

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2021.01.007

新疆博格达造山带西段石炭纪双峰式火山岩地球化学特征及成因

张振坤¹, 孙建东², 江辉³, 陆凡⁴, 岳继宗¹, 吴守智¹

(1. 成都理工大学, 成都 610051;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016;

3. 四川省地矿局川西北地质队, 四川 绵阳 621051;

4. 江西省核工业局 265 大队, 江西 鹰潭 335001)

摘要: 新疆博格达造山带博格达峰南侧柳树沟组出露大量双峰式火山岩组合。本文对博格达造山带西段石炭纪双峰式火山岩地球化学特征研究结果表明:①玄武岩具有贫 K 富 Na、富 Ti 富 Al 和富 Mg 的特征, $w(K_2O)/w(TiO_2)$ 、 $w(K_2O)/w(P_2O_5)$ 值较低且范围较小, 总体上玄武岩有轻度的地壳物质混染作用; HREE 相对富集, 轻重稀土无明显的分馏, 玄武质岩浆可能源于亏损地幔部分熔融。②流纹岩富 K 贫 Na, 低 Ti、Mg; 与其共生的玄武岩不同, 流纹岩稀土元素含量高于玄武岩, 轻重稀土分馏较为明显, 为右倾斜率稀土配分模式, Eu 的负异常较强 ($\delta Eu = 0.17 \sim 0.20$), 流纹岩可能为地壳物质重熔形成。③博格达造山带西段在晚石炭世时期处于大陆裂谷环境, 其形成与古亚洲洋顺着克拉麦里碰撞带斜向对准格尔-吐哈地块发生俯冲紧密相关。

关键词: 博格达造山带; 柳树沟组; 双峰式火山岩; 大陆裂谷; 新疆

中图分类号: P588.14 **文献标识码:** A

0 引言

博格达造山带位于新疆北部, 北邻准葛尔盆地, 南与吐哈盆地相望, 东侧与哈尔里克造山带相邻, 其东西延伸约 400 km, 区内大面积分布火山岩, 特别是分布于博格达峰南北两侧的双峰式火山岩。近年来随着研究的深入, 获得双峰式火山岩的年龄为 296 Ma—342 Ma^[1-3], 属于晚石炭世火山活动, 且形成的构造背景有各种不同的见解, 如: 造山后拉张^[4-7]、成熟岛弧^[8]、活动大陆边缘^[9]、弧后盆地^[10-11]、洋内岛弧^[12]、洋岛^[13] 及大陆拉张减薄^[8, 14-15] 等, 然而近些年对区内双峰式火山岩构造

环境的研究成果表明其构造属性更倾向于大陆裂谷环境^[1, 16-22]。事实上, 对于双峰式火山岩的成因及玄武质和流纹质岩浆二者的关系, 主要有两种观点, 一为二者同源^[23-25], 二为二者异源^[26-28]。

本文将通过对出露于博格达峰南北两侧的双峰式火山岩进行地球化学特征研究, 探讨其大地构造背景、岩石成因, 以期对恢复造山带大地构造格局有所裨益。

1 研究区地质概述及岩石学特征

1.1 研究区地质概述

研究区位于博格达造山带西段(图 1a) 博格达

收稿日期: 2020-08-31; **责任编辑:** 沈名星

基金项目: 国家重点研发项目(编号:2016YFC0600210)和中国地质调查局项目(编号:DD20190153)联合资助。

作者简介: 张振坤(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿床学矿物学岩石学。通信地址: 四川省成都市成华区成都理工大学; 邮政编码: 610051; E-mail: 875613002@qq.com

通信作者: 孙建东(1987—), 男, 助理研究员, 从事矿床地质研究工作。通信地址: 南京市玄武区中山东路南京地质调查中心; 邮政编码: 210016; E-mail: njsunjiandong@163.com

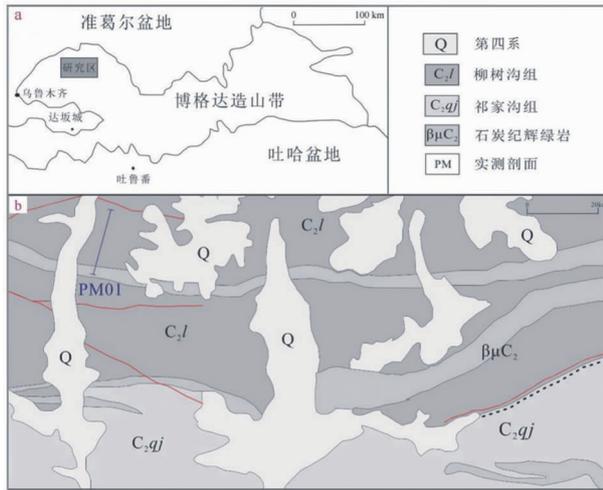


图 1 博格达造山带区域构造位置图(a)、研究区地质简图(b)

Fig. 1 Geotectonic sketch(a) of Bogda orogenic belt and geological sketch (b) of the study area

峰南侧,区内广泛出露火山岩系,地层褶皱平坦宽缓鲜有变质现象,少有花岗岩类侵入,在博格达山南北两侧有大量双峰式火山岩的出露^[1,3]。区内出露最古老的两套地层为上石炭世柳树沟组(C₂l)和祁家沟组(C₂qj)(图 1b)。其中,祁家沟组(C₂qj)火山岩岩石类型单一,为凝灰岩;柳树沟组(C₂l)火山岩岩石类型较为齐全,火山熔岩和火山碎屑岩均有出露,火山熔岩以具双峰式火山岩特征玄武岩和流纹岩为主,火山碎屑岩以火山角砾岩为主,凝灰岩次之。

1.2 岩石学特征

研究区双峰式火山岩以泉泉沟的柳树沟组南北向剖面(图 2)为代表,宏观上以灰黑色玄武岩(橄榄玄武岩)、流纹岩在空间上紧密伴生为分布特征。

橄榄玄武岩:灰色、深灰色,斑状结构,块状构造,斑晶由基性斜长石、辉石、少量橄榄石组成;基性斜长石:长柱状,粒径 1×2 mm—2×3 mm;橄榄石:

黄绿色,自形粒状,粒径 2~4 mm;辉石:自形粒状,粒径 2~3 mm;基质呈细粒结构,主要由基性斜长石、辉石呈格架状组成,约占 70%。

流纹岩:灰白色,斑状结构,流纹构造,斑晶为钾长石、石英,约占 20%;钾长石:板柱状,粒径 2×3 mm—3×4 mm;石英:他形粒状,油脂光泽,粒径 2~3 mm;基质具霏细结构,由长英质矿物组成,含量占 70%,基质中矿物定向排列明显,显示流纹构造(图 3)。

2 样品采集及分析测试

测试样品采集于博格达峰南侧黑沟、泉泉沟一带柳树沟组地层中,共采取 8 件新鲜的岩石样品,取样位置见图 2。其中,玄武岩样品 4 件(LSG-38/39/40/47),流纹岩样品 4 件(LSG-43/45/51/54)。

将样品细碎至 200 目,然后由西南冶金地质测试中心进行主量、微量及稀土元素测试分析。

样品分析测试全过程执行 GB/T14506.28-2010 标准,标样监控采用 BCR-2 和 GBW07105,数据检查采用 DZG20-02,分析精度和准确度优于 5%。除 FeO 和烧失量,主量元素采用标准湿化法分析,其余元素采用样品的碱熔玻璃片在帕拉科生产的 Axios 型荧光光谱仪(XPF)上分析测试,稀土、微量元素采用等离子发射光谱法和质谱法分析测试。详细数据处理及方法见文献[29]。

3 分析结果

3.1 主量元素

火山岩地球主量元素分析结果见表 1,表 2 为 CIPW 标准矿物计算结果。

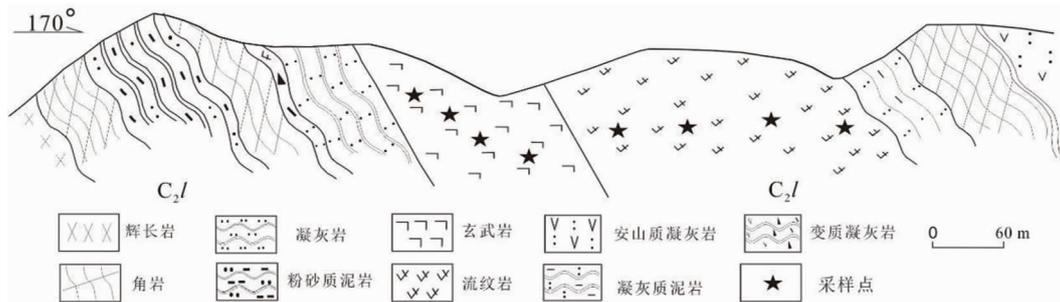


图 2 博格达造山带石炭纪柳树沟组地层火山岩 PM01(部分)

Fig. 2 Volcanic rock profile PM01 of Carboniferous Liushugou formation in Bogda orogenic belt

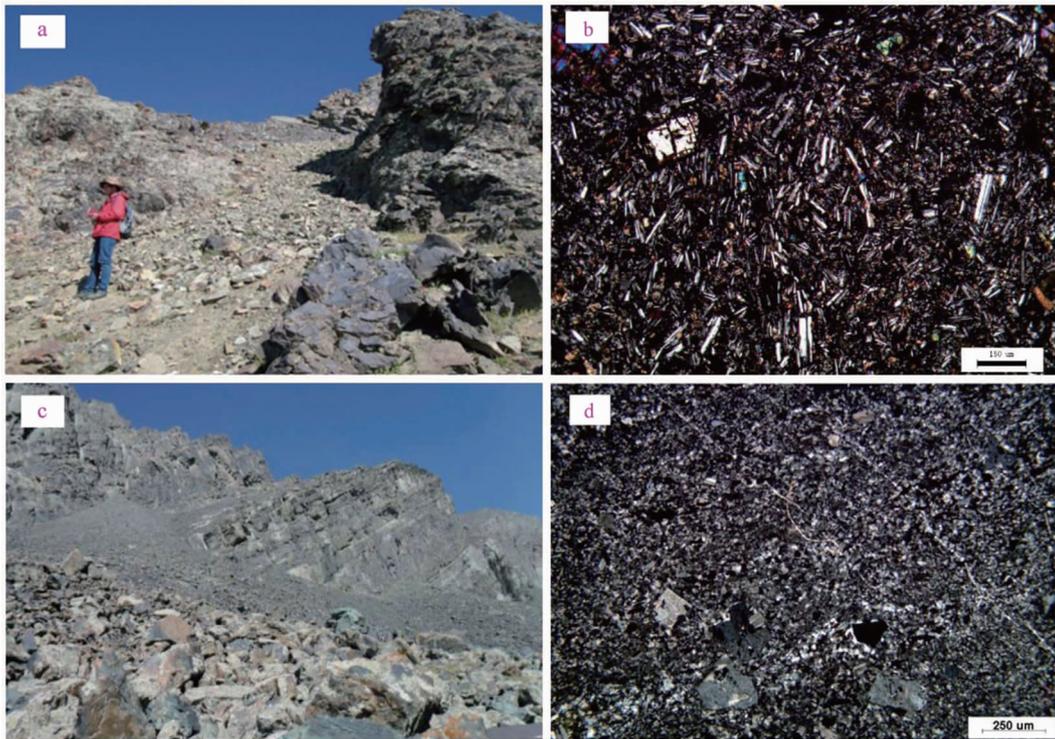


图3 博格达造山带西段双峰式火山岩镜下显微照片

Fig. 3 Microscopic photo of bimodal volcanic rock in the west Bogda orogenic belt

表1 博格达造山带西段石炭纪火山岩主量元素分析结果

Table 1 Major elements of Carboniferous volcanic rocks in the west Bogda orogenic belt

岩性 样品编号	玄武岩				流纹岩			
	LSG-38	LSG-39	LSG-40	LSG-47	LSG-43	LSG-45	LSG-51	LSG-54
SiO ₂	46.53	46.56	46.27	46.18	76.10	76.06	76.21	76.25
TiO ₂	1.68	1.70	1.67	1.69	0.27	0.24	0.26	0.23
Al ₂ O ₃	16.63	16.24	16.49	16.61	10.27	10.31	10.38	10.40
Fe ₂ O ₃	1.85	1.46	2.03	1.98	2.58	2.76	2.68	2.71
FeO	7.86	8.17	7.89	7.85	2.47	2.48	2.31	2.16
MnO	0.15	0.16	0.18	0.14	0.03	0.04	0.02	0.03
MgO	9.09	8.87	9.35	9.57	0.15	0.13	0.14	0.16
CaO	9.75	10.32	9.34	9.35	0.19	0.16	0.18	0.15
Na ₂ O	2.27	2.61	2.27	2.28	1.83	1.80	1.98	1.84
K ₂ O	0.44	0.38	0.44	0.45	5.64	5.66	5.57	5.61
P ₂ O ₅	0.26	0.27	0.26	0.28	0.04	0.05	0.03	0.04
LOI	3.87	3.70	3.85	3.95	0.70	0.68	0.63	0.72
Total	100.38	100.44	100.04	100.33	100.27	100.37	100.39	100.30
Mg [#]	62.98	62.51	63.17	63.91	5.29	4.46	5.02	5.84
σ	2.08	2.51	2.25	2.34	1.69	1.68	1.72	1.67
A/CNK	0.76	0.69	0.78	0.78	1.08	1.10	1.08	1.11

量单位: w_B/ %。

玄武岩 SiO₂ 含量 ($w(\text{SiO}_2) = 46.81\% \sim 46.53\%$), 其全碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 含量介于 $2.71\% \sim 2.99\%$ 。在火山岩 TAS 图 (图 4a) 上, 样品投点位于 Ir-Irvine 分界线下, 落入亚碱性系列的玄武岩区域; 在 $w(\text{TFeO})/w(\text{MgO}) - w(\text{SiO}_2)$ 图解 (图 4b)

中, 均落入拉斑系列区域, 可知其属于拉斑玄武岩系列; 在 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ 图解 (图 4d) 中^[30], 所有样品全落入亚碱性玄武岩范围。玄武岩富 Na 贫 K, $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}) = 5.07 \sim 6.87$; 其 $w(\text{TiO}_2) = 1.67\% \sim 1.70\%$, 高于 N-MORB 的 $w(\text{TiO}_2) =$

表 2 博格达造山带西段石炭纪火山岩 CIPW 标准矿物计算结果

Table 2 Calculations of CIPW standard minerals of Carboniferous volcanic rocks in the west Bogda orogenic belt

岩性	玄武岩				流纹岩			
样品编号	LSG-38	LSG-39	LSG-40	LSG-47	LSG-43	LSG-45	LSG-51	LSG-54
Q				42.62	42.78	42.22	43.16	
An	35.11	32.53	34.83	35.03	0.68	0.47	0.70	0.48
Ab	19.9	22.83	19.97	20.02	15.55	15.28	16.79	15.64
Or	2.69	2.32	2.70	2.76	33.47	33.55	33.00	33.29
C				0.91	1.05	0.84	1.13	
Di	10.70	15.04	9.34	9.03				
Hy	13.92	5.00	14.89	13.63	2.40	2.28	1.99	1.84
Ol	10.96	16.11	11.29	12.55				
Il	3.31	3.34	3.30	3.33	0.52	0.46	0.49	0.44
Mt	2.78	2.19	3.06	2.98	3.76	4.01	3.90	3.93
Ap	0.62	0.65	0.63	0.67	0.09	0.12	0.07	0.09
Total	100.00	100.01	100.01	99.99	100.01	100.00	100.00	100.00
A	4.11	3.84	4.14	4.22	48.71	48.62	49.44	48.71
P	53.59	53.84	53.36	53.59	0.99	0.68	1.05	0.70
DI	22.59	25.15	22.67	22.78	91.64	91.61	92.01	92.09
SI	42.26	41.28	42.54	43.24	1.18	1.01	1.10	1.28
AR	1.23	1.25	1.23	1.24	6.00	5.96	6.02	5.81
A/MF	0.46	0.45	0.44	0.44	1.43	1.40	1.47	1.50
C/MF	0.49	0.52	0.45	0.45	0.05	0.04	0.05	0.04

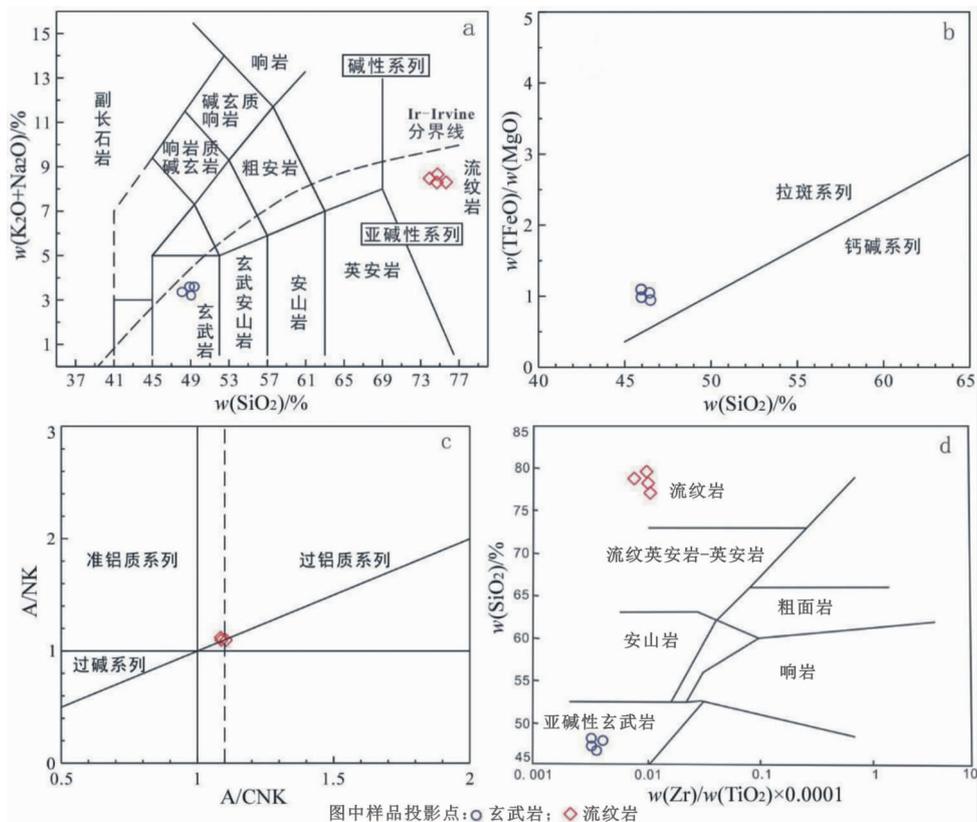


图 4 博格达造山带西段双峰式火山岩岩石系列图解

Fig. 4 A series diagram of bimodal volcanic rocks in the west Bogda orogenic belt

a. TAS 图解, 图底据 Le Maitre(2002);

b. $w(\text{TFeO})/w(\text{MgO})-w(\text{SiO}_2)$ 图解, 图底据 Miyashiro(1974);

c. $A/NK-A/CNK$ 图解, 图底据 Winchester 和 Floyd(1977);

d. $w(\text{SiO}_2)-w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ 图解, 图底据 P. D. Maniar 和 P. M. Piccoli(1989)

1.15%^[31]; $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 16.24\% \sim 16.63\%$ 、 $w(\text{CaO}) = 9.34\% \sim 10.32\%$ 和 $w(\text{MgO}) = 8.87\% \sim 9.57\%$,二者均较高, $\text{Mg}^\# = 62.51 \sim 63.91$,略高于 MORB 的 $\text{Mg}^\# = 60$,略低于判别原始岩浆的 $\text{Mg}^\# = 65$;同时,玄武岩的 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{P}_2\text{O}_5) = 1.41 \sim 1.69$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{TiO}_2) = 0.22 \sim 0.27$,比值均较低且变化范围较小。这与其 CIPW 标准矿物计算结果一致(见表 2),即玄武岩样品显示紫苏辉石(Hy)含量均大于 3%(5.00%~14.89%),且有橄榄石(Ol),无石英(Q)。

流纹岩 SiO_2 含量 $w(\text{SiO}_2) = 76.06\% \sim 76.25\%$,属高硅流纹岩^[32]。其全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量介于 7.45%~7.55%,变化较小。在火山岩 TAS 图解(图 4a)中,均落在亚碱性流纹岩区,属于亚碱性玄武岩系列的流纹岩区域;在 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ 图解(图 4d)中^[33],所有样品亦全落入亚碱性流纹岩范围。A/CNK 值为 1.08~1.11,显示准铝质—弱过铝质间的特征(图 4c)。流纹岩富 K 贫 Na, $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}) = 0.32 \sim 0.36$; $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 10.27\% \sim 10.40\%$, $w(\text{CaO}) = 0.15\% \sim 0.19\%$, $w(\text{MgO}) = 0.13\% \sim 0.16\%$,均低于与其伴生的玄武岩,表明岩浆源区存在有斜长石的残留; $w(\text{TiO}_2) = 0.23\% \sim 0.27\%$, $w(\text{P}_2\text{O}_5) = 0.03\% \sim 0.05\%$, $\text{Mg}^\# = 4.46 \sim 5.84$,均较低,指示其为低 Ti、Mg 类流纹岩;且流纹岩的 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{P}_2\text{O}_5) =$

113.20~185.67、 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{TiO}_2) = 20.89 \sim 24.39$,比值均显著高于与其伴生的玄武岩,与其 CIPW 标准矿物计算结果一致(见表 2),即流纹岩样品显示紫苏辉石(Hy)含量均小于 3%(1.84%~2.40%),且有石英(Q)无透辉石(Di)和橄榄石(Ol)。钠长石($\text{Ab} = 15.28\% \sim 16.79\%$)明显高于钙长石($\text{An} = 0.47\% \sim 0.70\%$),分异指数(DI)均明显高于玄武岩且大于 90,可知其岩浆分异程度较高^[34]。

3.2 稀土元素及微量元素

火山岩稀土元素及微量元素分析结果见表 3 所述。

玄武岩稀土元素总量相较于流纹岩稀土元素总量明显较低; $w(\text{LREE})/w(\text{HREE}) = 3.00 \sim 3.12$; 稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 5a)显示,玄武岩稀土元素具有 LREE 相对富集、HREE 轻度亏损的特点,为低缓略右倾平行曲线, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N = 1.69 \sim 1.80$, $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N = 1.06 \sim 1.09$, $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N = 1.03 \sim 1.10$,可知轻、重稀土之间及轻、重稀土内部无明显分馏特征^[35];玄武岩 Eu 正异常不明显(δEu 介于 1.10~1.17),整体接近平坦型的分布形式,与中国大兴安岭南段晚中生代大陆裂谷玄武岩^[36]稀土配分模式相似。微量元素分析结果显示,大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba 和不相容元素 K、P 相对富集, Ta、Nb、Ti 等高场强元素(HFSE)和不相容元素 Th、U 相对亏损为特征, Nb、Ta 呈现出“U”型槽, Th、Ti 亏损呈现出“V”型谷(图 6a)。

表 3 新疆博格达造山带西段石炭纪火山岩微量及稀土元素分析结果

Table 3 Analysis of trace elements and REE of Carboniferous volcanic rocks in the west Bogda orogenic belt, Xinjiang

岩性 样品编号	玄武岩				流纹岩			
	LSG-38	LSG-39	LSG-40	LSG-47	LSG-43	LSG-45	LSG-51	LSG-54
Cr	301.48	177.56	245.85	159.44	7.49	5.98	7.35	6.93
Rb	5.54	4.79	6.21	5.62	184.28	174.49	174.39	183.20
Cs	0.98	0.52	1.34	1.38	3.31	2.97	3.71	2.94
Sr	253.41	287.58	277.24	255.39	60.49	61.54	66.43	64.38
Ba	72.28	47.86	118.61	86.04	206.37	190.84	194.81	213.04
Ni	131.20	128.86	144.32	127.80	4.70	4.97	4.30	3.94
Sc	31.25	35.46	35.78	33.87	0.69	0.67	0.97	1.27
Nb	5.49	4.23	5.57	5.65	31.77	36.73	29.37	27.49
Ta	0.38	0.28	0.37	0.37	1.80	2.09	1.74	1.64
Zr	219.24	91.28	156.41	164.84	997.24	983.01	949.34	947.32
Ti	1007.16	1019.15	1001.17	1013.16	161.87	143.88	155.87	137.89
Hf	7.48	4.97	6.84	5.97	38.74	39.78	25.97	19.87
U	0.08	0.13	0.17	0.16	0.78	0.81	0.84	0.88
Th	0.43	0.48	0.66	0.35	13.84	14.32	13.74	13.91
La	8.32	8.68	8.04	8.23	93.14	94.63	87.13	97.15
Ce	21.43	22.41	21.33	21.15	187.12	210.07	195.14	213.88
Pr	3.66	3.84	3.68	3.66	30.93	30.14	27.24	31.79
Nd	17.83	18.47	17.75	17.58	127.41	125.24	114.09	131.27
Sm	4.81	5.07	4.77	4.81	28.03	28.17	26.38	29.48

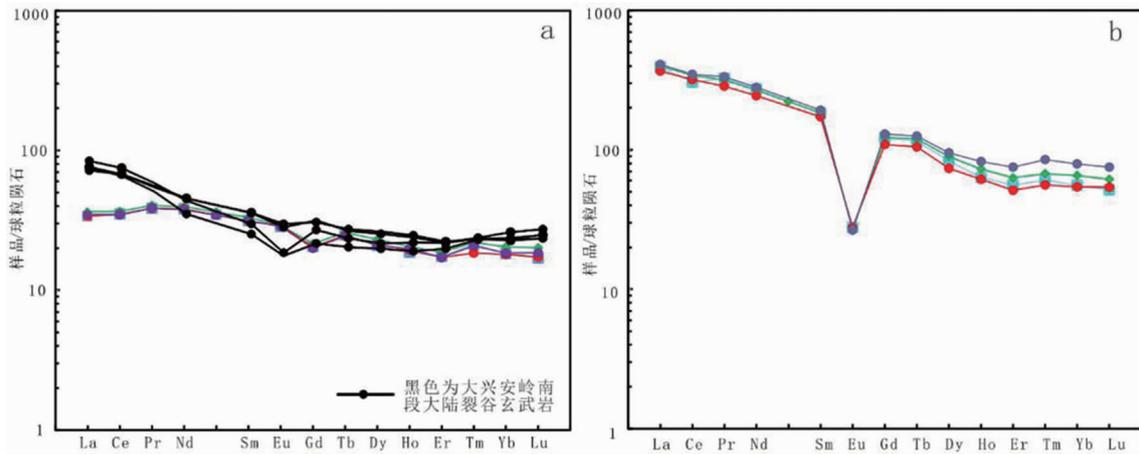


图 5 博格达造山带西段双峰式火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图
 Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern of the bimodal volcanic rocks
 in the west Bagda orogenic belt, Xinjiang
 (球粒陨石数据引自 Boynton, 1984)

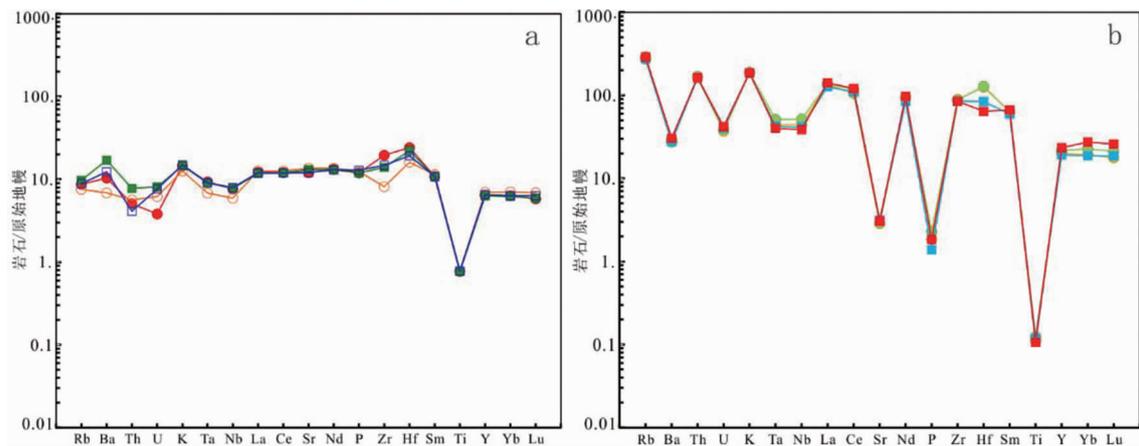


图 6 博格达造山带西段双峰式火山岩微量元素原始地幔标准化图
 Fig. 6 Prot-mantle-normalized trace element pattern of the bimodal volcanic rocks
 in the west Bagda orogenic belt
 (原始地幔数据引自 Sun 等, 1989)
 a. 玄武岩; b. 流纹岩

流纹岩样品稀土元素配分模式变化规律极为一致, LREE 相对富集, 且各元素标准化比值分别为: $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N = 4.87 \sim 6.63$, $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N = 2.07 \sim 2.11$, $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N = 1.60 \sim 2.15$, 表明轻、重稀土内部存在较为明显的分馏过程^[37]; Eu 的负异常强烈 ($\delta\text{Eu} = 0.17 \sim 0.20$), 具有右倾负斜率稀土元素配分模式(图 5b), 说明母岩浆演化过程中发生过斜长石分离结晶作用或地壳岩石部分熔融过程中残余相存在大量斜长石所致^[38-39]。流纹岩样品微量元素蛛网图与玄武岩的蛛网图完全不同, 蛛网曲线表现为 Rb、Th、K、La、Ce、Zr、Hf、Sm 等元

素的富集, Ba、U、Ta、Nb、Sr、P 和 Ti 元素的亏损, Sr、P、Ti 呈现明显亏损, 具深的“V”型谷(图 6b); $w(\text{Rb})/w(\text{Sr}) = 2.625 \sim 3.046 (> 0.5)$, 指示其成因和大陆地壳部分熔融有关^[40]; $w(\text{Ba})/w(\text{Sr}) = 2.9 \sim 3.4$, 类似于板内环境伸展构造体制下地壳物质部分熔融的产物。

4 讨论

4.1 关于双峰式火山岩岩石成因

(1) 玄武岩成因

双峰式火山岩组合中基性端元玄武岩源于地幔

部分熔融的成因模式争议较小。用微量元素比值来判别岩浆源区是比较成熟的方法之一^[41]。玄武岩的 $w(\text{Ta})/w(\text{Yb})=1.69\sim 1.80$, $w(\text{Th})/w(\text{Yb})=1.69\sim 1.80$, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})=1.69\sim 1.80$, $w(\text{Zr})/w(\text{Nb})=1.69\sim 1.80$, $w(\text{Zr})/w(\text{Y})=1.69\sim 1.80$, 可知玄武岩为亏损地幔的板内玄武岩特征, 与微量元素 $w(\text{Nb})-w(\text{Zr})$ 图解(图 7a)一致, 玄武岩源于亏损地幔的部分熔融。矿物相的不同、熔融程度的相异, 造成玄武质岩浆的 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值有所差异: 当 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb}) < 1.5$ 时为尖晶石地幔源区, $w(\text{Dy})/w(\text{Yb}) > 2.5$ 为石榴子石地幔源区^[3,42]。玄武岩的 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})$ 值介于 1.69~1.76 之间(均值为 1.71), 在 $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})-w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 图解中处于石榴子石二辉橄榄岩熔融趋势线以下, 尖晶石二辉橄榄岩熔融趋势线以上, 部分熔融程度已经接近 20%(图 7b), 显示该区玄武岩可能是亏损尖晶石相橄榄岩向石榴子石相橄榄岩过渡相对较高程度部分熔融的产物。

由于地壳岩石或其熔融体中具很低的 TiO_2 和 Nb、Ta 含量, 因此地壳混染作用会导致岩浆中的 Ti、Nb、Ta 等元素相对亏损, 表明源区可能有地壳物质加入^[43-45]; 幔源玄武质岩浆遭受到大陆地壳物质混染, 岩浆中不相容元素如 Ba 或 La 就会相对于 Nb 显著增高, 从而 $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{La})$ 值较高。研究区玄武岩 $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})=11\sim 21$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Nb})=1.4\sim 2.0$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{La})=5\sim 14$, 远大于原始地幔 ($w(\text{Ba})/w(\text{Nb})\approx 9.00$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Nb})\approx 0.94$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{La})\approx 9.60$) 和 N-MORB ($w(\text{La})/w(\text{Nb})\approx 1.07$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{Nb})\approx 4.30$ 、 $w(\text{Ba})/w(\text{La})\approx$

4.00), 且在微量元素 $w(\text{La})/w(\text{Ba})-w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 图解(图 7c)中, 样品所投区域均显示岩浆来自于受地壳混染的岩石圈地幔, 表明幔源玄武质岩浆在后期上升过程中可能受到一定程度的地壳物质混染, 与之前的主量元素讨论得出的结果相吻合; 由表 1 可知, 研究区火山岩相容元素 Ni ($w(\text{Ni})=127.8\times 10^{-6}\sim 144.32\times 10^{-6}$, 均值 133.05×10^{-6})、Cr ($w(\text{Cr})=159.44\times 10^{-6}\sim 301.48\times 10^{-6}$, 均值 221.08×10^{-6}) 含量分别低于判别原始岩浆的 Ni ($w(\text{Ni})\approx 250.00\times 10^{-6}$) 和 Cr ($w(\text{Cr})\approx 300.00\times 10^{-6}$) 参数值^[46], 与主量元素中 $\text{Mg}^\#$ 值 ($\text{Mg}^\#=62.51\sim 63.91$) 低于判别原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值 ($\text{Mg}^\#\approx 65$) 结果一致, 表明玄武岩岩浆在早期演化过程中可能发生过橄榄石、辉石以及钛氧化物的分离结晶作用。地壳岩石及其熔融体中 Nb、Ta 含量相对较低和很低的 TiO_2 含量, 地壳混染又会致使其在岩浆中含量降低, 从而最后出现明显的 Nb、Ta、Ti 负异常等信息; 样品微量元素原始地幔蛛网图(图 6a)显示, 玄武岩的 Ta、Nb 元素呈现出“U”型槽亏损及 Th 和 Ti 元素的亏损呈现出“V”型谷, 表明在玄武岩岩浆作用过程中, 受到了地壳物质的混染作用, 且没有俯冲流体参与其中^[47]。综上, 玄武岩岩浆可能来源于亏损的软流圈地幔或轻微富集的地幔, 且在演化过程中斜长石没有发生显著的分离结晶或堆晶作用, 在上升过程中混入少量的地壳物质从而导致元素的变化。

(2) 流纹岩成因

流纹岩的成因模式通常认为有两种, 一种是基性端元岩浆结晶分离成因, 一种是地壳物质部分熔

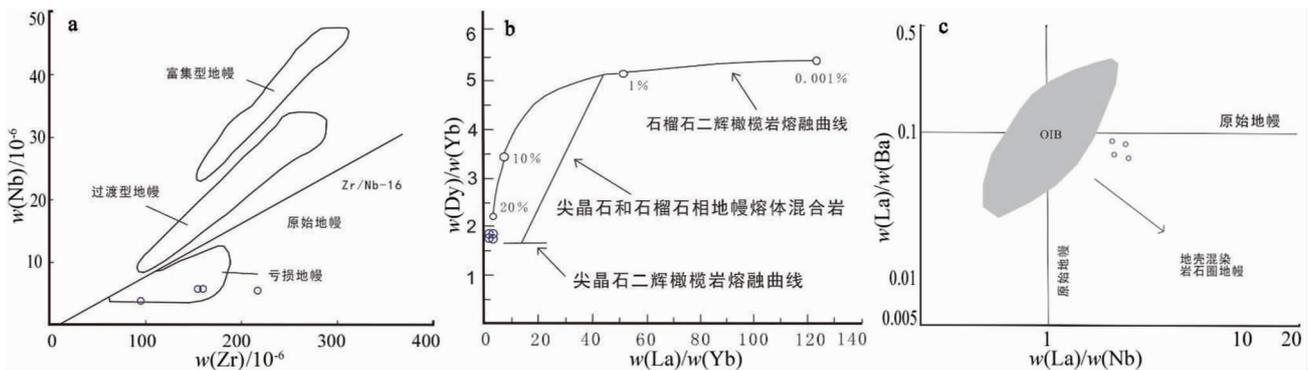


图 7 博格达造山带西段双峰式火山岩玄武岩岩石成因判别图解

Fig. 7 Genetic discrimination diagram of basalt in the bimodal volcanic rock in the west Bogda orogenic belt

a. $w(\text{Nb})-w(\text{Zr})$ 图解; b. $w(\text{Dy})/w(\text{Yb})-w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 图解(底图据 Miller, 1999);

c. $w(\text{La})/w(\text{Ba})-w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 图解(底图据 Miller, 1999)

融成因。基性岩浆结晶分离成因认为玄武岩和流纹岩岩浆皆来自于幔源母岩浆,在分离结晶过程中鲜有陆壳物质加入^[48-49],玄武岩和流纹岩微量元素地球化学特征较为相似^[3,50],且野外玄武岩分布面积较流纹岩大。地壳物质部分熔融成因认为流纹岩岩浆产生于玄武质岩浆底侵作用中的地壳物质部分熔融,在微量元素地球化学特征上二者存在较大的差异。

由前文可知,样品 SiO₂ 含量呈现出基性和酸性两个端元,具有明显的 Daly 成分间断,且 $w(K_2O)/w(P_2O_5)$ 和 $w(K_2O)/w(TiO_2)$ 值表明二者有明显不同的源区性质。流纹岩稀土元素总量明显高于玄武岩稀土元素含量,且 LREE 相对富集,具有强烈的负 Eu 异常,而玄武岩的 Eu 为轻微正异常,流纹岩球粒陨石标准化配分图(图 5b)具有明显的右倾斜率稀土元素配分模式,整体为平坦的配分模式,对比可知玄武岩和流纹岩缺乏直接的成因联系,流纹岩应该来自玄武岩底侵作用致使地壳物质重熔而成。据 Eu 的异常可知岩浆源区存在斜长石残留,暗示当时大陆地壳为拉张减薄过渡型地壳结构特征。考虑到双峰式火山岩形成于裂谷发育中晚期,地壳厚度 < 30 km,厚度减薄,发育断裂有利于岩浆快速上侵,且酸性岩浆极大程度以晶粥体存在^[51],发生分离结晶作用的可能大大降低^[52],甚至都不大可能发生^[53]。由其微量元素 Sr、Eu 等显著亏损及较低的 Al₂O₃ 含量,可知其流纹岩中大量的斜长石应属于源岩部分熔融过程中残留而来,这与野外实

测剖面情况基本一致,符合异源双峰式火山岩分布规律。

4.2 关于双峰式火山岩构造环境

玄武岩样品在 $w(Zr)/w(Y)-w(Zr)$ 图解(图 8a)中,样品均落于板内玄武岩区域,可知其形成于板内环境。高景刚等^[54]将柳树沟组划分到晚石炭世;李江涛等在博格达峰南侧识别出晚石炭世辉长岩,认为处于博格达裂谷火山活动的晚期^[55],此辉长岩所侵入层位为石炭世柳树沟组,与笔者所研究双峰式火山岩为同一区域,同一地层,故而在大地构造活动上有高度一致的同步性,结合本文之前论述可知该辉长岩形成的裂谷环境与本文一致。

流纹岩样品在 $w(Rb)-w(Y+Nb)$ 图解(图 8b)中,均落入板内花岗岩区,与玄武岩图解的板内构造环境相一致。结合林晋炎^[56]对博格达裂谷沉积层序的研究,依据区域地质背景及岩石地球化学特征和构造环境判别图解,可得知博格达造山带西段博格达峰一带在晚石炭世所处的构造环境及演化阶段为大陆裂谷环境。

结合这些年陆续发现的岩浆活动、不同时期的双峰式火山岩及其相关的大地构造资料^[57-72],进一步证实博格达造山带存在与裂谷演化相关的岩浆活动,双峰式火山岩作用在该背景下发生,在博格达地区晚古生代形成的撕裂型大陆裂谷和古亚洲洋顺着克拉麦里碰撞带斜向对准格尔—吐哈地块发生俯冲紧密相关。

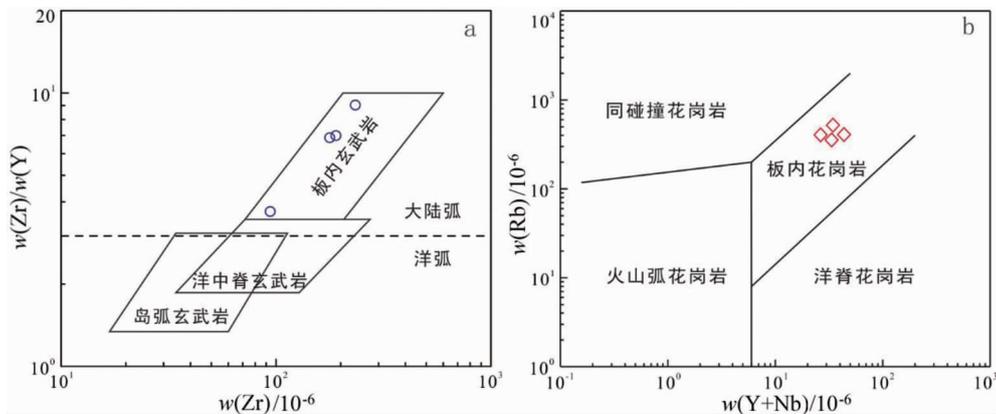


图 8 博格达双峰式火山岩构造环境判别图 $w(Zr)/w(Y)-w(Zr)$

图解(a)、 $w(Rb)-w(Y+Nb)$ 图解(b)

Fig. 8 Geotectonic environment discrimination diagram of the bimodal volcanic rocks

(a) $w(Zr)/w(Y)-w(Zr)$ and (b) $w(Rb)-w(Y+Nb)$

(a 图底据 Pearce 等,1982;b 图底据 Pearce 等,1984)

5 结语

(1)新疆博格达造山带西段博格达峰一带出露的火山岩岩性为玄武岩和流纹岩组合,地球化学成分上由基性和酸性两个端元组成,有非常明显的Daly间断,为典型的双峰式火山岩组合特征,形成于大陆裂谷环境,具有板内成因特征,玄武质火山岩来自亏损地幔部分熔融,流纹质火山岩为玄武质上涌底侵热量致使地壳物质部分熔融而成。

(2)博格达造山带存在与裂谷演化相关的岩浆活动,双峰式火山岩作用则在该背景下发生,晚石炭世时期在博格达地区形成的撕裂型大陆裂谷和古亚洲洋顺着克拉麦里碰撞带斜向对准格尔—吐哈地块发生俯冲紧密相关。

参考文献:

- [1] 王银喜,顾连兴,张遵忠,等. 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[J]. 岩石学报, 2006(5): 1215-1224.
- [2] 王金荣,李泰德,田黎萍,等. 新疆博格达造山带东段晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及其地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1103-1115.
- [3] 汪晓伟,徐学义,马中平,等. 博格达造山带东段芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 553-569.
- [4] Coulon C, Maluski H, Bollinger C, et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamic significance [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 79: 281-302.
- [5] Zhang X H, Zhang H F, Tang Y J, et al. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt [J]. Chemical Geology, 2008, 249: 262-281.
- [6] 陈培荣,孔兴功,王银喜,等. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的Rb-Sr同位素定年及意义[J]. 高校地质学报, 1999(5): 378-383.
- [7] 章邦桐,陈培荣,孔兴功. 赣南临江盆地余田群双峰式火山岩的Rb-Sr年代学研究[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 351-354.
- [8] Pin C, Marini F. 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 [J]. Lithos, 1993, 29: 177-196.
- [9] Donnelly T W, Rogers J J W. Igneous series in island arcs: the northeastern Caribbean compared with world wide island-arc assemblages [J]. Bulletin Volcanologique, 1980, 43: 347-382.
- [10] 李锦轶,王克卓,李文铅,等. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 304-322.
- [11] 孙桂华,李锦轶,朱志新,等. 新疆东部哈尔里克山南麓石炭纪砂岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007(5): 778-789.
- [12] 赖绍聪,张国伟. 勉略结合带五里坝火山岩的地球化学研究及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(1): 43-50.
- [13] Geist D, Howard K A, Larson P. The generation of oceanic rhyolites by crustal fractionation: the basalt-rhyolite association at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago [J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 965-982.
- [14] Duncan A R, Erlank A J, Marsh J S. Regional geochemistry of the Karoo igneous province [J]. Special Publication Geological Society of Africa, 1984, 13: 355-388.
- [15] 李献华,周汉文,李正祥,等. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和Sm-Nd同位素制约及其大地构造意义[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 264-276.
- [16] 马瑞士,舒良树,孙家齐,等. 东天山构造演化与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1997: 1-202.
- [17] 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004(Z2): 903-910.
- [18] Yuan C, Sun M, Wilde S, et al. Post-collisional plutons in the Balikun area, East Chinese Tianshan: Evolving magmatism in response to extension and slab break-off [J]. Lithos, 2010, 119(3-4): 269-288.
- [19] Xie W, Luo Z Y, Xu Y G, et al. Petrogenesis and geochemistry of the Late Carboniferous rear-arc (or back-arc) pillow basaltic lava in the Bogda Mountains, Chinese Northern Tianshan [J]. Lithos, 2016, 244: 30-42.
- [20] Xie W, Xu Y G, Chen Y B, et al. High-alumina basalts from the Bogda Mountains suggest an arc setting for Chinese Northern Tianshan during the Late Carboniferous [J]. Lithos, 2016, 256-257: 165-181.
- [21] Xie W, Xu Y G, Luo Z Y, et al. Petrogenesis and geodynamic implications of the Late Carboniferous felsic volcanics in the Bogda belt, Chinese Northern Tianshan [J]. Gondwana Research, 2016, 39: 165-179.
- [22] 祝近近,颜炜,宋谢炎. 中国北天山博格达隆起带早二叠世垭口双峰式火山岩的成因及地质意义[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报: 1-17[2020-06-30].
- [23] Grove T, Donnell y-Nol an J M. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California: implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series lavas [J]. Contrib Mineral Petrol, 1986, 92: 281-302.
- [24] Brophy J G. Compositional gaps, critical crystallinity, and fractional crystallization in orogenic (calc-alkaline) magmatic systems [J]. Contrib Mineral Petrol, 1991, 109: 173-182.
- [25] Geist D, Howard K A, Larson P. The generation of oceanic rhyolites by crustal fractionation: the basalt-rhyolite association

- tion at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 965-982.
- [26] Doe B R, Leeman W P, Christiansen R L, et al. Lead and Strontium isotopes and related trace elements as genetic tracers in the Upper Cenozoic rhyolite-basalt association of the Yellowstone plateau volcanic field [J]. *J Geophys Res*, 1982, 87: 4785-4806.
- [27] Huppert H E, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [J]. *Petrol*, 1988, 29: 599-624.
- [28] 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征 [J]. *岩石学报*, 2000(2): 169-173.
- [29] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace element in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507-513.
- [30] Winchester J A, R Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [31] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman Press, 1989: 1-464.
- [32] Gualda G A R, Ghiorso M S. Low-pressure origin of high-silica rhyolites and granites [J]. *The Journal of Geology*, 2013, 121(5): 537-545.
- [33] Winchester J A, R Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [34] 解超明. 青藏高原聂荣微陆块构造演化 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [35] Davies G R, Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints [J]. *Petrol*, 1987, 28(6): 1009-1031.
- [36] 郭锋, 范蔚若, 王岳军, 等. 大兴安岭南段晚中生代双峰式火山作用 [J]. *岩石学报*, 2001(1): 161-168.
- [37] Geist D, Howard K A, Larson P. The generation of oceanic rhyolites by crustal fractionation: the basalt-rhyolite association at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 965-982.
- [38] 邱家骧, 林景任. *岩石化学* [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [39] 李昌年. *火成岩微量元素岩石学* [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [40] 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 等. 新疆博格达造山带东段晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及其地球化学证据 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1103-1115.
- [41] 龙登红, 王思成, 郝贺超, 等. 新疆博格达中段木垒地区七角井组火山岩地球化学特征及构造意义 [J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 13-23.
- [42] Miller C, Schuster R, Klötzli U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40: 1399-1424.
- [43] Rolinson H R. *Suing geochemical date: Evolution, presentation, interpretation* [M]. Singapore Longman Singapore Publishers, 1993, 160-170.
- [44] Rudnick R L, Land F D M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective [J]. *Reviews in Geophysics*, 1995, 33: 267-309.
- [45] Caroline J, Stefan J, Edgar H, et al. Petrogenesis of Tertiary mafic alkaline magmas in the Hoheifel Germany [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(8): 1637-1667.
- [46] Wendlandt R F, Altherr R, Neumann E R, et al. *Petrology, geochemistry, isotopes* [C] // Olsen K H (ed.). *Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics*, Amsterdam: Elsevier, 1995: 47-60.
- [47] 刘亮, 何学锋, 李江涛, 等. 新疆东部哈尔里克造山带沁城天生圈岩体岩石成因及其构造意义 [J]. *地质科技情报*, 2017, 36(2): 86-96.
- [48] Grove T L, Donnelly-Nolan J M. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California: implications for the origin of compositional gaps in calc-alkaline series lavas [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 281-302.
- [49] Davies G R, Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace element and Sr-Nd-Pb isotope constraints [J]. *Petrol*, 1987, 28(6): 1009-1031.
- [50] Brouxel M, Lapierre H, Michard A, et al. The deep layers of a Paleozoic arc: geochemistry of the Copley-Blaklala series, northern California [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 85: 386-400.
- [51] Pitcher W S. *The nature and origin of granite*, 2nd edition [J]. London: Chapman and Hall, 1997: 386.
- [52] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 2007(6): 1217-1238.
- [53] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. *埃迪克岩和花岗岩: 挑战与机遇* [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [54] 高景刚, 李文渊, 刘建朝, 等. 新疆博格达东缘色皮口地区晚石炭世裂谷火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(12): 3539-3552.
- [55] 李江涛, 何学锋, 杨鹏涛, 等. 新疆东天山博格达造山带西段基性侵入岩的 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义 [J]. *地质科技情报*, 2018, 37(1): 96-107.
- [56] 林晋炎. 博格达裂谷的沉积-构造兼论新疆北部统一陆内盆地的形成和演化 [D]. 西安: 西北大学, 1993.
- [57] 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化与找油领域 [J]. *新疆地质*, 1986(3): 1-19.
- [58] 方国庆. 博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据 [J]. *沉积学报*, 1993(3): 31-36.
- [59] Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Jungar Basin [J]. *Science in China: Series D*, 1999, 42(2): 113-119.

- [60] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 博格达陆内碰撞造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动[J]. 岩石学报, 2001(2): 187-198.
- [61] Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia; Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21 (1): 87-110.
- [62] Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia [J]. *American Journal of Science*, 2004, 304(4): 370-395.
- [63] 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 等. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 304-322.
- [64] 张传恒, 刘典波, 张传林, 等. 新疆博格达山初始隆升时间的地层学标定[J]. 地学前缘, 2005(1): 294-302.
- [65] 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(1): 148-168.
- [66] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 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[J]. 岩石学报, 2006(5): 1215-1224.
- [67] 孙桂华, 李锦轶, 朱志新, 等. 新疆东部哈尔里克山南麓石炭纪砂岩碎屑锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007(5): 778-789.
- [68] 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 等. 新疆博格达造山带东段晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及其地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1103-1115.
- [69] 张小连, 吴昌志, 黄建华, 等. 东天山黄山岩体的侵位时代及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2012, 31(1): 22-26.
- [70] 马星华, 陈斌, 王超, 等. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自新疆哈尔里克侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 89-104.
- [71] 刘亮, 何学锋, 李江涛, 等. 新疆东部哈尔里克造山带沁城天生圈岩体岩石成因及其构造意义[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 86-96.
- [72] 李江涛, 何学锋, 刘亮, 等. 新疆东天山哈尔里克奥陶纪的构造属性: 来自火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学与地球化学的制约[J]. 现代地质, 2017, 31(3): 460-473.

Geochemical characteristics and genesis of the Carboniferous bimodal volcanic rocks in the west Bogda orogenic belt, Xinjiang Autonomous Region

ZHANG Zhenkun¹, SUN Jiandong², JIANG Hui³, LU Fan⁴,
YUE Jizong¹, WU Shouzhi¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China;

2. Nanjing Center of China Geological Survey, Nanjing 210016, China;

3. Sichuan Northwest Geological Team Sichuan, Mianyang 621051, Sichuan, China;

4. Jiangxi Provincial Nuclear Industry Bureau 265 Brigade, Yingtan 335001, Jiangxi, China)

Abstract: A large number of bimodal volcanic assemblages occur in the Liushugou Formation on the southern side of the Bogda Peak of the Bogda Orogenic Belt. Basalt is depleted in K and rich in Na, Ti, Al and Mg with lower values of $w(K_2O)/w(Ti_2O)$ and $w(K_2O)/w(P_2O_5)$ and limited range. Generally the basalt is slightly contaminated by crustal materials with relative HREE enrichment and without HREE and LREE fractionation. The basaltic magma may originate from partial melting of the depleted mantle. Rhyolite is rich in K, but poor in Na, low in Ti, Mg. Differing from the basalt the rhyolite is higher in REE with obvious HREE and LREE fractionation and a right slope distribution model and stronger negative Eu anomaly ($\delta Eu = 0.17 - 0.20$). The rhyolite may be formed by the remelting of crustal material. Comprehensive analysis shows that the Bogda area was under continental rift environment in Late Carboniferous Epoch and the rock assemblage is closely related to the subduction of the Paleo-Asian Ocean beneath the Junggar-Taha block along the Clamary collision zone.

Key Words: Bogda orogenic belt; Liushugou Formation; bimodal volcanic rock; continental rift; Xinjiang Autonomous Region