

北阿尔金红柳泉早古生代枕状玄武岩 及其大地构造意义

孟繁聪, 张建新, 于胜尧, 陈松永

中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:对北阿尔金蛇绿混杂岩带中红柳泉剖面的枕状玄武岩进行了岩石地球化学研究, 主元素具有高钛高钠、低铝低钾的特点。其中 SiO_2 含量为 43.34%~52.55%, Na_2O 含量为 3.97%~7.36%, K_2O 含量为 0.27%~0.94%。 TiO_2 含量为 2.13%~5.49%, Al_2O_3 含量为 9.02%~13.77%, 显示出细碧岩 (Spilite) 的地球化学特征。微量元素配分模式类似于洋岛或海山玄武岩 (OIB/Seamount), 不同于洋中脊玄武岩 (MORB)。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.7043~0.7052, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.51253~0.51265, $\epsilon_{\text{Nd}}(448\text{Ma})$ 为 2.19~3.88, 玄武岩浆主要来自于上涌的含有富集组分的软流圈地幔。综合考虑剖面上出现的沉积岩石组合, 推测玄武岩形成于弧后盆地的海山环境。在阿尔金走滑断裂形成以前, 北阿尔金与北祁连构成一个统一的弧后盆地系统, 是原特提斯洋在中国境内的最北部边界, 这对认识青藏高原和中国西部大地构造格局的演化具有重要意义。

关键词: 枕状玄武岩; 蛇绿岩; 北阿尔金; 红柳泉

在阿尔金山北部的红柳沟-拉配泉一带, 不仅有蛇绿岩出露(刘良, 1999; 吴峻等, 2001, 2002; 杨经绥等, 2002, 2008), 在北阿尔金东段的贝克滩一带还报道出露有高压泥质岩(车自成等, 1995; 刘良等, 1999)。近年来, 我们在北阿尔金西段的红柳泉一带, 通过详细的野外剖面观察和室内岩相学和矿物学工作, 在由蛇纹岩、堆晶岩、枕状熔岩及硅质岩等组成的蛇绿混杂岩之间, 发现有石榴蓝闪石片岩(蓝片岩)和榴辉岩的出露(Zhang et al., 2005; 张建新和孟繁聪, 2006), 它们可以和北祁连造山带所出露的 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩对比, 可能为同一洋壳俯冲变质的产物(Zhang et al., 2005), 支持北阿尔金是北祁连西延部分的认识(许志琴等, 1999)。本文重点对红柳泉蛇绿混杂岩中的枕状熔岩进行研究, 进一步探讨其形成环境及构造意义。

1 地质背景

阿尔金山在青藏高原北部边缘呈 SWW—NEE 向延伸约 800 km, 北邻塔里木盆地, 南为巨型的阿尔金左行走滑断裂所限(图 1)。根据已有的区域地质和岩石构造资料(新疆地质矿产局, 1993; Zhang et al., 2001), 在阿尔金山内可划分成三个近 EW

向的断裂(或剪切带)所分割的构造单元, 从北向南分别为: ①北阿尔金俯冲增生杂岩带(NAS), 主要呈近 EW 向分布在红柳沟-拉配泉一带, 由浅变质的火山岩、火山碎屑岩及碎屑岩等所组成, 并夹有具有蛇绿岩特征的超基性岩(蛇纹岩)、基性岩墙群和基性枕状熔岩。蛇绿岩中发现有代表洋脊扩张的基性岩墙群, 以及代表洋盆存在的洋壳岩石组合(刘良, 1999; 杨经绥等, 2002; 吴峻等, 2001, 2002); 获得的年代学证据显示其时代为早古生代(刘良, 1999; 修群业等, 2007; 杨经绥等, 2008)。蓝片岩和低温榴辉岩为特征的 HP/LT 变质带呈构造岩片分布在其中(Zhang et al., 2005; 张建新和孟繁聪, 2006)。榴辉岩中多硅白云母的坪年龄为 $512 \pm 3\text{Ma}$, 蓝片岩中钠云母的坪年龄为 $491 \pm 3\text{Ma}$ (张建新等, 2007)。此外, 与俯冲增生杂岩相伴生的还有具有岛弧环境的花岗岩, 其时代为 480Ma(戚学祥等, 2005a, b; 吴才来等, 2005, 2007)。②中阿尔金地块(CAB), 主要由浅变质的陆缘碎屑岩和碳酸盐岩所组成金雁山群、角闪岩相变质杂岩组成的阿尔金群及不同时代的侵入岩所组成, 其中碳酸盐岩中含有叠层石化石, 并据此认为其时代为中新元古代(新疆地质矿产局, 1993); 阿尔金群原被认为时代为古元古代, 近年来

注: 本文为中国地质调查项目(编号 1212010611811、1212010918003)资助的成果。

收稿日期: 2010-02-02; 改回日期: 2010-05-13; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 孟繁聪, 男, 1967年生。博士, 研究员。从事火成岩岩石学研究。电话: 010-68999734(O); Email: mengfancong@yeah.net。

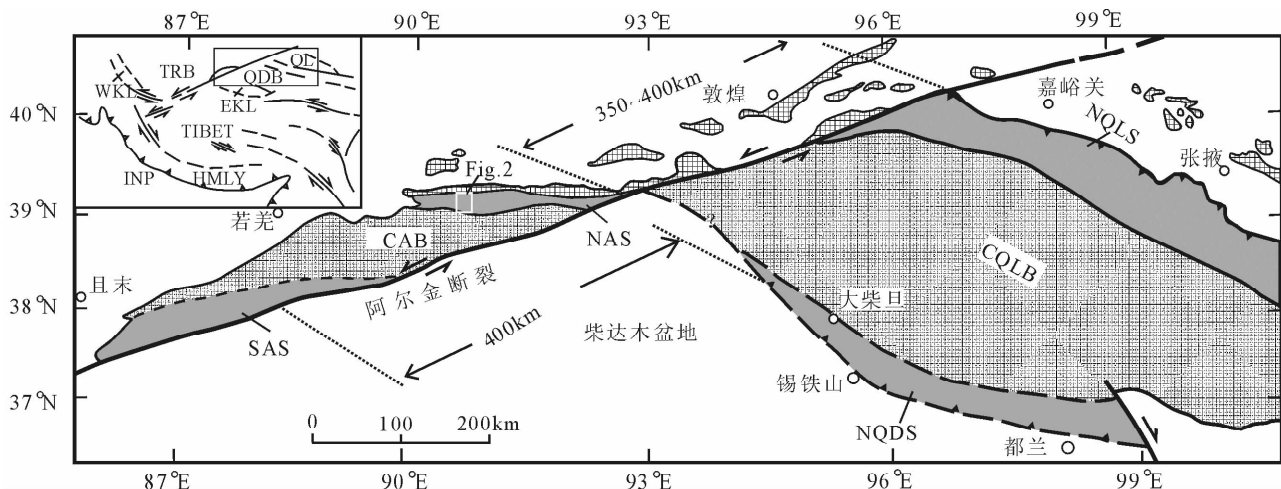


图1 阿尔金-祁连构造单元对比图(据许志琴等,1999; Zhang et al., 2001; Liu et al., 2007)

Fig. 1 The tectonic units comparison between Altyn and Qilian

(after Xu et al., 1999; Zhang et al., 2001; Liu et al., 2007)

QL—祁连山; TRB—塔里木盆地; QDB—柴达木盆地; WKL—西昆仑; EKL—东昆仑; NAS—北阿尔金缝合带;

CAB—中阿尔金地块; SAS—南阿尔金缝合带; NQLS—北祁连缝合带; CQLB—中祁连地块; NQDS—柴北缘缝合带

QL—Qilian Mountains; TRB—Tarim Basin; QDB—Qaidam Basin; WKL—Western Kunlun Mountains; EKL—Eastern Kunlun mountains; NAS—North Altyn Suture; CAB—Central Altyn tagh block; SAS—South Altun tagh Suture; NQLS—North Qilian Suture; CQLB—Central Qilian Block; NQDS—North Qaidam Suture

一些新的研究资料显示其主要形成于中元古代—新元古代早期(于海峰等, 2002)。③南阿尔金俯冲-碰撞杂岩带(SAS), 由长英质片麻岩和少量呈透镜状分布在这些片麻岩中的榴辉岩、高压麻粒岩和石榴橄榄岩等组成, 在这些岩石中已发现一些 UHP 变质作用证据(张建新等, 2002; 刘良等, 2002), 其峰期变质时代为 500Ma 左右(张建新等, 1999; Zhang et al., 2001)。

在阿尔金断裂东侧, 由北向南同样可分为三个构造单元, 分别为: 北祁连俯冲杂岩带(NQLS)主要由蛇绿岩、蛇绿混杂岩和高压蓝片岩、榴辉岩组成, 蛇绿岩的时代为早寒武世-奥陶纪(王荃和刘雪亚, 1976; 肖序常等, 1978; Xia et al., 2003; 史仁灯等, 2004; 相振群等, 2007), 高压蓝片岩和榴辉岩的变质时代为 440~480Ma(Wu et al., 1993; 张建新等, 1997; 宋述光等, 2004; Zhang et al., 2007)。中祁连地块(CQLB)主要由前寒武纪变质基底岩石所组成, 高级变质岩达角闪岩相, 浅变质岩由碳酸盐岩、碎屑岩夹火山岩组成(青海省地质矿产局, 1991); 时代为元古代。柴北缘俯冲碰撞杂岩带(NQDS)主要由片麻岩组成, 其中含有透镜状榴辉岩和石榴橄榄岩; 发生高压-超高压变质作用的时代为早古生代(许志琴等, 1999; Zhang et al., 2001)。根据柴北缘俯冲杂岩带与南阿尔金俯冲杂岩带的相似性, 推测

阿尔金断裂带左行走滑了约 400km(许志琴等, 1999; Zhang et al., 2001)。北阿尔金与北祁连的高压蓝片岩和榴辉岩有相似性, 推测北阿尔金是北祁连的西延部分(Zhang et al., 2005; 张建新和孟繁聪, 2006)。

2 野外产状及枕状熔岩的特征

红柳泉剖面位于北阿尔金西段(图 1), 北东起 39°11. 87'N, 90°38. 50'E, 南西至 39°07. 27'N, 90°32. 07'E。该段剖面所见岩性主要为灰岩、砂泥岩、条带状硅质岩和枕状熔岩(图 2b, 图 3a)。从岩石组合看, 推测为浅海-半深海环境, 而不是大洋环境, 尽管枕状熔岩具有洋岛玄武岩(OIB)性质(刘良, 1999)。该段剖面北侧为早古生代的花岗闪长岩, 形成时代 480Ma(戚学祥等, 2005), 西南侧为一套经历过低温高压变质的蓝片岩、榴辉岩和云母石英片岩组合(图 2a)。

具有枕状特征的火山熔岩剖面长度约 200m(图 2a, b)。岩枕灰绿色-黑色, 椭球状或球形, 直径约 30~60cm, 大小不等, 局部地段的岩枕呈半定向排列。岩枕碳酸盐化明显, 裂纹发育处可见毫米级的碳酸盐细脉。选择化学分析的样品尽量避开碳酸盐化发育的部位, 另外也采集了与枕状熔岩相邻的块状玄武岩。

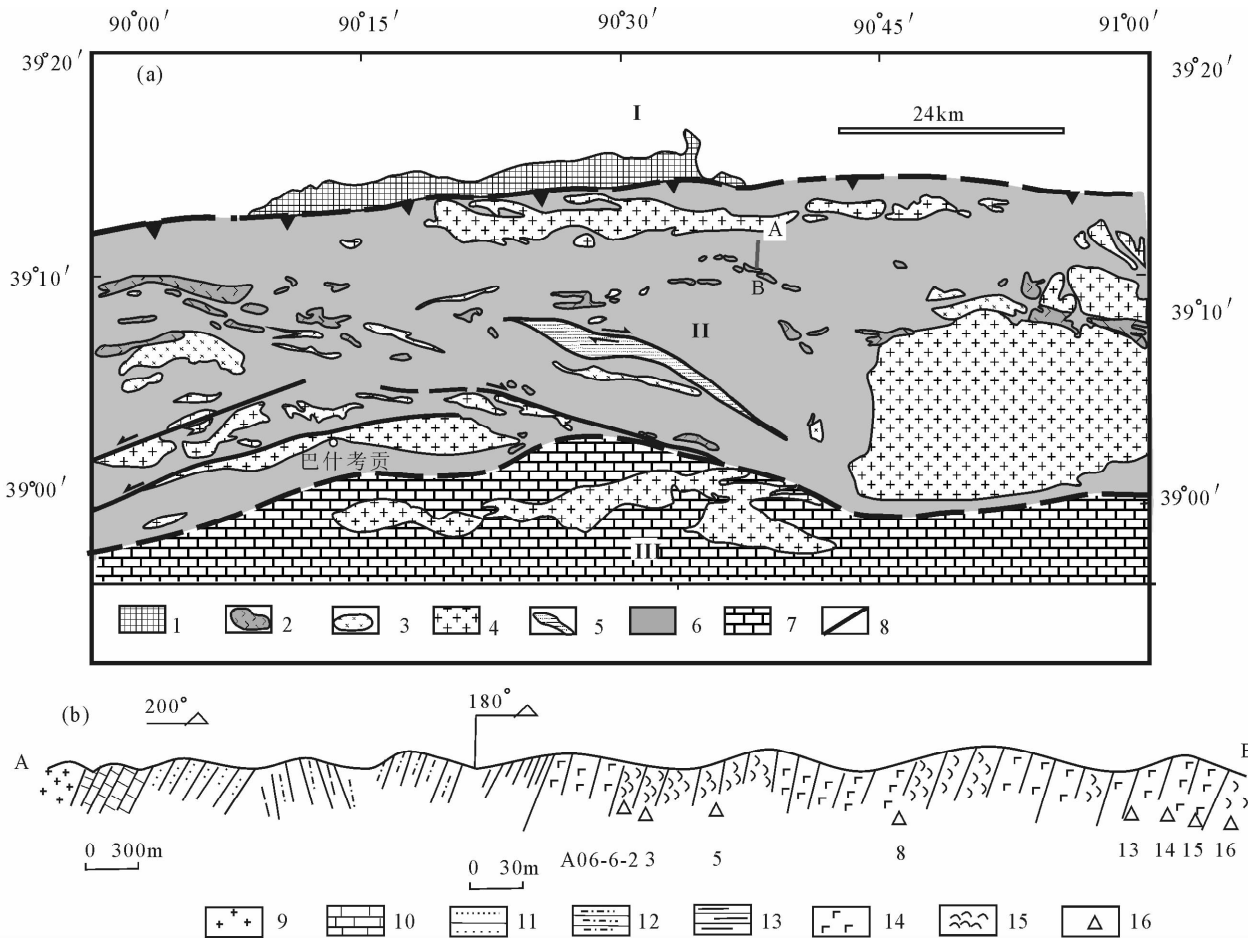


图 2 北阿尔金西段红柳泉蛇绿混杂岩及 HP/LT 变质岩片分布地质图(a)和红柳泉剖面(b)(位置见图 2aAB)

Fig. 2 Distribution of ophiolitic mélangé and HP/LT metamorphic terrane from western segment of North Altyn Tagh (a) and profile of Hongliuquan (b)

I—塔里木地块;II—北阿尔金俯冲增生杂岩带;III—中阿尔金地块;1—米兰群;2—超基性岩;3—辉长岩;4—花岗岩;5—高压低温变质岩;6—蛇绿混杂岩;7—灰岩及砂板岩;8—断层;9—花岗岩;10—灰岩;11—砂岩;12—砂质泥岩;13—粉砂岩/泥页岩;14—块状玄武岩;15—枕状玄武岩;16—取样点及样品编号

I—Tarim block; II—North Altyn Tagh accretionary complex; III—Central Altyn Tagh block; 1—Milan Group; 2—ultramafic rocks; 3—gabbro; 4—granite; 5—HP/LT metamorphic rock; 6—ophiolitic mélangé; 7—limestone and sandstone; 8—fault; 9—granite; 10—limestone; 11—sandstone; 12—pelite; 13—siltstone; 14—massif basalt; 15—pillow lava; 16—locations of samples

具有枕状构造的玄武岩(图 3b),一般为斑状结构,斑晶含量低,5%±,主要为辉石,颗粒小,0.5~1mm,基质主要为填隙结构或交织结构,主要由条带状斜长石(60%)、半自形辉石(20%~25%)和颗粒状铁钛氧化物(10%~20%)组成(图 3c)。部分样品(A06-6-7)中可见玄武岩浆屑,可能反映岩浆至少有过两次喷发。不具枕状构造的玄武岩,也具有类似的矿物组成和交织结构,但斑晶数量较多,可达10%,辉石斑晶颗粒较大,最大可达2mm,基质矿物颗粒也较枕状玄武岩大(图 3d),反映其在冷却速度较慢的情况下结晶的,推测可能为枕状玄武岩层的下部层位。

3 岩石化学

所选样品新鲜,烧失量(LOD)较低,为3.97%~1.39%(表1)。所有枕状玄武岩样品的SiO₂含量为43.34%~52.55%,属于玄武岩类。具有高钠低钾特点,Na₂O含量为3.97%~7.36%,K₂O含量为0.27%~0.94%。因此属于钠质火山岩。考虑到细碧岩化作用会导致玄武岩Na含量的增高,采用不活动元素鉴别火山岩的类型。在Nb/Y-SiO₂分类图(图4)中,均为碱性玄武岩。在硅-碱图(图5)中,多数样品落入粗面玄武岩区,相当于夏威夷岩,1个样品(A06-6-2)落入碱玄武岩区,一个样品(A06-6-5)

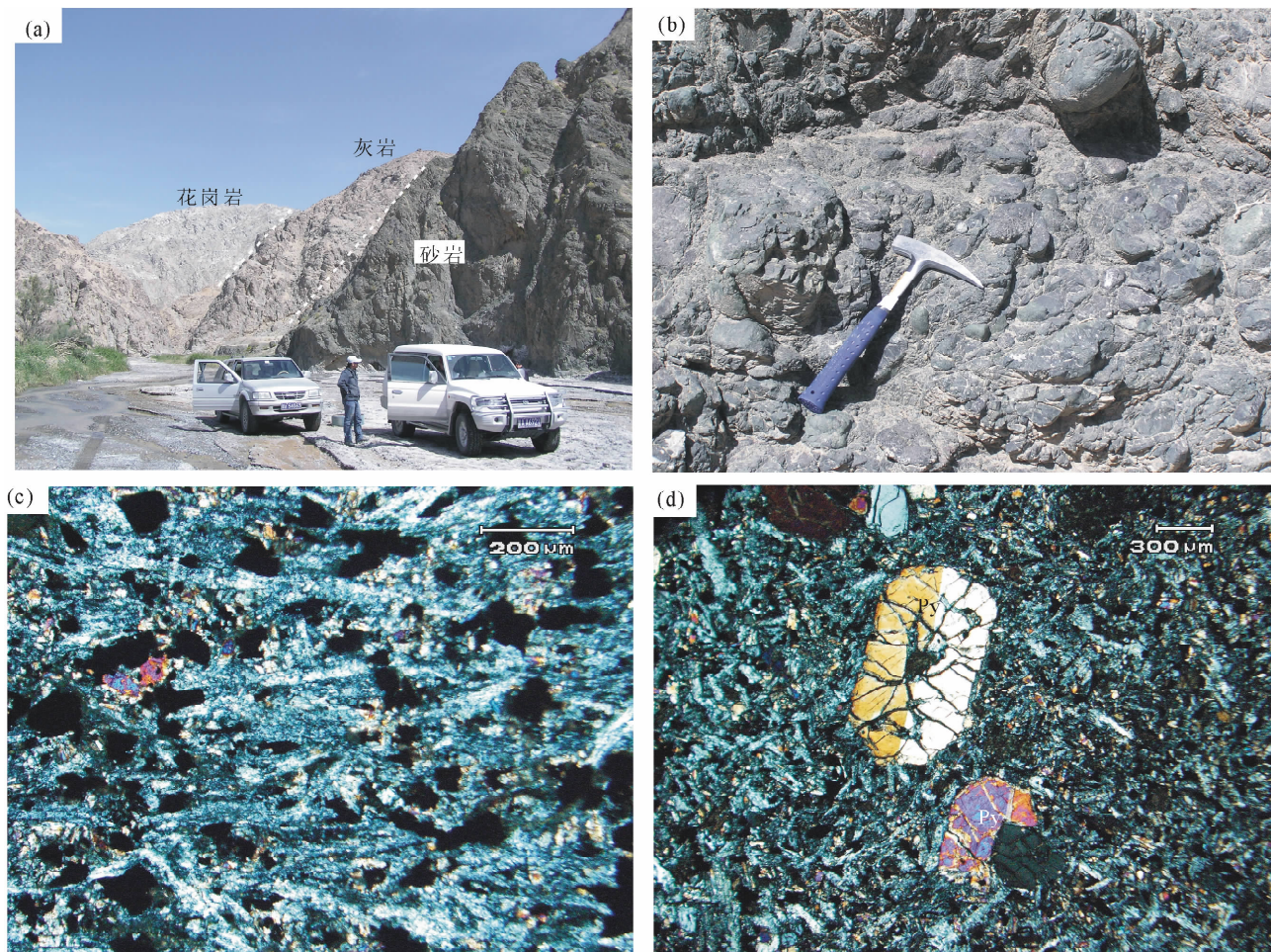


图3 北阿尔金红柳泉剖面及蛇绿岩

Fig. 3 Basalts from Hongliuquan in North Altyn Tagh

- (a)—红柳泉剖面北端的花岗岩、灰岩和砂岩；(b)—红柳泉碱性玄武岩的枕状构造；(c)—玄武岩的间粒结构-交织结构和矿物组成 (Pl、Py、Fe-Ti 氧化物)；(d)—玄武岩的斑状结构及其自形辉石斑晶(Py)
- (a)—Granite, limestone and sandstone in north end of Hongliuquan section; (b)—pillow basalts from Hongliuquan; (c)—petrographic features of basalts from Hongliuquan; (d)—basalt with phenocrysts of pyroxene; Pl—plagioclase; Py—pyroxene; Fe-Ti— Fe-Ti oxide

落入橄榄安粗岩区。这与前人获得的结果类似(刘良等, 1999)。另外所有玄武岩样品都高钛低铝, TiO_2 含量为 2.13%~5.49%, Al_2O_3 含量为 9.02%~13.77%。火山岩的 MgO 含量变化较大(3.49%~7.84%), 镁指数 ($Mg^{\#} = MgO / (MgO + TFcO) \times 100$) 为 39~58, 表明岩浆经历了结晶分异作用, 岩石由演化的玄武岩浆形成。

稀土元素 (ΣREE) 总量较高, 为 $124 \times 10^{-6} \sim 333 \times 10^{-6}$ 。稀土元素 (REE) 分布模式为轻稀土 (LREE) 富集型, $(La/Yb)_N$ 为 7.19~12.82, $(La/Sm)_N$ 为 2.32~3.38, Eu 异常不明显, Eu/Eu^* 值为 0.96~1.11, 表明岩浆不存在明显的斜长石的分异结晶作用。枕状玄武岩 REE 分布模式与洋岛玄武岩 (OIB) 的 REE 分布模式十分类似 (图 6), 与大

洋中脊玄武岩 (E-MORB, N-MORB) 稀土分布模式有明显区别。

但是与洋岛玄武岩相比, Rb、K、Sr、P 等元素含量明显偏低, 少量样品的 Nb、Ta、La、Ce 含量升高, 部分样品这些元素有所降低。玄武岩中这些微量元素的变化可能与岩浆源区、部分熔融程度及海水蚀变有关。总体上微量元素的含量特征与洋岛玄武岩比较接近, 与富集型洋中脊玄武岩 (E-MORB) 有明显区别 (图 7), 后者图示的微量元素含量均偏低。

采用不活动元素对其形成环境进行判别, 在 Zr-Nb-Y 三角图解中 (图 8), 红柳泉火山岩全部落入板内玄武岩范围, 在 Nb/Yb-Th/Yb 元素比值图解中 (图 9), 样品点落入 MORB-OIB 区域靠近洋岛玄武岩。

表 1 北阿尔金红柳泉火山岩的主量元素(%)、微量元素($\mu\text{g/g}$)组成

Table 1 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) concentration of basalts from Hongliuquan in North Altyn Tagh

样品号	A06-6-2	A06-6-3	A06-6-5	A06-6-8	A06-6-13	A06-6-14	A06-6-15	A06-6-16
SiO ₂	43.34	45.84	52.55	48.55	48.88	49.44	48.64	50.64
TiO ₂	5.49	3.95	2.13	3.54	2.41	2.38	2.64	2.83
Al ₂ O ₃	9.02	11.99	13.77	12.11	13.67	13.38	12.47	13.49
Fe ₂ O ₃	7.08	8.72	6.14	7.34	7.10	5.32	6.21	6.26
FeO	5.66	5.62	4.17	5.16	6.48	5.41	5.95	5.05
MnO	0.17	0.17	0.13	0.11	0.13	0.14	0.17	0.14
MgO	6.31	6.91	3.49	5.94	6.62	7.84	7.35	4.91
CaO	13.72	8.26	6.86	8.74	6.21	6.98	7.65	7.20
Na ₂ O	3.97	4.14	7.36	5.12	5.18	4.80	4.84	6.00
K ₂ O	0.27	0.94	0.30	0.38	0.70	0.79	0.38	0.37
P ₂ O ₅	0.51	0.62	0.78	0.49	0.28	0.38	0.30	1.13
H ₂ O ⁺	1.54	2.60	1.10	1.54	2.44	2.54	2.24	1.90
CO ₂	2.81	0.56	1.68	0.90	0.21	0.21	0.64	0.30
LOI	3.97	2.37	2.21	1.83	1.65	2.13	2.15	1.39
Total	99.89	100.32	100.46	99.92	100.31	99.61	99.48	100.22
Mg [#]	49	48	39	48	48	58	53	45
La	36.7	36.2	46.6	31.9	21.9	32.7	22.4	57.4
Ce	83.8	78.1	114	71.8	46.6	67.2	47.8	136
Pr	11.1	9.87	14.9	9.27	5.69	7.98	5.85	17.3
Nd	48.8	42.9	64.1	39.6	24.1	32.9	25.0	73.4
Sm	9.94	8.16	11.5	7.88	4.73	6.09	5.34	13.3
Eu	3.10	2.64	3.92	2.48	1.51	1.83	1.74	4.25
Gd	8.66	7.24	9.53	6.61	4.50	5.33	5.18	11.0
Tb	1.18	0.99	1.41	0.99	0.71	0.78	0.78	1.56
Dy	6.63	5.55	7.92	5.53	4.25	4.59	4.64	9.05
Ho	1.11	0.95	1.41	0.92	0.79	0.84	0.88	1.60
Er	2.81	2.68	3.86	2.46	2.18	2.27	2.54	4.19
Tm	0.32	0.33	0.49	0.28	0.29	0.29	0.34	0.52
Yb	1.93	1.95	2.99	1.77	1.86	1.85	2.10	3.23
Lu	0.26	0.26	0.43	0.25	0.26	0.26	0.31	0.47
∑REE	216.34	197.82	283.06	181.74	119.37	164.91	124.9	333.27
δEu	1.00	1.03	1.11	1.02	0.99	0.96	1.00	1.04
(La/Yb) _N	12.82	12.52	10.51	12.15	7.94	11.92	7.19	11.98
Y	30.8	26.9	40.5	26.1	22.8	24.6	25.7	44.7
Zr	311	194	328	226	150	188	158	321
Hf	8.43	5.25	7.81	5.74	3.95	4.60	4.20	7.88
V	310	341	70.2	305	336	296	306	151
Sc	35.2	29.7	12.0	31.7	43.3	36.7	41.7	14.3
Cr	117	45.3	11.5	77.1	79.2	276	342	14.7
Co	42.8	51.5	19.7	46.8	60.8	43.2	51.8	28.7
Ni	98.6	65.2	30.2	85.5	86.6	75.1	142	18.2
Rb	6.05	17.1	5.75	6.77	13.9	16.3	6.89	7.27
Sr	204	246	231	409	262	242	643	334
Nb	27.7	45.0	78.8	41.7	30.0	42.4	31.3	76.5
Ba	133	408	102	236	420	401	300	283
Ta	1.98	3.00	5.03	2.74	2.06	2.85	2.13	4.68
Th	3.47	3.25	5.64	2.90	2.78	3.52	2.33	4.93
U	0.89	0.87	1.13	0.84	0.67	0.72	0.55	0.87

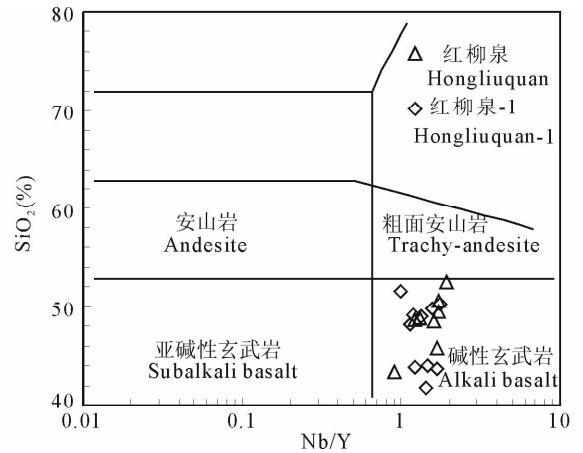


图 4 红柳泉火山岩的 Nb/Y-SiO₂ (据 Winchester 等,1977; 红柳泉-1, 据刘良,1999)

Fig. 4 Diagram of Nb/Y-SiO₂ of basalts from Hongliuquan (after Winchester and Floyd,1977; data of Hongliuquan-1, after Liu,1999)

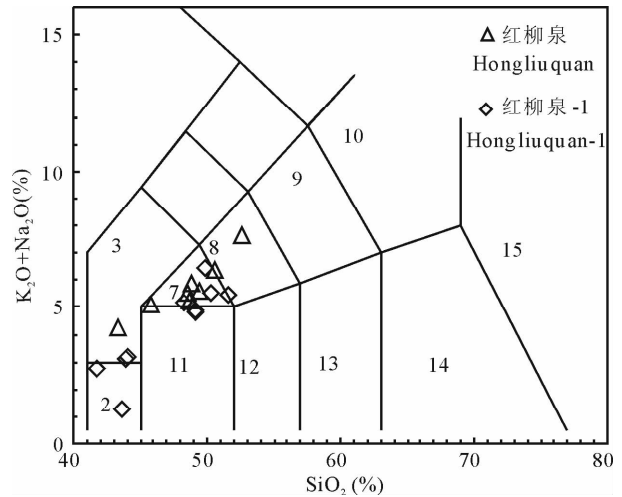


图 5 红柳泉火山岩的硅-碱图(据 Le Bas 等,1986)

Fig. 5 SiO₂-K₂O + Na₂O diagram of basalts from Hongliuquan in North Altyn Tagh (after Le Bas et al., 1986)

2—苦橄玄武岩; 3—碱玄武岩; 7—粗面玄武岩; 8—橄
安粗岩; 11—玄武岩; 12—玄武安山岩
2—Picro-basalt; 3—basanite; 7—trachy-basalt;
8—shoshonite; 11—basalt; 12—basaltic andesite

4 同位素组成

本文 8 个样品的 Sr-Nd 分析结果见表 2。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.7043~0.7052,这个结果与前人获得的结果类似,后者变化范围稍大,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.7040~0.7057(刘良,1999)。初始比值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 为

0.7038~0.7045($t=448\text{Ma}$, 锆石年龄,修群业等,2007),变化范围很小。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.51253~0.51265,初始比值(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{t=0} 为 0.51217~0.51226, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 -0.51~0.20, $\epsilon_{\text{Nd}}(448\text{Ma})$ 为 2.19~3.88,变化范围不大,亏损不明显。前人获得的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 为 -1.6~1.1, $\epsilon_{\text{Nd}}(448\text{Ma})$ 为 3.0~4.4(刘良,1999),与本文结果类似。

表 2 北阿尔金红柳泉火山岩的 Sr-Nd 组成

Table 2 Sr-Nd isotopic compositions of basalts from Hongliuquan in North Altun Tagh

样品号	Rb($\mu\text{g/g}$)	Sr($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	
A06-6-2	2.55E+00	1.51E+02	0.04892	0.704812	14	0.704500	
A06-6-3	6.00E+00	2.00E+02	0.08684	0.705132	17	0.704578	
A06-6-5	2.69E+00	1.68E+02	0.0464	0.704388	12	0.704092	
A06-6-8	6.19E+00	3.69E+02	0.04847	0.704454	13	0.704145	
A06-6-13	1.24E+01	2.28E+02	0.1569	0.704828	14	0.703827	
A06-6-14	1.58E+01	2.15E+02	0.2115	0.705193	14	0.703843	
A06-6-15	4.43E+00	5.45E+02	0.02349	0.704124	11	0.703974	
A06-6-16	5.24E+00	2.85E+02	0.0532	0.704174	23	0.703834	
样品号	Sm($\mu\text{g/g}$)	Nd($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
A06-6-2	8.102	35.286	0.1389	0.512612	5	0.512204	2.80
A06-6-3	7.46	36.324	0.1242	0.512614	5	0.512250	3.69
A06-6-5	11.905	60.175	0.1197	0.512577	5	0.512226	3.22
A06-6-8	7.928	36.917	0.1299	0.512638	7	0.512257	3.83
A06-6-13	4.907	22.614	0.1313	0.512645	5	0.512260	3.88
A06-6-14	6.312	31.415	0.1215	0.51253	9	0.512173	2.20
A06-6-15	5.113	23.284	0.1328	0.512648	7	0.512258	3.86
A06-6-16	13.038	66.445	0.1187	0.512583	7	0.512235	3.40

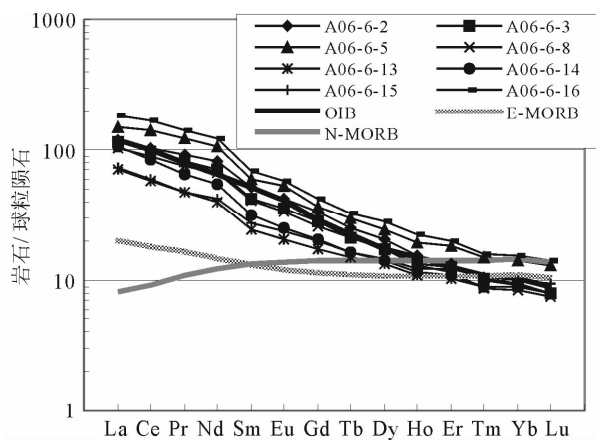
注: $t=448\text{Ma}$ (修群业等,2007)

图 6 红柳泉火山岩稀土元素配分曲线

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns of basalts from Hongliuquan

球粒陨石据 Boynton,1984; OIB,N-MORB,E-MORB

据 Sun & McDonough,1989

Chondrite after Boynton,1984; OIB,N-MORB,E-MORB

after Sun & McDonough,1989

为了使早古生代火山岩的同位素组成与新生代火山岩同位素组成具有可比性,本文采用样品的测试值进行对比,结果均落入洋岛玄武岩(OIB)范围内(图 10)。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t=448\text{Ma}) > 0$,最大为 3.88(表 2),表明岩浆起源于含富集组分的软流圈地幔(地幔柱?)。

Pb 同位素组成与印度洋 MORB Pb 同位素组成接近(刘良,1999),也与北祁连早古生代火山岩

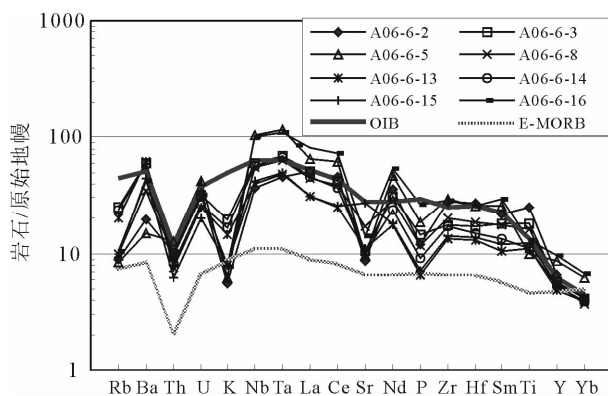


图 7 红柳泉早古生代火山岩的微量元素蛛网图

Fig. 7 Primary mantle-normalized spidergrams of incompatible elements for basalts from Hongliuquan

原始地幔、OIB、E-MORB 据 Sun & McDonough,1989

Primary mantle,OIB,E-MORB after Sun & McDonough,1989

类似(侯青叶等,2005),推测北阿尔金洋可能与北祁连洋相连,也是早古生代原特提斯洋的一部分。

5 形成时代

刘良(1999)获得红柳泉的(原文称恰什坎萨依)枕状玄武岩的 Sm-Nd 全岩等时线年龄为 $524 \pm 44\text{Ma}$,认为这一年龄代表了洋岛玄武岩的形成时代。在这条沟的南端距沟口约 3 km 西侧也出露有枕状玄武岩,对从玄武岩中分选出的锆石采用 TIMS 法测年获得了 $448 \pm 3\text{Ma}$ 的谐和年龄,认为这一锆石 U-Pb 年龄代表了枕状玄武岩的成岩年龄

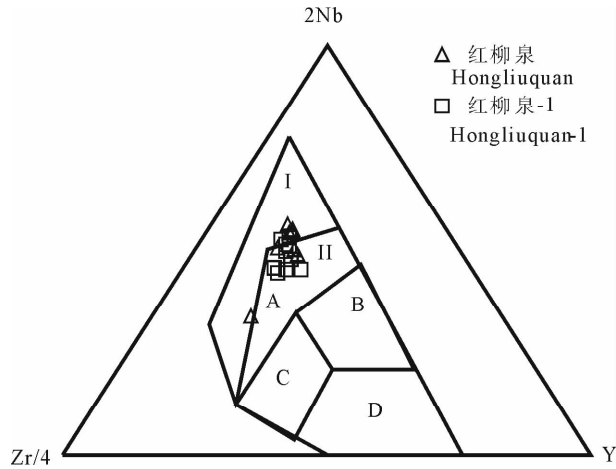


图 8 红柳泉玄武岩的 Nb-Zr-Y 图
(据 Meschede, 1986)

Fig. 8 Diagram of Nb-Zr-Y of basalt from Hongliuquan
(after Meschede, 1986)

A(I+II)—板内玄武岩; II+C—板内拉斑玄武岩; B-P—型洋中脊玄武岩; D-N—型洋中脊玄武岩; C+D—火山弧玄武岩; 红柳泉-1(据刘良, 1999)

A(I+II)—Basalt within plates; II+C—tholeiite within plates; B-P—MORB; D-N—MORB; C+D—Volcanic arc basalt; Hongliuquan-1(after Liu, 1999)

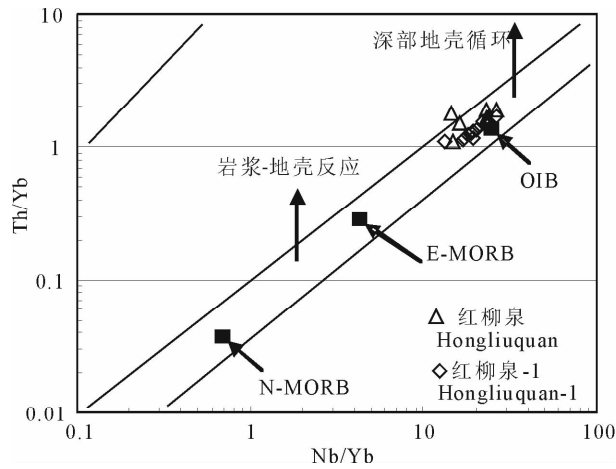


图 9 北阿尔金红柳泉火山岩的 Nb/Yb vs. Th/Yb 图
(据 Pearce, 2008)

Fig. 9 Diagram of Nb/Yb vs. Th/Yb of basalts from Hongliuquan in North Altyn Tagh (after Pearce, 2008)

红柳泉-1(据刘良, 1999)
Data of Hongliuquan-1 (after Liu, 1999)

(修群业等, 2007)。锆石颗粒细小($< 50\mu\text{m}$), 具有岩浆振荡带, 应是从玄武岩浆中结晶出的锆石。硅酸不饱和的岩浆中结晶出锆石是有可能的, 康西瓦玄武质火山岩中有大量锆石形成(罗照华等, 2006)。两种不同方法获得的结果存在近 70Ma 的

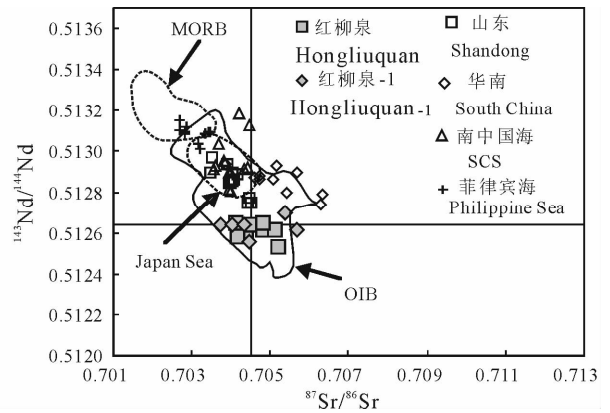


图 10 北阿尔金红柳泉火山岩的 Sr-Nd 同位素组成
Fig. 10 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ initial isotopic composition of basalts from Hongliuquan

洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩(Zindler and Hart, 1986); 红柳泉-1(刘良, 1999); 南中国海(Tu et al. 1992); 菲律宾海(Hickey-Vargas, 1991, 1998); 日本海(Nohda, 2009); 华南(Chung et al, 1997); 山东(支霞臣等, 1994)

MORB、OIB (Zindler and Hart, 1986); Data of Hongliuquan-1 (after Liu, 1999); SCS-South China Sea (Tu et al. 1992); Philippine Sea (Hickey-Vargas, 1991, 1998); Japan Sea (Nohda, 2009); South China (Chung et al, 1997); Shandong(Zhi Xiachen et al., 1994)

时差, 刘良(1999)未给出样品的具体位置, 无法对两种结果进行评估。尽管本文露头与剖面南端的枕状玄武岩相距约 20 km, 我们认为其形成时代是相近的, 可能为 448Ma 左右。

位于该条剖面中的高压/低温兰片岩和榴辉岩与相邻的蛇绿混杂岩呈断层接触(张建新等, 2007), 可能为外来的构造岩片。这些变质岩的形成明显早于枕状玄武岩, 榴辉岩中多硅白云母的坪年龄为 $512 \pm 3\text{Ma}$, 兰片岩中钠云母的坪年龄为 $491 \pm 3\text{Ma}$ (张建新等, 2007), 由此推测北阿尔金洋开始关闭(发生俯冲)的时间要早于 512Ma。尽管这一地区缺少岛弧火山岩的报道, 但是在阿尔金山北坡出露有岛弧型的花岗闪长岩, 其形成时代为 $482 \pm 5\text{Ma}$ (戚学祥等, 2005), 其形成可能与洋壳的俯冲有关。我们推测与北祁连北带的火山岩类似(Xia et al., 2003), 红柳泉这些具 OIB 性质的枕状玄武岩极有可能形成于弧后盆地的拉张环境, 形成时代应晚于岛弧花岗岩的时代。洋壳的俯冲与软流圈地幔的上涌是两个不同的地质事件。

6 讨论

6.1 玄武岩的岩浆源区及其形成环境

红柳沟席状岩墙群的地球化学具有 MORB 的

特征,形成于海底扩张的环境(杨经绥等,2002)。红柳泉枕状熔岩具有洋岛玄武岩(OIB)的特征,与中国东部新生代玄武岩的地球化学特征类似(如 Dostal et al., 1991; 支霞臣等,1994),具有初始裂谷的特点,属于拉张环境,我们认为主要是软流圈地幔上涌的结果。北阿尔金和北祁连的 N-MORB 型玄武岩可能形成于弧后盆地的扩张脊环境(吴峻等,2002;杨经绥等,2008;冯益民等,1995,张旗等,1997;钱青等,2001;Xia et al.,2003),其源区主要为亏损的软流圈地幔,而 OIB 特征的玄武岩可能为弧后盆地中的海山(Chung and Sun,1992),其源区为地幔柱-布丁型的对流地幔(Zindler et al.,1984)。北阿尔金红柳泉火山岩的同位素组成与新生代不同环境洋岛型玄武岩(OIB)的同位素组成有明显差别(图 10),反映了其源区性质的差异,前者含有更多的富集组分。具有 OIB 特征的火山岩可能形成于大洋板内如夏威夷(Wilson,1989)或洋脊附近的海山(Zindler et al.,1984),也可以形成弧后盆地的海山环境如中国南海(Tu et al.,1992; Chung and Sun,1992,1997)以及菲律宾海(Hickey-Vargas,1991,1998)和日本海(Nohda,2009)。考虑到火山岩伴生有硅质岩、灰岩和粉砂岩等岩石组合,最合理的解释是这套岩石形成于弧后盆地环境,我们推测火山岩为弧后盆地中的海山,理由是通常海底的正地形在盆地关闭过程中更容易上陆进入造山带(如夏林圻等,1998;钱青等,2001)。

6.2 构造意义

如果北阿尔金红柳泉 OIB 性质的枕状玄武岩形成于弧后盆地的海山环境,考虑到北祁连北带的玄武岩形成于弧后盆地环境(冯益民等,1995;钱青等,2001;Xia et al.,2003),很有可能在阿尔金走滑断裂形成以前,北阿尔金的弧后盆地向东与北祁连的弧后盆地相连,构成一个统一的弧后盆地体系。北阿尔金与北祁连都存在类似的低温/高压变质成因的兰片岩和榴辉岩也支持这样的认识(张建新和孟繁聪,2006;张建新等,2007)。阿尔金走滑断裂使这个原本统一的构造体系左行平移了 350~400 km(图 1)(Tapponnier et al.,1977;许志琴等,1999;葛肖虹和刘俊来,1999;Zhang et al.,2001;Liu et al.,2007)。

北阿尔金-北祁连是一条统一的早古生代缝合带(Sobel et al.,1999;许志琴等,1999)。北祁连蛇绿岩单元内如玉石沟、九个泉、大岔大坂等的枕状玄武岩具有印度洋型 MORB 同位素组成,被认为北祁

连古洋是原特提斯洋的一部分(北支)(侯青叶等,2005,2006)。北祁连浅变质沉积岩的 Sr-Nd 同位素研究也表明早古生代期间华北板块与南极大陆之间被北祁连海洋盆地分割,沉积物主要来自华北板块(Smith et al.,1997),但是祁连造山带中前寒武纪深变质基底的年代学和 Sm-Nd 同位素组成与扬子板块基底组成类似(Wan et al.,2001;张建新等,2003;孟繁聪等,2005),很有可能祁连造山带中的古老地体与扬子板块的基底一样都是冈瓦纳大陆的组成部分,这样,中国境内原特提斯洋的北界很可能在北祁连及北阿尔金一带。这对认识青藏高原及中国西部大地构造演化具有重要意义。

7 结论

北阿尔金红柳泉的枕状玄武岩具有洋岛玄武岩(OIB)的地球化学特征,其源区为含富集组分的软流圈地幔,根据岩石组合特征推测其形成于弧后盆地环境,火山岩形成盆地中的海山。

北阿尔金与北祁连的早古生代火山岩原本形成于统一的弧后盆地体系,阿尔金走滑断裂将其左行平移成现今的格局,与西南太平洋的沟弧盆体系类似,它们可能是原特提斯洋北缘沟弧盆体系在中国境内的残留。

致谢:由国家地质实验测试中心完成样品的主量、微量元素的分析,中国地质科学院地质研究所同位素实验室唐索寒、王进辉完成 Sr-Nd 同位素测试,英基丰和李天福研究员审阅了初稿并提出了中肯的修改意见,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 车自成,刘良,刘洪福,罗金海.1995.阿尔金山地区高压泥质岩石的发现及其产出环境.科学通报,40:1298~1300.
- 冯益民,何世平.1995.北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究.岩石学报,11(增刊):125~146.
- 葛肖虹,刘俊来.1999.北祁连造山带的形成与背景.地学前缘,6(4):223~229.
- 侯青叶,赵志丹,张宏飞,张本仁,陈岳龙.2005.北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义.中国科学(D 辑),35(8):710~719.
- 侯青叶,赵志丹,张本仁,张宏飞,张利,陈岳龙.2006.青藏高原东北缘特提斯构造域界线的探讨.岩石学报,22(3):567~577.
- 刘良,车自成,王焰,陈丹玲.1999.阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义.岩石学报,15:57~64.
- 刘良,孙勇,校培喜,车自成,罗金海,陈丹玲,王焰,张安达,陈亮,王永合.2002.阿尔金发现超高压(>3.8GPa)石榴二辉橄榄岩.科学通报,47(9):657~662.
- 刘良.1999.阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义.中国科学院博士学位研究生学位论文,29~36.

- 罗照华,莫宣学,万渝生,李莉,魏阳. 2006. 青藏高原最年轻碱性玄武岩 SHRIMP 年龄的地质意义. 岩石学报, 22(3): 578~584.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005. 俯冲的大陆岛弧——柴北缘片麻岩的地球化学和同位素证据. 地质学报, 79(1): 46~55.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 史仁灯, 陈松永. 2005a. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 50(6): 571~576.
- 戚学祥, 吴才来, 李海兵. 2005b. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 21(3): 859~866.
- 钱青, 张旗, 孙晓猛. 2001. 北祁连九个泉玄武岩的形成环境及地幔源区特征——微量元素和 Nd 同位素地球化学制约. 岩石学报, 17(3): 385~394.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~662.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, Wooden J. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 78(5): 649~657.
- 宋述光, 张立飞, Niu Y L, 宋彪, 张贵宾, 王乾杰. 2004. 北祁连山榴辉岩锆石 SHRIMP 定年及其构造意义. 科学通报, 49(6): 592~595.
- 王荃, 刘雪亚. 1976. 我国西部祁连山区的古海洋地壳及其大地构造意义. 地质科学, (1): 42~55.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥, Wooden J L, Mazdab F K. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 21(3): 849~858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 杨经绥, Wooden J L, 陈松永, Mazdab F K. 2007. 北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 中国科学(D辑), 37(1): 10~26.
- 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 俞良军. 2002. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据. 岩石矿物学杂志, 21(1): 24~30.
- 吴峻, 李继亮, 兰朝利, 俞良军. 2001. 阿尔金红柳沟蛇绿岩研究进展. 地质科学, 36(3): 342~349.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1998. 北祁连山早古生代洋脊及洋岛和弧后盆地火山作用. 地质学报, 72(4): 301~312.
- 相振群, 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 宋彪, 郑健康. 2007. 北祁连熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义. 地质通报, 26(12): 1686~1691.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义. 地质学报, 54(1): 287~295.
- 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, 1~841.
- 修群业, 于海峰, 刘永顺, 陆松年, 毛德宝, 李惠民, 李铨. 2007. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. 地质学报, 81(6): 787~794.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3): 193~205.
- 杨经绥, 吴才来, 史仁灯. 2002. 阿尔金山红柳沟席状岩墙群: 海底扩张的重要证据. 地质通报, 21(2): 69~74.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden J. 2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. 岩石学报, 24(7): 1567~1584.
- 于海峰, 陆松年, 刘永顺, 修群业, 李铨. 2002. “阿尔金山岩群”的组成及其构造意义. 地质通报, 21(12): 835~851.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 陈文, 陈松永. 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域地质意义. 中国地质, 34(4): 558~564.
- 张建新, 孟繁聪. 2006. 北祁连和北阿尔金硬柱石榴辉岩: 冷洋壳俯冲作用的证据. 科学通报, 51(14): 1683~1688.
- 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 杨经绥, 许志琴. 2003. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd 和 U-Pb 同位素研究——深俯冲的前寒武纪变质基底? 岩石学报, 19(3): 443~451.
- 张建新, 许志琴, 陈文, 徐惠芬. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨. 岩石矿物学杂志, 16(2): 111~118.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 孟繁聪, 宋述光, 李海兵, 史仁灯. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报, 47(3): 231~234.
- 张建新, 张泽明, 许志琴, 杨经绥, 崔军文. 1999. 阿尔金构造带西端榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄——阿尔金加里东期山根存在的证据. 科学通报, 44(10): 1109~1112.
- 张旗, 孙晓猛, 周德进, 钱青, 陈雨, 王岳明, 贾秀琴, 韩松. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 12(4): 366~393.
- 支霞臣, 陈道公, 张宗清, 王进辉. 1994. 山东蓬莱、临朐新生代碱性玄武岩的钕、铈同位素组成. 地质论评, 40(8): 526~533.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. (ed.), Rare earth element geochemistry. Elsevier, 63~114.
- Chun Sun Lin, Sun Shensu. 1992. A new genetic model for the East Taiwan ophiolite and its implications for Dupal domains in the Northern Hemisphere. Earth Planet. Sci. Lett., 109: 133~145.
- Chung S L, Chen H, Jahn B M, O'Reilly S Y, Zhu B Q. 1997. Major and trace element and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening. Lithos, 40: 203~220.
- Dostal J, Zhi X C, Muehlenbachs K, Dupuy C, Zhai M Z. 1991. Geochemistry of Cenozoic alkali basaltic lavas from Shandong Province, eastern China. Geochemical Journal, 25: 1~16.
- Hickey-Vargas R. 1991. Isotope characteristics of submarine lavas from the Philippine Sea: implications for the origin of arc and basin magmas of the Philippine tectonic plate. Earth and Planetary Science Letters, 107: 290~304.
- Hickey-Vargas R. 1998. Geochemical characteristics of island basalts from the Philippine Sea plate: implications for the soucees of East Asian Plata margin and intraplate basalts. In: Mantle dynamics and plate interactions in East Asia geodynamics. 365~384.
- Le Bas M J, Le Maitre, R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J. Petrology, 27: 745~750.
- Liu Y J, Neubauer F, Genser J, Ge X H, Takasu A, Yuan S H, Chang L H, Li W M. 2007. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn strike-slip fault, western China. Journal of Asian Earth Sciences, 29: 243~252.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chemical Geology, 56: 207~218.
- Nohda S. 2009. Formation of the Japan Sea basin: Reassessment from Ar-Ar ages and Nd-Sr isotopic data of basement basalts of the Japan Sea and adjacent regions. Journal of Asian Earth Sciences, 34: 599~609.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, 100: 14~48.

- Smith A D, Lian Feng-Rong, Chung Chuan-Hsiung, Yang Hong-Yi. 1997. Isotopic evidence from metasediments in the Qilian fold belt for a North China-Antarctica connection in the early Paleozoic. *Journal of the Geological Society of China (Taiwan)*, 40(3): 481~497.
- Sobel E R, Arnaud N. 1999. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 18: 64~74.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the oceanic basins*. Geological Society Special publication, 42: 313~346.
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and Cenozoic tectonic in China. *J. Geophys. Res.*, 82(20): 2905~2930.
- Tu K, Flower M F J, Carlson R W, Xie G H, Chen C Y, Zhang M. 1992. Magmatism in the South China Basin; 1. isotopic and trace-element evidence for an endogeneous Dupal mantle component. *Chemical Geology*, 97: 47~62.
- Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X. 2001. Age and composition of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 375~384.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. Oxford, Alden Press, 1~466.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Wu H Q, Feng Y M, Song S G. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belt and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *J. Metamorphic Geol.*, 11: 523~536.
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. 2003. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the northern Qilian Mountains, China. *GSA Bulletin*, 115(12): 1510~1522.
- Zhang J X, Meng F C, Wan Y S. 2007. A cold early Palaeozoic subduction zone in the north Qilian mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints. *J. Metamorphic Geol.*, 25: 285~304.
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, Cui J W. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, Northwestern China. *Lithos*, 56: 187~206.
- Zhang J X, Meng F C, Yang J S. 2005. A new HP/LT metamorphic terrance in the northern Altyn Tagh, western China. *International Geology Review*, 47(4): 371~386.
- Zindler A, Staudigel H, Batiza R. 1984. Isotope and trace element geochemistry of young Pacific seamounts: implications for the scale of upper mantle heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, 70: 175~195.
- Zinder A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493~573.

The Early Paleozoic Pillow Basalt in Northern Altyn, Western China and its Tectonic Implications

MENG Fancong, ZHANG Jianxin, YU Shengyao, CHEN Songyong
Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

This paper reports petrologic and geochemical study results of Early Paleozoic pillow basalt from ophiolite melange of the Hongliuquan section in the Northern Altyn Tagh, western China. The content of SiO_2 ranges from 43.34% to 52.55%; Mg-index vary from 39 to 58. They are high in TiO_2 (2.13%~5.49%) and Na_2O (3.97%~7.36%), low in Al_2O_3 (9.02%~13.77%) and K_2O (0.27%~0.94%), which resembles to those of spilite. Their trace elements are different from MORB but comparable to the OIB or seamount basalt. They display varied $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7043~0.7052), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.51253~0.51265). Our study interprets the pillow basalt originated from upwelling asthenospheric mantle with enriched components. Considering comprehensively the sedimentary rock assemblage on field profile, it is assumed that the magma extruded into the back-arc basin. System of back-arc basin in the northern Altyn Tagh was in the same unit as that in the northern Qilian Mountain, and likely it was the northernmost margin of proto-Tethys in China before the formation of the Altyn strike-slip fault. This is of great importance for understanding the evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and tectonic patterns of western China.

Key words: Pillow Basalts; Geochemistry; Back-arc basin; Northern Altyn; western China