1000-0569/2003/019(03)-0452-60　　*Acta Petrologica Sinica*　岩石学报

南天山榆树沟高压麻粒岩地体多期变质定年研究*

王润三[1]　周鼎武[1]　王焰[1]　王居里[1]　桑海清[2]　张任祜[2]

WANG RunSan[1], ZHOU DingWu[1], WANG Yan[1], WANG JuLi[1], SANG HaiQing[2] and ZHANG RenHu[2]

1. 西北大学大陆动力学教育部重点实验室,西北大学地质学系,西安　710069
2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京　100029
1. *The Key Laboratory of Northwest University Continental Dynamics, Ministry of Education, Department of Geology, Northwest University, Xi'an* 710069, *China*
2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

2002-06-12 收稿, 2003-01-08 改回.

Wang RS, Zhou DW, Wang Y, WANG JL, Sang HQ and Zhang RH. 2003. Geochronology for the multiple-stage metamorphism of high-pressure terrane of granulite facies from Yushugou area, south Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3):452 – 460

Abstract　A detailed investigation of mineralogy and petrology on amphiboles demonstrates that the granulite terrane of Yushugou underwent a four-stage metamorphism, *i. e.*, high-pressure granulite facies, medium-pressure granulite facies, amphibolite facies and greenschist facies. The sequence and the features of the metamorphism in each stage are concluded in the paper. The ^{40}Ar-^{39}Ar dating obtains a plateau age of 368.2 ± 4.8Ma and an isochron age of 360 ± 10Ma. The Sm-Nd mineral-rock isotopic dating gets an isochron age of 310 ± 5Ma by using Gra + Pl + Ilm + whole rock assemblage. Based on the dating results in this paper and literatures, the ^{40}Ar-^{39}Ar age is probably the peak-stage age of high-pressure granulite facies of Yushugou terrane while the Sm-Nd age is a retrograde age of medium-pressure granulite facies. The homogenization and block temperatures of isotopes in the multiple-stage metamorphism are also mentioned in the paper.

Key words　High-pressure granulite facies, Multiple-stage metamorphism, Isotopic dating, Isotopic homogenization, Block temperature

摘　要　通过详细的矿物学及岩石学研究,特别是对角闪石的系统研究,确定榆树沟麻粒岩地体至少经历过高压麻粒岩相、中压麻粒岩相、角闪岩相和绿片岩相四期变质作用的改造。总结了各期变质作用的期次和特点。在此基础上,采用^{40}Ar-^{39}Ar同位素定年获得368.2 ± 4.8Ma 坪年龄和360 ± 10Ma 等时线年龄。采用 Sm-Nd 同位素矿物等时线定年获得 Gra + Pl + Ilm + 全岩的等时线年龄为310 ± 5Ma。结合已发表的定年结果综合分析认为,前者可代表榆树沟地体峰期变质-高压麻粒岩相变质作用年龄;后者为峰期后经受中压麻粒岩相变质变形的叠加改造年龄。讨论了多期变质作用中同位素的均一化和封闭温度问题。

关键词　高压麻粒岩地体; 多期变质; 同位素定年; 同位素均一化; 封闭温度

中图法分类号　P597.3;P588.346

南天山榆树沟麻粒岩地体(出露面积约 18 km^2)是经历过高压、中压麻粒岩相等变质作用改造的蛇绿岩套(王润三等,1999a;王润三等,1999b; 董云鹏等, 2001)。锆石 U-Pb 定年表明,该蛇绿岩套形成年龄为 440 ± 18Ma(王润三等, 2000)。

由于该地体经历过多期变质作用的改造,为确定各期变质的年龄,笔者进行了 Sm-Nd 和 Rb-Sr 的内部矿物等时线和角闪石 Ar-Ar 的同位素定年研究,并对其地质意义进行了讨论。

* 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409801)和国家自然科学基金项目(编号:49972075,49472135)资助.
第一作者简介: 王润三,男,1936 年生,教授,岩石学和地球化学专业, E-mail: wrunsan@nwu.edu.cn

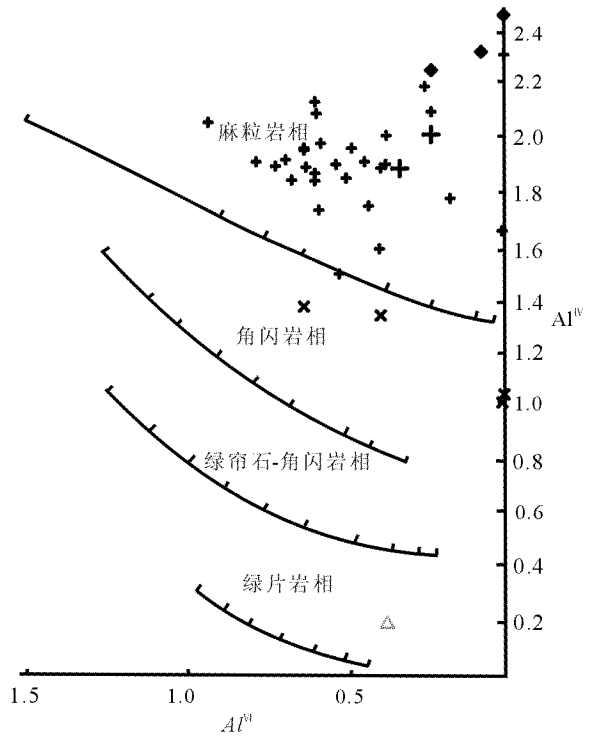


图 1 榆树沟高压麻粒岩地体中钙角闪石的 Al^{IV} - Al^{VI}变异图（据 B. Закруткин, 1968）

图例：× 镁铁闪石及浅闪石；◆ 钛角闪石；△ 阳起石； + Y-210 钙角闪石；+ 其它钙角闪石

Fig. 1 Al^{IV}-Al^{VI} variation of calci-amphiboles from high-pressure granulite terrane in Yushugou area (after B. Закруткин, 1968)

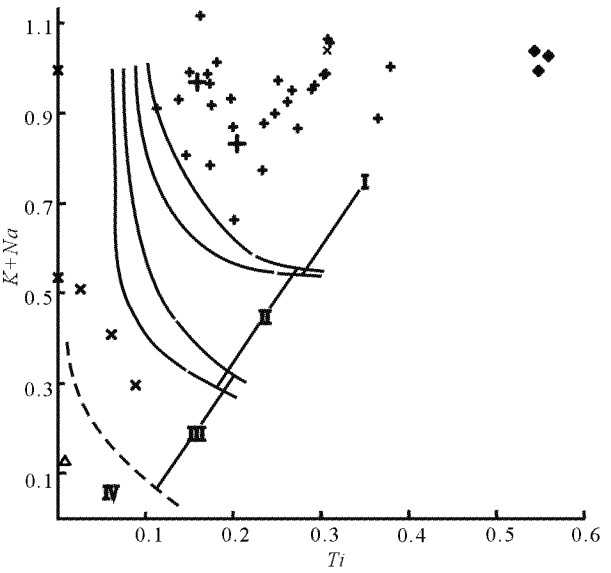


图 2 榆树沟高压麻粒岩地体中钙质角闪石的 Ti - (K + Na)变异图（据靳是琴，1991）

I-麻粒岩相；II-高角闪岩相；III-低角闪岩相；IV-绿片岩相。图例见图 1

Fig. 2 Ti - (K + Na) variation of calci-amphiboles from high-pressure granulite terrane in Yushugou area (after Jin, 1991)

1 榆树沟高压麻粒岩地体变质作用的期次和特点

通过岩石学和矿物学研究，确定榆树沟麻粒岩地体至少经历过高压麻粒岩相（王润三等，1999a）、中压麻粒岩相（王居里等，1999；王焰等，1999）、角闪岩相（王焰等，1999）和绿片岩相四期变质作用的改造。有关前三期变质作用的概况已在相关文献中进行过讨论。需要说明的是，过去我们曾将角闪石类矿物全部看作退变质作用的产物（王润三等，1999a；王焰等，1999），但据最近对该地体中的角闪石类矿物的进一步系统研究表明，该类矿物的存在情况要复杂得多。

1.1 榆树沟高压麻粒岩地体中的角闪石族矿物

角闪石族矿物比较广泛地分布于该地体不同单元的基性岩类岩石中。按照 1978 年 IMA 的角闪石分类原则，采用 1994 年林文蔚等提出的方法，对榆树沟麻粒岩地体不同单元中现有的 41 个角闪石电子探针分析数据进行了计算，其中绝大部分属钙质闪石亚族（见表 1），仅有一例为铝直闪石。

由于角闪石族矿物结晶化学的特殊性，其 T、C（M_I、M_{II}、M_{III}）、B（M_{IV}）和 A 等结构位可以容纳电荷 +1 ~ +4、离子半径 0.25 ~ 1.60Å 的几乎全部造岩元素阳离子，因而其化学成分变化很大，分布广泛，形成和稳定的温压区间宽阔，并且其化学成分随着变质温压条件的改变而变化，可以用来确定地体经历的多期变质作用的概况。按表 1 所列数据编的钙质角闪石变质相图解（图 1、2、3）表明，榆树沟高压麻粒岩地体中的钙质角闪石亚族矿物绝大部分属麻粒岩相（见于Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ单元无明显塑性变形的岩石中，以深褐色为特征），其中以韭闪石-绿钙闪石为主，少数为钙镁闪石-钙镁闪石质角闪石（见于Ⅲ、Ⅳ单元）和钛角闪石（仅见于Ⅱ单元）；地体中少数钙质角闪石亚族矿物属（低）角闪岩相（见于Ⅲ、Ⅳ单元），主要是镁角闪石和铁钙镁闪石（以淡蓝绿色为特征）以及 $(Na+K)_A = 0.51$ 的浅闪石；地体中个别钙质角闪石属绿片岩相（仅见于Ⅰ单元），为 $(Na+K)_A = 0$ 的阳起石。依据钙角闪石中 Al_2O_3 和 TiO_2 含量的半定量温压估算（图 4），麻粒岩相角闪石的温度在 700 ~ 900℃；压力介于 0.9 ~ 1.5 GPa，大体相当于高压麻粒岩相的温压范围。

1.2 高压麻粒岩相变质作用的特征

笔者先期对本区高压麻粒岩的研究基本未涉及角闪石，已发表的的研究成果曾将钙质角闪石当作退变质产物（王润三等，1999a）。最近对岩石薄片进行了全面详细复查，看来的确存在蓝绿色钙质角闪石取代单斜辉石的现象，但绝大多

表 1 榆树沟麻粒岩地体中钙角闪石类矿物部分数据

Table 1 Chemical composition of calci-amphiboles from high-pressure granulite terrane in Yushugou area

单元	Ⅰ		Ⅱ			Ⅲ				
种名	韭闪石	阳起石	钛闪石	钛闪石	钛闪石	钙镁闪石	钙镁闪石	镁角闪石	浅闪石	含铁韭闪石
编号	Y-159	Y-160	Y-125H	Y-125B	Y-83	Y-210B1	Y-210B2	Y-14-1	Y-14-2	Y-41B
TiO_2	2.38	0.11	4.92	4.88	5.10	1.86	1.57	0.80	0.22	1.44
Al_2O_3	13.24	3.39	14.28	13.67	14.49	12.81	13.50	6.11	5.70	11.16
$Al^{Ⅵ}$	0.393	0.355	0.000	0.07	0.228	0.325	0.216	0.000	0.007	0.007
$Al^{Ⅳ}$	1.893	0.216	2.471	2.335	2.266	1.893	2.030	1.058	1.016	1.661
Ti	0.262	0.012	0.543	0.548	0.560	0.205	0.167	0.088	0.025	0.163
K + Na	0.922	0.069	1.042	0.998	1.031	0.835	0.97	0.294	0.51	1.120

单元	Ⅲ									
种名	含镁绿钙闪石	含镁绿钙闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石
编号	Y-41J	Y-291-1	Y-291-2	Y-291-3	Y-291-4	Y-291-5	Y-294-1	Y-294-2	Y-294-3	Y-294-4
TiO_2	1.55	2.79	2.79	1.60	1.56	2.79	1.23	1.74	1.53	1.33
Al_2O_3	13.44	14.41	14.26	14.47	14.23	14.41	14.74	13.81	14.67	14.71
$Al^{Ⅵ}$	0.44	0.264	0.37	0.575	0.669	0.264	0.719	0.598	0.63	0.631
$Al^{Ⅳ}$	1.916	2.189	1.091	1.991	1.853	2.189	1.906	1.88	1.965	1.971
Ti	0.173	0.303	0.307	0.181	0.176	0.303	0.139	0.199	0.173	0.15
K + Na	0.785	0.981	1.043	1.017	0.918	0.981	0.93	0.872	0.968	0.993

单元	Ⅲ							Ⅳ		
种名	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	镁角闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	镁角闪石	含镁绿钙闪石	镁绿钙闪石	铁钙镁闪石
编号	Y-294-5	Y-294-6	Y-294-7	Y-294-8	Y-296-1	Y-296-2	Y-143	Y-152B	Y-152gB	Y-173
TiO_2	1.08	1.74	1.30	0.55	2.63	2.59	0.00	2.22	3.28	0.00
Al_2O_3	14.67	14.12	15.28	9.90	15.75	15.37	11.63	11.00	13.29	15.84
$Al^{Ⅵ}$	0.686	0.621	0.778	0.389	0.593	0.59	0.663	0.168	0.000	0.933
$Al^{Ⅳ}$	1.927	1.9	1.922	1.347	2.147	2.097	1.360	1.782	2.319	2.064
Ti	0.112	0.198	0.147	0.061	0.292	0.289	0.000	0.251	0.365	0.000
K + Na	0.912	0.936	0.81	0.41	0.962	0.958	0.538	0.973	0.891	0.999

单元	Ⅳ								接触带麻粒岩包体	
种名	韭闪石	镁绿钙闪石	钙镁闪石质角闪石	含铁韭闪石	含铁韭闪石	含镁绿钙闪石	含铁韭闪石	钙镁闪石质角闪石	钙镁闪石质角闪石	含铁韭闪石
编号	Y-175BB	Y-175BH	Y-175J	Y-224B1	Y-224B2	Y-224B3	Y-224J	Y-224JH	Y-229	Y-230G1
TiO_2	2.74	2.77	2.19	2.39	2.22	2.28	3.34	2.20	1.83	2.52
Al_2O_3	13.91	13.90	13.82	13.96	13.51	13.61	13.09	12.13	11.53	12.82
$Al^{Ⅵ}$	0.593	0.479	0.585	0.530	0.495	0.376	0.228	0.517	0.393	0.424
$Al^{Ⅳ}$	1.851	1.97	1.741	1.913	1.864	1.914	2.108	1.503	1.595	1.753
Ti	0.307	0.311	0.235	0.267	0.247	0.17	0.38	0.234	0.201	0.273
K + Na	1.068	1.059	0.878	0.954	0.901	0.99	1.006	0.774	0.665	0.866

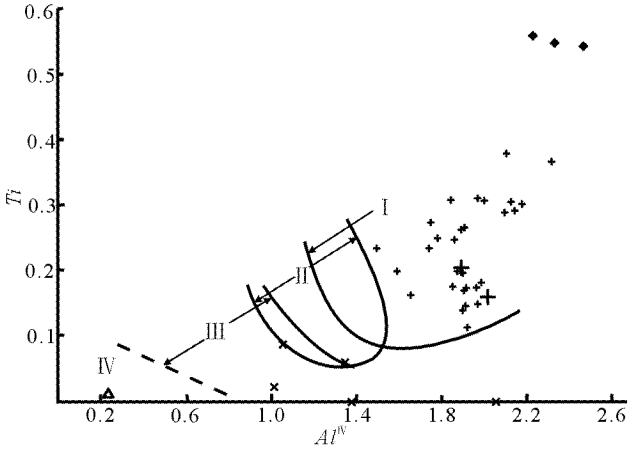


图 3　榆树沟高压麻粒岩地体中钙质角闪石的 Ti – Al^{IV} 变异图（据靳是琴，1991）

I-麻粒岩相；II-高角闪岩相；III-低角闪岩相；IV-绿片岩相。图例见图 1

Fig. 3　的 Ti – Al^{IV} variation of calci-amphiboles from high-pressure granulite terrane in Yushugou area (after Jin, 1991)

数深褐色钙质角闪石与高压麻粒岩相矿物间并不存在替代关系。榆树沟麻粒岩相地体中除存在典型的高压麻粒岩相矿物共生组合外（王润三等，1999a），还存在石榴石（Gar）＋单斜辉石（Cpx）＋斜长石（Pl）± 普通角闪石（Hb）± 石英（Qz）组合。基于基性成分的变质岩中水活度对矿物共生组合的影响，1994 年马军、王仁民曾利用 Berman（1988）的 PTx 计算程序进行了处理。其成果表明，当水活度不均匀时，可以在麻粒岩相岩石中形成角闪岩相岩石的夹层。在高压麻粒岩相温压范围内且温度偏低时，如果 H_2O 的活度高，并为有效惰性组分时，根据矿物相律，应可以形成石榴石＋单斜辉石＋斜长石＋（MgO 相对偏低的）普通角闪石 ± 石英组合。因而仅仅分布于弱应变域的深褐色钙质角闪石应该是高压麻粒岩相的变质产物。

由此可见，榆树沟高压麻粒岩地体中出现次透辉石斜长角闪岩夹层以及含普通角闪石的斜长石榴斜辉岩夹层或透镜体，应是高压麻粒岩相变质作用中 H_2O 作为有效惰性组分且其活度不均匀的反映，并非退变质作用的结果。

1.3　中压麻粒岩相变质作用的特征

该地体的中压麻粒岩相变质作用是伴随着韧性剪切变形作用发生的，它叠加改造早期形成的高压麻粒岩，以出现斜方辉石（Opx）为特征，其典型矿物组合为 Opx + Cpx + Pl ± Qz（王润三等，1999a；王居里等，1999）。此二变质相间的临界反应为 Cpx + Gar ± Opx + Pl。由于岩性差异及不均匀变形，地体中形成强应变带和弱应变域镶嵌的格局。发育强应变及中压麻粒岩相变质作用的岩石是化学成分相当于超镁铁质岩、中性岩及 SiO_2 不饱和的基性岩类，岩石中广泛发育初糜棱结构，其中辉石、石榴石、斜长石塑变残斑具核幔结构，其动态重结晶基质具典型的中压麻粒岩相矿物组合；弱应变域主要由 SiO_2 饱和的基性岩类岩石组成，其中极少见到明显韧性剪切变形及相伴的中压麻粒岩相变质作用（王润三等，1999a）。

上述情况表明，榆树沟地体中的中压麻粒岩相变质作用的分布是不均匀的，其发生与深层次固态流变有关，并明显受矿物和岩石抗韧性变形强度的控制（王润三等，1999a，王居里等，1999），其由小到大的顺序是：Qz、Pl、Opx、Ol、Cpx、Gar、Hb，这与林传勇等（1993）得出的造岩矿物韧性递降的顺序一致。在榆树沟地体中，韧性剪切变形主要发生于由抗韧性变形强度小的矿物组成的岩石中，亦即化学成分相当于超镁铁质岩、中性岩及 SiO_2 不饱和的基性岩类岩石中；而组成弱应变域的岩石则主要由抗韧性变形强度大的矿物组成，即 SiO_2 饱和的基性岩类岩石，包括斜长石榴斜辉岩、斜辉斜长角闪岩和斜长角闪岩等。它们大多仅受很弱的中压麻粒岩相变质作用的改造，从而保留了高压麻粒岩相的基本特征。

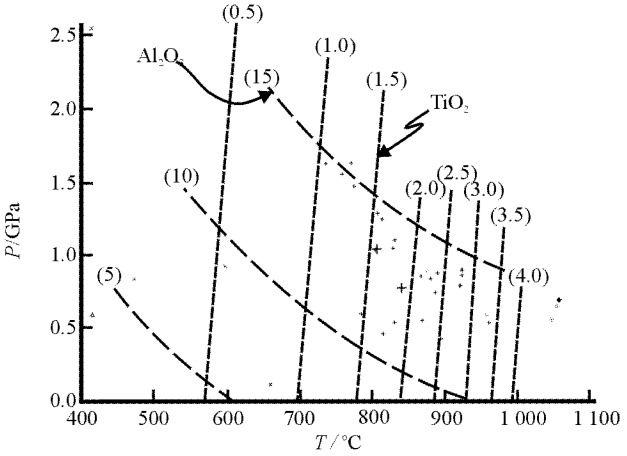


图 4　榆树沟高压麻粒岩地体中钙质角闪石的 Al_2O_3 和 TiO_2（%）等值线与半定量温压估算图（据 Ernst *et al.*，1998）

图例见图 1，浅灰色◆是按 Leake 等 1997 新分类方案的钠钙质角闪石

Fig. 4　Isopleth of Al_2O_3 and TiO_2 (%) and *P-T* estimation for calci-amphiboles from high-pressure granulite terrane in Yushugou area (after Ernst *et al.*, 1998)

1.4　（低）角闪岩相及绿片岩相变质作用的特征

在该地体中，（低）角闪岩相及绿片岩相变质作用分别叠加于高压和中压麻粒岩相岩石上，（低）角闪岩相变质主要表现为形成于绿帘石脉旁的蓝绿色角闪石取代早期单斜辉石，发育于地体的Ⅲ、Ⅳ单元。更晚发育的绿片岩相变质作用仅见于Ⅰ单元中，以形成基本不含 Al_2O_3 的阳起石为特征，该单

元超镁铁质岩中的石棉也是这一阶段的产物。此二期变质作用均与地体在浅层次发育的脆-韧性和脆性破裂及相伴随的流体作用相关,其分布更为局限。

根据上述可建立榆树沟地体变质矿物演化历史,如表2所示。

2 高压麻粒岩地体变质作用的同位素定年

2.1 角闪石^{40}Ar-^{39}Ar定年

2.1.1 样品概况

用于^{40}Ar-^{39}Ar定年的角闪石样品选自该地体Ⅲ单元的含单斜辉石的斜长角闪岩(岩石样品采自榆树沟托克逊县石棉矿西支沟,编号:Y210)。该样品无明显变形,岩石呈斑状变晶结构,变斑晶为钙镁闪石,其外形呈柱状,长轴略显平行排列,但晶格优选方位不明显;多色性为:Ng(深褐)>Nm(浅黄)>Np(淡黄);其化学式为:

$(Na_{0.455}, K_{0.026})_{0.481}(Ca_{1.646}, Na_{0.354})_2(Mg_{2.271}, Fe^{2+}_{1.135}, Fe^{3+}_{1.025}, Al_{0.325}, Ti_{0.205}, Mn_{0.021}, Ni_{0.014}, Cr_{0.003}, Ca_{0.001})_5[Si_{6.107}, Al_{2.218}]_8(OH)_2$

基质由钙镁闪石、斜长石(An=39)、单斜辉石和钛铁矿组成。其中钙镁闪石呈不规则短柱状或粒状,无定向排列,在基质中分布不均匀;多色性为:Ng(深褐)>Nm(黄)>Np(淡黄);其化学式为:

$(Na_{0.454}, K_{0.023})_{0.477}(Ca_{1.507}, Na_{0.493})_2(Mg_{2.486}, Fe^{2+}_{1.135}, Fe^{3+}_{1.456}, Al_{0.216}, Ti_{0.167}, Mn_{0.023}, Cr_{0.041})_5[Si_{5.976}, Al_{2.024}]_8(OH)_2$

2.1.2 测试及其结果

采用重选、电磁选及双目镜下手选等方法从Y210样品中分离出角闪石,样品重量0.35g。由中国科学院地质与地球物理研究所Ar-Ar定年实验室用^{40}Ar-^{39}Ar快中子活化法测定。样品在中国原子能研究院进行快中子照射,照射的要求及对K、Ca、Cl干扰的校正见王松山(1992)。利用英国RCA-10气体源质谱计(VSS公司)进行^{40}Ar-^{39}Ar分析。取^{40}K衰变常数$\lambda=5.543E-10$/年。测定结果见表3和图5。

表2 榆树沟高压麻粒岩地体基性麻粒岩中变质矿物演化历史及同位素定年数据

Table 2 The revolutionary history and isotopic composition of metamorphic minerals of basic granulite from Yushugou high-pressure granulite terrane

变质作用期次		变质矿物演化历史						同位素定年数据	参考文献
		Gra	Cpx	Opx	Hb	Pl	Qz		
1	高压麻粒岩相				Hb1			锆石 U-Pb 同位素不一致线与谐和线下交点年龄:364±5Ma 角闪石 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄:368±5Ma 角闪石 ^{40}Ar-^{39}A 等时线年龄:361±10Ma	王润三等,1998; 本文
2	中压麻粒岩相				Hb1			Sm-Nd 内部矿物等时线年龄:310±5Ma Rb-Sr 内部矿物等时线年龄:278±28Ma	本文 本文
3	(低)角闪岩相				Hb2			>侵入该地体的红色钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄:259Ma	王润三等,1999b; 新疆地质志,1993
4	绿片岩相				Hb3				

样品加热阶段共计八个,加热温度区间为500~1500℃。5~7阶段(950~1300℃)^{39}Ar的释出量共占94.63%,三个阶段的坪年龄接近,得坪年龄$t_p=368.2\pm4.8$Ma;5~7阶段与t_p对应的等时线年龄$t_i=361\pm10$Ma。图5年龄谱的特征及等时线的$A[(^{40}Ar/^{36}Ar)_i]$值与Nier值接近,表明样品不含过剩氩。

2.1.3 定年结果的地质意义

对于Ar-Ar年龄的地质意义存在两种不同的解释原则。张忠奎和王松山(1981),王松山(1983)解释为矿物的变质(或结晶)年龄;而Faure(1977), Berry and McDougall

表 3 榆树沟高压麻粒岩地体 Y210 角闪石^{40}Ar-^{39}Ar 快中子活化法定年数据

Table 3 ^{40}Ar-^{39}Ar dating for amphiboles (sample No. Y210) from Yushugou high-pressure granulite terrane

加热阶段	加热温度℃	$(^{40}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{36}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{37}Ar/^{39}Ar)_m$	$(^{38}Ar/^{39}Ar)_m$	$^{39}Ar_k 10^{-12}$mol	$(^{40}Ar/^{39}Ar) \pm 1\sigma$	$^{39}Ar_k$%	视年龄 t ±1σ
1	500	50.769	0.1026	1.2011	0.2051	0.09	20.67 ±0.16	0.68	351 ±11
2	650	49.946	0.1071	0.0957	0.1964	0.12	10.49 ±0.13	0.91	187 ± 5
3	800	47.015	0.1119	1.5021	0.1443	0.15	14.18 ±0.15	1.22	248 ± 6
4	950	48.706	0.1059	2.0522	0.1294	0.18	17.71 ±0.15	1.35	304 ± 8
5	1100	26.143	0.0157	1.2470	0.0486	0.75	21.60 ±0.08	5.63	365 ± 5
6	1200	23.809	0.0068	6.8719	0.0153	8.58	22.43 ±0.08	64.40	378 ± 5
7	1300	22.943	0.0072	6.9399	0.0203	3.29	21.44 ±0.08	24.60	363 ± 5
8	1500	91.892	0.2027	2.0930	0.2432	0.16	32.43 ±0.29	1.20	524 ±16

坪年龄 t_p = 368.2 ±4.8Ma； 5～7 阶段与 t_p 对应的等时线年龄 t_i = 361 ±10Ma

表 4 榆树沟高压麻粒岩地体 Y152 石榴斜长二辉岩 Sm-Nd 同位素定年数据

Table 4 Sm-Nd isotopic dating of garnet-plagioclase-websterite (sample No. Y152) from Yushugou high-pressure granulite terrane

样号*	样品名称	Sm(WB/μg.g^{-1})	Nd(WB/μg.g^{-1})	$^{143}Nd/^{144}Nd$(Atoms)	$^{143}Nd/^{144}Nd$ (2σ)	$T_{(Chur)}$(Ma)	$T_{(DM)}$(Ma)	$\varepsilon_{Nd}(0)$
Y152-1	全岩	5.096	13.542	0.227613	0.512966 ± 9	1613	0	6.39
Y152 +2	辉石	5.566	16.132	0.208653	0.513025 ± 6	4872	3845	7.54
Y152-3	斜长石	0.222	1.411	0.095171	0.512708 ±15	0	570	1.36
Y152 +3	斜长石	0.169	1.231	0.083179	0.512676 ± 7	0	555	0.74
Y152-4	石榴石	2.921	2.252	0.784420	0.514116 ± 9	384	258	28.83
Y152 +4	石榴石	2.645	2.003	0.798412	0.514105 ± 9	372	249	28.61
Y152-5	钛铁矿	0.204	0.649	0.189810	0.512883 ±10	0	1712	4.77

* 样品 -1、-3、-4 和-5 为初测数据；+2、+3 和 +4 为复测数据。

表 5 榆树沟高压麻粒岩地体 Y152 石榴斜长二辉岩 Rb-Sr 同位素定年数据

Table 5 Rb-Sr isotopic dating of garnet-plagioclase-websterite (sample No. Y152) from Yushugou high-pressure granulite terrane

样号	样品名称	Rb(WB/μg.g^{-1})	Sr(WB/μg.g^{-1})	$^{87}Rb/^{86}Sr$(Atoms)	$^{87}Sr/^{86}Sr(2\sigma)$	$^{87}Rb_{cont}$(μgA/g)	$^{86}Sr_{cont}$(μgA/g)
Y152-1	全岩	1.555	196.2	0.0229	0.704174 ±32	0.005048	0.2207
Y152-2	辉石	5.003	42.33	0.3411	0.703840 ±24	0.016242	0.0476
Y152-3	斜长石	1.260	796.0	0.0046	0.703479 ±31	0.004090	0.8954
Y152-4	石榴石	0.678	5.340	0.3663	0.705544 ±36	0.002200	0.0060
Y152-5	钛铁矿	2.143	6.913	0.8953	0.707283 ±30	0.006959	0.0078

(1986)，Owen *et al.* (1988)则解释为矿物对^{40}Ar封闭以来的年龄。笔者认为：由于矿物变质或结晶后赋存该矿物的地质体的地质演化过程不同，这两种情况都可能存在。当赋存该矿物的地质体埋深适中，且变质或结晶后地质体埋深不变或变动缓慢，该矿物随缓慢的降温而调整其成分，逐渐释放出^{40}Ar时，Ar-Ar 年龄应代表^{40}Ar封闭以来的年龄。Dodson (1973)提出的矿物封闭温度模型也仅仅适用于缓慢冷却，及简单化假设得到满足的那些情况(邱华宁等，1997)。但当赋存该矿物的地质体在埋深很大的环境下变质或结晶后，地质体快速抬升，该矿物立即进入亚稳定状态时，矿物成分随温度的快速降低而调整的速率极低，因而可以近似的认为^{40}Ar的扩散释放在由缓慢冷却模型得出的所谓的封闭温度之前早已终止，这时，Ar-Ar 年龄应当非常近似地代表矿物的变质(或结晶)年龄。现已发表 Ar-Ar 年龄代表矿物封闭温度的实例所依据的地质事实大多是中、深成侵入岩及与其相关的接触变质岩；而所作的有关实验也是在常压下的开放体系中

进行的(邱华宁等,1997),难以反映地质体埋深很大,且在该矿物变质或结晶后地质体快速抬升的实际情况。因而在解释 Ar-Ar 年龄之前,必须了解赋存该矿物的地质体的地质演化过程。

榆树沟高压麻粒岩地体以未记录反映缓慢减压降温的冠状体结构为突出特征,表明其经历了在麻粒岩相变质之后的快速抬升过程(王居里等,1999;王焰, 1999)。偏光显微镜下,Y210 岩石中的角闪石无论是斑晶还是基质都不存在任何塑性变形结构,表明该角闪石形成后未受过中压麻粒岩相的热扰动。因而 Y210 角闪石的 Ar-Ar 年龄应当基本代表高压麻粒岩相峰期变质作用的年龄。

非常有意义的是,笔者曾对榆树沟高压麻粒岩地体Ⅳ单元斜长石榴苏辉岩中的锆石进行过 U-Pb 同位素定年,获得不一致线与谐和线下交点变质年龄 364 ±5Ma(Wang RS *et al.* 2000)。此年龄值与 Y210 角闪石的 t_p、t_i两组年龄值在误差范围内非常吻合,它们共同表明了高压麻粒岩相变质作用期间,在不同矿物中发生了同位素均一化,并进一步证明了 Y210 角闪石的 t_p、t_i两组年龄值应基本代表峰期变质年龄的认识。

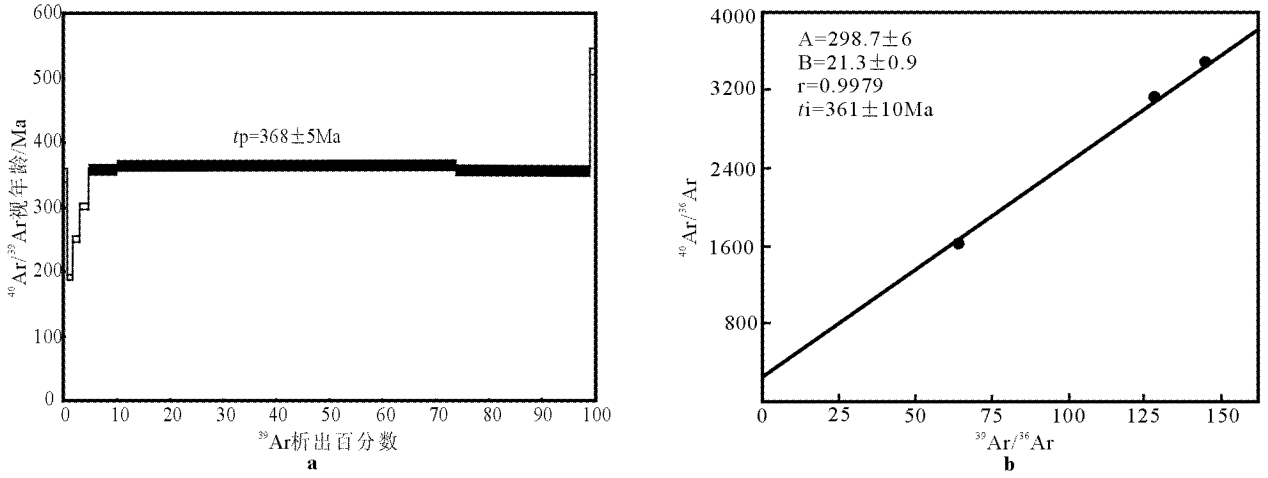


图 5 Y210 角闪石^{40}Ar-^{39}Ar 年龄谱

Fig. 5 ^{40}Ar-^{39}Ar plateau age(a) and isochron(b) of amphiboles in sample Y210

2.2 变质矿物 Sm-Nd、Rb-Sr 内部等时线定年

2.2.1 样品概况

用于 Sm-Nd、Rb-Sr 内部等时线定年的样品为石榴斜长二辉岩,样品(Y-152)采自榆树沟地体西北端的康恩萨拉沟口Ⅳ单元中,样品编号为 Y152。其矿物组成为:斜长石 30% ~35%, 单斜辉石 30% ~35%,石榴石 15% ~20%,钛铁矿 7% ~10%,斜方辉石 2% ~3%,褐色的镁绿钙闪石-含镁绿钙闪石 5%,及微量磷灰石;呈细粒粒状变晶结构。用重选、电磁选及双目镜下手选等方法,从 Y152 岩样中分别选出石榴石、斜长石、钛铁矿及辉石(单斜辉石与紫苏辉石未分)。

2.2.2 测试及其相关数据

所选四个矿物样品加上全岩样共五个样品。由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室分析,同位素比值在英国制造的 VG354 质谱仪上完成。分析结果见表 4、表 5。

在拟合上述两条等时线时之所以舍弃了辉石数据点,表面上看来是因为辉石点偏离等时线较远,实质上更可能是由于该辉石样品是单斜辉石和斜方辉石的混合样;同时,单斜辉石因抗应变强度大,在伴有韧性剪切的中压麻粒岩相变质作用中未达到 Sm、Nd 同位素均一化的缘故。

根据表 4 数据,在舍弃 Y152-2 辉石之后,按 6 个点获得 Sm-Nd 等时线(图 5),拟合的等时线的相关系数为 0.9998,等时线年龄为 310 ±5Ma。

根据表 5 数据,也在舍弃 Y152-2 辉石之后,按四个点获得 Rb-Sr 等时线较差(图 6),拟合的等时线的相关系数为 0.9834,等时线年龄为 278 ±28Ma

2.2.3 定年结果的地质意义

榆树沟麻粒岩地体 Y152 石榴斜长二辉岩的矿物组合为 Gar-Cpx-Opx-Pl-Hb-Iim。根据马军和王仁民(1994)的研究,并结合榆树沟地体的实际,这一矿物组合应是温、压条件处于高、中压麻粒岩相之间的临界反应 Cpx + Gar(Opx + Pl 的单变平衡线上的产物。如果这一认识是客观的,则可以认为 310 ±5Ma 的 Sm-Nd 同位素内部矿物等时线年龄应当代表中压麻粒岩相变质作用的起始年龄。而 278 ±28Ma 的 Rb-Sr 同位素内部矿物等时线的上限年龄与上述 Sm-Nd 年龄 310 ±5Ma 的下限基本相等,故可认定 278 ±28Ma 大体相当中压麻粒岩相变质作用年龄。

上述结果表明:Sm-Nd 同位素体系在高压麻粒岩相变质过程中发生了充分的均一化,并在其末期进入封闭;在伴有强烈韧性变形的中压麻粒岩相变质作用中,该体系并未受到扰动。而 Rb-Sr 同位素体系在伴有强烈韧性变形的中压麻粒岩相变质作用中发生了均一化。

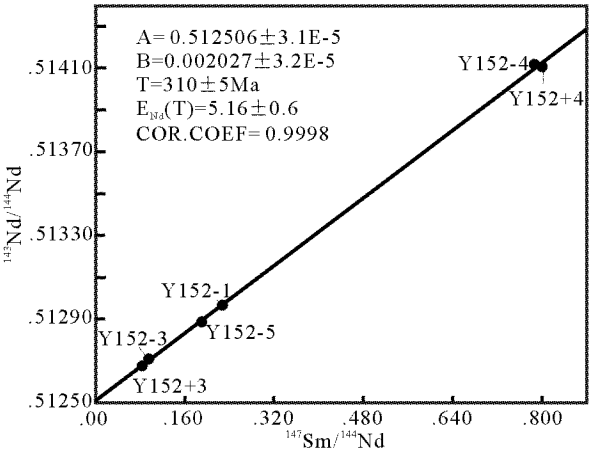


图 6 Y152 石榴斜长二辉岩 Sm-Nd 等时线

Fig. 6 Sm-Nd isochron of garnet-plagioclase-websterite (sample Y152)

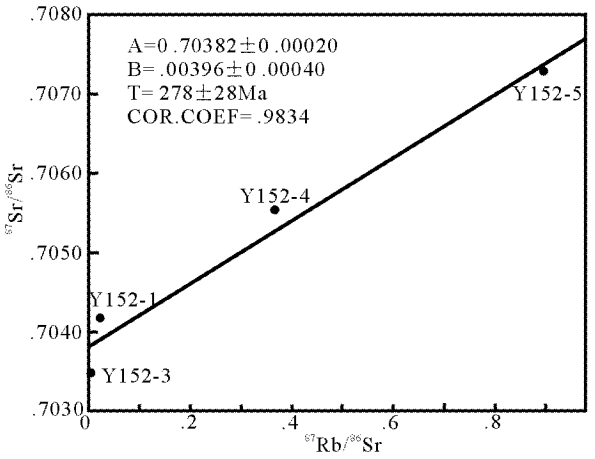


图 7 Y152 石榴斜长二辉岩 Rb-Sr 等时线

Fig. 7 Rb-Sr isochron of garnet-plagioclase-websterite (sample Y152)

除上述同位素定年外，笔者还对榆树沟地体Ⅲ、Ⅳ单元变拉斑玄武岩（基性麻粒岩）和Ⅳ单元变杂砂岩（中性麻粒岩）的全岩进行了 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素定年工作。因所得数据点相当分散，均未获可信的等时线（数据略）。这可能与该地体所经历的多期变质作用，以及峰期后的变质和韧性剪切的不均匀性有关。

3 结论

（1）由于角闪石族矿物结晶化学的特殊性，因而其化学成分变化很大，分布广泛，形成和稳定的温压区间宽阔，并且其化学成分随着变质温压条件的改变而变化，可以用来确定地体经历的多期变质作用的概况。通过榆树沟地体角闪石的系统研究，划分出三个世代的角闪石，结合变质岩的矿物共生分析，确定榆树沟高压麻粒岩地体曾经历过高压麻粒岩相、中压麻粒岩相、低角闪岩相和绿片岩相等四期变质作用（或热事件）。

（2）根据角闪石的晶体化学特征及 H_2O 作为有效惰性组分的矿物相律，可以确定分布于弱应变域的深褐色钙质角闪石应该是高压麻粒岩相的变质产物。由于榆树沟地体的中压麻粒岩相变质是在深层次固态流变的强烈韧性变形作用下发生的，故其分布极不均匀的，明显受矿物和岩石抗韧性变形强度的控制。在此变形过程中，角闪石是抗韧性变形能力最强的矿物，并未受中压麻粒岩相变质作用的改造，从而保留了高压麻粒岩相的基本特征。据此认为形成于 440 ± 18Ma 的榆树沟蛇绿岩套，在 364 ± 5Ma（锆石 U-Pb 同位素不一致线与谐和线下交点年龄）；368 ± 5Ma（角闪石 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄）；或 361 ± 10Ma（角闪石 ^{40}Ar-^{39}Ar 等时线年龄）年龄段经历了峰期高压麻粒岩相变质作用。

峰期变质之后，在 310 ± 5Ma（Sm-Nd 等时线年龄）至 278 ± 28Ma（Rb-Sr 同位素内部矿物等时线年龄）年龄段叠加了不均匀的中压麻粒岩相变质并伴有韧性剪切作用。

对于多期变质且峰期后变质变形不均匀的地体，宜采用单矿物（变质矿物）和内部矿物等时线（变质矿物共生组合）进行变质作用同位素定年。只有在查明用于定年的单矿物或变质矿物共生组合在变质变形序列中的位置时，才能准确地确定其地质意义。

致谢 感谢翟明国教授在本文样品同位素测定、复查及解释工作中的全力帮助，感谢胡蔼琴教授对本文 Sm-Nd 等时线数据的审查。

References

Berger G W and McDougall I. 1986. Interpretation of $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating evidence from the Ailon formation, East Timor, Indonesia. Chem. Geol., 59 : 43 - 58

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House. 488 (in Chinese with English abstract)

Dodson M H. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Coctrib. Mineral. Petrol., 40 : 259 ~ 274

Dong Y P, Wang R S, Zhou D W. 2001. Geochemistry and genesis of meta-mafic-ultramafic rocks from Yushugou region, north margin of the South Tianshan tactonic belt, western China. Geochimica, 30 (6) : 559 - 568 (in Chinese with English abstract)

Ermst E G, Liu J. 1998. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB-A semiquantitative thermobarometery. American Mineralogist, 82 : 952 - 969

Faure G. 1973. Principles of Isotope Geology. Wiley, New York

Harrison T M. 1981. Diffusion of ^{40}Ar in Hornblende. Contrib. Mineral. Petrol., 78 : 324 ~ 331

He T X, Lu L Z, Li S X *et al.* 1988. Metamorphic Petrology. Beijing:

Geological Publishing House, 174(in Chinese)

IMA. 1978. Nomenclature of Amphiboles. Mineral. Mag., 42: 533 - 563

Jin S Q. 1991. The compositional characteristics of calci-amphiboles in different metamorphic facies. Chinese Science Bulletin, 36 (11): 851 - 854 (in Chinese)

Leake B E, Woolley A R, Arps C E S *et al*. 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommitee on Amphiboles of the International Mineralogical Association. Commission on New Minerals and Mineral Names. Mineral. Mag., 61: 259 - 321

Lin C Y, He Y N, Shi L B. 1993. Ductile shearing and the brittle-ductile transition in rocks. In: Xiao Q H, Li X B, Liu S C *et al*. Frontiers of geological sciences in 1990's: Research priorities for China. Wuhan: The Press of the China University of Geosciences, 183 - 190 (in Chinese)

Lin W W, Peng L J. 1994. The estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in amphibole and biotite from empa data. Journal of Changchun Univercity of Earth Sciences, 24(2): 155 - 162 (in Chinese with English abstract)

Ma J, Wang R M. 1994. Reviews in garnet-clinopyroxene geothermometers and geobarometers with their application to granulite: The comparison of Miyun (Zunhua) and Xuanhua granulite forming condition. In: Qian X L, Wang R M (eds.). Geological evolution of the granulite terrain in north part of the North China craton. Beijing: Seismological Press, 71 - 87 (in Chinese with English abstract)

Owen J W, Dallmeyer R D, Gower C F *et al*. 1988. Metamorphics conditions and geochronologic contracts across the Grenvill Front Zone, Coastal Labrador. Lithos., 21: 13 ~ 36

Qiu H N and Peng L. 1997. ^{40}Ar-^{39}Ar geochronology and dating of fluid inclusions. Hefei: Chinese Science & Technology University Press House, 185 (in Chinese)

Wang J L, Wang R S, Zhou D W *et al*. 1999. A study of tectonics of granulite facies in Yushugou, South Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 15(4): 539 - 547 (in Chinese with English abstract)

Wang R S, Zhou D W, Wang J L *et al*. 1999a. Variscan terrane of deep-crustal granulite facies in Yushugou area, southern Tianshan. Science in China (Series D), 42(5): 482 - 490

Wang R S, Wang J L, Zhou D W *et al*. 1999b. Study on Yushugou ophiolite suite modified with the metamorphism of granulite facies in southern Tianshan. Scientia Geologica Scinca, 34(2): 166 - 176 (in Chinese with English abstract)

Wang R S, Wang Y, Li H M *et al*. 2000. Zircon U-Pb dating of Yushugou terrain of high-pressure granulite facies in southern Tianshan Mountain and its geological significance. Chinese Journal of Geochemistry, 19(1): 23 - 28

Wang S S. 1983. Age determinations of ^{40}Ar-^{40}K, ^{40}Ar-^{39}Ar and radiogenic ^{40}Ar released characteristics on K-Ar geostandards of China. Scientia Geologica Scinca, 18(4): 315 - 323 (in Chinese with English abstract)

Wang S S, Hu S L, Sang H Q *et al*. 1992. BSP-1 horblende, a 2Ga age standard as flux monitor of ^{40}Ar-^{39}Ar dating. Acta Petrologica Sinica, 8(1): 103 - 127 (in Chinese with English abstract)

Wang Y, Wang R S, Zhou D W *et al*. 1999. The uplifting process of a high-pressure terrain of granulite facies in Yushugou area of southern Tianshan, Xinjiang. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 29(6): 565 - 568 (in Chinese with English abstract)

Zhang K Z and Wang S S. 1981. ^{40}Ar-^{39}Ar dating and application in isotopic chronology. Abroad Geology, 7(4): 10 - 15 (in Chinese)

附中文参考文献

董云鹏,王润三,周鼎武. 2001. 南天山北缘榆树沟变质基性、超基性岩的地球化学及其成因机制. 地球化学,30(6):559 - 568

贺同兴,卢良兆,李树勋等. 1988. 变质岩石学. 北京: 地质出版社, 174

靳是琴. 1991. 不同区域变质相中钙质角闪石的成分特征. 科学通报, 36(11):851 ~ 854

林传勇,何永年, 史兰斌. 1993. 岩石的韧性剪切和脆-韧性转换变形. 见:肖庆辉,李小波, 刘树臣等. 当代地质科学前沿 - 我国今后值得重视的前沿研究领域. 武汉:中国地质大学出版社, 183 - 190

林文蔚,彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+}、Fe^{2+}. 长春地质学院学报, 24(2):155 ~ 162

马军,王仁民. 1994. 石榴石-辉石温度计、压力计综述及应用:密云(遵化)、宣化两地麻粒岩形成条件对比. 见:钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京:地震出版社.,71 ~ 87

邱华宁, 彭良. 1997. ^{40}Ar-^{39}Ar 年代学与流体包裹体定年. 合肥:中国科技大学出版社, 185

王居里,王润三,周鼎武等. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩相构造岩研究. 岩石学报, 15(4):539 ~ 547

王润三,周鼎武,王居里等. 1999a. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究. 中国科学, D 辑, 29(4):306 ~ 313

王润三,王居里,周鼎武等. 1999b. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究. 地质科学, 34(2):166 ~ 176

王润三,王焰,李惠民等. 1998. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地球化学, 27(6):517 ~ 522

王松山. 1983. 我国 Ar-K 法标准样 ^{40}Ar-^{40}K 和 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄测定及放射成因 ^{40}Ar 的析出特征.. 地质科学,18(4):315 ~ 323

王松山,胡世玲,桑海清等. 1992. 氩-氩定年法国际标准物质 BSP-1 角闪石的研制. 岩石学报, 8(1):103 ~ 127

王 焰,王润三,周鼎武等. 1999. 南天山榆树沟麻粒岩相高压地体的抬升过程. 西北大学学报(自然科学版), 29(6):565 ~ 568

新疆地维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆地维吾尔自治区区域地质志. 北京:地质出版社, 488

张奎忠,王松山. 1981. 同位素年代学中的 ^{40}Ar-^{39}Ar 快中子活化技术及其应用. 国外地质,7(4):10 ~ 15