

油气勘探风险分析技术应用现状与发展趋势

李 军, 蔡利学

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:通过对国内外油气勘探风险分析技术应用现状的系统介绍,分析目前勘探存在的主要问题,总结出今后勘探风险分析技术发展主要有五大趋势:一是勘探风险分析更加重视资料信息的应用,二是风险分析技术与商业或经济储量评价紧密结合,三是风险分析始终贯穿勘探评价和决策全过程,四是数学地质学与计算机的发展将促进勘探风险分析的量化发展,五是学科交叉和综合研究将随着石油地质理论的发展而发展。

关键词:勘探风险分析;含油气评价;资源评价;经济评价;勘探决策

中图分类号: TE15

文献标识码: A

Application status and development trend of petroleum exploration risk analysis

Li Jun, Cai Lixue

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

Abstract: Through the systematic introduction of the application status of petroleum exploration risk analysis within China and abroad, this paper analyzed the major problems in the current exploration and summarized that there would be five trends in the future technology development of the exploration risk analysis. The first one is that the exploration risk analysis will pay more attention to the application of data and information. The second one is that the risk analysis technology will integrate with the commercial or economic reserve evaluation closely. The third one is that the risk analysis will run through the whole process of exploration evaluation and decision. The fourth one is that Mathematical Geology and the development of Computer Science will accelerate the quantitative development of the exploration risk analysis. The fifth one is that the multi-disciplinary and comprehensive study will mature with the development of the theory of Petroleum Geology.

Key words: exploration risk analysis; hydrocarbon evaluation; resource evaluation; economic evaluation; exploration decision

随着我国国民经济持续快速增长,对能源的需求不断增加,油气在我国国民经济发展中有着举足轻重的地位。但是,目前待探明油气资源的位置大多地处偏远、自然条件恶劣的地区,地面条件相对恶化,施工难度加大。地下地质条件比较复杂,目标隐蔽性增强,勘探难度越来越大,勘探风险不断增加。

随着石油地质理论的发展,特别是油气成藏理论的深入发展以及数学地质学和计算机技术的广泛应用,油气勘探风险分析技术得到快速发展。油气勘探风险分析是认识一个地区地质规律的过程,是油气资源综合评价的一部分,同时,也为各级决策部门制定下一步油气勘探计划或规划以及为勘探部署提供科学依据。因此,勘探风险分析是指钻

前评价过程中对有利目标的不确定性因素和风险的定量或数值化评价。

目前,大多数外国石油公司都建立了常规的勘探风险分析和管理制度,在规避风险、降低成本和提高效益方面正发挥着越来越重要的作用。

1 国外现状

风险分析最早起源于欧洲银行业,但在20世纪30年代,美国为应对经济危机对企业经营的影响,开展了风险分析和管理研究,上世纪70年代以后,开始在全球各行各业风行,石油行业也不例外。

对于石油行业而言,风险的种类很多,如地质风险(勘探开发干井的风险)、工程技术风险、政治风险、经济风险、未来价格预测风险、环境风险、投

资者破产风险等等^[1-2]。但对于油气勘探项目和勘探人员而言,更注重油气勘探的地质风险,主要体现在地质评价、资源量估算和决策分析的整个评价过程中,风险分析亦随着勘探形势和技术的发展而发展。

在20世纪60年代以前,石油公司的油气勘探活动主要集中在局部构造简单地区,伴随着油气资源综合评价技术的发展,主要采用地质成藏条件静态研究与油气资源量的简单估算进行地质风险分析,从而评价油气勘探目标,当时的勘探发现以大构造为主。

20世纪60年代,随着数学地质学和计算机开始在油气勘探领域应用,开始采用成藏条件动态研究方法进行勘探目标地质评价,主要应用地质类比法,研究油源、储层、盖层、圈闭、保存等地质条件及其时空配套条件,加强了油气成藏时空配置关系的研究。同时,开始应用单储系数法、容积法、热模拟法、沉积岩体积丰度法等多种方法计算勘探目标资源量,但资源量计算参数为定值,且很少考虑资源的经济性。1960年Grayson等^[3]开始了早期的风险分析在勘探投资决策方面研究;1962年Kaufman^[4]发表了有关对数正态分布在勘探目标评价和投资决策中的应用的著作,他们的研究为勘探风险分析在油气勘探实际中应用奠定了基础。

20世纪70年代,由于1973年中东石油禁运及油价大幅上涨引起的“石油危机”,直接影响了世界经济,以美国为代表的发达国家开始了全球性的油气资源研究和勘探目标评价。伴随着地质理论和勘探技术的进步,以及数学地质学和计算机在油气工业中的广泛应用,开始了真正意义上的地质风险分析,Newendorp^[5]和Capen^[6]等采用统计学和概率论理论分析勘探目标含油气的可能性。同时,由于人们对地下油气资源认识的不确定性,开始应用统计概率方法,采用与地质类比相结合的面积产率法和体积产率法计算资源量,结果以累计概率形式来表达^[7-8],并开始考虑资源的经济性。随着70年代早期勘探风险分析在Exxon、Shell、Arco公司中开始系统应用,到70年代后期,Chevron、BP、Elf等石油公司以及某些政府机构(加拿大地质调查局、法国石油研究院和美国联邦地质调查局)也开始在勘探评价和投资中常规应用勘探风险分析。

自20世纪80年代以来,世界油气勘探的发现规模逐渐变小,发现油气田的预探井并没有明显地随时间而变化,预探井成功率平均为25.25%,而发

现大于100百万桶油当量储量的并由60、70年代的4%以上减少至90年代的1.9%^[9],勘探的难度在逐渐增大。尽管技术可以降低由于勘探难度增加的地质不确定性,但却不能排除风险。尤其勘探的研究对象在地下,具有隐蔽性,一些概念只能建立在“假设”的基础上,不确定的因素较多,例如地下情况复杂、地质资料不足等。加之人们对复杂事物的认识不可能一次完成,更增加了勘探项目的风险性。因此,20世纪80年代以来,不仅计算机在石油勘探研究和评价中得到了普遍应用,勘探目标风险分析和经济评价也更加受到重视。勘探风险分析与决策研究在石油工业上的应用飞速发展,勘探风险分析和管理在国外大中型石油公司得到广泛认同和应用^[10-15],许多小石油公司和国家石油机构也纷纷应用该技术。如何利用有限的投资最大限度地获得商业或经济储量成为勘探家所面临的重要课题^[16-17]。每个油公司都形成了自己的评价体系,并拥有专业评价人员。

发展至今,勘探风险分析技术愈加成熟,运用统计学、概率论和效用理论的原理,在综合研究油气成藏要素的基础上,采用地质风险概率法,将独立的地质成藏概率因子(一般4~5个,最多可达14个)连乘评价油气成藏的可能性^[18-22];并采用统计法和类比法估算储量参数分布范围,采用地质类比法(包括单储系数法、容积法、最小经济规模界限法等)、主观评价法(专家评价法、特尔菲法)、统计分析法(或历史经验外推法,包括油田规模序列法)、成因法(或地球化学物质平衡法,包括盆地模拟法、氯仿沥青“A”法、热模拟法等)和综合法(地质模型与计算模型相结合的地质风险概率法)五大类国际通用方法,应用蒙特卡洛模拟预测油气规模^[23-27];同时,考虑工程技术的适应性,采用现金流法评估资源的经济性^[28-31],估算不同意义的成功概率,对不同勘探目标进行分级和排序,并在此基础上,从公司的发展战略目标出发,进行风险—投资优化,最终筛选和编制出年度投资组合^[32-40]。

目前,在全球普遍使用且最具有代表性的评价系统包括美国地质调查所研制的FASPU(石油快速评价系统)、挪威Geoknowledge公司研制开发的GeoX(资源—经济分析系统)、美国Decisioneering公司研制的Crystal Ball、美国Landmark公司研制开发的TERAS(经济与风险分析系统)。

2 国内现状

自20世纪80年代,我国开展对外合作勘探,

将勘探风险分析的一般概念和方法引入中国,在学习借鉴国外有关地质风险概率方法、分析油气成藏经验的基础上,结合中国地质特点,国内学者总结了国内勘探目标评价流程和基本方法^[41-43]。这些方法和经验很快在海域盆地的目标评价优选中应用,提高了海域钻探目标成功率,有力地推动了海域油气资源勘探。另外,1986年我国第一次资源评价初步采用了资源量概率曲线形式表示^[44-46],所报道的 $787 \times 10^8 \text{ t}$ 就是P50的资源量^[47]。

随着90年代初期第二次油气资源评价的展开,勘探家更加关注勘探目标的地质风险分析和资源的经济性,并在一些盆地做了有价值的尝试。例如,根据大庆、胜利等已有油气发现凹陷的储量和经济门限统计,计算了不同凹陷类型的经济系数,提出了“经济资源量”的概念。同时,对一些关键问题展开了研究,如成功率的定义、风险分析与经济评价的关系等,初步形成了风险概率法^[48-53],并在圈闭和区带优选预探中发挥了较好作用。随着风险分析技术在资源量计算中得到进一步发展,勘探家还总结了5种常见的油气藏分布模型,并按照统一的统计检验标准进行校验^[54]。

在90年代末,中国各大石油公司纷纷上市成功,提出了勘探“效益第一”的原则。为了提高钻探成功率,寻找商业或经济的规模接替储量,增加公司价值,各上市石油公司对来自全国或全球范围内的不同地区的风险目标进行评价和优选,以便最终做出投资决策,为此均加强了地质风险分析和经济评价^[55-62]。近年来,勘探风险分析备受重视,三大石油公司均逐步建立各自的评价体系和系统^[63-64],先后涌现出具有代表性的TrapDES、OE、PdSys等勘探目标风险分析、评价、优选和决策系统,在油气勘探规划部署中起到了重要作用。

发展至今,勘探风险分析技术在地质风险评价和经济评价方法上取得了长足进步。目前,主要采用类比法和统计法,对圈闭、油源、储层、保存、运聚、匹配等成藏地质条件进行分析,但是大多是按照成藏地质条件的优劣分级进行打分,然后将所有成藏条件因子得分相乘求得地质综合评价因数,即地质把握程度,概念上等于1减去地质风险因数。其中,各成藏条件因子则通过对其各关键地质因子加权求和或相乘获得,无论子因子是否相关和独立;而仅把资料因素理解为圈闭落实程度,作为圈闭条件的一个因子与其他成藏要素相乘,而对资料因素在勘探风险中的重要程度没有足够的认识。

勘探目标的资源量计算则采用类比法、成因法和统计法等国际通用方法,虽然各石油公司和研究机构均提倡应用蒙特卡洛模拟等能够体现风险分析的方法进行估算,但实际操作大多采用定值进行计算,而忽略了油气勘探所具有的高度不确定性。

勘探目标的优选决策方法很多,但目前国内最通行的方法则是通过对勘探目标进行经济评价,从而选用不同经济指标求得经济评价系数,最终将地质综合评价系数和经济系数加权求和,得出勘探目标优选评价值,最终进行排序优选。这些优选评价方法和系统突出了效益观念,在勘探目标优选评价中起到了重要作用^[65]。投资组合优选是另一种更能体现勘探风险的决策方法,虽然国内也有研究^[66],但实际应用很少。因此,与国外相比,我国的勘探风险分析还相对比较粗放。

随着我国油气勘探领域的不断扩大和勘探目标的不断复杂化,勘探难度日益增加,则需要在前人研究的基础上,进一步深化我国的勘探风险分析技术。

3 发展趋势

油气勘探大都是在不确定的情况下进行的,因而风险高,投入大。勘探风险分析作为勘探目标评价的主要内容之一,它既是一项综合性的研究过程,也是一个充分应用最新科技成果的评价过程。近年来许多人进行了积极探索,提出了一些新的方法^[58]。勘探风险分析的发展趋势如下:

3.1 地质评价更加突出风险分析、重视资料信息的应用

地质评价是勘探的首要任务之一,地质风险分析技术通过几十年的发展,为了更加适应当前的勘探形势,使地质评价更科学和合理,将从可能发现油气的真正概率因素入手,进一步完善不同资料置信条件下的成藏条件评价标准。首先,选择相互独立的成藏概率因子或子因子,以便满足“木桶短板”原理。其次,成藏因子或子因子概率赋值应重视资料的置信程度,即根据资料信息的相关程度、质量和数量确定概率大小,而不是根据烃源岩、储层等质量的好坏评分,并将赋值标准尽量细化和明确,并与实际情况进行比对和校验,增加地质风险评价的可靠性。

3.2 风险分析技术与商业或经济储量评价紧密结合进行勘探目标评价

勘探目标是油气聚集的地质单元,但并非所有的勘探目标都含有油气,即使找到的含油气目标也

并非都有商业或经济价值。越来越高的勘探费用迫使人们反思,除了油气发现的地质成功之外,在当前勘探难度越来越大、技术要求越来越高的情况下,我们获得商业或经济储量的可能性有多大?即油气发现的商业或经济成功率是多少?这是所有石油公司都关心的问题。

这就要求勘探人员在充分考虑油气勘探特点的前提下,即正确认识勘探是在大量不确定因素下进行的,应用统计学方法描述油气资源计算参数的分布区间,估算出勘探目标的资源或储量分布,并根据经济上的投入和产出平衡原理,确定商业或经济储量下限,从而获得油气发现的商业或经济成功率,以满足勘探目标钻前预测的需求,进一步规范钻前经济评价,使风险分析不再停留在文字描述和定性判断上,并可进一步权衡风险,从而保证在最小的风险下获得最大经济可采储量。

3.3 风险分析始终贯穿于勘探评价全过程

油气勘探是个充满挑战的行业,风险是勘探最重要的特点。因此,风险分析应该贯穿于勘探评价和决策的全过程。截至目前,贯穿于地质评价、资源估算和投资决策全过程的勘探风险分析在我国陆上和海域勘探中均有所体现。但是,风险分析在目前勘探决策中的主要作用多是根据勘探目标的油气发现概率、资源规模、价值大小等指标,在有限的目标中优选最有利目标进行钻探,而在勘探的主要决策点上,风险分析作为一种量化的分析方法还没有普遍应用。

此外,在勘探决策中,应该进一步推广现代投资组合理论,应用概率论和线性代数等其他数学方法,根据不同阶段勘探任务、勘探目的和勘探对象要求,分析风险承担能力,结合效用分析理论权衡风险和收益,选择最佳投资组合,实现投资收益的最大化,为勘探规划和部署决策提供依据。

3.4 数学地质学与计算机的发展将促进勘探风险的定量化发展

近几十年来计算机和网络技术飞速发展,与之相伴的数值方法的发展将进一步促使地质学进入系统化研究。大规模数值模拟方法的出现和发展使得资源累积概率分布、投资组合优选等繁复的数学模拟得以实现。计算机数值模拟技术现在已成为地质学研究中与野外观察、实验室实验并重的基本方法。此外,计算机的应用也有利于大量勘探数据的积累,并形成数据库,节省大量的人力物力,加快勘探评价速度,提高评价精度,更好地为油气勘探服务。

3.5 学科交叉和综合研究将随着石油地质理论的发展而发展

随着油气勘探形势的变化以及地质领域其他相关学科的迅速发展,数理统计学、概率论、经济学等学科与经典石油地质学将进行深入的融合与交叉,勘探目标评价中有关石油与天然气地质学中的许多概念也将不断地得到发展。勘探风险分析将进入一个新的发展阶段,从过去的典型描述性向多维化、定量化和信息化迅速发展,从而形成比较完整的新评价体系。勘探风险分析已成为当今油气勘探中十分重要的内容之一,将随着石油地质理论的发展而发展。

4 结语

油气勘探具有复杂性和艰巨性,同时也使其具有了很高的风险性。历史数据表明,勘查和勘探投资中只有不到20%的支出能够有商业发现。因此我们要继续发展和完善勘探风险分析技术,研究勘探风险与收益之间的关系,优化资源配置,将资源(资金和人力)分配到资本回报最高的领域,最大限度地发现油气,寻找商业储量,增加企业价值。

参考文献:

- [1] Newendorp P D. Petroleum exploration risk analysis [C]// Developments in petroleum geology. London: Applied Science Publishers Ltd, 1980.
- [2] Barss D L. Conventional petroleum resource estimates: Methods of assessment and their implication for planning and policy issues [C]// Development in petroleum geology (2). London: Applied Science Publishers Ltd, 1980.
- [3] Grayson C J Jr. Decisions under uncertainty [C]// Drilling decisions by oil and gas operators. Boston: Harvard University Graduate School of Business Administration, 1960.
- [4] Kaufman G M. Statistical decision and related techniques in oil and gas exploration [M]. New York: Prentice-Hall, 1962.
- [5] Newendorp P D. Decision analysis for petroleum exploration [M]. Tulsa, Okla: Petroleum Publishing Company, 1975.
- [6] Capen E C. The difficulty of assessing uncertainty [J]. Journal of Petroleum Technology, 1976(8): 843-850.
- [7] Kaufman G M, Baker Y, Kruyt D. A probabilistic model of oil and gas discovery [M]// Haun J D, ed. Methods of estimating the volume of undiscovered oil and gas reserves: Studies in geology No1. Tulsa: AAPG, 1975.
- [8] Energy mines and resources Canada Report [R]. Oil and natural gas resources of Canada, 1977, 1.
- [9] Rose P R, Citron G P. The "Prospector Myth" vs. systematic management of exploration portfolios: Dealing with the dilemma [J]. Houston Geological Society Bulletin, 2000, 43(2): 27, 29-30.
- [10] Bailey W, Couett B, Lamb F E, et al. Taking a calculated risk [M].

- Schlumberger; Oilfield Review, 2001; 20-35.
- [11] While D A. Geologic risking guide for prospects and plays [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(12): 2048-2061.
- [12] Otis R M, Schneidemann N. A process for evaluating exploration prospects [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(7): 1087-1109.
- [13] MacKay J A. Utilizing risk tolerance to optimize working interest [R]. SPE 30043, 1995; 103-109.
- [14] McMaster G E. New trends in exploration risk analysis [R] // Internal Amoco Corporation Report, 1997, 9.
- [15] Jonkman R M, Bos C F M, Breunese J N, et al. Best practices and methods in hydrocarbon resource estimation, production and emissions forecasting, uncertainty evaluation and decision making [R]. SPE Paper 65144, 2000; 293-301.
- [16] Simpson G S, Lamb F E, Finch J H, et al. The application of probabilistic and qualitative methods to asset management decision making [R]. SPE 59455, 2000.
- [17] Murtha J A. Risk Analysis for the oil industry: A supplement [J]. Hart's E & P, 2001, 11; 1-24.
- [18] Capen E C. Dealing with exploration uncertainties [M] // Steinmetz R, ed. The business of petroleum exploration. Tulsa; AAPG, 1992; 29-61.
- [19] Boccia A. The trouble with high risk exploration: Oil and gas briefs [M]. South Carolina, Columbia; Carlisle Associates Inc, 1996.
- [20] Rose P R. Dealing with the risk and uncertainty in exploration; how can we improve? [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(1): 1-16.
- [21] Rose P R. Risk behavior in petroleum exploration [M] // AAPG Treatise of Petroleum Geology Handbook of Petroleum Geology. Tulsa; AAPG, 1992; 95-103.
- [22] Jan-Erik K, Bundit C, Simplicio P C. The CCOP guidelines for risk assessment of petroleum prospects [R]. Professional Paper of Coordinating Committee for Offshore Prospecting in Asia, 2000; 4-21.
- [23] Murtha J A. Estimating reserves and success for a prospect with geologically dependent layers [R]. SPE 30040, 1995.
- [24] Capen E C. Probabilistic reserves! Here at last? [R]. SPE 73828, 2001; 387-394.
- [25] Capen E C. Why lognormal? [M] // AAPG course "Evaluating and Managing Petroleum Risk". Tulsa; AAPG, 1984.
- [26] Capen E C. A consistent probabilistic definition of reserves [R]. SPE Reservoir Engineering, 1996; 23-28.
- [27] 谢寅符, 陈和平, 马中振, 等. 概率法油气储量评估及其与确定法的差异比较 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 117-122. Xie Yinfu, Chen Heping, Ma Zhongzhen, et al. Probabilistic estimation of reserves and difference between probabilistic and determine methods [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(1): 117-122.
- [28] Capen E C. Rethinking sunk costs; A value approach [J]. Journal of Petroleum Technology, 1991; 1418-1423.
- [29] Clapp R V. An alternate concept of investment for improved profitability measures [R]. SPE 30051, 1995; 179-185.
- [30] Capen E C. Property evaluation; a return to first principles [R]. SPE 68595, 2001.
- [31] Lohrenz J. Profitabilities on federal offshore oil and gas leases: A review [J]. Journal of Petroleum Technology, 1988; 760-764.
- [32] Cozzolino J M. New ideas, new methods, new developments; exploration risk management [C]. Proceedings of the Southwestern Legal Foundation Exploration and Economics of the Petroleum Industry, 1981, 19; 97-116.
- [33] Simpson G S, Lamb F E, Finch J H, et al. The application of probabilistic and qualitative methods to asset management decision making [R]. SPE 59455, 2000.
- [34] Bailey W, Couett B, Lamb F E, et al. Taking a calculated risk [J]. Schlumberger Oilfield Review, 2001; 20-35.
- [35] Rose P R. Taking the risk out of petroleum exploration: The adoption of systematic risk analysis by international corporations during the 1990s [J]. The Leading Edge, 1999, 192-199.
- [36] MacKay J A. Utilizing risk tolerance to optimize working interest [R]. SPE 30043, 1995; 103-109.
- [37] McMaster G E. New trends in exploration risk analysis [R] // Internal Amoco Corporation Report, 1997.
- [38] Jonkman R M, Bos C F M, Breunese J N. Best practices and methods in hydrocarbon resource estimation, production and emissions forecasting, uncertainty evaluation and decision making [R]. SPE 65144, 2000.
- [39] Howell J I, Tyler P A. Using portfolio analysis to develop corporate strategy [R]. SPE 68576, 2001.
- [40] Tversky A, Kahneman D. The framing of decision and the psychology of choice [J]. Science, 1981, 211(4481): 453-458.
- [41] 龚再升, 邱中健, 杨甲明. 含油气盆地早期油气资源评价方法: 局部圈闭评价 [J]. 石油学报, 1983, 4(3): 35-44. Gong Zaisheng, Qiu Zhongjian, Yang Jiaming. Method of evaluation of hydrocarbons resources of an oil basin at the early stage, evaluation of local traps [J]. Acta Petrolei Sinica, 1983, 4(3): 35-44.
- [42] 朱世新, 宋芝祥, 王定一. 油气田调查勘探与资源评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1987. Zhu Shixin, Song Zhixiang, Wang Dingyi. Searching and prospecting and resource evaluation for oil and gas field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [43] 张宽. 地质风险分析在海域油气勘探中的应用回顾及方法研讨 [J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(1): 19-28. Zhang Kuan. Review application of geological risk analysis in China offshore oil and gas exploration [J]. China Offshore Oil and Gas, 1997, 11(1): 19-28.
- [44] 王幼梅. 我国油(气)田规模分布与油(气)资源量估算方法研究 [J]. 石油勘探与开发, 1986(5): 16-21. Wang Youmei. A study of the distribution of oil and gas field size and the related method of reserve estimation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1986(5): 16-21.
- [45] 《油气资源评价方法研究与应用》编委会. 油气资源评价方法研究与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1988. Oil and Gas Resource Evaluation Method Study and Application Editorial Board. Oil and gas resource method study and application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988.
- [46] 武守诚. 油气资源评价与系统研究 [J]. 石油学报, 1989, 10(4):

- 1-11.
Wu Shoucheng. Petroleum resources evaluation in China and a unique system approach[J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(4): 1-11.
- [47] 武守诚. 油气资源评价导论[M]. 北京:石油工业出版社, 2005:30-40.
Wu Shoucheng. Introduction of petroleum resources assessment[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005:30-40.
- [48] 丁贵明, 张一伟, 吕鸣岗, 等. 油气田勘探工程[M]. 北京:石油工业出版社, 1997:179-180.
Ding Guiming, Zhang Yiwei, Lü Minggang, et al. Petroleum exploration engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:179-180.
- [49] 中国石油天然气总公司勘探局编. 油气资源评价技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1999:1-77.
The China National Petroleum Company Exploration Bureau. Oil and gas resources evaluation technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999:1-77.
- [50] 蔡希源, 侯启军. 油气圈闭地质评价方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 1994, 18(2):1-5.
Cai Xiyuan, Hou Qijun. Geological evaluation method of hydrocarbon traps and its application[J]. Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 1994, 18(2):1-5.
- [51] 何亚伟. 勘探风险分析方法[J]. 油气勘探开发信息, 1996, 13(4):26-26.
He Yawei. Exploration risk analysis method[J]. Oil and Gas Exploration and Production Information, 1996, 13(4):26-26.
- [52] 吕鸣岗, 朱向东, 胡素云, 等. 圈闭/区带的地质风险分析[J]. 石油学报, 1997, 18(2):49-53.
Lü Minggang, Zhu Xiangdong, Hu Suyun, et al. Geological risk analysis of trap and play[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(2):49-53.
- [53] 米石云, 石广仁, 郭秋麟. 论建立动态勘探目标评价体系的迫切必要性[J]. 中国石油勘探, 1998, 8(2):12-17.
Mi Shiyun, Shi Guangren, Guo Qiulin. Urgent to build a dynamic exploration target evaluation system[J]. China Petroleum Exploration, 1998, 8(2):12-17.
- [54] 金之钧. 五种基本油气藏规模概率分布模型比较研究及其意义[J]. 石油学报, 1995, 16(3):6-12.
Jin Zhijun. A comparison study of five basic oil and gas pool size probability distribution models and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3):6-12.
- [55] 焦方正. 油气勘探开发项目风险分析[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
Jiao Fangzheng. Petroleum exploration and production project risk analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [56] 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.
Jin Zhijun, Zhang Jinchuan. Petroleum resources evaluation technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [57] 邱中建, 龚再升. 中国油气勘探:第一卷[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
Qiu Zhongjian, Gong Zaisheng. China oil and gas exploration: The first volume[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [58] 贾承造, 杨树锋, 张永峰, 等. 油气勘探风险分析与实物期权法经济评价[M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
Jia Chengzao, Yang Shufeng, Zhang Yongfeng, et al. Risk analysis and economic evaluation of oil and gas exploration project with real option method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [59] 宋建国, 张光亚. 勘探目标评价方法[J]. 世界石油工业, 1998, 5(8):22-27.
Song Jianguo, Zhang Guangya. Exploration target evaluation method[J]. World Petroleum Industry, 1998, 5(8):22-27.
- [60] Rice D D. 油气评价方法与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1992.
Rice D D. Oil and gas assessment methods and application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [61] 武守诚. 油气资源评价技术规范[S]. 北京:中油股份公司主要含油气盆地资源评价项目办公室, 2001.
Wu Shoucheng. Technical specification for oil and gas resources evaluation[S]. Beijing: The main petroliferous basin resources assessment project office, CNPC, 2001.
- [62] 胡素云, 田克勤, 柳广弟, 等. 刻度区解剖方法与油气资源评价关键参数研究[J]. 石油学报, 2005, 26(S1):49-54.
Hu Suyun, Tian Keqin, Liu Guangdi, et al. Dissection of calibrated units and key parameters for oil and gas resource assessment[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(S1):49-54.
- [63] 曲德斌, 胡素云, 秦俭, 等. 圈闭描述评价原理及 TrapDES1.0 使用指南[M]. 北京:石油工业出版社, 1998.
Qu Debin, Hu Suyun, Qin Jian, et al. Principle of trap description and evaluation and guideline for the use of TrapDES1.0[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [64] 米立军, 张厚和, 陈蓉, 等. 中海油勘探投资组合系统开发与应用[J]. 中国石油勘探, 2008(5):54-60.
Mi Lijun, Zhang Houhe, Chen Rong, et al. Development and application of exploration portfolio system of CNOOC [J]. China Petroleum Exploration, 2008(5):54-60.
- [65] 黄旭楠, 包世界, 傅振华, 等. 油气勘探经济评价方法探讨[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3):9-13.
Huang Xunan, Bao Shijie, Fu Zhenhua, et al. A discussion on the method of economic evaluation in oil and gas exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3):9-13.
- [66] 米立军, 张厚和, 陈蓉. 中海油勘探投资组合管理理念与实践[J]. 中国石油勘探, 2011(1):70-74.
Mi Lijun, Zhang Houhe, Chen Rong. Management idea and practice of exploration portfolio of CNOOC[J]. China Petroleum Exploration, 2011(1):70-74.

(编辑 徐文明)