

南天山榆树沟蛇绿岩地体中高压麻粒岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义

周鼎武^① 苏犁^{①*} 简平^② 王润三^① 柳小明^① 陆关祥^① 王居里^①

(^①西北大学大陆动力学教育部重点实验室和西北大学地质学系, 西安 710069; ^②北京离子探针中心, 北京 100037.

* 联系人, E-mail: su-li@sohu.com)

摘要 利用阴极发光、LA-ICPMS 和 SHRIMP 定年技术, 对南天山北缘缝合带东段的榆树沟蛇绿岩地体中两个麻粒岩相变质基性火山岩样品中锆石进行了内部结构、微量元素组成分析和原位定年, 所获得的变质锆石年龄分别为 392 ± 7 和 390 ± 11 Ma, 代表了该蛇绿岩块体经历麻粒岩相变质改造的年龄, 揭示南天山洋在泥盆纪早期即开始向北俯冲。

关键词 榆树沟蛇绿岩 SHRIMP 定年 麻粒岩相变质 南天山东段

榆树沟蛇绿岩地体出露于南天山东段的榆树沟-铜花山-硫磺山蛇绿混杂岩带之中。地体组成的岩石学、地球化学和矿物温压测算研究揭示, 它是一俯冲至 40~50 km, 经深地壳高压麻粒岩相变质改造、岩石组合基本齐全的蛇绿岩残片^[1~3]。单颗粒锆石 U-Pb 定年^[4]、Sm-Nd 和 Rb-Sr 内部等时线、角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年^[5]等同位素地质年代学研究, 获得了多组年龄结果, 显示有明显的多阶段地质作用热事件叠加。考虑该地质体经历俯冲深变质和构造折返过程所造成岩石同位素体系的多次开放和锆石的多期次变质生长, 本次研究采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 微区定年、LA-ICPMS 微区化学成分分析和阴极发光(CL)图像分析, 对原岩恢复为基性熔岩的两个样品中锆石进行了系统研究。这一结果对了解榆树沟蛇绿岩地体经历高压麻粒岩相变质的地质作用过程和南天山的演化历史具有重要意义。

1 地质背景及样品描述

榆树沟高压麻粒岩相变质蛇绿岩地体长 10 余公里、宽 1~3 km, 为一呈北西~南东向展布的透镜状冲断构造岩片(图 1)。野外产状、岩石组合和系统的岩相学、地球化学研究揭示包含 4 个基本岩石单元^[1,2,6]:(I) 变质橄榄岩单元, 原岩为残留地幔橄榄岩;(II) 二辉麻粒岩单元, 原岩为镁铁质堆晶岩;(III) 石榴二辉麻粒岩单元, 原岩为拉斑玄武岩;(IV) 中、基性麻粒岩互层单元, 原岩为基性火山岩夹沉积岩, 研究表明是一整体经历了高压麻粒岩相变质改造的古洋残片, 并遭受中压麻粒岩相退变质及相应的深地壳固态流变强变形改造和抬升剥露过程中角

闪岩相、绿片岩相退变质作用的叠加, 具多期变质变形的特征^[1,3,5]。本次研究的两个样品均采自 III 单元(图 1), 分别为中基性麻粒岩(01-25, 采样点地理坐标: $N42^{\circ}15'52.3''$; $E87^{\circ}54'54.8''$; 海拔高度 1172 m)和基性麻粒岩(01-26, 采于 01-25 点北约 25 m)。两个样品均具糜棱斑状结构和变质分异条带状构造, 矿物组合: 石榴石 + 透辉石 ± 紫苏辉石 + 拉长石($An = 51\sim 63$), 01-26 基本不含石英, 而 01-25 中有约 8% 的石英。它们的全岩化学成分见表 1, 稀土分布形式见图 2 (分析数据列于表 2 中)。01-26 具有与 MORB 类似的 LREE 略亏损的近平坦型稀土分配模式, 与以往报道的榆树沟地体 III 单元岩石原岩恢复为洋脊玄武岩的认识^[6]一致。而 01-25 表现为 Sm~Lu 与 01-26 一致的平坦趋势, 但 La~Nd 富集, 显示有后期变质过程中 LREE 组分的叠加。

2 分析方法

锆石采用常规的浮选+电磁选重矿物分离后, 在双目显微镜下人工挑选获得。将锆石与标准锆石 TEM 一同粘于环氧树脂靶上, 凝固后磨至近一半并抛光, 使锆石颗粒的内部暴露, 用于锆石形态、阴极发光图像(内部结构)研究和微量元素组成分析、SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定。

锆石的阴极发光图像利用北京大学电子学系 FEI PHILIPS XL30 型扫描电子显微镜获得(实验条件: 15 kV/120 μA)。锆石的原位微量元素分析在西北大学大陆动力学重点实验室完成, 使用仪器: ICP-MS Elan 6100DRC, 激光剥蚀系统为: ComPex102 Excimer 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)。测

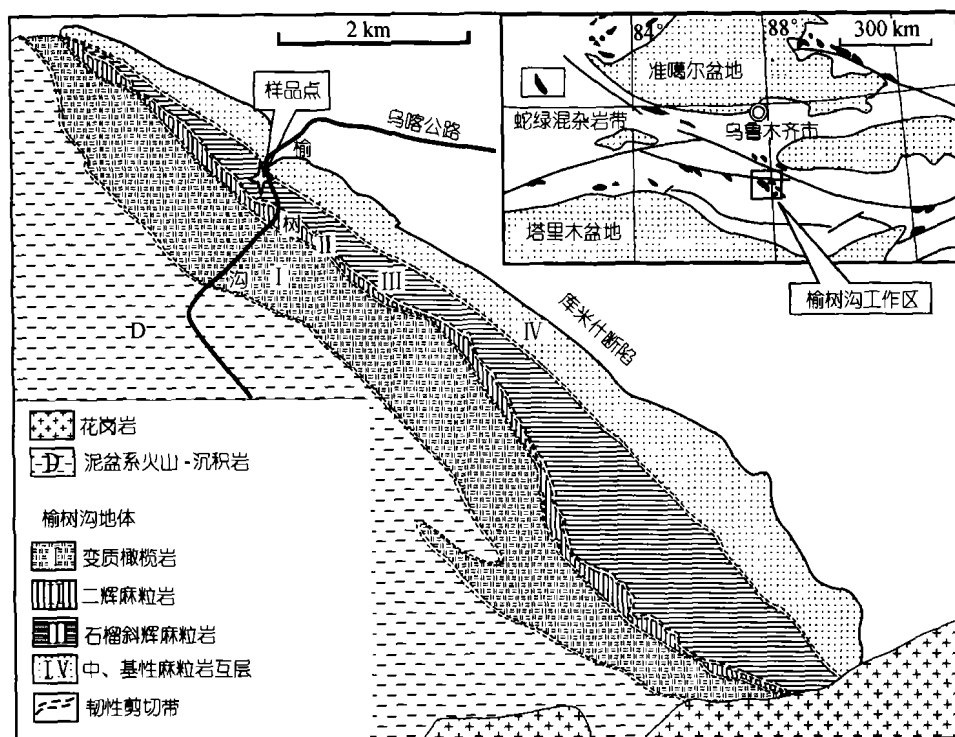


图1 榆树沟高压麻粒岩相变质蛇绿岩地体地质略图

表1 全岩主量元素组成(%)^{a)}

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	总和
01-25	58.61	1.2	17.78	10.28	0.2	5.9	2.47	1.87	0.98	0.06	100.32
01-26	44.73	2.4	12.86	14.14	0.17	7.78	13.17	3.06	0.14	0.05	100.47

a) 由西北大学大陆动力学重点实验室 X 荧光光谱(XRF)分析获得

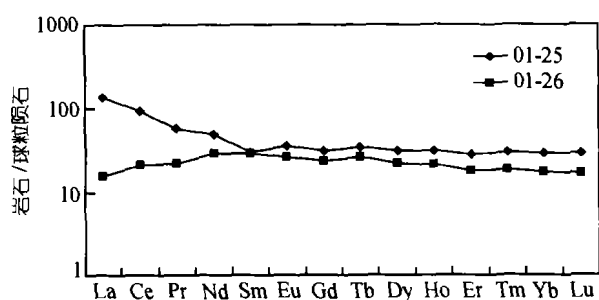


图2 全岩稀土元素分布形式图

试用激光束能量 170 mJ, 频率 10 Hz. 样品分析以 SiO₂ 作内部标准, NIST612 和 agv 作为外部标准. 测试点束斑直径 40 μm.

锆石 U-Th-Pb 年龄分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 型离子探针质谱仪上完成. 分析流程和原理同文献[7, 8]的阐述. 北京离子探针中心 SHRIMP II 的工作条件、分析方法详见文献[9, 10]. 标准锆石为 TEM (417 Ma), Pb/U 校正公式采用 $Pb/U = A (UO/$

$U)^{[11]}$, 应用 RSES 参考样 SL13 (572 Ma) 标定所测锆石的 U, Th 和 Pb 含量. 数据处理采用澳大利亚国立大学 PRAWN 程序^[12], 普通铅根据实测 ²⁰⁴Pb 校正, 年龄值选用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄, 单个数据点误差均为 1σ, 加权平均值误差为 2σ.

3 结果

3.1 锆石晶体特征

薄片观察显示, 锆石多呈包裹体产于石榴石、斜长石等矿物中, 也见有呈单晶分布于矿物粒间. 从两个样品中分选出的锆石粒径多介于 100~150 μm, 主要呈卵圆形, 并具有变质成因锆石特有的多晶面特征^[13]. 阴极发光图像显示两个样品中锆石特征相近, 大多数锆石都具有核-幔-壳多层结构(图 3). 内核通常为铀含量高、保留直线型岩浆结晶振荡环结构痕迹的细小锆石(通常小于 20 μm); 幔部为锆石的主体, 多具有变质生长锆石常见的杉树叶(fir-tree)结构和扇

表 2 锆石及全岩微量元素分析结果(mg/g)

	锆石								全 岩	
	25-11.1	25-11.2	25-13.1	25-13.2	26-6.1	26-6.2	26-2.1	26-2.2	01-25	01-26
	核	幔	幔	壳	核	幔	幔	核		
Y	164.17	63.08	46.78	272.75	245.56	47.38	45.44	231.9	47.69	29.70
Zr	78175	76632	85925	76376	76343	80439	86372	76245	148	73
Nb	37.86	39.84	43.28	35.92	38.34	39.99	41.42	34.01	8.59	6.51
La	0.39	0.03	0.019	187.11	1.07	0.02	0.43	0.11	32.02	3.68
Ce	8.29	1.38	1.81	148.7	11.36	1.67	2.26	10.26	56.89	12.95
Pr	0.66	0.57	1.08	103.3	1.34	0.63	2.15	1.81	5.47	2.12
Nd	2.84	3.55	3.23	71.36	2.36	1.87	5.04	4.69	22.76	13.44
Sm	18.84	19.08	16.91	24.98	10.61	16.9	17.82	13.74	4.66	4.37
Eu	5.79	3.16	2.52	4.21	2.18	2.86	2.93	7.52	2.05	1.54
Gd	51.08	37.95	26.02	41.76	40.61	23.64	28.82	49.54	6.33	4.86
Tb	65.51	43.76	30.51	71.9	76.67	30.46	29.87	84.27	1.27	0.97
Dy	90.92	46.71	31.54	126.91	129.86	31.54	32.1	124.04	7.96	5.67
Ho	130.42	48.38	30.24	223.58	198.29	34.17	32.22	190.94	1.78	1.22
Er	187.1	38.94	26.85	368.15	304.67	29.85	28.68	290.42	4.59	2.96
Tm	284.96	51.55	30.79	584.97	529.92	31.43	28.92	452.73	0.76	0.47
Yb	436.49	46.9	28.27	919.66	864.81	36.08	29.13	668.65	4.91	2.92
Lu	522.51	44.87	26.31	1035.12	1055.13	36.35	23.78	840.65	0.75	0.42
Hf	46171.39	48025.21	56592.69	44329.09	53025.38	49750.61	57485.74	48282.49	3.76	2.53
Ta	12.55	4.34	7.65	25.31	102.26	3.92	7.17	34.52	0.52	0.41

形结构^[14]; 外壳通常仅为几微米的亮边, 偶见大于 20 μm . 对分布于锆石幔部的矿物包裹体进行了初步的 Raman 探针分析, 见有石榴石、磷灰石、金红石和辉石等同变质矿物.

3.2 锆石的微量元素

对 4 粒 SHRIMP 定年用锆石进行了与 SHRIMP 测点位置相同点的原位微量元素组成分析, 结果见表 2(测点编号同图 3 SHRIMP 分析号). 由球粒陨石^[15]标准化 REE 分配形式(图 4)可见, 3 个内核都具有典型岩浆锆石的稀土分布形式, 呈现 HREE 富集、陡的左倾 REE 模式和强 Ce 正异常, 反映这些细小内核多是残留或继承原岩的岩浆锆石. 4 个锆石幔部的分析结果显示其 Lu-Tb 丰度和 Ce 正异常程度的显著降低, 与有石榴石结晶阶段生长锆石的微量元素组成特征一致^[16], 反映其生长于高压麻粒岩相变质作用阶段. 而一个可供分析的锆石边部(25-13.2)出现 REE 总量和 LREE 丰度的明显增高, 且表现为非常特殊的 V 型 REE 分配形式(图 4), 结合该样品(01-25)全岩稀土分布形式也具有 LREE 富集的特征, 推测该样品经历了高压麻粒岩相变质之后与剪切作用有关的退化变质过程中流体的改造.

3.3 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 3. 内核具

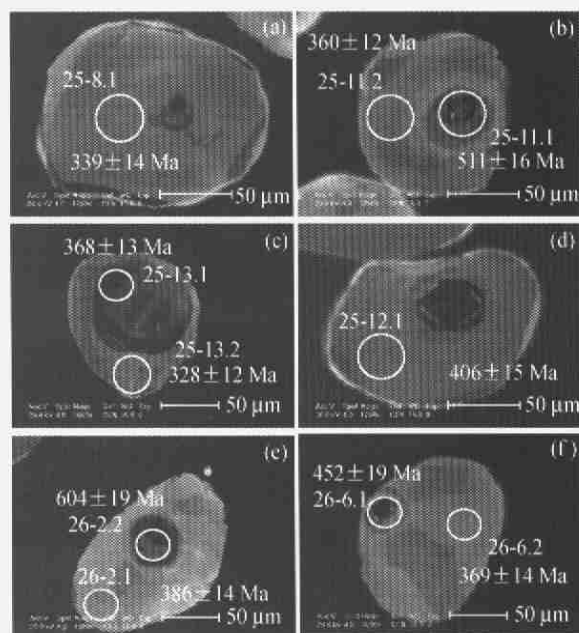


图 3 锆石阴极发光像

(a)~(d) 为样品 01-25 中分选出锆石, (e), (f) 为 01-26 中分选出锆石

有较高的 Th (75~351 $\mu\text{g/g}$)、U (227~567 $\mu\text{g/g}$)、Pb (24~65 $\mu\text{g/g}$) 含量, 变质生长的亮壳和幔部除测点 25-12.1 (图 3(d))外, Th, U, Pb 含量显著降低, 分别介于 36~83, 47~92 和 3~7 $\mu\text{g/g}$. 所有被分析样品点, 无论核、幔、边, 都具有较高的 Th/U 比值(0.20~0.95), 这

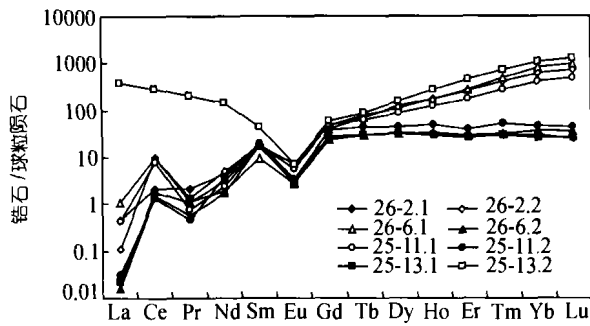


图4 锆石稀土元素分布形式图

一现象可能与其原岩中 Th 含量较高有关^[17]。锆石内核通常小于 30 μm ，有效测点数据少，年龄结果仅具参考意义，测试结果为：511 \pm 16, 452 \pm 19, 640 \pm 19 Ma，造成年龄变化的可能原因是：(1) 继承核与变质幔的混合，(2) 麻粒岩相变质事件对继承核的强烈改造。锆石幔部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相近，两个样品的加权平均值(2 σ)分别为 392 \pm 7 和 390 \pm 11 Ma (图 5)。鉴于该部位的结构特征和微量元素组成反映其生长于有石榴石结晶的变质阶段，该年龄应代表俯冲洋片经历高压麻粒岩相变质的年龄。所获得的一个外壳年龄为 328 \pm 12 Ma，结合该测点的 REE 分配形式，该年龄指示了榆树沟麻粒岩块体折返发生退变质的时限。

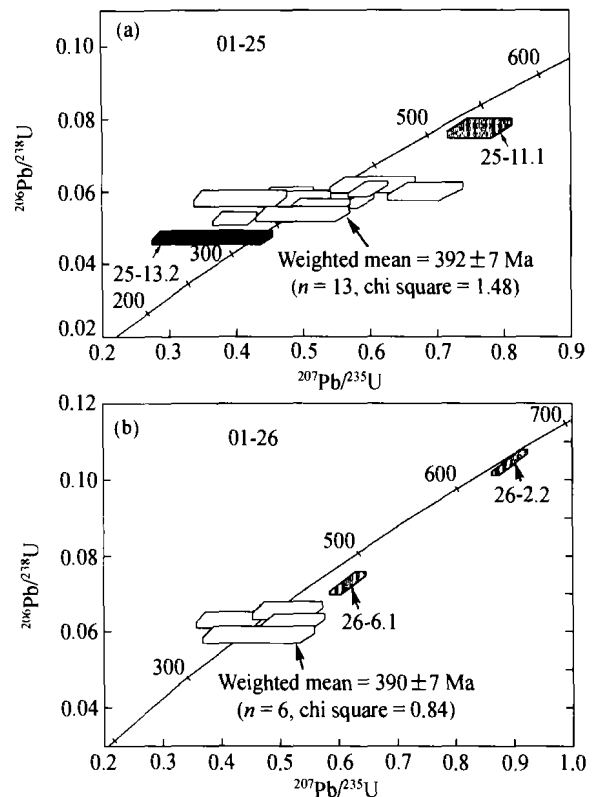


图5 锆石 SHRIMP U-Pb 一致图

表3 锆石 SHRIMP 分析结果^{a)}

点号	点位	U / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th/ U	Pb* / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	普通 $^{206}\text{Pb}/\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄/Ma
25-1.1	M	78	55	0.71	5	0.02	0.0633 \pm 0.0022	0.447 \pm 0.061	0.0512 \pm 0.0066	396 \pm 13	375 \pm 44
25-2.1	M	71	58	0.81	5	0.01	0.0629 \pm 0.0022	0.498 \pm 0.047	0.0575 \pm 0.0049	393 \pm 13	410 \pm 33
25-3.1	M	59	56	0.95	4	0.01	0.0625 \pm 0.0022	0.505 \pm 0.052	0.0586 \pm 0.0054	391 \pm 13	415 \pm 36
25-4.1	M	80	59	0.74	6	0.01	0.0631 \pm 0.0021	0.478 \pm 0.051	0.0550 \pm 0.0054	394 \pm 13	397 \pm 36
25-5.1	M	66	49	0.75	5	0.02	0.0641 \pm 0.0022	0.427 \pm 0.040	0.0483 \pm 0.0041	400 \pm 13	361 \pm 29
25-6.1	M	92	83	0.90	7	0.03	0.0669 \pm 0.0023	0.556 \pm 0.063	0.0603 \pm 0.0063	417 \pm 14	449 \pm 42
25-7.1	M	66	49	0.74	5	0.01	0.0656 \pm 0.0022	0.549 \pm 0.030	0.0607 \pm 0.0024	410 \pm 13	444 \pm 20
25-8.1	M	84	55	0.66	6	0.02	0.0628 \pm 0.0022	0.439 \pm 0.054	0.0507 \pm 0.0058	393 \pm 14	370 \pm 39
25-9.1	M	59	46	0.78	4	0.03	0.0630 \pm 0.0022	0.358 \pm 0.070	0.0412 \pm 0.0077	394 \pm 14	311 \pm 53
25-10.1	M	57	48	0.84	4	0.02	0.0608 \pm 0.0022	0.474 \pm 0.047	0.0566 \pm 0.0050	381 \pm 13	394 \pm 33
*25-11.1	C	277	117	0.42	24	0.01	0.0824 \pm 0.0027	0.716 \pm 0.049	0.0630 \pm 0.0035	511 \pm 16	548 \pm 29
25-11.2	M	88	70	0.79	6	0.02	0.0575 \pm 0.0019	0.349 \pm 0.033	0.0440 \pm 0.0038	360 \pm 12	304 \pm 26
25-12.1	M	306	153	0.50	22	0.04	0.0649 \pm 0.0025	0.634 \pm 0.056	0.0708 \pm 0.0053	406 \pm 15	499 \pm 36
25-13.1	M	47	36	0.76	3	0.03	0.0587 \pm 0.0021	0.450 \pm 0.070	0.0556 \pm 0.0082	368 \pm 13	378 \pm 50
*25-13.2	R	55	42	0.76	3	0.03	0.0523 \pm 0.0020	0.315 \pm 0.089	0.0438 \pm 0.0121	328 \pm 12	278 \pm 71
26-1.1	M	62	44	0.71	4	0.02	0.0626 \pm 0.0023	0.473 \pm 0.053	0.0548 \pm 0.0056	391 \pm 14	393 \pm 37
26-2.1	M	69	52	0.75	5	0.01	0.0618 \pm 0.0023	0.485 \pm 0.041	0.0570 \pm 0.0041	386 \pm 14	402 \pm 28
*26-2.2	C	567	351	0.62	65	0.01	0.1044 \pm 0.0033	0.896 \pm 0.032	0.0623 \pm 0.0008	640 \pm 19	650 \pm 17
26-3.1	M	65	49	0.75	4	0.02	0.0630 \pm 0.0022	0.416 \pm 0.057	0.0479 \pm 0.0062	394 \pm 13	353 \pm 42
26-4.1	M	68	52	0.76	5	0.02	0.0654 \pm 0.0023	0.515 \pm 0.060	0.0571 \pm 0.0061	408 \pm 14	422 \pm 41
26-5.1	M	66	50	0.76	5	0.01	0.0622 \pm 0.0024	0.523 \pm 0.056	0.0610 \pm 0.0058	389 \pm 15	427 \pm 38
*26-6.1	C	376	75	0.20	26	0.01	0.0727 \pm 0.0031	0.619 \pm 0.031	0.0618 \pm 0.0014	452 \pm 19	489 \pm 20
26-6.2	M	83	67	0.81	5	0.02	0.0589 \pm 0.0023	0.465 \pm 0.095	0.0573 \pm 0.0113	369 \pm 14	388 \pm 68

a) 普通 $^{206}\text{Pb}(\%)$ 指普通铅中的 ^{206}Pb 占全铅 ^{206}Pb 的百分数；表中所有误差为 1 σ 。C：内核，M：幔部，R：亮壳

4 构造意义

天山造山带是全球重要的古生代造山带之一,经历了复杂的俯冲、拼合和陆-陆碰撞造山过程.榆树沟-铜花山-硫磺山蛇绿混杂岩带是南天山北缘古生代板块缝合带(图1)的重要组成部分^[1,2,6,18].该带中的榆树沟高压麻粒岩相变质蛇绿岩地体已被证实为大洋岩石圈俯冲至40~50 km的深地壳经受变质后抬升剥露于现今地表的特殊地体^[1,2,3,6],其SHRIMP锆石U-Pb年龄 392 ± 7 Ma不仅记录了该地体经历高压麻粒岩相变质改造的峰期变质年龄,而且提供了南天山洋盆在泥盆纪早期已开始俯冲的信息.该过程也同样得到出露于榆树沟地体东侧铜花山一带蓝片岩形成年龄(360 ± 2 Ma, 蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ^[19])的佐证.这一年龄的获得为深入讨论南天山造山带的动力学过程具有重要意义.

致谢 研究工作得到国土资源部西安地质矿产研究所周庆华、北京大学电子学系扫描电子显微镜室、北京离子探针中心刘敦一研究员和张玉海、陶华的帮助.另外,感谢北京大学地球与空间科学学院提供的诸多研究便利和匿名评审人对本文修改提出的宝贵建议.本工作受国家重点基础研究发展规划项目(编号:2001CB409801)、国家自然科学基金(批准号:49972075)和西北大学大陆动力学教育部重点实验室开放基金资助.

参 考 文 献

- 王润山,周鼎武,王居里,等.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, 1999, 29: 306~313
- 王润山,王居里,周鼎武,等.南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造蛇绿岩套研究.地质科学, 1999, 43: 166~176
- 王居里,王润山,周鼎武,等.南天山榆树沟麻粒岩相构造岩研究.岩石学报, 1999, 15: 539~547
- 王润山,王焰,李惠民,等.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, 1998, 27: 517~521
- 王润山,周鼎武,王焰,等.南天山榆树沟高压麻粒岩地体多期变质定年研究.岩石学报, 2003, 19: 452~460
- 董云鹏,王润山,周鼎武.南天山北缘榆树沟-超基性岩的地球化学及其成因机制.地球化学, 2001, 30: 559~568
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale. Journal of Geological Society, 1992, 149: 171~184
- Williams I S, Claesson S. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe Zircon U-Th-Pb. Contributions to Mineralogy Petrology, 1987, 97: 205~217
- 刘敦一,简平.大别山双河硬玉石英岩的超高压变质和退变质年龄——SHRIMP测年的证据.地质学报, 2004, 78: 211~217
- 简平,刘敦一,孙晓猛.滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义.地球学报, 2003, 24: 337~342
- Claoue-Long J C, Compston W, Roberts J, et al. Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. In: Berggren W A, Kent D V, Aubry M P, et al, eds. Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation. SEPM Special Publication, 1995. 3~31
- Williams I S, Buick C I. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. Journal of Metamorphic Geology, 1996, 14: 29~47
- Gebauer D, Lappin M A, Grunenfeller M. The age and origin of some Norwegian eclogites: A U-Pb zircon and REE study. Chemical Geology, 1985, 52: 227~248
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple Zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 122: 337~358
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalt: Implications for mantle composition and processes. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 323~345
- Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chemical Geology, 2002, 184: 123~138
- 宋述光,张立飞, Niu Y, 等.北祁连山榴辉岩锆石SHRIMP定年及其构造意义.科学通报, 2004, 49: 592~595
- Shu L S, Charvet J, Lu H F, et al. Palaeozoic accretion-collision events and kinematics of ductile deformation in the eastern part of the southern-central Tianshan belt, China. Acta Geological Sinica (English Edition), 2002, 76: 324~330
- 刘斌,钱一雄.东天山三条高压变质带地质特征和流体作用.岩石学报, 2003, 19: 283~296

(2004-03-13 收稿, 2004-04-16 收修改稿)