



## 华北东部晚古生代过渡相煤系地层低阻成因、控制因素与地质意义

侯中帅 梁钊 陈世悦

### 引用本文:

侯中帅, 梁钊, 陈世悦. 华北东部晚古生代过渡相煤系地层低阻成因、控制因素与地质意义[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 159–168.

HOU Zhongshuai, LIANG Zhao, CHEN Shiyue. Genesis, controlling factors and geological significance of low resistivity in Late Paleozoic transitional coal measures in Eastern North China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 159–168.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1531>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 鸡西盆地梨树井田煤系气储层特征及改造工艺探索

Exploration of coal-measure gas reservoir characteristics and reforming technology in Lishu Mine Field of Jixi Basin

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 127–137 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dd8fe2ab-7a67-4549-96b1-4df585e9bb4d>

#### 山西霍西地区煤系泥岩储层特征及生烃潜力评价

Reservoir characteristics and hydrocarbon generation potential evaluation of coal measures mudstone in Huoxi Area of Shanxi Province

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4c7b9401-f6c9-421a-8d7a-747e2928b8c3>

#### 煤系碳酸盐岩天然气勘探前景初探——以华北太原组为例

Preliminary study on exploration prospect of carbonate gas in coal measures: a case study of Taiyuan Formation in North China

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 138–149 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e32c8895-1dae-483a-9619-93404efd170e>

#### 任家庄井田晚古生代煤系战略性金属元素富集特征

Enrichment characteristics of strategic metal elements in Late Paleozoic coal-bearing sequences in Renjiazhuang Mine Field

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 65–78 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0146>

#### 深井低阻体电性源短偏移距瞬变电磁探测技术研究

Study on short offset transient electromagnetic detection technology for low-resistance electrical sources in deep mine

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ec26982b-1e3f-47a5-8723-c253a14a86b3>

#### 黔西海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征研究

Study on formation conditions and reservoir characteristics of marine-terrigeneous facies coal measures shale gas in western Guizhou

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 201–207 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ae54498-1e71-4bac-89c2-9ea791ea1b94>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

侯中帅, 梁 钊, 陈世悦. 华北东部晚古生代过渡相煤系地层低阻成因、控制因素与地质意义[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 159-168.

HOU Zhongshuai, LIANG Zhao, CHEN Shiyue. Genesis, controlling factors and geological significance of low resistivity in Late Paleozoic transitional coal measures in Eastern North China[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 159-168.

## 华北东部晚古生代过渡相煤系地层低阻成因、 控制因素与地质意义

侯中帅<sup>1,2</sup>, 梁 钊<sup>1</sup>, 陈世悦<sup>3</sup>

(1. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学 能源研究所, 河北 石家庄 050031;

3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

**摘 要:** 华北东部晚古生代过渡相煤系地层中低阻层发育, 明确其成因类型、控制因素以及地质意义, 可以充分揭示其中所包含的地质信息, 对于相关层系油气资源评价和勘探部署具有积极意义。本文以华北东部太原组和山西组中低阻层为研究对象, 综合运用岩心、薄片、扫描电镜、碳氧同位素和测录井资料, 围绕其成因类型、控制因素和地质意义开展研究。结果表明: 华北东部晚古生代过渡相煤系低阻层主要发育在太 1 段和山 2 段, 成因类型包括砂泥岩薄互层、高束缚水体积和发育导电矿物, 沉积作用和成岩作用控制了低阻的形成; 太 1 段低阻的成因为砂泥岩薄互层和高束缚水体积, 潮汐作用导致的潮汐成因层理和微细孔隙发育促进了障壁海岸背景下太 1 段低阻的形成, 山 2 段低阻的成因为菱铁矿的密集发育, 稳定的覆水还原环境和沉积有机物的成岩演化共同控制了三角洲背景下山 2 段低阻的形成; 太 1 段的低阻和高毛细管束缚水体积指示着潮坪沉积, 说明太原组自下而上为一个海退的过程, 是对早二叠世早期冈瓦纳冰川迅速扩张和全球海平面快速下降的响应, 山 2 段的低阻和高光电吸收截面指数指示着三角洲前缘沉积, 说明山西组由一期三角洲沉积组成。

**关键词:** 砂泥岩薄互层; 高束缚水体积; 导电矿物; 低阻; 煤系地层

中图分类号: P534

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)03-0159-10

### Genesis, controlling factors and geological significance of low resistivity in Late Paleozoic transitional coal measures in Eastern North China

HOU Zhongshuai<sup>1,2</sup>, LIANG Zhao<sup>1</sup>, CHEN Shiyue<sup>3</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Shijiazhuang 050031, China; 2. Energy Institute, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Low-resistance layers are common in Late Paleozoic transitional coal measures in eastern North China. To clarify their genesis types, controlling factors and geological significance can fully reveal the geological information contained therein, which is of positive significance for the evaluation and exploration deployment of oil and gas resources in the relevant layers. Taking the low-resistance layers in the Taiyuan and Shanxi Formation in eastern North China as research object, their genesis types, controlling factors and geological significance were investigated based on the comprehensive use of cores, thin sections, SEM, carbon and oxygen isotopes and logging data. The results show that low-resistance layers in the Late Paleozoic transitional coal measures in eastern North China are mainly developed in the Tai 1 Member and the Shan 2 Member, and the genesis types include thin interbedding of sandstone and mudstone, high bound water volume and the development of conductive minerals, sedimentation and diagenesis control the formation of the low-resistance layers. The low resistivity of the Tai 1 Member can be attributed to thin interbedding of sandstone and mudstone and high bound water volume, tidal

收稿日期: 2023-10-23

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1531

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究资助项目(QN2022060); 河北地质大学 2023 年国家预研资助项目(QN202307); 国家油气科技重大专项资助项目(2016ZX05006-007)

作者简介: 侯中帅(1990—), 男, 河北邢台人, 助理研究员, 博士。E-mail: houzs1990@163.com

通讯作者: 梁 钊(1986—), 男, 河北邢台人, 助理研究员, 博士。E-mail: liangzhao@hgu.edu.cn

stratification and abundant micro-pore caused by tidal action promote the formation of low resistance in Tai 1 member under the barrier coast background. The low resistivity of the Shan 2 Member can be attributed to the dense development of siderite, stably reducing environment in water column and diagenetic evolution of sedimentary organic matter jointly control the formation of low resistance in the Shan 2 Member under the delta background. The low resistivity and high capillary bound water volume of the Tai 1 Member indicates tidal flat deposition, suggesting that the sedimentary evolution of the Taiyuan Formation is a process of regression, which is in response to the rapid expansion of Gondwana glacier and rapid global sea level fall in the early stage of early Permian. The low resistivity and high photoelectric absorption cross-section index of the Shan 2 Member indicates deltaic front deposition, suggesting that the Shanxi Formation consists of one phase of delta deposition.

**Key words:** interbedding of sandstone and mudstone; high bound water volume; conductive mineral; abnormal low resistivity; coal measures

## 0 引言

华北东部晚古生代过渡相煤系地层分布广泛,在经历了中生代多期构造活动的叠加改造后,在其中仍发现多个“新生古储”和“古生古储”型的潜山油气藏<sup>[1-3]</sup>,展现出该层系巨大的油气勘探潜力和广阔的开发前景,其已成为我国东部油气增储上产和储量接替的现实领域。在相关的勘探开发过程中,发现该层系部分层段在测井上常表现出低阻的特征,不仅增加了烃源岩和储层解释的难度,同时也阻碍了油气资源评价和勘探部署的进行。研究表明,全世界不同油气田在勘探开发过程中普遍发现有低阻层段,其成因包括高黏土矿物含量、高束缚水体积、颗粒表面亲水、高阳离子交换量、导电矿物发育、过成熟有机质、砂泥岩薄互层、复杂的孔隙结构、高矿化度的地层水、油气充注不足和钻井液侵入等因素<sup>[4-12]</sup>,但相关研究主要集中在海相和陆相含油气层系中,针对过渡相煤系地层中低阻层段的研究相对较少,同时多数研究均侧重于低阻层段成因分析和定量评价解释,对于其发育的控制因素以及地质意义等方面的综合研究较为匮乏。

研究综合利用岩心、薄片、扫描电镜、碳氧同位素、常规测井、成像测井、核磁测井和录井等资料,分析华北东部晚古生代过渡相煤系地层中低阻层段的成因,明确其形成的控制因素与地质意义,不仅可以丰富和完善对低阻地层成因机制的认识,还能充分揭示其中所包含的地质信息,对于相关层系的油气资源评价和勘探部署也能起到借鉴作用。

## 1 区域地质概况

晚石炭-早二叠世,晚古生代冰川活动达到鼎盛期<sup>[13]</sup>,冈瓦纳大陆冰川的动态消长造成冰川型的全球海平面变化<sup>[14]</sup>,对低纬度近海盆地中的沉积作用有着深远影响。在此背景下,华北东部发育了大型

克拉通陆表海聚煤盆地<sup>[15]</sup>,形成的过渡相煤系地层自下而上包括太原组和山西组(图1),太原组主要发育障壁海岸相和碳酸盐岩台地相,其中障壁海岸相由潮坪、潮道、潟湖和障壁岛亚相组成,山西组则主要发育三角洲相,包括三角洲平原和前缘亚相<sup>[16]</sup>。

华北东部太原组的地层时代为晚石炭-早二叠世,岩性主要包括砂岩、凝灰岩、泥岩、碳酸盐岩和煤层(图1)。太原组底部以晋祠砂岩底面为与下伏本溪组的分界面,顶部以北岔沟砂岩底面为与上覆山西组的分界面(图1)。位于太原组中部的8+9号煤在整个华北板块稳定分布,其底面不仅为太1段和太2段的分界面,同时也是华北板块石炭系和二叠系的分界面<sup>[17]</sup>。8+9号煤的发育指示着一次区域性的泥炭沼泽化事件,是对石炭-二叠纪界线附近全球海平面快速下降的响应<sup>[18]</sup>。8+9号煤之上常直接发育保德灰岩或其等效海相泥岩层(图1),代表了一次事件性的海侵活动,是对早二叠世最早期的一次脉冲式的全球变暖事件的响应<sup>[18-20]</sup>。

山西组的地层时代为早二叠世,岩性主要包括砂岩、泥岩和煤层(图1),其顶部以骆驼脖子砂岩的底面与上覆下石盒子组分界。位于山西组中部的3号煤的底面将山西组分为山1段和山2段,在3号煤不发育的地区则以船窝砂岩的底面为山1段和山2段的分界面(图1)。

## 2 低阻层段的分布

为了能精确地分析地层的电阻率特征,本次研究统一采用能够反映原状地层电阻率的RT(真电阻率)和RD(深电阻率)曲线来开展相关工作。通过对测井曲线观察分析可知,华北东部晚古生代煤系地层中低阻层主要发育在太1段和山2段(图1)。太1段中低阻层主要分布在保德灰岩或其等效海相泥岩层之上,除了局部发育的钙质砂岩和煤层外,地层表现出整体低阻的特点,电阻率曲线呈现低平的形

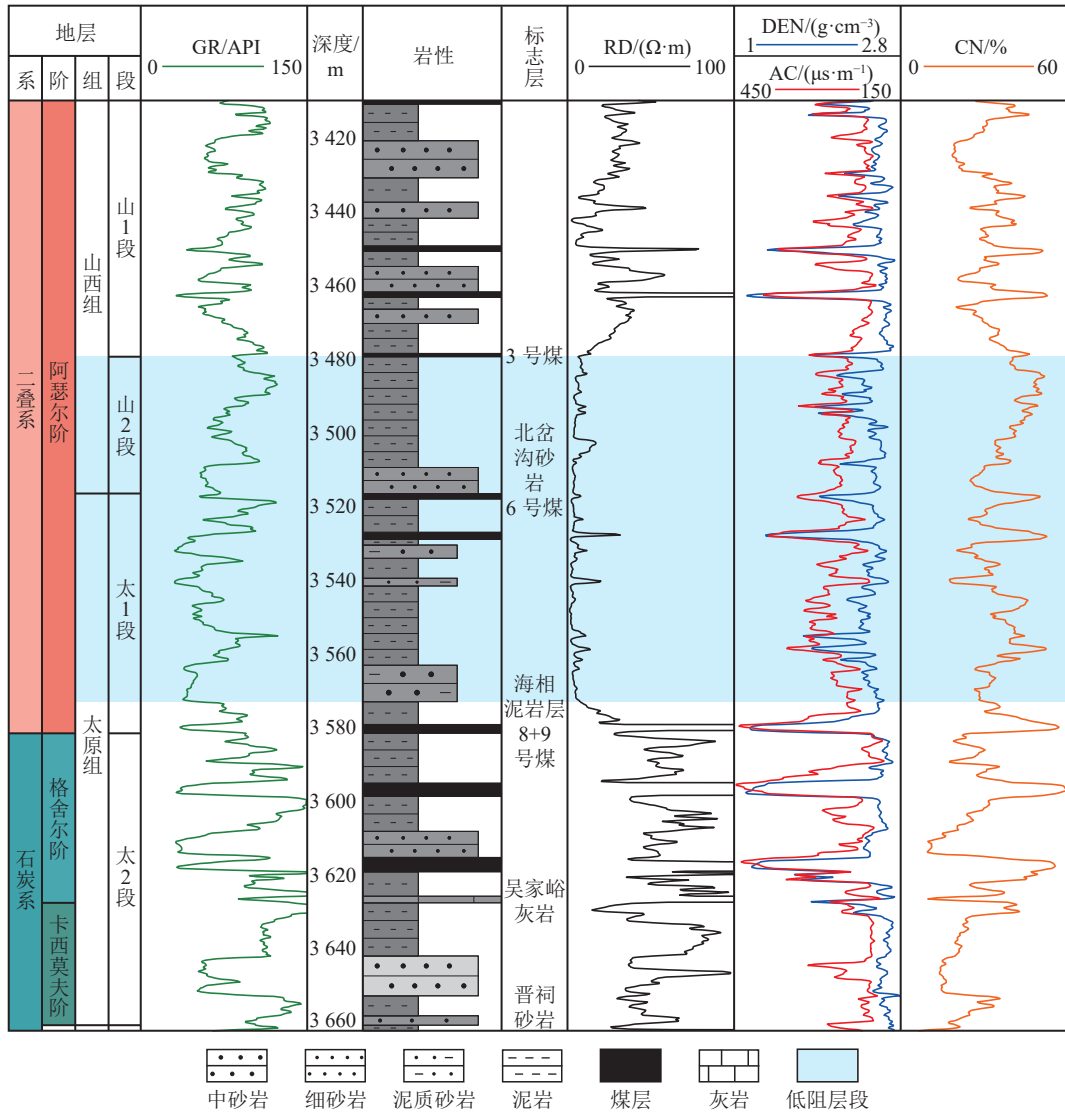


图1 华北东部晚古生代煤系地层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histogram of Late Paleozoic coal measures in Eastern North China

态,与太2段严重齿化的曲线形态对比明显(图1)。山2段中除煤层外整体具有低阻的特点,电阻率曲线形态与太1段低阻层类似,呈整体低平状,与山1段的电阻率曲线形态具有显著差异(图1)。通过观察相关层段的电阻率曲线数值,发现低阻层段的电阻率普遍不超过 $10 \Omega \cdot m$ 。

### 3 低阻层段成因

#### 3.1 潮汐成因的砂泥岩薄互层

通过岩心和薄片观察发现,华北东部太1段低阻层中潮汐成因层理极为发育,包括透镜状层理(图2a)、波状层理(图2b)、脉状层理(图2c)和潮汐韵律层理。不同类型层理中砂泥岩薄互层发育的尺度多样,可见泥岩中厚度约为 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 的砂质条带和透镜体频繁出现,形成透镜状层理(图2a、2d);

呈近似等厚状的砂质薄层和泥质薄层组成的频繁互层也较为发育,单个薄层的厚度在 $5 \sim 9 \text{ cm}$ ,砂质和泥质薄层的接触面呈缓波状,构成波状层理(图2b);同时也可见厚度 $2 \sim 8 \text{ cm}$ 的砂质薄层与厚度 $0.5 \sim 20 \text{ mm}$ 的泥质条带互层,构成脉状层理(图2c、图2e)。不同尺度的砂泥岩薄互层在垂向上频繁交替出现,使得太1段低阻层形成以潮汐成因砂泥岩薄互层为特点层系。

电阻率测井具有一定的纵向分辨率<sup>[21]</sup>,当砂泥岩薄互层中单层砂质层和泥质层的厚度都小于电阻率测井仪器的纵向分辨率时,所测量的视电阻率就不能反映地层的真实情况,通常测量的电阻率大大低于地层真实电阻率<sup>[22]</sup>。普通深探测电阻率测量仪的纵向分辨率为 $0.6 \text{ m}$ ,侧向测井以及阵列感应测井的纵向分辨率可以提高到 $0.3 \text{ m}$ <sup>[21,23]</sup>。华北东部太

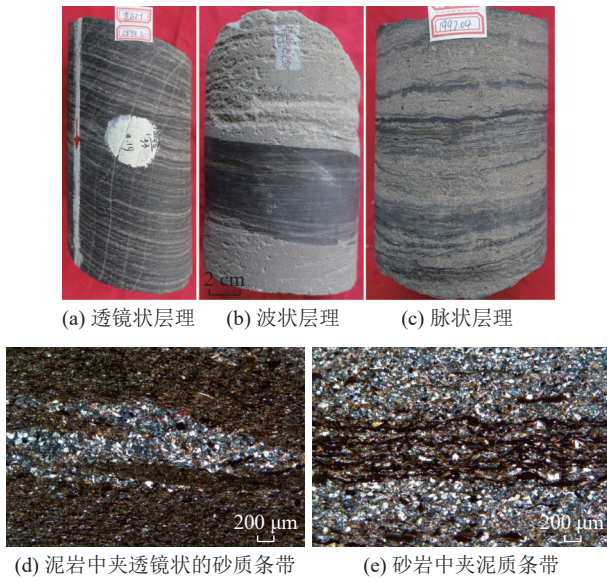


图2 太1段沉积与岩性特征

Fig.2 Sedimentary and lithological features of Tai 1 Member

1段低阻层中观察到的砂质和泥质薄层的厚度均远小于0.3 m,通常不超过0.1 m,造成其相对于太2段

表现出低阻的特征(图1、图3、图4),成像测井上其主要呈褐色,而太2段则主要呈橙红色和亮黄色(图3)。

### 3.2 高束缚水体积

束缚水是指在一定生产压差下储层孔隙中不可流动的水<sup>[24]</sup>。束缚水主要由毛细管束缚水和薄膜束缚水2部分组成,毛细管束缚水是由于毛细管压力的存在而形成的,主要滞留在微小毛细管中和颗粒接触处;薄膜束缚水指由于表面分子力的作用而滞留在亲水岩石孔壁上的薄膜残留水<sup>[25]</sup>,包括非黏土颗粒表面由于润湿性引起的吸附水和黏土颗粒吸附水<sup>[22]</sup>,由于黏土矿物的比表面积远大于其他非黏土矿物颗粒,故薄膜束缚水主要由黏土束缚水组成。束缚水具有较好的导电能力,束缚水体积越高时,其导电能力越强,从而降低地层的电阻率形成低阻层<sup>[24]</sup>。

通过对华北东部太原组进行电阻率测井和核磁测井联合分析可知,高束缚水体积段与低阻段同时出现在太1段的相同层位中,在垂向上表现出良好的耦合关系(图4),指示着高束缚水体积在研究区也

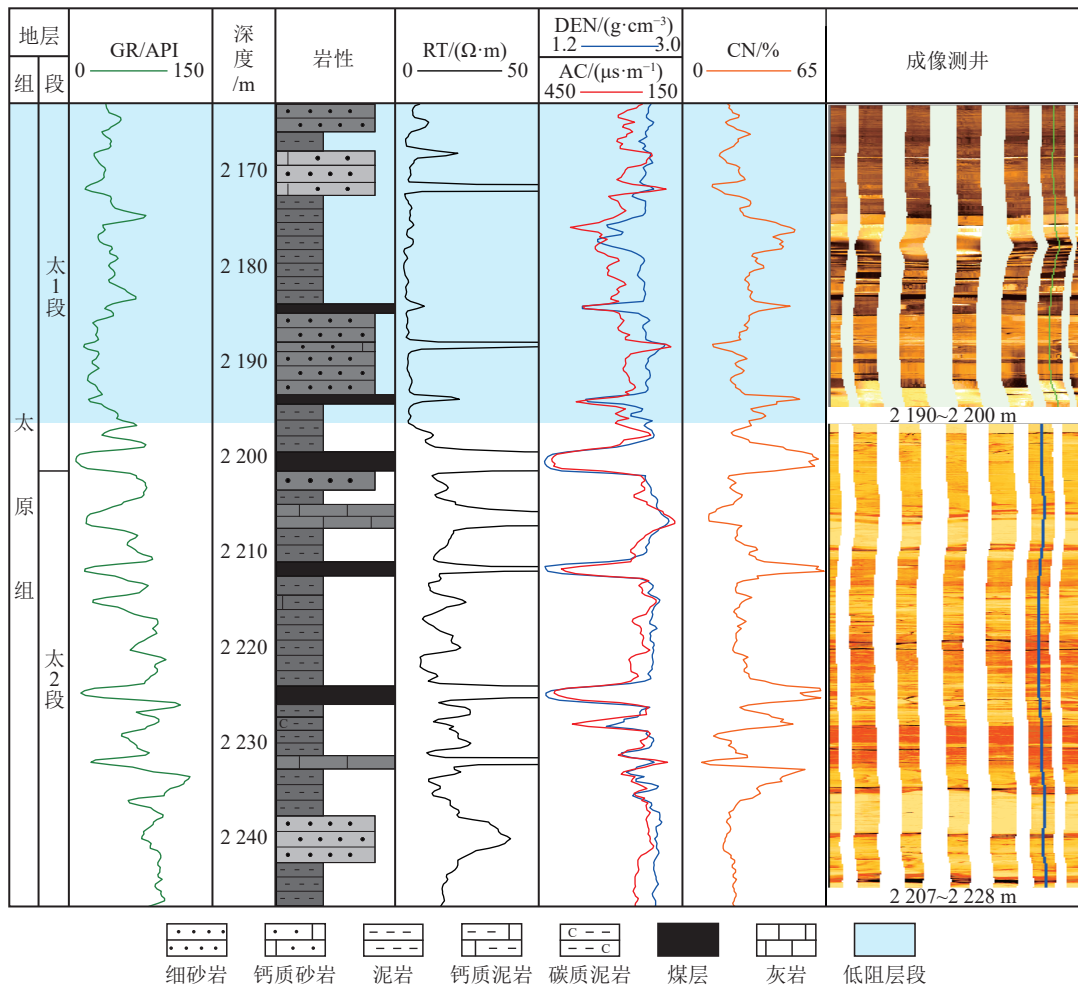


图3 太1段与太2段电阻率测井和成像测井特征对比

Fig.3 Comparison of resistivity and imaging logging between Tai 1 Member and Tai 2 Member

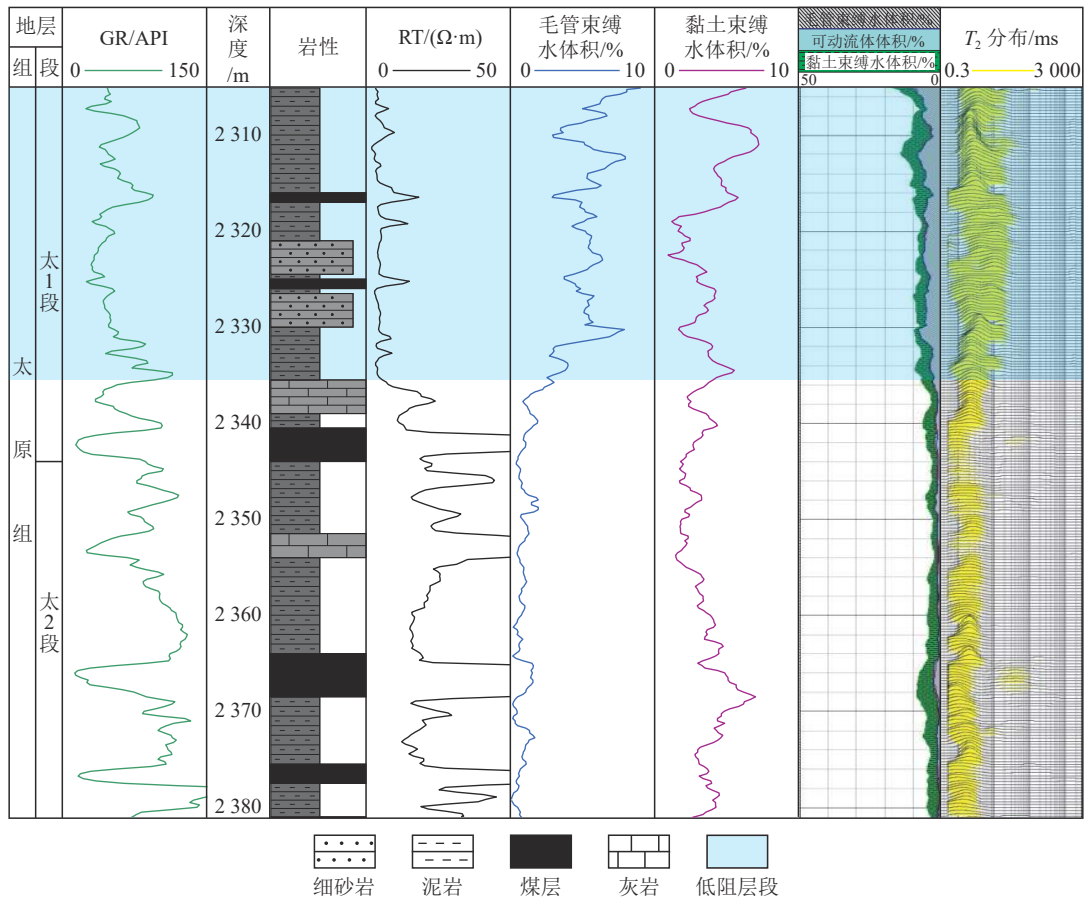


图4 太1段与太2段电阻率测井和核磁测井特征对比

Fig.4 Comparison of resistivity and NMR logging between Tai 1 Member and Tai 2 Member

是造成地层低阻的重要原因之一。通过核磁测井分析显示,太1段低阻层的毛细管束缚水体积明显高于太2段,而黏土束缚水体积变化不明显,毛细管束缚水体积的显著升高造成太1段低阻层的束缚水体积明显高于太2段(图4)。

太1段低阻层和太2段孔隙结构的非均质性决定了二者束缚水体积的差异。核磁共振 $T_2$ 谱显示太1段低阻层的 $T_2$ 谱分布范围明显宽于太2段,且 $T_2$ 谱的分布面积明显高于太2段,指示着太1段低阻层中孔隙度和孔径分布范围均高于太2段。同时太1段低阻层中 $T_2$ 谱形态以不对称的前高双峰型为主,指示着太1段低阻层中孔隙主要为微细孔。这些因素综合指示太1段低阻层相对于太2段具有更为发育的微细孔隙,使得太1段低阻层中毛细管束缚水体积明显高于太2段,最终导致太1段低阻层的形成。

### 3.3 导电矿物的发育

根据岩石物理研究表明,沉积岩中的长石、石英和方解石等矿物是通过矿物晶体的离子导电,导电性极其微弱<sup>[26]</sup>,但当地层中出现一些具有导电性的

矿物,且达到一定含量并呈层状或条带状分布时,就能够在地层中形成高导电路径,导致地层的电阻率显著降低。

菱铁矿是常见的具有较高导电性的矿物,其在华北东部晚古生代过渡相煤系地层中分布广泛,但在不同层段中的丰度和发育形式具有一定差异。通过岩心观察发现,华北东部晚古生代过渡相煤系地层中菱铁矿最发育的层段为山2段(图5)。在山2段的泥岩中,菱铁矿主要呈条带状产出,次为透镜状,颜色主要为褐红色(图5a、图5b)。条带状菱铁矿呈水平-近水平分布,厚度在0.5~4 cm(图5a、图5b);透镜状菱铁矿具压扁的椭圆状外形(图5b)。泥岩中的菱铁矿节理发育,与围岩形成鲜明对比(图5a、图5b)。在山2段的砂岩中,可见褐红色的菱铁矿颗粒呈弥散状分布,颗粒粒径在细砂级别,在局部可以发生明显富集(图5c),同时也可见褐红色的菱铁矿颗粒呈条带状分布在砂岩中(图5d)。菱铁矿在砂岩中的不均匀分布使砂岩显现出砂纹交错层理(图5c、图5d)。通过薄片观察发现,泥岩中的菱铁矿结核多由粉晶菱铁矿颗粒组成,其中常夹有少量粉砂级别的长石、

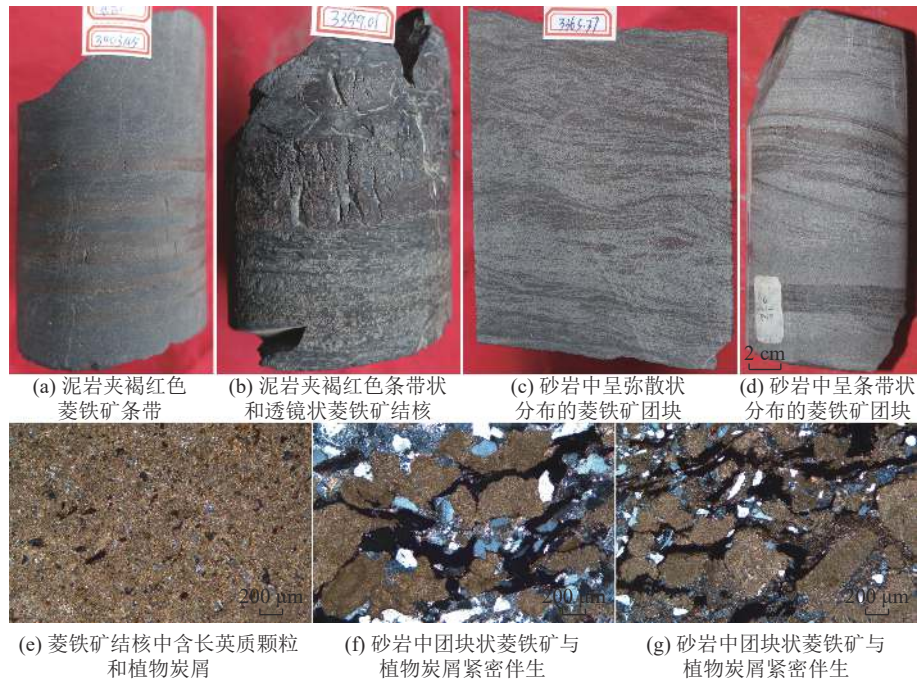


图5 山2段沉积与岩性特征

Fig.5 Sedimentary and lithological features of Shan 2 Member

石英等陆源碎屑物质,也可见黑色的植物炭屑(图5e);砂岩中的菱铁矿多以粉晶菱铁矿团块的形式产出,常与黑色的植物炭屑紧密共生(图5f、图5g)。

利用测井资料可以表征地层中菱铁矿的发育程度和分布特征。由于菱铁矿的PE值(光电吸收截面指数)为14.69~14.51,明显高于石英的1.81和长石的1.76~3.13<sup>[27]</sup>,当地层中菱铁矿大量发育时,会显著提高地层的PE值。研究区山1段的PE值主要分布在2.7~3.9,仅在局部层段表现出尖峰状的高值,使得曲线具有强烈齿化的特点(图6);山2段的PE值明显高于山1段,主要分布在3.1~4.7,且曲线总体的形态较为平缓光滑,呈微齿化的箱形(图6);这些特征指示着山2段中菱铁矿的发育程度明显高于山1段,且菱铁矿在地层中的分布较为均匀,而山1段中仅在局部层段中富集了菱铁矿。山2段中菱铁矿的大量发育同时也导致地层中陆源碎屑物质的含量受到稀释,自然伽马能谱测井中的TH(钍)含量可以指示地层中陆源碎屑输入的强度<sup>[28]</sup>,测井上可见山2段的TH含量受到稀释后明显低于山1段(图6)。

通过矿物岩石学和地球物理学的分析可知,山2段中菱铁矿的富集与低阻的发育表现出良好的耦合关系(图6),指示着菱铁矿的大量发育是造成山2段低阻的原因。山2段砂岩和泥岩中丰富的菱铁矿构建了一个高效的导电网络,最终导致该层段在测井上的电阻率明显低于山1段。

## 4 低阻层段发育的控制因素

综合华北东部晚古生代过渡相煤系地层低阻层段的地质特征与成因类型,认为低阻层段形成的主控因素包括沉积作用和成岩作用。

### 4.1 沉积作用

沉积作用控制了研究区地层中沉积构造、孔隙结构以及自生矿物的发育,为低阻层发育的首要控制因素。

通过岩心观察发现,太1段中发育了丰富的潮汐成因层理(图2a—图2c),指示着太1段主要形成于障壁海岸相中的潮坪亚相。潮坪环境中水动力条件发生频繁的周期性交替变化,在垂向上形成砂泥岩薄互层,从而控制了太1段低阻的形成。

由于潮坪沉积主要形成于波浪作用受到限制的地区,故其发育时的水动力条件较弱<sup>[29]</sup>,造成沉积过程中砂质和泥质的分异作用也随之衰退。薄片观察可见太1段潮坪沉积砂质薄层中常含有较多的泥质(图2e),同时由于泥质薄层在沉积期受到周期性潮汐水流作用的影响,其中常发育有较为丰富的细砂和粉砂级的陆源碎屑物质(图2d)。这种砂质和泥质的混杂沉积有利于微细孔隙的发育,通过扫描电镜观察可见太1段泥岩中陆源碎屑颗粒与黏土矿物接触界面附近常发育有管束状的微细孔隙(图7a),而太2段泥岩中砂质混杂的程度明显减弱(图7b),泥岩中微细孔隙的数量也随之降低(图4)。潮汐作用

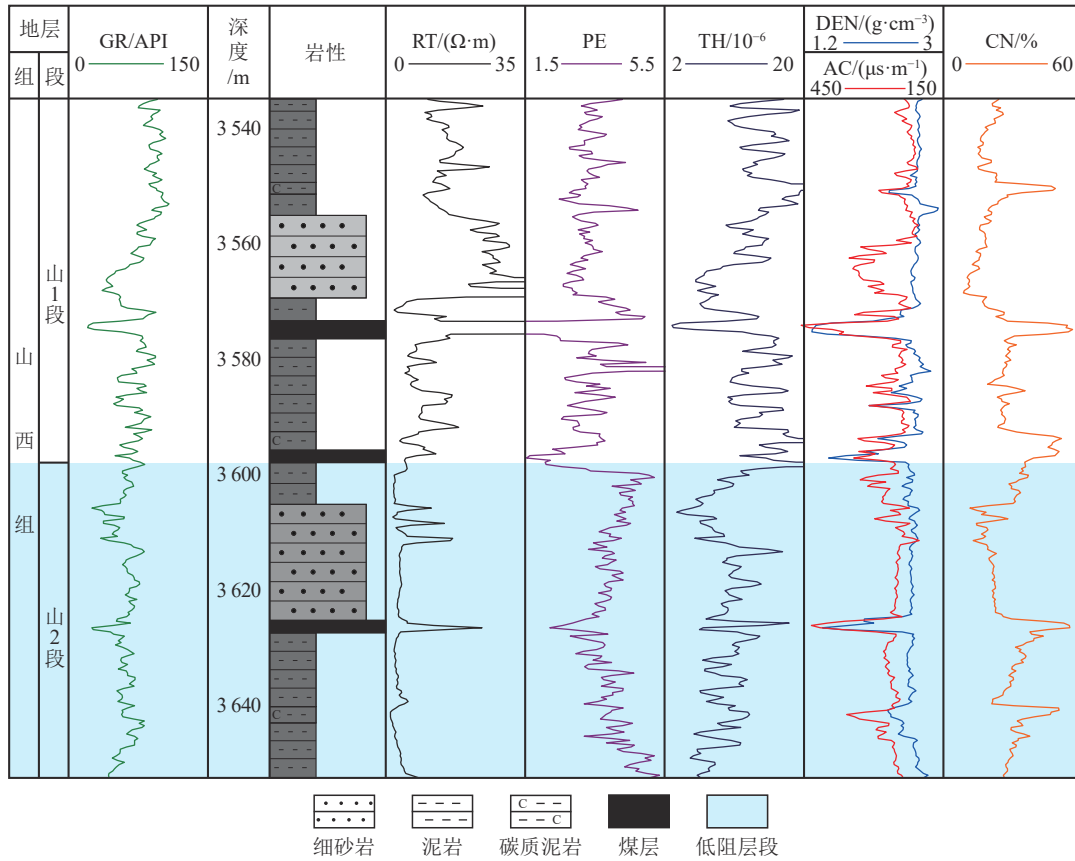
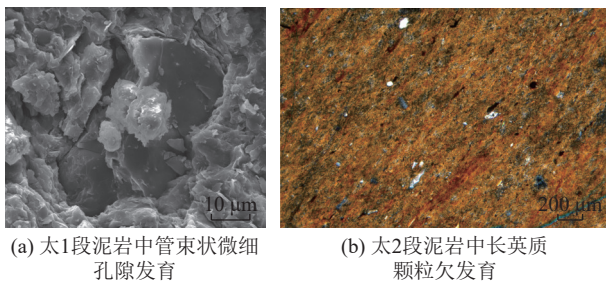


图 6 山 1 段与山 2 段测井响应特征对比

Fig.6 Comparison of logging responses between Shan 1 Member and Shan 2 Member



(a) 太 1 段泥岩中管束状微细孔隙发育

(b) 太 2 段泥岩中中长英质颗粒欠发育

图 7 太 1 段与太 2 段泥岩对比

Fig.7 Comparison of mudstones between Tai 1 Member and Tai 2 Member

导致的微细孔隙差异性发育造成太 1 段的束缚水体积明显高于太 2 段,从而促进了太 1 段低阻的形成。

山 2 段中菱铁矿的富集与均匀分布的形成需要稳定发育的弱还原环境,华北东部山西组沉积期主要发育陆表海背景下的浅水三角洲沉积<sup>[16]</sup>,其中三角洲前缘环境中发育稳定的覆水弱还原环境,可为菱铁矿的形成提供环境基础。通过薄片观察发现,无论在砂岩还是泥岩中,山 2 段中菱铁矿与植物炭屑均表现出紧密伴生的特征(图 5e—图 5g),指示着二者应该具有成因上的关联性。利用 4 块山 2 段菱铁矿样品开展碳氧同位素分析(表 1),将测试数据投

影到同位素判别图解中发现,同位素数据分布在海相碳酸盐岩和沉积有机物的过渡区域,同时也在沉积有机物脱羧基作用影响的区域内(图 8),指示着菱铁矿在形成过程中有沉积有机物的参与。三角洲前缘中沉积有机物的发育受沉积作用控制,在山西组沉积期,位于三角洲前缘上游位置的三角洲平原上植物发育繁盛,在局部地区还可以形成泥炭沼泽,为三角洲前缘中植物炭屑的发育提供了来源。三角洲平原上的植物残体进入分流河道中后随水流搬运至三角洲前缘沉积,为菱铁矿的发育提供了物质基础。综上可知,山西组浅水三角洲的沉积背景为山 2 段

表 1 山 2 段菱铁矿碳氧同位素数据

Table 1 Carbon and oxygen isotope data of siderite in Shan 2 Member

井号	深度/m	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$
CC1	1 584.8	-5.0	20.6
CC1	1 590.75	-4.6	21.6
DG1	3 403.6	-4.1	20.4
DG1	3 403.18	-4.9	20.1



菱铁矿的密集均匀发育提供了环境和物质基础,最终促进了山2段低阻的形成。

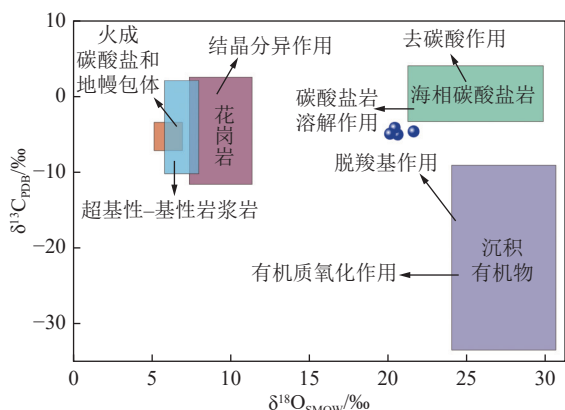


图8 山2段菱铁矿碳氧同位素特征

Fig.8 Carbon and oxygen isotope characteristics of siderite in Shan 2 Member

#### 4.2 成岩作用

山2段菱铁矿的形成与成岩作用密切相关。在同沉积期和早成岩阶段,在细菌作用的参与下,三角洲前缘中的沉积有机物不断发生分解,从沉积至埋藏过程中依次经历了异化铁还原细菌分解作用、硫酸盐还原细菌厌氧分解作用和甲烷菌厌氧发酵作用<sup>[30]</sup>,但不同生物化学过程中的产物具有较大差异。甲烷菌厌氧发酵作用产生的CO<sub>2</sub>具有较高的碳同位素值(δ<sup>13</sup>C>10‰)<sup>[31]</sup>,与菱铁矿碳同位素特征不符;硫酸盐还原细菌厌氧分解作用会产生一定量的黄铁矿,而通过岩心和薄片观察未在山2段中发现黄铁矿,说明其不是菱铁矿形成的主要控制因素;异化铁还原细菌在氧化分解沉积有机物的同时,还会将环境水体中的Fe<sup>3+</sup>还原成Fe<sup>2+</sup>,之后Fe<sup>2+</sup>与沉积有机物分解形成的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和环境水体中无机成因CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>结合形成菱铁矿<sup>[30]</sup>,其为控制菱铁矿发育的主要成岩因素。因此,同沉积期至早成岩阶段三角洲前缘沉积有机物的成岩演变对于菱铁矿的发育以及山2段低阻的形成起着决定性作用。

#### 5 低阻层段发育的地质意义

由于华北东部晚古生代煤系地层为盆地深部层系,在油气勘探过程中取心较少,故通过测井资料来判断沉积相类型是开展沉积特征研究的关键所在。研究区相关层系中低阻层段的发育与沉积作用密切相关,故利用其可以指示一些特定的沉积相类型,从而为沉积特征的研究提供有利条件。

华北东部太原组主要发育障壁海岸相,包括潮坪、潟湖、障壁岛和潮道亚相<sup>[16]</sup>。通过本次研究发

现,太原组中潮坪沉积作用造成地层中砂泥岩薄互层和微细孔隙的发育,导致了相关层段中电阻率的低值和毛细管束缚水体积的高值,其中潮汐弱水动力条件下砂泥混杂造成的高束缚水体积是潮坪沉积区别于障壁海岸背景中其他亚相的特征标志,故可以利用测井上的低电阻率与高毛细管束缚水体积的同时发育来指示潮坪沉积。研究区太1段在测井上总体具有低阻且高束缚水体积的特征(图4),指示着太1段主要发育潮坪沉积,而潟湖、障壁岛和潮道沉积则主要发育在太2段,说明太原组自下而上存在明显的优势沉积相的分异,其在沉积期总体为一个海侵强度减弱的海退过程,这也与早二叠世早期冈瓦纳大陆冰川活动增强导致全球海平面下降的特征相符<sup>[32]</sup>。

华北东部山西组发育三角洲相,主要由三角洲平原和前缘亚相组成<sup>[16]</sup>。通过本次研究发现,山西组中三角洲前缘稳定的覆水还原环境为菱铁矿的密集均匀发育提供了有利条件,三角洲前缘中沉积有机物的发育为菱铁矿的形成提供了物质基础,二者综合作用导致三角洲前缘中菱铁矿的相对富集。菱铁矿高导电性和高光电吸收截面指数的特征导致菱铁矿发育层段具有低电阻率和高PE的特点,故根据这两种测井响应特征综合分析可以指示三角洲前缘沉积。山2段总体具有低电阻率和高PE的特征(图6),指示着其为三角洲前缘沉积,而山1段则发育三角洲平原亚相。山西组自下而上的沉积演变指示了三角洲向盆地内部的进积作用,代表了一期三角洲的发育过程。

#### 6 结 论

1)华北东部晚古生代过渡相煤系地层中低阻层主要发育在太1段和山2段,成因类型包括3种:砂泥岩薄互层、高束缚水体积和导电矿物的发育。太1段低阻的成因为砂泥岩薄互层和高束缚水体积,山2段低阻的成因为导电矿物菱铁矿的大量发育。

2)华北东部晚古生代过渡相煤系地层中低阻的形成受沉积作用和成岩作用的控制。潮汐活动导致了太1段中砂泥岩薄互层和高束缚水体积的发育;三角洲前缘环境中的覆水弱还原条件和植物炭屑的发育为山2段中菱铁矿的形成提供了环境和物质基础。同生期至早成岩阶段三角洲前缘中植物炭屑的分解作用对菱铁矿的发育和山2段低阻的形成起着决定性作用。

3)华北东部太1段的低阻和高束缚水体积的同

时发育可以用来指示潮坪沉积,反映了太原组自下而上总体为一个海退的过程,是对早二叠世早期冈瓦纳大陆冰川的迅速扩张和全球海平面快速下降的响应。山2段低阻和高PE的同时发育指示着其主要形成于三角前缘环境,与山1段构成一期三角洲的沉积序列。

#### 参考文献(References):

- [1] 侯中帅,周立宏,陈世悦,等. 大港探区上古生界储层类型与控制因素[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 1021-1037.  
HOU Zhongshuai, ZHOU Lihong, CHEN Shiyue, *et al.* Reservoir types and controlling factors of Upper Paleozoic in Dagang exploration area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 47(5): 1021-1037.
- [2] 金凤鸣,王鑫,李宏军,等. 渤海湾盆地黄骅坳陷乌马营潜山内幕原生气藏形成特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 521-529.  
JIN Fengming, WANG Xin, LI Hongjun, *et al.* Formation of the primary petroleum reservoir in Wumaying inner buried-hill of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 521-529.
- [3] 孙沛沛,操应长,周立宏,等. 大港探区扣村潜山带二叠系优质砂岩储层成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 12-24.  
SUN Peipei, CAO Yingchang, ZHOU Lihong, *et al.* Genetic mechanisms of high quality sandstones reservoirs in Permian of Koucun buried hill, Dagang exploration area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(2): 12-24.
- [4] 游瑜春,刘伟兴,谭振华,等. 苏北盆地溱潼凹陷低阻油气层成因研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(6): 941-944.  
YOU Yuchun, LIU Weixing, TAN Zhenhua, *et al.* Genesis of Low-resistivity Reservoirs in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(6): 941-944.
- [5] 廖明光,苏崇华,唐洪,等. 砂泥岩薄互层低阻油层地质成因—以珠江口盆地A油藏M1油组为例[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(2): 154-157.  
LIAO Mingguang, SU Chonghua, TANG Hong, *et al.* Geological Genesis of Low Resistivity Formation with Thin Sand-Shale Interlayer—An example from M1 oil measure of A reservoir in Pearl River Mouth basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(2): 154-157.
- [6] 蒋裕强,张春,谭勇,等. 川东南地区须家河组低阻气层成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 124-132.  
JIANG Yuqiang, ZHANG Chun, TAN Yong, *et al.* Genetic pattern of low-resistivity gas reservoirs in the Xujiache Formation, Southeastern Sichuan Province[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 124-132.
- [7] 杨小兵,张树东,张志刚,等. 低阻页岩气储层的测井解释评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 692-699.  
YANG Xiaobing, ZHANG Shudong, ZHANG Zhigang, *et al.* Logging interpretation and evaluation of low resistivity shale gas reservoirs[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(6): 692-699.
- [8] 杨锐祥,王向公,白松涛,等. Oriente盆地海相低阻油层成因机理及测井评价方法[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 84-90.  
YANG Ruixiang, WANG Xiangong, BAI Songtao, *et al.* Formation mechanism and log evaluation methods of marine low resistivity reservoir in Oriente Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(6): 84-90.
- [9] 韩如冰,田昌炳,马思,等. 苏丹穆格拉德盆地福拉凹陷AG1层低阻油层形成机制及其控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 31-40.  
HAN Rubing, TIAN Changbing, MA Si, *et al.* Formation mechanisms and controlling factors of low resistivity pays of AG1 layer in Fula Sag, Muglad Basin, Sudan[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(3): 31-40.
- [10] 孙建孟,熊铸,罗红,等. 扬子地区下古生界页岩气储层低阻成因分析及测井评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(5): 47-56.  
SUN Jianmeng, XIONG Zhu, LUO Hong, *et al.* Mechanism analysis and logging evaluation of low resistivity in lower Paleozoic shale gas reservoirs of Yangtze region[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(5): 47-56.
- [11] 翟利华,林艳波,秦智,等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长4+5低阻油层成因及识别方法[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(2): 50-57.  
ZHAI Lihua, LIN Yanbo, QIN Zhi, *et al.* Genetic mechanism and identification methods of low resistivity oil reservoirs in Chang4+5 member of Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(2): 50-57.
- [12] 郑华,李云鹏,徐锦绣,等. 渤海海域低阻油层地质成因机理与识别: 以辽东湾旅大A油田为例[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 22-28.  
ZHENG Hua, LI Yunpeng, XU Jinxiu, *et al.* Geological genetic mechanism and identification of low resistivity reservoir in Bohai sea area: a case study of LD-A Oilfield in Liaodong Bay[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(1): 22-28.
- [13] FIELDING C R, FRANK T D, BIRGENHEIER L P. A revised, late Palaeozoic glacial time-space framework for eastern Australia, and comparisons with other regions and events[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 236: 104263.
- [14] RYGEL M C, FIELDING C R, FRANK T D, *et al.* The magnitude of late Paleozoic glacioeustatic fluctuations: a synthesis[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2008, 78: 500-511.
- [15] 鲁静,邵龙义,汪浩,等. 低可容空间河流三角洲沉积层序与聚煤模式[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2): 268-275.  
LU Jing, SHAO Longyi, WANG Hao, *et al.* Sequence stratigraphy and coal accumulation of fluvial delta under low accommodation conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 268-275.
- [16] 侯中帅,陈世悦,郭宇鑫,等. 华北中南部博山地区上古生界沉

- 积相与沉积演化特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 731-742.
- HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, GUO Yuxin, *et al.* Sedimentary facies and their evolution characteristics of Upper Paleozoic in Zibo Boshan Area, central and southern region of North China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(4): 731-742.
- [17] 李明培, 邵龙义, 李智学, 等. 华北地区石炭-二叠纪下煤组聚煤期岩相古地理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2399-2410.
- LI Mingpei, SHAO Longyi, LI Zhixue, *et al.* Lithofacies palaeogeography of lower coal group accumulation period of Carboniferous Permian in North China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2399-2410.
- [18] HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, LIANG Zhao. Sedimentary features and sequence stratigraphy of the successions around the Carboniferous-Permian boundary in the Ordos Basin: links to glacial and volcanic impacts[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 13(3): 358-383.
- [19] YANG J H, CAWOOD P A, MONTAÑEZ I P, *et al.* Enhanced continental weathering and large igneous province induced climate warming at the Permo-Carboniferous transition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 534: 116074.
- [20] LYU, D W, WANG L J, ISBELL J L, *et al.* Records of chemical weathering and volcanism linked to paleoclimate transition during the Late Paleozoic Icehouse[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 217: 103934.
- [21] 赖锦, 庞小娇, 赵鑫, 等. 测井地质学研究中的典型误区与科学思维[J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 31-44.
- LAI Jin, PANG Xiaojiao, ZHAO Xin, *et al.* Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 31-44.
- [22] 孙宝佃, 周灿灿, 赵建武. 油气层测井识别与评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014, 326-397.
- SUN Baodian, ZHOU Cancan, ZHAO Jianhu. Logging identification and evaluation of oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014, 326-397.
- [23] 中国石油勘探与生产公司. 低阻油气藏测井评价技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009, 14-17.
- PETROCHINA EXPLORATION and PRODUCTION COMPANY. Logging evaluation technology and application of low resistivity reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009, 14-17.
- [24] 赵洪, 党彝, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长2低阻油层成因机理[J]. 石油实验地质, 2009, 31(6): 588-592.
- ZHAO Hong, DANG Ben, YAO Jingli, *et al.* Forming mechanism of Chang 2 low resistivity oil layer, Yanchang Formation, Jiyuan region, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(6): 588-592.
- [25] 高楚桥. 复杂储层测井评价方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 71.
- GAO Chuqiao. Well logging evaluation of complex reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 71.
- [26] 周杨, 陈服军, 陈桂珠, 等. 高密度电阻率法测深原理及应用实例[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012: 8-27.
- ZHOU Yang, CHEN Fujun, CHEN Guizhu, *et al.* Principle and application examples of high-density resistivity sounding[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2012: 8-27.
- [27] 斯伦贝谢测井公司. 测井解释常用岩石矿物手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 16-118.
- SCHLUMBERGER. Commonly used Manual for logging interpretation of rocks and minerals[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 16-118.
- [28] CHEN Chao, MU Chuanlong, ZHOU Kenken, *et al.* The geochemical characteristics and factors controlling the organic matter accumulation of the Late Ordovician-Early Silurian black shale in the Upper Yangtze Basin, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 159-175.
- [29] 袁静, 王冠民, 徐方建, 等. 沉积学原理[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 226-227.
- YUAN Jin, WANG Guanmin, XU Fangjian, *et al.* Principles of Sedimentology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 226-227.
- [30] WANG Donong, MAO Qiang, LIU Keyu, *et al.* Genetic mechanism of Carboniferous-Permian coal measures siderite nodules in an epicontinental sea basin-An example from the Zibo area in North China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 154: 105254.
- [31] ANTOSHKINA A I, RYABINKINA N N, VALYAEVA O V. Genesis of siderite nodules from the lower carboniferous terrigenous sequence in the Subpolar Urals[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2017, 52(2): 111-124.
- [32] SHI G R, CHEN Z Q. Lower Permian oncolites from South China: Implications for equatorial sea-level responses to Late Palaeozoic Gondwanan glaciation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26: 424-436.