

基于模糊数学的豫东煤系气资源勘探有利区预测

张小东^{1,2}, 张硕¹, 许亚坤³, 王昆³, 张鹏³, 朱春辉¹

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000;

2.中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南 焦作 454000;

3.河南省地质矿产勘查开发局 第四地质矿产调查院,河南 商丘 476000)



扫码移动阅读

摘要:为了预测煤系气勘探开发的有利区,研究基于模糊数学的理论,系统分析了影响煤系气的生成条件、储层条件、含气条件及地质条件等因素,建立了豫东地区煤系气有利区预测的评价体系,结合模糊数学的计算方法,最终得到了相应的综合评价系数。研究结果表明:初步预测豫东地区煤系气最有利区块位于Ⅱ1和Ⅳ1区块,综合评价系数为0.808和0.788。两区块良好的含气性和储层条件,表现出更有利于煤系气的勘探开发。

关键词:豫东地区;煤系气;模糊数学;有利区预测

中图分类号:TE122.1, P618 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)11-0172-10

Favorable block prediction of coal measure gas resource exploration in Eastern Henan Area based on fuzzy mathematics

ZHANG Xiaodong^{1,2}, ZHANG Shuo¹, XU Yakun³, WANG Kun³, ZHANG Peng³, ZHU Chunhui¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovation

Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo 454000, China;

3. No.4 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan, Shangqiu 476000, China)

Abstract: In order to predict the favorable zone for exploration and exploitation of coal measure gas, based on the theory of the fuzzy mathematics, the study had a systematic analysis on the formation condition, reservoir condition, gas bearing condition and geological condition as well as other factors affected to the coal measure gas and a prediction evaluation system of the coal measure gas favorable zone in Eastern Henan Area was established. In combination with the calculation method of the fuzzy mathematics, the relevant comprehensive evaluation coefficients were finally obtained. The results showed that the most favorable blocks of the coal measure gas on Eastern Henan Area as the preliminarily predicted would be Block Ⅱ1 and Ⅳ1, and the comprehensive evaluation coefficients were 0.808 and 0.788 individually. The good gas bearing and reservoir conditions of the two blocks would be more favorable to the exploration and exploitation of the coal measure gas.

Key words: Eastern Henan Area; coal measure gas; fuzzy mathematics; favorable block prediction

0 引言

在油气代替煤炭的大发展背景下,非常规天然气的勘探和开发也倍受关注。煤系地层主要形成于温暖潮湿的气候环境,沉积有机质物源丰富、有机质

含量高且主要以Ⅲ型干酪根为主,在漫长的地质历史时期生成大量的气态烃类,加之岩性、岩相组合的旋回性,烃源岩、储集岩多重叠覆,为烃类气体的保存和富集提供了较好的生储盖组合,可形成较大规模的煤系气藏^[1]。前期研究表明,我国华北、西北

收稿日期:2018-07-15;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.11.027

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372162);河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(14IRTSTHN002)

作者简介:张小东(1971—),男,河南温县人,教授,博士。E-mail:z_wenfeng@163.com

引用格式:张小东,张硕,许亚坤,等. 基于模糊数学的豫东煤系气资源勘探有利区预测[J]. 煤炭科学技术,2018,46(11):172-181.

ZHANG Xiaodong, ZHANG Shuo, XU Yakun, et al. Favorable block prediction of coal measure gas resource exploration in Eastern Henan based on fuzzy mathematics [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 172-181.

主要含煤盆地大多富含煤系气资源,如鄂尔多斯盆地分布的石炭—二叠纪煤系气源^[2-3],沁水盆地分布的石炭—二叠纪煤系气源^[4-5],以及塔里木盆地库车坳陷分布的三叠—侏罗纪煤系气源^[6]。目前,我国煤层气、页岩气的发展已达到一定的商业化阶段,而煤系气本身的特殊性和复杂性,其勘探开发仍处于较为初级的阶段^[7]。

豫东地区处于南华北地区,含煤面积大,分布广,蕴含煤炭储量近300亿t。前期勘探成果表明,豫东地区煤层中含有较丰富的煤层气资源,煤系中各类泥岩(泥岩、碳质泥岩)、砂岩(细、中粒砂岩)、粉砂岩与煤层(煤线)互层出现,煤系三煤组顶部的K₄铝土质泥岩全区分布稳定,具有良好的封盖性,由此形成有利煤系气富集、成藏的生储盖组合。目前,豫东地区西部的中牟页岩气勘查区牟页一井已经成功实施,取得了较好的产期效果,但整个豫东地区煤系气地质条件、储层特征以及资源富集特征,尚未明确的研究报道。

本次研究基于前期煤田地质勘探成果,以及岩

心样、气样的测试分析结果,结合我国现有页岩气、砂泥岩气资源潜力评价与有利区优选标准,应用模糊数学的评价方法,建立了豫东地区煤系气有利区块评价模型,并进行了有利区划分,优选出煤系气勘探有利目标区,以期对豫东地区煤系气的进一步勘探开发提供借鉴作用。

1 地质概况

研究区隶属于中朝准地台之二级构造单元鲁西台隆及华北坳陷,位于河南省东部开封、商丘至永城一线。区内次级构造单元分布从北向南依次为开封凹陷、通许凸起、永城断褶带和周口凹陷,基本呈“两凹夹一隆”的格局^[8]。

南北凹陷保存了较为完整的石炭系和二叠系含煤岩系,中部隆起由于后期隆升剥蚀,部分含煤岩系缺失,加之后期北西向和北东向断层的切割和差异升降,使煤系地层的赋存格局发生变化,呈现东西成带、南北成块的格局,如图1所示。

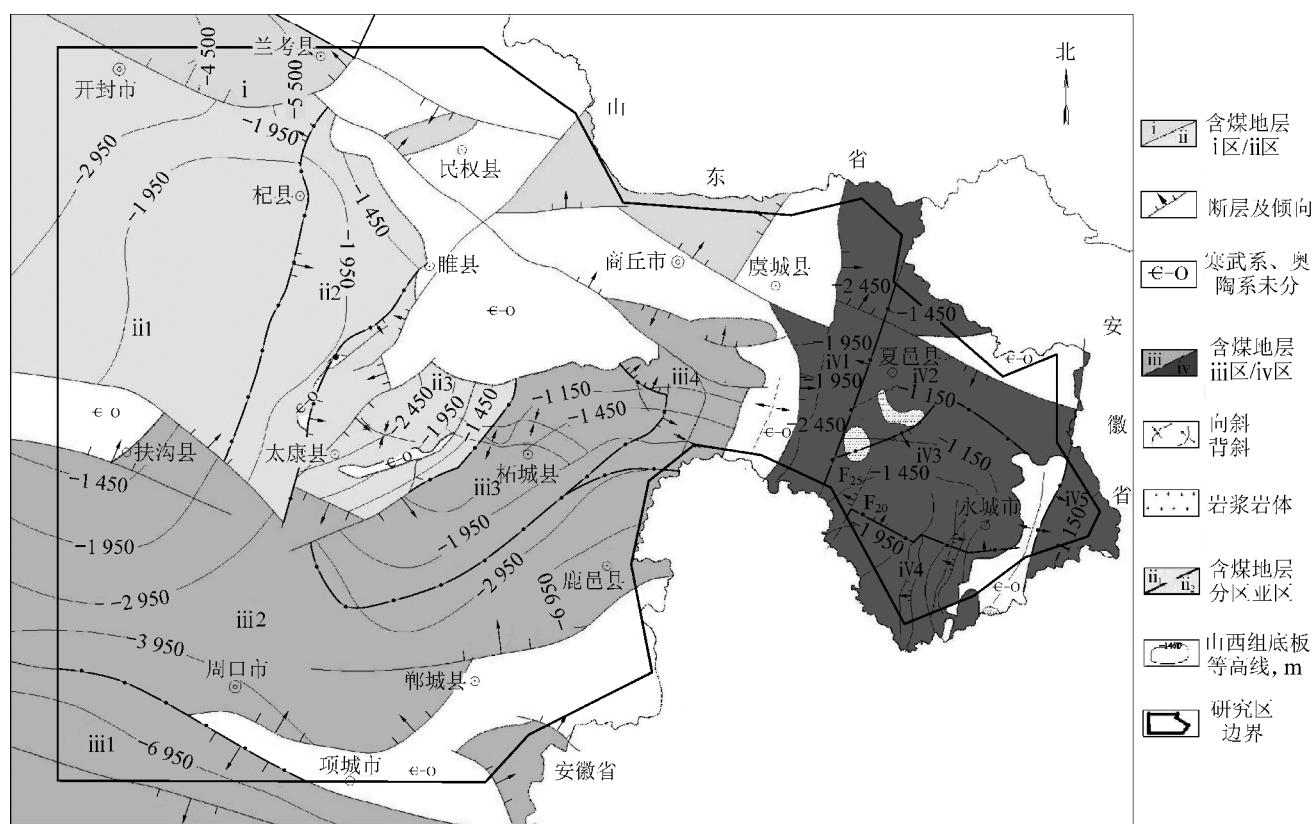


图1 豫东地区构造分布

Fig.1 Distribution of geological structure in Eastern Henan Area

本次研究中,首先根据区域性断裂构造及其发

育特征、地层界线等自西向东把区内含煤地层划分

为西北部的开封凹陷(Ⅰ区)、西部的睢西(Ⅱ区)、中部的胡襄(Ⅲ区)、东部的永夏(Ⅳ区)等四个大

区。而后根据次级断裂进一步划分,共计 13 个二级区块(图 1)。

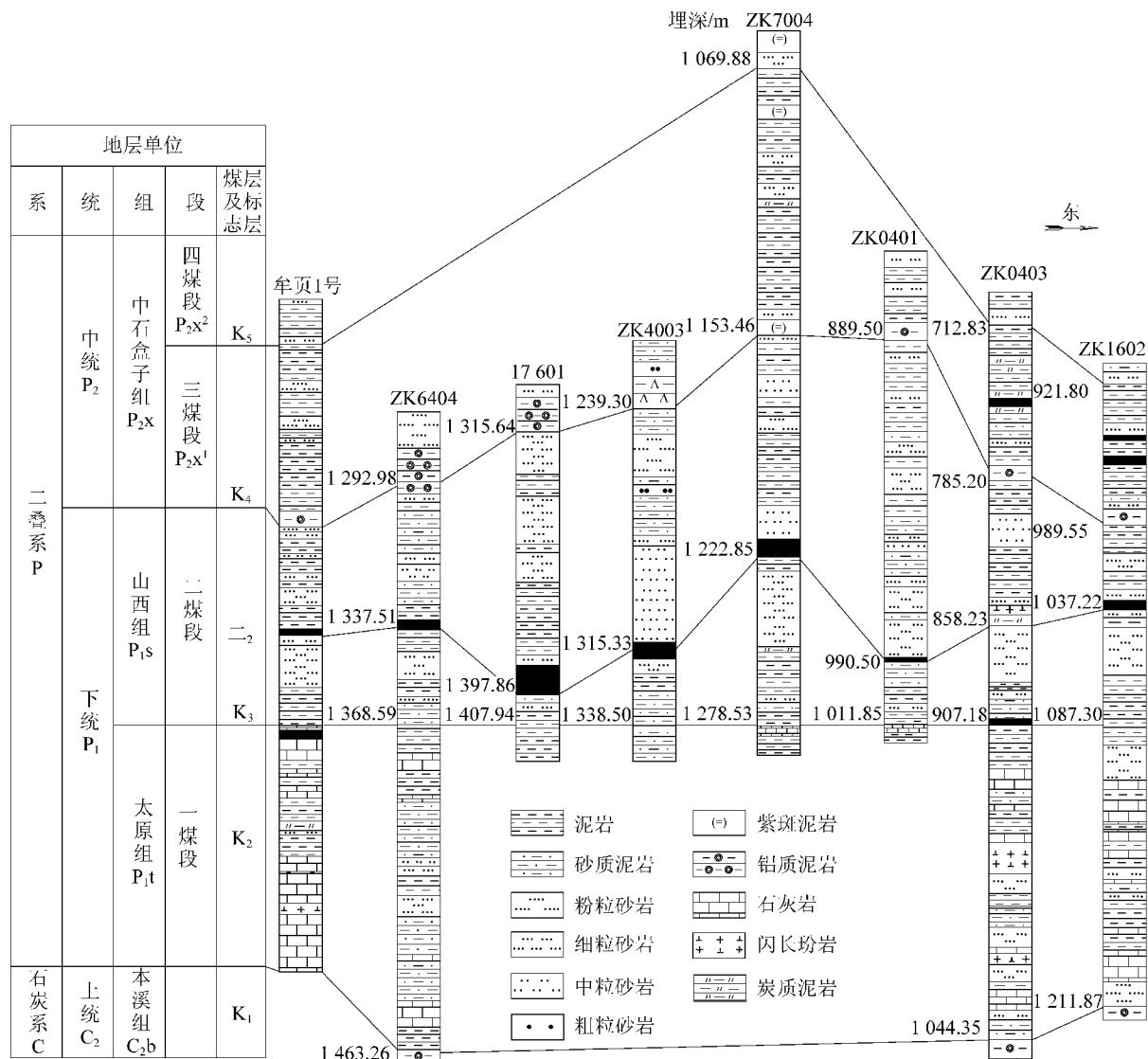


图 2 豫东地区煤系地层柱状对比(自西向东)^[2]

Fig.2 Comparison of coal measure stratigraphic histogram in Eastern Henan Area (from west to east)

豫东地区煤系主要为石炭—二叠系含煤地层,共包括 3 个含煤段,分别为太原组(一煤段)、山西组(即二煤段)和下石盒子组三煤段,其中二煤段和三煤段为包含砂岩、泥岩、砂质泥岩及煤层在内的含煤岩系,太原组为一套包含砂岩、泥岩、砂质泥岩、灰岩及煤层在内的含煤岩系。各组地层之间整合接触。由于沉积环境不同,煤系地层各含煤组段的煤、岩性组合也有所差异(图 2)。

2 模糊数学评价指标

实践表明,开展有利区块优选和评价,优选出下

步有利勘探区是新盆地、新区块的非常规天然气勘探开发的一项重要基础工作。目前常用的评价方法主要有模糊数学法、灰色关联法、层次分析法、加权求和法、软件分析法等^[9-11]。

借鉴煤层气等非常规天然气的评价方法,综合考虑砂泥岩有利区块的评价参数,采用模糊数学评价的方法对豫东地区煤系气有利区块进行了优选评价。根据我国页岩气及砂泥岩气资源潜力评价方法与有利区优选标准,煤系气资源潜力评价中一般选取对砂泥岩气生成、保存,以及开采影响较大的因素作为评价指标,如成烃因素、储层因素、含气性特

征、地表条件等^[12~14]。由此,考虑以上评价指标的基础上,结合豫东地区的实际情况,选取了成烃条件、储层条件、含气条件和地质条件作为豫东地区有利区块优选的评价指标,如图3所示。

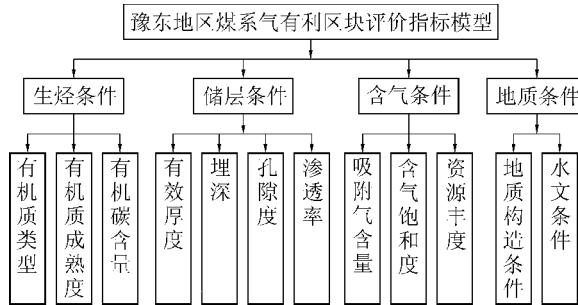


图3 豫东地区煤系气有利区块评价指标模型

Fig.3 Evaluation indicator model of favorable areas of coal measure gas in Eastern Henan Area

2.1 储层特征

1)埋深。豫东煤系埋深多大于1 000 m,且呈自东向西、自北向南埋深增加的赋存特征,仅在东部、中东部永夏区块及胡襄区块局部地段的煤系储层埋深小于1 000 m。在地质构造发育部位,埋深赋存特征发生改变,表现为阶梯状断层及地垒构造使煤系局部变深,背斜轴部埋深小于两翼,向斜轴部大于两翼,不同的断裂和褶皱构造组合,使含煤岩系局部埋深产生差异性变化。

睢西区块山西组埋深1 226.75~2 896.00 m,自东北露头一带向西、南逐渐变深。胡襄区块煤系埋深较大,一般大于1 000 m,表现为北部较浅、而南部较深的单斜构造特征。永城背斜西翼中南部及东翼局部地区埋藏较深,为1 000~1 700 m,其余地区埋深较浅(<1 000 m),且背斜西翼山西组埋深北浅南深、东浅西深规律性变化较明显。

2)有效厚度。有效厚度是指富含有机质砂泥岩的厚度,而非整个岩段的厚度。足够的厚度能够为煤系气的富集提供基本条件,同时也是后期确定资源量大小的重要因素。

美国五大页岩气勘探开发区页岩的有效厚度为9~100 m,一般在30 m以上。本研究采用达到渗透率下限的岩层平均累计厚度^[15~17],根据研究区内压汞资料,在排驱压力与对应渗透率交会中,当渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右时,排驱压力迅速增大,如图4所示,说明渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 后,很难成为有效储层,故将研究区渗透率下限定为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。最终利用渗透率大于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

μm^2 且含气饱和度正常的层位,以及总样品所处层位的资料,可以确定豫东地区各层位综合有效厚度为30~40 m。

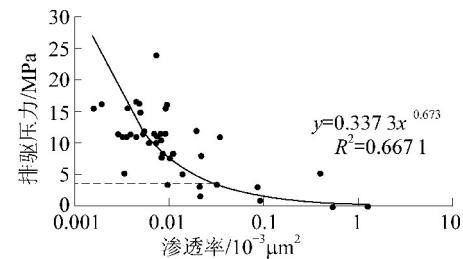


图4 研究区内渗透率与排驱压力的关系

Fig.4 Relationship between permeability and displacement pressure

3)孔隙度和渗透率。通过孔隙度与渗透率相关性可以研究和评价储层物性参数的好坏,能推断储层空间与气体渗透通道的匹配性。对砂岩而言,岩石孔隙是砂岩储层储集气体的主要场所,它与气体的渗透、扩散、运移密切相关,是衡量砂岩储层含气能力的重要参数之一。渗透性表示岩层允许流体运移能力的性质,通常可用渗透率来反映。

孔隙度和渗透率测试资料表明(表1),豫东下石盒子组砂岩孔隙度最小(1.8%),其次为山西组砂岩(2.2%),太原组砂岩孔隙度最大,约为4.3%;太原组泥岩的孔隙度(4.1%)与本组砂岩相当,也远大于山西组和下石盒子组(1.6%、1.7%)。但在不同区段中,砂岩和泥岩的孔隙度也略有差别,睢西大区砂泥岩孔隙度为0.9%~5.9%;胡襄大区砂泥岩孔隙度为0.2%~4.9%;永夏大区砂泥岩孔隙度为0.30%~6.9%。总体上,自西向东砂泥岩孔隙度呈现变小的趋势;随着地质时代的增加,孔隙度有增大的趋势。

豫东煤系砂泥岩储层的渗透性总体较低。相比而言,太原组砂岩、泥岩渗透率较高,分别为 $(0.0097 \sim 0.3403) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均 $0.093 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、 $(0.0018 \sim 1.14) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ($0.148 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);而下石盒子组砂岩、山西组泥岩渗透率最低,均值仅 $0.008 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.118 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。同一大区内,砂泥岩的渗透性相差不大,压汞渗透率测试值为同一数量级。如睢西区块砂、泥岩渗透率为 $(0.002 \sim 0.518) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.078 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要为 $(0.003 \sim 0.021) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;胡襄区块砂、泥岩渗透率为 $(0.002 \sim 0.395) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要为 $(0.003 \sim 0.033) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;永夏区块砂、泥岩渗透率为 $(0.001 \sim 2.211) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要为 $(0.003 \sim 0.03) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

表 1 豫东砂泥岩孔隙度、渗透率压汞测试结果

Table 1 Results of porosity and permeability based on mercury injection tests in Eastern Henan Area

层位岩	ii 区块		iii 区块		iv 区块	
	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
下石盒子组	砂岩 4.2	0.019 9	0.2~2.9 1.6	0.003 7~0.013 5 0.008 1	0.3~1.4 0.84	0.002 3~0.003 1 0.002 7
	泥岩 —	—	0.8	0.007 6	1.9~2.2 2.0	0.642 9~2.210 6 1.427 3
山西组	砂岩 1.1~3.5 2.3	0.004 3~0.011 0 0.007 4	2.4~4.9 3.4	0.020 8~0.033 2 0.025 0	0.7~3.1 1.7	0.001 6~0.080 7 0.018 3
	泥岩 0.9~4.9 3.4	0.003 1~0.518 4 0.176 7	1.0~3.0 1.7	0.001 5~0.394 8 0.081 8	0.5~2.5 1.1	0.000 6~0.379 1 0.107 9
太原组	砂岩 5.9	0.340 3	—	—	2.3~6.9 3.9	0.009 5~0.087 5 0.031 3
	泥岩 3.6~4.7 4.0	0.001 8~0.008 9 0.005 1	4.9	0.004 7	2.3~4.8 4.0	0.004 3~1.140 0 0.290 5

2.2 含气性特征

1) 吸附气含量。本次研究共做了 8 块泥岩的等温吸附试验, 试验结果显示泥岩的气体吸附遵循 Langmuir 等温吸附曲线(图 5)。

相比于北美部分泥页岩气吸附性测试结果, 如阿巴拉契亚盆地的泥页岩中, Langmuir 体积为 $0.5 \text{ m}^3/\text{t}$, 密执安盆地为 $0.7 \text{ m}^3/\text{t}$, 伊利诺斯盆地和福特沃斯盆地 Langmuir 体积最小为 $0.4 \text{ m}^3/\text{t}$, 最大为 $0.6 \text{ m}^3/\text{t}$, 圣胡安盆地 Langmuir 体积最小为 $0.6 \text{ m}^3/\text{t}$, 最大为 $0.88 \text{ m}^3/\text{t}$; 在豫东地区山西组选取的泥岩样品测试结果显示泥岩 Langmuir 体积最小为 $1.06 \text{ m}^3/\text{t}$, 最大达到了 $7.1 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均达到了 $3.04 \text{ m}^3/\text{t}$, 试验结果显示本地区泥岩样品优良的吸附性能。

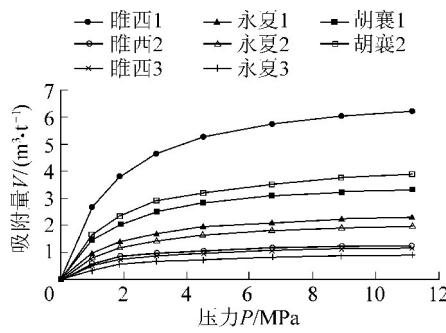


图 5 泥岩等温吸附曲线

Fig.5 Isothermal adsorption curves of mudstone samples

2) 含气饱和度。采集部分岩心样进行了岩电试验, 采用经典的阿尔奇公式计算得到了含气饱和度(表 2)。

可以看出, 泥岩的含气饱和度和含气性要略高于砂岩, 区内西部地区的砂泥岩含气性要高于东部地区, 这主要是由于西部地区和西南部地区的储层埋深较深, 有较厚的新生界地层, 对储层起到了很好的封盖作用; 同时由于埋深的关系造成储层地温较

高, 储层的地层水电阻率和气体的体积系数较低, 所以其含气饱和度计算结果较好, 含气量较高。

表 2 砂泥岩含气饱和度计算结果 %

Table 2 Results of gas saturation of sand-mudstone

区块层位岩性	含气饱和度		
	ii 区块	iii 区块	iv 区块
下石盒子组	砂岩 7.48	0~19.33 6.44	—
	泥岩 —	0~47.57 22.79	41.48~58.04 51.63
山西组	砂岩 0~85.02 39.55	12.85~39.72 32.46	8.85~45.49 30.97
	泥岩 0~75.28 39.66	10.89~42.57 28.01	0~48.23 24.78
太原组	砂岩 76.39	—	28.37~66.61 53.71
	泥岩 0~83.47 48.42	17.13	27.64~58.86 42.05

3) 资源丰度。根据得到的含气饱和度和有效厚度的计算结果, 结合孔隙度数据, 参考页岩气资源/储量估算方法和煤层气资源量块段划分, 计算砂泥岩气游离气总资源量为:

$$Q_i = 0.01 A_i h_i \varphi_i S_i / B_i \quad (1)$$

式中: Q_i 为 i 块段游离砂泥岩气资源量, 10^8 m^3 ; A_i 为 i 块段含气砂泥岩层面积, km^2 ; h_i 为 i 块段含气砂泥岩层有效厚度, m ; B_i 为 i 块段含气砂泥岩层体积系数, 根据研究区各块段地层温度、地层压力(取静水压力)、天然气压缩因子计算得到其平均体积系数^[18]。 φ_i 为 i 块段含气砂泥岩层平均孔隙度, %; S_i 为 i 块段含气饱和度, %; i 为区块内的某一块段, $i=1, 2, \dots, n$ 。

$$Q_y = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

$$Q = Q_y + Q_x \quad (3)$$

分块段对砂泥岩气游离气资源量进行计算,然后累加得到总的砂泥岩气游离气资源量 Q_y 。总的砂泥岩气资源量 Q 即游离气资源量 Q_y 和吸附气资源量 Q_x 的和。文献[19]指出,在 1 150 m 左右,游离气和吸附气的含量基本相等,之后随着埋深的增加,游离气含量逐步增加,在埋深达到 2 800 m 左右时,游离气达到吸附气的 2 倍以上。为便于计算,埋深 3 000 m 以浅时, $Q_x = Q_y$; 埋深 3 000 m 以深时, $Q_x = Q_y/2$ 。因此研究区内 i、ii、iii、iv 区块的资源量分别为 437.26×10^8 、 $6\ 681.47 \times 10^8$ 、 $5\ 732.26 \times 10^8$ 、 $5\ 552.77 \times 10^8$ m^3 , 对应的资源丰度为 0.87×10^8 、 0.97×10^8 、 0.75×10^8 、 2.15×10^8 m^3/km^2 。

2.3 生烃条件

1) 有机质类型。沉积有机质的类型对于生烃源岩的生烃潜力至关重要。干酪根类型通常包含:I型干酪根(腐泥型)、II₁型干酪根(腐泥腐植型)、II₂型干酪根(腐植腐泥型)和III型干酪根(腐植型)^[20]。一般情况下,I型干酪根的生烃潜力最强,常生成液态烃。II₁型和II₂型干酪根生烃潜力次之,而III型干酪根(腐殖型)主要生成气态烃。豫东地区煤系烃源岩以III型干酪根为主,在胡襄和睢西大区偶见II₂型干酪根。

2) 有机碳含量。烃源岩的有机质丰度作为评

价烃源岩生烃能力的重要参数之一,主要指标是有机碳含量(TOC),氯仿沥青“A”和总烃浓度等。本次研究主要采用有机碳含量进行判断。通过对研究区内 62 个样品的测试分析发现,研究区 TOC 含量为 0.10%~14.5%。其中烃源岩级别达到中等及以上($\text{TOC} > 1.5\%$)的睢西大区占 35.29%,胡襄大区占 50%,永夏大区占 40%。下石盒子组 TOC 含量最低,但胡襄和永夏大区 TOC 含量可达 3.5%以上;山西组 TOC 含量开始增加,以胡襄大区最为显著;太原组 TOC 含量最高,超过 50% 的样品烃源岩级别达到中等及以上($\text{TOC} > 1.5\%$)。

3) 有机质成熟度。有机质的成熟度对于生烃也具有重要意义,通常用 $R_{o,\max}$ 表示。豫东地区煤层成熟度普遍较高,其对应煤系烃源岩中砂泥岩的成熟度也较高,一般 $R_{o,\max}$ 为 1.44%~3.56%。大多数地区 $R_{o,\max}$ 在 1.5%~2.5% 的中高成熟阶段,进入高成熟的湿气~干气阶段。永夏的车集地区和睢西大区达到了 $R_{o,\max} > 2\%$ 的干气阶段。

3 基于模糊数学的豫东地区有利区预测

3.1 评价指标权重的确定

参考以往经验等^[21~24]对各评价模型中的各指标进行了权重划分,具体的豫东地区有利区块优选的评价体系及权重分配见表 3。

表 3 豫东地区有利区块优选的评价体系

Table 3 Evaluation system of favorable block selection in Eastern Henan Area

评价参数(权重)	评价等级					
	优	良	中等	一般	差	
成烃 条件 (0.30)	TOC/%(0.40)	≥4	2~4	1~2	0.5~1	≤0.5
	$R_{o,\max}/\% (0.40)$	2~4	1.5~2.0	1.0~1.5	0.5~1.0	≤0.5
	有机质类型(0.20)	I	II ₁	II ₂	II ₂ ~III	III
储层 条件 (0.35)	有效厚度/m(0.30)	>50	35~50	25~35	15~25	<15
	埋深/m(0.25)	1 500~3 000	1 000~1 500 或 3 000~3 500	700~100 或 3 500~4 000	300~700 或 4 000~4 500	<300 或 >4 500
	孔隙度/%(0.25)	≥6	4~6	2~4	1~2	≤1
	渗透率/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (0.20)	≥0.1	0.05~0.1	0.02~0.05	0.01~0.02	≤0.01
含气 条件 (0.25)	吸附气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$ (0.3)	≥4	3~4	2~3	1~2	≤1
	含气饱和度/% (0.3)	≥80	60~80	40~60	20~40	≤20
	资源丰度/ $(10^8\ \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$ (0.4)	≥1.5	1.0~1.5	0.6~1.0	0.3~0.6	≤0.3
地质条件 (0.10)	地质构造(0.5)	结构完整构造简单	轻度破坏构造简单	轻度破坏少量断层	中度破坏	严重破坏构造复杂
	水文条件(0.5)	简单	较简单	中等	较复杂	复杂

3.2 评价模型的建立

确定评价因素集合 U 包括成烃条件集合 U_1 、储层条件集合 U_2 、含气条件集合 U_3 、地质条件 U_4 , 即 $U=(U_1, U_2, U_3, U_4)$ 。评价结果划分为 5 个等级: 差、一般、中等、良、优, 构成评价集合, 即 $V=(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5)$, 对应的评价分数分别为 1, 2, 3, 4, 5。不同区域影响因素有所不同, 相同的地质因素, 影响程度也不一致。其中, 权重集合矩阵 $A=(A_1, A_2, A_3, A_4)$, 成烃条件子集

$A_1=(0.4, 0.4, 0.2)$, 储层条件子集 $A_2=(0.3, 0.25, 0.25, 0.2)$, 含气条件子集 $A_3=(0.3, 0.3, 0.4)$, $A_4=(0.5, 0.5)$ 。

3.3 评价结果

为了更准确地评价, 利用加权平均等方法确定具体评价参数见表 4, 同时进一步对照表 3 得到各区块的评价等级, 见表 5。根据表 5 建立豫东地区煤系气有利区块的模糊综合评价矩阵 R 。

表 4 豫东地区各区块评价参数

Table 4 Evaluation parameters of each block in Eastern Henan Area

评价参数	i	ii			iii				iv				
	i1	ii1	ii2	ii3	iii1	iii2	iii3	iii4	iv1	iv2	iv3	iv4	iv5
成烃条件	TOC/%	1.43	2.21	1.59	2.44	1.21	2.13	1.85	2.08	1.01	1.36	1.38	0.78
	$R_{o,\max}/\%$	2.36	3.80	2.83	3.09	1.07	2.19	1.75	1.71	2.43	1.84	1.84	2.59
	有机质类型	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
储层条件	有效厚度/m	38.06	32.25	32.24	33.65	28.92	27.90	33.51	35.75	35.60	37.94	37.54	32.86
	埋深/m	4 797	2 660	1 570	2 077	6 077	5 077	1 590	1 297	2 287	1 085	1 290	1 580
	孔隙度/%	3.20	3.15	2.85	4.45	6.90	2.26	3.28	3.28	5.14	5.18	5.19	5.15
含气条件	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.038	0.103	0.062	0.081	0.132	0.132	0.187	0.137	0.563	0.404	0.402	0.680
	吸附气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	4.01	4.10	4.23	1.37	4.01	4.10	4.14	4.48	2.49	2.71	2.71	2.28
	含气饱和度/%	42.5	68.8	49.6	40.7	28.9	28.1	26.6	26.7	49.1	46.2	45.9	51.8
地质条件	资源丰度/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	0.87	1.25	0.91	1.12	1.98	0.45	0.83	0.76	2.87	1.83	1.95	2.19
	地质构造	构造简单	构造简单	轻度破坏	中度破坏	轻度破坏	轻度破坏	轻度破坏	轻度破坏	轻度破坏	轻度破坏	中度破坏	构造简单
	水文条件	简单	较简单	较简单	较简单	简单	较简单						

表 5 豫东地区各区块评价等级

Table 5 Evaluation level of each block in Eastern Henan Area

评价参数	i	ii			iii				iv				
	i1	ii1	ii2	ii3	iii1	iii2	iii3	iii4	iv1	iv2	iv3	iv4	iv5
成烃条件	TOC/%	中等	良	中等	良	中等	良	中等	良	中等	中等	中等	一般
	$R_{o,\max}/\%$	优	优	优	优	中等	优	良	良	优	良	良	优
	有机质类型	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般
储层条件	有效厚度/m	良	中等	中等	中等	中等	中等	中等	良	良	良	良	中等
	埋深/m	差	优	优	优	差	优	良	优	良	良	良	优
	孔隙度/%	中等	中等	中等	良	优	中等	中等	良	良	良	良	良
含气条件	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	中等	优	良	良	优	优	优	优	优	优	优	良
	吸附气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	优	优	优	一般	优	优	优	优	中等	中等	中等	一般
	含气饱和度/%	中等	良	中等	中等	一般	一般	一般	一般	中等	中等	中等	中等
地质条件	资源丰度/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	中等	良	中等	良	优	一般	中等	中等	优	优	优	优
	地质构造	良	良	中等	一般	中等	中等	中等	中等	中等	中等	中等	一般
	水文条件	优	良	良	良	优	良	良	良	良	良	良	良

以Ⅲ1区块为例,其有利区的模糊综合评价矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

成烃条件权重子集 A_1 和成烃条件模糊综合评判矩阵 \mathbf{R}_{11} 相乘,即可得第1级成烃条件的评价矩阵 \mathbf{B}_{11} :

$$\mathbf{B}_{11} = A_1 \cdot \mathbf{R}_{11} = (0.4, 0.4, 0.2) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0, 0.2, 0, 0.4, 0.4) \quad (5)$$

同理可得,Ⅲ1区块第一级储层条件的评价矩阵 \mathbf{B}_{12} :

$$\mathbf{B}_{12} = A_2 \cdot \mathbf{R}_{12} = (0.30, 0.25, 0.25, 0.20) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (0, 0, 0.55, 0, 0.45) \quad (6)$$

Ⅲ1区块第1级含气条件的评价矩阵 \mathbf{B}_{13} :

$$\mathbf{B}_{13} = A_3 \cdot \mathbf{R}_{13} = (0.3, 0.3, 0.4) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = (0, 0, 0, 0.7, 0.3) \quad (7)$$

Ⅲ1区块第1级地质条件的评价矩阵 \mathbf{B}_{14} :

$$\mathbf{B}_{14} = A_4 \cdot \mathbf{R}_{14} = (0.5, 0.5) \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = (0, 0, 0, 1, 0) \quad (8)$$

然后可进行第2级的综合评价计算,得到Ⅲ1区块煤系气有利区预测的评价矩阵 \mathbf{B}_1 :

$$\mathbf{B}_1 = A \cdot \mathbf{R}_1 = (0.30, 0.35, 0.25, 0.10) \times \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0 & 0.40 & 0.40 \\ 0 & 0 & 0.55 & 0 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0 & 0.70 & 0.30 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 & 0 \end{bmatrix} = (0, 0.060, 0, 0.1925, 0, 0.395, 0, 0.3525) \quad (9)$$

最后求出Ⅲ1区块煤系气评价的模糊综合评价系数 D_1 :

$$D_1 = \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{C}^T = (0, 0.06, 0.1925, 0.395, 0.3525) \times \begin{bmatrix} \frac{1}{5} & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} & \frac{4}{5} & \frac{5}{5} \end{bmatrix}^T = 0.808 \quad (10)$$

其中 \mathbf{C}^T 为隶属度矩阵的转置矩阵,隶属度矩阵为评判分数与最高分数5的商。

同理,按照此方法依次得到划分的13个有利区块的模糊综合评价系数为0.682、0.808、0.725、0.732、0.691、0.658、0.700、0.728、0.788、0.746、0.746、0.733、0.696,见表6。

表6 豫东地区有利区块模糊评价结果

Table 6 Evaluation results of favorable areas in Eastern Henan Area

区块	i				ii				iii				iv				
	i1	ii1	ii2	ii3	iii1	iii2	iii3	iii4	iv1	iv2	iv3	iv4	iv5				
模糊评价系数	0.682	0.808	0.725	0.732	0.691	0.658	0.700	0.728	0.788	0.746	0.746	0.733	0.696				

3.4 有利区预测

模糊综合评价系数介于0~1,其大小表征了有利于煤系气形成、聚集和开发的程度。系数越大,越有利于煤系气形成、聚集和开发。

根据评价结果,初步预测豫东地区煤系气最有利区块位于研究区西部和东部的Ⅲ1和Ⅳ1区块。相较于其他有利区,Ⅲ1区块明显良好的含气饱和度和资源丰度保证了较好的含气性条件,Ⅳ1区块

则表现出较好的储层条件,有利于煤系气的开发。而位于研究区东部的Ⅳ2、Ⅳ3、Ⅳ4区块,西部的Ⅲ2、Ⅲ3区块以及中部的Ⅲ3、Ⅲ4区块,则相对Ⅲ1和Ⅳ1较差。评价系数低于0.7的Ⅰ1、Ⅲ1、Ⅲ2、Ⅳ5四个区块,煤系气开发条件最差。目前实施的牟页1井,位于Ⅲ1区块西部,目前该井产气开发效果较好,一定程度上反映了预测结果的合理性。

因此,研究认为,睢西大区西部,煤系埋深较大,

保存条件较好,含气性高,最有利煤系气的形成和开发,以及永夏大区西部,煤系埋深较大,煤系气赋存的岩层有效厚度大,资源丰度高,可作为进一步研究的区块。中部的胡襄大区西部尽管生烃条件良好,但区块内含气饱和度较低,埋深变化范围大,部分地区超过 5 000 m,不利于煤系气资源的商业化勘探与开发。

4 结 论

1) 根据区域性断裂构造及其发育特征、地层界线等自西向东把区内含煤地层划分为西北部的开封凹陷(Ⅰ区)、西部的睢西(Ⅱ区)、中部的胡襄(Ⅲ区)、东部的永夏(Ⅳ区)等 4 个大区。而后根据次级断裂进一步划分为 13 个二级区块。

2) 结合豫东地区的实际情况,确定了成烃条件、储层条件、含气条件和地质条件作为豫东地区有利区块优选的模糊数学评价模型的指标。

3) 模糊数学评价结果表明,睢西大区西部和永夏大区西部,煤系埋深较大,保存条件较好,含气性高,最有利煤系气的形成和开发,可作为豫东下步煤系气资源勘探的目标区。中部的胡襄大区西部尽管生烃条件良好,但区块内含气饱和度较低,埋深变化范围大,部分地区超过 5 000 m,煤系气资源勘探开发难度大。

参考文献(References) :

- [1] 王 佟,王庆伟,傅雪海.煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J].煤田地质与勘探,2014,42(1):24-27.
WANG Tong, WANG Qingwei, FU Xuehai. The significance and the systematic research of the unconventional gas in coal measures [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1):24-27.
- [2] 戴金星.中国煤成大气田及气源[M].北京:科学出版社,2014.
- [3] 李贤庆,冯松宝,李 剑,等.鄂尔多斯盆地苏里格大气田天然气成藏地球化学研究[J].岩石学报,2012, 28(3):836-846.
LI Xianqing, FENG Songbao, LI Jian, et al. Geochemistry of natural gas accumulation in Sulige large gas field in Ordos Basin [J]. Acta petrologica Sinica, 2012, 28(3): 836-846.
- [4] 李贤庆,王 元,董泽亮,等.沁水盆地煤系气源岩地球化学特征与生气评价[J].长江大学学报:自然科学版,2015, 12(14):1-8.
LI Xianqing, FENG Songbao, LI Jian, et al. The geochemical characteristics and gas generation evaluation of coal measure gas source rock in Qinshui basin [J]. Journal of Yangtze University: Nature Edition, 2015, 12(14):1-8.
- [5] 王海超.沁水盆地中南部煤系气储层物性及叠置成藏模式[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [6] 李贤庆,周 强,汪为孝,等.库车坳陷三叠-侏罗纪烃源岩生气特征与生气模式[J].煤田地质与勘探,2007,35(6):18-22.
LI Xianqing, ZHOU Qiang, WANG Weixiao, et al. Characteristics and models of gaseous hydrocarbon generation from Triassic - Jurassic source rocks in Kuqa depression [J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(6):18-22.
- [7] 李 靖,姚 征,陈利敏,等.木里煤田侏罗系煤系非常规气存规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):132-138.
LI Jing, YAO Zheng, CHEN Limin, et al. Study on unconventional gas coexisted law of Jurassic coal measures in Muli coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7):132-138.
- [8] 李文前.豫东地区岩浆活动对煤层结构及煤质的影响[J].煤田地质与勘探,2014,42(6):8-13.
LI Wenqian. Effects of igneous intrusions on texture and quality of coal seam in eastern Henan Province [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6):8-13.
- [9] 宋慧波,毕瑜珺,胡 斌.豫西下二叠统太原组遗迹化石与古氧相的响应特征[J].古地理学报,2017,19(4):653-662.
SONG Huibo, BI Yujun, HU Bin. Responding characteristics between ichnofossils and palaeo-oxygen facies in the Lower Permian Taiyuan Formation of western Henan Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(4):653-662.
- [10] 许亚坤,王 昆,张 鹏.永城矿区煤层气主控气因素分析及含气量预测研究[J].煤炭科学技术,2017,45(5):170-174.
XU Yakun, WANG Kun, ZHANG Peng. Study on coalbed methane main control factors and gas content prediction in Yongcheng Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5):170-174.
- [11] 张 硕,张小东,李学文,等.沁水盆地南部煤层气储层特征及可采性研究[J].中国煤炭地质,2015,27(11):9-13.
ZHANG Shuo, ZHANG Xiaodong, LI Xuewen, et al. CBM reservoir features and recoverability study in Southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology of China, 2015, 27(11):9-13.
- [12] 靳黎明,徐 影,卢玉杰,等.筠连-罗布地区页岩气资源可采性模糊数学评价[J].中国煤层气,2014,11(4):44-47.
JIN Liming, XU Ying, LU Yujie, et al. Fuzzy mathematic assessment of the recoverability of shale gas resources in Yunlian-Luobu Area [J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(4):44-47.
- [13] 肖正辉,宁博文,杨荣丰,等.多层次模糊数学法在湘西北页岩气有利区块优选中的应用[J].煤田地质与勘探,2015, 43(3):33-37.
XIAO Zhenghui, NING Bowen, YANG Rongfeng, et al. Application of multi-layered fuzzy mathematics in selecting the favorable areas of shale gas in northwestern Hunan [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(3):33-37.
- [14] 谢国根,张如鹏,杨金华.基于模糊物元分析法的页岩气有利选区评价模型[J].地质科技情报,2016, 35(6):98-102.
XIE Guogen, ZHANG Rupeng, YANG Jinhua. Shale gas favorable area evaluation model based on the fuzzy matter element analysis [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6):98-102.

- [15] 胡林楠,赵靖舟.致密砂岩气藏有效厚度确定方法及应用探讨[J].天然气地球科学,2013,24(1):69-77.
HU Linnan, ZHAO Jingzhou. A discussion on the determination way to effective thickness of tight sandstone gas pools [J]. Nature Gas Geoscience, 2013, 24(1): 69-77.
- [16] 鲁雪松,柳少波,李伟,等.低勘探程度致密砂岩气区地质和资源潜力评价:以库车东部侏罗系致密砂岩气为例[J].天然气地球科学,2014,25(2):178-184.
LU Xuesong, LIU Shaobo, LI Wei, et al. Geological and resource evaluation in tight sandstone gas plays of low exploration degree: A case of Jurassic tight sandstone gas in cast Kuqa basin [J]. Nature Gas Geoscience, 2014, 25(2): 178-184.
- [17] 刘占良,崔明明,樊爱萍,等.致密砂岩气藏储量计算方法探讨:以容积法计算 SX 区块储量为例[J].天然气地球科学,2014,25(12):1983-1993.
LIU Zhanliang, CUI Mingming, FAN Aiping, et al. Calculation method discussion of tight sandstone gas reserves: A case of volumetric method in SX block [J]. Nature Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1983-1993.
- [18] 韩洪升.天然气压缩因子计算方法的评价[J].油气储运,1994(1):12-17.
- [19] 李玉喜,乔德武,姜文利,等.页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J].地质通报,2011,30(2/3):308-317.
LI Yuxi, QIAO Dewu, JIANG Wenli, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 308-317.
- [20] 黄文辉,敖卫华,肖秀玲,等.鄂尔多斯盆地侏罗纪含煤岩系烃潜力评价[J].煤炭学报,2011,36(3):461-467.
HUANG Wenhui, AO Weihua, XIAO Xiuling, et al. The assessment of the capacity for producing hydrocarbon in the Jurassic coal and associate rocks in Ordos basin [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 461-467.
- [21] 李武广,杨胜来,王珍珍,等.基于模糊优化分析法的页岩气开发选区模型[J].煤炭学报,2013,38(2):264-270.
LI Wuguang, YANG Shenglai, WANG Zhenzhen, et al. Shale gas development evaluation model based on the fuzzy optimization analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 264-270.
- [22] 李延钧,刘欢,刘家霞,等.页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):28-34.
LI Yanjun, LIU Huan, LIU Jiaxia, et al. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2011, 33(2): 28-34.
- [23] 李军亮,柳忠泉,肖永军,等.柴达木盆地东部地区石炭系泥页岩生烃条件及选区[J].地质通报,2016,35(2/3):312-320.
LI Junliang, LIU Zhongquan, XIAO Yongjun, et al. Shale gas formation conditions and potential area selection in Carboniferous strata in eastern Qaidam Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(2/3): 312-320.
- [24] 涂乙,邹海燕,孟海平,等.页岩气评价标准与储层分类[J].石油与天然气地质,2014,35(1):153-158.
TU Yi, ZOU Haiyan, MENG Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 153-158.