

doi: 10.12029/gc20160611

刘文, 吴春明, 吕新彪, 等. 库鲁克塔格早寒武世泥质岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1999–2010.

Liu Wen, Wu Chunming, Lv Xinbiao, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Early Cambrian argillaceous rocks in Kuruk Tag, Xinjiang[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 1999–2010(in Chinese with English abstract).

库鲁克塔格早寒武世泥质岩的地球化学特征 及其地质意义

刘 文¹ 吴春明² 吕新彪³ 杨恩林³ 王祥东³ 汪一凡² 吴建亮¹

(1. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:通过对且干布拉克地区西山布拉克组泥质岩岩石学、地球化学特征的研究,探讨其物源特征、风化作用以及沉积盆地的构造环境。且干布拉克大坂剖面泥质岩 Al_2O_3/TiO_2 、 Th/Sc 、 $(Gd/Yb)_N$ 、 $(Eu/Eu^*)_N$ 、ICV、CIA 均值分别为 24、0.9、1.1、0.6、1.2、70, 莫合尔山剖面泥质岩 Al_2O_3/TiO_2 、 Th/Sc 、 $(Gd/Yb)_N$ 、 $(Eu/Eu^*)_N$ 、ICV、CIA 均值分别为 10.5、0.2、3.5、1.01、2.8、75。这些特征表明,研究区泥质岩为第一次沉积的沉积物,源区母岩主要以岩浆岩为主。且干布拉克大坂剖面泥质岩的源区母岩主要以南部的花岗岩等长英质岩浆岩为主,沉积于陆内较稳定的构造环境;莫合尔山剖面泥质岩的源区母岩主要以北部玄武岩等中基性岩浆岩为主,沉积于陆内火山岩隆起的构造环境。在诺丁尼亚超大陆裂解的大构造背景下,早寒武世早期莫合尔山的裂解作用比且干布拉克大坂更为强烈。CIA 值表明且干布拉克地区泥质岩物源区母岩经历了中等程度的化学风化作用,沉积物沉积时气候较温暖、湿润,早寒武世早期位于 $30^{\circ}S$ 左右的低纬度地区。且干布拉克大坂剖面的含钒炭质硅质页岩、莫合尔山剖面的铁质磷质岩的元素地球化学特征暗示了磷、钒等成矿元素与可能来自于震旦纪和寒武纪的中基性火山岩。

关键词:泥质岩;岩石学;地球化学;库鲁克塔格

中图分类号:P588.22 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)06-1999-12

Geochemical characteristics and geological significance of Early Cambrian argillaceous rocks in Kuruk Tag, Xinjiang

LIU Wen¹, WU Chun-ming², LV Xin-biao³, YANG En-lin³,
WANG Xiang-dong³, WANG Yi-fan², WU Jian-liang¹

(1. Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Faculty of Resource Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

收稿日期:2015-11-02;改回日期:2016-02-01

基金资助:“十二五”国家科技支撑计划“新疆 305 项目(2011BAB06B04-05)”资助。

作者简介:刘文,男,1990 年生,硕士,从事区域地质、矿产地质调查工作;E-mail:liuwen2009.hi@163.com。

通讯作者:吕新彪,男,1962 年生,教授,博士生导师,从事矿床学、矿产普查与勘探研究;E-mail:lvxb_01@126.com。

Abstract: Systematic analysis of petrology and geochemistry of Xishanbulake Formation argillaceous rocks in Tseganbrank was made in this study. The purpose of this paper is to discuss sediment provenance, weathering and tectonic setting of sedimentation basin. The ratios of Al_2O_3/TiO_2 , Th/Sc, $(Gd/Yb)_N$, $(Eu/Eu^*)_N$, ICV, CIA of argillaceous rocks in Qieganbulakedaban are 24, 0.9, 1.1, 0.6, 1.2, 70 respectively, while these ratios in Moheershan are 10.5, 0.2, 3.5, 1.01, 2.8, 75 respectively. These characteristics indicate that all of argillaceous rocks tended to occur in first-cycle deposit. The source rock of argillaceous rocks in Qieganbulakedaban were granitoids formed in a stable intracontinental environment, whereas the source rock of them in Moheershan were basic-intermediate magmatic rocks formed in a volcanic uplift environment. Under the tectonic setting of Rodinia Supercontinent cracking, the cracking of Moheershan was stronger than Qieganbulakedaban. The CIA in the study area demonstrates that the source region of argillaceous rocks suffered from medium degree chemical weathering which reflects a warm and moist climate located in 30°S. The CIA characteristics of vanadium-bearing carbonaceous shales and phosphorite suggest that the sources of vanadium and phosphorus were connected with basic-intermediate magmatism in Sinian and Cambrian.

Key words: argillaceous rocks; petrology; geochemistry; Kuruk Tag

About the first author: LIU Wen, male, born in 1990, master, engages in research on regional and mineral geology; E-mail: liuwen2009.hi@163.com.

Fund Support: Supported by National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Deviocl "Xinjiang 305 Program (No. 2011BAB06B04-05)".

近年来,沉积岩的地球化学组成被广泛用于研究沉积岩的物源^[1-2]、源区风化作用与古气候^[3-4]、沉积物的分选与成岩过程^[5]、重建沉积盆地的构造环境^[6-8]、大陆地壳的成分组成与演化^[9]。在全球范围内,泥质岩的化学组成可以反映大陆地壳的平均成分^[10]。大多数泥质岩形成于特定构造背景下的局限盆地,可以反映源区母岩的物质组成^[11]。基性元素(如 Sc、Cr、Co)、酸性元素(如 La、Th、REE)、稀土配分模式、铍异常值等参数可用于分析泥质岩的物源和构造环境^[12]。迄今为止,前人对且干布拉克地区早寒武世西山布拉克组的岩性序列、岩相特征、古生物有较多的研究^[13-15],但未开展对该组泥质岩元素地球化学方面的研究。本文运用元素地球化学的手段研究了西山布拉克组泥质岩的物源特征、风化作用以及沉积盆地的构造环境,试图从沉积物物源和盆地构造环境方面提取其沉积时期的古气候与古构造信息。

1 区域地质特征

且干布拉克地区西山布拉克组泥质岩在且干布拉克大坂—莫合尔山一带均有分布,大地构造位置上归属于库鲁克塔格地块。库鲁克塔格地块位于塔里木盆地东北缘,西北邻接南天山褶皱系,东邻中天山地块及北山褶皱系,南部为塔里木盆地坳陷带,为塔里木板块的一部分(图 1-b)。其北界为辛格尔断裂,南界为孔雀河断裂。

受震旦纪—早寒武世区域板块构造张裂活动

的影响,在塔里木板块的东北部发育有库鲁克塔格—满加尔拗拉槽,为一向西弧形凸出,向东开口的 U 形拗拉槽,发育酸性和基性双峰式火山岩^[16]。早寒武世库鲁克塔格裂陷槽作为库鲁克塔格—满加尔拗拉槽的一部分,向东开口,走向北西西,为补偿不足的深水海槽盆地^[17]。根据野外的岩性组合特征,建立了且干布拉克地区西山布拉克组地层柱状对比图(图 1-d)。且干布拉克大坂剖面由老到新可分为 3 个岩性段:第一岩性段,位于该组的底部,岩性主要为硅质岩夹粉砂质泥岩以及少量的玻屑凝灰岩;第二岩性段位于该组的中部,岩性主要为硅质岩与粉砂质页岩、炭质页岩互层,该岩性段部分层位钒较富集,金属钒主要富集在粉砂质页岩、炭质页岩中;第三岩性段位于该组的上部,岩性主要为炭质页岩、细砂岩夹硅质岩,该岩性段中含钒层主要出现在炭质页岩中,金属钒富集的层位往往伴随有薄层硅质岩的产出。该剖面中 3 个岩性段的岩性组合均指示海水较深的沉积环境。莫合尔山剖面由老到新可以分为两个岩性段,第一岩性段相当于且干布拉克大坂剖面第一、二岩性段,第二岩性段相当于且干布拉克大坂剖面第三岩性段。该剖面第一岩性段为铁质磷质岩、安山岩、硅质岩、硅质灰岩、粉砂质泥岩的岩性组合,该岩性段火山岩厚度较大,与上下地层均为整合接触,表明在沉积过程中火山活动强烈,为浅水环境;第二岩性段为页岩、粉砂岩、硅质岩、硅质灰岩的岩性组合,岩石颜色由灰

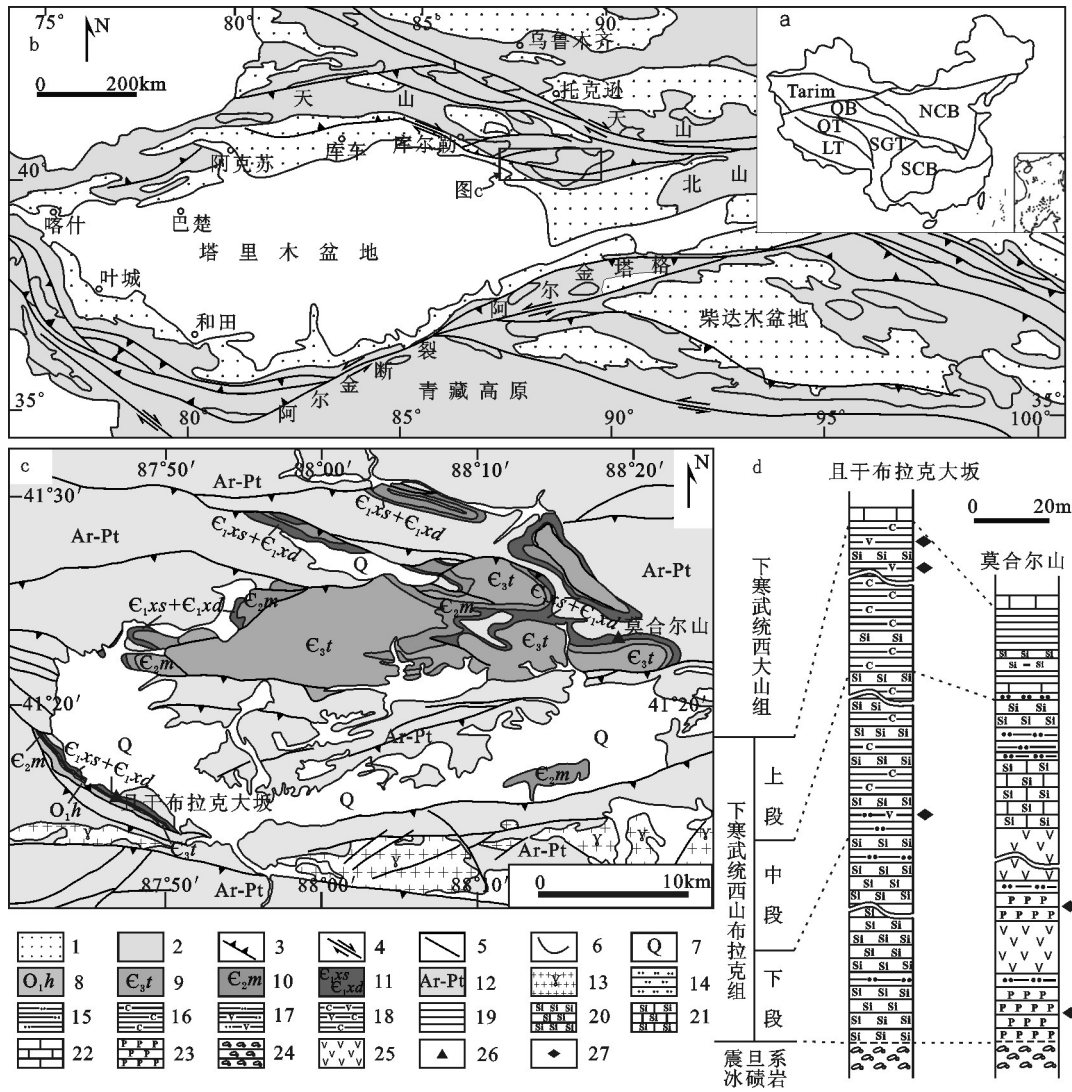


图1 研究区大地构造位置图、地质图及岩性柱状图

a—中国主要构造单元;b—塔里木及周缘地区构造简图(据文献[18]);c—且干布拉克地区地质图(据1:20万地质图);d—西山布拉克组岩性柱状图;Tarim—塔里木盆地;NCB—华北板块;SCB—华南板块;SGT—松潘甘孜地体;QB—柴达木盆地;QT—羌塘地体;LT—拉萨地体;1—新生代沉积盆地;2—前寒武纪-古生代岩石;3—逆冲断层;4—平移断层;5—性质不明断层;6—地质界线;7—全新世沉积物;8—奥陶系;9—上寒武统突尔沙克塔格组;10—中寒武统莫合尔山组;11—下寒武统西山组和西山布拉克组;12—前寒武系;13—花岗岩体;14—粉砂岩;15—粉砂质泥岩;16—炭质页岩;17—含钒粉砂质泥岩;18—含钒炭质页岩;19—页岩;20—硅质岩;21—硅质灰岩;22—灰岩;23—铁质磷质岩;24—冰碛岩;25—安山岩;26—剖面及采样位置;27—矿化层

Fig.1 Simplified tectonic map, geological map of the study area and lithologic columnar section

a—Main tectonic elements of China; b—Simplified tectonic map of the Tarim Block and its surrounding areas in northwest China (after reference [17]); c—Geological map of Tseganbrak (after 1:200 000 Geological Map); d—Lithologic column of Xishanbulake Formation; Tarim—Tarim Basin; NCB—North China Block; SCB—South China Block; SGT—Songpan-Ganzi terrane; QB—Qaidam basin; QT—Qiangtang terrane; LT—Lhasa terrane; 1—Cenozoic sedimentary basin; 2—Precambrian-Palaeozoic rocks; 3—Thrust fault; 4—Strike-slip fault; 5—Unknown nature fault; 6—Geological boundary; 7—Holocene Sediments; 8—Ordovician; 9—Tuershaketage Formation of Upper Cambrian; 10—Moheershan Formation of Middle Cambrian; 11—Xidashan Formation and Xishanbulake Formation of Lower Cambrian; 12—Precambrian; 13—Granite; 14—Siltstone; 15—Silty mudstone; 16—Carbonaceous shale; 17—Vanadium-bearing silty mudstone; 18—Vanadium-bearing carbonaceous shale; 19—Shale; 20—Chert; 21—Siliceous limestone; 22—Limestone; 23—Phosphorite; 24—Tillite; 25—Andesite; 26—Sampling location; 27—Mineralized layer

黑色与棕黄色相互交替变化,指示沉积时沉积物—海水界面氧化还原状态交替变化的过程。

本次研究的样品采自且干布拉克地区且干布拉克大坂剖面 and 莫合尔山剖面,按照从剖面底部到顶部逐层采样的原则进行样品采集,岩性包括粉砂质泥(页)岩、炭质页岩、含钒炭质硅质页岩、粉砂岩、铁质磷质岩。

炭质页岩、含钒炭质硅质页岩:黑色、泥质结构、页理状构造(图2-a、2-b)。与粉砂质页岩的特征基本一致。不同的是岩石中有机质含量更多,岩石主要由有机质、泥质、硅质组成。其中有机质泥质呈微粒分散状、成岩后形成不规则的团块状,或有机质与泥质相间排列构成微细层理。含钒炭质硅质页岩与炭质页岩在镜下没有明显的差异,肉眼很难区分。

粉砂质泥岩:灰黑色,粉砂质泥质结构,层状构造(图2-c、2-d)。由高岭石(70%)、金属矿物(10%)、微晶石英(15%)、粉砂岩岩屑(5%)组成。高岭石呈极细质点,金属矿物呈粉尘状和颗粒状,微晶石英则均匀分布于高岭石和金属矿物的空隙中。

2 样品采集与测试方法

所有样品经手工粉碎至200目后,在广州澳实矿物实验室进行主量元素、微量元素以及稀土元素的分析。主量元素用X荧光光谱仪测定,微量元素用等离子体发射光谱仪测定,稀土元素用等离子质谱仪测定。

3 测试结果

研究区主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表1。整体上,且干布拉克大坂剖面泥质岩 SiO_2 含量较高,为51.26%~88.40%,均值75%, CaO 、 Fe_2O_3 的含量相对较低,均值分别为0.97、3.9;莫合尔山剖面泥质岩 SiO_2 含量相对较低,为16.55%~56.05%,均值38.2%, CaO 、 Fe_2O_3 的含量相对较高,均值分别为9.62、16.9。在且干布拉克大坂剖面中含钒炭质硅质页岩与其它泥岩在 MnO 的含量上也存在明显差异,含钒炭质硅质页岩 MnO 含量明显高于泥质岩。且干布拉克大坂剖面泥质岩 Al_2O_3 含量变化范围(2.61%~9.20%)较莫合尔山剖面小(2.01%~

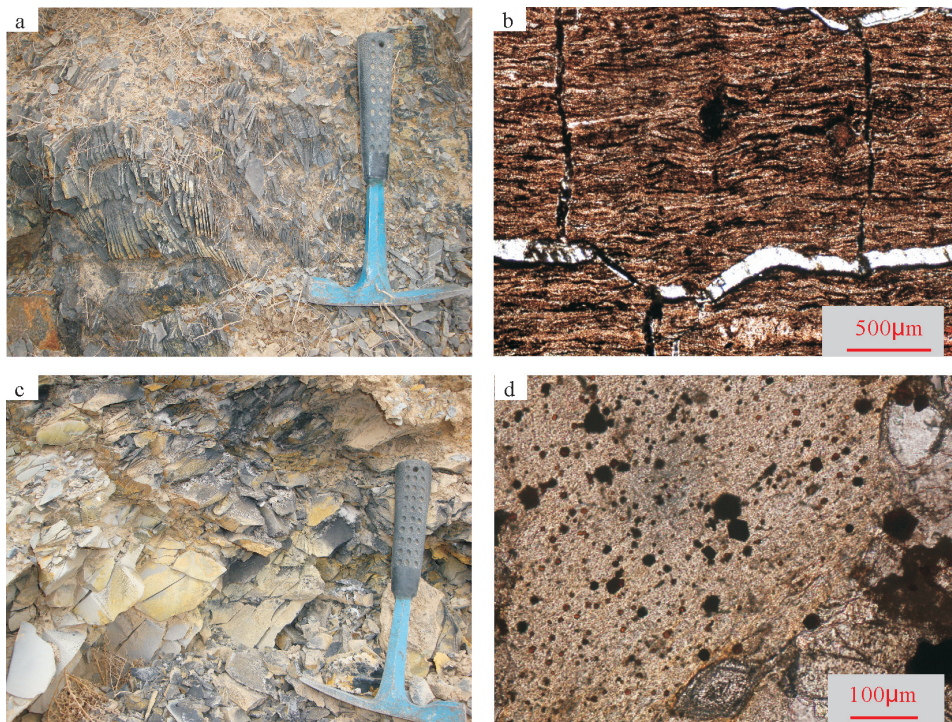


图2 野外露头及镜下照片

a—炭质页岩露头;b—炭质页岩镜下照片(单偏光);c—粉砂质泥岩露头;d—粉砂质泥岩镜下照片(单偏光)

Fig.2 Outcrops and characteristics under microscope

a—Outcrops of carbonaceous shale; b—Carbonaceous shale (plainlight); c—Outcrops of silty mudstone; d—Silty mudstone (plainlight)

表1 研究区泥质岩的主量元素(%)、微量元素和稀土元素(10⁻⁶)分析结果
Table 1 Analyses of main elements, trace elements and REE of argillaceous rocks

样品号	QGBLK6	QGBLK7	QGBLK8	QGBLK9	QGBLK10	QGBLK11	QGBLK12	xds02	xds03	xds05	xds07	xds08
岩性	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩	含钒炭质硅质页岩	含钒炭质硅质页岩	炭质页岩	铁质磷质岩	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩	粉砂岩	粉砂质页岩
Al ₂ O ₃	8.80	2.61	9.20	8.87	2.61	2.84	4.12	2.01	13.55	14.82	4.92	6.03
BaO	3.04	0.83	0.71	0.93	0.12	0.12	0.30	0.33	0.12	0.13	0.04	0.06
CaO	0.12	0.18	0.38	0.16	0.56	0.82	4.60	3.31	8.00	6.39	5.63	24.77
Cr ₂ O ₃	0.07	<0.01	0.03	0.02	0.06	0.06	0.01	0.02	0.06	0.05	0.01	0.01
Fe ₂ O ₃	12.19	0.72	3.58	2.40	3.15	4.61	0.99	29.94	9.45	11.10	22.76	11.07
K ₂ O	2.85	0.77	2.14	2.40	0.43	0.57	1.00	0.67	0.63	0.69	0.37	0.57
MgO	0.47	0.24	0.40	0.73	0.20	0.28	3.02	0.11	8.63	8.45	0.44	7.42
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.51	0.48	0.02	0.08	0.13	0.1	0.05	0.19
Na ₂ O	0.82	0.27	0.77	0.41	0.55	2.22	0.16	1.31	1.24	0.45	0.55	0.55
P ₂ O ₅	0.25	0.04	0.94	0.15	0.85	0.76	0.20	8.27	0.61	0.80	0.12	0.40
SiO ₂	51.26	88.40	70.10	75.29	85.10	79.20	75.80	34.54	41.74	42.22	56.05	16.55
SrO	0.06	0.02	0.08	0.02	0.20	0.14	0.02	0.34	0.09	0.07	0.02	0.04
TiO ₂	0.61	0.60	0.38	0.49	0.06	0.07	0.18	0.09	1.68	2.16	0.60	0.84
LOI	17.60	4.72	10.76	7.95	4.35	6.20	8.46	17.55	14.10	12.75	8.36	30.50
Total	98.14	100.90	105.65	99.82	100.55	102.35	99.76	98.57	100.03	100.2	99.92	99.00
Ba	>10 000	830	140	9710	1 070	1 080	2 360	3 160	1 040	1 210	287	519
Cr	470	36	158	130	375	426	66	110	500	440	60	50
Ga	14.8	10.0	20.0	14.2	10.0	10.0	10.0	5.6	18.0	19.6	5.9	8.9
Sr	572.0	145.0	634.0	190.5	1 810.0	1 275.0	230.0	2 980.0	782.0	638.0	169.5	413.0
Th	9.91	10.00	11.00	7.53	1.00	2.00	3.00	1.91	2.99	4.30	1.15	1.37
U	22.50	3.80	8.40	3.37	53.80	53.50	8.30	27.10	1.13	1.49	6.40	0.90
V	929	52	169	164	3 150	3 710	177	496	189	173	104	52
Zr	96	148	148	148	74	74	74	103	247	338	73	166
Ag	7.3	3.7	3.5	3.0	8.0	5.8	1.4	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
As	128	8	28	11	399	463	7	92	5	<5	181	<5
Cd	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	2.1	1.9	0.7	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Co	3	102	25	11	170	164	19	17	40	47	110	6
Cu	136	67	124	84	455	371	83	37	54	37	65	10
Mo	285	5	8	4	129	213	6	94	2	2	202	2
Ni	38	1	3	2	389	369	10	71	222	226	590	35
Pb	22	12	28	11	20	24	8	113	4	<2	42	3
Sc	36	5	8	10	3	3	4	6	23	20	7	4
Y	18.2	26.5	29.5	27.3	90.3	73.6	37.4	31.3	20.5	23.6	6.0	6.7
La	18.3	64.0	67.5	45.1	16.2	19.4	24.5	53.2	31.6	44.5	4.4	18.4
Ce	38.5	92.1	120.0	66.5	16.7	18.3	29.7	47.4	67.6	93.2	10.3	39.7
Pr	4.28	13.20	14.40	9.30	4.40	4.70	4.90	8.63	7.77	10.55	1.18	4.60
Sm	3.83	6.90	6.30	4.60	6.20	4.40	3.70	5.37	6.49	8.19	1.15	3.94
Eu	0.55	1.20	1.20	0.83	1.60	1.10	0.90	1.37	1.91	2.23	0.50	1.34
Gd	3.45	4.70	4.80	4.03	9.50	7.00	4.50	5.03	5.45	7.04	1.21	2.94
Tb	0.51	0.70	0.70	0.62	1.50	1.10	0.70	0.66	0.80	0.86	0.18	0.38
Dy	3.01	4.30	4.30	3.76	9.80	7.80	4.50	3.85	4.39	5.03	1.11	1.73
Tm	0.31	0.50	0.50	0.41	1.10	0.90	0.50	0.35	0.30	0.29	0.06	0.07
Yb	2.26	3.30	3.70	3.04	7.10	6.10	3.20	2.21	1.67	1.95	0.32	0.34
Lu	0.35	0.50	0.60	0.48	1.00	0.90	0.40	0.33	0.25	0.26	0.06	0.05
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.32	0.30	0.23	0.27	0.16	0.20	0.24	0.33	0.05	0.05	0.08	0.09
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	14.43	4.35	24.21	18.10	43.50	40.57	22.89	22.33	8.07	6.86	8.20	7.18
CIA	66.29	64.88	71.97	72.83	65.57	38.86	71.91	41.10	74.00	86.93	69.00	71.30
ICV	1.62	0.89	0.60	0.60	1.16	2.35	1.43	6.31	1.47	1.21	2.12	2.66
Th/Sc	0.28	2.00	1.38	0.75	0.33	0.67	0.75	0.32	0.13	0.22	0.16	0.34
(Eu/Eu*) _n	0.66	0.92	0.95	0.85	0.89	0.84	0.96	1.16	1.41	1.29	1.86	1.72
(La/Yb) _n	0.78	1.88	1.77	1.44	0.22	0.31	0.74	2.33	1.83	2.21	1.33	5.24
(Ce/Ce*) _n	0.95	0.69	0.84	0.70	0.43	0.42	0.59	0.47	0.94	0.94	0.98	0.94
(Eu/Eu*) _N	0.45	0.61	0.64	0.58	0.64	0.60	0.67	0.79	0.96	0.88	1.29	1.16
(Gd/Yb) _N	1.24	1.15	1.05	1.07	1.08	0.93	1.14	1.84	2.64	2.93	3.06	7.01

注:QGBLK 为且干布拉克大坂剖面样品,xds 为莫合尔山剖面样品,从左至右代表从剖面底部到顶部的采集顺序,Fe₂O₃ 为全铁的含量,(Ce/Ce*)_n=2Ce_n/(La_n+Pr_n),(Eu/Eu*)_n=2Eu_n/(Sm_n+Gd_n),(Eu/Eu*)_N=2Eu_N/(Sm_N+Gd_N),其中 n 下角标为北美页岩标准化,N 下角标为球粒陨石标准化,北美页岩数据来自文献[20],球粒陨石数据来自文献[10]。

14.82%)。相对上地壳元素丰度值^[19]而言,研究区泥质岩中富集系数接近于1的元素有Ba、Sr、Pb,强烈富集的元素有Cr、U、V、As、Co、Cu、Mo、Ni,亏损的元素有Ga、Zr。W元素比较特殊,在且干布拉克大坂剖面中表现为富集,在莫合尔山剖面中表现为亏损。

西山布拉克组泥质岩稀土总量变化较大。且干布拉克大坂剖面 ΣREE 为 $94.61 \times 10^{-6} \sim 281.70 \times 10^{-6}$,均值 157×10^{-6} ;经北美页岩标准化,具有中等的Ce负异常, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_n$ 值为0.42~0.95,均值0.65, $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_n$ 最小值(0.42~0.43)位于钒矿化层,几乎无Eu异常, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_n$ 值0.66~0.95,均值0.86;不含矿的样品稀土元素分馏不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 均值1.30,矿化样品重稀土更富集, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 均值0.26。莫合尔山剖面 ΣREE 为 $26.00 \times 10^{-6} \sim 218.90 \times 10^{-6}$,均值 132×10^{-6} ;经北美页岩标准化,泥质岩 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_n$ 值0.94~0.98,均值0.95,无Ce异常, $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_n$ 值1.29~1.86,均值1.6,具弱的正Eu异常。

4 讨 论

4.1 构造环境判别

在 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 判别图解中,且干布拉克大坂剖面泥质岩投点位于被动陆源区域,莫合尔山剖面泥质岩投点位于岛弧区域(图3)。被动边缘沉积盆地包括大西洋型大陆裂谷、汇聚带后缘的大陆边缘盆地、板块内部的沉积盆地、夭折的裂谷、地堑带等区域。克拉通内部盆地形成于厚的大陆地壳之上,从属于被动陆缘的构造环境^[21]。因此,克拉通内的构造环境和被动陆缘的构造环境是可以通用的,两个专业术语均可用来表示稳定的构造环境。岛弧区的沉积作用可以在弧前盆地、弧后盆地、弧间盆地进行。但是,姜常义等通过对库鲁克塔格地区震旦纪—早寒武世火山岩研究认为,该地质历史时期中火山岩形成于板内伸展的构造环境,为大陆内部碱性玄武岩系列^[22]。综上,早寒武世且干布拉克大坂剖面泥质岩形成于陆内较稳定的构造环境,莫合尔山剖面泥质岩形成于陆内火山岩隆起的构造环境。

高场强元素如Th、Sc、Ti、Nb、Zr,保留了母岩的原始信息,可用于沉积盆地构造环境的判别^[6,24-25]。Girty et al.认为,被动陆缘泥质岩沉积物的物源来自古老的、分异的上地壳,沉积物具有高的Th/Sc比值(约为1);相反,泥质岩的Th/Sc比值小于1时代表

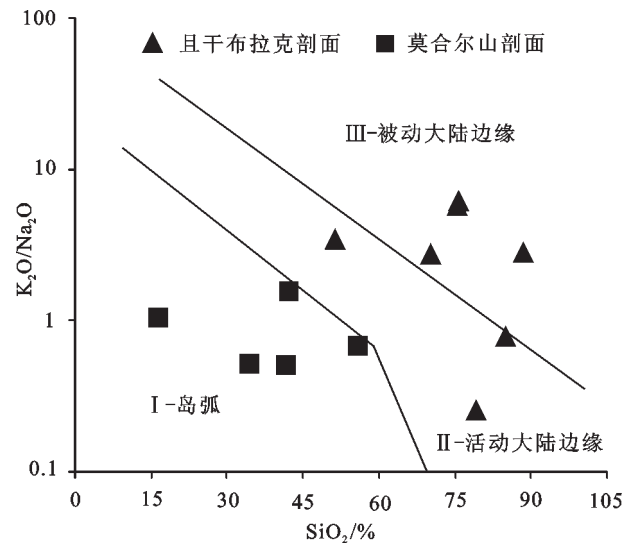


图3 研究区泥质岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 构造环境判别图解(底图据文献[23])

Fig.3 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram for tectonic setting (base map after reference [23])

均一的或很少分异的区^[26-27]。且干布拉克大坂剖面泥质岩Th/Sc均值0.9,具有被动陆缘沉积物源区的特征;莫合尔山剖面泥质岩Th/Sc均值0.2,小于1,指示很少分异的源区。

Bhatia and Crook(1986)通过对澳大利亚东部古生代浊积岩序列中杂砂岩微量元素的研究,建立了杂砂岩构造环境的La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10和Th-Sc-Zr/10判别图解^[6]。考虑到杂砂岩和泥质岩在微量元素的含量、分配上存在一定的差异,为了更准确地确定泥质岩的构造环境,Savoy et al.(2000)设计了泥质岩的La-Th-Sc判别图解^[27]。在该判别图中(图4),且干布拉克大坂泥质岩投点主要落于被动大陆边缘沉积物区域,为陆内较稳定的构造环境;莫合尔山泥质岩投点主要落于洋岛碱性玄武岩区域,结合研究区早寒武世所处的大地构造背景,这可能反应的是陆内火山岩隆起的构造环境。

此外,McLennan et al.(1990)提出被动陆缘沉积物和岩浆弧沉积物(包括岛弧、大陆边缘弧)Th/Sc比值、Zr/Sc比值有不同的演化趋势^[28]。岛弧环境下沉积的砂岩和泥岩投点与火成岩演化的趋势线一致,被动陆缘的沉积物投点与岛弧环境下沉积物投点的趋势线相交,具有Th/Sc比值较大,Zr/Sc比值变化范围较大的特点。在Th/Sc-Zr/Sc判别图中(图5),研究

区且干布拉克大坂剖面泥质岩投点与被动大陆边缘泥质岩趋势线一致,反映陆内较稳定的构造环境,莫合尔山剖面泥质岩投点与火成岩具有相同的演化趋势,考虑到早寒武世研究区岛弧并不发育,因此莫合尔山剖面样品趋势线代表的是陆内火山岩隆起的构造环境。这与早寒武世早期,库鲁克塔格地区地壳发生强烈的裂解作用,这种裂解作用形成了西山布拉克组火山岩、硅质岩、黑色泥(页)岩的岩石组合。且干布拉克大坂发育有火山碎屑岩,厚度较小,远离火山中心,构造环境较稳定;莫合尔山发育有安山岩,厚度较大,离火山活动中心较近,岩浆活动较强烈相一致。指示早寒武世早期莫合尔山的裂解作用比且干布拉克大坂更为强烈。

4.2 物源分析

成分变化指数(ICV)用于衡量碎岩原始成分的变化,判断碎屑岩是代表初始沉积的产物还是源于再循环的产物^[29]。ICV的计算公式为^[11,29]: $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$,公式中氧化物的单位均为摩尔,CaO*的摩尔含量是指硅酸盐组分中Ca的摩尔量。目前还没有

直接的方法区分和定量硅酸盐与非硅酸盐组分中Ca的摩尔含量。本文采用McLennan(1993)提出的鉴定硅酸盐中Ca/Na比值一定的间接方法计算样品中CaO*的含量,计算方法为:首先用样品中CaO的摩尔数减去P₂O₅的摩尔数得剩余的CaO摩尔数,如果剩余的CaO摩尔数大于Na₂O摩尔数,那么Na₂O摩尔数即为CaO*的摩尔数;如果剩余的CaO摩尔数小于Na₂O摩尔数,那么剩余的CaO摩尔数即为CaO*的摩尔数^[30]。如果剩余的CaO摩尔数小于零,即小于Na₂O摩尔数,将其CaO*的摩尔数以零计算。研究区样品未发生钾交代(详细讨论见下文),K₂O不需要进行钾校正。K₂O即为全岩中K的摩尔量。

对于非黏土质的硅酸盐矿物,ICV值具有组分浓度梯度:在Goldich的矿物稳定序列中,铁镁质等抗风化能力弱的碎屑矿物ICV值最大,抗风化能力中等的

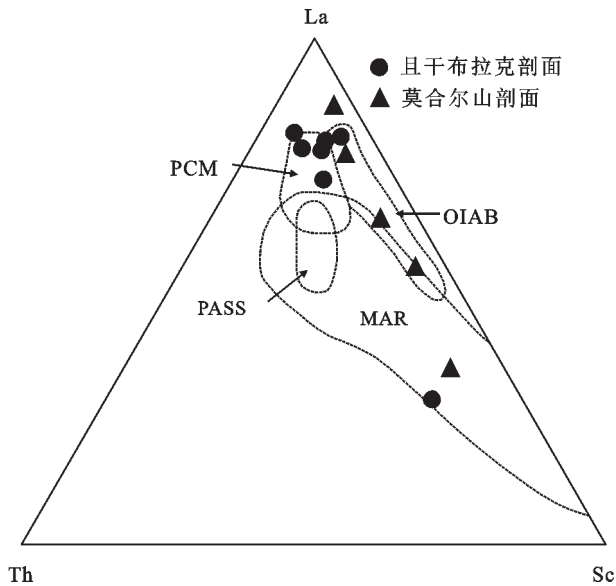


图4 泥质岩La-Th-Sc三角判别图(底图据文献[27])
PCM—被动大陆边缘沉积物;OIAB—洋岛碱性玄武岩;PASS—后太古宙澳大利亚页岩;MAR—与岩浆弧有关的沉积物
Fig. 4 La-Th-Sc diagram of argillaceous rocks (base map after reference [27])
PCM—Passive continental margin; OIAB—Ocean island alkalic basalt; PASS—Post-Archean Australian shale; MAR—Magmatic-Arc-Related

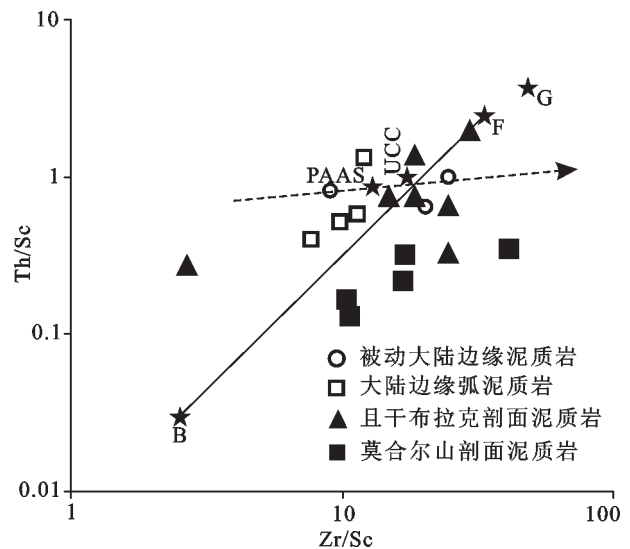


图5 研究区泥质岩Th/Sc-Zr/Sc判别图解(底图据文献[5])
黑色实线表示源区分别为铁镁质—长英质成分的母岩时,沉积物投点的趋势线;带箭头的虚线表示经沉积、分选、再循环过程沉积物中碎屑锆石含量的变化趋势;B—玄武岩;F—长英质火山岩;G—花岗岩平均值;UCC—平均上地壳;PAAS—澳大利亚后太古宙页岩。其中玄武岩、长英质火山岩、花岗岩平均值数据来源于文献[9],UCC和PAAS数据来源于文献[10]

Fig. 5 Th/Sc-Zr/Sc diagram of argillaceous rocks (base map after reference [5])
Solid line illustrates the trend expected in first-cycle sediments due to magmatic evolution from mafic to felsic end members; Arrow illustrates the trend produced by zircon concentration during sedimentary sorting and recycling; B—Basalt; F—Felsic volcanic rock; G—Average granite; UCC—Average upper crust; PAAS—Post-Archean Australian shale; Data of B, F, G after reference [9], UCC and PAAS after reference [10]

矿物ICV值有所减小。经风化作用形成的蒙脱石族矿物ICV值更低,ICV值在高岭石矿物中达到最小值,如高岭石的ICV值为0.03~0.05^[29,31]。由大量未经风化的细碎屑矿物组成的粉砂岩、泥岩的ICV值>1,相反由大量黏土矿物组成的粉砂岩、泥岩的ICV值<1^[31]。大多数陆相沉积岩的ICV值>1,代表第一次沉积的产物^[31],ICV值<1的沉积岩通常形成于风化作用较强、构造活动稳定的环境^[11]。且干布拉克大坂剖面ICV均值为1.2,莫合尔山剖面ICV均值为2.8,均大于1,说明研究区泥质岩为第一次沉积的沉积物,源区母岩主要以岩浆岩为主。

碎屑岩的 Al_2O_3/TiO_2 比值可用于推断沉积物源区母岩的化学成分,铁镁质端元火成岩的 Al_2O_3/TiO_2 值变化范围为3~8,铁镁质-长英质的过渡系列火成岩 Al_2O_3/TiO_2 值变化范围为8~21,长英质端元火成岩的 Al_2O_3/TiO_2 值变化范围为21~70^[32]。且干布拉克大坂剖面泥质岩的 Al_2O_3/TiO_2 均值24,指示源区母岩可能主要为长英质岩石;莫合尔山剖面泥质岩的 Al_2O_3/TiO_2 均值10.5,指示源区母岩可能为铁镁质向长英质过渡的中性、中酸性火成岩类。

应用Sc-Th图解可以识别出两类不同源区的母岩。一类是Th/Sc比值近于1,Th、Sc等不相容元素均较富集,具有典型大陆上地壳的特征;另一类则是Th/Sc值小于1,Sc元素相对富集,比值越小越具有铁镁质岩石的特征^[33]。在Th-Sc图解中(图6),且干布拉克大坂剖面样品的投点位于Th/Sc值近于1趋势线附近及左侧,指示沉积物源区母岩具有大陆上地壳的特征,母岩含有较多的硅铝质组分;莫合尔山剖面样品投点位于Th/Sc值等于0.2趋势线附近,暗示了其源区母岩有较多的铁镁质组分。

Taylor and McLennan(1985)提出,运用Th/Sc-La/Sc图解可以衡量沉积物源区地壳物质所占的比例^[33]。岩浆岩从基性-中性-中酸性-酸性,La/Sc值与Th/Sc值具有较好的正相关性,因此将沉积物中的相关比值与此值作比较,可以反映沉积物源区的母岩性质。且干布拉克大坂剖面泥质岩的投点位于酸性岩区域,指示源区母岩主要为花岗岩、流纹岩等酸性岩浆岩;莫合尔山剖面泥质岩的投点位于基性岩-中性岩浆岩之间,沉积物源既来自于长英质组分的岩石,也来自于铁镁质组分的岩石,具有混合源区的特征(图7)。

在地球演化初期,地壳中Gd含量较高,随着元素分馏作用的加强,Gd的含量越来越小,而Yb在地壳演化中含量变化较小,因此球粒陨石标准化 $(Gd/Yb)_N$ 比值随地层的变新而逐渐变小^[35]。沉积物的 $(Gd/Yb)_N$ 值以2为界, $(Eu/Eu^*)_N$ 值(球粒陨石标准化)以1为界,大于此值则物源以太古代岩石为主,小于此值则以后太古宙年轻地层为主^[36]。且干布拉克大坂泥质岩 $(Gd/Yb)_N$ 值0.93~1.24,均值1.1, Eu/Eu^* 值0.45~0.67,均值0.6,源区母岩具有后太古宙年轻岩石的特征,与花岗岩的 Eu/Eu^*_N 值(0.4)和片麻岩的 $(Eu/Eu^*)_N$ 值(0.65)最为接近^[36];莫合尔山泥质岩 $(Gd/Yb)_N$ 值1.84~7.01,均值3.5, $(Eu/Eu^*)_N$ 值0.79~1.29,均值1.01,可能反应的是源区母岩具有太古代和后太古宙岩石的综合特征。

陈哲夫和梁云海认为早寒武世且干布拉克地区为西大山拗陷区的一部分,与兴地-星星峡隆起带相邻^[37]。在研究区南部出露有前寒武纪的花岗岩、花岗闪长岩等酸性岩体,在研究区北部广泛分布有震旦纪的中基性火山岩、冰碛岩地层(图1-c),分别组成了南北地区的隆起带。南部花岗质岩石主要为且干布拉克大坂的源区母岩,北部的中基性火山岩主要为莫合尔山的源区母岩。源区母岩经过破坏(风化和剥蚀)、搬运、沉积、成岩,分别在且干布拉克大坂和莫合尔山拗陷区形成了泥质岩等沉积岩。

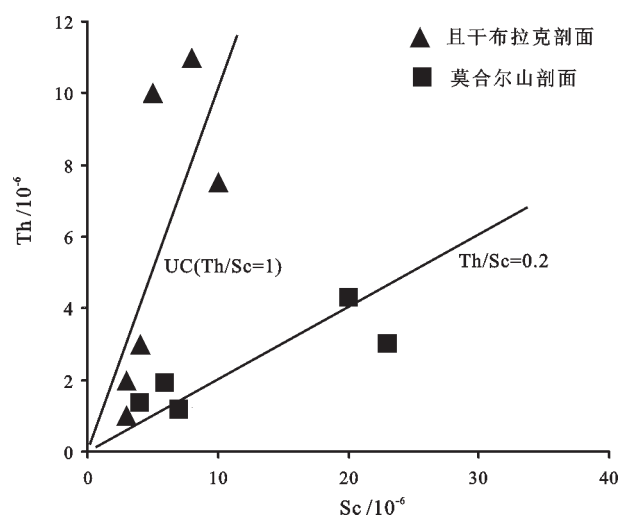


图6 研究区泥质岩Th-Sc图解
Fig.6 Th-Sc diagram of argillaceous rocks

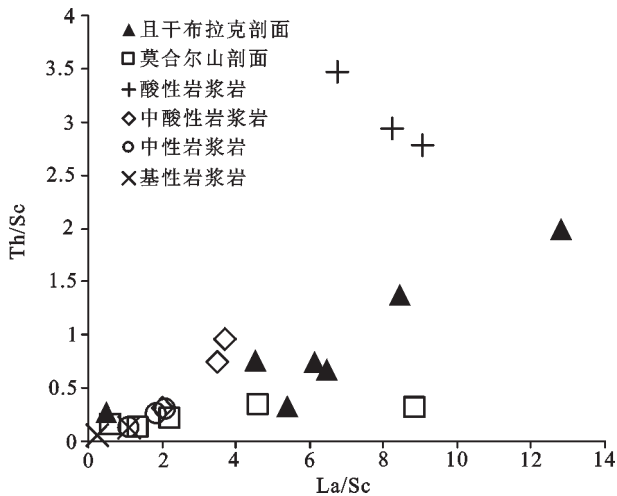


图7 研究区泥质岩 Th/Sc-La/Sc 图解

图中酸性岩浆岩包括花岗岩、流纹岩、二长花岗岩;中酸性岩浆岩包括花岗闪长岩、英云闪长岩、英安岩;中性岩包括闪长岩、安山岩;基性岩主要为玄武质岩石。以上酸性、中酸性、中性、基性岩浆岩数据引自文献[34]

Fig. 7 Th/Sc-La/Sc diagram of argillaceous rocks

On the graph acidic magmatic rocks include granite, rhyolite, adamellite; intermediate-acidic magmatic rocks include granodiorite, tonalite, dacite; intermediate magmatic rocks include diorite, andesite; basic magmatic rocks include basalt. The data of acidic—basic magmatic rocks after reference [34]

4.3 物源的风化作用

Nesbitt and Young 首次提出了化学蚀变指数 (CIA), 用于重建古气候运用最为广泛^[38-42]。CIA 可以很好的评价长石向黏土矿物(如高岭石)转化的程度, 其计算公式为: $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$ 。公式中氧化物的单位均为摩尔, CaO^* 的摩尔含量是指硅酸盐组分中 Ca 的摩尔量, 而不包括非硅酸盐组分(碳酸盐、磷酸盐等)^[42]。A-CN-K 图解可以用来判断源岩成分、揭示钾交代作用对源岩的影响^[4,43-46]。其中 A 指 Al_2O_3 , CN 指 $CaO^* + Na_2O$, K 指 K_2O , 氧化物的单位均为摩尔。在化学风化作用初期, 以斜长石的化学风化为主, 碱金属元素 Ca、Na 被释放, 风化产物主要为伊利石、蒙脱石、高岭石, 风化产物的主要化学成分演化趋势线与 A-CN 连线平行。当斜长石全部消失后, 黑云母、钾长石、伊利石等矿物开始被风化, K 元素迅速流失, 达到中等风化程度。在风化作用晚期, 次生黏土矿物(高岭石、三水铝石、绿泥石)开始被风化, 风化产物的组分向定点 A 靠近^[47]。

当沉积物中发生了钾交代作用, 外来 K 离子的

加入会使得沉积物风化产物的主要化学成分演化趋势线偏向预测的右侧。钾交代作用主要有两种表现: 一种是沉积物与孔隙水中的 K^+ 反应生成伊利石, 导致外来 K^+ 的加入; 另一种是流体中的 K^+ 替代了沉积物中长石矿物的 Ca^{2+} 、 Na^+ , 导致了 K^+ 含量的增加^[48]。在 A-CN-K 三角图中(图 8), 且干布拉克大坂剖面泥质岩投点落于花岗岩和 A 型花岗岩自然风化趋势线之间, 莫合尔山剖面泥质岩投点落于石英闪长岩自然风化趋势线之上及左侧附近, 均与 A-CN 连线平行, 表明研究区两个剖面未发生钾交代作用, 保留了原始沉积物的信息。

且干布拉克大坂剖面泥质岩的 CIA 值分布范围 65~73, 平均值 70, 含钒炭质硅质页岩 CIA 值分别为 66 和 39; 莫合尔山剖面泥质岩 CIA 值分布范围 71~74, 平均值 75, 铁质磷质岩 CIA 值分别为 41。低的 CIA 值与冷的或干旱的古气候条件有关, 高的 CIA 值指示温暖的或潮湿的古气候条件^[4,39]。CIA=50~65 指示寒冷、干燥的气候条件下低等化学风化程度, CIA=65~85 指示温暖、湿润条件下中等化学风化程度, CIA=85~100 指示炎热、潮湿的热带亚热带条件下强烈的化学风化程度^[42,44]。因此, 且干布拉克大坂剖面 and 莫合尔山剖面泥质岩的 CIA 值表

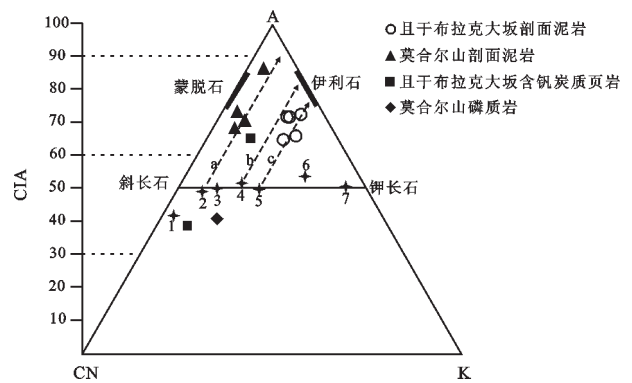


图8 研究区泥质岩 A-CN-K 三角图(底图据文献[4,44,47])

a—石英闪长岩自然风化趋势线; b—花岗岩自然风化趋势线; c—A 型花岗岩自然风化趋势线; 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—碱性花岗岩; 7—微斜长石

Fig. 8 A-CN-K diagram of argillaceous rocks (base map after reference [4, 44, 47])

a—Compositional trends of initial weathering profile of quartz diorite; b—Compositional trends of initial weathering profile of granite; c—Compositional trends of initial weathering profile of A-type granite; 1—Gabbro; 2—Quartz diorite; 3—Granodiorite; 4—Granite; 5—A-type granite; 6—Alkali granite; 7—Microcline

明其物源区中等程度的化学风化作用,沉积物沉积时气候较温暖、湿润。彭洪超等(2006)通过古地磁的研究认为塔里木东北缘库鲁克塔格地区早寒武世位于30°S左右的地理位置^[49],属于低纬度地区,气旋活动频繁,季节变化明显,可以佐证且干布拉克地区早寒武世温暖、湿润的气候特征。

含钒炭质硅质页岩和铁质磷质岩CIA较低,这可能与V、P的物质来源有关,海底热液物质的加入可以降低CIA值,此时CIA值是P、V元素未风化源区母岩或岩浆CIA值与风化形成的沉积物CIA值的综合反映。各种未风化的矿物、岩石的CIA值见表2。未蚀变的花岗岩和流纹岩CIA值(45~55)较低,离源区较近的砂岩(包括石英砂岩、长石砂岩、岩屑砂岩)CIA值接近未蚀变岩浆岩母岩的CIA值,陆相泥岩的CIA值为70~75^[42]。火山活动不发育的陆相黑色泥岩的CIA值位于平均泥岩CIA值范围内,而纹层状凝灰岩的CIA值接近未蚀变相同成分岩浆岩母岩的CIA值^[50]。且干布拉克大坂剖面的含钒炭质硅质页岩、莫合尔山剖面的铁质磷质岩的CIA值位于玄武岩的CIA范围,指示V、P等成矿元素可能来源于玄武质岩石。震旦纪火山岩主要有3个喷发期:水泉组、扎摩克提组、贝义西组,岩性为基性玄武质和酸性流纹质岩石,玄武质岩石V的平均含量为 246.9×10^{-6} ,P的平均含量为 1963×10^{-6} ,分别为平均上地壳的4.6倍和3倍(平均上地壳V= 53×10^{-6} ,P= 665×10^{-6} ^[19])。此外,早寒武世西山布拉克组中也发育有基性火山岩,岩石中V的平均含量为 463×10^{-6} ,

P的平均含量为 256×10^{-6} ,均可作为V、P等成矿元素的物源层。结合笔者研究认为,且干布拉克大坂剖面硅质岩是热水和正常海水共同作用的结果,从剖面底部到顶部热水活动强度呈减弱的趋势;莫合尔山剖面硅质岩主要为热水成因,佐证了且干布拉克地区火山热液活动的存在。因此,作为与硅质岩互层的含钒炭质硅质页岩、铁质磷质岩中的P、V等成矿元素可能来自于震旦纪和寒武纪中基性火山岩的风化产物以及直接来源于早寒武世西山布拉克组同生期的火山活动。

5 结 论

(1)泥质岩地球化学特征表明,且干布拉克大坂剖面泥质岩沉积于陆内较稳定的构造环境,莫合尔山剖面泥质岩沉积于陆内火山岩隆起的构造环境。指示早寒武世早期莫合尔山的裂解作用比且干布拉克大坂更为强烈。

(2)且干布拉克地区泥质岩为第一次沉积的沉积物,源区母岩主要以岩浆岩为主。且干布拉克大坂剖面泥质岩源区母岩主要以研究区以南的花岗岩等长英质岩浆岩为主,莫合尔山剖面泥质岩源区母岩主要以研究区以北的玄武岩等中基性岩浆岩为主。CIA值表明且干布拉克地区泥质岩物源区母岩经历了中等程度的化学风化作用,沉积物沉积时气候较温暖、湿润,早寒武世早期位于30°S左右的低纬度地区。

(3)且干布拉克大坂剖面的含钒炭质硅质页岩、莫合尔山剖面的铁质磷质岩的元素地球化学特征暗示了磷、钒等成矿元素与中基性岩浆岩有关,震旦纪和寒武纪的中基性火山岩可作为磷、钒元素的矿源层。

致谢:在野外地质调查和样品的采集中曹晓峰老师、袁迁博士、路通、刘幸时、陈威提供了极大的帮助,匿名审稿人及编辑部老师提出了建设性意见和细致的修改,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(6): 1153-1177.

表2 各种未风化矿物、岩石的化学蚀变指数(CIA)

Table 2 CIA for various representative minerals and rocks

名称	CIA	名称	CIA
透辉石	0	花岗岩/花岗闪长岩	45~55
钠长石	50	玄武岩	30~45
钙长石	50	英安岩	46~50
钾长石	50	流纹质凝灰岩	48~63(52)
白云母	75	流纹岩	49
伊利石	75~80	页岩平均值	70~75
绿泥石	100	现代河流沉积物	46~89
高岭石	100	未成熟的河流沉积物	46~70
辉长岩	35~37	成熟的河流沉积物	70~89

注:数据引自文献[50]。

- [2] Bhat M I, Ghosh S K. Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur Group pelites, western Himalayas: Implications for their provenance and weathering[J]. *Precambrian Research*, 2001, 108(1-2): 1-16.
- [3] Sreenivas B, Srinivasan R. Identification of paleosols in the Precambrian metapelitic assemblages of Peninsular India major element geochemical approach[J]. *Current Science*, 1994, 67(2): 89-94.
- [4] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [5] McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1993, 284: 21-40.
- [6] Bhatia M R, Crook K A W. Trace Element Characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [7] Naqvi S M, Sawkar R H, Rao D, et al. Geology, geochemistry and tectonic setting of Archaean greywackes from Karnataka Nucleus, India[J]. *Precambrian Research*, 1988, 39(3): 193-216.
- [8] Banerjee D M, Bhattacharya P. Petrology and geochemistry of greywackes from the Aravalli Supergroup, Rajasthan, India and the tectonic evolution of a Proterozoic Sedimentary Basin[J]. *Precambrian Research*, 1994, 67(1-2): 11-35.
- [9] Condie K C. Chemical composition and evolution of the Upper Continental Crust: Contrasting results from surface samples and shales[J]. *Chemical Geology*, 1993, 104(1-4): 1-37.
- [10] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [11] Cox R, Lowe D R. A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(1): 1-12.
- [12] Cullers R L. The Controls On the Major and Trace Element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(22): 4955-4972.
- [13] 刘万洙, 白雪峰, 包亚范, 等. 新疆库鲁克塔格地区寒武-奥陶系硅质岩的岩石学特征及其成因分析[J]. *新疆地质*, 2006(04): 344-347.
Liu Wanzhu, Bai Xuefeng, Bao Yafan, et al. Petrological characteristics and genetic analysis of the silicalite on Cambrian-Ordovician in Kuruketage region, Xinjiang Province[J]. *Xinjiang Geology*, 2006, 24(4): 344-347 (in Chinese with English abstract).
- [14] 秦天西, 范雪红. 新疆库鲁克塔格孔雀河地区震旦-寒武-奥陶系沉积相及生油岩特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2003, 33:53-59(01).
Qin Tianxi, Fan Xuehong. Sedimentary facies and source rocks of the Sinian-Cambrian-Ordovician strata in the Kuruktag-Konqi region, Xinjiang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2003, 23(1):53-59 (in Chinese with English abstract).
- [15] 程日辉, 王璞珺, 刘万洙, 等. 库鲁克塔格地区寒武系层序地层与发育模式[J]. *新疆地质*, 2006(04): 353-360.
Chen Rihui, Wang Pujun, Liu Wanzhu, et al. Sequence stratigraphy and models for the Cambrian in Kuluketage, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2006, 24(4): 353-360 (in Chinese with English abstract).
- [16] 贾承造, 孙德龙, 周新源, 等. 塔里木盆地板块构造与大陆动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
Jia Chengzao, Sun Delong, Zhou Xinyuan, et al. *Tarim Plate Tectonics and Continental Dynamics*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [17] 张先树, 张书元, 张大权, 等. 塔里木盆地东北地区构造演化及其与油气的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1992, 13(2): 135-146.
Zhang Xianshu, Zhang Shuyuan, Zhang Daquan, et al. Tectonic evolution in northeast Tarim Basin and its relation to hydrocarbon[J]. *Oil & Gas Geology*, 1992, 13(2): 135-146 (in Chinese with English abstract).
- [18] Zhu W, Zhang Z, Shu L, et al. Thermotectonic evolution of Precambrian basement rocks of the Kuruktag uplift, NE Tarim craton, China: Evidence from apatite fission-track data[J]. *International Geology Review*, 2010, 52(9): 941-954.
- [19] Hans Wedepohl K. The composition of the Continental Crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [20] Haskin M A, Haskin L A. Rare Earths in European shales: A Redetermination[J]. *Science*, 1966, 154(3748): 507-509.
- [21] Bhatia M R. Plate Tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
- [22] 姜常义, 白开寅, 黑爱芝, 等. 库鲁克塔格地区火山岩的岩浆过程与源区组成[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(1): 8-18.
Jiang Changyi, Bai Kaiyin, Hei Aizhi, et al. Petrology, geochemistry, magmatic process and source composition of Sinian-Cambrian volcanic rocks in Kuruktag area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(1): 8-18 (in Chinese with English abstract).
- [23] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.
- [24] McLennan S M. Rare Earth Elements in sedimentary rocks; Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21: 169-200.
- [25] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *Journal of Geology*, 1991, 99(1): 1-21.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [27] Savoy L E, Stevenson R K, Mountjoy E W. Provenance of Upper Devonian-Lower Carboniferous Miogeoclinal Strata, southeastern Canadian Cordillera: Link between tectonics and sedimentation[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(1A): 181-193.

- [28] McLennan S M, Taylor S R, Mcculloch M T, et al. Geochemical and Nd–Sr isotopic composition of deep–sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(7): 2015–2050.
- [29] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919–2940.
- [30] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295–303.
- [31] Caracciolo L, Le Pera E, Muto F, et al. Sandstone petrology and mudstone geochemistry of the Peruc–Korycany Formation (Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic) [J]. *International Geology Review*, 2011, 53(9): 1003–1031.
- [32] Hayashi K, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of similar to 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115–4137.
- [33] Totten M W, Hanan M A, Weaver B L. Beyond whole–rock geochemistry of shales: The importance of assessing mineralogic controls for revealing tectonic discriminants of multiple sediment sources for the Ouachita Mountain flysch deposits[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(7): 1012–1022.
- [34] 迟清华, 鄯明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Chi Qinghua, Yan Mingcai. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007 (in Chinese).
- [35] 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2001, 31(10): 828–833.
Shao Lei, Li Xianhua, Wei Gangjian, et al. The slope of the south China sea material sources of the deposit[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(10): 828–833 (in Chinese with English abstract).
- [36] Wani H, Mondal M E A. Evaluation of Provenance, Tectonic setting, and Paleoredox conditions of the Mesoproterozoic–Neoproterozoic Basins of the Bastar Craton, Central Indian Shield: Using petrography of sandstones and geochemistry of shales[J]. *Lithosphere*, 2011, 3(2): 143–154.
- [37] 陈哲夫, 梁云海. 库鲁克塔格—马宗山地质构造特征及其构造单元归属问题的讨论[J]. *地质论评*, 1981, 27(4): 292–301.
Chen Zhefu, Liang Yunhai. Discuss on the geological structural characteristic of the Kuruktag—Mazongshan area and the problem about its attribution of tectonic units[J]. *Geological Review*, 1981, 27(4): 292–301 (in Chinese with English abstract).
- [38] Yang S Y, Yim W W S, Huang G Q. Geochemical composition of inner shelf Quaternary sediments in the Northern South China Sea with implications for provenance discrimination and paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 207–221.
- [39] Scheffler K, Buehmann D, Schwark L. Analysis of late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies – response to climate evolution and sedimentary environment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240(1/2): 184–203.
- [40] Liu Z F, Colin C, Huang W, et al. Climatic and tectonic controls on weathering in South China and Indochina Peninsula: Clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong Drainage Basins[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(5): Q5005.
- [41] Passchier S, Krissek L A. Oligocene–Miocene Antarctic continental weathering record and paleoclimatic implications, Cape Roberts Drilling Project, Ross Seal, Antarctica[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 260(1/2): 30–40.
- [42] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from Major Element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715–717.
- [43] Fedo C M, Young G M, Nesbitt H W, et al. Potassic and sodic metasomatism in the southern province of the Canadian shield: evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada[J]. *Precambrian Research*, 1997, 84(1/2): 17–36.
- [44] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129–147.
- [45] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. *Journal of Geology*, 1996, 104(5): 525–542.
- [46] Young G M, Nesbitt H W. Paleoclimatology and provenance of the Glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada: A chemostratigraphic approach[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(2): 264–274.
- [47] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523–1534.
- [48] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地质前缘*, 2003, 10(4): 539–544.
Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. CIA (Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(4): 539–544 (in Chinese with English abstract).
- [49] 彭洪超, 张振生, 刘社平. 塔里木盆地古生代盆地类型及板块运动特征[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(6): 711–718.
Pen Hongchao, Zhang Zhensheng, Liu Sheping. Type of Paleozoic basin and feature of plate movement in Tarimbasin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(6): 711–718 (in Chinese with English abstract).
- [50] Fritz W J, Vanko D A. Geochemistry and origin of a black mudstone in a volcanoclastic environment, Ordovician lower rhyolitic tuff formation, North Wales, UK[J]. *Sedimentology*, 1992, 39(4): 663–674.