

# 多层圈闭资源量计算方法研究

——以两层圈闭为例

杨 双 闫相宾 刘志鹏 蔡利学 马晓娟

(中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要:** 容积法是圈闭地质资源量计算常用方法,包括确定法和概率法 2 种。与确定法相比,概率法可提供不同风险的圈闭地质资源量值,能更好地对圈闭地质资源量的不确定性进行评估。当勘探目标具有多套目的层时,以往是将各目的层圈闭资源量算术加和作为勘探目标资源量,该算法经常造成与实际地质储量相差较为悬殊,从而失去钻前资源量计算参考价值。在考虑圈闭各目的层风险(或含油气概率)的基础上,通过分析各目的层之间的地质相关关系,即:无地质相关、部分地质相关和完全地质相关 3 种情况,计算出不同成功情况下的圈闭含油气概率和风险后的地质资源量,并利用风险后的地质资源量除以至少有 1 个目的层成功的含油气概率,最终得到多层圈闭(勘探目标)资源量。

**关键词:** 概率法;地质资源量;多层圈闭;东濮凹陷

中图分类号: TE155

文献标识码: A

## Resource calculation methods for multilayer traps:

Case study of two-layer traps

Yang Shuang, Yan Xiangbin, Liu Zhipeng, Cai Lixue, Ma Xiaojuan

(SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Volumetric method is a formal way to predict the in-place or recoverable resources of a play or trap, including deterministic and probabilistic methods. Probabilistic evaluation is an optimal way for the assessment of resources in tectonic traps, but the resource assessment of targets with multiple strata is usually calculated by directly and simply cumulating the resources of individual targets using given specified success probability weights. This prediction generally does not correctly reflect actual geological conditions. Taking into account the risk of each target stratum in the trap, we analyzed the geological correlation between each target, including non-correlation, partial and complete geological correlation, and calculated the probability of in-place resources under different conditions. Then the risked resource in-place is divided by the probability of hydrocarbons existing in at least one of the targets to obtain the resource volumes of multilayer traps.

**Key words:** probabilistic evaluation; in-place resource; multilayer trap; Dongpu Sag

油、气储量是勘探工作的最终成果,是进行圈闭评价优选和勘探规划编制的基础,直接关系到圈闭经济效益和勘探部署决策<sup>[1-2]</sup>。勘探实践表明,多数圈闭包含多个目的层,目的层之间地质关系可能相关,也可能独立。目前对于具有多目的层圈闭地质资源量计算采用方法是:首先按照容积法计算出每个目的层圈闭的地质资源量,然后将计算得到的各目的层圈闭地质资源量算术加和作为多目的层圈闭地质资源量。该计算方法仅体现勘探最乐观的一种情况,即各目的层圈闭均获得成功情况下的地质资源量,而未考虑圈闭各目的

层风险,以及目的层之间地质关系,严格来讲,这不是很精确的<sup>[3-4]</sup>。同时,在实际圈闭资源量计算过程中,受地质人员过分乐观等主观认识的影响,普遍存在过高估算圈闭地质资源量情况,直接对勘探部署决策和勘探效益产生影响<sup>[5]</sup>。从目前国内研究技术现状来看,针对多目的层圈闭地质资源量计算,还没有形成统一、可操作性强和精度高的计算方法。本文既考虑各个目的层含油气概率和资源量,又兼顾各个目的层地质相关性,通过“概率求和”的方法实现多目的层圈闭地质资源量的计算。

收稿日期: 2016-02-18; 修订日期: 2016-06-28。

作者简介: 杨双(1973—)男,博士,高级工程师,从事油藏描述、圈闭评价优选与管理等研究。E-mail: yangshuang\_syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化勘探部署决策平台建立与应用(G5800-14-ZS-YTB001)资助。

# 1 方法与原理

## 1.1 单层圈闭资源量计算

常用的圈闭地质资源量计算方法有容积法、类比法和物质平衡法等<sup>[6]</sup>,其中容积法应用最为广泛,可适用于勘探开发的不同阶段。容积法评价圈闭资源量主要技术参数包括含油(或气)面积、油(或气)层有效厚度和单储系数。其计算结果的可靠程度取决于地质资料的数量和质量,合理确定含油(或气)面积、油(或气)层有效厚度和单储系数(孔隙度、饱和度等)是圈闭地质资源量计算精度的关键所在。其数学公式如下:

$$Q = A C_a H_f \cdot SNF \quad C_a = S/A$$

式中:  $Q$  为圈闭地质资源量;  $A$  为圈闭面积;  $C_a$  为含油(或气)面积系数;  $H_f$  为油(或气)层有效厚度;  $SNF$  为单储系数;  $S$  为圈闭含油(或气)面积。

容积法估算圈闭地质资源量可分为确定法及概率法 2 种,二者主要区别在于确定法只取每个参数的一个固定值,地质人员对圈闭资源不确定性的评估较为主观臆断,很难反映地下资源不确定性特点;概率法则将资源量各个技术参数视为随机变量,通过对其不确定性分析,最终得出地质资源量的概率分布,是一种风险分析方法<sup>[7-8]</sup>。

### 1.1.1 确定法

确定法是我国目前圈闭地质资源量评价最常用的方法,该方法认为可以精确计算圈闭地质资源量。在资源量各个技术参数的选取上,地质人员对每个参数仅选取一个主观上认为最佳值,从而导致圈闭地质资源量也是唯一确定值。然而,由于受到地质资料和认识的限制,圈闭地质资源量技术参数经常存在极大的不确定性。因此,确定法很难对勘探阶段圈闭地质资源量的不确定性进行合理估算<sup>[9]</sup>。

### 1.1.2 概率法

概率法是基于对地质资源量各个技术参数值范围的认识和评估,视各个计算参数为随机变量,采用概率分布函数量化参数的不确定性;概率分布

函数可以反映出参数的整个范围,包括最小值、最大值和均值等,并以概率曲线形式提供不同可靠程度的地质资源量分布范围,包括资源量低值、中值和高值等,不同级别的资源量与不同的概率值相对应。因此,概率法能够提供一组基于不同概率的地质资源量,能够更好地满足圈闭地质资源量不确定的特点,从而为圈闭的进一步勘探决策提供重要的依据<sup>[9]</sup>。

## 1.2 多层圈闭资源量计算

本文以两层圈闭为例,阐述通过“概率求和”得到多层圈闭地质资源量原理(表 1)。如图 1 所示,一个勘探目标(或圈闭)纵向上由 2 个层圈闭组成,即层圈闭 A 和层圈闭 B。若该勘探目标钻探取得成功,可有 3 种情况,即层圈闭 A、B 都成功;仅层圈闭 A 成功;仅层圈闭 B 成功。每种成功情况下,其含油气概率和风险后资源量均不同。

### 1.2.1 层圈闭 A 和 B 均成功情况

如果层圈闭 A、B 通过钻探后均获得成功时,勘探目标(或圈闭)含油气概率( $P_{AB}$ )应为各层圈闭含油气概率乘积,即  $P_{AB} = P_{gA} P_{gB}$ ,  $P_{gA}$  为层圈闭 A 含油气概率,  $P_{gB}$  为层圈闭 B 含油气概率。采用概率法(或确定法)计算出各层圈闭的地质资源量均值为

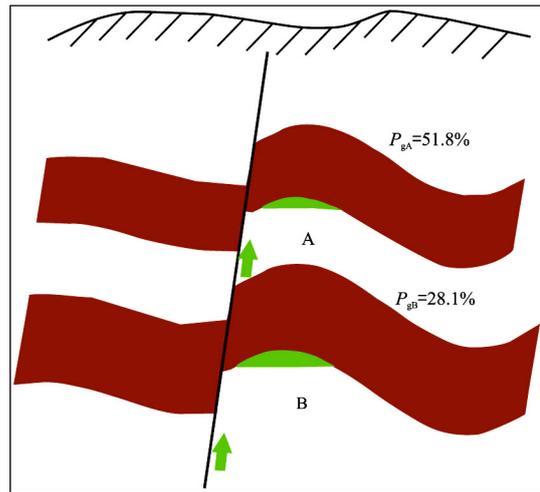


图 1 勘探目标(层圈闭 A、B)油藏剖面示意  
Fig. 1 Fairplay profile of targets (traps A&B)

表 1 层圈闭 A、B 风险与资源量对应关系

Table 1 Correlation between risk of traps A, B and resource in-place

成功结果	$P_{gA}$	$P_{gB}$	$P_{AB}$	风险前资源量	风险后资源量
层圈闭 A、B 均成功	$P_{gA}$	$P_{gB}$	$P_{gA} P_{gB}$	$Q_A + Q_B$	$P_{AB} (Q_A + Q_B)$
仅层圈闭 A 成功	$P_{gA}$	$1 - P_{gB}$	$P_{gA} (1 - P_{gB})$	$Q_A$	$P_{AB} Q_A$
仅层圈闭 B 成功	$1 - P_{gA}$	$P_{gB}$	$(1 - P_{gA}) P_{gB}$	$Q_B$	$P_{AB} Q_B$
至少有一个圈闭成功			$\Sigma P$		$\Sigma P_{AB} (Q_A + Q_B)$

$Q_A$  和  $Q_B$ 。那么, 风险前勘探目标的总资源量为  $Q_A + Q_B$ , 风险后勘探目标的总资源量为  $P_{AB}(Q_A + Q_B)$ 。

### 1.2.2 仅层圈闭 A 成功情况

如果层圈闭 A、B 通过钻探后仅层圈闭 A 获得成功时, 勘探目标(或圈闭)含油气概率( $P_{AB}$ )应为层圈闭 A 含油气概率与层圈闭 B 失败的概率乘积, 即  $P_{AB} = P_{gA}(1 - P_{gB})$ 。在只有层圈闭 A 成功情况下, 风险前勘探目标的总资源量为  $Q_A$ , 风险后勘探目标的总资源量为  $P_{AB}Q_A$ 。

### 1.2.3 仅层圈闭 B 成功情况

如果层圈闭 A、B 通过钻探后仅层圈闭 B 获得成功时, 勘探目标(或圈闭)含油气概率( $P_{AB}$ )应为层圈闭 A 失败的概率与层圈闭 B 含油气概率乘积, 即  $P_{AB} = (1 - P_{gA})P_{gB}$ 。在只有层圈闭 B 成功情况下, 风险前勘探目标的总资源量为  $Q_B$ , 风险后勘探目标的总资源量为  $P_{AB}Q_B$ 。

### 1.2.4 勘探目标(层圈闭 A、B)总资源量

将勘探目标 3 种成功情况下的含油气概率相加, 得到至少有 1 个层圈闭成功的含油气概率, 即  $\Sigma P = P_{gA}P_{gB} + P_{gA}(1 - P_{gB}) + (1 - P_{gA})P_{gB}$ 。同时, 对 3 种成功情况下风险后勘探目标资源量算术加和, 即  $\Sigma P_{AB}(Q_A + Q_B) = P_{AB}(Q_A + Q_B) + P_{AB}Q_A + P_{AB}Q_B$  并利用风险后资源量  $\Sigma P_{AB}(Q_A + Q_B)$  除以至少有 1 个层圈闭成功的含油气概率  $\Sigma P$ , 即得到勘探目标(层圈闭 A、B)总资源量。

因此, 对包含多目的层圈闭来讲, 其地质资源量应为不同成功情况风险后的地质资源量加和除以至少有 1 个层圈闭成功的含油气概率。该方法具有良好的可操作性和实用性, 可应用于勘探阶段不同类型多目的层圈闭地质资源量计算。

## 2 不同地质相关关系资源量对比

本文以两层圈闭为例, 阐述勘探目标各目的层之间不同地质相关资源量差异(图 1)。已知层圈闭 A 的含油气概率  $P_{gA} = 51.8\%$ , 资源量为  $1.0 \times 10^4$  t; 层圈闭 B 的含油气概率  $P_{gB} = 28.1\%$ , 资源量为  $3.0 \times 10^4$  t。按照以下 3 种地质相关关系分别计算出勘探目标(层圈闭 A、B)地质资源量。

### 2.1 无地质相关

无地质相关指勘探目标的各个目的层在油气成藏体系上是相互独立的。如层圈闭 A、B 在圈闭、储层、充注和保存等方面完全独立、各成体系, 这也意味着层圈闭 A 的钻探结果对层圈闭 B 的钻探结果没有影响, 此情况在概率论中属于相互独立事件。我们可以描述 4 种钻探结果, 即 3 种成功的

结果和 1 种失败的结果。按照第 1 节所讲的计算方法, 计算得到勘探目标(层圈闭 A、B)至少有 1 个目的层成功的含油气概率为 65.0%, 以及勘探目标风险后资源量为  $1.4 \times 10^4$  t, 用风险后资源量 ( $1.4 \times 10^4$  t) 除以至少有 1 个目的层成功的含油气概率(65.0%), 得到勘探目标(层圈闭 A、B)地质资源量为  $2.1 \times 10^4$  t。

### 2.2 部分地质相关

部分地质相关指勘探目标的各个目的层在油气成藏体系上存在部分相关依赖。如层圈闭 A 和层圈闭 B 部分地质相关的情况: 在烃源岩、运移及圈闭方面具有依赖性, 即油气充注条件和圈闭背景一致, 而在储层和保存方面相互独立。根据层圈闭 A、B 部分地质相关特点, 计算出至少有 1 个目的层成功的含油气概率为 59.7%, 勘探目标风险后资源量的结果不变 ( $1.4 \times 10^4$  t), 用风险后资源量除以至少有 1 个目的层成功的含油气概率, 得到勘探目标(层圈闭 A、B)地质资源量为  $2.3 \times 10^4$  t。

### 2.3 完全地质相关

完全地质相关指勘探目标的各个目的层在油气成藏体系上是完全依赖的, 如层圈闭 A、B 具有相同的圈闭、储层、充注和保存等成藏要素。这种情况通常意味着如果层圈闭 A 成功则层圈闭 B 也成功, 层圈闭 A 失败则层圈闭 B 也失败。通常对完全地质相关的 2 个层圈闭来说, 概率因子必须一样, 其含油气概率也必然一样, 勘探目标资源量是 2 个层圈闭资源量的简单相加。但完全地质相关中也存在特例, 即高含油气概率层圈闭 A 的失败意味着层圈闭 B 的失败, 但是高含油气概率层圈闭 A 的成功并不能确保低含油气概率层圈闭 B 的成功。依据层圈闭 B 完全依赖层圈闭 A, 计算出至少有 1 个目的层成功的含油气概率为 51.8%, 勘探目标风险后资源量的结果仍然不变 ( $1.4 \times 10^4$  t), 用风险后资源量除以至少有 1 个目的层成功的含油气概率, 得到勘探目标(层圈闭 A、B)地质资源量为  $2.7 \times 10^4$  t。

### 2.4 不同地质相关资源量对比

通过对勘探目标各目的层不同地质相关资源量进行计算, 不难看出, 地质相关关系逐渐增加导致勘探目标含油气概率降低, 而勘探目标地质资源量增加。其中, 完全地质相关勘探目标地质资源量最大, 无地质相关勘探目标地质资源量最小, 部分地质相关资源量介于前二者之间。但无论勘探目标各目的层地质相关性有多大, 其风险后资源量保持恒定不变(图 2)。

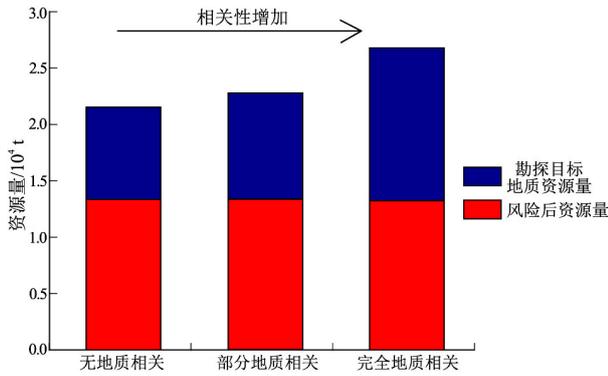


图 2 勘探目标目的层不同地质相关资源量对比

Fig. 2 Resource in-place with different levels of geological correlation

### 3 应用实例

以柳屯南圈闭为例介绍多层圈闭资源量的计算。该圈闭位于渤海湾盆地东濮凹陷柳屯洼陷东北翼,是由邢庄断层和文西断层共同控制的断鼻构造圈闭(图 3)。

#### 3.1 单层圈闭资源量

柳屯南圈闭主要目的层由沙三中 4-8 和沙三

中 9-12 砂组构成,其中,沙三中 4-8 砂组圈闭含油面积为 4.6 km<sup>2</sup>,油层有效厚度 14.0 m,单储系数 4.9×10<sup>4</sup> t/(km<sup>2</sup>·m),该层圈闭石油地质资源量为 318.0×10<sup>4</sup> t;沙三中 9-12 砂组圈闭含油面积为 3.8 km<sup>2</sup>,油层有效厚度 16.0 m,单储系数 5.1×10<sup>4</sup> t/(km<sup>2</sup>·m),该层圈闭石油地质资源量 310.0×10<sup>4</sup> t。

#### 3.2 多层圈闭资源量

沙三中 4-8 和沙三中 9-12 两个层圈闭均为断鼻构造,沙三中一沙三下段的暗色泥(页)岩是本区的主要烃源岩,油气以储层和断层运移方式为主(图 4)。因此认为沙三中 4-8 和沙三中 9-12 属于部分地质相关,即在圈闭、油气充注方面具有相互依赖性,在储层和保存方面相互独立。

依据 2 个层圈闭之间存在部分地质相关特点,计算出至少有 1 个目的层成功的含油气概率为 36.4%,同时计算出柳屯南圈闭(沙三中 4-8、9-12)风险后资源量为 125.1×10<sup>4</sup> t,用风险后资源量除以至少有 1 个目的层成功的含油气概率,计算得到柳屯南圈闭(沙三中 4-8、9-12)地质资源量为 344.1×10<sup>4</sup> t(表 2)。

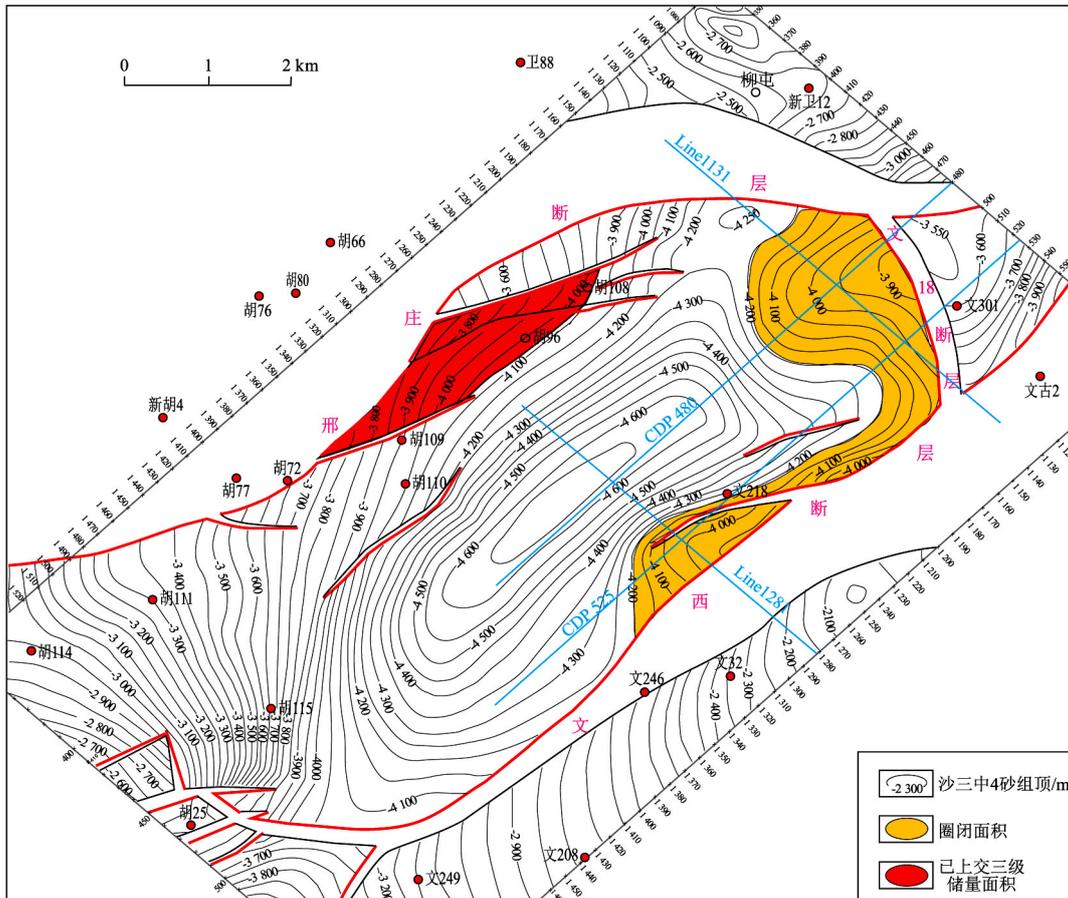


图 3 渤海湾盆地东濮凹陷柳屯洼陷柳屯南圈闭沙三中 4 砂组顶构造

Fig. 3 Top structure of sand group 4 of the middle part of the third member of Shahejie Formation in the South Liutun Trap, Liutun sub-Sag, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

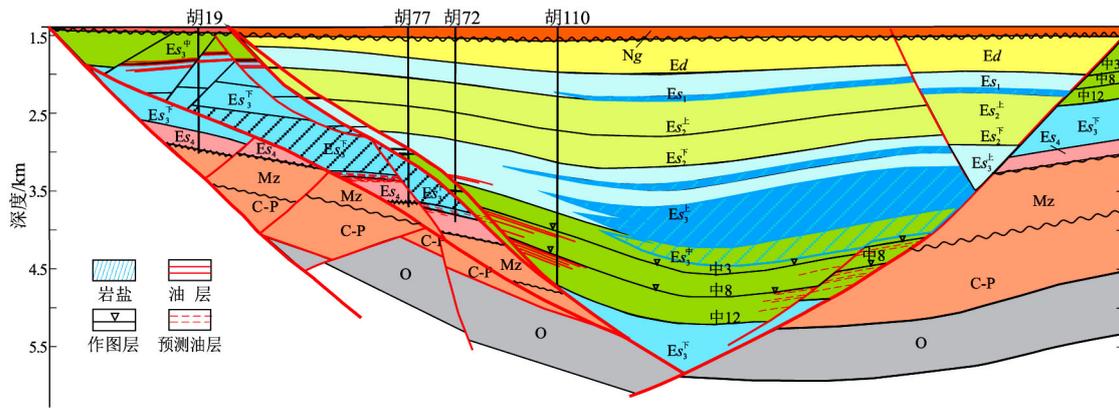


图 4 渤海湾盆地东濮凹陷胡 19-胡 110 井油藏剖面

Fig. 4 Profile from well Hu19 to Hu110 in the Dongpu Sag , Bohai Bay Basin

表 2 渤海湾盆地东濮凹陷柳屯洼陷柳屯南圈闭不同目的层风险与资源量对应关系

Table 2 Correlation between risk and resource in-place of different targets in the Liutun South Trap , Liutun sub-Sag , Dongpu Sag , Bohai Bay Basin

成功结果	含油气 概率/%	风险前 资源量/ $10^4$ t	风险后 资源量/ $10^4$ t
沙三中 4-8、9-12 均成功	3.6	628.0	22.9
仅沙三中 4-8 成功	10.4	318.0	32.9
仅沙三中 9-12 成功	22.4	310.0	69.3
至少有一层成功	36.4	344.1	125.1

柳屯南圈闭于 2011 年提交探明储量  $132.0 \times 10^4$  t 按照以往计算多层圈闭资源量的方法,该圈闭地质资源量为  $628.0 \times 10^4$  t (即 2 个层圈闭资源量算术加和);而按照本文所讲的方法,柳屯南圈闭地质资源量为  $344.1 \times 10^4$  t。不难看出,前者与探明储量之间误差较大,后者与探明储量之间误差相对较小,表明本方法计算结果更接近地质客观实际。

#### 4 结论

(1) 在考虑勘探目标各目的层风险的基础上,分析各目的层之间的地质相关关系,采用“概率求和”法实现多目的层圈闭地质资源量计算。

(2) 该方法具有良好的可操作性和实用性,可应用于勘探阶段不同类型多目的层圈闭地质资源量计算;能够体现地下资源不确定性特点,合理估算多目的层圈闭地质资源量。近三年通过开展预探井钻探前、后资源量对比分析,圈闭地质资源量计算精度得到较大提高,可有效指导勘探部署决策。

#### 参考文献:

[1] 杨通佑. 石油及天然气储量计算方法 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 1998: 17-39.  
Yang Tongyou. Estimation approach for oil and gas [M]. 2nd ed.

Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 17-39.

[2] 田军. 对油藏评价管理工作的认识和探讨 [J]. 中国石油勘探 2007(2): 58-61.  
Tian Jun. Understanding and research on reservoir evaluation management [J]. Petroleum Exploration of China 2007(2): 58-61.

[3] Rose P R. 油气勘探项目的风险分析与管理 [M]. 龚立荣, 译. 北京: 石油工业出版社, 2002: 8-75.  
Rose P R. Risk analysis and management of petroleum exploration ventures [M]. Dou Lirong, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press 2002: 8-75.

[4] 贾成业, 贾爱林, 邓怀群, 等. 概率法在油气储量计算中的应用 [J]. 天然气工业 2009 29(11): 83-85.  
Jia Chengye, Jia Ailin, Deng Huaqun, et al. Application of the stochastic method to oil and gas reserves estimation [J]. Natural Gas Industry 2009 29(11): 83-85.

[5] 武守诚. 石油资源地质评价导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 161-284.  
Wu Shoucheng. Introduction of petroleum resources assessment [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 161-284.

[6] 吕鸣岗, 程永才, 袁自学, 等. 石油天然气储量计算规范 DZ/T 0217-2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 7-33.  
Lv Minggang, Cheng Yongcai, Yuan Zixue, et al. Regulation of petroleum reserves estimation DZ/T 0217-2005 [S]. Beijing: China Standards Press 2005: 7-33.

[7] 文环明, 肖慈珣, 李薇, 等. 蒙特卡洛法在油气储量估算中的应用 [J]. 成都理工学院学报 2002 29(5): 487-492.  
Wen Huanming, Xiao Cixun, Li Wei, et al. Applications of the Monte-Carlo method to the petroleum reserves estimation [J]. Journal of Chengdu University of Technology 2002 29(5): 487-492.

[8] 胡允栋. 基于不确定性分析的油气储量分类与评估方法 [D]. 北京: 中国地质大学(北京) 2007: 25-67.  
Hu Yundong. Oil and gas reserve classification and estimation on the basis of uncertainty analysis [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) 2007: 25-67.

[9] 闫相宾, 李军, 杨双. 三级圈闭含油气概率和资源量表征方法探讨 [J]. 石油实验地质 2014 36(4): 495-499.  
Yan Xiangbin, Li Jun, Yang Shuang. An approach to hydrocarbon-bearing probability and resource characterization of third-order trap [J]. Petroleum Geology & Experiment 2014 36(4): 495-499.

(编辑 徐文明)