

东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究^{*}

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

WANG YinXi^{1,2,3}, GU LianXing³, ZHANG ZunZhong³, WU ChangZhi³, LI HuiMin^{1,3} and YANG JieDong^{1,3}

1. 南京大学现代分析中心,南京 210093

2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

3. 成矿作用国家重点实验室(南京大学),南京大学地球科学系,南京 210093

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

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2007-03-01 收稿, 2007-05-06 改回.

Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Li HM and Yang JD. 2007. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of Rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou group in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7):1749–1755

Abstract The Dashitou-Shepikou area belongs to the northern part of the eastern section of the Bogda orogen. Rhyolite of the Dashitou group gave a Rb-Sr age of 306.7 ± 2.3 Ma, and thus is suggested to have been produced at the uplifting stage following the closure of the Bogda rift. With $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ of $+5.30 \sim +6.40$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of $0.703289 \sim 0.703496$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ of $18.037 \sim 18.425$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ of $15.524 \sim 15.567$ and $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ of $37.198 \sim 37.810$, the rhyolite is comparable in Nd, Sr and Pb isotopes to the basalt and rhyolite of the Lower and Middle Carboniferous Qijiaoqing formation that were formed during extension and subsidence of the Bogda intra-continental rift. Minor rhyolite accompanying a large amount of basalt in the Qijiaoqing formation are though to have been produced by fractional crystallisation of the basaltic magma, but a large quantity of rhyolite accompanied by very minor basaltic rocks can precludes the big possibility of their formation by fractional crystallisation of basaltic magma. The rhyolite of the Dashitou group is likely to have been derived from an underplated basaltic body by remelting of this body in response to mantle heating. Highly positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$, and negative $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ (low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial ratio), and low Pb isotope ratios suggested that, like the pre-collision basalt of the Qijiaoqing formation, the mantle magma underplated basaltic body by re-melting at the post-collision stage of the Bogda rift came from depleted mantle.

Key words Nd-Sr-Pb isotope geochemistry; Bogda post-collision rhyolite, Xinjiang

摘 要 新疆大石头-色皮口地区位于博格达造山带东段北部。该区大石头群流纹岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 306.7 ± 2.3 Ma, 是博格达裂谷闭合后区域隆升阶段的产物。这些流纹岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $+5.30 \sim +6.40$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 $0.703289 \sim 0.703496$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 $18.037 \sim 18.425$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 $15.524 \sim 15.567$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 为 $37.198 \sim 37.810$, 因此其 Nd-Sr-Pb 同位素特征与博格达陆内裂谷伸展和沉降阶段形成的早石炭世七角井组玄武岩和流纹岩相近。七角井组与大量玄武岩伴生的少量流纹岩是由玄武岩岩浆分离结晶作用的产物, 而大石头群中的大量流纹岩群仅与少量玄武岩伴生故是由玄武岩岩浆分离结晶的产物可排除大的可能性。该区流纹岩很可能是碰撞后的底侵玄武岩在地幔热量影响下发生重熔的产物。大石头群流纹岩正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、负 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值(低 Sr 初始值)和低 Pb 同位素比值表明博格达裂谷碰撞后的底侵慢源岩浆重熔的基性产物与碰撞前的七角井组玄武岩一样也来自亏损地幔。

关键词 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学; 碰撞后流纹岩; 博格达; 新疆

中图法分类号 P597.3; P588.141

^{*} 国家自然科学基金项目(No. 40472042, No. 40072075)、国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409802)、国家九·五攻关 305 项目(No. 96-915-05-03-01)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, E-mail: yxwang@nju.edu.cn

1 引言

天山晚古生代火山岩与中亚主要成矿带的形成和演化密切相关(何国琦等,1994;何国琦和朱永峰,2006;王京彬等,2006;Zhu *et al.*, 2006, 2007),中亚主要成矿带矿床特征和时空分布格局为重建东天山地区大地构造演化提供了新的制约。晚古生代后碰撞深成岩浆作用造成大陆地壳生长具有广泛的区域性(韩宝福等,2006;李锦轶等,2006)。东天山博格达造山带的构造属性是裂谷还是岛弧经历过长期的争论(成守德等,1986;Coleman, 1989;Gao *et al.*, 1998)。近年来,顾连兴等(2000,2001a, b)对该带的下、中石炭统七角井组和柳树沟组火山岩作了系统研究,确定了这是一套双峰式火山岩,因而认为该造山带是早、中石炭世发展起来的,并于中石炭世末闭合的大陆裂谷,这一带的侵入岩主要形成于碰撞后的挤压拉张转折阶段。王银喜等(2006)获得七角井组流纹岩 Rb-Sr 同位素年龄 $340.3 \pm 3.4\text{Ma}$,并对七角井组玄武岩和流纹岩作了 Nd-Sr-Pb 同位素示踪,认为这套双峰式火山岩来自亏损的地幔源区(王银喜等,2006;Wang *et al.*, 2006b)。但是迄今为止,位于博格达造山带东北段的大石头-色皮口地区的晚石炭世大石头群火山岩仍然缺少详细的同位素年龄和 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学资料。本文将报道大石头群火山岩的 Rb-Sr 同位素年龄以及 Nd、Sr 和 Pb 同位素组成特征,并对其成因演化源区特征进行探讨。

2 区域地质与火山岩特征

博格达裂谷位于准噶尔盆地与吐鲁番-哈密两个前寒武

纪地块之间,呈东西走向,西起乌鲁木齐,东与克拉麦里-哈尔里克造出带相接,北为准噶尔中、新生代沉积盆地,南隔吐-哈中、新生代盆地与觉罗塔格造山带相望(图1)。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_2I)火山岩出露完整。七角井组为海相火山岩建造,块状或枕状玄武岩中夹有流纹岩层,并夹有少量的凝灰质砂岩及页岩。在七角井地区的刺梅沟可见玄武岩与流纹岩组成的韵律喷发旋回(顾连兴等,2000)。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。博格达地区的这套下、中石炭统火山岩为裂谷沉降阶段的产物(顾连兴等,2000,2001a, b)。在大石头-色皮口一带分布着一套上石炭统陆相火山-沉积岩系,被称为大石头群,其中包括前人所称的沙雷塞尔克组、扬布拉克组、沙马尔沙依组和缪林托凯陶组,顾连兴等(2001b)认为大石头群是博格达裂谷碰撞闭合后的产物。大石头群的岩性主要为钙碱性火山岩,其中流纹岩和英安岩占90%以上,仅含极少量的玄武粗安岩,玄武安山岩和粗面安山岩(顾连兴等,2001b)。大石头群流纹岩呈灰紫色或绿灰色,常具流纹构造和斑状结构。斑晶主要为斜长石、碱性长石及石英。斜长石斑晶呈自形-半自形板条状,粒度1~3mm不等,可见钠长石律聚片双晶,主要为An=10左右的钠长石或更长石,轻度绢云母化。碱性长石斑晶呈半自形,偶见卡氏双晶,少数岩石中的碱性长石为条纹长石。基质具球粒结构及霏细结构,由斜长石,碱性长石和石英微晶及隐晶质组成。气孔构造较发育,多呈不规则状,被石英和绿泥石所充填。基本不含暗色矿物,仅少数岩石中含少量黑云母及榍石。

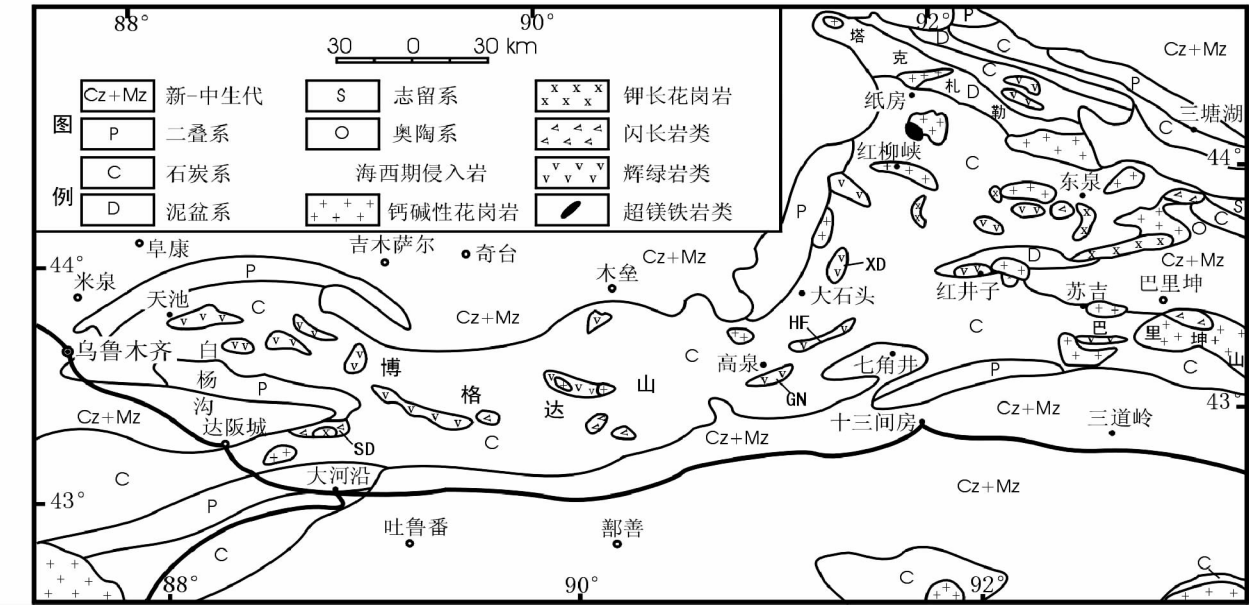


图1 东天山博格达造山带地质略图

Fig. 1 Geological map of the Bogda Mountains in the East Tianshan region.

3 分析方法

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⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 为标准化值，测得⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710224 ± 8 (*n* = 10)；对美国 La Jolla Nd 同位素标准样中¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的测定值为 0.511860 ± 8 (2σ, *n* = 8)；标准化值采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正。测定 NBS981Pb 同位素标准为：²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 16.939 ± 0.006, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.489 ± 0.009 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 36.698 ± 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 的全流程本低分别为 6 × ⁻¹¹g、3 × ⁻⁹g 和 2 × ⁻¹⁰g。计算 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 过程中，(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.1967；(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{UR} = 0.7045, (⁸⁷Rb/⁸⁶Sr)_{UR} = 0.0827 (Jacobsen, *et al.*, 1984)。年龄计算采用国际通用的 Ludwig (1998) 的 ISOPLLOT 计算程序。在等时线年龄计算中，样品⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值误差分别为 1% 和 0.2%，⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 误差采用 0.005%。铅同位素初始值计祢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 1。详细的 Sm-Nd、Rb-Sr 和 U-Th-Pb 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, 2006)。

表 1 博格达大石群流纹岩 Nd、Sr 和 Pb 同位素组成

Table 1 Sr-Nd-Pb isotope compositions of the rhyolite from the Dashitou group, Bogeda

样品号	B5	B39	B40	X-161	X-163	X-164	X-165	X-166	X-376	X-377
Rb(× 10 ⁻⁶)	148.7	34.79	50.02	153.4	136.1	149.9	148.2	160.5	145.7	148.1
Sr(× 10 ⁻⁶)	129.6	457.8	213.5	96.21	90.34	109.8	94.56	118.7	126.3	106.2
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	3.354	0.2292	0.6671	4.875	4.501	4.036	4.620	3.857	3.427	4.116
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.718102	0.704301	0.706205	0.724536	0.722914	0.720894	0.723545	0.720186	0.718260	0.721213
误差 2σ	11	9	12	6	9	11	8	8	14	9
ε _{Sr} (<i>t</i>)	-9.1	-12	-12	-12	-12	-11	-10	-11	-11	-12
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.703496	0.703303	0.703300	0.703307	0.703314	0.703319	0.703426	0.703390	0.703336	0.703289
Sm(× 10 ⁻⁶)	3.005	7.936	3.472	2.607	2.713	2.993	3.346	2.819	2.807	4.398
Nd(× 10 ⁻⁶)	18.17	36.41	18.15	15.92	16.14	17.51	18.26	18.57	17.13	22.81
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1012	0.1306	0.1138	0.0964	0.1072	0.1037	0.1109	0.0916	0.1039	0.1151
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512774	0.512803	0.512762	0.512716	0.512737	0.512725	0.512741	0.512753	0.512756	0.512789
误差 1σ	9	11	8	7	8	10	11	10	10	13
ε _{Nd} (<i>t</i>)	6.4	5.8	5.7	5.4	5.5	5.3	5.4	6.4	5.9	6.1
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _i	0.512571	0.512541	0.512534	0.512523	0.512522	0.512517	0.512519	0.512570	0.512548	0.512558
U(× 10 ⁻⁶)	2.15	1.23	2.21	1.02	0.98	1.08	0.96	1.05	1.17	1.21
Th(× 10 ⁻⁶)	12.34	5.37	11.05	5.31	4.95	5.29	4.91	5.42	5.58	5.49
Pb(× 10 ⁻⁶)	14.12	16.16	13.36	15.2	14.7	14.9	15.1	15.4	16.3	15.9
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18.576	18.635	18.607	18.569	18.564	18.562	18.576	18.469	18.479	18.695
误差 1σ	35	28	31	34	41	46	37	37	45	28
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.552	15.581	15.578	15.549	15.546	15.551	15.558	15.553	15.549	15.546
误差 1σ	38	42	33	29	36	31	37	33	35	39
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38.175	38.169	38.162	38.172	38.175	38.185	38.174	38.179	38.193	38.168
误差 1σ	9	11	14	11	9	10	8	11	9	12
(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	18.037	18.365	18.224	18.331	18.327	18.305	18.351	18.227	18.304	18.425
(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	15.524	15.567	15.547	15.537	15.534	15.538	15.546	15.540	15.536	15.512
(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	37.198	37.797	37.238	37.778	37.779	37.787	37.810	37.785	37.809	37.780

注：下角 i 者代表按岩石时代计算的初始值(*t* = 306.7Ma)

4 常量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征

据顾连兴等(2000^①,2001)的研究结果,大石头群流纹岩的 SiO_2 为 69.74% ~ 75.18%; ΣREE 为 97.97×10^{-6} ~ 101.36×10^{-6} , LREE/HREE 为 7.96 ~ 9.79, δEu 为 0.61 ~ 0.70, La_N/Lu_N 为 7.95 ~ 11.33, 具有轻稀土富集和轻度铈亏损的特征; 大石头群流纹岩具有 U、Nb、Ti、P 和 Sr 的亏损特征, Zr 含量在 233×10^{-6} ~ 243×10^{-6} , TiO_2 在 0.28% ~ 0.62%, Nb 含量在 8.3×10^{-6} ~ 10.2×10^{-6} 范围内, U 含量在 2.0×10^{-6} , Rb 含量在 47.7×10^{-6} ~ 150.0×10^{-6} , Th 含量在 10.7×10^{-6} ~ 11.7×10^{-6} 范围内, Sr 含量在 47.7×10^{-6} ~ 150.0×10^{-6} , Zn 含量在 27×10^{-6} ~ 48×10^{-6} 。大石头群粗安岩、安山岩和英安岩常量元素含量: SiO_2 = 53.39% ~ 66.58%; ΣREE = 64.09×10^{-6} ~ 172.2×10^{-6} , LREE/HREE = 4.17 ~ 9.4, δEu = 0.67 ~ 1.03, La_N/Lu_N = 3.27 ~ 11.79, 具有轻稀土富集和轻度铈亏损的特征; 大石头群粗安岩、安山岩和英安岩具有 U、Nb、Ti、P 和 Sr 的亏损特征, Zr 含量在 174×10^{-6} ~ 441×10^{-6} , TiO_2 在 0.69% ~ 1.31%, Nb 含量在 9.3×10^{-6} ~ 13.2×10^{-6} , 范围内, U 含量在 $0.7 \sim 1.0 \times 10^{-6}$, Rb 含量在 27×10^{-6} ~ 45×10^{-6} , Th 含量在 4.6×10^{-6} ~ 6.5×10^{-6} 范围内, Sr 含量在 462×10^{-6} ~ 633×10^{-6} , Zn 含量在 90×10^{-6} ~ 127×10^{-6} 。由微量元素可知, 该区火山岩均属不相容元素富集型。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。大石头群流纹岩相对与大石头群粗安岩、安山岩和英安岩更富集 SiO_2 、Zr、U、Rb、Th, 而相对贫 Sr 和 Zn。

5 博格达大石头群火山岩 Rb-Sr 同位素等时线年龄

表 1 列出了博格达大石头群 10 件流纹岩全岩 Rb-Sr 同位素分析数据, 图 2 为这些数据构成的 Rb-Sr 等时线。各数据点之间高度的线性关系和一致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值表明这些样品为同期同源产物。年龄计算采用国际通用的 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 1998), 用模式 1 算得流纹岩年龄为 $306.7 \pm 2.3\text{Ma}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.703316 \pm 54$, $\text{MSWD} = 4.5$ 。该年龄与大石头群沉积岩夹层中的晚石炭世古生物群落 (吴乃元和王明倩, 1983, 肖世绿等, 1985) 相吻合, 因此代表了流纹岩固结时代, 证明博格达火山活动始于早石炭世 ($342.0 \pm 3.2\text{Ma}$, 王银喜等, 2006), 晚石炭世前火山活动已结束。这一年龄表明, 博格达裂谷至 306.7Ma 前后已经闭合并进一步证明博格达从早石炭世持续到晚石炭世的火山活动代表着由挤压到拉张这个地球动力学环境的重大转折时期。尽管这套火山岩与下一中石炭统海相地层均为断层接触, 但据其晚石炭世化石组合和陆相喷发环境, 似可视之为裂谷闭合和区

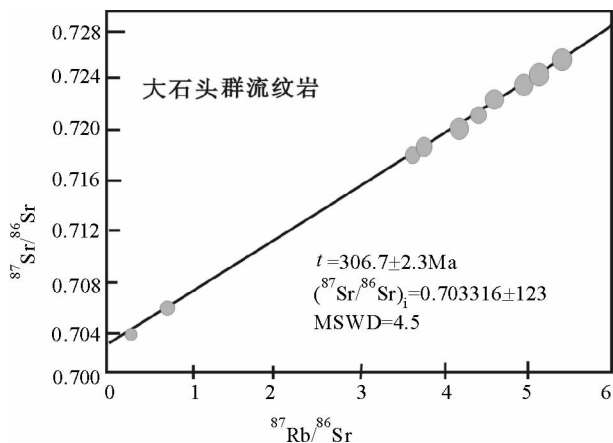


图 2 博格达大石头群流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 2 Rb-Sr isochron diagram of rhyolites from Dashitou group of the Bogda orogen

域隆升之后造山阶段的产物 (顾连兴等, 2001b)。由此大石头群流纹岩同位素等时线年龄代表了裂谷闭合和区域隆升之后造山阶段的时代。大石头组流纹岩同位素等时线年龄在误差范围内与西天山拉尔敦达坂一带测定的 306 ~ 313Ma 年龄几乎一致 (Zhu *et al.*, 2005; 2006c) 几乎一致。这也反映东天山与西天山石炭纪火山活动在构造演化的同步性, 也可能意味着西天山与东天山在晚石炭世处于一个统一的大的地质环境。但在局部小地质地球化学环境还是有所不同, 特别是在 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征却明显不相同 (王银喜等, 2006; Wang *et al.*, 2006b)。

6 大石头群火山岩 Nd、Sr 和 Pb 同位素特征和岩石成因

从表 1 和图 3a, b, c, d 可见, 大石头群流纹岩的 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 为 $-9.1 \sim -12.0$, 等时线 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始为 0.703316 ± 123 , 各样品初始比值变化较小, 为 $0.703289 \sim 0.703496$, 表明这些岩石来自 Sr 同位素较均匀的同一源区, 比某些洋中脊玄武岩 (MORB) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 ($0.7022 \sim 0.7032$) 的上限值高 (White and Hofmann, 1982), 但与某些大洋岛屿玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($0.703 \sim 0.706$) 的下限值相一致 (Stille *et al.*, 1983)。总之, 大石头群流纹岩的 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值均为明显的负值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+5.3 \sim +6.4$ (表 1), 如此高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表明流纹岩是由来自亏损地幔的幔源基性火成岩经过部分熔融形成。 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ 的负值、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的正值和低 Pb 同位素初始值均表明大石头群流纹岩是由来自亏损地幔的幔源基性火成岩经过部分熔融形成。七角井组流纹岩: $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $+6.4 \sim +6.6$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

① 顾连兴, 严正富, 于春水. 2000. 达坂城铜、金成矿带成矿地质环境研究. 加速查明新疆优势金属矿产资源及大型矿床综合研究 96-915-05-03-01 子专报告. 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室内部资料。

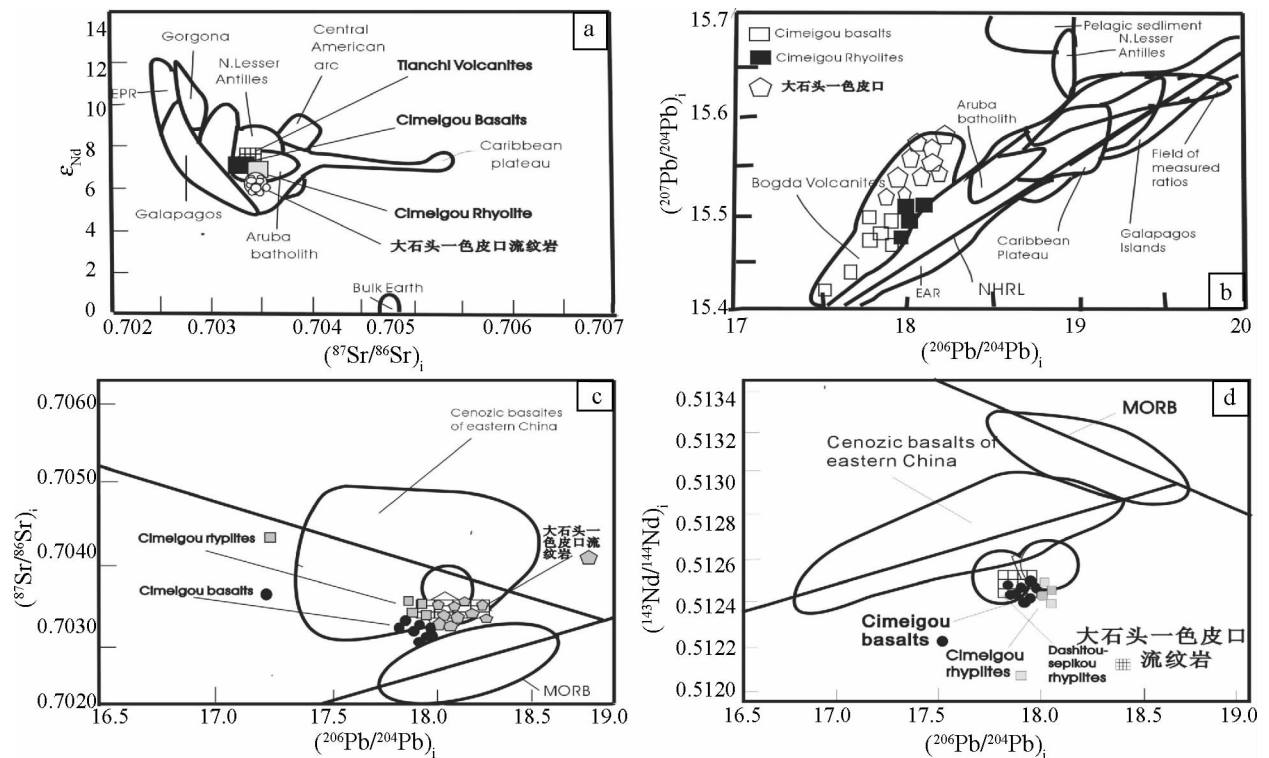


图3 博格达大石头群流纹岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) (仿 Thompson, *et al.*, 2004), $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (b) (仿 Thompson *et al.*, 2004), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (c) (仿 Peng, *et al.*, 1986) 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (d) (仿 Peng *et al.*, 1986) 图解。

EPR-东太平洋隆升岛弧; Gorgona-戈尔戈纳岛; Central American arc-中美洲弧; 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 batholite-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; Dashitou-Sepikou Rhyolites-大石头-色皮口流纹岩

Fig. 3 Plots of $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) (after Thompson *et al.*, 2004), $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ vs. $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (b) (after Thompson *et al.*, 2004), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (c) (after Peng, *et al.*, 1986) and Plot of initial $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ vs. $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ (d) (after Peng, *et al.*, 1986) for rhyolite from the Dashitou group of the Bogda orogen

$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 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。大石头群流纹岩 Nd、Sr 和 Pb 同位素特征与七角井组流纹岩的 Nd、Sr 和 Pb 同位素特征相近。其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 特征也与东天山地区一些碰撞后酸性侵入岩特征(王银喜等, 1991; 顾连兴等, 2001a) 相一致。

大石头-色皮口流纹岩 Pb 同位素初始($t = 306\text{Ma}$)值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.037 ~ 18.425, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.524 ~ 15.567, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.198 ~ 37.810。大石头-色皮口粗面岩和粗安岩的 Pb 同位素数据测定值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.036 ~ 18.369, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.518 ~ 15.571, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.607 ~ 37.927。大石头-色皮口流纹岩 Pb 同位素初始值与中天山企鹅山群火山岩和斜长花岗斑岩的 Pb 同位素初始值(侯广顺等, 2006; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.733 ~ 17.838, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.449 ~ 15.490, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.367 ~ 37.659) 相比前者比后者具有富放射成因铅同位素组成特征。大石头-色皮口流

纹岩 Pb 同位素初始值与中天山雅满苏组火山岩 Pb 同位素初始值(侯广顺等, 2006; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.841 ~ 18.105, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.507 ~ 15.585, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.704 ~ 38.095) 相比前者和后者较为接近。

在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图 3a 中, 博格达大石头群流纹岩样品点落在 Galapagos 中部区内。在 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图 3b 中, 大石头群流纹岩样品点均落在 NHRL 线上 EPR 区内上方附近。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图 3c 中, 玄武岩和流纹岩样品点均落在在中国东部新生代玄武岩区内。在 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 图 3d 中, 流纹岩样品点均落在在中国东部新生代玄武岩区的下方。

从上述投影图可知, 大石头-色皮口流纹岩与博格达玄武岩和流纹岩以及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七角井玄武岩来自亏损地幔而伴生的七角井流纹岩则是由玄武岩浆分离结晶作用的产物(顾连兴等, 2000; 王银喜等, 2006;

Wang *et al.*, 2006b)。然而,根据大石头地区玄武岩仅少量出露,因此其流纹岩的成因不能用玄武岩浆分离结晶作用来解释,该区的流纹岩可能是碰撞后底侵的玄武岩在地幔热量影响下发生部分熔融的产物。但是也不排除玄武岩岩浆多侵入到地下作为辉长岩产出,如果这样大石头群流纹岩是由玄武岩浆分离结晶作用所形成的可能性是存在的。另外大石头群火山岩形成在一个碰撞后环境也得到其它地质证据的支持。在博格达造山带东段北缘沟川达坂至大石头一带分布着一套晚石炭陆相钙碱性火山岩,其晚石炭化石组合和陆相喷发环境拟可视之为裂谷闭合和区域隆升之后,即后造山阶段的产物。造山后的火山岩除以玄武岩和各重富碱岩石类型为特征外也伴随钙碱性和偏酸性岩石组合的出现(顾连兴等,2001b)。阿尔泰库马苏地区的泥盆-石炭系火山岩是这种组合的实例。博格达裂谷带于中一晚石炭世闭合,该造山带侵入岩以辉绿岩为主,仅有少量中酸性岩株如大河沿钾长花岗岩。野外地质关系及上大河沿钾长花岗岩侵入体的 $298.3 \pm 0.76\text{Ma}$ Rb-Sr 同位素年龄,不单表明博格达地区晚于海西期的侵入活动并不重要,还表明该造山带侵入岩的定位紧随博格达裂谷的陆内碰撞,并代表了地球动力学环境由挤压变为拉张这个重大转折时期(顾连兴等,2001a)。约为 300Ma 大河沿钾长花岗岩侵入体出现以及胡霭琴等(1997)和赵振华等(2006)认为新疆北部的板块碰撞和造山运动主要发生在 $300 \pm 10\text{Ma}$ 左右等,这些证据都支持大石头群火山岩形成在碰撞后环境。

7 结论

(1) 博格达大石头群流纹岩的 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 $306.7 \pm 2.3\text{Ma}$, 与该群地层中所夹的沉积地层中的晚石炭世古生物化石一致,因此代表了区域隆升阶段的火山喷发时间。

(2) 大石头群流纹岩的正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、负 $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$ (低 Sr 初始值)和低 Pb 同位素比值表明其源区物质来自于强烈亏损的地幔源区,可能主要是地幔部分熔融形成基性岩浆底侵体在后期地幔热量作用下发生二次部分熔融的产物。

(3) 大石头组流纹岩同位素等时线年龄在误差范围内与西天山拉尔敦达坂一带已测定的 $306 \sim 313\text{Ma}$ 年龄完全一致,也与新疆北部广泛出露的碱性花岗岩年龄(约 300Ma)相近。这反映东天山与西天山石炭纪火山活动和北疆岩浆活动在构造演化上的同步性,意味着西天山与东天山在晚石炭世处于统一的大地构造环境中。

致谢 本文初稿得到本专刊特邀主编朱永峰教授有益指导。中国科学院广州地球化学所赵振华研究员和许继峰研究员对本文初稿认真、细致的审阅以及提出许多富有创造性和建设性的意见,对本文质量的提高和完善给予了很大的帮助,对此作者特表敬意谨致谢忱。

References

- Cheng SD, Wang GG and Yang SD. 1986. The Palaeoplate tectonics of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 4(2): 1–26 (in Chinese with English abstract)
- Coeman RG. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8(1): 621–635
- Gao J, Li MS, Xiao XC, Tang YQ *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. *Tectonophysics*, 287: 213–231
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY *et al.* 2000. 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, 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 CX, 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, Ji JQ, Song B *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077–1086 (in Chinese with English abstract)
- He GQ and Zhu YF. 2006. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang, China, and its adjacent regions. *Geology in China*, 33(3): 451–460
- Hou GS, Tang HF, Liu CQ *et al.* 2006. Lead isotopic composition of volcanic rocks in the Qoltag tectonic belt, East Tianshan, and its significance. *Geology in China*, 33(3): 509–515 (in Chinese with English abstract)
- Jacobsen SB and Wasserbury GJ. 1984. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 67: 137–150
- Li JY and 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 JY, Wang KZ, Sun GH *et al.* 2006. Paleozoic active margin slices in the southern Turfan-Hami basin: Geological records of subduction of the Paleo-Asian Ocean plate in central Asian regions. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1087–1102 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 1998. Using Isoplot/Ex: Age of chronnological 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. *Geochemica*, 33(5): 459–464 (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
- 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
- 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
- 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)
- 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*, 3: 19 – 26 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ *et al.* 2006a. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5): 1215 – 1224 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ and Li HM. 2006b. The volcanic rocks of the Bogda Rift, China: A possibly new genetic type of bimodal suite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (18) Supplement: A688
- White WM and Hofmann AW. 1982. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution. *Nature*, 296 (5860): 821 – 825
- 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)
- Xiao SL and Zhang Z. 1985. The upper Palaeozoic in Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 3 (3): 15 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Wang Q, Xion XL *et al.* 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1249 – 1265 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and 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 and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2833 – 2842 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Guo X and Zhou J. 2006a. The Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 1341 – 1350 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Guo X and Zhou J. 2006b. Petrology and geochemistry of a Nd gabbro body in Baluntai region, central Tianshan mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 1178 – 1192 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006c. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountain, northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 61 – 77
- Zhu YF, Zhou J and Zeng YS. 2007. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, west Tianshan, NW China: petrographic and geochemical characteristics. *Ore Geology Review*, 32: 337 – 365

附中文参考文献

- 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
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 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, 1 – 437
- 何国琦, 朱永峰. 2006. 中国新疆及邻区地质矿产对比研究. *中国地质*, 33(3): 451 – 460
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水等. 2000. 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
- 韩宝福, 季建清, 李彪等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)—后碰撞深成岩浆活动时限. *岩石学报*, 22(5): 1077 – 1086
- 侯广顺, 唐红峰, 刘丛强等. 2006. 东天山觉罗塔格构造带火山岩的铅同位素组成及意义. *中国地质*, 33(3): 509 – 515
- 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
- 李锦轶, 王克卓, 孙桂华等. 2006. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录. *岩石学报*, 22(5): 1087 – 1102
- 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
- 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铍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. 2006. 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. *岩石学报*, 22(5): 1215 – 1224
- 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
- 肖世录, 张志民. 1985. 新疆天山上古生界. *新疆地质*, 3(3): 1 – 14
- 赵振华, 王强, 熊小林等. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩. *岩石学报*, 22(5): 1249 – 1265
- 朱永峰, 郭璇, 周晶. 2006a. 新疆中天山巴仑台地区晚石炭世 + ϵ_{Nd} 辉长岩体的岩石学 and 同位素地球化学研究. *岩石学报*, 22(5): 1178 – 1192
- 朱永峰, 周晶, 宋彪, 张立飞, 郭璇. 2006b. 新疆“大哈拉军山组”火山岩的形成时代问题及其解体方案. *中国地质*, 33: 487 – 497