

柿庄南区块煤层气“甜点”预测方法研究

王存武,柳迎红,郭广山,吕玉民,喻梓靓
(中海油研究总院 新能源研究中心,北京 100028)

摘要:为探索煤层气地质甜点预测方法,以沁水盆地柿庄南区块为靶区,提出了利用分频属性反演技术和频谱成像技术预测了煤层厚度与含气量,并结合钻井获取的其他煤储层评价参数,采用多层次模糊评价方法预测柿庄南区块3号煤层气地质甜点。结果表明,柿庄南区块3号煤层在平面上存在3个地质甜点区,即中部甜点区、东北部甜点区和西部甜点区。与现今煤层气井产量分布对比显示,高产井主要分布在中部甜点区内,低产井绝大多数位于非甜点区。由此可见,柿庄南区块煤层气地质甜点的预测较为准确。

关键词:煤层气;甜点;分频属性反演;频谱成像;柿庄南;沁水盆地

中图分类号:P631.4 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)03-0102-06

Research on sweet spots of coalbed methane in Southern Shizhuang block of Qinshui Basin

WANG Cunwu, LIU Yinghong, GUO Guangshan, LYU Yumin, YU Ziliang
(New Energy Research Center, CNOOC Institute Research, Beijing 100028, China)

Abstract: To explore the prediction technique of CBM geological sweet spots, the Southern Shizhuang block of Qinshui Basin was taken as the study area, and frequency-divided inversion and spectrum imaging techniques were applied to predict coal seam thickness and gas content. Combined with the other parameters of coal reservoirs from exploratory wells, multi-layer evaluation method was applied to determine the CBM sweet spot of No. 3 coal seam in Southern Shizhuang block. The results showed that three sweet spots in the No. 3 coal seam existed in the study area, namely central, northwest and west sweet spots. Compared with the distribution of gas production performance, high production performance was located in the central sweet spot, and low production performance located in no-sweet spot, which meant that the prediction of sweet spots was fairly reliable.

Key words: coalbed methane; sweet spot; frequency-divided inversion; spectrum imaging; Southern Shizhuang block; Qinshui Basin

0 引言

所谓煤层气“甜点区”一般指煤层气富集高产区,美国煤层气勘探开发实践显示其煤层气年产量64%来自于圣胡安盆地,而圣胡安盆地产量的80%来自面积仅占盆地面积20%的富集高产区^[1]。美国阿拉巴契亚盆地中部和北部均有数个煤层气田投入生产,但气田面积仅占整个盆地面积的1/10左右;Deerlick Creek是美国黑勇士盆地最具生产能力的煤层气田之一,产能最高的2个井群都分布在气

田范围内的半地堑部位;Ceder Cove气田的煤层气产能在黑勇士盆地中排名第三,高产气井分布在背斜翼部正断层相对稀疏的部位。我国沁水盆地的勘探实践也表明,高产井大多分布在沁水盆地南部的局部地区,而产量却占到了整个盆地的90%以上。因此,寻找煤层气“甜点区”是煤层气高效勘探开发的核心目标。

刻画煤层气“甜点区”需综合考虑资源条件和可开发性两方面,资源条件中尤以煤厚、含气量的评价最为关键,可开发性与物性、临储比、含气饱和度、

收稿日期:2016-02-23;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.03.022

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05060);中海油总公司综合科研项目(YXKY-2015-ZY-08)

作者简介:王存武(1980—),男,山东梁山人,工程师,博士,从事非常规油气勘探研究工作。E-mail:wangcw@cnooc.com.cn

引用格式:王存武,柳迎红,郭广山,等.柿庄南区块煤层气“甜点”预测方法研究[J].洁净煤技术,2016,22(3):102-107.

WANG Cunwu, LIU Yinghong, GUO Guangshan, et al. Research on sweet spots of coalbed methane in Southern Shizhuang block of Qinshui Basin [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3): 102-107.

媒体结构等参数的评价较为密切。近年来诸多学者在煤层气甜点的预测方法上进行了有益探讨,如霍丽娜等^[2]提出利用地震资料开展 AVO (Amplitude Versus Offset) 反演预测裂缝、多属性反演预测煤厚、叠前反演预测含气性的方法;彭苏萍等^[3]在三维地震反演和属性分析的基础上,提出基于地球物理信息融合方法对煤层气富集区进行了预测;宋岩等^[4]提出含气量和渗透率耦合作用是高产富集区形成的机制;孙斌等^[5]利用地震 AVO 属性数值模拟探讨了煤层气富集区预测技术;汤红伟^[6]利用波阻抗反演、频谱分解技术对煤层气富集区进行了常识性预测;陈贵武等^[7]利用改进的层次分析法对高丰度煤层气富集区进行了地球物理定量识别,认为地震资料质量直接影响预测精度;陈勇等^[8]提出了基于影响煤层气富集主控因素的地震多属性综合预测煤层气富集区的方法,认为可以应用层次分析法将多项地震技术预测结果进行不同权重系数的有效结合,提高预测精度。魏东等^[9]总结了基于煤储层的方位各向异性和双向介质特征、方位 AVO、转换横波法和 AVO 等地震勘探技术在煤层气富集区预测中的应用。

从近年来煤层气甜点预测方法和技术上看,较少涉及利用二维地震资料刻画关键参数并开展甜点预测,但在勘探初期往往只有二维地震资料。本文以沁水盆地柿庄南区块为主要研究对象,探讨了利用二维地震资料开展煤层厚度、含气量预测方法,并基于大量煤层气钻井资料开展了煤储层精细评价,采用多层次模糊评价法开展该区块 3 号煤层甜点区预测。

1 柿庄南区块概况

柿庄南区块位于沁水盆地东南部,隶属山西省晋城市管辖。区块面积约为 388 km²,含气面积为 187.80 km²,二维地震测线已布 33 条,共计 256 km,各类煤层气钻井超过 1 000 口,累计产气量约为 1.90×10⁸ m³。柿庄南区块二维地震测线长度共计 336 km,区域测网密度 2 km×5 km,在西部加密区测网密度为 0.25 km×0.5 km。

柿庄南区块隶属于沁水盆地,该盆地基底为上太古界——下元古界变质岩,地层沉积充填序列自下而上依次为古生界奥陶系、石炭系、二叠系、中生界三叠系和新生界第四系。钻井揭示太原组和山西组含煤 16 层,煤层总厚度最大达 23.6 m。其中太

原组 15 号煤和山西组 3 号煤在全盆地稳定分布,为主力煤层。在柿庄南区块煤层气主采煤层为 3 号煤层,15 号煤层仅个别井有涉及,因此本文研究的重点放在山西组 3 号煤层上^[10]。

2 分频属性反演技术预测煤层厚度

柿庄南区块的已钻井揭示,山西组 3 号煤层厚度普遍在 6 m 左右,由楔形模型的理论研究证明:地震无法准确分辨厚度小于 1/4 波长的地层厚度。而本区煤层平均速度大约 2 300 m/s,地震主频 35 Hz,基于目前地震资料条件可分辨 16.4 m (1/4 波长) 地层。而实际煤层厚度只有 6 m 左右,所需地震主频应为 95.8 Hz,常规波阻抗反演无法准确预测煤层厚度。

因此采用分频反演开展煤厚预测。首先对地震资料的频宽进行分析,掌握资料的有效频带范围,并根据有效频带范围设计合适的尺度进行分频,产生不同频段的数据体;然后对分频后的数据体利用支持向量机(SVM)方法计算出不同厚度下振幅与频率(AVF)之间的关系,并将 AVF 关系引入反演,建立测井目标曲线与地震波形之间的非线性映射关系;最终把每个频率属性作为输入,用支持向量机建立已经学习好的分频体与反演体之间的映射关系,合成反演体(图 1)。预测过程中,对目的层地震数据进行分频处理,提取分频属性,产生地震频带范围内的高中频不同频段的数据体,并对每一个频段的数据体提取不同的属性。分频属性提取后,采用支持向量机的方法建立地震分频属性与测井目标曲线非线性映射关系,从而得到反演结果。

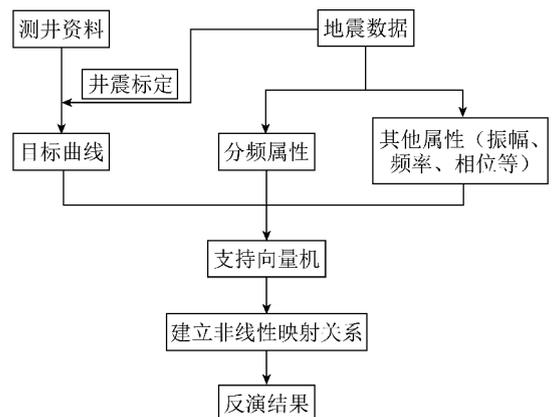


图 1 分频反演工作流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of frequency division inversion process

将分频反演技术应用到柿庄南区块,选取离二维测线相对较近的12口井参与分频属性反演。由于本区煤层表现为明显的低速、低密特征,利用支持向量机的方法建立测井密度曲线与地震波形间的非线性关系,并对12口井的密度曲线进行重新预测。对预测曲线和实测曲线进行对比可知,目的层参与反演井位置实测曲线与预测曲线相一致,平均吻合率均在82%以上。

柿庄南地区煤层埋藏浅、煤变质程度高,利用反演数据体上煤层低密度特征,通过井震标定,对3号煤层的密度范围选取一个门槛值,之后计算煤层密度范围内的煤层时间厚度,再与煤层速度相乘,从而得到煤层厚度。由11口实钻厚度和预测厚度对比看(表1),整体上,采用分频反演技术预测的煤层厚度与实钻结果十分吻合,绝对误差在0.05~0.70 m,多数小于0.3 m,相对误差均小于0.11%。

表1 柿庄南区块3号煤层预测厚度与实钻厚度对比

Table 1 Comparison between drilling and prediction thickness of No. 3 coal seam in southern Shizhuang block

井号	煤层厚度/m		绝对误差/m	相对误差/%
	实钻值	预测值		
SN-001	6.10	5.80	0.30	0.05
SN-002	5.20	5.10	0.10	0.02
SN-005	7.20	6.90	0.30	0.04
SN-007	5.80	5.40	0.40	0.07
SN-016	6.20	5.50	0.70	0.11
SN-019	6.30	6.40	-0.10	0.02
TS-007	6.25	5.80	0.45	0.07
TS-012	6.10	6.20	-0.10	0.02
TS-017	6.55	6.50	0.05	0.01
TS-019	6.20	6.00	0.20	0.03
TS-020	5.50	5.30	0.20	0.04

3 频谱成像技术预测含气性

煤层含气量预测比较困难,本文通过属性优选,结合频谱分解技术,得到反映煤层气含气量的敏感属性,其能够定性反映含气量的平面分布,然后利用井点煤层含气量与井旁地震属性的拟合关系计算含气量。

本区内煤层在地震上表现为强振幅、低频的特征。在本区地震资料的调谐振幅响应不仅与储层的厚度有关,还与储层所含流体的性质有关。对比20~70 Hz单频调谐能量发现,低频主要反映较厚地层,高频主要反映较薄地层。但对比发现不同频

率的调谐能量所示厚度与本区反演预测的厚度变化并不一致。因此,可以认为该区煤层厚度变化对调谐能量变化影响小,不同频率调谐能量变化可能反映煤层含气性的变化。

为了突出不同频率调谐能量的变化特征,采用能量变化属性,即低频能量与高频能量的比值,作为预测煤层气富集程度主要预测参数。为了进一步验证能量变化属性和3号煤储层含气量之间的关系,将实钻位置的属性值和实钻井的含气量值进行统计,可以发现能量变化属性与含气量存在较好的线性关系(图2),通过线性拟合可以将能量属性转换为含气量。从预测结果与参数井实测煤层气含气量对比上看(表2),预测含气量与实测含气绝对误差在0.33~3.89 m³/t,绝对误差均小于15%,58%的样本相对误差在6%以下。

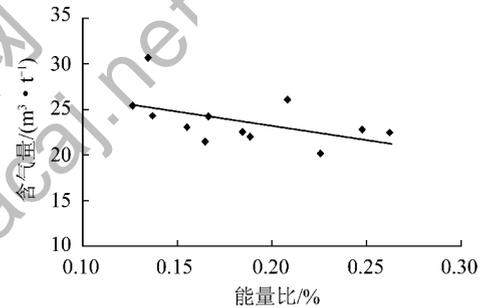


图2 能量比属性与含气量关系

Fig. 2 Relationship of energy ratio attribute and gas content

表2 柿庄南区块山西组3号煤层含气量测井解释值与预测值对比

Table 2 Comparison of gas content between log interpretations value and prediction value of No. 3 coal seam in southern Shizhuang block

井号	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)		绝对误差/(m ³ ·t ⁻¹)	相对误差/%
	测井解释值	地震预测值		
SN-001	22.04	23.20	-1.16	5.00
SN-002	23.00	24.86	-1.86	7.48
SN-005	22.50	21.85	0.65	2.97
SN-007	24.20	23.87	0.33	1.38
SN-016	22.49	20.06	2.43	12.11
SN-019	26.01	24.29	1.72	7.08
TS-007	24.31	24.77	-0.46	1.86
TS-010	21.43	22.89	-1.46	6.38
TS-012	25.38	25.19	0.19	0.75
TS-017	30.68	26.70	3.98	14.91
TS-019	20.18	21.07	-0.89	4.22
TS-020	22.69	21.47	1.22	5.68

4 多层次模糊评价预测甜点区

利用变频反演预测的煤层厚度、频谱成像预测的含气量,加之参数井获取的其他煤储层评价参数,开展柿庄南区块煤储层精细评价和甜点区综合预测。这里主要采用的方法为多层次模糊综合评价法。该方法已大量应用于油气资源战略选区评价,包括勘探早期的全国煤层气资源战略选区工作。许浩等^[11]、胡宝林等^[12]均采用多层次模糊数学评价方法对鄂尔多斯盆地东缘的煤层气有利区开展了评价;张培河等^[13]则提出多因素加权发育储层数值模拟法相结合来判定煤层气可采性;邵龙义等^[14]、韩俊等^[15]也采用了模糊数学法评价了青海木里煤田、川南盆地群的煤层气有利区;姚艳斌等^[16]则采用基于GIS的多层次模糊树蕨评价法计算了平顶山煤田煤层气资源量;此外,唐书恒等^[17]、刘大锰等^[18]、赵庆波等^[19]、姚纪明等^[20]均提出了煤层气有利区识别方法,围绕多层次模糊数学评价模型。

本次甜点区预测主要结合柿庄南区块现有探井所取得的参数,分别从地质条件和开采条件两方面,选取煤厚、含气量、灰分、镜质组反射率、顶底板岩性与厚度、埋深、孔渗性、储层压力梯度、临储比、吸附时间、含气饱和度和煤体结构进行综合评价。

1) 建立评价指标

参照煤层气行标 NB/T 10013—2014《煤层气地质选区评价方法》及《煤储层物性控制机理及有利储层预测方法》、《煤储层精细定量表征与综合评价模型》,结合柿庄南区块高煤阶煤层气地质特征,构建四层次的多参数评价模型,并确定评价模型各级评价参数的权重和评价指标(表3和图3)。

表3 柿庄南区块煤层气有利区主要评价指标

Table 3 Main evaluating indicator for CBM favorable areas of Shizhuangnan block

评价参数	优	中等	差
厚度/m	>6	2~6	<2
埋深/m	500~800	800~1 000	<500 或>1 000
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	>25	10~25	<10
灰分/%	<10	10~30	>30
渗透率/mD	>1	0.01~0.1	<0.01
吸附时间/d	<10	10~50	>50
临储比	>0.8	0.5~0.8	<0.5
含气饱和度	>0.8	0.5~0.8	<0.5
储层压力梯度/(kPa·m ⁻¹)	>0.8	0.6~0.8	<0.6



图3 柿庄南区块四层次评价模型

Fig. 3 Four levels evaluation model of the southern Shizhuang block

2) 基于测井信息获取评价参数

由于该区搜集到的试井渗透率、含气饱和度、临界解吸压力等数据较少,为了实现有利区的多参数多层次模糊评价,需要利用测井信息求取这些评价参数。本次选用声波(AC)、自然电位(SP)、深浅侧向测井(LLD/LLS)以及埋深(D)作为自变量,结合已测试获取的渗透率数据,拟合出渗透率与测井信息间的最优相关关系,并以此预测缺失的渗透率数据。

拟合得到如下方程

$$K = 25.985 \lg D + 53.179 \lg AC + 43.236 \lg LLD - 50.581 \lg LLS - 2.313 \lg SP - 30.960$$

方程的R²值为0.895,具有较好的拟合效果。

对于含气饱和度、临界解吸压力等其他评价参数,可以利用已有资料,根据相关公式进行求取。

3) 评价结果

评价结果显示,柿庄南区块3号煤层在平面上存在3个甜点区,即中部甜点区、东北部甜点区和西部甜点区(图4)。中部甜点区集中在TS-007、TS-018和TS-011附近,评价价值整体上自中部向周围区域呈降低趋势。东北部甜点区和西部甜点区(主要集中在SN-007井区)规模较小。

5 结 语

1) 利用二维地震变频属性反演技术预测煤层厚度效果较好,相对常规反演,变频反演具有较高的分辨率,因为它是一种全频带约束反演,能合理、有效地利用地震信息中相对高频和相对低频成分。二维地震中低频与高频能量来反映含气性存在一定多

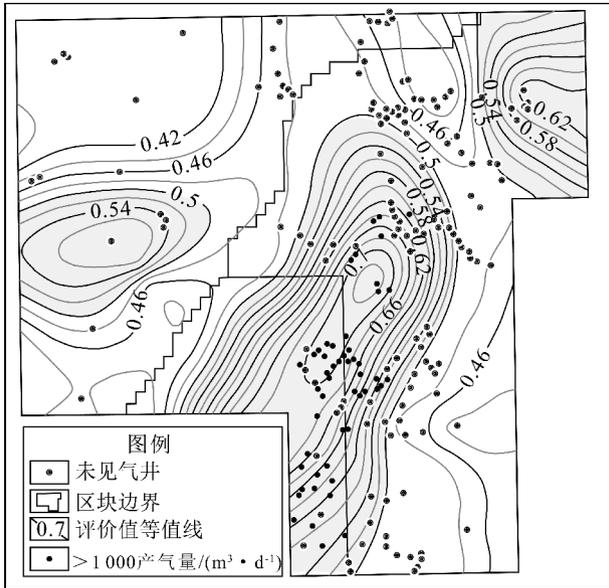


图4 柿庄南区块3号煤层甜点区综合预测

Fig. 4 Comprehensive sweet spots forecast map of No. 3 coal seam in southern Shizhuang block

解性,从预测结果上看也往往存在一定偏差。

2)利用多层次模糊评价方法预测的柿庄南区块3号煤层煤层气甜点区,与实际产量分布较吻合。从柿庄南区块目前的产量分布上可以看出,高产区主要分布于预测的中部甜点区,而南部产量较低的区域基本位于非甜点区内。在煤层气勘探开发的早期应该以甜点区识别与预测为主,然后围绕甜点区优先部署煤层气开发井网,实现快速产气并以此向外逐步拓展。

参考文献(References):

[1] Ayers Jr W B. Coalbed gas systems, resources and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Power River Basins[J]. American Association of Petroleum Geologists, 2002, 86(11):1856-1890.

[2] 霍丽娜,徐礼贵,邵林海,等.煤层气“甜点区”地震预测技术及其应用[J].天然气工业,2014,34(8):46-52.
Huo Li'na, Xu Ligui, Shao Linhai, et al. Seismic prediction technologies of CBM sweet spots and their application[J]. Nature Gas Industry, 2014, 34(8):46-52.

[3] 彭苏萍,杜文凤,殷裁云,等.高丰度煤层气富集区地球物理识别[J].煤炭学报,2014,39(8):1398-1403.
Peng Suping, Du Wenfeng, Yin Caiyun, et al. High abundance coalbed methane rich region geophysical identification[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1398-1403.

[4] 宋岩,柳少波,琚宜文,等.含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J].石油学报,2013,34(3):417-426.
Song Yan, Liu Shaobo, Ju Yiwen, et al. Coupling between gas con-

tent and permeability controlling enrichment zones of high abundance coal bed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3):417-426.

- [5] 孙斌,杨敏芳,孙霞,等.基于地震AVO属性的煤层气富集区预测[J].天然气工业,2010,30(6):15-18.
Sun Bin, Yang Minfang, Sun Xia, et al. Prediction of coalbed methane enrichment zones based on AVO attributes[J]. Nature Gas Industry, 2010, 30(6):15-18.
- [6] 汤红伟.地震勘探技术在煤层气富集区预测中的探索性研究[J].中国煤炭,2012,38(2):46-49.
Tang Hongwei. Study on seismic exploration technology applied to forecast of CBM-rich regions[J]. China Coal, 2012, 38(2):46-49.
- [7] 陈贵武,董守华,吴海波,等.高丰度煤层气富集区地球物理定量识别技术研究与应用[J].地球物理学进展,2014,29(5):2151-2156.
Chen Guiwu, Dong Shouhua, Wu Haibo, et al. Research and application of quantitative geophysics recognition in high abundance of coalbed methane-rich region[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5):2151-2156.
- [8] 陈勇,陈洪德,关达,等.基于主控因素的煤层气富集区地震预测技术应用研究[J].石油物探,2013,52(4):426-431.
Chen Yong, Chen Hongde, Guan Da, et al. Application of coalbed methane accumulation zone seismic prediction technology based on main geological controlling factors[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(4):426-431.
- [9] 魏东,王宏宇.地球物理技术在煤层气勘探中的应用[J].洁净煤技术,2011,17(5):52-55.
Wei Dong, Wang Hongyu. Application of geophysical technique on coal bed methane exploration[J]. Clean Coal Technology, 2011, 17(5):52-55.
- [10] 郭广山,邢力仁.柿庄南煤层气富集主控因素及开发潜力分析[J].洁净煤技术,2015,21(4):117-121.
Guo Guangshan, Xing Liren. Primary geological controlling factors of coalbed methane enrichment and its exploration potential in Southern Shizhuang Block[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4):117-121.
- [11] 许浩,汤达祯,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地西部侏罗系煤储层特征及有利区预测[J].煤田地质与勘探,2010,38(1):26-29.
Xu Hao, Tang Dazhen, Tang Shuhuan, et al. Coal reservoir characteristics and prospective areas for Jurassic CBM exploitation in western Ordos basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(1):26-29.
- [12] 胡宝林,杨起,刘大锰,等.鄂尔多斯盆地煤层气资源多层次模糊综合评价[J].中国煤田地质,2003,15(2):16-19.
Hu Baolin, Yang Qi, Liu Dameng, et al. Multilayer fuzzy synthetic appraisal for the coalbed gas resources in Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 15(2):16-19.
- [13] 张培河,张群,王宝玉,等.煤层气可采性综合评价方法研

- 究——以潘庄井田为例[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(1): 21-25.
- Zhang Peihe, Zhang Qun, Wang Baoyu, *et al.* Integrated methods of CBM recoverability evaluation: a case study from Pan-zhuang mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(1): 21-25.
- [14] 邵龙义, 文怀军, 李永红, 等. 青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1896-1903.
- Shao Longyi, Wen Huaijun, Li Yonghong, *et al.* Assessment of favorable areas for coalbed methane resources exploration in the Muli coalfield of Qinghai Province based on multi-layered fuzzy mathematics [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1896-1903.
- [15] 韩俊, 邵龙义, 肖建新, 等. 多层次模糊数学在煤层气开发潜力评价中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(3): 31-35.
- Han Jun, Shao Longyi, Xiao Jianxin, *et al.* Application of multi-layered fuzzy mathematics in assessment of exploitation potential of coalbed methane resources [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(3): 31-35.
- [16] 姚艳斌, 刘大锰, 汤达祯, 等. 平顶山煤田煤储层物性特征与煤层气有利区预测[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2007, 32(2): 285-290.
- Yao Yanbin, Liu Dameng, Tang Dazhen, *et al.* Coal reservoir physical characteristics and prospective areas for CBM exploitation in pingdingshan coalfield [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(2): 285-290.
- [17] 唐书恒, 岳巍, 崔崇海, 等. 用模糊数学方法评价煤层气的可采性[J]. 地质论评, 2000, 46(S): 284-287.
- Tang Shuhuan, Yue Wei, Cui Chonghai, *et al.* Assessment of coalbed methane workability through fuzzy mathematics [J]. Geological Review, 2000, 46(S0): 284-287.
- [18] 刘大锰, 姚艳斌, 刘志华, 等. 华北安鹤煤田煤储层特征与煤层气有利区分布[J]. 现代地质, 2008, 22(5): 787-793.
- Liu Dameng, Yao Yanbin, Liu Zhihua, *et al.* Coal reservoir characteristics and perspective and target areas forcbm in the Anyang-Hebi coalfield, North China [J]. Geoscience, 2008, 22(5): 787-793.
- [19] 赵庆波, 张公明. 煤层气评价重要参数及选区原则[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(2): 23-26.
- Zhao Qingbo, Zhang Gongming. Important parameters in the evaluation of coal bed gas and principles for screening exploration target [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(2): 23-26.
- [20] 姚纪明, 于炳松, 车长波, 等. 中国煤层气有利区带综合评价[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 353-358.
- Yao Jiming, Yu Bingsong, Che Changbo, *et al.* Study of comprehensive evaluation of coalbed methane zone in China [J]. Geoscience, 2009, 23(2): 353-358.
- [11] 孙玉岭, 刘景振. 微波溶样在元素检测方面的应用研究[J]. 中国公共卫生, 2002, 18(2): 231-232.
- Sun Yuling, Liu Jingzhen. Study on application of microwave acid-digestion in determination of metal elements [J]. China Public Health, 2002, 18(2): 231-232.
- [12] SN/T 3521—2013, 进口煤炭中砷、汞含量同时测定 氢化物发生-原子荧光法[S].
- [13] 韩素平, 淦五二, 张王兵, 等. 电磁感应加热与原子荧光光谱联用测定海产品中的无机汞和有机汞[J]. 分析化学, 2007, 35(9): 1373-1376.
- Han Suping, Tu Wuer, Zhang Wangbing, *et al.* Determination of inorganic mercury and organic mercury in seafood by electromagnetic induction heating coupled to atomic fluorescence spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(9): 1373-1376.
- [14] 吴超, 杨胜强. 基于智能微波化学工作站的煤溶解实验[J]. 煤矿安全, 2012, 43(4): 18-20.
- Wu Chao, Yang Shengqiang. The coal dissolution experiments based on the intelligent microwave chemical workstations [J]. Coal Mine Safety, 2012, 43(4): 18-20.
- [15] 康艳红, 朱永春, 王莹, 等. 煤中多元素同时分析的湿法消化法及其利用[J]. 光谱实验室, 2007, 24(4): 549-553.
- Kang Yanhong, Zhu Yongchun, Wang Ying, *et al.* Wet-digest method for determination of trace elements in coal and its application [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2007, 24(4): 549-553.

(上接第 101 页)