

doi:10.3799/dqkx.2016.072

不同地质条件约束下的油气资源量 概率组合加和方法及应用

盛秀杰¹, 金之钧¹, 肖 晔², 王义刚¹

1. 中国石油化工股份有限公司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 100083

摘要:目前,国内普遍使用的“简单加和”或“概率加权加和”方法计算的区带或三(四)级圈闭资源量很大程度上与实际地质情况并不吻合。在 PetroV 开发过程中,设计并实现了一种可充分考虑不同地质条件约束的油气资源量计算方法——以不确定性体积法的随机蒙氏模拟为基础,对最新地质上识别出的、不可切分的含油气聚集单元,进行符合不同地质模型约束的取样、组合;在明确了哪些单元才应该同时出现的基础上,将其他不同地质条件约束有机融合到模拟过程中,客观描述各个计算单元体积模型的不确定性。从实例计算结果分析可以看出,“概率组合加和”可获取更加符合当前地质模型的不确定性油气资源量计算结果,显著提升勘探部署项目优选排队的合理性。

关键词:不确定性体积法;含油气性风险依赖;油气资源评价;地质多场景;概率组合加和;数学模型;石油地质。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2016)05-0853-11

收稿日期: 2016-02-28

Combination Probability Cumulating Method of Resources Evaluation and Its Application for Oil & Gas Zone and Trap under Different Geological Constrains

Sheng Xiujie¹, Jin Zhijun¹, Xiao Ye², Wang Yigang¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, SINOPEC, Beijing 100083, China

2. Department of Mathematical Sciences, Tsinghua University, Beijing 100083, China

Abstract: Resources of the zone or the 3rd (or the 4th) tectonic trap are often evaluated by directly and simply cumulating the resources size of its segments weighted by discovery probability in China. Obviously, not all segments certainly have been discovered due to constraints of special geological conditions. In addition, prediction value generally doesn't honestly reflect the practical geological model if quantifying the direct effect of geological model constraints on volumetric parameters and Monte Carlo simulation process is ignored. For the development of PetroV, an improved non-deterministic volumetric method with quantifying kinds of geological constraints is devised in the paper; to sample and composite the undivided segments which should stay in the same combination, then quantify impact caused by the key geological factors in order to objectively delineate volumetric uncertainty. It is confirmed by applications and detailed analysis that “combination probability cumulating” method proposed in this paper could explain each quantile value of resource distribution with clear geological scenarios, which leads to more reasonable exploration strategies.

Key words: non-deterministic volumetric method; discovery risk dependency; resources assessment; geological scenarios; combination probability cumulating; mathematical models; petroleum geology.

油气资源评价方法很多,每种方法都有一定的局限性和适用范围,分别适用于不同油气勘探阶段

的资源评价对象(Houghton and Dolton,1993;金之钧和张金川,1999,2002;Meneley *et al.*,2003;武守

基金项目:国家重大油气专项项目(No.2011ZX05005-001-004)。

作者简介:盛秀杰(1973-),男,高级工程师,博士,从事勘探开发软件设计、开发与产业化工作。E-mail: shengxj.syky@sinopec.com

引用格式:盛秀杰,金之钧,肖晔,等,2016.不同地质条件约束下的油气资源量概率组合加和方法及应用.地球科学,41(5):853-863.

诚,2005;国土资源部油气战略研究中心,2009,新一轮全国油气资源评价;张林晔等,2014)。如,以石油地质综合研究为基础的盆地油气资源评价(雷闯等,2014),是以定位寻找有利的勘探地区为目的,应用盆地模拟技术及油气勘探新技术,对盆地进行多学科的深入细致的研究工作,展示盆地良好的找油找气前景;区带和圈闭的油气资源评价(White,1993;Schneidermann,1997;Lee,2008),评价流程主要为(盛秀杰等,2014):首先,依据不同勘探阶段的构造类、沉积类、成藏类等最新石油地质解释成果,遵循不同石油地质分析方法(如基于构造带划分、成藏体系理论或含油气系统理论等)(金之钧等,2003),刻画并用适合的空间图形表征区带和圈闭的空间分布范围;然后,在此基础上,对最新石油地质分析成果进行量化归纳,定义评价单元有效类比维度,依据不同勘探阶段的地质认知,进行多轮次的、基于统计概率方法的地质风险评价、资源量估算(或储量计算)及油藏规模结构分析(金之钧,1995;Chen and Osadetz,2006;Lee,2008;盛秀杰等,2013;杨宝林等,2014;刘佳等,2015);最后,通过测算经济技术指标分析潜在油气资源量的特点及对应的勘探部署决策方案(郭秋麟和米石云,2004)。

其中,建立客观的地质模型并匹配合理的数学模型,是获取合理油气资源定量评价结果的必要条件。从广泛到具体,不同地质尺度的评价对象一般被定义为工区、盆地、区带、圈闭以及单个油藏,并根据上述对象地质模型的差异来设计、应用不同的定量资源评价方法。其中,与概率统计方法间接反映区带、圈闭的地质模型不同,不确定性体积法能够客观反映区带或圈闭的最新地质认识,是较为直接有效的定量评价方法。不确定性体积法的应用效果取决于多种不确定性地质条件的合理量化。如,是否为每一个体积计算参数(面积、厚度、几何变形因子等)选取了适合的概率分布模型等。

1 地质与数学模型

笔者提出一种新的评价思路来区分最小地质计算单元及勘探目标,并配套面向常规以及非常规油气资源的通用不确定性体积法计算公式。地质模型与数学模型有效匹配易于量化表达系列地质约束条件。

1.1 最小地质计算单元

最小地质计算单元是指基于不同沉积层位(或部位)、断层上与下盘划分等,特指在区带或圈闭内能够被识别且可作为最小且完整的油气聚集单元(图1)。如,国内圈闭评价主要是围绕三(四)级圈闭以及它们从属的次级圈闭展开,其中次级圈闭就是典型的最小含油气聚集单元,是三(四)级圈闭中的局部构造或小规模的岩性地层等非构造圈闭或复合圈闭,具备独立封闭条件和单一压力系统(陶士振等,2011)。

油气聚集单元具有独立、完整的地质边界条件,可独立定义与体积法相关计算参数,同时各个油气聚集单元之间又存在明显的地质场景约束。如,油气聚集单元的计算参数取值有可能取决于断层是否封堵或其直接叠置的其他油气聚集单元储层、盖层条件等。油气聚集单元间常见的地质场景假设主要包括:(1)油气聚集单元自身含油气的可能性;(2)不同油气聚集单元之间的含油气性风险依赖;(3)不同油气聚集单元之间的体积计算参数间的相关性;不同油气聚集单元间的上下接触关系;(4)不同油气聚集单元间因断层封堵造成的流体移动(油水界面是否一致等)。

1.2 勘探(评价)目标

勘探目标不再局限为单一区带内圈闭的概念和仅仅定位于计算油气资源量,而是以不同矿权区块的空间范围为基础,组合来自于不同区带或三(四)级圈闭内的系列最小地质计算单元,进行综合的地质、工程、经济评价,因地制宜地实现对油气资源的经济决策分析与不同投资勘探方案的制定。从地质

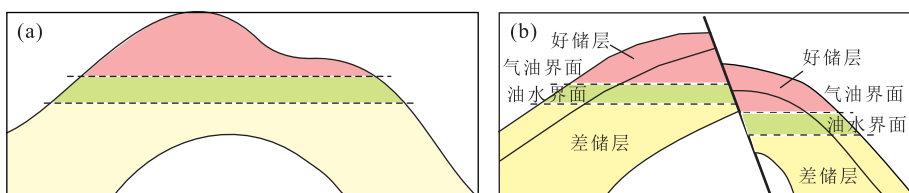


图 1 剖分前与剖分后油气聚集单元地质模型示意

Fig.1 Geological model between original and anatomized units

a.剖分前定义两个油气聚集单元;b.基于断层与储层条件进一步剖分 4 个油气聚集单元

模型的角度,选取的局部对象之间可能存在明显的不同地质场景依赖,不同油气聚集单元可以跨越多个河道体、多套地层、多个断块、多套油水界面等;从数学模型的角度,通过多次组合、模拟不同油气聚集单元内可能存在的系列地质场景,能够较为准确地定义不同油气聚集单元的地质条件(体现为计算参数的合理取值)以及不同油气聚集单元组合出现的概率,尤其通过钻后验证(某一局部对象油气资源有无的验证),可有效调整其他局部对象的油气资源量.建立系列具有不同投资价值、适用于不同投资情况的勘探目标,是揭示不同尺度勘探目标最大化商业投资机会、规避投资风险的有效石油资源管理手段(Rose,2002;刘振武和方朝亮,2004;潘继平和李志,2007;李颂和李俊廷,2012).

1.3 不确定性体积法

油气资源评价的关键目标是计算勘探目标的商业成功机率,反映商业成功机率的一个最佳方式就是能够计算勘探目标潜在油气资源量可能值的概率(潜在的不确定性油气资源量分布;Lee,2008).在实际评价过程中,无法通过每一体积计算参数的概率分布来直接计算油气资源量并估算出对应的超概率曲线(体现不同分位的油气资源量)——基于分布假设的解析方法无法适当地直接呈现油气资源量与相关地质概念的依赖关系和相关程度.一种有效的解决方法就是采用利用蒙特卡罗模拟(Casella and Robert,2004)来计算可能的油气资源量分布(图2):(1)利用每个计算参数的有限样本数据,可以匹配不同计算参数可能的概率分布模型;(2)在迭代过程中利用概率随机值获取不同计算参数的可能取

表1 体积法计算资源量的相关参数

Table 1 Core parameters involved by volumetric method

运算符	体积参数	计算结果
×	含油气面积	
×	总厚度	岩石总体积
×	几何因子	有效岩石体积
×	净毛比	孔隙体积
×	孔隙度	含油气孔隙体积
×	含油饱和度	地质资源量(体积单位)
×	1/体积系数	
×	采收率	
×	转换因子	可采资源量(体积单位)

值;(3)最后通过直方图统计每次计算的油气资源量以及对应的超出概率(不同分位数的油气资源量).

定位于获取区带或圈闭的潜在可采资源量不确定性分布(Lee and Wang,1984),本文采纳含油气面积、地层厚度、几何变形因子、净毛比、孔隙度、饱和度和地层体积因子、采收率、转换因子等作为通用体积法计算参数,通过调整某些计算参数是否为1,可成功应用于不同资源类型的资源量计算.表1从上到下不同体积计算参数的组合,可区分不同性质的体积以及资源类型.在实际应用时,利用不同计算参数、有限的一些样本数据,通过最大似然求取不同概率分布模型的分布参数,进而分析关键统计值(如均值、峰值、期望)来确定适合的概率分布模型.

2 基于含油气性风险依赖量化系列地质约束条件

不确定性体积法计算参数间具有较强的地质模

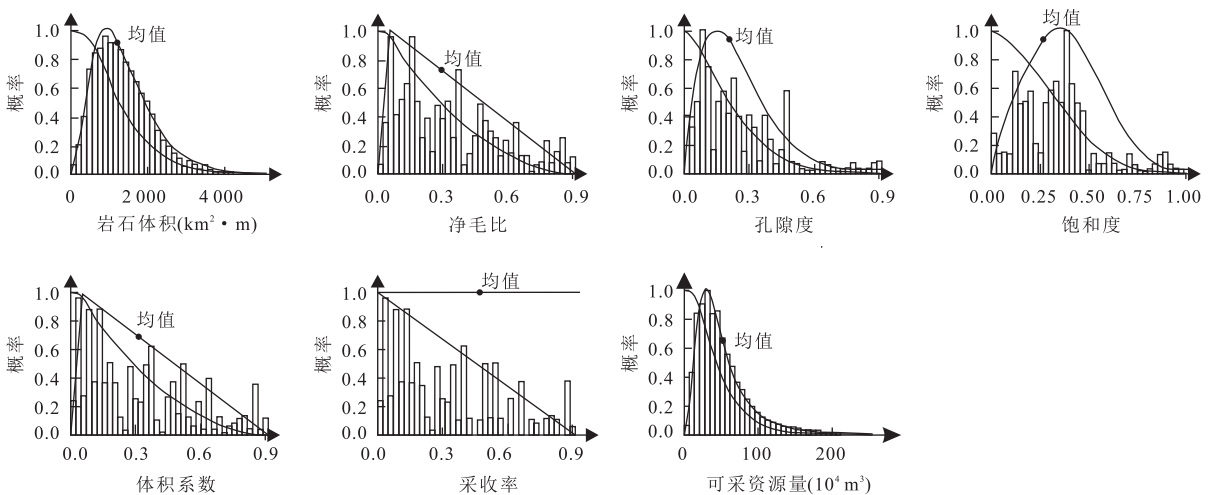


图2 不确定性体积法计算参数及结果分布

Fig.2 Monte Carlo simulation process of uncertainty volumetric method

型约束,在大统计量计算过程中,哪些含油气聚集单元可以同时含有油气以及它们之间的地质约束条件,将直接影响关键体积计算参数的随机取值是否合理。

2.1 含油气性风险依赖的影响

从地质分析的角度,不是每个油气聚集单元肯定会有油气发现,其含油气的可能性可用各成藏条件是否存在的概率的乘积来表达(Rose, 2001; Martinelli *et al.*, 2010);同时,由于它们经历了相同或类似的成藏过程,不同油气聚集单元之间存在明显的含油气性风险依赖关系,这也就决定了不同油气聚集单元以不同组合形式出现的概率也不同,存在“至少有一个次级圈闭发现”、“多个次级圈闭同时发现”等诸多可能情况。从概率分析的角度,相同或类似成藏条件的成功概率乘积表示边际概率,而其值的大小决定了不同油气聚集单元之间的含油气性风险依赖关系,用各局部成藏条件的概率的乘积表示条件概率。以三角洲不同沉积亚环境间含油气性风险依赖分析为例(刁帆等, 2013)(图 3a),假定 A 次级圈闭含油气成功概率为 0.3, B 含油气成功概率为 0.2,显然 A 和 B 两个次级圈闭有可能经历了相同的储层沉积条件,意味着二者之间可能存在不同性质的含油气性风险依赖,可分为 3 种情况(图 3b): (1) 边际概率值是 1, 表示它们没有共同的油气成藏地质条件, 储层沉积有可能来自不同河道, 意味着 A 和 B 含油气性完全独立; (2) 边际概率值介于 0.3 (含油气概率的最大值) 和 1.0 之间, 表示二者具有部分类似或相同的成藏条件, 储层有可能来自同一

河道的不同分支, 由于 A 含油气概率高, 易被先发现; 但 A 如果被证明没有很好的储层条件, 则 B 一般也会被认为没有油气, 意味 A 部分决定 B 的含油气性; (3) 边际概率值等于 0.3 (含油气概率最大值), 表示二者具有明确的相同成藏条件, 它们隶属同一河道, 且 A 处于上游沉积位置, 而 B 处于下游沉积位置, 意味着 A 是否含有油气直接决定了 B 是否含有油气。可见, 边际概率的大小决定了不同油气聚集单元间含油气性风险依赖关系类型, 不同含油气性风险依赖类型决定了不同对象以何种组合形式出现, 而不同油气聚集单元组合形式决定了“至少一层出现”的概率和最终油气资源量的分布。需要说明的是, 每一含油气性风险依赖情形对应的地质要素组合特征不尽相同, 3 种依赖情形的划分是否合适, 还有待进一步应用验证。

2.2 层间上、下叠置的影响

如果一定厚度的储层中存在两个(或两个以上)储层物性(如孔隙度)有差别的连续叠置层, 那么两个(或两个以上)叠置层的厚度就具有相互关联性。因此, 层间上、下叠置的地质场景就是指在剖面上垂直叠置的两个油气聚集单元间, 其中某一局部对象的体积参数的变化对另外油气聚集单元储层厚度带来的影响, 以及在二者厚度不变的情况下, 油水界面发生变化对二者含油气体积的影响。其中, 上、下叠置两个油气聚集单元需满足如下地质条件: (1) 上层油气聚集单元的底界面等同于下层的顶界面, 也就是说, 上层厚度的不确定性直接影响了下层的厚度变化(图 4a); (2) 共享同一盖层条件。也就是说, 上下

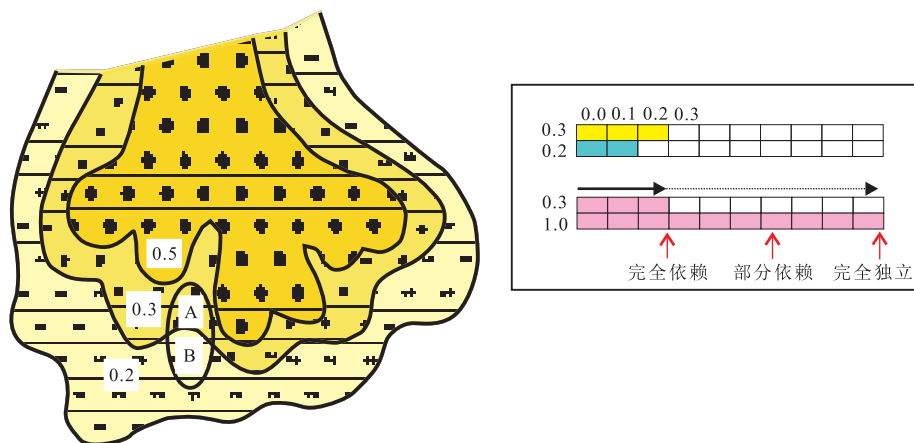


图 3 油气聚集单元的相互依赖性

Fig.3 Types of discovery risk dependency between petroleum assessment units

右图划分为 10 个格, 代表 10 个概率刻度, 从 0.0 到 1.0, 图只标出了实际最大概率值 0.3; A 与 B 用以代表三角洲沉积环境下两种不同沉积亚相成因的圈闭, 具有部分相同成藏条件又各自有局部成藏条件

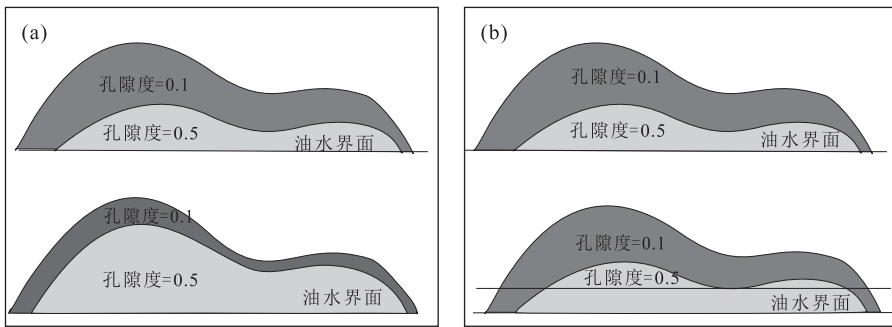


图 4 层间上、下叠置影响示意

Fig.4 Kinds of geological effects caused by stabbed horizons

a. 上部储层变厚或变薄直接决定了下部储层的厚薄; b. 油水界面的变化直接决定了上、下两层的有效含油气体积

两层共享统一的油水界面、溢出点、盖层等地质条件,它们直接由上层油气聚集单元的计算参数决定(图 4b).以此类推,可以模拟大于两套油气聚集单元的上下叠置地质场景的处理.

2.3 关键地质因素的影响

在计算油气资源量时,一般不会轻易否定一个油气聚集单元的有效含油气体积的存在.但某个油气聚集单元的关键地质条件会直接否决另一油气聚集单元的有效体积的存在.图 4b 共享同一油水界面的层间上、下叠置的两个油气聚集单元,如果上层局部对象缺少有效盖层条件,则说明油气溢出点在上层的顶界面,那么不管其他体积计算参数随机值是多少,都意味着下层部评价对象的有效含油气体积为 0.

2.4 参数间相关性的影响

在油气资源评价中,地质统计变量间的相关性是一个非常重要的因素,如果考虑不周的话,油藏规模分布的均值和方差就会被高估或低估——地质统计变量间的相关性是地质总体的共同特征,计算参数间的相关性可决定那一次的随机取样是符合地质条件间约束.例如,同一油气聚集单元的油藏面积和砂岩有效厚度这两个变量,在对数坐标下经常具有负相关关系,意味着当油藏面积取对数后递增,砂岩有效厚度取对数也会随之递减;考虑圈闭盖层、储层有无、储层质量等地质条件,不同油气聚集单元间的相关计算参数具有显式的地质场景依赖(表 2).如,图 4a 油气聚集单元 B 的储层厚度、孔隙度随机取值应小于油气聚集单元 A 的随机取值.因此,不管是面向单一油气聚集单元,还是勘探目标内多个油气聚集单元,计算参数间的相关性决定了蒙氏模拟过程中不是每一次的随机取值都是可以采用的,需要基于不同地质场景的有效取舍,使得最终蒙氏模拟结果趋于合理.

表 2 反映影响圈闭的各种地质因素

Table 2 Key geological conditions for one trap

圈闭及封盖	储层发育参数	储层质量参数
溢出点深度	厚度	凝析油产量
圈闭充注	净毛比	气油比
	砂地比	NGL Yield
	净储层比	采收率
	孔隙度	
	含油气饱和度	

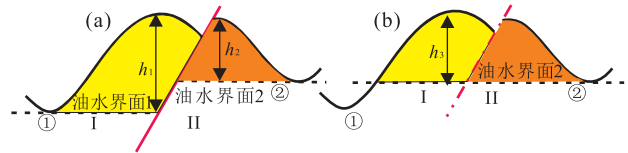


图 5 断层封闭性对油气充注的影响

Fig.5 Sealing or leak directly affects HC volume of up and down block

a. 封闭断层; b. 连通断层

2.5 断层封闭性的影响

断层的封闭性对油气成藏具有重要影响作用(姜大鹏等,2014).如果断层封闭性较好,那么断层下降盘和断层上升盘各自为独立的油气藏单元,油气藏油水界面各不相同,不受另一盘油水界面的影响.如图 5a 中,断块 I 为下降盘,在断层封闭的情况下,其溢出点为①,油水界面为 OWC1,断块 II 的溢出点深度②,油水界面为 OWC2;此时,两个油气聚集单元是相对独立的,油气藏储集空间的体积为: $V = V_1 + V_2 = A_1 \times h_1 \times \varphi_1 \times GF_1 + A_2 \times h_2 \times \varphi_2 \times GF_2$,其中 A_1 、 A_2 分别为断块 I、断块 II 的面积; h_1 、 h_2 分别为断块 I、断块 II 的厚度; φ_1 、 φ_2 分别为断块 I、断块 II 的孔隙度; GF_1 、 GF_2 分别为断块 I、断块 II 的变形因子;如果断层封闭性较差,油

气通过断层渗漏,那么上下盘就会形成连通的油气藏,具有统一的油水界面,此时圈闭的溢出点就取决于所有断块中最高的溢出点,在图 5b 中,断层封闭性较差,油气有渗漏时,下降盘(断块 I)的油水界面就取决于上升盘(断块 II)的溢出点深度②,此时两个油气聚集单元具有相互依赖性,可以将其看作一个储集单元,其储集空间的体积为: $V = A \times h_3 \times \varphi \times GF$, 其中 GF 、 φ 、 h_3 均为两个油气聚集单元的统计结果。

3 “概率组合加和”方法

在国内,区带或三(四)级圈闭资源量的计算,基本上都是在假定其所属每个次级圈闭含油气概率为定值的前提下,片面地“简单加和”或“概率加权加和”所有次级圈闭的资源量。“简单加和”代表了一种最为理想也是可能性最低的一种情况(每个含油气聚集单元都含有油气是小概率事件),实际开采的资源量将明显低于“简单加和”的结果;“概率加权加和”从多种可能性中,局限性地选择了一种可能性,武断地将含油气概率与含油气物理体积混为一体,并不是地质模型本身的忠实反映(每一次级圈闭的物理体积不会因为其含油气概率的大小而发生改变),这就意味着该方法的计算结果具有很强的随机性。本文提出的“概率组合加和”算法,本质上对最新地质上识别出的、不可切分的含油气聚集单元进行符合不同地质模型约束的取样、组合,结合不同的组合充分考虑不同地质条件约束下的体积计算参数的不确定性。该方法随机模拟给出的不确定性油气资源量分布,不同分位值对应的就是各种可能的含油气聚集单元组合情况,可以回答“大于某油气资源量

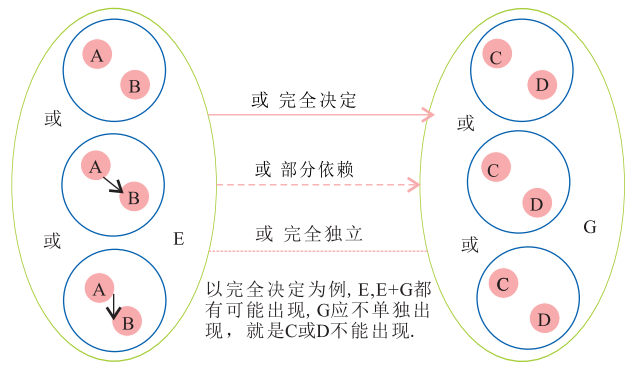


图 7 “概率组合加和”算法的自顶到底的分解模式
Fig.7 Top-down composition model of probability combinatory accumulation
A、B、C、D 为次级圈闭, E 和 G 为三级或四级圈闭

值的概率是多少”、“该资源量主要有哪些产层组成”、“分别贡献了多少”等实际勘探部署问题。

以图 6 为例, A 和 B 两个次级圈闭隶属同一储层形成环境而后经历同一构造运动(断层形成)。储层条件对二者而言是全局成藏条件,圈闭、盖层和烃源岩条件是局部成藏条件;考虑 A 圈闭储层的有无直接决定了 B 圈闭储层的有无,因此 A 和 B 间的含油气性风险依赖是典型的“完全决定”。基于此地质模型约束建立概率树模型,可分别计算 A 和 B 四种不同组合形式对应的含油气成功概率;利用上述概率值和蒙氏模拟能够合理取样 A 和 B,来计算对应的不确定性资源量分布。图 7 和表 3 的计算结果表明,“完全决定”意味着 B 圈闭单独出现的概率是 0,由于 A 和 B 的概率相差无几,二者同时出现的概率大于 A 单独出现的概率;基于此“有偏”取样,不确定性资源量分布的不同分位值对应的主要是有 A 和 B 共同贡献,A 单独贡献很少,B 单独没有任何贡献,该计算结果与当前地质模型约束也是吻合的。

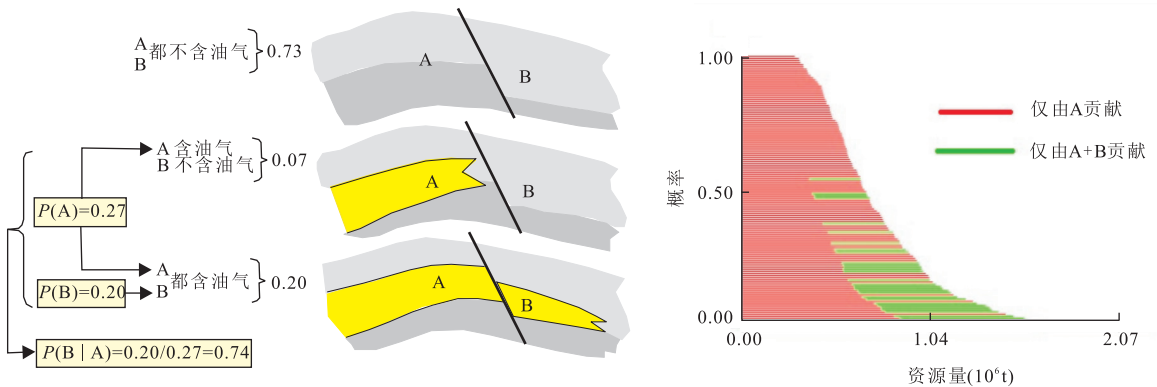


图 6 “完全决定”的地质涵义与不确定性资源量计算结果示意

Fig.6 Compositions and corresponding resource distribution of “discovery full risk dependency”

表 3 二个次级圈闭的含油气组合概率计算(完全决定)

Table 3 Calculation demo of discovery full risk dependency between two trap segments

公式	评价因子	A	B	含油气概率
P_1	圈闭条件	0.8	0.8	
P_2	储层条件	0.7	0.7	
P_3	盖层条件	0.8	0.6	
P_4	烃源岩条件	0.6	0.6	
$P(S) = P_1 \times P_2$	边际概率	0.56	0.56	
$P(X S) = P_3 \times P_4$	条件概率	0.48	0.36	
$P(X) = P(X S) \times P(S)$	非条件(后验)概率	0.27	0.20	
A 和 B 同时出现 = $P(S) \times P(A S) \times P(B A)$, 其中 $P(B A) = P(B S) / P(A S)$				0.20
仅 A 出现 = $P(A) - P(B)$				0.07
仅 B 出现 = $P(B) \times (1 - P(A A))$				0.0
A 和 B 都不出现 = $1 -$ 上述概率和				0.73

新方法计算过程:(1)对选定的不同油气聚集单元进行含油气性风险分析,其大小决定了在迭代过程中该聚集单元是否会出现;(2)根据设定的地质场景,分情况调整不同油气聚集单元计算参数,甚至直接决定某一油气聚集单元是否出现;(3)统计每一油气聚集单元出现概率,确定其与原始含油气概率是否一致,一致意味着此次蒙氏模拟结果可信;(4)汇总、排序迭代过程中油气资源量计算结果,给出超概率曲线,其中,截断资源量为零的情况,意味着获取的是风险前不确定性油气资源量分布,反之为风险后油气资源量分布。“概率组合加和”算法实现的模式采用自顶到底的分解模式,如,三级圈闭资源量取决于其所属不同四级圈闭组合情况,而四级圈闭的资源量取决于其所属次级圈闭组合情况(图 7)。可见,算法本质是对地质上识别出的、不可切分的最小油气聚集单元的取样、组合,在计算过程中充分考虑不同油气聚集单元“含油气体积”的合理性定义。

4 实例应用

以东营凹陷南斜坡八面河地区滩 I 断块圈闭的圈闭资源量计算为例(图 8),该断块包含 4 个次级断块圈闭(图 9 中 4 块绿色区域)。从地质条件分析,该断块的烃源岩来自构造西北低洼部位的古近系孔店组孔二段,目的层位为中生界碎屑岩,盖层为上覆孔一段厚层泥岩。4 个断块圈闭具有相似的沉积环境(即具有相似的储层条件)和相似的充注条件(均以断层为主要油气运移通道),因此这二项成藏条件为全局成藏条件(共性因子)而对于各断块圈闭的圈闭条件和保存条件,因为所处构造位置高低不同,圈闭幅度大小各异:其中 1 号断块所处构造部位最高,

构造高点埋深为 2 200 m,圈闭幅度最大(380 m),圈闭面积最大(3.5 km²);而 2 号断块所处构造部位较低,构造高点埋深为 2 660 m,圈闭幅度最小(80 m),圈闭面积最小(0.1 km²),这 2 项成藏条件为局部成藏条件(个性因子)。各断块圈闭成藏要素评价结果见表 4。根据成藏条件分析:1 号断块地质成功的概率最大,为 0.489,4 号断块地质成功的概率最小,为 0.408。由于储层条件相同,1 号断块勘探成功与否对其他 3 个断块圈闭的成功率有一定影响:1 号断块是否含有油气决定了其他 3 个断块圈闭勘探的成功率,或者说该勘探目标中勘探成功率较低的 2、3、4 号圈闭对成功概率较高的 1 号断块具有部分依赖性。

滩 I 断块多层含油气概率的计算过程可用改进后的概率树模型表示(图 9),图中根节点的数字(0.68)表示部分决定情况下整个勘探目标含有油气的边际概率,是各断块圈闭共性因子地质概率的乘积,各断块圈闭对应节点上的数字表示该断块圈闭含有油气或不含油气的条件概率,是该断块圈闭非共性因子地质概率的乘积;本例中,1 号断块含油气概率最大,2 号含油气概率次之,4 号含油气概率最小,从左到右按含油气概率从大到小排列,其中 1 号是否含油气对其他 3 个的含油气概率有一定影响。该概率树列出了 4 个各种可能结果的组合,每一个分支后面的非条件概率表示该种情况下发生的概率,4 个不同组合及其发生的概率见表 5。滩 I 断块山发现油气的概率(即 4 个至少一个发现油气的概率)为 0.685,其中包含 4 种情况:4 层均有油气发现(概率为 0.133)、同时有 3 层发现油气(0.272)、同时有 2 层发现油气(0.210)及仅有 1 层发现油气(0.070)。部分决定情况下,含油气概率较大的 1 号

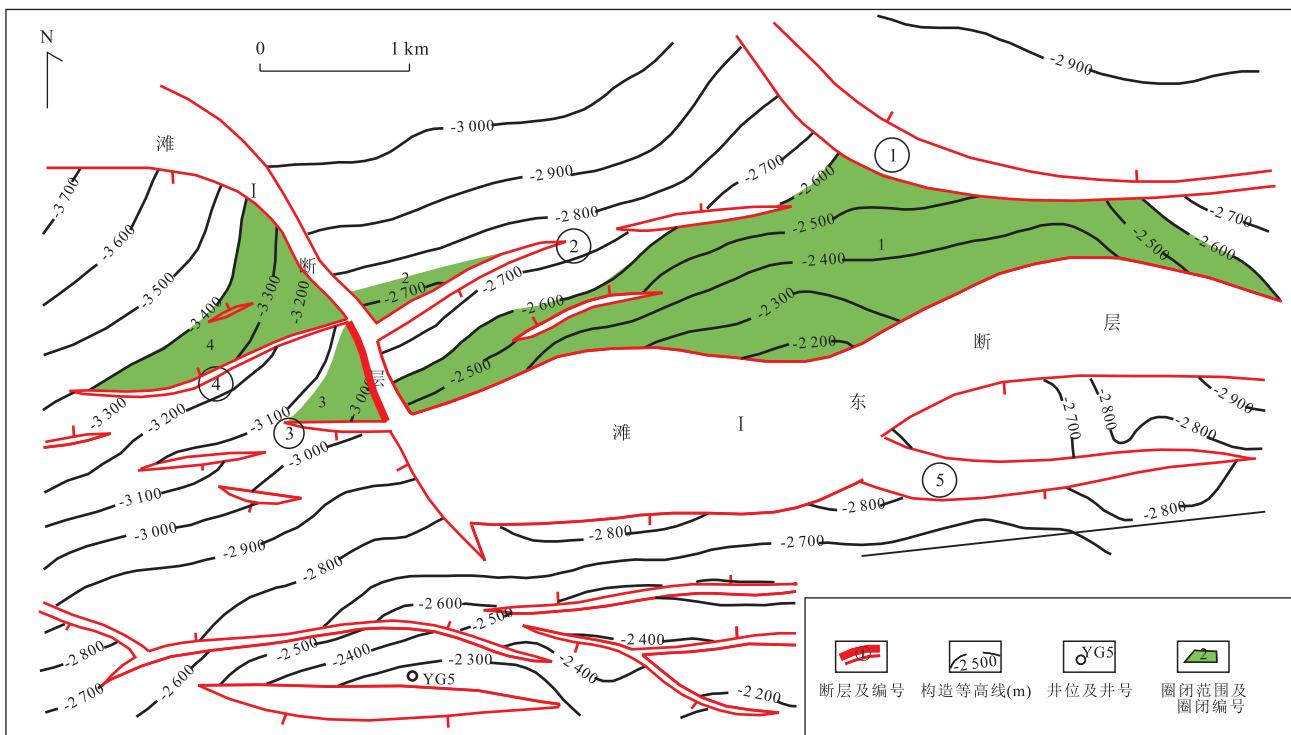


图 8 滩 I 断块中生界顶层构造

Fig.8 The structural sketch of top boundary of Mesozoic in Tan I block

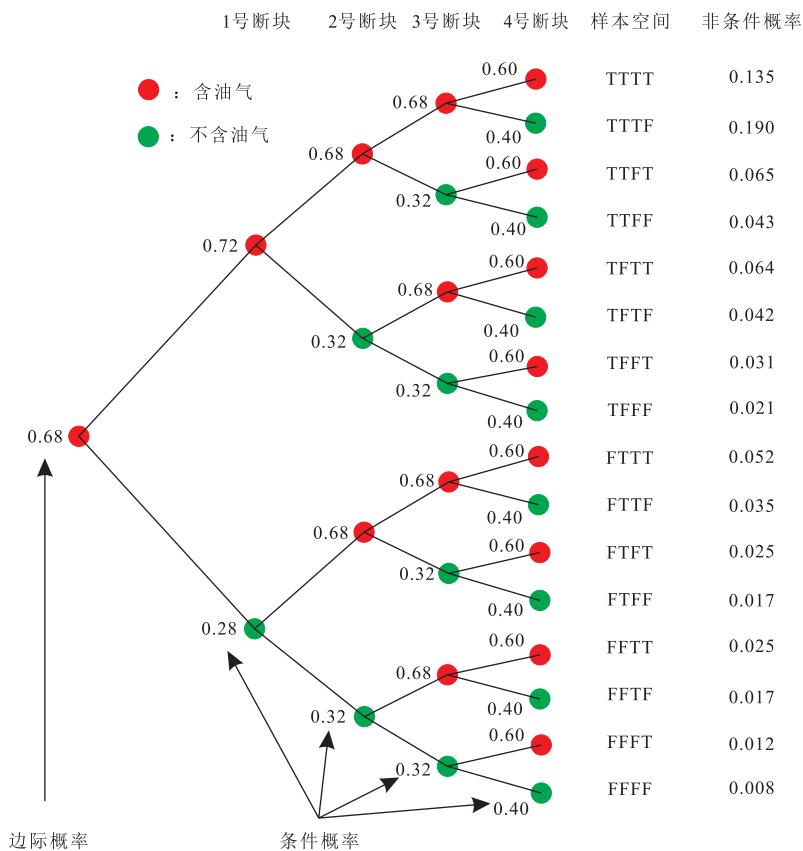


图 9 “部分决定时”多个次级圈闭含油气概率树组合概率计算

Fig.9 Probability tree modified following the “discovery partial dependency” geological constraint

表4 成藏要素风险概率评价

Table 4 The table of risk assessment of accumulation factors

圈闭名称	次级圈闭	圈闭条件(个性因子)	储层条件(共性因子)	充注条件(共性因子)	保存条件(个性因子)	成功概率
I断块山	1号断块	0.80	0.8	0.85	0.90	0.489
	2号断块	0.80	0.8	0.85	0.85	0.462
	3号断块	0.75	0.8	0.85	0.90	0.459
	4号断块	0.75	0.8	0.85	0.80	0.408

表5 “部分决定时”各圈闭油气发现的可能情况及各自发生的概率

Table 5 Probable trap compositions and their probabilities sampled by “discovery partial dependency” principle

油气发现情况	次级圈闭名称				含油气概率
	1号断块	2号断块	3号断块	4号断块	
4个均有发现	✓	✓	✓	✓	0.133
3个有发现	✓	✓	✓		0.094
	✓	✓		✓	0.064
	✓		✓	✓	0.063
2个有发现		✓	✓	✓	0.051
	✓	✓			0.049
	✓		✓		0.045
	✓			✓	0.040
		✓	✓		0.031
			✓	✓	0.023
仅1个有发现			✓	✓	0.022
	✓				0.023
		✓			0.014
			✓		0.019
至少一层含油气的概率				✓	0.014
					0.685

注:表中✓表示该圈闭有油气发现。

断块未发现油气时,其他含油气概率较低的3个也可能发现油气,但它们单独组合出现的概率就小了很多,而伴随1号断块同时发现的组合概率比重明显偏大。

各断块含油气概率的大小以及它们之间的依赖关系对整个断块油气资源量计算结果有明显的影 响。根据勘探成果及获得的相关地质参数,估算出滩 I断块山4个断块圈闭的可采资源量分别为:1号断块 295×10^4 t,2号断块 8×10^4 t,3号断块 16×10^4 t,4号断块 57×10^4 t。按以往的两种方法计算总资源量:(1)“简单加和”:滩 I断块山整个圈闭的资源量为4个资源量的简单相加,即总的资源量为 376×10^4 t;(2)“概率加权加和”:整个圈闭的资源量为4个资源量的简单概率乘积加和,即各个断块圈闭资源量乘以自身含油气概率再相加,总的资源量为 178×10^4 t。利用本文所述的概率组合加和方法,综合考虑4个断块之间的部分决定关系,通过蒙特卡洛模拟方法计算滩 I断块山平均可采资源量为 270×10^4 t,至少一层含油气的概率为0.685。通过计

算结果比较可以看出,按以往的“简单加和法”计算资源量结果偏大,“概率加权加和法”计算结果又偏小。可见,“概率组合加和方法”不仅考虑了各个断块圈闭的含油气概率和发现油气的组合关系,还考虑了同一勘探目标中各断块之间的依赖关系,使多层资源量和含油气概率的计算结果更符合实际地质情况,其结果也更为可信。

5 结论

面向当下多数勘探地区存在着成藏过程复杂、油气不确定性大等难题,“概率组合加和方法”可以较好地融合专家经验、客观量化地下复杂地质条件对计算参数的影响,获取较为可信的资源量计算结果。该方法本质上是:(1)对最新地质上识别出的、不可切分的含油气聚集单元进行符合不同地质模型约束的取样、组合,并在模拟过程中充分考虑不同含油气聚集单元体积计算参数的不确定性;(2)通过设置不同含油气聚集单元间的含油气性风险依赖关系,

能够合理计算“至少有一层含油气次级圈闭发现”概率并给出对应的含油气聚集单元组合;(3)基于不同组合,可量化处理油气聚集单元之间存在的、诸如计算参数间的相关性、断层封堵性等地质条件约束,提升随机模拟过程的合理性;(4)给出的不确定性资源量结果,可以回答“大于某油气资源量值的概率是多少”、“该资源量主要有哪些产层组成”、“分别贡献了多少”等实际勘探部署问题。

References

- Casella, G., Robert, C. P., 2004. Monte Carlo Statistical Methods (Second Edition). Springer Science & Business Media, New York.
- Chen, Z. H., Osadetz, K. G., 2006. Undiscovered Petroleum Accumulation Mapping Using Model-Based Stochastic Simulation. *Mathematical Geology*, 38(1): 1–16. doi: 10.1007/s11004-005-9000-1
- Diao, F., Wen, Z. G., Zou, H. Y., et al., 2013. Sedimentary Characteristics of Shallow-Water Deltas in Chang 8 Oil-Bearing Interval in Eastern Gansu, Ordos Basin. *Earth Science*, 38(6): 1289–1298 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Q. L., Mi, S. Y., 2004. Petroleum Prospect Assessment & Decision Analysis. Petroleum Industry Press, Beijing, 21–22 (in Chinese).
- Houghton, J. C., Dolton, G. L., 1993. U. S. Geological Survey Estimation Procedure for Accumulation Size Distributions by Play. *AAPG Bulletin*, 77(3): 454–466. doi: 10.1306/bdff8c4a-1718-11d7-8645000102c1865d
- Jiang, D. P., Dai, Y. D., Liu, L. H., et al., 2014. A Discussion on Fault Conduit Mechanism and Control Factors of Petroleum Lateral Diversion. *Geoscience*, 28(5): 1023–1031 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., 1995. A Comparison Study of Five Basic Oil and Gas Pool Size Probability Distribution Models and Its Significance. *Acta Petrolei Sinica*, 16(3): 6–13 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Zhang, J. C., 1999. Petroleum Resources Assessment Techniques. Petroleum Industry Press, Beijing, 66–71 (in Chinese).
- Jin, Z. J., Zhang, J. C., 2002. Fundamental Principles for Petroleum Resources Assessments. *Acta Petrolei Sinica*, 23(1): 19–23 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Zhang, Y. W., Wang, J., 2003. Hydrocarbon Accumulation Mechanisms and Oil/Gas Distribution. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Lee, P. J., Wang, P. C., 1984. PRIMES: A Petroleum Resources Information Management and Evaluation System. *Oil and Gas Journal*, 82(40): 204–206.
- Lee, P. J., 2008. Statistical Methods for Estimating Petroleum Resources. Oxford University Press, Oxford.
- Lei, C., Ye, J. R., Wu, J. F., et al., 2014. Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression. *Earth Science*, 39(7): 837–847 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Li, J. T., 2012. Comprehensive Evaluation Method of Oversea Opportunity in Oil and Gas Exploration. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 807–812 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Wang, D. M., Liu, D. C., et al., 2015. Oil and Gas Anomaly Extraction by Combining Hyperspectral Image Data with Multispectral Image Data. *Earth Science*, 40(8): 1371–1380 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. W., Fang, C. L., 2004. Key Technology of Petroleum Industry in the 21st Century. Petroleum Industry Press, Beijing, 81–82 (in Chinese).
- Martinelli, G., Eidsvik, J., Hauge, R., et al., 2010. Bayesian Networks for Prospect Analysis in the North Sea. *The American Association of Petroleum Geologists*, 95(8): 1423–1442.
- Meneley, R. A., Calverley, A. E., Logan, K. G., et al., 2003. Resource Assessment Methodologies: Current Status and Future Direction. *AAPG Bulletin*, 87(4): 535–540. doi: 10.1306/10180202006
- Pan, J. P., Li, Z., 2007. Integrated Evaluation Technology of Resources and Targets and Its Implication for Petroleum Exploration. *China Petroleum Exploration*, 12(1): 76–80 (in Chinese with English abstract).
- Rose, P. R., 2001. Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures. *AAPG Methods in Exploration*, 12: 178.
- Rose, P. R., 2002. Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures. Translated by Dou, L. R., et al., Petroleum Industry Press, Beijing, 6–9 (in Chinese).
- Schneiderm, R. M. O. A. N., 1997. A Process for Evaluating Exploration Prospects. *AAPG Bulletin*, 81(7): 1087–1109. doi: 10.1306/522b49f1-1727-11d7-8645000102c1865d
- Sheng, X. J., Jin, Z. J., Guo, Q. T., 2014. Discussion on Integrated Resource Evaluation and Software Development. *Geological Review*, 60(1): 159–168 (in Chinese with English abstract).
- Sheng, X. J., Jin, Z. J., Yan, Q., et al., 2013. Statistical Method Series for the Resource Assessment of Petroleum Accu-

- mulation System. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 827—833, 854 (in Chinese with English abstract).
- Tao, S.Z., Zou, C.N., Wang, J.H., et al., 2011. On the Identification of Connotation, Extension, and Type for Some Hydrocarbon Accumulations. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 571—575 (in Chinese with English abstract).
- White, D.A., 1993. Geologic Risking Guide for Prospects and Plays. *AAPG Bulletin*, 77(12): 2048—2061. doi: 10.1306/bdff8fce-1718-11d7-8645000102c1865d
- Wu, S.C., 2005. Introduction of Petroleum Resources Assessment. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Yang, B.L., Ye, J.R., Wang, Z.S., et al., 2014. Hydrocarbon Accumulation Models and Main Controlling Factors in Liaodong Bay Depression. *Earth Science*, 39(10): 1507—520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.Y., Li, Z., Kong, Y.X., et al., 2014. Study on Evaluation Method of Petroleum Resources in Mature Exploration Area: Taking Niuzhuang Sag of Bohaiwan Basin as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 25(4): 477—489 (in Chinese with English abstract).
- 金之钧, 张一伟, 王捷, 2003. 油气成藏机理与分布规律. 北京: 石油工业出版社.
- 金之钧, 1995. 五种基本油气藏规模概率分布模型比较研究及其意义. *石油学报*, 16(3): 6—13.
- 雷闯, 叶加仁, 吴景富, 等, 2014. 低勘探程度盆地成藏动力学过程: 以西湖凹陷中部地区为例. *地球科学*, 39(7): 837—847.
- 李頌, 李俊廷, 2012. 海外油气勘探项目综合评价方法. *天然气地球科学*, 23(4): 807—812.
- 刘佳, 汪大明, 刘德长, 等, 2015. 协同利用高光谱与多光谱遥感技术提取油气异常信息. *地球科学*, 40(8): 1371—1380.
- 刘振武, 方朝亮, 2004. 21世纪石油工业关键技术. 北京: 石油工业出版社, 81—82.
- 潘继平, 李志, 2007. 资源与目标一体化评价技术及其勘探意义. *中国石油勘探*, 12(1): 76—80.
- Rose, P.R., 2002. 油气勘探项目的风险分析与管理. 窦立荣, 等译. 北京: 石油工业出版社, 6—9.
- 盛秀杰, 金之钧, 郭勤涛, 2014. 油气资源评价一体化技术及软件实现的探讨. *地质论评*, 60(1): 159—168.
- 盛秀杰, 金之钧, 鄢琦, 等, 2013. 成藏体系油气资源评价中的统计方法体系. *石油与天然气地质*, 34(6): 827—833, 854.
- 陶士振, 邹才能, 王京红, 等, 2011. 关于一些油气藏概念内涵、外延及属类辨析. *天然气地球科学*, 22(4): 571—575.
- 武守诚, 2005. 石油资源地质评价导论. 北京: 石油工业出版社.
- 杨宝林, 叶加仁, 王子嵩, 等, 2014. 辽东湾断陷油气成藏模式及主控因素. *地球科学*, 39(10): 1507—1520.
- 张林晔, 李政, 孔样星, 等, 2014. 成熟探区油气资源评价方法研究——以渤海湾盆地牛庄洼陷为例. *天然气地球科学*, 25(4): 477—489.

附中文参考文献

- 刁帆, 文志刚, 邹华耀, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区长8油层组浅水三角洲沉积特征. *地球科学*, 38(6): 1289—1298.
- 郭秋麟, 米石云, 2004. 油气勘探目标评价与决策分析. 北京: 石油工业出版社, 21—22.
- 姜大朋, 代一丁, 刘丽华, 等, 2014. 断层侧向封闭性及对断圈油水关系的控制. *现代地质*, 28(5): 1023—1031.
- 金之钧, 张金川, 1999. 油气资源评价技术. 北京: 石油工业出版社, 66—71.
- 金之钧, 张金川, 2002. 油气资源评价方法的基本原则. *石油学报*, 23(1): 19—23.