

宋换新,王天明,文志刚,等.鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组富有机质泥页岩发育影响因素与发育模式[J].地球科学与环境学报,2023,45(2):294-305.

SONG Huan-xin, WANG Tian-ming, WEN Zhi-gang, et al. Influencing Factors and Development Pattern of Organic-rich Shale in Benxi Formation of Liulin-Zizhou Area, the Eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 294-305.

DOI:10.19814/j.jese.2022.08048

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

# 鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组 富有机质泥页岩发育影响因素与发育模式

宋换新<sup>1,2</sup>, 王天明<sup>1</sup>, 文志刚<sup>1</sup>, 吴陈君<sup>1</sup>, 赵伟波<sup>3</sup>, 张辉<sup>3</sup>, 刘燕<sup>3</sup>

(1. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 非常规油气省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**鄂尔多斯盆地东缘上石炭统本溪组海陆过渡相泥页岩是该区潜在的页岩气勘探目标。在盆地东缘柳林—子洲地区本溪组代表性剖面 and 重点探井的系统观测和采样分析基础上, 对该区本溪组富有机质泥页岩的发育影响因素与发育模式进行了研究, 并建立了本溪组“缓慢沉降、陆源供给、封闭保存”的海陆过渡相富有机质泥页岩的发育模式。结果表明: 鄂尔多斯盆地柳林—子洲地区本溪组富有机质泥页岩主要发育在晋祠段和畔沟段, 以黏土质泥页岩为主, 含少量硅质泥页岩; 其有机质丰度高, 有机质类型主要为腐殖型; 本溪期炎热潮湿的气候导致区域内成煤植物繁盛, 沉积水体有机质供应充足; 在鄂尔多斯盆地东缘整体缓慢沉降的海侵背景下, 障壁岛-泻湖-浅海泥质陆棚体系在水体底层形成较高盐度的缺氧还原性水体, 为沉积有机质的保存和富集提供了良好场所。

**关键词:**页岩气; 地球化学; 富有机质; 本溪组; 发育模式; 保存条件; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)02-0294-12

## Influencing Factors and Development Pattern of Organic-rich Shale in Benxi Formation of Liulin-Zizhou Area, the Eastern Ordos Basin, China

SONG Huan-xin<sup>1,2</sup>, WANG Tian-ming<sup>1</sup>, WEN Zhi-gang<sup>1</sup>, WU Chen-jun<sup>1</sup>, ZHAO Wei-bo<sup>3</sup>,  
ZHANG Hui<sup>3</sup>, LIU Yan<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China;  
3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** The marine-continent transitional mud shale in Upper Carboniferous Benxi Formation is a potential shale gas exploration target in the eastern Ordos Basin. Based on the systematic observation and sampling analysis of representative profiles and key well, the influencing factors and development pattern of organic-rich mud shale in Benxi Formation of Liulin-Zizhou area, the

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-09-16 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 中国石油长庆油田分公司科研项目(技 2020-151); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201905); 国家自然科学基金项目(41502133, 42272160)

作者简介: 宋换新(1980-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 工学博士, E-mail: shx@yangtzeu.edu.cn.

eastern Ordos Basin were studied, and the development pattern “slow subsidence, terrigenous organic matter supply, and enclosed preservation” of marine-continent transitional organic-rich mud shale was established. The results show that the organic-rich mud shale in Benxi Formation of Liulin-Zizhou area, the eastern Ordos Basin mainly belongs to Jinci and Pangou members, and the lithofacies is mainly clay mud shale with a small amount of siliceous mud shale; the abundance of organic matter is high, and the type is mainly humic; the coal-forming plants flourish in the region because of the hot and humid climate in Benxi depositional period, and result in an abundant supply of organic matter for the sedimentary water; the transgression occurs in the eastern Ordos Basin under the tectonic background of slow subsidence; the high salinity of anoxic water at the bottom maintains reduction environment in the barrier island-lagoon-neritic muddy shelf sedimentary system, which provides a favorable zone for the preservation and enrichment of sedimentary organic matter.

**Key words:** shale gas; geochemistry; organic-rich; Benxi Formation; development pattern; preservation condition; Ordos Basin

## 0 引言

中国页岩气资源丰富,其中下古生界海相地层页岩气勘探在四川盆地及周缘不断取得突破,目前蜀南和川东区块已进入规模化开发阶段<sup>[1-2]</sup>。近年来,以四川盆地和鄂尔多斯盆地为主的上古生界海陆过渡相页岩气的勘探逐渐受到重视<sup>[2-6]</sup>。在鄂尔多斯盆地二叠统山西组—太原组和四川盆地及其周缘的上二叠统大隆组—龙潭组多口探井显示良好的含气性,展现出一定的勘探开发前景<sup>[3-4]</sup>。

鄂尔多斯盆地东部上石炭统本溪组—下二叠统太原组和山西组海陆过渡相含煤地层是盆地古生界常规天然气藏的主要气源岩层系,同时也是潜在的页岩气勘探目标层系<sup>[7-9]</sup>。匡立春等研究认为,该套海陆过渡相地层中泥页岩具有与煤层伴生、与致密砂岩或碳酸盐岩互层的特征,其单层厚度薄,分布连续性差,有机碳含量和黏土矿物体积分数高,脆性矿物体积分数低,含气量变化大<sup>[3,5-9]</sup>。目前对于鄂尔多斯盆地东部上古生界海陆过渡相页岩气勘探整体还处于起步阶段<sup>[7-9]</sup>,但近几年相关研究进展迅速<sup>[3,9-19]</sup>。有学者分别对鄂尔多斯盆地东部海陆过渡相页岩气成藏条件和勘探前景<sup>[3,9-11]</sup>、沉积岩相特征<sup>[12-14]</sup>、储层特征及含气性<sup>[15-16]</sup>、页岩发育及地球化学特征<sup>[17-18]</sup>等进行了研究。但是,整体上对于鄂尔多斯盆地东部上古生界海陆过渡相富有机质泥页岩的认识还不深入,特别是对上石炭统本溪组富有机质泥页岩的研究相对薄弱<sup>[20-31]</sup>。基于此,本文利用代表性剖面 and 重点探井地质与分析测试资料,对鄂尔多斯盆地东缘中部柳林—子洲地区本溪组富有机

质泥页岩发育影响因素和发育模式进行研究,以期为研究区页岩气勘探与相关研究提供参考。

## 1 研究区概况

鄂尔多斯盆地是一个稳定沉降的多旋回克拉通盆地<sup>[7,19]</sup>。晚古生代,盆地经历了从陆表海盆地—海陆过渡相近海湖盆沉积向以陆源碎屑岩为主的坳陷湖盆沉积的演化<sup>[20]</sup>。上石炭统本溪组和下二叠统太原组、山西组发育以障壁岛—泻湖—潮坪—三角洲体系为主的海陆过渡相含煤地层。晚石炭纪本溪期,在盆地东部,华北海由东向西、西北方向侵入并超覆于中央古隆起之上,自东向西依次发育浅海陆棚相、障壁岛—泻湖—潮坪相等<sup>[20-21]</sup>。地层厚度一般为10~70 m,平均厚度为35 m左右,整体呈东厚西薄。其中,泥页岩厚度一般为10~20 m,局部地区可超过30 m<sup>[19-20]</sup>。

鄂尔多斯盆地东缘中部柳林—子洲地区上石炭统本溪组与下伏奥陶系碳酸盐岩风化壳呈平行不整合接触,与上覆下二叠统太原组底部庙沟灰岩呈平行不整合接触,其间以晋祠砂岩和畔沟砂岩为标志层,本溪组自下而上可划分为湖田段、畔沟段和晋祠段<sup>[21]</sup>。底部湖田段主要为一套含铁铝质岩层,是华北地区重要的铁矿(山西式铁矿)和铝土矿(G型铝土矿)目的层;中部畔沟段和顶部晋祠段主要为泥岩、碳质泥岩、粉—细砂岩、煤层或煤线互层分布,局部夹灰岩或薄层灰岩透镜体(图1)。

## 2 剖面及泥页岩发育特征

在鄂尔多斯盆地东缘中部柳林—子洲地区选取

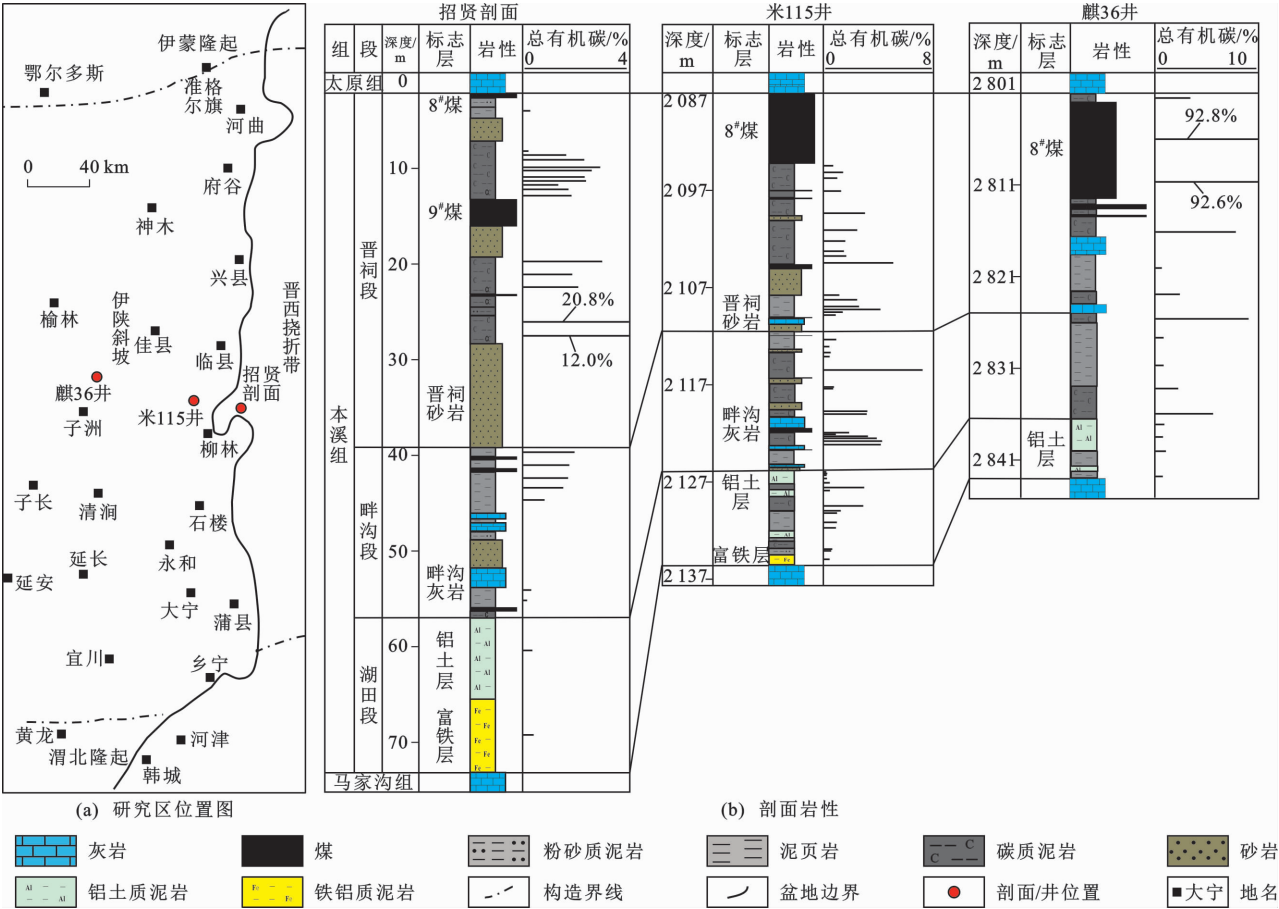


图 1 鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区剖面岩性柱状图

Fig. 1 Lithological Columns of Profiles in Liulin-Zizhou Area, the Eastern Ordos Basin

招贤剖面(中国石油长庆油田分公司将该剖面页岩段称为“招贤页岩”)作为本溪组代表性剖面,并将最近获取的全取芯探井米 115 井和麒 36 井作为研究对象,进行详细的剖面实测、岩芯描述和采样分析(图 1)。

招贤剖面本溪组厚度为 71 m。晋祠段为多套中—厚层黑色泥岩、碳质泥岩与粉—细砂岩互层,夹薄层粉砂质泥岩和煤线;顶部 8# 煤不发育,9# 煤较发育。畔沟段上部 and 下部发育黑色泥岩,中部为薄—中层灰岩、细砂岩、泥质粉砂岩互层。湖田段下部为厚层紫红—红褐色含铁铝土层,上部为大套厚层灰—深灰色含铝土质泥岩[图 1(b)和 2(a)~(c)、(i)]。

米 115 井本溪组厚度为 49 m。晋祠段顶部 8# 煤发育,中部发育大套黑色碳质泥岩夹多层薄层煤层和煤线,下部为细砂岩、灰岩和灰色泥岩互层;畔沟段主体为灰黑—黑色泥页岩、碳质泥岩与中—薄层粉—细砂岩、灰岩、煤层和煤线互层分布;湖田段底部为红褐色富铁黏土岩,中上部为灰—黑色泥岩与灰色含铝土泥岩互层[图 1(b)和 2(d)、(e)、(g)、

(h)]。

麒 36 井本溪组厚度为 40 m。晋祠段顶部 8# 煤发育,下部为灰黑—黑色的中—厚层碳质泥岩、泥岩夹两套灰岩透镜体;畔沟段泥页岩发育,整体为大套灰黑—黑色碳质泥岩和泥岩互层;湖田段主要为灰黑色泥岩与灰色含铝土泥岩互层,其底部富铁黏土岩不发育[图 1(b)和图 2(f)]。

通过剖面描述和对比可以看出:从岩性组合来看,自下而上,研究区本溪期整体是一个海平面逐渐上升的海侵过程,到太原期为区域最大海侵期<sup>[20]</sup>。岩性组合分析表明,本溪组富有机质泥页岩主要发育在中部畔沟段和顶部晋祠段,底部湖田段整体不发育。从区域分布来看,自东向西,本溪组地层厚度逐渐减薄,沉积环境由海向陆逐渐过渡,靠近中部古陆的米 115 井和麒 36 井晋祠段煤系地层特征更加明显(图 1)。

3 泥岩中有机质及矿物组成

3.1 有机质丰度

前人研究表明,鄂尔多斯盆地东缘本溪组泥页

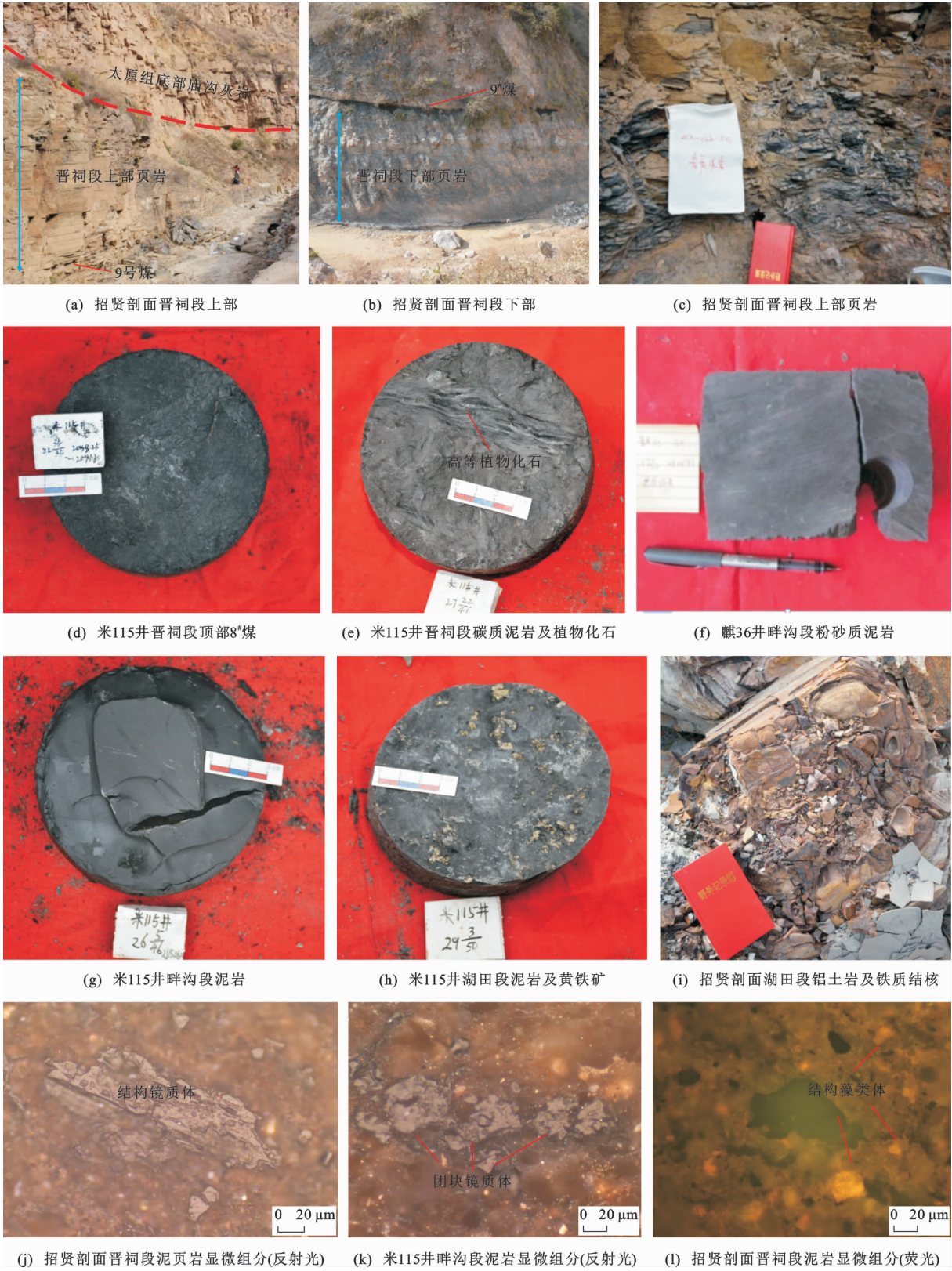


图 2 本溪组剖面、岩芯及全岩有机显微组分观察

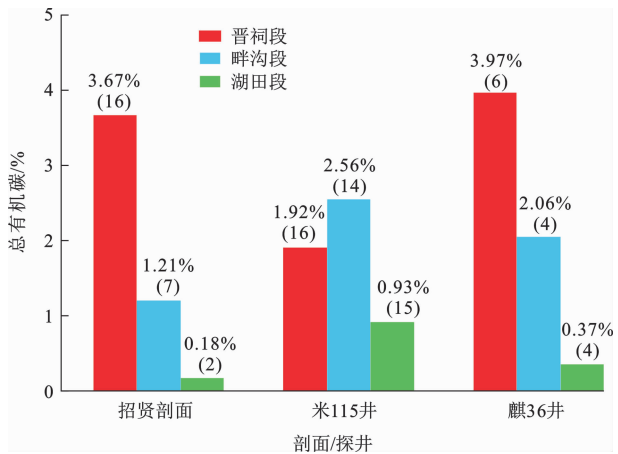
Fig. 2 Observation of Profile, Core and Whole Rock Organic Maceral of Benxi Fomation

岩有机质丰度高<sup>[19]</sup>。本次研究对柳林—子洲地区招贤剖面、米 115 井和麒 36 井的统计表明,84 件暗色泥岩、碳质泥岩样品(不包括煤岩样品)总有机碳

(TOC)平均值为 2.16%,达到了具有商业开采价值的泥页岩下限值(总有机碳为 2%)<sup>[1,4]</sup>。这表明研究区本溪组泥页岩具有较好的页岩气生烃物质基础

和生烃能力。

从垂向分布上来看,3 个剖面/探井均显示顶部晋祠段和中部畔沟段泥页岩总有机碳平均值较底部湖田段泥页岩总有机碳平均值高(图 3)。晋祠段和畔沟段泥页岩总有机碳平均值均超过 1%,大部分超过 2%;而 3 个剖面/探井湖田段泥页岩总有机碳平均值均较低,招贤剖面和麒 36 井总有机碳平均值分别仅为 0.18% 和 0.37%,生烃潜力低。由此可见,研究区本溪组富有机质泥页岩主要发育在顶部晋祠段和中部畔沟段,其中利于页岩气富集的大套连续分布的优质泥岩段在晋祠段更加集中(图 1)。



直方图上方百分数表示总有机碳平均值,括号内数字表示样品数  
图 3 代表性剖面/探井本溪组泥页岩总有机碳平均值分布直方图

Fig. 3 Mean TOC Histograms of Mud Shale in Benxi Formation from Representative Profile/Well

### 3.2 有机质类型

中国海陆过渡相富有机质泥页岩中有机质类型以腐殖型和偏腐殖混合型为主<sup>[4-5,9]</sup>。研究区招贤剖面、米 115 井和麒 36 井样品的全岩光片显微组分分析表明,本溪组不同层段富有机质泥页岩中的有机显微组分均以镜质体占绝对优势,主要为结构镜质体、均质镜质体、团块镜质体和碎屑体[图 2 (g)~(k)]。招贤剖面泥页岩样品干酪根显微组分分析表明:晋祠段样品干酪根中镜质组体积分数为 74.2%~83.4%,平均值为 80.5%;畔沟段样品镜质组为 92.2%~95.2%,平均值为 93.6%。有机质类型指数均小于 0,表明其整体有机质类型为腐殖型<sup>[22]</sup>。

米 115 井、麒 36 井等的泥页岩岩芯样品干酪根碳同位素分析结果表明:晋祠段泥页岩中干酪根有机碳同位素值为 -26.9‰~-24.3‰,平均值为

-25.2‰;畔沟段干酪根碳同位素值为 -25.8‰~-23.9‰,平均值为 -25.2‰。碳同位素分析数据也表明,研究区本溪组晋祠段和畔沟段富有机质泥页岩中有机质主要为陆源高等植物来源的腐殖型<sup>[22]</sup>。

另外,晋祠段和畔沟段多套煤层、煤线发育[图 2(d)],以及探井岩芯中发育大量植物叶片和茎秆化石[图 2(e)]。上述特征均表明研究区本溪组富有机质泥页岩中陆源高等植物有机质贡献占绝对优势。另外,在招贤剖面晋祠段泥页岩个别样品中见少量结构藻类体[图 2(l)],表明靠近盆地东部边缘的偏浅海陆棚环境中发育的泥页岩有机质,存在少量水生藻类的贡献。

### 3.3 矿物组成

页岩储层的矿物组成是影响页岩吸附和储集性能的重要因素,其中脆性矿物体积分数还影响后期压裂改造效果<sup>[1,4]</sup>。与海相页岩相比,一般认为海陆过渡相页岩矿物组成中黏土矿物往往体积分数更高,而脆性矿物体积分数相对较低<sup>[4,6,9]</sup>。研究区本溪组富有机质泥页岩发育的晋祠段和畔沟段样品中,其矿物组成中的黏土矿物体积分数高,各层段体积分数平均值均超过 40%,大部分超过 50%。脆性矿物主要为石英,晋祠段和畔沟段大部分样品的石英体积分数超过 30%,招贤剖面超过 45%;而碳酸盐岩矿物(方解石+白云石)和长石(钾长石+斜长石)体积分数低,其平均值低于 5%(表 1)。湖田段样品由于铝土岩特殊的成因,矿物组成变化大<sup>[23-24]</sup>。利用矿物组成进行泥页岩岩相分析,结果表明研究区本溪组主体属于黏土质泥页岩,晋祠段和畔沟段少量样品属于硅质泥页岩(图 4)。

从区域分布来看,招贤剖面相对于米 115 井和麒 36 井晋祠段、畔沟段而言,样品矿物组成中石英和脆性矿物体积分数相对更高,而黏土矿物体积分数相对较低(图 5),同样表明鄂尔多斯盆地东部的招贤剖面偏向浅海陆棚环境,而靠近盆地中部隆起的米 115 井和麒 36 井受到陆源碎屑影响更加明显。

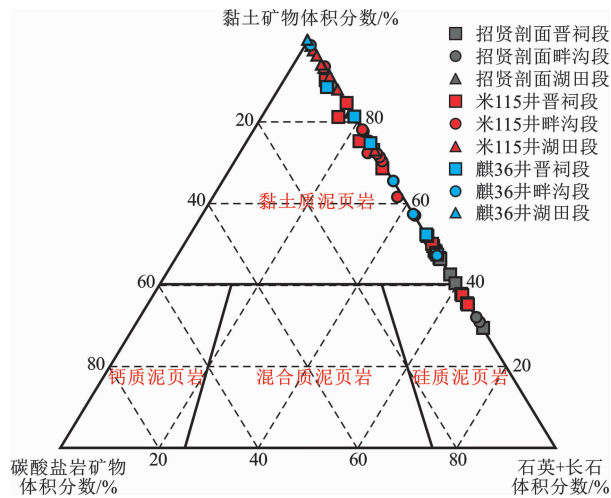
## 4 富有机质泥页岩发育影响因素

前人研究表明,富有机质泥页岩发育影响因素较多,其中古气候及区域构造背景是两大基本控制因素<sup>[25-26]</sup>。一般认为,在炎热—温暖、潮湿的古气候条件及长期稳定沉降的构造环境中,具备充足的有机质供给及还原性保存条件的地区有利于优质烃源岩的发育<sup>[27-28]</sup>。

表 1 本溪组泥页岩矿物组成统计结果

Table 1 Statistical Results of Mineral Compositon of Mud Shale in Benxi Formation

剖面/探井	层段	样品数	不同矿物体积分数/%							
			硅质矿物		黏土矿物		碳酸盐岩矿物		其他矿物	
			范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
招贤剖面	晋祠段	9	32.0~69.5	55.3	29.0~48.6	41.0	0~17.0	1.9	0~5.2	1.8
	畔沟段	5	6.8~68.6	46.7	30.9~90.0	52.0	0~2.5	0.5	0~2.5	0.8
	湖田段	2	1.4~6.9	4.2	11.3~19.3	15.3	0~43.5	21.8	30.3~87.3	58.7
米 115 井	晋祠段	13	8.0~59.7	35.2	32.3~88.5	57.0	0~2.9	0.5	1.0~26.1	7.3
	畔沟段	11	6.2~37.1	24.7	61.8~89.2	72.5	0~1.4	0.2	0~8.6	2.6
	湖田段	12	0.3~49.0	11.4	44.1~98.3	80.1	0~1.2	0.2	0.7~31.8	8.3
麒 36 井	晋祠段	6	6.9~47.0	30.3	43.1~65.4	54.4	0~1.4	0.2	4.7~27.0	15.1
	畔沟段	4	31.6~52.0	41.8	47.0~60.4	54.7	0~1.6	0.3	0.8~7.9	3.2
	湖田段	5	0~1.2	0.2	85.6~99.2	91.8	0~2.0	0.4	0.8~14.4	7.6



底图引自文献[23]

图 4 本溪组泥页岩矿物组成三角图解

Fig. 4 Ternary Diagram of Mineral Compositon of Mud Shale in Benxi Formation

4.1 古气候及区域构造背景

4.1.1 古气候

古气候影响古生物的繁盛程度和沉积有机质的供给,还影响盆地沉积水体环境,这些都与优质烃源岩发育密切相关<sup>[25]</sup>。研究证实地层主量、微量元素迁移和富集与古气候关系密切,因此,可利用化学蚀变指数(CIA)、古气候指数等参数表征地层沉积期古气候特征<sup>[29-30]</sup>。一般认为:化学蚀变指数低于 60、介于 60~80 和高于 80 分别对应寒冷干燥、温暖湿润、炎热潮湿的古气候<sup>[29]</sup>;古气候指数低于 0.4、介于 0.4~0.6、高于 0.6 分别对应干旱、干旱—潮湿过渡和潮湿环境<sup>[30]</sup>。

鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组富有机质泥页岩层段中,晋祠段样品化学蚀变指数为 72.2~98.9,平均值为 95.4;古气候指数为 0.3~

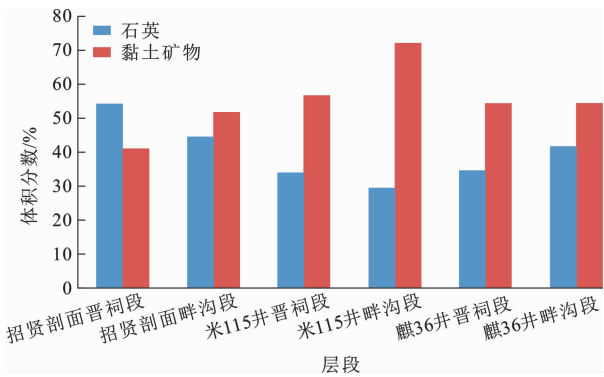


图 5 本溪组晋祠段、畔沟段泥页岩矿物组成分布直方图

Fig. 5 Histogram of Mineral Composition of Mud Shale in Jinci and Pangou Members of Benxi Formation

2.5,平均值为 1.1。畔沟段样品化学蚀变指数为 94.9~98.7,平均值为 97.7;古气候指数为 0.4~2.6,平均值为 1.1。以上结果均表明本溪期研究区主要属于炎热潮湿的古气候环境(图 6),与郭德运的研究结果<sup>[31]</sup>一致。研究区本溪期整体炎热潮湿的古气候环境有利于生物的大量繁盛,为富有机质泥页岩的发育提供了充足的物质基础。

本溪组底部湖田段铁铝质层由于铝土矿成矿过程存在特殊的表生淋滤作用,成岩阶段存在强烈的元素迁移和富集过程<sup>[24]</sup>,不适合利用元素特征来研究古气候和沉积环境特征。

4.1.2 区域构造背景

晚石炭世本溪期,鄂尔多斯盆地受加里东运动的影响整体是处于伸展-压缩交替阶段的克拉通盆地<sup>[9]</sup>。在盆地东部,华北海自东向西逐渐侵入,在奥陶系古风化壳之上发育了本溪组。虽然本溪期是一个持续海侵的过程,但是研究区本溪组厚度不大,表明本溪期整体沉降幅度较小,属于相对稳定的缓慢

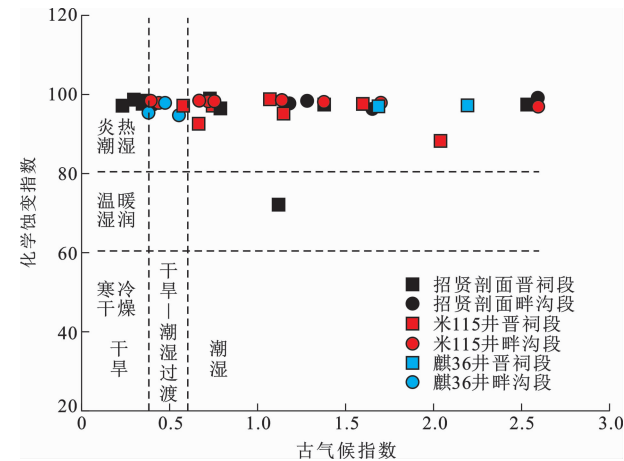


图 6 本溪组泥页岩古气候判别图解

Fig. 6 Paleoclimate Identification Diagram of Mud Shale in Benxi Formation

沉降构造环境<sup>[31-32]</sup>。

(La/Yb)<sub>N</sub> 值常用来表征沉积水体的沉积速率<sup>[33-34]</sup>。沉积速率越慢,稀土元素在水体中滞留时间越长,轻、重稀土元素分异越明显,则(La/Yb)<sub>N</sub> 值越大,反之则越小。研究区招贤剖面、米 115 井和麒 36 井本溪组晋祠段和畔沟段富有机质泥页岩样品的(La/Yb)<sub>N</sub> 平均值分别为 2.0、1.9 和 2.1,与海相志留系龙马溪组页岩<sup>[23]</sup>和寒武系牛蹄塘组页岩<sup>[34]</sup>的(La/Yb)<sub>N</sub> 平均值具有可比性,同样表明本溪组沉积速率较低。

腾格尔等研究认为鄂尔多斯盆地海相优质烃源岩主要发育于沉积速率较小、低能缺氧的沉积环境<sup>[35]</sup>。晚石炭世本溪期,鄂尔多斯盆地东缘主要发育障壁海岸沉积体系<sup>[20-21]</sup>,障壁岛、泻湖、沼泽环境发育,环境相对闭塞,水体安静。由此可见,研究区本溪期相对闭塞的沉积环境和稳定的、低沉积速率的沉降背景,同样有利于富有机质泥页岩的发育。

4.2 水体氧化-还原性与盐度

4.2.1 水体氧化-还原性

沉积水体的氧化-还原性和盐度是影响有机质保存效率的重要方面<sup>[27]</sup>。一般认为一定盐度的滞留还原性水体有利于沉积有机质的保存,而动荡的氧化性水体中有机质降解严重,不利于沉积有机质的保存与富集<sup>[25-27,36]</sup>。Elderfield 等研究认为:微量元素 V 和稀土元素 Ce 均在氧化性水体沉积物中易迁移和亏损,显示低 V/(V+Ni) 值(<0.60)和 Ce 负异常(Ce 异常低于-0.1);而 V 和 Ce 在还原性水体沉积物中易沉淀和富集,显示高 V/(V+Ni) 值(>0.77)和 Ce 正异常(Ce 异常高于-0.1)<sup>[37-38]</sup>。

研究区本溪组晋祠段富有机质泥页岩样品 V/(V+Ni) 值为 0.39~0.91,平均值为 0.79;Ce 异常为-0.13~0,平均值为-0.05。畔沟段样品 V/(V+Ni) 值为 0.48~90.91,平均值为 0.77;Ce 异常为-0.18~0.02,平均值为-0.05。以上结果均表明,研究区本溪组晋祠段和畔沟段富有机质泥页岩主要发育于还原性水体(图 7),有利于沉积有机质的保存和优质烃源岩的发育。

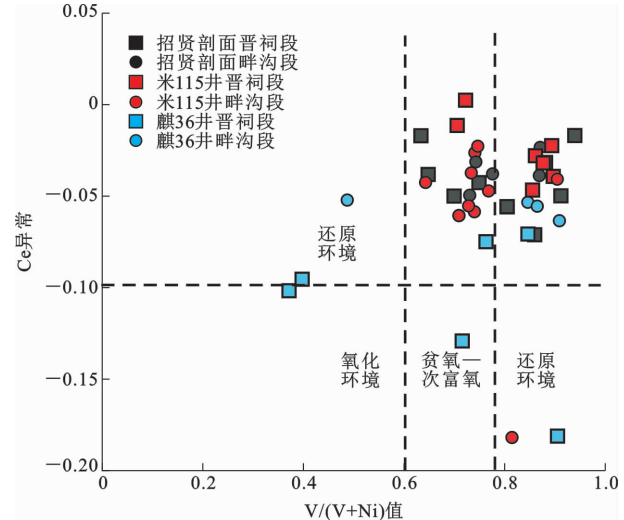


图 7 本溪组泥页岩氧化-还原性判别图解

Fig. 7 Oxidation-reduction Identification Diagram of Mud Shale in Benxi Formation

4.2.2 水体盐度

有机质的保存效率还与沉积水体的盐度有关,一般认为半咸水—咸水环境中有机质保存效率更高,对沉积有机质的保存有利<sup>[25-27]</sup>。地层中 Li、Sr、Ni、Ba、B 等微量元素对沉积水体的盐度十分敏感,常用其含量(质量分数,下同)来表征古水体盐度<sup>[39-40]</sup>。一般而言,海相或咸水环境的沉积岩 Li、Sr 和 Ni 含量相对较高,Ba 和 B 含量相对较低,而陆相或淡水环境中的沉积岩则正好相反。

研究区本溪组晋祠段富有机质泥页岩样品中 Li、Sr 和 Ni 含量平均值分别为  $89.7 \times 10^{-6}$ 、 $211.4 \times 10^{-6}$  和  $23.2 \times 10^{-6}$ ,畔沟段分别为  $140.9 \times 10^{-6}$ 、 $176.2 \times 10^{-6}$  和  $43.0 \times 10^{-6}$ 。按照文献<sup>[39]</sup>的划分标准,上述层段均属于半咸水—咸水环境(图 8)。晋祠段富有机质泥页岩样品的 Ba 含量为  $(91.9 \sim 389.3) \times 10^{-6}$ ,平均值为  $213.3 \times 10^{-6}$ ;畔沟段为  $(45.5 \sim 357.1) \times 10^{-6}$ ,平均值为  $168.4 \times 10^{-6}$ 。根据文献<sup>[41]</sup>中依据 Ba 含量划分沉积相带的标准,上述层段主体属于海陆过渡相半咸水—咸水环境。由此可见,研究区本溪组富有机质泥页岩发育

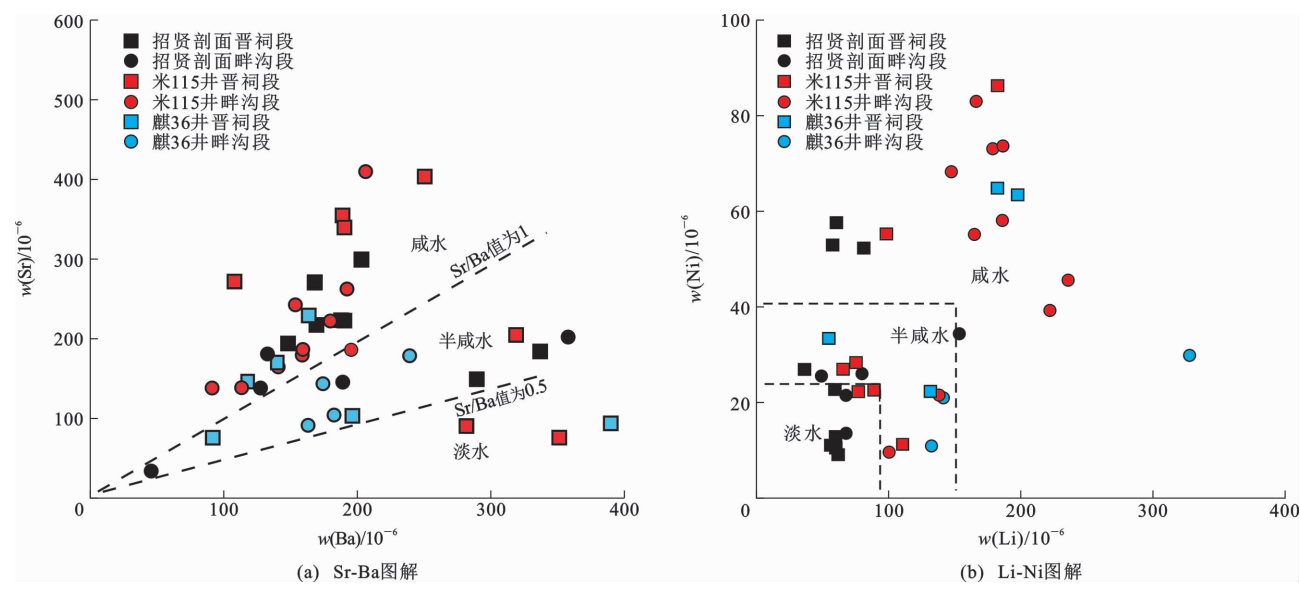


图 8 本溪组泥页岩盐度判别图解

Fig. 8 Salinity Identification Diagrams of Mud Shale in Benxi Formation

于海陆过渡相中半咸水—咸水环境。

### 4.3 沉积有机质来源与供给

石炭纪—二叠纪是鄂尔多斯盆地主要的聚煤期。研究表明,稳定的成煤植物种类和数量形成充足的泥炭供给,以及利于泥炭沉积与保存的合适水体条件是煤层发育的关键<sup>[42]</sup>。本溪组煤层发育,其顶部晋祠段 8<sup>#</sup> 和 9<sup>#</sup> 煤是区域分布的开采煤层,中部畔沟段也有多层薄煤层/煤线发育(图 1),同时钻井岩芯在晋祠段和畔沟段多处见丰富的高等植物茎秆和叶片化石[图 2(d)、(e)]。这表明本溪期研究区陆源高等成煤植物繁盛,并且能为沉积水体提供充足的陆源有机质输入。

本溪组晋祠段和畔沟段富有机质泥页岩样品的干酪根显微组分观测统计、干酪根有机质碳同位素等分析数据均表明,本溪组富有机质泥页岩中有机质类型以腐殖型占绝对优势,说明研究区本溪组富有机质泥页岩中的有机质主要来源于沉积水体周缘的陆源高等植物。显微组分中藻类等水生生物来源有机质比例极低,表明水生藻类等沉积水体“原地来源”的有机质供给有限。另外,本溪组泥页岩中具有相对高的黏土矿物含量,同样表明陆源碎屑输入对于该套地层沉积过程的重要影响。

研究区本溪组煤层/煤线及高等植物化石发育,富有机质泥页岩中有机质类型主要为腐殖型,表明本溪组富有机质泥页岩中的沉积有机质主要来自于物源区及水体周缘陆生高等植物的贡献,即沉积有机质是“外源输入”而非沉积水体自身“古生产力”形

成的。仅在招贤剖面晋祠段个别样品中见到少量低等水生藻类,表明在靠近盆地东部边缘个别层段可能存在少量低等水生藻类有机质的贡献。

## 5 富有机质泥页岩发育模式

邹才能等在系统研究了扬子地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组海相页岩发育特征的基础上,提出了“缓慢沉降的稳定海盆、高海平面、半封闭水体和低沉积速率”的海相深水陆棚相富有机质页岩发育模式<sup>[43]</sup>。鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组海陆过渡相含煤地层富有机质泥页岩发育特征与其有相似之处,但也有一定差异。相似之处在于,两者富有机质泥页岩发育均具有温暖潮湿的古气候条件、稳定的沉降以及地层缺氧水体良好的保存条件;不同之处主要在于,不同的构造和沉积环境导致的有机质供给及水体特征具有差异。

在有机质供给方面,本溪期研究区炎热潮湿的古气候适合陆地高等植物的繁盛,能为沉积水体提供充足的有机质供给;本溪组富有机质泥页岩有机质供给主要为河流水体等搬运来的“陆生外源”有机质,水生藻类等“水生原地”有机质供给比例较低,与五峰组—龙马溪组深水陆棚环境的源内表层水体生物残骸形成的“海洋雪”模式<sup>[43]</sup>明显不同。在有机质保存方面,本溪期研究区为滨浅海环境,在障壁岛分隔的相对闭塞的瀉湖—沼泽—潮坪相沉积体系中,同样可以形成类似于深水陆棚沉积区的底层水体缺氧带,在水体底层由较高盐度的滞留水体形成缺氧

环境,为沉积有机质的保存和富集提供了良好的保存条件。

鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组富有机质泥页岩发育于缓慢沉降的稳定构造背景下,地层发育特征整体为自东向西超覆于中央古隆起的楔状沉积体。温暖潮湿的气候及繁茂的植被条件,为研究区沉积水体提供了充足的陆源有机质供给。海

侵过程中,在障壁岛分隔的相对闭塞的水体环境,其底层较高盐度的滞留水体形成缺氧环境,为沉积有机质的保存和富集提供了良好的保存条件。基于以上认识,结合招贤剖面、米 115 井、麒 36 井具体构造位置及沉积特征,本文建立了研究区本溪组“缓慢沉降、陆源供给、封闭保存”的海陆过渡相富有机质泥页岩的发育模式(图 9)。

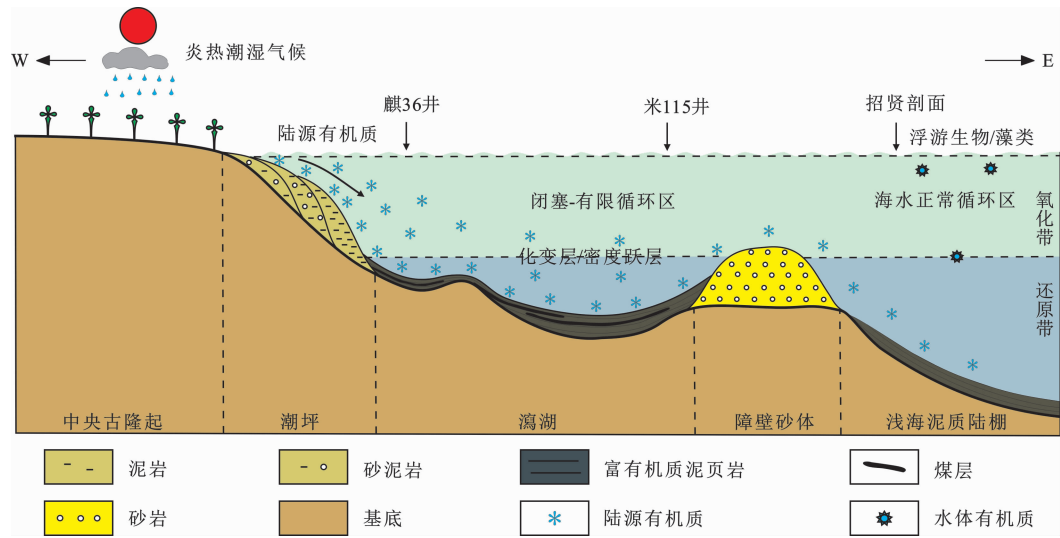


图 9 本溪组富有机质泥页岩发育模式

Fig. 9 Development Pattern of Organic-rich Mud Shale in Benxi Formation

6 结 语

(1)鄂尔多斯盆地东缘柳林—子洲地区本溪组地层发育特征表明该时期研究区为一个自东向西缓慢海侵过程。本溪组富有机质泥页岩发育,有机质丰度高,样品总有机碳平均值为 2.16%,有机质类型主要为来自于陆源高等植物的腐植型,整体具有较好的生气物质基础。

(2)研究区本溪组富有机质泥页岩中黏土矿物体积分数整体较高,大部分样品超过 50%,其次为石英,而碳酸盐岩矿物和长石体积分数低。岩相划分主体为黏土质泥页岩,少量样品属于硅质泥页岩。靠近盆地中部的探井样品相对于盆地东部边缘的招贤剖面样品黏土矿物体积分数相对更高,而脆性矿物体积分数更低,表明受陆源碎屑的影响更加明显。

(3)富有机质泥页岩样品的化学蚀变指数、古气候指数等参数表明,本溪期研究区属于炎热潮湿的古气候,适合于成煤植物的繁盛,为沉积水体提供了充足的陆源有机质供给。克拉通盆地整体稳定的缓慢沉降的构造背景,利于沉积水体中有机质富集。微量元素参数表明,本溪组富有机质泥页岩发育于半咸水—咸水的还原性水体环境,有利于有机质的

保存。

(4)根据研究区本溪组富有机质泥页岩发育特征,结合前人沉积和构造环境研究成果,建立了研究区本溪组“缓慢沉降、陆源供给、封闭保存”的海陆过渡相富有机质泥页岩的发育模式。

祝贺《地球科学与环境学报》更名二十周年! 贵刊更名二十年来在报道地学及交叉学科前沿学术成果、服务作者和读者等方面发挥了重要作用,得到作者、读者和行业的广泛认可! 希望贵刊精益求精,越办越好,在地球科学与环境领域发挥更强的学术引领作用!

参考文献：

References：

[1] 邹才能,王红岩,董大忠,等. 非常规油气勘探开发[M]. 北京:石油工业出版社,2019.  
ZOU Cai-neng, WANG Hong-yan, DONG Da-zhong, et al. Unconventional Oil & Gas Exploration and Development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.

[2] 董大忠,王玉满,李新景,等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业,2016,36(1): 19-32.

- DONG Da-zhong, WANG Yu-man, LI Xin-jing, et al. Breakthrough and Prospect of Shale Gas Exploration and Development in China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1):19-32.
- [3] 匡立春,董大忠,何文渊,等.鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2020,47(3):435-446.
- KUANG Li-chun, DONG Da-zhong, HE Wen-yuan, et al. Geological Characteristics and Development Potential of Transitional Shale Gas in the East Margin of the Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3):435-446.
- [4] 翟刚毅,王玉芳,刘国恒,等.中国二叠系海陆交互相页岩气富集成藏特征及前景分析[J].沉积与特提斯地质,2020,40(3):102-117.
- ZHAI Gang-yi, WANG Yu-fang, LIU Guo-heng, et al. Enrichment and Accumulation Characteristics and Prospect Analysis of the Permian Marine Continental Multiphase Shale Gas in China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2020, 40(3):102-117.
- [5] 郭旭升,胡东风,刘若冰,等.四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力[J].天然气工业,2018,38(10):11-18.
- GUO Xu-sheng, HU Dong-feng, LIU Ruo-bing, et al. Geological Conditions and Exploration Potential of Permian Marine-continent Transitional Facies Shale Gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10):11-18.
- [6] 郭少斌,付娟娟,高丹,等.中国海陆交互相页岩气研究现状与展望[J].石油实验地质,2015,37(5):535-540.
- GUO Shao-bin, FU Juan-juan, GAO Dan, et al. Research Status and Prospects for Marine-continent Shale Gases in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5):535-540.
- [7] 王社教,李登华,李建忠,等.鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J].天然气工业,2011,31(12):40-46.
- WANG She-jiao, LI Deng-hua, LI Jian-zhong, et al. Exploration Potential of Shale Gas in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12):40-46.
- [8] 付金华,郭少斌,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(2):382-389.
- FU Jin-hua, GUO Shao-bin, LIU Xin-she, et al. Shale Gas Accumulation Condition and Exploration Potential of the Upper Paleozoic Shanxi Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(2):382-389.
- [9] 刘亢.鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪海陆过渡相页岩气成藏条件及勘探潜力[J].中国煤炭地质,2021,33(9):1-7.
- LIU Kang. Permo-Carboniferous Marine-terrestrial Transitional Facies Shale Gas Reservoiring Condition and Exploration Potential in Ordos Basin[J]. Coal Geology of China, 2021, 33(9):1-7.
- [10] 郭旭升,周德华,赵培荣,等.鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1013-1023.
- GUO Xu-sheng, ZHOU De-hua, ZHAO Pei-rong, et al. Progresses and Directions of Unconventional Natural Gas Exploration and Development in the Carboniferous-Permian Coal Measure Strata, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5):1013-1023.
- [11] 刘洪林,王怀厂,张辉,等.鄂尔多斯盆地东部山西组页岩气成藏特征及勘探对策[J].地质学报,2020,94(3):905-915.
- LIU Hong-lin, WANG Huai-chang, ZHANG Hui, et al. Geological Characteristics and Exploration Countermeasures of Shale Gas in the Shanxi Formation of the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3):905-915.
- [12] 彭思钟,刘德勋,张磊夫,等.鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县地区山西组页岩岩相与沉积相特征[J].沉积学报,2022,40(1):47-59.
- PENG Si-zhong, LIU De-xun, ZHANG Lei-fu, et al. Shale Lithofacies and Sedimentary Facies of the Permian Shanxi Formation, Daning-Jixian Area, Eastern Margin of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(1):47-59.
- [13] 武瑾,王红岩,施振生,等.海陆过渡相黑色页岩优势岩相类型及成因机制:以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组为例[J].石油勘探与开发,2021,48(6):1137-1149.
- WU Jin, WANG Hong-yan, SHI Zhen-sheng, et al. Favorable Lithofacies Types and Genesis of Marine-continent Transitional Black Shale: A Case Study of Permian Shanxi Formation in the Eastern Margin of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6):1137-1149.
- [14] 吴鹏,高丽军,李勇,等.海陆过渡相岩性频繁互层型页岩气潜力评价方法:以鄂尔多斯盆地临兴区块下二叠统山西组为例[J].天然气工业,2022,42(2):28-39.
- WU Peng, GAO Li-jun, LI Yong, et al. An Evaluation Method for Shale Gas Potential of Marine-continent Transitional Facies with Frequent Interbedded Litho-

- logy: A Case Study on the Lower Permian Shanxi Formation in Linxing Block of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 28-39.
- [15] 熊 荃, 彭 渊, 唐友军, 等. 鄂尔多斯盆地东部太原组页岩气吸附特征及影响因素[J]. 中国地质调查, 2019, 6(4): 51-57.
- XIONG Quan, PENG Yuan, TANG You-jun, et al. Shale Gas Adsorption Characteristics and Influencing Factors of Taiyuan Formation in Eastern Ordos Basin[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(4): 51-57.
- [16] 陈 鑫, 吴 鹏, 高计县, 等. 临兴地区海陆过渡相页岩及页岩气地球化学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 12-23.
- CHEN Xin, WU Peng, GAO Ji-xian, et al. Geochemical Characteristics of Marine-continental Transitional Facies Shale and Shale Gas in Linxing Area[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 12-23.
- [17] 崔晨光, 张 辉, 刘文香, 等. 鄂尔多斯盆地东部本溪组一段泥页岩元素地球化学特征: 以山西临县招贤剖面 and M115 井为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6): 1001-1012.
- CUI Chen-guang, ZHANG Hui, LIU Wen-xiang, et al. Element Geochemical Characteristics of Shale in the First Member of Benxi Formation in Eastern Ordos Basin; Take Zhaoxian Section and Well M115 in Linxian County, Shanxi as Examples[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 1001-1012.
- [18] 张力文, 吴陈君, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地东部石炭系本溪组泥页岩地球化学特征及沉积环境[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(9): 1485-1498.
- ZHANG Li-wen, WU Chen-jun, HUANG Dao-jun, et al. Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of Carboniferous Benxi Formation in Eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(9): 1485-1498.
- [19] 闫德宇, 黄文辉, 张金川. 鄂尔多斯盆地海陆过渡相富有机质泥页岩特征及页岩气意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 197-206.
- YAN De-yu, HUANG Wen-hui, ZHANG Jin-chuan. Characteristics of Marine-continental Transitional Organic-rich Shale in the Ordos Basin and Its Shale Gas Significance[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(6): 197-206.
- [20] 于兴河, 王香增, 王念喜, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界层序地层格架及含气砂体沉积演化特征[J]. 古地理学报, 2017, 19(6): 935-954.
- YU Xing-he, WANG Xiang-zeng, WANG Nian-xi, et al. Sequence Stratigraphic Framework and Sedimentary Evolution Characteristics of Gas-bearing Sandbody in the Upper Paleozoic in Southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2017, 19(6): 935-954.
- [21] 冯娟萍, 欧阳征健, 陈全红, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区上石炭统沉积特征[J]. 古地理学报, 2021, 23(1): 53-64.
- FENG Juan-ping, OUYANG Zheng-jian, CHEN Quan-hong, et al. Sedimentary Characteristics of the Upper Carboniferous in Ordos Basin and Its Adjacent Areas[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(1): 53-64.
- [22] 卢双舫, 张 敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
- LU Shuang-fang, ZHANG Min. Petroleum Geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [23] 李 卓, 姜振学, 唐相路, 等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩岩相特征及其对孔隙结构的控制[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1116-1123.
- LI Zhuo, JIANG Zhen-xue, TANG Xiang-lu, et al. Lithofacies Characteristics and Its Effect on Pore Structure of the Marine Shale in the Low Silurian Longmaxi Formation, Southeastern Chongqing[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1116-1123.
- [24] 杜远生, 余文超. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用: 兼论铝土矿床的成因分类[J]. 古地理学报, 2020, 22(5): 812-826.
- DU Yuan-sheng, YU Wen-chao. Subaerial Leaching Process of Sedimentary Bauxite and the Discussion on Classifications of Bauxite Deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(5): 812-826.
- [25] CARROLL A R, BOHACS K M. Stratigraphic Classification of Ancient Lakes: Balancing Tectonic and Climatic Controls[J]. Geology, 1999, 27(2): 99-102.
- [26] 李友川. 中国近海湖相优质烃源岩形成的主要控制因素[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 1-9.
- LI You-chuan. Main Controlling Factors for the Development of High Quality Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 1-9.
- [27] 丁修建, 柳广弟, 黄志龙, 等. 有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用[J]. 地球科学, 2016, 41(5): 832-842.
- DING Xiu-jian, LIU Guang-di, HUANG Zhi-long, et al. Controlling Function of Organic Matter Supply and Preservation on Formation of Source Rocks[J]. Earth Science, 2016, 41(5): 832-842.

- [28] ARTHUR M A, DEAN W E. Organic-matter Production and Preservation and Evolution of Anoxia in the Holocene Black Sea[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(4):395-411.
- [29] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. *Nature*, 1982, 299:715-717.
- [30] CAO J, WU M, CHEN Y, et al. Trace and Rare Earth Element Geochemistry of Jurassic Mudstones in the Northern Qaidam Basin, Northwest China[J]. *Geochemistry*, 2012, 72(3):245-252.
- [31] 郭德运. 鄂尔多斯盆地东部上古生界沉积体系研究[D]. 西安:西北大学, 2009.  
GUO De-yun. The Study of Sedimentary System of Upper Paleozoic in East Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- [32] 李江涛. 鄂尔多斯盆地北部加里东期后构造演化及其与古生界天然气的关系[J]. *现代地质*, 1997, 11(4):488-495.  
LI Jiang-tao. Tectonic Evolution and Its Relation to Paleozoic Gas Reservoirs Since Caledonian Movement in Northern Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 1997, 11(4):488-495.
- [33] 何佳伟, 谢 渊, 侯明才, 等. 川西南盐津地区志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J]. *古地理学报*, 2021, 23(6):1174-1191.  
HE Jia-wei, XIE Yuan, HOU Ming-cai, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Silurian Longmaxi Formation Shale in Yanjin Area, Southwestern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 2021, 23(6):1174-1191.
- [34] 毛瑞勇, 张 杰, 冷济高, 等. 岑巩页岩气区块牛蹄塘组黑色页岩稀土元素地球化学特征及沉积环境分析[J]. *矿物岩石*, 2016, 36(4):66-73.  
MAO Rui-yong, ZHANG Jie, LENG Ji-gao, et al. Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements and Depositional Environments of the Niutitang Formation Black Shale in Cen'gong Shale Gas Block[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2016, 36(4):66-73.
- [35] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 高演化海相碳酸盐烃源岩地球化学综合判识:以鄂尔多斯盆地为例[J]. *中国科学:D辑, 地球科学*, 2006, 36(2):167-176.  
TENG Ge-er, LIU Wen-hui, XU Yong-chang, et al. Comprehensive Geochemical Identification of Highly Mature Marine Carbonate Source Rocks: A Case Study of Ordos Basin[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2006, 36(2):167-176.
- [36] 郑海峰, 宋换新, 杨振瑞, 等. 湖北神农架地区南华系大塘坡组元素地球化学特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(3):316-326.  
ZHENG Hai-feng, SONG Huan-xin, YANG Zhen-rui, et al. Element Geochemical Characteristics of Datangpo Formation of Nanhua System in Shennongjia Area of Hubei, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(3):316-326.
- [37] ELDERFIELD H, GREAVES M J. The Rare Earth Elements in Seawater[J]. *Nature*, 1982, 296:214-219.
- [38] TALBOT M R. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1990, 80(4):261-279.
- [39] 田景春, 张 翔. 沉积地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2016.  
TIAN Jing-chun, ZHANG Xiang. *Sedimentary Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [40] COUCH E L. Calculation of Paleosalinities from Boron and Clay Mineral Data[J]. *AAPG Bulletin*, 1971, 55(10):1829-1837.
- [41] 苗 耀, 桑树勋, 林会喜, 等. 渤海湾盆地石炭—二叠系微量元素特征及其指相意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2007, 27(4):27-32.  
MIAO Yao, SANG Shu-xun, LIN Hui-xi, et al. Trace Element Signatures of the Carboniferous-Permian Deposits in the Bohai Gulf Basin and Their Facies Significance[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(4):27-32.
- [42] 鲁 静, 邵龙义, 孙 斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠纪煤系层序—古地理与聚煤作用[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5):747-754.  
LU Jing, SHAO Long-yi, SUN Bin, et al. Sequence-paleogeography and Coal Accumulation of Carboniferous-Permian Coal Measures in the Eastern Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5):747-754.
- [43] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(6):689-701.  
ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, WANG Yu-man, et al. Shale Gas in China: Characteristics, Challenges and Prospects ( I ) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(6):689-701.