

doi:10.3799/dqkx.2012.101

阿尔金北缘古元古代壳源火成碳酸岩的发现

杨俊泉^{1,2}, 万渝生^{3*}, 刘永顺², 辛后田², 张素荣², 李名则¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

3. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037

摘要: 报道了阿尔金东段北缘的古元古代晚期壳源火成碳酸岩全岩地球化学和锆石 SHRIMP 定年结果。它们明显切割围岩, 以岩株状、岩脉状产出, 包裹不同类型围岩包体。岩石主要由方解石、透辉石组成, 含石英、长石等长英质矿物。岩石高 CaO (20.56%~39.80%), SiO₂ 含量变化较大(23.33%~54.06%), 稀土总量低(TREE=28.36×10⁻⁶~63.01×10⁻⁶), 弱负铕异常(Eu/Eu* = 0.69~0.83)、轻重稀土分离不强((La/Yb)_N = 9.20~16.85), 相对富集大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba、Th, 亏损高场强元素 Nb、Ti、P。锆石具核-边结构, 边部锆石普遍存在不明显的环带, 具变质深熔锆石的结构特征, 其²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1931±18 Ma。它们是高级变质作用条件下米兰岩群不纯大理岩深熔作用的产物。

关键词: 火成碳酸岩; 地质年代学; 地球化学; 岩石学; 阿尔金北缘。

中图分类号: P588.15

文章编号: 1000-2383(2012)05-0929-08

收稿日期: 2011-10-22

Discovery of Paleoproterozoic Crustally Derived Carbonatite in the Northern Altyn Tagh

YANG Jun-quan^{1,2}, WAN Yu-sheng^{3*}, LIU Yong-shun², XIN Hou-tian², ZHANG Su-rong², Li Ming-ze¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170

3. Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: This paper reports whole-rock geochemical compositions and zircon dating results of late Paleoproterozoic crustally-derived carbonatite in the northern Altyn Tagh. The carbonatite cuts country rocks and occurs as stocks or dikes and contains different types of country rocks. It is mainly composed of calcite, diopside, and a few silicate minerals (such as, feldspar, quartz, etc.). Samples of the carbonatite are characterized with high CaO contents (20.56%–39.80%), a large range of SiO₂ contents (23.33%–54.06%), low TREE (28.36×10⁻⁶–63.01×10⁻⁶), weakly negative Eu anomalies (Eu/Eu* = 0.69–0.83), moderately fractionated REE patterns ((La/Yb)_N = 9.20–16.85). Compared with Sr, Rb, Ba, Th (LILE), the high field strength elements (HFSE), especially Nb, Ti and P, are strongly depleted. Zircons of the carbonatite show core-rim textures, and commonly show weakly zoning. SHRIMP U-Pb zircon dating result of the carbonatites is 1931±18 Ma. All these three lights on that the carbonatite are formed by the anatexis of impure marbles from Milan group.

Key words: derived carbonatite; geochronology; geochemical geochemistry; Petrology; northern Altyn Tagh.

0 引言

自从发现正在喷溢的碳酸盐熔浆以来,火成碳酸岩的存在就得到地质学家的认可(Le Bas, 1987)。由于火成碳酸岩与许多金属(Nb、Ta、REE)及非金

属(磷灰石、萤石、金刚石等)矿床关系密切,其成因受到广泛的重视。火成碳酸岩主要为幔源成因(喻学惠, 1992; Schleicher *et al.*, 1997; Harmer and Gittins, 1998; 秦朝建和裘愉卓, 2001; Pandit *et al.*, 2002; 邵济安等, 2003; 喻学惠等, 2003; Ying *et al.*,

基金项目: 中国地质调查局 J46C001002(石棉矿幅)1:25 万区域地质调查(修测)项目(No. 200413000006)。

作者简介: 杨俊泉(1980—), 助理研究员, 从事岩石学研究。E-mail: dap-yangjunquan@163.com

* 通讯作者: 万渝生, E-mail: wanyusheng@bjshrmp.cn

2004; 黄智龙等, 2005; Chakhmouradian, 2006; Hou *et al.*, 2006; Rosatelli *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2007), 但近年来的研究表明也有壳源火成碳酸岩存在(赵斌等, 2004; Liu *et al.*, 2006; Wan *et al.*, 2008; 董春艳等, 2009). 本文报道了阿尔金东段北坡的古元古代晚期壳源火成碳酸岩. 它们曾被认为变质的碳酸盐岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993), 但野外地质、锆石特征等表明它们经历过岩浆阶段, 为碳酸盐岩深熔作用的产物.

1 地质背景

在阿尔金断裂以北, 早前寒武纪变质岩广泛分布, 被称为米兰(岩)群(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 程裕淇, 1994). 在 1 : 25 万地质图的修测过程中, 从原米兰群中分辨出大量的花岗质岩石和火成碳酸岩(图 1, 刘永顺等, 2010). 排除 TTG 岩石和火成碳酸岩, 新划分的米兰岩群为一套高角闪岩相—麻粒岩相变质的表壳岩系, 主要由黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、黑云变粒岩、含矽线石榴黑云斜长片麻岩、含石榴斜长角闪岩、斜长角闪岩夹石榴二辉斜长麻粒岩、紫苏黑云斜长麻粒岩组成, 存在少量石墨黑云斜长片麻岩、石英岩、大理岩. 变质原岩以中酸性火山岩夹基性火山岩组成的双峰式火山岩系为主, 夹少量碎屑和化学沉积岩; 形成时代为新太古代, 在其中获得的一批 1.9 Ga 左右的无震荡环带的增生锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄(刘永顺等, 2010), 是米兰岩群在古元古代晚期遭受强烈变质变形的响应. 该区存在新太古代和古元古代不同时代

的花岗质岩石. 新太古代花岗质岩石以英云闪长质片麻岩为主, 包含少量二长花岗质片麻岩, 其分布规模较大. 古元古代花岗质岩石主要包括片麻状闪长岩、片麻状石英二长闪长岩和片麻状石英正长岩, 规模较小(刘永顺等, 2010). 此外, 该区还有中生代花岗岩存在.

2 火成碳酸岩地质特征

火成碳酸岩主要分布于拉配泉以北的卡拉塔什塔格、乌什喀特一带, 在斯木图以东也有零星分布(图 1). 它们以岩株状、岩脉状产出, 以不规则状为主, 次为椭圆状和脉状, 无规律展布, 大小不等, 最大者约 5 km². 岩石易风化, 风化面呈浅灰、灰白、浅灰红色, 表面粗糙但手摸有滑感. 围岩主要为新太古代米兰岩群和变质花岗质岩石, 也有古元古代变质花岗质岩石和古生代花岗岩. 宏观上, 火成碳酸岩以不规则状侵入英云闪长质片麻岩(图 2a). 在变形强的情况下, 火成碳酸岩与围岩的侵入关系难以确定(图 2b, 2c), 因为碳酸岩容易变形和重结晶, 这种接触关系也可解释为变形改造的结果. 但在变形弱的地方, 可见火成碳酸岩呈清楚的脉状切割围岩(图 2d, 2e). 火成碳酸岩中存在不同形态、不同大小和不同类型的围岩包体(图 2f, 2g, 2h), 有花岗质片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩等包体, 大小一般为 10~20 cm, 有的达 100 cm 以上. 包体含量变化也很大, 个别地段或侵入体边部可达 20%~30%. 火成碳酸岩呈脉状侵入包体, 两者之间发生同化混染. 在露头尺度上可见不同包体的片麻理方向发生变化.

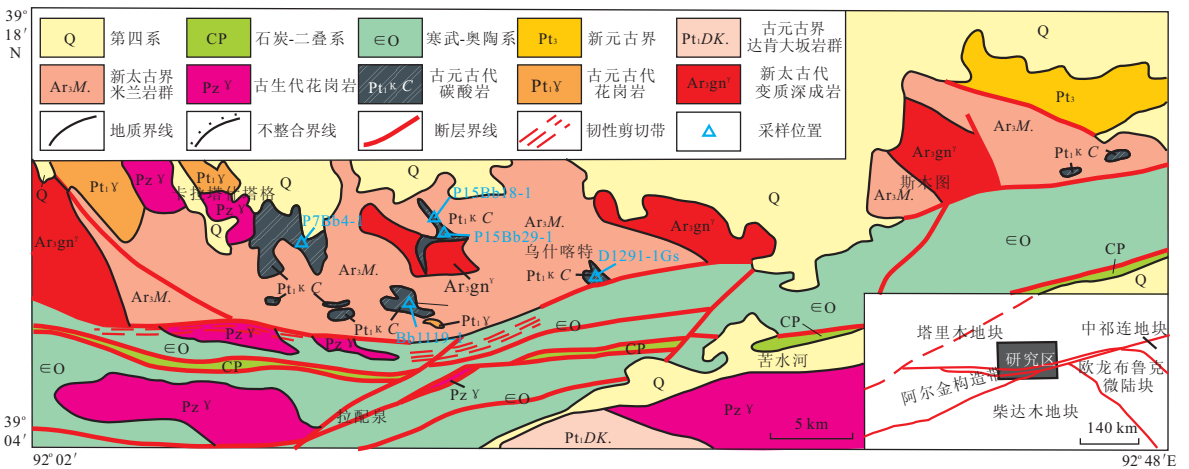


图 1 阿尔金北缘地质简图示火成碳酸岩的分布(据拉配泉地区基岩区侵入岩分布图改编; 刘永顺等, 2010)

Fig. 1 Sketched geological map of the northern Altyn Tagh showing carbonatite distribution

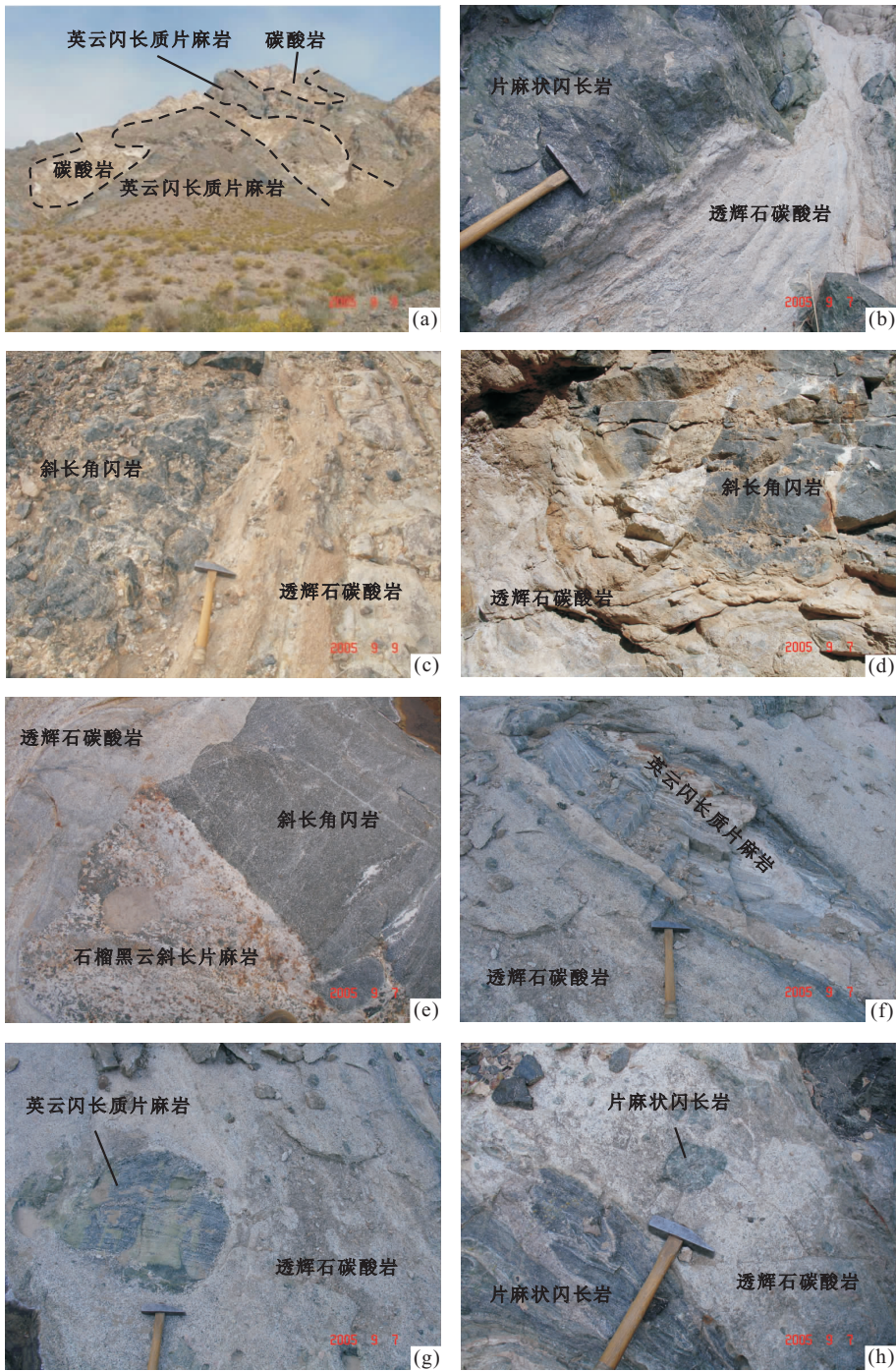


图 2 阿尔金北缘火成碳酸岩野外照片

Fig. 2 Field features of carbonatites in the northern Altyn Tagh

a. 火成碳酸岩侵入英云闪长质片麻岩; b. 火成碳酸岩与围岩片麻状闪长岩的接触带呈强变形特征; c. 火成碳酸岩与围岩斜长角闪岩的接触带呈强变形特征; d. 火成碳酸岩呈分支脉状切割米兰岩群斜长角闪岩; e. 火成碳酸岩切割石榴黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩, 接触界线波状不平; f. 火成碳酸岩中长条状英云闪长质片麻岩包体, 有碳酸岩岩脉侵入切割包体; g. 火成碳酸岩中椭圆形英云闪长质片麻岩包体, 相互之间存在反应; h. 火成碳酸岩中不同形态的片麻状闪长岩包体, 片麻理方向不同

3 分析技术

元素分析在天津地质矿产研究所实验室完成, 常量元素用 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪测试, 按

GB/T 14506. 28-1993 标准执行. 稀土元素及微量元素用等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测试, 稀土元素按 Q/GD 003-2002 标准执行, 微量元素按 Q/GD 002-2002 标准执行. 激光拉曼光谱分析在中国地质科学院地

质所大陆动力学实验室完成. 锆石 SHRIMP U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心完成. 定年方法见张艳飞等(2010). 标准锆石 SL13($U=238\times 10^{-6}$)用于校正 U 含量, TEM($t=417$ Ma)用于校正年龄. TEM 和待测样之比为 $1/4\sim 1/3$.

4 岩相学和地球化学

火成碳酸岩主要由方解石、透辉石组成,局部石英、长石等长英质矿物可达 $20\%\sim 30\%$,部分岩石中存在金云母、方柱石、蛇纹石. 方解石呈他形粒状,颗粒大小不一($0.5\sim 2.5$ mm),大的个体边界较规则,粒间似镶嵌状分布于其他矿物间,小的颗粒呈集合体分布于其他矿物间. 普遍发育波状消光、机械双晶. 透辉石呈半自形粒状、柱状,分散分布. 边部常见溶蚀港湾状,有的沿裂隙被方解石充填,被阳起石、透闪石交代. 石英和长石分散分布,有时呈集合体分布,石英、长石呈港湾状、浑圆状,其中裂隙内可见方解石充填. 有的岩石中可见橄榄石或辉石等假象,均被蛇纹石替代. 还见次生矿物透闪石、阳起石、绿帘石等;副矿物为磁铁矿、榍石、锆石等.

5 个样品分析, $SiO_2=23.33\%\sim 54.06\%$, $Al_2O_3=1.63\%\sim 5.44\%$, $TFeO=0.85\%\sim 2.74\%$, $MgO=1.37\%\sim 3.32\%$, $CaO=20.56\%\sim 39.80\%$. Na_2O, K_2O 含量均低于 1.0% (表 1). CaO 与 SiO_2 呈负相关,反映了碳酸盐矿物与石英+硅酸盐矿物的互补关系. 稀土总量低($TREE=28.36\times 10^{-6}\sim 63.01\times 10^{-6}$),具弱负铕异常($Eu/Eu^*=0.69\sim 0.83$),轻重稀土分离不强($(La/Yb)_N=9.20\sim 16.85$)(图 3a). 在微量元素蛛网图上,大离子亲石元素 Sr、Rb、Ba、Th 相对富集,高场强元素 Nb、Ti、P 相对亏损(图 3b). 地球化学组成上,它们与幔源火成碳酸岩(很高的稀土含量,轻重稀土强烈分离,富集高场强元素,杨学明等,1999;邵济安等,2003)存在明显区别,而与大青山地区壳源火成碳酸岩类似(图 3a, 3b);与大青山地区壳源火成碳酸岩相比,它们的稀土和微量元素含量更低,可能与两地带入碳酸岩体系的表壳岩的地球化学组成存在差异有关.

5 锆石特征及定年结果

对样品 TW1119-1 进行了锆石定年. 锆石形态

表 1 阿尔金北缘古元古代火成碳酸岩元素组成

Table 1 Chemical compositions of carbonatite in the northern Altyn Tagh

样号	Bb1119-1	P15Bb29-1	P15Bb18-1	D1291-IGs*	P7Bb4-1
SiO ₂	54.06	40.19	29.44	28.36	23.33
TiO ₂	0.27	0.24	0.32	0.25	0.12
Al ₂ O ₃	5.44	4.37	5.28	4.1	1.63
Fe ₂ O ₃	0.83	0.16	0.1	—	0.11
FeO	2.02	1.78	2.71	1.39	0.84
MnO	0.05	0.03	0.03	0.02	0.06
MgO	2.56	3.32	2.78	1.94	1.37
CaO	20.56	29.78	36.30	36.56	39.80
Na ₂ O	0.77	0.76	0.49	0.45	0.29
K ₂ O	0.75	0.86	0.64	0.65	0.31
P ₂ O ₅	0.02	0.06	0.09	0.07	0.07
LOI	11.69	17.76	21.94	25.36	31.46
La	8.05	12.6	12.5	8.49	6.08
Ce	15.8	24.7	23.6	13.7	11.1
Pr	1.74	2.67	2.44	1.59	1.13
Nd	6.31	9.65	8.51	5.64	4.19
Sm	1.21	1.66	1.46	0.98	0.78
Eu	0.26	0.35	0.32	0.27	0.16
Gd	0.91	1.39	1.12	0.98	0.53
Tb	0.15	0.24	0.18	0.13	0.09
Dy	0.97	1.27	1.05	0.83	0.52
Ho	0.18	0.23	0.19	0.17	0.1
Er	0.6	0.72	0.56	0.47	0.31
Tm	0.08	0.09	0.08	0.08	<0.05
Yb	0.59	0.61	0.5	0.44	0.31
Lu	0.08	0.09	0.09	0.08	<0.05
Y	4.82	6.74	5.43	4.61	2.98
TREE	41.75	63.01	58.03	38.46	28.36
σEu	0.73	0.69	0.74	0.83	0.72
(La/Yb) _N	9.2	13.93	16.85	13.01	13.22
Ba	227	241	243	251	97.7
Rb	24.9	29.4	14.1	17.3	13.1
Sr	646	1089	1154	1648	909
Zr	50.5	51.7	34.3	60.7	34.2
Nb	2.71	3.03	3.5	2.47	1.27
Th	1.54	2.58	2.43	2.16	1.86
Pb	4.67	12.6	8.43		4.13
Zn	55.5	44.7	70.9		15.3
Cu	11.9	9.66	12.1		3.46
Ni	28.2	29.6	31.2		24
V	59.2	35.6	47.2		16.8
Cr	61.5	34.5	35.7	77.8	14.4
Hf	1.52	1.34	1.02	1.58	0.74
Sc	9.85	6.6	7.8	4.74	3.26
Ta	0.23	0.14	0.29	0.17	0.09
Co	9.6	9.33	13.4		5.84
Li	7.5	12	8.6		1.94
U	1.36	2.11	1.52	2.15	1.38

* 引自拉配泉地区 1:5 万区调报告;常量元素单位为%,稀土和微量元素单位为 10^{-6} .

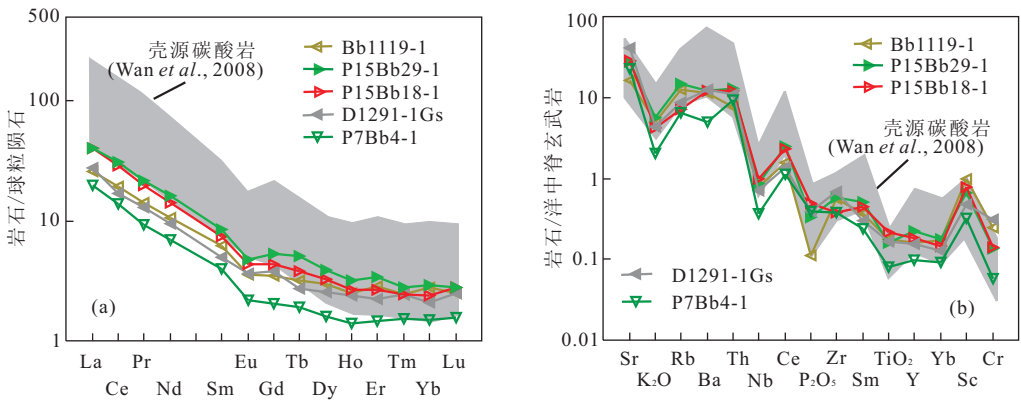


图 3 阿尔金北缘碳酸岩地球化学图谱

Fig. 3 REE pattern (a) and trace element spider diagram (b) of carbonatite in the northern Altyn Tagh
a. 稀土配分曲线; b. 微量元素蛛网图; 标准化数据分别取自 Boynton(1984)和 Pearce(1982)

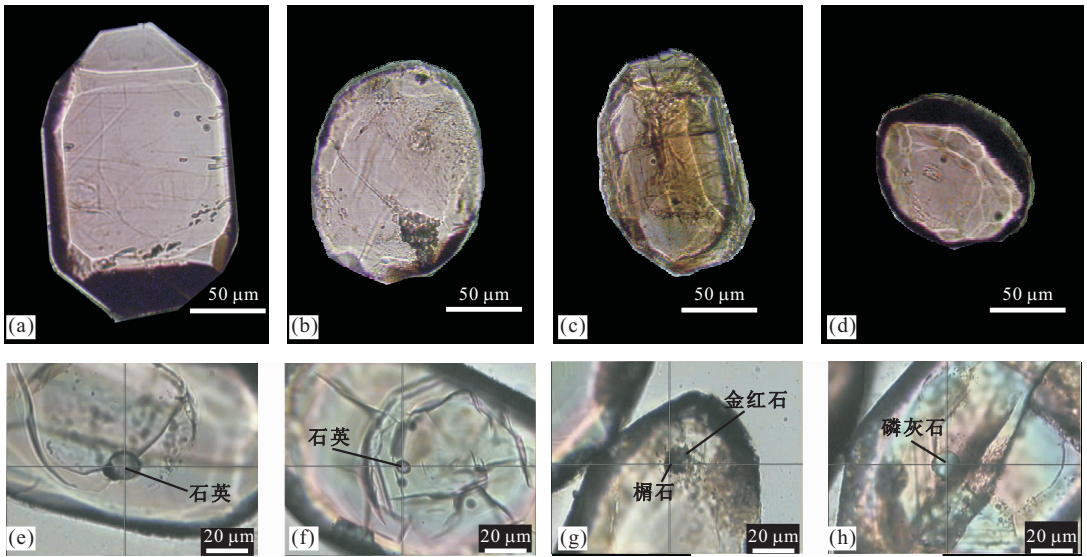


图 4 阿尔金北缘火成碳酸岩(TW1119-1)的锆石透射光图像

Fig. 4 Plane polarized light images of zircons from carbonatite in the northern Altyn Tagh

变化很大,从自形到圆形都有,一些锆石存在平行环带(图 4a-4d)。包裹体较少,包括石英、榧石、磷灰石、金红石等(图 4e-4h),结合阴极发光研究,包体多位于核部残余锆石。阴极发光下,一些锆石具核一边结构(图 5a),核部锆石为残余成因。一些锆石的核部呈扇形结构(图 5b-5d),具高级变质(高角闪岩相-麻粒岩相)锆石的结构特征,部分可能为残余锆石重结晶的结果。边部锆石普遍存在不明显的环带(图 5a-5d),具深熔成因锆石的结构特征。

对 17 颗锆石进行了 19 个数据点分析(表 2)。5 个残余锆石数据点分析,U 含量和 Th/U 比值分别为 308×10^{-6} 和 $0.16 \sim 0.37$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,274 \sim 2\,540$ Ma。12 个变质或深熔锆石数据点分析,U 含量和 Th/U 比值分别为 $241 \times 10^{-6} \sim 984 \times$

10^{-6} 和 $0.04 \sim 0.14$ 。由于部分一次离子流斑点位于残余锆石上,数据点 1.1ME 和 13.1ME 的年龄偏大。再除去 3 个误差大的数据点,其余 7 个变质或深熔锆石数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\,931 \pm 18$ Ma(MSWD=5.4;图 6)。该年龄被解释为变质深熔作用的时期,大的 MSWD 可能与作用过程的复杂性有关。

6 讨论及结论

阿尔金北缘原米兰岩群大理岩的一部分被认为是壳源火成碳酸岩,证据可概括如下:(1)它们明显切割围岩,以岩株状、岩脉状产出;(2)岩石中存在不

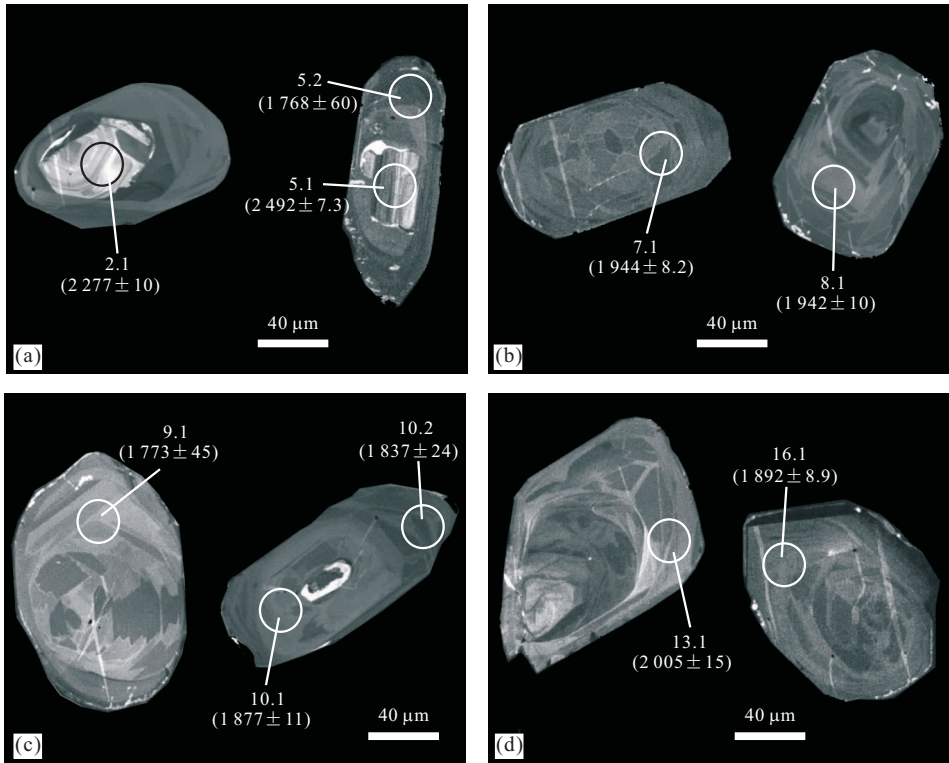


图 5 阿尔金北缘火成碳酸岩(TW1119-1)的锆石阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of zircons from carbonatite in the northern Altyn Tagh
图中圆圈内为锆石 SHRIMP U-Pb 测年位置,其编号与表 2 中的一致

表 2 阿尔金北缘火成碳酸岩(Tw1119-1)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 2 U-Pb SHRIMP data of zircons from carbonatite in the northern Altyn Tagh

点号	$w_B/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$			Th/ U	同位素原子比率				误差 相关	表面年龄(Ma)			
	$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* \pm \%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			
1. 1ME	117	395	53	0.14	0.122 22	0.55	5.78	3.9	0.343	3.8	0.99	1901±63	1989±9.9
2. 1IN	98.9	308	51	0.17	0.144 06	0.56	7.42	3.5	0.374	3.4	0.987	2047±60	2277±10
3. 1IN	240	790	281	0.37	0.144 93	0.37	7.04	3.4	0.353	3.4	0.994	1947±57	2287±6.3
4. 1IN	169	450	158	0.36	0.168 2	0.68	10.1	3.5	0.436	3.4	0.981	2331±67	2540±11
5. 1IN	130	461	72	0.16	0.163 46	0.44	7.39	3.4	0.328	3.4	0.992	1828±54	2492±7.3
5. 2ME	196	612	23	0.04	0.108 1	3.3	5.56	4.7	0.373	3.4	0.72	2044±60	1768±60
6. 1ME	243	984	53	0.06	0.120 3	0.44	4.77	3.4	0.2876	3.4	0.992	1630±49	1961±7.8
7. 1ME	176	511	56	0.11	0.119 17	0.46	6.58	3.4	0.4	3.4	0.991	2171±63	1944±8.2
8. 1ME	110	421	45	0.11	0.119 02	0.56	4.99	3.9	0.304	3.9	0.99	1712±59	1942±10.0
9. 1ME	73.1	241	22	0.09	0.108 4	2.5	5.27	4.2	0.352	3.4	0.813	1946±58	1773±45
10. 1ME	122	413	41	0.10	0.114 8	0.6	5.45	3.5	0.344	3.4	0.985	1907±57	1877±11
10. 2ME	212	685	70	0.11	0.112 3	1.3	5.58	3.6	0.36	3.4	0.932	1983±58	1837±24
11. 1ME	147	513	44	0.09	0.116 5	0.5	5.37	3.4	0.334	3.4	0.989	1858±55	1903±9.0
12. 1ME	134	443	44	0.10	0.117 57	0.52	5.73	3.4	0.353	3.4	0.988	1951±57	1920±9.4
13. 1ME	102	341	42	0.13	0.123 3	0.84	5.93	3.5	0.349	3.4	0.971	1929±57	2005±15
14. 1ME	227	714	44	0.06	0.118 01	0.5	6.01	3.4	0.369	3.4	0.989	2026±59	1926±8.9
15. 1ME	174	542	43	0.08	0.117 44	0.43	6.06	3.4	0.375	3.4	0.992	2051±60	1918±7.7
16. 1ME	135	499	53	0.11	0.115 74	0.49	5.01	3.5	0.314	3.4	0.99	1760±53	1892±8.9
17. 1IN	199	580	93	0.17	0.143 85	0.59	7.92	3.7	0.399	3.6	0.987	2165±66	2274±10

注:误差为 1σ;Pb* 指示放射成因铅;所有同位素比率已对测得的 ^{204}Pb 进行了校正. 样品数据由地科院北京离子探针中心测试.

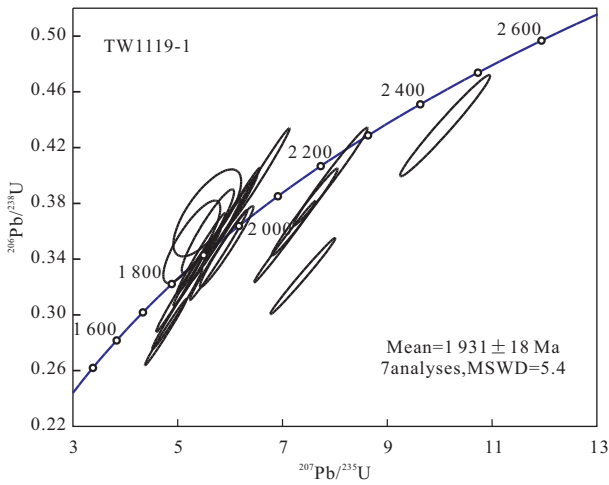


图 6 阿尔金北缘火成碳酸岩 (TW1119-1) 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 Concordia diagram of U-Pb SHRIMP data of zircons from carbonatite in the northern Altyn Tagh

同类型包体,野外特征表明它们不是变形作用改造的结果;(3)幔源火成碳酸岩常与碱性玄武岩、煌斑岩和金伯利岩空间上共生(Harmer and Gittins, 1998; Ying *et al.*, 2004; 黄智龙等, 2005; Zhang *et al.*, 2007; 董春艳等, 2009), 但该区无这些同时代的幔源岩浆岩存在;(4)它们与米兰岩群关系密切,米兰岩群中存在大理岩;(5)该区在古元古代晚期遭受高级麻粒岩相变质作用叠加(刘永顺等, 2010),该条件下不纯大理岩如果含水可发生深熔(Wyllie and Huang, 1976; Baker and Wyllie, 1990);(6)地球化学上,它们与幔源火成碳酸岩存在明显区别,而与大青山地区壳源火成碳酸岩类似;(7)锆石普遍具变质锆石的形态、结构和组成特征,但部分锆石呈自形,边部锆石大多发育不明显环带,具深熔锆石的特点。

壳源火成碳酸岩研究近年来受到重视。阿尔金北缘壳源火成碳酸岩是迄今为止在国内分辨出的规模最大的壳源火成碳酸岩,它们是由新太古代米兰岩群中不纯大理岩发生深熔作用形成。阿尔金北缘和大青山地区存在十分类似的早前寒武纪地质演化,开展两地对比研究,不论对华北克拉通孔兹岩带西延范围的确定,还是进一步了解壳源火成碳酸岩的形成过程,都具有重要的科学意义。

致谢:本文写作过程中,中国地质科学院张洪瑞博士提出很多宝贵意见,天津地质矿产研究所张健工程师、中国地质科学院闫玲教授在实验测试方面为作者提供了帮助及指导,尹海龙工程师在绘图过

程中给予了帮助,匿名审稿人也在成文过程中提供了许多建议,在此一并致以诚挚的感谢。

References

Baker, M. B., Wyllie, P. J., 1990. Liquid immiscibility in a nephelinite-carbonate system at 25 kbar and implications for carbonatite origin. *Nature*, 346: 168—170. doi: 10.1038/346168a0

Boynnton, W. V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P., Rare earth element geochemistry. Elsevier, 63—114.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Chakhmouradian, A. R., 2006. High-field-strength elements in carbonatitic rocks: geochemistry, crystal chemistry and significance for constraining the sources of carbonatites. *Chemical Geology*, 235 (1—2): 138—160. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.06.008

Chen, Y. Q., 1994. The generality of regional geology in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Dong, C. Y., Liu, D. Y., Wan, Y. S., et al., 2009. Crustally derived carbonatite from the Daqingshan area: zircon features and SHRIMP dating. *Acta Geologica Sinica*, 83 (3): 388—398 (in Chinese with English abstract).

Harmer, R. E., Gittins, J., 1998. The case for primary, mantle-derived carbonatite magma. *Journal of Petrology*, 39(11—12): 1895—1903. doi: 10.1093/ptro/39.11—12.1895

Hou, Z. Q., Tian, S. H., Yuan, Z. X., et al., 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *EPSL*, 244(1—2): 234—250. doi: 10.1016/j.epsl.2006.01.052

Huang, Z. L., Xu, C., Liu, C. Q., 2005. Carbonatites and geochemistry of platinum-group elements. *Geological Review*, 51(4): 443—451 (in Chinese with English abstract).

Le Bas, M. J., 1987. Nephelinites and carbonatites. In: Fitton, J. G., Upton, B. J. G., eds., Alkaline igneous rocks. *Geological Society, London, Special Publication*, 30: 53—83. doi: 10.1144/GSL.SP.1987.030.01.05

Liu, Y., Berner, Z., Massonne, H. J., et al., 2006. Carbonatite-like dykes from the eastern Himalayan syntaxis: geochemical, isotopic, and petrogenetic evidence for melting of metasedimentary carbonate rocks within the orogenic crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26 (1): 105—120. doi: 10.1016/j.jseaes.2004.10.003

Liu, Y. S., Xin, H. T., Zhou, S. J., et al., 2010. Precambrian and Paleozoic tectonic evolution in Lapeiquan area, eastern Altyn

- Tagh. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Pandit, M. K., Sial, A. N., Sukumaran, G. B., et al., 2002. Depleted and enriched mantle sources for Pale- and Neoproterozoic carbonatites of southern India; Sr, Nd, C-O isotopic and geochemical constraints. *Chemical Geology*, 189 (1—2): 69—89. doi: 10.1016/S0009—2541(02)00136—5
- Pearce, J. A., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., *Orogenic andesites and related rocks*. John Wiley and Sons, Chichester, England, 528—548.
- Qin, C. J., Qiu, Y. Z., 2001. Recent progress in carbonatite research. *Advance of Earth Science*, 16 (4): 501—507 (in Chinese with English abstract).
- Rosatelli, G., Wall, F., Stoppa, F., 2007. Calcio-carbonatite melts and metasomatism in the mantle beneath Mt. Vulturno (southern Italy). *Lithos*, 99(3—4): 229—248. doi: 10.1016/j.lithos.2007.05.011
- Schleicher, H., Todt, W., Viladkar, S. G., et al., 1997. Pb/Pb age determinations on the Newania and Sevattur carbonatites of India; evidence for multi-stage histories. *Chemical Geology*, 140 (3): 261—273. doi: 10.1016/S0009—2541(97)00022—3
- Shao, J. A., Zhang, Y. B., Zhang, L. Q., et al., 2003. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 93—104 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Xu, Z. Y., et al., 2008. Paleoproterozoic crustally derived carbonatite-rich magmatic rocks from the Daqinshan area, North China Craton; geological, petrographical, geochronological and geochemical (Hf, Nd, O and C) evidence. *American Journal of Science*, 308: 351—378. doi:10.2475/03.2008.07
- Wyllie, P. J., Huang, W. I., 1976. Carbonation and melting reactions in the system CaO-MgO-SiO₂-CO₂ at mantle pressure with geological and petrological applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 54 (2): 79—107. doi: 10.1007/BF00372117
- Yang, X. M., Yang, X. Y., Chen, T. H., et al., 1999. Geochemical characteristics of a carbonatite dyke rich in rare earths from Bayan Obo, China. *Journal of Chinese Rare Earths Society*, 17(4): 289—295 (in Chinese with English abstract).
- Ying J. F., Zhou X. H., Zhang H. F., 2004. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu Zibo carbonatites from western Shandong Province, China, and implications for their petrogenesis and enriched mantle source. *Lithos*, 75 (3—4): 413—426. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.037
- Yu, X. H., 1992. Geological, petrol-mineralogical characteristics and origin of the carbonatites from huayangchijian, shaanxiprovince. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(2): 151—158 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., Mo, X. X., Su, S. G., et al., 2003. Discovery and significance of Cenozoic volcanic carbonatite in Lixian, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 105—112 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. L., Li, X. H., Li, Z. X., et al., 2007. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim block, western China: geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Precambrian Research*, 152 (3—4): 149—169. doi: 10.1016/j.precamres.2006.11.003
- Zhang, Y. F., Liu, J. D., Xiao, R. G., et al., 2010. The hyalotourmalites of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning: zircon features and SHRIMP dating. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35 (6): 985—999 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B., Zhao, J. S., Wang, J. C., et al., 2004. A possible new carbonatite type: crust-derived carbonatite. *Geochimica*, 33 (6): 649—652 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程裕祺, 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社.
- 董春艳, 刘敦一, 万渝生, 等, 2009. 大青山地区古元古代壳源碳酸岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年. *地质学报*, 83(3): 388—398.
- 黄智龙, 许成, 刘丛强, 2005. 碳酸岩与铂族元素地球化学. *地质论评*, 51(4): 443—451.
- 刘永顺, 辛后田, 周世军, 等, 2010. 阿尔金山东段拉配泉地区前寒武纪及古生代构造演化. 北京: 地质出版社.
- 秦朝建, 裘愉卓, 2001. 岩浆(型)碳酸岩研究进展. *地球科学进展*, 16(4): 501—507.
- 邵济安, 张永北, 张履桥, 等, 2003. 大同地区早中生代煌斑岩—碳酸岩岩墙群. *岩石学报*, 19(1): 93—104.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 杨学明, 杨晓勇, 陈天虎, 等, 1999. 白云鄂博富稀土碳酸岩的地球化学特征. *中国稀土学报*, 17(4): 289—295.
- 喻学惠, 1992. 陕西华阳川碳酸岩地质学和岩石学特征及其成因初探. *地球科学——中国地质大学学报*, 17(2): 151—158.
- 喻学惠, 莫宣学, 苏尚国, 等, 2003. 甘肃礼县新生代火山喷发碳酸岩的发现及意义. *岩石学报*, 19(1): 105—112.
- 张艳飞, 刘敬党, 肖荣阁, 等, 2010. 辽宁后仙峪硼矿区古元古代电气石岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(6): 985—999.
- 赵斌, 赵劲松, 汪劲草, 等, 2004. 一种可能的碳酸岩类型: 壳源成因碳酸岩. *地球化学*, 33(6): 649—652.