

扎赉诺尔煤田煤炭地下气化地质评价与有利区优选

崔 义¹, 陶 树², 王志珩², 吴亚宁², 井庆贺¹, 李寿君¹, 李德军¹,
郭 洁¹, 闫寿庆¹, 焦 扬¹, 邹 迪¹

(1. 扎赉诺尔煤业有限责任公司, 内蒙古呼伦贝尔 021410; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘 要:煤炭地下气化(UCG)技术是一种将原位煤层在地下进行有控制的燃烧,以获取可燃合成气的技术,该技术有望发展成为弥补我国天然气供需缺口的重要技术。UCG 过程的选址问题需综合考虑煤岩自身特性及煤层地质环境等诸多因素,客观的选址评价工作是地下气化稳定运行的基本保障。在查明扎赉诺尔煤田地质条件的基础上,从煤岩煤质特征、煤炭赋存条件、构造条件和水文地质条件 4 个方面综合分析伊敏组主煤层 UCG 的可行性。运用层次分析(AHP)法和模糊数学评价法,优选 4 个一级评价指标和 13 个二级评价指标以构建多层次模糊数学评价模型,明确扎赉诺尔煤田 UCG 有利区分布特征。结果表明:该煤田 II₂₋₁ 和 II₃ 煤层为褐煤,以中等全水分含量、低灰分产率、高挥发分产率煤为主,煤中氮、硫等有害元素含量低;2 层煤的发热量平均值($Q_{\text{net,ar}}$)分别为 23.41 和 23.73 MJ/kg;气化活性(CO₂, 900 °C)的平均值分别为 91.90% 和 79.64%;热稳定性(TS-6)的平均值分别为 58.95% 和 58.20%;煤灰熔点分别为 1 145 和 1 170 °C。煤层厚度大且侧向分布稳定(煤厚变异系数 10.14%~33.55%)、埋深适中,断层复杂程度较低,煤层平均单位涌水量整体较低,含煤层系发育良好且稳定的隔水层。整体而言,扎赉诺尔煤田 II₂₋₁ 和 II₃ 煤层具有实施 UCG 项目的可行性,其中,灵东煤矿南部为 II₂₋₁ 煤层 UCG 的 I 类有利区,灵东煤矿、灵东煤矿南部和灵泉煤矿南部为 II₃ 煤层 UCG 的 I 类有利区,建议进一步开展有利区内煤炭气化物理模拟试验,获取气化产物及气化效率等关键参数,并落实气化炉建设方案、优化气化工艺。

关键词:煤炭地下气化(UCG);有利区;多层次模糊数学评价;扎赉诺尔煤田

中图分类号:TD841 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)05-2596-14

Geological evaluation and favorable area optimization for underground coal gasification in Zhalaينوer coal field

CUI Yi¹, TAO Shu², WANG Zhiheng², WU Yaning², JING Qinghe¹, LI Shoujun¹, LI Dejun¹, GUO Jie¹,
YAN Shouqing¹, JIAO Yang¹, ZOU Di¹

(1. Zhalaينوer Coal Industry Co., Ltd., Hulun Buir 021410, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Underground coal gasification (UCG) can control the combustion of in-situ coal seams underground to obtain combustible synthesis gas, which is expected to become an important way to fill the gap in natural gas supply and demand in China. The site selection for UCG requires comprehensive consideration of various factors such as coal's own characteristics and the geological environment of coal seams. Objective site selection evaluation is the basic guarantee for the stable

收稿日期:2024-05-21 策划编辑:韩晋平 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2024.0569

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(42272200);扎赉诺尔煤业有限责任公司科技资助项目(2021RXDXLX12)

作者简介:崔 义(1982—),男,河北衡水人,教授级高级工程师,硕士。E-mail: cuiyicugb@126.com

通讯作者:陶 树(1981—),男,安徽合肥人,教授,博士。E-mail: taoshu@cugb.edu.cn

引用格式:崔义,陶树,王志珩,等.扎赉诺尔煤田煤炭地下气化地质评价与有利区优选[J].煤炭学报,2025,50(5):2596-2609.

CUI Yi, TAO Shu, WANG Zhiheng, et al. Geological evaluation and favorable area optimization for underground coal gasification in Zhalaينوer coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2596-2609.



移动阅读

operation of UCG. On the basis of identifying the geological conditions of the Zhalainguoer coal field, the feasibility of UCG and the favorable areas for UCG of the main coal seam in the Yimin Formation are comprehensively analyzed from four aspects: coal petrological and quality characteristics, coal occurrence conditions, structural conditions, and hydrogeological conditions. Moreover, Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy mathematics evaluation method are used to develop the multi-level site selection evaluation system, which comprises 4 primary indicators and 13 secondary indicators. This evaluation system is used to clarify the distribution characteristics of favorable areas for UCG in the Zhalainguoer coal field. The results show that II_{2-1} and II_3 coal seams of the Yimin Formation are lignite with medium total moisture content, low ash yield, high volatile matter yield. The content of harmful elements such as nitrogen and sulfur in coal is low. The average calorific value ($Q_{net,ar}$) of the two coal seams is 23.41 and 23.73 MJ/kg, respectively, and the average gasification activity (CO_2 , 900 °C) is 91.90% and 79.64%, respectively, and the average value of thermal stability (TS-6) is 58.95% and 58.20%, respectively, and the melting point of coal ash is 1 145 and 1 170 °C, respectively. The coal seam has a large thickness and stable lateral distribution (coal thickness variation coefficient of 10.14%~33.55%), with moderate burial depth and low complexity of faults. The average unit water inflow of coal seams is generally low, and the coal bearing strata have well-developed and stable aquitards. Overall, the II_{2-1} and II_3 coal seams in the Zhalainguoer coal field have the feasibility of implementing UCG tests. The southern part of Lingdong Coal Mine is identified as a class I favorable area for UCG in the II_{2-1} coal seam. Meanwhile, the Lingdong Coal Mine, the southern part of Lingdong Coal Mine and the Lingquan Coal Mine are identified as class I favorable areas for UCG in the II_3 coal seam. It is suggested to further carry out physical simulation experiments on UCG in favorable areas to obtain key parameters such as gasification products and gasification efficiency, to implement gasification furnace construction plans, and to optimize gasification processes.

Key words: UCG; favorable area; multilevel fuzzy mathematical evaluation; Zhalainguoer coal field

0 引言

煤炭地下气化 (Underground Coal Gasification, UCG) 技术是通过特定技术手段将原位煤层在地下进行有控制地燃烧,生成并回收合成的煤气资源以供其他行业利用,该技术对改善我国以煤为主的能源结构的持续发展具有战略性意义^[1-4]。UCG 技术包括选址、建炉、运行、控制、地面和利用 6 个方面^[5]。地质工作贯穿于整个 UCG 流程,开展系统性的地质评价工作是推动 UCG 商业化的关键^[6]。近年来,有利区评价、高效气化工艺、气化炉稳定运行和碳封存等技术的有效结合成为 UCG 技术亟需攻关的重要方向^[3, 7-8]。其中,层次分析 (Analytic Hierarchy Process, AHP)、模糊数学评价、人工神经网络等方法为 UCG 科学选址的重要手段^[9-12]。

扎赉诺尔煤田煤炭资源丰富,具有煤化程度低、煤层厚度大和埋深较稳定等优势。文中考虑煤岩煤质、煤层赋存、构造和水文地质等条件,综合分析扎赉诺尔煤田伊敏组主煤层 UCG 的可行性,运用 AHP 法和模糊数学评价法,优选 UCG 评价指标,建立评价模型,明确主煤层 UCG 的有利区。

1 地质概况

扎赉诺尔煤田位于内蒙古自治区海拉尔盆地呼

伦湖凹陷,基本地貌形态为构造侵蚀丘陵和河流冲积平原,含煤地层为白垩系下统大磨拐河组 (K_{1d}) 和伊敏组 (K_{1y}),发育 4 个煤层组 (伊敏组发育 I、II 煤层,大磨拐河组发育 III、IV 煤层),呈宽缓向斜构造形态展布,轴向 NE17°,总含煤面积 399.2 km²。伊敏组煤层主要形成于湖泊三角洲分流间湾泥炭沼泽相,大磨拐河组煤层主要形成于湖泊沉积体系^[13]。构造地质条件相对简单,含煤地层未受强烈地壳运动的影响,以断层为主,不发育陷落柱,没有发现岩浆岩侵入现象。根据地下水含水介质和水动力特征,伊敏组含煤地层可将含水层划分为孔隙裂隙水承压水含水岩组和基岩裂隙水含水岩组。

伊敏组 I 煤层分布于矿区西南部,主要发育 I_1 、 I_2 和 I_3 3 层煤,与 II 煤层相比 I 煤层埋深较浅、煤层较薄,于盆地边缘风化剥蚀殆尽,盆地中部 I 煤层基本采空; II 煤层全区稳定发育 II_{2-1} 和 II_3 厚煤层,结构稳定且大部分可采,夹矸少;大磨拐河组 III、IV 煤层于盆地边缘浅部区基本采空,于盆地中部由于埋深较大,尚未开采。扎赉诺尔煤田煤矿区/勘查区包括:正在开采伊敏组 II_{2-1} 煤层、 II_3 煤层的灵东煤矿、灵泉煤矿、灵露煤矿、铁北煤矿以及勘探程度较高的铁南煤矿矿区和勘探程度低的东山煤矿、铁道北勘查区、阿尔公勘查区。扎赉诺尔煤田构造位置、构造样式及综合柱状图如图 1 所示。

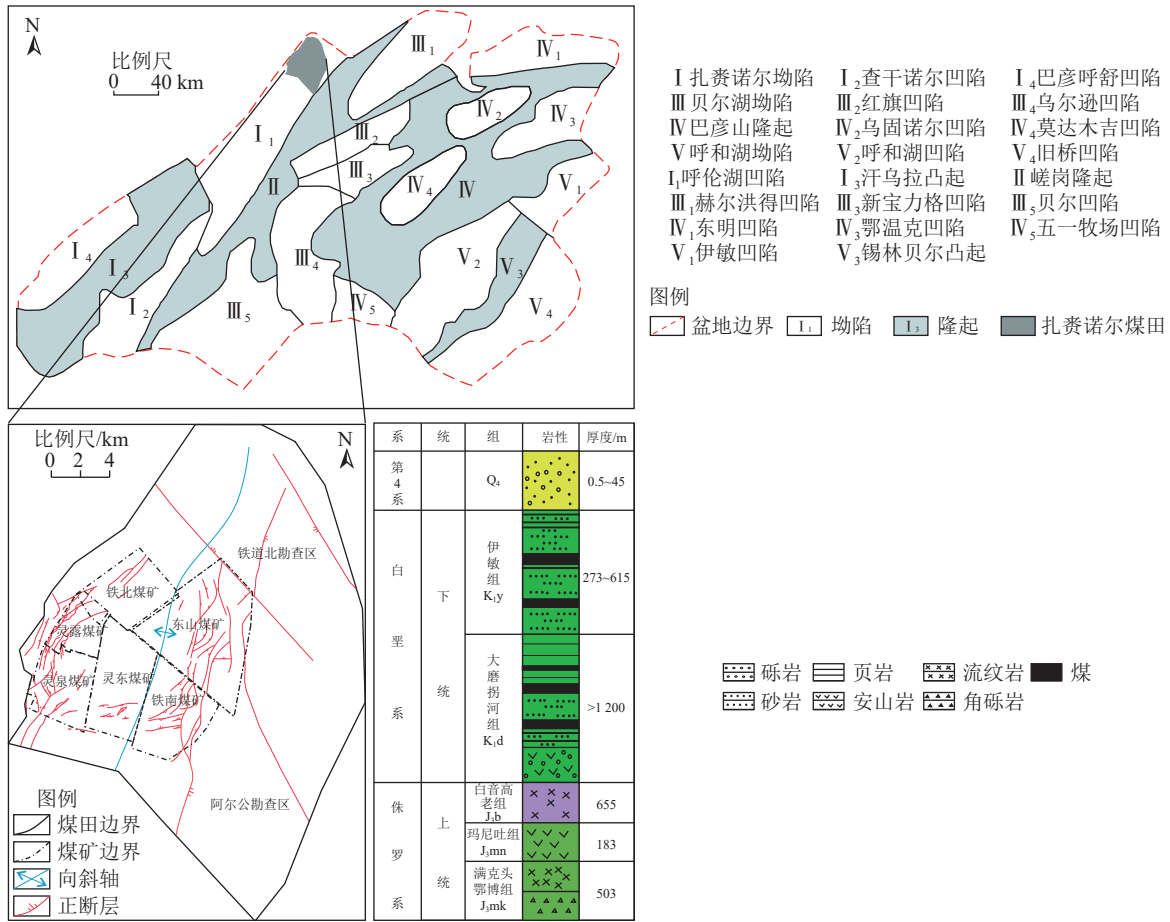


图 1 扎赉诺尔煤田构造位置、构造样式及综合柱状图

Fig.1 Structural location, structural style, and synthesis column map of Zhalaunuoer coal field

2 UCG 地质条件

UCG 选址是一项复杂且综合的研究工作,受诸多因素制约,如煤岩煤质特征、煤层赋存条件、构造条件和水文地质条件等,各个因素的综合作用共同影响 UCG 的效率与产气构成。开展 UCG 地质条件评价工作将为后续气化炉的工程施工与稳定运行提供保障。

2.1 煤岩煤质特征

1) 煤化程度。不同煤化作用程度的煤均可被气化,但有效气体产率有较大差异,煤气的热值大小也有较大不同^[14]。由于低阶煤通常具有良好的孔隙结构和物性条件,连通的气化通道能够充分与气化剂相接触,因此,褐煤等低煤化程度的煤较适合开展 UCG 项目^[15-16]。煤的挥发分产率对 UCG 煤气组成有较大影响,较高挥发分的煤在气化过程中将产生较多轻烃和氢气,提高了所产煤气的热值,且随着气化炉的持续运行,气化效率逐渐增高^[17-20]。

2) 煤质。煤质对 UCG 有效气体组分、煤气热值和气化效率等方面具有较大影响,关键参数主要包括

热值、气化活性、热稳定性以及煤灰熔点。原煤热值决定了单位质量煤炭的气化效率^[21],气化活性影响 UCG 的反应速率^[14]。热稳定性影响 UCG 的稳定性,热稳定性差的煤在气化炉内易受热粉化,被粉化的煤一方面增加了床层阻力,另一方面提高了气体粉尘带出量^[22]。煤灰熔点影响气化通道的渗流能力,低煤灰熔点煤通常结渣性较差,残留煤灰将阻止气化剂向煤层传递,并阻碍气化产物进入煤气的产出通道^[22]。

3) 有害元素。煤中硫元素和氮元素通常以杂基和杂环等形式存在。在 UCG 运行过程中,硫元素和氮元素不直接参与化学反应,对气化炉的稳定运行影响甚微,但易形成二氧化硫和氮氧化物等有害物质^[23-24]。一方面,有害物质对输气管道等设备具有破坏作用;另一方面,有害气体通过扩散作用进入含水层或大气中,将造成环境污染^[25-26]。因此,需要处理含有害物质超量的煤气需净化处理,势必增加运行成本。一般认为硫元素含量小于 0.5%,氮元素含量小于 1.5% 的煤层适合开展 UCG 项目^[18]。

扎赉诺尔煤田典型矿区 II₂₋₁、II₃ 煤层物质构成、煤质参数和硫、氮元素含量见表 1—表 3。由表 1—

表 3 可知: 扎赉诺尔煤田 II₂₋₁ 和 II₃ 煤的镜质体反射率为 0.38%~0.50%, 均属于褐煤; 煤的挥发分产率平均值分别为 40.11%、35.44%, 综合其他参数, II₂₋₁ 和 II₃ 煤均以中等全水分、低灰分和高挥发分煤为主。

II₂₋₁ 和 II₃ 煤的发热量平均值 ($Q_{\text{net,ar}}$) 分别为 23.41 和 23.73 MJ/kg, 属于中—高热值煤; 气化活性 (CO_2 , 900 °C) 平均值分别为 91.90% 和 79.64%; 热稳定性 (TS-6) 平均值分别为 58.95% 和 58.20%; 煤灰熔点分

表 1 扎赉诺尔煤田典型矿区 II₂₋₁、II₃ 煤层物质构成

Table 1 Material composition of coal seams II₂₋₁ and II₃ in typical mining areas of Zhalainguoer coal field %

矿区	煤层	样号	镜质体反射率	工业分析				有机组分			
				水分	灰分	挥发分	固定碳	壳质组	镜质组	惰质组	次生有机组
灵东矿区	II ₃ 煤层	SLD-1	0.43	9.44	4.08	35.20	51.28	3.3	82.1	12.8	1.8
		SLD-2	0.38	8.82	4.04	34.83	52.31	6.8	79.3	10.5	3.4
		SLD-3	0.48	8.94	3.93	31.81	55.32	3.1	79.5	13.9	3.5
		平均	0.43	9.07	4.02	33.95	52.97	4.4	80.3	12.4	2.9
灵泉矿区	II ₃ 在采煤层	SLQ-1	0.49	11.74	4.93	35.11	48.22	8.0	78.0	11.0	3.0
		SLQ-2	0.44	7.68	6.81	34.92	50.59	7.0	81.0	10.0	2.0
		SLQ-3	0.38	10.53	3.60	35.27	50.60	8.2	78.7	11.6	1.5
		平均	0.44	9.98	5.11	35.10	49.80	7.7	79.5	10.7	2.1
灵泉矿区	II ₃ 待采煤层	SLQ-4	0.42	10.03	3.51	39.07	47.39	6.7	78.9	11.6	2.8
		SLQ-5	0.50	8.40	6.26	36.06	49.28	5.9	81.2	9.3	3.6
		平均	0.46	9.22	4.89	37.57	48.34	6.3	80.1	10.5	3.2
		STB-1	0.42	8.78	6.99	44.54	39.69	6.5	78.2	11.9	3.4
铁北矿区	II ₃ 煤层	STB-2	0.38	10.01	7.64	35.72	46.63	7.4	71.3	19.2	2.1
		STB-3	0.46	9.95	6.64	35.58	47.83	5.9	77.8	14.8	1.5
		平均	0.42	9.58	7.09	38.61	44.72	6.6	75.8	15.3	2.3
		SLL-1	0.39	9.21	6.80	39.57	44.42	7.1	72.7	18.7	1.5
灵露矿区	II ₂₋₁ 煤层	SLL-2	0.48	8.03	9.64	41.46	40.87	5.8	70.4	21.1	2.7
		SLL-3	0.44	7.61	6.92	39.29	46.18	6.3	77.6	14.3	1.8
		平均	0.44	8.28	7.79	40.11	43.82	6.4	73.6	18.0	2.0
		SLL-4	0.45	6.38	6.94	27.12	59.56	5.5	68.3	23.4	2.8

表 2 扎赉诺尔煤田 II₂₋₁、II₃ 煤层煤质参数

Table 2 Coal quality parameters of coal seams II₂₋₁ and II₃ in Zhalainguoer coal field

煤层号	发热量/(MJ · kg ⁻¹)	反应活性/%	热稳定性/%	煤灰熔点/°C
II ₂₋₁ 煤层	21.41 ~ 24.61	79.3 ~ 96.3	41.8 ~ 75.1	1 055 ~ 1 290
	23.41/27	91.90/7	58.95/33	1 145/20
II ₃ 煤层	19.33 ~ 27.83	65.3 ~ 84.6	35.9 ~ 78.2	1 105 ~ 1 290
	23.73/30	79.64/8	58.20/31	1 170/12

注: 最小值~最大值
平均数/数据量。

表 3 扎赉诺尔煤田 II₂₋₁、II₃ 煤层硫、氮元素含量

Table 3 Sulfur and nitrogen elements content of coal seams II₂₋₁ and II₃ in Zhalainguoer coal field

煤层号	灵东煤矿		灵泉煤矿		铁北煤矿		铁南煤矿	
	S _{t,d}	N _{daf}	S _{t,d}	N _{daf}	S _{t,d}	N _{daf}	S _{t,d}	N _{daf}
II ₂₋₁ 煤层	0.11 ~ 0.66	0.77 ~ 2.39	0.11 ~ 0.93	0.80 ~ 1.87	0.09 ~ 0.48	0.62 ~ 1.77	0.07 ~ 0.64	0.94 ~ 1.48
	0.31/93	1.19/35	0.46/23	1.36/4	0.27/7	1.31/5	0.28/66	1.14/24
II ₃ 煤层	0.11 ~ 0.53	0.82 ~ 1.88	0.11 ~ 0.31	0.96 ~ 1.88	0.15 ~ 0.47	0.75 ~ 1.73	0.15 ~ 0.57	1.05 ~ 1.39
	0.24/33	1.21/22	0.19/25	1.56/5	0.34/11	1.59/8	0.23/30	1.17/13

别为 1 145 和 1 170 ℃。Ⅱ₂₋₁ 煤层硫元素含量在灵东煤矿、灵泉煤矿、铁北煤矿和铁南煤矿平均值分别为: 0.31%、0.46%、0.27%、0.28%, 均小于 0.5%; 氮元素含量平均值分别为: 1.19%、1.36%、1.31%、1.14%, 均小于 1.5%。Ⅱ₃ 煤层硫元素含量在上述矿区平均值分别为: 0.24%、0.19%、0.34%、0.23%, 均小于 0.5%; 氮元素含量平均值分别为: 1.21%、1.56%、1.59%、1.17%, 其中灵东煤矿、铁南煤矿氮元素含量小于 1.5%。

从煤岩煤质特征来看, 扎赉诺尔煤田全区基本适合开展 UCG 项目; 从氮元素含量来看, Ⅱ₂₋₁ 煤层在各矿区均适合开展 UCG 项目, Ⅱ₃ 煤层在灵东煤矿、铁南煤矿适合开展 UCG 项目。

2.2 煤层赋存条件

2.2.1 煤层厚度与埋深

煤层厚度与埋深对气化炉的密闭性、经济性、安全性和环保性等方面有重要影响。煤层厚度能够对地下气化效率和煤气热值产生影响, 通常用煤厚变异系数表征煤层厚度平面展布的稳定性, 不同厚度的煤层需采用不同的气化工艺^[27-28]。煤层埋深直接决定了地下气化炉密闭性、工程施工难度与经济成本等。煤层埋深较小时, 地下气化炉密闭性差, 且上覆岩层垮落后易与地表沟通, 存在潜在漏气风险; 煤层埋深较大时, 增加了 UCG 难度和气化炉建设成本, 降低了 UCG 经济性^[16, 18]。一般认为厚度为 3~12 m, 埋深为 100~500 m 的煤层适合开展 UCG^[18] 项目。

扎赉诺尔煤田 Ⅱ₂₋₁、Ⅱ₃ 煤层厚度平均值分别为 11.33、10.63 m, 平均埋深分别为 290.83 和 389.80 m。煤厚平均变异系数分别为 31.60% 和 33.55%, 均为较稳定煤层(表 4)。其中, Ⅱ₂₋₁ 煤层在灵东煤矿和铁南煤矿煤厚变异系数分别为 11.45% 和 19.85%, Ⅱ₃ 煤层在灵东煤矿、铁南煤矿和东山煤矿煤厚变异系数分别为 10.14%、14.12% 和 22.61%, 均小于 30%, 其为稳定煤层, 适合开展 UCG 项目(图 2、图 3、表 5)。

2.2.2 顶板岩性及厚度

煤层顶板岩性及厚度是影响 UCG 实施的关键条件, 顶板岩石的渗透性是决定地下气化炉封闭性的重要因素^[29-30]。煤层顶板岩性一般以泥岩、砂岩和石灰岩等类型为主, 渗透性差异较大, 煤层顶板岩性的平

面分布对 UCG 选址具有重要意义^[18, 31]。根据渗透系数的对数换算关系, 采用岩石渗透系数分类法, 可以把岩石划分为渗透性岩石、半渗透性岩石和不渗透性岩石 3 种类型。当煤层直接顶板为不渗透性岩石或半渗透性岩石时, 能够保持地下气化炉的温压条件, 同时不会造成气化煤气的泄漏, 是 UCG 最理想的围岩条件^[18, 30]。若气化腔上覆岩层采动裂隙连通上覆含水层, 则不适宜开展 UCG 项目, 该指标具有一票否决权。

扎赉诺尔煤田 Ⅱ₂₋₁ 煤层在灵东煤矿、灵泉煤矿、铁北煤矿、东山煤矿和阿尔公勘查区顶板岩性以砂岩为主, 在灵露煤矿、铁南煤矿和铁道北勘查区煤层顶板岩性以泥岩为主。Ⅱ₂₋₁ 煤层顶板厚度为 0.10~37.85 m, 平均为 7.81 m(图 4)。灵东煤矿、灵泉煤矿、灵露煤矿和铁北煤矿的直接顶板厚度较为稳定; 铁南煤矿的顶板厚度不稳定, 呈现出厚度在矿区范围内起伏变化的特点; 东山煤矿顶板厚度自东向西逐渐减薄。

Ⅱ₃ 煤层在灵泉煤矿、灵露煤矿、铁北煤矿、东山煤矿和阿尔公勘查区煤层顶板岩性以砂岩为主, 在灵东煤矿、铁南煤矿和铁道北勘查区煤层顶板岩性以泥岩为主。Ⅱ₃ 煤层顶板厚度为 0.10~38.08 m, 平均为 6.00 m(图 5)。灵东煤矿、灵露煤矿和铁北煤矿直接顶板厚度较为稳定; 灵东煤矿顶板厚度不稳定, 呈现出厚度在矿区范围内起伏变化的特点; 铁南煤矿和东山煤矿的顶板厚度分别自东北向西南、自东南向西北逐渐减薄。

煤层顶板不具渗透性是 UCG 最理想的顶板条件。Ⅱ₂₋₁ 煤层顶板在灵露煤矿、铁南煤矿和铁道北勘查区均为泥岩, Ⅱ₃ 煤层顶板在灵东煤矿、铁南煤矿和铁道北勘查区均为泥岩, 从顶板岩性的角度来看这些矿区适合开展 UCG 项目; Ⅱ₂₋₁ 煤层在灵东煤矿、灵泉煤矿、灵露煤矿和铁北煤矿的顶板稳定性较好, Ⅱ₃ 煤层在灵泉煤矿、灵露煤矿和铁北煤矿的顶板稳定性较好, 从顶板稳定性的角度来看这些矿区均适合开展 UCG 项目。

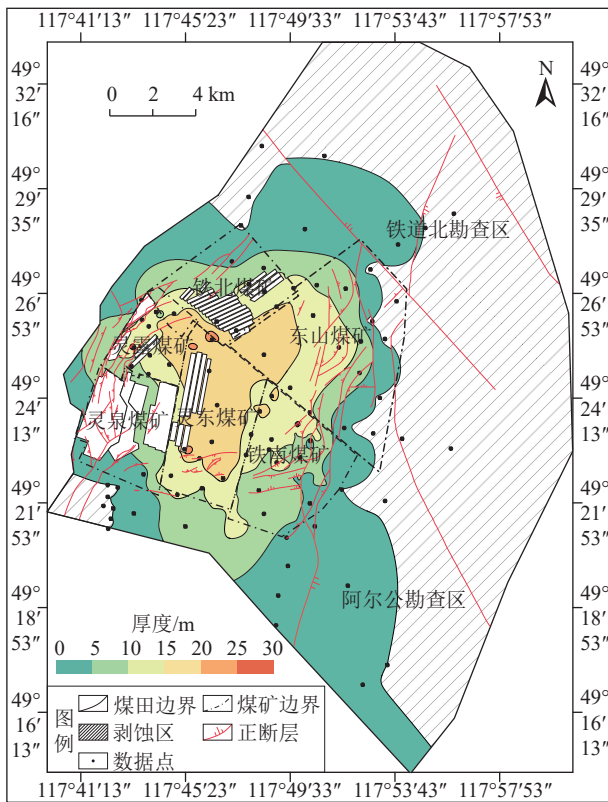
2.3 构造条件

地质构造的复杂程度与煤层发育的稳定性和连

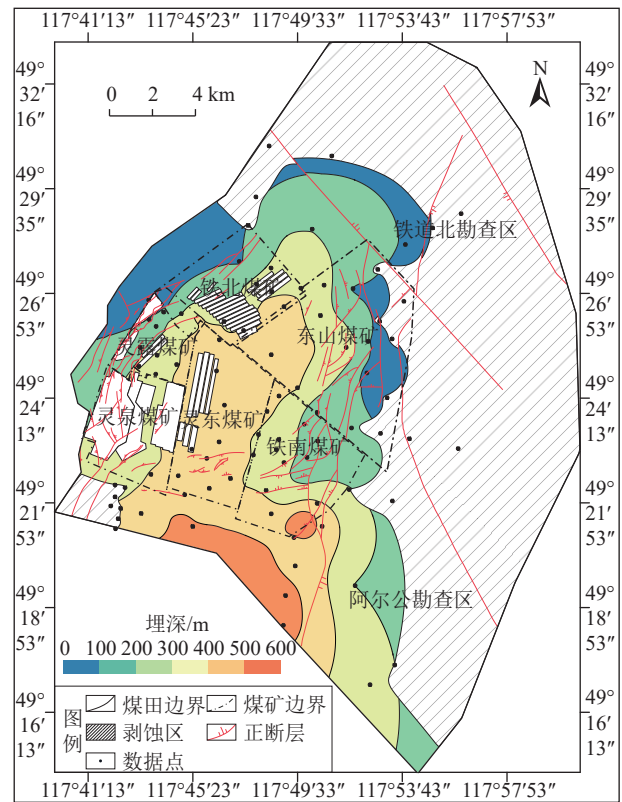
表 4 扎赉诺尔煤田煤层赋存条件

Table 4 Coal Seam occurrence condition table of Zhalaier coal field

煤层号	煤层赋存			结构复杂程度	煤厚变异系数/%	稳定程度	可采程度
	总厚度/m	埋深/m	夹矸厚度/m				
Ⅱ ₂₋₁ 煤层	0.50 ~ 23.85	31.94 ~ 491.45	0 ~ 1.52	较简单	31.60	较稳定	大部可采
	11.33	290.83	0.83				
Ⅱ ₃ 煤层	0.20 ~ 27.25	50.79 ~ 562.40	0.10 ~ 1.65	较简单	33.55	较稳定	全区可采
	10.63	389.80	0.87				



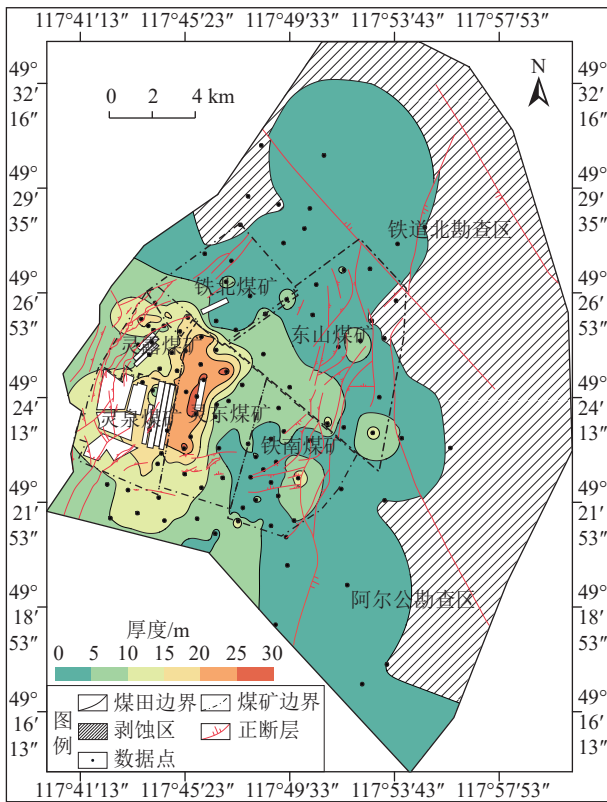
(a) 煤层厚度



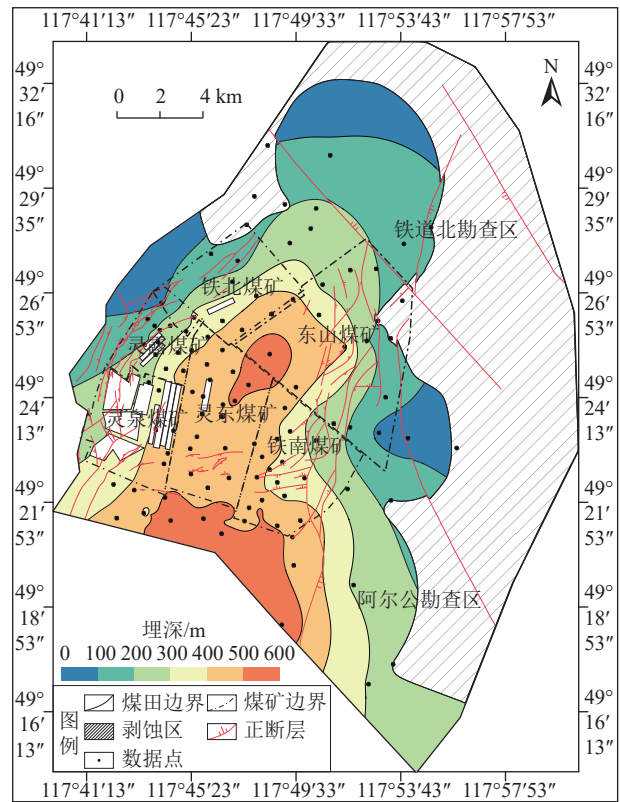
(b) 煤层埋深

图 2 扎赉诺尔煤田 II₂₋₁ 煤层等值线

Fig.2 Contour map of II₂₋₁ coal seam in Zhalaizuoer coal field



(a) 煤层厚度



(b) 煤层埋深

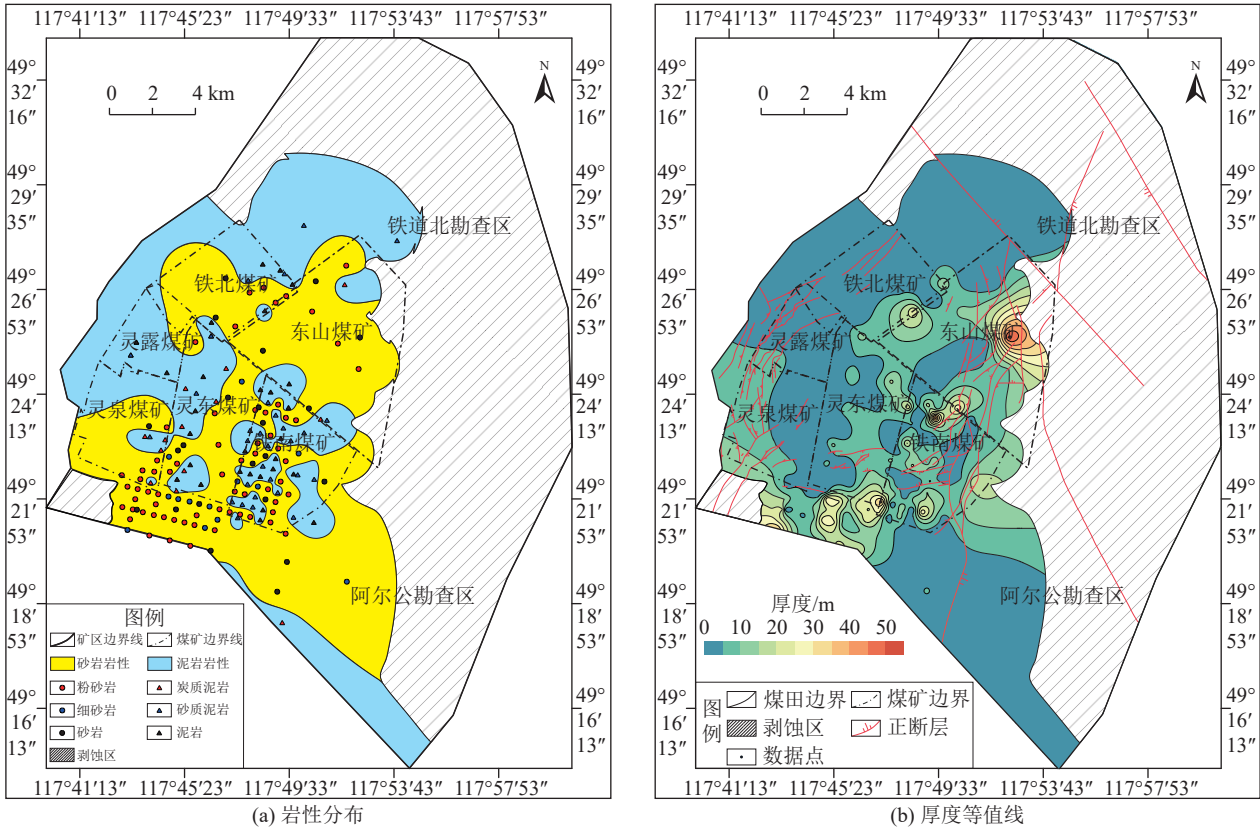
图 3 扎赉诺尔煤田 II₃ 煤层等值线

Fig.3 Contour map of II₃ coal seam in Zhalaizuoer coal field

表 5 扎赉诺尔煤田各矿区煤厚变异系数

Table 5 Variation coefficient of coal thickness in each mining area of Zhalainguoer coal field

煤层	灵东煤矿	灵泉煤矿	灵露煤矿	铁北煤矿	铁南煤矿	东山煤矿
II ₂₋₁ 煤层	11.45	39.57	44.70	40.47	19.85	49.05
II ₃ 煤层	10.14	42.62	41.90	45.82	14.12	22.61

图 4 II₂₋₁煤层顶板岩性分布与厚度等值线Fig.4 Roof lithology distribution and thickness contour map of II₂₋₁ coal seam

续性密切相关,复杂的构造条件直接影响地下气化炉的稳定运行^[18,20]。评价一定区域内构造条件的复杂程度,通常需考虑断层、岩浆岩侵入以及陷落柱等的分布情况^[32-33]。断层可能破坏地下气化炉的密闭性,造成炉内温压降低和煤气泄漏;岩浆侵入或陷落柱影响可气化煤层的厚度。扎赉诺尔煤田含煤地层未受强烈地壳运动的影响,其构造类型以发育正断层为主,陷落柱不发育,无岩浆岩侵入活动。

在 UCG 选址评价中,一般采用断层复杂程度指数(Z)定量描述断层对 UCG 的影响^[32]。通常将 $Z < 1$ 、 $1 \leq Z \leq 3$ 和 $Z > 3$ 分别视为适宜、较适宜和不适宜开展 UCG 项目的条件^[10,34]。扎赉诺尔煤田内部及其周边共发育 77 条断层,其中灵东煤矿发育 9 条断层,灵泉煤矿发育 21 条断层,灵露煤矿发育 8 条断层,铁北煤矿发育 6 条断层,铁南煤矿发育 11 条断层,东山煤矿发育 18 条断层(图 1)。灵东煤矿、灵泉煤矿、灵露煤矿和铁北煤矿 Z 值分别为 0.204 6、0.895 6、0.775 5、

0.322 4,均小于 1,适合开展 UCG 项目;铁南煤矿、东山煤矿 Z 值分别为 1.428 9、2.416 8,均大于 1,但小于 3,较适宜开展 UCG 项目(表 6)。

2.4 水文地质条件

水文地质条件对 UCG 的影响主要体现在 2 方面:一是适量围岩层自由水涌入到地下气化炉内后,将参与反应生成氢气,为 UCG 过程的有利条件,但涌水量达到一定值后,参与反应过剩的水会带走一部分热量,使得地下气化炉内温度降低,为 UCG 过程的不利条件,涌水量过多时甚至会导致 UCG 过程的停止;二是在 UCG 项目结束后,二氧化硫、氮氧化物等污染物会通过融水运移等方式渗流到周围岩层中,会对环境造成污染。因此,煤层钻孔单位涌水量和隔水层厚度为 UCG 选址评价的关键水文地质条件参数^[35-37]。

煤层涌水主要来源包括地下含水层中水的渗入和煤基质水分,地下气化炉内水的多少与煤层涌水量大小密切相关。一般将钻孔单位涌水量 $q \leq$

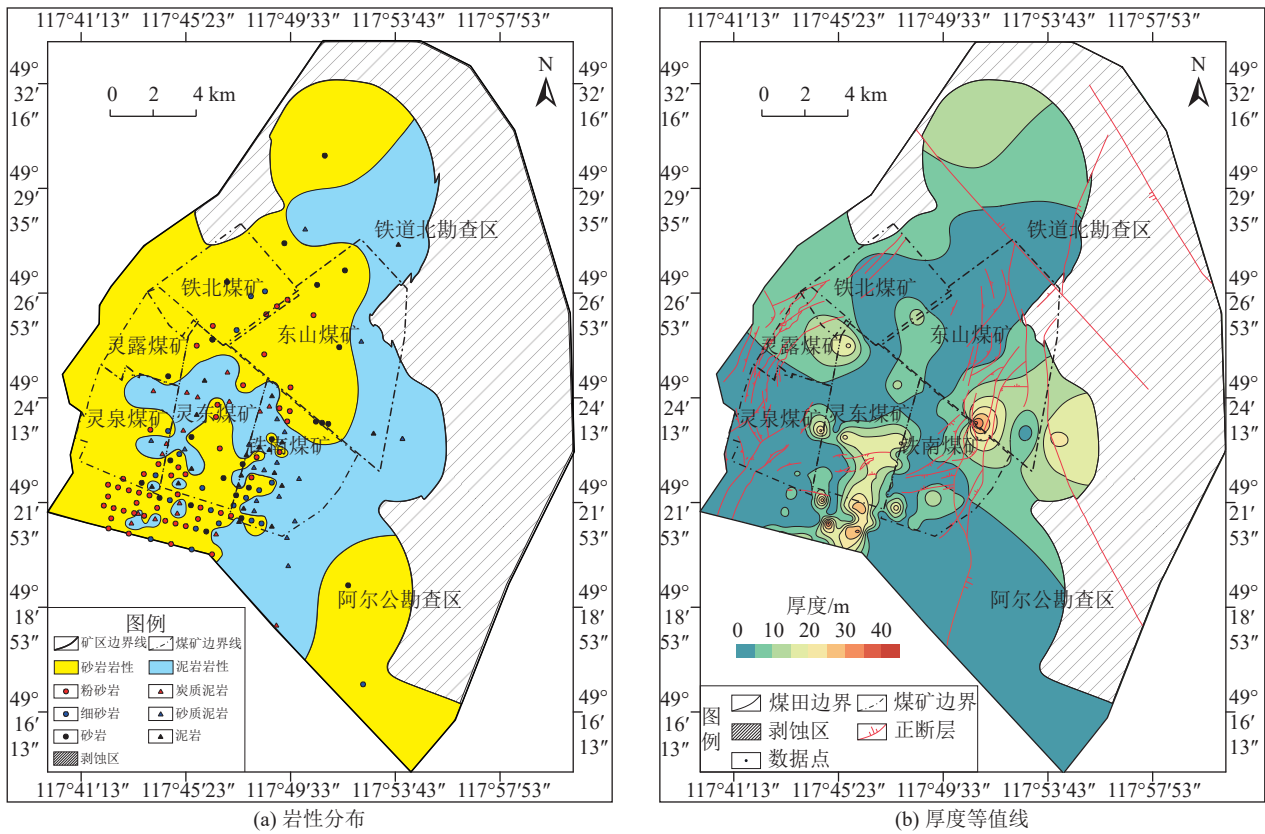


图 5 II₃ 煤层顶板岩性分布与厚度等值线

Fig.5 Roof lithology distribution and thickness contour map of II₃ coal seam

表 6 扎赉诺尔煤田地质构造复杂程度指数

Table 6 Geological structure complexity index in Zhalaier coal field

矿区	灵东煤矿	灵泉煤矿	灵露煤矿	铁北煤矿	铁南煤矿	东山煤矿
Z	0.204 6	0.895 6	0.775 5	0.322 4	1.428 9	2.416 8

0.1 L/(s · m)、0.1 L/(s · m) < q ≤ 1.0 L/(s · m) 和 q > 1.0 L/(s · m) 分别视为适宜、较适宜和不适宜开展 UCG 项目条件^[36]。气化煤层的顶板均有较厚的隔水层,且当燃烧区顶板自然垮落后,在被破坏的隔水层中产生的导水裂隙带没有连通上覆含水层时,该气化煤层的水文地质条件是最适合开展 UCG 项目的水文地质条件之一^[36-37]。当气化煤层上覆岩层存在含水层时,需要综合评价含水层和隔水层厚度,以保证 UCG 的顺利进行^[6, 18]。以顶板自然垮落后不破坏隔水层的隔水功能为考量依据,一般认为在薄—中厚煤层进行 UCG 项目时,当隔水层厚度大于 30 m,且隔水

层与含水层厚度比大于 1.5 时,才能保证地下气化炉的稳定运行^[20, 37-39]。

由抽水试验中煤层涌水量数据统计显示(表 7):灵东、灵泉、铁北和铁南煤矿 II₂₋₁ 煤层平均涌水量分别为 0.080 7、0.049 8、0.056 4 和 0.847 7 L/(s · m); II₃ 煤层平均涌水量分别为 0.038 2、0.023 3、0.105 8 和 0.454 2 L/(s · m)。从钻孔单位涌水量来看,灵东煤矿、灵泉煤矿 II₂₋₁ 和 II₃ 煤层以及铁北煤矿 II₂₋₁ 煤层平均单位涌水量较低,适合开展 UCG 项目,铁北煤矿 II₃ 煤层以及铁南煤矿 II₂₋₁ 和 II₃ 煤层平均单位涌水量相对较高,较适合开展 UCG 项目。

表 7 扎赉诺尔煤田 II₂₋₁ 和 II₃ 煤层钻孔单位涌水量数据表

Table 7 Water inflow data of II₂₋₁ and II₃ coal seams in Zhalaier coal field

煤层号	涌水量/(L · s ⁻¹ · m ⁻¹)			
	灵东煤矿	灵泉煤矿	铁北煤矿	铁南煤矿
II ₂₋₁ 煤层	0.003 8 ~ 0.469	0.021 9 ~ 0.077 7	0.006 7 ~ 0.106	0.271 ~ 2.436
	0.080 7/12	0.049 8/4	0.056 4/5	0.847 7/4
II ₃ 煤层	0.000 5 ~ 0.173	0.011 ~ 0.041 4	0.044 6 ~ 0.167	0.403 ~ 0.512
	0.038 2/12	0.023 3/4	0.105 8/5	0.454 2/4

扎赉诺尔煤田发育第 4 系孔隙潜水含水岩组和伊敏组煤系孔隙裂隙水含水岩组,二者之间广泛分布有厚层泥岩,该层泥岩通常能够起到隔水作用,有效阻碍含水层与煤层之间的水力联系,因此,仅考虑煤系自身含水层及其间发育的隔水层。 II_{2-1} 煤层上覆含水层厚度为 1.56~50.30 m,平均为 20.70 m,含水层厚度高值区主要集中在灵东煤矿、铁北煤矿和铁南煤矿; II_{2-1} 煤层上覆隔水层厚度为 5.95~55.1 m,平均为 24.50 m,隔水层厚度大于 30 m 的区域主要集中在灵东煤矿南部、铁南煤矿、铁北煤矿东部与东山煤矿西部(图 6)。 II_3 煤层上覆含水层厚度为 0~34.2 m,平均为 11.11 m,含水层厚度高值区主要集中在灵东煤矿、铁南煤矿; II_3 煤层上覆隔水层厚度为 3.2~42.4 m,平均为 16.52 m,隔水层厚度大于 30 m 的区域主要集中在灵东煤矿、灵泉煤矿、灵露煤矿、铁北煤矿、铁道北勘查区和阿尔公勘查区(图 7)。 II_{2-1} 煤层隔水层与含水层厚度比大于 1.5 的区域集中在灵泉煤矿、东山煤矿、灵东煤矿南部、铁南煤矿东部、铁道北勘查区和阿尔公勘查区西北部(图 8); II_3 煤层隔水层与含水层厚度比大于 1.5 的区域集中在灵东煤矿及其南部、灵露煤矿、铁北煤矿、铁道北勘查区和阿尔公勘查区。整体而言, II_{2-1} 煤层隔水层厚度大于 30 m,

且隔水层与含水层厚度比大于 1.5 的区域主要位于灵东煤矿南部和铁南煤矿东部; II_3 煤层隔水层厚度大于 30 m,且隔水层与含水层厚度比大于 1.5 的区域主要分布在灵东煤矿、灵露煤矿、铁北煤矿、铁道北勘查区和阿尔公勘查区。

3 评价模型构建及有利区优选

UCG 的选址是多层次、多目标的综合评价结果,采用层次分析 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 与模糊数学评价法构建多层次模糊数学模型能够有效应用于 UCG 选址评价中。

3.1 评价参数

如前文所述,煤岩煤质、煤层赋存、构造和水文地质等对 UCG 具有不同程度的影响。结合扎赉诺尔煤田地质条件及煤岩煤质特性,选取煤岩煤质条件 U_1 、煤层赋存条件 U_2 、构造条件 U_3 和水文地质条件 U_4 共 4 个部分作为一级评价指标,并在一级评价指标基础上选取挥发分 U_{11} 、气化活性 U_{12} 、热稳定性 U_{13} 、煤灰热值 U_{14} 、有害元素 U_{15} 、煤厚变异系数 U_{21} 、煤层埋深 U_{22} 、顶板岩性 U_{23} 、顶板厚度 U_{24} 、断层指数 U_{31} 、涌水量 U_{41} 、隔水层厚度 U_{42} 、隔水层与含水层比值 U_{43} 共 13 个因素为二级评价指标,构建该区 UCG

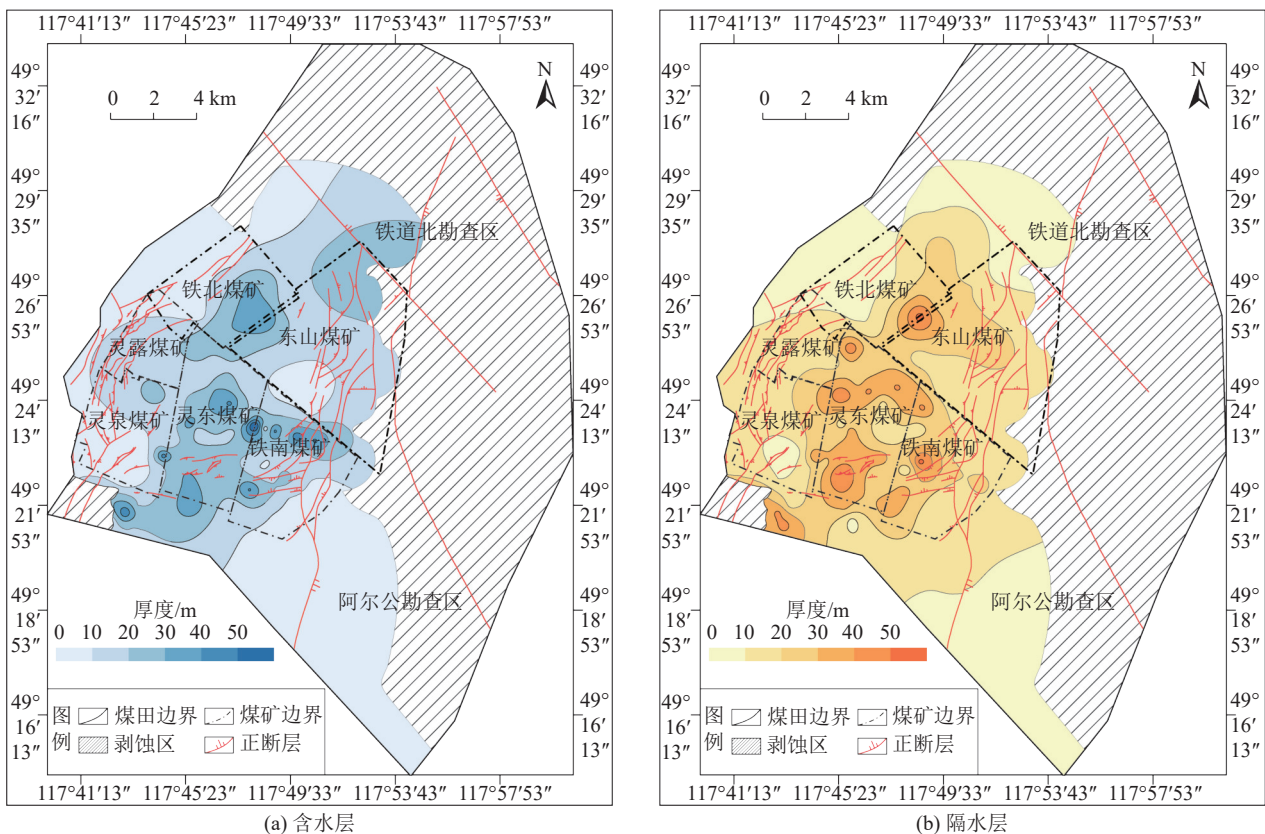


图 6 扎赉诺尔煤田 II_{2-1} 煤层含水层和隔水层厚度等值线

Fig.6 Contour map of the thickness of aquifer and aquicludes of II_{2-1} coal seam in Zhalaizuoer coal field

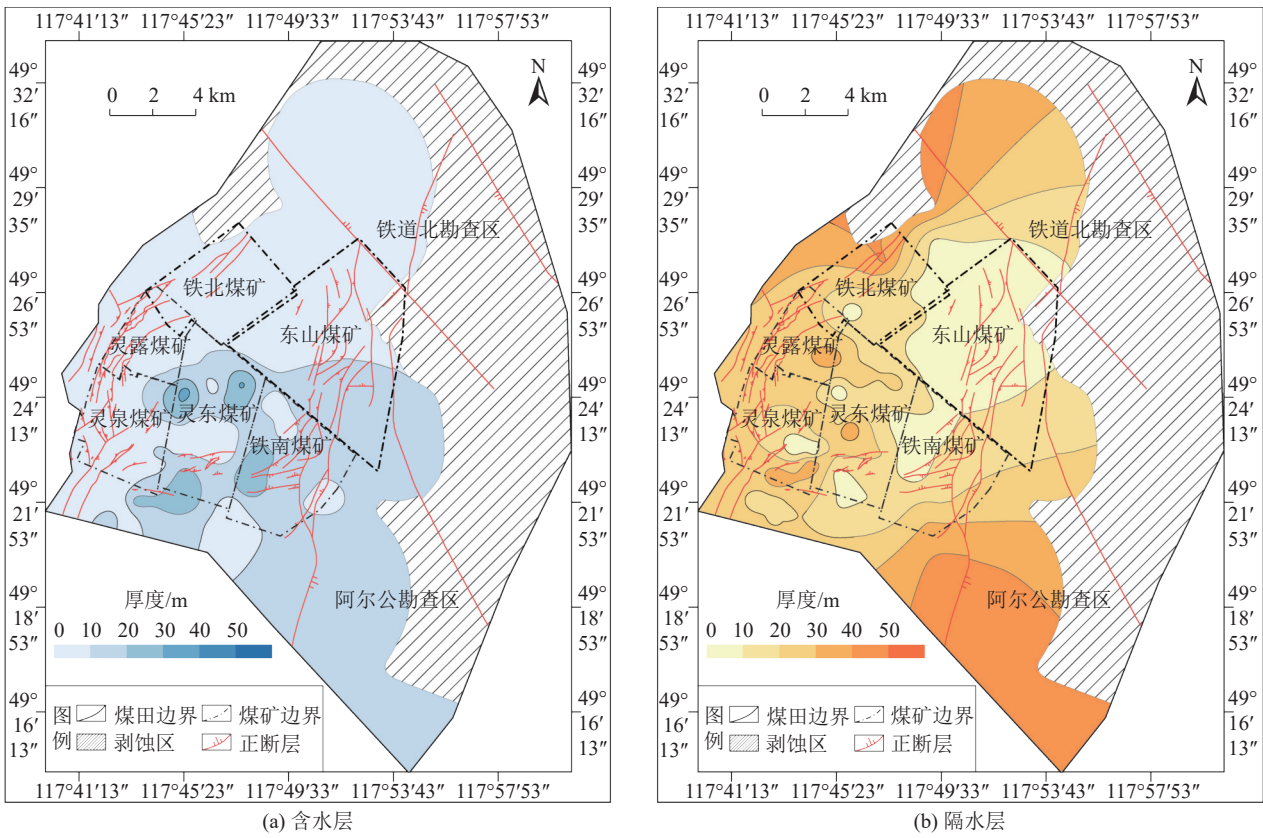


图 7 扎赉诺尔煤田 II₃ 煤层含水层和隔水层厚度等值线

Fig.7 Contour map of the thickness of aquifer and aquicludes of II₃ coal seam in Zhalaينوer coal field

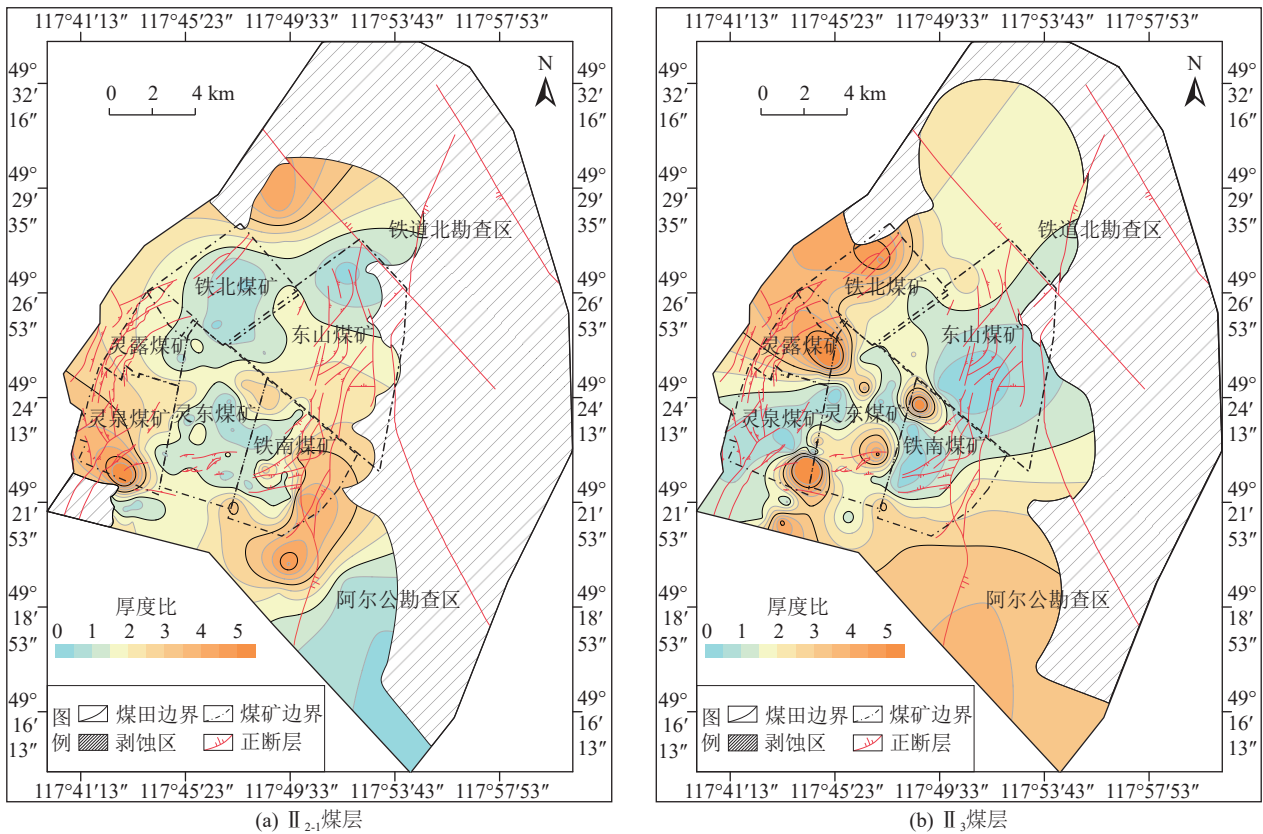


图 8 扎赉诺尔煤田隔水层与含水层厚度比等值线

Fig.8 Contour map of thickness ratio of aquiclude to aquifer of Zhalaينوer coal field

选址评价指标体系。

3.2 权重与隶属度

评价指标权重反映各个指标对 UCG 的重要程度,体现在各个指标在评价体系中的占比。在进行 UCG 选址评价时,需分别计算各级评价指标的权重。根据层次分析法原理,将所构建的 UCG 选址评价体系中第 2 层次的各个评价指标对应第 1 层次准则的重要性进行两两比较,在对同层次评价指标进行比较时,采用数字 0~4 来表示 2 个同层次评价指标间的矩阵系数(表 8),再通过构建各级指标的判别矩阵计算各级指标权重值(表 9)。

UCG 选址评价所选取的各级评价指标依据其性质可分为定性参数和定量指标 2 类。其中顶板岩性二级指标为定性评价指标,其余二级指标为定量评价指标,并结合扎赉诺尔煤田地质条件,将隶属度分为

表 8 判别矩阵系数的意义

Table 8 Scaling of judgment matrix and its meaning

重要性	极重要	很重要	重要	相当	不重要	很不重要	极不重要
比值	4~3	3~2	2~1	1	1~1/2	1/2~1/3	1/3~0

表 9 UCG 评价参数判别矩阵

Table 9 Judgment matrix of underground coal gasification evaluation parameters

评价指标	判别矩阵						权重
	U	U_1	U_2	U_3	U_4	—	—
一级指标	U_1	1.00	0.70	1.19	1.16	—	0.247
	U_2	1.42	1.00	1.28	1.25	—	0.305
	U_3	0.84	0.78	1.00	0.89	—	0.217
	U_4	0.86	0.80	1.12	1.00	—	0.231
煤岩煤质	U_1	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}	U_{15}	—
	U_{11}	1.00	0.54	0.47	0.41	0.48	0.104
	U_{12}	1.86	1.00	0.69	0.54	0.84	0.171
	U_{13}	2.12	1.44	1.00	0.73	1.09	0.226
	U_{14}	2.43	1.86	1.37	1.00	1.27	0.286
U_{15}	2.07	1.19	0.92	0.79	1.00	0.213	
煤层赋存	U_2	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	—	—
	U_{21}	1.00	1.25	1.18	1.25	—	0.290
	U_{22}	0.80	1.00	0.89	0.94	—	0.225
	U_{23}	0.85	1.12	1.00	0.91	—	0.240
U_{24}	0.80	1.06	1.10	1.00	—	0.245	
构造条件	U_3	U_{31}	—	—	—	—	—
	U_{31}	1	—	—	—	—	1
水文地质	U_4	U_{41}	U_{42}	U_{43}	—	—	—
	U_{41}	1.00	0.56	0.61	—	—	0.225
	U_{42}	1.80	1.00	1.11	—	—	0.407
	U_{43}	1.65	0.90	1.00	—	—	0.368

优-中-差 3 类,其隶属度取值分别对应于 0.7~1、0.3~0.7、0~0.3(表 10)。

表 10 UCG 评价参数隶属度

Table 10 Membership degree of UCG evaluation parameters

评价指标	优(0.7~1)	中(0.3~0.7)	差(0~0.3)
挥发分/%	> 37	20~37	< 20
气化活性/%	> 60	30~60	< 30
热稳定性/%	> 80	60~80	< 60
灰分熔点/℃	> 1 250	1 150~1 250	< 1 150
有害元素/%	$S_{td} < 0.5$; $N_{daf} < 1.5$	$0.5 \leq S_{td} \leq 1$; $1.5 \leq N_{daf} \leq 2.5$	$S_{td} > 1$; $N_{daf} > 2.5$
煤厚变异系数/%	< 30	30~50	> 50
煤层埋深/m	100~500	> 500	< 100
顶板岩性	泥岩、 砂质泥岩	粉砂岩、 细砂岩	中砂岩、 粗砂岩
顶板厚度/m	> 5	1~5	< 1
断层指数	< 1	1~3	> 3
单位钻孔涌水量/ ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	< 0.1	0.1~1	> 1
隔水层厚度/m	> 30	20~30	< 20
隔水层与含水层比值	> 1.5	0.67~1.5	< 0.67

3.3 多层次模糊数学模型

通过建立多层次模糊数学评价模型可以定量表征 UCG 可行性指数 ($0 < U < 1$), U 值越大则表明其可行性越高。

$$U(x) = \sum_{i=1}^4 A_i \sum_{i,j} B_i x_{ij} \quad (1)$$

式中: U 为 UCG 可行性指数; A 为一级评价指标权重; B 为各二级评价指标权重; x 为各个评价指标隶属度。

3.4 有利区优选结果

计算 UCG 可行性指数,得到各矿区 UCG 有利区优选结果(表 11): II_{2-1} 煤层 UCG 可行性指数平均值在灵东煤矿最高,其次为铁南煤矿、灵泉煤矿; II_3 煤层 UCG 可行性指数平均值在灵东煤矿最高,其次为灵泉煤矿、灵露煤矿。

基于可行性指数,绘制扎赉诺尔煤田 UCG 有利区分布图(图 9),并划分出 3 类区: I 类有利区 ($U \geq 0.85$)、II 类较有利区 ($0.75 < U < 0.85$)、III 类一般区 ($U \leq 0.75$)。结果显示 II_{2-1} 煤层 I 类有利区主要位于灵东煤矿南部,在灵东煤矿、灵泉煤矿,铁南煤矿有零星分布; II_3 煤层 I 类有利区主要位于灵东煤矿、灵东煤矿南部与灵泉煤矿南部,在灵露煤矿、铁北煤矿少量分布。通过对比 I 类有利区分布情况,在灵东煤矿南部

表 11 扎赉诺尔煤田 UCG 可行性指数
Table 11 Feasibility index of UCG in Zhalaينوer coal field

可行性指数	灵东煤矿	灵泉煤矿	灵露煤矿	铁北煤矿	铁南煤矿	东山煤矿
II ₂₋₁ 煤层	0.73~0.91 0.83/77	0.64~0.85 0.78/27	0.72~0.80 0.76/10	0.66~0.83 0.76/28	0.72~0.86 0.80/63	0.73~0.82 0.77/7
II ₃ 煤层	0.77~0.94 0.86/75	0.78~0.93 0.84/37	0.78~0.90 0.83/14	0.72~0.88 0.80/19	0.70~0.87 0.80/59	0.65~0.77 0.74/6

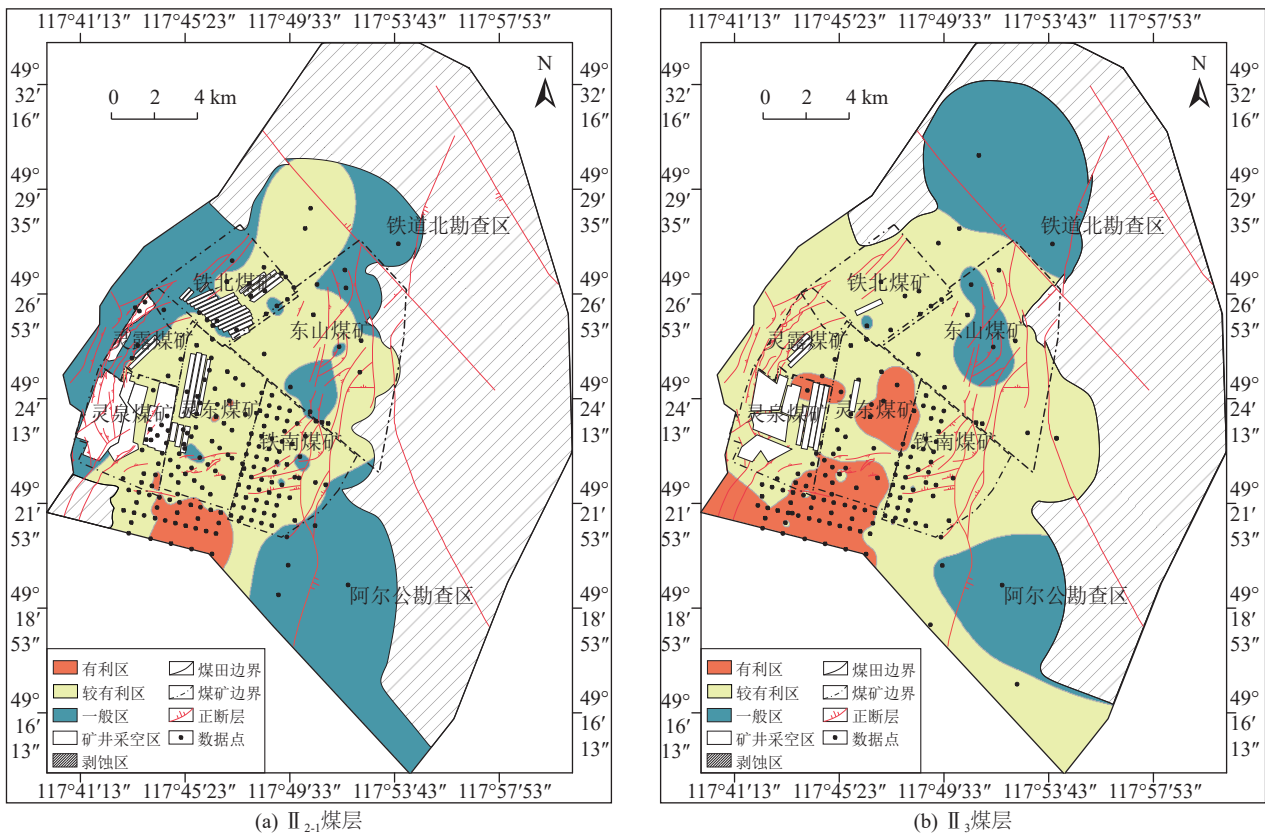


图 9 扎赉诺尔煤田 UCG 评价结果

Fig.9 Evaluation results of coal underground gasification in Zhalaينوer coal field

II₂₋₁ 和 II₃ 煤层均适合开展 UCG 项目, 且 II₃ 煤层更具潜力。

4 结 论

1) 扎赉诺尔煤田 II₂₋₁ 和 II₃ 煤均为褐煤, 以中等全水分、低灰分、高挥发分煤为主, 煤的发热量、气化活性等条件较为优越, 煤层埋深、厚度较为稳定, 构造和水文地质条件简单, 综合分析认为扎赉诺尔煤田适合开展 UCG 项目。

2) 采用 AHP 法和模糊数学评价法, 选取煤岩煤质条件、煤层赋存条件、构造条件、水文地质条件 4 个部分作为一级评价指标, 并在一级评价指标基础上选取 13 个因素为二级评价指标, 构建了适用于扎赉诺尔煤田 UCG 选址评价的多层次模糊数学模型。

3) II₂₋₁ 煤层 UCG I 类有利区主要位于灵东煤矿的南部, 在灵东煤矿、灵泉煤矿和铁南煤矿有零星分

布; II₃ 煤层 UCG I 类有利区主要位于灵东煤矿、灵东煤矿南部与灵泉煤矿南部, 在灵露煤矿、铁北煤矿有少量分布。通过对比 I 类有利区分布特征, 在灵东煤矿南部 II₂₋₁ 和 II₃ 煤层均适合开展 UCG 项目, 且 II₃ 煤层更具潜力。

参考文献(References):

[1] 葛世荣. 深部煤炭化学开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 679-691.
GE Shirong. Chemical mining technology for deep coal resources[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 679-691.

[2] 孔令峰, 张军贤, 李华启, 等. 我国中深层煤炭地下气化商业化路径[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 156-165.
KONG Lingfeng, ZHANG Junxian, LI Huaqi, et al. Commercialization path of medium-deep underground coal gasification in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 156-165.

- [3] 秦勇, 易同生, 周永锋, 等. 煤炭地下气化碳减排技术研究进展与未来探索[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 495-512.
QIN Yong, YI Tongsheng, ZHOU Yongfeng, et al. Research progress and future study of carbon emission reduction for UCG[J]. Journal of China Coal Society, 2024; 1-18.
- [4] 许浩, 陈艳鹏, 辛福东, 等. 煤炭地下气化面临的挑战与技术对策[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 265-274.
XU Hao, CHEN Yanpeng, XIN Fudong, et al. Challenges faced by underground coal gasification and technical countermeasures[J]. 2022, 50(1): 265-274.
- [5] 邹才能, 陈艳鹏, 孔令峰, 等. 煤炭地下气化及对中国天然气发展的战略意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 195-204.
ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 195-204.
- [6] 秦勇, 王作棠, 韩磊. 煤炭地下气化中的地质问题[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2516-2530.
QIN Yong, WANG Zuotang, HAN Lei. Geological problems in underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2516-2530.
- [7] 刘建海, 吴蒙, 王思云, 等. 煤炭地下气化影响因素研究进展[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(9): 155-158.
LIU Jianhai, WU Meng, WANG Siyun, et al. Progress in research on coal underground gasification impacting factors[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(9): 155-158.
- [8] 吴财芳, 蒋秀明. 煤炭地下气化过程中温度场及其传热特征研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 275-285.
WU Caifang, JIANG Xiuming. Research progress of temperature field and heat transfer characteristics in process of underground coal gasification[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 275-285.
- [9] HUANG W G, ZHANG S W, WANG G Z, et al. Modeling methodology for site selection evaluation of underground coal gasification based on combination weighting method with game theory[J]. ACS Omega, 2023(12): 11544-11555.
- [10] 傅振斌. 基于 LM-BP 神经网络的煤炭地下气化选址决策探讨[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
FU Zhenbin. Study on location decision of ucg based on LM-BP neural network[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [11] 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 Wengang, WANG Zuotang. 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.
- [12] 尹振勇, 许浩, 汤达祯, 等. 准东地区煤炭气化地质评价与有利区预测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3845-3851.
YIN Zhenyong, XU Hao, TANG Dazhen, et al. Geological evaluation for underground coal gasification and favorable area optimization in eastern Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3845-3851.
- [13] 郭彪, 邵龙义, 马施民, 等. 扎赉诺尔凹陷下白垩统含煤岩系层序-古地理与聚煤规律研究[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(3): 6-11.
GUO Biao, SHAO Longyi, MA Shimin, et al. Lower cretaceous coal-bearing strata sequence-paleogeography and coal accumulation pattern in jalai nur depression[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(3): 6-11.
- [14] 刘淑琴, 梁杰, 余学东, 等. 不同煤种地下气化特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(6): 624-628.
LIU Shuqin, LIANG Jie, YU Xuedong, et al. Characteristics of underground gasification of different kinds of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(6): 624-628.
- [15] 单佩金, 梁杰, 王皓正, 等. 不同体积分数氧气体化剂下煤炭地下气化过程焓分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2673-2680.
SHAN Peijin, LIANG Jie, WANG Haozheng, et al. Exergy analysis of underground coal gasification with different oxygen concentrations[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2673-2680.
- [16] 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 Lei, Qin Yong, WANG Zuotang. Geological consideration for site selection of underground coal gasifier[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 44-50.
- [17] BIELOWICZ B, KASIŃSKI J R. The possibility of underground gasification of lignite from Polish deposits[J]. International Journal of Coal Geology, 2014(131): 304-318.
- [18] 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 He, WU Caifang, JIANG Xiuming, 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.
- [19] 王志刚, 付小锦, 梁杰, 等. 天津静海含煤区无井式煤炭地下气化选址地质评价模型[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3): 41-48.
WANG Zhigang, FU Xiaojin, LIANG Jie, et al. Geological evaluation model for site selection of underground coal gasification without well in Jinghai coal-bearing area, Tianjin, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3): 41-48.
- [20] 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 Shuqin, SHI Suzhen, FENG Guoxu, et al. Geological site selection and evaluation for underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2531-2538.
- [21] 易同生, 秦勇, 周永峰, 等. 煤炭地下气化项目技术经济评价研究进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 1-16.
YI Tongsheng, QIN Yong, ZHOU Yongfeng, et al. Research advances on the techno-economic evaluation of UCG projects[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 1-16.
- [22] 秦勇, 易同生, 汪凌霞, 等. 面向项目风险控制的煤炭地下气化地质条件分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 290-306.
QIN Yong, YI Tongsheng, WANG Lingxia, et al. Analysis of geological conditions for risk control of UCG project[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 290-306.
- [23] 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 Shuqin, DONG guiming, YANG guoyong, et al. Numerical

- simulation of phenol migration for underground coal gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 796–801.
- [24] 马伟平, 梅霞, 李真, 等. 煤炭地下气化残渣中微量元素的环境风险评估[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3670–3681.
- MA weiping, MEI xia, LI zhen, et al. Environmental risk assessment of trace elements in the underground coal gasification residues[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3670–3681.
- [25] PERKINS G, SAHAJWALLA V. Modelling of heat and mass transport phenomena and chemical reaction in underground coal gasification[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, 85(3): 329–343.
- [26] 谌伦建, 徐冰, 叶云娜, 等. 煤炭地下气化过程中有机污染物的形成[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 150–156.
- CHEN lunjian, XU bing, YE yunna, et al. Formation of organic contaminants during underground coal gasification[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(1): 150–156.
- [27] 柳迎红, 梁新星, 梁杰, 等. 影响煤炭地下气化稳定性生产因素[J]. *煤炭科学技术*, 2006, 34(11): 79–82.
- LIU Yinghong, LIANG Xinxing, LIANG Jie, et al. Factors influenced to stability of coal underground gasification[J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(11): 79–82.
- [28] 杨兰和. 煤炭地下气化“三带”特征及影响变量的研究[J]. *南京理工大学学报: 自然科学版*, 2001(5): 533–537.
- YANG Lanhe. Characteristics of “three zones” in underground coal gasification and its study of influence variables[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 2001(5): 533–537.
- [29] 刘曰武, 刘畅, 丁玖阁. 钻井式煤炭地下气化技术的发展及关键力学问题[J]. *力学与实践*, 2021, 43(1): 1–12.
- LIU Yuewu, LIU Chang, DING Jiuge. Development history and key mechanical problems of well drilling underground coal gasification technology[J]. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(1): 1–12.
- [30] 陆银龙, 王连国, 唐芙蓉, 等. 煤炭地下气化过程中温度-应力耦合作用下燃空区覆岩裂隙演化规律[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(8): 1292–1298.
- LU Yinlong, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Fracture evolution of overlying strata over combustion cavity under thermal mechanical interaction during underground coal gasification[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(8): 1292–1298.
- [31] SHAHBAZI M. A thermo-mechanical simulation for the stability analysis of a horizontal wellbore in underground coal gasification[J]. *Petroleum*, 2023.
- [32] RAFIEE R, AZARFAR A, NAJAFI M, et al. Z-number-based selection of suitable underground coal gasification site considering information reliability[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020: 1–21.
- [33] 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, 3(3): 1–11.
- ZHAO Yue, HUANG Wengang, XU Qiang, 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, 3(3): 1–11.
- [34] 黄温钢. 残留煤地下气化综合评价与稳定生产技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- HUANG Wengang. Study on comprehensive evaluation and stable production technology for underground gasification of residual coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [35] PERKINS G. Underground coal gasification-part i: field demonstrations and process performance[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018(67): 158–187.
- [36] 庞旭林, 陈峰, 潘霞, 等. 涌水条件下富氧煤炭地下气化温度场扩展的模型试验[J]. *煤炭学报*, 2011(S1): 151–155.
- PANG Xulin, CHEN Feng, PAN Xia, et al. Model test research on the temperature field of underground coal gasification with water influx and oxygen-enriched[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011(S1): 151–155.
- [37] 姚凯, 刘洪涛, 潘霞, 等. 涌入水对煤炭地下气化影响的模型实验研究[J]. *煤炭转化*, 2011, 34(3): 27–30.
- YAO Kai, LIU Hongtao, PAN Xia, et al. Model test on water inflow of underground coal gasification (UCG)[J]. *Coal Conversion*, 2011, 34(3): 27–30.
- [38] 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治[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(5): 23–27.
- LIU Shuqin, ZHOU Rong, PAN Jia, et al. Location selection and groundwater pollution prevention & control regarding underground coal gasification[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(5): 23–27.
- [39] 张金华, 陈艳鹏, 张梦媛, 等. 水文地质条件与煤炭地下气化的相互影响[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(12): 150–154.
- ZHANG Jinhua, CHEN Yanpeng, ZHANG Mengyuan, et al. Interaction between hydrogeological conditions and underground coal gasification[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(12): 150–154.