

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.112>



煤炭地下气化地质选区指标体系 构建及有利区评价技术

周 贺, 吴财芳*, 蒋秀明, 王振至

中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008

摘要: 为厘清影响煤炭地下气化的地质因素, 构建科学的地质指标评价体系, 对影响煤炭地下气化的七大大类地质条件、41 个次级地质指标进行了系统分析和分级量化, 建立了地质选区指标体系; 根据对选区的重要程度, 将各地质指标分为基本地质指标(A)和关键地质指标(B)两类, 基于这两大类指标, 提出了两种新的煤炭地下气化有利区定量评价方法, 精细型(A+B)和通用型(B); 利用专家打分法和层次分析法确定了这两种评价方法中所涉及到的地质指标权重; 依据资源、开采技术、区域构造和环境四大类条件, 厘定了评价结果的定性分级方案; 综合定量评价和定性分级, 提出了有利区优选的一般步骤, 最终形成了一套完整的煤炭地下气化有利区评价技术体系。该评价技术体系的有效应用, 可为煤炭地下气化科学选址和产业化进程推进提供重要理论支撑。

关键词: 煤炭地下气化; 地质指标体系; 精细型评价方法; 通用型评价方法; 评价等级; 油气地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2022)05-1777-14

收稿日期: 2021-12-05

Construction of Geological Selection Index System and Evaluation Technology of Favorable Area for Underground Coal Gasification

Zhou He, Wu Caifang*, Jiang Xiuming, Wang Zhenzhi

Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: In order to clarify the geological factors affecting underground coal gasification (UCG) and construct a scientific and quantitative geological index evaluation system, seven types of geological conditions and 41 geological indexes affecting UCG are systematically analyzed, graded and quantified, and then the geological selection index system is established in the paper. According to the importance of the selected area, each geological index is divided into two categories: basic geological index (A) and key geological index (B). Based on these two categories of indexes, two new quantitative evaluation methods for favorable areas of UCG are proposed, namely fine type (A+B) and general type (B). The weight of geological indexes involved in the two evaluation methods is determined using expert scoring method and analytic hierarchy process (AHP). According to the conditions of resources, mining technology, regional structure and environment, the qualitative classification scheme of evaluation results is determined, and the general steps of favorable area optimization are put forward by comprehensive quantitative evaluation and

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41572140, 41872170); 国家科技重大专项(No.2016ZX05044-001)。

作者简介: 周贺(1990-), 男, 博士, 主要从事煤层气和煤炭地下气化的地质综合研究。ORCID: 0000-0002-1001-8912. E-mail: zhou977519568@163.com

* **通讯作者:** 吴财芳, E-mail: caifangwu@sina.com

引用格式: 周贺, 吴财芳, 蒋秀明, 王振至, 2022. 煤炭地下气化地质选区指标体系构建及有利区评价技术. 地球科学, 47(5):1777-1790.

Citation: Zhou He, Wu Caifang, Jiang Xiuming, Wang Zhenzhi, 2022. Construction of Geological Selection Index System and Evaluation Technology of Favorable Area for Underground Coal Gasification. *Earth Science*, 47(5):1777-1790.

qualitative classification. Finally, a complete set of evaluation technical system for favorable areas of UCG is formed. The effective application of the evaluation technology system can provide important theoretical support for the scientific site selection and industrialization process of UCG.

Key words: underground coal gasification; geological index system; fine evaluation method; general evaluation method; evaluation grade; petroleum geology.

0 引言

21 世纪以来,在国际能源紧缺、低碳发展以及油气后备资源不足引起油气价格剧烈上升的现状下,煤炭地下气化技术在国际上重新受到广泛关注.2020 年,我国天然气进口量为 10 166 万吨,同比增长 5.3%,对外依存度高达 43%.相较于传统采煤,煤炭地下气化作为一种利用可控的燃烧技术,将煤炭在地下直接通过不完全燃烧而转化为合成可燃烧性气体(H_2 、 CO 、 CH_4 等)的化学开采方法,可以弥补我国“富煤,少气”的先天不足(许浩等, 2022).因此,开展煤炭地下气化技术对于缓解能源危机和调整国家能源结构具有重要的现实意义.

自我国“十二五”规划实施以来,“煤炭地下气化”被列入国家能源科技计划和战略性新兴产业目录,科技部为此设立了煤炭地下气化产业化关键技术主题项目.2015 年,国家能源局发布《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020 年)》,明确提出推进煤炭地下气化示范工程建设,探索适合我国国情的煤炭地下气化发展路线.十三五规划更加重视节能环保方面的考虑,煤炭地下气化及其全链条综合利用技术作为一种节能、高效、安全、环保的技术,成为国家重点扶持的高新技术.然而,迄今为止,经历 87 年漫长历程发展的煤炭地下气化产业,还未形成产业化.秦勇等(2019)认为前期对地质条件的系统性工作重视度不足,是导致产业化未形成的主要原因.此外,也有专家指出,煤矿床地质条件限制了煤炭地下气化技术的广泛应用(Nieć *et al.*, 2017).这说明,建立可适合我国煤炭地下气化有利区优选地质指标体系,提高选区成功率,是发展煤炭地下气化产业必经之路(许浩等, 2022),即气化炉的科学选址是解决这一难点的关键所在.

发展煤炭地下气化技术,就必须跨越地质风险.煤炭地下气化技术面临的地质风险主要有两类,安全性和环保性(秦勇等, 2019; 许浩等, 2022).安全性主要为地表下沉,这与煤种、煤厚、埋深、倾角、顶底板力学性质等因素有关,而后者主要为地下水污

染,这与煤岩煤质条件、有害元素分布以及水文地质条件有关.可以看到,影响地质风险的地质条件与地质选区参数高度重合(刘淑琴等, 2013; Vyas and Singh, 2015; Sheng *et al.*, 2016),这说明,若跨越地质风险,就必须构建科学的煤炭地下气化地质指标体系.遗憾的是,适合我国煤炭地下气化有利区优选地质指标体系并未建立(许浩等, 2022).此外,由于我国复杂的地质构造格局,特别在煤层层数多、单层厚度小、煤层间距小、地应力高、构造条件复杂区域的滇东黔西等地区(吴财芳等, 2018),按照以往“标准”,进行煤炭地下气化选址则更为困难.因此,从国家能源安全、环境保护、煤炭资源可持续利用等角度出发,突破现有地质瓶颈,建立可适合我国特殊地质条件的煤炭地下气化有利区优选指标体系,是我国实现煤炭开采跨越式发展的必要条件.

1 影响煤炭地下气化的主要地质因素

1.1 煤岩煤质条件

(1)煤种.煤种是煤化作用所达到的阶段,也是煤质众多指标综合表征的结果.试验结果表明,煤种的不同组成决定了空气煤气中 CO 、 H_2 、 CH_4 含量的不同,鼓风量影响着空气煤气的组成.相较于烟煤和无烟煤,褐煤最适于进行煤炭地下气化,其次为长焰煤(王张卿, 2016; 刘淑琴等, 2019).气肥煤层升温速率最快,煤气产率仅次于瘦煤,但在煤挥发分析出后,气化速率减小,气化稳定性较差;瘦煤地下气化时,纯氧-水蒸汽气化效率为 74%,气化过程稳定,且具有高的煤气产率,可以进行煤炭地下气化(刘淑琴等, 2003);无烟煤由于较低的反应活性,进行煤炭地下气化时难度较大,可用富氧工艺提升气化炉温度,进而实现连续稳定生产(梁杰等, 2006).值得注意的是,刘淑琴等(2013)认为除焦煤外,其他煤种均适合煤炭地下气化.但在众多国内外煤炭地下气化项目中,所有煤种均有进行地下气化的实例(Bhutto *et al.*, 2013; 葛世荣, 2017; 邹才能等, 2019).同时,也有学者认为,焦煤虽然在物

理模拟实验中可对气化产生影响,但在实际生产过程中,其物性条件不会对气化产生影响(杨兰和等,2013)。同时,煤种虽是煤岩煤质众多指标综合表征的结果,但由于煤具有强烈的非均质性(特别是在中低煤阶段),在相同煤种条件下,其水分、灰分、挥发分等指标均有一定差异。因此,在利用煤种作为反映进行煤炭地下气化的适宜程度时,必须使用其他指标加以辅助,如水分、灰分、挥发分、反应性和黏结性等指标。

(2)水分。原煤中会赋存一定量的水分,这些水分可以作为煤炭地下气化原料之一。目前,在煤炭地下气化过程中,富氧-水蒸气气化工艺是常用的气化工艺。对于不含水和弱含水煤层,就需要向气化炉内通过人工注水的方式进行水源补给,增强还原区的化学反应,以获取高热值的气体(主要为 H_2)的产出,同时也伴随着气化炉温度的降低;随着煤层水分含量的升高,需要人工补给的水量就逐渐减小;当煤层自身水分含量高于气化所需的最大气化水量时,则此时的煤层自身的水分就会对气化过程起到抑制作用。因此,国内外研究人员对煤中水分的上限进行了规定,其阈值上限变化范围为15%~55%(Bielowicz and Kasiński, 2014; Vyas and Singh, 2015)。

(3)灰分。灰分是煤中矿物质在一定条件下经一系列分解、化合等复杂反应而形成的,是煤中矿物质的衍生物。在气化过程中,金属元素对煤的热解、气化过程具有明显催化作用,如K、Na、Ca、Mg、Fe等金属元素;而煤中铝硅酸盐矿物在高温下与碱金属生成无催化作用的非水溶性化合物,从而降低碱金属的催化作用。当煤中灰分较高时,大量的气化残留物粉尘会覆盖至气化煤层表面,阻止气化剂与煤层的密切接触。此时,即使存在一定的催化作用,但也效果微弱。因此,在煤炭地下气化过程中,国内外研究人员对煤中的灰分上限进行规定,其上限变化范围为20%~50%(Bielowicz and Kasiński, 2014; Vyas and Singh, 2015)。

(4)挥发分。煤的热解反应贯穿于整个煤炭地下气化过程中,关系到气化温度、气化产物、产出气热值等重要参数。而煤的热解反应效率主要取决于挥发分含量,挥发分高的原煤在气化过程中会生成较多的轻质烃和氢气,产出气热值较高。挥发分越高,在气化反应阶段气化速率总体上呈上升趋势(陈波,2006)。目前,很少研究对挥发分的下限进行

规定。就国内外煤气化试验煤种来说,作为挥发分最低的无烟煤均可进行煤气化实验,而无烟煤的挥发分在10%以下。对于挥发分上限,Shafirovich and Varma(2009)认为挥发分低于50%的中低煤级煤样适宜进行煤气化。因此,适宜进行煤炭地下气化的挥发分上限在50%左右。

(5)硫分。硫元素对气化过程的影响微弱,但经氧化和还原反应可产生的二氧化硫和硫化氢等气体,一方面会对井下设备和管道造成腐蚀作用,另一方面也会增加产出气净化装置的方面的投资。相较于高硫煤层,低硫煤层更有利于进行煤炭地下气化试验。因此,国内外研究人员对煤中的硫分上限进行规定,其上限变化范围为2%~4%(Bielowicz and Kasiński, 2014; Vyas and Singh, 2015)。这主要得益于目前脱硫技术的成熟,促使产出气的脱硫成本的降低,让高硫煤的气化开发存在了可能。

(6)反应性。煤的反应性(α)是指煤与 CO_2 和 H_2O 的相互反应能力。在相同温度条件下,煤的反应性越高,气化反应速率就越快。煤与 CO_2 、 H_2O 的相关反应主要是在还原区进行的,相较于氧化区,还原区的温度较低,在1000℃左右。有研究表明,当气化炉温度位于1000~1100℃内时, CO_2 具有较高的还原率(杨兰和等,2001)。因此,本文将1000℃时对应的二氧化碳与煤的反应能力作为参考指标,并认为 $\alpha(1000℃) > 30\%$ 的煤层适宜进行煤炭地下气化(黄温钢,2014)。

(7)黏结性。煤的黏结性是指粉煤在隔绝空气条件下加热,本体黏结或与外加惰性物质黏结的能力。相较于褐煤,强黏结性烟煤气化时其气化效率均有一定程度的下降。究其原因,除了反应性和挥发分方面的原因之外,还有强黏结性烟煤在高温条件下易黏结成块状,致使气化煤层的透气性变差,妨碍气化剂与气化煤层的充分接触,从而不利于气化的进行(周泽等,2020)。然而,也有研究表明,强黏结性煤有利于控制燃空区上覆岩层移动和减小地表下沉(Li *et al.*, 2018)。众所周知,控制地表下沉的方法有很多。在煤炭地下气化过程中,地表下沉幅度主要与煤种、煤厚、埋深、倾角、顶底板力学性质等因素有关。在原有地质条件的基础上,选择合适的气化炉位置,设计合理的气化工作面宽度,均可有效控制地表下沉和减弱黏结性对地表下沉的影响。对于煤炭地下气化来说,相较于控制地表下沉,黏结性对气化过程的

影响却难以控制.因此,从经济角度出发,气化煤的黏结性还是以不黏结或弱黏结为好.

1.2 煤层赋存条件

(1)煤层厚度.目前,煤厚对地下气化的影响多为定性化总结,尚无定量化结论(黄温钢和王作棠,2017).当气化薄煤层时,气化煤层产生的热量较小,同时围岩会吸收大量热量,致使气化工作面的温度、气化热效率以及产出气热值降低.随着煤厚的增加,气化炉的温度和产出气热值均逐渐升高,但煤层的采出率开始逐渐降低.刘淑琴等(2013)认为褐煤气化的最小厚度为2 m,烟煤以上的最小气化厚度是0.8 m,安全煤层总厚度为15 m.Vyas and Singh(2015)认为褐煤和亚烟煤的气化厚度应在2.0~15 m.因此,这些煤厚限定可为本文提供理论依据和数值参考.

(2)煤层倾角.据现有的国内外煤气化试验研究表明:水平至急倾斜煤层均可进行煤炭地下气化试验.水平和缓倾斜煤层易于建炉,不利于保证气化过程的稳定性;倾斜和急倾斜煤层气化过程稳定性较好,但工程施工难度大.国外对煤层倾角要求较低($0^{\circ}\sim 70^{\circ}$),但对煤层整体倾角变化要求一般小于 2° (Vyas and Singh, 2015; Yang *et al.*, 2016).黄温钢(2014)结合国内煤气化工程试验认为,煤炭地下气化试验选取的煤层倾角应介于 $12^{\circ}\sim 65^{\circ}$,且煤层倾角为 35° 时,比较适合进行煤炭地下气化试验.

(3)煤层埋深.煤层埋深与气化炉的密封性和工程实施难度存在正相关关系.埋深过浅,上覆岩层垮落形成裂隙带,易沟通地表,从而造成煤气泄漏;埋深过深,易增加建炉和气化炉维护难度,从而加大投资成本(韩磊等,2019).Yang *et al.*(2016)认为气化炉的埋深宜在100~1 000 m,深部(1 000 m以深)煤层气化时难度更大,需进行更为深入的研究.Khadse(2015)利用物料平衡对印度300~1 200 m地下气化褐煤和亚烟煤资源及其经济性进行了初步的评价.目前,全球最大煤层埋深(1 400 m)的煤炭地下气化试验位于加拿大,而在全球范围内并不多见(Perkins, 2018).因此,深部(1 000 m以深)煤层的地下气化技术尚不成熟,仍需进一步的研究(秦勇等,2019).

(4)煤体结构.由于我国复杂的地质构造背景,煤体结构是所有煤地下相关行业领域都绕不开的话题.据国标GB/T 30050-2013,煤体结构可分为原

生结构煤、碎裂煤、碎粒煤以及糜棱煤4类.构造煤的分布特征与构造活动密切相关,特别是井下分布较多的小断层.碎粒煤和糜棱煤受构造作用影响强烈,结构破碎,在煤气化过程中是否会造成煤与瓦斯突出、煤气泄漏、断层水流入气化炉等问题,继而堵塞气化通道,对煤气化过程稳定性的影响仍属未知.可以确定的是,在气化炉选址初期,在大断层识别清楚的前提下,利用小断层识别技术,避开断层复杂区域,是气化炉选址工作的必要步骤.

(5)煤层稳定性.煤层稳定性表示煤层形态、厚度、结构和可采性在空间上的变化程度,主要包括煤层结构和煤层厚度变化两个方面.前者通过其所含夹矸数量和厚度进行评价,煤层夹矸会影响煤层的真厚度.在煤层厚度一定的前提下,夹矸层数和夹矸厚度越大,煤层的真厚度就越小,煤的灰分也就越高,煤气化的热效率就越低.当煤层的夹矸系数超过0.30时,煤的损失率将达到15%~40%.刘淑琴等(2013)认为对于整个煤层而言(含夹矸),灰分不可超过60%.Vyas and Singh(2015)认为对于2~15 m的气化煤层,单层夹矸厚度不得大于1 m,总夹矸率不得高于20%,这表明国外对于煤层夹矸率容忍度较低.为避免煤层太薄(小于0.8 m)影响产气效果,需要对气化煤层的稳定性进行评价.Yang *et al.*(2016)认为煤层厚度变化不应超过15%,气化炉选址时需避开厚度变化较大的煤层.可见,国内外在煤气化选区时对煤层稳定性的关注度较高.

(6)可动用煤炭资源量.可动用煤炭资源量是保障项目收益的必要条件.刘淑琴等(2013)认为气化炉的生产年限应不低于9年.国外要求则更为严格,认为可动用资源量需大于3.5 Mt,正常生产年限需超过20年(Yang *et al.*, 2016).诚然,国内外对于该方面存在着一定差异,但这主要取决于合成气的用途和经济效益.对于一个正常的煤炭地下气化试验项目,上述年限只可作为参考.在查明研究区的地质禀赋条件和可研究报告完成的前提下,需单独制作该项目的经济预算,包括科研费用、工程造价、维护成本、预估可产气量/年、煤气用途及市场价格等多个方面.根据经济预算,设定项目生产年限,预估气化资源量,并与可动资源量进行对比,综合分析煤田可动用资源量是否满足设计需要.

1.3 围岩条件

(1)顶底板岩性.围岩渗透性是影响气化炉

地质密封性的关键因素,而渗透性是由围岩类型决定的.刘淑琴等(2019)认为当煤层顶板以一定厚度的泥岩和粉砂岩为主时,可视为稳定隔水层,对煤气化起到了较好的封闭作用.赵岳等(2018)认为气化煤层的顶底板岩性以泥岩最为有利,砂质泥岩和粉砂岩中等,砂岩和岩浆岩不利于煤炭地下气化的实施.Niec *et al.*(2017)认为不透水泥岩最好,多孔透水砂岩不利于煤炭地下气化的进行.因此,在一定厚度条件下的粉砂岩或泥岩,可以作为气化煤层上覆隔水层.

(2)顶底板厚度.在煤气化过程中,燃空区垮落后形成“三带”,顶板裂隙向上下扩展而沟通井下巷道或含水层,可能出现煤气泄漏或涌水事故(黄温钢,2014).刘淑琴等(2013)认为,当烟煤厚度为0.8~2.3 m时,顶板厚度需大于煤厚的0.9~1.8倍;当烟煤厚度为3~9 m时,其顶板厚度需大于煤厚的2~4倍.Bielowicz and Kasiński(2014)认为气化煤层的顶板(泥岩和粉砂岩)厚度应大于20 m,或者为煤厚的2.8倍.因此,在布置气化炉方位时,需关注顶板厚度与煤厚的比值关系,是否满足开采要求.

1.4 地质构造条件

影响煤炭地下气化的地质构造类型主要为断层、陷落柱以及岩浆岩入侵(赵岳等,2018).在煤气化过程中,断层易连接裂隙下沉带,沟通含水层,从而造成气化中断.气化炉的选址需要规避断层发育的复杂区域,选取简单的地质构造区域.气化炉的位置需与最近断层保持一定的距离(50~150 m之间).对于无法规避的小段层,需查明断层是否连接含水层,同时其断层规模不能太大,以避免连通裂隙带,沟通含水层.为防止断层引起的煤气泄漏,单个气化炉内不宜有断距大于1/2平均煤层厚度的断层(刘淑琴等,2016).

无论陷落柱是否含水,若切割煤层,均会破坏煤层的连续性,造成气化中断;若陷落柱位于气化煤层上方,陷落柱虽未破坏煤层连续性,但也极易沟通裂隙带,造成气化中断.岩浆入侵煤层时,不仅对煤层具有化学破坏作用,特别在垂向上使得煤变质程度的升高(多演变为天然焦);同时也对煤层产生物理破坏或机械破坏作用(金法礼等,1998).相较于其他岩层,煤层力学性质较小,强度偏软,当岩浆岩入侵煤层时,岩浆易沿煤层层理侵入;在高温条件下,煤层会发生化学破坏作用,致使煤层的挥发分和化学结构发生变化,不

利于煤气化的进行.因此,陷落柱和岩浆岩的侵入均会对煤层的连续性和可气化性造成破坏.

1.5 水文地质条件

水文地质条件是影响煤炭地下气化的关键因素.地下水赋存特征、顶底板隔水性等因素决定着气化炉的构建、气化工艺及稳定性的控制(刘淑琴等,2016).当隔水层足够厚时,即使出现燃空区坍塌,也不会导致气化炉进水.因此,隔水层厚度、涌水量、与含水层的距离是水文地质条件评价的主要地质因素(黄温钢,2014).同时,气化煤层的煤级越低,煤层本身含水量就越高,所需要的水蒸气量就越低,故其允许的最大涌水量就越小.因此,刘淑琴等(2013)认为高含水褐煤在气化过程中不允许气化炉涌水,烟煤气化允许涌水量为0.7~1.5 m³/t,褐煤允许涌水量为0.3~1.0 m³/t.姚凯等(2011)利用褐煤地下气化物理模型对涌水量进行研究,认为在鼓风量20 m³/h,涌水量为8 L/h是最佳气化状态,两者比值为2.5:1;涌水临界值为14.5 L/h,两者比值为1.4:1.当气化炉涌水量超过该标准时,需进行排水工作.

隔水层的厚度也是评价水文地质条件之一.顶板隔水层厚度需保证大于顶板导水裂隙带的最大高度,导水裂隙带与煤层气化过程中顶板垮落的上三带(冒落带、裂隙带以及弯曲下沉带)有关.Vyas and Singh(2015)认为距上覆含水层的最近距离需在31 m以上,才是理想的水文地质条件.而Yang *et al.*(2016)认为距上覆含水层的最近距离需在100 m以上.而这些阈值的差异,主要是由于不同研究区域因不同的地层岩性组合差异而造成的.因而,需确定煤层三带的发育高度,保证煤层顶板隔水层厚度大于或等于裂隙发育高度的1.2倍(刘淑琴等,2016).底板隔水层的厚度应保证底板含水层不会被加热至100 °C.李文军等(2016)利用Matlab对煤炭地下气化传热模拟研究发现,煤炭地下气化热影响扩散程度约为35 m.赵明东等(2017)认为燃烧断面处高温对顶板的垂直影响距离为20 m.因此,本文认为当底板隔水层的厚度大于35 m时,底板下方含水层不会对煤气化产生影响.

1.6 环境地质条件

环境问题几乎是每个行业都需面对的话题,煤炭地下气化也不例外.煤炭地下气化产业的环境地质风险可波及到大气圈、水圈以及岩石圈.潜在的环境影响包括3个方面:空气污染,地表沉降以及土

壤污染,地下水污染(秦勇等,2019)。空气污染主要是二氧化碳、二氧化硫、一氧化氮等气体或粉尘向大气中释放而造成的污染,而这些气体或粉尘可以通过气体净化装置进行脱除。地表下沉与煤厚、气化煤层上覆地层岩性组合、煤气化工艺有关。气化煤层愈厚,燃空区顶板垮落的风险就愈高,地表下沉的幅度就越大;顶板的抗压强度越低,初次垮落步距越小,顶板垮落的风险就越大。有研究表明,利用隔段气化保留煤柱的方法可有效控制地表下沉(Li *et al.*, 2020)。

地下水污染是煤炭地下气化领域持续关注的重要环境问题,如贵州六盘水地区煤矿众多,发展煤炭地下气化产业,其自身独特的喀斯特关键带岩溶水系统是否对当地生活和农业用水造成潜在威胁(罗维等,2019;叶慧君等,2019),也是我们必须考虑的问题。众所周知,地下水污染大致可以分为2类:无机物和有机物污染。前者主要来源于煤中常见的金属元素和微量元素,如汞、镉、铅、砷等(陈佳木等,2021);后者主要是苯、酚、多环芳烃等有机污染物。在气化结束之后,导水裂隙带贯通或者顶板冒落,导致地下水涌入气化区,残留的灰分被浸出,导致地下水 pH 值和许多无机物质浓度增加(Liu *et al.*, 2007)。残留至地下水中的有机污染物由于具有较高的水溶性,成为了典型的污染物。由于地层的自净化能力的存在,这些污染物含量随着时间的推移而逐渐降低。在水动力作用下,地下水的污染问题基本上无法规避,只能通过地下水污染防控加以缓解。地下水污染防控措施主要包括气化炉科学选址、气化钻孔封闭、气化工艺优化、生物降解以及燃空区充填吸附材料等方法(韩磊等,2019)。通过这些方法,可有效降低地下水污染的潜在风险。

1.7 其他条件

其他条件是指在煤炭地下气化过程中,需要考

虑和关注的、非隶属于上述地质问题的条件,如研究区勘查程度、与生产矿井距离、与废弃矿井距离等问题,这些因素直接或间接地对气化炉选址产生影响。按照我国勘查标准,据不同勘查程度,大致可分为预查、普查、详查以及勘探4个阶段。勘查程度越高,地质数据越详细,气化炉选址结果就越可信。气化炉选址必须避开生产矿井(>3.2 km),以避免出现安全事故和煤气泄漏事故(Yang *et al.*, 2016)。是否限定与废弃矿井的距离需视研究区情况而定。如将煤炭地下气化技术用于矿井残留煤的回收时,就不必限定该距离。同时,还需考虑气化炉上部地表的建筑、河流与湖泊、铁路与公路、输电线路等众多问题,且需与这些保持一定的安全距离。

2 煤炭地下气化有利区优选技术体系

2.1 地质指标体系构建

显而易见,影响煤炭地下气化的地质因素种类繁多,次级参数数量更甚。因此,对这些地质指标进行合理的综合统计分析和科学的分级量化处理,不仅是开展煤炭地下气化有利区评价的基础工作,更是核心内容。综合以上分析,可对所有相关地质指标进行分类分级。特征值等级划分与赋分标准主要是以目前技术经济为基础,与煤气化技术政策和文献的分级标准相对应,文献中没有的,则根据实际生产实际情况加以确定,如表1所示。同时,本文根据对气化炉选址的影响程度,将地质指标分为两大类,分别为基本地质指标(A),关键地质指标(B)。关键地质指标(B)是对气化炉的选址、正常运行影响较大的指标,而基本地质指标(A)是指在实际选区过程中获取不到,可以舍弃而又对选区结果影响不大的地质指标。

表1 煤炭地下气化地质选区指标体系

Table 1 Geological selection index system of UCG

序号	类型	亚类	参考指标	指标类型	分类评价级别							
					I类		II类		III类		IV类	
1		煤种 U11	中国煤炭分类	B	HM 8	CY 7	SM 6	QM 5	FM 4	PM 3	WY 2	JM 1
2	煤岩煤质条件 U1	水分 U12	原煤水分含量 (%)	A	0~15		15~35		35~55		>55	
3		灰分 U13	原煤灰分含量 (%)	B	0~20		20~35		35~50		>50	

续表1

序号	类型	亚类	参考指标	指标类型	分类评价级别				
					I类	II类	III类	IV类	
4		挥发分 U14	原煤挥发分含量 (%)	B	50~37	37~20	20~10	<10	
5		硫分 U15	原煤全硫含量 (%)	B	0~1.00	1.01~3.00	3.01~4	>4	
6		反应性 U16	1 000度时,对 CO ₂ 反应性 (%)	B	>30	20~30	20~10	<10	
7		黏结性 U17	原煤黏结指数 (%)	B	0~5	5~20	20~45	>45	
8		煤层厚度 U21	煤层厚度(m)	B	5~15	2.5~5	2~2.5	>15 m;<2 m	
				B	5~15	2.5~5	0.8~2.5	>15 m;<0.8 m	
9		煤层倾角 U22	煤层倾角(°)	A	35	12~35	35~70	<12;>70	
10		煤层埋深 U23	煤层埋深(m)	B	100~500	500~1 000	1 000~2 000	<100; >2 000	
11	煤层赋存条件 U2	煤体结构 U24	原生煤和碎裂煤所占比重 A 为评定指标 (%)	A	<30	30~50	50~70	>70	
12		煤层结构 U25	夹矸厚度系数 (%)	A	<20	20~30	30~60	>60	
13		煤层厚度变化 U26	煤层厚度变异系数 (%)	B	≥0.95	0.85~0.95	0.85~0.75	<0.75	
14		煤炭储量 U27	开采年限(a)	B	>20	15~20	9~15	<9	
15	围岩条件 U3	顶板渗透性 U31	k为渗透率;以 lg(k)为计算值	B	>6	4~6	2~4	<2	
16		底板渗透性 U32	k为渗透率;以 lg(k)为计算值	B	>6	4~6	2~4	<2	
17		顶板岩性 U33	常见煤层顶底板沉积岩层	A	泥岩 6	砂质泥岩 5	泥质砂岩 4	粉砂岩 3 细砂岩 2	多孔透水含水砂岩 1
18		顶板厚度 U34	煤层顶板的厚度 (m)	B	≥100	100~20	20~15	<15	
19	构造条件 U4	断层 U41	断层复杂程度 ZG(黄温钢, 2014)	B	<1	1~2	2~3	≥3	
20		褶皱 U42	褶皱复杂程度 K _s (%)	A	≤70	70~117	117~165	>165	
21		陷落柱 U43	陷落柱影响指数 (%)	B	≤5	5~15	15~30	>30	
22		岩浆岩侵入 U44	岩浆岩侵入指数 (%) (黄温钢, 2014)	B	≤5	5~15	15~30	>30	
23	水文条件 U5	相对涌水量 U51	煤层相对涌水量 (m ³ /t)	B	<1	1~2	2~5	>5	
24		距顶板含水层距离 U52	气化煤层距顶板含水层最近距离 (m)	B	>100	40~100	40~31	<31	

续表1

序号	类型	亚类	参考指标	指标类型	分类评价级别							
					I类	II类	III类	IV类				
25		距底板含水层距离 U53	气化煤层距底板含水层最近距离 (m)	B	50	35	20	15				
26		氟 U61	煤中有害元素分级 ($\mu\text{g/g}$)	A	≤ 100	100~200	200~400	>400				
27		砷 U62	煤中有害元素含量分级 ($\mu\text{g/g}$)	A	≤ 4	4~25	25~80	>80				
28		汞 U63	煤中有害元素含量分级 ($\mu\text{g/g}$)	A	< 0.150	0.150~0.250	0.250~0.600	>0.600				
29		镉 U64	煤中镉含量分级 ($\mu\text{g/g}$)	A	≤ 0.20	0.20~1.00	1.00~10.00	>10.00				
30	环境条件 U6	氯 U65	煤中有害元素含量分级 ($\mu\text{g/g}$)	A	≤ 0.05	0.05~0.150	0.150~0.300	>0.300				
31		磷 U66	煤中有害元素含量分级 (%)	A	≤ 0.010	0.010~0.050	0.050~0.100	>0.100				
32		空气污染可能程度 U67	主要为硫化物和粉尘	B	轻微 4	中等 3	严重 2	极严重 1				
33		有机物污染可能程度 U68	主要为有机物污染问题	B	轻微 4	中等 3	严重 2	极严重 1				
34		地面塌陷可能程度 U69	气化厚煤层时可能出现地面垮落的风险	B	轻微 4	中等 3	严重 2	极严重 1				
35		勘查程度 U71	预查、普查、详查、勘查	B	勘查 4	详查 3	普查 2	预查 1				
36		距生产矿井 U72	气化炉距生产矿井最近距离 (km)	B	≥ 5	5~3.2	3.2~1.6	≤ 1.6				
37		距废弃矿井 U73	气化炉距废弃矿井最近距离 (km)	A	≥ 3	3~1.6	≤ 1.6					
38	其他条件 U7	地形地貌 U74	地形地貌特征	A	平原 8	低山丘陵 7	平坦高原 6	低山 5	沟壑高原 4	中山 3	高山 2	高寒高原 1
39		交通运输 U75	地表交通运输便利程度 (km)	A	便利 4	中等 3	一般 2	困难 1				
40		居民区 U76	研究区距居民区最近距离	A	≥ 3	1~3	≤ 1					
41		生态保护区 U77	视当地政府政策而定	B	≥ 3	1~3	≤ 1					

2.2 有利区定量化评价方法

(1)有利区评价方法选取.常用的有利区定量评价方法主要有列表分类法、综合指数法、模糊综合评价、神经网络法以及灰色聚类法等(黄发明等,2019; Chen and Jiang, 2020).本文基于地质指标的重要程度分类(A类和B类),提出了两种新的煤炭地下气化有利区定

量化评价方法,即精细型评价方法(A+B)和通用型评价方法(B).其中,精细型评价方法(A+B),包含所有基本地质指标(A)和关键地质指标(B),通用型评价方法(B)仅包含关键地质指标(B).相对于通用型评价方法(B),精细型评价方法(A+B)涵盖更多的地质要素,对研究区的地质评价更为全面,可适用于单个区域内

地质数据全面而又充足的地质评价;而通用型评价方法(B)则适用于多个或大面积区域的、地质数据不足的煤炭地下气化地质选区评价。

基于计算机技术的发展以及定量化选区的需要,本文选取模糊综合评判法作为指标体系中参数综合定量化的主要方法。该方法以模糊数学为基础,将受到多种因素制约的对象做出一个综合评价,主要包括确定因素集、确定隶属度、确定权重以及综合评价 4 个步骤(Wang *et al.*, 2018),详细步骤可参考 NB/T 10013-2014。其中,隶属度主要是由隶属函数决定。目前,确定隶属函数方法主要有专家经验法、模糊统计法、推理法以及二元对比排序法等。根据曲线类型,可将隶属函数分为线性和非线性两种类型,常用隶属函数如表 2 所示。参考前人研究成果,采用较多的隶属函数为梯形型和正态型(黄温钢,2014;NB/T 10013-2014),也可绕开隶属函数直接进行赋值,各种方法均有优缺点,在选区时可根据实际情况灵活选用。

(2)地质指标权重确定。目前,有关指标权重

的确定方法有很多,可分为三大类,即主观赋权法、客观赋权法以及组合赋权法(李因果和李新春,2007)。主观赋权法是指根据决策者依据主观经验和重视程度对各属性进行赋值的方法。其常用方法主要有专家调查法、德尔菲法、层次分析法、最小平方方法等。其主要优点在于专家可以根据实际决策问题和专家自身经验合理地确定各属性权重的排序,不至于出现属性权重与属性实际重要程度相悖的情况;主要缺点在于主观性强,客观性较差,在实际应用中有较大局限性。

客观赋权法是指各属性在属性集中的变异程度和对其他属性的影响程度的度量。其常用方法有主成分分析法、熵值法、变异系数法、多目标规划法等。该方法的优点为利用数学方法对各属性权重进行确定,客观性强;缺点在于可能出现确定的权重与实际相悖的情况。组合赋权法(主客观综合赋权法)是指基于指标数据之间的内在规律和专家经验对各属性进行综合赋值的方法。其常用方法是“乘法集成法”和“加法集成法”,可参考该文献(李因果

表 2 常用隶属函数

Table 2 Common membership functions

类型	成本型	区间型	效益型
矩阵型	$A(x)=\begin{cases} 1, & x \leq a, \\ 0, & x > a, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} 1, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x < a, x > b, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} 1, & x \geq a, \\ 0, & x < a, \end{cases}$
梯形型	$A(x)=\begin{cases} 1, & x < a, \\ \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x > b, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b, \\ 1, & b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d, \\ 0, & x < a, x \geq d, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} 0, & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ 1, & x > b, \end{cases}$
k次抛物型	$A(x)=\begin{cases} 1, & x < a, \\ (\frac{b-x}{b-a})^k, & a \leq x \leq b, \\ 0, & x > b, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} (\frac{b-x}{b-a})^k, & a \leq x \leq b, \\ 1, & b < x \leq c, \\ (\frac{b-x}{b-a})^k, & c < x \leq d, \\ 0, & x > d, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} 0, & x < a, \\ (\frac{b-x}{b-a})^k, & a \leq x \leq b, \\ 1, & x > b, \end{cases}$
Γ型	$A(x)=\begin{cases} 1, & x \leq a, \\ e^{-k(x-a)}, & x > a, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} e^{k(x-a)}, & x < a, \\ 1, & a \leq x \leq b, \\ e^{-k(x-a)}, & x > b, \end{cases}$	$A(x)=\begin{cases} 0, & x < a, \\ 1 - e^{-k(x-a)}, & x \geq a, \end{cases}$
正态型	$A(x)=\begin{cases} 1, & x \leq a, \\ \exp\left\{-\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right\}, & x > a, \end{cases}$ $\sigma > 0,$	$A(x)=\exp\left\{-\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right\},$ $\sigma > 0,$	$A(x)=\begin{cases} 0, & x \leq a, \\ 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right\}, & x > a, \end{cases}$ $\sigma > 0,$
柯西型	$A(x)=\begin{cases} 1, & x \leq a, \\ \frac{1}{1 + \alpha(x-a)^\beta}, & x > a, \end{cases}$ $(\alpha > 0, \beta > 0)$	$A(x)=\frac{1}{1 + \alpha(x-a)^\beta},$ $(\alpha > 0, \beta \text{ 为正偶数})$	$A(x)=\begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{1}{1 + \alpha(x-a)^\beta}, & x > a, \end{cases}$ $(\alpha > 0, \beta > 0)$

表 3 煤炭地下气化地质指标权重
Table 3 Weight of geological indexes of UCG

序号	类型	权重	精细化评价		通用型评价	
			亚类(A+B类,共 41 个)	权重	亚类(B类,共 25 个)	权重
1	煤岩煤质条件 U1	0.160 8	煤种 U11	0.283 2	煤种 U11	0.295 2
2			水分 U12	0.040 7	-	-
3			灰分 U13	0.107 0	灰分 U12	0.105 0
4			挥发分 U14	0.156 2	挥发分 U13	0.162 8
5			硫分 U15	0.133 6	硫分 U14	0.139 3
6			反应性 U16	0.155 5	反应性 U15	0.162 1
7			黏结性 U17	0.123 8	黏结性 U16	0.129 1
8	煤层赋存条件 U2	0.195 0	煤层厚度 U21	0.182 9	煤层厚度 U21	0.235 5
9			煤层倾角 U22	0.101 2	-	-
10			煤层埋深 U23	0.136 2	煤层埋深 U22	0.178 8
11			煤体结构 U24	0.081 9	-	-
12			煤层结构 U25	0.104 1	-	-
13			煤层厚度变化 U26	0.184 5	煤层厚度变化 U23	0.276 6
14			煤炭储量 U27	0.209 3	煤炭储量 U24	0.309 2
15	围岩条件 U3	0.124 1	顶板渗透性 U31	0.233 9	顶板渗透性 U31	0.275 1
16			底板渗透性 U32	0.219 2	底板渗透性 U32	0.272 5
17			顶板岩性 U33	0.140 6	-	-
18			顶板厚度 U34	0.406 4	顶板厚度 U34	0.452 4
19	构造条件 U4	0.141 4	断层 U41	0.285 2	断层 U41	0.320 8
20			褶皱 U42	0.110 9	-	-
21			陷落柱 U43	0.331 2	陷落柱 U42	0.372 6
22			岩浆岩侵入 U44	0.272 6	岩浆岩侵入 U43	0.306 6
23	水文条件 U5	0.147 4	相对涌水量 U51	0.388 7	相对涌水量 U51	0.388 7
24			距顶板含水层距离 U52	0.490 8	距顶板含水层距离 U52	0.490 8
25			距底板含水层距离 U53	0.120 5	距底板含水层距离 U53	0.120 5
26	环境条件 U6	0.133 4	氟 U61	0.056 5	-	-
27			砷 U62	0.056 5	-	-
28			汞 U63	0.056 5	-	-
29			镉 U64	0.056 5	-	-
30			氯 U65	0.056 5	-	-
31			磷 U66	0.056 5	-	-
32			空气污染可能程度 U67	0.180 0	空气污染可能程度 U61	0.164 5
33			有机物污染可能程度 U68	0.272 6	水污染可能程度 U62	0.489 3
34			地面塌陷可能程度 U69	0.208 3	地面塌陷可能程度 U63	0.346 2
35	其他条件 U7	0.097 9	勘查程度 U71	0.184 4	勘查程度 U71	0.295 8
36			距生产矿井 U72	0.127 1	距生产矿井 U72	0.294 4
37			距废弃矿井 U73	0.098 4	-	-
38			地形地貌 U74	0.162 8	-	-
39			交通运输 U75	0.025 3	-	-
40			居民区 U76	0.201 0	-	-
41			生态保护区 U77	0.201 0	生态保护区 U73	0.409 9

和李新春, 2007). 这种方法理论上拥有上述 2 种方法的优点, 同时也可克服这 2 种方法的缺点.

考虑到模型的通用性, 本文采用专家调查法和

层次分析法(AHP)相结合来确定地质指标权重, 而在实际选区时可灵活选择权重确定方法, 如组合赋权法. 专家调查法和 AHP 法较为常见, 这里不再阐

表4 煤炭地下气化四大类条件定性评价及分级方案

Table 4 Qualitative evaluation and classification scheme of four conditions for UCG

评价指标	分类评价级别			
	优	良	中	劣
资源条件	可气化煤炭资源量分布非常集中,开采年限20年以上.厚煤层和特厚煤层发育,厚度变化稳定,埋深较浅(>100 m),煤质变化稳定,以褐煤或长焰煤为主.	可气化煤炭资源量集中,开采年限15至20年;中厚和厚煤层发育,厚度变化较稳定,埋深较大;煤质变化稳定,以瘦煤、气煤或肥煤为主.	可气化煤炭资源量一般,开采年限9~15年.中厚煤层发育,煤厚变化一般,埋深较大;煤种以贫煤、无烟煤或焦煤为主.	煤炭资源分布分散,开采年限9年以下.极薄和薄煤层发育,煤厚极不稳定,埋深过浅或过深,煤层分叉严重.
开采技术条件	水文地质条件简单,煤层上部含水层不发育或距顶板距离非常大,煤层顶底板渗透率低,且不易垮落.	水文地质条件一般,煤层顶板距上部含水层较远,一般不会出现顶板垮落沟通含水层致气中断的风险.	水文地质条件中等,煤层距上部含水层较近,可能会出现含水层沟通气化炉的事故;顶板强度低,厚度不大.	水文地质条件复杂,煤层距含水层非常近,极易出现含水层沟通气化炉的风险;顶板极易垮落.
区域构造条件	地质构造简单,断层稀少,煤层不受岩浆岩影响,陷落柱不发育.	地质构造一般,断层较发育,有时受岩浆岩影响,陷落柱分布稀少.	地质构造中等,断层发育,或受岩浆岩和陷落柱影响一般.	地质构造复杂,断层、陷落柱非常发育,煤层受岩浆岩侵入严重.
环境条件	水污染和地面塌陷可能性很低,距地表密集建筑物和生态保护区很远.	水污染和地面塌陷可能性一般,距地表密集建筑物的距离较近.	水和空气污染中等,地面塌陷严重,可能会对周围建筑物存在影响.	水污染和空气污染严重,地面塌陷非常严重,会严重干扰正常的居民生活和交通运输.

述,其原理和相关步骤可参考该文献(黄温钢, 2014;张纪伟和陈华勇, 2021).经一致性检验,煤炭地下气化地质指标所获权重如表3所示.

2.3 定性分级与综合评价

在地质指标分级量化、权重赋值以及评价方法类型确定之后,煤炭地下气化有利区优选评价方法就初步构建完成.本文遵循地质研究(定性)→定量排序(定量)→地质分析(再定性)的辩证思路,对煤炭地下气化有利区优选评价技术体系进行完善和提升.由于精细型评价方法(A+B)包括41个量化指标,权重赋值不尽相同,无法对评价结果阈值限定作出准确评估.而通用型评价方法(B)的基础是精细型评价方法中的关键指标,两者在选取指标方面是一脉相承的,故两者资源评价分级方案是一致的.为此,本文仅对通用型评价方法(25个指标)中所涉及到的权重大于0.2的关键地质指标,进行分类汇总,形成了资源、开采技术、区域构造和环境四大类条件,其中,资源条件包括煤岩煤质条件、煤层赋存条件,开采技术条件包括围岩条件和水文条件.将每类条件进行了定性描述,细分为优、良、中、劣4级,如表4所示.依据这四大类条件的相互组合关系,可以将选区结果进行定性分级,其标准为:凡达到3个优级及一个良好的,定为I级经济资源;凡达到4个良好的,定为II级经济资源;凡达到4个中级

的,定为III级经济资源;凡有1个劣级的,定为IV级经济资源;凡有2个劣级及以上的,定为V级,属非经济资源.需要说明的是,在两类之间的区块(如既不属于II级又不属于III级,则定为III级).

依据上述定性评价分级与定量评价结果(2.2部分),可以对最终评价结果进行排序和综合类别划分,可分为有利区、较有利区、不利区等.

综上所述,依据定量评价和定性评价过程,煤炭地下气化有利区优选的一般步骤为:①研究区地质资料分级汇总→②基于研究区地质资料的丰富程度确定评价方法(精细型或通用型)→③对研究区各区块煤炭地下气化地质可行性进行定量评价和量化排序→④依据4类条件的分级方案(表4),对各区块进行等级评价→⑤基于定量化评价结果和定性分级结果,最终确定各区块开发次序,完成选区工作.至此,基于精细型和通用型评价方法的煤炭地下气化有利区优选技术体系的构建工作全部完成.

3 结论

(1)对影响煤炭地下气化的七大类条件,如煤岩煤质、煤层赋存、围岩(顶底板)、地质构造、水文地质、环境地质等,和41个次级地质指标,进行了分类汇总和量化分级处理,构建了煤炭地

下气化地质选区指标体系。

(2) 根据对选区评价的重要程度, 将各次级地质指标分为基本地质指标(A)和关键地质指标(B)两大类; 基于该两大类指标, 提出了 2 种新的煤炭地下气化有利区定量评价方法, 即精细型(A+B)和通用型(B); 利用专家打分法和层次分析法确定了这 2 种评价方法中地质指标的权重; 依据资源、开采技术、区域构造和环境四大类条件, 确定了定性评价结果的分级方案, 即优、良、中、劣 4 级。

(3) 综合定量评价和定性分级过程, 提出了有利区优选的一般步骤, 可以对最终选区结果进行排序和综合类别划分, 最终形成了一套完整的煤炭地下气化有利区优选技术体系。

References

- Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., Zahedi, G., 2013. Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1): 189–214. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.09.004>
- Bielowicz, B., Kasiński, J. R., 2014. The Possibility of Underground Gasification of Lignite from Polish Deposits. *International Journal of Coal Geology*, 131: 304–318. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.06.025>
- Chen, B., 2006. The Study on High Temperature Gasification of Different Types of Coal (Dissertation). East China University of Technology, Shanghai (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. M., Wu, Z. H., Liu, W. H., et al., 2021. Heavy Metal Pollution Evaluation and Species Analysis of Waste Rock Piles in Shuikoushan, Hunan Province. *Earth Science*, 46(11): 4127–4139 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. H., Jiang, C. Q., 2020. An Integrated Mass Balance Approach for Assessing Hydrocarbon Resources in a Liquid-Rich Shale Resource Play: An Example from Upper Devonian Duvernay Formation, Western Canada Sedimentary Basin. *Journal of Earth Science*, 31(6): 1259–1272.
- Ge, S. R., 2017. Chemical Mining Technology for Deep Coal Resources. *Journal of China University of Mining & Technology*, 46(4): 679–691 (in Chinese with English abstract).
- Han, L., Qin, Y., Wang, Z. T., 2019. Geological Consideration for Site Selection of Underground Coal Gasifier. *Coal Geology & Exploration*, 47(2): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Wang, Y., Dong, Z. L., et al., 2019. Regional Landslide Susceptibility Mapping Based on Grey Relational Degree Model. *Earth Science*, 44(2): 664–676 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. G., 2014. Study on Comprehensive Evaluation and Stable Production Technology for Underground Gasification of Residual Coal (Dissertation). China University of Mining & Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. G., Wang, Z. T., 2017. Comprehensive Evaluation Model of Fuzzy Analytic Hierarchy Process with Variable Weight for Underground Coal Gasification. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 37(4): 500–507 (in Chinese with English abstract).
- Jin, F. L., Ji, M. J., Zhang, P. C., 1998. Characteristics of Magmatic Intrusion and Prediction for Coalbed Thickness in Yonggu Mine, Huaibei Coalfield. *Journal of China University of Mining & Technology*, 27(2): 100–103 (in Chinese with English abstract).
- Khadse, A. N., 2015. Resources and Economic Analyses of Underground Coal Gasification in India. *Fuel*, 142: 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.057>
- Li, H. Z., Guo, G. L., Zheng, N. S., 2018. Influence of Coal Types on Overlying Strata Movement and Deformation in Underground Coal Gasification without Shaft and Prediction Method of Surface Subsidence. *Process Safety and Environmental Protection*, 120: 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.023>
- Li, H. Z., Zha, J. F., Guo, G. L., et al., 2020. Improvement of Resource Recovery Rate for Underground Coal Gasification through the Gasifier Size Management. *Journal of Cleaner Production*, 259(Publish): 120911. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120911>
- Li, W. J., Wei, J. J., Su, Q. Q., et al., 2016. Analysis of Heat Transmission Effect of Underground Coal Gasification Process on Upper Strata of Coal Seam. *Energy and Energy Conservation*, (1): 3–4, 35 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. G., Li, X. C., 2007. Weight Determination of Comprehensive Evaluation Model. *Journal of Eastern Liaoning University (Social Sciences)*, 9(2): 92–97 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J., Zhang, Y. C., Wei, C. Y., et al., 2006. Experiment Research on Underground Coal Gasification of Xiyang Anthracite. *Journal of China University of Mining & Technology*, 35(1): 25–28, 34 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. Q., Li, J. G., Mei, M., et al., 2007. Groundwater

- Pollution from Underground Coal Gasification. *Journal of China University of Mining & Technology*, 17(4): 467–472.
- Liu, S.Q., Liang, J., Yu, X.D., et al., 2003. Characteristics of Underground Gasification of Different Kinds of Coal. *Journal of China University of Mining & Technology*, 32(6): 624–628 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.Q., Shi, S.Z., Feng, G.X., et al., 2019. Geological Site Selection and Evaluation for Underground Coal Gasification. *Journal of China Coal Society*, 44(8): 2531–2538 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.Q., Zhang, S.J., Niu, M.F., et al., 2016. Technology Process and Application Prospect of Underground Coal Gasification. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.Q., Zhou, R., Pan, J., et al., 2013. Location Selection and Groundwater Pollution Prevention & Control Regarding Underground Coal Gasification. *Coal Science and Technology*, 41(5): 23–27, 62 (in Chinese with English abstract).
- Luo, W., Yang, X.L., Ning, L.Y., et al., 2019. Pollution Status and Characteristics of Main Carbonate Aquifers in Guizhou Province. *Earth Science*, 44(9): 2851–2861 (in Chinese with English abstract).
- Nieć, M., Sermet, E., Chećko, J., et al., 2017. Evaluation of Coal Resources for Underground Gasification in Poland. Selection of Possible UCG Sites. *Fuel*, 208: 193–202.
- Perkins, G., 2018. Underground Coal Gasification—Part I: Field Demonstrations and Process Performance. *Progress in Energy and Combustion Science*, 67: 158–187.
- Qin, Y., Wang, Z.T., Han, L., 2019. Geological Problems in Underground Coal Gasification. *Journal of China Coal Society*, 44(8): 2516–2530 (in Chinese with English abstract).
- Shafirovich, E., Varma, A., 2009. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(17): 7865–7875. <https://doi.org/10.1021/ie801569r>
- Sheng, Y., Benderev, A., Bukolska, D., et al., 2016. Interdisciplinary Studies on the Technical and Economic Feasibility of Deep Underground Coal Gasification with CO₂ Storage in Bulgaria. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(4): 595–627. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9592-1>
- Vyas, D. U., Singh, R. P., 2015. Worldwide Developments in UCG and Indian Initiative. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.005>
- Wang, G., Qin, Y., Xie, Y. W., et al., 2018. Coalbed Methane System Potential Evaluation and Favourable Area Prediction of Gujiao Blocks, Xishan Coalfield, Based on Multi-Level Fuzzy Mathematical Analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 160: 136–151.
- Wang, Z. Q., 2016. Establishment of Mass and Energy Balance Model in UCG Process Based on Three Zones Distribution (Dissertation). China University of Mining and Technology, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wu, C.F., Liu, X.L., Zhang, S.S., 2018. Construction of Index System of “Hierarchical Progressive” Geological Selection of Coalbed Methane in Multiple Seam Area of Eastern Yunnan and Western Guizhou. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1647–1653 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Chen, Y.P., Xin, F.D., et al., 2022. Challenges Faced by Underground Coal Gasification and Technical Countermeasures. *Coal Science and Technology*, 50(1): 265–274 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. M., Koukouzas, N., Green, M., et al., 2016. Recent Development on Underground Coal Gasification and Subsequent CO₂ Storage. *Journal of the Energy Institute*, 89(4): 469–484. <https://doi.org/10.1016/j.joie.2015.05.004>
- Yang, L.H., Liang, J., Xiang, Y.Q., 2001. Study on the Reaction Kinetic Character in Underground Coal Gasification. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 29(3): 223–227 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L.H., Pan, X., Dong, G.M., 2013. Study on Model Test of Underground Gasification of Coking Coal. *Coal Science and Technology*, 41(5): 16–18, 22 (in Chinese with English abstract).
- Yao, K., Liu, H.T., Pan, X., et al., 2011. Model Test on Water Inflow of Underground Coal Gasification (UCG). *Coal Conversion*, 34(3): 27–30, 40 (in Chinese with English abstract).
- Ye, H.J., Zhang, R.X., Wu, P., et al., 2019. Characteristics and Driving Factor of Hydrochemical Evolution in Karst Water in the Critical Zone of Liupanshui Mining Area. *Earth Science*, 44(9): 2887–2898 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. W., Chen, H. Y., 2021. Preliminary Study on Quantitative Ecological Evaluation of Exploration and Development of Ore Deposits: A Case Study of Luoboling Porphyry Copper Molybdenum Deposit, Fujian Province. *Earth Science*, 46(11): 3818–3828 (in Chi-

- nese with English abstract).
- Zhao, M.D., Dong, D.L., Tian, K., 2017. Change Mechanism Simulation Study of the Overlying Strata Temperature Field and Fracture Field in UCG. *Journal of Mining Science and Technology*, 2(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Huang, W.G., Xu, Q., et al., 2018. Study on Evaluation of Geological Conditions for Underground Coal Gasification: Taking Zhuzhai Minefield of Jiangsu Province as an Example. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 37(3): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z., Wang, L.X., Guo, Z.J., et al., 2020. Assessment of Coal Underground Gasification Resources in Lupanshui Coalfield, Guizhou Province. *Coal Geology of China*, 32(3): 27–33 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C.N., Chen, Y.P., Kong, L.F., et al., 2019. Underground Coal Gasification and Its Strategic Significance to the Development of Natural Gas Industry in China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2): 195–204 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈波, 2006. 不同煤种的高温气化反应性研究(硕士学位论文). 上海: 华东理工大学.
- 陈佳木, 吴志华, 刘文浩, 等, 2021. 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. *地球科学*, 46(11): 4127–4139.
- 葛世荣, 2017. 深部煤炭化学开采技术. *中国矿业大学学报*, 46(4): 679–691.
- 韩磊, 秦勇, 王作棠, 2019. 煤炭地下气化炉选址的地质影响因素. *煤田地质与勘探*, 47(2): 44–50.
- 黄发明, 汪洋, 董志良, 等, 2019. 基于灰色关联度模型的区域滑坡敏感性评价. *地球科学*, 44(2): 664–676.
- 黄温钢, 2014. 残留煤地下气化综合评价与稳定生产技术研究(博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.
- 黄温钢, 王作棠, 2017. 煤炭地下气化变权-模糊层次综合评价模型. *西安科技大学学报*, 37(4): 500–507.
- 金法礼, 冀明君, 张培础, 1998. 淮北煤田永固井田岩浆岩侵入特征及煤厚预测. *中国矿业大学学报*, 27(2): 100–103.
- 李文军, 魏家骏, 苏倩倩, 等, 2016. 煤炭地下气化过程对煤层上部岩层的传热分析. *能源与节能*, (1): 3–4, 35.
- 李因果, 李新春, 2007. 综合评价模型权重确定方法研究. *辽东学院学报(社会科学版)*, 9(2): 92–97.
- 梁杰, 张彦春, 魏传玉, 等, 2006. 昔阳无烟煤地下气化模型试验研究. *中国矿业大学学报*, 35(1): 25–28, 34.
- 刘淑琴, 梁杰, 余学东, 等, 2003. 不同煤种地下气化特性研究. *中国矿业大学学报*, 32(6): 624–628.
- 刘淑琴, 师素珍, 冯国旭, 等, 2019. 煤炭地下气化地质选址原则与案例评价. *煤炭学报*, 44(8): 2531–2538.
- 刘淑琴, 张尚军, 牛茂斐, 等, 2016. 煤炭地下气化技术及其应用前景. *地学前缘*, 23(3): 97–102.
- 刘淑琴, 周蓉, 潘佳, 等, 2013. 煤炭地下气化选址决策及地下水污染防治. *煤炭科学技术*, 41(5): 23–27, 62.
- 罗维, 杨秀丽, 宁黎元, 等, 2019. 贵州主要碳酸盐岩含水层污染现状与特征. *地球科学*, 44(9): 2851–2861.
- 秦勇, 王作棠, 韩磊, 2019. 煤炭地下气化中的地质问题. *煤炭学报*, 44(8): 2516–2530.
- 王张卿, 2016. 基于三区分布的煤炭地下气化物料与能量平衡模型的构建(博士学位论文). 北京: 中国矿业大学.
- 吴财芳, 刘小磊, 张莎莎, 2018. 滇东黔西多煤层地区煤层气“层次递阶”地质选区指标体系构建. *煤炭学报*, 43(6): 1647–1653.
- 许浩, 陈艳鹏, 辛福东, 等, 2022. 煤炭地下气化面临的挑战与技术对策. *煤炭科学技术*, 50(1): 265–274.
- 杨兰和, 梁杰, 项友谦, 2001. 煤炭地下气化反应动力学特性的研究. *燃料化学学报*, 29(3): 223–227.
- 杨兰和, 潘霞, 董贵明, 2013. 焦煤地下气化模型试验研究. *煤炭科学技术*, 41(5): 16–18, 22.
- 姚凯, 刘洪涛, 潘霞, 等, 2011. 涌入水对煤炭地下气化影响的模型实验研究. *煤炭转化*, 34(3): 27–30, 40.
- 叶慧君, 张瑞雪, 吴攀, 等, 2019. 六盘水矿区关键带岩溶水化学演化特征及驱动因子. *地球科学*, 44(9): 2887–2898.
- 张纪伟, 陈华勇, 2021. 金属矿床勘查与开发定量生态评估体系初探: 以福建罗卜岭斑岩型铜钼矿为例. *地球科学*, 46(11): 3818–3828.
- 赵明东, 董东林, 田康, 2017. 煤炭地下气化覆岩温度场和裂隙场变化机制模拟研究. *矿业科学学报*, 2(1): 1–6.
- 赵岳, 黄温钢, 徐强, 等, 2018. 煤炭地下气化地质条件评价研究: 以江苏省朱寨井田为例. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 37(3): 1–11.
- 周泽, 汪凌霞, 郭志军, 等, 2020. 贵州省六盘水煤田煤炭地下气化资源评价. *中国煤炭地质*, 32(3): 27–33.
- 邹才能, 陈艳鹏, 孔令峰, 等, 2019. 煤炭地下气化及对中国天然气发展的战略意义. *石油勘探与开发*, 46(2): 195–204.