弧碰撞和弧-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世(Zuo *et al.*, 1991; Ao *et al.*, 2010, 2012; Xiao *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2011a)。前人通过柳园榴辉岩的研究,揭示了俯冲的洋壳于 ~465Ma 经历了榴辉岩相变质,以及 ~430Ma 的退变质过程(Liu *et al.*, 2010; Qu *et al.*, 2011)。同时,北山造山带中的古老微陆块也卷入了古生代造山作用过程,基底岩石发生一定程度的混合岩化或者再造。前人对北山地区花岗岩的 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素研究显示这些古生代花岗岩部分为古老地壳再造的产物或者有古老地壳的参与(江思宏和聂凤军,2006;刘雪敏等,2010;张文等,2010;Song *et al.*, 2013)。但是,对北山造山带广泛发育的混合岩化的时代、过程和构造意义关注较少。

本文选取位于北山造山带南缘,即石板山地块上的石板墩斜长角闪岩、白墩子片麻岩及其中长英质脉体进行锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素分析和全岩地球化学分析,揭示它们的形成时代和变质作用历史,以期探讨北山造山带中古老微陆块的归属,及其对北山造山带古生代构造演化的制约。

## 2 地质概况

北山造山带位于甘肃省西北部及内蒙古西部,呈东西向延伸,西邻东天山,东于弱水走滑断裂被巴丹吉林沙漠掩盖,向北可以延伸到蒙古增生造山带,南至阿尔金断裂,全长约 520km,南北宽约 250km(图 1b;刘雪亚和王荃,1995;Zuo *et al.*, 1991;Xiao *et al.*, 2010)。北山造山带由一系列的岛弧、蛇绿混杂岩带和微陆块等构造单元组成。其中可能存在古老前寒武纪基底的微陆块有黑鹰山-旱山地块、马鬃山地块、双鹰山-花牛山地块和石板山地块等(图 1b、表 1)。

黑鹰山-旱山地块主要发育石炭系海相碎屑岩及中-酸性火山岩,并广泛发育晚古生代花岗岩体(Xiao *et al.*, 2010)。在红石山以东地段及旱山一带,出现片岩、片麻岩以及混合岩等。孙新春等(2005)获得了小红山一带黑云斜长片麻岩

表 1 北山造山带部分已有前寒武纪年龄结果

Table 1 Some Precambrian dating results of the Beishan orogen

构造单元	地点	岩石类型	方法	年龄	资料来源
黑鹰山-旱山地块	红石山东	黑云斜长片麻岩	单颗粒锆石上交点	2656 ± 146Ma	孙新春等, 2005
	交叉沟	斜长角闪岩	Sm-Nd 等时线	1264 ± 11 Ma	聂凤军等, 2004
	白石山	片麻状花岗岩	锆石 Hf 模式年龄	1741 ~ 1901Ma	刘雪敏等, 2010
马鬃山地块	盐池东	斜长角闪岩	Sm-Nd 等时线	2839 ± 163Ma	魏学平等, 2000
	草呼勒哈德	角闪斜长片岩	Sm-Nd 等时线	1981 ± 116Ma	魏学平等, 2000
双鹰山-花牛山地块	柳园	眼球状花岗岩	单颗粒锆石上交点	880 ± 31Ma	梅华林等, 1999
		眼球状花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	902 ± 3Ma	叶晓峰等, 2013
	花牛山	玄武岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	1071 ± 5Ma	杨建国等, 2010
	白湖	糜棱花岗闪长岩	单颗粒锆石上交点	1756 ± 88Ma	梅华林等, 1998
		糜棱含榴英云闪长岩	单颗粒锆石上交点	1660 ± 28Ma	梅华林等, 1998
石板山地块	老君庙	片麻状石英闪长岩	Ar-Ar 等时线	~ 1800Ma	桑海清等, 1997
		斜长角闪岩	Sm-Nd 等时线	~ 2900Ma	李志琛, 1994

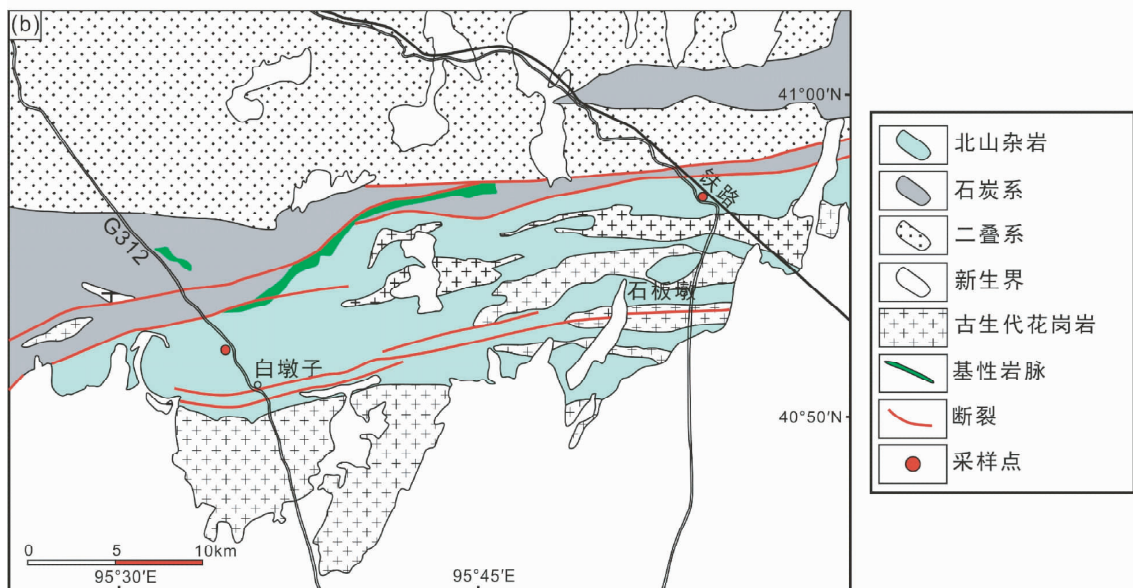
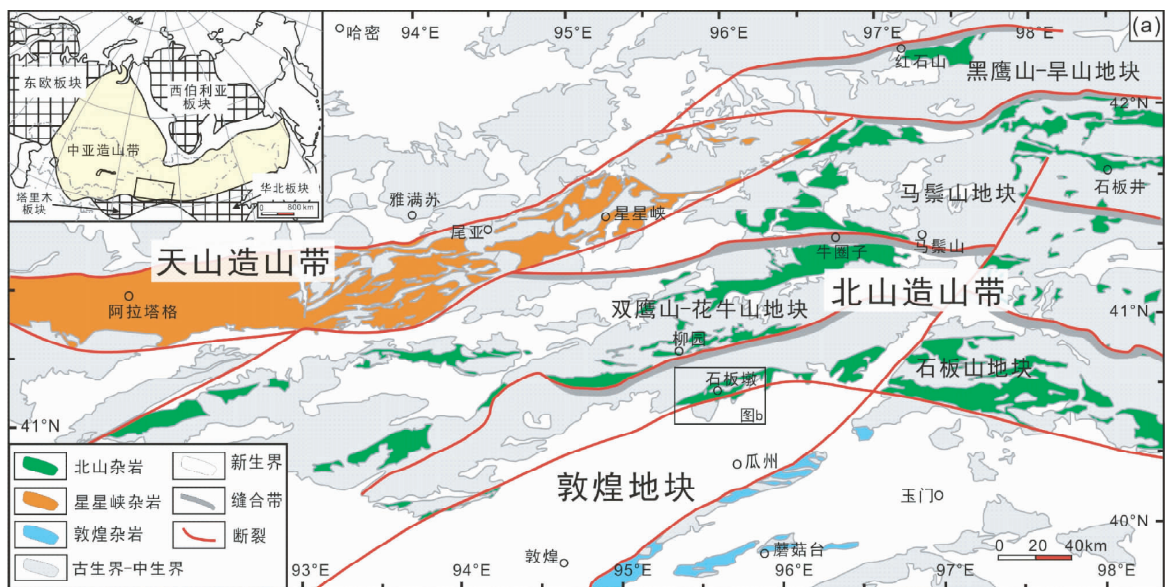


图 1 北山造山带构造简图(a, 插图中亚造山带位置示意图, 据 Xiao *et al.*, 2010) 和石板墩-白墩子地区地质简图(b)  
 Fig.1 Simplified tectonic map of Beishan orogenic belt (a, the inset showing sketched tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt, modified after Xiao *et al.*, 2010) and simplified geological map of Shibandun-Baidunzi area (b)

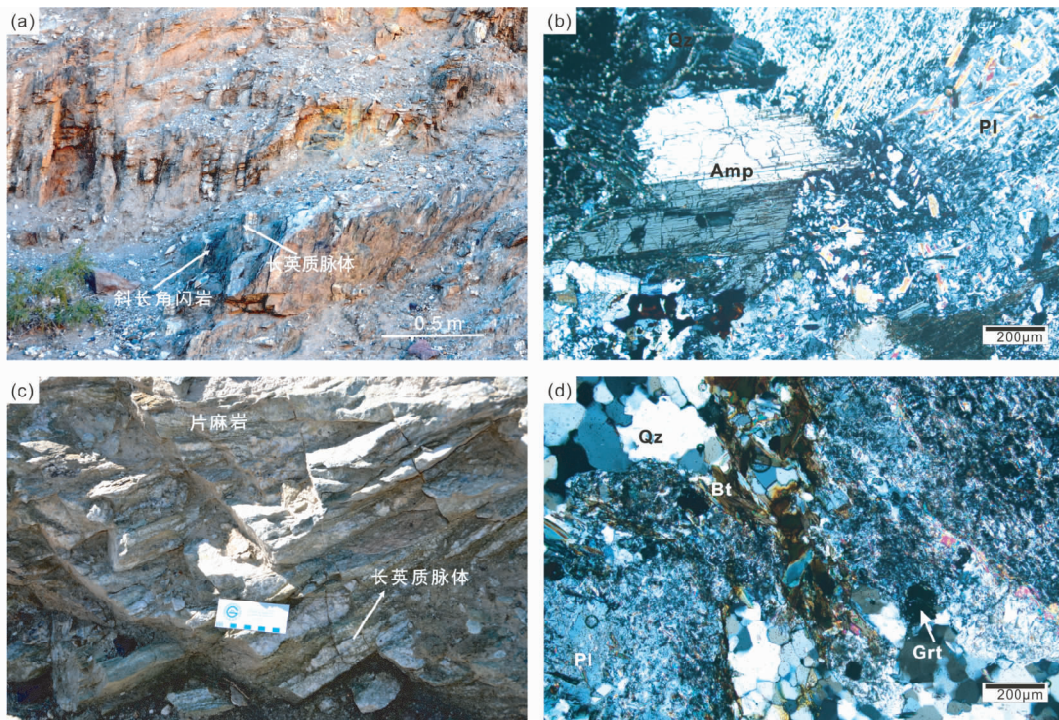


图2 研究样品的野外露头照片和显微照片

(a)-石板墩斜长角闪岩;(b)-石板墩斜长角闪岩的显微照片(正交偏光);(c)-白墩子片麻岩和长英质脉体;(d)-白墩子片麻岩的显微照片(正交偏光). 矿物缩写: Amp-角闪石; Bt-黑云母; Grt-石榴子石; Ms-白云母; Pl-斜长石; Qz-石英

Fig.2 Field photographs and photomicrograph of the studied samples

(a)-field photo of the Shibandun amphibolite; (b)-photomicrograph of the Shibandun amphibolite (crossed nicols); (c)-field photo of the Baidunzi gneiss sample and feldspar-quartz veins; (d)-photomicrograph of the Baidunzi gneiss (crossed nicols). Amp-amphibole; Bt-biotite; Grt-garnet; Ms-muscovite; Pl-plagioclase; Qz-quartz

的单颗粒锆石上交点年龄为 $\sim 2656\text{Ma}$ 。聂凤军等(2004)测得了交叉沟地区斜长角闪岩的 Sm-Nd 等时线年龄为  $1264 \pm 11\text{Ma}$ (表 1)。马鬃山地块西接中天山地块,有研究者认为其是中天山地块的东延部分(刘雪亚和王荃,1995;左国朝等,2003)。在明水、盐池、草呼勒哈德、石板井等地分布有一套高级变质岩,岩石类型包括片麻岩、片岩、混合岩等,前人认为是古元古代-中太古代的基底岩石(魏学平等,2000)。但是,最近 Song *et al.* (2013) 对马鬃山镇北一带的片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄研究表明,它们的形成年龄峰期为 $\sim 494\text{Ma}$ 和 $\sim 465\text{Ma}$ ,是古生代岛弧岩浆作用的产物,变质作用时代为 $\sim 460\text{Ma}$ 和 $\sim 430\text{Ma}$ 。双鹰山-花牛山地块为古生代岛弧带,在北部边缘红柳河、牛圈子及月牙山等地分布有蛇绿混杂岩带。梅华林等(1998)通过单颗粒锆石定年认为双鹰山-花牛山地块的白湖地区存在古元古代花岗质岩石。杨建国等(2010)对原划分为石炭纪的花牛山铅锌矿玄武岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得年龄为  $1071 \pm 5\text{Ma}$ ,认为代表玄武岩的时代。但是我们的定年结果显示玄武岩的结晶年龄可能为 $\sim 460\text{Ma}$ ,并存在少量  $1200 \sim 2600\text{Ma}$  继承锆石(测试数据另文发表)。在柳园古堡泉一带发育一套新元古代眼球状片麻岩,形成年龄为 $\sim 900\text{Ma}$ (梅华林等,

1999;叶晓峰等,2013),这是北山地区已知的具有可靠年龄的前寒武纪岩石。

石板山地块被认为是古生代的活动大陆边缘(Xiao *et al.*, 2010),东起金塔县、旧寺墩,经老君庙、石板墩,西至玉门关以北及白山一带。该构造单元除广泛分布晚古生代花岗岩类之外,主要为中高级变质岩,岩石组成有混合岩、片麻岩、大理岩、片岩、变质砂岩、千枚岩等。长期以来,该地块被认为是塔里木板块或敦煌地块的一部分(刘雪亚和王荃,1995;李志琛,1994;梅华林等,1997;左国朝等,1990)。前人对这些中高级变质岩也开展了大量的年代学研究。例如:李志琛(1994)报道了老君庙斜长角闪岩 $\sim 2900\text{Ma}$  Sm-Nd 等时线年龄,桑海清等(1997)报道了老君庙片麻状石英闪长岩的 $\sim 1800\text{Ma}$  Ar-Ar 等时线年龄。但是,上述年龄结果大多为基于少量样品的全岩等时线年龄或为单颗粒锆石的上交点年龄,且没有原始数据供检验,其结果的可靠性需要进一步验证。本文的研究样品采集自北山造山带南缘的石板山地块,均位于原划分的“北山杂岩”中(图 1b)。样品 X11-109-1 和样品 X12-12-1 采于石板墩地区, GPS 坐标为  $N40^{\circ}57.2'/E95^{\circ}54.0'$ ,岩性为斜长角闪岩;样品 X10-37-1 和 X10-37-2 采于白墩子地区, GPS 坐标为  $N40^{\circ}52.6'/E95^{\circ}34.7'$ ,分别为片

表 2 代表性矿物电子探针成分分析结果 (wt%)

Table 2 Representative mineral compositions (wt%)

样品号	X12-12-1			X11-109-1		X10-37-1			X10-37-2		
	斜长角闪岩			斜长角闪岩		片麻岩			长英质脉体		
位置	石板墩					白墩子					
矿物	Pl	Amp	Kfs	Pl	Ms	Pl	Bt	Grt	Ms	Pl	Bt
SiO <sub>2</sub>	57.27	44.57	64.56	68.64	47.92	68.07	34.43	36.72	48.32	67.70	37.38
TiO <sub>2</sub>	-	1.38	-	0.00	0.45	0.02	1.89	0.02	0.02	-	1.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.31	8.79	18.30	19.48	32.26	20.05	16.67	20.72	32.54	20.05	16.09
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0.04	0.02	0.05	-	0.02	-	0.04
FeO	0.09	15.41	0.12	-	2.74	0.03	27.83	26.02	1.79	0.11	16.97
MnO	-	0.37	0.03	0.01	0.01	-	0.21	5.61	0.03	0.02	0.24
NiO	-	-	-	-	-	-	0.02	0.02	0.00	-	0.03
MgO	-	12.44	0.01	-	1.45	0.01	6.58	0.65	1.14	-	12.63
CaO	8.81	11.84	0.02	0.67	0.04	1.46	0.02	9.78	0.08	1.99	0.12
Na <sub>2</sub> O	6.07	1.11	0.37	11.13	0.35	10.60	0.12	0.00	0.30	10.37	0.13
K <sub>2</sub> O	0.05	1.21	15.92	0.03	10.64	0.09	8.96	0.00	11.04	0.07	9.71
总量	99.61	97.10	99.32	99.96	95.89	100.34	96.76	99.52	95.29	100.32	95.21
Si	2.57	6.61	3.00	3.00	3.19	2.97	2.70	2.97	3.22	2.96	2.82
Ti	-	0.15	-	-	0.02	0.00	0.11	-	-	-	0.11
Al	1.44	1.53	1.00	1.00	2.53	1.03	1.54	1.97	2.56	1.03	1.43
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe <sup>3+</sup>	-	0.64	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-
Fe <sup>2+</sup>	-	1.27	-	-	0.15	-	1.82	1.67	0.10	-	1.07
Mn	-	0.05	-	-	-	-	0.01	0.38	-	-	0.02
Ni	-	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	2.75	-	-	0.14	-	0.77	0.08	0.11	-	1.42
Ca	0.42	1.88	-	0.03	-	0.07	-	0.85	0.01	0.09	0.01
Na	0.53	0.32	0.03	0.94	0.04	0.90	0.02	-	0.04	0.88	0.02
K	-	0.23	0.94	-	0.90	-	0.90	-	0.94	0.00	0.93
阳离子	4.97	15.43	4.99	4.97	6.99	4.97	7.88	8.01	6.98	4.97	7.83
Ab/Alm	55	-	3	97	-	93	-	57	-	90	-
An/Sps	44	-	0	3	-	7	-	13	-	10	-
Or/Prp	0	-	97	0	-	0	-	3	-	0	-
Grs	-	-	-	-	-	-	-	28	-	-	-

注:“-”低于检测限

麻岩和其中的长英质脉体。从野外观察来看,两个地点均发育较强的混合岩化,可见宽度不等的长英质脉体平行片麻理方向分布,石板墩斜长角闪岩、白墩子片麻岩样品均为混合岩化片麻岩的暗色部分(图2)。

### 3 岩石特征

石板墩斜长角闪岩的主要矿物组成为斜长石(50%)、角闪石(30%)、石英(10%),含少量钾长石、以及黑云母、磷灰石、金红石、榍石等(图2b)。角闪石为镁质普通角闪石,具有较高的 MgO(12.3%~17.2%),较低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1.4%~9.5%)、FeO(11.4%~15.8%)和 Na<sub>2</sub>O(0.1%~1.2%),斜长石为中长石(An=41~44)(样品 X12-12-1)(表2)。应用角闪石-斜长石温度计(Holland and Blundy, 1994)和角闪石-斜长石-石英压力计(Bhadra and Bhattacharya, 2007)计算的变质温压条件为760℃和0.5GPa。但另一个样品(X11-109-1)蚀变较强,斜长石较强烈的绢云母化,成分主要为钠长石(An=3),角闪石发生绿泥石化、碳酸盐化等。

白墩子片麻岩呈鳞片粒状变晶结构,片麻状构造,主要由斜长石(50%)、石英(30%)、黑云母(10%)等组成,含少量白云母和石榴子石,副矿物有榍石、磷灰石等(样品 X10-37-1)(图2d)。斜长石主要为钠长石(An=7~12),强烈绢云母化和黝帘石化。黑云母呈条带状,部分发生绿泥石化。石榴石富 CaO(8.5%~9.8%)和 MnO(5.6%~7.0%),端元组成为 Alm<sub>57-59</sub>Grs<sub>24-28</sub>Prp<sub>3</sub>Sps<sub>13-16</sub>(表2)。

长英质脉体(X10-37-2),粒状镶嵌结构,块状构造,主要由石英(60%)、斜长石(30%)、黑云母(5%)、白云母(5%)组成,副矿物有榍石、磷灰石。斜长石主要为富钠长石(An=9~10),部分绢云母化。黑云母部分绿泥石化。

### 4 分析方法

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,分析结果误差小于 0.5%。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 型 ICP-MS 测定。用于 ICP-MS 分析的样品处

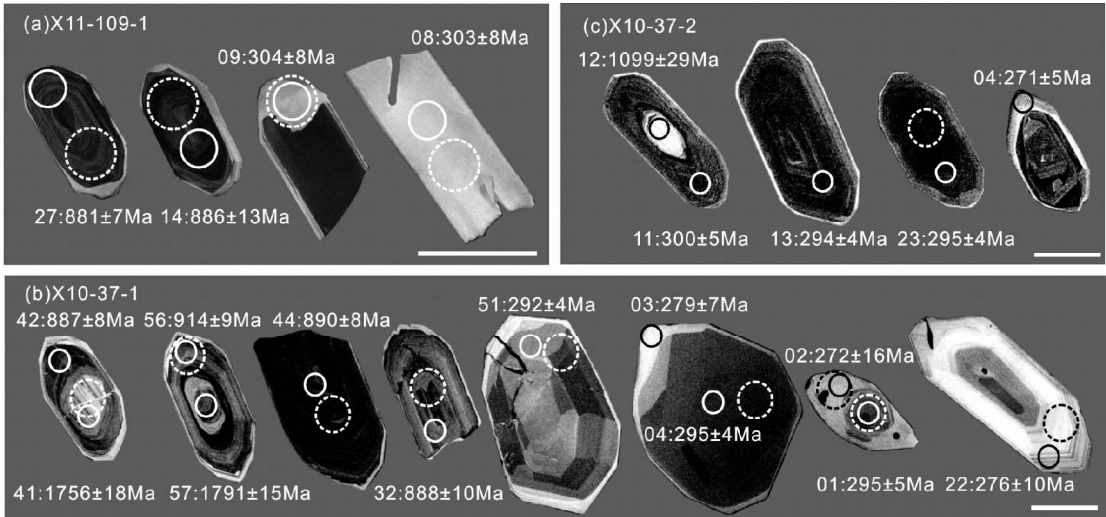


图3 代表性锆石 CL 图像

实线圆圈为年龄测点,虚线圆圈为 Hf 同位素测点,标尺长度为 100 $\mu\text{m}$

Fig. 3 CL images of representative zircons

Solid circles denote U-Pb analysis spot and dashed circles denote Lu-Hf analysis spot, the scale bars are 100 $\mu\text{m}$

理过程如下:(1)称取粉末 50mg 于 Teflon 溶样器中;(2)采用 Teflon 溶样弹将样品用 HF + HNO<sub>3</sub> 在 195 $^{\circ}\text{C}$  条件下消解 48h;(3)将在 120 $^{\circ}\text{C}$  条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO<sub>3</sub> 稀释 2000 倍,定容于干净的聚酯瓶中。详细的样品处理过程、分析条件同 Liu *et al.* (2008)。

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 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。每个分析包括大约 20~30s 的空白信号和 50s 的样品信号,激光束斑直径为 32 $\mu\text{m}$ 。对分析数据处理,包括样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算,采用软件 ICPMSDataCal 完成。详细的仪器操作条件和实验步骤参考 Liu *et al.* (2008, 2010)。锆石微量元素含量利用 NIST610 做为外标,<sup>29</sup>Si 做内标的方法进行定量计算(Liu *et al.*, 2010)。采用 ISOPLOT 2.04 (Ludwig, 2001) 进行锆石加权平均年龄计算及谐和图的绘制。

样品 X11-109-1 和 X10-37-1 的锆石原位 Hf 同位素分析,在中国地质科学院矿产资源研究所配有 Newwave UP 213nm 激光剥蚀系统的 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)上进行。分析方法与步骤类似 Wu *et al.* (2006)。激光剥蚀的斑束大小为 44 $\mu\text{m}$ ,频率为 8Hz。以国际锆石标准 GJ-1 为参考物质,本次实验<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 加权平均值为 0.282007  $\pm$  0.000007 (2 $\sigma$ , n = 36),与参考标准值 (Morel *et al.*, 2008) 在误差范围内一致。样品 X10-37-2 的原位 Hf 同位素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究

国家重点实验室的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS) 和 Newwave UP 213nm 激光剥蚀系统上进行的。分析时激光束直径 44 $\mu\text{m}$ ,激光脉冲频率为 8Hz。

在计算(<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> 和  $\epsilon_{\text{Hf}}$  值时,<sup>176</sup>Lu 的衰变常数采用 1.865  $\times 10^{-11} \text{a}^{-1}$  (Scherer *et al.*, 2001),  $\epsilon_{\text{Hf}}$  的计算采用 Bouvier *et al.* (2008) 推荐的球粒陨石 Hf 同位素值,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf = 0.0336,<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf = 0.282785。Hf 模式年龄计算中,亏损地幔<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 现在值采用 0.28325,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 为 0.0384,两阶段模式年龄采用平均地壳的 (<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf)<sub>c</sub> = 0.015 (Griffin *et al.*, 2000) 进行计算。

## 5 分析结果

### 5.1 锆石 U-Pb 年代学

斜长角闪岩样品 X11-109-1 中锆石呈柱状,长 100~150 $\mu\text{m}$ 。CL 图像显示这些锆石可以分为两类,一类锆石具震荡环带,且发育 CL 发光较强的窄边,部分锆石含有继承的核部;另一类锆石整体成分均一,CL 图像特征类似第一类锆石的边部(图 3a)。共进行了 34 个点的 U-Pb 年龄和微量元素分析(表 3、表 4)。22 个点位于第一类锆石震荡环带的区域,分析结果一致,均位于谐和线上,<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 882  $\pm$  4Ma (2 $\sigma$ ; MSWD = 0.66)。它们的 Th 含量为 47  $\times 10^{-6}$  ~ 413  $\times 10^{-6}$ ,U 含量为 60  $\times 10^{-6}$  ~ 827  $\times 10^{-6}$ ,Th/U 为 0.09 ~ 1.08,稀土元素配分曲线具有轻稀土亏损,重稀土富集(Yb/Dy = 3.50 ~ 5.83),Ce 正异常以及 Eu 负异常的特点,应为原岩岩浆结晶锆石。两个核部分析点的年龄分别为 941  $\pm$  9Ma 和 1066  $\pm$  11Ma,明显老于原岩岩浆结晶锆石的年龄,应为继承锆石。10 个分析点位于第一类锆石的边部和第二

表 3 锆石 U-Pb 同位素定年结果  
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results

测点号	Th		U		U-Pb 同位素比值					年龄(Ma)								
	Th/U	$(\times 10^{-6})$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$
石板滩斜长角闪岩(X11-109-1)																		
X11-109-1-01	0.20	392	0.06917	0.00174	1.40307	0.03678	0.14594	0.00183	0.04595	0.00144	906	53	890	16	878	10	908	28
X11-109-1-02	0.23	233	0.07140	0.00201	1.56296	0.04487	0.15718	0.00163	0.04867	0.00188	969	58	956	18	941	9	961	36
X11-109-1-03	0.15	351	0.06671	0.00191	1.37617	0.04073	0.14829	0.00192	0.04375	0.00173	828	59	879	17	891	11	865	33
X11-109-1-04	0.15	518	0.06702	0.00177	1.37910	0.03612	0.14755	0.00135	0.04300	0.00115	839	54	880	15	887	8	851	22
X11-109-1-05	0.33	550	0.06675	0.00194	1.39061	0.04186	0.14924	0.00186	0.04467	0.00171	831	66	885	18	897	10	883	33
X11-109-1-06	0.12	605	0.07015	0.00200	1.43105	0.04019	0.14587	0.00183	0.04615	0.00163	933	59	902	17	878	10	912	31
X11-109-1-07	0.59	480	0.06634	0.00190	1.37742	0.04005	0.14962	0.00258	0.03823	0.00096	817	55	879	17	899	14	758	19
X11-109-1-08	1.11	111	0.05128	0.00387	0.34472	0.02815	0.04809	0.00123	0.01533	0.00097	254	169	301	21	303	8	308	19
X11-109-1-09	0.88	101	0.05454	0.00469	0.34680	0.03155	0.04825	0.00122	0.01445	0.00081	394	194	302	24	304	8	290	16
X11-109-1-10	0.88	327	0.06754	0.00192	1.38124	0.03785	0.14752	0.00143	0.04284	0.00117	854	64	881	16	887	8	848	23
X11-109-1-11	0.21	458	0.07041	0.00193	1.40333	0.04133	0.14733	0.00199	0.04037	0.00133	940	56	890	17	862	11	800	26
X11-109-1-13	0.16	622	0.06977	0.00192	1.38375	0.03903	0.14283	0.00209	0.03655	0.00145	922	56	882	17	861	12	726	28
X11-109-1-14	0.27	511	0.06821	0.00183	1.39363	0.03804	0.14740	0.00235	0.04263	0.00121	876	57	886	16	886	13	844	23
X11-109-1-15	1.07	187	0.05504	0.00319	0.34472	0.02025	0.04644	0.00079	0.01411	0.00050	413	130	301	15	293	5	283	10
X11-109-1-16	0.85	483	0.06970	0.00165	1.42259	0.03315	0.14713	0.00131	0.04451	0.00086	920	49	898	14	885	7	880	17
X11-109-1-17	0.18	452	0.06961	0.00167	1.41571	0.03625	0.14642	0.00143	0.04114	0.00109	917	44	896	15	881	8	815	21
X11-109-1-18	0.89	60.0	0.06814	0.00342	1.38510	0.07220	0.14649	0.00213	0.04429	0.00127	872	104	883	31	881	12	876	25
X11-109-1-20	1.09	204	0.05637	0.00398	0.35529	0.02388	0.04612	0.00068	0.01473	0.00044	478	157	309	18	291	4	296	9
X11-109-1-22	0.85	72.0	0.06306	0.00667	0.38637	0.04214	0.04458	0.00100	0.01504	0.00089	709	221	332	31	281	6	302	18
X11-109-1-23	0.97	86.0	0.05333	0.00655	0.33369	0.04321	0.04567	0.00139	0.01354	0.00076	343	280	292	33	288	9	272	15
X11-109-1-24	0.26	357	0.09661	0.00213	2.42068	0.06106	0.17989	0.00197	0.06120	0.00201	1561	241	1249	18	1066	11	1201	38
X11-109-1-25	1.08	162	0.07017	0.00204	1.41897	0.04224	0.14639	0.00154	0.04357	0.00095	1000	60	897	18	881	9	862	18
X11-109-1-27	0.16	399	0.07008	0.00165	1.41981	0.03340	0.14638	0.00123	0.05159	0.00159	931	53	897	14	881	7	1017	31
X11-109-1-28	1.23	172	0.04881	0.00343	0.30423	0.02158	0.04511	0.00080	0.01372	0.00046	139	156	270	17	284	5	275	9
X11-109-1-29	0.09	827	0.06806	0.00137	1.38236	0.02849	0.14639	0.00115	0.04745	0.00121	872	47	881	12	881	6	937	23
X11-109-1-31	0.88	329	0.06769	0.00167	1.38025	0.03644	0.14658	0.00163	0.04510	0.00101	859	51	881	16	882	9	892	19
X11-109-1-33	1.42	135	0.05658	0.00376	0.35396	0.02313	0.04559	0.00072	0.01554	0.00055	476	148	308	17	287	4	312	11
X11-109-1-34	0.42	133	0.06379	0.00225	1.29653	0.04517	0.14649	0.00167	0.04475	0.00149	744	76	844	20	881	9	885	29
X11-109-1-35	0.14	347	0.06999	0.00194	1.42397	0.03892	0.14639	0.00117	0.05070	0.00167	928	57	899	16	881	7	1000	32
X11-109-1-36	0.34	112	0.06697	0.00181	1.36093	0.03740	0.14630	0.00170	0.04370	0.00120	837	52	872	16	880	10	865	23
X11-109-1-38	1.88	716	0.05494	0.00226	0.35279	0.01457	0.04644	0.00053	0.01439	0.00032	409	88	307	11	293	3	289	6
X11-109-1-39	0.19	522	0.07408	0.00196	1.47335	0.04892	0.14286	0.00277	0.06001	0.00273	1044	53	920	20	861	16	1178	52
X11-109-1-41	0.44	101	0.06825	0.00179	1.38555	0.03785	0.14628	0.00154	0.04457	0.00110	876	54	883	16	880	9	881	21
X11-109-1-45	1.47	156	0.04970	0.00339	0.31389	0.02055	0.04645	0.00077	0.01373	0.00044	189	159	277	16	293	5	276	9
白敏子片麻岩(X10-37-1)																		
X10-37-1-01	1.09	153	0.05303	0.00296	0.33752	0.01834	0.04682	0.00075	0.01419	0.00044	332	128	295	14	295	5	285	9

续表 3

Continued Table 3

测点号	Th		U		U-Pb 同位素比值					年龄(Ma)									
	Th/U ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$				
																$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$
X10-37-1-02	17.1	24.3	0.70	0.17298	0.02988	0.86820	0.09453	0.04308	0.00265	0.02318	0.00247	2587	292	635	51	272	16	463	49
X10-37-1-03	48.2	72.4	0.67	0.07827	0.00678	0.46480	0.04028	0.04422	0.00112	0.01239	0.00083	1154	172	388	28	279	7	249	17
X10-37-1-04	209	200	1.05	0.05500	0.00310	0.35338	0.01957	0.04680	0.00067	0.01397	0.00043	413	160	307	15	295	4	280	9
X10-37-1-05	116	71.6	1.62	0.06342	0.00644	0.37998	0.03472	0.04433	0.00112	0.01270	0.00052	724	212	327	26	280	7	255	10
X10-37-1-06	73.6	303	0.24	0.06730	0.00223	1.38896	0.04678	0.14803	0.00182	0.04396	0.00160	856	69	884	20	890	10	870	31
X10-37-1-09	127	147	0.86	0.05424	0.00328	0.34841	0.01981	0.04695	0.00091	0.01398	0.00052	389	142	304	15	296	6	281	10
X10-37-1-10	31.7	480	0.07	0.07046	0.00190	1.41672	0.03743	0.14413	0.00149	0.06430	0.00295	943	54	896	16	868	8	1259	56
X10-37-1-11	269	284	0.94	0.05357	0.00244	0.33986	0.01509	0.04588	0.00062	0.01412	0.00045	354	99	297	11	289	4	283	9
X10-37-1-12	22.0	32.5	0.68	0.10515	0.01036	0.59195	0.05258	0.04330	0.00163	0.01441	0.00133	1717	182	472	34	273	10	289	27
X10-37-1-15	305	924	0.33	0.05355	0.00157	0.34125	0.00954	0.04578	0.00041	0.01352	0.00039	354	67	298	7	289	3	272	8
X10-37-1-16	120	110	1.09	0.05480	0.00379	0.34931	0.02473	0.04645	0.00086	0.01485	0.00069	467	156	304	19	293	5	298	14
X10-37-1-17	40.0	30.8	1.30	0.11305	0.01408	0.63642	0.06194	0.04448	0.00162	0.01359	0.00078	1850	227	500	38	281	10	273	16
X10-37-1-18	142	365	0.39	0.06901	0.00215	1.41549	0.04407	0.14704	0.00177	0.04541	0.00142	898	63	895	19	884	10	898	27
X10-37-1-19	101	285	0.35	0.05190	0.00264	0.33761	0.01704	0.04698	0.00068	0.01385	0.00062	280	114	295	13	296	4	278	12
X10-37-1-21	158	192	0.82	0.05302	0.00290	0.34145	0.01854	0.04638	0.00079	0.01479	0.00053	328	119	298	14	292	5	297	11
X10-37-1-22	58.8	47.3	1.24	0.07554	0.00797	0.43778	0.04522	0.04379	0.00155	0.01511	0.00116	1083	213	369	32	276	10	303	23
X10-37-1-23	12.1	19.2	0.63	0.14977	0.01696	0.82066	0.07698	0.04566	0.00245	0.01830	0.00169	2344	195	608	43	288	15	367	33
X10-37-1-24	77.7	349	0.22	0.05594	0.00260	0.36151	0.01719	0.04661	0.00078	0.01508	0.00072	450	104	313	13	294	5	303	14
X10-37-1-26	163	128	1.28	0.05175	0.00330	0.33703	0.02073	0.04764	0.00081	0.01526	0.00052	276	146	295	16	300	5	306	10
X10-37-1-27	152	396	0.38	0.05187	0.00216	0.33945	0.01469	0.04720	0.00079	0.01545	0.00053	280	92	297	11	297	5	310	11
X10-37-1-28	662	513	1.29	0.04969	0.00182	0.32854	0.01269	0.04761	0.00064	0.01380	0.00033	189	82	288	10	300	4	277	7
X10-37-1-29	202	263	0.77	0.05145	0.00254	0.32915	0.01633	0.04640	0.00068	0.01396	0.00040	261	113	289	12	292	4	280	8
X10-37-1-30	577	649	0.89	0.06825	0.00203	1.38698	0.05616	0.14642	0.00418	0.05053	0.00335	876	62	883	24	881	23	996	65
X10-37-1-31	163	202	0.81	0.05352	0.00313	0.34004	0.01851	0.04628	0.00072	0.01427	0.00050	350	133	297	14	292	4	286	10
X10-37-1-32	199	349	0.57	0.06765	0.00187	1.39191	0.04203	0.14774	0.00187	0.04799	0.00135	857	57	886	18	888	10	947	26
X10-37-1-33	161	171	0.94	0.05238	0.00283	0.33623	0.01769	0.04766	0.00076	0.01398	0.00043	302	124	294	13	300	5	281	9
X10-37-1-34	88.0	200	0.44	0.05881	0.00573	0.36737	0.03499	0.04544	0.00105	0.01525	0.00108	561	215	318	26	286	6	306	21
X10-37-1-35	206	392	0.53	0.06411	0.00168	1.26705	0.03329	0.14250	0.00143	0.04218	0.00121	746	56	831	15	859	8	835	23
X10-37-1-36	311	554	0.56	0.05355	0.00213	0.33427	0.01384	0.04547	0.00094	0.01112	0.00047	354	89	293	11	287	6	224	9
X10-37-1-38	60.4	121	0.50	0.05263	0.00381	0.34364	0.02514	0.04812	0.00108	0.01309	0.00071	322	169	300	19	303	7	263	14
X10-37-1-39	50.9	334	0.15	0.06357	0.00172	1.32475	0.03587	0.15123	0.00165	0.04164	0.00147	728	25	857	16	908	9	825	29
X10-37-1-40	99.7	120	0.83	0.04950	0.00416	0.30420	0.02500	0.04526	0.00102	0.01356	0.00058	172	194	270	19	285	6	272	12
X10-37-1-41	100	148	0.68	0.11326	0.00273	4.90625	0.12792	0.31301	0.00359	0.09351	0.00256	1854	43	1803	22	1756	18	1807	47
X10-37-1-42	48.2	505	0.10	0.06779	0.00156	1.37989	0.03191	0.14749	0.00140	0.03858	0.00153	861	48	880	14	887	8	765	30
X10-37-1-43	531	629	0.84	0.07056	0.00174	1.38321	0.04255	0.14177	0.00270	0.04074	0.00182	946	50	882	18	855	15	807	35
X10-37-1-44	54.6	923	0.06	0.06829	0.00158	1.39616	0.03306	0.14803	0.00148	0.04078	0.00139	877	48	887	14	890	8	808	27
X10-37-1-46	136	169	0.80	0.05698	0.00377	0.36621	0.02242	0.04764	0.00088	0.01446	0.00055	500	146	317	17	300	5	290	11



续表 3

Continued Table 3

测点号	Th		U		U-Pb 同位素比值					年龄(Ma)							
	Th/U ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	
																	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$
X10-37-1-48	81.0	0.79	0.05948	0.36792	0.03290	0.04640	0.00114	0.01249	0.00054	583	202	318	24	292	7	251	11
X10-37-1-49	59.4	0.17	0.06953	1.40592	0.03612	0.14576	0.00163	0.04131	0.00134	915	52	891	15	877	9	818	26
X10-37-1-51	264	1.02	0.04867	0.31130	0.01462	0.04627	0.00057	0.01526	0.00028	132	111	275	11	292	4	306	6
X10-37-1-52	94.5	1.03	0.06384	0.37974	0.03225	0.04446	0.00087	0.01512	0.00060	744	186	327	24	280	5	303	12
X10-37-1-53	36.0	0.08	0.06600	1.31004	0.02828	0.14289	0.00128	0.04586	0.00161	806	42	850	12	861	7	906	31
X10-37-1-54	71.9	0.06	0.06865	1.38691	0.02846	0.14554	0.00132	0.04820	0.00138	889	40	883	12	876	7	951	27
X10-37-1-55	424	0.34	0.06930	1.41383	0.03120	0.14734	0.00168	0.04802	0.00105	909	43	895	13	886	9	948	20
X10-37-1-56	34.1	0.07	0.06997	1.47400	0.03948	0.15226	0.00163	0.05237	0.00194	928	58	920	16	914	9	1032	37
X10-37-1-57	236	0.51	0.10668	4.73098	0.11779	0.32029	0.00303	0.09792	0.00220	1744	44	1773	21	1791	15	1888	40
X10-37-1-58	164	0.33	0.05479	0.36066	0.01436	0.04770	0.00060	0.01635	0.00058	467	95	313	11	300	4	328	11
X10-37-1-59	222	0.44	0.05510	0.35848	0.01377	0.04736	0.00053	0.01158	0.00041	417	87	311	10	298	3	233	8
X10-37-1-60	187	0.90	0.05289	0.34793	0.01653	0.04777	0.00061	0.01610	0.00046	324	107	303	12	301	4	323	9
X10-37-1-63	304	0.69	0.05129	0.32727	0.01164	0.04630	0.00051	0.01541	0.00038	254	88	287	9	292	3	309	8
白墩子长英质脉体(X10-37-2)																	
X10-37-2-02	177	0.23	0.05166	0.33271	0.01089	0.04673	0.00073	0.01205	0.00204	270	47	292	8	294	4	242	41
X10-37-2-03	151	0.21	0.05225	0.34152	0.01108	0.04744	0.00078	0.00737	0.00080	296	44	298	8	299	5	148	16
X10-37-2-04	202	0.40	0.05379	0.31848	0.01364	0.04298	0.00081	0.00550	0.00056	362	63	281	11	271	5	111	11
X10-37-2-05	69.0	0.08	0.05334	0.00129	0.00824	0.04664	0.00064	0.01291	0.00179	343	30	299	6	294	4	259	36
X10-37-2-06	97	0.10	0.05071	0.33497	0.01130	0.04793	0.00081	0.00732	0.00096	228	47	293	9	302	5	147	19
X10-37-2-07	273	0.14	0.05183	0.00114	0.00739	0.04689	0.00063	0.01265	0.00188	278	27	293	6	295	4	254	38
X10-37-2-09	144	0.12	0.05301	0.34284	0.00906	0.04692	0.00067	0.01333	0.00244	329	35	299	7	296	4	268	49
X10-37-2-10	275	0.34	0.06370	0.00272	0.00142	0.04679	0.00085	0.01736	0.00675	732	56	349	12	295	5	348	134
X10-37-2-11	107	0.10	0.05271	0.00184	0.01172	0.04761	0.00075	0.02063	0.00686	316	49	302	9	300	5	413	136
X10-37-2-12	76.0	0.65	0.07890	2.02166	0.12601	0.18583	0.00525	0.02992	0.00725	1170	79	1123	42	1099	29	596	142
X10-37-2-13	286	0.32	0.06236	0.00155	0.00959	0.04659	0.00069	0.01081	0.00143	686	27	342	7	294	4	217	29
X10-37-2-15	107	0.11	0.05374	0.00217	0.01389	0.04859	0.00085	0.02059	0.00680	360	56	312	10	306	5	412	135
X10-37-2-16	292	0.19	0.06075	0.00205	0.01244	0.04613	0.00076	0.01235	0.00253	630	41	332	9	291	5	248	51
X10-37-2-17	152	0.15	0.05329	0.00247	0.01509	0.04643	0.00088	0.00987	0.00198	341	66	298	11	293	5	199	40
X10-37-2-18	370	0.46	0.05812	0.00230	0.01397	0.04594	0.00081	0.00969	0.00273	534	52	318	10	290	5	195	55
X10-37-2-19	236	0.21	0.06159	0.00213	0.01306	0.04666	0.00078	0.01433	0.00292	660	42	339	9	294	5	288	58
X10-37-2-20	105	0.14	0.05446	0.00196	0.01197	0.04603	0.00077	0.01205	0.00240	390	48	301	9	290	5	242	48
X10-37-2-21	112	0.11	0.05353	0.00163	0.01020	0.04707	0.00073	0.01287	0.00248	351	39	303	8	297	4	258	49
X10-37-2-22	287	0.28	0.05765	0.00178	0.01094	0.04629	0.00073	0.00757	0.00150	516	38	318	8	292	4	152	30
X10-37-2-23	87.0	0.11	0.05061	0.00148	0.00919	0.04682	0.00071	0.01421	0.00250	223	38	287	7	295	4	285	50
X10-37-2-24	108	0.10	0.05261	0.00198	0.01225	0.04719	0.00081	0.00959	0.00194	312	50	299	9	297	5	193	39

表4 锆石稀土元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )Table 4 REE compositions of zircons from the studied samples ( $\times 10^{-6}$ )

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
石板墩斜长角闪岩(X11-109-1)														
X11-109-1-01	0.02	1.25	0.07	1.15	4.76	0.04	36.7	14.5	179	60.9	259	49.7	467	71.9
X11-109-1-02	0.01	1.69	0.06	0.95	3.08	0.06	22.9	10.2	132	49.5	240	49.4	483	82.1
X11-109-1-03	-	0.83	0.05	0.64	3.01	0.05	26.6	11.7	154	58.5	280	58.7	583	96.1
X11-109-1-04	0.04	1.98	0.13	1.51	4.76	0.30	30.7	13.9	176	61.1	266	52.2	494	79.2
X11-109-1-05	0.16	2.13	0.29	4.99	9.71	0.28	62.8	20.0	223	67.7	288	55.2	508	79.2
X11-109-1-06	0.34	2.12	0.09	1.53	4.05	0.14	26.1	12.0	155	54.2	248	49.3	498	80.0
X11-109-1-07	1.74	7.85	1.35	11.0	15.3	0.68	71.2	25.0	296	102.3	447	84.5	815	129
X11-109-1-08	0.05	9.76	0.24	4.69	8.90	2.68	44.0	14.8	187	73.4	348	75.7	804	147
X11-109-1-09	0.14	8.13	0.33	4.46	9.10	2.51	50.0	15.8	192	70.7	344	70.3	744	135
X11-109-1-10	0.04	1.01	0.05	1.15	3.54	0.07	30.0	11.1	147	52.9	243	49.5	476	79.5
X11-109-1-11	0.01	1.10	0.08	1.67	4.42	0.12	41.1	17.9	250	93.9	457	94.0	930	154
X11-109-1-13	1.64	16.3	3.62	25.5	22.1	7.19	61.2	23.1	275	87.9	384	75.0	723	113
X11-109-1-14	0.04	2.64	0.10	2.59	6.27	0.27	44.6	15.8	189	62.1	265	50.2	473	76.2
X11-109-1-15	0.03	17.4	0.20	4.45	10.8	3.19	67.6	24.1	318	126	612	130	1365	246
X11-109-1-16	0.47	9.84	1.22	11.1	12.4	2.11	48.0	17.4	203	70.9	301	66.8	633	88.8
X11-109-1-17	0.01	1.01	0.09	1.45	3.63	0.09	29.4	12.7	163	59.8	266	59.6	567	88.2
X11-109-1-18	0.02	1.99	0.10	1.99	6.62	0.18	44.7	16.3	193	67.3	281	58.4	549	74.5
X11-109-1-20	0.07	17.1	0.39	6.90	14.1	4.25	80.7	27.5	337	129	584	132	1299	212
X11-109-1-22	0.05	7.45	0.09	1.17	3.56	1.28	25.1	9.75	128	49.3	231	55.2	596	94.2
X11-109-1-23	-	8.25	0.28	4.40	10.7	2.84	46.9	15.5	183	66.9	294	67.0	666	111
X11-109-1-24	0.15	6.67	0.08	0.99	3.08	0.20	17.6	6.9	83.3	31.6	140	33.8	352	53.3
X11-109-1-25	0.07	2.79	0.27	6.09	11.5	0.14	53.2	16.2	170	59.6	250	54.9	522	76.3
X11-109-1-27	0.42	2.19	0.16	1.53	4.01	0.09	28.3	11.4	135	43.0	180	39.6	380	56.1
X11-109-1-28	0.02	17.2	0.47	8.40	17.3	5.26	84.9	29.8	346	128	568	131	1316	213
X11-109-1-29	0.33	2.43	0.63	4.79	7.09	1.03	37.1	15.6	193	64.4	264	57.9	549	79.4
X11-109-1-31	0.82	10.6	0.39	4.51	9.32	0.35	44.1	15.8	195	68.4	291	61.8	572	84.9
X11-109-1-33	0.09	12.5	0.43	8.83	17.6	5.19	87.8	28.1	322	117	505	113	1119	176
X11-109-1-34	0.04	1.42	0.08	1.68	4.23	0.13	28.6	10.9	130	49.0	208	47.9	460	67.7
X11-109-1-35	0.01	0.91	0.02	0.75	3.11	0.00	20.9	9.81	128	47.6	202	43.6	398	59.0
X11-109-1-36	0.91	8.98	1.40	10.7	12.3	2.81	40.3	14.3	164	54.2	230	50.5	478	72.8
X11-109-1-38	0.09	43.2	1.01	18.0	36.2	9.25	168	56.4	649	231	988	218	2103	313
X11-109-1-39	1.49	30.6	3.07	20.6	20.2	5.26	59.1	20.8	221	67.6	266	58.7	562	81.8
X11-109-1-41	0.36	2.17	0.21	3.62	8.66	0.17	54.4	19.9	247	91.3	393	86.8	827	117
X11-109-1-45	0.15	19.0	0.70	14.3	24.7	7.41	111	34.5	392	142	613	140	1385	215
白墩子片麻岩(X10-37-1)														
X10-37-1-01	-	13.1	0.03	1.29	3.66	0.36	23.8	8.74	109	40.4	178	37.2	336	65.7
X10-37-1-02	0.03	3.08	0.04	0.89	1.02	0.34	11.0	4.08	55.4	22.5	102	23.7	229	49.4
X10-37-1-03	-	5.06	0.01	0.06	0.54	0.09	6.3	2.52	32.9	13.8	64.6	14.5	142	29.1
X10-37-1-04	-	13.7	0.03	1.07	4.12	0.23	22.1	8.90	110	42.1	192	39.6	357	69.8
X10-37-1-05	0.04	18.1	0.06	0.79	2.39	0.31	16.9	6.62	75.3	27.7	122	25.9	232	44.8
X10-37-1-06	0.05	1.20	0.09	1.40	3.18	0.04	29.2	11.6	153	59.5	267	55.6	487	95.9
X10-37-1-09	0.14	5.24	0.19	1.65	2.97	0.11	22.0	7.92	102	38.8	173	37.8	350	69.4
X10-37-1-10	1.18	1.17	0.31	1.51	1.90	0.09	16.4	7.75	102	36.2	153	31.8	268	48.6
X10-37-1-11	1.94	24.1	1.08	7.20	7.28	0.54	38.3	16.2	210	85.1	401	86.0	786	155
X10-37-1-12	-	3.03	0.02	0.92	1.53	0.24	12.4	4.51	64.0	25.5	126	29.3	283	58.3
X10-37-1-15	0.16	6.15	0.13	1.25	2.42	0.13	17.2	6.90	97.3	40.9	204	47.3	454	92.9
X10-37-1-16	0.03	8.23	0.09	1.35	4.08	0.61	30.2	12.0	147	58.6	267	57.2	529	104
X10-37-1-17	0.01	5.00	0.06	1.55	3.28	0.66	23.0	8.30	110	44.1	203	43.9	416	83.4
X10-37-1-18	0.18	5.73	0.33	3.21	4.00	0.15	23.5	8.47	110	41.5	184	37.7	328	61.8
X10-37-1-19	0.02	7.56	0.05	0.57	1.70	0.31	10.7	4.29	55.0	23.0	117	27.6	276	57.1
X10-37-1-21	0.02	3.73	0.05	0.95	3.36	0.17	24.0	9.71	134	55.7	271	60.9	590	121
X10-37-1-22	0.10	6.60	0.08	1.38	3.38	0.47	23.0	9.16	126	51.2	242	53.1	506	101
X10-37-1-23	-	5.77	0.05	0.68	2.70	0.91	16.3	6.00	82.2	33.8	165	36.6	362	74.7
X10-37-1-24	0.02	1.99	0.04	0.66	2.32	0.08	14.6	6.30	69.9	22.3	89.4	18.0	168	32.5

续表 4

Continued Table 4

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
X10-37-1-26	-	20.3	0.08	1.70	4.62	0.39	31.4	11.2	141	55.7	252	53.6	498	99.0
X10-37-1-27	2.37	20.0	1.12	6.52	3.57	0.34	17.7	6.47	82.9	33.3	162	37.2	360	73.4
X10-37-1-28	0.12	33.0	0.44	6.22	11.9	0.92	64.9	20.8	238	84.0	351	67.6	577	107
X10-37-1-29	0.01	6.63	0.08	1.10	2.75	0.04	21.7	8.48	106	42.1	192	41.5	389	76.5
X10-37-1-30	2.36	30.2	3.18	24.4	21.6	1.20	77.9	25.3	274	92.0	382	73.8	651	112
X10-37-1-31	0.01	5.90	0.09	0.77	2.13	0.15	13.5	5.56	75.3	31.7	158	36.0	357	73.9
X10-37-1-32	0.10	4.07	0.20	2.68	6.22	0.15	35.5	12.6	145	52.3	220	44.2	390	70.6
X10-37-1-33	0.03	6.96	0.02	0.99	2.25	0.27	13.8	5.36	66.4	26.9	124	27.8	274	55.3
X10-37-1-34	0.03	7.90	0.09	0.71	3.16	0.72	23.7	10.8	150	64.9	317	74.7	664	133
X10-37-1-35	0.08	4.64	0.29	4.36	7.46	0.28	43.4	15.8	186	66.9	285	56.1	481	89.3
X10-37-1-36	14.6	114	18.2	112	63.6	5.58	102	24.3	223	63.7	256	51.5	466	87.5
X10-37-1-38	0.36	9.74	0.48	3.12	3.56	0.28	16.8	6.32	73.3	27.3	124	26.1	241	44.4
X10-37-1-39	0.01	1.02	0.08	0.99	2.97	0.09	24.9	9.53	103	34.1	137	26.8	237	42.4
X10-37-1-40	0.10	10.6	0.50	6.34	9.63	1.21	41.9	13.9	149	52.3	214	42.9	369	65.5
X10-37-1-41	0.29	9.62	0.16	2.00	3.68	0.23	18.4	6.33	75.8	27.2	122	25.0	225	42.0
X10-37-1-42	0.13	1.45	0.12	1.10	2.15	0.04	18.4	9.37	106	34.9	137	27.1	229	43.0
X10-37-1-43	16.4	312	18.5	109	62.3	5.83	100	26.6	234	66.2	256	50.8	432	78.8
X10-37-1-44	1.44	11.4	1.98	13.2	9.27	0.72	32.8	13.7	166	60.0	260	52.8	472	84.4
X10-37-1-46	0.03	11.2	0.08	1.01	3.44	0.32	23.7	10.6	141	60.3	290	62.1	597	120
X10-37-1-48	0.08	11.4	0.08	0.92	1.62	0.24	10.4	4.09	50.3	20.8	103	23.8	253	53.6
X10-37-1-49	0.01	0.89	0.07	1.57	4.31	0.08	32.7	13.4	157	56.5	239	48.0	414	72.1
X10-37-1-51	0.04	12.6	0.08	1.43	6.10	0.35	34.0	11.9	150	55.9	253	61.7	646	95.9
X10-37-1-52	0.01	8.26	0.03	0.79	2.27	0.43	14.3	6.02	79.2	31.2	137	32.6	356	49.5
X10-37-1-53	-	0.54	0.01	0.25	2.53	0.04	20.6	8.23	104	31.8	127	27.4	264	35.7
X10-37-1-54	3.94	28.6	4.37	27.9	20.7	1.55	52.4	19.0	229	74.6	295	64.0	602	76.5
X10-37-1-55	16.0	178	16.5	91.1	55.2	5.37	85.2	23.9	238	74.5	304	69.1	709	91.7
X10-37-1-56	0.12	0.90	0.19	0.88	3.39	0.03	21.5	8.41	101	33.9	126	28.3	265	35.5
X10-37-1-57	1.77	33.1	1.60	12.3	6.61	0.54	23.6	7.62	89.6	32.3	138	32.7	328	49.4
X10-37-1-58	15.2	52.3	4.77	26.2	8.95	0.69	25.7	8.45	107	41.6	195	50.5	564	81.8
X10-37-1-59	7.43	132	7.5	41.6	24.1	2.23	36.0	10.0	92.9	29.9	123	30.8	332	50.1
X10-37-1-60	0.09	7.05	0.04	0.84	2.42	0.26	17.9	6.26	77.2	30.4	140	34.5	366	54.1
X10-37-1-63	0.07	3.21	0.07	1.72	4.73	0.09	27.1	11.0	150	61.2	284	72.6	799	119
白墩子长英质脉体(X10-37-2)														
X10-37-2-02	0.12	15.4	0.24	2.44	3.53	0.59	17.9	7.85	115	46.3	234	51.0	489	98.2
X10-37-2-03	0.05	14.4	0.06	1.2	2.75	0.56	18.7	8.35	123	51.4	261	58.7	573	119
X10-37-2-04	1.58	21.6	1.65	12.5	8.72	1.14	30.4	10.9	140	54.6	263	57.4	530	108
X10-37-2-05	0.05	7.88	0.04	0.20	0.78	0.19	6.6	3.00	51.1	23.1	128	31.8	327	72.0
X10-37-2-06	0.17	10.2	0.21	1.97	2.24	0.28	10.9	5.25	83.2	37.3	205	50.0	527	110
X10-37-2-07	0.04	18.7	0.04	0.39	1.96	0.65	14.3	6.33	97.0	42.5	226	53.1	530	113
X10-37-2-09	0.44	17.9	0.75	5.71	3.34	0.86	14.5	5.96	91.6	41.0	219	53.5	561	125
X10-37-2-10	3.26	45.3	4.2	25.3	14.5	2.07	35.7	12.4	156	61.4	301	65.6	619	127
X10-37-2-11	0.13	11.1	0.125	0.91	1.38	0.29	9.1	3.97	66.7	29.7	164	38.9	404	87.0
X10-37-2-12	1.15	12.9	2.36	20.8	16.9	2.68	52.7	14.8	154	49.6	196	37.2	312	55.4
X10-37-2-13	4.77	75.9	6.38	36.0	18.4	2.54	37.4	11.6	143	52.6	247	54.9	519	104
X10-37-2-15	0.30	12.8	0.42	1.67	0.86	0.42	10.4	3.86	64.9	31.0	163	39.3	422	91.1
X10-37-2-16	10.9	180	15.6	90.1	43.4	5.71	64.4	18.0	197	69.1	332	75.8	762	164
X10-37-2-17	0.05	12.6	0.06	0.52	1.25	0.54	14.3	6.94	101	44.8	237	53.5	531	113
X10-37-2-18	5.79	93.8	7.61	42.4	21.2	3.26	54.2	12.5	150	52.2	242	51.4	485	97.3
X10-37-2-19	4.06	69.6	5.72	30.1	19.9	2.69	39.8	12.5	155	57.9	273	59.1	572	115
X10-37-2-20	0.10	11.6	0.22	1.74	2.2	0.59	13.3	5.86	92.2	40.7	213	49.3	490	103
X10-37-2-21	0.57	13.9	0.91	7.19	4.05	0.63	13.2	5.20	80.0	34.7	178	41.8	418	89.1
X10-37-2-22	4.88	80	6.86	41.2	20.3	2.49	33.9	8.75	107	39.9	202	47.4	490	107
X10-37-2-23	0.14	10.5	0.15	1.63	1.53	0.34	10.6	4.61	71.9	31.9	168	39.6	404	86.7
X10-37-2-24	0.15	10.4	0.14	1.07	1.37	0.54	10.6	4.75	78.8	36.1	191	46.3	491	108

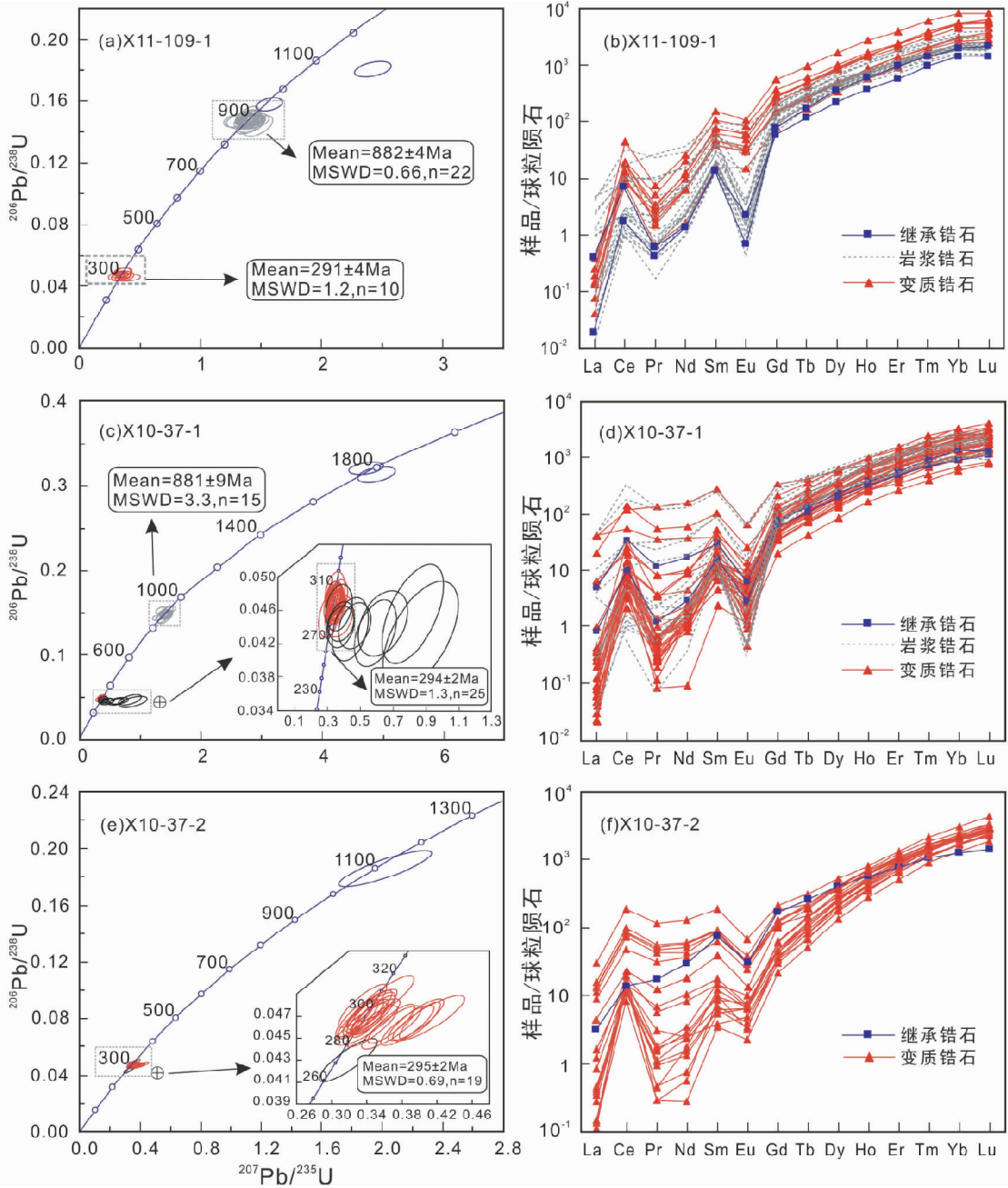


图4 锆石 U-Pb 谐和曲线图解(左栏)和稀土配分曲线(右栏,球粒陨石标准值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams (left column) and chondrite-normalized REE patterns of zircons (right column, chondrite values after Taylor and McLennan, 1985)

类锆石,分析结果较为一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $281 \pm 6 \text{ Ma} \sim 304 \pm 8 \text{ Ma}$ ,加权平均为  $291 \pm 4 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ; MSWD = 1.2),应代表变质作用的年龄。但是其 Th、U 含量, Th/U 比值(0.85 ~ 1.88),以及稀土元素配分曲线与原岩结晶锆石没有显著区别(图 4a, b、图 5)。

片麻岩样品 X10-37-1 锆石呈柱状,长约  $150 \sim 300 \mu\text{m}$ 。CL 图像显示锆石可以分为两类,一类具有震荡环带,发育 CL 发光较强的窄边,部分含有继承的核部;另一类锆石也呈

核-边结构,但是内部呈均一或分区结构,边部具有较核部强的 CL 特点(图 3b)。15 个分析点位于第一类锆石振荡环带的区域(表 3、表 4),结果较为一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $855 \pm 15 \text{ Ma} \sim 914 \pm 9 \text{ Ma}$ ,加权平均年龄  $881 \pm 9 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ; MSWD = 3.3)。它们的 Th 含量为  $31.7 \times 10^{-6} \sim 577 \times 10^{-6}$ ,U 含量为  $303 \times 10^{-6} \sim 1254 \times 10^{-6}$ ,Th/U 为 0.06 ~ 0.89,稀土配分曲线显示轻稀土亏损,重稀土富集( $\text{Yb}/\text{Dy} = 2.84 \sim 4.90$ ),Ce 正异常及 Eu 负异常的特点,具有岩浆成因锆石的特征,881

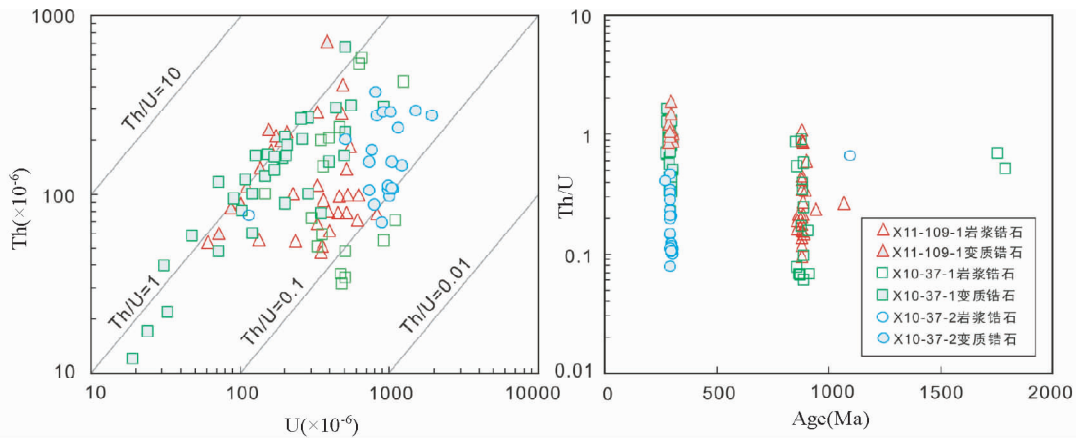


图5 Th-U 图(a, Th/U 在 0.01 ~ 10 之间)和 Th/U-年龄图(b)

Fig. 5 Plot of Th vs. U (a, contoured for Th/U ratios form 0.01 to 10) and Th/U vs. age diagram (b)

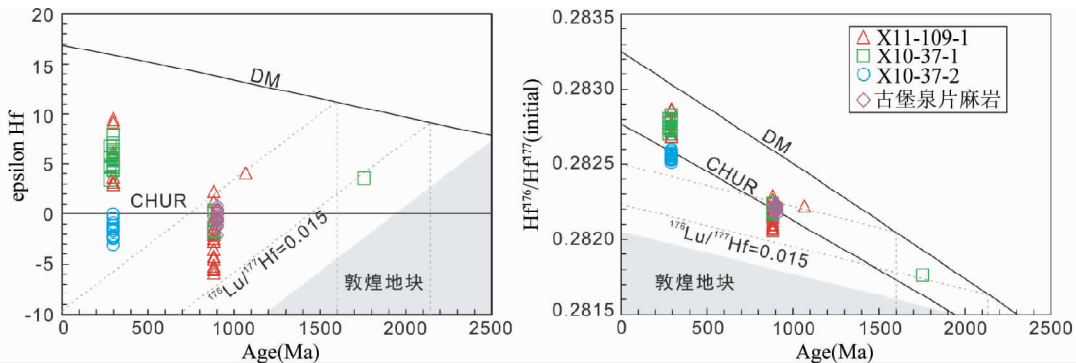


图6 锆石 Hf 同位素演化图解

敦煌地块 TTG 岩石和古堡泉眼球状片麻岩锆石 Hf 同位素数据分别引自 Zhang *et al.* (2013) 和叶晓峰等(2013)

Fig. 6 Hf isotopic evolution diagram for the representative samples

The values of Dunhuang block after Zhang *et al.* (2013); the values of Gubaquan gneiss after Ye *et al.* (2013)

$\pm 9\text{Ma}$  应代表原岩岩浆结晶年龄。两个位于锆石核部的分析点给出了较老的年龄,分别为  $1756 \pm 18\text{Ma}$  和  $1791 \pm 15\text{Ma}$ 。25 个分析点位于第二类锆石的核部,结果一致, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $294 \pm 2\text{Ma}$  ( $2\sigma$ ;  $\text{MSWD} = 1.3$ ),应代表样品的变质作用年龄。与样品 X11-109-1 的变质成因锆石类似,其 Th、U 含量和 Th/U 比值(0.22 ~ 1.29),以及稀土元素配分曲线与原岩结晶锆石没有显著区别。10 个分析点位于第二类锆石的边部,其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $272 \pm 16\text{Ma} \sim 292 \pm 7\text{Ma}$ ,应代表更晚一期热事件的时代。值得注意的是其 Th、U 含量, Th/U 比值(0.63 ~ 1.62),以及稀土元素配分曲线也与岩浆锆石类似(图 4c, d, 图 5)。

长英质脉体样品 X10-37-2 中锆石呈柱状,长  $120 \sim 280\mu\text{m}$ 。锆石 CL 发光较弱,振荡环带发育,具有 CL 发光较强的窄边,部分锆石含有核部(图 3c)。共进行了 21 个点的测试分析(表 3、表 4)。19 个点位于 CL 发光较弱具振荡环带的区域, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $295 \pm 2\text{Ma}$  ( $2\sigma$ ;  $\text{MSWD} = 0.69$ ),Th 含量为  $69.0 \times 10^{-6} \sim 370 \times 10^{-6}$ ,U 含量为  $728 \times 10^{-6} \sim 1927 \times 10^{-6}$ ,Th/U 比值为 0.08 ~ 0.46。该年龄与

样品 X11-109-1 和 X10-37-1 的变质年龄接近,反映脉体形成可能与区域混合岩化作用有关。1 个分析点位于 CL 发光较强、均一的锆石边部,年龄为  $271 \pm 5\text{Ma}$ ,与 X10-37-1 的晚期热事件年龄接近。另一个分析点位于继承的锆石核部,年龄为  $1099 \pm 29\text{Ma}$ (图 4e, f, 图 5)。

## 5.2 锆石 Hf 同位素

对样品 X11-109-1 共进行了 27 个点的 Hf 同位素分析(表 5)。其中 19 个点位于原岩岩浆结晶锆石的区域,其初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282063 ~ 0.282291,相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-6.3 \sim 2.2$ ,  $t_{\text{DM2}}$  变化于 1.62 ~ 2.14Ga。7 个分析点位于变质成因的锆石边部或颗粒上,具有较高的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282687 ~ 0.282870,相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 3.0 ~ 9.4,  $t_{\text{DM2}}$  变化于 0.69 ~ 1.10Ga。一个继承锆石核的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282225,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 4.1,  $t_{\text{DM2}}$  为 1.65Ga(图 6)。

对样品 X10-37-1 共进行了 30 个点的 Hf 同位素分析(表 5),其中 7 个点位于第一类锆石振荡环带的核部,初始

表5 研究样品的锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotope compositions of the studied samples

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 SE	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1 SE	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
石板墩斜长角闪岩(X11-109-1)										
X11-109-1-01	878	0.282209	0.000011	0.001398	0.051879	0.282186	-1.6	0.4	1.49	1.86
X11-109-1-03	891	0.282172	0.000011	0.001203	0.048602	0.282152	-2.5	0.4	1.53	1.92
X11-109-1-04	887	0.282109	0.000011	0.001619	0.062909	0.282082	-5.0	0.4	1.64	2.08
X11-109-1-05	897	0.282129	0.000010	0.001252	0.049999	0.282108	-3.9	0.4	1.59	2.02
X11-109-1-06	878	0.282174	0.000011	0.001332	0.052081	0.282152	-2.8	0.4	1.53	1.93
X11-109-1-07	899	0.282096	0.000010	0.001408	0.057573	0.282072	-5.1	0.4	1.65	2.10
X11-109-1-08	303	0.282706	0.000013	0.002315	0.083785	0.282693	3.5	0.5	0.80	1.08
X11-109-1-09	304	0.282719	0.000014	0.002259	0.081330	0.282706	4.0	0.5	0.78	1.05
X11-109-1-10	887	0.282091	0.000010	0.001063	0.042748	0.282074	-5.4	0.3	1.64	2.10
X11-109-1-11	862	0.282092	0.000011	0.001826	0.073632	0.282063	-6.3	0.4	1.67	2.14
X11-109-1-13	861	0.282105	0.000016	0.001881	0.077223	0.282075	-5.9	0.6	1.65	2.12
X11-109-1-14	886	0.282121	0.000010	0.001157	0.048147	0.282102	-4.4	0.4	1.60	2.04
X11-109-1-15	293	0.282715	0.000016	0.005213	0.189698	0.282687	3.0	0.5	0.86	1.10
X11-109-1-16	885	0.282180	0.000007	0.001215	0.078202	0.282159	-2.4	0.3	1.52	1.91
X11-109-1-17	881	0.282208	0.000006	0.002275	0.131881	0.282170	-2.1	0.2	1.52	1.89
X11-109-1-18	881	0.282192	0.000008	0.001181	0.080322	0.282173	-2.0	0.3	1.50	1.88
X11-109-1-20	291	0.282882	0.000013	0.003798	0.217298	0.282861	9.2	0.5	0.57	0.70
X11-109-1-22	281	0.282782	0.000010	0.002161	0.126085	0.282771	5.8	0.3	0.69	0.91
X11-109-1-23	288	0.282889	0.000013	0.003480	0.168290	0.282870	9.4	0.4	0.55	0.69
X11-109-1-24	1066	0.282276	0.000022	0.002514	0.112988	0.282225	4.1	0.8	1.44	1.65
X11-109-1-25	881	0.282249	0.000008	0.001763	0.103632	0.282220	-0.3	0.3	1.44	1.78
X11-109-1-27	881	0.282181	0.000009	0.003158	0.145346	0.282128	-3.5	0.3	1.60	1.98
X11-109-1-29	881	0.282322	0.000006	0.001867	0.103045	0.282291	2.2	0.2	1.34	1.62
X11-109-1-31	882	0.282294	0.000007	0.001862	0.105685	0.282263	1.3	0.2	1.39	1.68
X11-109-1-34	881	0.282216	0.000007	0.001489	0.082762	0.282191	-1.3	0.3	1.48	1.84
X11-109-1-36	880	0.282246	0.000008	0.002073	0.106647	0.282212	-0.6	0.3	1.46	1.80
X11-109-1-45	293	0.282808	0.000013	0.005496	0.249481	0.282777	6.2	0.5	0.72	0.89
白墩子片麻岩(X10-37-1)										
X10-37-1-01	295	0.282736	0.000009	0.002206	0.111340	0.282724	4.4	0.3	0.76	1.01
X10-37-1-02	272	0.282783	0.000010	0.002189	0.102541	0.282772	5.6	0.4	0.69	0.92
X10-37-1-04	295	0.282737	0.000007	0.001370	0.083452	0.282730	4.6	0.3	0.74	1.00
X10-37-1-05	280	0.282817	0.000015	0.003055	0.146296	0.282801	6.8	0.5	0.65	0.85
X10-37-1-06	890	0.282211	0.000008	0.002076	0.127931	0.282176	-1.7	0.3	1.51	1.87
X10-37-1-09	296	0.282762	0.000007	0.001385	0.081050	0.282754	5.5	0.3	0.70	0.94
X10-37-1-10	868	0.282199	0.000008	0.001517	0.097211	0.282174	-2.2	0.3	1.51	1.89
X10-37-1-11	289	0.282762	0.000008	0.001749	0.102604	0.282752	5.3	0.3	0.71	0.95
X10-37-1-12	273	0.282757	0.000009	0.001825	0.100573	0.282748	4.7	0.3	0.72	0.97
X10-37-1-17	281	0.282755	0.000010	0.002713	0.132497	0.282740	4.7	0.3	0.74	0.98
X10-37-1-19	296	0.282783	0.000007	0.001138	0.065300	0.282776	6.3	0.3	0.67	0.89
X10-37-1-21	292	0.282738	0.000007	0.001303	0.074217	0.282731	4.6	0.2	0.73	1.00
X10-37-1-22	276	0.282713	0.000010	0.001621	0.095207	0.282705	3.3	0.4	0.78	1.07
X10-37-1-23	288	0.282753	0.000008	0.001864	0.103839	0.282743	4.9	0.3	0.72	0.97
X10-37-1-24	294	0.282727	0.000007	0.001091	0.058526	0.282721	4.3	0.3	0.75	1.02
X10-37-1-26	300	0.282760	0.000008	0.001998	0.114255	0.282749	5.4	0.3	0.72	0.95
X10-37-1-28	300	0.282790	0.000008	0.003349	0.185472	0.282771	6.2	0.3	0.70	0.90
X10-37-1-29	292	0.282800	0.000006	0.001547	0.087100	0.282792	6.7	0.2	0.65	0.86
X10-37-1-30	881	0.282252	0.000006	0.001230	0.073304	0.282232	0.1	0.2	1.42	1.75
X10-37-1-32	888	0.282219	0.000007	0.001675	0.099656	0.282191	-1.2	0.2	1.48	1.84
X10-37-1-33	300	0.282746	0.000008	0.001135	0.059903	0.282740	5.1	0.3	0.72	0.97
X10-37-1-38	303	0.282809	0.000006	0.001442	0.082575	0.282800	7.3	0.2	0.64	0.83
X10-37-1-39	908	0.282205	0.000008	0.001562	0.077761	0.282178	-1.2	0.3	1.50	1.85

续表 5

Continued Table 5

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 SE	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1 SE	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
X10-37-1-40	285	0.282833	0.000011	0.001110	0.058844	0.282827	7.8	0.4	0.60	0.79
X10-37-1-41	1756	0.281815	0.000010	0.001470	0.077111	0.281766	3.5	0.4	2.04	2.23
X10-37-1-44	890	0.282199	0.000007	0.001958	0.098488	0.282166	-2.0	0.2	1.52	1.89
X10-37-1-48	292	0.282807	0.000011	0.001255	0.056696	0.282801	7.0	0.4	0.64	0.84
X10-37-1-49	877	0.282266	0.000006	0.001672	0.099652	0.282239	0.3	0.2	1.42	1.74
X10-37-1-51	292	0.282794	0.000007	0.002214	0.132517	0.282782	6.4	0.2	0.67	0.88
X10-37-1-63	292	0.282731	0.000006	0.001485	0.078832	0.282723	4.3	0.2	0.75	1.02
白墩子长英质脉体(X10-37-2)										
X10-37-2-02	294	0.282538	0.000018	0.001309	0.040971	0.282530	-2.4	0.6	1.02	1.45
X10-37-2-03	299	0.282521	0.000018	0.001316	0.039512	0.282513	-3.0	0.6	1.04	1.49
X10-37-2-05	294	0.282563	0.000015	0.000888	0.027255	0.282558	-1.5	0.5	0.97	1.39
X10-37-2-06	302	0.282563	0.000022	0.001151	0.036113	0.282557	-1.5	0.8	0.98	1.39
X10-37-2-07	295	0.282575	0.000015	0.001470	0.046910	0.282567	-1.2	0.5	0.97	1.37
X10-37-2-09	296	0.282561	0.000015	0.001674	0.051192	0.282552	-1.7	0.5	1.00	1.40
X10-37-2-10	295	0.282607	0.000015	0.001479	0.046725	0.282599	0.0	0.5	0.93	1.29
X10-37-2-15	306	0.282579	0.000016	0.001096	0.036130	0.282573	-0.9	0.6	0.96	1.35
X10-37-2-16	291	0.282595	0.000016	0.001526	0.051057	0.282586	-0.5	0.6	0.94	1.32
X10-37-2-19	294	0.282543	0.000015	0.001451	0.048799	0.282535	-2.3	0.5	1.02	1.44
X10-37-2-21	297	0.282547	0.000018	0.001399	0.044718	0.282539	-2.2	0.6	1.01	1.43
X10-37-2-23	295	0.282539	0.000019	0.001778	0.059265	0.282530	-2.5	0.7	1.03	1.45

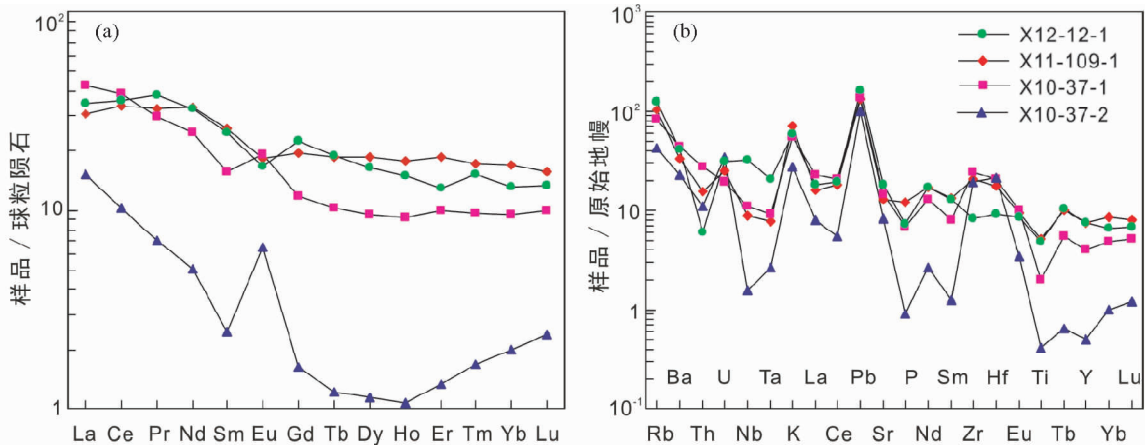


图 7 球粒陨石标准化稀土配分曲线(a, 标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)和原始地幔标准化微量元素蜘蛛图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern (a, chondrite values after Taylor and McLennan, 1985) and primitive mantle-normalized trace element spidergram (b, primitive mantle values after Sun and McDonough, 1989)

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282166 ~ 0.282239, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -2.2 ~ 0.3,  $t_{\text{DM}}$  变化于 1.74 ~ 1.89Ga; 15 个点位于第二类锆石的核部, 初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282721 ~ 0.282827, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 4.3 ~ 7.8,  $t_{\text{DM2}}$  变化于 0.79 ~ 1.02Ga,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值比震荡环带的核部偏大; 7 个点位于第二类锆石的边部, 初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282705 ~ 0.282801, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 3.3 ~ 6.8,  $t_{\text{DM2}}$  变化于 0.85 ~ 1.07Ga; 一个年龄为  $1756 \pm 18\text{Ma}$  的继承锆石核的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.281766,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 3.5,  $t_{\text{DM2}}$  为 2.23Ga(图 6)。

对样品 X10-37-2 共进行了 12 个点的 Hf 同位素分析(表 5), 都位于 CL 发光较弱且具震荡环带的区域, 初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  为 0.282513 ~ 0.282599, 相应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -3.0 ~ 0,  $t_{\text{DM2}}$  变化于 1.29 ~ 1.49Ga(图 6)。

### 5.3 地球化学

样品的主量和微量分析结果列于表 6。两个斜长角闪岩样品具有较低的  $\text{SiO}_2$  含量(49.73% ~ 52.23%)、较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (17.45% ~ 17.71%) 和  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (7.59% ~ 8.31%)。片

表6 样品的主量元素 (wt%) 和微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果

Table 6 Major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) element composition of the studied samples

样品号	X12-12-1	X11-109-1	X10-37-1	X10-37-2
采样点	石板墩		白墩子	
岩性	斜长角闪岩		片麻岩	长英质脉体
SiO <sub>2</sub>	52.23	49.73	66.39	82.54
TiO <sub>2</sub>	1.05	1.12	0.43	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.71	17.45	16.17	9.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	7.59	8.31	4.02	0.83
MnO	0.14	0.13	0.08	0.01
MgO	5.65	3.94	0.84	0.34
CaO	8.03	6.20	3.83	2.91
Na <sub>2</sub> O	3.22	2.90	4.25	2.07
K <sub>2</sub> O	1.79	2.14	1.63	0.82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.26	0.15	0.02
LOI	2.08	7.19	1.09	0.19
Total	99.65	99.37	98.88	99.24
A/CNK	0.81	0.95	1.03	0.98
A/NK	2.45	2.46	1.85	2.19
V	234	126	27.5	13.7
Cr	77.8	51.8	7.31	11.6
Ni	49.5	19.2	5	4.81
Rb	78.9	65	53.1	27
Sr	382	268	306	175
Y	33.9	34.5	18.3	2.24
Zr	91.5	234	274	218
Nb	5.97	6.37	7.8	1.1
Ba	290	230	307	158
Hf	2.85	5.42	6.41	6.63
Ta	0.85	0.32	0.37	0.11
Pb	11.4	9.58	9.68	7.2
Th	0.52	1.33	2.35	0.93
U	0.66	0.52	0.41	0.72
La	12.6	11.2	15.6	5.51
Ce	34.1	32.2	36.9	9.75
Pr	5.21	4.47	4.04	0.96
Nd	23.1	23.3	17.5	3.58
Sm	5.68	5.9	3.61	0.56
Eu	1.44	1.59	1.67	0.57
Gd	6.86	5.97	3.59	0.5
Tb	1.1	1.07	0.59	0.07
Dy	6.25	7.01	3.58	0.43
Ho	1.27	1.5	0.78	0.09
Er	3.21	4.62	2.48	0.33
Tm	0.54	0.61	0.34	0.06
Yb	3.24	4.18	2.36	0.49
Lu	0.51	0.59	0.38	0.09
Eu/Eu*	0.70	0.81	1.40	3.23
ΣREE	105.11	104.21	93.42	22.99

注: Eu/Eu\* =  $2 \times \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$ ; A/CNK =  $\text{Al}_2\text{O}_3 / [\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]$  (mol%); A/NK =  $\text{Al}_2\text{O}_3 / [\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}]$  (mol%)

麻岩样品的 SiO<sub>2</sub> 含量为 66.39%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 16.17%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 为 4.02%, 弱过铝质 (A/CNK = 1.03)。长英质脉体 (样品 X10-37-2) 具有较高的 SiO<sub>2</sub> 含量 (82.54%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 9.42%, 较低的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 含量 (0.83%)。

斜长角闪岩具有较平缓的的稀土配分曲线, Eu 为负异常不明显 (Eu/Eu\* = 0.70 ~ 0.81)。片麻岩样品具有类似的稀土配分曲线型式, Eu 呈正异常 (Eu/Eu\* = 1.40)。长英质脉体的稀土总量偏低, 配分曲线具有轻稀土富集, Eu 正异常明显 (Eu/Eu\* = 3.23) 的特点。在微量元素蜘蛛图上, 所有样品都显示出富集 Rb、Ba、U、K、Pb, 亏损 Nb、Ta 的特点, 但是长英质脉体的 Nb、Ta、P、Sm、Nd 呈现出更低的特点 (图 7)。深熔作用形成的长英质脉体的稀土和高场强元素含量通常较低, 主要是深熔作用过程中锆石、磷灰石等富稀土的副矿物残留的结果 (Watt and Harley, 1993; 万渝生等, 2002)。

## 6 讨论

### 6.1 北山造山带前寒武纪基底及其归属

石板墩斜长角闪岩 (X11-109-1) 和白墩子片麻岩 (X10-37-1) 中原岩岩浆锆石均给出了一致的原岩结晶年龄, 即 ~880Ma, 显示北山石板山地块存在新元古代早期 (~880Ma) 的岩浆活动产物。这两个样品也具有类似的锆石 Hf 同位素组成, 初始 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值为 0.282063 ~ 0.282291,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化为 -6.3 ~ 2.2, 具有远大于其结晶年龄的两阶段 Hf 模式年龄 ( $t_{\text{DM2}}$ ) 1.62 ~ 2.14Ga, 反映了其原岩岩浆可能起源于古元古代地壳的部分熔融, 但其变化较大的锆石 Hf 同位素组成, 暗示了有新生地壳物质的加入。

已有研究表明北山的双鹰山-花牛山地块上广泛出露的眼球状片麻岩的形成时代也为新元古代, 为 ~900Ma (叶晓峰等, 2013), 与石板墩斜长角闪岩和白墩子片麻岩的原岩形成年龄较为一致。此外, 它们也具有类似的锆石 Hf 同位素组成 (图 6), 显示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。虽然目前在北山造山带还没有确切的证据表明存在古元古代的岩石, 但本文和前人的已有研究显示石板山地块和双鹰山-花牛山地块存在明显老于北山造山带中洋壳形成年龄的地质体, 并可能存在更古老的地壳物质, 因此, 它们应代表北山造山带中具有古老微陆块性质的构造单元。但是, 其它的马鬃山地块或黑鹰山-旱山地块是否存在古老的地壳基底, 及其时代与归属仍有待于进一步研究。

由于“北山杂岩”普遍经历了高级变质作用, 长期以来被认为是北山造山带的前寒武纪基底 (左国朝等, 1990, 2003; 刘雪亚和王荃, 1995; 李景春等, 1996; 魏学平等, 2000), 但是缺少足够的精确的同位素年龄制约 (表 1), 这也造成了对基底归属的多种不同认识。北山南缘的石板山地块被认为属于敦煌地块的一部分 (刘雪亚和王荃, 1995; 梅华林等, 1997;



李景春等, 1996; Xiao *et al.*, 2010)。敦煌地块是塔里木板块东缘的基底出露区, 在敦煌党河水库、三危山、安西以南、肃北红柳峡, 以及金塔等地, 广泛分布晚太古代-早元古代敦煌群的中、深变质岩系 (He *et al.*, 2012, 2013)。梅华林等 (1998) 从敦煌地块南部靠近阿尔金断裂的石包城北侧获得的英云闪长岩 2.67Ga 锆石年龄和 2.68Ga 的 Nd 模式年龄, 反映敦煌存在着太古宙岩石信息。最近, Zhang *et al.* (2013) 报道了位于红柳河-石包城一带的 ~2.5Ga 的 TTG 质岩石, 并经历了 ~1.85Ga 的高压麻粒岩相变质作用, 确证了敦煌地块存在太古代的基底。而且, 新太古代和古元古代片麻岩的锆石 Hf 同位素研究表明, 敦煌地块甚至可能存在古太古代的地壳基底 (He *et al.*, 2013; 图 6)。这与锆石 Hf 同位素显示的石板山地块可能存在的最古老基底为古元古代存在显著区别。因此, 北山南缘的石板山地块并不是来自敦煌地块, 而应有其它来源。

## 6.2 北山造山带二叠纪早期深熔作用及其构造意义

石板墩斜长角闪岩和白墩子片麻岩中的变质锆石均给出了 ~295Ma 的变质作用年龄。这些变质成因锆石的 Th/U 比值和稀土元素配分曲线特征与岩浆锆石并没有明显区别。而且, 白墩子片麻岩发育有石榴石, 但是其锆石稀土配分曲线并没有显示重稀土元素相对亏损的特点。这些可能反映了它们形成于开放体系, 即 ~295Ma 的变质成因锆石为深熔作用过程中熔体结晶锆石 (Rubatto and Gebauer, 2000; Harley *et al.*, 2007)。反之, 如果是流体活动成因的锆石则会具有较低的 Th 和 U 含量 (Kessel *et al.*, 2005)。另外, 它们的初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值明显高于原岩岩浆结晶锆石 (图 6), 也反映了它们为新生锆石, 而不是由原岩锆石改造或重结晶形成 (Gerdes *et al.*, 2009)。因此, ~295Ma 的变质作用应代表区域上的一次地壳深熔事件, 这也得到了白墩子片麻岩中发育同时期长英质脉体的支持。

前人根据柳园榴辉岩的变质作用和年代学研究, 认为奥陶纪时柳园洋北向俯冲于双鹰山-花牛山地块之下 (Liu *et al.*, 2010; Qu *et al.*, 2011)。在泥盆纪-石炭纪, 柳园洋开始向南俯冲于石板山地块之下, 并形成石板山弧岩浆作用 (Xiao *et al.*, 2010)。在北山造山带的桥湾、西涧泉子、音凹峡等地有 304 ~ 281Ma 后碰撞花岗岩的产出, 可能反映了俯冲作用于石炭纪末期结束, 北山南缘处于石板山地块与双鹰山-花牛山地块碰撞后的伸展构造背景 (张文等, 2010, 2011; 冯继承等, 2012)。此外, 柳园、笔架山、坡什等地 295 ~ 270Ma 的基性岩和 ~250Ma 的超基性岩、红石山一带的 ~280Ma 的双峰式火山岩均被认为形成于伸展作用环境, 反映了二叠纪北山造山带处于伸展的构造背景下 (Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2011b; Zhang *et al.*, 2011)。本文获得的 ~295Ma 变质作用事件可能也形成于该时期后碰撞的构造环境, 地壳拉伸减薄, 软流圈地幔物质上涌, 从而在中上地壳形成一种高温低压的构造环境, 使得地壳物质发生深熔作用

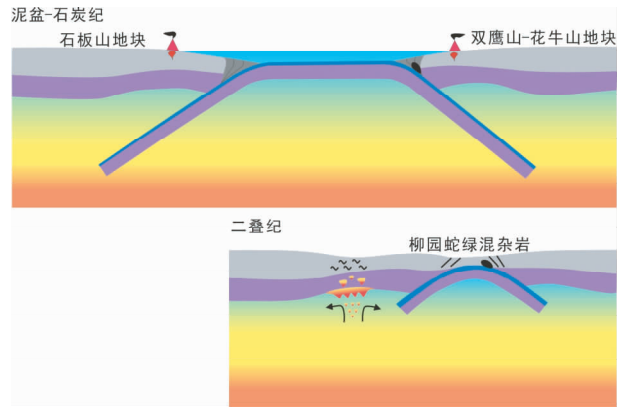


图 8 北山造山带南缘古生代构造演化模式简图

Fig. 8 Schematic model illustrating Paleozoic tectonic evolution of the southern Beishan orogenic belt

(图 8; Brown, 2001; Foster *et al.*, 2001)。此外, 样品中锆石可能还记录了更晚期的一次构造热事件 (270 ~ 280Ma)。

## 7 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年确证了北山造山带存在 ~880Ma 新元古代岩石, 锆石 Hf 同位素显示其岩浆来自古老地壳的再造, 反映北山地区存在古老的前寒武纪基底;

(2) 北山造山带南缘的石板山地块与敦煌地块具有新太古代地壳基底存在显著区别, 可能并不是属于敦煌地块的一部分;

(3) 石板墩斜长角闪岩和白墩子片麻岩和长英质脉体记录了 ~295Ma 的深熔作用事件, 代表了北山造山带南缘在二叠纪初期处于后碰撞有关的伸展构造背景下。

**致谢** 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, 在此表示诚挚的谢意。

## References

- Ao SJ, Xiao WJ, Han CM, Mao QG and Zhang JE. 2010. 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 Altai. *Gondwana Research*, 18: 466 - 478
- Ao SJ, Xiao WJ, Han CM, Li XH, Qu JF, Zhang JE, Guo QQ and Tian ZH. 2012. Cambrian to Early Silurian ophiolite and accretionary processes in the Beishan collage, NW China: Implications for the architecture of the southern Altai. *Geological Magazine*, 149(4): 606 - 625
- Bhadra S and Bhattacharya A. 2007. The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: Constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages. *American Mineralogist*, 92(4): 491 - 502
- 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
- Brown M. 2001. Crustal melting and granite magmatism: Key issues. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(4–5): 201–212
- Feng JC, Zhang W, Wu TR, Zheng RG, Luo HL and He YK. 2012. Geochronology and geochemistry of granite pluton in the north of Qiaowan, Beishan Mountain, Gansu Province, China, and its geological significance. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(1): 61–70 (in Chinese with English abstract)
- Foster DA, Schafer C, Fanning CM and Hyndman DW. 2001. Relationships between crustal partial melting, plutonism, orogeny, and exhumation; Idaho-Bitterroot batholith. *Tectonophysics*, 342(3–4): 313–350
- Gerdes A and Zeh A. 2009. Zircon formation versus zircon alteration: New insights from combined U-Pb and Lu-Hf in-situ LA-ICP-MS analyses, and consequences for the interpretation of Archean zircon from the Central Zone of the Limpopo Belt. *Chemical Geology*, 261(3–4): 230–243
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Acherbergh 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
- Harley SL, Kelly NM and Möller A. 2007. Zircon behaviour and the thermal histories of mountain chains. *Elements*, 3(1): 25–30
- He ZY, Zhang ZM, Zong KQ, Wang W and Santosh M. 2012. Neoproterozoic granulites from the northeastern margin of the Tarim Craton; Petrology, zircon U-Pb ages and implications for the Rodinia assembly. *Precambrian Research*, 212–213: 21–33
- 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*, doi: 10.1016/j.jseaes.2013.07.022
- Holland TJB and Blundy JD. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433–447
- Jiang SH and Nie FJ. 2006. Nd-isotope constraints on origin of granitoids in Beishan Mountain area. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 826–842 (in Chinese with English abstract)
- Kessel R, Schmidt MW, Ulmer P and Petke T. 2005. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. *Nature*, 437(7059): 724–727
- Li JC, Zhao AS and Cui HW. 1996. The characteristics of geological tectonic in the north belt of Beishan. *Journal of Precious Metallic Geology*, 5(1): 59–68 (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*, (2): 131–134 (in Chinese with English abstract)
- Liu XC, Chen BL, Jahn BM, Wu GG and Liu YS. 2010. Early Paleozoic (ca. 465 Ma) 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 XM, Chen YL, Li DP, Wang Z and Liu JB. 2010. The U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in the metadiabase and gneissic granite, Beishan orogenic belt, Inner Mongolia, China and its significance. *Geological Bulletin of China*, 29(4): 518–529 (in Chinese with English abstract)
- Liu 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, Hu ZC, Gao SG, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Ludwig KR. 2001. *Users Manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49)*: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, No. 1. 55
- Mei HL, Yu HF, Li Q 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, Li Q, Lu SN, Li HM, Zuo YC, Zuo GC, Ye DJ and Liu JC. 1998. The first discovery of eclogite and Palaeoproterozoic granulites in the Beishan area, northwestern Gansu Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 43(19): 2105–2111 (in Chinese)
- Mei HL, Li HM, Lu SN, Yu HF, Zuo YC and Li Q. 1999. The age and origin of the Liuyuan granulitoid, northwestern Gansu. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(1): 14–17 (in Chinese with English abstract)
- Morel MLA, Nebel O, Nebel-Jacobsen YJ, Miller JS and Vroon PZ. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 255(1–6): 231–235
- Nie FJ, Jiang SH, Liu Y and Zhang Y. 2004. Sm-Nd isotope study on metamorphosed volcano-sedimentary rocks of the Jiaochagou metamorphic complex, Beishan Mt., Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 76(8): 807–812 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Su BX, Li XH, Tang DM, Sakyi PA, Sun H, Xiao QH and Liu PP. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan: correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume. *American Journal of Sciences*, 311(3): 237–260
- 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 Altaids. *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: *Cathodoluminescence in Geoscience*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 373–400
- Sang HQ, Qiu J, Wang SS and Qu HS. 1997. A preliminary study on Ar-Ar chronology of Dakouzi gneiss from Beishan Area. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(S1): 58–61 (in Chinese with English abstract)
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683–687
- Song DF, Xiao WJ, Han CM, Li JL, Qu JF, Guo QQ, Lin LN and Wang ZM. 2013. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, southern Altaids: Insights from zircon U-Pb and Hf isotopic data of high-grade complexes. *Precambrian Research*, 227: 368–388
- Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Li XH, Yang YH, Sun H, Tang DM, Liu PP, Xiao QH and Malaviarachchi SPK. 2011a. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume. *Gondwana Research*, 20(2–3): 516–531
- Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Liu PP, Tang DM, Malaviarachchi SPK, Xiao QH, Sun H, Dai YC and Hu Y. 2011b. Geochemistry and geochronology of acidic rocks in the Beishan region, NW China: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 31–43.
- Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Long XP, Xia XP, Zhao GC, Lin SF, Wu FY 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 Palaeozoic. *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
- Sun XC, Zhang HJ, Wei ZJ, Huang ZB and Gao BN. 2005. Time of definition and geological meaning for metamorphic intrusive rock body in Xiaohongshan region, Beishan area of Gansu and Inner Mongolia. *Northwestern Geology*, 38(3): 61–67 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. London: Blackwell Scientific Publications, 328
- Wan YS, Cheng YQ, Gao JF and Yang CH. 2002. Study on geochemistry of hornblende rocks and their anatexitic derivatives of the Fuping Group in the Xiaojue area, Hebei Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(5): 429–434 (in Chinese with English abstract)
- Watt GR and Harley SL. 1993. Accessory phase controls on the geochemistry of crustal melts and restites produced during water-undersaturated partial melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(4): 550–566
- Wei XP, Gong QS, Liang MH and Dai WJ. 2000. Metamorphic-deformational and evolutionary characteristics of pre-Changcheng Dunhuang terrain occurring on Mazongshan upwelling area. *Acta Geologica Gansu*, 9(1): 36–43 (in Chinese with English abstract)
- 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, Mao QG, Windley BF, Han CM, Qu JF, Zhang JE, Ao SJ, Guo QQ, Cleven NR, Lin SF, Shan YH and Li JL. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553–1594
- Yang JG, Zhai JY, Yang HW, Wang CF, Xie CL, Wang XH and Lei YX. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of basalt and its geological significance in Huaniushan Pb-Zn deposit, Beishan area, Gansu, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1017–1023 (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 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 W, Wu TR, He YK, Feng JC and Zheng RG. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Xijianquanzi alkali-rich potassium-high granites in Beishan, Gansu Province, and their tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 719–731 (in Chinese with English abstract)
- Zhang W, Feng JC, Zheng RG, Wu TR, Luo HL, He YK and Jing X. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the granites from the south of Yin'aoxia and their tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1649–1661 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YY, Jaroslav D, Zhao ZH, Liu C and Guo ZJ. 2011. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of mafic and ultramafic rocks from southern Beishan area, NW China: Implications for crust-mantle interaction. *Gondwana Research*, 20(4): 816–830
- Zuo GC, Zhang SL, He GY and Zhang Y. 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan area. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 305–314 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC, Zhang SL, He GQ and Zhang Y. 1991. Plate tectonic characteristics during the Early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian border region, China. *Tectonophysics*, 188(3–4): 385–392
- 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

- 冯继承, 张文, 吴泰然, 郑荣国, 罗红玲, 贺元凯. 2012. 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. *北京大学学报(自然科学版)*, 48(1): 61–70
- 江思宏, 聂凤军. 2006. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约. *地质学报*, 80(6): 826–842
- 李景春, 赵安生, 崔惠文. 1996. 北山北带地质构造特征. *贵金属地质*, 5(1): 59–68
- 李志琛. 1994. 敦煌地块变质岩系时代新认识. *中国区域地质*, (2): 131–134
- 刘雪敏, 陈岳龙, 李大鹏, 王忠, 刘金宝. 2010. 内蒙古北山造山带变辉绿岩和片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及地质意义. *地质通报*, 29(4): 518–529
- 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
- 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, 李铨, 陆松年, 李惠民, 左义成, 左国朝, 叶得金, 刘金城. 1998. 甘肃北山地区首次发现榴辉岩和古元古花岗岩质岩石. *科学通报*, 43(19): 2105–2111
- 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质岩石时代及成因. *岩石矿物学杂志*, 18(1): 14–17
- 聂凤军, 江思宏, 刘妍, 张义. 2004. 内蒙古北山交叉沟地区变质火山岩 Sm-Nd 同位素研究. *地质学报*, 76(8): 807–812
- 桑海清, 襄冀, 王松山, 屈徽生. 1997. 北山地区大口子片麻岩 Ar-Ar 年代学初步研究. *地球学报*, 18(S1): 58–61
- 孙新春, 张红军, 魏志军, 黄增保, 高柏年. 2005. 甘蒙北山地区小红山一带变质侵入岩体的时代厘定及其地质意义. *西北地质*, 38(3): 61–67
- 万渝生, 程裕淇, 高吉凤, 杨崇辉. 2002. 河北小觉地区阜平岩群斜长角闪岩及深熔产物的稀土和 Nd 同位素地球化学研究. *地球学报*, 23(5): 429–434
- 魏学平, 龚全胜, 梁明宏, 代文军. 2000. 马鬃山隆起区前长城系敦煌岩群变质变形和演化特征. *甘肃地质学报*, 9(1): 36–43
- 杨建国, 翟金元, 杨宏武, 王冲峰, 谢春林, 王小红, 雷永孝. 2010. 甘肃北山地区花牛山铅锌矿区玄武岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 29(7): 1017–1023
- 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
- 张文, 吴泰然, 贺元凯, 冯继承, 郑荣国. 2010. 甘肃北山西涧泉子富碱高钾花岗岩体的锆石 LA-ICP-MS 定年及其构造意义. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 719–731
- 张文, 冯继承, 郑荣国, 吴泰然, 罗红玲, 贺元凯, 荆旭. 2011. 甘肃北山音凹峡南花岗岩体的锆石 LA-ICP-MS 定年及其构造意义. *岩石学报*, 27(6): 1649–1661
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 张杨. 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