

文章编号:1000-0550(2020)03-0676-11

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.103

柴北缘大煤沟组七段页岩地球化学特征 ——对中侏罗世晚期物源及风化作用的指示及意义

郭望^{1,2}, 张卫刚^{1,3}, 李玉宏², 雷迅⁴, 李永红⁵, 陈刚¹, 张云鹏², 陈磊⁶, 徐学敏⁷

1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054

3. 中国石油长庆油田分公司, 西安 710021

4. 长庆油田分公司第三采气厂, 内蒙古自治区鄂尔多斯 017300

5. 青海煤炭地质局, 西宁 810001

6. 青海煤炭地质勘察院, 西宁 810001

7. 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘要 柴达木盆地北缘中侏罗世晚期沉积的大煤沟组七段页岩(J_2d^7)记录了该地质历史时期的物源、风化作用及对应的气候和构造特征信息。对钻井岩芯样品进行元素地球化学分析, 结果显示, 较高的 Al_2O_3/TiO_2 , La/Sc, Th/Co, 较低的 TiO_2/Zr , 以及 TiO_2-Zr , La/Sc-Th/Co, La/Th-Hf, La-Th-Sc组成表明大煤沟组七段页岩物源主要为长英质花岗闪长岩。A-CN-K组成特征指示钾交代作用对页岩的影响有限, 整体较高化学蚀变指数(CIA)、化学风化指数(CIW)、斜长石蚀变指数(PIA)表明物源区经历了中等—强烈的化学风化作用, 且自下而上, 风化作用逐渐减弱, 结合逐步降低的古气候指数C值及增高的Sr/Cu值, 可得出在中侏罗世晚期柴北缘地区的古气候条件由温暖潮湿向干旱炎热明显转变, 为该时期我国西北地区“干热化”事件在柴北缘的具体表现, 同期构造沉降幅度大于因气候变干导致的湖平面下降速率, 为有机质的富集提供了有利条件。

关键词 柴北缘; 中侏罗世晚期; 页岩; 物源; 风化作用; 古气候; 干热化事件; 有机质

第一作者简介 郭望, 男, 1986年出生, 博士研究生, 油气成因机理与分布预测, E-mail: geology2010@126.com

通信作者 张卫刚, 男, 高级工程师, E-mail: 757554670@qq.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

碎屑岩的地球化学组成是源岩成分、物理和化学风化、剥蚀、运移、沉积埋藏及成岩演化综合作用的结果^[1]。相对于其他碎屑岩, 由于较强的均质性及致密性, 泥页岩等细粒沉积岩较好的保存了物源区的原始信息, 其地球化学特征与源区更为接近, 因而被广泛用于沉积期物源组成和风化作用的研究, 并在此基础上, 进行沉积期古气候及古构造的重建^[1-4]。

柴达木盆地为我国七大内陆含油气盆地之一^[5], 中侏罗世晚期在柴达木盆地北缘(柴北缘)大范围沉

积的大煤沟组七段(J_2d^7)页岩作为祁连山前油气聚集带的重要烃源岩层及潜在的页岩油气层已被广泛研究^[5-10], 对其有机地球化学、有机岩石学及构造—沉积环境有了较为详细的了解。已有大量研究证实, 该时期为研究区古气候由温暖潮湿向炎热干旱逐步转化的关键阶段^[11-12], 但对该重要节点的物源、风化作用及对应的气候条件和构造特征缺少基于钻井岩芯资料支撑的详细探讨^[1, 11]。本文选取柴北缘鱼卡地区大煤沟组七段(J_2d^7)页岩典型发育的钻井进行系统采样, 通过元素地球化学手段对该套页岩的物源及风化作用特征进行详细研究, 以期对该重

收稿日期: 2019-08-06; 收修改稿日期: 2019-12-16

基金项目 国家科技重大专项(2016ZX05034001-006), 国家自然科学基金项目(41602162, 41702159, 41502200, 41630312), 大陆动力学国家重点实验室科技部重点专项经费(BJ14252), 国家基础科学人才培养基金(XDCX2018)[**Foundation**: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05034001-006; National Natural Science Foundation of China, No. 41602162, 41702159, 41502200, 41630312; Most Special Fund from the State Key Laboratory of Continental Dynamics, No. BJ14252; Fostering Talents in Basic Research of National Natural Science Foundation of China, No. XDCX2018]

要节点的气候特征进行更为精细地刻画,并对构造背景及同时期富有机质页岩的发育机理有更进一步的认识。

1 地质背景

柴达木盆地地处青藏高原东北缘,为前寒武纪结晶基底上发育的中-新生代陆内盆地^[13-14]。柴北缘构造分区西起阿尔金山前,东至德令哈陷大浪一土尔岗构造带的东段,北界为祁连山前深大断裂,南界为鄂博梁南缘一陵间断裂一黄泥滩断裂一埃姆尼克山南缘深断裂与盆地中央坳陷带分界,可划分为多个二级构造带及凹陷,凸起^[10](图1)。整个柴达木盆地的形成和发展,自始至终受控于特提斯一喜马拉雅构造域活动的强烈影响^[14]。在早侏罗世末期一中侏罗世初期,区域构造应力由拉伸转变为挤压,柴北缘的沉积中心由西向东迁移至鱼卡一大煤沟一带,大煤沟组四至七段(J₂d⁴~J₂d⁷)即为该时期的沉积产物,自下而上发育了完整的低位一高位体系域过

程。大煤沟组七段(J₂d⁷)页岩主要形成于最大湖盆规模条件下的浅湖一半深湖环境,中下部岩性单一,以厚层灰黑色页岩为主,有机碳含量中等;上部发育灰褐色页岩和泥灰岩夹层,有机碳含量较高,含油率可达油页岩级别^[10](图2)。

2 样品、实验方法及结果

本次研究充分考虑样品在空间上的代表性,沿鱼卡凹陷南北向选取4口J₂d⁷页岩发育良好的钻井(图1),共采集25个样品,包括10个中下部的灰黑色泥页岩和15个上部的灰褐色页岩样品(表1)。

样品的制备及岩石主、微量和稀土元素地球化学分析均在自然资源部“岩浆作用成矿与找矿重点实验室”完成。其中主量元素的分析仪器为荷兰PANalytical公司的Axios 4.0kw型X射线荧光光谱仪(XRF),分析精度优于5%。微量和稀土元素的分析仪器为美国Thermo公司Series II型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度优于5%~10%。具体

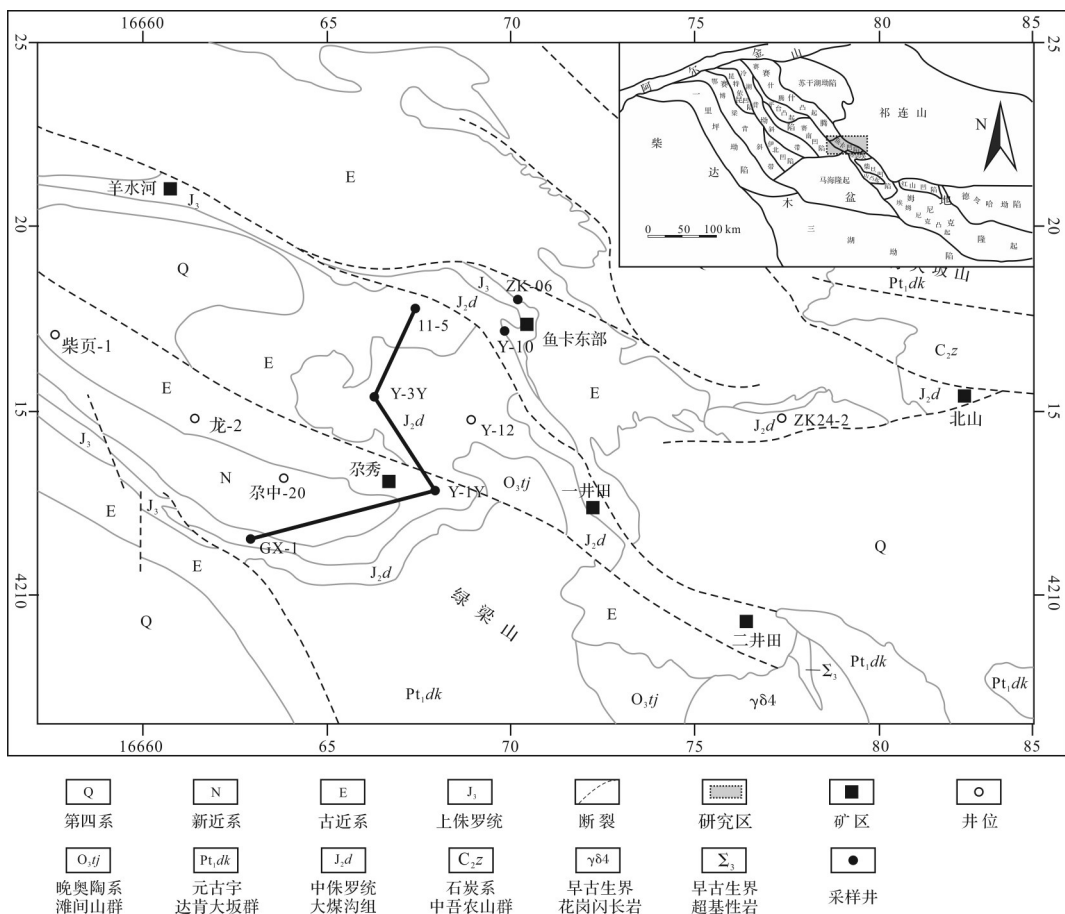


图1 柴北缘构造位置及采样井分布
Fig.1 Tectonic location of northern Qaidam Basin and distribution of sampling wells

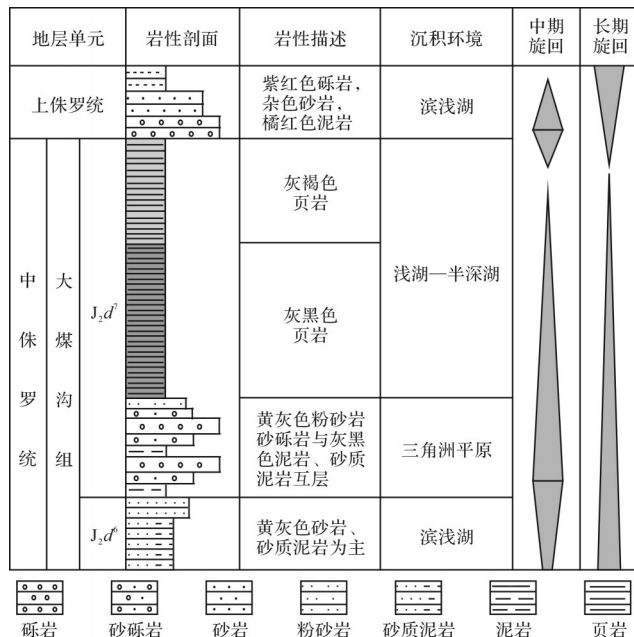


图2 柴北缘中侏罗统大煤沟组7段页岩沉积相柱状图
Fig.2 Sedimentary column of shale in the Middle Jurassic 7 Member (J_2d'), Dameigou Formation, northern Qaidam Basin

实验步骤参照国标 GB/T 14506.28—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第28部分:16个主次成分测定》及 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》进行。

有机地球化学测试在长江大学“油气资源与勘探技术教育部重点实验室”完成。其中总有机碳(TOC)分析仪器为CS-230碳硫分析仪,具体实验步骤参照 GB/T 19145—2003《沉积岩中总有机碳的测定》进行。热解分析仪器为OGE-VI油气评价工作站,具体实验步骤参照 GB/T 18602—2012《岩石热解分析方法》进行。

样品的部分分析结果及相关参数见表1。从上地壳配分图中可以看出(图3),整体上 J_2d' 页岩具有明显的Na元素亏损,这与钠斜长石以及对应风化产物的不稳定有关^[2]。与中下部灰黑色页岩相比,灰褐色页岩的元素含量变化较大,可能与灰质夹层频繁发育导致的岩性不均一改变有关,尤其主量元素中Ca的明显富集及大离子亲石元素中Sr的相对富集,应当为气候逐步干燥引起的水体蒸发量增大所致。高场强元素和过渡元素的配分模式相近,均表现为Zr、Nb、Hf和Ta轻微亏损,但U和V轻微富集,表明 J_2d' 页岩段沉积时为还原缺氧条件。此外,上部灰褐色页岩的有机质相对富集,其TOC值整体高于下部灰黑色页岩的值(表1)。

3 讨论

3.1 物源类型

由于在风化作用及沉积成岩过程中相对稳定的化学性质,一些高场强元素(如Th、Ti、Zr、Hf等),过渡元素(如Co、Sc等)及稀土元素可用于表征陆源碎屑沉积的物源类型^[1,16-17]。

Hayashi *et al.*^[16]认为不同物源沉积物的 Al_2O_3/TiO_2 和 TiO_2/Zr 差别明显,具体表现为基性铁镁质火成岩的 Al_2O_3/TiO_2 比值介于3~5, TiO_2/Zr 值大于200;酸性长英质火成岩的该比值分别为21~70及<55;中性火成岩的对应值介于二者之间。在 TiO_2-Zr 判别图解中(图4a),所有的样品均分布于中性与酸性火成岩的界限附近,但 Al_2O_3/TiO_2 的值均介于酸性岩范围内(表1),这可能与沉积物运移、沉积过程中Zr与含Ti化合物的差异分馏有关^[16]。

Cullers^[18]提出,相对于基性岩,酸性岩明显富La和Th,而贫Sc、Cr和Co,因此La/Sc、Th/Co等参数可用于判别物源组成。 J_2d' 灰褐色页岩的La/Sc值为2.42~3.78,均值2.86, Th/Co值为0.69~1.20,均值0.92;灰黑色页岩的La/Sc值为2.64~4.26,均值3.49, Th/Co值为0.57~1.09,均值0.88,均与酸性来源的沉积物范围相吻合^[2],同时,在La/Sc-Th/Co判别图解中也可以看到 J_2d' 段页岩均落在酸性物源附近(图4b)。通过La-Th-Sc判别图解可进一步确定对应的酸性火山岩为花岗闪长岩(图4c),这与Jian *et al.*^[1]提出的从中生代开始至新生代,柴北缘地区的物源一直以花岗闪长岩为主的观点相一致。

Floyd *et al.*^[19]认为,Hf与Zr的化学性质接近,可用于物源分析。在La/Th-Hf判别图解中,仅有个别灰黑色页岩样品落入安山岩区域,大部分灰黑色页岩样品落入长英质火成岩区域;大部分灰褐色页岩样品落入长英质—基性混合源区域,但并不能表明该时期存在大范围基性物源的混入。首先,Jian *et al.*^[1]虽然提出整个中生界在柴北缘地区物源端元存一定量的石英闪长岩(中性—酸性过渡型)混入,但主体仍以酸性火成岩为主。其次,由图4d可知,样品分布于长英质区域之外主要是由于Hf的降低造成,La/Th并未表现明显的变化。Hf主要赋存在锆石中,极耐风化,灰褐色页岩沉积期源区风化作用变化可能导致了Hf的降低,将在后文中详细讨论。

整体上,大煤沟组七段(J_2d')上部的灰褐色页岩

表1 柴北缘中侏罗统大煤沟组7段页岩部分元素含量及参数

Table 1 Element contents and parameters in shale from the Middle Jurassic 7 Member (J₄^d), Dameigou Formation, northern Qaidam Basin

样品编号	岩性	Al ₂ O ₃ /10 ⁻²	K ₂ O /10 ⁻²	CaO /10 ⁻²	Na ₂ O /10 ⁻²	P ₂ O ₅ /10 ⁻²	TiO ₂ /10 ⁻²	MgO /10 ⁻²	MnO /10 ⁻²	TFe ₂ O ₃ /10 ⁻²	Zr /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	Sc /10 ⁻⁶	Co /10 ⁻⁶	Hf /10 ⁻⁶	Sr /10 ⁻⁶	Cu /10 ⁻⁶	La /10 ⁻⁶	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	La/Sc	Th/Co	La/Th	ICV	CIA	CIW	PIA	Sr/Cu	C值	TOC/%
GX-1-1	灰褐色页岩	7.49	0.84	20.22	0.5	0.4	0.28	3.15	0.1	4.16	44.4	11.2	8.5	10.1	1.4	505	30.8	23.2	26.75	2.73	1.11	2.07	6.62	74.57	81.99	80	16.4	0.17	13.3
GX-1-2	灰褐色页岩	4.56	0.21	36.12	0.29	1.28	0.18	1.1	0.2	4.06	27.3	5.4	5.99	7.75	0.84	469	22	15.9	25.33	2.65	0.7	2.94	15.85	79.42	82.7	81.95	21.32	0.11	7.1
GX-1-3	灰褐色页岩	4.76	0.28	33.56	0.32	1.76	0.2	1.33	0.49	5.5	36.6	5.07	6.38	7.18	1	313	22.9	18.6	23.8	2.92	0.71	3.67	14.64	77.83	81.89	80.89	13.67	0.17	4.4
GX-1-4	灰黑色页岩	18.27	2.47	0.84	0.54	0.09	0.7	1.92	0.15	5.4	98.3	16.3	10.5	16.7	3.21	115	56.8	40.9	26.1	3.9	0.98	2.51	0.79	80.41	91.14	89.77	2.02	0.92	6.24
GX-1-5	灰黑色页岩	21.88	2.49	0.49	0.37	0.1	0.78	1.61	0.3	6.75	124	25.6	20.9	25.3	3.79	82.5	64.2	67.8	28.05	3.24	1.01	2.65	0.64	84.83	94.73	94.03	1.29	1.34	4.2
GX-1-6	灰黑色页岩	23.17	2.35	0.63	0.3	0.24	0.8	1.22	0.19	8.92	122	25.1	18.3	23.6	3.56	133	50	58.5	28.96	3.2	1.06	2.33	0.62	86.78	95.91	95.43	2.66	1.87	3.21
Y-1Y-1	灰褐色页岩	9.77	1.25	17.88	0.28	0.25	0.34	1.97	0.25	5.22	57	15.7	8.3	13.7	1.88	358	—	23.9	28.74	2.88	1.15	1.52	4.45	81.12	91.38	90.13	—	0.25	15.59
Y-1Y-2	灰褐色页岩	17.44	2.04	3.6	0.34	0.12	0.54	1.87	0.06	7.08	87.1	25.8	10.23	23.3	2.7	154	—	29.3	32.3	2.86	1.11	1.14	1.11	83.98	93.97	93.16	—	0.88	7.27
Y-1Y-3	灰褐色页岩	9.46	1.41	12.7	0.37	0.21	0.31	4.39	0.1	3.35	52.6	14.5	7.26	12.1	1.79	490	—	21	30.52	2.89	1.2	1.45	4.12	77.52	88.6	86.7	—	0.18	9.38
Y-1Y-4	灰褐色页岩	15.64	1.93	3.24	0.44	0.45	0.54	2.5	0.06	5.53	89.9	23.8	10.41	20.8	2.82	205	—	29.8	28.96	2.86	1.14	1.25	1.24	81.56	91.53	90.35	—	0.68	13.82
Y-1Y-5	灰褐色页岩	12.48	1.72	14.06	0.52	0.44	0.47	2.02	0.1	3.8	82.1	17.4	10.56	17.1	2.68	333	—	30.2	26.55	2.86	1.02	1.74	2.93	77.74	87.94	86.12	—	0.21	10.76
Y-1Y-6	灰褐色页岩	17.9	2.32	1.2	0.42	0.26	0.68	1.88	0.04	4.1	109	22.1	14.86	26.7	3.54	126	—	42.2	26.32	2.84	0.83	1.91	0.76	82.14	92.83	91.76	—	0.68	11.03
Y-1Y-7	灰黑色页岩	21.39	2.76	0.58	0.43	0.11	0.78	1.87	0.11	4.82	134	18.7	10.25	23.4	4.38	112	—	35.5	27.42	3.46	0.8	1.9	0.64	82.93	93.8	92.86	—	0.83	5.5
Y-1Y-8	灰黑色页岩	20.12	2.15	0.9	0.25	0.37	0.68	1.69	0.63	12.13	109	14.3	7.75	23.5	3.73	152	—	29	29.59	3.74	0.61	2.03	0.9	86.46	96.07	95.58	—	2.43	5.73
Y-1Y-9	灰黑色页岩	23.82	2.45	1.11	0.25	0.18	0.78	1.2	0.12	6.36	132	11.9	6.67	20.8	4.31	402	—	26.2	30.54	3.93	0.57	2.2	0.56	87.27	96.66	96.26	—	1.21	6.98
Y-3Y-1	灰褐色页岩	11.35	1.18	17.39	0.52	0.58	0.38	3.22	0.15	5.07	61.9	11.2	11.4	12.8	1.8	469	34.4	30.9	29.87	2.71	0.88	2.76	4.04	79.16	86.9	85.48	13.63	0.23	8.78
Y-3Y-2	灰褐色页岩	9.12	0.66	23.51	0.56	0.55	0.33	2.53	0.14	4.17	55.2	10.2	10.5	13.3	1.7	726	37.7	27.6	27.64	2.63	0.77	2.71	5.93	78.1	83.19	82.02	19.26	0.16	8.3
Y-3Y-3	灰褐色页岩	8.36	0.93	23.16	0.51	0.43	0.34	2.37	0.2	4.22	55.2	8.44	9.87	12.2	1.64	539	32.9	23.9	24.59	2.42	0.69	2.83	6.38	75.69	83.28	81.42	16.38	0.16	5.09
Y-3Y-4	灰黑色页岩	19.15	2.62	0.65	0.76	0.11	0.7	1.86	0.22	6.41	111	17.4	17	19.7	3.08	146	58.6	44.8	27.36	2.64	0.88	2.57	0.8	78.68	89.06	87.4	2.49	1.07	5.3
Y-3Y-5	灰黑色页岩	21.91	2.33	0.83	0.36	0.29	0.76	1.27	0.22	11.37	126	25.5	21	23.5	3.66	147	51.4	63.3	28.83	3.01	1.09	2.48	0.75	85.53	94.87	94.24	2.86	2.24	2.09
11-5-1	灰褐色页岩	4.75	0.49	27.79	0.37	0.26	0.2	5	0.3	3.64	38.9	8.04	6.7	8.53	1.1	993	23.5	25.3	23.75	3.78	0.94	3.15	14.17	73.1	79.6	77.61	42.26	0.12	8.59
11-5-2	灰褐色页岩	13.14	1.83	3.9	0.67	1.15	0.54	1.62	1.01	15.12	77.8	12.5	11.2	14.1	2.42	196	43.7	34.5	24.33	3.08	0.89	2.76	1.98	75.84	85.63	83.5	4.49	1.94	7.36
11-5-3	灰褐色页岩	15.03	2.15	0.71	1.15	0.25	0.64	1.72	0.05	4.29	103	12.5	13.1	17.8	2.95	115	55	37.1	23.48	2.83	0.7	2.97	0.9	73.82	83.35	80.88	2.09	0.72	11.6
11-5-4	灰黑色页岩	10.64	1.32	4.7	0.49	1.04	0.4	2.6	0.54	25.73	64.2	11.8	10.9	12	1.88	106	34.6	38.6	26.6	3.54	0.98	3.27	3.3	77.77	86.84	85.11	3.06	2.86	4.55
11-5-5	灰黑色页岩	8.87	0.9	3.31	0.27	1.53	0.31	2.84	1.15	36.23	55.5	7.51	9.71	9.19	1.42	58.2	29.6	41.4	28.61	4.26	0.82	5.51	4.49	82.65	90.9	89.89	1.97	5.18	1.89

注:“—”代表无数据。ICV=(TFe₂O₃+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+TiO₂)/Al₂O₃;式中氧化物以摩尔数为单位。C值=(Fe+Mn+Cr+V+Co+Ni)/(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)。

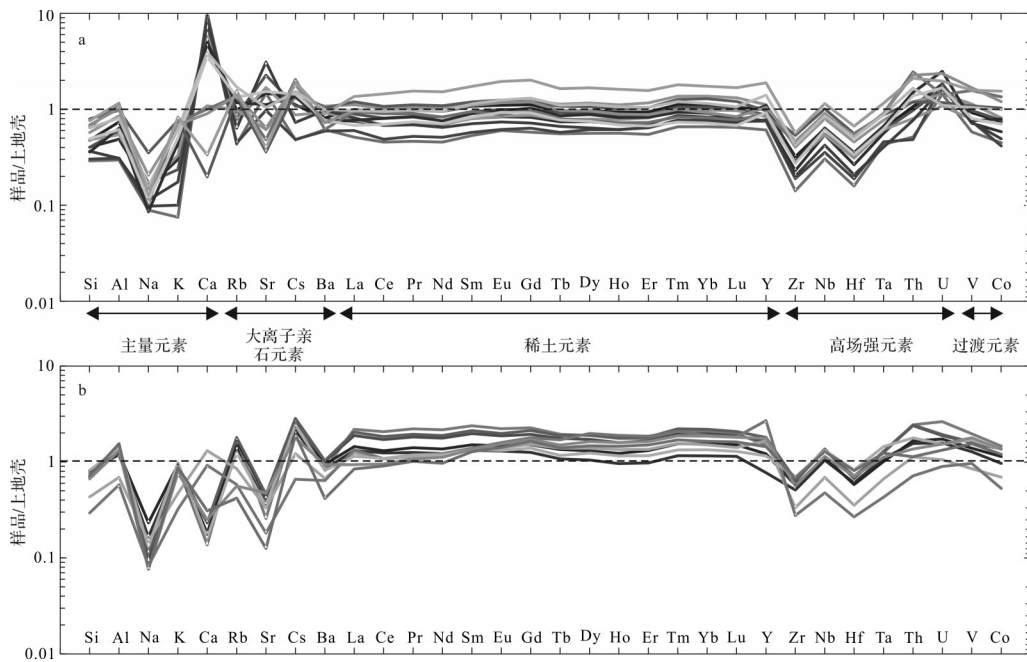


图3 柴北缘中侏罗统大煤沟组七段灰褐色页岩(a)和灰黑色页岩(b)元素上地壳配分图 (上地壳数据引自 Rudnick *et al.*^[15])

Fig.3 Elements normalized to upper crust content (UCC) for Middle Jurassic J_2d^7 : (a) grayish-brown and (b) grayish-black shale, northern Qaidam Basin (UCC data from Rudnick *et al.*^[15])

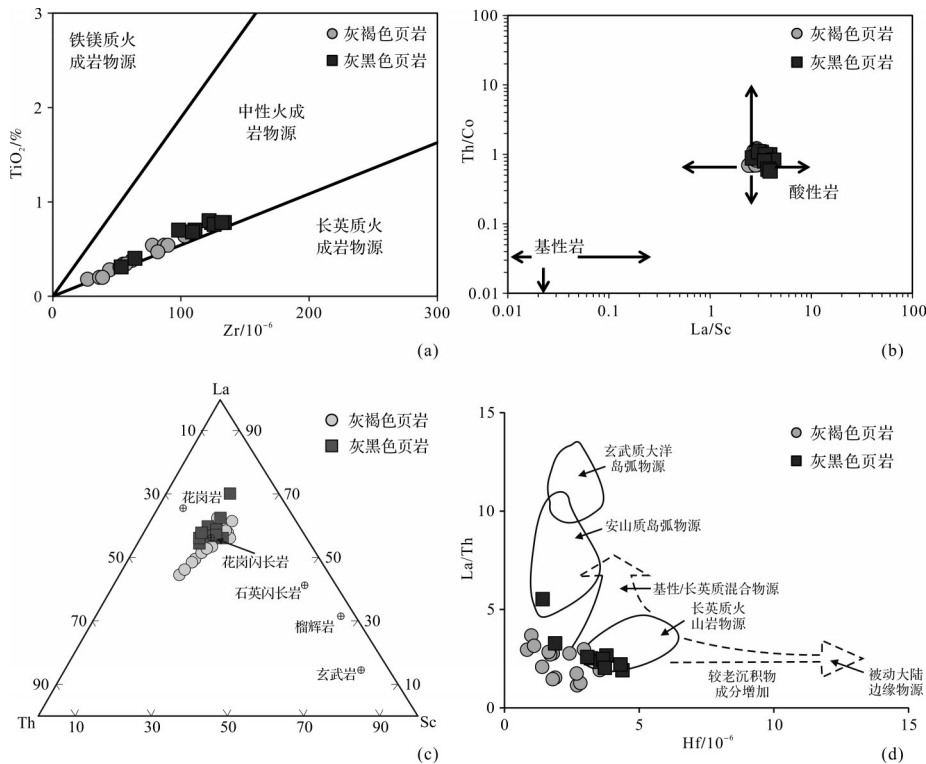


图4 柴北缘中侏罗统大煤沟组七段灰褐色页岩和灰黑色页岩的物源判别((a)底图引自 Hayashi *et al.*^[16]; (b)底图引自 Cullers^[18]; (c)底图引自 Jian *et al.*^[1]; Cullers^[18]; (d)底图引自 Jian *et al.*^[1])

Fig.4 Source rock discrimination for Middle Jurassic J_2d^7 grayish-brown shale and grayish-black shale, northern Qaidam Basin. The base map of (a) is from Hayashi *et al.*^[16]; the base map of (b) is from Cullers^[18]; the base map of (c) is from Jian *et al.*^[1] and Cullers^[18]; the base map of (d) is from Jian *et al.*^[1]

和中下部灰黑色页岩的物源相近,均以长英质的花岗闪长岩为主。

3.2 物源风化作用

岩石在化学风化过程中,优先将比较活泼的元素(如Na、Ca、K、Mg等)淋滤出来,经水流搬运在合适的地方沉积下来,而稳定的元素(如Al、Ti、Sc、Th、Zr、Hf和REE)则可在风化残留物中保存下来^[2]。Nesbitt *et al.*^[20]指出长石是目前为止地壳中含量最高的不稳定矿物,因此化学风化作用主要体现为长石的分解及相应黏土矿物的形成,长石中Ca、Na及K的析出会导致风化产物中Al相对碱金属的比例增加,据此提出化学蚀变指数(CIA)的计算公式:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

Harnois^[21]认为,K在风化过程中变化较为复杂,即可被淋滤,也可在风化残留物中保存下来,不适宜表征风化作用的强弱。因而提出不包含K的化学风化指数(CIW):

$$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100 \quad (2)$$

Fedo *et al.*^[22]认为CIW中简单地将CIA中的K₂O舍去来评价化学风化程度是不合适的,如未经风化的钾质花岗岩和钾长石的CIW分别为80和100,与蒙脱石(CIW=80)、高岭石(CIW=100)、伊利石(CIW=100)、三水铝(CIW=100)石风化残留物的值接近。为了更加合理消除钾交代作用对于评价化学风化程度的影响,Fedo *et al.*^[22]对CIA进行了改进,提出了一种更为精细的化学风化程度评价参数,即斜长石蚀变指数(PIA):

$$PIA = \{ (Al_2O_3 - K_2O) / [(Al_2O_3 - K_2O) + CaO^* + Na_2O] \} \times 100 \quad (3)$$

(1)、(2)、(3)式中氧化物的单位均为摩尔,CaO*为硅酸盐中的CaO,不包括碳酸盐和磷酸盐等其他组

分中的CaO含量。McLennan^[23]提出CaO*的校正方法,即通过对比沉积物CaO与P₂O₅摩尔数差值与Na₂O摩尔数的大小得出,如果前者大于后者,则后者即为CaO*的摩尔数,反之,前者为CaO*的摩尔数。CIA、CIW和PIA均随着风化作用的增强而增大,CIA=50~60、PIA=50~69指示初级风化作用强度,CIA=60~80、PIA=69~86指示中等风化强度,CIA=80~100、PIA=86~100指示强烈风化作用强度^[11,20,22]。CIA、CIW和PIA均将小于50作为未经风化的界限,将100作为完全风化的上限。

大煤沟组七段(J₂d⁷)页岩的CIA值介于71.10~87.27,均值为80.20,PIA介于77.61~96.26,均值为87.70,指示其物源区经历了中等—强烈的风化作用。进一步区分灰褐色页岩与灰黑色页岩的风化作用参数可以发现(图5a),灰褐色页岩的CIA介于73.82~83.98,均值为78.46,指示中等风化强度,而灰黑色页岩的CIA介于77.77~87.27,均值为83.33,指示强烈风化强度,PIA和CIW具有近似的趋势(表1、图5b)。因此可得出,J₂d⁷页岩自下而上,灰黑色页岩沉积期的物源风化作用强于灰褐色页岩沉积期的物源特征,风化逐渐减弱可能造成物源区部分稳定组分难以有效释放,如上文提到沉积物中Hf的降低,对物源类型的判识有一定影响。

通常情况下,成岩过程中钾交代作用会带入新的K元素,从而导致CIA的计算值偏低,一些学者^[24-25]提出通过A(Al₂O₃)-CN(CaO*+Na₂O)-K(K₂O)图进行校正。图6中近似平行于A-CN的实线代表未发生钾交代作用的母岩风化趋势,从左至右依次为石英闪长岩、花岗闪长岩、石英二长岩、花岗岩。在判定物源区母岩类型的基础上,可以判断是否存在钾交代作用,并通过K端元与样品点连线的反向延长线与对

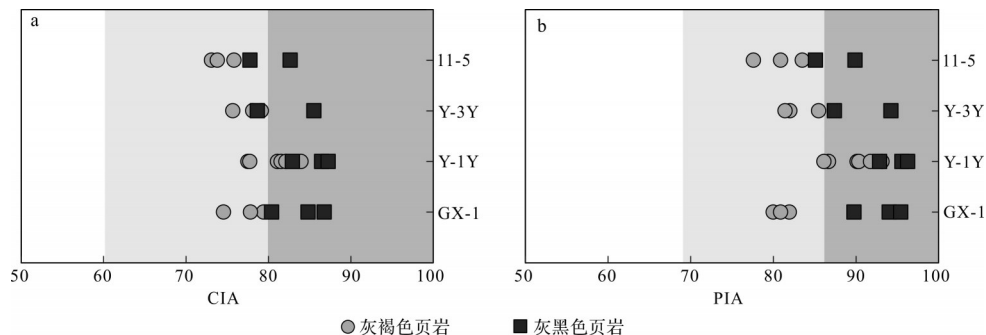


图5 柴北缘中侏罗统大煤沟组七段灰褐色页岩和灰黑色页岩的物源风化作用强度判识
Fig.5 Chemical weathering of source for Middle Jurassic J₂d⁷ grayish-brown shale and grayish-black shale, northern Qaidam Basin

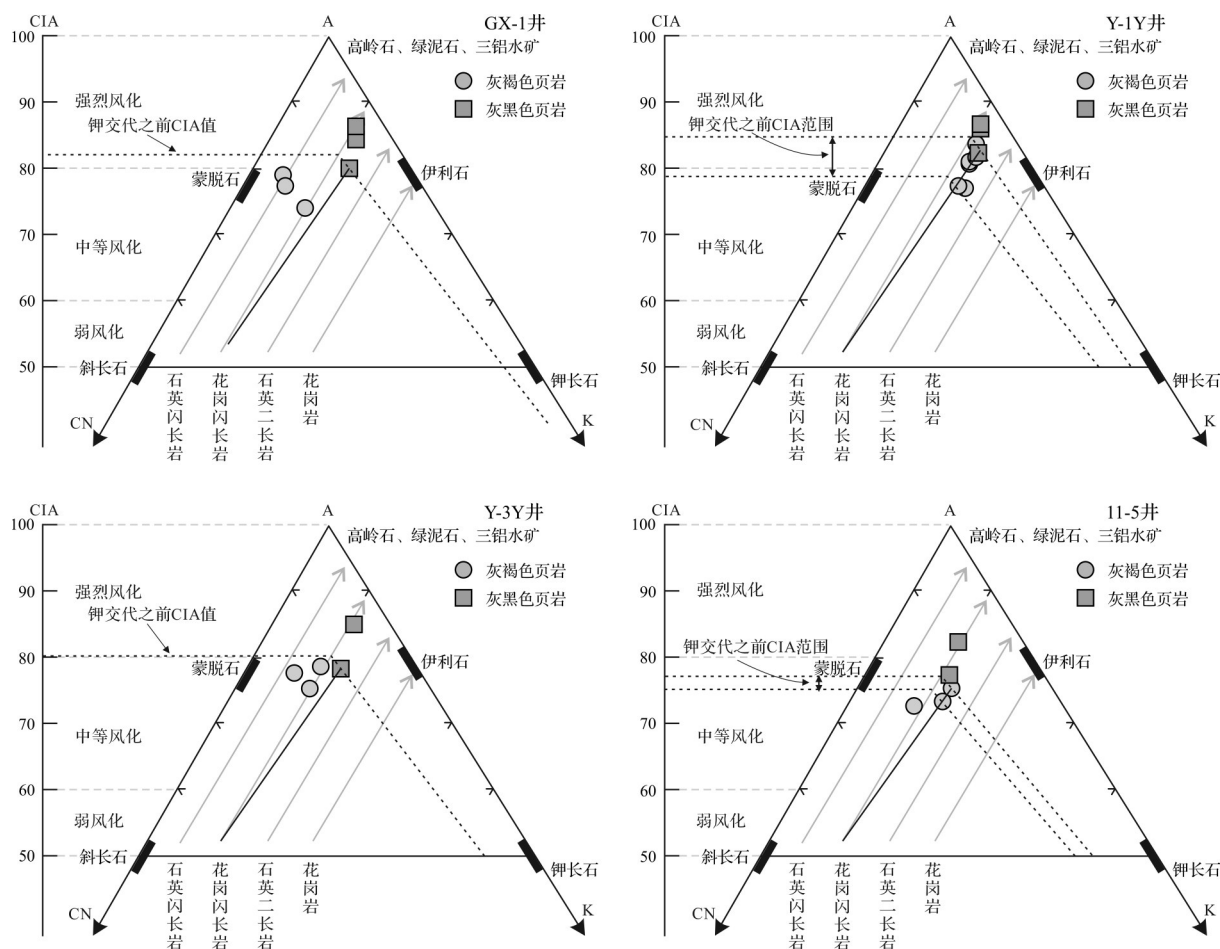


图6 柴北缘中侏罗统大煤沟组七段页岩的A-CN-K图(图版引自 Fedo *et al.*^[22]; Nesbitt *et al.*^[24])

Fig.6 A-CN-K diagram of Middle Jurassic J_2d' shale, northern Qaidam Basin
(the base map is from Fedo *et al.*^[22], and Nesbitt *et al.*^[24])

应类型的未发生交代作用的风化趋势线的交点值,确定真实的CIA值。研究区 J_2d' 页岩的物源类型主要为花岗闪长岩,从图6可以看出,钾交代作用导致部分样品的CIA计算存在一定程度降低,但变化不大,整体上灰褐色页岩沉积期对应的物源风化作用仍相对较弱。需要注意的是,对于个别灰褐色页岩样品CIA值偏大的情况,首先排除再旋回作用及沉积区进一步风化影响,因为再旋回作用导致的CIA偏大主要针对 $ICV < 1$ 的样品^[25],而研究区灰褐色页岩的 ICV 普遍大于1(表1)。另外,沉积区进一步风化的影响主要针对沉积区气候温暖湿润的条件,而区域资料初步显示灰褐色页岩沉积期的气候为炎热干燥条件^[11-12]。因此可能的原因为, Jian *et al.*^[1]指出柴北缘中生界沉积物的物源存在少量石英闪长岩贡献,这些样品本身可能即是石英闪长岩正常风化的产物。

整体上,大煤沟组七段(J_2d')页岩的物源经历了中等—强烈风化作用,且从灰黑色页岩沉积期到灰褐色页岩沉积期,风化作用逐渐减弱。

3.3 对古气候及构造特征的指示

风化作用是古气候和古构造综合作用的结果。一般认为,温暖潮湿的气候条件对应较强的化学风化作用,而炎热干燥的气候对应较弱的化学风化作用,即CIA、CIW、PIA越高,代表物源区的古气候趋向于温暖、潮湿^[2,20,26-27]。Perri *et al.*^[28], Perri^[29]强调通过化学风化参数在进行古气候判别式应选取 ICV (成分变异指数) > 1 的样品,由表1可得,所有灰褐色页岩样品的 $ICV > 1$,可直接进行古气候判别,而灰黑色页岩样品中,仅有研究区北部11-5井的灰黑色页岩的 $ICV > 1$,其余样品的 ICV 均 < 1 ,即除了11-5井,其余大部分的灰黑色页岩到灰褐色页岩,呈现出 ICV 的突然增大。 ICV 是表征沉积再旋回作用的参数,对于两

套连续递变沉积的页岩来说,简单归因为再旋回母岩的二次沉积显然是不合适的,如ICV计算公式中,Na、Ca元素在搬运沉积成岩过程中的流失也会导致页岩的ICV变低。因而,在缺乏有效解释该现象的前提下,本文暂将化学风化参数作为判别古气候的标准之一,并结合其他参数综合分析。研究区 J_2d^7 整体灰黑色页岩到灰褐色页岩,CIA逐渐减小(表1、图5、6),指示气候逐渐干燥。

潮湿气候条件下,沉积岩中Fe、Mn、Cr、V、Ni和Co元素含量相对富集,而Ca、Mg、K、Na、Sr和Ba元素容易在干旱气候条富集,因此,C值 $= (Fe+Mn+Cr+V+Co+Ni)/(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)$ 可用于表征气候变化^[11,30-31]。当C值介于0~0.2时,指示干旱气候,0.2~0.4时为半干旱气候,0.4~0.6为半湿润气候,大于0.8时则指示湿润气候^[11]。 J_2d^7 灰黑色页岩的C值介于0.83~5.18,均值1.99,指示湿润气候;灰褐色页岩的C值介于0.11~1.94,均值0.44,整体指示半湿润—半干旱的气候,但变化频繁,显示该时期气候条件波动较大(表1)。

Sr/Cu小于5.0指示温暖潮湿的气候环境,大于5.0则显示沉积时期以干旱炎热的气候为主^[2,11]。 J_2d^7 灰黑色页岩的Sr/Cu为1.29~3.06,均值2.34,灰褐色页岩的Sr/Cu为2.09~42.26,均值16.61,可见,灰褐色页岩的Sr/Cu高于下伏的灰黑色页岩,表明气候由温暖潮湿向干旱炎热逐步转变。

CIA,C值及Sr/Cu特征均一致显示中侏罗世晚期的古气候由温暖潮湿向干旱炎热演化的趋势,且在一定范围内呈剧烈波动状态,部分灰褐色页岩样品的C值及Sr/Cu甚至与上侏罗统红层的值相当^[11],说明中侏罗世晚期的古气候已相当干旱,与胡俊杰等^[11]通过露头资料得出的结论相近。普遍认为,包括柴达木盆地在内的西北地区气候变干为晚侏罗世,拉萨地体与羌塘板块碰撞造成的隆升阻挡了特提斯洋季风的输送所致,本文通过分析认为,隆升作用引起的气候变化于中侏罗世晚期已在研究区有所体现。

此外,一般认为温暖潮湿的气候更有利于富有机质页岩的发育,但对于研究区而言,随着气候逐渐干旱,灰褐色页岩的有机质丰度整体却高于相对湿润气候条件下发育的灰黑色页岩的值,这可能与当时的沉积、构造背景有关。自下而上,尽管气候逐渐干旱,但湖泊规模逐渐增大,且在灰褐色页岩发育期达到顶峰,反映构造沉降引起的湖泊发育程度

大于因气候变干而导致的湖平面下降速率,进而为有机质的富集提供了有利条件。有机质类型的明显变化也在一定程度上揭示了该过程(图7),可以发现,下部灰黑色页岩的有机质类型以偏腐殖型的 II_2 型为主,少数为 II_1 型,指示陆源高等植物输入为主,上部灰褐色页岩的有机质类型为偏腐泥型的 $I \sim II_1$ 型,指示低等水生藻类及浮游生物的贡献较大,同样反映湖泊的规模逐渐扩大,有利于有机质的发育。因此,本文初步认为构造沉降幅度较大可能是研究区在气候逐步干旱条件下湖泊水体中有机质富集的主控因素。

4 结论及展望

(1) 钻井岩芯样品的元素地球化学分析结果表明,柴北缘中侏罗世晚期 J_2d^7 页岩的物源主要来自长英质的花岗闪长岩。

(2) 钾交代作用对于柴北缘大煤沟组七段(J_2d^7)页岩的影响有限,沉积期物源的风化过程整体上为中等—强烈风化作用,且自下而上,灰黑色页岩到灰褐色页岩沉积期,物源区经历的风化作用逐渐减弱。

(3) 逐渐减弱的风化作用、逐步降低的C值及增高Sr/Cu值指示中侏罗世晚期柴北缘地区的古气候条件由温暖潮湿向干旱炎热逐步演化,且西北地区的“干热化”事件于中侏罗世晚期已在柴北缘有较为明显的体现。气候干旱条件下,同期构造沉降引起

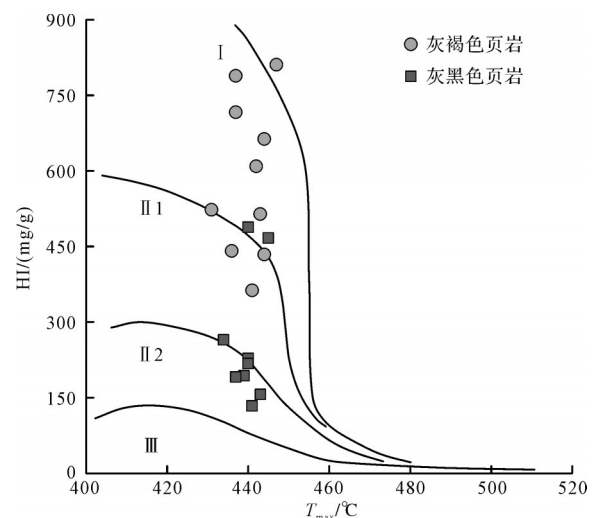


图7 柴北缘中侏罗统大煤沟组七段页岩有机质类型HI- T_{max} 判别图

Fig.7 Organic matter type discrimination of HI- T_{max} diagram for Middle Jurassic J_2d^7 shale, northern Qaidam Basin

的湖泊发育程度大于因气候变干导致的湖平面下降速率,可为有机质的富集提供有利条件。

(4) 本次研究结论基于元素地球化学特征得出,除本身存在多解性外,同一区域不同位置,如本文选取大煤沟组七段(J_2d')页岩发育的4口钻井,以及不同区域,如鱼卡地区之外的 J_2d' 同样发育的大煤沟地区、团鱼山地区等,页岩的元素组成存在一定差别,因此需要引入更为精细的局部构造环境和物源研究以及相对(半)定量的参数,以合理揭示该套页岩所蕴含的源区及环境信息。

参考文献(References)

- [1] Jian X, Guan P, Zhang W, et al. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for provenance and weathering[J]. *Chemical Geology*, 2013, 360-361: 74-78.
- [2] 罗情勇,钟宁宁,王延年,等. 华北北部中元古界洪水庄组页岩地球化学特征:物源及其风化作用[J]. *地质学报*, 2013, 87(12): 1913-1921. [Luo Qingyong, Zhong Ningning, Wang Yannian, et al. Geochemistry of Mesoproterozoic Hongshuizhuang Formation shales in northern North China: Implications for provenance and source weathering[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(12): 1913-1921.]
- [3] 田洋,赵小明,王令占,等. 鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 261-272. [Tian Yang, Zhao Xiaoming, Wang Lingzhan, et al. Geochemistry of clastic rocks from the Triassic Xujiahe Formation, Lichuan area, southwestern Hubei: Implications for weathering, provenance and tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 261-272.]
- [4] Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. *Precambrian Research*, 2000, 104(1/2): 77-93.
- [5] 付锁堂. 柴达木盆地油气勘探潜在领域[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(5): 1-10. [Fu Suotang. Potential oil and gas exploration areas in Qaidam Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(5): 1-10.]
- [6] 任收麦,包书景,张毅,等. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质条件[J]. *地质通报*, 2016, 35(2/3): 204-210. [Ren Shoumai, Bao Shujing, Zhang Yi, et al. Geological conditions of the Jurassic shale gas on the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(2/3): 204-210.]
- [7] Guo T X, Ren S M, Luo X R, et al. Accumulation conditions and prospective areas of shale gas in the Middle Jurassic Dameigou Formation, northern Qaidam Basin, Northwest China[J]. *Geological Journal*, 2018, 53(6): 2944-2954.
- [8] Qin J, Wang S Q, Sanei H, et al. Revelation of organic matter sources and sedimentary environment characteristics for shale gas formation by petrographic analysis of Middle Jurassic Dameigou Formation, northern Qaidam Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 195: 373-385.
- [9] 李永红,张云鹏,李玉宏,等. 柴达木盆地北缘中段侏罗系页岩气关键参数研究及资源前景评价[J]. *中国煤炭地质*, 2017, 29(9): 11-17. [Li Yonghong, Zhang Yunpeng, Li Yuhong, et al. Study on Jurassic shale gas key parameters and resource prospect assessment in middle sector of northern Qaidam Basin[J]. *Coal Geology of China*, 2017, 29(9): 11-17.]
- [10] 郭望,张云鹏,李永红,等. 柴达木盆地北缘侏罗系大煤沟组7段油页岩低放射性控制因素[J]. *现代地质*, 2016, 30(4): 905-913. [Guo Wang, Zhang Yunpeng, Li Yonghong, et al. Factors controlling the low radioactivity of oil shale in the 7th section of Dameigou Formation of Jurassic in northern Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 2016, 30(4): 905-913.]
- [11] 胡俊杰,马寅生,王宗秀,等. 地球化学记录揭示的柴达木盆地北缘地区中一晚侏罗世古环境与古气候[J]. *古地理学报*, 2017, 19(3): 480-490. [Hu Junjie, Ma Yinsheng, Wang Zongxiu, et al. Palaeoenvironment and palaeoclimate of the Middle to Late Jurassic revealed by geochemical records in northern margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(3): 480-490.]
- [12] 杨平,杨玉芹,马立协,等. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积环境演变及其石油地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 160-164. [Yang Ping, Yang Yuqin, Ma Lixie, et al. Evolution of the Jurassic sedimentary environment in northern margin of Qaidam Basin and its significance in petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 160-164.]
- [13] Ren Y F, Chen D L, Kelsey D E, et al. Petrology and geochemistry of the lawsonite (pseudomorph)-bearing eclogite in Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt: An eclogite facies metamorphosed oceanic slice[J]. *Gondwana Research*, 2017, 42: 220-242.
- [14] 邵龙义,李猛,李永红,等. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质特征及控制因素[J]. *地学前缘*, 2014, 21(4): 311-322. [Shao Longyi, Li Meng, Li Yonghong, et al. Geological characteristics and controlling factors of shale gas in the Jurassic of the northern Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 311-322.]
- [15] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 4: 1-51.
- [16] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,

- 1997, 61(19): 4115-4137.
- [17] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-area weathering and provenance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(9): 2401-2416.
- [18] Cullers R L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA [J]. *Chemical Geology*, 2002, 191(4): 305-327.
- [19] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [20] 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.
- [21] Harnois L. The CIW index: A new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 319-322.
- [22] 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.
- [23] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [24] 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.
- [25] 徐小涛, 邵龙义. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素 [J]. *古地理学报*, 2018, 20(3): 515-522. [Xu Xiaotao, Shao Longyi. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2018, 20(3): 515-522.]
- [26] Meng Q T, Liu Z J, Sun P C, et al. Characteristics and accumulation of Middle Jurassic oil shale in the Yuqia area, northern Qaidam Basin, northwest China [J]. *Oil Shale*, 2018, 35(1): 1-25.
- [27] 刘惟庆, 乔雨, 薄婧方, 等. 鄂西恩施地区上二叠统大陆组泥质岩地球化学特征及对风化、物源和构造背景的指示 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 158-167. [Liu Weiqing, Qiao Yu, Bo Jingfang, et al. Geochemistry of mudstones from the Upper Permian Dalong Formation in the Enshi area, western Hubei, and its implications for weathering, provenance and tectonic setting [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, 55(2): 158-167.]
- [28] Perri F, Ohta T. Paleoclimatic conditions and paleoweathering processes on Mesozoic continental redbeds from western-central Mediterranean Alpine Chains [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 395: 144-157.
- [29] Perri F. Reconstructing chemical weathering during the Lower Mesozoic in the western-central Mediterranean area: A review of geochemical proxies [J]. *Geological Magazine*, 2018, 155(4): 944-954.
- [30] Li L, Liu Z J, George S C, et al. Lake evolution and its influence on the formation of oil shales in the Middle Jurassic Shimengou Formation in the Tuanyushan area, Qaidam Basin, NW China [J]. *Geochemistry*, 2019, 79(1): 162-177.
- [31] 关有志. 科尔沁沙地的元素、粘土矿物与沉积环境 [J]. *中国沙漠*, 1992, 12(1): 9-15. [Guan Youzhi. The element, clay mineral and depositional environment in Horqin sand land [J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(1): 9-15.]

Geochemistry of 7 Member Shale of the Dameigou Formation in the Northern Qaidam Basin, China: Significance and Implication for Provenance and Source Weathering in the Late Middle Jurassic

GUO Wang^{1,2}, ZHANG WeiGang^{1,3}, LI YuHong², LEI Xun⁴, LI YongHong⁵, CHEN Gang¹, ZHANG YunPeng², CHEN Lei⁶, XU XueMin⁷

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Geology Department, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China

3. Changqing Oilfield Company, PetroChina Company Limited, CNPC, Xi'an 710021, China

4. No. 3 Gas Production Plant of Changqing Oilfield, PetroChina, Ordos, Inner Mongolia 017300, China

5. Qinghai Bureau of Coal Geological Exploration, Xining 810001, China

6. Qinghai Coal Geological Exploration Institute, Xining 810001, China

7. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China

Abstract: The shale of the 7 Member (J_2d^7) in the late Middle Jurassic Dameigou Formation, northern Qaidam Basin, records important information about the provenance and weathering, and the corresponding climatic and structural developments. An analysis of the element geochemistry in drill core samples showed high ratios of Al_2O_3/TiO_2 , La/Sc and Th/Co and a low ratio of TiO_2/Zr . The TiO_2-Zr , La/Sc-Th/Co, La/Th-Hf and La-Th-Sc diagrams all indicate that granodiorite was the main source of the J_2d^7 shales. The A-CN-K ternary diagram indicates only a limited influence of potassium metasomatism on the shale. The overall high values of the chemical alteration index (CIA), chemical weathering index (CIW) and plagioclase alteration index (PIA) are evidence that the provenance experienced moderate to intense chemical weathering, gradually weakening from bottom to top. Combined with the lowered paleoclimatic index C and increased Sr/Cu values, it is concluded that, during the late Middle Jurassic, the paleoclimate in the northern Qaidam Basin clearly changed from warm and humid to arid and hot, and is regarded as firm evidence of a hot, arid climate event in northwestern China. During that period, tectonic subsidence exceeded the rate of lake level decline that resulted from the changing climate and provided favorable conditions for organic matter enrichment.

Key words: northern Qaidam Basin; late Middle Jurassic; shale; provenance; weathering; paleoclimate; hot-arid climate event; organic matter