

引用格式:王晓琳,朱筱敏,祝彦贺,等. 2026. 铝土岩系沉积环境及储层特征——以鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组为例[J]. 沉积学报, 44(3): 1082-1095.

WANG XiaoLin, ZHU XiaoMin, ZHU YanHe, et al. 2026. Sedimentary Environment and Reservoir Characteristics of Bauxite Rock Series: A Case Study of the Benxi Formation in the Linxing Area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(3): 1082-1095.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.110

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.110

铝土岩系沉积环境及储层特征

——以鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组为例

王晓琳^{1,2}, 朱筱敏^{1,2}, 祝彦贺³, 于珊珊³, 赖锦^{1,2}, 李红斌^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要 【目的】国内外鲜有铝土岩油气储集层的研究成果,随着鄂尔多斯盆地西南部陇东地区太原组铝土岩系储层获得高产工业气流,标志着铝土岩天然气储层勘探的突破。近年来,盆地东北缘临兴地区本溪组铝土岩系地层也发现工业气流,表现出良好的勘探潜力。为进一步探明临兴地区铝土岩系天然气勘探开发潜力,需对铝土岩系储层的基础地质特征进行深入剖析。【方法】基于测井、录井及地震资料,利用X射线衍射、铸体薄片、扫描电镜、主微量元素、高压压汞、N₂、CO₂吸附及常规物性等实验方法,系统分析了临兴地区本溪组铝土岩系的沉积环境、储层特征及沉积模式。【结果】研究区铝土岩系富含一水硬铝石和黏土矿物,垂向上呈现明显的三段式结构,具有底部富铁、中部多铝、顶部低铁的特点;铝土岩系储层孔隙类型包括溶蚀孔、晶间孔、有机质孔和微裂缝,其中溶蚀孔是主要的储集类型,孔径主要介于2~50 nm,孔喉分选及连通性相对较好,孔隙度平均为3.64%,渗透率平均为7.24×10⁻³ μm²。【结论】铝土岩系的发育厚度受沉积环境和岩溶古地貌的控制,炎热潮湿、贫氧—还原、海陆交替的浅水沉积环境为铝土岩系的形成和保存提供了有利的基础条件,斜坡(潜坑)处是铝土岩系勘探开发的重点区域。以上认识期为该地区及类似地质背景的铝土岩系天然气勘探开发提供地质依据。

关键词 铝土岩系;沉积环境;储层特征;沉积模式;临兴地区

第一作者 王晓琳,女,1998年出生,博士研究生,储层沉积学,E-mail: 525179881@qq.com

通信作者 朱筱敏,男,教授,沉积地质学、储层地质学和含油气盆地分析,E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)03-1082-14

0 引言

铝土岩富含氢氧化铝矿物,其Al₂O₃含量大于40%,Al₂O₃与SiO₂的含量之比大于2:1(廖士范和梁同荣,1991;朱筱敏,2020)。根据基岩类型通常将铝土岩系划分为红土型和喀斯特型两大类:红土型的铝土矿主要为潮湿炎热气候条件下铝硅酸盐的风化产物,红色的褐铁矿含量高;喀斯特型是我国沉积型铝土矿的重要类型,基底均为碳酸盐岩,富含硬水铝石矿物(刘学飞等,2012;余文超等,2023)。我国铝土矿资源量丰富,总储量为9.8亿吨,主要分布于山西、河南、广西及贵州等几个主要成矿带中(高兰等,

2015;孟卫工等,2021)。

早期研究主要集中在含铝岩系的构造特征、成矿作用及富矿因素等方面,将铝土岩系作为天然气储集层的研究较少。2015年,长庆油田陕464井石炭系本溪组钻遇铝土岩层,试气获低产气流,首次证实了铝土岩作为储集层的勘探潜力,揭开了铝土岩气藏的勘探序幕(孟卫工等,2021)。近几年,鄂尔多斯盆地陇东探区太原组部署的L47井获得高产工业气流,标志铝土岩天然气勘探开发获得突破,同时对铝土岩系的沉积相、岩石学特征、孔隙类型及结构、测井识别、储层主控因素及成藏模式等方面进行了初步研究(付金华等,2021;姚泾利等,2023)。但目

收稿日期:2024-03-29;修回日期:2024-10-14;录用日期:2024-11-12;网络出版日期:2024-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目(42272110)

前发表的研究成果主要局限于鄂尔多斯盆地陇东地区太原组,且基础地质研究仍处于初期阶段,主要研究内容集中在铝土岩系储层的矿物类型、岩性组合、储集空间特征及勘探潜力,关于铝土岩系的沉积环境、形成过程与沉积模式之间的联系尚不明确。此外,盆地东北部的临兴地区二叠系本溪组底部也发育一套铝土岩系,2021年10月,中海油对盆地东缘临兴区块LX-41-3D井铝土岩系气测异常段开展了压裂试气及试采工作,获工业气流发现,日产气量最高达7 000 m³。截至2023年2月,已累计产超160×10⁴ m³,证实了临兴区块铝土岩系也具有十分可观的天然气勘探潜力。为了阐明临兴地区本溪组铝土岩系的沉积环境、形成机理和沉积—储层发育模式的关系,前人对铝土岩系样品进行测试分析,认为长期低频旋回下海平面整体上升、短期高频下海平面是频繁升降变化的,氧化—还原环境交替是铝土岩形成的有利环境,斜坡(潜坑)处是铝土岩系勘探开发的重点区域(米立军和朱光辉,2021;朱光辉等,2022;李勇等,2024;吴见等,2025)。

本次研究以关键取心井为研究对象,基于地质背景,结合测井、录井和地震资料,根据岩心观察与描述、岩石薄片、X射线衍射、扫描电镜、主微量元素、高压压汞、氮气和二氧化碳吸附及常规物性等实验,对临兴地区本溪组铝土岩系进行深入研究,以期为华北克拉通铝土岩系天然气勘探提供理论支持。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地地理位置位于我国中西部,是一个发育在古老结晶基底之上的整体升降、拗陷迁移、构造简单的大型多旋回叠合盆地,可划分为6个一级构造单元:北部伊盟隆起、南部渭北隆起、中部伊陕斜坡、东缘晋西挠褶带、西部的天环拗陷和西缘冲断带(郭艳琴等,2019;李文厚等,2021)。临兴地区面积为2 620.3 km²,位于盆地的东北部边缘地带,构造位置处于晋西挠褶带的中北部,多为NE—SW走向,地势上呈东高西低、北高南低的趋势,北部以西倾的单斜构造为主,南部多发育断层及褶皱(图1)。奥陶纪末期,加里东运动造成盆地大规模抬升,历经1.4亿年以上的沉积与风化剥蚀,志留系,泥盆系和下石炭统缺失,形成奥陶系风化壳(李克永等,2023)。晚石炭世在拉张构造作用下再沉积,本溪期海水自东向西快速入侵,海侵范围最大,研究区主要为潮坪—潟湖相沉积(于兴河等,2017)。

古生界自下而上发育了上石炭统本溪组(C₂b)、下二叠统太原组(P₁t)和山西组(P₁s)、中二叠统石盒子组(P₂sh)以及上二叠统石千峰组(P₂s)。其中,石炭统本溪组为本次研究的目的层位,厚30~70 m,参照前人划分方案及测井曲线形态特征将本溪组自下至上划分为湖田段、畔沟段和晋祠段(王桂成等,2004)。顶部发育的8#+9#煤层是地层划分与对比常

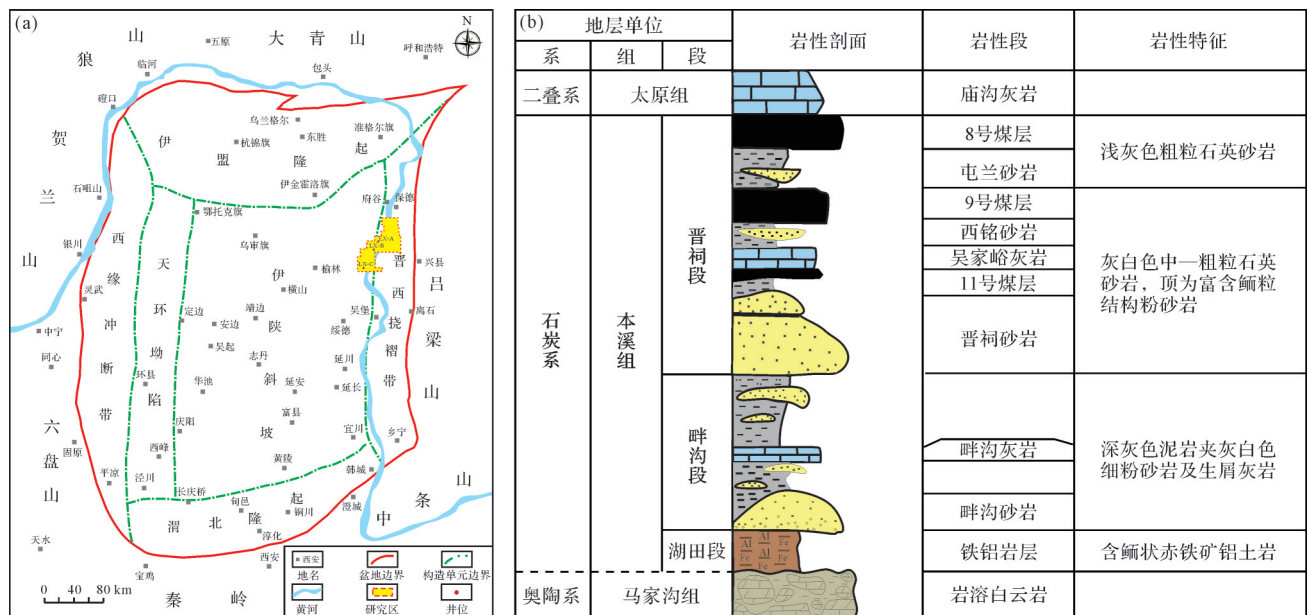


图1 鄂尔多斯盆地临兴地区构造及地层岩性柱状图

Fig.1 Structure and stratigraphic lithology histogram of the Linxing area in the Ordos Basin

用的标志层,中部岩性以深灰色、黑色泥岩和浅灰色石英砂岩、泥质粉砂岩为主,发育多套薄煤层,底部湖田段发育一套灰褐色铝土岩系,与下伏马家沟组碳酸盐风化壳呈不整合接触关系。

2 铝土岩系岩石学研究

2.1 矿物组成特征

通过岩心观察、铸体薄片和X射线衍射测试结果分析铝土岩系的岩矿组成,铸体薄片实验应用偏光显微镜Leica DM4500P,依据《岩石薄片鉴定》SY/T 5368—2016完成;X射线衍射实验应用D/max-2600衍射仪,依据《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》SY/T 5163—2018完成。结果表明,研究区本溪组岩性复杂多样,包括砂岩、泥岩、铝土岩、灰岩和白云岩,铝土岩系矿物类型包括铝质矿物、铁质矿物和黏土矿物,铝质矿物多以一水硬铝石为主,其含量变化范围较大,介于48%~94%(平均含量高达71.2%),主量元素测试可知铝土岩富集段 Al_2O_3 平均值为58.8%。铁质矿物包括锐铁矿、赤铁矿和黄铁矿等,其平均含量分别为7.4%、5.4%和1.4%。黏土矿物含量介于7%~22%(平均为10.2%),黏土矿物中富含绿泥石(平均为34.37%)、高岭石(平均为28.11%)和伊利石(平均为34.32%)。此外,还发育少量方解石、石英和斜长石(表1)。铝土岩系主要矿物成分为一水硬铝石和黏土矿物,铸体薄片镜下常见碎屑、豆—鲕粒等颗粒结构,可见铝土质矿物呈豆粒、鲕粒,颗粒细小,分选一般,磨圆相对较好,定向排列,颗粒呈压扁拉长的形状(图2a,b),高倍显微镜下可见结晶较好的自生长柱状一水铝石发育于粒内溶孔中(图2c),鲕粒状菱铁矿分布于碎屑和黏土矿物中(图2d),镜下黄铁矿结核广泛分布于泥质中(图2e),偶见石英破碎现象(图2f)。

2.2 铝土岩系分类及垂向演化特征

结合X射线衍射和主微量元素等分析测试,依据前人现阶段研究图版将临兴地区本溪组铝土岩系划分为铝土岩、泥质铝土岩、铁质铝土岩、泥岩、铝土质泥岩和铁质泥岩五种类型(李勇等,2024)(图3)。垂向上呈明显的三段式结构:本溪组下段含铝岩系底部为发育于奥陶系马家沟组碳酸盐岩不整合面之上的铝土质铁矿,铝土质铁矿成分以锐铁矿、黄铁矿和赤铁矿为主,含少量一水硬水铝石和黏土矿物;中部铝土质矿物富集,矿物成分以一水硬水铝石为主,平均含量高达70%,含少量菱铁矿及黏土矿物;顶部发育铝土质泥岩、泥质铝土岩及一些碳质泥岩(图4a)。整体沉积序列表现为底部富铁低铝、中部高铝铁低硅、顶部高硅低铁的特点。黏土矿物也呈分段式特点:底部富含伊利石,中部以绿泥石为主,顶部高岭石占比最高(图4b)。

3 铝土岩系储层孔隙及物性特征

3.1 孔隙类型

通过铸体薄片和扫描电镜等测试分析,认为临兴地区本溪组铝土岩系储层孔隙类型主要包括溶蚀孔、晶间孔、微裂缝及有机质孔4种储集空间类型。扫描电镜实验依据《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》SY/T 5162—2021,应用扫描电子显微镜FEI Quanta FEG450仪器完成。

1) 溶蚀孔隙

溶蚀孔是临兴地区本溪组铝土岩储集层的主要储集空间,进一步可划分为粒间溶孔、粒内溶孔和基质溶孔。粒内溶孔通常发育于碎屑矿物中,镜下常见溶蚀孔隙内被针叶状、片状绿泥石等黏土矿物充填(图5a,b),孔径多介于30~40 μm ,孔隙连通性较好,为天然气的运移提供良好空间。一水硬铝石和黏土矿物粒间溶孔分布广泛,主要发育于颗粒间接

表1 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系矿物组成(%)

Table 1 Mineral composition (%) of bauxite in Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

井号	深度/m	铝质矿物		铁质矿物			碳酸盐矿物	黏土矿物	硅质矿物	其他矿物
		一水硬铝石	锐铁矿	赤铁矿	黄铁矿	方解石	石英		斜长石	
LX-A	2 060.74	71	6	4	/	11	7	1	/	
LX-A	2 062.38	80	6	/	6	1	6	1	/	
LX-A	2 062.58	63	10	10	/	/	16	1	/	
LX-A	2 064.65	48	13	13	/	/	22	4	/	
LX-B	2 003.15	94	2	/	1	/	/	/	3	
平均值/%		71.2	7.4	5.4	1.4	2.4	10.2	1.4	0.6	

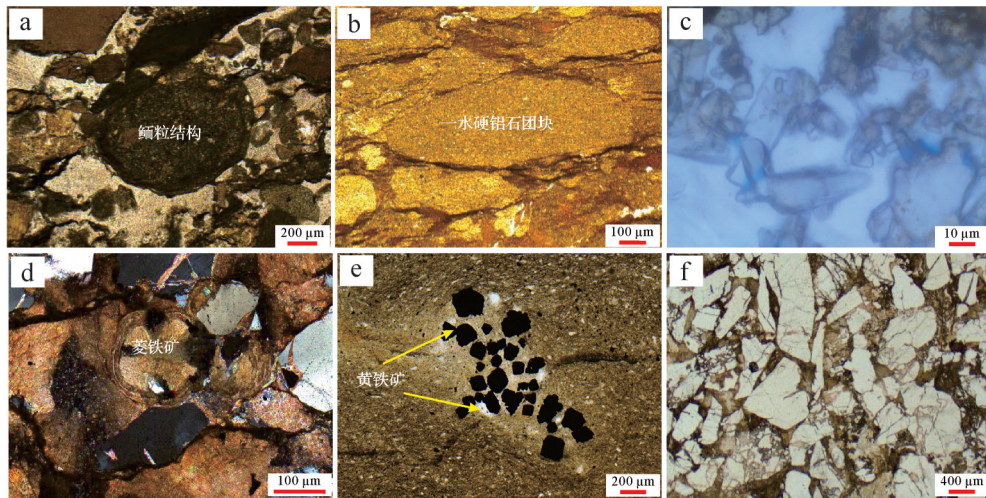


图2 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系矿物组成微观特征

(a)LX-A井, 2 002.31 m, 100×(-), 铝土质鲕粒结构; (b)LX-A井, 2 002.31 m, 一水硬铝石团块; (c)LX-A井, 2 003.15 m, 1 000×(-), 粒内自生长柱状一水铝石; (d)LX-B井, 2 057.09 m, 100×(-), 鲕粒状菱铁矿; (e)LX-B井, 1 999.15 m, 50×(-), 黄铁矿结核; (f)LX-B井, 2 056.38 m, 100×(-), 石英破裂

Fig.2 Mineral composition photomicrographs of bauxite in Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

(a) well LX-A, 2 002.31 m, 100×(-), oolitic bauxite; (b) well LX-A, 2 002.31 m, diaspore agglomerates; (c) well LX-A, 2 003.15 m, 1 000×(-), columnar diaspore; (d) well LX-B, 2 057.09 m, 100×(-), oolitic siderite; (e) well LX-B, 1 999.15 m, 50×(-), pyrite nodules; (f) well LX-B, 2 056.38 m, 100×(-), ruptured quartz

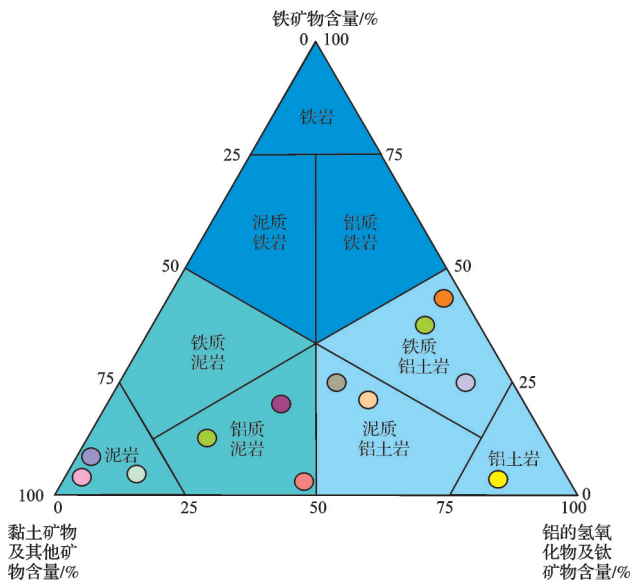


图3 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系岩石类型分类方案(据李勇等, 2024)

Fig.3 Classification scheme of bauxite in Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin (after Li *et al.*, 2024)

触部位, 孔径较粒内溶孔来说较小, 孔隙之间的连通性也相对较差(图5f)。由于鲕状铝石重结晶作用析出一水硬铝石微晶体, 易形成孔径较小, 松散且密集堆积的黄铁矿基质溶孔(图2e)。

2) 晶间孔隙

晶间孔隙是埋藏成岩作用下体积较大、晶体结构松散的一水软铝石向致密片状、柱状的一水硬铝

石转变过程中体积收缩形成的。晶间孔孔径较小, 形态不规则, 主要发育于结晶程度高的黏土矿物、一水硬铝石及富铁矿物中, 孔径细小, 纳米级孔隙占比较大。镜下可见晶间孔发育于草莓状黄铁矿及黏土矿物中(图5c, d), 一水铝石微晶和黏土矿物、铁质矿物等共生, 发育晶间孔隙(图5e)。

3) 微裂缝

扫描电镜和铸体薄片下可见黏土矿物内部发育顺层微裂缝, 宽度约160 nm(图5g), 一般受微构造和成岩作用的影响, 主要分布于富铝质层段中, 层间微裂缝和构造微裂缝占比最大, 为油气运移提供重要通道, 部分微裂缝被黏土矿物或一水铝石充填。

4) 有机质孔隙

研究区有机质孔隙较为少见, 主要赋存于有机质丰度和成熟度较高的黏土矿物和硬水铝石中, 扫描电镜下可观察到有机质与黏土矿物混生, 发育少量有机质孔(图5h); 条带状有机质内部发育微孔隙, 大小不等, 形状多样, 呈圆形、椭圆形、蜂窝状及狭长缝状等不规则形状, 孔径较小, 多以纳米级孔隙为主(图5i)。

3.2 孔隙结构特征

压汞法主要测量孔径较大的孔隙, N_2 和 CO_2 吸附法可以准确测量介孔和微孔(谢晓永等, 2006)。因此, 结合高压压汞、 N_2 吸附和 CO_2 吸附实验对研究区铝土岩系孔隙结构特征进行综合分析, 氮气吸附采用ASAP2460型比表面积及孔隙分析仪, 依据《岩石

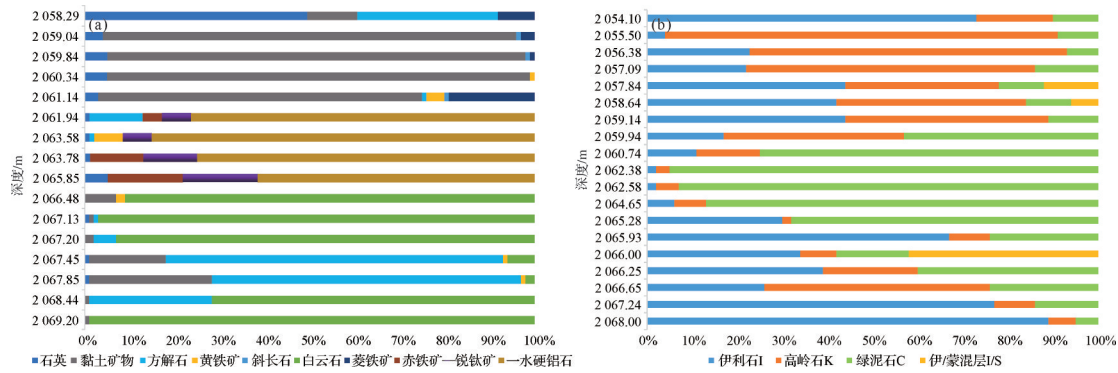


图4 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组岩石矿物组成及黏土矿物

Fig.4 Mineral composition and clay minerals of the Benxi Formation in Linxing area, Ordos Basin

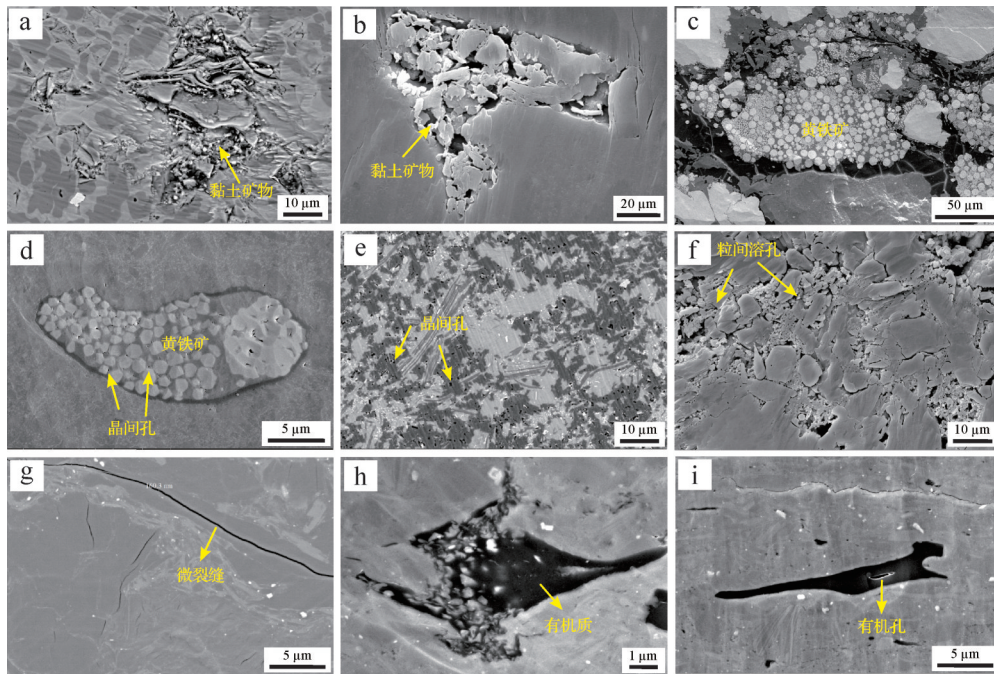


图5 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系储层孔隙类型

(a)LX-B井, 2 065.93 m, 溶蚀孔隙内充填黏土矿物; (b)LX-B井, 1 999.85 m, 碎屑矿物发育溶蚀孔隙; (c)LX-B井, 1 992.82 m, 草莓状黄铁矿内部发育晶间孔; (d)LX-B井, 1 999.85 m, 晶间孔分布于黄铁矿及黏土矿物; (e)LX-B井, 2 062.38 m, 黏土矿物晶间孔; (f)LX-B井, 2 003.50 m, 一水铝石发育粒间溶蚀孔隙; (g)LX-A井, 2 057.84 m, 微裂缝; (h)LX-B井, 2 058.64 m, 有机质和黏土矿物混生, 发育少量有机孔; (i)LX-A井, 2 058.64 m, 条带状有机质发育微孔隙

Fig.5 Reservoir pore types of bauxite in the Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

(a) well LX-B, 2 065.93 m, clay minerals filling dissolved pores; (b) well LX-B, 1 999.85 m, dissolution pores of detrital minerals; (c) well LX-B, 1 992.82 m, framboidal pyrite in intercrystalline pore; (d) well LX-B, 1 999.85 m, intergranular pores of pyrite and clay minerals; (e) well LX-B, 2 062.38 m, intercrystalline pores in clay minerals; (f) well LX-B, 2 003.50 m, intergranular dissolution pores in diaspore; (g) well LX-A, 2 057.84 m, microfracture; (h) well LX-B, 2 058.64 m, organic pore; (i) well LX-A, 2 058.64 m, banded organic matter pores

比表面积和孔径分布测定—静态吸附容量法》SY/T 6154—2019完成; 高压压汞测试依据《岩石毛管压力曲线的测定》GB/T 29171—2012进行, 仪器为Autopore9500压汞仪, 低温CO₂吸附实验使用自动比表面测定仪进行, 以上分析测试均在中海油能源发展股份有限公司非常规实验中心完成。

从铝土岩系样品高压压汞曲线得出(图6a), 最

大汞饱和度为74.3%, 排驱压力较低, 为2.738 MPa, 退汞饱和度高说明孔喉比小, 孔隙连通性好, 进汞曲线相对平缓说明孔喉分选较好。本溪组铝土岩系样品的低温氮气吸附实验表明(图6b), 相对压力(P/P₀)小于0.45时, 吸附曲线缓慢上升, 与脱附曲线几乎完全重合, 当相对压力大于0.45时, 吸附曲线缓慢上升并与脱附曲线逐渐分离, 形成明显的滞后环, 当相对

压力大于0.9时,吸附曲线急剧上升。根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)孔隙分类方案将孔隙划分为微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)和宏孔(>50 nm),本溪组铝土岩样品孔径主要介于2~50 nm(图6c),介孔贡献了主要的储集空间,孔隙连通性较好,是储集天然气的主要场所。根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)等温吸附曲线分类,CO₂等温吸附曲线为I型曲线,说明储层微孔占比较大,大孔径的数量较少(图6d)。

综合高压压汞、N₂和CO₂吸附实验结果,临兴地区本溪组铝土岩系储层孔喉以纳米级—亚微米级为主,孔隙结构分选较好,非均质性强,属于中孔—细喉型低渗透储层。

3.3 孔隙演化过程

依据扫描电镜和铸体薄片等资料分析,发现研究区成岩现象丰富,可见压实作用下鲕粒表现出长轴方向一致的定向性,一水硬铝石和碎屑颗粒发生溶蚀作用和一水软铝石向一水硬铝石转化过程中

形成晶间孔等现象。根据成岩现象和微观特征,认为成岩演化大致可以划分为三个阶段:陆源期、同生期和埋藏成岩期(图7)。陆源期的矿物成分是研究区本溪组铝土岩的物质基础,其中三水铝石和一水软铝石不稳定,逐渐向一水硬铝石转化;同生期是指沉积物被搬运到沉积洼地中,还没有压实成岩作用之前发生的一系列物理化学作用过程,这一阶段最重要的成岩现象是在大气淡水淋滤作用下发生一水硬铝石和碎屑颗粒的溶蚀;埋藏成岩期是一水硬铝石结晶并经历一系列成岩作用改造的过程,有机酸溶蚀和后期黏土矿物的形成是这一阶段重要的事件。

研究区本溪组铝土岩系储层处于埋藏成岩期,含铝矿物以一水硬铝石为主,大气淡水淋滤、有机酸溶蚀和铝矿物向一水硬铝石转化使储层孔隙度增加,而压实作用以及黏土矿物充填孔隙则不利于孔隙度的保存。研究区本溪组铝土岩储层孔隙演化主要经历三个增孔过程。

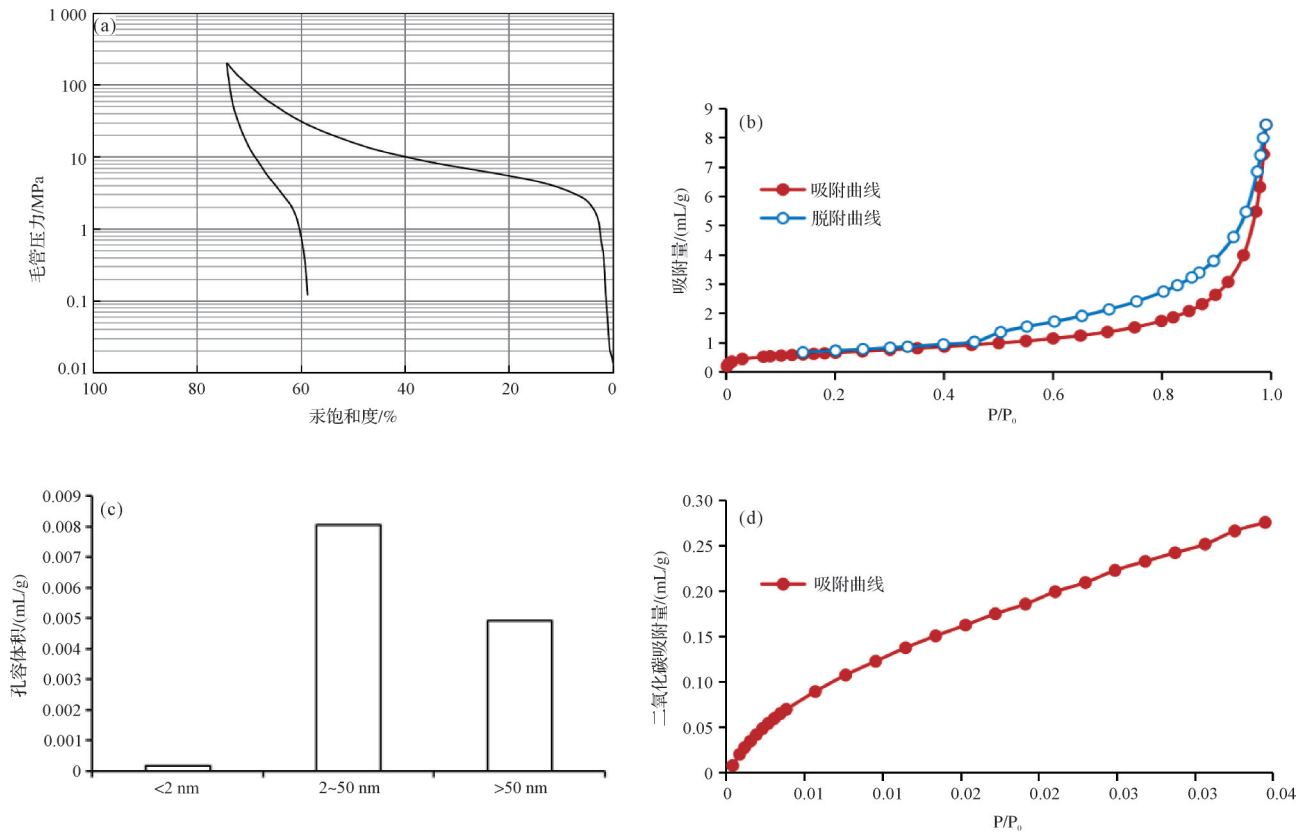


图6 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系孔隙微观特征

(a) LX-B井, 2 003.15 m, 高压压汞曲线; (b) LX-A井, 2 060.74 m, 氮气吸附—脱附曲线; (c) LX-A井, 2 060.74 m, 纳米级孔隙分布图; (d) LX-A井, 2 064.65 m, 二氧化碳吸附曲线

Fig.6 Pore microscopic characteristics of bauxite in the Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

(a) well LX-B, 2 003.15 m, high-pressure mercury injection curve; (b) well LX-A, 2 060.74 m, nitrogen adsorption-desorption curve; (c) well LX-A, 2 060.74 m, histogram of nanoscale pore distribution; (d) well LX-A, 2 064.65 m, CO₂ adsorption curve

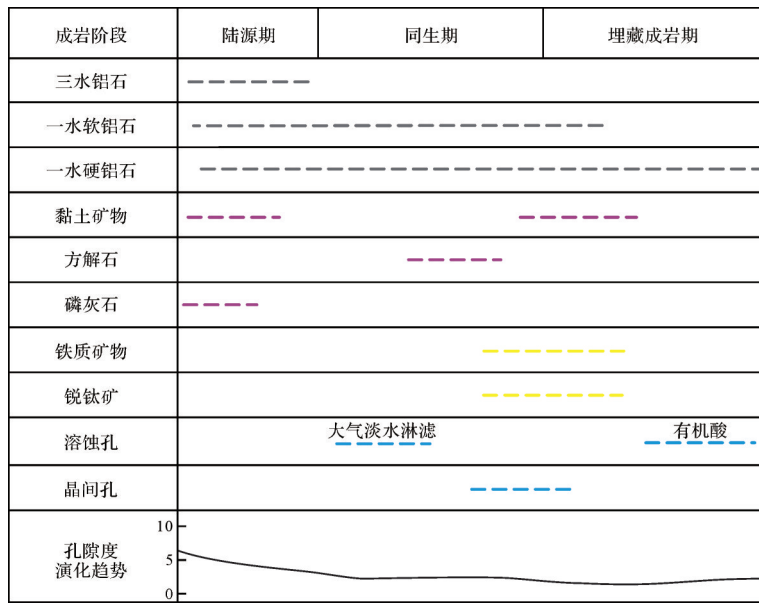


图7 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系储层成岩演化特征

Fig.7 Diagenetic evolution characteristics of bauxite reservoir in the Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

(1) 准同生期的大气淡水淋滤下的脱硅溶蚀作用增孔(图8a)。铝土质在沉积初期主要物质成分为一水软铝石、高岭石、氢氧化铝胶体、硅酸盐胶体等组成同生期的粒屑、豆—鲕粒,化学性质极不稳定。在温暖潮湿的气候下,植被开始繁殖并形成腐殖酸,同时降雨充足,地层流体呈酸性,有利于一水软铝石、氢氧化铝胶体脱硅溶蚀,形成大量溶蚀孔隙。

(2) 硬水铝石化过程中形成晶间孔(图8b)。随着埋深的增加,软粒屑及豆鲕粒在上覆压力作用下被压实变形,长轴平行分布,地层温度升高,片状的一水软铝石矿物与氢氧化铝胶体发生变化,形成板柱状的一水硬铝石矿物,硬水铝石化过程中同时形

成了大量的晶间孔(南珺祥等,2022)。

(3) 上覆煤层和碳质泥岩成熟后排出的有机酸溶蚀增孔(图8c)。上覆本溪组铝土岩沉积的为太原组碳质泥岩、煤层,煤系地层成熟后释放出大量有机酸,通过裂缝等渗流通道在铝土岩储层中形成有机酸溶孔。沉积晚期频繁的构造作用形成了较多的裂缝,在一定程度上提高了储集空间连通性,但后期这些裂缝大部分被一水硬铝石和铁泥质充填。

3.4 物性特征

岩心常规物性检测依据为《岩心分析方法》GB/T 29172—2012,应用VINCI孔隙度和渗透率测定仪完成。根据临兴地区本溪组共167块样品不同岩性的

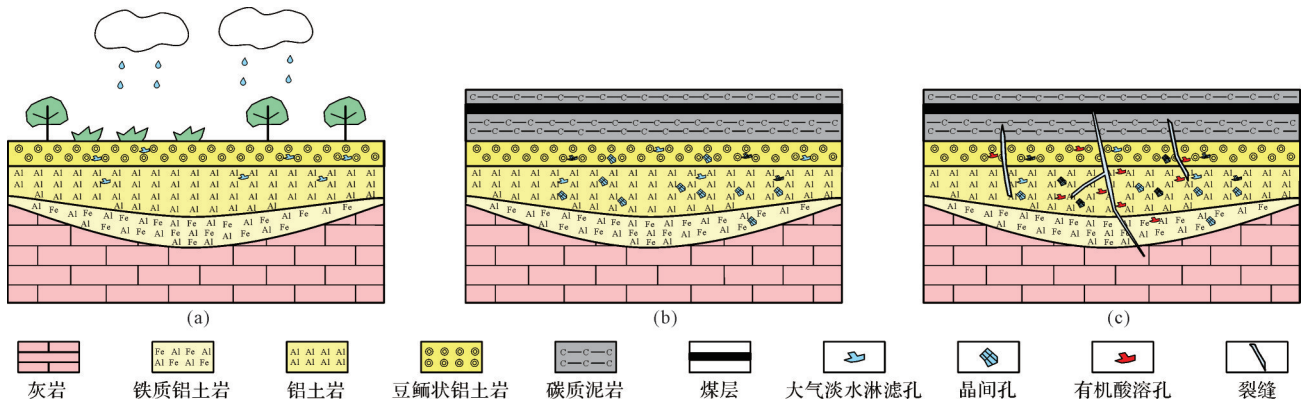


图8 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系储层孔隙演化模式

(a)大气淡水淋滤增孔;(b)硬水铝石化增孔;(c)有机酸溶蚀增孔

Fig.8 Pore evolution model of Benxi Formation bauxite reservoir in Linxing area, Ordos Basin

(a) porosity enhancement by meteoric freshwater leaching; (b) porosity enhancement by diasporization; (c) porosity enhancement by organic acid dissolution

物性结果,整体来看,研究区本溪组储层物性条件一般,孔隙度和渗透率均偏低,但是含铝矿物的物性相对较好,孔隙度介于1.51%~9.90%(平均为3.64%),主体介于2%~4%(图9a),渗透率较高,介于(0.02~36.20)×10⁻³ μm²(平均为7.24×10⁻³ μm²)(表2)。孔隙度与渗透率交会图可看出,孔隙度与渗透率之间几乎无相关关系,个别铝土岩样品点的渗透率极高(超过10×10⁻³ μm²),但是孔隙度偏低,推测是在微裂缝密集发育的区间取样,也表明铝土岩系储层非均质性较强,储层物性受裂缝、成岩作用等多重因素的影响(图9b)。

4 铝土岩系储层展布规律及富集模式

4.1 铝土岩系展布规律

众多学者在鄂尔多斯盆地西南部陇东地区太原组铝土岩系勘探实践中发现,构造演化、古地貌和沉积环境共同控制了铝土岩储层的品质(谢晓永等,2006;付金华等,2021;姚泾利等,2023)。基于此研究利用三维地震精细刻画,井震结合,采用(多井校

正)印模法恢复重建鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组沉积时期的微古地貌形态(图10)。印模法主要依据“填平补齐”原理,首先在目的层上覆地层的界面中寻找合适的等时基准面,然后计算基准面与待恢复侵蚀面之间的厚度,通过这之间的沉积厚度描述古地貌形态。该方法的关键是基准面的选取,要求具有分布范围广、等时性、靠近性和易识别性的特点。

构造作用和风化溶蚀作用导致鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩台地形成了高差不同的古地貌地形,橘黄色和黄色区域表示古地貌最高,绿色相对较高,蓝色区域为洼地,依据前人经验,古地貌形态可划分为高地(潜坑)、斜坡(潜坑)和洼地(沟槽)三个古地貌单元(张雷等,2024)。由于长期受大气淡水的淋滤作用,在岩溶高地形成“蜂窝”状的潜坑型地貌(杜远生和余文超,2020),高地区域容易受到风化剥蚀的影响,不利于铝质矿物的保存,只在高地(潜坑)相对封闭的区域,富集了少量的铝土岩。斜坡地区位于高地和沟槽的过渡地带,沉积水体动荡,沉积环境以半封闭潟湖及潮坪为主,在地表径流的作用下,发

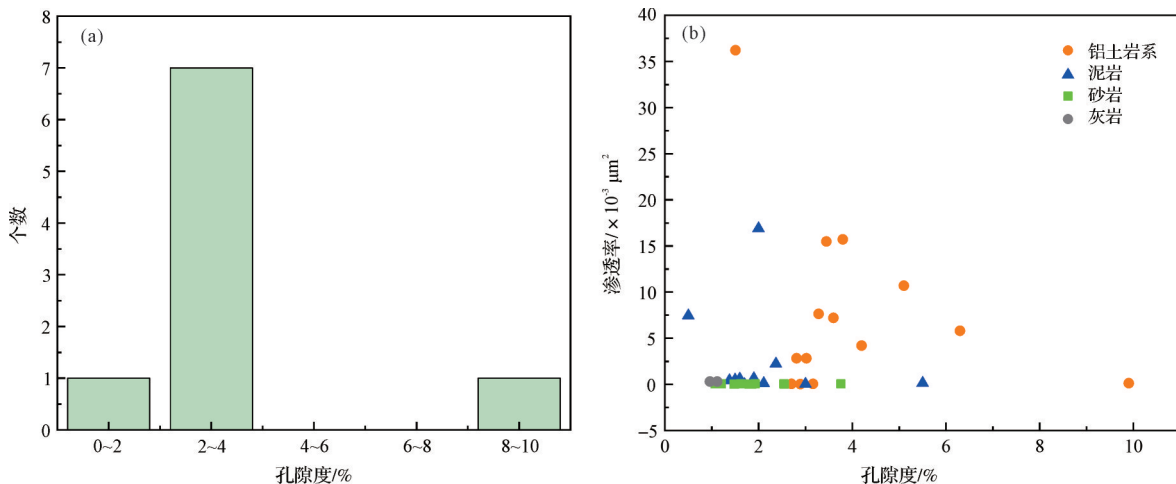


图9 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组储层物性特征
(a)铝土岩系孔隙度分布直方图;(b)孔隙度与渗透率交会图

Fig.9 Reservoir physical characteristics of the Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin
(a) histogram of porosity distribution of bauxite series; (b) crossplot of porosity and permeability

表2 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组不同岩性孔隙度和渗透率统计

Table 2 Porosity and permeability statistics of different lithologies in Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

岩性	孔隙度/%	渗透率/×10 ⁻³ μm ²
砂岩	0.36~5.50 1.97	0.01~16.9 2.65
泥岩	0.26~3.76 1.65	0.001~0.05 0.026
铝土岩系	1.51~9.90 3.64	0.02~36.20 7.24
灰岩	0.96~1.12 1.04	0.29~0.30 0.30

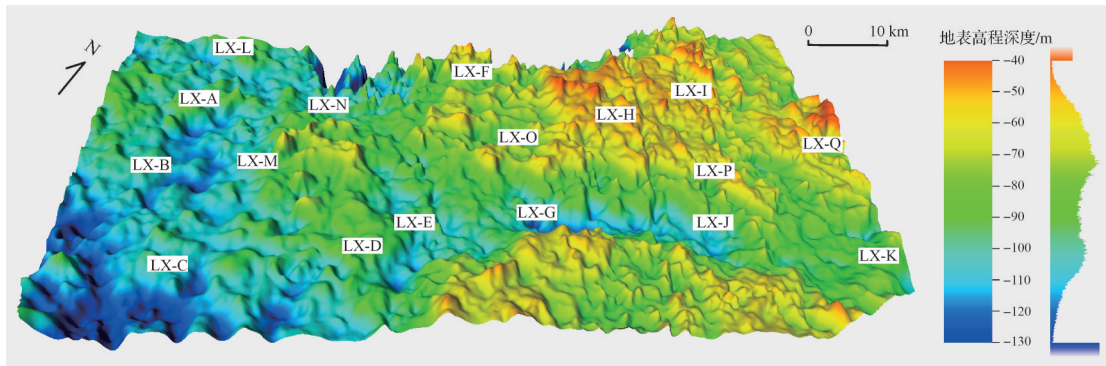


图10 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组沉积期微古地貌

Fig.10 Paleogeomorphology of Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin

育差异溶蚀作用,形成了“树枝状”和“条带状”沟槽网络,是铝土岩发育的有利地区,洼地长期处于水下强还原环境,安静的浅水沉积环境,沉积速率低,多发育碳质泥岩盖层(张雷等,2024)。

根据铝土岩系测井响应特征,统计研究区80余口井铝土岩发育厚度,整体来说,铝土岩系在全区均有发育,但是厚度差异较大,连续性也较差,主要呈团块状分布,铝土岩系地层厚度介于0.57~15.80 m,平均厚度为4.52 m。进一步将铝土岩系厚度与重建的古地貌形态进行对比分析,发现铝土岩厚度大的区域几乎均发育在斜坡(潜坑)地貌,形态呈弯曲条带状和团簇状,少部分发育于高地(潜坑)和洼地中,斜坡(潜坑)、高地(潜坑)和洼地(沟槽)的铝土岩平均厚度分别为5.82 m、2.44 m和1.82 m。前人研究也表明,岩溶古地貌形态特征对铝土岩系的形成与保存具有明显的控制作用,岩溶平台和岩溶斜坡处发育较厚层的铝土岩系(李勇等,2024),这与陇东地区的认识较相似(付金华等,2021)。

4.2 铝土岩系沉积环境

古环境演化对铝土岩系的发育与保存具有重要意义,恢复古环境的方法丰富多样。目前,在恢复和重建古环境的研究中,地球化学分析技术提供了重要的支撑,包括有机地球化学法、元素地球化学法及碳氧同位素分析等。元素地球化学在沉积物中具有相对的稳定性特征,可以较好地指示古沉积环境(张启连等,2016;金中国等,2018)。本次研究主要针对临兴地区25块岩心样品进行常量和微量元素测试分析,从古气候、古盐度、古氧化还原条件和古水深的演化特征对临兴地区本溪组铝土岩系的古沉积环境进行恢复。实验均在中海油能源发展股份有限公司非常规实验中心完成,测试仪器为PE 350X电感耦合

等离子体质谱仪,常量元素的检测依据为《硅酸盐岩石化学分析方法 第28部分:16个主次成分测定》GB/T 14506.28—2010,微量元素的检测依据为《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》GB/T 14506.30—2010。

4.2.1 古气候

古气候控制着气温、盆地沉积水体的环境等,影响沉积物的化学风化过程。化学蚀变指数(CIA)是指示古气候的有效参数,其计算公式为: $CIA=100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$, CaO^* 仅为硅酸盐矿物中CaO。当CIA值>80时,反映炎热、潮湿气候下的强化学风化条件,CIA值介于70~80反映温暖、湿润气候下的中等风化作用(Nesbitt and Young, 1982)。值得注意的是,采用CIA判断源区的风化程度时,需要注意沉积分异作用、再旋回作用及沉积区的进一步风化作用的影响,利用ICV这个化学指标来判断沉积再循环作用对沉积物成分的改造,ICV>1表明沉积再循环作用的影响极小,所以应尽量选取ICV>1的样品作为研究对象(Algeo *et al.*, 2011)。此外, Sr/Cu、Rb/Sr也是表征古气候演化的有效指标, Sr/Cu>10, Rb/Sr值较低,指示干热气候; 1.5<Sr/Cu<7.0, Rb/Sr值较高,则指示温湿气候(Moradi *et al.*, 2016)。研究区铝土岩系样品CIA值均大于90(平均为97), Sr/Cu值介于4.08~44.19(平均为24.43), Rb/Sr值介于0.004~0.090(平均为0.04),表明研究区含铝岩系沉积时化学风化作用强烈,为炎热潮湿的气候。前人研究也表明,华北地块成壳时温度为32.4℃~33.1℃,具有长期湿热的气候条件,属热带—亚热带气候,有利于铝土岩的形成(刘学飞等,2012;王庆飞等,2012)。

4.2.2 古盐度

Sr与Ba的化学性质相似,但Sr的迁移能力高于Ba,可以在深海沉积,在淡水沉积中 Ba^{2+} 与富含 SO_4^{2-} 的相遇容易形成 Ba_2SO_4 发生沉淀,因此,Sr的丰度和Sr/Ba值与古盐度呈明显正相关关系。但是对于深海沉积物,可能与海底热液喷流作用有关,其Ba的含量显著增加,Sr/Ba的海、陆相判定就变得不准确,应用此指标需谨慎(Moradi *et al.*, 2016)。研究区石炭系为浅海陆棚沉积体系,通常情况下,Sr/Ba>1指示海相咸水沉积,0.5<Sr/Ba<1指示过渡相半咸水沉积环境,Sr/Ba<0.6为陆相淡水沉积环境,研究区铝土岩系样品Sr/Ba值介于2.67~16.02(平均为6.34)。此外,Sr/Ca、Zr/Cu值的变化与古盐度密切相关,也常用作表征古盐度的标志(Zhao *et al.*, 2023)。综上,研究区含铝岩系整体为海相咸水环境。

4.2.3 氧化还原条件

沉积环境的氧化还原条件控制Mo、U、V等氧化还原敏感微量元素在沉积物中的富集程度。V/Ni、V/(V+Ni)、Ni/Co、Th/U、V/Cr、U-Mo协变模式图等来反映氧化还原条件(Hatch and Leventhal, 1992; Kimura and Watanabe, 2001)。但是这些指标提出于海相背景下的盆地,在应用于陆相盆地时,其比值的阈值范围和海相盆地往往存在较大的差异。Th/U<2,指示缺氧还原的环境,主要代表沉积成因;2<Th/U<7指示贫氧环境,反映经历过沉积混杂或不彻底的风化作用;Th/U>7时,则指示强烈风化作用。V/(V+Ni)在缺氧环境中大于0.6,在贫氧环境下一般介于0.45~0.60,而在富氧环境下小于0.46。需要注意的是,必须排除陆源碎屑、热液流体以及生物体来源的贡献,即剔除非自生的那部分元素含量(Kimura and Watanabe, 2001)。研究区铝土岩系列Th/U值介于0.22~3.86(平均为1.93),V/(V+Ni)值介于0.45~0.90(平均为0.70),表明主要形成于贫氧—缺氧环境,由沉积或沉积混杂作用形成。此外,在岩心及薄片上可见反映氧化环境的赤铁矿,也可见反映还原环境的黄铁矿,表明随着海平面的升降,氧化还原环境交替出现,但总体以还原缺氧环境为主。

4.2.4 古水深

元素的聚集和分散与水深(离岸距离)有一定的相关性,很多过渡元素、微量元素及REE对古水深具有良好的指示意义。从海岸带到深海,沉积物中富集元素由Fe族(Fe、Cr、V、Ge)最终过渡为Mn族元素

(Mn、Co、Ni、Mo)。Mn/Fe和Fe/Co值通常用来反映运输距离的远近,可间接表征古水深信息。Mn/Fe值越高,Fe/Co值越低指示离岸距离越远(Rimmer, 2004)。临兴地区铝土岩系样品Mn/Fe值介于 2.00×10^{-4} ~ 8.40×10^{-3} (平均值为 2.92×10^{-3}),Fe/Co值介于0.04~1.22(平均值为0.60),表明铝土岩系形成时期水体较浅,在垂向演化可见沉积期水体深度频繁波动。

如LX-A井2 062.11~2 065.68 m深度段,为典型的铝土岩层段,具有明显的“三高两低”测井响应特征,即高自然伽马、高中子、高密度、低声波时差及低电阻率(刘蝶等, 2022;刘可可等, 2022)。基于区域构造—沉积背景及上述元素地球化学指标的分析,综合认为临兴地区铝土岩系沉积时期整体处于炎热潮湿、贫氧—还原、海陆交互的潮坪—潟湖的浅水环境,且在沉积过程中经历了水体先上升后下降的震荡式海退背景,在低频的长期旋回,海平面整体上升,在高频的短期旋回中海平面频繁波动变迁,为铝土岩系的发育和保存提供了有利基础(图11)。

4.3 铝土岩系沉积模式

石炭纪—二叠纪是中国铝土矿重要成矿期,此时华北地块处于赤道区,年平均温度在25℃以上,海陆交互的沉积环境和长期湿热的热带—亚热带气候为风化壳残积物的形成创造了有利条件,风化产物原地堆积,就近搬运到岩溶潜坑、阶地等负地形部位(刘长龄, 1988; Yu *et al.*, 2019)。晚石炭世,盆地再次接受沉积,海水自东部快速侵入,在临兴地区发育潮坪—潟湖沉积,富铝矿物的风化产物、铁矿物、黏土矿物及不易风化的陆源碎屑物,被海水搬运至贫氧—还原、水体频繁震荡的环境中,在岩溶古地貌负地形部位不断富集,发生机械沉积分异作用的同时,海水中大量电解质作用使悬浮物、胶体和介质发生化学反应形成黄铁矿、菱铁矿、一水硬铝石等,铁质矿物由于质量分数较大,沉积于最底部,形成富铁铝土岩层,其上陆续发育铝土岩、高铁铝土岩及铝土质泥岩,纵向上形成从底部至顶部为Fe-Al-Si的沉积系列。局部负地形部位铝土岩厚度较大,且由于构造位置较低,在海平面频繁波动期间,时常暴露出水面,有利于地表水的淋滤改造,形成泄水通道,因此易于形成溶蚀孔洞,后期随着地层埋深增大,继续发生一水硬铝石化,形成晶间孔。此外,有机酸溶解作用等也可以形成溶孔,对储层物性起到一定改善作用(Yu *et al.*, 2024)。

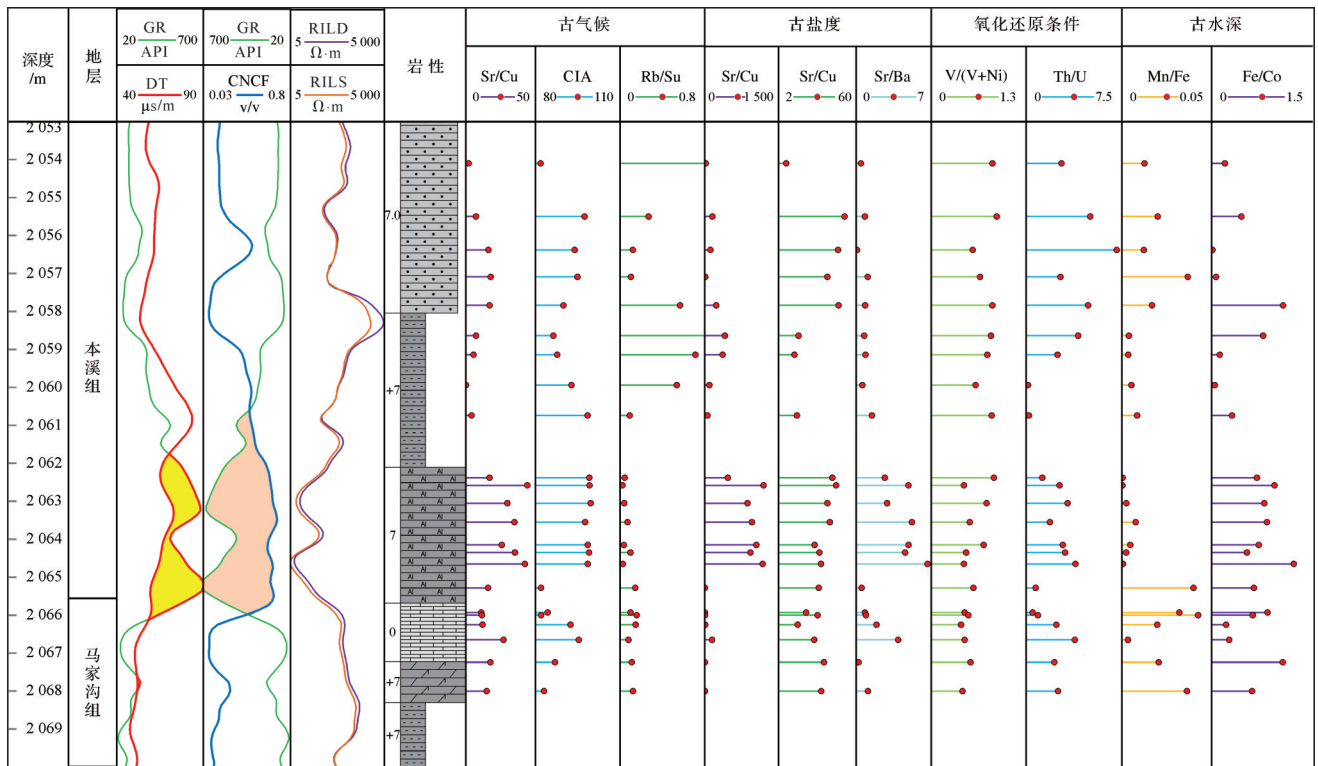


图 11 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组 LX-A 井古环境演化特征

Fig.11 Paleoenvironmental evolution characteristics in the Benxi Formation, well LX-A, Linxing area, Ordos Basin

铝土岩系的形成是多因素综合影响的结果,基于以上铝土岩系沉积、构造和古地貌背景的分析,考虑海平面周期上升的特点,建立了研究区本溪组铝土岩三阶段沉积模式演化(图 12)。沉积早期,海平面较低,奥陶系马家沟组基岩碳酸盐沉积风化后,形成高低不平的丘陵地貌,风化作用的改造把易溶的组分搬运到海里,难溶的物质(如铁、铝等)以胶体的形式残留在原地,此时高地(潜坑)和斜坡低洼处的富铁矿物出露地表,后期经风化淋滤氧化成氧化铁,以氧化条件为主,形成富铁矿层(图 12a);沉积中期,海平面上升,气候更加炎热潮湿,临近丘陵的高地,海水淹没斜坡和高地的一部分,使原来的偏酸性环境转变为碱性环境,氧化还原条件交替出现,氧化铁和铝土矿易形成沉淀,形成富铝层段(图 12b);沉积晚期,海平面继续上升,此时高地和斜坡均被海水完全淹没,形成水下还原环境的暗色泥岩和碳质泥岩,也解释了煤—铝—铁岩性三段式垂向结构的成因(图 12c)。

5 结论

(1) 临兴地区本溪组岩石矿物组成主要为含铝矿物、含铁矿物和黏土矿物三大类五小类,其中铝土岩

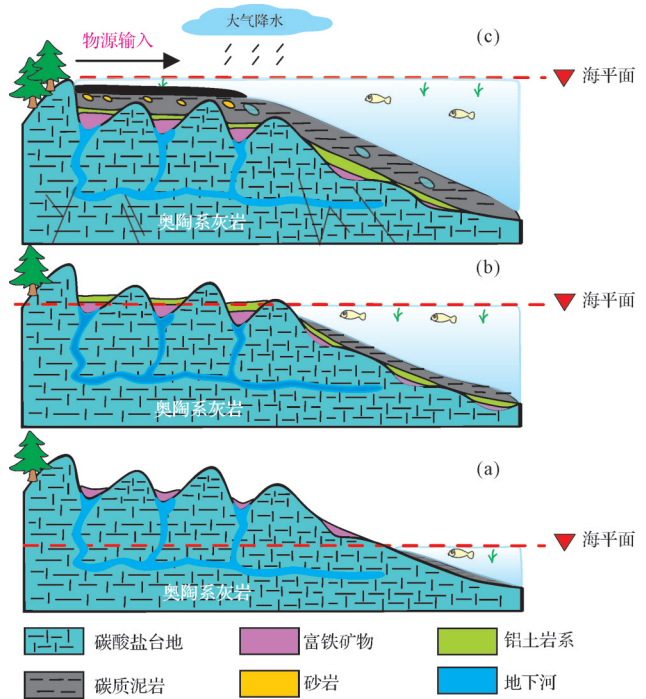


图 12 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩系沉积模式(据李涵等, 2023 修改)

(a) 沉积早期; (b) 沉积中期; (c) 沉积晚期

Fig.12 Sedimentary model of bauxite in Benxi Formation, Linxing area, Ordos Basin (modified from Li *et al.*, 2023)
(a) early depositional stage; (b) middle depositional stage; (c) late depositional stage

系矿物组分以一水硬铝石为主(含量可高达94%),其次为黏土矿物和铁质矿物,垂向上岩性呈明显的三段式结构,具有底部富铁、中部多铝、顶部低铁的特点。

(2) 临兴地区本溪组铝土岩系储层孔隙类型主要包括溶蚀孔、晶间孔、微裂缝及有机质孔,溶蚀孔是主要的储集空间,孔喉以纳米级—亚微米级为主,2~50 nm的介孔贡献了主要的孔隙体积,是天然气的主要储集空间,孔隙结构分选较好,可见微裂缝,储层非均质性较强。

(3) 铝土岩系厚度分布主要受沉积环境、古地貌和海平面升降的影响,炎热潮湿、贫氧—还原、海陆交替的潮坪—泻湖浅水环境有利于铝土岩的形成,古地貌斜坡(潜坑)区域有利于铝土岩系的保存,是铝土岩系气藏勘探开发的有利方向。

参考文献(References)

杜远生,余文超. 2020. 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, 22(5):812-826. [Du Yuansheng, Yu Wenchao, et al. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. Journal of Palaeogeography, 22(5): 812-826.]

付金华,李明瑞,张雷,等. 2021. 鄂尔多斯盆地陇东地区铝土岩天然气勘探突破与油气地质意义探索[J]. 天然气工业, 41(11):1-11. [Fu Jinhua, Li Mingrui, Zhang Lei, et al. 2021. Breakthrough in the exploration of bauxite gas reservoir in Longdong area of the Ordos Basin and its petroleum geological implications[J]. Natural Gas Industry, 41(11): 1-11.]

高兰,王登红,熊晓云,等. 2015. 中国铝土矿资源特征及潜力分析[J]. 中国地质, 42(4): 853-863. [Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, et al. 2015. Minerogenetic characteristics and resource potential analysis of bauxite in China[J]. Geology in China, 42(4): 853-863.]

郭艳琴,李文厚,郭彬程,等. 2019. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J]. 古地理学报, 21(2):293-320. [Guo Yanqin, Li Wenhou, Guo Bincheng, et al. 2019. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 21(2): 293-320.]

金中国,刘辰生,邹林,等. 2018. 贵州务—正—道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. 地质学报, 92(4): 817-827. [Jin Zhongguo, Liu Chensheng, Zou Lin, et al. 2018. Geochemical evidence of sedimentary environment of Permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province[J]. Acta Geologica Sinica, 92(4): 817-827.]

李涵,付金华,季汉成,等. 2023. 鄂尔多斯盆地西南部上中生界风化壳型铝土岩系发育过程及优势储层分布规律[J]. 石油与天然气地质, 44(5): 1243-1255. [Li Han, Fu Jinhua, Ji Hancheng, et al. 2023. Bauxite series in the Upper Paleozoic weathering crusts in

the southwestern Ordos Basin: Development and distribution of dominant reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 44(5): 1243-1255.]

李克永,杨文鹏,徐帅康,等. 2023. 鄂尔多斯盆地中南部上中生界层序与岩相古地理演化[J]. 古地理学报, 25(1): 75-92. [Li Keyong, Yang Wenpeng, Xu Shuaikang, et al. 2023. Sequence stratigraphy and lithofacies palaeogeography evolution of the Upper Paleozoic in central-southern Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 25(1): 75-92.]

李文厚,张倩,李克永,等. 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. 古地理学报, 23(1): 39-52. [Li Wenhou, Zhang Qian, Li Keyong, et al. 2021. Sedimentary evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography, 23(1): 39-52.]

李勇,王壮森,邵龙义,等. 2024. 鄂尔多斯盆地东部上石炭统铝土岩系储集层特征及形成模式[J]. 石油勘探与开发, 51(1):39-47. [Li Yong, Wang Zhuangsen, Shao Longyi, et al. 2024. Reservoir characteristics and formation model of Upper Carboniferous bauxite series in eastern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(1): 39-47.]

廖士范,梁同荣. 1991. 中国铝土矿地质学[M]. 贵阳:贵州科技出版社: 146-181. [Liao Shifan, Liang Tongrong. 1991. Bauxite geology of China[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House Co., Ltd: 146-181.]

刘长龄. 1988. 中国石炭纪铝土矿的地质特征与成因[J]. 沉积学报, 6(3): 1-10. [Liu Changling. 1988. Geological features and genesis of Carboniferous bauxite in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(3): 1-10.]

刘蝶,张海涛,杨小明,等. 2022. 鄂尔多斯盆地铝土岩储集层测井评价[J]. 新疆石油地质, 43(3):261-270. [Liu Die, Zhang Haitao, Yang Xiaoming, et al. 2022. Well logging evaluation of bauxite reservoirs in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 43(3): 261-270.]

刘可可,付鑫,荣伟,等. 2022. 鄂尔多斯盆地X区铝土岩储层分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 37(2):25-31. [Liu Keke, Fu Xin, Rong Wei, et al. 2022. Analysis of bauxite reservoir in X area of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 37(2): 25-31.]

刘学飞,王庆飞,李中明,等. 2012. 河南铝土矿矿物成因及其演化序列[J]. 地质与勘探, 48(3): 449-459. [Liu Xuefei, Wang Qingfei, Li Zhongming, et al. 2012. Mineral genesis and evolutionary sequence of the bauxite deposits in Henan province[J]. Geology and Exploration, 48(3): 449-459.]

孟卫工,李曙光,吴炳伟,等. 2021. 鄂尔多斯盆地宁古3井太原组含铝岩系天然气成藏特征及地质意义[J]. 中国石油勘探, 26(3):79-87. [Meng Weigong, Li Xiaoguang, Wu Bingwei, et al. 2021. Research on gas accumulation characteristics of aluminiferous rock series of Taiyuan Formation in well Ninggu 3 and its geological significance, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(3): 79-87.]

米立军,朱光辉. 2021. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府致密气田成藏地质特征及勘探突破[J]. 中国石油勘探, 26(3):53-67. [Mi Lijun, Zhu Guanghui. 2021. Geological characteristics and exploration

- tion breakthrough in Linxing-Shenfu tight gas field, northeastern Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 26(3): 53-67.]
- 南珺祥,柳娜,王邢颖,等. 2022. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩储层特征及形成机理[J]. *天然气地球科学*, 33(2):288-296. [Nan Junxiang, Liu Na, Wang Xingying, et al. 2022. Characteristics and formation mechanism of bauxite reservoir in Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 33(2): 288-296.]
- 王桂成,王秀林,莫小国,等. 2004. 鄂尔多斯盆地富县探区上古生界天然气运移模式[J]. *石油勘探与开发*, 31(3): 30-33. [Wang Guicheng, Wang Xiulin, Mo Xiaoguo, et al. 2004. Gas migration pattern of Upper Paleozoic in the Fuxian exploration area, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 31(3): 30-33.]
- 王庆飞,邓军,刘学飞,等. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. *地质与勘探*, 48(3):430-448. [Wang Qingfei, Deng Jun, Liu Xuefei, et al. 2012. Review on research of bauxite geology and genesis in China[J]. *Geology and Exploration*, 48(3): 430-448.]
- 吴见,杨昊宇,徐延勇,等. 2025. 鄂尔多斯盆地临兴地区本溪组铝土岩储层特征及其发育控制因素[J]. *地质科技通报*, 44(5): 123-134. [Wu Jian, Yang Haoyu, Xu Yanyong, et al. 2025. Reservoir characteristics and development control factors of Benxi Formation bauxite in Linxing area of Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(5): 123-134.]
- 谢晓永,唐洪明,王春华,等. 2006. 氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J]. *天然气工业*, 26(12): 100-102. [Xie Xiaoyong, Tang Hongming, Wang Chunhua, et al. 2006. Contrast of nitrogen adsorption method and mercury porosimetry method in analysis of shale's pore size distribution[J]. *Natural Gas Industry*, 26(12): 100-102.]
- 姚泾利,石小虎,杨伟伟,等. 2023. 鄂尔多斯盆地陇东地区二叠系太原组铝土岩系储层特征及勘探意义[J]. *沉积学报*, 41(5):1583-1597. [Yao Jingli, Shi Xiaohu, Yang Weiwei, et al. 2023. Reservoir characteristics and exploration significance of the bauxite rock series of Permian Taiyuan Formation in the Longdong area of the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1583-1597.]
- 于兴河,王香增,王念喜,等. 2017. 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*, 19(6):935-954. [Yu Xinghe, Wang Xiangzeng, Wang Nianxi, et al. 2017. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution characteristics of gas-bearing sandbody in the Upper Paleozoic in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 19(6): 935-954.]
- 余文超,杜远生,周锦涛,等. 2023. 中国铝土矿成矿作用的物质来源与深时环境因素:进展与讨论[J]. *地质学报*, 97(9):3056-3074. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Jintao, et al. 2023. Pro-venance and deep-time environmental factors for bauxitization in China: Progress and discussion[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3056-3074.]
- 张雷,曹茜,张才利,等. 2024. 鄂尔多斯盆地含铝岩系天然气成藏主控因素与勘探启示[J]. *石油勘探与开发*, 51(3): 541-552. [Zhang Lei, Cao Qian, Zhang Caili, et al. 2024. Main controlling factors and exploration enlightenment of aluminous rock series gas reservoirs in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(3): 541-552.]
- 张启连,梁裕平,余文超,等. 2016. 桂西地区二叠系合山组铝土岩的沉积环境[J]. *古地理学报*, 18(4):595-604. [Zhang Qilian, Liang Yuping, Yu Wenchao, et al. 2016. Sedimentary environment of al-lites in the Permian Heshan Formation in western Guangxi[J]. *Journal of Palaeogeography*, 18(4): 595-604.]
- 朱光辉,李本亮,李忠城,等. 2022. 鄂尔多斯盆地东缘非常规天然气勘探实践及发展方向:以临兴—神府气田为例[J]. *中国海上油气*, 34(4):16-29. [Zhu Guanghui, Li Benliang, Li Zhongcheng, et al. 2022. Practices and development trend of unconventional natural gas exploration in eastern margin of Ordos Basin: Taking Linxing-Shenfu gas field as an example[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 34(4): 16-29.]
- 朱筱敏. 2020. 沉积岩石学:富媒体[M]. 5版. 北京:石油工业出版社, [Zhu Xiaomim. 2020. *Sedimentology*[M]. 5th ed. Beijing: Petroleum Industry Press.]
- Algeo T J, Kuwahara K, Sano H, et al. 2011. Spatial variation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian-Triassic Panthalassic Ocean[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308(1/2): 65-83.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale member of the Dennis limestone, Wabaunsee county, Kansas, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 99(1/2/3): 65-82.
- Kimura H, Watanabe Y. 2001. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Geology*, 29(11): 995-998.
- Moradi A V, Sarı A, Akkaya P. 2016. Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançili Formation) in the Çankırı-Çorum Basin, central Turkey: Implications for paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance and tectonic setting[J]. *Sedimentary Geology*, 341: 289-303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715-717.
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. *Chemical Geology*, 206(3/4): 373-391.
- Yu S S, Zhao Z G, Zhu Y H, et al. 2024. Reservoir characteristics and formation model of the bauxite gas reservoir: The Benxi Formation in the LX block, northeast of Ordos Basin, China[J]. *ACS Omega*, 9(16): 18127-18136.
- Yu W C, Algeo T J, Yan J X, et al. 2019. Climatic and hydrologic controls on Upper Paleozoic bauxite deposits in South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 189: 159-176.
- Zhao L H, Wang W X, Liu X F, et al. 2023. The formation environment of Carboniferous karstic bauxite deposits in the central North China Craton: Insights from nitrogen isotopes and geochemical proxies [J]. *Ore Geology Reviews*, 159: 105559.

Sedimentary Environment and Reservoir Characteristics of Bauxite Rock Series: A Case Study of the Benxi Formation in the Linxing Area, Ordos Basin

WANG XiaoLin^{1,2}, ZHU XiaoMin^{1,2}, ZHU YanHe³, YU ShanShan³, LAI Jin^{1,2}, LI HongBin^{1,2}

1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: [Objective] Current domestic and international research on bauxite oil and gas reservoirs is limited in scope. The bauxite reservoir with high-yield industrial gas flow discovered in the Taiyuan Formation, Longdong area, southwestern Ordos Basin, represents a significant advance in the exploration for bauxite gas reservoirs, and the recent identification and production tests of bauxite rock series in the Benxi Formation in the Linxing area at the north-eastern margin of the basin suggests promising exploration potential. Further natural gas exploration and development in the bauxite series in the Linxing area requires a comprehensive analysis of the fundamental geology of the sedimentary environment, including the mineral composition, reservoir pore properties and the structure of the bauxite series. In addition, it is essential to identify the factors that control the development of bauxite and which areas are most conducive to such activity. [Methods] A comprehensive analysis of the sedimentary environment, reservoir characteristics and sedimentary model of the Benxi Formation bauxite rock series in the Linxing area was conducted using logging, seismic data, X-ray diffraction, casting thin sections, scanning electron microscopy, major and trace elements, high-pressure mercury injection, N₂ and CO₂ adsorption and conventional physical properties, and other experimental methods. [Results] The bauxite rock series in the study area is characterized by a high concentration of diaspore and clay minerals, and has a distinctive three-stage vertical structure. The lower portion is rich in iron, the middle zone contains a higher aluminum content, and the upper section has a lower iron concentration. The pore types include predominantly dissolution pores typically ranging between 2 nm and 50 nm, along with intercrystalline pores, organic pores and microfractures. The sorting and connectivity of the pores are relatively good, with average porosity 3.64% and average permeability $7.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. [Conclusions] The thickness of a bauxite rock series depends upon the sedimentary environment and karst paleogeomorphology. A shallow-water sedimentary environment with high temperature and high humidity, low oxygen levels and alternating marine and terrestrial conditions is optimal for its formation and preservation. A slope, or buried pit, is a crucial area for exploration and development. This understanding provides a geological foundation for the exploration and development of natural gas in bauxite with comparable geological background in this region.

Key words: bauxite rock series; sedimentary environment; reservoir characteristics; sedimentary model; Linxing area