

[美] I. 莱尔歇 著 赵贤正 译

# 油气勘探中的 地质风险和不确定性

Geological Risk and Uncertainty in Oil Exploration



石油工业出版社

# 油气勘探中的 地质风险和不确定性

[美] I. 莱尔歇 著  
赵贤正 译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

油气勘探投资是高风险、高投入的,全世界从事这项投资成功的不过百分之十。因此,石油界一直在寻求一种能牢牢控制投资风险的途径。本书综合了各种类型盆地分析的不确定性并把这种不确定性应用到与油气聚集相关的可能的盆地演化模型中,促使油气勘探效果进一步提高,从而降低投资的风险。

本书可供从事油气勘探风险评价的工程技术人员和物探、地质方面的专家及相关院校的师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

油气勘探中的地质风险和不确定性/[美]I. 莱尔歇著;赵贤正译.  
北京:石油工业出版社,2004.4

书名原文:Geological Risk and Uncertainty in Oil Exploration  
ISBN 7-5021-4547-8

I. 油…

II. ①莱…②赵…

III. 油气勘探-不确定性-风险分析

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 003035 号

Copyright © 1997 by Elsevier Inc.

Translation Copyright © (2004) by Petroleum Industry Press.

All rights reserved.

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷



2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:28.25

字数:718 千字 印数:1—1500 册

定价:80.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

## 译 者 的 话

由于工作的原因,本人一直对油气勘探风险分析和经济评价十分关注。1999 年在美国参加 AAPG 年会期间看到并购买了美国学术出版社刚刚出版的一本新书——《油气勘探中的地质风险和不确定性》,读后觉得是一本很有价值的参考书。

该书共分两部分。第一部分介绍了模型及其不确定性,包括挠曲板块运动、沉积物演化、沉积物热演化、烃反应、可变总有机碳及可变溶解度、断层、盆地沉积物充填、浊积物流动的模型及不确定性;第二部分包括地质时代、信息的不确定性,科学结论的风险确定,模型使用的策略。

该书内容新颖,虽然这些概念是大家所熟知的,但是对这些概念的不确定性和风险分析是我们所忽略的,也正是我们所必需的和急需的。到目前为止,国内学者正在对此课题进行探索性研究,但还没有对此作系统论述的专著。在国内油气勘探难度越来越大、对象越来越复杂、工程成本越来越高的情况下,本书的翻译出版有助于我国的勘探家们对油气勘探中许多概念的不确定性和风险有一个系统的了解和认识,不断开阔视野,在实际石油地质研究、部署编制和勘探决策中进一步增加风险意识,有利于油气勘探效果的进一步提高。

本书由赵贤正翻译,胡素云、余华琪、黎民同志参与了部分章节的翻译,石油大学(北京)留澳博士白国平教授审校了全书,在此一并对帮助和支持本书的翻译和出版工作做出贡献的同志们表示衷心的感谢!由于水平所限,译文之中错误在所难免,恳请读者批评指正。

译 者  
2003 年 6 月

## 前 言

在过去的几年里，如本书所述，出现了许多解决盆地演化问题的定量方法。高速度计算机的出现使人们找到了更多的解决盆地演化的定量化方法。那些过去在 PC486 计算机上需要花费几小时或几天时间才能解决的问题，现在在 SunSparc10 上仅需用几分钟或几小时即可完成，因此，这使得人们能够对研究盆地演化的多种可能情况做出迅速的解释，并提高潜在的研究能力。然而，我们却发现，与五年前相比，我们的研究处在一种更加不确定的状态中。这种不确定性原因有三个：①不管我们做什么，只能对目前的沉积盆地做出观测，有关古演化的推断肯定是从当前不精确的信息中获取的；②不管我们做什么，事实上一定要依据盆地演化特定方面的某个（某些）模式，这些模式不仅必须涵盖现今的地质、地球物理和地球化学方面的数据，而且还须提供古演化特征；③不管我们做什么，以某种方式从模型中推断出的古演化必然包含有模型的假设条件、模型的参数以及那些因数据有限、采样不均匀、数据不准确而导致的种种后果。因此，从模拟得出的古演化具有不惟一性、不准确性和不完美性特征，而且，它对假设条件、所用的参数及数据是敏感的（程度不同）。所有上述影响因素都必须定量化，以便能够评估重建古演化模拟结果所包含的风险和不确定性。我以前的两部著作《盆地分析与定量方法》（卷 1 和卷 2）阐述了为解决盆地演化的不同构成部分而建立模型的定量化步骤，据此可以构建动力学、热力学及油气的综合演化史。

本书主要论述不确定性。本书的大多数读者都已熟悉盆地分析，并且可能从事过关于地质过程定量化的研究。在校研究生、从事研究的科学工作者、石油勘探工作者以及战略经济学家都将喜欢这种对地质风险和不确定性进行定量化的系统研究方法。

有两种相反的观点。认为古不确定性会导致我们无法确定我们所感兴趣的因素，或者我们可以利用关于古演化不确定的程度的知识，进而对一系列的答案给予一个准确的评价。显然，要运用定量化盆地分析模式，则必须确定：①什么是可以准确无误地得到的；②什么因素可以在某个可以接受的不确定范围内确定（且必须给出“可接受”的含义）；③什么因素由于没有进一步的信息而不能确定，以及必须提供信息的数量与类型。

从油气勘探的观点来看，以下几个方面都包含不确定性的成分并且需要定量化：①确定与油气生成的时间和数量相匹配的盆地当时构造和地层情况；②确定与油气运移时间（油气运移量所占的百分比）相匹配的盆地状态；③确定油气聚集的场所和数量；④确定目前滞留烃的能力；⑤考虑盆地动态演化中每一个阶段的不确定性。因此，在评价盆地是否含油气时必须考虑到科学的风险和科学的不确定性因素。

近年来，在进行经济价值预测时，也出现了十分类似的问题。在预测时，未来通货膨胀率、未来油气价格、未来的开发费用等因素都是未知的。在经济预测领域里，人们早已具备了根据不同的经济推测和预测模型计算出期望值和不确定性期望区间的能力。这些模型都有其自己的假设条件和参数，并且也都满足过去和现今的资料。一般说来，利用现今经济资料进行预测的经济模型所用的工具，几乎可以完全地用于利用现今的资料进行科学预言。这里，要探讨的就是与油气勘探息息相关的两个课题。

在经济领域，使用模型进行预测之前，还常需要测试模型的准确性、可重复性以及解释

已知资料的能力（由此可以确定每个模型的局限性、优缺点）。同样在盆地定量分析领域，使用模型评价盆地的含油气可能性之前，要受到同样严格的测试与研究。盆地定量分析模型所涉及到的科学不确定性与科学风险的交互发展是贯穿本书的一条主线。

本书论述的重点是探讨盆地评价的不确定程度，而不是绝对地阐明某一给定的评价结果是多么正确。援引传奇人物 Joe Warren 的话来说：“告诉我，你在多大程度上是错误的而不是你想多正确。”

在结构上，本书可分为两部分：第一部分阐述如何依据手头资料，运用确定结果不确定性的各种方法来定量地解决各种地质、地球物理和地球化学方面的问题。本部分的目的是说明盆地分析模型的各个方面对所做的假设、参数及对所用资料的敏感程度，研究的问题从基底挠曲、断层、流体运移和浊积岩滑塌，一直到热与烃的确定，同时给出一些典型的例子，以对真实盆地的多样性有一定程度的认识。

第二部分主要讨论的是：利用模型状态的不确定性知识（来自于第一部分）给出状态不确定性的概率范围。此处的关键是使科学上的不确定性研究达到这样一种程度，即科学上的风险和经济上的综合风险可以同时来处理，因为其中一种风险都与另一种风险的不确定性息息相关，最终形成一个整体性的油气勘探战略。

许多石油公司和个人给予本书许多帮助，我一如既往地感谢南卡罗莱那大学的盆地建模工业协会。特别需要感谢的是 Unocal、Sagon、Phillips 和 Texaco 石油公司，它们给予了巨大的财政和科学支持。我也真诚地感谢我的博士后和研究生们多年来的帮助，如果没有他们的帮助，我是无法完成此书的。他们包括 Song Cao、Alan Yu、Y. Y. Li、Z. Kai、A. Abbott、Kenneth Petersen、Frederic Maubeuge、Olivier Bour、J. Liu、J. Tang、Z. He 和 Kay Carter。那些提供过想法、建议和资料的专业人员更是不胜枚举，特别一提的是 Brett Mudford、Marty Perlmuter、Dan Tetzlaff、Chuck Shearer 等为了让我弄清一些迷惑不解的问题而度过了许多不眠之夜，对此，我深表谢意。

没有秘书 Donna Black 的帮助，这里所有的工作都不可能完成，她曾多次把我那不明确的表达方法转变成合乎逻辑的英语，我的家人和朋友在我似乎没完没了的撰写本专著的书稿期间承受的最多，对于他们的耐心与支持我深表感谢。

I. 莱尔歌

# 目 录

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 第一章 总论                              | (1)   |
| 第一节 综述                              | (1)   |
| 第二节 储量评价及不确定性实例                     | (2)   |
| 第三节 盆地分析及不确定性实例                     | (14)  |
| 第四节 总结                              | (44)  |
| 附录 A 对数正态分布的一些特征                    | (44)  |
| 第一部分 模型及其不确定性                       | (48)  |
| 第二章 挠曲板块运动——弹性、热弹性和塑弹性模型            | (49)  |
| 第一节 概述                              | (49)  |
| 第二节 模型描述                            | (50)  |
| 第三节 对数据的思考                          | (55)  |
| 第四节 在阿拉斯加州 Central Chukchi 海盆中的应用   | (58)  |
| 附录 A 板块硬度恒定的弹性模型                    | (66)  |
| 附录 B 模型控制方程                         | (68)  |
| 第三章 沉积物演化的动力学模型及其不确定性               | (73)  |
| 第一节 引言                              | (73)  |
| 第二节 一维动力学图解                         | (74)  |
| 第三节 盆地多井研究和二维图解                     | (78)  |
| 第四节 动力和热层析相结合的分析法                   | (79)  |
| 第五节 动力学热指标图解的综合测试                   | (80)  |
| 第六节 单井实例：阿拉斯加州 Navarin 盆地的 COST-1 井 | (83)  |
| 第七节 多井实例：阿拉斯加州的 Navarin 盆地          | (88)  |
| 第八节 讨论和总结                           | (101) |
| 第四章 沉积物的热演化模型及其不确定性                 | (103) |
| 第一节 古热流正演模型                         | (103) |
| 第二节 古热流的反演和拟反演模型                    | (105) |
| 附录 A 透射光颜色指数推导                      | (147) |
| 第五章 烃反应动力学模型及其不确定性                  | (149) |
| 第一节 简介                              | (149) |
| 第二节 热解炉产物分析                         | (154) |
| 第三节 残留干酪根分析 ( $S_2$ )               | (171) |
| 附录 A 式 (5.45) 的反演程序                 | (194) |
| 附录 B 数学方面的考虑                        | (195) |
| 第六章 可变总有机碳及可变溶解度研究                  | (201) |

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 第一节 可变总有机碳和烃类生成·····                     | (201) |
| 第二节 三相流与可变溶解度·····                       | (209) |
| 附录 A 定义回顾·····                           | (230) |
| 附录 B 三相流体系统中的溶解度·····                    | (230) |
| <b>第七章 断层：开启还是封闭？</b> ·····              | (232) |
| 第一节 引言·····                              | (232) |
| 第二节 倾斜正断层模型·····                         | (233) |
| 第三节 在海上尼日利亚盆地的应用·····                    | (242) |
| 第四节 弧形生长断层模型·····                        | (252) |
| 第五节 具体实例：路易斯安那州南部的滚动构造·····              | (266) |
| <b>第八章 盆地沉积物的充填模型、浊积物的流动及其不确定性</b> ····· | (273) |
| 第一节 层序地层沉积充填模型·····                      | (273) |
| 第二节 三维浊积岩流动模型·····                       | (289) |
| <b>第二部分 科学的可能性、风险和策略</b> ·····           | (308) |
| <b>第九章 地质时代的不确定性</b> ·····               | (310) |
| 第一节 前言·····                              | (310) |
| 第二节 地质年代表的选择·····                        | (310) |
| 第三节 地质年代对盆地模拟结果的影响·····                  | (314) |
| 第四节 讨论·····                              | (319) |
| <b>第十章 信息的不确定性</b> ·····                 | (321) |
| 第一节 源于测井的量值·····                         | (321) |
| 第二节 剥蚀与隆升评估·····                         | (338) |
| <b>第十一章 确定科学结论的风险</b> ·····              | (351) |
| 第一节 资源评价中的风险和概率·····                     | (351) |
| 第二节 储量评估中的风险和概率·····                     | (373) |
| 第三节 盐下成藏组合的钻探风险·····                     | (386) |
| 附录 A 概率统计方法·····                         | (403) |
| 附录 B 不确定性的近似贡献·····                      | (405) |
| <b>第十二章 模型使用的策略</b> ·····                | (407) |
| 第一节 盆地分析程序和资料的可获取性·····                  | (407) |
| 第二节 科学风险和相对重要性·····                      | (414) |
| 第三节 科学和经济的综合风险·····                      | (418) |
| <b>参考文献</b> ·····                        | (420) |
| <b>附录 单位换算表</b> ·····                    | (442) |

# 第一章 总 论

## 第一节 综 述

把量化的经济效益模型用于油气勘探主要有两个目的：一是在生产可行情况下，评价公司可能得到的总效益；二是评价由于未来种种因素（如不可知的产品销售价格、通货膨胀、商品升值和生产成本等）变化而导致总效益不确定性的范围区间。因此，勘探经济效益模型是用于预测的工具，它在一定程度上受控于在完成建模之前对已知信息的预测精度。这种经济效益模型包括了正在评估的油藏的估算储量和这些储量的不确定性范围。

量化盆地分析模型的一个主要目的就是评价油气的可能生成量、运移量和在当前的储集场所的聚集量（包括估计盆地中油气藏可能的位置），进而对每个潜在储集场所进行经济评估，评估结果将被用来进行某些排序和目标优选。

盆地分析模型还必须评价潜在油气藏内油气聚集量的不确定程度。这是由下述不确定性造成的：①模型的内在假设；②模型使用的参数；③数据的离散性；④数据的质量和数量以及控制模型输出的数据采集频率。因此，盆地分析模型是一种预测工具，在一定程度上受控于当前资料的可获取性，以及可以与正在勘探的盆地相类比的、勘探程度较高的盆地中油气藏分布的解释能力。这些模型应包括盆地中被评价的物理、化学、地质与输导过程模型以及这些过程的不确定性范围。

这两种模型（经济效益模型和盆地分析模型）的共同点是：两者都试图在信息不完整、使用不确定的参数、不同的模型假设和处理过程基础上去预测或反映目标的状态。

我们关心的是评价模型的相对优缺点与模型预测及反映的输出之间的关系。用这种方式可得到一些与内在假设、参数的不确定性和所用控制资料的变化相关的每个模型的分辨率、精确度、惟一性以及灵敏度的结果。定量测量模型输出结果的不确定性可以在概率意义上用于对风险进行评价并对相关的策略进行评价，这些策略可用于确定先进的勘探和生产以及在彼此相关的潜在油气藏方面可获得的经济回报；即一个客观的、可再现风险与分级的策略，它可以公式表达并正确地应用。

本专著的目的是提供一个定量的、可操作的程序，用以说明如何完成上面提到的任务，并指明：从战略和经济意义上讲，在考虑到盆地模型计算固有的不确定性的同时如何使用这些结果。然后，可以得到一个一体化的勘探评价，这种评价取决于一个人在多大程度上利用所有可以利用的信息所得到有科学价值和经济价值的可靠测量结果，并准确地量化描述不确定性。

当然，有人可能要问，这样做对保障油气的供求来说是否必要？回答这个问题的一种更为明显的方法也许取决于：①用储量评价及其不确定性的例子说明当前的变化范围；②用盆地演化模型的例子说明变化和不确定性的范围。这样，就会明白定量地论述不确定性关系的必要性。

## 第二节 储量评价及不确定性实例

### 一、到 2000 年美国油气资源的短缺量

1991 年 4 月,在斯坦福大学召开了一个能源建模研讨会。会议的目的是对美国总液态烃(包括原油和天然气液)到 2000 年时所预期的供应不足情况进行评价。评价结果如图 1.1 所示,在相同的价格情况下,不同模型的输出结果相差不止一个数量级。Porter (1992)曾评价说:“著名预测者的估计值范围,与用目前观测到的数据而得到的估计值范围具有惊人的差别,这使人们怀疑在过去的 10 年里,对美国油气供应的认知状态是否改进了。”我们的目的并不是反驳在斯坦福会议上得到的对美国油气供应不足的 10 种估计;相反,我们坚信每一个模型的输出结果,就其模型的内在假设以及用于评价下一个 10 年需求的固有参数来说,都是客观的、合理的、可信的。

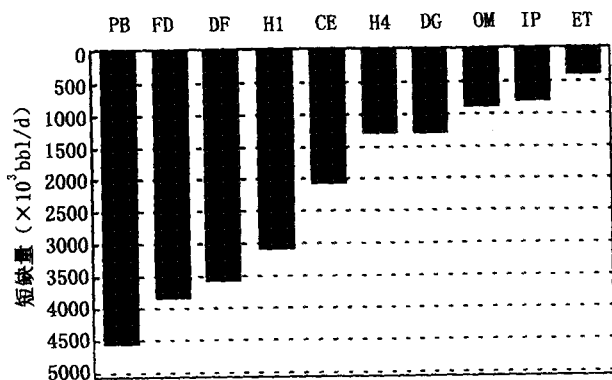


图 1.1 美国 1990—2000 年间供给短缺的测算

(引自 Potter, 1992)

斯坦福研讨会中用到的 10 个模型的简写为: PB—宾夕法尼亚/波士顿大学; FD—联邦储备银行(达拉斯); DF—Decision Focus 公司; H1、H4—哈佛原油市场模拟模型; CE—加拿大能源研究所; DG—纽约大学的 Dermot Gately; OM—美国能源部能源属原油市场模拟模型; IP—麻省理工学院的国际石油交易所; ET—斯坦福大学的 Alan Manne  
这里的供给定义为总液量(即原油和天然气液)

事实上,准确地说,预测的基本问题都是假设基于未知的供需因素而定的,另外,假设必须包含在每个模型之中,在处理与预测有关的过程时,每一个模型都有其自己的规则与函数状态。在经济与科学领域这种差异曾时不时地引发过有趣的讨论。

就勘探经济效益模型而言,许多参数既可单独起作用也可与其他参数一起作用,但是,每一个参数都有其不确定性。就推测来讲,模型方面的问题就是斯坦福实验结果差异的原因之一。因此,我们需要切实可行的方法来估计参数不确定性对某一勘探项目的综合影响。

然而,要指出的是我们有用不同模型得到的关于未来油气短缺的 10 个估计值,我们想利用所有的模型结果(消除那些有意或无意的系统误差)来对可能的短缺提供一些定量的估计,同时对

此定量估计在某一可信度的不确定性有充分的了解。本节的目的就是证明这种想法是切实可行的。

多年来石油工业在许多方面都遇到这类问题,包括:利用井下测井仪器确定岩石可能的物理特性,而装置中有关把岩石物理性质与测井响应联系起来的关系式中就含有精确值及其范围尚不太明了的参数(Hearst 和 Nelson, 1985; Wahlstorm, 1967; Carpentier, 1989; Lerche, 1992a, b);对油田的可能产量和寿命进行估计,其中二次与三次采收率在完成之前是无法知道的(Harbaugh, 1977; Nind, 1981; Megill, 1971);对投标策略的预测,其中竞标者与投标数额是未知的(Lerch, 1992c);对某一盆地剩余的潜在可采储量进行评价

(Warren, 1978; Magill, 1971; Lerche, 1992c; Murtha, 1995; CaldWell 和 Heather, 1995; Moore 和 Tucker, 1995)。

在此, 目标是以斯坦福会议的 10 个模型结果为基础, 应用相似的概率技术来评价美国石油供应的不足。尽管蒙特卡罗方法是一种有效的评价误差的方法, 但是用蒙特卡罗方法评价误差范围的缺点是它必须以实际调查参数为基础。这种数据调查非常耗时, 也许是这种方法不能广泛应用的原因之一。对于它的优点, 我们注意到蒙特卡罗方法是一种完全通用的方法, 并且一旦确定参数的范围、参数的基本概率分布和不确定性的概率, 它可以用于任何一个响应方程。

我们在此要指出的问题是, 不用为每一个具有固定的内在参数变化范围及不确定性范围的测量值而进行冗长耗时的蒙特卡罗计算, 这种计算方法是否能以概率方式评价物理性质数值的误差及其不确定性? 显然, 如果能找到这样一种方法, 那么, 把误差范围转化成相关联的数值就成了一件相对简单的事。

为了能够充分利用有力的概率测量技术, 必须知道如何获得一个事件的固有概率。这种认知一般都建立在科学处理的数据基础上。但是在评价阶段可以利用的数据经常是有限的, 且通常是不准确的或者是通过类比, 或者根据不太了解的条件 (与推测相反) 而得到的。正是这些原因, 为了得到与数据有关的、可用来进行一些评价的数值的相对准确性估计, 就要引入假设。

通常而言, 我们认为那些不太了解的参数或变量 (以后会更精确) 都是以一定的方式围绕某一平均值随机变化的。习惯上用频率分布直方图来表示这个随机分量, 通过这个分布图可以得到一个参数在一个与整个范围相比的给定间距范围内出现的相对次数。习惯上, 分布图下的面积都归一化, 利用频率分布可以对一个参数在每一个间距范围内出现的概率进行近似的经验评价。这种评价是以已获得的数据为基础的。

频率分布 (例如, 不足量在  $0.5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^6$  bbl/d 液态烃的概率是多少) 不是我们主要关心的。我们主要关心的是累积概率分布 (例如, 不足量大于 (小于)  $1 \times 10^6$  bbl/d 的概率是多少)。

在大于的情况下, 其累积频率分布通常是图中大于某一个值以后的剩余面积。在小于的情况下, 则是直到某一值前的那一部分的面积。这两部分是相互排斥的 (也就是短缺量大于  $1 \times 10^6$  bbl/d 的可能性加上短缺量小于  $1 \times 10^6$  bbl/d 的可能性之和必是 1)。因此, 如果  $p(x) dx$  表示  $x$  在  $x \sim x + dx$  之间的频率分布 (标准化的), 那么:

$$P(y > x) = \int_y^{\infty} p(x) dx \quad (1.1)$$

就表示累积概率分布, 也就是说大于特定值  $y$  的机会。而:

$$P(y < x) = \int_0^y p(x) dx = \int_0^{\infty} p(x) dx - \int_y^{\infty} p(x) dx = 1 - P(y > x) \quad (1.2)$$

表示不超过某一个特定值  $y$  的机会。

在大量的勘探评价中, 要近似地得到频率分布都是很困难的。正是这种原因, 基本分布矩阵经常只是近似值。则频率分布为  $p(x) dx$  的  $x$  的平均值  $E_1(x)$  为:

$$E_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \quad (1.3)$$

平均平方值  $E_2(x)$  为:

$$E_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx \quad (1.4)$$

以平均值为中心的方差  $\sigma^2$  为:

$$\sigma^2 = E_2(x) - E_1(x)^2 \geq 0 \quad (1.5)$$

这里  $\sigma$  为标准偏差。

在本书的大部分讨论中, 经常用到频率分布的多次幂, 其定义如下:

$$E_j(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x^j p(x) dx \quad (1.6)$$

我们也用到频率分布的中值  $x_{1/2}$ , 它等于符合下面条件的  $x$  值:

$$P(y < x) = P(y > x) = 1/2 \quad (1.7)$$

与用到的众值  $x_m$  (对一单峰分布) 为这样一个  $x$  值, 即  $p(x)$  有最大值时的  $x$ 。

现实中, 许多分布都呈对数正态分布。这种分布从太阳黑子的面积大小分布一直到勘探区块投标的报价分布。当一个变量有限制时, 正态分布就不合适了, 例如面积不能为负值, 报价只能是正值。在这些条件下, 经验数据表明, 利用对数正态分布可以得到累积频率分布的近似值, 对数正态分布规律为:

$$P(x | x_{1/2}, \mu) = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\ln(x | x_{1/2}) / 2^{1/2} \mu)] \quad (1.8)$$

$x$  的均值为  $E_1(x)$ , 由下式得出:

$$E_1(x) = x_{1/2} \exp(\mu^2/2) \quad (1.9a)$$

众值为:

$$x_m = x_{1/2} \exp(-\mu) \quad (1.9b)$$

$x$  的方差  $\sigma^2 = E_2(x) - E_1(x)^2$ , 由下式给出

$$\sigma^2 = E_1(x)^2 [\exp(\mu^2) - 1] \quad (1.9c)$$

式中  $x_{1/2}$  为中值。在  $x = x_\sigma = x_{1/2} \exp(\mu)$  处有  $P(x_\sigma | x_{1/2}, \mu) = 0.84$ , 而在  $x = x_m$  处, 有  $P(x_m | x_{1/2}, \mu) = 0.16$ , 在这种情况下, 注意到在  $x_{1/2}$  处  $P = 1/2$ , 但是在  $x = E_1(x) > x_{1/2}$  处  $P \cong 0.68$  (参照本章后面的附录 A)。

由经验可知, 即使有可能得到足够的信息, 在评价阶段要确定某一参数或变量的频率分布精确形态, 经常也是比较困难的。事实上, 人们经常这样认为, 对于某一参数能够估计其可能的最小值  $x_{\min}$ 、可能的最大值  $x_{\max}$  和最可能值  $x_p$  就相当不错了。如果我们的目标变量是近似对数正态分布的, 那么, 可以反推方程 (1.9) 得到  $\mu$ 、 $x$ 、 $x_{1/2}$  和  $x_m$  的估计值, 因此从方程 (1.9c) 可以得到:

$$\mu = [\ln(1 + \sigma^2/E_1(x)^2)]^{1/2} \quad (1.10a)$$

然后, 由方程 (1.9a) 和 (1.9b) 得到:

$$x_{1/2} = E_1(x) \exp(-\mu^2/2) = E_1(x) [1 + \sigma^2/E_1(x)^2]^{-1/2} < E_1(x) \quad (1.10b)$$

由方程 (1.9b) 有:

$$x_m = x_{1/2} \exp(-\mu) \quad (1.10c)$$

以及:

$$x_\sigma = x_{1/2} \exp[(\ln(1 + \sigma^2/E_1(x)^2))^{1/2}] > x_{1/2} \quad (1.10d)$$

我们就是应用这种累积概率的方法得到了美国油气供应短缺的 10 个结果, 图 1.1 的 10 个数据近似地反映了人们依据经验来确定供应不足的固有频率。假设这个实验在相同的条件下及相同的价格下重复多次, 那么实验的结果会证实图 1.1 所示的分布结果 (实验中每个模型的

内部参数均在其设计者认可的范围内变化)。因此假设这 10 个结果在相当程度上代表事件的真正出现频率。根据这样的假设, 油气供应不足的期望值  $E_1(x)$  的无偏估计为:

$$E_1(x) = (1/10) \sum_{i=1}^{10} x_i \quad (1.11a)$$

式中,  $x_i$  为来自于第  $i$  个模型结果供应不足量, 由图 1.1 的结果可以得到:

$$E_1(x) \approx 2.6 \times 10^6 \text{ bbl/d} \quad (1.11b)$$

同样, 二阶距的无偏估计为:

$$E_2(x) \approx 6.8 (\times 10^6 \text{ bbl/d}) \quad (1.11c)$$

从方程 (1.10) 可以有以下估计:

$$\mu^2 = \ln(E_2/E_1^2) = \ln[6.8/(2.6)^2] \quad (1.12)$$

这样, 依据累积概率估计, 可以得到:

$$x = 0.8 \times 10^6 \text{ bbl/d 处有 } P(16\%) \quad (1.13a)$$

$$x = 2.6 \times 10^6 \text{ bbl/d 处有 } P(68\%) \quad (1.13b)$$

$$x = 4.0 \times 10^6 \text{ bbl/d 处有 } P(84\%) \quad (1.13c)$$

累积概率图如图 1.2 所示。从图中可以得到可能的短缺量 (shortfall) 估计范围 (有 90% 的把握程度) 为:

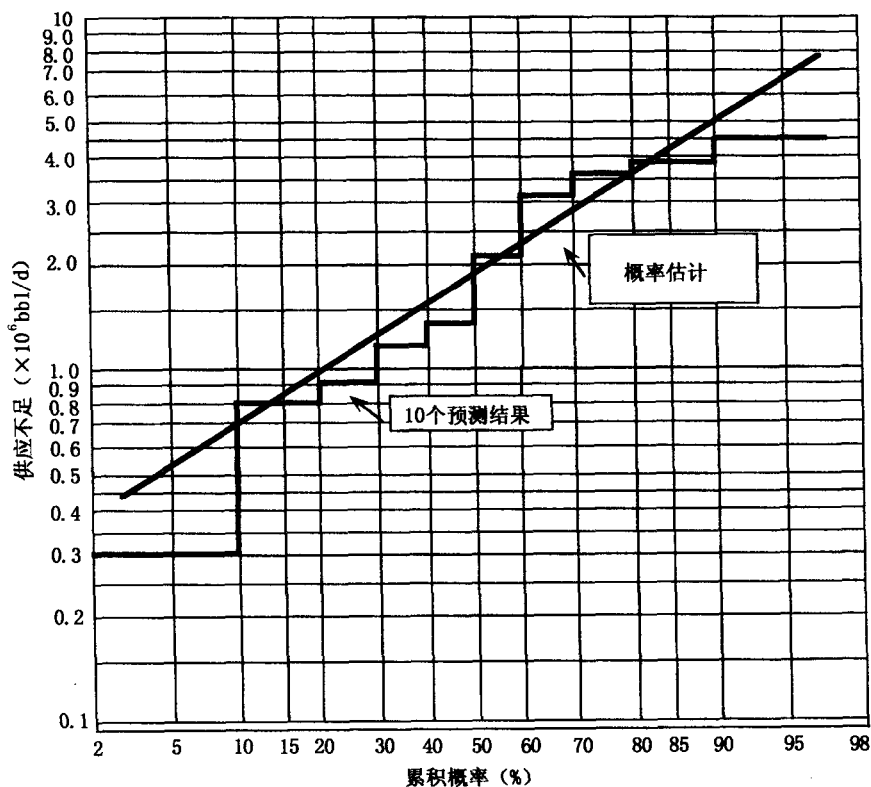


图 1.2 依据斯坦福研讨会的 10 个结果 (“阶梯”状线条)  
做出的短缺供给的累积概率估计 (直线)

$$\text{SHORTFALL} = (2.6 \pm 1.3) \times 10^6 \text{ bbl/d} \quad (1.14)$$

这样,不足量小于  $2.6 \times 10^6 \text{ bbl/d}$  的机会为 68%, 小于  $4.8 \times 10^6 \text{ bbl/d}$  的机会为 90%, 小于  $0.7 \times 10^6 \text{ bbl/d}$  的机会为 10%。以这种最佳的状态为基础进行计划似乎也是不谨慎的。

但是,目前的问题已从对油气供应短缺的定量评价转为对国家经济与政治的良性发展的评价。准确地讲,美国石油工业界、美国政府以及其他一些对此感兴趣的团体对国家的可以预见优劣势的变化与连续且不间断的液态烃供应之间的关系所采取的行动,以及这些行动与全球化的经济和政治发展的相互作用,所有这些,在未来 10 年内将构成一个非常有趣的且值得观测的发展格局。

我们并不轻率地对待美国能源供给短缺的现实,而是在概率意义上对其进行研究,这将使得公司与政府的政策和行动应用得更加稳妥,这正是这个例子的意义所在。这里,所提供的结果取决于两个主要条件:①10 个模型分别产生一个估计值,每个估计值与相应模型的假设、参数及控制信息是一致的(没有给出各个估计值的分辨能力与不确定性);②在不同的情况下,估计值不被不同的控制信息所影响,所以,尽管每一个值都有一定的不确定性,但在一起使用时,可在相当程度上代表正确的分布。然而,考虑到这 10 个值的巨大变化范围,上述两个条件中至少有一个甚至两个都是错误的。同时,模型中所使用的不同的内在假设和不同的参数值在很大程度上可能影响着上面所给出值的范围。

显然,当输出结果与假设、参数和控制数据的质量、数量和采样频率密切相关时,我们需要评价一下每种估计所使用的方式,只有完成了这一分析,我们才能相信各个估计值。

## 二、美国天然气资源估计中可能的不确定性范围

如果要对下面各个主题在政治上、社会上和经济上做出评价,相对于目前和计划的需要来说,就要对一个国家未来可能的油气储备做出估计:①保证资源的进口;②及时进行国内勘探并寻求增加储量。这涉及到一个国家中所有人员、居民以及工业的需求,同时要维护一个国家未来能源的健康发展,就必须做出对不同的能源进行投资的决定,同时还要确定每一个决定的执行计划与执行结果(Etherton 和 Brumbaugh, 1995)。

人们为取代一种现存的能源而计划未来能源开发项目,但如果所开发的能源要在 20 年后才能使用,而当前能源的寿命又小于 20 年,则这种开发项目是没有意义的。如果想在一能源衰竭之前实现从一种能源到另外一种能源的平稳过渡,那么私营公司和政府部门就要关注一个国家的能源需求。因此对某个能源基地需进行探明储量、潜在储量和可能储量的评估,以用来评价对国家需求的预测。

本节主要解决如何估计美国未来天然气储量。当前已证实的天然气的储量为  $200 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。而每年的消耗量为  $20 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ , 因此其能源寿命仅为 10 年。显然,要先评价潜在的天然气储量、发现的可能性和发现的条件,然后才能做出对这种资源的投资和开发决定。除此之外,我们还要估计所做评价正确性的概率。

### 1. 基本数据与概率解释

在过去的 6 年时间里,几个研究小组使用不同的方法和不同的数据质量及数量对不同类的储量进行了估计。潜在天然气评估机构(PGA, Potential Gas Agency)于 1993 年曾对所作的估计进行了总结,总结的结果如表 1.1 所示(摘自于 PGA 报告),表中所有的估计都调整到 1992 年底。在表 1.1 中,各个评价小组所做出评价的结果是不同的。例如, NRA (UDGS/MMS) 估计美国大陆 48 个州中现有的气田潜在天然气资源量为零,尽管这些油田仍在进行生产。而安然(ENRON)公司并未评价各个部分,仅仅做了整体性评价。因此我

表 1.1 潜在天然气资源量的估计值 ( $\times 10^{12} \text{ ft}^3$ , 调整到 1992. 12. 31)

| 能源类别<br>(地区)          | DOE<br>1988 | NRA<br>(USGS/MMS)<br>1989 | NES<br>参考<br>1990 | NES<br>近似<br>1990 | NPC<br>目前<br>1992 | NPC<br>高级<br>1992 | ENRON<br>1993 | GRI<br>目前<br>1993 | GRI<br>高级<br>1993 | PGA<br>1993 |
|-----------------------|-------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------|
| 1. 常规能源 (美国大陆 48 个州)  |             |                           |                   |                   |                   |                   |               |                   |                   |             |
| a. 现存气田               | 186         | 0                         | 108               | 196               | 149               | 168               | ③             | 209               | 209               | 167         |
| b. 未发现的气田             | 353         | 324                       | 256               | 327               | 375               | 413               | ③             | 608               | 667               | 493         |
| 2. 常规能源 (阿拉斯加)        |             |                           |                   |                   |                   |                   |               |                   |                   |             |
| a. 现存气田 <sup>①</sup>  | 28          | 28                        | 33                | 33                | 30                | 30                | ②             | ②                 | ②                 | 37          |
| b. 未发现的气田             | 93          | 75                        | ②                 | 75                | 76                | 84                | ②             | ②                 | ②                 | 157         |
| 3. 非常规能源 (美国大陆 48 个州) |             |                           |                   |                   |                   |                   |               |                   |                   |             |
| a. 致密砂岩               | 180         | ②                         | 230               | 383               | 232               | 349               | ③             | 156               | 241               | ③           |
| b. 煤层甲烷               | 48          | ②                         | 50                | 90                | 62                | 98                | ③             | 81                | 103               | 90          |
| c. 页岩气体               | 31          | ②                         | 15                | 30                | 37                | 57                | ③             | 48                | 127               | ①           |
| d. 其他                 | ②           | ②                         | ②                 | ②                 | 15                | 15                | ③             | 0                 | 43                | ②           |
| 4. 非常规能源 (美国大陆 48 个州) |             |                           |                   |                   |                   |                   |               |                   |                   |             |
| a. 煤层甲烷               | ②           | ②                         | ②                 | ②                 | 37                | 57                | ②             | ②                 | ②                 | 57          |
| 5. a. 常规资源总量          | 660         | 427                       | 397               | 631               | 630               | 695               | ③             | 817               | 876               | 854         |
| b. 非常规资源总量            | 259         | ②                         | 295               | 503               | 383               | 576               | ③             | 285               | 514               | 147         |
| c. 美国大陆 48 个州总量       | 798         | 324                       | 659               | 1026              | 870               | 1100              | 1145          | 1102              | 1390              | 750         |
| d. 美国总量               | 919         | 427                       | 692               | 1134              | 1013              | 1271              | 1145          | 1102              | 1390              | 1001        |

①包括 1988 年前已探明的  $25 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  的天然气;

②未评价;

③未作为一个类别进行报导。

们不可能评价它们评估的质量。若干个小组并未对几种不同类别的储量做出任何评估（有上标②）。

仔细观察一下表 1.1 中其他数字是很有意思的。各个小组都给出了关于常规与非常规能源中各个类别的潜在储量的 3 位和 4 位数字的准确估计；但是由于它们的估计值相差很大，达 3 倍之多，这使得人们怀疑这种估计的精确性，每个评价的准确性都存在问题。当对表 1.1 中的各个类别进行检查时，会产生同样的问题；例如，常规能源情况（美国大陆 48 个州）中，估计的未发现气田的潜在储量从  $256 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  一直到  $667 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ，它们相差了 2.5 倍。如果是按每年消耗  $20 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  计算，则这一类能源的估计寿命从 13 年到 33 年不等，这是一个相当广的范围。

这样大的不确定性范围表明：不同的假设、数据、解释方法和个人偏见都可能影响到评估结果的变化程度，但是这种程度是不可知的。问题在于当面对这种不确定性时，如何对未来进行规划。很明显，如果想估计潜在天然气资源中某一类的储量和资源总量，则需要评价所做估计的质量和把握程度，以便生成一个合理的并把风险考虑在内的供规划所用的基础。

这里，为了鉴别估算出的潜在天然气资源量的准确程度，我们使用了累积概率方法，这种方法在勘探与经济领域已被证明是一种非常有效的工具（Lerch, 1992c）。在油气勘探领域，为了在概率意义上对一些数值进行评估而发展了一套相应的基本理论知识和详细的数学观点（Warren, 1981, 1983a, b, 1988），并且在这个领域及其他领域内广泛应用。读者如想详细了解这方面的知识，需要参阅以前的参考书（参看本章末附录 A）。使用累积概率可以估计不超过某一可考虑数值的特定数量级的概率。

举例来说，把表 1.1 中所列现存油田的常规资源的数据（美国大陆 48 个州）（把由 NRA（USGS/MMS）提供的零值除掉）按从小到大的顺序进行排序，我们得到  $108 \times 10^{12}$

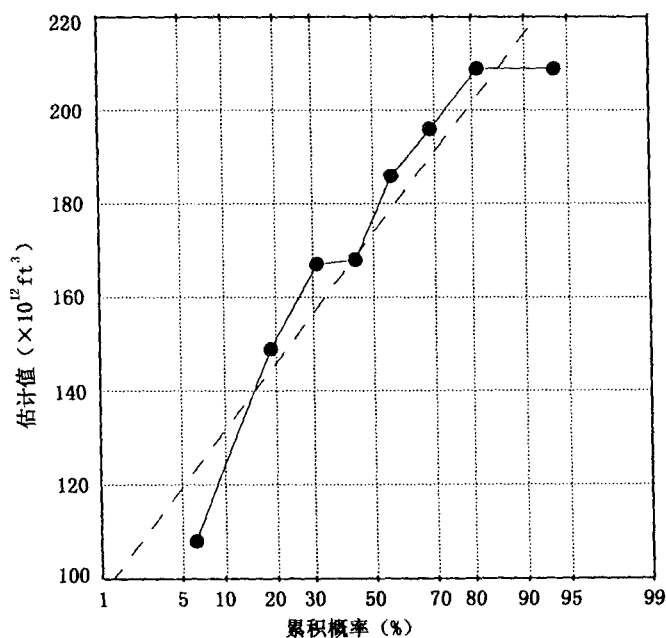


图 1.3 表 1.1 中的 1a 类别的累积概率曲线和对数正态概率拟合曲线

$\text{ft}^3$ 、 $149 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 、 $167 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 、 $168 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 、 $186 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 、 $196 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 、 $209 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ， $209 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  共 8 个值。仅以表 1.1 中的数据为基础，这些值与对应的累积概率可标于如图 1.3 所示的对数概率坐标纸上，从而得出累积概率直方图。

把代表对数正态概率分布的最佳拟合直线叠加在图 1.3 上，可以看出，除了累积概率图的两个端点部分外，其余穿过直方图的部分与对数正态分布是十分吻合的。以前，人们在勘探与经济评价的其他方面经常注意到这种经验情况（Warren, 1983a），这就是为什么对数正态概率方法（以累积概率为基础）经常用来表征不确定性，本书仍将使用这种方法。

关于对数正态累积概率分布的重要意义有：① $x$  的期望值  $E(x)$  的累积概率近似为 68% [即一个实际值不大于  $E(x)$  的机会为 2/3]；②累积概率为 10% 和 90% 处的值是稳定的，在这个范围内的值与对数正态分布吻合很好，以至于可以用对数正态分布来确定其累积概率直方图的值 (Feller, 1957)。因此，累积概率为 10% 和 90% 的点可以用来测量一个数值  $x$  的估计值的“发散性”。例如，在图 1.3 中，68% [ $P(68)$ ] 的累积概率值为  $200 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ，10% [ $P(10)$ ] 的累积概率值为  $137 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ，90% [ $P(90)$ ] 的累积概率值为  $215 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。因此，一个值小于  $200 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  的几率为 2/3，小于  $215 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  的几率为 90%，大于  $137 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  的几率为 90%。估计值的范围经常写成  $(200 \pm \frac{25}{63}) \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。发散性  $\nu$  可以表示为 (Warren, 1978)。 $\nu = [P(90) - P(10)] / P(68)$ ，其提供了对  $P(68)$  的值的的不确定程度的估计。就图 1.3 中的情况而言，有  $\nu = (215 - 137) / 200 = 78/200 \equiv 39\%$ ，小于  $200 \times 10^{12} \text{ ft}^3$  的几率为 2/3，这一结论有 39% 的发散性。

这种发散性不仅仅只对一类潜在天然气储量类有用，因为：如果  $\nu$  值与 1 相比较小，那么这种估计值是相当准确的，这是因为  $P(90)$  与  $P(10)$  的值更加接近 [其两值中间包括  $P(68)$  的值]，因而在  $P(68)$  的局部误差就小。如果  $\nu$  值与 1 相比较大，则  $P(68)$  的估计值的局部误差就大，那么估计值就不如低发散性的估计值那么可靠。为了使  $\nu$  可以测量一个期望值  $E$  的可靠性，使用了不同的权因子设计 (设计中含有  $\nu$ )；最简单的权重方案就是反权重  $E/\nu$ ，而某些则考虑到了发散性与 1 相比较小的简单的权重方案，则包括  $E \exp(-\nu)$ 、 $E(1 + \nu^2)^{-1/2}$  等。这里为了说明的方便，我们对表 1.2 的数据使用  $E/\nu$  权重，尽管应该用其他的加权方法得到与所选的每个加权方法相关的每个加权估计的稳定性信息。

表 1.2 表 1.1 中 1a、1b、2a、2b、3a、3b 和 3c 各类的概率值及发散性测量值

| 类 别 | $P(10)$ 处的值<br>( $\times 10^{12} \text{ ft}^3$ ) | $P(68)$ 处的值<br>( $\times 10^{12} \text{ ft}^3$ ) | $P(90)$ 处的值<br>( $\times 10^{12} \text{ ft}^3$ ) | 发散性 (%) |
|-----|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|
| 1a  | 137                                              | 200                                              | 215                                              | 39      |
| 1b  | 270                                              | 500                                              | 650                                              | 76      |
| 2a  | 26                                               | 32                                               | 55                                               | 90      |
| 2b  | 70                                               | 80                                               | 125                                              | 70      |
| 3a  | 150                                              | 280                                              | 400                                              | 89      |
| 3b  | 47                                               | 80                                               | 118                                              | 87      |
| 3c  | 13                                               | 57                                               | 110                                              | 160     |

对一系列分类数据，可以进行两种简单的计算。假如有  $N$  个类别的数据，期望值为  $E(x_i)$ ，对应于  $P(68)$ ，并且每类的发散性为  $\nu_i$ 。则每个类别的潜在储量的风险加权测量为：

$$R_i = (E(x_i) / \nu_i) \quad (1.15)$$

则总的加权估计为：

$$R = \sum_{i=1}^N R_i \quad (1.16)$$

其衡量每种类型根据自己的相对发散性对总量的贡献。

第二种简单的计算是风险加权的相对重要性，用  $RI(i)$  表示， $RI(i)$  表示第  $i$  类相对其他类所占的百分比，有：