

# 柴北缘锡铁山榴辉岩退变质成因角闪石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学研究\*

胡荣国<sup>1,2,3</sup> 王敏<sup>1,3</sup> Jan R WIJBRANS<sup>2</sup> Fraukje M BROUWER<sup>2</sup> 邱华宁<sup>1\*\*</sup>  
HU RongGuo<sup>1,2,3</sup>, WANG Min<sup>1,3</sup>, Jan R WIJBRANS<sup>2</sup>, Fraukje M BROUWER<sup>2</sup> and QIU HuaNing<sup>1\*\*</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640
  2. Department of Earth Sciences, VU University Amsterdam, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, Netherlands
  3. 中国科学院大学, 北京 100049
  1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
  2. Department of Earth Sciences, VU University Amsterdam, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, Netherlands
  3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 2012-03-15 收稿, 2013-01-01 改回.

Hu RG, Wang M, Wijbrans JR, Brouwer FM and Qiu HN. 2013. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of amphibole from the amphibolite rocks, Xitieshan terrane, north Qaidam UHP metamorphic belt, western China. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (9): 3031–3038

**Abstract** Two amphibole samples from the garnet-amphibolite and amphibolite were dated by the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar laser stepwise heating. The amphibole from the garnet-amphibolite 09NQ44Amp yielded a monotonic declining staircase-shaped age spectrum (by excluding non-radiogenic <sup>40</sup>Ar with <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratio of 295.5 of the modern atmosphere), marked by anomalously old apparent ages (to 6.0Ga) at low temperature steps. The data points shows two linear arrays on the inverse isochron diagram. The data of steps 2~4 define an isochron with an age of 427.6 ± 10Ma and initial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratio of 435.2 ± 6.1. Those of steps 5~18 construct another isochron with an age of 425.1 ± 2.6Ma and initial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratio of 705.3 ± 13. The amphibole from amphibolite (09NQ43Amp) yielded similar declining staircase-shaped age spectrum and isochron plot. Data points of steps 3~6 and 7~16 define two isochrons. The isochron of steps 3~6 corresponds to an age of 418.9 ± 2.9Ma and initial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratio of 493.7 ± 2.8, while the other one of steps 7~16 yields concordant isochron age of 418.1 ± 2.1Ma but with higher initial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratio of 685.8 ± 34.3. These initial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios are much higher than that of the modern atmosphere, indicating the existence of excess <sup>40</sup>Ar in the amphibole samples. The obviously different initial ratios of the two isochrons of each amphibole sample reveal two argon reservoirs trapped inside, and concordant isochron ages probably indicate rapid exhumation happened to the Xitieshan eclogites at 425Ma and 418Ma.

**Key words** <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar method; Trapped argon; Amphibole; Laser stepwise heating; Isochron diagram

**摘要** 采用激光阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar技术,对柴达木盆地北缘锡铁山榴辉岩退变质作用形成的榴辉岩和斜长角闪岩之角闪石进行了定年分析。09NQ44Amp来自榴辉岩,各阶段表观年龄(以现代空气氩<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar比值295.5扣除非放射性成因<sup>40</sup>Ar)构成了单调下降的阶梯状年龄谱。在反等时线图解上,2~4阶段数据点和5~18阶段数据点分别构成了两条等时线,等时年龄分别为427.6 ± 10Ma和425.1 ± 2.6Ma,对应的初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar比值则分别为435.2 ± 6.1和705.3 ± 13。角闪石09NQ43Amp来自榴辉岩强烈退变质作用形成的斜长角闪岩,<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar阶段加热分析也获得单调下降的年龄谱,在反等时线图解上其数据点3~6阶段和7~16阶段分别构成了两条等时线,等时年龄分别为418.9 ± 2.9Ma和418.1 ± 2.1Ma,对应的初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar比值则分别为493.7 ± 2.8和685.8 ± 34.3。等时线截距值高于现代大气<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar比值,表明角闪石中含过剩<sup>40</sup>Ar。同时,由低温和中-高温阶段加热数据点分别构成两条等时年龄基本一致,截距值却明显不同的等时线,表明在角闪石

\* 本文受荷兰皇家文理科学院基金(06CDP002)和中-荷联合培养博士生计划(ISK/3523/PhD)联合资助。

第一作者简介: 胡荣国,男,1982年生,博士生,地球化学专业, E-mail: rongguo.hu@gmail.com

\*\* 通讯作者: 邱华宁,男,博士,研究员,地球化学专业, E-mail: qiuhn@gig.ac.cn

热力学性质不同的源区,存在两期明显不同且未混合的初始捕获 Ar 组分。等时年龄 425 ~ 418Ma 代表的是锡铁山榴辉岩角闪岩相退变质作用发生的时间。等时线图解法虽然有效的校正了角闪石中的过剩<sup>40</sup>Ar,但仅根据表观年龄图谱和等时线图谱还无法清晰判断过剩<sup>40</sup>Ar 在角闪石中的赋存状态,有待进一步探讨。

**关键词** <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法; 捕获 Ar; 角闪石; 激光阶段加热; 等时线图解  
**中图分类号** P597.3

经历过高压-超高压变质作用的矿物普遍易含过剩氩,致使其<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果变得异常复杂且难以解释(Li *et al.*, 1994; Hacker *et al.*, 2003);若矿物结晶时捕获的初始氩并非大气氩组成,数据处理时以大气氩比值 295.5 来扣除非放射性成因<sup>40</sup>Ar,也可能会形成复杂的年龄图谱(Heizler and Harrison, 1988; Onstott *et al.*, 1989)。如何甄别过剩氩,确定其在矿物中的赋存状态,如何有效地校正过剩氩,从而获得有地质意义的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄,一直是国内外学者探讨的科学问题。通过对大量高压-超高压变质岩的云母、角闪石和长石阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 实验结果进行系统的统计、对比和总结, Hacker and Wang(1995)、Hacker *et al.*(2000)认为在<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄谱中,平坦的年龄谱一般具有明确的地质意义,而马鞍形、驼峰形和复杂的年龄谱可能由“外来”<sup>40</sup>Ar 造成。而阶梯状图谱则可由 Ar 扩散丢失,不同初始 Ar 混合以及矿物长期生长等因素造成(Chen *et al.*, 2004)。在缺乏流体、且体系相对封闭的高压-低温环境下,由原岩钾矿物中<sup>40</sup>K 衰变所形成的<sup>40</sup>Ar 扩散范围十分有限,绝大部分会被后生钾矿物所继承(Sherlock and Kelley, 2002);榴辉岩中的多硅白云母存在由中心向边缘辐射递减的年龄梯度,可能暗示其“外来氩”从原岩“继承”而来(Giorgis *et al.*, 2000)。矿物电子探针成分分析和<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年研究结果则显示过剩氩在白云母中的赋存和矿物的 Mg/(Fe + Mg) 比值、Si<sup>4+</sup> 含量有关(Scaillet *et al.*, 1992)。正反等时线图解法一直是识别和校正过剩氩,从而获得有地质意义年龄的最有效方法(Merrihue and Turner, 1966; Roddick *et al.*, 1980; Heizler and Harrison, 1988; Kuiper, 2002)。本文对青海柴北缘超高压变质带锡铁山地区榴辉岩和斜长角闪岩中的角闪石进行单矿物激光阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年实验,采用反等时线图解法,辨别出角闪石内部存在两种不同热力学性质的源区,具有两期明显不同、且未混合的初始氩。根据等时线截距给出的初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 比值分别校正角闪石两种源区的过剩<sup>40</sup>Ar,获得了具有地质意义的坪年龄,从而对该区榴辉岩角闪岩相退变质作用发生的时间进行了有效制约。

## 1 地质背景及样品描述

柴北缘古生代超高压变质带是近十年来新厘定的一条由榴辉岩、榴闪岩、石榴石橄榄岩、斜长角闪岩和各类片麻岩所组成的大陆深俯冲变质带(Yang *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2003)。锡铁山榴辉岩-片麻岩地块位于该高压-超高压变质带的中东部(图 1a),主要由下元古界达肯大坂群一套以副

变质岩为主的中-高级变质表壳岩所组成。此外还广泛发育有似层状、布丁状或透镜状赋存于片麻岩、片岩中的榴辉岩。榴辉岩退变质作用极其强烈,新鲜的榴辉岩只有在体积较大的透镜状榴辉岩的核部存在,边部大多已经退变质成榴闪岩或斜长角闪岩(Zhang *et al.*, 2005, 2008)。锡铁山地区中部部分榴辉岩的岩石地球化学研究和稀土配分曲线特征表明其具有洋脊玄武岩的特征,因此有学者认为其为洋壳俯冲产物,但不同程度的受到过地壳物质的混染(孟繁聪等, 2003; Yang *et al.*, 2006)。根据榴辉岩与典型陆壳岩石共生关系,以及榴辉岩和围岩的原岩年龄(750 ~ 996Ma)与榴辉岩相超高压变质年龄(488 ~ 440Ma)之间具有约 300Ma 的时间间隔,远大于洋壳的最大寿命(约 200Ma),因此目前多数学者偏向于持锡铁山榴辉岩为大陆俯冲产物的观点(陈丹玲, 2007; Zhang *et al.*, 2005, 2008, 2009, 2011, 2012)。通过 Grt-Omp-Ph 温压计获得的榴辉岩峰期温压变质条件为  $T = 750 \sim 790^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 2.7 \sim 3.2\text{GPa}$ (Zhang *et al.*, 2011)。就该区同位素年代学工作而言,目前已有大量的榴辉岩及其围岩片麻岩的锆石 U-Pb 及角闪石、白云母 Ar/Ar 年龄报导。花岗岩片麻岩白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 等时年龄为 405Ma(Xu *et al.*, 2006)。退变质榴辉岩锆石 U-Pb 下交点年龄为 ~486Ma; 全岩-石榴石-辉石 Sm-Nd 等时年龄为 435Ma; 角闪石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 等时年龄 ~409Ma(Zhang *et al.*, 2005)。正、副片麻岩的锆石 U-Pb 下交点年龄分别为 478Ma 和 437 ~ 441Ma(Zhang *et al.*, 2006, 2008)。黄羊沟榴辉岩 SHRIMP 法锆石 U-Pb 上交点和下交点年龄分别为 877Ma 和 439 ~ 461Ma(Zhang *et al.*, 2011)。全集峡榴辉岩 SIMS 法锆石 U-Pb 年龄为 435Ma(宋述光等, 2011)。但由于测试方法的不同和锆石年龄本身具有多解性,锡铁山地区的高压-超高压峰期变质时代以及其后的热构造事件发生的时代及期次,目前尚存较大争议。

本次样品都采自锡铁山黄羊沟(图 1b),经纬度坐标为: E95°30'53.4", N37°24'5.6"。定年样品的岩石特征如下: 样品 09NQ43 为斜长角闪岩,细粒变晶结构,弱片状构造,是榴辉岩强烈退变质的产物。主要由角闪石(30% ~ 45%)、斜长石(25%)、钾长石(15%)、黑云母/绿泥石(10%)、角闪石 + 斜长石后合成晶(5%)、辉石(<0.1%)组成,副矿物有少量榍石和锆石。电子探针结果显示角闪石主要为浅闪石、非闪石和镁角闪石,多呈半自形-他形柱状,单偏光镜下呈暗绿色;黑云母大多蚀变呈绿泥石(图 2a);斜长石多见卡斯巴-钠长石复合双晶,钾长石见卡斯巴双晶。09NQ44 号样品为榴闪岩,由榴辉岩退变质而来,中粗粒结构,块状构造。主要由角闪石(40%)、石榴石(20%)、角闪石/单斜辉石 + 斜长石

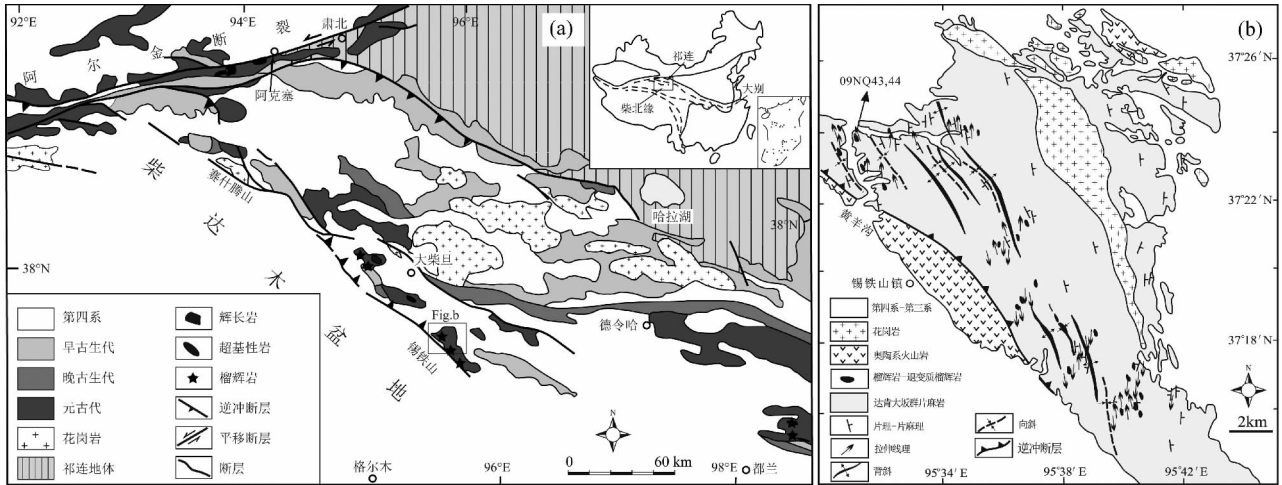


图1 柴北缘高压-超高压变质带区域地质简图 (a) 和锡铁山榴辉岩地体地质简图以及采样点位置 (b) (据 Zhang *et al.*, 2005 修改)

Fig.1 Geological sketch map of the northern Qaidam HP/UHP metamorphic belt (a) and samples localities and distribution of eclogites in the Xitieshan terrane (b) (modified after Zhang *et al.*, 2005)

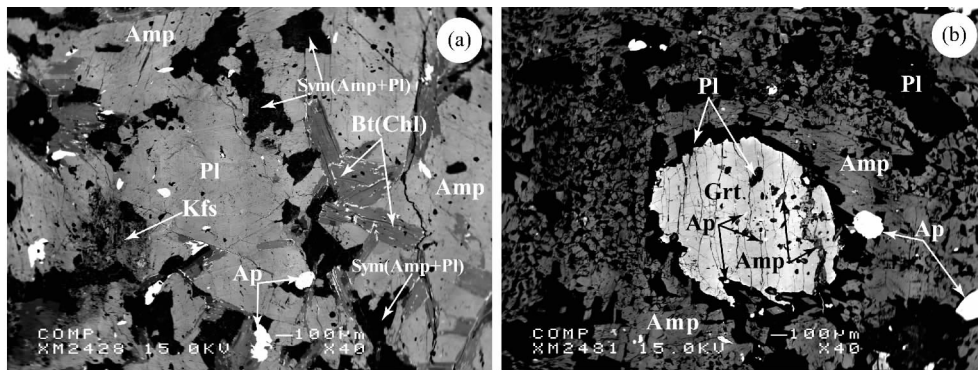


图2 柴北缘锡铁山高压-超高压地体斜长角闪岩 09NQ43 Amp (a) 和榴闪岩 09NQ44 Amp (b) 显微结构图 (BSE 图片)  
 (a) 斜长角闪岩中的黑云母强绿泥石化, 后成合晶主要由角闪石和斜长石组成; (b) 榴闪岩中石榴石变斑晶斜长石 (主要为钠长石) 环绕, 裂隙由角闪石和后成合晶 (角闪石 + 斜长石) 所填充, 包裹体主要为角闪石和磷灰石, 基质以角闪石为主

Fig. 2 Microtextures of amphibolite (09NQ43) and garnet-amphibolite (09NQ44) in the Xitieshan area, north Qaidam orogenic belt, western China (BSE images)

(a) -strong chloritization biotite in amphibolite, symplectite composed by amphibole + plagioclase; (b) -idioblastic garnet in garnet-amphibolite with amphibole and apatite inclusions and surrounded by plagioclase, crack filled by amphibole and symplectite. Matrix is mainly amphibole

后成合晶 (20%) 绿泥石 + 绿帘石 (10%), 长石 (5%) 和辉石 (<0.5%) 组成。角闪石主要为镁角闪石, 呈半自形-他形柱状、粒状, 粒径 0.1 ~ 2 mm; 石榴石呈半自形粒状, 裂隙极其发育, 粒径为 0.5 ~ 1.5 mm 不等, 边部由斜长石所环绕, 大多包含有角闪石和磷灰石包体 (图 2b), 部分包裹在大颗粒角闪石斑晶中。

## 2 实验技术

单矿物分选工作于荷兰阿姆斯特丹自由大学选矿实验

室完成。样品用液压机碎成小块, 再用鄂式破碎机碎成细粒, 过筛, 选取粒径在 250 ~ 500 μm 之间的矿物进行重液分选 (角闪石比重: 3.1 ~ 3.3 g/cm<sup>3</sup>) 和磁选。由于角闪石多含细粒石英连晶, 因此将样品置于浓度为 ~5% HF 酸中 10 min, 而后再在超声波中用水中清洗。最后, 所有样品在双目镜下手选出未见明显矿物连晶的样品, 纯度达 99%。实验样品与标准样品分别用铝箔和铜箔包装呈小圆饼状, 密封于玻璃管内。为了获得样品的 J 值, 在玻璃管两端及每 4 个样品中间插入一个标样, 并记录每个样品及标样在玻璃管中的位置, 用以确定样品管 J 值的变化曲线, 并通过曲线方程计算出每

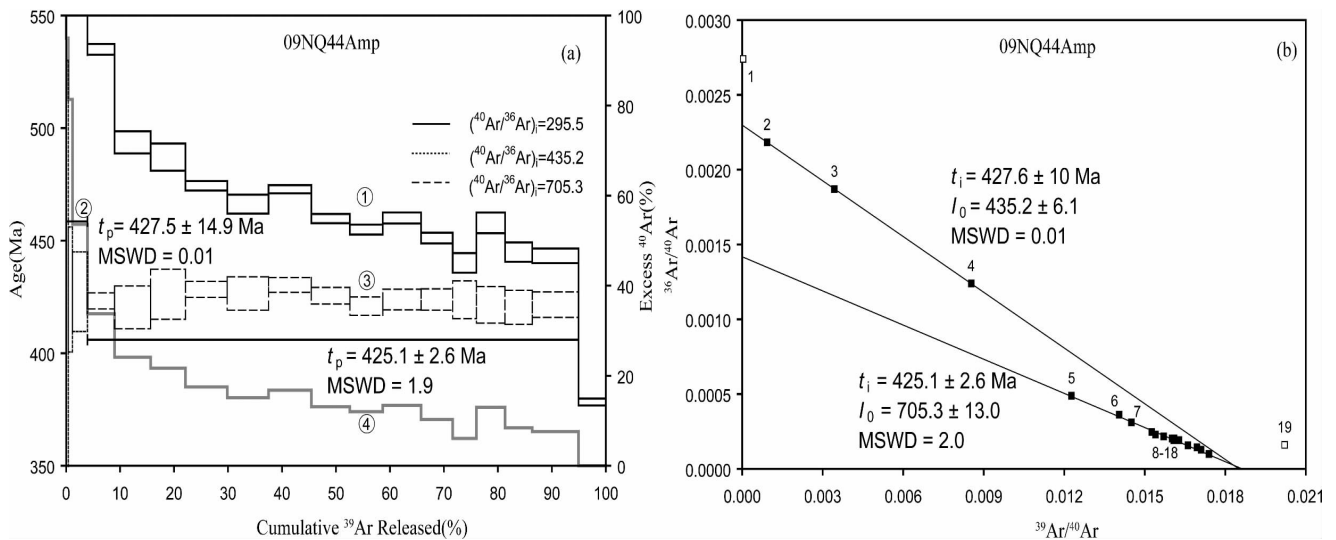


图3 榴闪岩之角闪石 09NQ44Amp 激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果

(a): 线①、线②和线③为年龄谱, 分别以 295.5、435.2 和 705.3 扣除非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ ; 线④为过剩 $^{40}\text{Ar}$  谱线。(b): 反等时线, 两条等时线分别由 2-4 和 5-18 阶段数据点构成

Fig. 3 Plots based on the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data of the amphibole 09NQ44Amp from garnet-amphibolite by laser stepwise heating

(a): The age spectra. Line ①, line ② and line ③ are obtained by excluding non-radiogenic  $^{40}\text{Ar}$  with 295.5, 435.2 and 705.3, respectively. Line ④ shows the excess  $^{40}\text{Ar}$  distributions. (b): The inverse isochron plot, two linear arrays are evident and defined by heating steps 2-4 and 5-18, respectively

个样品的 J 值。样品送至美国俄勒冈州立大学核反应堆中心, 在 TRIGA 反应堆中使用快中子照射 20h, 中子活化编号为 VU83。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年实验在阿姆斯特丹自由大学岩石系 Ar/Ar 同位素实验室 MAP215-50 质谱计上完成。中子通量监测标准样品为本实验室所采用的标样 DRA-1 透长石, 其年龄为 25.26Ma (Wijbrans *et al.*, 1995)。样品用激光阶段加热求得 J 值, 然后根据 J 值变化曲线的函数关系和样品的位置计算每个样品的 J 值。干扰氩同位素校正因子为:  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 6.73 \times 10^{-4}$ ,  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.64 \times 10^{-4}$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 8.60 \times 10^{-4}$ 。

氩同位素分析流程同 Qiu and Wijbrans (2006, 2008) 所描述的相同。整个系统在实验分析前先使用加热带在 150°C 下烘烤去气。而后, 激光阶段加热释放出来的气体通过 Fe-V-Zr 和 Zr-Al 泵纯化后送入质谱计进行氩同位素分析。整个流程由计算机自动控制完成。每次实验以本底分析开始, 在完成 2~4 个阶段后, 插做一个本底分析, 用以准确扣除系统的本底。

### 3 实验结果

角闪石激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果采用 A Koppers 博士编写的 ArArCALC V2.50 进行计算和作图 (Koppers, 2002)。样品阶段加热数据列于表 1。

#### 3.1 榴闪岩角闪石

榴闪岩角闪石 09NQ44Amp 进行了 19 个阶段的激光加热分析, 以现代大气氩比值 295.5 扣除非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ , 形成了单调递减的阶梯状年龄图谱 (图 3a 线①)。在激光能量 0.13~0.24W 的低温阶段, 表观年龄高达 5974~897Ma; 温度升高表观年龄逐渐下降, 在激光能量 0.3~1.3W 的中-高温阶段, 表观年龄从 565Ma 下降至 443Ma; 样品完全熔融时, 表观年龄进一步下降到 378Ma (表 1)。

将数据点投到反等时线图 ( $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  vs.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ) 上, 样品表现如下释气特征: 低温阶段的第一个数据点几乎落在  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  轴上, 暗示释放出来的放射性成因 $^{40}\text{Ar}$  所占比例非常小, 空气 $^{40}\text{Ar}$  占主导地位; 伴随着温度的增加, 数据点逐步从空气 $^{40}\text{Ar}$  端元向放射性成因 $^{40}\text{Ar}$  端元移动, 直至放射性成因 $^{40}\text{Ar}$  逐步占统治地位。由 2~4 和 5~18 阶段数据点分别构成了两条等时线, 对应的等时线年龄分别为  $427.6 \pm 10\text{Ma}$  (MSWD = 0.01,  $^{39}\text{Ar}$  约占 4%) 和  $425.1 \pm 2.6\text{Ma}$  (MSWD = 2.0,  $^{39}\text{Ar}$  约占 91%); 对应的截距值分别为  $435.2 \pm 6.1$  和  $705.3 \pm 13$  (图 3b), 显示了过剩氩的存在。

#### 3.2 斜长角闪岩角闪石

斜长角闪岩角闪石 09NQ43Amp 也进行了 19 个阶段激光加热分析, 以现代大气氩比值 295.5 扣除非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ , 同样构成的是单调递减的阶梯状年龄图谱 (图 4b 线①)。

表1 角闪石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar定年结果

Table 1 Amphibole <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating results

激光强度(W)	<sup>36</sup> Ar <sub>Air</sub>	<sup>37</sup> Ar <sub>Ca</sub>	<sup>38</sup> Ar <sub>Cl</sub>	<sup>39</sup> Ar <sub>K</sub>	<sup>40</sup> Ar*	Age(Ma ± 2σ)	<sup>40</sup> Ar* (%)	<sup>39</sup> Ar <sub>K</sub> (%)	K/Ca ± 2σ
角闪石 09NQ43Amp 激光阶段加热 J = 0.004977 柴北缘锡铁山 斜长角闪岩									
0.13	0.081	0.010	0.016	0.006	44.060	5142.6 ± 78.7	45.7	0.02	0.266 ± 7.566
0.20	0.163	0.263	0.034	0.098	98.588	2297.1 ± 13.8	51.1	0.25	0.159 ± 0.149
0.24	0.067	1.387	0.016	0.219	44.233	803.9 ± 6.3	55.7	0.56	0.068 ± 0.013
0.30	0.058	1.633	0.017	0.402	48.924	601.7 ± 11.8	65.2	1.03	0.106 ± 0.019
0.35	0.061	3.059	0.024	0.807	72.107	522.1 ± 1.9	75.3	2.07	0.113 ± 0.023
0.39	0.048	6.650	0.029	1.387	95.311	464.5 ± 4.0	85.6	3.56	0.089 ± 0.016
0.42	0.042	14.207	0.040	2.085	134.179	465.6 ± 3.4	91.5	5.34	0.063 ± 0.017
0.45	0.040	15.577	0.056	3.187	190.179	447.4 ± 1.4	94.4	8.18	0.088 ± 0.017
0.48	0.035	17.857	0.056	3.174	187.483	446.5 ± 2.1	95.1	8.14	0.076 ± 0.014
0.52	0.028	15.488	0.056	3.244	186.900	441.0 ± 1.4	96.2	8.32	0.09 ± 0.016
0.56	0.018	12.529	0.044	2.538	141.835	432.1 ± 1.4	97.0	6.51	0.087 ± 0.016
0.60	0.028	16.705	0.049	2.811	163.610	443.1 ± 1.6	95.7	7.21	0.072 ± 0.016
0.65	0.021	15.752	0.051	2.934	165.036	434.9 ± 1.4	97.0	7.53	0.08 ± 0.015
0.70	0.023	15.466	0.054	3.133	176.662	435.3 ± 1.5	96.9	8.04	0.087 ± 0.022
0.75	0.015	12.394	0.050	2.988	163.036	426.3 ± 1.8	97.9	7.67	0.103 ± 0.028
0.85	0.018	16.287	0.048	2.797	155.201	431.4 ± 1.7	97.5	7.17	0.074 ± 0.014
1.00	0.013	10.050	0.037	2.201	112.909	401.7 ± 1.8	97.4	5.65	0.094 ± 0.018
1.30	0.016	13.421	0.050	3.095	157.467	400.0 ± 1.8	97.7	7.94	0.099 ± 0.017
1.60	0.005	7.668	0.028	1.879	86.602	369.5 ± 1.0	98.8	4.82	0.105 ± 0.018
角闪石 09NQ44Amp 激光阶段加热 J = 0.00494991 柴北缘锡铁山 榴闪岩									
0.13	0.100	0.566	0.019	0.002	36.303	5974.3 ± 464.2	19.0	0.01	0.001 ± 0.001
0.20	0.151	0.661	0.036	0.065	69.154	1915.4 ± 40.4	35.5	0.39	0.042 ± 0.047
0.24	0.070	0.672	0.021	0.128	37.121	897.4 ± 20.2	44.7	0.78	0.082 ± 0.093
0.30	0.067	3.669	0.023	0.456	53.087	564.8 ± 12.3	63.4	2.78	0.053 ± 0.011
0.35	0.034	6.883	0.021	0.825	66.852	535.0 ± 2.4	85.6	5.02	0.051 ± 0.009
0.39	0.031	10.231	0.022	1.097	77.629	493.7 ± 4.9	89.3	6.68	0.046 ± 0.008
0.42	0.025	10.143	0.020	1.062	72.743	487.1 ± 6.0	90.8	6.46	0.045 ± 0.008
0.45	0.024	13.612	0.022	1.272	82.730	474.4 ± 2.1	92.7	7.73	0.04 ± 0.007
0.48	0.021	12.641	0.021	1.260	79.662	466.2 ± 4.2	93.6	7.66	0.043 ± 0.007
0.52	0.023	13.125	0.022	1.303	84.025	472.8 ± 1.8	93.2	7.92	0.042 ± 0.007
0.56	0.017	11.360	0.019	1.173	72.454	459.8 ± 2.0	94.3	7.14	0.044 ± 0.008
0.60	0.014	10.134	0.016	1.003	61.222	454.9 ± 2.2	94.3	6.10	0.042 ± 0.007
0.65	0.018	11.517	0.019	1.166	72.285	460.1 ± 2.5	94.0	7.09	0.043 ± 0.007
0.70	0.011	8.841	0.016	0.964	57.649	451.1 ± 2.4	95.3	5.86	0.047 ± 0.008
0.75	0.006	6.511	0.012	0.721	41.187	440.1 ± 4.4	97.1	4.39	0.047 ± 0.009
0.85	0.013	8.685	0.015	0.872	53.778	457.9 ± 4.6	94.0	5.30	0.043 ± 0.007
1.00	0.009	8.681	0.013	0.830	48.644	444.9 ± 4.3	95.7	5.05	0.041 ± 0.007
1.30	0.014	13.398	0.023	1.409	81.888	443.2 ± 3.2	96.2	8.58	0.045 ± 0.008
1.60	0.008	6.256	0.012	0.830	40.852	378.3 ± 1.5	95.3	5.06	0.057 ± 0.010

注: 氩同位素单位为伏(V)

低温阶段的表现年龄高达 5143Ma, 样品完全熔融时表现年龄则下降到 370Ma(表 1)。在反等时线图上, 由 3~6 和 7~16 阶段数据点分别构成了两条等时线, 对应的等时线年龄分别为 418.9 ± 2.9Ma (MSWD = 0.9, <sup>39</sup>Ar 约占 7%) 和 418.1 ± 2.7Ma (MSWD = 2.0, <sup>39</sup>Ar 约占 74%), 等时线对应的截距值分别 493.7 ± 2.8 和 685.8 ± 34.3(图 4b), 也显示了过剩氩的存在。

由此可见 榴闪岩和斜长角闪岩的角闪石具有非常相似的年龄谱、等时线和 Ar 气释放特征。

#### 4 讨论

Heizler and Harrison(1988) 在对形成于不同地质环境下的角闪石、黑云母、白云母和钾长石的阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年研究中发现, 部分含过剩<sup>40</sup>Ar, 表现年龄图谱复杂且表面上看似无地质意义的样品, 通过等时线图解法可以有效的校正过剩<sup>40</sup>Ar, 从而获得相对平坦的年龄坪, 以及具有明确地质意

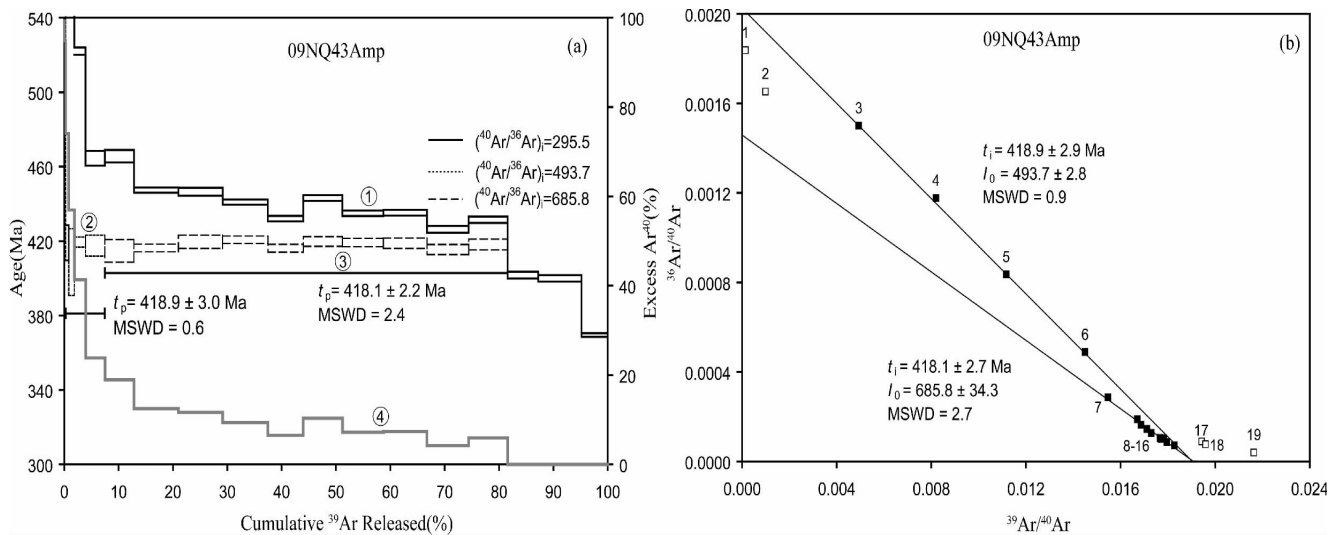


图4 斜长角闪岩之角闪石 09NQ43Amp 激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果

(a): 线①、线②和线③为年龄谱, 分别以 295.5、493.7 和 685.8 扣除非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ ; 线④为过剩 $^{40}\text{Ar}$  谱线。(b): 反等时线, 两条等时线分别由 3-6 和 7-16 阶段数据点构成

Fig. 4 Plots based on the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data of the amphibole 09NQ43Amp from amphibolite by laser stepwise heating

(a): The age spectra. Line ①, line ② and line ③ are obtained by excluding non-radiogenic  $^{40}\text{Ar}$  with 295.5, 493.7 and 685.8, respectively. Line ④ shows the excess  $^{40}\text{Ar}$  distributions. (b): The inverse isochron plot, two linear arrays are evident and defined by heating steps 3-6 and 7-16, respectively

义的坪年龄和等时年龄。

锡铁山榴闪岩和斜长角闪岩中的角闪石激光阶段加热实验分析都呈现出相同特征的单调递减年龄图谱, 未形成年龄坪(图 3a 线①、图 4a 线①)。若采用其两条等时线截距值分别扣除对应阶段的非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ , 两个角闪石均获得了平坦的年龄谱(如图 3a 线②和线③、图 4a 线②和线③), 榴闪岩和斜长角闪岩的角闪石坪年龄分别约为 425Ma 和 418Ma, 与它们的反等时线年龄几乎完全一致。就榴闪岩角闪石 09NQ44Amp 而言, 采用两条等时线的年龄作为真实年龄, 分段计算过剩 $^{40}\text{Ar}$  ( $^{40}\text{Ar}_E$ ) (不包括最后 1 个阶段), 并与角闪石原位的钾产生的放射性成因 $^{40}\text{Ar}$  ( $^{40}\text{Ar}_R$ ) 进行对比, 各个阶段 $^{40}\text{Ar}_E$  占 $^{40}\text{Ar}^*$  (即扣除空气氩 $^{40}\text{Ar}_A$  之后的 $^{40}\text{Ar}_R + ^{40}\text{Ar}_E$ ) 的百分数从 98.7% 逐渐降为 3.0% (图 3a 线④所示)。斜长角闪岩角闪石 09NQ43Amp 的情况也相同, 除最后 3 个阶段外, 其余阶段 $^{40}\text{Ar}_E$  含量从 98.4% 逐渐降为 2.3% (图 4a 线④所示)。可以看出, 正是由于过剩 $^{40}\text{Ar}$  的这种不均匀混入, 导致了角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  表观年龄偏老且形成单调下降的年龄谱。这一现象同时也表明了初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值对年龄的影响是非常敏感的, 简单基于表观年龄谱的形态来判断 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果有无地质意义是草率的, 采用等时线图解法, 有可能揭示出复杂表观年龄谱的真实年龄信息。

在反等时线图上, 两个角闪石激光阶段加热数据点均获得了等时年龄几乎一致、对应的初始氩比值却明显不同的两条等时线(图 3b、图 4b), 原因何在? 根据矿物的释气特征, 对比前人的研究结果 (Hanes *et al.*, 1985; Heizler and Harrison, 1988) 我们认为锡铁山退变质成因角闪石内部存

在两种热力学性质不同的源区, 其捕获的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  初始值显著不同, 在阶段加热实验过程中, 分别释放出来。低温加热阶段释放出来的气体可能主要赋存于沿微裂隙和次生包裹体中; 而中高温阶段释放的气体可能来自矿物晶格。

比较两条等时线, 不难发现两个角闪石另一个共同点: 低温等时线对应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  初始值低于高温等时线的比值。这两条等时线可能记录了锡铁山榴闪岩退变质历程中两个重要阶段: 在较深部时, 岩石处于相对较封闭的体系中, 富含过剩 $^{40}\text{Ar}$ , 这时结晶的角闪石捕获了较高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值进入矿物晶格或微小的原生包裹体中; 随后岩石快速折返到浅部, 这时变质流体中可能有一定量的大气降水渗入, 使环境的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值降低, 这种浅部流体被深部结晶的角闪石捕获在微裂隙中形成次生和假原生包裹体。

值得一提的是: 09NQ44Amp 最后 1 个阶段和 09NQ43Amp 最后 3 个阶段之表观年龄都出现了较大幅度的下降, 明显小于其等时线年龄, 但其 K/Ca 比值却无显著变化 (表 1), 表明后期新生他种矿物 (如: 长石、云母等) 影响的可能性不大。这种现象出现在最高温阶段, 我们暂且无法解释, 有待进一步研究。

由于过剩 $^{40}\text{Ar}$  的存在, 以空气氩比值扣除非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$  而获得的角闪石的表观年龄而未能形成年龄坪。但是, 利用两条反等时线截距值, 对应地分段扣除非放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ , 则得到了较为平坦的年龄谱, 且坪年龄与等时线年龄一致, 由此得到榴闪岩角闪石的年龄为 425Ma, 斜长角闪岩角闪石年龄为 418Ma, 代表了锡铁山榴闪岩折返过程两个阶段退变质作用发生的时间。

## 5 结论

(1) 锡铁山榴辉岩和斜长角闪岩的角闪石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar阶段加热分析,均获得了两条等时线,其年龄值在实验误差范围内一致,但<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar初始值明显不同,表明角闪石存在热学性质不同的、捕获Ar同位素性质亦不同的两种源区,可能反映了榴辉岩折返退变质过程中的两个不同深度的地质环境。

(2) 榴辉岩和斜长角闪岩的角闪石都含有一定的过剩<sup>40</sup>Ar,可以通过等时线初始值进行校正,从而获得较平坦的年龄谱和有地质意义的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄。

(3) 榴辉岩和斜长角闪岩角闪石的年龄分别为425Ma和418Ma,代表了锡铁山榴辉岩折返过程两个阶段退变质作用发生的时间。

(4) 榴辉岩和斜长角闪岩角闪石各自的两条等时线年龄在实验误差范围内一致,但<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar初始值却明显不同,这一事实可能反映了锡铁山榴辉岩在425Ma和418Ma发生了快速折返。

**致谢** 本文研究工作得到了荷兰皇家文理科学院提供的中荷联合培养博士生计划(ISK/3523/PhD)和荷兰皇家文理科学院基金(06CDP002)的支持;在荷兰阿姆斯特丹自由大学实验和学习期间,得到了Roel van Elsas, Onno Postma, Arie Bikker和Wim van der Plas的大力帮助和指导,在此表示真诚的感谢。

## References

Chen DG, Deloule E, Cheng H *et al.* 2004. Multi-isotopic system geochronology of low temperature eclogite from Huangzhen, southern Dabie Terrain. *Science in China (Series D)*, 47(10): 931–942

Chen DL. 2007. Petrology, geochemistry and geochronology of the North Qaidam ultra-high pressure terrane, NW China. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 128–130 (in Chinese)

Giorgis D, Cosca M and Li SG. 2000. Distribution and significance of extraneous argon in UHP eclogite (Sulu terrain, China): Insight from in situ <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar UV-laser ablation analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 181(4): 605–615

Hacker BR and Wang QC. 1995. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China. *Tectonics*, 14(4): 994–1006

Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L *et al.* 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic–Early Jurassic tectonic unroofing. *J. Geophys. Res.*, 105(B6): 13339–13364

Hacker BR, Calvert A, Zhang RY *et al.* 2003. Ultrarapid exhumation of ultrahigh-pressure diamond-bearing metasedimentary rocks of the Kokchetav Massif, Kazakhstan? *Lithos*, 70(3–4): 61–75

Hanes JA, York D and Hall CM. 1985. An <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronological and electron microprobe investigation of an Archean pyroxenite and its bearing on ancient atmospheric compositions. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22(7): 947–958

Heizler MT and Harrison TM. 1988. Multiple trapped argon isotope

components revealed by <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isochron analysis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 1295–1303

Koppers AAP. 2002. ArArCALC—software for <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age calculations. *Computers & Geosciences*, 28(5): 605–619

Kuiper YD. 2002. The interpretation of inverse isochron diagrams in <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 499–506

Li SG, Wang SS, Chen YZ *et al.* 1994. Excess argon in phengite from eclogite: Evidence from dating of eclogite minerals by Sm–Nd, Rb–Sr and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar methods. *Chemical Geology*, 112(3–4): 343–350

Merrillue C and Turner G. 1966. Potassium–argon dating by activation with fast neutrons. *J. Geophys. Res.*, 71(11): 2852–2857

Meng FC, Zhang JX, Yang JS *et al.* 2003. Geochemical characteristics of eclogites in Xitieshan area, North Qaidam of northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 435–442 (in Chinese and with English abstract)

Onstott TC, Sisson VB and Turner DL. 1989. Initial argon in amphiboles from the Chugach Mountains, southern Alaska. *J. Geophys. Res.*, 94(B4): 4361–4372

Qiu HN and Wijbrans JR. 2006. Paleozoic ages and excess <sup>40</sup>Ar in garnets from the Bixiling eclogite in Dabieshan, China: New insights from <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating by stepwise crushing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(9): 2354–2370

Qiu HN and Wijbrans JR. 2008. The Paleozoic metamorphic history of the Central Orogenic Belt of China from <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of eclogite garnet fluid inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(3–4): 501–514

Roddick JC, Cliff RA and Rex DC. 1980. The evolution of excess argon in alpine biotites: A <sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 48(1): 185–208

Scailliet S, Feraud G, Balleve M *et al.* 1992. Mg/Fe and [(Mg, Fe) Si–Al<sub>2</sub>] compositional control on argon behaviour in high-pressure white micas: A <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar continuous laser-probe study from the Dora-Maira nappe of the internal western Alps, Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(7): 2851–2872

Sherlock S and Kelley S. 2002. Excess argon evolution in HP–LT rocks: A UVLAMP study of phengite and K-free minerals, NW Turkey. *Chemical Geology*, 182(2–4): 619–636

Song SG, Yang JS, Liou JG *et al.* 2003. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70(3–4): 195–211

Song SG, Zhang C, Li XH *et al.* 2011. HP/UHP metamorphic time of eclogite in the Xitieshan terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1191–1197 (in Chinese and with English abstract)

Wijbrans JR, Pringle MS, Koppers AAP *et al.* 1995. Argon geochronology of small samples using the Vulkan argon laserprobe. Amsterdam: Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 98(2): 185–218

Xu ZQ, Yang JS, Wu CL *et al.* 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2–3): 160–173

Yang JS, Xu ZQ, Song SG *et al.* 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences-Series IIA—Earth and Planetary Science*, 333(11): 719–724

Yang JS, Wu CL, Zhang JX *et al.* 2006. Protolith of eclogites in the north Qaidam and Altun UHP terrane, NW China: Earlier oceanic crust? *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2–3): 185–204

Zhang C, Zhang LF, van Roermund H *et al.* 2011. Petrology and SHRIMP U–Pb dating of Xitieshan eclogite, North Qaidam UHP metamorphic belt, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4): 752–767

Zhang C, van Roermund H, Zhang LF *et al.* 2012. A polyphase metamorphic evolution for the Xitieshan paragneiss of the north Qaidam UHP metamorphic belt, western China: In-situ EMP monazite- and U–Pb zircon SHRIMP dating. *Lithos*, 136–139: 27

- 45

- Zhang JX, Yang JS, Mattinson CG *et al.* 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84(1-2): 51-76
- Zhang JX, Yang JS, Meng FC *et al.* 2006. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam mountains, western China: New evidence for an early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2-3): 143-150
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC *et al.* 2008. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the north Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, western China: Evidence from zircon U-Pb geochronology. *Geological Society of America Bulletin*, 120(5-6): 732-749
- Zhang JX, Mattinson CG, Meng FC *et al.* 2009. U-Pb geochronology of

paragneisses and metabasite in the Xitieshan area, north Qaidam Mountains, western China: Constraints on the exhumation of HP/UHP metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3-4): 245-258

#### 附中文参考文献

- 陈丹玲. 2007. 柴北缘超高压变质地体的岩石学、地球化学和同位素年代学研究. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 128-130
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥等. 2003. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征. *岩石学报*, 19(3): 435-442
- 宋述光, 张聪, 李献华等. 2011. 柴北缘超高压带中锡铁山榴辉岩的变质时代. *岩石学报*, 27(4): 1191-1197