第三次国际石油工程会议
论文集

2

中国 天津
1988·11

第三次国际石油工程会议
论文集

2

一 九 八 八 年 十 一 月

目　录

SPE 17554

油 气 远 景 带 的 评 价

J.E.Warren, Joseph E.Warren Inc.

胡征钦 译

油 工 校

摘 要

一个油气远景带（play）是指在一个连续的层段内具有地质上相同烃源、圈闭和储集层特性的一组远景探区（prospects）或一组潜在的油气田。用一种简单的方法（虽然是主观的方法）可以估算一个未勘探远景带的总经济储量，并且可用对比方法近似求得其净现值价值。

首先，假定这个远景带是存在的，并可根据下述估计对其进行模拟：（1）基本的远景探区规模（大小）的分布，假定等于油气田规模的分布；（2）远景带内远景探区数量的分布，以及每个远景探区均含烃的条件概率，或更简单地说，是远景带内油气田数量的分布；（3）远景探区规模分布的实际截点，即远景带中最小的（经济的）和最大的油气田规模。所有这些估计是以有关该远景带的所有地质、地球化学和地球物理资料的分析以及（或）一个或更多个类似（看来相似的）远景带的资料的分析为基础的。

其次，这些随机变量（油气田规模和数量）是随机组合的，不用蒙特卡洛模拟法就可模拟有关远景带的总经济储量。最后，估算[4]该远景带实际存在的概率，即足够的烃源、圈闭和储集层存在的机会，并近似确定该远景带总的地质风险性经济储量的分布。

为进行经济评价，确定最小（经济的）油气田规模的评价方法已扩展到整个双截尾油气田规模的分布；已采用同样的组合方法来获得远景带总的无风险性净现值价值的分布。通过有效远景带的概率和希望的勘探成本引入风险性。近似确定了远景带总的地质风险性净现值价值。

本文讨论所建议的方法的理论基础和适用于输入信息的某些实际考虑。同时也提供了应用油田实际数据的一个完整实例，并将其结果与应用同样数据的一个独立评价作了比较。

一、引 言

在一个未勘探的地区，勘探的基本目标就是“远景带”，一个远景带由具有同一烃源、地质上类似的圈闭和类似储集层特性的一组远景探区或潜在油气田组成。一般，区域的烃源评价被认为是远景带的总潜力，即远景带中各远景探区储量的总和。一个盆地可能有一个或

更多个远景带，因此，一个盆地的潜力也可用各远景带的潜力总和来表示。

Atwater[1]概述了一种远景带的简单评价方法，该方法只需要用一个假设的成功率和一个平均的油气田规模逐次乘以远景探区数，并用最终可采当量桶表示，来获得一个远景带储量的确定（单点的）估算值。Roy等[2]和Procter[3]等在加拿大地质调查局的赞助下，极大地发展了这一方法。他们认识到这种估算过程所固有的不确定性和风险性，因此采用了油气田数量和规模的范围值，并应用蒙特卡洛模拟法确定远景带总储量的分布。White[4]在加拿大地调局方法基础上建立的模型中结合了边缘概率（marginal probabilities）和条件概率。Baker等[5]阐述了类似的方法，并加以发展，他们强调应用对比的或相似的远景带。Bois[6]对60个远景带的数据进行了群分析（cluster analysis），以确定相似的“石油带”（远景带）。Kingston等[7]根据世界600个盆地的资料提出了一种盆地分类体系，他们应用了成盆的构造运动、沉积层系和改造盆地的构造运动来确定“旋回”（远景带）。Kingston等[8]讨论了8个简单旋回和一个复杂旋回（多期的），并指出，结合沉积区（旋回）构造背景、圈闭类型和总的岩性特征的远景带分类完全能够确定相似的远景带。值得注意的是，Bois(群论)和Kingston（旋回论）均指出有9类主要远景带。

在远景带的评价中，油气田规模的确定方法吸引了人们的注意，因为这种方法在处理自然单元（远景探区和油气田）时，同时采用地质标准和经济标准来划分远景带的等级和进行盆地或租区的评价。理想的是，每一个远景探区都能加以评价和风险分析，然后把各个远景探区的结果加以综合以获得远景带的评价(参见Gehman等[9])。然而，数据和时间往往迫使人们采用更快的近似方法来获得同样的结果。本文将阐述一种概率方法，它与可编程序计算机同时使用。

本文阐述的基本方法严格遵循Baker 等[5]概述的方法，但做了某些重要改进。我们假设一个远景带是存在的，并按油气田数量、规模和价值对其进行模拟，然后判断该远景带实际存在的概率。为了进行近景带的地质模拟，应对下述问题进行评估：（1）基本的远景探区规模的分布或超总体（superpopulation）远景带模型，假设这种分布等于该类远景带中油气田规模的分布；（2）远景带内远景探区数量的分布以及任何远景探区含烃的条件概率（独立的），或者说是远景带内油气田数量的分布；（3）符合该远景带的最小（经济的)和最大地质的）规模的油气田。

在上述评估基础上，并由于假设远景带是存在的，可确定双截尾的油气田规模的分布和油气田数的分布。将油气田规模和数量分布结合起来，可获得总的无风险经济储量的期望值及其方差，利用这些参数，并结合最小油气田规模，就可近似确定所求的分布。为进行经济评价，需估算：（4）在双截尾油气田规模分布中油气田的纯现值分布。如前所述，把这种分布与油气田数量分布相结合，可获得总的无风险性净现值价值的期望值及其方差，并近似确定其分布。最后，估算：（5）有效远景带的概率，即足够的烃源、圈闭和储集层存在的机会。将此估算与以上结果相结合，可获得远景带总的经济储量的风险加权分布，并在考虑勘探成本以后可获得远景带总的净现值的风险加权分布。

关于这个课题的许多文章均停留在确定风险加权的总经济储量上，见参考文献〔5〕。这样的结果有时是不够的，因为通常要根据储量和概率两个目标来进行勘探资源（人员、时间、设备和资金）分配的预测。

二、确定远景带

根据盆地埋藏史和成熟曲线可将盆地划分为具有不同潜力远景带的地区，并圈定具体远景带的地理范围，见图1。

下一步就是对该远景带存在的那个盆地进行分类，确定感兴趣的旋回或远景带。根据Kingston等[7]，一个旋回是由一个构造运动幕期间堆积的沉积岩所组成，它可能受到以后改造盆地的构造运动的影响和（或）附加的沉积旋回的影响。Kingston 等根据构造板块复原，用世界上600个盆地的资料提出了一个详细的盆地分类表，以便从地质史角度研究盆地的成因和发育。他们还举例讨论了旋回/远景带分类的实际意义[8]。

在确定了一个远景带的类别以后，就可利用已勘探盆地的生产旋回（具相似圈闭类型和地层）来建立历史数据库或提出一个类比远景带或相似远景带作为评价之用，见图2。

三、油气田规模的分布

我们假设，在确定远景带以后，把它作为与特定的旋回/远景带类别有关的无限总体或超总体（superpopulation）的一个随机抽样处理。我们还假设：油气储量用当量油桶表示，并且其基本分布呈对数正态，油气田规模和远景探区规模的分布是相同的；即：

$$\text{概率}(<R)=F(Z)=\frac{1}{2}\left[1+\mathrm{erf}(Z)\right] \qquad (1)$$

式中 $Z=\left(\frac{\ln R-\mu}{\sqrt{2}\delta}\right)$

$\mu=m_1(\ln R)$

$\delta^2=m_2(\ln R)-[m_1(\ln R)]^2$

参数μ和δ完全确定远景带所依据的对数正态分布。遗憾的是，由于各种原因，数据正在某一最低水平（R_c）下截取，通常不能获得这些参数值，见图3。然而，根据该远景带本身，历史数据库或相似远景带，可用附录A中提出的方法确定储量的基本分布，见图4。

对一个有效远景带来说，最小的经济油气田规模 R_m，是在特定的自然环境/纳税体制下局部地区开发和开采经济的函数。正如附件B所述的情况，

$$[\mathrm{NPWCF}(R_m)]_k=0 \qquad (2)$$

式中 $[\mathrm{NPWCF}(R_m)]_k$=纳税后的净现值的现金流动，用开采开始时的固定美元表示；

k＝可接受的最低的实际收益率。

估计最大油气田规模R_M，可根据该远景带内最大远景探区的评价，根据历史数据库或相似远景带资料，也可根据储量基本分布R_m和该远景带内预测的经济油气田数量。R_M的讨论见附件C。

双截尾对数正态分布是将R_m和R_M当作截止值的结果，见图5，可用下式表达[11]：

$$m_j'(R)=m_j(R)\left\{\frac{F\left(Z_M-\frac{j\delta}{\sqrt{2}}\right)-F\left(Z_m-\frac{j\delta}{\sqrt{2}}\right)}{F(Z_M)-F(Z_m)}\right\} \qquad (3)$$

式中　$m_j(R)=\exp\left(\mu+\frac{j^2\delta^2}{2}\right)$

图6表示基本分布及其分矩（partial moment）分布之间的关系。

这种改进的油气田规模分布所需要的参数如下：

$$E(R)=m_1'(R) \tag{4}$$

$$\sigma^2(R)=m_2'(R)-[m_1'(R)]^2 \tag{5}$$

四、油气田数量

为了客观地和真实地测定不确定性，有必要估算远景带内远景探区的总数（N_E），而不考虑经济的或勘探的制约条件。如果勘探数据充分而详细，就可直接地估算，如果可利用相似的远景带资料或历史数据库，也可间接地估算。通过评价各个远景探区能确定出经济油气田数的频率函数或频率分布图，是极少能做到的情况，因此必须估算成功概率P_H。P_H是量度远景带内远景探区中独立地质风险的条件概率。正如附录D中所讨论的那样，在任何情况下，有了远景带内远景探区的总数N_E，成功的概率P_H和远景带内任一经济油气田的概率（1-G），就完全能够确定远景带评价所必须包含的那批油气田的参数。一般：

$$E(N)=(1-G)E(N_F) \tag{6}$$

$$\sigma^2(N)=G(1-G)E(N_F)+(1-G)^2\sigma^2(N_F) \tag{7}$$

由于在实践中必须采用（6）和（7）式的标准形式以满足至少存在一个经济油气田的假设，因此需要参看公式（D23）和（D24），或者在特殊极端情况下需要参看（D25）和（D26）。

五、经济评价

附录B中描述的最佳评价方法可扩展用于整个的经济储量范围$R_m \leqslant R \leqslant R_M$，以获得用纳税后固定美元表示的净现值的现金流动，参见图7。采用非参数方法[13]，油气田的价值的分布可用其矩加以表征，参见附录E：

$$E[NPWCF]_k=m_1[NPWCF]_k \tag{8}$$

$$\sigma^2[NPWCF]_k=m_2[NPWCF]_k-\{m_1[NPWCF]_k\}^2 \tag{9}$$

六、组合方法

曾经假设所评价的远景带是双截尾后基本油气田规模分布的一个随机抽样。由于与远景带所含经济油气田数有关的不确定性，此抽样的规模也认为是随机的。因此，远景带的经济储量及其价值，均可作为随机变量的随机和[14,15]处理，即：

$$E(S)=E(n)\cdot E(x) \tag{10}$$

$$\sigma^2(S)=E(n)\cdot\sigma^2(x)+[E(x)]^2\cdot\sigma^2(n) \tag{11}$$

式中　S—随机变量x的n个值的和；

n—抽样的随机规模；

x—哑随机变量。

因此，对于远景带的经济储量来说

$$E(R_p)=E(N)\cdot E(R) \tag{12}$$

$$\sigma^2(R_p)=E(N)\cdot\sigma^2(R)+[E(R)]^2\cdot\sigma^2(N) \tag{13}$$

对于远景带的净现值价值来说

$$E(V_p)=E(N)\cdot E[NPWCF]_k \tag{14}$$

$$\sigma^2(V_p)=E(N)\cdot\sigma^2[NPWCF]_k+\{E[NPWCF]_k\}^2\cdot\sigma^2(N) \tag{15}$$

与所确定的参数一致的R_p和V_p的分布，正如附录F所证明的那样，可近似地用 Erlangm 分布确定，参见图8。

七、风　　险

至此，一直假设远景带是实际存在的，现在必须考虑群地质风险或边缘地质风险，这些风险有可能完全否定假设的有效性。如果掌握足够详细的资料，可主观地估计足够的烃源、圈闭和储集层存在的各概率；如果假设这些概率是独立的，可以合并给出远景带有效性的总的（边缘的）概率：

$$P_P=P_S\cdot P_T\cdot P_R \tag{16}$$

这个关系式并不那么简单。必须加以改变以反映至少存在一个经济油气田的假设。这个问题曾广泛讨论过[2,4,9]。然而，并没有一个简单的解。由于在推导经济油气田数的各矩中需要标准化，为保证至少存在一个经济油气田，有效远景带机会的下限可直观地估算：

$$(P_P)_{最小}=(P_S\cdot P_T\cdot P_R)(1-G)[1-(1-P_H)^{N_E}] \tag{17}$$

当然，获得P_p满意估算的最实际方法是利用为远景带指定的旋回/远景带类的历史数据库；例如Kingston等[8]列举了已商业性生产的具体旋回的概率，它至少有一个油田，其储量在50百万桶以上。根据600个盆地的研究，他们指出4类主要旋回/远景带的 P_p 平均值范围是0.35至0.50（考虑到远景带评价的不可靠性和远景带类型）。

引入远景带风险性P_p，可建立如图 9 所示的决策树。这时，远景带的风险加权经济储量P_p^*可描述如下：

$$E(R_p^*)=P_pE(R_p) \tag{18}$$

$$\sigma^2(R_p^*)=P_p^2\sigma^2(R_p) \tag{19}$$

同样，远景带的风险加权净现值现金流动V_p^*可描述如下：

$$E(V_p^*)=[P_pE(V_p)-PWEx] \tag{20}$$

$$\sigma^2(V_p^*)=P_p^2\sigma^2(V_p)$$

式中　PWEx—现值勘探成本，以纳税后的固定美元表示。

将无风险性分布的纵坐标简单地转变为线性方式，即可获得这些风险加权参量的分布，即：

$$R_p^*=P_pR_p \tag{21}$$

$$V_p^*=P_pV_p-PWEx \tag{22}$$

图 8 表示储量分布的转换坐标。

八、举　　例

Baker等[5]描述了他们所评价的一个海上小型远景带的简化实例，此远景带为三角洲型，预测圈闭类型是与下降盘在盆地一侧的断层有关的滚动背斜圈闭，油田最小经济规模假设为50百万桶油当量。为取得相似远景带作比较，他们选择了墨西哥湾盆地得克萨斯州南部68个油气田（圈闭相同的第三系砂岩油藏），其可采储量从50百万到1150百万桶油当量，平均2亿桶油当量。Baker等根据得克萨斯州南部的情况，用50百万桶和1000百万桶油当量截取了油田规模分布，并假设了在这个新远景带内经济油气田数的不连续三角形频率函数或频率分布图，即E（N）=3.00和σ^2（N）=0.70。然后，他们做了蒙特卡洛模拟，从双截尾的油气田规模分布和R_p分布图选用了5000个抽样，抽样的规模由频率函数确定。按照Kingston 等[8]对这类旋回/远景带的观察，采用 P_p=0.50 以考虑风险性，并绘制了风险加权的分布曲线R_p^*。

我们来评价一个同样的远景带来说明所建议的方法。设得克萨斯州南部的数据如下：

$m'_1=5.0749$

$m'_2=26.3102$

R'_c=50百万桶油当量

$N'_t=68$

利用附录A的方法

$\mu=4.7333$

$\delta=0.9760$

$K=0.2000$

这些结果说明，在截尾以前，远景带有85个油气田，其最大油气田期望值为13亿桶油当量。

现在我们从不支付矿区使用费和也不付税的一个国家石油公司的观点来评价这个远景带。我们假设的经济参数列于表1。附录B所述最佳评价方法提供的评价结果见图10，按图10可确定最小的经济油气田的规模：

R_m=50百万桶油当量

$G=F(Z_m)=0.2000$

用附录C的公式（3），取$\alpha=0.05$和E（N）=3.00，R_M（0.05；3）可计算如下：

R_M（0.05；3）=983百万桶油当量

因此，为与Baker等一致，令

R_M=1000百万桶油当量

根据所固定的基础油气田规模分布的截点，公式（3）将经济油气田规模分布描述如下：

E（R）=200百万桶油当量

σ^2（R）=26900（百万桶油当量）^{2}

采用附录E所述非参数方法和从双截尾油气田规模分布曲线确定的最佳值，可获下述结果：

E〔NPWCF〕$_k$=277百万固定美元

σ^2〔NPWCF〕$_k$=95200〔百万固定美元〕^{2}

为作对比，我们采用Baker等使用的经济油气田数频率分布图，即

$E(N)=3.00$

$\sigma^2(N)=0.70$

将上述估算值代入公式（12）和（13），

$E(R_p)=600$百万桶油当量

$\sigma^2(R_p)=109000$（百万桶油当量）^{2}

代入（14）和（15）式，

$E(V_p)=831$百万固定美元

$\sigma^2(V_p)=339000$（百万固定美元）^{2}

为近似确定R_p和V_p的分布，根据附录E确定适当的m值。

$m(R_p)=3.30$

$\therefore m=3$

并且

$m(V_p)=2.04$

$\therefore m=2$

结果是，

$$概率(<R_p)=F_3(R_p)=\left\{1-\exp\ (-D)\left[1+D+\frac{D^2}{2}\right]\right\}$$

式中 $D=\left[\frac{3(R_p-R_m)}{E(R_p)-R_m}\right]$

$$概率(<V_p)=F_2(V_p)=\{1-\exp(1-D)\ [1+D]\ \}$$

式中 $D=\left[\frac{2V_p}{E(V_p)}\right]$

这些分布曲线见图11和图12。

Baker等算得的期望经济储量为600百万桶油当量，最小储量为50百万桶油当量，其结果与我们的结果相同。他们还指出，70%的模拟结果超过400百万桶油当量和最大值为2000百万桶油当量。我们的近似分布说明概率为0.701，远景带的无风险性储量将等于或超过400百万桶油当量，在概率为0.0016时，该储量将等于或大于2000百万桶油当量。因此，我们的近似结果等于Baker等用蒙特卡洛模拟所得的结果[5]。

引入无效远景带的风险性，令$P_p=0.50$和现值勘探成本PWEx，就可完成评价工作，见图11和图12。

$E(R_p^*)=300$百万桶油当量

$\sigma^2(R_p^*)=27200$（百万桶油当量）^{2}

$概率(<R_p^*)=F_3(R_p)$

式中 $R_p^*=0.50R_p$（百万桶油当量）

并且

$E(V_p^*)=364$百万固定美元

$\sigma^2(V_p^*)=84800$（百万固定美元）^{2}

$概率(<V_p^*)=F_2(V_p)$

式中 $V_p^*=(0.50V_p-51.8)$（百万固定美元）

九、总结和结论

对可能的油气田规模和数量进行地质估算为在经济储量和现值价值方面评价远景带提供了确实的根据。基本方法是假设远景带存在而进行远景带的模拟，然后估算有效远景带的概率。这种方法的主要步骤如下：

1. 圈定远景带为一组相关的远景探区，并根据其盆地/旋回史确定远景带的类别。

2. 根据远景带内各个远景探区的评价，或根据类似远景带的资料，或根据有关类型远景带的历史数据库，确定基本的（未截尾的）油气田规模（或等于远景探区规模）的分布曲线。

3. 确定最小的（经济的）和最大的（地质的）油气田规模，并用来客观地截取基本的分布曲线，然后，确定双截尾分布曲线的特性。

4. 合理地评价三种油气田规模的净现值现金流动，并结合非参数方法来描述油气田价值分布曲线的特性。

5. 根据远景带本身的评价或与类似远景带或旋回对比，确定远景带内远景探区的总数。

6. 根据经济界限和利用有效远景带内任一远景探区是油气田的条件概率，估算远景带内的经济油气田数及其方差。

7. 双截尾油气田规模分布曲线和油气田价值分布曲线分别与油气田数分布曲线相结合，以近似确定远景带的储量及其现值的价值。

8. 通过有效远景带的边缘概率引入风险性，并修改储量及其价值的分布曲线以计算失败机会。

这个方法主要集中在远景带本身并应用远景带的分类作为弥补数据不足的基础。尽量可行地减少了主观性，同时保留了利用判断经验的机会。由于未采用蒙特卡洛模拟，计算量降到了最低限度，然而，这种计算结果可满足输入的需要，以进行区域评价和为编制预算而对各远景带划分等级。

一个现场实例说明这个方法既简单又可行。

符号说明

D—Erlang-m分布$\left[\frac{mx}{E(x)}\right]$自变量；

E(x)—x的期望值；

F(Z)—$\frac{1}{2}$〔1+erf(Z)〕；

$F_m(x)$—Erlang-m 分布$=\left[1-\exp(-D)\sum_{i=1}^{m-1}\frac{D^i}{i!}\right]$；

G—F(Z_m)＝不经济油气田的概率；

I_o—投资，百万固定美元；

K—F(Z_c)＝从数据中删去的油气田分数；

N—经济油气田数；

N_E—远景探区总数（未截尾的）；

N_F—油气田总数（未截尾的）；

$[NPWCF]_k$—纳税后净现值价值，固定美元；

P_H——一个远景探区转变为油气田的概率（自变量）；

P_P—有效远景带概率；

P_R—足够储集层存在的概率；

P_S—足够圈闭存在的概率；

P_T—足够烃源存在的概率；

$PW(x)$—因素x的现值价值，固定美元；

PWEx—纳税后现值勘探成本，固定美元；

R—最终可采储量，百万桶油当量；

R_i—远景带中第i个油气田的储量，百万桶油当量；

R_M—油气田规模曲线的上截点，百万桶油当量；

R_m—油气田规模曲线的下截点，百万桶油当量；

R_P—远景带中总的无风险性经济储量，百万桶油当量；

R_P^*—远景带中总的风险性经济储量，百万桶油当量；

S—随机变量的随机和；

V_P—远景带总的无风险性纯现值价值，百万固定美元；

V_P^*—远景带总的风险性纯现值价值，百万固定美元；

Z—$(\ln R-\mu)/\sqrt{2\sigma}$；

a—增长速率，1/年；

$\text{erf}(x)$—$y=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-\lambda^2)\,d\lambda$＝误差函数；

$\text{erf}^{-1}(y)$—x＝误差函数自变量，其数值是y；

$fn(x)$—x的函数；

i—伪指数；

j—通货膨胀率，1/年；

k—贴现率＝可接受的最低收益率，1/年；

$m(x)$—$[E(x)]^2/\sigma^2(x)$；

m—Erlang-m分布的整数阶；

$m'_j(x)$—x截尾分布的第j矩；

$m_j(x)$—x分布的第j矩；

n—井数；

p—$(1-G)/[1-G^{E(N_P)}]$；

q—$(1-G)P_H/\{1-[1-(1-G)P_H]^{N_E}\}$；

q_o—设计的产量＝设备的产能，$\frac{\text{桶油当量}}{\text{日}}$；

x—伪变量；

α—在以R_m截尾的分布曲线的随机抽样N中超过R_M的概率；

δ—对数标准误差（LN分布）；

θ—勘探期，年；

λ—伪参数；

μ—对数期望值（LN分布）；

ρ—相似远景带的油气田密度，油气田数/单位面积；

$\sigma^2(x)$—x的标准方差；

T—开发期，年；

Ψ—$\exp(-Z_c^2)/\sqrt{\pi}(1-K)$。

下角符号：

M—远景带内最大的油气田规模；

m—远景带内最小的油气田规模；

c—油气田规模数据截点。

上角符号：

*—地质风险值；

′—截取。

注：

1. 未给出单位的参量可为无因次的或为任意单位。
2. 固定美元是现时天的美元。

附录A：基本分布的确定

我们定义

$$F(Z)=\frac{1}{2}[1-\mathrm{erf}(Z)] \tag{A1}$$

$$F'(Z)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\exp(-Z^2) \tag{A2}$$

式中 $Z=\left(\frac{\ln R-\mu}{\sqrt{2}\delta}\right)$

现在假设油气田总数的某一部分K在预定的某最低储量R_c以下。对于历史数据库来讲R_c值可能是已知的；但对于相似的远景带或以各远景探区评价为基础的远景带来说，应取其最小的油气田规模或最小的远景探区规模作为R_c。

按定义，Z的截止值按下式给定：

$$Z_c=\mathrm{erf}^{-1}(2K-1) \tag{A3}$$

对等于或大于R_c的其余油气田确定储量对数矩如下：

$$m'_i(\ln R;K)=\frac{\int_{Z_c}^{\infty}(\ln R)^iF'(Z)\,dZ}{\int_{Z_c}^{\infty}F'(Z)\,dZ} \tag{A4}$$

代入并积分

$$m'_1(\ln R;K)=\mu+\frac{\delta}{\sqrt{2}}\Psi \tag{A5}$$

$$m'_2(\ln R;K)=\mu^2+(1+Z_c\Psi)\delta^2+\sqrt{2}\mu\delta\Psi \tag{A6}$$

式中 $\Psi=\frac{\exp(-Z_c^2)}{\sqrt{\pi}(1-K)}$

确定下述各值

$$\mu(k)=m'_1(\ln R;K) \tag{A7}$$

$$\delta^2(k)=m'_2(\ln R;K)-[m'_1(\ln R;K)]^2 \tag{A8}$$

代入得

$$\mu(K)=\mu+\frac{\delta}{\sqrt{2}}\Psi \tag{A9}$$

$$\delta^2(K)=\left[1+Z_c\Psi-\frac{\Psi^2}{2}\right]\delta^2 \tag{A10}$$

求基本分布的各参数和截点R_c，

$$\delta=\left[\frac{\delta^2(K)}{1+Z_c\Psi-\frac{\Psi^2}{2}}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{A11}$$

$$\mu=\mu(K)-\frac{\delta}{\sqrt{2}}\Psi \tag{A12}$$

$$R_c=\exp(\mu+\sqrt{2}\,\delta Z_c) \tag{A13}$$

设已有下列资料，

R'_c＝数据中的最小油气田规模

$$m'_1=\frac{1}{N'_F}\sum_{i=1}^{N'_F}(\ln R_i)$$

$$m'_2=\frac{1}{N'_F}\sum_{i=1}^{N'_F}(\ln R_i)^2$$

式中N'_F＝抽样中的油气田数，对此数来说

$$R_i\geqslant R'_c$$

令
$$\mu(K)=m'_1$$
$$\delta^2(K)=m'_2-(m'_1)^2$$

选定K值，确定Z_c和Ψ；把这些值以及从已知数据中计算的$\mu(K)$和$\delta^2(K)$值代入方程（A11）、（A12）和C（A13），并进行计算。如果$R_c\neq R'_c$，选另一K值，用叠代法直到$R_c=R'_c$，用这种方法确定的K值就决定了基本分布的参数μ和δ。Aitchison和Brown[11]论述了另一种方法。

附录B：最小的油气田规模

假设有一生产油田并忽略勘探费（已偿还成本），我们定义

$$[NPWCF]_k=PW(收益)_k-PW(作业费)_k-PW(矿区使用费)_k-PW(税收)_k-PW(投资) \tag{B1}$$

式中　$[NPWCF]_k$—用纳税后现时固定美元表示的净现值的现金流动；

$PW(x)_k$—用现时固定美元表示的因素“x”的现值价值；

k—可接受的最小实际收益率。

如果假设一具体模型代表举例油田的开采史，并假定产能以固定百分数递减，同时假定价格-成本参数，那就可对油田整个寿命期中公式（B1）的全部因素进行评价（以封闭形式）。因此，可采用下述表达式：

$$〔NPWCF〕_k = fn〔q_o, n, R; 常数〕_k \tag{B2}$$

式中 q_o—最大产量（设备的设计产能），千桶油当量/日；

n—井数；

R—最终可采储量，百万桶油当量。

对特定的R值，可以确定q_o和n（设计变量）的最佳结合。见参考献文〔12〕中更详细的讨论。

$$\underset{q_o, n}{最大}〔NPWCF〕_k \Rightarrow q_o(R), n(R) \tag{B3}$$

经最佳化处理得，

$$〔NPWCF(R)〕_k = fn〔q_o(R), n(R) R; 常数_k〕 \tag{B4}$$

可按下式确定最小的油田经济规模：

$$〔NPWCF(R_m)〕_k = 0 \tag{B5}$$

当发现这种R_m规模的油田时，它将是一种可开发的边际油田。

附录C：最大的油气田规模

我们曾用R_m估算了远景带内经济油气田的期望数E（N），我们也可估算出远景带内的最大的油气田规模，以保证我们的评价不会由于在油气田规模分布中包括不可能的大油气田而受到歪曲。我们定义：

$$\alpha = \left\{1 - \left[\frac{F(Z_M) - F(Z_M)^{\bar{N}}}{1 - F(Z_m)}\right]\right\} \tag{C1}$$

式中 α=在用R_m截尾的基本分布曲线的规模$\bar{N}$随机抽样中超过R_M的概率

$\bar{N}$=E（N）—经济油气田期望数。

求解F（Z_M）

$$F(Z_M) = F(Z_m) + 〔1 + F(Z_m)〕(1-\alpha)^{1/\bar{N}} \tag{C2}$$

因此

$$Z_M(\alpha; \bar{N}) = \mathrm{erf}^{-1}\{1 - 2〔1 - F(Z_m)〕〔1 - (1-\alpha)^{1/\bar{N}}〕\} \tag{C3}$$

并且

$$R_M(\alpha; \bar{N}) = \exp〔\mu + \sqrt{2}\,\delta Z_M(\alpha; \bar{N})〕 \tag{C4}$$

一般说来，当$\alpha=0.05$时，可求得一合理的$R_M(\alpha; \bar{N})$值；但α的选定带明显的主观性，可能歪曲最终评价。比较客观的方法是令α为$\bar{N}$的函数，例如，

$$\alpha = 1/2\left(\frac{1}{\bar{N}+1}\right) \tag{C5}$$

对油气田数不多（$\bar{N}<9$）的情况来讲，这个假设比用$\alpha=0.05$更保守些。

另一种更为客观而比$\alpha=0.05$更为保守的方法是确定$R_M(\bar{N})$的期望值，即令$\alpha=0.05$，0.50和0.95，并代入（C2）式，计算$R_M(0.05; \bar{N})$，$R_M(0.50; \bar{N})$和$R_M(0.95; \bar{N})$；然后用非参数式[13]将这些数值综合而得期望值：

$$E〔R_M(\bar{N})〕 = 0.630\, R_M(0.50; \bar{N}) + 0.185〔R_M(0.05; \bar{N}) + R_M(0.95; \bar{N})〕 \tag{C6}$$

在实践中，此期望值与用$\alpha=0.50$的计算值差别不是太大，因此（C6）式的保守性是明显的。

附录D：油气田数

由于局部的经济因素，与资料有关的不确定性和（或）勘探计划提出的远景评价不充分，确定基本油气田规模分布的数据往往是截取的，因此，被截尾所删去的油气田分数K（K是在确定原始分布参数时估算的）必须加以利用，以便确定远景带内的远景探区总数N_E（不考虑经济性，不考虑勘探资料的数量和质量）。我们定义

$$N_E=\left(\frac{N'_E}{1-K}\right) \quad (D1)$$

式中，N_E—远景带内远景探区总数；

N'_E—用于确定K的抽样中的远景探区数。

如果有充分资料确定远景带的远景探区总数，则可用计算方法直接求得N_E。而在一般缺乏资料的多数情况下，应根据相似远景带或历史数据库（均曾用来确定基本分布曲线）以利用带K和N'_E的公式（D1）来间接地估算N_E。

在万一有理想的资料的情况下，可建立频率函数（三角函数，单值函数，高斯函数等）或相当的频率分布图以反映每种可能油气田数发生的概率，即从1（假设远景带是有效的）到N_E的概率。可从下式计算所需参数：

$$E(N_F)=\sum_{i=1}^{N_E}(iPi) \quad (D2)^{*}$$

$$\sigma^2(N_F)=\sum_{i=1}^{N_E}\{[i-E(N_F)]^2Pi\} \quad (D3)$$

式中 $\sum_{i=1}^{N_E}Pi=1$

N_F—远景带内的油气田数。

如果根据资料能求得N'_E和N'_F，一般的成功概率P_H（此概率量度远景探区单独的地质风险性，如储集层变坏，运移路线堵塞，盖层被断裂或剥蚀）可用下式计算：

$$P_H=\left(\frac{N_F'}{N'_E}\right) \quad (D4)$$

式中 N'_F—用于确定K的抽样中的油气田数。在N_E的试算中，可从"I"成功率（$1\leqslant i\leqslant N_E$）的二项式概率中求得所需的参数；例如，

$$E(N_F)=P_HN_E \quad (D5)$$

$$\sigma^2(N_F)=P_H(1-P_H)N_E \quad (D6)$$

如没有足够的勘探资料，就要应用相似远景带。可用远景带面积和相似远景带的油气田密度ρ估算N'_F：

$$N'_F=\frac{1}{\rho}(\text{远景带面积}) \quad (D7)$$

---

* 假设$E(N_F)\geqslant1$是绝对的，否则该远景带就要废弃。

式中，ρ—相似远景带单位面积的油气田数。

然后，用相似远景带的K和P_H求得近似的N_E，而$E(N_F)$和$\sigma^2(N_F)$可按公式（D5）和（D6）计算。

当依赖该类远景带的历史数据库时，通常没有油气田密度数据可用。这时N'_F需按下式估算：

$$N'_F=\left[\frac{\text{油气田总数}}{\text{远景带总数}}\right]_{\text{等级}} \tag{D8}$$

同样，用历史数据库的K和P_H可求得N_E，并用（D5）和（D6）式确定所需参数。

如P_H不能得到满意地估算，就假设一个单值频率函数代表油气田数，并按下式计算所需参数的近似值：

$$E(N_F)=\frac{1}{2}\left(1+\frac{N'_F}{1-K}\right) \tag{D9}$$

$$\sigma^2(N_F)=\frac{1}{3}\left[E(N_F)-1\right]^2 \tag{D10}$$

在确定了远景带内油气田期望数及其方差以后，就应考虑经济的截取值。我们定义

$$F(Z_m)=G \tag{D11}$$

因此　概率$R\geqslant R_m=(1-G)$　（D12）

设对$E(N_F)$和$\sigma^2(N_F)$已作出估算，并且各油气田互相是独立的。其次，假设有一随机过程，使"i"油气田抽样中每个油气田有一给定值φ，当$\phi=1$时概率为$(1-G)$，当$\phi=0$时概率为G。因此，对一给定值$N_F=i$来说，N的各条件矩（moment）可根据二项式分布计算如下：

$$E[N\mid N_F=i]=(1-G)i \tag{D13}$$

$$D[(N\mid N_F=i)^2]=(1-G)[G+(1-G)i]i \tag{D14}$$

N的各矩可按$N_F=i$的各矩求得：

$$E(N)=\sum_{i=1}^{N_F}E[N\mid N_F=i]\ \text{概率}(N_F=i) \tag{D15}$$

$$E(N^2)=\sum_{i=1}^{N_F}E[(N\mid N_F=i)^2]\ \text{概率}(N_F=i) \tag{D16}$$

此时

$$E(N)=(1-G)E(N_F) \tag{D17}$$

$$E(N^2)=G(1-G)E(N_F)+(1-G)^2E(N_F^2) \tag{D18}$$

使$\sigma^2(N)=E(N^2)-[E(N)]^2$，得通用结果如下：

$$E(N)=(1-G)E(N_F) \tag{D19}$$

$$\sigma^2(N)=G(1-G)E(N_F)+(1-G)^2\sigma^2(N_F) \tag{D20}$$

对结合P_H利用二项式概率的那些情况来讲，将（D5）和（D6）式代入上述公式，得

$$E(N)=(1-G)P_HN_E \tag{D21}$$

$$\sigma^2(N)=(1-G)P_H\{1-[1-(1-G)P_H]\} \tag{D22}$$

显然，这些结果描述了事件独立概率等于$(1-G)P_H$的二项式分布；因此，由于假设至少有一个经济油气田而需要的标准化，可完成如下：