

# 准噶尔盆地深层煤岩特征及含气量测井解释方法研究

——以滴南 - 白家海区块西山窑组、八道湾组煤岩为例

尹奇<sup>1</sup>, 胡梦蝶<sup>2</sup>

<sup>1</sup>成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

<sup>2</sup>国家管网集团储能技术有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月29日

## 摘要

深层煤岩气为非常规油气开采领域的热点, 但存在煤岩特征不清以及基于浅层煤层气储层含气量测井评价模型精度低等问题, 亟需开展煤岩特征及含气量测井解释评价方法研究。以准噶尔盆地滴南 - 白家海区块侏罗系西山窑组、八道湾组深层煤岩为研究对象, 综合岩心、物性以及扫描电镜等分析化验资料, 系统研究煤岩的煤阶、宏观煤岩类型、工业组分、孔 - 裂隙特征、物性以及含气性等特征, 建立深层煤岩含气量测井解释评价模型。结果表明: (1) 研究区煤岩镜质体反射率介于0.43%~0.85%之间, 主要为长焰煤和气煤, 属中低煤阶。西山窑组主要为半暗 - 半亮型煤, 结构以原生 - 碎裂结构为主; 八道湾组煤岩以半亮 - 光亮型为主, 主要发育原生结构; (2) 西山窑组为低 - 中挥发分、特低灰分、中 - 高固定碳煤; 八道湾组为中 - 高挥发分、低灰分、低 - 中固定碳煤; (3) 储集空间类型以胞腔孔、气孔和裂隙为主, 其中裂隙以割理及微裂缝为主; (4) 西山窑组煤岩孔隙率介于10.48%~21.47%之间, 平均值为15.71%, 渗透率介于 $(0.98\sim 23.82) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 平均值为 $6.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属中 - 高孔隙率、中 - 高渗透率储层; 八道湾组煤岩孔隙率介于0.95%~3.88%之间, 平均值为3.00%, 渗透率介于 $(0.0044\sim 0.0681) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 平均值为 $0.028 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属低孔 - 低渗类储层; (5) 优选敏感测井曲线, 构建西山窑组、八道湾组深层煤岩总含气量复合参数( $G_x$ 、 $G_b$ )。根据总含气量与复合参数的关系, 建立含气量测井解释模型。相较于多元线性回归模型, 采用复合参数的含气量测井解释模型, 表现出较高的准确性和良好的适用性, 应用前景较好。

## 关键词

准噶尔盆地, 深层煤岩, 煤岩特征, 含气量, 测井解释评价

# Characteristics of Deep Coal Rock and Logging-Based Interpretation Method for Gas Content

—A Case Study of the Xishanyao and Badaowan Formations in the Dinan-Baijiahai Block, Junggar Basin

Qi Yin<sup>1</sup>, Mengdie Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>PipeChina Energy Storage Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: April 22, 2026; accepted: June 15, 2026; published: June 29, 2026

## Abstract

Deep coal-rock gas has become a research focus in the field of unconventional oil and gas exploitation. However, challenges remain, including insufficient understanding of coal-rock characteristics and low accuracy of gas content logging evaluation model derived from shallow coalbed methane reservoirs. Consequently, it is urgent to carry out research on coal-rock characteristics and logging interpretation method for gas content evaluation. This study investigates the deep coal seams of the Jurassic Xishanyao and Badaowan Formations in the Dinan-Baijiahai block of the Junggar Basin. The coal rank, macroscopic coal rock type, maceral composition, pore-fracture characteristics, physical properties and gas content of coal rock are systematically studied by integrating the analysis and test data of core, physical properties and scanning electron microscope. The logging interpretation and evaluation model for gas content in deep coal rock is established. The results show that: (1) The vitrinite reflectance of the coal rock ranges from 0.43% to 0.85%, corresponding to long-flame and gas coals of medium to low coal rank. The Xishanyao Formation is characterized by semi-dark to semi-bright coal with primary-fragmentation structure. The coal rock of Badaowan Formation is mainly semi-bright to bright coal with preserved primary structure. (2) The Xishanyao Formation coals exhibit low to medium volatile matter, ultra-low ash yield, and medium to high fixed carbon content. In contrast, the Badaowan Formation coals are characterized by medium to high volatile matter, low ash yield, and low to medium fixed carbon content. (3) The types of reservoir space are primarily composed of cellular pores, gas pores and fractures, among which cleats and microcracks are the dominant fracture types. (4) The porosity of Xishanyao Formation ranges from 10.48% to 21.47%, with an average of 15.71%, and the permeability ranges from  $0.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  to  $23.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , with an average of  $6.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , indicating a medium-high porosity and permeability reservoir. The porosity of coal rock in Badaowan Formation ranges from 0.95% to 3.88%, with an average of 3.00%, and the permeability ranges from  $0.0044 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  to  $0.0681 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , with an average of  $0.028 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , indicating a low porosity and permeability reservoir. (5) Sensitive logging curves are optimized to construct composite parameters ( $G_x$  for Xishanyao Formation and  $G_b$  for Badaowan Formation) representing the total gas content in deep coal rock. Based on the relationship between total gas content and these composite parameters, a gas content logging interpretation model is established. Compared with the multiple linear regression model, the proposed composite-parameter model demonstrates superior accuracy and good applicability, suggesting promising potential for field application.

## Keywords

### Junggar Basin, Deep Coal Rock, Coal Rock Characteristics, Total Gas Content, Logging Interpretation and Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

相较于中-浅层煤层气(埋藏深度小于 1500 m), 深层煤岩气(埋藏深度大于 1500 m)指以煤作为储集岩且处于煤炭开采经济技术极限深度以深煤层中的天然气, 主要分布在我国鄂尔多斯、准噶尔、吐哈-三塘湖等盆地[1][2]。煤岩气资源量约为  $60 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 占全国煤层气资源的 30%以上, 且具有构造简单、厚度稳定及气测活跃等优点, 勘探前景十分广阔[3][4]。深层中低阶煤岩气资源潜力巨大, 有望成为我国天然气的重要替代领域。

准噶尔盆地天然气资源十分丰富, 2000 m 以深煤岩气资源量  $15 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 占全国中深层煤岩气资源总量 37.5%。近年来, 在盆地西部及南缘冲断带煤岩气勘探相继取得重大突破[5][6], 进一步证实盆地内煤岩气勘探前景广阔。已有研究表明, 盆地深层煤岩煤阶类型以中-低阶煤岩为主, 镜质体反射率  $R_o$  介于 0.4%~0.8%之间, 主要发育褐煤、气煤以及长焰煤等[7][8]。八道湾组煤岩埋深更深, 热演化程度更高, 多为气煤和肥煤。西山窑组宏观煤岩类型以暗淡型和半暗淡型煤为主; 八道湾组则以半亮型和光亮型煤为主。煤岩显微、工业组分含量层间及平面差异较大: 准东地区八道湾组煤岩显微组分以镜质组为主, 惰质组含量较少。而盆地中部煤岩属特低灰分, 低水分, 中高挥发分煤, 属于优质煤岩气储层; 显微组分以镜质组为主, 腐泥组和壳质组含量较低[9]-[11]。淮南地区八道湾组煤岩水分平均质量分数一般在 1%~3%之间, 灰分平均质量分数在 10%~20%之间, 挥发分平均质量分数超过 33%; 西山窑组煤样水分平均含量值一般小于 5%, 灰分平均质量分数一般在 10%~20%之间, 挥发分平均质量分数一般都超过 33%。准西北地区同淮南地区类似, 煤岩储集空间类型为孔-缝双重介质, 主要为植物组织孔和次生孔隙, 其中八道湾组煤以微-小孔为主, 西山窑组煤以小-中孔为主[12][13]。综合而言, 盆地内煤岩非均质性较强, 各区块间煤岩特征差异较大。

由于盆地内深层煤岩特征复杂多变, 且含气性测井评价技术暂未突破, 盆地内深层煤岩气开采程度较低, 仍处于勘探早期阶段。且与中浅层煤层气不同, 深层煤岩气具有赋存状态复杂、气测活跃以及吸附气和游离气共存等特点[14]。目前, 盆地内含气量测井评价方法及存在的诸多技术难题如下: (1) 基于常规测井, 选择敏感曲线, 采用回归法建立总含气量测井解释模型; 该类模型未充分考虑敏感曲线的权重差异, 模型普适性不强[15]-[19]。(2) 基于成像资料区, 分煤岩结构建立区域含气量测井评价模型; 该类区域评价模型精度虽然有提升, 但高度依赖成像资料对煤体结构的精细标定, 应用条件受限[20]。(3) 基于核磁-等温吸附联测数据, 分别计算煤岩吸附气及游离气含量, 最终获得总含气量; 该模型因涉及大量原位实验测试, 成本高昂且操作复杂[21][22]。(4) 基于煤岩岩石体积模型, 求取含气量; 该模型需要实验测定煤岩各组分密度和声波速度, 依旧存在成本高昂且数据获取难度较大的问题[23]。(5) 基于地震及测井数据, 分析煤岩含气性影响因素, 耦合岩性系数、构造曲率及灰分含量 3 个参数建立煤岩含气性定量评价模型; 该类模型具有较高精度且地震及测井数据相对

容易获取, 但具有区域局限性[24]。整体而言, 现有煤岩总含气量的测井评价方法在精度、成本、适用范围和实验依赖性等方面存在明显局限性, 暂未形成适用于准噶尔盆地的深层煤岩气含气性测井评价方法。

基于此, 笔者以准噶尔盆地滴南-白家海区块深层煤岩气为研究对象, 开展深层煤岩储层特征研究; 进一步基于岩心及常规测井数据, 建立了一种基于构建参数法的煤岩气总含气量测井解释模型。

## 2. 研究区地质概况

准噶尔盆地位处新疆北部, 属中生代大型拗陷盆地[25], 面积约  $13.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其经历了泥盆纪-早石炭世洋盆俯冲消减、晚石炭世-中二叠世伸展裂陷、晚二叠世-三叠纪前陆盆地、侏罗纪伸展-局部前陆、白垩纪-古近纪稳定大陆陆内拗陷以及古近纪之后的前陆盆地等六大阶段[26]。基于石炭系褶皱基底顶面与中二叠世的隆拗格局, 盆地构造上可划分为6个一级构造单元(东部隆起、南缘冲断带、西部隆起、陆梁隆起、乌伦古拗陷以及中央拗陷)和44个二级构造单元(图1)[27]-[30]。

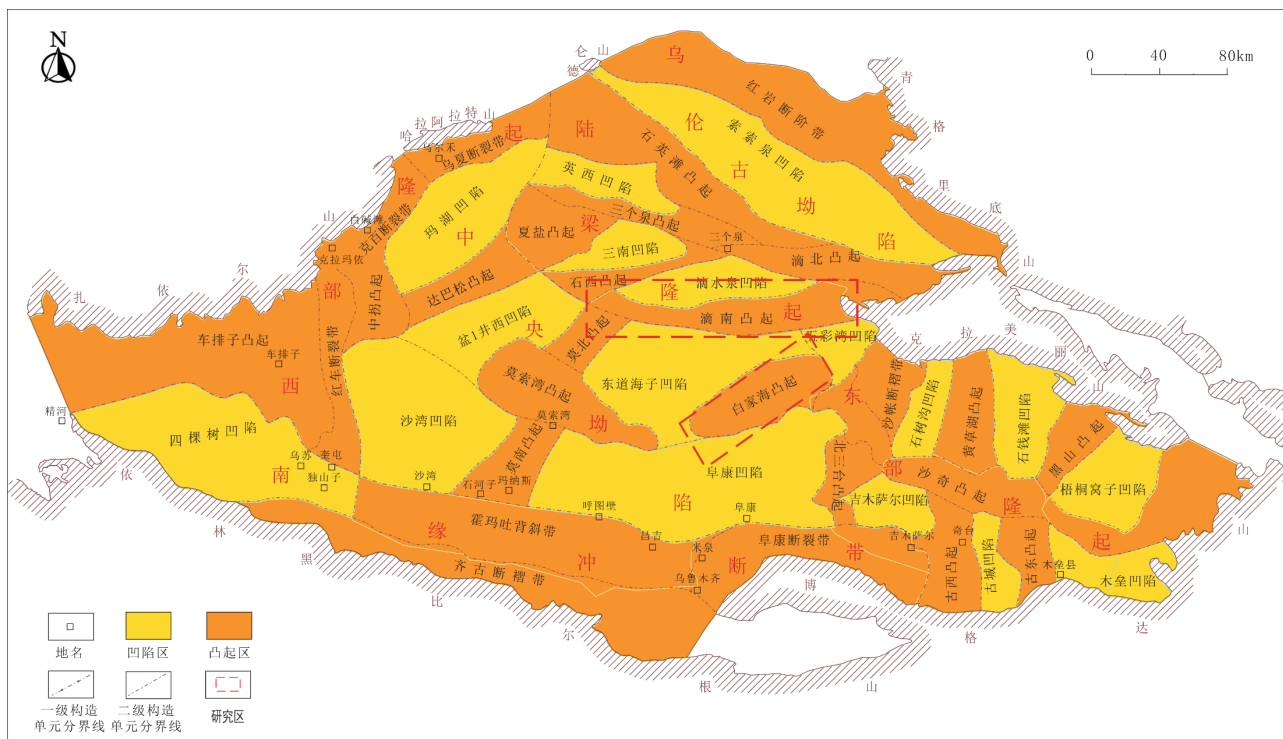


Figure 1. Structural unit map of Junggar Basin

图 1. 准噶尔盆地构造单元

研究区位于滴南-白家海地区, 在一级构造分区上属于准噶尔盆地中央拗陷区, 盆地侏罗统从下到上依次为八道湾组( $J_1b$ )、三工河组( $J_1s$ )、西山窑组( $J_2x$ )、头屯河组( $J_2t$ )和齐古组( $J_3q$ ) [31]-[33], 主要含煤地层为西山窑组和八道湾组[34]。其中, 西山窑组一共发育3套煤岩, 仅2号煤岩稳定分布在层系底部, 在滴南地区呈单层展布, 为湖滨泥炭沼泽相, 厚度为4~6m; 在白家海地区呈双层展布, 为三角洲平原泥炭沼泽相, 厚度为3~16m, 整体呈滴南薄, 白家海厚的特征。八道湾组一共发育5套煤岩, 仅5号煤岩稳定分布于层系顶部, 在滴南地区呈单层展布, 为湖滨泥炭沼泽相, 厚度为9~10m; 在白家海地区呈单层展布, 为湖滨泥炭沼泽相, 厚度在6~12m之间, 整体厚度相当[8] [35]。

### 3. 深层煤岩基本特征

#### 3.1. 煤阶

煤阶描述煤形成过程中煤化程度, 反映煤化作用中能达到的成熟度级别。目前国内外对于煤阶类型的分类标准并不统一, 李国欣等[36]参考常规天然气、页岩气和煤层气等分类标准, 综合考虑煤岩气地质特征、开发技术和开发效果等因素, 综合建立一套煤阶分类标准。该标准根据煤岩最大镜质体反射率  $R_{o,max}$  不同, 将  $0 = R_{o,max} < 0.7\%$  的煤岩划分为低阶煤岩(褐煤、长焰煤),  $0.7\% < R_{o,max} \leq 1.9\%$  为中阶煤岩(气煤、肥煤、焦煤和瘦煤),  $R_{o,max} > 1.9\%$  为高阶煤岩(贫煤、无烟煤)。准噶尔盆地中、低阶煤岩非常发育。该类煤岩变质程度较低, 含有大量原生结构孔隙, 孔隙率相对较大, 但煤岩孔隙率分布可能存在较大的区间变化特征[37]。

研究区煤岩最大镜质体反射率  $0.45\% < R_{o,max} < 0.96\%$ , 发育褐煤、长焰煤、气煤、肥煤不等。其中西山窑组最大镜质体反射率  $0.45\% < R_{o,max} < 0.87\%$ , 平均为  $0.68\%$ , 主要发育长焰煤, 占比  $50\%$ ; 八道湾组热演化程度略高于西山窑组,  $0.66\% < R_{o,max} < 0.96\%$ , 平均为  $0.76\%$ , 煤阶类型以气煤为主, 占比  $85.71\%$ 。整体而言, 研究区煤岩热演化程度均较低, 主要发育以长焰煤和气煤为主的中-低阶煤岩, 部分为肥煤(图2)。

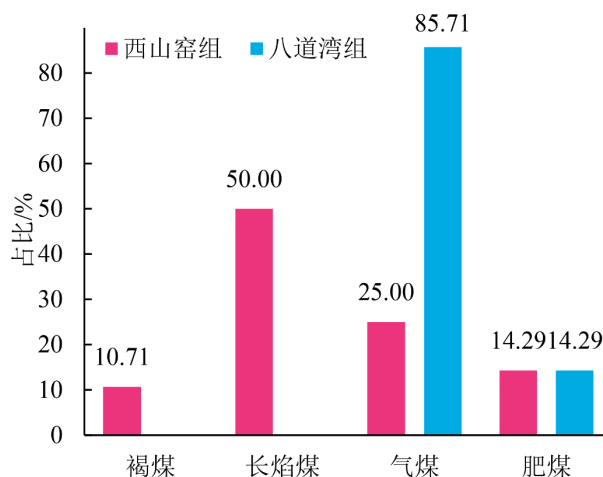


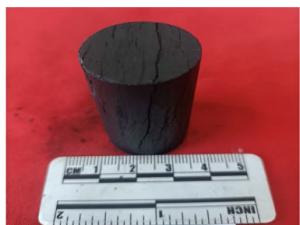
Figure 2. The distribution map of the main coal rank types of coal and rock in the study area  
图2. 研究区煤岩主要煤阶类型

#### 3.2. 煤岩类型与煤体结构

依据现行标准 GB/T 18023-2000《烟煤的宏观煤岩类型分类》, 结合煤岩的总体相对光泽强度和光亮成分(镜煤和亮煤)含量, 可将宏观煤岩类型划分为光亮煤(光泽强度最强, 光亮成分体积分数  $> 80\%$ )、半亮煤(光泽强度较强, 光亮成分体积分数介于  $50\% \sim 80\%$  之间)、半暗煤(光泽强度较弱, 光亮成分体积分数介于  $20\% \sim 50\%$  之间)和暗淡煤(光泽强度最弱, 光亮成分体积分数  $< 20\%$ )四类。测试数据及岩心观察结果表明, 西山窑组镜质组体积分数在  $46\% \sim 67\%$  之间, 宏观煤岩类型以黑色沥青光泽的半暗煤和灰黑色玻璃光泽的半亮煤为主, 发育少量光亮煤, 如图 3(a)~(c)所示; 八道湾组镜质组体积分数在  $73\% \sim 85\%$  之间, 以黑色光亮煤和半亮煤为主, 见少量半暗煤, 如图 3(d)~(f)所示。八道湾组煤岩镜质组含量更高, 煤岩更光亮。

依据煤体结构破坏程度, 可将煤岩划分为原生、碎裂、碎粒以及糜棱结构四类。研究区主要发育原

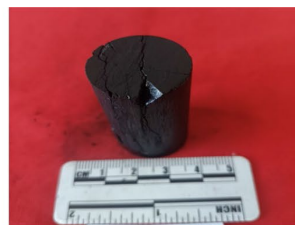
生、碎裂以及碎粒结构三类。其中, 西山窑组煤岩以原生-碎裂结构为主, 见少量碎粒结构如图 3(g)~(i)所示; 八道湾组煤岩以原生结构为主, 如图 3(j)~(l)所示。研究区光亮煤以发育原生结构为主; 半亮煤主要发育原生结构, 占比 83%, 见少量碎裂结构, 占比 17%; 半暗煤碎粒和碎裂结构更为发育, 分别占比 28%和 29%, 原生结构占比 43%。随着煤岩光亮程度的减少, 煤体结构破碎趋势增强。



(a) CM-2-004H 井, J2x, 2432.14~2432.42 m, 半暗煤, 黑色沥青光泽, 镜煤和亮煤占比 40%



(b) CM-2-101 井, J2x, 2855.8~2856.1 m, 半亮煤, 镜煤和亮煤占比 55%



(c) CM-2-004H 井, J2x, 2436.79~2437.06 m, 光亮煤, 灰黑色玻璃光泽, 镜煤和亮煤占比 85%



(d) DN141 井, J1b, 3014.73~3015.01 m, 光亮煤, 黑色沥青光泽, 镜煤和亮煤占比 87%



(e) DN141 井, J1b, 3013.44~3013.72 m, 半亮煤, 镜煤和亮煤占比 60%



(f) CM-2-101 井, J1b, 3252.2~3252.49 m, 半亮煤, 镜煤和亮煤占比 70%



(g) DN141 井, J2x, 2585.65~2585.93 m, 原生结构



(h) CM-2-004H 井, J2x, 2439.08~2439.33 m, 碎裂结构



(i) CM-2-001 井, J2x, 2435.99~2436.39 m, 碎粒结构



(j) CM-2-101 井, J1b, 3254.04~3254.36 m, 原生结构



(k) DN141 井, J1b, 3007.59~3007.87 m, 原生结构



(l) DN141 井, J1b, 3010.86~3011.14 m, 原生结构

Figure 3. Macroscopic coal rock type and coal structure core diagram  
图 3. 宏观煤岩类型及煤体结构

### 3.3. 工业组分

工业组分作为反映煤岩品质的主要指标之一, 通常由固定碳、灰分、挥发分和水分四个部分组成。其中, 灰分和水分属无机组分, 固定碳和挥发分属有机组分[21]。研究区西山窑组煤岩固定碳含量介于 54.62%~75.84%之间, 平均为 64.54%; 挥发分含量介于 22.6%~32.28%之间, 平均为 26.62%; 灰分含量介于 1.34%~15.25%之间, 平均为 4.02%; 水分含量介于 0.97%~8.81%之间, 平均为 4.82%, 属于低-中挥发分、特低灰分、中-高固定碳煤, 如图 4(a)所示。八道湾组煤岩固定碳含量介于 39.79%~57.17%之间, 平均为 47.93%; 挥发分含量介于 36.15%~46.17%之间, 平均为 43.15%; 灰分含量介于 3.2%~14.37%之间, 平均为 7.28%; 水分含量介于 0.72%~3.12%之间, 平均为 1.64%, 属于中-高挥发分、低灰分、低-中固定碳煤, 如图 4(b)所示。西山窑组煤岩, 展现较高的固定碳含量特征; 而八道湾组煤岩挥发分含量更高, 灰分和水分含量与西山窑组整体差别较小。

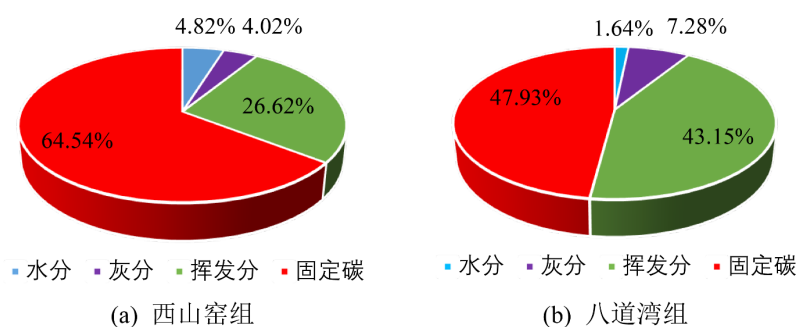


Figure 4. Comparison of industrial components between Xishanyao Formation and Badaowan Formation  
图 4. 西山窑组与八道湾组工业组分对比

### 3.4. 孔隙和裂隙

煤岩储层具有特殊的双重孔隙结构, 即孔隙和裂隙(图 5)。研究区煤岩孔隙类型以胞腔孔、气孔为主。

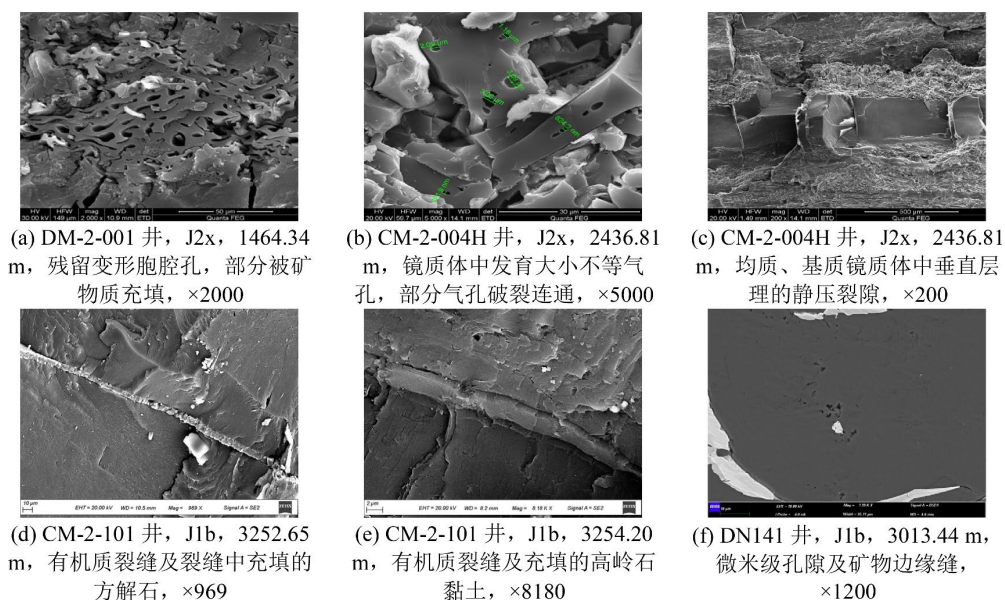


Figure 5. Photographs of microscopic pores and fractures of coal rock in the study area  
图 5. 研究区煤岩显微孔、裂隙特征照片

胞腔孔是植物细胞的细胞腔在成煤过程中保留或部分保留的孔隙结构, 多呈不规则多边形或管状, 是煤岩重要的原生孔隙, 如图 5(a)所示; 气孔是煤化作用过程中, 有机质热解或气体逸出形成的次生孔隙, 多呈圆形、椭圆形或不规则状, 属次生孔隙, 如图 5(b)所示。裂隙类型以割理及微裂缝为主。割理是煤岩中 2 组相互垂直同时又垂直于煤层面的天然开放式破裂系统, 通过煤化作用过程中物质结构、构造等的变化而产生。延伸较长的一组称作面割理, 与之垂直并支撑面割理的一组称作端割理, 二者是由垂向应力与煤体积收缩共同作用形成[38]。

研究区煤岩割理发育, 一般 4~17 条/5 cm, 平均 9~10 条/5 cm, 未充填 - 完全充填不等。微裂隙主要利用扫描电镜观察。观察结果表明, 煤岩中均质、基质镜质体上发育垂直层理的静压裂隙、平行于层理的层间裂缝以及斜交层理且穿越不同组分的裂隙, 如图 5(c)所示。西山窑组煤岩煤内孔隙较发育, 多为微米级孔隙, 少量纳米级孔隙, 整体连通性较好, 矿物含量较少, 石英为主, 见少量黏土矿物、长石、黄铁矿等。八道湾组煤岩煤内孔隙较为发育, 微孔为主, 少量发育矿物边缘孔隙, 整体上连通性较差, 矿物种类较多, 呈现一定的层状发育, 见石英、黄铁矿、方解石等发育, 如图 5(d)~(f)所示。

### 3.5. 物性特征

统计研究区 21 块岩心样品孔隙率与渗透率数据结果表明, 西山窑组煤岩孔隙率介于 10.48%~21.47% 之间, 平均值为 15.71%; 渗透率介于  $(0.98\sim 23.82) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 平均为  $6.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属中 - 高孔隙率、中 - 高渗透率储层。八道湾组煤岩孔隙率介于 0.95%~3.88% 之间, 平均为 3.00%; 渗透率介于  $(0.0044\sim 0.0681) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  之间, 平均为  $0.028 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 低于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 属低孔 - 低渗类储层(图 6)。

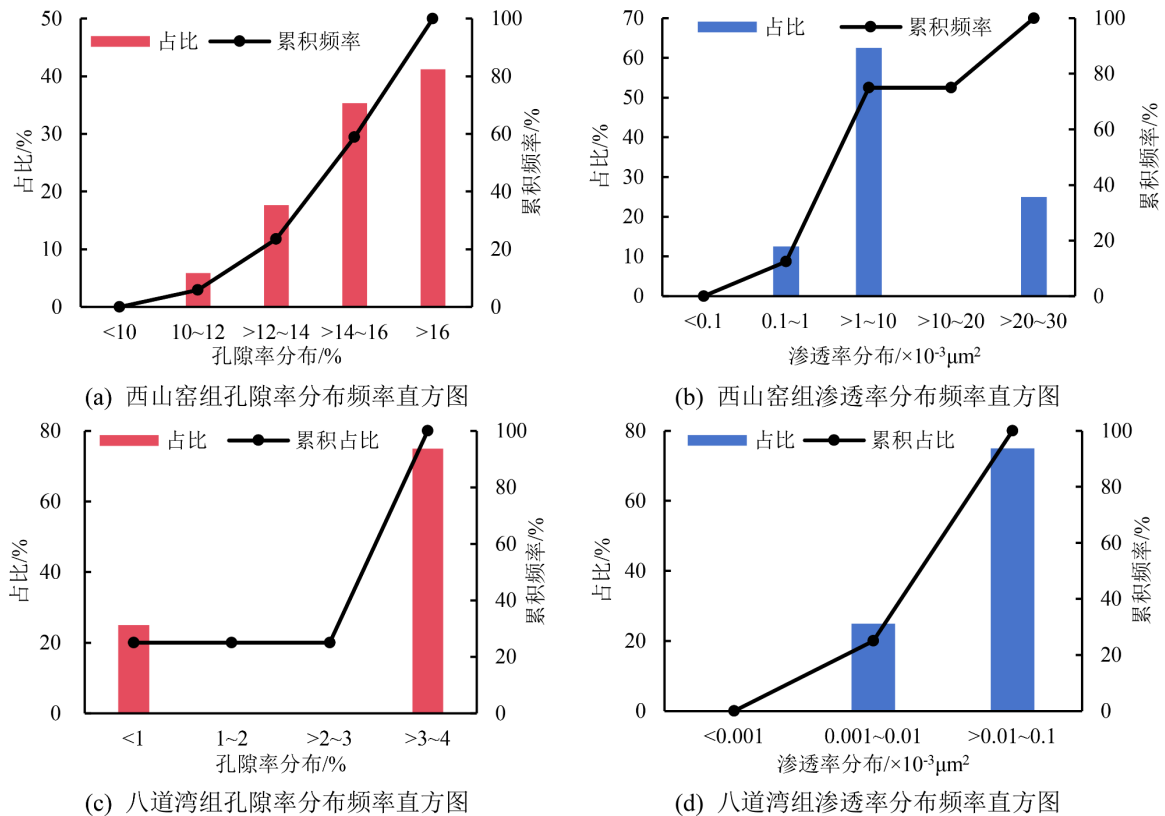


Figure 6. Distribution characteristics of coal physical properties in the study area

图 6. 研究区煤岩物性分布特征

## 4. 深层煤岩含气量评价方法

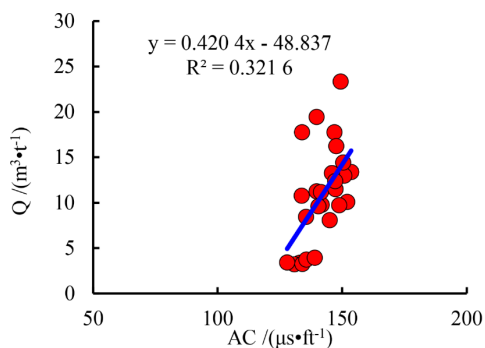
基于深层煤岩气常规测井响应特征, 结合总含气量保压取心测试结果, 建立了一种考虑权重系数的深层煤岩总含气量参数构建方法, 能够有效计算深层煤岩储层总含气量, 为盆地深层煤岩含气量测井评价提供了新方法。

### 4.1. 测井单相关性分析

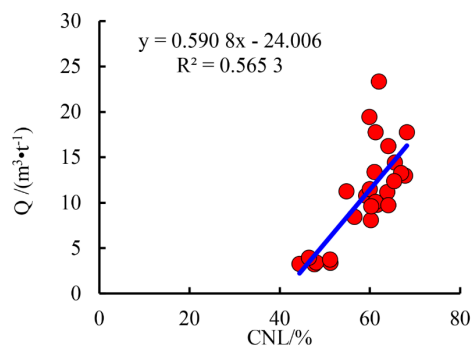
煤岩含气性测井响应受变质程度、煤体结构、骨架成分等影响, 相应的电性测井曲线主要包括浅侧向电阻率(RI)、深侧向电阻率(RT)、泥浆冲洗带电阻率(RXO)、自然伽马(GR)、补偿中子(CNL)、补偿密度(DEN)以及补偿声波(AC)等。分层系拟合研究区煤岩总含气量( $Q$ )与各测井曲线之间的关系。结果表明, 西山窑组煤岩总含气量与声波时差、补偿中子以及深浅电阻率曲线的对数( $\lg RT$ 、 $\lg RI$ )有较好的正相关关系, 如图 7(a)~(d)所示; 八道湾组煤岩总含气量与自然伽马、补偿密度曲线有较好的正相关关系, 与浅电阻率曲线的对数( $\lg RI$ )以及补偿中子曲线有较好的负相关关系, 如图 7(e)~(h)所示。图中显示 CNL 和  $\lg RI$  在两套煤层中与总含气量呈现相反的相关性, 该现象由孔隙内煤岩气的赋存状态差异导致。西山窑组煤岩气以游离态为主, 孔隙内游离气含量的增加导致含氢指数增大, 导电性变差, 进而表现为深浅电阻率、CNL 增大。八道湾组煤岩气以吸附气为主, 孔隙内影响含氢指数及导电性的游离气较少, 进而表现为随含气量的增大, 深浅电阻率、CNL 具有减小的趋势。

### 4.2. 多元线性回归模型

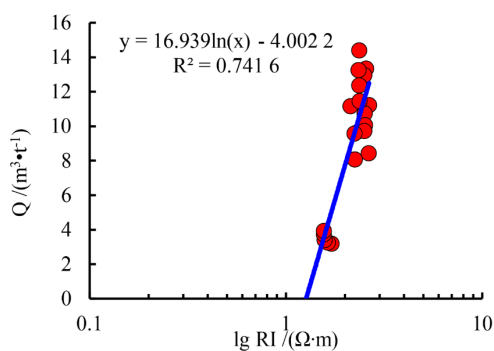
基于上述测井单相关性分析结果, 优选敏感测井曲线, 采用多元回归法, 分层系建立总含气量测井评价模型。



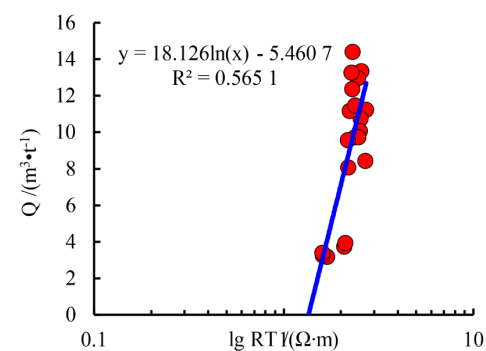
(a) 西山窑组总含气量与 AC 相关性



(b) 西山窑组总含气量与 CNL 相关性



(c) 西山窑组总含气量与  $\lg RI$  相关性



(d) 西山窑组总含气量与  $\lg RT$  相关性

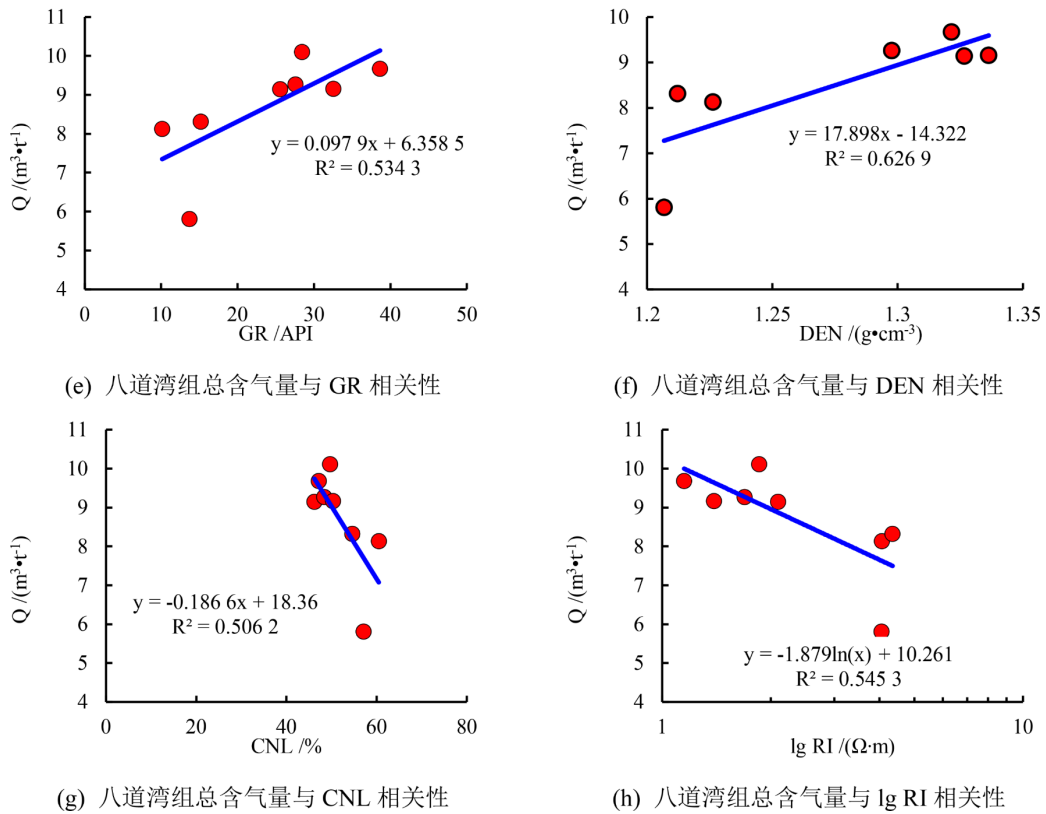


Figure 7. Correlation chart of total gas content and logging curve

图 7. 总含气量与测井曲线相关性图版

西山窑组优选 AC、CNL、lg RI、lg RT 4 条敏感曲线, 建立西山窑组总含气量多元回归模型  $Q_x$ :

$$Q_x = -0.025AC + 0.43CNL + 4.45\lg RI - 0.58\lg RT - 19.23$$

$$R^2 = 0.762$$

八道湾组优选 DEN、CNL、GR、lg RI, 4 条敏感曲线, 建立八道湾组总含气量多元回归模型  $Q_b$ :

$$Q_b = -0.01GR - 0.08CNL - 6.3DEN - 0.8\lg RI + 23.01$$

$$R^2 = 0.788$$

### 4.3. 构建参数法模型

为提高测井解释模型精度, 提出一种考虑权重系数的深层煤岩总含气量参数构建方法(图 8)。通过考虑不同测井曲线对总含气量的敏感程度, 构建含气量复合参数  $G$ :

$$G = \omega_1 \times \log i_1 \cdots \omega_n \times \log i_n / (k_1 \times \log J_1 \cdots k_n \times \log J_n)$$

式中  $\log i_n$  ——第  $n$  个正相关曲线;  $\omega_n$  ——第  $n$  个正相关曲线加权系数;  $\log J_n$  ——第  $n$  个负相关曲线;  $k_n$  ——第  $n$  个负相关曲线加权系数。

基于上述思路, 通过选取敏感参数曲线, 利用归一化法确定敏感曲线权重系数(表 1), 分层位构建总含气量参数  $G$ 。

(1) 西山窑组: 选择声波时差、补偿中子、电阻率对数曲线作为基础参数, 并根据不同曲线对含气性敏感性的高低, 建立含气量参数  $G_x$ :

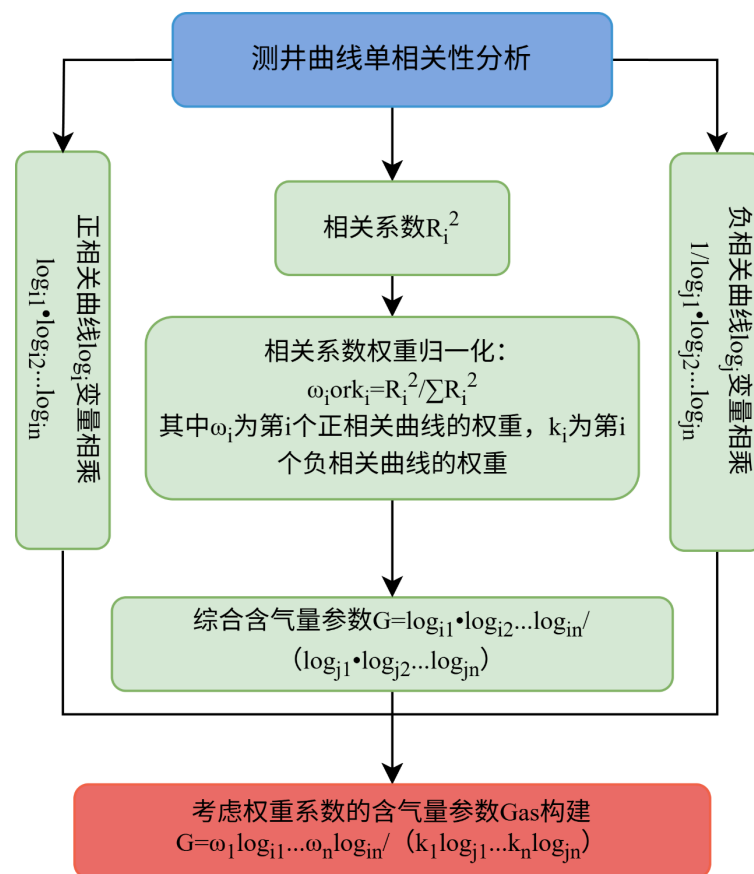


Figure 8. Construction process of gas content parameter Gas considering weight coefficient

图 8. 考虑权重系数的含气量参数 Gas 构建流程

Table 1. G weighted coefficient table of gas content comprehensive parameters

表 1. 含气量综合参数 G 加权系数表

J <sub>2x</sub> 相关系数加权项			J <sub>1b</sub> 相关系数加权项		
测井曲线	R <sup>2</sup>	加权系数	测井曲线	R <sup>2</sup>	加权系数
AC	0.32	0.19	GR	0.53	0.24
CNL	0.56	0.34	CNL	0.51	0.23
lgRI	0.74	0.28	DEN	0.63	0.28
lgRT	0.56	0.19	lgRI	0.54	0.25
总和	1.66	1	总和	2.21	1

$$G_x = 0.19AC \times 0.34CNL \times 0.28lgRI \times 0.19lgRT$$

(2) 八道湾组: 选择自然伽马、补偿中子、补偿密度、电阻率对数曲线作为基础参数, 并根据不同曲线对含气性敏感性的高低, 建立含气量参数  $G_b$ :

$$G_b = 0.24GR \times 0.23CNL \times 0.28DEN \times 0.25lgRI$$

以建立的含气量参数为基础, 将西山窑组和八道湾组含气量参数分别与总含气量开展相关性分析, 建立准噶尔盆地滴南-白家海区块煤岩气含气量解释模型, 如图 9(a), 图 9(b)所示。

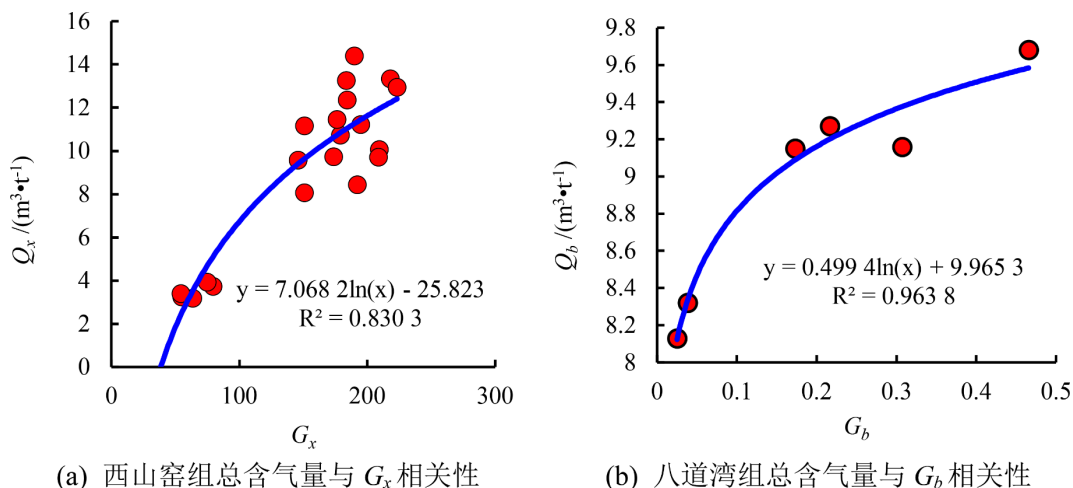


Figure 9. Correlation between total gas content and construction parameter G

图 9. 总含气量与构建参数 G 相关性

西山窑组煤岩总含气量解释模型:

$$Q_x = 7.06 \times \ln(0.19AC \times 0.34CNL \times 0.28lg RI \times 0.19lg RT) - 25.823$$

$$R^2 = 0.8303$$

八道湾组煤岩总含气量解释模型:

$$Q_b = 0.499 \times \ln(0.24GR \times 0.23CNL \times 0.28DEN \times 0.25lg RI) + 9.9653$$

$$R^2 = 0.9638$$

## 5. 应用效果分析

为了验证方法可靠性,以研究区 A 井为例开展分析验证(图 10)。其中第一道为层位道;第二道为深度道;第三道为录井岩性道;第四道为测井曲线道,从上到下依次为自然伽马、井径、自然电位曲线;第五道为测井曲线道,从上到下依次为岩心密度、补偿密度曲线、补偿中子、声波曲线;第六道为常规曲线道,从上到下依次为深、浅、泥浆冲洗带电阻率曲线;第七道为测井计算煤岩组分道,从上到下依次为测井计算孔隙率、固定碳、挥发分、灰分、水分、砂、泥质含量;第八道为测井计算孔隙率和岩心孔隙率;第九道为测井计算渗透率和岩心渗透率;第十道为多元回归法总含气量计算结果,与岩心吻合效果较差;第十一道为构建参数法总含气量计算结果,与岩心测试结果更为吻合。

其中 2580~2595 m 井段西山窑组含气量多元线性回归模型解释结果绝对误差为 0.1~4.58 m<sup>3</sup>/t,平均为 2.24 m<sup>3</sup>/t,相对误差为 1.16%~32.07%,平均为 18.85%;构建参数法模型测井解释结果绝对误差为 0.06~3.58 m<sup>3</sup>/t,平均为 1.3 m<sup>3</sup>/t,相对误差为 0.51%~30.14%,平均为 11.36%。3010~3022 m 井段八道湾组含气量多元线性回归模型解释结果绝对误差为 0.32~2.86 m<sup>3</sup>/t,平均为 1.41 m<sup>3</sup>/t,相对误差为 4.22%~30.47%,平均为 17.05%;构建参数法模型测井解释绝对误差为 0.25~1.72 m<sup>3</sup>/t,平均为 0.94 m<sup>3</sup>/t,相对误差为 3.19%~29.5%,平均为 12.34%。

## 6. 结论

(1) 研究区煤岩属中低阶煤岩(0.43% < R<sub>o,max</sub> < 0.85%),主要为长焰煤和气煤,八道湾组热演化程度略高,部分达肥煤。西山窑组主要煤岩类型为半暗-半亮型煤,结构以原生-碎裂结构为主;八道湾组

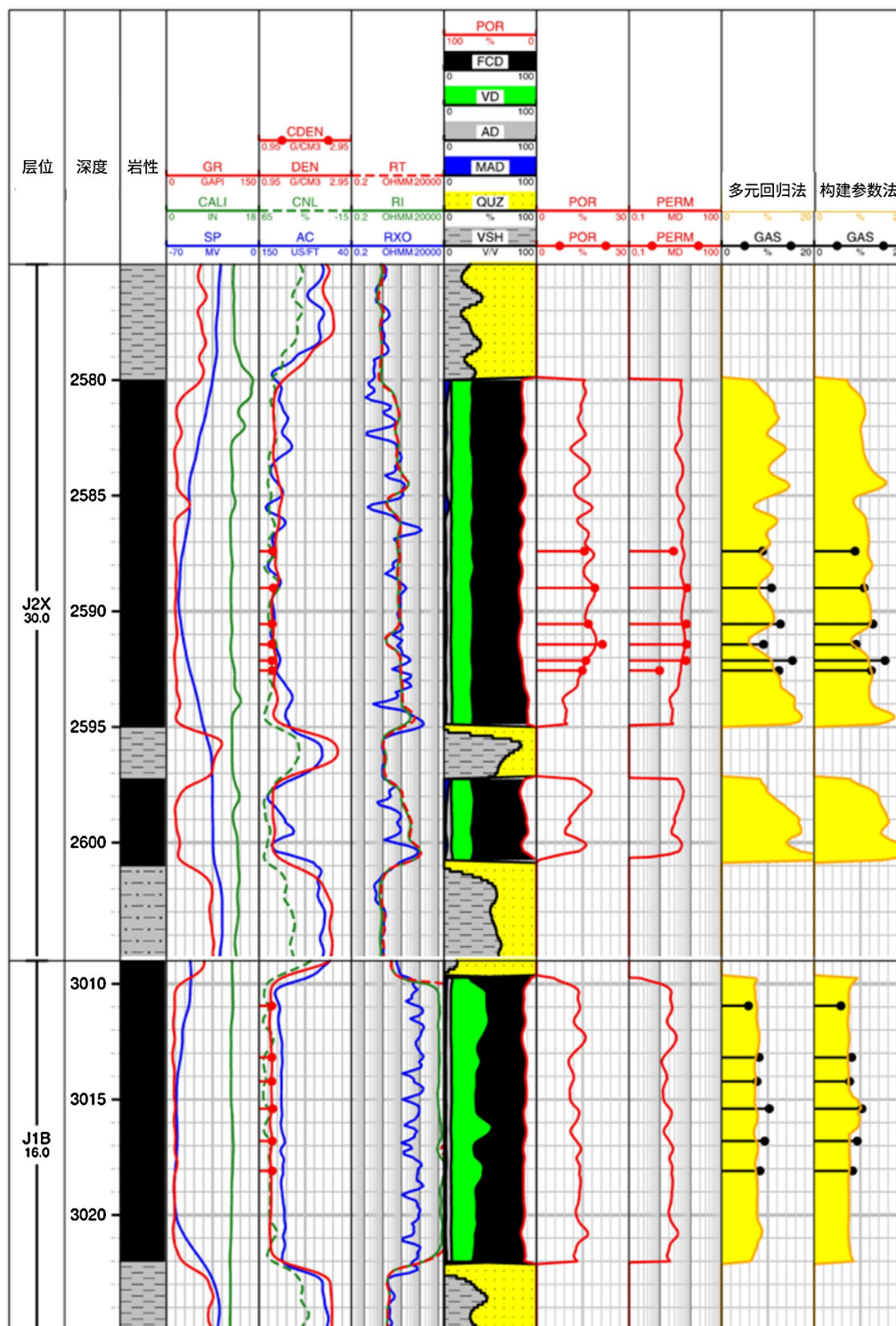


Figure 10. Gas content logging calculation results of Well A in Dinan-Baijiahai Block, Junggar Basin

图 10. 准噶尔盆地滴南 - 白家海区块 A 井含气量测井计算结果

煤岩类型以半亮 - 光亮型为主, 主要发育原生结构。

(2) 西山窑组煤岩固定碳平均含量为 64.54%; 挥发分平均含量为 26.62%; 灰分平均含量为 4.02%;

水分平均含量为 4.82%，属于低 - 中挥发分、特低灰分、中 - 高固定碳煤。八道湾组煤岩固定碳平均含量为 47.93%；挥发分平均含量为 43.15%；灰分平均含量为 7.28%；水分平均含量为 1.64%，属于中 - 高挥发分、低灰分、低 - 中固定碳煤。

(3) 煤岩储集空间类型以胞腔孔、气孔和裂隙为主。西山窑组煤岩煤内孔隙较为发育，多为微米级孔隙，见少量纳米级孔隙，整体连通性较好；八道湾组煤内孔隙以微米级孔隙为主，发育少量矿物边缘孔隙，整体连通性较差。

(4) 研究区西山窑组煤岩孔隙率平均值为 15.71%；渗透率平均值为  $6.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属中 - 高孔隙率、中 - 高渗透率储层。八道湾组煤岩孔隙率平均值为 3.00%；渗透率平均值为  $0.028 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，低于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属低孔 - 低渗类储层。煤岩物性与固定碳含量呈明显正相关关系，裂隙发育的样品出现特高渗特征。

(5) 分析煤岩总含气量与常规测井曲线相关性，优选敏感参数曲线，分层位构建侏罗系西山窑组、八道湾组深层煤岩总含气量复合参数  $G_x$ 、 $G_b$ ，并根据总含气量与复合参数的关系，建立总含气量测井解释模型。相较于多元回归模型，构建参数法模型表现出更高精度，证明了该模型的准确性。

## 参考文献

- [1] 刘得光, 罗晓静, 万敏, 等. 准噶尔盆地东部煤层气成藏因素及勘探目标[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(4): 349-351.
- [2] 邢丽茹, 张洲, 任峻杉, 等. 准噶尔盆地深部与浅部煤层气储层物性特征对比分析[J]. 中国煤炭, 2024, 50(9): 9-17.
- [3] 李雪彬, 金力新, 陈超峰, 等. 深层煤层气水平井压裂关键技术-以准噶尔盆地白家海地区侏罗系为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 629-637.
- [4] 赵喆, 杨威, 赵振宇, 等. 中国煤成气地质理论研究进展与重点勘探领域[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1240-1253.
- [5] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 38-49.
- [6] 李道清, 陈永波, 杨东, 等. 准噶尔盆地白家海凸起侏罗系西山窑组煤层气“甜点”储层智能综合预测技术[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(6): 23-35.
- [7] Cheng, Y., Jiang, H., Zhang, X., Cui, J., Song, C. and Li, X. (2017) Effects of Coal Rank on Physicochemical Properties of Coal and on Methane Adsorption. *International Journal of Coal Science & Technology*, 4, 129-146. <https://doi.org/10.1007/s40789-017-0161-6>
- [8] 余琪祥, 罗宇, 曹倩, 等. 准噶尔盆地东北缘深层煤层气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(5): 888-899.
- [9] 杨兆彪, 李存磊, 郭巧珍, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气不同赋存态分配规律[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 127-137.
- [10] 程长领, 刘华, 纪雪冰, 等. 准噶尔盆地中部 4 区块侏罗系西山窑组煤岩特征及成煤环境[J]. 地质科学, 2025, 60(2): 474-483.
- [11] 徐茂轩, 杜文凤, 赫云兰, 等. 准噶尔盆地南缘低煤阶煤层气富集区三维地震预测[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(5): 593-599.
- [12] 孙斌, 杨敏芳, 田文广, 等. 准噶尔盆地深部煤层气开发潜力分析[C]/中国石油学会石油地质专业委员会, 中国煤炭学会煤层气专业委员会, 煤层气产业技术创新战略联盟. 煤层气勘探开发技术新进展——2018 年全国煤层气学术研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2018: 163-174.
- [13] 王鹏翔, 张洲, 余婉莹, 等. 深/浅部煤储层孔裂隙结构及三维空间分布差异特征——以准噶尔盆地为例[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(2): 227-236.
- [14] 李勇, 徐凤银, 唐书恒, 等. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 63-79.
- [15] 王安龙. 煤层气测井资料建模及其应用评价研究[J]. 中国煤层气, 2014, 11(4): 31-35.
- [16] 侯颀, 邹长春, 杨玉卿, 等. 测井解释中煤层含气量评价方法对比研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 157-161+156.

- [17] 刘国伟, 张涛, 韩文龙. 基于常规测井的煤层含气量研究[J]. 内蒙古石油化工, 2017, 43(2): 20-21.
- [18] 孙云川. 关于煤层含气量的测井综合评价方法[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(3): 148-150.
- [19] 陈涛, 张占松, 周雪晴, 等. 基于测井参数优选的煤层含气量预测模型[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 227-235+243.
- [20] 刘荣芳, 王建功, 刘文华, 等. 基于煤岩结构的煤层含气量测井评价方法[J]. 中国煤层气, 2014, 11(4): 22-25.
- [21] 石玉江, 何羽飞, 王金彬, 等. 深层煤岩气地质品质及含气量测井评价方法研究[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 126-141.
- [22] 陈国军, 李军红, 张文芊, 等. 深层中低煤阶储层煤层气含量测井计算方法[J]. 新疆地质, 2024, 42(3): 385-391.
- [23] Shao, X., Sun, Y., Sun, J., Tang, D., Xu, H., Dong, X., *et al.* (2013) Log Interpretation for Coal Petrologic Parameters: A Case Study of Hancheng Mining Area, Central China. *Petroleum Exploration and Development*, **40**, 599-605. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(13\)60078-6](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(13)60078-6)
- [24] Liu, D., Zhao, Z., Cai, Y. and Sun, F. (2024) Characterizing Coal Gas Reservoirs: A Multiparametric Evaluation Based on Geological and Geophysical Methods. *Gondwana Research*, **133**, 91-107. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.06.001>
- [25] 汤达祯, 杨曙光, 唐淑玲, 等. 准噶尔盆地煤层气勘探开发与地质研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2412-2425.
- [26] 项威, 蒋文龙, 刘超威, 等. 准噶尔盆地白家海凸起侏罗系煤岩气地球化学特征与成因[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(2): 367-379.
- [27] 毛新军, 李艳平, 梁则亮, 等. 准噶尔盆地侏罗系煤岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 31-43.
- [28] 杨海波, 陈磊, 孔玉华. 准噶尔盆地构造单元划分新方案[J]. 新疆石油地质, 2004(6): 686-688.
- [29] 龚德瑜, 周川闽, 齐雪峰, 等. 准噶尔盆地东部多类型天然气的发现与勘探启示[J]. 地质学报, 2024, 98(4): 1263-1278.
- [30] 付永红, 能源, 邢向杰, 等. 准噶尔盆地西北缘大侏罗沟走滑断裂带分层、分段变形特征及形成演化过程[J]. 大地构造与成矿学, 2025, 49(6): 1349-1366.
- [31] 李建忠, 王小军, 杨帆, 等. 准噶尔盆地中央坳陷西部下组合油气成藏模式及勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1059-1072.
- [32] 胡鑫, 姚卫江, 胡正舟, 等. 准噶尔盆地白家海地区西山窑组深部煤岩储层孔隙结构表征及发育主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 12-23.
- [33] Zhao, Z., Yang, W., Zhao, Z., Xu, W., Gong, D., Jin, H., *et al.* (2024) Research Progresses in Geological Theory and Key Exploration Areas of Coal-Formed Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, **51**, 1435-1450. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(25\)60551-9](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(25)60551-9)
- [34] 兰浩, 杨兆彪, 仇鹏, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气勘探开发进展及启示[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 13-22.
- [35] 康永尚, 皇甫玉慧, 张兵, 等. 含煤盆地深层“超饱和”煤层气形成条件[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1426-1438.
- [36] 李国欣, 张水昌, 何海清, 等. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 783-795.
- [37] 陈国军, 潘拓, 张帆, 等. 深层中低煤阶煤层气产能分类评价方法[J]. 特种油气藏, 2025, 32(1): 71-78.
- [38] 刘新社, 黄道军, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 51-62.