东天山博格达造山带东段七角井组枕状玄武岩地球 化学特征及构造背景探讨

孙吉明¹⁾, 白建科¹⁾, 朱小辉¹⁾, 牛峥²⁾, 马中平¹⁾

1) 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,西安地质矿产研究所,西安,710054;
 2) 陕西省地质矿产勘查开发局第二综合物探大队,西安,710016

内容提要:东天山博格达东段下涝坝南部地区七角井组枕状玄武岩地球化学特征表明,玄武岩属于亚碱性拉 斑玄武岩系列,具有轻稀土轻微富集的特征((La/Yb)_N介于1.89~2.21之间)及弱的Eu负异常(*d*Eu=0.89~ 0.96),并且显示出岛弧火山岩的Nb-Ta-Ti负异常特征。微量元素中除活动性较强的元素(Cs、Rb、Ba)其余元素均 为N-MORB的1~2倍,接近下地壳的含量。(La/Nb)_N介于1.82~2.62之间,远远大于1,暗示了该地区的火山 岩在上升过程中可能遭受了地壳的混染。Zr含量大于142×10⁻⁶、Zr/Y值大于4,也显示了板内玄武岩的特征。 在多种环境判别图解中均落入大洋岛弧边缘,靠近IAT和MORB或板内构造环境区域内,显示了同时具有IAT 和MORB的特征,结合研究区内的早石炭世地层的沉积构造环境,笔者认为博格达东段下涝坝南部地区在早石炭 世期间处于一种伸展(弧后拉张)的构造环境。

关键词:博格达地区;枕状玄武岩;地球化学特征;沉积构造特征;构造环境

博格达造山带位于东天山北部,夹持于准噶尔 地块和吐哈地块之间,东邻卡拉麦里蛇绿岩带,西止 巴音沟-达坂城蛇绿岩。康古尔塔格-黄山深断裂与 卡拉麦里蛇绿岩带是东天山地区板块接触和(或)洋 壳消亡残留的最重要的两条构造带(Li Jinvi et al., 1995,2004; Zhou Jiyuan et al., 2001; Zhang Qi et al., 2003; Xiao W J et al., 2004; Li Wengian et al., 2005; Wang Bangyao et al., 2009; Zhao Hengle et al., 2012; Fang Aimin et al., 2015), 而吐哈盆地 北缘广泛分布的博格达一哈尔里克泥盆纪一石炭纪 火山岩被公认是对古亚洲洋俯冲消亡岩浆事件的响 应,它们所处的大地构造位置对研究天山的构造格 架及地质演化具有重要意义。经过近几年对东天山 地区晚古生代的研究,在哈尔里克泥盆纪火山岩的 成因方面已初步达成共识,但在博格达造山带的地 球动力学机制是属于俯冲侧向撕裂(Gu Lianxing et al., 2001; Lei Wanshan et al., 2016), 弧后拉张(Li Jinyi et al., 2004; Tian Liping et al., 2010)还是与 地幔柱有关的大火成岩省事件(Xia Linqi et al., 2004,2007a);博格达石炭纪的构造属性是裂谷(He Guogi et al., 1994; Gu Lianxing et al., 2000, 2001; Wang Yinxi et al., 2005, 2006; Wang Jinrong et al., 2010; Tian Liping et al., 2010), 岛弧(Fang Guoqing et al.,,1993; Ma Ruishi et al.,1997),还是弧后盆地(L Jinyi et al., 2004; Sun Guihua et al., 2005); 博格 达一哈尔里克晚古生代岩浆活动是北部卡拉麦里俯 冲带,南部康古尔塔格俯冲带,还是这两个缝合带板 块活动的共同产物;进而引出北天山洋的俯冲极性 是向南俯冲(Gu Lianxing et al., 2001; Li Yuan et al., 2011),向北俯冲(Xu Xueyi et al., 2014)还是 双向俯冲(Li Jinyi et al., 2002; Zuo Guochao et al.,2006)等问题上仍存在较大分歧。因此对东天 山博格达地区地区火山岩的成因、年代学及其所属 的构造背景研究对进一步理解天山造山带古生代的 构造演化具有重要意义。本文通过对博格达地区石 炭纪七角井组枕状火山岩进行岩石成因、地层沉积 特征和构造属性研究,为恢复和理解东天山博格达 一带晚古生代构造演化提供了重要依据。

注:本文为国家自然科学青年基金项目(编号 41502061、41402051)、中国地质调查局基础性公益性地质矿产调查项目(编号 DD20160009) 资助成果。

收稿日期:2016-06-29;改回日期:2017-01-24;责任编辑:周健。

作者简介:孙吉明,男,1981年生。硕士,助理研究员,主要从事岩石地球化学研究。通讯地址:710054,西安市友谊东路 438号;Email: sjiming@163.com。

1 地质概况及样品特征

研究区位于博格达造山带东段北部,北临准噶 尔盆地,南隔吐哈盆地和觉罗塔格石炭纪火山岩带 相邻,东以红柳峡-苏吉断裂与克拉麦里-莫钦乌拉 晚古生代蛇绿岩相接,是三个主要大地构造单元交 汇的部位(Ma Ruishi et al., 1997)。区域内出露的 主要地层为石炭系七角井组和柳树沟组,七角井组 主要分布于博格达造山带东部的七角井—高泉地 区,位于研究区克孜库都克一带的北侧;柳树沟组分 布于研究区西北部,与七角井组主要呈断层接触关 系。本次工作选取博格达造山带东段下涝坝东南部 地区早石炭世七角井组枕状玄武岩为研究对象(图 1)。七角井组由火山熔岩、酸性火山碎屑岩及沉积 碎屑岩组成,其岩性主要为灰绿色(枕状)玄武岩(图 2)、薄层状粉砂岩、砂岩、凝灰质砂岩、晶屑凝灰岩、 岩屑晶屑凝灰岩,另有少量流纹岩。

玄武岩呈灰绿色,隐晶质结构,块状构造,枕状 产出,与下伏地层凝灰质硅化细砂岩呈断层接触(图 2、图 3),采样位置:N43°42′08.89″,E91°44′58″,海 拔 1553m(图 3)。主要由长石、角闪石斑晶和基质 组成。长石斑晶呈自形一半自形长柱状,以斜长石 为主,角闪石斑晶呈半自形一他形长条一长针状分 布;斑晶总体含量约 15%。基质隐晶质或微细粒结 构充填在长石斑晶之间,主要为长石和暗色矿物。 玄武岩基质约占 85%,发育典型间隐-间粒结构,斜 长石微晶为针柱状呈杂乱排列,形成的三角空隙中 充填有若干暗色矿物或(和)磁铁矿细小颗粒,反映 其在冷却速度较慢的情况下形成的。(图 2)。长石 蚀变较弱至无蚀变(图 2)。

2 地球化学特征

2.1 测试方法

主元素分析方法为 X 荧光光谱分析(XRF) (TFe₂O₃与 FeO 为实测值, Fe₂O₃为计算值, 利用 XRF 测定出 TFe₂O₃、化学滴定法测定出 FeO 结 果、Fe₂O₃ = TFe₂O₃ - 1.1113FeO)。使用的仪器是 荷兰帕纳科公司 Axios 4.0kw 波长色散 X 射线荧 光光谱仪, 精密度: RSD \leq 0.134, 稳定性: RMS Rel (%) \leq 0.050。稀土微量元素分析采用 Thermo



图 1 研究区地质略图(据崔方磊等,2015)

Fig. 1 Geological sketch map of the research area (after Cui Fanglei et al., 2015)

1一大南湖组;2一康古尔塔格组;3一七角井组;4一黑山头组;5一姜巴斯套组;6一阿什喀腊组;7一奥尔吐组;8一柳树沟组;

9—石人子沟组;10—三塘湖组;11—全新统冲洪积物;12—二辉橄榄岩;13—辉长岩;14—二长花岗岩;15—正长花岗岩;16—采样位置
1—Dananhu Formation; 2—Kangguertage Formation; 3—Qijiaojing Formation; 4—Heishantou Formation; 5—Jiangbasitao Formation;
6—Ashikala Formation; 7—Aoertu Formation; 8—Liushugou Formation; 9—Shirenzigou Formation; 10—Santanghu Formation;
11—Holocene alluvial; 12—iherzolite; 13—gabbro; 14—monzogranite; 15—syenogranite; 16—sample location



图 2 博格达七角井组枕状玄武岩地质特征及显微照片 Fig. 2 The micro photoshop and geological characteristics of the pillow basalts of Qijiaojing Formation, Bogda (a)-枕状玄武岩与砂岩;(b)-砂岩; (c、d)- 枕状玄武岩显微照片 50×和10×

(a)—The pillow basalts and sandstones; (b)—the sandstones; (c, d)— the micro photoshop of the pillow basalts, $50 \times$ and $10 \times$





Fig. 3 The section of the pillow basalts of Qijiaojing Formation, Bogda Fisher 公司产 X-SeriesII 型电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS)测定,检测限优于 5×10⁻⁹,相对标准偏 差优于 5%。测试单位为西安地质矿产研究所实验 测试中心。

2.2 测试结果

样品的主量、微量及稀土元素测试结果见表 1, 表中数据显示样品的 SiO₂ 含量在 46.94% ~ 49.45%之间,属玄武岩范畴。由于 K 和 Na 是活泼 元素,它们的浓度在次生蚀变中可能会发生改变,因 此,我们采用 Winchester 和 Floyd(1977)建立的 SiO₂-Nb/Y 图解(图 4)和 Miyashiro(1975)建立的 FeO_T/MgO-SiO₂图解(图 4)来划分岩石类型和岩浆 系列;在分类图解中样品均属于亚碱性拉斑玄武岩 系列(图 4)。玄武岩 TiO₂含量介于 1.97%~ 2.10%之间,FeOT含量在9.26%~10.45%之间, CaO含量介于 8.43%~10.73%之间,K2O含量较 低,在 0.15%~0.53%之间,变化不大, Na₂O 含量 较 K₂O 高,为 2.52%~2.93%,较稳定;所有样品 的 K₂O < Na₂O,全碱含量 2.69%~3.36%。MgO 含量为 6.39%~7.49%, Mg[#] 较低, 为 53.04~ 56.09,显示出演化型岩浆的特征。

样品稀土元素总量(∑REE)在 91.12×10⁻⁶~ 107.68×10⁻⁶之间,并且各样品的元素变化趋势具 有一致性,暗示了它们可能为同源岩浆演化的产物。 经过球粒陨石标准化后,稀土配分模式如图所示(图 5),显示区内火山岩具有一致的配分特征,均为轻稀 土轻微富集和重稀土亏损的右倾模式(图 5),(La/ Yb)_N介于 1.89~2.21 之间。在 N-MORB 标准化 图中轻稀土含量为 N-MORB 的 2~5 倍,重稀土的 含量非常接近 N-MORB 的含量,略高于 N-MORB





 $\label{eq:Fig.4} Fig. 4 \quad The ~SiO_2-Nb/Y~diagram~(after Winchester \& Floyd,1977)~and~SiO_2-FeO_T/MgO~(after Miyashiro,1975)~diagram of the Pillow basalts of Qijiaojing Formation, Bogda$

5	ົ	2
υ	2	о.

样品编号	13BD-19h	13BD-20h	13BD-21h	13BD-22h	14HM-05(1)h	14HM-05(2)h	14HM-05(3)h	14HM-05(4)h
SiO ₂	47.28	49.45	48.29	47.92	47.07	49.26	46.94	47.26
TiO_2	2.10	1.97	2.07	2.04	2.04	1.99	2.00	2.02
Al_2O_3	16.72	15.76	16.30	15.75	16.22	15.87	16.10	16.20
Fe_2O_3	1.33	1.65	1.47	1.52	1.71	1.82	2.44	2.01
FeO	9.09	7.99	8.95	9.08	8.52	7.62	8.20	8.36
FeOT	10.29	9.47	10.27	10.45	10.06	9.26	10.40	10.17
MnO	0.18	0.19	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.18
MaO	6.52	6.50	7.09	7 49	7 03	6.39	7 02	6 81
C ₂ O	10.04	10.26	8 13	8 46	10.72	10.64	10.61	10 73
K O	10.04	0.15	0.43	0.40	0.12	0.19	0.17	0.17
K_2O	0.24	0.15	0.00	0.60	0.10	0.10	0.17	0.17
	2.88	2.93	2.75	2.76	2.03	2.76	2.02	2.64
P_2O_5	0.36	0.34	0.32	0.32	0.36	0.34	0.34	0.35
LOI	3.21	2.80	3.59	3.88	3.36	2.87	3.39	3.18
Tol	99.95	99.99	99.97	99.99	99.92	99.91	99.91	99.91
Mg #	53.04	55.01	55.15	56.09	55.47	55.16	54.61	54.41
La	12.00	11.40	11.30	9.82	9.61	10.00	9.88	9.24
Ce	31.80	29.70	30.40	26.60	25.80	27.30	27.20	26.30
Pr	4.82	4.46	4.77	4.26	4.13	4.29	4.27	4.22
Nd	23.20	21.20	22.60	20.00	20.40	21.10	21.00	20.90
Sm	6.51	5.91	6.53	5.80	5.67	5.67	5.72	5.54
Eu	2.09	1.96	2.16	1.82	1.80	1.77	1.82	1.79
Gd	7.26	6.78	7.26	6.80	6.61	6.56	6.50	6.51
Tb	1.21	1.11	1.21	1.05	1.03	1.06	1.03	1.05
Dy	7.52	6.76	7.42	6.73	6.52	6.52	6.42	6.40
Ho	1.54	1.38	1.46	1.32	1.36	1.34	1.32	1.32
Er	4.22	3.78	4.15	3.82	3.68	3.65	3.62	3.52
Tm	0.66	0.57	0.64	0.56	0.54	0.54	0.54	0.52
Yh	4, 23	3. 70	4. 08	3.72	3. 45	3. 45	3.42	3. 34
Lu	0.62	0.57	0.60	0.54	0.52	0.52	0.50	0.50
K	2058 60	1280 67	4563.05	5180 23	1494 23	1494 23	1411 22	1411 22
D	1624 80	1527 42	1440 66	1452 72	1570.08	1492 70	1492 70	1527 24
T Ti	12024.60	19161 75	12226 40	19725 41	19297 76	11022 06	11082 00	1927.34
11 V	13024.00	12101.75	12000.49	12735.41	12227.70	11928.00	11988.00	12107.00
r C	35.80	32.20	35.30	55.60	28.70	30.80	29.00	28.20
Cu	66.80	65.60	59.50	56.40	75.50	72.60	74.20	77.50
Pb	2.05	2.80	1.84	3.12	13.30	1.30	0.76	0.47
Zn	96.90	98.60	98.10	104.00	126.00	94.20	90.40	96.40
Cr	210.00	189.00	156.00	149.00	201.00	200.00	200.00	192.00
Ni	77.00	70.60	81.60	67.00	75.90	71.90	74.00	74.70
Co	42.10	41.60	41.30	36.80	43.00	38.90	44.60	41.80
Li	10.20	8.68	17.80	16.40	8.78	7.43	8.54	8.21
Rb	5.50	3.08	8.19	8.70	9.38	4.17	3.66	3.20
Cs	0.65	0.48	1.14	1.70	0.91	0.66	0.77	0.57
Mo	0.96	0.60	0.93	0.46	0.58	0.49	0.56	0.56
Sr	335.00	307.00	276.00	283.00	334.00	339.00	316.00	338.00
Ba	129.00	82.50	151.00	140.00	73.60	83.30	73.70	75.70
V	322.00	295.00	268.00	240.00	346.00	332.00	332.00	341.00
Sc	39.20	35.20	31.90	28.50	17.50	30.00	22.80	14.80
Nb	5.28	4.67	4.47	4.05	5.49	5.31	5.24	5.24
Та	0.42	0.36	0.36	0.30	0.42	0.42	0.40	0.40
Zr	159.00	142.00	174.00	163.00	162.00	156.00	156.00	157.00
Hf	4.32	3.87	4.69	4.06	4.36	4.15	4.24	4.25
Ga	20.20	18.00	19.10	18.50	19.90	19.20	19.40	19.20
U	0.30	0.25	0.32	0.28	0.22	0.24	0.24	0.19
Th	0.77	0.63	0.81	0.68	0.37	0.52	0.50	0.31
\sum REE	107.68	99.28	104.58	92.84	91.12	93.77	93.24	91.15
(La/Yb) _N	2.03	2.21	1.99	1.89	2.00	2.08	2.07	1.98
(Nb/La) _N	0.42	0.39	0.38	0.40	0.55	0.51	0.51	0.55
La/Ba	0.09	0.14	0.07	0.07	0.13	0.12	0.13	0.12
Th/Ce	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01
Zr/Y	4.44	4.41	4.93	4.85	5.64	5.06	5.29	5.57
δEu	0.93	0.95	0.96	0.89	0.90	0.89	0.91	0.91



图 5 博格达七角井组玄武岩稀土元素球粒陨石标准化及微量元素原始地幔标准化配分图 (球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram and primitive mantle-normalized trace elements diagram of the Pillow basalts of Qijiaojing Formation, Bogda (chondrite-normalized and primitive mantle-normalized according as Sun and McDonough, 1989)

的重稀土含量(图略)。而在下地壳标准化图中则显 示出轻稀土含量很接近下地壳的值。∂Eu在0.89 ~0.96之间,具有轻微的Eu负异常,显示了在岩浆 演化过程中发生了一定的斜长石分离结晶作用。

微量蛛网图元素中,研究区的火山岩样品元素 分布模式较平缓(除 Cs 以外),总体在原始地幔的 10 倍左右,具有较轻的 Nb、Ta、Ti 负异常特征(图 5),这些特征类似形成于俯冲带火山岩的地球化学 特征(McCulloch et al.,1991; Innocenti et al., 2005)。在 N-MORB 与上地壳蛛网图中(图略),除 活动性较强的元素(Cs、Rb、Ba)外,其余元素均为 N-MORB 的 1~2 倍,远远低于上地壳的含量。与 下地壳相比,元素的含量最为接近下地壳的含量。与 下地壳相比,元素的含量最为接近下地壳的含量。 原始地幔标准化的(La/Nb)_N介于 1.82~2.62 之 间,远远大于 1,暗示了该地区的火山岩可能遭受了 地壳的混染。Zr 含量大于 142×10⁻⁶、Zr/Y 大于 4,显示了板内玄武岩的特征。

3 讨论

3.1 地壳混染讨论

讨论岩浆源区以及形成大地构造环境的前提是 要区分哪些化学成分(变化)特征是岩浆固有的,哪 些是后期外来物质影响所致。实验岩石学和原子组 成分析认为 Nb、Zr、Y 被公认为强不相容元素(Zr 在晚期演化中有显著的相容性),在岩浆演化早期不 会生成独立矿物而总以自由元素存在于残余岩浆 中,因此它们含量的差异可以反映岩浆成分的变化 而不受结晶分异作用的影响;同时,地壳岩石和地壳 岩石的 部分 熔融体 通常具有 很低的 TiO₂含量 (Wilson, 1989)和较低的 Nb、Ta 含量(Thompson et al., 1984),从而地壳混染作用会使得软流圈源 大陆板内玄武岩的原始 Ti、Nb、Ta 含量下降,因此, 大陆伸展环境下源自于陆下富集地幔部分熔融作用 形成的火成岩,在受到了较为强烈的地壳混染作用 后,也能表现为出高场强元素 Nb、Ta、Ti 负异常等 岛弧火山岩的特征(Wilson, 1989;Xia Linqi et al., 2007a,2007b)。这种混染作用导致 Ti、Nb、Ta 等元 素的浓度降低,其成分的投影位置就会向着这些图 解中 Ti、Nb、Ta 含量降低的方向(岛弧玄武岩)发生 迁移,因此我们利用稀土元素和高场强元素讨论同 化混染是比较可靠的。

研究表明,地壳物质通常具有高 La/Nb、高 Ba/ Nb 和低 La/Ba 值(Weaver and Tarney, 1984; Wedepohl,1995),如果幔源玄武质岩浆遭受到大陆 地壳物质的混染,会增加SiO₂、K₂O、Rb、Ba、Zr、Th 等氧化物或元素的丰度,同时会升高 La/Nb、K/P、 Zr/Nb 和⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 比值,降低 Ti/Yb、Ce/Pb 比值 和 Sr 丰度(Barker et al., 1997; McDonald et al., 2001),岩浆中的不相容元素如 La 或 Ba 就会相对 于 Nb 明显增高,从而具有低的 Nb/La、低 La/Ba 值。本文枕状玄武岩样品 Nb_N/La_N=0.38~0.55, 远小于 1, La/Ba 比值低(0.07~0.14)。同时, Th/ Ce 比值可以很好地识别俯冲板片中沉积物组分对 俯冲带岩浆的贡献率(You C F et al., 1996),因为 洋底沉积物中高度富集 Th, 而 Ce 在热液中的活动 性比 Th 强。本文火山岩的 Th/Ce 介于 0.01~ 0.02 之间,在 Sr/Th-Th/Ce 图解中明显偏离大陆 地壳而落在 MORB 的区域内(图 6c)。有鉴于此,



图 6 博格达七角井组枕状玄武岩构造环境判别图解(a 据 Wood,1980;b 据 Pearce et al., 1995; c 据 Kerr et al., 1997;d 据 Pearce and Cann,1973)

Fig. 6 The tectonic setting discrimination diagram of the pillow basalt of Qijiaojing Formation, Bogda (a after Wood, 1980; b after Pearce et al., 1995; c after Kerr et al., 1997; d after Pearce and Cann, 1973)
(a):A-亏损型洋中脊玄武岩;B-富集型洋中脊玄武岩和板内玄武岩;C-板内玄武岩;D-火山弧玄武岩;
(b):SHO-岛弧橄榄玄粗岩系列;ICA-岛弧钙碱性系列;IAT-岛弧拉斑系列;WPB-板内玄武岩;MORB-大洋中脊玄武岩;
TH-拉斑玄武岩;TR-过渡性玄武岩;ALK-碱性玄武岩

(a); A—Depleted mid ocean ridge basalt; B—enrichment type mid ocean ridge basalt and within plate basalt; C—within plate basalt;
 D—volcanic arc basalt; (b): SHO—island arc shoshonite series; ICA—island arc calc-alkaline series; IAT—island arc tholeiite series;
 WPB—within plate basalt; MORB—mid ocean ridge basalt; TH—tholeiite series; TR—transitional basalt; ALK—alkali basalt

本文认为该地区枕状玄武岩岩浆在形成及上升过程 中受到了轻微的地壳混染影响,但俯冲沉积物的同 化混染影响十分微弱。

研究区枕状玄武岩 Mg[#] 较低,为 53.04 ~ 56.09,低于原始岩浆 Mg[#] = 68~75(Frey,1978), 以及 Eu 负异常都说明该套火山岩是轻度演化岩浆 的产物。同时,从表 1 中可看出,样品的 MgO 含量 均低于 8%,Ni 和 Cr 等幔源特征元素平均含量分别 为 74.09×10⁻⁶和 187.13×10⁻⁶,低于原生岩浆(Ni =250×10⁻⁶,Cr=300×10⁻⁶),这也表明岩浆经历 了一定程度的结晶分异作用。在哈克图解中, MgO、FeO_T、TiO₂、Cr 和 Ni 与 SiO₂的相关关系趋 势十分相似,均呈现为一定的折线型负相关(图略), 说明在岩浆演化的早期阶段,以 Fe、Mg、Ti、Cr 和 Ni为主要载体矿物的钛铁氧化物(如橄榄石和斜方 辉石)可能是最主要的分离相之一。

3.2 形成环境

众所周知,多种微量(稀土)元素组合特征要比 单一元素稳定得多,大多数火成岩即使经历了热液 蚀变甚至静力变质作用,其稀土配分模式不会发生 改变(Hanson,1980;Ganzeyev et al.,1984),而不 同构造环境中形成的玄武岩具有不同的微量元素特 征,这主要是受源区成分控制(Wilson,1989; Forster et al.,1997),故可根据其特点来判断岩浆 起源和构造环境。本文样品呈现明显一致的弱的轻 稀土富集重稀土亏损(图 5),较低的稀土总量以及 大离子亲石元素的富集,这都是典型的岛弧玄武岩 特征,但是,样品在 N-MORB 标准化图中与 N- MORB 的重稀土、微量元素的含量极为接近,同时, 样品 Zr 平均值为 158×10⁻⁶(大于 142×10⁻⁶)、Zr/ Y大于4,远大于岛弧火山岩的 Zr 丰度而类似于板 内玄武岩,显示了板内玄武岩的成分特征(Hf/Th< 8,Condie,1989)。前文已说明该火山岩收到了轻微 的地壳同化混染作用,因此样品中的 Nb、Ta、Ti 负 异常应该是受地壳混染所致,在使用含有 Nb、Ta、 Ti 元素的图解中会使样品发生一定的偏移,因此, 样品在 Th/Yb-Ta/Yb 环境判别图解中(图 6b),有 三个样品位于大洋岛弧拉斑玄武岩区域边缘靠近 MORB 区域,其余5个样品均落入 MORB 环境区 域,同样在 Th-Hf-Nb 环境判别图解中(图 6a)四个 样品落入了大洋岛弧边缘偏向亏损型 MORB,四个 样品落入亏损型 MORB 的构造环境中。但在 Zr-Zr/Y判别图解中(图 6d),样品均投入到板内玄武 岩的构造环境区域内。这说明该套玄武岩可能形成 于一种伸展(弧后盆地)的构造环境,同是兼有 IAT 和 N-MORB 的特征(图 6)。张旗等(2001)将蛇绿 岩中基性火山岩的地球化学类型归结为岛弧拉斑玄 武岩(IAT)和洋脊玄武岩(MORB)两种,认为产于 消减带之上的岛弧和弧前环境蛇绿岩中基性熔岩具 IAT 特征,产于不成熟弧后盆地蛇绿岩的基性熔岩 兼具 IAT 和 MORB 的特征,产于成熟弧后盆地蛇 绿岩的玄武岩为 MORB 特征。本文玄武岩与不成 熟弧后盆地蛇绿岩的基性熔岩类似,因此推测研究 区内的枕状玄武岩可能与俯冲带中的局部拉伸作用 有关。

3.3 构造背景讨论

笔者通过对博格达东段研究区北地区早石炭世 沉积地层进行地质调查发现,主要岩性为砾岩、含砾 粗砂岩、粗砂岩、细砂岩、泥岩夹有安山岩及凝灰岩。 砾岩呈透镜状分布,其中发育有大量的板状斜层理 (图 7),属于河流相沉积特征;见有砂岩透镜体,透 镜体中发育斜层理,见有底冲刷面沉积特征;泥岩中 见有砂岩透镜体;总体上处于一种陆相-沙坝相的沉 积特征,并且地层中夹有安山岩及凝灰岩整合于地 层之中,说明这段时间内有较强的火山活动。因此, 我们推测该地区在早石炭世期间处于陆相-沙坝相 的环境并伴有较强的火山活动。

而在下涝坝南部(研究区位置)早石炭世七角井 组沉积岩主要岩性为黄绿色厚层粗砂岩夹薄层细砂 岩、粗砂岩、黄绿色泥岩夹中一细粒砂岩和黄绿色泥 岩(图 8)。黄绿色厚层粗砂岩夹薄层细砂岩中发育 有底冲刷面和斜层理沉积构造特征(图 8),属于滨- 浅海相;粗砂岩中见有少量的钙质结核,发育滑塌构 造沉积特征(图 8),黄绿色泥岩夹中一细粒砂岩中 发育有较好的交错层理,整体上属于斜坡相的沉积 环境;黄绿色泥岩中水平层理比较发育,为陆棚相的 沉积环境。因此,下涝坝南部(研究区位置)早石炭



图 7 新疆巴里坤下涝坝北部早石炭世沉积特征及分段柱状图 Fig. 7 The sedimentary characteristics and stratigraphic column of early Carbonferous in northern Xialaoba of Balikun, Xinjing

世期间沉积环境为滨-浅海相一斜坡相一陆棚相,处 于一种水体逐渐加深的过程。结合北侧地区的沉积 特征我们认为博格达东段在早石炭世期间处于一种 伸展的构造环境。这个过程与我们地球化学数据分 析的结果相吻合。

4 结论

(1)博格达早石炭世七角井组枕状玄武岩在上 升过程中经历了早期的以Fe、Mg、Ti、Cr和Ni为主 要载体矿物的钛铁氧化物(如橄榄石和斜方辉石)分 离相,其地球化学特征显示岩浆在上升过程中遭受 了轻微的地壳混染。

(2)博格达东段下涝坝南部地区火山岩主、微量、稀土元素地球化学数据显示出兼有 IAT 和 N-MORB 的特征,与不成熟弧后盆地蛇绿岩的基性熔 岩类似,在构造环境图解中也显示出具有 IAT 和 N-MORB 的特征。结合该地区中早石炭世沉积地 层的沉积构造特征,我们认为在早石炭世期间,博格 达东段下涝坝南部地区处于一种伸展(弧后拉张)的 构造环境。



图 8 新疆下涝坝南部(研究区位置)早石炭世七角井组柱状图 Fig. 8 The stratigraphic column of Qijiaojing Formation of Carbonferous in southern Xialaoba, Xinjiang

References

- Barker J A, Menzies M A, Thirlwall M F, Macpherson C G. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a Yenmen: Implication and polybaric melt hybridization. Journal of Petrology, 38:1359~1390.
- Condie K S. 1989. Geochemical changes in basalts and andesitesthe Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance. Lithos, 23:1~18.
- Cui Fanglei, Wang Xiaowei, Ma Zhongping, Sun Jiming, Zhu Xiaohui. 2015. Confirmaion of genesis of Devonian volcanic rocks in the Bogda and Harlik areas and its tectonic implication. Geology and Exploration, 51(3):519~533 (in Chinese with English abstract).
- Fang Aimin, Wang Shigang, Zhang Junmin, Zang Mei, Fang Jiahu, Hu Jianmin. 2015. The U-Pb ages of zircons from the gabbro in the Kalamaili ophiolite, North Xinjiang and its tectonic significances. Chinese Journal of Geology, 50(1): 140~154 (in

Chinese with English abstract).

- Fang Guoqing, 1993. Sedimentological evidence of Lae Palaeozoic Bogda island arc. Acta Sedimentologica Sinica, 11(3): 31~36 (in Chinese with English abstract).
- Forster H J, Tisehendorf G, Trumbull R B. 1997. Anevolution of the Rb vs (Y + Yb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silica igneous rocks. Lithos, 40:261~293.
- Ganzeyev A A, Sotskav Y P, Lyapunov S M. 1984. Geochemical specialization of ore-bearing solutions in relation to rare-earth elements. Geochemistry, 20:160~164.
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, Li Hongyu, Xiao Xinjian, Yan Zhengfu. 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 Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, Wu Changzhi, Yan Zhengfu. 2001. Initiation and evolution of Bogda subductiontorn-type rift. Acta Petrologica Sinica, 17(4):585~597 (in Chinese with English abstract).

- Hanson G N. 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 8:371~406.
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Nvhong. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. Volksverlag Xinjiang, Ürümqi, 1~437 (in Chinese with English abstract).
- Innocenti F, Agostini S, Di Vincenzo G, Dogliono C, Manetti P, Savascin M Y, Tonarini S. 2005, Neogene and Quaternary volcanism in western Anatolia: magma sources and geodynamic evolution. Marine Geology, 221: 397~421.
- Kerr A C, Marriner G F, Tarney J, Nivia A, Saunder A D, Thielwall M F, Sinton C W. 1997. Cretaceous basaltic terranes in western Colombia: Elemental, chronological and Sr-Nd isotopic contrains on petrogenesis. Journal of Petrology, 38:677 ~702.
- Lei Wanshan, Xu Peng, Guo Junfeng, Xiao Liang, Li Xiangchuan, Li Yong. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geological and geochemical features of Sujishan gabbro pluton, eastern Bogda Mountains, and their tectonic significances. Geological Review, 62(2): 317~330 (in Chinese with English abstracts).
- Li Jinyi. 1995. Main characteristics ang emplacement processes of the East Junggar Ophiloites, Xinjiang, China. Acta Petrologica Sinica, 11(Suppl):73~84 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2004. Late Neoproterozioc and Paleozoictectonic framework and evolution of Eastern Xinjiang, NW China. Geological Review, 50(3):304~322 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Wang Kezhuo, Li Wenqian, Guo Chunhua, Song Biao, Wang Yu, MoShenguo, Zhao Ziran, Zhu Zhixin, Pan Chengze. 2002. Tectonic evolution since the Late Paleozoin and mineral prospecting in eastern Tianshan Mountains, NW China. Xinjiang Geoology, 20(4):295~301 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenqian, Xia Bin, Wu Guogan, Wang He, Wang Ran. 2005. Kangguertage ophiolite and tectornic significance, Shanshan, Xingjian China. Acta Petrologica Sinica, 21(6):1617~1632 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuan, Yang Jingsui, Zhang Jian, Li Tianfu, Chen Songyong, Ren Yufeng, Xu Xiangzhen. 2011. Tectonical significance of the Carboniferous volcanic rocks in eastern Tanshan. Acta Petrologica Sinica, 27(01):193~209 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ruishi, Shu Liangshu, Sun Jiaqi. 1997. TectonicEvolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1~200 (in Chinese with English abstract).
- McCulloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constrains on subdction zone magmatism. Earth and Planetary Science Letters, 102:358~374.
- McDonald R, Rogers N W, Fitton J G. 2001. Plume lithoslothosphere interactions in the generation of the basahs of the Kenya Rift, East Africa. Joural of Petrology, 42:877~900.

- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. Journal of Geology, 83:249~281.
- Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Science Letters, 19:290~300.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implacations of the composition of volcanic arc magmas. Annual Review Earth Planetary Sciences, 23:251~285.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Pub., London, 42:313 ~345.
- Sun Guihua, Li Jinyi, Gao Liming, Yang Tiannan. 2005. Zircon SHRIMP U-Pbage of a dioritic in the Harlik Mountains, Eastern Xinjiang, and ite tectonic implication. Geological Review, 51(4):463~469 (in Chinese with English abstract).
- Thompson R N, Morrison M A, Hendry G L, et al. 1984. An assessment of the relative roles of a crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 310, Issue 1514, 549~585.
- Tian Liping, Wang Jinrong, Tang Zhongli, Yu Man, Wang Huaitao, Zhao Zhixiong. 2010. Geochemical characteristic and tectonic significance of the Early Carboniferous volcanic rocks in eastern Bogda Mountains of Xinjiang region. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 46(4): 30~41 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bangyao, Jiang Changyi, Li Yongjun, Wu Hongen, Xia Zhaode, Lu Ronghui. 2009. Geochemistry and tectonic implications of Karamaili ophiolite in East Junggar of Xinjiang. J. Mineral. Petrol., 29(3): 74~82 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinrong, Li Taide, Tian Liping, Yu Man, Wang Huaitao, Zhi Xiong, Tang Zhongli. 2010. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda orogenic beit, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic. Acta Petrologica Sinica, 26(4):1103 ~1115 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Zhang Kaijun, Li Huimin, Wu Changzhi, Yang Jiedong. 2005. Isotopic chronoligic evidence of Bogda Rift closure and regional uplift and its geological significance. Acta Geoscientica Sinica, 26(Suppl): 102~104 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, Zhang Kaijun, Li Huimin, Yang Jiedong. 2006. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotops of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. Acta Petrologica Sinica, 22(5):1215~1224 (in Chinese with English abstract).
- Weaver B L, Tarney J. 1984. Major and trace element composition of the continental lithosphere. In: Pollack H N, Murthy V R, eds. Structure and Evolution of the Continental Lithosphere, Physics and Chemistry of the Earth, vol 15, $39 \sim 68$.

529

- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 1217~1232.
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogensis: A Global Tectonic Approach. London: Oxford University Press, 1~466.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination os different magma series and their diffe rentiation os products using immobile elements. Chemical Geology, 20:325~343.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary vocanic province. Earth and Planetary Science Letters, $50:11 \sim 30$.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and Mantle Plume. Geological Bulletin of China, 23(9/10):903~910 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. 2007a. Tianshan Magmatism. Beijing: China Land Press, 1 ~ 360 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2007b. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. Acta Petrologica et Mineralogical, 26(1):77~89 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S, Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. American Journal of Science, 304: 370~395.
- Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Junlu, Ma Zhongping, Li Zhipei, Wang Hongliang, Bai Jianke, Tang Zhuo. 2014. New constrains on the Paleozonic tectonic evolution of the northern Xinjiang area. Acta Petrologica Sinica, 30(06):1521~1534 (in Chinese with English abstract).
- You C F, Castillo P R, Gieskes J M, Chan L P, Spivack A J. 1996. Trace-element behavior in hydrothermal experiments: implication for fluid processes at shallow depths in subduction zones. Earth and Planetary Science Letters, 140:41~52.
- Zhang Qi, Zhou Guoing, Wang Yan. 2003. The distribution of time and space ofChinese ophiolites, and their ttectonic settings. Acta Petrologica Sinica, 19(1):1~8 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hengle, Xu Fan, Zhang Ji, Yang Yi. 2012. The Kalmaili ophiolites: age, geological characteristics and tectonic significance. Xinjiang Geology, 30(2):161~164 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiyuan, Cui Bingfang, Xiao Huiliang, Chen Shizhong, Zhu Demao. 2001. Kangguerta-Huangshan collosion zone of bilateral subduction and its metallogenic model and prognosis in Xinjiang, China. Volcanology and Mineral Resources, 22(4): 252~263 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liang Guanglin, Chen Jun, Zheng Yong, Gao Junbao, Xing Dezhao, Li Shaoxiong. 2006. Late Paleozoic

tectonic framework and evolution in the Jiabaishan area, Qoltag, eastern Tianshan Mountains, Northwest China. Geological Bulletin of China, $25(1 \sim 2)$:48 \sim 57.

参考文献

- 崔方磊,汪晓伟,马中平,孙吉明,朱小辉.2015.博格达与哈尔里克 早泥盆世火山岩成因对比及其构造意义.地质与勘探,51(3): 519~533.
- 方爱民,王世刚,张俊敏,藏梅,方家虎,胡健民.2015.新疆北部卡拉 麦里蛇绿岩中辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.地质科 学,50(1):140~154.
- 方国庆.1993. 博格达晚古生代岛弧的沉积岩石学证据. 沉积学报, 11(3):31~36.
- 顾连兴,胡受奚,于春水,李宏宇,肖新建,严正富.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,吴昌志,严正富.2001.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.
- 何国琦,李茂松,刘德权,何国琦,唐延龄,周汝洪.1994.中国新疆古 生代地壳演化与成矿.乌鲁木齐:新疆人民出版社,1~437.
- 雷万杉,许鹏,郭俊锋,肖良,李相传,李勇. 2016. 博格达山东段苏吉 山辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地质地球化学特征及构 造意义. 地质论评, 62(2): 317~330.
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的基本特征和侵位历 史. 岩石学报,11(增刊):73~84.
- 李锦轶.2004.新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变. 地质论评,50(3):304~322.
- 李锦轶,王克卓,李文铅,郭华春,宋彪,王瑜,莫申国,赵子然,朱志 新,潘成泽.2002.东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. 新疆地质,22(4):295~301.
- 李文铅,夏斌,吴国干,王核,王冉.2005.新疆鄯善康古尔塔格蛇绿 岩及其大地构造意义.岩石学报,21(6):1617~1632.
- 李源,杨经绥,张健,李天福,陈松永,任玉峰,徐向珍.2011.新疆东 天山石炭纪火山岩及其构造意义.岩石学报,27(01):193~209.
- 马瑞士,舒良树,孙家齐.1997.东天山构造演化与成矿.北京:地质 出版社,1~200.
- 孙桂华,李锦轶,高立明,杨天南.2005.新疆东部哈尔里克山闪长岩 锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.地质论评,51(4):463 ~469.
- 田黎萍,王金荣,汤中立,于漫,王怀涛,赵志雄.2010.新疆博格达山 东段早石炭世火山岩地球化学特征及其构造意义.兰州大学学 报,46(4):30~41.
- 汪帮耀,姜常义,李永军,吴宏恩,夏昭德,卢荣辉.2009. 新疆东准噶 尔卡拉麦里蛇绿岩的地球化学特征及大地构造意义. 矿物岩 石,29(3):74~82.
- 王金荣,李泰德,田黎萍,于漫,王怀涛,赵志雄,汤中立.2010.新疆 博格达造山带晚古生代构造-岩浆演化过程:火山岩组合及地球 化学证据.岩石学报,26(4):1103~1115.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,张开均,李惠民,吴昌志,杨杰东.2005.博 格达裂谷闭合和区域隆起的同位素年代学证据及地质意义.地 球学报,26(增刊):102~104.
- 王银喜,顾连兴,张遵忠,张开均,李惠民,吴昌志,杨杰东.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.

- 夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平,王立社.2004.天山石炭纪 大火成岩省与地幔柱.地质通报,23(9~10):903~910.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平,王立社.2007a.天山岩浆作用.北京:中国大地出版社,1~360.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,等. 2007b.利用地球化学方法判别大陆玄 武岩和岛弧玄武岩.岩石矿物学杂志,26(1):77~89.
- 徐学义,李荣社,陈隽璐,马中平,李智佩,王洪亮,白建科,唐卓. 2014.新疆北部古生代构造演化的几点认识.岩石学报,30 (06):1521~1534.

- 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.
- 赵恒乐,许凡,张冀,杨屹.2012.东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成时 代、地质特征及构造意义.新疆地质,30(2):161~164.
- 周济元,崔炳芳,肖惠良,陈世忠,朱德茂.2001.新疆康古尔一黄山 对接碰撞带的存在成矿模式及成矿预测.火山地质与矿产,22 (4):252~263.
- 左国朝,梁广林,陈俊,郑勇,高俊宝,邢德超,李绍雄.2006.东天山 觉罗塔格地区夹白山一带晚古生代构造格局及演化.地质通 报,25(1~2):48~57.

Geochemistry of the Qijiaojing Formation Pillow Basalt in the Eastern Bogda Orogenic Belt, East Tianshan and Its Implications for Tectonic Setting

SUN Jiming¹⁾, BAI Jianke¹⁾, ZHU Xiaohui¹⁾, NIU Zheng²⁾, MA Zhongping¹⁾

1) MLR Key Laboratory of Genesis and Exploration of Magmatic Ore Deposits,

Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, 710054;

 $\label{eq:cond} \ensuremath{\text{2}}\xspace{\ensuremath{\text{2}}}\xspace{\ensuremath{2}}\xspace{\ensuremath{$

and Mineral Resources Exploration and Development of Shaanxi, Xi'an, 710016

Abstract

The study carried out geochemical analysis of pillow basalts in the group of Qijiaojing, Eastern Bogda Orogenic Belt in East Tianshan. The results show that the basalt belongs to sub-alkaline tholeiitic basalts, with slight enrichment in LREE ((La/Yb)_N=1.89~2.21) and a weak Eu anomaly (δ Eu=0.89~0.96), presenting the typical features of island-arc basalts which have negative anomalies of Nb, Ta and Ti. The trace elements of pillow basalts, except active elements (Cs, Rb and Ba), are similar to that of lower crust, between one time to two times contrast N-MORB. (La/Nb)_N=1.82~2.62>>1 suggests that the volcanic rocks was contaminated by the lithosphere during the uprising process of magma. Zr content (>142×10⁻⁶) and Zr/Y ratio (>4) show the characters of intraplate volcanic rocks. In multiple environment discrimination diagrams, the samples of the volcanic rocks fall into the N-MORB area or the margin of IAT area or the intraplate basalt area, presenting characteristics of both N-MORB and IAT. Combined with the sedimentary tectonic environment of early-Carboniferous strata in the region, it can be concluded that the southern Xialaoba area in the Eastern Bogda Orogenic Belt should be in the extension tectonic environment (arc-back extension) in the Carboniferous.

Key words: Bogda region; pillow basalts; geochemical characteristics; sedimentary tectonic characteristics; tectonic environment