

非常规天然气

基于边界要素二分的煤层气封存单元分类与评估

赵一民¹, 陈强^{1,2}, 常锁亮^{1,2}, 田忠斌^{2,3}, 桂文华⁴

(1.太原理工大学矿业工程学院, 山西 太原 030024;

2.煤与煤系气地质山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3.山西省煤炭地质物探测绘院, 山西 晋中 030600;

4.山西山地物探技术有限公司, 山西 晋中 030600)

摘要:为有效预测古县区块煤层气富集有利区,基于煤层气封存单元的地质理念,讨论了煤层气封存单元边界构成要素的识别参数,提出了基于单元边界要素二分的煤层气封存单元分类与评价方法。在地质综合解释成果的基础上,从构造、沉积、岩性、水文和物性5个方面,对研究区太原组9+10号煤层进行了煤层气封存单元边界识别及单元分类,共解释5个大类、22个小类、43个煤层气封存单元。基于单元构成地质要素对煤层气富集的影响,将识别出的单元划分为煤层气富集有利、较有利、较不利和不利4类。经已有煤田钻井瓦斯含量数据及新实施的5口探井煤层气含量测试成果验证,表明了该方法的有效性及其合理性。

关键词:煤层气;封存单元;地球物理;边界要素;二分法

中图分类号:TE132.2

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2018)01-0130-10

引用格式:Zhao Yimin, Chen Qiang, Chang Suoliang, *et al.* Classifiable and evaluative method of coal-bed methane storage unit based on binary elements dichotomy[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(1): 130-139. [赵一民, 陈强, 常锁亮, 等. 基于边界要素二分的煤层气封存单元分类与评估[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(1): 130-139.]

0 引言

煤层气富集有利区评价和区块优选是煤层气勘探阶段的首要目标。近年来,以“煤层气多层叠置系统”和“三控论”等的富集地质理论^[1,2]为代表的适应我国复杂煤层气地质条件的煤层气选区评价技术已日趋成熟,但由于煤储层强烈的纵横向非均一性,现有的富集有利地质选区评价方法划分尺度一般较大,不能完全适应煤层气的精细开发需求^[2]。

随着地球物理技术逐渐被引入到煤层气勘探开发领域^[3,4],地震技术目前大量应用于煤层气富集有利区的预测研究,包括:基于蚂蚁体、相干、倾角等属性分析的构造精细识别技术,基于地震反演的岩性预测技术,基于属性、AVO、叠前弹性阻抗反演技术的煤储层物性和含气性预测技术^[4-13],基于地震

沉积学方法的煤系沉积相研究技术^[14]等;从不同的侧面开展了对煤层气富集地质控制要素的研究。但这些技术大多数将研究对象集中在煤储层本身上,而受煤储层厚度薄、煤层气为吸附气的影响,预测成果多数存在较大的不确定性;地球物理测井技术在煤岩和煤质分析、孔隙度、构造煤、含气量、地层水矿化度解释等方面取得了诸多成效^[15-19]。但为单点数据,横向外推的可靠性较差。如何充分发挥地震技术横向上分辨率较高的优势,结合测井数据弥补其垂向上分辨率对煤储层预测的不足,实现尺度更小的富集有利区的预测,成为煤层气富集有利区预测亟需解决的问题。

常锁亮等^[20]提出的“煤层气封存单元”理念,将煤层气富集地质控制因素的研究对象从煤层本身的变化特征转变为研究煤系层序内纵横向上对煤层气

运移起封堵作用的构造、沉积、岩性等变化,为识别更小尺度的煤层气富集区提供了一条新途径与思路,但对如何实现单元的有效划分与分类评价,还有待进一步研究。

针对上述问题,本文以沁水盆地古县区块高质量二维地震成果和大量钻测井资料,从构造、沉积、水文、岩性、物性 5 个方面采用边界要素二分组合识别了研究区太原组 9+10 号的煤层气封存单元,基于单元构成地质要素对煤层气富集的影响,结合已有钻测井成果,对识别出的煤层气封存单元划分进行了评价。

1 研究区煤层气地质概况

研究区位于沁水盆地的西南部[图 1(a)],面积为 1 417.1km²。研究区东部发育宽缓褶皱构造,轴

向为 NNE 向,地层倾角一般在 3°~10°之间。本文基于沁水盆地古县区块 8km×8km 网度的高质量二维地震构造解释成果[图 1(b)]构造线总体呈 NNE—SSW 方向展布,断裂在研究区西部密集出现,性质以正断层为主。主要断裂包括霍山山前断裂、浮山断裂及其派生断层,断距一般大于 200m,最大可达 1 000m 以上。

1.1 地层及层序

区内发育地层由老到新主要有:中上寒武统、中奥陶统、石炭系、二叠系、三叠系及第四系。以区域不整合面、下切谷冲刷面和海侵方向转换面、河流侵蚀面、煤层顶面、古土壤层(根土岩)为三四级界面,利用钻测井和二维地震资料,将本溪组—山西组含煤岩系划分出 11 个四级层序界面(图 2),其中 9+10 号煤层位于 PS4 层序顶部,层序厚度为 11.15~32.4m。

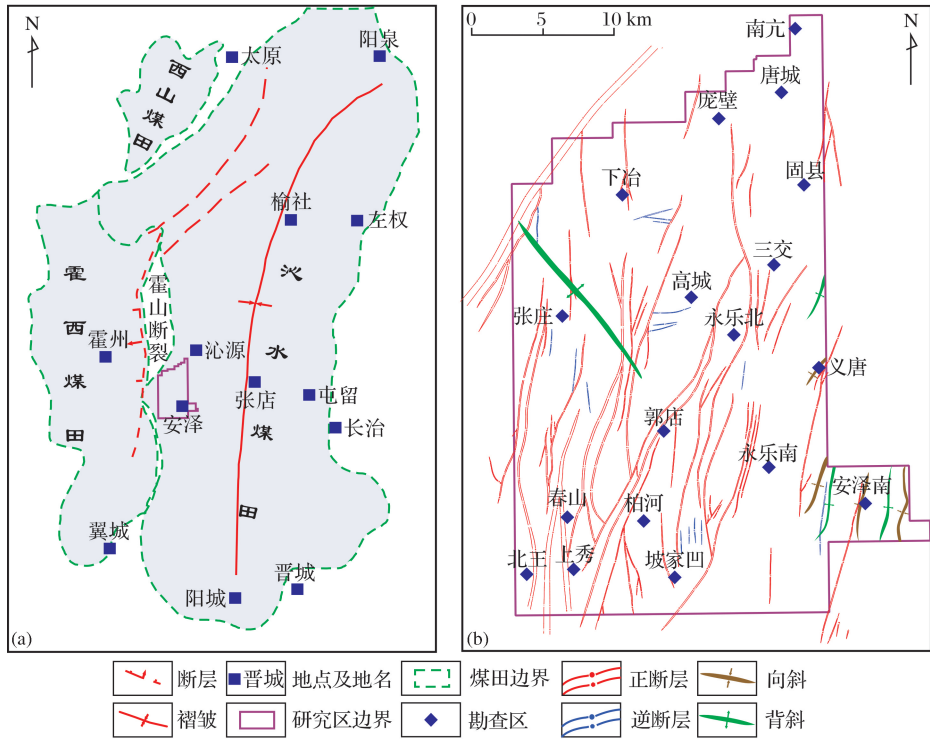


图 1 沁水盆地古县区块构造

Fig.1 Brief introduction to the structure of Guxian block, Qinshui Basin

1.2 煤储层

本区含煤地层主要为上古生界石炭系—二叠系太原组和山西组,2 号煤层位于山西组中部,区内埋深主要集中在 600~800m 之间;煤层厚度为 0~3.80m,平均厚度为 1.32m;9+10 号煤层位于太原组下部,区内埋深主要集中在 600~1 000m 之间,平均为 800m 左右;煤层厚度为 0.66~7.46m,平均厚度为 2.72 m,镜质组反射率在 1.40%~2.39%之

间。研究区主要煤层含气量介于 0.24~11.66m³/t 之间,平均为 4.02m³/t;9+10 号煤层含气量为 1.15~11.58m³/t,平均为 4.56m³/t。

2 煤层气封存单元边界构成要素的确定及分类

2.1 构造边界的确定及分类

利用二维地震构造解释成果和 100 余口钻井煤

层数据可得到的 9+10 煤层的埋深、倾角、曲率等参数。在此基础上,考虑断层的隐伏性、可靠程度、性质、断裂密度、断距、与断煤交线的距离、地层倾角、埋深、风氧化带深度等参数,可将研究区划分了风氧化带区、断裂发育区、断裂相对发育区和断裂不发育等 4 类区。具体划分的参数如下。

- (1)断裂不发育区:无断裂或断裂密度较低(2 条/km)、落差小于 50m,不切穿地表,构造为缓背斜、向斜或单斜,可靠性较差,且地层倾角小于 8°。
- (2)断裂相对发育区:地层较陡,倾角大于 8°,断裂密度相对较低,落差介于 50~100m 之间。
- (3)断裂发育区:断裂密度较高,最大落差超过 100m 或切穿地表。
- (4)风氧化带区:9+10 号煤层埋深小于 550m。
- (5)考虑到二维地震解释的断裂平面摆动及储层所在层序及相邻层序垂向厚度范围,构造边界与断煤交线(9+10 号煤层)相距不低于 50m。

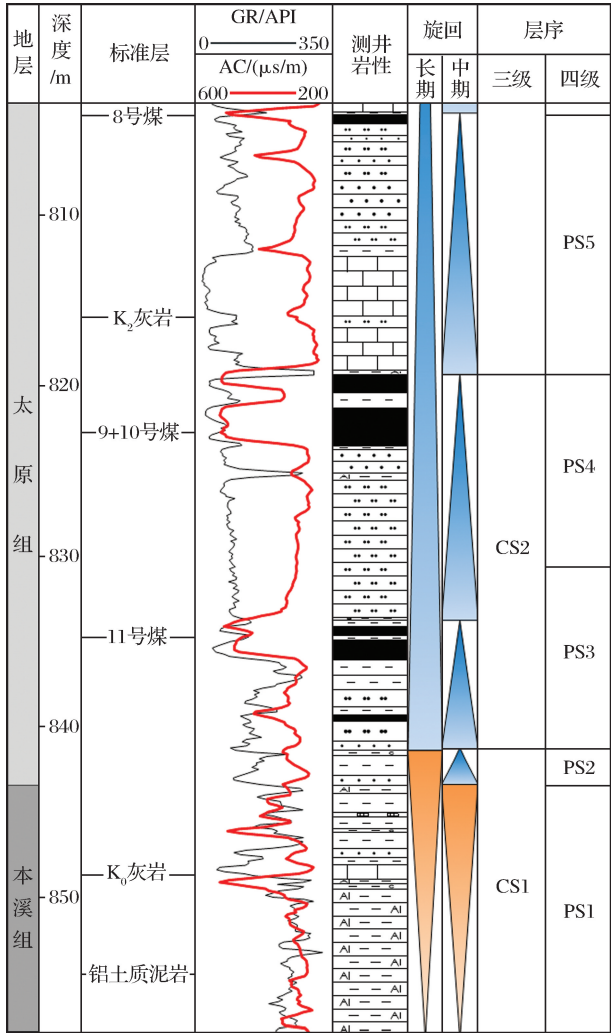


图 2 研究区层序地层格架

Fig.2 Sequence stratigraphic framework of study area

为简化构造边界条件,将断裂不发育区定为构造有利区,其他 3 类归为构造不利区,如图 3(a)所示,绿色部分为构造有利单元,淡紫色部分为构造不利单元。

2.2 沉积边界的确定及分类

研究区 9+10 号煤层所在 PS4 层序为海陆过渡相沉积环境,地震资料内部反射结构为平行或亚平行反射结构为主,外部几何形状以席状为主,局部夹杂有透镜体几何外形,反射特征不典型,常规地震沉积相解释方法不适用。为此,以单井层序内沉积相解释成果为标定依据,优选分频技术提取了 PS4 层序的调谐能量属性参数,解释了研究区地震沉积相。调谐能量高,砂质碎屑含量高,沉积环境水动力能量强、岩性相变快;调谐能量低泥质碎屑相对含量高,沉积环境水动力能量弱、岩性相变慢。

该层序主要发育有障壁岛、砂坪相、混合坪和潟湖—泥炭坪等微相,同样采用二分法,将潟湖—泥炭坪相和泥坪相[图 3(b)绿色部分]划分为有沉积封堵有利单元,其他相[图 3(b)淡紫色部分]划分为沉积封堵不利沉积单元。

2.3 水动力边界的确定及分类

地层水矿化度可以表征地层水的流动性,高煤阶地区高矿化度即滞流区有利于煤层气封存。鉴于研究区自然电位曲线品质较差,且相邻区沁南区块 9+10 号煤层所在石炭系下段砂岩含水层的视电阻率的平均值与砂岩地层水矿化度之间有近似的幂函数关系。因此,根据区块已知井通过分层抽水试验得到的矿化度数据与对应的含水层视电阻率平均值进行了回归统计计算,修正了解释模型,进而通过井间插值得到了全区矿化度分布特征图。并采用分水岭算法计算了封堵边界,划分了地下水相对滞流区,解释为水动力封堵有利单元,如图 3(c)绿色区域,其他区域解释为水动力封堵不利单元(淡紫色区域)。

2.4 岩性边界的确定及分类

由于研究区石炭系一二叠系含煤地层的岩石处于晚成岩期,泥岩的压实效应较强,其密度和速度接近砂岩,从原始波阻抗曲线上,二者无法区分,为此,利用声波和对砂泥分辨率较高的自然伽玛曲线,重构了拟声波阻抗曲线,利用交会图分析获得的煤层、砂岩、泥岩及灰岩的波阻抗门槛,在此基础上,采用叠后模型反演技术,提高了岩性解释精度。

9+10 号煤层位于 PS4 层序顶部,其封堵层为 PS5 层序,封堵岩性为砂岩和灰岩,为此,利用 PS5

层序岩性反演数据,计算了 PS5 层序的砂地比和灰岩厚度。根据井标定结果,以砂地比值小于0.15、灰岩厚度大于等于 3m 为界,解释了岩性有利封堵单元,如图 3(d)中绿色区域,其他为不利单元(淡紫色区域)。

2.5 物性边界要素

利用叠前弹性波阻抗反演技术,可获得纵横波速度、泊松比、弹性模量等表征岩石弹性力学性质的

参数,其中裂隙发育程度与横波速度降低程度呈高负相关关系。由于 9+10 号煤层顶板灰岩裂隙直接影响煤层气的封存。利用弹性波阻抗反演得到的灰岩视纵横波速度比数据,根据井标定结果,以视纵横波速度比门槛值 3.02 为界,解释了 9+10 号煤层顶板灰岩的物性封堵边界,以小于 3.02 的为物性有利封堵区,如图 3(e)绿色区域,其他为不利单元(淡紫色区域)。

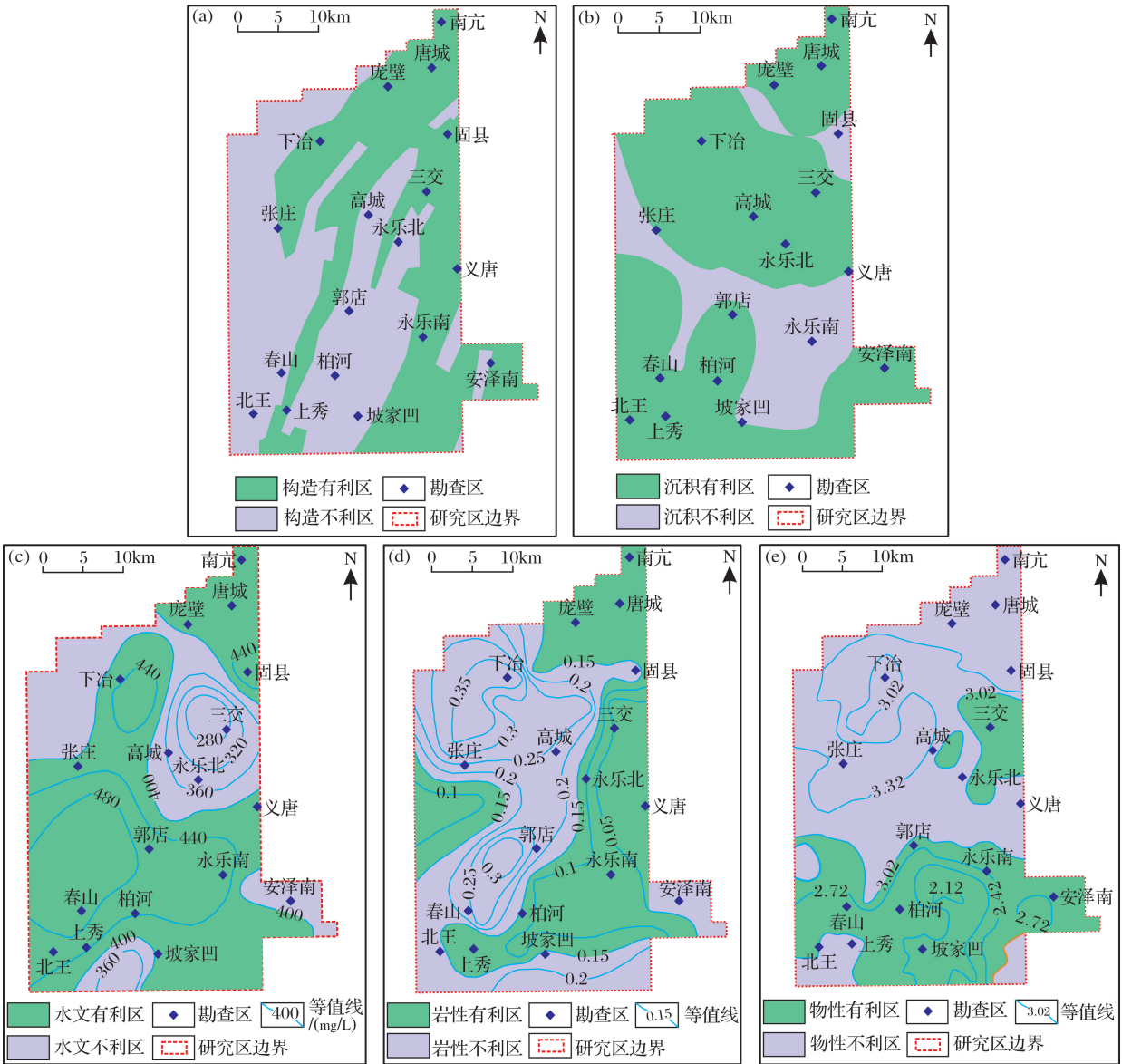


图 3 封存单元边界要素成果分区

Fig.3 Storage unit boundary element zoning map

3 煤层气封存单元的划分及分类

对于我国中高阶煤层气储层来说,煤层气的富集成藏研究主要体现在沉积期后煤层气的保存条

件,涉及构造、沉积、水文及岩性、物性等多项地质因素^[21,22],主控因素和边界类型、条件复杂。叶建平^等^[23]将与煤层气有关的构造样式总结为向斜构造、背斜构造、褶皱—逆冲推覆构造和伸展构造 4 个大

类 14 种构造样式。在沉积方面,秦勇等^[24]概括了与煤层气有关的 6 种储盖组合基本成因类型。在岩性方面,曾勇^[25]未考虑不同类型的砂岩和灰岩,仅就煤层顶板泥岩封存层气的能力归纳了黏土矿物类型、砂质含量、厚度和埋深等多个因素。虽然对于一个具体区块和煤层,边界类型会有所减少,但是利用地球物理数据成果全部准确识别这些条件是困难的,即使全部识别,也可能产生封存单元类型过多,不易进行分类地质评价的问题。

为减少封存单元类型,便于富集有利区的地质评价,可结合研究目标区地质特点及相关煤层气地质理论,分别对构造、水文、沉积、岩性、物性等 5 项封堵边界涉及的各类地质要素,根据已有的地质评价和参数标准,统一进行有利和不利条件简单划分,这样,每一项封存因素均可相对应地简化为单一条件下的 2 类单元——有利和不利单元,如构造有利单元,构造不利单元,以此类推;再利用数学组合原理,可将各单项封存单元类型综合为 6 个大类、32 个小类(表 1)。

为突出有利条件个数以及构造因素的重要性,本文将封存单元编号形式确定为数字—字母—数字,第 1 个数字 0~5 代表有利条件个数,字母 A 代表构造有利,B 代表构造不利,第 2 个数字代表小类序号,无小类的无序号。例如:4A1 代表有利条件个数为 4,构造有利,小类为构造、水文、沉积、岩性这 4 类条件有利。

在油气勘探选区阶段,为了降低风险,多采用多因素叠合评价法预测勘探区中有利区带,其思路是把地球物理基础资料形成的各个单一因素有利分区分带图,通过将各个边界的有利分区以交集的叠合方式进行叠加,形成具有组合特征的有利分带。

根据以上划分出的构造、水力、沉积、岩性、物性等封堵边界,采用多因素交集叠合的方法,划分了研究区封存单元类型,共计 5 个大类、22 个小类,43 个封存单元(图 4)。

4 煤层气封存单元的评价

4.1 研究区的煤层气富集性

统计结果见表 2,研究区 4A 类封存单元面积为 451.46km²,占比 31.86%;3A 类和 3B 类单元面积为 520.8km²,占比 36.75%;2A 类和 2B 类单元面积为 215.77km²,占比 15.23%;1A 类和 1B 类有利因素区域面积为 196.38 km²,占比 13.86%;全不利单元面积为 32.69km²,占比 2.31%;全区 4 类有利条

件以下的单元面积占比达到了 68.14%,且 5 类有利因素区域面积为 0。而全区 67 口井的含气量数据也表明,9+10 号煤层含气量超过 10m³/t 的仅有 1 口井,8~10m³/t 的 1 口井,5m³/t 以下的达 53 口井之多,个别井甚至低至 0.85m³/t。这也说明该区封存单元类型特点与区块整体煤层气含量水平整体不高相符,总体来看,9+10 号煤层气封存条件较差。

表 1 边界要素二分组合的煤层气封存单元分类
Table 1 Classification of coalbed methane storage units with combination of binary elements dichotomy

序号	封存单元类型	封存单元编号	有利条件	构造	水文	沉积	岩性	物性
1	5 类条件有利	5A	均有利	✓	✓	✓	✓	✓
2		4A1	物性不利	✓	✓	✓	✓	×
3		4A2	岩性不利	✓	✓	✓	×	✓
4		4A3	沉积不利	✓	✓	×	✓	✓
5		4A4	水文不利	✓	×	✓	✓	✓
6		4B	构造不利	×	✓	✓	✓	✓
7	3 类条件有利	3A1	构造有利	✓	✓	✓	×	×
8		3A2		✓	✓	×	✓	×
9		3A3		✓	×	✓	✓	×
10		3A4		✓	✓	×	×	✓
11		3A5		✓	×	✓	×	✓
12		3A6		✓	×	×	✓	✓
13	2 类条件有利	3B1	构造不利	×	✓	×	✓	✓
14		3B2		×	✓	✓	×	✓
15		3B3		×	✓	✓	✓	×
16		3B4		×	×	✓	✓	✓
17		2A1	构造有利	✓	×	×	×	✓
18		2A2		✓	×	×	✓	×
19	1 类条件有利	2A3		✓	×	✓	×	×
20		2A4		✓	✓	×	×	×
21		2B1		×	✓	×	×	✓
22		2B2		×	✓	×	✓	×
23	无条件的有利	2B3	构造不利	×	✓	✓	×	×
24		2B4		×	×	✓	×	✓
25		2B5		×	×	✓	✓	×
26		2B6		×	×	×	✓	✓
27	1 类条件有利	1B1	物性有利	×	×	×	×	✓
28		1B2	岩性有利	×	×	×	✓	×
29		1B3	沉积有利	×	×	✓	×	×
30		1B4	水文有利	×	✓	×	×	×
31	无条件的有利	1A	构造有利	✓	×	×	×	×
32		0B	均不利	×	×	×	×	×

注:✓为地质评价有利条件类型,×为地质评价不利边界条件类型

4.2 不同封存单元的煤层气富集性

区内煤田钻孔 9+10 号煤层实测含气量和 5 类封存单元类型对比分析表明,4A 单元内含井个数 22 口,含气量为 1.24~11.58m³/t,平均含气量为 5.68m³/t;3A 和 3B 单元内井数为 27 口,含气量为 1.15~4.04m³/t,平均含气量为 2.44m³/t;2A 和 2B 单元内井数为 9 口,含气量为 1.22~3.11m³/t,平均含气量为 2.35m³/t;1A 和 1B 单元内井数为 8 口,最大含气量为 1.38~2.89m³/t,平均含气量为 2.0m³/t;无有利因素单元内含井 1 口,含气量为 1.56m³/t。其关系如图 5 所示,可以看出平均含气量随着有利封存条件个数的增大而增加。

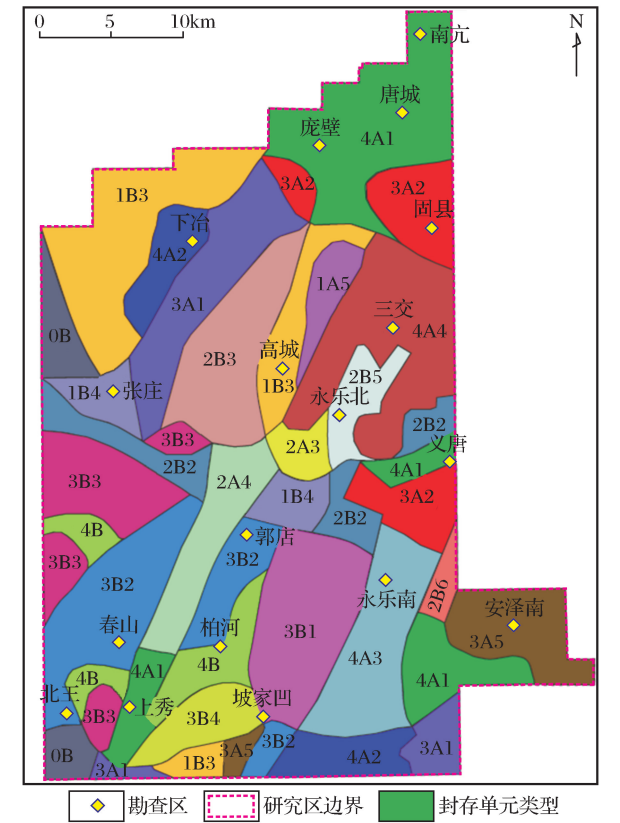


图 4 研究区封存单元及类型划分

Fig.4 Storage units and type division of the study area

1A、2A、3A 平均含气量分别为 2.0m³/t、2.35m³/t、2.44m³/t,区分度不明显,但是 4A 和 0B 区分明显,所以可以识别出煤层气富集最有利区和最差区。对于本区来说,4A 为封存单元最有利的类型,4A1 为最有利的煤层气富集区,1A、1B 及 0B 为最不利区。最有利煤层气富集区集中在研究区北东部—南亢、唐城、庞壁一带,南部上秀,东部义唐以及安泽西南部,富集最差区集中在张庄、高城、郭店北部以及北王南部区域。

表 2 研究区封存单元类型统计

Table 2 List of storage units in the study area

封存单元 大类	封存单 元小类	封存单元类型	面积 /km ²	面积比 /%
4 类条件有利	4B	沉积水文物性岩性有利	50.41	3.56
	4A4	构造沉积物性岩性有利	101.62	7.17
	4A3	构造水文物性岩性有利	71.49	5.04
	4A2	构造沉积水文物性有利	54.15	3.82
	4A1	构造沉积水文岩性有利	173.79	12.26
3 类条件有利	3B4	沉积岩性物性有利	29.66	2.09
	3B3	沉积水文岩性有利	77.64	5.48
	3B2	水文物性沉积有利	105.13	7.42
	3B1	水文物性岩性有利	83.2	5.87
	3A5	构造沉积物性有利	56.84	4.01
	3A2	构造水文岩性有利	73.76	5.20
	3A1	构造沉积水文有利	94.57	6.67
2 类条件有利	2B5	沉积岩性有利	26.19	1.85
	2B6	岩性物性有利	9.84	0.69
	2B3	水文物性有利	74.75	5.27
	2B2	水文岩性有利	41.61	2.94
	2A4	构造水文有利	48.53	3.42
	2A3	构造物性有利	14.85	1.05
1 类条件有利	1A5	构造有利	19.19	1.35
	1B4	水文有利	36.07	2.55
	1B3	沉积有利	141.12	9.96
无条件有利	0B	无有利	32.69	2.31

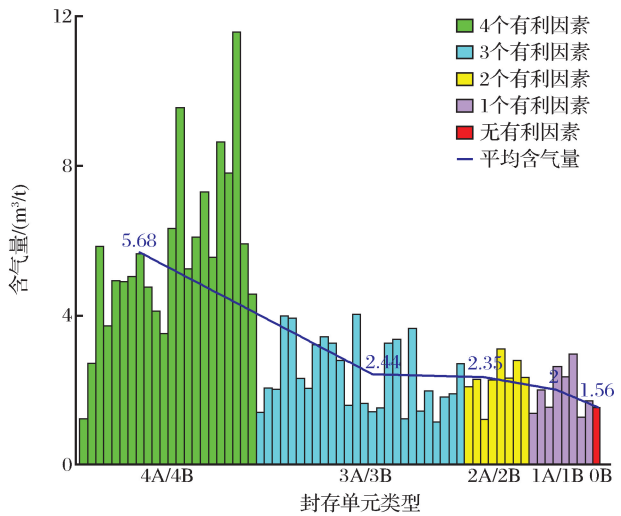


图 5 封存单元类型与含气量关系

Fig.5 Relationship between storage unit type and gas content

4.3 有利煤层气封存单元的控气要素分析

通过对比含气量大于 5m³/t 和低于 1.5m³/t 的 17 口井数据(表 3)可以发现:构造条件差的单元中

7 井含气量均低于 $1.5\text{m}^3/\text{t}$,反之则均高于 $5\text{m}^3/\text{t}$,说明构造为该区的第一级主导因素。

表 3 高含气和低含气井统计

含气量类型	井号	封存单元类型	含气量 /(m^3/t)
含气量大于 $5\text{m}^3/\text{t}$	YLB109	水文差 4A4	5.85
	YLB101	水文差 4A4	5.03
	YLN109	沉积差 4A3	5.67
	XY107	沉积差 4A3	6.32
	XY501	岩性差 4A2	9.56
	BH4-1	物性差 4A1	6.09
	SX3-1	物性差 4A1	7.31
	AZN902	物性差 4A1	5.55
	SX6-1	物性差 4A1	8.65
含气量小于 $1.5\text{m}^3/\text{t}$	17-1	物性差 4A1	11.58
	BW305	构造差 4B	1.24
	FS102	构造水文差 3B4	1.43
	BW305	构造物性差 3B3	1.24
	FS502	构造岩性差 3B2	1.44
	BW301	构造岩性差 3B2	1.15
	ZZ1301	构造物性岩性差 2B3	1.22
	FS501	构造水文岩性物性差 1B3	1.28

为进一步分析其余条件的影响层次,选择井控制程度较高且封存条件较好的 4 个有利条件的单元,对比了 4A1—4A4 以及 4B 单元与含气量的关系,如图 6(a)所示。构造单一条件差,其他条件均有利的单元 4B,其平均含气量仅为 $1.98\text{m}^3/\text{t}$,水文差(4A4)的区域井的平均含气量为 $4.89\text{m}^3/\text{t}$,沉积差(4A3)的区域井的平均含气量为 $4.85\text{m}^3/\text{t}$,岩性差(4A2)的区域井的平均含气量为 $6.16\text{m}^3/\text{t}$,而物性差(4A1)的区域井的平均含气量为 $7.18\text{m}^3/\text{t}$,最高可达 $11.58\text{m}^3/\text{t}$;说明水文和沉积为该区煤层气二级主导因素,岩性和物性为该区煤层气三级主导因素。

此外,在同一小类封存单元中,含气量并不是相同的,可能还会呈剧烈的变化。如图 6(b)所示,在只有物性条件不利的区域 4A1 内有 8 口井,井的含气量最高为 $11.58\text{m}^3/\text{t}$,含气量最低仅为 $4.57\text{m}^3/\text{t}$ 。分析后认为二分法的粗糙性是造成这一现象的主要原因,以构造封堵要素来说,断裂不发育的背斜、单斜和向斜构造此次均划分为有利区,但是现有煤层气地质研究表明,即使其他封存条件完全一致,上述 3 类构造样式内含气量也会发生明显变化。

4.4 分类评价效果的检验

根据封存单元有利单元个数及含气量将研究区

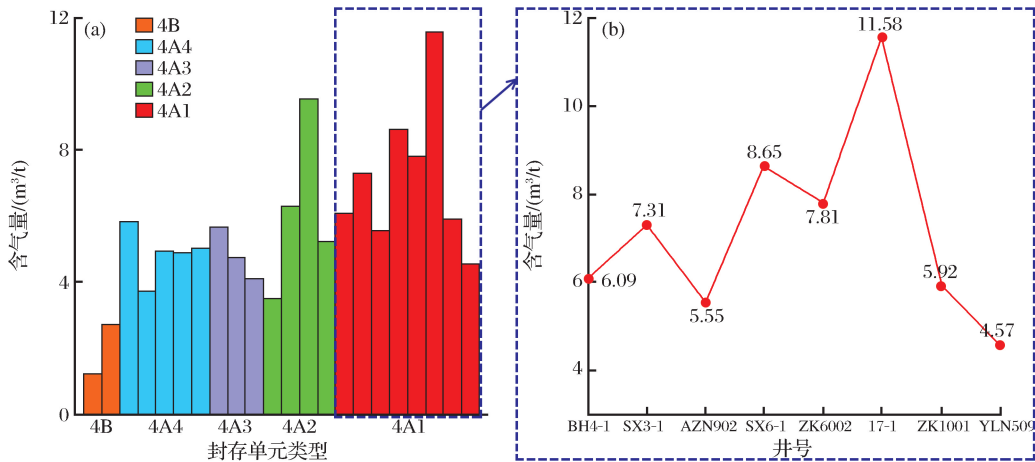


图 6 4A/B 封存单元类型与含气量关系

Fig.6 Relationship between 4A/B storage unit type and gas content

表 4 煤层气富集有利区类型

煤层气富集类型	等级	封存单元类型	面积/ km^2
I 类	有利	4A1	173.79
II 类	较有利	4A2,4A3,4A4,3A1,3A2,3A5,2A3,2A4	515.85
III 类	较不利	4B,3B1,3B2,3B3,3B4,2B5,2B6,2B2,2B3	498.43
IV 类	不利	0B,1A5,1B3,1B4	229.07

煤层气富集区域分为4类(表4):Ⅰ类为煤层气富集最有利区域;Ⅱ类为煤层气富集较有利区域;Ⅲ类为煤层气富集较不利区域;Ⅳ类为煤层气富集最差区域。

后续实施的5口煤层气钻井如图7所示,初步证实了研究区煤层气封存单元划分的合理性。2口井ZK1001井和ZK6002井位于4A1单元内,含气量分别为 $5.92\text{m}^3/\text{t}$ 和 $7.81\text{m}^3/\text{t}$,1口井ZK4005井位于3A5单元内,含气量为 $5.24\text{m}^3/\text{t}$,封存条件相对较好。ZK3002井和ZK4003井分别位于1B4和1B5单元内,含气量分别为 $1.39\text{m}^3/\text{t}$ 和 $1.56\text{m}^3/\text{t}$,与封存单元的分类与评价结果吻合,表明了方法的可行性。

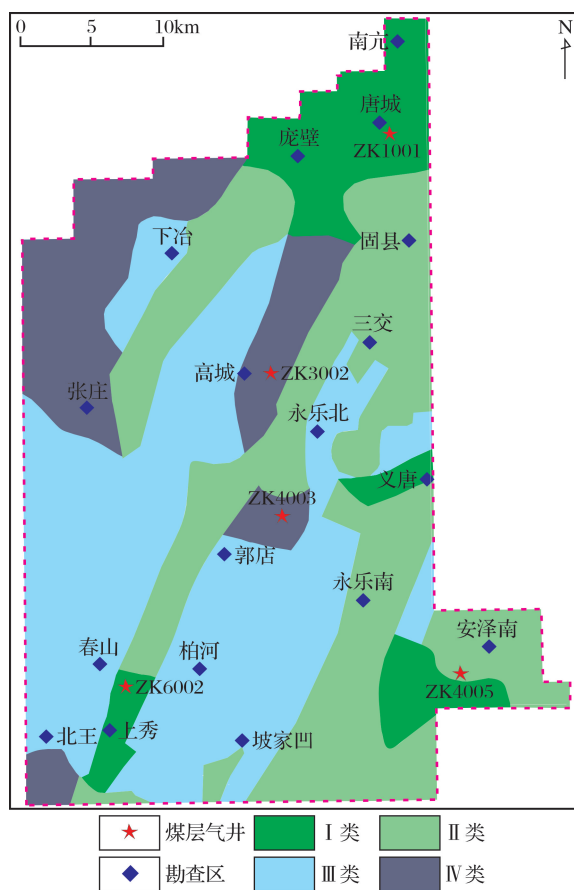


图7 煤层气富集有利区划分

Fig.7 Coalbed methane enrichment favorable area division map

5 结论

(1)采用基于有利封堵条件个数分类的边界要素二分组合法划分了5个大类、22个小类、43个封存单元;研究区发育的封存单元类型及其特点可反映研究区的整体封存条件,能用于评价区富集潜力;封存单元中有利封存因素个数越多,含气量越高。

(2)对研究区而言,在这5类条件中,构造封存

条件对封存单元内含气量的影响最明显,其次为水文和沉积,再次为物性和岩性。

(3)本文将研究区煤层气富集分为Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类,分别对应于煤层气富集最有利区、相对有利区、相对不利区和最差区。在煤层气富集最有利区,是由上述5种边界要素共同指向的,可优先进行煤层气井位的布置。

(4)本文研究是对封存单元分类方法的一次有益的尝试。但是要理清不同类型单元内控气因素及控气程度,还需进一步对封存边界进行细分,并研究与之相匹配的封存单元分类方法。

参考文献(References)

- [1] Qin Yong, Xiong Menghui, Yi Tongsheng, *et al.* On unattached multiple superposed coal-bed methane system: In a case of the Shuigonghe Syncline, Zhijin-Nayong Coalfield, Guizhou [J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65-69.
秦勇,熊孟辉,易同生,等.论多层叠置独立含煤层气系统——以贵州织金—纳雍煤田水公河向斜为例[J].地质评论, 2008, 54(1): 65-69.
- [2] Zhao Qinbo, Sun Fenjin, Li Wuzhong, *et al.* Geological Theory and Practice of Coalbed Methane Exploration and Development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 10-25.
赵庆波,孙粉锦,李五忠,等.煤层气勘探开发地质理论与实践 [M].北京:石油工业出版社, 2011: 10-25.
- [3] Marroquin I D, Hart B S. Seismic attribute-based characterization of coalbed methane reservoirs: An example from the Fruitland, San Juan Basin, New Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(11): 1603-1621.
- [4] Peng Suping, Du Wengfeng, Yin Caiyun, *et al.* High abundance coalbed methane rich region geophysical identification [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 29(8): 1398-1430.
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.
- [5] Peng S P, Chen H J, Yang R Z, *et al.* Factors facilitating or limiting the use of AVO coalbed methane [J]. Geophysics, 2006, 71: 49-56.
- [6] Peng S P, Gao Y F. Study on the AVO forward modeling of coal bearing strata [J]. Chinese Bulletin Science, 2005, 50(s): 151-158.
- [7] Peng Suping, Gao Yufeng, Yang Ruizhao, *et al.* Theory and application of AVO for detection of coal-bed methane: A case from the Huainan Coalfield [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1475-1486.
彭苏萍,高玉峰,杨瑞召,等. AVO探测煤层瓦斯富集的理论探讨与初步实践——以淮南煤田为例[J].地球物理学报, 2005, 48(6): 1475-1486.

- [8] Chen Xinping, Huo Quanming, Lin Jiandong, *et al.* The relation between CBM content and the elastic parameters of CBM reservoirs: Reasoning and initial probing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(8): 2837-2848.
陈信平, 霍全明, 林建东, 等. 煤层气储层含气量与其弹性参数之间的关系——思考与初探[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(8): 2837-2848.
- [9] Cui Ruofei, Chen Tongjun, Qian Jin, *et al.* CBM(gas) seismic prospecting technology[J]. *Coal Geology of China*, 2012, 24(6): 48-56.
崔若飞, 陈同俊, 钱进, 等. 煤层气(瓦斯)地震勘探技术[J]. *中国煤炭地质*, 2012, 24(6): 48-56.
- [10] Yang Shuanguan, Ning Shunian, Zhang Huixing, *et al.* Research achievements of forecasting gas using three-dimensional seismic exploration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(3): 334-336.
杨双安, 宁书年, 张会星, 等. 三维地震勘探技术预测瓦斯的研究成果[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(3): 334-336.
- [11] Chang Suoliang, Liu Dameng, Lin Yucheng, *et al.* Application of spectral decomposition for fine seismic structural interpretation in coalfield and gas bearing property predication of coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(8): 1015-1021.
常锁亮, 刘大锰, 林玉成, 等. 频谱分解技术在煤田精细构造解释及煤含气性预测中的应用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(8): 1015-1021.
- [12] Yan Wenhua, Chen Zongcui, Ma Ximei, *et al.* 3D seismic interpretation of coal-bed methane in Zhengzhuang block, Qinshui Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(S1): 66-71.
闫文华, 陈宗翠, 马喜梅, 等. 煤层气地震解释技术应用及效果——以沁水盆地郑庄区块三维为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(S1): 66-71.
- [13] Chen Guiwu, Dong Shouhua, Wu Haibo, *et al.* 2014. Research and application of quantitative geophysics recognition in high abundance of coal-bed methane rich region[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(5): 2151-2156.
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.
- [14] Zeng Hongliu, Backus MM. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 1: Modeling[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 5-7.
- [15] Fu Xuehai, Ye Shizhong, Jiang Bo, *et al.* Classification of Coal-body structure and prediction of coal reservoir permeability with log curves[J]. *Well Logging Technology*, 2003, 27(2): 140-143.
傅雪海, 叶诗忠, 姜波, 等. 用测井曲线划分煤体结构和预测煤层渗透率[J]. *测井技术*, 2003, 27(2): 140-143.
- [16] Li J, Liu D, Yao Y, *et al.* Evaluation of the reservoir permeability of anthracite coals by geophysical logging data[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87(2): 121-127.
- [17] Pan Heping, Liu Guoqiang. Evaluating gas content of coal-bed from density log data[J]. *Progress in Geophysics*, 1996, 11(4): 53-60.
潘和平, 刘国强. 依据密度测井资料评估煤层的含气量[J]. *地球物理学进展*, 1996, 11(4): 53-60.
- [18] Wang Anlong, Sun Xiaoqin, Xie Xuehen-g, *et al.* The method of calculating gas content and industrial components of coal-bed by using well logging data[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2011, (1-2): 69-73.
王安龙, 孙小琴, 谢学恒, 等. 利用测井资料计算煤层含气量及工业组分方法研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2011, 1(1-2): 69-73.
- [19] Zhao Fazhan, Qi Hongbin, Wang Yun. A geophysical logging method to detect the water mineralization intensity underground[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(3): 551-558.
赵发展, 戚洪彬, 王贻. 地层水矿化度检测的地球物理测井方法[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(3): 551-558.
- [20] Chang Suoliang, Chen Qiang, Liu Dongna, *et al.* Preliminary discussion on coal bed methane storage unit and its seismic geology comprehensive identification method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 57-66.
常锁亮, 陈强, 刘东娜, 等. 煤层气封存单元及其地震-地质综合识别方法初探[J]. 2016, 41(1): 57-66.
- [21] Song Yan, Qin Shengfei, Zhao Mengjun. Two key geological factors controlling the coal-bed methane reservoirs in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 545-552.
宋岩, 秦胜飞, 赵孟军. 中国煤层气成藏的两大关键地质因素[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 545-552.
- [22] Zhang Zhenwen, Gao Yongli, Dai Fenghong, *et al.* The geological agent affecting: The gas occurrence of the coal seam unmined in Xiaonan coalmine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 950-954.
张振文, 高永里, 代凤红, 等. 影响晓南矿未开采煤层瓦斯赋存的地质因素[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(9): 950-954.
- [23] Ye Jianping, Qin Yong, Lin Dayang. Coal-bed Methane Resources of China[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999: 1-229.
叶建平, 秦勇, 林大杨. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999: 1-229.
- [24] Qin Yong, Fu Xuehai, Yue Wei, *et al.* Relationship between depositional systems and coalbed gas reservoir and its caprock[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(1): 77-84.
秦勇, 傅雪海, 岳巍, 等. 沉积体系与煤层气储盖特征之关系探讨[J]. *古地理学报*, 2000, 2(1): 77-84.
- [25] Zeng Yong. Influence of Gas Capability on Closure of Coal Seam[C]. 2002 National Symposium on Gas Geology. Chengdu: China coal society Gas Geological Professional Committee, 2002: 1-3.
曾勇. 煤层顶板泥岩封存瓦斯能力的影响[C]. 2002 全国瓦斯地质学术年会论文集. 成都: 中国煤炭学会瓦斯地质专业委员会, 2002: 1-3.

Classifiable and evaluative method of coal-bed methane storage unit based on binary elements dichotomy

Zhao Yi-min¹, Chen Qiang^{1,2}, Chang Suo-liang^{1,2}, Tian Zhong-bin^{2,3}, Gui Wen-hua⁴

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Shanxi Key Laboratory of Coal and Coal Measure Gas Geology, Taiyuan 030024, China;

3.Shanxi Provincial Coal Geological, Geophysical Prospecting, Surveying and Mapping Institute, Jinzhong 030600, China;

4.Shanxi Shandi Geophysical Prospecting Technology Co.Ltd., Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to effectively predict the favorable area of CBM enrichment in the Guxian block, this paper discusses the identification parameters of the boundary elements of the coal-bed methane storage unit from the geological concept of the CBM storage unit, classification and evaluation method of coal-bed methane storage unit based on binary elements of element boundary is proposed. On the basis of comprehensive interpretation of seismic geology, the CBM storage units were identified and classified by aspects of structure, sedimentary, lithology, hydrology and physical properties. A total of 5 categories, 22 small categories, and 43 CBM storage units were given. The identified units were divided into coal-bed methane enrichment, favorable, relatively unfavorable and unfavorable based on the influence of geological elements on coal-bed methane enrichment. The gas content data of the existing coal mine drilling and the test results of coal-bed methane of 5 newly implemented exploration wells demonstrates the method is effective and reasonable.

Key words: Coal-bed methane; Storage units; Geophysical technique; Block boundary; Dichotomy

简 讯

USGS 重新评估美国阿拉斯加国家石油储备区油气资源

2017 年 12 月 22 日,美国地质调查局(USGS)宣布其最新评估结果,阿拉斯加国家石油储备区(National Petroleum Reserve-Alaska, NPR-A)拥有 87 亿桶(约 11.87×10^8 t)石油和 25 万亿立方英尺(约 0.71×10^{12} m³)天然气资源,这一评估结果是 2010 年 USGS 对该地区评估结果的 6 倍多。

阿拉斯加国家石油储备区位于北极国家野生动物保护区(Arctic National Wildlife Refuge)的西边,是由美国联邦政府拥有并由内政部土地管理局(Bureau of Land Management, BLM)管理的阿拉斯加北坡地区,占地面积约 2 280 万英亩,比整个南加州的面积还要大。

USGS 对该地区进行重新评估的主要原因是石油公司在该地区附近发现了比之前预想大的多的油田。2015 年和 2017 年,在科尔维尔河三角洲附近分别发现了 Pikka 油田和 Horseshoe 油田,两者相距 21 英里,可能处于同一油区,蕴藏有超 10 亿桶的可采石油。与此同时,近年来技术进步和人类对石油地质认识的不断进步也给了 USGS 更新其评估结果、为管理者提供最新可靠知识的机遇。

虽然 USGS 在油气资源评估方面具有一定的实力,但专家表示对该地区的评估仍然具有很大的不确定性。

(赵纪东 编译)