

北极地区石油资源开发潜力评估

许晴, 胡麦秀

(上海海洋大学 上海 201306)

摘要:随着全球能源竞争的日益激烈, 北极这块能源“宝藏地”逐渐成为各国关注和争夺的焦点区域。文章综合生命周期理论与世界石油市场特征, 分析北极国家构建石油生产方程的理论基础, 选择多循环 Hubbert 模型与情景分析法构建北极国家石油生产方程; 综合理论与实际情况, 合理设定不同发展情景, 分析北极地区石油资源对北极国家石油产量的影响, 进而研究北极地区石油资源的开发潜力。研究结果表明: 北极地区的石油资源一旦得以开发, 可使北极国家石油产量峰值时间递延 2~4 年; 北极重点地区(西西伯利亚盆地、阿拉斯加北坡盆地、西北内陆盆地、斯维尔德鲁盆地)的未被发现可采石油资源更加丰厚, 开发该地区石油资源的石油产量峰值时间递延效果更加明显。

关键词: 北极; 石油资源; 情景分析; 开发潜力

中图分类号: F4; P74

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2023)08-0035-06

Evaluation of Oil Resources Development Potential in the Arctic Region

XU Qing, HU Maixiu

(Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the increasingly fierce global energy competition, the Arctic, a “treasure land” of energy, has gradually become the focus of competition among countries. Based on the life cycle theory and the characteristics of the world oil market, this paper analyzed the theoretical basis of constructing the oil production equation of Arctic countries, and selected the multi-cycle Hubbert model and scenario analysis method to construct the oil production equation of Arctic countries. Moreover, based on the actual situation of theory and reality, different development scenarios were reasonably set up in order to analyze the impact of oil resources in the Arctic on the oil production of Arctic countries, and then studied the development potential of oil resources in the Arctic. The results showed that once the oil resources in the Arctic were developed, the peak oil of Arctic countries could be postponed for 2~4 years. The key development areas in the Arctic (West Siberia Basin, North Slope Basin of Alaska, Northwest Inland Basin

收稿日期: 2022-03-07; 修订日期: 2023-07-22

基金项目: 国家社会科学基金一般项目“‘北极航道’与世界贸易格局和地缘政治格局的演变研究”(17BGJ059); 教育部哲学社会科学研究后期资助重大项目“北极航道开发利用有关问题研究”(20JHQ016)。

作者简介: 许晴, 硕士研究生, 研究方向为海洋经济与贸易

通信作者: 胡麦秀, 教授, 博士生导师, 研究方向为国际贸易理论与政策、海洋战略与国际经济合作

and Sverdrup Basin) had not been found, and the recoverable oil resources were richer. The effect of deferring the oil peak when developing the oil resources in this area was more obvious.

Keywords: Arctic, Petroleum resources, Scenario analysis, Tap potential

1 北极地区油气资源概况

根据美国地质调查局 2008 年对北极地区的勘探结果,北极地区油气资源总蕴藏量约为 4 121.6 亿桶油当量,占世界未被发现可采油气资源总量的 20%;其中,未被发现可采石油资源总量约为 899.8 亿桶油当量,占世界未被发现可采石油资源总量的 13%^[1]。北极地区未被发现可采的油气资源主要分布于北极地区的大陆架区域和深度超过 500 m 的深水区域,具体来讲主要分布于 25 个地质省盆地,尤其集中在西西伯利亚盆地、北极阿拉斯加盆地、东巴伦支盆地、东格陵兰裂谷盆地、叶尼塞-哈坦加盆地、美亚盆地和西格陵兰-东加拿大盆地(表 1)。

表 1 北极地区未被发现可采油气资源的主要分布
Table 1 Main distribution of undiscovered recoverable gas resources in the Arctic

地质省盆地	石油/ 10 亿桶	天然气/ 万亿 m ³	天然气液/ 10 亿桶
西西伯利亚盆地	3.66	651.50	20.33
北极阿拉斯加盆地	29.96	221.40	5.90
东巴伦支盆地	7.74	317.56	1.42
东格陵兰裂谷盆地	8.90	86.18	8.12
叶尼塞-哈坦加盆地	5.58	99.96	2.68
美亚盆地	9.72	56.89	0.54
西格陵兰-东加拿大盆地	7.72	51.82	1.15
合计	72.83	1 485.31	40.14

2 模型引入及理论基础

国内外学术领域预测石油产量主要采用曲线拟合方法、理论模拟方法以及计量经济模型,其中曲线拟合方法的应用比较广泛。Hubbert 是美国著名的石油地质学家,开创石油峰值理论模型研究,其于 1949 年提出矿物资源的“钟形曲线”问题,1962 年利用实际资料拟合 Logistic 曲线的方法得到可用于预测石油累计产量和最终可采储量的模型,该模型被命名为 Hubbert 模型。Hubbert 模型

是曲线拟合方法中比较经典的模型,考虑石油这种不可再生资源的生命体性质,对于未来作出较好的判断,而不是简单延伸现在的趋势,在国外得到广泛应用。国内外学者关于 Hubbert 模型的应用主要集中在石油等资源的产量峰值预测,如中国学者张映红等^[2]和黎斌林^[3]选择 Hubbert 模型预测石油资源的生产峰值。

2.1 模型拓展

单循环 Hubbert 模型存在明显的缺陷,即忽略生产过程中对石油产量的制约因素,如油价上涨、新勘探领域和新技术、资源稀缺性加剧或政治事件。此外,Hubbert 模型源于勘探和产量的自我调节,仅能反映勘探成本的内在动态而忽略价格成本关系,即忽略石油发现和生产的重要影响因素——盈利能力。因此,许多学者对 Hubbert 模型进行修正,认为石油的全面发现和生产可能涉及多个周期,每个周期的产量取决于相应石油资源的预期可盈利采收率^[4],多循环 Hubbert 模型应运而生。多循环 Hubbert 模型的表达式为:

$$q(t) = \sum_{i=1}^k q_i(t) = \sum_{i=1}^k 4(q_{\max})_i \frac{e^{-a_i(t-t_{\max})}}{(1 + e^{-a_i(t-t_{\max})})^2}$$

式中: k 为生产循环数; i 为生产循环时期; t 为开发时间; $q_{\max}$ 和 $t_{\max}$ 分别为石油年产量峰值和相应的时间; a 为常数; e 为自然对数函数的底数。

每个生产循环都有其自身的最终可采储量(URR),最终可采储量是对未来可采和已生产石油产量的估算,其预估值随着知识增加、技术进步和经济发展呈动态变化,包括累计产量、证实储量、储量增长量和未被发现可采量 4 个部分。最终可采储量的计算公式为:

$$Q_{\infty} = \frac{4q_{\max}}{a}$$

多个循环的最终总可采储量可表示为:

$$N_{PA} = \sum_{i=1}^k \frac{4(q_{\max})_i}{a_i}$$

那么,其逻辑方程即多个循环的石油累计产量

可表示为:

$$Q = \sum_{i=1}^k \frac{Q_{\infty i}}{(1 + e^{-a(t-t_{\max})})_i}$$

未来的石油可采量可表示为:

$$N_{FR} = N_{PA} - Q$$

在对多循环 Hubbert 模型的求解过程中,首先根据历史石油产量确定生产循环数,而后使用非线性最小二乘回归法计算模型参数。每个完整的生产周期都有自己的最终可采储量,将每个生产周期的最终可采储量相加便得到最终总可采储量,通过使均方根最小得到参数最优值。

2.2 理论基础

2.2.1 方法原理

Hubbert 模型的理论根源在于石油的生命周期理论。生命周期理论认为石油资源属于不可再生资源,所能利用的资源禀赋有限,最终均会走向耗竭。石油资源自开发之时必然经历产量上升(缓慢上升、加速上升)、产量达到顶峰及产量下降(加速下降、缓慢下降)3个阶段,表现为“倒U”形曲线或“钟形曲线”。这是因为在石油生产模型中,通常假定石油生产过程的价值顺序为从生产成本较低廉的石油到生产成本较高昂的石油,直至生产过程的边际利润耗尽。对于正在开采的油田而言,在短期内贸然提高石油采收率可能导致较高的边际成本,这就意味着对于正在开采的油田实施产量调整缺乏灵活性,在预测未来石油供应时必须考虑时间对于石油生产的限制。基于上述假定,在短期内为提高某个地区的石油产量,必须投资开发新的油田。因此,石油的发现趋势大致决定石油的产量趋势,这种逻辑增长模式表现为“倒U”形曲线或“钟形曲线”,可用 Hubbert 模型来描述。

综上所述,在 Hubbert 模型等“钟形曲线”模型中,石油的生产趋势在某种程度上反映其早期的发现趋势。有学者又对 Hubbert 模型补充经济学理论基础,认为石油发现过程受2种潜在效应控制即信息效应和耗竭效应^[5],其中信息效应特指受信者根据所获得的信息相应调整自己行为的现象。自然资源勘探过程中的信息包括地质信息和技术信息,勘探过程始于信息,信息又激励进一步的勘探。人们会依据既有的知识水平判断勘探成功的概率,

继而决定是否进行资源勘探活动;相对于未知区域,在有成功勘探历史的区域找到资源的概率更高,因此人们偏好于在这些区域从事资源勘探活动。

2.2.2 使用条件

合理的 Hubbert 模型必然具有经济和政治因素制约,主要包括:①石油需求呈指数增长;②在给定可获得的石油资源规模条件下,未来一段时间的石油资源开采成本、利润水平和技术发展趋势可以被合理地估计;③石油市场的营商环境稳定,即政治和市场规则稳定;④在石油交易过程中,在资源拥有者可获得客观利润的同时,消费者有支付石油价格的能力^[6]。

根据英国石油公司(BP)数据库的历史石油产量数据,自1860年以来北极国家的石油产量历经上升、稳定、下降、上升的阶段,产量曲线近似“钟形曲线”。因此,基于曲线拟合理论的 Hubbert 模型等峰值模型符合北极国家的石油产量趋势(图1)。

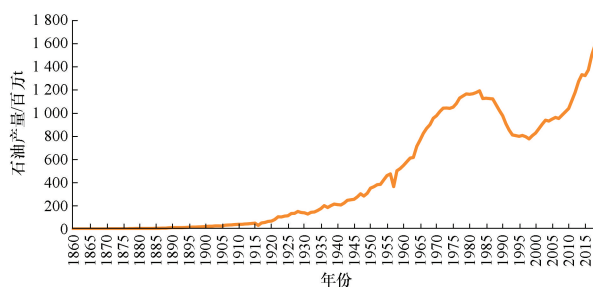


图1 北极国家的石油产量趋势

Fig.1 Oil production trend of Arctic countries

随着全球现代化进程的加快,石油作为重要的战略资源,北极国家及全球对其的需求与日俱增。一方面,以中国为代表的新兴力量的石油需求量连年攀升,刺激其石油进口量的增加,无形中扩大俄罗斯、美国作为重要石油生产国的石油出口市场;另一方面,在可以预见的未来,以美国为首的发达经济体将摆脱金融危机及欧洲债务等困境,国内经济将进一步复苏,石油需求量将与其经济同步增长。根据美国能源信息署(EIA)的分析,2030年世界石油需求量较2020年有望增长0.5%。

石油最终可采储量包括累计产量、证实储量、储量增长量和未被发现可采量4个部分,其具体数值关乎石油产量预测的精确度。然而石油产量预

测是浩繁的系统工程,尤其针对北极地区的石油资源,个人或单个学术组织难以完成各项数值评估。美国地质调查局(USGS)对北极地区进行地理勘探,在此基础上发布北极地区未被发现可采石油资源量以及模型所需的其他关键数据。

3 北极地区石油资源开发潜力评估

3.1 样本选取和数据来源

综合考虑北极石油开发实际进展以及数据可获得性,本研究选取俄罗斯、加拿大以及美国为样本代表北极国家,主要涉及石油的未被发现可采量、储量增长量、探明储量和产量数据。其中,3个国家1860—1964年的石油产量数据来自《帕尔格雷夫:世界历史统计》^[7],1965—2019年的石油产量及探明储量数据来自英国石油公司的《世界能源统计回顾》^[8];美国及俄罗斯的石油未被发现可采量和储量增长量数据来自美国地质调查局官网^[9],加拿大的石油未被发现可采量和储量增长量数据来自加拿大统计局官网。

3.2 北极地区石油资源开发的情景设计

3.2.1 设计依据

北极地区的未被发现可采石油资源代表其勘探潜力,已被发现石油资源代表其开发潜力。基于石油勘探、开发和生产的进程,北极地区的未被发现可采石油资源须历经勘探过程从而转化为已被发现资源,在资源商业性机会增加以及市场、技术、法规等许可的前提下,经生产过程最终转化为实际产出。根据信息效应,人们会依据既有的知识水平判断勘探成功的概率,继而决定是否进行资源勘探活动。由于北极大部分地区是未知区域,人们对于北极地区未被发现可采石油资源的勘探开发意愿必然不同于非北极地区。王淑玲等^[10]认为受地质油藏条件、极地自然环境和工程设施等因素的限制,北极石油资源的开发难度大,目前该地区的石油开发尚不具备经济性。此外,相较于非北极地区,北极地区石油资源勘探的相关信息较少,未被发现可采石油资源转化为实际产出的时间有待商榷。

与此同时,北极地区内部各地质盆地的勘探基础也有所不同。①亚欧大陆向北延伸至北极圈内

形成北极陆上区域,其中一部分归属俄罗斯,构成俄罗斯的北极陆上领土。俄罗斯北极石油资源开发项目数量众多,但绝大多数分布在北极陆上区域,主要集中在亚马尔-涅涅茨自治区和克拉斯诺亚尔克边疆区。俄罗斯北极大陆架区域的石油开发进展缓慢,且尚未有大规模的石油资源开发活动^[11]。②美国在北极地区的石油资源主要分布在阿拉斯加州,阿拉斯加自然资源厅将该地区具有潜在开采价值的地块划分为5块,即波弗特海、北坡、北坡山脚、库克湾和阿拉斯加半岛。③加拿大因育空地区、西北地区以及努纳武特部分地区位于北极圈内,面积占其国土总面积的40%。目前仅西北地区开展石油生产活动,且全部集中在诺曼韦尔斯附近,帝国石油资源有限公司、壳牌加拿大有限公司、康菲石油加拿大有限公司等多家公司持有该地区的油气生产许可证,而其他地区尚未有油气开采计划。

3.2.2 情景设计

基于Hubbert峰值理论的信息效应,人们对有石油生产基础地区的勘探开发意愿更加强烈,该地区未被发现可采石油资源转化为实际产出的概率更高。结合上述依据分析可知,非北极地区与北极地区、北极地区内部各地质盆地之间的勘探基础存在较大差异。因此,本研究比较不同情景设定下北极国家石油产量的预测结果,明晰开发北极地区未被发现可采石油资源对北极国家石油产量及其峰值的影响,进而探讨北极地区石油资源的开发潜力。

根据美国地质调查局的勘探结果,俄罗斯、美国 and 加拿大在北极圈内共拥有18个含油气地质盆地。梳理3个国家的北极石油资源开发情况可知,绝大多数石油开发项目位于西西伯利亚盆地、阿拉斯加北坡盆地、西北内陆盆地以及斯维德鲁普盆地。因此,假定在未来一段时间内,北极国家对上述4个地质盆地(重点地区)进行石油勘探开发活动的意愿高于其他14个地质盆地(次重点地区)。此外,假定研究过程满足Hubbert模型的必要限制因素,即稳定的政治和市场规则。

综上所述,设定北极国家的3种石油勘探开发方案,北极国家石油资源的最终可采储量有3种核

算方法。①情景一:北极国家未被发现可采石油资源仅包含北极国家在非北极地区的未被发现可采石油资源,在此种情景下,北极国家石油资源的最终可采储量为 1 309.38 亿 t;②情景二:北极国家未被发现可采石油资源包括北极国家在非北极地区和重点地区的未被发现可采石油资源,在此种情景下,北极国家石油资源的最终可采储量为 1 385.55 亿 t;③情景三:北极国家未被发现可采石油资源包括北极国家在非北极地区和次重点地区的未被发现可采石油资源,在此种情景下,北极国家石油资源的最终可采储量为 1 357.13 亿 t。

3.3 参数可靠性检验

使用拟合度检验方式来检验模型的预测结果,计算公式为:

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{actual} - q_{forecast})^2}{n}}$$
$$D_{RMS} = \frac{R_{RMS}}{q_{max}} \times 100\%$$

式中: R_{RMS} 为均值平方根,反映石油产量预测值与实际值的离散程度; q_{actual} 和 $q_{forecast}$ 分别为实际产量与预测产量; n 为预测年; D_{RMS} 为均值平方根与最大产量的相对差距。

当 $D_{RMS} \leq 5.5\%$ 时,拟合程度较高;当 $5.5\% < D_{RMS} \leq 18\%$ 时,拟合程度一般;当 $D_{RMS} > 18\%$ 时,拟合程度较低。经测算,拟合程度较高,表明预测结果可信(表 2)。

表 2 北极国家石油产量预测可靠性检验
Table 2 Reliability test of oil production forecast in Arctic countries

类型	情景一	情景二	情景三
URR/百万 t	130 938	138 555	135 713
$D_{RMS}/\%$	3.87	3.72	3.14

3.4 情景分析

石油资源是重要的战略物资,影响地区经济发展。未来世界各国都将面临出现石油产量峰值,这意味着低成本、经济性可采石油产量增长率趋近于零,石油产量将在峰值过后逐步下滑。在 3 种情景下,多循环 Hubbert 模型对北极国家石油产量峰值

的预测如表 3 所示。

表 3 多循环 Hubbert 模型对北极国家石油产量峰值的预测
Table 3 Prediction of peak oil production of Arctic countries by multi cycle Hubbert model

类型	情景一	情景二	情景三
产量峰值/百万 t	1 714.06	2 029.40	2 019.15
峰值时间/年份	2032	2036	2034

从 Hubbert 模型的预测结果来看,3 种情景下北极国家均未达到石油产量峰值,这意味着北极国家石油开采正由资源品质好、成本低的阶段向资源品质一般、成本较高的阶段过渡。随着 URR 的增加,北极国家石油产量峰值时间递延,其原因在于开发北极地区未被发现可采石油资源增加北极国家可采石油资源储备,延缓石油产量峰值的到来。

根据预测结果,开发北极地区未被发现可采石油资源可使北极国家石油产量峰值时间递延 2~4 年。值得注意的是,由于北极国家在重点地区的未被发现可采石油资源更加丰厚,开发重点地区的未被发现可采石油资源将使石油产量峰值时间递延的效果更加明显。近年来,以俄罗斯、美国、加拿大为代表的北极国家在世界石油市场的供给地位逐年上升,这些国家的石油产量峰值及其时间不仅关乎本国命运,还将对世界石油市场产生深刻影响。

4 结论与建议

根据研究结果,将不开发北极地区未被发现可采石油资源的情景作为参照时,由于重点地区未被发现可采石油资源更加丰厚,对其开发将使北极国家石油产量峰值时间的递延效果更加明显。鉴于此,北极国家未来须大力发展西西伯利亚盆地、阿拉斯加北坡盆地、西北内陆盆地和斯维尔德鲁盆地等地区的石油开采项目。在当前世界石油资源愈发紧缺而石油资源需求愈发上涨的背景下,北极国家应抓住机遇、顺势而为,积极挖掘北极地区石油资源的开采潜力,在延缓本国石油产量峰值到来的同时,缓解世界石油资源供给矛盾。

参考文献(References):

[1] BIRD K J, CHARPENTIER R R, GAUTIER D L, et al. Circum-

- Arctic resource appraisal; estimates of undiscovered oil and gas North of the Arctic Circle [J]. Fact Sheet, 2008, 51 (1): 2008—3049.
- [2] 张映红,路保平,尹秀琳.修正 Hubbert 模型及世界石油产量临界点预测[J].石油学报,2009(1):112—116.
- ZHANG Yinghong, LU Baoping, YIN Xiulin. Modified Hubbert model and prediction of critical point of world oil production[J].Petroleum Journal,2009(1):112—116.
- [3] 黎斌林.全球石油峰值预测及中国应对策略研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- LI Binlin. Global oil peak prediction and China's coping strategies [D].Beijing:China University of Geosciences (Beijing),2014.
- [4] REHRL T, FRIEDRICH R. Modelling long-term oil price and extraction with a Hubbert approach; the LOPEX model[J].Energy Policy,2006,34(15):2413—2428.
- [5] SARAIVA T A, SZKLO A, LUCENA A F P, et al. Forecasting Brazil's crude oil production using a multi-Hubbert model variant[J].Fuel,2014,115(1):24—31.
- [6] OAVALLO A J. Hubbert 模型:用途、意义和局限性[J].谢力,译.国外石油动态,2005(16):1—11.
- OAVALLO A J. The Hubbert model: purpose, significance, and limitations[J]. Trans. by XIE Li. Foreign Oil Dynamics, 2005 (16):1—11.
- [7] 米切尔·帕尔格雷夫:世界历史统计[M].贺力平,译.北京:经济科学出版社,2002.
- Mitchell. Palgrave; statistics of world history[M]. Trans. by HE Liping. Beijing: Economic Science Press, 2002.
- [8] Company BP. BP statistical review of world energy[R]. London: British Petroleum Company, 2021.
- [9] Central Energy Resources Science Center. An estimate of undiscovered conventional oil and gas resources of the world, 2012 [R]. Lakewood: Central Energy Resources Science Center, 2012.
- [10] 王淑玲,姜重昕,金玺.北极的战略意义及石油资源开发[J].中国矿业,2018,27(1):20—26.
- WANG Shuling, JIANG Chongxin, JIN Xi. The strategic significance of the Arctic and the development of oil resources [J]. China Mining, 2018, 27(1): 20—26.
- [11] 刘乾.西方制裁下的俄罗斯北极油气开发[J].欧亚经济,2019(4):76—87,128.
- LIU Qian. Russia's Arctic oil and gas development under Western sanctions [J]. Eurasian Economy, 2019 (4): 76 — 87, 128.