

未来我国气体能源发展动向研究

宋科余^{1,2)}, 龙涛^{1)*}, 段红梅³⁾, 陈其慎¹⁾, 张艳飞¹⁾, 郑国栋¹⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2)山西省地质调查院, 山西太原 030006;
3)商务部国际贸易经济合作研究院, 北京 100710

摘要:“十四五”期间我国能源需求增速将有所放缓,但仍将处于高位,随着经济社会的不断恢复以及环境问题的显现,未来能源安全形势仍然严峻,及早建立清洁、高效、安全、多元化的现代能源体系,调整优化我国能源供给结构迫在眉睫。本文通过判断我国气体能源发展现状,构建气体能源优先发展评价指标体系,运用层次分析法与灰色关联度评价法对各气体能源进行对比分析得出,消耗排放、燃料热值、国际合作、政策扶持、生产成本、资源潜力、生产排放等因素对各气体能源发展影响最大;未来应优先发展致密气、页岩气、煤层气,理性发展煤制气,科学布局可燃冰开发规划;建议加大气体能源勘探投入,提高天然气供应比例,摸清页岩气资源家底,突破核心技术,提升环保监督、安全生产意识,优化统一现有政策。

关键词: 气体能源; 层次分析法; 灰色关联度法; 发展动向

中图分类号: F426.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.102602

Research on the Development Trend of China's Gas Energy in the Future

SONG Ke-yu^{1,2)}, LONG Tao^{1)*}, DUAN Hong-mei³⁾, CHEN Qi-shen¹⁾,
ZHANG Yan-fei¹⁾, ZHENG Guo-dong¹⁾

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*
2) *Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan, Shanxi 030006;*
3) *Chinese Academy of International Trade and Economic Cooperation, Beijing 100710*

Abstract: During the "14th Five-Year Plan" period, China's energy demand growth rate will slow down but will remain at a high level. With the continuous recovery of the economy and society and the emergence of environmental problems, the future energy security situation will remain severe, and the establishment of clean, efficient, safe and diversified modern energy system and the adjustment as well as optimization of China's energy supply structure are imminent. Based on the judgment of the current status of gas energy development in China, this paper constructs an indicator system specifically for the evaluation of priority development of gas energy, and uses Analytic Hierarchy Process and gray correlation evaluation methods to make a comparatively analysis. The results show that from the perspective of indicator weights, factors such as consumption emissions, fuel calorific value, international cooperation, policy support, production costs, resource potential, production emissions and other factors have the greatest impact on the development of gas energy; from the perspective of the priority development sequence of gas energy, priority should be given to the development of tight gas, shale gas, and coalbed methane, the rational development of coal gas, and the scientific layout of combustible ice development plans in addition to conventional natural gas. It is recommended to increase investment in gas energy exploration, increase the proportion of natural gas energy supply, find out shale gas resources, break through core technologies, improve environmental protection supervision and safety production awareness, and optimize and unify existing

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20160103; DD20190674)和中国工程院重大咨询研究项目(编号: 2017-ZD-15-05-01)联合资助。

收稿日期: 2020-09-24; 改回日期: 2020-10-20; 网络首发日期: 2020-10-27。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 宋科余, 男, 1988年生。工程师。主要从事矿产资源评价和战略研究。E-mail: 329757247@qq.com。

*通讯作者: 龙涛, 男, 1991年生。硕士, 研究实习员。主要研究方向为矿产资源战略与规划。E-mail: 240505451@qq.com。

policies.

Key words: gas energy; analytic hierarchy process; gray correlation method; development trend

我国能源资源(除煤炭)贫乏且长期以来供不应求,2019年能源消费总量48.6亿t标准煤,较2018年增长3.3%,石油、天然气对外依存度分别为71%和43%,2020年以来,新冠疫情暴发对我国经济社会和能源发展带来较大阶段性影响,“十四五”期间我国能源需求增速将有所放缓,但仍将处于高位(陈其慎等,2015a, b),随着经济社会的不断恢复以及环境问题的显现,未来能源安全形势仍然严峻,及早建立清洁、高效、安全、多元化的现代能源体系,调整优化我国能源供给结构迫在眉睫(陈其慎等,2016, 2021; 董延涛等, 2021; 郭娟等, 2021)。气体能源指在经济社会条件下,能产生热能或动力的气态可燃物质(郭焦锋, 2013),根据国家能源领域战略规划指出,气体能源将作为未来我国能源结构调整的主要增长点,作为优质、高效、清洁能源,气体能源可成为我国有效缓解能源供应安全、实现能源体系多元化发展、降低环保压力、提高能源综合利用效率以及保障国家能源安全等多重考验的重要解决途径。当前我国气体能源产业发展已初具规模,2019年我国天然气产量同比增长10%,致密气、页岩气等非常规天然气产量约占天然气总产量的1/3,非常规气占比逐年提高,常规天然气与非常规天然气发展并举的格局已初步形成。为科学布局我国气体能源产业,提高发展成效,避免无序竞争,化解发展结症,本文在对我国气体能源发展现状分析的基础上,通过构建评价指标体系,瞄准不同气体能源当前所面临的主要影响因素及存在问题,并提出相应的对策建议。

1 研究概况

气体能源是近年来能源领域的研究热点,关于气体能源发展战略的研究较多,宏观来看,我国非常规气存在资源勘查程度低、核心技术落后、鼓励政策不完善、环境影响风险高等问题(陈和渭, 2018; 郭焦锋, 2019),应以常规与非常规协调发展、攻克关键技术、加强国际合作、保护生态环境、完善相关政策等作为未来战略发展方向(姜鑫民等, 2017; 潘继平, 2019)。具体到不同气体能源,应根据产业特性,剖析发展影响因素,建立评价体系,郭万山(1997)提出产业间客观存在着错综复杂的经济依存关系,资源的有限性、分布不均衡性以及资源丰度的差异性客观上决定了产业发展应按优先次序进行,他以定性分析与定量分析相结合为原则,运用主成分分析法建立了产业优先发展序列排序模型;汪莹

和王光岐(2014)运用灰色关联度分析法对矿产资源禀赋、市场条件、开发技术条件、市场配套条件和环境保护条件等5个影响因素进行分析,并对矿产资源发展评价进行实证研究;张艳飞等(2014)根据我国矿产资源的供需特征从134种矿产中初步筛选出48种作为评价样本,建立了重点勘查矿种评价指标体系,并通过层次分析法对我国非油气资源矿种需求评价及优先勘查序列进行厘定;邢万里(2015)运用层次分析法对我国2030年之前我国新能源发展优先序列进行排序,得出2030年我国新能源发展优先序列的为风能、核能、太阳能、生物质能和地热能。

目前国内外通过构建评价体系对气体能源发展战略的研究相对较少,郭焦锋(2013)对我国气体能源可持续发展战略进行定性及简单的定量分析,提出加快发展常规天然气、页岩气、煤层气、煤制甲烷、可燃冰等气体能源可作为新的经济增长点有效缓解我国面临的能源安全、环境保护和减排等多重压力。

2 气体能源优先发展评价指标体系

2.1 研究方法

综合前人研究可见,当前相关研究大多都是单纯使用层次分析法或灰色关联法等其中一种方法进行,然而层次分析法(AHP)虽然能够充分体现打分者主观意见,但很难排除人为因素带来的偏差;灰色关联度法在测算各个方案与最优方案间关联度时全部使用同一权重,不能体现评价最优性、公正性。因此,本文在借鉴前人研究的基础上,选定常规天然气、页岩气、致密气、煤层气、煤制气、可燃冰六项作为研究对象,采用将定性分析和定量研究相结合的评价模型与方法:层次-灰色关联度分析法(AHP-GRG),将评价产业优先发展序列的有关影响因素作为评价指标,基于层次分析法建立评价指标的层次关系及权重向量并赋予合理的权重,然后构建灰色关联分析法模型,计算各气体能源产业发展优势与它的灰色加权关联度。最后,根据指标权重大小分析影响产业发展的主要因素,确定各气体能源产业间灰色关联度,遵从择优选择、择幼保护、重点突出原则进行优先发展排序,通过以上分析得出我国气体能源产业所存在的问题,为我国气体能源的可持续发展提供参考。

2.2 基于AHP的评价指标体系

(1)评价指标体系构建及研究范围界定

气体能源(除常规天然气外)区别于常规化石能源优势在于资源潜力大,使用范围广,能量密度高,低碳环保。气体能源优先发展序列的决定因素是它的潜力性、经济性和科技性和环保性,体现在指标设置上,潜力性体现在气体能源的资源、技术及创新和发展潜力三个方面,产业和经济意义体现了经济性,环境影响体现了环保性。

本文基于气体能源产业特点与我国气体能源发展现状实际,在建立评价指标的基础上,通过层次-灰色关联度分析法(AHP-GRG),构建我国气体能源优先发展评价体系,该指标体系由三个层级和两个要素构成,目标层为我国气体能源优先发展序列(A1),准则层包含资源状况(B1)、经济意义(B2)、技术及创新(B3)、环境影响(B4)以及发展潜力(B5)5个二级指标,资源状况(指标层 C1-C4)包含资源禀赋、资源获取、开发现状及燃料热值4个三级指标;经济意义(指标层 C5-C8)包含市场程度、全生命周期成本、相关产业影响及应用范围4个三级指标;技术及创新(指标层 C9-C12)包含技术水平、国际合作、人才储备及科研环境4个三级指标;环境影响(指标层 C13-C14)包含生产排放、消耗排放2个三级指标;发展潜力(指标层 C15-C18)包含资源潜力、政策扶持、资金投入及监管机制4个三级指标,共计18项三级指标。两个要素为指标含义及编号,指标含义对各个指标的意义及计算方式进行了简要介绍,编号对三个层级分别编号。最后,在对我国气体能源产业发展初步判断的基础上,选取常规天然气、页岩气、致密气、煤层气、煤制气、可燃冰为

主要研究对象(表1),分析不同气体能源产业特性,得出主要影响因素及优先发展排序。

(2)指标分析

本文指标选取依照表1中的指标含义,其原始数据来源于政府部门公开发展的数据,如BP、国际能源署(IEA)和美国能源署(EIA)等网站的公开数据,《能源发展“十三五规划”》等政府公开规划、以及各类专业科研单位的行业分析和研究专题报告。

①资源状况

我国天然气资源总量丰富,资源潜力较大。据国家能源局数据,2019年我国常规天然气新增探明地质储量为 $0.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,新增技术可采储量 $0.35 \times 10^{12} \text{ m}^3$;天然气(含非常规气)产量达 $17.7 \times 10^{10} \text{ m}^3$,创历史新高,其中常规气产量为 $15.3 \times 10^{10} \text{ m}^3$,页岩气产量为 $154 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤层气产量为 $55 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤制气产量为 $36.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,对外依存度开始下行。我国非常规气体资源丰富,资源类型复杂,构造多样,开发潜力巨大,但禀赋差,勘探开发难度大。据中石油数据,2019年底,我国页岩气累计探明地质储量达 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,煤层气资源量达 $3.68 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量约为 $1.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截止2019年我国致密气已进入规模化开发利用阶段,页岩气两大产区已初具规模,未来5至10年页岩气将成为天然气产量增长的重要来源,煤层气经过20余年发展实现工业突破,天然气水合物也已于2020年3月底实现第2次试采成功。

②经济意义

我国常规天然气产业处于快速发展阶段,消费

表1 气体能源产业发展时序评价指标体系
Table 1 Time series evaluation index system for the development of gas energy industry

目标层	准则层	指标层	指标含义
A1 中国 气体能 源优先 发展序 列	B1 资源状况	C1 资源禀赋	资源总量及资源品质
		C2 资源获取	资源获取渠道、获取方式以及资源开采
		C3 开发现状	资源开发情况、投入情况、生产情况以及产业规模
		C4 燃料热值	单位质量(指固体或液体)或单位的体积(指气体)的燃料完全燃烧并冷却到燃烧前的温度所释放出来的热量
	B2 经济意义	C5 市场程度	生产、销售规模以及开放程度
		C6 全生命周期成本	生产单位能源产品自勘探、开采、运输所耗费的所有成本
		C7 相关产业影响	受其他资源产业发展影响程度以及对其他产业的影响力
		C8 应用范围	主要用途、所能应用的不同领域以及潜在的应用领域
	B3 技术及创新	C9 技术水平	核心技术、技术储备
		C10 国际合作	对国外先进技术、设备、发展模式、资金等合作及学习引进
		C11 人才储备	参与研究队伍规模及水平
		C12 科研环境	科研基础、科研投入
	B4 环境影响	C13 生产排放	生产过程中所消耗其他能源及产生的有害物质
		C14 消耗排放	消耗完成后所排放的有害物质
	B5 发展潜力	C15 资源潜力	资源潜力中可利用的部分
		C16 政策扶持	政府针对气体能源发展制定的各种利好政策
		C17 资金投入	国家对不同气体能源发展进行的投资力度
		C18 监管机制	发展过程中所设立的良好、快速、高效发展的监督、管理机制

量高速增长,下游市场已形成多主体竞争格局,储产量不断增长,供应能力大幅提升,基础设施不断完善,积极引进国外资源,多元供气格局初步形成;近年来我国页岩气产业投资规模不断扩大,但勘探开发缺乏竞争,大规模商业化仍面临挑战;致密气探矿权集中,只有中石油和中石化有开采权,市场开发主体相对单一,作为当前我国天然气储量、产量扩大的主要增长来源,已引入市场化机制,运作模式成熟,开发前景广阔;同发达国家相比我国煤层气产业开发成本高、资源利用率较低,近些年发展迅速,市场化程度不断扩大;煤制气市场程度较高,在国内天然气供应紧张和国际油价、天然气价格不稳定情况下,煤制天然气具有一定生存空间和盈利能力,另外,推动煤制气发展的另一个重要动力是煤炭市场的持续不景气(白金燕等,2017);我国可燃冰尚未实现商业化开采,但资源丰富,市场前景可期。

我国常规天然气成本大约在 25 ~ 65 USD/桶原油;受益于有利的政策导向、迅速的技术科研进展,非常规气体开发成本不断下降,致密气大多分布区域与常规天然气属同一油气区块,两者基础设施大多可共用,基础开发成本节省(陈一鹤,2015);煤制气生产成本中原料煤占比约四成,同时需要耗费大量水资源,耗水量约 10 t/m³,高于常规天然气 3 t/m³,全生命周期成本大约在 65 ~ 105 USD/桶原油(Li et al., 2020);当前技术条件下我国页岩气开发成本同国内天然气价格基本持平,为美国开发成本的两倍多,短期内难以实现盈亏平衡;煤层气井生产年限较长,导致投资回报较慢,相比常规天然气井七至八年的有效生产年限,煤层气的生产周期及投资回报周期较长,通常三至四年后产量才能达到峰值,后开始逐年递减,长周期直接导致市场与政策变化风险的不可控。常规天然气应用领域非常广泛,主要用途包括发电、工业燃料、城市燃气、工艺生产以及天然气汽车等领域;页岩气、致密气、煤层气也已逐步用于民用、工业、化工和发电等领域。

③技术 & 创新

当前我国已掌握岩性地层气藏、海相碳酸盐岩成藏等理论,以及以地球物理识别为核心的气藏勘查技术,资源勘探理论知识不断完善;已攻克超低渗透气藏经济开发以及高含硫化氢气田安全开采、集输处理和驱油循环利用等关键技术,开采能力得到提升;已完成 3000 型大型压裂车、可钻式桥塞等页岩气关键装备研制,装备自主化水平逐步成型(董大忠等,2018)。我国作为全球范围内唯一大规模生产煤制气的国家,CH₄化技术等技术手段已经相

对成熟,已具备大型煤气化设备自主生产能力。我国的可燃冰勘探技术、海底采掘技术研制也走在了世界前列(表 2)。

我国天然气“走出去”较早,国际合作对象多元化:包括与天然气生产大国俄罗斯、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦等国家以及 IEA、OPEC 国际能源组织合作,合作方式多元化:包括天然气的勘探、开发、运输管道建设、以及技术交流;页岩气方面,政府鼓励企业(如中石化、中石油和中海油)进行海外收购来获得最先进的勘探开采技术,同时联手国际石油公司(如壳牌、雪弗龙、道达尔和康菲公司)开始在国内进行项目试点(贾凌霄等,2018);我国煤层气国际合作起步较早,在经历了波折与困难之后,煤层气对外合作项目已经从初期重视外资引进转向引进技术为主,在研发条件上,由于我国天然气及煤层气开发已具备一定的基础,在研发条件上无论是资金还是试验条件都具有一定的优势(李健,2012),煤制气与页岩气是目前我国未来能源发展的重点方向,并都有一定规模的投入,未来我国页岩气开发要逐步从理论研究到商业开发转变,煤制气的研发条件要优于页岩气(张抗和白振瑞,2020)。

④环境影响

常规天然气具备燃烧排放零废渣、废水,生产排放少有毒、有害产物的特点,同时常规天然气热值高,符合低碳、环保的清洁能源要求;页岩气在整个开发过程中,甲烷排放问题比较突出,平均排放率在 3.26%左右,同时水力压裂法产生回流液可能造成水污染等风险,危及生态环境,页岩气全生命周期排放比常规天然气高 6%左右(余晨等,2014);煤层气是一种在采煤过程中所产生的以 CH₄ 为主的烃类气体,同时在采煤过程中还会产生大量 H₂S、CO₂、CH₄ 及烃类有毒有害气体,其对大气流产生的增温效应比二氧化碳高 20 至 60 倍,因此开发利用煤层气可变害为利,变废为宝,具有良好的经济效益和社会效益,同时,对保障煤矿安全生产、增加清洁能源供应、促进节能减排、减少温室气体排放

表 2 我国气体能源发展主要技术难题
Table 2 Main technical problems in the development of gas energy in China

类别	技术瓶颈
常规天然气	成藏理论、地震技术
页岩气	埋深超过 3500 m 深层开发技术
煤层气	压裂技术、环保技术
煤制气	新型煤气化技术、自动化集成体系
可燃冰	可燃冰勘探技术、海底采掘技术

资料来源:郭焦锋,2013;国家发展和改革委员会和国家能源局,2016;国家能源局,2016。

具有重要意义；据大唐内蒙古克什克腾旗煤制天然气示范项目内部统计，煤制气发电 CO₂ 排放总量与燃煤发电 CO₂ 排放总量相当，在生产过程中会产生全生命周期 CO₂ 排放总量的四分之三，消耗仅占四分之一，碳排放总量高。

假设能源消耗均为常规天然气的话，大气污染排放中的 SO₂ 及粉尘将不再存在，CO₂ 及氮氧化物排放量将分别减少六成与五成，酸雨及温室效应也将得到极大改善(肖晖和周佚, 2010)。虽然页岩气在能源结构中的占比不断升高，但由于我国对非常规气生产排放方面监管政策法律尚属空白，因此所产生的碳排放并没有减少(王建良和冯连勇, 2016)。煤制气一方面可提供清洁能源，无疑可为中国乃至全球的大气污染防治作出贡献，但煤制气项目在全生产周期中的二氧化碳排放、水资源消耗以及一次能源消耗并不低。煤层气燃烧所产生的二氧化碳仅为煤炭燃烧的一半，且不产生二氧化硫和烟尘(叶汝陵和苏文叔, 1999)。

⑤发展潜力

据 BP 预计，2035、2050 年我国天然气产量将分别达到 3000×10⁸ m³ 和 3500×10⁸ m³。我国页岩气、煤层气、致密气资源潜力很大，随着技术不断完善和投入不断扩大，2035 年后将与常规气产量规模基本相当。据自然资源部数据，我国页岩气有利区的技术可采资源量 21.8×10¹² m³，目前探明率不足 5%，资源潜力巨大，与煤层气将成为我国天然气能源的重要支柱。我国天然气水合物资源潜力巨大，总体研究正处于资源调查评价阶段。国家对煤层气开发的补贴开始为 0.2 元/m³，2016 年增至 0.3 元/m³，对页岩气按规定最初补贴 0.4 元/m³，2019 年递减至 0.2 元/m³(汪锋, 2014)。目前我国已制定并实施了气体能源总量目标、优惠上网电价等政策措施，并通过开展资源评价、组织矿业权招标、推进重大工程示范项目建设等方式，基本建立了促进气体清洁能源发展的政策体系(刘剑, 2014)，我国有关气体能源相关政策已初步形成体系，“十二五”时期以来我国关于气体能源规划陆续出台，尤其《能源发展“十三五”规划》、《煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划》、《页岩气发展规划(2016—2020 年)》等

政策的出台对我国气体能源未来发展指明方向，但仍有很多政策需要进一步完善及细化。

(3)确定评价指标体系权重

①运用 AHP 法确定权重

本文使用北京欣晟允软件技术有限公司开发的 yaahp 软件对气体能源优先发展序列进行评价分析，通过前文建立的评价指标体系，在软件中进行赋值计算，得出特征向量为： $\omega = (0.116\ 9, 0.069\ 5, 0.240\ 8, 0.572\ 8, 0.216\ 6, 0.479\ 4, 0.108\ 3, 0.195\ 7, 0.247\ 7, 0.553\ 8, 0.125\ 9, 0.072\ 7, 0.250\ 0, 0.750\ 0, 0.250\ 8, 0.536\ 9, 0.144\ 8, 0.067\ 6)$ 。

②一致性检验

计算一致性指标得：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.351$$

经查表 $RI = 1.6133$ ，计算一致性比例得(表 3)：

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.021757 < 0.1$$

显然通过一致性检验，所以，影响优先发展序列的 18 个指标权重从高到低的排序为：消耗排放、燃料热值、国际合作、政策扶持、全生命周期成本、资源潜力、生产排放、技术水平、开发现状、市场程度、适用范围、资金投入、人才储备、资源禀赋、相关产业影响、科研环境、资源获取、监管机制。

2.3 基于灰色关联度分析的评价模型

(1)数据标准化

本文原始数据中，部分数据如政策扶持、监管机制等指标无法对其进行量化(表 5)。因此，在综合考虑各项影响因素的基础上，需经过专家进行模糊评价，并采用 0~10 之间的整数对其进行量化(表 4)。

数据标准化处理方式有很多种，但必须将不同类型的指标作不同的处理，以保证评价结果与指标数据关系的一致性。本文对 18 个主要评价指标数据标准化处理，得到无量纲化数据表。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^{\min}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}}$$

其中： a_{ij} 表示第 i 个评价对象的第 j 项指标的数据； a_j^{\max} 、 a_j^{\min} 分别表示第 j 项指标的最大值和最小值。

表 3 平均随机一致性指标 RI
Table 3 Average random consensus index RI

矩阵阶数	1	2	3	...	16	17	18
RI	0	0	0.52	...	1.594 3	1.606 4	1.613 3

表 4 模糊指标量化表
Table 4 Fuzzy index quantification table

最差	很差	差	较差	一般	较好	好	很好	最好
1	2	3	4	5	6	7	8	9

表5 原始数据表
Table 5 Original data sheet

指标	单位	气体能源					
		常规天然气	页岩气	致密气	煤层气	煤制气	可燃冰
资源禀赋	m ³	16.3×10 ¹²	1.8×10 ¹²	3.8×10 ¹²	1.1×10 ¹²	17 588 亿 t 煤炭	80×10 ¹²
资源获取*	-	8	4	8	5	10	2
开发现状	亿 m ³	1527	154	443.4	55	36.8	0.105
燃料热值	10 ³ kJ/m ³	35.88 ~ 39.82	56 kJ/g	35.88 ~ 39.82	36 ~ 40	约 6	5.9
市场程度*	-	10	3	8	5	7	1
全生命周期成本	USD/桶原油	25 ~ 65	80 ~ 120	25 ~ 65	65 ~ 105	65 ~ 105	≥100
相关产业影响*	-	8	6	7	2	3	1
应用范围*	-	8	6	8	6	8	5
技术水平	-	10	4	8	8	5	1
国际合作*	-	10	8	7	8	6	3
人才储备*	-	10	3	8	7	5	3
科研环境*	-	10	3	8	7	5	3
生产排放*	-	10	8	9	3	3	10
消耗排放*	-	10	4	8	8	4	9
资源潜力	m ³	63×10 ¹²	21.8×10 ¹²	(8 ~ 11)×10 ¹²	55.2×10 ¹²	-	800 亿 t 油当量
政策扶持*	-	7	10	6	4	7	5
资金投入*	-	8	10	7	6	9	3
监管机制*	-	10	8	9	7	4	3

注: *指标为需进行专家模糊评价。数据来源: 国务院发展研究中心, 2015; 国家发展和改革委员会和国家能源局, 2016; 国家能源局, 2016; 国家能源局, 2017; 国家能源局, 2020; 中国能源研究会, 2020; 等。

(2) 确定比较序列和参考序列

依次提取每一项指标的最大值为:

$$x_0(j) = b_j^{\max} \{j = 1, 2, \dots, m\}$$

得到参考序列为:

$$x_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$$

并将各比较序列记为:

$$x_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \quad i=1, 2, \dots, m$$

根据无量纲化数据可得比较和参考序列。

(3) 确定灰色关联度系数

通过以下公式, 得到关联系数矩阵。

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |x_0(j) - x_i(j)| + \rho \max_i \max_j |x_0(j) - x_i(j)|}{|x_0(j) - x_i(j)| + \rho \max_i \max_j |x_0(j) - x_i(j)|}$$

其中: $\xi_i(j)$ 表示比较序列 x_i 对参考序列 x_0 在第 j 项指标上的关联系数; $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数。分辨系数 ρ 越大, 分辨率越大, ρ 越小, 分辨率越小, 一般取 $\rho = 0.5$; 称 $\min_i \min_j |x_0(j) - x_i(j)|$, $\max_i \max_j |x_0(j) - x_i(j)|$ 分别为两极最小差及两极最大差。

(4) 确定灰色加权关联度

通过以下公式:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \xi_i(j)$$

得到关联度向量:

$$\gamma = (4.257, 3.313, 3.428, 2.911, 2.739, 2.625)$$

其中: ω_j 为上述 AHP 法确定指标权重, γ_i 为第 i 个评价对象对虚拟最优对象(竞争力最强)的灰

色加权关联度。

(5) 排序

根据灰色关联度的大小进行排序, γ_i 越大, 则说明第 i 个评价对象与虚拟最优对象越接近, 也即是该产业发展优势最大; 反之, γ_i 越小, 则说明第 i 个评价对象与虚拟最优对象越远, 也即是该产业发展优势最小。由灰色加权关联度 $\gamma_1 > \gamma_2 > \gamma_3 > \gamma_4 > \gamma_5 > \gamma_6$ 可知我国气体能源优先发展由先后的顺序为: 常规天然气、致密气、页岩气、煤层气、煤制气、可燃冰。

3 我国气体能源行业发展面临的主要问题

根据我国气体能源发展现状剖析及评价结果, 结合前人研究成果, 未来我国气体能源不同矿种发展若要做到经济、高效、环保的高质量发展, 仍面临诸多问题。

(1) 常规天然气供需区域不平衡, 致密气产业参与主体单一。当前常规天然气的勘探开发大部分局限于少数地区, 尚未在全国各主要资源富集盆地取得全面突破, 在很大程度上制约了非常规气资源快速增储上产。目前我国气体能源产业存在供应地与需求地区不平衡、经济水平与开发利用程度不匹配的矛盾, 未来短期内这两种不平衡状态仍将持续。致密气探矿权集中, 只有中石油和中石化有开采权, 市场开发主体相对单一。

(2) 页岩气勘查程度低, 核心技术亟待突破。与

常规天然气相比,我国页岩气资源潜力巨大,探明率不足5%,同时页岩气、致密气、煤层气储层大部分具有低孔、低渗等特点,导致资源的探明程度及勘查程度较低。我国页岩气资源评价预测体系基础较差,科技创新不足,勘探开发技术研究力度不够,缺少理论支撑和技术支持,深层气、深水气、非常规气勘探开发,如成藏理论、深层开发技术、压裂技术、环保技术、自动化集成技术等核心技术仍受制于人,核心技术及新型高科技装备的落后成为我国非常规气体能源产业商业化开发滞后的主要障碍。

(3)煤层气、煤制气开发成本与环境风险偏高。非常规天然气具备资源潜力大、消耗低排放等特点,但在现有技术条件下,非常规天然气尤其是煤层气、煤制气存在开发周期较长,生产排放较高,环境污染风险高的特点。

(4)环保监管政策缺失,政策机制有待细化。随着经济社会发展,环境保护要求也在加强,许多气体能源资源地与重要的生态环境保护区、生态脆弱敏感区域有重叠,同时,对气体能源从产出到消耗过程中所产生的污染排放监管政策还尚属空白,环境保护相关政策有待加强。另外,气体能源的区域不平衡以及各省之间管网、运输不一致,模式不统一,导致能源运输成本高并价格升高。

4 结论与对策建议

4.1 结论

我国大部分气体能源开发利用已进入加速车道,但要真正实现规模开采以替代非气体能源在经济发展中的作用仍有时日。本文通过建立基于层次分析的灰色关联分析法模型,从我国实际出发,对气体能源优先发展序列进行了综合评价研究,研究结果表明。

(1)从产业影响因素分析,消耗排放、燃料热值、国际合作、政策扶持、全生命周期成本、资源潜力、生产排放等因素对各气体能源发展依次影响最大,而资源获取、监管机制等因素对产业发展的影响最低。

(2)从未来发展动向分析,常规天然气相较于其他气体能源已具备一定的产业规模和发展基础,未来仍然是优先重点发展和投资的主要方向;致密气发展基础良好,市场化程度高,环境污染小,应用范围广,近年来相关扶持政策陆续出台,致密气储、产量不断扩大,其在非常规天然气的体量及其在天然气总量中的占比也显著提高,应优先发展;页岩气资源潜力丰富,政策扶持力度大,投资力度大,但目前核心技术尚不成熟,商业前景不明确,

投资页岩气应更加理性,如果核心技术得以突破,未来十年将迎来巨大发展,是我国能源安全未来有力保障,应同致密气同属优先发展梯队;煤层气资源潜力丰富,技术水平相对成熟,已具备一定的坚实基础,可作为我国能源安全未来有力保障,但相关政策还不够完善,资源利用效率低,可作为次要发展矿种;煤制气在其资源禀赋和资源获取上稍有优势,可消耗一部分煤炭过剩产能,但考虑到其技术不成熟、成本过高以及环境影响过大等问题,未来应减少侧重;可燃冰发展潜力巨大,燃料热值高,环境影响小,但开发成本过大、投资周期过长,应排在其他气体能源之后,主要在勘探潜在资源、提升开采技术以及制定初步发展规划上做研究。

4.2 对策建议

(1)加大气体能源勘探投入,提高天然气供能比例。与国际平均水平相比,我国气体能源资源潜力大,当前全球经济不景气,未来几年世界经济增速进一步放缓的前景可能遏制能源需求水平,但我国气体能源产业发展得益于国家能源结构调整,未来几年勘探投入可能稳步增加,从结构上提高气体能源尤其常规天然气资源的使用比例及供能比例,加速塔里木盆地、四川盆地、柴达木盆地等主要气体能源生产基地勘探开发,提升全产业链系统效率,以满足国内对天然气的巨大需求。

(2)摸清页岩气资源家底,突破核心技术。当前需要进一步提升地质认识,通过大量的钻井实践、实验测试准确评价我国气体能源资源前景,对应优先发展的页岩气资源,政府应重点攻关资源评价预测、气藏富集机理、改造压裂工程技术等可实现发展突破的关键核心技术。同时,在严格准入门槛的前提下,进一步放开市场准入,鼓励多主体参与,激励科技型民营开发企业、装备制造企业参与其中,力求多点突破。

(3)提升环保监督、安全生产意识。以绿色开发、节能减排、环境友好开发为目标,加强气体能源的全产业链生态监管,实行生态环境风险评估机制,建立环境风险防控技术规范体系,制定非常规天然气资源环境开发影响相关法律及政策。我国非常规气开采、开发技术尚不成熟,安全、有序、可控的生产是确保产业健康、可持续发展的决定性因素。

(4)优化统一现有政策。对非常规天然气补贴除现有的财政补贴外,应在科技创新、环境监管、生态保护、用地征地、投融资、税收减免等方面进一步完善机制。现有相关政策具有临时性、特殊性、区域性特点,以部门规章制度及地方性政策法规为主,应进一步完善现有全国统一政策的细节条款。我国致密气勘探程度较高,储量情况相对清楚,开

发技术相对成熟, 体量颇大, 开发前景十分广阔, 未来 5~10 年我国致密气将进入快速发展期, 应进一步加大中央财政补贴, 推动致密气、页岩气、煤层气三气合采。对煤层气资源开发实行国家一级统一管理, 出台相关政策措施, 利用煤层气变害为利, 变废为宝, 提升利用量、利用率水平, 实现良好的经济效益和社会效益。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20160103 and DD20190674), and Chinese Academy of Engineering (No. 2017-ZD-15-05-01).

参考文献:

- 白金燕, 郑德志, 赵迪斐, 崇璇. 2017. 中国非常规天然气发展趋势及对煤炭产业的影响[J]. 煤炭经济研究, 37(7): 41-46.
- 陈和渭. 2018. 中国非常规天然气资源潜力及开发前景[J]. 现代国企研究, (18): 178-179.
- 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 谭化川. 2015a. 资源-产业“雁行式”演进规律[J]. 资源科学, 37(05): 871-882.
- 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 谭化川. 2015b. 矿业发展周期理论与中国矿业发展趋势[J]. 资源科学, 37(05): 891-899.
- 陈其慎, 于汶加, 张艳飞. 2016. 点石——世界矿产资源大势[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 龙涛, 郑国栋, 王琨, 崔博京, 覃升. 2021. 国内外战略性矿产厘定理论与方法[J]. 地球学报, 42(2): 137-144.
- 陈一鹤. 2015. 非常规天然气藏开发成本问题研究[J]. 中州煤炭, (1): 107-111, 117.
- 董大忠, 施振生, 管全中, 蒋珊, 张梦琪, 张晨晨, 王书彦, 孙莎莎, 于荣泽, 刘德勋, 彭平, 王世谦. 2018. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气勘探进展、挑战与前景[J]. 天然气工业, 38(4): 67-76.
- 董延涛, 阴秀琦, 张艳飞, 郑国栋. 2021. 战略性矿产资源高质量开发利用问题与对策[J]. 地球学报, 42(2): 145-150.
- 郭焦锋. 2013. 加快发展气体能源是我国可持续发展战略的重要选择[J]. 国际石油经济, 21(12): 25-31, 103.
- 郭焦锋. 2019. “十四五”天然气发展路径[J]. 中国石油石化, (24): 34-37.
- 郭娟, 闫卫东, 徐曙光, 崔荣国, 胡容波, 林博磊, 周起忠, 周舟, 杨玲. 2021. 中国关键矿产评价标准和清单的探讨[J]. 地球学报, 42(2): 151-158.
- 郭万山. 1997. 确定产业优先发展序列的定量研究[J]. 辽宁经济, (03): 33-34.
- 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 2016. 能源发展“十三五规划” [EB/OL]. [2016-12-05]. http://www.nea.gov.cn/135989417_14846217874961n.pdf.
- 国家能源局. 2016. 页岩气发展规划(2016-2020年)[EB/OL]. [2016-09-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-09/30/content_5114313.htm.
- 国家能源局. 2017. 煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划 [EB/OL]. [2017-08-09]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzllgh/gjjzxgh/201708/t20170809_1196879.html.
- 国家能源局. 2020. 《中国天然气发展报告 2020》[R]. 北京: 国家能源局.

- 国务院发展研究中心. 2015. 中国气体清洁能源发展报告[R]. 北京: 国务院发展研究中心.
- 贾凌霄, 田黔宁, 张炜, 菅笑飞. 2018. 全球非常规天然气发展趋势: 国际市场融合与探采技术进步[J]. 中国矿业, 27(05): 1-8, 27.
- 姜鑫民, 田磊, 刘琪, 孙瑞昊. 2017. 我国非常规天然气发展战略研究[J]. 中国能源, 39(06): 8-11, 7.
- 李健. 2012. 山西省煤层气开发利用管理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘剑. 2014. 政府推动清洁能源产业发展研究[D]. 济南: 山东师范大学.
- 潘继平. 2019. 中国非常规天然气开发现状与前景及政策建议[J]. 国际石油经济, 27(02): 51-59.
- 汪锋. 2014. 中国天然气价格形成机制改革的经济分析[J]. 安全与管理, (34): 135-142.
- 汪莹, 王光岐. 2014. 灰色关联分析在矿产资源开发优先序列中的应用[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 26(4): 290-295.
- 王建良, 冯连勇. 2016. 页岩气开发水资源影响及温室气体排放研究评述[J]. 中国矿业, 25(4): 61-67.
- 肖晖, 周佚. 2010. 气体能源计量在碳经济时代的作用[C]//江苏省“能源计量与节能减排”论坛: 216-221.
- 邢万里. 2015. 2030年我国新能源发展优先序列研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 叶汝陵, 苏文叔. 1999. 煤矿煤层气排放对大气的污染及对策[J]. 矿业安全与环保, (1): 1-5.
- 余晨, 唐旭, 张宝生. 2014. 页岩气开发利用过程中甲烷排放的研究[J]. 资源与产业, (6): 78-84.
- 张抗, 白振瑞. 2020. 第三次全国油气勘探战略展开的优先指向[J]. 中外能源, 25(06): 1-18.
- 张艳飞, 王高尚, 陈其慎, 于汶加. 2014. 我国非油气资源矿种需求评价及优先勘查序列厘定[J]. 地球学报, 35(6): 751-758.
- 中国能源研究会. 2020. 中国能源发展报告 2020[R]. 北京: 中国能源研究会.

References:

- BAI Jin-yan, ZHENG De-zhi, ZHAO Di-fei, CHONG Xuan. 2017. China unconventional natural gas development tendency and influences to coal industry[J]. Coal Economic Research, 37(7): 41-45(in Chinese with English abstract).
- CHEN He-wei. 2018. China's unconventional natural gas resource potential and development prospects[J]. Modern State-owned Enterprise Research, (18): 178-179(in Chinese).
- CHEN Qi-shen, YU Wen-jia, ZHANG Yan-fei, TAN Hua-chuan. 2015. Mining development cycle theory and development trends in Chinese mining[J]. Resources Science, 37(05): 891-899(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qi-shen, YU Wen-jia, ZHANG Yan-fei, TAN Hua-chuan. 2015. Resource-industry "flying geese" evolution law[J]. Resources Science, 37(05): 0871-0882(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qi-shen, YU Wen-jia, ZHANG Yan-fei. 2016. Dian-shi——The general trend of world mineral resources[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- CHEN Qi-shen, ZHANG Yan-fei, XING Jia-yun, LONG Tao, ZHENG Guo-dong, WANG Kun, CUI Bo-jing, QIN Sheng. 2021. Methods of Strategic Mineral Resources Determination in China and Abroad[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(2):

- 137-144(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yi-he. 2015. Research on Development Cost Problems of Unconventional Gas[J]. *Zhongzhou Coal*, (1): 107-111, 117(in Chinese with English abstract).
- China Energy Research Society. 2020. China Energy Development Report 2019[R]. Beijing: China Energy Research Society(in Chinese).
- Development Research Center of the State Council. 2015. China Gas Clean Energy Development Report[R]. Beijing: Development Research Center of the State Council(in Chinese).
- DONG Da-zhong, SHI Zhen-sheng, GUAN Quan-zhong, JIANG Shan, ZHANG Meng-qi, ZHANG Chen-chen, WANG Shu-yan, SUN Sha-sha, YU Rong-ze, LIU De-xun, PENG Ping, WANG Shi-qian. 2018. Progress, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 38(4): 67-76(in Chinese with English abstract).
- DONG Yan-tao, YIN Xiu-qi, ZHANG Yan-fei, ZHENG Guo-dong. 2021. Research on High Quality Development of Strategic Mineral Re-sources Industry[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 145-150(in Chinese with English abstract).
- GUO Jiao-feng. 2013. Accelerating gas energy development is China's chosen sustainable development strategy[J]. *International Petroleum Economics*, 21(12): 25-31, 103(in Chinese with English abstract).
- GUO Jiao-feng. 2019. The development path of natural gas in the "14th Five-Year Plan" period[J]. *China Petroleum*, (24): 34-37(in Chinese).
- GUO Juan, YAN Wei-dong, XU Shu-guang, CUI Rong-guo, HU Rong-bo, LIN Bo-lei, ZHOU Qi-zhong, ZHOU Zhou, YANG Ling. 2021. A Discussion on Evaluation Criteria and List of Critical Minerals in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(2): 151-158(in Chinese with English abstract).
- GUO Wan-shan. 1997. Quantitative Research on Determining the Priority Sequence of Industrial Development[J]. *Liaoning Economy*, (3): 33-34(in Chinese).
- JIA Ling-xiao, TIAN Qian-ning, ZHANG Wei, JIAN Xiao-fei. 2018. The trend of global unconventional natural gas development:international market integration and exploration technology progress[J]. *China Mining Magazine*, 27(05): 1-8, 27(in Chinese with English abstract).
- JIANG Xin-min, TIAN Lei, LIU Qi, SUN Rui-hao. 2017. Study on the Development Strategy of Unconventional Natural Gas in China[J]. *Energy of China*, 39(06): 8-11, 7(in Chinese).
- LI Jian. 2012. Study on management of Development and Utilization of Coal-bed Gas in Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- LI Xi, MAO Hong-min, MA Yong-song, WANG Bing, LIU Wen-shi, XU Wen-jia. 2020. Life cycle greenhouse gas emissions of China shale gas[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 152: 1-8.
- LIU Jian. 2014. Research on the government's promotion of the development of clean energy industry[D]. Jinan: Shandong Normal University(in Chinese with English abstract).
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 2016. Energy development "13th Five-Year Plan" [EB/OL]. [2016-12]. http://www.nea.gov.cn/135989417_14846217874961n.pdf(in Chinese).
- National Energy Administration. 2016. Shale Gas Development Plan (2016-2020) [EB/OL]. [2016-09-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-09/30/content_5114313.htm (in Chinese).
- National Energy Administration. 2017. The 13th Five-Year Plan for the Development and Utilization of Coal Bed Methane (Coal Mine Methane) [EB/OL]. [2017-08-09]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzqgh/201708/t20170809_1196879.html(in Chinese).
- National Energy Administration. 2020. China Natural Gas Development Report 2020[R]. Beijing: National Energy Administration(in Chinese).
- PAN Ji-ping. 2019. Status quo, prospects and policy suggestions for unconventional natural gas E&D in China[J]. *International Petroleum Economics*, 27(2): 51-59(in Chinese with English abstract).
- WANG Feng. 2014. An Economic analysis of natural gas price-forming mechanisms in China: From the previous cost-plus pricing method to the net market value pricing method[J]. *Safety and Management*, (34): 135-142(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-liang, FENG Lian-yong. 2016. A review on the impact of shale gas development on water resources and greenhouse gas emissions[J]. *China Mining Magazine*, 25(4): 61-67(in Chinese with English abstract).
- WANG Ying, WANG Guang-qi. 2014. Application of Grey Relational Analysis in Priority Sequence of Mineral Resources Development[J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science Edition)*, 26(4): 290-295(in Chinese with English abstract).
- XIAO Hui, ZHOU Yi. 2010. The role of gas energy measurement in the era of carbon economy[C]// "Energy Measurement and Energy Saving and Emission Reduction" Forum in Jiangsu Province: 216-221(in Chinese).
- XING Wan-li. 2015. The Priority Sequence of New Energy Development in China until 2030[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- YE Ru-ling, SU Wen-shu. 1999. Air pollution caused by coal-bed methane emissions from coal mines and countermeasures[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, (1): 1-5(in Chinese).
- YU Chen, TANG Xu, ZHANG Bao-sheng. 2014. Methane emission during the shale gas development[J]. *Resources and Industry*, (6): 78-84(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Kang, BAI Zhen-rui. 2020. Priorities of the Third Strategic Expansion of Petroleum Exploration in China[J]. *Sino-Foreign Energy*, 25(06): 1-18(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yan-fei, WANG Gao-shang, CHEN Qi-shen, YU Wen-jia. 2014. The Evaluation of China's Mineral Resources Demand and Exploration Priority Sequence[J]. *Acta Geosciences*, 35(6): 751-758(in Chinese with English abstract).