

博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征*

王银喜^{1,2} 顾连兴^{2,3} 张遵忠^{2,3} 吴昌志^{2,3} 张开均^{2,4} 李惠民^{1,2} 杨杰东^{1,2}

WANG YinXi^{1,2}, GU LianXing^{2,3}, ZHANG ZunZhong^{2,3}, WU ChangZhi^{2,3}, ZHANG KaiJun^{3,4}, LI HuiMin^{1,2} and YANG JieDong^{1,2}

1. 南京大学现代分析中心, 南京 210093

2. 成矿作用国家重点实验室(南京大学), 南京 210093

3. 南京大学地球科学系, 南京 210093

4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. Center of Modern Analysis, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2005-12-20 收稿, 2006-03-22 改回.

Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Zhang KJ, Li HM and Yang JD. 2006. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5):1215-1224

Abstract The Bogda orogen, which is located between the Junggar and Turpan-Hami Precambrian blocks, has been proved to be a Late Palaeozoic continental rift by many lines of geological and geochemical evidence. SiO₂ content of Lower Carboniferous volcanic rocks in this orogen exhibits a gap between 55% and 64%. Bimodal volcanic suite of the Cimeitou formation at Qijiaojing is composed of basalt and a less amount of rhyolite. The Rb-Sr isochron ages of the basalts and rhyolite are 342.0 ± 3.2 Ma 和 340.3 ± 3.4 Ma, respectively. These rocks were formed during strong extension of the rift. These ages are consistent with those indicated by fossil. Basalts of the Qijiaojing formation are characterized by $\epsilon_{Nd}(t) = +6.4 \sim +6.7$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.703261 \sim 0.703328$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.703 \sim 17.989$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.407 \sim 15.498$ and $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.147 \sim 37.825$, while rhyolites of this formation are characterized by $\epsilon_{Nd}(t) = +6.4 \sim +6.6$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.703368 \sim 0.703469$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.827 \sim 18.114$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.460 \sim 15.517$ and $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.077 \sim 37.973$. These data indicate that the rhyolites is similar in Nd-Sr-Pb isotopes to basalts and that the basalts were derived from a depleted mantle, while the associated rhyolites were formed by fractional crystallization of the basaltic magma. It is a common idea that fractional crystallisation can only produce a continuously differentiated rock series. However, bimodal volcanic rocks can also be formed in some particular cases. Bimodal volcanic rocks, in which rhyolite is formed by fractional crystallisation of basalt is not rare on earth, but has not been reported from continental rift environments. Therefore, the bimodal volcanic rocks is a very rare case, and is possibly a new genetic type of bimodal suite.

Key words Bimodal volcanic rocks, Rb-Sr geochronology, Nd-Sr-Pb isotope geochemistry, Continental rift, Bogda, Tianshan

摘要 东天山博格达造山带位于准噶尔和吐鲁番-哈密两个前寒武纪地块之间。已有充分的地质与元素地球化学证据证明东天山博格达陆内碰撞造山带构造属性是属于大陆裂谷, 全区早石炭世火山岩的 SiO₂ 含量在 55% ~ 64% 之间出现明显的间断, 其刺梅沟七角井组中玄武岩和流纹岩在时空上紧密共生, 为一典型的双峰式火山岩组合。该双峰式火山岩组合中玄武岩和流纹岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄分别为: 342.0 ± 3.2 Ma 和 340.3 ± 3.4 Ma。七角井组中玄武岩和流纹岩同位素等时线

* 本文为国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409802)、国家自然科学基金项目(No. 40472042, No. 40072075)、国家九〇五攻关 305 项目(No. 96-915-05-03-01)和中国百人人才计划(CAS Hundred Talents Project)合作研究成果, 并得到南京大学开放测试基金(0303Y302-2004)资助。

第一作者简介: 王银喜, 男, 1955 年, 副教授, 同位素地球化学专业, Tel. 025-86315092; E-mail: wyxnu@sohu.com

年龄在误差范围内与博格达古生物化石指示的早石炭世时代一致。七角井组玄武岩： $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 +6.4 ~ +6.7, ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 为 0.703261 ~ 0.703328, ($^{206}Pb/^{204}Pb$)_i 为 17.703 ~ 17.989, ($^{207}Pb/^{204}Pb$)_i 为 15.407 ~ 15.498, ($^{208}Pb/^{204}Pb$)_i 为 37.147 ~ 37.825; 七角井组流纹岩： $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 +6.4 ~ +6.6, ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 为 0.703368 ~ 0.703469, ($^{206}Pb/^{204}Pb$)_i 为 17.827 ~ 18.114, ($^{207}Pb/^{204}Pb$)_i 为 15.460 ~ 15.517, ($^{208}Pb/^{204}Pb$)_i 为 37.077 ~ 37.973, 由此可见七角井组玄武岩和流纹岩在 Nd-Sr-Pb 同位素特征方面具有相当一致。根据 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学和元素地球化学认为其玄武岩是来源于亏损地幔, 而伴生的流纹岩则是由玄武岩浆分离结晶作用的产物。一般都认为岩浆分离结晶作用只产生成分连续变化的岩浆系列, 但是在特定条件下也是可以产生双峰式火山岩组合。由玄武岩浆分离结晶作用形成的双峰式火山岩并不少见, 但是在裂谷环境下双峰式火山岩中流纹岩是由玄武岩浆分离结晶作用形成的这种双峰式火山岩组合至今还未发现。因此, 博格达双峰式火山岩是大陆裂谷环境中比较特殊的并是十分少见的或可能是一种新的双峰式火山岩构造成因类型。

关键词 双峰式火山岩; Rb-Sr 同位素地质年代学; Nd-Sr-Pb 同位素地球化学; 大陆裂谷环境; 博格达; 东天山

中图分类号 P588.145; P597.3

素年龄, 并根据元素地球化学资料以及 Nd, Sr 和 Pb 同位素组成对该火山岩的成因、演化和构造属性进行探讨。

1 引言

东天山博格达陆内碰撞造山带的构造属性属裂谷还是岛弧一直存在较大的争议(吴庆福, 1986; 王利利等, 1986; 杨浩和顾连兴, 1989; 成守德等, 1986; 方国庆, 1993; 马瑞士等, 1997; Coleman, 1989; Gao Jun *et al.*, 1998)。顾连兴等(2000; 2001a; 2001b)根据花岗侵入活动和火山岩地质和元素地球化学研究成果认为博格达造山带是大陆裂谷。但是, 该区火山岩的成岩时代主要依靠地层和古生物学资料来确定(吴乃元等, 1983; 肖世绿等, 1985), 而其成因研究主要依靠岩石学和元素地球化学(周济元等 1994; 顾连兴等, 2000), 尚缺乏系统的同位素年龄资料和同位素地球化学信息。本文将报道博格达裂谷带双峰式火山岩的 Rb-Sr 同位

2 区域地质概况与火山岩特征

博格达造山带位于准噶尔盆地与吐鲁番-哈密盆地之间, 其西端止于乌鲁木齐, 东端在红柳峡-苏吉一带与克拉麦里造出带相接(图 1), 全长约 600 公里。该带的海相沉积作用主要发生在早、中石炭世。在东部的七角井-高泉地区, 下石炭统塔普捷尔泉组(C_{1t}), 七角井组(C_{1q})及中石炭统柳树沟组(C_{2l})火山岩出露完整。七角井组为海相火山-沉积岩建造, 其火山岩为块状或枕状玄武岩与流纹岩互层, 并夹有少量的凝灰质砂岩及页岩。双峰式火山岩主要出露在七角井地区的刺梅沟, 在刺梅沟处七角井组上部层位中, 可见

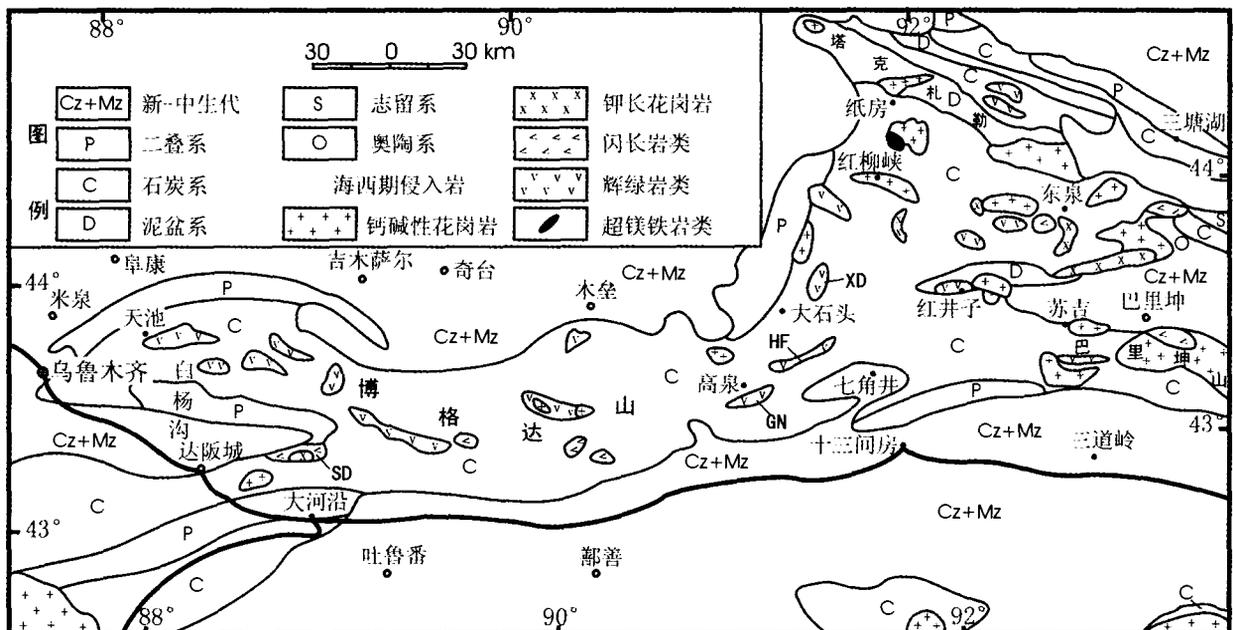


图 1 东天山博格达造山带地质略图

Fig. 1 Geology of the Bogda orogen, Eastern Tianshan Mountains

玄武岩与流纹岩组成的韵律喷发旋回(顾连兴等,2000),相互之间呈突变接触。在这 700 多米长的剖面上,玄武岩中夹有 8 层流纹岩,其单层厚度 1 米至 30 余米不等。该剖面上玄武岩与流纹岩的比例大约为 7:1,且缺乏中间组分,从而构成为双峰式火山岩。玄武岩呈块状或枕状构造,并具无斑隐晶或少斑结构。斑晶以自形板状斜长石为主,基质由斜长石和辉石微晶构成填间结构。流纹质熔岩在露头上呈灰绿色或绿灰色,与玄武岩呈互层产出,其岩石呈斑状结构或无斑隐晶结构。

3 分析方法

本文对采自博格达七角井刺梅沟地区玄武岩和流纹岩样品进行了 Rb-Sr, Sm-Nd 和 Pb 同位素测定。为了使 Rb/Sr 和 Sm/Nd 的比值能有所分开,用磁选方法从部份样品中分离出轻富集物和重富集物。样品中的 Sm, Nd, Rb, Sr, U, Th 和 Pb 元素含量以及同位素比值测定均由笔者在南京大学现代分析中心由英国制造的 VG354 多接收质谱计上完成。实验测定美国 NBS987Sr 同位素标准:以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 为标准化值,测得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710224 \pm 8$, $n = 10$; 对美国 La Jolla Nd 同位素标准样中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测定值为 0.511860 ± 8 (2σ), $n = 8$; 标准化值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。为了去除岩石表面、裂缝和裂口污染物,需用 5% HF-HBr 混合液对其样品进行清洗;0.1g 的粉末样品用 HF-HNO₃-HClO₄ 混合酸来溶解;U-Th-Pb 的化学分离是通过分析级的阳离子交换树脂和阴离子交换树脂来进行的;Pb 的同位素质谱分析是采用硅胶-磷酸发射技术和单铋带单接收技术;测定 NBS981Pb 同位素标准为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.939 \pm 0.006$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.489 \pm 0.009$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.698 \pm 0.029$ ($n = 20$),测定值都用 NBS 981 标样进行标准化校正,在通常实验室工作程序基础上对所有 Pb 同位素分析被给予的精度在 95% 置信度下为 0.05%。Nd, Sr 和 Pb 的全流程本底分别为 $6 \times 10^{-11}\text{g}$, $3 \times 10^{-9}\text{g}$ 和 $2 \times 10^{-10}\text{g}$ 。计算 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 过程中, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} = 0.7045$, $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} = 0.0827$ (Jacobsen, et al., 1984)。年龄计算采用国际通用的 Ludwig K. R. (1998) 博士研制的 ISOPLOT 计算程序。在等时线年龄计算中,样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值误差分别为 1% 和 0.2%, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 误差采用 0.005%。绘制常量元素、微量元素和稀土元素图型的数据引自有关文献(顾连兴等, 2000; 2001a)。元素图型绘制以及铅同位素初始值计标采用一个地球化学数据处理软件包(路远发, 2004)。同位素分析结果和参数列于表 2、表 3 和表 4。详细的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 化学制备,质谱测定方法以及各类标准样品测定结果可见有关报道(王银喜等,1988)。

4 常量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征

该火山岩岩石常量元素含量在 TAS 分类图(图 2)主要落在玄武岩和流纹岩区内(绘制常量元素、微量元素和稀土元素图型的数据引自顾连兴等,2000, 2001a),全区火山岩的 SiO₂ 值在 55.22% ~ 70.78% 之间出现明显的间断,为典型的双峰式岩系。其中玄武岩 Zr 含量在 43 ~ 446 μg/g, TiO₂ 在 0.97% ~ 2.45%, Nb 含量在 3.3 ~ 12.8 μg/g, Y 含量在 16.9 ~ 74.0 μg/g 范围内。岩石化学表明这些玄武岩总体上属橄榄拉斑玄武岩系并向石英拉斑玄武岩方向演化。以 Zr/TiO₂ 和 Nb/Y 比值为特征,类似于拉斑玄武岩;全区玄武岩的 MgO 含量在 3.36% ~ 7.92% 范围内, (Fe₂O₃ + FeO) 含量在 9.06% ~ 12.1%, 100Mg/(Mg + ΣFe) 值均低于判别原始岩浆的参数值 65 (Wendland et al., 1995); Ni 含量为 3.3 ~ 95.0 μg/g, Cr 含量为 5.9 ~ 167 μg/g, 也分别低于判别原始岩浆的参考数值 250 μg/g 和 300 μg/g (Wendlandt et al., 1995)。这些特征表明这些玄武岩是原始岩浆经分异演化后的结晶产物。七角井刺梅沟玄武岩 Zr/Nb 比值在 12 ~ 35 范围内, Zr/Y 比值在 2.5 ~ 6.0 范围内,表明刺梅沟玄武岩中含有相当数量亏损地幔物质。由微量元素原始地幔标准曲线图(图 3a, b)可知,该区火山岩均属强不相容元素富集型。Sr 的适度亏损表明岩浆曾在低压下经历过斜长石的分离结晶。刺梅沟地区玄武岩和流纹岩轻稀土呈轻度富集,重稀土较平缓并无富集现象(图 4a, b), 铕异常不显著, $(\text{La}/\text{Lu})_n$ 为 2.75 ~ 4.03, $\delta\text{Eu} = 0.93 \sim 1.15$, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 为 2.19 ~ 3.56, 这些特征与典型的 N-MORB 又有所差别。

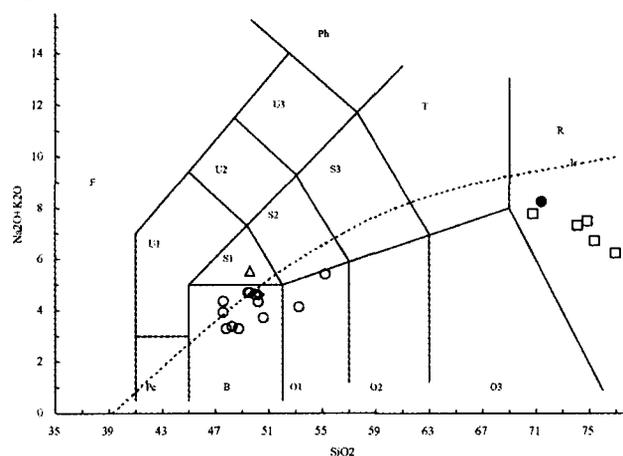


图 2 博格达火山岩 TAS 分类图

(仿 Le Bas et al., 1986) (空心圆代表七角井刺梅沟双峰式火山岩中的玄武岩;空心方框代表七角井刺梅沟双峰式火山岩中的流纹岩)

Fig. 2 TAS plots of the bimodal volcanic rocks from the Bogda belt

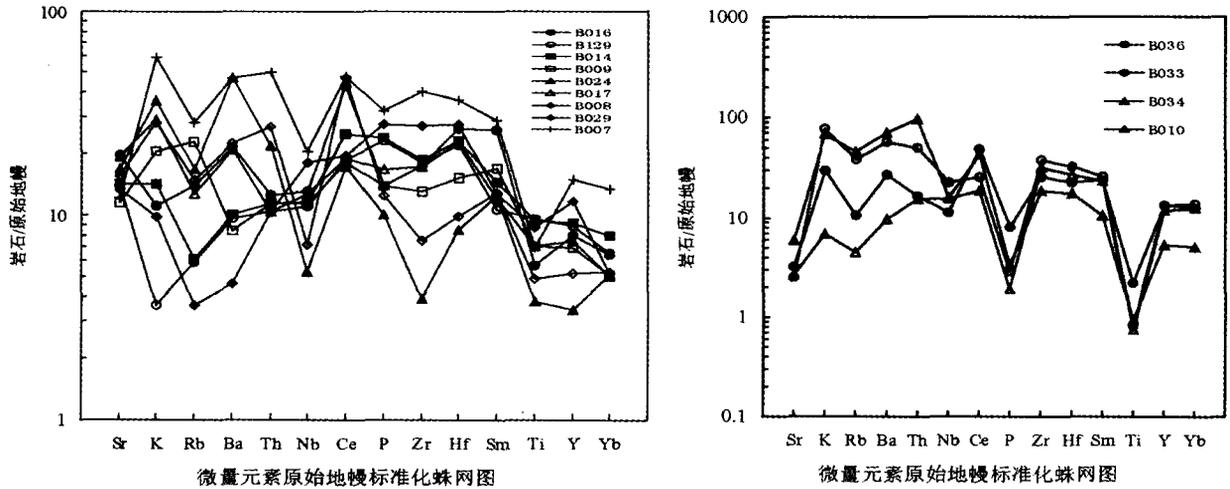


图3 博格达玄武岩(a)和流纹岩(b)微量元素原始地幔标准曲线图. 原始地幔数据取自 Wood *et al.* , (1979)
 Fig.3 Primitive mantle-normalized patterns for trace elements of basalts (a) and rhyolites (b) from the Bogda belt (after Wood *et al.* , 1979)

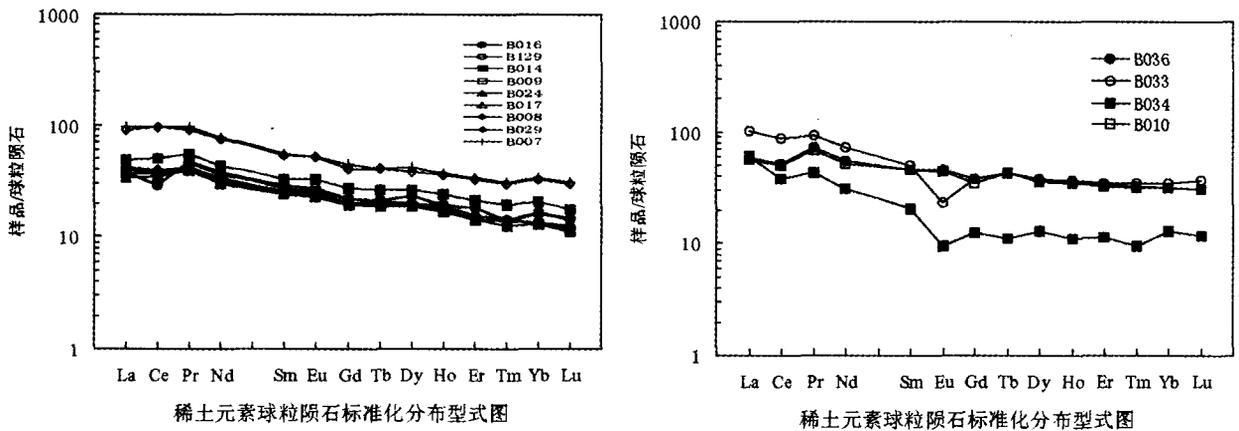


图4 博格达玄武岩(a)和流纹岩(b)微量元素稀土元素球粒陨石标准配分曲线图. 球粒陨石数据取自 McDonough *et al.* , 1995
 Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of basalts (a) and rhyolites (b) from the Bogda belt (after McDonough *et al.* , 1995)

5 博格达双峰式火山岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄

表1列出了博格达七角井刺梅沟18件玄武岩 Rb-Sr 同位素分析数据。从表1中可看出,玄武岩的全岩 Rb 含量为 2.48 μg/g ~ 22.96 μg/g; Sr 含量为 124.36 μg/g ~ 481.2 μg/g; ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值变化范围为 0.029 ~ 0.7633。由于 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值变化较小,故将玄武岩粉样经过磁选机反复分离出较轻富集物(从颜色看,色相对浅些,样品号为-1)和较重富集物(颜色相对深些,样品号为-2),其结果使所选出的轻、重富集物两部分的 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值变化范围增大为 0.0091 ~ 0.7633。图 5a, b 分别展示了由 18 件刺梅沟玄武岩全岩、轻和重的富集物和 10 件刺梅沟流纹岩全岩、轻和重的富集物

组成的 Rb-Sr 同位素等时线。年龄计算采用国际通用的 ISOPLOT 程序(Ludwig, 1998),用模式 1 算得玄武岩年龄为 342.0 ± 3.2 Ma, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.703289 ± 11, MSWD = 1.4; 10 件流纹岩组成的年龄为 340.3 ± 3.4 Ma, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.703422 ± 35, MSWD = 2.5。由此可见玄武岩与流纹岩同位素年龄基本一致。Sr 同位素初始比值的一致性表明两者为同源同期的产物。尤其值得注意的是,玄武岩和流纹岩的年龄均与所属地层的早石炭世古生物群落相吻合(吴乃元等, 1983, 肖世绿等, 1985)。Rb-Sr 同位素等时线年龄代表了刺梅沟玄武岩和流纹岩结晶时代,进而证明博格达火山活动始于早石炭世。七角井组玄武岩和流纹岩同位素等时线年龄在误差范围内与西天山大哈拉军山组石炭纪火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(313 ~ 354 Ma)(朱永峰等, 2005; 2006)基本一致。

表1 博格达双峰式火山岩 Nd, Sr 和 Pb 同位素组成和 Rb-Sr 年龄测定结果

Table 1 Rb-Sr isotope ages and Nd, Sr and Pb isotope compositions of the bimodal volcanic rocks from the Bogda belt

岩性 样号	玄武岩						
	B007-1	B008-2	B125	B141	B127	B141-1	B009-2
岩体年龄	342 ± 3.2Ma						
Rb(μg/g)	63.67	1.09	13.23	20.24	14.01	65.87	20.15
Sr(μg/g)	246.2	358.6	254.1	124.6	481.2	271.9	268.9
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.7633	0.0091	0.1886	0.4735	0.0837	0.7082	0.2187
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(M)	0.706994 ± 9	0.703314 ± 11	0.704192 ± 10	0.705576 ± 15	0.703702 ± 13	0.706727 ± 9	0.704358 ± 10
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	-11	-12	-12	-12	-11	-11	-11
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(I)	0.703289	0.703270	0.703276	0.703278	0.703297	0.703289	0.703296
Sm(g/g)		8.99		5.42	6.01	3.68	7.98
Nd(g/g)		25.76		19.61	25.16	23.47	20.37
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd		0.2113		0.1675	0.1443	0.0954	0.2369
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(M)		0.513008 13		0.512913 9	0.512862 13	0.512751 10	0.513069 14
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$		6.7		6.6	6.7	6.6	6.6
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(I)		0.512533		0.512537	0.512538	0.512537	0.512537
U(μg/g)							0.39
Th(μg/g)							1.12
Pb(μg/g)							4.425
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)							18.335
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)							15.509
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)							37.942
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)							18.124
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)							15418
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)							37.635
岩性 样号	玄武岩				流纹岩		
	B014-2	B018	B020	B026	B33	B34	B10
岩体年龄	342 ± 3.2Ma	342 ± 3.2Ma	342 ± 3.2Ma	342 ± 3.2Ma	340.3 ± 3.4Ma	340.3 ± 3.4Ma	340.3 ± 3.4Ma
Rb(μg/g)	5.12	0.89	7.83	3.70	31.85	40.12	4.01
Sr(μg/g)	331.3	258.4	451.7	330.6	56.27	140.1	59.24
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.0478	0.0103	0.0516	0.0328	1.673	0.8466	0.1889
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(M)	0.703522 ± 12	0.703318 ± 9	0.703571 ± 14	0.703454 ± 9	0.711556 ± 12	0.707509 ± 15	0.704345 ± 11
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	-11	-12	-11	-11	-9.1	-9.8	-9.5
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(I)	0.703290	0.703268	0.703321	0.703295	0.703459	0.703411	0.703431
Sm(g/g)	8.71		2.91		11.04	4.20	9.45
Nd(g/g)	20.94		13.07		45.16	19.02	35.09
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.2517		0.1369		0.1399	0.1198	0.1765
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(M)	0.513102 9		0.512841 8		0.512848 10	0.512802 12	0.512933 10
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	6.6		6.6		6.6	6.5	6.6
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(I)	0.512538		0.512534		0.512537	0.512536	0.512541
U(μg/g)	1.20				1.45	2.514	1.03
Th(μg/g)	1.09				5.12	1.81	4.92
Pb(μg/g)	4.91				12.37	15.13	5.98
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)	18.349				18.574	18.481	18.502
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)	15.505				15.541	15.495	15.496
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)	37.954				38.086	38.121	38.094
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)	18.151				18.265	18.297	18.248
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)	15.407				15.439	15.382	15.394
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)	37.612				37.808	37.821	37.794
岩性 样号	流纹岩						
	B27	B36	B126	B144	B15	B31	B32
岩体年龄	340.3 ± 3.4Ma						
Rb(μg/g)	15.87	10.18	25.89	5.02	17.34	22.06	50.03
Sr(μg/g)	168.9	76.28	198.1	145.6	248.7	57.43	62.54
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	168.9	76.28	198.1	145.6	248.7	57.4	2.408
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(M)	0.704717 ± 13	0.705242 ± 9	0.705332 ± 16	0.703948 ± 11	0.704393 ± 10	0.708831 ± 12	0.715072 ± 15
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	-10.0	-9.0	-9.7	-9.2	-10.4	-9.7	-9.7
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(I)	0.703398	0.703469	0.703416	0.703453	0.703369	0.703415	0.703418
Sm(g/g)	7.32	9.50	15.7	8.91	10.87	12.91	10.32
Nd(g/g)	30.8	35.14	46.85	36.38	32.63	44.36	33.78
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1028	0.1678	0.1995	0.1483	0.2004	0.1761	0.1683
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(M)	0.512761	0.512912 9	0.512982 15	0.512859 9	0.512987 10	0.512925 10	0.512910 11
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	6.5	6.6	6.6	6.4	6.6	6.5	6.5
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(I)	0.512533	0.512540	0.512539	0.512530	0.512542	0.512534	0.512536
U(μg/g)		0.729					
Th(μg/g)		3.41					
Pb(μg/g)		6.72					
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)		18.521					
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)		15.516					
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(M)		38.095					
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)		18.312					
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)		15.404					
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb(I)		37.807					

注(1) 刺梅沟玄武岩 Rb-Sr 年龄 $t = 342.0 \pm 3.2\text{Ma}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703289 \pm 0.000011$, MSWD = 1.4; (2) 刺梅沟流纹岩 Rb-Sr 年龄 $t = 340.3 \pm 3.4\text{Ma}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703422 \pm 0.000035$, MSWD = 2.5; (3) M 代表仪器测定值, I 代表按岩石时代计算的初始值

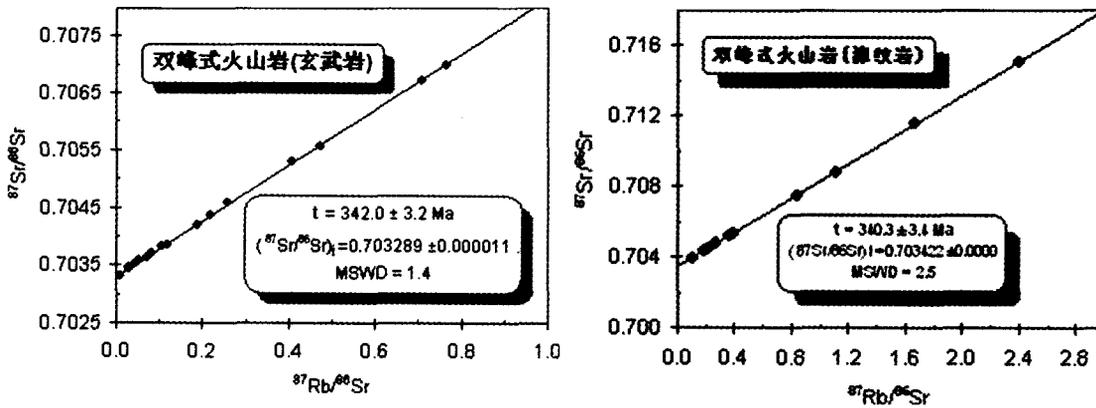


图5 博格达刺梅沟玄武岩(a)和流纹岩(b)Rb-Sr等时线年龄图

Fig. 5 Rb-Sr isochron diagram of basalts (a) and rhyolites (b) from the Bogda belt

6 玄武岩和流纹岩 Nd、Sr 和 Pb 同位素特征

从表1和图5a可见,七角井刺梅沟玄武岩石 $\epsilon_{Sr}(t)$ 值为 $-11.0 \sim -13$, 等时线 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值为 0.703290 ± 21 ; 各样品初始比值变化较小,表明这些岩石来自 Sr 同位素较均匀的同源区,并且与某些洋中脊玄武岩(MORB) $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(0.7022~0.7032)的上限值较为接近,又与某些大洋岛屿玄武岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.703~0.706)的下限值相一致。从表1和图5b可见,刺梅沟流纹岩的 $\epsilon_{Sr}(t)$ 为 $-9.0 \sim -10.0$, 等时线 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始为 0.703422 ± 35 , 与某些洋中脊玄武岩(MORB) $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(0.7022~0.7032)的上限值高,但与某些大洋岛屿玄武岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.703~0.706)的下限值相一致。总之,七角井刺梅沟玄武岩和流纹岩的 $\epsilon_{Sr}(t)$ 值均为明显的负值,表明该岩石组合来源于强烈亏损的地幔源区。流纹岩与玄武岩具有相似的稀土和微量元素配分型式,表明流纹岩可能是玄武岩浆分离结晶作用的产物。

从表1可见,刺梅沟玄武岩和流纹岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 $+6.50 \sim +6.70$ 和 $+6.4 \sim +6.6$, 均接近于 $+7$ 。如此高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值表明玄武岩和流纹岩均来源于强烈亏损的地幔源区,且未受明显的地壳混染。假设现代 MORB 型亏损地幔的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值($+10 \pm 2$)是太古代(4.0Ga)球粒陨石分异型地幔的演化产物,则 300 Ma 前的 MORB 型亏损地幔的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 平均值约为 $+9 \pm 2$ (李献华等,2000)。博格达七角井玄武岩与流纹岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(接近 $+7$)恰与同时期的 MORB 型亏损地幔下限值一致。因此,Nd 同位素组成也表明七角井刺梅沟玄武岩和流纹岩的源区都具备了同时期 MORB 特点。

博格达玄武岩与流纹岩的 Pb 同位素数据测定值 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 18.289~18.635, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.505~15.581, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 37.942~38.175。由此可见,刺梅沟玄武岩和流纹岩的 Pb 同位素特征相似。在 $\epsilon_{Nd}(t) \sim (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图(图6)中,刺梅沟玄武岩样品点落在 Galapagos

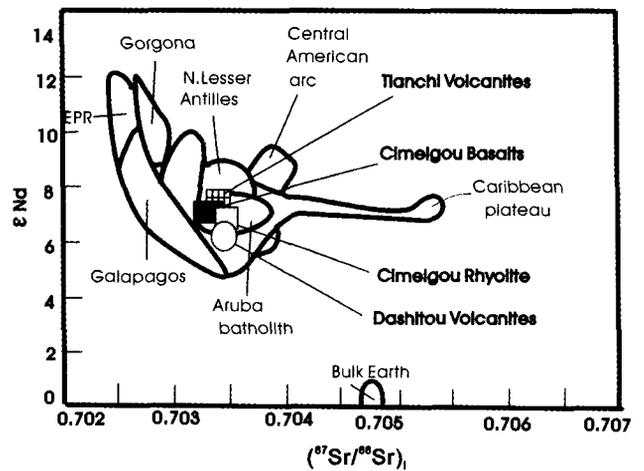


图6 博格达双峰式火山岩 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 关系(仿 Thompson, et al., 2004)

EPR-东太平洋隆升岛弧; Gorgona-戈尔戈纳岛; Central American arc-中美州弧; N. Lesser Antilles-北小的列斯群岛; Caribbean plateau-加勒比高原; Galapagos-加拉帕戈斯群岛; Aruba batholith-阿鲁巴岩基; Bulk Earth-全球; Cimeigou Basalts-刺梅沟玄武岩; Cimeigou Rhyolites-刺梅沟流纹岩

Fig. 6 Plot of initial $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ for bimodal volcanites from the Bogda belt (after Thompson, et al., 2004)

中部区内,而流纹岩则落在 Caribbean 高原火山岩和 Aruba 岩基区内。在 $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i \sim (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$ 图(图7)中,玄武岩和流纹岩样品点均落在 NHRL 线上 EPR 区内上方附近。在 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i \sim (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$ 图(图8)中,玄武岩和流纹岩样品点均落在中国东部新生代玄武岩区内。在 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i \sim (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$ 图(图9)中,玄武岩和流纹岩样品点均落在中国东部新生代玄武岩区的下方。从上述投影图可知,博格达玄武岩和流纹岩与世界各地典型的幔源玄武岩都具有非常类似的 Nd-Sr-Pb 同位素特征,从而进一步证明博格达玄武岩与流纹岩来自同一种地幔岩浆。

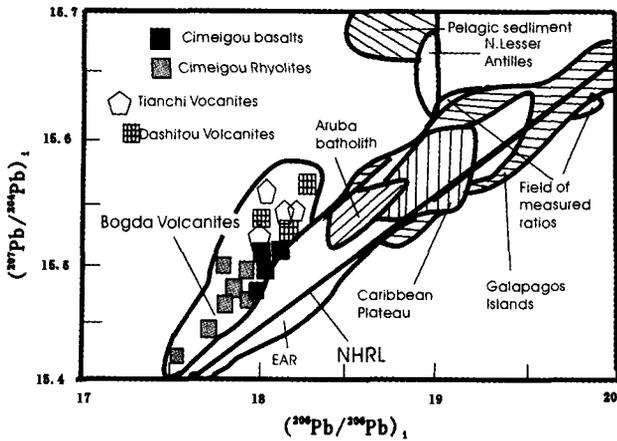


图7 博格达火山岩 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 关系 (仿 Thompson *et al.*, 2004)

EPR-东太平洋隆升岛弧; NHRL-北半球参考线 (Hart, 1984) - N. Lesser Antilles-北小安的列斯群岛; Caribbean plateau- 加勒比高原; Galapagos Islands-加拉帕戈斯群岛; Aruba batholite-阿鲁巴岩基; Field of measured ratios-荷兰安的列斯宝来耳岛弧测定比值; Cimeigou Basalts-刺梅沟玄武岩; Cimeigou Rhyolites-刺梅沟流纹岩; Bogda Volcanites-博格达火山岩类

Fig. 7 Plot of initial $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ vs. $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ for bimodal volcanites from the Bogda belt (after Thompson *et al.*, 2004)

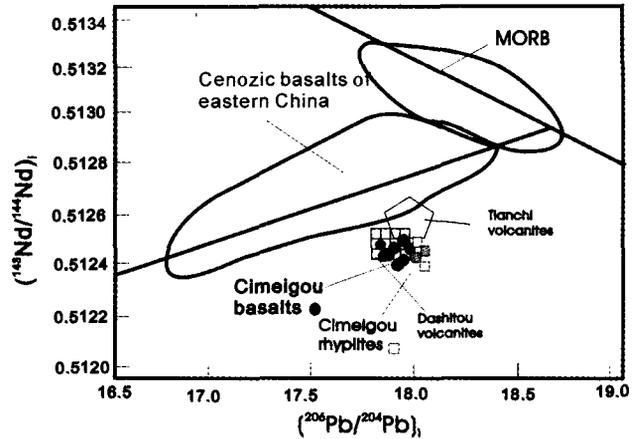


图9 博格达双峰式火山岩 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 关系 (仿 Peng *et al.*, 1986)

MORB-大洋中脊玄武岩; Cenozoic basalts of eastern China-中国东部新生代玄武岩; Cimeigou Basalts-刺梅沟玄武岩; Cimeigou Rhyolites-刺梅沟流纹岩

Fig. 9 Plot of initial $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ for bimodal volcanites from the Bogda belt (after Peng, *et al.*, 1986)

7 岩石成因与构造环境的讨论

双峰式火山岩中玄武岩来自地幔岩石的部分熔融已被公认,但流纹岩的成因却有两种:一种是由玄武岩浆热量导致的地壳岩石部分熔融 (Christiansen, 1984),如在东非裂谷 (Wilson, 1989) 和 Naivasha 裂谷 (Davies *et al.*, 1987), 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为负值。另一种则是玄武岩浆分离结晶的产物,其中只有微量或根本没有陆壳物质的加入 (Cleverly *et al.*, 1984; Grove *et al.*, 1986; MacDonald *et al.*, 1987; Bacon *et al.*, 1988), 其微量元素和 Nd 同位素特征一般与伴生的玄武岩相似 (Brouxel *et al.*, 1986; Hochstaedter *et al.*, 1990b; Geist *et al.*, 1995)。博格达裂谷与其它裂谷 (Wilson, 1989) 相比虽构造环境类似,但火山岩地球化学却存在显著差异 (Davies, *et al.*, 1987); 许多大陆裂谷双峰式火山岩中玄武岩和流纹岩为不同源 (Wilson, 1989), 且玄武岩的出露面积很小,如肯尼亚中部 Naivasha 双峰式火山岩中玄武岩的出露面积小于 2% (Davies *et al.*, 1987), 酸性岩一般为陆壳重熔的产物 (Wilson, 1989); 双峰式火山岩 Nd 和 Sr 同位素初始值变化大,从正值到负值均有 (Pin *et al.*, 1993); 林强等 (2003) 认为大兴安岭中生代双峰式火山岩为大陆裂谷环境的产物,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 Sr 同位素初始值分别为 +3 ~ -4.6 和高于 0.7045。博格达七角井组玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +6.4 ~ +6.7, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.703261 ~ 0.703328, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 17.703 ~ 17.989, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 15.407 ~ 15.498,

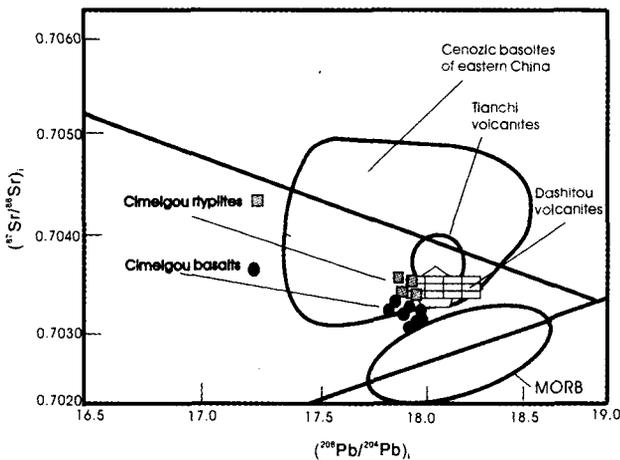


图8 博格达双峰式火山岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 关系 (仿 Peng, *et al.*, 1986)

MORB-大洋中脊玄武岩; Cenozoic basalts of eastern China-中国东部新生代玄武岩; Cimeigou Basalts-刺梅沟玄武岩; Cimeigou Rhyolites-刺梅沟流纹岩

Fig. 8 Plot of initial $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ for bimodal volcanites from the Bogda belt (after Peng, *et al.*, 1986)

($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 37.147 ~ 37.825; 七角井组流纹岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +6.4 ~ +6.6, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.703368 ~ 0.703469, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 17.827 ~ 18.114, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 15.460 ~ 15.517, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 37.077 ~ 37.973。由此可见, 七角井组玄武岩和流纹岩的 Nd-Sr-Pb 同位素特征相当一致或接近。这些特征表明博格达流纹岩是玄武质岩浆经分离结晶作用形成的 (Geist *et al.*, 1995), 而不是地壳岩石重熔的产物 (Wilson, 1989)。博格达刺梅沟玄武岩 7 个样品 Zr 平均为 161 $\mu\text{g}/\text{g}$, Nb 平均为 8.15 $\mu\text{g}/\text{g}$; 4 个样品 Ce 平均为 50.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。流纹岩 4 个样品 Ba 平均为 220 ppm, Zr 平均为 315 ppm, Nb 平均为 10.2 ppm, Y 平均为 54.5 $\mu\text{g}/\text{g}$; 3 个样品 Ce 平均为 23.5 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。玄武岩和流纹岩 Zr/Nb 比值分别为 26.9 和 30.8, Zr/Y 比值分别为 5.1 和 5.8, Nb 分别为 8.15 和 10.2 ppm。从这些数据来看, 博格达玄武岩与 Foder *et al.* (1984) 三种类型中的过渡型 (具有 T-MORB 特征, 类似大西洋中脊和 FAMOUS 玄武岩特征) 相类似。刺梅沟玄武岩和流纹岩的比例是 7:1, 两种岩石轻稀土均较富集, 但重稀土均较平坦, Pb 同位素、 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值完全一致, 表明流纹岩是由玄武岩浆演化而来的。然而, 多数已报道的大陆裂谷双峰式火山岩中流纹岩和玄武岩均来源于不同的母岩浆 (Davies *et al.*, 1987; Wilson, 1989; 林强等, 2003), 只有极少数来源于共同的母岩浆, 但其流纹岩主要是由结晶分异和同化混染共同作用的产物 (Teresa, *et al.*, 1999)。岩浆分离结晶通常只产生成分连续变化的岩浆系列, 但是在特定条件下也可以形成双峰式火山岩组合 (Grove *et al.*, 1986; Brophy, 1991; Brouxe *et al.*, 1987; Hochstaedter *et al.*, 1990a)。双峰式火山岩中由玄武岩浆分离结晶产生的流纹岩在洋岛、初始弧后盆地和洋内岛弧均可见到, 但这类双峰式火山岩仍为数表多。在博格达我们没有发现洋岛、初始弧后盆地和洋内岛弧环境的野外地质证据, 而更多的即是大陆裂谷环境的证据。另外, 在天山地区已发现不少造山后酸性侵入岩正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (王银喜等, 1992; 顾连兴等, 2001), 但目前还未看到裂谷型双峰式火山岩中流纹岩物质源于强烈亏损地幔源区的报道。因此, 博格达双峰式火山岩是大陆裂谷环境中比较特殊的并十分少见的构造成因类型。

东天山博格达早石炭纪七角井组玄武岩: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +6.4 ~ +6.7, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.703261 ~ 0.703328, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 17.703 ~ 17.989, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 15.407 ~ 15.498, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 37.147 ~ 37.825; 七角井组流纹岩: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +6.4 ~ +6.6, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.703368 ~ 0.703469, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 17.827 ~ 18.114, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 15.460 ~ 15.517, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 37.077 ~ 37.973, 由此可见七角井组玄武岩和流纹岩在 Nd-Sr-Pb 同位素特征方面具有相当一致或接近的地方。另外, 王银喜等 (2005) 报道了晚石炭纪流纹岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.703289 ~ 0.703496。车自成等 (1996) 报道了西天山石炭纪火山岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 +2.3 ~ +4.6, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 ~0.7058, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 ~18.378,

($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 为 ~38.452。另外朱永峰等 (2006) 也较详细的报道了西天山石炭纪火山岩: $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$; 玄武岩为 +3.0 ~ -0.22, 不同地方和不同时代的中酸性火山岩分别为 +4.29 ~ +0.32, +2.68 ~ +4.29, -0.22 ~ +0.32; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i; 玄武岩为 0.7055 ~ 0.7065, 不同地方和不同时代的中酸性火山岩分别为 0.7067 ~ 0.7146, 0.7146 ~ 0.7221。由此看出西天山不同地方和不同时代的中酸性火山岩和玄武岩其 Nd 和 Sr 同位素特征内部之间比较就显得较大的不同, 与东天山博格达石炭纪火山岩比较其 Nd 和 Sr 同位素特征更是明显不同, 反映它们不是同一岩浆演化的产物, 并且反映它们源区物质来源的多样性。

无论从化学成份、同位素特征还是从矿物岩石组合比较东天山和西天山火山岩还是有明显不同的, 因此它们产出在不同的构造环境就不足为奇。东天山和西天山石炭纪火山岩构造环境属性是不同的, 火山岩的物质来源均不相同, 多成因是它们的主要特点。

8 结论

(1) 博格达刺梅沟双峰式火山岩中玄武岩和流纹岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄分别为: 342.0 \pm 3.2 Ma 和 340.3 \pm 3.4 Ma, 它们分别代表了这两种岩石的结晶时代, 从而表明博格达火山活动始于早石炭世, 双峰式火山岩中玄武岩和流纹岩均为博格达裂谷强烈伸展阶段的产物。东天山石炭纪火山岩在误差范围内与西天山大哈拉军山组火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 (313 ~ 354 Ma) 基本一致, 西天山早石炭纪火山活动的开始略微早于东天山早石炭纪火山活动。

(2) 根据元素地球化学、地质学和 Pb, Sr, Nd 同位素地球化学研究, 刺梅沟双峰式火山岩形成于大陆裂谷环境, 其玄武岩岩石来源于亏损地幔, 而与此伴生的流纹岩是由玄武岩浆分离结晶作用形成的。

(3) 流纹岩 Nd-Sr-Pb 同位素一致性反映其物质源于强烈亏损的地幔源区, 不存在显著的地壳混染。由玄武岩浆分离结晶作用形成的双峰式火山岩并不少见, 但是在裂谷环境下双峰式火山岩中玄武岩浆分离结晶作用形成流纹岩, 这种情形至今还未发现。因此, 博格达双峰式火山岩是大陆裂谷环境中比较特殊的, 并可能是一种新的双峰式火山岩构造成因类型。

(4) 化学成份、同位素特和矿物岩石组合均表明, 东天山和西天山石炭纪火山岩构造环境和物质来源均不同。

References

- Bacon CR and Druit TH. 1988. Compositional evolution of the zoned calc-alkaline magma chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98: 224-256
- Brophy JG. 1991. Composition gaps, critical crystallinity, and fractional crystallization inorganic (calc-alkaline) magmatic systems. *Contrib.*

- Mineral petrol. , 109:173 - 182
- Brouxel M, Lapierre H, Michard A, Albrede F. 1987. The deep Layers of a Paleozoic; geochemistry of the Copley-Blakala series, northern California. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 85:386 - 400
- Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1996. Review on the Ancient Yili rift, Xingjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3) : 478 - 490 (in Chinese with English abstract)
- Cheng SD, Wang GR and Yang SD. 1986. The Palaeoplate tectonics of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 4(2) : 1 - 26 (in Chinese with English abstract)
- Christiansen RL. 1984. Yellowstone magmatic evolution; its bearing on understanding large-volume explosive volcanism. In: *Explosive Volcanism: Inception, evolution and hazards*. National Academy Press, Washington DC, 84 - 95
- Cleverly RW, Betton PJ and Bristow JW. 1984. Geochemistry and petrogenesis of the Lebombo rhyolites. *Spec. Publ. Geol. Soc. S. Afr.* , 13:171 - 194
- Coeman RG. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8(1) : 621 - 635
- Cooper JA and Richards JR. 1966. Lead Isotopes and Volcanic magmas. *Earth Planet. Sci. Letters*, 1(3) : 259 - 269
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamic significance. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 79: 281 - 302
- Duncan AR, Erlank AJ and Marsh JS. 1984. Regional geochemistry of the Karoo igneous province. *Spec. Publ. Geol. Soc. Afr.* , 13: 355 - 388
- Davies GR and Macdonald R. 1987. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex; combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints. *J. Petrol.* , 28: 1009 - 1031
- Fang Q. 1993. Sedimentological evidence of late Palaeozoic Bogda island arc. *Acta Sedimentologica Sinica*, 11(3) : 31 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Foder RV and Vetter SK. 1984. Rift-zone magmatism: petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 8: 307 - 321
- Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213 - 231
- Garland F, Hawksworth CJ and Mantvani MSM. 1995. Description and petrogenesis of the Parana rhyolites, southern Brazil. *J. Petrol.* , 36: 1193 - 1227
- Geist D, Howard KA, Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation; the basalt-rhyolite association at Volcan Alcedo, Galapagos Archipelago. *J. Petrol.* , 36: 965 - 982
- Green DH and Ringwood E. 1967. The genesis of basaltic magmas. *Contr. Mineral. Petrol.* , 15(2) : 103 - 190
- Grove TL and Donnelly-Nolan M. 1986. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California; implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series lavas. *Contr. Mineral. Petrol.* , 92(2) : 281 - 302
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY *et al.* 2000a. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan; Their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3) : 305 - 316 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Yu CS, Li HY, Xiao XJ *et al.* 2000b. Rb-Sr isotope age of the Shangdaheyan intrusion in the Bogda orogenic belt and its geological implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(1) : 19 - 21 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Zhao M *et al.* 2001a. Intrusive activities during compression-extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2) : 187 - 198 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Wu CZ *et al.* 2001b. Initiation and evolution of the Bogda subduction-torn-type rift. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4) : 585 - 597 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Post-collisional mantle-derived magmatism, underplating and implication for basement of the Junggar basin. *Science in China(Series D)* , 4292: 113 - 119
- Hauff F, Hoernle K, Tilton G, Graham D W *et al.* 2000b. Large volume recycling of oceanic lithosphere over short time scales: geochemical constraints from the Caribbean Large Igneous Province. *Earth Planet Sci. Lett.* , 174: 247 - 263
- He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL *et al.* 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumqi and Hongkong: Xinjiang People's Publication House and Educational and Cultural Press LTD, 1-437(in Chinese with English abstract)
- Hochstaedter AG, Gill JB, Kusakabe M, Newman S, *et al.* 1990a. Volcanism in the Sumisu Rift. I. Element, volatile and stable geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 100: 179 - 194
- Jacobsen SB and Wasserbury GJ. 1984. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 67: 137 - 150
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rock based on the total alkalisilica diagram. *J. Petrol.* , 27: 745 - 750
- Li JY, Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4) : 405 - 419 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou HW, Ding SJ *et al.* 2000. Metamorphosed mafic rocks with N-type MORB geochemical features in Hainan Island, Remnants of the Paleo-Tethys oceanic crust? *Chi. Sci. Bull.* , 45: 84 - 88 (in China)
- Liao ZT, Zhou YX, Wang KL and Xia FS. 1992. The Carboniferous of the Kuangou ares of the Bogda mountain in Xinjian. *J. Stratigraphy*, 16(2) : 105 - 110 (in Chinese with English abstract)
- Lin Q, Ge WC, Cao L, Sun DY *et al.* 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling: The bimodal volcanic rocks. *Geochimica*, 32(5) : 208 - 222 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 1998. Using Isoplot/Ex: Ageochronological toolkit for Microsoft Excel, version 1. 00, Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1; 1 - 4
- Lu YF. 2004. Geokit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel. 33(5) : 459 - 464 (in Chinese with English abstract)
- MacDonough WF, Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* , 120: 223 - 253
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 202 (in Chinese with English abstract)
- Peng ZC, Zartman RE, Futa K and Chen DG. 1986. Pb-, Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)* , 59: 3 - 33
- Pin C and Marini F. 1993. Early Ordovician continental break-up in Variscan Europe; Nd-Sr isotope and trace element evidence from bimodal igneous associations of the southern Massif Central, France. *Lithos*, 29: 177 - 196
- Pin C and Paquette JL. 1997. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian belt; Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the late Devonian Brevenne metavolcanics, Massif Central(France). *Contrib. Mineral. Petrol.* , 129: 222 - 238
- Tatsumi Y. 1991. Origin of subduction zone magmas based on experimental petrology. In: Perchuk L L and Kushiro I (eds.). *Physical Chemistry of Magmas*. Springer-Verlag, 268 - 301
- Thompson PME, Kempton PD, White RV, Saunders AD *et al.* 2004. Elemental, Hf-Nd isotopic and geochronological constraints on an island arc sequence associated with the Cretaceous Caribbean plateau: Bonaire, Dutch Antilles. *Lithos*, 74: 91 - 116
- Turner S, Sandoford M and Foden J. 1992. Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism. *Geology*, 20: 931 - 934
- Patterson CC and Duffield B. 1963. The isotopic composition of lead in Easter Island rhyolite. *Geochim. Cosmochim. Acta.* , 27(11) : 180 - 1181

- Stille P, Unruh DM and Tatsumoto M. 1983. Pb, Sr, Nd and Hf isotopic evidence of multiple sources for Oahu, Hawaii basalts. *Nature*, 304 (7): 25 - 29
- Wang LL and Zhan K. 1986. Characteristics of structural evolution and oil-gas potential prediction in southern margin area of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 7(2): 1 - 9 (in Chinese)
- Wang Y, Qian Q, Liu L and Zhang Q. 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 169 - 173 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Zhang KJ, Li HM, Wu CZ, Yang JD. 2005. Isotopic chronologic evidence of Bogda rift closure and regional uplift and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 26:102 - 104 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Li HM, Tao XC, Yang H *et al.* 1991. A study of Nd, Sr, and O isotopes and the crustal growth age of granites in eastern segment of middle east Tianshan belt, China. *Acta Petrologica Sinica*, 7(3): 19 - 26 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Yang JD, Tao XC and Li HM. 1988. A study of the Sm-Nd method for fossil mineral and rock and its applications. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 24(2): 297 - 308 (in Chinese with English abstract)
- Wendlandt RF, Altherr R, Neumann ER and Baldrige WS. 1995. *Petrology, Geochemistry, isotopes*. In: Olsen KH (ed.). *Continental Rifts; Evolution, Structure, Tectonics*. Amsterdam: Elsevier, 47 - 60
- White WM and Hofmann AW. 1982. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296(5860): 821 - 825
- Willson W. 1989. *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 327 - 373
- Wood DA. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle-genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence. *Geology*, 7: 499 - 503
- Wu NY and Wang MQ. 1983. The Carboniferous system and its fossil assemblage characteristics in Northern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 1(2): 17 - 31 (in Chinese with English abstract)
- Wu QF. 1986. Structural evolution and prospects of Junggar Basin. *Xinjiang Geology*, 4(3): 1 - 19 (in Chinese with English abstract)
- Xiao SL and Zhang ZM. 1985. The upper Palaeozoic in Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 3(3): 15 - 31 (in Chinese with English abstract)
- Yang H and Gu LX. 1989. Preliminary discussion on the tectonic significance of the Tulufan-Hami Precambrian block in the East Tianshan orogenic belt. *J. Nanjing University (earth science edition)*, (1-2): 82 - 86 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JY, Mao YS and Huang ZX. 1994. *Volcanic geology of Palaeocontinental margin in East Tianshan Mountains*. Chendu: Chendu University of Science and Technology Press, 1 - 280 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X, Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2201 - 2212
- Zhu YF, Zhou J and Guo X. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1341 - 1350
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水等. 2000b. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. *岩石学报*, 16(3): 305 - 316
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水等. 2001a. 博格达陆内碰撞造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动. *岩石学报*, 17(2): 187 - 198
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水等. 2001b. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化. *岩石学报*, 17(4): 585 - 597
- 成守德, 王广端, 杨树德等. 1986. 新疆古板块构造. *新疆地质*, 4(2): 1 - 26
- 方国庆. 1993. 博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据. *沉积学报*, 11(3): 31 - 36
- 何国琦, 李茂松, 刘德权等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994, 1 - 437
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与演化几个问题的简要评述. *地质科学*, 349(4): 405 - 419
- 李献华, 周汗文, 丁式江等. 2000. 海南岛洋中脊型变质基性岩? 古特提斯洋壳的残片? *科学通报*, 45(1): 84 - 88
- 林强, 葛文春, 曹林等. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征. *地球化学*, 32(3): 208 - 222
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459 - 464
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1 - 202
- 廖卓庭, 周宇星, 王克良等. 1992. 新疆博格达山宽汉地区的石炭系. *地层学杂志*, 16(2): 105 - 110
- 王利利, 张凯, 高明远. 1986. 准噶尔盆地南缘的构造演化特征及含油气预测. *新疆石油地质*, 7(2): 1 - 9
- 王焰, 钱青, 刘良等. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征. *岩石学报*, 16(2): 169 - 173
- 王银喜, 杨杰东, 陶仙聪等. 1988. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法研究及其应用. *南京大学学报(自然科学版)*, 21(2): 297 - 308
- 王银喜, 李惠民, 陶仙聪等. 1991. 中天山东段花岗岩类铷锶氧同位素及地壳形成年龄. *岩石学报*, 3: 19 - 26
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠等. 2005. 博格达裂谷闭合和区域隆起的同位素年代学证据及地质意义. *地球学报*, 26: 102 - 104
- 吴乃元, 王明倩. 1983. 新疆北部石炭系地层层序和化石组合特征. *新疆地质*, 1(2): 17 - 31
- 吴庆福. 1986. 准噶尔盆地构造演化及含油气远景. *新疆地质*, 4(3): 1 - 19
- 肖世录, 张志民. 1985. 新疆天山上古生界. *新疆地质*, 3(3): 1 - 14
- 杨浩, 顾连兴. 1989. 东天山造山带中吐哈地块的认识及意义. *南京大学学报(地球科学版)*, 25(1-2): 82 - 86
- 周济元, 茅燕石, 黄志勋. 1997. 东天山古大陆边缘火山地质. 成都: 成都科技大学出版社, 1 - 280
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. *科学通报*, 50(18): 2004 - 2014
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. *岩石学报*, 22(6): 1341 - 1350

附中文参考文献

- 车自成, 刘良, 刘洪福等. 1996. 论伊犁裂谷. *岩石学报*, 12(3): 305 - 316
- 顾连兴, 于春水, 李宏宇等. 2000a. 博格达上在河沿岩体铷-锶同位素年龄及地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 19(1): 19 - 21