

#### 徐家围子断陷沙河子组烃源岩形成古环境及主控因素

孙立东,杨亮,李笑梅,周翔,胡博,蔡壮,杜影

引用本文:

孙立东,杨亮,李笑梅,等. 徐家围子断陷沙河子组烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 沉积学报, 2024, 42(5): 1753-1764. SUN LiDong, YANG Liang, LI XiaoMei, et al. Paleoenvironment and Main Controlling Factors of Source Rocks in the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(5): 1753-1764.

#### 相似文章推荐(请使用火狐或IE浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

准噶尔盆地中拐地区上乌尔禾组富火山碎屑砂砾岩储层的古环境及储层机理研究

Study of the Paleoenvironment and Reservoir Mechanism for Volcanic Rich Clastic Reservoirs in the Upper Urho Formation in the Zhongguai Region, Junggar Basin

沉积学报. 2020, 38(4): 851-867 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.054

#### 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组物源与沉积体系分析

Provenance and Sedimentary System Analysis of the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin 沉积学报. 2020, 38(3): 610-619 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.060

#### 玛湖凹陷夏子街地区三叠系百口泉组砂砾岩储层特征及控制因素

The Characteristics and Controlling Factors of Glutenite Reservoir in the Triassic Baikouquan Formation, Xiazijie Area, Mahu Depression 沉积学报. 2019, 37(5): 945–956 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000–0550.2019.002

#### 甘肃天水全新世黄土一古土壤序列化学风化特征及其古气候意义

Chemical Weathering Characteristics and Its Climate Significance of Holocene Loess-paleosol Sequence in Tianshui of Gansu Province 沉积学报. 2018, 36(5): 937-945 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.138

#### 焦作煤田石炭—二叠纪泥质岩地球化学特征及古环境意义

Geochemical Characteristics of Mudstones in the Permo–Carboniferous Strata of the Jiaozuo Coalfield and Their Paleoenvironmental Significance

沉积学报. 2018, 36(2): 415-426 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.034

文章编号:1000-0550(2024)05-1753-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.117

## 徐家围子断陷沙河子组烃源岩形成古环境及主控因素

孙立东,杨亮,李笑梅,周翔,胡博,蔡壮,杜影 中国石油大庆油田勘探开发研究院,黑龙江大庆 163712

**摘 要 【目的**】明确沙河子组优质烃源岩形成的主控因素,为松辽盆地深层天然气勘探方向优选提供地质依据。【**方法**】综合利 用岩心、有机地球化学和元素地球化学等多种资料,系统研究沙河子组沉积环境和水体环境,明确了断裂活动、沉积相和古沉积 环境对烃源岩有机质丰度、类型的控制作用。【**结果**】沙河子组发育暗色泥岩和煤岩两种类型烃源岩,沙I段沉积期断裂活动强, 水体相对局限、深度大,形成的"深水窄盆"盐度高、还原性好,以半深湖相泥岩为主,沙II段时断裂活动弱,湖盆面积达到最大,形 成的"浅水宽盆"盐度低、还原性变差,烃源岩以滨浅湖相煤岩为主。【**结论**】断裂活动在下降盘为泥岩堆积提供可容纳空间,控制 了泥岩厚度;沉积环境影响有机质输入,决定了泥岩有机质类型和煤岩分布;由古盐度、古水深和氧化还原组成的古沉积环境影 响有机质的富集和保存,是导致现今烃源岩质量差异的主要原因。

关键词 微量元素;古环境;烃源岩;控制因素;沙河子组

**第一作者简介** 孙立东,男,1981年出生,硕士,高级工程师,石油地质学,E-mail: sunlidong@petrochina.com.cn 通信作者 周翔,男,博士,高级工程师,石油地质学,E-mail: zhouxiang2206@petrochina.com.cn 中图分类号 P618.13 文献标志码 A

## 0 引言

优质烃源岩是油气形成的基础,其成因及分布预 测更是影响油气勘探决策的关键因素。通常,烃源岩 的发育受构造特征、沉积相和沉积环境等因素影 响[1-3],尤其是湖泊面积小、相变迅速的小型断陷湖盆, 环境变化对烃源岩的控制更为明显。沉积岩中常、微 量元素组成是沉积环境变迁在地层中留下的可追溯 记录,利用泥岩中元素含量及相关元素比值可恢复沉 积时古沉积环境特征4。大量优质烃源岩沉积古环境 相关的研究表明,古盐度、古生产力和氧化还原条件 等沉积环境因素通过控制有机质的富集和保存,直接 决定了烃源岩的质量[58]。徐家围子断陷是松辽盆地 深层最主要的含气断陷,具有沉积环境复杂、烃源岩 类型多、非均质性强的特点,不同类型烃源岩的质量 及分布影响了该断陷多类型气藏的富集。前人对徐 家围子断陷的构造特征、沉积相和储层特征进行了大 量研究,但对于沙河子组沉积特征及古沉积环境尚未 进行深入研究<sup>19</sup>。本次研究在沙河子组烃源岩特征和 沉积环境、水体环境恢复的基础上,讨论断裂、沉积相 和古沉积环境对烃源岩形成的控制作用,以期为松辽 盆地深层天然气勘探方向优选提供地质依据。

## 1 区域地质概况

徐家围子断陷构造上位于松辽盆地深层东南断 陷带,西邻中央古隆起、东接朝阳沟阶地,面积约 5350km<sup>2</sup>,天然气探明地质储量近3000×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,是盆 地内发现天然气资源最多的深部断陷<sup>100</sup>。徐家围子断 陷具有"下断上坳"的二元结构,深层即断陷期地层依 次为火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组和泉头组。 沙河子组是盆地强烈断陷期沉积的一套含煤湖相碎 屑岩,也是盆地深层沙河子组致密气、营城组火山岩 气、登娄库组构造气等多类型气藏的气源岩,可分为 下部沙I段、上部沙II段2个层段和4个亚段(图1)。

2 沙河子组烃源岩形成的沉积环境与 特征

#### 2.1 沙河子组沉积相类型及分布

沙河子组沉积期为松辽盆地断陷湖盆发育鼎盛

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05001-002);中国石油集团公司前瞻性基础性重大科技项目(2021DJ0205)[Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05001-002; Important National Science and Technology Project of CNPC, No. 2021DJ0205]

收稿日期:2022-07-08;修回日期:2022-09-16;录用日期:2022-11-20;网络出版日期:2022-11-20

第42卷





期,研究区发育辫状河三角洲、扇三角洲、滨浅湖— 半深湖和近岸水下扇等四种沉积相,断陷西侧以扇三 角洲—滨浅湖、半深湖为主,局部见近岸水下扇;东侧 则为辫状河三角洲,向前过渡为滨浅湖—半深湖相 (图2)。沙I下亚段为初始断陷期,受古地貌影响沉 积充填范围较小,沿徐西断裂下降盘发育多个小型扇 三角洲朵叶体,徐中地区强烈下陷成半深湖,徐东斜 坡发育辫状河三角洲。沙I上亚段时断陷西侧扇三 角洲进一步扩大,以扇三角洲前缘最发育,徐东斜坡 仍为辫状河三角洲,徐中地区湖盆范围扩大,发育滨 浅湖、半深湖—深湖。沙Ⅱ下亚段时东、西两侧发育 三角洲平原迅速扩大。沙Ⅱ上亚段时断裂活动减弱、 湖泊面积减少,仅在三角洲沉积间隙见滨浅湖相。

#### 2.2 沙河子组烃源岩类型与特征

岩心观察表明,沙河子组烃源岩分为暗色泥岩 和煤岩两种类型。暗色泥岩包括辫状河(扇)三角洲





前缘分流间湾灰色、灰绿色泥岩和半深湖相灰黑色 泥岩三种类型。煤岩分为辫状河(扇)三角洲平原沼 泽煤岩和滨浅湖煤岩两种类型,是分流河道两侧湿 地泥炭沼泽化或湖泊大面积淤浅沼泽化形成的。不 同类型烃源岩特征差异明显,暗色泥岩集中在下部 沙I段,沙I下和沙I上亚段半深湖相泥岩TOC普遍大 于2%,平均为4.06%和4.36%(表1),为好一很好烃 源岩,有机质类型以II型为主,部分为III型(图3),沙 II上和沙II下亚段三角洲前缘分流间湾暗色泥岩有 机质丰度较差,TOC平均为2.34%和1.94%,为中等 一好烃源岩。煤岩主要在沙II段,沙II上和沙II下亚 段滨浅湖相煤岩TOC平均为29.65%和48.86%,全部 为III型有机质,沙I下亚段三角洲平原沼泽煤岩厚度 薄、分布零散,有机质丰度也相对较低。

沙河子组热演化程度高,沙I下亚段埋深最大, *R*。和*T*<sub>ma</sub>分别介于2.18%~3.91%和480 ℃~598 ℃,平 均约2.40%和532 ℃,处于过成熟阶段。沙I上亚段  $R_0$ 和 $T_{max}$ 平均为2.28%和480 ℃,达到高一过成熟。 沙II下亚段 $R_0$ 和 $T_{max}$ 分别介于1.35%~3.40%和306 ℃ ~587 ℃,平均为2.17%和437 ℃,为高成熟阶段。沙 II上亚段 $R_0$ 和 $T_{max}$ 平均为1.82 ℃和390 ℃,处于成熟 阶段。

### 3 沙河子组沉积期古环境特征

#### 3.1 沙河子组沉积期古气候条件

沉积岩中常、微量元素组成及相对含量记录了 水体环境的变化,可提供古气候、古盐度、古生产力、 氧化还原条件等环境变迁的信息<sup>[11]</sup>。潮湿气候条件 下,沉积岩中Fe、Mn、Cr、V、Ni和Co等喜湿元素富 集,气候干燥、水分蒸发时喜干型元素Ca、Mg、K、Na、 Sr和Ba析出,利用二者之比即气候指数C和Sr/Cu比

表1 徐家围子断陷沙河子组烃源岩地球化学特征

Table	e 1	Geochemical	characteristics	of	source	rock	from	the	Shahezi	Formation	in	the	Xujiaweizi	Fault	Depression
-------	-----	-------------	-----------------	----	--------	------	------	-----	---------	-----------	----	-----	------------	-------	------------

烃源岩类型		有机	贡丰度	有机质	质类型	有机质成熟度		
		TOC/%	$S_1+S_2/(mg/g)$	H/C	O/C	R <sub>°</sub> /%	$T_{\rm max}^{}/^{\circ}{ m C}$	
	御山	0.26~45.96	0.01~122.84	0.42~1.14	0.02~1.16	2.18~3.91	480~598	
ØΓΓ	化石	4.03(44)	2.86(44)	0.79(14)	0.22(14)	2.40(52)	532(45)	
	泥岩	0.15~54.19	0.01~105.99	0.35~2.18	0.03~1.21		$\frac{452 \sim 590}{512(36)}$	
Sals r. L.		4.36(56)	4.03(56)	0.85(15)	0.16(15)	1.69~3.44		
UIL.	煤岩	1.31~65.11	0.21~4.44	0.12~0.52	0.02~0.06	2.28(33)		
		17.66(46)	2.09(46)	0.28(8)	0.04(8)			
	泥岩	0.08~30.45	0.02~33.29	0.32~2.18	0.03~0.91		$\frac{447 \sim 587}{493(42)}$	
沙口下		2.34(42)	1.75(42)	0.82(18)	0.16(18)	1.35~3.40		
10 II F	卅山	2.86~75.57	0.09~39.23	0.22~0.52	0.01~0.05	2.17(42)		
	深石	29.65(26)	7.12(26)	0.32(17)	0.03(17)			
	泥岩	0.51~6.36	0.02~2.41	0.32~0.94	0.03~0.24			
where L		1.94(33)	0.85(33)	0.61(16)	0.12(16)	1.07~2.91	437~527	
UIL	冲电	0.63~83.06	0.06~115.52	0.22~0.68	0.02~0.06	1.82(33)	457(33)	
	深石	48.86(26)	16.83(26)	0.38(12)	0.04(12)			





Fig.3 Classification of elemental in kerogen, and pyrolysis parameters of mudstone in the Xujiaweizi Fault Depression

可反映沉积时古气候。通常温暖、潮湿气候下0.6<C <1、1<Sr/Cu<10,而0.2<C<0.6和Sr/Cu>10指示半潮湿 一半干燥气候,干燥气候条件下C<0.2<sup>112]</sup>。沙河子组 不同层段泥岩的气候指数C和Sr/Cu变化较小,沙I 段气候指数C介于0.05~1.02,平均为0.29,Sr/Cu介于 5.36~24.88,平均为14.82,指示其为半潮湿一半干旱 气候(图4)。沙II段气候指数C和Sr/Cu分别介于 0.02~0.64和5.48~30.72,平均为0.24和18.02,与沙I 段相似,表明沙河子组时气候稳定,为半潮湿一半干 旱气候(图5a)。

#### 3.2 沙河子组沉积期古盐度特征

古盐度通过影响生物种类、繁盛程度控制有机 质富集,沉积物中Sr含量、Sr/Ba和Mg/Ca与古盐度正 相关,是水体盐度的指示<sup>[13]</sup>。通常Mg/Ca≤0.25时为 微咸水,0.25<Mg/Ca≤0.50时为半咸水,0.50<Mg/Ca≤ 1.00时指示咸水,Mg/Ca大于1.00则为盐湖沉积<sup>[14]</sup>。 下部沙I段Sr/Ba和Mg/Ca相对较大,介于0.04~0.66 和0.56~4.74,平均为0.42和1.16,为咸水一盐湖环境 (图5b),沙II段沉积时盐度降低,Sr/Ba介于0.02~ 0.46,平均为0.16,Mg/Ca介于0.08~2.19,平均0.25, 为半咸水—咸水环境。不同层段Sr含量也具有类似 特征,沙I段Sr含量较高,从329 μg/g到594 μg/g均有 分布,为咸水—盐湖,而沙II段沉积时Sr含量减小, 为半咸水一咸水环境(图5c)。

#### 3.3 沙河子组沉积期氧化还原条件

贫氧强还原的深水环境有利于有机质保存,是 形成优质烃源岩的必要条件。富氧的环境中V/(V+ Ni)≤0.45、V/Cr≥4.25,厌氧的强还原环境中V/(V+Ni) ≥0.60、V/Cr≤2.0,0.45<V/(V+Ni)<0.60和2.00<V/Cr< 4.25则为贫氧的弱还原环境<sup>[15]</sup>。沙I段V/(V+Ni)普 遍大于0.5,介于0.53~0.95,平均为0.82,V/Cr介于 0.23~2.39,平均为1.58,为厌氧的还原环境;沙II段 V/(V+Ni)和V/Cr分别介于0.44~0.78和0.88~3.64,平 均为0.55和2.63,相对于沙I段水体还原性减弱,为 还原—弱还原环境(图5d)。沙河子组Pr/Ph也具类 型特征,Pr/Ph介于0.12~2.00,平均为0.84,大部分样 品处于强还原—还原环境(图5e);Pr/nC<sub>17</sub>和Ph/nC<sub>18</sub> 关系也表明,沙河子组烃源岩均形成于还原环境,下 部沙I段还原性更强(图5f)。

#### 3.4 沙河子组沉积期古水深特征

不同水体深度下元素的富集呈规律性变化,Fe、K、Al易与黏土矿物结合在滨岸带富集,而Mn、Ca和Mg则吸附于黏土矿物中,经长距离搬运到湖盆中部沉淀,因此随水体加深Fe/Mn、(Al+Fe)/(Ca+Mg)迅速减小。通常30<Fe/Mn<50为半深湖沉积,Fe/Mn>50为浅湖<sup>1161</sup>。沙I段Fe/Mn和(Al+Fe)/(Ca+Mg)分别介

第5期



Fig.4 Change modes of mudstone elemental contents and total organic carbon (TOC) of Da21 in the Xujiaweizi Fault Depression

于18.74~78.51和1.37~7.31,平均为33.18和5.63,以 半深湖一深湖为主;上部沙II段Fe/Mn和(Al+Fe)/ (Ca+Mg)明显偏高,分别介于32.39~292.62和3.92~ 19.82,平均为74.72和7.83,表明沙II段水体变浅(图 5g),随水深减小,V/Cr增大、还原性减弱(图5h)。

## 4 沙河子组烃源岩形成控制因素

#### 4.1 断裂活动形成可容纳空间,控制了泥岩的厚度

湖相烃源岩中有机质富集受多种因素控制,其 中构造活动从宏观上形成可容纳空间并决定沉积体 发育,进而影响断陷湖盆烃源岩的形成<sup>117</sup>。沙河子组 沉积期徐西、徐中和徐东断裂活动在下降盘形成巨 大可容纳空间,是暗色泥岩堆积的主要场所。尤其 是沙I下亚段时,徐西断裂活动强度最大,此时湖盆 面积较小,徐家围子断陷迅速下陷,在徐西断裂下降 盘处形成深凹区,堆积巨厚的非补偿性沉积的暗色 泥岩(图6),最大厚度达120m。沙I上亚段时徐西、 徐中断裂仍保持较高的活动强度,沿徐西、徐中断 裂下降盘形成Da2井、S3井、Xu28井、Xu904井等串 珠状分布的深凹区,堆积巨厚的滨浅湖、半深湖相 泥岩。

![](_page_6_Figure_3.jpeg)

![](_page_6_Figure_4.jpeg)

![](_page_7_Figure_3.jpeg)

![](_page_7_Figure_4.jpeg)

![](_page_7_Figure_5.jpeg)

图 7 徐家围子断陷沙河子组暗色泥岩厚度分布 (a)沙1下亚段暗色泥岩厚度分布;(b)沙1上亚段暗色泥岩厚度分布;(c)沙11下亚段暗色泥岩厚度分布;(d)沙11上亚段暗色泥岩厚度分布 Fig.7 Distribution of mudstones in the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression

沙II下亚段,徐西断裂活动性减弱,对暗色泥岩 的控制也随之减弱,徐中地区暗色泥岩最大厚度仅 为80m(图7)。沙II上亚段时随徐西、徐中断裂活动 进一步减弱,水体持续变浅,暗色泥岩厚度进一步减 小,同时沙河子沉积末期徐东断裂开始活动,造成沙 河子地层抬升,造成断陷西部和南部沙II上和沙II下 亚段大范围抬升剥蚀,仅在Da2、Xu28、Xu401等局部 深凹残留沙II段泥岩。

总体上,徐西、徐中断裂活动控制了沙I段暗色

泥岩的分布,由断裂活动形成的安达凹陷、徐中凹陷 等局部深凹是泥岩富集有利区,远离断裂的徐东地 区泥岩不发育;沙Ⅱ段时随徐西、徐东断裂活动降 低、对泥岩控制减弱,泥岩厚度明显减小;沙河子沉 积期末徐东断裂活动造成地层抬升、沙Ⅱ段大范围 剥蚀,泥岩局限在北部安达凹陷和徐中凹陷。

#### 4.2 沉积相影响有机质输入,决定了烃源岩类型

陆相断陷湖盆面积小、沉积相变快,不同沉积环 境中机质输入存在差异,决定了烃源岩类型,是影响 烃源岩发育的重要因素。沙I下亚段扇三角洲前缘 分流间湾泥岩 CPI和 OEP 分别介于 0.62~1.03和 0.76~1.16,奇偶优势不明显,  $C_{21+22}/C_{28+29}$ 介于 0.85~ 6.42,  $\sum C_{21}/\sum C_{21}$ 介于 0.45~1.34, 是以 $nC_{21}$ 为主峰的 前峰型(图 8a),母质为低等水生生物和陆源高等植 物的混合型母质。沙I上亚段辫状河三角洲前缘分 流间湾泥岩也有类似特征, CPI和 OEP 平均为0.73和 0.85,  $C_{21+22}/C_{28+29}$ 介于 0.86~5.82,  $\sum C_{21}/\sum C_{21}$ 介于 0.49~1.26,是以 $nC_{21}$ , $nC_{23}$ 为主峰的前峰型(图 8b),反 映低等水生生物是烃源岩母质的重要来源,同时有 部分陆源高等植物混入。沙I上亚段滨浅湖泥岩  $C_{21+22}/C_{28+29}$ 介于 1.24~23.66,  $\sum C_{21}/\sum C_{21}$ 介于 0.69~ 2.12, 正构烷烃是以 $nC_{19}$ 为主峰的前峰型(图 8c),母 质以水生生物为主,有机质类型以II型为主,含少量

![](_page_8_Figure_4.jpeg)

I型。沙Ⅱ上亚段半深湖相泥岩正构烷烃是以 $nC_{19}$ 为 主峰的前峰型(图 8d), $C_{21+22}/C_{28+29}$ 介于1.29~24.05,  $\sum C_{21}/\sum C_{21}$ 介于0.89~2.29,表明母质以水生生物为 主,同时含部分陆源高等植物,有机质类型以Ⅱ型为 主,含少量Ⅰ型。

沙II段煤岩正构烷烃是以nC27为主峰的后峰型, 指示其为III型干酪根(图8e,f)。煤岩发育受沉积环 境控制明显,断裂活动对其影响较小。沙I段时湖盆 范围小,断陷边部碎屑物质在两侧三角洲平原堆积, 促进植物生长、沼泽化,在巨厚的砂砾岩中形成夹层 型薄层煤岩,单层厚度小于2m、分布范围窄(图9)。 沙II沉积时,湖盆范围大、水体浅,早期沉积淤浅,植 物大量生长并逐渐沼泽化,形成与暗色泥岩频繁互 层的滨浅湖相煤岩,厚3~5m,最大达60m,也是沙河 子组煤岩发育的主要时期。

![](_page_8_Figure_7.jpeg)

(a)Xu1井,4364 m,沙I下亚段,扇三角洲前缘深灰色泥岩;(b)Xu904井,4206 m,沙I上亚段,辫状河三角洲前缘深灰色泥岩;(c)Fa8井,3974 m,沙I上亚段,滨浅湖 相灰黑色泥岩;(d)Xu904井,4168 m,沙II上亚段,半深湖相黑色泥岩;(e)S6井,3484 m,沙II下亚段,滨浅湖相煤岩;(f)Xt1井,3286 m,沙II上亚段,滨浅湖相煤岩 Fig.8 Gas chromalogram of different source rocks in the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

(a)沙I下亚段煤岩厚度;(b)沙I上亚段煤岩厚度;(c)沙II下亚段煤岩厚度;(d)沙I上亚段煤岩厚度 Fig.9 Distribution of coals in the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression

#### 4.3 古沉积环境条件差异对烃源岩质量的控制作用

优质烃源岩的形成是古气候、古盐度、古生产力 等有机质输入和氧化一还原条件、沉积一沉降速率 等保存条件综合作用的结果<sup>[18]</sup>。沙河子组沉积时为 半潮湿一半干旱环境、气候波动较小,各层段间气候 指数C和Sr/Cu与TOC相关性较差(图10a),暗示沙 河子组沉积时气候波动较小、对有机质富集的影响 有限。

Sr含量和Mg/Ca等古盐度参数与TOC正相关(图 10b),表明古盐度有利于有机质富集。较高的盐度 促进Ba、P等营养元素的输入,其中P作为藻类繁盛 必须的限制性元素,是引发低等水生生物勃发、形成 较高的古生产力的必要条件<sup>[19]</sup>。沙I段泥岩母质中 藻类等低等水生生物含量较高,较高古生产力指标 P/A1也与TOC正相关(图10c),而沙II段煤岩母质为 陆源高等植物,TOC与P/A1关系不明显。同时,较高 的盐度造成水体中盐度分层、限制水体对流,形成有 利于沙I段有机质保存的强还原环境。

沙I段时强烈的断裂活动形成的半深湖—深湖 既是烃源岩堆积的有利场所,同时深水、咸水条件下 形成的强还原环境也是有机质保存的有利条件<sup>[20]</sup>。 TOC与Fe/Mn、(Al+Fe)/(Ca+Mg)等古水深指标关系表 明,由下部沙I段到上部沙II段,随水体变浅、盐度降 低、还原性减弱,沙II段煤岩TOC也迅速降低(图 10d)。V/Cr和Pr/Ph等氧化还原指标也具有类似的 变化特征,进一步证实沙河子组下部沙I段沉积时强 烈断陷形成的"深水窄盆"盐度高、还原性强、有机质 保存条件好(图10e,f),上部沙II段断裂活动弱,形成 的"浅水广盆"盐度低、还原性较差,泥岩中有机质部 分氧化、质量变差,而以滨浅湖相煤岩为主。由古盐 度、古水深和氧化还原组成的古环境差异影响有机 质富集和保存,是导致下部沙I段泥岩有机质丰度较 高,而上部沙II段泥岩有机质丰度变差、煤岩发育的 主要原因。

## 5 结论

(1)沙河子组暗色泥岩集中在下部沙Ⅰ段,有机 质丰度高,以Ⅱ型干酪根为主,普遍达到过成熟阶段;煤岩主要分布在上部沙Ⅱ段,为Ⅲ型干酪根,处 于成熟一过成熟阶段。

(2)沙I段沉积期断裂活动强,形成的"深水窄 盆"水体深、盐度高、还原性好,有利于半深湖相泥岩

![](_page_10_Figure_3.jpeg)

Fig.10 Relationship between TOC and paleoenvironment index in the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression

有机质的富集和保存;沙II段沉积期断裂活动弱,形成"浅水广盆"水体浅、盐度低、还原性较差,不利泥岩发育,而以湖泊大面积淤浅沼泽化形成的煤岩为主。

(3)断裂下降盘可容纳空间大,是泥岩堆积的主要场所,控制了烃源岩厚度;沙Ⅰ段时深水的高盐、强还原环境有利于泥岩中有机质富集,沙Ⅱ段时水体变浅、盐度和还原性降低,泥岩质量随之变差,而以煤岩为主。

#### 参考文献(References)

[1] 姚泾利,高岗,庞锦莲,等.鄂尔多斯盆地陇东地区延长组非主 力有效烃源岩发育特征[J].地学前缘,2013,20(2):116-124. [Yao Jingli, Gao Gang, Pang Jinlian, et al. Development characteristics of non-main effective source rocks of the Yanchang Formation in eastern Gansu province of Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 116-124. ]

- [2] Peters K E, Snedden J W, Sulaeman A, et al. A new geochemicalsequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 12-44.
- [3] Isaksen G H, Patience R, van Graas G, et al. Hydrocarbon system analysis in a rift basin with mixed marine and nonmarine source rocks: The South Viking Graben, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(4): 557-591.
- [4] 辛补社,杨华,付金华,等.鄂尔多斯盆地南部晚三叠世泥岩微 量元素地球化学特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),

2013, 49 (1) : 57-60. [Xin Bushe, Yang Hua, Fu Jinhua, et al. Geochemical characteristics of trace elements in Triassic mudstone in the upper Ordos Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(1): 57-60. ]

- [5] 周翔,何生,陈召佑,等.鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架中烃源岩特征及控制因素[J].地球科学,2016,41(6):1055-1066. [Zhou Xiang, He Sheng, Chen Zhaoyou, et al. Characteristics and controlling factors of source rocks in Yanchang Formation sequence framework, Ordos Basin[J]. Earth Science, 2016, 41(6):1055-1066.]
- [6] 陈晶,黄文辉,何明倩.鄂尔多斯盆地东南部本溪组—下石盒 子组泥岩元素地球化学特征[J].现代地质,2018,32(2):240-250. [Chen Jing, Huang Wenhui, He Mingqian. Elemental geochemistry characteristics of mudstones from Benxi Formation to Lower Shihezi Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2018, 32(2): 240-250. ]
- [7] 刘英杰,黄传炎,岳家恒,等.陆相湖盆层序地层格架内有机质 发育及控制因素分析:以中上扬子建南地区侏罗系东岳庙段为 例[J]. 天然气地球科学,2017,28(6):930-938.[Liu Yingjie, Huang Chuanyan, Yue Jiaheng, et al. Analysis of organic matter characteristics and their controlling factors in the sequence stratigraphic framework: Case study of Jurassic Dongyuemiao member of the Ziliujin Formation in Jiannan area, Upper and Middle Yangtze region[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(6): 930-938.]
- [8] 殷杰,王权,郝芳,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊 环境与烃源岩发育模式[J]. 地球科学,2017,42(7):1209-1222.
  [Yin Jie, Wang Quan, Hao Fang, et al. Paleolake environment and depositional model of source rocks of the Lower submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1209-1222. ]
- [9] 邵曌一,吴朝东,张大智,等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组 储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质,2019,40(1):101-108. [Shao Zhaoyi, Wu Chaodong, Zhang Dazhi, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 101-108. ]
- [10] 钟安宁,周翔. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组物源与沉积 体系分析[J]. 沉积学报,2020,38(3):610-619. [Zhong Anning, Zhou Xiang. Provenance and sedimentary system analysis of the Shahezi Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(3): 610-619.]
- [11] Prego R, Caetano M, Vale C, et al. Rare earth elements in sediments of the Vigo Ria, NW Iberian peninsula[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(7): 896-902.
- [12] 陈治军,高怡文,刘护创,等.银根—额济纳旗盆地哈日凹陷 下白垩统烃源岩地球化学特征与油源对比[J].石油学报,

2018, 39(1): 69-81. [Chen Zhijun, Gao Yiwen, Liu Huchuang, et al. Geochemical characteristics of Lower Cretaceous source rocks and oil-source correlation in Hari Sag, Yingen-Ejinaqi Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1): 69-81. ]

- [13] 刘刚,周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用:以江 汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质,2007,29(3):307-310, 314. [Liu Gang, Zhou Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-310, 314. ]
- [14] Mongenot T, Tribovillard N P, Desprairies A, et al. Trace elements as palaeoenvironmental markers in strongly mature hydrocarbon source rocks: The Cretaceous La Luna Formation of Venezuela[J]. Sedimentary Geology, 1996, 103(1/2): 23-37.
- [15] Sheldon N D, Tabor N J. Quantitative paleoenvironmental and paleoelimatic reconstruction using paleosols[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 95(1/2): 1-52.
- [16] 侯庆杰,金强,牛成民,等. 辽东湾地区主力烃源岩分布特征 与主控因素[J]. 地球科学,2018,43(6):2160-2171. [Hou Qingjie, Jin Qiang, Niu Chengmin, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of main hydrocarbon source rocks in Liaodong bay area[J]. Earth Science, 2018, 43(6): 2160-2171.]
- [17] 赵贤正,柳广弟,金凤鸣,等.小型断陷湖盆有效烃源岩分布 特征与分布模式:以二连盆地下白垩统为例[J].石油学报, 2015,36(6):641-652. [Zhao Xianzheng, Liu Guangdi, Jin Fengming, et al. Distribution features and pattern of effective source rock in small faulted lacustrine basin: A case study of the Lower Cretaceous in Erlian Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 641-652.]
- [18] 刘安,李旭兵,王传尚,等.湘鄂西寒武系烃源岩地球化学特征与沉积环境分析[J].沉积学报,2013,31(6):1122-1132.
  [Liu An, Li Xubing, Wang Chuanshang, et al. Analysis of geochemical feature and sediment environment for hydrocarbon source rocks of Cambrian in west Hunan-Hubei area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 1122-1132. ]
- [19] Sinha R, Smykatz-Kloss W, Stüben D, et al. Late Quaternary palaeoclimatic reconstruction from the lacustrine sediments of the sambhar playa core, thar desert margin, India[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 233(3/4): 252-270.
- [20] Herbin J P, Fernandez-Martinez J L, Geyssant J R, et al. Sequence stratigraphy of source rocks applied to the study of the Kim meridgian/Tithonian in the north-west European shelf (Dorset/UK, Yorkshire/UK and Boulonnais/France)[J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(2): 177-194.

## Paleoenvironment and Main Controlling Factors of Source Rocks in the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression

# SUN LiDong, YANG Liang, LI XiaoMei, ZHOU Xiang, HU Bo, CAI Zhuang, DU Ying Exploration and Production Research Institute, Daqing Oilfield, CNPC, Daqing, Heilongjiang 163712, China

Abstract: [Objective] The study make clear the main controlling factors of source rock in Shahezi Formation, and provides geologic basis for the optimal selection of gas exploration in deep layer of Songliao Basin. [Methods] We recovered the sedimentary facies and water property in the Shahazi Formation, based on core observation, organic geochemical analysis, and major and trace elements testing, determining fault activity, sedimentary facies, water properties, and their control on source rock quality. [Results] Two source rock, mudstone and coal, were identified in the Shahezi Formation. The faulting during the deposition of the first source rock in the Shahezi Formation was characterized by strong activity, generating a small lake with great water depth, high salinity, and strong reducing properties. These source rocks were mudstone in a semi-deep lake. The faulting activity during the deposition of the second source rock gradually weakened, with the lake size increasing while water depth decreased. Salinity and reducibility were also weakened, and the coal in shore lake was the primary source rock. [Conclusions] The source rock type was mainly controlled by fault activity, sedimentary facies, and water properties. The downthrown side become important storage for mudstone because of the fault activity, which determined the thickness of mudstone. The sedimentary facies controlled the source rock type through their impact on organic matter import. The difference between paleoenvironments, which was determined by paleosalins, paleowater depth, and redox, is the key factor for the enrichment and preservation of organic matter, and the main controlling factor for source rock quality distribution. Key words: trace elements; paleoenvironment; source rocks; controlling factor; Shahezi Formation