

煤层气开采关键地质影响因素

冯立杰^{1,2}, 贾依帛¹, 岳俊举¹, 王金凤¹

(1. 郑州大学 郑州大学管理工程研究所, 河南 郑州 450001; 2. 河南省煤层气开发利用有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要:中国储量丰富的煤层气有着巨大的环保效益和资源潜力,但因独特的资源赋存条件,其规模化开采水平不高,亟待运用科学合理的方法来筛选出各类关键地质因素以实现开采创新。针对中国煤层气开采影响要素多、动态复杂性高等特点,构建了基于粗糙集属性约简的关键地质因素识别分析模型并进行了分析。首先从煤岩特征、煤层特征、地质影响3方面选取16个原始地质因素,以华北、西北、西南地区的40个煤层气井作为研究对象,对原始地质因素进行判定并构建决策数据,进而运用粗糙集数据分析工具集进行决策表属性约简,最终根据重要性进行排序并确定了关键地质影响因素。研究结果表明:地质构造类型、地应力、煤层孔隙及裂隙等8个地质因素重要度相对较高,且在煤层气开采过程中,外界的地质作用影响程度总体要比内部(如煤层与煤岩等)要大,因此,在实践过程中,应多关注于煤田外部地质因素的影响程度与作用方式,以期提升矿区瓦斯隐患治理水平。

关键词:地质因素;粗糙集;因素重要度;决策数据;煤层气开采

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Key geological factors influencing coal-bed methane exploitation

Feng Lijie^{1,2}, Jia Yibo¹, Yue Junju¹, Wang Jinfeng¹

(1. Management Engineering Department, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan, 450001, China;

2. Henan Provincial Coal Seam Gas Development and Utilization Corporation, Zhengzhou, Henan, 450016, China)

Abstract: Coal-bed gas resources are huge in China. However, its scaled exploitation is limited due to unique occurrence status. Scientific methods are needed to identify the key geologic factors influencing its effective exploitation. In view of that the influencing factors are large in number and high in dynamic complexity, this paper established a model to identify and analyze the key geological factors based on rough set attribute reduction theory. First, sixteen original geologic factors were selected in respects of coal petrologic characteristics, coal seam features and geologic influences and were optimized according to the available data from 40 CBM wells selected for study in different regions of China. Then, decision data were constructed and attribute reduction of decision table was performed through rough set data analysis. Finally, sorting was performed according to their relative importance and the key influential geologic factors were identified. Eight geologic factors including, geological structure type, in-situ stress, coal seam pores and fractures are relatively high in importance. Overall, external influential geologic factors have stronger power than internal ones such as coal seam and coal rock. Therefore, more attentions should be paid to the influence degree and action mode of the external geologic factors to enhance the level of mining gas hazard management in practice.

Key words: geologic factor, rough set, importance degree of factors, decision data, coal-bed gas exploitation

煤层气(瓦斯)作为安全高效清洁能源,其巨大的环境效益和资源潜力日益受到重视。我国煤层气资源丰富[储量约为 $(30 \sim 35) \times 10^{12} \text{ m}^3$],对其高效合理开发不仅可以减缓我国巨大的能源需求压力,而且可以从根本上治理矿井瓦斯隐患以减少煤矿灾

害。但由于我国大部分地区成煤期地质构造及环境差异性较大,形成了诸如储层非均质性强、煤层气成藏结构复杂等众多影响煤层气开采的特殊地质因素,给我国煤层气高效开采及矿井瓦斯治理带来了巨大困难。因此,针对我国煤层气开采影响地质因

收稿日期:2015-09-15;修订日期:2017-08-01。

第一作者简介:冯立杰(1966—),男,教授级高级工程师、硕士生导师,工程技术创新。E-mail:ak3399@vip.sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(71472171)。

素众多、动态复杂性高等特点,科学合理地选取影响煤层气开采的原始地质因素并辨识出关键影响因素,对提高煤层气开采利用效率和矿井安全生产水平具有重要的指导意义。

为深入了解影响煤层气开采的地质因素,国内外众多专家学者针对我国特有的煤层气赋存地质条件开展了大量研究。Beaton 等^[1]在分析加拿大阿尔伯塔平原煤层气赋存特征基础上,评估了该地区的煤层气资源储量及影响因素;Lv 等^[2]对沁水盆地南部矿区的煤层气井生产状况进行了分析,应用统计学方法确定了影响煤层气开采的主要影响因素,结果表明水力压裂影响煤层气井初期的生产性能,而含气量和渗透率则决定其长期运行性能;Feng 等^[3]针对影响煤层气井位的因素众多且不确定特征,提出了应用粒子群(PSO)算法优化煤层气井位,结果表明该算法减少了优化的时间和工作量;Zhao 等^[4]针对韩城区域煤层气开采的特点,在灰色系统理论的基础上,定量评价了6大地质因素对煤层气产能的影响;孙万禄等^[5]提出了在含煤盆地中影响煤层气藏主要有沉积环境、地质构造变形程度、煤岩变质程度以及水动力条件等地质条件。孙粉锦等^[6]综合分析了影响沁水盆地煤层气富集、高产的主要影响因素,包括沉积作用、地下水动力场及、底板岩性分布等;刘大锰等^[7]较为深入地探究了地质构造条件、煤层埋藏深度、水文地质条件、沉积环境、煤层物性和岩浆活动等6个影响煤层含气性的主控地质因素;孟召平等^[8]从成藏地质条件、赋存环境条件和开发工程力学条件三方面深入分析了影响煤层气/页岩气开发的地质因素;龙胜祥等^[9]通过分析国内外煤层气基本地质条件的差异,建立了煤层气富集参数体系,从盆地和区块两级对比分析并提出相关建议。王怀劭等^[10]阐明了影响煤层气赋存的构造演化和水动力条件,并依据水动力的影响过程系统探究了河北赵各庄井田的煤层气赋存特征;付庆华等^[11]以郑庄区块东大井区作为研究对象,结合沉积、构造和地下水动力的原理和方法,分析了该区煤层含气量分布并对关键地质要素进行了汇总;康永尚等^[12]以寿阳区块和南部柿庄区块煤层气地质及排采动态为研究对象,得出煤层渗透率、地应力类型和构造应力强度对煤层气排采有着重要的影响作用;康园园等^[13]从煤储层因素和资源因素两方面系统分析了影响煤层气开采的地质因素,并结合实践构建了煤层气目标区域评价指标体系。

综上所述,已有文献大多对煤层气含量、赋存、成藏等影响煤层气开采的地质因素进行了深入分析,其

中,国外研究成果更多的是用定量分析方法去识别和探究其地质因素,而我国学者大多在借鉴了国外定量分析方法的基础上,针对某些地区进行了煤层气地质评价初步研究。但有鉴于我国的成煤区地质条件复杂且地质构造活动类型不一,难以建立通用的地质因素识别分析体系,且加上现有文献采用的数据分析工具均未能从模糊庞大的信息量中有效识别关键因素。针对上述问题,作者在研究过程中将粗糙集属性约简理论应用于影响煤层气开采的地质因素识别中,运用该理论能够在保证研究对象信息和分类能力完整基础上消除冗余的特性,进而建立关键地质因素识别分析模型,全面收集原始地质影响因素并利用模型筛选出关键因素进行排序。该研究能够有效简化煤层气地质因素评价分析的复杂程度,揭示各影响因素的重要程度,在弥补现有研究不足的同时为我国煤层气开采的地质影响因素分析提供科学合理的理论支撑。

1 基于粗糙集理论的关键地质影响因素识别分析模型构建

粗糙集作为一种定量分析工具,能够对不完全、有噪声、模糊且随机的多源异构数据进行有效分析,而其中属性从简可通过保留其中基本知识且删除不相关信息,以实现知识的压缩和提炼,进而提取简明直接的决策规则并计算出各属性的重要度,是目前数据挖掘和知识发现方面广泛运用的工具之一。

有鉴于此,本研究拟构建基于粗糙集理论的关键地质影响因素识别模型对我国煤层气地质影响因素诸多复杂信息进行筛选,其具体流程如图1所示。

依据粗糙集理论建模方法,首先构建煤层气开采并对多种地质因素评价知识系统 $S = (U, A, V, f)$ 其中设若干煤层气矿井为研究对象 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, U 是有限非空集合; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为属性有限集合,

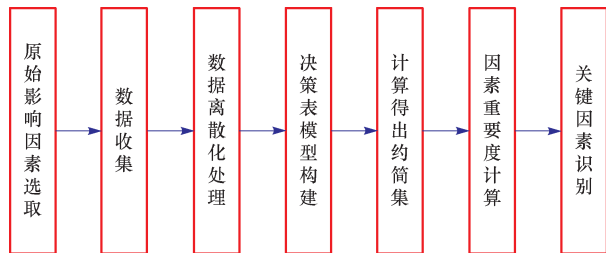


图1 关键因素识别分析模型构建流程

Fig. 1 Flow chart of building key factor identification analysis model

其中 $A = C \cup D, C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 是条件属性集合,表示选取影响煤层气开采的各原始影响因素, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为决策属性集合,表示根据产能分级针对研究对象所进行的整体评价,且 $C \cap D = \varnothing$; V 则代表上述属性集合 A 的值域;而 $f: U \times A \rightarrow V$ 代表信息函数集,使得对每个 $x_i \in U, q \in A$, 有 $f(x_i, q) \in V_q$, 用于确定上述每个研究对象 x_n 有对应的属性值。详细构建流程如下:

1) 采用文献综述法选取影响煤层气开采的各原始影响因素 $c_1, c_2, \dots, c_n$, 建立条件属性 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。

2) 根据研究主题选取有代表性的若干煤层气矿井为研究对象 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 并依据将煤层气井划分为个 n 等级, 对应的评语集为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 据此构建决策属性集。

3) 采用专家打分法根据原始地质因素在不同煤层气井重要度进行数据采集, 构建属性集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 的值域, 并对数据集合进行离散化处理以形成最终决策表。

4) 运用粗糙集数据处理工具 ROSETTA 对构建的决策表进行属性约简, 利用区分矩阵得到若干个属性约简集合。

5) 根据粗糙集中的属性重要度公式计算属性 a 在一个区分矩阵 $M = (m_{ij})$ 的重要度 $f(a)$, 依据各地质因素重要度排序判定出影响煤层气开采的关键地质因素^[13]。其中相应的属性 a 的重要度公式为:

$$f(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{\text{card}(m_{i,j})} \quad (1)$$

$\text{card}(m_{i,j})$ 为 $m_{i,j}$ 包含属性的个数, λ_{ij} 为属性 a 出现在区分矩阵的长度。当 $a \in m_{ij}$ 时, $\lambda_{ij} = 1$; 当 $a \notin m_{ij}$ 时, $\lambda_{ij} = 0$ (其中, $i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, n$)。

2 煤层气开采原始地质影响因素选取

由于影响煤层气开采的地质因素众多、动态复杂性高, 因此, 选取原始影响因素的过程是否科学合理, 将直接影响分析结果的准确性。基于此, 本文在遵循科学性、系统性、全面性原则基础上, 通过下述方法进行原始因素选取。

1) 文献分析法。通过分析现有资料, 筛选出 13 个原始影响因素, 分别是构造煤发育程度、煤体结构、围岩条件、煤层流变、煤层埋藏深度、水文地质、地质构造演化、地质构造类型、地应力、煤破坏程度、煤变质程度、煤储层厚度、煤阶。

2) 现场调研。通过对山西晋城沁田盆地南部的潘庄、山西韩城、河南平顶山、云南滇东等若干矿区进行实地调研并根据不同地区煤层气开采井区的地质特点, 进一步在原始地质因素中增加岩浆活动、煤田暴露程度。

3) 专家提问评估法。将收集到的原始因素集合交由相关领域专家评审选取, 在评审过程中专家依据实践经验认为煤层孔隙、裂隙均是煤层研究的重要内容, 并将其补充其中。

通过以上 3 种方法最终选取 16 个原始地质影响因素, 依据各因素的作用区域、地质模式、属性特征归纳为煤岩特征、煤层特征、地质影响 3 个方面, 具体分析如下。

2.1 煤岩特征

1) 构造煤发育程度

构造煤发育程度对煤层气开采的影响主要体现在两个方面, 一是构造煤的发育程度对瓦斯突出起着关键的控制作用, 构造煤最发育的地区, 往往是瓦斯突出最严重的伤害地带; 二是构造煤发育程度不同, 可导致空间上构造煤组合不同, 其含气性和渗透性的变化也有所差异。李辛子^[14]等研究发现我国含煤地层大多经历过多次构造运动演化的作用, 造成在同一地区不同构造煤组合其含气性和渗透性差异性明显, 使构造煤发育区域瓦斯气藏分布的非均质性更为显著。

2) 煤阶

孔隙率、含气性、解吸率是煤层气井可采资源量大小的参数, 且三者在不同的煤化作用阶段差异性较大。刘升贵等^[15]的研究发现煤的孔隙结构参数及形态在高煤化程度与中低煤化程度中显著不同, 这直接关系着储层物性及煤层气的富集。综合分析煤储层地质构造条件及水动力状况对不同煤阶的煤层气富集控制的差异性可知: 煤阶高的煤层产气量较大, 吸附能力强, 含气量较高; 通过综合分析沁水盆地各煤层气区块的资料, 中、高煤阶煤层中, 解吸率随着镜煤反射率的升高而增大。

3) 煤的破坏程度

煤体破坏程度越严重, 煤的强度越小, 瓦斯解析量和解析速度越大, 突出危险就变得越大。孟召平等^[16]提出在同一地质情况下, 不同破坏类型的构造煤, 因其超微结构的变化不同, 可导致煤层气吸附和渗透能力的显著差异, 随着构造煤碎裂程度的增加, 其孔容和孔比表面积也相应增大, 同时, 含气量及相

对渗透率也随之增高,均有利于煤层气煤层气勘探开采的条件。

4) 煤变质程度

煤的变质程度不仅影响瓦斯的生成量,还决定着煤对瓦斯的吸附能力和煤岩的孔隙特征,即在其他因素恒定条件下,煤层瓦斯含量与煤的变质程度具有显著的正相关关系。许江^[17]等通过实验探究了变质程度、孔隙特征与渗透率之间的内在关联性,得出煤变质程度越高,内外部孔隙越发达,其渗透性和透气性越好。

5) 煤体结构

胡奇等^[18]通过对比沁南地区3号煤层中原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤等不同煤体结构的钻井、压裂、排采资料发现,煤体结构越破碎,井壁稳定性越差,且造成抽采孔钻屑量和储层污染范围也越大;白鸽等^[19]以山西潞安矿区井田为例,通过实验分析阐明了煤体结构是煤层气高渗高产的关键性因素,其中原生煤和碎裂煤的煤层裂隙较为发育,其渗透性、连通性较好,有利于煤层气的开发利用。

2.2 煤层特征

1) 煤储层的厚度

煤储层渗透性是影响煤层气开发选区和产量最重要的因素,而煤层厚度与煤储层渗透率之间存在着耦合关系。刘峻杉^[20]的研究表明由于煤储层中天然裂隙的发育密度与煤岩类型条带或分层厚度呈负相关关系,而且在构造煤不发育的储层,其渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,煤层越厚,渗透率相对减小。

2) 煤层埋藏深度

在瓦斯风化带以下,煤层埋藏深度均对煤层瓦斯含量、瓦斯压力和瓦斯涌出量有一定的影响。杨玉中等^[21]指出煤层埋藏深度在一定范围内,煤层瓦斯含量与埋藏深度呈显性正相关关系,但随着埋藏深度的增加,正比例系数逐渐减少,瓦斯含量趋于稳定;陈刚等^[22]通过系统分析全国314口1200 m以浅的不同煤阶煤层气井含气量数据得出:高、中、低阶煤层含气量随深度的变化呈现出明显的差异性,且煤层含气量与埋藏深度具有较为显著的正相关关系。

3) 煤层孔隙、裂隙

煤的孔隙结构、大小及其分布影响着煤的吸附性和渗透性,而煤层中的节理裂缝构造是影响煤层结构构造和物理性质的关键因素,对煤层瓦斯的生储、聚集等起着直接或间接的控制作用,有效影响着煤层气开采的难易程度。陶树等^[23]对煤的孔隙率的研究表明

煤中孔隙-裂隙系统发育程度显著影响着煤储层原始绝对渗透率,并作用于煤层气解吸-扩散-渗流产出过程,不同尺度、不同产状的孔隙和裂隙对煤储层渗透率的贡献程度不同;薄冬梅等^[24]发现裂隙系统的发育程度和连通程度决定着煤层的渗透性,对煤层气可采性评价有着极其重要的参考价值。

4) 围岩条件

已有研究表明,煤层甲烷含量很大程度上取决于煤层围岩的封闭性能,应重视煤层围岩的性质、构造、水动力系统,尤其是断层、裂隙等构造对煤层气可采性的影响。王德利等^[25]的研究表明煤储层顶板通过毛细管封闭、压力封闭及浓度封闭3种机制对煤层气保存会产生一定影响,同时盖层岩石的岩性、粒度、致密程度和厚度也是考虑开采区煤层气保存状况的重要条件。

5) 煤层流变

研究煤层流变机理和变化规律是探究煤层气赋存和突出的基础,在开采过程中造成煤矿瓦斯突出的主要因素就是煤层流变引起的煤层厚度变化与构造煤的产生。我国大量矿井煤层气地质研究资料表明:在受到强烈流变的地区,一方面因煤层厚度与含气量呈正相关关系,煤体流变使煤厚发生变化造成瓦斯分布不均;另一方面煤体结构又导致了煤体结构的破坏,并改变了瓦斯的赋存方式使煤层含气量增高,从而加剧开采煤层气的危险性。

6) 煤田暴露程度

张子敏等^[26]指出瓦斯是地质作用的产物,煤田的暴露程度是影响煤层瓦斯含量的重要因素。暴露式煤田因煤系地层露出于地表,煤层瓦斯往往沿煤层露头排放,则瓦斯含量大为减少;反之隐伏式煤田盖层厚度大,透气性差,则煤层瓦斯聚集状况较好。

2.3 地质影响

1) 水文地质

煤矿瓦斯与地下水共存于煤层之中,地下水的运移对该煤层瓦斯含量和保存状况至关重要。在地下水活跃的地区,水能从煤层中运移大量瓦斯,使煤层瓦斯含量大为减少。吴鲜等^[27]的研究表明水动力条件是影响煤层气富集的关键条件之一,同时地下水的pH值、矿化度、矿物离子组分等水化学特征对煤层气的生成和富集成藏均有一定的控制作用。

2) 地质构造演化

刘大锰等的研究表明构造演化能够控制含煤层系沉积埋深和热演化,从而对煤层气生成、赋存及成藏过

程起着关键性作用,且在成煤期后,构造沉降作用有利于煤层气赋存,而构造抬升对赋存起反向作用;同时,含煤盆地的构造演化控制其构造应力场变化,从而影响着含煤层系的构造展布、构造类型以及煤储层、围岩节理裂隙发育程度等。

3) 地质构造类型

因构造应力场及其内部应力状态不同,导致不同类型地质构造(褶曲构造、推覆构造、伸展构造)对煤层瓦斯赋存影响亦有明显差异。赵少磊等^[28]的研究表明地质构造形态对煤层气的运移和保存至关重要,其中褶曲两翼及向斜核部含气量高,而背斜核部及开放性断层附近含气量较低。

4) 岩浆活动的影响

我国勘采实践表明,较多的煤层气富集区在地质历史上经历过岩浆侵入而引起的叠加加热变质作用,从而使煤层含气量增高并有效改善了煤储层渗透性,有利于该地区煤层气的开发。张明杰等^[29]通过对云驾岭煤矿研究分析,从煤层气生成、运移、储存等角度得出岩浆活动是影响煤岩变质程度、煤层渗透性、瓦斯含量及赋存状况的主要控制因素。

5) 地应力

地应力对煤层气成藏具有显著的控制作用^[30]。逢思宇等^[31]的研究认为其影响主要体现在:一是地应力对煤储层渗透性和储层压力均有重要的影响,即煤层渗透率随地应力增大而下降,储层压力随地应力上升而变大;二是地应力和储层压力对煤层的渗透率和含气量至关重要,进而影响着煤层气的吸附、解吸、扩散和渗流;三是地应力不仅对天然裂缝目前在地下的附存状态及有效性有控制作用,而且影响了人工压裂裂缝的形态和延伸方向。

3 煤层气开采关键地质影响因素

3.1 数据收集对象选取

我国华北地区、西北地区和西南地区赋存的煤层气地质资源量分别占全国煤层气地质资源总量的56.3%,28.1%和14.3%。为了对我国煤层气开采提供普适性理论指导,根据《2014—2018年中国煤层气行业经济效益评价及投资战略规划分析报告》,从山西蓝焰煤层气集团有限责任公司、山西能源煤层气投资控股有限公司、中石油煤层气有限责任公司、中联煤层气有限责任公司、河南煤层气开发利用有限公司五家企业中分别挑选40口分布于华北、西北、西南地区的煤层气开采井作为研究对象(表1)。

表1 40个煤层气开采井分布情况

Table 1 Distribution of 40 coal bed gas wells

地区	煤田	开采井数量/口
华北地区	山西晋城沁田盆地	5
	山西大同煤田	3
	河南焦作煤田	4
	河南平顶山煤田	5
	河南鹤壁煤田	3
西北地区	内蒙古鄂尔多斯盆地	5
	新疆伊犁盆地	3
	新疆准噶尔盆地	2
西南地区	江西丰城煤田	5
	云南滇东煤田	5

表2 影响程度等级划分

Table 2 Classification of influence degree

分值	解释
5分	有决定性影响
4分	有较大影响
3分	有基本影响
2分	影响较小
1分	影响很小,可以忽略

表3 煤层气井产能分级

Table 3 Rating scale of coal bed gas well productivity

等级	稳定产气井 产气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	不稳定产气井		分值
		井口压力/ MPa	产气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
高产气井	$\geq 5\ 000$	≥ 0.50	$\geq 3\ 000$	5
较高产气井	$3\ 000 \sim 5\ 000$	≥ 0.15 < 0.15	$\geq 2\ 000$ $\geq 3\ 000$	4
中等产气井	$1\ 000 \sim 3\ 000$	≥ 0.13 < 0.13	$\geq 1\ 000$ $\geq 2\ 000$	3
低产气井	$< 1\ 000$	< 0.13	$< 2\ 000$	2

3.2 原始数据收集

本文采用LIKERT5点尺度法,将影响程度划分为5个等级(表2),采用专家打分法对16个原始因素重要程度进行评分,以此来构建条件属性数据集;另外,利用煤层气井产能分级表^[32](表3)对上述40口煤层气开采井赋予分值,构建决策属性数据集。

3.3 分析决策表建立

将上述16个影响煤层气开采的原始因素视为条件属性,煤层气井产能等级为决策属性。根据专家打分法的结果,加上离散化处理过的属性值,由此得出关键地质因素分析决策表(表4)。

表 4 关键地质影响因素分析决策

Table 4 Analysis decision table of key geological factors													
论域	条件属性 C											决策属性 D	
U	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	...	C ₁₆		
1	5	5	5	1	3	2	5	3	3	...	3	4	
2	4	4	5	2	2	1	5	4	2	...	2	5	
3	3	5	3	4	1	2	2	2	3	...	3	5	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
40	4	5	5	5	2	2	1	3	3	...	3	4	

3.4 决策表属性约简

利用基于粗糙集理论框架的表格逻辑数据工具 ROSETTA 进行决策表属性约简,其中得出若干属性约简集合,结果如表 5 所示。

通过运行结果共得出 196 个约简集,各自包含不同的属性,其稳定系数均为 1,且所有约简集的属性长度不完全相同。对 16 个条件属性中出现频率的顺序由大到小进行排序,依次是地应力(76 次)、构造类型(75 次)、煤层孔隙、裂隙(65 次)、水文地质条件(60 次)、煤变质程度(57 次)、煤层埋藏(54 次)、地质构造演化(49 次)、岩浆活动(44 次)、煤体结构(43 次)、煤阶(40 次)、构造煤发育程度(40 次)、煤田暴露程度(40 次)、煤层流变(39 次)、围岩条件(37 次)、煤破坏程度(31 次)、煤层厚度(30 次)。

3.5 影响因素重要性计算

根据属性 a 的重要度计算公式(1),分别对 16 个条件属性重要度进行计算,所得结果如图 2 所示。

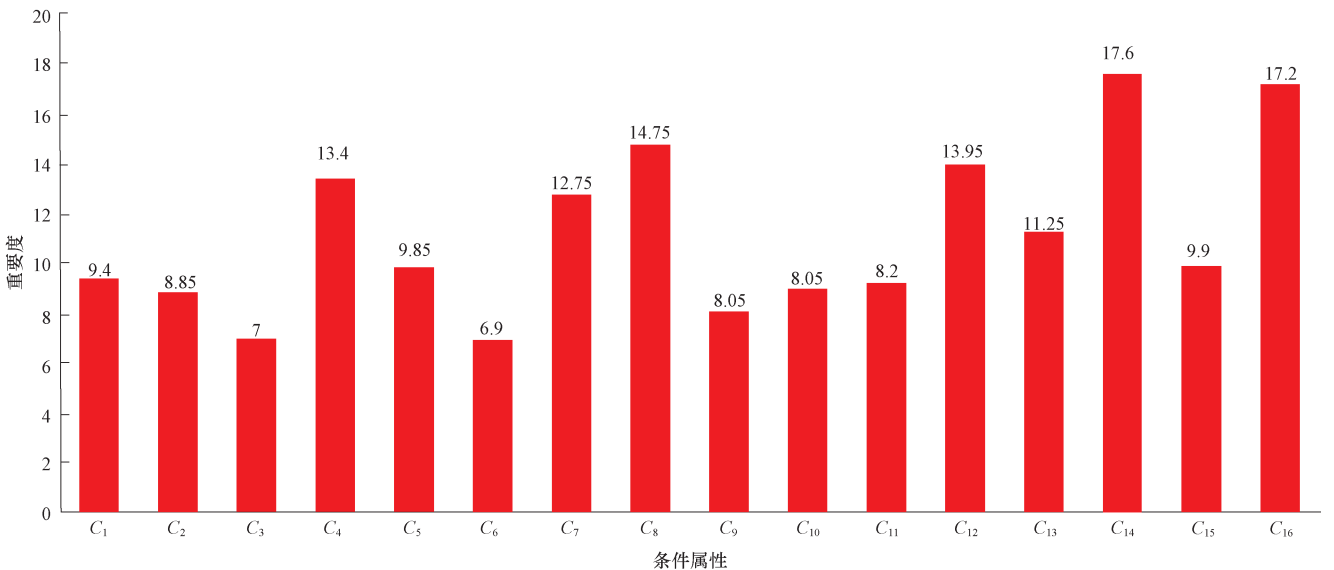


图 2 各条件属性与重要度

Fig. 2 Condition attributes and their importance

表 5 影响煤层气开采的地质因素约简集

Table 5 Reduction set of geological factors influencing coal bed gas exploitation		
约简集	稳定系数	长度
{ C ₇ , C ₁₂ , C ₁₅ , C ₁₆ }	100	4
{ C ₁ , C ₆ , C ₁₁ , C ₁₂ }	100	4
{ C ₄ , C ₆ , C ₈ , C ₁₁ }	100	4
{ C ₁ , C ₂ , C ₁₀ , C ₁₄ }	100	4
{ C ₂ , C ₃ , C ₇ , C ₁₂ }	100	4
{ C ₃ , C ₇ , C ₁₂ , C ₁₄ }	100	4
{ C ₄ , C ₅ , C ₁₂ , C ₁₄ }	100	4
.....	...	...
.....	...	...
{ C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₆ , C ₉ }	100	5
{ C ₁ , C ₂ , C ₁₁ , C ₁₄ , C ₁₆ }	100	5
{ C ₃ , C ₆ , C ₈ , C ₁₄ , C ₁₆ }	100	5

3.6 结果讨论

1) 由计算可知:地质构造类型、地应力、煤层孔隙、裂隙、水文地质条件、煤变质程度、煤层埋藏程度、地质构造演化是最为关键的地质因素;岩浆活动、煤体结构、构造煤发育程度、煤田暴露程度对煤层气开采影响较大;煤层流变、煤阶、围岩条件影响程度次之;而煤层流变、煤阶、围岩条件,煤破坏程度,煤层厚度影响程度最小。

2) 根据重要度排序可以发现,外界的地质作用比煤层及煤岩本身对煤层气开采影响作用要大。

研究表明,不同类型的地质构造,内部应力状态的不同,地质构造演化程度不一致以及水文地质条件作用的差异,不仅对煤层气的含气量、赋存状态、渗透性及运移等影响极大,还在一定程度上决定了瓦斯生成的物质基础以及煤储层及盖层的结构、物性、裂隙发育程度、煤体的破坏、变质程度等。因此,在实际勘探、开采过程中应更加注重煤田外界地质的作用和影响。

4 结论

本文针对影响煤层气开采的地质因素间呈多样性、复杂性及动态性等特征,在现有成果基础上运用粗糙集属性约简理论构建了煤层气开采关键地质影响因素分析模型,研究了各地质影响因素重要度并筛选出关键地质因素。研究结果一方面丰富发展了我国煤层气开采的瓦斯地质学理论;另一方面在勘探过程中,通过实际地质状况与关键因素模型对比分析,可对该地区开采情况进行有效评价,进而为煤层气开发部署提供地质依据。同时,在实际开采过程中,不少专家指出在一个煤层气富集地区,虽然其瓦斯总体赋存状况受多种地质因素共同影响,但某一区块上煤层气气藏的分带性常受到某一两个主导因素所影响,并对区域内富集程度起决定性作用,因此应更有针对性的对主导因素进行分析控制,提升矿区瓦斯隐患治理水平,保障煤炭安全生产。

参 考 文 献

- [1] Beaton A, Langenberg W, Pană C. Coal bed methane resources and reservoir characteristics from the Alberta Plains, Canada[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 65(1-2): 93-113.
- [2] Lv Y, Tang D, Xu H, et al. Production characteristics and the key factors in high-rank coalbed methane fields: A case study on the Fanzhuang Block, Southern Qinshui Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 96-97: 93-108.
- [3] Feng Q F, Zhang J Y, Zhang X M, et al. Optimizing well placement in a coalbed methane reservoir using the particle swarm optimization algorithm[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 104: 34-45.
- [4] Zhao Junlong, Tang Dazhen, Xu H, et al. High production indexes and the key factors in coalbed methane production: A case in the Hancheng block, southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 130: 55-67.
- [5] 孙万禄, 陈召佑, 陈霞, 等. 中国煤层气盆地地质特征与资源前景[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(2): 141-146, 154.
Sun Wanlu, Chen Zhaoyou, Chen Xia, et al. Geological features and resource potentials of coalbed methane basins in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 141-146, 154.
- [6] 孙粉锦, 王勃, 李梦溪, 等. 沁水盆地南部煤层气富集高产主控地质因素[J]. *石油学报*, 2014, 35(6): 1070-1079.
Sun Fenjin, Wang Bo, Li Mengxi, et al. Major geological factors controlling the enrichment and high yield of coalbed methane in the Southern Qinshui Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1070-1079.
- [7] 刘大锰, 李俊乾. 我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(6): 19-24.
Liu Dameng, Li Junqian. Main geological controls on distribution and occurrence and enrichment patterns of coalbed methane in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 19-24.
- [8] 孟召平, 刘翠丽, 纪懿明. 煤层气/页岩气开发地质条件及其对比分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(5): 728-736.
Meng Zhaoping, Liu Cuili, Ji Yiming. Geological conditions of coalbed methane and shale gas exploitation and their comparison analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(5): 728-736.
- [9] 龙胜祥, 李辛子, 叶丽琴, 等. 国内外煤层气地质对比及其启示[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 696-703.
Long Shengxiang, Li Xinzi, Ye Liqin, et al. Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 696-703.
- [10] 王怀劼, 朱炎, 李伍, 等. 煤层气赋存的两大地质控制因素[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(7): 1129-1134.
Wang Huaimeng, Zhu Yan, Li Wu, et al. Two major geological control factors of occurrence characteristics of CBM [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(7): 1129-1134.
- [11] 付庆华, 宋智华, 姚磊, 等. 郑庄东大井区煤层含气量主控地质因素[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 198-202.
Fu Qinghua, Song Zhihua, Yao Lei, et al. Main geological control factors of coalbed methane content in Zheng zhuang Dongda well block [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2015, 34(2): 198-202.
- [12] 康永尚, 王金, 姜杉钰, 等. 煤层气井排采动态主控地质因素分析[J]. *地质论评*, 2016, 62(6): 1511-1520.
Kang Yongshang, Wang Jin, Jiang Shanyu, et al. Analysis on controlling geological factors influencing performance of coalbed methane wells[J]. *Geological Review*, 2016, 62(6): 1511-1520.
- [13] 康园园, 邵先杰, 石磊, 等. 煤层气开发目标区精选体系与方法研究[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(1): 62-66+78.
Kang Yuanyuan, Shao Xianjie, Shi Lei, et al. Study on system and method of ranking coalbed methane development perspectives[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(1): 62-66+78.
- [14] 李辛子, 王赛英, 吴群. 论不同构造煤类型煤层气开发[J]. *地质论评*, 2013, 59(5): 919-923.
Li Xinzi, Wang Saiying, Wu Qun. Scheme for subdivision of tectonic coal systematics; implications for coalbed methane development[J]. *Geological Review*, 2013, 59(5): 919-923.
- [15] 刘升贵, 彭智高, 江新照, 等. 中、高煤阶对煤层气采收率的影响[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(4): 437-442.
Liu Shenggui, Peng Zhigao, Jiang Xinzao, Chen Han, et al. Influence

- of medium and high coal rank on coalbed methane recovery ratio[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(4): 437-442.
- [16] 孟召平, 刘珊珊, 王保玉, 等. 不同煤体结构煤的吸附性能及其孔隙结构特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1865-1870.
Meng Zhaoping, Liu Shanshan, Wang Baoyu, et al. Adsorption capacity and its pore structure of coals with different coal body structure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1865-1870.
- [17] 许江, 袁梅, 李波波, 等. 煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 681-687.
Xu Jiang, Yuan Mei, Li Bobo, et al. Experimental study of relationships between metamorphic grade, pore characteristics and permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 681-687.
- [18] 胡奇, 王生维, 张晨, 等. 沁南地区煤体结构对煤层气开发的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(8): 65-68+74.
Hu Qi, Wang Shengwei, Zhang Chen, et al. Coal structure affected to coalbed methane development in Qinnan region[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(8): 65-68+74.
- [19] 白鸽, 张遂安, 张帅, 等. 煤层气选区评价的关键性地质条件——煤体结构[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(5): 26-29.
Bai Ge, Zhang Suian, Zhang Shuai, et al. A crucial geological condition-coal mass texture in CBM exploration target optimization[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(5): 26-29.
- [20] 刘峻杉. 煤储层渗透率影响因素探讨[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2014, 31(2): 100-104.
Liu Junshan. The influencing factors of coal reservoir permeability[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2014, 31(2): 100-104.
- [21] 杨玉中, 高金龙. 煤层瓦斯含量与煤层埋藏深度之间的定量关系[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 1-4.
Yang Yuzhong, Gao Jinlong. Quantitative relationship between gas content and burial depth of coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 1-4.
- [22] 陈刚, 秦勇, 胡宗全, 等. 不同煤阶深煤层含气量差异及其变化规律[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 274-279.
Chen Gang, Qin Yong, Hu Zongquan, et al. Variations of gas content in deep coalbeds of different coal ranks. [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 274-279.
- [23] 陶树, 王延斌, 汤达祯, 等. 沁水盆地南部煤层孔隙-裂隙系统及其对渗透率的贡献[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 522-527.
Tao Shu, Wang Yanbin, Tang Dazhen, et al. Pore and fracture systems and their contribution to the permeability of coal reservoirs in southern Qinshui Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 522-527.
- [24] 薄冬梅, 赵永军, 姜林. 煤储层渗透性研究方法及其主要影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 18-21+112.
Bo Dongmei, Zhao Yongjun, Jiang Lin. Research method and main influencing factors of coal reservoir permeability[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 18-21+112.
- [25] 王德利, 李凤义, 杨曙光. 淮南煤田煤储层和围岩对煤层气聚集的影响分析[J]. 中国煤层气, 2013, 10(2): 7-11.
Wang Deli, Li Fengyi, Yang Shuguang. The influence analysis of coal reservoir and surrounding rock on CBM accumulation in Zhunnan coalfield[J]. China Coalbed Methane, 2013, 10(2): 7-11.
- [26] 张子敏. 瓦斯地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009. 5.
Zhang Ziming. Gas-geology [M]. XuZhong: China University of Mining and Technology Press, 2009. 5.
- [27] 吴鲜, 廖冲, 叶玉娟, 等. 水文地质条件对煤层气富集的影响[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 13(5): 78-81.
Wu Xian, Liao Chong, Ye Yujuan, et al. The influence of hydrogeological conditions on the enrichment of coal bed methane[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 13(5): 78-81.
- [28] 赵少磊, 朱炎铭, 曹新款, 等. 地质构造对煤层气井产能的控制机理与规律[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(9): 108-111+116.
Zhao Shaolei, Zhu Yanming, Cao Xinkuan, et al. Control mechanism and law of geological structure affected to production capacity of coal bed methane well[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(9): 108-111+116.
- [29] 张明杰, 李凯, 付帅. 云驾岭煤2号煤层瓦斯赋存主控地质因素分析[J]. 中国煤层气, 2014, 11(1): 20-24+11.
Zhang Mingjie, Li Kai, Fu Shuai. Analysis on main controlling geological factors to gas occurrence of No. 2 coal seam in Yunjialing Coal Mine[J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(1): 20-24+11.
- [30] 赵庆波, 孔祥文, 赵奇. 煤层气成藏条件及开采特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 552-560.
Zhao Qingbo, Kong Xiangwen, Zhao Qi. Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 552-560.
- [31] 逢思宇, 贺小黑. 地应力对煤层气勘探与开发的影响[J]. 中国矿业, 2014, 23(S2): 173-177.
Pang Siyu, He Xiaohei. Influence of crustal stress on coal bed methane exploration and developing[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(S2): 173-177.
- [32] 张培河. 煤层气井产能分级方案研究[J]. 中国煤层气, 2007, 4(1): 28-29, 27.
Zhang Peihe. Study on CBM well capacity grading scheme[J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(1): 28-29, 27.

(编辑 张亚雄)