

成藏体系油气资源评价中的统计方法体系

盛秀杰¹,金之钧¹,鄢琦¹,肖晔²,谢国军¹,徐京新³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 清华大学理学院数学科学系,北京 100084; 3. 中国石油大学地球科学学院,北京 102249)

摘要:基于成藏体系理论对传统区带油气资源评价技术进行了系统归纳与新方法的补充,深入阐述了成藏体系油气资源评价的内涵。其中,在深层次剖析上述制约因素的形成机制以及相关统计数学模型机理的基础上,通过界定不同勘探程度的成藏体系油气资源评价的关键目标(如,资源有无、多少、在哪里等),整理、归类并规范了业内主流统计方法以及在开发油气资源一体化评价软件过程中涉及的系列特色评价技术,约定了成藏体系油气资源评价统计方法体系,其内容主要包括:①面向新区的概率分析系列;②面向未成熟区(早期)的蒙特卡罗模拟系列;③面向未成熟区(中、晚期)的数理统计系列;④面向成熟区(早、中期)的概率推理系列;⑤面向成熟区(中、晚期)的发现过程和空间分布预测系列。提出的统计方法体系,较为全面地阐述了系列主流以及最新统计方法的成因机制与适用性说明,在实际应用时,可以有效规避地质模型的差异性、增强统计方法应用的针对性以及降低计算参数的敏感性。此外,该方法体系的归类逻辑也有助于明确后续进一步值得关注的资源评价方法研究方向。

关键词:地质模型;统计模型;油气资源评价;成藏体系理论

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Statistical method series for the resource assessment of petroleum accumulation system

Sheng Xiujie¹, Jing Zhijun¹, Yan Qi¹, Xiao Ye², Xie Guojun¹, Xu Jingxin³

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Department of Mathematical Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the principles of petroleum accumulation system, this paper systematically summarizes and perfects the traditional techniques of petroleum resource assessment, and expounds the connotation of resource evaluation under a petroleum accumulation system. On the basis of a deep understanding of the controlling factors of petroleum accumulation and the principles of statistical models, we defined the key objectives of resource assessment at various exploration stages, categorized and standardized the most popular mainstream approaches used in the industry and academia, as well as methods evolved during the development of PetroV (a petroleum resource evaluation system of Sinopec), and proposed a methodology framework for resource assessment of a petroleum accumulation system. The categorized five methodology series include 1) probabilistic inference or analogue approaches for frontier targets, 2) Monte Carlo approaches for conceptual plays, 3) statistical methods for established plays in early exploration stage, 4) probabilistic reasoning models for targets in mature plays and 5) discovery process and spatial statistical models in well explored regions. We elaborate the objectives of assessment and the suitability of statistical methods under a variety of exploration scenarios through real examples. In practice, the proposed assessment framework can effectively reduce the sensitivity on parameter selections and the impact due to differences in the geological models on output, thus enhancing applicability of the statistical methods. In addition, the proposed framework may also provide useful information for direction on future methodology development.

Key words: geological model, statistic model, resource assessment, petroleum accumulation theory

油气资源评价是油气勘探开发决策科学中的一部分,其目的主要是在不同阶段、针对不同勘探对象、采用不同方法进行描述评价,并依照不同的经济技术指标测算、分析油气资源(储)量的存在特点、分布状况、

规模概率与序列,为勘探开发整体部署、计划安排、工作量测算以及勘探开发效益分析提供科学的基础。根据资源评价对象的不同,油气资源评价一般按照含油气大区、盆地(凹陷)、区带和圈闭等不同地质尺度建

收稿日期:2012-12-07;修订日期:2013-11-06。

第一作者简介:盛秀杰(1973—),博士,石油工程。E-mail: Shengxj. syky@sinopet. com。

基金项目:国家重大油气专项(2011ZX05005-001-004)。

立评价流程^[1]。其中,区带介于盆地(或坳陷、凹陷)和圈闭之间,存在于盆地同一构造带中,具有相同成因联系和油气生、运、聚规律并在地域分布上相邻的一系列圈闭与已发现油气藏的统一组合,它们或以一类为主,或几类相互组合,在平面上形成带状或块状,在剖面上交错叠加;区带油气资源评价通过统计各种因素与油气资源之间的关系来估算待发现油气资源量、进行油藏结构分析、识别油藏资源类型等评价工作;区带油气资源评价中的一个难点就是如何合理刻画区带范围,也就是说,如何有效界定统计边界。近些年,油气成藏体系理论中的亚成藏体系、成藏组合的提出为区带的划分提供了新的思路^[2],并进一步延伸了区带油气资源评价的地质内涵:油气成藏体系理论以“成藏”为核心:油气藏是盆地内相对独立的油气生成、运移、聚集单元;围绕“成藏”构建的地质模型涵盖具体的储集层段和圈闭结构,具有自己的物质基础和空间结构,经历了相同或相似的油气成藏所需的地质要素和作用;强调了油源、输导体和圈闭之间相互关联、相互制约的“随机”特点,可以较为准确地预测油气资源量,并可对油气藏规模序列分布进行评价,使得勘探和评价的目标更具体化,更加有利于提高评价对象分布规律和资源量推测的准确性。

1 统计方法体系的提出

一般根据地质认识程度的把握性、油气藏规模样本数据的多少、勘探开发投入的工作量等,成藏体系油气资源评价可分为新区、未成熟区和成熟区评价3个评价阶段^[3];利用概率推演、统计归纳等原理和方法去整理、分析已完成的勘探工作和成果(如,已经发现的油气藏个数、规模等),进而预测待发现油气资源量,体现了地质模型与数理统计、推理相结合的特点^[4]。问题是成藏体系油气资源评价涉及的系列统计法,据不完全估计多达数十种面对不同地质条件^[5-6]、地质资料的可靠性、对地下情况认识程度^[7]的不同以及资源评价目的性的差异等情况,如何才能从现有的数十种统计方法中进行有效取舍并进行针对性应用。此外,统计法实际应用时还有许多影响评价效果的制约因素。如,油气藏规模的样本统计边界难以确定、样本数量偏少、计算参数取值(概率分布参数)的敏感性、对地质模型认识的偏差等。

文中从3个维度的差异性来构建成藏体系油气资源评价的统计方法体系,不同勘探阶段成藏体系的具体资评目标、地质模型以及数学模型机理。在新区阶段,需要合理刻画成藏体系边界并建立地质评价参数模板,通过系列概率分析模型能够快速回答目标区域是否含

有油气;在未成熟区早期阶段,初步识别了亚成藏体系或成藏组合,在没有任何已发现油气藏样本数据的情况下,需要通过类比其他成熟成藏体系给出关键计算参数的不确定性统计估计(如,油气藏个数、油气藏规模、储层面积的峰值、最小值、最大值等),进而计算油气地质资源量(in-place reserves)的不同概率分位值;在未成熟区晚期阶段,通过预、探井以及勘探早期相关投入,发现了少量油气藏,但其还不足以作为统计样本集,可利用线性或非线性趋势可初步预测后续几年的油气资源量;在成熟区早、中期阶段,随着地质资料的可靠性提升,尤其得益于地震数据的应用,成藏体系边界的界定相对准确,处于滚动勘探阶段的油气藏个数、规模样本数据集,易于通过显著性检验等数学方法匹配最佳的概率分布模型,利用二者的概率分布模型能够有效推理待发现油气资源量;在成熟区晚期阶段,在考虑最大、最小等油气藏规模的地质截断的基础上,概率分布模型需要进一步强调与地质模型的匹配;成熟阶段晚期大量的油气藏样本数据不能够再被简单认为是随机取样的结果,而是典型的有偏采样的结果;换言之,最大油气藏先被发现、同一个油气藏不会被第二次发现(取出不放回)等;此外,油气藏结构分析以及油气资源量的空间分布^[8]是本阶段主要资评目的。可见,通过界定不同勘探阶段的资评目标,明确不同勘探阶段成藏体系地质模型的差异性,以及剖析相关统计法数学模型机理,有助于实现地质模型与数学模型的最佳匹配,进而显著提升地质评价、油气资源量预测结果的合理性。文中通过分析上述3个维度的交集,整理、归类了目前主流统计方法以及PetroV提出的系列特色资评方法;以其数学模型的数学机理为命名原则,将成藏体系油气资源评价中的主流统计方法划分为:概率分析、蒙氏模拟、数理统计、概率推理、发现过程以及空间分布预测系列(图1)。

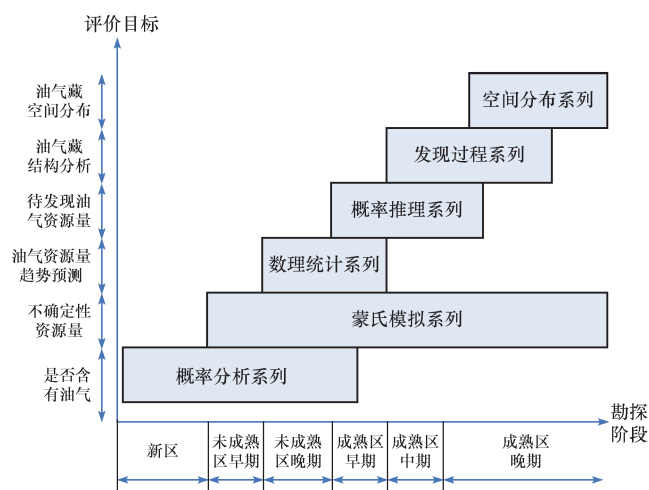


图1 PetroV 建议的统计方法体系分类方案

Fig. 1 The Proposed statistical method system classification scheme of Petrov

2 统计方法体系

2.1 概率分析系列

以地质风险评价和不确定性分析为研究主线,用于快速评价新区的含油气有无,同时兼顾未成熟区、成熟区早期阶段具有地震数据等高可靠地质资料的圈闭的地质风险评价,能够较为系统地实现面向不同评价目标层次的地质风险评价过程;随着地质认识的深入以及成藏主控因素的识别与界定,能够逐级量化、回答油气资源有无以及识别勘探投资、部署风险,体现油气资源评价结果的不确定性,辅助决策人员进行合理决策。同时,结合不同地质场景的合理假设、钻后油气发

现的实际验证,能够实现基于不同主控成藏条件动态配置关系的合理成藏模式推理,以及面向不同勘探阶段、不同勘探目标间的风险评估结果的动态调整与钻后评估。概率分析系列统计方法主要由4大类风险分析方法序列组成(表1):①基于边际概率数学模型的定量地质风险分析类[公式(1)和公式(2)];②基于条件概率数学模型的定量地质风险分析类[公式(3)和公式(4)];③基于效用理论(或模糊规则)的不确定性地质风险分析类[公式(5)];④基于贝叶斯信念网络的动态成藏过程评价(也称多地质场景假设推理)类[公式(6)]。

2.2 蒙氏模拟系列

新区含油气有无的回答并不能够直接转换为商业

表1 概率分析系列统计方法说明

Table 1 Explanation of the methods based on probabilistic analysis

分 类	目 的	公 式	适用性
1	通过界定缺一不可可有效成藏条件,基于边际概率模型,给出单一或“点估计”风险量化结果 ^[9-10]	$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad P_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} P_{ij}, \quad \sum_{j=1}^n q_{ij} = 1 \quad (1)^{[11]}$ 式中:P为含油气概率;P_i代表区带缺一不可的成藏条件;P_{ij}表示隶属某一关键成藏条件的子项成藏条件;q_{ij}表示子项成藏条件的权重 $P = 1 - (1 - P_a)(1 - P_b)(1 - P_c) \quad (2)$ 式中:P_a, P_b, P_c表示区带基于不同沉积相进一步区分的系列区带敏感区域,可至少一个“子”区带含有油气的概率	定位于新区的快速评价,适用于成藏体系、亚成藏体系、成藏组合的快速地质风险评价
2	基于经典条件概率模型,对经历相似地质作用的圈闭或目标,进行系列组合条件定量风险分析	$P(X \bar{A}) = \frac{P(X A)P(S)[1 - P(A S)]}{1 - P(A)} \quad (3)$ 式中:$P(X \bar{A})$表示在A圈闭被证实为不含油气情况下,计算其他(X)圈闭成藏的可能性;$P(X A)$表示在假定A圈闭含有油气的情况下,X圈闭的含油气概率;$P(S)$表示区带背景下相同成藏因素的乘积;$P(A S)$表示假定区带含有油气的情况下,A圈闭的含油概率 $P(Q Play) = P(Play) \left\{ 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P(iTrap)] \right\} \quad (4)^{[12]}$ 式中:$P(Q Play)$表示假定基于共同成藏因素背景下,至少一层有发现的概率;$P(Play)$表示区带背景下相同成藏因素的乘积;$P(iTrap)$为第三个圈闭的含油气的概率;$P(Q Play)$表示在区带含油气概率控制下,至少一个圈闭含有油气的概率	适用于圈闭等勘探目标的快速评价以及资评对象间的联合地质风险评价,以及钻后风险评价结果调整
3	强调如何将“点估计”风险评价结果有效转换为多种可能性(多分位)的定义	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < x \leq x_2 \\ 1, & x_2 < x \leq x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3}, & x_3 < x \leq x_4 \\ 0, & x > x_4 \end{cases} \quad (5)$ 式中:$\mu(x)$表示某一地质评价因子的“梯形”成员函数定义,其他成员包括“三角”;x, x_1, x_2, x_3, x_4为系列模糊边界值	定位于新区的不确定性地质评价,可定量体现地质评价参数的地质边界的不确定性
4	合理推测最有可能的成藏模式	$P(u, v, w x, y, z) = P(u x) P_{v u}(y x) P_{w v}(z y) \quad (6)^{[13]}$ 式中:$P(u, v, w x, y, z)$表示不同地质事件影响下的成藏条件配置(时空配置)关系;$P(u x)$为假设x地质事件发生的前提下,u成藏条件成立的概率;$P_{v u}(y x)$为以x地质条件为前提,y地质事件发生时对v, u成藏条件的影响;$P_{w v}(z y)$为以y地质事件为前提,z地质事件发生时对v, w成藏条件的影响	定位于新区成藏机制的动态分析

成功机率,反映商业成功机率的一个最佳方式就是给出成藏体系潜在资源量可能值的概率(不同分位的待发现油气资源量值):蒙氏模拟系列统计方法的目的就是能够快速给出未成熟区早期的不确定性油气资源量分布。在未成熟阶段,几乎没有部署任何预探井意味着没有任何油气藏的发现,需要通过人为构造合适的、依赖随机变量的资源量计算模型,使这些随机变量的统计量变为该模型待求问题的解,通过进行大统计量的统计实验来规避地质资料的欠缺以及不可靠性^[14],该系列资源量计算模型主要包括(表2):①不确定性体积法[以常规油藏为例,(公式7)];②美国地调局(USGS)的第七逼近法^[17][公式(8)];③油气藏规模排序法^[13][Pool-Size-by-Rank,公式(9)];④傅里叶空间分布预测法^[16][公式(10)]。应说明,即使在勘探成熟阶段,蒙氏模拟仍是克服地下认知的不确定性的主要数学手段。

2.3 数理统计系列

在未成熟区中、晚期阶段,基于有限的地质资料很难建立客观、准确的地质模型,但随着预、探井的部署等勘探投入,发现了少量油气藏规模等样本数据。脱离地质模型的约束,将已发现的油气藏样本数据简单泛化成随机现象的观察试验——通过研究收集、分析与油气藏规模相关的数据,识别敏感统计变量,能够估算油气藏资源量的统计变化趋势。面向成藏体系油气资源评价的常见一个统计变量就是勘探效率的定义,

也称油气藏发现率。随着单位投入或工作量发现的储量或资源量与勘探进程(如,勘探时间跨度、探井数量、探井进尺累计等)存在一定的统计关系[公式(11)],通过对评价区勘探历程进行统计分析,可确定评价区内油气田(藏)发现效率与勘探进程的关系[公式(12)],从而通过不同统计趋势预测评价区的油气资源量。

$$Q_k = F(K) = \int_0^K f(k) dk \tag{11}$$

$$\frac{dQ}{dK} = f(k) \tag{12}$$

式中: K 表示累计勘探投入或工作量; Q_k 表示累计勘探投入或工作量为 K 时的已发现资源量; $f(k)$ 表示某种勘探效率(统计)函数。

将勘探效率函数进一步具体化,可进一步分为(表3):①线性趋势预测类[油气藏规模序列法为代表^[18],公式(13)];②简单非线性趋势预测类[以二元三次数学模型为例,公式(14)];③随机场模拟类[以如BP神经网络为例^[19],公式(15)]。理论上,数理统计方法也可被应用于勘探成熟阶段,甚至开发阶段——统计样本越多,获取的经验值越可靠,则统计结果的合理性越高。如,多种线性、非线性统计模型被广泛应用于开发阶段的单井储量评估。考虑到数理统计法所采用的系列统计数据模型并不结合成藏体系地质模型的相关地质变量,所考察的数据都带有随机性(偶然性)的误差,所做出的资源规模估算具有明显的不确定性,因此其很少被直接应用于成熟区的油气资源量计算。

表2 蒙氏模拟系列统计方法说明

Table 2 Explanation of the statistic methods based on Monte Carlo simulation

分 类	目 的	公 式	适用性
1	匹配体积参数的概率分布模型,随机取值来计算可能的油气资源量分布	$Q_{oil} = 100AH\phi S_{oil} \rho_{oil}/B_{oil} \tag{7}$ 式中:Q_{oil}为石油地质资源量,$10^4 t$; A为储层含油气面积,km^2; H为储层有效厚度,m; ϕ为储层孔隙度,小数; ρ_{oil}为原油地面密度,g/cm^3; S_{oil}为储层含油饱和度,小数; B_{oil}为原油体积系数	不确定性体积法可应用于后续各个阶段的油气资源量计算,其计算结果的合理性受限于各个计算参数所匹配的概率分布模型的合理性
2	匹配油气藏个数与规模概率分布模型,随机取值计算待发现资源量	$Q_1 = S_1 + S_2 + \cdots + S_n \tag{8}$ 式中:S_n表示n次随机模拟过程中,每一次对应可能的油气藏规模; Q_1表示n次迭代后,系列油气藏规模的累积和为待发现油气资源量,在模拟过程中充分考虑地质、经济可采风险	定位于未成熟阶段的快速油气资源量计算,概率分布模型的选取是关键
3	假定的油气藏规模分布和油气藏个数分布,随机生成系列油气藏规模,并从大到小排序,分析不同油气藏规模的分布结构特征	考虑油气藏个数 n 的泊松分布,则第 r 大油气藏的密度应为 ^[15] : $l_r = \sum_{n=r}^{\infty} \frac{n!}{(r-1)!(n-r)!} F(x)^{r-1} [1-F(x)]^{n-r} f(x) P(N=n)/P(N \geq r) \tag{9}$ 式中:N为理论上油藏个数;n为实际发现的油藏个数;对任意$x > 0$规模的油气藏,且按$r=1,2,\cdots$进行排序; $P(N=n)$是油气藏个数分布当$N=n$的概率值; $P(N \geq r)$是$N \geq r$的概率值; $F(x)$表示油气藏规模分布函数; $f(x)$表示油气藏规模密度函数	定位于成熟阶段油气藏规模的分布结构特征分析,并不直接用于油气资源量的计算,而是对假定的分布模型及其分布参数估计的一个再检验、再调整过程
4	频率域下的地质模型(相位)与资源模型(功率谱)反变换获取油气资源空间分布(密度)信息	基于马氏距离的有利油气资源发现区域的条件概率: $P[A D(r)] = P[A, D(r)]/P[D(r)] \tag{10}^{[16]}$ 式中:$D(r)$表示某一特定空间位置(r)上由不同地质统计变量计算的马氏距离; $P[A D(r)]$为假设马氏距离小于某一定值情况下的某一空间位置的含油气概率; $P[D(r)]$为不同空间位置上马氏距离转换为合理油气概率	定位于成熟阶段晚期油气资源密度的空间分布预测

表3 数理统计系列统计方法说明

Table 3 Explanation of the statistic methods based on statistical theory

分 类	目 的	公 式	适用性
1	识别有效统计变量, 进行线性回归拟合, 并作极限值(如油气藏规模最大值)预测	幂律线性趋势预测(Zipf定律^[18]), 国内也称之为油气藏规模序列表: $\log Q_m = a \log m + b \quad (13)$ 式中: m, n 表示油气藏规模序号; Q_m 表示排序第 m 位置的油气藏规模; a 表示幂律; 公式(13)的斜率表示幂律, y 轴截距间接表示了最大油气藏规模, x 轴截距间接表示油气藏个数	适用于未成熟区的少量油气藏规模样本的趋势预测, 其受限于特定样本异常值对线性回归效果的影响
2	同1, 区别是进行非线性回归拟合	以二元三次数学模型为例: $y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (14)$ 式中: x 表示“发现年份”、“钻井数”、“钻井进尺数”等统计变量; y 表示资源量增量变化趋势; a, b, c, d 为常数	非线性趋势预测的“数学”计算结果具有明显的“时效性”, 需要主观取舍
3	通过识别多个统计变量, 建立不同随机场分布模型, 进行随机非线性模拟	以 BP 神经网络为例: $y_i = f \left[\sum_{j=1}^n (w_{ij} x_j) - \theta_i \right] \quad (15)^{[19]}$ 式中: x_j 表示系列地质统计变量; w_{ij} 表示不同地质统计变量的权值; y_i 表示第 i 个神经元输出值(油气资源量); f 表示激发函数; θ_i 为第 i 个理论元阈值	适用于成熟区的多油气藏规模样本数据的直接趋势预测, 计算效果受限于有效统计变量的定义与目标函数的约定

2.4 概率推理系列

在成熟区的早、中期阶段, 成藏体系划分较为客观, 对复杂地质过程主要特点和演化规律有了较为充分的认识, 可利用此阶段油气藏规模样本数据进行油气藏规模概率分布拟合推理, 并将该概率分布模型用于估算成藏体系待发现油气资源量以及初步分析油气藏结构。该系列资源量计算数学模型依据的地质假设是: 基于同一沉积地质模型, 后续经历系列相同或类似的构造、油气运移与聚集等地质作用过程, 所形成的油气藏规模分布是某种概率随机取样的结果。即, 发生于成藏体系范围内的相同或类似系列地质活动的直接结果是符合某种概率最大可能的油气藏规模分布, 而其概率分布参数的最大似然求解(也称最大可能求解)恰恰反映了针对上述地质活动结果的反向求解过程, 从而基于该概率分布可以进行有效的资源规模估算与结构分析。

考虑到油气藏规模的最大值、最小值具有明确的地质含义(常见概率密度函数无最大值、最小值限定), 同时为了克服有限样本数据不能反应自然总体分布的缺陷, 国内外学者提出了系列基于最大、最小值进行密度曲线截断和样本偏移等数学处理技术。如, 金之钧(1995)^[20]基于普通帕莱托分布的截断数学模型推导, 建立了面向油气资源密度与勘探程度的概率密度分布。依据不同地质模型选取油气藏规模概率分布模型的不同以及做了何种截断处理, 该系列可进一步划分为(表4): ①超总体模型类^[13][以对数正态分布为例, 公式(16)]; ②特定密度曲线截断类[以地质帕莱托分布为例^[20], 公式(17)]; ③通用密度曲线截断

处理类[公式(18)和公式(19)]。应说明的是, 许多成藏体系的油气藏规模结构存在分配额多(油气藏规模大)的群体的个体个数少, 而分配额少(油气藏规模小)的群体的个体个数多的分布状态。即, 大量的小抽样取值和少量的大抽样取值并存, 选取的概率分布曲线应该具有典型的重尾分布特点, 重尾分布又可进一步区分为长尾分布(Zipf定律)和次指数分布。

2.5 发现过程系列

区别于概率推理系列的无偏采样假设, 在成熟区的中、晚期阶段, 油气藏规模样本已经能够充分体现随着勘探投入油气藏被发现的特点: 最大油气藏先被发现, 已经发现的油气藏不会被第二次发现。“取出不放回”、“最大油气藏先发现”等有偏采样数学模型与体现系列地质活动结果的概率分布模型结合, 更容易客观地获取资源预测结果以及进行油藏结构分析, 是成熟区晚期资源预测的主要统计手段。围绕不同类型的“发现”过程, 国内外学者提出了多种“发现过程”数学模型(表5), 主要包括: ①基于有偏取样的发现过程类^[13][公式(20)]; ②基于资源总量变化的发现过程类^[15][公式(21)]。公式(20)利用勘探效率系数(β)体现某个油气藏勘探投入程度, 利用阶乘公式[公式(20)左侧]体现“取出不放回”, Kaufman的地质锚链数学模型^[21]很好体现了最大先被发现的条件概率模型[公式(20)右侧]。

3 成藏体系油气资源评价与软件实现

遵循成藏体系理论开发的一体化油气资源评价软

表 4 概率推理系列统计方法说明

Table 4 Explanation of the statistic methods based on probability inference

分 类	目 的	公 式	适用性
1	油气藏规模大小被看作来自一个无限的连续总体分布的样本,成藏体系内油气资源分布是所有油气藏规模的总和	对数正态密度曲线(次指数分布): $f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$ 式中: μ 与 σ 分别是变量对数的平均值与标准差;其他常见的此类总体分布包括三角分布、贝塔、韦布分布等	在成熟区早期阶段,三角分布体现可能的最大、最小以及最有可能的油气藏规模;随着样本数据的增多,通过显著性检验可以初步判定其是长尾或次指数分布;如果现有常见重尾概率分布模型均不理想,可以考虑调整贝塔分布参数,获取较为理想的概率分布模型
2	油气藏规模被看做一个具有边界限制的连续总体分布,即存在最大和最小油气藏规模边界	地质帕莱托(Geological Pareto, GP): $f(x) = \begin{cases} 0 & x < q_0 \\ \frac{\lambda}{\left(\frac{1}{(q_0 + \gamma)^\lambda} - \frac{1}{(q_m + \gamma)^\lambda}\right)(x + \gamma)^{\lambda+1}} & q_0 \leq x \leq q_m \\ 1 & x > q_m \end{cases} \quad (17)^{[20]}$ 式中: q_0 表示最小油藏规模; q_m 表示最大油藏规模; γ 为位置参数, $\gamma > 0$,油藏规模期望值; λ 为密度曲线形状参数	适用于成熟区中、晚期的待发现油气资源量计算,此时地质模型的一个明显特点就是最大和后续几年内最小经济可采的油藏规模可以被确定下来,通过显著性检验来选取合适的重尾分布类型
3	为了迎合尽可能多的概率分布数学模型(体现地质模型的差异性),以及满足不同资源评价目标的最大、最小值截断,PetroV提出通用概率密度函数线性截断方案	通用截断密度曲线: $f_p(x) = \begin{cases} 0 & x_{\min} < x \\ \frac{f(x)}{F(x_{\max}) - F(x_{\min})} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (18)$ 通用截断分布曲线: $F_p(x) = \begin{cases} 0 & x_{\min} < x \\ \frac{F(x) - F(x_{\min})}{F(x_{\max}) - F(x_{\min})} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (19)$ 式中: $F_p(x)$ 为截断后的分布函数; $f_p(x)$ 为截断后的密度曲线; $F(x_{\max})$ 在 $x_{\max}$ 处截断前累积分布值; $F(x_{\min})$ 在 $x_{\min}$ 处的截断前累积分布值	等同 2 类适用性;相对于 2 类系列截断处理,其应归类为简单截断处理,数学模型推导不够严谨

表 5 发现过程系列统计方法说明

Table 5 Explanation of the statistic methods based on discovery process

分 类	目 的	公 式	适用性
1	含油气油藏的勘探和发现过程看作是对 N 个含油气油藏进行有偏采样的过程	$L(\theta) = \frac{N!}{(N-n)!} \prod_{j=1}^n f_{\theta}(x_j) E_{\theta} \left[\prod_{j=1}^n \frac{x_j^{\beta}}{b_j + Y_{n+1}^{\beta} + \dots + Y_N^{\beta}} \right] \quad (20)^{[13]}$ 式中: $L(\theta)$ 为似然函数; x_j 为 j 个油气藏规模; E_{θ} 为期望值; Y 为待发现的油气藏规模; N 表示理论油藏个数; n 表示已经发现的油藏个数; $\frac{N!}{(N-n)!}$ 阶乘部分表示取出不放回; f_{θ} 表示概率分布模型; β 表示勘探效率(表示最大或投入最多先发现)	该模型中 β 是关键参数,若 $\beta = 0$,则发现过程就是一种从有限总体进行随机采样过程,此时,规模对油气藏的发现顺序没有影响;若 $\beta > 0$,则发现过程是一种有偏采样过程,采样将偏向于较大规模的油气藏
2	对已发现的油气藏分组,分别计算出不同分组待发现油气藏个数及对应的油气资源量,累加得出对应整个区带的含油气单元个数及对应的油气资源量的预测值	利用经典 Horvitz-Thompson 估算子面向油气藏规模分组(个数)与油气藏规模之间的非线性统计数学模型(目标函数),利用相关最小二乘原理可获取目标函数中的勘探效率以及非线性系数: $m_j(i) = \max\{m_j(i-1) - q_j(i-1), 0\} \quad (21)^{[15]}$ 式中: $m_j(i)$ 为第 j 次迭代第 i 分组的目標值; i 为分 i 分组; $q_j(i)$ 为第 j 次迭代第 i 分组后实际累加值	对观测样本进行合理有效的分组,是 GSC 非参数发现过程模型建模以及利用该模型进行油气资源评价与预测的基础;分组方案(包括分组组数 K 的确定、分组区间的划分方法)对模型以及模型的评价计算结果有着直接的影响

件(PetroV),完整地实践了上述系列成藏体系油气资源评价新方法,并进一步将其归纳为资源管理一体化、评价过程一体化以及软件实现一体化为内核的油气资源一体化评价技术:资源管理一体化可理解为对评价对象与勘探目标的数据管理一体化,实现对油气资源的多层次的分类、分级管理;评价过程一体化定位不同勘探阶段或投资阶段,通过滚动评价、增量实现不同评价目标对应的风险模型(回答油气资源有无)、资源模

型(估算资源量以及回答在哪里)以及经济模型(分析投资可行性以及获取效益最大化),实现从盆地资源量推测,到区带资源量估算,到圈闭资源量计算,到油藏储量计算,直至单井储量评估的一体化全周期油气资源量追溯体系;软件一体化实现定位于信息科学技术的最新技术发展,实现数据集成与软件集成,强调建立共享数据平台和规范评价流程。其中,评价过程一体化中的一个关键环节就是,如何通过规避不同勘探阶段区带地质模型的差异、识别不同统计方法的适用性及分析数学模型中计算参数的敏感性,构建统一、完整的面向成藏体系油气资源评价的统计方法体系。

成藏体系油气资源评价方法体系的提出,是传统区带油气资源评价发展到一定阶段后自然产生。通过PetroV对方法体系的整体实践,其扩展与提升的系列油气资源评价方法与技术主要包括:①有效划分评价对象并提升统计边界的合理性。区别于含油气系统以烃源岩为中心,成藏体系核心是以经历了相同或类似地质作用的系列油气藏为目标,其地质边界划分使得油气藏规模分布更加具有“超总体分布”的数学统计意义;②基于层次分析法的油气藏成熟度分析。基于“三元一体”分析方法,一个成藏体系或亚成藏体系可划分为烃源体、输导体、圈闭体等缺一不可功能元素,而每个元素又是系列地质单因素的集合,评价单元与评价参数构成了成藏体系内由高到低的层次组成与评价序列,依层次可以给出合理的量化地质风险评价结果。③基于不同地质场景假设的定量成藏过程分析。“源-位”匹配概念的提出,突出了以成藏过程为主线的各类地质要素组合关系的建立,以及它们之间的相互依赖性分析,利用贝叶斯最大可能性推理技术,能够量化推断不同地质场景假设与验证情况下的油气生成、油气运移、圈闭形成、油气成藏等过程。④基于成藏要素的领域数据模型建立。站在软件数据建模的角度,成藏体系理论提出的静态地质要素、组合关系以及动态地质作用过程等“图”、“表”定义,有助于分主题、分类别组织、衔接与油气资源评价紧密相关的不同专业软件地质解释成果,并用合适的空间数据模型表达。(5)提出了以地质帕莱托法为代表的系列最新资源量预测方法。充分考虑最小、最大油藏规模、油藏结构的实际地质特点,对普通帕莱托概率分布做了合理地质截断处理与数学模型推导,构建了全新的地质帕莱托概率分布模型,使得国内多数区块的油藏规模概率模型不再局限于对数正态概率分布模型、普通帕莱托分布模型,可明显提升区带待发现资源量预测结果的合理性。

4 结论

通过深入消化现有区带资源评价相关资评技术,

基于成藏体系理论,文中作者在一体化油气资源评价软件(PetroV)开发过程中系统归纳了成藏体系油气资源评价内涵,并实践了相关资源评价新方法。特别是,针对不同勘探阶段成藏体系油气资评地质模型和评价目标的差异性,基于统计方法的数学模型机理,PetroV较为全面地归类了业内系列主流统计方法以及自主特色资评技术,提出了面向成藏体系资源评价的统计方法体系,并明确了不同统计方法的应用要点:1)概率分析系列主要用于回答新区含油气有无;2)蒙氏模拟系列能够快速给出未成熟区早期的商业潜力判断;3)数理统计系列较好地规避了未成熟区中、晚期地质资料的不可靠性;4)概率推理系列的概率推演,统计归纳能够较好反映成藏体系相同或类似地质作用过程;5)发现过程系列使得成熟区晚期油藏结构,甚至空间分布预测成为可能。后续,希望本文提出的主流统计方法成因机制与适用性说明,可以辅助我们明确后续进一步值得关注的统计法研究方向,或自主研究或引进最新研究成果,为统计法在成藏体系资源评价中的应用再上一个台阶打下良好基础。

参 考 文 献

- [1] 金之钧,张金川. 油气资源评价技术[M]. 北京:石油工业出版社,1999:66-71.
Jin Zhijun, Zhang Jinchuan. Petroleum resource assessment techniques[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1999:66-71.
- [2] 金之钧,张一伟. 油气成藏机理与分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
Jin Zhijun, Zhang Yiwei. Hydrocarbon accumulation mechanisms and oil/gas distribution[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2003.
- [3] 张湘宁,任宏斌,张学文. 对外合作油气资源评价方法探讨[J]. 石油学报,2003,24(1):9-14.
Zhang Xiangning, Ren Hongbin, Zhang Xuewen. Discussion on resources assessment of PetroChina methodology in cooperation projects with foreign oil company[J]. Acta Petrolei Sinica,2003,24(1):9-14.
- [4] 国土资源部油气战略研究中心. 新一轮全国油气资源评价[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2009:66-71.
Strategic Research Center of Oil & Gas Resources, Ministry of Land & Resources. Petroleum the latest national petroleum resources assessment[M]. Wuhan:China University of Geosciences Press,2009:66-71.
- [5] 汪泽成,赵文智,胡素云,等. 我国海相碳酸盐岩大油气田油气藏类型及分布特征[J]. 石油与天然气地质,2013,34(2):153-160.
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, et al. Reservoir types and distribution characteristics of large marine carbonate oil and gas fields in China[J]. Oil & Gas Geology,2013,34(2):153-160.
- [6] 赵靖舟,李军,曹青,等. 论致密大油气田成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):573-583.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Cao Qing, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields[J]. Oil & Gas Geology,2013,34(5):573-583.

(下转第854页)

- physical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(4): 368–376.
- [14] 黄饶, 陈小宏, 李景叶. 基于谱分解的气藏识别技术与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1): 35–39.
- Huang Rao, Chen Xiaohong, Li Jingye, et al. Spectral decomposition based gas reservoir identification and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1): 35–39.
- [15] 杨占龙, 沙雪梅, 李在光. 含油气检测技术及其在岩性圈闭油气藏勘探中的应用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 822–827.
- Yang Zhanlong, Sha Xuemei, Li Zaiguang, et al. Hydrocarbon detection and application in lithologic reservoir exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 822–827.
- [16] 张会星, 何兵寿, 姜效典, 等. 利用地震波在双相介质中的衰减特性检测油气[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 343–349.
- Zhang Huixing, He Bingshou, Jiang Xiaodian, et al. Utilizing attenuation characteristic of seismic wave in dual-phase medium to detect oil and gas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3): 343–349.
- [17] 宋效文, 马世忠, 秦秋寒, 等. 频谱分解技术在深层致密砾岩气藏检测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 107–113.
- Song Xiaowen, Ma Shizhong, Qin Qiuhan, et al. Application of spectral decomposition in deep tight conglomerate reservoir prediction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 107–113.
- [18] Castagna J P, Sun S, Siegfried R W. Instantaneous spectral analysis: detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. The Leading Edge, 2003, 22(1): 127–129.
- [19] Mitchell J T, Derzhi N, Lichman E, et al. Energy absorption analysis: a case study[Z]. Expanded Abstracts of 66th Annual International SEG Meeting, 1996: 1785–1788.
- [20] Lichman E, Goloshubin G. Unified approach to gas and fluid detection on instantaneous seismic wavelets[Z]. Expanded Abstracts of 73rd Annual International SEG Meeting, 2003: 1669–1702.
- [21] 高建虎, 雍学善, 刘洪, 等. 叠后地震油气检测技术与应用[J]. 石油物探, 2006, 45(4): 385–389.
- Gao Jianhu, Yong Xueshan, Liu Hong, et al. Post-stack seismic hydrocarbon detection technology and application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(4): 385–389.

(编辑 张亚雄)

(上接第 833 页)

- [7] 霍志鹏, 庞雄奇, 杜宜静, 等. 含油气盆地油气藏破坏的油气显示及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 421–430.
- Huo Zhipeng, Pang Xiongqi, Du Yijing, et al. Oil-gas shows from destruction oil/gas reservoirs in the petroliferous basins of China and their geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 421–430.
- [8] 胡素云, 郭秋麟, 湛卓恒, 等. 油气空间分布预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 113–117.
- Hu Suyun, Guo Qiulin, Chen Zhuoheng, et al. A method of predicting petroleum resource spatial distribution and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 113–117.
- [9] White D A. Geologic risking guide for prospects and plays[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(12): 2048–2061.
- [10] Rose P R. Chance of success and its use in petroleum exploration[C]// Norman H F, Edward A B. The business of petroleum exploration. AAPG Treatise of Petroleum Geology, Handbook of Petroleum Geology, 1992: 71–86.
- [11] 陈善勇, 金之钧, 刘小平. 黄骅拗陷第三系油气成藏体系定量评价[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 544–547, 602.
- Chen Shanyong, Jin Xhijun, Liu Xiaoping. Quantitative evaluation of Tertiary petroleum accumulation systems in Huanghua depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(5): 544–547, 602.
- [12] 吕鸣岗, 朱向东. 圈闭/区带的地质风险分析[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 49–53.
- Lv Minggang, Zhu Xiangdong. Geological risk analysis of trap and play[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2): 49–53.
- [13] Loeliger H A, Lustenberger F. Probability propagation and decoding in analog VLSI[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 837–843.
- [14] Casella G, Robert C P. Monte carlo statistical methods, second edition[M]. New York: Springer, 2004.
- [15] Lee P J. Statistical methods for estimating petroleum resources[M]. London: Oxford University Press, 2008.
- [16] Chen Zhuoheng. Undiscovered petroleum accumulation mapping using model-based stochastic simulation[J]. Mathematical Geology, 2006, 38(1): 1–16.
- [17] US Geological Survey World Energy Assessment Team. US Geological Survey World Petroleum Assessment 2000—Description and results. US Geological Survey Data Series DDS-60, 4 CD-ROM, 2000.
- [18] Zipf G K. Human behavior and the principle of least effort[M]. Cambridge, London: Addison-Wesley, 1949.
- [19] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- Jiang Zongli. Introduction to artificial neural networks[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2001.
- [20] 金之钧. 五种油气藏规模概率分布模型比较研究[J]. 石油学报, 1995, 74(3): 12–15.
- Jin Zhijun. A comparison study on five basic oil and gas pool size probability distribution models and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 74(3): 12–15.
- [21] Kaufman G M. Statistical decision and related techniques in oil and gas exploration[M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1963.

(编辑 高岩)