www.
geojournals.cn/georev

准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩地球化学特征及其地质意义

邓敏[1,2],程锦翔[1,2],唐勇[3],付国斌[4],王正和[1,2],冯伟明[1,2],李嵘[1,2]

1)中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心),成都,610213;
2)自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室,成都,610213;
3)中国石油新疆油田分公司,新疆克拉玛依,834000;
4)中国石油吐哈油田分公司,新疆哈密,839000

内容提要:准噶尔盆地东部石钱滩凹陷石炭系巴塔玛依内山组火山岩之后发育一套连续稳定的碎屑岩沉积。笔者等通过XRD、主微量元素分析等手段针对其中的细粒沉积岩开展元素地球化学研究,其结果对恢复准东地区晚石炭世源区风化特征、古气候、判断其源岩性质及源区构造背景具有重要意义。研究表明,巴山组—石钱滩组泥岩具有低石英含量特点,其中巴山组泥岩黏土含量稍高,而石钱滩组泥岩中长石含量高,两者黏土成份均为蒙脱石(>99%),反映了干燥、寒冷的气候特征且沉积介质长期为碱性;*CIA* 结果显示巴山组—石钱滩组时期经历了中等—弱化学风化作用,并具有干湿交替气候变化特征;主微量元素及相关判别图解显示巴山组—石钱滩组泥岩的源岩多以偏中性的长英质火山岩为主,少量中基性及少量偏酸性的火山岩物源,并且多数为未分异的弧;泥岩的地球化学特征反映了沉积物源区构造背景主要为大陆岛弧背景,结合石钱滩组碎屑锆石峰值年龄及主要物源区分析认为,野马泉地体与其南部的准噶尔地体东北缘于335 Ma左右开始由俯冲转变为碰撞造山。

关键词:准噶尔盆地东部;石炭系;源岩性质;古气候;构造背景;地球化学特征

碎屑岩的地球化学组成与源岩、构造环境等密切相关(Bhatia, 1983; McLennan et al., 1993)。因此,碎屑岩的地球化学特征常用来判别源区的风化特征、源岩成份类型及指示源岩形成构造背景(Nesbitt and Young, 1982; Bhatia and Crook, 1986; Girty et al., 1996)。前人的研究表明,微量元素在识别构造环境和分析源岩组成方面比主量元素更为实用(Nesbitt, 1979; Bhatia and Crook, 1986; McLennan, 1989; Condie, 1993)。同时,细粒沉积物的微量元素含量往往高于砂岩等粗粒碎屑岩(Taylor and McLennan, 1985; Cullers et al., 1987),更能有效的指示沉积物质的来源(Young and Nesbitt, 1999; 刘锐娥等, 2005; Ghosh and Sarkar, 2010)。因此,细粒沉积岩的地球化学可以用来分析物源、揭示风化条件和构造背景(Geel and Bordy, 2021),推断大陆地壳演化史和盆山耦合关系,为区域构造演化提供证据(张茜等,2020)。新疆克拉美丽北部地区,已有学者利用东准噶尔下石炭统南明水组弧前沉积砂岩和泥岩的地球化学特征讨论了早石炭世地层的物源和构造背景,在认识泥盆纪—石炭纪之交的构造演化特征方面取得了较好的效果(Tao Huifei et al., 2014)。

中亚造山带是地球上最大的增生造山带之一,多年来受到了地质学界的广泛关注。位于新疆东北缘的东准噶尔构造带是中亚造山带西南缘古生代构造重建的关键地质体之一(Chen and Jahn, 2004; Su Yuping et al., 2012; 李涤等, 2012; Huang Bo et al., 2018),也是中亚造山带重要的组成部分。前人在造山带内开展了大量工作,包括克拉美丽(卡拉麦里)地区古生代板块的基本特征及演化(李锦轶等, 1988, 1990, 2009)、后碰撞岩浆活动时限(韩宝福等, 2006),克拉美丽洋的关闭时限(王道永等, 1995; 吴润江等, 2009; 田健等, 2015; 杨凯凯等, 2018; Wang Jian et al., 2021)、准噶尔洋壳的俯冲—

注:本文为成都理工大学自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室开放基金资助项目(编号:DGERA20231108)的成果。
收稿日期:2024-01-15;改回日期:2024-04-02;网络首发:2024-04-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.04.031
作者简介:邓敏,男,1985年生,博士,高级工程师,主要从事沉积地质、石油地质、非常规油气方面的研究工作;Email: dengmin911@126.com。

侵入过程(龙晓平等,2006;Long Xiaoping et al.,2012)以及石炭纪构造转变的时限等(Guo Jianming et al.,2020)。这些研究成果不仅初步理清了准噶尔东北缘的构造演化过程,还对逐步认识中亚造山带演化历程做出了贡献。同时,因北疆石炭系具有丰富的油气资源潜力,在造山带研究基础之上,前人对山前沉积盆地开展了一系列工作,主要涉及北疆石炭纪盆地沉积—构造演化(况军等,1993;唐勇等,2015;杨延绘等,2016;张磊等,2020)、东准噶尔晚石炭世原型盆地演化(匡立春等,2013;易泽军等,2018)等,为油气勘探奠定了基础。上述针对造山带的研究多着手于广泛出露的火山岩、混杂岩带、花岗岩等可直接反映构造活动的地质体及缝合带内野外丰富的构造变形特征,而沉积盆地的研究多围绕地震剖面开展。尽管沉积岩地球化学特征研究可以明确潜在的物源区及源岩性质,从而解剖沉积盆地的构造—沉积演化过程,这对油气勘探有重要的意义,并且凹陷内沉积物质也是造山作用较好的响

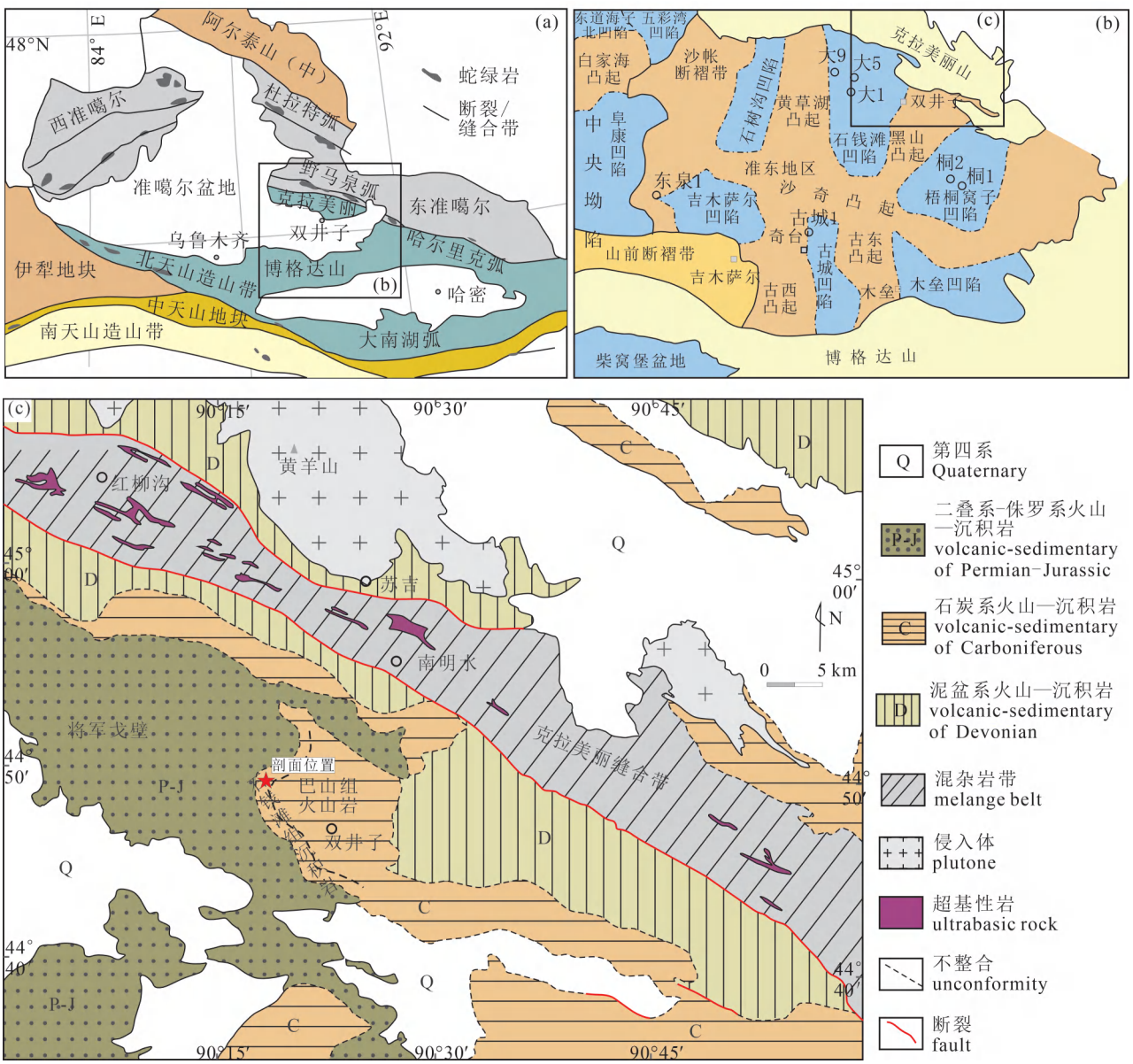

图 1 新疆北部主要地体及构造格架图(a)(据 Huang Bo et al.,2018 修改)、准东地区主要构造分区图(b)(据杨延绘等,2016 修改)及双井子地区地质简图(c)(据李锦轶等,1990 修改)

Fig. 1 Main terrane and tectonic framework in northern Xinjiang (a) (modified after Huang Bo et al., 2018); main structural zoning map of eastern Junggar area (b) (modified after Yang Yanhui et al., 2016&) and geological sketch of Shuangjingzi area (c) (modified after Li Jinyi et al., 1990&)

应,但克拉美丽山前带关于这方面的研究相对较少。因此本次利用上石炭统泥岩样品地球化学特征,对其源区性质、古气候特征及构造背景进行了探讨,以期能为该地区晚石炭世的未来油气勘探以及更好的理解该地区乃至古亚洲洋(中亚造山带)的演化提供一些证据支撑。

1 地质背景

准噶尔盆地是中国重要的含油气盆地之一,多次的构造运动形成了现今的格局,盆地东部夹于天山造山带、克拉美丽造山带和东准噶尔地体之间(图 1a)。准东地区由众多的次级凸起及凹陷构成(郑孟林等,2018),隆凹格局明显(图 1b),克拉美丽山前凹陷是准噶尔盆地东部重要的沉积区之一。克拉美丽缝合带(克拉美丽山)呈北西西向沿红柳沟—南明水一线向展布,缝合带内蛇绿混杂岩发育(图 1c),缝合带控制了南北沉积区的地层分区;西南部为将军戈壁地层小区,出露泥盆—侏罗系地层;东北部苏吉—黄羊山地区岩体发育,属于野马泉构造带的南段,该区沉积地层属卡拉麦里地层分区。

将军戈壁地层小区上石炭统出露石钱滩组(C_2sh)及巴塔玛依内山组(巴山组)地层。石钱滩组不整合于巴塔玛依内山组之上,为一套滨浅海相地层(袁复礼等,1956),岩性以砾岩、细粒沉积岩、夹海相生屑灰岩为主要特征。该地层主要在石钱滩凹陷及梧桐窝子凹陷内发育(张磊等,2020),在双井子地区出露地表,厚 1000 m 左右,凹陷内大 1 井、大 5 井中钻遇,并在凹陷西部大 9 井中尖灭,整体呈西薄东厚的特征。石钱滩组形成于 318.7±4.2 Ma 之后(杨凯凯等,2018),大致形成于晚石炭世,与东

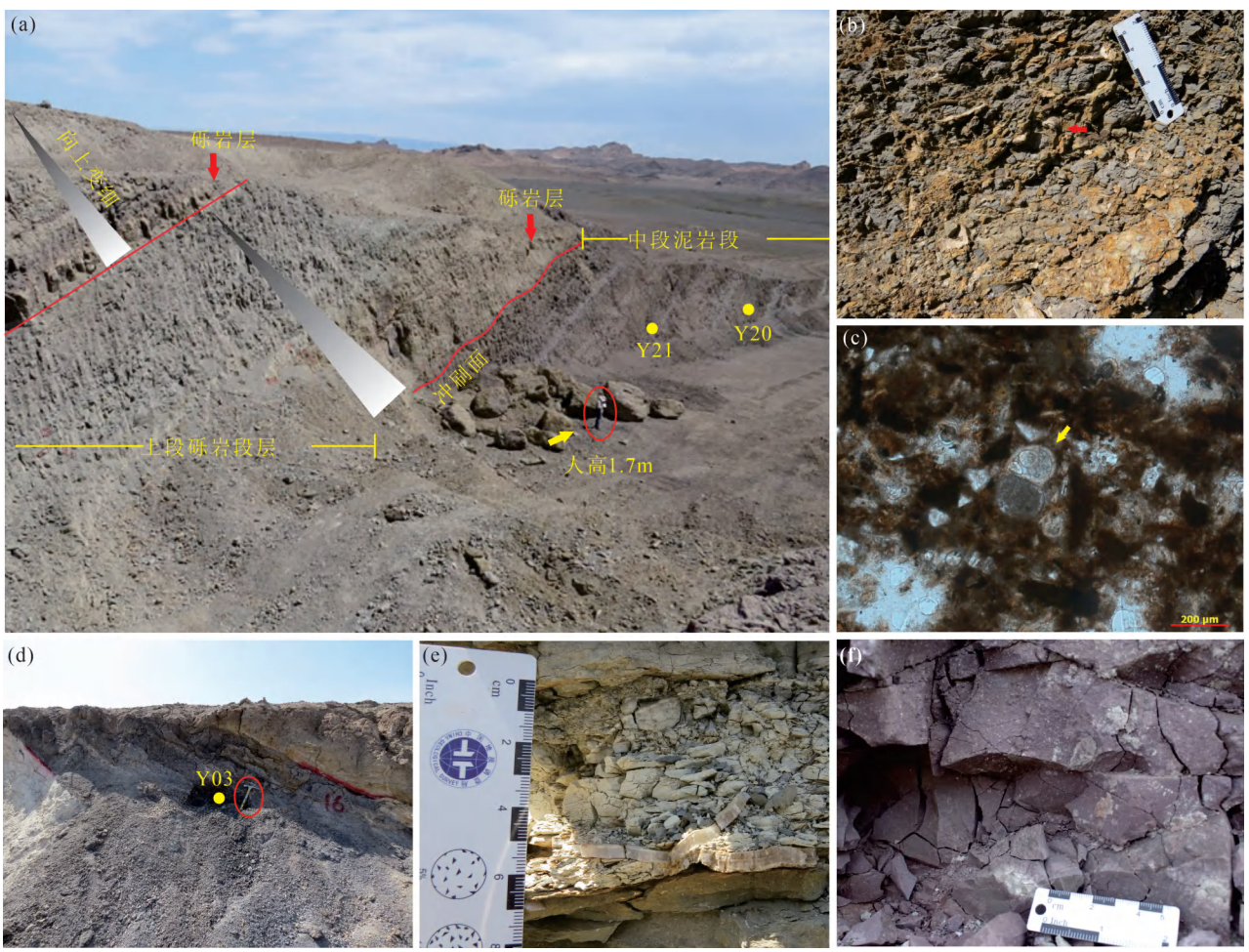

图 2 准噶尔盆地东部上石炭统露头及泥岩特征:(a) 野外露头特征;(b) 生屑泥岩;(c) 含有孔虫泥岩显微照片(+);(d) 灰黑色泥岩;(e) 灰白色泥岩;(f) 紫红色泥岩

Fig. 2 Characteristics of the Upper Carboniferous outcrop and mudstones in the Eastern Junggar Basin: (a) characteristics of outcrop; (b) bioclastic mudstone; (c) photomicrographs of foraminifera mudstone; (d) gray-black mudstone; (e) grayish-white mudstone; (f) fuchsia mudstone

准噶尔地区上妖魔梁组(315 Ma)时代相当(Huang Bo et al., 2018)。该地层由晚石炭世短暂的海侵形成(李锦轶等,1990)。古地理重建研究认为,石钱滩组时期古地理面貌具有由五彩湾向巴里坤方向开口的喇叭状滨浅海沉积特征(唐勇等,2015)。

巴山组($C_{1-2}b$)主要为为一套火山岩地层,横跨

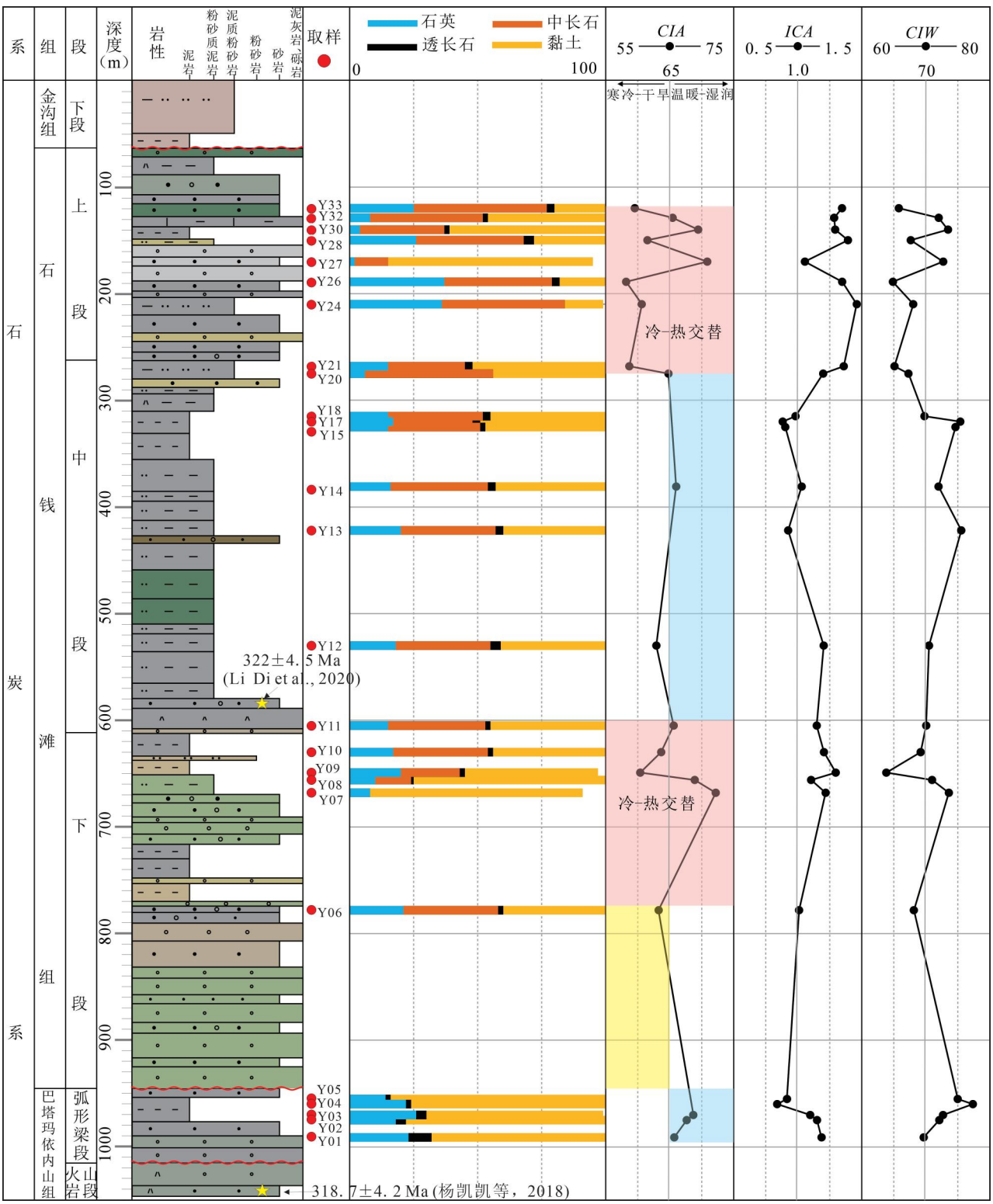

图 3 准噶尔盆地东部双井子地区巴山组取样位置及泥岩全岩 X 衍射矿物含量、*CIA*、*ICV*、*CIW* 垂向分布特征

Fig. 3 Whole-rock X-ray diffraction characteristics, *CIA*, *ICV* and *CIW* of mudstone from Carboniferous samples in Shuangjingzi area, Eastern Junggar Basin (vertical distribution)

下—上石炭统,由一套基性—中基性—酸性火山熔岩和火山碎屑岩组成(杨凯凯等,2018),在双井子地区,其顶部发育一套厚度较薄的碎屑岩段,支倩(2018)将此段厘定为"弧形梁组",由该地区石钱滩组牙形石发育时限(晚石炭世)和该区巴山组顶部玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄结果(318.7±4.2 Ma)限定(杨凯凯等,2018),"弧形梁组"沉积于巴什基尔阶之后,与准噶尔盆地东南缘井下"巴塔玛依内山组"泥岩地层发育的时代(孢粉限定为巴什基尔阶中期)大致相当(龚德瑜等,2021),此段地层是东准噶尔石炭系气藏的烃源岩层之一(王绪龙等,2010,龚德瑜等,2021)。

2 取样及方法

本次在双井子地区沙漠道路新挖基坑中自巴山组顶部向石钱滩组顶部逐层采集新鲜泥岩样品(图 2a—f),系统采集样品 26 件(图 3)。其中巴山组顶部沉积岩段样品 5 件,石钱滩组 21 件,所取样品脉体较少,样品干净,受后期风化作用较弱。样品在自然资源部西南矿产资源监督检测中心测试完成,主要完成主微量及稀土元素分析。X 衍射在四川省科源工程技术测试中心完成。

X 衍射分析仪器为 PANalytical X'pert Pro X 射线衍射仪,执行标准为《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2018)。元素分析仪器为 AXIOS X 射线荧光光谱仪及 iCAP Qc 等离子体质谱仪,主量元素执行标准为《硅酸盐岩石化学分析方法》(GB/T 14506.28—2010),微量及稀土元素执行标准为《硅酸盐岩石化学分析方法》(GB/T 14506.30—2010),具体操作过程为:①将样品破碎并研磨至 200 目;②在干燥箱中干燥后取样 100 mg,放入马弗炉内 200℃加热 2 h 以后去除有机质的影响;③使用 $HCl+HClO_4+HF+HNO_3$ 进行样品分解,定容至 25 mL,静置 24 h 后进行测试。测试误差控制在±5%以内,各测试结果均为 3 次测试的平均值。

3 实验结果

3.1 X 衍射矿物含量

全岩及黏土 X 衍射结果显示(图 3,表 1),巴山组泥岩主要由黏土和石英组成,含少量透长石。石钱滩组泥岩主要矿物为石英、中长石、黏土,三者比例约为 1∶2∶3,并含少量透长石。而所有样品的黏土均以蒙脱石为主要成份(石钱滩组蒙脱石含量 99%以上,含少量伊利石,巴山组蒙脱石含量均为 100%)。巴山组的黏土含量均值为 75%,石钱滩组均值为 46%,由巴山组到石钱滩组,泥岩中黏土含量呈减少趋势,中长石在石钱滩组中较为发育,而巴山组中未见到。紫红色泥岩中含少量黄铁矿和赤铁矿,个别样品中含微量方解石。

3.2 主量元素特征

主量元素特征见表 2。石钱滩组泥岩中 SiO_2 含量介于 53.28%~69.08%之间,平均值为 59.25%,MnO 含量介于 0.01%~0.05%之间(均值为 0.03%),K_2O 含量介于 0.42%~2.52%之间(均值为 1.61%),Na_2O 含量介于 1.82%~3.76%之间(均

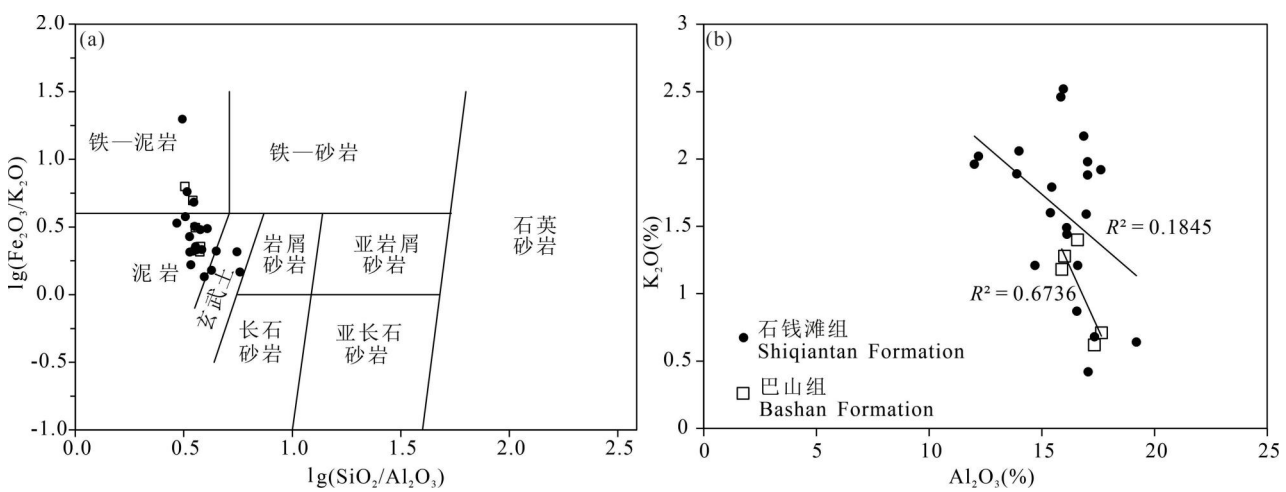

图 4 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩化学分类(a)及主量元素(b)交汇图

Fig. 4 Geochemical classfication (a) and major oxides correlation(b) diagrams of the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩全岩及黏土 X 衍射矿物含量结果(%)

Table 1 X-ray diffraction results of whole rock and clay of the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin(%)

取样编号	取样层位	岩性	全岩成分含量(%)								黏土矿物含量(%)			
			石英	钾长石	中长石	方解石	透长石	黄铁矿	赤铁矿	黏土矿物	蒙脱石 S	伊利石 I	高岭石 K	绿泥石 C
STZP Y01	巴塔玛依内山组	泥岩	23	0	0	0	9	0	0	68	100	0	0	0
STZP Y02		泥岩	18	0	0	0	4	0	0	78	100	0	0	0
STZP Y03		泥岩	26	0	0	0	4	0	0	69	100	0	0	0
STZP Y04		泥岩	22	0	0	0	2	0	0	76	100	0	0	0
STZP Y05		泥岩	14	0	0	0	2	0	0	84	100	0	0	0
STZP Y06	石钱滩组	泥岩	21	0	37	0	2	0	0	40	100	0	0	0
STZP Y07		紫红色泥岩	8	0	0	0	0	3	6	83	100	0	0	0
STZP Y08		白色泥岩	10	0	14	0	1	0	0	75	100	0	0	0
STZP Y09		泥岩	20	0	23	3	2	0	0	52	100	0	0	0
STZP Y10		泥岩	17	0	37	0	2	0	0	44	99	1	0	0
STZP Y11		泥岩	15	0	38	0	2	0	0	45	92	2	1	5
STZP Y12		泥岩	18	0	37	0	4	0	0	41	98	2	0	0
STZP Y13		泥岩	20	0	37	0	3	0	0	40	99	1	0	0
STZP Y14		泥岩	16	0	38	0	3	0	0	43	99	1	0	0
STZP Y15		泥岩	17	0	31	0	3	0	0	49	100	0	0	0
STZP Y17		泥岩	15	0	36	0	2	0	0	47	100	0	0	0
STZP Y18		泥岩	15	0	37	0	3	0	0	45	98	2	0	0
STZP Y20		泥岩	6	0	50	0	0	0	0	44	99	1	0	0
STZP Y21		泥岩	15	0	30	0	3	0	0	52	98	2	0	0
STZP Y24		泥岩	36	0	48	0	0	1	0	15	100	0	0	0
STZP Y26		泥岩	37	0	42	0	3	0	0	18	99	1	0	0
STZP Y27		白色泥岩	2	5	13	0	0	0	0	80	100	0	0	0
STZP Y28		泥岩	26	0	42	0	4	0	0	28	100	0	0	0
STZP Y30		泥岩	4	0	33	0	2	0	0	61	100	0	0	0
STZP Y32		泥岩	8	0	44	0	2	0	0	46	99	1	0	0
STZP Y33		泥岩	25	0	52	0	3	0	0	20	98	2	0	0
均值	巴山组	泥岩	21	/	0	/	4	/	/	75	100	/	/	/
	石钱滩组	泥岩	17	/	34	/	2	/	/	46	99	/	/	/

值为 2.59%)。与后太古代页岩(PAAS)相比,石钱滩组泥岩具有低钾、锰、高纳含量的特征。巴山组泥岩中大多数主量元素含量与石钱滩组相当,但其 CaO 含量介于 0.22%~0.6%之间(均值为 0.36%),其 P_2O_5 含量介于 0.035%~0.092%之间(均值为 0.05%),两者明显低于石钱滩组泥岩与后太古代页岩,具低钙、磷含量的特征。Fe_2O_3/K_2O 与 SiO_2/Al_2O_3 的对数关系图(Herron,1988)表明,大多数样品主要为泥岩、少量为富铁泥岩及(玄武土)黏土岩(图 4a)。泥岩 K_2O 与 Al_2O_3 呈明显的负相关性,这与黏土中伊利石较少有关(图 4b)。

3.3 微量元素特征

石炭系泥岩样品微量元素特征见表 3。从与 PAAS 及 UCC 对比结果可见,泥岩样品中大离子亲石元素 Rb、Ba 含量明显较低,Cr、Ni 含量也十分低,且巴山组地层中 Sr、Th 元素含量极低。而两个组样品中元素含量又存在一定差别,巴山组地层中 Ni、Rb、Sr、Ba、Th 等元素含量明显低于上覆的石钱滩组地层。原始地幔元素蛛网图(图 5)显示,石炭系泥岩样品具有 Nb、Sr、亏损和 Th 富集的特征,而巴山组 Sr 亏损更为严重,两套地层中均可见的白色泥岩层具有 Th 富集、Sr 及 Ti 严重亏损的特点。

表 4 显示了石炭系泥岩中稀土元素特征。其中,巴山组稀土元素总量(∑REE)为 133×10^{-6}~444×10^{-6},平均值为 230×10^{-6},高于上地壳(UCC)(148×10^{-6})及后太古代页岩(PAAS)(185×10^{-6}),石钱滩组稀土元素总量(∑REE)为 92×10^{-6}~298×10^{-6},平均值为 160×10^{-6},含量高于上地壳低于 PAAS,反映两个组泥岩物质来源有一定的差异;巴山组样品的 ∑LREE/∑HREE 值为 4.01~10.1(均值为 5.94),石钱滩组为 3.57~10.7(均值为 6.22),与 PAAS(9.49)和 UCC(9.33)相比,样品具偏低的轻/重稀土比值,表明源岩更偏向中—基性火山岩(Bhatia and Crook,1986)。巴山组与石钱滩组样品

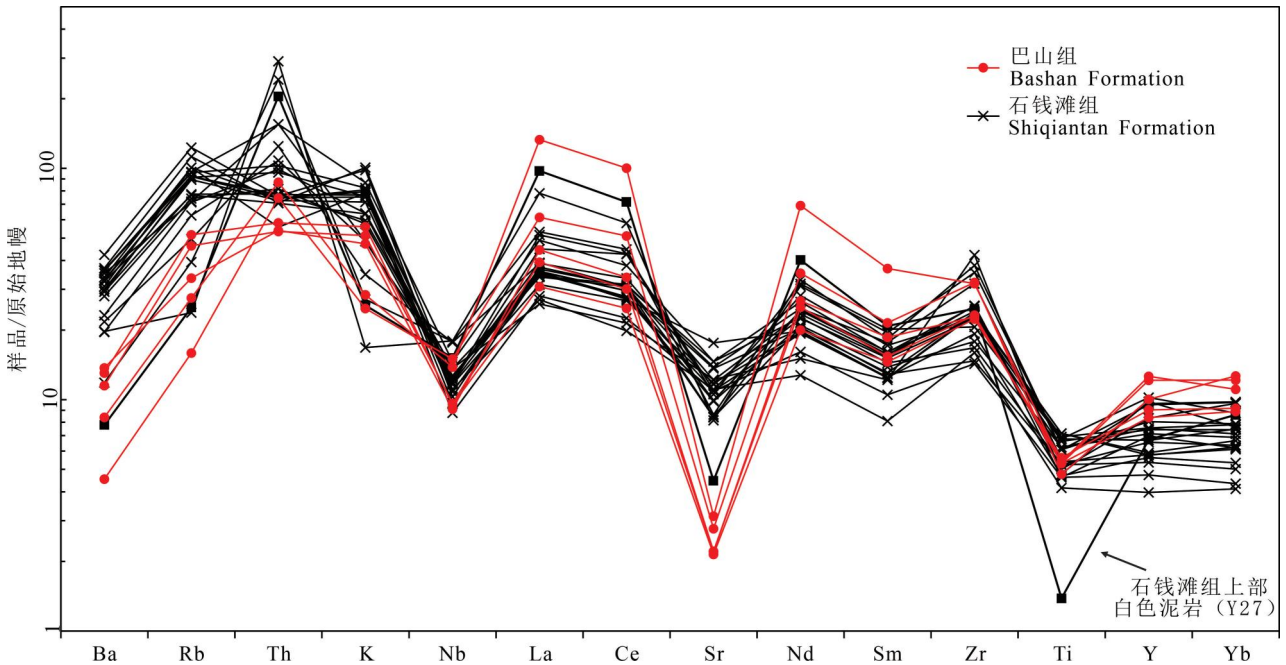

图 5 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩标准化微量元素蛛网图(原始地幔据 Sun and McDonouph, 1989)

Fig. 5 Spider map of normalized trace elements of the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin(Primitive mantle values are from Sun and McDonouph, 1989)

$(La/Yb)_N$ 均值分别为 4.34 及 4.71,反映轻、重稀土元素分异程度相对低。与 UCC 标准化后的稀土元素配分曲线较为平缓,呈现轻微的左倾特征(图 6a),表明源岩受中—基性岩影响,而与球粒陨石标准化后的稀土元素配分曲线具轻稀土元素右倾及 Eu 负异常特征(上部白色泥岩层 Eu 负异常较明显),而重稀土元素曲线则较为平缓,显示轻稀土元素明显的分馏作用,指示源岩仍具有长英质特征(图 6b)。样品泥岩 $(Gd/Yb)_N$ 均值=1.42,与上地壳值(1.35)相近,表明具有长英质物特征;δEu均值<1,

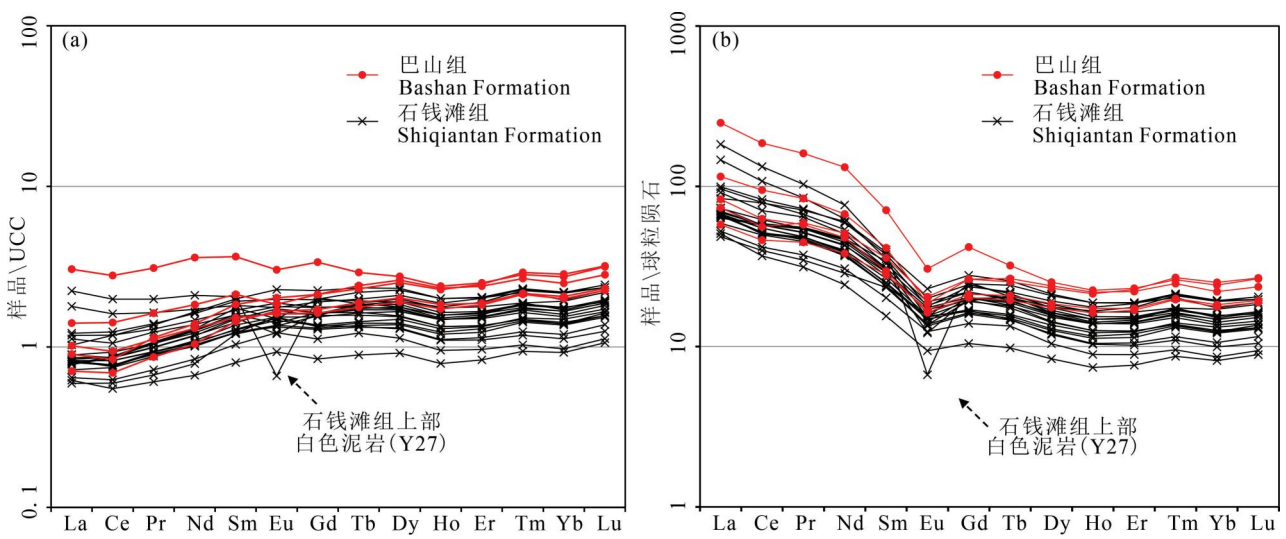

图 6 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩上地壳标准化(a)和球粒陨石标准化(b)稀土元素配分模式图
(上地壳数据据 Rudnick and Gao, 2003,球粒陨石数据据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 6 UCC-normalized (a) (UCC values are from Rudnick and Gao, 2003) and Chondrite-normalized(b) (Chondrite values are from Taylor and McLennan, 1985) REE partterns of the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin

表 2 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩主量元素分析结果(%)

Table 2 Analysis results of major elements(%) of the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin

层位	取样编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	灼失	总含量	*ICV*	*CIA*	*CIW*
巴塔玛依内山组	STZP Y001	60.06	16.00	2.66	0.09	0.28	3.16	1.28	3.98	0.70	0.04	0.03	10.68	98.96	1.19	65.71	69.67
	STZP Y002	59.24	16.57	4.38	0.07	0.22	2.91	1.40	3.72	0.73	0.05	0.04	10.47	99.79	1.15	67.65	72.11
	STZP Y003	60.00	15.88	2.68	0.083	0.60	2.98	1.18	3.02	0.69	0.04	0.04	11.76	98.95	1.10	68.68	72.69
	STZP Y004	60.40	17.32	3.09	0.11	0.32	2.37	0.62	2.78	0.62	0.03	0.02	11.43	99.12	0.84	/	/
	STZP Y005	56.40	17.64	4.47	0.10	0.40	2.26	0.71	3.27	0.69	0.09	0.04	13.44	99.51	0.92	/	/
石钱滩组	STZP Y006	60.59	15.37	2.17	0.20	1.61	1.69	1.60	2.81	0.72	0.15	0.02	12.10	99.03	1.01	63.27	68.13
	STZP Y007	53.28	17.05	8.32	0.01	1.19	3.10	0.42	2.65	0.79	0.17	0.02	12.40	99.40	1.22	72.18	73.60
	STZP Y008	56.86	17.33	3.91	0.01	1.70	3.07	0.68	3.01	0.79	0.40	0.03	11.78	99.57	1.10	68.91	70.98
	STZP Y009	59.71	14.69	3.72	0.14	2.99	2.4	1.21	2.53	0.70	0.16	0.05	10.24	98.54	1.30	60.40	63.83
	STZP Y010	58.35	15.44	5.40	0.01	1.55	2.08	1.79	2.83	0.81	0.25	0.03	10.17	98.71	1.20	63.67	69.19
	STZP Y011	57.28	16.11	4.60	0.28	1.54	2.38	1.44	2.70	0.81	0.15	0.05	11.58	98.92	1.15	65.62	70.07
	STZP Y012	57.28	15.95	5.70	0.23	1.17	1.96	2.52	3.07	0.88	0.21	0.04	9.84	98.85	1.20	62.92	70.50
	STZP Y013	59.79	17.03	3.95	0.16	0.95	1.79	1.88	2.55	0.86	0.17	0.04	10.55	99.72	0.93	/	/
	STZP Y014	57.36	17.03	5.31	0.20	1.72	1.66	1.98	2.36	0.90	0.16	0.03	9.86	98.57	1.03	66.01	71.99
	STZP Y015	61.84	16.1	3.20	0.26	0.76	1.64	1.49	2.48	0.88	0.09	0.01	10.28	99.03	0.88	/	/
	STZP Y017	59.50	17.61	3.95	0.19	1.17	1.62	1.92	2.52	0.93	0.12	0.02	9.18	98.73	0.90	/	/
	STZP Y018	60.53	16.97	3.47	0.17	1.59	1.65	1.59	2.84	0.93	0.09	0.02	8.97	98.82	0.98	/	/
	STZP Y020	58.33	16.55	4.19	0.13	2.41	2.89	0.87	2.49	0.65	0.18	0.02	10.24	98.95	1.20	64.81	67.29
	STZP Y021	57.51	15.84	5.28	0.25	3.06	2.41	2.46	2.58	0.68	0.33	0.03	9.40	99.83	1.36	58.69	65.11
	STZP Y024	67.82	12.18	4.19	0.46	1.25	2.48	2.02	2.36	0.68	0.18	0.05	6.31	99.98	1.46	60.63	68.03
	STZP Y026	69.08	12.00	2.88	0.32	1.72	1.94	1.96	2.24	0.60	0.13	0.02	6.16	99.05	1.35	58.19	64.86
	STZP Y027	56.46	19.19	2.16	0.03	0.61	4.34	0.64	3.76	0.18	0.04	0.01	11.47	98.89	1.06	70.86	72.72
	STZP Y028	62.15	13.88	3.97	0.01	1.69	2.92	1.89	2.4	0.54	0.16	0.02	9.44	99.07	1.39	61.52	67.65
	STZP Y030	53.41	16.58	4.56	0.01	2.15	4.11	1.21	1.82	0.62	0.11	0.02	14.22	98.82	1.29	69.44	73.47
	STZP Y032	57.64	16.86	3.60	0.18	1.83	3.82	2.17	2.15	0.60	0.13	0.02	10.39	99.39	1.28	65.45	72.01
	STZP Y033	59.44	13.98	3.12	0.22	4.55	2.56	2.06	2.21	0.61	0.16	0.05	10.31	99.27	1.35	59.54	65.79

注:* Fe_2O_3 仅代表三价铁含量。

与 PAAS 和上地壳均相近,也支持源岩为长英质岩。

4　讨论

4.1　源区风化特征

成分变异指数(*ICV*)、化学蚀变指数(*CIA*)和化学风化指数(*CIW*)是对源区风化程度进行评价的常用方法(Nesbitt and Young,1982;Harnois,1988;孙娇鹏等,2016)。*CIA* 表示为:

$$CIA=\frac{n(Al_2O_3)\times 100}{n(Al_2O_3)+n(CaO^*)+n(Na_2O)+n(K_2O)}$$

其中 CaO^* 仅限于来自硅酸盐矿物(不包括方解石、白云石和磷灰石),$n(CaO^*)$ 的估算详见孙娇鹏等(2016)。经过计算,石钱滩泥岩的 *ICV* 值(*ICV* 值的计算方法详见孙娇鹏等,2016)多数大于 1,少数小于 1(表 2),多数泥岩成分成熟度低(*ICV*>1),表明可能为构造活动时期的首次沉积,进而选取 *ICV*>1 的泥岩样品进行 *CIA* 计算。计算结果(表 2)显示,石炭系泥岩 *CIA* 值范围为 58.19~72.18,平均值为 64.70(n=20),稍低于 PAAS(70.36)。通过与前人(Nesbitt and Young,1984;Fedo et al.,1995;孙娇鹏等,2016)总结的 *CIA* 判别标准对比,样品源岩经历了弱—中等程度的风化。在纵向上显示出向石钱滩组晚期,*ICV* 值有增高趋势,泥岩成分成熟度逐渐降低,而 *CIA* 显示源区风化能力有减弱的趋势(图 3)。*CIW* 数据作为参考数据辅助 *CIA* 和 *ICA* 进行评价。

A—CN—K 三元图被广泛用来评价火成岩风化史(Nesbitt and Young,1984)和钾交代作用(Fedo et al.,1995)。通常情况下,沉积期后发生钾交代作用,风化趋势线会偏离风化预测线,向 K_2O 顶点移动(图 7a 虚线 c 代表钾质交代后风化趋势)。样品泥岩风化趋势与预测的风化趋势稍有偏离但整体特征较为相似(图 7a 实线 a 带箭头为预测风化线,虚线 a′带箭头为实际风化线),表明泥岩受到了一定程度的钾质交代作用。泥岩的交代前 *CIA* 值可以通

表 3 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩微量元素分析结果($\times10^{-6}$)

Table 3 Analysis results ($\times10^{-6}$) of trace elements of the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, Eastern Junggar Basin

层位	取样编号	Zn	Cr	Ni	Co	Li	Rb	Mo	Sr	Ba	V	Sc	Nb	Zr	Be	U	Th
巴塔玛依内山组	STZP Y001	87.6	21.3	9.39	9.68	23.8	29.4	0.46	46.5	80.4	81.2	16.1	6.87	256	2.84	2	4.54
	STZP Y002	76.7	22.7	6.85	9.95	13.9	32.8	0.4	45.3	91.2	76.6	15	6.79	250	2.01	1.1	4.94
	STZP Y003	92.3	18.9	6.53	8.99	21.5	21.3	0.36	46.7	95.9	83.2	14.7	6.49	260	1.47	1.6	4.58
	STZP Y004	68.6	20	5.34	4.71	11.3	10.1	0.51	58.4	31.7	64.7	13.4	10.7	360	1.26	2.81	6.33
	STZP Y005	79.8	17.2	6.6	5.13	8.26	17.5	0.72	66.2	58.7	85	15.5	9.86	356	3.36	4.04	7.4
	均值	81	20	6.94	7.69	15.8	22.2	0.49	52.6	71.58	78.1	14.9	8.14	296	2.19	2.31	5.56
石钱滩组	STZP Y007	54.9	39.4	14.7	5.52	19.7	45.3	2.45	292	246	89.8	14.1	9.73	356	2.45	2.95	8.42
	STZP Y007	56.6	10.4	9.31	7.91	13.9	15.1	1.15	172	138	62.8	11.8	12.8	427	1.64	5.71	24.7
	STZP Y008	55.7	17.3	10.2	8.24	13.8	25	0.67	182	82.8	70.5	11.5	12.7	398	2	5.26	20.6
	STZP Y009	60.5	24.5	14.9	9.99	17	45.7	0.5	231	162	86.7	12.5	9.06	265	2.12	2.99	13.2
	STZP Y010	118	38.9	26.2	26	25.4	56.8	0.55	208	210	113	17.8	7.73	200	1.63	1.49	6.18
	STZP Y011	90.2	36.9	23.7	12.6	21.6	47.1	0.64	232	196	106	14.8	8.5	252	2.22	1.86	6.93
	STZP Y012	142	44.6	31.8	20.1	31.9	71.5	0.73	223	259	116	16.2	8.49	231	2.34	2.76	6.03
	STZP Y013	111	42.8	26	16.6	18.8	58.6	0.88	178	229	103	15.6	9	259	2.27	2.28	6.34
	STZP Y014	119	40.2	31.5	14.2	20	64	0.72	246	216	112	16.7	8.72	251	2.03	2.65	6.33
	STZP Y015	61	41.4	13.5	7.5	13.4	49.1	1.35	210	205	106	16.2	8.98	270	1.48	2.31	6.59
	STZP Y017	81.3	41.6	16.4	9.1	12.8	58.7	1.11	288	231	113	16.9	8.89	267	1.99	2.24	6.55
	STZP Y018	71.6	44.1	15.8	9.89	12.9	48.6	0.85	248	227	110	15.9	8.3	262	1.39	2.38	6.01
	STZP Y020	114	34	25.4	19	18.2	31.4	0.32	256	152	76.5	11.5	12.6	286	1.63	3.41	10.6
	STZP Y021	79.4	41.6	23.8	14.1	18.4	78.2	0.5	308	296	104	13.8	7.34	188	2.5	1.31	6.46
	STZP Y024	131	39.9	50	9.77	47.8	58.9	0.67	177	253	86.5	11.6	6.91	165	1.98	2.32	6.31
	STZP Y026	76.4	39.5	23.2	7.82	26	64	0.35	230	237	79.8	11.1	6.26	160	1.81	1.52	4.74
	STZP Y027	59.6	8.46	11.2	9.47	48.1	15.9	0.14	94.2	54.4	38.7	4.13	10.8	277	2.01	2.63	17.4
	STZP Y028	71.8	31.7	23.6	9.45	63.2	58.1	0.58	234	205	76	9.35	7.91	179	1.44	3.78	8.17
	STZP Y030	65.4	20.4	14.9	6.59	107	39.8	1.54	258	137	70	12.4	9.75	473	2.02	4.12	9.19
	STZP Y032	77.4	29	23.8	5.28	94.6	61.3	0.5	309	252	76.4	11.1	10.4	284	2	4.74	13.2
	STZP Y033	71.5	35.9	22.6	10.9	60	60.9	0.64	372	254	81.6	10.4	8.44	216	2.2	3.63	8.74
	均值	84.2	33.5	21.6	11.4	33.6	50.2	0.8	235	202	89.4	13.1	9.21	269	1.96	2.97	9.65
PASS		85	110	55	23	/	160	/	200	650	150	16	19	210	/	3.1	14.6
UCC		67	92	47	17.3	20	82	0.5	320	628	97	14	12	193	1.11	2.7	10.5

注：PAAS 数据据 Taylor and McLennan, 1985；UCC 数据据 Rudnick and Gao, 2003。

过从 K_2O 顶点沿 A—CN 方向向单个 *CIA* 数据点画一条线来估计，这条线与“预测的风化路径”的交点代表了发生交代作用前的 *CIA* 值(Bhat and Ghosh, 2001)。泥岩样品投点显示钾交代前 *CIA* 值范围为 58~72(平均值为 65)，表明源区为低至中等风化作用(图 7a)，这与计算结果相符。风化趋势向蒙脱石方向不断靠近 A—CN 线，这可能是由于气候条件更为湿热、环境条件呈碱性导致黏土矿物中的 K^+不断流失所致(张青青等，2018)。样品的黏土矿物几乎均由蒙脱石构成进一步表明，除原始风化作用外，早期形成的伊利石在成岩期不断向蒙脱石转化，这一作用加剧了该趋势线向 A—CN 线靠近(风化趋势由 a 向 a′方向不断迁移)。

4.2 古气候特征

黏土矿物含量在一定程度上反映古气候变化。蒙脱石是区域火山喷发物质(云母类矿物脱钾)或由辉石、角闪石在碱性环境下蚀变而成的产物(吴劲宣等，2021)，自生蒙脱石易形成于干湿交替的环境中(陈涛等，2003)，介质条件富盐基，同时需要稍冷的气候(Keller, 1970)。样品泥岩黏土中蒙脱石富集反映沉积时期和沉积期后水介质可能为碱性，同时气候温凉(相对于伊利石形成条件更为湿热)。双井子地区石炭系泥岩中黏土几乎全为蒙脱石，可能是由于沉积期气候干冷气候与温暖—湿热频繁气候交替影响及成岩作用的改造所致。

同时，*CIA* 对古气候具一定的指示作用(Nesbitt and Young, 1984; Young and Nesbitt, 1999)，一般认为热湿气候下沉积物 *CIA* 介于 85~100，温湿气候下 *CIA* 介于 65~85，而干燥气候下 *CIA* 介于 50~65。巴山组 *CIA*>65，气候温暖—湿润；石钱滩下段砾岩

表 4 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩稀土元素分析结果(×10⁻⁶)

Table 4 REE characteristic of the upper carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, Eastern Junggar Basin(×10⁻⁶)

取样编号	STZP Y01	STZP Y02	STZP Y03	STZP Y04	STZP Y05	STZP Y06	STZP Y07	STZP Y08	STZP Y09	STZP Y10	STZP Y11	STZP Y12	STZP Y13
层位	巴塔玛依内山组					石钱滩组							
La	27	21.2	30.5	42.2	91.4	23.5	53.7	36.5	24.4	24	35.4	30.8	23.3
Ce	53.5	44.1	60	90.6	178	56	103	79.3	49.5	49	75.8	75.5	54.6
Pr	8.11	6.14	7.91	11.5	22	7.61	11.6	9.91	6.36	6.57	9.18	9.72	7.53
Nd	36.2	27.1	34	47.7	93.6	33.6	44.6	42	26.2	28.4	38.2	42.9	33.2
Sm	8.26	6.48	6.84	9.55	16.4	7.86	8.15	8.66	5.53	6.15	7.62	8.95	7.16
Eu	1.78	1.47	1.42	1.62	2.66	1.32	1.55	1.74	1.2	1.35	1.65	2	1.57
Gd	8.06	6.48	6.18	8.06	12.8	7.54	7.24	7.47	4.98	5.85	6.72	8.52	6.69
Tb	1.54	1.21	1.13	1.47	1.86	1.4	1.27	1.24	0.87	1.04	1.13	1.49	1.16
Dy	9.12	7.06	6.67	8.81	9.6	7.92	7.33	6.66	4.81	5.81	6.04	8.11	6.43
Ho	1.86	1.47	1.38	1.82	1.91	1.6	1.5	1.31	0.96	1.18	1.19	1.6	1.26
Er	5.5	4.31	4.2	5.65	5.75	4.69	4.61	3.82	2.84	3.52	3.45	4.65	3.71
Tm	0.88	0.71	0.7	0.96	0.93	0.76	0.75	0.61	0.47	0.56	0.54	0.72	0.58
Yb	5.47	4.53	4.39	6.24	6	4.83	4.8	3.88	3.01	3.51	3.39	4.32	3.66
Lu	0.9	0.74	0.72	1.02	1.01	0.75	0.78	0.61	0.49	0.58	0.55	0.72	0.6
Y	57.4	41.1	38.1	45.7	55.2	43.8	43.3	36.6	26.3	34.2	32.4	46.5	33.8
∑REE	168	133	166	237	444	159	251	204	132	138	191	200	151
LREE/HREE	4.05	4.02	5.54	5.97	10.1	4.40	7.87	6.96	6.14	5.24	7.29	5.64	5.29
La/Sc	1.68	1.41	2.07	3.15	5.90	1.67	4.55	3.17	1.95	1.35	2.39	1.90	1.49
La/Yb	4.94	4.68	6.95	6.76	15.2	4.87	11.2	9.41	8.11	6.84	10.4	7.13	6.37
$(La/Yb)_N$	3.34	3.16	4.69	4.57	10.3	3.29	7.56	6.36	5.48	4.62	7.06	4.82	4.3
δEu	0.67	0.69	0.67	0.56	0.56	0.52	0.62	0.66	0.7	0.69	0.7	0.7	0.69
$(La/Sm)_N$	2.06	2.06	2.81	2.78	3.51	1.88	4.15	2.65	2.78	2.46	2.92	2.17	2.05
$(Gd/Yb)_N$	1.19	1.16	1.14	1.05	1.73	1.27	1.22	1.56	1.34	1.35	1.61	1.6	1.48

取样编号	STZP Y14	STZP Y15	STZP Y17	STZP Y18	STZP Y20	STZP Y21	STZP Y24	STZP Y26	STZP Y27	STZP Y28	STZP Y30	STZP Y32	STZP Y33
层位	石钱滩组												
La	26.9	25.2	24.7	21.6	26.7	25.7	24.6	19.3	67	18.6	17.8	33.6	24.6
Ce	54.7	55.1	52.5	47.6	59.4	55.1	52.6	40	127	35.2	38.1	67.5	48.2
Pr	7.04	7.42	6.6	6.2	7.45	7.07	6.65	5.11	14.1	4.3	4.75	8.79	6.47
Nd	30.4	32.8	27.4	26.5	31.8	30.7	27.9	21.8	54.4	17.3	20.4	35.9	26.8
Sm	6.72	6.99	5.8	5.51	6.81	6.4	5.73	4.66	9.26	3.59	5.41	7.12	5.55
Eu	1.52	1.41	1.33	1.35	1.06	1.48	1.29	1.08	0.58	0.82	1.19	1.24	1.17
Gd	6.21	6.1	5.2	5.07	6.13	5.96	5.15	4.26	7.69	3.2	5.91	6.19	4.88
Tb	1.11	1.09	0.92	0.9	1.17	1.01	0.86	0.78	1.19	0.57	1.2	1.05	0.85
Dy	6.19	5.96	5.2	4.91	6.73	5.4	4.53	3.97	6.21	3.2	6.97	5.46	4.6
Ho	1.26	1.18	1.04	0.99	1.42	1.07	0.88	0.76	1.21	0.63	1.4	1.07	0.89
Er	3.76	3.55	3.07	2.99	4.37	3.11	2.54	2.22	3.64	1.91	4.09	3.12	2.63
Tm	0.6	0.57	0.5	0.48	0.74	0.49	0.39	0.34	0.62	0.31	0.62	0.49	0.41
Yb	3.84	3.68	3.28	3.07	4.75	3.13	2.47	2.14	4.24	2.03	3.75	3.05	2.63
Lu	0.63	0.6	0.53	0.52	0.75	0.5	0.4	0.36	0.7	0.34	0.62	0.5	0.44
Y	34.4	30.4	26.9	26.2	37.9	29.8	24.4	21.5	30.6	18.1	44.6	31.7	25.6
∑REE	151	152	138	128	159	147	136	107	298	92	112	175	130
LREE/HREE	5.39	5.67	5.99	5.75	5.11	6.12	6.9	6.2	10.7	6.55	3.57	7.37	6.51
La/Sc	1.61	1.56	1.46	1.36	2.32	1.86	2.12	1.74	16.2	1.99	1.44	3.03	2.37
La/Yb	7.01	6.85	7.53	7.04	5.62	8.21	9.96	9.02	15.8	9.16	4.75	11	9.35
$(La/Yb)_N$	4.73	4.63	5.09	4.75	3.8	5.55	6.73	6.09	10.7	6.19	3.21	7.44	6.32
δEu	0.72	0.66	0.74	0.78	0.5	0.73	0.73	0.74	0.21	0.74	0.64	0.57	0.69
$(La/Sm)_N$	2.52	2.27	2.68	2.47	2.47	2.53	2.70	2.61	4.55	3.26	2.07	2.97	2.79
$(Gd/Yb)_N$	1.31	1.34	1.28	1.34	1.05	1.54	1.69	1.61	1.47	1.28	1.28	1.64	1.50

注:$(La/Yb)_N$ 为球粒陨石标准化之后的比值;$\delta Eu = Eu_N/(Sm \times Gd)_N$,$\delta Ce = Ce_N/(La \times Pr)_N$,球粒陨石数据及计算公式据 Taylor and McLennan,1985。

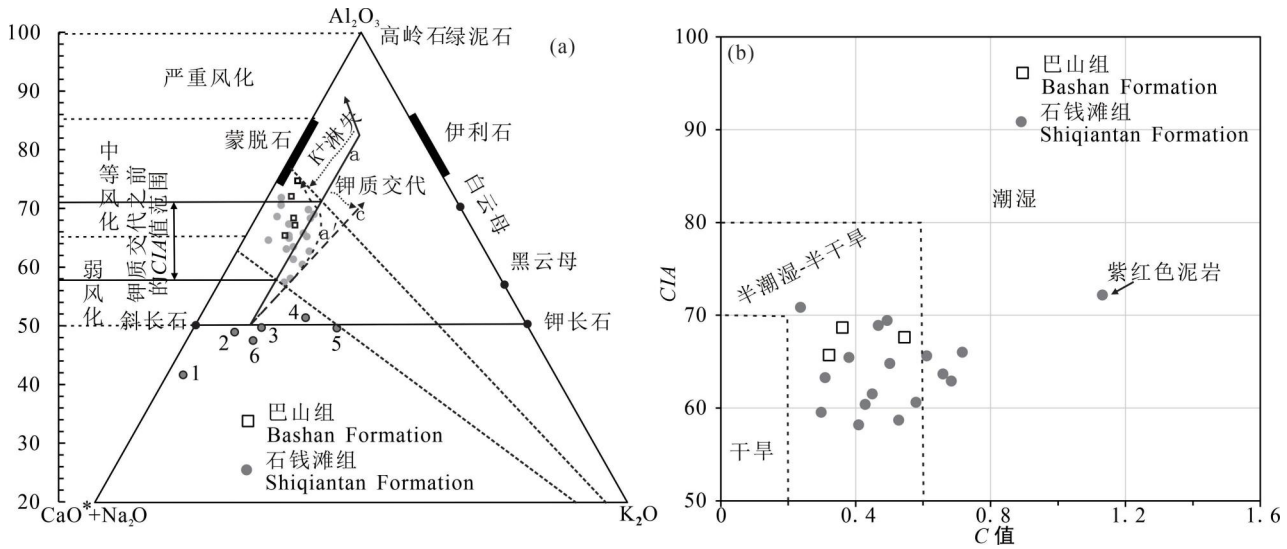

图 7 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩 A—CN—K 图(a)和 *CIA*—C 值交汇图(b)

Fig. 7 A—CN—K ternary diagram(a) and *CIA* vs. C value diagram(b) for the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, Eastern Junggar Basin

1—辉长岩;2—石英闪长岩;3—花岗闪长岩;4—花岗岩;5—A 型花岗岩;6—上地壳

1—gabbro;2—tonalite;3—granodiorite;4—granite;5—A-type granite;6—UCC

段 *CIA*<65 为主,气候寒冷—干旱,下段上部气候干湿交替,中段泥岩 *CIA*>65 为主,气候温暖—湿润,而上段气候干湿交替出现(图 3)。这跟前人通过古生物研究认为石钱滩组沉积时期气候由相对潮湿转变为干旱,呈现暖温带半干旱气候特征、晚期可能有明显的干湿交替(冯庆来等,1988)的结果类似。*CIA* 与 *C* 值的交汇图显示,石炭系古气候以半干旱—半湿润气候为主,少数时期气候较为湿润(图

表 5 巴山—石钱滩组泥岩(含矫正后值)与不同背景下杂砂岩的化学组成对比

Table 5 Comparison of the chemical composition of mudstone (including corrected values) in Bashan—Shiqiantan Formation with greywacke in different backgrounds

元素特征	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	PAAS	上地壳	巴塔玛依内山组	石钱滩组
Th($\times10^{-6}$)	2.27±0.7	11.11±1.1	18.8±3	16.7±3.5	14.6	10.7	5.56	9.65
Zr($\times10^{-6}$)	96±20	229±0.7	179±33	298±80	210	190	296.4	269.81
Sc($\times10^{-6}$)	19.5±5.2	14.8±1.7	8±1.1	6±1.4	16	11	14.94	13.11
V($\times10^{-6}$)	131±40	89±13.7	48±5.9	31±9.9	150	60	78.14	89.44
Co($\times10^{-6}$)	18±6.3	12±2.7	10±1.7	5±2.4	23	10	7.69	11.43
Rb/Sr	0.05±0.05	0.65±0.33	0.89±0.24	1.19±0.4	0.8	0.32	0.42	0.21
La/Sc	0.55±0.22	1.82±0.3	4.55±0.8	6.25±1.35	2.38	2.73	2.84	3.14
Th/Sc	0.15±0.08	0.85±0.13	2.59±0.5	3.06±0.8	0.91	0.97	0.37	0.73
Sc/Cr	0.57	0.32	0.3	0.16	0.15	0.31	0.74	0.39
Ti/Zr	56.8	19.7	15.3	6.74	28.6	15.8	13.87	16.03
La	8±1.7	27±4.5	37	39	38	30	35.38*	24.12*
Ce	19±3.7	59±8.2	78	85	80	64	71.03*	50.62*
∑REE	58±10	146±20	186	210	183	146	191.39*	132.94*
LREE/HREE	3.8±0.9	7.7±1.7	9.1	8.5	9.45	9.47	4.95*	5.18*
La/Yb	4.5±1.3	11±3.6	12.5	15.9	13.57	13.63	6.42*	6.97*
La_N/Yb_N	2.8±0.9	7.5±2.5	8.5	10.8	9.2	9.2	4.34*	4.71*
σEu	1.04±0.11	0.79±0.13	0.6	0.56	0.66	0.65	0.53*	0.55*

注:特征值数据据 Bhatia, 1985; Bhatia et al., 1986;并参考王旭影(2021)总结成果;* 为矫正值,矫正系数 1.2(据 Mclennan et al., 1989);单元格颜色代表泥岩数据值与某特征值更靠近,浅灰色代表巴塔玛依内山组,深灰色代表石钱滩组,灰黑色表明两者均相近。

7b),表明巴山组—石钱滩组多数时期气候为干湿交替特征。本次数据反映的特征与 Yang Sunrong 等(2022)通过 Pennsylvanian 珊瑚的对比研究认为莫斯科期双井子地理位置位于北纬 30°附近、该纬度内气候多样强、气候干湿交替变换明显的结果相符合。

4.3　源岩性质

中长石是中性火成岩(安山岩及闪长岩)的标志矿物,透长石是高温变种矿物(常丽华,2006),是钾长石的高温形态,也通称正长石,正长石是长英质岩的成分之一。从岩石组成来看,泥岩样品中石英含量低、黏土含量高,并含丰富的中长石、少量透长石,其中,巴山组长石以透长石为主,表明物源可能主要为长英质,石钱滩组含较多中长石及少量透长石,指示源区多数以偏中性长英质火山岩为主,少量偏基性火山岩物源。

火成岩化学风化趋势通常与 A—CN 连接线形成平行线,通过样品投点向长石连线的反向延长线与之对比,还能反映源岩性质(Fedo et al., 1995)。从图 7a 看出,泥岩样品投点反向延长线与长石线交点指示研究区源岩主要具中性火山岩特征,进一步判断其沉积物源可能以石英闪长岩或安山岩为主,有少量样品源岩可能为辉长岩与闪长岩之间过渡偏基性火山岩。

源岩属性也是影响沉积岩化学组成的重要因素(Verma et al., 2017)。石钱滩泥岩 K_2O 均值为 1.49,略小于上地壳均值(2.8%),Rb 均值为 44.8×10^{-6},也小于上地壳均值(82×10^{-6}),接近地壳均值(49×10^{-6})(Rudnick et al., 2004)。主量元素中 Al/Ti 值可以确定物源母岩性质(Girty et al., 1996),$Al_2O_3/TiO_2<14$ 表明物源来自铁镁质岩。进一步研究认为,$Al_2O_3/TiO_2<8$ 为铁镁质物源,$8<Al_2O_3/TiO_2<21$ 为中间岩性物源,而长英质物源 Al_2O_3/TiO_2 普遍大于 21 而小于 70(Hayashi et al., 1997)。除石钱滩组白色泥岩(Y27)1 件样品外,其余样品 Al_2O_3/TiO_2 值介于 17.9~26.7 之间,多数落入为长英质火成岩范围,少数落入中间岩性范围内(图 8a)。除样品 Y27 异常低值外,其余样品 TiO_2/Zr 值低(介于 13.1~41.2,均值为 28.7),反映多数物源具长英质源岩特征(Hayashi et al., 1997)(图 8b)。Th、Sc 和高场强元素可以判别沉积岩源岩属性,通常 Th/Sc=1 显示源岩为古老大陆上地壳,Th/Sc≥1 显示源岩为再循环沉积岩,Th/Sc<1 显示源岩为年轻未分异弧(Taylor and McLennan,1985)。样品 Th/Sc 值除了 5 个样大于 1 以外,其余 21 个样品 Th/Sc 值均<1,显示源岩多数为未分异的弧,少数可能受再旋回沉积影响。Th/Sc—Zr/Sc 交汇图是识别沉积分选和再循环特征的经典图解(Mclennan et al., 1993),沉积岩 Th/Sc—Zr/Sc 的正相关趋势反映沉积物主要受母岩岩浆分异的影响。样品 Th/Sc—Zr/Sc 具较好的正相关性,比值与成分变化趋势平行,Th/Sc 值有较为明显的增加而 Zr/Sc 值增加幅度稍小,除白色泥岩、紫红色泥岩夹层样品受风化程度影响成分变化明显且其中 1 件样品具明显再循环特征外,其余样品物源来源相对集中,表明风化程度低,无明显的沉积再循环影响,投点大多数指示物源偏中性火山岩—中偏酸性火山岩(图 8c)。La 和 Th 是已知较好的物源示踪指标(Mclennan et al., 1980),随着岩浆的持续演化,La、Th 等微量元素越来越富集,而 Sc、Cr、Co 等元素逐渐亏损,所以,酸性岩的 La/Sc 值会逐渐增加,而 Co/Th 值会减小。Co/Th—La/Sc 相关性分析图也是用来分析物源属性的重要手段(Mclennan et al.,1984),已知基性岩具有较高的 Co/Th 值和较低 La/Sc 值而酸性岩具有高 La/Sc 值和较低的 Co/Th 值。Gu 等(2002)将前人(Condie et al., 1993)的火山岩数据投入 Co/Th—La/Sc 相关性图中形成了物源性质判别图解,样品在此图解(图 8d)中投点主要落入长英质—安山岩范围之间,少数具偏酸性岩特征,指示物主要以长英质—中性火山岩为主,少量长英质偏酸性火山岩源岩。

4.4　源区构造背景

表生条件下,碎屑沉积岩的地球化学特征受构造环境和物源影响较为明显。虽然砂岩、泥岩在地球化学特征上稍有差别,但在多数判别图解中投点位置近似相同(Tao Huifei et al., 2014)。然而,碎屑沉积岩的地球化学特征只能反映物源区的构造背景,却不能反映沉积盆地的构造背景(张建军等,2017)。源区构造环境的改变,主量元素中某些元素含量均会发生较大改变(Bhatia,1983),比如 TiO_2 含量与 Al_2O_3/SiO_2 值、K_2O/Na_2O 值与 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 值会随构造环境改变而变化。所以,一些主量元素交汇图解常用来反映沉积物源区构造背景特征,在 K_2O/Na_2O 值分别与 SiO_2 和与 SiO_2/Al_2O_3 值的交汇图解(Roser and Korsch,1986)中,样品投点大多数落入岛弧环境中,少量落入活动大陆边缘(图 9a、b),反映其源区构造背景以岛弧相关为主。在 $(Fe_2O_3^T+MgO)$—TiO_2 构造背景判别图解及 $(Fe_2O_3^T+MgO)$—Al_2O_3/SiO_2 图解中(图 9c、d),样

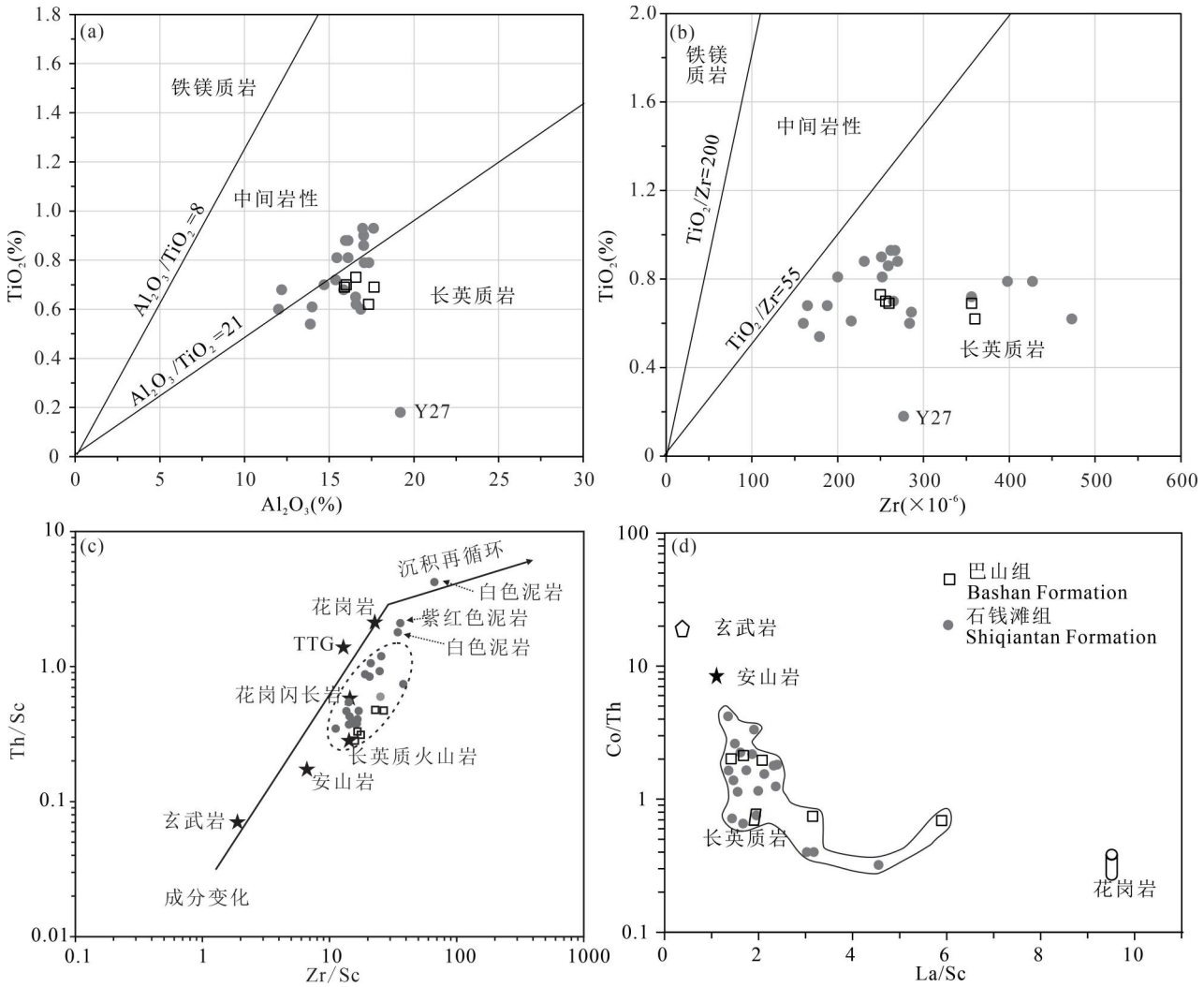

图 8 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩双变量判别图

Fig. 8 Bivariate plots for the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin: (a) Cross-plot of TiO_2 vs. Al_2O_3; (b) TiO_2 vs. Zr; (c) Th/Sc vs. Zr/Sc ratios; (d) La/Sc vs. Co/Th ratios

品投点较为集中,大多数点落入大陆岛弧范围内,少数落入大洋岛弧范围内。

微量元素中较为不活泼的元素 La、Th、Co、Zr 等也携带了较多物源区构造背景信息,常用于物源区属性及大地构造背景研究(Roser and Korsch, 1986)。在微量元素 La—Th—Sc 判别图解及 Th—Co—Zr/10 判别图解中(图 10a、b),投点均相对集中,多数落在大陆岛弧范围,少数在被动大陆边缘内。在主微量—稀土元素交汇图(Ti/Zr—La/Sc 图解)中,多数投点也落入大陆岛弧或者靠近大陆岛弧环境内,少数测试结果落入活动大陆边缘环境中(图 10c);而 La/Y—Sc/Cr 判别图解投点稍显分散,但也可以看出,多数投点落在了大陆岛弧环境中,而少数落入大洋岛弧内(图 10d)。同时,从具构造环境判别意义的各种元素特征及其比值也可以看出(表 5),泥岩样品的地球化学指标与 PAAS 及 UCC 差异明显,巴山组泥岩地球化学值较为分散,与大洋岛弧、大陆岛弧及活动大陆边缘均有部分值相近;而石钱滩组地化特征相对单一稳定,多数值与大陆岛弧背景下沉积岩地化特征接近。综合分析表明,石炭系巴山组—石钱滩组沉积物源区为与弧相关的构造背景,并更偏向大陆岛弧性质。

克拉美丽洋盆的闭合时间、准噶尔东北缘的构造演化及构造性质转换时间一直存在争议(田健等,2015;Huang Bo et al., 2018;Guo Jianming et al., 2020)。早期的研究认为其洋壳形成时间可能为早泥盆世(李锦轶等,1990),也有学者根据蛇绿岩中硅质放射虫研究认为克拉美丽洋壳可能形成于

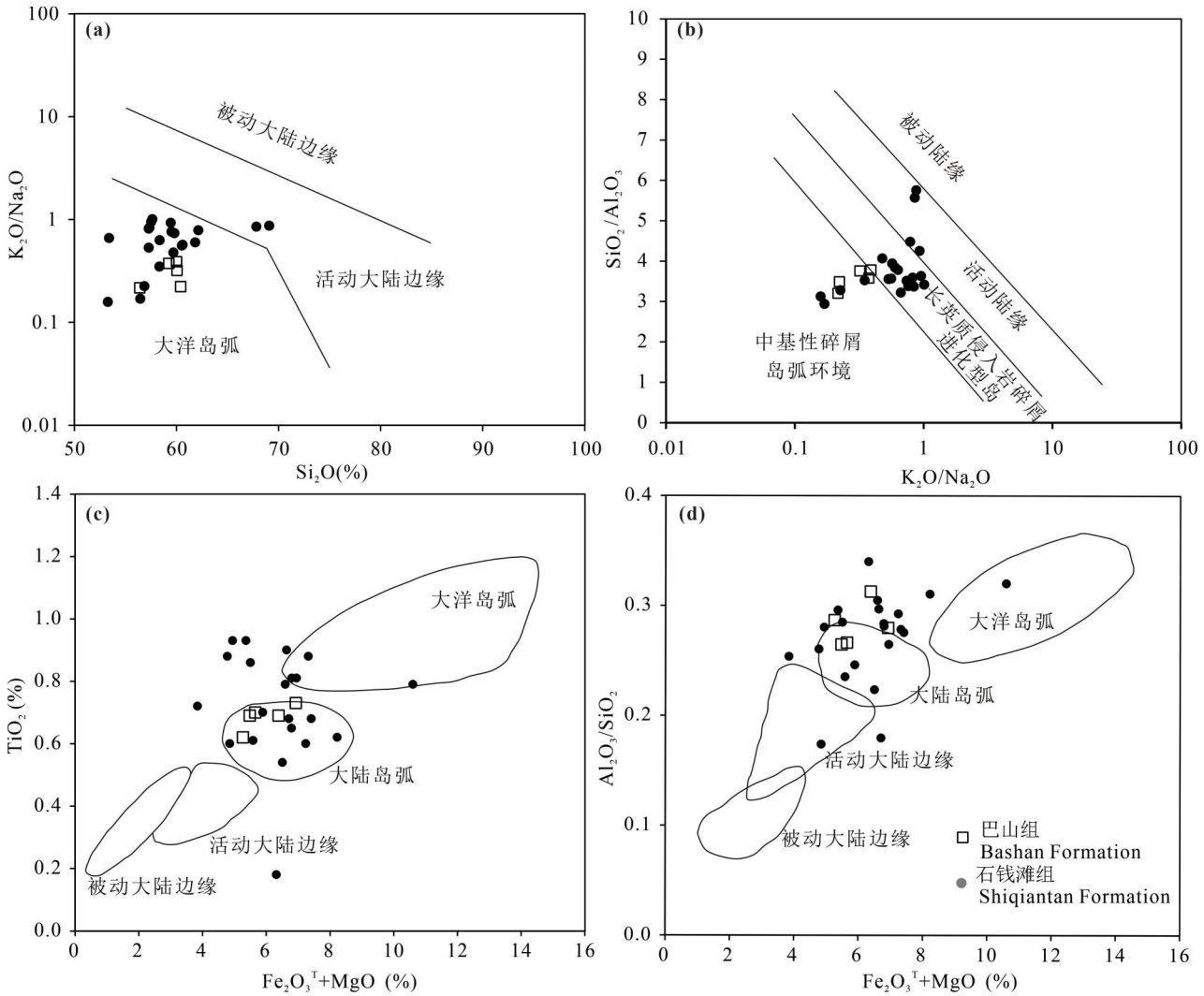

图 9 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩主量元素的构造背景判别图

Fig. 9 Tectonic setting discrimination diagrams based on major elements for the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin: (a) K_2O/Na_2O vs. SiO_2; (b) SiO_2/Al_2O_3 vs. K_2O/Na_2O; (c) TiO_2 vs. (TFe_2O_3+ MgO); (d) Al_2O_3/SiO_2 vs. (TFe_2O_3+ MgO)

早石炭世(舒良树和王净玉,2003)。而针对闭合时限,地质调查和综合研究认为克拉美丽洋盆在早石炭世初期已经形成(李锦轶等,1990),而后有学者通过对克拉美丽缝合带南部的早石炭世磨拉石沉积建造特征及分布范围研究,进一步推断碰撞作用发生在早石炭世(Zhang Yuanyuan et al., 2013;白建科等,2018),佐证了前人的观点。之后经过对克拉美丽缝合带不断深入研究认为该区洋盆关闭是洋壳不断向北部野马泉弧俯冲的结果,并在晚石炭世晚期最终完全闭合(Charvet et al., 2001;李锦轶等,2004,2009)。还有学者经过五彩湾、苏吉、双井子等地巴塔玛依内山组火山岩特征的不断研究(吴小奇等,2009;杨凯凯等,2018)证实,至少在巴山组(早石炭世)以前,五彩晚—红柳沟—苏吉一带的克拉美丽洋盆已经逐渐闭合。近北西—南东向展布的克拉美丽洋分布较远,不同区域洋盆关闭时间有所差异,其构造演化具区域性差别,但其主体在早石炭世或之前已经开始作用(王京彬和徐新,2006),最晚在二叠纪闭合(龙小平等,2006),且将军庙一带洋盆关闭时限可能与盆地内陆梁隆起地区时限相近,早于西准噶尔及东部三塘湖地区(吴小奇等,2009;李涤等,2012)。洋盆闭合之后,准噶尔盆地内陆梁隆起地区在早石炭世进入了碰撞后伸展阶段(李涤等,2012),卡拉麦里黄羊山地区后碰撞作用从早石炭世末期一直持续到石炭纪末(杨高学等,2009,Wang Jian et al., 2022)。而另一些人的观点则倾向

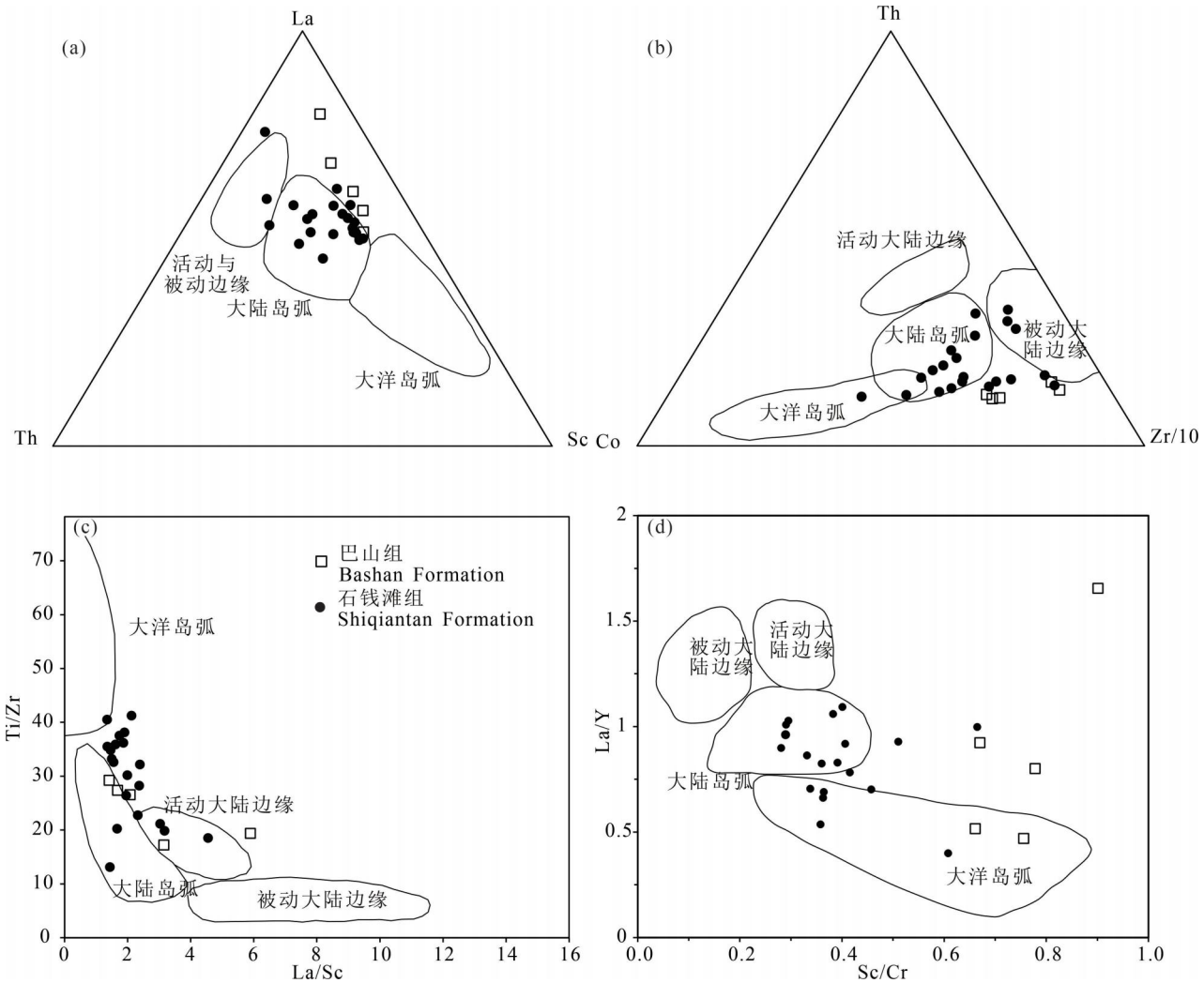

图 10 准噶尔盆地东部双井子地区上石炭统泥岩微量元素构造背景判别图(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 10 Tectonic setting discrimination diagrams based on trace elements for the Upper Carboniferous mudstones in Shuangjingzi area, eastern Junggar Basin: (a) La—Th—Sc ternary plot; (b) Th—Co—Zr/10 ternary plot; (c) Ti/Zr vs. La/Sc and (d) La/Y vs. Sc/Cr diagrams (Diagrams are from Bhatia and Crook, 1986)

于大陆碰撞后双井子地区进入陆间演化阶段,由于克拉美丽洋盆在东段的巴里坤以北、三塘湖及北部富蕴等地还有残余(Tao Huifei et al., 2014; Huang Bo et al., 2018),海水依然淹没了双井子大部分地区,晚石炭世该地区可能整体进入陆内断陷或陆间残余海发育背景(李锦轶等, 1990; Yang Xiaofa et al., 2012; Li Di et al., 2020; 王国灿等, 2019; 顾连兴等, 2000; Xia Linqi et al., 2004, 2013; Xu Qinqin et al., 2013)。

双井子地区石炭系沉积地层中通过 LA-(MC-)ICP-MS 获得的碎屑锆石(剖面地点位于本剖面东北 3 km,其石钱滩组地层可能有缺失或断失,采样层位相当于本文石钱滩组中段下部,见图 2)U-Pb 最年轻锆石年龄为 322±4.5 Ma(Li Di et al., 2020),代表石钱滩组的沉积年龄为 320 Ma 左右,结合杨凯凯等(2018)在双井子南部测得下伏巴山组火山地层最年轻年龄 318.7±4.2 Ma 及张峰等(2014)所获得的 Sm-Nd 等时线年龄 319.7±5.9 Ma 分析,巴山组晚期泥岩—石钱滩组沉积年龄应为~318 Ma,该区巴山组最年轻年龄与吉木萨尔凹陷东泉 1 井巴山组最年轻锆石 LA-ICP-MS 年龄 316.1 Ma 及古城凹陷古城 1 井巴山组最年轻锆石 LA-ICP-MS 年龄 317.7 Ma 接近(李涤,2016),代表准噶尔地块准东凸起上的火山作用在 316.1~318.7 Ma 期间已经较弱,在次级凹陷内接受了碎屑沉积作用。经过构造及沉积盆地分析,有学者提出,双井子周边地区晚石炭世

中—晚期发育巴山组断陷(张磊等,2020),也有学者认为其特征更类似于山前前陆盆地(易泽军等,2018),但多数人认为晚石炭世克拉美丽山前双井子沉积区具前陆盆地特征(吴晓智等,1996;吴孔友等,2005;陈书平等,2001,王国灿等,2019),其碎屑—碳酸盐岩沉积形成也进一步反映准噶尔地块东北缘板块活动及伴生火山作用相对平静。火山作用减弱、五彩湾地区巴山组双峰式火山(LA-ICP-MS 锆石年龄 320.2±4.2 Ma)的出现(罗婷等,2016)和稳定碎屑沉积特别是石钱滩组碳酸盐岩地层形成都暗示克拉美丽碰撞造山作用已经接近尾声。

石钱滩组碎屑锆石年龄主峰集中区为 335 Ma,代表该组的沉积物源区的主要火山事件发生在维宪阶—谢尔普霍夫阶。经过年龄对比、εHf(t)值特征(Li Di et al., 2020)、构造演化模式下的可能物源区判别(李锦轶等,1990;王国灿等,2019),并结合双井子地区“北陆南海”的古地理特征(吴小齐等,2009;唐勇等,2015;杨延绘,2016)总结分析认为,巴山组—石钱滩组的主要物源来自北部野马泉弧。同时,双井子地区巴塔玛依内山组较多的岩浆锆石年龄集中在 335 Ma 附近证实该时期克拉美丽缝合带南北均发生了广泛的火山作用(杨高学等,2010;杨凯凯等,2018;Li Di et al., 2020;李海等,2021),晚石炭世的准东地区进入了岛弧地体增生后阶段,造山事件导致准东地区大面积的剥蚀作用发生,抬升的剥蚀区为石钱滩凹陷提供了丰富的物源(李锦轶等,1990;张磊等,2020),并进一步堆积形成石钱滩组地层,这与石钱滩组碎屑锆石年龄主要峰值为 335 Ma 匹配。巴山—石钱滩组泥岩整体均反映其源区主要为大陆岛弧构造背景属性,但也还含一些大洋岛弧构造背景特征(表 5),这可能是巴山组晚期还存在构造岩浆活动导致有更老的物源混入的结果。沉积岩地化结果反映,野马泉弧及邻近克拉美丽蛇绿岩带的南部地区早石炭世(335 Ma 左右)的主要构造背景为大陆岛弧背景,这也从沉积盆地汇集区沉积物地化特征进一步补充证实,335 Ma 左右开始,野马泉地体与准噶尔地体东北缘已经开始从俯冲背景转变为碰撞造山(Li Di et al., 2020;Wang Jian et al., 2022)。

5　结论

(1)巴塔玛依内山组顶部及上石炭统石钱滩组泥岩的 *CIA* 值范围为 58.19 ~ 72.18,平均值为 64.70,反映源区经历了低至中等强度化学风化。富集的蒙脱石黏土矿物、CIA 值的频繁变化及与 C 值的交汇结果共同反映,巴山组—石钱滩组泥岩经历了明显的干湿交替气候变化。

(2)巴山组及石钱滩组泥岩的源岩多数以偏中性长英质火山岩为主,少量偏基性火山岩及少量偏酸性物源,并且多数为未分异的弧。从矿物、微量元素差异及与不同构造背景下杂砂岩地球化学组成指标对比判断,巴山组可能有更老地层的物源混入。

(3)巴山组及石钱滩组泥岩的地球化学特征反映了沉积物源区构造背景主要为大陆岛弧背景,结合其碎屑锆石主要峰值年龄判断,335 Ma 左右克拉美丽缝合带北部的野马泉弧(主要沉积物源区)为大陆岛弧背景,其南部双井子地区(次要物源区)也可能具有相同构造背景。这表明,克拉美丽缝合带北部的野马泉地体与南部的准噶尔地体东北缘于 335 Ma 左右开始由洋陆俯冲转变为碰撞造山。

致谢:感谢中国石油吐哈油田分公司韩诚高级工程师、任志跃高级工程师等在野外工作中的指导和帮助以及对石钱滩凹陷区域地质背景的讲解和石炭系沉积演化认识方面无私的贡献;感谢四川煤田地质局科源测试中心邓予伟工程师对黏土矿物 X 衍射的指导和帮助。

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)

白建科, 陈隽璐, 唐卓, 张越. 2018. 新疆准噶尔古生代洋盆闭合时限——来自卡拉麦里地区石炭纪碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束. 地质通报, 37(1): 26~38.

常丽华, 陈曼云, 金巍, 李世超, 于介江. 2006. 透明矿物薄片鉴定手册. 北京: 地质出版社: 1~236.

陈书平, 张一伟, 汤良杰, 白国平. 2001. 准噶尔晚石炭世—二叠纪前陆盆地的构造演化. 地质学报, 25(5): 11~15

陈涛, 王欢, 张祖青, 王河锦. 2003. 粘土矿物对古气候指示作用浅析. 岩石矿物学杂志, 22(4): 416~420.

冯庆来, 王治平. 1988. 准噶尔盆地东北缘石钱滩组古气候特征. 新疆地质, 6(3): 16~21.

龚德瑜, 王绪龙, 周川闽, 郑孟林, 蒋文龙, 吴卫安. 2021. 准噶尔盆地东南部石炭系规模烃源岩的发现及天然气勘探潜力. 石油学报, 42(7): 836~852.

顾连兴, 胡受奚, 于春水, 李宏宇, 肖新建, 严正富. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. 岩石学报, 16(3): 305~316.

韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(Ⅰ)——后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5): 1077~1086.

况军. 1993. 地体拼贴与准噶尔盆地的形成演化. 新疆石油地质, 14(2): 126~132.

匡立春, 张越迁, 查明, 陈中红, 李林, 孔玉华, 张勇. 2013. 新疆

北部石炭纪构造背景及演化. 地质学报, 87(3): 311~320.
李涤, 何登发, 唐勇, 樊春, 孔玉华. 2012. 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. 岩石学报, 28(8): 2340~2354.
李涤. 2016. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化. 导师:何登发. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文..
李海, 李永军, 徐学义, 杨高学, 王祚鹏, 徐倩, 王龙江. 2021. 东准噶尔卡拉麦里地区碱性玄武岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 95(11): 3282~3300.
李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 冯益民, 朱宝清. 1988. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区古板块构造研究的新进展. 科学通报, 33(10): 762~764.
李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 赵民, 朱宝清, 冯益民. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. 地质论评, 36(4): 305~316.
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, 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.
刘锐娥, 卫孝峰, 王亚丽, 孙粉锦, 肖红平, 张春林. 2005. 泥质岩稀土元素地球化学特征在物源分析中的意义——以鄂尔多斯盆地上古生界为例. 天然气地球科学, 16(6): 788~791.
龙晓平, 孙敏, 袁超, 肖文交, 陈汉林, 赵永久, 蔡克大, 李继亮. 2006. 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. 岩石学报, 22(1): 31~40.
罗婷, 陈帅, 廖群安, 陈继平, 胡朝斌, 王富明, 田健, 吴魏伟. 2016. 东准噶尔晚石炭世双峰式火山岩年代学、地球化学及其构造意义. 地球科学, 41(11): 1845~1862.
舒良树, 王玉净. 2003. 新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石. 地质论评, 49(4): 408~412+450.
孙娇鹏,陈世悦,彭渊,马帅,邵鹏程,刘金. 2016. 欧龙布鲁克地块新元古代早期冰川事件:来自 *CIA* 指数的证据. 地质论评,62(1): 29~36.
唐勇, 王刚, 郑孟林, 陈磊, 冯莉, 孔玉华, 卫延召, 赖世新, 丁靖, 鲍海娟. 2015. 新疆北部石炭纪盆地构造演化与油气成藏. 地学前缘, 22(3): 241~253.
田健, 廖群安, 樊光明, 聂小妹, 王富明. 2015. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. 岩石学报, 31(5): 1471~1484.
王道永, 邓江红. 1995. 东准噶尔地区板块构造特征及演化. 成都理工学院学报, 22(4): 38~45.
王国灿, 张孟, 冯家龙, 廖群安, 张雄华, 康磊, 郭瑞禄, 玄泽悠, 韩凯宇. 2019. 东天山新元古代—古生代大地构造格架与演化新认识. 地质力学学报, 25(5): 798~819.
王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23~31.
王绪龙, 赵孟军, 向宝力, 达江, 蒋宜勤, 刘翠敏. 2010. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系烃源岩. 石油勘探与开发, 37(5): 523~530.
王旭影, 姜在兴. 2021. 苏北东台坳陷古新统阜宁组三段微量、稀土元素地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 67(2): 355~366.
吴劲宣, 夏国清, 陈云, 徐为鹏, 伊海生. 2022. 西藏伦坡拉盆地渐新世—中新世之交黏土矿物特征及其古气候意义. 沉积学报, 40(5): 1265~1279.
吴孔友, 查明, 王绪龙, 曲江秀, 陈新. 2005. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识. 地球学报, 26(3): 217~222.
吴润江, 张元元, 谭佳奕, 郭召杰. 2009. 新疆卡拉麦里地区晚古生代以来不同构造层特征及大地构造意义. 地学前缘, 16(3): 102~109.
吴小奇, 刘德良, 李振生. 2009. 卡拉麦里缝合带后碰撞期火山活动. 地学前缘, 16(3): 220~230.
吴晓智, 赵永德, 李策. 1996. 准噶尔东北缘前陆盆地构造演化与油气关系. 新疆地质, 14(4): 297~305.
杨高学, 李永军, 佟丽莉, 刘晓宇, 闫存兴, 杨宝凯, 吴宏恩. 2010. 新疆东准噶尔卡拉麦里钾质玄武岩的地球化学特征、成因及其构造意义. 岩石学报, 26(8): 2345~2356.
杨高学, 李永军, 吴宏恩, 司国辉, 金朝, 张永智. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区黄羊山花岗岩和包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. 岩石学报, 25(12): 3197~3207.
杨凯凯, 边伟华, 王千军, 王璞珺, 郎嘉彬, 李昭. 2018. 东准噶尔巴塔玛依内山组火成岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 34(11): 3341~3358.
杨延绘. 2016. 准东大井坳陷带石炭系沉积充填演化. 导师:何登发. 北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文.
易泽军, 何登发. 2018. 准噶尔盆地东部构造地层层序及盆地演化. 石油与天然气地质, 39(5): 932~942
袁复礼. 1956. 新疆准噶尔东部地质报告. 地质学报, 30(2): 113~132+240~245.
张峰, 徐涛, 范俊杰, 潘爱军, 王斌, 朝银银. 2014. 东准噶尔石炭系巴塔玛依内山组火山岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄及其构造意义. 地球化学, 43(3): 301~316.
张建军, 牟传龙, 周恳恳, 伍皓, 陈小炜, 夏彧. 2017. 滇西户撒盆地芒棒组第三段泥岩地球化学特征: 物源及其风化作用. 矿物岩石地球化学通报, 36(4): 574~581.
张磊, 何登发, 易泽军, 李涤. 2020. 克拉美丽山与大井坳陷的构造关系——兼论石炭纪构造—沉积格局. 石油勘探与开发, 47(1): 29~44.
张茜, 肖渊甫, 王晓飞, 余谦, 王剑, 赵安坤, 门玉澎, 周业鑫. 2020. 四川盆地西南缘龙马溪组泥岩地球化学特征及物源区和构造背景分析. 地质论评, 66(5): 1393~1411.
张青青, 黄菁华, 姚军, 胡斐南, 霍娜, 尚应妮, 常闻谦, 赵世伟. 2018. 淳化黄土—古土壤序列黏土矿物分布特征及古环境意义. 土壤学报, 55(5): 1062~1073.
郑孟林, 田爱军, 杨彤远, 何文军, 陈磊, 吴海生, 丁靖. 2018. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集. 石油与天然气地质, 39(5): 907~917.
支倩. 2018. 新疆东、西准噶尔上石炭统典型剖面对比研究. 导师:李永军. 西安:长安大学硕士学位论文.
Bai Jianke, Chen Junlu, Tang Zhuo, Zhang Yue. 2018&. The closure time of Junggar Paleozoic oceanic basin: Evidence from Carboniferous detrital zircon U-Pb geochronology in Kalamaili Area. Geological Bulletin of China, 37(1): 26~38.
Bhat M I, Ghosh S K. 2001. Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur Group pelites, western Himalayas: Implications for their provenance and weathering. Precambrian Research, 108(1~2): 1~16.
Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 45(1~2): 97~113.
Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(2): 181~193.
Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 91(6): 611~627.
Chang Lihua, Chen Manyun, Jin Wei, Li Shichao, Yu Jiejiang. 2006#.

Handbook of Transparent Mineral Flake Identification. Beijing: Geological Publishing House: 1~236.

Charvet J, Laurent-Charvet S, Shu Liangshu, Ma Ruishi. 2001. Paleozoic continental accretions in central Asia around Junggar Block: New structural and geochronological data. Gondwana Research, 4(4): 590~592.

Chen Bin, Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence. Journal of Asian Earth Sciences, 23: 691~703.

Chen Shuping, Zhang Yiwei, Tang Liangjie, Bai Guoping. 2001&. Tectonic evolution of Junggar Late Carboniferous—Permian foreland Basin. Acta Geologica Sinica, 25(5): 11~15.

Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, Wang Hejin. 2003&. Clay minerals as indicators of paleoclimate. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(4): 416~420.

Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. Chemical Geology, 104(1~4): 1~37.

Cullers R L, Barrett T, Carlson R, Robinson B. 1987. Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, U. S. A. Chemical Geology, 63(3~4): 275~297.

Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology, 23(10): 921.

Feng Qinglai, Wang Zhiping. 1988&. Palaeoclimatic characteristics of the shiqiantan formation in northeast margin of Junggar Basin, Xinjiang. Xinjiang Geology, 6(3): 16~21.

Geel C, Bordy E M. 2021. Palaeo-environmental and provenance reconstruction of the Lower Permian mudstones (lower Ecca Group) in the main Karoo Basin, South Africa. Journal of African Earth Sciences, 182: 104303.

Ghosh S, Sarkar S. 2010. Geochemistry of Permo—Triassic mudstone of the Satpura Gondwana Basin, central India: Clues for provenance. Chemical Geology, 277(1~2): 78~100.

Girty G H, Ridge D L, Knaack C, Johnoson, Al-Riyami R K. 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, sierra Nevada, California. SEPM Journal of Sedimentary Research, 66(1): 107~118.

Gong Deyu, Wang Xulong, Zhou Chuanmin, Zheng Menglin, Jiang Wenlong, Wu Weian. 2021&. Discovery of large-scale Carboniferous source rocks and natural gas exploration potential in the southeast of Junggar Basin. Acta Petrolei Sinica, 42(7): 836~852.

Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chuanshui, Li Hongyu, Xiao Xinjian, Yan Zhengfu. 2000&. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 16(3): 305~316.

Gu X X, Liu J M, Zheng M H, Tang J X, Qi L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence. Journal of Sedimentary Research, 72(3): 393~407.

Guo Jianming, Fan Hailong, Zhang Shengyin, Liu Xiang, Wu Tao, Ma Wanyun, Zhang Shuncun, Guo Hui. 2020. Petrological, He-Ne-Ar and Sr-Nd-Pb geochemical of volcanic rocks constraint on tectonic settings and geodynamic process of the Carboniferous, East Junggar. Journal of Natural Gas Geoscience, 5(2): 91~104.

Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Zhang Lei. 2006&. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part Ⅰ): Timing of post-collisionai plutonism. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1077~1086.

Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering. Sedimentary Geology, 55(3): 319~322.

Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, Ohmoto H. 1997. Geochemistry of approximately 1. 9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(19): 4115~4137.

Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. SEPM Journal of Sedimentary Research, 58: 820~829.

Huang Bo, Fu Dong, Kusky T, Ruan Kunpeng, Zhou Wenxiao, Zhang Xionghua. 2018. 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.

Keller W D. 1970. Environmental aspects of clay minerals. SEPM Journal of Sedimentary Research, 40(3): 788~813.

Kuang Jun. 1993&. Terrene connection, formation and evolution of Junggar Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 14(2): 126~132

Kuang Lichun, Zhang Yueqian, Zha Ming, Chen Zhonghong, Li Lin, Kong Yuhua, Zhang Yong. 2013&. Carboniferous tectonic setting and evolution in northern Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica, 87(3): 311~320.

Li Di, He Dengfa, Sun Min, Zhang Lei. 2020. The role of arc—arc collision in accretionary orogenesis: Insights from ~ 320 ma tectono—sedimentary transition in the karamaili area, NW China. Tectonics, 39(1): e2019TC005623.

Li Di, He dengfa, Tang yong, Fan chun, Kong yuhua. 2012&. Genesis of Early Carboniferous volcanic rocks of the Di'nan uplift in Junggar Basin: Constraints to the closure time of Kalamaili ocean. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2340~2354.

Li Di. 2016&. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China. master tutor: He Dengfa. A dissertation for Doctor's degree. Bei Jing: China University of Geosciences (Beijing).

Li Hai, Li Yongjun, Xu Xueyi, Yang Gaoxue, Wang Zuopeng, Xu Qian, Wang Longjiang. 2021&. Petrogenesis and tectonic implications of alkali basalts in Kalamaili Area, East Junggar, Xinjiang(NW China): Constraints from petrology, geochronology and geochemistry. Acta Geologica Sinica, 95(11): 3282~3300.

Li Jinyi, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Zhao Min, Feng Yimin, Zhu Baoqing. 1988#. New progress in the study of paleoplate tectonics in Karamaili Area, East Junggar, Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 33(10): 762~764.

Li Jinyi, Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Zhao Min, Zhu Baoqing, Feng Yimin. 1990&. Main characteristics of late Paleozoic plate tectonics in the southern part of East Junggar, Xinjiang. Geological Review, 36(4): 305~316.

Li Jinyi. 2004&. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolutionof eastern Xinjiang, NW China. Geological Review, 50(3): 304~322.

Li Jinyi, Yang Tiannan, Li Yaping, Zhu Zhixin. 2009&. Geological features of the Karamaili faulting belt, eastern Junggar 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.

Liu Rui'e, Wei Xiaofeng, Wang Yali, Sun Fenjin, Xiao Hongping, Zhang Chunlin. 2005&. The geochemical characteristics of rare earth elements of the shale rock in the geologic signification of the

analysis of the sedimentary provenance: An example in the upper palaeozoic in the Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 16(6): 788~791.

Long Xiaoping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Chen Hanlin, Zhao Yongjiu, Cai Keda, Li Jiliang. 2006&. Genesis of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar: Constraints on the closure of the Junggar Ocean. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 31~40.

Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Safonova I, Xiao Wenjiao, Wang Yujing. 2012. Geochemistry and U-Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in East Junggar, NW China: Insights into subduction-accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 21(2~3): 637~653.

Luo Ting, Chen Shuai, Liao Qun'an, Chen Jiping, Hu Chaobin, Wang Fuming, Tian Jian, Wu Weiwei. 2016&. Geochronology, geochemistry and geological significance of the late carboniferous bimodal volcanic rocks in the eastern Junggar. Earth Science, 41(11): 1845~1862.

McLennan S M, Nance W B, Taylor S R. 1980. Rare earth element—thorium correlations in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44(11): 1833~1839.

McLennan S M. 1989. Chapter 7. rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In: Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 21(1): 169~200.

McLennan S M, Taylor S R, McGregor V R. 1984. Geochemistry of Archean metasedimentary rocks from West Greenland. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(1): 1~13.

McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geological Society of America, Specical Papers 284: 21~40.

Nesbitt H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. Nature, 279: 206~210.

Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 299: 715~717.

Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1523~1534.

Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone—mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio. The Journal of Geology, 94(5): 635~650.

Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, 3: 1~64.

Rudnick R L, Gao Shan, Ling Wenli, Liu Yongshen, McDonough W F. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from hannuoba and Qixia, North China Craton. Lithos, 77: 609~637.

Shu Liangshu, Wang Yujing. 2003&. Late Devonian—Early Carboniferous radiolarian fossils from siliceous rocks of the kelameili ophiolite, Xinjiang. Geological Review, 49(4): 408~412+450.

Su Yuping, Zheng Jianping, Griffin W L, Zhao Junhong, Tang Huayun, Ma Qiang, Lin Xiangyang. 2012. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: Implication for a tectonic transition. Gondwana Research, 22(3~4): 1009~1029.

Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, Peng Yuan, Ma Shuai, Shao Pengcheng, Liu Jin. 2016. Early Neoproterozoic glacier event in Oulongbuluke block: Evidence from *CIA* Index. Geological Review, 62(1): 29~36.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geological Society of London Special Publications, 42(1): 313~345.

Tang Yong, Wang Gang, Zheng Menglin, Chen Lei, Feng Li, Kong Yuhua, Wei Yanzhao, Lai Shixin, Ding Jing, Bao Haijuan. 2015&. Carboniferous basin evolution and its hydrocarbon accumulation in the north of Xinjiang. Earth Science Frontiers, 22(3): 241~253.

Tao Huifei, Sun Shu, Wang Qingchen, Yang Xiaofa, Jiang Lin. 2014. Petrography and geochemistry of lower carboniferous greywacke and mudstones in Northeast Junggar, China: Implications for provenance, source weathering, and tectonic setting. Journal of Asian Earth Sciences, 87: 11~25.

Taylor S R, McLennan S M, 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. London: Blackwell Scientific Publications, 1~312.

Tian Jian, Liao Qun'an, Fan Guangmin, Nie Xiaomei, Wang Fuming. 2015&. The discovery and tectonic implication of Early Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junngar. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1471~1484.

Verma S P, Rivera-Gomez M A, Diaz-Gonzalez L, Pandarinath K, Amezcua-Valdez A, Rosales-Rivera M, Verma S K, Quiroz-Ruiz A, Armstrong-Altrin J S. 2017. Multidimensional classification of magma types for altered igneous rocks and application to their tectonomagmatic discrimination and igneous provenance of siliciclastic sediments. Lithos, 278~281: 321~330.

Wang Daoyong Deng Jianghong. 1995&. Characteristics and evolution of the plate tectonics in Eastern Junggar, Xinjiang. Journal of Chengdu University of Technology, 22(4): 38~45.

Wang Guocan, Zhang Meng, Feng Jialong, Liao Qun'an, Zhang Xionghua, Kang Lei, Guo Ruilu, Xuan Zeyou, Han Kaiyu. 2019&. New understanding of the tectonic framework and evolution during the Neoproterozoic—Paleozoic era in the East Tianshan Mountains. Journal of Geomechanics, 25(5): 798~819.

Wang Jian, Su Yuping, Zheng Jianping, Belousova E A, Chen Ming, Dai Hongkun, Zhou Liang. 2022. Rapid transition from oceanic subduction to postcollisional extension revealed by Carboniferous magmatism in East Junggar (NW China), southwestern Central Asian orogenic belt. Geological Society of America Bulletin, 134(3~4): 1018~1042.

Wang Jingbin, Xu Xin. 2006&. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica, 80(1): 23~31.

Wang Qian, Zhao Guochun, Han Yigui, Yao Jinlong, Liu Qian, Guo Yu, Zhao Yan, Zhang Hong. 2021. Late Paleozoic tectonic transition in East Junggar, NW China: Insights from I- and A-type granitic magmatism in the Karamaili Region. Lithos, 404~405: 106481.

Wang Xulong, Zhao Mengjun, Xiang Baoli, Da Jiang, Jiang Yiqin, Liu Cuimin. 2010&. Carboniferous source rocks in the Ludong—Wucaiwan Area, Junggar Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 37(5): 523~530.

Wang Xuying, Jiang Zaixing. 2021&. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the 3rd Member of Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression, North Jiangsu Basin, and their

geological significance. Geological Review, 67(2): 355~366.

Wu Jinxuan, Xia Guoqing, Chen Yun, Xu Weipeng, Yi Haisheng. 2022&. Characteristics of clay mineralogy and its paleoclimatic significance across the Oligocene—Miocene transition in the lunpola basin, central Tibet. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1265~1279.

Wu Kongyou, Zha Ming, Wang Xulong, Qu Jiangxiu, Chen Xin. 2005&. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin. Acta Geosicientia Sinica, 26(3): 217~222.

Wu Runjiang, Zhang Yuanyuan, Tan Jiayi, Guo Zhaojie. 2009&. The characteristics of different structure layers and tectonic implications since Late Paleozoic in Kalamaily Area, Xinjiang. Earth Science Frontiers, 16(3): 102~109.

Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Li Zhensheng. 2009&. Post-collisional volcanism of Kalamaili suture zone. Earth Science Frontiers, 16(3): 220~230.

Wu Xiaozhi, Zhao Yongde, Li Ce. 1996&. Tectonic evolution of foreland basin at northeastern margin of Junggar and its relation with oil—gas. Xinjiang Geology, 14(4): 297~305.

Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Xia Zuchun. 2012. Reassessment of petrogenesis of Carboniferous-Early Permian Rift-related volcanic rocks in the Chinese Tianshan and its neighboring areas. Geoscience Frontiers, 3(4): 445~471.

Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, Ma Zhongpin, Wang Lishe. 2004. Petrogenesis of Carboniferous Rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. Geological Society of America Bulletin, 116(3~4): 419~433.

Xu Qinqin, Ji Jianqing, Zhao Lei, Gong Junfeng, Zhou Jing, He Guoqi, Zhong Dalai, Wang Jinduo, Griffiths L. 2013. Tectonic evolution and continental crust growth of Northern Xinjiang in northwestern China: Remnant Ocean model. Earth Science Reviews, 126: 178~205.

Yang Gaoxue, Li Yongjun, Tong Lili, Liu Xiaoyu, Yan Cunxing, Yang Baokai, Wu Hongen. 2010&. Genesis and geochemical characteristics of the Kalamaili potassic basalt in the East Junggar, Xinjiang and tectonic implication. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2345~2356.

Yang Gaoxue, Li Yongjun, Wu Hongen, Si Guohui, Jin Zhao, Zhang Yongzhi. 2009&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili Area eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3197~3207.

Yang Kaikai, Bian Weihua, Wang Qianjun, Wang Pujun, Lang Jiabin, Li Zhao. 2018&. Zircon U-Pb age and its geological significance of the igneous rocks from Batamayineishan Formation in East Junggar. Acta Petrologica Sinica, 34(11): 3341~3358.

Yang Sunrong, Yao Le, Hou Zhangshuai, Ye Xunyan, Li Ying, Huang Xing, Shen Shuzhong, Wang Xiangdong. 2022. A Pennsylvanian rugose coral assemblage from eastern Junggar Basin, Northwest China, Palaeoworld, https:// doi. org/10. 1016/j. palwor. 12. 009.

Yang Xiaofa, He Dengfa, Wang Qingchen, Tang Yong. 2012. Tectonostratigraphic evolution of the Carboniferous arc-related basin in the East Junggar Basin, Northwest China: Insights into its link with the subduction process. Gondwana Research, 22(3~4): 1030~1046.

Yang Yanhui. 2016&. Carboniferous Sedimentary Fill Evolution of Dajing Depression at the estern Junggar Basin. master tutor: He Dengfa. A dissertation for Master's degree. Bei Jing: China University of Geosciences(Beijing).

Yi Zejun, He Dengfa. 2018&. Tectono—stratigraphic sequence and basin evolution of the eastern Junggar Basin. Oil & Gas Geology, 39(5): 932~942.

Young G M, Wayne Nesbitt H. 1999. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada: A chemostratigraphic approach. Geological Society of America Bulletin, 111(2): 264~274.

Yuan P L. 1956&. Geology of eastern Dzungaria, Sinkiang. Acta Geological Sinica, 30(2): 113~132+240~245.

Zhang Feng, Xu Tao, Fan Junjie, Pan Aijun, Wang Bin, Chao Yinyin. 2014&. Whole-rock Sm-Nd isochron age of Carboniferous volcanic rocks in eastern Junggar and its tectonic significance. Geochimica, 43(3): 301~316.

Zhang Jianjun, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Wu Hao, Chen Xiaowei, Xia Yu. 2017&. Geochemistry of the Mangbang Formation mudstones of the husa basin, western Yunnan: Implications for provenance and source weathering. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(4): 574~581.

Zhang Lei, He Dengfa, Yi Zejun, Li Di. 2020&. Tectonic relationship between the Kelameili range and the Dajing depression: Insights into the Carboniferous tectonic—sedimentary framework. Petroleum Exploration and Development, 47(1): 29~44.

Zhang Qian, Xiao Yuanfu, Wang Xiaofei, Yu Qian, Wang Jian, Zhao Ankun, Men Yupeng, Zhou Yexin. 2020&. Geochemistry of the Longmaxi Formation mudstones of the southwest Sichuan Basin: Implications for provenance and source weathering. Geological Review, 66(5): 1393~1411.

Zhang Qingqing, Huang Jinghua, Yao Jun, Hu Feinan, Huo Na, Shang Yingni, Chang Wenqian, Zhao Shiwei. 2018&. Distribution of clay minerals in the Chunhua loess—paleosol sequence and its paleoenvironmental significance. Acta Pedologica Sinica, 55(5): 1062~1073.

Zhang Yuanyuan, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Zhaojie. 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, North Xinjiang, and its implications: Evidence from molasse deposits. Geological Society of America Bulletin, 125(5~6): 932~944.

Zheng Menglin, Tian Ai'jun, Yang Tongyuan, He Wenjun, Chen Lei, Wu Haisheng, Ding Jing. 2018&. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin. Oil& Gas Geology, 39(5): 907~917.

Zhi Qian. 2018&. A comparative study on the upper Carboniferous standard stratotype-section profiles in the eastern and western Junggar, Xinjiang, NW China. master tutor: Li Yongjun. A dissertation for Master's degree. Xi'an: Chang'an University.

Geochemical characteristics and its geological significance of Upper Carboniferous mudstone in Shuangjingzi area, Eastern Junggar Basin, Xinjiang

DENG Min[1, 2), CHENG Jinxiang[1, 2), TANG Yong[3), FU Guobin[4),
WANG Zhenghe[1, 2), FENG Weiming[1,2), LI Rong[1,2)

1) *Chengdu Center, China GeologicalSurvey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu*, 610213;

2) *Key Laboratory of Sedimentary Basin & Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu*, 610213;

3) *Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang*, 834000;

4) *Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami, Xinjiang*, 839000

Objectives: A set of continuous and stable clastic deposits rock developed after volcanic rocks of the Batamayneishan Formation in Shiqiantan sag, Eastern Junggar Basin. The study of the Upper Carboniferous mudstones are of great significance for restoring the weathering characteristics and paleoclimate of the late Carboniferous source area in Eastern Junggar and judging the properties and tectonic setting of the source rocks.

Methods: In order to systematically study the whole-rock geochemistry of the fine-grained sedimentary rocks, the author have combined with the XRD, major and trace element results of the outcrop samples.

Results: Mudstones from the Upper Carboniferous mudstones are all have low quartz contents. The Batamayneishan Formation mudstones have high clay contents, whereas those of the Shiqiantan Formation have high andesine contents. The clay compositions both of them are montmorillonites (content>99%), reflecting dry and cold climate characteristics and long-term alkaline deposition medium conditions. The *CIA* results show that the Batamayneishan and Shiqiantan Formations experienced moderate to weak chemical weathering and had the characteristic of alternating dry and wet climate change. The major trace elements and related discriminant diagrams shows that the provenance of tow formations are dominated by felsic, mixed with a few meso-mafic and acidic sources, and most of them come from undifferentiated arcs. The element-geochemical characteristics of the mudstones reflect that the tectonic background of the provenance is mainly the continental island arc.

Conclusions: Combined with the peak age of detrital zircon in Shiqiantan Formation and the analysis of the main provenance area, it is concluded that the Yemaquan terrane and the northeastern Junggar terrane began to change from subduction to collision orogeny around 335 Ma.

Keyword: Eastern Junggar Basin; Carboniferous; provenance; paleoclimate; tectonic setting; geochemical characteristics

Acknowledgements: This paper is supported By Open Fund (No. DGERA20231108) of Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology

First author: DENG Min, male, born in 1985, PH. D., senior engineer, mainly engaged in sedimentary geology, petroleum geology, unconventional oil & gas research; Email: dengmin911@126.com

Manuscript received on: 2024-01-15; Accepted on: 2024-04-02; Published online on: 2024-04-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.04.031 **Edited by**: LIU Zhiqiang