

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.12.001

底线思维下中国天然气供需平衡研究^①

柴 建, 张晓空*, 贾锐宁, 寇红红
(西安电子科技大学经济与管理学院, 西安 710126)

摘要:当前俄乌战争将油气安全问题推到了新的战略高度,正确研判未来天然气供需形势对于天然气能源安全重大工程建设具有重要战略意义.本文创新性地将天然气消费划分为生存、生产和非底线消费三类,从而在考虑多要素协同不确定性条件下预测中长期天然气消费,以做好底线思维下天然气供需形势的综合研判.研究结果表明:第一,在三种可采储量情景下,天然气产量分别于2030年、2033年和2037年达峰,其峰值产量分别为2 441.46亿m³、3 464.92亿m³和4 227.95亿m³;第二,至2030年,生产消费最低占底线消费的31.70%,但其年均增速远超生存消费;第三,2025年和2030年底线消费分别达到3 057.19亿m³~3 578.61亿m³和3 704.95亿m³~4 730.81亿m³,若严格落实梯级用气思维,在任何产量情景下生存消费均基本可以实现自给自足,而“十五五”末天然气产量最乐观情景下生产消费最低自给率不超过52%,甚至1倍情景下生产消费可能将完全对外依赖;第四,在天然气产量2倍或1.5倍情景可将天然气对外依存度严格控制在50%以内;利用不同情景组合来降低天然气对外依存度的效果有限,天然气对外依存度最高降幅为8.71%.研究结论对于保障我国天然气供需平衡,从而落实能源安全战略具有重要意义.

关键词:天然气;底线思维;能源安全;底线消费;供需平衡

中图分类号: F407.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)12-0001-18

0 引 言

油气资源是俄罗斯在地缘政治中的重要战略筹码,俄乌战争不仅使得严重依赖俄罗斯能源的欧盟国家面临能源断供危机,也引发了全社会对我国油气安全的广泛担忧.习近平总书记曾反复强调:“必须坚持统筹发展和安全,增强机遇意识和风险意识,树立底线思维”.《2030年前碳达峰行动方案》也明确指出,要“以保障国家能源安全和经济发展为底线,推动能源低碳转型平稳过渡”.可见,保障能源安全必须强化底线思维.与石油和煤炭相比,天然气具有单位热值含碳量更低的清洁高效特征,因此被各国视为未来较长时

间内最具潜力的过渡型能源.2016年—2020年我国天然气年均消费增长率高达11%,但年均产量增长率仅为7.4%.在供需失衡条件下,我国天然气行业面临着敞口式的消费风险,对外依存度呈现逐年走高态势,2020年天然气对外依存度攀升至43%,严重危害了我国天然气安全.当前,国际经济政治形势错综复杂对天然气供需带来了较大不确定性,亟需在底线思维下做好我国天然气供需演变的科学研判,从而充分保障我国天然气安全.

妥善应对天然气安全问题需要从供给侧和需求侧两端协同发力.现有文献针对解决弃水^[1,2]、

① 收稿日期:2022-07-31;修订日期:2024-05-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71874133;72373116);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-JCQN-40);陕西省高校青年创新团队项目(2020-68);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022QCY-17).

通讯作者:张晓空(1996—),男,山西太原人,博士生. Email: ZhangXiaoKong1996@outlook.com

弃风和弃光问题^[3-5],提高天然气系统整体运行效率^[6,7],统筹规划管网建设以及构建调峰储备体系^[8-15]等供给侧方面设计出诸多改革路径。与之相比,无论是在理论研究还是政策举措上,我国天然气需求侧管理均存在较大滞后和不足,这也成为我国天然气安全问题的重要掣肘。由于精准预测用气需求不仅可以为需求侧管理的制度设计提供重要依据,而且还能够提高未来供应调节的预判性、针对性和灵活性,因此对天然气消费需求进行预测成为开展需求侧管理的重要前提。

首先,既有研究已经就价格、人口、经济和环境等各类驱动要素对天然气消费的影响机理开展了深入的理论分析和严谨的实证检验。如 Chai 等^[16]提出了研究天然气消费与其影响因素关系的 LMDI-STIRPAT-PLSR 框架,实证检验了 GDP、城镇化率、非清洁能源结构、能源强度等对天然气消费的影响效应。然而,天然气消费及经济变量常伴随着较大结构性突变,线性关系难以刻画变量间复杂的影响效应。之后, Liang 等^[17]采用 MS-AR 模型按照天然气消费阶段性特征,将其划分为两个不同的区制,并识别出不同区制下天然气消费关键因素,以实现天然气消费精细化预测。然而,该文献仅关注了天然气消费的两种区制划分。更符合现实的情况是不同要素在多个特定时段对天然气消费的预测能力可能存在差异,而已有文献对变量的动态调变特征缺乏关注,从而在一定程度上弱化了模型的稳定性和预测结果的可靠性。

其次,由于样本容量和模型技术等限制,已有研究大多聚焦于短期负荷预测和调峰优化^[18-24]。如 Wei 等^[25]为有效解决高频数据噪声问题,开发了 ISSA-LSTM 混合模型,对温带、亚热带和热带地区主要城市的日度天然气消费量进行了精准预测。中国天然气能源安全问题突出,天然气消费中长期预测问题对于天然气规划同样具有重要意义。现有文献对中长期预测的关注较少,未综合考虑“双碳”战略与经济高质量发展的制度背景,从而不利于刻画未来天然气安全形势并制定安全可靠的供应调度方案。

最后,突发事件情境下天然气消费预测有助于资源调配和应急响应。现有文献仅关注数据和模型层面天然气消费突变性的预测能力^[26],然而,在面对突发事件、极端天气等外部挑战时,需

要妥善处理天然气消费的局部与整体关系,通过有序用能来缓解用气压力。但现有文献对天然气消费的内部层级结构缺乏剖析,尚未将底线思维和梯级用气思维纳入天然气的能源安全框架内,对现实诉求的回应不足。因此,在未来天然气消费预测的研究中,有必要结合我国的发展诉求和梯级用气思维,在长期“双碳”战略和经济转型升级的背景中研判未来消费趋势,从而准确把握当前天然气供需形势。

本文主要贡献如下。第一,创新性地将天然气消费解构为生存、生产和非底线消费三类,并提出了“生存消费及时响应,生产消费次优先供应,非底线消费动态调整”的用气模式,拓展了天然气需求侧管理研究的学理视角;第二,综合筛选和集成天然气消费驱动要素体系,并将变量情景归结为发展情景和节能清洁情景两类。考虑到经济变量具有路径依赖特征,本文采用 K 均值聚类方法确定了各变量围绕基准情景的浮动比例,克服了已有研究对变量情景的主观设置问题;第三,采用了能够关注变量动态性和时变性特征的动态模型平均(dynamic model average, DMA)方法,明确了生存、生产和非底线消费的演化规律和驱动机理。在此基础上,通过预测未来天然气产量演化路径和多维情景下天然气各层级消费的趋势轨迹来准确研判供需形势,为国家天然气供应安全重大工程建设提供有效理论支撑。本文逻辑框架如图 1 所示。

1 天然气底线消费的内涵及概念界定

天然气行业发展起缘于用气需求的变化,社会主体的用气需求改变,满足需求的天然气管理条件就要相应改变,管理条件调整和跟进的过程也就是天然气行业健康发展的过程。研究天然气行业发展的根源及趋势,从根本上就是分析用气需求的变化。因此,为有效管理和规范终端用户有序用气行为,本文参照国家发改委发布的《加快推进天然气利用的意见》,并结合天然气用户用气类型、用气规律和用气弹性等因素,将天然气消费划分为底线消费和非底线消费两类。

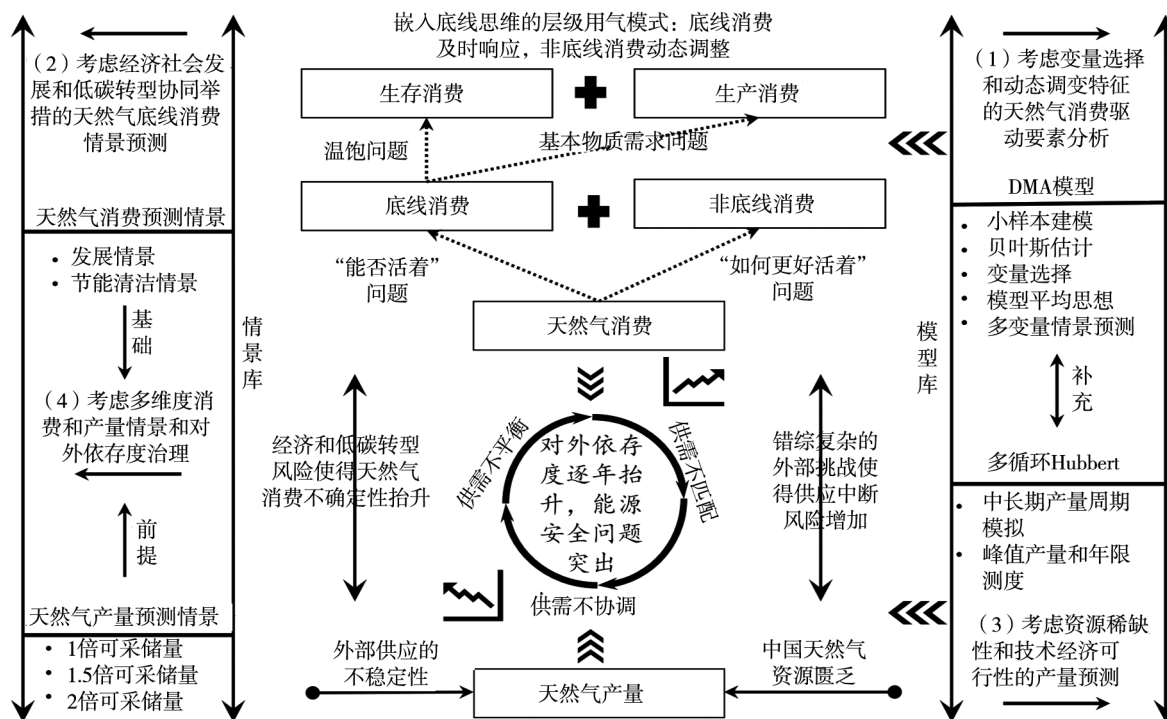


图 1 逻辑框架

Fig. 1 Logic framework

陈文学等^[27]曾定义了油气底线消费的概念：“对国民经济运行及人民生活产生重大影响的特定行业主体的天然气消费，具有刚需性且不可替代，如民生领域或基础产业；或这部分天然气消费理论上虽然可能被替代（不考虑煤炭对油气逆替代），但受技术、资源和商业模式转型周期限制，替代过程缓慢并产生极大外部成本，影响产业供应链正常运行，造成社会经济运行不稳定。”在煤改气等清洁政策驱动下，天然气底线消费存在总量规模大和涉及行业广等特征，有必要将底线消费按照用户用气刚性程度进一步解构，以充分挖掘结构化的用气规律，从而制定和完善底线消费分级响应预案。因此，本文将天然气底线消费拆解为生存消费和生产消费两类，生存消费主要解决“温饱”问题，而生产消费主要解决基本物质需求问题。

综上，本文将天然气底线消费定义为，用于满足全国人民生存和日常生产消费，以及维持经济社会基本运转的最低用气消费，其主要致

力于解决“能否活着”的问题，即要满足民众温饱无忧的用气需求。可见，底线消费涉及到民生用气和维系社会基本运转的必要用气，因此该消费的首要特征是底线性。在煤改气等政策背景下，部分天然气底线消费的不可替代性通常来自于制度约束而非技术约束。与底线消费相比，非底线消费是形式多元、内容丰富的用气需求，其用气主体通常具有需求弹性较大的用气特征，因此这类用气易于和其他能源品种发生横向替代。非底线消费主要解决和应对的是“如何更好活着”的问题，该消费的上述特征允许政府部门根据减排目标和外部事件响应级别，适时而合理地调整消费规模，从而有助于提高应对短期减排目标压力和调整有序用能机制的灵活性。天然气消费层级结构的划分有助于提前规划并制定有序用能应急预案，在面对不同事件响应下贯彻“兜住底线”的思维，从而充分保障用气安全。本文提出的不同层级天然气消费划分情况如表 1 所示。

表 1 不同层级天然气消费划分

Table 1 Division of natural gas consumption at different levels

消费类型		行业划分	划分依据
底线消费	生存消费	生活消费	民生领域且难以替代
		农、林、牧、渔、水利业	民生领域且难以替代
		交通运输、仓储和邮政业	民生领域
		水的生产和供应业	民生领域
		燃气生产和供应业	民生领域且难以替代
		电力、热力的生产和供应业	民生领域且难以替代
	生产消费	有色金属冶炼及压延加工业	基础产业
		黑色金属冶炼及压延加工业	基础产业且难以替代
		石油加工、炼焦及核燃料加工业	基础产业且难以替代
		化学原料及化学制品制造业	基础产业且难以替代
		煤炭开采和洗选业	基础产业
		石油和天然气开采业	基础产业且难以替代
非底线消费		《中国能源统计年鉴》中“分行业消费总量”一表中列出的其他行业	非民生、非基础产业或可替代

2 模型、变量及情景设定

2.1 模型与方法

1) 多循环 Hubbert 模型

传统的统计回归、机器学习和多变量预测方法仅适用于中短期预测^[28-31],且忽视了资源稀缺性、开采的技术和经济可行性对产量的约束作用,而中长期预测则需要采用生命周期模型来研究,最为典型的代表为 Hubbert 曲线模型.该模型认为矿产资源产量的变化可以形象的表述为有限体系中的一个生命周期旋回.当时间趋近于无穷时,钟型曲线下方的面积将等于油田的最终可采储量.由于 Hubbert 模型具有经济含义明确等特点,后续学者逐渐将其应用范围由石油峰值预测,拓展至煤炭、天然气、金属资源和矿产资源的产量模拟中.

由于现实中矿产资源的产量会受到行政干预、自然灾害等多重因素的叠加影响,传统的单循环 Hubbert 模型通常难以模拟资源产量的周期演化规律,从而难以保障预测结果的准确性.针对这一问题,多循环 Hubbert 模型可以有效刻画技术、经济和地缘政治等因素引致的产量波动,因此其拟合效果通常优于单循环 Hubbert 模型.基于此,

本文采用如下的多循环 Hubbert 模型来开展研究

$$P_t = \sum_{i=1}^k (P_t)_i = \sum_{i=1}^k 4 (P_{\max})_i \left\{ \frac{e^{-a(t-t_{\max})}}{[1 + e^{-a(t-t_{\max})}]^2} \right\} \quad (1)$$

其中 P_t 为天然气在 t 时刻的产量; k 是循环个数; a 是每一个循环的斜率; P_{\max} 和 t_{\max} 分别为每一个循环中的最大产量和对应时间.累积消费量和最终可采资源量(累积产量、证实储量、储量增长和待发现资源量之和)可表示为

$$N_p = \frac{UUR}{1 + e^{-a(t-t_{\max})}} \quad (2)$$

$$UUR = \frac{4P_{\max}}{a} \quad (3)$$

其中 N_p 为累积产量; UUR 为最终可采资源量.

2) DMA 方法

传统时间序列模型的建模重点是价格波动率^[32-34].结构方程模型和贝叶斯网络等因果关系模型捕捉了变量之间的影响机制和强度,可以应用于能源消费的预测中,但其对变量之间的动态性和时变性特征考虑不足,通常在某些时期内有良好的预测能力,在其他时期预测性能下降.如何更高效地应用大数据承载的信息成为机器学习的主要研究方向,因此其主要侧重于高频率序列建模,如日度和月度的能源价格和消费预测^[35-39],对于年度能源消费预测效果不佳.由于本文主要致力于中长期消费预测,多变量、小样本预测场景使得

时间序列和机器学习模型预测效果不佳,同时因果关系模型无法考虑变量的动态调变特征.因此,常见的预测方法并不能有效解决本文的预测问题.

为将预测变量的多元化和时变性特征纳入预测建模,Raftery 等^[40]将时变系数思想引入静态模型平均分析框架,从而提出了 DMA 方法.由于 DMA 方法具备如下三方面优势,本文主要采用该方法来进行天然气消费预测.首先,DMA 方法可以处理不同驱动要素对天然气消费的动态调变问题,从而有效满足本文的多变量预测需求.其次,允许变量之间的系数是随时间变化的,还可以防止过度参数化和过度拟合问题的出现.最后,由于模型误设和变量选取不合理等问题难以完全规避,DMA 方法引入了模型平均化的思想,从而在很大程度上降低了预测结果的不确定性.

DMA 方法的具体分析框架如下.假设有 k 个模型($M_k, i = 1, 2, \dots, k$),每个模型均满足方程(4)和方程(5),特定模型 M_k 用下标 k 表示,每个模型的状态向量 $\theta_i^{(k)}$ 和预测变量 $x_i^{(k)}$ 都不相同

$$y_t = (x_t^{(k)})^T \theta_t^{(k)} + \varepsilon_t^{(k)} \quad (4)$$

$$\theta_t^{(k)} = \theta_{t-1}^{(k)} + \sigma_t^{(k)} \quad (5)$$

其中 y_t 是待预测的因变量,列向量 $x_t^{(k)}$ 是第 k 个模型 M_k 中的自变量.每个自变量都可以包括或不包括在一个模型中,若有 m 个自变量,则最多有 $k = 2^m$ 个模型.在特定时点下,每个模型都可通过递归算法计算出后验概率,所有模型通过后验概率得到的组合预测结果即为该点的最终预测值. $\varepsilon_t^{(k)} \sim N(0, H_t^{(k)})$ 和 $\sigma_t^{(k)} \sim N(0, W_t^{(k)})$ 为模型 M_k 的误差项.

令 $L_t = k$ 代表 t 时刻的模型 M_k ,其对应的概率分布可以概括为

$$p(\theta_t, L_t) = \sum_{k=1}^K p(\theta_t^{(k)} | L_t = k) p(L_t = k) \quad (6)$$

假设 $t-1$ 时刻条件概率分布为

$$p(\theta_{t-1}, L_{t-1} | Y^{t-1}) = \sum_{k=1}^K p(\theta_{t-1}^{(k)} | L_{t-1} = k, Y^{t-1}) p(L_{t-1} = k | Y^{t-1}) \quad (7)$$

令 $\pi_{t|t-1,k} \equiv p(L_t = k | Y^{t-1})$,则 DMA 方法提前一步的预测结果可表示为

$$\begin{aligned} \hat{y}_t &= \sum_{k=1}^K \pi_{t|t-1,k} \hat{y}_t^{(k)} \\ &= \sum_{k=1}^K \pi_{t|t-1,k} x_t^{(k)T} \hat{\theta}_{t-1}^{(k)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 \hat{y}_t 为预测值,是以多个模型后验概率为权重的加权平均值.本文将 DMA 方法与情景分析法相结合以预测不同发展情景和政策不确定性条件下我国天然气需求的演变趋势.

2.2 变量选取及数据来源

天然气消费的驱动要素主要包括经济、人口、环境、供给、替代和基础设施因素.盲目地将大量变量纳入预测框架会带来多重共线性和过拟合问题,而本文所采用 DMA 方法,客观上允许指标体系尽可能多的囊括具有代表性的驱动要素,这不仅有效规避了上述问题,还可以在一定程度上减少由变量错选和漏选造成的模型预测失真.在当前我国绿色低碳转型的关键时期,天然气的发展和应用理应服务于经济高质量发展和“双碳”战略目标,这决定了在进行中长期天然气消费预测时,需要兼顾经济社会发展模式转变、产业结构优化升级和能源消费结构低碳转型等多个政策目标.鉴于此,本文参考现有文献,并结合我国未来的经济和环境发展目标,对天然气消费驱动要素的指标体系予以集成和拓展(如表 2 所示).

具体而言,遵循已有研究的思路,结合官方发布的与高质量发展和“双碳”战略实施相关的规划文件,从“两个维度、三个方面”审视了天然气消费的驱动要素,并按照可量化和可代表我国未来经济社会发展目标和清洁低碳政策目标的原则,对二级指标进行了选取.此外,考虑到能源不仅具有商品属性,还兼具金融属性和战略属性,国际局势的变化势必会影响到国内天然气市场的健康可持续发展.基于此,本文在既有研究的基础上,还额外在指标体系中引入了地缘政治指数.数据来源于 Wind 数据库、世界银行、EIA 和 BP.

表 2 变量选取及依据

Table 2 Variable selection and justification

指标类型	变量	简写	选取依据
经济维度	GDP	X1	Li 等 ^[41] 、卢全莹等 ^[42] 、Chai 等 ^[16] 、Liu 等 ^[43] 、 Liang 等 ^[17]
	产业结构	X2	
	天然气产量	X3	
	人口密度	X4	
	城镇化率	X5	
节能清洁化维度	碳排放强度	X6	Chai 等 ^[16] 、Xu 和 Lin ^[44] 、Liang 等 ^[17] 、丁聿等 ^[45] 、 李弩等 ^[46]
	单位 GDP 能耗	X7	
	非化石能源消费结构	X8	
温度方面	年平均气温	X9	Kani 等 ^[47] 、Bianco 等 ^[48]
基础设施方面	天然气管道长度	X10	高建和董秀成 ^[49] 、柴建等 ^[50]
地缘政治方面	地缘政治指数	X11	Chai 等 ^[51] 、Caldara 和 Iacoviello ^[52]

2.3 情景设定

结合当前经济发展和节能清洁化政策导向,本文在预测天然气消费和产量时,综合考虑天然气消费发展指标和节能清洁指标情景以及产量三种可采储量情景,通过考虑不同情景的交织影响研判未来天然气供需形势,以应对各种可能性变化,便于制定更具弹性和适应性的治理政策。

2.3.1 天然气产量预测的情景设定

考虑到不同权威机构在核算资源储量时所依据的标准有所差异,本文分别从《2021 年 BP 世界能源统计年鉴》、EIA《2021 年国际能源展望》和国家自然资源部《中国矿产资源报告(2021)》三个来源收集了天然气剩余探明技术可采储量数据,并将其均值作为天然气剩余探明技术可采储量的衡量指标。在选择增量因子时,参考了天然气勘探和产量历史数据,从而对未来的勘探增长进行合理推测,进而得出不同倍数的增量因子。据此,本文所设定的三种 UUR 情景分别如下:第一,1 倍情景,即最终可采资源量为天然气历史累积产量与剩余探明技术可采储量之和;第二,1.5 倍情景,即最终可采资源量为天然气历史累积产量与 1.5 倍剩余探明技术可采储量之和;第三,2 倍情景,即最终可采资源量为天然气历史累积产量与 2 倍剩余探明技术可采储量之和。

2.3.2 天然气消费预测的多维情景设定

为体现经济社会发展战略和“双碳”战略实施路径的不确定性对不同层级天然气消费的潜在

影响,本文将各类变量情景归纳为发展指标和节能清洁指标两大类情景,以描绘多举措的协同效应。具体而言,发展指标情景包括 GDP、产业结构、人口密度、城镇化率和天然气产量五种子指标情景,有助于多角度刻画未来经济社会发展的可能路径;节能清洁指标情景包括单位 GDP 能耗、碳排放强度和非化石能源消费结构三种子指标情景,有助于考察未来节能减排工作对不同层级天然气消费的影响。本文基于政策文件、各驱动要素的历史演化趋势和潜在变动规律,分别将各子指标划分为低情景、基准情景和高情景三类,基准情景设定主要参考了官方政策文件和高水平学者有影响力的研究成果,在此基础上,通过设置合理的上下浮动比例得到另外两种情景。对于有政策文件或有影响力的研究成果明确指出子指标上下浮动比例的,可直接参考,如 GDP 指标。对于无直接参考资料确定上下浮动比例的指标,为克服已有研究主观设定变量上下浮动比例的缺陷,本文充分利用历史数据所包含的潜在信息,采用 K 均值聚类方法将各驱动要素的增长率分为 3 类,从而将聚类中心之间的差值设定为本文各驱动要素的上下浮动比例。各子指标对应情景分类汇总即可得到一级指标的情景,即低发展情景、基准发展情景和高发展情景;低节能清洁情景、基准节能清洁情景和高节能清洁情景。此外,由于本文主要考察“双碳”战略和“经济转型”的不确定性对不同层级天然气消费的影响,对于年平均温度、管道长度

和地缘政治指数三个控制变量不设定情景分类,而是结合各变量的演变规律,充分利用变量的惯性特征,采用 ETS 模型或 ARIMA 模型预测其未来演变趋势。

发展情景的设定如下所述。第一, GDP 情景。由于我国经济发展目标已由 GDP 总量转变为经济高质量发展,因此《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(以下简称《十四五规划》)中首次未给出未来的 GDP 增长率目标。因而,参照李平等^[53]对我国 GDP 增长率的预测,对经济情景进行设定。具体而言,李平等^[53]采用 CN3ET-DCGE 模型,测算了 2020 年—2035 年我国按照当前历史惯性发展的较慢情景、基准情景和较快情景的 GDP 增长率,本文将其推演结果分别对应为本文 GDP 的低情景、基准情景和高情景;第二,产业结构情景。产业情景的设置参考了国家发改委^②和人民网^③发布的预测结果,即在基准情景中将产业结构 2021 年—2025 年年均增长率设置为 1.15%;而 2026 年—2030 年年均增长率设置为 1.89%。同时,按照增长率上下浮动 1.49% 的标准,分别设置了高情景和低情景;第三,人口密度情景。《国家人口发展规划(2016—2030 年)》提出,到 2030 年中国人口将达到 14.5 亿,即 2020 年—2030 年人口密度的年均增长率为 0.27%。据此,将人口情景中基准情景的人口密度增长率设置为 0.27%,并按照上下浮动 0.31% 的标准分别设置了高情景和低情景;第四,城镇化率城市化情景。《十四五规划》指出,到 2025 年中国城镇化率将达到 65%,年均增长率为 0.35%;《国家人口发展规划(2016—2030 年)》《城市蓝皮书:中国城市发展报告 No. 12》和《中国人类发展报告 2016》一致认为,2030 年中国城镇化率将高达 70%,2025 年—2030 年年均增长率为 1.49%。经测算,上下浮动 1.02% 对应城镇化率的高情景、低情景;第五,产量情景设定参考前文多循环 Hubbert 模型介绍中

的产量情景划分,将 1 倍情景、1.5 倍情景和 2 倍情景分别对应为低情景、基准情景和高情景。

节能清洁情景的设定如下所述。第一,单位 GDP 能耗情景。国务院印发的《“十四五”节能减排综合工作方案》(以下简称《节能减排方案》)中指出,到 2025 年,我国单位 GDP 能耗要比 2020 年下降 13.5%,年均增长率为 -2.86%。假定 2025 年—2030 年单位 GDP 能耗将保持相同增速,据此将基准情景下单位 GDP 能耗的增长率设置为 -2.86%,并按照上下浮动 1.57% 的标准分别设置高情景和低情景;第二,非化石能源消费结构情景。《节能减排方案》指出,到 2025 年,我国非化石能源消费结构将达到 20%,因此,本文将 2021 年—2025 年基准情景下非化石能源消费结构增长率设定为 4.70%;此外,国务院《2030 年前碳达峰行动方案》提出,到 2030 年,我国非化石能源消费结构将达到 25%,据此将 2026 年—2030 年基准情景下非化石能源消费结构增长设置为 4.56%。分别以非化石能源消费结构增长率上下浮动 4.07% 为标准,设定了高情景和低情景;第三,碳排放强度情景。《十四五规划》提出,到 2025 年,我国碳排放强度需下降 18%,年均增速为 -3.89%。假定 2025 年—2030 年碳排放强度将保持相同增速,经计算,上下浮动 6.16% 为碳排放强度的高情景、低情景。据此将基准情景下单位 GDP 能耗的增长率设置为 -2.86%,并按照上下浮动 1.57% 的标准分别设置高情景和低情景。

3 天然气层级消费的驱动要素分析

依据经济发展模式、市场条件和节能清洁政策的动态调整和转变, DMA 方法可以选择合理的驱动要素来适应天然气消费的变动规律,从而通过考虑变量的动态调变特征而显著提高不同时段下天然气消费的预测精度。本文将数据分为

② 2021 年—2025 年产业结构预测数据来源于政府部门官方网站: https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202110/t20211012_1299485.html?code=&state=123。

③ 2026 年—2030 年产业结构预测数据来源于人民网: <http://www.rmlt.com.cn/2017/0605/477258.shtml>。

训练集和测试集,80%为训练集,20%为测试集使用训练集来建立模型.如表3所示,不同需求类型下的RMSE集中在0.19~0.28之间,而MAE集中在0.09~0.18之间,表明模型的预测精度较高.

图2展示了驱动要素对各层级天然气消费预测能力的动态调变过程.可以发现,在1994年—2000年期间,各要素对生存消费、生产消费和非底线消费的预测能力基本一致,尚未出现占主导

地位的驱动要素,这可能与2000年之前我国经济体量低、清洁环保意识淡薄和天然气产业发展滞后有关.自2000年开始,不同要素对各层级天然气消费的预测贡献度逐渐分化.同时,由于用气需求弹性存在差异,不同类型天然气消费的主控要素和动态调变轨迹有所差异.若将后验概率0.5作为分界线,可以发现,相比于生存消费,对生产消费和非底线消费具有良好预测能力的要素繁多且复杂.

表3 各驱动要素对不同层级天然气消费的后验概率

Table 3 Posterior probabilities of each driving factor on natural gas consumption at different levels

变量	生存消费 ($\lambda = 0.9, \alpha = 0.99$)	生产消费 ($\lambda = 0.98, \alpha = 0.99$)	非底线消费 ($\lambda = 0.94, \alpha = 0.99$)
	后验概率均值	后验概率均值	后验概率均值
GDP	0.31	0.41	0.41
城镇化率	0.63	0.45	0.44
产业结构	0.61	0.32	0.40
单位GDP能耗	0.40	0.37	0.43
人口密度	0.65	0.40	0.42
碳排放强度	0.42	0.41	0.49
天然气产量	0.36	0.44	0.45
非化石能源消费结构	0.20	0.30	0.33
天然气管道长度	0.69	0.41	0.61
年平均气温	0.28	0.34	0.36
地缘政治指数	0.18	0.22	0.18
RMSE	0.193 1	0.288 2	0.215 4
MAE	0.099 2	0.179 6	0.130 2
模型数量	2 048		

全时域来看,第一,由于生存消费主要解决的是人的基本生存用气问题,其主要受到发展指标的影响,其主控要素包括城镇化率、产业结构、人口密度和天然气管道长度(如表3所示,其后验概率均值在0.6以上),并且这四个要素在全时域内对生存消费均保持了较高的预测能力;第二,除天然气管道长度变量外,各要素对生产消费和非底线消费预测概率均在0.5以下,不存在较为明显的全时域主控要素,且各要素对二者的预测能力有所差异.具体而言,非底线消费受到发展指标和节能清洁指标共同驱动,其预测概率均值均在0.4以上;发展指标对生产消费具有良好预测效果,其预测概率均值在0.4以上,但节能清洁指标对生产消费预测能力不足,仅有碳排放强度预

测概率为0.41;第三,天然气产量对生产消费和非底线消费的预测概率较高.这是因为,在梯级用气思维下,生产消费和非底线消费主要依赖于天然气产量的多寡.与之相比,无论产量如何,生存消费均属于刚需而需要优先供给;第四,全时域看,我国天然气价格管制措施降低了地缘政治风险传导至我国天然气中下游市场的可能性.然而,2015年—2020年之间,地缘政治指数对非底线消费的预测概率有所抬升.其原因可能在于,底线消费具有刚性特征,由于我国天然气资源贫瘠,在“底线需求及时响应,非底线需求灵活调整”供应模式下,客观上要求依赖国外天然气市场来保障非底线消费用气.在地缘政治形势日趋复杂背景下会加剧非底线消费用户的预防性买气和储气行

为,从而增加了地缘政治风险影响非底线消费的可能性。

分时域看,自“十二五”以来,我国开始高度重视生态环境治理,从而使得天然气这一过渡型能源的消费总量逐年攀升。从图2可以看出,虽然节能清洁指标在全时域内缺乏预测能力,但在2010年之后的分时域内,其在预测框架中的地位开始上升,一定程度上证明了将节能清洁指标纳入指标体系的重要性。同时,还可以发现,各节能清洁指标对不同类型天然气消费的预测能力存

在异质性。第一,在2010年—2020年期间,节能清洁指标对底线消费内部的动态调变轨迹存在差异。整体来看,2010年之后,节能清洁指标对底线消费的预测概率有所改善,部分时点的预测概率突破0.5;第二,与底线消费相比,非底线消费具有可替代性强、替代成本低、涉及行业范围广以及节能降耗空间大等特征,因此其受到节能清洁指标的影响更大。因而,大部分时间内,非化石能源结构和碳排放强度对非底线消费的预测概率均在0.5以上。

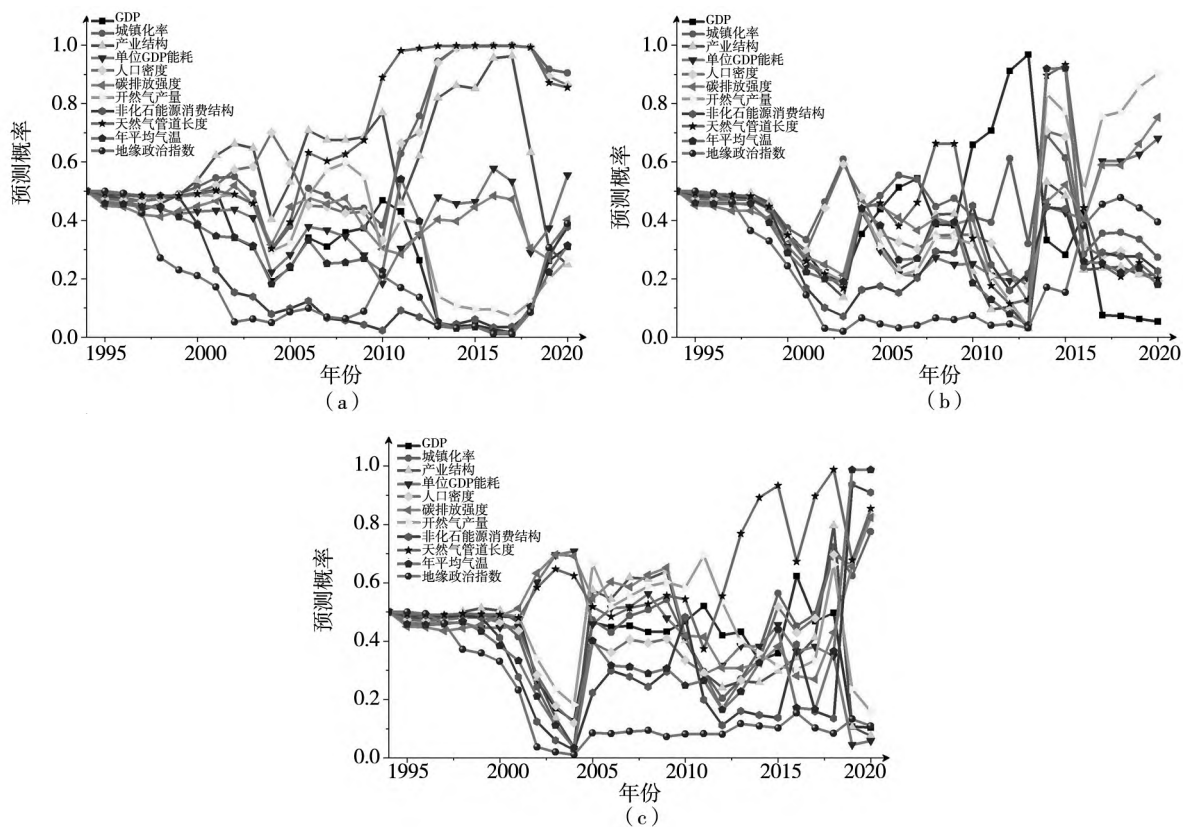


图2 各变量对不同层级天然气消费的后验概率变化:(a)生存消费;(b)生产消费;(c)非底线消费

Fig. 2 Posterior probability changes of variables on different levels of natural gas consumption:

(a) subsistence consumption; (b) productive consumption; (c) non-bottom-line consumption

综上,可以得到如下五个结论。第一,由于我国仍属于发展中国家,经济绿色低碳转型尚未完全实现,快速的经济增长仍然会带动能源消费的持续攀升,因此在全时域下,各类天然气消费的主控要素主要集中于发展指标集之中;第二,底线消费主要受到发展指标的影响,这就要求我国在推进经济转型和城市化进程中,立足于自身天然气资源禀赋,重视不合理

的发展目标对底线消费的促增作用,以防止过高的发展目标会通过增加底线消费而加重天然气供应负担;第三,近年来非底线消费受到经济社会发展与节能清洁政策的双重影响;第四,相比于生存消费,生产消费和非底线消费更依赖天然气产量的演化轨迹;第五,整体看,地缘政治风险对不同层级天然气消费的预测能力较低。

4 多维情景下天然气供需形势分析

4.1 天然气产量预测

本文在三种情景下预测了我国天然气产量的演化轨迹,结果如图3所示.从总量来看,在1倍情景、1.5倍情景和2倍情景下,天然气产量分别于2030年、2033年和2037年达峰,峰值产量分别为2 441.46亿 m^3 、3 464.92亿 m^3 和4 227.95亿 m^3 .换言之,由于未来天然气可采资源量的预估不同,1倍情景的峰值产量与1.5倍情景相差1 023.46亿 m^3 ,与最乐观的2倍情景的差值更是高达1 786.49亿 m^3 .同时,在1倍情景、1.5倍情景和2倍情景下,“十四五”末期的产量分别为2 253.45亿 m^3 、2 835.01亿 m^3 和2 928.33亿 m^3 .《“十四五”现代能源体系规划》提出,我国天然气产量至2025年要达到2 300亿 m^3 以上,从本文的预测结果来看,1.5倍情景和2倍情景均能实现目标产值,且有535亿 m^3 ~628亿 m^3 的存量余额,仅1倍情景与目标产值存在47亿 m^3 的差额.此外,在1倍情景、1.5倍情景和2倍情景下,“十五五”末期的产量分别为2 441.46亿 m^3 、3 352.20亿 m^3 和3 711.26亿 m^3 .从增速来看,在1倍情景、1.5倍情景和2倍情景下,“十四五”期间我国天然气产量的年均增长率分别为3.99%、5.67%和6.61%,而“十五五”期间的年均增长率分别为1.34%、3.14%和4.64%,不同情景下“十四五”期间的增长率均高于“十五五”期间.此外,2021年—2030年,三种情景下天然气产量年均增长率的下限为2.66%,而上限为5.63%.

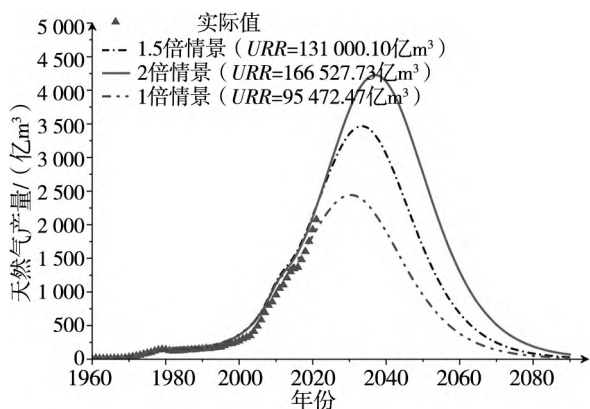


图3 中国天然气产量的情景预测

Fig.3 Scenario forecast of natural gas production in China

4.2 不同层级天然气消费量预测

本文将三种发展情景(低发展、基准发展和高发展)和三种节能清洁情景(低节能清洁、基准节能清洁和高节能清洁)两两组合,共形成9种目标情景以对天然气消费进行多维情景预测.

从天然气底线消费的内部预测结果来看,第一,多维情景下生存消费的预测结果存在显著差异.由图4(a)可知,发展指标变动是造成组合情景预测产生差异的关键原因.其中,无论选取何种节能清洁情景,高发展情景下的生存消费均显著高于基准发展和低发展情景.高发展—高节能清洁情景下生存消费量最高,而低发展—低节能清洁情景最低,二者分别构成未来生存消费量的上限和下限.因此,生存消费在“十四五”末期或将达到1 683.11亿 m^3 ~1 869.07亿 m^3 ,年均增速为2.63%~4.85%.随着天然气在居民取暖、日常生活中使用广度和深度的不断拓展,居民用气行为不断塑造和强化,生存消费“十五五”末将达2 113.79亿 m^3 ~2 528.49亿 m^3 左右,年均增速可达4.56%~6.11%;第二,如前文所述,由于发展指标对生产消费产生较大影响,2021年—2030年生产消费在低发展情景下边际动能减弱,其与基准和高发展情景下预测结果分化差异较大(如图4(b)所示).同时,发展情景和节能清洁情景两两组合的协同效应存在交织重叠现象,如在“十四五”期间基准发展—低节能清洁、基准发展—基准节能清洁、基准发展—高节能清洁、高发展—低节能清洁、高发展—基准节能清洁和高发展—高节能清洁情景下生产消费预测结果基本一致,“十五五”期间预测值逐渐分化,但高发展—高节能清洁和基准发展—低节能清洁两种情景仍相差不大.这一结论表明相关部门可以立足于经济发展和低碳转型的实际情况,通过多维情景的合理组合实现相同效果的生产消费调控目标,增加了经济和清洁政策有效协同的灵活性.此外,到“十四五”末生产消费量预计可达1 328.12亿 m^3 ~1 755.50亿 m^3 ,年均增速高达5.54%~8.13%;“十五五”末其将达1 499.43亿 m^3 ~2 301.47亿 m^3 ,年均增速放缓至2.14%~5.30%区间;第三,从底线消费内部结构来看,生存消费是底线消费的重要组成部分,到2030年生产消费最低仅占底线

消费总量的 31.70%, 但由于生产消费增量变动较大, 2021 年—2025 年生产消费年均增速远超生存消费, 甚至最高可突破 8%。因此, 要注意不恰当的经济转型和节能清洁化速度组合刺激生产消费不合理或过快增长加重底线消费供应负担的可

能性。同时, 单一的政策情景会同方向调控生存和生产消费变动, 但影响效果存异。这就要求在政策选择中合理取舍以防止天然气底线消费过渡膨胀导致天然气对外依存度过高而增加能源供应负担和延缓低碳转型步伐。

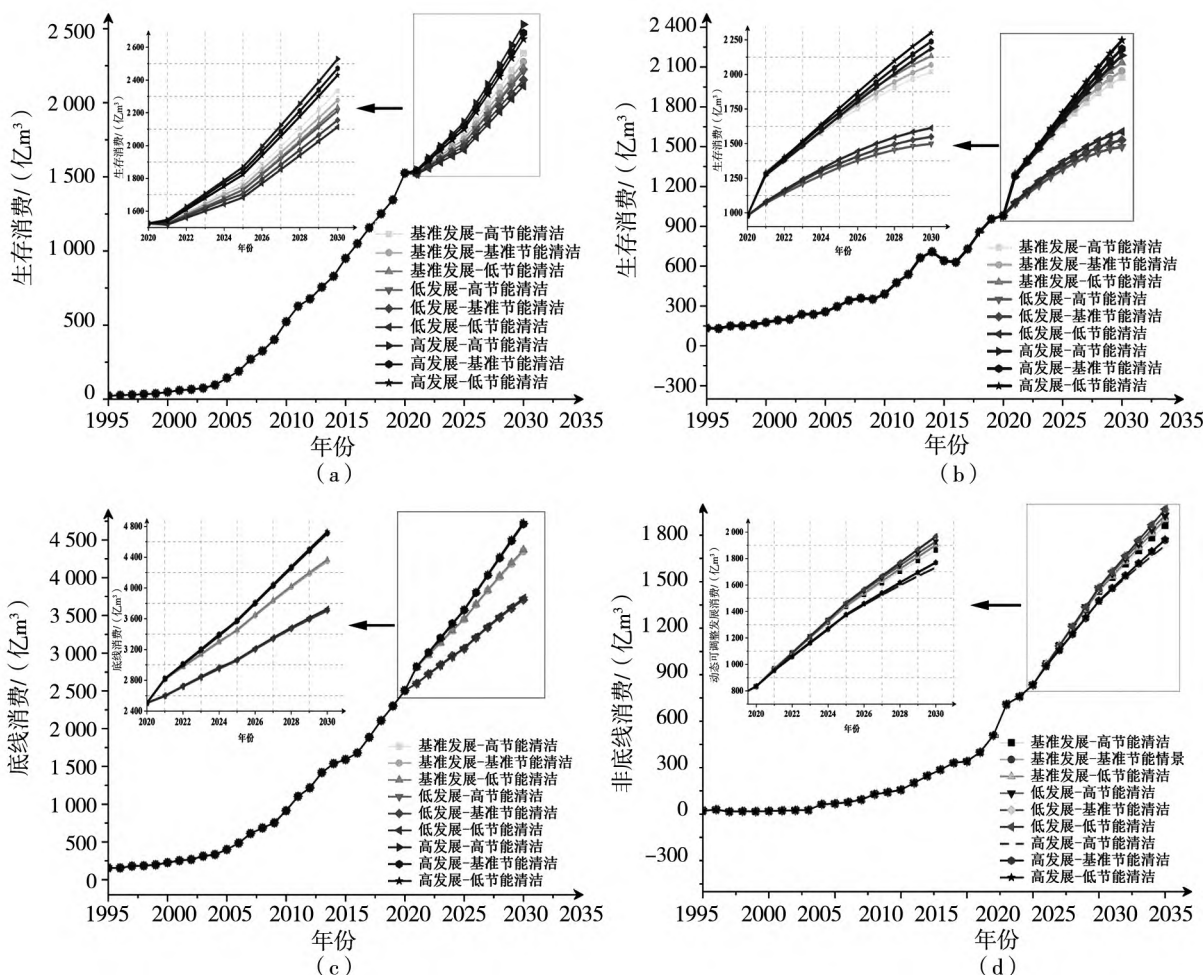


图4 不同层级天然气消费的多维情景预测: (a) 生存消费; (b) 生产消费; (c) 底线消费; (d) 非底线消费

Fig. 4 Multidimensional scenario-based forecast of tiered natural gas consumption: (a) subsistence consumption;

(b) productive consumption; (c) bottom-line consumption; (d) non-bottom-line consumption

从底线消费和非底线消费预测结果来看, 第一, 将多维情景下底线消费和非底线消费预测结果对应叠加, 可得到“十四五”和“十五五”期间天然气消费总量。2025 年天然气消费规模或将达到 4 516.08 亿 m^3 ~ 4 953.34 亿 m^3 , “十四五”期间年均增速 6.15% ~ 7.02%; 2030 年将达到 5 641.05 亿 m^3 ~ 6 502 亿 m^3 , “十五五”期间年均增速放缓至 4.67% ~ 5.12%。据预测, 2021 年我国天然气消费量预估为 3 556.50 亿 m^3 ~ 3 775.42 亿 m^3 , 实际值为 3 726 亿 m^3 , 在预估范围内; 同样地, 2021 年天然气产量预估值为

1 926.89 亿 m^3 ~ 2 273.75 亿 m^3 , 实际值 2 051 亿 m^3 , 也在预估范围内, 进一步验证了本文研究设计的合理性和模型结果的可靠性; 第二, 如图 4(c) 所示, 在既定发展情景下, 无论节能清洁情景如何设置底线消费预测结果基本一致。因此, 发展指标的变动是 2021 年—2030 年底线消费量持续分化的关键原因, 这主要由底线消费的刚性需求特征决定。同时, “十四五”末底线消费下限为 3 057.19 亿 m^3 , 上限为 3 578.61 亿 m^3 。“十四五”期间, 在 1 倍、1.5 倍和 2 倍天然气产量情景下底线消费均无法实现自

给,届时底线消费供应缺口预计分别 803.74 亿 m^3 ~ 1 325.16 亿 m^3 、222.18 亿 m^3 ~ 743.60 亿 m^3 和 128.86 亿 m^3 ~ 650.28 亿 m^3 。“十五五”期间底线消费将步入中速增长阶段,年均增速保持在 3.71% ~ 5.56%,2030 年底线消费将达 3 704.95 亿 m^3 ~ 4 730.81 亿 m^3 ,届时,若底线消费处于最低时,天然气产量 2 倍情景下底线消费可实现完全自给。天然气产量 1 倍情景和 1.5 倍情景下底线消费最低自给率分别为 51.61% 和 70.86%,底线消费供应压力较大;第三,多维情景下非底线消费预测结果随着时间推移差距逐渐拉大,如图 4(d) 所示。“十四五”期间,2025 年非底线消费在 1 371.11 亿 m^3 ~ 1 462.51 亿 m^3 之间变动,相比于 2021 年,“十四五”末其涨幅将超过 400 亿 m^3 ,年均增速高达 9.43% ~ 11.14%;“十五五”期间,高发展 - 高节能清洁情景为非底线消费下限情景,2030 年非底线消费将保持在 1 732.05 亿 m^3 ~ 1 967.82 亿 m^3 区间内波动,年均增速下降至 4.56% ~ 5.89%。在既定发展情景下,低节能清洁和基准节能清洁情景的作用效果一致。结果表明,通过多维情景的合理组合可以实现相同效果的非底线消费调控目标;第四,单一的政策情景组合同方向调控底线消费和非底线消费变动,但影响效果存异。这就要求在政策选择中合理取舍以寻求底线消费和非底线消费的平衡关系,防止天然气底线消费和非底线消费过渡膨胀导致天然气对外依存度过高而增加能源供应负担和延缓低碳转型步伐;第五,由于底线消费和非底线消费用气规律的差异,不同组合情景对二者的潜在影响存在矛盾,如高发展 - 高节能清洁情景下底线消费最高,而同样情景下非底线消费却最低,这一结果表明不存在能够实现底线消费和非底线消费同方向调控的最优政策情景组合,这就要求在制定经济环境政策时,要结合实际调控需求,对经济社会发展和清洁化转型速度合理取舍以寻求天然气消费内部某种平衡稳定关系。

由于三种产量情景下底线消费总量较难实现自给,届时非底线消费将完全对外依赖。为充分贯彻底线思维,若采取“生存消费及时响应,生产消费次优先供应,非底线消费动态调整”的层级用气模式,生产消费的自给率分三种情形:

情形 1 天然气产量 1 倍情景下“十四五”末

生存消费可实现完全自给,但生产消费自给率最低仅为 21.90%，“十五五”末生存消费最低自给率高达 96.56%，而生产消费最高自给率仅为 21.85%，甚至生产消费可能将完全依赖对外进口。

情形 2 天然气产量 1.5 倍情景下生存消费可实现完全自给,但“十四五”末生产消费自给率最低仅为 55.02%，到“十五五”末其自给率最高可达 82.59%。

情形 3 “十四五”末天然气产量 2 倍情景下生产消费自给率最高可达 93.76%，“十五五”末生产消费有实现完全自给的可能性,但仍取决于经济发展和节能清洁化速度的合理取舍。

可以发现,若严格执行层级用气模式,2025 年—2030 年生存消费基本可以实现自给自足,即使在天然气产量最悲观情景下生存消费最低自给率也高达 96.56%。然而,“十五五”末天然气产量最乐观情景下生产消费最低自给率不超过 52%，甚至 1 倍情景下生产消费可能将完全对外依赖。层级用气模式对于挤出非理性消费、维系社会正常运转具有重要现实意义。然而,预计 2030 年生产消费最低仅占底线消费总量的 31.70%，底线消费最低占天然气总消费的 56.98%。以生存消费为核心的底线消费规模总量庞大且有刚需特征,而生产和非底线消费囊括了大量高碳排和高污染行业用气需求,是天然气消费增长的核心力量,坚持层级用气模式将挤占生产消费和非底线消费的用气空间、延缓能源结构清洁化步伐。因此,层级用气的基本前提是要立足于本国发展情形和非化石能源发展进程,以系统性思维研判合理的经济社会发展和清洁化速度,提高经济和节能清洁政策组合的平衡性和协调性,一方面避免因政策组合不协调、发展速度不合理导致底线消费无序扩张、误伤非底线消费供应的可能性,另一方面,防止底线消费和非底线消费过度膨胀致使我国面临天然气能源安全问题击溃能源转型的风险。

4.3 天然气供需形势分析

天然气产量和消费量相互影响且互为条件。通过对未来天然气供需情况分类组合来研判天然气能源安全形势,对于建议以对外依存度为主的天然气分类施策管理机制意义重大。因此,本文将

天然气1倍情景、1.5倍情景和2倍情景下的天然气产量分别对应为低供给、较高供给和高供给;天然气消费量上、下限值分别对应于高消费和低消费。为尽可能归纳未来天然气对外依存度的可能性边界情景,本文将天然气供需类型两两组合后共形成6种对外依存度情景,并按照对外依存度走势情况将高供给、较高供给和低供给对应为价值型市场、潜在型市场和管控型市场。由于计算未来对外依存度需要精准预测天然气进口量和出口量,为便于计算,本文首先通过天然气产量和消费量预测值计算天然气自给率^④,进而通过自给率换算得到对外依存度^⑤。

如图5所示,多情景下“十四五”末对外依存度将在35.16%~54.51%内宽幅波动;“十五五”末对外依存度最低为34.21%,最高可达62.45%,可波动空间大。这一结果说明以天然气对外依存度为主线的天然气能源安全管理机制的治理空间大、管理弹性高、灵活性强,可以在梳理未来天然气供应形势和低碳转型规律特点基础上,通过持续提升天然气产量、制定合理的经济发展和节能清洁化目标、优化政策组合的协同效应,从而在天然气能源安全和能源转型之间实现动态、合理和可靠的平衡关系。因此,本文进一步探讨了天然气对外依存度治理的具体可实现路径,如下所示:

1)价值型市场情景下天然气安全问题合理可控,通过经济和节能清洁政策的协调联动可以在“十四五”和“十五五”末分别实现对外依存度5.72%和8.71%的降幅。

第一,在低消费-高供给情景下,非化石能源利用率高,能源转型速度快,产量增速大于消费增速,减少了经济社会对天然气依赖,对外依存度呈现平稳下降的发展格局,但未来变动幅度不超过2%。因此,低消费-高供给情景下能够使得政府在天然气能源安全和能源转型之间取得良好的平衡关系。第二,对于高消费-高供给情景而言,2030年天然气对外依存度达42.92%,2021年—2030年年均增速仅为0.80%,增速合理可控且总

量尚未突破天然气对外依存度50%的安全线。能源转型速度慢,天然气消费高,但依赖于高产量情景,天然气对外依存度增速温和,在此情景下可以逐步提高非化石能源在能源结构中的占比,逐渐引导市场向低消费-高供给市场过渡。第三,价值型市场情景下,若从天然气高消费向低消费情景过渡,到2025年和2030年对外依存度可分别降低5.72%和8.71%。

2)潜力型市场情景下天然气安全取决于经济和节能清洁政策的协调配合情况,若组合恰当,2025年和2030年对外依存度最高分别可降低5.54%和7.87%。

高消费-较高供给情景下2030年对外依存度将超过48.44%,天然气安全问题相对突出。在产量较高供给情景下,通过将发展指标下调为低发展情景下的目标增速,将节能清洁指标上调为高节能清洁情景下的目标增速可以显著改善天然气安全问题,天然气高消费向低消费情景过渡到2025年和2030年可将对外依存度分别下降5.54%和7.87%。

3)管控型市场情景下无论天然气消费状态如何,对外依存度远超50%安全线且统筹协调经济和节能清洁化发展速度仅能实现4.40%和5.73%的降幅。

第一,在低消费-低供给情景下,要多措并举突破天然气产量瓶颈,同时要加大非化石能源利用深度和广度,防止天然气能源安全拖累经济社会发展;第二,在高消费-低供给情景下,天然气低供给叠加能源转型步伐慢,致使天然气行业面临严重的能源安全问题。因此,在高消费-低供给情景下,政府要从供需两端发力,在加快推进增产上储能力的同时,需要注重天然气需求侧管理;第三,在管控型市场情景下,天然气能源严重不安全,需要相关部门加强对天然气市场的调节力度。在产量低供给情景下,相比于高消费情景,低消费情景下2025年和2030年对外依存度分别低4.40%和5.73%。

综上所述,对比三种市场情景可以发现,第一,

④ 天然气自给率 = 天然气产量 / 天然气消费。

⑤ 天然气对外依存度 = 1 - 天然气自给率。

无论经济和节能清洁化的目标增速如何组合,高供给是将对外依存度严格控制在安全线内的有效手段.换言之,天然气可采储量要突破 142 110 亿 m^3 ,产量在“十四五”和“十五五”末要达到 2 928.33 亿 m^3 和 3 711.26 亿 m^3 ;天然气产量在 1.5 倍情景下需配合低消费情景方能实现对外依存度的有效控制.换言之,将我国天然气产量 2021 年—2030 年年均增速调整到 4.41% ~ 5.63% 可将对外依存度严格控制在 50% 安全线

内;第二,三种市场情景下,从管控型市场—潜力型市场—价值型市场的过渡使得以对外依存度为主线的天然气管理策略灵活性更高,拓宽了经济和节能清洁政策组合调节对外依存度的空间;第三,不同市场情景下高消费向低消费情景过渡可以降低对外依存度,但最高降幅仅为 8.71%. 这一结果表明利用不同政策目标组合降低对外依存度的空间有限,需充分配合其它需求侧管理手段来有效降低对外依存度.

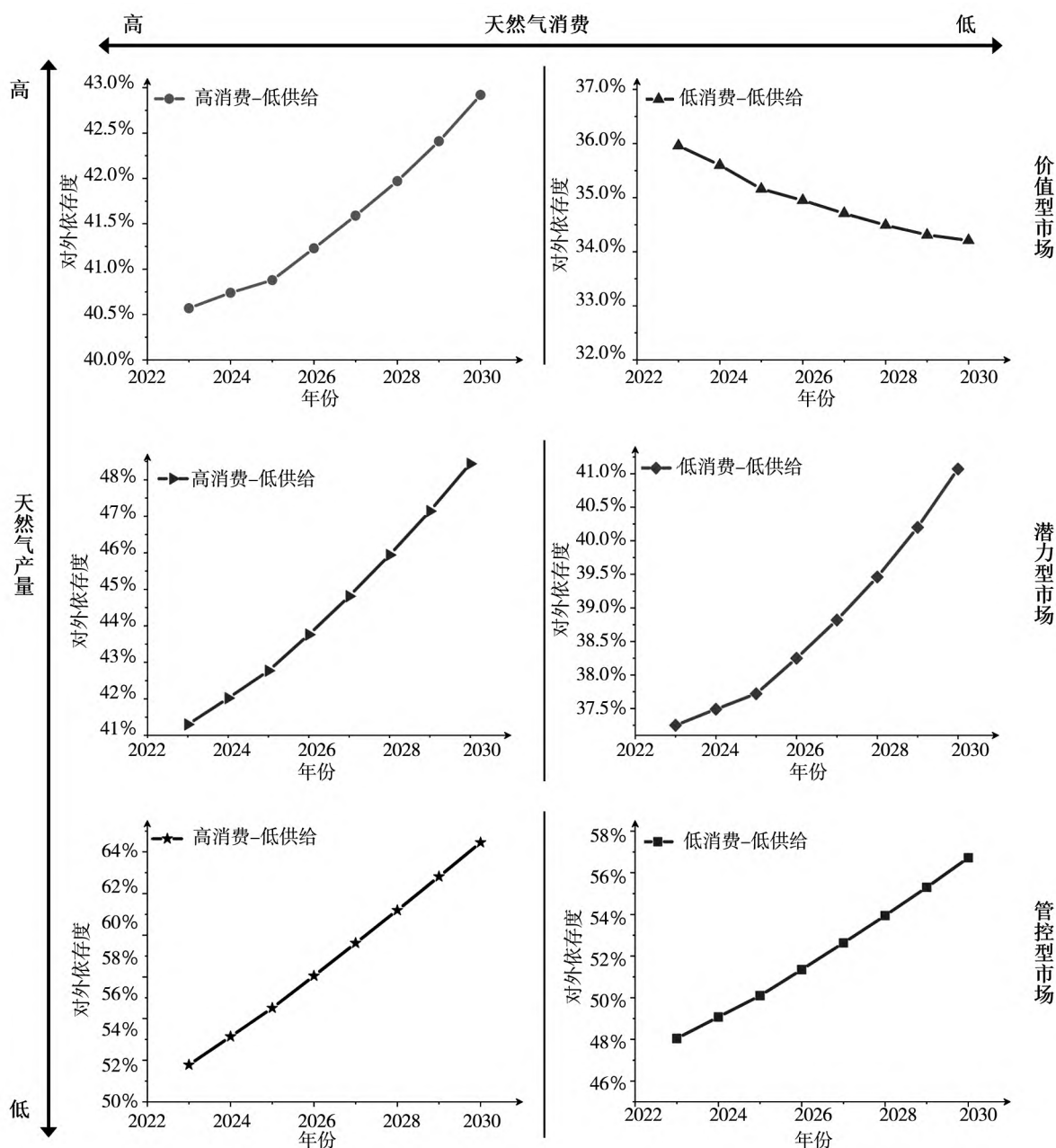


图 5 三种市场情景下 2021 年—2030 年天然气对外依存度走势

Fig. 5 Trend of natural gas dependency on external sources from 2021 to 2030 under three market scenarios

5 结束语

本文创新性地将天然气消费解构为生存消费、生产消费和非底线消费三类,并对中国天然气底线消费、非底线消费和总消费量进行了多维情景预测。随后,在三种产量情景下探讨了“十四五”和“十五五”天然气供需形势。针对预测结果,提出了如下对策建议:

第一,有效确保天然气能源安全关键在于保供,全力以赴实现天然气产量1.5倍情景下产量目标,争取实现2倍情景下的产量目标,将对外依存度控制在合理安全范围内。要着力推动供给革命,提高天然气产量,同时大力发展可再生能源,形成有效能源替代。保持较高经济增速和发展质量要求中长期仍需在天然气勘探开发上持续发力,若要实现2倍情景下产量目标,不仅要求在已有油气田上提高采收率和动用未开发储能,还需在油气新区推进新一轮大范围勘探。此外,通过发展、推广和应用风能、太阳能和地热能对天然气形成有效替代和补充,缓解供应压力。

第二,坚持“生存消费及时响应,生产消费次

优先供应,非底线消费动态调整”的层级用气模式,筑牢底线思维的同时要加强天然气需求侧管理,抑制天然气不合理消费,扎实推动节能增效,防止天然气底线消费过渡膨胀误伤非底线消费正常供应的可能性,同时要加强对生产消费增速的动态调控和监管。

第三,层级用气的核心前提是正确认识资源禀赋、经济发展和能源转型现状,以系统性思维研判合理的经济社会发展和清洁化速度,提高政策组合的整体平衡性,避免过渡追求经济社会发展或实现节能清洁目标而致使天然气行业严重超出自身供应极限。据本文研究结论,调整为低发展-高节能清洁情景有助于减少天然气消费需求,但不同情景对底线消费和非底线消费的影响存在矛盾,需要在经济转型速度和节能清洁化速度之间合理取舍以寻求天然气消费内部的平衡关系。

第四,由于天然气对外依存度治理空间大,可以建立以天然气对外依存度为主线的管理机制,根据不同场景下对外依存度走势灵活调整天然气管理策略,多措并举引导天然气行业从管控型市场到潜力型市场最终到价值型市场的渐进式过渡。

参考文献:

- [1]王克强,李国军,刘红梅. 中国农业水资源政策一般均衡模拟分析[J]. 管理世界, 2011, (9): 81-92, 188.
Wang Keqiang, Li Guojun, Liu Hongmei. A simulation analysis of the general equilibrium in China's policy about the resources of the agricultural water[J]. Journal of Management World, 2011, (9): 81-92, 188. (in Chinese)
- [2]马超. 耦合航运要求的三峡-葛洲坝梯级水电站短期调度快速优化决策[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1345-1350.
Ma Chao. Fast optimal decision of short-term dispatch of Three Georges and Gezhouba Cascade Hydropower Stations with navigation demand considered[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(5): 1345-1350. (in Chinese)
- [3]林伯强,李江龙. 基于随机动态递归的中国可再生能源政策量化评价[J]. 经济研究, 2014, 49(4): 89-103.
Lin Boqiang, Li Jianglong. Quantitative evaluation of Chinese renewable energy policy based on recursive stochastic dynamic programme[J]. Economic Research Journal, 2014, 49(4): 89-103. (in Chinese)
- [4]何文韬,肖兴志. 进入波动、产业震荡与企业生存——中国光伏产业动态演进研究[J]. 管理世界, 2018, 34(1): 114-126.
He Wentao, Xiao Xingzhi. Entry turbulence, industry shakeouts and firm survival: A dynamic evolution study of China's photovoltaic industry[J]. Journal of Management World, 2018, 34(1): 114-126. (in Chinese)
- [5]杨洪明,刘俊鹏,梁芮,等. 考虑动态功率调节裕度的高比例风电系统水-火-荷分布鲁棒优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(9): 2327-2337.
Yang Hongming, Liu Junpeng, Liang Rui, et al. Distributionally robust optimal dispatching of hydro-thermal-load resources for high penetration of wind system with dynamic power regulation margin[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2021, 41(9): 2327-2337. (in Chinese)
- [6]周志斌. 构筑我国天然气企业要素成本管理模式[J]. 管理世界, 2004, (2): 145-147.
Zhou Zhibin. Construct the factor cost management model of natural gas enterprises in China[J]. Journal of Management

- World, 2004, (2): 145 – 147. (in Chinese)
- [7] 王克强, 武英涛, 刘红梅. 中国能源开采业全要素生产率的测度框架与实证研究[J]. 经济研究, 2013, 48(6): 127 – 140.
- Wang Keqiang, Wu Yingtao, Liu Hongmei. An analytical framework and empirical study for TFP in Chinese energy mining industry[J]. Economic Research Journal, 2013, 48(6): 127 – 140. (in Chinese)
- [8] 李 卓. 石油战略储备计划与石油消费的动态路径分析[J]. 管理科学学报, 2008, 11(1): 22 – 30.
- Li Zhuo. Dynamic path analysis of strategic petroleum reserve plans and oil consumption[J]. Journal of Management Sciences in China, 2008, 11(1): 22 – 30. (in Chinese)
- [9] Bjerkstrand P, Stensland G, Vagstad F. Gas storage valuation: Price modelling v. optimization methods[J]. The Energy Journal, 2011, 32(1): 203 – 228.
- [10] 焦建玲, 张峻岭, 魏一鸣. 石油储备价值研究: 基于供应链视角[J]. 管理科学学报, 2011, 14(2): 53 – 60.
- Jiao Jianling, Zhang Junling, Wei Yiming. Research on the value of petroleum reserve based on supply chain[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(2): 53 – 60. (in Chinese)
- [11] Sönmez E, Kekre S, Scheller-Wolf A, et al. Strategic analysis of technology and capacity investments in the liquefied natural gas industry[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 226(1): 100 – 114.
- [12] 林 琪, 赵秋红, 倪冬梅. 考虑关联与替代关系的应急物资储备量模型[J]. 管理科学学报, 2018, 21(8): 112 – 126.
- Lin Qi, Zhao QiuHong, Ni Dongmei. Decision-making model for emergency material reserve considering and substitution [J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(8): 112 – 126. (in Chinese)
- [13] 李 山, 张 荣. 天然气储备及开采技术投资影响下的进出口策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(1): 163 – 175.
- Li Shan, Zhang Rong. Import and export strategy under natural gas reserve and exploitation technology investment[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2021, 41(1): 163 – 175. (in Chinese)
- [14] Ding B, Makowski M, Zhao J, et al. Analysis of technology pathway of China's liquid fuel production with consideration of energy supply security and carbon price[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2023, 8(1): 1 – 14.
- [15] 彭正银, 楚伯微, 汪 爽, 等. 使命驱动、网络联结与资源调配——重大突发事件应急志愿组织高效运作机制研究[J]. 管理科学学报, 2023, 26(11): 102 – 124.
- Peng Zhengyin, Chu Bowei, Wang Shuang, et al. Mission-drive connection and resource allocation: Efficient operation mechanism of emergency volunteer organizations in major emergencies [J]. Journal of Management Sciences in China, 2023, 26(11): 102 – 124. (in Chinese)
- [16] Chai J, Liang T, Lai K K, et al. The future natural gas consumption in China: Based on the LMDI-STIRPAT-PLSR framework and scenario analysis[J]. Energy Policy, 2018, (119): 215 – 225.
- [17] Liang T, Chai J, Zhang Y J, et al. Refined analysis and prediction of natural gas consumption in China[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2019, 4(2): 91 – 104.
- [18] Chen Y, Koch T, Zakiyeva N, et al. Modeling and forecasting the dynamics of the natural gas transmission network in Germany with the demand and supply balance constraint[J]. Applied Energy, 2020, (278): 115597.
- [19] Potocnik P, Soldo B, Šimunovic G, et al. Comparison of static and adaptive models for short-term residential natural gas forecasting in Croatia[J]. Applied Energy, 2014, (129): 94 – 103.
- [20] Chen Y, Chua W S, Koch T. Forecasting day-ahead high-resolution natural-gas demand and supply in Germany[J]. Applied Energy, 2018, (228): 1091 – 1110.
- [21] Özmen A, Yılmaz Y, Weber G W. Natural gas consumption forecast with MARS and CMARS models for residential users [J]. Energy Economics, 2018, (70): 357 – 381.
- [22] Sen D, Günay M E, Tunç K M M. Forecasting annual natural gas consumption using socio-economic indicators for making future policies[J]. Energy, 2019, (173): 1106 – 1118.
- [23] Song J, Zhang L, Jiang Q, et al. Estimate the daily consumption of natural gas in district heating system based on a hybrid seasonal decomposition and temporal convolutional network model[J]. Applied Energy, 2022, (309): 118444.
- [24] Rehman A, Zhu J J, Segovia J, et al. Assessment of deep learning and classical statistical methods on forecasting hourly natural gas demand at multiple sites in Spain[J]. Energy, 2022, (244): 122562.
- [25] Wei N, Li C, Peng X, et al. Daily natural gas consumption forecasting via the application of a novel hybrid model[J]. Applied Energy, 2019, (250): 358 – 368.
- [26] Gao X, Gong Z, Li Q, et al. Model selection with decision support model for US natural gas consumption forecasting[J].

- Expert Systems with Applications, 2023, (217): 119505.
- [27] 陈文学, 罗佐县, 杨国丰. 新形势下中国油气底线需求分析[J]. 国际石油经济, 2021, 29(3): 7-14.
Chen Wenxue, Luo Zuoxian, Yang Guofeng. Analysis on China's oil and gas demand baseline under the new situation[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(3): 7-14. (in Chinese)
- [28] Lin B, Wang T. Forecasting natural gas supply in China: Production peak and import trends[J]. Energy Policy, 2012, (49): 225-233.
- [29] Li S Q, Zhang B S, Tang X. Forecasting of China's natural gas production and its policy implications[J]. Petroleum Science, 2016, (13): 592-603.
- [30] Wang Q, Li S, Li R, et al. Forecasting US shale gas monthly production using a hybrid ARIMA and metabolic nonlinear grey model[J]. Energy, 2018, (160): 378-387.
- [31] Qiao W, Liu W, Liu E. A combination model based on wavelet transform for predicting the difference between monthly natural gas production and consumption of US[J]. Energy, 2021, (235): 121216.
- [32] Maitra D, Rehman M U, Dash S R, et al. Oil price volatility and the logistics industry: Dynamic connectedness with portfolio implications[J]. Energy Economics, 2021, (102): 105499.
- [33] Huang Y, Dai X, Wang Q, et al. A hybrid model for carbon price forecasting using GARCH and long short-term memory network[J]. Applied Energy, 2021, (285): 116485.
- [34] Hernandez J A, Shahzad S J H, Sadorsky P, et al. Regime specific spillovers across US sectors and the role of oil price volatility[J]. Energy Economics, 2022, (107): 105834.
- [35] Guo Y, Wang J, Chen H, et al. Machine learning-based thermal response time ahead energy demand prediction for building heating systems[J]. Applied Energy, 2018, (221): 16-27.
- [36] Herrera G P, Constantino M, Tabak B M, et al. Long-term forecast of energy commodities price using machine learning[J]. Energy, 2019, (179): 214-221.
- [37] Beyca O F, Ervural B C, Tatoglu E, et al. Using machine learning tools for forecasting natural gas consumption in the province of Istanbul[J]. Energy Economics, 2019, (80): 937-949.
- [38] Brusaferrri A, Matteucci M, Portolani P, et al. Bayesian deep learning based method for probabilistic forecast of day-ahead electricity prices[J]. Applied Energy, 2019, (250): 1158-1175.
- [39] Tschora L, Pierre E, Plantevit M, et al. Electricity price forecasting on the day-ahead market using machine learning[J]. Applied Energy, 2022, (313): 118752.
- [40] Raftery A E, Kúrný M, Ettler P. Online prediction under model uncertainty via dynamic model averaging: Application to a cold rolling mill[J]. Technometrics, 2010, 52(1): 52-66.
- [41] Li J, Dong X, Shangguan J, et al. Forecasting the growth of China's natural gas consumption[J]. Energy, 2011, 36(3): 1380-1385.
- [42] 卢全莹, 柴 建, 朱 青, 等. 天然气消费需求分析及预测[J]. 中国管理科学, 2015, 23(S1): 823-829.
Lu Quanying, Chai Jian, Zhu Qing, et al. Analysis and forecast for natural gas consumption demand[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(S1): 823-829. (in Chinese)
- [43] Liu G, Dong X, Jiang Q, et al. Natural gas consumption of urban households in China and corresponding influencing factors[J]. Energy Policy, 2018, (122): 17-26.
- [44] Xu B, Lin B. Can expanding natural gas consumption reduce China's CO2 emissions? [J]. Energy Economics, 2019, (81): 393-407.
- [45] 丁 聿, 付佳鑫, 唐 旭, 等. 基于 SD-GIS 方法的天然气需求量中长期变化趋势及其空间格局预测——以北京市为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 176-185.
Ding Yu, Fu Jiaxin, Tang Xu, et al. Prediction of medium- and long-term change trend and spatial distribution of natural gas demand based on the SD-GIS method: A case study of Beijing[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 176-185. (in Chinese)
- [46] 李 弩, 王建良, 刘 睿, 等. 碳中和目标下天然气产业发展的多情景构想[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 183-192.
Li Nu, Wang Jianliang, Liu Rui, et al. Multi-scenario conception on the development of natural gas industry under the goal of carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 183-192. (in Chinese)
- [47] Kani A H, Abbasspour M, Abedi Z. Estimation of demand function for natural gas in Iran: Evidences based on smooth transition regression models[J]. Economic Modelling, 2014, (36): 341-347.
- [48] Bianco V, Scarpa F, Tagliafico L A. Scenario analysis of nonresidential natural gas consumption in Italy[J]. Applied En-

- ergy, 2014, (113): 392–403.
- [49] 高 建, 董秀成. 中国城市天然气消费驱动因素分析[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 130–137.
Gao Jian, Dong Xiucheng. Stimulating factors of urban gas consumption in China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 130–137. (in Chinese)
- [50] 柴 建, 王亚茹, KIN Keung-lai. “新常态”下的中国天然气消费分析及预测[J]. 运筹与管理, 2019, 28(6): 175–183.
Chai Jian, Wang Yaru, KIN Keung-lai. Analysis and forecast of China's natural gas consumption under the “New Normal” [J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(6): 175–183. (in Chinese)
- [51] Chai J, Zhang X, Lu Q, et al. Research on imbalance between supply and demand in China's natural gas market under the double-track price system[J]. Energy Policy, 2021, (155): 112380.
- [52] Caldara D, Iacoviello M. Measuring geopolitical risk[J]. American Economic Review, 2022, 112(4): 1194–1225.
- [53] 李 平, 娄 峰, 王宏伟. 2016—2035 年中国经济总量及其结构分析预测[J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 13–20.
Li Ping, Lou Feng, Wang Hongwei. Analysis and forecast of China's total economy and its structure from 2016–2035[J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 13–20. (in Chinese)

China's natural gas supply and demand balance embedded in bottom-line thinking

CHAI Jian, ZHANG Xiao-kong^{*}, JIA Rui-ning, KOU Hong-hong

School of Economics and Management, Xidian University, Xi'an 710126, China

Abstract: The current Russia-Ukraine war has elevated the issue of oil and gas security to a new strategic height. Accurately assessing the future supply and demand for natural gas is of great strategic significance for the construction of major natural gas energy security projects. This paper innovatively divides natural gas consumption into three categories: survival, production, and non-bottom-line consumption. It predicts medium- and long-term natural gas consumption under conditions of multi-factor collaborative uncertainty and makes a comprehensive study and judgment of the natural gas supply and demand situation under the bottom-line thinking. The results show that, first, under the three scenarios of recoverable reserves, natural gas production will peak in 2030, 2033, and 2037, with peak productions of 2 441.46, 346.492 and 422.795 billion cubic meters, respectively. Second, by 2030, the lowest production consumption accounts for 31.70% of the bottom-line consumption, but its average annual growth rate far exceeds that of survival consumption. Third, the bottom-line consumption in 2025 and 2030 will reach 3 057.19 ~ 3 578.61 and 3 704.95 ~ 4 730.81 billion cubic meters, respectively. If the cascade gas consumption thinking is strictly implemented, subsistence consumption can basically achieve self-sufficiency under any production scenario. However, the lowest self-sufficiency rate for production and consumption under the most optimistic scenario of natural gas production at the end of the “15th Five-Year Plan” does not exceed 52%. Furthermore, even under scenario of one times production and consumption, there may be complete dependence on external sources. Fourth, in the scenario of two times or 1.5 times natural gas production, the external dependence on natural gas can be strictly controlled within 50%; however, the effect of using different scenarios to reduce this external dependence is limited, with a maximum reduction of 8.71%. The research conclusions are of great significance for ensuring the balance between the supply and demand of natural gas in my country and implementing the energy security strategy.

Key words: natural gas; bottom-line thinking; energy security; bottom-line consumption; supply and demand balance