

# 新疆阜康白杨河矿区煤层气-煤炭地下气化 协调开发地质选区评价\*

张亚斌<sup>1</sup>, 杨曙光<sup>1,2</sup>, 李鑫<sup>1†</sup>, 韦波<sup>3</sup>, 苏红梅<sup>4</sup>, 贾超<sup>5</sup>, 胡振鹏<sup>3</sup>, 王博<sup>3</sup>, 赵琛<sup>3</sup>

(1. 新疆大学 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆维吾尔自治区煤田地质局 煤层气研究开发中心, 新疆 乌鲁木齐 830091; 3. 新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830009; 4. 新疆维吾尔自治区煤田地质局 一五六煤田地质勘探队, 新疆 乌鲁木齐 830047; 5. 新疆维吾尔自治区能源安全监测中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 我国已开展了煤炭地下气化项目和煤层气开发项目, 但均存在经济效益偏低问题。新疆倾斜煤层发育良好, 具备煤层气-煤炭地下气化协调开发的有利地质条件。以新疆阜康白杨河矿区为例, 在综合考虑煤层气开采和煤炭地下气化主控地质条件的基础上, 构建了煤层气-煤炭地下气化协调开发地质选区评价指标体系并开展了地质选区评价, 结果如下: 1) 构建了煤层气资源条件、煤岩煤质条件、煤储层条件、围岩条件、协调开发关键地质条件等9大类一级指标和33小类二级指标的煤层气-煤炭地下气化协调开发地质选区评价指标体系; 2) 基于层次分析-CRITIC法计算了各级选区评价指标权重, 认为含气量、煤层厚度、渗透率等是关键指标; 3) 研究区煤层气-煤炭地下气化协调开发有利区与较有利区面积总和达4.82 km<sup>2</sup>, 建议在示范区的西部、中部部分区域以及东南部开展工程部署。

**关键词:** 煤层气开发; 煤炭地下气化; 协调开发; 评价指标; 白杨河矿区

**DOI:** 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.12.20.0002

**中图分类号:** TD84; TE37 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)03-0335-014

**引文格式:** 张亚斌, 杨曙光, 李鑫, 韦波, 苏红梅, 贾超, 胡振鹏, 王博, 赵琛. 新疆阜康白杨河矿区煤层气-煤炭地下气化协调开发地质选区评价[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(3): 335-348.

**英文引文格式:** ZHANG Yabin, YANG Shuguang, LI Xin, WEI Bo, SU Hongmei, JIA Chao, HU Zhenpeng, WANG Bo, ZHAO Chen. Geological selection and evaluation of coordinated development of coalbed methane-coal underground gasification in Baiyanghe mining area of Fukang, Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(3): 335-348.

## Geological Selection and Evaluation of Coordinated Development of Coalbed Methane-Coal Underground Gasification in Baiyanghe Mining Area of Fukang, Xinjiang

ZHANG Yabin<sup>1</sup>, YANG Shuguang<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, WEI Bo<sup>3</sup>, SU Hongmei<sup>4</sup>,  
JIA Chao<sup>5</sup>, HU Zhenpeng<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, ZHAO Chen<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Key Laboratory of Continental Dynamics and Metallogenic Prediction of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Coalbed Methane Research and Development Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region Coalfield Geology Bureau, Urumqi Xinjiang 830091, China; 3. Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830009, China; 4. No. 156 Coalfield Geological Exploration Team, Xinjiang Uygur Autonomous Region Coalfield Geology Bureau, Urumqi Xinjiang 830047, China;

\* 收稿日期: 2024-12-20

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区天山英才计划“新疆深部煤层气成藏地质规律及资源有利区评价”(2023TSYCLJ0005),“新疆富油煤地质成因与薄层富油煤原位热解提取煤基油气基础研究”(2022TSYCLJ0021)。

**作者简介:** 张亚斌(1998—), 男, 硕士生, 从事非常规油气勘探开发的研究, E-mail: 2608158776@qq.com.

**† 通讯作者:** 李鑫(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事非常规油气勘探开发的研究, E-mail: lixinwaxj@xju.edu.cn.

5. Energy Security Monitoring Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang 830002, China)

**Abstract:** China has carried out underground coal gasification projects and coalbed methane development projects, but there are problems of low economic benefits. The inclined coal seam in Xinjiang is well developed, and it has favorable geological conditions for the coordinated development of coalbed methane and underground coal gasification. Taking the Baiyanghe mining area in Fukang of Xinjiang as an example, this paper constructs the evaluation index system of geological selection for the coordinated development of coalbed methane and underground coal gasification. The evaluation of geological selection on the basis of comprehensive consideration of the main control geological conditions of coalbed methane and underground coal gasification, is also carried out. The results are as follows: 1) A comprehensive geological selection index system for coalbed methane-underground coal gasification coordinated development has been established, consisting of 9 major categories of first-level indicators and 33 sub-categories of secondary indicators, including geological conditions for coalbed methane resources, coal quality conditions, coal reservoir conditions, rock conditions, and key geological conditions for coordinated development; 2) Based on the analytic hierarchy process-CRITIC method, the evaluation weight of each index is calculated, and it is considered that the gas content, coal seam thickness and permeability are the key indexes. 3) The total area of the favorable area and the sub-favorable area for the coordinated development of coalbed methane-underground coal gasification in the study area is 4.82 km<sup>2</sup>, and it is recommended to carry out engineering deployment in the western and central parts of the demonstration area and the southeastern region.

**Key words:** coalbed methane development; underground coal gasification; coordinated development; evaluation indicators; Baiyanghe mining area

## 0 引言

近年来,能源领域“碳中和”已经成为世界多国的战略选择<sup>[1]</sup>.煤炭地下气化作为一种安全、环保、高回收率的绿色煤炭开采新工艺,是一种极具发展潜力的高碳能源低碳化、流态化开采方法<sup>[2-3]</sup>.中国新疆阜康矿区煤层气资源丰富,预测煤层气资源量达 $4 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>,赋存煤炭资源量84亿吨<sup>[5]</sup>.煤炭及煤层气等资源的综合研究和开发利用,是发展洁净能源、提高国家能源供给稳定性的关键,同时煤炭地下气化以及煤层气协调开发是缓解我国天然气资源高需求量现状的一种有效途径<sup>[6]</sup>.

地质选区是煤层气与煤炭地下气化协调开发的关键基础,我国在煤层气可采资源评价和地质选区方面已经开展了大量工作.经过多年的总结与积累,关于煤层气开发区块优选指标对开发效果的影响研究已较为成熟<sup>[7-9]</sup>,如在资源条件、储层条件、保存条件等评价指标权重认识上已达成共识.现有基于组合权重的多层次多目标模糊优选模型、灰色聚类分析法、随机森林算法等选区定量评价方法<sup>[10-13]</sup>.对于煤炭地下气化选区评价,大多采用多层次数学模糊综合评价模型<sup>[14-16]</sup>,评价的主要地质条件指标有煤层空间展布特征、煤岩煤质特征、水文地质条件、地质构造等.尽管前人分别提出了煤层气地质选区和煤炭地下气化地质选区评价模型,但并没有建立二者协调开发选区的评价方法.

在“煤层气开发疏干效应”“煤炭地下气化热作用解吸效应”“煤炭地下气化采动卸压效应”下,煤层气与煤炭地下气化协调开发可形成相互促进的良性循环<sup>[6]</sup>,煤层气与煤炭地下气化的协调开发有望破解当前二者单独开发的经济效益偏低难题.本文基于新疆阜康白杨河矿区勘探开发实践成果,优选出不同层次的各级评价指标,结合“一票否决+模糊数学层次分析”的综合选区评价思路,构建煤层气-煤炭地下气化综合地质选区评价指标体系,圈定下一步勘探开发的有利区块,为白杨河矿区进行煤层气与煤炭地下气化协调开发提供参考.

## 1 研究区地质概况

白杨河矿区位于北天山褶皱带中,地质构造呈现南向倾斜的单斜构造,地层倾角介于 $30^\circ \sim 58^\circ$ ,平均值为 $46^\circ$ .矿区内含煤地层分布和变化相对稳定,主要产于三叠西黄山街组、八道湾组和三工河组等中生界地层.八道湾组( $J_1b$ )是本区的主要含煤层位,其与上覆三工河组为整合接触.八道湾组( $J_1b$ )的39、41、42号煤层为主力可采煤层,平均可采厚度分别为10.58 m、7.55 m、12.58 m,含矸0~4层,煤层浅部有火烧(图1).本文主要研究39号主力煤层地下气化与煤层气协调开发地质选区.

## 2 协调开发主控地质条件

煤炭地下气化与煤层气协调开发地质选区评价指标的选取是一项重要的基础工作,选取的评价指标将决定最终的评价结果.本文在考虑煤层生气潜力、储集性能和保存条件的同时,还必须考虑影响煤炭地下气化的具

体地质条件,提炼出了9大类地质条件及33小类二级地质指标.

### 2.1 煤层气资源条件

39号煤层的含气量在0.077~18.84 m<sup>3</sup>/t之间,平均值为5.72 m<sup>3</sup>/t,含气量偏小,可通过煤层气和煤炭地下气化协调开发克服含气量偏低的问题.风氧化带深度介于44.6~902.1 m,平均值为393.32 m,其深度偏低,有利于煤层气开发.煤层气主要吸附在煤微孔表面,含气量是评价煤层气资源量的基础参数,是评价煤层气可采性的物质基础,也是煤储层储集性能的基本指标,其取值大小直接决定经济可采性评价的结果<sup>[17]</sup>.煤层含气量主要受控于煤岩、煤阶、煤层厚度以及煤层埋藏深度.如图2所示,白杨河矿区的煤层含气量与埋深呈正相关关系,即随着埋深的增加,其含气量也增大.

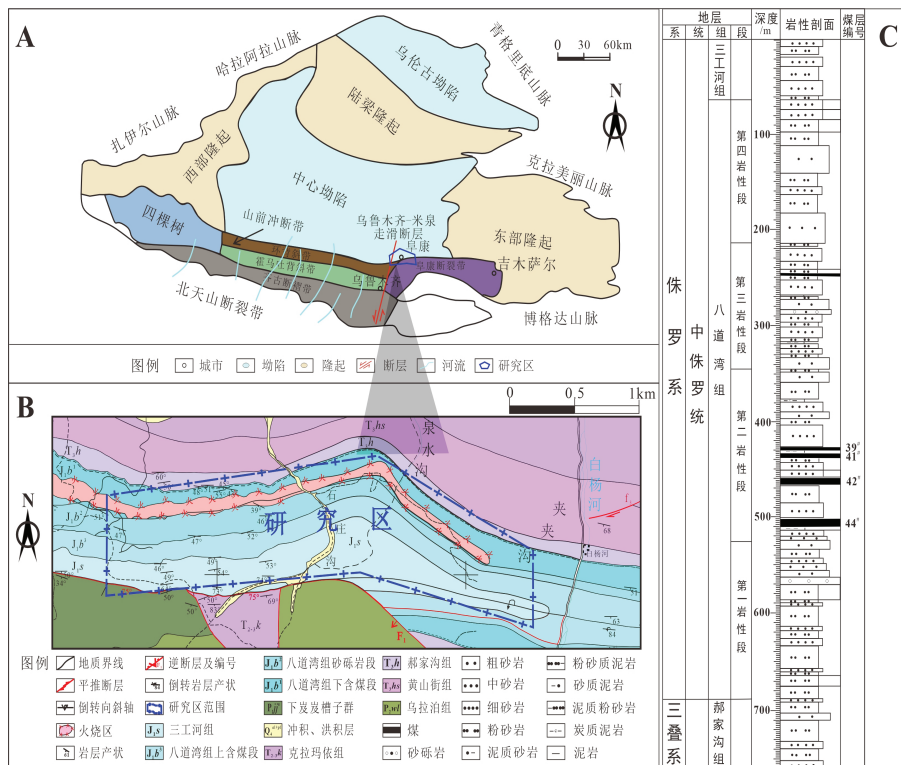


图1 白杨河区域地质概况

注: A为研究区位置和准噶尔盆地大地构造划分; B为白杨河矿区构造轮廓图; C为白杨河矿区含煤地层柱状图

### 2.2 煤岩煤质条件

#### 2.2.1 水分含量

研究区内水分含量较低,平均值为0.92%~2.21%,有利于煤层气吸附且适宜进行煤炭地下气化.煤储层中水分的赋存方式及分布特征是影响煤层气吸附/解吸的基础,微孔隙中煤-水作用方式及水分相态是影响煤层气吸附/解吸、运移的核心<sup>[18]</sup>.相同温度和压力条件下,煤含水量越高,吸附量越小,解吸率越大<sup>[19]</sup>.富氧-水蒸气气化工工艺是煤炭地下气化最常用的工艺之一,水分可以作为煤炭地下气化的原料,但水分含量过高会对气化过程产生抑制作用.

#### 2.2.2 灰分产率

如图3所示,39号煤的灰分产率在4.65%~34.42%,平均值为14.91%,属低灰煤,灰分产率值较小,有利

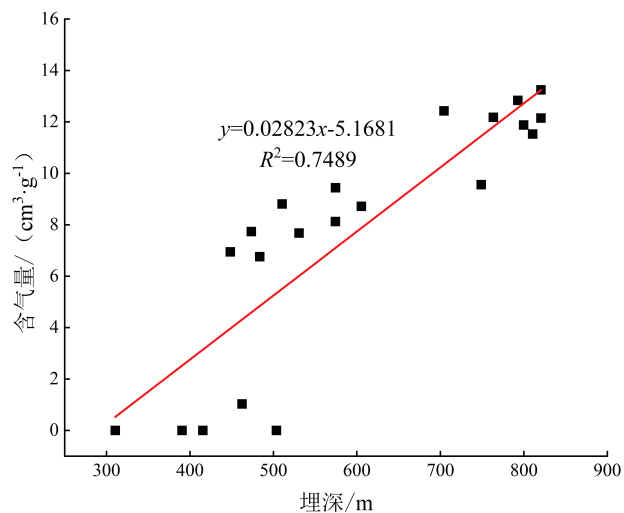


图2 白杨河矿区39号煤层含气量与埋深关系

于煤储层吸附煤层气,也有利于开展煤炭地下气化.当煤粉中含有过多的灰分时,其表面将生成大量气化粉尘,妨碍气化剂与煤粒的密切接触,影响气化效果;灰分产率对煤孔隙的发展有一定影响,灰分产率较低的煤层具有连通性较好的中大孔隙,灰分产率越小,煤层孔隙度越大,越有利于煤层气开发<sup>[20]</sup>.

### 2.2.3 挥发分产率

39号煤层的挥发分产率在5.02%~46.71%之间,平均值为32.39%,属中高挥发分煤,挥发分产率值较大,有利于进行煤炭地下气化.煤的热裂解特性与其挥发分产率密切相关,高挥发分煤在气化反应中生成大量的低碳烷烃、氢气.有研究表明高挥发分产率会使得气化反应阶段的气化速率整体呈上升趋势<sup>[21]</sup>.

### 2.2.4 硫分含量

研究区内煤层原煤全硫(St,d)平均含量为0.26%~0.47%,属特低硫煤,有利于进行煤炭地下气化.煤气化时,80%~85%的硫以 $H_2S$ 和 $CS_2$ 形式进入煤气当中.一方面,气化过程中产生的 $SO_2$ 及 $H_2S$ 气体对井下设备和管道有腐蚀作用;另一方面,利用高硫煤制备的煤气中 $H_2S$ 等气体较多且不易脱净,这容易造成合成氨催化剂中毒失效,影响操作和产品质量.

### 2.2.5 显微组分

39号煤层有机组分中镜质组含量介于76.08%~97.83%,壳质组含量介于0.2%~1.27%,惰质组含量介于2.1%~22.93%,该煤层的镜质组以均质的镜质体为主.煤的显微组分含量会影响煤层生气量,镜质组含量越高,煤层含气量越高.研究区内镜质组含量较高,有利于进行煤层气开发.

## 2.3 煤储层条件

### 2.3.1 渗透率

39号煤层渗透率在0.03~4.23 mD之间,平均值为1.54 mD,适宜进行煤层气开发.渗透率是衡量孔隙介质渗流能力的重要指标,也是决定煤层气产量的一个重要指标,直接影响煤层气的产出和运移.

### 2.3.2 孔隙度

39号煤层孔隙度在2.51%~13.3%之间,平均值约为7.6%,对煤层气的开采极为不利,通过煤层气和煤炭地下气化协调开发可克服孔隙度偏小的问题.煤的孔隙度是指煤中孔洞和裂缝的总体积与煤样体积的比值,是影响煤层气开采效率的一个重要参数.孔隙度直接影响煤层气的渗透和扩散能力,孔隙度越高,煤层气的开采效率越高.进行煤层气开采前,必须对煤孔隙度进行充分评估,以确定开采的可行性和经济效益<sup>[22]</sup>.

### 2.3.3 吸附性

39号煤层兰氏体积值在19.51~29.55  $m^3/t$ 之间,平均值为25.97  $m^3/t$ ,兰氏体积数值较大,适宜进行煤层气开发.煤体对 $CH_4$ 气体的吸附性能是量化评价煤层气赋存状况的重要指标,能较好反映 $CH_4$ 在煤体中的分布状况.兰氏体积可用于测量煤对瓦斯的吸附能力,兰氏体积越大,吸附能力越强.

### 2.3.4 含气饱和度

39号煤层的含气饱和度在40.17%~85.13%之间,平均值为56.93%,可通过煤层气和煤炭地下气化协调开发克服含气饱和度偏低的问题.含气饱和度是煤层气开发可行性的评价参数,煤层含气饱和度越高,越具有开发价值.

### 2.3.5 储层压力

根据注入/压降试井的结果,39号煤层实测储层压力为6.08~7.29 MPa,压力梯度为7.58~8.23 MPa/100 m,储层压力梯度偏小,可通过煤层气和煤炭地下气化协调开发克服地层能量偏低的问题.煤层气的储层压力反映了煤层气开采的难易程度,储层压力越高,临界解吸压力越大,有效应力越小,气井产能效果越好.

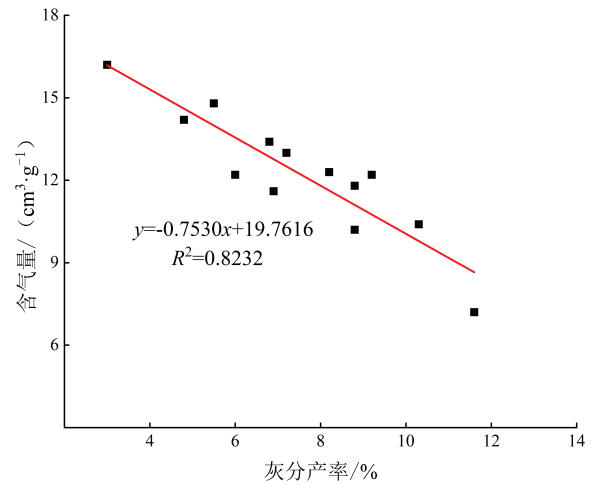


图3 白杨河矿区39号煤层含气量与灰分产率的关系

## 2.4 煤层赋存条件

### 2.4.1 煤层厚度

39号煤层总厚度为7.33~24.51 m,平均值为13.33 m,为全区可采的稳定厚煤层,结构较简单,适宜进行煤层气与煤炭地下气化协调开发.对于煤层气开发,煤层厚度决定着一个区块的煤层气储量.但煤层厚度对煤炭地下气化的影响多为定性化总结,有学者认为褐煤气化的最小厚度为2 m,烟煤气化的最小厚度为0.8 m<sup>[23]</sup>.

### 2.4.2 煤层埋深

39号煤层埋深在136.15~1 072.19 m之间,平均值为507.88 m,具备煤层气与煤炭地下气化协调开发的有利条件.虽然煤层埋深与煤阶有较好的对应关系,对煤层气的开发起到了关键作用,但埋深过深将加大开采成本,且随埋深增大,渗透性下降,不利于煤层气开发<sup>[17]</sup>.煤层埋深对气化炉的密封性有很大影响,对项目的实施也有很大影响.埋深过大虽会增加气化炉的建炉以及维修成本,但有利于气化炉封闭.

### 2.4.3 煤层倾角

39号煤层各钻孔倾角在34°~55°之间,适宜进行煤炭地下气化.含倾角煤层受重力势能的影响,不同煤层倾角下水平井呈现不同的产能规律.水平井生产初期,倾角越大,排水效果越好,产气量也越高,但随着生产时间的增加,受到气水重力分异的影响,一部分气体会向倾角高部位聚集,倾角越大,这种聚集现象越明显,导致最终产气量越低<sup>[24]</sup>.地下气化方面,进行长距离定向钻井、建造气化炉时,要求煤层倾角不大于7°<sup>[25]</sup>.适合煤炭地下气化的煤层倾角介于0°~70°<sup>[16]</sup>,最佳气化倾角为35°,此时可以避免燃烧后灰渣掉落造成的影响<sup>[26]</sup>.

### 2.4.4 煤层稳定性

研究区内夹矸层数为0~7,平均值为1.25,夹矸系数为0~0.23%,平均值为0.06%,夹矸层数和夹矸系数值均偏小,有利于进行煤炭地下气化.煤层稳定性主要表现在两个方面:一方面,随着夹矸数量及厚度的增大,实际煤壁厚度减小,灰分增大,热利用率下降.当煤层夹矸系数超过0.3%时,煤炭地下气化的损失将达到15%~40%<sup>[2]</sup>;另一方面,煤层厚度变化特征会对煤炭地下气化造成影响,有学者认为煤层厚度变化不应超过15%,气化炉的选址应避免厚度变化较大的煤层<sup>[27]</sup>.

## 2.5 围岩条件

39号煤层的顶板岩性以泥岩和砂质泥岩为主,泥岩和砂质泥岩厚度介于10~27 m,平均值为14.14 m;底板岩性主要为泥岩,厚度较大,介于9~24 m,平均值为14 m.顶板和底板渗透性都较低,且厚度较大,有利于煤层气保存和煤炭地下气化.煤层顶板和底板的岩性对煤层气的赋存状况起着决定性作用.煤层顶板和底板为泥岩和粉砂岩时,渗透率低,阻碍了煤层气的逸出,具有良好的封闭性,有利于煤层气的富集;反之,若煤层顶板和底板为渗透性好的砂岩或石灰岩,则不利于煤层气的富集,对煤层气的开发具有破坏作用<sup>[28]</sup>.围岩渗透性是影响气化炉地质密封性的关键因素,围岩渗透性取决于煤层顶板和底板岩性,对于某一特定厚度的泥质粉砂岩,其起到封闭隔水层的作用,有利于煤炭地下气化<sup>[29]</sup>.

## 2.6 构造条件

研究区内主力煤层各钻孔距断层的距离介于0.010 8~1.13 km,平均值为0.356 km,较适宜进行煤炭地下气化.本文主要研究断层对煤层气富集和煤炭地下气化的影响,断层不仅会破坏生储盖层的连续性、完整性,而且会导致生储盖体系的平衡,进而导致煤层气的逸散.气化炉的选址应注意距断层的距离,远离断层发育复杂的区域,以避免气化炉漏气.气化炉中不能出现断裂间距超过一半平均煤厚的断裂<sup>[30]</sup>.

## 2.7 水文地质条件

研究区内地下水影响半径为14.89~83.05 m,平均值为65.35 m,地下水影响半径偏小,有利于煤炭地下气化开发.研究区抽水实验井的单位涌水量为0.002 1~0.020 0 L/(S·m),渗透系数为0.000 32~0.001 00 m/d,可见研究区含水层组具有较弱的富水性和渗透性,为弱含水层,有利于煤炭地下气化.八道湾组地下水化学类型为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Mg<sup>2+</sup>(Ca<sup>2+</sup>),矿化度为2.92~5.22 g/L,表明深部煤层水动力强度减弱,与外界的联系减弱,煤层气具有封闭、弱水动力的封存环境,有利于煤层气的保存和富集.综上,研究区水文地质条件总体利于煤层气-煤炭地下气化协调开发.

水文地质条件不仅影响煤层气的富集与保存,还是影响煤炭地下气化过程的关键因素.在径流区,煤层中的流动水会对煤层产生冲洗作用,导致煤层气的散失,不利于富集;在滞留区,水动力条件比较差,有利于煤

层气的保存<sup>[31]</sup>. 地下水动力条件是影响煤层气成藏及煤层气地球化学特性的重要因素<sup>[32]</sup>, 同时煤炭地下气化过程可能会对地下水造成污染. 地下水影响半径不能过大, 否则地下水涌入气化炉, 将导致煤炭地下气化失败. 如表1所示, 地下水影响半径与单位涌水量之间存在一定的关联, 单位涌水量越大, 地下水影响半径越大. 地下水涌水量过多会降低气化炉反应温度, 从而导致煤炭地下气化作用减弱. 只有适宜的涌水量, 才能维持最佳的水煤气反应, 控制最优的煤气组分<sup>[33]</sup>. 煤炭地下气化的过程中会出现燃空区, 为防止燃空区坍塌、导致气化炉进水, 要求气化煤层与顶板含水层距离超过31 m<sup>[34]</sup>.

表 1 单位涌水量与地下水影响半径的关系

| 单位涌水量 $Q/(L/(S \cdot m))$ | 影响半径 $R/m$         | 单位涌水量 $Q/(L/(S \cdot m))$ | 影响半径 $R/m$       |
|---------------------------|--------------------|---------------------------|------------------|
| $Q \geq 2.0$              | $R \geq 300$       | $0.3 \leq Q < 0.5$        | $25 \leq R < 50$ |
| $1.0 \leq Q < 2.0$        | $100 \leq R < 300$ | $0.2 \leq Q < 0.3$        | $10 \leq R < 25$ |
| $0.5 \leq Q < 1.0$        | $50 \leq R < 100$  | $Q < 0.2$                 | $R < 10$         |

## 2.8 环境地质条件

39号煤层原煤氟 ( $F_{ad}$ ) 含量为28~123  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为71.5  $\mu\text{g/g}$ , 属特低氟煤 (SLF) -低氟煤 (LF). 原煤砷 ( $As_d$ ) 含量为1~12  $\mu\text{g/g}$ , 平均值为3.59  $\mu\text{g/g}$ , 属一级含砷煤 (I As) -三级含砷煤 (III As). 原煤磷 ( $P_d$ ) 含量为0~0.056%, 平均值为0.011%, 属特低磷煤 (P-1) -低磷分煤 (P-2). 原煤氯 ( $Cl_d$ ) 含量为0.010%~0.146%, 平均值为0.048%, 属特低氯煤 (Cl-1) -低氯煤 (Cl-2). 上述4种有害元素的含量均较低, 对煤炭地下气化的影响不大.

环境问题一直是国家关注的重点, 煤炭地下气化可能导致地下水污染以及地表沉降. 地下水污染物分为两大类: 一类是无机类, 如汞、镉、铅和砷, 都是煤中常见的元素<sup>[35]</sup>; 另一类是煤炭气化过程中产生的有机物, 如苯、萘、酚、多环芳烃等. 地下水污染是严重影响煤炭地下气化可行性的问题之一, 煤层顶板和底板为充水含水层时, 气化过程中产生的污染物可能会进入含水层. 对于煤炭地下气化过程中地下水污染的防控, 主要方法有优选气化炉、优化气化工艺、封闭气化炉等<sup>[36]</sup>. 研究区用环境地质指标氟含量、氯含量、磷含量以及砷含量确定目标煤层环境条件的优劣.

## 2.9 协调开发关键地质条件

煤层层间距在3.8~234.55 m之间, 平均值为108.34 m, 煤层层间距较大, 有利于进行煤层气-煤炭地下气化协调开发. 导水裂隙发育高度在18.9~314.96 m之间, 平均值为93.08 m, 导水裂隙发育高度值偏小, 有利于进行煤炭地下气化. 煤层层间距对于煤层气开采有影响, 各含气系统间不同层间距对气、水产能有影响<sup>[37]</sup>. 只有煤层之间的距离比较大时, 才能减少水涌入气化通道造成燃烧失败的危害, 确保煤炭地下气化顺利进行. 冒落带和导水裂隙可波及地表引发地裂缝和地面塌陷, 引起煤层气逸散, 导水裂隙带高度过高也会引起地下水大量涌入气化炉, 使得煤炭地下气化过程不能顺利进行<sup>[38]</sup>.

# 3 煤层气-煤炭地下气化协调开发地质选区评价指标体系

## 3.1 评价指标体系的建立

通过对上述影响煤层气开采与煤炭地下气化地质条件的分析, 结合前人研究成果, 本文将煤层气资源条件U1、煤岩煤质条件U2、煤储层条件U3、煤层赋存条件U4、围岩条件U5、封闭条件U6、水文地质条件U7、环境地质条件U8、协调开发关键地质条件U9作为一级评价指标; 将含气量U11、风氧化带深度U12、水分U21、灰分产率U22、挥发分产率U23、硫分U24、煤种U25、最大镜质组反射率U26、渗透率U31、孔隙度U32、兰氏体积U33、含气饱和度U34、储层压力梯度U35、煤层厚度U41、煤层埋深U42、煤层倾角U43、夹矸层数U44、夹矸系数U45、煤厚变异系数U46、顶板岩性U51、底板岩性U52、距断层的距离U61、相对涌水量U71、距顶板含水层的距离U72、氟U81、砷U82、氯U83、磷U84、地下水影响半径U91、煤层导热能力U92、岩层导热能力U93、煤层层间距U94、裂隙发育高度U95作为二级评价指标. 以此为基础建立煤层气-煤炭地下气化综合地质选区评价指标体系(表2).

表2 煤层气-煤炭地下气化综合地质选区评价指标体系

| 一级地质指标       | 二级地质指标  | 分类评价级别    |           |             |              |
|--------------|---|-----------|-----------|-------------|--------------|
|              |   | I类(优)     | II类(良)    | III类(中)     | IV类(劣)       |
| 煤层气资源条件U1    | 含气量U11 (m <sup>3</sup> /t)                      | ≥10       | 6~10      | 4~6         | ≤4           |
|              | 风氧化带深度U12 (m)                                   | ≤300      | 300~600   | 600~900     | ≥900         |
|              | 水分U21 (%)                                       | 0~15      | 15~35     | 35~55       | >55          |
|              | 灰分产率U22 (%)                                     | 0~10      | 10~20     | 20~50       | >50          |
|              | 挥发分产率U23 (%)                                    | >37       | 20~37     | 10~20       | <10          |
| 煤岩煤质条件U2     | 硫分U24 (%)                                       | 0~1.00    | 1.01~3.00 | 3.01~4      | >4           |
|              | 煤种U25   | HM        | SM        | FM          | WY           |
|              |   | CY        | QM        | PM          | JM           |
|              | 最大镜质组反射率U26 (%)                                 | ≥0.8      | 0.6~0.8   | 0.4~0.6     | ≤0.4         |
|              | 渗透率U31 (mD)                                     | ≥5        | 1~5       | 0.5~1       | ≤0.5         |
| 煤储层条件U3      | 孔隙度U32 (%)                                      | ≥10       | 6~10      | 3~6         | ≤3           |
|              | 兰氏体积U33 (m <sup>3</sup> /t)                     | ≥25       | 15~25     | 5~15        | ≤5           |
|              | 含气饱和度U34 (%)                                    | ≥60       | 40~60     | 20~40       | ≤20          |
|              | 储层压力梯度U35 (MPa/m)                               | ≥9.83     | 8.83~9.83 | 7.83~8.83   | ≤7.83        |
|              | 煤层厚度U41 (m)                                     | 5         | 5~15      | 2~5         | <2; >15      |
| 煤层赋存条件U4     | 煤层埋深U42 (m)                                     | 500~1 000 | 100~500   | 1 000~2 000 | <100; >2 000 |
|              | 煤层倾角U43 (°)                                     | 35        | 12~35     | 35~70       | <12; >70     |
|              | 夹矸层数U44   | 0         | 1         | 2           | >2           |
|              | 夹矸系数U45 (%)                                     | <0.1      | 0.1~0.3   | 0.3~0.5     | >0.5         |
|              | 煤厚变异系数U46 (%)                                   | ≤25       | 25~35     | 35~45       | ≥55          |
|              | 围岩条件U5  | 顶板岩性U51   | SHY       | SZNY        | XSY          |
| 底板岩性U52      |   | NY        | FSY       | ZSY         | LY           |
|              |   | SHY       | SZNY      | XSY         | CSY          |
| 封闭条件U6       | 距断层的距离U61 (km)                                  | <0.5      | 0.5~1     | 1~1.5       | ≥1.5         |
| 水文地质条件U7     | 相对涌水量U71 (m <sup>3</sup> /t)                    | <1        | 1~2       | 2~5         | >5           |
|              | 距顶板含水层的距离U72 (m)                                | >100      | 50~100    | 30~50       | <30          |
| 环境地质条件U8     | 氟U81 (μg/g)                                     | ≤100      | 100~200   | 200~400     | >400         |
|              | 砷U82 (μg/g)                                     | ≤4        | 4~25      | 25~80       | >80          |
|              | 氯U83 (μg/g)                                     | ≤0.05     | 0.05~0.15 | 0.15~0.30   | >0.30        |
|              | 磷U84 (μg/g)                                     | ≤0.01     | 0.01~0.05 | 0.05~0.10   | >0.10        |
| 协调开发关键地质条件U9 | 地下水影响半径U91 (m)                                  | <50       | 50~80     | 80~120      | >120         |
|              | 煤层导热能力U92 (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | >0.15     | 0.12~0.15 | 0.09~0.12   | <0.09        |
|              | 岩层导热能力U93 (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | <1        | 1~2       | 2~3         | >3           |
|              | 煤层层间距U94 (m)                                    | >100      | 50~80     | 20~50       | <20          |
|              | 裂隙发育高度U95 (m)                                   | <90       | 90~120    | 120~150     | >150         |

注: HM为褐煤, CY为长焰煤, SM为瘦煤, QM为气煤, FM为肥煤, PM为贫煤, WY为无烟煤, JM为焦煤; SHY为石灰岩, NY为泥岩, SZNY为砂质泥岩, FSY为粉砂岩, XSY为细砂岩, ZSY为中砂岩, CSY为粗砂岩, LY为砾岩

### 3.2 评价指标权重计算

#### 3.2.1 一级指标权重计算

本文采用层次分析法计算一级指标权重, 该方法是主观赋权法的一种, 通过对各个层次的指标进行定量分析与定性分析, 并利用专家经验来判定各个指标是否达到相应的重要性<sup>[39]</sup>. 运用层次分析法构建了一级评价指标的判断矩阵(表3), 求出其最大特征值, 并进行一致性验证.

表 3 白杨河矿区一级评价地质指标的判断矩阵和特征向量

| 评价参数             | 判断矩阵           |                |                |                |                |                |                |                |                |                | 相对权重    |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
|                  | U              | U <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | U <sub>3</sub> | U <sub>4</sub> | U <sub>5</sub> | U <sub>6</sub> | U <sub>7</sub> | U <sub>8</sub> | U <sub>9</sub> |         |
| U~U <sub>i</sub> | U <sub>1</sub> | 1              | 2              | 1              | 1              | 3              | 3              | 3              | 5              | 2              | 0.191 6 |
|                  | U <sub>2</sub> | 1/2            | 1              | 1              | 1              | 3              | 3              | 3              | 3              | 2              | 0.154 3 |
|                  | U <sub>3</sub> | 1              | 1              | 1              | 2              | 3              | 3              | 3              | 3              | 1              | 0.173 3 |
|                  | U <sub>4</sub> | 1              | 1              | 1/2            | 1              | 2              | 2              | 2              | 3              | 1              | 0.127 3 |
|                  | U <sub>5</sub> | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 1/2            | 1              | 1              | 2              | 2              | 3              | 0.083 2 |
|                  | U <sub>6</sub> | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 1/2            | 1              | 1              | 1              | 2              | 3              | 0.076 2 |
|                  | U <sub>7</sub> | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 1/2            | 1/2            | 1              | 1              | 2              | 3              | 0.072 3 |
|                  | U <sub>8</sub> | 1/5            | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 1/2            | 1/2            | 1/2            | 1              | 3              | 0.054 7 |
|                  | U <sub>9</sub> | 1/2            | 1/2            | 1              | 1              | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 1/3            | 1              | 0.067 1 |

采用层次分析法进行各要素间重要性的对比时,需要建立统一的标准.本文使用的评价尺度需从定性化转为定量化.对单一准则来说,两个方案进行比较总能判断出优劣,层次分析法采用1~9标度方法,对不同情况的评比给出数量标度,见表4.

表 4 评价尺度表

| 成对比较标准  | 定义   | 内容                                    |
|---------|------|---------------------------------------|
| 1       | 同等重要 | 两要素具有同等的重要性                           |
| 3       | 稍微重要 | 认为其中一个要素比另一个要素稍微重要                    |
| 5       | 相当重要 | 根据经验判断,强烈倾向于某一要素                      |
| 7       | 明显重要 | 实际上非常倾向于某一要素                          |
| 9       | 绝对重要 | 两要素进行比较时,某一要素非常重要                     |
| 2、4、6、8 |      | 用于上述标准之间的折中值                          |
| 倒数      |      | 两要素比较时,若一个要素被赋予某个数值,另一个要素的权重则是这个标度的倒数 |

对判断矩阵进行一致性检验.

1) 计算判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ .

2) 计算一致性指标 $CI$ :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (1)$$

3) 计算随机一致性比率 $CR$ :

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (2)$$

式中:  $RI$ 为平均随机一致性指标,与判断矩阵的阶数 $n$ 相关,关系如表5所示.

表 5 平均随机一致性指标

| $n$  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| $RI$ | 0 | 0 | 0.52 | 0.89 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 | 1.45 |

当 $CR < 0.1$ 时,表明矩阵的一致性是可以接受的;当 $CR > 0.1$ 时,表明矩阵没有良好的一致性,需要进行适当修正.计算表明,本文判断矩阵的随机一致性比率 $CR$ 为0.083,通过了一致性检验,权重计算结果可取.

### 3.2.2 二级指标综合权重计算

运用层次分析法确定二级地质指标的主观权重,根据表1所列评价指标体系,通过专家打分构造两两判断矩阵,并得出其分析计算结果.计算方法与一级指标权重一致.

运用客观权重计算-CRITIC法确定二级地质指标的客观权重. CRITIC法是一种客观赋权法, 主要根据评估指标的反差程度以及指标间的冲突性, 对各个指标进行全面地衡量和确定<sup>[40]</sup>. 该方法可以有效确定指标的客观权重, 从而提高决策结果的准确性.

1) 原始数据无量纲化处理. 正向指标(指取值越大越好的指标, 如含气量)进行正向化处理, 负向指标(指取值越小越好的指标, 如灰分)进行逆向化处理, 即

$$\text{正向指标: } x_{ij} = [x'_{ij} - \min(x_j)] / [\max(x_j) - \min(x_j)], \quad (3)$$

$$\text{逆向指标: } x_{ij} = [\max(x_j) - x'_{ij}] / [\max(x_j) - \min(x_j)], \quad (4)$$

式中:  $x_{ij}$  为标准化值;  $x'_{ij}$  为变量  $j$  的初始值;  $\max(x_j)$  为指标  $j$  的最大值;  $\min(x_j)$  为指标  $j$  的最小值.

2) 计算变异性. 单独考虑每个指标生成的向量, 将第  $j$  个指标的标准差用  $\sigma_j$  表示:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x'_{ij} - \bar{x}'_j)^2}{m}}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

3) 量化冲突性. 冲突性可通过相关系数  $R_{ij}$  进行量化:

$$R_{ij} = \frac{\text{COV}(x'_i, x'_j)}{(\sigma_i, \sigma_j)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

4) 计算信息量. 计算指标  $i$  包含的信息量  $C_i$ :

$$C_i = \sigma_i \sum_{j=1}^n (1 - R_{ij}). \quad (7)$$

5) 归一化处理. 权重计算方式如下:

$$\omega_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^n C_j}. \quad (8)$$

由于层次分析法存在一定的主观局限性, 而CRITIC法过于依赖原始数据, 因此需要将二者进行组合权重. 为使综合权重不偏向主观权重或客观权重任何一项, 本文应用相对重要程度参数  $\alpha$  确定综合权重, 即

$$W_{\text{综合}} = \alpha W_{\text{主观}} + (1 - \alpha) W_{\text{客观}}, \quad (9)$$

式中:  $\alpha$  取值范围为  $0 \sim 1$ , 经咨询专家后, 取  $\alpha = 0.725$ . 所得二级指标综合权重如表6所示.

表6 煤层气-煤炭地下气化综合地质选区各级指标权重

| 一级地质指标    | 权重      | 二级地质指标                      | 权重      |
|-----------|---------|-----------------------------|---------|
| 煤层气资源条件U1 | 0.202 0 | 含气量U11 (m <sup>3</sup> /t)  | 0.719 9 |
|           |         | 风氧化带深度U12 (m)               | 0.280 1 |
| 煤岩煤质条件U2  | 0.126 6 | 水分U21 (%)                   | 0.099 4 |
|           |         | 灰分产率U22 (%)                 | 0.171 0 |
|           |         | 挥发分产率U23 (%)                | 0.167 0 |
|           |         | 硫分U24 (%)                   | 0.087 9 |
|           |         | 煤种U25                       | 0.243 4 |
| 煤储层条件U3   | 0.186 9 | 最大镜质组反射率U26 (%)             | 0.231 3 |
|           |         | 渗透率U31 (mD)                 | 0.233 0 |
|           |         | 孔隙度U32 (%)                  | 0.276 3 |
|           |         | 兰氏体积U33 (m <sup>3</sup> /t) | 0.199 9 |
|           |         | 含气饱和度U34 (%)                | 0.168 9 |
|           |         | 储层压力梯度U35 (MPa/m)           | 0.121 9 |

续表 6

| 一级地质指标       | 权重      | 二级地质指标  | 权重      |
|--------------|---------|---|---------|
| 煤层赋存条件U4     | 0.125 4 | 煤层厚度U41 (m)                                     | 0.259 8 |
|              |         | 煤层埋深U42 (m)                                     | 0.145 8 |
|              |         | 煤层倾角U43 (°)                                     | 0.123 5 |
|              |         | 夹矸层数U44   | 0.123 4 |
|              |         | 夹矸系数U45 (%)                                     | 0.139 4 |
|              |         | 煤厚变异系数U46 (%)                                   | 0.208 1 |
| 围岩条件U5       | 0.101 8 | 顶板岩性U51   | 0.597 3 |
|              |         | 底板岩性U52   | 0.402 7 |
| 封闭条件U6       | 0.048 8 | 距断层的距离U61 (km)                                  | 1.000 0 |
| 水文地质条件U7     | 0.047 1 | 相对涌水量U71 (m <sup>3</sup> /t)                    | 0.507 4 |
|              |         | 距顶板含水层的距离U72 (m)                                | 0.492 6 |
| 环境地质条件U8     | 0.029 9 | 氟U81 (μg/g)                                     | 0.332 7 |
|              |         | 砷U82 (μg/g)                                     | 0.148 8 |
|              |         | 氯U83 (μg/g)                                     | 0.198 7 |
|              |         | 磷U84 (μg/g)                                     | 0.319 8 |
| 协调开发关键地质条件U9 | 0.131 5 | 地下水影响半径U91 (m)                                  | 0.297 8 |
|              |         | 煤层导热能力U92 (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 0.182 2 |
|              |         | 岩层导热能力U93 (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 0.150 0 |
|              |         | 煤层层间距U94 (m)                                    | 0.134 4 |
|              |         | 裂隙发育高度U95 (m)                                   | 0.235 6 |

表 7 煤层气-煤炭地下气化各级指标分级隶属函数<sup>[14]</sup>

| 指标类型 | 有利   | 较有利  | 不利  |
|------|--|--|---|
| 成本型  | $A(x) = \begin{cases} 1, & x \leq u_1 \\ \frac{u_2-x}{u_2-u_1}, & u_1 < x < u_2 \\ 0, & x \geq u_2 \end{cases}$  | $A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq u_1 \\ \frac{x-u_1}{u_2-u_1}, & u_1 < x \leq u_2 \\ \frac{u_3-x}{u_3-u_2}, & u_2 < x < u_3 \\ 0, & x \geq u_3 \end{cases}$   | $A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq u_2 \\ \frac{x-u_2}{u_3-u_2}, & u_2 < x < u_3 \\ 1, & x \geq u_3 \end{cases}$   |
| 中间型  | $A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq u' \\ \frac{x-u'}{u_2-u'}, & u' < x \leq u_2 \\ \frac{u''-x}{u''-u_2}, & u_2 < x < u'' \\ 0, & x \geq u'' \end{cases}$ | $A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq u_1 \\ \frac{x-u_1}{u'-u_1}, & u_1 < x \leq u' \\ \frac{u_2-x}{u_2-u'}, & u' < x \leq u_2 \\ \frac{x-u_2}{u''-u_2}, & u_2 < x \leq u'' \\ \frac{u_3-x}{u_3-u''}, & u'' < x < u_3 \\ 0, & x \geq u_3 \end{cases}$ | $A(x) = \begin{cases} 1, & x \leq u_1 \\ \frac{u'-x}{u'-u_1}, & u_1 < x \leq u' \\ 0, & u' < x \leq u'' \\ \frac{x-u''}{u_3-u''}, & u'' < x < u_3 \\ 1, & x \geq u_3 \end{cases}$ |
| 效益型  | $A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq u_2 \\ \frac{x-u_2}{u_3-u_2}, & u_2 < x < u_3 \\ 1, & x \geq u_3 \end{cases}$  | $A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq u_1 \\ \frac{x-u_1}{u_2-u_1}, & u_1 < x \leq u_2 \\ \frac{u_3-x}{u_3-u_2}, & u_2 < x < u_3 \\ 0, & x \geq u_3 \end{cases}$   | $A(x) = \begin{cases} 1, & x \leq u_1 \\ \frac{u_2-x}{u_2-u_1}, & u_1 < x < u_2 \\ 0, & x \geq u_2 \end{cases}$   |

注:  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u'$ 、 $u''$ 分别为成本型、中间型以及效益型的分级界定值

### 3.3 隶属度确定

利用模糊数学中的梯形隶属函数,在 $[0, 1]$ 内对各个等级的初始值进行规划,并将其统一无量纲化,从而确定隶属度.将隶属度评级标准划分为有利、较有利、不利,指标划分为成本型、中间型和效益型.成本型指标是指成本值越低、隶属度越高的指标;中间型指标是指成本值在一个特定范围内波动,隶属度也随之变化的指标;效益型指标是指能够直接影响收益,且隶属度随着指标值变大而变大的指标.各级指标的分级隶属函数见表7.

## 4 有利区优选

依据评价指标体系及权重计算出不同钻孔的评价系数,评价系数 $U = U_i \times X_i (i = 1, \dots, n)$ ,其中: $U_i$ 表示钻孔的隶属度值, $X_i$ 表示钻孔指标的权重值.根据 $U$ 值将白杨河矿区煤层气-煤炭地下气化地质选区划分为4类,即: $U < 0.4$ 为不利区, $0.4 < U < 0.5$ 为一般有利区, $0.5 < U < 0.6$ 为较有利区, $U > 0.6$ 为有利区.依据划分标准,得出白杨河矿区39号煤层有利区块主要分布在示范区的西北部及东南部分区域,面积为 $0.91 \text{ km}^2$ ;较有利区块位于示范区的中部、西北部及东南部,面积为 $3.91 \text{ km}^2$ ;一般有利区块位于示范区的中西部以及东南部分区域,面积为 $8.73 \text{ km}^2$ ;不利区位于示范区的西部、中部部分区域以及东南部分区域(图4),面积为 $2.29 \text{ km}^2$ .

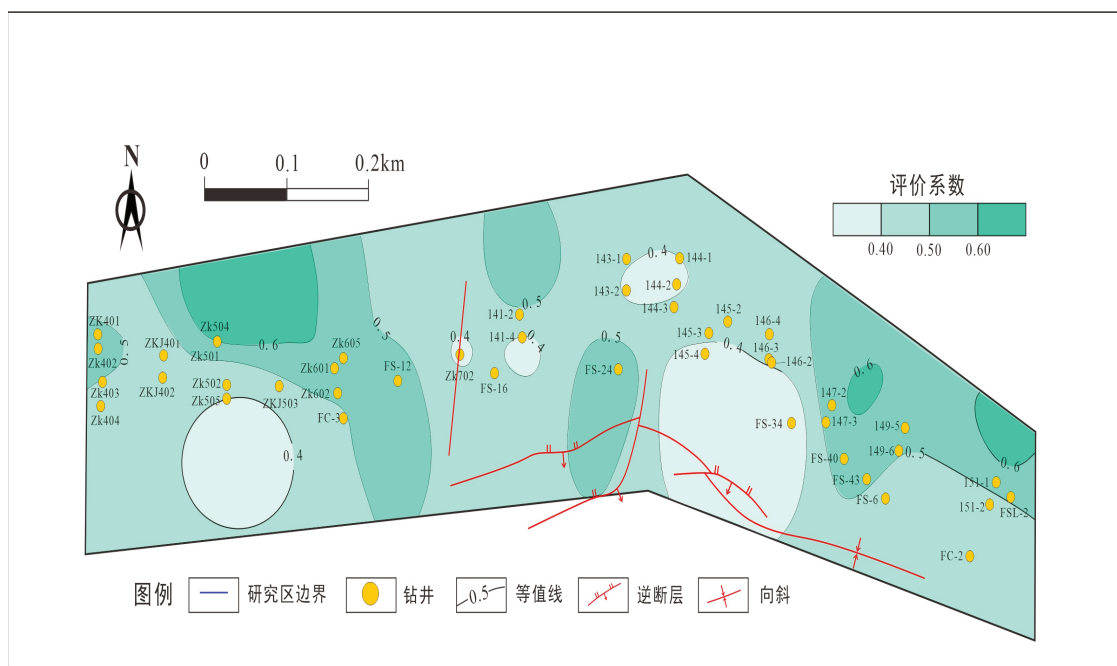


图4 白杨河39号煤层煤层气-煤炭地下气化协调开发有利区等值线图

## 5 结论

1) 白杨河矿区39号煤层具有良好的赋存条件以及水文地质条件,为煤层气-煤炭地下气化协同开发提供了基础.梳理得出煤层气-煤炭地下气化协调开发主控地质因素,分别为煤层气资源条件、煤岩煤质条件、煤储层条件、煤层赋存条件、围岩条件、封闭条件、水文地质条件、环境地质条件以及协调开发关键地质条件.上述9大类一级地质指标还包括含气量、煤层厚度、渗透率、孔隙度、顶板和底板岩性等33小类二级地质指标.

2) 构建了白杨河矿区煤层气-煤炭地下气化协调开发地质选区评价指标体系,采用模糊数学评价方法对本区块作出评价.利用层次分析法和CRITIC法计算出各级指标权重,通过梯形隶属函数得出二级指标隶属度,进而得出各钻孔的模糊评价系数,该系数越大,越有利于开发.

3) 白杨河矿区煤层气-煤炭地下气化协调开发的有利区位于研究区西北部及东南部分区域,较有利区位于研究区的中部、西北部及东南部,有利区面积为 $0.91 \text{ km}^2$ ,较有利区面积为 $3.91 \text{ km}^2$ .

### 参考文献:

- [1] 李嘉敏,王猛,贾腾飞,等.淮南煤田煤地下气化地质条件评价及有利区模糊优选[J].煤炭技术,2022,41(8):67-71.

- LI J M, WANG M, JIA T F, et al. Evaluation of geological conditions and fuzzy optimization of favorable area for coal gasification in southern Junggar coalfield[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(8): 67-71. (in Chinese)
- [2] 周贺, 吴财芳, 蒋秀明, 等. 煤炭地下气化地质选区指标体系构建及有利区评价技术[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1777-1790.  
ZHOU H, WU C F, JIANG X M, et al. Construction of geological selection index system and evaluation technology of favorable area for underground coal gasification[J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1777-1790. (in Chinese)
- [3] 梁杰, 王喆, 梁鲲, 等. 煤炭地下气化技术进展与工程科技[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 393-402.  
LIANG J, WANG Z, LIANG K, et al. Progress and technology of underground coal gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 393-402. (in Chinese)
- [4] 王生维, 王峰明, 侯光久, 等. 新疆阜康白杨河矿区急倾斜煤层的煤层气开发井型[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1914-1918.  
WANG S W, WANG F M, HOU G J, et al. CBM development well type for steep seam in Fukang Baiyanghe mining area, Xinjiang[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1914-1918. (in Chinese)
- [5] 唐先滨. 新疆阜康市煤炭产业发展研究[J]. *和田师范专科学校学报*, 2012, 31(1): 10-12.  
TANG X B. Research on the development of coal industry in Fukang City, Xinjiang[J]. *Journal of Hotan Teachers College*, 2012, 31(1): 10-12. (in Chinese)
- [6] 韦波, 杨曙光, 李鑫, 等. 倾斜煤层煤层气与煤炭地下气化协调开发技术构想[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(5): 152-165.  
WEI B, YANG S G, LI X, et al. Conception of coordinated development technology system for coalbed methane and underground coal gasification in inclined coal seams[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 152-165. (in Chinese)
- [7] 王一兵, 田文广, 李五忠, 等. 中国煤层气选区评价标准探讨[J]. *地质通报*, 2006, 25(9/10): 1104-1107.  
WANG Y B, TIAN W G, LI W Z, et al. Criteria for the evaluation of coalbed methane area selection in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(9/10): 1104-1107. (in Chinese)
- [8] 杨曙光, 伏海蛟, 王刚, 等. 淮南地区煤层气选区评价体系及有利区预测[J]. *新疆地质*, 2021, 39(2): 292-296.  
YANG S G, FU H J, WANG G, et al. Evaluation system and prediction of coalbed methane exploration targets in the southern Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(2): 292-296. (in Chinese)
- [9] 赵黔荣. 六盘水煤层气选区评价参数及勘探开发模式[J]. *贵州地质*, 2000, 17(4): 226-235.  
ZHAO Q R. Discussion on geological feature of coal-bed gas and its mode of exploration and development in Liupanshui area[J]. *Guizhou Geology*, 2000, 17(4): 226-235. (in Chinese)
- [10] 罗金辉, 杨永国, 秦勇, 等. 基于组合权重的煤层气有利区块模糊优选[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(2): 242-246.  
LUO J H, YANG Y G, QIN Y, et al. Fuzzy optimization for CBM favorable targets based on combined weights[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(2): 242-246. (in Chinese)
- [11] 侯海海, 邵龙义, 唐跃, 等. 基于多层次模糊数学的中国低煤阶煤层气选区评价标准: 以吐哈盆地为例[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 1002-1009.  
HOU H H, SHAO L Y, TANG Y, et al. Criteria for selected areas evaluation of low rank CBM based on multi-layered fuzzy mathematics: A case study of Turpan-Hami Basin[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 1002-1009. (in Chinese)
- [12] 霍凯中, 赵永军, 孙立冬. 灰色聚类分析在煤层气选区评价中的应用[J]. *断块油气田*, 2007, 14(2): 14-17.  
HUO K Z, ZHAO Y J, SUN L D. Application of grey cluster analysis in selective area and evaluation of coalbed methane[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2007, 14(2): 14-17. (in Chinese)
- [13] 陈跃, 王丽雅, 李国富, 等. 基于随机森林算法的低煤阶煤层气开发选区预测[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(4): 596-603+616.  
CHEN Y, WANG L Y, LI G F, et al. Prediction of favorable areas for low-rank coalbed methane based on Random Forest algorithm[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(4): 596-603+616. (in Chinese)
- [14] 黄温钢, 王作棠. 煤炭地下气化变权-模糊层次综合评价模型[J]. *西安科技大学学报*, 2017, 37(4): 500-507.  
HUANG W G, WANG Z T. Comprehensive evaluation model of fuzzy analytic hierarchy process with variable weight for underground coal gasification[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017, 37(4): 500-507. (in Chinese)
- [15] 郑超, 余岚, 张巨峰, 等. 煤炭地下气化资源条件的模糊层次综合评价[J]. *矿业工程研究*, 2019, 34(1): 40-44.  
ZHENG C, YU L, ZHANG J F, et al. Fuzzy hierarchy comprehensive evaluation on resource conditions for underground coal gasification[J]. *Mineral Engineering Research*, 2019, 34(1): 40-44. (in Chinese)
- [16] 赵岳, 黄温钢, 徐强, 等. 煤炭地下气化地质条件评价研究: 以江苏省朱寨井田为例[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(3): 1-11.

- ZHAO Y, HUANG W G, XU Q, et al. Study on evaluation of geological conditions for underground coal gasification: Taking Zhuzhai minefield of Jiangsu Province as an example[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2018, 37(3): 1-11. (in Chinese)
- [17] 武杰, 李国富. 基于模糊数学的山西省典型煤矿区煤层气可采性评价[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(10): 29-32.  
WU J, LI G F. Recoverability evaluation of coalbed methane in typical coal mining areas of Shanxi Province based on fuzzy mathematics[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(10): 29-32. (in Chinese)
- [18] 郑超, 马东民, 陈跃, 等. 水分对煤层气吸附/解吸微观作用研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 256-268.  
ZHENG C, MA D M, CHEN Y, et al. Research progress micro effect of water on coalbed methane adsorption/desorption[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 256-268. (in Chinese)
- [19] 李沛. 大佛寺井田煤-水-甲烷作用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.  
LI P. Study on coal-water-methane interaction in Dafosi mine field[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [20] DONG D W, YANG J S, HU Q J, et al. Pore structure characteristics of low-rank coal reservoirs with different ash yields and their implications for recoverability of coalbed methane: A case study from the Erlan Basin, northeastern China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2023, 17(1): 18-29.
- [21] 陈波. 不同煤种的高温气化反应性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2006.  
CHEN B. The study on high temperature gasification of different types of coal[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [22] 刘娜, 康永尚, 李喆, 等. 煤岩孔隙度主控地质因素及其对煤层气开发的影响[J]. *现代地质*, 2018, 32(5): 963-974.  
LIU N, KANG Y S, LI Z, et al. Geological controlling factors of coal pore system and its significance in CBM development[J]. *Geoscience*, 2018, 32(5): 963-974. (in Chinese)
- [23] 刘淑琴, 周蓉, 潘佳, 等. 煤炭地下气化选址决策及地下水污染防控[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(5): 23-27+62.  
LIU S Q, ZHOU R, PAN J, et al. Location selection and groundwater pollution prevention & control regarding underground coal gasification[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(5): 23-27+62. (in Chinese)
- [24] 蒋睿, 王永清, 李海涛, 等. 煤层倾角对煤层气水平井产能影响的数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(S1): 151-157.  
JIANG R, WANG Y Q, LI H T, et al. A numerical simulation on the impact of coal seam dip on productivity of CBM horizontal well[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(S1): 151-157. (in Chinese)
- [25] 刘淑琴, 师素珍, 冯国旭, 等. 煤炭地下气化地质选址原则与案例评价[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2531-2538.  
LIU S Q, SHI S Z, FENG G X, et al. Geological site selection and evaluation for underground coal gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2531-2538. (in Chinese)
- [26] 谢明忠. 冀北榆树沟煤矿区褐煤地下气化地质条件分析[J]. *中国煤炭地质*, 2008, 20(2): 9-11.  
XIE M Z. Analysis of underground gasification geological condition in Yushugou coalmine area, northern Hebei Province[J]. *Coal Geology of China*, 2008, 20(2): 9-11. (in Chinese)
- [27] YANG D M, KOUKOUZAS N, GREEN M, et al. Recent development on underground coal gasification and subsequent CO<sub>2</sub> storage[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2016, 89(4): 469-484.
- [28] 欧阳永林, 孙斌, 王勃, 等. 煤层气封闭体系及其与煤层气富集的关系[J]. *天然气工业*, 2016, 36(10): 19-27.  
OUYANG Y L, SUN B, WANG B, et al. CBM sealing system and its relationship with CBM enrichment[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(10): 19-27. (in Chinese)
- [29] 王作棠, 王建华, 张朋, 等. 华亭煤地下气化与固定床气化指标对比研究[J]. *煤炭工程*, 2013(1): 99-101+104.  
WANG Z T, WANG J H, ZHANG P, et al. Study on index comparison between underground coal gasification in Huating mine and fixed bed coal gasification[J]. *Coal Engineering*, 2013(1): 99-101+104. (in Chinese)
- [30] 刘淑琴, 张尚军, 牛茂斐, 等. 煤炭地下气化技术及其应用前景[J]. *地学前缘*, 2016, 23(3): 97-102.  
LIU S Q, ZHANG S J, NIU M F, et al. Technology process and application prospect of underground coal gasification[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(3): 97-102. (in Chinese)
- [31] 孙凡星, 赵钧儒, 李元敏. 新疆五官煤矿煤层气赋存及影响因素研究[J]. *山东煤炭科技*, 2019(1): 164-166.  
SUN F X, ZHAO J R, LI Y M. Study on the occurrence and influencing factors of CBM in Xinjiang Wugong coal mine[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2019(1): 164-166. (in Chinese)
- [32] 李洋冰, 曾磊, 胡维强, 等. 保德地区煤层气地球化学特征及成因探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 133-141+151.

- LI Y B, ZENG L, HU W Q, et al. Geochemical characteristics and genesis of coalbed methane in Baode area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 133-141+151. (in Chinese)
- [33] 刘淑琴,董贵明,杨国勇,等. 煤炭地下气化酚污染迁移数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(5): 796-801.  
LIU S Q, DONG G M, YANG G Y, et al. Numerical simulation of phenol migration for underground coal gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 796-801. (in Chinese)
- [34] VYAS D U, SINGH R P. Worldwide developments in UCG and Indian initiative[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 11: 29-37.
- [35] 陈佳木,吴志华,刘文浩,等. 湖南水口山多金属矿区废石堆重金属污染评价及赋存形态分析[J]. *地球科学*, 2021, 46(11): 4127-4139.  
CHEN J M, WU Z H, LIU W H, et al. Heavy metal pollution evaluation and species analysis of waste rock piles in Shuikoushan, Hunan Province[J]. *Earth Science*, 2021, 46(11): 4127-4139. (in Chinese)
- [36] 韩磊,秦勇,王作棠. 煤炭地下气化炉选址的地质影响因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 44-50.  
HAN L, QIN Y, WANG Z T. Geological consideration for site selection of underground coal gasifier[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 44-50. (in Chinese)
- [37] 李鑫,傅雪海. 不同层间距条件下煤层气井递进排采气、水产能研究[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(10): 44-47.  
LI X, FU X H. Research on gas and water capacity of CBM well during process of progressive drainage with different coal seam interval[J]. *Coal Technology*, 2015, 34(10): 44-47. (in Chinese)
- [38] 唐芙蓉. 煤炭地下气化燃空区覆岩裂隙演化及破断规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013.  
TANG F R. Fracture evolution and breakage of overlying strata of combustion space area in underground coal gasification[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese)
- [39] 梁宇,李诺恩. 国际中文教材评价指标体系构建:基于德尔菲法和层次分析法[J]. *贵州师范大学学报(社会科学版)*, 2023(6): 30-40.  
LIANG Y, LI N E. Construction of evaluation indicator system for CSL textbooks: Based on Delphi method and analytic hierarchy process[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Social Science)*, 2023(6): 30-40. (in Chinese)
- [40] 万林,章国宝,陶杰. 基于AHP-CRITIC的电梯安全性评估[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(5): 1696-1700.  
WAN L, ZHANG G B, TAO J. On the safety evaluation of the elevator based on AHP-CRITIC criteria[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(5): 1696-1700. (in Chinese)

责任编辑:岳荣强