

鄂尔多斯盆地西南部上古生界风化壳型铝土岩系发育过程及优势储层分布规律

李 涵^{1,2,3}, 付金华^{2,3}, 季汉成¹, 张 雷^{2,3}, 余钰蔚^{2,3}, 官 伟⁴, 井向辉^{2,3}, 王红伟^{2,3}, 曹 茜^{2,3},
刘 刚^{2,3}, 魏嘉怡^{2,3}

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 4. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069]

摘要:鄂尔多斯盆地西南部陇东探区上古生界二叠系太原组铝土岩系天然气勘探近期取得重大突破, 开辟了新的勘探领域。但是目前对于铝土岩系分布及储层发育特征认识不清, 制约了勘探进程。基于岩心观察、薄片、测录井及地震等资料, 通过分析铝土岩系的物源、沉积环境及形成过程并探讨铝土岩系储层特征及形成机理, 建立了铝土岩系形成分布模式及储层发育模式。研究认为: ①陇东地区铝土岩系物源主要来自上古生界马家沟组碳酸盐岩。②铝土岩系发育在海退背景下湿热多雨的沉积环境, 垂向结构包括漏斗状、透镜状及似层状3种岩性组合类型, 不同成因组合类型受岩溶的容积空间和淋滤程度等因素影响。平面上分布受古地貌控制, 高地岩溶潜坑区发育漏斗状铝土岩系, 垂向厚度大。斜坡区岩溶阶地以连续透镜状铝土岩为主, 且横向分布具有一定范围。洼地区发育似层状铝土岩系。③岩溶负地形是控制铝土岩系发育的重要因素, 泄水通道的存在是控制优势储层发育的关键因素。高地潜坑和斜坡阶地微古地貌单元是理想的铝土岩系优势储层发育区。该研究成果可为盆地内寻找铝土岩系优质储层提供依据, 对新类型天然气勘探提供借鉴。

关键词:形成模式; 优势储层分布; 铝土岩系; 天然气勘探; 太原组; 陇东地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Bauxite series in the Upper Paleozoic weathering crusts in the southwestern Ordos Basin: Development and distribution of dominant reservoirs

LI Han^{1,2,3}, FU Jinhua^{2,3}, JI Hancheng¹, ZHANG Lei^{2,3}, SHE Yuwei^{2,3}, GUAN Wei⁴, JING Xianghui^{2,3},
WANG Hongwei^{2,3}, CAO qian^{2,3}, LIU Gang^{2,3}, WEI Jiayi^{2,3}

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Branch Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China]

Abstract: In the Longdong area—a gas exploration area in the southwestern Ordos Basin, breakthroughs have been made in gas exploration in the bauxite series of the Upper Paleozoic Permian Taiyuan Formation, offering a new exploration target. However, the distribution of the bauxite series and reservoir developmental characteristics within remain unclear, hindering exploration progress. Using data from core and thin-section observations, logs, and seismic data, we analyze the provenance, sedimentary environment, and formation process of the bauxite series and explore the characteristics and formation mechanisms of reservoirs within the bauxite series. Based on these effects, we establish the formation and distribution patterns of the bauxite series, as well as reservoir development model. The results are as follows. (1) The bauxite series in the Longdong area primarily originate from carbonate rocks in the Lower Paleozoic Majiagou Formation. (2) The bauxite series is developed in a warm and rainy sedimentary environment under marine regression. In the vertical direction, the rock series consists of funnel-shaped, lenticular, and stratoid lithologic

收稿日期:2023-05-02;修回日期:2023-08-20。

第一作者简介:李涵(1993—),女,博士研究生,石油天然气地质。E-mail:lihan1_cq@petrochina.com.cn。

通信作者简介:季汉成(1966—),男,教授、博士生导师,矿物学、岩石学、矿床学。E-mail:jhch@cup.edu.cn。

基金项目:中国石油科技创新基金研究项目(2021D002-0102);中国石油天然气股份有限公司生产技术攻关与现场试验项目(2022KT0504)。

assemblages. The lithologic assemblages of different origins are controlled by factors such as volumetric space of karsts and leaching degree. Regarding the planar distribution, the bauxite series is dictated by paleogeomorphology. For instance, karst-related sinkholes in the highlands house funnel-shaped bauxite series with considerable vertical thickness; karst-related terraces in the slope zone predominantly contain lenticular bauxite series with a broad and continuous lateral distribution, and the depression zones show the development of stratoid bauxite series. (3) The karst-related negative landforms serve as a key factor controlling the development of bauxite series, while drainage channels are critical to the development of dominant reservoirs. Furthermore, as micro-paleogeomorphic units, including sinkholes in the highlands and terraces in the slope zone, provide favorable conditions for the development of dominant reservoirs within the bauxite series. These findings provide a basis for seeking high-quality reservoirs within the bauxite series in the Ordos Basin and can be used as a reference for exploring new types of natural gas.

Key words: formation model, distribution of dominant reservoirs, bauxite series, natural gas exploration, Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin

引用格式:李涵,付金华,季汉成,等.鄂尔多斯盆地西南部上古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,2023,44(5):1243-1255. DOI:10.11743/ogg20230513.

LI Han, FU Jinhua, JI Hancheng, et al. Bauxite series in the Upper Paleozoic weathering crusts in the southwestern Ordos Basin: Development and distribution of dominant reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1243-1255. DOI: 10.11743/ogg20230513.

铝土岩是一种富含铝质矿物的化学沉积岩^[1],岩石中 Al_2O_3 与 SiO_2 的含量比值大于1,主要矿物为一水铝石、三水铝石或软水铝石,其中也包括铁的氧化物或少量黏土矿物^[2-3]。近期在鄂尔多斯盆地西南部陇东探区上古生界二叠系太原组发育的铝土岩系天然气勘探获得重大突破,证实铝土岩气藏具有很大的勘探潜力^[4-8],改变了以往只能作为盖层的认识。

在盆地内,铝土岩系几乎全盆分布,且紧邻上、下古生界两套优质烃源岩,成藏条件优越。目前除鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩天然气取得突破外,延长气田、大牛地气田分别在盆地东部和北部本溪组中铝土岩系取得天然气发现,说明华北板块上古生界铝土岩系具有区域性天然气成藏的条件。

2021年以来,盆地陇东地区钻遇铝土岩系的探井已有60余口,在试气过程中,多口探井具有良好的含气显示。继L47井在太原组铝土岩段试气获 $67.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产气流,首次在这一领域取得重大突破后,2022年11月C3-17-22井试气获 $102.29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产气流,突破日产气百万方大关。近期,盆地内首口铝土岩水平井L47-1CH试气获 $353 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产气流,创鄂尔多斯盆地上古生界勘探开发50多年来最高无阻流量记录,展示出铝土岩系天然气的巨大潜力。由于是勘探新发现,国内外关于铝土岩“成储”机理的研究几乎是空白。在陇东地区,铝土岩系基础地质研究仍处于初期认识阶段。铝土岩系的物源、沉积环境、成因、溶蚀机理及储层分布规律等亟待明确。

基于鄂尔多斯盆地陇东地区岩心、薄片、测井、录

井、地震等资料,建立陇东地区铝土岩系形成模式;根据垂向岩性组合序列不同及典型井分析,提出了“微古地貌控储”这一观点,分析优势储层控制因素,对铝土岩系气藏勘探具有一定参考意义。

1 陇东地区铝土岩系物源

铝土岩系形成过程中,物源区提供的碎屑物质是基础,也与当时的古环境和古构造等有着重要的联系^[9]。关于华北地区古风化壳沉积型铝土矿物质来源目前有3种观点。①“基底说”:物质来源于下伏的寒武系-奥陶系碳酸盐岩;②“古陆说”:古老隆起区的铝硅酸盐或变质岩提供了成矿物质来源;③“混源说”:铝土矿的物质来源是多样的,是前述二者来源不同程度混合而成^[10]。关于鄂尔多斯盆地陇东地区的早期研究认为,铝土岩系为风化壳中含铝物质以化学方式搬运至古地貌低部位形成。这些认识仍然存在争议,本文从构造背景和地化特征两方面进一步开展对比研究,为铝土岩系物源为下伏碳酸盐岩风化搬运提供更详实的证据。

1.1 基于构造背景的物源分析

寒武系-奥陶系沉积期,陇东地区为一继承性古隆起(庆阳古陆),周围被秦岭海、祁连海、华北海等海洋环绕,因而对陇东地区而言,外部的陆源碎屑物质供应严重匮乏,导致该地区广泛发育碳酸盐岩沉积^[11-13]。

到太原组沉积期,华北板块南部为被动大陆边缘,构造稳定,板块升降运动和岩浆活动不发育。此时,陇

东地区南邻古特提斯洋,西南方向的物源缺乏;鄂尔多斯地区北部虽有碎屑物源供应,但与陇东地区距离较远且中间隔有华北海,北方物源也供应不足^[14]。因此,在太原组沉积期,陇东地区也不具备从外地输入铝土物质的地质条件^[15]。

从地层接触关系来看,鄂尔多斯盆地上古生界底部大多与奥陶系马家沟组不整合接触,然而由于陇东地区的剥蚀最为强烈,该地区马家沟五段(马五段)已缺失,围绕古隆起核部,奥陶系-寒武系各组地层由新

到老依次剥露,在镇原、崇信和泾川等地,甚至已经出露震旦系(图1)。因此,陇东地区主要以风化剥蚀为主,且剥蚀量大,为铝土岩系母岩物质的形成提供了丰富的地质基础^[16-17]。

1.2 基于地化特征的岩-源对比

从元素含量上看,鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩中 Al_2O_3 含量为 0.06 % ~ 13.06 %,平均为 2.20 %;据 Li 等(2020)研究,陇东地区及邻区马五段 Al_2O_3 含

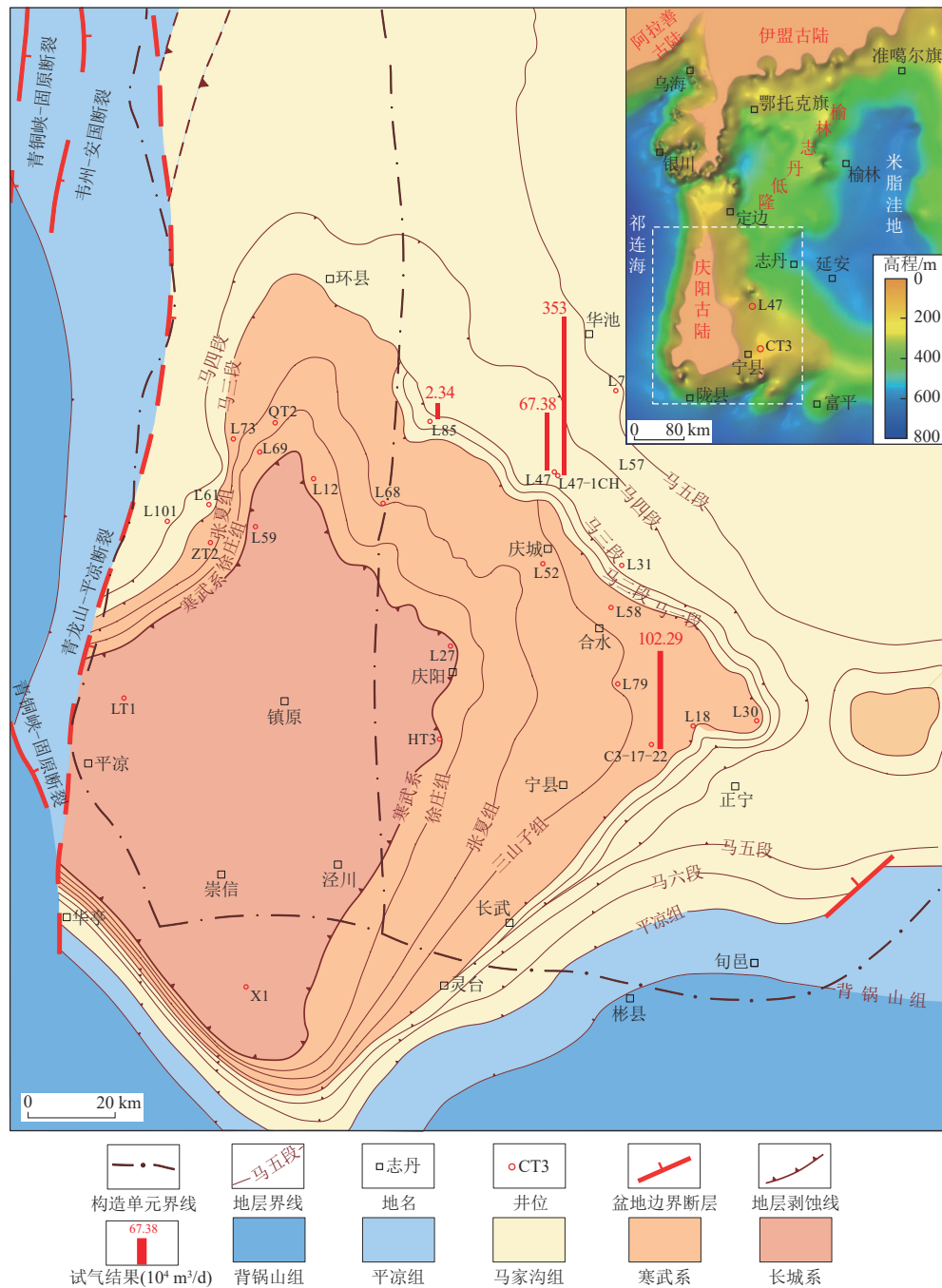


图1 鄂尔多斯盆地中央古隆起前石炭系风化壳古地质图

Fig. 1 Paleogeologic map showing the pre-Carboniferous weathering crust in the central paleo-uplift of the Ordos Basin

量为1.1%~11.9%,平均为5.8%(约为岩浆岩铝含量的1/3)^[18];三山子组 Al_2O_3 含量为2.9%。再考虑到陇东地区的强烈风化剥蚀,下古生界碳酸盐岩完全具有作为铝源的潜力^[19]。

在风化过程中,稳定元素Zr和Nb不易迁移,随淋滤强度增大而逐渐在残留物中富集,从而具有物源指示意义,是铝土岩系理想的物源示踪指标^[20-21]。本研究选用Zr和Nb两种元素对铝土岩系开展了物源示踪。

1.2.1 样品与方法

研究共选取L58井太原组不同深度段岩心样品5块(40个点位)进行微区原位微量元素测试,深度段为4 041.59~4 049.84 m。样品岩性包括铝土岩、泥质铝土岩和铝土质泥岩。

本次铝土岩系微区原位微量元素含量在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪Agilent 7 700x ICP-MS完成,Y,Zr,Nb,Co,Ni,Rb,Hf,Ta和Zn等元素分析精度高于5%。

1.2.2 样品结果分析

通过元素对比,认为陇东地区铝土岩系物质来源主要为马家沟组碳酸盐岩。如图2a所示,L58井铝土岩的Zr/Nb元素含量比(约为8.8)与紧邻其上、下的泥质岩处于两条明显不同的风化线上,表明铝土岩与泥质岩物源并不相同^[22]。与下古生界碳酸盐岩相比(图2b,c),L58井铝土岩系中的泥质岩与下伏三山子组白云岩处于同一风化线,L58井铝土岩与豫西铝土岩系、盆地内马家沟组碳酸盐岩处于同一风化线,揭示其铝土岩系的物源主要来自马家沟组,也有少量来自寒武系。分析原因认为,陇东地区在晚加里东期经历了强烈的抬升剥蚀,下古生界剥蚀量大且跨越多个层系,因此沉积了不同物源的铝土岩系^[23]。

与北秦岭构造带的早古生代花岗岩体(450.5 Ma±1.8 Ma)和火山岩体(480~465 Ma)对比后发现(图2d-f),北秦岭构造带岩浆岩的Zr/Nb比值与L58井铝土岩系的并不相同,再次证实陇东地区不存在外部物质输入,铝土岩系的主要物源为原地物源,即下伏的下古生界碳酸盐岩^[24]。

2 铝土岩沉积环境与形成模式

2.1 铝土岩形成环境

现今铝土矿主要分布于赤道附近的热带辐合带

中。石炭纪—二叠纪是中国铝土矿的重要成矿期,在华北和华南板块上形成了多个铝土矿,如华北板块的本溪组铝土矿。地质历史中该时期华北和华南板块均处于古热带辐合带,说明高温多雨的气候对铝土矿的形成十分有利。

此外,研究也发现铝土矿的形成与全球海平面升降密切相关^[25]。石炭纪—二叠纪,冈瓦纳大陆漂移至南极附近,冰期—间冰期交替导致全球海平面升降。该时期,华南板块记录了6次大规模的海退事件。海退事件与铝土矿成矿期具有明显的对应关系,即铝土矿可能形成于海退背景。太原组沉积期,华南板块发生海进—海退—海进旋回,这次海退为有记录的第6次大规模海退,海退持续时间约5 Myr。这次海退势必对华北板块包括陇东地区太原组的沉积过程产生重要影响。

三环萜烷系列化合物普遍存在于烃源岩中,主要碳数分布在 C_{19} — C_{29} ,其相对含量可指示沉积环境和成熟度等特征^[26-27]。 C_{23} 三环萜烷在海相和咸水湖相烃源岩中具有优势,而淡水湖相烃源岩则表现为 C_{21} 优势。沉积有机质的 $\text{C}_{23}/\text{C}_{21}$ 三环萜烷(TT)是指示沉积水体盐度的一个有效指标,常随水体盐度增加而增大^[28]。陇东地区太原组含铝岩系中三环萜烷的 $\text{C}_{23}/\text{C}_{21}$ TT纵向变化规律,刻画了一个海侵—海退旋回,而铝土岩则形成于海退趋势中^[29](图3)。

2.2 铝土岩系垂向岩性组合特征

通过分析不同古地貌单元的单井岩性特征,发现陇东地区垂向发育3类不同的岩性组合。高地及斜坡带岩溶潜坑中发育漏斗状铝土岩+炭质泥岩的组合,在岩心中可观察到孔洞和鲕状颗粒,铝土岩系厚度较大^[30-31];斜坡带岩溶阶地发育铁元素丰富的透镜状铝土岩+薄层煤+碎屑岩组合,铁元素的富集是由于海平面升降过程中Fe元素滤失程度低导致的,其平面分布具有一定连续性;洼地区铝土岩长期处于海平面之下,淋滤时间短,形成了似层状铝土质泥岩+灰岩+煤的组合,并且铝土岩系厚度较薄(图4)。

究其原因,认为古地貌单元、海平面变化、容积空间和淋滤程度决定了垂向岩性组合的差异。在岩溶高地,以垂向渗流为主的岩溶潜坑发育,强烈的岩溶作用造成下伏碳酸盐岩形成较大的沉积空间,因此铝土岩系沉积厚度较大。海平面下降时,斜坡带地势较高的区域沉积的物质暴露时间长、接受淋滤程度高,在漏斗底部有良好的泄水条件,有利于元素迁移后在漏斗区形成铁、铝物质富集的豆鲕状铝土岩;地势较缓的斜坡带岩溶阶地地区,铝土岩系经过二次搬运,垂向上具有两

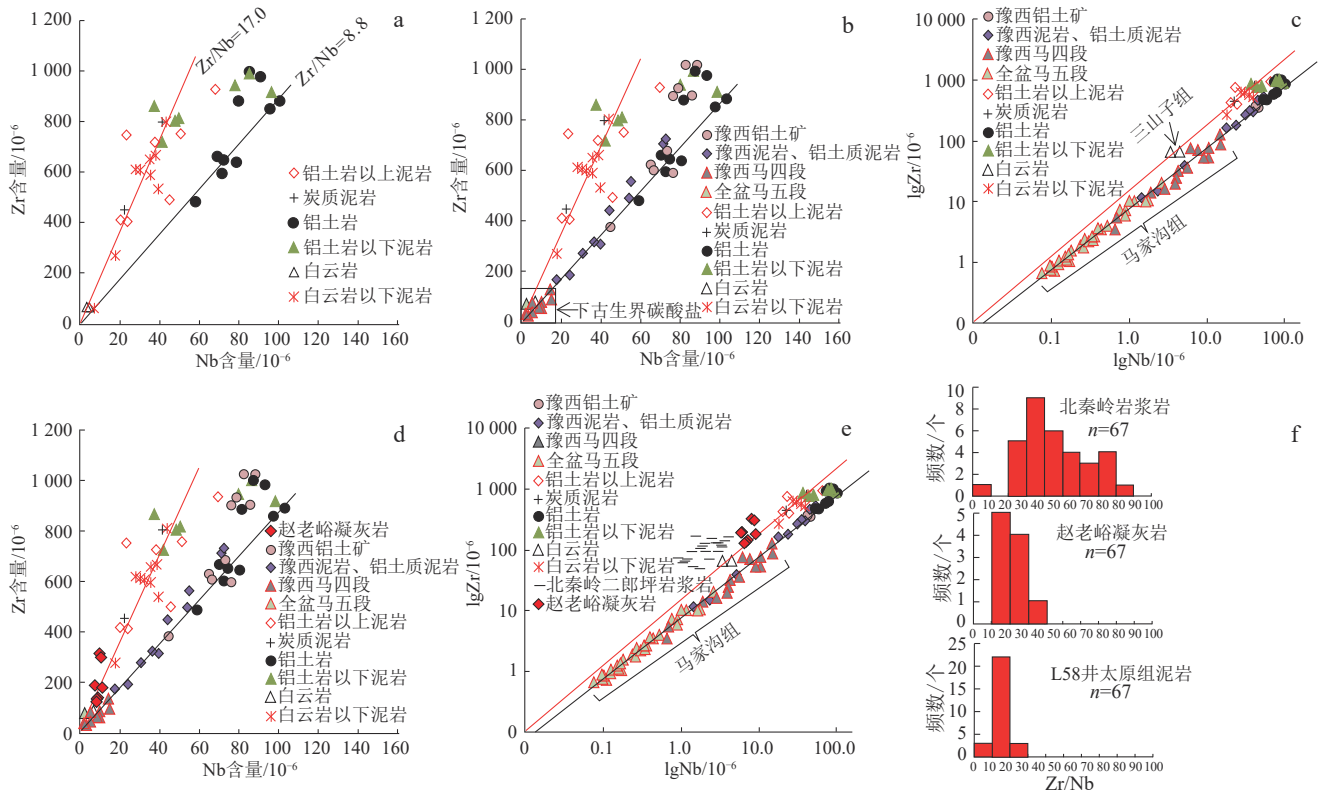


图2 鄂尔多斯盆地、豫西地区含铝岩系和渭北隆起赵老峪凝灰岩、北秦岭岩浆岩Zr和Nb元素丰度交汇图

Fig. 2 Cross plots between the Zr and Nb abundance in the Al-bearing rock series in the Ordos Basin and western Henan, the Zhaolaoyu

Formation tuffs in the Weibei Uplift, and magmatic rocks in the North Qinling tectonic zone

a. 鄂尔多斯盆地太原组铝土岩系与上、下紧邻的泥质岩Zr和Nb元素含量交汇图;b. 增加下古生界碳酸盐样品后Zr和Nb元素含量交汇图;c. 将纵、横坐标取对数放大后Zr和Nb元素含量交汇图;d. 增加赵老峪凝灰岩样品后Zr和Nb元素含量交汇图;e. 增加北秦岭岩浆岩样品后Zr和Nb元素含量交汇图;f. 北秦岭岩浆岩、赵老峪凝灰岩和L58井太原组泥岩锆石年龄频数统计

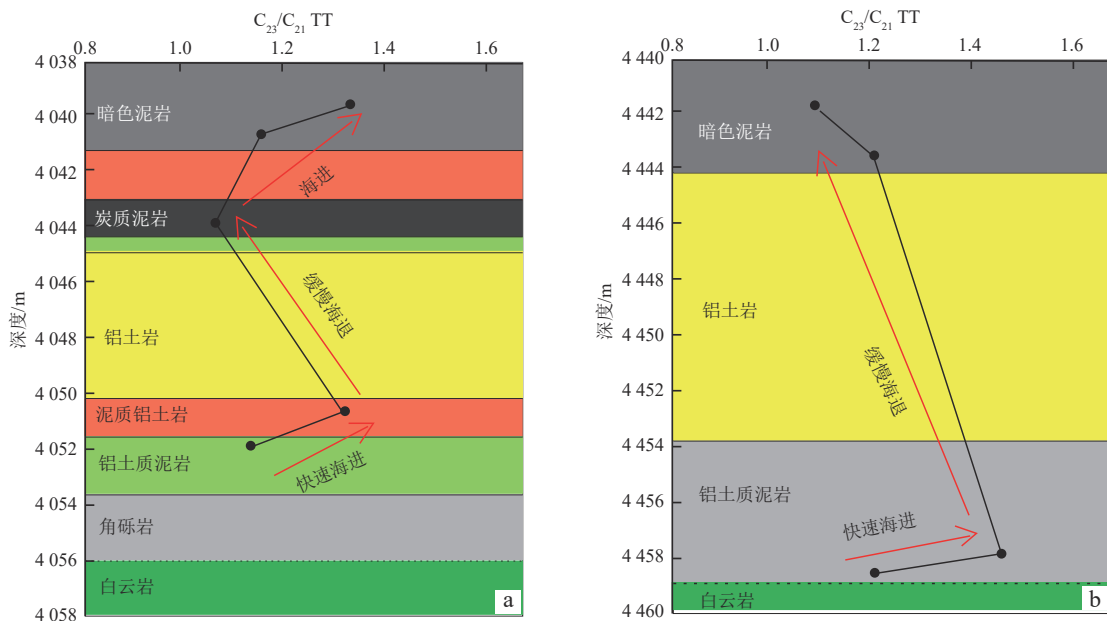


图3 陇东地区太原组含铝岩系三环萜烷分布纵向特征及其揭示海平面升降

Fig. 3 Vertical distribution of tricyclic terpanes in the Al-bearing rock series of the Taiyuan Formation in the Longdong area and its implications for eustatic changes

a. L58井; b. HT7井

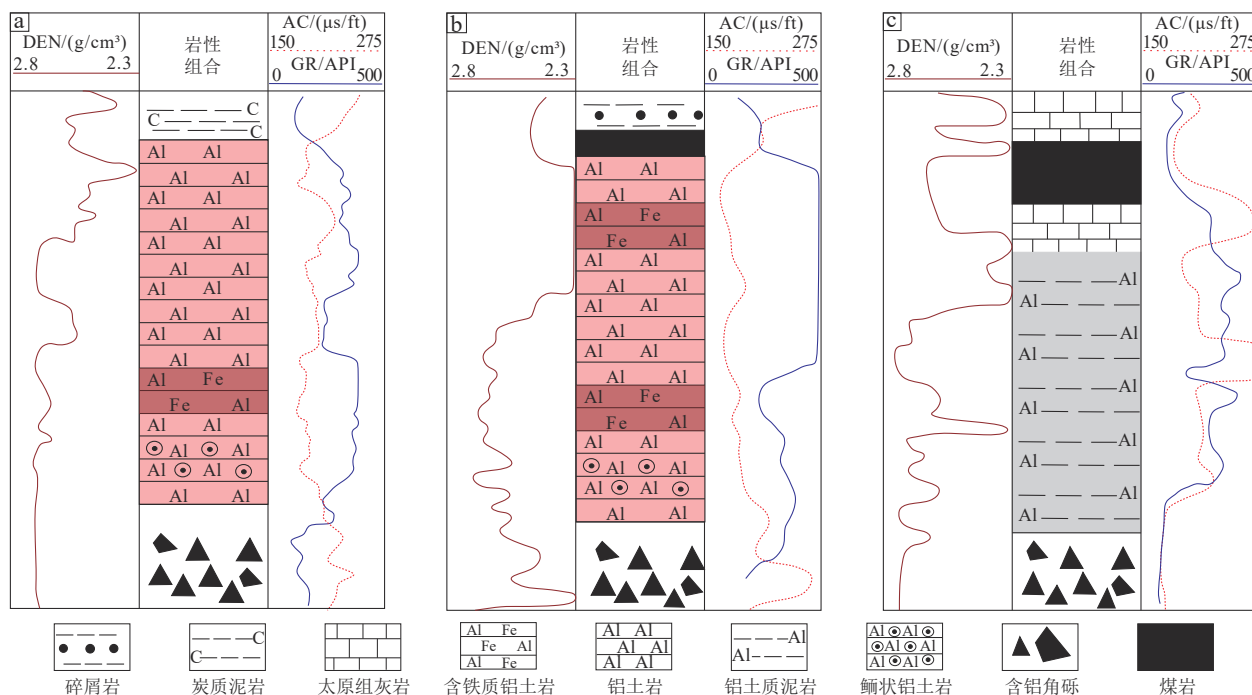


图4 陇东地区不同古地貌单元铝土岩系垂向组合序列

Fig. 4 Vertical lithologic assemblages of bauxite series in various paleogeomorphic units in the Longdong area

a. 以L47井为代表的斜坡带阶地中透镜状铝土岩系岩性垂向组合特征:铝土岩系+炭质泥岩组合,代表井无阻流量 $67.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;b. 以L85井位代表的高地潜坑和斜坡漏斗中铝土岩系岩性垂向组合特征:铝土岩系+煤+碎屑岩组合,代表井井口气产量 $2.34 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;c. 以QT16井为代表的洼地中似层状铝土岩系岩性垂向组合特征:铝土岩系+灰岩+煤

段式特征,顶部发育煤层。同时,由于海平面频繁变化,形成氧化-还原交互出现的环境,有利于铝土岩系的元素迁移与交换,使得铝质富集;而长期在海平面之下的洼地区,原本沉积空间较小且暴露时间短、淋滤作用弱、富铁铝化作用弱,故形成黏土含量高的铝土质泥岩且上部会形成灰岩、煤等岩性组合。

2.3 铝土岩系剖面及平面分布规律

太原组沉积时的构造作用、气候条件等在研究区各地没有明显差异,因此,铝土岩系厚度及发育程度差异可能是由微古地貌和淋滤程度不同造成的^[32]。

在陇东地区,铝土岩系是沉积型的,主要分布于岩溶负地形中。通过研究认为,研究区铝土岩系发育程度主要受古地貌和沉积相带的控制,且厚度横向变化很大^[33]。研究区发育岩溶高地、岩溶斜坡带和岩溶洼地3种古地貌单元。通过不同古地貌单元的连井剖面可以看出(图5):岩溶高地(除岩溶潜坑外)不发育 Al_2O_3 含量较高的铝土岩系,偶见铝土质泥岩和泥质铝土岩发育;岩溶斜坡带铝土岩普遍较发育且厚度大;岩溶洼地不发育铝土岩。这说明在岩溶高地,虽可接受强烈的淋滤作用,但前期未形成具有足够容积空间的地形,且溶蚀作用弱,大部分富铝胶体经受风化剥蚀未

保存下来。而在斜坡带,会形成岩溶漏斗、天坑和溶坑等有利于铝土岩沉积的地形,风化淋滤作用使得沉积在有利地形中的含铝胶体更易形成铝土岩系。

通过测井分析及岩心观察认为,研究区铝土岩系纵向通常具有3层结构:下段为铝土质角砾岩和泥岩,中段为碎屑状、豆鲕状和土状铝土岩,上段为炭质泥岩和纹层状铝土质泥岩(图6)。中段的铝土岩层溶孔最为发育,其中土状铝土岩储层条件最好,认为是准同生期和暴露期强烈淋滤作用形成的。底部铝土质角砾排除碎屑远距离搬运的可能,是风化剥蚀后原地堆积并被改造而成^[34]。

借助地震资料对太原组沉积前的古地貌进一步划分,细分出高地潜坑、斜坡带漏斗和洼地等微古地貌单元。据此,将单井纵向结构模式图叠加在古地貌图中,认为古地貌单元对铝土岩的分布具有控制作用^[35]。以L58井发育完整三段式(下段角砾岩+铝土质泥岩,中段铝土岩,上段炭质泥岩+泥质铝土岩)结构为参考,对比区内单井结构,初步认为:①下段式:3个古地貌单元都有分布,分布较为广泛。②中+下两段式:主要分布在高地区,局部在斜坡区发育。高地会形成有利于含铝物质沉积的溶洞、潜坑等空间,但后期由于淋滤条件弱等因素,很难形成物性较好的中段铝土岩。③三段式:目前仅在L58井可见(图7),该井处于斜坡带与高地的

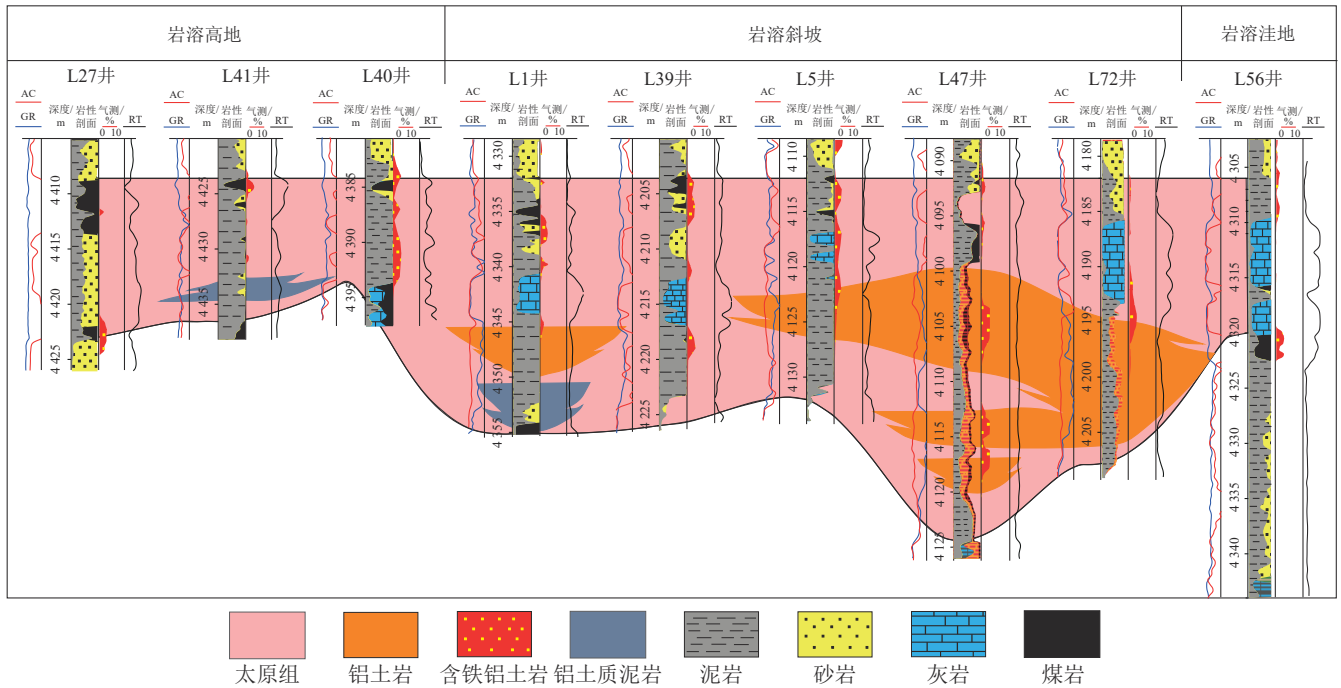


图5 陇东地区太原组铝土岩系连井剖面

Fig. 5 Cross well correlation of the bauxite series in the Taiyuan Formation, Longdong area



图6 鄂尔多斯盆地陇东地区L58井太原组铝土岩系结构特征岩心照片

Fig. 6 Textural characteristics of the bauxite series in well L58 in the Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin

a. 埋深4 047.74 m, 铝土岩, 豆鲕状结构, 纹层构造; b. 埋深4 049.50 m, 多孔土状灰色铝土岩, 孔洞发育呈蜂窝状; c. 埋深4 065.36 m, 致密块状泥质铝土岩, 变形构造

过渡区, 容积空间大、原始含铝物质充分、淋滤条件好等一系列条件形成了完整序列。铝土岩系中段的物性、含气性均好于上、下两段, 是最理想的优质储层段^[36]。

2.4 铝土岩系形成过程及模式

上述研究成果表明, 含铝岩系的分布和厚度受沉积古地貌控制, 同时古地貌也反映了暴露淋滤的范围, 后期淋滤作用控制了铝土岩系储层品质^[37], 在此基础上建立了陇东地区铝土岩系形成模式(图8)。

晚石炭世表生期经历 140 Myr 风化作用, 下古生界顶部形成钙红土残积物, 成分以黏土矿物为主, 它们是形成铝土岩的早期母岩物质, 同时古隆起区剥蚀形成潜坑、阶地和洼地等古地貌。

早二叠世冰期-间冰期引起了盆地内大规模的海进-海退, 在钙红土富集区淋滤作用使得大量元素迁移形成含铝物质。在高水位期, 钙红土等物质继续向海湾方向搬运; 在低水位期, 出现准同生期的淋滤作用, 钙红土物质形成含铝物质。

早二叠世末期, 在海侵、地表水及悬浮作用下碎屑及胶体在负地形区聚集, 已经形成的含铝胶体再一次经历风化淋滤作用, 形成铝土岩系。最终潜坑部位的铝土岩系沉积厚度大、淋滤时间久, 富Al胶体颗粒中的Si和Fe滤失程度高, 形成规模较大、物性较好的铝土岩系; 阶地铝土岩胶体颗粒Fe滤失程度低, 形成铁质铝土岩; 局限海湾洼地长期处于海平面之下, 主要形成铝土质黏土岩^[38-39]。

因此, 尽管陇东地区太原组含铝岩系均有富集, 但

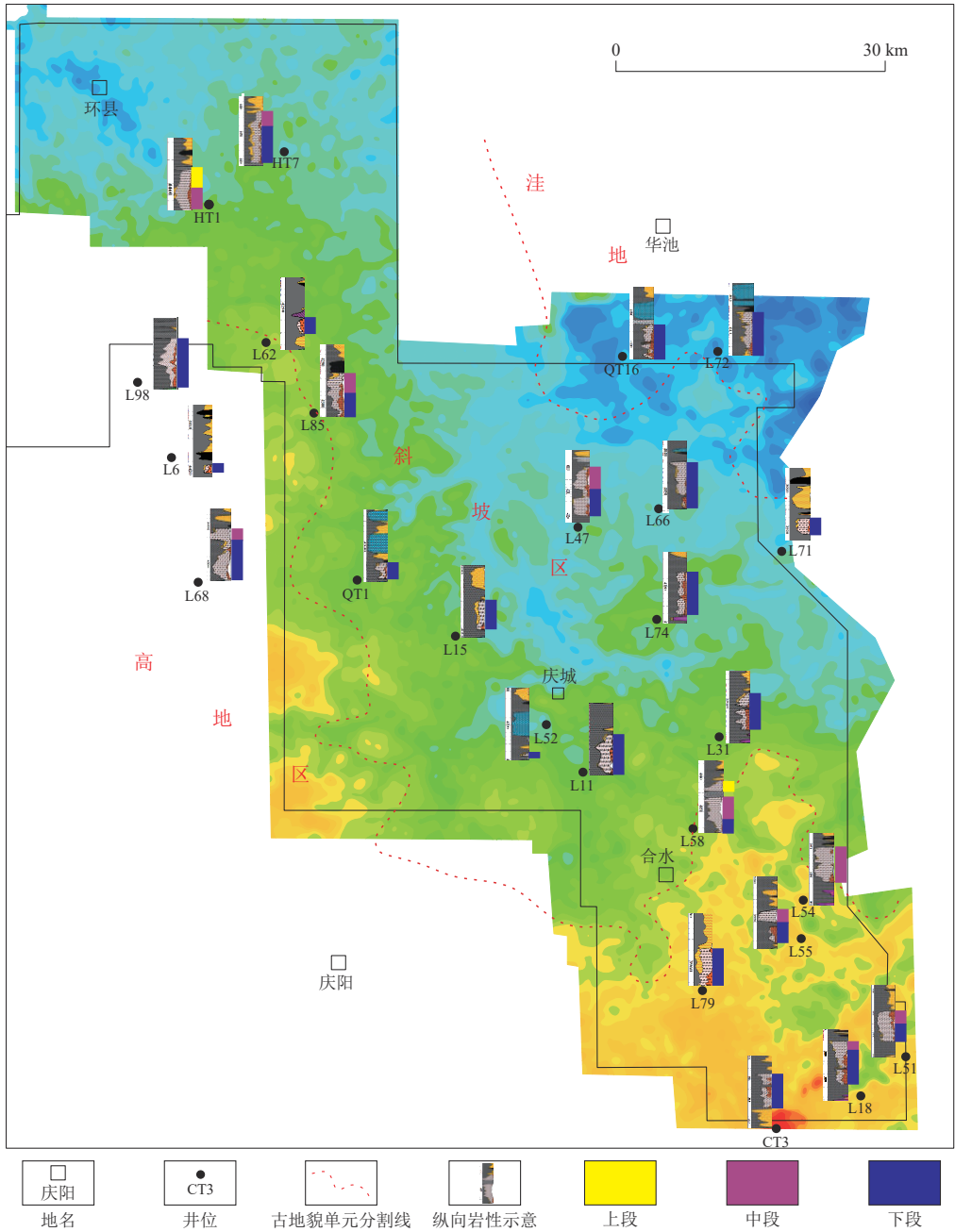


图7 陇东地区太原组不同古地貌单元铝土岩系纵向岩性组合分布
Fig. 7 Distribution of vertical lithologic assemblages of bauxite series in various paleogeomorphic units of the Taiyuan Formation, Longdong area

是 Al_2O_3 含量高, 铝/硅比大的优质铝土岩系主要发育在斜坡带。尤其是岩溶漏斗发育的位置, 铝土岩系物性好且厚度大。

3 铝土岩系储层分布规律

3.1 铝土岩系储层特征

陇东地区铝土岩系储层物性数据统计表明, 储层

孔隙发育, 孔隙度介于 $8.0\% \sim 26.3\%$, 其中大于 16.0% 的占比 63.2% , 渗透率在 $(0.1 \sim 20.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占比 58.6% , 孔、渗性能较好。根据 L47 井、L58 井和 C3-17-22 井太原组铝土岩系铸体薄片及扫描电镜照片显示, 孔隙类型多为粒内溶孔、基质溶孔和残余格架孔, 溶蚀孔内次生矿物主体为一水硬铝石微晶, 常见绿泥石和高岭石, 孔缝中常见水铝石、天青石和锐钛矿等矿物(图9)。

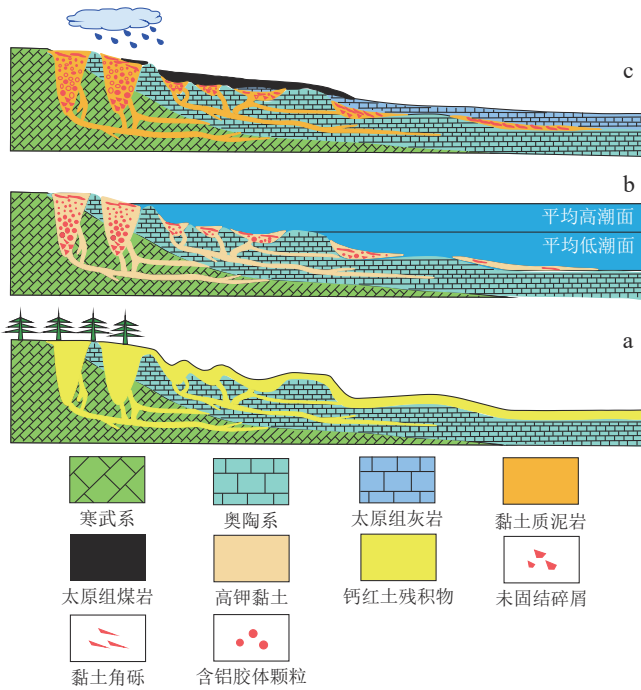


图8 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩系沉积演化模式

Fig. 8 Sedimentary evolutionary model of the bauxite series in the Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin

a. 晚石炭世表生期; b. 早二叠世冰期-间冰期; c. 早二叠世末期

3.2 铝土岩系优势储层发育主控因素

目前,铝土岩系储层物性与岩性密切相关,物性发育段主要是较纯的铝土岩段^[40]。因此,物源对铝土岩

优势储层的形成具有明显的控制作用:当物源区缺少原生铝土岩时,风化剥蚀后的铝土岩屑不足以支撑沉积区发育较纯的铝土岩;当物源供应较充足时,强水动力条件对铝土岩优势储层的形成也具有明显的控制作用;最后,由于铝土岩储层的储集空间主要是各种溶孔,因此强溶蚀作用也是铝土岩优势储层形成的主控因素之一,在弱溶蚀的情况下,铝土岩中的硬水铝石易发生高岭石化,对储层物性的改善作用不明显^[41-42]。

3.3 铝土岩系优势储层分布规律

3.3.1 古地貌

前期研究已明确,不整合面上的古地貌对铝土岩系的分布具有明显的控制作用。岩溶高地中的岩溶漏斗、潜坑以及岩溶斜坡带是铝土岩系有利分布区。借助地震和测、录井等资料,开展鄂尔多斯盆地庆城—合水三维地震连片解释,精细刻画太原期古地貌与微古地貌(图10),自西南向东北古地貌分为高地—斜坡—洼地。可以看出,岩溶洼地形态与铝土岩系的厚度和储层质量相关,岩溶洼地越深,铝土岩系的厚度越大,铝土岩系优势储层越发育。分析认为,岩溶漏斗处具有良好的泄水条件,不仅增强了风化淋滤作用的强度,也影响沉积时的可容纳空间,进而影响沉积厚度,所以,铝土岩系厚度的变化和岩性序列的差异与古岩溶引起的微环境密切相关。

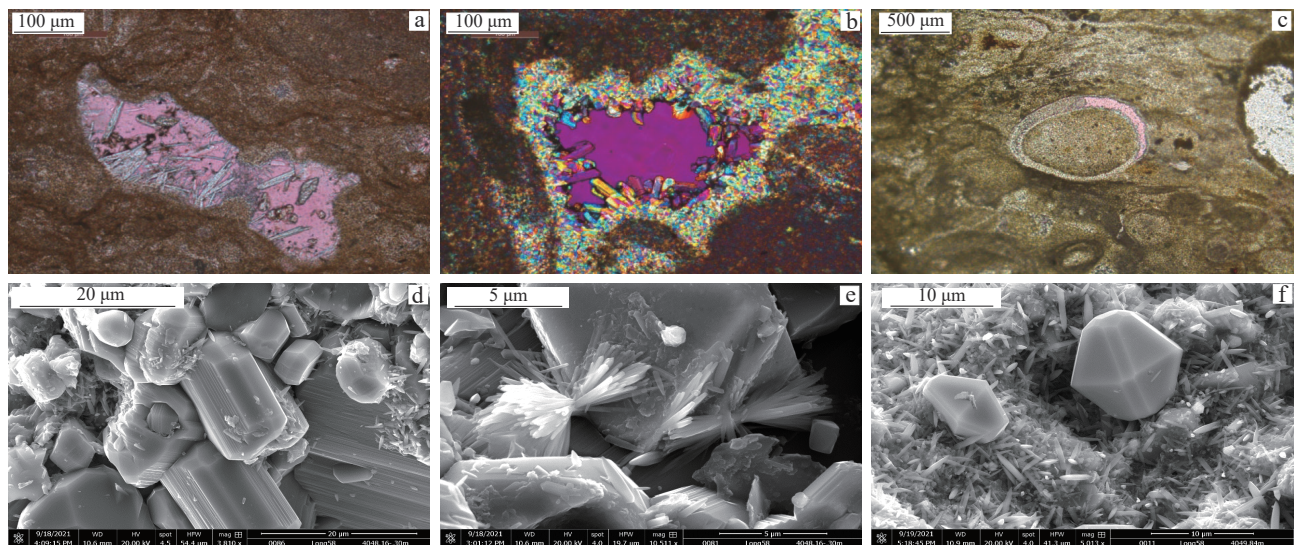


图9 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩系储层特征显微照片

Fig. 9 Reservoir characteristics of the bauxite series in the Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin observed under a microscope
a. L47井,埋深4 107.00 m,粒内溶孔,绿泥石呈针状,正交光;b. L47井,埋深4 119.00 m,颗粒间残余格架孔,正交光;c. C3-25-11井,埋深3 808.11 m,鲕粒结构性溶孔,正交光;d. L58井,埋深4 048.16 m,短柱状水铝石,SEM;e. L58井,埋深4 048.30 m,少量纤维状水青石,SEM;f. L58井,埋深4 049.84 m,自形双锥锐钛矿,SEM

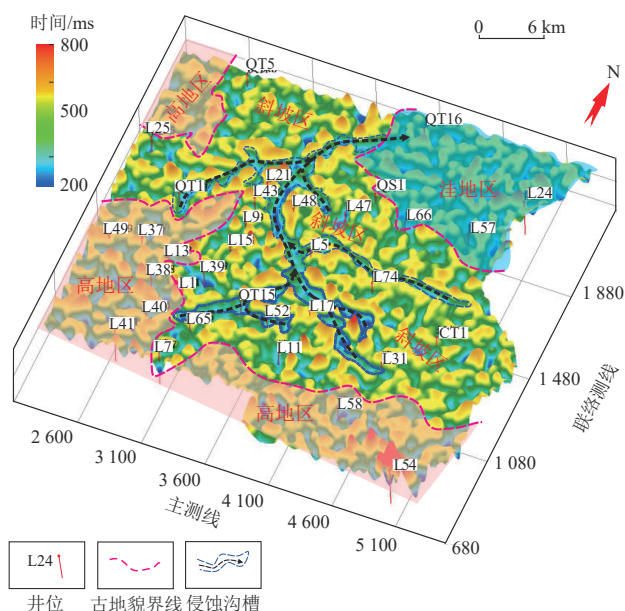


图10 鄂尔多斯盆地庆城—合水三维地震工区太原期微古地貌
Fig. 10 Micro-paleogeomorphological map of the 3D seismic acreage in Qingcheng-Heshui, Ordos Basin during the deposition of the Taiyuan Formation

在陇东地区,铝土岩系主要分布于岩溶负地形中。由此可见,太原组沉积前的古地貌对铝土岩系的分布具有明显的控制作用。然而,由于古地貌平面变化大、

地震资料分辨率精度有限等因素,该古地貌与铝土岩、铝土岩+泥质铝土岩的厚度的相关性较差,因而对铝土岩系优势储层的分布预测不够精准。这说明,除了需精细刻画古地貌外,还需多维度考虑铝土岩系优势储层发育的控制因素。

3.3.2 泄水通道

岩溶作用与水循环密不可分,可溶性的矿物溶解、岩溶古地貌形态的形成均需要水的参与,而具备良好的泄水条件,也是铝土岩系优势储层形成的一个关键因素。

通过野外露头观察,在沉积厚度大且孔洞发育的铝土岩系的岩溶漏斗下方存在泄水通道(图11)。岩溶漏斗和岩溶洼陷处覆盖层强烈的风化淋滤作用和碳酸盐岩强烈的岩溶作用,造成体积亏损较大,必然会产生较大的沉降^[43-45],在海平面上升时,具有较大的可容纳空间,沉积了较厚的沉积物。在岩溶漏斗中,泄水条件良好,可以有效地促进铝土岩系原岩中可溶矿物的溶解,并促使硬水铝石富集。

4 结论

1) 构造背景及全岩 Zr 和 Nb 元素岩-源对比分析

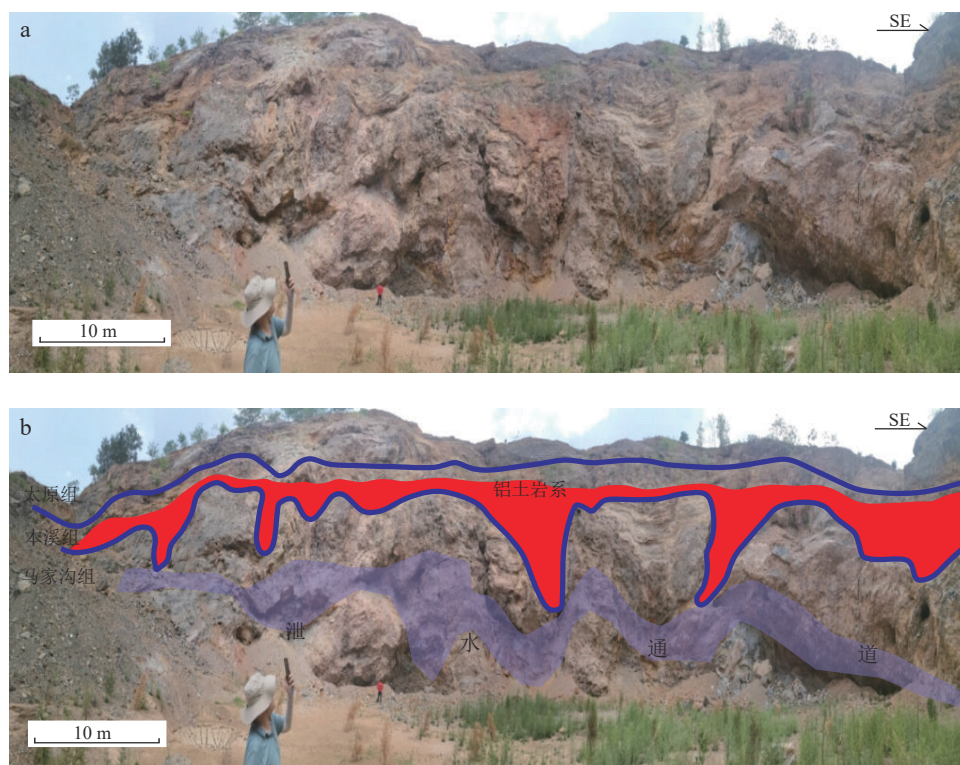


图11 河南焦作巩义铝土岩系剖面

Fig. 11 Profile of the bauxite series in Gongyi, Jiaozuo, Henan Province

a. 野外照片 b. 泄水通道及漏斗型铝土岩系解释图

结果证实,鄂尔多斯盆地西南部陇东地区原地风化的下古生界碳酸盐岩为铝土岩系主要物质来源。其中铝土岩主要源自马家沟组,泥质岩主要源自寒武系。

2) 高温多雨的热带辐合带气候对铝土岩的形成十分有利。陇东地区铝土岩系形成过程经历一个海侵—海退旋回,其中铝土岩系主要形成于海退背景的海—陆过渡相。

3) 太原期纵向上形成了3种岩性组合序列,分别为铝土岩系+炭质泥岩、铝土岩系+煤+碎屑岩及铝土岩系+灰岩,反映了不同的风化壳形成的古地貌部位,其中斜坡带具有较大的容积空间以及良好的淋滤作用条件,形成了厚度大、物性好的铝土岩系。

4) 陇东地区土状、豆鲕状铝土岩系为含铝胶体在准同生和暴露期淋滤形成。在洼地,由于没有经过淋滤作用,形成铝土质黏土岩。优质铝土岩系主要发育在斜坡带,尤其是岩溶漏斗发育的位置。

5) 物源对铝土岩优势储层的形成具有明显的控制作用。岩溶负地形控制铝土岩系沉积厚度,但优势储层的发育还受裂缝及断裂发育程度、泄水通道、古地貌形态等综合因素的影响。高地潜坑和斜坡漏斗是最有利于优势储层沉积发育的微古地貌单元。

参 考 文 献

- [1] 张文雅,张春阳,刘治恒,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩储层录井评价[J]. 录井工程, 2022, 33(3): 41–48.
ZHANG Wenya, ZHANG Chunyang, LIU Zhiheng, et al. Mud logging evaluation of bauxite reservoir in Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin [J]. Mud Logging Engineering, 2022, 33(3): 41–48.
- [2] 姚泾利,石小虎,杨伟伟,等. 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/OL]. 沉积学报: 1–20 [2023–02–13]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.034>. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.034.
YAO Jingli, SHI Xiaohu, YANG Weiwei, et al. Reservoir characteristics and exploration significance of the bauxite rock series of Permian Taiyuan Formation in the Longdong area of the Ordos Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1–20 [2023–02–13]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.034>. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.034.
- [3] 刘蝶,张海涛,杨小明,等. 鄂尔多斯盆地铝土岩储集层测井评价[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(3): 261–270.
LIU Die, ZHANG Haitao, YANG Xiaoming, et al. Well logging evaluation of bauxite reservoirs in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(3): 261–270.
- [4] 刘可可,付鑫,荣伟,等. 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), 2022, 37(2): 25–31.
LIU Keke, FU Xin, RONG Wei, et al. Analysis of bauxite reservoir in X area of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(2): 25–31.
- [5] 贺淑琴,郭建卫,胡云沪. 河南省三门峡地区铝土矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿产与地质, 2007, 21(2): 181–185.
HE Shuqin, GUO Jianwei, HU Yunhu. Geological characteristics of the bauxite deposit in Sanmenxia of Henan and ore prospecting direction [J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(2): 181–185.
- [6] 付金华,李明瑞,张雷,等. 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, 2021, 41(11): 1–11.
FU Jinhua, LI Mingrui, ZHANG Lei, et al. Breakthrough in the exploration of bauxite gas reservoir in Longdong area of the Ordos Basin and its petroleum geological implications [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 1–11.
- [7] 孟卫工,李晓光,吴炳伟,等. 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, 2021, 26(3): 79–87.
MENG Weigong, LI Xiaoguang, WU Bingwei, et al. 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, 2021, 26(3): 79–87.
- [8] 王涛,聂万才,刘军,等. 鄂尔多斯盆地宜川地区太原组致密砂体控砂机理[J]. 断块油气田, 2021, 28(1): 40–45.
WANG Tao, NIE Wancai, LIU Jun, et al. The sand control mechanism of Taiyuan Formation tight sand bodies in Yichuan area, Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(1): 40–45.
- [9] BÁRDOSY G. Karst bauxites: bauxite deposits on carbonate rocks [J]. Amsterdam: Elsevier, 1982: 2–441.
- [10] 郭书元,张广权,陈舒薇,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田晚石炭—早二叠世地层划分[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 697–705.
GUO Shuyuan, ZHANG Guangquan, CHEN Shuwei, et al. Stratigraphic division of the Upper Carboniferous-Lower Permian in Daniudi gasfield, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(6): 697–705.
- [11] 任海蛟,吴伟涛,赵靖舟,等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马四段天然气成藏主控因素[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 27–33.
REN Haijiao, WU Weitao, ZHAO Jingzhou, et al. Key controlling factors of natural gas accumulation in the Ordovician Ma member 4 in the central Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 27–33.
- [12] 史刘奇,张瑞,王印章,等. 鄂尔多斯盆地西南部S1–S15井区山₁₃亚段沉积特征[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(5): 17–21.
SHI Liuqi, ZHANG Rui, WANG Yinzhong, et al. Sedimentary characteristics of Shan₁₃ sub-member in S1–S15 well block in the southwest Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(5): 17–21.
- [13] 赵俊峰,刘池洋,张东东,等. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组长7段剖面及其油气地质意义[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 233–245.

- ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, ZHANG Dongdong, et al. Description and its hydrocarbon geological implications of outcrop sections of Triassic Chang-7 Member in southern Ordos Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 233-245.
- [14] 曹高社, 邢舟, 毕景豪, 等. 豫西偃龙地区本溪组铝土矿成矿物质来源分析[J]. 地质学报, 2018, 92(7): 1507-1523.
- CAO Gaoshe, XING Zhou, BI Jinghao, et al. Material sources analysis of the Benxi Formation bauxite in the Yanshi-Longmen area, western Henan[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(7): 1507-1523.
- [15] 周雁, 付斯一, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界构造-沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 264-275.
- ZHOU Yan, FU Siyi, ZHANG Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 264-275.
- [16] 程付启, 金强, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳混源气成藏分析[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 38-42.
- CHENG Fuqi, JIN Qiang, LIU Wenhui, et al. Formation of source-mixed gas reservoir in Ordovician weathering crust in the central gas-field of Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2007, 28(1): 38-42.
- [17] 武春英, 贾亚妮, 韩会平, 等. 鄂尔多斯盆地西缘探区奥陶系烃源岩评价[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(2): 180-185.
- WU Chunying, JIA Yani, HAN Huiping, et al. Evaluation of Ordovician source rocks in western margin of Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(2): 180-185.
- [18] LI Peigang, YU Wenchao, DU Yuansheng, et al. Influence of geomorphology and leaching on the formation of Permian bauxite in northern Guizhou Province, South China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 210: 106446.
- [19] LI Xiaofeng, Gang Wenzhe, YAO Jingli, et al. Major and trace elements as indicators for organic matter enrichment of marine carbonate rocks: A case study of Ordovician subsalt marine formations in the central-eastern Ordos Basin, North China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 111: 461-475.
- [20] 曾方明, 薛红盼. 青藏高原东北部晚第四纪黄土-古土壤的元素组成及其物源指示[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 105-117.
- ZENG Fangming, XUE Hongpan. Elemental compositions of the late Quaternary loess-paleosol on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau and their implications for provenance[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 105-117.
- [21] HAO Qingzhen, GUO Zhengtang, QIAO Yansong, et al. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(23/24): 3317-3326.
- [22] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92(2): 181-193.
- [23] 刘凌之. 豫西偃龙地区本溪组含铝岩系的物源研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
- LIU Lingzhi. Study on the provenance of aluminiferous rocks in Benxi Formation at Yanlong area, western Henan[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [24] 王天顺. 黔中成铝区铝土矿成矿物质来源研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- WANG Tianshun. Study on the source of ore-forming materials of Bauxite in Central Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.
- [25] 崔滔. 黔北铝土矿成矿关键控制因素——海平面变化[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1466-1479.
- CUI Tao. Key control factor in ore-forming process of bauxite in northern Guizhou--sea level changes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1466-1479.
- [26] 肖洪, 李美俊, 尤兵. 一种有机质沉积环境判识的方法: CN202211186443. 5[P]. 2022-11-19.
- XIAO Hong, LI Meijun, YOU Bing. A method for identifying organic sedimentary environment: CN202211186443. 5[P]. 2022-11-19.
- [27] 肖洪, 李美俊, 杨哲, 等. 不同环境烃源岩和原油中 $C_{19} \sim C_{23}$ 三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. 地球化学, 2019, 48(2): 161-170.
- XIAO Hong, LI Meijun, YANG Zhe, et al. Distribution patterns and geochemical implications of $C_{19} \sim C_{23}$ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments[J]. Geochimica, 2019, 48(2): 161-170.
- [28] 王爱国, 李春雨, 杨泽光, 等. 一种有机质沉积环境判识图版的制作及其应用方法: CN202110333419. 9[P]. 2022-04-26.
- WANG Aiguo, LI Chunyu, YANG Zeguogang, et al. Preparation and application method of an organic sedimentary environment identification plate: CN202110333419. 9[P]. 2022-04-26.
- [29] 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(7): 1395-1404.
- ZHENG Yiding, LEI Yuhong, ZHANG Liqiang, et al. Characteristics of element geochemistry and paleo sedimentary environment evolution of Zhangjiantan shale in the southeast of Ordos Basin and its geological significance for oil and gas s [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(7): 1395-1404.
- [30] 南珺祥, 柳娜, 王邢颖, 等. 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, 2022, 33(2): 288-296.
- NAN Junxiang, LIU Na, WANG Xingying, et al. Characteristics and formation mechanism of bauxite reservoir in Taiyuan Formation, Longdong area, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 288-296.
- [31] 朱洪立, 宋世豪, 邢舟, 等. 豫西偃龙地区本溪组含铝岩系的结构特征[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(10): 107-110.
- ZHU Hongli, SONG Shihao, XING Zhou, et al. Texture characteristics of Al-bearing rock series of Benxi Formation, Yanlong District, Western Henan Province[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(10): 107-110.
- [32] 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]. 古地学报, 2020, 22(5): 812-826.
- DU Yuansheng, YU Wenchao. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(5): 812-826.
- [33] 陈有能, 汪生杰, 杨文会. 贵州北部含铝岩系地质时代及沉积相特征[J]. 贵州地质, 1987(3): 323-338.
- CHEN Youneng, WANG Shengjie, YANG Wenhui. Geological age and sedimentary facies characteristics of aluminium-bearing rock series in northern Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1987(3): 323-338.
- [34] 曹高社, 杜欣. 华北陆块本溪组含铝岩系形成机理[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- CAO Gaoshe, DU Xin. Formation mechanism of the aluminiferous rock series in Benxi formation, North China Block[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [35] 廉吕型. 广西平果地区晚二叠世铝土矿沉积古地理条件与成矿作用研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- LIAN Lyuxing. Sedimentary paleogeographic features and metallogenesis of bauxite during Late Permian in Pingguo, Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2022.
- [36] 高兰, 王登红, 熊晓云, 等. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2284-2295.
- GAO Lan, WANG Denghong, XIONG Xiaoyun, et al. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2284-2295.
- [37] 田合利, 聂坤, 李信念. 贵州务正道地区铝土矿成矿规律浅析[J]. 云南地质, 2022, 41(4): 483-490.
- TIAN Heli, NIE Kun, LI Xinnian. A preliminary analysis on metallogenesis rule of bauxite deposit in Wuzhengdao area, Guizhou[J]. Yunnan Geology, 2022, 41(4): 483-490.
- [38] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式[J]. 古地学报, 2014, 16(1): 1-8.
- DU Yuansheng, ZHOU Qi, JIN Zhongguo, et al. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 1-8.
- [39] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究进展[J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 1-6.
- DU Yuansheng, ZHOU Qi, JIN Zhongguo, et al. Advances in basic geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 1-6.
- [40] 刘平, 韩忠华, 聂坤. 黔中—渝南岩溶型铝土矿含矿岩系特征、控制条件及生成发展模式[J]. 地质论评, 2022, 68(6): 2147-2174.
- LIU Ping, HAN Zhonghua, NIE Kun. Characteristics of ore-bearing rock series, control conditions and generative development model of karst bauxite deposit in central Guizhou—southern Chongqing[J]. Geological Review, 2022, 68(6): 2147-2174.
- [41] 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 Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, 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.
- [42] 金晓辉, 张军涛, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组浅钻中古岩溶洞穴的发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 595-603.
- JIN Xiaohui, ZHANG Juntao, SUN Dongsheng, et al. Discovery and significance of the Ordovician paleo-karst caves in shallow drilling in the southern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 595-603.
- [43] 王耀华, 甘军, 梁刚, 等. 断裂-砂体-潜山复式天然气输导体系及成藏模式——以琼东南盆地深水区为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 319-324.
- WANG Yaohua, GAN Jun, LIANG Gang, et al. Composite fault-sand body-buried hill migration systems and accumulation models of natural gas: A case study of the deep-water area in Qiongdongnan Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(3): 319-324.
- [44] 陈强, 李文厚, 孙娇鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘岐山曹家沟奥陶系剖面地层和沉积特征[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 246-254, 264.
- CHEN Qiang, LI Wenhui, SUN Jiaopeng, et al. Ordovician stratigraphy and sedimentary characteristics of Caojiagou section in Qishan County, southern margin of Ordos Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 246-254, 264.
- [45] 李浩. 鄂尔多斯盆地古生界气藏成藏模式及优势储层预测[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2): 57-63.
- LI Hao. Accumulation pattern and favorable reservoir prediction of Paleozoic gas reservoirs in Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(2): 57-63.

(编辑 张玉银)