

东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其 对准噶尔洋盆闭合时限的制约*

龙晓平¹ 孙敏² 袁超¹ 肖文交³ 陈汉林⁴ 赵永久¹ 蔡克大¹ 李继亮³

LONG XiaoPing¹, SUN Min², YUAN Chao¹, XIAO WenJiao³, CHEN HanLin⁴, ZHAO YongJiu¹, CAI KeDa¹ and LI JiLiang³

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 香港大学地球科学系, 香港薄扶林道

3. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化重点实验室, 北京 100029

4. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2005-11-30 收稿, 2005-12-19 改回.

Long XP, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Chen HL, Zhao YJ, Cai KD and Li JL. 2006. Genesis of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar: constraints on the closure of the Junggar Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1):31-40

Abstract Zhaheba Carboniferous volcanic rocks mainly composed of basalts and basaltic andesites occur within Upper Carboniferous Batamayi Group, north of Zhaheba ophiolite in the eastern Junggar. These rocks have relatively high Mg^* (64 ~ 73) values, moderate TiO_2 (<0.85%), Al_2O_3 (13.75% ~ 16.88%), but low CaO (4.51% ~ 7.28%) and FeO^T (5.82% ~ 7.71%) contents, showing characteristics of primitive magmas. These rocks have relatively high Na_2O/K_2O ratios (>1) and alkali contents ($Na_2O + K_2O$) = 4.3% ~ 7.1%. They are enriched in LILEs but relatively depleted in HFSEs, with strong negative Nb-Ta anomalies, showing typical characteristics of subduction zone. These samples are slightly enriched in LREEs ($(La/Yb)_N = 1.0 \sim 2.1$) and possess weak Eu and Ce anomalies (0.94 ~ 1.08, 1.00 ~ 1.06, respectively), without significant fractionations of HREEs ($Gd_N/Yb_N = 1.1 \sim 1.3$). Furthermore, they have high radioactive Sr ($I_{Sr} = 0.705282 \sim 0.705420$) and low radioactive Nd ($\epsilon_{Nd}(t) = +6.59 \sim +7.58$). These characteristics, along with their low contents of Th ($<0.55 \times 10^{-6}$) and Pb ($<3.52 \times 10^{-6}$) and high ratio of Ce/Pb (4 ~ 79), preclude the possibility for involvement of continental crust, suggesting that they were most likely produced in a subduction-related environment. Their high Ce/Th (18 ~ 32), Ce/Pb, Ba/Rb (21 ~ 76), Ba/Th (>179), $\epsilon_{Nd}(t)$ values and lack of obvious Ce anomalies indicate that there was no significant involvement of subducted sediment during their genesis. Moreover, their trace elements and Nd-Sr isotope compositions are consistent with their origination from a mantle wedge metasomatized by slab-derived fluid. Different from typical arc-related magmas, however, most Zhaheba samples show negative Pb anomalies and relatively high Ce/Pb ratios, which can probably be ascribed to Pb-poor fluid derived from an amphibolite-facies slab in high temperatures. These characteristics indicate that an intra-oceanic subduction environment existed in the eastern Junggar, and that the Junggar Ocean must close after the Late Carboniferous.

Key words Eastern Junggar, CAOB, Subduction, Zhaheba, Volcanic Rocks, Geochemistry, Isotope

摘要 扎河坝石炭系火山岩出露于东准噶尔扎河坝蛇绿岩带北侧的上石炭统巴塔玛依内山组地层内, 主要为玄武岩及玄武安山岩, Mg^* 介于 64 ~ 73, 中等的 TiO_2 (<0.85%) 和 Al_2O_3 (13.75% ~ 16.88%) 含量, 相对低的 CaO (4.51% ~ 7.28%) 和

* 国家 973 项目 (2001CB409801), 香港 RGC 项目 (HKU 7040/04P), 自然科学基金 (40572043) 及中科院领域前沿项目 (GIGCX-03-01) 资助成果。

第一作者简介: 龙晓平, 男, 1979 年生, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: lxp_79@sina.com

FeO^T (5.82% ~ 7.71%) 含量, 显示初始岩浆特征。样品富 Na ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$), 具有较高的全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.4\% \sim 7.1\%$)。样品富集大离子亲石元素 (LILE), 相对亏损高场强元素 (HFSE), 具有较低的 Nb 含量 ($0.8 \times 10^{-6} \sim 2.6 \times 10^{-6}$) 和明显的 Nb-Ta 负异常, 显示典型的消减带岩浆特征。样品显示微弱的轻稀土富集 ($\text{La}/\text{Yb})_N = 1.0 \sim 2.1$, 无明显的重稀土分馏 ($\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.1 \sim 1.3$, 无明显的铕异常 ($\delta\text{Eu} = 0.94 \sim 1.08$) 及铈异常 ($\delta\text{Ce} = 1.00 \sim 1.06$)。此外, 样品具有较高的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.705282 ~ 0.705420) 和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+6.59 ~ +7.58)。上述特征与样品低的 Th 及 Pb 含量 ($\text{Th} < 0.55 \times 10^{-6}$, $\text{Pb} < 3.52 \times 10^{-6}$) 和较高的 Ce/Pb 比值 (4 ~ 79) 可以排除陆壳混染, 说明其形成于消减带环境。样品较高的 Ce/Th (18 ~ 32), Ce/Pb, Ba/Rb (21 ~ 76) 和 Ba/Th (> 179) 比值, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值接近亏损地幔, 并缺乏明显的负铈异常, 说明源区没有明显的消减沉积物加入。样品的微量元素特征及 Sr-Nd 同位素组成说明其形成于热液交代洋壳俯冲脱水使上覆地幔楔部分熔融。而样品相对贫 Pb 的特征, 可能与源于高温角闪岩相俯冲板片特殊的贫 Pb 流体有关。这套火山岩说明东准噶尔晚石炭世仍存在洋内的消减俯冲环境, 准噶尔大洋的闭合应当发生在晚石炭世之后。

关键词 东准噶尔; 中亚造山带; 俯冲消减; 扎河坝; 火山岩; 地球化学; 同位素

中图分类号 P597.3

古亚洲洋是显生宙的一个位于西伯利亚克拉通和中朝-塔里木克拉通之间的东西向展布的古大洋 (Dobretsov NL *et al.*, 1995; Sengör AMC *et al.*, 1996; Kovalenko VI *et al.*, 2004), 新疆北部的准噶尔洋是其演化的阶段性产物, 是其北部的重要分支 (肖序常等, 1990; 黄汲清等, 1990)。近年来, 虽然国内外众多学者对古亚洲洋的研究取得了许多成果 (Khain EV *et al.*, 2003; Jahn BM, 2004), 但对于其北支准噶尔洋的最终闭合时间, 还存在不同的认识: 一些学者认为其闭合于泥盆纪 (王道永等, 1995); 但另一些学者则认为其闭合于石炭纪 (肖序常等, 1990; 成守德等, 1998)。此外, 对准噶尔盆地是否存在前寒武纪的大陆基底, 学术界也存在多种不同的认识 (Hsu KJ, 1988; Coleman RG, 1989; Kwon ST *et al.*, 1989; Feng Y *et al.*, 1989; 袁学诚, 1995), 并直接导致了对准噶尔块体演化历史的不同解读: 微陆块或地体的多期碰撞 (何国琦等, 1994) 或岛弧地体俯冲增生的结果 (Sengör AMC *et al.*, 1996)。准噶尔盆地周边发育数条典型的蛇绿混杂岩带 (李锦轶, 1995; 王宗秀等, 2003) 及众多的古生代火山岩 (梅厚均等, 1994), 是研究古亚洲洋演化, 解决上述争议的关键地区。尤其是发育在盆地东北缘的泥盆-石炭系火山岩及阿尔曼太-扎河坝蛇绿混杂岩带和克拉麦里蛇绿混杂岩带, 对研究噶尔洋的闭合时间, 有重要的意义。但是, 蛇绿混杂岩带中基性-超基性岩体作为洋壳的残片, 其年龄仅代表洋壳存在过的年龄, 并不能限定大洋开启及闭合的时间。东准噶尔扎河坝地区石炭系火山岩毗邻扎河坝蛇绿混杂岩, 本文通过对其矿物学、岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素研究, 讨论东准噶尔石炭纪构造环境, 为限定准噶尔洋盆的最终闭合时间, 探讨准噶尔盆地基底属性及其形成模式, 提供依据。

1 样品地质背景

“三山夹两盆”是新疆北部大地构造的显著特征 (肖序常等, 1992), 北侧的准噶尔盆地位于阿尔泰造山带和天山造山带之间, 是中亚造山带的一个重要组成部分 (Coleman RG,

1989; Sengör AMC *et al.*, 1996)。在盆地四周, 残留有多条不同时代的蛇绿混杂岩带, 不仅反映了准噶尔板块所经历的复杂消减增生和地体拼贴过程 (李锦轶, 1995; Wang Z *et al.*, 2003; Xiao W *et al.*, 2004), 而且表明了古亚洲洋的多旋回的开合构造演化历史 (陈哲夫, 1993; 梁云海, 2004)。在准噶尔盆地东北缘, 出露有两条著名的蛇绿混杂岩带: 阿尔曼太-扎河坝蛇绿混杂岩带和克拉麦里蛇绿混杂岩带 (王宗秀等, 2003; 张旗等, 2003)。扎河坝位于额尔齐斯断裂以南, 乌伦古断裂北侧的早古生代褶皱带内 (何国琦等, 1990)。阿尔曼太-扎河坝蛇绿混杂岩带就出露在扎河坝西南 10km 处, 沿乌伦古断裂向东南延伸与中蒙边界的北塔山蛇绿岩相连 (李锦轶, 1995), 向西与西准噶尔的洪古勒楞蛇绿岩相连 (Wang Z *et al.*, 2003)。古生代火山岩在准噶尔盆地东北缘出露广泛 (梅厚均等, 1994; 于学元等, 1995), 扎河坝地区主要出露泥盆纪和石炭纪的基性-中性的玄武岩、玄武安山岩及安山岩。其中该区最老的火山岩地层为下泥盆统托让格库都克组, 最近在该组地层中先后发现了一些埃达克岩和富铈玄武岩 (许继峰等, 2003; 张海祥等, 2004), 和钾质火山岩 (袁超等, 2006), 显示这些火山岩形成于一个与消减带有关的环境, 说明早泥盆世该地区就已经发生洋壳消减。在研究区的东南, 扎河坝蛇绿岩的基性和超基性岩块与泥盆统托让格库都克组构造接触, 最近对扎河坝层状辉长岩和斜长岩中锆石的 SHRIMP 测年分别获得了 $489 \pm 4\text{Ma}$ 和 $481 \pm 5\text{Ma}$ 的年龄 (简平等, 2003), 表明该蛇绿混杂带中有奥陶纪洋壳残片。

本次研究的石炭系火山岩样品采自扎河坝蛇绿岩的西北侧, 扎河坝煤矿附近的上石炭统巴塔玛依内山组地层内 (图 1), 主要为玄武岩及玄武安山岩, 灰绿结构或粗面结构, 个别发育杏仁构造, 杏仁直径小于 3mm, 充填物为玉髓及碳酸岩盐。样品主要矿物为斜长石和镁铁质矿物, 后者不同程度绿泥石化, 无石英矿物。上石炭统巴塔玛依内山组为一套基性-中性的火山岩及火山碎屑岩夹凝灰砂岩和炭质页岩, 产数种石炭纪植物化石 (1:20 万恰库尔特幅)。区域上, 该套晚石炭世的地层主体由基性及中酸性火山熔岩组成。现

有研究认为,该套地层是一套典型的陆相火山-沉积体系(朱志新等,2005),代表了活动陆缘张性构造环境。

2 分析结果

本次分析选取蚀变弱,杏仁构造少的岩石样品,经清除表面杂质后破碎成岩屑,置入烧杯后加入去离子水在超声波

洗槽中清洗 15 分钟,并重复 2~3 次,之后用 5% 的稀盐酸浸泡约 10 分钟,经烘干后再用玛瑙研钵磨至 200 目供化学分析。主量元素的分析在 Phillip XRF 上完成。微量元素的分析在 VG Elemental Plasma Quad Excell ICP-MS 上进行,溶样和分析流程采用 Qi *et al.* (2000)。上述分析均在香港大学地质系实验室完成,主量元素的分析精度优于 2%,微量元素的分析精度可达 5%,主微量元素分析结果列于表 1 中。

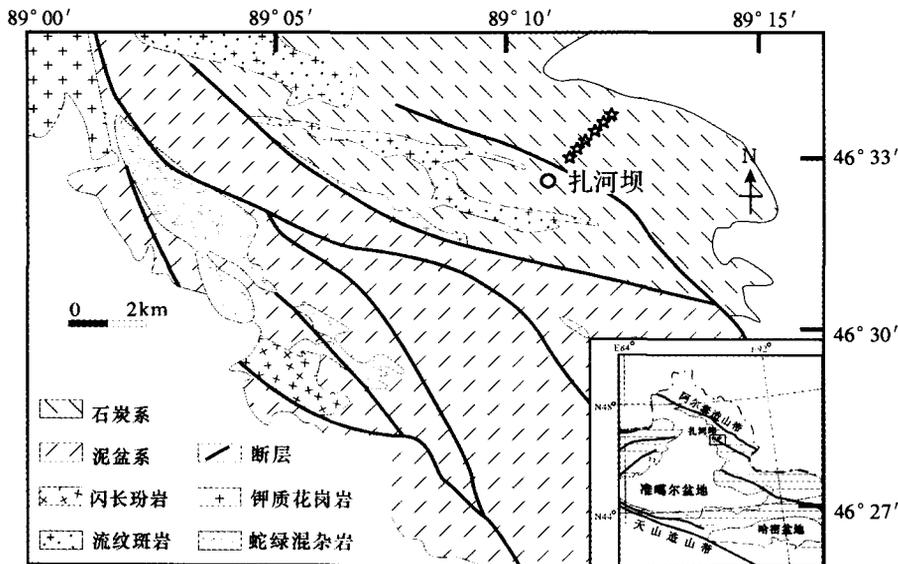


图 1 扎河坝地区地质图(采样位置如星号所示)

Fig. 1 Simplified geological map of Zhaheba region

表 1 扎河坝石炭系火山岩主量元素 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 1 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements contents of Zhaheba Carbonic volcanic rocks

样品号	ZHB-12	ZHB-13	ZHB-15	ZHB-16	ZHB-17	ZHB-20	ZHB-21	ZHB-22	ZHB-23	ZHB-24
SiO ₂	52.44	53.83	50.58	54.32	52.47	53.36	52.98	50.32	52.02	53.88
TiO ₂	0.56	0.59	0.84	0.59	0.58	0.56	0.55	0.68	0.57	0.57
Al ₂ O ₃	16.17	16.40	14.74	13.75	16.31	16.10	16.05	14.99	16.88	16.13
Fe ₂ O ₃	5.95	6.35	7.71	7.05	5.70	6.11	5.82	7.63	6.09	5.99
MnO	0.08	0.08	0.13	0.10	0.08	0.08	0.08	0.11	0.08	0.08
MgO	6.39	6.42	10.74	10.45	6.90	6.91	6.62	9.51	6.95	6.87
CaO	5.82	5.24	7.23	5.35	7.28	4.51	5.94	5.50	5.96	5.46
Na ₂ O	6.20	5.76	3.35	4.67	5.20	6.16	5.81	4.04	5.60	5.86
K ₂ O	0.48	0.64	0.85	0.39	0.54	0.50	0.57	1.19	0.36	0.52
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	0.09	0.09	0.07	0.08
LOI	5.11	3.30	2.81	2.32	4.11	4.54	4.22	4.66	4.27	3.52
总量	99.27	98.67	99.07	99.06	99.24	98.89	98.73	98.72	98.84	98.98
Mg ^{**}	66	64	71	73	68	67	69	69	67	67
Li	7.7	8.2	8.4	5.8	5.1	6.8	1.4	7.2	9.2	8.3
Be	0.38	0.56	0.40	0.45	0.40	0.29	0.67	0.34	0.58	0.47
Sc	24.2	31.5	27.7	25.1	20.5	24.6	33.0	27.7	31.3	32.0
V	166	178	210	198	140	163	283	216	165	157
Cr	121	138	503	366	109	146	100	349	126	137

续表 1

Continued Table 1

样品号	ZHB-12	ZHB-13	ZHB-15	ZHB-16	ZHB-17	ZHB-20	ZHB-21	ZHB-22	ZHB-23	ZHB-24
Co	27.0	33.4	42.8	37.7	23.0	28.9	34.1	40.6	31.9	32.2
Ni	57.4	70.2	264.4	208.8	55.0	64.0	42.3	175.8	67.3	67.4
Cu	11.8	13.0	28.3	6.7	4.7	11.1	28.1	27.6	9.5	10.9
Zn	18	20	39	23	15	18	110	33	19	19
Ga	14.3	14.2	13.6	12.9	11.3	12.5	15.7	13.0	13.9	12.8
Rb	3.6	3.7	4.2	2.0	3.0	3.9	1.0	8.3	2.3	3.3
Sr	379	426	349	361	292	204	165	177	283	308
Y	13.8	16.2	21.0	16.6	11.8	13.7	33.0	18.2	14.2	14.9
Zr	63	72	70	63	51	61	103	60	62	67
Nb	1.1	1.4	1.4	0.9	0.9	1.1	2.6	0.8	1.2	1.2
Mo	0.18	0.23	0.39	0.23	0.20	0.25	0.43	0.25	0.20	0.19
Cs	0.09	0.06	0.07	0.02	0.05	0.04	0.01	0.06	0.05	0.05
Ba	85	255	322	110	93	125	22	172	132	182
La	3.7	4.5	3.2	4.4	3.5	3.6	4.7	4.2	3.5	4.0
Ce	9.1	10.8	8.8	10.6	9.1	8.9	13.1	11.0	9.2	10.1
Pr	1.3	1.6	1.4	1.5	1.3	1.2	2.1	1.6	1.3	1.4
Nd	6.0	7.3	7.1	7.0	5.6	5.8	10.8	7.7	6.3	6.8
Sm	1.70	2.20	2.33	2.01	1.55	1.71	3.62	2.29	1.92	2.06
Eu	0.67	0.85	0.86	0.74	0.60	0.62	1.29	0.77	0.74	0.79
Gd	2.05	2.66	3.02	2.35	1.89	2.07	4.59	2.76	2.26	2.32
Tb	0.38	0.44	0.58	0.43	0.34	0.39	0.89	0.50	0.38	0.40
Dy	2.35	2.98	3.53	2.67	2.02	2.31	5.53	3.01	2.57	2.78
Ho	0.50	0.62	0.77	0.58	0.44	0.51	1.21	0.65	0.55	0.58
Er	1.47	1.89	2.27	1.69	1.31	1.50	3.49	1.93	1.64	1.73
Tm	0.22	0.28	0.34	0.25	0.19	0.22	0.53	0.28	0.24	0.26
Yb	1.38	1.80	2.12	1.60	1.21	1.39	3.23	1.77	1.59	1.65
Lu	0.22	0.27	0.32	0.25	0.19	0.21	0.50	0.27	0.25	0.25
Hf	1.59	1.92	1.83	1.63	1.33	1.53	2.64	1.56	1.73	1.85
Ta	0.09	0.12	0.12	0.07	0.08	0.10	0.19	0.07	0.10	0.10
W	0.11	0.12	0.19	0.16	0.13	0.14	0.22	0.12	0.12	0.12
Pb	0.24	0.28	0.26	0.20	0.33	0.99	3.52	0.14	0.58	0.57
Th	0.47	0.55	0.27	0.51	0.37	0.43	0.33	0.44	0.50	0.55
U	0.32	0.35	0.22	0.43	0.39	0.21	0.46	0.24	0.45	0.32
ΣREE	31.07	38.15	36.61	36.19	29.24	30.38	55.60	38.74	32.43	35.13
δEu	1.09	1.08	1.00	1.04	1.07	1.01	0.97	0.94	1.08	1.11
δCe	1.02	1.00	1.02	1.01	1.06	1.04	1.02	1.04	1.04	1.03
(La/Yb) _N	1.94	1.78	1.08	1.98	2.11	1.84	1.04	1.70	1.60	1.74
(Gd/Yb) _N	1.23	1.22	1.18	1.22	1.29	1.23	1.18	1.29	1.18	1.16
(La/Nb) _{PM}	3.44	3.42	2.28	5.26	4.01	3.42	1.89	5.53	3.10	3.45

注: $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 为全铁; $\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 全部作为 FeO 计算; $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ 为初始地幔标准化值, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Sun SS and McDonough WF (1989); 标注 * 者为无水体系计算结果。

表2 扎河坝石炭系火山岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions of Zhaheba Carbonic volcanic rocks

样品号	Rb (10 ⁻⁶)	Sr (10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (±2σ)	Sm (10 ⁻⁶)	Nd (10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (±2σ)	I _{Nd} (t)	I _{Sr} (t)	ε _{Nd} (t)	t _{DM} (Ga)
ZHB-12	3.20	364	0.0252	0.705534 ± 13	2.03	6.87	0.1788	0.512989 ± 14	0.512614	0.70542	7.6	0.70
ZHB-15	3.77	343	0.0317	0.705426 ± 14	2.56	7.71	0.2012	0.513028 ± 12	0.512606	0.70528	7.4	1.49
ZHB-17	3.32	393	0.0245	0.705448 ± 12	2.50	8.95	0.1690	0.512931 ± 14	0.512577	0.70534	6.9	0.75
ZHB-20	3.45	216	0.0458	0.705559 ± 13	2.32	7.81	0.1798	0.512954 ± 13	0.512577	0.70535	6.9	0.88
ZHB-22	7.22	166	0.1254	0.705880 ± 13	2.56	8.63	0.1793	0.512939 ± 12	0.512563	0.70531	6.6	0.94
ZHB-24	2.95	312	0.0272	0.705462 ± 12	2.37	7.96	0.1803	0.512958 ± 12	0.512580	0.70534	6.9	0.88

注：误差为2σ；Nd和Sr同位素的初始值根据320Ma计算；λ_{Sm} = 6.54 × 10⁻¹²/a；λ_{Rb} = 1.42 × 10⁻¹¹/a；亏损地幔的Sm-Nd同位素组成采用¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.51315, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.2137。

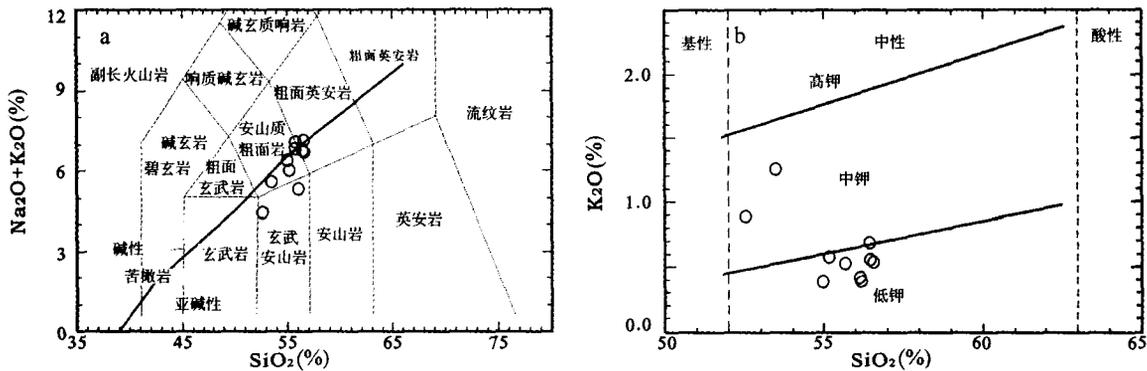


图2 扎河坝石炭系火山岩 (Na₂O + K₂O) - SiO₂ 及 K₂O - SiO₂ 图解 (数据均经无水处理)
Fig. 2 (Na₂O + K₂O) vs. SiO₂ (Le Maitre, 1989) and K₂O vs. SiO₂ diagrams

Sr-Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。大约 100 毫克全岩粉末样品,加入适量的⁸⁷Rb-⁸⁴Sr 和¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 混合稀释剂和纯化的 HF-HClO₄酸混合试剂后,在高温下完全溶解。Rb-Sr 和 REE 的分离和纯化是在装 5mL 体积 AG 50W-X12 交换树脂 (200 ~ 400 目) 的石英交换柱进行的,而 Sm 和 Nd 的分离和纯化是在石英交换柱用 1.7mL Teflon 粉末为交换介质完成的。Sr 同位素比值测定采用 Ta 金属带和 Ta-HF 发射剂,而 Rb、Sm 和 Nd 同位素比值测定采用双 Re 金属带形式。化学流程和同位素比值测试可参见 Chen ZF *et al.* (2002), Sr-Nd 同位素比值测定分别采用⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.1194、¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行标准化,铷-锶和钐-钕的全流程本底分别为 100 pg 和 50 pg 左右。同位素比值测量采用德国 Finnigan 公司 MAT262 固体源质谱计。实验过程中国际标样分析结果分别为: NBS-607 的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 1.201262 ± 21; BCR-1 的¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512652 ± 10,测定结果详见表 2。

3 样品地球化学特征

3.1 微量元素地球化学

扎河坝石炭系火山岩样品的烧失量中等,介于 2.3% ~ 5.1%,其 SiO₂ 含量为 50.32% ~ 54.32%,部分进入安山岩范围。样品含有较高的 P₂O₅ (< 0.1%), MgO (6.39% ~ 10.74%), 中等的 TiO₂ (0.56% ~ 0.84%), Al₂O₃ (13.75% ~ 16.88%) 以及相对低的 CaO (4.51% ~ 7.28%) 和 FeO^T (5.82% ~ 7.71%) 含量, Mg[#] 介于 64 ~ 73, 在 AFM 图解中, 该套火山岩归属钙碱性火山岩系列。样品的全碱含量 (K₂O + Na₂O 为 4.4% ~ 7.1%) 较高, 火山岩硅-碱分类图解 (图 2A) 中样品落入玄武安山岩和安山质粗面岩区域; 其 Na₂O 含量为 (3.35% ~ 6.20%), K₂O 含量小于 1.2%, 属低钾-中钾火山岩 (图 2B), Na₂O/K₂O 比值远大于 1, 属钠质钙碱性火山岩系列。CIPW 的计算结果显示, 绝大多数样品不

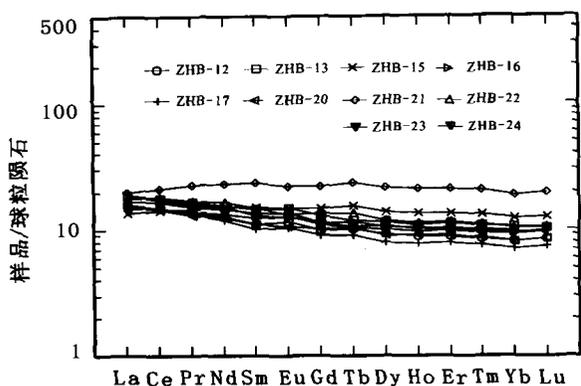


图3 球粒陨石标准化稀土元素分配图
(球粒陨石标准化值引自 Sun SS and McDonough WF, 1989)
Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern

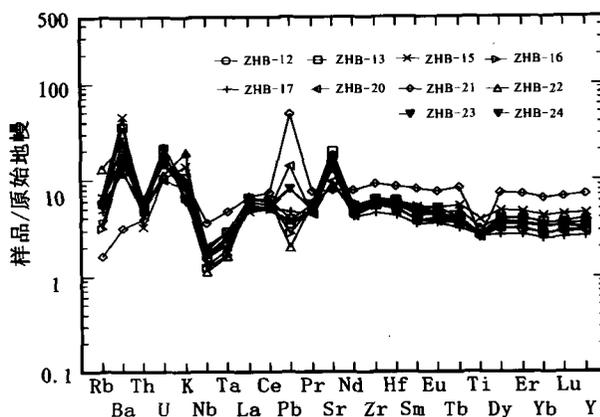


图4 原始地幔标准化微量元素蛛网图
(原始地幔标准化值引自 Sun SS and McDonough WF, 1989)
Fig. 4 PM-normalized trace elements spider diagram

含石英、霞石及刚玉标准矿物, 出现橄榄石及辉石标准矿物, 为一套 SiO₂ 不饱和的火山岩。

3.2 微量元素地球化学

在 Mg[#] 相似的情况下 (≈68), 样品的过渡族元素 (Cr, Ni, Co, Cu 和 Zn) 含量明显低于 MORB。样品富集 Sr (165 × 10⁻⁶ ~ 426 × 10⁻⁶), Ba (22 × 10⁻⁶ ~ 322 × 10⁻⁶), K 等活动元素, 却贫 Rb (1.0 × 10⁻⁶ ~ 8.3 × 10⁻⁶) 和 Th (0.27 × 10⁻⁶ ~ 0.55 × 10⁻⁶), 并同时出现 Pb (0.14 × 10⁻⁶ ~ 3.52 × 10⁻⁶) 的不同程度富集和亏损。但在微量元素蛛网图中, 这些活动元素地球化学行为极其一致, 说明样品受到后期的蚀变作用不明显。火山岩稀土元素含量较高, 约十倍于球粒陨石, 显示微弱的轻稀土富集 (La/Yb)_N = 1.0 ~ 2.1, 无明显的重稀土分馏 ((Gd/Yb)_N = 1.1 ~ 1.3) 和铈 (δEu = 0.94 ~ 1.11)、铈异常 (δCe = 1.00 ~ 1.06) (图3), 除样品 ZHB-21 外, 整体不同于轻稀土亏损的 N-MORB 型和轻稀土强烈富集的 OIB-型稀土配分特征。

石炭系火山岩样品含有相对较低的高场强元素 (HFSE), 其 Nb/Ta (11 ~ 13) 明显低于原始地幔 (Nb/Ta = 17, Sun SS and McDonough WF, 1989), 其 Zr/Hf (36 ~ 40) 则接近原始地幔 (Zr/Hf = 36, Sun SS and McDonough WF, 1989)。样品 Nb 含量 (0.8 × 10⁻⁶ ~ 2.6 × 10⁻⁶) 明显低于 N-MORB (Nb = 2.3 × 10⁻⁶, Sun SS and McDonough WF, 1989), 接近原始地幔 (Nb = 0.7 × 10⁻⁶, Sun SS and McDonough WF, 1989), 显示出明显的 Nb-Ta 负异常, Nb/La 比值 (0.19 ~ 0.55), Zr/Nb 比值 (40 ~ 77), Ti 轻微亏损, 表明扎河坝石炭系火山岩具有典型的消减带岩浆特征 (图4)。

3.3 Sr-Nd 同位素地球化学

扎河坝石炭系火山岩 Sr-Nd 同位素分析结果列于表 2, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值介于 0.705426 ~ 0.705880, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值介于 0.512931 ~ 0.513028。对比表 1 和表 2 发现, 样品 ZHB-17

的 Sr 含量 ICP-MS 分析结果与 TIMS 分析结果不一致, 用其 ICP-MS 分析结果计算 I_{Sr} (320) 为 0.70531, 这与 TIMS 分析结果基本一致, 表明 ICP-MS 与 TIMS 对个别样品分析结果的不一致系样品的不均匀性所造成。由于该套火山岩所在上石炭统巴塔玛依内山组含有丰富的晚石炭世植物化石 (朱志新等, 2005), 所以取 t = 320 Ma 做为估算初始同位素组成的大致年龄。对于 20 Ma 误差, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值误差小于 0.006%, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 初始比值误差小于 0.09%。经时间校正后, 样品 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值介于 0.705282 ~ 0.705420, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 初始比值则介于 0.512563 ~ 0.512614, ε_{Nd}(t) 值为 +6.59 ~ +7.58, 表明源于长期亏损的地幔源区。

4 讨论

4.1 源区及其成因

扎河坝石炭系火山岩样品相对较高的 Mg[#] 值 (64 ~ 73) 且铈异常不明显 (δEu = 0.94 ~ 1.08), 表明其岩浆演化程度较低 (Rollinson HR, 1993)。样品的 HFSE 含量高于原始地幔, 但明显低于大洋中脊玄武岩, 而且富集 LILE 和 LREE, 并具有强烈的 Nb-Ta 负异常及不同程度的 Ti 和 P 亏损, 显示出典型的消减带岩浆特征。尽管 Ti-Nb-Ta 的相对亏损是消减带岩浆的典型特征, 但是具有该特征的岩浆却可以出现在多种构造环境中。由于大陆地壳的物质组成具有与消减带岩浆相似的地球化学特征 (Rudnick RL and Gao S, 2003), 陆壳的混染也可使板内岩浆具有上述特征。扎河坝石炭系火山岩虽然相对富集 U, Sr, Ba, 并具有较高的全碱含量及放射性 Sr 同位素组成, 但却具有较低的 Th 及 Pb 含量 (Th < 0.55 × 10⁻⁶, Pb < 3.52 × 10⁻⁶), 低的 (La/Sm)_N 和 (Sm/Yb)_N 比值 (0.8 ~ 1.4 和 7.8 ~ 9.2), 以及高 (La/Nb)_{PM} 比值 (1.9 ~ 5.5)。此外多数样品的 Ce/Pb 比值接近或高于 MORB 及 OIB (Ce/Pb = 25 ± 5, Hofmann AW et al., 1986)。这些特征连

同其较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+6.59 ~ +7.58) 一起,表明该套火山岩不同于陆壳混染的板内岩浆产物。

通常,消减带岩浆岩的形成主要是俯冲洋壳及其沉积物在脱水过程中形成的流体或熔体交代上覆地幔楔的结果 (Eiler *et al.*, 2000; Elliott *et al.*, 1997)。消减沉积物的熔体往往具有较高的 Th、Pb 含量和较低的 Ce/Th (≈ 8), Ce/Pb (≈ 3), Ba/Rb (≈ 4) 和 Ba/Th (≈ 111) 比值 (Plank *et al.*, 1998), 熔体的加入将改变消减带岩浆的 Sr-Nd 同位素初始比值,使其发育铈异常。而扎河坝石炭系火山岩较高的 Ce/Th (18 ~ 40), Ce/Pb (4 ~ 79), Ba/Rb (21 ~ 76) 和 Ba/Th (多数 > 179) 比值和 Nd 同位素组成以及缺乏明显的负铈异常排除了消减沉积物熔体加入的可能性 (Edwards *et al.*, 1994; Turner *et al.*, 2003)。同时,低的 Nb 含量 ($0.8 \times 10^{-6} \sim 2.6 \times 10^{-6}$) 也排除了由消减洋壳发生部分熔融产生埃达克质熔体进而交代上覆地幔楔并熔融形成富铯玄武质岩浆的可能性 (Wyman *et al.*, 2000; Hollings *et al.*, 2002)。

对于源于俯冲带的流体,低 Cl 流体的微量元素特征整体类似于岛弧玄武岩或大陆地壳,大离子亲石元素 (LILE) 及 Pb 富集,高场强元素 (HFSE) 亏损 (Manning *et al.*, 2004)。然而深海沉积物及地壳物质的加入,都将使源于亏损地幔的岩浆 Ce/Pb 及 Nb/U 比值明显降低 (Klein *et al.*, 1995)。样品的 Nb/U (2.0 ~ 6.7) 低于亏损地幔 (Nb/U = 47 ± 10 , Hofmann *et al.*, 1986), 而其 Ce/Pb 比值多数高于亏损地幔 (Ce/Pb = 25 ± 5 , Hofmann *et al.*, 1986), 这难以用简单的深海沉积物或地壳物质的加入进行解释。样品大离子亲石元素 (LILE) Ba, Sr 和 U 明显富集,高场强元素 (HFSE) 亏损且明显富钐,同时其较低的 Nb/Th (1.7 ~ 5.3) 和 Hf/U (3.4 ~ 8.5), 与典型的岛弧岩浆完全相同 (Kelemen *et al.*, 2003), 这说明交代蚀变的洋壳俯冲脱水使上覆地幔楔部分熔融可能是该套火山岩形成的主要原因。值得注意的是,样品 ZHB-21 具有平坦的 REE 配分模式,并相对贫 Rb, Sr, Ba 和 Th (图 4), 完全不同于活动大陆边缘的弧岩浆 (Kelemen *et al.*, 2003), 指示这套与俯冲消减有关的火山岩形成环境可能为大洋岛弧环境。

然而,与成熟的大洋岛弧火山岩相比 (Kelemen *et al.*, 2003), 扎河坝石炭系火山岩相对贫 Pb, 原始地幔标准化蛛网图中少数样品 Pb 轻微富集,而多数样品 Pb 轻微亏损,从而导致其 Ce/Pb 比值变化较大,该特征类似于出露在阿曼蛇绿岩带中的低 Pb 岛弧安山岩 (Ishikawa *et al.*, 2005)。在绿片岩-榴辉岩相俯冲板片脱水过程中 Pb 通常被视作流体活动元素 (Elliott *et al.*, 1997)。然而最近的一项研究表明,角闪岩相的俯冲板片在较高温度的脱水过程中, Pb 在流体中的浓度主要受俯冲板片厚度的控制,俯冲板片表层脱水形成的流体较之由深层板片脱水形成的流体具有明显低的 Pb 含量 (Ishikawa *et al.*, 1994)。因此,当由板片表层脱水形成的流体交代上覆地幔楔时将形成相对贫

Pb 的岛弧火山岩 (Ishikawa *et al.*, 2005)。扎河坝石炭系火山岩同时包含了富 Pb 和贫 Pb 的样品,这在一定程度上反映出来自不同层位角闪岩相俯冲洋壳脱水的贡献。

4.2 准噶尔洋的闭合

准噶尔古大洋是存在于西伯利亚板块与准噶尔-哈萨克板块之间的一个横跨北疆的古大洋 (肖序常等, 1992), 出露于准噶尔盆地东北缘及西北缘的蛇绿岩带保留了该古大洋演化的信息。在盆地东北缘,自北向南依次分布三条蛇绿岩带: 库尔提蛇绿岩带, 阿尔曼太-扎河坝蛇绿岩带及克拉麦里蛇绿岩带 (李锦轶, 1995; 何国琦等, 2001; 许继峰等, 2001), 其中, 克拉麦里蛇绿岩与西准噶尔达拉布特蛇绿岩一起代表了准噶尔古大洋洋盆, 而扎河坝蛇绿岩则是其北侧的边缘海盆或弧后盆地 (肖序常等, 1990), 库尔提蛇绿岩是其北侧的洋内岛弧的弧后盆地 (许继峰等, 2001)。部分学者认为准噶尔古大洋于中泥盆世末期发生消减 (肖序常等, 1990; 杨树德, 1994), 于中石炭世末期最终闭合 (肖序常等, 1990)。然而有学者则认为准噶尔洋盆早在泥盆纪就已经闭合 (王道永等, 1995)。但最近, 扎河坝蛇绿岩中辉长岩 SHRIMP 定年结果为 $489 \pm 4\text{Ma}$ (简平等, 2003), 库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩 SHRIMP 定年结果为 $372 \pm 19\text{Ma}$ (张海啸等, 2003)。此外, 盆地北缘早泥盆世钾质玄武岩和泥盆系玻安岩, 埃达克岩和富铯玄武岩 (许继峰等, 2001; 张海啸等, 2004; 袁超等, 2006) 的发现, 说明洋壳俯冲消减作用在早泥盆世就已经发生。而本次发现的与俯冲消减有关的扎河坝石炭系火山岩, 至少说明晚石炭世东准噶尔地区仍旧部分存在俯冲消减环境。结合标志造山作用结束分布广泛的东准噶尔晚古生代碱性花岗岩形成时代 (刘家远等, 1999), 可以认为准噶尔盆地 (东) 北缘从晚元古代准噶尔大洋开启以来, 在泥盆纪之前达到鼎盛, 早泥盆世-晚石炭世洋壳广泛俯冲消减, 并于二叠纪期间完全闭合, 东准噶尔众多岛弧地体完成与西伯利亚板块的拼贴。

4.3 地质意义

目前对准噶尔盆地的性质以及是否存在前寒武纪基底, 存在不同的认识: 一些学者认为准噶尔盆地的基底主要是由残余洋壳组成 (Coleman *et al.*, 1989; Hu *et al.*, 2000); 而另一些学者根据地球物理资料认为盆地存在前寒武纪的变质基底 (彭希龄, 1994; 袁学诚, 1995)。然而在准噶尔盆地, 至今尚未有可靠的前寒武纪年龄数据报道 (胡霁琴等, 2003)。在此基础上, 有学者根据对准噶尔盆地周边后碰撞的幔源花岗岩类和基性-超基性杂岩体地球化学及同位素研究, 提出准噶尔盆地基底不是洋壳, 而是以底垫的幔源岩浆为主, 即使存在古老陆壳基底, 也会因此而受到强烈改造 (韩宝福等, 1999)。

然而, 近年来扎河坝早泥盆世钾质玄武岩和盆地北缘泥盆纪玻安岩, 埃达克岩和富铯玄武岩 (许继峰等, 2001; 张海

祥等, 2004; 袁超等, 2006), 反映本区泥盆系火山岩可能形成一个与洋内弧有关的环境。本次对扎河坝石炭系火山岩研究表明, 该套火山岩形成于消减带环境, 源于亏损地幔且未经地壳混染。最近位于准噶尔盆地核心地带的陆梁地区钻孔岩芯发现的早石炭世玄武岩(王方正等, 2002), 具有较高的 Nb ($7.8 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$) 含量, Nb-Ta 明显亏损, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+7.2 \sim +8.4$, Th/Nb 比值小于 1.0, 与典型富铈玄武岩特征相同, 表明其形成与俯冲带有关(袁超等, 2006)。而且, 对准噶尔基底火山岩的 Nd-Sr 同位素组成研究也揭示(郑建平等, 2000), 准噶尔盆地基底可能由分属哈萨克斯坦板块、塔里木板块和西伯利亚板块外围的岛弧体系拼合而成。综上所述, 准噶尔盆地东北缘早泥盆世及石炭系的岛弧岩石组合与盆地内部早石炭世的富铈玄武岩表明, 洋壳的俯冲消减作用是该地区晚古生代地质演化的重要特征, 在准噶尔盆地基底的组成中, 岛弧地体是其重要的组成部分, 盆地基底可能由拼贴的古生代岛弧地体构成。

致谢 在分析测试过程中, 中科院北京地质与地球物理研究所及香港大学地质系相关实验室给予了大力帮助, 在此一致表示感谢。

References

- Chen ZF, Xu X and Liang YH. 1993. The basic features of the accordion-style opening-closing evolution structures in Xinjiang. *Regional Geology of China*, 1: 45 - 58 (in Chinese with English abstract)
- Cheng SD and Wang YL. 1998. Basic characteristics of geotectonic evolution of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 16(2): 97 - 107 (in Chinese with English abstract)
- Coleman RG. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8: 621 - 635
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 - 665
- Dobretsov NL, Berzin NA and Buslov MM. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geology Review*, 35: 335 - 360
- Edmond JM, Measures C, McDuff RE, Chan LH, Collier R, Grant B, Gordon LI and Corliss JB. 1979. Ridge crest hydro-thermal activity and the balance of the major and minor elements in the ocean: the Galapagos data. *Earth and Planetary Science Letters*, 46: 1 - 18
- Edwards CMH, Menzies MA, Thirlwall MF, Norris JD, Leeman WP, Harmon RS. 1994. The transition to potassic alkaline volcanics in island arcs: the Ringgit-Beser complex, East Java, Indonesia. *Journal of Petrology*, 35: 1557 - 1595
- Eiler J, Crawford A, Elliott T, Farley KA, Valley JV and Stolper EM. 2000. Oxygen isotope geochemistry of oceanic arc lavas. *Journal of Petrology*, 41: 229 - 256
- Elliott T, Plank T, Zindler A, White W and Bourdon B. 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research*, 102(B7): 14991 - 15019
- Feng Y, Coleman RG, Tilton G and Xiao X. 1989. Tectonic evolution of the west Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8: 729 - 752
- He GQ, Han BF and Yue YJ. 1990. Tectonic division and crustal evolution of Altay Orogenic Belt in China. *Geosciences of Xinjiang*, 2: 9 - 20 (in Chinese with English abstract)
- He GQ, Li MS, Jia JD and Zhou H. 2001. A discussion on age and tectonic significance of ophiolite in eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37(6): 852 - 858 (in Chinese with English abstract)
- He GQ, Li MS, Liu DQ, Tang YL and Zhou RH. 1994. Palaeozoic crustal evolution and metallogeny of Xinjiang, China. Xinjiang People's Publishing House, Urumqi, China. Hong Kong Culture and Education Press, Hongkong, China (in Chinese with English abstract)
- Hofmann AW, Seufert M and White WM. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79: 33 - 45
- Hollings P. 2002. Archean Nb-enriched basalts in the northern Superior province. *Lithos*, 64: 1 - 14
- Hsu KJ. 1988. Relic back-arc basins of China and their petroleum potential, in *New Perspectives in Basin Analysis*, edited by K. Kleinspehn, Springer-Verlag, New York, 245 - 263
- Hu AQ and Wei GJ. 2003. A review of ages of basement rocks from Junggar Basin in Xinjiang, China, based on studies of geochronology. *Xinjiang Geology*, 21: 398 - 406 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX and Chen YB. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1-2): 15 - 51
- Huang JQ, Jiang CF and Wang ZX. 1990. On the Opening-closing tectonics and accordion movement of plate in Xinjiang and adjacent regions. *Geosciences of Xinjiang*, 1: 3 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Ishikawa T, Fujisawa S, Nagaishi K and Masuda T. 2005. Trace element characteristics of the fluid liberated from amphibolite-facies slab: Inference from the metamorphic sole beneath the Oman ophiolite and implication for boninite genesis. *Earth and Planetary Science Letters*, in press
- Ishikawa T and Nakamura E. 1994. Origin of the slab component in arc lavas from across-arc variation of B and Pb isotopes. *Nature*, 370: 205 - 208
- Jahn BM. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in Phanerozoic. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison JC (eds). *Aspects of the tectonic evolution of China*. Geological Society, London, Special Publications, 226: 73 - 100
- Jian P, Liu DY, Zhang Q, Zhang FQ, Shi YR, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2003. SHRIMP dating of ophiolite and leucocratic rocks within ophiolite. *Earth Science Frontiers*, 10: 439 - 456 (in Chinese with English abstract)
- Kelemen PB, Hanghøj K and Greene AR. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick (ed). *The Crust Vol. 3 Treatise on geochemistry* (eds. Holland HD and Turekian KK), Elsevier-Perгамon, Oxford, 594 - 659
- Khain EV, Bibikova EV, Salnikova EB, Krner A, Gibsher AS, Didenko AN, Degtyarev KE and Fedotova AA. 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: new geochronological data and palaeotectonic reconstructions. *Precambrian Research*, 122: 329 - 358
- Klein EM and Karsten JL. 1995. Ocean ridge basalt with convergent margin geochemical affinities from the Chile Ridge. *Nature*, 374: 52 - 57
- Kovalenko VI, Yarmolyuk VV, Kovach VP, Kotov AB, Kozakov IK, Salnikova EB and Larin AM. 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: geological and isotopic evidence. *Journal of Asian Earth*

- Sciences, 23: 605 - 627
- Kwon ST, Tilton GR, Coleman RG and Feng Y. 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the west Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8: 719 - 727
- Le Maitre RW. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford, Blackwell Scientific
- Liang YH, Li WQ and Li WD. 2004. Characteristics of polycyclic opening-closing tectonics in the Junggar orogenic belt, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 279 - 285 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 1995. Main characteristics and emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (suppl.): 73 - 84 (in Chinese with English abstract)
- Liu JY, Yu HX and Wu GQ. 1999. Two kinds of alkaline granites in Eastern Junggar, Xinjiang and their geological significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18(2): 89 - 94 (in Chinese with English abstract)
- Manning CE. 2004. The chemistry of subduction-zone fluids. *Earth and Planetary Science Letters*, 223: 1 - 16
- Mei HJ. 1994. Volcanic rocks of northwest Xinjiang and their relationship with mineralization. *Xinjiang Geology*, 12: 16 - 26 (in Chinese with English abstract)
- Michard A and Albarde F. 1985. Hydrothermal uranium uptake at ridge crests. *Nature (London)*, 317: 244 - 246
- Peng XL. 1994. Evidence for the presence of early Paleozoic continental crust in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 15(4): 289 - 297 (in Chinese with English abstract)
- Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145: 325 - 394
- Chen F, Siebel W, Satir M, Terzioglu N and Saka K. 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91: 469 - 481
- Qiao GS. 1998. Normalization of isotopic dilution analysis. *Scientia Geologica Sinica (Series A)*, 31(10): 1263 - 1268
- Rollinson HR. 1993. Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation. First published in 1993, Produced by Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick (ed). *The Crust Vol. 3 Treatise on geochemistry* (eds. Holland HD and Turekian KK), Elsevier- Pergamon, Oxford, 1 - 64
- Şengör AMC and Natal' in BA. 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 24: 263 - 337
- Styr MM, Brackmann AJ, Holland HD, Clark BC, Pisutha-Arnond V, Eldridge CS and Ohmoto H. 1981. The mineralogy and the isotopic composition of sulfur in hydrothermal sulfide /sulfate deposit on the East Pacific Rise, 21 N latitude. *Earth and Planetary Science Letters*, 53: 382 - 390
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds). *Magmatism in the Ocean Basin*, Geological Society Special Publication. Blackwell Scientific Publications 42: 313 - 346
- Turner S, Foden J, George R, Evans P, Varne R, Elburg M and Jenner G. 2003. Rates and processes of potassic magma evolution beneath Sangeang Api Volcano, East Sunda Arc, Indonesia. *Journal of Petrology*, 44: 491 - 515
- Wang DY and Deng JH. 1995. Characteristics and evolution of the plate tectonics in eastern Jungar, Xinjiang. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 22(4): 38 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Wang FZ, Yang MZ and Zheng JP. 2002. Geochemical characteristics and geological environment of basement volcanic rocks in Luliang, central region in Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 9 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Wang Z, Sun S, Li J, Hou Q, Qin K, Xiao W and Hao J. 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constraints from the ophiolites. *Tectonics*, 22(2): 1014 - 1029
- Wang ZX, Zhou GZ and Li T. 2003. The consideration on ophiolite and interrelated issue in northern Xinjiang, northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 683 - 691 (in Chinese with English abstract)
- Wyman DA, Ayer JA and Devaney JR. 2000. Niobium-enriched basalts from the Wabigoon subprovince, Canada: Evidence for adakitic metasomatism above an Archean subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 179: 21 - 30
- Xiao W, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K and Wang Z. 2004. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 161: 339 - 342
- Xiao XC, Tang YQ and Li JY. 1992. *Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Region*. Beijing: Geological Publishing House. 1 - 180 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC, Tang YQ, Li JT, Zhao M, Feng YM and Zhu BQ. 1990. On the tectonic evolution of the Northern Xinjiang, Northwest China. *Geosciences of Xinjiang*, 1: 47 - 68 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Mei HJ, Yu XY, Bai ZH, Niu HC, Chen FR, Zhen ZP and Wang Q. 2001. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting. *Chinese Science Bulletin*, 46: 684 - 988 (in Chinese with English abstract)
- Yang SD. 1994. Ancient plate tectonics in North Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 12(1): 1 - 8 (in Chinese with English abstract)
- Yu XY, Mei HJ, Jiang FZ, Luo CR, Liu TG, Bai ZH, Yang XC and Wang JD. 1995. The Irtysh volcanic rocks and mineralization. Beijing: Science Press, 17 - 30 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Xiao WJ, Chen HL, Li JL and Sun M. 2006. Zhaheba Potassic Basalt, Eastern Junggar (NW China): Geochemical Characteristics and Tectonic Implications. *Geological Review*, in press
- Yuan XC. 1995. On continental basal structure in China. *Acta Geophysica Sinica*, 38: 448 - 459 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HX, Niu HC, Hiroaki S, Shan Q, Yu XY, Jun'ichi I and Zhang Q. 2004. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from Northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian Ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 106 - 113 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HX, Niu HC, Terada K, Yu XY, Sato H and Ito J. 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altay, North Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2231 - 2235 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Zhou GQ and Wang Y. 2003. The distribution of time and space of Chinese ophiolites, and their tectonic settings. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 1 - 8 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Wang FZ, Cheng ZM, Wu XZ and Zhang YJ. 2000. Nature and evolution of amalgamated basement of Junggar basin, northwest China: Sr-Nd isotope evidence of basement igneous rocks. *Earth Science*, 25: 179 - 185 (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZX, Li SZ and Li GL. 2005. The characteristics of sedimentary system-continental facies volcano in later Carboniferous Batamayineishan Formation, Zhi-fang region, East Junggar. *Xinjiang Geology*, 23(1): 14 - 18 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈哲夫, 徐新, 梁云海. 1993. 新疆构造手风琴式开合演化的基本特点. 中国区域地质, 1: 45-58
- 成守德, 王元龙. 1998. 新疆大地构造演化基本特征. 新疆地质, 16(2): 97-107
- 韩宝福, 何国琦, 王式洗. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底. 中国科学(D辑), 29(1): 16-21
- 何国琦, 韩宝福, 岳永君. 1990. 中国阿勒泰造山带的构造划分和地壳演化. 新疆地质科学, 2: 9-20
- 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 周辉. 2001. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 852-858
- 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, 香港: 香港文化教育出版社, 1-210
- 胡儒琴, 韦刚健. 2003. 关于准噶尔盆地基底时代问题的讨论: 据同位素年代学研究结果. 新疆地质, 21: 398-406
- 黄汲清, 姜春发, 王作勋. 1990. 新疆及邻区板块开合构造及手风琴式运动. 新疆地质科学, 1: 3-16
- 简平, 刘敦一, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. 地学前缘, 10: 439-456
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史. 岩石学报, 11(suppl.): 73-84
- 梁云海, 李文铅, 李卫东. 2004. 新疆准噶尔造山带多旋回开合构造特征. 地质通报, 23(3): 279-285
- 刘家远, 喻亨祥, 吴郭泉. 1999. 新疆东准噶尔两类碱性花岗岩及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 18(2): 89-94
- 梅厚钧. 1994. 新疆北部火山岩及其与成矿的关系. 新疆地质, 12: 16-24
- 彭希龄. 1994. 准噶尔盆地早古生代陆壳存在的证据. 新疆石油地质, 15(4): 289-297
- 王道永, 邓江红. 1995. 东准噶尔地区板块构造特征及演化. 成都理工大学学报, 22(4): 38-45
- 王方正, 杨梅珍, 郑建平. 2002. 准噶尔盆地陆梁地区基底火山岩的岩石地球化学及其构造环境. 岩石学报, 18: 9-16
- 王宗秀, 周高志, 李涛. 2003. 对新疆北部蛇绿岩及相关问题的思考和认识. 岩石学报, 19(4): 683-691
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 赵民, 冯益民, 朱宝清. 1990. 试论新疆北部大地构造演化. 新疆地质科学, 第一辑, 北京: 地质出版社, 47-68
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶. 1992. 新疆北部及其邻区的构造演化. 北京: 地质出版社. 1-180
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 白正华, 牛贺才, 陈繁荣, 郑作平, 王强. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. 科学通报, 46: 684-688
- 杨树德. 1994. 新疆北部的古板块构造. 新疆地质, 12(1): 1-8
- 于学元, 梅厚钧, 姜福芝, 罗才让, 刘铁庚, 白正华, 杨学昌, 王俊达. 1995. 额尔齐斯火山岩和成矿作用. 科学出版社, 北京, 17-30
- 袁超, 肖文交, 陈汉林, 李继亮, 孙敏. 2006. 东准扎河坝钾质玄武岩的地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 80(1), 出版中
- 袁学诚. 1995. 论中国大陆基底构造. 地球物理学报, 38: 448-459
- 张海洋, 牛贺才, Hiroaki Sato, 单强, 于学元, Jun'ichi Ito, 张旗. 2004. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富镍玄武岩组合: 古亚洲板块南向俯冲的证据. 高校地质学报, 10: 106-113
- 张海洋, 牛贺才, Terada K, 于学元, Sato H, Ito J. 2003. 新疆北部阿尔泰地区库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的 SHRIMP 年代学研究. 科学通报, 48(12): 1350-1354
- 张旗, 周国庆, 王焰. 2003. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境. 岩石学报, 19(1): 1-8
- 郑建平, 王方正, 成中梅, 吴晓智, 张义杰. 2000. 拼合的准噶尔盆地基底: 基底火山岩 Sr-Nd 同位素证据. 地球科学, 25: 179-185
- 朱志新, 李少贞, 李嵩龄. 2005. 东准噶尔纸房地区晚石炭世巴塔玛依内山组陆相火山-沉积体系特征. 新疆地质, 23(1): 14-18