



## 沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应

侯晓伟 张津铭 朱炎铭 周官群 陈陆望 王颖晋 屈晓荣

### 引用本文:

侯晓伟, 张津铭, 朱炎铭, 等. 沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 141-151.

HOU Xiaowei, ZHANG Jinming, ZHU Yanming. Distribution and geological controls on gas-bearing section of coal measure gases in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 141-151.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2081>

### 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>

#### 六盘水地区煤层含气性地质特征及差异成因

Difference characteristics and main controlling factors in gas-bearing of coal seams in Liupanshui Area

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 122-130 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ecb6a475-7c24-44bc-a4b3-dfcc8d3bcab5>

#### 沁水盆地中南部太原组煤系页岩孔隙结构特征

Pore structure characteristics of Taiyuan Formation coal measure shale in south central Qinshui Basin

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 184-192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/24e9c1de-0717-45e7-a086-2db58bcf930c>

#### 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>

#### 沁水盆地郑庄区块煤层气水平井钻井体系优化

Optimization of drilling system for CBM horizontal wells in Zhengzhuang Block of Qinshui Basin

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 118-126 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0670>

#### 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

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

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 159-168 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1531>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

侯晓伟, 张津铭, 朱炎铭, 等. 沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 141-151.  
HOU Xiaowei, ZHANG Jinming, ZHU Yanming, *et al.* Distribution and geological controls on gas-bearing section of coal measure gases in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 141-151.

## 沁水盆地煤系气含气层段发育特征及其地质控制效应

侯晓伟<sup>1</sup>, 张津铭<sup>1</sup>, 朱炎铭<sup>2</sup>, 周官群<sup>1</sup>, 陈陆望<sup>1</sup>, 王颖晋<sup>1</sup>, 屈晓荣<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008;  
3. 山西省煤炭地质勘查研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 为揭示煤系气共生成藏特征及其地质控制效应, 以沁水盆地石炭-二叠纪太原组-山西组煤系为研究对象, 通过资料收集、现场和室内试验测试、理论分析等综合研究手段, 厘定了煤系气储层空间叠置特征, 定量表征了煤系气储层多尺度储集空间, 判识了煤系气共生含气层段空间发育规律, 明确了煤系气共生成藏类型及其地质控制效应。结果表明, 海陆交互沉积的岩性多样、旋回性叠置煤系, 具备了煤系气共生成藏基础及合探共采条件, 目标煤系从“无机储层”至“混合储层”到“有机储层”, 有机质丰度逐渐增高, 形成一个不存在自然界限的连续岩性序列。煤系气共生含气层段垂向上呈间隔式分布, 共生气藏组合类型包括煤系页岩气主导型共生气藏、煤层气主导型共生气藏和多元型煤系气共生气藏。煤系气共生含气层段地质控制效应显著, 煤层发育程度决定了共生含气层段的形成基础; 埋藏条件造就了优势气藏类型的差异性, 煤层固气能力更强, 更易形成独立煤层气藏, 而煤系页岩气和煤系气砂岩气成藏条件相对更为苛刻, 对地质基础与时空配置条件要求极高; 储层物性特征限制了煤系页岩气和煤系砂岩气的成藏潜力。研究成果有助于今后进一步深入开展煤系气共生成藏机理研究, 系统完善煤系气共探合采评价体系。

**关键词:** 煤系气; 含气层段; 共生气藏组合类型; 地质控制效应; 时空配置条件

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)S2-0141-11

### Distribution and geological controls on gas-bearing section of coal measure gases in Qinshui Basin

HOU Xiaowei<sup>1</sup>, ZHANG Jinming<sup>1</sup>, ZHU Yanming<sup>2</sup>, ZHOU Guanqun<sup>1</sup>, CHEN Luwang<sup>1</sup>,  
WANG Yingjin<sup>1</sup>, QU Xiaorong<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Resources & Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Shanxi Coal Geology Surveys Research Institute, Taiyuan 300006, China)

**Abstract:** To study the characteristics of coupled accumulation and determine the geological control effects on coal measures gases (CMGs), coal measures of the Carboniferous-Permian Taiyuan and Shanxi formations at Qinshui Basin were selected as the target formations. Various methods including field data collection, field/lab measurements, and theoretical analyses were applied to described the spatial superposition of CMG reservoirs, quantitatively determine the multi-scale pore system, identify the spatial development pattern of CMGs gas-bearing section, and clarify the types of CMGs coupled accumulation and geological controls. Results show that coal measures deposited at the unique marine-terrestrial depositional environment was characterized by lithological diversity and cyclic superposition which was served as the potential basics for coupled accumulation and co-exploration/development of CMGs. The abundance of the organic matter gradually increased from the “inorganic reservoir” to “organic reservoir”, forming a continuous rock sequence without a natural boundary in target coal measures. Gas-bearing sections was characterized by a vertically intermittent distribution and the dominant coupled

收稿日期: 2022-12-01 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2081

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42102208); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGTTB0236); 安徽省高校协同创新资助项目(GXXT-2021-018)

作者简介: 侯晓伟(1990—), 男, 山西灵丘人, 讲师, 博士。E-mail: xwhou@hfut.edu.cn

accumulation assemblages can be subdivided into: shale gas dominated coupled accumulation type, CBM dominated coupled accumulation type, and multiple CMGs coupled accumulation type. Obviously, the effective gas-bearing sections need the appropriate combination of source, reservoir and cap. Coal reservoirs directly controlled the distribution of effective gas-bearing section. Reservoir burial conditions restricted the possibility of an effective gas-bearing section. Moreover, coals were believed to be more favorable for independent coalbed methane accumulation, whereas shale gas and sandstone gas required extremely strict geological, spatial and temporal conditions. Additionally, both organic-inorganic fabric and physical characteristics limited the potential of effective gas-bearing sections. Inspired by the findings of this study, further studies on the coupled accumulation mechanism and the co-exploration evaluation system of CMGs should be continuously conducted.

**Key words:** coal measure gases; gas-bearing section; gas co-existing combination; geological controls; spatiotemporal condition

## 0 引言

我国天然气资源消耗大、对外依存度高,随着能源需求的日益增长,常规天然气资源供不应求现象日益彰显<sup>[1]</sup>。高效开发非常规天然气是增强我国能源自主保障能力与优化能源结构的重要途径<sup>[2]</sup>。煤系气是指发育于煤系中的非常规天然气,主要包括煤层气、煤系砂岩气和煤系页岩气,具有平面上分布范围重合,空间上存在层间联系的共生成藏特征<sup>[2-7]</sup>。我国煤系气资源禀赋、分布范围广,其资源量占全国天然气资源总量的60%以上,具备得天独厚的共生成藏基础和共探合采条件<sup>[8-11]</sup>,深部煤系气共探合采是未来非常规天然气增储上产的有效途径<sup>[1,12-13]</sup>。

全球煤系气共探合采以美国皮森斯盆地、粉河盆地和澳大利亚苏拉特盆地为成功先例<sup>[14-15]</sup>。我国现阶段主要从独立气藏角度对浅部煤层气进行勘探开发,特殊的高地温、高地应力、高储层压力地质环境,导致深部煤层气开发过程中表现出储层改造难、产能衰减严重的劣象<sup>[16-18]</sup>。深部煤系气共探合采尚处于探索阶段,而含气层段的优选是煤系气共探合采的前提和关键环节,直接决定了生产井的排采周期和合采效果,是制约煤系气合采的主要高产瓶颈<sup>[6,19]</sup>。实际地质条件下,并非所有的煤系层段均为含气层段,同时煤系气储层宏观平面非均质性显著,在不同区块的层段内部岩性组合很难固定,不同含气层段中煤系气共生成藏组合类型各异,增大了甜点层段优选的难度<sup>[10,19-25]</sup>。因此,共生含气层段的判识及优选是构建和完善煤系气共探合采评价体系的基础,亟需深入开展煤系气共生含气层段空间发育规律判识及其地质控制效应的研究。鉴于此,笔者以沁水盆地太原组-山西组煤系为研究对象,判识煤系气共生含气层段空间发育规律及其地质控制效应,为深化煤系气共生成藏机理和优化煤系气共探合采评价体系提供理论支撑和实践指导。

## 1 区域地质背景

沁水盆地位于华北断块区吕梁-太行山断块内,是华北晚古生代成煤期之后由断块差异性抬升形成的山间断陷盆地,主体呈NNE-SSW向的大型复向斜构造形态,内部构造线主要为NNE向,且以开阔的短轴褶曲和高角度正断层为主<sup>[26]</sup>,如图1a所示。沁水盆地的构造演化大体上经历了3个阶段<sup>[27]</sup>:①盆地构造基底形成阶段。自太古代以来至古生代早期,经历了结晶基底形成和沉积盖层沉积2个阶段,受加里东运动影响,在中奥陶世之后整体抬升,构成石炭-二叠纪煤系的沉积基底;②含煤盆地泥炭堆积阶段。自古生代晚期以来,转变为海陆交互相聚煤盆地,发育了一套广泛分布的煤系,随后连续稳定沉降,接受上覆沉积,并构成了石炭-二叠纪煤系的上覆盖层;③构造抬升剥蚀阶段。受多期构造运动的影响,特别是在燕山运动和喜山运动期间,经受强烈的挤压抬升剥蚀作用,造成厚达数千米的地层损失,由构造活动所导致的褶皱及断裂造成区域及局部构造裂隙广泛发育,对区域广覆式煤系气共生成藏潜力产生了巨大影响<sup>[8]</sup>。

煤系作为煤系气共生成藏的唯一层系,气源源自层内烃源岩。煤和富有机质煤系泥页岩作为煤系烃源岩,区域稳定连续发育是煤系气共生成藏的前提条件。因此,煤系烃源岩优势发育层位为煤系气共生成藏的优势层位<sup>[28]</sup>。沁水盆地煤系主要发育于石炭-二叠纪的太原组和山西组(图1b、1c),为本次研究的目标煤系。近年来,沁水盆地开展了煤系气共探合采先导性实践,在中东部榆社-武乡区块和南西部古县区块建立了煤系气共探合采示范区(图1a),先后施工了18口煤系气共探合采示范井和参数井。总体而言,研究区地质研究程度高,资料丰富完整,研究力度大,开展了一系列基础理论研究和勘探开发试验,取得了突破性的进展。目标煤系形成于海陆交互相沉积环境,沉积环境动荡不稳定的特殊性



1c)。2号煤、3号煤、8号煤、12号煤和15号煤厚度相对较大,为\*\*主力煤层,其中3号煤和15号煤全区连续稳定发育,厚度可观,总体介于2~6 m。

## 2 资料收集及研究方案

系统收集区内煤田勘探钻孔及煤系气合探共采参数井/示范井相关资料,分析区内煤系气储层空间发育特征及叠置关系;采集不同层段各类岩性储层样品开展有机质丰度(TOC)测试、X射线衍射(XRD)测试定量获取不同类型储层有机-无机组分含量,厘定不同煤系气储层岩性序列;联合高压压汞试验、低温液氮和二氧化碳吸附试验测试对不同层段、各类煤系气储层样品多尺度孔裂隙结构进行定量表征;系统收集区内典型井气测录井资料和现场解吸气试验数据,进而判识区内煤系气共生含气层段空间发育规律并划分煤系气共生含气层组合类型,结合气体组分含量测试结果分析区内煤系气共生含气层段的地质控制效应。

## 3 结果及探讨

### 3.1 煤系气储层岩性序列连续性

TOC含量测试结果表明,煤作为聚集有机质,有机质丰度极高(>50%),生烃潜力大,为共生煤系气提供了充足的气源保障。煤系泥页岩TOC含量变化范围极大,介于0.02%~47.45%,主要分布于1%~2%和2%~5%等2个区间,源岩类型整体属于较好-好型,为共生煤系气成藏提供了气源补充,同时为独立煤系页岩气藏提供了气源基础。我国页岩气开发主要针对南方海相页岩龙马溪组,其主要沉积于浅海陆棚沉积环境,水体较深,海水能量较低,沉积厚度大,TOC含量较高且具有一定的垂向分布特征。下段深水陆棚相沉积相较于上部浅水陆棚相沉积处于相对更快速的沉积条件和封闭性较好的还原环境,导致TOC含量与埋深间普遍呈正相关关系。与海相页岩不同,煤系泥页岩垂向上连续性差、不同层段呈间隔式展布,TOC含量与埋深间无规律性变化。垂向上与煤层临近沉积的炭质泥页岩和暗色泥页岩是富有机质泥页岩沉积的优势层段(图1b)。此外,煤系砂岩中亦含有一定量的有机质,TOC含量甚至可达1.94%。究其原因,认为煤系砂岩沉积过程中在河道同生/准同生冲刷背景下与其邻层沉积的烃源岩层中的有机组分易于脱落并呈现颗粒状碎屑夹杂于煤系砂岩沉积产物中,导致煤系砂岩表现出具

有一定有机质丰度的特殊岩石学特征<sup>[29]</sup>,其间发育的有机质微孔为吸附气的赋存提供了可能,致使煤系砂岩气赋存规律和成藏机理有别于常规砂岩气<sup>[30]</sup>。

XRD测试结果表明,煤系泥页岩和煤系砂岩无机组分均以黏土矿物和石英为主(图2)。因此,有机质、黏土矿物和石英为煤系气储层的主要代表组分。基于有机质丰度、黏土矿物和石英相对含量获得了煤系气储层代表性岩性连续图谱(图2)。其中煤和煤系砂岩分布范围相对集中且局限,位于岩性连续图谱边缘,物质组别以有机质和石英占绝对优势。煤系泥页岩分布范围较为离散,虽然其间含有一定量的有机质,但仍以无机组分黏土矿物和石英为主。然而,煤系储层代表性岩性连续图谱中的相对位置并未见严格的界限,煤系泥页岩和煤系砂岩在代表性岩性连续图谱中重叠范围较大。此外,高灰分煤层中无机组分发育,而炭质泥页岩中有机质含量较高,导致炭质泥页岩有向煤层过渡的趋向性。显然,煤系中“粗-细砂岩→粉砂岩→泥质砂岩→砂质泥页岩→泥页岩→炭质泥页岩→煤”从“无机储层”至“混合储层”到“有机储层”,有机质丰度逐渐增高,形成一个不存在自然界限的连续岩性序列。

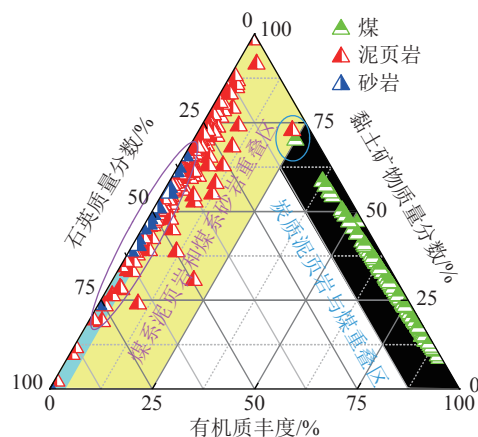


图2 煤系气储层有机-无机组分连续性评价图谱

Fig.2 Precession diagram of organic-inorganic fabric for coal measures

### 3.2 煤系气共生含气层段空间发育特征及共生成藏类型

#### 3.2.1 煤系气共生含气层段空间发育规律

受综合地质因素的制约,实际地质条件下并非所有的煤系层段均为煤系气共生含气层段,共生含气层段需要兼具优势的生、储、盖组合配置<sup>[8,20]</sup>。通过剖析沁水盆地煤系气共探合采示范井和参数井含气性实测数据及气测录井解译结果,发现煤系气共生含气层段主要发育于区内连续性较强、厚度较大

的主力煤层及其相邻的煤系泥页岩和煤系砂岩储层中,如图 3 所示。进一步厘定出垂向上普遍发育的 5 个代表性共生含气层段为

含气层段 1: 山西组顶部(主力煤 2 号煤及其上覆煤系泥页岩和砂岩);

含气层段 2: 山西组中下部(主力煤 3 号煤及其顶底煤系泥页岩和砂岩);

含气层段 3: 太原组顶部(4 号、5 号、6 号煤及其间叠置煤系泥页岩和砂岩);

含气层段 4: 太原组中部(主力煤 8 号、12 号煤

及其限定下的煤系泥页岩和砂岩);

含气层段 5: 太原组底部(主力煤 15 号煤及其邻层煤系泥页岩和砂岩)。

同一钻孔揭示的含气层段 2、含气层段 4 和含气层段 5 中气测录井实测全烃含量相对其他含气层段全烃含量高,煤系气储层含气性解译结果以气层为主;含气层段 3 中气测全烃含量次之,含气性解译结果含气层和气层均等发育;此外,含气层段 1 中气测全烃含量相对较低,含气性解译结果以含气层为主。

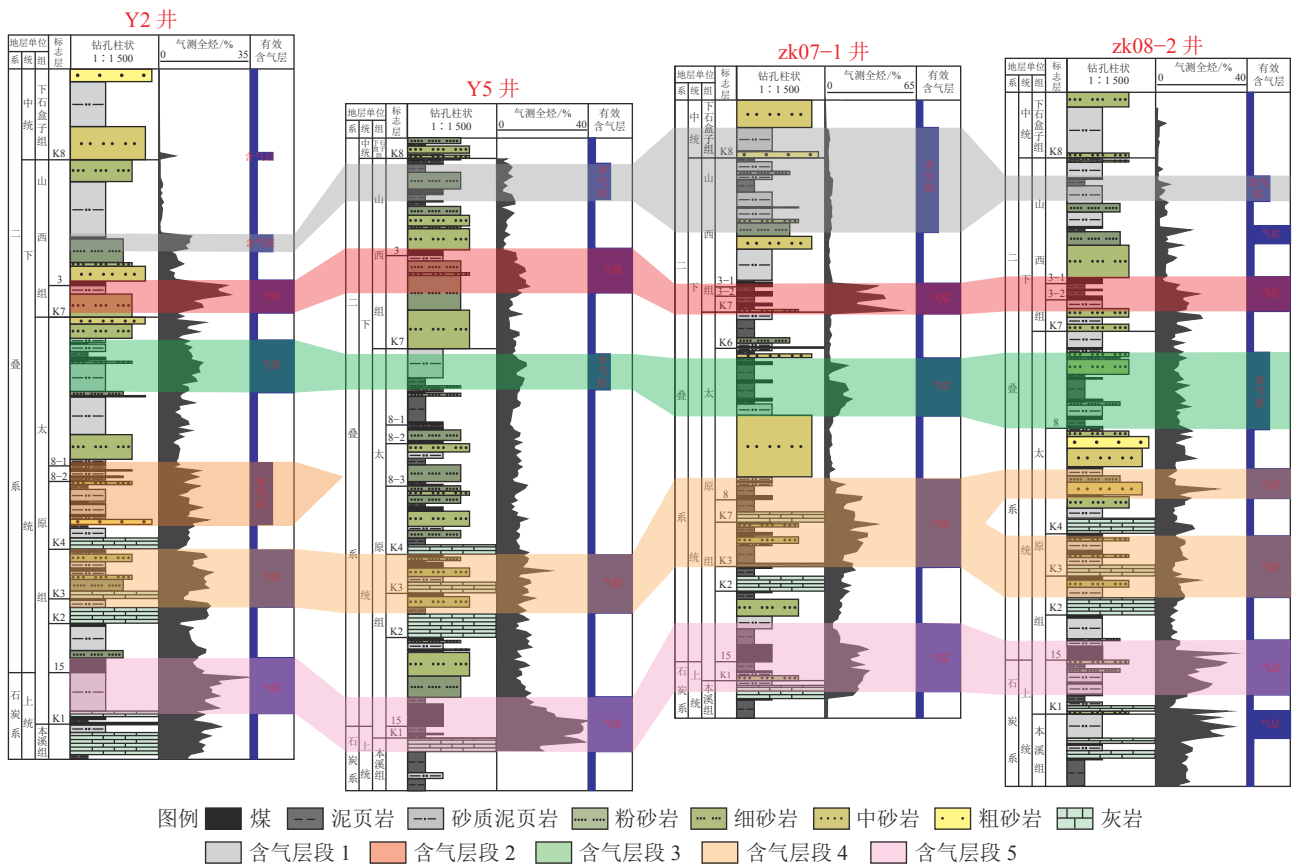


图 3 沁水盆地地区域目标层煤系气共生成藏有效含气层段空间发育特征

Fig.3 Spatial development characteristics of effective gas-bearing sections within coal measures in Qinshui Basin

### 3.2.2 煤系气共生成藏组合类型

煤系气共生成藏组合类型可依据共生含气层段限定下各类气藏相对发育程度进行划分。

1)含气层段 1 中,煤层单层厚度较薄,难以形成独立煤层气藏,且上覆岩层为稳定发育、厚度较大、封闭性强的煤系泥页岩,伴生有薄层煤系砂岩,岩性类型以煤系泥页岩为主,称之为煤系页岩气主导型共生气藏。

2)含气层段 2 和含气层段 5 中,主力煤层厚度大、连续性强,煤层气具有很好的独立成藏条件,称

之为煤层气主导型共生气藏。

3)含气层段 3 和含气层段 4 中,煤层单层厚度较薄,煤层层数多,独立煤层气成藏潜力较弱,但煤层与煤系泥页岩和煤系砂岩重复叠置展布,各类煤系气藏均具有一定的成藏潜力,称之为多元型煤系气共生气藏。

### 3.3 煤系气共生含气层段地质控制效应

#### 3.3.1 煤层发育程度决定了共生含气层段的形成基础

沁水盆地煤系气共生含气层段空间发育具有规律性,共生含气层段主要位于煤层发育部位。指示

了连续稳定发育有主力煤层的层段,不仅具有独立煤层气成藏潜力,同时煤层气能够对临近煤系泥页岩和砂岩进行有效的气源补给,利于煤系页岩气和煤系砂岩气成藏。反之,煤层不发育层段,基本不具备煤系气共生成藏的条件。连续稳定发育的主力煤层是煤系气共生成藏的提前保障。

以榆社-武乡区块煤系气共探合采参数井Y5井为例,目标煤系垂向上可判识出5个共生含气层段,其中包括2个含气层段和3个气层段(表1)。共生

含气层段中煤层累计厚度介于0.50~6.90 m,平均为2.44 m,而贫气层段中煤层不甚发育,煤层累计厚度普遍小于0.5 m(图3,表1)。然而,共生含气层段和贫气层段中煤系泥页岩储层和煤系砂岩储层不管是累计厚度亦或是单层厚度均未见明显差异(图3,表1)。进一步证实了连续稳定发育的主力煤层可为煤系气共生含气层段的形成提供充足的气源保障,而与优势煤层叠置展布的煤系泥页岩和煤系砂岩是煤系气共生含气层段的特殊时空配置要素。

表1 沁水盆地榆社-武乡Y5井煤系气共生含气层段分布及发育特征

Table 1 Distribution of effective gas-bearing sections in well Y5 in Yushe-Wuxiang Block, Qinshui Basin

含气层段	井段/m	厚度/m	层位	岩性组合	气测显示	解译结果
层段1	1464.68~1476.35	11.67	山西组	煤、泥页岩、粉砂岩	全烃由1.384%增到7.206%,净增值:5.822%	含气层
层段2	1492.5~1507	14.50	山西组	煤、泥页岩、粉砂岩、细砂岩	全烃由2.157%增到13.576%,净增值:11.419%	气层
层段3	1527~1544	17	太原组	砂质泥岩、泥岩、粉砂岩、细砂岩及煤	全烃由5.685%增到12.364%,净增值:6.679%	含气层
层段4	1592.72~1611.52	18.8	太原组	煤、粉砂岩、泥岩及石灰岩	全烃由8.822%增到22.525%,净增值:13.703%	气层
层段5	1639.12~1654.42	15.30	太原组	泥页岩、煤及炭质泥页岩	全烃由7.166%增到38.883%,净增值:31.717%	气层

3.3.2 埋藏条件造就了共生煤系气优势气藏类型的差异性

1) 风氧化带深度体现了煤系气储层固气能力强弱之别。煤系气为典型的多元混合天然气,气体组分复杂多样,除主要组分CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>外,还有一定量的CO<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub>等重烃类气体,及极少量的稀有气体。随着煤系气储层埋深不断增加,不同气体组分相对含量随之发生变化,根据CH<sub>4</sub>相对含量分布特征,垂向上由浅至深可划分为:CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>带(CH<sub>4</sub>体积分数小于20%)、N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>带(CH<sub>4</sub>体积分数介于20%~80%)

和CH<sub>4</sub>带(CH<sub>4</sub>体积分数大于80%),前两者统称为煤系气风氧化带<sup>[31]</sup>。

系统收集到区内不同埋深条件下338件煤系气样气体组分数据。结果显示,煤层气气体组分以CH<sub>4</sub>为主,伴生有一定量的N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>。CH<sub>4</sub>体积分数高达74.54%~99.55%,平均为96.20%;N<sub>2</sub>含量次之,介于0.23%~23.78%,平均为3.20%;CO<sub>2</sub>体积分数介于0.01%~1.84%,平均为0.58%。煤层气中CH<sub>4</sub>体积分数随煤层埋深的增加而增大(图4a)。进一步得到煤层气风氧化带深度约为300 m,表明区域

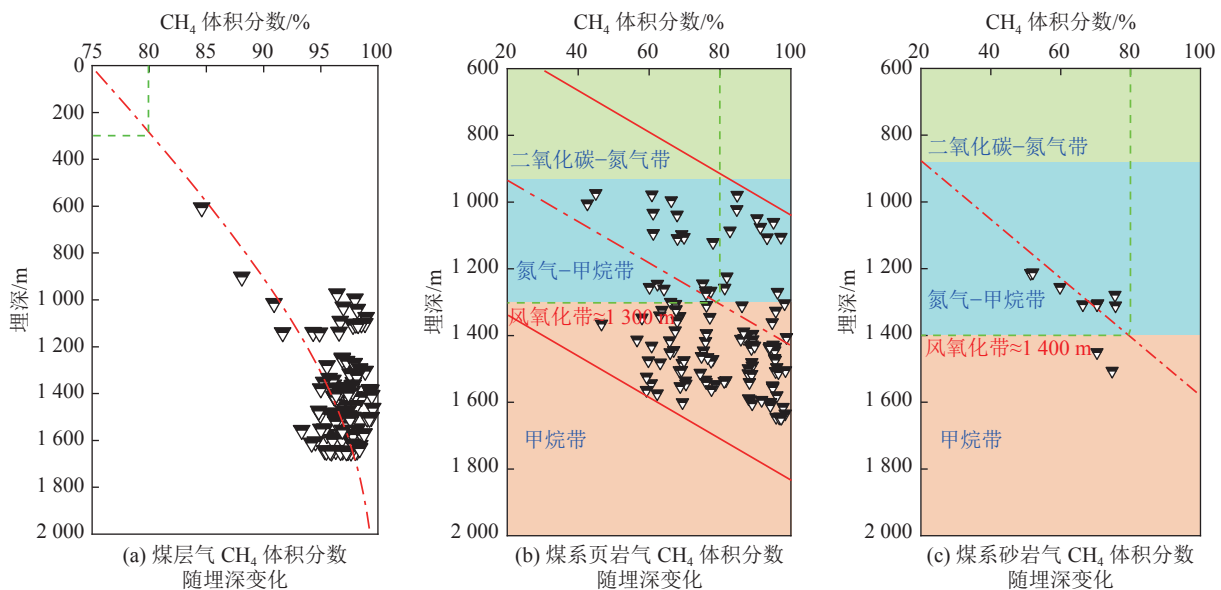


图4 沁水盆地煤系气气体组分随埋深的递变规律

Fig.4 Gas composition variation of CMGs with changing in burial depth

范围内埋深 300 m 以深的区带便具备形成独立煤层气藏的成藏条件。煤系页岩气和煤系砂岩气中气体组分同样以  $\text{CH}_4$  为主。然而,相同埋深条件下煤系页岩气和煤系砂岩气中  $\text{CH}_4$  体积分数远远低于煤层气。煤系页岩气中  $\text{CH}_4$  体积分数介于 42.62%~98.74%,平均为 78.73%, $\text{CH}_4$  体积分数与储层埋深具有一定正相关性(图 4b)。进一步得到煤系页岩气风氧化带深度约为 1 300 m,其中  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  带埋深在 900 m 以浅, $\text{N}_2\text{-CH}_4$  带埋深介于 900~1 300 m, $\text{CH}_4$  带埋深在 1 300 m 以深。煤系砂岩气中  $\text{CH}_4$  相对含量变化幅度极大,介于 9.66%~94.74%,平均为 57.31%, $\text{CH}_4$  相对含量随储层埋深的增加亦具有增大趋势(图 4c)。煤系砂岩气风氧化带深度约为 1 400 m,其中  $\text{CO}_2\text{-N}_2$  带埋深在 900 m 以浅, $\text{N}_2\text{-CH}_4$  带埋深介于 900~1 400 m, $\text{CH}_4$  带埋深在 1 400 m 以深。

显然,煤系页岩气和煤系砂岩气风氧化带下限深度远大于煤层气,介于 1 300~1 400 m,约为煤层气风化带下限深度的 5 倍。独立煤系气藏风氧化带深度差异直观地体现了煤系气储层固气能力的各异性。煤层气风氧化带浅,表明煤层固气能力更强,更易形成独立煤层气藏,而煤系页岩气和煤系气砂岩气成藏条件相对更为苛刻,对地质基础与时空配置条件要求极高。

2)埋藏条件决定了煤系气共生成藏潜力。沁水盆地古县区块目标煤系埋深相对较浅,煤系气含气层段以独立煤层气藏为主,部分煤系泥页岩/砂岩层段虽然具有一定的含气性,但是  $\text{CH}_4$  体积分数较低,难以作为有效含气层段进行煤系气共探合采。以古县区块参数井 zk1001 井为例(图 1c),目标煤系埋藏深度相对较浅,太原组底部埋深仅为 786.70 m,目标煤系总厚度达 177.00 m,虽然该参数井垂向上亦发育有 5 个含气层段,但含气层段累计厚度仅为 40.95 m,占目标煤系总厚度的 23.13%。发育于其中的煤系泥页岩和煤系砂岩位于煤系气风氧化带之上,难以独立成藏。然而,煤层具有更强的固气能力,能够确保煤层气独立成藏,导致该区目标煤系含气层段以煤层气主导型共生气藏为绝对优势。相对而言,榆社-武乡区块的 Y5 井目标煤系埋深较深,太原组底部埋深可达 1 656.80 m,目标煤系累计厚度与 zk1001 井相近,为 194.5 m,但含气层段累计厚度较厚,可达 77.27 m(表 1),含气层段地层占比高达 39.73%,煤系页岩气主导型共生气藏、煤层气主导型共生气藏和多元型煤系气共生气藏等共生组合类型均有不同程度的发育。可见,埋深条件对煤系气共生含气层段

发育程度起决定性作用,埋深在 1 300 m 以浅主要以单独煤层气藏占主导,煤系气共生含气层段优势埋深则在 1 300 m 以深。

### 3.3.3 储层物性特征限制了煤系页岩气和煤系砂岩气的成藏潜力

连续稳定发育的煤层是形成煤系气共生含气层段的前提,而与煤层临近叠置沉积的泥页岩储层和砂岩储层则是煤系页岩气和煤系砂岩气有效成藏的必备地质配置要素。煤系泥页岩和煤系砂岩自身发育特征对煤系页岩气和煤系砂岩气成藏潜力势必具有显著影响。独立气藏是否具备有效成藏潜力主要取决于 2 方面因素:①源岩生烃潜力决定了独立煤系气藏的气源基础;②储层孔裂隙发育特征影响着煤系气的赋存和运移规律。煤系气的气源基础主要受煤层生烃作用主导,煤系泥页岩生烃作用补充,沁水盆地范围内发育有多层连续稳定的主力煤层,确保了煤系气共生成藏的气源保障。作为孔裂隙系统发育的载体,有机-无机组分对非常规储层孔裂隙系统发育特征具有显著的控制作用<sup>[32-33]</sup>。因此,煤系气共生含气层段发育特征与储层有机-无机组分必然存在内在联系。

对煤系气储层多尺度孔裂隙系统进行了精细表征,同时定量获取了主要组分的体积分数,结果如图 5—图 7 所示。图中实心三角“散点”为实测数据,代表了相关指标的分布范围;半实心“五边形”为实测数据的平均值;虚线为分布曲线,代表了相关指标不同赋值范围的分布频率;箱体反应了实测数据的置信区间,代表了实测值有一定概率落在测量结果的周围的程度。煤系泥页岩多尺度孔裂隙系统测试结果显示(图 5):共生含气层段泥页岩孔隙度介于 2.77%~3.57%(平均 3.04%),微孔(<2 nm)孔容介于 0.003~0.014 mL/g(平均 0.005 9 mL/g),介孔(2~50 nm)孔容介于 0.005 3~0.018 7 mL/g(平均 0.013 mL/g),宏孔(>50 nm)孔容介于 0.011~0.015 2 mL/g(平均 0.012 4 mL/g);贫气层段孔隙度介于 1.70%~3.32%(平均 2.36%),微孔孔容介于 0.002~0.006 mL/g(平均 0.003 9 mL/g),介孔孔容介于 0.006 9~0.015 6 mL/g(平均 0.011 mL/g),宏孔孔容介于 0.006 5~0.011 7 mL/g(平均 0.009 mL/g)。显然,共生含气层段中泥页岩孔隙度、微孔和宏孔发育程度远远优于贫气层段。煤系页岩气中吸附气和游离气均较显著,吸附位主要由微孔提供,微孔发育程度直接决定了煤系泥页岩储层的吸附性能,微孔相对发育的煤系泥页岩储层具有更强的固气能力<sup>[28]</sup>。

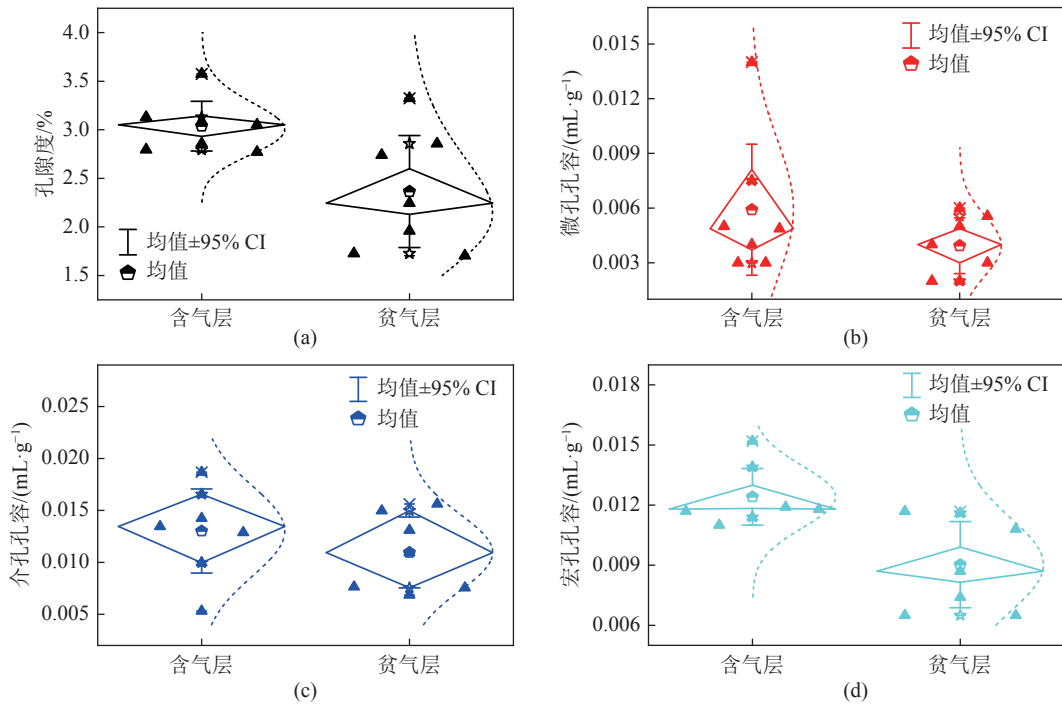


图5 含气层段和贫气层段间煤系泥页岩中全尺度孔隙发育特征差异对比

Fig.5 Difference of full scale pore structures between gas-bearing and gas-free sections in mud-shale reservoirs

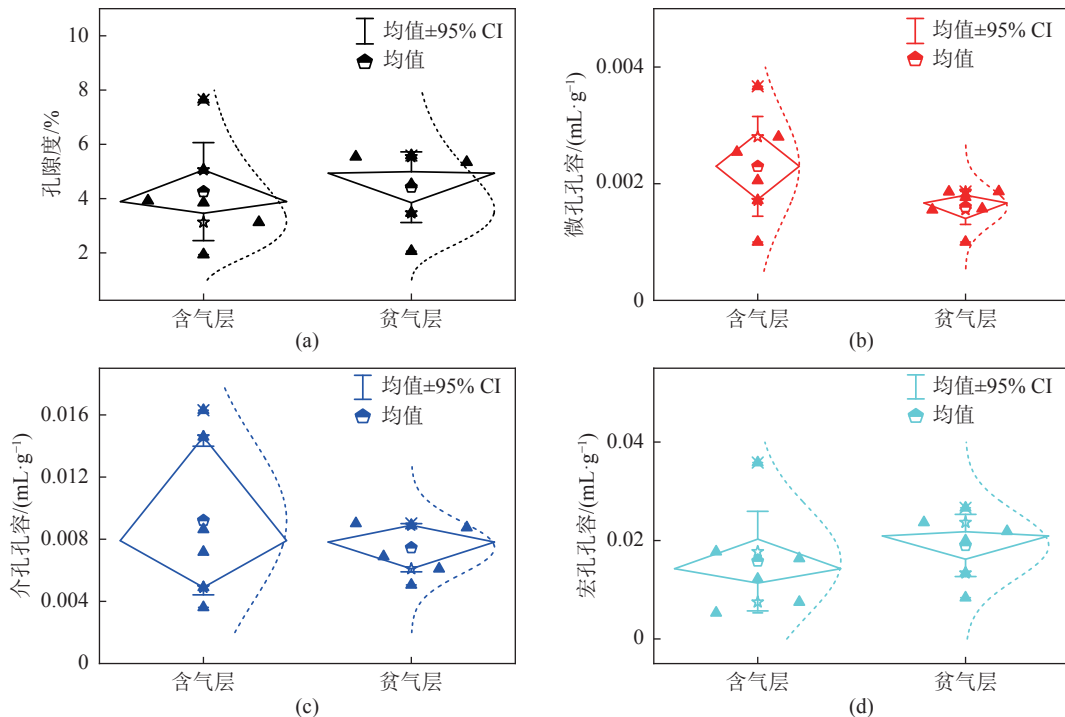


图6 含气层段和贫气层段间煤系砂岩中全尺度孔隙发育特征差异对比

Fig.6 Difference of full scale pore structures between gas-bearing and gas-free sections in sandstone reservoirs

尺度较大的宏孔可以为游离态煤系页岩气的有效赋存提供有利的储集空间。

煤系砂岩多尺度孔裂隙系统测试结果(图6)表明:共生含气层段砂岩孔隙度介于1.93%~7.64%(平均4.25%),微孔孔容介于0.001~0.0037 mL/g(平均0.0023 mL/g),介孔孔容介于0.0036~0.0163 mL/g

(平均0.0092 mL/g),宏孔孔容介于0.0053~0.0358 mL/g(平均0.0158 mL/g);贫气层段孔隙度介于2.06%~5.58%(平均4.42%),微孔孔容介于0.001~0.0019 mL/g(平均0.0016 mL/g),介孔孔容介于0.0051~0.009 mL/g(平均0.0075 mL/g),宏孔孔容介于0.0084~0.0266 mL/g(平均0.019 mL/g)。

可见,共生含气层段砂岩中的微孔和介孔相对更为发育。虽然煤系砂岩气以游离气占绝对优势,但是微孔和介孔的发育能够一定程度上增大比表面积,尤其微孔对比表面的贡献更为重要,进而有助于吸附气的赋存,一定程度上可适当增大煤系砂岩储层的固气能力<sup>[29-30,34]</sup>。

煤系泥页岩和煤系砂岩中不同层段孔裂隙发育特征亦具有差异,而有机-无机组分则是储层孔裂隙系统的直接载体,决定了不同尺度孔裂隙系统的发育程度,其中有机组分决定了煤系气储层中微孔的发育程度,黏土矿物则主要控制了介孔的发育程度<sup>[32,35]</sup>。地质演化过程中,发育于煤系泥页岩和煤系砂岩中的刚性石英颗粒能够对尺度相对较大的粒间

孔(宏孔)起到良好的保护作用<sup>[36]</sup>。TOC和XRD测试结果(图7)显示:共生含气层段泥页岩TOC质量分数介于1.06%~24.23%(平均5.63%),黏土矿物质量分数介于25.6%~58.8%(平均46.2%),石英质量分数介于32.3%~72.4%(平均45.7%);贫气层段泥页岩TOC质量分数介于1.05%~2.67%(平均1.76%),黏土矿物质量分数介于29.7%~52.9%(平均44.8%),石英质量分数介于27.6%~56.9%(平均41.2%)。显然,共生含气层段泥页岩具有相对更高的有机质丰度(图7a),利于有机质微孔的发育<sup>[33]</sup>。同时,共生含气层段泥页岩中石英相对更为发育(图7c),利于发育于碎屑颗粒间粒间孔和微裂隙等大尺度宏孔的有效保存<sup>[37]</sup>。

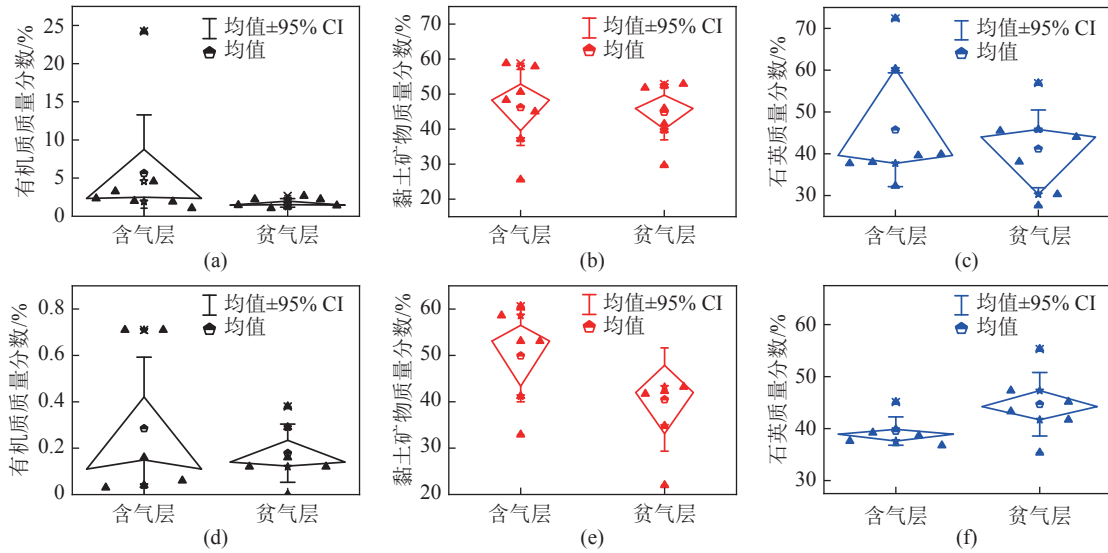


图7 含气层段和贫气层段间煤系泥页岩和煤系砂岩中物质组分含量对比

Fig.7 Difference of organic and inorganic matter contents between gas-bearing and gas-free sections in mud-shales and sandstones

共生含气层段砂岩TOC质量分数介于0.03%~0.71%(平均0.29%),黏土矿物质量分数介于32.9%~60.6%(平均49.9%),石英质量分数介于33.5%~50.3%(平均39.1%);贫气层段砂岩TOC质量分数介于0%~0.38%(平均0.18%),黏土矿物质量分数介于22.0%~58.9%(平均40.5%),石英质量分数介于30.7%~70.6%(平均49.4%)。共生含气层段砂岩具有相对较高的有机质丰度和黏土矿物(图7d, e),为微孔和介孔的发育的提供了一定的保障,进而为吸附气的赋存提供了一定的吸附位,增强了煤系砂岩储层的固气能力<sup>[29]</sup>。

#### 4 结 论

1)海陆交互沉积环境下形成的煤系空间上呈现单层厚度薄、累计厚度大、旋回性叠置展布特征。

煤系中从“无机储层”至“混合储层”到“有机储层”,有机质丰度逐渐增高,形成一个不存在自然界限的连续岩性序列。

2)厘定出5个区域范围内垂向上发育的共生含气层段,含气层段1中以煤系泥页岩为主,为煤系页岩气主导型共生气藏;含气层段2和含气层段5中的主力煤层发育稳定,厚度大、连续性强,为煤层气主导型共生气藏;含气层段3和含气系统4中单层煤层较薄,煤层层数多,煤层与煤系泥页岩和煤系砂岩层重复叠置展布,各类煤系气藏均具有一定的成藏潜力,为多元型煤系气共生气藏。

3)煤系气共生含气层段需要兼具优势的生、储、盖组合配置:煤层发育程度决定了共生含气层段的发育程度;埋藏条件造就了共生煤系气优势气藏类型的差异性,煤系气共生成藏优势埋深在1300m以

深;物性特征限制了煤系页岩气和煤系砂岩气的成藏潜力。

#### 参考文献(References):

- [1] 邹才能, 杨智, 黄士鹏, 等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 433-442.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, *et al.* Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 451-462.
- [2] 邹才能, 杨智, 董大忠, 等. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1517-1533.  
ZOU Caineng, YANG Zhi, DONG Dazhong, *et al.* Formation, distribution, and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1517-1533.
- [3] 侯晓伟, 朱炎铭, 付常青, 等. 沁水盆地压裂裂缝展布及对煤系“三气”共采的指示意义[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 729-738.  
HOU Xiaowei, ZHU Yanming, FU Changqing, *et al.* Fractures distribution of Qinshui basin and its indicative significance to unconventional gas co-exploration in coal measures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 729-738.
- [4] 屈晓荣, 朱炎铭, 张庆辉. 海陆过渡相煤系非常规天然气储层特征及共探共采浅析—以榆社-武乡区块为例[J]. 西安石油大学学报, 2017, 32(3): 1-8.  
QU Xiaorong, ZHU Yanming, ZHANG Qinghui. Reservoir Characteristics and co-exploration and concurrent production analysis of unconventional natural gases in transitional facies coal measures: taking Yushe-Wuxiang block as an example[J]. Journal of Xi'an Shiyou, 2017, 32(3): 1-8.
- [5] 林中月, 刘亢, 魏迎春. 沁水盆地中北部石炭-二叠纪煤系构造演化特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 68(3): 1-7.  
LIU Zhongyue, LIU Kang, WEI Yingchun. characteristics of tectonic evolution of carboniferous-permian coal measures in the north-central Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 68(3): 1-7.
- [6] LI Ruirui, HOU Xiaowei, CHEN Luwang, *et al.* Multifractal investigation on multi-scale pore structure heterogeneity of high rank coal reservoirs[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(3): 1665-1685.
- [7] 蔡益栋, 高国森, 刘大锰, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴中区煤系气富集地质条件及成藏模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(11): 25-36.  
CAI Yidong, GAO Guosen, LIU Dameng, *et al.* Geological conditions for coal measure gas enrichment and accumulation models in Linxingzhong Block along the eastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11): 25-36.
- [8] 侯晓伟. 沁水盆地深部煤系气储层控气机理及共生成藏效应[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
HOU Xiaowei. Study on gas controlling mechanism and coupled accumulation of deep coal measure gases in Qinshui Basin [J]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [9] LI Yong, YANG Jianghao, PAN Zhejun, *et al.* Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: a discussion of upper paleozoic coal-bearing strata in the east margin of the Ordos basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2019, 93(1): 111-129.
- [10] 曹代勇, 聂敬, 王安民, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气富集的构造-热作用控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1526-1532.  
CAO Daiyong, NEI Jing, WANG Anmin, *et al.* Structural and thermal control of enrichment conditions of coal measure gases in Linxing block of eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1526-1532.
- [11] 胡进奎, 杜文凤. 浅析煤系地层“三气合采”可行性[J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 83-84.  
HU Jinkui, DU Wenfeng. Analysis on Feasibility of Three Gas Co-Exploration in Coal Measure Strata[J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 83-84.
- [12] 傅雪海, 张苗, 张庆辉, 等. 山西省域石炭二叠纪煤系泥页岩气储层评价指标体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1654-1660.  
FU Xuehai, ZHANG Miao, ZHANG Qinghui, *et al.* Evaluation index system for the Permo-Carboniferous mud shale reservoirs of coal measures in Shanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1654-1660.
- [13] 秦勇, 吴建光, 李国璋, 等. 煤系气开采模式探索及先导工程示范[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2513-2522.  
QIN Yong, WU Jianguo, LI Guozhang, *et al.* Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2513-2522.
- [14] CUMELLA S P, WOODRUFF W F, REVIL A. Piceance Basin Mesaverde anomalous self-potential response: Identification of capillary seals in a basin-centered gas accumulation[J]. *AAPG Bulletin*, 2017, 101(1): 19-37.
- [15] HOU Bing, CUI Zhuang, DING Jihui, *et al.* Perforation optimization of layer-penetration fracturing for commingling gas production in coal measure strata[J]. Petroleum Science, 2022, 19(7): 1718-1734.
- [16] 张健, 申建, 朱苏阳, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤系气合采接替方案优化[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3965-3974.  
ZHANG Jian, SHEN Jian, ZHU Suyang, *et al.* Productivity prediction and gas production technology of superimposed coal measure gas in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3965-3974.
- [17] HOU Xiaowei, WANG Yang, ZHU Yanming, *et al.* Pore structure complexity and its significance to the petrophysical properties of coal measure gas reservoirs in Qinshui Basin, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2021, 15(4): 860-875.
- [18] 刘闯. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界煤系气共生组合模式[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(2): 1-7.  
LIU Chuang. Symbiotic combination model of coal measures and gas in Upper Paleozoic in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(2): 1-7.
- [19] HOU Xiaowei, ZHU Yanming, YAO Haipeng. Coupled Accumulation Characteristics of Carboniferous-Permian Coal Measure

- Gases in the Northern Ordos Basin, China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(7): 156.
- [20] 朱炎铭, 侯晓伟, 崔兆帮, 等. 河北省煤系天然气资源及其成藏作用[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 202–211.  
ZHU Yanming, HOU Xiaowei, CUI Zhaobang, *et al.* Resources and reservoir formation of unconventional gas in coal measure, Hebei Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 202–211.
- [21] 谢英刚, 孟尚志, 万欢, 等. 临兴地区煤系地层多类型天然气储层地质条件分析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(9): 71–75.  
XIE Yinggang, MENG Shangzhi, WAN Huan, *et al.* Analysis on geological conditions of multi type natural gas reservoir in coal measure strata of Linxing area[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(9): 71–75.
- [22] HOU Xiaowei, LIU Shimin, ZHU Yanming, *et al.* Experimental and Theoretical Investigation on Sorption Kinetics and Hysteresis of Nitrogen, Methane, and Carbon Dioxide in Coals[J]. *Fuel*, 2020, 268: 117349.
- [23] 钟建华, 刘闯, 吴建光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气共生藏特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1517–1525.  
ZHONG Jianhua, LIU Chuang, WU Jianguang, *et al.* Symbiotic accumulation characteristics of coal measure gas in Linxing Block, eastern Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1517–1525.
- [24] 郑力会, 魏攀峰, 张峥, 等. 联探并采: 非常规油气资源勘探开发持续发展自我救赎之路[J]. *天然气工业*, 2017, 37(5): 126–140.  
ZHENG Lihui, WEI Panfeng, ZHANG Zheng, *et al.* Joint exploration and development: A self-salvation road to sustainable development of unconventional oil and gas resources[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(5): 126–140.
- [25] 秦勇, 申建, 史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 371–387.  
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 371–387.
- [26] 毕彩芹, 周阳, 姚忠岭, 等. 鸡西盆地梨树井田煤系气储层特征及改造工艺探索[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(12): 127–137.  
BI Caiqin, ZHOU Yang, YAO Zhongling, *et al.* Exploration of coal-measure gas reservoir characteristics and reforming technology in Lishu Mine Field of Jixi Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(12): 127–137.
- [27] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 煤层气合采地质研究进展述评[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 42–57.  
GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, *et al.* Review of the progress of geological research on coalbed methane co-production[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 42–57.
- [28] HOU Xiaowei, ZHU Yanming, CHEN Shangbin, *et al.* Gas flow mechanisms under the effects of pore structures and permeability characteristics in source rocks of coal measures in Qinshui Basin, China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2017, 35(3): 338–355.
- [29] 秦勇. 中国煤系气共生藏作用研究进展[J]. *天然气工业*, 2018, 38(4): 26–36.  
QIN Yong. Research progress of symbiotic accumulation of coal measure gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(4): 26–36.
- [30] 杨玉平, 钟建华, 孙玉凯, 等. 吐哈盆地水西沟群“近生近储”型致密砂岩气藏特征及其成藏机制[J]. *中国石油大学学报*, 2014, 38(4): 34–41.  
YANG Yuping, ZHONG Jianhua, SUN Yukai, *et al.* Discussion on characteristics and accumulation mechanisms of “proximal-generation and proximal storage” type tight sandstone gas accumulations in Shuixigou Group, Turpan-Hami Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 38(4): 34–41.
- [31] 秦勇. 煤系气聚集系统与开发地质研究战略思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2387–2399.  
QIN Yong. Strategic thinking on research of coal measure gas accumulation system and development geology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2387–2399.
- [32] HOU Xiaowei, LIU Shimin, LI Guofu, *et al.* Quantifying and modeling of in situ stress evolutions of coal reservoirs for helium, methane, nitrogen and CO<sub>2</sub> Depletions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(8): 3701–3719.
- [33] 张吉振, 李贤庆, 张学庆, 等. 煤系页岩储层孔隙结构特征和演化[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S1): 195–204.  
ZHANG Jizhen, LI Xianqing, ZHANG Xueqing, *et al.* Microscopic characteristics of pore structure and evolution in the coal-bearing shale[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S1): 195–204.
- [34] HOU Xiaowei, ZHU Yanming, CHEN Shangbin, *et al.* Investigation on Pore Structure and Multifractal of Tight Sandstone Reservoirs in Coal Bearing Strata Using LF-NMR Measurements[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 187: 106757.
- [35] 龚卓, 陈尚斌, 李学元, 等. 基于 AFM 的巫溪 2 井页岩储层孔隙特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 216–223.  
GONG Zhuo, CHEN Shangbin, LI Xueyuan, *et al.* Research on pore characteristics of shale reservoir in Wuxi No. 2 well based on AFM[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 216–223.
- [36] 宋岩, 高凤琳, 唐相路, 等. 海相与陆相页岩储层孔隙结构差异的影响因素[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1501–1512.  
Song Yan, Gao Fenglin, Tang Xianglu, *et al.* Influencing factors of pore structure differences between marine and terrestrial shale reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1501–1512.
- [37] 张曼婷, 付炜, 姜秉仁, 等. 黔北煤田上二叠统龙潭组煤系页岩气储层特征与勘探潜力评价[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 133–139.  
ZHANG Manting, FU Wei, JIANG Bingren, *et al.* Shale gas reservoir characteristics and exploration potential analysis of Longtan Formation of the upper Permian Series in Qianbei Coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 133–139.