



东天山亚勒曼一带下泥盆统头苏泉组 火山岩地质、地球化学特征、U-Pb 年龄及其构造意义

张亚光,邢伟伟,马梦玲,李强,姚鱼,李泽阳,夏祥,郭士恩

河北省区域地质调查院,河北廊坊,065000

内容提要:东天山亚勒曼一带头苏泉组发育一套中—酸性火山熔岩、火山凝灰岩及火山角砾岩。岩浆从早期至晚期具有由中性向酸性演化的特征,发育爆发相、喷溢相及潜火山岩相,具7个喷发韵律旋回特征。根据 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年,确定了头苏泉组流纹岩年龄为 406.0 ± 3.0 Ma ($MSWD=0.35$),时代为早泥盆世。岩石地球化学显示,头苏泉组火山岩具中铝(13.20%~18.10%)、富钠贫钾特征($K_2O/Na_2O=0.10\sim 0.67$),属高分异低—中钾钙碱性岩石系列;稀土元素总量较高($\Sigma REE=98.7 \times 10^{-6} \sim 214 \times 10^{-6}$),LREE 富集,而 HREE 亏损($LREE/HREE=3.75\sim 4.58$),Eu 元素具不明显负异常($\delta Eu=0.62\sim 0.92$),大离子亲石元素 Rb、K、Ba 明显富集,高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 亏损。地球化学特征显示,头苏泉组火山岩具地幔重融型火山岩特征,且岩浆上侵过程中同化地壳物质,构造环境为俯冲背景下大陆边缘弧环境。

关键词:头苏泉组;火山岩;火山韵律;早泥盆世;东天山

天山造山带为中亚造山带的重要组成部分,它夹持于西伯利亚板块、塔里木板块和华北板块之间(Windley et al., 2007; 曹锐等, 2016; 邓小华等, 2023),其形成、演化和消亡过程均伴随着古亚洲洋俯冲作用、弧—陆碰撞等演化过程(夏林圻等, 2008; Zhao Hao et al., 2020),由一系列的岛弧、洋岛、增生楔和微陆块等组成(Şengör et al., 1993; 肖文交等, 2019; 刘鸿飞等, 2022)。目前哈尔里克地区泥盆纪—石炭纪构造背景及其演化期次仍存在较大争议,其构造位置属裂谷岩浆带(王良玉等, 2016),或是岛弧(方国庆, 1993; 马志杰等, 2021),还是弧后盆地(李锦轶, 2004; 罗婷等, 2020; 任文秀等, 2020);动力学机制是俯冲侧向撕裂(顾连兴等, 2001),弧后拉张(田黎萍等, 2010),还是地幔柱火成岩(夏林圻等, 2004)所引起;俯冲结束对应的古亚洲洋的闭合时限是晚泥盆纪末至早石炭世初(Xiao Wenjiao et al., 2004),早石炭世末期(李锦轶等, 2006; 李永军等, 2010; 徐学义等, 2014)还是二叠纪末或三叠纪初(Xiao Wenjiao et al., 2009)目前也尚不明确。东天山哈尔里克地区发育一套火山岩沉

积地层,为研究天山造山带构造演化提供理想条件。

造山带中岩浆活动记录了许多重要地质信息(徐学义等, 2005; 黄河等, 2024),对恢复古构造环境有着重要的指示意义。头苏泉组作为东天山地区重要的早泥盆世火山—沉积地层单元,广泛分布于卡拉塔格—大南湖一带,其岩性组合以中酸性火山岩为主,夹少量火山碎屑岩及沉积岩(李锦轶等, 2006)。已有研究表明,该组火山岩的形成时代和地球化学特征可能为恢复古亚洲洋闭合时限及碰撞后伸展机制提供关键证据(崔方磊等, 2015)。然而,目前对头苏泉组火山岩的研究多集中于区域地层划分及岩石学描述,其精确年代学框架、岩浆源区性质及构造环境仍缺乏系统性约束。特别是亚勒曼一带的火山岩剖面因构造改造强烈、露头连续性差,导致其成因类型与区域构造演化的联系尚未明晰,限制了东天山早泥盆世构造—岩浆活动模型的建立。

本研究以新疆东天山亚勒曼地区头苏泉组火山岩为研究对象,通过详细的野外地质调查、锆石 U-Pb 年代学及主微量元素地球化学分析,拟解决以下

注:本文为新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目(编号:T15-1-LQ21)的成果。

收稿日期:2025-02-14;改回日期:2025-06-08;网络首发:2025-06-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.06.045

作者简介:张亚光,男,1990年生,硕士,工程师,地质工程专业,研究方向:区域地质调查;Email:245334366@qq.com。通讯作者:邢伟伟,男,1985年生,硕士,高级工程师,矿产地质专业,研究方向:区域地质调查;Email:yongyan0803@126.com。

关键问题:①厘定头苏泉组火山岩的精确形成时代,完善区域地层格架;②揭示火山岩的岩石成因及岩浆演化过程;③探讨早泥盆世东天山地区的构造属性及其对古亚洲洋闭合阶段的响应。研究成果将为中亚造山带南缘晚古生代构造体制转换提供新的年代学与地球化学约束,同时对区域成矿背景分析具有重要参考价值。

1 地质背景

研究区位于新疆东天山哈尔里克山脉东段,区域地层出露齐全,侵入岩以中酸性为主(图 1a)。一级构造单元隶属哈萨克斯坦—准噶尔板块,二级构造单元属准格尔微陆块(张良臣等,1985),三级构造单元划分方案较混乱,本文参照 2003 年张良臣的新疆板块构造图的划分方案,以塔水河断裂为界,北侧为唐巴勒—卡拉麦里古生代复合沟弧带,南侧为哈尔里克古生代深成岩浆弧(图 1b)。

研究区出露古生界及新生界地层,其中古生界地层主要包括中—上奥陶统乌列盖组、大柳沟组,下

泥盆统头苏泉组及下石炭统姜巴斯套组。区内构造—岩浆活动频繁,侵入时间从志留纪延续至二叠纪,侵入岩种类繁多,从中性—酸性—碱性均有发育,多呈大规模复式岩基状产出,少数呈岩株状、脉状分布,岩性主要包括辉长闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩及碱长花岗岩。火山活动强烈而频繁,在区内各地层中均有发育,包括加里东期和华力西期两个喷发旋回,加里东期包括中—晚奥陶世乌列盖组火山岩、大柳沟组火山岩,华力西期包括下泥盆统头苏泉组火山岩(图 1b)。研究区经历了漫长的地质构造演化过程,形成了复杂多样的构造形迹。奥陶纪—泥盆纪地层经历了绿片岩相—低角闪相变质作用,片麻理或片理取代了原生面理成为主要的面状构造。早古生代板块俯冲、碰撞形成了复杂的逆冲褶断系。晚石炭世之后强烈的造山作用造成古生代盆地收缩、褶皱、区域性逆冲推覆构造、走滑韧性剪切变形带的形成。中—新生代之后,受天山以南多个块体俯冲增生及印度、欧亚两大板块陆陆碰撞的远程影响,以隆升剥蚀为主。

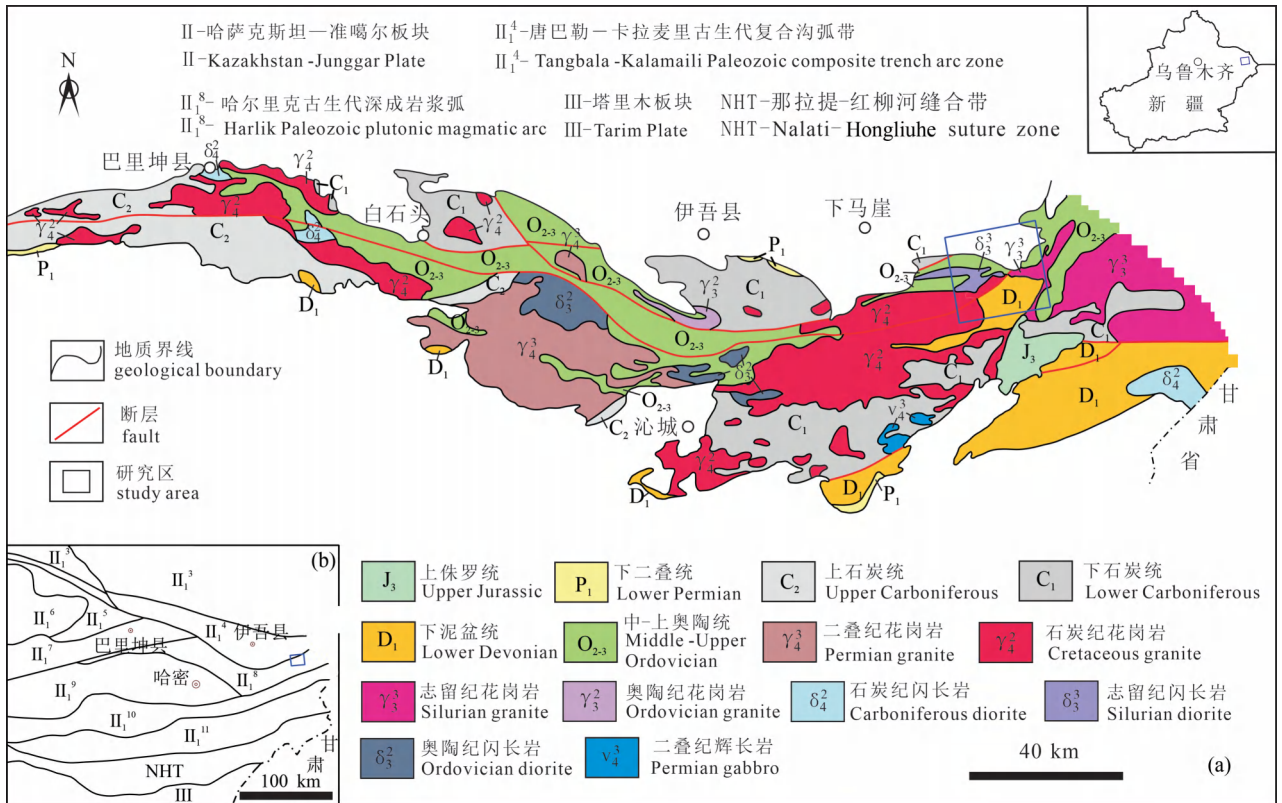


图 1 东天山哈尔里克区域地质简图(a) (据姚鱼等,2020 修改)和东天山大地构造简图(b) (据张良臣等,1985 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of Harlik region in the Eastern Tianshan Mountains(a) (modified from Yao Yu et al., 2020&) and geotectonic sketch of the Eastern Tianshan Mountains(b) (modified from Zhang Liangchen et al., 1985&)

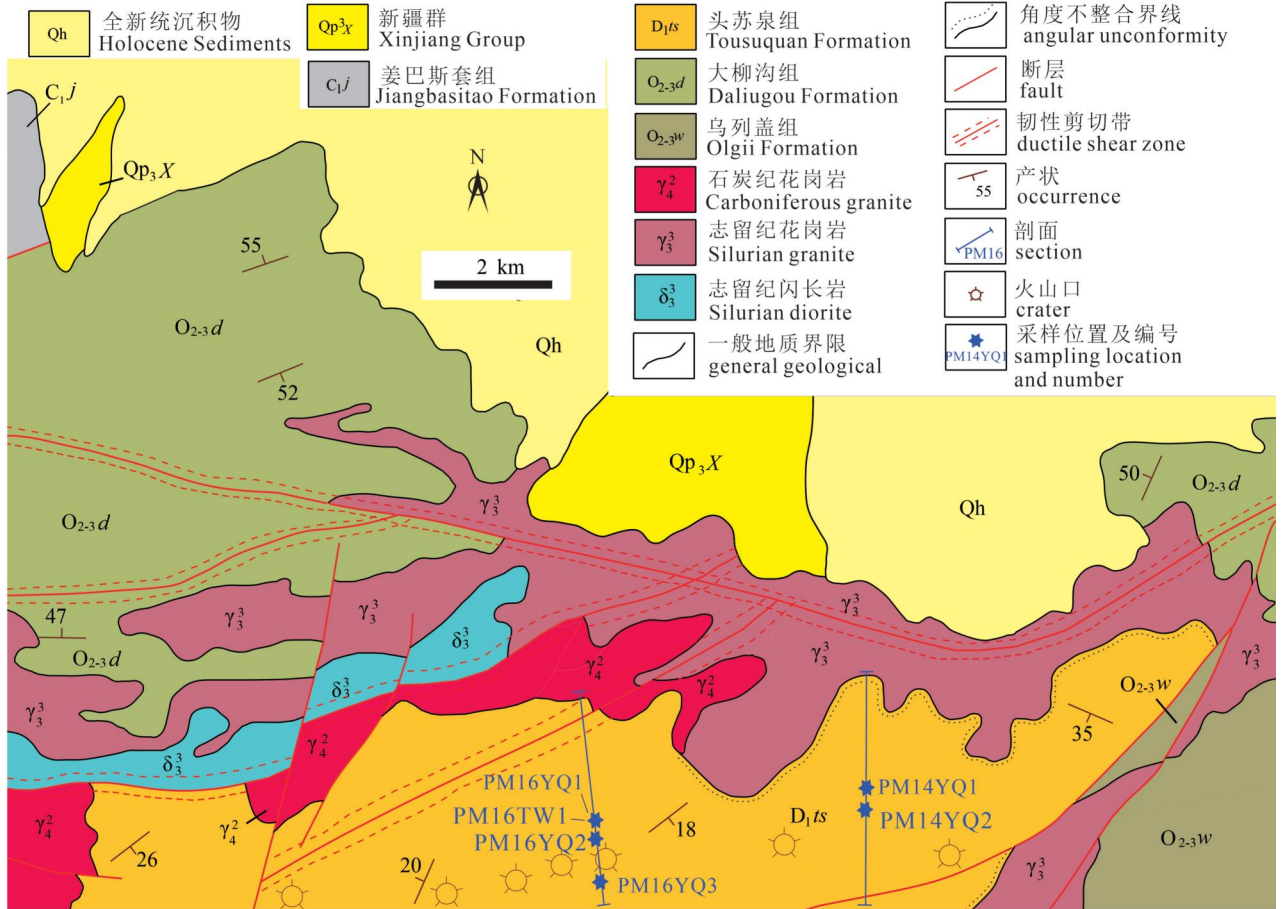


图 2 东天山亚勒曼地区地质简图

Fig. 2 Geological map of Yalaman area in the Eastern Tianshan Mountains

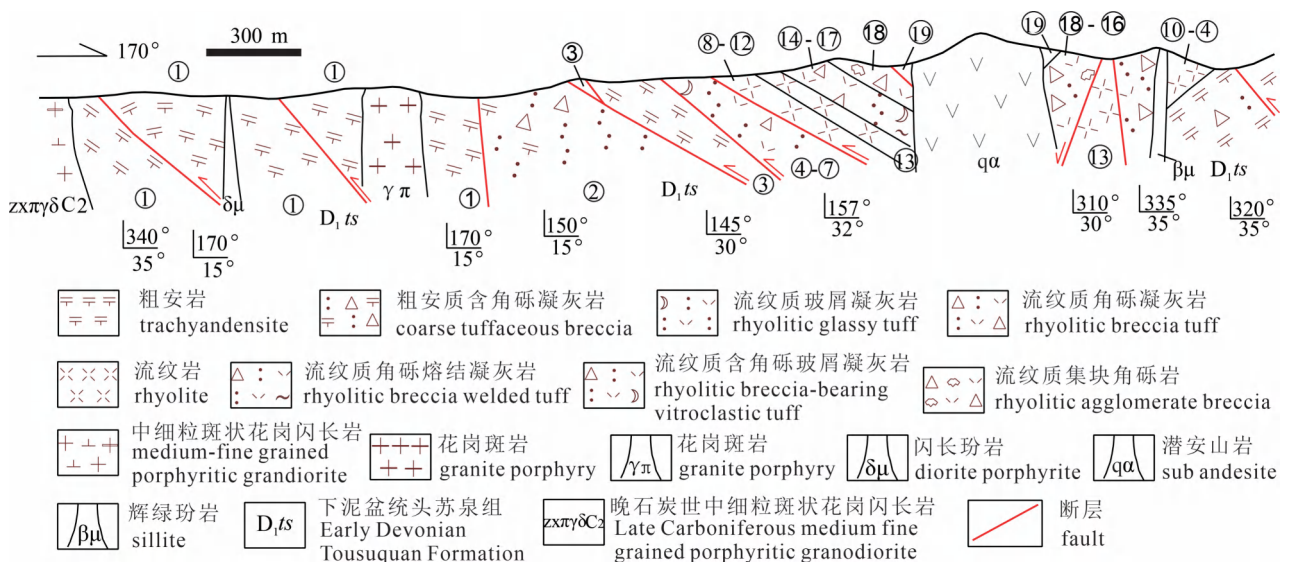


图 3 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组实测剖面

Fig. 3 Measured section of the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yalaman area, Eastern Tianshan Mountains

2 地层及火山作用特征

2.1 地层特征

头苏泉组由新疆地质局地质研究所(1961)编制1:100万哈密幅(K-46)地质图定名,将大南湖组第四、五、六亚组划为头苏泉组,主要出露在哈密以北,哈尔里克主峰等地。研究区阔托尔依—亚勒曼断裂以南,乌硝尔麦特塔格走滑断裂以西发育头苏泉组地层,岩层总体呈近东西向展布,地层西北侧被晚石炭世中酸性岩体侵入,东北侧角度不整合覆盖于志留纪侵入岩之上,东侧局部与中—上奥陶统乌列盖组呈断层接触(图2)。由于受后期构造及岩体侵蚀,地层完整度较差。

本次头苏泉组共测制两条实测剖面,本文以典型剖面PM16(图3)进行探讨分析,剖面总方位为170°,起点坐标为95°38'04"E;43°02'34"N,厚度>517.8 m;剖面未见底,被晚石炭世中粒斑状花岗闪长岩侵入,下部岩性为粗安岩、粗安质含角砾凝灰岩,中部为流纹岩、流纹质角砾凝灰岩夹少量流纹质凝灰岩;顶部发育一套近火山口堆积相的灰色流纹质集块角砾岩、流纹质含角砾熔岩。由于受华力西末—印支早期古亚洲洋闭合产生南北向挤压应力影响,形成宽缓的向斜构造,且岩石遭受韧脆性变形改造,局部形成了糜棱岩化、片理化。剖面详细分层描

述见表1。

2.2 火山岩相及火山韵律

头苏泉组火山活动强烈,岩石类型复杂,根据岩性差异,可将其划分为爆发相、喷溢相及潜火山岩相3种。其中爆发相又可分为爆发空落相、火山碎屑流相和近火山口堆积相。爆发空落相包括流纹质(含)角砾凝灰岩、流纹质玻屑凝灰岩、粗安质含角砾凝灰岩等;火山碎屑流相包括流纹质角砾熔结凝灰岩等;近火山口堆积相主要发育于上部层位,岩性包括流纹质含集块角砾凝灰岩、流纹质集块角砾岩、流纹质集块岩等。喷溢相岩石类型包括粗安岩和流纹岩,其中流纹岩流动构造十分发育。潜火山相包括流纹斑岩及安山玢岩等,前者常沿火山断裂侵位,而后者多填充于破火山口内。

该组火山岩根据岩性、岩相变化特征可划分出7个喷发韵律(表1),总体表现为从中性—酸性演化的趋势,向上酸性火山活动愈发强烈,并且出现近火山口相堆积。

3 样品特征及分析方法

3.1 样品特征

本次剖面测制工作中,采集了粗安岩样品2件、流纹岩3件用于地球化学分析,1件流纹岩样品用于年代学,采集位置见图2。

表1 东天山亚勒曼地区头苏泉组火山喷发韵律

Table 1 Volcanic eruption rhythm of the Tousuquan Formation in Yalman area, Eastern Tianshan Mountains

层号	岩性	厚度(m)	火山岩相	喷发韵律	韵次
19	灰色流纹质含角砾熔岩,被安山玢岩侵位	28.6	爆发喷溢相+潜火山岩相	(酸性)爆发—喷溢	VII
18	灰色流纹质集块角砾岩	110.9	近火山口堆积相		
17	灰紫色流纹质含角砾玻屑凝灰岩	3.5	爆发空落相		
16	灰色微糜棱岩化流纹质含集块角砾凝灰岩	35.2	近火山口堆积相		
15	灰白色流纹质玻屑凝灰岩	41.8	爆发空落相		
14	灰色流纹质角砾熔结凝灰岩	34.3	火山碎屑流相		
13	灰色流纹岩	48.5	喷溢相		
12	灰紫色流纹质凝灰岩	5.7	爆发空落相		
11	灰绿色流纹质角砾凝灰岩	8.5	爆发空落相		
10	灰绿色流纹岩	9.6	喷溢相	(酸性)爆发—喷溢	V
9	灰绿色流纹质角砾凝灰岩	13.4	爆发空落相		
8	浅灰色流纹岩	7.8	喷溢相	(酸性)爆发—喷溢	IV
7	灰色流纹质角砾凝灰岩	20.6	爆发空落相		
6	深灰紫色流纹岩	13.4	喷溢相	(酸性)爆发—喷溢	III
5	深灰色球粒流纹岩	2.2	喷溢相		
4	流纹质玻屑凝灰岩	5.6	爆发空落相		
3	灰黑色粗安岩,局部被流纹斑岩侵入	53.7	喷溢相+潜火山相	(中性)爆发—喷溢	II
2	灰绿、灰黑色粗安质含角砾凝灰岩	138.2	爆发空落相		
1	灰黑色粗安岩,局部被流纹斑岩侵入	120.1	喷溢相+潜火山相	(中性)喷溢	I

粗安岩:呈深灰色,块状构造(图 4a),斑状结构(图 4c)。岩石由斑晶(5%~10%)和基质(90%~95%)组成。斑晶由斜长石组成,粒径为 0.4~1.6 mm,星散分布。斜长石呈半自形板状,少部分呈次棱角状,具轻黏土化、绢云母化,局部可见绿帘石化、绿泥石化,部分可见具钾长石环边,构成正边结构,聚片双晶发育,由于切面及蚀变原因,排号无法测得。基质由斜长石、钾长石及少量石英组成,粒径一般<0.2 mm。其中斜长石呈微晶状、板条状,具黏土化、绢云母化,零星可见绿帘石化、绿泥石化,部分隐约可见聚片双晶,由于粒度细小,排号无法测得,杂乱或半定向分布;钾长石主呈微晶集合体状,填隙于斜长石颗粒间,构成间碱结构;石英呈他形粒状,主

呈填隙状分布于斜长石颗粒间。

流纹岩:呈灰紫色,流纹构造(图 4b)、块状构造,斑状结构—基质隐晶结构(图 4d)。岩石由斑晶和基质组成。斑晶由斜长石(5%~10%)、钾长石(5%~10%)、石英(10%)组成,粒径为 0.1~1.6 mm,星散分布,局部以聚斑状、联斑状产出。斜长石呈半自形板状,具轻黏土化、绢云母化,部分可见聚片双晶,由于切面原因,排号无法测得。钾长石呈半自形板状,具轻微高岭土化。石英呈他形粒状,部分略显熔蚀现象,粒内具轻微波状消光。基质(75%±,石英>20%)由长英质组成,主呈隐晶状、霏细状,杂乱分布,局部略显重结晶,另见少量长英质呈纤状,构成放射状球粒,球粒内具十字消光,星散或似

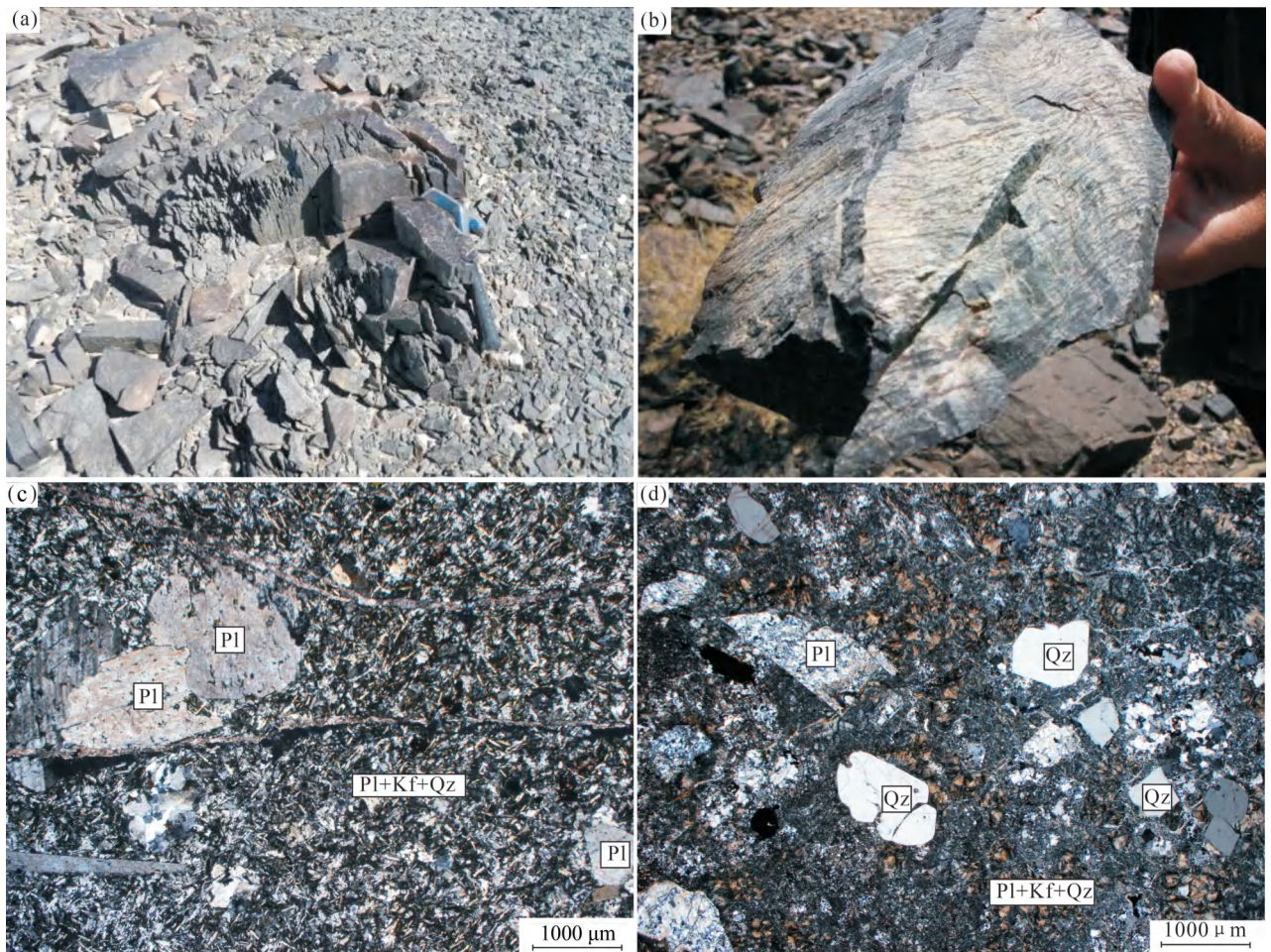


图 4 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组岩石野外和镜下特征照片:(a)粗安岩野外特征;(b)流纹岩野外特征;(c)粗安岩镜下特征;(d)流纹岩镜下特征

Fig. 4 Field and microscopic characteristic photos of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yalman area, Eastern Tianshan Mountains: (a) field characteristics of the trachyandesite; (b) field characteristics of rhyolite; (c) microscopic features of trachyandesite; (d) microscopic features of rhyolite

Pl—斜长石;Kf—钾长石;Qz—石英

Pl—plagioclase; Kf—potassium feldspar; Qz—quartz

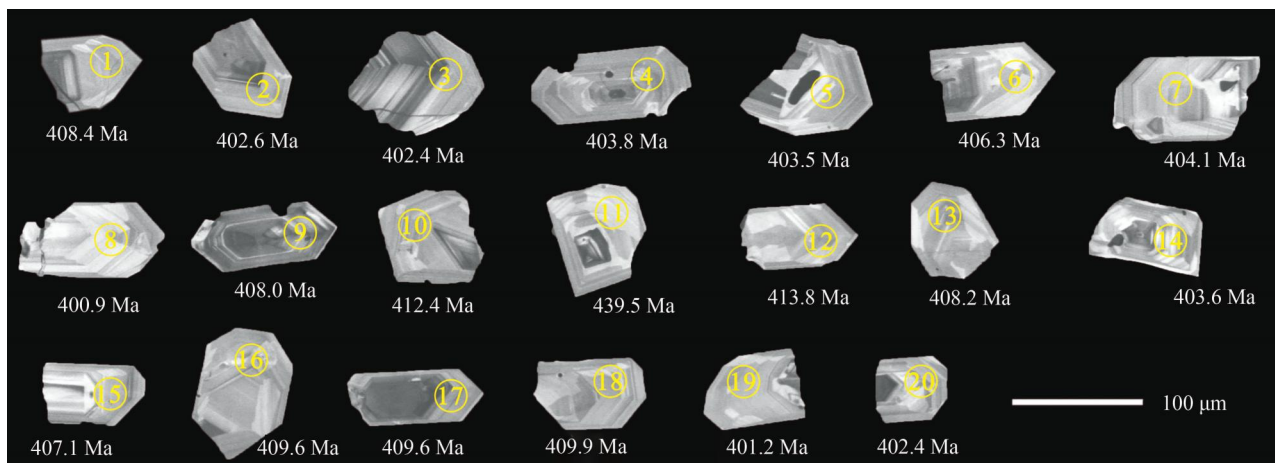


图5 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组流纹岩典型锆石的 CL 图像和年龄值

Fig. 5 The zircons CL images and ages of the Lower Devonian Tousuquan Formation rhyolites in Yuleman area, Eastern Tianshan Mountains

堆状分布于基质中。

3.2 分析方法

本次选择岩石地球化学样品的全岩主量元素、微量元素及稀土元素分析由新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队实验室完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱 (XRF) 完成,分析相对误差小于 5%。微量元素、稀土元素分析采用 Thermofisher X Series II 型 ICP-MS 测定完成,分析相对误差均小于 5%。

锆石分选在河北省区域地质调查院实验室完成,在双目镜下挑选晶形好、无包裹体和裂隙的锆石,用环氧树脂制靶。将锆石靶打磨、抛光后,进行反射光、透射光和阴极发光图像分析 (CL)。锆石 U-Pb 年龄测试工作由国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室采用 Finnigan Neptune 型 LA-MC-ICP-M 及与之配套的 Newwave UP213 激光剥蚀系统分析完成。激光剥蚀所用束斑直径为 25 μm ,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm^2 ,仪器详细参数及操作流程可参考侯可军等,2007。

4 结果分析

4.1 锆石 U-Pb 年龄

流纹岩样品 (PM16TW1) 锆石较小,多短柱状、等轴状及短柱状,大小 50~80 μm ,长宽比 1:1~1:2,振荡环带结构发育 (图 5),可见扇形分带结构。本次共测定 20 颗锆石 20 个点,其中有效点 18 个 (剔除 11 和 16 号),具体测试数据见表 2。所测锆

石 Pb 质量分数, $14.56 \times 10^{-6} \sim 45.32 \times 10^{-6}$, U 质量分数 $181.5 \times 10^{-6} \sim 495.5 \times 10^{-6}$, Th 质量分数 $80.73 \times 10^{-6} \sim 463.2 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.44~0.93 > 0.3, 表现为岩浆锆石的特征。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中显示 (图 6a), 测点呈集中分布, 均落在谐和曲线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 406 ± 3.0 Ma ($MSWD = 0.35$) (图 6), 代表了流纹岩的结晶年龄。

4.2 主量元素

头苏泉组火山岩全岩地球化学测试结果见

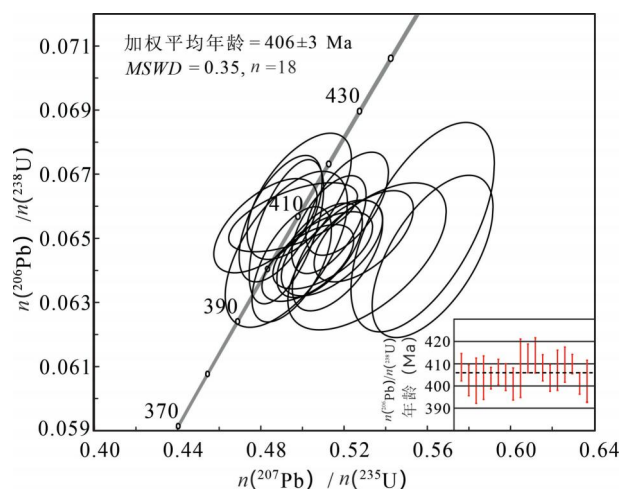


图6 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄值

Fig. 6 The LA-ICP-MS U-Pb concordance diagram and weighed age of the zircons from Lower Devonian Tousuquan Formation rhyolites in Yuleman area, Eastern Tianshan Mountains

表 2 东天山亚勒曼一带下泥盆统头苏泉组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb age data of the zircons from the rhyolite in the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		谐和度 (%)		
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ			
PM16TW01-01	21.94	136.1	279.5	0.49	0.5708	0.00146	0.5126	0.0119	0.06541	0.00102	494.5	55.6	420.2	8.0	408.4	6.2	97
PM16TW01-02	39.62	434.0	465.8	0.93	0.05810	0.00118	0.5166	0.0144	0.06444	0.00114	600.0	44.4	422.9	9.7	402.6	6.9	95
PM16TW01-03	16.42	99.72	202.3	0.49	0.06367	0.00270	0.5626	0.0193	0.06441	0.00169	731.5	88.9	453.2	12.5	402.4	10.2	88
PM16TW01-04	18.94	122.3	232.5	0.53	0.05528	0.00223	0.4919	0.0195	0.06464	0.00162	433.4	88.9	406.2	13.3	403.8	9.8	99
PM16TW01-05	21.79	142.6	267.3	0.53	0.05736	0.00214	0.5096	0.0159	0.06460	0.00080	505.6	83.3	418.1	10.7	403.5	4.9	96
PM16TW01-06	14.56	80.73	181.5	0.44	0.05917	0.00171	0.5294	0.0159	0.06505	0.00095	572.3	63.0	431.4	10.5	406.3	5.7	93
PM16TW01-07	24.54	180.6	282.9	0.64	0.05777	0.00183	0.5140	0.0161	0.06468	0.00100	520.4	70.4	421.1	10.8	404.0	6.0	95
PM16TW01-08	19.52	126.4	242.5	0.52	0.05607	0.00125	0.4945	0.0127	0.06417	0.00119	453.8	50.0	408.0	8.7	400.9	7.2	98
PM16TW01-09	29.09	253.8	321.8	0.79	0.06207	0.00199	0.5577	0.0229	0.06534	0.00217	675.9	68.5	450.1	14.9	408.0	13.1	90
PM16TW01-10	24.95	153.9	283.8	0.54	0.05730	0.00125	0.5214	0.0132	0.06607	0.00107	501.9	48.1	426.1	8.8	412.4	6.5	96
PM16TW01-11	20.58	117.1	226.5	0.52	0.05688	0.00151	0.5510	0.0149	0.07055	0.00101	487.1	59.3	445.6	9.7	439.5	6.1	98
PM16TW01-12	20.03	118.5	236.7	0.5	0.05488	0.00209	0.4980	0.0166	0.06630	0.00131	405.6	89.8	410.4	11.3	413.8	7.9	99
PM16TW01-13	21.09	124.1	252.8	0.49	0.05352	0.00165	0.4818	0.0165	0.06538	0.00098	350.1	70.4	399.3	11.3	408.2	5.9	97
PM16TW01-14	23.23	156.2	278.2	0.56	0.05708	0.00133	0.5079	0.0136	0.06461	0.00098	494.5	51.8	417.0	9.2	403.6	6.0	96
PM16TW01-15	26.96	187.3	317.8	0.59	0.05500	0.00200	0.4918	0.0119	0.06519	0.00149	413.0	86.1	406.1	8.1	407.1	9.0	99
PM16TW01-16	20.39	116.8	237.7	0.49	0.06813	0.00222	0.6152	0.0209	0.06561	0.00103	872.2	67.7	486.8	13.2	409.6	6.2	82
PM16TW01-17	45.32	463.2	495.5	0.93	0.05414	0.00117	0.4891	0.0133	0.06560	0.00131	376.0	52.8	404.3	9.1	409.6	7.9	98
PM16TW01-18	21.03	124.7	249.5	0.50	0.05467	0.00212	0.4951	0.0205	0.06565	0.00072	398.2	87.0	408.4	13.9	409.9	4.3	99
PM16TW01-19	17.53	109.8	216.5	0.51	0.05683	0.00162	0.5023	0.0146	0.06421	0.00080	483.4	63.0	413.3	9.9	401.2	4.8	97
PM16TW01-20	22.77	144.6	272.9	0.53	0.05968	0.00199	0.5308	0.0253	0.06441	0.00152	590.8	73.0	432.3	16.8	402.4	9.2	92

表 3。

粗安岩 SiO_2 含量为 56.81% ~ 59.86%; Al_2O_3 含量 15.90% ~ 18.10%; 富碱且富钠贫钾 ($\text{ALK} = 5.60\% \sim 6.00\%$, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O}) = 0.10 \sim 0.67$); 全铁 TFe_2O_3 含量 7.60% ~ 7.80%, MgO 含量 3.31% ~ 3.71%, TiO_2 含量 0.74% ~ 0.80%。 $\text{A}/\text{CNK} = 0.90 \sim 0.94$, $\text{A}/\text{NK} = 1.89 \sim 2.00$, 属准铝质岩石, 在 TAS 分类图解上样点投入亚碱性玄武安山岩、粗面安山岩 (图 7a), $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解进一步判别, 样点多落入中—高钾钙碱性区域 (图 7b), 岩石化学显示该期粗安岩属中—高钾钙碱性准铝质岩石。分异指数 DI 为 56.17 ~ 56.63, 固结指数 SI 在 19.85 ~ 22.52 之间, 表明其原生岩浆分异演化程度不高。

流纹岩 SiO_2 含量为 73.15% ~ 75.29%; Al_2O_3 含量 13.20% ~ 14.30%; 富碱且富钠贫钾 ($\text{ALK} = 6.28\% \sim 6.92\%$, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O}) = 0.22 \sim 0.46$); 全铁 TFe_2O_3 含量 2.30% ~ 2.90%, MgO 含量 0.16% ~ 0.32%, TiO_2 含量 0.34% ~ 0.38%。 $\text{A}/\text{CNK} = 1.06 \sim 1.14$, $\text{A}/\text{NK} = 1.32 \sim 1.43$, 属过铝质岩石, 在 TAS 分类图解上样点投入流纹岩区域 (图 7a), $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解进一步判别, 样点多落入低钾 (拉斑)—中钾钙碱性区域 (图 7b), 岩石化学显示该期流纹岩属低—中钾钙碱性过铝质岩石。分异指数 DI 为 86.56 ~ 90.42, 固结指数 SI 在 1.75 ~ 3.59 之间, 表明其原生岩浆经历了较程度

表3 东天山亚勒曼一带下泥盆统头苏泉组火山岩主量(%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 3 Analysis results of major(%), trace and rare earth elements($\times 10^{-6}$) of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains

岩性	粗安岩			流纹岩			岩性	粗安岩			流纹岩		
样号	PM14YQ1	PM14YQ2	PM16YQ1	PM16YQ2	PM16YQ3	样号	PM14YQ1	PM14YQ2	PM16YQ1	PM16YQ2	PM16YQ3		
SiO ₂	56.81	59.86	73.15	75.29	74.83	Cr	97.2	74.2	172	32.2	244		
TiO ₂	0.80	0.74	0.36	0.34	0.38	Ni	172	179	14.4	17.0	15.8		
Al ₂ O ₃	18.10	15.90	14.30	13.20	13.20	V	28.6	46.3	39.1	38.2	60.5		
Fe ₂ O ₃	4.20	3.48	1.73	1.53	2.08	Sc	21.1	23.1	10.5	10.7	9.80		
FeO	3.24	3.71	0.65	0.70	0.74	Cs	0.63	1.58	1.50	1.54	1.40		
MnO	0.18	0.19	0.02	0.02	0.02	Ga	17.8	16.8	11.6	15.0	10.7		
MgO	3.31	3.71	0.32	0.32	0.16	Rb/Sr	0.06	0.17	0.26	0.57	0.21		
CaO	5.38	5.38	1.57	0.90	1.79	Nb/Ta	21.43	20.76	18.65	20.46	19.42		
Na ₂ O	5.46	3.35	5.05	5.30	4.31	Zr/Hf	33.21	37.30	43.68	44.76	44.64		
K ₂ O	0.54	2.25	1.87	1.18	1.97	La	22.8	16.8	32.6	40.4	32.6		
P ₂ O ₅	0.14	0.12	0.05	0.05	0.06	Ce	42.6	33.4	61.4	78.2	60.0		
H ₂ O ⁺	1.68	1.08	0.46	0.38	0.58	Pr	7.40	5.60	11.6	13.2	11.1		
烧失	2.12	1.12	0.76	0.52	0.84	Nd	20.8	16.9	32.3	34.2	32.6		
总和	100.28	99.81	99.83	99.34	100.38	Sm	5.40	4.30	8.90	8.40	8.00		
TFe ₂ O ₃	7.80	7.60	2.45	2.30	2.90	Eu	1.30	1.20	1.70	1.50	1.70		
ALK	6.00	5.60	6.92	6.48	6.28	Gd	5.00	4.30	8.80	7.50	8.10		
K ₂ O/Na ₂ O	0.10	0.67	0.37	0.22	0.46	Tb	0.95	0.86	1.70	1.40	1.60		
Mg [#]	45.67	49.15	20.54	21.55	9.85	Dy	5.90	5.10	10.0	9.70	9.50		
A/NK	1.89	2.00	1.38	1.32	1.43	Ho	1.50	1.20	2.40	2.30	2.40		
A/CNK	0.94	0.90	1.08	1.14	1.06	Er	4.20	3.60	6.50	7.10	6.90		
SI	19.85	22.52	3.37	3.59	1.75	Tm	0.75	0.64	1.20	1.10	1.20		
DI	56.17	56.63	87.34	90.42	86.56	Yb	4.60	4.20	7.80	8.10	7.60		
Rb	21.8	55.0	36.2	57.8	21.8	Lu	0.70	0.61	1.20	1.20	1.20		
Ba	106	304	270	589	106	Y	38.0	33.6	66.6	62.1	67.7		
Sr	342	332	140	101	342	ΣREE	124	98.7	188	214	185		
Th	7.24	4.59	11.8	12.8	10.7	δEu	0.83	0.92	0.63	0.62	0.70		
U	1.30	1.20	3.00	2.70	2.80	LREE/HREE	4.25	3.81	3.75	4.58	3.79		
Ta	0.42	0.34	0.99	1.00	0.98	(La/Yb) _N	4.67	3.77	3.94	4.70	4.04		
Nb	9.00	7.06	18.5	20.5	19.0	(La/Sm) _N	2.66	2.46	2.31	3.03	2.56		
Zr	174	141	304	333	300	(Gd/Yb) _N	0.88	0.83	0.91	0.75	0.86		
Hf	5.24	3.78	6.96	7.44	6.72								

注: Mg[#] = n(Mg) / [n(Mg) + n(TFe)] · 100。

的分异演化。

4.3 稀土和微量元素特征

粗安岩稀土元素总量相对较低, ΣREE = 98.7 × 10⁻⁶ ~ 124 × 10⁻⁶。稀土元素原始球粒陨石标准化分布型式图右倾(图 8a), 显示轻稀土略富集。(La/Yb)_N = 3.77 ~ 4.67, LREE/HREE = 3.81 ~ 4.25; (La/Sm)_N = 2.46 ~ 2.66, (Gd/Yb)_N = 0.83 ~ 0.88, 表明 LREE、HREE 内部均有一定成程度的分馏。δEu = 0.83 ~ 0.92, 具微弱负铕异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8b)显示大离子亲石元素 Rb、Th、K 相对富集, 高场强元素 P、Nd、Nb、Ti 明显亏损, Sr 无明显亏损。

相较于粗安岩, 流纹岩多具较高的稀土总量,

ΣREE = 185 × 10⁻⁶ ~ 214 × 10⁻⁶。稀土元素球粒陨石标准化分布型式图与粗安岩类似, 呈不光滑的右倾型(图 8a), 显示轻稀土略富集。(La/Yb)_N = 3.94 ~ 4.70, LREE/HREE = 3.75 ~ 4.58; (La/Sm)_N = 2.31 ~ 3.03, (Gd/Yb)_N = 0.75 ~ 0.91, 显示 LREE、HREE 内部均有一定成程度的分馏。δEu = 0.62 ~ 0.70, 具微弱负异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 8b)亦表现为 Rb、Th、K 相对富集, P、Nb、Ta、Ti 明显亏损, 较粗安岩, 不同之处在于流纹岩具明显 Sr 亏损。

5 讨论

5.1 时代探讨

针对头苏泉组地层形成年龄, 前人已开展了一

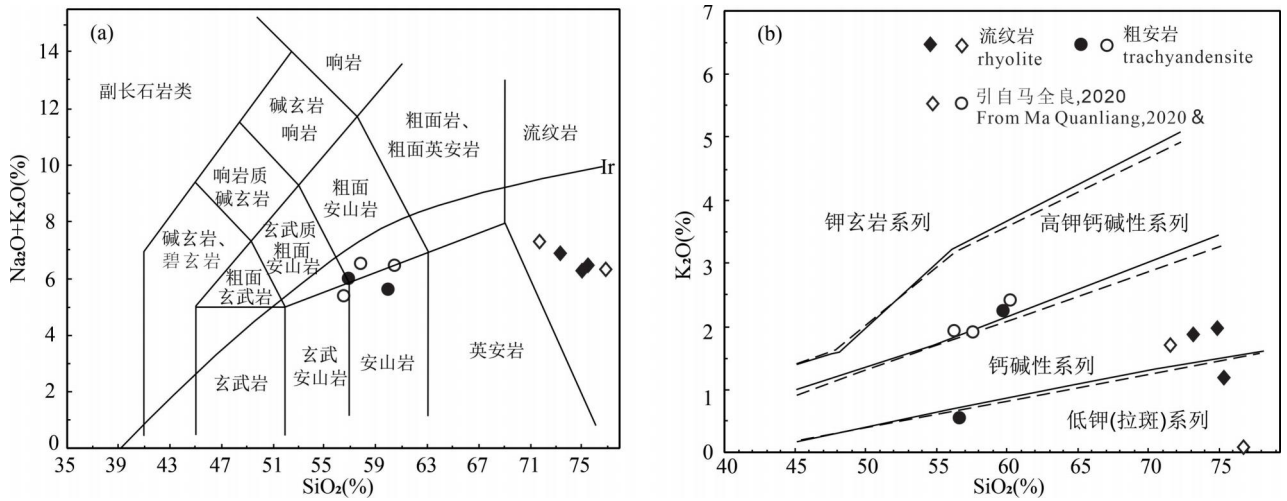


图 7 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组火山岩 TAS 分类图解 (a) (底图据 Le Maitre, 1989); K_2O-SiO_2 图解 (b) (实线据 Peccerillo and Taylor, 1976; 虚线据 Middlemost, 1985)

Fig. 7 TAS classification diagram (a) (Base map data from Le Maitre, 1989); K_2O-SiO_2 diagram (b) (Solid line from Peccerillo and Taylor, 1976; dotted line from Middlemost, 1985) of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation rhyolites in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains

系列研究工作。中国地质调查局西安地质调查中心在进行 1 : 25 万沁城幅区调修测工作(2013)时,于本区南邻奥莫尔塔格幅中部恰干昆多一带头苏泉组英安岩中获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 391.6 ± 7.5 Ma;赵恒乐等(2012),在工作区南部香山一带该套地层中获得该组英安岩锆石 U-Pb 年龄 398 ± 5 Ma;肖渊甫等(1992),东天山泥盆纪英安岩全岩 Rb-Sr 等时线同位素年龄 398 ± 10 Ma。且本区头苏泉组火山岩不整合覆盖于北侧中粒黑云二长花

岗岩、中细粒正长花岗岩之上,本次测得后二者的锆石 U-Pb 年龄分别为 435.6 ± 3.4 Ma、 425.9 ± 5.4 Ma,时代为早、中志留世,地层东侧被中粒斑状花岗岩闪长岩、中细粒二长花岗岩侵入,后二者的锆石 U-Pb 年龄分别为 300.0 ± 2.5 Ma、 292.0 ± 2.3 Ma,时代为晚石炭世。南侧被中粒石英闪长岩侵入,新疆哈密市 K46E006021、K46E007021、K46E007022 三幅 1 : 5 万区域地质矿产调查时,测得其年龄为 301.7 ± 0.8 Ma,时代亦为晚石炭世,该期火山岩时代被限定在

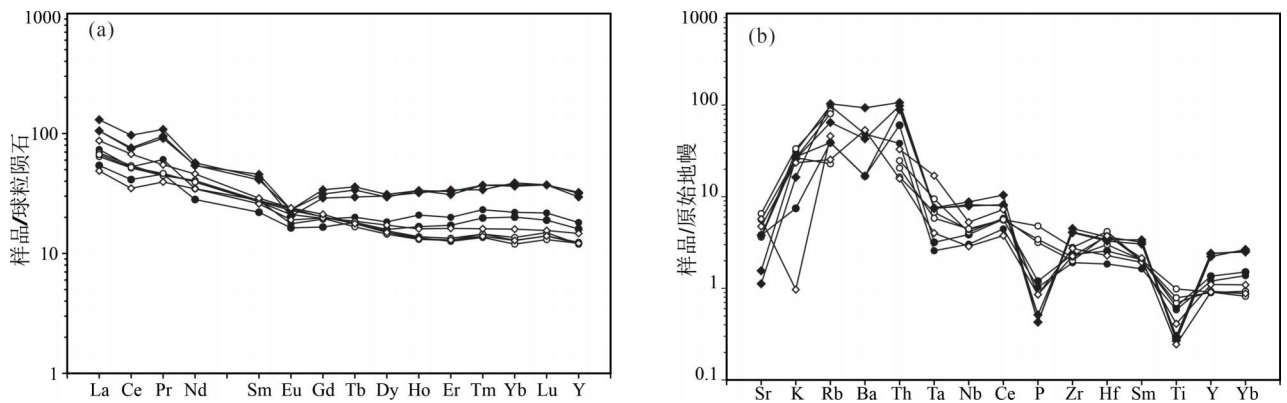


图 8 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 (a); 微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (球粒陨石和原始地幔标准数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains (the data of chondrite and primitive mantle from Sun and McDonough, 1989)

晚石炭世和中志留世之间。本次获得的该期火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 406.0 ± 3.0 Ma ($MSWD=0.35$), 根据野外关系、同位素年龄并结合前人资料对比, 头苏泉组火山岩的时代置于早泥盆世。

5.2 岩石成因

相较地幔来源的基性玄武岩而言, 中性岩浆来源更为复杂, 既可起源于幔源岩浆的结晶分异 (Grove et al., 2005), 也可由下地壳物质部分熔融形成 (Borg et al., 1998), 还可能形成于陆壳俯冲熔融 (张峰等, 2014); $Mg^{\#}$ 值是区分岩浆壳幔来源的重要指标, 典型洋中脊拉斑玄武岩 (MORB) 的 $Mg^{\#}$ 值 60 左右 (Donato et al., 1988), 而岩石地球化学研究表明, 下地壳来源的熔体, 无论熔融程度高低, 其 $Mg^{\#}$ 值均 <40 , 只有在地幔物质参与成岩时, 才能使熔体的 $Mg^{\#}$ 值 >40 (Rapp et al., 1995), 而本次研究的粗安岩样品具有较高的 $Mg^{\#}$ 值 (45.67 ~ 49.15), 平均值为 47.41, 表明粗安岩应主要来源于

地幔, 并非下地壳产物。另外, $Rb/Sr = 0.06 \sim 0.17$ 明显低于全球下地壳平均值 0.32 (Taylor et al., 1995), $Nb/Ta = 20.76 \sim 21.43$ 均高于上地幔平均值 17.5 (Sun et al., 1989), $Zr/Hf = 33.21 \sim 37.30$ 均接近于原始地幔平均值 36.3 (Hofmann, 1988), 同样暗示了其幔源特征。综合以上分析, 粗安岩应主要由幔源物质的熔融结晶分异形成。

一般认为流纹质岩石存在以下 3 种成因: 地壳物质受幔源岩浆底侵发生部分熔融形成 (Skjerlie et al., 1992); 幔源岩浆分离结晶作用形成 (Eby, 1992); 幔源岩浆同化地壳物质形成 (尹志刚等, 2013)。头苏泉组火山岩地球化学数据显示 (表 3), 流纹岩与粗安岩主量元素组成存在一定差异, 但在哈克图解 (图 9) 中两类岩石存在一定相关性, MgO 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 与 SiO_2 含量呈负相关性, 全碱 (ALK) 与 SiO_2 含量呈正相关性, 流纹岩样品 Rb/Sr (0.21 ~ 0.57)、 Nb/Ta (18.65 ~ 20.46)、 Zr/Hf (43.68 ~ 44.76) 比值表现为与粗安岩一致的特征, REE 配分

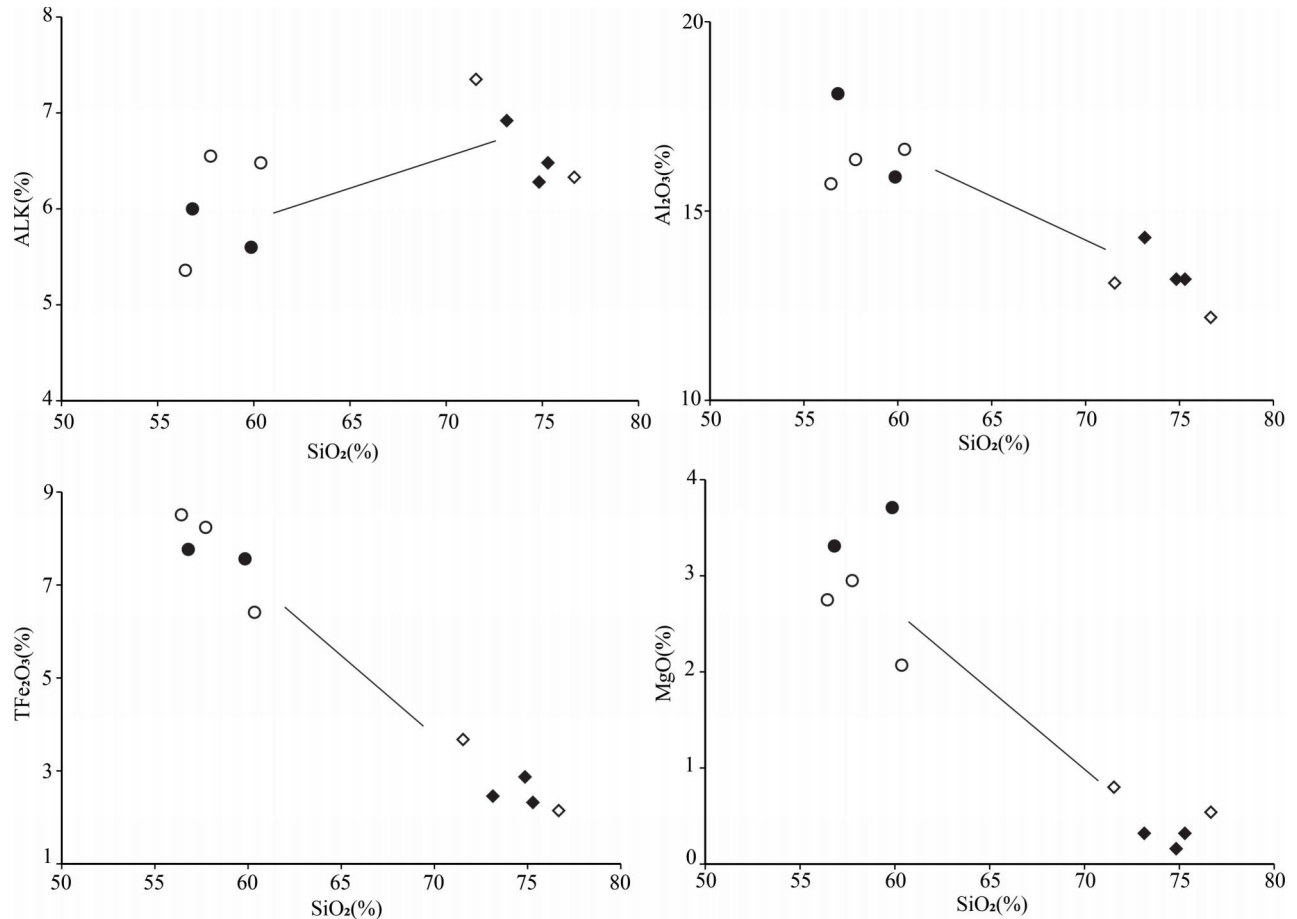


图 9 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组火山岩 SiO_2 —ALK, SiO_2 — Al_2O_3 , SiO_2 — TFe_2O_3 和 SiO_2 — MgO 哈克图解

Fig. 9 SiO_2 —ALK, SiO_2 — Al_2O_3 , SiO_2 — TFe_2O_3 and SiO_2 — MgO Huck diagrams of

the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaluman area, Eastern Tianshan Mountains

曲线形态相似,均表现出铕负异常,且由中性→酸性随着斜长石分离,铕异常逐渐增强,以上主量元素趋势、微量元素斜变、同位素的均一性均暗示该两类火山岩为同源岩浆演化关系。但地幔熔融岩浆通常形成中基性岩,很难直接形成酸性岩浆,地幔物质的部分熔融产生的岩浆 SiO₂ 不超过 65% (石林, 1990),研究区流纹岩 SiO₂ 含量 73.15%~75.29%,因此其并非由地幔熔融分离结晶形成。幔源岩浆高度分异并同化地壳物质可能形成酸性岩浆,在同化过程中,会增加 SiO₂、Rb、Zr、Th 等丰度,还会升高 La/Nb、K/P、Zr/Nb 值,降低 Ti/Yb、Ce/Pb 比值和 Sr 丰度 (McCulloch et al., 1991),头苏泉组流纹岩 La/Nb 值为 1.71~1.97,高于地壳萃取过后亏损地幔 La/Nb=0.68 (Sun et al., 1989),且随 Sr 含量的变化随之变化,表现为同化地壳物质特征。流纹岩还表现出与粗安岩同源特征,且具弱 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 0.7$),结晶分异度 ($DI = 86.56 \sim 90.42$) 较高,La/Sm—La 判别图解中 (图 10),样品呈水平变化趋势,表现出结晶分异特征, $\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \delta\text{Eu}$ 图解中 (图 11),岩石均落入壳幔混合区域。综合表明流纹岩为地幔熔融岩浆向上侵入同化地壳物质形成。

5.3 构造环境

新疆东天山哈尔里克带古生代构造演化长期存在诸多关键争议,前人多将哈尔里克带构造属性与北部卡拉麦里洋、南天山洋或康古尔塔格洋俯冲相联系。卡拉麦里洋奥陶纪至泥盆纪向北俯冲 (李海鸱等, 2006; 李锦轶等, 2009), 北侧发育大量活动大

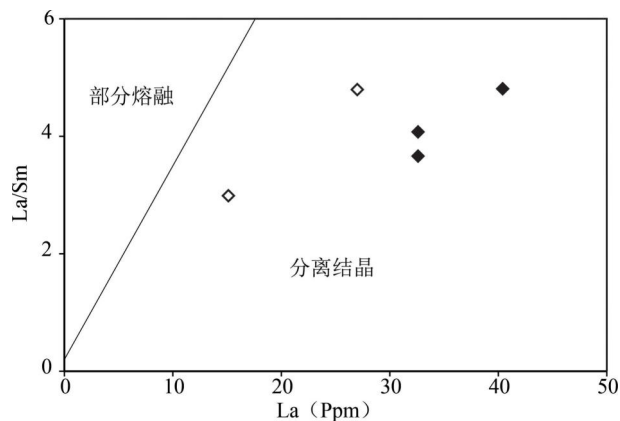


图 10 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组火山岩 La/Sm—La 判别图解

Fig. 10 La/Sm—La discrimination diagram of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yalerman area, Eastern Tianshan Mountains

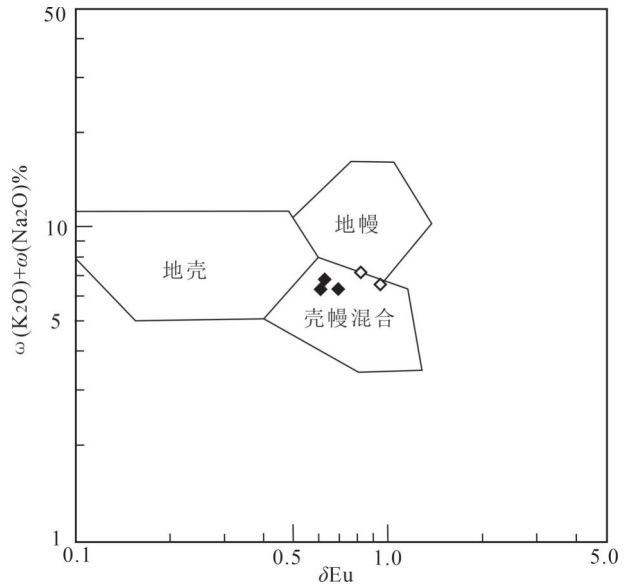


图 11 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组火山岩 $\omega(\text{K}_2\text{O}) + \omega(\text{Na}_2\text{O}) - \delta\text{Eu}$ 图解 (底图据 Chappell, 1999)

Fig. 11 $\omega(\text{K}_2\text{O}) + \omega(\text{Na}_2\text{O}) - \delta\text{Eu}$ diagram of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yalerman area, Eastern Tianshan Mountains (after Chappell, 1999)

陆边缘岛弧岩浆,而南侧哈尔里克地区为被动大陆边缘弧 (Huang Bo et al., 2018; Zhang Yunying et al., 2018)。康古尔塔格洋盆向北俯冲,形成奥陶纪—早志留世岛弧 (孙桂华等, 2007), 早志留世后,随着吐哈盆地南缘活动陆缘逐渐向南迁移,洋盆逐渐萎缩 (木合塔尔·扎日等, 2010)。然而,李文铅 (2005)、汪冲等 (2018) 提出康古尔塔格洋盆/南天山洋向北 (哈尔里克方向) 的俯冲作用至少持续至早石炭世,这一观点暗示了该区可能存在多阶段洋盆叠合演化的复杂过程。在构造环境转换节点方面存在多种分歧,王瑜等 (2002)、孙桂华等 (2005)、郭华春等 (2006)、曹福根等 (2006)、Yuan Chao 等 (2010) 认为泥盆纪—石炭纪是连续的岛弧活动期,但陈希节等 (2016) 基于对早二叠世 A2 型花岗岩的研究,提出该时期已转入后碰撞—板内伸展阶段,杜晓飞等 (2025) 对早二叠世超基性岩墙研究,认为该时期哈尔里克山南缘已转化板内伸展阶段。

本研究表明,东天山哈尔里克地区泥盆纪火山岩从中性—酸性连续演化,以钙碱性和低钾 (拉斑) 系列为主,锆石 U-Pb 定年,确定其年龄为 406.0 ± 3.0 Ma。地球化学分析显示 LREE 富集、Al₂O₃ (13.20%~18.10%) 含量较高,且大离子亲石元素

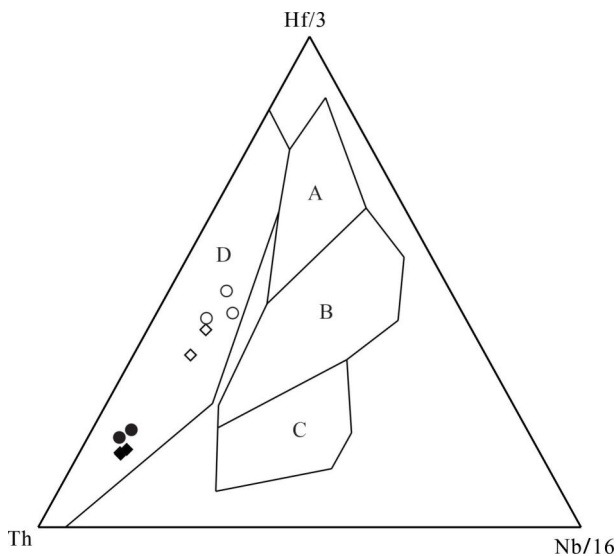


图 12 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉组火山岩 Th—Hf—Nb 判别图解(据 Wood,1980)

Fig. 12 Hf—Th—Ta diagram of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains (after Wood, 1980)

A—N 型 MORB; B—E 型 MORB 和板内拉班玄武岩;
C—碱性板内玄武岩; D—火山弧玄武岩

A—N type MORB; B—E type MORB and within-plate tholeiite;
C—alkaline within-plate basalt; D—volcanic arc basalt

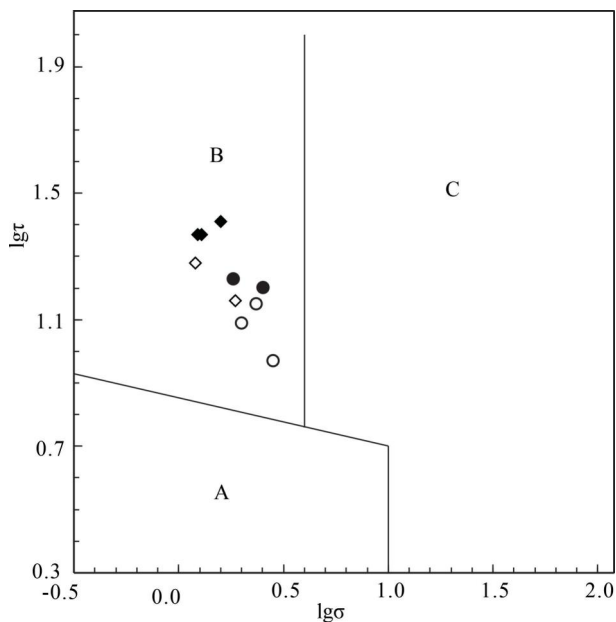


图 13 东天山亚勒曼地区下泥盆统头苏泉火山岩 $lg\sigma$ — $lg\tau$ 图解(据 Rittmann,1973)

Fig. 13 $lg\sigma$ — $lg\tau$ diagram of the volcanic rocks from the Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains (after Rittmann, 1973)

$$\sigma = \frac{[100w(K_2O) + 100w(Na_2O)]^2}{100w(SiO_2) - 43}; \tau = \frac{w(Al_2O_3) - w(Na_2O)}{w(TiO_2)}$$

A—板内稳定区火山岩; B—消减带火山岩(岛弧与活动大陆边缘); C—A 和 B 区演化的碱性火山岩

$$\sigma = \frac{[100w(K_2O) + 100w(Na_2O)]^2}{100w(SiO_2) - 43}; \tau = \frac{w(Al_2O_3) - w(Na_2O)}{w(TiO_2)}$$

A—intraplate stable volcanic rocks; B—subduction zone volcanic rocks (Island arc and active continental margin); C—alkaline volcanic rocks evolved in areas A and B

(LILE) 富集、高场强元素 (HFSE) 存在明显分异, 这都是俯冲带弧火山岩特征 (邓晋福等, 2015)。依据 Th—Hf—Nb 图解 (图 12)、 $lg\sigma$ — $lg\tau$ 图解 (图 13) 综合判断, 早泥盆世该区域仍处于活动大陆边缘弧环境。支持了汪冲等 (2018) 关于俯冲作用延续至石炭纪的观点, 揭示康古尔塔格洋盆闭合时间晚于传统认识的早志留世。同时, 区域早二叠世 A2 型花岗岩 (陈希节等, 2016) 与泥盆纪弧火山岩的时空共存, 表明东天山经历了“俯冲持续 (泥盆—石炭纪)—碰撞滞后 (早二叠世)”的多阶段演化模式, 提出洋盆闭合与构造体制转换具有穿时性, 为东天山“多洋盆—多期次”构造模型 (夏林圻等, 2002, 2004, 2007; 王宗秀, 2003; 李锦轶, 2004; 李锦轶等, 2006, 2009; 徐学义等, 2014; 崔方磊等, 2015) 提供了关键岩石学证据。

6 结论

(1) 东天山亚勒曼地区头苏泉组主要由中性、酸性火山熔岩及凝灰岩、火山角砾岩等组成, 可划分为爆发相、喷溢相、及潜火山岩相 3 种火山岩相, 并

存在至少 7 个喷发韵律, 未发育长时间的喷发间断, 总体表现为由中性—酸性火山喷发旋回。

(2) 东天山亚勒曼地区头苏泉组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 406.0 ± 3.0 Ma ($MSWD=0.35$), 结合前人测试结果, 综合分析认为本区头苏泉组火山岩地层形成时代为早泥盆世。

(3) 岩石地球化学特征表明, 东天山亚勒曼地区头苏泉组火山岩具高铝、富钠贫钾特征, 属低—中钾钙碱性岩石, 稀土元素总量较高, 轻稀土相对富集, 重稀土亏损, 大离子亲石元素 Rb、K、Ba 明显富集, 高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 亏损, 由地幔熔融结晶分析形成, 构造环境为俯冲背景下大陆边缘弧环境。

致谢: 感谢审稿专家的宝贵意见和建议!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 曹福根, 涂其军, 张晓梅, 任燕, 李嵩龄, 董富荣. 2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定——来自塔水河一带花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据. 地质通报, 25(8): 923~927.
- 曹锐, 木合塔尔·扎日, 王敦科, 曹福根. 2016. 东天山觉罗塔格造山带康古尔塔格断裂带构造特征及边界属性研究. 西北地质, 49(3): 28~38.
- 陈希节, 张奎华, 周健. 2016. 东天山哈密地区早二叠世花岗岩体及镁铁质包体的年代学, 岩石地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 90(9): 2334~2354.
- 崔方磊, 徐学义, 马中平, 汪晓伟, 朱小辉, 孙吉明. 2015. 东天山吐哈盆地北缘晚泥盆世火山岩的确立、成因及其构造意义. 地质学报, 89(8): 1402~1416.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 马帅, 姚图. 2015. 岩浆弧成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61(3): 473~484.
- 邓小华, 姜晓, 吴艳爽, 薛东, 赵鹏飞, 陈衍景. 2023. 东天山钨矿床时空分布、矿床类型及构造背景. 岩石学报, 39(6): 1557~1578.
- 杜晓飞, 王威, 张传林, 马华东, 朱炳玉, 邱林. 2025. 新疆东天山哈尔里克山早二叠世超基性岩墙锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质力学学报, 31(1): 156~168.
- 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, 吴昌志, 严正富. 2001. 论博格达俯冲断裂裂谷的形成与演化. 岩石学报, 17(4): 585~597.
- 郭华春, 钟莉, 李丽群. 2006. 哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. 地质通报, 25(8): 928~931.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595~2604.
- 黄河, 王涛, 童英, 张建军, 王朝阳. 2024. 中国西天山古生代岩浆岩时空架构、源区特征及构造背景. 西北地质, 57(6): 25~43.
- 李海鸥, 姜枚, 王亚军, 张立树, 于更新. 2006. 新疆富蕴—库勒勒剖面接收函数方法获得的地壳上地幔结构成像. 地质学报, 80(1): 135~141.
- 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, 何国琦, 徐新, 李华芹, 孙桂华, 杨天南, 朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报, 80(1): 148~168.
- 李锦轶, 杨天南, 李亚萍, 朱志新. 2009. 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. 地质通报, 28(12): 1817~1826.
- 李文铅. 2005. 新疆东天山康古尔塔格地区古弧—盆系统研究. 导师: 嵇少丞. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博士学位论文: 1~107.
- 李永军, 李注苍, 佟丽莉, 高占华, 佟黎明. 2010. 论天山古洋盆关闭的地质时限——来自伊宁地块石炭系的新证据. 岩石学报, 26(10): 2905~2912.
- 刘鸿飞, 赵浩, 郭瑞禄, 王国灿, 廖群安. 2022. 东天山哈尔里克地区早石炭世 A 型花岗岩年代学、地球化学及地质意义. 地球科

学, 47(6): 2245~2263.

- 罗婷, 陈继平, 廖群安, 王国灿, 张雄华, 张随安, 康琴琴. 2020. 东天山觉罗塔格构造带石炭纪弧后盆地:来自基性火山岩的证据. 地球科学, 45(1): 194~210.
- 马全良. 2020. 东天山哈密地区红石梁金矿成矿作用研究. 导师: 杨兴科. 西安: 长安大学硕士学位论文: 1~85.
- 马志杰, 柴凤梅, 许强奋, 王雯, 毛启贵, 祁冬梅. 2021. 东天山卡拉塔格晚石炭世岛弧火山岩发现的地质意义. 地质科学, 56(3): 683~700.
- 任文秀, 黄增保, 王军, 王文佳, 王怀涛, 李通国. 2020. 东天山玉石山蛇绿混杂岩带辉长岩 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 兰州大学学报(自然科学版), 56(5): 690~699+710.
- 石林. 1990. 地幔平衡部分熔融与岩浆分离结晶两种成因模式的微量元素判别式讨论. 矿物岩石, 10(4): 85~88.
- 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.
- 孙桂华, 李锦轶, 朱志新, 李亚萍, 杨之清. 2007. 新疆东部哈尔里克山南麓石炭纪砂岩碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 34(5): 778~789.
- 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(自然科学版), 46(4): 30~36+41.
- 汪冲, 张成立, 徐学义, 王洪亮, 张帮禄, 李雷. 2018. 东天山巴里坤地区早石炭世高镁闪长岩的确定及地质意义. 地质科学, 53(1): 341~362.
- 王瑜, 李锦轶, 李文铅. 2002. 东天山造山带右行剪切变形及构造演化的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学证据. 新疆地质, 20(4): 315~319.
- 王良玉, 廖群安, 肖典, 罗婷, 赵浩, 刘鸿飞, 王国灿. 2016. 新疆哈尔里克早石炭世 A 型花岗岩的岩石成因及构造意义. 地质力学学报, 22(4): 1032~1048.
- 王宗秀. 2003. 博格达山链的造山活动与山体形成演化. 导师: 马宗晋. 北京: 中国地震局地质研究所博士论文: 1~133.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据. 地质通报, 21(2): 55~62.
- 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): 903~910.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 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.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因. 西北地质, 41(4): 1~68.
- 肖文交, 宋东方, Windley B F, 李继亮, 韩春明, 万博等. 2019. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展. 中国科学(地球科学), 49(10): 1512~1545.
- 肖渊甫, 茅燕石, 周济元. 1992. 新疆东天山泥盆纪火山岩岩石学特征及其形成的大地构造环境. 矿物岩石, 12(2): 34~42.
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2005. 天山石炭—二叠纪后碰撞花岗岩的 Nd、Sr、Pb 同位素源区示踪. 西北地质, 38(2): 1~18.
- 徐学义, 李荣社, 陈勇璐, 马中平, 李智佩, 王洪亮, 唐卓. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识. 岩石学报, 30(6): 1521~1534.
- 尹志刚, 张跃龙, 杜玉春. 2013. 大兴安岭北部早白垩世上库力组流纹岩的地球化学特征及成因. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 788~796.
- 姚鱼, 邢伟伟, 贾红旭, 王彦光, 赵泽南, 马梦玲, 郭士恩. 2020.

- 东天山哈尔里克地区下马崖南花岗岩体年代学 地球化学特征及构造意义. *矿物岩石*, 40(4): 30~43.
- 木合塔尔·扎日, 吴兆宁, 吴昌志, 帕拉提·阿布都卡迪尔. 2010. 东天山板块缝合区(带)的构造演化与多金属矿床成矿的关系. *地球科学(中国地质大学学报)*, 35(2): 245~253.
- 赵恒乐, 马玉周, 郭利, 刘崑国. 2012. 哈密黄山东一带早泥盆世地层的发现及地质意义. *新疆地质*, 30(3): 283~286.
- 张峰, 陈建平, 徐涛, 范俊杰, 潘爱军, 郭晓东, 李杰美, 朝银银. 2014. 东准噶尔晚古生代依旧存在俯冲消减作用——来自石炭纪火山岩岩石学、地球化学及年代学证据. *大地构造与成矿学*, 38(1): 140~156.
- 张良臣, 吴乃元. 1985. 天山地质构造及演化史. *新疆地质*, 3(3): 3~16.
- Borg L E, Clynne M A. 1998. The Petrogenesis of Felsic Calc-alkaline Magmas from the Southernmost Cascades, California; Origin by partial melting of basaltic Lower Crust. *Journal of Petrology*, 39(6): 1197~1222.
- Cao Fugen, Tu Qijun, Zhang Xiaomei, Ren Yan, Li Songling, Dong Furong. 2006&. Preliminary determination of the Early Paleozoic magmatic arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China — Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating of granite bodies in the Tashuihe area. *Geological Bulletin*, 25(8): 923~927.
- Cao Rui, Muhetaer Zari, Wang Dunke, Cao Fugen. 2016&. Structural characteristics and plate boundary properties of the Kangguertage fault zone in Jueluotag. *Northwest Geology*, 49(3): 28~38.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535~551.
- Chen Xijie, Zhang Kuihua, Zhou Jian. 2016&. Geochronology and geochemistry characteristics of the Early Permian monzogranite and dioritic enclaves of East Tianshan and their tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2334~2354.
- Cui Fanglei, Xu Xueyi, Ma Zhongping, Wang Xiaowei, Zhu Xiaohui, Sun Jiming. 2015&. Confirmation of the Late Devonian volcanic rocks from the northern Tuha Basin in East Tianshan and its petrogenetic and tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1402~1416.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015&. Magmatic arc and ocean—continent transition: Discussion. *Geological Review*, 61(3): 473~484.
- Deng Xiaohua, Jiang Xiao, Wu Yanshuang, Xue Dong, Zhao Pengfei, Chen Yanjing. 2023&. Temporal and spatial distribution, deposit type and tectonic setting of East Tianshan tungsten deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 39(6): 1557~1578.
- Donato G, Loubet M. 1988. Mid atlantic ridge peridotites (from ODP Leg 109) geochemical compositions and conditions of partial melting of the upper mantle at slow spreading ridges. *Chemical Geology*, 70(1): 153~153.
- Du Xiaofei, Wang Wei, Zhang Chuanlin, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Qiu Lin. 2025&. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics, and tectonic significance of the early Permian ultrabasic dykes in the Harlik Mountains, east Tianshan, Xinjiang. *Journal of Geomechanics*, 31(1): 156~168.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoid; Petrogenetic and tectonic implication. *Geology*, 20(7): 641.
- Fang Guoqing. 1993&. Sedimentological evidence of Late Palaeozoic Bogda island arc. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 31~36.
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, Wu Changzhi, Yan Zhengfu. 2001&. Formation and evolution of Bogda subduction tearing rift. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 585~597.
- Guo Huachun, Zhong Li, Li Liqun. 2006&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of quartz diorite in the Koumenzi area, Harlik Mountain, East Tianshan, Xinjiang, China, and its geological significance. *Geological Bulletin*, 25(8): 928~931.
- Huang Bo, Fu Dong, Kusky Timothy, Ruan Kunpeng, Zhou Wenxiao, Zhang Xionghua. 2017. Sedimentary provenance in response to Carboniferous arc—basin evolution of East Junggar and North Tianshan belts in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 722: 324~341.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297~314.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tainren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007&. Analysis method and geological application of LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595~2604.
- Huang He, Wang Tao, Tong Ying, Zhang Jianjun, Wang Chaoyang. 2024&. Spatial and temporal framework, evolution of magma sources, and tectonic settings of paleozoic magmatic rocks in West Tianshan, China. *Northwest Geology*, 57(6): 25~43.
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell Scientific Publications; 1~193.
- Li Haiou, Jiang Mei, Wang Yajun, Zhang Lishu, Yu Gengxin. 2006&. Image of Crust and Upper Mantle structure along the array from Fuyun to Kuerle by P-to-S converted waves. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 135~141.
- Li Jinyi. 2004&. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 50(3): 304~322.
- Li Jinyi, He guoqi, Xu Xin, Li Huaqin, Sun Guihua, Yang Tiannan, Zhu Zhixin. 2006&. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168.
- Li Jinyi, Yang Tiannan, Li Yaping, Zhu Zhixin. 2009&. Geological features of the Kalamaili faulting belt, eastern Junggar and region Xinjiang, China and its constraints on the reconstruction of Late Paleozoic ocean—continental framework of the Central Asian region. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1817~1826.
- Li Wenqian. 2005&. Research on ancient arc—basin system of Kangguertage in Eastern Tianshan, Xinjiang. Tutor: Ji Shaocheng. Guangzhou: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry) Doctoral dissertation; 1~107.
- Li Yongjun, Li Zhucang, Tong Lili, Gao Zhanhua, Tong Liming. 2010&. Revisit the constraints on the closure of the Tianshan ancient oceanic basin: New evidence from Yinin Block of the Carboniferous. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2905~2912.
- Liu Hongfei, Zhao Hao, Guo Ruilu, Wang Guocan, Liao Qunan. 2022&. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Early Carboniferous A-type granites in the Harlik Area from East Tianshan. *Earth Science*, 47(6): 2245~2263.
- Luo Ting, Chen Jiping, Liao Qunan, Wang Guocan, Zhang Xionghua, Zhang Suian, Kang Qinqin. 2020&. A back-arc basin in eastern Tianshan, Central Asia: Evidence from geochronology and geochemistry of Carboniferous basalts. *Earth Sciences*, 45(1): 194~210.
- Ma Quanliang. 2020&. Study on the metallogenesis of Hongshiliang gold deposit in Hami Area, Eastern Tianshan. Tutor: Yang Xingke. Xian: Chang'an University Master thesis; 1~85.

- Ma Zhijie, Chai Fengmei, Xu Qiangfen, Wang Wen, Mao Qigui, Qi Dongmei. 2021. The discovery of Low-Carboniferous are volcanic rocks and its tectonic significance at Kalatage area in the eastern Tianshan. *Geological Science*, 56(3): 683~700.
- McCulloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102: 358~374.
- Middlemost E A K. 1985. Magmas and magmatic rocks: An introduction to igneous petrology. *Geological Magazine*, 123(1): 87~88.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 58(1): 63~81.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 - 32 kbar: Implications for continental growth and Crust—Mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Ren Wenxiu, Huang Zengbao, Wang Jun, Wang Wenjia, Wang Huaitao, Li Tongguo. 2020. Zircon U-Pb age based on LA-ICP-MS and its tectonic significance in the Yushishan ophiolitic melange. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition)*, 56(5): 690~699+710.
- Rittmann A. 1973. Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks. London: Blackwell Scientific Publication: 1~64.
- Sengör C M C, Natal'in A B, Burtman S V. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 363(6435): 299.
- Shi Lin. 1990. Discussion on discriminative equations about trace elements of two genetic models of Partial fusion of Equilibrium in the Mantle and Magmatic fractional crystallization. *Mineral Rock*, 10(4): 85~88.
- Skjerlie K P, Johnston A D. 1992. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 20(3): 263~266.
- Sun Guihua, Li Jinyi, Gao Liming, Yang Tiannan. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of a diorite pluton in the Harlik Mountain, Eastern Xinjiang and its tectonic implication. *Geological Review*, 51(4): 463~469.
- Sun Guihua, Li Jinyi, Zhu Zhixian, Li Yaping, Yang Zhiqing. 2007. Detrital zircon SHRIMP U-Pb dating of Carboniferous sandstone from the southern foot of the Harlik Mountains, eastern Xinjing, and its geological implications. *Geology of China*, 34(5): 778~789.
- Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and source processes. *Geological Society of London Special Publication*, 42(1): 313~345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241~265.
- Tian Liping, Wang Jinrong, Tang Zhongli, Yuman, Wang Huaitao, Zhao Zhixiong. 2010. Geochemical characteristics and tectonic significance of the early carboniferous volcanic rocks in eastern Bogda of Xinjiang. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition)*, 46(4): 30~36+41.
- Grove L T, Baker B M, Price C R, Parman W S, Elkins T L, Müntener O C N. 2005. Magnesian andesite and dacite lavas from Mt. Shasta, northern California: products of fractional crystallization of H₂O-rich mantle melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(5): 542~565.
- Wang Chong, Zhang Zhili, Xu Xueyi, Wang Hongliang, Zhang Banglu, Li Lei. 2018. Determination and geological significance of Early Carboniferous high magnesium diorite in Balikun area, Eastern Tianshan. *Geological Science*, 53(1): 341~362.
- Wang Yu, Li Jinyi, Li Wenqian. 2002. (40) Ar-(39) Ar chronological evidence of dextral shear and tectonic evolution of the eastern Tianshan Orogenic Belt. *Xinjiang Geology*, 20(4): 315~319.
- Wang Liangyu, Liao Qunan, Xiao Dian, Luo Ting, Zhao Hao, Liu Hongfei, Wang Guocan. 2016. Petrogenesis and tectonic significance of Early Carboniferous A-type gneiss in Harlik, Xinjing. *Journal of Geomechanics*, 22(4): 1032~1048.
- Wang Zongxiu. 2003. Orogeny, Formation and Evolution in the Bogda Mountain chain, Northwestern China. Tutor: Ma Zongjin. Beijing: Institute of geology, China Seismological Bureau Doctoral dissertation: 1~133.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the central asian orogenic belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- 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 Volcanic Province—Science Direct. *Earth Planetary Science Letters*, 50(1): 11~30.
- Xia Linqi, Zhang guowei, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Dong Yunpeng, Li Xiangmin. 2002. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic ocean basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks. *Geological Bulletin of China*, 21(2): 55~62.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. *Geological Bulletin*, 23(9): 903~910.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77~89.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2008. Petrogenesis of Carboniferous—Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its Neighboring. *Northwest Geology*, 41(4): 1~68.
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min, Lin Shoufa, Chen Hanlin, Li Zilong, Li Jiliang, Sun Shu. 2009. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102~117.
- Xiao Wenjiao, Zhang Lianchang, Qin Kezhang, Sun Shu, Liang JiLiang. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern tianshan (china): Implications for the continental growth of central asia. *American Journal of Science*, 304(4): 370~395.
- Xiao Wenjiao, Song Dongfang, Windley B F, Li Jiliang, Han Chunming, Wan Bo, etc. 2019. Research progress on accretionary orogeny and mineralization in Central Asia. *Chinese Science: Earth Science*, 49(10): 1512~1545.
- Xiao Yuanfu, Mao Yanshi, Zhou Jiyuan. 1992. The petrological characteristics of volcanic rocks in Devonian and the tectonics environment in Eastern Tianshan, Xinjiang. *Mineral Rock*, 12(2): 34~42.
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Zuchun, Xia Linqi, Li Xiangmin, Wang Lishe. 2005. Discussion of the sources and characteristics on Sr, Nd, Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan. *Northwest Geology*, 38(2): 1~18.
- Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Junlu, Ma Zhongping, Li Zhipei, Wang Hongliang, Tang Zhuo. 2014. New constrains on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area. *Acta Petrologica*

- Sinica, 30(6): 1521~1534.
- Yin Zhigang, Zhang Yuelong, Du Yuchun. 2013&. Geochemical characteristics and genesis of rhyolites of the early Cretaceous Kuli formation in northern Daxing'an Mountains. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 43(3): 788~796.
- Yao Yu, Xing Weiwei, Jia Hongxu, Wang Yanguang, Zhao Zenan, Ma Mengling, etc. 2020&. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of southern Xia MAYa Granite in Harlik Area, DongTianshan Mountain. Mineral Rock, 40(4): 30~43.
- Yuan Chao, Sun Min, Wilde S, Xiao Wenjiao, Xu Yigang, Long Xiaoping, Zhao Guochun. 2010. Post-collisional plutons in the Balikun area, East Chinese Tianshan; Evolving magmatism in response to extension and slab break-off. Lithos, 119(3~4): 269~288.
- Muhetaer Zari, Wu Zhaoning, Wu Changzhi, Parat Abudukadeer. 2010&. Relationship between Tectonic Evolution and Polymetallic Mineralization of the East Tianshan Plate Suture Zone. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 35(2): 245~253.
- Zhao Hao, Liao Qunan, Li Sanzhong, Xiao Dian, Wang Guocan, Guo Ruilu, Xue Zhuqing, Li Xiyao. 2020. Early paleozoic tectonic evolution and magmatism in the eastern tianshan, nw china; evidence from geochronology and geochemistry of volcanic rocks. Gondwana Research, 102: 354~371.
- Zhao Hengle, Ma Yuzhou, Guo Li, Liu Weiguo. 2012&. The discovery and geological significance of Early Devonian strata of the area of Xinjiang Hami Huanshandong. Geology of Xinjiang, 30(3): 283~286.
- Zhang Feng, Chen Jianping, Xu Tao, Fan Junjie, Pan Aijun, Guo Xiaodong, Li Jiamei, Chao Yin. 2014&. Late Paleozoic subduction in the eastern Junggar; evidence from the petrology, geochemistry and geochronology of carboniferous volcanic rocks. Geotectonica et Metallogenia, 30(3): 283~286.
- Zhang Liangchen, Wu Naiyuan. 1985&. The geotectonic and its evolution of Tianshan. Geology of Xinjiang, 3(3): 3~16.
- Zhang Yunying, Sun Min, Yuan Chao, Long Xiaoping, Jiang Yingde, Li Pengfei, Huang Zongying, Du Long. 2018. Alternating trench advance and retreat; Insights from Paleozoic magmatism in the Eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt. Tectonics, 37(7): 2142~2164.

Geological, geochemical characteristics, U-Pb ages of the volcanic rocks from Lower Devonian Tousuquan Formation in Yaleman area, Eastern Tianshan Mountains, and their tectonic significance

ZHANG Yaguang, XING Weiwei, MA Mengling, LI Qiang, YA Yu, LI Zeyang, XIA Xiang, GUO Shien
Hebei Institute of Regional Geological Survey, Langfang, Hebei, 065000

Abstract: A set of intermediate and acid volcanic lava, volcanic tuff and volcanic breccia are developed in Yaleman Tousuquan Formation in the Eastern Tianshan Mountains. The magma evolved from neutral to acidic from early to late, and developed explosive facies, effusive facies and subvolcanic facies, characterized seven eruption rhythmic cycles. According to LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating, the rhyolite age of the Tousuquan Formation is 406.0 ± 3.0 Ma ($MSWD = 0.35$), and the age is early Devonian. Rock geochemistry shows that the volcanic rocks of Tousuquan formation have the characteristics of medium aluminum (13.2%~18.10%), rich in sodium and poor in potassium ($K_2O/Na_2O = 0.10 \sim 0.67$), belonging to the high differentiation, low- to medium-K calc-alkaline series; The total amount of rare earth elements is relatively high ($\sum REE = 98.7 \times 10^{-6} \sim 214 \times 10^{-6}$), LREE is enriched, HREE is depleted ($LREE/HREE = 3.75 \sim 4.58$), Eu shows weak negative anomalies ($\delta Eu = 0.62 \sim 0.92$), large ion lithophile elements Rb, K, Ba are significantly enriched, and high field strength elements Nb, Ta and Ti are depleted. These geochemical characteristics exhibit signatures of mantle-derived remelted volcanic rocks that assimilated crustal materials during magma ascent, and indicate a continental margin arc tectonic setting related to subduction.

Keywords: Tousuquan Formation; volcanics; volcanic rhythm; Devonian; Eastern Tianshan Mountains

Acknowledgements: This paper was supported by Geological Exploration Fund Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region(No. T15-1-LQ21).

First author: ZHANG Yaguang, male, born in 1990, engineer, majoring in geological engineering, is mainly engaged in regional geological survey; Email: 245334366@qq.com

Corresponding author: XING Weiwei, male, born in 1985, senior engineer, majoring in mineral geology, is mainly engaged in regional geological survey; Email: yongyan0803@126.com

Manuscript received on: 2025-02-14; **Accepted on:** 2025-06-08; **Published online on:** 2025-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.06.045

Edited by: ZHANG Yuxu