

区带勘探中的油气资源评价方法

盛秀杰¹,金之钧¹,肖 晔²

(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)

摘要:国内外主流统计方法的预测结果,作为区带高效勘探部署的有效决策依据还有一段距离,评价方法研究与应用仍有提升空间。立足于提升区带商业发现效益以及解决区带勘探部署规划中的实际问题,分别提出:①区分边际概率、条件概率与空间概率模型的地质模型内涵与适用条件,揭示特定地质条件约束下的地质风险,辅助提升低勘探程度区带的预探目标或风险井的勘探成功率;②遵循油气成藏体系理论划分高勘探程度区带范围,按最早探井发现时间整理、归并储量计算单元为经历了相同地质作用过程的油气藏(样本)数据,为求解油气藏规模总体分布模型提供较为客观的样本数据;③充分考虑不同勘探投入对油气藏发现的影响,推导期望最大化算法并基于勘探效率图版求解地质帕莱托概率分布参数,更加客观地预测区带油气资源潜力及油气藏规模结构;④分别采用体现地质和市场不确定性的情景树,以及勘探目标地质相关性或战略相关性的贝叶斯网络,可有效将投资组合技术与公司战略规划部署有机结合起来。

关键词:地质帕莱托;勘探效率图版;投资组合;地质风险评价;区带定量评价;油气资源评价

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Petroleum resources assessment methodology in play exploration stages

Sheng Xiujie¹, Jin Zhijun¹, Xiao Ye²(1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*2. *Department of Mathematical Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Abstract: The assessment results of prevailing statistical methods used in the petroleum industry are, to some extent, inadequate in helping the formulation of effective exploration strategies. There are still plenty of rooms of improvement in terms of assessment methods. Aiming at enhancing the economy of commercial discoveries and dealing with challenges faced during exploration deployment planning, we proposed that: (1) Differentiating the applicable scope and conditions of marginal, conditional and spatial probability mathematical assessment models and providing information concerning geological-constraint risk so as to improve success rate of exploratory drilling in less-explored areas; (2) Providing more objective data samples for solving general reservoir scale distribution models by delineating highly-explored areas with the guidance of petroleum accumulation theories and sorting and merging reserve assessment units into oil and gas reservoirs (samples) that went through the same geologic processes according to the time order of first discovery well; (3) Taking into consideration the effect of different exploratory investments upon oil and gas discoveries and eliciting expectation maximization algorithm to work out the Pareto distribution parameters based on exploration efficiency plates, so as to predict more objectively the resource potential of oil and gas and the structure of reservoir scales; (4) Using scenario trees representing respectively geological and market uncertainties and geology-or strategy-related Bayesian networks to combine effectively and organically investment portfolios and exploration strategies.

Key words: geological Pareto, exploration efficiency plate, investment portfolio, geological risk assessment, quantitative assessment of play, assessment of oil and gas resources

区带油气资源评价在油气勘探部署规划中占据着重要地位,是油气勘探一系列投资决策过程中的关键

环节^[1-2]。国外科研机构和学者一般认为,区带是介于盆地(或坳陷、凹陷)与圈闭之间,处于盆地同一构

收稿日期:2016-03-03;修订日期:2017-03-21。

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

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA14010101)的软件成果。

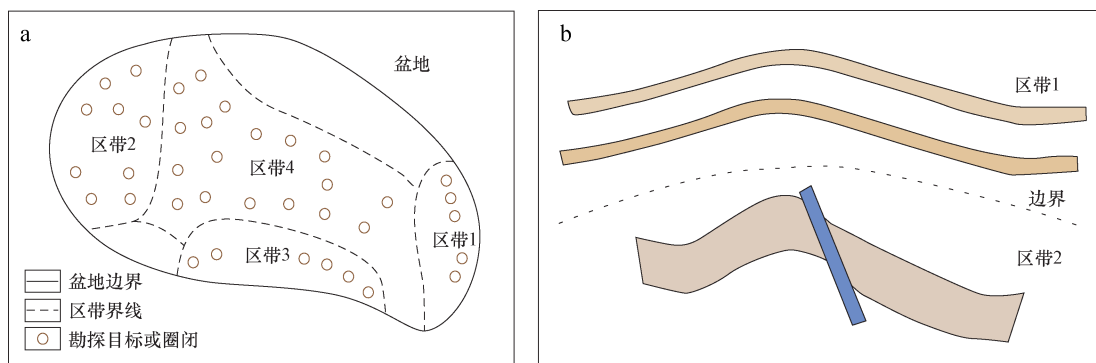


图1 平面a)和剖面b)上的区带展布特点

Fig. 1 Distribution of plays in map view (a) and section view (b)

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(田)的统一组合。区带中的圈闭或油气藏类型可以具有不同的地质特点,或以一类为主,或几类相互组合。基于含油气系统理论,它们可以在平面上形成带状或块状,交错叠加,在剖面上以沉积层系进行划分(图1)。如何基于区带地质特点进行有效资源评价,提升区带勘探效率,降低勘探成本,从而提高投资回报率,是各石油公司或企业所追求的核心目标。

近些年,为了最大程度地规避风险,获取最佳经济效益,通过不断的实践探索,国外各大石油公司都在持续不断地建设和开发具有本公司特色的区带定量资源评价软件系统和方法,并把该项技术列为公司上游的核心保密技术,但少见较为详细的软件系统和评价方法介绍。国内油公司的区带勘探中的油气资源评价(包括国土部的新一轮油气资源评价),以预测油气资源潜力为核心,根据区带勘探程度的不同和实际地质特点,从成因、类比及统计3个角度匹配适合的评价方法进行资源评价。尽管单一的油气资源潜力评价结果可以作为新区勘探部署规划的主要依据,但仍不足以满足现有区带勘探现状的油气资源评价需求。目前,国内区带勘探风险在增加,勘探成效在降低,主要表现在:一方面,随着勘探程度的增加,未发现的剩余油气资源量和油气藏规模不断降低;另一方面,随着勘探转入新区,勘探成功率也随之不断降低。此外,油气价格的大范围波动,甚至有可能面临长时期低油价,使具有工业经济价值区带资源潜力的预测难度增加。因此,如何客观预测区带油气资源潜力,最大限度地为勘探部署决策提供科学依据成为首要任务^[3-10]。定位于突破国外跨国石油公司的技术壁垒,服务于中石化近些年“突出资源战略,注重油气发现和商业发现,走高效勘探之路”的战略调整,本文深入阐述了在研发PetroV的过程中^[11-21]新研究的、可服务于区带高效勘

探的油气资源定量评价方法,涵盖精细地质风险评价,预测体现资源空间分布的新领域与新方向,以及分析具有工业经济价值的区带资源潜力等,以期在这一领域与同行们探讨、促进和完善国内主流区带定量评价方法,找准区带定量评价方法在油气勘探部署规划中的应用点,以更好地应对全球油气资源勘探一体化给中石化、甚至中国其他石油公司带来的机遇与挑战。

1 低勘探程度区带的地质风险评价

在对低勘探程度、尚未发现油气的区带设计地震方案,或对已经具备一定资料的勘探目标或含油气构造进行风险井或预探井部署时,面临的首要问题是地质风险(图2)。评价的关键点首先在于结合不同区带的勘探程度和实际地质特点,从资料缺乏到具备一定的地质分析和井-震资料,依次匹配边际、条件及空间概率数学模型量化潜在的地质风险,分别回答是否进入新区勘探(图2蓝色框图部分)、为预探目标或风险井的选择提供依据(图2红色框图部分)以及协助回答可能的油气资源潜力所在的新领域或新方向(图2绿色框图部分)。其次,通过进一步预测考虑地质风险的油气资源潜力,为低勘探程度区带的勘探部署规划(如选择地震部署方案方面)提供客观的资源战略价值分析结果。

1.1 边际概率评价

边际概率用于定量表征“区带有油气存在”的可能性。其评价场景包括:

1) 给出确定性的区带含油气成功概率。它涵盖“生、储、盖、运、聚、保”各个环节,识别、定义油气成藏缺一不可的地质条件(如烃源岩条件、圈闭条件、储层条件、盖层条件等),推断每一地质条件的主观成功概率(边际概率),利用概率基本原则中的乘法原则(缺一不可)计算关键地质条件的联合概率。

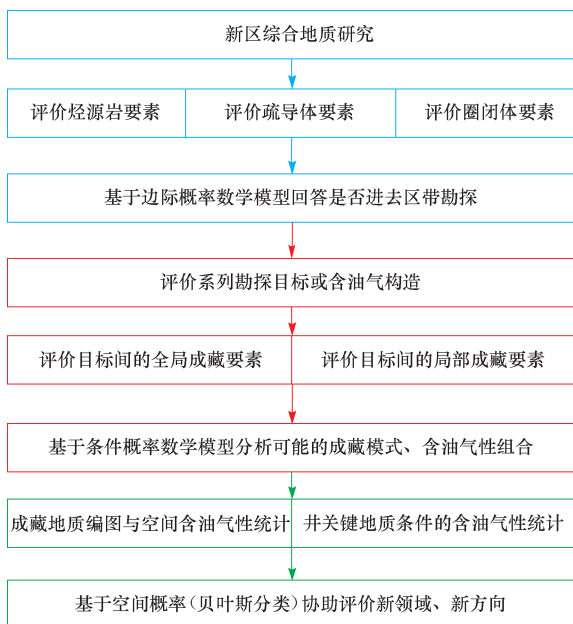


图2 不同勘探程度区带地质风险评价模型及流程

Fig. 2 Models and flow charts for assessing the geological risks in plays with different exploration maturity

2) 分析油气藏成熟度。在实际勘探部署规划时,可以将评价结果区间(0~1)划分为能够体现油气藏发展阶段的区间,反映油气成藏的成熟度(Petroleum Accumulation System Mature Index, *PASMI*),即当前油气藏是处于“生长”还是“破坏”阶段。

3) 给出含油气性有无的把握度。基于模糊规则推理区带含油气性的不确定性分布,可改变油气藏成熟度单一评价值的局限性,为勘探决策给出尽可能全面的地质评价结果。

1.2 条件概率评价

同一区带内不同含油气区块的油气成藏经历了部分相同(全局成藏条件)和部分不同(局部成藏条件)的成藏过程。以全局成藏地质条件(边际概率评价)

为前提评价某一区块是否含油气性,遵循的是贝叶斯条件概率数学模型。其评价场景包括:

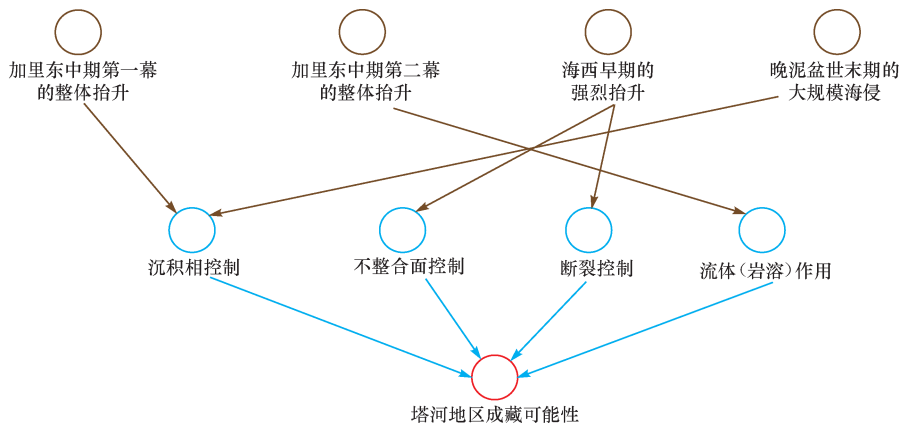
1) “至少一个区块含有油气”的组合概率评价。利用概率树可视化分析技术,通过区分不同区块间的地质依存相关性,分析不同区块同时含有油气的可能性;同时,根据某一区块的钻后验证,条件概率模型可调整其他区块的含油气概率评价结果,及时反馈到最新勘探部署规划中。

2) 成藏模式最大可能性推理。利用贝叶斯网络可视化分析技术,将概率推理所需的复杂联合概率密度,分解为一个油气成藏所需的系列地质要素的组合;对各地质要素按因果、时空等关系或成藏过程,依次、分别按先后条件设置,以可视化方式降低概率推理中的复杂程度,使概率推理的方法可用于涉及大量地质不确定性因素的成藏模式分析(图3)。

1.3 空间概率评价

在同一个区带(或目标层系)的不同空间位置(或不同新老区块),控制油气藏生成和聚集的地质变量体现了几乎相同的地质作用和地质过程。利用老区块较为详实的地质资料及新区块的少量井资料,通过跨学科技术融合来研究油气资源的空间分布特征,预测未发现油气藏的可能位置及不确定性。其评价场景包括:

1) 从统计成因的角度,推测在某一特定位置油气存在的可能性。将不同空间位置上油气存在的可能性视为具有不确定性的一个分类问题(区分有油和无油两个总体),将马氏距离与贝叶斯方法结合应用,以井为统计单位预测特定空间位置油气成藏可能性,以有效的关键成藏地质变量为空间维度计算马氏距离;统计、绘制含有油气和不含有油气井的马氏距离直方图,计算不同井的含油气成功概率值,通过克里金空间插值计算区带含油气概率的空间分布(图4)。

图3 基于贝叶斯网络推理塔河地区成藏成因的最大可能性^[5]Fig. 3 The most possible genesis of reservoirs in Tahe area based on Bayesian network^[5]

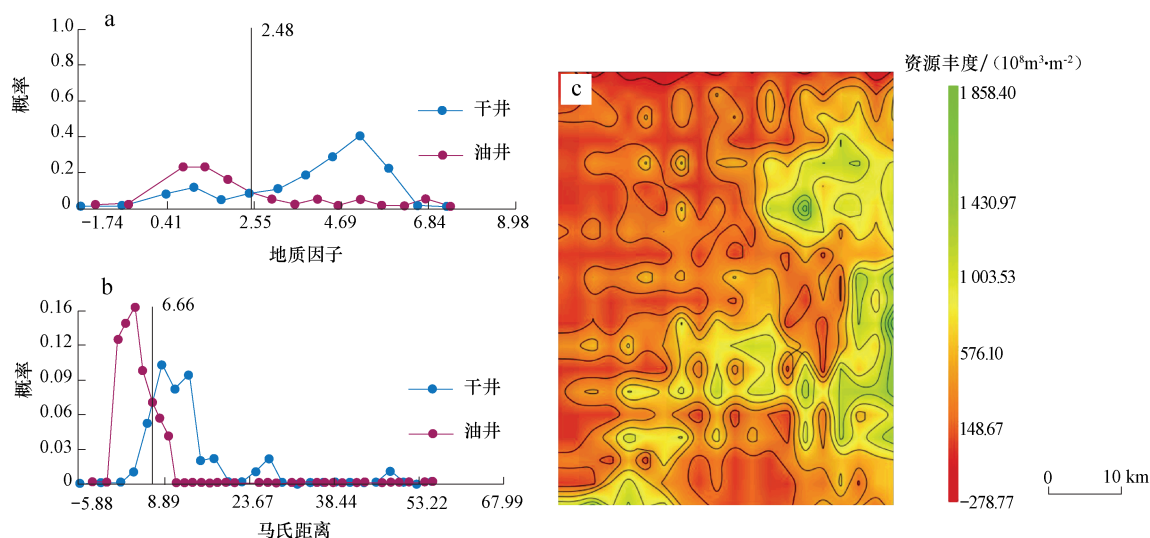


图4 基于马氏距离先验概率和傅里叶变换的资源丰度空间分布条件模拟

Fig. 4 Simulation of spatial distribution condition of resources based on prior probabilities from Mahalanobis distance and Fourier transform

a. 识别、区分油井和干井的系列关键成藏地质变量; b. 计算、统计油井和干井的马氏距离直方图; c. 基于傅里叶变换条件模拟资源丰度空间分布 (概率 = 50%)

2) 从地理信息系统的空间建模角度, 利用地图代数回答空间上某一位置油气存在的可能性有多大。定义与全局成藏地质条件对应的 GIS 专题矢量或栅格图层, 通过图层空间叠合算法离散每一图元并统计每一网格的地质变量值, 利用边际或条件概率数学模型分

别计算出不同网格的含油气概率 (图 5)。

3) 利用 GIS 空间分析技术与贝叶斯数学模型结合的证据权法^[22-23], 叠加没有地质相关性的系列 GIS 成藏因素专题图层与含油气信息图层 (如测网图层中的干井、油井), 建立基于重叠区的含油气条件先验概率。

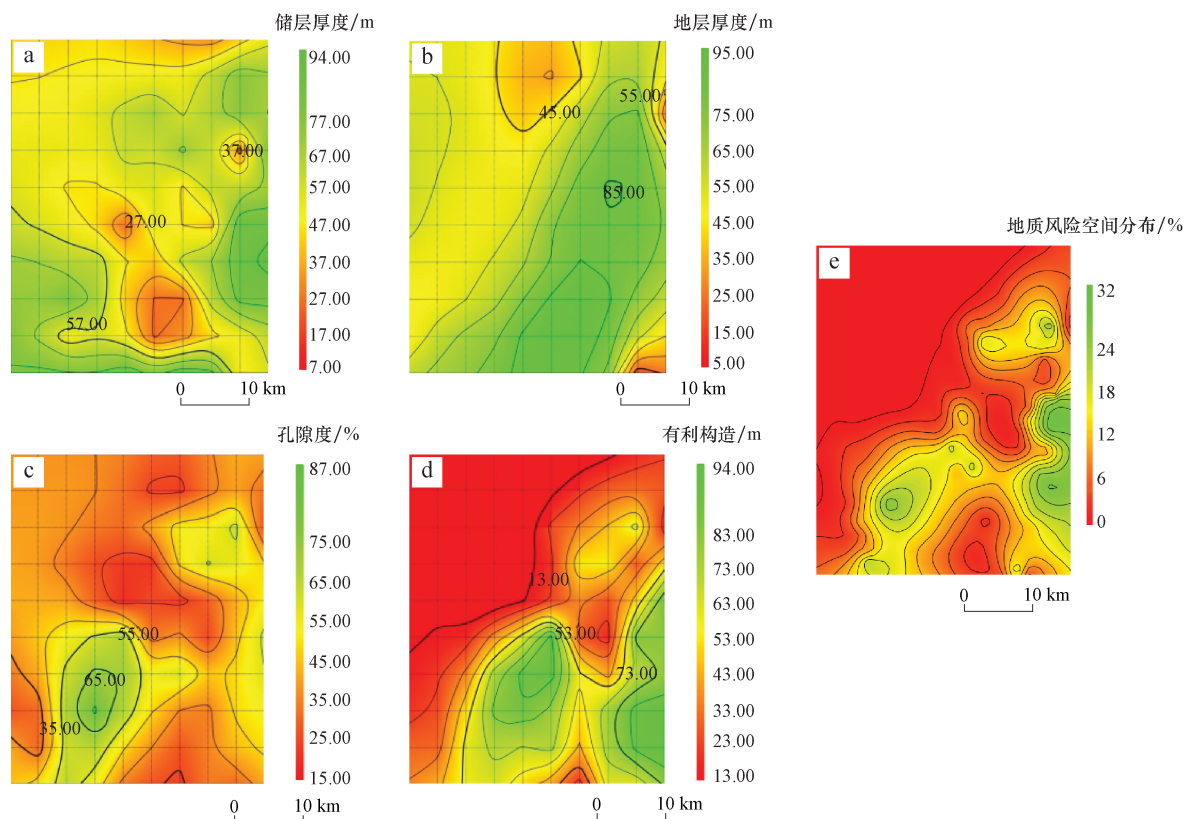


图5 基于地图代数的空间概率评价 ($P_e = P_a P_b P_c P_d$)

Fig. 5 Assessment of space probability based on map algebra ($P_e = P_a P_b P_c P_d$)

利用 GIS 空间分析功能中的求并函数,将研究区划分为不同状态的被评价区域,根据每个区域的证据状态计算其含油气后验概率并能够识别关键成藏因素。

2 高勘探程度区带的资源潜力分析

高勘探程度区带可粗略分为 3 个阶段开展评价,包括油气藏滚动发现阶段的待发现资源量预测、油气藏稳定发现阶段的油气藏规模结构分析及油气藏增储发现阶段的资源空间结构分析(图 6)。评价的关键点是以经济效益最大化、回答新领域与新方向及落实高效勘探为目的,利用地质帕累托发现过程模型,来评价油气资源潜力、分析油气资源规模和空间结构并计算盈利能力,为科学优选和部署高效勘探开发方案提供扎实的地质评价结果。评价的流程包括:①基于成藏体系理论划分评价单元(图 6 蓝色、红色框图部分);③匹配油气藏规模分布模型(图 6 绿色框图部分);③基于发现过程模型计算关键分布模型参数(图 6 绿色框图部分);④预测资源潜力、规模与空间结构(图 6 绿色框图部分);⑤快速、经济评价与区块投资组合分析(图 6 棕色框图部分)。

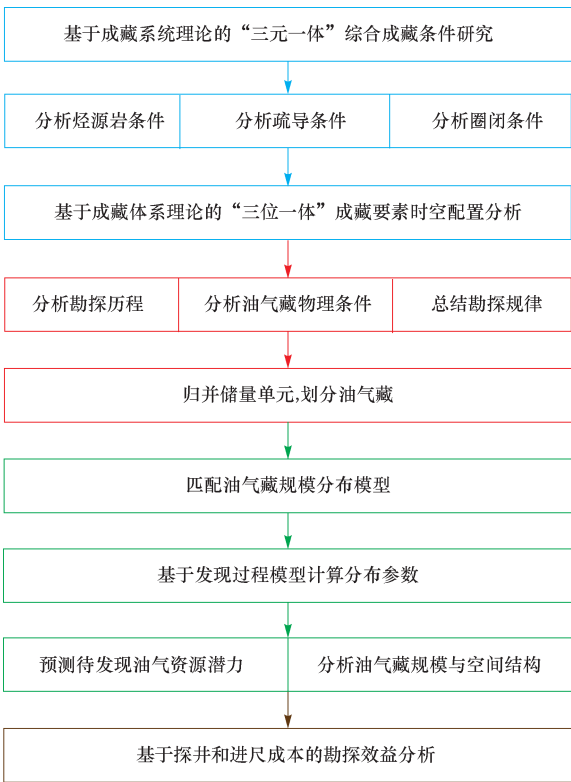


图 6 高勘探程度区带油气资源潜力、规模和空间结构以及勘探效益与投资组合评价流程

Fig. 6 Flow chart for assessing oil and gas potential, scale, and spatial distribution as well as exploration economy and investment portfolios in highly-explored plays

2.1 基于成藏体系理论^[24]的区带划分

客观地界定哪些油气藏(样本数据)属于同一个区带或经历了相同的地质作用过程,是求解总体概率分布参数的必要条件。基于不同油气地质理论来划分区带,决定了一个区带内的系列油气藏作为样本数据,是否具有随机分布特点,是否能够很好地反映总体分布。与遵循以“源”为核心的含油气系统理论划分区带有较大区别,本文采用金之钧的以“藏”为核心的成藏体系理论来划分区带范围,整理油气藏样本数据。油气成藏体系理论提出了“三元一体”及“源位匹配”等研究思路来分析可能的油气成藏模式,符合国内多期构造叠合盆地背景下的油气成藏特点,强调了油源、输导体和圈闭之间相互关联、相互制约且可以跨层系的油气“随机”成藏的特点(表 1)。在平面或剖面上通过流体势的高势面(分隔槽,多为二级构造的轴线和封闭性良好的边界断层,部分等同于含油气系统边界)来确定成藏体系(区带分布范围),识别系列具有统一温压场和水动力场(每个油气藏具有独立的油-水统一界面)的油气藏作为统计样本数据。

2.2 充分考虑发现过程特点的地质帕累托分布

国内外油气藏规模分布采用的主要是对数正态分布。对数正态的“轻尾”分布特点(大油气藏比重偏低),使得在分析油气藏规模结构时难以预测大油气藏的存在;加之没有考虑地质截断,意味着在数学模型上降低了油气藏规模的期望值。事实证明,基于对数正态描述的资源规模预测结果往往偏于保守。金之钧(1990,2012)通过深入研究指出,油气藏规模分布规律应该具有明确地质截断涵义和考虑样本地质特征。样本的统计规律是随着勘探程度的提高而变化的,但随着勘探程度的不断增加,油气藏样本的分布会逐渐

表 1 成藏体系理论的源位匹配类型

Table 1 Accumulation composition types based on petroleum accumulation systems

类型	一位	二位	三位
单源	单源一位	单源二位	单源三位
多源		二源二位	二源三位
三源			三源三位
说明	烃源岩 圈闭 烃源岩+圈闭 疏导体系		

逼近于理论总体的分布。同时,在实际勘探过程中,由于不同地区地质条件、勘探理论甚至勘探部署投入上的差异,导致了不同地区油气藏发现的过程具有较大差别。为了使得增加了系列地质条件约束的油气藏规模概率分布函数与自然总体中的分布形式具有一致的数学表达,金之钧以广义帕累托概率分布数学模型为基础,全新推导了基于油气藏规模限定条件下的地质帕累托(Geological Pareto, GP) 累计和密度分布数学模型[式(1)、式(2)],并建立了体现发现过程特点的地质帕累托最大似然方程[式(3)]^[25],用期望最大化算法(Expectation Maximization Algorithm, EM 方法)数值模拟求解式(3)的根,以获取概率分布参数 θ 的最大似然解,其中包括分布的位置参数(γ)、形态参数(λ)以及勘探效率参数(β)。基于发现过程的地质帕累托分布可完整地应用于:①表征不同盆地类型的区带油气藏规模分布;②充分考虑地质截断和发现过程的待发现油气资源量计算及分析油气藏规模结构。

$$F(q) = 1 - \left(\frac{q_0 + \gamma}{q + \gamma} \right)^\lambda + \frac{q - q_0}{q_{\max} - q_0} \left(\frac{q_0 + \gamma}{q_{\max} + \gamma} \right)^\lambda \quad (1)$$

$$f(q) = \frac{\lambda (q_0 + \gamma)^\lambda}{(q + \gamma)^{\lambda+1}} + \frac{1}{q_{\max} - q_0} \left(\frac{q_0 + \gamma}{q_{\max} + \gamma} \right)^\lambda \quad (2)$$

式中: $F(q)$ 为油气藏规模累计分布函数; $f(q)$ 为油气藏规模密度分布函数; q 为可能的油气藏规模; q_0 为具有经济可采门限的最小油气藏规模; $q_{\max}$ 为区带内最大油气藏规模; λ 为油气藏规模形态分布参数; γ 为油气藏位置分布参数。

$$L(\theta) = \frac{N!}{(N-n)!} \prod_{j=1}^n f_\theta(x_j) E_\theta \left[\prod_{j=1}^n \frac{x_j^\beta}{b_j + Y_{n+1}^\beta + \dots + Y_N^\beta} \right] \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad b_j = x_j^\beta + x_{j+1}^\beta + \dots + x_n^\beta \quad (4)$$

式中: $L(\theta)$ 为似然函数值; θ 为分布参数; x_j 为第 j 个被发现的油气藏; b_j 为截止到发现第 j 个油气藏时的累计油气藏规模总和; β 为勘探效率。式(3)中包含有3个关键算子。算子 $\frac{N!}{(N-n)!}$ 描述油气藏被发现后不会

再被发现, N 为理论上可被发现的油气藏个数; n 为已发现的油气藏个数。算子 $f_\theta(x)$ 为油气藏规模分布的密度函数,它是对油气藏规模的分布和变化特征的数学描述。算子 $E_\theta[\bullet]$ 表示数学期望,是对油气藏的发现过程和发现模式的数学表示。

式(3)可以称为发现过程模型的特征方程;从概率及数理统计学的角度来看,又是(油气藏)发现序列的似然函数(或称似然方程)。因此,可以通过最优化搜索等数学方法,得到方程 $L(\theta)$ 的最大似然解,从而实现对分布参数 θ 和 N 的求值过程。根据式(3)来进行分布模型参数 θ 的估计算法异常复杂,很难实现解析解,PetroV给出了基于数值模拟的最优化搜索方法。以渤海湾盆地东营中央背斜构造带为例,按第一口探井部署时间归并储量单元为系列油气藏样本数据,利用式(3)求取分布参数后,用卡方值和正态概率纸图版检验地质帕累托和对数正态分布模型与已发现油气藏的匹配效果。图7表明,地质帕累托(绿色线)和对数正态(棕色线)分布模型

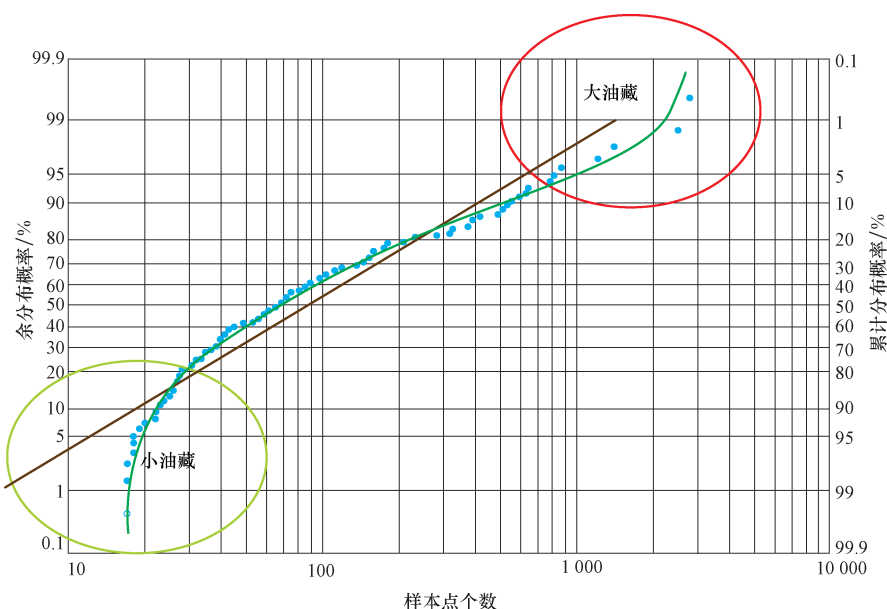


图7 渤海湾盆地东营中央构造背斜带已发现油气藏(蓝色点)、地质帕累托(绿色线)与对数正态(棕色线)分布拟合曲线

Fig. 7 Fitted curves between the oil and gas discoveries (blue dots), their geological Pareto (green line) and lognormal distributions (brown line), in the anticline of the central structural zone in Dongying area, Bohai Bay Basin

都适合油气藏规模分布描述,但地质帕累托分布模型的卡方值更小,对数正态概率纸图版揭示其在描述大油藏(红色圈)和小油藏(绿色圈)方面优于对数正态分布模型。

2.3 勘探效率图版的提出与应用

为了准确理解式(3)中的 β 值并用于辅助确定地质帕累托分布参数的最优解,本文设计了能够反映区带勘探效率的图版(图8),同时模拟不同地质帕累托分布参数情形下的油气藏发现过程。图版的横轴是发现油气藏的时间序列(第几个被发现),纵轴是对应的被发现油气藏规模的累加值。图版的目的是在假定不同勘探效率的情况下,基于式(3)求解可能的地质帕累托总体分布(参数),通过取出不放回算法模拟油气藏发现过程,模拟曲线与实际已发现油气藏累加曲线最为接近的分布为可能油气藏规模总体分布。勘探效率图版可分3种典型情形(图8):① $\beta=0$ (棕色线),如果每次发现的油气藏规模大小随机,累计曲线的增量是常数,增量没有变化,意味着油气藏发现过程是个随机发现过程,是无偏取样的过程;② $\beta>0$ (绿色线),假定油气藏发现总是先发现规模大的,再发现规模小的,增量变化(导数)越来越小,曲线形态上凸,发现过程效率最高,因为最少的先期投入发现最大的油气藏;③ $\beta<0$ (红色线),先发现规模小的油气藏,后续依次发现规模大的油气藏,意味着增量(导数)越来越大,曲线形态下凹,勘探效率最低,这在实际情况中是小概率事件。

利用符合地质模型约束的系列 N 和 β 值求解地质帕累托分布参数的最优解,设计“最大油气藏会被最

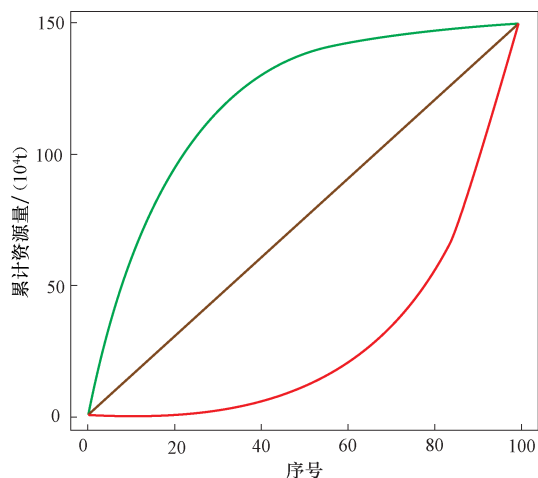


图8 勘探效率图版的3种典型情形

Fig. 8 Three typical scenarios shown with exploration efficiency plates

先发现、已被发现的油气藏不会再被发现”的抽样算法,通过蒙特卡洛模拟遵循地质帕累托分布模型的油气藏发现过程(图9系列草绿色线),并与实际的发现油气藏过程(图9蓝色线)进行匹配,以确定最佳分布参数,以便应用于后续待发现资源潜力分析及油气藏规模结构分析。除辅助判断油气藏规模分布参数外,区带勘探效率图版对已有的勘探过程有较为充分的定量描述,并可揭示勘探过程中的一些“波折”(又发现大油田)。以东营中央背斜带3种类型的油气藏发现过程分析为例,构造类油气藏的发现基本处于高成熟阶段,勘探理论也相对成熟,是勘探效率最高的油气藏类型(图9a);岩性类油气藏的发现中间明显有些波折,岩性成藏理论趋于稳定是个渐进过程,最大的特点就是后期有大岩性油气藏(牛庄)的发现(红色箭头处)(图9b);而遵循隐蔽油气藏勘探理论的复合油气藏的发现,还处于理论需要进一步丰富和实践的阶段,目前的勘探投入并没有呈现出典型的高效率特点(与勘探效率等于零的红色虚线相比),是下一步勘探努力的方向(图9c)。

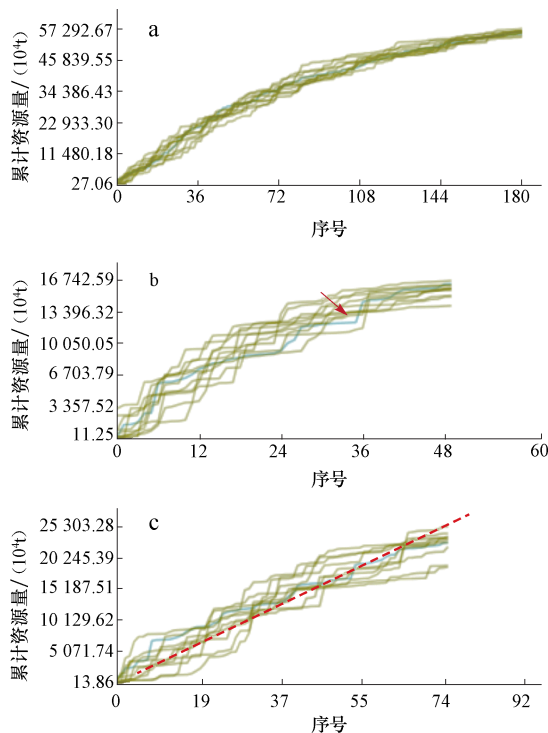


图9 渤海湾盆地东营凹陷中央构造带3种油气藏的发现过程模拟

Fig. 9 Simulation of discovery process of three types of oil and gas reservoirs in the central structural zone in Dongying area, Bohai Bay Basin

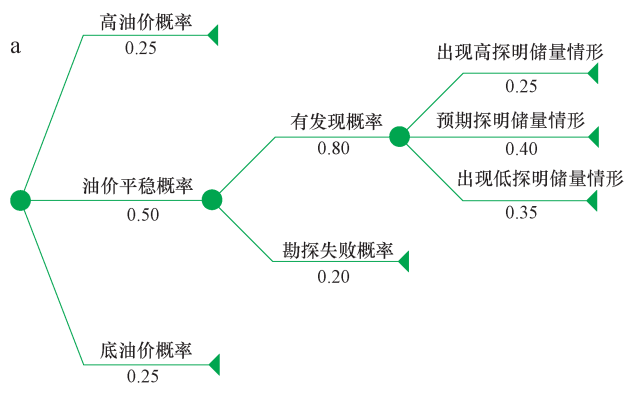
a. 构造类油气藏发现过程; b. 岩性类油气藏发现过程; c. 复合类油气藏发现过程

3 考虑项目相关性的投资组合优选

为了提高区带钻探成功率,寻找商业或经济的规模接替储量、增加公司价值,各上市石油公司加强了经济评价和投资组合优选技术的应用。对由多个潜在含油气区带构成的勘探区块进行评价和优选,以便最终作出最佳投资决策——十分重视如何在有限的勘探投资条件下,获取最佳投资效果。区别于主流投资组合技术一是以确定性经济评价结果为依据,二是更多关注勘探投资相关的直接约束条件,本文积极实践了基于情景树不确定性经济评价和考虑项目地质或战略相关性的贝叶斯网络技术,以突出地质和市场不确定性对经济评价结果的影响,以及勘探项目间相关性对投资效益的影响。

3.1 以情景树为代表的的多不确定性净现金流分析

PetroV 基于净现金流模型,分别配套完善了专有财税模型(中国石化财税、海外矿税、分成及服务合同等类型)及针对每一经济评价参数的评价细则。净现金流模型是基于不确定性的地质风险分析和资源量预测结果进行的,另外在经济评价中还涉及各种成本费用变动,通过识别所有经济评价参数的不确定性分布规律(匹配适合的概率分布模型),进而获取收益分布。但该方法在实际操作过程中具有一定的局限性,对评价人员要求很高。本文提出基于情景树的不确定性经济评价技术,通过识别关键评价参数在有限概率场景下的取值(比如高、正常、低),进而组合这些变量、选择可能的不同场景计算收益分布(图10)。



3.2 考虑勘探目标相关性的投资组合优选

基于排队优选的区带勘探部署规划,不能够体现不同勘探目标组合之后的经济效益,且缺乏关于企业自身与社会效益的综合评价——尤其很难直接量化、传递公司的勘探部署战略意图。如,将有限勘探资金在不同勘探阶段对不同地域的区带进行分配,以保持各级储量序列的合理性,为油田企业长期稳定发展提供基础等^[26-27]。以中石化预探井部署为例,每年参与投资分配的勘探目标往往数量较多,而实际要投入勘探开发的资金有限,这就需要从所有参与评价的勘探目标中筛选出经济效益回报最高的进行投资,以期通过有限的投资取得最大收益,寻求效益最大化和风险最小化之间的最佳平衡(也称效益边缘曲线,图11c红色线)。其中,投资效益可以用项目群的净现金流表示(图11c纵轴),投资风险可以用方差、半方差、VaR及CVaR等描述(图11c横轴)。区别于以确定性经济评价结果为基础的主流遗传算法^[28]投资组合分析技术,在同样考虑勘探、开发投资及获取的储量等约束条件之外,本文以每个勘探目标的不确定性经济评价结果为基础(基于情景树),通过贝叶斯网络设置不同项目间的地质或战略相关性^[11],利用吉布斯采样遍历该网络发现所有满足限制条件的项目组合。如,图11a中A和B两个目标的含油气性有无直接决定了C目标,C含油气性有无决定了D目标。利用图11b的地质相关性进行描述(烃源岩条件是全局成藏条件,储层和盖层是局部成藏条件),计算结果设置图11a中A,B,C三个目标的概率。

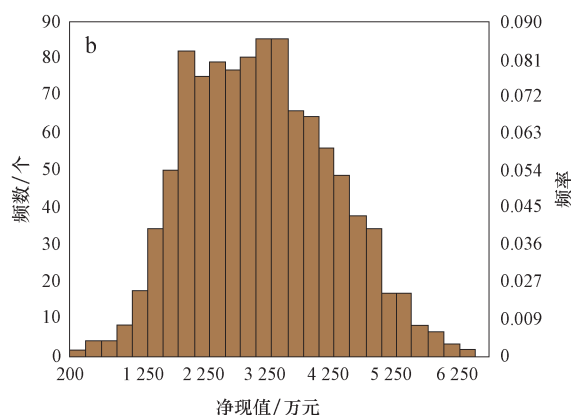


图10 基于情景树计算的不确定性经济评价

Fig. 10 Economic assessment based on uncertainties calculated from scenario trees

a. 基于多分支概率树体现价格、地质风险及开发产量的各种可能性;b. 基于情景树计算的净现金流分布

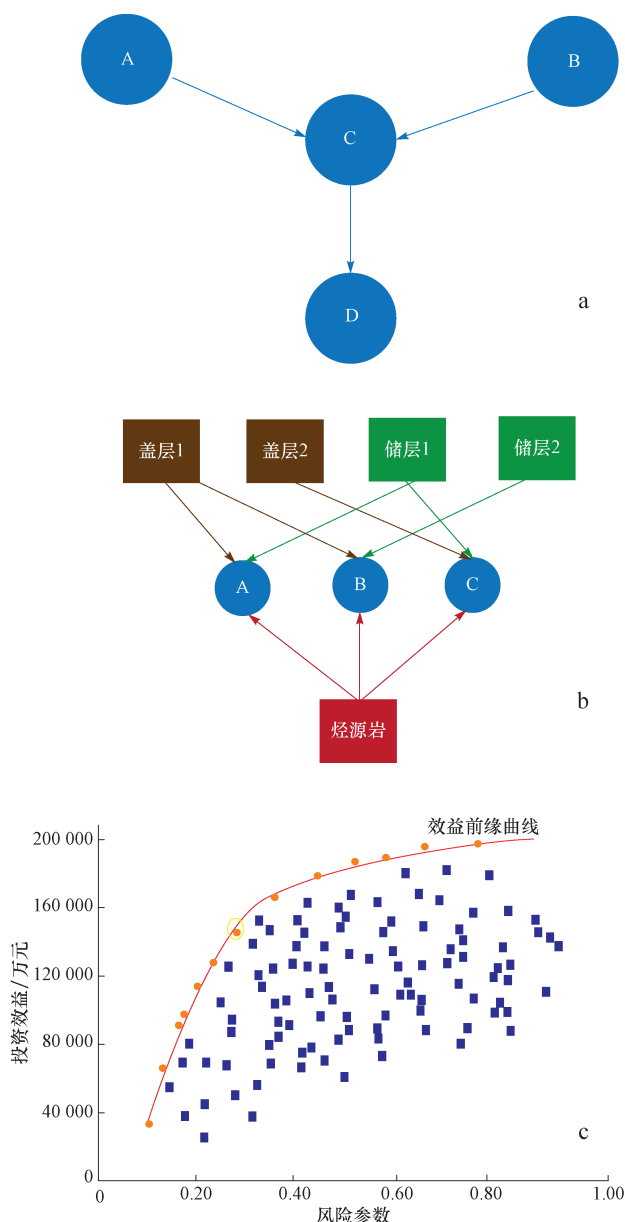


图 11 体现勘探目标间相关性的投资组合分析

Fig. 11 Investment portfolio analyses showing the correlation among exploration targets

- a. 基于贝叶斯网络设置勘探目标间的相关性;
b. 识别共性(烃源岩)、局部(盖层、储层)成藏因素,设置条件概率;
c. 投资效益前缘曲线

4 结论

紧贴区带勘探中定量评价的实际需求,本文研究成果充分支持了 PetroV 的研发,拓宽了以“含油气有无、多少及是否值得可采”为代表的传统区带定量评价方法及流程,有助于促进当前区带评价从定性评价向定量评价转变:

- 1) 注重利用多种概率数学模型实现不同勘探阶

段下,多层次、多阶段、可回溯的区带地质风险评价;强调系列跨学科最新技术的应用,使得油气资源规模结构和空间结构互为条件、交叉模拟验证,提高待发现资源量预测的合理性,最大限度地减小勘探风险。

2) 除了以地质帕累托分布模型为代表的概率推理和统计归纳回答油气藏规模结构外,全新设计的区带勘探效率图版,可视化地定量表征不同勘探投入下对油气藏发现的影响,以及勘探过程中可能存在的勘探理论或方向性问题,可有效揭示当前区带勘探投入的程度和待突破的方向,从而从地质成因的角度为高效勘探部署规划提供了新的思路与方法。

3) 立足于优化区带勘探决策及提升区带商业发现效益,实现基于不同投资策略的目标决策分析与投资组合分级管理,建立适合国内外油气勘探情况的目标综合评价优选及投资优化组合等方面的技术方法体系,实现中石化年度勘探部署的综合排队筛选与优化,获取油气勘探投资效益的最大化效果。

最后,实现上述区带定量评价方法的 PetroV 1.0 和 2.0 已经分别于 2013 年和 2014 年正式发布,并被中国石化作为唯一软件平台用于股份公司预探井、勘探评价项目及地震部署方案的年度勘探部署及优选决策。

参 考 文 献

- [1] 罗斯 P R. 油气勘探项目的风险分析与管理[M]. 奚立荣,译. 北京:石油工业出版社,2002:6-50.
Rose P R. Risk analysis and management of petroleum exploration ventures [M]. Dou Lirong, translated. Beijing: Petroleum Industry Press,2002:6-50.
- [2] 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]. 北京:中国地质出版社,2009:66-71.
Strategic Research Center of Oil & Gas Resources, Ministry of Land & Resources. The latest national petroleum resources assessment [M]. Beijing: China University of Geosciences Press,2009:66-71.
- [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] 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.
- [5] 陈善勇,金之钧,刘小平. 黄骅坳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 Zhijun, Liu Xiaoping. Quantitative evaluation of Tertiary petroleum accumulation systems in Huanghua depression

- [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(5): 544–547, 602.
- [6] 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.
- [7] Loeliger H A, Lustenberger F. Probability propagation and decoding in analog VLSI[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 837–843.
- [8] Casella G, Robert C P. Monte carlo statistical methods (second edition) [M]. New York: Springer, 2004.
- [9] Chen Zhuoheng. Undiscovered petroleum accumulation mapping using model-based stochastic simulation[J]. *Mathematical Geology*, 2006, 38(1): 1–16.
- [10] US Geological Survey World Energy Assessment Team. US Geological Survey world petroleum assessment 2000—Description and results [DB/CD]. US Geological Survey Data Series DDS–60, 2000.
- [11] 盛秀杰, 金之钧, 肖晔, 等. 圈闭评价中含油气性风险依赖性概念、方法及应用[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 154–161.
Sheng Xiujie, Jin Zhijun, Xiao Ye, et al. Concept, method and application of geological risk dependency indicating petroleum discovery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 154–161.
- [12] 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.
- [13] Kaufman G M. Statistical decision and related techniques in oil and gas exploration [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1963.
- [14] 张中华, 周继涛. 油气藏最小商业储量规模计算方法[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 148–153.
Zhang Zhonghua, Zhou Jitao. Calculation of the minimum commercial reserves of petroleum reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 148–153.
- [15] 刘超英, 闫相宾, 高山林, 等. 油气预探区带评价优选方法及其应用[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 314–318.
Liu Chaoying, Yan Xiangbin, Gao Shanlin, et al. Play evaluation methods and their application in preliminary exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 314–318.
- [16] 李娜, 闫相宾, 蔡利学. 圈闭含油气概率赋值标准及其在塔里木盆地的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 330–338.
Li Na, Yan Xiangbin, Cai Lixue. Assignment standard for hydrocarbon-bearing probability of traps and its application in Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 330–338.
- [17] 徐旭辉, 蔡利学, 刘超英, 等. 油气勘探目标评价与优选系统[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 517–524.
Xu Xuhui, Cai Lixue, Liu Chaoying, et al. Evaluation and selection system for petroleum exploration targets [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 517–524.
- [18] 蔡庆龙. 油气勘探风险评价方法与评价模型[J]. *石油化工技术经济*, 2003, 19(2): 58–62.
Cai Qinglong. Evaluation method and model of risks in oil-gas exploration [J]. *Techno-economics in Petrochemicals*, 2003, 19(2): 58–62.
- [19] 蔡利学, 闫相宾, 李娜, 等. 钻探目标评价优选决策系统[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 720–727.
Cai Lixue, Yan Xiangbin, Li Na, et al. Evaluation, optimization and decision system for prospects to drill [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 720–728.
- [20] 方小东, 郭元岭, 胡兴中. 油气勘探状态评价新方法[J]. *河南石油*, 2005, 106(6): 6–8.
Fang Xiaodong, Guo Yuanling, Hu Xingzhong. New evaluation method of petroleum exploration [J]. *Hennan Petroleum*, 2005, 106(6): 6–8.
- [21] 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.
- [22] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2011, 41(7): 910–926.
Jin Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins [J]. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 2011, 41(7): 910–926.
- [23] David O, David J. Geographic information analysis (2nd Edition). [M]. New York: Wiley & Sons, 2010: 315–337.
- [24] 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: 87–90.
Jin Zhijun, Zhang Yiwei. Hydrocarbon accumulation mechanisms and oil/gas distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 87–90.
- [25] Lee P J. Statistical methods for estimating petroleum resources [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2008: 56–71.
- [26] White D A. Geologic risking guide for prospects and plays [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(12): 2048–2061.
- [27] 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.
- [28] Melanie M. An introduction to genetic algorithms [M]. Cambridge, UK: MIT Press, 1996: 158–161.

(编辑 李 军)