

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.01.13

引用格式: 郭广山,李昊,田永净,等. 基于测井参数宏观煤岩类型预测及三维地质建模[J]. 中国地质调查,2022,9(1): 125 – 130. (Guo G S, Li H, Tian Y J, et al. Macrolithotype prediction and 3D geological modeling based on logging parameters[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(1): 125 – 130.)

基于测井参数宏观煤岩类型预测及三维地质建模

郭广山, 李昊, 田永净, 杜凯

(中海油研究总院非常规研究院, 北京 100028)

摘要:为实现定量判别宏观煤岩类型分布特征,依据煤层气参数井煤岩描述结果,利用不同宏观煤岩类型在测井响应特征的差异性,建立宏观煤岩类型指数(HMLZ)。通过该判别方法完成SZB区块30口井宏观煤岩类型定量识别及验证,进一步采用随机建模方法实现宏观煤岩类型空间分布特征的三维可视化。结果表明:HMLZ > 20.0为光亮煤; 10.0 < HMLZ < 20.0为半亮煤; 5.5 < HMLZ < 10.0为半暗煤; HMLZ < 5.5为暗淡煤。研究区3号煤层宏观煤岩类型主要为光亮煤和半亮煤,半暗煤次之,暗淡煤不发育。光亮煤平均厚度占比36%; 半亮煤平均厚度占比46%,主要分布在区块的北部和南部煤层的中上段; 半暗煤主要分布在区块的中部煤层的中下段,平均占15%; 暗淡煤零星发育在区块的西南角煤层的底部,厚度较薄,占3%。总体来看,模型能有效地定量评价煤岩类型分布规律,为煤层气开发提供有力支撑。

关键词: 宏观煤岩类型; 测井响应; 三维地质建模; SZB区块

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2022)01-0125-06

0 引言

煤层气作为非常规能源,在我国已有几十年的勘探开发历程。随着勘探开发程度的不断深入,单井产量低、达产率低的难题日渐凸显。经大量的理论分析和技术攻关,认为煤层气产量主控因素是含气量、渗透率、孔隙度、吸附能力、煤储层改造效果和排采管控等,煤岩特征通过对煤层含气性、可改造性和渗流条件等因素的控制作用进而影响着产气效果^[1]。近年来,一些学者开展了煤岩特征对煤层气产能影响机理、基于测井参数的宏观煤岩类型识别方法等工作。许浩等^[2]阐明煤岩制约下的储层有效孔渗空间发育特征、层内(间)本构关系变化及煤层气开发过程储层物性响应成为亟待探索的科学问题;赵石虎等^[3]利用多元线性回归方法,建立了柿庄地区3号煤层宏观煤岩类型测井解释模型,并划分了该煤层宏观煤岩类型;邵先杰等^[4]在岩电关系研究的基础上,确定了不同煤岩类型电

性参数分布区间,建立了煤岩测井解释图版,提出了灰色关联法解释煤岩方法。但这些判别方法不能明确表征煤岩类型的空间分布特征和分布规律,不能满足煤层气生产的需求。

本文利用主成分分析法确定出自然伽马测井、补偿密度测井、声波时差测井和深侧向测井等能较好地表征不同宏观煤岩类型测井响应的特征,建立了宏观煤岩指数(HMLZ),结合研究区20口煤层气参数井3号煤层煤岩描述结果,计算出判别标准,并对结果进行验证,进而展开3号煤层宏观煤岩类型分布规律评价。基于随机建模思路,建立了3号煤层宏观煤岩类型三维地质模型,明确了宏观煤岩类型空间分布规律,研究成果为研究区煤层气持续勘探开发提供有力支撑。

1 研究区地质概况

SZB区块位于沁水盆地东南部,沁水复向斜的东翼,受区域构造应力场的控制,具有典型的東西

分带性,大致可划分为东部缓坡带、中央褶皱带和西部缓坡带(图 1)。含煤层系为二叠系山西组和石炭系太原组,山西组 3 号煤层全区稳定发育,是研究区主要开发目的煤层。3 号煤层埋深为 300 ~ 1 200 m,平均 800 m;煤层厚度为 5.5 ~ 7.0 m,平均 6.0 m;含气量为 8.0 ~ 20.0 m³/t,平均 14.5 m³/t。

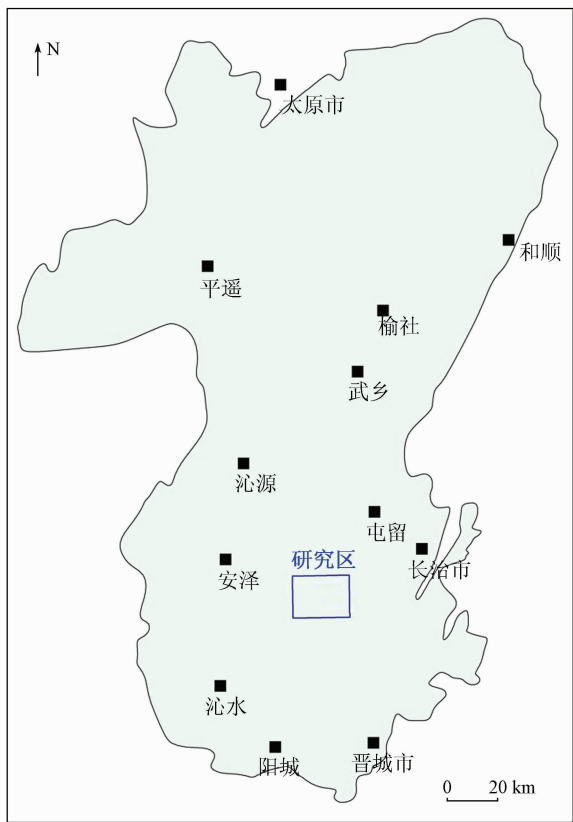


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

3 号煤层顶底板主要以泥岩为主,局部发育泥质砂岩或致密粉砂岩,整体保存条件较好。孔渗条件相对较差,注入/压降测试渗透率为 $1 \times 10^{-5} \sim 46 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 。

2 宏观煤岩类型及测井响应特征

2.1 宏观煤岩类型特征

按照同一变质程度煤的相对光泽强度和光亮煤岩成分比例,把宏观煤岩类型划分为光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗淡煤(图 2)。不同宏观煤岩类型表现出差异明显的物理性质^[5-7]。

(1)光亮煤。相对光泽强度最强,光亮煤岩成分含量大于 80%,结构近于均一,条带状结构不明显。内生裂隙发育、脆性大、机械强度小、易破碎,具贝壳状断口。镜质组含量在 80% 以上。

(2)半亮煤。相对光泽强度次强,光亮煤岩成分含量为 50% ~ 80%,具有明显的条带状,凸镜-条带状和线理-条带状结构。内生裂隙发育,常具有棱角状或不平坦状断口,易破碎。镜质组含量为 60% ~ 80%。

(3)半暗煤。相对光泽强度较弱的煤岩类型,光亮煤岩成分含量为 20% ~ 50%,具条带状和线理状结构。内生裂隙不发育,比较坚硬,密度相对较大。镜质组含量为 35% ~ 60%。

(4)暗淡煤。相对光泽强度最弱,光亮煤岩成分含量小于 20%,多呈粒状结构。层理不明显,质地坚硬,韧性大,密度大,内生裂隙不发育,常呈棱角状或参差状断口。镜质组含量小于 35%。



(a) 光亮煤

(b) 半亮煤

(c) 半暗煤

(d) 暗淡煤

图 2 宏观煤岩类型岩心照片

Fig. 2 Marcolithotypes core photos

2.2 测井响应特征

实现基于测井参数的宏观煤岩类型预测,需结合煤层气参数并煤岩描述结果,刻画出不同宏观煤岩类型在测井曲线上的变化规律和响应特征^[8]。

在成煤过程中,受成煤物质、煤相和煤变质作用等因素影响,不同类型煤岩的物理性质差异较大,其中灰分、密度、矿物含量、内生裂隙发育程度等参数决定着测井曲线响应变化特征,这些响应变化特征

是建立宏观煤岩类型判别模型的理论依据^[9-10]。采用 SPSS 软件利用主成分分析法确定出自然伽玛测井 (GR)、补偿密度测井 (DEN)、声波时差测井 (AC) 和深侧向电阻率测井 (RD) 作为评价曲线。

(1) 自然伽马测井 (GR)、深侧向电阻率测井 (RD)。主要受煤岩中矿物含量和灰分影响。从光亮煤到暗淡煤,矿物含量和灰分逐渐增加,GR 响应值随之变大,而 RD 响应值逐渐降低。

(2) 补偿密度测井 (DEN)。主要受煤岩密度的变化影响。从光亮煤到暗淡煤,密度逐渐增大,DEN 响应值随之变大。

(3) 声波时差测井 (AC)。主要受煤岩内生裂隙发育程度影响。从光亮煤到暗淡煤,内生裂隙发育程度逐渐变低,声波时差测井值逐渐变小。

3 宏观煤岩类型测井模型预测及验证

3.1 定量预测方法

对研究区不同宏观煤岩类型测井响应特征分析发现,光亮煤表现出低伽马、低密度、高声波时差、高

电阻率的响应特征,暗淡煤则表现出高伽马、高密度、低声波时差、低电阻率的响应特征;半亮煤和半暗煤介于两者之间。因此选择自然伽马、补偿密度、声波时差和深侧向测井响应值建立宏观煤岩类型指数 (HMLZ) (以下简称指数 HMLZ),其表达式为

HMLZ = \frac{\lg(RD) \times AC}{DEN^2 \times GR}。(1)

式中: RD 为深侧向电阻率值,Ω·m; AC 为声波时差测井值,μs/m; DEN 为补偿密度测井值,g/cm³; GR 为自然伽马测井值,API。

3.2 预测结果验证

建立研究区 20 口煤层气参数井煤岩综合测井图(图 3),结合 3 号煤层宏观煤岩类型描述结果,划分出不同宏观煤岩类型评价测井曲线响应范围(表 1),利用建立的指数 HMLZ 分别计算出煤岩类型分区范围^[11-12]。研究区 3 号煤层宏观煤岩类型的识别标准为: HMLZ > 20.0 为光亮煤; 10.0 < HMLZ < 20.0 为半亮煤; 5.5 < HMLZ < 10.0 为半暗煤; HMLZ < 5.5 为暗淡煤。

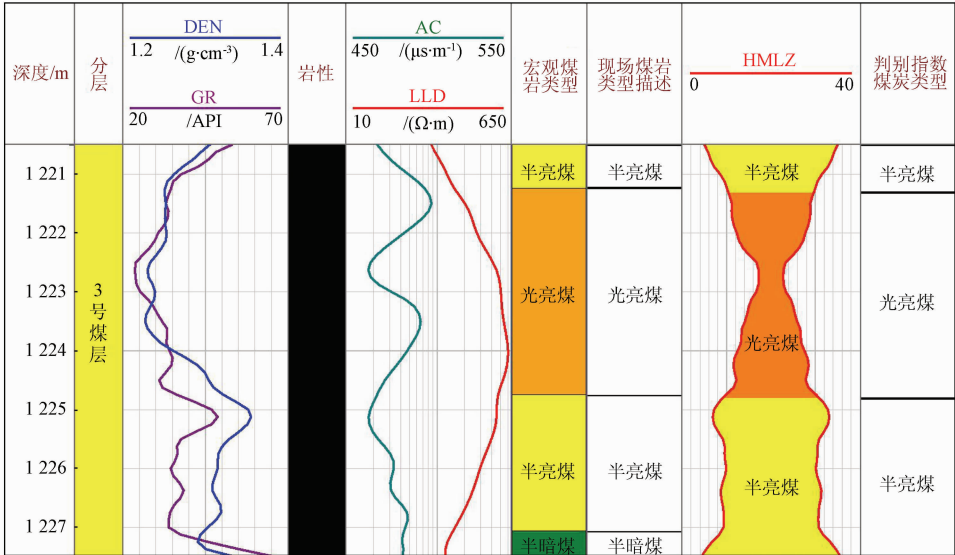


图 3 SZB-007 井宏观煤岩类型测井特征验证曲线
Fig. 3 Logging characteristic verification curve of marcolithotypes in SZB-007

表 1 宏观煤岩类型电性参数及判别指数划分标准
Tab.1 Classification standard of electrical parameters and discrimination index of marcolithotypes

宏观煤岩类型	补偿密度/ (g·cm ⁻³)	自然伽马/ API	声波时差/ (μs·m ⁻¹)	深侧向电阻 率/(Ω·m)	判别指数 HMLZ
光亮煤	[1.10,1.30]	[30,60]	[400,540]	[1 500,12 000]	>20.0
半亮煤	[1.30,1.50]	[35,65]	[390,480]	[400,9 500]	[10.0,20.0]
半暗煤	[1.35,1.60]	[50,90]	[380,470]	[350,7 500]	[5.5,10.0]
暗淡煤	[1.50,1.70]	[70,100]	[360,430]	[340,900]	<5.5

依据建立的宏观煤岩类型测井模型和判别标准,对未参与计算的 10 口井进行煤岩类型划分,并与煤岩描述结果进行对比发现,吻合率为 85% ~ 89%,验证结果说明预测模型可靠性和准确性较好^[13-14]。

以 SZB-007 井为例,3 号煤层埋深为 1 220.5 ~ 1 228.3 m,现场描述在上部 1.23 m 发育半亮煤,

中间 1 221. 23 ~ 1 224. 74 m 发育光亮煤,下部 1 224. 74 ~ 1 227. 07 m 发育半亮煤,底部发育 0. 5 m 厚度的半暗煤。将指数 HMLZ 计算结果与煤岩描述进行对比,吻合率为 80% ~ 86. 5%,吻合率相对较高。对于存在的误差,主要是受限于煤层气参数井煤心观察描述结果,其准确性受制于现场技术人员的经验。同时煤层的最上部与顶板的结合部位,受限于顶板岩性的影响,对预测结果会产生部分影响。相较而言,基于测井参数的宏观煤岩类型评价方法是一种较可靠的定量性表征方法。

3.3 煤岩类型分布规律

按照指数 HMLZ 进行研究区 3 号煤层宏观煤岩类型分布规律评价。结果显示:研究区主要发育光亮煤和半亮煤,半暗煤和暗淡煤发育较少;半亮煤全区发育,厚度多为 1. 0 ~ 4. 5 m,呈现南北厚度大、中间薄的分布特征,仅在区块的东北角厚度小于 1 m;光亮煤厚度多为 1. 5 ~ 3. 5 m,呈现东西厚、中间薄,且局部不发育的特征;半暗煤呈现南北薄、中间厚的分布特征,厚度多为 0. 5 ~ 3. 0 m,在区块东北角半暗煤不发育;暗淡煤仅在区块西南角发育,厚度为 0. 2 ~ 0. 8 m(图 4)。

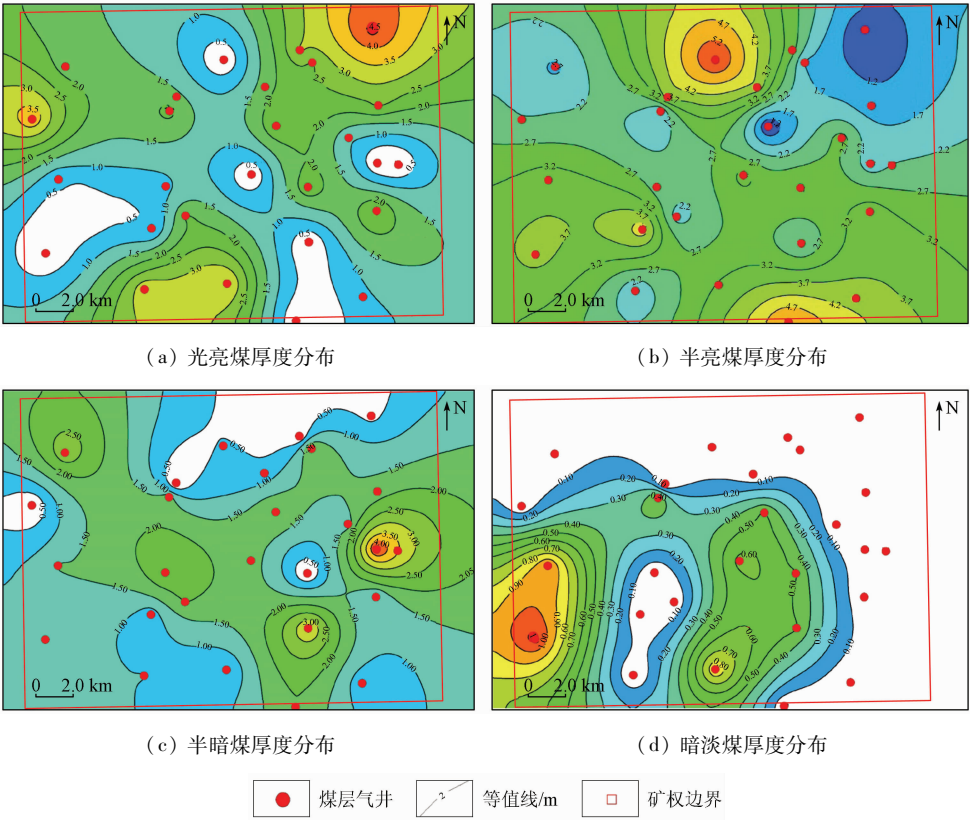


图 4 3 号煤层宏观煤岩类型厚度分布
Fig. 4 Thickness distribution of macrolithotypes in No. 3 coal seam

4 宏观煤岩类型地质建模

随着煤层气勘探开发程度的深入,宏观煤岩类型判识对井位部署、射孔选层和排采管控愈发重要。目前针对煤岩类型空间分布的研究较少,有必要建立宏观煤岩类型的三维地质模型,为区块煤层气开发提供技术支撑。

依据煤岩类型测井判别模型,计算得出研究区

3 号煤层不同煤岩类型发育厚度,采用随机地质建模方法构建出三维地质模型,评价研究区煤岩类型空间分布规律^[15-16]。从建立的模型(图 5)分析结果可以得出:光亮煤占比为 15% ~ 80%,平均 36%;半亮煤占比为 30% ~ 92%,平均 46%,主要分布在区块的北部和南部煤层的中上段;半暗煤主要分布在区块的中部煤层的中下段,呈 EW 向展布,平均厚度仅占 15%;暗淡煤零星发育在区块的西南角煤层的底部,平均厚度仅占 3%。因此推断

研究区勘探开发应集中在光亮煤和半亮煤发育的北部为主,其次是南部^[16-17]。

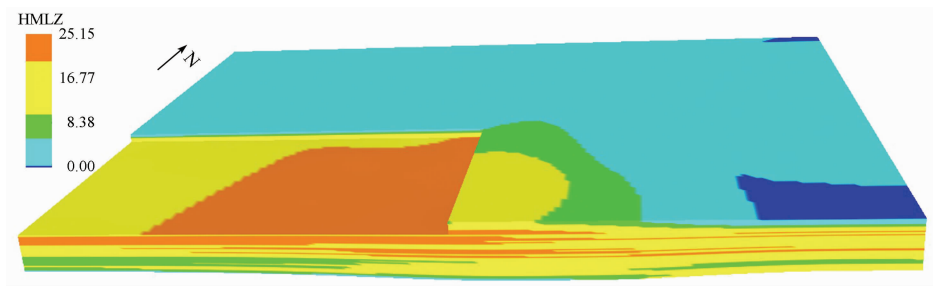


图 5 宏观煤岩类型三维地质模型
Fig. 5 3D geological model of macrolithotypes

5 结论

(1)研究区 3 号煤层宏观煤岩类型主要以光亮煤和半亮煤为主,半暗煤次之,暗淡煤不发育。利用宏观煤岩类型在自然伽马、补偿密度、声波时差和深侧向测井曲线的变化规律,建立宏观煤岩类型指数 HMLZ 进行定量识别,3 号煤层判别标准为: $HMLZ > 20.0$ 为光亮煤, $10.0 < HMLZ < 20.0$ 为半亮煤, $5.5 < HMLZ < 10.0$ 为半暗煤, $HMLZ < 5.5$ 为暗淡煤。宏观煤岩类型指数 HMLZ 判别模型可靠性和准确性较高。

(2)采用随机地质建模方法对 3 号煤层构建宏观煤岩类型三维地质模型。其中,光亮煤和半亮煤分别平均占比 36% 和 46%,主要分布在区块的北部和南部煤层的中上段。宏观煤岩类型分布主要与成煤环境、成煤物质等相关。

参考文献 (References):

[1] 郭广山,邢力仁,李娜,等. 煤层气井组生产特征及产能差异控制因素[J]. 天然气地球科学,2020,31(9):1334-1342.
Guo G S,Xing L R,Li N,et al. Study on production characteristics and controlling factors of capacity differences of coalbed methane well group[J]. Nat Gas Geosci,2020,31(9):1334-1342.

[2] 许浩,汤达祯. 基于煤层气产出的煤岩学控制机理研究进展[J]. 煤炭科学技术,2016,44(6):140-145,158.
Xu H,Tang D Z. Research progress of control mechanism of coal petrology on CBM production [J]. Coal Sci Technol, 2016, 44(6):140-145,158.

[3] 赵石虎,于腾腾,何云超,等. 基于测井的柿庄地区宏观煤岩类型划分[J]. 中国矿业,2017,26(S1):382-384.
Zhao S H,Yu T T,He Y C,et al. Classification of macroscopic type based on logging in Shizhuang area [J]. China Min Mag, 2017,26(S1):382-384.

[4] 邵先杰,董新秀,汤达祯,等. 韩城矿区煤岩类型测井解释技术及产能预测方法[J]. 测井技术,2013,37(6):671-675.

Shao X J,Dong X X,Tang D Z,et al. Coal type definition and productivity production of Hancheng mining area based on logging data[J]. Well Logg Technol,2013,37(6):671-675.

[5] 郭广山,邢力仁,李昊. 基于 NMR 和 X-CT 的不同煤阶煤储层物性定量表征[J]. 中国地质调查,2020,7(6):103-108.
Guo G S,Xing L R,Li H. Quantitative characterization of different coal rank reservoirs permeability based on NMR and X-CT technology[J]. Geol Survey China,2020,7(6):103-108.

[6] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等. 沁水盆地煤储层微裂隙发育的煤岩学控制机理[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(1):6-13.
Yao Y B,Liu D M,Tang D Z,et al. Influence and control of coal petrological composition on the development of microfracture of coal reservoir in the Qinshui Basin [J]. J China Univ Min Technol,2010,39(1):6-13.

[7] 钟玲文,张新民. 煤的吸附能力与其煤化程度和煤岩组成间的关系[J]. 煤田地质与勘探,1990,18(4):29-35.
Zhong L W,Zhang X M. The relationship of sorption capacity and coal rank and coal maceral [J]. Coal Geol Explorat,1990,18(4):29-35.

[8] 郑贵强,杨德方,李小明,等. 沁水盆地柿庄北区块深部煤储层特征测井评价研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(6):178-186.
Zheng G Q,Yang D F,Li X M,et al. Study on features and logging evaluation of deep coal reservoir in North Shizhuang block of Qinshui Basin [J]. Coal Sci Technol,2019,47(6):178-186.

[9] 王胜建,高为,郭天旭,等. 黔北林华井田煤质参数特征及其成煤沉积环境意义[J]. 煤炭科学技术,2017,45(10):162-168.
Wang S J,Gao W,Guo T X,et al. Coal quality parameters features and coal formation sedimentary environment significance of Linhua Minefield in north Guizhou [J]. Coal Sci Technol,2017,45(10):162-168.

[10] 吴翔,吴建光,张平,等. 沁源区块 2 号煤层煤相展布特征及对含气量的控制[J]. 煤炭科学技术,2017,45(4):117-122.
Wu X,Wu J G,Zhang P,et al. Coal facies distribution features of No. 2 seam in Qinyuan Block and gas content control [J]. Coal Sci Technol,2017,45(4):117-122.

[11] 陶传奇,王延斌,倪小明,等. 基于测井参数的煤体结构预测

模型及空间展布规律[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 173 – 177, 196.

Tao C Q, Wang Y B, Ni X M, et al. Prediction model of coal – body structure and spatial distribution law based on logging parameters[J]. Coal Sci Technol, 2017, 45(2): 173 – 177, 196.

[12] 魏迎春, 闵洛平, 常东亮, 等. 基于测井资料的临汾区块煤体结构识别及其分布规律[J]. 中国煤炭, 2018, 44(4): 35 – 40.

Wei Y C, Min L P, Chang D L, et al. Structure identification and distribution regularities of coal in Linfen block based on well logging data[J]. China Coal, 2018, 44(4): 35 – 40.

[13] 王勇飞, 曾焱, 卜海. 利用测井曲线定量识别安泽区块煤体结构[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2019, 38(2): 103 – 111.

Wang Y F, Zeng Y, Bu T. Well logs applied to quantitatively identify coal structure in the Anze area[J]. J Liaoning Techn Univ; Nat Sci, 2019, 38(2): 103 – 111.

[14] 梅放, 康永尚, 李喆, 等. 中高煤阶煤层煤体结构识别测井法适用性评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 95 – 107.

Mei F, Kang Y S, Li Z, et al. Applicability evaluation of logging method for recognition of coal body structure in medium and high rank coal seams[J]. Coal Sci Technol, 2019, 47(7): 95 – 107.

[15] 陈博, 汤达祯, 张玉攀, 等. 韩城矿区 H3 井组煤体结构测井反演及三维地质建模[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 88 – 94.

Chen B, Tang D Z, Zhang Y P, et al. Logging inversion and three – dimensional geological modeling of coal structure in Hancheng H3 well group[J]. Coal Sci Technol, 2019, 47(7): 88 – 94.

[16] 徐光波, 赵金环, 崔周旗, 等. 沁水盆地南部安泽区块煤体结构测井识别研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 179 – 184, 53.

Xu G B, Zhao J H, Cui Z Q, et al. Study on well logging identification of coal structure in Anze Block of southern Qinshui Basin[J]. Coal Sci Technol, 2018, 46(5): 179 – 184, 53.

[17] 王生维, 陈钟惠, 张明, 等. 煤相分析在煤储层评价中的应用[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 396 – 401.

Wang S W, Chen Z H, Zhang M, et al. Application of the technique of coal facies analysis to evaluation of coal reservoir[J]. Geol J China Univ, 2003, 9(3): 396 – 401.

Macrolithotype prediction and 3D geological modeling
based on logging parameters

GUO Guangshan, LI Hao, TIAN Yongjing, DU Kai

(Unconventional Research Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: In order to quantitatively distinguish the distribution characteristics of marcolithotypes, the authors in this research utilized the differences of logging response characteristics of different marcolithotypes to establish the marcolithotypes index HMLZ, according to the coal and rock description results of CBM parameter wells. The quantitative identification and verification of marcolithotypes of 30 wells in SZB block are completed through the discrimination index, and the 3D visualization of the spatial distribution characteristics of macrolithotypes are realized using the stochastic modeling method. The results show that the $HMLZ > 20.0$ is bright coal, and the $10.0 < HMLZ < 20.0$ is semi bright coal. Besides, $5.5 < HMLZ < 10.0$ is semi dark coal and the $HMLZ < 5.5$ is dull coal. The macrolithotypes of coal seam 3 in the study area are mainly bright coal and semi bright coal, followed by semi dark coal, and the dull coal is not developed. The average thickness of bright coal accounts for 36%, and the average thickness of semi bright coal accounts for 46%, which is mainly distributed in the middle and upper sections of coal seams in the north and south of the block. Semi dark coal is mainly distributed in the middle and lower section of the middle coal seam of the block, accounting for an average of 15%. The dull coal is sporadically developed at the bottom of the coal seam in the southwest corner of the block, with a thin thickness, accounting for 3% of the whole seam. Overall, the model can be used to quantitatively evaluate the distribution law of lithotype and provide strong support for CBM development.

Keywords: marcolithotypes; logging response; 3D geological modeling; SZB block

(责任编辑: 常艳)