

# 油气藏工程论文集

(2013—2018)

陈元千 著

**Article Collection of  
Petroleum Reservoir  
Engineering**

石油工业出版社

目录

前言  
第一篇 油气藏工程基础  
第二篇 油气藏工程应用

# 油气藏工程论文集

(2013—2018)

陈元千 著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书分为3部分,共42篇论文。第一部分:质疑、评价与建议;第二部分:油气资源量、可采储量和产量的评价方法;第三部分:水平井产量、等温吸附方法及其他。本书是陈元千教授步入80岁高龄,于2013年至2018年间撰写发表的论文,每篇都有原理叙述、方法推导和应用实例。

本书可以作为科研单位、教学单位和生产单位油气藏工程师的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

油气藏工程论文集:2013—2018 / 陈元千著. —  
北京:石油工业出版社,2019.1  
ISBN 978-7-5183-3034-8

I. ①油… II. ①陈… III. ①油气藏-文集  
IV. ①P618.13-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第268279号

---

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](http://www.petropub.com)

编辑部:(010) 64523541 图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:23.25

字数:570千字

---

定价:98.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

本书是我步入 80 岁高龄后，于 2013 年至 2018 年间撰写发表的论文，也是我有生之年为广大读者奉献的第 7 本论文集。本论文集分 3 个部分，共 42 篇论文。第一部分：质疑、评价与建议，共有论文 9 篇，重点内容有：评加拿大籍华人李沛然所著《油气资源评价的统计法》存在的问题；评中国的石油、天然气、页岩气资源量与可采储量的国家行业标准存在的问题；评重油开采 Butler 的 SAGD 产量公式和相似准数公式的错误；第二部分：油气资源量、可采储量和产量的评价方法，共有论文 21 篇，其中的多篇文章是最新的研究成果，重点的内容有：Pareto（帕雷托）分布模型新解的应用；广义递减模型的建立及应用；线性递减类型的建立和 Arps 递减微分方程的推导；多峰预测模型的建立，模型分类和典型曲线的拟合；页岩气地质储量、可采储量和井控可采储量的评价方法；重质油藏开采 GASD 产量公式的推导，以及蒸汽驱经济可采储量和经济极限汽油比的评价方法等。第三部分：水平井产量、等温吸附方法及其他，共有论文 12 篇，其中的各向异性断块油藏水平井产能公式的推导、水平油井和水平气井的 IPR 方程，以及等温吸附方程、解吸方程的推导和等温吸附量的计算方法等内容，都值得大家予以关注。

回想起我的这一生，多数是在读书学习、科研探索和撰写论文中度过的，也可以说是在拼搏忘我中度过的。不敢偷懒，不敢懈怠，把时间紧紧地抓在自己手里，发挥它的较大作用。在别人看来，我是一个“不食人间烟火”的书呆子，也是一个不会做事、不懂人际关系、随和而不盲从的人。家人对我也是无微不至的关心、无限的劝告、无止的埋怨和无奈的理解。对我来说，真是上山不易下山更难。人的一生是短暂的，不可逆转的，应当活到老学到老，生命不息，奋斗不止，为祖国人民做点力所能及的事情才好。

本书中的多篇文章，在打印、计算、绘图、翻译、校对和邮箱投稿等方面，得到了许多青年朋友的热心帮助，并以并列署名的方式表示对他们的诚挚感谢，祝愿他们开拓进取、不忘初心、承担事业的历史责任。同时，我还要感谢充满热情、为人谦和的王瑞责任编辑。她对工作的负责任态度，使本书得以顺利出版与广大读者见面。最后，我想以近日写的五首不成诗意的感受，作为本书前言的结语吧！

一生科研画句号，忘我拼搏情难消，八十五岁闪到来，成败得失任评道。

一生科研画句号，享受沉静苦中熬，诚然激情依旧在，怎奈黄昏夕阳照。

一生科研画句号，年事已高病来找，眼疾之痛堪忧患，焦虑强迫病困扰。

一生科研画句号，追求事业不酬劳，无怨无悔终一生，愧对家人心知道。

一生科研画句号，难舍难离情义高，夜深人身孤灯闪，问君为何不服老。

陈元千

2018 年 5 月 20 日

北京

# 目 录

一、质疑、评价与建议 .....	1
1-1 评 Lee 的油气资源量发现过程模型及预测模型的建立 .....	3
1-2 中国新版《天然气可采储量计算方法》标准存在的主要问题及建议 .....	12
1-3 中国《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》计算方法存在的问题与建议 .....	24
1-4 中国新版《石油可采储量计算方法》标准中存在的主要问题与建议 .....	31
1-5 对 Butler 双水平井 SAGD 产量公式的质疑 .....	41
1-6 Butler 的 SAGD 产量计算公式错在哪里 .....	48
1-7 对 Butler SAGD 无因次相似准数计算公式的质疑及新公式的建立 .....	57
1-8 对“一种广义水驱特征曲线”的质疑、对比与评论 .....	64
1-9 对张金庆水驱曲线的质疑、对比与评论 .....	69
二、油气资源量、可采储量和产量的评价方法 .....	75
2-1 修正的 Pareto 分布模型在油气资源评价中应用的新方法—— 兼评三种 Pareto 分布模型的不正确性 .....	77
2-2 油气资源量评估方法的对比与评论 .....	90
2-3 广义递减模型的建立及应用 .....	102
2-4 油气田剩余可采储量、剩余可采储采比和剩余可采程度的年度评价方法 .....	109
2-5 注水开发油田加密调整效果的评价方法 .....	119
2-6 产量递减阶段开发指标的预测方法 .....	127
2-7 线性递减类型的建立、对比及应用 .....	132
2-8 Arps 递减微分方程的推导及应用 .....	141
2-9 多峰预测模型的建立与应用 .....	145
2-10 HCZ 模型在多峰预测中的应用 .....	153
2-11 预测油田产量和可采储量模型的典型曲线及其应用 .....	163
2-12 累积增长预测模型的典型曲线及其应用 .....	171
2-13 威布尔模型的典型曲线及应用 .....	179
2-14 利用典型曲线拟合的递减常数预测油气藏的可采储量 .....	184
2-15 页岩气藏地质资源量、可采资源量和井控可采储量的确定方法 .....	193
2-16 评价井控页岩气可动地质储量和可采储量的方法 .....	202
2-17 利用 SAGD 开采技术预测重质油藏可采储量新方法 .....	213
2-18 重质油藏注蒸汽开采预测经济可采储量和经济极限汽油比的 方法——兼评国家行业标准的预测方法 .....	221
2-19 双水平井注蒸汽开采重质油藏 GASD 产量计算公式的推导与对比 .....	231
2-20 广义童氏图版的建立与应用 .....	239
2-21 预测水驱体积波及系数方法的推导、对比与应用——兼评胡罡的“新方法” .....	248

<b>三、水平井产量、等温吸附方程、等温吸附量计算及其他</b> .....	259
3-1 水平井产量公式的对比研究 .....	261
3-2 各向异性断块油藏水平井产能公式的推导 .....	269
3-3 水平油井 IPR 方程的建立与对比 .....	278
3-4 水平气井二项式方程的推导与应用 .....	284
3-5 水平油井无因次 IPR 方程在 JUNIN 油田 4 区的应用 .....	294
3-6 等温吸附方程和解吸方程的推导及应用 .....	300
3-7 等温吸附方程常数的物理含义及无因次吸附方程 .....	310
3-8 等温吸附量计算方法的推导及应用 .....	320
3-9 称重吸附仪计算等温吸附量方法的推导及应用 .....	331
3-10 对 Aronofsky 渗吸驱油机理经验模型的推导 .....	340
3-11 三种岩石压缩系数关系的推导与对比 .....	345
3-12 关于确定兰氏体积和兰氏压力方法 .....	348
<b>附录</b> .....	355

# 1-1 评 Lee 的油气资源量发现过程模型及预测模型的建立

图 1-1 Lee 的专著《Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources》第 4 章和第 7 章的定理可被理解为针对油气资源量的重要统计基础。Lee 利用对数正态 (Lognormal) 分布、威布尔 (Weibull) 分布、伽马 (Gamma) 分布、逻辑斯谛 (Logistic) 分布和帕累托 (Pareto) 分布时概率密度函数来描述一个含油气盆地地质资源量发现过程。图 1-1 引用的多价概率密度函数, 除对数正态分布函数外, 还有下列

## 一、质疑、评价与建议

### resources and establishment of prediction model

**Abstract** The discovery process model in Chapters 4 and 7 of Lee's *Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources* is the important statistical foundation to evaluate oil and gas resource. Lee uses probability density function of Lognormal distribution, Weibull distribution, Gamma distribution, Logistic distribution and Pareto distribution to describe the discovery process of mineral cyclic resources on a petroleum basin. But, it is found also except for Lognormal distribution, other 4 distributions are all wrong, which will inevitably influence the accuracy of the book. Additionally, direct use transformation must be performed to establish a reliable prediction model because the probability density function is a dimensionless quantity of  $0 \sim 1$ . The Lee never mentions the dimension transformation of the probability density function in his manuscript. Based on comparison, the authors point out the mistakes in probability density functions introduced by Lee, and establishes a prediction model to evaluate petroleum resources through dimension transformation and derivation.

**Keywords** petroleum resource; discovery process model; prediction model; probability density function



# 1-1 评 Lee 的油气资源量发现过程模型及预测模型的建立

**摘要** Lee 的专著《Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources》第 4 章和第 7 章的发现过程模型是评价油气资源量的重要理论基础。Lee 利用对数正态 (Lognormal) 分布、威布尔 (Weibull) 分布、伽马 (Gamma) 分布、逻辑斯谛 (Logistic) 分布和帕雷托 (Pareto) 分布的概率密度函数来描述一个含油气盆地单峰周期资源量的发现过程, 但 Lee 引用的 5 种概率密度函数, 除对数正态分布正确外, 其余 4 种都是错误的, 因而, 必然影响到发现过程模型的正确性。此外, 由于概率密度函数是 0~1 的无量纲量, 必须进行量纲的变换, 才能建立可靠的预测模型, 但 Lee 在专著中没有提到关于概率密度函数的量纲变换。本文以对比的方式, 指出了 Lee 引用的概率密度分布函数存在的错误, 并经过量纲变换和推导, 建立了评价油气资源量的预测模型。

**关键词** 油气资源量; 发现过程模型; 预测模型; 概率密度函数

## Review of Lee's discovery process model for petroleum resources and establishment of prediction model

**Abstract** The discovery process model in Chapters 4 and 7 of Lee's Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources is the important theoretical foundation to evaluate oil and gas resources. Lee uses probability density functions of Lognormal distribution, Weibull distribution, Gamma distribution, Logistic distribution and Pareto distribution to describe the discovery process of unimodal cyclic resources in a petroliferous basin. But, it is found that except for Lognormal distribution, other 4 distributions are all wrong, which will inevitably influence the accuracy of the model. Additionally, dimension transformation must be performed to establish a reliable prediction model because the probability density function is a dimensionless quantity of 0~1. But Lee never mentions the dimension transformation of the probability density functions in his monograph. Based on comparison, the authors point out the mistakes of probability density functions introduced by Lee, and establishes a prediction model to evaluate petroleum resources through dimension transformation and derivation.

**Keywords** petroleum resource; discovery process model; prediction model; probability density function

Lee P. J. (李沛然, 1934—1999)是一位加拿大籍华裔地球化学家。1979—1996年在加拿大地质调查局沉积与石油地质研究所工作,从事含油气盆地与区带的资源评价研究,1996年转入中国台湾成功大学任教,1999年11月离世。在他生前留下了大量的科研和教学方面的文稿,经朋友、同事们的整理和编辑,于2008年出版了专著《Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources》<sup>[1]</sup>,后经李小地教授等人翻译,于2011年出版了中文版专著《油气资源评价的统计方法》<sup>[2]</sup>。专著中的发现过程模型是Kaudman教授于20世纪70—80年代在研究含油气盆地或区带的资源量发现过程时首先提出来的。Lee在专著的第4章和第7章中引用的概率密度函数,是油气田发现过程模型的理论基础。但令人遗憾的是, Lee引用的5种概率密度函数,除对数正态分布正确外,其余4种均是错误的。此外,概率密度函数是0~1的无因次量,必须进行量纲的变换才可用于建立有效的预测模型。Lee在其专著中却忽略了这一重要的技术要求。本文指出了Lee的发现过程模型所引用的概率密度函数存在的错误,并经过量纲变换和推导,建立了预测1个含油气盆地或区带资源量的不同模型。

## 1 对 Lee 发现过程模型基础的质疑

Lee的发现过程模型,就是在专著第4章和第7章中引用的对数正态(Lognormal)分布、威布尔(Weibull)分布、伽马(Gamma)分布、逻辑斯谛(Logistic)分布和帕雷托(Pareto)分布的概率密度函数。应当指出的是,这些概率密度函数,除对数正态分布的正确外,其余4种都是错误的。

(1) Lee引用的对数正态分布概率密度函数<sup>[1,2]</sup>为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \alpha)^2}{2\beta^2}\right] \quad (1)$$

在这里, Lee引用的对数正态分布概率密度函数式(1)是正确的。应当指出,正态分布的特点在于,当变量趋近于无穷大时,单峰随机变量的乘积是正态分布,2个或2个以上分布的乘积也是正态分布。因此,对数正态分布适用于多参数相乘计算地质储量的容积法。

(2) Lee引用的威布尔分布的概率密度函数<sup>[1,2]</sup>为:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{1-\alpha} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

应当指出, Lee引用的式(2)是不正确的,正确的表达式<sup>[3-5]</sup>为:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{1-\alpha} \exp\left(-\frac{x^\alpha}{\beta}\right) \quad (3)$$

(3) Lee引用的伽马(Gamma)分布的概率密度函数<sup>[1,2]</sup>为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad (4)$$

应当指出, Lee引用的式(4)是不正确的,正确的表达式<sup>[5,6]</sup>为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-\beta x) \quad (5)$$

(4) Lee在专著的第7章<sup>[1,2]</sup>中以回归法命名的逻辑斯谛分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-bx}} \quad (6)$$

应当指出, Lee引用的式(6)是不正确的,正确的表达式<sup>[7,8]</sup>应为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + ae^{-bx}} \quad (7)$$

(5) 在文献[1]和文献[2]中, Lee 直接给出的所谓帕雷托分布概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\theta x_L^{-(\theta-1)}}{a_L^{-\theta} - b_L^{-\theta}} \quad (8)$$

应当指出, 帕雷托分布是一个有因次量的确定性分布, 完全不同于上述 4 种无因次量的概率分布。帕雷托采用一个负指数幂函数表示按储量规模排序的油气资源评价方法, 详见本文的第 3 部分。

## 2 资源量预测模型的建立及求解方法

上述 5 种概率密度函数的概率  $f(x)$  是 0~1 的无因次量。而年度发现的资源量为有因次量。因此, 必须进行量纲的变换, 才能建立可靠的预测模型。若设一个含油气盆地  $t$  年度的油气发现量为  $N(t)$ , 预期最终可能发现的总资源量为  $N_T$ , 那么,  $t$  年度发现资源量的概率为:

$$f(t) = \frac{N(t)}{N_T} \quad (9)$$

### 2.1 对数正态分布的预测模型

将式(1)代入式(9), 得对数正态分布的预测模型<sup>[9]</sup>为:

$$Q(t) = at^{-1} \exp\left[-\frac{(\ln t - b)^2}{c}\right] \quad (10)$$

其中:

$$a = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi\beta}} \quad (11)$$

$$b = \alpha \quad (12)$$

$$c = 2\beta^2 \quad (13)$$

为了利用线性迭代试差法, 确定模型常数  $a$ 、 $b$  和  $c$  的数值, 以及由式(12)和式(13)确定分布参数  $\alpha$  和  $\beta$  的数值, 将式(10)取常用对数:

$$\log t Q(t) = A - B(\log t - b)^2 \quad (14)$$

其中:

$$A = \log a \text{ 或 } a = 10^A \quad (15)$$

$$B = 1/c \text{ 或 } c = 1/B \quad (16)$$

根据不同  $t$  时间的实际发现资源量  $Q(t)$ , 给定不同的  $b$  值, 由式(14)进行线性迭代试差, 并以最佳直线关系的回归求得  $A$  和  $B$  的数值后, 再由式(15)和式(16)分别求得  $\alpha$  和  $\beta$  的数值, 最后由式(13)代入式(11), 可得确定总资源量的关系式:

$$N_T = a \sqrt{\pi c} \quad (17)$$

### 2.2 威布尔分布的预测模型

由式(3)代入式(9), 得威布尔分布的预测模型<sup>[10]</sup>为:

$$Q(t) = at^b \exp\left(-\frac{t^{b+1}}{c}\right) \quad (18)$$

其中:

$$a = \alpha N_T / \beta^\alpha \quad (19)$$

$$b = 1 - \alpha \quad (20)$$

$$c = \beta \quad (21)$$

为了进行线性迭代试差法求解, 将式(18)改写并取常用对数得:

$$\log \frac{Q(t)}{t^b} = A - Bt^{b+1} \quad (22)$$

其中:  $A = \log a$  或  $a = 10^A$  (23)

$$B = 1/c \text{ 或 } c = 1/B \quad (24)$$

给定不同的  $b$  值, 由式(22)的线性迭代试差法, 求得最佳直线的  $A$  和  $B$  的数值后, 再由式(23)和式(24)分别求得  $a$  和  $c$  的数值。然后, 确定总资源量:

$$N_T = \frac{ac}{1-b} \quad (25)$$

### 2.3 伽马分布的预测模型

由式(5)代入式(9), 得伽马分布的预测模型<sup>[11]</sup>为:

$$Q(t) = at^b \exp\left(-\frac{t}{c}\right) \quad (26)$$

其中:  $a = \frac{N_T}{c^{b+1} \Gamma(b+1)}$  (27)

$$b = \alpha - 1 \quad (28)$$

$$c = \beta \quad (29)$$

为了进行线性迭代试差, 将式(26)改写后再取常用对数为:

$$\log \frac{Q(t)}{t^b} = A - Bt \quad (30)$$

其中:  $A = \log a$  或  $a = 10^A$  (31)

$$B = c \quad (32)$$

给不同的  $b$  值, 由式(30)线性迭代试差法, 求得最佳直线关系后, 经线性回归求得  $A$  和  $B$  的数值, 进而由式(31)和式(32)确定  $a$  和  $c$  的数值, 然后确定总资源量:

$$N_T = ac^{b+1} \Gamma(b+1) \quad (33)$$

### 2.4 逻辑斯谛分布的预测模型

由式(7)代入式(9), 得逻辑斯谛分布的预测模型<sup>[7]</sup>为:

$$N(t) = \frac{N_T}{1 + ae^{-bt}} \quad (34)$$

由式(34)对时间  $t$  求导数得:

$$Q(t) = \frac{abN_T e^{-bt}}{(1 + ae^{-bt})^2} \quad (35)$$

由式(35)除以式(34)得:

$$\frac{Q(t)}{N_T(t)} = \frac{abe^{-bt}}{1 + ae^{-bt}} = \frac{abN(t)e^{-bt}}{N_T} \quad (36)$$

将式(36)等号右端的分子, 同时加和减一项  $bN(t)$  得, 式(36)改写为:

$$\frac{Q(t)}{N_T(t)} = A - BN_T(t) \quad (37)$$

其中:  $A = b$  (38)

$$B = b/N_T \quad (39)$$

根据由式(37)线性回归求得直线的截距  $A$  和斜率  $B$  的数值后, 将式(38)代入式(39),

得总资源量为:

$$N_T = A/B \quad (40)$$

### 3 帕雷托(Pareto)分布的性质及预测模型的建立

帕雷托分布是一个由已发现油气田储量的规模排序, 预测含油气盆地或区带的总资源量和未发现资源量的方法。对于一个含油气盆地或区带, 按油气田储量规模, 由大到小排序, 相应的油气田按  $x = 1, 2, 3 \cdots m \cdots n \cdots$  的正整数由小到大编号。因此, 帕雷托分布是一个连续性分布的函数。由文献[12]和文献[13]可看出, 帕雷托 1897 年提出的分布是一个有因次量的确定性分布, 并采用了如下的负指数幂函数表示:

$$x = aN(x)^{-b} \quad (41)$$

应当说明, 美国地质调查局(USGS)的研究单位曾用式(41)对美国各州含油气盆地的资源量进行评价<sup>[14-16]</sup>。然而, 由式(41)看出, 将油气田按储量大小的编号作为函数的纵轴, 在实际应用时很不方便。因此, 文献[12]设  $A = a^{1/b}$  和  $B = 1/b$ , 将式(41)改为:

$$N(x) = Ax^{-B} \quad (42)$$

在储量规模排序中, 任取  $m$  和  $n$  两个序点, 由式(42)可写出:

$$N(m) = Am^{-B} \quad (43)$$

$$N(n) = An^{-B} \quad (44)$$

由式(43)除以式(44)得:

$$\frac{N(m)}{N(n)} = \left(\frac{m}{n}\right)^{-B} = \left(\frac{n}{m}\right)^B \quad (45)$$

将式(45)取常用对数得:

$$\frac{\log N(m) - \log N(n)}{\log n - \log m} = B \quad (46)$$

中国许多油气资源评价工作者, 将式(45)和式(46)误称为帕雷托定律, 这是一个误解, 而在 Lee 的专著中将式(45)称为齐波夫定律<sup>[1,2]</sup>也是不正确的。

当储量编号  $x = 1$  时, 由式(42)可得油气田储量最大值为:

$$N(1) = A \quad (47)$$

将式(47)代入式(42), 即得中国第 3 轮全国油气资源量评价时广泛应用的公式:

$$N(x) = N(1)x^{-B} \quad (48)$$

应当指出, 这种把  $N(1)$  作为资源量预测的基础是不可靠的。由式(42)可看出, 当  $i = 0$  时,  $N(0) = \infty$  (无穷)是不正确的。因为, 作为一个连续性幂函数关系, 当  $x = 0$  时,  $N(0)$  不应当等于  $\infty$ , 而应当是一个实数, 即模型常数  $A$ 。

将式(42)等号两端取常用对数得:

$$\log N(x) = \alpha - \beta \log x \quad (49)$$

其中:

$$\alpha = \log A \text{ 或 } A = 10^\alpha \quad (50)$$

$$\beta = B \quad (51)$$

由式(49)可以看出,  $\log N(x)$  与  $\log x$  之间应为直线下降关系。然而, 在双对数坐标纸上的实际数据点却是一条明显的曲线。为了使用帕雷托分布, 建立预测盆地或区带油气资源量的模型, 文献[12]对式(42)进行了如下的修正:

$$N(x) = A(x+1)^{-B} \quad (52)$$

由式(52)看出,当  $x=0$  时,  $N(0)=A$ , 这就符合了连续性负指数幂函数的要求。根据已发现油气田储量规模的排序,为了确定模型常数  $A$  和  $B$  的数值,将式(52)等号两端取常用对数得:

$$\log N(x) = \lambda - \omega \log(x+1) \quad (53)$$

其中:  $\lambda = \log A$  或  $A = 10^\lambda$  (54)

$$\omega = B \quad (55)$$

由式(53)看出,  $\log N(x)$  与  $\log(x+1)$  之间为直线关系。根据实际数据,利用式(53)的线性回归求得  $\lambda$  和  $\omega$  的数值后,再由式(54)和式(55)分别确定  $A$  和  $B$  的数值。一个含油气盆地或区带的的总资源量(总地质储量)确定为:

$$N_T = \int_0^{x_{EL}} N(x) dx \quad (56)$$

将式(52)代入式(56)经积分后得,预测含油气盆地或区带的总资源量的关系式为:

$$N_T = \frac{A[(x_{EL}+1)^{1-B} - 1]}{1-B} \quad (57)$$

由式(57)看出,预测一个含油气盆地或区带的总资源量,除与  $A$  和  $B$  的数值有关外,还与经济极限储量的编号  $x_{EL}$  的数值有关。当由经济评价确定了经济极限储量  $N_{EL}$  后,可由下式确定与其相应的储量编号:

$$x_{EL} = \left( \frac{A}{N_{EL}} \right)^{1/B} - 1 \quad (58)$$

未(待)发现的油气田资源量(地质储量)确定为:

$$N_{undis} = N_T - N_{dis} \quad (59)$$

采用文献[12]的实例,我国金湖凹陷的  $A=1327$ ,  $B=0.9266$  和  $x_{EL}=175$ , 将其代入式(57)可得金湖凹陷的总资源量(总地质储量)为:

$$N_T = \frac{1327[(175+1)^{1-0.9266} - 1]}{1-0.9266} = 8348 \times 10^4 t$$

金湖凹陷已累计探明的地质储量为  $6764 \times 10^4 t$ , 因此,未发现的地质储量约为  $1584 \times 10^4 t$ 。

## 4 结语

Lee P J(李沛然)于2008年出版的《Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources》专著,在北美和我国受到业内人士的高度重视。在专著的第4章和第7章中, Lee 提出的发现过程模型可以说是专著的核心部分。然而,作为发现过程模型理论基础的概率密度函数,除对数正态分布正确外,其余的威布尔分布、伽马分布、逻辑斯谛分布和帕雷托分布都是错误的。因此,如果应用这些错误的概率密度函数,作为发现过程模型的理论基础,进行油气资源量的评价,肯定得不到正确的结果。当然,即使这些概率密度函数都是正确的,如果不进行量纲的变换,也建立不了可靠的预测模型。本文以对比的方式指出了在 Lee 的发现过程模型中,所引用的威布尔分布、伽马分布、逻辑斯谛分布和帕雷托分布的错误,并经过量纲变换和推导,建立了预测年度发现资源量和总资源量的不同实用模型。同时,本文对于在中国第3轮全国油气资源评价中,广泛应用的储量规模排序法(即帕雷托分布)存在的问题,以及笔者进行的修正原因作出了说明。最后,应当指出,在文献[17]和文献[18]中提出的多峰预测模型,以及在文献[19]、文献[20]和文献[21]中提出的典型曲线拟合求解法,都可以用于油气资源量的预测。最后,应当强调指出,文献[22]提出的应用于油气资源量评

价的 SP(Shifted Pareto)分布、STP(Shifted Truncated Pareto)分布、LDP(Lognormal Developed Process)分布,以及由文献[23]提出的广义帕雷托分布,均因未见严格推导,而存在相当大的不确定性和不可靠性,值得大家关注,有待进一步探讨。

## 5 符号及单位注释

$A, B$ ——不同概率密度函数的直线截距和斜率;

$a, b, c$ ——不同概率密度函数的模型常数;

$a_L$ ——Lee 引用的帕雷托分布的储量上限,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$b_L$ ——Lee 引用的帕雷托分布的储量下限,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$f(x)$ —— $x$  变量的概率;

$f(t)$ —— $t$  时间发现资源量的概率;

$N_{\text{dis}}$ ——已发现的资源量(或地质储量),  $10^4 \text{m}^3$ ;

$N_{\text{undis}}$ ——未发现的资源量(或地质储量),  $10^4 \text{m}^3$ ;

$N_T$ ——总资源量(或总地质储量),  $10^4 \text{m}^3$ ;

$N(x)$ ——编号为  $x$  油气田的地质储量,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$N(m)$ ——编号为  $m$  油气田的地质储量,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$N(n)$ ——编号为  $n$  油气田的地质储量,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$N(t)$ —— $t$  年度发现的资源量(或地质储量),  $10^4 \text{m}^3/\text{a}$ ;

$N(1)$ ——在一个含油气区带内  $x=1$  油气田的最大地质储量,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$Q(t)$ —— $t$  年度发现的资源量(或地质储量),  $10^4 \text{m}^3/\text{a}$ ;

$t$ ——时间变量, a;

$x$ ——概率分布变量;

$x_{\text{EL}}$ ——帕雷托分布的经济极限储量编号;

$x_L$ ——Lee 引用的帕雷托分布的储量规模,  $10^4 \text{m}^3$ ;

$\Gamma(\alpha)$ ——伽马函数值;

$\Gamma(b+1)$ —— $b+1$  的伽马函数值;

$\alpha, \beta$ ——控制不同分布形态的分布参数;

$\theta$ ——帕雷托分布的形状因子(shape factor);

$\lambda, \omega$ ——帕雷托分布的直线截距和斜率。

## 参 考 文 献

- [1] LEE P J. Statistical methods for estimating petroleum resources [M]. New York: Oxford University Press, 2008: 61-63, 171-172.
- [2] LEE P J. 油气资源评价的统计方法 [M]. 李小地, 赵喆, 梁英波, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011: 42-43, 131-132.  
LEE P J. Statistical methods for estimating petroleum resources [M]. Translated by LI Xiaodi, ZHAO Zhe, LIANG Yingbo. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 42-43; 131-132.
- [3] PEARSON C E. Handbook of applied mathematics (2nd edition) [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1983: 1225-1229.
- [4] BRONSHTEIN I N, SEMENDYAYEV K A. Handbook of mathematics [M]. New York: Van Nostrand Rein-

- hold Company, 1985: 1225 - 1229.
- [5] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979: 794 - 797.  
“Handbook of mathematics” writing group. Handbook of mathematics[M]. Beijing: People's Education Press, 1979: 794 - 797.
- [6] 贺才兴. 大学数学手册(第二版)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006: 405 - 408.  
HE Caixing. Handbook of college mathematics (2nd edition)[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2006: 405 - 408.
- [7] 陈元千, 胡建国, 张栋杰. Logistic 模型的推导及自回归方法[J]. 新疆石油地质, 1996, 17(2): 150 - 155.  
CHEN Yuanqian, HU Jianguo, ZHANG Dongjie. Derivation of logistic model and its self regression method [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1996, 17(2): 150 - 155.
- [8] AL-JARRI A S, STARTZMAN R A. Worldwide petroleum-liquid supply and demand[J]. Journal of Petroleum Technology, 1997, 49(12): 1329 - 1338.
- [9] 陈元千, 袁自学. 预测油气田产量和可采储量的新模型[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 84 - 88.  
CHEN Yuanqian, YUAN Zixue. A new model for predicting production and reserves of oil and gas fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 84 - 88.
- [10] 陈元千, 胡建国. 预测油气田产量和储量的 Weibull 模型[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(3): 250 - 255.  
CHEN Yuanqian, HU Jianguo. Weibull model for predicting output and reserve in an oil and gas field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(3): 250 - 255.
- [11] 陈元千, 胡建国. 对翁氏模型建立的回顾及新的推导[J]. 中国海上油气, 1996, 10(5): 317 - 324.  
CHEN Yuanqian, HU Jianguo. Review and derivation of Weng model [J]. China Offshore Oil and Gas, 1996, 10(5): 317 - 324.
- [12] 陈元千. 预测油气资源 Pareto 模型的建立、修正与应用——兼评我国现行的油田储量规模排序法[J]. 中国石油勘探, 2008, 13(4): 43 - 49.  
CHEN Yuanqian. Establishment, modification, and application of Pareto model for forecasting oil and gas resources—review of existing rank order method of accumulation size in oilfields[J]. China Petroleum Exploration, 2008, 13(4): 43 - 49.
- [13] BARTON C C, LA POINTE P R. Fractals in petroleum geology and earth processes[M]. New York: Plenum Press, 1995: 59 - 72.
- [14] MANDELBROT B B. The statistics of natural resources and the law of Pareto[M]//BARTON C C, LA POINTE P R. Fractals in petroleum geology and earth processes. New York: Plenum Press, 1995: 1 - 12.
- [15] ROOT D H, ATTANASI E D. Small field in the national oil and gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(3): 485 - 490.
- [16] BAKER B A, GEHMAN H M, JAMES W R, et al. Geologic field number and size assessments of oil and gas plays[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(4): 426 - 437.
- [17] 陈元千, 郝明强. 多峰预测模型的建立与应用[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3): 296 - 299.  
CHEN Yuanqian, HAO Mingqiang. Establishment and application of the multi - peak forecasting model[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(3): 296 - 299.
- [18] 陈元千, 郝明强. H CZ 模型在多峰预测中的应用[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 747 - 752.  
CHEN Yuanqian, HAO Mingqiang. Application of H CZ model to predict multiple production peaks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 747 - 752.
- [19] 陈元千, 邹存友. 预测油田产量和可采储量模型的典型曲线及其应用[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 749 - 753.  
CHEN Yuanqian, ZOU Cunyou. Model's typical curve and its application for forecasting production and recoverable reserves of fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 749 - 753.

- [20] 陈元千, 邹存友, 于立君. 累积增长预测模型的典型曲线及应用[J]. 中国海上油气, 2014, 26(1): 54-57.  
CHEN Yuanqian, ZOU Cunyou, YU Lijun. A type curve of the cumulative growth forecast models and its application[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(1): 54-57.
- [21] 陈元千, 李剑. 威布尔模型的典型曲线及应用[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 33-39.  
CHEN Yuanqian, LI Jian. Application and type curves of Weibull's model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 33-39.
- [22] 郭秋麟, 闫伟, 高日丽, 等. 3种重要的油气资源评价方法及应用对比[J]. 中国石油勘探, 2014, 10(1): 50-59.  
Guo Qiulin, Yan Wei, Gao Rili, et al. Application and comparison of three petroleum resource assessment methods[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 10(1): 50-59.
- [23] 金之钧. 五种基本油气藏规模概率分布模型比较研究及其意义[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 6-13.  
JIN Zhijun. A comparison study of five basic oil and gas pool size probability distribution models and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3): 6-13.

摘自:《新疆石油地质》, 2016, 37(4): 442-1446