

# 陇东太原组铝土岩分布特征及成藏主控因素

肖文同<sup>1</sup>, 和丽安<sup>1</sup>, 王雷<sup>2</sup>, 王文泽<sup>3</sup>, 马喆<sup>3</sup>, 朱佳宝<sup>2</sup>

(1. 中国石油集团西部钻探工程有限公司录井工程分公司, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院 长庆分院, 陕西 西安 710000; 3. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 近期, 太原组铝土岩气藏已经成为鄂尔多斯盆地陇东地区的勘探热点。为系统探究铝土岩分布及成藏主控因素, 基于最新钻井岩心、岩石薄片、三维地震、测井、扫描电镜、模型正演等方法, 详细研究了太原组铝土岩分布特征, 进而阐述了铝土岩成藏主控因素。研究表明, 含铝岩系纵向具有典型的五段式, 其中C段是铝土岩的主要储集层段, 硬水铝石含量超过80%。含铝岩系纵向岩性组合主要受岩溶古地貌单元控制, 铝土岩在岩溶高地、岩溶斜坡及岩溶洼地分别呈点状、带状及片状分布特征, 其中岩溶斜坡区铝土岩储层最为发育。铝土岩天然气富集主要受优质储层、断裂、裂缝及构造位置综合控制, 其中储层是天然气富集高产的前提, 早期断裂表现出建设作用, 晚期断裂表现出破坏作用, 裂缝能够改善储层物性, 构造高部位的低幅度构造或鼻状圈闭更易成藏, 岩溶斜坡区是最有利于铝土岩天然气成藏的古地貌单元。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地; 岩溶古地貌; 含铝岩系; 分布特征; 天然气富集

中图分类号: P588.24; P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)04-0889-16

## Distribution characteristics and main controlling factors of accumulation of bauxite rock in Taiyuan Formation in Longdong area

XIAO Wen-tong<sup>1</sup>, HE Li-an<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, WANG Wen-ze<sup>3</sup>, MA Zhe<sup>3</sup> and ZHU Jia-bao<sup>2</sup>

(1. Logging Engineering Branch, CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Karamay 834000, China; 2. Changqing Branch, Geophysical Research Institute, BGP, CNPC, Xi'an 710000, China; 3. Changqing Branch, China National Logging Corporation, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Recently, the bauxite gas reservoir of Taiyuan Formation has become a hot spot of exploration in Longdong area of Ordos Basin. In order to systematically explore the distribution of bauxite rock and the main controlling factors of reservoir formation, based on the latest drilling cores, rock slices, three-dimensional seismic, logging, scanning electron microscopy, model forward modeling and other methods, the distribution characteristics of bauxite rock in Taiyuan Formation were studied in detail, and then the main controlling factors of bauxite rock reservoir formation were expounded. The results show that the aluminiferous rock series has a typical five-stage type in the longitudinal direction, in which the C section is the main reservoir section of the bauxite rock, and the content of diasporite is more than 80%. The longitudinal lithologic association of the aluminiferous rock series is mainly controlled by the karst paleogeomorphology unit. The distribution characteristics of bauxite in karst highland, karst slope and karst depression are punctate, banded and flaky, respectively. The bauxite reservoir in the karst slope area is the most developed. The enrichment of natural gas in bauxite rock is mainly controlled by high-quality reservoirs, faults,

收稿日期: 2023-05-17; 接受日期: 2024-02-26; 编辑: 郝艳丽

作者简介: 肖文同(1990-), 男, 本科, 工程师, 从事油气评价解释及地质工程一体化工作, E-mail: xiaowentong@cnpc.com.cn; 通讯作者: 和丽安(1985-), 男, 本科, 工程师, 从事油气藏综合地质研究, E-mail: 1242490668@qq.com。

fractures and structural positions. Reservoirs are the premise of natural gas enrichment and high yield. Early faults show construction effect, and late faults show destruction effect. Fractures can improve reservoir physical properties. Low-amplitude structures or nose-like traps in high structural parts are more likely to accumulate. Karst slope area is the most favorable paleogeomorphologic unit for natural gas accumulation in bauxite rock.

**Key words:** Ordos Basin; karst paleogeomorphology; aluminiferous rock series; distribution characteristics; natural gas enrichment

铝土岩以往主要是作为固体矿产被关注,很少在油气勘探领域被作为研究重点。早期,鄂尔多斯盆地大量钻井在本溪组底部广泛钻遇铝土岩,然而由于缺乏深度研究,一直认为铝土岩密度大、封盖能力强,适合作为盖层,而不能作为有效储集层(王庆飞等, 2012; 袁珍等, 2016; 赵利华, 2020; 姚泾利等, 2023)。然而,近年来,鄂尔多斯盆地陇东地区的 L47-1CH 井及 L47 井在太原组铝土岩段分别获得  $353.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  及  $67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的高产工业气流,标志着一个新的含油气储层的发现,打破了铝土岩以往仅作为固体矿产进行勘探的局面,展示了铝土岩良好的勘探潜力,具有巨大的理论研究及勘探生产意义。

铝土岩矿物成分主要包括含铝矿物、黏土矿物及其他微量矿物,其中含铝矿物以一水硬铝石为主,按照一水硬铝石和黏土矿物的占比,可以细分为铝土岩、泥质铝土岩、铝土质泥岩。当含有富铁矿物时,又可称为铁质铝土岩(高兰等, 2014, 2015; 张海坤等, 2021)。根据基岩类型可将铝土矿划分为喀斯特型、红土型和季赫温型 3 种成因类型(刘全有等, 2012; 张银德等, 2014; 杜远生等, 2020)。陇东地区太原组铝土岩属于喀斯特沉积型。铝土岩作为一个新发现的勘探领域,但关于陇东地区铝土岩的研究报道却相对较少。南珺祥等(2022)通过对铝土岩储层形成机理进行了深入研究,认为铝土岩储层孔隙的形成主要经历了准同生期、埋藏期及成岩期 3 个阶段,且储集空间以晶间溶孔及溶蚀孔为主;姚泾利等(2023)认为,铝土岩垂向上具有三段式结构,中部铝土岩是主要储层发育段,沉积环境和古地貌控制了铝土岩储层的分布。然而目前对于铝土岩的分布特征及其天然气富集的主控因素却鲜有报道。

在充分吸收铝土矿研究的基础上,利用近年采集的大量三维地震资料、钻井资料,通过对铝土岩纵向岩性序列解剖,精细刻画关键沉积期岩溶古地貌特征,建立了不同地貌单元的铝土岩分布模式,并基

于模型正演优选敏感属性,定性预测了铝土岩分布,同时初步探讨了铝土岩富集主控因素,以期对铝土岩研究及勘探提供借鉴。

## 1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个典型的多旋回克拉通盆地,位于华北板块西部,由渭北隆起、伊盟隆起、天环坳陷、西缘冲断带、晋西挠褶带、伊陕斜坡等 6 个一级构造单元组成(李振宏等, 2010; 兰叶芳等, 2014; 密文天等, 2016),陇东地区跨伊陕斜坡及天环坳陷两大构造单元(图 1a)。古生界自下而上依次发育寒武系三山子组及张夏组、奥陶系马家沟组,二叠系太原组、山西组、石盒子组、石千峰组。目的层系太原组的平均厚度约 30 m,与下伏地层碳酸盐岩古风化壳呈平行不整合接触,越靠近古隆起核部,出露年代越老,且逐渐缺失奥陶系、寒武系,与上覆二叠系山西组整合接触关系(图 1b)。

鄂尔多斯盆地西南缘受早期构造运动控制(邓军等, 2005; 付金华等, 2019; 包洪平等, 2022),形成了“L”型中央古隆起,研究区位于中央古隆起边缘。奥陶纪末,受加里东构造运动的影响,鄂尔多斯盆上升为陆地,盆地整体缺失志留系至泥盆系沉积,此时马家沟组暴露,发育盆地级规模岩溶地貌,奠定了含铝岩系发育的环境基础(付金华等, 2021; 付金华, 2023)。石炭纪末本溪期,海水由西部的秦祁海和东部的华北海向中央古隆起海侵,鄂尔多斯地区开始整体沉降接受海陆交互相沉积,盆地东部本溪组底部发育含铝岩系沉积,以潟湖和潮坪沉积为主(孟卫工等, 2021),此时陇东地区主要处于高地区,未接受本溪组沉积,仍然以表生风化作用为主。早二叠世太原期,海侵进一步加剧,陇东地区西部中央古隆起接受太原组沉积,太原组下部发育含铝岩系地层,上部发育海侵期煤系及碳酸盐岩地层。晚二叠世山西期,受南北两侧大洋相向俯冲作用的影响,华北地台抬升,海水退出,鄂尔多斯盆地演化

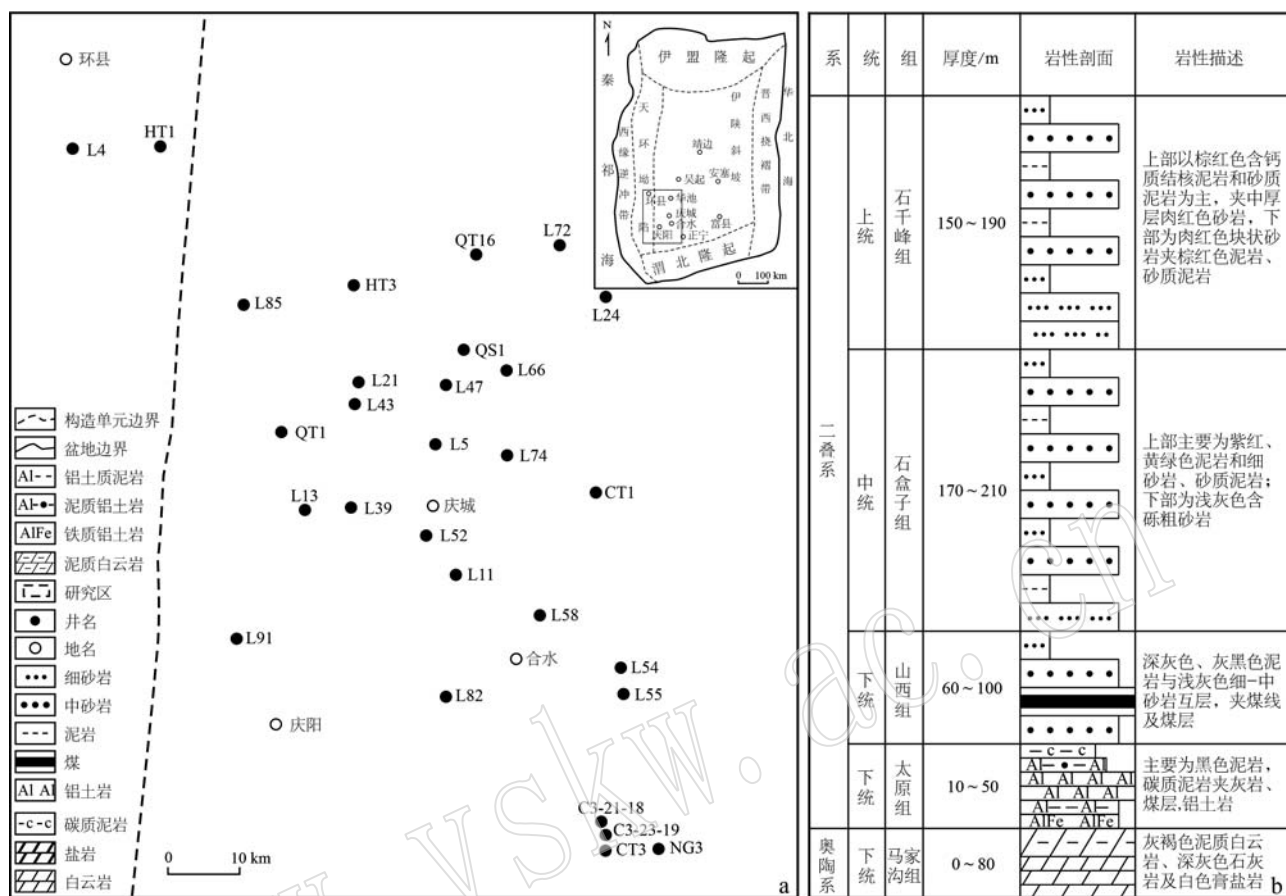


图1 鄂尔多斯盆地构造区划图及研究区位置图(a)和陇东地区古生界沉积地层柱状图(b)

Fig. 1 Structural zoning map and study area location map of Ordos Basin (a) and Palaeozoic sedimentary strata histogram in Longdong area (b)

为内陆盆地。

## 2 铝土岩预测及分布特征

### 2.1 组构特征

统计和分析了陇东地区 30 余口井的岩屑、测录井和取心资料,将含铝岩层自下而上依次划分出铁质铝土岩(A段)、铝土质泥岩(B段)、铝土岩(C段)、泥质铝土岩(D段)和碳质泥岩及煤线或灰岩(E段)五段(南珩祥等, 2022)(图2)。

A段: 铁质铝土岩段,平均厚度约 2 m,矿物成分以黄铁矿、一水硬铝石及伊利石为主,其中一水硬铝石含量不足 30%,发育碎屑状铝铁矿(图3a),该段平均厚度约 2 m,总体表现出铁质铝土岩特征。

B段: 矿物成分以黏土矿物高岭石、伊利石为主,其中一水硬铝石含量较低,不足 40.0%,黏土矿物含量平均超过 40.0%,呈豆鲕、团块及碎屑状、纹

层状不连续分布(图4a、4c),高岭石多以隐晶质集合体出现,结晶以泥-微晶为主,呈碎屑状结构。该段平均厚度约 3.5 m,呈浅灰色,滑塌构造,发育高角度裂缝、角砾黄铁矿团块及分散层状黄铁矿,菱铁矿呈结核状且局部被氧化成褐铁矿(图3b、3c、3d),岩性致密,总体表现出铝土质泥岩特征。

C段: 矿物成分以一水硬铝石、黏土矿物、锐钛矿为主,其中一水硬铝石含量超过 80%,黏土矿物含量小于 10%,具有鲕粒、豆粒、多孔状结构,并见圈层结构(图4d),铝土岩颗粒定向排列,分选较好,呈层状连续分布。孔隙类型为粒内溶孔和晶间溶孔(图4e、4f),孔径细小,以纳米级孔隙为主,孔洞表现为下部孔径大、上部孔径小的特征。该段平均厚度约 10~20 m,为灰白色,以多孔状、蜂窝状结构为主,可见残余豆鲕、碎屑等结构,偶见高角度裂缝(图3e、3f、3g),整体表现为灰白色多孔状铝土岩,是铝土岩储层主要发育段。



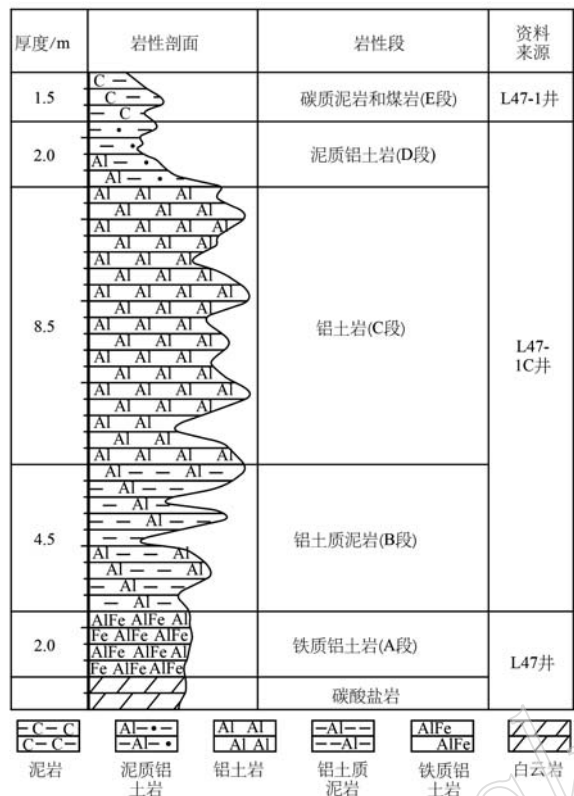


图 2 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组含铝岩系沉积序列图  
Fig. 2 Al-bearing rock series sedimentary sequence diagram of Taiyuan Formation in Longdong area, Ordos Basin

D 段：矿物成分以一水硬铝石及伊利石为主，其中一水硬铝石以隐晶质为主(图 4b)，含量较低，平均含量不超过 40%，常见碎屑状、鲕状铝土质，偶见菱铁矿呈结核(图 4g、4h、4i)。该段平均厚度约 2 m，具纹层状构造，形态不规则(图 3h)，总体表现出泥质铝土岩特征。

E 段：该段岩性变化较大，主要为碳质泥岩及煤线或灰岩，一般灰岩的厚度约为 1.5 m，灰岩相对富含泥质，碳质泥岩及煤线的厚度介于 1~2 m 之间，厚度变化较大，个别井不发育煤层及灰岩。不同钻井中岩性组合方式不同，推测主要与沉积环境及所处古地貌位置相关。

2.2 岩溶古地貌划分及地貌单元特征

前人针对盆地大量的本溪组野外露头及沉积特征的研究(傅金华, 1991; 赵淑平等, 2012; 王高平等, 2013; 刘文辉等, 2015),发现含铝岩系的沉积具有一定的重力流沉积特征,尤其是喀斯特型含铝岩系的沉积往往表现出“填平补齐”的特征,其分布与岩溶“负向地貌”单元基本对应。精确刻画岩溶古地貌是研究铝土岩分布的重要手段,常用的岩溶古地貌的恢复方法主要有印模法、残余厚度法、沉积学方法(肖笛等, 2014; 王建民等, 2014; 闫海军等, 2016)。



图 3 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组含铝岩系典型岩心照片  
Fig. 3 Typical core photos of aluminiferous rock series of Taiyuan Formation in Longdong area, Ordos Basin  
a—碎屑状铁质铝土岩, L47-1C 井, 井深 4 153.26 m; b—浅灰色铝土质泥岩, 滑塌构造, L47-1C 井, 井深 4 154.9 m; c—铝土质泥岩, 黄铁矿团块及分散层状黄铁矿, L47-1C 井, 井深 4 156.85 m; d—菱铁矿局部被氧化成褐铁矿, L47-1 井, 井深 4 135.02 m; e—豆鲕状铝土岩, L47-1C 井, 井深 4 146.56 m; f—铝土岩, 高角度裂缝, L47-1C 井, 井深 4 153.05 m; g—多孔铝土岩, L58 井, 井深 4 049.50 m; h—泥质铝土岩, 纹层状构造, L58 井, 井深 4 041.54 m  
a—clastic ferruginous bauxites, Well L47-1C, depth 4 153.26 m; b—light gray bauxite mudstone, slip formations, Well L47-1C, depth 4 154.9 m; c—bauxite mudstone, pyrite agglomerates and disseminated laminated pyrite, Well L47-1C, depth 4 156.85 m; d—rhodochrosite locally oxidized to limonite, Well L47-1, depth 4 135.02 m; e—bean oolitic bauxite, Well L47-1C, depth 4 146.56 m; f—bauxite, high-angle fractures, Well L47-1C, well depth 4 153.05 m; g—porous bauxite, Well L58, well depth 4 049.50 m; h—muddy bauxite, striated formation, Well L58, well depth 4 041.54 m



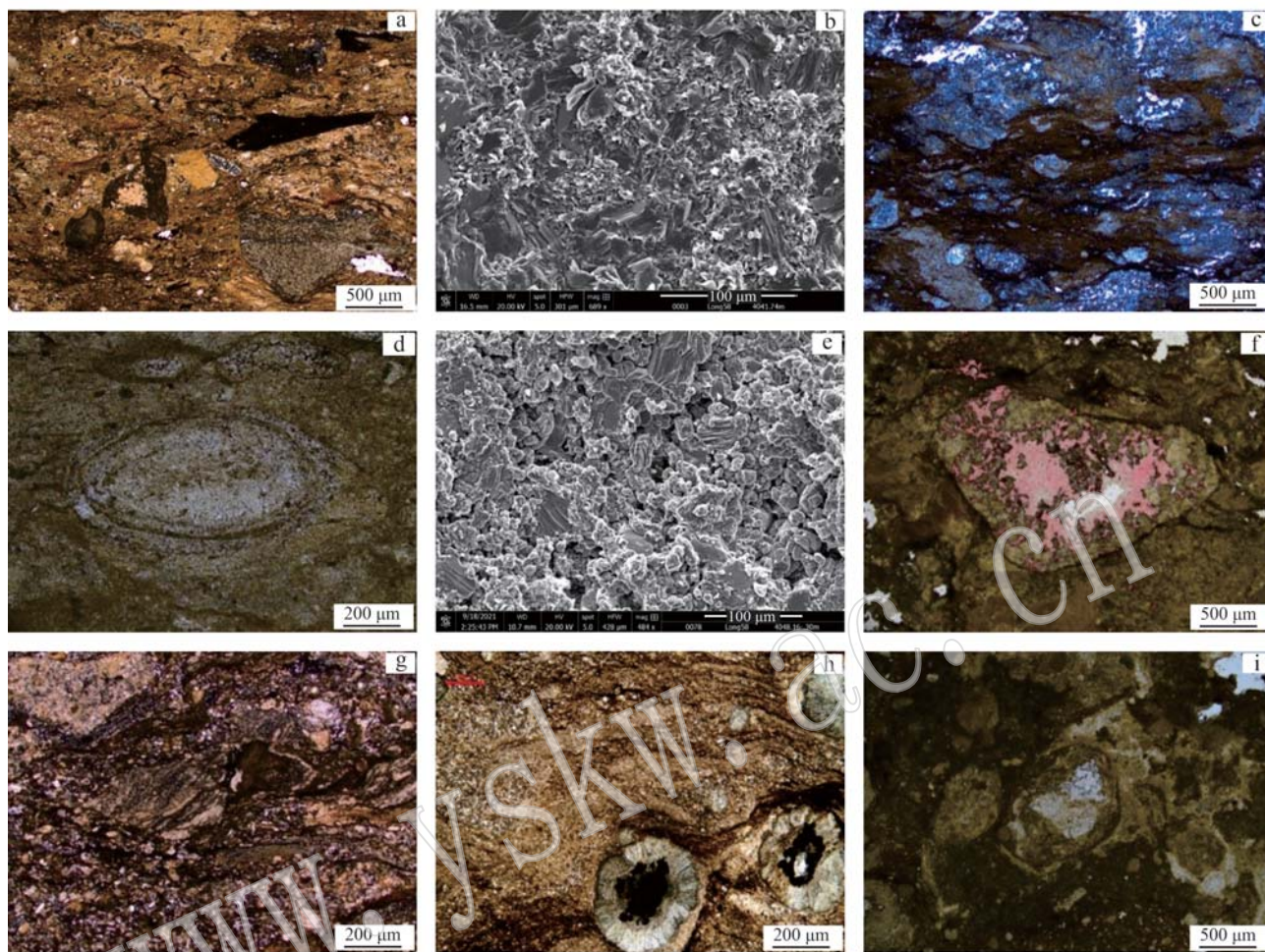


图4 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组铝土岩铸体薄片及扫描电镜照片

Fig. 4 Cast thin sections and SEM photos of Taiyuan Formation bauxite in Longdong area of Ordos Basin

a—L58井, 井深4 041.00 m, 铝土质泥岩, 碎屑状结构, 碎屑为一水铝石; b—L58井, 井深4 041.74 m, 泥质铝土岩, 高岭石隐晶质它形; c—L58井, 井深4 045.24 m, 铝土质泥岩, 碎屑结构, 纹层状构造; d—L47井, 井深4 104.00 m 铝土岩, 具鲕粒、圈层结构; e—L58井, 井深4 048.16 m, 铝土岩, 一水铝石重结晶, 发育晶间孔隙; f—L58井, 井深4 049.0 m, 铝土岩, 豆粒团块粒内溶孔; g—L82井, 井深4 043.25 m, 泥质铝土岩, 具鲕状、碎屑状结构; h—泥质铝土岩, 菱铁矿结核, L82井, 井深4 044.12 m; i—泥质铝土岩, 具豆鲕结构, 水铝石以隐晶质为主 L58井, 井深4 050.76 m

a—bauxite mudstone, clastic structure, clasts are monohydrate alumina, Well L58, depth 4 041.00 m; b—muddy bauxite, kaolinite cryptocrystalline it form, Well L58, depth 4 041.74 m; c—bauxite mudstone, clastic structure, grainy laminae structure, Well L58, depth 4 045.24 m; d—bauxite, oolitic and trap structure, Well L47, depth 4 104.00 m; e—bauxite, recrystallization of alumina monohydrate, development of intergranular pores, Well L58, depth well 4 048.16 m; f—bauxite, intragranular solution pores of pea-grain agglomerates, Well L58, depth well 4 049.0 m; g—muddy bauxite, oolitic and clastic structure, Well L82, depth well 4 043.25 m; h—muddy bauxite, with rhodonite nodules, Well L82, depth 4 044.12 m; i—muddy bauxite, with oolitic structures, hydrotalcite dominated by cryptocrystalline, Well L58, depth 4 050.76 m

残余厚度法是在奥陶系中选择一个基准面,以残余厚度反映岩溶古地貌特征,精确度依赖于基准面的选择。印模法的原理是在不整合面之上尽量选择一个等时面,等时面与不整合面之间沉积厚度的“镜像”反映古地貌起伏形态。陇东地区碳酸盐岩内部基准面难以准确解释,残厚法较难恢复岩溶古地貌,而上古地震资料品质好,能够准确追踪标志层,故采用印模法能够更好地恢复岩溶古地貌。

岩溶高地区古地势相对较高,地表长期远离潜

水面,受大气淡水淋滤叠加垂直渗流作用下,在高地区形成以点状分布、形状不均、大小不一的潜坑型负向地貌单元,潜坑直径最大约为4~5 km,平均约1~1.5 km。岩溶斜坡是位于岩溶高地和岩溶洼地之间的过渡带,淋滤时期较长,往往沿古断裂、裂缝等地层薄弱带发生差异岩溶,形成岩溶沟槽型“负向地貌”单元,平面上呈主沟槽和次沟槽组成的“树型”沟槽网络体系特征。次沟槽组成的沟槽网络发育于岩溶上斜坡,呈分散的“树枝型”展布,槽坡度相对下斜



坡较大、较深,介于 35~45 m 之间,宽度较小,介于 200~300 m 之间。主沟槽主要发育于较为平缓的岩溶下斜坡区域,呈“树干型”展布,相比岩溶上斜坡侵蚀深度浅,沟槽坡度较小,深度介于 25~35 m 之间,沟槽宽度较大,介于 800~1 500 m 之间。岩溶洼地位于古地势低洼的汇水区,长期处于海平面以下,向北开口与广海相连。

陇东地区前石炭纪岩溶古地貌整体表现为西南部高、东北部低的特征。根据岩溶古地貌划分的标准(表 1),自西南部向北东部依次划分为岩溶高地、岩溶上斜坡、岩溶下斜坡及岩溶洼地 4 个沉积单元(图 5),又可细分为潜坑型(漏斗型)、主沟槽型、次沟槽型及浅洼型 4 种典型的“负向地貌”单元。

表 1 鄂尔多斯盆地陇东地区岩溶古地貌单元划分  
Table 1 Division of karst paleogeomorphological units in Longdong area of Ordos Basin

二级地貌	三级地貌	主要指标
岩溶高地	潜坑	$H_y < 20\text{ m}$
岩溶上斜坡	次沟槽	$35\text{ m} \leq H_y \leq 50\text{ m}$ , 带状侵蚀, 宽 200~300 m
岩溶下斜坡	主沟槽	$20\text{ m} \leq H_y \leq 35\text{ m}$ , 带状侵蚀, 宽 800~1 500 m
岩溶洼地	浅洼	$H_y \geq 50\text{ m}$

$H_y$  是指印模地层厚度。

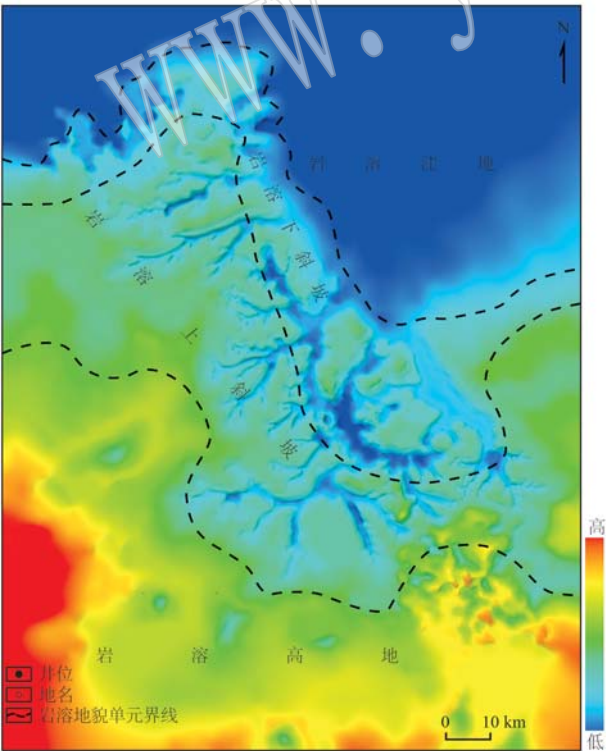


图 5 鄂尔多斯盆地陇东地区前石炭纪古地貌图(印模法)  
Fig. 5 Pre-Carboniferous palaeogeomorphology map of Longdong area of Ordos Basin (impression method)

2.3 岩溶古地貌对铝土岩沉积的控制作用

岩溶“负向地貌”单元控制了含铝岩系的沉积,但是对于不同的“负向地貌”单元,其纵向岩性组合是有一定差异的(图 6),主要受“负向地貌”单元的规模、宏观地貌位置、距含铝岩系物源的远近及地表径流的强度等四要素综合控制。

岩溶高地区潜坑型“负向地貌”单元纵向发育 B 段、C 段、泥岩及细砂岩岩性组合,其中 B 段与细砂岩频繁互层(图 6a)。潜坑型“负向地貌”单元沉积环境较为独立,当地表径流发育时,潜坑周缘含铝物质被搬运至潜坑沉积形成铝土岩及铝土质泥岩薄层,当地表径流不发育时,细砂岩经风力搬运,在潜坑中形成砂岩薄层,造成 B 段与细砂岩频繁互层,从而在地震剖面中形成“透镜”型强反射特征(图 6b)。

岩溶上斜坡区次沟槽“负向地貌”单元距离物源较近,纵向发育 B 段、C 段及泥岩岩性组合(图 6c),受季节性地表径流的影响,含铝物质被快速搬运至沟槽内沉积,形成铝土岩及铝土质泥岩层。同时上斜坡沟槽坡度大,铝土岩常出现滑塌型、揉皱型结构,且常见厚层鲕状铝土岩段,从而在地震剖面中形成波谷振幅减弱、类串珠反射特征(图 6d)。

岩溶下斜坡区距离物源相对较远,主要接受物源区及次沟槽中铝土岩再搬运沉积,纵向发育 A 段、B 段、C 段及泥岩岩性组合(图 6e)。下斜坡沟槽段的铝土岩颗粒分选较好,同时下斜坡较为开阔、平缓,坡度稳定,沟槽深度横向相对稳定,因此,铝土岩的厚度横向分布也较稳定。此外,沟槽上游铝土岩受物源的控制作用更强,铝土岩厚度相对较厚,物性好。下斜坡下游紧邻岩溶洼地一侧,铝土岩厚度相对较薄,物性差。在地震剖面中形成波谷振幅整体减弱特征,且弱振幅反射横向延伸较远,此特征可作为识别铝土岩的重要标志(图 6f)。

岩溶洼地区浅洼型“负向地貌”单元宏观地势低且连通古河,长期处于海平面以下,受地表径流影响弱,距离物源较远,水体相对低能,这为细粒和黏土物质提供了好的发育环境,所以纵向发育 B 段及灰岩岩性组合(图 6g),造成总体岩性较为致密,铝土岩沉积厚度薄,分布局限。因此在地震剖面中,波谷振幅反射强度均衡,基本无变化(图 6h)。

2.4 铝土岩预测方法

岩溶古地貌的精细刻画能够指示铝土岩的分布范围,但是难以准确预测铝土岩的分布特征。为了解决这种问题,建立了两种地质模型,一种是伴生煤

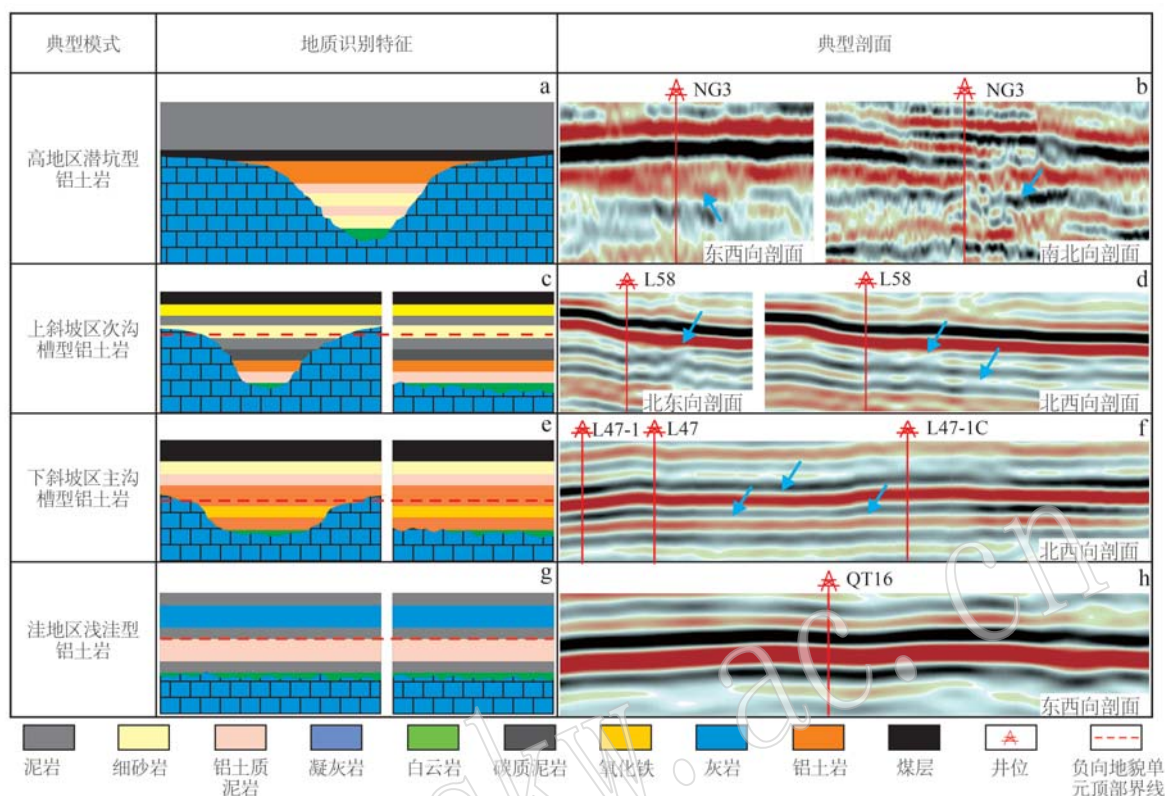


图6 陇东地区4种典型岩溶负向地貌单元铝土岩发育特征图版

Fig. 6 The development characteristics of bauxite rock in four typical karst negative geomorphic units in Longdong area

层的铝土岩楔状正演地质模型,另一种是去煤层后的铝土岩楔状正演地质模型(张强等, 2018; 毕臣臣等, 2020; 崔哲等, 2021; 程豪华, 2022),旨在解决两个问题:①解决铝土岩厚度变化在地震上的响应特征;②在煤层发育的情况下,建立有煤层的铝土岩楔状正演地质模型和去煤层的铝土岩楔状正演地质模型,筛选有效的地震属性,进一步预测铝土岩的分布特征。在建立正演模型的过程中,根据声波测井的速度计算得到各地层速度,其中太原组上覆为山西组,岩性为砂岩,地层速度为4 400 m/s;太原组岩性以泥岩为主,地层速度为4 300 m/s,其中夹一套厚度为0~30 m的铝土岩,铝土岩速度相对较高,为5 300 m/s;太原组下伏直接接触高速奥陶系,速度为6 200 m/s。选取子波主频为25 Hz频率的雷克子波,采用自激自收的射线追踪方法建立楔状正演模型,此方法的精度可以满足水平层状介质模型的精度要求,能够达到模拟结果的准确性及可靠性(程豪华, 2022)。

从含煤层的铝土岩楔状正演模型结果分析,随着铝土岩厚度的减薄,正演地震剖面最大波谷振幅的反射减弱程度较小(图7a、7b、7c),而去除煤层之

后,随着铝土岩厚度减薄,正演地震剖面最大波谷振幅的反射减弱程度急剧下降(图7d、7e、7f),因此,去除煤层强干涉,有利于突出铝土岩在地震剖面中的真实反射。从去除煤层后的正演地震剖面中可以看出,铝土岩在厚度较大处响应表现为弱振幅波谷反射特征,相反在厚度较小处的响应则表现为强振幅波谷反射特征,下二叠统底界、顶界也表现出同样的特征。这表明铝土岩发育段的地震响应为弱波谷反射特征,即地震响应上的波谷振幅越弱,则铝土岩越发育。依据铝土岩在正演地震剖面中表现出的波谷振幅响应特征,对目的层太原组提取最大波谷振幅属性(图8),结果表明,最大波谷振幅属性值域分布在-35 000~-12 500之间,铝土岩段主要分布在-20 000~-12 000之间,即值域的绝对值越小,铝土岩越发育。

## 2.5 铝土岩分布及铝土岩储层分布

基于岩溶古地貌能够圈定铝土岩的分布范围,而利用正演模拟得到的最大波谷振幅属性,能够半定量预测铝土岩的分布特征,综合古地貌刻画及最大波谷振幅属性两种方法,对铝土岩厚度进行了初步预测,预测结果与实钻结果吻合度较高(表2),也



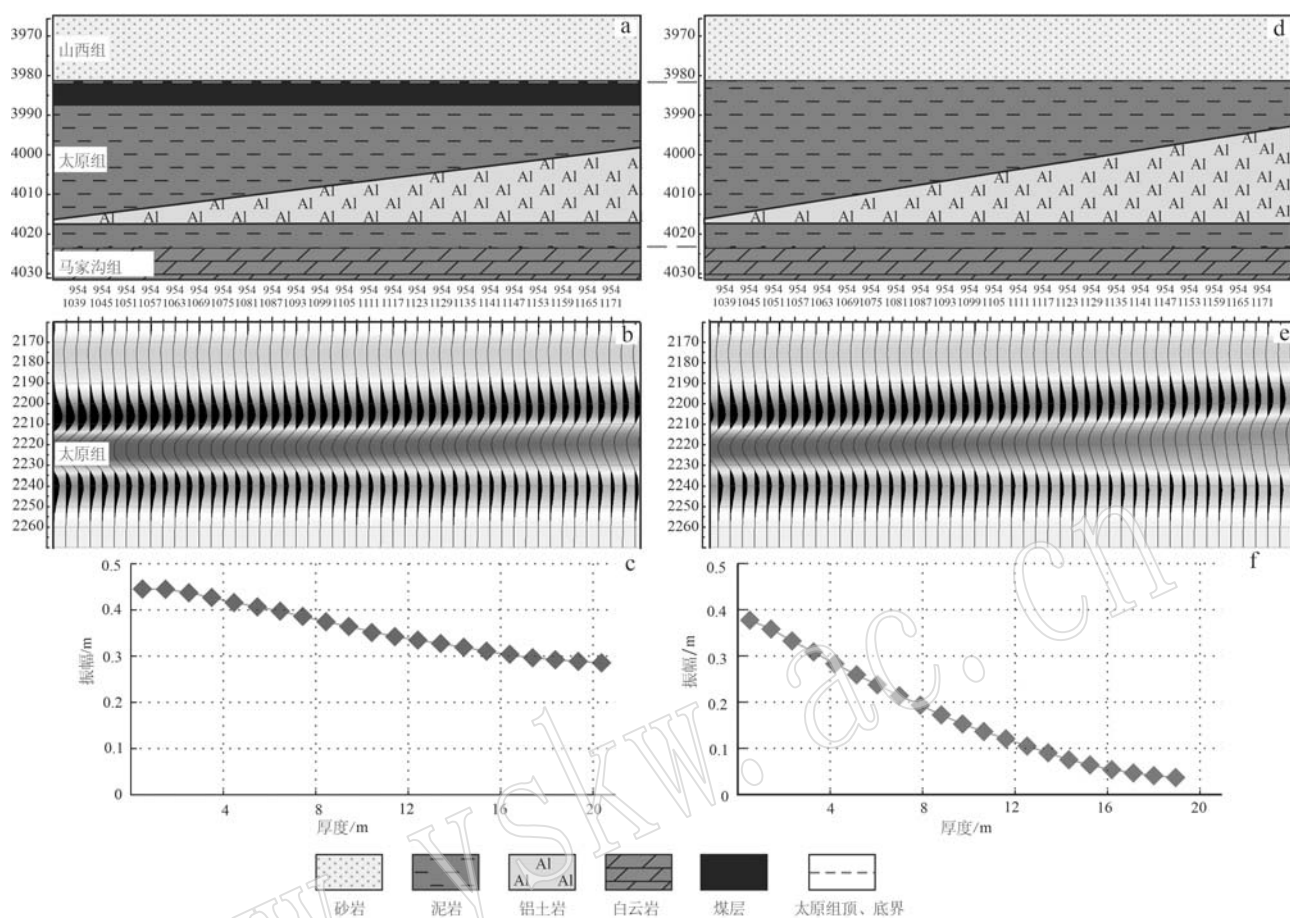


图7 陇东地区太原组铝土岩楔状模型及正演地震剖面

Fig. 7 Wedge model and forward seismic profile of Taiyuan Formation bauxite rock in Longdong area

a—楔状正演模型(去煤层前); b—正演地震剖面(去煤层前); c—铝土岩厚度与最大波谷振幅变化关系(去煤层前); d—楔状正演模型(去煤层后); e—正演地震剖面(去煤层后); f—铝土岩厚度与最大波谷振幅变化关系(去煤层后)

a—wedge orthogonal model of bauxite from the Taiyuan Formation in the Longdong area (before removing coal seams); b—orthorectified seismic section of bauxite of the Taiyuan Formation in the Longdong area (before removing coal seams); c—thickness of bauxite of Taiyuan Formation in Longdong area in relation to the variation of maximum trough amplitude (before removing coal seams); d—wedge orthotropic model of bauxite wedge of Taiyuan Formation in Longdong area (after removing coal seams); e—orthorectified seismic section of bauxite of the Taiyuan Formation in the Longdong area (after removing coal seams); f—relationship between thickness and maximum trough amplitude variation of bauxite of Taiyuan Formation in Longdong area (after removing coal seams)

进一步有效刻画了陇东地区太原组铝土岩的分布。结果表明,4种岩溶“负向地貌”单元中的铝土岩明显呈现出点状、窄带状、宽带状、片状等多种类型分布(图9)。

以二维、三维地震资料为基础,结合最大波谷振幅属性,在岩溶高地区共刻画了7个潜坑型铝土岩分布区,铝土岩以“点”状分布为主,其中面积最小的铝土岩分布区约0.09 km<sup>2</sup>,面积最大约10 km<sup>2</sup>,平均约5 km<sup>2</sup>。近南北向的铝土岩分布区基本与岩溶斜坡沟槽的走向一致,推测是岩溶作用控制的结果。NG3井钻遇的含铝岩系总厚度约24 m,其中铝土岩

厚度约10 m,横向延伸约20~30 m。铝土岩储层厚度约6 m,横向延伸约10~20 m(图10)。

岩溶上斜坡区共刻画了9条窄带状铝土岩发育带,沿环县南-庆城南-合水西部一带呈片状展布,其走向基本与岩溶斜坡方向一致。L58井位于窄带状铝土岩分布区内,钻遇含铝岩系总厚度约15 m,其中铝土岩厚度13 m,横向延伸约50 m。铝土岩储层主要集中在太原组地层中部及中上部,厚度约7 m,横向延伸较短,约20 m(图11)。

岩溶下斜坡区共刻画了3条近南北、东西走向的宽带状铝土岩发育带,沿环县-庆城北-合水一带

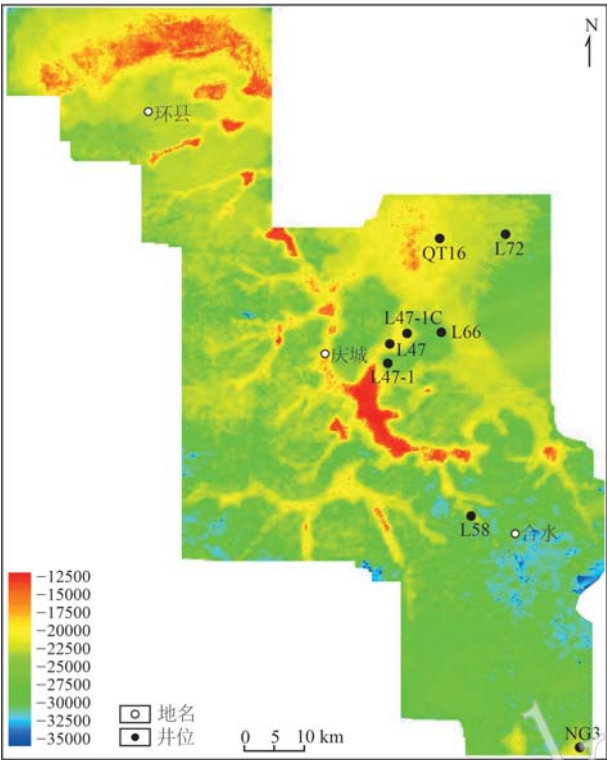


图 8 陇东地区太原组铝土岩最大波谷振幅属性图

Fig. 8 The maximum trough amplitude attribute diagram of Taiyuan Formation bauxite rock in Longdong area

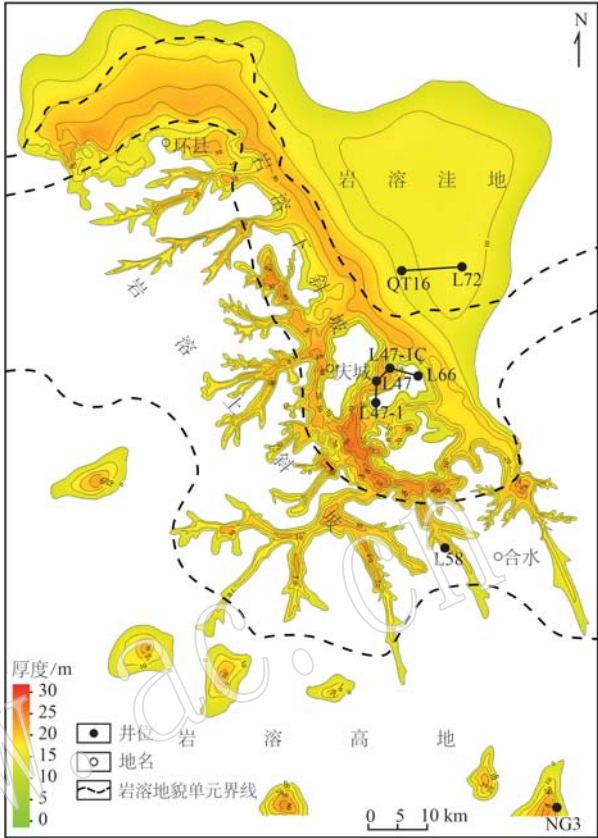


图 9 陇东地区太原组铝土岩沉积厚度图

Fig. 9 Sedimentary thickness of Taiyuan Formation bauxite in Longdong area

表 2 最大波谷振幅属性铝土岩厚度预测与实钻厚度对比

Table 2 Maximum trough amplitude attribute bauxite rock thickness prediction and actual drilling thickness comparison		
井名	预测厚度(铝土岩)/m	实钻厚度(铝土岩)/m
QT16	0	0
L72	0	0
L66	5	3
L58	15	13
L47	24	25
L47-1C	10	10
L47-1	5	4
NG3	8	10
L54	13	12
L31	7	5
L74	5	4
L85	8	7
L62	0	0
HT2	4	4
L21	5	6
L51	14	15
L19	21	19

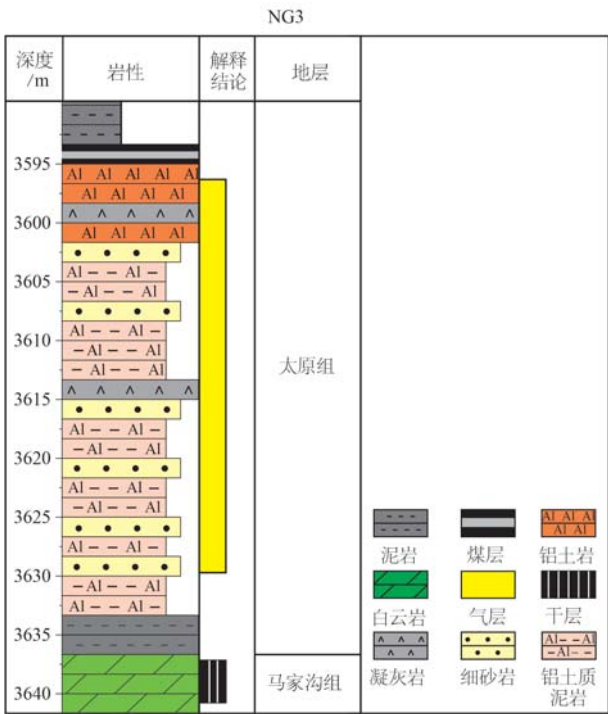


图 10 NG3 井太原组岩性剖面图

Fig. 10 Lithologic profile of Taiyuan Formation in NG3 well

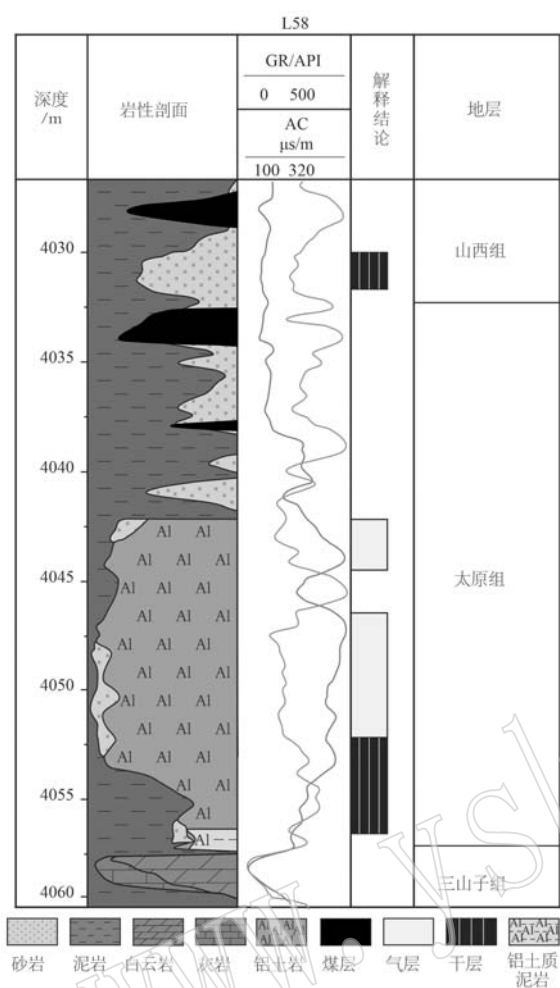


图 11 L58 井太原组岩性剖面图

Fig. 11 Lithologic profile of Taiyuan Formation in L58 well

呈带状展布。岩溶下斜坡的含铝岩系平均厚度介于 5~15 m 之间,其中 L47-1 井-L47 井-L47-1C 井-L66 井连井剖面中含铝岩系平均厚度约 16 m,最大约 25 m,最小约 6 m,且含铝岩系厚度及铝土岩厚度由 L47 井、L47-1C 井向 L47-1 井、L66 井逐渐减薄,在 L47 井区铝土岩厚度达到最大,储层也最为发育,横向延伸至岩溶洼地上游,具连续性规模分布(图 12)。

岩溶洼地位于环县东部及合水北部古地貌低洼的汇水区,岩性较为致密,含铝岩系厚度薄,铝土岩欠发育。从 QT16 井、L72 井连井剖面可以证实(图 13),虽然含铝岩系在横向上较为连续,但铝土岩及铝土岩储层在横向上延伸短,纵向厚度也较薄。

### 3 油气富集规律及富集类型

#### 3.1 油气富集规律

陇东地区太原组铝土岩气藏作为一种新发现的

气藏,初步研究认为是一种岩性-构造型气藏,主要受优质储层、裂缝、构造位置等因素的控制。

##### 3.1.1 优质储层对铝土岩天然气的富集作用

陇东太原组含铝岩系横向分布厚度变化大,导致储层的横向分布变化大,物性变化大,非均质性强。优选铝土岩厚度及储层物性参数等作为综合评价铝土岩储层的标准,对铝土岩储层进行分类评价(表 3),共划分为 2 类:Ⅰ类优质储层和Ⅱ类普通储层(图 14)。

一般来说,在含铝岩系分布厚度最大区,发育一定厚度的铝土岩段,且不同的“负向地貌”单元其储层分布的形态是不同的。岩溶上斜坡及下斜坡区域优质储层以带状分布为主,只是带状的宽度及深度具有一定的差异,而在含铝岩系最厚区的两翼一般不发育储层段,但对于储层段内富集的天然气,具有侧向遮挡的作用。铝土岩普通储层沿合水东部及庆城北部以带状展布为主。因此,铝土岩优质储层不仅是天然气的储集空间,控制着天然气的富集,同时也是铝土岩圈闭的基础,高孔渗的铝土岩段被致密层所包围,顶板是致密含铝岩系(铝土质泥岩)、泥岩、碳质泥岩,四周被致密含铝岩系直接遮挡,底板由致密泥质铝土岩遮挡。太原组顶部直接覆盖 6#煤层,厚度约 1.5 m,与太原组铝土岩储层构成了一套非常优质的上生下储的储盖组合,天然气通过微裂缝网及断裂-裂缝网等疏导体系或通过扩散的方式向铝土岩储层中充注成藏,故优质储层对于铝土岩天然气的富集具有一定的控制作用。

##### 3.1.2 断裂(裂缝)对铝土岩天然气的控制作用

断裂对铝土岩天然气富集具有明显的建设性及破坏性双重控制作用。加里东期及早海西期断裂发育时间早,后经构造运动导致加里东期断裂活化,发育大量的断裂伴生缝及构造伴生缝,不但沟通了上覆煤层,而且改善了储层物性,因此该期断裂主要表现为建设性作用。如 L47 井及 L47-1C 井位于加里东期及早海西期断裂附近,叠前裂缝预测指示(图 15),裂缝明显较为发育,含气显示情况好,其中 L47 井试采超  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,而 L47-1 井远离加里东期及早海西期断裂,裂缝欠发育,未见气显示。印支及喜山期断裂形成时间晚,断穿地层多,一方面破坏了早期形成的铝土岩气藏,导致原生气藏被破坏而向上溢散,另一方面破坏了原始圈闭的有效性,导致天然气不能有效富集。如 L58 井位于北西向印支期断裂和北东向加里东期断裂结合部,受印支期断裂破坏



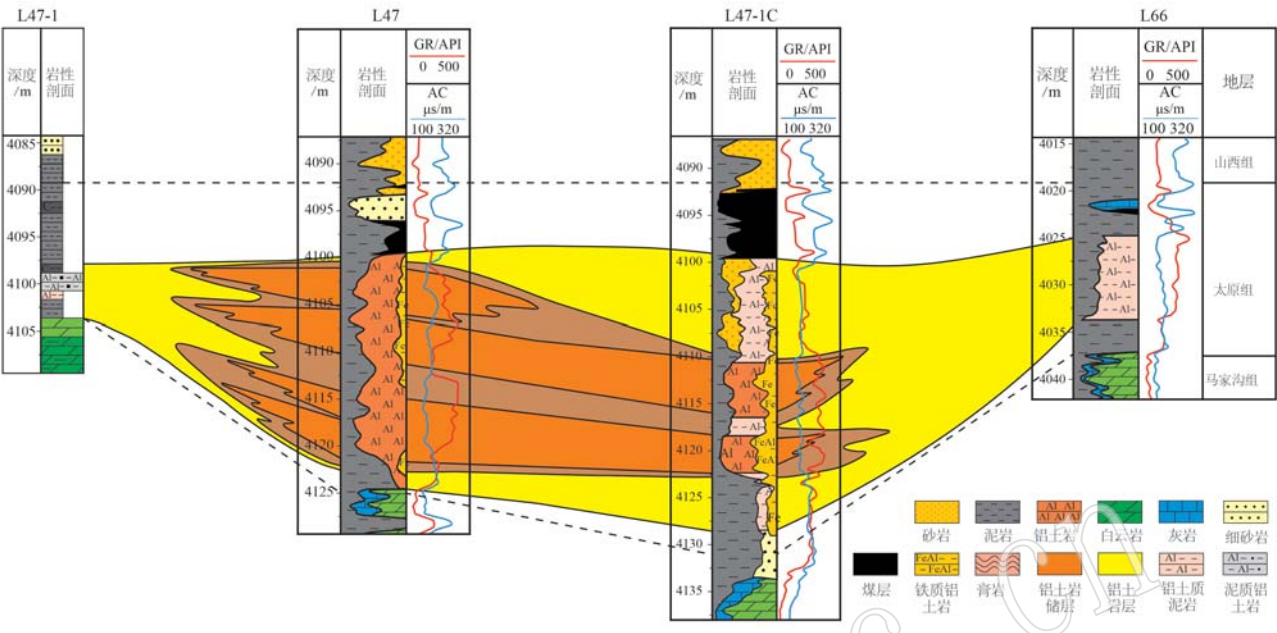


图 12 L47-1-L47-L47-1C-L66 井太原组连井剖面图

Fig. 12 Cross-section of Well L47-1-L47-L47-1C-L66 Taiyuan Formation

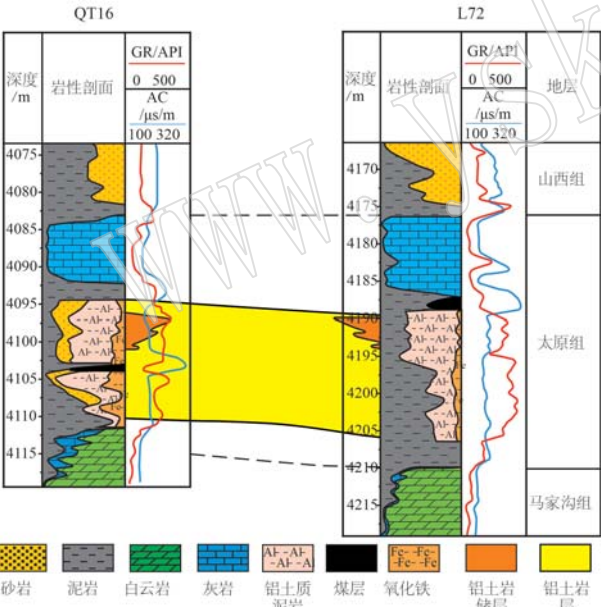


图 13 QT16-L72 太原组连井剖面图

Fig. 13 Cross-section of Well QT16-L72 Taiyuan Formation

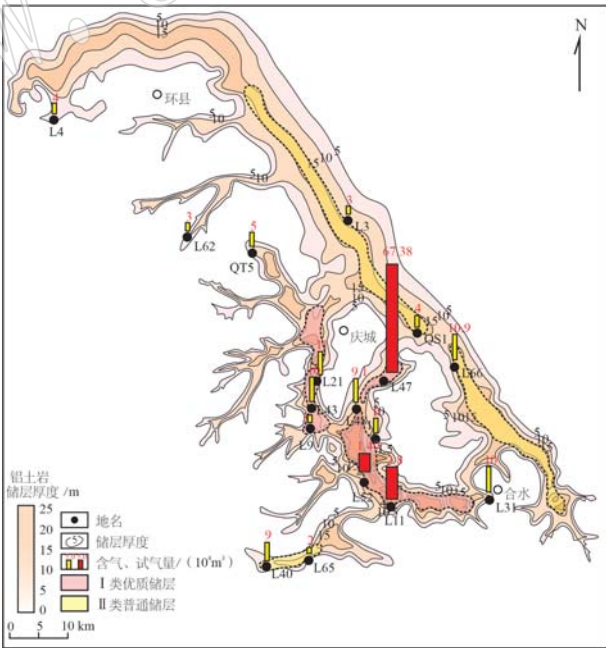


图 14 陇东地区太原组铝土岩储层厚度图

Fig. 14 Thickness map of Taiyuan Formation bauxite reservoir in Longdong area

表 3 陇东地区太原组铝土岩储层分类评价表

Table 3 Classification and evaluation table of Taiyuan Formation bauxite reservoir in Longdong area

项目	I 类优质储层	II 类中等储层
孔隙度/%	≥16	<16
渗透率/ $10^{-3} \cdot \mu\text{m}^2$	≥10.5	<10.5
铝土岩实钻厚度/m	15~27	0~15
试气日产量/ $10^4 \text{ m}^3$	≥60	<60
综合评价	优质储层	普通储层

性作用影响,造成太原组铝土岩原生气藏的有效性被破坏,天然气沿断裂向上溢散,“部分”被截留在盒 8 及山 1 河道砂体内成藏,试采结果证实,太原组铝土岩段产水 26 m<sup>3</sup>/d,未见气显示,盒 8 及山 1 测试见少量气,分别为 300 m<sup>3</sup>/d 和 700 m<sup>3</sup>/d。

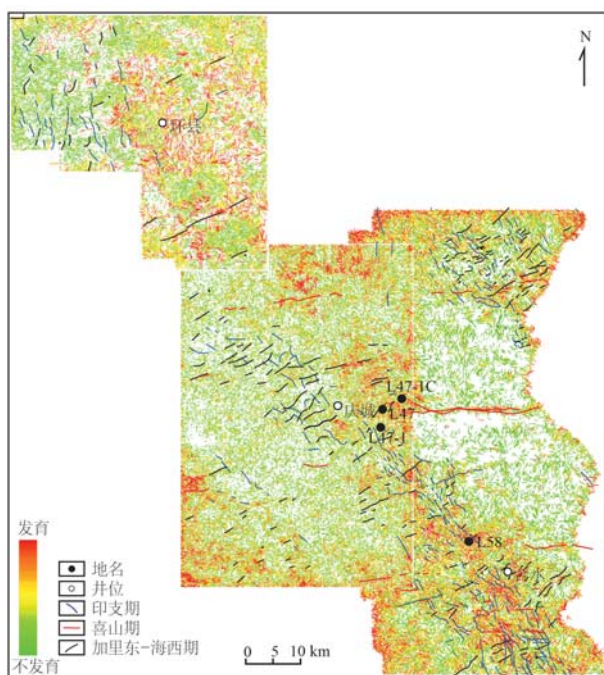


图 15 陇东地区太原组叠前裂缝分布图

Fig. 15 Prestack fracture distribution map of Taiyuan Formation in Longdong area

### 3.1.3 构造对铝土岩天然气的控制作用

铝土岩的分布为天然气的富集提供了储集基础,然而构造位置对于铝土岩天然气的富集具有明显的控制作用。从宏观角度分析,陇东地区构造整体表现出西倾单斜构造特征,自西向东发育多排西倾鼻状构造,并叠加了多个低幅度背斜及鼻状构造(图 16)。目前已发现的铝土岩气藏及气测显示的钻井主要分布在陇东地区东部,部分井已获高产工业气流,如 L47 井、L11 井等均达到高产工业气流标准,其中 L47 井试气超  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,而西部地区的钻井基本都没有太好的气显示。从微观角度分析,对于单一的优质储层,由于铝土岩储层的孔隙度和渗透率较大,油气在孔吼、孔隙之间能够相互流动,具有常规气藏的特征。因此,铝土岩气藏主要表现出岩性控藏的特点,此外,现今构造高部位(图 17a、17b)低幅度构造叠合铝土岩圈闭区成功率明显高于构造低部位(图 17c、17d)钻井成功率,单一铝土岩气藏构造上倾方向的铝土岩储层含气丰度相对气藏低部位更高。在天然气运移过程中,更容易向优质储层的局部高部位聚集,但可能会形成一些边水、低水型气藏。因此,单一的优质储层中,天然气在构造高部位更为富集。

## 3.2 铝土岩气藏富集类型

陇东太原组上覆为山西组煤层,下伏为前石炭纪碳酸岩盐底板,铝土岩气藏受优质储层、裂缝、断裂三要素综合控制,发育 3 种富集类型(李军等, 2016)。

第 1 种富集类型是“源-断孔洞”型(图 18a)。上覆煤层生成的天然气主要沿断裂作为油气运移通道,向孔洞型储层进行运移,该储层孔隙类型以原生孔和次生孔为主。第 2 种富集类型是“源-裂缝孔洞”型(图 18b)。因铝土岩具有较强的脆性,受构造挤压作用,形成空间裂缝网络系统,改善了铝土岩储层的储集性。此外,裂缝网能够作为运移通道沟通上覆煤层,使产生的天然气通过裂缝网向铝土岩储层中充注。第 3 种富集类型是“源-断-裂缝孔洞”型(图 18c)。断裂两侧形成一系列的断裂伴生缝,能够有效沟通上覆煤层与储层,煤层生成的天然气沿着断裂及断裂伴生缝作为天然气运移通道,向铝土岩储集层中运移。此外,裂缝的发育可为铝土岩层中的天然气提供储集空间,连接喉道和孔隙,疏导油气,提高储层渗透性。

目前已发现的铝土岩富集类型以“源-断-裂缝孔洞”型为主,此类型的断裂及断裂伴生缝极大地改善了铝土岩储层的物性,沟通储集渗滤空间,使得铝土岩气藏富集高产。

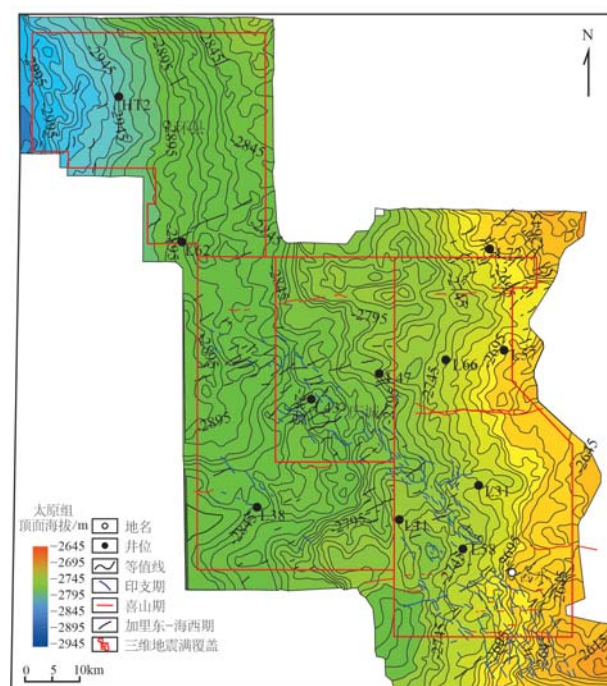


图 16 陇东地区太原组顶面构造图

Fig. 16 Top structural map of Taiyuan Formation in Longdong area



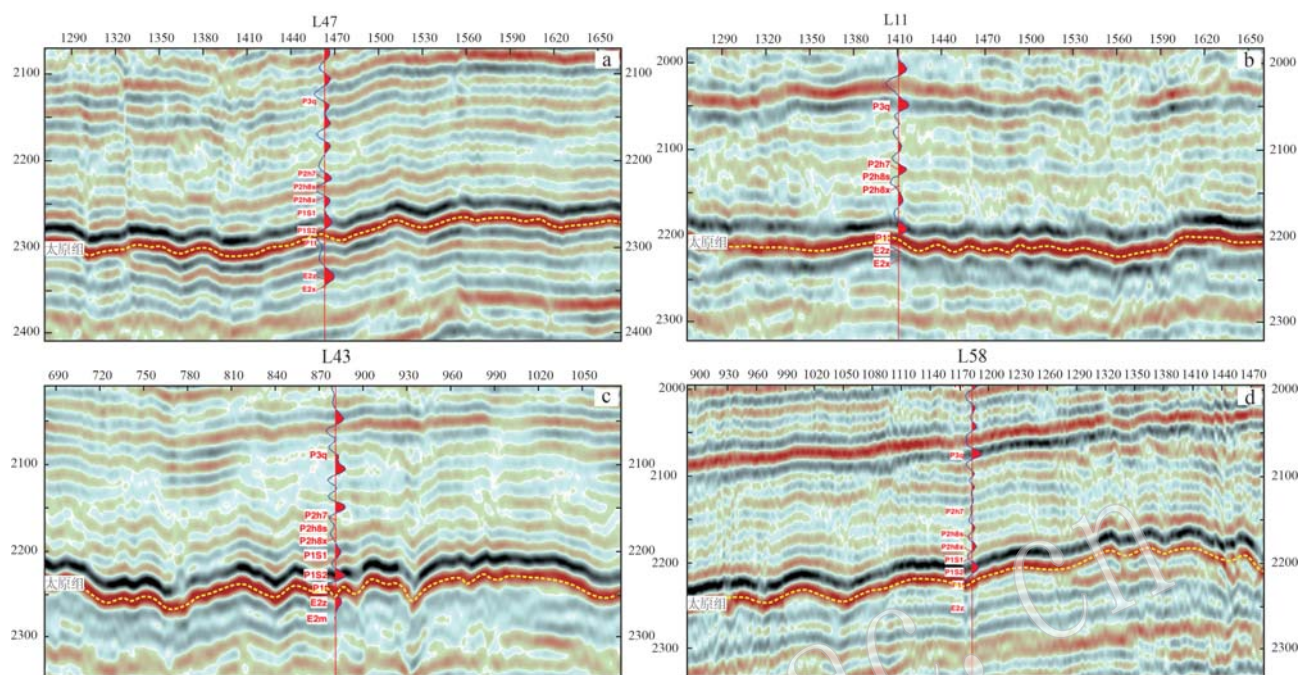


图 17 陇东地区太原组典型地震剖面

Fig. 17 Typical seismic profile of Taiyuan Formation in Longdong area

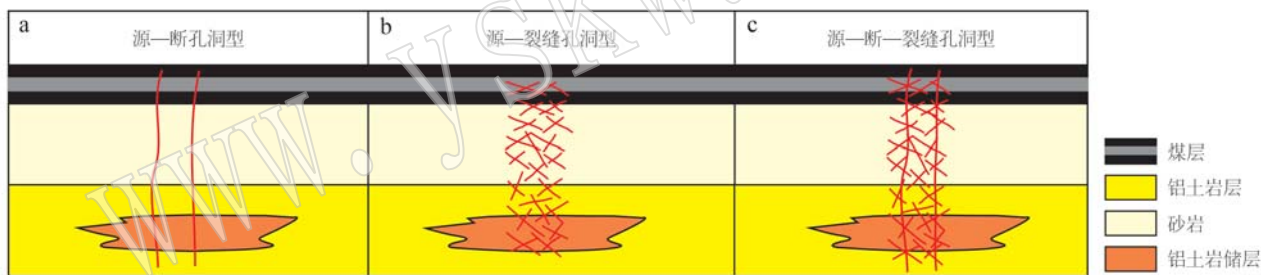


图 18 陇东地区太原组铝土岩气藏富集类型

Fig. 18 Enrichment types of Taiyuan Formation bauxite gas reservoir in Longdong area

## 4 勘探有利区

综合储层、断裂、古地貌及构造位置四要素,优选出 L47-L11 井区、L43 井区周缘及 L58 井北区三大有利区带,铝土岩平均厚度介于 2~14 m 之间,总面积约为 800 km<sup>2</sup>(图 19)。

(1) L47-L11 井区带。该区面积约为 400 km<sup>2</sup>,位于岩溶下斜坡区,该区铝土岩主要呈宽带状—片状展布,铝土岩厚度大,普遍约为 24~40 m,储集层较为发育;同时,该区北西向加里东期断裂发育数量较少,但规模较大,伴生裂缝亦较为发育,L47 井已在该区带内突破,证实该区成藏有利。

(2) L43 井区带。该区面积约为 200 km<sup>2</sup>,位于岩溶下斜坡区,该区铝土岩主要呈片状展布,铝土岩

厚度为 10~20 m,发育多组加里东—早海西期北西向走滑断裂,断裂及构造伴生缝非常发育,并且位于现今构造高部位,对于铝土岩成藏非常有利。

(3) L58 井北区带。该区面积约为 200 km<sup>2</sup>,位于岩溶上斜坡区,铝土岩厚度为 20~30 m,铝土岩主要呈窄带状分布,发育北西向加里东期及东西向印支期断裂,发育低幅度构造圈闭,避开东西向断裂发育区外,铝土岩成藏有利。

## 5 结论

(1) 陇东地区太原组铝土岩属于喀斯特沉积型,A、B、C、D、E 五段沉积序列相对完整,其中 C 段以一水硬铝石(>80%)、黏土矿物(<10%)、锐钛矿为主,是多孔状铝土岩的主要发育段。



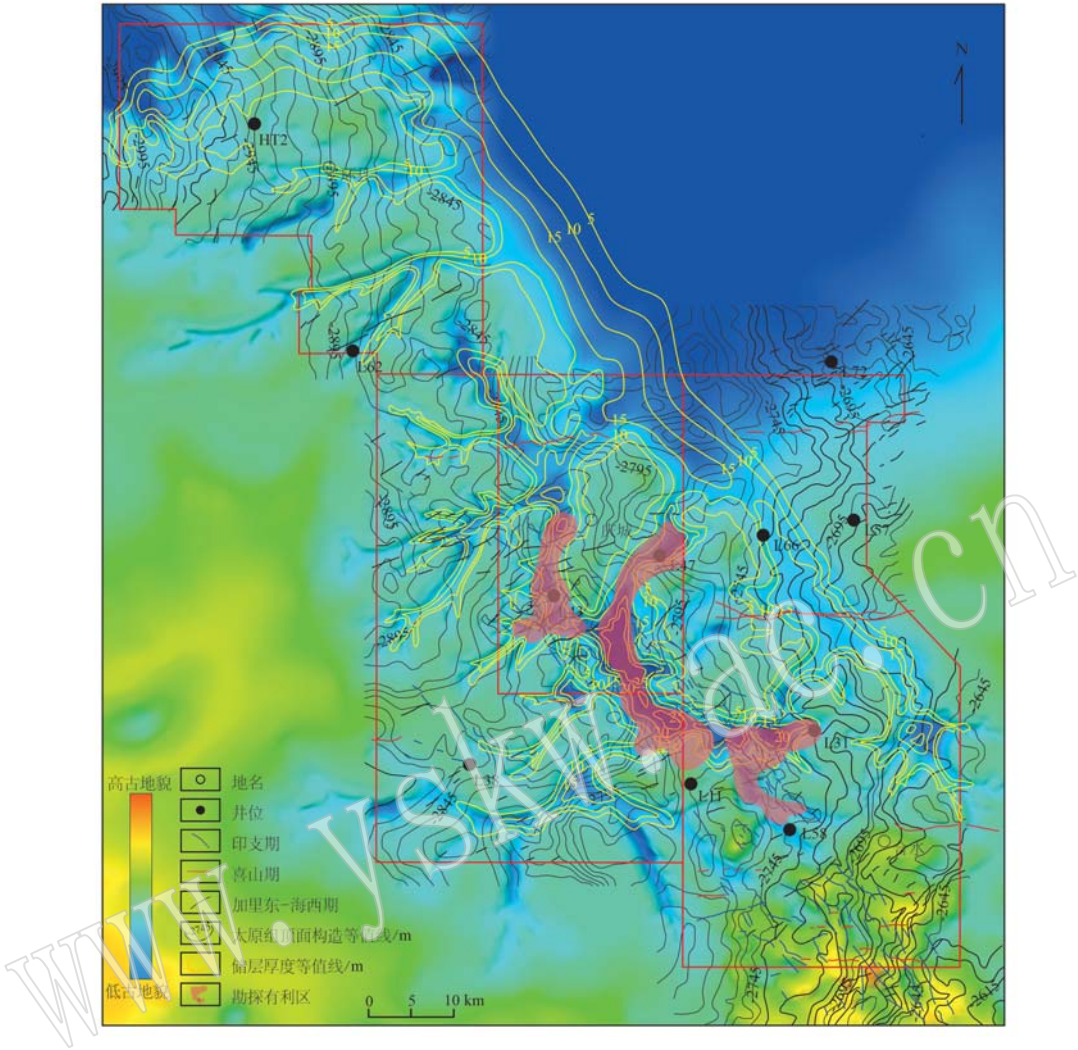


图 19 陇东地区太原组铝土岩有利区评价图

Fig. 19 Evaluation map of favorable area of Taiyuan Formation bauxite in Longdong area

(2) 采用印模法精细刻画古地貌,将古地貌划分为岩溶高地潜坑型、岩溶上斜坡次沟槽型、岩溶下斜坡主沟槽型及岩溶洼地 4 种典型的负向地貌单元。结合最大波谷振幅属性预测出铝土岩在岩溶高地、岩溶斜坡区及岩溶洼地区依次呈点状、带状、片状展布,其中岩溶斜坡区铝土岩最为发育,预测结果与实际钻井结果吻合度较高,有效地辅助了铝土岩气藏的勘探和开发。

(3) 铝土岩天然气的富集主要受优质储层、裂缝、断裂、构造等因素的综合控制。其中优质储层是天然气富集高产的前提,加里东期、早海西期断裂和印支、喜山期断裂的发育分别对铝土岩气藏具有建设性和破坏性作用,铝土岩天然气通过断裂、裂缝更容易向优质储层的局部构造高部位聚集。铝土岩气藏富集类型主要以“源-断-裂缝孔洞”型为主,这种

富集类型使得铝土岩气藏具有较高的产气潜力。岩溶上斜坡和下斜坡是最有利于铝土岩天然气成藏的古地貌单元。

References

Bao Hongping, He Dengfa, Wang Qianping, *et al.* 2022. Four main paleo-uplifts evolution in Ordos Basin and their differences in significance of oil and gas reservoir control[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(5): 951~969 (in Chinese with English abstract).

Bi Chenchen, Xie Wei, Wang Yanchun, *et al.* 2020. Seismic response characteristics of forward modeling of shale reservoirs in Sichuan Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 20(16): 6 350~6 356 (in Chinese with English abstract).

Cheng Haohua. 2022. Study on seismic forward modeling of tight reservoir of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field[J]. *Papermaking Equip-*

- ment & Materials, 51(3): 136~138 (in Chinese).
- Cui Zhe, Xing Wenjun, Zhang Hao, *et al.* 2021. Study on response characteristics of seismic forward modeling of tight sandstone reservoir in Linxing area[J]. Science Technology and Industry, 21(12): 70~76 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Huang Dinghua, *et al.* 2005. Basement evolution of the Ordos Basin and its constraint on cap rock[J]. Earth Science Frontiers, 12(3): 91~99 (in Chinese with English abstract).
- Du Yuansheng and Yu Wenchao. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 812~826 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jinhua. 1991. A study of the sealing properties of the palaeozoic caprocks in erduosi basin[J]. Natural Gas Industry, 11(6): 6~11, 6 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jinhua. 2023. Accumulation characteristics and exploration potential of tight limestone gas in the Taiyuan Formation of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 30(1): 20~29 (in Chinese with English abstract).
- Fu Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, *et al.* 2019. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 24(4): 418~430 (in Chinese with English abstract).
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, *et al.* 2014. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2 284~2 295 (in Chinese with English abstract).
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Lan Yefang, Deng Xiuqin, Cheng Dangxing, *et al.* 2014. Diagenetic facies and reservoir quality evaluation of Chang 6 sandstone reservoir in the Upper Triassic Yanchang Formation of Huaqing area, Ordos Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(1): 51~63 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Wang Yunuo, Zhao Jingzhou, *et al.* 2016. Accumulation patterns of natural gas in the Upper Paleozoic in Longdong area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 37(2): 180~188 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenhong and Hu Jianmin. 2010. Structural evolution and distribution of paleokarst reservoirs in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 31(5): 640~647, 655 (in Chinese with English abstract).
- Liu Quanyou, Jin Zhijun, Wang Yi, *et al.* 2012. Gas filling pattern in Paleozoic marine carbonate reservoir of Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 847~858 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenhui, Pan Heping, Li Jianwei, *et al.* 2015. Well logging evaluation on bauxitic mudstone reservoirs in the Daniudi Gasfield, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 35(5): 24~30 (in Chinese with English abstract).
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Mi Wentian, Chen Anqing, Zhang Chenggong, *et al.* 2016. Sandbody's distribution and genetic model of member Chang-8 of Yanchang Formation of upper Triassic, Fuxian area in Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 16(29): 13~19 (in Chinese with English abstract).
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gaoping, Wang Zhenliang, Zhao Xuejiao, *et al.* 2013. Palaeogeomorphology Restoring of Ordovician weathering crust in Yan'an area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(4): 563~570 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianmin, Wang Jiayuan, Sha Jianhui, *et al.* 2014. Karst paleogeomorphology and comprehensive geological model of the Ordovician weathering crust in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(2): 409~418 (in Chinese with English abstract).
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Di, Tan Xiucheng, Shan Shujiao, *et al.* 2014. The restoration of palaeokarst geomorphology of middle Permian Maokou Formation and its petroleum geological significance in southern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 88(10): 1 992~2 002 (in Chinese with English abstract).
- Yan Haijun, He Dongbo, Xu Wenzhuang, *et al.* 2016. Paleotopography restoration method and its controlling effect on fluid distribution: A case study of the gas reservoir evaluation stage in Gaoqiao, Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(12): 1 483~1 494 (in Chinese with English abstract).
- 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): 1 583~1 597 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhen, Wu Fuli and Feng Rong. 2016. The distribution rule and its geological significance of Bauxite in Yanchang gasfield of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 36(6):



- 843~848 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haikun, Hu Peng, Jiang Junsheng, *et al.* 2021. Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources[J]. *Geology in China*, 48(1): 68~81 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qiang, Wang Xin, Le Xingfu, *et al.* 2018. The application of forward modeling to the study of thin dolomite reservoir[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42(5): 1 042~1 048 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yinde, Zhou Wen, Deng Kun, *et al.* 2014. Palaeogeomorphology and reservoir distribution of the Ordovician karstified carbonate rocks in the structurally-gentle Gaoqiao area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 757~767 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lihua. 2020. Genesis of the Late Carboniferous Karstic Bauxite Deposits in Western Henan, Southern North China Craton[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shuping and Wang Qicong. 2012. Characteristics of Majiagou palaeokarstic reservoir of Ordovician in daniudi gas field of Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 33(2): 170~174 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 包洪平, 何登发, 王前平, 等. 2022. 鄂尔多斯盆地四大古隆起演化及其油气控藏意义的差异[J]. *古地理学报*, 24(5): 951~969.
- 毕臣臣, 谢 玮, 王彦春, 等. 2020. 四川盆地页岩储层正演模拟地震响应特征[J]. *科学技术与工程*, 20(16): 6 350~6 356.
- 程豪华. 2022. 大牛地气田下石盒子组致密储层地震正演模拟研究[J]. *造纸装备及材料*, 51(3): 136~138.
- 崔 哲, 邢文军, 张 昊, 等. 2021. 临兴地区致密砂岩储层地震正演模型响应研究[J]. *科技和产业*, 21(12): 70~76.
- 邓 军, 王庆飞, 黄定华, 等. 2005. 鄂尔多斯盆地基底演化及其对盖层控制作用[J]. *地学前缘*, 12(3): 91~99.
- 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.
- 傅金华. 1991. 鄂尔多斯盆地古生界盖层封盖性研究[J]. *天然气工业*, 11(6): 6~11, 6.
- 付金华. 2023. 鄂尔多斯盆地太原组致密灰岩天然气成藏地质特征与勘探潜力[J]. *地学前缘*, 30(1): 20~29.
- 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. *中国石油勘探*, 24(4): 418~430.
- 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.
- 高 兰, 王登红, 熊晓云, 等. 2014. 中国铝矿成矿规律概要[J]. *地质学报*, 88(12): 2 284~2 295.
- 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.
- 兰叶芳, 邓秀芹, 程党性, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地华庆地区长6油层组砂岩成岩相及储层质量评价[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(1): 51~63.
- 李 军, 王禹诺, 赵靖舟, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界天然气富集规律[J]. *石油与天然气地质*, 37(2): 180~188.
- 李振宏, 胡健民. 2010. 鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J]. *石油与天然气地质*, 31(5): 640~647, 655.
- 刘全有, 金之钧, 王 毅, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究[J]. *岩石学报*, 28(3): 847~858.
- 刘文辉, 潘和平, 李健伟, 等. 2015. 鄂尔多斯盆地大牛地气田铝土质泥岩储层的测井评价[J]. *天然气工业*, 35(5): 24~30.
- 孟卫工, 李晓光, 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.
- 密文天, 陈安清, 张成弓, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地富县上三叠统长8段砂体分布及成因模式[J]. *科学技术与工程*, 16(29): 13~19.
- 南珩祥, 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.
- 王高平, 王震亮, 赵雪娇, 等. 2013. 鄂尔多斯盆地延安地区奥陶系风化壳古地貌恢复[J]. *沉积学报*, 31(4): 563~570.
- 王建民, 王佳媛, 沙建怀, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳岩溶古地貌特征及综合地质模型[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(2): 409~418.
- 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.
- 肖 笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 2014. 四川盆地南部中二叠统茅口组古岩溶地貌恢复及其石油地质意义[J]. *地质学报*, 88(10): 1 992~2 002.
- 闫海军, 何东博, 许文壮, 等. 2016. 古地貌恢复及对流体分布的控制作用——以鄂尔多斯盆地高桥区气藏评价阶段为例[J]. *石油学报*, 37(12): 1 483~1 494.
- 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): 1 583~1 597.
- 袁 珍, 武富礼, 封 蓉. 2016. 鄂尔多斯延长气田铝土岩分布规律及其地质意义[J]. *西安科技大学学报*, 36(6): 843~848.
- 张海坤, 胡 鹏, 姜军胜, 等. 2021. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. *中国地质*, 48(1): 68~81.
- 张 强, 王 鑫, 乐幸福, 等. 2018. 正演模拟技术在白云岩薄储层预测研究中的应用[J]. *物探与化探*, 42(5): 1 042~1 048.
- 张银德, 周 文, 邓 昆, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地高桥构造平缓地区奥陶系碳酸盐岩岩溶古地貌特征与储层分布[J]. *岩石学报*, 30(3): 757~767.
- 赵利华. 2020. 豫西晚石炭世喀斯特型铝土矿成因——以渑池仁村铝土矿为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 赵淑平, 王起琼. 2012. 鄂尔多斯盆地大牛地气田马家沟组古岩溶储集层特征[J]. *新疆石油地质*, 33(2): 170~174.