

页岩气资源评价方法研究进展与发展方向

宋振响¹,徐旭辉²,王保华¹,赵琳洁¹,杨国桥¹,邱 岐¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:基于资评方法的原理和评价思路,目前页岩气资评方法可划分为静态法、动态法和综合法三大类。静态法包括成因法、统计法和类比法3类,每类方法下又包括若干种具体评价方法。国外常用统计法和动态法开展页岩气可采资源量的计算,而国内主要采用统计法中的体积法和类比法开展页岩气地质资源量评估。文章系统阐述了各资评方法的适用性、优缺点和取得的主要进展。随着我国页岩气勘探开发进程的深入,静态法和动态法页岩气资源评价均取得了较大进展;综合法进展相对缓慢。文中指出,页岩气资源分级评价和空间分布预测、页岩气资评刻度区建设和大数据应用技术以及多方法综合应用的资评方法体系是未来页岩气资源评价发展的主要方向,下一步要尽快完善适合中国页岩气勘探现状的页岩气经济评价和生态环境评价方法体系。

关键词:刻度区;非均质性;泥页岩;页岩气;资源评价方法;页岩气勘探

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Advances in shale gas resource assessment methods and their future evolvement

Song Zhenxiang¹, Xu Xuhui², Wang Baohua¹, Zhao Linjie¹, Yang Guoqiao¹, Qiu Qi¹

(1. Wuxi Branch of Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

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

Abstract: Shale gas resource assessment has been carried out mostly with the static, dynamic and comprehensive approaches based on the principles it employs and the paths it explores. Of which, the static approach is composed of the genesis, statistics and analogy methods, with each being further divided into different and specific assessment procedures. The bulk procedure under the statistics method and the analogy method are adopted more often by the Chinese assessment teams during their estimation of shale gas resources in place in the country, while the statistics method and the dynamic approach are more frequently used by assessors in other countries during their calculation of recoverable shale gas resources. This paper provides a thorough review of the applicability and the advantages and disadvantages of as well as advances in all these assessment methods. It concludes that with the development of shale gas exploration and development in China, the static and dynamic approaches have been widely used and greatly improved but the comprehensive approach has been relatively overlooked. It also suggests that the grading and spatial distribution prediction of shale gas, establishment of calibration units, utilization of big data as well as set-up of a comprehensive assessment system based on all these methods are the main development directions for shale gas resource assessment, and that the next step for those doing the shale gas assessment work in China is to facilitate the bringing in of a more applicable and completed system for economic and ecological evaluations of shale gas exploration and development.

Key words: calibration unit, heterogeneity, mud shale, shale gas, resource assessment method, shale gas exploration

继2012年中国第一个商业页岩气田——涪陵页岩气田发现以来,国家不断加大页岩气勘探开发力度,相继在四川盆地探明了涪陵、威远、长宁和威荣4个整装页岩气田,为打好中国“十三五”阶段的“稳油增气”

攻坚战作出了积极贡献。尽管四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气获得了重大突破,但较中国 $21.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (2017年国土资源部评价)的页岩气可采资源量来看,目前探明的页岩气仅为冰山一角。下一步如何借鉴四

收稿日期:2019-09-30;修订日期:2020-05-07。

第一作者简介:宋振响(1983—),男,高级工程师,油气成烃成藏及非常规油气地质。E-mail: songzx_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05036-001);国家自然科学基金项目(42072156)。

川盆地页岩气的成功勘探开发经验,有效指导其他盆地(地区)的页岩气资源潜力评价和有利区优选工作,尽快发现下一个“涪陵页岩气田”,成为中国页岩气勘探开发面临的重要问题。

现阶段来看,“资源摸底、甜点优选”仍是当前中国页岩气发展的首要问题。客观、准确评价重点盆地主要泥页岩段的页岩气资源潜力是页岩气获得突破的基础和关键,也是下一步页岩气有利区优选的前提。近年来,页岩气资源评价方法得到了不断的完善与发展^[1-8],由于不同评价方法也有一定的局限性和适用性,导致不同时期、不同机构对页岩气资源评价结果可比性较差。因此,有必要系统总结目前页岩气资源评价中采用的主要方法及其适用性,结合资评方法研究进展和页岩气勘探开发需求,建立适合中国地质实际的页岩气资源评价方法及关键参数体系。这将为客观评价页岩气资源潜力奠定理论基础,并将有效指导中国新一轮的页岩气资源评价和有利区优选工作。

1 页岩气资评方法研究现状及应用情况

1.1 资评方法分类

近20年来,随着国内外页岩气资源勘探开发的快速发展,页岩气地质评价与勘探开发力度逐年加大,这也带动了页岩气资源评价方法的完善与进步。页岩气资源评价方法较多,依据各资评方法基于的原理,笔者将目前常用的页岩气资评方法划分为3大类,分别为静态法、动态法和综合法,每种方法下又可细分为若干种具体评价方法(图1)。

1.1.1 静态法

静态法主要依据富有机质泥页岩层系的静态地质指标计算页岩气资源量,具体又可以划分为成因法、统计法和类比法。

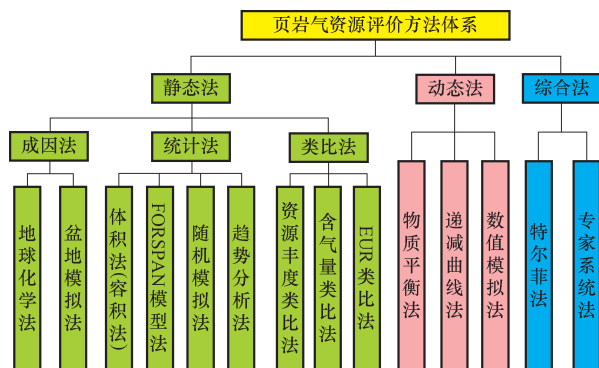


图1 页岩气资源评价方法分类

Fig.1 Classification of shale gas assessment methods

1) 成因法

成因法主要是从泥页岩生、排、滞留烃演化过程出发,通过计算待评价区泥页岩生/排油、气量和原油裂解气量,得到泥页岩中残余天然气量^[2]。成因法主要包括地球化学法和盆地模拟法两种^[5]。地球化学法计算页岩气资源量的思路分为两种:一种是用泥页岩的总生气量减去总排气量及天然气运聚过程中的各种损耗量,得到残留在泥页岩层系中的天然气量^[3];另外一种更直接的方法是在生、排烃模拟实验基础上发展起来的,直接得到不同演化阶段生-排-滞留油气产率^[9]、干酪根裂解气产率^[10]和残留油裂解气产率^[11-12],在此基础上采用成因法计算页岩气资源量。

2) 统计法

统计法是常规油气资源评价中常用的一种评价方法,也是一种较成熟的评价方法,是通过对中、高勘探程度区大量静态地质参数或动态生产数据进行统计分析,建立相关数学预测模型,进而预测页岩气资源量的一种方法。依据依靠原始资料的不同,统计法主要包括体积法(容积法)、FORSPAN模型法、随机模拟法和趋势分析法等(图1)。

① 体积法

体积法也叫容积法,其实质是根据泥页岩的含气性,直接计算泥页岩储层储集空间内的油气体积或重量,是目前国内页岩气资源评价中最常用的方法之一。根据含气量获取方式的不同,可以直接计算页岩气资源量;也可以根据页岩气赋存方式的不同,分别计算游离气及吸附气含量。考虑到泥页岩空间展布、生烃、储集性能和含气性具有较强的非均质性,为保证评价结果的可信度,需要对资评关键参数进行合理性分析,采用统计学原理确定参数变化范围及分布规律,由此发展出了概率体积法^[13]。

② FORSPAN模型法

FORSPAN模型是USGS(美国地质调查局)在1999年为评价连续型油气藏资源评价提出的,并在国外页岩油气和致密油气评价过程中得到广泛应用,多用于已开发单元的剩余资源潜力预测。该方法涉及的参数众多,主要包括评价单元基础信息、地质地球化学特征和勘探开发历史数据等,经过近几年的发展,该方法已经比较完善^[14-15]。该方法在实际应用过程中常和类比法和动态法综合使用。

③ 随机模拟法

针对传统类比法的不足,Olea等^[16]提出了采用随机模拟法开展非常规油气资源评价。这是一种以统计法为主、类比法为辅的综合性评价方法,其原理主要是

采用地质统计学的方法(主要是序贯高斯算法)模拟有生产井区的单元格的 EUR(最终可采储量),综合得到已钻井区域的可采储量;在无井区,主要采用类比法得到 EUR 的空间关系及相关参数,综合模拟未钻井区的可采储量。

④ 趋势分析法

趋势分析法是通过分析高勘探程度区的勘探工作量和油气储量发现情况等,建立相关数学统计模型,进而预测油气资源规模与结构的评价方法。目前,该类资评发展已比较成熟,并在常规油气资源评价中得到广泛应用,具体方法主要包括油藏规模序列法、地质帕莱托法和发现趋势法等^[17]。由于中国现阶段页岩气勘探开发程度总体较低,缺少趋势分析法应用的基础,故该类方法较少采用。

3) 类比法

类比法采用的是由已知推测未知的经典地质思想,是根据低勘探程度区与高勘探程度区页岩气形成地质条件的相似性粗略估算资源量的一种方法。根据类比参数的不同,类比法可以分为资源丰度类比法、含气量类比法^[18]和 EUR 类比法^[7](图1)。

① 资源丰度类比法

这是根据待评价区与刻度区页岩气形成地质条件的相似性,由刻度区页岩气面积(体积)资源丰度推测待评价区页岩气资源丰度^[1],结合泥页岩空间展布,简单、快速估算页岩气资源量的一种方法。

② 含气量类比法

该方法主要根据待评价区页岩气形成地质条件与页岩气资评刻度区的相似性及刻度区页岩气含气量来推测待评价区的含气量^[18],然后采用体积法估算页岩气资源量。

③ EUR 类比法

该方法是由生产区单井 EUR 值,根据单井泄气面积预测评价单元所需钻井数,结合钻井成功率,来估算待评价区页岩气资源量的一种方法^[7]。评价单元的 EUR 值主要通过生产周期较长井的 EUR 值类比获得,常用来计算页岩气可采资源量。

1.1.2 动态法

动态法根据页岩气在实际开发过程中的动态生产资料计算资源量,根据采用生产数据的不同又可以细分为物质平衡法、递减曲线法和数值模拟法(图1)。

1) 物质平衡法

该方法通过对气田平均地层压力和采气量之间的隐含关系进行分析,建立适合页岩气藏的物质平衡方

程^[19],通过描绘 p/Z (产层压力/气体压缩因子) - G_p (天然气体积)图,进而计算出页岩气资源量。该方法需要的参数众多,主要适用于气田开发的中、后期。

2) 递减曲线法

该方法主要是基于页岩气初期产量高、后期递减快和产气周期长的生产特征提出的,以大量生产井的历史生产数据为基础,建立适合研究区的递减趋势模型,从而预测页岩气可采储量。根据递减趋势的不同,递减曲线法又分为指数递减、双曲线递减和调和递减3个模型,目前页岩气产量计算中一般采用双曲线递减模型^[20]。

3) 数值模拟法

该方法以进入开发生产期后的页岩气生产数据为基础,采用数值模拟软件,对页岩气储层参数和实际生产数据进行拟合,模拟得到气井的预计生产曲线和最终可采储量^[4]。

1.1.3 综合法

随着勘探程度和地质认识程度的提高,某一地区的资源量也是动态变化的;即使一个地区达到了高勘探程度,也很获得准确的资源量评价结果。因此,在资源评价过程中,还有必要进行专家评断,根据多组资评结果和专家经验,获得更可靠的资源量估算结果。综合法又分为特尔菲法和专家系统法(图1)。

1) 特尔菲法

该方法系统综合了专家小组的经验知识,专家组成员考虑不同评价方法的可信度,按照各自的地质认识分别给予一定的权系数,综合得到待评价区的资源量。这种方法相对简单、有效,需要在其他多种资评方法开展评价的基础上应用。

2) 专家系统法

专家系统法是特尔菲法的发展与延伸,完备的基础资料库、评价参数库、资评成果库和图形库是该方法应用的基础,同时还要有一系列严谨的标准规范和逻辑关系^[5],在此基础上根据专家经验给出待评价区的资源量。

1.2 资评方法应用情况

美国和加拿大是世界上最早进行页岩气勘探开发,并成功实现商业化开采的国家,页岩气资源评价方法体系也最为完善。由于北美页岩气勘探开发程度相对较高,目前主要以基于生产数据的统计法(体积法、FORSPAN 法、EUR 法)和动态法(递减曲线法、物质平衡法等)开展页岩气资源量计算。如 Decker 等 1993

年利用体积法计算了 Antrim 页岩的资源量^[21], USGS 在 2003 年、2007 年采用 FORSPAN 法估算了沃斯堡盆地 Barnett 页岩气资源量^[15], ARI(先进资源国际公司) 2006 年用 EUR 类比法估算了全美 48 州的页岩气资源^[15], EIA(美国能源信息署) 2012 年采用 EUR 方法评价了美国未探明致密油技术可采资源量^[22]; Valko^[23]和 Duong^[24]等针对页岩气递减模型作了改进。2002—2013 年期间,多家机构陆续开展了加拿大不同地区的页岩气资源评价工作^[25-26],采用的方法也主要是统计法和动态法。除采用统计法和动态法外,国外在页岩气的资源评价过程中也采用了成因法和类比法,如 Jarvie^[27]和 Talukdar^[28]等采用成因法计算了页岩中残留天然气的资源量,澳大利亚和德国学者对美国 Marcellus 页岩和 Bakken 页岩的含油气性进行了盆地模拟^[29];英国能源与气候变化部^[30]通过与美国页岩气成藏条件的类比预测英国页岩气资源潜力。

从 2002 年开始,国内外科研机构、企事业单位和专家学者对中国页岩气资源开展了多轮系统评价工作(表 1)。评价结果显示,中国页岩气可采地质资源量分布在 $(10 \sim 36.1) \times 10^{12} \text{ m}^3$,不同时期和机构的评价结果存在较大的差异。从采用的评价方法来看,国外机构由于掌握的实际地质资料较少,主要是采用类比法粗略估算中国主要盆地和地区的页岩气资源量;而中国主要是采用静态法中的体积法和类比法^[31]开展页岩气资评工作。除体积法和类比法外,也有学者采用成因法估算页岩气资源量,如王香增^[32]和朱华^[33]等采用体积法计算了鄂尔多斯盆地延长油区长 7 段和川西凹陷须五段的页岩气资源量。随着四川盆地页岩气勘探开发程度的提高,也有学者尝试采用 EUR 法^[34]和动态法中的递减曲线法^[35]预测页岩气可采储量。

从页岩气资评方法应用情况来看,国内外存在较大差别。国外主要采用统计法和动态法开展高勘探程度地区页岩气可采储量的计算,采用类比法和成因法

开展中、低勘探程度地区的页岩气地质资源量评价。而中国目前主要采用统计法中的体积法开展中、高勘探程度地区页岩气资源评价,采用类比法估算低勘探程度区页岩气资源量,动态法和成因法应用较少。另外,且中国目前主要强调的是页岩气地质资源量的评价,而国外更重视可采资源量的评估。

2 页岩气资评方法适用性及研究进展

2.1 成因法

成因法最大的优点是通过分析复杂的油气成藏过程来评估油气资源潜力,对资源潜力的宏观把控具有独到的优势;缺点是评价过程复杂,难以准确预测泥页岩在地质历史时期的生-排-滞留烃演化过程,造成计算残留在泥页岩层系中的油气量十分困难(表 2)。

针对成因法计算页岩气资源量时存在的上述问题,近年来专家学者主要在页岩气赋存方式、成因来源和泥页岩生-排-滞留烃过程方面开展了针对性研究工作,主要取得以下两方面的进展。

一是针对页岩气资源评价的盆地模拟技术取得了进展。近年来,随着计算机技术的飞速发展,盆地模拟技术取得了长足的进步,并在油气资源评价中也发挥了越来越重要的作用^[17],盆地模拟技术同样适用于页岩气的资源评价。与常规油气盆地模拟流程不同,页岩气盆地模拟计算中只需考虑油气的生成与初次运移,不用考虑常规油气盆地模拟中的油气二次运移及聚集过程^[29],模拟过程相对更简单,评价结果也更可靠。近年来,德国 IES 公司的 PetroMod 和法国石油研究院的 TemisFlow 盆地模拟软件都新增了页岩气资源评价模块,针对页岩气形成过程的特殊性,新增了基于生烃动力学的泥页岩生烃模型和逾渗法流动运移模型,并基于烃类多组分模型和 Langmuir 吸附模型计算不同赋存方式下的页岩气量。

表 1 中国页岩气资源量历次评价结果

Table 1 List of previous assessment results of shale gas resources in China

评价范围	评价时间	地质资源量/ (10^{12} m^3)	可采资源量/ (10^{12} m^3)	评价单位	主要评价方法
中国(主要地区)	2002 年	—	15 ~ 30	美国科罗拉多矿业学院	类比法为主
中国(主要盆地)	2009 年	30.7	10 ~ 20	中国石油勘探开发研究院	体积法、类比法为主
中国(四川、塔里木盆地)	2011 年	144.5	36.1	美国能源信息署	类比法为主
中国	2011 年	—	15.2	中国石油勘探开发研究院	体积法、类比法为主
中国	2012 年 6 月	83.3	10 ~ 13	中国工程院	体积法、类比法为主
中国(不含青藏)	2012 年 11 月	134.42	25.08	中国自然资源部	体积法、类比法为主
中国(主要盆地)	2013 年	134.3	31.55	美国能源信息署	类比法为主
中国(不含青藏)	2017 年 10 月	121.86	21.81	中国自然资源部	体积法、类比法为主

表 2 页岩气主要资评方法原理及优缺点对比

Table 2 Principles and comparison of advantages and disadvantages of major shale gas resource assessment methods

方法体系	资评方法	基本原理及适用性	关键参数	优点	缺点
静态法	成因法	干酪根热降解生烃理论, 碳质量守恒定律; 适用于勘探全过程评价	泥页岩生烃潜力参数、生-排-滞留烃模式、页岩气存滞系数等	强调泥页岩生-排-滞留烃过程, 资源潜力宏观把控	评价过程复杂, 难以准确建立地史时期的生-排-滞留烃过程, 存滞系数等关键参数难以准确预测
	统计法	基于数理统计学的方法及原理; 用于中-高勘探程度区评价	泥页岩空间展布、含气性、勘探开发历程和储产量数据、单井 EUR 等	多用于储量和可采资源量的计算, 参数取值客观、人为影响小, 评价过程简单	未考虑到评价参数的非均质性, 缺乏地质分析, 不能给出资源分布
	类比法	相似性原则, 已知推测未知; 用于低勘探程度区评价	资评刻度区选取、资源丰度、含气量、类比参数体系及评价标准	评价思路、过程简单	类比过程复杂, 类比标准及参数主观性强
动态法	物质平衡法	页岩气地层压力和产量之间物质平衡方程	产层压力、气体压缩因子、天然气产量等	充分考虑页岩气生产动态变化, 适用于均质性较好、改造较弱地区	未充分考虑页岩气受保存条件影响大、产量变化快的特点
	递减曲线法	页岩气初期产量高、后期递减快和生产周期长的特征	初始产量、累计产量、生产周期、适合的递减模型	充分反映生产过程的动态变化, 适用于生产井已进入下降期的地区	建立符合页岩气生产规律的递减模型困难, 误差大
	数值模拟法	数理统计及计算机模拟	页岩气储层参数、大量页岩气生产数据等	考虑页岩气藏开发过程的气体渗流特征	建立符合地质实际的页岩气渗流模型困难
综合法	特尔菲法	综合分析、归纳	不同资评方法获取的结果	评价过程简单、快速, 综合考虑多种资评方法结果及其可信度	难以准确界定不同方法的权重
	专家系统法	专家地质认识与经验	专家地质认识与经验、以往资评结果	评价过程简单、快速, 充分考虑专家认识和经验	专家评价主观性较强

二是明确了页岩气的来源及构成,在此基础上完善了泥页岩生-排-滞留烃模式。研究表明,页岩气主要来源于干酪根裂解气和滞留油裂解气两部分:早期以干酪根裂解气为主,如鄂尔多斯盆地三叠系页岩气^[36];高-过成熟演化阶段以滞留油裂解气为主,如四川盆地志留系页岩气^[37]。目前,地层孔隙热压模拟实验^[38]已能够定量评价各演化阶段的生油量、排出油量、残留油量和总生气量。总气主要包括三部分来源:排出油裂解气、烃源岩中的干酪根裂解气和滞留在烃源层系中的残留油裂解气。干酪根裂解气可以直接通过热模拟实验的方式获得^[39];排出油和滞留油裂解气可根据各演化阶段排出油量和原油性质,根据原油向天然气的转化效率^[11]计量。从位置上来说,滞留油裂解气和干酪根生气都属于烃源岩层系内生气,即源内生气(图 2)。随着生、排烃作用的进行,源内生气又分为两部分:一部分排出烃源岩层系外;另外一部分残留在烃源岩层系内,形成页岩气。根据地层孔隙热压模拟实验,再结合盆地模拟技术,可实现不同地质时期总生气量及源内生气量的定量计算,这在解决页岩气资源量定量计算方面前进了一大步。下一步要重点研究

目前残留在泥页岩层系中的页岩气占源内生成气的比例,即“存滞系数”的问题。

2.2 统计法

统计法主要基于数理统计学原理,计算方法和过程简单,参数取值客观,资评结果可信度较高,除体积法常用于计算页岩气地质资源量外,其他统计法主要

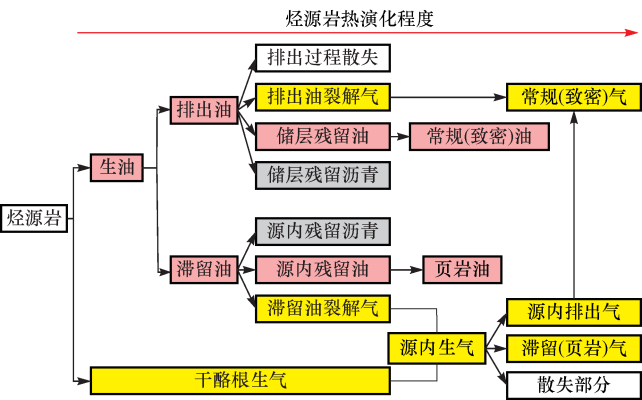


图 2 泥页岩完整的生-排-滞留烃演化模式
Fig. 2 The generation-expulsion-retention hydrocarbon evolution model of mud shale

用于计算页岩气探明储量和可采资源量。统计法在应用中存在的主要问题包括:①未充分考虑到参数取值的非均质性,也不能给出资源的空间展布;②参与计算的某些参数过于简单,缺乏地质分析;③需要大量的勘探开发历程和储、产量数据等,多适用于高勘探程度地区中、后期的资源评价(表2)。

经过近几年的发展,统计法在页岩气资源评价中也取得了一定的进展:一是体积法评价更为精细,在传统概率体积法评价的基础上考虑到了泥页岩分布的非均质性,提出了改进的曲面积分法,也叫小面元容积法^[40]。二是计算机技术和地质建模技术的发展提高了随机模拟法的可信度,包括算法的发展、参数分布模型的确立及网格单元的划分^[41]等方面都取得了长足的进步。

2.3 类比法

类比法是目前中国页岩气资源评价中最常用的方法,它的评价思路和评价过程都十分简单,主要用于勘探早期的评价。该方法应用的关键是刻度区的选取和类比参数体系的确定;缺点是类比过程较为复杂,类比标准和参数体系主观性强(表2),导致评价结果存在较大的误差。

随着中国页岩气勘探程度的不断提高,类比法在页岩气资源评价中也取得了较大的进步。一是类比法应用更细致、更有针对性,在前期资源丰度类比法的基础上提出了分级资源丰度类比法和分类 EUR 类比法等^[41],进一步体现了连续性资源分布的非均质性。二是页岩气资评刻度区建设初见苗头。继涪陵页岩气获得重大突破后,中国相继探明了威远、长宁和威荣3个整装页岩气田,满足了建设中国南方海相页岩气刻度区的需求;此外,在四川盆地海-陆过渡相的二叠系、四川盆地陆相的侏罗系和鄂尔多斯盆地陆相的三叠系也有望实现页岩气的勘探突破。页岩气的重大勘探进展和地质认识为我们下一步建立不同类型页岩气资评刻度区奠定了基础。

2.4 动态法

动态法是基于页岩气的流动及生产规律提出的,用于已进入生产阶段,且有一批长期生产井地区页岩气可采储量的评价。动态法计算页岩气资源量的关键参数是生产井的产层压力和产量数据等,参数取值较为客观,评价结果具有较强的指导性。其缺点是:①需要大量生产井的历史数据,主要用于生产阶段中、后期的产量评价;②页岩气压力和产量变化大,递减规律难

以准确把握;③页岩气渗流模型预测困难,开展数值模拟难度大(表2)。总体看来,中国在动态法计算页岩气储量方面仍比较落后。近年来,中国部署了大批页岩气专探井,尤其是在四川盆地有一批页岩气生产井的产气周期已超过5年,为动态法计算页岩气资源量积累了大批历史生产数据。下一步需加强页岩气渗流机理和生产规律研究,改进与完善符合页岩气生产规律的递减曲线模型^[34]和数值模拟^[42]方法,进一步提高了动态法计算页岩气可采资源量的可靠性。

2.5 综合法

综合法原理和评价思路都很简单,主要适用于低勘探程度地区,评价的关键是依靠其他资评方法获得的资评结果和专家的地质认识,优点是在综合给出资评结果时充分考虑了不同资评方法得到的资评结果和专家经验,缺点是评价过程中不同资评结果赋予的权重和专家赋值主观性较强。目前,特尔菲法在油气资源评价中得到了广泛应用;而专家系统法进展缓慢,是未来页岩气资源评价的重要发展方向之一。随着中国页岩气勘探开发进程的不断深入,未来有必要建立不同类型页岩气资评关键参数和资评结果数据库,同时要加强对资评专家库的建设,发挥专家经验在资源评价中的作用,保证资评结果更符合地质实际。

3 页岩气资评方法发展方向

尽管我国页岩气资评方法取得了长足的进步,但面临快速发展的页岩气勘探开发形势,目前的资评方法已满足不了页岩气目标优选、精细评价和效益勘探的需求。展望未来,页岩气资评方法的发展方向主要包括以下几点。

3.1 资源分级评价及空间分布预测

页岩气资源分布非均质性强,只算一个总量已远远达不到页岩气目标优选和勘探开发的需求。研究表明,优质泥页岩段对页岩气资源量和产量贡献大,如四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气产量主要来自于厚度不足5m的“甜点段”^[43],这些“甜点段”和优质富集资源分布在哪儿是我们开展页岩气资源评价必须要回答的问题。目前,分级资源丰度类比法、盆地模拟法、曲面积分法和数值模拟法等都在资源分级评价和资源空间分布预测方面做了积极的探索,并在指导页岩气有利区优选、井位部署和产量预测方面取得了较好的应用效果。下一步如何完善符合页岩气生成、聚集及

保存过程规律的评价参数和地质模型,建立泥页岩和页岩气资源分级分类评价方案,提高资源空间分布定量预测精度,是页岩气资源评价的重要发展方向之一。

3.2 页岩气资评刻度区建设和大数据应用技术

随着中国页岩气勘探开发工作的深入,页岩气形成地质条件和富集规律研究取得了突破性进展,也积累了一大批页岩气勘探开发生产数据,为中国页岩气刻度区建设奠定了基础。下一步需尽快建立中国不同类型页岩气资源评价刻度区,分析不同类型刻度区页岩气形成地质条件差异及资源分布、富集和生产特征^[44-45],建立完善的页岩气资源评价类比参数体系,为统计法、类比法和动态法计算资源量提供客观的评价参数,进一步提高资评结果的可信度。此外,随着人工智能技术的进步,可以将大数据技术应用到统计样本数据分析、刻度区数据库管理和页岩气数值模拟中。大数据技术能够让人们从繁杂的地质大数据中找出规律,优选评价模型,使油气资源评价结果更精确^[17]。

3.3 多方法综合应用的页岩气资源评价体系

资源评价作为一门综合性很强的学科,评价结果具有较强的不确定性,资源评价的过程就是随着油气勘探进展和地质新认识一步步去伪存真、不断逼近“地质实际”的过程。目前,中国页岩气资源评价主要采用静态法中的体积法和类比法;而随着盆地模拟技术的进步和中国页岩气勘探进程的不断推进,部分地区已满足了采用成因法和动态法计算页岩气资源量的要求;另外,基于目前已建立的页岩气资评刻度区,类比法的应用也将更有针对性。采用多种方法开展页岩气资源评价将有效降低资评结果的不确定性,为页岩气有利区优选和勘探部署提供依据。

3.4 页岩气经济可采资源量评价

与国外相比,当今中国页岩气资源评价主要侧重于地质资源量的评价,经济可采资源量研究较少,这主要和中国油气行业勘探与开发剥离的体制有关^[17]。目前,常规油气主要采用“现金流法”开展经济评价,该方法是基于气藏总体开发方案的项目全过程经济评价流程^[46];而页岩气作为连续性气藏的一种,其非均质性很强,单井产量差异大,勘探开发方案往往会随着开发井试气效果的进行而调整,经济评价参数及结果不确定性因素较多;此外,页岩气开采多需要大型的水力压裂才有产能,勘探开发成本更高,页岩气在经济评价思路、方法和流程上应该有别于常规油气。此前,有

学者针对页岩气资源经济评价开展过一些针对性的研究工作,并提出了改进的经济评价方法^[46-48],但总体研究仍较落后。下一步亟需尽快建立一套符合页岩气地质特点和生产方式的勘探开发一体化分级经济评价方法。

3.5 生态环境评价

页岩气勘探一般采用水平井和水力压裂技术。水平井压裂除消耗大量的水资源外,压裂过程中还需要注入大量的化学试剂,压裂后也会产生大量的返排废水,施工过程中若控制不好,很容易对地下水和周边环境造成污染。一些欧洲国家(如瑞典、法国等)不支持大力开采页岩气,就是因为考虑到页岩气开采的压裂技术可能会对生态环境造成破坏。在国家不断加大环境保护力度的前提下,中国的页岩气资源评价工作也必须考虑到生态环境的因素,目前正在进行的“十三五”全国油气资源评价中已将生态环境评估纳入到资源评价工作中。与美国相比,中国页岩气勘探开发总体还处于起步阶段,无论是页岩气勘探开发关键技术,还是生态环境风险评价体系和生态环境法律法规制定等方面,都存在较大的差距^[49]。国家在综合考虑页岩气资源经济效益和生态环境风险评估的基础上,必须尽快出台严格、有效的环境保护监管体系和有利的政策扶植体系,加快推进页岩气生态环境风险评估。

4 结论

1) 目前的页岩气资源评价方法主要包括静态法、动态法和综合法。静态法又包括成因法、统计法和类比法;动态法主要包括物质平衡法、递减曲线法和数值模拟法;综合法包括特尔菲法和专家系统法。从资评方法应用情况来看,国外主要采用统计法和动态法开展高勘探程度地区的页岩气可采储量计算;而中国目前主要采用统计法中的体积法和类比法开展页岩气地质资源量的评价,动态法较少采用。

2) 每种页岩气资评方法都有一定的适用性和优缺点。成因法在盆地模拟和泥页岩生-排-滞留烃演化过程研究方面取得了重要进展;统计法进一步修正了预测模型和关键参数,提高了预测精度;类比法在资评刻度区建设和分级、分类资源评价中前进了一大步;动态法中进一步改进与补充了符合页岩气生产规律的递减曲线模型和数值模拟方法;综合评价法研究相对薄弱,未来亟需加强研究。

3) 资源分级评价和空间分布定量预测可为页岩

气有利区优选和勘探部署提供重要依据。未来亟需建立不同类型的页岩气资源评价数据库和多方法综合应用的页岩气资源评价技术,并需进一步加强页岩气经济可采性和生态环境评价。

参 考 文 献

- [1] 李延钧,刘欢,刘家霞,等.页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):28-34.
Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, et al. Geological regional selection and evaluation method of resource potential of shale gas[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(2): 28-34.
- [2] 姜生玲,张金川,李博,等.中国现阶段页岩气资源评价方法分析[J].断块油气田,2017,24(5):642-646.
Jiang Shengling, Zhang Jinchuan, Li Bo, et al. Analysis of shale gas resources assessment method in China[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(5): 642-646.
- [3] 王伟锋,刘鹏,陈晨,等.页岩气成藏理论及资源评价方法[J].天然气地球科学,2013,24(3):429-438.
Wang Weifeng, Liu Peng, Chen Chen, et al. The study of shale gas reservoir theory and resources evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 429-438.
- [4] 张金华,魏伟,钟太贤.国外页岩气资源储量评价方法分析[J].中外能源,2011,16(9):38-42.
Zhang Jinhua, Wei Wei, Zhong Taixian. Evaluation methods analysis about resources and reserves of foreign shale gas[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(9): 38-42.
- [5] 林腊梅.页岩气资源评价方法研究及应用[D].中国地质大学(北京),2013:84-86.
Lin Lamei. Shale gas resources assessment methodology and application[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2013: 84-86.
- [6] 马宁,侯读杰,包书景,等.页岩气资源潜力评价方法[J].油气地质与采收率,2012,19(6):25-29.
Ma Ning, Hou Dujie, Bao Shujing, et al. Evaluation method of shale gas resource potential[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 25-29.
- [7] 董大忠,王玉满,黄旭楠,等.中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J].天然气地球科学,2016,27(9):1583-1601.
Dong Dazhong, Wang Yuman, Huang Xunan, et al. Discussion about geological characteristics, resource evaluation methods and its key parameters of shale gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1583-1601.
- [8] 邱振,邹才能,李建忠,等.非常规油气资源评价进展与未来展望[J].天然气地球科学,2013,24(2):238-246.
Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 238-246.
- [9] 秦建中,申宝剑,腾格尔,等.不同类型优质烃源岩生排油气模式[J].石油实验地质,2013,35(2):179-186.
Qin Jianzhong, Shen Baojian, Tengger, et al. Hydrocarbon generation and expulsion pattern of different types of excellent source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(2): 179-186.
- [10] 胡国艺,张水昌,田华,等.不同母质类型烃源岩排气效率[J].天然气地球科学,2014,25(1):45-52.
Hu Guoyi, Zhang Shuichang, Tian Hua, et al. Gas relative expulsion efficiency of source rocks with different types of kerogen[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 45-52.
- [11] 郑伦举,王强,秦建中,等.海相古油藏及可溶有机质再生烃气能力研究[J].石油实验地质,2008,30(4):390-395.
Zheng Lunju, Wang Qiang, Qin Jianzhong, et al. Hydrocarbon-regeneration capability of marine paleo-reservoir and soluble organic matter[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(4): 390-395.
- [12] 李剑,王义凤,马卫,等.深层-超深层古老烃源岩滞留烃及其裂解气资源评价[J].天然气工业,2015,35(11):9-15.
Li Jian, Wang Yifeng, Ma Wei, et al. Evaluation on occluded hydrocarbon in deep-ultra deep ancient source rocks and its cracked gas resources[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(11): 9-15.
- [13] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J].地质前缘,2012,19(2):184-191.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: Probability volume method[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.
- [14] 董大忠,程克明,王世谦,等.页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J].天然气工业,2009,29(5):33-39.
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39.
- [15] 郭秋麟,周长迁,陈宁生,等.非常规油气资源评价方法研究[J].岩性油气藏,2011,23(4):12-19.
Guo Qiulin, Zhou Changqian, Chen Ningsheng, et al. Evaluation methods for unconventional hydrocarbon resources[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 12-19.
- [16] Olea R A, Cook T A, Coleman J L. A methodology for the assessment of unconventional (continuous) resources with an application to the greater natural buttes gas field, Utah[J]. Natural Resources Research, 2010, 19(4): 237-251.
- [17] 宋振响,陆建林,周卓明,等.常规油气资源评价方法研究进展与发展方向[J].中国石油勘探,2017,22(3):21-31.
Song Zhenxiang, Lu Jianlin, Zhou Zhuoming, et al. Research progress and future development of assessment methods for conventional hydrocarbon resources[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(3): 21-31.
- [18] 赵倩茹.页岩气资源评价方法优选[D].中国地质大学(北京),2017:18-19.
Zhao Qianru. Optimization of evaluation methods for shale gas resources[D]. China University of Geosciences (Beijing), 2017: 18-19.
- [19] King G R. Material balance techniques for coal seam and devonian shale gas reservoirs[J]. SPE Reservoir Engineering, 1993, 8(1): 67-72.
- [20] 白玉湖,杨皓,陈桂华,等.页岩气产量递减典型曲线的不确定性分析方法[J].石油勘探技术,2013,41(4):97-100.
Bai Yuhu, Yang Hao, Chen Guihua, et al. An uncertainty analysis

- method on typical production decline curve for shale gas reservoirs [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(4): 97–100.
- [21] Decker A D, Hill D G, Wicks D E. Log-based gas content and resource estimates for the Antrim shale, Michigan Basin [C]//Low permeability reservoirs symposium. Society of Petroleum Engineers, 1993.
- [22] U. S. Energy Information Administration (EIA). Annual energy outlook 2012 with projection to 2035 [R]. Washington: EIA, 2012.
- [23] Valko P P. Assigning value to stimulation in the Barnett shale: A simultaneous analysis of 7000 plus production histories and well completion records [C]//SPE hydraulic fracturing technology conference. Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [24] Duong A N. An unconventional rate decline approach for tight and fracture-dominated gas wells [C]//Canadian unconventional resources and international petroleum conference. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [25] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay [J]. *AAPG Explorer*, 2005, 26(2): 5–7.
- [26] EIA/ARI. World shale gas and shale oil resource assessment [R]. EIA/ARI, 2013.
- [27] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475–499.
- [28] Thlukdar S C. Application of geochemistry for shale gas assessment [EB/OL]. 2016–09–12, <https://www.fwgs.org/c/TalukdarASSESSMENT.pdf>.
- [29] 杨升宇, 张金川, 唐玄. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩气区三维盆地模拟 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 932–941.
- Yang Shengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. Three-dimensional basin modeling study on Zhangjiantan shale gas area in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 932–941.
- [30] Department of Energy and Climate Change. The unconventional hydrocarbon resources of Britain's onshore basins—shale gas [EB/OL]. 2012. <https://og.decc.gov.uk>.
- [31] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 451–458.
- Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 451–458.
- [32] 王香增, 张金川, 曹金舟, 等. 陆相页岩气资源评价初探: 以延长直罗—下寺湾区中生界长7段为例 [J]. *地质前缘*, 2012, 19(2): 192–197.
- Wang Xiangzeng, Zhang Jinchuan, Cao Jinzhou, et al. A preliminary discussion on evaluation of continental shale gas resources: A case study of Chang 7 of Mesozoic Yanchang Formation in Zhiluo-Xiasiwan area of Yanchang [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 192–197.
- [33] 朱华, 姜文利, 边瑞康, 等. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例 [J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 130–134.
- Zhu Hua, Jiang Wenli, Bian Ruikang, et al. Shale gas assessment methodology and its application: A case study of the western Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 130–134.
- [34] 赵群, 杨慎, 王红岩, 等. 钻井工作量分析法预测中国南方海相页岩气产量 [J]. *天然气工业*, 2016, 36(9): 44–50.
- Zhao Qun, Yang Shen, Wang Hongyan, et al. Prediction of marine shale gas production in South China based on drilling workload analysis [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(9): 44–50.
- [35] 沈金才, 刘尧文, 葛兰, 等. 四川盆地焦石坝区块页岩气井产量递减典型曲线建立 [J]. *天然气勘探与开发*, 2016, 39(2): 36–40.
- Shen Jincai, Liu Yaowen, Ge Lan, et al. Establishment of typical production-decline curves for shale gas wells, Jiaoshiba block, Fuling area [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2016, 39(2): 36–40.
- [36] 徐红卫, 李贤庆, 周宝刚, 等. 延长探区延长组陆相页岩气地球化学特征和成因 [J]. *矿业科学学报*, 2017, 2(2): 99–108.
- Xu Hongwei, Li Xianqing, Zhou Baogang, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Yanchang Formation terrestrial shale gas in the Yanchang exploration area [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 2(2): 99–108.
- [37] 魏祥峰, 郭彤楼, 刘若冰. 涪陵页岩气田焦石坝地区页岩气地球化学特征及成因 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(3): 539–548.
- Wei Xiangfeng, Guo Tonglou, Liu Ruobing. Geochemical features of shale gas and their genesis in Jiaoshiba block of Fuling shale gas-field, Chongqing [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(3): 539–548.
- [38] 郑伦举, 秦建中, 何生, 等. 地层孔隙热压生排烃模拟实验初步研究 [J]. *石油实验地质*, 2009, 31(3): 296–302, 306.
- Zheng Lunju, Qin Jianzhong, He Sheng, et al. Preliminary study of formation porosity thermocompression simulation experiment of hydrocarbon generation and expulsion [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(3): 296–302, 306.
- [39] 胡国艺, 李志生, 罗霞, 等. 两种热模拟体系下有机质生气特征对比 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 718–723.
- Hu Guoyi, Li Zhisheng, Luo Xia, et al. The comparison of gas generation potential and model between two different thermal simulation systems [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 718–723.
- [40] 李建忠, 吴晓智, 郑民, 等. 常规与非常规油气资源评价的总体思路、方法体系与关键技术 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(9): 1557–1565.
- Li Jianzhong, Wu Xiaozhi, Zheng Min, et al. General philosophy, method system and key technology of conventional and unconventional oil & gas resource assessment [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(9): 1557–1565.
- [41] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等. 致密油资源评价方法研究 [J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(2): 67–76.
- Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Wu Xiaozhi, et al. Method for assessment of tight oil resources [J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(2): 67–76.
- [42] 糜利栋, 姜汉桥, 李俊键. 页岩气离散裂缝网络模型数值模拟方法研究 [J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(11): 1795–1803.
- Mi Lidong, Jiang Hanqiao, Li Junjian. Investigation of shale gas numerical simulation method based on discrete fracture network model [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(11): 1795–1803.
- [43] 董大忠, 施振生, 管全中, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气

- 勘探进展、挑战与前景[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 67-76.
- Dong Dazhong, Shi Zhensheng, Guan Quanzhong, et al. Progress, challenges and prospects of shale gas exploration in the Wufeng-Longmaxi reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 67-76.
- [44] Yang Yi, Zhou Dehua, Wang Weihong, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1): 55-68.
- [45] 李东晖, 聂海宽. 一种考虑气藏特征的页岩含气量计算方法——以四川盆地及周缘焦页1井和彭页1井为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1324-1332.
- Li Donghui, Nie Haikuan. A new method to calculate shale gas content based on gas reservoir characterization—A case study of Wells JY 1 and PY 1 in Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1324-1332.
- [46] 苏佳纯, 张金川, 朱伟林. 非常规天然气经济评价对策思考[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 743-753.
- Su Jiachun, Zhang Jinchuan, Zhu Weilin. Study on unconventional natural gas economic evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 743-753.
- [47] 黄旭楠, 董大忠, 王玉满, 等. 非常规油气资源经济性评价方法与案例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1651-1658.
- Huang Xunan, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Economic assessment method of unconventional oil and gas resources and case study[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1651-1658.
- [48] 郑波, 张蔓. 基于模糊层次法的页岩气开发经济评价模型[J]. 西安石油大学学报(社会科学版), 2016, 25(2): 1-5, 30.
- Zheng Bo, Zhang Man. The economic evaluation model of shale gas development based on fuzzy hierarchy method[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Social Science Edition), 2016, 25(2): 1-5, 30.
- [49] 杨德敏, 喻元秀, 梁睿, 等. 我国页岩气开发环境影响评价现状、问题及建议[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 119-125.
- Yang Demin, Yu Yuanxiu, Liang Rui, et al. Environment impact appraisal (EIA) for shale gas development in China: Present status, existing issues and proposals[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 119-125.

(编辑 李 军)

(上接第 995 页)

- [22] 斯春松, 乔占峰, 沈安江, 等. 塔北南缘奥陶系层序地层对岩溶储层的控制作用[J]. 石油学报, 2012, 33(S2): 135-144.
- Si Chunsong, Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, et al. The controlling effect of sequence stratigraphy on karst reservoirs of Ordovician in the south margin of northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 135-144.
- [23] 刘嘉庆, 李忠, 黄君涛, 等. 塔里木盆地良里塔格组沉积环境差异及其对碳酸盐储层发育的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1802-1816.
- Liu Jiaqing, Li Zhong, Huang Juntao, et al. Distinct sedimentary environments and their influences on carbonate reservoir evolution of the Lianglitag Formation in the Tarim Basin, Northwest China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 55: 1641-1655.
- [24] 毛雪莲, 马青, 刘伟, 等. 哈拉哈塘地区良里塔格组沉积特征分析[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 21-26.
- Mao Xuelian, Ma Qing, Liu Wei. Sedimentary characteristics of the Upper Ordovician Lianglitag Formation in Halahatang area[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(3): 21-26.
- [25] Palmer A N. Origin and morphology of limestone caves[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.
- [26] Ford D C, Williams P W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Springer Netherlands London: Unwin Hyman, 1989: 601.
- [27] Zeng H L, Loucks R, Janson X, et al. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2061-2083.
- [28] Kerans C. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of west Texas[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(10): 1160-1183.
- [29] 凌云. 基本地震属性在沉积环境解释中的应用研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 642-653.
- Ling Yun. Study on application of basic seismic attributes to interpretation of depositional environment[J]. OGP, 2003, 38(6): 642-653.
- [30] Choquette P W, James N P. Paleokarst [M]. New York: Springer-Verlag, 1988: 1-24.
- [31] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 142-147.
- An Haiting, Li Haiyin, Wang Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 142-147.
- [32] 张光亚, 赵文智, 王红军, 等. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J]. 石油与天然气地质, 2007, (5): 653-663.
- Zhang Guangya, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, et al. Multicycle tectonic evolution and composite petroleum systems in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, (5): 653-663.
- [33] 江茂生, 朱井泉, 陈代钊, 等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002, 32(1): 36-42.
- Jiang Maosheng, Zhu Jingquan, Chen Daizhao, et al. Carbon and strontium isotopic characteristics of Ordovician carbonate rocks in Tarim Basin and their response to sea level changes[J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2002, 32(1): 36-42.
- [34] 李永安, 李强, 张慧, 等. 塔里木及其周边古地磁研究与盆地形成演化[J]. 新疆地质, 1995, 13(4): 293-378.
- Li Yongan, Li Qiang, Zhang Hui, et al. Palaeomagnetic study of Tarim and its adjacent areas well as the formation and evolution of Tarim Basin[J]. Xinjiang Geology, 1995, 13(4): 293-376.

(编辑 梁 慧)