

基于系统动力学模型的中国天然气需求 情景预测及影响因素研究

穆献中, 李国昊

(北京工业大学 循环经济研究院, 北京 100124)

摘要: 本文在对中国天然气系统结构和反馈关系分析的基础上, 建立中国天然气供需系统动力学模型, 并提出一种改进的 Logistic 模型求解方法对中国天然气产量进行预测, 然后将产量预测值输入系统动力学模型中, 通过改变模型中的部分参数, 设置了 7 种情景对中国天然气的需求量及消费结构进行仿真模拟。结果表明: 中国天然气产量峰值将出现在 2038 年左右, 峰值产量约为 2800 亿立方米; 随着经济的不断发展以及城镇化的不断深入, 中国天然气需求量将逐年稳步增长, 到 2035 年将达到 3600~4500 亿立方米之间; 在消费结构方面, 城市燃气仍将是天然气消费的第一大户, 其后依次是工业燃料、天然气发电和天然气化工; 此外, 相较于人口增长, 经济发展在促进天然气需求量增长中仍起主导作用, 而城镇化对城市燃气的影响较为明显, 天然气利用技术的提升可有效降低天然气消费总量。

关键词: 天然气供需系统; 系统动力学; Logistic 模型; 情景预测

中图分类号: F407.22

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2018)01-0056-12

中国以煤炭为主和直接燃烧煤比重过高的能源结构特点导致了大气污染等一系列严重的环境问题。在全球气候变暖的趋势仍在加剧的背景下, 减少温室气体的排放成为各国共同的目标。相比于煤炭和石油, 天然气具有清洁和低碳的优点, 在同等能量产出情况下, 天然气的碳排放约为石油的 2/3、煤炭的 3/7, 在污染气体排放上, 更是基本上实现了零排放。大气污染防治与全球气候变暖为中国天然气的发展创造了历史性机遇, 天然气在能源革命中将扮演重要角色。从发达国家经验看, 中国的天然气市场尚处在早期阶段, 未来仍有较大的发展潜力。分析中国天然气需求结构, 预测中国天然气未来的消费量, 对于促进中国天然气工业的发展和缓解环境问题具有重要的

意义。

1 天然气需求预测研究现状

国内外对天然气的需求预测, 主要从能源消耗与经济发展关系出发, 通过对未来经济发展和能源消耗强度的判断, 得到全社会总的能源消费量, 再由天然气在能源消费结构中所占的比重计算得到天然气的消费量。近年来, 由于计算机技术的兴起, 人工智能预测模型在天然气需求预测方面得以快速发展。Wei Zhang^[1]等建立贝叶斯平均模型预测中国天然气消费量, 有效地解决了模型结构和参数的不确定性问题, 提高了预测精度。Jolanta Szoplik^[2]利用神经网络方法, Yun Bai^[3]利用支持向量机, 分别建立天然气消费量预测模型,

收稿日期: 2017-11-22; 修回日期: 2018-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(71273021), 国家自然科学基金项目(7167030506)。

作者简介: 穆献中(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域经济、技术经济, 能源经济。

李国昊(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 能源系统建模。E-mail: leegh@emails.bjut.edu.cn

可实现对天然气日度消费量的预测。此外,越来越多的学者尝试将多种预测方法混合使用,这样克服了单一方法的弊端,提高了预测精度,如 Xu Gang^[4]将多项式曲线模型和移动平均模型结合建立 PCMACP 混合模型,殷建成^[5]等建立包含线性回归模型、人工神经网络模型、灰色系统预测模型的优化组合模型,又采用自适应递推适时算法对其进行改进,得到更准确的预测结果。以上研究虽取得了一些较为重要的结论,但考虑的因素不够全面,导致其预测的有效期很短。此外,这类研究有一个共同点,即是利用历史数据直接建立相应的模型,除经济增长因素外,其他影响天然气消费量的因素均未加以考虑。

天然气需求系统是一个复杂的动态系统,与经济、社会、政策环境等诸多方面有交互影响,系统动力学在描述系统内部的动态关系方面具有独特的优势。系统动力学是美国麻省理工学院的 Forrester 教授于 1956 年创立的以系统和反馈为基础的一门学科。整个系统的因果关系和流量关系都依靠系统的输入和流出以及多个循环系统之间的正负反馈达到平衡,从而模拟不同情景的变化情况。国内学者将系统动力学的基本原理和方法运用于能源供需预测领域已经取得可观的成果^[6-9]。在研究天然气方面,史立军、周泓从我国未来天然气供需安全的视角出发,运用系统动力学方法,建立了我国天然气供需预测模型^[10]。李君臣、董秀成等在对我国天然气消费进行行业划分后,综合考虑各行业天然气消费的相关影响因素,利用系统动力学模型,对我国未来天然气消费量进行了预测^[11]。Sunjingchun 建立了我国天然气工业供需系统动力学模型,预测我国天然气未来的供求关系,分析相关因素对供应和需求的影响,并得出相比于天然气资源和投资水平,我国能源结构对天然气供需的影响更为明显这一结论。以上这些研究为本文提供了方法来源,但在对系统动力学模型中部分设定参数时,由于只设定了一个数

值,而一旦这个数值与实际发生较大偏差,将导致预测结果的偏差被放大。为避免这一缺陷,本文在建立天然气需求系统动力学模型后,设置不同的情景,充分考虑各种情况,预测不同情景下天然气需求量,同时分析各参数的灵敏度,以确定影响天然气消费量的因素。

2 中国天然气需求系统边界确定和结构分析

2.1 系统边界确定

天然气系统是能源系统(Energy System)的重要组成部分。能源系统是指自然界中的一次能源经开发、输送、加工、转换、储存和分配后,最后被终端用户消费的完整的能源流过程。能源系统按其范围可划分为全球能源系统、国家能源系统、城市能源系统等,按能源种类又可划分为石油系统、煤炭系统、天然气系统、新能源系统等。根据系统论的基本观点,现实的系统都是开放系统,都具有不断地与外界环境进行物质、能量和信息交换的性质和特点,这也是系统得以稳定存在的前提条件^[12]。中国天然气系统是全球能源系统的一个子系统,必然与其他地区或种类的能源系统有着密切的联系。国家层面的天然气系统之间相互联系是通过贸易实现的,但由于天然气具有不易储存和运输的性质,使得它不能像煤炭和石油那样可以用火车、货轮等常规运输工具灵活地从产地运到消费市场,国际间的天然气交易只能通过管线或者船运达成,而管线建设费用和船运天然气的液化成本都十分高昂,这在很大程度上限制了天然气在区域间的贸易往来,因此各区域间的天然气系统相对孤立。目前世界形成了三大天然气市场,按其成熟度依次为:北美市场、欧洲市场和亚太市场,中国天然气市场发展在亚太市场中尚且落后于日、韩等国。因此,本文将中国天然气系统脱离于全球能源系统单独进行分析。

对于天然气价格是否纳入本系统研究范畴, 本文基于如下几点考虑: 一方面, 根据商品的需求曲线, 价格上升通常会抑制其需求量, 但目前我国天然气处在快速发展阶段, 市场对天然气的需求绝大部分属于刚性需求; 另一方面, 天然气价格长期以来由政府定价, 导致其价格处于低位, 不论是企业还是家庭用户, 价格的承受能力都比较强。由此可知, 天然气价格上涨对其需求的抑

制作用微乎其微。此外, 目前我国天然气价格改革还未完成。因此, 本文的天然气系统并未将价格因素考虑在内。

2.2 结构分析

图 1 展示了天然气供需系统的结构, 因本文以天然气需求系统为主要研究对象, 供给侧天然气产量不作详细分解。

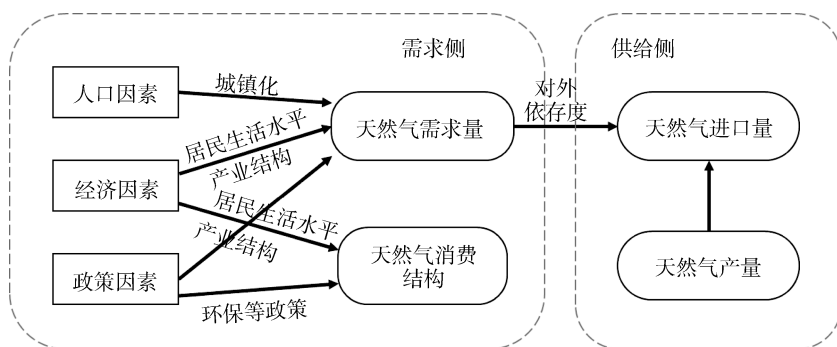


图 1 中国天然气供需系统结构图

由图 1 可知, 影响天然气需求的主要因素有:

(1) 经济因素。经济因素对天然气需求的影响表现在三个方面。首先, 经济增长增加了社会的总投资, 使天然气基础设施逐步完善, 为天然气供应提供了条件。其次, 从居民的角度, 人均收入的增加使居民对能源的环保性和便捷性有了更高的要求, 而天然气满足了居民这些需求。最后, 经济发展的不同阶段, 产业结构必然会有很大的差异, 以天然气为原料或燃料的行业的比重对于总体天然气的消费量有重要影响。

(2) 人口因素。虽然目前我国的人口数量已趋向于饱和, 但城镇化建设仍在稳步推进, 城镇人口将不断增加, 而城市天然气基础设施更为完善, 因此城市燃气的需求还会继续增加。

(3) 政策因素。政策对天然气需求的影响往往立竿见影。近年来, 相继出台的环保政策和能源利用政策, 确立了天然气成为大力发展的化石能源品种。优化产业结构, 逐步淘汰高耗能高污染产业, 有条不紊地实现清洁型能源对污染型能

源的替代, 将对天然气消费产生重大影响。

3 天然气供需系统动力学建模和参数估计

3.1 建立模型

根据以上对中国天然气供需系统边界的确定和结构的分析, 本文建立系统动力学模型预测未来中国天然气的供给量和需求量, 并通过改变部分参数进行政策模拟, 探寻不同因素对结果影响的强弱。图 2 为基于该模型的中国天然气供需系统流图。流图在因果回路图的基础上, 区分了不同性质的变量, 不仅能反应系统中各变量之间的因果关系, 还能清晰地描述系统的动态性能的积累效应。状态变量 (level variable) 和速率 (rate) 共同描述这种积累效应, 速率是使状态变量的值发生变化的原因。本模型中的状态变量有天然气年末库存量、GDP、全国总人口数, 速率变量有天然气供应量、天然气消费量、GDP 变化量、年人口变化量。

为了解决天然气产量与消费量之间的缺口

往往并不等于进口量这一问题, 引入库存这一变量。天然气进口国从能源安全的角度考虑到天然气进口量需保证长期稳定, 出口国从价格波动风险的角度考虑到应首先保证长期投资成本的回收和收入的稳定, 因此, 无论是天然气进口方还是出口方, 都比较支持天然气贸易采用长期合同

的方式。因此天然气实际进口量是由过去几年天然气消费量和产量的历史数据预测得到的未来几年两者之间的缺口决定的。库存可以消除天然气贸易与实际消费之间的延迟和预测偏差带来的损失: 上一年的库存余量将成为后一年供应量的一部分。

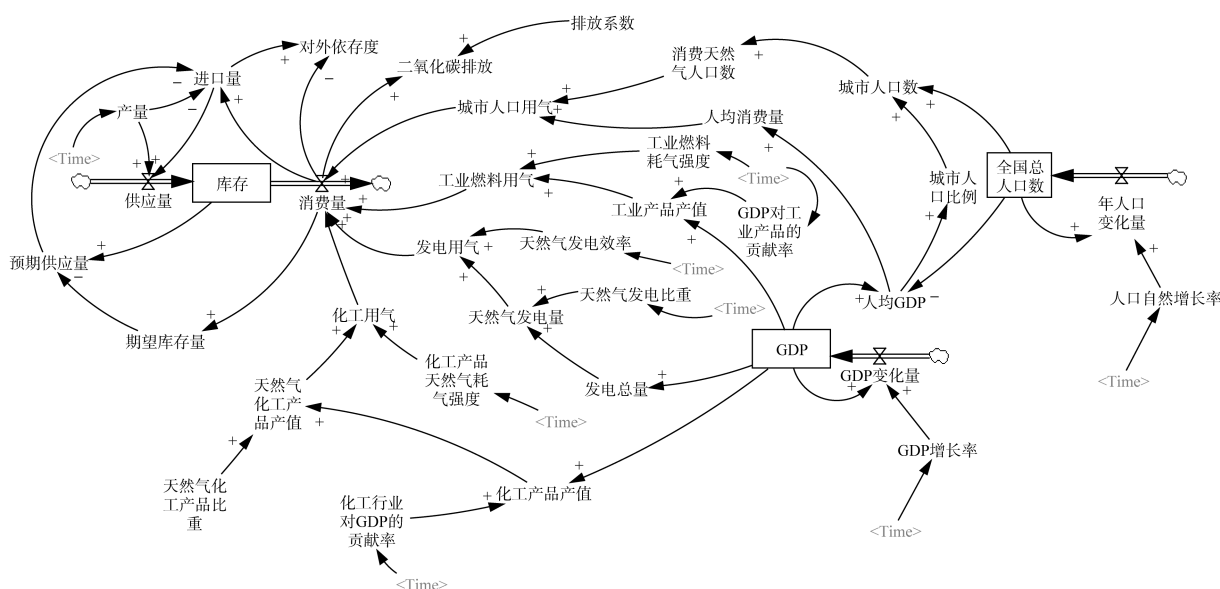


图2 中国天然气供需系统流图

3.2 产量预测

Logistic 模型是最早应用于油气资源预测的数学模型之一。该模型最初是为了模拟生物种群演化规律而建立的, 后来推广到人口增长问题的研究中, 均收到较好的效果。美国地质学家 Hubbert 于 1962 年首次将该模型运用到石油产量的预测中, 此后 Logistic 模型在预测能源产量方面被广泛地应用。Douglas B.Reynolds、Wang Jianliang 和 Wang Jianzhou 等都建立 Logistic 模型对中国天然气需求和供给进行预测^[13-15], 李明玉以美国产量数据为例对 Logistic 模型的预测能力进行分析^[16]。林伯强和王婷使用该模型对中国天然气产量和煤炭产量进行了预测, 并将 Logistic 模型与 Gaussian 模型进行比较, 得出这两个模型拟合的结果相当接近的结论^[17, 18]。可见, Logistic

预测模型在学术界依然有着广泛的应用。然而, 以文献[17]为例, 该研究于 2011 年预测中国天然气峰值将出现在 2018 年左右, 峰值产量为 1031.4 亿立方米, 而实际上 2014 年中国天然气产量已经超过 1300 亿立方米, 且峰值远未到来, 类似的研究实例说明了该模型的预测结果在一定程度上不容乐观。因此, 本文在运用 Logistic 模型时对求解方法做了改进, 以期能获得更高的预测精度。该模型表达式为:

$$N_P = \frac{N_{UR}}{1 + e^{-(t-t_{\max})/w}} \quad (1)$$

其中, N_P 为天然气累计产量, N_{UR} 为天然气最终可采储量, t 为预测年份, $t_{\max}$ 为产量达到峰值时的年份, w 是一个参数。

该模型一般的求解方法是根据天然气年产量是累计产量的一阶导数, 对 N_P 求导得到产量

$Q = \frac{abN_{UR}e^{-bt}}{(1+ae^{-bt})^2}$, 再求出 Q 与 N_P 比值关系:

$\frac{Q}{N_P} = \frac{N_Pabe^{-bt}}{N_{UR}}$, 经转化变形后最终得到 $\frac{Q}{N_P}$ 与

N_P 的关系为:

$$\frac{Q}{N_P} = \alpha - \beta N_P \quad (2)$$

其中 $a = b$, $\beta = \frac{b}{N_{UR}}$.

再根据产量可累计产量的历史数据拟合, 得到参数的值和最终可采储量 (这种求解方法的一个前提是认为一个国家或者一个油气田的最终可采储量变化幅度微小, 于是假定最终可采储量为定值), 便可用以测算未来天然气的产量和累计产量。

本文对该模型求解方法改进之处为: 在对 N_P 求导得到产量 Q 的基础上, 求出 Q 与 N_P^2 的比值

关系: $\frac{Q}{N_P^2} = \frac{abe^{-bt}}{N_{UR}}$, 再左右两边取以 10 为底的

对数, 得到 $\lg \frac{Q}{N_P^2} = \lg \frac{ab}{N_{UR}} - \frac{b}{t \ln 10}$, 经变形后得到

$\lg \frac{Q}{N_P^2}$ 与 t 的线性关系:

$$\lg \frac{Q}{N_P^2} = A - Bt \quad (3)$$

其中 $A = \lg \frac{ab}{N_{UR}}$, $B = \frac{b}{\ln 10}$.

相比于一般的求解方法, 本文提出的求解方法有如下的优点: $\frac{Q}{N_P}$ 与 N_P 的平均数量级相差为

10^5 , 而 $\lg \frac{Q}{N_P^2}$ 与 t 的平均数量级只相差 10^1 , 因此,

采用后一种方法进行拟合可以获得更高的精度, 同时减少系统误差。

本文累计产量由 1949 年以来我国历年天然气产量数据累加而来, 产量数据来自 2014 年能源统计年鉴^[19]。为了使结果具有说服力, 减少特殊数据带来的偶然性, 分别选取 1949~2015 年、1966~2015 年、1982~2015 年的中国天然气和天然气累计产量数

据对 $\lg \frac{Q}{N_P^2}$ 与 t 进行拟合, 结果显示, 1949~2015

年拟合优度为 0.85, 1966~2015 年拟合优度为 0.89, 而 1982~2015 年拟合优度为 0.9508, 达到最优, 且残差平方和 SSE 仅为 0.1281, 拟合最为显著。虽然 1949~2015 年和 1967~2015 年拟合的结果不是最优, 但也达到了显著的水平, 这样进一步验证了该模型对于中国天然气产量预测的适用性。

回归结果显示: $A = -4.134$, $B = 0.03334$, $b = 0.07678$, $\alpha = 140.1$, 最终得到 N_P 与 N_{UR} 之间的代数关系为:

$$N_P = \frac{N_{UR}}{1 + 0.000956N_{UR}e - 0.07678t} \quad (4)$$

再由 Q 是 N_P 的一阶导数, 可以计算出产量 Q 的表达式, 最终得到的我国天然气模拟产量和模拟的累计产量如图 3 所示。

由图 3(a) 可以看出, 我国天然气生产正处在高速增长的阶段, 这种趋势将延续至 2020 年左右, 随后增速有所变缓, 但产量仍在增加, 到 2040

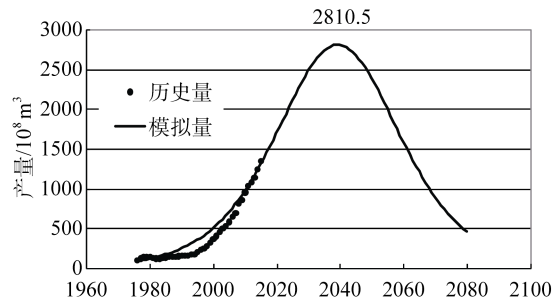
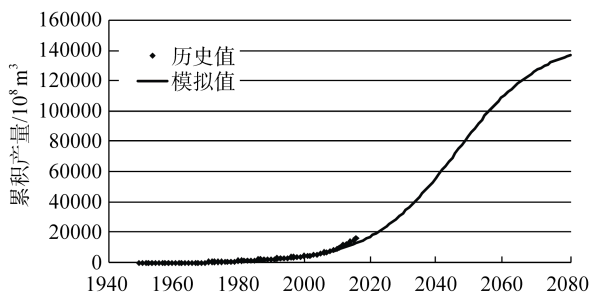


图 3 中国天然气产量和累积产量预测结果

年左右天然气生产将达到峰值,峰值产量在 2800 亿立方米左右,随后开始下降。图 3(b) 中累计产量最终趋于稳定,稳定值即为我国天然气最终可采储量,同时证明了最终可采储量与累计产量之间的数量关系:

$$N_{UR} = \lim_{t \rightarrow \infty} N_P \quad (5)$$

为验证本模型对天然气产量预测的有效性,将 2006~2015 年模型运行结果与历史数据进行比较。如图 4 所示,模拟值与实际值呈现同步平稳的增长的发展态势,且 2009 年以后,模拟值与历史数据之间的差值逐步缩小,在极小的范围内上下波动。通过计算误差,在观测时间区间内,振幅在 10% 以内,说明拟合程度较好。

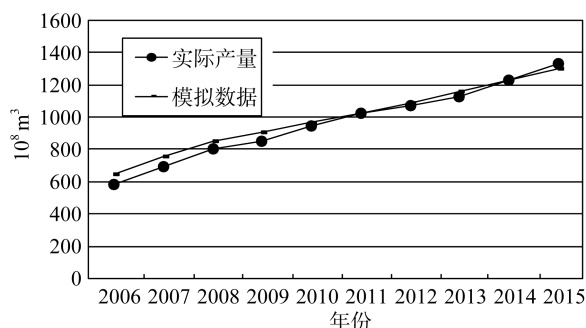


图 4 2006~2015 年中国天然气产量模拟值与历史数据比较

3.3 模型初值设定和参数确定

本系统预测的基准年为 2016 年,目标年为 2035 年,步长为 1;GDP 的初值取 2015 年的 GDP 与当年的 GDP 增长率的乘积,人口的初值取 2015 年的人口总数与当年的人口增长率的乘积,库存的初值设定为 0;化工行业对 GDP 的贡献率、天然气化工产品比值、化工产品天然气耗气强度、天然气发电比重、天然气发电效率、工业产品对 GDP 对工业产品的贡献率、工业产品耗气强度、天然气碳排放系数等系列参数的测算主要根据行业报告和相关文献提供的方法和数据,在测算过程中遵循《天然气利用政策》中规定的天然气消费结构优化方向,即确保城市燃气、发展工业燃

料、鼓励天然气发电、限制天然气化工;人均天然气消费量和城市人口比例关于人均 GDP 的函数关系、发电总量与 GDP 的函数关系,均使用多项式回归的拟合方法求得其函数表达式及其系数。具体测算过程和结果如下:

(1) 人均 GDP 与城市人口比例之间有显著的正相关性。本文采用联合国《2014 年世界城市化展望》^[20]里对中国城镇化历史统计数据,结合我国人均 GDP 变化规律,运用 Curve Fitting 工具对这两个变量进行拟合,如图 5(a) 所示。其中城市人口比例中的城市人口具体指年中居住在城市的人的数量,而不是一般意义上的拥有城市户籍的人口数量。

(2) 电力消费和经济增速之间存在长期、均衡、稳定的关系^[21]。在国家范围内,电力消费与供给是一个动态均衡的过程,因此发电量和 GDP 之间也存在这样的关系。本文基于 2000~2015 年的 GDP 和发电量的历史数据进行线性回归,并据此预测未来全国发电总量,如图 5(b) 所示。天然气发电量占全国发电总量的比重借鉴中国电力企业联合会对中国电力工业现状与展望报告中电力工业发展的预测数据和文献^[22]中的部分结论进行预测。天然气发电效率由天然气的热值和天然气发电机组的能量转化效率共同决定,取天然气低位发热量为 38931KJ/m³,天然气联合循环机组发电效率 2015 年为 52%,按此后每五年增加一个百分点,则天然气发电效率依次为: 5.62KW·h/m³、5.73 KW·h/m³、5.84 KW·h/m³、5.95 KW·h/m³、6.06 KW·h/m³。

(3) 一般工业产品和化工产品种类繁多,各产品的规格、产量均有很大差别,按照产品单位产量的耗气量来估算总耗气量,不仅繁琐,而且还会产生较大误差。本文中计算化工用气和工业燃料用气均使用单位 GDP 的耗气量,即 m³/万元。具体的做法是由工业产品的历年产值和相应的耗气量得到工业燃料耗气强度,由天然气化工产品

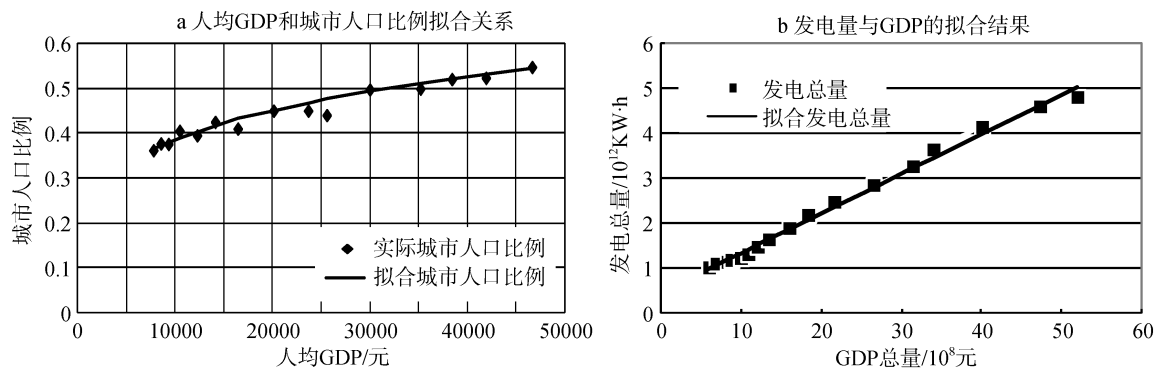


图5 部分参数拟合结果

历年的产值和相应的耗气量得到天然气化工产品耗气强度。

(4) 情景参数设定。受政策影响较大的参数由于政策走向难以预测和政策执行的不可确定，通常具有很大的突变性和难以预测性，将这类参数按不同情景设定，可以很大程度上抵消掉这种突变性和难以预测性，这也是政策模拟的依据之一。本文的情景参数包括人口增长率、GDP增长率和城市化率。

据相关推算，中国在实施计划生育的三十年里总共减少了4亿左右的新增人口，GDP增长率也由2000年以前保持的1%降至现在的0.5%左右。十八届三中全会以后，中国的人口政策迈出了跨时代的一步——实行“单独二胎”政策，但由于我国人口基数很大，在未来相当长的一段时间内，计划生育仍将是我国的基本国策。参照2015年联合国《世界人口展望》^[20]和国家人口与计划生育委员会所做的《国家人口发展战略研究报告》^[23]中对中国未来的人口发展的情景设定，以及蔡昉^[24]、李建民^[25]等对中国未来人口发展的趋势分析，本文对人口增长率设定三个情景方案（表1）。

表1 2016~2035年中国人口自然增长率情景参数设定

年份	延续当前	中速	低速
2016~2020	5.8	4.1	2.3
2021~2025	4.3	1.9	-0.5
2026~2030	2.9	0.3	-2.4
2031~2035	1.7	-0.8	-3.6

GDP增长率不仅受政策影响较大，同时由于影响因素繁多且错综复杂，往往又超出政策的影响。“十一五”以来，中国经济增速经历了两次变缓，第一次是2008年受国际金融危机的冲击和地震的影响由2007年的14%的高速骤降至9%，而后有所反弹；第二次是2012年由9%降至7%，且呈现出持续下降的趋势，至2015年跌破7%。一般来说，当经济总量达到一定规模以后GDP增速都会下降，这是存在客观必然性的。本文参照世界银行和国务院发展研究中心合著的《2030年的中国》^[26]和中国能源中长期发展战略研究项目组所作《中国能源中长期发展战略研究综合卷》，以及佟贺丰^[27]、理查德·库珀^[28]等对中国未来经济增长的分析与展望，设定以下三种情景方案（表2）。

表2 2016~2035年中国GDP增长率情景参数设定

年份	延续当前	中速	低速
2016~2020	6.7	6.5	6.1
2021~2025	5.9	5.4	4.9
2026~2030	5.0	4.5	4.0
2031~2035	4.3	3.8	3.3

3.4 政策组合情景构建

本文基于上述对模型中两类参数的设定和假设，构建7种情景方案，探讨各类情景对我国天然气供需的影响。各方案中具体参数设定和政策假设的说明见表3。

表 3 各类政策情景的假设和说明

参数设定与政策假设	
情景一	人口增速和经济增速延续当前
情景二	人口增速和经济增速较当前有所下降，保持中速增长
情景三	人口增速和经济增速较当前有较大下降，保持低速增长
情景四	人口增速维持当前，经济增速有较大下降
情景五	人口增速有较大下降，经济增速延续当前
情景六	人口增速和经济增速延续当前，城市化进程加快
情景七	人口增速和经济增速延续当前，天然气利用技术大幅提升，具体表现在化工产品耗气强度，天然气发电效率，工业燃料耗气强度均提高 2%

4 仿真结果和分析

将以上变量和参数输入 Vensim 系统动力学软件后进行仿真，即得到我国天然气需求总量、进口量、对外依存度、天然气碳排放以及我国天然气消费结构的预测值。然后按照各类政策情景的假设和说明，改变对应的参数，得到不同情景下的预测结果。

4.1 天然气需求总量

从我国天然气消费情景预测结果(图 6)可以看出，我国天然气消费量整体上呈上升趋势，到 2035 年天然气消费总量将在 3700~4500 亿立方米之间。同时，天然气随时间呈现出近似的线性变化，天然气的年均增长量维持在一定水平，这样一来，天然气的年均增长率就在不断下降。这种增长模式结果的出现，是基于本文对天然气消费强度不断下降的假设。随着天然气工业的发展，天然气消费强度必然会不断下降，这也是天然气利用政策导向的结果。预测结果最低值是情景四，2015 年天然气消费量为 3611 亿立方米。情景四在情景一的基础上，将延续当前的 GDP 增速变为较低的水平，预测结果比情景一少 800 亿立方米；而情景五在情景一的基础上，将延续当前的人口增速变为较低水平，预测结果比情景一只有及其微小的减少，图中可以看出情景一与情景五的曲线几乎重合。对比情景五和情景四，不难得出，比起人口增长，经济发展水平对天然气消费量的

影响更大。一方面原因是经济发展与天然气四大消费用户有着直接紧密的联系，而人口增长主要对城市燃气的消费产生影响；另一方面，目前我国经济增速维持在 7%左右的水平，经济发展仍有很大的增长空间，即使最悲观的预测，在接下来二十年经济增速也不大可能为负数，而中国人口增速已经低至 5%左右，人口数量处在饱和状态，逐渐逼近峰值。情景六在情景一的基础上假定城镇化进程加快，结果到 2035 年比情景一预测的天然气消费量多出 129 亿立方米，表明城镇化可以成为天然气消费增长的动力之一。情景七的假设基于天然气利用技术的进步，其预测结果到 2035 年比情景一减少 102 亿立方米，技术进步通过降低天然气消耗强度，提高天然气使用效率而发挥作用。

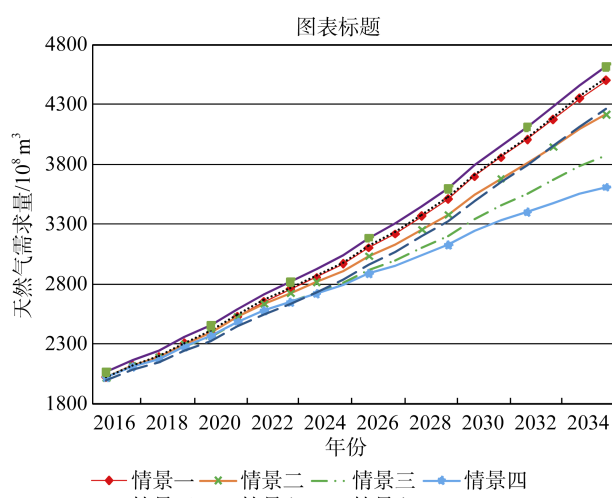


图 6 2016~2035 年中国天然气需求仿真结果

4.2 天然气对外依存度

图 7 显示了我国天然气对外依存度的情景预测结果。容易看出，不管哪种情景下，我国天然气对外依存度的均呈现出“先下降再上升”的走势。这是因为目前我国天然气产量正处在高速增长阶段，而天然气消费增长虽然已经步入快车道，但其增长速率仍低于产量增长速率。随着国内天然气基础设施的完善，天然气的需求将会进一步增加，而此时受限于可采储量，天然气产量

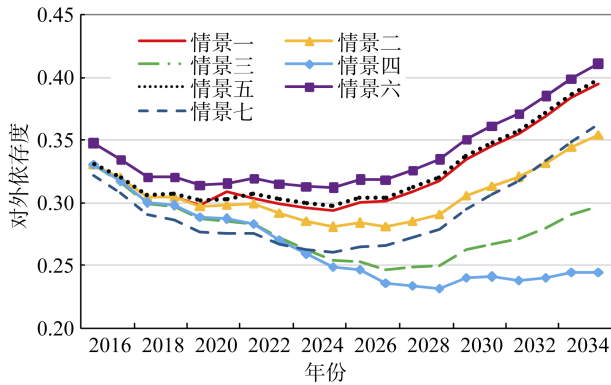


图7 2016~2035年中国天然气对外依存度仿真结果

难以维持高速增长, 当天然气消费的增长速率超过产量的增长速率, 对外依存度开始上升。不同

情景下的天然气对外依存度达到最小值的时间有所差异, 天然气需求增长越快, 越早达到最小值。如情景六对外依存在 2025 年达到最小值, 而情景四则到 2029 年才达到最小值。

4.3 天然气消费结构

图 8 显示了中国天然气消费结构的情景预测结果, 由于情景一、二、三设置的两个变化参数 GDP 增速和人口增速同步变化, 对天然气消费总量产生较大的影响, 而对天然气消费结构的影响较弱, 故取情景一、二、三预测结果的平均值, 反映其消费结构的变化 (图 8a)。

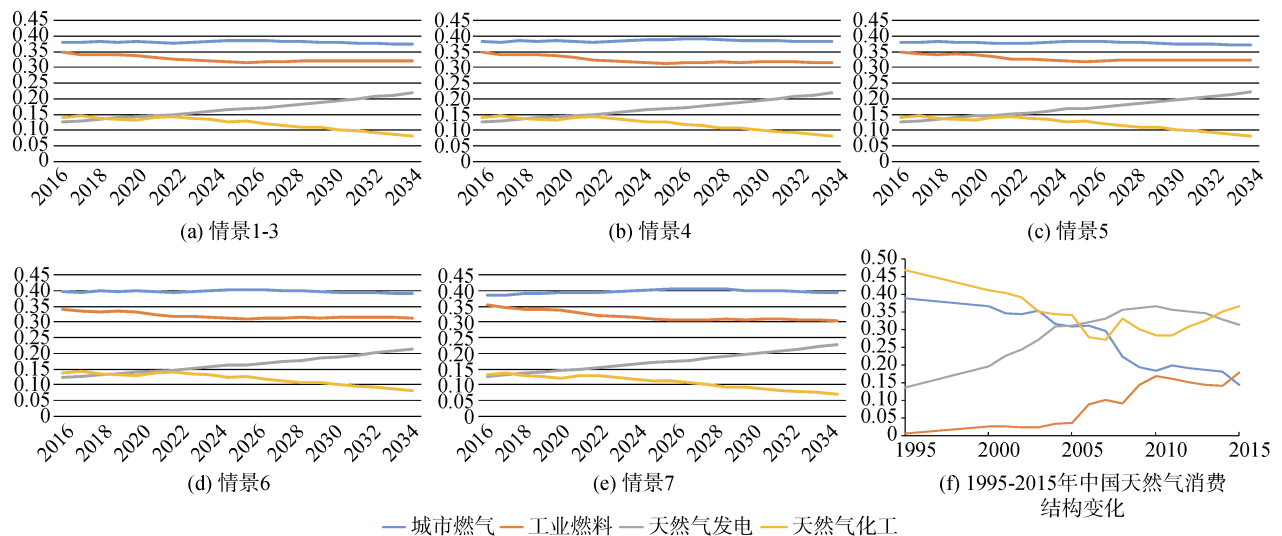


图8 中国天然气消费结构情景预测结果(a-e)和历史变化(f)

改革开放后, 随着我国工业化进程加快, 能源需求增加, 天然气消费也随之增加, 工业燃料逐渐取代天然气化工成为天然气消费的第一大户。1995 年工业燃料在天然气消费结构中的比例超过 50%。此后经过产业调整, 以及随着天然气输气管线和城市管网等基础设施的完善和人民生活水平的提高, 城市燃气进入高速发展的阶段, 到 2008 年又取代工业燃料成为天然气消费的第一大户, 工业燃料下降至 31%左右。天然气化工具有风险大、成本高、产业链短、效益低等弊端, 除天然气制氢项目因具有较高价格承受力而继续发展, 包括天然气制甲醇等项目在内的其余全部

天然气化工项目均被限制或禁止。1995~2005 年间, 天然气化工比例持续下降, 但其比例一直保持在 30%以上, 虽然此后天然气化工产品的产量逐渐上升, 但由于增速远低于其他三个用户的增速, 故其比例快速下降, 至 2015 年天然气化工在天然气消费结构中所占比重下降至 15%左右。天然气发电主要用于电厂调峰和热电联产等项目, 随着煤炭使用中出现的环境问题日益严峻, 天然气发电项目在全国范围内得到推广, 天然气发电比例从 1995 年的 2%左右上升到 2015 年的 13%左右 (图 8f)。

从图 8(a-e) 中的总体变化趋势可以看出,

城市燃气和工业燃料在天然气消费结构中的比例均只有微小变化,而天然气化工和天然气发电的比例呈反向替代的变化趋势。城市燃气的比例从37%~39%微降至35%~37%,工业燃料比例将维持在32%~35%,天然气化工比例从15%下降至7%~9%,天然气发电比例从13%逐步上升至22%左右。作为城市燃气的天然气主要用于居民生活用气、服务行业、交通运输业和公共事业等:一方面,随着我国经济发展,第三产业在整个产业结构中所占比重不断提高,到2015年达到50.5%,第三产业的发展促进服务行业、交通运输业和公共事业等部门天然气消费增加,发达国家第三产业比重普遍在70%~80%,中国在2035年前难以步入发达国家的行列,因此未来二十年中国第三产业比重增加将较为缓慢;另一方面,中国政府目前正在推进供给侧结构性改革,城镇化是实现这一目标的途径之一,本文对城市人口比例这一参数采用联合国预测数据,到2035年达到68%,届时,城市资源约束以及城市问题将日益突出,城镇化进程必将趋缓。基于这两点原因,城市燃气消费将趋于饱和,而其他行业用气依然会上升,但由于城市燃气消费基数较大,故城市燃气在天然气消费结构中会有微小下降。工业燃料在天然气消费结构中的比例从90年代的超过50%降至目前的31%,这一下降趋势将不会延续下去,由于在改善大气环境、提高能源利用效率、促进节能减排方面,天然气的优势明显,天然气工业燃料置换其他化石能源尤其是煤炭的进程将全面加快,虽然第二产业在三大产业结构中的比重将呈下降趋势,但天然气在能源消费结构中的比重在日益增加,故工业燃料在天然气消费结构中的比重将会小幅增加。天然气化工所具有的多种弊端,加上天然气化工产品需求量有限,且部分天然气化工产品如甲醇等可通过生物质能获得,使得化工用气在天然气消费结构中的比重将持续下降。天然气发电具有效率高、环境污染低、建设周期短等多种优点,得到了政策的大力支持,

未来发电用气在天然气消费结构中的比重将进一步提高。

相较于情景一,情景五假设人口增速有较大下降,天然气消费结构的变化十分微小,而情景六假设城镇化进程加快,2035年城市燃气的比例较情景一的37.6%上升至39.2%,变化相对较大。两种不同的人口政策,控制人口总量和改变人口结构,对天然气消费结构的影响效果差别很大。通过加快城镇化进程,可以有效提高城市燃气的比例。比较情景一和情景六,可以看出天然气利用技术的进步对天然气消费结构的影响与城镇化进程加快对天然气消费结构的影响正好相反。

5 结论与讨论

5.1 主要结论

本文在综合考虑了人口、经济、环境等因素的基础上,运用系统动力学方法建立了我国天然气供需系统模型,对我国2015年到2035年的天然气供应量、消费量、净进口量、对外依存度、二氧化碳排放量等进行了预测,同时,通过改变模型中的变量,设置不同的情景,探讨各因素对天然需求总量和消费结构的影响,最终得出以下结论:

(1) 未来我国天然气供应量和消费量均将快速增长,但由于可采储量的限制,天然气生产量增长率在2023年左右开始下降,产量增速变缓。我国经济在未来一段时间仍将保持增长,人民生活水平稳步提升,天然气需求量也持续上升,导致进口量的不断增加,天然气资源对外依存度将不断提高。

(2) 通过不同情景下对天然气消费量和消费结构的预测表明,比起人口的增长,经济发展在促进天然气消费量增长中仍起主要作用,此外,城镇化对城市燃气的影响较为明显,天然气利用技术的提升可有效降低天然气消费量。

5.2 不足和讨论

本文首先从系统论的角度确定中国天然气供需系统边界并对其结构和影响因素进行详细分析, 然后建立模型, 通过设置不同的情景分析影响天然气需求的因素, 并比较了不同因素对其的影响程度。本文仍存在需要完善的方面:

(1) 由于资料和精力所限以及系统动力学模型本身的局限性, 本文中个别数据(如天然气耗气强度和碳排放系数)主要依据其他文献, 带有一定的主观性;

(2) 本研究目前未能将价格因素考虑进去, 虽说明了原因, 但从长期来看, 中国的天然气价格改革必将实施, 随着天然气价格改革引起的需求量变化是一个值得研究的问题。

参考文献

- [1] Zhang W, Yang J. Forecasting natural gas consumption in China by Bayesian Model Averaging[J]. Energy Reports. 2015, 1: 216-220.
- [2] Szoplik J. Forecasting of natural gas consumption with artificial neural networks[J]. energy. 2015(85): 208-220.
- [3] Bai Y, Li C. Daily natural gas consumption forecasting based on a structure-calibrated support vector regression approach[J]. Energy and Buildings. 2016, 127: 571-579.
- [4] Xu G, Wang W. Forecasting China's natural gas consumption based on a combination model[J]. Journal of Natural Gas Chemistry. 2010(19): 493-496.
- [5] 殷建成, 陈建斌. 天然气需求自适应优化组合预测模型研究[J]. 天然气工业, 2004, 21(11).
- [6] 杨瑞广, 范英, 魏一鸣. 煤炭投资—供应的系统动力学分析模型[J]. 数理统计与管理, 2005(05): 6-12.
- [7] 陈海涛. 基于系统动力学的中国石油需求系统模型及预测[J]. 统计与决策, 2010(20): 98-101.
- [8] 李玮, 杨钢. 基于系统动力学的山西省能源消费可持续发展研究[J]. 资源科学, 2010(10): 1871-1877.
- [9] 吕涛, 张美珍, 雷强. 基于系统动力学的印度能源及煤炭需求情景预测[J]. 资源科学, 2015(06): 1199-1206.
- [10] 史立军, 周泓. 我国天然气供需安全的系统动力学分析[J]. 中国软科学, 2012(03): 162-169.
- [11] 李君臣, 董秀成, 高建. 我国天然气消费的系统动力学预测与分析[J]. 天然气工业, 2010(04): 127-129.
- [12] 赵媛, 曾尊固, 陈周骅. 树立大能源系统观, 促进能源可持续发展[J]. 经济地理, 2001(06): 749-752.
- [13] Wang J, Jiang H, Zhou Q, et al. China's natural gas production and consumption analysis based on the multicycle Hubbert model and rolling Grey model[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 53: 1149-1167.
- [14] Reynolds D B, Kolodziej M. North American Natural Gas Supply Forecast: The Hubbert Method Including the Effects of Institutions[J]. Energies. 2009, 2(2): 269-306.
- [15] Wang J, Feng L, Zhao L, et al. China's natural gas: Resources, production and its impacts[J]. Energy Policy. 2013, 55: 690-698.
- [16] 李明玉, 李凯, 郁培丽. Hubbert 曲线系统动力学模型预测能力分析——以美国石油产量数据为例[J]. 系统工程, 2009(02): 102-108.
- [17] Lin B, Wang T. Forecasting natural gas supply in China: Production peak and import trends[J]. Energy Policy. 2012, 49: 225-233.
- [18] Wang T, Lin B. China's natural gas consumption and subsidies—From a sector perspective[J]. Energy Policy. 2014, 65: 541-551.
- [19] 国家统计局能源统计司. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [20] Nations U. World Polulation Prospects[R]. New York, 2015.
- [21] 林伯强. 电力消费与中国经济增长: 基于生产函数的研究[J]. 管理世界, 2003(11): 18-27.
- [22] 杨勇平, 杨志平, 徐钢等. 中国火力发电能耗状况及展望[J]. 中国电机工程学报, 2013(23): 1-11.
- [23] 国家人口发展战略研究课题组. 国家人口发展战略研究报告[R]. 北京, 2007.
- [24] 蔡昉, 张车伟. 人口与劳动绿皮书: 中国人口与劳动问题报告 No.16[R]. 北京, 2015.
- [25] 李建民. 中国的人口新常态与经济新常态[J]. 人口研究, 2015(01): 3-13.
- [26] 世界银行, 国务院发展研究中心. 2030 年的中国[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2013.
- [27] 佟贺丰, 杨阳, 王静宜等. 中国绿色经济发展展望——基于系统动力学模型的情景分析[J]. 中国软科学, 2015(06): 20-34.
- [28] 理查德·库珀, 许佳. 2035 年世界经济展望[J]. 东北亚论坛, 2015(01): 3-10.

Study on Natural Gas Consumption Forecast and Influence Factors in China based on System Dynamics Model

Mu Xianzhong, Li Guohao

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on the analysis of the structure and feedback relation of China's natural gas supply-demand system, this paper establishes a system dynamics model. The natural gas production is set as an input variable of the model, and is forecasted by the improved logistic model in solving method. In order to simulate the total demand and consumption structure of China natural gas, we set seven scenarios by means of changing some of the parameters of the model. Results shows that the peak of natural gas production in China will occur in about 2038, and the production peak is expected to reach 2800 billion cubic meters. With the continuous development of the economy and the deepening of urbanization, the total demand of China natural gas will steadily increase year by year, and will reach an interval from 3600 to 4500 billion cubic meters in 2035. What's more, in terms of consumption structure, urban gas will be still the first large consumption sector of natural gas, followed by industrial fuel, gas power generation and natural gas chemical industry. In addition, compared with the population growth, economic development still plays a dominant role in the promotion of natural gas demand growth, and the impact of urbanization on urban gas is obvious, the promotion of natural gas utilization technology can effectively reduce the total consumption of natural gas.

Keywords: natural gas supply-demand system; system dynamic; logistic model; scenario prediction