

现代地质
Geoscience
ISSN 1000-8527, CN 11-2035/P

《现代地质》网络首发论文

题目: 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩地球化学特征及其成因机制
作者: 牛花朋, 刘姗, 焦小芹, 张关龙, 王千军, 周健, 赵贤, 于洪洲, 熊峥嵘, 何晓
DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.039
网络首发日期: 2025-03-24
引用格式: 牛花朋, 刘姗, 焦小芹, 张关龙, 王千军, 周健, 赵贤, 于洪洲, 熊峥嵘, 何晓. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩地球化学特征及其成因机制[J/OL]. 现代地质. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.039>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.039

准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩地球化学特征 及其成因机制

牛花朋^{1,2}, 刘 珊^{1,2}, 焦小芹³, 张关龙⁴, 王千军⁴, 周 健⁴, 赵贤^{1,2}, 于洪洲⁴, 熊峰
嵘⁴, 何 晓^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
3. Department of Geosciences, University of Padova, Padua, Italy; 4. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 山
东 东营 257015)

摘要: 本文选取准噶尔盆地西北缘哈拉阿拉特山(哈山)地区石炭系火山熔岩(玄武岩、玄武安山岩、安山岩)来说明其成因机制及构造背景。研究表明,三类岩石的 MgO 含量中等(3.21%~6.82%), Al₂O₃ 含量中等偏高(11.30%~17.78%), 全碱 K₂O+Na₂O 含量较高(4.24%~7.24%)。其中,玄武岩样品整体 K₂O 含量较低,体现 Na 相对于 K 富集的特点,判断其为低钾拉斑系列玄武岩;玄武安山岩、安山岩的钙碱元素含量高,具有弧火山岩特征。三类火山岩整体呈现 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值中等偏低(0.702877~0.706620)、εNd(t) 同位素值(+4.59~+9.85)高的特征,表明岩浆在深部岩浆房经历了壳-幔混合作用。玄武安山岩、安山岩的稀土元素含量与玄武岩相比,大离子亲石元素 Ba 富集,高场强元素 U、Pb 相对富集、Nb 亏损,表现出与俯冲消减带相关的岛弧岩浆作用的特点。通过与稀土、微量元素相关的构造环境分析,玄武岩含有源自亏损地幔的组分,低钾拉斑系列产于洋盆俯冲消减的构造背景,中性火山岩则刻度了大洋板块向大陆板块俯冲消减的过程,具体表现为亏损地幔楔受俯冲板块脱水释放的沉积物或洋壳熔体交代后,部分熔融形成玄武安山岩和安山岩。结合区域地质资料分析,准噶尔洋盆的俯冲消减可持续至晚石炭世。

关键词: 准噶尔盆地;哈山;石炭系;火山岩;岩石成因

Geochemical characteristics and petrogenesis of Carboniferous volcanic rocks in the northwestern margin of the Junggar Basin

NIU Huapeng^{1,2}, LIU Shan^{1,2}, JIAO Xiaoqin³, ZHANG Guanlong⁴, WANG Qianjun⁴, ZHOU
Jian⁴, ZHAO Xian^{1,2}, YU Hongzhou⁴, XIONG Zhengrong⁴, HE Xiao^{1,2}

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05063002-006); 北京高等学校青年英才计划项目(YETP0669)。

作者简介: 牛花朋,女,博士,教授,1979年出生,主要从事矿物岩石学与储层地质学相关研究。Email: niuhuapeng@126.com。

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Department of Geosciences, University of Padova, Padua, Italy; 4. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257015, China)

Abstract: This study selects Carboniferous volcanic rocks (basalt, basaltic andesite, andesite) in the Hara Arat Mountain (Hashan) area on the northwestern margin of the Junggar Basin to illustrate its genetic mechanism and tectonic background. The results show that the three types of rocks have medium MgO content (3.21% ~ 6.82%), medium to high Al₂O₃ content (11.30% ~ 17.78%), and high total alkali K₂O + Na₂O content (4.24% ~ 7.24%). Among them, the overall K₂O content of the basalt sample is low, reflecting the characteristics of Na enrichment relative to K, and it is classified to be an low K- tholeiite series basalt; the basaltic andesite and andesite have high calc-alkali element content and have the characteristics of island arc volcanic rocks. The three types of volcanic rocks generally show the characteristics of medium-low ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values (0.702877 ~ 0.706620) and high εNd (t) isotope values (+4.59 ~ +9.85), indicating that the magma has undergone crust-mantle mixing in the deep magma chamber. Compared with basalt, the rare earth element content of basaltic andesite and andesite is enriched in large ion lithophile element Ba, relatively enriched in high field strength elements U and Pb, and depleted in Nb, showing the characteristics of island arc magmatism related to subduction zones. According to the analysis of tectonic environment related to trace elements and rare earth elements, the basalt was formed under the derivation of depleted mantle materials with the background of the tectonic convergence, and intermediate volcanic rocks recorded the process of subduction of the oceanic plate to the continental plate, which is specifically manifested as the depleted mantle wedge being replaced by sediments or oceanic crust melts released by the dehydration of the subducting plate, and then partially melted to form basaltic andesite and andesite. Combined with the analysis of regional geological data, the subduction of the oceanic plate continued until the late Carboniferous.

Key words: Junggar Basin; Hashan; Carboniferous; Volcanic rock; Petrogenesis

0 引言

准噶尔盆地西北缘地处哈萨克斯坦板块和西伯利亚板块之间(图 1a,b),是中亚造山带的重要部位。在复杂地质条件控制下,其经过多阶段的盆地演化、构造活动改造,发育为现今的构造单元格局^[1-6]。晚古生代(尤其是石炭纪)为准噶尔板块构造格局转换的重要时期^[7-9],记录了准噶尔古大洋盆发育、俯冲消减、闭合及准噶尔微陆块碰撞的过程,以及以陆内伸展和板内造山为特点的盆地发育阶段^[10-12]。

哈山地区位于准噶尔盆地西北缘山前冲断带(图 1c),是晚石炭世增生造山带的重要组成部分^[13],晚古生代以来的板块造山运动促成了哈山构造带的发育,体现为挤压与伸展相交替的复杂构造格局,与之响应的火山岩记录了该构造演化过程。前人对相关岩浆活动构造背景发育模式存在争议,一种观点认为准噶尔盆地西缘在晚石炭世—早二叠世经历了洋壳俯冲至碰撞后伸展的构造背景演化^[14,15],另一种观点指出该洋壳俯冲过程持续至早二叠世—晚二叠世^[16,17]。石炭纪为准噶尔盆地西北缘构造转型的关键时期,准噶尔洋盆闭合、大陆碰撞过程加速了岩浆活动及复杂构造格局的形成^[10-13]。石炭系地层变形强烈,地层倾角较大,层间褶皱类型多样^[9]。下石炭统包古图组为深海-半深海环境沉积,希贝库拉斯组为浅海粗粒碎屑岩沉积,整合覆盖于包古图组之上^[9]。上石炭统哈拉阿拉特组由火山岩、火山碎屑岩和陆源碎屑岩组成^[9]。然而,石炭系火山岩的成因及发育构造背景有待明确。本文以准噶尔盆地西北缘的哈山地区石炭系火山岩为研究对象,通过全岩主微量元素、Sr-Nd 同位素数据分析,进一步限定其成因机制和深部动力学背景。

1 区域地质背景及样品特征

哈山地区位于准噶尔盆地西北缘区域(图 1a,b),隶属于克夏断裂带和哈山构造带,是重要的陆块拼合造山部位,其构造活动强烈,发育断裂及大规模的逆冲推覆构造。呈条带状展布的哈山构造带南邻玛湖凹陷,北部与和什托洛盖盆地相接。研究区位于哈山地区的西南部(图 1c),该区域石炭纪火山活动强烈,多发育基性火山熔岩、中性火山碎屑岩、中-基性熔结火山碎屑岩及火山喷发间歇期的沉凝灰岩。

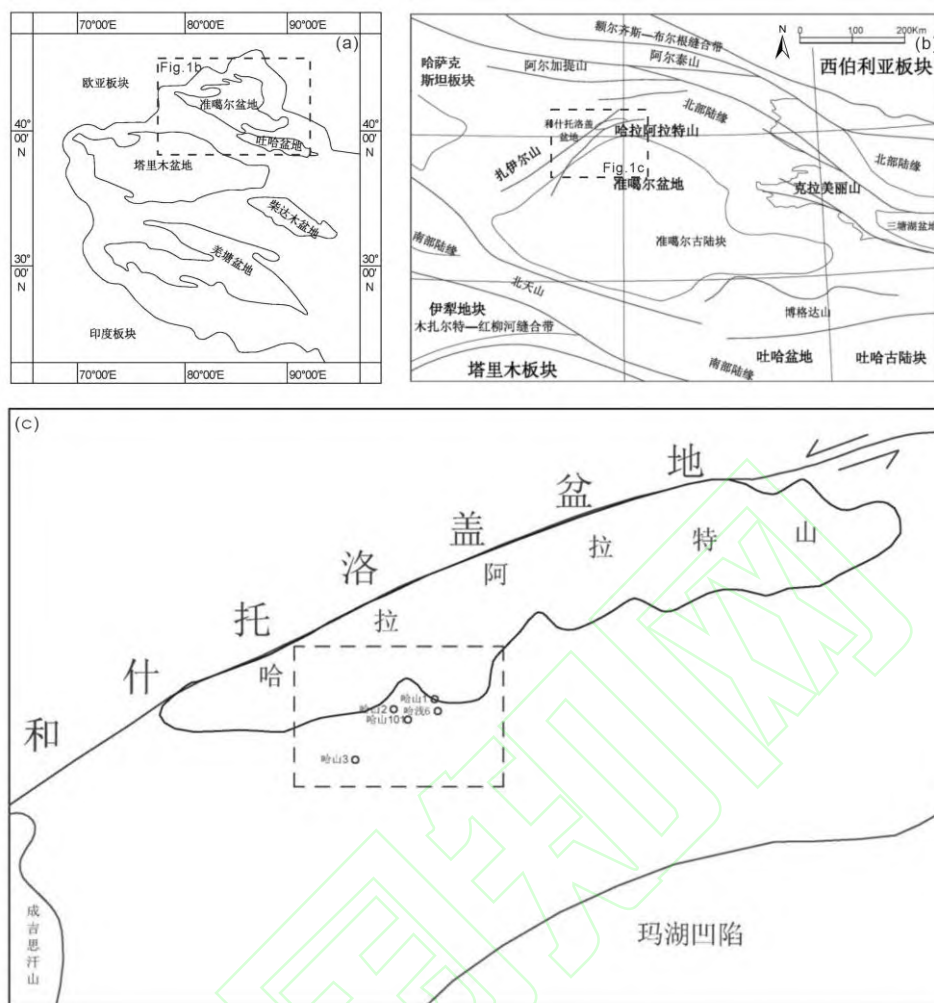


图1 研究区地质简图

(a) 中国西北缘地质概况图; (b) 准噶尔盆地构造单元划分简图^[18]; (c) 哈山地区研究区位置图 (据胜利油田勘探开发研究院, 2020 修改)

Fig.1 Simplified geological maps of the study area

(a) Geological sketch map of the northwestern China; (b) Tectonic sketch map of the Junggar Basin (modified after [18]); (c) Geological sketch map of the Hashan region (modified after the research institute of petroleum exploration and development in Shengli, 2020).

本文在研究区内采集的 7 件样品均取自石炭系。其中, 玄武岩样品 HS-4、HS-5 和 HS-6 分别产自哈山 2 井、哈山 3 井和哈浅 6 井, 玄武安山岩样品 HS-1、HS-3 分别产自哈山 1 井、哈山 2 井, 安山岩样品 HS-2、HS-7 分别产自哈山 1 井、哈山 101 井。玄武岩、玄武安山岩和安山岩为多期岩浆喷发、冷凝结晶的产物。通过光学显微镜观察岩心薄片发现, 玄武岩样品的主要造岩矿物包括基性斜长石 (50%~55%)、单斜辉石 (15%~20%), 伊丁石化橄榄石 (10%), 具有间粒间隐结构, 基质由单斜辉石、磁铁矿和玻璃质构成 (20%~30%) (图 2a,b)。玄武安山岩主要由斜长石组成 (55%~60%), 充填有单斜辉石 (10%~15%)、磁

铁矿和玻璃质（25%~30%）（图 2c,d），为斑状结构，基质主要由隐晶质和玻璃质组成。安山岩主要由中性斜长石组成（55%~65%），其次为单斜辉石和角闪石（2%~5%），基质为微晶斜长石和少量单斜辉石、磁铁矿等（30%~35%），可见玻璃质成分（图 2e,f），具有斑状结构。火山岩基质中斜长石微晶均呈定向—半定向排列，微晶之间有辉石或玻璃质充填（图 2）

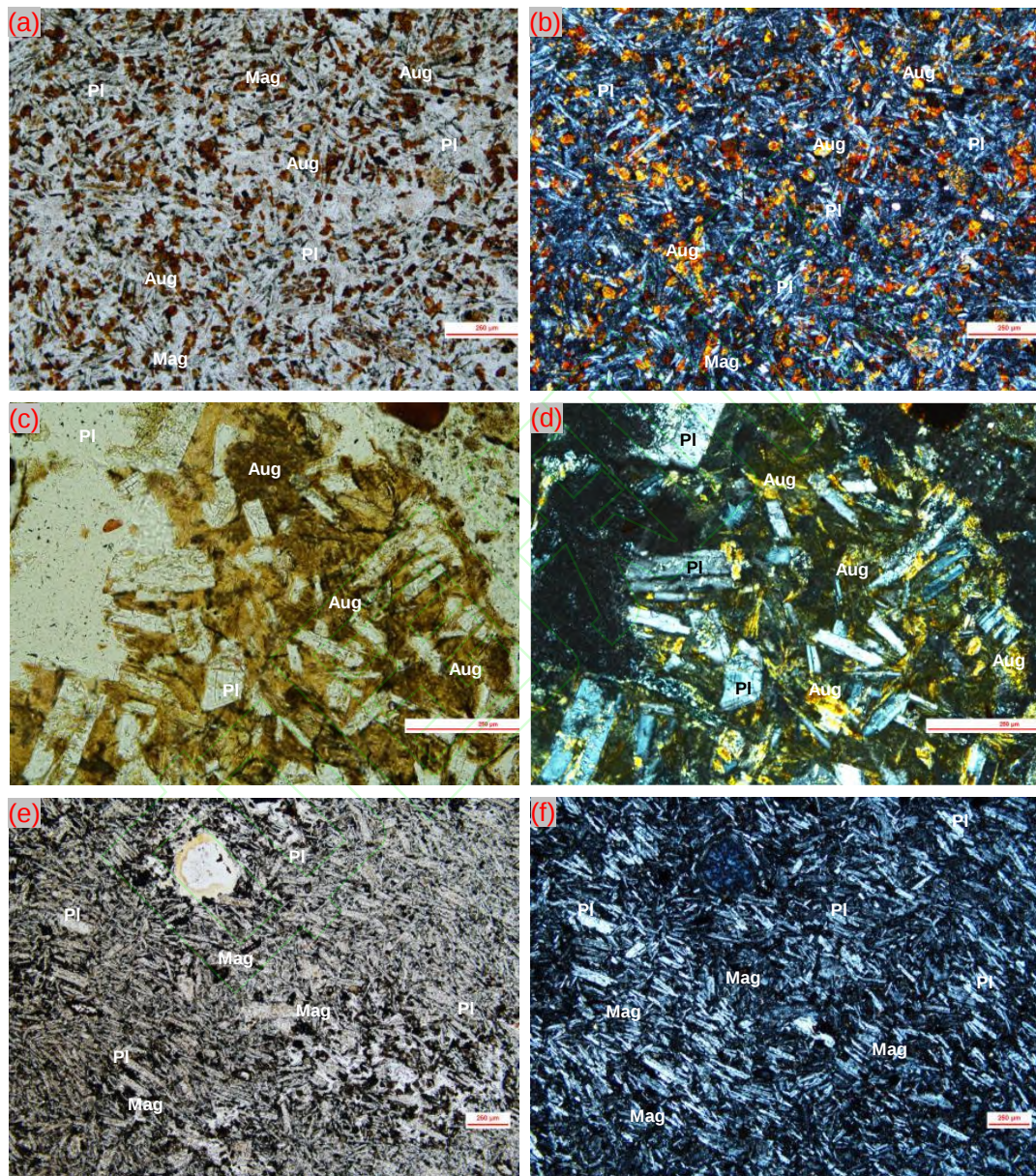


图 2 哈山地区中 - 基性火山岩类矿物组成特征

(a) 玄武岩, 哈浅 6 井, 141.7m (-); (b) 玄武岩, 哈浅 6 井, 141.7m (+); (c) 玄武安山岩, 哈山 101 井, 900 – 904m (-); (d) 玄武安山岩, 哈山 101 井, 900 – 904m (+); (e) 安山岩, 哈山 2 井, 151.9m (-); (f) 安山岩, 哈山 2 井, 151.9m (+). Pl-斜长石; Aug-辉石; Hbl-角闪石; Mag-磁铁矿

Fig.2 Mineral composition characteristics of andesitic – basaltic volcanic rocks in Hashan area

(a) Basalts, HQ6, 141.7m (-) ; (b) Basalts, HQ6, 141.7m (+) ; (c) Basaltic andesites, HS101, 900 – 904m (-) ; (d) Basaltic andesites, HS101, 900 – 904m (+) ; (e) Andesites, HS2, 151.9m (-) ; (f) Andesites, HS2, 151.9m (+).

Pl-plagioclase; Aug-Augite; Hbl-hornblende; Mag-Magnetite.

2 样品分析方法

岩石样品于中国石油大学（北京）完成挑选与处理工作，并送往中国地质调查局天津地质调查中心实验室进行常量元素测定、微量元素测定、同位素成分分析等工作。常量元素采用 X 射线荧光光谱仪进行分析，精度在 2% ~ 5% 之间，微量及稀土元素采用高压密闭溶样法，通过 PW4400/40 X 射线荧光光谱仪、X SeriesII 电感耦合等离子体质谱仪测得，检测温度为 23℃，湿度为 44%RH。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素通过 Triton 型热电离质谱仪（TIMS）测得，利用 $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}=8.375209$ 和 $^{146}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}=0.7219$ 分别对 Sr 和 Nd 进行质量分馏校正，并通过国际标准岩石样品 BCR-2（玄武岩）监测分离流程，以确保实验的准确性。国际标准岩石样品 BCR-2（玄武岩）测定结果是： $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}=0.705025 \pm 0.000006$ （SE）； $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}=0.512646 \pm 0.000003$ （SE）。用于计算 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 的校正年龄为 $333.4 \pm 8.6\text{Ma}$ 。

3 地球化学特征

3.1 常量元素特征

哈山地区石炭系火山岩的常微量元素分析结果见表 1，具体特征如下：玄武岩 SiO_2 含量低（45.61% ~ 47.60%）， TiO_2 含量为 1.54% ~ 2.24%， MgO 含量很低（5.81% ~ 6.82%）， CaO 含量为 6.30% ~ 11.97%， Al_2O_3 含量偏高（16.74% ~ 17.78%），全碱 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 4.24% ~ 6.57%。玄武安山岩 SiO_2 含量中等（54.80% ~ 56.54%）， TiO_2 含量为 0.96% ~ 1.02%， MgO 含量很低（4.59% ~ 5.57%）， CaO 含量为 6.05% ~ 6.35%， Al_2O_3 含量为 17.35% ~ 17.49%，全碱 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 4.65% ~ 7.24%。安山岩 SiO_2 含量为 60.35% ~ 60.59%， TiO_2 含量为 0.57% ~ 1.23%， MgO 含量很低（3.21% ~ 3.23%）， CaO 含量为 5.76% ~ 12.31%， Al_2O_3 含量为 11.30% ~ 14.55%，全碱 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 6.54% ~ 7.04%。

表 1 哈山地区石炭系火山岩的常量 (wt%) 元素分析结果

Table 1 Major (wt%) element (ppm) data for the Carboniferous volcanic rocks of the Hashan area

样品号	HS-2	HS-7	HS-1	HS-3	HS-4	HS-5	HS-6
岩性	安山岩		玄武安山岩		玄武岩		
SiO_2	60.59	60.35	56.54	54.80	47.24	47.60	45.61
Al_2O_3	11.30	14.55	17.49	17.35	17.55	17.78	16.74
Fe_2O_3	4.73	7.99	9.25	7.33	13.00	12.53	12.42
CaO	12.31	5.76	6.05	6.35	9.17	6.30	11.97
MgO	3.23	3.21	4.57	5.57	6.07	6.82	5.81
K_2O	2.72	1.28	1.07	1.02	0.26	0.19	0.27
Na_2O	4.32	5.26	3.58	6.22	3.98	6.38	5.24

图3 哈山地区石炭系火山岩地球化学特征

(a) TAS 火山岩岩性判别图 (边界据文献[19]); (b) K_2O-SiO_2 关系图 (边界据文献[20])

Fig.3 Geochemical characteristics of the Carboniferous volcanic rocks in Hashan area

(a) TAS volcanic rock classification diagram (modified from [19]); (b) K_2O versus SiO_2 diagram (modified from [20])

3.2 微量元素特征

对该地区火山岩进行稀土元素分析, 并对分析结果进行球粒陨石标准化处理(表 2)。结果显示, 该区火山岩稀土元素总量较高, $\sum REE = (85.98 \sim 213.41) \times 10^{-6}$, 平均值为 118.80×10^{-6} , 轻稀土元素 $LREE = (45.83 \sim 143.24) \times 10^{-6}$, 平均为 78.41×10^{-6} , 重稀土元素 $HREE = (20.38 \sim 70.17) \times 10^{-6}$, 平均为 40.39×10^{-6} , $LREE/HREE = 1.10 \sim 3.22$, 平均为 2.12, $(La/Lu)_N = 15.75 \sim 91.43$, 平均为 47.66。总体上该区火山岩轻重稀土分馏明显, 其稀土分配曲线表现为轻稀土富集而重稀土较为平坦的右倾型 (图 4a)。

表 2 哈山地区石炭系火山岩的微量 (10^{-6}) 元素分析结果

Table 2 Trace element (ppm) data for the Carboniferous volcanic rocks of the Wulungu area

样品号	HS-2	HS-7	HS-1	HS-3	HS-4	HS-5	HS-6
岩性	安山岩		玄武安山岩		玄武岩		
La	17.60	24.90	16.60	12.80	8.84	7.38	5.67
Ce	39.00	62.4	35.90	29.60	26.90	22.80	16.80
Pr	4.68	8.45	5.12	3.60	4.02	3.48	2.85
Nd	19.10	37.40	21.90	15.20	19.70	17.40	14.90
Sm	4.01	8.05	4.52	3.09	5.31	4.60	4.21
Eu	0.90	2.04	1.25	1.31	1.67	1.51	1.40
Gd	3.72	7.59	3.83	2.99	4.86	4.44	3.99
Tb	0.57	1.31	0.58	0.41	0.92	0.82	0.75
Dy	3.49	8.02	3.40	2.41	5.79	5.18	4.93
Ho	0.68	1.60	0.63	0.46	1.12	1.03	1.01
Er	1.94	4.60	1.68	1.24	3.08	2.84	2.75
Tm	0.29	0.71	0.24	0.16	0.44	0.40	0.38
Yb	1.93	4.73	1.52	1.07	2.86	2.62	2.57
Lu	0.27	0.71	0.20	0.14	0.39	0.36	0.36
Y	18.20	40.90	16.10	11.50	28.40	25.80	24.80
$\Sigma LREE$	85.29	143.24	85.29	65.60	66.44	57.17	45.83
$\Sigma HREE$	31.09	70.17	28.18	20.38	47.86	43.49	41.54
$LREE/HREE$	2.74	2.04	3.03	3.22	1.39	1.31	1.10

在稀土元素球粒陨石标准化配分图中(图 4a), 玄武岩 $\sum REE = (87.37 \sim 114.30) \times 10^{-6}$, 平均为 100.78×10^{-6} , $LREE = (45.83 \sim 66.44) \times 10^{-6}$, 平均为 56.48×10^{-6} , $HREE = (41.54 \sim 47.86) \times 10^{-6}$, 平均为 44.30×10^{-6} , $LREE/HREE = 1.10 \sim 1.39$, $(La/Lu)_N = 15.75 \sim 22.67$, 平均为 19.64。该组轻重稀土无明显分馏, 稀土配分曲线为弱右倾型, 有明显 La、Ce 含量较低的特

征，其稀土配分曲线与 N-MORB 型洋中脊玄武岩具有一定相似性。玄武安山岩和安山岩 $\Sigma\text{REE} = (85.98 \sim 213.41) \times 10^{-6}$ ，平均为 132.31×10^{-6} ， $\text{LREE} = (65.60 \sim 143.24) \times 10^{-6}$ ，平均为 94.86×10^{-6} ， $\text{HREE} = (20.38 \sim 70.17) \times 10^{-6}$ ，平均为 37.46×10^{-6} ， $\text{LREE/HREE} = 2.04 \sim 3.22$ 。 $(\text{La/Lu})_{\text{N}} = 35.07 \sim 91.43$ ，平均 68.67。轻重稀土分馏明显，稀土配分曲线为明显右倾型，钕元素具有微弱的负异常，表明岩浆演化过程中斜长石的结晶分异作用不明显或岩浆源区少有斜长石残留。

同样，在微量元素原始地幔标准化蜘蛛图中（图 4b），玄武安山岩、安山岩元素分配曲线呈现右倾型，与玄武岩相对平坦的曲线分布型式相似性较弱，说明他们是不同的两套岩系。玄武安山岩、安山岩与玄武岩相比，大离子亲石元素（LILE）（如 Rb、Ba）强烈富集，高场强元素（HFSE）U、Pb 相对富集，Nb 亏损，其微量元素分布曲线与岛弧钙碱性安山岩相似^[21]。而玄武岩微量曲线特征与洋中脊玄武岩的相似性较弱，Rb、Ba、K 等大离子亲石元素呈现出正异常，Nb、Ta 等高场强元素为微弱负异常，具有弧亲和性的地球化学特征。

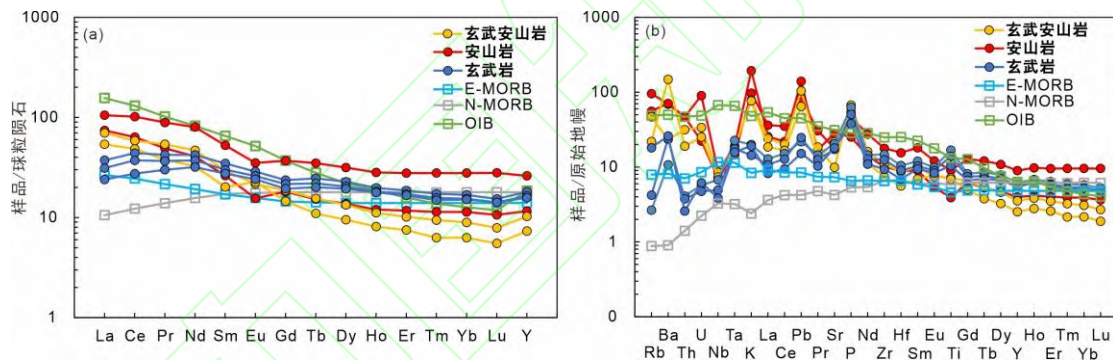


图 4 (a) 哈山地区石炭系火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (标准化值据文献[22]) 和 (b) 微量元素原始地幔标准化蛛网图 (标准化值据文献[22]), E-MORB, N-MORB, OIB 等值据文献[22]

Fig.4 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive mantle-normalized trace element spidergrams for Carboniferous volcanic rocks of the Hashan area. Chondrite-normalized and primitive mantle-normalized values are from [22].

3.3 Sr-Nd 同位素特征

对 Sr-Nd 同位素分析得出，哈山地区石炭系火山岩样品具有中-低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值、高放射性 Nd ($\epsilon\text{Nd}(t)$ 值均大于 0) 的特征 (表 3)。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在一定范围内变化 ($0.702877 \sim 0.706620$)，玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 略低于玄武安山岩、安山岩。玄武岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值介于 $+9.81 \sim +9.85$ ，安山岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 $+4.60 \sim +8.67$ 。

表 3 哈山地区石炭系火山岩 Sr-Nd 同位素组成分析结果

Table 3 Sr-Nd isotope compositions of Carboniferous volcanic rocks from the Hashan area

岩性	样品号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	SE	Rb(ppm)	Sr(ppm)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	SE	Sm(ppm)	Nd(ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)$
----	-----	---------------------------------	----	---------	---------	-----------------------------------	----	---------	---------	---------------------------------	-----------------------------------	------------------------

安山岩	HS2	0.70662	0.000007	61	596	0.512721	0.000005	4.01	19.1	0.296089423	0.126928268	4.59
	HS7	0.704834	0.000005	35.5	377	0.512937	0.000002	8.05	37.4	0.272364453	0.130134887	8.67
玄武安山岩	HS1	0.705716	0.000008	29.9	210	0.512866	0.000003	4.52	21.9	0.411863019	0.124783313	7.51
	HS3	0.704365	0.000004	14	460	0.51286	0.000004	3.09	15.2	0.088026553	0.122906958	7.48
	HS4	0.702877	0.000004	1.69	433	0.513067	0.000005	5.31	19.7	0.011287014	0.162971275	9.81
玄武岩	HS5	0.703324	0.000007	2.68	364	0.513062	0.000004	4.6	17.4	0.021292794	0.159841976	9.85
	HS6	0.703889	0.000009	11.5	380	0.513084	0.000004	4.21	14.9	0.087526085	0.170836371	9.81

4 讨论

4.1 火山岩成因机制

通过 Sr-Nd 同位素分析得出, 研究区具有 MORB 特征的玄武岩更多的来自亏损地幔部分熔融, 而玄武安山岩和安山岩样品落在上地壳与亏损地幔混合线附近, 暗示了研究区火山岩主要为幔源岩浆结晶分异而成, 且均有上地壳成分的加入 (图 5), 其组分与弧成因的火山岩相似。玄武安山岩和安山岩的稀土配分曲线为明显右倾型, 且大离子亲石元素 (LILE) (如 Rb、Ba) 强烈富集, 高场强元素 (HFSE) U、Pb 相对富集, Nb 亏损, 这些特征与岛弧安山岩的配分曲线具有相似性, 表现出该地区经历过俯冲消减带相关的岛弧岩浆作用^[23]。结合 Nb、Th、Zr 等数据, 表明岩浆房熔体在壳-幔混合过程中, 发生了交代作用 (图 6d)。玄武岩样品 Zr/Nb 值 (15.82 – 39.77) 和 Hf/Ta 值 (2.31 – 8) 远大于洋岛玄武岩 (OIB) (Zr/Nb=5.8, Hf/Ta=2.9), 且与大洋中脊玄武岩 (N-MORB) 的比值部分接近 (Zr/Nb=30, Hf/Ta=15.5), 表明玄武岩样品来自类似 MORB 特征的亏损地幔源区。玄武岩中 Ce/Pb (6.43 – 17.36) 和 Nb/U 比值 (9.92 – 40.08) 低于洋中脊玄武岩^[24,25] (Ce/Pb=25±5, Nb/U=47±7), 说明了岩浆源区有地壳成分的加入。同时, 这些玄武岩的 Ce/Pb 比值和 Nb/U 比值没有随着 SiO₂ 含量的增加而呈现降低的趋势, 这与大规模地壳混染的影响显著不一致, 因而推断交代作用引起的地壳混染作用为其主因^[26]。与玄武岩样品相比, 玄武安山岩和安山岩的 SiO₂ 含量相对较高, MgO 和 Fe₂O₃ 含量较低, 但同样表现出亏损地幔的特征, 暗示其发育与玄武岩有成因联系, 玄武安山岩和安山岩可能为源自亏损地幔的岩浆结晶分离作用形成, 后期在俯冲消减带混入了更多地壳成分, 受板块俯冲相关的沉积物或熔体交代作用。

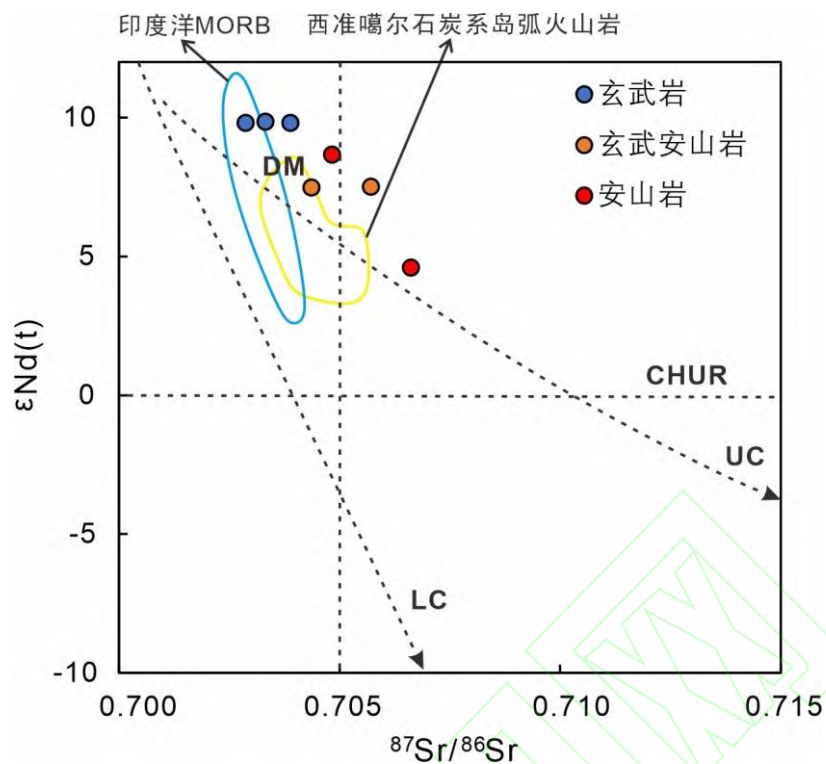


图 5 哈山地区石炭系火山岩 Sr-Nd 同位素图解 (边界据文献[27]), LC: 下地壳; UC: 上地壳; DM: 亏损地幔

西准噶尔岛弧火山岩数据引自 Geng et al. (2011) [28], 印度洋 MORB 数据引自 Stracke et al. (2003) [29]

Fig.5 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$ plot for Carboniferous volcanic rocks of the Hashan area (modified from [27]), LC: Lower Crust; UC: Upper Crust; DM: Depleted Mantle.

4.2 构造背景启示

综上所述,哈山地区石炭系火山岩构造背景为大洋板块向大陆板块的汇聚过渡、大洋板块俯冲消减至大陆板块之下的过程,发育玄武岩以及高钾、低钛的钙碱性玄武安山岩和安山岩,反映了其形成于挤压构造环境的岩浆房。通过 Th、Yb、Nb 等元素的构造环境判别图(图 6a,b,c,d),可见玄武岩具有一定洋中脊玄武岩的特征,但是正异常的 Rb、Ba、K 元素和负异常的 Nb、Ta 元素与弧成因的地质背景相联系。此外,准噶尔盆地西缘哈图地区的 MORB 特征的拉斑玄武岩(ca. 315 – 290 Ma)代表了洋脊俯冲的产物^[30]。晚石炭世中晚期的浊积岩和遗迹化石等表明准噶尔盆地西缘在该时期仍处于浅海-滨海环境^[31]。古地磁和古地理资料指示晚石炭世末期该区域为次深海-浅海环境^[32],表明准噶尔洋还未完全闭合。随之发育的弧成因中-基性岩暗示区域性构造背景仍为弧-盆消减的阶段。由此,我们推断玄武岩、玄武安山岩、安山岩处于大洋岛弧与大陆岛弧交汇处,源自亏损地幔的岩浆因结晶分离作用发育中-基性岩类,在交代作用下,后期的俯冲消减带混入了更多地壳成分,表明研究区构造背景向板块汇聚、俯冲与消减的岛弧环境逐渐过渡。

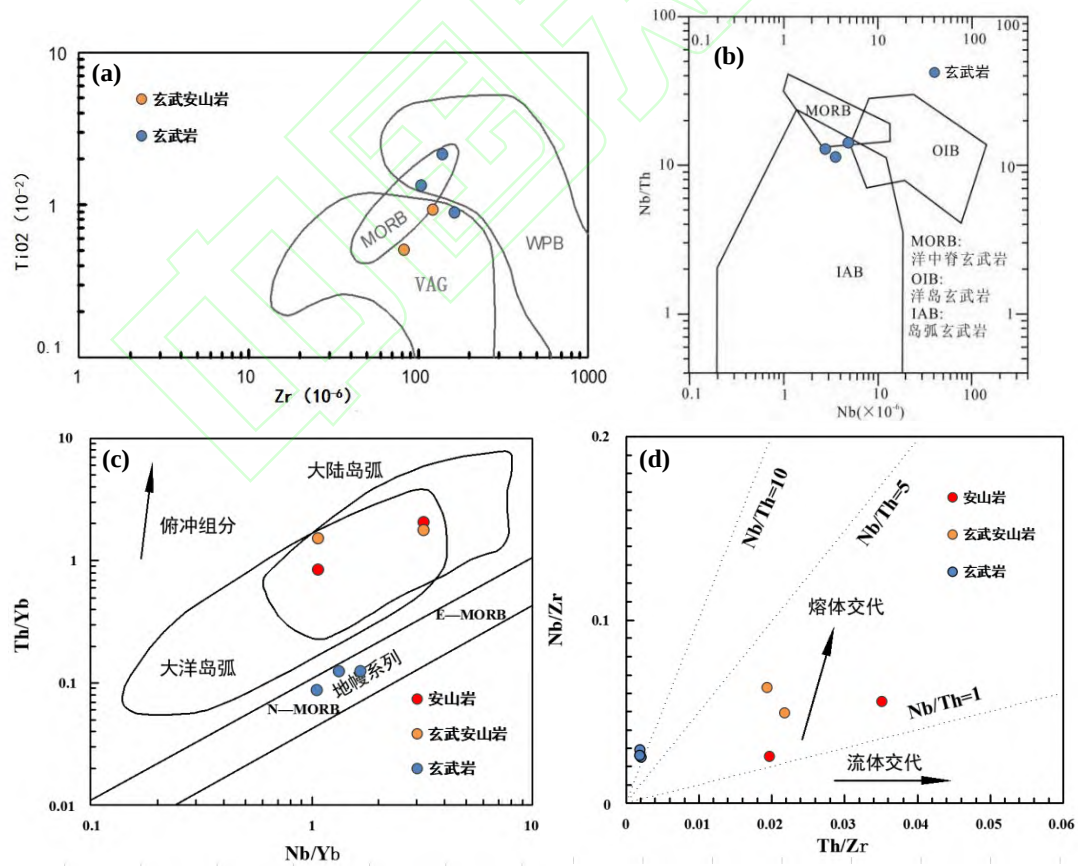


图 6 哈山地区石炭系火山岩构造判别图解

(a) TiO_2 - Zr 图解 (边界据文献[33]); (b) Nb/Th - Nb 图解; (c) Th/Yb - Nb/Yb 图解 (边界据文献[34]); (d) Nb/Zr - Th/Zr 图解 (边界据文献[35])

Fig.6 Tectonic identification diagrams for the Carboniferous volcanic rocks in Hashan area

(a) TiO_2 versus Zr plot (modified from [33]); (b) Nb/Th versus Nb/Yb plot; (c) Th/Yb versus Nb/Yb plot (modified from [34]); (d) Nb/Zr versus Th/Zr plot (modified from [35]).

准噶尔古大洋是介于西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块之间的古亚洲洋北部的重要分支及阶段性演化产物。晚石炭世 – 早二叠世为准噶尔西缘构造格局转换的重要阶段, 大量研究通过广泛分布的蛇绿混杂岩带、花岗岩类和中基性岩, 探讨了这一阶段的构造演化过程。石炭纪为准噶尔洋盆发育-消减-闭合的重要阶段, 然而, 该大洋板块在晚石炭世为连续俯冲、消减背景^[12,16,36], 还是由俯冲转变为碰撞后的伸展作用^[9,37,38], 仍存在争议。此外, 徐新等 (2010)^[39]认为西准噶尔晚古生代残余洋盆是继承早古生代洋盆基础上发育的, 残余洋盆在晚古生代发生过新的扩张, 洋盆于早石炭世处于汇聚-闭合的构造背景。我们的数据难以证实西准噶尔洋盆的闭合时间点, 但石炭纪准噶尔洋盆持续汇聚的构造背景得到较好的佐证 (图 7), 与前人得出的哈山地区大洋板块于晚石炭世持续俯冲的构造环境相一致^[35], 本研究为深入探讨准噶尔西缘洋盆的发育及消减、闭合过程提供重要基础。

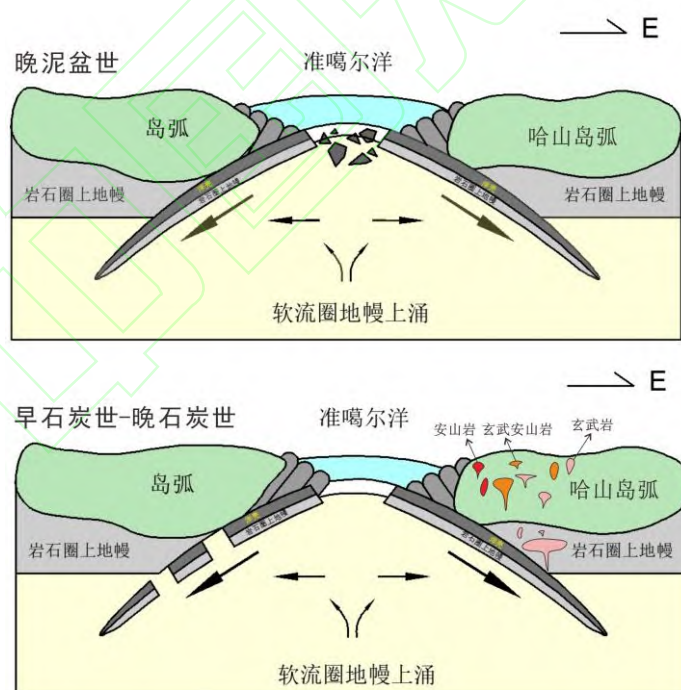


图 7 准噶尔西北缘哈山地区构造演化模式图

Fig.7 The model of tectonic evolution of Hashan area

5 结论

(1) 准噶尔盆地哈山地区石炭系火山岩包括玄武岩、玄武安山岩和安山岩。玄武岩表现为“低钾高钛”的特点，为低钾拉斑系列，指示继承了洋盆汇聚板块边缘背景；玄武安山岩和安山岩表现“高钙碱”的特点，为中-高钾钙碱系列，指示板块汇聚边缘火山岛弧的发育背景。

(2) 玄武岩发育于洋盆俯冲消减的构造背景，源区成分主要来源于亏损地幔，混有部分由于地幔对流带入的地壳成分；玄武安山岩和安山岩来自于板块俯冲消减带有关的弧岩浆作用，为地幔熔融岩浆后期分异结晶形成。

(3) 准噶尔古洋盆于石炭纪经历了板块持续汇聚的过程，该残余洋盆于晚石炭世仍处于向大陆板块俯冲、消减及碰撞的阶段。

参考文献

- [1] COLEMAN R G. Continental growth of northwest China[J]. *Tectonics*, 1989, 8(3): 621-635.
- [2] 肖序常. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [3] JAHN B M, WINDLEY B, NATAL'IN B, et al. Phanerozoic continental growth in central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 599-603.
- [4] 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 77-89.
- [5] 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(1): 148-168.
- [6] 朱永峰, 王涛, 徐新. 新疆及邻区地质与矿产研究进展[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1785-1794.
- [7] FENG Y, COLEMAN R G, TILTON G, et al. Tectonic evolution of the west Junggar Region, Xinjiang, China[J]. *Tectonics*, 1989, 8(4): 729-752.
- [8] 梁云海, 李文铅, 李卫东. 新疆准噶尔造山带多旋回开合构造特征[J]. *地质通报*, 2004, 23(3): 279-285.
- [9] CAI Q R, SONG Z H, ZHANG G L, et al. Geochronological and geochemical study of the Late Carboniferous volcanic drilling cores from the Piedmont of the Hala'ulate Mountain in West Junggar: Implications for stratigraphic division and tectonic evolution[J]. *Lithos*, 2023, 456:

107305.

[10] 肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1062-1076.

[11] 毛治国, 邹才能, 朱如凯, 等. 准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 207-216.

[12] 焦小芹, 张关龙, 牛花朋, 等. 准噶尔盆地东北缘石炭系火山岩形成机制: 对准噶尔洋盆闭合时限的新启示[J]. 地学前缘, 2022, 29(4): 385-402.

[13] GENG H Y, SUN M, YUAN C, et al. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction?[J]. Chemical Geology, 2009, 266(3/4): 364-389.

[14] YIN J Y, CHEN W, YUAN C, et al. Petrogenesis of Early Carboniferous adakitic dikes, Sawur region, northern West Junggar, NW China: Implications for geodynamic evolution[J]. Gondwana Research, 2015, 27(4): 1630-1645.

[15] DING W C, LI T D, CHEN X H, et al. Intra-continental deformation and tectonic evolution of the West Junggar Orogenic Belt, Central Asia: Evidence from remote sensing and structural geological analyses[J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(2): 651-663.

[16] YIN J Y, YUAN C, SUN M, et al. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in Western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 2010, 17(1): 145-152.

[17] 李永军, 徐倩, 杨高学, 等. 陆内“滞后”弧岩浆岩特征及其地质意义: 来自西准噶尔乌鲁木齐北早二叠世岩浆作用的证据[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 190-199.

[18] 张韶琛. 准噶尔盆地西北缘哈山构造样式及对成藏影响作用研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.

[19] LE BAS M J, LE MAITRE R W, STRECKEISEN A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27(3): 745-750.

[20] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.

[21] Pearce, J.A. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In:

Thorpe, R.S., Ed., *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, John Wiley and Sons, 1982, 252-548.

[22] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.

[23] CULLERS R L, GRAF J L. Chapter 8 rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks—ore petrogenesis[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 275-316.

[24] HOFFMAN P F. Did the breakout of laurentia turn Gondwanaland inside-out?[J]. *Science*, 1991, 252(5011): 1409-1412.

[25] TAYLOR, S.R., MCLENNAN, S.M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [D]. Blackwell: Oxford, 1985.

[26] 张继恩, 肖文交, 韩春明, 等. 西准噶尔石炭纪洋中脊俯冲岩浆活动: 以玛里雅蛇绿岩为例[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3272-3282.

[27] DOSSO L, MURTHY V R. A Nd isotopic study of the Kerguelen Islands: Inferences on enriched oceanic mantle sources[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 48(2): 268-276.

[28] GENG H Y, SUN M, YUAN C, et al. Geochemical and geochronological study of early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 854-866.

[29] STRACKE A, BIZIMIS M, SALTERS V J M. Recycling oceanic crust: Quantitative constraints[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(3): 8003.

[30] TANG G J, WANG Q, WYMAN D A, et al. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar Region, northern Xinjiang (west China)[J]. *Chemical Geology*, 2010, 277(3/4): 281-300.

[31] 向坤鹏. 新疆西准噶尔包古图-哈拉阿拉特山一带石炭纪沉积盆地分析及构造意义. 西安: 长安大学, 2015.

[32] 王福同. 新疆维吾尔自治区古地理及地质生态图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2006.

[33] PEARCE J A, CANN J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace

element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.

[34] PEARCE J. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251-285.

[35] LI D, HE D F, MA D L, et al. Carboniferous–Permian tectonic framework and its later modifications to the area from eastern Kazakhstan to southern Altai: Insights from the Zaysan–Jimunai Basin evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 16-35.

[36] SHEN P, PAN H D, XIAO W J, et al. Early Carboniferous intra-oceanic arc and back-arc basin system in the West Junggar, NW China[J]. *International Geology Review*, 2013, 55(16): 1991-2007.

[37] DUAN F H, LI Y J, ZHI Q, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of Late Carboniferous sanukitic dikes from the Bieluagaxi area of West Junggar, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 175: 158-177.

[38] 徐新, 周可法, 王煜. 西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造背景研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3206-3214.

[39] 杨高学, 李永军, 佟丽莉, 等. 西准噶尔海山俯冲的地质效应: 来自泥盆纪—石炭纪火山岩地球化学证据[J]. *地学前缘*, 2017, 24(6): 60-67.