

库车坳陷第三系泥岩地球化学特征及其对构造背景和物源属性的指示

李双建^{1,2}, 王清晨²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 利用碎屑岩地球化学特征判断沉积盆地的构造背景和物源属性是盆地分析的重要手段, 也是对利用粗碎屑沉积岩的组分统计判断盆地源区背景的有益补充和验证。对库车坳陷第三系 36 件泥岩样品的地球化学特征分析表明, 主量元素中 CaO 的含量很高, 对其他主量元素以及微量和稀土元素有稀释作用, 一些可靠的物源分析指标主要指示了非碳酸盐沉积物的源区性质。REE 分布模式与上地壳相似, 轻稀土元素富集, Eu 负异常, 微量元素比值显示源岩以长英质岩石为主。通过 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ 以及 La - Th - Sc 和 Th - Sc - Zr/10 判别图分析, 认为源区的构造背景具有类似于岛弧的特征。这一结果与前人所做的砂岩组分的研究结果存在差异, 说明板内造山带与其前陆盆地之间在沉积与构造耦合上具有特殊性。

关键词: 库车坳陷, 第三系, 地球化学, 构造背景, 物源

中图分类号: P588.22, P591, P541

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)03-0219-11

Geochemical characteristics of Tertiary mudstones in Kuqa depression and their implications to tectonic setting and provenance attribute

LI Shuang-jian^{1,2} and WANG Qing-chen²

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Corp., Beijing 100083; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The application of detrital geochemistry to determining tectonic setting and provenance attribute is an important means for basin analysis and also a helpful supplementary or verification method in using coarse detrital rocks to judge the background of provenance. Geochemical characteristics of 36 Tertiary mudstone samples from Kuqa depression show that the content of CaO is very high, which can somewhat dilute other major elements, trace elements and rare elements. Some reliable indicators for provenance analysis show the source rock nature of noncarbonate sediments. The REE distribution pattern is similar to that of the upper continental crust, characterized by enrichment of LREE and negative Eu anomalies. Some trace element ratios show that the source rocks are mainly felsic. According to $K_2O/Na_2O - SiO_2$, La - Th - Sc and Th - Sc - Zr/10 discrimination diagrams, the tectonic setting of the provenance is similar to that of island arc. This result is different from the former research result on sandstones, suggesting that there exist specific characteristics between the orogenic inner plate and its foreland basin in sedimentary and tectonic coupling.

Key words: Kuqa depression; Tertiary; geochemistry; tectonic setting; provenance

通过碎屑组分恢复沉积盆地的物源和构造背景是造山带沉积学的一项重要工作。碎屑沉积物可以提供关于那些以前存在、后来被剥蚀或者经过变质的大陆或大洋板块的信息。除了气候、地形、搬运距离和成岩作用,一般认为碎屑岩组分主要受物源区母岩性质和构造背景影响(McLennan *et al.*, 1993; Fralick and Kronberg, 1997)。碎屑岩中的粗碎屑组分容易受风化作用、搬运作用和成岩作用的影响,丢失一些重要的物源信息。一些在沉积、成岩过程中性质稳定的地球化学元素(如 REE、Th、Sc、Co 和 Zr 等)被广泛用来推断物源区的组成特征和大地构造背景,并取得了良好的效果(Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; McLennan *et al.*, 1993; 邵磊等, 1997)。

天山与相邻新生代沉积盆地形成了复杂的盆山系统,具有鲜明的中国地域特色,曾被称为“中国型盆地”(Bally and Snelson, 1980)。这一盆山系统的构造演化过程是亚洲大规模陆内变形的产物。前人对该区的研究主要集中在中生代以前天山造山带的形成过程和中生代以来库车坳陷内沉积构造演化与油气形成的关系,对库车坳陷物源和构造背景的研究仅限于对砂岩碎屑组分的统计(高长林等, 1993; Graham, 1993; Carroll *et al.*, 1995; 何登发等, 1996; Yin *et al.*, 1998; 卢华复等, 2000; Hendrix, 2000; 李忠等, 2003, 2004; 柳永清等, 2004)。根据砂岩碎屑的研究结果,库车坳陷第三纪粗碎屑砂岩富岩屑、贫长石,岩屑中的碳酸盐岩岩屑和变质岩岩屑富集,而火山岩岩屑含量较少,源区的构造背景主要为再造山旋回带。本次研究在库车坳陷第三系中采集了 36 个泥岩样品,通过主量元素、微量元素和稀土元素测试,分析库车坳陷第三系碎屑岩地球化学特征、高碳酸盐岩含量对各种地球化学元素及其比值的影响,并探讨其物源属性和形成的构造背景。选择泥岩是因为地球化学元素在泥岩中分布的均一性更强,更适合于物源分析(Cullers, 1995)。

1 地质背景

天山造山带东西绵延 1 500 km,是中亚地区最重要的古生代造山带之一,包括塔里木板块、伊犁中天山板块和准噶尔板块,由一些具前寒武基底的微板块组成,普遍分布中新世盖层。塔里木板块和伊犁中天山板块之间以南天山缝合带为界(形成于

早石炭世)缝合带广泛分布的蛇绿混杂岩和蓝片岩是早石炭世晚期塔里木板块北缘与伊犁板块南缘碰撞的结果。伊犁中天山板块与准噶尔板块之间的缝合带也形成于早石炭世晚期。在这条缝合带上,中奥陶世的蛇绿混杂岩、蓝片岩和晚泥盆-早石炭世的蛇绿岩都有分布。古生代末期塔里木板块、伊犁中天山板块与准噶尔板块和欧亚大陆拼合在一起。早二叠世,天山开始隆升,并伴随有火山喷发和花岗岩侵入(Gao *et al.*, 1995; 吴世敏等, 1995)。目前南天山出露的主要岩石是浅变质的古生界千枚岩、板岩、结晶灰岩及晚古生代花岗岩和钙碱性火山岩等(图 1)。

库车坳陷位于塔里木盆地北缘、天山南麓,是一个中生代前陆盆地。新生代特别是晚第三纪渐新世以来,伴随着天山强烈的隆升,盆地内沉积了巨厚、连续的陆相沉积,为研究天山陆内造山的隆升过程和机制提供了天然实验室。库车坳陷第三系包括 5 个组,自下而上依次是库姆格列木组、苏维依组、吉迪克组、康村组和库车组。在克孜勒努尔沟剖面除了库姆格列木组底部的一小部分为海相沉积外,其余地层都是陆相沉积,沉积物的粒度向上变粗,沉积相由湖相逐步演变为河流相和冲积扇相。库姆格列木组底部为灰白、浅灰色泥灰岩、灰质砾岩,下部为紫红色砂砾岩与同色泥岩、粉砂岩、石膏层互层,上部为紫红色泥岩,厚 130 m。苏维依组主要为褐红色砂岩、泥岩和少量砾岩,上部含钙质较高,厚 143 m。吉迪克组主要为一套棕红色砂质泥岩与泥岩互层,其间夹有较多的厚层状或中薄层状灰绿色泥灰质粉砂岩或泥质条带,宏观上具有明显的红、绿条带相间的特点,厚 1 075 m。康村组下段为暗棕色砂质泥岩夹灰绿色泥岩及粉砂岩,上段以暗棕褐色砂质泥岩为主,夹砂岩,厚 1 140 m。库车组下段为青灰色细-中粒块状砂岩夹褐黄色带灰色砾岩,上段主要为褐黄色粉砂岩夹灰褐色砾岩、砂岩,厚 2 700 m。

2 样品采集与分析

本次研究在库车县牙哈乡克孜勒努尔剖面(42°04.715'N, 83°18.419'E)共采集地球化学样品 36 块,其中库姆格列木组 3 块、苏维依组 2 块、吉迪克组 12 块、康村组 15 块、库车组 4 块,均为泥岩。主量元素分析采用 Shimadzu 1500 X 射线荧光仪测定,分析误差除 P_2O_5 约为 5% 外,其余氧化物均小于 1%。 CO_2 含量用酸溶法测定,所用仪器为 High TOC

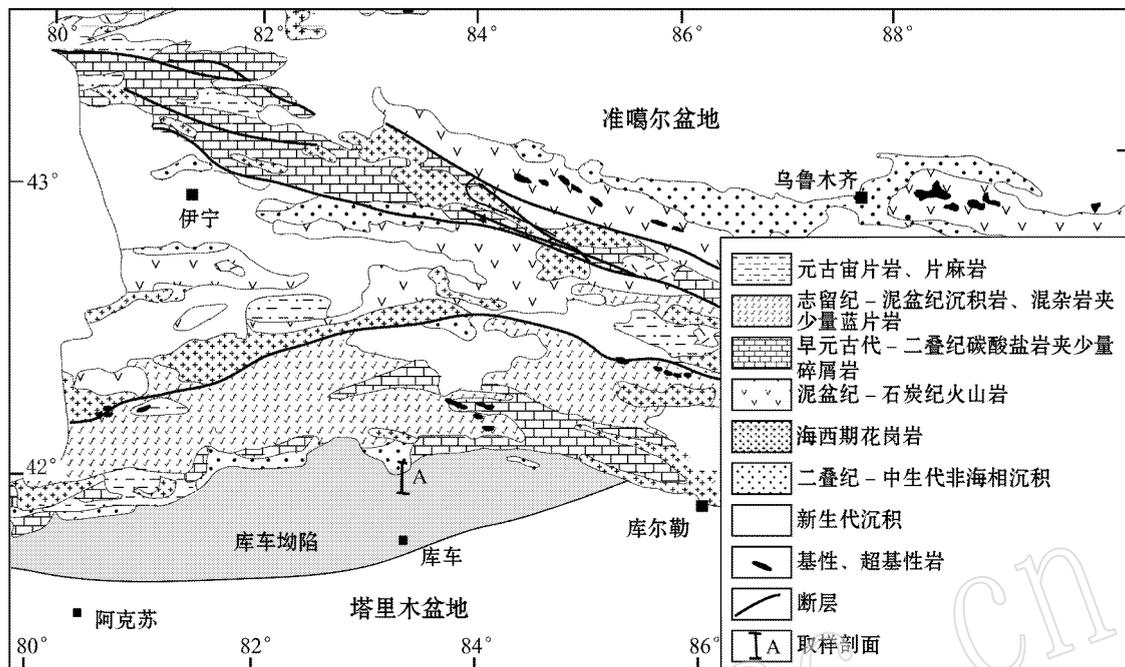


图 1 研究区构造地质图 [据 Graham 等(1993)李忠(2004)等修改]

Fig. 1 Tectonic geological map of the study area (modified after Graham *et al.*, 1993 and Li Zhong *et al.*, 2004)

II 红外线检测仪,分析误差小于 1%。微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)方法完成,分析误差小于 5%。所有测试均由中国科学院地质与地球物理研究所地球化学实验室完成。

3 泥岩地球化学特征

3.1 主量元素

研究区主量元素测试结果见表 1。由主量元素的纵向变化图(图 2)可以看出,库车坳陷第三系泥岩中的 CaO 含量普遍较高,特别是在库姆格列木组,平均含量高达 36.4%,受此影响其他主量元素的含量偏低。库姆格列木组、苏维依组、吉迪克组和康村组 CaO 含量向上增加,但库车组有所降低。其他主量元素如 SiO₂、Fe₂O₃、MgO、K₂O 和 Na₂O 的变化趋势与 CaO 相反,Al₂O₃和 TiO₂的含量变化不明显,MnO 和 P₂O₅的含量均小于 1%,纵向上几乎没有什么变化。与澳大利亚后元古宙平均泥岩(PASS)主量元素相比,该区泥岩富 CaO,贫 TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 K₂O,而 SiO₂、MgO、MnO 和 Na₂O 与 PASS 相差不多(PASS 数据来自 Taylor 和 McLennan, 1985)(图 3)。因为 SiO₂ 亏损的程度并不高,所以 K₂O 和 Al₂O₃不完全亏损是由于碳酸盐岩稀释的影响。一

般来讲,Al 和 K 元素富集于长石和伊利石、高岭石等粘土矿物中,K₂O 和 Al₂O₃ 的亏损与岩石中这些矿物含量较少有关。

3.2 微量和稀土元素

库车坳陷第三系泥岩中微量元素含量最大的特点是总量偏低(表 1),特别是库姆格列木组,一些微量元素含量不及 PASS 的 1/5(图 3),这可能与该区泥岩中丰富的碳酸盐含量有关。大离子亲石元素 Rb、Cs、Ba 和 Sr 的含量变化较大,但总体和 PASS 的成分相当(图 3)。库姆格列木组 Sr 元素含量相对较高,是由于 Sr 元素在碳酸盐岩中含量较高的缘故(Cullers, 2002)。研究区沉积岩中 Co、Cr、Ni、Sc 和 V 等铁镁族元素的含量虽有一定的变化,但总体上除了总量偏低以外均类似于 PASS。

该区稀土元素同样受到了碳酸盐岩稀释作用的影响。在碳酸盐岩含量高的库姆格列木组,ΣREE 平均值仅为 45.88×10⁻⁶,说明稀土元素富集于碎屑组分中。经球粒陨石标准化后,各组稀土元素的分布模式相似(图 4),均表现为轻稀土元素富集,重稀土元素分布平坦, Eu 显著负异常;指示轻重稀土元素分异度的(La/Yb)_n在 9~11 之间,各组平均值均大于 PASS 的值(9.2);指示轻稀土元素分异程度的(La/Sm)_n一般都大于 4;指示重稀土元素分异程度

表1 库车坳陷第三系泥岩主要元素($w_B/\%$)与微量元素($w_B/10^{-6}$)含量表Table 1 The contents of major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) in Tertiary mudstones from Kuqa depression

地层	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	IOI	TOTAL	CO ₂	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb
库姆格列木组	KM-40	20.62	0.09	2.06	0.58	0.05	1.19	38.34	0.00	0.20	0.01	35.92	99.07	35.04	5.99	0.21	2.20	21.80	17.37	2.58	9.30	3.03	40.82	2.43	13.62
	KM-45	28.55	0.16	3.35	1.21	0.08	1.67	33.54	0.06	0.45	0.02	30.86	99.95	30.30	9.15	0.42	4.30	29.61	28.33	5.33	13.89	9.76	15.11	3.94	21.31
	KM-42	34.70	0.16	3.60	1.30	0.08	1.63	30.06	0.64	0.55	0.02	27.63	100.36	27.10	9.78	0.38	4.49	32.91	27.45	5.48	17.49	30.11	13.57	4.21	21.11
	KM-50	65.89	0.49	11.27	3.66	0.05	2.65	2.96	2.40	2.59	0.11	7.88	99.96	2.45	39.67	1.60	10.19	106.84	54.03	10.81	29.71	48.39	53.52	13.55	94.84
依组	KM-55	50.79	0.55	9.22	3.39	0.10	2.02	13.80	2.38	1.37	0.10	15.78	99.50	11.53	57.79	3.31	19.13	143.30	86.50	18.46	50.26	38.20	94.79	25.28	164.21
	KM-53	49.74	0.74	17.07	7.42	0.07	3.61	4.87	1.43	4.15	0.21	10.98	100.28	4.00	28.78	1.07	9.17	59.26	47.59	9.36	26.51	53.15	55.52	10.75	68.62
吉迪克组	KM-91	54.02	0.66	13.94	5.51	0.09	3.49	6.71	1.72	3.14	0.16	10.55	99.97	5.88	54.19	2.15	14.22	97.37	70.61	14.36	44.93	33.02	221.30	17.85	124.01
	KM-97	56.14	0.58	11.82	4.44	0.07	2.19	8.99	1.56	2.51	0.13	10.97	99.40	7.69	41.14	1.74	11.45	84.04	68.22	12.11	32.28	20.12	73.97	15.13	101.68
	KM-100	55.97	0.50	10.62	3.72	0.13	2.10	11.00	1.63	2.13	0.13	12.06	99.98	9.54	38.76	1.48	10.06	70.32	63.52	9.99	73.07	32.52	55.82	13.07	86.74
	KM-104	58.43	0.56	12.37	4.48	0.09	2.15	7.40	1.64	2.49	0.12	10.02	99.76	6.46	42.08	1.64	11.78	79.27	57.53	12.01	33.43	21.90	72.07	15.70	101.84
	KM-107	38.13	0.38	7.22	2.54	0.06	1.67	25.18	1.09	1.17	0.06	22.49	99.99	21.69	24.21	0.97	7.23	49.59	37.00	7.10	17.31	12.91	38.76	8.76	56.61
	KM-115	50.43	0.64	13.00	5.36	0.09	3.06	9.00	2.33	2.42	0.14	13.10	99.56	7.62	41.47	1.82	13.27	84.11	58.11	12.97	35.68	20.43	64.07	15.32	99.05
	KM-122	53.03	0.71	13.65	5.74	0.11	3.07	7.85	1.80	2.71	0.15	10.98	99.80	6.68	51.86	2.05	14.59	99.20	81.22	15.32	42.39	28.40	97.11	17.89	113.95
	KM-125	43.88	0.50	7.37	2.82	0.08	1.46	21.29	1.72	1.28	0.15	18.96	99.49	7.28	50.07	1.90	14.83	101.47	79.80	15.75	43.64	25.25	76.74	17.01	109.20
	KM-126	48.10	0.54	10.32	4.06	0.08	2.26	13.84	1.71	1.50	0.15	16.34	98.90	6.97	51.18	1.90	15.13	100.45	82.17	16.18	43.59	28.13	76.94	17.21	114.01
	KM-131	47.86	0.68	14.96	6.79	0.11	3.44	8.10	1.46	3.16	0.15	12.93	99.64	7.13	65.87	2.53	18.07	126.51	110.02	12.19	85.57	37.28	23.96	47.21	23.136.44
KM-133	46.95	0.65	14.05	6.28	0.09	3.56	9.55	1.42	2.94	0.18	13.88	99.55	8.42	62.31	2.39	16.13	101.44	76.40	16.84	47.37	27.45	90.79	18.85	124.50	
康村组	KM-137	50.37	0.67	12.35	5.18	0.09	3.88	9.01	1.79	2.26	0.12	13.66	99.39	8.73	24.15	1.19	9.38	60.58	45.88	10.11	28.50	22.94	52.31	10.27	64.88
	KM-142	37.74	0.45	8.09	3.27	0.09	2.08	22.86	0.96	1.03	0.09	23.31	99.97	19.29	43.66	1.75	14.02	98.81	75.75	15.16	41.86	29.99	84.21	15.64	100.92
	KM-144	31.68	0.37	7.57	3.06	0.08	2.28	26.60	0.56	0.96	0.07	25.81	99.04	23.11	29.62	1.23	8.87	54.83	50.29	9.65	29.24	20.89	41.89	9.81	64.30
	KM-169	50.13	0.65	12.58	5.31	0.10	3.13	9.64	1.33	2.40	0.12	14.00	99.39	8.01	42.11	2.03	14.58	101.71	73.49	14.81	74.18	50.43	75.49	17.55	112.59
	KM-150	45.38	0.55	12.12	5.07	0.11	3.91	11.01	1.38	2.12	0.11	17.78	99.54	9.53	35.62	1.81	13.68	98.37	71.43	16.07	36.32	22.30	66.95	16.41	98.44
	KM-153	48.55	0.60	10.44	4.27	0.10	2.72	14.23	1.35	1.99	0.15	15.38	99.78	12.17	32.02	1.53	11.43	80.14	61.71	11.94	29.02	19.43	60.01	13.44	84.72
	KM-9	30.07	0.36	7.14	2.96	0.09	2.32	28.39	0.71	0.91	0.09	26.45	99.49	25.22	24.16	1.06	7.98	52.58	46.03	8.95	21.25	19.67	41.30	9.46	60.56
	KM-73	50.00	0.57	10.62	4.04	0.08	2.80	11.93	1.35	1.64	0.14	16.02	99.19	10.14	33.33	1.52	11.33	70.88	56.86	10.39	28.78	19.46	65.04	13.57	87.15
	KM-13	32.57	0.40	7.83	3.15	0.11	2.11	26.16	1.20	1.14	0.10	24.45	99.22	22.58	26.48	1.19	8.73	59.19	42.84	10.52	26.00	22.56	52.90	10.32	70.01
	KM-18	45.83	0.58	11.12	4.64	0.07	2.90	13.48	1.82	1.74	0.13	17.43	99.74	10.82	34.45	1.65	11.70	78.72	60.68	11.40	29.25	25.15	73.35	14.76	97.14
	KM-23	44.09	0.62	9.25	3.67	0.06	2.20	18.06	1.56	1.29	0.16	18.69	99.65	15.02	26.73	1.22	10.79	67.79	74.48	7.73	27.36	23.00	53.43	11.51	72.85
	KM-24	44.29	0.55	12.32	4.89	0.05	4.28	2.10	5.62	1.86	0.09	22.11	98.16	0.76	37.40	1.84	13.72	93.91	77.92	12.26	35.72	29.11	64.07	16.65	101.71
	KM-35	31.48	0.38	8.89	3.67	0.09	2.35	24.57	1.23	0.94	0.09	25.60	99.29	21.38	29.24	1.39	9.39	65.35	47.05	12.12	28.18	23.03	50.77	11.77	76.82
	KM-58	44.59	0.57	12.62	5.29	0.13	3.03	10.29	2.32	1.56	0.10	18.92	99.43	8.16	39.09	1.81	13.53	90.86	63.14	15.14	38.18	29.33	66.98	16.01	102.91
	KM-63	47.09	0.62	13.04	5.63	0.12	3.23	10.67	1.96	2.34	0.14	14.75	99.58	8.95	45.03	2.04	14.32	100.74	70.63	16.22	42.11	35.38	91.85	18.41	122.01
库车组	KM-66	50.12	0.40	7.29	2.89	0.07	1.47	17.48	1.39	1.16	0.08	17.21	99.56	14.62	19.90	0.95	7.66	47.83	46.71	7.65	18.29	15.94	37.17	8.94	61.07
	KM-67	51.22	0.52	9.93	3.96	0.08	1.98	13.63	1.59	1.81	0.13	14.53	99.38	10.86	19.48	1.07	8.16	49.74	37.67	7.43	17.91	13.98	40.29	9.10	56.42
	KM-69	52.41	0.67	13.06	5.32	0.12	3.19	8.40	1.93	2.60	0.17	11.34	99.22	10.87	32.60	1.49	11.09	71.01	53.81	10.68	29.63	26.55	58.31	13.44	89.34
	KM-158	51.4	0.64	12.99	5.324	0.121	3.29	8.5	1.79	2.54	0.18	12.06	98.831	11.1	30.09	1.432	10.6	69.48551	054	10.14	29.41	22.75	55.481	12.61	84.856

续表 1
Continued Fig. 1

地层	样号	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
库姆格列木组	KM-40	1416.40	8.26	21.92	2.81	0.89	970.67	0.63	0.33	6.08	1.51	0.43	8.19	11.90	1.88	7.40	1.53	0.45	1.50	0.24	1.45	0.29	0.75	0.10	0.59	0.08
	KM-45	484.58	9.98	37.87	3.75	1.51	429.62	1.08	0.47	14.21	2.40	0.82	11.92	14.70	2.68	10.20	2.00	0.46	1.85	0.28	1.67	0.34	0.91	0.13	0.79	0.11
	KM-42	618.58	12.29	38.08	3.72	1.38	512.17	1.09	0.47	15.14	2.41	0.83	13.08	15.60	2.90	11.22	2.37	0.58	2.29	0.35	2.11	0.42	1.11	0.15	0.91	0.13
	KM-50	107.99	17.60	113.46	9.92	6.96	334.62	3.29	0.95	20.94	8.18	2.36	24.77	45.97	5.74	20.78	3.94	0.84	3.52	0.56	3.15	0.66	1.87	0.28	1.75	0.27
依组	KM-55	104.26	30.47	144.72	13.70	14.60	436.12	4.05	1.25	40.73	13.32	3.50	42.62	79.22	9.50	36.13	7.06	1.40	5.69	0.93	5.23	1.06	2.82	0.44	2.74	0.39
	KM-53	844.26	20.41	121.63	9.96	5.28	282.89	3.65	0.96	23.70	8.54	2.10	27.01	52.71	6.36	24.62	4.73	0.97	4.18	0.67	3.81	0.79	2.16	0.32	1.98	0.30
吉迪克组	KM-91	140.12	24.41	137.58	12.30	11.80	319.75	3.83	1.18	28.04	11.31	3.26	35.25	64.55	7.89	28.62	5.42	1.03	4.46	0.72	4.41	0.91	2.50	0.36	2.20	0.34
	KM-97	142.39	21.86	147.96	11.36	9.31	419.46	4.21	1.00	22.18	9.44	2.17	29.02	56.11	6.87	25.44	4.99	0.92	4.01	0.66	3.84	0.80	2.20	0.33	1.97	0.29
	KM-100	142.17	21.18	137.39	10.32	7.61	441.54	3.83	0.95	27.49	8.53	3.21	27.21	55.59	6.47	23.53	4.55	0.86	3.97	0.60	3.62	0.76	2.15	0.32	1.97	0.29
	KM-104	131.83	21.08	125.53	10.70	8.68	312.02	3.76	1.04	26.03	10.32	2.46	28.08	53.24	6.58	23.96	4.79	0.95	4.13	0.66	3.90	0.82	2.29	0.34	2.11	0.30
	KM-107	166.29	16.02	75.05	7.69	4.74	282.07	2.31	0.97	19.95	6.80	1.53	21.53	39.43	5.12	19.43	3.88	0.81	3.53	0.56	3.13	0.64	1.73	0.24	1.50	0.22
	KM-115	178.98	21.94	116.58	10.92	8.34	380.35	3.33	0.97	23.08	9.17	3.91	28.49	55.29	6.76	25.24	4.90	0.93	4.07	0.61	3.85	0.78	2.25	0.32	2.07	0.31
	KM-122	198.75	24.26	117.62	13.59	10.94	493.64	3.54	1.59	40.38	12.28	4.70	35.39	66.35	7.97	30.99	5.61	1.18	4.98	0.82	4.62	0.96	2.64	0.40	2.42	0.37
	KM-125	321.74	24.23	120.00	13.05	9.80	565.27	3.40	1.12	26.88	10.40	2.51	33.15	63.69	7.73	29.39	5.52	1.11	4.79	0.73	4.25	0.85	2.41	0.36	2.19	0.34
	KM-126	414.49	24.58	122.89	12.66	9.79	576.89	3.34	1.10	27.70	10.39	2.47	32.87	63.64	7.82	29.26	5.54	1.11	4.77	0.76	4.21	0.86	2.41	0.36	2.21	0.33
	KM-131	253.75	24.81	136.28	13.27	12.66	536.60	3.81	1.19	31.71	12.48	5.06	34.40	65.87	8.04	30.23	5.93	1.13	4.81	0.70	4.48	0.91	2.54	0.39	2.37	0.35
康村组	KM-133	269.92	25.92	122.03	13.22	12.10	710.33	3.44	1.11	31.53	11.06	3.05	33.88	66.01	8.22	30.51	6.01	1.21	5.13	0.78	4.65	0.93	2.57	0.38	2.34	0.35
	KM-137	207.27	18.85	91.72	8.67	5.36	253.71	2.55	0.80	15.27	6.59	1.27	24.14	44.24	5.57	21.43	4.17	0.83	3.58	0.55	3.25	0.66	1.86	0.27	1.64	0.25
	KM-142	361.60	23.34	130.76	12.29	9.32	370.40	3.54	1.05	26.26	9.65	2.56	30.03	57.61	7.10	26.58	5.18	0.98	4.33	0.71	4.04	0.82	2.29	0.35	2.17	0.33
	KM-144	243.93	16.36	81.37	8.17	6.01	295.13	2.31	0.77	18.08	6.61	1.22	20.13	38.57	4.71	17.47	3.44	0.92	2.97	0.47	2.76	0.56	1.64	0.24	1.46	0.21
	KM-169	194.06	23.22	115.44	12.76	10.24	431.42	3.25	1.23	23.13	11.66	2.25	33.19	62.92	7.51	28.08	5.47	1.11	4.63	0.74	4.17	0.88	2.34	0.36	2.13	0.32
	KM-150	469.81	21.20	99.22	11.18	9.81	446.63	2.84	1.02	27.40	10.13	2.04	30.02	56.70	6.79	24.68	4.68	0.93	3.98	0.66	3.68	0.77	2.07	0.31	1.91	0.28
	KM-153	191.83	22.93	102.04	11.59	7.15	368.56	3.05	1.14	23.25	11.21	2.18	35.43	65.48	8.24	31.26	5.79	1.15	5.09	0.79	4.43	0.89	2.44	0.36	2.09	0.31
	KM-9	252.56	18.54	60.32	7.65	5.38	251.17	1.85	0.86	21.83	7.11	1.59	23.65	45.98	5.45	20.51	4.12	0.83	3.71	0.58	3.34	0.70	1.78	0.27	1.63	0.24
	KM-73	224.09	20.13	89.64	11.39	7.06	363.14	2.81	1.18	17.70	11.17	2.15	29.66	55.72	6.91	26.59	5.09	1.02	4.35	0.69	3.90	0.79	2.17	0.32	1.90	0.28
	KM-13	268.18	18.71	59.44	8.52	5.91	1030.97	7.74	0.84	32.41	7.38	1.54	27.36	47.34	6.11	22.25	4.36	0.90	3.70	0.59	3.29	0.67	1.81	0.26	1.62	0.24
	KM-18	228.60	19.03	75.73	11.50	8.44	400.80	2.39	1.11	22.91	11.97	2.24	29.94	57.64	6.83	25.81	4.76	0.95	4.15	0.65	3.69	0.74	2.07	0.30	1.81	0.27
	KM-23	192.73	27.74	111.81	12.28	5.66	319.89	3.24	1.36	14.29	11.14	2.15	37.69	65.64	8.93	32.70	6.37	1.22	5.53	0.89	5.12	1.02	2.80	0.43	2.56	0.38
KM-24	337.70	16.61	91.22	11.01	9.10	351.97	2.62	1.09	21.02	10.14	2.19	22.63	45.17	5.05	19.40	3.65	0.71	3.14	0.51	2.94	0.62	1.72	0.27	1.68	0.24	
KM-35	254.91	16.77	59.05	8.42	6.95	316.99	1.84	0.92	21.92	8.59	1.80	23.52	41.35	5.10	18.86	3.73	1.06	3.40	0.53	3.07	0.62	1.74	0.26	1.53	0.22	
KM-58	172.58	19.62	83.98	10.84	9.09	465.31	2.62	1.22	30.12	11.16	2.44	28.62	58.32	6.63	25.03	4.80	0.97	4.19	0.64	3.72	0.76	2.16	0.30	1.86	0.28	
KM-63	176.71	23.26	93.76	12.62	10.76	461.16	2.61	1.13	32.56	11.71	2.60	32.88	64.09	7.74	28.14	5.48	1.05	4.71	0.75	4.25	0.85	2.43	0.37	2.22	0.33	
KM-66	132.30	18.74	78.78	7.86	4.05	600.08	2.42	0.82	18.73	7.64	1.68	25.41	40.35	5.70	22.26	4.32	0.94	3.86	0.60	3.48	0.72	1.90	0.28	1.67	0.25	
KM-67	196.60	23.79	94.14	10.31	3.90	2008.08	2.98	1.19	18.97	10.23	2.20	33.61	53.42	7.78	28.32	5.63	1.27	5.05	0.80	4.51	0.91	2.50	0.35	2.08	0.31	
KM-69	301.40	22.30	93.27	11.62	6.99	409.82	2.64	1.05	21.18	10.20	1.96	31.09	58.68	7.37	27.03	5.58	0.99	4.53	0.69	3.91	0.82	2.25	0.32	1.91	0.30	
KM-158	189.98	42.36	92.747	10.89	6.538	385.02	2.665	1.033	21.95	10.21	1.99	30.75	56.43	7.19	26.27	5.22	1.446	0.71	4.128	0.832	2.25	0.33	1.95	0.29		

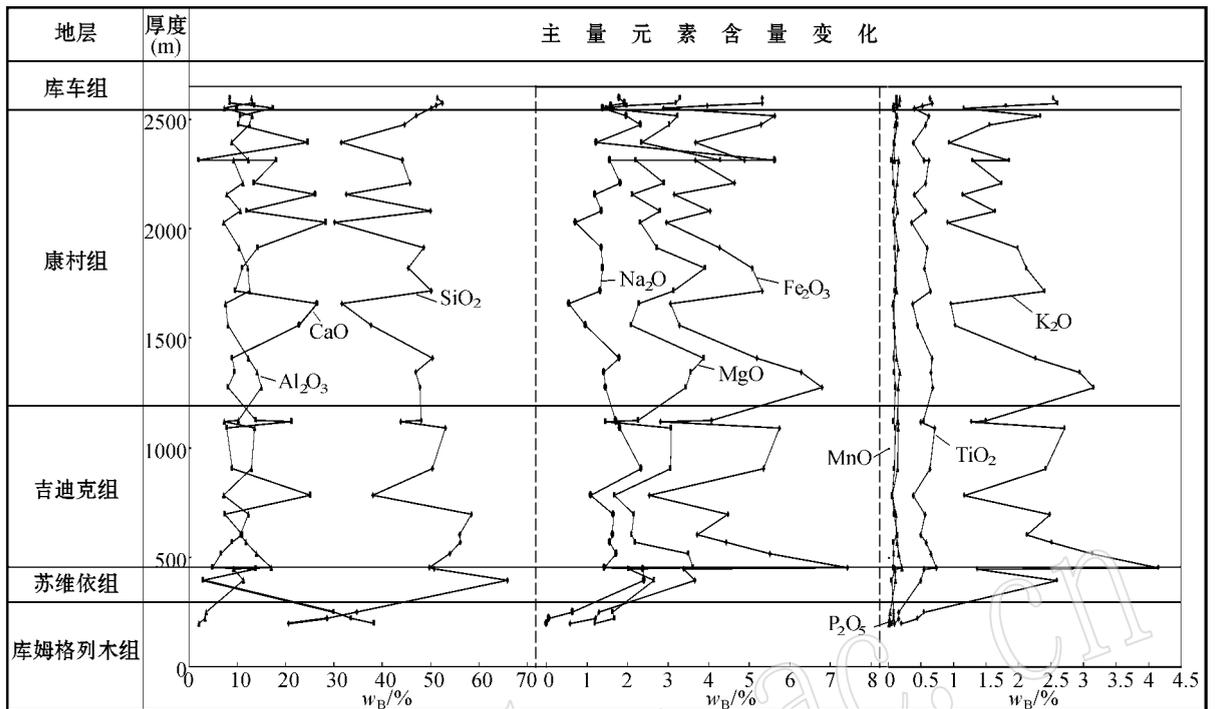


图 2 库车坳陷第三系泥岩主量元素含量变化

Fig. 2 Variation of major elements in Tertiary mudstones from Kuqa depression

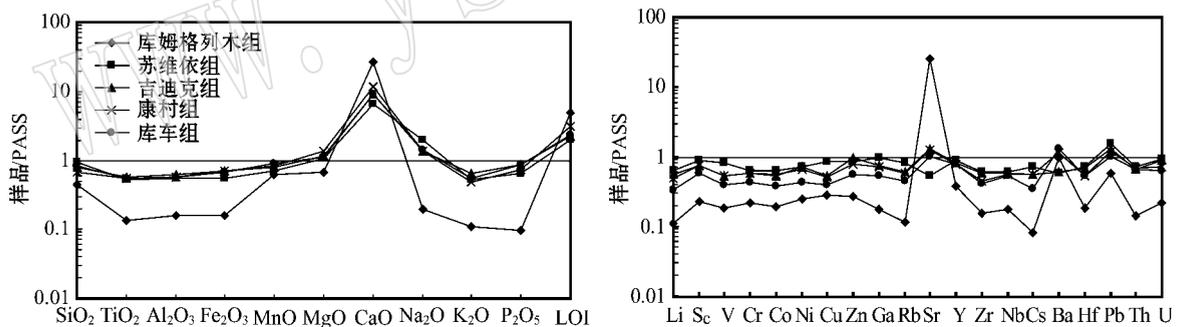


图 3 库车坳陷第三系各组泥岩主、微量元素平均含量 PASS 标准化蛛网图

Fig. 3 Spiderplot of average major elements and trace elements for mudstone in each formation normalized against PASS

的 $(Gd/Yb)_n$ 一般都小于 2, ϵ_{Eu} 负异常在库姆格列木组最大(平均 0.8), 其他组平均 0.65 ~ 0.68, 与 PASS 的 ϵ_{Eu} 异常相近(0.66)。

4 高碳酸盐岩含量对主量、微量元素含量的影响

已有研究(Graham, 1993)和本次研究都证实了研究区砂岩中富含碳酸盐岩岩屑, 这对库车坳陷物源区的恢复有重要意义。由泥岩主量元素分析结果(表 1)可以看出, 库车坳陷第三系细粒沉积岩 CaO 含量普遍较高。为了进一步证实这些 CaO 基本都是

来源于碳酸盐岩, 采用酸溶法测得了样品中来源于碳酸盐岩溶解产生的 CO_2 的含量(表 1)。结果表明, CO_2 与 CaO 有良好的线性相关关系, 两者的相关系数达到 0.997(图 5a), 这说明泥岩样品中几乎所有的 CaO 都来源于可溶的碳酸盐岩而非长石等其他不溶矿物。除去 CaO 以外的主量元素总量与 CO_2 含量呈负相关, 相关系数为 0.904(图 5b), 说明这些元素基本上源于陆源碎屑组分。另外, 这种负相关性还表明, 岩石中的碳酸盐岩均来自源区碳酸盐岩的风化而非成岩过程中新生成, 因为成岩过程中生成碳酸盐矿物会导致两者之间的离散(Feng and Ker-

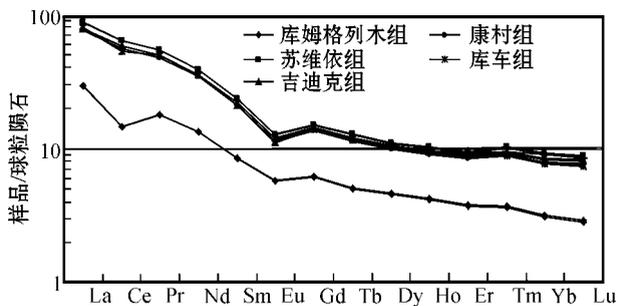


图 4 库车坳陷第三系各组泥岩稀土元素平均含量球粒陨石标准化蛛网图

Fig. 4 Chondrite-normalized mean REE patterns of Tertiary mudstones from Kuqa depression

rich, 1990 (Gu, 1994).

以 Sc 和 La 与 $\Sigma(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{total}) +$

$\text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{TiO}_2 + \text{MnO} + \text{P}_2\text{O}_5$) 的关系为例研究该区高碳酸盐岩岩屑含量对微量元素含量的影响(图 5 c, d) 结果发现在该主要元素总含量小于 60% 时, 随着主要元素总量的增加, Sc 和 La 含量也呈线性增加; 但是当该主要元素总含量大于 60% 时, Sc 和 La 含量趋于稳定或不规律变化。其他微量元素如 Sm、Eu、Tb、Yb、Lu、Ta、Sc、Th 和 Cr 的含量与该主要元素总量也具有类似的关系。这种结果表明这些元素主要来源于陆源碎屑, 而非碳酸盐岩。

本次研究的另一个目的是探究有多少陆源碎屑的物源信息保留在这种富碳酸盐岩岩屑的沉积物中, 这主要涉及到对于物源分析可靠的微量元素比值与碳酸盐岩含量的关系。以 La/Co 和 Eu/Eu^* 为例, 它们的值随 CO_2 含量的增减基本保持恒定的变

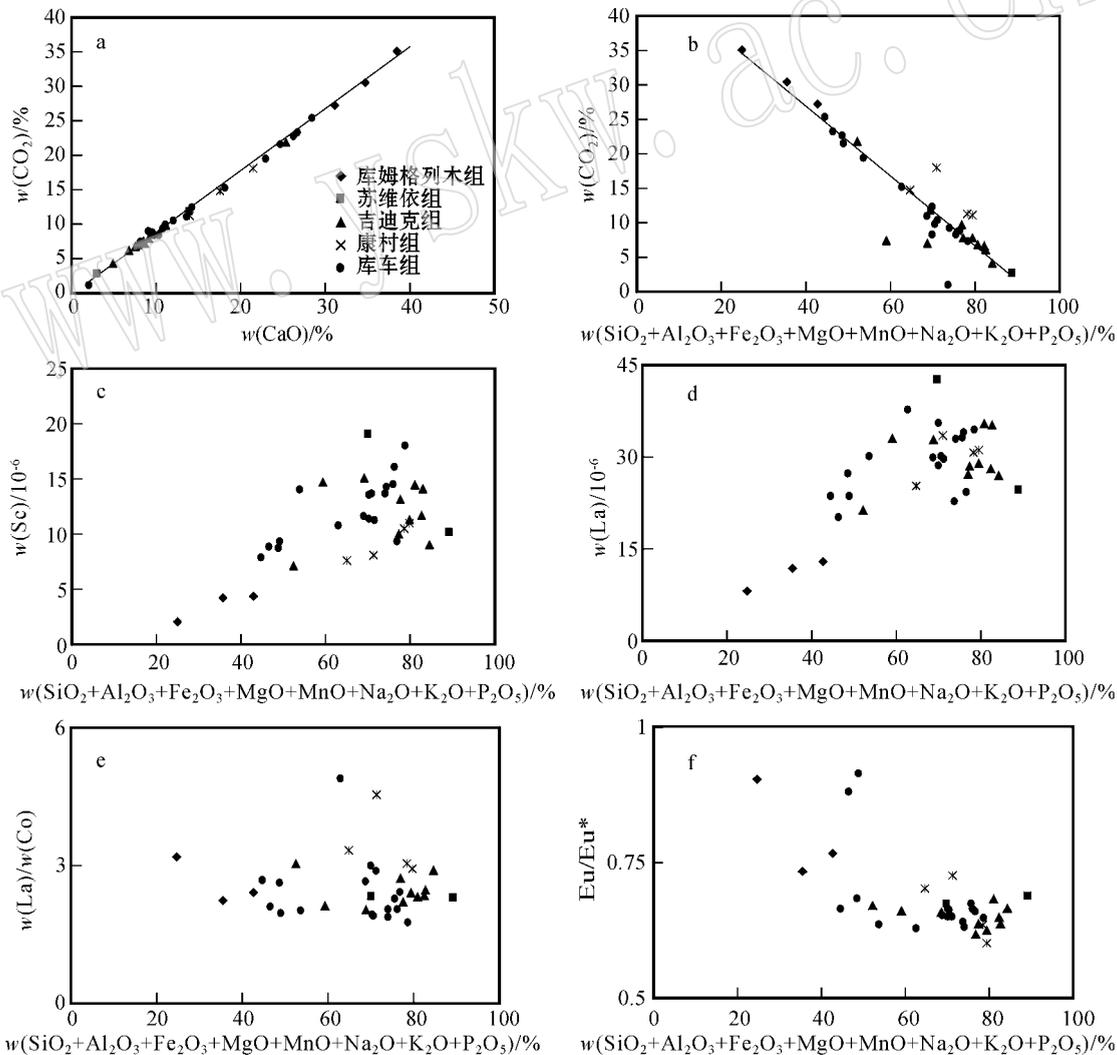


图 5 库车坳陷第三系泥岩高碳酸盐岩含量与其他主要、微量元素的关系

Fig. 5 The relationship between high carbonate content and other major and trace elements in Tertiary mudstones from Kuqa depression

化范围(图 5e, f),其他稳定微量元素比值诸如 Th/Cr、Th/Co和 La/Sc 等也具有类似的性质。这说明在该区 CO₂ 含量 35% 以下的沉积物中,稳定微量元素比值受碳酸盐岩含量变化的影响不大,它们仍然可以用来研究陆源碎屑的物源性质。

5 泥岩地球化学对物源属性的指示

泥岩中的微量元素可以提供有关沉积岩物源属性的信息。例如,相对于基性岩,长英质岩石中 La 和 Th 含量高,而 Co、Sc 和 Cr 则富集于基性岩中。由于这些元素在风化过程中相对稳定,其比值很适合于指示物源的组成(Roser and Korsch, 1986, 1988; Cullers *et al.*, 1988; Girty *et al.*, 1993)。由表 2 可见,库车坳陷第三系各组地层泥岩的非迁移性元素比值如 La/Sc、Th/Sc、Th/Co 和 Th/Cr 均与大陆上地壳(UCC)和硅质砂岩的特征值相近,而与大陆下地壳(LUC)、洋壳(OC)和基性砂岩的特征值相差甚远。为进一步揭示源岩的属性,利用 La/Th-Hf 和 Co/Th-La/Sc 源岩属性判别图解,对泥岩样品的原始属性进行分析(图 6)。由图 6a 可见,大多

数泥岩落在长英质岩与基性岩混合源区。在 Co/Th-La/Sc 图解(图 6b)上,研究区的泥岩具有低而相对稳定的 Co/Th 值,平均为 1.32,而 La/Sc 的值较高,多数大于 2。样品分布区域在长英质火山岩和安山岩之间,反映源岩以长英质岩为主,并有安山质岩石的混入。

在指示沉积物源区的指标中,稀土元素模式是最可靠的指标。源自上地壳的稀土元素具有富集轻稀土元素、重稀土元素含量稳定和 Eu 具负异常等特征。如果组成泥岩的碎屑母岩源自上地壳,泥岩中稀土元素的分布形态应与上地壳中稀土元素相一致(Taylor and McLennan, 1985)。库车坳陷第三系各组地层的砂岩经球粒陨石平均值标准化后,稀土元素分布表现为富轻稀土元素、重稀土元素含量均一、Eu 元素具明显的负异常(图 4),这与上地壳中稀土元素的分布形态几乎完全一致。所以,研究区第三系沉积岩的原始物质应来自于上地壳。

6 泥岩地球化学对物源区构造背景的指示

基于对砂岩的研究,前人已总结出板块构造环境碎屑岩化学组成特征的一系列判别图解(Bhatia,

表 2 库车坳陷第三系泥岩微量元素比值

Table 2 Trace element ratios of Tertiary mudstones from Kuqa depression

库车组	UCC ^a	LUC ^a	OC ^a		硅质砂岩 ^b	基性砂岩 ^b	库姆格列木组苏维依组	吉迪克组	康村组	
La/Sc	2.7	0.3	0.1	2.5~16	0.4~1.1	3.14	2.33	2.5	2.46	3.28
Th/Sc	0.97	0.029	0.935	0.84~20.5	0.05~0.22	0.59	0.75	0.81	0.83	1.03
Th/Co	1.07	0.030	0.005	0.67~19.4	0.04~1.4	0.49	0.74	0.80	0.80	1.08
Th/Cr	0.31	0.005	0.001	0.13~2.7	0.018~0.046	0.09	0.15	0.15	0.16	0.21

a—据 Cullers 等(1988); b—据 Girty 等(1993)

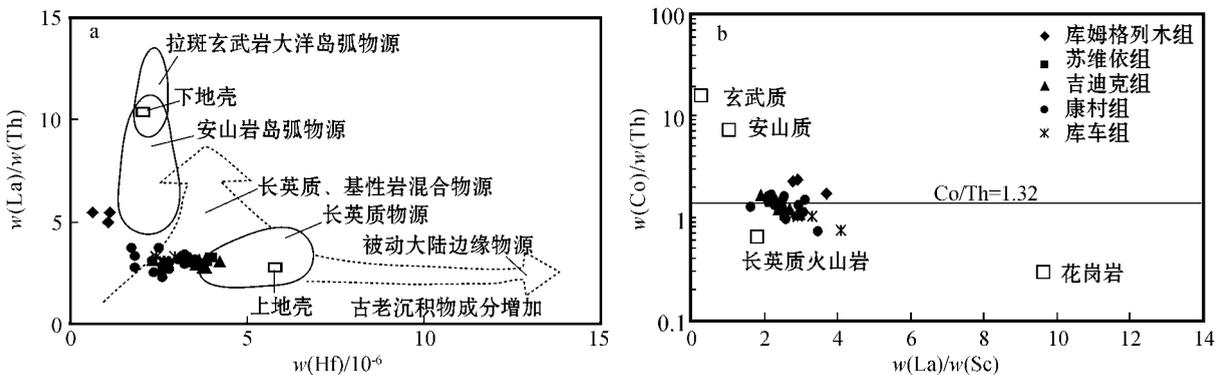


图 6 库车坳陷第三系泥岩物源属性判别图

Fig. 6 Discrimination diagram for provenance attribute of Tertiary mudstone in Kuqa depression

a—据 Floyd and Leveridge(1987); b—据 Gu 等(2002)

a—after Floyd and Leveridge(1987); b—after Gu *et al.*(2002)

1983,1985 ;Bhatia and Crook ,1986 ;Roser and Korsch ,1986 ,1988)。通常细碎屑岩(粉砂岩和泥、页岩)与其相伴生的砂岩往往具有相同的物源和沉积构造背景,因而具有相似的地球化学特征(Roser 和 Korsch ,1986)。在 Roser and Korsch(1986)提出的 K_2O/Na_2O-SiO_2 图解上,几乎所有的数据点都落在岛弧区域(图 7)。在非迁移性微量元素 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 组成的构造背景判别图上,几乎所有的样品点都落在大陆岛弧范围内(图 8)。Bhatia 等(1986)指出,形成于大陆岛弧构造背景的主要盆地有弧间盆地、弧后盆地和弧前盆地,邻近盆地的地壳性质是岛弧形成并发育良好的大陆壳或是变薄的大陆边缘,源区类型属于切割弧到再造山旋回带。李忠等(2004)通过对砂岩组分的统计认为,库车坳陷白垩-第三纪的物源区构造属性为“混合造山带”,受岛弧和碰撞造山冲断的多重影响,这一结论与南天山现今岩石组合和构造特征基本吻合。本次研究

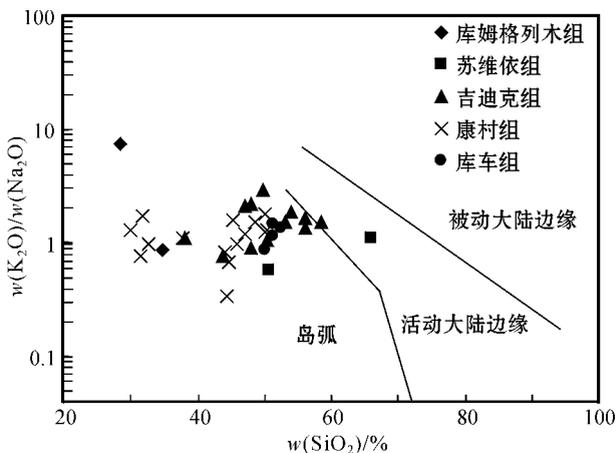


图 7 库车坳陷第三系泥岩主量元素对构造背景的指示(据 Roser 和 Korsch ,1986)
Fig. 7 The indication of major elements in Tertiary mudstones of Kuqa depression to tectonic setting (after Roser and Korsch ,1986)

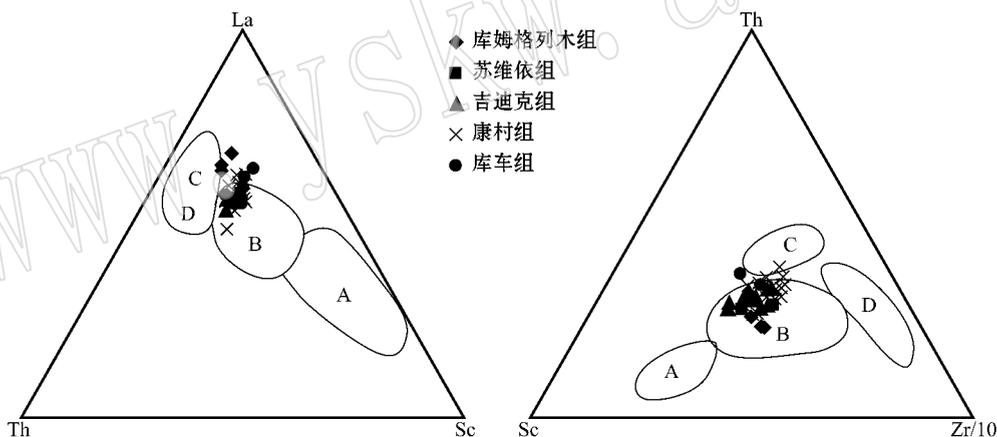


图 8 库车坳陷第三系泥岩微量元素对构造背景的指示(据 Bhatia 和 Crook ,1986)
Fig. 8 The indication of trace elements in Tertiary mudstones of Kuqa depression to tectonic setting (after Bhatia and Crook ,1986)
A—大洋岛弧 ; B—大陆岛弧 ; C—活动大陆边缘 ; D—被动大陆边缘
A—oceanic island arc ; B—continental island arc ; C—active continental margin ; D—passive continental margin

通过微量元素确定的类似于岛弧构造背景应该是指库坳陷物源区源岩形成时的构造背景,因为现今的南天山是古生代塔里木板块与伊犁中天山板块碰撞增生的结果,中生代库车坳陷的沉积是在板内构造运动的背景下形成的,它的物源区除了已存在的古生代岛弧以外,没有新的弧出现,只有地层的变形和变质。这就进一步深化了对砂岩组分不能揭示的一些问题的认识,同时也证明了造山带沉积岩岩石地球化学特征具有构造背景的继承性,特别是表现

在非迁移性元素中,这与李双应等(2004)的认识是一致的。

7 结论

(1)通过泥岩全岩地球化学,特别是 CO_2 与各类元素含量的对比分析认为,库车坳陷第三系物源区存在大量的碳酸盐岩,这些碳酸盐岩以继承碎屑的形式富集于沉积岩中,受其影响研究区泥岩的主

量(除 CaO 外)微量及稀土元素总量偏低,对源区指示可靠的地球化学指标主要反映了岩石中碎屑组分的源区背景。

(2) 主量元素风化趋势和非迁移性微量元素比值表明,库车坳陷第三系源区主要由长英质岩石和安山岩组成,稀土元素分布模式与上地壳相似,轻稀土元素富集, E_{U} 负异常,说明源岩来自上地壳并接受了壳内分异作用的影响。

(3) 由于造山带周缘盆地碎屑岩岩石地球化学具有构造背景的继承性,一些非迁移性元素所揭示的源区构造背景为造山带岩石形成时的古地理特征,库车坳陷第三系泥岩地球化学特征揭示其源区构造背景具有类似于岛弧的特征。

致谢 野外工作得到中石油塔里木油田分公司宋文杰副总经理的大力支持,研究生张然和彭守涛参加了野外取样,全岩分析得到了中科院地质所肖举乐研究员、李禾和靳新娣高级工程师的帮助,在此一并表示衷心的感谢!

Reference

Bally A W and Snelson S. 1980. Realms of subsidence[A]. Miall A D. Facts and Principles of World Petroleum Occurrence[C]. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir , 6 : 9~94.

Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. Journal of Geology , 91 : 611~627.

Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudstones : Provenance and tectonic control[J]. Sedimentary Geology , 45 : 97~113.

Bhatia M R and Crook K W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 92 : 181~193.

Carroll A R , Graham S A , Hendrix M S , *et al.* 1995. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China : Sedimentary record of the northern Tarim , northwestern Turpan , and southern Junggar basins[J]. Geological Society of America Bulletin , 107 : 571~594.

Cullers R L. 1995. The controls on the major and trace elements evolution of shales , siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region , Colorado , U. S. A [J]. Chemical Geology , 123 : 107~131.

Cullers R L. 2002. Implications of elemental concentrations for provenance , redox conditions and metamorphic studies of shales and limestones near Puerblo , Co , USA [J]. Chemical Geology , 191 : 305~327.

Cullers R L , Basu A and Suttner L. 1988. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the

Tobacco Root batholith , Montana , USA [J]. Chem. Geol. , 70 : 335~348.

Feng R and Kerrich R. 1990. Geochemistry of fine grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt , Canada : Implications for provenance and tectonic setting[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 54 : 1061~1081.

Floyd P A and Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of Devonian Gramscatho basin , South Cornwall : Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. Geological Society of London Journal , 144 : 531~542.

Fralick P W and Kronberg B I. 1997. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources[J]. Sediment Geol , 113 : 11~24.

Gao Changlin , Cui Kerui , Qian Yixiong , *et al.* 1993. Microplate Tectonics in the Tianshan and the Northern Tarim Basin [M]. Beijing : Geological Publishing House , 229~270 (in Chinese).

Gao Jun , He Guoqi , Li Maosong , *et al.* 1995. The mineralogy , petrology , metamorphic P-T-t trajectory and exhumation mechanism of blueschists , South Tianshan , northwestern China [J]. Tectonophysics , 250 : 151~16.

Girty G H , Hanson A D , Yoshinobu A S , *et al.* 1993. Provenance of Paleozoic mudstones in a contact metamorphic aureole determined by rare earth element , Th , and Sc analyses , Sierra Nevada , California [J]. Geology , 21 : 363~66.

Graham S A , Hendrix M S , Wang L B , *et al.* 1993. Collisional successor basins of western China : Impact of tectonic inheritance on sand composition[J]. Geological Society of America Bulletin , 105 : 323~344.

Gu X X. 1994. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys-turbidites in the northwestern Sichuan , China : Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 58 : 4615~4631.

Gu X X , Liu J M , Zheng M H , *et al.* 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan , South China : Geochemical evidence [J]. Journal of Sedimentary Research , 72 : 393~407.

He Dengfa and Li Desheng. 1996. Tectonic Evolution and Oil-Gas in Tarim Basin [M]. Beijing : Geological Publishing House , 44~67 (in Chinese).

Hendrix M S. 2000. Evolution of Mesozoic sandstone compositions , southern Junggar , northern Tarim , and western Turpan basins , Northwest China : A detrital record of the ancestral Tian Shan [J]. Journal of Sedimentary Research , 70(3) : 520~532.

Li Shuangying , Li Renwei , Yue Shucang , *et al.* 2004. Geochemistry of Mesozoic detrital rocks and its constrains on provenance in Feixi basin , Anhui Province [J]. Acta Petrologica Sinica , 20 : 667~676 (in Chinese with English abstract).

Li Zhong , Wang Daoxuan , Lin Wei , *et al.* 2004. Mesozoic-Cenozoic clastic composition in Kuqa depression , northwest China : Implication for provenance types and tectonics attributes [J]. Acta Petrologica Sinica , 20(3) : 655~666 (in Chinese with English abstract).

Li Zhong , Wang Qingchen , Wang Daoxuan , *et al.* 2003. Depositional

- record constraints on Late Cenozoic uplift of Tian Shan and tectonic transformation in Kuqa depression, West China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 38~45 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing, Wang Zongxiu, Jin Xiaochi, *et al.* 2004. Evolution, chronology and depositional effect of uplifting in the eastern sector of the Tian Shan Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78: 319~331 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huafu, Chen Chuming, Liu Zhihong, *et al.* 2000. The structural featyres and origin of the Kuqa rejuvenation foreland and thrust belt [J]. *Acta Petroleum Sinica* 21(3): 18~24 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [A]. Johnson M J and Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments [C]. Geological Society of America, Boulder, CO, 21~40.
- Roser B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio [J]. *Journal of Geology*, 94: 635~650.
- Roser B P and Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data [J]. *Chemical Geology*, 67: 119~139.
- Shao Lei, Statterger K and Li Wenhou. 1997. Discussion on tectonic setting of basin with geochemistry of sandstones [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(9): 985~988 (in Chinese).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. *Geoscience Texts* Blackwell Scientific Publications, 312.
- Wu Shimin, Lu Huafu, Ma Ruishi, *et al.* 1995. Classification of tectonic facies and their evolutionary features in the west Tianshan mountains [J]. *Regional Geology of China*, 14(2): 149~159 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Nie S, Craig P, *et al.* 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan [J]. *Tectonics*, 17(1): 1~27.

附中文参考文献

- 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 等. 1993. 天山微板块构造与塔北盆地 [M]. 北京: 地质出版社, 229~270.
- 何登发, 李德生. 1996. 塔里木盆地构造演化与油气 [M]. 北京: 地质出版社, 44~67.
- 李双应, 李任伟, 岳书仓, 等. 2004. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约 [J]. *岩石学报*, 20: 667~676.
- 李忠, 王道轩, 林伟, 等. 2004. 库车坳陷中-新生界碎屑组对物源类型及其构造属性的指示 [J]. *岩石学报*, 20(3): 655~666.
- 李忠, 王清晨, 王道轩, 等. 2003. 晚新生代天山隆升与库车坳陷构造转换的沉积约束 [J]. *沉积学报*, 21(1): 38~45.
- 柳永清, 王宗秀, 金小赤, 等. 2004. 天山东段晚中生代-新生代隆升沉积响应、年代学与演化研究 [J]. *地质学报*, 78: 319~331.
- 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 等. 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因 [J]. *石油学报*, 21(3): 18~24.
- 邵磊, Statterger K, 李文厚. 1997. 从砂岩地球化学探讨盆地构造背景 [J]. *科学通报*, 43(9): 985~988.
- 吴世敏, 卢华复, 马瑞士, 等. 1995. 西天山一带大地构造相划分及其演化特征 [J]. *中国区域地质*, 14(2): 149~159.