

新疆东准噶尔滴水泉一带早石炭世火山岩年龄及地球化学特征

王富明¹, 廖群安¹, 樊光明¹, 蔡雄飞¹, 田 健¹, 陈 帅¹,
胡朝斌¹, 吴魏伟¹, 程雯娟²,

WANG Fu-ming¹, LIAO Qun-an¹, FAN Guang-ming¹, CAI Xiong-fei¹, TIAN Jian¹,
CHEN Shuai¹, HU Chao-bin¹, WU Wei-wei¹, CHENG Wen-juan²

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 江西省地质矿产开发局赣西北地质大队, 江西 九江 332000

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Northwestern Jiangxi Geological Party, Bureau of Geology and Exploration and Development
of Mineral Researches of Jiangxi Province, Jiujiang 332000, Jiangxi, China

摘要:滴水泉一带早石炭世火山岩分布于卡拉麦里蛇绿岩带南侧、准噶尔盆地东缘。岩石类型有玄武岩、玄武安山岩、安山岩、安山质角砾熔岩。岩石系列为碱性系列和拉斑玄武岩系列, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(336.6 \pm 3.7)\text{Ma} \sim (338.3 \pm 5.2)\text{Ma}$, 时代为早石炭世。火山岩富集 LILE 和轻稀土元素 $((\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.3 \sim 8.5)$, Nb、Ta 略显亏损, I_{sr} 值在 0.70354~0.70411 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +4.9~+6.6, 源区可能是受到俯冲板片脱水流体交代的大陆地幔楔。地球化学特征表明, 火山岩形成于板内环境, 为后碰撞岩浆活动的产物, 暗示准噶尔盆地东缘地区后碰撞岩浆活动至少从早石炭世就已经开始。火山岩中捕获的老锆石指示, 准噶尔盆地东部可能存在古老基底。

关键词:东准噶尔; 滴水泉; 早石炭世; 火山岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学

中图分类号: P595; P597^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)10-1584-12

Wang F M, Liao Q A, Fan G M, Cai X F, Tian J, Chen S, Hu C B, Wu W W, Cheng W J. Age and geochemical characteristics of the Early Carboniferous volcanic rocks in Dishuiquan area of East Junggar Basin, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(10):1584-1595

Abstract: The Early Carboniferous volcanic rocks in Dishuiquan area are distributed in southern Kalamaili ophiolite belt on the eastern margin of the Junggar Basin. The volcanic rocks are mainly composed of basalts, basaltic andesites, andesite and andesitic breccia lava, belonging to alkaline series and tholeiite series. The LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the volcanic rocks are $(336.6 \pm 3.7)\text{Ma} \sim (338.3 \pm 5.2)\text{Ma}$, indicating that they were formed in early Carboniferous. These volcanic rocks are enriched in LILE and REE $((\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.3 \sim 8.5)$, depleted in Nb and Ta slightly, with relatively low I_{sr} (0.70354~0.70411) and positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+4.9~+6.6). They were probably derived from a continental mantle wedge source metasomatized by dehydration fluids produced by a subducted slab. Geochemical features indicate that volcanic rocks were formed in an intraplate environment and produced in the post-collisional extensional period. These volcanic rocks suggest that post-collision magmatic activity had already begun at least in the Early Carboniferous in the eastern margin of the Junggar Basin. The captured ancient zircons in volcanic rocks indicate the presence of the old basement in eastern Junggar Basin.

Key words: Eastern Junggar; Dishuiquan; Early Carboniferous; volcanic rocks; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; geochemistry

收稿日期: 2013-03-01; 修订日期: 2013-05-22

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212011120508)

作者简介: 王富明(1987-), 男, 在读硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: liqinghan55555@126.com

通讯作者: 廖群安(1959-), 男, 教授, 从事岩石学及岩石地球化学研究。E-mail: qanliao@cug.edu.cn

研究区处于新疆卡拉麦里蛇绿岩带南侧, 准噶尔盆地的东北缘(图 1)。区内的卡拉麦里造山带是衔接阿尔泰和天山造山带的重要构造单元。卡拉麦里蛇绿岩带呈 NW—SE 走向从该区通过, 断续出露于卡拉麦里、莫钦乌拉等地。目前对于卡拉麦里蛇绿岩所代表的洋盆形成的具体时间还存在争议, 但都认为其形成于早古生代^[1-5], 而对于洋盆完全闭合的时间则存在中泥盆世^[3]、晚泥盆世^[6]、早石炭世^[7-10]、晚石炭世^[11-12]、二叠纪^[13]的不同认识, 表明卡拉麦里造山带经历了复杂的构造演化过程。大量的研究表明, 石炭纪是该区的一个重要转折期, 广泛分布于东准噶尔的火山岩记录了这一过程。前人对位于准噶尔盆地内部及其边缘的火山岩的相关研究较多^[14-17], 但多局限于对晚石炭世(300.4Ma^[17]、315Ma^[18])巴塔玛依内山组(C_2b)的年代学和地球化学的研究, 认为其是后碰撞岩浆活动的产物; 少量涉及到了准噶尔盆地内部采自钻孔岩心的早石炭世火山岩^[19-21], 但对于该区早石炭世火山的形成背景还存在岛弧^[19-20]、裂谷^[21-22]的不同认识。本文的研究对象是准噶尔盆地东缘滴水泉一带出露的早石炭世中基性火山岩, 用 LA-ICP-MS 法测得其锆石 U-Pb 年龄在

(336.6±3.7)~(338.3±5.2)Ma 之间, 相当于卡拉麦里断裂带北侧的下石炭统黑山头组火山岩的形成时代^[23]。火山岩地球化学特征显示, 其为板内岩浆活动的产物, 形成于后碰撞环境。这一认识表明, 该区后碰撞岩浆活动至少从早石炭世就已经开始, 卡拉麦里洋在早石炭世前已经关闭。

1 地质概况

研究区志留系—石炭系发育齐全, 出露有志留系中统白山包组(S_2b)、上统红柳沟组(S_3D_h), 泥盆系下中统卡拉麦里组($D_{1-2}k$)、中统白塔山组 and 上统克安库都克组(D_3ka), 石炭系下统塔木岗组、黑山头组、姜巴斯套组、上统巴塔玛依内山组(C_2b)。1:20 万卡拉麦里山幅将其中的上泥盆统克安库都克组归入下石炭统松喀尔苏组, 为一套陆相含火山岩的磨拉石建造, 角度不整合在下中泥盆统的卡拉麦里组之上, 《新疆岩石地层》^[24]将其归入晚泥盆统克安库都克组, 最近笔者在该组下部的砾岩中发现了晚泥盆世—早石炭世的植物化石 *Prelepidodendron* sp. (先鳞木), 在侵入于该组地层的后碰撞型花岗岩中获得 342Ma 的锆石 U-Pb 年龄(待发表), 因此同意《新疆

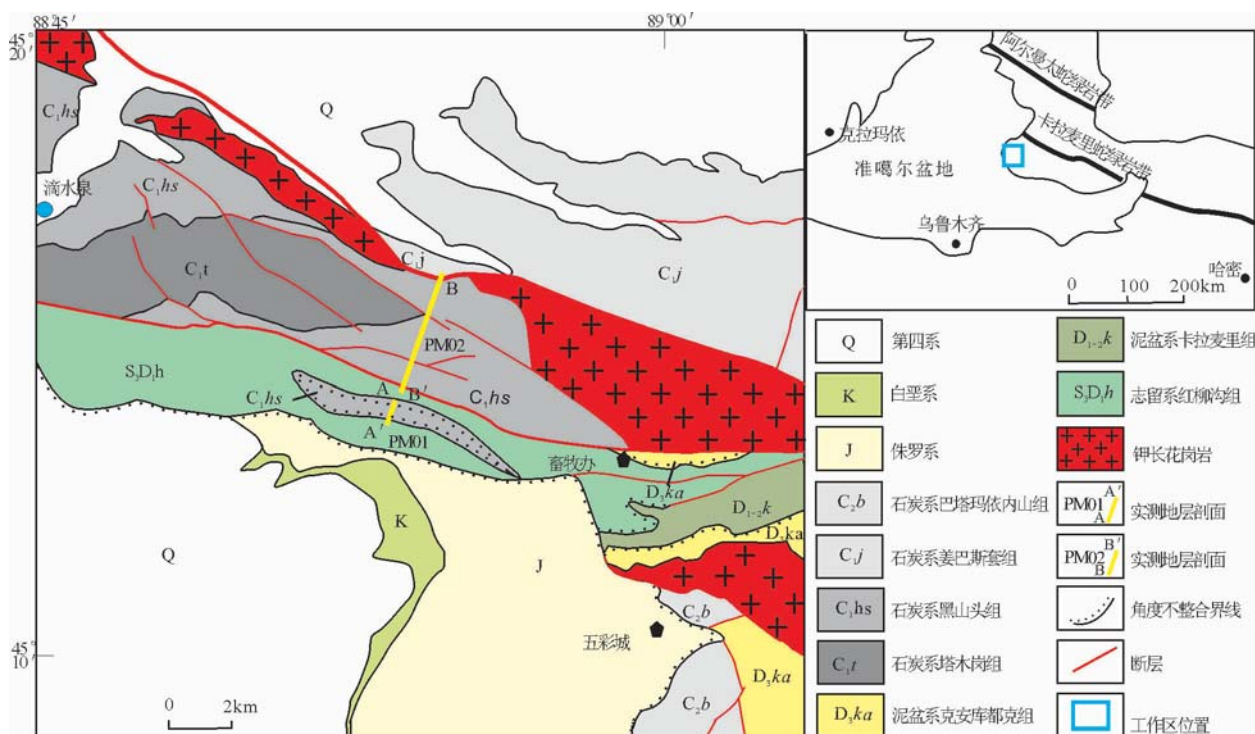


图 1 工作区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the work area

岩石地层》的观点,将其归入克安库都克组。克安库都克组与下伏地层呈角度不整合接触关系,表明卡拉麦里洋的关闭时间应在晚泥盆世之前。

本文研究的黑山头组为一套火山沉积建造,底部为正常沉积的砾岩、含砾砂岩、凝灰质砂岩,整合于下石炭统塔木岗组之上,或呈角度不整合超覆于志留系红柳沟组之上;中部为中基性的火山岩,以溢流相玄武岩、玄武安山岩为主,夹玄武质角砾凝灰岩、安山质角砾熔岩、凝灰质砂岩和岩屑长石砂岩,顶部为含砾砂岩、粉砂岩,总体上具上叠式盆地堆积的特征。

2 样品采集及分析方法

文中样品分别采自 2 个剖面(PM01、PM02)。用于化学分析和同位素分析的样品气孔和杏仁含量都较少,化学分析样品共 13 个,同位素样品 4 个,锆石 U-Pb 年龄样品 2 个(01-55、02-12),岩性分别为玄武岩和玄武安山岩。

锆石的分离、挑选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。锆石制靶和阴极发光(CL)显微照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行。然后进行透、反射光和阴极发光图象拍摄,选取无包体、无裂纹、岩浆环带清楚的样品用于测试。样品测试也在中国地质大学(武汉)国家重点实验室完成,使用的设备为 LA-ICP-MS,激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a,激光斑束直径为 32 μm 。样品分析流程:在开始测量和测定结束后分别测定 Nist610、91500、GJ-1 标样,每测定 5 个样品点测定 2 次锆石标样 91500,测试结果通过 ICPMSDataCal 软件处理。详细的处理流程和数据处理方法见相关文献^[25-26]。样品锆石 U-Pb 谐和图的绘制和年龄加权平均值的计算均采用 Isoplot 3.0 软件^[27]完成。

13 个化学分析样品中的 11 个由广州澳实矿物实验室测试,主量元素采用硼酸锂熔融消解,X 荧光光谱法(ME-XRF12)测定;微量元素采用四酸消解,质谱/光谱仪综合分析(ME-MS61);稀土元素采用硼酸锂熔融、等离子质谱定量(ME-MS81);亚铁分析采用酸消解,重铬酸钾滴定测量。2 个样品在湖北省地质实验研究所测试,其中,主量元素中的氧化物测定采用 X 荧光光谱法;微量、稀土元素测试则通过电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行。

Sr-Nd 同位素样品测试在中国地质大学(武汉)国家重点实验室完成,采用 Finnigan 公司的 MAT261 进行比值测量,准确度通过标样 NBS987 和 La Jolla 国际标样进行监测,Sr 同位素的质量分馏用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 校正,Nd 同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,详细流程见相关文献^[28]。

3 锆石 U-Pb 测年结果

用于同位素测定的单颗粒锆石均无色、透明,多为柱状且晶形较好,阴极发光图象显示,这些锆石的韵律环带清楚(图 2),部分具有继承核。锆石的 Th/U 比值介于 0.03~1.3 之间,除 4 个样品具较低的 Th/U 比值外,其余样品的 Th/U 比值均大于 0.2 (表 1、表 2),具岩浆锆石的特征。

样品 01-55 共测了 49 个点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 311~1193Ma 之间,变化范围很大,说明样品中既有火山岩形成时结晶的锆石,也有捕获的锆石。在 U-Pb 谐和图(图 3)中,数据投点在谐和图中分为 4 组,其中较年轻的 3 组对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(338.3\pm 5.2)\text{Ma}$ (MSWD=2.5)、 $(412.6\pm 4.5)\text{Ma}$ (MSWD=2.0)、 $(436.5\pm 4.2)\text{Ma}$ (MSWD=0.74);最大一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围较大,未进行加权平均计算。最小年龄 $(338.3\pm 5.2)\text{Ma}$ 代表了火山岩的喷发年龄,时代为早石炭世。

样品 02-12 共测了 16 个点,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 332~882Ma 之间。在谐和图中,投点主要集中在 337Ma 和 430Ma 两个区域,还有少量更老的点(图 4)。最年轻的 1 组给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(336.6\pm 3.7)\text{Ma}$ (MSWD=0.65),代表了火山岩的喷发年龄,与 01-55 样品获得的年龄非常接近,时代也为早石炭世。

4 岩石学特征

4.1 岩相学特征

结合镜下薄片鉴定和岩石化学分析结果,确定火山岩的岩石类型主要有玄武岩、玄武安山岩、安山岩、安山质角砾熔岩。代表性火山岩特征描述如下。

玄武岩(图 5-a):斑状结构,斑晶为斜长石(5%),长柱状,大小一般为 0.2mm×0.8mm。基质由微晶斜长石、辉石、磁铁矿组成,构成间粒结构。微晶斜长石(45%)呈长柱状,可见聚片双晶,测得 $\text{Np}'/\wedge\alpha$ 夹角

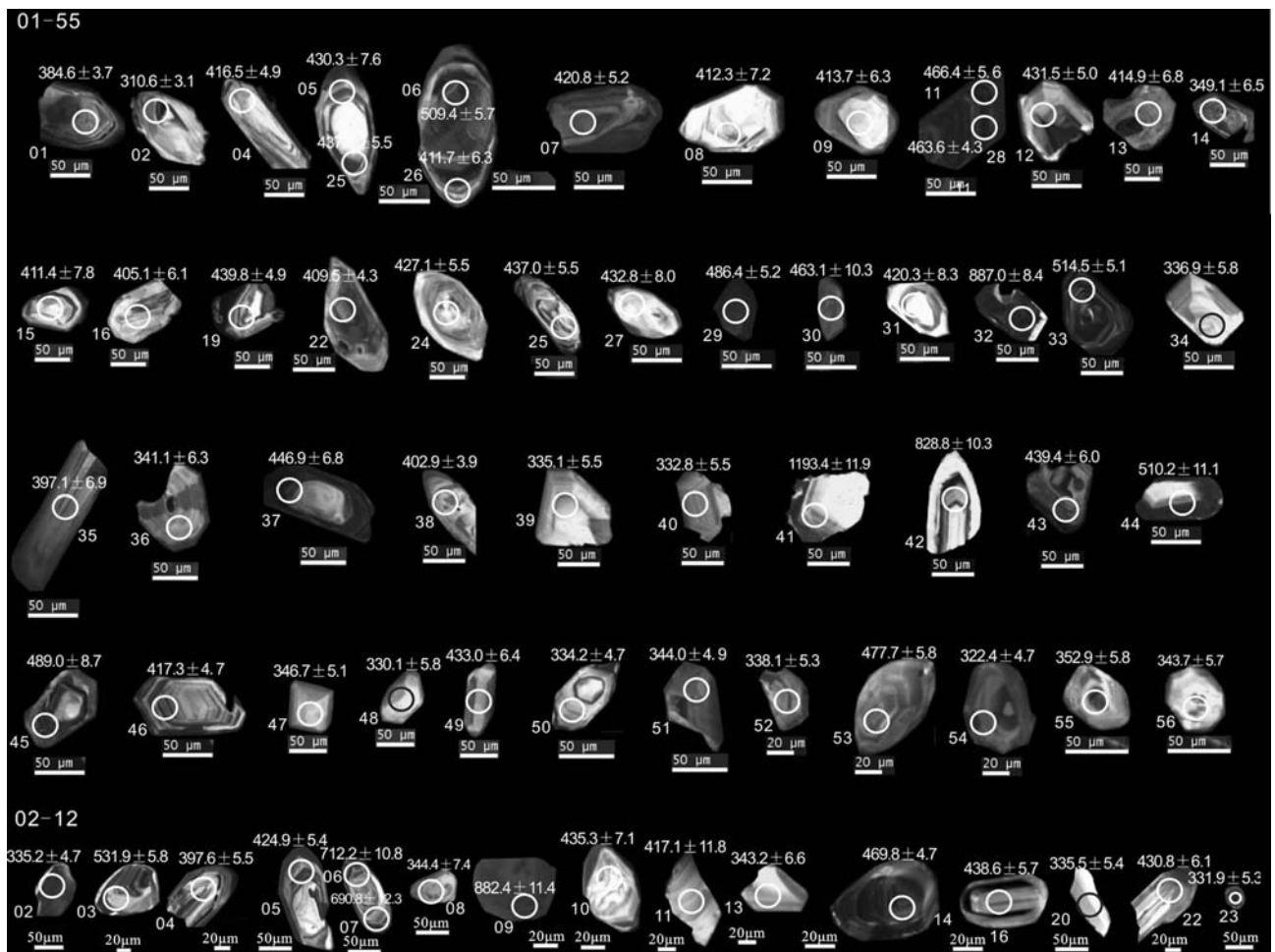


图 2 锆石 CL 图像(01-55、02-12)(数值单位为 Ma)

Fig. 2 CL images of zircons (01-55, 02-12)

最大为 28°, 为 An53 拉长石;辉石(43%)部分发生绿泥石化;磁铁矿(2%)呈粒状、不透明。

玄武安山岩(图 5-b):斑状结构,斑晶为斜长石(1%),一般 0.1mm×0.5mm 左右,多发生土化和绿泥石化;基质由微晶斜长石、辉石、磁铁矿组成,其中斜长石呈定向—半定向排列,辉石、磁铁矿充填于斜长石空隙当中构成交织结构。微晶斜长石(60%)可见聚片双晶,测得 $Np' \wedge a$ 夹角最大为 24°, 为 An49 中长石,具高岭土化现象;辉石(37%),部分发生绿泥石化;磁铁矿(2%)粒状、不透明。

安山岩(图 5-c):斑状结构,基质为安山结构;斑晶为斜长石,大小为 0.1~0.5mm,含量约 15%;基质中微晶斜长石(38%),大小不一;辉石含量较少(约 2%),基本全部发生绿帘石化;其余为玻璃质。部分安山岩中含有约 12% 的角砾,呈次棱角状,大小

约 2~4mm,由先期固结的安山岩组成,形成角砾熔岩(图 5-d)。

4.2 地球化学特征

样品的主量、微量和稀土元素分析结果见表 3。样品的 SiO_2 含量在 46.07%~54.40%之间, Na_2O 含量(2.47%~7.42%)明显大于 K_2O (0.04%~1.86%), 部分低 K_2O 样品同时存在 Rb 的强烈亏损,可能与后期蚀变中 K 和 Rb 的带出有关,高 TiO_2 (1.52%~2.64%)、高 Al_2O_3 (15.40%~18.85%); TFe_2O_3 含量 6.96%~11.65%; MgO 含量 2.35%~6.72%; CaO 含量 3.09%~9.88%。总体上属拉斑玄武岩系列(图 6、图 7),偏基性的端元较富碱,有向碱性系列过渡的趋势。

微量元素配分型式如图 8 所示,总体上大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)富集,高场强元素(HFSE)Nb、Ta 略显亏损。K 和 Rb 丰度变化

表 1 样品 01-55 锆石 U-Tu-Pb 同位素分析结果
Table 1 Zircon U-Tu-Pb isotopic analytical results of sample 01-55

分析点	Th /U	元素含量/ 10^{-6}			同 位 素 比 值					^{207}Pb	年 龄 /Ma					
		Pb	Th	U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ		
01-55																
01 ²	0.1	50.7	62.2	719.0	0.0589	0.0018	0.5015	0.0157	0.0615	0.0006	561.1	66.7	412.7	10.6	384.6	3.7
02 ¹	0.3	34.8	112.0	324.0	0.0569	0.0024	0.3857	0.0160	0.0494	0.0005	487.1	92.6	331.2	11.7	310.6	3.1
04 ²	0.6	32.5	105.0	166.0	0.0540	0.0026	0.4996	0.0246	0.0667	0.0008	372.3	109.2	411.4	16.7	416.5	4.9
05 ³	0.5	24.6	69.6	139.0	0.0613	0.0035	0.5720	0.0306	0.0690	0.0013	650.0	122.2	459.3	19.8	430.3	7.6
06	0.2	90.8	162.0	714.0	0.0568	0.0016	0.6465	0.0177	0.0822	0.0010	483.4	63.0	506.3	10.9	509.4	5.7
07 ²	0.4	30.9	87.3	200.0	0.0522	0.0025	0.4862	0.0225	0.0675	0.0009	294.5	107.4	402.3	15.4	420.8	5.2
08 ²	0.6	19.1	60.9	105.0	0.0591	0.0033	0.5297	0.0282	0.0660	0.0012	572.3	122.2	431.6	18.7	412.3	7.2
09 ²	0.5	24.2	67.8	143.0	0.0536	0.0025	0.4836	0.0214	0.0663	0.0010	353.8	100.9	400.5	14.6	413.7	6.3
11	0.3	160.0	348.0	1280.0	0.0540	0.0014	0.5620	0.0165	0.0750	0.0009	372.3	61.1	452.8	10.7	466.4	5.6
12 ³	0.6	144.0	416.0	711.0	0.0588	0.0016	0.5629	0.0152	0.0692	0.0008	561.1	57.4	453.4	9.8	431.5	5.0
13 ²	0.9	23.7	78.1	87.6	0.0623	0.0038	0.5544	0.0307	0.0665	0.0011	687.1	129.6	447.9	20.0	414.9	6.8
14 ¹	0.7	24.0	86.2	125.0	0.0559	0.0030	0.4257	0.0229	0.0556	0.0011	450.0	120.4	360.1	16.3	349.1	6.5
15 ²	0.5	18.2	56.0	105.0	0.0557	0.0029	0.5079	0.0270	0.0659	0.0013	438.9	118.5	417.0	18.2	411.4	7.8
16 ²	0.6	40.3	116.0	205.0	0.0625	0.0030	0.5625	0.0274	0.0649	0.0010	694.5	102.6	453.2	17.8	405.1	6.1
19 ³	0.3	62.6	139.0	483.0	0.0556	0.0015	0.5452	0.0168	0.0706	0.0008	435.2	61.1	441.8	11.1	439.8	4.9
22 ²	1.0	143.0	465.0	481.0	0.0606	0.0017	0.5461	0.0148	0.0656	0.0007	627.8	61.1	442.4	9.7	409.5	4.3
24 ³	0.3	27.6	56.8	193.0	0.0610	0.0025	0.5750	0.0230	0.0685	0.0009	640.5	87.0	461.2	14.8	427.1	5.5
25 ³	0.4	31.9	83.5	214.0	0.0576	0.0025	0.5555	0.0225	0.0701	0.0009	516.7	96.3	448.6	14.7	437.0	5.5
26 ²	0.0	47.2	22.8	779.0	0.0559	0.0020	0.5125	0.0190	0.0660	0.0010	455.6	79.6	420.2	12.7	411.7	6.3
27 ³	0.4	12.4	33.4	85.1	0.0571	0.0037	0.5416	0.0348	0.0694	0.0013	498.2	144.4	439.5	22.9	432.8	8.0
28	0.1	190.0	273.0	1906.0	0.0577	0.0014	0.5975	0.0139	0.0746	0.0007	520.4	53.7	475.6	8.9	463.6	4.3
29	0.1	102.6	79.7	1449.0	0.0532	0.0014	0.5789	0.0157	0.0784	0.0009	344.5	61.1	463.7	10.1	486.4	5.2
30	0.5	30.3	79.7	147.0	0.0660	0.0039	0.6863	0.0464	0.0745	0.0017	809.3	124.1	530.6	28.0	463.1	10.3
31 ²	0.7	23.0	72.0	102.0	0.0628	0.0040	0.5774	0.0366	0.0674	0.0014	701.9	135.2	462.8	23.5	420.3	8.3
32	0.3	214.0	276.0	823.0	0.0684	0.0017	1.4020	0.0338	0.1475	0.0015	879.6	51.1	889.8	14.3	887.0	8.4
33	0.4	177.0	368.0	1019.0	0.0551	0.0014	0.6357	0.0163	0.0831	0.0009	416.7	52.8	499.7	10.1	514.5	5.1
34 ¹	0.5	19.3	83.9	181.0	0.0595	0.0041	0.4331	0.0275	0.0537	0.0010	583.4	150.0	365.4	19.5	336.9	5.8
35 ²	1.1	25.3	115.0	109.0	0.0617	0.0044	0.5406	0.0375	0.0635	0.0011	664.8	154.5	438.8	24.7	397.1	6.9
36 ¹	0.5	15.8	69.6	150.0	0.0635	0.0038	0.4670	0.0266	0.0543	0.0010	724.1	132.4	389.1	18.4	341.1	6.3
37 ³	0.4	24.8	83.5	205.0	0.0605	0.0034	0.5903	0.0305	0.0718	0.0011	620.4	123.1	471.1	19.5	446.9	6.8
38 ²	0.0	55.2	41.1	1141.0	0.0565	0.0017	0.5046	0.0147	0.0645	0.0007	472.3	66.7	414.8	9.9	402.9	3.9
39	0.5	16.1	74.0	157.0	0.0569	0.0039	0.4137	0.0286	0.0534	0.0009	487.1	151.8	351.5	20.5	335.1	5.5
40	0.5	18.1	84.2	173.0	0.0634	0.0037	0.4557	0.0253	0.0530	0.0009	724.1	123.0	381.3	17.6	332.8	5.5
41	0.3	86.2	90.9	266.0	0.0834	0.0026	2.3543	0.0735	0.2034	0.0022	1279.6	60.3	1228.9	22.2	1193.4	11.9
42	0.8	53.3	111.0	148.0	0.0688	0.0032	1.2955	0.0591	0.1372	0.0018	892.3	94.9	843.7	26.1	828.8	10.3
43 ³	0.5	30.2	91.4	204.0	0.0600	0.0028	0.5868	0.0280	0.0705	0.0010	611.1	103.7	468.8	17.9	439.4	6.0
44	0.2	48.1	98.0	456.0	0.0617	0.0023	0.7183	0.0347	0.0824	0.0019	664.8	76.8	549.7	20.5	510.2	11.1
45	0.4	49.4	151.0	367.0	0.0577	0.0024	0.6275	0.0276	0.0788	0.0015	520.4	88.0	494.5	17.2	489.0	8.7
46 ²	0.4	88.0	283.0	752.0	0.0537	0.0019	0.4973	0.0176	0.0669	0.0008	366.7	79.6	409.9	11.9	417.3	4.7
47 ¹	0.5	17.0	74.9	152.0	0.0516	0.0030	0.3886	0.0214	0.0553	0.0008	264.9	133.3	333.3	15.7	346.7	5.1
48 ¹	0.6	17.6	83.8	154.0	0.0560	0.0039	0.4012	0.0270	0.0525	0.0010	453.8	149.1	342.5	19.5	330.1	5.8
49 ¹	0.4	24.3	75.5	208.0	0.0559	0.0033	0.5331	0.0291	0.0695	0.0011	455.6	125.0	433.9	19.3	433.0	6.4
50 ¹	0.7	45.4	235.0	324.0	0.0528	0.0025	0.3926	0.0201	0.0532	0.0008	320.4	109.2	336.3	14.7	334.2	4.7
51 ¹	0.7	38.9	193.0	269.0	0.0498	0.0026	0.3747	0.0187	0.0548	0.0008	187.1	118.5	323.1	13.8	344.0	4.9
52 ¹	0.5	19.7	87.6	166.0	0.0594	0.0034	0.4403	0.0250	0.0538	0.0009	588.9	125.9	370.4	17.6	338.1	5.3
53	0.5	36.5	112.0	242.0	0.0563	0.0030	0.5967	0.0312	0.0769	0.0010	464.9	116.7	475.2	19.9	477.7	5.8
54 ¹	0.5	32.0	146.0	283.0	0.0615	0.0033	0.4319	0.0224	0.0513	0.0008	657.4	114.8	364.6	15.9	322.4	4.7
55 ¹	0.6	19.8	92.0	149.0	0.0642	0.0036	0.4923	0.0267	0.0563	0.0009	746.3	113.9	406.5	18.2	352.9	5.8
56 ¹	0.7	26.4	129.0	173.0	0.0632	0.0039	0.4673	0.0274	0.0548	0.0009	716.7	126.8	389.3	19.0	343.7	5.7

注:分析点数字上标号“1、2、3”分别代表图 3 中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(338.3\pm 5.2)\text{Ma}$ 、 $(412.6\pm 4.5)\text{Ma}$ 、 $(436.5\pm 4.2)\text{Ma}$ 的 3 组样品

较大,显示出由正常到明显的低谷的特征,应与后期蚀变作用有关。

稀土元素配分型式如图 9 所示,所有样品的稀

土元素分配型式都为右倾型,显示出轻稀土元素(LREE)明显富集的特征, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=3.3\sim 8.5$,轻、重稀土元素分馏明显。稀土元素总量(ΣREE)为 $101\times$

表 2 样品 02-12 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 Zircon U-Pb Isotopic analytical results of sample 02-12

分析点	Th /U	元素含量/ 10^{-6}			同 位 素 比 值						^{207}Pb ^{206}Pb	年 龄 /Ma				
		Pb	Th	U	^{207}Pb ^{206}Pb		^{207}Pb ^{235}U		^{206}Pb ^{238}U			^{207}Pb ^{235}U	^{206}Pb ^{238}U	1σ	1σ	1σ
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ							
02-12																
02	1.3	87.0	421.0	327.0	0.0493	0.0020	0.3642	0.0147	0.0534	0.0008	161.2	94.4	315.3	11.0	335.2	4.7
03	0.4	136.0	309.0	733.0	0.0568	0.0016	0.6816	0.0199	0.0860	0.0010	483.4	61.1	527.8	12.0	531.9	5.8
04	0.2	48.2	83.9	521.0	0.0615	0.0019	0.5415	0.0168	0.0636	0.0009	657.4	66.7	439.4	11.0	397.6	5.5
05	0.3	82.3	195.0	714.0	0.0541	0.0017	0.5128	0.0164	0.0681	0.0009	376.0	76.8	420.3	11.0	424.9	5.4
06	0.3	82.6	115.0	345.0	0.0639	0.0019	1.0356	0.0326	0.1168	0.0019	738.9	263.9	721.7	16.3	712.2	10.8
07	0.4	89.0	137.0	346.0	0.0626	0.0018	0.9860	0.0329	0.1131	0.0021	694.5	61.1	696.7	16.8	690.8	12.3
08	0.6	23.2	80.7	130.0	0.0579	0.0041	0.4293	0.0266	0.0549	0.0012	524.1	155.5	362.7	18.9	344.4	7.4
09	0.2	175.0	169.0	726.0	0.0789	0.0017	1.6040	0.0382	0.1467	0.0020	1169.4	42.6	971.8	14.9	882.4	11.4
10	0.3	26.5	58.9	213.0	0.0625	0.0025	0.5992	0.0245	0.0699	0.0012	700.0	82.4	476.7	15.6	435.3	7.1
11	0.7	12.2	37.8	57.2	0.0668	0.0047	0.5698	0.0344	0.0668	0.0020	831.5	147.1	457.9	22.2	417.1	11.8
13	0.9	15.5	60.0	68.1	0.0617	0.0041	0.4612	0.0307	0.0547	0.0011	664.8	338.9	385.1	21.3	343.2	6.6
14	0.4	139.0	357.0	849.0	0.0558	0.0015	0.5854	0.0153	0.0756	0.0008	455.6	61.1	467.9	9.8	469.8	4.7
16	0.4	38.8	103.0	247.0	0.0530	0.0024	0.5135	0.0219	0.0704	0.0009	327.8	97.2	420.8	14.7	438.6	5.7
20	1.0	25.0	107.0	112.0	0.0569	0.0037	0.4128	0.0251	0.0534	0.0009	487.1	144.4	350.9	18.0	335.5	5.4
22	0.6	56.5	159.0	263.0	0.0644	0.0026	0.6173	0.0238	0.0691	0.0010	766.7	52.8	488.2	14.9	430.8	6.1
23	0.9	35.2	147.0	159.0	0.0508	0.0030	0.3685	0.0207	0.0528	0.0009	231.6	130.5	318.5	15.3	331.9	5.3

10^{-6} ~ 174×10^{-6} 。Eu 异常不明显, δEu 值在 0.88~1.08 之间,说明基本上没有斜长石的结晶分离。

4.3 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析

用于同位素分析的样品共 4 个,其中 3 个样品为玄武岩,1 个样品为安山岩,分析结果见表 4。4 个样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.703703\pm5\sim0.704699\pm5$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.512769\pm3\sim0.512868\pm3$ 。经过年

龄校正后,所有样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为 0.70354~0.70411, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 +4.9~+6.6。

5 讨 论

5.1 源区性质

研究区黑山头组火山岩 $I_{\text{sr}}(0.70354\sim0.70411)$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+4.9~+6.6) 范围较接近普通地幔(图 10),火山岩

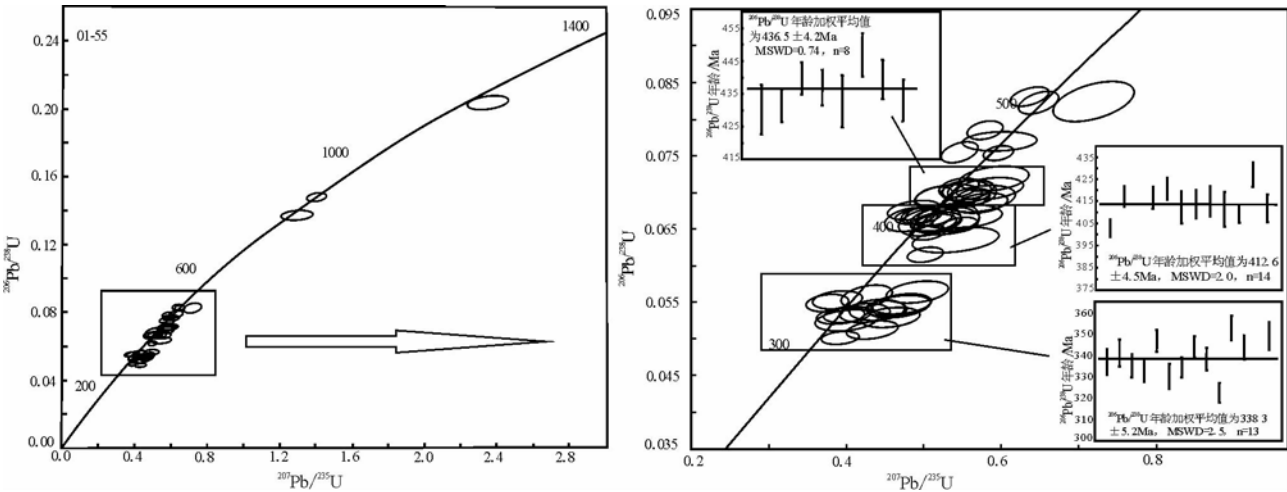
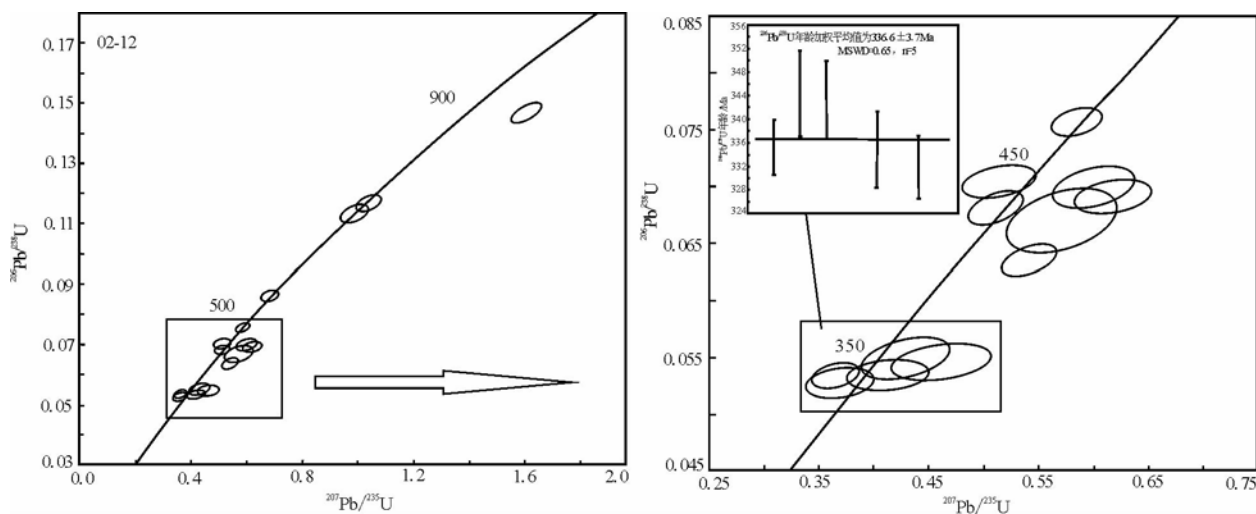


图 3 锆石样品 01-55 U-Pb 谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄
Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram of sample 01-55 and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagram

图 4 锆石样品 02-12 U-Pb 谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of sample 02-12 and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagram

中中等—较高的 TiO_2 (1.52%~2.64%) 含量也表明地幔源区没有经历明显的亏损。火山岩的微量元素配分型式基本相同, 总体上具大离子亲石元素

和轻稀土元素明显富集的特征, 但同时 Nb、Ta 略显亏损, 这可能与源区受到俯冲板片脱水流体的交代作用有关。因此, 本研究认为黑山头组火山岩

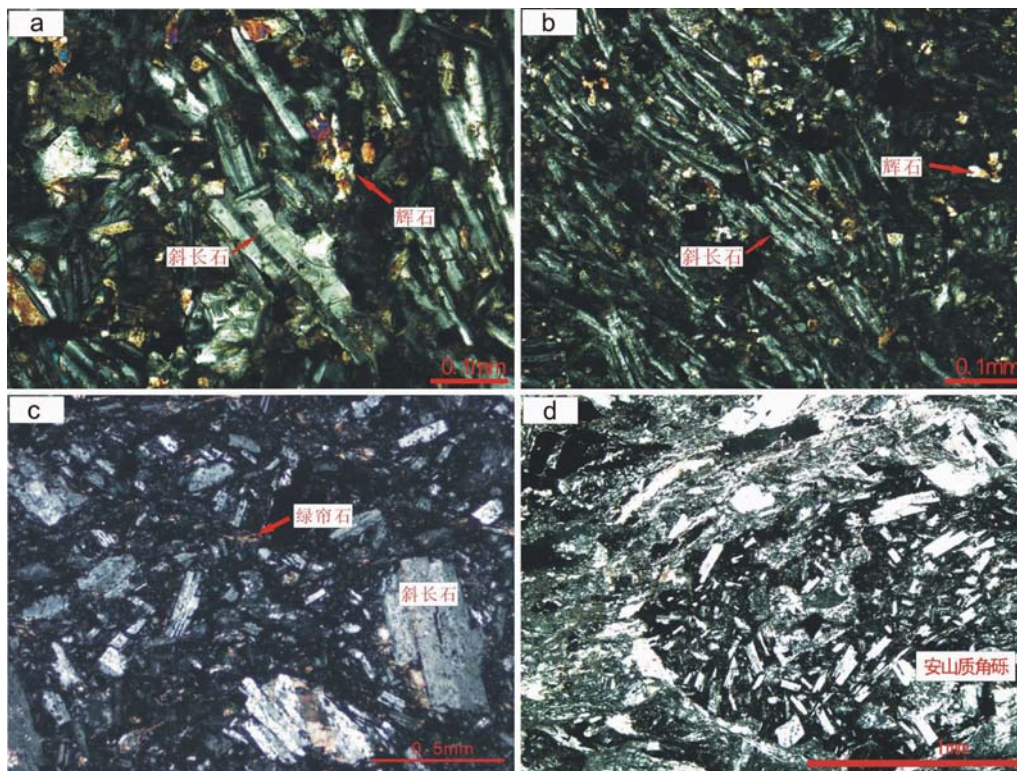


图 5 早石炭世火山岩显微照片

Fig. 5 Photomicrographs of the early Carboniferous volcanic rocks
a—玄武岩(+); b—玄武岩安山(+); c—安山岩(+); d—安山质角砾熔岩(+)

表 3 样品全岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 3 Analyses of major elements, trace elements and REE

样号	01-50-1H	01-52-1H	01-55-1H	D6150-1H	D6150-2H	02-4-1H	02-5-1H	02-7-1H	02-10-1H	02-11-1H	02-12-1H	02-13-1H	02-14-1H
SiO ₂	54.40	46.10	51.50	46.07	52.94	45.70	50.00	47.50	48.70	51.90	51.80	49.10	51.10
TiO ₂	1.70	2.09	1.52	2.15	1.80	2.11	1.54	2.04	2.02	2.03	1.98	2.44	2.64
Al ₂ O ₃	18.85	17.65	15.80	18.68	18.30	15.40	16.60	15.60	16.65	16.35	16.15	16.00	17.25
FeO	1.12	4.46	3.92	4.38	4.05	7.46	6.03	8.27	5.17	4.63	4.21	5.31	4.39
Fe ₂ O ₃	5.72	4.37	4.60	5.64	4.73	2.61	2.70	2.46	4.46	4.36	5.18	4.40	5.77
TFe ₂ O ₃	6.96	9.33	8.96	10.51	9.23	10.90	9.40	11.65	10.20	9.50	9.86	10.30	10.65
TFeO	6.26	8.40	8.06	9.45	8.31	9.81	8.46	10.48	9.18	8.55	8.87	9.27	9.58
MnO	0.05	0.14	0.15	0.17	0.09	0.21	0.13	0.16	0.14	0.13	0.13	0.14	0.11
MgO	2.35	4.71	5.80	6.18	4.13	6.72	5.66	6.28	5.89	4.64	4.70	5.14	4.20
CaO	3.50	6.88	8.19	5.51	3.09	9.31	4.72	7.00	9.85	6.98	8.01	9.88	6.67
Na ₂ O	7.05	3.46	3.04	3.23	7.42	2.66	5.05	2.57	2.84	3.64	3.19	3.13	2.95
K ₂ O	1.48	0.46	0.04	1.25	0.09	0.56	0.23	0.30	0.87	1.76	1.86	1.01	0.72
P ₂ O ₅	0.47	0.50	0.25	0.34	0.35	0.53	0.38	0.52	0.47	0.57	0.54	0.47	0.43
LOI	2.55	8.09	4.39	5.55	2.34	5.60	5.67	5.87	2.34	2.00	1.35	1.96	2.72
Cr	80.0	39.0	111	70.3	23.9	330	94.0	160	107	65.0	84.0	104	90.0
Ni	39.8	38.2	81.4	32.2	11.6	149	67.4	85.6	74.9	54.5	63.4	36.4	56.0
Rb	23.4	5.00	0.30	26.2	1.46	6.60	2.80	2.70	8.00	15.6	20.3	13.2	5.00
Ba	280	260	60.0	248	82.5	170	170	160	150	370	390	170	150
Th	1.90	2.90	1.90	3.14	3.94	1.40	1.20	1.40	1.10	3.10	3.30	1.70	0.70
U	0.90	0.90	1.00	1.12	0.72	0.50	2.10	0.50	0.30	1.20	1.10	0.60	0.30
Nb	14.0	11.7	9.40	10.2	10.4	8.70	9.90	8.40	5.00	11.7	10.8	8.20	8.30
Ta	0.93	0.62	0.61	0.71	0.75	0.52	0.57	0.49	0.31	0.77	0.77	0.54	0.55
La	25.6	31.3	16.4	19.7	23.8	24.4	17.5	22.7	20.0	27.4	27.6	18.6	19.0
Ce	54.6	70.9	37.2	44.9	53.5	56.6	39.3	52.2	46.1	62.3	61.7	44.0	44.9
Pr	6.40	8.56	4.80	6.13	6.85	7.48	5.04	7.02	5.93	7.93	7.56	5.89	6.17
Sr	579	937	712	426	541	479	820	439	439	526	440	415	426
Nd	24.6	32.2	19.3	24.8	26.6	30.7	20.0	29.1	24.1	31.3	30.6	24.9	26.9
Zr	282	242	150	195	217	201	187	195	209	289	270	215	187
Hf	2.80	3.10	2.20	4.12	4.90	4.00	3.40	4.50	2.60	6.20	6.20	4.80	4.40
Sm	5.68	7.11	4.53	6.51	6.79	7.37	4.61	6.97	5.70	7.31	7.29	6.35	6.72
Eu	2.05	2.41	1.69	1.93	1.92	2.78	1.75	2.50	2.09	2.48	2.50	2.46	2.59
Ti	10150	12950	8700	12887	10789	12750	9380	12000	8710	12350	13300	13850	15500
Gd	6.67	7.24	5.32	6.12	6.27	8.32	5.39	8.11	6.79	8.67	8.21	7.79	8.31
Tb	0.97	1.06	0.79	0.93	0.94	1.19	0.84	1.17	1.08	1.36	1.27	1.27	1.31
Dy	4.98	5.61	4.25	5.20	5.07	6.22	4.43	6.19	5.66	7.09	7.05	6.73	7.23
Y	19.1	20.8	20.3	24.7	24.4	28.6	21.5	33.1	18.0	31.5	33.1	36.0	36.6
Ho	1.06	1.16	0.92	0.98	0.94	1.30	0.97	1.31	1.23	1.57	1.57	1.51	1.64
Er	2.85	3.20	2.57	2.67	2.56	3.65	2.76	3.73	3.65	4.52	4.30	4.17	4.53
Tm	0.37	0.42	0.33	0.36	0.35	0.48	0.37	0.50	0.49	0.62	0.61	0.60	0.66
Yb	2.31	2.65	2.11	2.40	2.34	3.03	2.34	3.12	2.99	3.94	4.02	3.75	4.09
Lu	0.32	0.37	0.30	0.34	0.33	0.42	0.32	0.43	0.42	0.56	0.56	0.52	0.59
Pb	6.00	5.40	3.70	4.07	4.39	3.10	3.30	4.60	2.50	7.80	6.70	3.30	3.10
Cs	4.39	4.85	0.32	4.35	0.49	1.29	0.37	1.19	0.16	0.36	0.43	0.43	0.29
K	11600	4500	300	10377	747	4700	1800	2400	5200	13800	16900	7900	5600
P	2070	2640	1050	1484	1527	2340	1670	2170	1500	2570	2630	1860	1780

注:主量元素单位为%,微量、稀土元素单位为 10⁻⁶

的物源区很可能是受到俯冲板片脱水流体交代的大陆幔楔。

5.2 形成环境

具大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)富集,高场强元素(HFSE)Nb、Ta 亏损特征的火山岩在岛弧和非岛弧环境中都可以产出^[35]。图 8 表明样品的微量元素丰度明显高于典型的岛弧拉斑玄武岩。样品的 TiO₂ 含量在 1.52%~2.15%之间,明显大于典型的岛弧火山岩(小于 1%)^[36],而与产于板内环境的玄武岩相近。虽然样品的 Nb 含量(5×10⁻⁶~14×

10⁻⁶)和岛弧富铌玄武质、玄武安山质熔岩相近(7×10⁻⁶~16×10⁻⁶)^[37],但(La/Nb)_{PM} 比值在 0.2~4.2 之间,大部分都明显大于 2.0,不同于岛弧富 Nb 玄武质和玄武安山质熔岩((La/Nb)_{PM} 小于 2.0,但是多大于 0.7^[37])。在 Zr–Zr/Y 图解(图 11)和 Ti–Zr–Y 图解(图 12)中所有样品基本都位于板内玄武岩区域,因此这些火山岩并不是岛弧环境的产物。同时火山岩具有 HFSE 亏损的特征,不同于洋岛玄武岩(OIB),说明火山岩产自于大陆板内。

介于俯冲碰撞期和板内期过渡阶段的后碰撞

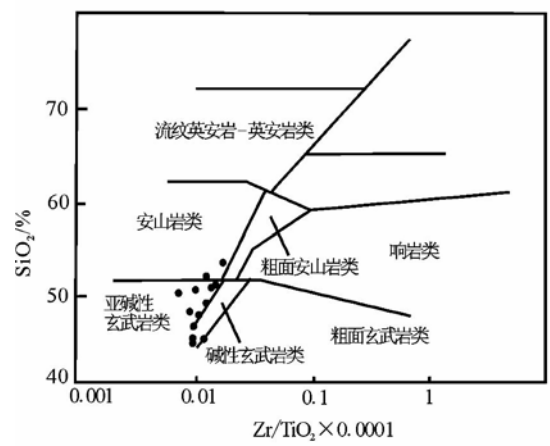


图 6 样品 Zr/TiO₂-SiO₂ 图解(底图据参考文献[29])
Fig. 6 Zr/TiO₂-SiO₂ diagram of samples

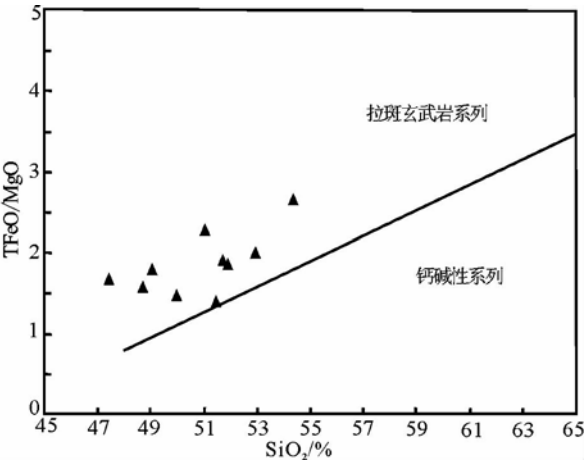


图 7 样品 SiO₂-TFeO/MgO 图解
Fig. 7 SiO₂-FeOt/MgO diagram of samples

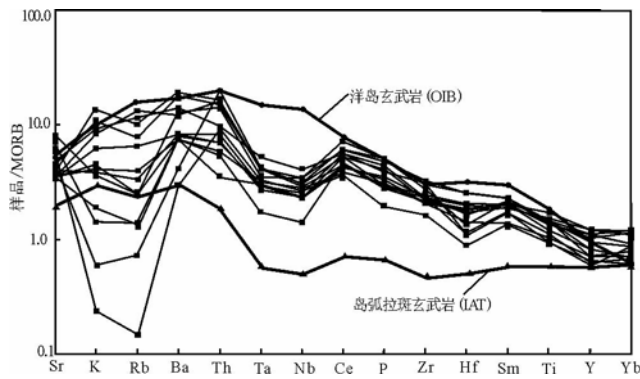


图 8 样品微量元素蛛网图(MORB 数据据参考文献[30],
OIB 据参考文献[31],IAT 据参考文献[32])
Fig. 8 Spider diagram of trace elements of samples

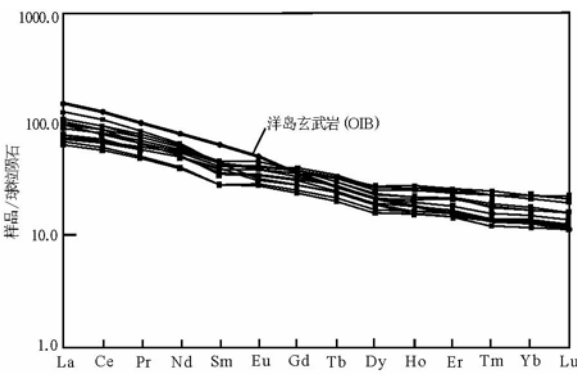


图 9 样品稀土元素球粒陨石标准化图
(标准化数据据参考文献[31])
Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of samples

期,由于岩石圈的伸展、减薄,诱发软流圈物质上涌,先前在洋壳俯冲期被流体交代提取而变得相对难熔的岩石圈地幔会发生再次熔融,形成的岩浆具有 LILE 相对富集、HFSE 相对亏损的特征^[40],

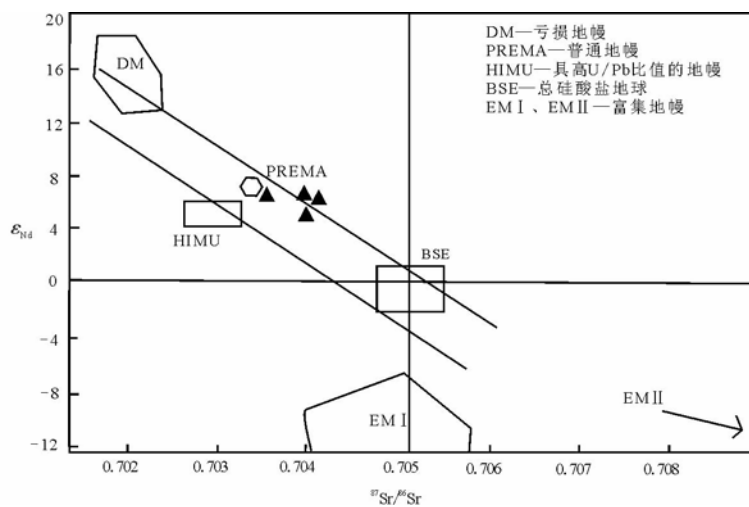
形成的火山岩同样具 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始比值较低,ε_{Nd} 值较高的特点。

前人研究表明,卡拉麦里洋盆在闭合的时间上存在区域差异,主体时限为早石炭世维宪期—

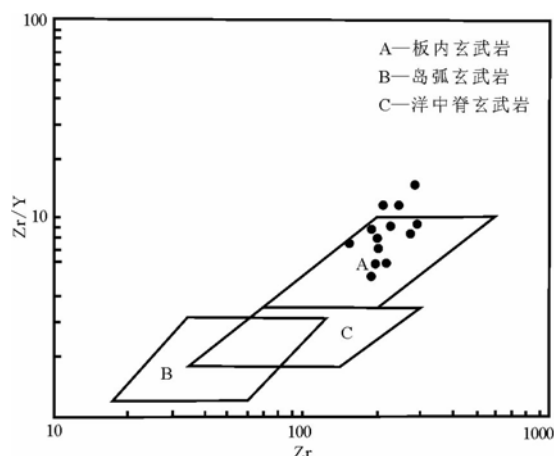
表 4 样品 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 4 Sr-Nd isotopic analytical data for samples

样品号	岩性	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(±2σ)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd(±2σ)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	ε _{Nd(t)}	T _{DM1} Nd /Ga
01-50	安山岩	0.1107	0.704669±5	0.1401	0.512830±7	0.70411	6.2	0.66
01-55	玄武岩	0.0012	0.703973±9	0.1424	0.512769±3	0.70397	4.9	0.82
02-5	玄武岩	0.0099	0.703991±6	0.1244	0.512815±3	0.70394	6.6	0.57
02-14	玄武岩	0.0340	0.703703±5	0.1516	0.512868±3	0.70354	6.4	0.69

注:Nd、Sr 同位素初始值分别根据锆石年龄 338.3、336.6Ma 计算,亏损地幔的 Sm-Nd 同位素组成采用 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.51315,¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.2135(亏损地幔相关值据文献[33])

图 10 样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\epsilon_{\text{Nd}}$ 图解(底图据参考文献[34])Fig. 10 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\epsilon_{\text{Nd}}$ diagram for samples

晚二叠世^[41],卡拉麦里蛇绿岩带南侧、准噶尔盆地东缘地区晚石炭世巴塔玛依内山组(C_2b)火山岩是该区后碰撞岩浆活动的典型代表^[14-16, 40, 42-43]。最近的研究表明,准噶尔盆地东缘地区卡拉麦里洋盆的关闭至少发生在 343Ma 以前^[9-10]。滴水泉一带 338Ma 和 336Ma、具板内特征火山岩的出现表明。该区在早石炭世时已处于后碰撞环境,这和蛇绿岩带北侧苏吉泉一带早石炭世(339Ma $\pm$ 4Ma)黑山头组后碰撞火山岩^[44]的时间基本一致。所以,准噶尔盆地东缘地区后碰撞岩浆活动开始的时间要比原来认为的更早,后碰撞岩浆活动至少从早石炭世就已经开始。

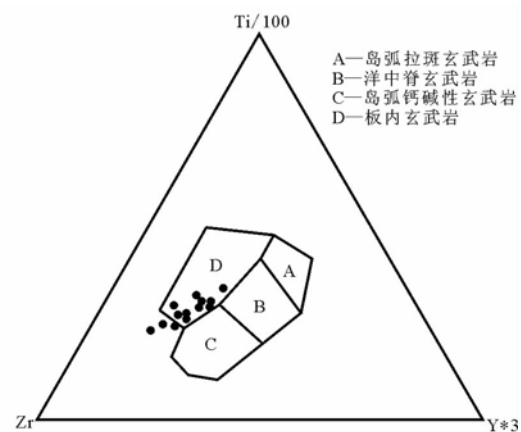
图 11 样品 $\text{Zr}-\text{Zr}/\text{Y}$ 图解(底图据参考文献[38])Fig. 11 $\text{Zr}-\text{Zr}/\text{Y}$ diagram for samples

5.3 捕获锆石的意义

2 个火山岩样品中都含有捕获锆石,其年龄在 397~1193Ma 之间。前人在该区也发现了前寒武纪的锆石,甚至有太古宙的锆石^[45],是否暗示准噶尔盆地下部存在前寒武纪结晶基底,值得关注。

值得注意的是,本研究还获得了谐和度和集中程度都很好的 3 组老锆石年龄,分别为(470~500)Ma($n=8$)、(436.5 $\pm$ 4.2)Ma(MSWD=0.74, $n=8$)、(412.6 $\pm$ 4.5)Ma(MSWD=2.0, $n=14$) (图 3),时代分别为晚寒武世—早奥陶世、早志留世、晚志留世—早泥盆世。对于这些老锆石的来源,李亚萍等^[45]和苏玉平等^[17]得出了不同的结论。

李亚萍等认为,其只能来自被古生代洋盆围限的准噶尔盆地东部,该地区存在前寒武系的岩浆杂岩,苏玉平等则认为这些年龄与盆地周缘岛弧火山岩和蛇绿岩的时代一致,准噶尔盆地的基底,可能主要由早古生代—中古生代的残余洋壳和岛弧地体组成。从研究区的地质情况来看,奥陶系—下中泥盆统为一套连续稳定的被动陆源沉积,要求有来自准噶尔一侧的基底提供物源。另外,研究区与卡拉麦里蛇绿岩带北侧的活动构造环境存在明显的差异,没有中泥盆世之前的岩浆事件记录,这些老锆石只能来自卡拉麦里蛇绿岩带南侧的准噶尔盆地一侧。至于这些老锆石是否来自更南部

图 12 样品 $\text{Ti}/100-\text{Zr}-\text{Y} * 3$ 图解(底图据参考文献[39])Fig. 12 $\text{Ti}/100-\text{Zr}-\text{Y} * 3$ diagram for samples

的中天山地块(因为只有那里才有新元古代的岩浆事件记录),笔者认为因天山洋阻隔的可能性很小,因此本文更认同李亚萍等^[45]的观点。

6 结 论

卡拉麦里蛇绿岩带南侧,准噶尔盆地东缘发育早石炭世((338.3±5.2)~(336.6±3.7)Ma)火山岩。LILE 相对富集、HFSE 略显亏损、 I_{sr} 较低、 ε_{Nd} 较高的特征揭示,这些火山岩可能来自受到俯冲板片脱水流体交代的大陆地幔楔。地球化学特征表明,其是大陆板内岩浆活动的产物,形成于后碰撞环境。准噶尔盆地东缘地区后碰撞岩浆活动至少从早石炭世就已经开始。另外,火山岩中捕获的老锆石表明,准噶尔盆地东部可能存在古老基底。

参考文献

- [1]李锦铁,杨天南,李亚萍,等.东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束[J].地质通报,2009,28(12):1817-1826.
- [2]何国琦,李茂松,贾进斗,等.论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(6):852-858.
- [3]赵恒乐,许凡,张冀,等.东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩形成时代、地质特征及构造意义[J].新疆地质,2012,30(2):161-164.
- [4]唐红峰,苏玉平,刘丛强,等.新疆北部卡拉麦里斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].大地构造与成矿学,2007,31(1):110-117.
- [5]汪帮耀,姜常义,李永军,等.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[J].矿物岩石,2009,29(3):74-82.
- [6]王道永,邓江红.东准噶尔地区板块构造特征及演化[J].成都理工大学学报,1995,22(4):38-45.
- [7]李锦铁.试论新疆东准噶尔早古生代岩石圈板块构造演化[J].中国地质科学院院报,1991,(2):1-12.
- [8]舒良树,王玉净.新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石[J].地质论评,2003,49(4):408-412.
- [9]吴琪,屈迅,常国虎,等.红柳峡韧性剪切带形成时代及其对准噶尔洋盆闭合时限的约束[J].岩石学报,2012,28(8):2331-2339.
- [10]黄岗,牛广智,王新录,等.新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限——来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J].地质通报,2012,31(8):1267-1278.
- [11]赵泽辉,郭召杰,韩宝福,等.新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造-岩浆演化意义[J].岩石学报,2006,22(1):199-214.
- [12]李玮,柳益群,董云鹏,等.新疆三塘湖地区石炭纪火山岩年代学、地球化学及其大地构造意义[J].中国科学(D 辑),2012,42(11):1716-1731.
- [13]龙晓平,孙敏,袁超,等.东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约[J].岩石学报,2006,22(1):31-40.
- [14]赵霞,贾承造,张光亚,等.准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系中、基性火山岩地球化学及其形成环境[J].地学前缘,2008,15(2):272-279.
- [15]吴小奇,刘德良,魏国齐,等.准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系火山岩地球化学特征及其构造背景[J].岩石学报,2009,25(1):55-66.
- [16]李涤,何登发,樊春,等.准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系玄武岩的地球化学特征及构造意义[J].岩石学报,2012,28(3):981-992.
- [17]苏玉平,郑建平,Griffin W L,等.东准噶尔盆地巴塔玛依内山组火山岩锆石 U-Pb 年代及 Hf 同位素研究[J].科学通报,2010,55(30):2933-2945.
- [18]Xiao Y, Zhang H F, Shi J A, et al. Late Paleozoic magmatic record of East Junggar, NW China and its significance: Implication from zircon U-Pb dating and Hf isotope[J]. Gondwana Research, 2011, 20: 532-543.
- [19]罗静兰,侯连华,蒋宜勤,等.陆东地区火成岩形成时代与构造背景及火山岩储层成因[J].石油学报,2012,33(3):351-360.
- [20]李涤,何登发,唐勇,等.准噶尔盆地滴南凸起早石炭世火山岩的成因及其对克拉美丽洋闭合时限的约束[J].岩石学报,2012,28(8):2340-2354.
- [21]王方正,杨梅珍,郑建平.准噶尔盆地陆梁地区基底火山岩的岩石地球化学及其构造环境[J].岩石学报,2002,18(1):9-16.
- [22]夏林圻,夏祖春,徐学义,等.天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J].西北地质,2008,41(4):1-68.
- [23]杨宝凯,李永军,闫存兴,等.东准卡拉麦里地区苏吉泉一带黑山头组的厘定[J].新疆地质,2011,29(1):13-16.
- [24]蔡土赐.新疆维吾尔自治区岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,2008:1-430.
- [25]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [26]Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.
- [27]Ludwig K R. Users manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California,2003:1-39.
- [28]Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultra high-pressure metamorphic belt, China[J]. Chemical Geology, 2002, 186: 281-299.
- [29]Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.
- [30]Pearce J A. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins[C]//Hawkesworth C J, Norry M J. Continental basalts and mantle xenoliths, Nantwich, Cheshire: Shiva Publications, 1983: 230-249.

- [31]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [32]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, 1992:181–182.
- [33]韩吟文,马振东,张宏飞,等.地球化学[M].北京:地质出版社,2003: 227–228.
- [34]Hart S R. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle[J]. Nature, 1984, 309: 753–757.
- [35]赵振华.关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J].大地构造与成矿学,2007, 31(1):92–103.
- [36]Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. Springer, 1989: 173–174.
- [37]Sajona F G, Maury R G, Bellon H, et al. High field strength element enrichment of Pliocene–Pleistocene island arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao(Philippines)[J]. Journal of Petrology, 1996, 37(3): 693–726.
- [38]Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contribution Mineralogy and Petrology, 1979, 69: 33–47.
- [39]Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis[J]. Earth Planetary Science Letters, 1973, 19:290–300.
- [40]吴小奇,刘德良,李振生.卡拉麦里缝合带后碰撞期火山活动[J].地学前缘,2009,16(3):220–230.
- [41]王京彬,徐新.新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J].地质学报,2006,80(1):23–31.
- [42]毛治国,邹才能,朱如凯,等.准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义[J].岩石学报,2010, 26(1):207–216.
- [43]Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, et al. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: Implication for a tectonic transition[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 1009–1029.
- [44]杨高学,李永军,严镜,等.卡拉麦里地区黑山头组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J].新疆地质,2011,29(3):257–262.
- [45]李亚萍,李锦轶,孙桂华,等.准噶尔盆地基底的探讨:来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据[J].岩石学报,2007,23(7):1577–1590.