

北山石炭纪-二叠纪火山岩成因及构造背景

王国强¹, 李向民¹, 徐学义², 余吉远¹, 计波¹, 朱涛¹

(1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要: 北山古生代火山岩尤其是石炭纪-二叠纪火山岩的形成环境及成因备受学者关注且长期以来存在争议。本文收集了近年来发表的关于北山石炭纪-二叠纪火山岩研究的地球化学数据, 岩石地球化学特征显示北山石炭纪玄武岩主要为安山玄武岩, 属拉斑系列, 二叠纪火山岩主要为安山玄武岩和亚碱性玄武岩, 落入拉斑系列及过渡区; 石炭纪玄武岩和二叠纪玄武岩均具有 LREE 富集的球粒陨石标准化稀土元素配分模式, 轻重稀土元素分馏程度均较低。在微量元素蛛网图上, 石炭纪-二叠纪遭受地壳混染的玄武岩呈现出明显的 Nb-Ta 亏损和微弱的 Ti 亏损特征, 而未遭受地壳混染作用的绝大多数石炭纪-二叠纪玄武岩主要呈现出与 OIB 相似的“隆起”状不相容元素标准化配分模式。岩石成因分析认为, 石炭纪-二叠纪玄武质岩浆可能主要来源于地幔柱, 部分石炭纪-二叠纪玄武岩在形成演化过程中遭受了明显的大陆地壳混染作用, 导致其出现十分相似于岛弧或活动大陆边缘的地球化学特征。结合区域构造演化分析及构造环境判别, 认为石炭纪-二叠纪玄武岩均形成于大陆板内环境。

关键词: 石炭纪; 二叠纪; 玄武岩; 岩石成因; 构造环境; 北山

中图分类号: P588.14; P544

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)06-0884-17

Petrogenesis and tectonic setting of the Carboniferous and Permian volcanic rocks in the Beishan orogenic belt

WANG Guo-qiang¹, LI Xiang-min¹, XU Xue-yi², YU Ji-yuan¹, JI Bo¹ and ZHU Tao¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of Geological Survey, Geological Survey of China, Xi'an 710054, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The tectonic setting and petrogenesis of the Paleozoic volcanic rocks, especially the Carboniferous and Permian volcanic rocks in the Beishan orogenic belt are problems of long controversy and have aroused much interest among geologists. The authors consider that the Carboniferous volcanic rocks belong to the andesitic basalt of tholeiite series and the Permian volcanic rocks belong to the andesitic basalt and subalkaline basalt of tholeiite and transition series. The samples collected from the Carboniferous and Permian volcanic rocks are characterized by slight enrichment of LREE and slight fractionation between LREE and HREE. The Carboniferous and Permian volcanic rocks which were contaminated by the crust are highly depleted in Nb, Ta and slightly depleted in Ti, whereas the Carboniferous and Permian volcanic rocks which were not contaminated by the crust are similar to ocean island basalts (OIB) and “hump-shaped” mantle-normalized multi-element patterns without negative Nb and Ta anomalies. The Carboniferous and Permian basaltic rocks were derived from the mantle plume, because some basalts which belong to the Carboniferous and Permian volcanic rocks were obviously contaminated by the crust, exhibiting

收稿日期: 2018-01-15; 接受日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41703038, 41202045); 中国地质调查局工作项目(DD20160012)

作者简介: 王国强(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究; E-mail: gqwangmint@gmail.com。

geochemical characteristics of island-arc or active continental margin basalts. Combined with the research on tectonic evolution in the study area and the related tectonic setting discrimination diagram, the authors have reached the conclusion that the Carboniferous and Permian basalts were all formed in an intraplate setting.

Key words: Carboniferous; Permian; basalts; petrogenesis; tectonic setting; Beishan

Fund support: National Nature Science Foundation of China(41703038, 41202045); Project of China Geological Survey(DD20160012)

北山位于中亚造山带的近东段,北山火山岩研究作为中亚造山带构造演化研究的一部分,受到众多学者们的关注,尤其以玄武质火山岩为主的古生代大规模火山作用(左国朝等,1990; Allen *et al.*, 1992; Yarmolyuk *et al.*, 2000; 顾连兴等, 2000; Xia *et al.*, 2004; 赵泽辉等, 2006; 姜常义等, 2007; 夏林圻等, 2007b)的相关研究涉及较多,其中,石炭纪-二叠纪火山岩究竟产于哪种构造环境,引起广泛争议,目前主要有两种认识:一种观点认为东天山-北山石炭纪火山岩产于裂谷环境(顾连兴等, 2000; Xia *et al.*, 2004; 夏林圻等, 2007b);另一观点认为晚古生代二叠纪是中亚造山带的一个重要动力学转换阶段(Hong *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2004a, 2004b; Zhou *et al.*, 2004; 李锦轶等, 2004; 赵泽辉等, 2006; Zhang *et al.*, 2009a, 2009b; Ma *et al.*, 2016)。然而近年来随着对镁铁质-超镁铁质岩研究的进一步深入,在图拉耳根(三金柱等, 2010)和四顶黑山地区识别出早石炭世的镁铁-超镁铁质杂岩体(李奇祥等, 2010; 王国强等, 2012),发现它们并非二叠纪碰撞后伸展作用的产物,暗示了早石炭世该区已处于伸展裂解环境。此外,大量镁铁质-超镁铁质岩体和火山岩的岩石学和地球化学研究结果认为东天山-北山地区的火山岩(顾连兴等, 2000; Xia *et al.*, 2004; 夏林圻等, 2007b; 姜常义等, 2007)和镁铁质-超镁铁质岩体(秦克章等, 2002; 韩宝福等, 2004; Zhou *et al.*, 2004; 汤中立等, 2006)是石炭纪及早二叠世于碰撞后伸展背景下幔源岩浆活动的产物。本文以整个北山区域内石炭纪-二叠纪玄武质火山岩作为研究对象,系统收集了近年来已发表的石炭-二叠纪玄武质火山岩的地球化学数据并对其进行分析,对比研究了北山地区石炭-二叠纪火山岩岩石成因及其构造背景,对讨论北山乃至中亚造山带石炭纪-二叠纪构造格局以及天山(中亚)大火成岩省提供了重要依据。

1 区域地质概况

北山石炭纪-二叠纪火山作用规模为古生代最大,在北山分布范围最为广泛,且两者分布范围在北山南部干泉-大奇山-野马井一带基本一致或重合,而在北山北部的红石山北-绿条山-园包山一带则以二叠纪火山作用分布最为强烈,石炭纪次之(图1)。石炭纪-二叠纪火山活动是该区活动最强烈的一次火山活动,自二叠纪火山活动之后本区再未出现过火山活动。

石炭纪地层单元包括绿条山组、红柳园组、白山组、热泉子组、雅满苏组、扫子山组、石板山组、芨芨台子组、梧桐窝子组、底坎儿组、干墩组、干泉组,其中甘蒙北山范围内含火山岩的地方性地层单元主要为绿条山组、白山组、扫子山组、红柳园组、干泉组。二叠纪地层单元包括阿尔巴萨依组、红柳河组、双堡塘组、金塔组、红岩井组、方山口组、骆驼沟组和库莱组,其中内含火山岩的地方性地层单元主要为阿尔巴萨依组、红柳河组、双堡塘组、金塔组、方山口组、骆驼沟组和库莱组。

本次所采用的石炭纪火山岩主要分布层位为绿条山组、红柳园组及干泉组,二叠纪火山岩主要选用红柳河组、双堡塘组、金塔组及方山口组。以下重点介绍上述层位特征(甘肃省地质矿产局,1997)。

1.1 石炭纪地层单元

绿条山组(C_1l): 仅在北山北部的内蒙古额济纳旗一带出露。该组为一套碎屑岩夹火山岩组合。绿条山组具体可划分为两个岩性段,其中砂砾岩段以粗碎屑岩为主(灰黄色长石砂岩、砾岩及杂砂岩);板岩段以细碎屑岩为主(灰黑色千枚状板岩、硅质板岩、千枚岩),该组中偶夹灰岩和火山岩。区域上,绿条山组与白山组火山岩犬牙交错或被其叠覆,与下伏雀儿山群不整合接触。

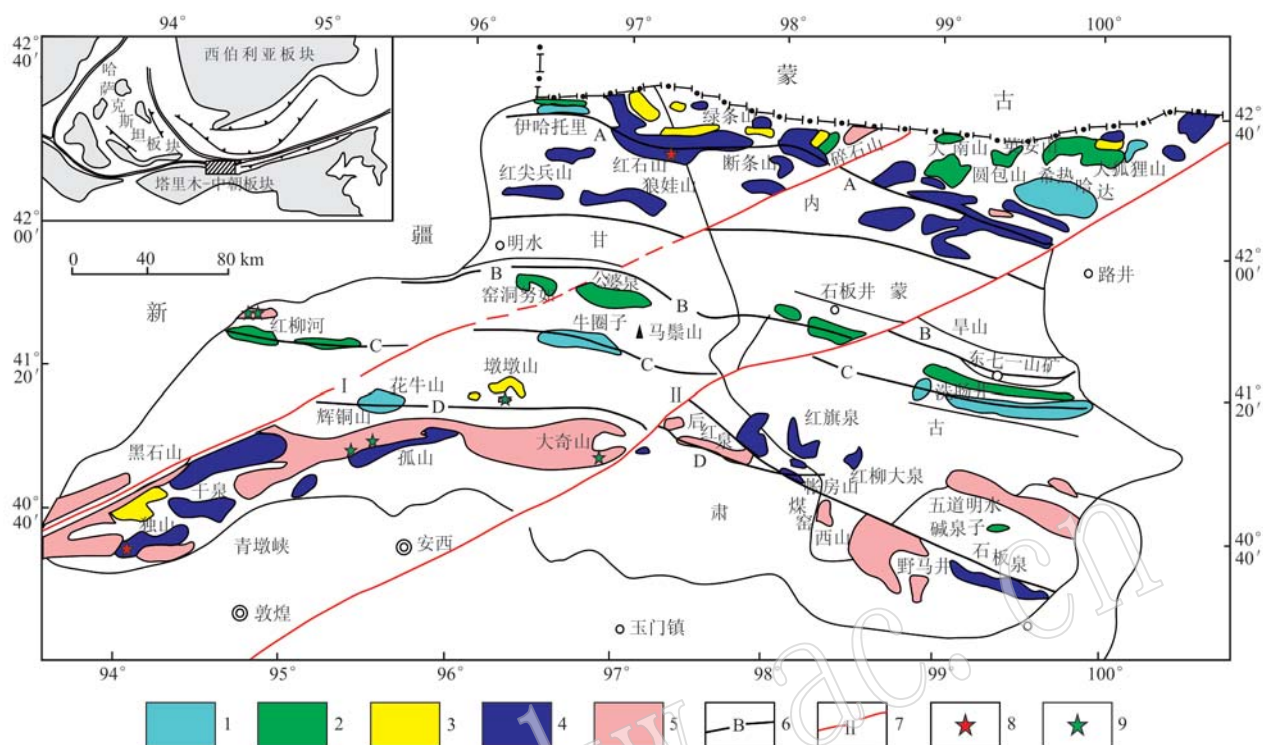


图1 甘蒙北山地区蛇绿岩带及火山岩分布图[据何世平等(1999) ①修改]

Fig. 1 Sketch map showing the distribution of ophiolite belts and the volcanic rocks in Beishan (after He Shiping *et al.*, 1999) ①

1—奥陶纪火山岩; 2—志留纪火山岩; 3—泥盆纪火山岩; 4—石炭纪火山岩; 5—二叠纪火山岩; 6—蛇绿岩带及编号; 7—断裂及编号; 8—石炭纪火山岩样品点; 9—二叠纪火山岩样品点; A—红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩带; B—芨芨台子山-小黄山蛇绿岩带; C—红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带; D—辉铜山-帐房山蛇绿岩带; I—大南山-公婆泉-黑石山断裂; II—卓尔-骆驼泉-西涧泉断裂

1—Ordovician volcanic rocks; 2—Silurian volcanic rocks; 3—Devonian volcanic rocks; 4—Carboniferous volcanic rocks; 5—Permian volcanic rocks; 6—ophiolite belt and its serial number; 7—fault and its serial number; 8. Carboniferous sample; 9—Permian sample; A—Hongshishan-Baiheshan-Pengboshan ophiolite belt; B—Jijitazishan-Xiaohuangshan ophiolite belt; C—Hongliuhe-Niujuanzi-Xichangting ophiolite belt; D—Huitongshan-Zhangfangshan ophiolite belt; I—Dananshan-Gongpoquan-Heishishan fault; II—Zhuoer-Luotuoquan-Xijianquan fault

红柳园组(C_1h): 主要沿磁海-红柳园-白山堂晚古生代裂谷带断续分布。该组为一套正常碎屑岩夹碳酸盐岩和火山岩的岩石组合。火山岩岩性有玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩, 岩石类型有熔岩、熔岩角砾岩、熔岩凝灰岩、凝灰岩、角砾凝灰岩、层凝灰岩等。典型熔岩有杏仁状玄武岩、玻屑晶屑岩屑凝灰熔岩、角砾凝灰岩、细碧岩等。与中基性熔岩伴生有铁矿层, 矿物为磁铁矿、赤铁矿和石英、碧玉, 应属含铁碧玉岩类型。区域上有时碳酸盐岩发育, 顶部常发育中酸性火山岩(以此为本组的顶界)。在区域上岩性和层序变化大, 与上下层位均为不整合或断层接触。

干泉组(C_3g): 分布于北山南部的青墩峡西至玉石山以东一带。该组为一套火山岩夹陆源碎屑岩-

碳酸盐岩建造。碎屑岩包括钙泥质粉砂岩、细砂岩、砾岩等; 碳酸盐岩主要为夹在火山-沉积岩中的灰岩透镜体; 火山-沉积岩包括了酸性灰绿色流纹岩、酸性凝灰角砾熔岩、凝灰岩, 中性安山岩, 玄武岩。干泉组以火山岩为底界与下伏石板山组整合接触, 与上覆双堡塘组不整合。

1.2 二叠纪地层单元

红柳河组($P_{1-2}h$): 分布于黑山岭、磁海、红柳河、乱山子、独山、黑石山一带, 呈北东向展布。根据最新填图资料对红柳河组进行的厘定, 北山地区红柳河组下亚组为一套碎屑岩-火山岩建造, 下部为砾岩、砂岩互层夹灰岩, 上部主要为辉绿岩、辉绿玢岩、玄武岩及细碧岩; 上亚组为一套碎屑岩建造, 下部为

① 何世平. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分及古生代地壳演化研究报告. 1999.

砂岩、长石砂岩与砾岩互层夹鲕状灰岩透镜体,含双壳类及植物化石碎片,上部为砾岩与长石砂岩、复矿砂岩互层,向上以砾岩为主夹砂岩。下亚组不整合于华力西组岩体或白云山组之上,上亚组顶部为向斜核部。

双堡塘组($P_{1-2}s$):南带分布于红柳园西、后红泉、煤窑西山、双堡塘一带。中带分布于马莲井、双井、同昌口、望石山、红柳井一带。北带分布于尹哈托里、碧云泉及哈珠、芦草井一带。最新研究认为本组上部为一粗面玄武岩带(姜常义等, 2007),可细分为3个岩性段,其中第1岩性段为无斑显微晶结构的玄武岩,枕状构造特别发育;第2岩性段主体为斑晶发育的玄武岩和粗玄武岩;第3岩性段主体岩性为玄武岩,玄武质凝灰岩夹少量的安山岩。与下伏雀儿山群(英安质凝灰熔岩)角度不整合,与上覆金塔组整合接触。

金塔组(P_2j):南带分布于大沙沟、芦草滩、黑山东、红柳园南、后红泉、煤窑西北、梧桐井、俞井子等地。中带分布于孔雀泉、野马营、红山井一带。北带分布于沙林浩来、哈尔陶勒盖及芦草井西南等地。本组为一套海相基性火山岩夹正常碎屑岩组合。岩性为灰绿色玄武岩、凝灰岩、火山角砾岩、凝灰质砂岩、砾岩夹黑色、黄绿色页岩、硅质岩、砂岩及灰岩。含腕足类化石。下界与双堡塘整合接触,上界被侏罗系不整合覆盖。其中南带以基性火山岩(玄武岩为主)夹正常碎屑岩组合,为火山碎屑岩沉积。中带为一套海相基性火山岩为主夹碎屑岩及灰岩的沉积。北带岩性单一,厚度较大,玄武岩中未见枕状构造和海相夹层,可能为一套山间盆地性质的基性陆相火山喷发。

方山口组(P_3f):南带分布于白尖山、石板山、大奇山、珊瑚井、俞井子和野马井等地。中带仅分布于孔雀泉和红山井两地,北带没有方山口组沉积。主要由一套巨厚的以中酸性为主的火山熔岩和火山碎屑岩组成,局部可见少量的基性火山岩,下部火山碎屑岩中常夹有正常沉积碎屑岩和粉砂质灰岩,底部有一层砾石成分复杂的砾岩。下部流纹英安质角砾熔岩、角砾岩、流纹岩、流纹英安岩夹凝灰质粉砂岩。中部流纹质含集块晶屑岩屑熔岩、流纹岩、流纹英安斑岩及其同质凝灰岩、含砾砂岩、粉砂岩。上部流纹英安质含集块火山弹角砾岩及其熔岩、凝灰岩、凝灰质砾岩、砂砾岩、砂岩。顶部与红柳园组断层接触。

2 岩石学特征

本次研究的北山地区石炭纪火山岩主要分布层位为绿条山组、红柳园组及干泉组,基性火山岩以玄武岩、安山玄武岩为主。根据已有资料总结其共同特征为:岩石手标本呈灰黑色、暗灰绿色,具斑状结构,斑晶由数量不等的半自形-自形柱状、短柱状斜长石、极少量的辉石组成,基质具间粒-间隐结构,主要由斜长石、辉石及玻璃质组成并充填于长石斑晶之间,部分样品中可见少量磁铁矿。样品普遍遭受一定程度的绿泥石化、绿帘石化、绢云母化及碳酸盐化等蚀变。

北山地区二叠纪火山岩主要选用红柳河组、双堡塘组、金塔组和方山口组,岩性以玄武岩和安山玄武岩为主。其中玄武岩为墨绿色,呈大小不一的枕状,具斑状结构,斑晶以自形斜长石和普通辉石为主,斜长石呈片状或块状,辉石为粒状,基质主要由斜长石和辉石微晶构成填间结构,发育轻微的绿泥石化和绿帘石化,小草湖地区玄武岩具糜棱结构、变余杏仁状构造,矿物成分以斜长石和辉石为主。

3 岩石地球化学特征

3.1 测试方法

本次研究所选样品均来自于已发表的文献,其中主量元素采用X荧光光谱分析(XRF),微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,主量、微量及稀土元素分析结果列于表1。

3.1 分析结果

3.1.1 主量元素及岩石分类

北山地区石炭纪(绿条山组、红柳园组、干泉组)玄武岩 SiO_2 含量变化范围为 44.63% ~ 53.00%,平均值为 48.75%; Al_2O_3 含量变化于 10.76% ~ 18.09% 之间, TiO_2 含量介于 0.53% ~ 3.50% 之间; Na_2O 含量介于 1.74% ~ 5.65% 之间, K_2O 含量介于 0.08% ~ 1.95% 之间,具有相对中等的 $Mg^\#$ 值(平均值为 51)。

北山地区二叠纪(红柳河组、双堡塘组、金塔组、方山口组)玄武岩 SiO_2 含量变化范围为 42.00% ~ 54.31%,平均值为 49.78%; Al_2O_3 含量变化于 12.32% ~ 18.43% 之间,平均值为 15.33%; TiO_2 含量介于 0.88% ~ 4.18% 之间; Na_2O 含量介于 1.09% ~

表 1 北山石炭纪、二叠纪火山岩主量、微量及稀土元素分析结果
Table 1 Analytical results of major element, trace element and REE of volcanic rock from Beishan area

层位	干泉组、石板山组										干泉组			
	党彝等, 2013										李煜航, 2009			
资料来源	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
岩性	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
样号	08ZSGH01	08ZSGH03	092664GH1	092664GH2	092664GH3	092664GH4	08MHCH8	08MHCH9	08MHCH10	09CJHCH2	Ⅲ-5YQ1	Ⅲ-5YQ2	0836YQ1	4049YQ1
SiO ₂	49.42	51.38	50.05	49.43	50.41	49.42	45.41	44.63	44.67	50.75	48.59	47.67	50.61	53.53
TiO ₂	1.48	1.35	3.03	2.89	2.20	2.14	3.29	3.50	3.43	1.30	1.68	1.68	1.99	1.98
Al ₂ O ₃	15.21	14.89	14.02	12.99	14.55	13.48	12.74	13.22	13.10	18.09	17.30	17.75	15.30	14.36
Fe ₂ O ₃	2.37	1.96	7.95	10.52	3.61	3.87	3.23	2.70	2.78	4.84	6.58	8.44	4.42	3.61
FeO	6.38	6.46	5.15	1.94	7.51	6.97	10.06	10.81	11.12	3.96	3.80	2.30	6.10	5.30
MnO	0.15	0.15	0.16	0.22	0.17	0.21	0.24	0.25	0.26	0.32	0.18	0.14	0.21	0.23
MgO	6.98	6.97	2.48	6.31	6.44	5.23	6.40	6.28	6.56	3.03	4.39	4.35	5.28	3.51
CaO	9.95	8.98	4.70	6.31	6.44	5.80	11.25	10.22	10.70	8.99	8.86	8.52	9.53	6.79
Na ₂ O	3.35	3.26	4.69	5.39	3.02	3.83	2.37	2.99	2.39	3.42	3.98	3.84	3.64	4.63
K ₂ O	0.48	0.40	0.57	0.58	0.74	0.44	0.32	0.31	0.29	0.74	1.13	1.95	0.40	0.88
P ₂ O ₅	0.22	0.19	0.92	0.87	0.47	0.47	0.52	0.60	0.57	1.30	0.52	0.53	0.34	0.69
LOI	3.33	3.33	6.23	6.56	5.93	8.12	3.22	3.68	3.26	0.17	2.40	2.31	1.29	3.84
Total	99.48	99.54	100.53	100.81	100.65	100.69	99.22	99.38	99.42	97.10	99.44	99.48	99.17	99.35
FeOt	8.51	8.22	12.30	11.41	10.76	10.45	12.97	13.24	13.62	8.32	9.72	9.89	10.08	8.55
Mg#	59	60	26	26	45	47	47	46	46	39	44	44	48	42
La	8.24	7.59	24.00	22.20	16.20	16.90	31.20	34.70	32.40	16.60	20.32	20.14	8.48	16.83
Ce	20.94	19.00	41.00	56.90	39.90	41.80	63.90	69.50	66.60	39.60	50.38	50.81	22.53	43.59
Pr	3.14	2.88	8.89	8.32	5.77	6.02	8.31	8.95	8.62	5.56	8.08	8.02	3.67	6.48
Nd	16.6	14.6	41.1	38.4	25.9	27.4	38.8	41.6	39.8	23.6	36.51	36.20	18.74	31.73
Sm	4.67	4.18	11.00	10.60	6.94	7.24	8.15	8.55	8.37	6.00	8.75	8.83	5.17	8.44
Eu	1.40	1.22	3.61	3.43	2.27	2.27	2.73	2.87	2.88	1.75	2.58	2.53	1.93	2.83
Gd	4.90	4.49	12.20	11.80	7.62	8.06	7.71	7.99	7.75	5.85	8.80	8.81	6.37	9.57
Tb	0.84	0.74	1.83	1.73	1.12	1.26	1.17	1.26	1.24	0.85	1.37	1.36	1.07	1.58
Dy	5.10	4.61	11.50	11.10	7.33	7.84	6.58	6.46	6.74	5.24	7.95	7.90	6.76	9.84
Ho	1.07	0.89	2.41	2.33	1.49	1.65	1.24	1.21	1.20	1.10	1.56	1.59	1.36	1.97
Er	3.06	2.65	6.46	6.13	3.93	4.40	3.28	3.26	3.47	3.01	4.36	4.48	3.80	5.39
Tm	0.41	0.38	0.92	0.87	0.59	0.64	0.44	0.43	0.44	0.42	0.67	0.68	0.58	0.83
Yb	2.70	2.25	5.66	5.31	3.55	3.96	2.75	2.48	2.62	2.65	4.20	4.21	3.63	5.04
Lu	0.35	0.34	0.85	0.83	0.55	0.60	0.37	0.34	0.33	0.41	0.62	0.65	0.52	0.75
Y	27.5	24.8	64.8	62.8	39.7	44.1	31.6	32.1	32.2	29.2	38.65	38.79	32.24	47.30
ΣREE	73.42	65.82	171.43	179.95	123.16	130.04	176.63	189.60	182.46	112.64	156.10	156.21	84.61	144.87
La/REE	2.98	3.03	3.10	3.49	3.70	3.58	6.50	7.09	6.67	4.77	4.29	4.26	2.51	3.14
(La/Yb) _N	2.19	2.42	3.04	3.00	3.27	3.06	8.14	10.04	8.87	4.49	3.47	3.43	1.68	2.40
δEu	0.89	0.86	0.95	0.90	0.95	0.90	1.04	1.04	1.07	0.89	0.89	0.87	1.03	0.96
δCe	1.01	1.00	0.69	1.03	1.01	1.01	0.95	0.94	0.96	1.01	0.96	0.98	0.99	1.02
Rb	9.13	9.86	13.10	10.50	15.20	10.20	7.92	8.26	10.60	16.30	25.9	40.1	15.2	18.0
Sr	236	249	90	172	329	225	476	482	539	620	475	621	359	370
Ba	58.4	61.8	426.0	437.0	298.0	213.0	78.2	187.0	141.0	228.0	120.0	137.0	646.7	121.0
Nb	4.29	4.35	8.56	8.83	6.97	7.24	34.60	37.70	35.80	5.02	5.7	5.2	3.7	5.6
Ta	0.48	0.52	0.52	0.61	0.44	0.46	2.53	2.56	2.55	0.30	0.37	0.32	0.27	0.37
Zr	131	130	317	277	203	206	195	201	208	158	259	264	155	246
Hf	3.42	3.52	6.51	6.26	4.71	4.79	5.25	5.64	5.57	3.74	5.8	6.4	3.9	6.8
U	0.68	0.68	1.63	1.62	0.69	0.74	0.82	0.96	0.88	1.18	0.92	0.81	0.21	0.82
Th	0.58	0.70	3.85	3.54	2.24	2.25	3.03	3.18	2.95	3.35	2.70	2.00	0.78	1.60
Zr/Y	4.76	5.24	4.89	4.41	5.11	4.67	6.17	6.26	6.46	5.41	6.70	6.81	4.81	5.20
Nb/La	0.52	0.57	0.36	0.40	0.43	0.43	1.11	1.09	1.10	0.30	0.28	0.26	0.44	0.33

续表 1-2
Continued Table 1-2

层位		双堡塘组																	
资料来源		赵泽辉等, 2006									姜常义等, 2007								
玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	
LY-1-33	LY-1-47	LY-5-11	LY-5-18	LY-5-24	LY-2-6	LY-2-27	LY-2-9	LY-2-30	LI-1	LI-2	LI-4	LI-5	LI-6	LI-7	LI-9	LI-10	LI-12		
49.20	47.30	49.36	48.11	47.01	45.52	47.03	42.78	50.42	47.55	47.76	52.05	49.30	49.70	50.28	48.51	48.65	51.52		
1.64	1.97	1.78	0.95	2.08	0.98	0.95	0.93	0.88	4.02	4.18	2.97	3.20	2.23	2.38	1.68	1.55	2.78		
15.50	15.19	15.18	18.43	15.64	18.07	16.71	18.36	17.57	13.41	13.65	12.30	13.08	14.83	14.76	14.99	15.07	14.24		
11.26	11.92	10.70	8.11	11.55	6.42	6.74	6.51	7.49	16.43	16.60	13.75	15.12	12.13	12.21	11.53	10.99	12.32		
0.19	0.18	0.17	0.12	0.20	0.10	0.11	0.08	0.13	0.19	0.21	0.18	0.19	0.20	0.19	0.13	0.12	0.15		
7.18	7.04	6.17	7.49	6.41	7.51	8.56	14.18	8.87	5.70	5.42	4.82	5.59	6.14	6.07	7.73	7.69	5.90		
9.46	11.91	10.20	10.91	10.37	14.74	13.29	12.32	10.21	8.77	7.96	8.59	8.24	10.91	10.13	10.60	11.43	7.34		
3.73	1.81	2.64	2.57	2.27	1.39	2.81	1.98	3.30	3.12	3.40	4.81	4.60	3.09	3.16	3.59	3.67	4.59		
K ₂ O	0.34	0.33	0.03	0.75	1.70	0.35	0.89	0.34	0.29	0.27	0.15	0.26	0.48	0.51	1.08	0.69	0.80		
P ₂ O ₅	0.14	0.18	0.20	0.06	0.28	0.13	0.28	0.12	0.52	0.54	0.38	0.41	0.29	0.31	0.16	0.15	0.36		
LOI	2.25	2.34	2.59	3.38	3.14	2.78	1.95	0.97	2.22	2.20	1.30	1.93	2.24	1.32	5.51	5.27	1.68		
Total	100.68	100.17	99.84	99.36	99.94	99.83	100.27	100.29											
La	4.07	6.00	6.87	1.13	9.01	16.49	19.39	12.66	16.80	14.60	12.58	13.20	12.23	12.00	3.70	3.84	15.60		
Ce	12.64	16.73	19.88	4.94	24.95	35.10	32.27	24.29	46.30	44.30	36.48	35.80	37.46	32.50	13.00	12.60	40.50		
Pr	2.18	2.80	3.26	0.99	3.92	4.73	3.69	3.20	7.09	7.07	5.07	5.39	5.03	4.92	2.00	2.11	5.87		
Nd	11.58	13.70	15.37	5.40	18.63	18.83	13.11	12.95	34.30	36.32	24.75	26.30	23.39	23.40	10.00	11.50	27.30		
Sm	3.56	4.23	4.35	2.11	5.36	3.99	2.55	3.17	10.80	10.32	7.20	8.02	6.55	7.14	3.30	3.68	8.24		
Eu	1.33	1.65	1.61	0.88	1.90	1.42	1.05	1.05	3.64	3.46	2.95	2.63	2.70	2.38	1.70	1.46	2.48		
Gd	5.25	6.37	6.65	3.35	7.47	4.13	3.23	3.86	12.80	13.50	8.48	9.24	8.78	8.44	4.80	5.05	9.38		
Tb	0.83	0.99	1.03	0.56	1.16	0.65	0.53	0.45	2.29	2.35	1.86	1.71	1.71	1.53	0.90	0.91	1.70		
Dy	5.24	6.21	6.51	3.42	7.23	3.86	3.31	3.89	14.50	14.62	11.04	10.90	10.09	9.85	5.40	5.73	10.80		
Ho	1.10	1.31	1.37	0.76	1.47	0.80	0.72	0.53	3.00	2.99	2.24	2.24	2.03	2.05	1.20	1.18	2.26		
Er	2.90	3.44	3.58	1.95	3.91	2.16	2.07	1.44	8.59	8.32	6.49	6.42	5.91	5.88	3.20	3.18	6.40		
Tm	0.46	0.52	0.55	0.31	0.60	0.33	0.33	0.36	1.18	1.33	1.02	0.89	0.94	0.82	0.50	0.50	0.88		
Yb	2.81	3.37	3.53	1.99	3.82	2.21	2.22	1.56	7.30	8.41	5.32	5.66	5.05	5.25	2.70	3.13	5.45		
Lu	0.45	0.51	0.56	0.29	0.57	0.35	0.37	0.25	1.08	1.32	0.83	0.86	0.79	0.77	0.40	0.49	0.78		
ΣREE	54.40	67.83	75.12	28.08	90.00	95.05	47.74	81.69	169.67	168.91	126.31	129.26	122.66	116.93	52.80	55.36	137.64		
REE/HREE	1.86	1.99	2.16	1.22	2.43	5.56	7.48	3.94	2.34	2.20	2.39	2.41	2.47	2.38	1.76	1.74	2.66		
(La/Yb) _N	1.04	1.28	1.40	0.41	1.69	5.35	8.92	3.91	1.65	1.25	1.70	1.67	1.74	1.64	0.98	0.88	2.05		
δEu	0.94	0.97	0.91	1.01	0.92	1.06	0.98	0.92	0.94	0.90	1.15	0.93	1.09	0.94	1.30	1.04	0.86		
δCe	1.03	1.00	1.03	1.06	1.03	0.96	0.97	0.87	0.91	1.04	1.06	1.12	1.17	1.04	1.16	1.07	1.04		
Pb	0.98	4.58	1.70	0.66	1.47	24.32	27.16	9.38	4.82	4.00	125.90	5.03	359.00	5.41	25.00	2.21	3.30		
Cr	187.00	233.00	212.00	355.00	195.00	224.00	306.00	313.00	52.20	45.55	97.42	59.20	195.60	142.00	109.00	134.00	32.90		
Rb	5.67	8.89	10.38	1.00	24.30	103.00	33.38	11.24	2.33	1.97	2.24	4.21	6.21	8.31	19.00	12.60	24.80		
Sr	175.40	208.40	177.90	130.30	245.20	270.30	99.45	219.50	184.00	161.40	209.90	205.00	189.20	203.00	149.00	150.00	139.00		
Ba	5.42	26.37	44.31	4.01	32.47	188.40	97.99	47.43	57.80	38.37	127.00	88.70	132.50	70.50	152.00	94.70	118.00		
Nb	2.29	3.41	3.57	0.46	5.97	11.00	5.32	10.14	6.83	10.80	9.26	6.16	7.20	6.04	7.47	1.80	2.57		
Ta	0.14	0.22	0.24	0.03	0.37	0.69	0.60	0.42	0.56	0.63	0.48	0.51	0.40	0.50	0.10	0.19	0.52		
Zr	115.50	127.70	153.30	54.51	188.40	62.83	96.96	65.18	356.00	343.20	238.40	303.00	246.50	306.00	104.00	89.10	290.00		
Hf	2.57	2.97	3.50	1.44	4.17	1.99	2.05	2.17	1.85	10.30	9.05	5.46	8.86	5.16	8.74	2.33	8.24		
U	0.08	0.18	0.20	0.03	0.18	0.62	0.33	0.46	0.37	0.47	0.74	0.54	0.44	0.76	0.34	0.12	0.23		
Th	0.18	0.53	0.66	0.05	0.58	2.01	0.87	1.54	0.82	1.07	1.36	1.00	1.01	1.10	0.94	0.34	1.58		
Zr/Y	3.98	3.86	4.50	2.93	4.92	2.89	3.89	7.24	2.81	3.99	4.51	5.10	4.59	5.99	5.21	4.52	2.91		
(Th/Nb) _N	0.66	1.30	1.55	0.91	0.81	1.53	1.37	1.27	1.01	0.83	1.23	1.36	1.18	1.53	1.06	0.93	1.11		
Nb/La	0.56	0.57	0.52	0.41	0.66	0.67	1.00	0.52	0.54	0.64	0.63	0.49	0.55	0.49	0.62	0.49	0.67		

续表 1-3
Continued Table 1-3

层位		双堡塘组										红柳河组									
资料来源		姜常义等, 2007										潘金花等, 2008									
岩性	玄武岩	橄榄粗安岩	夏威夷岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩		
样号	L1-14	LX1-1	LX2-2	LX4-1	LX4-2	LX4-3	LX5-1	06HL04	06HL07	06HL09	06HL10	06HL11	06HL15	06HL17	06HL27	06HL34	05LY17-5	05LY17-6	05LY17-6		
SiO ₂	50.61	55.38	50.74	57.80	54.80	53.82	49.89	48.70	50.29	47.03	50.80	50.05	48.19	47.41	49.53	46.40	49.10	49.10	49.10		
TiO ₂	2.68	2.59	3.30	2.21	2.79	2.96	2.58	2.52	2.51	2.98	2.46	2.98	2.79	2.06	1.61	2.68	2.76	2.76	2.76		
Al ₂ O ₃	13.32	12.83	14.18	13.75	13.01	13.40	14.65	14.85	13.37	15.54	12.70	12.93	16.07	16.94	15.65	16.82	14.94	14.94	14.94		
TF ₂ O ₃	12.55	11.59	13.48	9.93	12.37	12.92	12.80	13.49	12.78	14.92	13.56	14.55	13.47	13.39	12.22	13.90	13.98	13.98	13.98		
MnO	0.16	0.16	0.25	0.16	0.18	0.19	0.17	0.19	0.18	0.18	0.18	0.19	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19		
MgO	5.54	4.31	4.96	3.79	3.65	3.37	5.76	6.74	5.59	6.36	6.49	5.74	6.59	6.34	6.79	6.58	5.37	5.37	5.37		
CaO	11.17	7.12	7.05	6.41	7.52	3.73	10.44	10.94	10.65	8.85	10.76	10.89	7.93	10.61	10.83	11.15	11.27	11.27	11.27		
Na ₂ O	3.52	5.06	4.91	3.91	4.42	4.51	2.98	2.18	4.10	3.53	2.44	2.05	4.10	2.56	2.84	2.01	1.99	1.99	1.99		
K ₂ O	0.11	0.54	0.72	1.7	0.81	0.66	0.43	0.18	0.30	0.41	0.35	0.37	0.45	0.35	0.21	0.03	0.17	0.17	0.17		
P ₂ O ₅	0.33	0.41	0.41	0.35	0.45	0.45	0.30	0.22	0.23	0.25	0.20	0.25	0.24	0.16	0.13	0.24	0.22	0.22	0.22		
LOI	1.38	1.28	1.97	1.34	1.97	3.64	1.98	3.80	3.51	2.18	2.80	3.07	2.56	1.76	1.87	3.63	1.83	1.83	1.83		
Total	12.70	16.90	20.30	22.58	18.98	20.79	11.64	99.85	99.84	99.82	99.78	99.75	99.8	99.85	99.83	99.99	100.00	100.00	100.00		
La	35.50	44.27	52.39	51.05	47.95	51.05	30.54	41.62	34.27	41.62	34.27	41.62	34.27	41.62	34.27	41.62	34.27	34.27	34.27		
Ce	4.98	5.98	7.03	6.21	6.45	6.79	4.30	5.55	5.05	5.55	5.05	5.55	5.05	5.55	5.05	5.55	5.05	5.05	5.05		
Pr	23.10	32.90	38.13	31.05	34.75	36.39	24.05	34.75	36.39	34.75	36.39	34.75	36.39	34.75	36.39	34.75	36.39	36.39	36.39		
Nd	6.86	8.89	10.24	7.59	9.24	9.72	6.83	9.24	9.72	6.83	9.24	9.72	6.83	9.24	9.72	6.83	9.24	9.24	9.24		
Sm	2.58	2.75	3.09	2.62	2.92	3.13	2.33	2.92	3.13	2.33	2.92	3.13	2.33	2.92	3.13	2.33	2.92	2.92	2.92		
Eu	8.18	10.89	12.51	9.40	11.19	11.68	8.11	11.19	11.68	8.11	11.19	11.68	8.11	11.19	11.68	8.11	11.19	11.19	11.19		
Tb	1.70	1.79	2.07	1.45	1.82	1.90	1.37	1.82	1.90	1.37	1.82	1.90	1.37	1.82	1.90	1.37	1.82	1.82	1.82		
Dy	10.20	11.73	13.65	9.06	11.82	12.31	8.97	11.82	12.31	8.97	11.82	12.31	8.97	11.82	12.31	8.97	11.82	11.82	11.82		
Ho	2.13	2.24	2.62	1.71	2.26	2.32	1.69	2.26	2.32	1.69	2.26	2.32	1.69	2.26	2.32	1.69	2.26	2.26	2.26		
Er	6.14	7.21	8.38	5.50	7.29	7.57	5.41	7.29	7.57	5.41	7.29	7.57	5.41	7.29	7.57	5.41	7.29	7.29	7.29		
Tm	0.91	0.92	1.10	0.70	0.90	0.96	0.69	0.90	0.96	0.69	0.90	0.96	0.69	0.90	0.96	0.69	0.90	0.90	0.90		
Yb	5.00	6.82	8.04	5.18	6.70	7.03	5.05	6.70	7.03	5.05	6.70	7.03	5.05	6.70	7.03	5.05	6.70	6.70	6.70		
Lu	0.77	0.94	1.12	0.72	0.91	0.99	0.69	0.91	0.99	0.69	0.91	0.99	0.69	0.91	0.99	0.69	0.91	0.91	0.91		
Y	40.80	53.39	62.44	41.06	53.10	55.89	39.96	53.10	55.89	39.96	53.10	55.89	39.96	53.10	55.89	39.96	53.10	53.10	53.10		
ΣREE	120.75	154.23	180.67	154.82	163.18	172.63	111.67	163.18	172.63	111.67	163.18	172.63	111.67	163.18	172.63	111.67	163.18	163.18	163.18		
REE/HREE	2.45	2.63	2.65	3.59	2.80	2.86	2.49	2.80	2.86	2.49	2.80	2.86	2.49	2.80	2.86	2.49	2.80	2.80	2.80		
(La/Yb) _N	1.82	1.78	1.81	3.13	2.03	2.12	1.65	2.03	2.12	1.65	2.03	2.12	1.65	2.03	2.12	1.65	2.03	2.03	2.03		
δEu	1.05	0.85	0.83	0.95	0.88	0.90	0.96	0.88	0.90	0.96	0.88	0.90	0.96	0.88	0.90	0.96	0.88	0.88	0.88		
δCe	1.09	1.08	1.07	1.04	1.06	1.05	1.06	1.06	1.05	1.06	1.06	1.05	1.06	1.05	1.06	1.05	1.06	1.06	1.06		
Pb	110.00	2.32	4.86	11.54	4.44	5.45	2.97	4.44	5.45	2.97	4.44	5.45	2.97	4.44	5.45	2.97	4.44	4.44	4.44		
Cr	70.60	79.09	21.28	24.83	29.30	28.61	144.20	29.30	28.61	144.20	29.30	28.61	144.20	29.30	28.61	144.20	29.30	29.30	29.30		
Rb	1.10	8.06	10.22	26.58	19.72	13.63	5.25	19.72	13.63	5.25	19.72	13.63	5.25	19.72	13.63	5.25	19.72	19.72	19.72		
Sr	203.00	191.70	194.60	293.30	270.90	246.10	227.60	270.90	246.10	227.60	270.90	246.10	227.60	270.90	246.10	227.60	270.90	270.90	270.90		
Ba	69.10	129.30	149.10	458.80	167.00	136.10	131.60	167.00	136.10	131.60	167.00	136.10	131.60	167.00	136.10	131.60	167.00	167.00	167.00		
Nb	6.77	7.81	8.68	10.87	7.82	8.55	5.12	7.82	8.55	5.12	7.82	8.55	5.12	7.82	8.55	5.12	7.82	7.82	7.82		
Ta	0.45	0.38	0.42	0.72	0.37	0.43	0.14	0.37	0.43	0.14	0.37	0.43	0.14	0.37	0.43	0.14	0.37	0.37	0.37		
Zr	216.00	286.80	310.70	233.20	273.30	293.60	190.00	273.30	293.60	190.00	273.30	293.60	190.00	273.30	293.60	190.00	273.30	273.30	273.30		
Hf	5.06	7.68	8.57	6.33	7.35	7.78	5.16	7.35	7.78	5.16	7.35	7.78	5.16	7.35	7.78	5.16	7.35	7.35	7.35		
U	0.54	0.73	1.32	2.45	1.17	1.28	0.59	1.17	1.28	0.59	1.17	1.28	0.59	1.17	1.28	0.59	1.17	1.17	1.17		
Th	1.64	3.76	7.05	11.09	6.15	6.74	2.50	6.15	6.74	2.50	6.15	6.74	2.50	6.15	6.74	2.50	6.15	6.15	6.15		
Zr/Y	5.29	5.37	4.98	5.68	5.15	5.25	4.75	5.15	5.25	4.75	5.15	5.25	4.75	5.15	5.25	4.75	5.15	5.15	5.15		
(Th/Nb) _N	2.03	4.04	6.81	8.56	6.60	6.61	4.10	6.60	6.61	4.10	6.60	6.61	4.10	6.60	6.61	4.10	6.60	6.60	6.60		
Nb/La	0.53	0.46	0.43	0.48	0.41	0.41	0.44	0.41	0.41	0.44	0.41	0.41	0.44	0.41	0.41	0.44	0.41	0.41	0.41		

红柳河组

层位		红柳河组																		
资料来源		潘金花等, 2008					赵泽辉等, 2006					李煜航, 2009					校培喜, 2010			
岩性	样号	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
SiO ₂	47.34	47.35	47.35	49.05	47.90	42.00	48.79	49.39	50.37	48.24	47.66	52.22	49.75	54.27	54.31	51.25	52.75	52.75	52.75	
TiO ₂	2.16	2.21	2.29	2.36	1.78	1.78	1.94	2.03	2.20	2.33	2.13	1.94	1.45	1.08	1.03	1.03	1.28	1.03	1.28	
Al ₂ O ₃	14.95	16.32	14.73	14.55	15.64	13.79	15.52	16.57	16.72	17.37	17.32	15.87	16.88	17.12	15.9	18.42	16.79	18.42	16.79	
TF ₂ O ₃	14.69	14.05	14.73	15.02	13.69	11.58	9.97	11.15	10.18	10.58	11.19	10.92	10.50	7.19	9.35	9.87	8.69	9.87	8.69	
MnO	0.19	0.19	0.20	0.19	0.20	0.18	0.17	0.13	0.24	0.22	0.21	0.22	0.20	0.09	0.23	0.12	0.13	0.12	0.13	
MgO	5.45	5.96	5.95	5.77	6.78	6.54	3.49	3.66	3.07	5.94	6.84	6.83	8.13	7.97	7.87	6.56	6.69	6.56	6.69	
CaO	12.89	10.80	11.81	11.60	11.63	20.59	15.27	12.24	14.02	11.00	9.93	8.95	11.08	7.94	8.85	9.43	9.59	8.85	9.43	
Na ₂ O	1.98	2.76	2.09	1.09	2.06	2.69	2.92	2.75	2.54	3.37	3.82	3.48	2.34	3.81	2.19	3.06	3.47	3.06	3.47	
K ₂ O	0.18	0.18	0.23	0.18	0.18	0.75	1.45	1.57	0.22	0.46	0.49	0.23	0.24	0.20	0.75	0.10	0.44	0.10	0.44	
P ₂ O ₅	0.18	0.17	0.18	0.14	0.12	0.12	0.47	0.50	0.45	0.49	0.40	0.23	0.19	0.55	0.18	0.16	0.19	0.16	0.19	
LOI	3.57	2.02	1.62	8.61	2.04	15.10	4.96	3.58	3.68	5.47	5.19	6.65	1.99	3.82	3.29	3.77	8.28	3.77	8.28	
Total	99.99	99.99	100.00	99.99	100.00	99.75	99.68	99.90	99.48	99.53	99.67	98.69	99.19	99.88	99.59	100.53	100.02	100.53	100.02	
La	9.21	9.74	9.78	9.67	8.37	8.80	20	24	28	28	19	9.54	4.96	35.52	8.99	4.96	35.52	8.99	4.96	
Ce	23.52	24.90	25.07	24.58	21.14	20.20	43	54	61	59	41	24.58	12.50	75.27	20.57	12.50	75.27	20.57	12.50	
Pr	3.41	3.62	3.62	3.57	2.97	2.61	5.79	6.74	7.95	7.25	5.35	3.69	1.98	9.73	3.06	1.98	9.73	3.06	1.98	
Nd	16.23	17.38	17.40	17.13	13.93	11.30	23	26	28	28	21	17.21	9.96	36.03	12.96	17.21	9.96	36.03	12.96	
Sm	4.60	4.90	4.94	4.90	3.99	2.79	4.14	5.84	6.12	5.99	4.66	4.79	2.94	6.27	3.20	4.79	2.94	6.27	3.20	
Eu	1.59	1.70	1.70	1.70	1.32	0.75	1.60	1.72	1.89	1.85	1.76	1.78	1.16	1.81	1.06	1.78	1.16	1.81	1.06	
Gd	5.01	5.38	5.41	5.25	4.54	2.89	5.21	6.43	6.86	6.53	5.30	5.64	3.47	4.99	3.59	5.64	3.47	4.99	3.59	
Tb	0.85	0.90	0.88	0.85	0.76	0.51	0.73	0.90	1.02	0.96	0.89	0.97	0.62	0.73	0.63	0.97	0.62	0.73	0.63	
Dy	4.99	5.16	5.30	5.12	4.69	3.10	4.37	4.99	5.44	5.49	5.14	6.14	3.91	3.94	3.87	6.14	3.91	3.94	3.87	
Ho	1.01	1.03	1.03	1.00	0.96	0.65	0.89	0.93	1.04	0.99	0.99	1.25	0.81	0.78	0.80	1.25	0.81	0.78	0.80	
Er	2.62	2.68	2.57	2.62	2.56	1.83	1.86	2.23	2.42	2.39	2.46	3.47	2.20	2.05	2.27	3.47	2.20	2.05	2.27	
Tm	0.36	0.38	0.37	0.37	0.37	0.28	0.30	0.33	0.33	0.29	0.36	0.55	0.34	0.30	0.36	0.55	0.34	0.30	0.36	
Yb	2.14	2.24	2.22	2.32	2.27	1.72	1.69	1.47	1.90	1.66	1.79	3.33	2.17	1.85	2.23	3.33	2.17	1.85	2.23	
Lu	0.30	0.32	0.32	0.30	0.33	0.26	0.16	0.21	0.21	0.21	0.23	0.47	0.31	0.28	0.34	0.47	0.31	0.28	0.34	
Y	23.52	24.82	25.36	24.55	23.06	16.26	36	40	45	38	39	28.43	19.35	18.25	19.03	28.43	19.35	18.25	19.03	
ΣREE	75.84	80.33	80.61	79.22	68.20	57.69	112.74	135.89	152.18	148.61	109.93	83.41	47.33	179.55	63.93	83.41	47.33	179.55	63.93	
REE/HREE	3.39	3.44	3.45	3.48	3.14	4.13	6.41	6.73	6.92	7.02	5.41	2.82	2.42	2.42	11.03	2.82	2.42	11.03	2.42	
(La/Yb) _N	3.09	3.12	3.16	3.21	2.64	3.67	8.49	11.71	10.57	12.10	7.61	2.05	1.64	13.77	2.89	2.05	1.64	13.77	2.89	
δEu	1.01	1.01	1.00	1.02	0.94	0.80	1.05	0.85	0.89	0.90	1.08	1.04	1.11	0.96	0.95	1.04	1.11	0.96	0.95	
δCe	1.03	1.03	1.03	1.02	1.04	1.02	0.97	1.02	0.99	0.99	0.98	1.02	0.98	0.97	0.96	1.02	0.98	0.97	0.96	
Pb	2.15	2.24	1.87	1.79	2.04	2.81	2.24	3.31	9.30	4.87	2.20	1.02	0.98	0.97	0.96	1.02	0.98	0.97	0.96	
Cr	90.48	93.51	100.74	99.35	145.09	136.57	236.00	270.00	357.00	180.00	404.00	6.99	6.65	3.30	25.10	6.99	6.65	3.30	25.10	
Rb	4.85	5.20	5.82	6.48	4.68	25.81	63.00	89.00	4.88	8.99	4.54	290.00	253.00	905.00	396.00	290.00	253.00	905.00	396.00	
Sr	371.50	329.04	379.43	182.51	925.46	434.65	538	696	1789	896	712	122.00	54.00	223.00	153.00	122.00	54.00	223.00	153.00	
Ba	232.95	94.38	171.72	53.78	191.20	487.05	213.00	159.00	226.00	247.00	178.00	17.21	9.96	36.03	12.96	17.21	9.96	36.03	12.96	
Nb	6.88	7.27	7.45	7.07	6.26	9.38	17.00	21.00	28.00	25.00	15.90	0.29	0.30	0.49	0.24	0.29	0.30	0.49	0.24	
Ta	0.53	0.55	0.55	0.53	0.48	0.64	1.62	1.16	1.75	1.77	1.13	0.29	0.30	0.49	0.24	0.29	0.30	0.49	0.24	
Zr	113.90	119.39	122.92	116.44	95.00	98.99	268.00	254.00	326.00	328.00	271.00	172.00	85.80	159.00	105.00	172.00	85.80	159.00	105.00	
Hf	3.41	3.55	3.60	3.49	2.86	2.89	5.78	6.01	6.88	6.50	6.33	4.34	2.37	5.50	3.00	4.34	2.37	5.50	3.00	
U	0.44	0.44	0.42	0.41	0.43	0.60	0.51	0.55	0.67	0.72	0.42	0.37	0.21	0.61	0.60	0.37	0.21	0.61	0.60	
Th	1.09	1.10	1.13	1.07	1.11	2.31	1.73	1.88	3.49	3.25	1.16	1.10	1.18	4.30	2.40	1.10	1.18	4.30	2.40	
Zr/Y	4.84	4.81	4.85	4.74	4.12	6.09	7.44	6.35	7.24	8.63	6.95	6.05	4.43	8.71	5.52	6.05	4.43	8.71	5.52	
(Th/Nb) _N	1.33	1.27	1.27	1.27	1.49	2.07	0.85	0.75	1.05	1.09	0.61	0.54	0.99	1.00	1.55	0.54	0.99	1.00	1.55	
(Th/Nb) _N	0.75	0.75	0.76	0.73	0.75	1.07	0.85	0.88	1.00	0.89	0.84	1.80	2.01	1.01	1.44	1.80	2.01	1.01	1.44	

Continued Table 1-5

层位	方山口组				金塔组		双堡塔组						红柳河组							
	校培喜等, 2010				校培喜等, 2010		Zheng <i>et al.</i> , 2014						夏昭德等, 2014							
	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	
岩性	310-GQ1	552-GQ1	S-168	Fangshankou	Y-8	Y-9	Y-10	Y-11	Y-12	Y-13	Y-14	Y-15	Y-16	Y-17	BIX-2	BIX-64	BIX-32	BIX-50	玄武岩	
样号	SiO ₂	51.88	52.05	52.33	50.44	53.29	54.15	51.46	51.73	53.9	52.82	51.77	53.18	53.33	47.38	49.86	50.57	51.23	51.87	玄武岩
	TiO ₂	1.32	1.56	2.01	1.27	2.56	2.56	2.77	2.69	2.57	2.88	1.99	2.1	2.05	2.62	3.81	2.83	2.75	2.74	玄武岩
	Al ₂ O ₃	17.04	18.12	14.70	17.96	14.74	14.53	14	14.16	14.66	14.65	14.55	13.74	13.03	13.73	12.73	14.71	14.57	13.9	玄武岩
	TFe ₂ O ₃	8.57	10.32	11.45	8.62	10.89	11.98	13.61	13.72	12.94	13.23	11	11.61	10.4	14.11	15.42	14.13	14.29	14.03	玄武岩
	MnO	0.13	0.13	0.20	0.12	0.24	0.22	0.24	0.28	0.25	0.23	0.21	0.21	0.21	0.2	0.21	0.18	0.18	0.22	玄武岩
	MgO	7.45	4.25	5.35	7.64	3.72	3.14	4.03	4.08	3.33	3.55	3.9	3.93	4.29	3.99	4.17	4.45	4.29	4.22	玄武岩
	CaO	9.53	9.33	9.34	8.95	6.35	6.59	6.56	6.34	5.84	5.26	6.43	6.1	6.84	6.59	7.81	6.82	6.73	6.68	玄武岩
	Na ₂ O	3.47	4.02	3.32	4.00	1.64	1.51	2.5	1.59	1.61	2.05	4.4	4.45	3.81	4.14	3.43	3.39	3.5	3.75	玄武岩
	K ₂ O	0.44	0.05	1.02	0.79	1.35	1.69	1.04	1.07	1.54	1.72	1.3	2.26	1.96	1.36	0.08	0.46	0.47	0.79	玄武岩
	P ₂ O ₅	0.17	0.17	0.30	0.20	0.78	0.8	0.82	0.86	0.8	0.88	0.75	0.69	0.68	1.1	0.5	0.35	0.4	0.4	玄武岩
	LOI	9.16	3.51	2.18	1.05	2.29	2.72	2.87	3.28	2.43	2.41	3.59	1.6	3.3	4.69	2.18	2.19	1.48	1.87	玄武岩
	Total	100.01	99.96	99.60	99.69	99.86	99.89	99.89	99.88	99.87	99.68	99.9	99.89	99.9	99.91	100.2	100.08	99.89	100.47	玄武岩
	La	61.2	55.8	55.8	50.44	24.7	23.5	22.0	22.6	24.5	24.5	25.0	25.9	24.5	19.1	13.51	8.39	23.07	19.85	玄武岩
	Ce	61.2	58.8	55.8	50.44	61.2	58.8	55.8	56.8	61.9	62.1	65.6	65.9	61.7	50.2	36.90	22.37	61.22	54.06	玄武岩
	Pr	8.23	7.97	7.63	7.72	7.72	7.97	7.63	7.72	8.32	8.39	9.06	9.01	8.35	7.18	5.51	3.33	8.33	7.92	玄武岩
	Nd	39.8	38.9	37.6	37.6	39.8	38.9	37.6	37.6	40.2	41.0	45.4	43.9	41.3	37.1	27.80	17.39	39.69	40.46	玄武岩
	Sm	10.20	10.10	9.84	9.76	10.30	10.10	9.84	9.76	10.30	10.70	11.40	11.20	10.50	9.91	8.27	5.37	10.69	11.29	玄武岩
	Eu	3.47	3.37	3.25	3.25	3.25	3.37	3.25	3.25	3.45	3.58	3.69	3.74	3.59	3.45	2.78	2.02	2.94	3.34	玄武岩
	Gd	11.9	11.7	11.6	11.5	11.5	11.7	11.6	11.5	12.1	12.4	12.9	12.9	12.0	11.4	10.41	6.75	13.33	13.97	玄武岩
	Tb	1.92	1.89	1.86	1.85	1.86	1.89	1.86	1.85	1.96	1.99	2.12	2.13	1.95	1.79	1.77	1.12	2.30	2.34	玄武岩
	Dy	12.0	11.7	11.6	11.5	12.0	11.7	11.6	11.5	12.2	12.3	13.0	13.1	12.1	10.7	11.06	7.00	14.91	14.65	玄武岩
	Ho	2.43	2.37	2.32	2.32	2.32	2.37	2.32	2.32	2.48	2.49	2.61	2.65	2.44	2.09	2.31	1.39	3.14	3.02	玄武岩
	Er	7.02	6.83	6.61	6.69	7.02	6.83	6.61	6.69	7.25	7.14	7.56	7.69	7.05	5.78	6.61	3.90	9.45	8.64	玄武岩
	Tm	0.994	0.953	0.924	0.933	0.933	0.953	0.924	0.933	1.020	0.992	1.050	1.090	0.992	0.774	0.94	0.54	1.38	1.20	玄武岩
	Yb	6.51	6.19	5.99	6.09	6.09	6.19	5.99	6.09	6.67	6.47	6.90	7.06	6.47	4.81	6.02	3.48	9.41	8.05	玄武岩
	Lu	0.972	0.914	0.872	0.891	0.872	0.914	0.872	0.891	0.983	0.952	1.030	1.050	0.961	0.692	0.91	0.51	1.38	1.17	玄武岩
	ΣREE	63.3	61.7	59.8	59.9	63.9	61.7	59.9	64.6	63.9	70.9	72.1	72.1	66.1	55.7	54.78	33.74	79.11	73.45	玄武岩
	REE/HREE	191.35	185.19	177.90	179.50	193.33	195.00	193.33	195.00	207.32	207.32	207.32	207.32	193.90	164.98					玄武岩
	(La/Yb) _N	3.37	3.35	3.26	3.30	3.33	3.36	3.33	3.36	3.40	3.35	3.41	3.34	3.41	3.40					玄武岩
	δEu	2.72	2.72	2.63	2.66	2.63	2.66	2.63	2.66	2.63	2.72	2.60	2.63	2.72	2.85					玄武岩
	δCe	0.96	0.95	0.93	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.95	0.93	0.95	0.97	0.99					玄武岩
	δCe	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.06	1.05	1.05					玄武岩
	Pb	7.84	6.46	6.18	8.29	11.30	11.30	11.30	11.30	11.20	10.70	9.45	10.70	16.90		24.47	5.97	20.66	17.24	玄武岩
	Cr	14.70	17.50	11.00	10.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.90	13.00	21.70	23.10	23.10	31.40	14.41	35.09	7.49	12.52	玄武岩
	Rb	220.00	331.00	239.00	290.00	265.00	265.00	265.00	265.00	299.00	317.00	332.00	332.00	266.00	346.00	6.72	15.35	22.00	2.62	玄武岩
	Sr	226.00	254.00	150.00	131.00	220.00	220.00	220.00	220.00	250.00	250.00	442.00	379.00	247.00	179.00	180.90	193.50	176.50	591.10	玄武岩
	Ba	14.60	13.50	12.80	13.60	14.20	13.90	13.80	14.20	13.90	13.80	14.20	10.90	8.64	5.96	38.54	102.40	204.80	39.98	玄武岩
	Nb	0.92	0.86	0.81	0.85	0.87	0.86	0.87	0.86	0.86	0.75	0.81	0.43	0.55	0.70	3.88	10.22	6.86	4.86	玄武岩
	Ta	406.00	377.00	353.00	363.00	418.00	388.00	388.00	418.00	388.00	388.00	421.00	377.00	238.00	242.20	0.32	0.70	0.32	0.70	玄武岩
	Zr	8.53	7.96	7.44	7.59	8.71	8.24	10.40	11.20	10.40	11.20	10.70	10.00	7.27	5.88	248.70	547.20	345.90	194.70	玄武岩
	Hf	1.07	1.13	0.87	0.90	0.92	1.13	1.31	1.17	0.92	1.13	1.17	0.88	0.56	0.68	5.88	12.88	8.23	4.65	玄武岩
	U	2.77	2.52	2.32	2.47	2.82	2.47	2.82	2.47	2.82	2.63	2.82	2.99	2.70	1.56	6.72	15.35	22.00	2.62	玄武岩
	Th	6.41	6.11	5.90	6.06	6.47	6.07	5.47	5.84	5.70	4.27	4.42	4.41	6.93	4.71	1.30	6.01	3.01	2.18	玄武岩
	Zr/Y	1.59	1.57	1.52	1.52	1.67	1.59	1.71	1.77	2.08	1.51	3.01	2.81	4.93	3.68	4.41	6.92	4.71	4.95	玄武岩
	(Th/Nb) _N	0.59	0.57	0.58	0.60	0.58	0.57	0.55	0.55	0.55	0.55	0.44	0.45	0.44	0.43	0.44	0.46	0.44	0.35	玄武岩
	Nb/La	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	玄武岩

4.91%之间, K_2O 含量介于 0.03% ~ 2.26% 之间。石炭纪和二叠纪火山岩的 Na_2O 、 K_2O 等元素含量均变化较大, 可能与遭受蚀变作用有关。

在 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解中, 石炭纪玄武岩样品点主要落入安山玄武岩范围内, 极个别样品落入碱性玄武岩范围(图 2a)。落入安山玄武岩范围内的样品点 Nb/Y 值均小于 0.8, 属于亚碱性系列。在 $FeO^I/MgO - SiO_2$ 图解(图 2b)中, 石炭纪火山岩样品绝大多数落入拉斑系列。在 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解中, 二叠纪火山岩样品点主要落入安山玄武岩和亚碱性玄武岩范围内, 仅有少部分落入安山岩范围内, 极少数落入碱性火山岩范围(图 2c); Nb/Y 值均小于 0.8, 属于亚碱性系列。由于所收集的二叠纪火山岩数据未单独提供 FeO 及 Fe_2O_3 含量, 因此, 本文选用 $Y - Zr$ 图解对其进行了进一步划分, 在 $Y - Zr$ 图解中, 除个别样品落入钙碱系列外, 其余绝大多数二叠纪火山岩落入拉斑系列和过渡区(图 2d)。

3.1.2 微量元素

石炭纪玄武岩的稀土元素总量($45.08 \times 10^{-6} \sim 189.60 \times 10^{-6}$)和二叠纪玄武岩的稀土元素总量($28.08 \times 10^{-6} \sim 207.32 \times 10^{-6}$)均变化较大, 远高于球粒陨石总量, 各稀土元素含量约为球粒陨石的 10 ~ 100 倍左右。石炭纪-二叠纪玄武岩(混染及未混染)均具有 LREE 富集的球粒陨石标准化配分模式(图 3a、3b), 其中石炭纪玄武岩的 LREE/HREE 值介于 1.48 ~ 7.09 之间, $(La/Yb)_N$ 值介于 0.84 ~ 10.04 之间, δEu 值主体集中在 1 附近; 二叠纪玄武岩的 $(La/Yb)_N$ 值变化较大, 介于 0.41 ~ 13.77 之间, 发育轻微的 Eu 负异常。石炭纪-二叠纪遭受地壳混染的玄武岩在微量元素蛛网图(图 3c)上呈现出明显的 Nb-Ta 亏损和微弱的 Ti 亏损特征, 而未遭受地壳混染作用的绝大多数石炭纪-二叠纪玄武岩主要呈现出与 OIB 相似的“隆起”状不相容元素标准化配分模式(图 3d)。

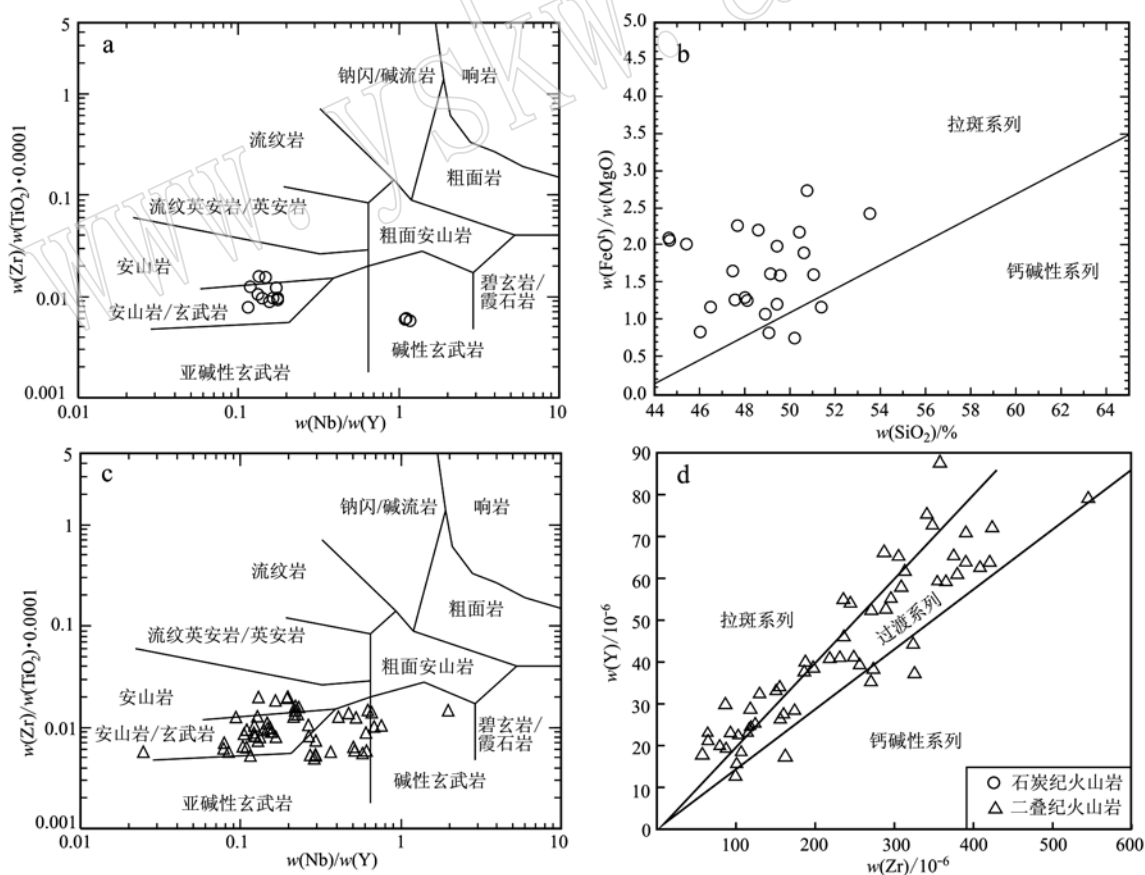


图 2 北山石炭纪、二叠纪火山岩的 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ (Winchester and Floyd, 1977)、 $FeO^I/MgO - SiO_2$ 图解 (Miyashiro, 1975) 及 $Y - Zr$ 图解 (Maclean and Barrett, 1993)

Fig. 2 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ diagram (after Winchester and Floyd, 1977), $FeO^I/MgO - SiO_2$ diagram (after Miyashiro, 1975) and $Y - Zr$ diagram (after Maclean and Barrett, 1993) for the Carboniferous and Permian volcanic rocks

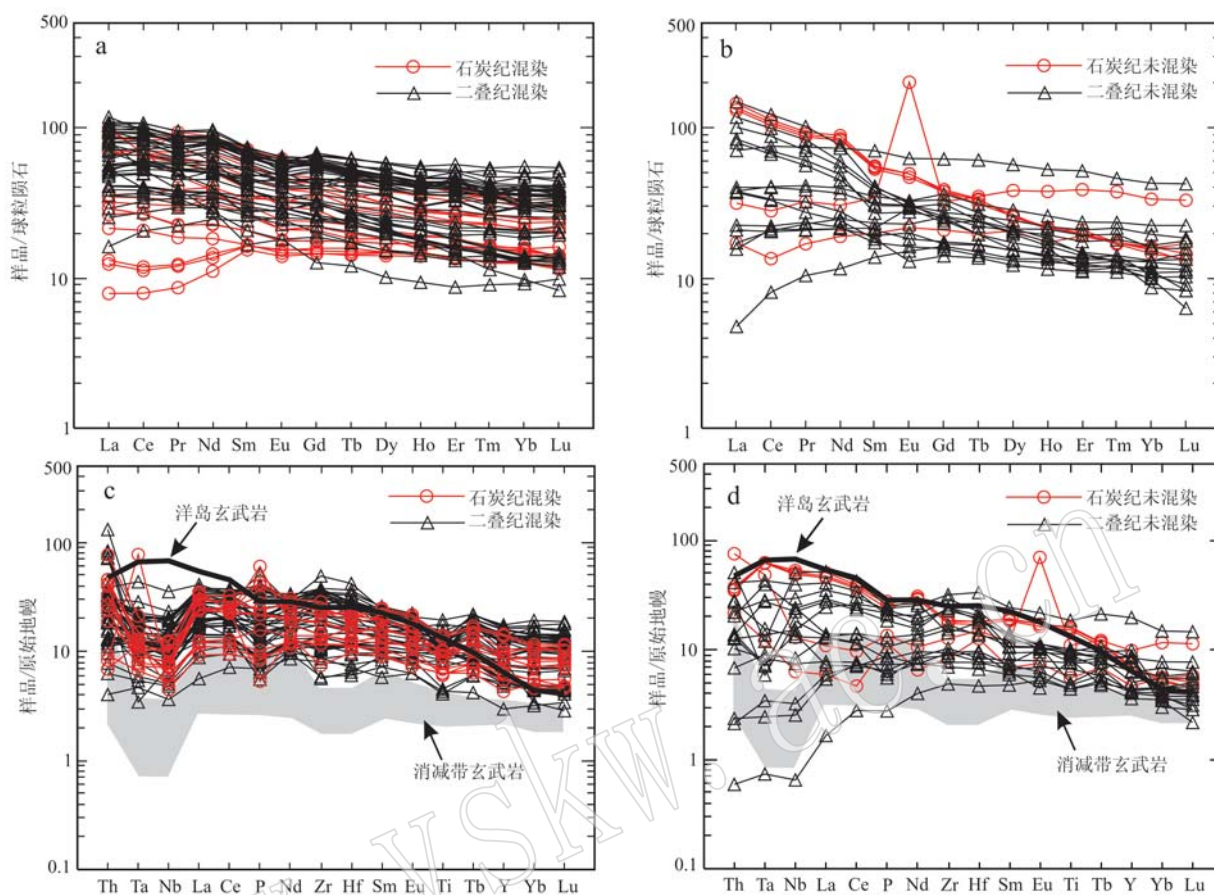


图3 北山石炭纪-二叠纪火山岩稀土元素配分模式图(a,b)及微量元素蛛网图(c,d)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a, b) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (c, d) of Carboniferous and Permian volcanic rocks

球粒陨石、原始地幔标准化值和洋岛玄武岩值据 Sun and McDonough, 1989; 阴影区代表的消减带玄武岩的成分范围, 其上限和下限分别由高 K 玄武岩和低 K 玄武岩的平均值限定, 平均值数值据 Tatsumi and Eggins, 1995
chondrite-normalized value after Sun and Mc Donough, 1989; the shaded area shows the range for arc sub-alkaline basalts, with the lower and upper limits being defined by “average” low-K and high-K basalts, respectively (after Tatsumi and Eggins, 1995)

4 讨论

关于北山石炭纪-二叠纪火山岩浆源区特征研究已有涉及, 本文在此不再赘述, 以下主要从北山石炭纪-二叠纪玄武质火山岩浆是否遭受地壳混染以及玄武质岩浆是否为地幔柱源两个方面进行讨论。

4.1 地壳混染

地壳混染作用在大陆火山岩的岩石成因中占有十分重要的地位, 也是当代大陆火山岩研究中非常重要的基础性理论问题(夏林圻等, 2007a)。因此, 在讨论北山石炭纪-二叠纪玄武岩时有必要判断其是否遭受了地壳混染作用。对于地壳卷入的识别信号, 通常以很高的原始地幔标准化 Th/Nb 值(≥ 1),

高 La/Nb 值, 低 Nb/La 值(< 1), 具有明显 Nb、Ta、Ti 负异常的微量元素分配型式, 低-非常低的 ϵNd 值(< 0)以及高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(> 0.706)为特征, 这是受到地壳混染的大陆板内玄武岩的最鲜明的特点(Saunders *et al.*, 1992; Kieffer *et al.*, 2004)。

本次工作将北山石炭纪-二叠纪玄武岩样品按照是否遭受地壳混染(Saunders *et al.*, 1992; Kieffer *et al.*, 2004)的标准, 将其分开进行讨论。石炭纪-二叠纪玄武岩中部分样品具有原始地幔标准化 $\text{Th}/\text{Nb} \gg 1$ 、 $\text{Nb}/\text{La} < 1$ (表1)、微量元素蛛网图(图3c、3d)上呈现出明显的 Nb-Ta 亏损和微弱的 Ti 亏损特征, 但不相容元素丰度与消减带玄武岩微量元素丰度存在明显差异, 即它们的不相容元素丰度仍然明显地高于消减带玄武岩(图3c), 因此不能将混染的

玄武岩当作是消减带玄武岩(包括岛弧玄武岩和活动大陆边缘玄武岩)。未遭受地壳混染的石炭纪-二叠纪玄武岩具有与洋岛玄武岩较为相似的不相容元素原始地幔标准化分配模式,而与消减带玄武岩的不相容元素原始地幔标准化分配模式具有明显区别(图3d)。结合以上特征,笔者认为北山地区石炭纪-二叠纪玄武岩遭受了大陆地壳的混染作用。

4.2 地幔柱的鉴别和组分推断

天山及相邻地区的石炭纪-二叠纪火成岩省(包括塔里木盆地东北缘的北山地区)已被提出(夏林圻等, 2004, 2006; Xia *et al.*, 2003, 2004, 2005, 2008),亦得到了一些学者的认可(Pirajno, 2007; Bryan and Ernst, 2008; Pirajno *et al.*, 2008, 2009),该火成岩省的发育可能与地幔柱有关。本文所涉及的北山地区石炭纪和二叠纪玄武岩样品点(混染和未混染)绝大多数落入了板内范围内(图4)。在北山地区,从晚泥盆世开始,北山南部及北部先后进入碰撞后的板内伸展阶段,其标志是沿北山南部墩墩山一带形成晚泥盆世墩墩山群陆相火山-沉积岩系底部的退积型盆地沉积充填序列和北山北部早中泥盆世雀儿山群与上覆早石炭世绿条山组底部砾岩之间的不整合接触(李向民等, 2011; 王国强等, 2015)。在东天山的小热泉子一带,罗雅楚山一带和中天山的马鞍桥一带的上泥盆统一下石炭统均可见底部沉

积同下伏地层为角度不整合接触,这一区域性不整合代表了一次重大的地质事件,即亚洲古生代洋盆的结束和陆内演化的开始(夏林圻等, 2007b)。岩石地球化学及地质证据均显示石炭纪及二叠纪火山岩形成于板内环境,支持了前人关于大火成岩省的观点。

地幔柱假说已被国际地学界广泛接受,将其当作是大火成岩省的动力学机制,虽然也有一些学者提出了其他模型解释大火成岩省的成因。识别古老的地幔柱主要依靠火山作用之前的地壳或岩石圈穹状隆升、巨大的放射状岩墙群、火山链的年代学变化、火山作用的物理特征以及深部地幔地球化学等标志来鉴别(夏林圻等, 2013)。尽管根据地球化学特征比较难以识别地幔柱的卷入,但某些方面的判断还是有可能的(Campbell, 1998; Condie, 2001; Ernst and Buchan, 2003),例如,没有遭受地壳或岩石圈混染的地幔柱玄武岩通常具有平坦的或轻稀土元素富集的稀土元素配分模式,且缺乏 Nb、Ta、Ti、Zr 和 Hf 负异常;干的高镁质岩浆岩(苦橄岩、苦橄质玄武岩和科马提岩)的存在被当作地幔柱的特征(Zhang *et al.*, 2006a, 2006b, 2008)。基于“不相容元素(高场强元素)比值既不容易受到次生蚀变作用的影响,亦不像同位素比值那样随时间发生改变(即高场强元素比值随着时间不会发生变化)”的优点,Condie(2003, 2005)提出可以利用 Nb/Th、Zr/Nb、Zr/Y 和 Nb/Y 等4个高场强元素(HFSE)比值对同位素地幔域特征化,从而将地幔柱源和非地幔柱源玄武岩加以区分。北山地区石炭纪、二叠纪未遭受混染的玄武岩除主要具有轻稀土元素富集或平坦的配分模式外,还呈现出与 OIB 相似的“隆起”状不相容元素标准化配分模式(图3)。

对比分析近年来北山地区(图1)已发表的大量火山岩数据,看其是否支持“北山石炭纪-二叠纪玄武岩可能具地幔柱成因”的观点。本文采用 Condie(2003, 2005)提出的深部地幔地球化学的方法对北山地区的石炭纪和二叠纪玄武岩成因进行探讨。在图5中可以发现,没有受到明显地壳或岩石圈混染的北山石炭纪-二叠纪玄武岩样品点多数落入 PM 和 EM II 之间的 ΔNb 线之上(图5b),明显反映了它们主要是源于地幔柱源特征,样品点特征与源于地幔柱头部的大洋高原玄武岩(成分点在深部亏损组分 DEP 和富集组分 EN 之间)相似,也和地幔柱尾部玄武岩(成分点在或靠近由再循环组分 REC 所限定的区域)相似。其余混染了的多数玄武岩成分点则

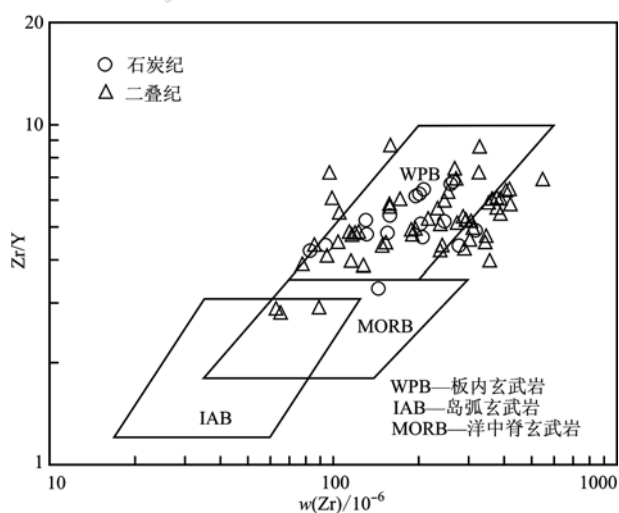


图4 玄武岩 Zr/Y-Zr 构造环境判别图
(Pearce 和 Cann, 1973)

Fig. 4 Discrimination of tectonic setting of basalts from Carboniferous and Permian strata (after Pearce and Cann, 1973)

主要集中围绕 EN 分布(图 5a, 5b), 主要反映了地幔柱源玄武岩受到了地壳或陆下岩石圈的污染, 这亦

与前述石炭纪-二叠纪玄武岩的微量元素地球化学研究所得的结论一致。

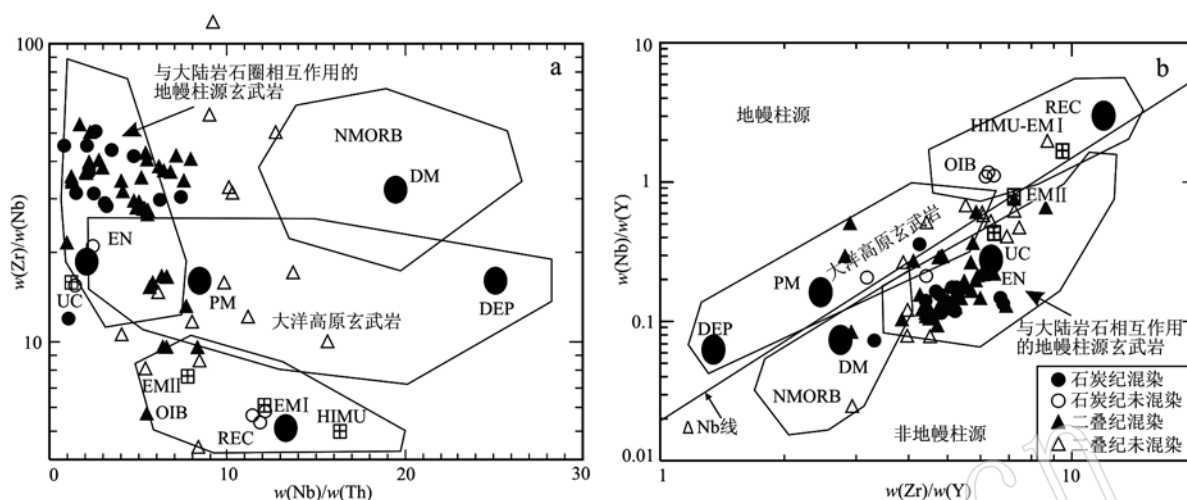


图 5 北山地区石炭-二叠纪玄武岩的 Zr/Nb - Nb/Th (a) 和 Nb/Y - Zr/Y (b) 图解(据 Condie, 2005)

Fig. 5 Zr/Nb - Nb/Th (a) and Nb/Y - Zr/Y (b) diagrams of basalts from Carboniferous and Permian strata (after Condie, 2005)

UC—上部陆壳; PM—原始地幔; DM—浅部亏损地幔; HIMU—高 $\mu(U/Pb)$ 源; EM I、EM II—富集地幔源 1、2; OIB—洋岛玄武岩;

DEP—深部亏损地幔; EN—富集组分; REC—再循环组分

U—upper crust; PM—primitive mantle; DM—depleted mantle; HIMU—high- $\mu(U/Pb)$ mantle source; EM I, EM II—enriched mantle I and II sources; OIB—ocean island basalt; DEP—deep depleted mantle; EN—enriched component; REC—recycled component

综上所述,笔者认为北山石炭纪-二叠纪火山岩浆可能主要来源于地幔柱,岩浆从大陆岩石圈之下上升,在通过大陆岩石圈时受到了岩石圈地幔或地壳明显污染。尽管本文地幔地球化学研究给出了石炭纪-二叠纪玄武岩源自地幔柱的可能性,但要最终确定石炭纪-二叠纪火山岩浆作用的地幔动力学机制,仍需找寻更多的地质学依据。

5 结论

北山地区石炭纪-二叠纪玄武岩具有较为一致的稀土元素地球化学特征;微量元素特征表明,遭受地壳污染的玄武岩呈现出明显的 Nb-Ta 亏损和微弱的 Ti 亏损特征,而未遭受污染的玄武岩则主要具有与 OIB 相似的“隆起”状不相容元素配分特征。石炭纪-二叠纪玄武岩浆可能主要来源于地幔柱,部分石炭纪-二叠纪玄武岩在形成演化过程中遭受了明显的大陆地壳污染作用,导致其出现十分相似于岛弧或活动大陆边缘的地球化学特征。结合区域构造演化分析及玄武岩构造环境判别认为,石炭纪-二叠纪玄武岩均形成于大陆板内环境。

References

- Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1992. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220(1~4): 89~115.
- Bryan S and Ernst R E. 2008. Revised definition of large igneous provinces (LIPs)[J]. *Earth-Science Reviews*, 86(1): 175~202.
- Campbell I H. 1998. The mantle's chemical structure: Insights from the melting products of mantle plumes[A]. Jackson I N S. *The Earth's Mantle: Composition, Structure and Evolution*[C]. Oxford: Cambridge Univ. Press.
- Condie K C. 2001. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History* [M]. Oxford: Cambridge Univ. Press.
- Condie K C. 2003. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(1): 1~28.
- Condie K C. 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? [J]. *Lithos*, 79(3): 491~504.
- Dang Ben, Zhao Hong, Lin Guangchun, et al. 2013. Petrogenesis and

- tectonic significance of carboniferous volcanic rocks in northern Alxa and its neighboring areas, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 963 ~ 974 (in Chinese with English abstract).
- Ernst R E and Buchan K L. 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 31(16): 469 ~ 523.
- Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1997. Lithostratigraphy of Gansu[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, *et al.* 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305 ~ 316 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb dating on the mafic-ultramafic complexes from Kelatongke and Huangshandong, Xinjiang, and their geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2 324 ~ 2 328 (in Chinese).
- Hong D, Zhang J, Wang T, *et al.* 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 799 ~ 813.
- Huang Zengbao and Jin Xia. 2006. Tectonic environment of basic volcanic rocks in the Hongshishan ophiolite melange zone, Beishan Mountains, Gansu[J]. *Geology in China*, 33(5): 1 030 ~ 1 037 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Xia Mingzhe, Yu Xu, *et al.* 2007. Liuyuan Trachybasalt belt in the northeastern Tarim plate: products of asthenosphere mantle decompressional melting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1 765 ~ 1 778 (in Chinese with English abstract).
- Kieffer B, Arndt N, Lapierre H, *et al.* 2004. Flood and shield basalts from Ethiopia: Magmas from the African superswell[J]. *Journal of Petrology*, 45(4): 793 ~ 834.
- Li Jinyi and Xu Xin. 2004. Major problems on geologic structures and metallogenesis of northern Xinjiang, northwest China[J]. *Xinjiang Geology*, 22(2): 119 ~ 124 (in Chinese with English abstract).
- Li Qixiang, Liao Qun'an, San Jinzhu, *et al.* 2010. Characteristics and tectonic significances of the mafic-ultramafic rocks from Sidingheishan area in Hami, Xinjiang[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(4): 14 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiangmin, Yu Jiuyuan, Wang Guoqiang, *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Devonian Sangejing formation and Dundunshan group in Hongliuyuan, Beishan area, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1 501 ~ 1 507 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuhang. 2009. The Volcanic Activity Characteristics and Tectonic Evolution of Rift from Carboniferous to Early Permian in the Southeast of Heishanling, Xinjiang Beishan[D]. Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Maclean W H and Barrett T J. 1993. Lithogeochemical techniques using immobile elements[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 48(2): 109 ~ 133.
- Ma Y, Zhang Z C, Huang H, *et al.* 2016. Petrogenesis of the Bashisuogong bimodal igneous complex in southwest Tianshan Mountains, China, implications for the Tarim Large Igneous Province[J]. *Lithos*, 264: 509 ~ 523.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics, and origin of ophiolites[J]. *The Journal of Geology*, 83(2): 249 ~ 281.
- Pan Jinhua, Guo Zhaojie, Liu Chang, *et al.* 2008. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of Permian basalts in Hongliuhe area on the border between Xinjiang and Gansu[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 793 ~ 802 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J and Cann J. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290 ~ 300.
- Pirajno F. 2007. Mantle plumes, associated intraplate tectono-magmatic processes and ore systems[J]. *Episodes*, 30(1): 6 ~ 19.
- Pirajno F, Ernst R E, Borisenko A S, *et al.* 2009. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 114 ~ 136.
- Pirajno F, Mao J W, Zhang Z C, *et al.* 2008. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2): 165 ~ 183.
- Qin Kezhang and Fang Tonghui. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan mountains, NW-China[J]. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302 ~ 308 (in Chinese with English abstract).
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, *et al.* 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3 027 ~ 3 035 (in Chinese with English abstract).
- Saunders A, Storey M, Kent R, *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 68(1): 41 ~ 60.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J].

- Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 ~ 345.
- Tang Zhongli, Yan Haiqin, Jiao Jiangang, *et al.* 2006. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 1 ~ 9(in Chinese with English abstract).
- Tatsumi Y and Eggins S. 1995. *Subduction Zone Magmatism*[M]. Cambridge: Blackwell Science.
- Wang Guoqiang, Li Xiangmin, Xu Xueyi, *et al.* 2012. Zircon U-Pb ages of Sidingheishan mafic-ultramafic rocks in Xinjiang-Gansu border area and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2 046 ~ 2 051(in Chinese with English abstract).
- Wang Guoqiang, Li Xiangmin, Xu Xueyi, *et al.* 2015. Geochemistry and tectonic setting of volcanic rocks from Devonian Sangejing formation and Dundunshan group in Dundunshan area, Gansu province[J]. *Geological Review*, 61(Supp.): 730 ~ 732(in Chinese).
- Winchester J and Floyd P. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325 ~ 343.
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Xia Zuchun, *et al.* 2006. Carboniferous-Permian rift-related volcanism and mantle plume in the Tianshan large igneous province, northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 39(1): 1 ~ 49(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, *et al.* 2013. *Continental Intraplate Volcanism in Mid-western China and Its Neighboring Areas*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9 ~ 10): 903 ~ 910(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007a. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77 ~ 89(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007b. *Magmatism in the Tianshan*[M]. Beijing: Chinese Earth Publishing House(in Chinese).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2008. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4 ~ 6): 357 ~ 378.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2005. Nature of the mantle source of the Tianshan carboniferous rift-related basalts [J/OL]. November 2005 LIP of the Month. <http://www.largeigneousprovinces.org/05nov>.
- Xia Linqi, Xu Xueyi and Xia Zuchun. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3 ~ 4): 419 ~ 433.
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zuchun, *et al.* 2003. Carboniferous post-collisional rift volcanism of the Tian Shan Mountains, northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 77(3): 338 ~ 360.
- Xia Zhaode, Jiang Changyi and Lin Jinlan. 2014. Petrogenesis of early Permian Bijianshan volcanic rocks in Beishan area, Xinjiang, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and isotopic geochronology[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 817 ~ 834(in Chinese with English abstract).
- Xiao Peixi, You Weifeng, Dong Zengchan, *et al.* 2010. The re-definition of formation age of Xiaocaohu volcanic rocks in Beishan area, Gansu province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(9): 1 268 ~ 1 274(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B, Badarch G, *et al.* 2004a. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339 ~ 342.
- Xiao W J, Zhang L, Qin K Z, *et al.* 2004b. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304: 370 ~ 395.
- Xiao Yuanfu, Wang Daoyong, Deng Jianghong, *et al.* 2004. Volcanism during activity period of Beishan craton rift in Xinjiang, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(4): 331 ~ 337(in Chinese with English abstract).
- Yarmolyuk V, Kovalenko V and Kuzmin M. 2000. North Asian superplume activity in the Phanerozoic: magmatism and geodynamics[J]. *Geotectonics*, 34(5): 343 ~ 366.
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, *et al.* 2006a. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *Journal of Petrology*, 47(10): 1 997 ~ 2 019.
- Zhang Z C, Mao J W, Chai F M, *et al.* 2009a. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, Northern Xinjiang, NW China, Implications for the Genesis of the Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit[J]. *Economic Geology*, 104(2): 185 ~ 203.
- Zhang Z C, Mao J W, Wang F S, *et al.* 2006b. Native gold and native copper grains enclosed by olivine phenocrysts in a picrite lava of the Emeishan large igneous province[J]. *American Mineralogist*, 91(7): 1 178 ~ 1 183.
- Zhang Z C, Zhi X C, Chen L L, *et al.* 2008. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(1 ~ 2): 30 ~ 39.

- Zhang Z C, Zhou G, Kusky T M, *et al.* 2009b. Late Paleozoic volcanic record of the Northern Junggar Terrane, Xinjiang, northwestern China, major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 201 ~ 215.
- Zhao Zehui, Guo Zhaojie, Han Baofu, *et al.* 2006. Comparative study on Permian basalts from eastern Xinjiang-Beishan area of Gansu province and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 279 ~ 1 293(in Chinese with English abstract).
- Zheng R G, Wu T R, Zhang W, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic magmatic rocks in the Yinwaxia area, Beishan: Implications for rift magmatism in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91: 39 ~ 55.
- Zhou M F, Michael L C, Yang Z, *et al.* 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 209(3 ~ 4): 233 ~ 257.
- Zuo Guochao and He Guoqi. 1990. Plate Tectonics and Metallogensis Regularities in Beishan Region[M]. Beijing: Peking University Press, 1 ~ 226(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 党 桦, 赵 虹, 林广春, 等. 2013. 阿拉善北部地区石炭纪火山岩岩石成因及构造意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(5): 963 ~ 974.
- 甘肃省地质矿产局. 1997. 甘肃省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境[J]. *岩石学报*, 16(3): 305 ~ 316.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁~超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 49(22): 2 324 ~ 2 328.
- 黄增保, 金 霞. 2006. 甘肃北山红石山蛇绿混杂岩带中基性火山岩构造环境分析[J]. *中国地质*, 33(5): 1 030 ~ 1 037.
- 姜常义, 夏明哲, 余 旭, 等. 2007. 塔里木板块东北部柳园粗面玄武岩带: 软流圈地幔减压熔融的产物[J]. *岩石学报*, 23(7): 1 765 ~ 1 778.
- 李锦轶, 徐 新. 2004. 新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题[J]. *新疆地质*, 22(2): 119 ~ 124.
- 李奇祥, 廖群安, 三金柱, 等. 2010. 新疆哈密四顶黑山地区镁铁质-超镁铁岩特征及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 29(4): 14 ~ 20.
- 李向民, 余吉远, 王国强, 等. 2011. 甘肃北山红柳园地区泥盆系三个井组和墩墩山群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其意义[J]. *地质通报*, 30(10): 1 501 ~ 1 507.
- 李煜航. 2009. 新疆北山黑山岭东南石炭纪-早二叠世火山活动特征与裂谷构造演化[D]. 长安大学.
- 潘金花, 郭召杰, 刘 畅, 等. 2008. 新甘交界红柳河地区二叠纪玄武岩年代学、地球化学及构造意义[J]. *岩石学报*, 24(4): 793 ~ 802.
- 秦克章, 方同辉. 2002. 东天山板块构造分区演化与成矿地质背景研究[J]. *新疆地质*, 20(4): 302 ~ 308.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(10): 3 027 ~ 3 035.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 2006. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(1): 1 ~ 9.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2012. 甘新交界四顶黑山镁铁-超镁铁质岩的形成时限及其地质意义[J]. *地质通报*, 31(12): 2 046 ~ 2 051.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2015. 甘肃北山墩墩山一带泥盆系三个井组与墩墩山群火山岩地球化学特征及形成环境[J]. *地质论评*, 61(增刊): 730 ~ 732.
- 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等. 2006. 天山石炭-二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. *西北地质*, 39(1): 1 ~ 49.
- 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 2013. 中国中西部及邻区大陆板内火山作用[M]. 北京: 科学出版社.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. *地质通报*, 23(9 ~ 10): 903 ~ 910.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007a. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77 ~ 89.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007b. 天山岩浆作用[M]. 北京: 中国大地出版社.
- 夏昭德, 姜常义, 凌锦兰. 2014. 新疆笔架山早二叠世火山岩带岩石成因: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(3): 817 ~ 834.
- 校培喜, 由伟丰, 董增产, 等. 2010. 甘肃北山小草湖火山岩系形成时代的重新厘定[J]. *地质通报*, 29(9): 1 268 ~ 1 274.
- 肖渊甫, 王道永, 邓江红, 等. 2004. 新疆北山晚古生代克拉通裂谷火山作用特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(4): 331 ~ 337.
- 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 等. 2006. 新疆东部-甘肃北山地区二叠纪玄武岩对比研究及其构造意义[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 279 ~ 1 293.
- 左国朝, 何国琦, 李红诚. 1990. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1 ~ 226.