

# 中国石油储备的补仓与释放策略及最优规模分析

谢楠<sup>1</sup>, 林伯强<sup>2,3</sup>, 苏彤<sup>2,3</sup>, 庞连芳<sup>1</sup>

(1. 振华石油控股有限公司 北京 100031; 2. 厦门大学 管理学院 福建 厦门 361005;

3. 厦门大学 能源经济与能源政策协同创新中心 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 石油安全是能源安全的核心部分,保障石油安全对于国家经济社会的长期稳定发展具有重要意义。石油储备作为保障石油安全的重要手段之一,能够有效地减轻国际原油断供所带来的负面影响,最终平抑石油价格、保障原油供应。充分发挥石油储备的作用需要明确影响储备补仓与释放的不确定因素,构建合理的补仓与释放策略,最终实现长期成本控制,同时还需要结合当前中国经济发展与能源供需的现实情况构建出最优的石油储备规模,保证石油储备能够发挥足够的应急作用。影响石油储备补仓和释放的主要因素包括价格、供给以及需求的不确定性。定量模型测算结果显示,我国石油储备的最优规模应当在 117 天左右,储备成本的下降、石油供应中断天数的上升以及石油价格的下降都倾向于最优石油储备规模的提升。结合敏感性分析的结果可以看出,石油最优储备规模对于石油供应中断天数最敏感,其次是储备成本,对石油价格则较不敏感。同时,根据对模型加入 GDP 收益前后的情况进行分析的结果显示,当考虑 GDP 收益时,石油储备规模必然会相应上升,而在这一前提下得出的石油储备规模适用于我国当前的主要发展状况,具有更强的现实意义。

**关键词:** 石油储备; 能源安全; 补仓与释放; 最优规模

**中图分类号:** F416.22; F764.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0438-0460(2019)06-0122-16

## 一、引言

第二次工业革命后,石油逐渐替代煤炭成为支撑经济社会发展最重要的能源消费品。因此,世界各国都在不断着力于保障石油供应,维护自身石油安全。就中国来说,由于国内石油产量相对短缺,石油需求不断增长,因此石油供给与需求之间显现出了明显的不平衡矛盾。<sup>[1]</sup>为缓解供需不平衡带来的负面影响,我国不断扩大石油进口量,由此导致石油进出口逆差逐年增大,石油对外依存度上升。在这样的背景下,中国石油安全正在面临着巨大的挑战,具体体现在以下几个方面:

首先,由于受到国内资源禀赋条件的限制,我国石油生产量增长缓慢且发展潜力受限,石油对外依存度不断上升。针对这一问题,党和政府虽然采取了一系列措施,例如拓宽石油进口渠道、构

收稿日期: 2019-09-30

基金项目: 国家社会科学基金重点项目“绿色金融创新与政策保障研究”(17AZD013); 振华石油控股有限公司项目(16701)

作者简介: 谢楠,女,河南息县人,振华石油控股有限公司石油储运部总经理,管理学博士; 林伯强,男,福建漳州人,厦门大学管理学院中国能源政策研究院教授、博士生导师,长江学者特聘教授,经济学博士; 苏彤,男,山西阳泉人,厦门大学管理学院硕士研究生; 庞连芳,女,天津人,振华石油控股有限公司天然气事业部执行主管。

建战略石油储备等,但由于我国经济正处于快速发展时期,能源需求量大,石油供给缺口仍在继续扩大,这使得我国石油进口量居高不下,石油消费严重依赖于境外石油。近年来,我国石油对外依存度不断走高,截至2017年已接近70%,远高于50%的国际安全警戒线,国内石油供给不足所带来的结构性能源安全隐患愈发明显(见图1)。

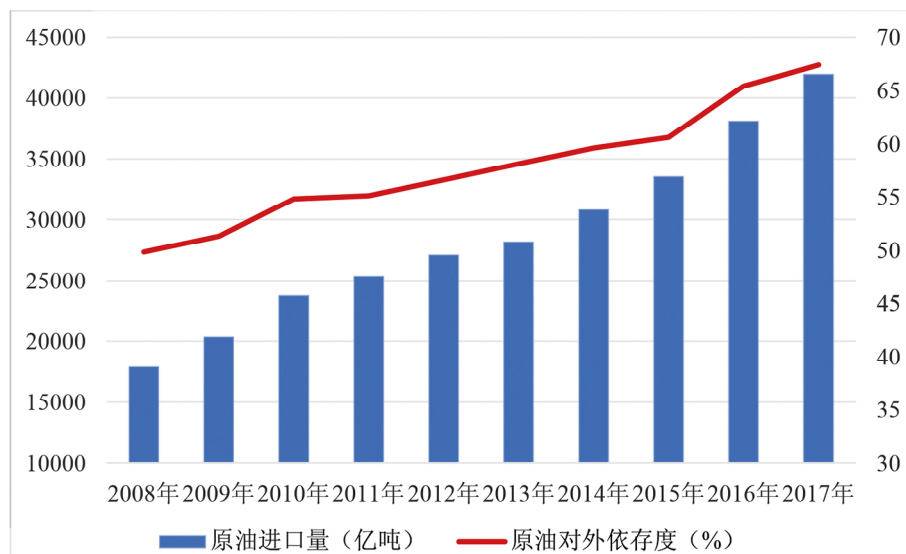


图1 2006—2017年中国原油进口量和原油对外依存度

注: 数据来源于中国国家统计局历年统计数据

其次,中国石油进口对不稳定地区依赖严重。具体表现为,中东由于地缘政治、宗教、民族等问题,不稳定因素较多、政治局势瞬息万变,而我国最大的五个原油进口来源国中却有三个是中东国家;同时,安哥拉作为我国重要的石油进口来源国也一直处于国内政治局势不稳的状态,其石油供应也存在较大的安全隐患。从图2可以看出,虽然我国已经着力于分散石油进口来源,但由于来自不稳定地区的石油仍然占据了石油进口的大头,我国石油安全仍旧受到巨大威胁,进口断供的隐患仍旧存在。

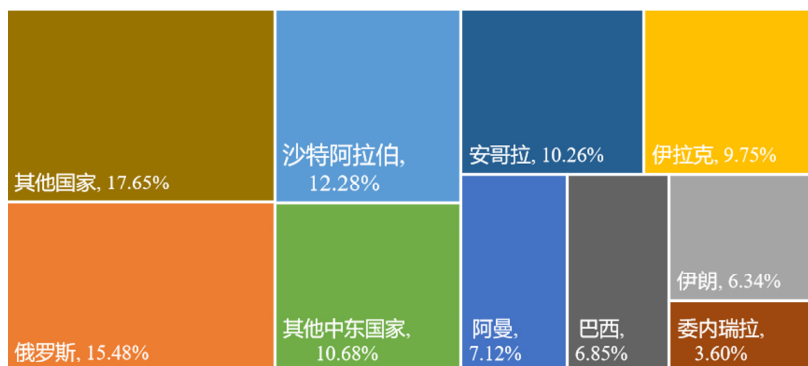


图2 2017年中国进口石油来源国

注: 数据来源于中国海关总署

除此之外,我国石油供需两侧的不平衡状况正在随着供给缺口的增大而愈发明显。由于国内能源需求持续攀升,国内石油生产增长缓慢,因此增加了国家对进口石油的依赖程度。同时,由于我国各地区之间资源分布不均、经济发展水平不同,能源在不同地区之间存在着严重的供需矛盾,

这使得以地方政府为主导,通过发挥各地资源禀赋来解决当地石油供给问题的想法变得不切实际。而建立石油储备则可以统筹协调国内各地区的能源供需情况,从更高的维度推动保障石油安全。

石油储备指的是一国政府、民间以及石油企业原油的库存综合以及管线和中转站的存量<sup>[2]</sup>,因此,广义上的石油储备囊括了战略石油储备、商业石油储备以及其他类型的石油储备。其中,战略石油储备是国家统一构建,以应对石油供应冲击为主要目的的储备种类。金芳曾指出,石油战略储备是稳定供求关系、平抑油价、应对突发事件、保障国民经济安全的有效手段,也就是说,构建战略石油储备是石油供求不平衡下解决石油断供问题的有效手段。<sup>[3]</sup>商业石油储备则指的是相关企业为承担社会责任而保有的最低库存量,国家可依法进行统一调度,对保障国家石油安全同样发挥着重要作用。详细地说,战略石油储备的建设是在国家的统一宏观指导下由上至下地进行,充足的储备能力能够有效应对战争、自然灾害、进口源政治局势紧张等造成的石油短缺,最终有效地维护国家能源安全。而商业石油储备则是由相关企业建立并控制的一种石油储备,反映了企业所必须承担的社会责任,是战略石油储备的补充。当石油供应紧张时,国家可依法调度商业石油储备,这说明商业石油储备与战略石油储备同样处于国家整体石油储备的统一管理之下。因此,二者虽然建立方式不同,但却需要解决类似的石油供给暂时性短缺的问题,并且具有相同的目的:保障国家能源安全、应对油价大幅度波动。

20 世纪 70 年代因为依赖世界石油市场而经历的 11 次石油价格冲击,推动了发达国家对石油安全的重视,国家级别的战略石油储备逐渐得以广泛应用。<sup>[4]</sup>由于石油供给短缺必然会导致石油价格上涨,石油储备的构建则能够使国家有更强的应对能力,发挥石油储备的作用不仅能够抑制短时间内石油价格的飙升而且也能被政府看作宏观调控的重要手段。对于依赖石油进口才能满足国内能源需求的国家来说,石油储备量不仅影响着国家是否能够有效应对石油价格波动所带来的经济风险,更极大地影响了国家能源安全甚至国家整体安全,是应对石油短缺危机的关键所在。而由于建设战略石油储备需要国家消耗大量的人力、物力和财力,为保障石油安全构建大规模战略石油储备会占用大量的财政资金,在一定程度上影响国民经济的发展。因此,引导并规范企业履行社会责任,建设商业石油储备不仅能够补充战略石油储备,而且能够动员企业的资金力量,保障石油储备体系的构建。总之,国家在建立石油储备的过程中应当统筹考虑多种石油储备方式,发挥多方作用,更好地利用石油储备的方式保障石油安全。

近年来,中国正不断着力于建设一定规模的石油储备,但建设完成的石油储备仍仅停留在应急储备阶段,缺少对石油储备的有效合理利用。因此,如何妥善通过利用石油储备的补仓和释放,在短期内平抑油价波动是亟待解决的重大现实问题。同时,中国当前正处于民族复兴的关键时期,明确在新的现实背景下构建石油储备应当采取怎样的规模设定,对于保障石油及能源安全、稳定社会经济发展都有着重要意义。综合统筹考虑不同类别的石油储备,能够从宏观视角把握国家石油储备的总体情况与未来建设方向,为国家保障能源安全提供具体思路。

基于上述背景,本文首先针对中国石油储备的补仓和释放策略进行研究,在探讨影响石油储备补仓与释放的风险因素的基础上,分析了中国石油储备整体的补仓和释放策略;随后结合现实情况,对中国最优石油储备规模进行综合评估,并且针对不同条件进行敏感性分析;最后,基于本文的研究结论,讨论了以何种策略来发展并利用石油储备。具体来说,本文为当前相关领域的研究做出如下几点贡献:第一,在研究思路上有创新,同时关注了影响石油储备发挥作用的关键因素并总结了石油储备补仓与释放的总体策略,弥补了前人在研究视角上的不足之处。第二,本文计算了中国石油储备最佳规模,并在前人相关研究的基础上,进一步将 GDP 收益纳入到分析模型中,得出了更为合理且有效的最优石油储备规模,并利用敏感性分析讨论了影响最优石油储备规模的因素。

本文接下来安排如下:第二部分是关于石油储备的相关文献综述,第三部分为中国战略石

油补仓和释放策略的分析,第四部分为中国石油储备规模评估及敏感性分析,第五部分则是本文研究内容的总结与政策建议。

## 二、文献综述

建立石油储备的目的是发挥其平抑国际原油价格、保障国家能源安全的作用,而实现这一目标既需要充足且合理的储备规模,也需要做到在合适的时机完成补仓与释放,从而实现石油储备的动态平衡。关于石油储备的补仓和释放,已经有许多文献通过不同的方法进行了研究,包括随机动态规划模型<sup>[5]</sup>、成本函数模型<sup>[6]</sup>、博弈模型<sup>[7]</sup>以及计量模型<sup>[8]</sup>等。具体来说,石油储备补仓和释放的核心目的在于有效降低石油储备的成本,发挥石油储备平抑油价的积极作用,基于这一点前人进行了一定研究。例如,Liao等<sup>[9]</sup>研究了突发事件对原油价格以及储备释放的影响;周德群等<sup>[10]</sup>则通过构建战略石油模型,分析了石油储备补仓和释放的时机和速率;张力菠和谢丽琨<sup>[11]</sup>在考虑价格波动、需求变化等因素的情况下,得到了不同石油价格波动下的补仓和释放策略。除此之外,也有一些研究从定性的角度分析了石油储备的补仓与释放策略问题,从更为宏观的角度得出结论。例如,李慧<sup>[12]</sup>通过分析美国的战略石油储备补仓策略,为我国开展战略石油储备补仓工作提出相关建议;马波<sup>[13]</sup>通过分析中国的战略石油储备体制建设,深入剖析了战略石油储备体制的吸、放、储策略。综合前人的研究可以发现,不论利用何种分析方法,石油储备的补仓与释放都显示出巨大的意义。目前,尚缺少研究从影响因素的角度入手,探讨中国石油储备补仓与释放的策略问题,因此本文致力于弥补这一空白。

在有关确定储备规模的现有研究中,前人大都通过成本和收益分析得到相关结论。Teisberg<sup>[14]</sup>最早通过多目标规划模型测算了最优的战略石油储备规模,随后这一方法在该领域得到了广泛应用并逐步扩展到针对中国情境的相关研究。Wu等<sup>[15]</sup>运用类似方法,分析了在石油价格不确定背景下2007—2010年和2011—2020年两个区间中国战略石油储备的最优策略。Wei等<sup>[16]</sup>基于成本函数的决策树模型探讨了中国战略石油储备规模,基于对经济发展和能源供应的安全考虑,得到了30—60天的最优储备规模方案。林伯强和杜立民<sup>[17]</sup>从社会福利最大化的视角构建静态模型,测算了中国的最优战略石油储备规模,为政府构建战略石油储备提供了理论与数据上的支持,同时利用敏感性分析发现,明确石油进口需求的价格弹性以及将要应对的石油中断危机规模对于战略石油储备决策具有关键性意义。随后,Bai等<sup>[18]</sup>进一步考虑了不同情景下的2008—2020年的最优储油规模,发现最优的储存规模主要取决于石油价格和总库存成本。Bai等<sup>[19]</sup>还提出了可以使用马尔科夫决策过程模型来研究石油消费国的战略石油储备的规模和政策,从而发现不同石油消费国应当构建差异化的石油储备。近年来,仍然有许多研究关注最优石油储备规模的测算。如Gao等<sup>[20]</sup>运用定量的能源安全模型计算了战略石油储备及其替代燃料的最优规模,并在模型中强调了成本效益分析;吕涛等<sup>[21]</sup>利用灰色预测和多目标优化模型测算了成品油角度下2020年的应急储备规模与布局。基于前人的研究可以发现,利用多目标规划以及静态分析是测算石油储备规模的主流手段。虽然这类方法无法充分动态地考虑石油消费、石油生产的变化,但由于石油储备是长期性过程,储备规模应当在一段时间内相对固定,因此静态分析得出的结果具有更强的可操作性。

本文研究的主体内容主要分为两块:首先,分析影响中国战略石油储备和商业储备补仓与释放的关键因素并基于此提出了补仓释放的相关策略;其次,沿袭林伯强和杜立民的研究思路<sup>[22]</sup>,构建并优化最优石油储备规模的静态模型,将石油储备带来的GDP收益纳入其中,计算得出我国当前最优石油储备规模,并进行敏感性分析。

### 三、中国战略石油储备和商业石油储备的补仓和释放

在分析石油储备的补仓和释放策略时,我们首先需要从石油储备建立的目的进行把握。国家之所以建立石油储备,就是为了保障国家的石油安全,平抑大的石油价格波动风险。由于建立石油储备的成本高昂,通过恰当的补仓和释放策略在一定程度上能够降低总成本。与欧美国家相比,中国石油储备体系正处在逐步建立和完善的阶段,通过补仓和释放发挥作用的实际机会比较少。为此,借鉴西方国家的历史经验,结合中国的特点有助于形成更加科学恰当的补仓释放策略。

#### (一) 补仓和释放的不确定性因素分析

中国建立石油储备的原因在于较高的石油对外依存度和石油的不可替代性。自然灾害、地缘政治冲突等因素均有可能导致原油供给中断或者国际原油价格剧烈波动,从而通过产业间传导对整个经济造成冲击。<sup>[23]</sup>因此,合理调控石油储备,首先需要对不确定性因素进行识别,并对其持续时间进行判定。不确定性因素大概分为以下几种,如图3所示。

##### 1. 价格不确定

战略石油储备的库存调整等可以借助于价格波动,在相对较高的价格释放,在低价位时补仓,降低总成本。价格是影响补仓和释放的主要因素之一,所有的影响因素归根到底都可以反映在石油价格的现货、期货和预期变动上面。

##### 2. 供给的不确定性

石油供给主要的影响因素有:勘探开发情况、局部地缘政治和宗教冲突、港口禁运、OPEC 的联合限产、罢工、产油国的政治稳定情况、自然灾害对产油设备和运油设备的影响等。

##### 3. 需求的不确定性

市场对原油的需求疲软和旺盛决定了对石油储备的补仓和释放。经济的发展情形和结构调整、替代能源的发展、节能技术进步、气候变化、国家政策等因素都对原油的需求有较大影响,进而导致需求的不确定性。

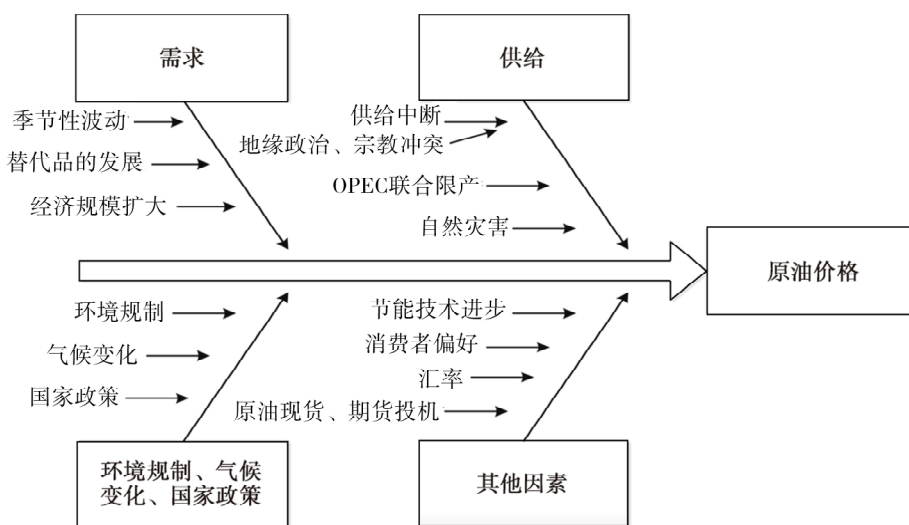


图3 原油价格的主要影响因素

#### (二) 策略构建

影响原油价格的因素较多,逐一考察可能难以得到合意的结果。因而,应针对影响油价的主要

因素,根据时间跨度和变动幅度对不同情形进行策略分析。原油储备的补仓和释放策略形成的主要过程如图4所示。

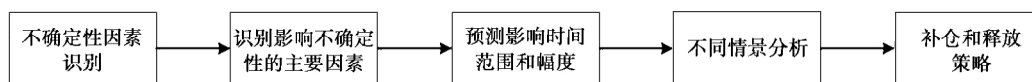


图4 补仓和释放策略主要决策流程

石油储备建成后管理运作中补仓和释放的时机选择是重要议题。补仓和释放需要科学的分析和数据支撑。通过结合西方国家石油储备吸、放、储的时机和运作过程,我们发现,在发生以下情况时启用储备油可以产生较大的现实效果:剧烈的地缘政治冲突甚至发生战争时期;不可抗拒的自然灾害发生;经济危机爆发;石油来源国的供应大幅度减少甚至中断等。

石油储备的补仓和释放涉及成本因素分析以及对国内外市场的冲击,合理的策略设计首先需要考虑补仓和释放的因果反馈关系。石油储备的补仓和释放主要作用关系分为成本子系统和供给需求子系统。对于成本子系统而言,石油储备量、储备成本、运营和维护成本、GDP损失以及石油短缺率等不确定性因素均会受到石油储备补仓与释放的影响。如图5所示,这些因素的变动同时也会进一步反馈影响下一步将要采取的策略。从供求的角度而言,补仓会短期内减少石油供给,释放将在短时间内增加石油供给,石油储备的补仓和释放还将影响人们对于未来石油供给的预期,进而提前反映在相应的现货和期货价格上。

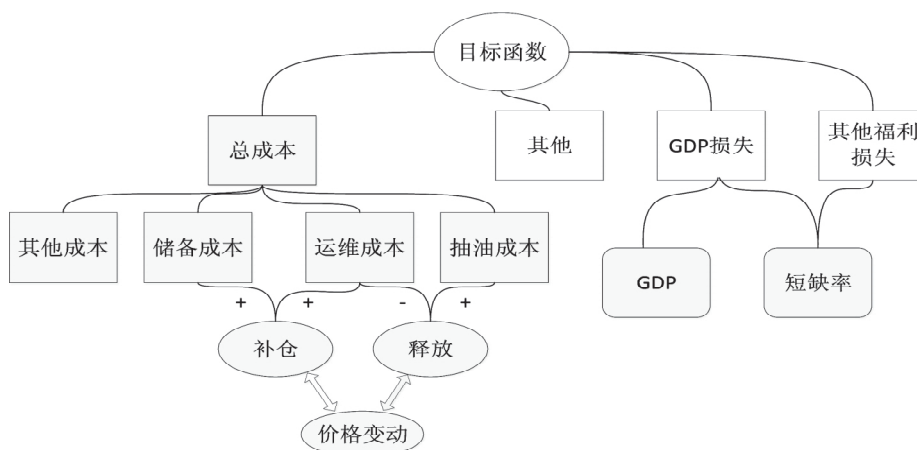


图5 石油储备补仓和释放策略目标

应对突发事件时,石油储备释放是平抑油价的重要手段。一般来说突发事件包括:不可预料的自然灾害情况(最为不可预料,对原油价格的影响最弱,持续的时间最短)、主要石油产地的地区性武装和宗教冲突(短时间内冲击大,持续时间长度为中期)、突发性的金融危机(对原油价格的影响幅度和时间长度最大)。在石油储备建设过程中进行吸储和释放,采用“高抛低吸”策略<sup>[24]</sup>,即高价位抛售,低价位补仓,一方面可以平抑石油价格的剧烈波动,另一方面可以有效降低石油储备的成本。因此,结合中国现实情况与国外石油储备补仓与释放经验,我们可以为不同冲击情境下中国储备油补仓释放构建基本策略:

(1) 短期冲击。例如在自然灾害发生的情况下,为了应对民众对于未来油品供应短缺的恐慌,可以根据短期冲击的大小在短时间内释放一定数量的储备油,以平抑由于公众恐慌预期和投机等因素对油价上升的推动。随着石油储备的释放,短期冲击造成的油价波动会一定程度地回落。由于短期冲击历时较短、影响力小,因此释放少量石油储备即可。

(2) 中期冲击。例如在发生地区性的宗教和武装冲突的时候,国际原油受到供给中断的威胁较大,此类冲击很容易引起全球范围内的恐慌,因此需要快速释放相当规模的战略储备。在这种情况下,如果石油价格处于高位,仍然具有进一步上涨的趋势,则应该在快速释放之后进行一定数量的补仓。

(3) 长期冲击。例如发生金融危机之时,应该在高位油价快速释放一定规模的储备油,随着危机的逐步发展油价会进一步降低。由于金融危机的深度和广度难以预料,其是否会进一步演变成经济危机和萧条仍存在较大的不确定性,因此决策时应当更加审慎。如果发展到萧条,油价可能会低位徘徊,储备油的补仓策略应有序地进行。金融危机的冲击在不同油价情境下有所不同,中高油价冲击较大,低油价情况下冲击较小,因此在中高油价时只需择机释放储备油。

#### 四、中国战略石油储备和商业石油储备的敏感性分析

##### (一) 石油储备规模估算

此部分沿袭林伯强和杜立民<sup>[25]</sup>的研究方法构建静态分析模型,研究石油储备的最优规模。石油中断对国民经济会沿着这样的路径产生影响:当石油供给由于自然灾害、地缘政治变化等特殊情况而导致中断时,首当其冲的是交通运输业;随后,由于缺少石油供应,正常工业生产的需求难以满足,工业制造业便会随即受到影响;最终,由于交通运输业与工业制造业等上游行业带来的冲击逐渐影响到服务业等下游行业,石油供应中断便会对整个国民经济产生极为不利的影响。

石油供应短缺带来的直接影响便是石油价格上升和石油供应数量减少,二者均会造成消费者剩余损失以及国内生产总值的下降。因此,构建石油储备的直接目的应当是最小化储备成本的同时尽可能地最大化降低消费者剩余损失以及最小化国内生产总值的下降幅度。基于这一目的,本研究选择利用线性规划方式,探索最优石油储备规模。具体来说,首先是构建出石油进口需求函数以及石油供给函数,讨论消费者剩余在不同情况下的具体变化,然后结合石油储备对减少 GDP 下降幅度做出的贡献,探讨石油储备对整个国民经济的实际影响。

在构建线性规划模型之前,需要对研究问题进行简化。本文首先假定中国石油储备无法对世界石油市场、世界能源市场的供需情况产生显著影响,中国构建石油储备无法影响到世界石油价格的整体波动。同时,在本文的研究过程中,假设中国石油价格与国际市场保持一致,而不是实际情况下的每 10 个工作日才会进行一次调整。石油储备由于其耗资巨大、建设周期长,根据世界石油价格进行不断调整显然难以实现且不利于研究分析。因此,本文以一年为决策期,对问题进行静态分析,探讨我国石油储备建设中一次性的最优储备规模。静态分析虽然不能够充分反映中国对国际石油进口的动态依赖程度,但更具有现实意义。具体来说,由于中国对国际石油进口的依赖程度受到国内供给和需求两方面的影响,且中国政府正在致力于进一步降低石油进口依赖,因此在未来一段时间内,中国石油对外依存度具有较强的不确定性。同时,如果利用动态模型进行分析,得出的动态结果显然无法在现实中利用,因为石油储备建设是耗资巨大且历时较长的建设过程,根据动态情况不断调整储备规模会造成储备过度或储备不足等问题。

为了计算最优石油储备规模,首先应当构建石油中断规模的密度函数。具体来说,本研究中的石油供应中断规模用随机变量  $t$  表示,单位为“天进口量”(即  $t^* N$  吨),服从均值为  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) 的指数分布如下:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \in (-\infty, 0) \\ \frac{e^{-\frac{t}{\lambda}}}{\lambda(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}})} & t \in (0, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$



进一步参照 Teisberg<sup>[26]</sup>、Oren 和 Wan<sup>[27]</sup> 的设定, 本文假设需求函数具有不变弹性  $D(Q) = a + bp^\varepsilon$ 。由于石油价格上涨必然会到来消费量或需求量的减少, 而当石油价格下降时, 需求量则会增加, 因此构建逆需求函数为:

$$P(Q) = p + rQ^{(1/\varepsilon)} \quad (2)$$

在构建石油供给中断规模的分布函数以及石油价格逆需求函数的基础上, 可以进行静态模型分析。本文假定石油供给存在两种状态, 分别为石油供给正常以及石油供给发生中断。首先, 当石油供给处于正常状态下, 我国可以根据自身需求进口数量为  $N^*$  价格为  $P$  的石油, 即, 石油不存在中断供应的前提下, 初始的均衡点位于  $E$  处, 如图 6 所示。

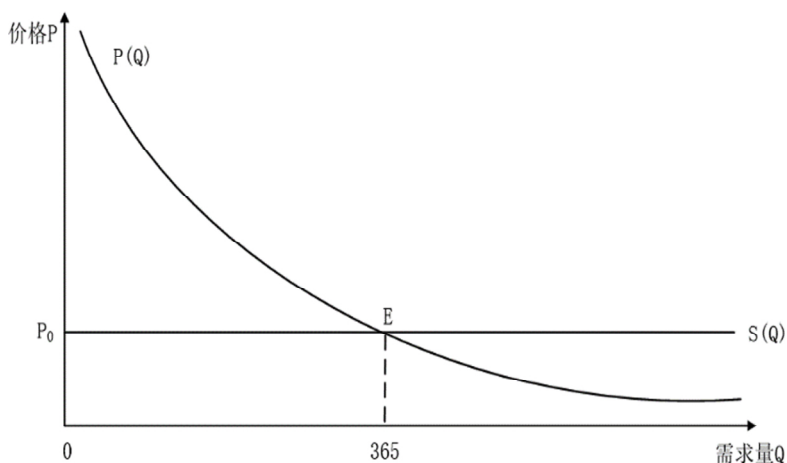


图6 石油的进口需求曲线

其中,  $P(Q)$  代表了中国进口石油的需求情况,  $\varepsilon$  表示石油价格弹性。由于石油是当代工业生产及居民生活的重要必需品, 因此其需求呈现刚性特点, 即价格弹性相对较小, 因此参照 Zhang 和 Chen<sup>[28]</sup> 的研究设定  $\varepsilon < 0$ 。为便于计算最优储备规模, 本文将中国原油进口需求的单位设定为“天进口量”。 $S(Q)$  是平行于  $X$  轴的一条直线, 本研究用其表示石油供给曲线。由于石油开采受到资源禀赋、技术、开采设备建设等条件的限制, 且石油资源大多被 OPEC 国家所掌握, 导致短期内石油供给同样缺乏弹性, 同时前文中已经假定中国石油储备策略不影响世界石油市场的价格, 因此将供给曲线设定为平行线具有一定合理性。同样, 石油供给也用“天进口量”为单位衡量。

而当石油供给发生中断时, 随着石油供给的减少, 原有的石油需求难以得到满足, 进而石油价格上涨。如果国家建立了石油储备, 在此类情况下必然动用或释放储备的石油以满足需求、平抑价格, 减轻石油供给中断对工业生产、社会经济等方面带来的负面影响。综合分析可以发现, 如果发生石油供给中断事件, 构建的石油储备便能发挥作用, 从而获得两个方面的总收益: 一是减少了石油供给中断带来的社会福利的损失, 二是减少了石油供给中断带来的国家整体经济的损失, 即对 GDP 的弥补。

假设石油储备规模为  $z$ , 本文首先针对石油供给中断的社会福利变化情况进行分析, 将社会福利利用消费者剩余进行表示。

如图 7 所示, 当石油供给中断未发生时, 供给和需求位于均衡点  $E$  处, 此时的消费者剩余所表示的部分为需求曲线以下, 供给曲线以上, 用积分代数表示为  $\int_0^{365} p(Q) dQ - 365P_0$ 。而当石油供给中断发生时, 假设中断规模为  $t$ , 需求量将被迫向左移动至  $A$  点, 即消费量变为  $365 - t$  天, 消费者剩余则随之变为  $\int_0^{365-t} p(Q) dQ - (365 - t)P_0$ 。因此, 石油供给中断后, 石油价格上涨, 消费者剩



余必然减少,从而使社会福利受到损失,损失的值为上述两者之差。而如果存在石油储备,则可以通过释放石油储备使效用较大的消费者在供给中断的背景下得到石油,减少由石油供给中断带来的消费者剩余上的损失。针对石油储备带来社会福利上的影响,分两种情况讨论:

第一种情况为,当石油储备小于中断规模时,通过储备量的释放,可以使石油消费量恢复到  $365 - t + z$  的规模,此时消费者剩余为  $\int_0^{365-t+z} p(Q) dQ - (365 - t + z) P_0$ 。因此,通过释放石油储备所避免的消费者剩余损失为图 6 中 ABCD 的区域面积(图中正斜杠阴影部分),表示如下:

$$\int_0^{365-t+z} p(Q) dQ - \int_0^{365-t} p(Q) dQ - zP_0 \quad (3)$$

第二种情况为,当石油储备大于中断规模时,通过储备量的释放,可以使石油消费量恢复到最初的 365 天的规模,此时消费者剩余与无供给中断时相同,即  $\int_0^{365} p(Q) dQ - 365P_0$ 。因此,由于构建石油储备从而减轻了由石油供给中断带来的消费者剩余损失,减轻部分为图 6 中 EAB 的区域面积(图中所有阴影部分),表示如下:

$$\int_0^{365-t+z} p(Q) dQ - \int_0^{365-t} p(Q) dQ - tP_0 \quad (4)$$

综合上述两种情况,将石油储备挽回的消费者剩余损失总结表示为:

$$CP = \begin{cases} \int_0^{365-t+z} p(Q) dQ - \int_0^{365-t} p(Q) dQ - zP_0, & z \\ \int_0^{365-t+z} p(Q) dQ - \int_0^{365-t} p(Q) dQ - tP_0, & z \end{cases} \quad (5)$$

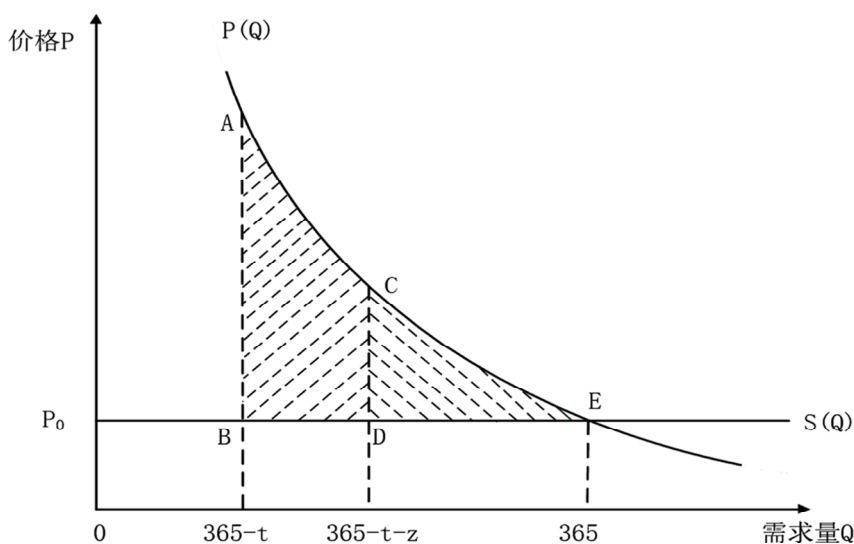


图 7 石油储备前后消费者剩余变化

由于石油是经济社会平稳运行的关键性投入,因此本文在社会福利角度分析的基础上,参考 Difiglio<sup>[29]</sup>、Liao 等<sup>[30]</sup>的分析思路,进一步将石油与国民经济的直接关系引入到模型中。具体来说,基于当前中国现实情况与国际石油储备的利用现状,引入 GDP 指标进行分析具有显著的现实意义。首先,中国当前正处于百年未有之大变局,同时正在经历实现伟大复兴的关键时段,进一步推进现代化进程,保障经济的持续发展是中国现阶段的重要任务,在石油储备建设中考虑 GDP 能够更好地反映现实需要;其次,从国际石油储备利用方面来说,美国、日本等国都是在国际石油价格高企的特殊状况下释放石油储备,其目的也是为了平抑国内油价,保障经济发展,且都取得了不错的

成果。因此,为了更好地反映石油储备在当前现实情况下担负的保障石油安全与稳定经济发展的双重任务,在整体的模型设计中考虑石油供给中断带来的 GDP 损失或减轻的 GDP 损失是十分必要的。进一步来说,我们将进口石油中断供应所产生的 GDP 损失表示为:

$$CG_{\text{损}} = \delta \times t \times d \times gdp_0 \quad (6)$$

其中  $\delta$  代表 GDP 对石油消费的弹性,石油中断量用  $t$  表示,石油对外依存度用  $d$  表示,初期的 GDP 值为  $gdp_0$ 。

石油中断供应发生后,通过释放石油储备同样可以避免原有的 GDP 损失。此部分收益与消费者剩余收益大致相同,在此不再进一步分析和赘述。因此,石油储备挽回的 GDP 的损失可用 CG 表示:

$$CG = \begin{cases} \delta \times z \times gdp_0 \times d / (365 - d \times t), & z < t \\ \delta \times t \times gdp_0 \times d / (365 - d \times t), & z \geq t \end{cases} \quad (7)$$

所以,建立石油储备可以得到两方面的收益:挽回了石油中断供应带来的消费者剩余损失、挽回了石油中断供应带来的 GDP 损失。将两部分收益求和即为石油储备带来的总收益,用 RP 表示:

$$RP = CP + CG \quad (8)$$

从理论上讲,石油储备规模越大越能够保证国家石油安全与能源安全,但由于石油储备的建立需要土地、技术、采购、建设等多方面成本,无限制地扩大石油储备规模既不现实也缺乏经济性。因此,本文将石油储备所需成本考虑为最优石油储备规模的约束条件。具体来说,如前所述,以一年为决策期,根据石油储备的建设成本和一年期的运维成本进行折算,同时以购买储备性石油所耗资金的利息支出作为资本的机会成本,构建出统一的石油储备成本并用  $C(z)$  表示:

$$C(z) = z \times v + i \times z \times P_0 \quad (9)$$

其中  $v$  代表石油储备的建设成本与一年期的运维成本之和;  $i$  为利率,用来表示购买储备性石油所耗资本的机会成本;  $P_0$  为石油价格。

政府构建石油储备需要对其成本与收益进行综合考虑,在考虑石油储备成本的基础上,尽可能实现石油储备收益的最大化,也就是最大化石油储备收益与石油储备成本之间的差。同时,由于石油储备产生收益的前提是石油供给中断的发生,且石油供给中断存在不确定性,符合均值为  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) 的指数分布,因此建设石油储备所获得的总收益也应当符合这一概率分布。综合上述两点,可将石油储备规模的最优函数表示为:

$$\max_{0 \leq z \leq 365} \int_0^{365} f(t) RP(t, z) dt - C(z) \quad (10)$$

在该模型下,首先计算其一阶条件得到均衡条件,随后推导其二阶条件从而验证出一阶条件的充分性,即一阶条件所求得的石油储备规模  $z$  能够保证有唯一最优解,所有推导过程本文不在此赘述。模型中相关参数设置如表 1 所示。

表 1 模型参数设置

参数	含义	数值	来源
$P_0$	石油价格	\$ 50.8	2017 年 EIA-Brent 原油均价
$P_1$	最低石油价格 - 生产成本	\$ 15	加权平均三大石油生产商成本求得
$\gamma$	进口石油需求系数	$35.8 \times 365^{(1/\varepsilon)}$	根据点( $P_1$ , 365 天进口量)求得
$\varepsilon$	中国石油需求价格弹性	- 0.1	Lin and Zeng; 李坤望与孙玮
$\lambda$	石油供给中断天数	21, 31, 42 天	孙天晴
$d$	石油进口依存度	69.8%	《2018 国内外油气行业发展报告》

续表 1

参数	含义	数值	来源
$q^0$	2017 年的石油进口量	865 万桶 / 天	根据 IEA 的数据调整为天进口量
$q^1$	2017 年的石油消费总量	1203 万桶 / 天	《2018 国内外油气行业发展报告》
$\delta$	GDP 石油消费弹性	0.34	彭涛, 颜云云; 牟敦国
$c$	石油储存固定成本	2.5 美元 / 桶	Zhang et al.
$v$	石油储存可变	0.4	Wei
$i$	以基准利率作为资金占用成本率	4.35%	2017 年中国人民银行 6 个月 - 1 年贷款基准利率
$gdp_0$	国民生产总值	$\$ 13.9 \times 10^{13}$	国家统计局

注: 部分参数来源于以下文献: Lin, C-Y, Cynthia, and Jieyin Jean Zeng, "The elasticity of demand for gasoline in China", *Energy Policy*, 2013, 59, pp. 189-197; 李坤望和孙玮 《我国石油进口需求弹性分析》, 《当代财经》2008 年第 4 期; 孙天晴 《基于复合泊松过程战略石油储备天数的概率模型及其应用》, 《数理统计与管理》2007 年第 5 期; 彭涛和颜云云 《能源消费与经济增长关系的实证分析》, 《统计与决策》2011 年第 21 期; 牟敦国 《中国能源消费与经济增长的因果关系研究》, 《厦门大学学报(哲学社会科学版)》2008 年第 2 期; Zhang, Nan, et al., "Stability and availability evaluation of underground strategic petroleum reserve (SPR) caverns in bedded rock salt of Jintan, China", *Energy*, 2017, 134, pp. 504-514; Wei, Yi-Ming, et al., "Empirical analysis of optimal strategic petroleum reserve in China", *Energy Economics*, 2008, 30(2), pp. 290-302

本文以十年一遇的石油中断危机为基准情景<sup>[31]</sup> 将表 1 中各参数值带入原模型的一阶条件方程式中, 利用 MATLAB 数值计算功能求得  $z$  的最优解约为 117。也就是说, 我国建立石油储备的目的如果是要防范十年一遇的石油中断危机, 那么最优储备规模应当是 117 “天进口量”。进一步对比近年来计算最优石油储备规模的相关文献和各国的现实情况来看, 本文的计算结果具有一定合理性。具体地, Gao<sup>[32]</sup> 利用净现值分析的方法得出中国最佳的石油储备规模应当是 4 个月进口量左右; 根据 EIA<sup>[33]</sup> 介绍的美国、欧洲、日本等国家和地区的石油储备情况则可以看出, 3—4 个月的进口量对大多数国家来说确为合理的石油储备规模。因此, 本文得出的最优储备规模得到了其他文献和现实情况的支持, 可以应用于国家能源战略的决策过程。

## (二) 中国石油储备敏感性分析

### 1. 不同储备成本对最优石油储备规模的敏感性分析

由于在不同地区、不同地理条件下建立石油储备基地的成本具有较大差异, 因此, 我们将基准成本分别提升 50% (即  $C = 3.75$ ,  $v = 0.6$ ,  $i = 6.525\%$ ) 和 100% (即  $C = 5$ ,  $v = 0.8$ ,  $i = 8.7\%$ ), 从而考察不同储备成本对最优石油储备规模的敏感性情况, 并生成模拟结果。

从图 8 中可以看出, 当固定成本、可变成本与资金占用成本率均提升 50% 时, 最优石油储备规模将从 117 天进口量下降到 107 天, 仅下降了 10 天, 约为 9.3%, 下降幅度较小; 而固定成本、可变成本与资金占用率进一步上升到基准成本的 100% 时, 最优石油储备规模仍未发生大幅度下降, 相对基准成本情况下仅下降了 15 天, 约为 12.8%。因此, 最优石油储备规模受到石油储备成本的影响较小, 这一结论也符合林伯强和杜立民<sup>[34]</sup> 在不考虑 GDP 因素的情况下得出的有关储备成本敏感性方面的结论。

### 2. 石油中断天数对最优石油储备规模的敏感性分析

国家进行石油储备的目的是为了预防石油中断危机, 从而尽可能降低石油中断带来的社会经济福利损失, 因此当需要应对的石油中断危机发生变化, 石油储备的规模也应当进行相应调整。根据前文的结果可知, 如果中断天数为十年一遇的 21 天, 则中国应当构建约 117 天石油进口量的战略性石油储备。在此基础上, 进一步将十年一遇的中断情况变更为十五年一遇、二十年一遇, 即讨

论 $\lambda$ 分别等于31天、42天时,我国石油储备的最优规模应当发生怎样的变化,分析石油中断天数对最优石油储备规模的敏感性情况。根据敏感性分析结果,生成图9。

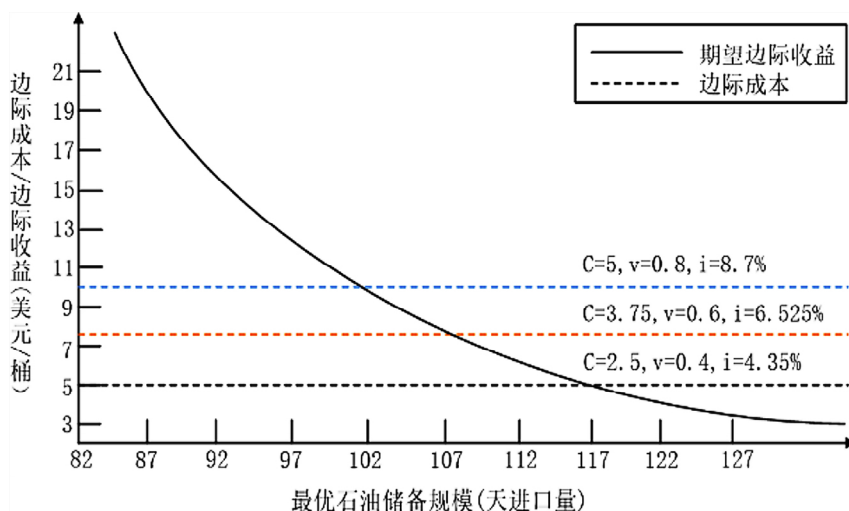


图8 不同储备成本对最优石油储备规模的敏感性分析结果

从图9中可以发现,当石油中断天数从基准情况下的21天增加到31天时,最优石油储备规模也相应发生变化,增加了63天进口量,达到180天进口量。换言之,如果中国将要面临十五年一遇的石油中断,最优石油储备规模也需要提升至180天进口量以更好地应对危机。再次增加石油中断天数至二十年一遇的水平(42天)根据计算结果,此时中国的最优石油储备规模将达到250天进口量,与基准的中断21天相比,增加了113.7%。因此,我国最优石油储备规模在很大程度上受到石油中断规模的影响,政府在决策最优石油储备规模时,必须对石油中断做出合理的概率估计才能使石油储备更好地发挥作用,同时避免石油储备规模过大所带来的浪费。

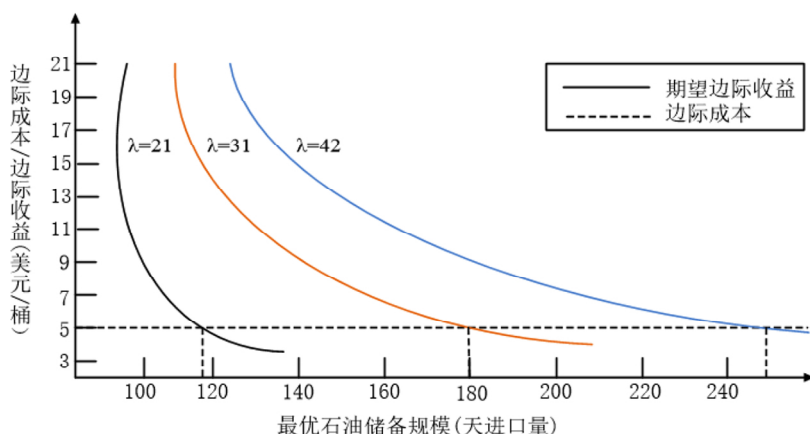


图9 石油中断天数对最优石油储备规模的敏感性分析结果

### 3. 石油价格对最优石油储备规模的敏感性分析

由于受到世界范围内多重供需关系以及众多的投机活动、政治局势等冲击带来的影响,国际石油价格几十年来始终呈现复杂波动状态,从而给石油价格预测带来了巨大的困难。在石油价格波动且无法准确预测的前提下,分析不同石油价格水平对我国最优石油储备规模的影响具有重要的现实意义。

本研究基于石油价格长期上涨的预期,将基准情况下 50.8 美元/桶的石油价格  $P_0$  提升 50%,达到 76.2 美元/桶,利用原有模型计算最佳石油储备规模  $z$  为 116 天,与基准模型相比仅下降一天;随后将石油价格进一步提升 100%,即提升至 101.6 美元/桶,计算得出最佳石油储备规模  $z$  为 114 天,与基准模型相比也仅下降三天。从中可以看出,中国最优石油储备规模在石油价格上涨的情景下,发生变化较为微弱,即石油储备规模对石油价格  $P_0$  并不敏感。

#### 4. 模型中是否考虑 GDP 收益对最优石油储备规模的敏感性分析

本文将石油储备对中断后 GDP 产生损失的挽回情况纳入到模型中,进一步考虑了石油储备产生的 GDP 收益,因此得出的最优石油储备规模应当比不考虑 GDP 收益时略大。具体来说,在不考虑 GDP 收益的情况下,通过同样的方式计算十年一遇的石油中断前提下的最优石油储备规模,得到  $z = 80$ 。也就是说,当不考虑石油储备产生的 GDP 收益时,我国应该建设 80 天进口量规模的石油储备,少于前文计算得出的 117 天进口量。而最优储备规模从 117 到 80 天进口量的变化也反映出是否考虑 GDP 收益对储备规模具有较强的敏感性,因此在实际构建石油储备时应当审慎确定是否将 GDP 收益纳入考虑。结合现实背景来说,党和国家正在着力推进社会主义现代化建设,经济实力的持续增长必然在其中发挥着重要的作用。因此,我国在构建最优石油储备规模时,考虑 GDP 收益从而尽可能保障我国经济社会的平稳可持续发展具有较强的现实意义,从这一角度来说,本文所使用的将 GDP 收益考虑在内的测算方法具有一定优势。

## 五、研究结论与政策建议

本文分析了影响石油储备补仓和释放的不确定性因素,并就这些不确定因素分情况探讨了石油储备的补仓与释放策略。同时,本文对中国最优石油储备规模进行评估,得出了基准情景下我国的最优石油储备规模为 117 天进口量的结论;在此基础上,我们针对不同储备成本、不同石油供应中断天数、不同石油价格以及是否考虑 GDP 收益对最优储备规模的敏感性情况进行了分析。

根据前文的分析,本文主要获得了两方面研究结论:

(1) 影响石油储备补仓和释放的主要因素包括价格、供给以及需求的不确定性。在不同时间长度以及不同类型的冲击中,我们需要有规则地进行应对。短期冲击对油价的影响较小,需要短时间内释放一定量的储备油来平抑价格的波动。在中长期的事件冲击中,战略石油储备的补仓释放较为复杂。中期冲击需要快速释放相当规模的战略储备并在后期进行补仓。长期冲击的深度以及广度难以预料,中高油价冲击较大,低油价冲击较小。在高位油价区快速释放一定规模的储备油,并随着油价的下降择机有序地进行石油的补仓与释放。

(2) 我国石油储备的最优规模应当在 117 天左右,储备成本的下降、石油供应中断天数的上升以及石油价格的下降都倾向于最优石油储备规模的提升。进一步研究说明,石油最优储备规模对于石油供应中断天数最敏感,其次是储备成本,对石油价格则较不敏感。由于石油供应中断会直接影响正常的石油供应流量,因此政府在政策制定时应该充分考量可能面临的石油中断情况,保障石油储备能够发挥足够的应急效果。同时,根据对模型加入 GDP 收益前后的情况进行分析,我们发现,当考虑 GDP 收益时,石油储备规模必然会相应上升,而在这一前提下得出的石油储备规模符合我国当前的主要发展战略,具有更强的现实意义。

我国作为石油消费大国,且正处于快速发展的经济转型期,石油安全能否得到保障具有重要的现实意义。石油储备作为保障石油安全的重要手段,合理规划储备规模、合理应用石油储备是充分发挥石油储备作用的关键问题。为此,结合本文的研究结论与现实情况,未来中国可以从以下几个方面入手,进一步建立和完善石油储备体系:

(1) 关于健全石油储备体系相关法律法规。石油安全直接关乎国家安全,必须通过使用法律

法规来规范化石油储备体系的建设。政府应在已采用的《石油储备条例》基础上,根据实际情况,制定包括更多内容的相关法规条例,以明确石油储备的国家战略地位、石油储备的规模、储备主体的构成等多方面的内容,并且从法律上统筹战略和商业等多种储备手段,明确不同石油储备的法律地位。

(2) 关于中国战略石油储备资金的来源。开展战略石油储备建设需要大量的资金,包括基地建设、管理、运营、维护等费用以及原油采购成本。如何筹集足够的资金,以实现中国战略石油储备体系的发展,是关键的一环。中国现有战略石油储备体系的主体是国家,进行战略石油储备建设的资金来源也应该由政府拨款为主。以政府为主的资金筹集,主要可以通过财政筹资、政策性筹资、债券筹资、国际金融机构融资、企业筹资等方式得到。

(3) 关于石油储备形式的选择。目前,国际上采用的石油储备形式主要有地上油罐、海上船罐以及地下盐穴三种储备方式。<sup>[35]</sup>中国当前在用以及正在建设的都是地上油罐形式。从成本和安全的角度出发,未来政府应考虑建设多种储备形式,尤其是成本较低、安全性较高的地下岩盐储备。<sup>[36]</sup>目前中国岩盐开采的规模正在不断扩大,岩盐溶腔的规模和质量均能够保证地下盐穴石油储备库的建设。中国政府应考虑加快地下盐穴储备库的建设,以降低中国石油储备的总成本及提高保障石油储备的安全水平。

(4) 关于石油储备国际化合作与国际石油期货市场联动机制的建设。石油储备的国际化发展策略可以通过双边以及多边的方式在国家层面或者企业层面加强能源合作。全球化的石油资源发展策略能够保证中国稳定且优质的石油资源供应。加强国际合作能够构建较好的石油储备体系,实现共同的能源安全。石油期货属于流动性较好的储备,建立石油储备与石油期货的联动机制能够更加有效地防范石油价格波动,如此可以更好地保证石油安全。

(5) 关于多层次发展石油储备的主体。中国与美、日等发达国家相比,建立与其相当的完备的石油储备体系仍需要时间。根据发达国家的经验,石油储备体系的构建应该以多层次、多元化、国家主导、企业承担部分责任为导向,在以国家为主体的基础上进一步放开展以企业为主体的储备形式,完善多层次的储备体系建设。

#### 注释:

- [1] 谢楠、龚旭、林伯强、庞莲芳《中国石油需求与全球石油库存对国际油价的影响研究》,《当代经济科学》2018年第4期;曹轶《中国石油安全的现状与对策研究》,《经济研究导刊》2018年第2期;许庆、范英《预期原油供给威胁与外部价格传导——一个液态生物质能源缓解能源安全危机的视角》,《世界经济文汇》2011年第4期。
- [2] 于博、刘国宝《海上战略石油储备基地建设方案研究》,《中国港湾建设》2018年第6期。
- [3] 金芳《建立和完善我国石油战略储备的探析》,《产经评论》2008年第5期。
- [4] Helm, D., "Energy policy: security of supply, sustainability and competition", *Energy policy*, 2002, 30(3), pp. 173-184; Fan, Y. and X. B. Zhang., "Modelling the strategic petroleum reserves of China and India by a stochastic dynamic game", *Journal of Policy Modeling*, 2010, 32(4), pp. 505-519.
- [5] Teisberg, T. J., "A dynamic programming model of the US strategic petroleum reserve", *The Bell Journal of Economics*, 1981, 12(2), pp. 526-546; Hogan, W. W., "Oil stockpiling: help thy neighbor", *The Energy Journal*, 1983, 4(3), pp. 49-71; Helm, D., "Energy policy: security of supply, sustainability and competition", *Energy policy*, 2002, 30(3), pp. 173-184; Fan, Y. and X. B. Zhang., "Modelling the strategic petroleum reserves of China and India by a stochastic dynamic game", *Journal of Policy Modeling*, 2010, 32(4), pp. 505-519; 吴刚、魏一鸣《突发事件情景下的中国战略石油储备应对策略研究》,《中国管理科学》2011年第2期。
- [6] Samouilidis, J. E. and S. A. Berahas., "A methodological approach to strategic petroleum reserves", *Omega*, 1982, 10(5), pp. 565-574; Greene, D. L., D. W. Jones and P. N. Leiby., "The outlook for US oil dependence", *Energy Policy*, 1998, 26(1), pp. 55-69; Wei, Yi-Ming, et al., "Empirical analysis of optimal strategic petroleum reserve in



- China" *Energy Economics* ,2008 ,30( 2) , pp. 290–302; Zhang , Xiao–Bing , Ying Fan , and Yi–Ming Wei. , “A model based on stochastic dynamic programming for determining China’s optimal strategic petroleum reserve policy” , *Energy Policy* ,2009 ,37( 11) , pp. 4397–4406.
- [7]Balas and Egon. , “The Strategic Petroleum Reserve: How Large Should it be?” , *Energy Policy Planning* ,1981 , Springer , Boston , MA. , pp. 335–386; 周德群、孙立成、万红 《考虑石油替代品和关税配额政策的石油储备模型研究》,《中国管理科学》2010 年第 1 期; 周东亮、陈智、艾德恩、李忠国、刘金卓 《基于博弈论的军民融合式战备物资储备》,《兵器装备工程学报》2018 年第 11 期。
- [8]李青亮、李兰兰、焦建玲 《战略石油储备系统动力学模型研究》,《价值工程》2015 年第 11 期; 谢楠、颜志军、薛倩倩 《石油市场供需关系与战略石油储备策略的相互影响——基于 VEC 模型的研究》,《价值工程》2018 年第 1 期。
- [9]Liao , Shujie , et al. , “Crude oil price decision under considering emergency and release of strategic petroleum reserves” , *Energy* ,2016 ,102 , pp. 436–443.
- [10]周德群、孙立成和万红 《考虑石油替代品和关税配额政策的石油储备模型研究》,《中国管理科学》2010 年第 1 期。
- [11]张力菠、谢丽琨 《国际原油价格与我国原油进口量关系研究——基于系统思考与格兰杰因果检验》,《技术经济与管理研究》2013 年第 6 期。
- [12]李慧、孙仁金、董康银 《美国战略石油储备补仓策略分析及对我国的启示》,《价格理论与实践》2014 年第 11 期。
- [13]马波、梁东霞 《我国战略石油储备基地建设法律问题探析》,《行政与法》2015 年第 6 期。
- [14] [26]Teisberg , T. J. , “A dynamic programming model of the US strategic petroleum reserve” , *The Bell Journal of Economics* ,1981 ,12( 2) , pp. 526–546.
- [15]Wu , Gang , et al. , “A dynamic programming model of China’s strategic petroleum reserve: General strategy and the effect of emergencies” , *Energy Economics* ,2012 ,34( 4) , pp. 1234–1243.
- [16]Wei , Yi–Ming , et al. , “Empirical analysis of optimal strategic petroleum reserve in China” , *Energy Economics* ,2008 ,30( 2) , pp. 290–302.
- [17] [22] [25] [34]林伯强、杜立民 《中国战略石油储备的最优规模》,《世界经济》2010 年第 8 期。
- [18] [19]Bai , Y. , et al. , “Desirable policies of a strategic petroleum reserve in coping with disruption risk: A Markov decision process approach.” , *Computers & Operations Research* ,2016 ,66 , pp. 58–66.
- [20] [32]Gao , Dan , et al. , “A coordinated energy security model taking strategic petroleum reserve and alternative fuels into consideration” , *Energy* ,2018 ,145 , pp. 171–181.
- [21]吕涛、高剑、王政 《长三角地区成品油应急储备布局优化研究》,《资源科学》2018 年第 7 期。
- [23]钱浩祺、吴力波、汤维祺 《成本效应与需求效应——原油价格冲击的行业传导机制研究》,《世界经济文汇》2014 年第 3 期。
- [24]张小陌 《美日矿产资源战略储备制度研究及其借鉴意义》,《矿业研究与开发》2019 年第 1 期。
- [27]Oren , S. S. and Wan , S. H. , “Optimal strategic petroleum reserve policies: a steady state analysis” , *Management Science* ,1986 ,32( 1) , pp. 14–29.
- [28]Zhang , Chuanguo and Xiaoqing Chen. , “The impact of global oil price shocks on China’s bulk commodity markets and fundamental industries” , *Energy policy* ,2014 ,66 , pp. 32–41.
- [29]Difiglio , C. , Oil, “economic growth and strategic petroleum stocks ” , *Energy Strategy Reviews* ,2014 ,5 , pp. 48–58.
- [30]Liao , S. , Wang , F. , Wu , T. , and Pan , W. , “Crude oil price decision under considering emergency and release of strategic petroleum reserves” , *Energy* ,2016 ,102 , pp. 436–443.
- [31]孙天晴 《基于复合泊松过程战略石油储备天数的概率模型及其应用》,《数理统计与管理》2007 年第 5 期。
- [33]US Energy Information Administration Monthly energy review ,<http://www.eia.doe.gov/totalenerge/data/mothly/index.php> ,2017–09–27.
- [35]Bérest P , and Brouard B. “Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage Blow Out; Mechanical Instability;

- Seepage; Cavern Abandonment”, *Oil & Gas Science & Technology*, 58.3(2003): 361–384.
- [36] Wu, Gang, et al. “A dynamic programming model of China’s strategic petroleum reserve: General strategy and the effect of emergencies”, *Energy Economics*, 2012, 34(4) pp. 1234–1243; Yang, Chunhe, et al. “Analysis of major risks associated with hydrocarbon storage caverns in bedded salt rock”, *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 113 pp. 94–111; Zhang, Nan, et al. “Stability and availability evaluation of underground strategic petroleum reserve (SPR) caverns in bedded rock salt of Jintan, China”, *Energy*, 2017, 134 pp. 504–514.

[责任编辑: 叶颖玫]

## Analysis of the Replenish and Release Strategy and Optimal Scale of China’s Petroleum Reserves

XIE Nan<sup>1</sup>, LIN Bo-qiang<sup>2,3</sup>, SU Tong<sup>2,3</sup>, PANG Lian-fang<sup>1</sup>

(1. Zhenhua Petroleum Holdings Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian; 3. Collaborative Innovation Center for Energy Economics and Energy Policy, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian)

**Abstract:** Petroleum safety is the core part of energy security. Safeguarding oil safety is of great significance to the long-term stable development of the country’s economy and society. As one of the important means to achieve this, oil reserves can effectively alleviate the negative impacts caused by the lack of international crude oil supply, and finally stabilize oil prices and guarantee the supply of crude oil. However, in order to make full use of the role of oil reserves, it is necessary to clearly identify uncertain factors affecting the reserve and release of reserves, so as to develop a reasonable strategy and ultimately achieve a lower long-term cost. At the same time, the construction of the optimal oil reserve scale should combine the current situation of China’s economic development and energy supply and demand, so as to ensure that this scale can play a sufficient emergency role. The main factors affecting the reserve and release of oil reserves include the uncertainty of price, supply and demand. The quantitative model calculation results show that the optimal size of China’s oil reserves should be around 117 days. Declining reserve costs, increasing oil supply disruptions and falling oil prices tend to increase the optimal oil reserve. Combined with the results of the sensitivity analysis, it can be seen that the optimal reserve size of oil is the most sensitive to the duration of oil supply disruption, followed by reserve costs, and less sensitive to oil prices. According to the analysis of the situation before and after inputting GDP as an influential factor, the scale of the oil reserve will inevitably rise when considering the GDP, which is more applicable to China’s current major developments, with stronger practical significance.

**Keywords:** oil reserve, energy security, margin and release, optimal scale