

贵州无井式 UCG 选址选层“四性”地质评价模式与资源类型划分

周 泽^{1,2,4}, 易同生^{1,4}, 秦 勇^{2,3}, 周永峰², 杨 磊², 汪凌霞^{1,4}

(1. 贵州省煤田地质局, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州优驰能源科技有限责任公司, 贵州 贵阳 550014; 3. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116; 4. 贵州省煤炭流态化开采重点实验室, 贵州 贵阳 550014)

摘 要: 为建立科学系统的“地质-工程”一体化地质风险评估模式, 解决煤炭地下气化 (UCG) 选址选层难题, 提出了一种以“建炉可行性、过程易控性、气化安全性、开发经济性”四性认识为基础, 利用 FAHP 模糊层次分析法创建的包括 4 项一级指标、10 项 2 级指标、26 项 3 级关键地质参数的地质评价要素层次结构模型。该模型引入“阈值”概念, 对断层指数、奥亚膨胀度、黏结指数、上覆含水层距离 4 项指标的超“阈值”情况实施“一票否决”, 充分重视特定地质参数对 UCG 控制的关键作用; 通过“两两判断矩阵”确定各指标权重向量, 根据隶属函数厘定指标层隶属度; 并提出了相应地质评价技术方法, 配套建立了权重积、综合权重积以及最优 3 段分割等算法, 将所涉及指标量化分析, 精准判断资源类型与级别; 同时基于矩阵结构混合编码方式, 提出了“四性四级”五位编码的 UCG 资源类型表征系统。最终形成了以“四性”理论为基础, “算法”为骨架, “四性四级”五位编码为灵魂的科学化、系统化 UCG 选址选层地质评价体系。该评价体系可在多场耦合的 UCG 生产过程相关风险识别机制的前沿探索方面发挥关键作用, 有效改善现有 UCG 风险识别理论局限于地质单方面, 缺乏工程联系的问题, 实现大区域的 UCG 量化选址选层, 为省级乃至国家级煤炭地下气化战略规划提供解决途径, 从而提出可供分步实施的典型地质条件先导性试验区建议, 推动煤炭地下气化产业化进程。

关键词: 煤炭地下气化; 地质评价; 资源分类; 层次结构模型

中图分类号: TD84 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2414-12

“Four properties” geological evaluation model and resource type classification of non-well type UCG site and layer selection in Guizhou Province

ZHOU Ze^{1,2,4}, YI Tongsheng^{1,4}, QIN Yong^{2,3}, ZHOU Yongfeng², YANG Lei², WANG Lingxia^{1,4}

(1. Coal Geology Bureau of Guizhou, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Youchi Energy Technology Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 3. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Guizhou Provincial Key Laboratory of Coal Fluidized Mining, Guiyang 550014, China)

Abstract: In order to establish a scientific and systematic “geology-engineering” integrated geological risk assessment model, so as to solve the problem in the site and layer selection of underground coal gasification (UCG) project, a new hierarchical structure model of geological evaluation elements including 4 first-level indicators, 10 second-level indicators

收稿日期: 2023-11-30 修回日期: 2024-04-02 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1634

基金项目: 贵州省科技重大专项资助项目 (黔科合成果[2022]重点 001 号, 黔科合重大专项字[2021]3002)

作者简介: 周 泽 (1990—), 男, 江西南昌人, 高级工程师, 硕士。E-mail: zhouze565105610@163.com

通讯作者: 易同生 (1964—), 男, 贵州遵义人, 教授级高级工程师。E-mail: gzsmtzys@vip.163.com

引用格式: 周泽, 易同生, 秦勇, 等. 贵州无井式 UCG 选址选层“四性”地质评价模式与资源类型划分[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2414-2425.

ZHOU Ze, YI Tongsheng, QIN Yong, et al. “Four properties” geological evaluation model and resource type classification of non-well type UCG site and layer selection in Guizhou Province[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2414-2425.



移动阅读

and 26 third-level key geological parameters is established using the FAHP fuzzy analytic hierarchy process based on the four characteristics of 'feasibility of furnace construction, easy control of process, safety of gasification and economy of development'. The model introduces the concept of "threshold", and implements "one-vote veto" when exceeding the thresholds of the four indicators including fault index, Oya expansion degree, bond index and distance of overlying aquifer, and pays full attention to the key role of specific geological parameters in the UCG control. The weight vector of each index is determined by "pairwise judgment matrix". According to the membership function, the membership degree of the index layer is determined. The corresponding geological evaluation techniques and methods are put forward, and the algorithms of weight product, comprehensive weight product sum and optimal three-segment segmentation are established, so as to quantitatively analyze the indicators involved and accurately assess the type and level of resources. In addition, based on the mixed coding method of matrix structure, a UCG resource type representation system of "four properties and four levels" five-bit coding is proposed. Finally, a scientific and systematic geological evaluation system of UCG site and layer selection is formed, which is based on the understanding of "four properties", "algorithm" as the skeleton, and "four properties and four levels" five codes as the soul. This evaluation system can play a key role in the frontier exploration of risk identification mechanism related to UCG production process with multi-field coupling. It can effectively overcome the problem that the existing UCG risk identification theory is limited to geological unilateral and lacks engineering connection. In order to realize the UCG quantitative site and layer selection in a large area, it provides an efficient solution for the strategic planning of underground coal gasification at the provincial and even national levels. The study puts forward the suggestions for the pilot test area of typical geological conditions that can be implemented step by step, and effectively promote the industrialization process of underground coal gasification.

Key words: underground coal gasification; geological evaluation; resource classification; hierarchical structure model

国家“双碳”战略实施为煤炭行业升级高技术产业提供了战略机遇^[1]。“碳中和、碳达峰”目标背景下,煤炭地下气化技术发展已纳入中央和贵州省委省政府各项规划部署中。2022年1月国务院发布《关于进一步促进贵州经济社会又好又快发展的若干意见》(国发〔2022〕2号)^[2],提出积极推进低碳循环发展。巩固森林生态系统碳汇能力,发挥森林固碳效益。探索实施碳捕获、利用与封存(CCUS)示范工程,有序开展煤炭地下气化、规模化碳捕获利用和岩溶地质碳捕获封存等试点。2022年3月,国家发布《“十四五”现代能源体系规划》^[3],分析了国内外能源发展趋势,强调加强能源安全战略技术储备,做好煤制油气战略基地规划布局 and 管控,建立产能和技术储备。

面向“双碳”目标及富煤缺油少气的能源结构,贵州省近年来积极推动 UCG 技术产业化。2022年5月,贵州省发布《贵州省能源科技创新发展“十四五”规划》^[4]。首次将煤炭地下气化技术研发列入全省能源规划重点。面对这一历史性难题,贵州省科学技术厅以建立无井式 UCG 全链条现场先导性试验技术为总目标,设置集资源评价、关键技术与装备、产品发电利用与分布式电网多个重大科技专项。UCG 资源评价作为产业发展突破口,地质认识和选址选层评价技术是关键。

1933年3月,全球首次 UCG 先导性试验在前苏

联 Krutovskoe 煤矿启动,尽管未能取得成功,但开创了 UCG 产业化尝试的先河^[5]。然而,UCG 现场试验历经 90 余年,除前苏联曾经商业化生产之外,其他国家和地区迄今仍未形成产业化推广^[6-9],关键是煤矿床地质条件限制了 UCG 技术的广泛应用^[10]。UCG 炉载体作为地质体,开展选址评价,实质上是面向工程的地质风险分析^[11]。或者说,煤矿床地质禀赋约束了特定地下气化项目的可行性,推进 UCG 产业化必须跨越地质风险瓶颈,确保 UCG 炉运行安全可控,具有规模性持续转化煤炭的能力、较高的合成气质量和产能及环境承载力^[12]。

然而,国内先前多数 UCG 地质评价或局限于单因素对 UCG 可行性的分析,或陷入复杂数学模型设计,面向项目风险控制的针对性较弱,几乎没有考虑参数指标“阈值”,将某些明显具有“一票否决”的阈值指标也“模糊”地参与评价,既不甚客观,现场应用也极不方便。国外 UCG 地质评价多采用列表式定性分析,或将地质条件隐含在传热传质模型中开展综合数值模拟,缺乏分层次、分目标的定量评价^[13]。鉴于此,笔者基于研究团队前期“四性”认识: UCG “地质风险”涉及炉体建造、气化过程稳定控制、生产与环境安全以及可能导致经济损失的其他风险,UCG 地质评价应围绕“建炉可行性、过程易控性、气化安全性、开发经济性”四性展开^[13]。鉴于有井式煤炭地下气化

必须利用现有的矿井系统进行气化,地质评价一般局限于气化炉施工区的局部地质条件分析。本次研究结合贵州构造复杂,煤层多、薄的地质条件,构建了一套面向工程的大区域无井式 UCG 选址选层地质风险评估模式,将地质评价与工程可行性密切结合,力求 UCG 地质-工程一体化,为贵州乃至全国相似地质条件的区域提供选址“标准”,持续推动煤炭地下气化产业化发展。

1 UCG 地质评价要素层次结构模型

1.1 “四性”认识

UCG 项目第 1 个步骤是构建地下气化炉,接着点火生产并按设计要求保证气化稳定运行、生产与环

境安全可控以及避免可能导致的经济损失。整个过程中,均需要地质保障。也就是说,针对性的 UCG 地质评价模式应围绕建炉可行性、过程易控性、气化安全性、开发经济性 4 个方面展开,否则就可能局限于煤矿床地质分析,使得地质研究失去针对性^[13]。

建炉可行性即气化炉(水平井)在目的煤层中高质量成井能力,取决于井壁稳定性和井眼轨迹可控性两个方面^[13],前者关键地质因素是煤体结构或煤层强度^[14],在焦作矿区恩村井田,Ⅲ-Ⅳ类煤分层占比增加,直井平均井径随之增大,说明在钻进参数基本相同的前提下,Ⅲ-Ⅳ类煤是引起井径扩大的重要因素(图 1)^[15],煤体结构采用坚固性系数参数表征,可综合且简便地表达影响井壁稳定性的地质因素;后者主要受控于煤层厚度及其稳定性^[16],而煤层稳定性与工作面推进关系更为密切。

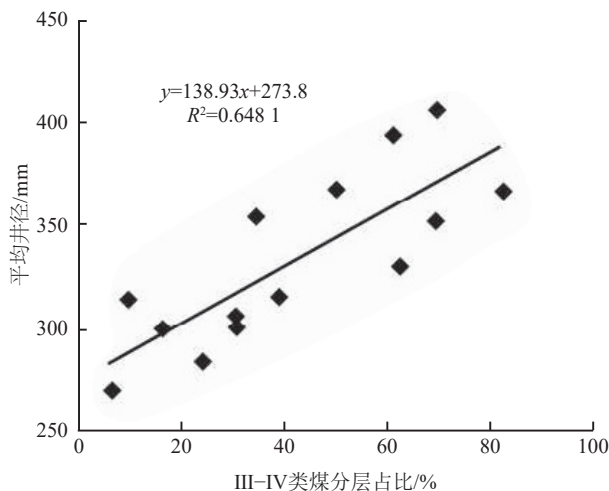


图 1 恩村井田平均井径与Ⅲ-Ⅳ类煤分层占比关系^[15]

Fig.1 Relationship between the average well diameter and the proportion of III-IV coal layers in Encun mine field^[15]

UCG 的功能,是将富含固体碳的煤层在地下原位

转化为合成气,并通过炉内渗流和生产管道输送至地表^[17],意味着过程易控性地质评价应聚焦于工作面推进易控性、层内通道易控性两个目标^[13]。UCG 工作面推进即 UCG 腔体的顺层扩展,扩展范围取决于诸多因素,如注氧速率、煤层倾角、煤质、煤层侧向连续性、可接受的合成气质量下限、工作压力、岩层和灰层渗透率等,服从于煤层传热传质的基本规律^[18]。贵州省龙潭组尽管薄煤层较多,但总体较好,影响工作面推进易控性因素主要是厚度的变化程度,可采用“变异系数”定量刻画;产状稳定性受局部或微(小)构造控制,“褶曲指数”等参数可定量描述这一特点。同时,煤层泥质夹矸可能误导随钻导向而降低钻遇率,气化过程中也易导致炉火熄灭,过程易控性地质评价有必要考虑这一因素。就地质因素而言,具体涉及煤层倾角、煤厚变异系数、与传热传质密切相关的煤层结构(含矸性)、微构造(褶曲幅度、小断层)等^[19-20]。UCG 通道的畅通与否取决于气化煤层本身、煤层外部因素、前 2 者因素耦合 3 个方面,从 UCG 选区选址地质评价来看,最重要的地质因素是煤层深度、煤层膨胀收缩性和热稳定性^[13];在当前工艺技术水平下,UCG 可行性随煤层埋深增大显著降低^[21],高热熔融膨胀性煤层严重危害 UCG 气化通道畅通程度^[22];煤灰熔点对气化通道影响存在正反两方面效应,对 UCG 炉空腔来说,低灰熔点可保障堆积层(以灰烬、炉渣和焦炭碎屑为主)形成稳固充填床^[23],传质总速率又会受到熔融灰层的限制^[24];高热稳定性煤层 UCG 气化通道畅通的可能性高。

气化安全性主要取决于地下气化炉密封性和稳定性,控制因素包括静态和动态地质条件,影响对象包括 UCG 生产安全和环境安全^[25-26]。就 UCG 生产安全地质影响因素来看,含水层钻孔单位涌水量过大会给 UCG 安全生产造成隐患^[27],气化煤层上覆足够厚度隔水层是保障 UCG 生产安全的关键,断距达到煤层厚度的一定比例将会导致 UCG 生产中断事故^[5],气化煤层上覆岩层稳定性是保障 UCG 生产安全的另一关键。广义而言,UCG 环境安全包括对地质环境、气体处理过程中水污染、钻井作业过程污染 3 个方面^[28],如果不考虑地面处理和钻井作用,UCG 环境安全主要涉及合成产物污染物泄露和燃空区地表沉降 2 个方面^[13]。但是,全球多数 UCG 先导试验项目监测数据显示,UCG 诱导的地面沉降并不显著^[13]。为此,本次研究 UCG 环境安全评价结合贵州龙潭组煤质实际情况,结合可以获得的勘查资料,主要关注煤中硫和主要有害微量元素的燃烧迁移行为和污染潜势。

开发经济性受包括上述 3 个评价分目标在内的全过程地质条件及工艺技术影响,涉及气化有效性、合成气质量、资源可靠性 3 个方面^[13]。气化有效性主要涉及煤对 CO₂ 反应性,与煤阶密切相关而信息覆盖范围更大^[29],是气化有效性地质评价的重点关注对象。合成气质量表现为有效成分浓度高低,可采用原煤热值(发热量)作为衡量 UCG 合成气质量的煤质因素^[13]。在 UCG 地质评价阶段,从煤炭资源可靠性角度评价 UCG 总体经济性,具体应该考察煤田地质勘查程度和原始煤炭资源储量两个地质参数^[13]。同时,煤层气吸附-解吸性对温度极其敏感,UCG 炉辐射热对其影响

范围内煤层气解吸的促进作用^[30],贵州省龙潭组煤层多、间距小且含气量高,相邻煤层构成煤组,具备利用 UCG 扩散热开展煤炭地下气化与煤层气提效联采(UCG-ECBM)的地质条件。

1.2 地质评价要素层次结构模型建立

结合上述“四性”认识,针对贵州省龙潭组煤层多且厚煤层较少、构造发育、煤体结构复杂、煤阶跨度大、全硫质量分数总体较高、煤系上覆长兴组含水层发育等 UCG 地质条件,结合模糊层次分析法(FAHP)建立了贵州省 UCG 地质评价要素多层次结构模型(表 1)。

表 1 贵州省 UCG 地质评价要素层次结构模型

Table 1 Hierarchical structure model of UCG geological evaluation elements in Guizhou Province

目标层		参数层					指标层			
		一级(分目标)		二级(目标控制)		三级(地质参数)		分级赋值和隶属度 X_i		
		参数	权重	参数	权重	参数	顶层权重 W_{ij}	3(好)	2(中等)	1(差)
贵州省煤炭 地下气化资源评价 及有利区优选	建炉可行性 A01	0.332 0	井壁稳定性B01	0.249 0	煤的坚固性系数C01	0.249 0	> 1.5	0.8~1.5	< 0.8	
			轨迹可控性B02	0.083 0	煤层厚度(m)C02	0.083 0	> 2.0	2.0~1.3	< 1.3	
	过程易控性 A02	0.415 1	气化工作面 推进B03	0.138 4	煤层倾角(°)C03	0.006 7	25~65	< 25	> 65	
					煤厚变异系数(%)C04	0.074 3	< 25	25~40	> 40	
					夹矸厚度系数C05	0.012 9	< 0.15	0.15~0.30	> 0.30	
					褶曲指数C06	0.014 4	< 0.5	0.5~1.0	> 1.0	
					断层指数(m/km ²)C07	0.030 2	< 500	500~1 000	> 1 000 (一票否决)	
					煤层埋深(m)C08	0.033 5	< 600	600~1 000	> 1 000 > 220 (一票否决)	
					奥亚膨胀度(%)C09	0.114 1	< 150	150~220	> 80 (一票否决)	
			气化通道连 通性B04	0.276 7	黏结指数C10	0.059 2	< 50	50~80	(一票否决)	
			煤灰熔点(°C)C11		0.025 1	> 1 250	1 250~1 000	< 1 000		
			煤热稳定性(%)C12		0.044 9	> 80	80~60	< 60		
			含水层钻孔单位 涌水量(L/(s·m))C13		0.003 4	< 0.1	0.1~1.0	> 1.0		
			生产安全B05		0.049 4	上覆含水层距离(m)C14	0.019 8	> 50	50~30	< 30 (一票否决)
	断距(m)C15	0.017 7	< 0.5	0.5~1.0		> 1.0				
	气化安全性 A03	0.148 3			直接顶稳定性C16	0.008 5	灰岩	砂岩	泥岩	
					煤层全硫质量分数(%)C17	0.057 6	< 1.0	1.0~2.0	> 3.0	
					磷质量分数(μg/g)C18	0.006 7	< 0.01	0.01~0.10	> 0.10	
					氟质量分数(μg/g)C19	0.006 7	< 130	130~200	> 200	
			环境安全B06	0.098 9	砷质量分数(μg/g)C20	0.027 9	< 25	25~80	> 80	
					煤对CO ₂ 反应性(%)C21	0.041 6	> 80	80~60	< 60	
					灰分干燥基质量分数(%)C22	0.013 9	< 20	20~30	> 30	
					高位发热量(MJ/kg)C23	0.031 4	> 27	27~21	< 21	
	开发经济性 A04	0.104 6	合成气质量B08	0.031 4	勘查程度C24	0.003 8	详+勘	普+预	预测	
资源可靠性B9			0.011 4	原始资源量(Mt)C25	0.007 6	> 1.2	1.2~0.8	< 0.8		
煤气联采B10			0.006 4	上覆50 m范围煤层累厚(m)C26	0.006 4	> 10	10~5	< 5		

模型的参数层分为 3 个亚层,建立了 UCG 地质评价目标与具体地质参数之间有机关联。第 1 亚层针对评价总目标设置 4 个分目标参数层,进一步细化分目标形成第 2 亚层,然后通过第 3 亚层 26 项具体地质参数逐级与评价目标相互关联。其中,建炉可行性是实现 UCG 项目预期总目标的首要基础,过程易控性为实现 UCG 过程的必由途径,气化安全性是任何工业活动对项目实施的基本要求,开发经济性则是 UCG 活动的根本目的。前 2 个亚层元素尽管不属于地质参数,但强化了地质评价对工程目标的指向性与层次性,强调评价工作服务于 UCG 产业发展需求,并非单纯评价。同时,基于“以地质控制为主、工程控制为辅、地质控制服务于工程控制”评价思路,第 3 亚层强调主控地质因素,突出 UCG 地质保障的重点并与贵州省 UCG 特殊地质条件特点密切结合,最大限度降低将来 UCG 活动的地质风险。

地质参数指标分级参考依据来自 3 类情况:有规范标准的地质参数,尽可能参考其分级方案;无规范标准的地质参数,尽可能参考国内外研究成果或建议的分级方案;无规范标准且无现成建议可供参考的地质参数,按照煤田勘查的一般方法进行二次计算。

第 1 类情况,多数参数的指标分级范围参考国内煤田勘探相关规范标准,共计 16 个,包括煤的坚固性系数、煤层厚度^[31]、煤层倾角、奥亚膨胀度、黏结指数、灰熔点、热稳定性、钻孔单位涌水量、煤层全硫质量分数、磷质量分数、煤中氟质量分数、砷质量分数^[32]、煤对 CO₂ 反应性、煤的灰分干燥基质量分数、高位发热量和煤田勘查程度。由于气化炉运行过程中奥亚膨胀度、黏结指数过大时将极大可能堵塞气化炉,评价体系中作为一票否决指标,“阈值”参考了中国煤炭分类规范^[33]。

第 2 类情况,5 个地质参数的分级指标主要参考国内外 UCG 研究与工程实践^[5-9],包括煤层埋深、气化煤层上覆含水层距离、断距、气化煤层上覆岩层稳定性、气化煤层上覆 50 m 范围煤层累计厚度。其中,为有效规避气化炉中有害物质可能导致的含水层污染,结合贵州煤系地质条件实际,将气化煤层与上覆含水层距离 < 30 m 时一票否决;同时考虑到现有工艺水平,UCG 现场试验大都局限于 500 m 以浅^[6],将深度 > 1 000 m 的煤层定义为“差”等级(隶属度为 1),但不代表大埋深煤层不具有 UCG 前景,只是现阶段深部 UCG 工艺技术瓶颈有待突破,丰富的深部煤炭资源 UCG 产业化具有远大前景。

第 3 类情况,基于煤田勘查原始资料,计算求得的二次地质参数 5 个,包括煤层厚度变异系数、煤层

夹矸厚度系数、褶曲指数、断层指数和建炉所需最低原始煤炭资源量。计算方法分别为

$$C04 = 100\% \times s/X_m \quad (1)$$

$$C05 = h_d/H_m \quad (2)$$

$$C06 = V/W \quad (3)$$

$$C07 = \sum L/S \quad (4)$$

$$C25 = M_d t/\alpha \quad (5)$$

式中, s 为煤层厚度变异标准差; X_m 为煤层平均厚度, m; h_d 为煤层夹矸累计厚度, m; H_m 为煤层总厚度, m; V 为褶曲高度, m; W 为褶曲宽度, m; 褶曲指数 $C06=0.2\sim0.5$ 代表缓波状褶曲, $C06=0.6\sim1.0$ 代表较紧密褶曲, $C06>1.0$ 代表紧密褶曲; $\sum L$ 为断层累计长度, m; S 为勘查区面积, km²; M_d 为日消耗煤量, t; t 为气化时间, d; α 为煤量回收率校正因子。

其中断层指数对煤层的连续性及气化炉的构建可行性影响极大,也是作为一票否决指标,其“阈值”参考复杂构造程度级别的相应指数。

1.3 结构模型的特色

(1) 结合建炉可行性、生产易控性,三级参数舍去了可被替代地质因素,采用信息量大且指向性明确的主因素建立评价要素模型。单项地质因素往往对 UCG 行为具有多重影响,导致地质因素与 UCG 地质评价分控目标并非简单的一一对应。同时,各种地质因素之间也具有程度不等的关联性。基于“四性”认识,本次研究甄别了地质因素交叉影响及主次关系,明确信息量大且指向性明确的主因素,将之纳入地质评价要素层次结构模型(表 1)。例如,坚固性系数与煤体结构具有可量化的对应关系,在评价中根据勘查资料完善程度可以互代;奥亚膨胀度和黏结性与煤阶具有确定关系,气化活性、热稳定性等也与煤阶密切相关,故要素体系不再单独考虑煤阶;有机污染物的产率和组成与膨胀性、黏结性有关,极大程度上受控于气化工艺技术,不作为单独的地质评价因素。

(2) 高度重视地下水污染风险。地下水污染是 UCG 产业化面临的最大地质风险,尽管工程上已有较为成熟的控制措施,全球 80 余个现场试验出现污染的案例寥寥无几,但这绝不是地质评价中将环境因素置于次要地位的借口,仍应予以重视。鉴于此,评价模式构建从 3 个方面考虑这一社会公众关心的可能诉求:

① 考虑到开展 UCG 战略性选区时主要利用的传

统煤勘资料。煤焦油污染潜势采用其他因素替代。焦油产率-煤阶关系近似正态分布,具有黏结性的烟煤焦油产率远高于褐煤和无烟煤^[34],高焦油产率煤阶范围与高膨胀性/黏结性煤阶范围一致,2者信息相互包容,焦油产率可用后者参数替代;相当一部分煤焦油在 UCG 高温下可被裂解,会降低 UCG 焦油产率^[35];燃空腔中焦油残留物在气化后可用蒸汽或水冲洗炉腔而被清除,属于工程控制范畴。

② 龙潭组 UCG 产物污染上覆裂隙岩溶含水层的可能性极小,评价模式中采用其它参数来防范这一风险。贵州省溶洞管道水分布层系极为广泛,龙潭组上覆岩溶裂隙含水层主要发育在三叠系中下统碳酸盐岩段,距离龙潭组顶部一般大于 200 m^[36],如盘关向斜和土城向斜下三叠统永宁镇组与龙潭组的间距分别为 286~874 m 和 452~785 m、五轮山向斜下三叠统飞仙关组上段与龙潭组顶部间距 195 m。这个间距等于隔水层厚度,远远大于 UCG 炉上覆岩层所需的最小安全距离(导水裂隙带高度),如果没有贯通性断层发育,气化产物不可能对主要含水层地下水产生污染。为此,采用上覆含水层距离、断距、上覆岩层稳定性 3 个参数(表 1),足以对上覆裂隙岩溶含水层 UCG 安全性进行评价预测。

③ 基于人身性环境利益优先于财产性经济利益的原则,优先考虑可能发生的 UCG 人身环境危害。环境优先常被人们模糊地界定为环境利益优先于经济利益,而环境利益和经济利益均应分别兼具人身与财产两方面的价值属性,即人身性环境利益与财产性环境利益,利益视角下的“环境优先”实质上是应指人身性环境利益优先于财产性经济利益^[37]。基于这一辩证关系,评价模式考虑了环境安全性优于生产安全性原则,并在参数权重设置中予以体现。

(3) 充分重视特定地质参数对 UCG 活动的关键作用,对超“阈值”的情况实施“一票否决”。包括断层指数、奥亚膨胀度、黏结指数和上覆含水层距离 4 项指标。过于发育的断层会导致 UCG 工程难以布置,也存在气化工作面由于煤层错开而难以连续推进、贯通含水层导致浇灭火焰工作面及合成产物泄露致使地下水污染等重大风险。奥亚膨胀度和黏结指数,在 UCG 高温条件下,特定煤阶和显微组成的煤层往往发生膨胀黏结,强烈的膨胀黏结会阻塞气化通道,高膨胀性和强黏结性煤层不适宜 UCG。上覆含水层距离,在高温热应力及重力作用下,UCG 燃空腔上覆岩层会发育导水裂隙带,存在贯通上覆含水层而污染地下水、合成气泄露而降低气化效率以及地下水涌入炉腔而中断气化进程的地质风险,气化煤层与上覆含水层之

间必须具有足够的安全距离。

1.4 评价模式配套算法

考虑到贵州地质条件实际,按 4 个关键参数指标阈值“一票否决”,即三级参数中断层指数 > 1 000,奥亚膨胀度 > 220 或黏结指数 > 80 或顶板含水层安全距离 < 30 m 时,煤层视为不适宜气化煤层。

然后,根据相关参数分级权重,将“一票否决”后剩下勘查区或煤层进行权重分析,具体算法、原理在“煤炭地下气化的敏感性地质因素探讨”^[38]一文详述。技术算法简述如下:

(1) 建立权重向量算法矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (6)$$

其中, a_i 、 a_j 为地质参数, n 为样本个数,设参数 a_i 与参数 a_j 比为 a_{ij} ,则 a_j 与 a_i 比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$,为此,权重向量算法矩阵是一个方阵,也是一个正互反矩阵。通过 n 阶两两判断矩阵 A 把定性分析结果定量化,采用特征向量法求解矩阵 A ,获得最大特征根 λ_{\max} 及特征向量集 ω 。将特征向量集中的最大向量序列 ω_{\max} 归一化处理,则获得下一层评价参数相对于上层目标的权重向量: $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})$,据此计算各参数权重,结果见表 1。在两两判断矩阵构建过程中,受控于评价者经验及地质条件复杂性,某些相对重要的成对参数赋值往往存在误差,导致判断矩阵的特征值产生偏差。为此,需要基于最大特征根 λ_{\max} ,对两两判断矩阵的客观性进行一致性检验^[38]。

(2) 基于 FAHP 模糊层次综合分析法^[39],将特定参数指标分布范围分为 3 级,赋值 X_i ,分级赋值指标设定为 3、2、1,对应于评语集{好、中等、差},即分级赋值越大,对煤炭地下气化的适应性就越强,结果见表 1。

(3) 利用隶属函数求得综合权重积之和,按值进行分级分类以及资源潜力排序,开展选址选层,算法为

$$PW_x = W_{ij}X_i \quad (7)$$

$$PW = \sum_{x=1}^n PW_x \quad (8)$$

式中, W_{ij} 为某个评价参数的权重; PW 为特定信息采集点同层次所有评价参数或对应上层目标域评价参数的权重积之和; x 为同层次参与评价参数的个数; PW_x 为对应权重积。

(4) 进一步地,将所有待评价区域按照权重积和进行排序,建立最优 3 段分割序列模型,分别将 n 个有序样品 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 分为 3 段,即划分 3 个级别,算法为

$$\{x_1, \dots, x_{a_1}\} \{x_{a_1+1}, \dots, x_{a_2}\} \{x_{a_2+1}, \dots, x_n\} \quad (9)$$

$$W_n(3; a_1, a_2) \quad (10)$$

式中, a_1 和 a_2 为最小二乘法数学方法计算的 3 段内离差平方最小的分割点, 且 $a_1 < a_2$; W_n 为权重积最优 3 段分割序列模型。

据此, 可将“一票否决”后所有可气化煤层进行评价分级分类排序, 进而优选出最适宜开展煤炭地下气化的区域及煤层。

2 资源类型及其划分系统

以 UCG 地质评价分目标控制为分类基础, 以权重积作为分型依据, 类级结合划分 UCG 资源类型。具体来说, 根据建炉可行性、过程易控性、气化安全性、开发经济性 4 个评价分目标, 将 UCG 资源定义为 4 类; 在此基础上, 依据综合权重积算法计算每一类权重积, 接着采用 3 段最优分割算法对每一类权重积分割为 3、2、1 三级; 四类与三级 (型) 相结合, 构成 UCG 资源类型划分系统。

采用矩阵结构混合分类编码方式表征 UCG 资源类型 (表 2)。分类编码系统是对矿产资源信息进行有效管理、高效利用的重要手段, 系指采用字符对特定信息特征进行描述和标识的一套规则和依据。本次研究采用分类编码表征 UCG 煤炭资源类型, 目的是整合“孤岛式” UCG 地质信息子系统, 便于业界使用与共享 UCG 资源信息, 并为 UCG 产业规划提供参考依据。

表 2 UCG 资源类型概略划分方案

Table 2 Schematic division of UCG resource types

类级	类型(混合编码后4位数字)			
(混合编码首位字母)	建炉可行性	过程易控性	气化安全性	开发经济性
优A	第1位数码	第2位数码	第3位数码	第4位数码
	(3/2/1)	(3/2/1)	(3/2/1)	(3/2/1)
良B	第1位数码	第2位数码	第3位数码	第4位数码
	(3/2/1)	(3/2/1)	(3/2/1)	(3/2/1)
差C	第1位数码	第2位数码	第3位数码	第4位数码
	(3/2/1)	(3/2/1)	(3/2/1)	(3/2/1)
否决D	D类, 一票否决煤炭资源, 不再赋予数字编码			

分类编码系统制订遵循几项基本原则: 一是简明性, 代码结构尽量简短明确, 层级可能减少, 方便快速定位资源信息; 二是唯一性, 类目设置不应重复, 一个代码只能唯一地标识一个分类对象; 三是实用性, 代码尽可能反映编码对象的特点, 支持系统集成, 方便信息的有序管理和开发利用; 四是开放性, 尽可能保持代码系统的稳定性, 适当预留“接口”, 允许新信息

动态加入, 适应不断扩充的需要^[40]。同时, 还应考虑客观性、合理性、规范性、完整性、区分性、可操作性等原则^[41]。

本次编码系统由 5 位符号构成: 第 1 位为英文大写字母, 分别代表优 (A)、良 (B)、差 (C) 3 个 UCG 资源类级; 后面四位阿拉伯数字, 第 1~4 位依次代表建炉可行性、过程易控性、气化安全性和开发经济性, 每一位数字分为 3、2、1 三级, 分别代表最优分割所约束的好、中等、差 3 个等级。此外, D 级 (型) 代表在当前工艺技术条件下不利于地下气化的煤炭资源, 经“一票否决”后失去分目标细化评价价值, 对“型”不再细分, 整体资源类型仅以“D”编码表示。如类型 A3333, 表示“四性”均为优等级的 A 类 UCG 资源。

阈值界线根据权重积和最优分割结果确定, 将参评单元每项分目标的权重积数据序列, 依据最小二乘法原理, 将数据序列 3 段最优分割, 两两分段之间的 2 个权重积即为分割临界值。具体分级算法数列表达式为

$$\{A: x_1, \dots, x_{a_1}\} \{B: x_{a_1+1}, \dots, x_{a_2}\} \{C: x_{a_2+1}, \dots, x_n\} \quad (11)$$

据此可依次获得 UCG 建炉可行性、过程易控性、气化安全性和开发经济性的权重积 3 级划分方案, 结合 4 个分目标, 划分 UCG 资源潜力类型, 并进行编码。

3 案例分析

针对贵州省煤炭资源, 从“建炉可行性、过程易控性、气化安全性、开发经济性”4 个方面, 以煤田作为一级评价单元, 独立向斜作为二级评价单元, 勘查区/井田作为 3 级评价单元, 煤层作为底层单元, 逐级进行评价和汇总。本次研究以贵州织纳煤田为案例进行 UCG 选址选层地质评价。

3.1 评价示例

织纳煤田作为贵州省重要产煤基地, 涉及 16 个独立向斜区, 102 个勘查区/井田, 资源量十分丰富, 探获资源量 258.950 5 亿 t。按照评价模式逐一针对各勘查区/井田内各煤层进行评价, 并以此作为选层依据。如研究区内新益勘查区 6 号煤层评价 (表 3), 依据煤田勘探资料分析勘查区 26 项地质参数实际值 (一般取区内平均值, 面积较大时须分块段取平均值), 根据评价模式隶属度 (表 1) 进行分级赋值 X_i , 根据算法 (7)、(8) 计算出该煤层“四性”权重积和分别为 0.664 0、1.113 6、0.415 3、0.186 5, 综合权重积和为 2.379 4。以此类推对勘查区内其余煤层依次评价, 分别取勘查区/井田内所有参评煤层权重积和的平均值, 作为该待评价区域权重积和, 结合算法 (11) 将煤田内各勘查区

/井田 UCG “四性”权重积和、综合权重积进行分级排序编码,并以此作为选址依据。如新益勘查区 6 号煤层分级排序编码为 A2333(表 3),代表该煤层总体评价结果为 A(优),建炉可行性中等,过程易控性、气化安全性、开发经济均为优等;综合其他煤层取平均值后勘查区排序编码为 A3322,即代表该区综合评价结果为 A(优),建炉可行性、过程易控性优等,气化安全性、开发经济良等。以此类推对织纳煤田各勘查区/井田依次评价编码排序。

3.2 评价结果

织纳煤田作为贵州省重要产煤基地,涉及 16 个

独立向斜区, 102 个勘查区/井田。一票否决后共评价 100 个勘查区/井田, 分级排序结果如图 2 所示。其中, A 类资源勘查区/井田 16 个, 分布在金龙向斜南、白泥箐向斜、比德—三塘向斜、阿弓向斜、黔西向斜、小箐向斜 6 个构造单元(图 3), 可气化煤炭资源量 27.081 1 亿 t(表 4); B 类资源勘查区 72 个, 分布在 13 个构造单元(图 3), 合计可气化煤炭资源量 92.177 0 亿 t。

A 类资源作为最优等级,可优先作为选址标的。织纳煤田 6 个构造单元以及同一构造单元中不同勘查区的 A 类资源规模变化较大,部分勘查区具有较大 UCG 产业前景。煤田 A 类可气化煤炭资源的

表3 织纳煤田新益勘查区6号煤层评价结果

Table 3 Evaluation results of No.6 coal seam in Xinyi exploration area of Zhina coalfield

目标层	参数层				新益勘查区6号煤		评价层		资源类型 评价结果		
	分目标	目标控制	地质参数		实际值	赋值 X_i	权重积 W_{ij}	权重积和PW			
	参数	参数	参数	权重 PW_x							
贵州省煤炭 地下气化资源评价及 有利区优选K	建炉可行性	井壁稳定性B01	煤的坚固性系数C01	0.249 0	0.88	2	0.498 0	0.664 0	2		
	A01	轨迹可控性B02	煤层厚度C02	0.083 0	1.59	2	0.166 0				
	过程易控性	气化工作面 推进B03	煤层倾角C03	0.006 7	30.00	3	0.020 0	1.113 6	3		
			煤厚变异系数C04	0.074 3	39.50	2	0.148 5				
			夹矸厚度系数C05	0.012 9	0.28	2	0.025 9				
			褶曲指数C06	0.014 4	0.60	2	0.028 8				
			断层指数C07	0.030 2	600.00	2	0.060 3				
			煤层埋深C08	0.033 5	467.95	3	0.100 4				
		气化通道连 通性B04	奥亚膨胀度C09	0.114 1	无烟煤	3	0.342 2				
			黏结指数C10	0.059 2	无烟煤	3	0.177 7				
			煤灰熔点C11	0.025 1	1 406.00	3	0.075 2				
			煤热稳定性C12	0.044 9	83.60	3	0.134 6				
	气化安全性	生产安全B05	含水层钻孔单位涌水量C13	0.003 4	0.173	2	0.006 8	0.415 3	3		
			上覆含水层距离C14	0.019 8	60.81	3	0.059 4				
			断距C15	0.017 7	0.58	2	0.035 4				
		A03	直接顶稳定性C16	0.008 5	砂岩	2	0.016 9				
		环境安全B06	煤层全硫质量分数C17	0.057 6	0.780	3	0.172 9				
			磷质量分数C18	0.006 7	0.008	3	0.020 0				
			氟质量分数C19	0.006 7	71.00	3	0.020 0				
			砷质量分数C20	0.027 9	2.00	3	0.083 8				
开发经济性		气化有效性B07	煤对CO ₂ 反应性C21	0.041 6	12.87	1	0.041 6			0.186 5	3
			灰分干燥基质量分数C22	0.013 9	19.59	3	0.041 6				
	A04	合成气质量B08	高位发热量C23	0.031 4	26.27	2	0.062 8				
	资源可靠性B9	勘查程度	0.003 8	勘探	3	0.011 4					
		原始资源量C25	0.007 6	8.24	3	0.022 8					
	煤气联采B10	上覆50 m范围煤层累厚C26	0.006 4	2.88	1	0.006 4					
综合权重积和PW								2.379 4	A		

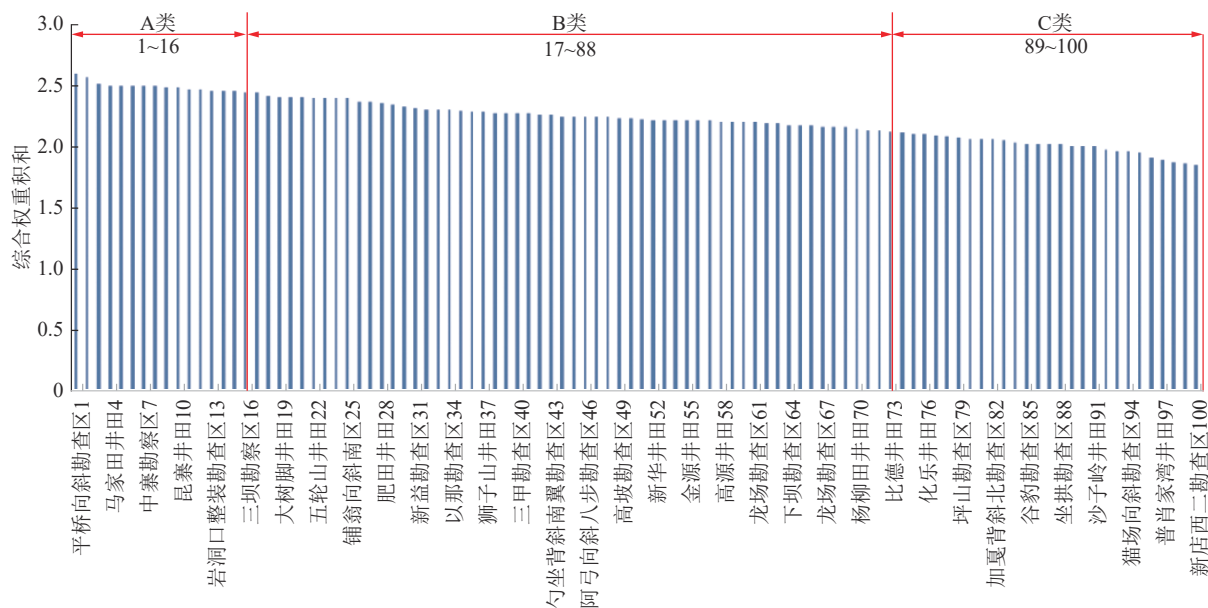
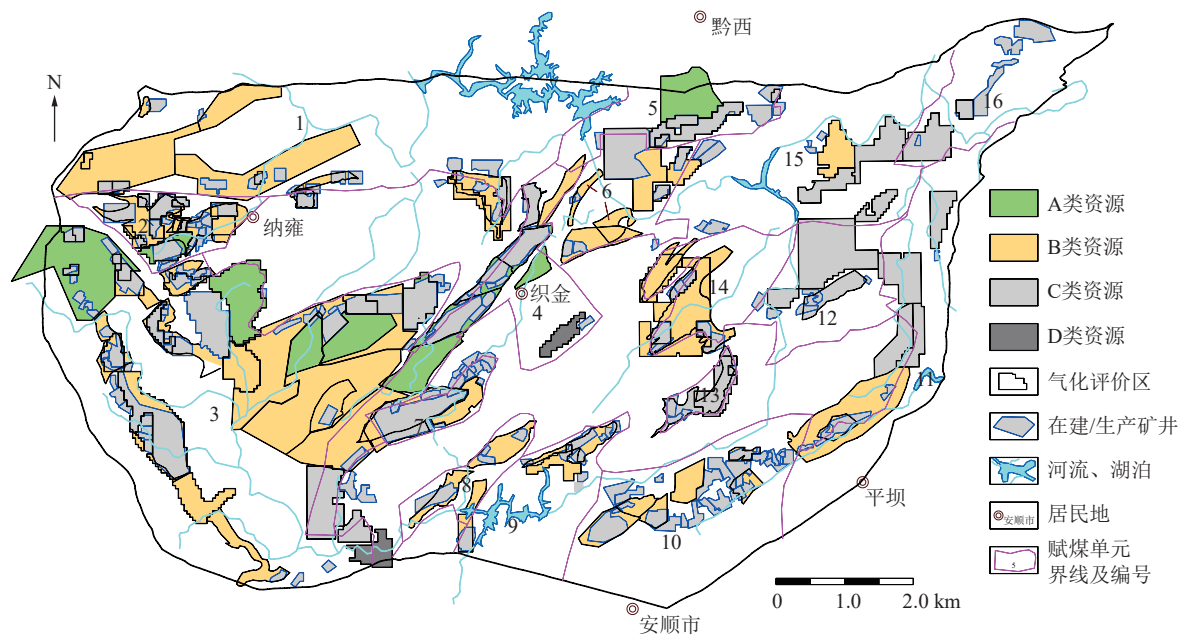


图2 织纳煤田 UCG 参评勘查区/井田总体排序

Fig.2 Overall ranking of UCG participating coal exploration area / minefield in Zhina coalfield



注: 1—金龙向斜南区; 2—白泥箐向斜区; 3—比德—三塘向斜区; 4—阿弓向斜区; 5—黔西向斜南区; 6—关寨向斜区; 7—珠藏向斜区; 8—白果寨—鸡场坡向斜区; 9—补郎向斜北区; 10—轿子山区; 11—席关—谷豹区; 12—流长区; 13—大猫场向斜区; 14—牛场向斜区; 15—莫老坝向斜区; 16—小箐向斜区。

图3 贵州省织纳煤田 UCG 资源评价

Fig.3 UCG resource evaluation map of Zhina coalfield, Guizhou Province

62.17% 赋存在比德—三塘向斜, 资源量 16.836 6 亿 t, 分布的 8 个勘查区/井田具有勘查程度高的共性特点, 且埋深较浅, 以三坝勘查区资源量最大, 占煤田 A 类资源总量的 17.16%, 可作为煤田 UCG 产业规划布局的首选地区。阿弓向斜 A 类煤炭资源量 5.273 3 亿 t, 占煤田 A 类资源的 19.47%, 在构造单元中位列第 2, 分布在 4 个勘查区/井田, 埋深均在 600 m 以浅。黔西向斜 A 类煤炭资源量 3.506 7 亿 t, 占煤田 A 类资源

的 12.95%, 均分布在绿化整装勘查区内, 可惜埋深较大且勘查程度较低。金龙、白泥箐、小箐 3 个向斜 A 类资源量较少, 难以形成大规模产业化。

4 结 论

(1) 基于“四性”认识, 甄别了 UCG 地质评价关键因素, 建立了由 4 类 10 组 26 个参数构成的 UCG 地质评价要素层次结构模型。将评价总目标分解为建

表4 织纳煤田 A 类 UCG 煤炭资源分布
Table 4 Distribution of class A UCG coal resources in Zhina coalfield

构造单元	勘查区		A类可气化煤炭 资源量/亿t
	名称	埋深/m	
金龙向斜南	昆寨井田	600~1 000	0.075 8
白泥箐向斜	中岭井田	0~600	1.276 0
比德—三塘向斜	西北翼整装勘查区	600~1 000	4.187 9
	左鸠戛井田	0~600	0.100 8
	聂家寨井田	600~1 000	0.070 3
	补作勘查区	0~600	3.955 9
	中寨勘查区	0~600	1.673 3
	马家田勘查区	0~600	0.343 7
	三坝勘查区	600~1 000	4.645 8
	岩洞口整装勘查区	600~1 000	1.858 9
	文家坝北区	0~600	1.842 7
阿弓向斜	大冲头井田	0~600	1.627 9
	阿弓向斜南区	0~600	1.687 6
	平桥向斜勘查区	0~600	0.115 1
黔西向斜	绿化整装勘查区	> 1 000	3.506 7
小箐向斜	洒坪井田	0~600	0.112 7
合计			27.081 1

炉可行性、过程易控性、气化安全性、开发经济性 4 个评价分目标,建立了 UCG 地质评价目标与具体地质参数之间有机关联。并对断层指数、奥亚膨胀度、黏结指数、上覆含水层距离四项指标的超“阈值”情况实施“一票否决”,充分重视到特定地质参数对 UCG 控制的关键作用。

(2) 建立了 UCG 资源潜力类型及其划分方法。根据 4 个评价分目标将 UCG 资源进行分类分级,类级结合形成了 4 类与 3 级(型)相结合的 UCG 资源类型划分方案。采用英文大写字母与阿拉伯数字混合编码方法以及矩阵结构形式,提出了“四性四级”五位编码的 UCG 资源类型表征方法。

(3) 基于评价模式及资源划分方法,评价了贵州省织纳煤田 UCG 资源潜力,划分出各类各级资源类型。煤田 102 个勘查区/井田中, A 类 16 个、B 类 72 个、C 类 12 个、D 类 2 个。通过对 A 类资源分布范围、资源量、埋深等方面分析,初步优选了 UCG 产业规划布局的首选地区。

鉴于地质条件的复杂多变及耦合影响,评价模式在推广运用时有 2 点思考:

(1) 考虑到单项地质因素往往对 UCG 行为具有多重影响,导致地质因素与 UCG 地质评价分目标并

非简单一一对应。同时,本评价模式相关算法要求实际勘查测试资料予以支撑。因此地质参数选取时参考了贵州省地质条件和煤勘资料特征,舍去可被替代地质参数,采用信息量大且指向性明确的主因素建立评价要素模型,如有机污染物的产率和组成与膨胀性、黏结性有关,极大程度上受控于气化工艺技术,不作为单独的地质评价因素。但在其他地区建立评价模式时可结合当地地质条件和煤勘资料适当调整参数和权重。

(2) 利用权重积进行目标排序,仅能反映特定勘查区/井田及煤层 UCG 综合地质条件在所有评价对象中的相对潜力位置,据此得到的 UCG 选区选址排序与“四性四级” UCG 资源类型可能不会完全匹配,此时需结合评价分目标的可行性相对权重,在相同分级框架下,按四个评价分目标的权重逐级比较优选,从而实现 UCG 区块排序与 UCG 资源类型的有序结合。但这也只能作为大区资源评价选区与战略规划依据,从而提出可供分步实施的典型地质条件先导性试验区建议,涉及具体施工炉址优选仍需开展进一步分项的综合分析,如交通条件、地形地貌、资源条件、技术方案、工艺水平、环境影响、安全保障、能耗水平、赢利能力等。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7): 2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [2] 国务院.国务院关于支持贵州在新时代西部大开发上闯新路的意见(国发〔2022〕2号)[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/26/content_5670527.htm, 2022-07-04.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局.关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知(发改能源〔2022〕210号)[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html?code=state=123, 2022-01-26.
- [4] 贵州省能源局,贵州省科学技术厅.关于印发《贵州省能源科技创新发展“十四五”规划》的通知(黔能源发〔2022〕7号)[EB/OL]. http://www.guizhou.gov.cn/zwgk/zdlygk/jjgzlzf/nyzy/nyjyhkjzbg/202206/t20220601_74572300.html?isMobile=true, 2022-05-31.
- [5] 孔维敏,周永峰,易同生,等.苏联煤炭地下气化产业化历史回顾与评述[J].煤田地质与勘探,2023,51(7): 26-33.
KONG Weimin, ZHOU Yongfeng, YI Tongsheng, et al. UCG industrialization in the Soviet Union: History and comments[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(7): 26-33.
- [6] 秦勇,易同生,杨磊,等.中国煤炭地下气化现场试验探索历程与前景展望[J].煤田地质与勘探,2023,51(7): 17-25.
QIN Yong, YI Tongsheng, YANG Lei, et al. Underground coal gasi-

- fication field tests in China: History and prospects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 17–25.
- [7] 周泽, 汪凌霞, 秦勇, 等. 澳大利亚 UCG 工程示范历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 52–60.
ZHOU Ze, WANG Lingxia, QIN Yong, et al. UCG engineering demonstrations in Australia: History and its implications[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 52–60.
- [8] 黄婉, 王军, 汪凌霞, 等. 美国煤炭地下气化先导试验及其对现代 UCG 技术的贡献[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 34–42.
HUANG Wan, WANG Jun, WANG Lingxia, et al. UCG pilot tests in the United States and their contributions to modern UCG technologies[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 34–42.
- [9] 金黎黎, 杨磊, 吴亚荣, 等. 欧盟国家煤炭地下气化先导试验历程与进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 43–51.
JIN Lili, YANG Lei, WU Yarong, et al. UCG pilot tests in EU countries: A review of history and progress[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(7): 43–51.
- [10] NIEĆ M, SERMET E, CHEĆKO J, et al. Evaluation of coal resources for underground gasification in Poland. Selection of possible UCG sites[J]. *Fuel*, 2017, 208: 193–202.
- [11] PEI P, NASAH J, SOLC J, et al. Investigation of the feasibility of underground coal gasification in North Dakota, United States[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 113: 95–103.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 韩颖, 张飞燕. 煤层钻孔失稳机理研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(4): 114–119.
HAN Ying, ZHANG Feiyan. Progress in research on instability mechanism of coalbed borehole[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(4): 114–119.
- [15] 乔伟, 倪小明, 张小东. 煤体结构组合与井径变化关系研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 162–166.
QIAO Wei, NI Xiaoming, ZHANG Xiaodong. The relation between the coal structure combination and the changes in well diameter[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2010, 29(2): 162–166.
- [16] 孙正财. 煤岩力学井壁失稳机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2021.
SUN Zhengcai. Study on mechanism of mechanical borehole wall instability in coal rock [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2021.
- [17] KOUKOUZAS N. Underground gasification of low rank coals [C]//Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production. Amsterdam: Elsevier, 2017: 179–215.
- [18] PERKINS G. Underground coal gasification—Part I: Field demonstrations and process performance[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 158–187.
- [19] 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, 62.
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, 62.
- [20] 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.
- [21] 尹振勇, 许浩, 汤达祯, 等. 淮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.
- [22] 刘淑琴, 梁杰, 常建, 等. 华亭煤纯氧-水蒸汽地下气化模型试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(3): 355–358.
LIU Shuqin, LIANG Jie, CHANG Jian, et al. UCG model test of Huating coal with oxygen-steam as gasification agent[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(3): 355–358.
- [23] PERKINS G, SAHAJWALLA V. A numerical study of the effects of operating conditions and coal properties on cavity growth in underground coal gasification[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(2): 596–608.
- [24] PERKINS G. Mathematical modelling of underground coal gasification [D]. Sydney: The University of New South Wales, 2005.
- [25] 朱伟娜, 赵霄鹏, 苏春生. 不同煤种在碎煤加压气化炉上的工业应用分析[J]. 化工进展, 2016, 35(S2): 132–136.
ZHU Weina, ZHAO Xiaopeng, SU Chunsheng. Analysis of various kinds of coal applied in crushed coal pressurized gasifier[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(S2): 132–136.
- [26] FENG M, XIN L, ZHIGANGWANG, et al. Discussion on requirements of gasifier gas tightness for underground coal gasification production[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101550.
- [27] 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.
- [28] ŠKVAREKOVÁ E, TOMAŠKOVÁ M, WITTENBERGER G, et al. Analysis of risk factors for underground coal gasification[J]. *Management Systems in Production Engineering*, 2019, 27(4): 227–235.
- [29] HUANG W, WANG Z, XIE T, et al. Feasibility study on underground coal gasification of quality characteristics of 9 Chinese coal types[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 42(2): 131–152.
- [30] 申建. 论深部煤层气成藏效应[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9):

- 1599–1600.
SHEN Jian. CBM-reservoiring effect in deep strata[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(9): 1599–1600.
- [31] 中华人民共和国自然资源部. 矿产地质勘查规范 煤: DZ/T 0215—2020[S].
- [32] 煤炭资源勘查煤质评价规范: MT/T 1090—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [33] 国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化管理委员会. 中国煤炭分类: GB/T 5751—2009E [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [34] 全翠, 王惠惠, 高宁博. 煤热解影响因素与油品提质研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1): 187–193.
QUAN Cui, WANG Huihui, GAO Ningbo. Review of factors affecting coal pyrolysis and quality improvement of oil[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S1): 187–193.
- [35] 王鹏, 文芳, 步学朋, 等. 煤热解特性研究[J]. 煤炭转化, 2005, 28(1): 8–13.
WANG Peng, WEN Fang, BU Xuepeng, et al. Study on the pyrolysis characteristics of coal[J]. Coal Conversion, 2005, 28(1): 8–13.
- [36] 唐显贵, 张伟, 孔维敏. 贵州省煤炭资源现状及其潜力评价[J]. 中国煤炭, 2013, 39(10): 27–30.
TANG Xiangui, ZHANG Wei, KONG Weimin. Present situation and potential evaluation of coal resource in Guizhou Province[J]. China Coal, 2013, 39(10): 27–30.
- [37] 唐绍均, 蒋云飞. 论基于利益分析的“环境优先”原则[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2016, 22(5): 144–149.
TANG Shaojun, JIANG Yunfei. Discussion on “Environmental Priority” principle based on benefit analysis[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2016, 22(5): 144–149.
- [38] 周泽, 易同生, 秦勇, 等. 煤炭地下气化的敏感性地质因素探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 24–36.
ZHOU Ze, YI Tongsheng, QIN Yong, et al. Exploring geological parameters sensitive to underground coal gasification[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 24–36.
- [39] 周泽, 汪凌霞, 郭志军, 等. 贵州省六盘水煤田煤炭地下气化资源评价[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(3): 27–33.
ZHOU Ze, WANG Lingxia, GUO Zhijun, et al. Assessment of coal underground gasification resources in lupanshui coalfield, Guizhou Province[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(3): 27–33.
- [40] 国家市场监督管理总局, 中国标准化管理委员会. 公共信用信息分类与编码规范: GB/T 39441—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [41] 陈鹏. 对中国煤炭分类编码系统的建议[J]. 中国煤炭, 1996, 22(1): 47–50.
CHEN Peng. Suggestions on China coal classification and coding system[J]. China Coal, 1996, 22(1): 47–50.