

# 柴北缘鱼卡多硅白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代学研究 及其外来<sup>40</sup>Ar 来源探讨

胡荣国<sup>1,2,3</sup>, 邱华宁<sup>1,\*</sup>, Jan WIJBRANS<sup>2</sup>, Fraukje BROUWER<sup>2</sup>, 王 敏<sup>1,3</sup>

1. 同位素地球化学国家重点实验室; 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640

2. Department of Petrology, VU University Amsterdam, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, Netherlands

3. 中国科学院大学, 北京 100049

HU Rongguo<sup>1,2,3</sup>, QIU Huaning<sup>1,\*</sup>, Jan WIJBRANS<sup>2</sup>, Fraukje BROUWER<sup>2</sup>, WANG Min<sup>1,3</sup>

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry; Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Department of Petrology, VU University Amsterdam, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam, Netherlands

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

HU Rongguo, QIU Huaning, WIJBRANS J, et al. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronological study and the genesis of extraneous <sup>40</sup>Ar in Yuka HP/UHP phengite, North Qaidam, NW China. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 216-227

**Abstract:** Six phengites from a restrict area in the Yuka terrane of the north Qaidam high/ultrahigh pressure (HP/UHP) metamorphic belt were dated using the <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar method by laser stepwise heating, in order to investigate their geochronological significances and decipher the genesis of extraneous <sup>40</sup>Ar in phengite. New <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age results show that the extraneous <sup>40</sup>Ar exists in UHP metamorphic rocks (eclogite and amphibolite) phengite but not in their country rocks (gneiss and schist) phengite. High-Si and Mg-rich phengites from eclogite and phengite-bearing amphibolite yield disturbed age spectra, anomalously old apparent ages and a large variation in total gas ages (708-534 Ma) and isochron ages (681-513 Ma), indicating the existence of heterogeneous extraneous <sup>40</sup>Ar. In contrast, relative low-Si and Fe-rich phengites from granitic gneiss and schist yield flat age spectra and geologically significant plateau ages (454.4 Ma and 418.0 Ma). The data points constituting the age plateaux yield isochrons with concordantly intercept ages of 456.2 ± 2.3 and 418.1 ± 2.2 Ma, corresponding to initial <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar ratios of 177.3 ± 151.2 and 287.1 ± 16.9, respectively, implying that there is no extraneous <sup>40</sup>Ar inside the minerals. The plateau age of 454.4 Ma recorded by phengite from granitic gneiss is interpreted as the age of cooling through its retention temperature for argon (ca. 400 °C), and responding to the time of the Yuka metamorphic rocks exhumed from upper-mantle depth to middle-lower crustal levels (ca. 10 km in depth) after deep subduction. In contrast, the plateau age of 418 Ma from the schist should correspond to a Later Silurian ductile shearing deformation event. Considering the protoliths characteristics of the eclogite and amphibolite, the extremely high *p-T* metamorphic condition and aqueous fluid shortage environment during eclogite formation, we would suggest that the extraneous <sup>40</sup>Ar\* (not produced by *in situ* radiogenic decay of <sup>40</sup>K) in phengites from Yuka is a locally derived component from the protolith rather than from a late infiltrating fluid.

**Key words:** extraneous <sup>40</sup>Ar; inherited <sup>40</sup>Ar; phengite; Yuka terrane; UHP metamorphic rock

收稿日期: 2012-12-27; 修回日期: 2013-03-19

基金项目: 荷兰皇家文理科学院基金项目(06CDP002); 中-荷联合培养博士生计划(ISK/3523/PhD)

作者简介: 胡荣国(1982—), 男, 博士研究生, 地球化学专业。E-mail: rongguo.hu@gmail.com

\* 通讯作者简介: 邱华宁, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 长期从事<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代学研究工作。E-mail: qiuhn@gig.ac.cn

**摘要:**采用激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术,选取柴北缘超高压变质带鱼卡地体超高压变质岩及其围岩的6个多硅白云母进行了Ar同位素分析,获得丰富年代学数据。榴辉岩和云母斜长角闪岩多硅白云母具有高Si、高Mg含量的特征,阶段加热给出复杂的表观年龄图谱,总气体年龄(708~534 Ma)和等时年龄(681~513 Ma)都明显老于区内榴辉岩锆石U-Pb年龄,暗示样品含大量外来 $^{40}\text{Ar}$ 。相比之下,围岩花岗质片麻岩和白云母石英片岩多硅白云母具有相对低Si高Fe的特征,阶段加热给出平坦的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱,对应坪年龄分别为454和418 Ma。构成年龄坪的数据点形成了线性关系良好的反等时线,并获得同坪年龄一致的等时年龄,能与区域地质年龄很好地吻合。坪年龄454 Ma解释为花岗质片麻岩冷却到约400℃时的时间,同时也代表了鱼卡变质岩在经历了深俯冲超高压变质作用后,从地幔折返抬升至中-上地壳深度的时限;片岩多硅白云母坪年龄418 Ma纪录的则是区内一次强韧性剪切事件发生的时代。考虑到榴辉岩和斜长角闪岩原岩为变基性玄武岩类,其主要含钾矿物角闪石的Ar封闭稳定性较高,同时在超高压变质过程中,它们处在一个相对封闭和缺乏流体活动的极端地质环境,所以认为鱼卡榴辉岩多硅白云母外来 $^{40}\text{Ar}$ 来自原岩而非后期渗入的流体,属于“继承” $^{40}\text{Ar}$ 的范畴。

**关键词:**外来 $^{40}\text{Ar}$ ;继承 $^{40}\text{Ar}$ ;多硅白云母;鱼卡地体;超高压变质岩

**中图分类号:**P597.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2014)01-0216-12

## 0 引言

白云母得益于其较高的钾含量以及良好的放射性成因Ar保存能力,长期以来都是K-Ar和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年的首选矿物之一。然而,越来越多的研究表明高压-超高压环境下形成的白云母普遍含有外来 $^{40}\text{Ar}$ <sup>[1-7]</sup>,从而导致在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年中形成形态复杂、难以解释,同时表观年龄相对其他同位素年代学方法偏老的年龄图谱。对于这些形成于高压-超高压环境下白云母中的外来 $^{40}\text{Ar}$ 之来源,及其在矿物中的赋存机制,目前还存在较大的争议。有部分学者认为,在高压-超高压变质条件下,由 $^{40}\text{K}$ 就地衰变而形成的放射性成因 $^{40}\text{Ar}$ 会脱离原来赋存的矿物晶体结构,呈游离状态,并在高温-高压或低温-高压条件下随流体扩散进入后形成的白云母的晶格缺陷或二八面体大阳离子层的空位中,持外来 $^{40}\text{Ar}$ 外部来源,属于“过剩” $^{40}\text{Ar}$ 范畴的观点<sup>[7-12]</sup>。而另有学者则通过对比激光微区探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果和矿物电子探针成分及矿物显微结构之间的关系,发现在流体缺乏、且体系相对封闭的高压-超高压环境下,由原岩残余含钾矿物中 $^{40}\text{K}$ 衰变所形成的 $^{40}\text{Ar}$ 只能进行十分有限的扩散,绝大部分会被后生成的高钾矿物所继承,并有可能在白云母内部形成年龄梯度,所以更偏向于持高压白云母中的外来 $^{40}\text{Ar}$ 来源于原岩内部,属于“继承” $^{40}\text{Ar}$ 范畴的观点<sup>[6,13-15]</sup>。此外,也有研究提出白云母Na/(Na+K)和Mg/Fe值大小与多硅白云母是否含有外来 $^{40}\text{Ar}$ 以及外来 $^{40}\text{Ar}$ 含量高低具有一定的相关性<sup>[1-5]</sup>。

结合鱼卡地区已有的岩石地球化学和同位素年代学研究成果,以及本次研究获得的榴辉岩、云母斜长角闪岩及其围岩白云母石英片岩和花岗质片麻岩多硅白云母电子探针成分分析和Ar/Ar同位素分析结果,本文将从外来 $^{40}\text{Ar}$ 在不同类型超高压变质岩中的分布规律性、外来 $^{40}\text{Ar}$ 的可能来源、外来 $^{40}\text{Ar}$ 与其化学成分的相关性以及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果所代表的地质意义这4个方面进行研究和讨论。

## 1 地质背景及样品描述

柴北缘超高压变质带位于柴达木盆地北侧,祁连地块和柴达木地块之间,从东向西依次为都兰榴辉岩、锡铁山榴辉岩、绿梁山石榴石橄榄岩和鱼卡榴辉岩地块,绵延长达400 km(图1a)。鱼卡榴辉岩地体位于海西州大柴旦镇西北约40 km处,沿鱼卡河两岸出露,是柴北缘古生代超高压变质带重要组成部分。榴辉岩、榴闪岩和斜长角闪岩等呈大小不等的透镜状赋存于片岩、片麻岩中,透镜体长轴多与围岩片理-片麻理方向一致。对于这些高压-超高压变质岩及其围岩,前人从岩石学、矿物学、地球化学和同位素年代学等方面已经进行过较为详细的研究<sup>[16-27]</sup>。就年代学工作而言,目前针对鱼卡地体中的超高压变质岩榴辉岩相峰期变质作用的时间仍存在分歧。已完成的榴辉岩锆石U-Pb TIMS法和LA-ICP-MS法定年结果分别为488~495 Ma<sup>[28]</sup>和约431 Ma<sup>[29]</sup>,差异明显。白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果分为两种情况。Zhang等获得466 Ma的榴辉岩多硅白云母和477 Ma的片麻岩白云母等时年龄,

等时线截距值暗示前者基本不含过剩<sup>40</sup>Ar 而后者含<sup>[28]</sup>。Menold 则发现鱼卡地区榴辉岩多硅白云母皆含外来<sup>40</sup>Ar,其<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 表观年龄高达 734~608 Ma;片麻岩多硅白云母的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果则显示出分带性:离榴辉岩透镜体 1 m 内和 5 m 外的样品年龄分别为 454 Ma 和 461 Ma,而 1~5 m 这个范围内样品表观年龄则高达 610~824 Ma<sup>[30]</sup>。本次研究样品都来自大柴旦鱼卡河北岸(图 1b),各定年样品主要特征如下。

样品 09NQ08MS(94°52'31" E, 37°59'50" N)、09NQ20MS(94°55'51.1" E, 38°00'5.8" N)和 09NQ23MS

(94°55'59.6" E, 38°70'9.7" N)皆为弱角闪石化榴辉岩,浅绿色,块状构造,粒状变晶结构。主要由石榴石、绿辉石、绿帘石、角闪石、白云母和石英组成,副矿物以锆石、榍石和磷灰石为主。石榴石呈自形、半自形变斑晶,粒径为 1~6 mm,内含细粒石英、绿辉石和角闪石矿物包体。绿辉石为它形、半自形短柱状,粒径约 0.5~1.5 mm。白云母为半自形鳞片状。

09NQ32MS 为云母斜长角闪岩(94°55'51.1" E, 38°00'5.8" N),野外多包裹有榴辉岩透镜体,但二者接触界限清晰(图 2b),暗示其并非榴辉岩退变质产物。样品为鳞片粒状变晶结构,块状构造。主要由

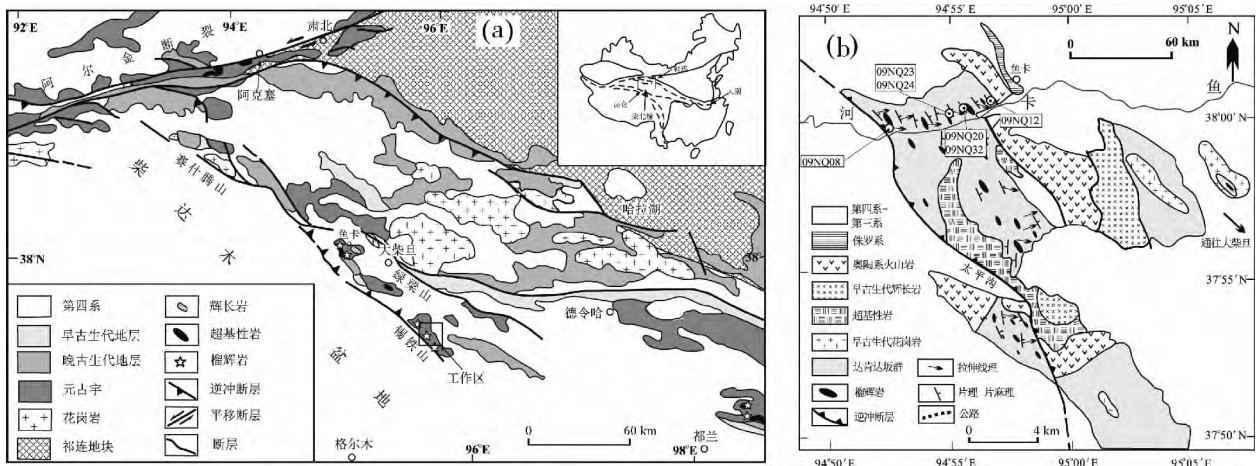


图 1 柴北缘高压-超高压变质带区域地质简图(a)和鱼卡榴辉岩地体地质简图及采样点示意图(b) (据文献[28]修改)

Fig.1 Geological sketch map of the northern Qaidam HP-UHP metamorphic belt (a), and distribution of eclogites in the Yuka terrane and sample locations (b)

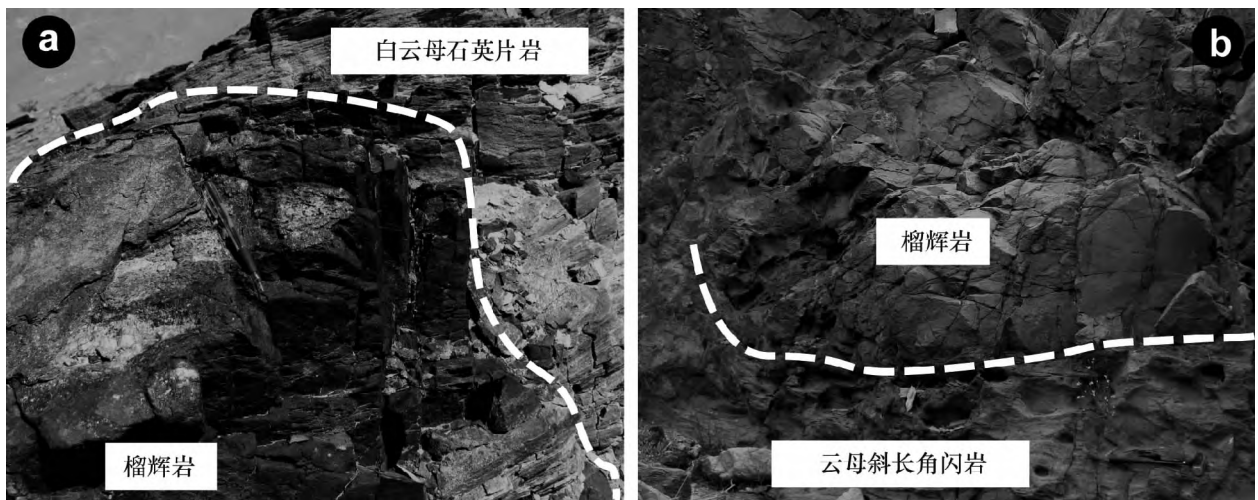


图 2 鱼卡超高压地体中榴辉岩和白云母石英片岩的野外关系,白云母石英片岩发生强烈变形,片理极其发育(a);榴辉岩和云母斜长角闪岩野外关系,榴辉岩包裹在云母斜长角闪岩中,二者接触界限清晰(b)

Fig.2 Field views showing occurrence and relationship of the eclogite and its host rock muscovite-quartz schist, schist with strongly foliation and deformation (a); the eclogite lens and their wall rock muscovite-amphibolite (b), Yuka terrane

斜长石、角闪石、白云母、石英、黑云母、石榴石以及黝帘石组成,副矿物主要为少量金红石、锆石及磷灰石。白云母呈鳞片状,断续定向排列。石英呈它形粒状,被拉伸变形,同白云母一同定向排列。角闪石呈碎斑状结构,包含白云母、石英等子矿物包体。

09NQ12MS 为白云母石英片岩(94°57'38"E, 38°00'38"N),是榴辉岩和榴闪岩的直接围岩,片理极其发育(图 2a)。主要由石英和白云母组成。石英为不规则的它形粒状,粒径范围为 0.1~1.5 mm。白云母粒径为 0.1~1.8 mm,以长条鳞片状和拉长的石英呈定向分布。09NQ24MS 为花岗质片麻岩(94°55'59.6"E,387°0'9.7"N),块状构造,花岗结构。主要由石英、钾长石、斜长石和白云母组成,副矿物包括有锆石和磷灰石。石英呈不等轴粒状,粒径为 0.1~0.6 mm。钾长石和斜长石呈半自形板状,粒径 0.5~4.0 mm,部分可观察到卡斯巴双晶和聚片双晶。白云母呈细粒鳞片状,弱定向排列。

6 件样品中的白云母在荷兰阿姆斯特丹自由大学地球和生命科学学院岩石系的 JEOL JXA-8800M 上进行了电子探针分析。利用多硅白云母 Al 阳离子数对 Si 阳离子数进行投图,结果显示白云母 Si 含量呈现出由片岩→片麻岩→斜长角闪岩→榴辉岩依次递增的趋势,变化范围为 3.10~3.57 p. f. u(图 3),都属于多硅白云母。

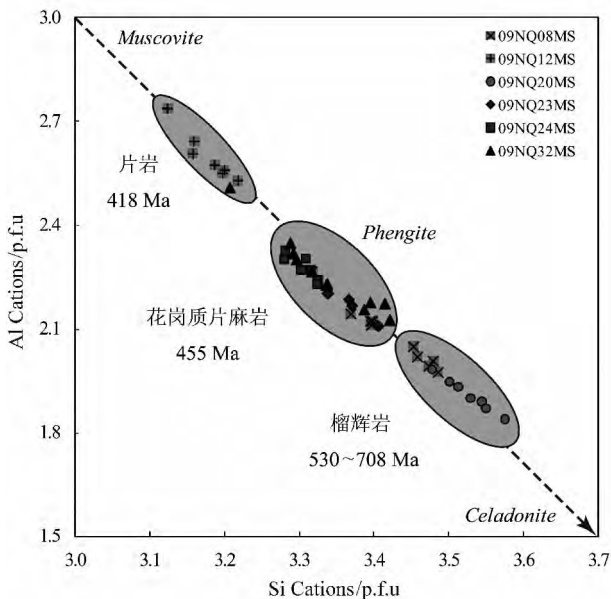


图 3 鱼卡多硅白云母 Al 阳离子数对 Si 阳离子数投图  
Fig. 3 Compositional variation of phengite in schist, granitic gneiss, amphibolite and eclogite from Yuka terrane  
以 11 个 O 为计算方式。

## 2 实验技术

多硅白云母单矿物分选工作完成于荷兰阿姆斯特丹自由大学选矿实验室。样品用液压机及颚式破碎机破碎,过筛后,选取粒径在 250~500 μm 的矿物,利用震动板对云母进行筛选。最后,所有样品在双目镜下手选出未见矿物连晶和明显蚀变的样品,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 1 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个样品的  $J$  值。4 件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 20 h,中子活化编号为 VU83,中子通量监测标准样品为 DRA-1 透长石,其年龄为 25.26 Ma<sup>[31]</sup>,干扰同位素校正因子为多次测量的平均值,分别为  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 6.73 \times 10^{-4}$ ,  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.64 \times 10^{-4}$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 8.60 \times 10^{-4}$ 。2 件样品送至中国原子能科学研究院 49-2 游泳池反应堆中用快中子照射 50 h,活化编号为 GZ17,中子通量监测标准样品为北京房山花岗闪长岩黑云母 ZBH-2506(其年龄为 132.5 Ma),干扰 Ar 同位素校正因子分别为:  $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 8.984 \times 10^{-4}$ ,  $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.673 \times 10^{-4}$ ,  $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 5.97 \times 10^{-4}$ 。标样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出每个样品的  $J$  值。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测试工作分别在阿姆斯特丹自由大学岩石系  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素实验室 MAP 215-50 气体质谱和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 GVI 5400<sup>®</sup> 质谱计上完成,实验流程略有差别。Ar 同位素分析之前,整个系统都先使用加热带在 150 °C 下烘烤去气。在广州实验室,激光阶段加热释放出来的气体通过 2 个 SAES NP10<sup>®</sup> Zr-Al 吸气泵在室温条件下进行纯化,而后送入质谱计进行 Ar 同位素分析;而在阿姆斯特丹自由大学实验室,气体分别由一个 Fe-V-Zr 泵(250 °C)和一个 Zr-Al 泵(450 °C)纯化后再送入质谱计进行 Ar 同位素分析。每次实验以本底分析开始,在完成 4~6 个阶段后插做 1 个本底分析,用以准确扣除系统的本底。本底分析的实验流程与样品分析流程完全一致,但不发射激光,为冷本底。

### 3 实验结果

多硅白云母激光加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果采用 Koppers 博士编写的软件 ArArCALC V2.50 进行计

算和作图<sup>[32]</sup>。多硅白云母放射性<sup>40</sup>Ar\* 含量很高, 致使数据点在反等时线图解会上集中在 X 轴(<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar)端员, 不能很好地展示数据分布情况, 因此本文采用正等时线图解法讨论实验结果。样品阶段加热数据汇总于表 1 和表 2, 年龄误差以 2σ 给出。

表 1 鱼卡片岩、片麻岩、斜长角闪岩和榴辉岩多硅白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果

Table 1 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating results for phengites from Yuka schist, gneiss, amphibolite and eclogite

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(±2σ)/Ma	<sup>40</sup> Ar*/%	<sup>39</sup> Ar <sub>K</sub> /%
白云母 09NQ12MS 激光阶段加热 J=0.005 232 79 柴北缘鱼卡 白云母片岩								
0.10*	0.006	0.001	0.000	0.274	13.662	418.2±1.1	88.34	1.40
0.14*	0.010	0.003	0.000	1.885	94.180	419.0±1.2	97.06	9.63
0.18*	0.011	0.004	0.000	4.193	209.604	419.2±1.7	98.49	21.41
0.20*	0.004	0.004	0.000	4.876	243.605	419.0±1.8	99.51	24.90
0.22*	0.002	0.004	0.000	3.839	191.849	419.1±1.3	99.62	19.61
0.25*	0.001	0.001	0.000	2.078	103.838	419.0±1.4	99.68	10.62
0.27*	0.001	0.001	0.000	0.565	28.182	418.3±1.8	99.33	2.89
0.28*	0.001	0.003	0.000	0.219	10.811	413.8±3.0	98.30	1.12
0.29*	0.000	0.000	0.000	0.133	6.618	418.3±6.3	98.62	0.68
0.30*	0.000	0.000	0.000	0.099	4.940	417.7±5.8	99.05	0.51
0.31*	0.000	0.001	0.000	0.113	5.590	415.5±1.8	98.43	0.58
0.33*	0.000	0.000	0.000	0.109	5.443	418.3±5.7	99.44	0.56
0.38*	0.000	0.000	0.000	0.162	8.078	417.3±1.8	99.11	0.83
0.45*	0.001	0.001	0.000	0.454	22.657	418.3±1.5	99.06	2.32
0.50*	0.000	0.001	0.000	0.390	19.340	416.5±1.3	99.48	1.99
0.51*	0.000	0.000	0.000	0.189	9.412	417.6±4.4	99.15	0.97
白云母 09NQ20MS 激光阶段加热 J=0.005 201 5 柴北缘鱼卡 榴辉岩								
0.10*	0.001	0.000	0.000	0.057	4.960	670.4±5.6	93.08	0.19
0.14*	0.006	0.000	0.000	0.284	27.920	744.4±2.9	94.30	0.94
0.18*	0.012	0.003	0.000	1.714	165.489	734.0±2.2	97.82	5.68
0.20*	0.008	0.003	0.000	2.866	255.271	686.9±2.2	99.13	9.50
0.22*	0.008	0.005	0.000	2.509	233.824	713.2±1.8	98.95	8.31
0.25*	0.006	0.000	0.000	3.713	353.251	725.3±1.5	99.52	12.30
0.27*	0.006	0.000	0.000	3.907	372.971	727.4±1.8	99.50	12.94
0.28*	0.004	0.001	0.000	2.602	238.743	703.9±2.9	99.52	8.62
0.29*	0.003	0.000	0.000	2.156	199.479	708.9±1.7	99.52	7.14
0.30*	0.003	0.000	0.000	2.438	217.100	686.6±1.5	99.55	8.08
0.31*	0.002	0.002	0.000	1.660	147.088	683.9±2.1	99.58	5.50
0.33*	0.002	0.000	0.000	1.538	137.517	688.9±2.0	99.56	5.10
0.38*	0.002	0.000	0.000	2.030	170.432	653.8±1.6	99.61	6.72
0.45*	0.003	0.001	0.000	1.800	171.976	727.9±1.3	99.51	5.96
0.50*	0.002	0.002	0.000	0.779	80.023	772.6±1.6	99.43	2.58
0.51*	0.000	0.001	0.000	0.129	13.745	796.5±2.8	99.42	0.43

(续表 1)

激光强度/W	$^{36}\text{Ar}_{\text{air}}$	$^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}$	$^{38}\text{Ar}_{\text{Cl}}$	$^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$	$^{40}\text{Ar}^*$	Age( $\pm 2\sigma$ )/Ma	$^{40}\text{Ar}^*/\%$	$^{39}\text{Ar}_{\text{K}}/\%$
白云母 09NQ24MS 激光阶段加热 $J=0.005$ 122 72 柴北缘鱼卡 花岗片麻岩								
0.14	0.004	0.000	0.000	0.261	13.331	418.7 $\pm$ 3.0	92.07	0.82
0.18	0.007	0.001	0.000	0.966	52.797	445.4 $\pm$ 1.7	95.99	3.05
0.20	0.005	0.000	0.000	1.689	93.456	450.2 $\pm$ 1.1	98.41	5.33
0.22*	0.006	0.001	0.000	2.191	122.861	455.5 $\pm$ 1.5	98.66	6.91
0.25*	0.009	0.000	0.000	3.656	204.334	454.2 $\pm$ 1.5	98.74	11.53
0.27*	0.005	0.005	0.000	4.749	266.235	455.5 $\pm$ 1.0	99.43	14.98
0.28*	0.002	0.004	0.000	3.899	217.826	454.0 $\pm$ 1.1	99.75	12.30
0.29*	0.001	0.000	0.000	2.517	140.642	454.1 $\pm$ 1.5	99.72	7.94
0.30*	0.001	0.001	0.000	1.582	88.452	454.4 $\pm$ 1.1	99.79	4.99
0.31*	0.001	0.002	0.000	1.265	70.661	454.0 $\pm$ 1.2	99.78	3.99
0.33*	0.001	0.001	0.000	1.253	70.089	454.4 $\pm$ 1.2	99.75	3.95
0.38*	0.001	0.001	0.000	1.367	76.580	455.1 $\pm$ 1.3	99.78	4.31
0.45*	0.001	0.001	0.000	2.811	157.891	456.2 $\pm$ 1.6	99.82	8.87
0.50*	0.001	0.002	0.000	2.265	127.104	455.8 $\pm$ 1.5	99.86	7.15
0.51*	0.000	0.000	0.000	1.229	69.176	457.0 $\pm$ 1.0	99.84	3.88
白云母 09NQ32MS 激光阶段加热 $J=0.005$ 102 13 柴北缘鱼卡 云母斜长角闪岩								
0.10*	0.004	0.000	0.000	0.122	7.957	516.7 $\pm$ 4.7	87.96	0.42
0.14*	0.007	0.001	0.000	0.848	54.629	512.7 $\pm$ 1.7	96.27	2.94
0.18*	0.005	0.000	0.000	1.500	99.004	523.7 $\pm$ 1.5	98.56	5.21
0.20*	0.009	0.000	0.000	3.382	233.788	545.1 $\pm$ 1.3	98.87	11.74
0.22*	0.008	0.000	0.000	4.449	312.626	552.7 $\pm$ 2.7	99.23	15.45
0.25*	0.005	0.004	0.000	3.281	221.835	534.7 $\pm$ 1.7	99.39	11.39
0.27*	0.003	0.004	0.000	2.199	146.785	528.8 $\pm$ 1.3	99.49	7.63
0.28*	0.001	0.000	0.000	1.784	112.973	505.2 $\pm$ 1.2	99.65	6.19
0.29*	0.001	0.000	0.000	1.486	96.309	515.5 $\pm$ 1.2	99.57	5.16
0.30*	0.001	0.000	0.000	0.895	59.366	526.1 $\pm$ 1.1	99.48	3.11
0.31*	0.001	0.000	0.000	1.194	79.888	530.0 $\pm$ 1.1	99.50	4.14
0.33*	0.002	0.000	0.000	1.840	124.596	535.5 $\pm$ 1.3	99.49	6.39
0.38*	0.004	0.000	0.000	2.543	171.469	533.4 $\pm$ 1.4	99.39	8.83
0.45*	0.003	0.000	0.000	2.210	152.264	543.4 $\pm$ 1.6	99.34	7.67
0.50*	0.001	0.000	0.000	1.076	71.798	528.5 $\pm$ 1.2	99.51	3.74
0.51*	0.004	0.000	0.000	0.122	7.957	516.7 $\pm$ 4.7	87.96	0.42

注:带\*数据为用于计算坪年龄或等时年龄的数据;Ar 同位素分析质谱型号为 MAP 215-50, Ar 同位素单位为伏(V)。

围岩多硅白云母 09NQ12MS 和 09NQ24MS 激光阶段加热分析都获得了较为平坦的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱,对应的坪年龄分别为(418.1 $\pm$ 2.2) Ma 和(456.2 $\pm$ 2.3) Ma(图 4a 和图 4c)。形成年龄谱的数据点在正等时线图解( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ )上

构成了相关性良好的等时线,对应的等时年龄分别为(418.1 $\pm$ 1.8) Ma 和(454.4 $\pm$ 2.1) Ma,相应的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值则分别为 287.1 $\pm$ 16.9 和 177.3 $\pm$ 151.2(图 4b 和图 4d),暗示样品不含外来 $^{40}\text{Ar}$ 。

表 2 鱼卡榴辉岩多硅白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果Table 2 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating results for phengites from Yuka eclogite

激光强度/%	<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(±2σ)/Ma	<sup>40</sup> Ar*/%	<sup>39</sup> Ar <sub>K</sub> /%
白云母 09NQ08MS 激光阶段加热 J=0.004 636 9 柴北缘鱼卡 榴辉岩								
4.5*	0.000 2	0.000 1	0.000 0	0.012 4	0.983 9	565.2±2.1	95.52	6.28
5.0*	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.031 5	2.453 9	556.3±1.9	98.39	15.95
5.5*	0.000 1	0.000 4	0.000 0	0.031 2	2.466 3	563.0±2.0	98.48	15.80
6.0*	0.000 1	0.000 5	0.000 0	0.028 4	2.208 9	554.8±1.9	98.75	14.40
6.5*	0.000 1	0.000 5	0.000 0	0.035 3	2.716 9	550.6±1.9	98.97	17.87
7.0*	0.000 1	0.000 6	0.000 0	0.031 6	2.511 4	565.6±2.0	98.98	16.01
7.5*	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.016 2	1.285 7	564.9±2.2	99.02	8.21
8.5*	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.009 5	0.744 1	560.2±2.7	99.25	4.80
10.0*	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.001 4	0.101 5	534.5±4.8	99.48	0.69
白云母 09NQ23MS 激光阶段加热 J=0.004 619 9 柴北缘鱼卡 榴辉岩								
4.5*	0.000 4	0.000 0	0.000 0	0.005 0	0.364 7	523.1±3.2	77.19	1.96
5.5*	0.000 4	0.000 0	0.000 0	0.023 8	1.833 8	548.6±2.0	94.52	9.33
6.0*	0.000 2	0.000 1	0.000 0	0.026 7	2.077 0	554.2±2.0	97.74	10.44
6.5*	0.000 2	0.000 3	0.000 0	0.036 2	2.892 8	567.1±2.3	98.14	14.16
6.8*	0.000 0	0.000 1	0.000 0	0.014 1	1.073 4	544.4±1.9	98.83	5.51
7.3*	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.009 7	0.769 5	560.9±2.0	98.29	3.81
8.0*	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.013 7	1.088 1	563.3±2.0	97.83	5.37
9.0*	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.019 7	1.557 6	562.7±2.0	98.36	7.69
10.0*	0.000 1	0.000 2	0.000 0	0.031 7	2.499 5	560.6±2.0	99.03	12.40
11.0*	0.000 1	0.000 4	0.000 0	0.027 4	2.007 8	525.4±1.9	98.43	10.74
12.0*	0.000 1	0.000 4	0.000 0	0.033 9	2.658 5	558.0±2.0	99.03	13.26
13.0*	0.000 0	0.000 2	0.000 0	0.013 7	1.088 0	564.8±2.0	98.84	5.35

注:带\*数据为用于计算坪年龄或等时年龄的数据;Ar 同位素分析质谱型号为 GVI 5400,Ar 同位素单位为伏(V)。

榴辉岩多硅白云母 09NQ08MS 形成相对平坦的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄谱,表观年龄变化范围 566~535 Ma,总气体年龄(558.9±4.9) Ma(图 5a)。在正等时线图解上,所有数据点构成一条相关性较好的等时线,对应的等时年龄(551.0±9.7) Ma,初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值 545.4±254.7,MSWD=46(图 5b)。09NQ20MS 表观年龄谱最为复杂,表观年龄变化范围较宽,从 797 Ma 至 654 Ma,总气体年龄为(708.3±3.0) Ma(图 5c)。在正等时线图上,所有数据点对应的等时年龄为 680.6±16.6 Ma,初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值为 697.2±453.5(图 5d)。09NQ23MS 和 09NQ32MS 表观年龄起伏相对较小,变化在 567~505 Ma。总气体年龄则分别为(554.6±4.8) Ma 和(534.1±2.4) Ma(图 5e 和图 5g)。所有数据点在正等时线图解上对

应的等时年龄分别为(558.1±9.4) Ma 和(513.4±9.3) Ma,初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值为 216.9±78.7 和 377.0±248.2(图 5f 和图 5h)。

## 4 讨论

### 4.1 多硅白云母外来<sup>40</sup>Ar 来源及其与矿物成分相关性

白云母 K-Ar 体系封闭温度在 400 °C 上下<sup>[33]</sup>,要远低于锆石 Pb 扩散封闭温度。因此理论上讲,从榴辉岩及其围岩中分选出的白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果小于代表榴辉岩峰期变质作用的锆石 U-Pb 年龄 495~488 Ma,就可认为是具有地质意义的,而大于该值的坪年龄或等时年龄则很可能是由

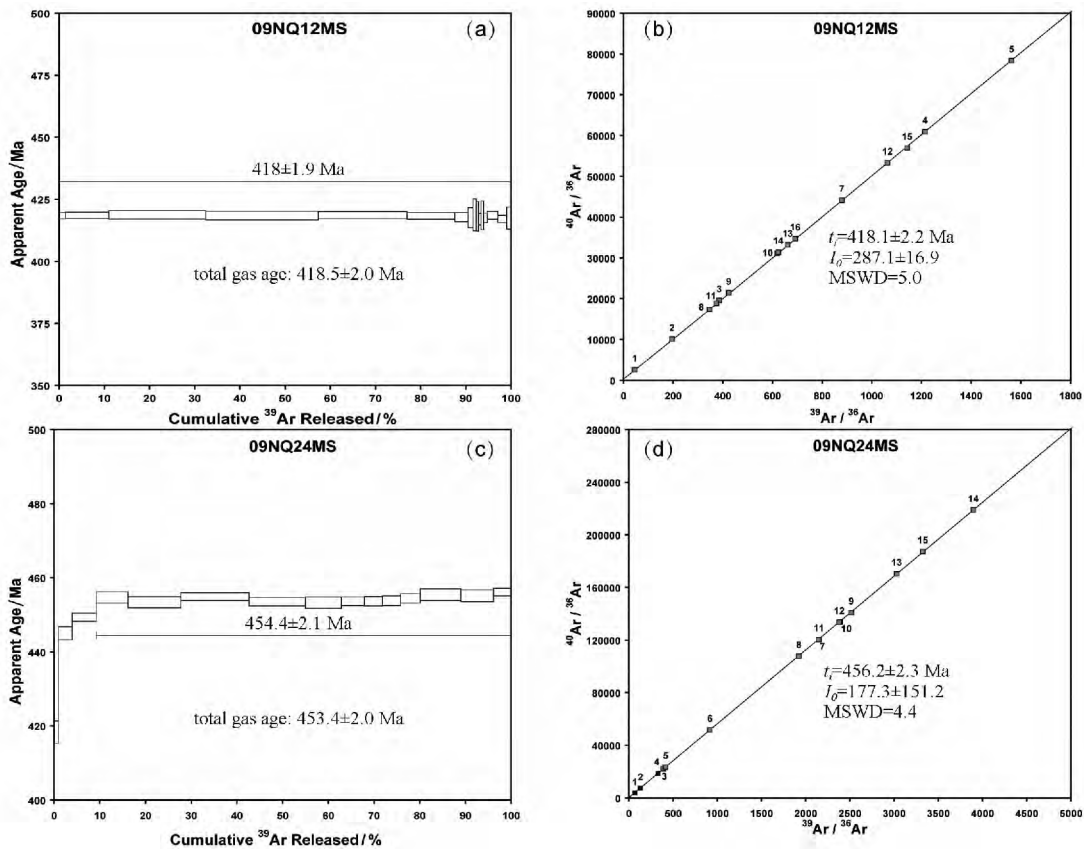


图4 鱼卡片岩、片麻岩多硅白云母激光阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄谱和正等时线

Fig. 4 Apparent age spectra and normal isochrons plot of schist and gneiss phengites from Yuka area by laser stepwise heating

于样品中含有外来<sup>40</sup>Ar 或其他因素所造成。

本次研究获得的榴辉岩和斜长角闪岩多硅白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 测年结果都远高于代表榴辉岩相峰期变质年龄的约 495 Ma 的表观年龄以及总气体年龄,暗示这类多硅白云母中毫无疑问地含外来<sup>40</sup>Ar。下面就多硅白云母中的外来<sup>40</sup>Ar 究竟是属于外部流体带入的过剩<sup>40</sup>Ar,还是原岩中未扩散出去的继承<sup>40</sup>Ar 进行探讨。

假使多硅白云母中的外来<sup>40</sup>Ar 属于“过剩”<sup>40</sup>Ar,即在高温高压条件下,游离态的<sup>40</sup>Ar 从介质扩散到多硅白云母中,赋存于多硅白云母二八面体大阳离子层的空位位置,那么作为榴辉岩和云母斜长角闪岩围岩的花岗质片麻岩在相同的环境下同样有机会通过流体摄入游离态的<sup>40</sup>Ar,从而导致赋存外来<sup>40</sup>Ar。但该类云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果却给出了平坦的年龄图谱,合理的坪年龄和一致等时年龄,以及在误差范围内同现代大气初始<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值一致的结果,从而否定了外来<sup>40</sup>Ar 在矿物中存在的可能性,间接表明榴辉岩和云母斜长角闪岩中多硅白

云母的外来<sup>40</sup>Ar 很可能并非由外部流体从围岩中带入,而是来源于原岩。类似的现象在苏鲁青龙山榴辉岩及其围岩的多硅白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 研究中也出现过<sup>[14,34]</sup>。

岩石学研究显示,鱼卡地体中的榴辉岩原岩包括洋脊玄武岩和洋岛玄武岩<sup>[35]</sup>;斜长角闪岩的原岩为拉斑玄武岩质岩石<sup>[36]</sup>。由这类基性-超基性岩经超高压变质作用形成的榴辉岩和斜长角闪岩其K<sub>2</sub>O 质量分数都相对较高,达 0.5%~1.25%,暗示其原岩 K 含量同样可观。在这种高 K<sub>2</sub>O 含量的原岩、相对封闭的同位素体系、并缺乏流体的超高压条件下,由这些玄武岩残余含钾矿物中<sup>40</sup>K 衰变所形成的<sup>40</sup>Ar<sub>E</sub> 在榴辉岩相变质过程中,只进行了十分有限的扩散,绝大部分被后生成的高钾矿物(如白云母、角闪石和钾长石等)所继承了下来,导致这些后期生成的退变质矿物含有大量的外来<sup>40</sup>Ar。这也很可能是白云母总气体年龄(708~534 Ma)会介于代表榴辉岩相峰期变质作用最老年龄(约 495 Ma<sup>[28]</sup>)和原岩年龄(750~790 Ma<sup>[18]</sup>)之间的一个主要原因。



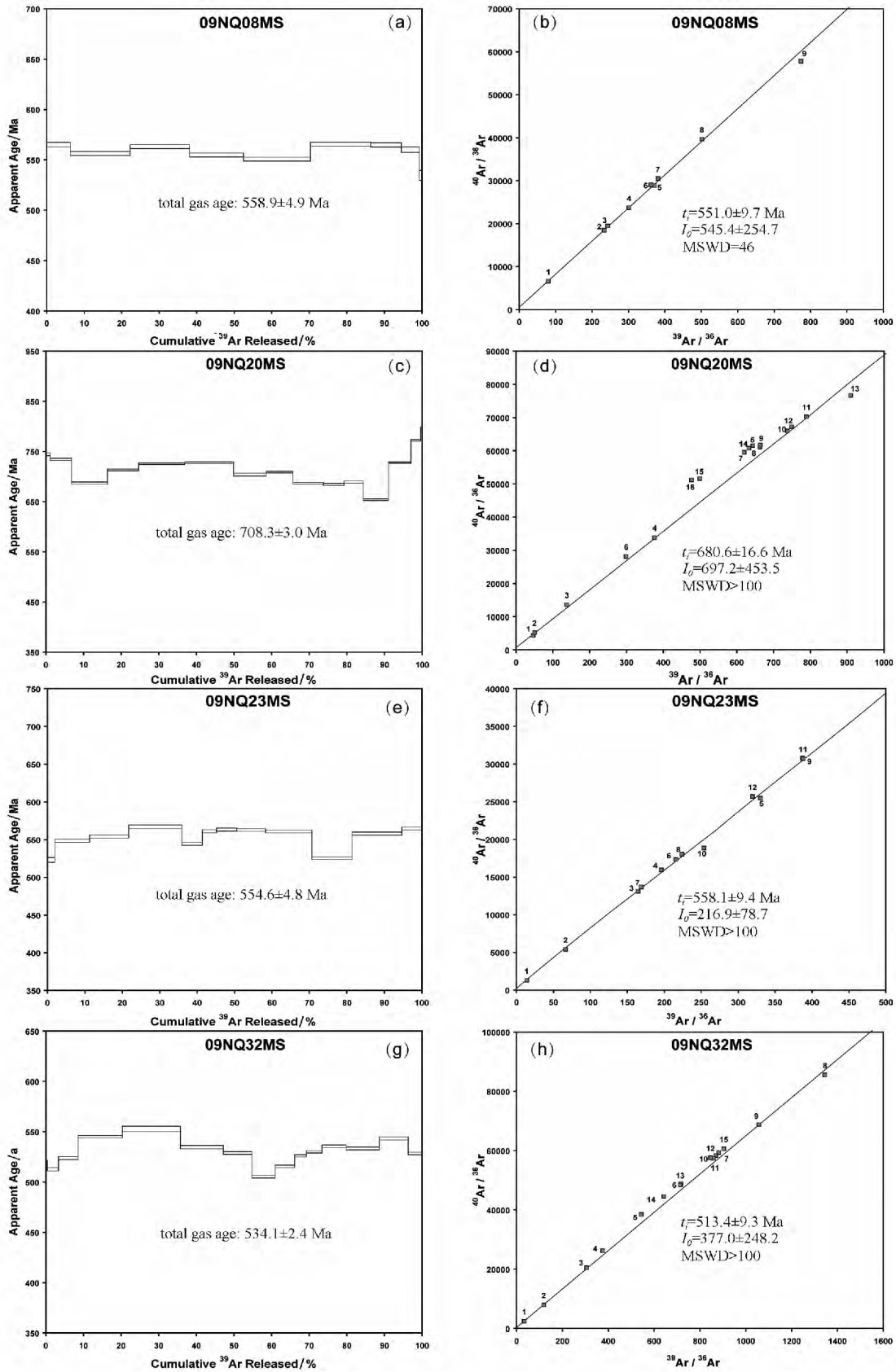


图 5 鱼卡榴辉岩和斜长角闪岩多硅白云母激光阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄谱和正等时线

Fig. 5 Apparent age spectra and normal isochrons plot of eclogite and amphibolite phengites from Yuka terrane by laser stepwise heating

结合电子探针成分分析和阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年结果,我们注意到外来 $^{40}\text{Ar}$  在多硅白云母中的含量与其化学成分显然具有一定的相关性(图6)。首先,我们观察到多硅白云母 Si 原子数与外来 $^{40}\text{Ar}$  含量具有正相关性。图3显示了鱼卡白云母 Si 含量呈现出由片岩→片麻岩→斜长角闪岩→榴辉岩依次递增的趋势。而在图6a和图6b中,我们又可以明显地观察到榴辉岩和斜长角闪岩的表观年龄要明显偏老(708~510 Ma),相应的 Si 原子数也高(3.28~3.57 p. f. u)。与之对应的围岩的总气体年龄则明显要年轻(455~418 Ma),Si 原子数也相对要低(3.10~3.32 p. f. u)。其次,我们还发现多硅白云母的 Mg/Fe 值与外来 $^{40}\text{Ar}$  含量也具有正相关性。通过图6b,我们可以清晰地观察到含外来 $^{40}\text{Ar}$  的榴辉岩和斜长角闪岩多硅白云母与不含外来 $^{40}\text{Ar}$  的围岩多硅白云母具有截然不同的 Mg/(Mg+Fe) 值。前者较高,Mg/(Mg+Fe) 值为 0.70~0.83;后者较低,比值变化在 0.36~0.49(图6b)。这一发现与 Scaillet 等对意大利西部的 Dora-Maira 推覆体中正片麻岩、富镁云母片岩和变泥质岩中高压多硅白云母的研究结果一致<sup>[5]</sup>。表明经历过高压-超高压变质作用的多硅白云母,其 Ar(包括外来 $^{40}\text{Ar}$ ) 的保存能力受到 Mg/Fe 值的控制可能具有普遍性。此外,还有研究学者指出白云母中外来 $^{40}\text{Ar}$  和 Na/(Na+K) 值大小也有相关性:当比值在 0.18~0.32 时,样品含外来 $^{40}\text{Ar}$ ,比值在 0.10~0.17 时,不含外来 $^{40}\text{Ar}$ <sup>[1]</sup>。

在我们的研究中,4 件含外来 $^{40}\text{Ar}$  和 2 件不含外来 $^{40}\text{Ar}$  多硅白云母 Na/(Na+K) 值分别为 0.03~0.09 和 0.03~0.13(图6a),并没有展示出类似的规律性。因此对于鱼卡地区多硅白云母外来 $^{40}\text{Ar}$  和 Na/(Na+K) 值是否具有相关性还需要更深入的研究。

#### 4.2 多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果地质意义

本次研究中的 4 件榴辉岩多硅白云母样 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  测年得到的是复杂的释气图谱以及偏老的表观年龄和总气体年龄。其中总气体年龄可以分为两组:708 Ma 和 559~534 Ma。李曙光等<sup>[37]</sup> 通过对我国大别造山带内超高压变质岩及其围岩多硅白云母进行系统的年代学研究后指出,由于榴辉岩的原岩为玄武质岩石,其主要含 K 矿物角闪石所积累的放射性成因 $^{40}\text{Ar}^*$  要在高于其封闭温度 500 °C 时才会开始释放。在前面我们已经探讨过,形成于退变质阶段的这些榴辉岩或斜长角闪岩多硅白云母能够将绝大部分的这些外来 $^{40}\text{Ar}$  继承下来。因此多硅白云母 559~534 Ma 这组总气体年龄很可能记录的是榴辉岩或斜长角闪岩的原岩俯冲至中-下地壳深度,变质温度开始高于 500 °C 的时间。这一结果暗示柴北缘地区拖拽陆壳俯冲的洋壳最早开始俯冲时间不会晚于 559 Ma。这与佐证柴北缘在早古生代发生过洋壳向陆壳俯冲作用的岛弧火山岩锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 年龄(514±8.5) Ma 在时序上是相符的<sup>[38]</sup>。对于 708 Ma 这组总气体年龄我们暂时无法

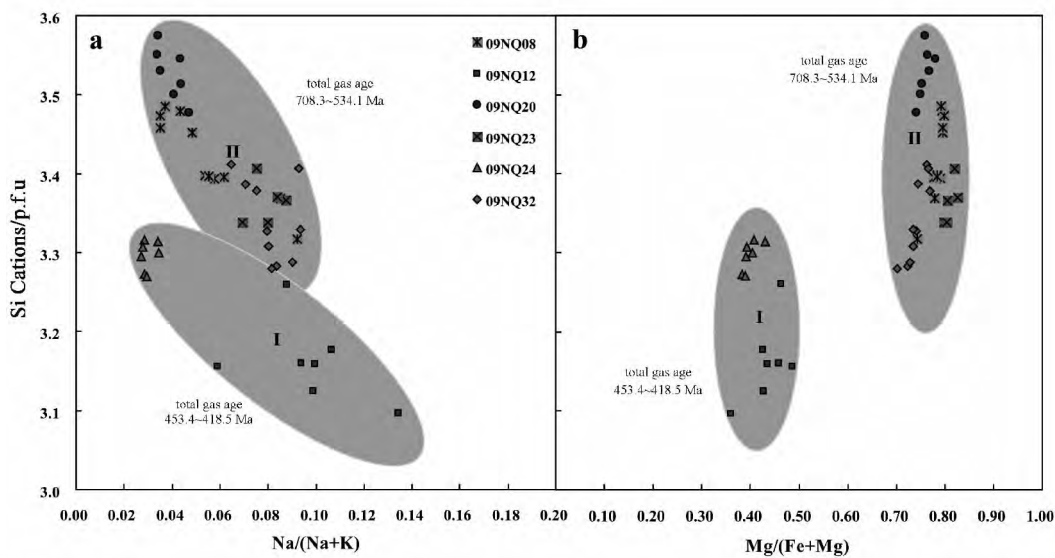


图6 超高压变质岩及其围岩多硅白云母 Si-[Na/(Na+K)], Si-[Mg/(Fe+Mg)] 化学成分图  
Fig. 6 Si-[Na/(Na+K)] and Si-[Mg/(Fe+Mg)] diagrams showing the main variations in phengite composition

做出明确论断, 该年龄可能接近榴辉岩原岩形成时代, 而或无任何地质意义。

在野外采样中我们发现围岩白云母石英片岩的片理极其发育, 在镜下也可观察到多颗小颗粒石英组合呈一个大石英的现象, 表明石英在结晶过程中受到过挤压应力的作用。因此, 我们认为白云母石英片岩在抬升至中-上地壳的位置后遭受了一期强韧性剪切变形作用的叠加, 而这期剪切变形事件很可能就是张建新等<sup>[23]</sup>提到的鱼卡地区中第三期与折返有关的后榴辉岩相从 SW 向 NE 的正滑剪切运动。因此其等时年龄( $418.3 \pm 1.9$ ) Ma 纪录的是这期韧性剪切事件或与折返有关的后榴辉岩相变质变形构造事件发生的时代。相比之下, 花岗质片麻岩则未显示出明显变形作用叠加的痕迹, 花岗结构保持完好。暗示发生在 418 Ma 左右的这期韧性剪切事件未能将花岗片麻岩多硅白云母 K-Ar 同位素封闭体系完全重置, 但还是导致了其在此期间发生了部分氩丢失的情况, 其冷却至约 400 °C 的时间是 ( $454.4 \pm 2.1$ ) Ma。该年龄也代表了鱼卡变质岩在经历深俯冲超高压变质作用后从上地幔位置折返抬升至中-上地壳深度(估计在 10 km 深左右)的时间。

## 5 结论

(1) 鱼卡多硅白云母阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年结果显示外来<sup>40</sup>Ar 在高压/超高压变质岩的分布具有不均一性: 榴辉岩和斜长角闪岩多硅白云母含大量外来<sup>40</sup>Ar, 围岩片岩和片麻岩多硅白云母不含<sup>40</sup>Ar。

(2) 综合考虑榴辉岩和斜长角闪岩的原岩岩性特征, 以及外来<sup>40</sup>Ar 仅出现在超高压变质多硅白云母中, 围岩多硅白云母却不含外来<sup>40</sup>Ar 这一明显的反差, 我们认为外来<sup>40</sup>Ar 并非来自围岩或后期渗入的流体, 而是来源于原岩, 属于“继承”<sup>40</sup>Ar 的范畴。

(3) 外来<sup>40</sup>Ar 在多硅白云母中的含量与多硅白云母的化学成分具有相关性: 与 Si 原子数和 Mg/Fe 值都具有正相关性, 但同 Na/(Na+K) 值关系不明确。

(4) 花岗质片麻岩冷却到约 400 °C 的时间为 454 Ma, 该年龄也代表了鱼卡变质岩在深俯冲超高压变质作用后从上地幔折返抬升至中-上地壳深度的时代; 白云母石英片岩遭受区域性强韧性剪切事件叠加, 这期剪切事件发生的时间约在 418 Ma 左右。

野外采样过程中得到了杨启军教授的大力指导; 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, 在此一并致谢。

## 参考文献

- [1] Boundy T M, Hall C M, Li G, et al. Fine-scale isotopic heterogeneities and fluids in the deep crust: An <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar laser ablation and TEM study of muscovites from a granulite-eclogite transition zone[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(1/2): 223-242.
- [2] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B6): 13339-13364.
- [3] Hacker B R, Wang Q C. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China [J]. Tectonics, 1995, 14(4): 994-1006.
- [4] Li S G, Wang S S, Chen Y Z, et al. 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[J]. Chemical Geology, 1994, 112(3/4): 343-350.
- [5] Scaillet S, Feraud G, Balleuvre M, et al. 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[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(7): 2851-2872.
- [6] Sherlock S, Kelley S, Inger S, et al. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar and Rb-Sr geochronology of high-pressure metamorphism and exhumation history of the Tavsanli Zone, NW Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 137(1): 46-58.
- [7] Wang S S, Ge N J, Sang H Q, et al. Genesis of excess argon in phengite and significance of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age spectra for omphacite: A case study on UHP eclogite of South Dabie Terrain, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(15): 1345-1351.
- [8] Arnaud N O, Kelley S P. Evidence for excess argon during high pressure metamorphism in the dora maira massif (Western Alps, Italy), using an ultra-violet laser ablation microprobe <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar technique[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 121(1): 1-11.
- [9] Chen D G, Jia M M, Li B X, et al. Argon diffusion from biotite at high-temperature and high-pressure [J]. Science in China: Series D, 1995, 38(2): 221-227.
- [10] de Jong K, Feraud G, Ruffet G, et al. Excess argon incorporation in phengite of the Mulhacén Complex: Submicroscopic illitization and fluid ingress during late Miocene extension in the Betic Zone, south-eastern Spain[J]. Chemical Geology, 2001, 178: 159-195.

- [11] Ruffet G, Feaud G, Balere M, et al. Plateau ages and excess argon in phengites: An  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe study of Alpine micas (Sesia Zone, Western Alps, northern Italy) [J]. *Chemical Geology*, 1995, 121: 327-343.
- [12] Ruffet G, Gruau G, Ballèvre M, et al. Rb-Sr and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe dating of high-pressure phengites from the Sesia zone (Western Alps): Underscoring of excess argon and new age constraints on the high-pressure metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 1997, 141(1/2): 1-18.
- [13] Giorgis D, Cosca M, Li S G. Distribution and significance of extraneous argon in UHP eclogite (Sulu terrain, China): Insight from in situ  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  UV-laser ablation analysis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 181(4): 605-615.
- [14] 陈文, 李曙光, 张彦, 等. 苏鲁超高压变质带东海青龙山高压正片麻岩中白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. *地质论评*, 2003, 49(5): 537-543.
- [15] 邱华宁, Wijbrans J R. 超高压变质岩多硅白云母的外来 $^{40}\text{Ar}$ 探讨[J]. *地球化学*, 2007, 36(3): 237-246.
- [16] Menold C A, Manning C E, Yin A, et al. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of orthogneiss hosting ultrahigh-pressure eclogites in the North Qaidam metamorphic belt, Western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3/4): 273-284.
- [17] Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, et al. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21(6): 1287-1300.
- [18] 陈丹玲, 孙勇, 刘良, 等. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的超高压变质年龄: 锆石 LA-ICP-MS 微区定年 [J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(增刊): 279-287.
- [19] 陈丹玲, 孙勇, 刘良, 等. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的变质演化: 石榴石成分环带及矿物反应结构的证据 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1039-1048.
- [20] 李怀坤, 陆松年, 赵风清, 等. 柴达木盆地北缘鱼卡河含柯石英榴辉岩的确定及其意义 [J]. *现代地质*, 1999, 13(1): 43-50.
- [21] 张建新, 孟繁聪, Mattinson C G. 南阿尔金—柴北缘高压-超高压变质带研究进展、问题及挑战 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 526-545.
- [22] 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 柴北缘西段榴辉岩相的变质泥质岩: 榴辉岩与围岩“原地”关系的证据 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(9): 825-834.
- [23] 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 柴达木北缘鱼卡—落凤坡榴辉岩片麻岩单元的变质变形演化 [J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1468-1474.
- [24] 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 柴达木盆地北缘西段榴辉岩相变质泥质岩的确定及意义 [J]. *地质通报*, 2003, 22(9): 655-657.
- [25] 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 柴北缘鱼卡河榴辉岩围岩的变质时代及其地质意义 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 108-116.
- [26] 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 等. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 291-314.
- [27] Mattinson C G, Menold C A, Zang J X, et al. High- and ultrahigh-pressure metamorphism in the North Qaidam and South Altyn Terranes, western China [J]. *International Geology Review*, 2007, 49(11): 969-995.
- [28] Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints [J]. *Lithos*, 2005, 84(1/2): 51-76.
- [29] Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukaha HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3/4): 259-272.
- [30] Menold C A. Tectonic and Metamorphic Evolution of the North Qaidam Ultrahigh-Pressure Metamorphic Terrane, Western China [D]. Los Angeles: University of California, 2006: 261.
- [31] Wijbrans J R, Pringle M S, Koppers A A P, et al. Argon geochronology of small samples using the Vulkana argon laser probe [J]. *Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 1995, 98(2): 185-218.
- [32] Koppers A A P. ArArCALC-software for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age calculations [J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(5): 605-619.
- [33] Harrison T M, Celeier J, Aikman A, et al. Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in muscovite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(4): 1039-1051.
- [34] Li S G, Jagoutz E, Lo C H, et al. Sm/Nd, Rb/Sr, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu Belt, Central China: A retrospective view [J]. *International Geology Review*, 1999, 41(12): 1114-1124.
- [35] Yang J S, Wu C L, Zhang J X, et al. Protolith of eclogites in the north Qaidam and Altyn UHP terrane, NW China: Earlier oceanic crust [J]? *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28(2/3): 185-204.
- [36] 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 等. 柴北缘斜长角闪岩的地球化学特征及其构造背景 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1271-1282.
- [37] 李曙光, 侯振辉. 大陆俯冲过程中的流体 [J]. *地学前缘*, 2001, 8(3): 123-129.
- [38] 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩 [J]. *地质学报*, 2004, 78(1): 52-64.