

华北板块南缘六盘山盆地固参 1 井马东山组 泥页岩段古沉积环境研究

马风华,潘进礼,马瑞赞,吴文忠,张勇,马小娟

宁夏回族自治区地质调查院,银川,750021

内容提要:以六盘山盆地固参 1 井白垩系马东山组泥页岩段为研究对象,通过元素地球化学测试分析,采用 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 Sr/Cu 、 Rb/Sr 、 Sr/Ba 、 Sr 丰度、 Th/U 、 V/Cr 、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 Fe/Mn 和 $(\text{Al}+\text{Fe})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ 等一系列古气候、古盐度、古氧化还原条件和古水深判别指标,对固参 1 井马东山组泥页岩沉积古环境进行探讨。结果表明:马东山组泥页岩沉积时期总体为年平均古气温应大于 15°C 的温暖潮湿气候,水体为半深湖—滨浅湖的半咸水—咸水环境,沉积物是在贫氧—厌氧环境中形成的。古气候、古盐度、古氧化还原条件及古水深在垂向上存在 3 个相对变化的旋回,且古气候与古水深、古还原条件呈正相关性,与盐度呈负相关性。适宜的古水深、较强的还原条件,稳定匮乏的碎屑供给等古环境因素相对变化的 3 个旋回共同控制了马东山组泥岩、页岩、钙质泥岩、泥灰岩组合的非均质的页岩油气储层。

关键词:古气候;古盐度;古氧化还原条件;古沉积环境;马东山组;六盘山盆地

六盘山盆地位于鄂尔多斯地块、阿拉善地块及祁连褶皱带结合部位,大地构造上隶属于华北板块南缘(图 1),是在元古代结晶基底和加里东褶皱基底上发育起来的走向为 NW—SE、平面形态向 NE 突出展布的中、新生代小型陆相湖盆(殷占华等,2000;施炜等,2006)。因其构造位置特殊,并含有侏罗系和白垩系两套烃源岩,众多学者及单位先后通过钻探、路线调查、测试分析、地震及电磁法等手段,在该盆地开展了大量基础地质工作,并取得丰富的研究成果,可概括为构造特征与地层沉积研究、烃源岩与油气系统研究、矿产勘查如石膏勘查等几个方面,对六盘山盆地构造背景、地层发育与沉积相展布、烃源岩油气生产潜力与储层特征等有较为系统的认识(蹇启权,1986;韩长金,1992;杨福忠,1995;杨福忠等,2001;种俊丰等,2007;杨济广等,2009)。2014 年以来,该盆地开展了页岩油气等非常规油气资源勘查相关工作,在实施的固参 1 井马东山组泥页岩段中见到油迹、解吸气体点燃等良好的页岩油气显示,并开展了相关有机地球化学、储层研究、泥页岩有机相等较为系统的工作(陈金燕,2018)。总体来说,六盘山盆地开展的各类地质工作具有平面

上研究程度相对高、研究范围大,但精度相对欠缺的特点,针对马东山组页岩油气勘探潜力的富有机质泥页岩段,没有涉及到精细的泥页岩段古沉积环境研究。根据该盆地开展的页岩油气相关勘探工作,在前人的研究基础上,本文以固原凹陷固参 1 井马东山组泥页岩段为研究对象(图 1),采用目前古沉积环境研究最为常用的主量元素和微量元素地球化学定量分析方法,对古气候采用 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量的变化、 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值、 Sr/Cu 值、及 Rb/Sr 比值法等精细综合识别;对古盐度采用 Sr/Ba 、 Sr 丰度及 Th/U 比值法进行分析;对古氧化还原化解采用 V/Cr 、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 Th/U 比值法进行分析;对古水深采用金属元素含量比 Fe/Mn 和 $(\text{Al}+\text{Fe})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ 值进行分析,以期较为精细的刻画六盘山盆地马东山组泥页岩段古沉积环境及变化规律,为六盘山盆地马东山泥页岩段页岩油气研究、勘探提供基础研究资料。

1 样品处理与测试方法

样品采集于固参 1 井 2134.02~2390.10 m 马东山组泥页岩段,岩性为灰色、深灰色、浅灰黑色钙质

注:本文为宁夏回族自治区地质局科技计划项目(编号:宁地科发[2016]号)的成果。

收稿日期:2019-03-07;改回日期:2019-07-18;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.05.005

作者简介:马风华,男,1988 年生,工程师,主要从事非常规油气地质及勘探工作;Email:mfhatcug@163.com。通讯作者:潘进礼,男,1979 年生,高级工程师,主要从事油气地质勘探工作;Email:461486308@qq.com。

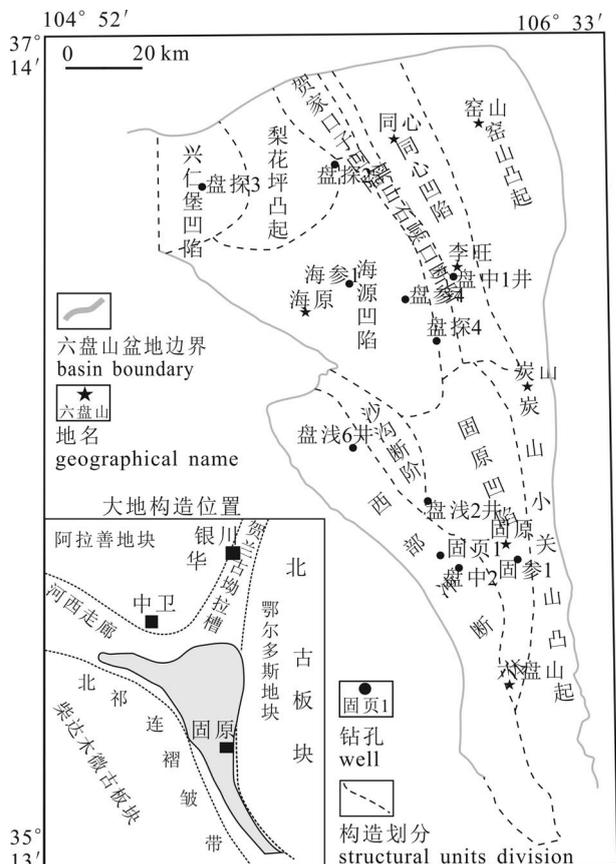


图1 华北板块南缘六盘山盆地构造位置

Fig. 1 Tectonic location and division of the Liupanshan Basin, North China plate

泥岩、泥灰岩及页岩(图2)。本次测试由西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素测试仪

器为日本理学(RIGAKU)产 RTX2100 型、ZSXPrimus II 型 X 射线荧光光谱仪。微量元素测试仪器为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a 等离子体质谱仪。制样分 7 个步骤:①将样品置于烘箱中,于 105℃ 烘干 3 h;②取出样品,称取样品 50±1 mg 于高压密闭 Teflon 溶样器中,缓慢加入 1.5 mL 的高纯硝酸,1.5 mL 的高纯氢氟酸,0.01 ml 高纯氯酸;③在电热板上于 140℃ 将样品蒸至小体积,缓慢加入 1.5 mL 高纯硝酸,1.5 mL 高纯氢氟酸,加盖并旋紧溶样器钢套;④将装有样品的容器放入烘箱中,于 190℃ 保温加热 48 h;⑤待溶样器冷却后开盖,在电热板上于 140℃ 将溶液蒸干,再加入 3 mL 高出硝酸蒸至湿盐状;⑥然后缓慢加入 3 mL 50% 的高纯硝酸,加盖并旋紧溶样器钢套,再次置于烘箱 150℃ 过夜,提取盐类;⑦待溶样器冷却后,将提取液用 2% 的硝酸稀释于清洗干净的 PET(聚酯)瓶中,至 80 g(稀释因子 1:1600)密闭保存,上机完成测定。

2 实验结果

2.1 主量元素特征

六盘山盆地固参 1 井马东山组泥页岩段主量元素测试结果见表 1,马东山组泥页岩段主量元素(元素成分)以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 为主,含量分别为 32.65% ~ 64.80%、10.01% ~ 16.90%、6.73% ~ 16.43%,均值分别为 43.99%、13.06%、10.08%;对比北美页岩(NASC)主量元素分布特征(李婧婧, 2009),马东山组泥页岩具有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 含量相对偏低, Na_2O 、 MgO 、 CaO 含量相对偏高,

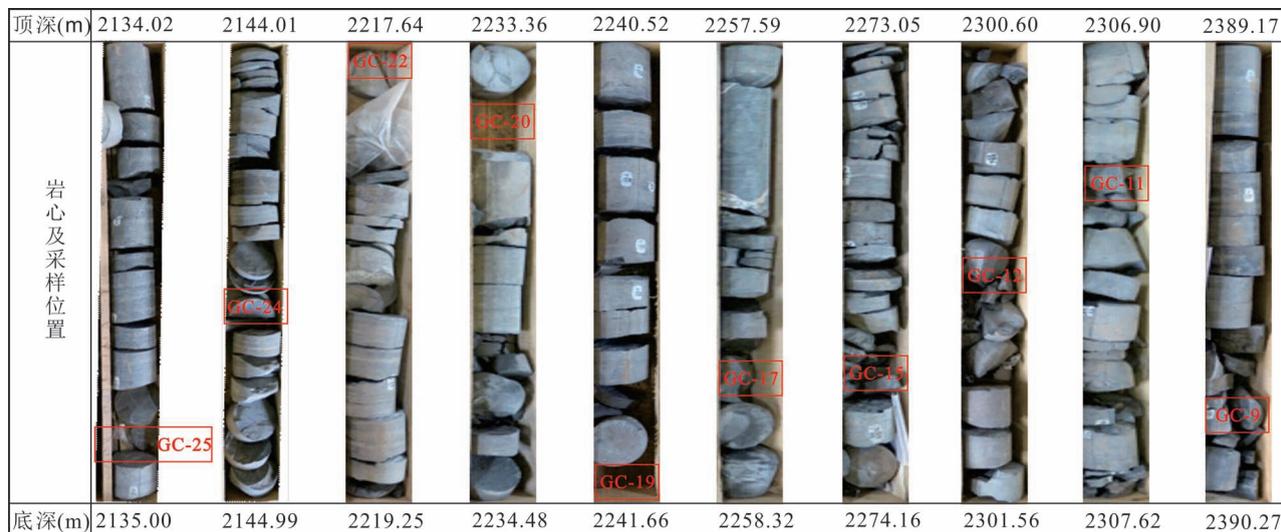


图2 华北板块南缘六盘山盆地马东山组泥页岩岩心照片及采样位置

Fig. 2 Photos of the Madongshan Formation mud—shale and samples location in the Liupanshan Basin, North China Plate

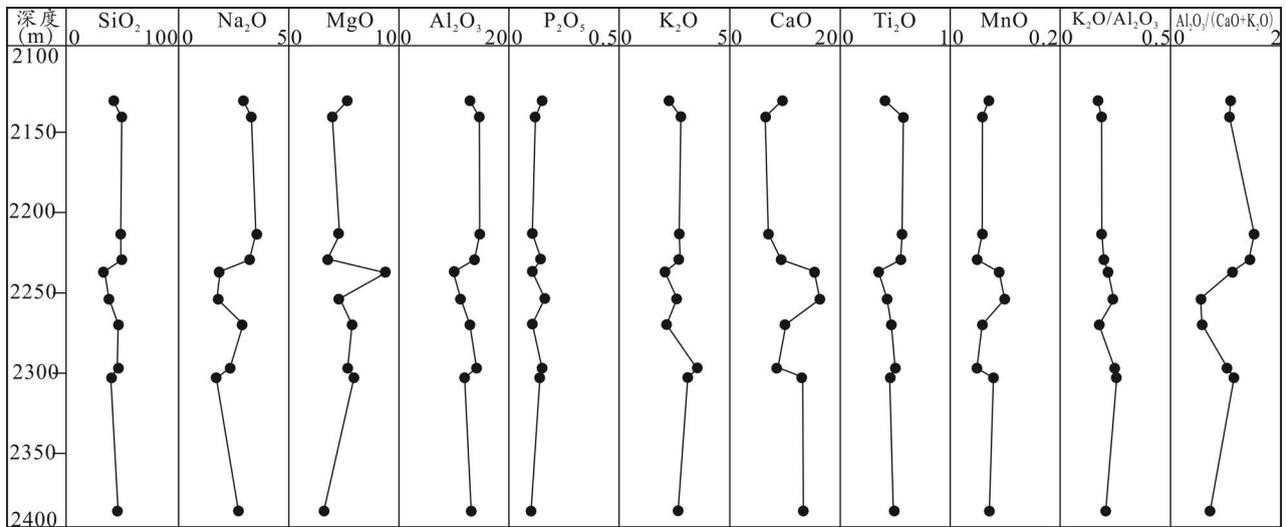


图 3 华北板块南缘六盘山盆地固参 1 井马东山组泥页岩主要元素垂向分布

Fig. 3 Changes of elements in samples from the Madongshan Fm. of well Gucan-1 in the Liupanshan Basin, North China Plate

K_2O 、 P_2O_5 含量相近的特点。相对较低的 SiO_2 含量与相对较高的 CaO 、 MgO 含量,表明马东山组泥页岩沉积时期,陆源碎屑供应相对匮乏但稳定的特点;加之半咸水—咸水的沉积环境(见下文 3.2),其较高的古盐度导致了马东山组泥页岩地层中碳酸盐类自生矿物含量相对较多,故而形成如钙质泥岩、泥灰岩等 Ca 、 Mg 含量相对高的细粒岩石类型。

垂向变化显示,各主要元素含量自下而上呈现两种趋势, SiO_2 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 Ti_2O 、 K_2O 呈现变小再变大的趋势; MgO 、 CaO 、 MnO 呈现变大再变小之相反趋势(图 3),说明马东山组泥页岩沉积时期陆源碎屑供给量呈先变小再变大的趋势,碳酸盐类等

自生矿物含量先变大再变小的趋势,其碎屑供应的程度反映了古环境的变化趋势。郑玉龙等(2015)研究表明沉积岩中 K_2O/Al_2O_3 值能够反映主要由主要元素控制的矿物状况,马东山组泥页岩 K_2O/Al_2O_3 值范围为 0.18~0.26,均值 0.22,小于粘土矿物中的 K_2O/Al_2O_3 值 0.3,表明马东山组泥页岩的主要元素主要由粘土矿物控制,且钾长石含量很少。 $Al_2O_3/(CaO+K_2O)$ 能够反映沉积岩样品中稳定组分和不稳定组分的相对含量,马东山组泥页岩 $Al_2O_3/(CaO+K_2O)$ 值变化范围 0.56~1.53,均值 1.02,表明马东山组泥页岩中稳定组分和不稳定组分差异不大,在垂向上稳定组分与不稳定组分相对

表 1 华北板块南缘六盘山盆地固参 1 井马东山组主要元素分析结果 (%)

Table 1 Analytical results of major elements of samples from Madongshan Fm. of well Gucan-1 in the Liupanshan Basin, North China Plate

样号	SiO_2	Na_2O	MgO	Al_2O_3	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	$Fe_2O_3^T$	烧失	$\frac{K_2O}{Al_2O_3}$	$\frac{Al_2O_3}{CaO+K_2O}$
GC-25	42.02	2.97	5.34	12.94	0.15	2.26	9.65	0.41	0.07	5.9	18.09	0.17	1.09
GC-24	49.41	3.33	4.03	14.67	0.12	2.86	6.74	0.55	0.06	5.55	12.58	0.19	1.09
GC-22	47.78	3.53	4.56	14.77	0.11	2.81	7.35	0.55	0.06	4.76	13.55	0.19	1.53
GC-20	48.52	3.26	3.61	13.80	0.14	2.78	9.34	0.54	0.05	4.34	13.48	0.20	1.45
GC-19	32.65	1.87	8.80	10.01	0.11	2.24	15.54	0.37	0.09	5.06	23.32	0.22	1.14
GC-17	37.48	1.82	4.62	11.30	0.16	2.70	16.43	0.43	0.10	4.38	20.44	0.24	0.56
GC-15	44.66	2.91	5.82	12.95	0.11	2.30	10.10	0.47	0.06	4.54	16.11	0.18	0.59
GC-12	44.81	2.37	5.38	14.21	0.15	3.50	8.74	0.51	0.05	4.97	15.17	0.25	1.04
GC-11	39.23	1.74	5.98	12.00	0.14	3.14	13.24	0.46	0.08	4.95	18.95	0.26	1.16
GC-9	43.90	2.73	3.26	13.20	0.10	2.76	13.49	0.49	0.07	4.72	15.16	0.21	0.73
NASC	58.1	1.3	2.44	15.4	0.17	3.24	3.11	0.75	0.119	/	/	/	/

含量呈现先变小再变大的趋势,与前述碎屑输入和自生矿物含量变化相适应(图3),说明马东山组泥页岩沉积时期物源碎屑供给相对匮乏但稳定。

2.2 微量元素特征

微量元素在沉积、搬运以及成岩后生作用等一系列过程中较难受到水体与变质作用的影响,因此微量元素组合及比值可作为指示物源区类型和构造背景的良好指标(彭媛媛等,2017)。本次10个不同深度泥页岩样品微量元素含量及变化特征较为一致,反应了稳定的物源供应。微量元素球粒陨石标准化蜘蛛图解整体显示出“三峰四谷一平坦型”特征,曲线呈阶梯状右倾分布,微量元素Rb、Th、K、La、Ce、Sr、Nd、Zr、Hf、Sm、Y、Yb、Lu富集,U尤其富集,Ta、Nb、P、Ti亏损(图4)。

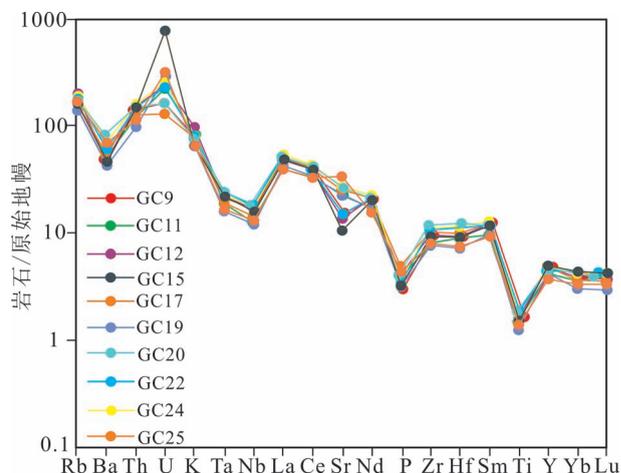


图4 华北板块南缘六盘山盆地马东山组泥页岩段微量元素上地壳标准化蛛网图

Fig. 4 Primitive upper crust-normalized spider diagrams of the Madongshan Fm. mud—shale in the Liupanshan Basin, North China Plate

3 古沉积环境指示意义

3.1 古气候

前人研究显示, SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量的变化、 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值、 Sr/Cu 值、及 Rb/Sr 值均能在一定程度上可以指示沉积岩沉积时期的古气候条件(尹锦涛等,2017;付金华等,2018;李浩等,2017)。

SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量的变化可以指示陆源碎屑加入的程度及气候背景,温暖潮湿时,风化程度强,陆源碎屑输入量大, SiO_2 含量呈相对高值;干旱炎热时,风化程度相对弱,陆源碎屑输入量相对减

少, Al_2O_3 含量呈相对高值。本次样品测试显示马东山组泥页岩页岩 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量在垂向上变化趋势基本一致(图3),且存在3个小的相对干旱炎热—温暖潮湿的相对旋回,说明马东山组泥页岩沉积时期陆源碎屑输入与自生矿物沉积含量相当且保持稳定,原因在于其沉积时期古气候虽有变化,但总体相对稳定。 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值可灵敏反映内生碳酸盐含量的相对高低,具有指示气温变化的意义,其值高指示温暖时期,低值指示相对寒冷时期(付金华等,2018),图5显示,马东山组泥页岩沉积时期 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值呈现出3个由高值—低值的变化过程,指示其沉积时期存在3个相对由温暖—寒冷的旋回。贵州红枫湖于1960~1990年在平均气温 15°C 条件下,沉积物中 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值主要分布在0.043~0.104,平均值为0.075(吴丰昌等,1996)。比较而言,马东山组 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值范围为0.11~0.31,均值0.18,较红枫湖地区沉积物之值高,据此认为马东山组泥页岩段沉积期年平均古气温应大于 15°C 。 Sr/Cu 值处于0~10为潮湿—半潮湿,10~20为半潮湿—半干旱,大于20为干旱环境(李浩等,2017)。数据显示,马东山组泥页岩段 Sr/Cu 范围介于5.6~42.2,均值19.6,主体以半潮湿—半干旱沉积环境为主,图5显示出3个干旱—潮湿的相对旋回。 Rb/Sr 值呈现出高值时,温暖潮湿,风化相对强烈; Rb/Sr 值呈现出低值时,干旱炎热,风化强度相对降低(郑玉龙等,2015);马东山组泥页岩 Rb/Sr 值范围为0.15~0.46,图5显示纵向上呈现出3个由低值—高值的变化过程,指示马东山组泥页岩段沉积时期存在3个相对干旱炎热—温暖潮湿的旋回。

总体来看,马东山组泥页岩段沉积期,古气候呈现出3个由温暖潮湿—干旱炎热的相对旋回,温暖潮湿时,湖盆范围相对变大,水体变深,风化强度增大,陆源碎屑供应量相对增加;干旱炎热时,湖盆范围相对变小,水体变浅,风化程度相对减弱,陆源碎屑供应量减少,碳酸盐等自生矿物含量增加,但这种变化具有相对的旋回性和总体的稳定性,是在年平均古气温大于 15°C 的温暖潮湿环境的总体背景下进行的。

3.2 古盐度

李浩等(2017)采用 Sr/Ba 、 Sr 丰度及 Th/U 值作为古盐度表征参数(表2)。马东山组泥页岩 Sr/Ba 范围介于0.69~1.57,均值属于1.13,表明其沉积时期湖盆水体为半咸水—咸水环境; Th/U 值范围

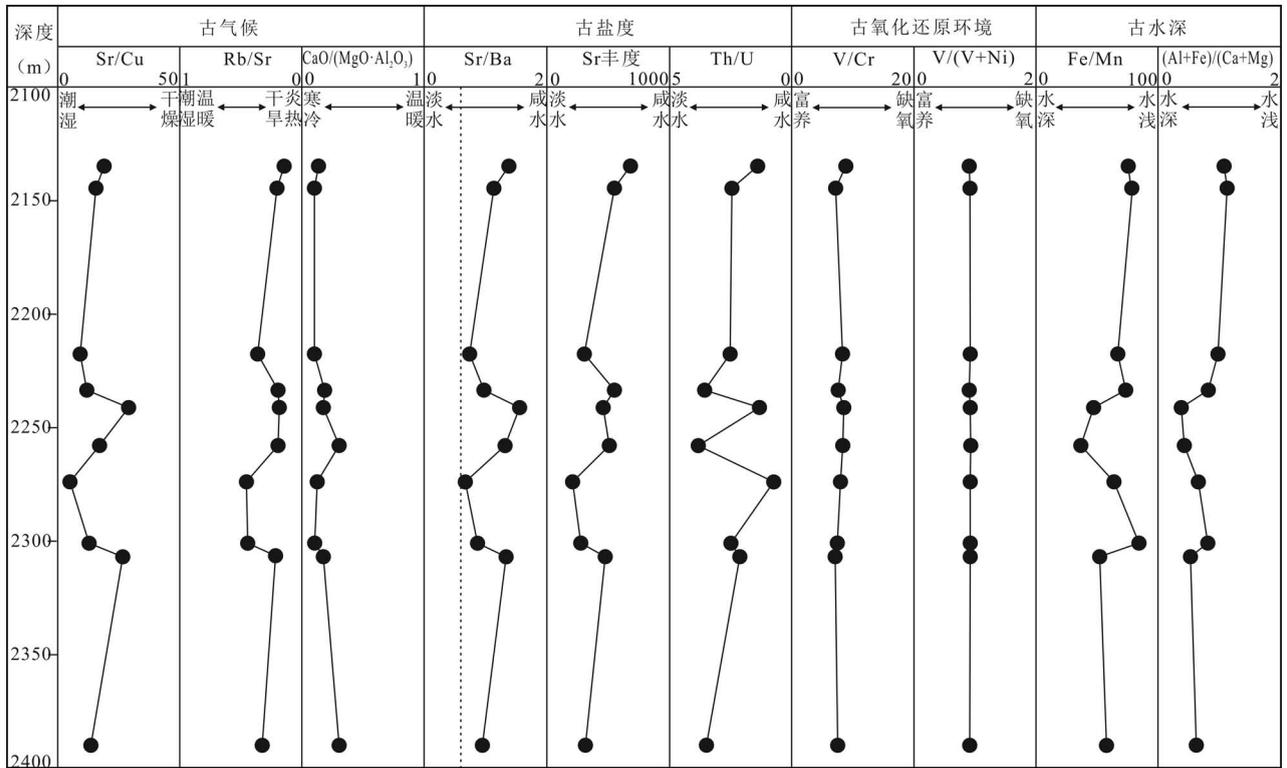


图 5 华北板块南缘六盘山盆地固参 1 井马东山组泥页岩段古环境参数垂向变化

Fig. 5 Vertical variation of paleo-sedimentary environmental of the Madongshan Fm. of well Guacan-1 in the Liupanshan Basin, North China Plate

为 0.78~4.04, 均值 2.44, 呈现半咸水—咸水特征; Sr 含量 $220.68 \times 10^{-6} \sim 687.98 \times 10^{-6}$, 均值 444.46×10^{-6} , 仅在 GC-12 与 GC-15 处小于淡水标准值 300×10^{-6} , 总体仍旧以半咸水—咸水环境为主。纵向上看(图 5), 3 个古盐度参数均显示出 3 个盐度增高的旋回, 亦即呈现出 3 个半咸水—咸水的旋回; 且该 3 个旋回与古气候的 3 个旋回相对应, 温暖潮湿时古盐度相对呈低值, 干旱炎热时古盐度相对呈高值, 说明本次测试数据可信度良好。

3.3 古氧化还原条件

李艳芳等 (2015) 采用 V/Cr、V/(V+Ni)、Th/U 对古氧化还原条件进行表征, 各类指标见表 3。马东山组泥页岩 V/Cr 值处于 7.32~9.04, 均值 8.07, 显示为厌氧环境; V/(V+Ni) 值处于 0.92~0.95, 均值 0.94, 显示厌氧环境; Th/U 值处于 0.78~3.89, 均值 2.44, 显示贫养—厌氧环境。综合来看, 马东山组泥页岩沉积时期水体整体处于贫养—厌氧的还原环境。垂向来看(图 5), 厌氧—贫养之强度相对呈现

3 个旋回, 与古气候、古盐度相适应, 显示古气候越干旱炎热, 盆地范围缩小, 古水深相对变浅, 古水体还原性越弱, 但古盐度越高; 反之, 在温暖潮湿时, 表现出盆地范围扩大, 古水深变深, 还原性增强, 盐度

表 2 古盐度微量元素判别指标 (李浩等, 2017)

Table 2 Trace element index for paleosalinity recognition in samples (Li Hao et al., 2017&)

判断指标	淡水	半咸水	咸水	马东山组参数
Sr/Ba	<0.6	0.6~1.0	>1.0	0.69~1.57/1.13
Th/U	>7	2~7	<2	0.78~4.04/2.44
Sr 丰度 (10^{-6})	<300	300~500	>500	220.68~687.98/444.46

表 3 氧化还原环境的元素判别参数 (李艳芳等, 2015)

Table 3 Element discrimination parameters in redox condition (Li Yanfang et al., 2015&)

沉积环境判别参数	缺氧环境		富养环境	马东山组参数
	厌氧	贫养		
V/Cr	>4.25	2.0~4.25	<2.0	7.32~9.04/8.07
V/(V+Ni)	>0.54	0.46~0.54	<0.46	0.92~0.95/0.94
Th/U	>1.25	0.75~1.25	<0.75	0.78~3.89/2.44

反而相对减小,古水体还原性与古水深和古气候呈一定程度的正相关性,与古盐度呈负相关性(图6),说明温暖潮湿时,水体较深,水体还原性更好,水体盐度的增加会导致氧的溶解量增加,从而降低水体的还原性。

3.4 古水深

研究表明:随着离岸距离的增大和水深的增加,金属元素含量比 Fe/Mn 和 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 呈现逐渐减小的趋势,这2个参数常用来指示湖泊古水深(李浩等,2017)。马东山组泥岩段 Fe/Mn 值范围为 37.31~84.66,均值 63.57。显示马东山组泥岩沉积于半深湖—滨浅湖的古水体环境;(Al+Fe)/(Ca+Mg) 值范围为 0.39~1.14,均值 0.75,显示马东山泥岩沉积于深湖环境。分析认为,鉴于马东山的半咸水—咸水之水体属性及自生矿物含量较

高而导致的 Ca、Mg 含量异常富集之特征,更倾向于 Fe/Mn 值指示的半深湖—滨浅湖水体环境。虽然两者指示结果有所差别,但纵向上变化趋势趋于一致,均显示出自下而上的3个与古气候、古盐度、古氧化还原条件相对应的水体由浅变深的旋回(第三个变深旋回仅显示出变深趋势;图5)。

4 讨论

综上所述,固参1井马东山组泥页岩沉积时期,古气候、古盐度、古还原环境及古水深均存在3个明显的旋回性。据各古环境指标之间相关关系可知(图6),古气候温暖潮湿时,水体盐度相对变小,古水深相对变深(以沉积中心水深为准),水体还原性增强,泥页岩沉积以物源碎屑为稳定组分含量的增加为特征(如 SiO₂),不稳定组分含量相对减少,但

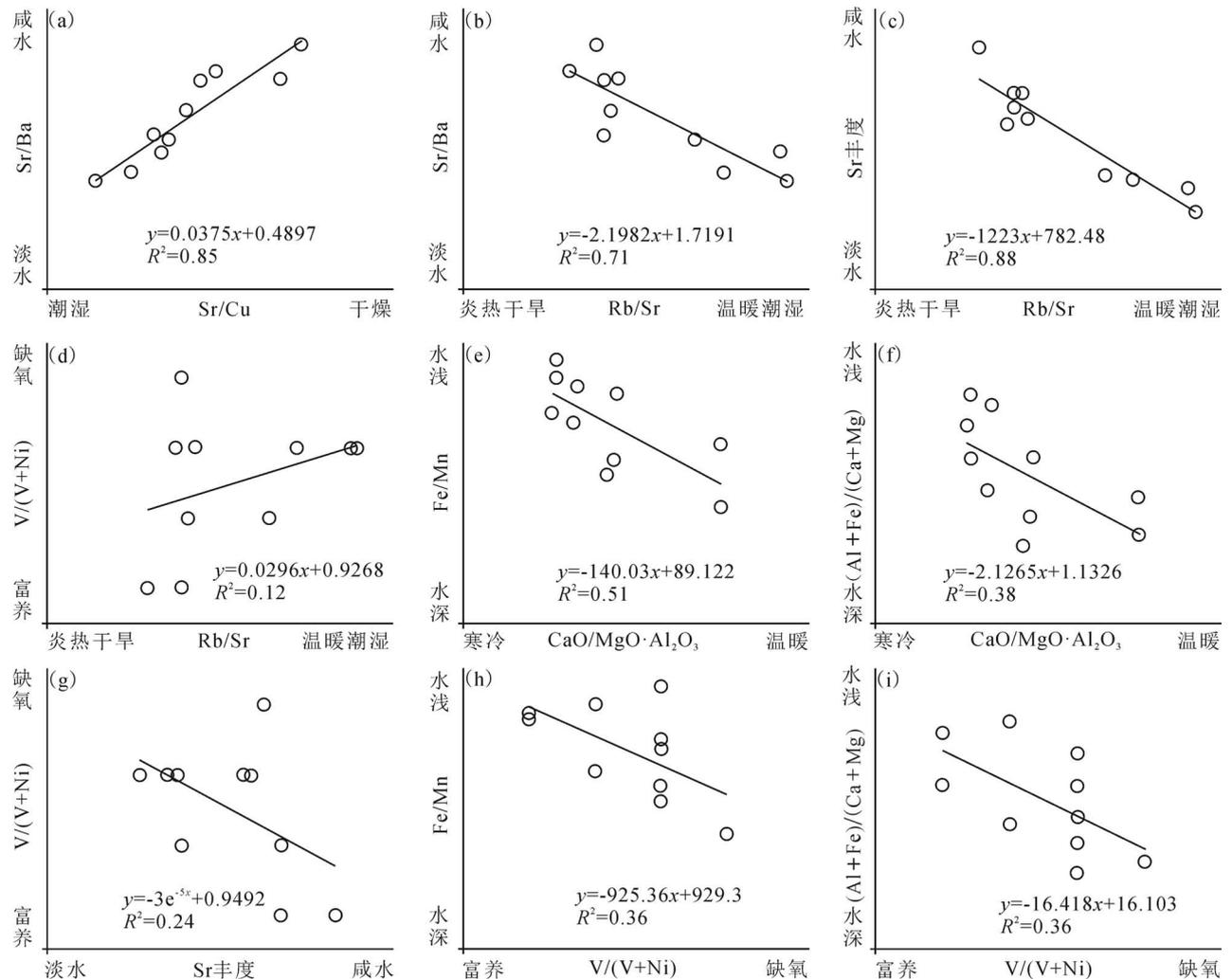


图6 华北板块南缘六盘山盆地马东山组泥页岩古环境指标相关性

Fig. 6 Relationship of paleo-sedimentary environmental index of the Madongshan Fm. in the Liupanshan Basin, North China Plate

由于物源碎屑总体相对匮乏且稳定,稳定组分含量与不稳定组分含量差异并不明显;古气候干旱炎热时,水体盐度相对变大,古水深相对变浅,泥页岩中稳定组分含量相对变少,不稳定组分含量相对增多。总体来说,六盘山盆地马东山组泥页岩段沉积时期,水体并不深,以半深湖—滨浅湖的半咸水—咸水沉积环境为主,其相对的温暖潮湿与干旱炎热之气候更多的是影响湖盆范围,对水体深度影响有限,在温暖潮湿时以碎屑沉积为主,在干旱炎热时自生矿物含量明显增加,从而形成马东山组页岩、泥岩、钙质泥岩、泥灰岩组合的非常规页岩油气储层。

5 结论

(1) 马东山组泥页岩具有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 含量相对偏低, Na_2O 、 MgO 、 CaO 含量相对偏高, K_2O 、 P_2O_5 含量相近的特点,主量元素主要由粘土矿物控制,泥页岩矿物中稳定组分和不稳定组分差异不大,碎屑供给相对匮乏但稳定。

(2) 微量元素含量及变化特征较为一致,具有不同程度的 U 正异常, P 和 Ti 负异常。

(3) 古环境指标显示,马东山组泥页岩沉积时期总体为年平均古气温应大于 15°C 的温暖潮湿气候,水体为半深湖—滨浅湖的半咸水—咸水环境,沉积物是在贫养—厌氧的还原环境中形成。

(4) 古气候、古盐度、古氧化还原条件及古水深在垂向上存在 3 个相对变化的旋回,且古气候与古水深、古还原条件呈正相关性,与盐度呈负相关性。这种旋回性变化形成了马东山组泥岩、页岩、钙质泥岩和泥灰岩的非均质性页岩油气储层。

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)

陈金燕. 2018. 六盘山盆地早白垩世烃源岩沉积有机相研究. 地球化学, 47(4): 325~334.

付金华, 李士祥, 徐黎明, 牛小兵. 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义. 石油勘探与开发, 45(6): 936~946.

韩长金. 1992. 六盘山盆地石油地质条件及评价. 石油勘探与开发, 19(3): 7~13.

蹇启权. 1986. 六盘山盆地含油气远景. 天然气工业, 6(2): 20~23.

李浩, 陆建林, 李瑞磊, 王保华, 徐文, 左宗鑫, 王苗, 刘娅昭. 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素. 地球科学, 42(10): 1774~1786.

李婧婧. 2009. 博格达山北麓二叠系芦草沟组油页岩地球化学特征研究. 导师: 汤大祯. 北京: 中国地质大学博士学位论文: 1~106.

李艳芳, 邵德勇, 吕海刚, 张瑜, 张小龙, 张同伟. 2015. 四川盆地五

峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系. 石油学报, 36(12): 1470~1483.

彭媛媛, 康志宏, 李伟奇, 韩慧宇, 谭龙. 2017. 武威盆地石炭系泥页岩元素地球化学特征及意义. 现代地质, 31(3): 574~586.

施炜, 张岳桥, 马寅生, 刘刚, 武丽. 2006. 六盘山盆地形成和改造历史及构造应力场演化. 中国地质, 33(5): 1066~1074.

吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 1996. 贵州红枫湖纹层沉积物中近代气温记录. 地理科学, 16(4): 345~350.

杨福忠, 胡社荣. 2001. 六盘山盆地中、新生代构造演化和油气勘探. 新疆石油地质, 22(3): 192~195.

杨福忠. 1995. 六盘山盆地含油气远景预测. 石油勘探与开发, 22(1): 5~8.

杨济广, 梅廉夫, 李琪, 张静. 2009. 六盘山盆地构造演化及对成藏的控制. 石油天然气学报(江汉石油学报), 31(5): 1~6.

殷占华, 薛萍. 2000. 六盘山盆地含油气系统. 吐哈油气, 5(4): 11~15.

尹锦涛, 俞雨溪, 姜呈馥, 刘健, 赵谦平, 史鹏. 2017. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩元素地球化学特征及与有机质富集的关系. 煤炭学报, 42(6): 1544~1556.

郑玉龙, 马志强, 王伯长, 袁国礼, 谭建勋. 2015. 黑龙江省柳树河盆地始新统八虎力组油页岩元素地球化学特征及沉积环境. 地理学报, 17(5): 689~698.

种俊丰, 魏巍. 2007. 六盘山盆地地下白垩统烃源岩特征. 石油天然气学报, 29(3): 23~25.

Chen Jinyan. 2018&. Study of sedimentary organic facies of Early Cretaceous source rocks in Liupanshan Basin. Geochimica, 47(4): 325~334.

Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, Niu Xiaobing. 2018&. Paleosedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 45(6): 936~946.

Han Changjin. 1992&. Petroleum geology of the Liupanshan Basin and its evaluation. Petroleum Exploration and Development, 19(3): 7~13.

Jian Qiquan. 1986&. Hydrocarbon bearing prospects of Liupanshan Basin. Nature Gas Industry, 1986, 6(2): 20~23.

Li Hao, Lu Jianlin, Li Ruilei, Wang Baohua, Xu Wen, Zuo Zongxin, Wang Miao, Liu Yazhao. 2017&. Generation paleoenvironment and its controlling factors of Lower Cretaceous lacustrine hydrocarbon source rock in Changling depression, South Songliao Basin. Earth Science, 41(10): 1744~1786.

Li Jingjing. 2009&. Study on geochemical characteristics of oil shale in Lucaogou formation within Permian northern Bogda Mountain. Dissertation Supervisor: Prof. Tang Dazhen. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Doctoral Degree: 1~106.

Li Yanfang, Shao Deyong, Lü Haigang, Zhang Yu, Zhang Xiaolong, Zhang Tongwei. 2017&. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation—Longmaxi Formation, Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(12): 1470~1483.

Peng Yuanyuan, Kang Zhikong, Li Weiqi, Han Huiyu, Tan Long. 2017&. Element geochemical characteristics of carboniferous shale in Wuwei Basin and its significance. Geoscience, 31(3): 574~586.

Shi Wei, Zhang Yueqiao, Ma Yinsheng, Liu Gang, Wu Li. 2006&. Formation and modification history of the Liupanshan Basin on the southwestern margin of the Ordos block and tectonic stress field evolution. Geology in China, 33(5): 1066~1074.

- Wu Fengchang, Wan Guojiang, Huang Ronggui. 1996&. Recent temperature records of annually laminated sediments in Hongfeng Lake, Guizhou. *Scientia Geographica Sinica*, 16(4): 345~350.
- Yang Fuzhong, Hu Sherong. 2001#. Tectonic evolution and oil—gas exploration during the Mesozoic and Cenozoic in Liupanshan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 22(3): 192~195.
- Yang Fuzhong. 1995&. Hydrocarbon Potential of the Liupanshan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 22(1): 5~8.
- Yang Guangji, Mei Lianfu, Li Qi, Zhang Jing. 2009&. Tectonic evolution and its control of hydrocarbon accumulation in Liupanshan Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(5): 1~6.
- Yin Jintao, Yu Yuxi, Jiang Chengfu, Liu Jiang, Zhao Qianping, Shi Peng. 2017&. Relationship between element geochemical characteristic and organic matter enrichment in Zhangjiatan Shale of Yanchang Formation, Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 42(6): 1544~1556.
- Yin Zhanhua, Xue Ping. 2000&. The study of oil—gas-bearing system in Liupanshan Basin. *Tuha Oil and Gas*, 5(4): 11~15.
- Zhang Junfeng, Wei Wei. 2007&. Characteristics of lower Cretaceous source rocks in Liupanshan Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 29(3): 23~25.
- Zheng Yulong, Ma Zhiqiang, Wang Baichang, Yuan Guoli, Tan Jianxun. 2015&. Geochemistry characteristics and sedimentary environment of oil shale from the Eocene Bahuli Formation in Liushuhe Basin, Heilongjiang Province. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 689~698.

Paleo-sedimentary environmental study of mud—shale member of Madongshan Formation of well Gucan-1 in Liupanshan Basin, North China Plate

MA Fenghua, PAN Jinli, MA Ruiyun, WU Wenzhong, ZHANG Yong, MA Xiaojuan
Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yichuan, Ningxia, 750021

Objectives: Paleosedimentary environmental study of mud—shale member of Cretaceous Madongshan Formation (Fm.) in the Liupanshan Basin includes the paleoclimate, paleosalinity, paleoredox conditions and paleobathymetric through 10 samples collected from well Gucan-1 in the basin.

Methods: Based on geochemical element analysis and a series of identification indexes of paleoclimate, paleosalinity, paleoredox conditions and paleobathymetric, such as $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$, Sr/Cu , Rb/Sr , Sr/Ba , Sr abundance, Th/U , V/Cr , $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$, Fe/Mn and $(\text{Al}+\text{Fe})/(\text{Ca}+\text{Mg})$ to restore its Paleosedimentary environmental.

Results: Comprehensive analysis shown that the sedimentary period of mud—shale member in the Madongshan Fm., the paleoclimate was warm temperate higher than 15 °C, the water body was brackish—salt water of semi-deep to shallow lake, and the sediments were deposited under strong reduction conditions. The paleoclimate, paleosalinity, paleoredox conditions and paleobathymetric had 3 relative changes cycles in vertical direction, and the paleoclimate had a positive correlation with paleoredox conditions and paleobathymetric while had a negative correlation with paleosalinity.

Conclusions: Paleoenvironmental factors of relative changes of 3 cycles such as appropriate paleodepth, strong reduction conditions, stable and scarce supply debris jointly control the heterogeneous of unconventional shale and gas reservoir facies of the Madongshan Fm.

Keywords: paleoclimate; paleosalinity; paleoredox conditions; paleosedimentary environment; Madongshan Formation; Liupanshan Basin

Acknowledgements: This study was generously financed by Innovation Team Project of Ningxia Geological and Mineral Resources Exploration (No. 2016). We would like to express our thanks to the reviewers for examining the manuscripts

First author: MA Fenghua, male, born in 1988, engineer, is mainly engaged in geology and exploration of unconventional oil and gas; Email: mfhatcug@163.com

Corresponding author: PAN Jinli, male, born in 1979, senior engineer, is mainly engaged in exploration of oil and gas; Email: 461486308@qq.com

Manuscript received on: 2019-03-07; Accepted on: 2019-07-18; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.05.005