

引用格式:张金川,陈世敬,李中明,等.页岩气资源智能评价[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):476-486.

ZHANG Jinchuan, CHEN Shijing, LI Zhongming, et al. Intelligent evaluation of shale gas resources[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 476-486.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.002

页岩气资源智能评价

张金川^{1,2,3},陈世敬^{1,2,3},李中明⁴,郎岳^{1,2,3},王春艳^{1,2,3},王东升^{1,2,3},李振^{1,2,3},唐玄^{1,2,3},刘颺^{1,2,3},李沛^{1,2,3},仝忠正^{1,2,3}

(1.中国地质大学(北京),北京 100083;2.自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室,北京 100083;

3.非常规天然气能源地质评价与开发工程北京市重点实验室,北京 100083;4.河南省地质调查院,河南 郑州 450000)

摘要:页岩气资源评价包含基于地质及勘探过程分析基础之上的资源量计算、有利区分布及经济有效性分析等内容,其核心是符合地质过程演化特点及资料掌握程度的评价方法选择、参数处理及结果分析。页岩气资源智能评价能够克服现实资源评价中的局限性,可实现从定性到定量的全程模拟与评价,具有明显的发展阶段性特点,利用机器学习、推理机等现代手段开展资源评价是现阶段的主要特点。方法选择、参数质量及评价效果是页岩气资源评价的关键,基于地质特点和勘探程度的知识库建立、数据搜集、参数分析、数据挖掘、地质推理、方法选择、智能运算、结果可信度分析、结果的空间表达及全程连续执行等,是页岩气资源智能评价的基本思路和方法。功能强大、全程连续实现的智能评价是页岩气资源评价发展的基本方向,需要在现有技术基础上不断积累与实践,在更大的范围内推动页岩气资源评价方法和技术的发展。

关键词:页岩气;地质分析;资源计算;智能评价;机器学习

中图分类号:TE19

文献标识码:A

Intelligent evaluation of shale gas resources

ZHANG Jinchuan^{1,2,3}, CHEN Shijing^{1,2,3}, LI Zhongming⁴, LANG Yue^{1,2,3}, WANG Chunyan^{1,2,3}, WANG Dongsheng^{1,2,3}, LI Zhen^{1,2,3}, TANG Xuan^{1,2,3}, LIU Yang^{1,2,3}, LI Pei^{1,2,3}, TONG Zhongzheng^{1,2,3}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Strategy Evaluation for Shale Gas, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geological Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China; 4. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: Shale gas resource evaluation includes resource calculation, favorable distribution area and economic effectiveness based on geological and exploration process analysis. Its core is evaluation method selection, parameter processing and result analysis in line with geological process evolution characteristics and data mastery degree. The intelligent evaluation of shale gas resources can overcome the limitations of real resource evaluation, and can realize the whole process simulation and evaluation from qualitative to quantitative. It has obvious characteristics of development stages. The main feature of resource evaluation at this stage is to use modern means such as machine learning and inference engine. Method selection, parameter quality and evaluation effect are the keys to shale gas resource evaluation. Knowledge base establishment based on geological characteristics and exploration level, data collection, parameter analysis, data mining, geological reasoning, method selection, intelligent calculation, and reliability of results analysis, spatial expression of results and continuous execution throughout the process are the basic ideas and methods for intelligent evaluation of shale gas resources. Intelligent evaluation with powerful functions and continuous implementation throughout the whole process is the basic direction of the development of shale gas resource evaluation, which requires continuous accumulation and practice on the basis of existing technologies to promote the development of shale gas resource evaluation methods and technologies in a wider range.

Keywords: shale gas, geology analysis, resource calculation, intelligent evaluation, machine learning

收稿日期:2021-04-27。

第一作者简介:张金川(1964—),男,博士,教授,博士研究生导师,本刊第二届编委会委员,长期从事非常规天然气地质与资源评价研究工作。地址:北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)能源学院,邮政编码:100083。E-mail:zhangjc@cugb.edu.cn

通信作者简介:李中明(1969—),男,教授级高级工程师,主要从事地质矿产勘查研究工作。地址:河南省郑州市高新技术开发区科学大道81号,邮政编码:450000。E-mail:lzm87122@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目“页岩含气性关键参数测试及智能评价系统”(41927801);国家科技重大专项“页岩气分类分级资源评价方法研究”(2016ZX05034-002-001)。

人工智能的出现和发展,极大地改变了人们对世界的认识方法和实践效果,完成了传统方法难以企及的功能任务,推动了各行各业科学技术的快速发展,深层次改变了社会的分工结构和人们的行为方式。人工智能领域的国际竞争异常激烈^[1],美、日、俄等国及欧盟等近年来不断增加力度,努力把握未来发展先机^[2]。在我国,习近平主席多次指示加快人工智能建设。2017年7月8日,国务院印发了《新一代人工智能发展规划》,明确指出了我国人工智能发展的指导思想和战略目标。同年12月,“人工智能”入选2017年度中国媒体十大流行语。

油气形成的历史和过程复杂,油气藏规模及空间分布受多种因素制约,油气勘探不断挑战人们的能力极限。人工智能出现后,在地质评价和勘探过程中发挥了重要作用。智能评价是人工智能的一部分,它侧重于数据的逻辑分析并按照科学原理给出符合限定条件的智慧评价结果,快速、客观、准确是智能评价的基本特点。通过尝试探讨智能评价思路和方法,试图阐明智能评价方法在油气勘探中的应用。

1 人工智能及智能评价

顾名思义,人工智能就是要让机器的行为看起来像人所表现出的智能一样^[3],其追求的目标是赋予人造机器以思考、决策及行为,且具有或超越人类的智慧。朴素的人工智能思想可追溯至久远的历史文明时期,但真正能够使这一思想得以实现的基础是1937—1946年间出现的电子计算机。继Turing测试之后^[4],McCarthy在Dartmouth College的夏季讨论班会议(1956)上首次提出了人工智能的概念。随后,

这一思想得到了快速发展,工业机器人(1959)、专家系统(1976)及深度学习等应运而生并风靡全球。特别是1970年《Artificial Intelligence》(《人工智能》杂志)的创刊,促使许多国家都开始了以知识为中心的人工智能研究,目前已在多个领域开展了系统应用并形成了完整的应用程式,辐射到了各个不同的角落^[5-8]。

通常大家所理解的人工智能是以人的方式做出智能反应的机器,是计算机科学的一个分支,是不同领域中机器概念的延伸^[9]。完整的人工智能不仅强调了机器的判断分析能力,而且更要有形象和语言识别能力以方便与人沟通。从目前的科学应用角度看,人工智能的核心功能是在设定的过程逻辑和特定的场景约束下,结合专家知识库完成已知模式、不确定模式及未知模式条件下的特定目标任务。其中,重要代表作之一就是用于固体矿产勘探的Prospector专家系统的问世及应用^[10]。在目前条件下的油气地质评价中,智能评价仍然是可普遍实现的最主要方法。将“速度快、记性好、容量大”的机器和“灵活性强、逻辑性强、变通性强”的专家知识库与地质目标逻辑相结合,在地质逻辑约束和多种可能性并存的前提下开展智能评价,使用兼具电脑和人脑优势的先进算法开展油气地质勘探分析,有助于捕捉油气成藏历史中的细节,具象表达“不可言状”的模糊影像,准确、合理、有的放矢地揭示地质历史过程,快捷、高效、准确地获得预期成果。

机器学习^[11-14]是一类由机器自动对数据进行识别、分类、分析、挖掘及预测的一种算法(表1),它提供了强有力的参数计算逻辑和方法^[15-16]。基于系统的数据识别、归类及判断等参数计算和强大的自我学习能力,智能评价是一种高效、准确、多功能的评

表1 机器学习主要算法
Table 1 The main machine learning algorithm

学习方法	常规学习			深度学习		
	原理	应用	算法	原理	应用	算法
监督学习	使用标准数据 标定新数据	分类、检索、 判断等	决策树、朴素贝叶斯、最小二乘法、逻辑回归、支持向量机、集成方法、袋装法和随机森林、Boosting、AdaBoost、K最近邻算法等	基于大数据 的深层结构 或多应用场 景	空间分布、 时间分布、 时空节点记 忆等	卷积神经网络、循环神经网络、深度置信网络、多视角、生成模型、受限玻尔兹曼机、图论推理及支持向量机等
非监督学习	研究无标定数 据的结构规律	检验、识别、 预测等	聚类算法、主成分分析、奇异值分解、独立成分分析、线性判别分析等			
强化学习	数据与环境 关系	自动计算、 目标搜索等	神经网络、马尔可夫等			

价方法。智能评价包括了评价目标模型构架、参数搜集与输入、主动运算、判断决策、结果输出及虚拟现实等自动完成的连续功能。可对油气资源评价中的参数识别、归类分析、概率分布、因果关联、系统逻辑、资源计算等进行系统运算。根据地质评价目标任务,智能评价按照已有的油气成藏原理、边界条件、成藏模式及地质逻辑等专家知识库,在已有不同程度的参数条件约束下,自动完成智能评价,系统输出成果数据。

2 页岩气资源评价——原理与方法

页岩气资源评价在地质研究、地球化学、地球物理、钻井工程及试产分析等资料基础上,以预测未知分布为主要目标^[17-19],预测资源类型、数量、位置等必要信息,回答“有什么、有多少、在哪里”等基本问题,满足勘探分析、部署决策、经济评价、投资控制、开发规划等重大决策与分析的基本需求^[20-21]。页岩气资源评价包括了从岩性描述到沉积分析、从构造演化到盆地分析、从含气分析到有利选区等内容,从地质研究到模型建立、从数据分析到数值模拟、从勘探评价到决策部署、从定性到定量的全过程模拟与评价。广义上,页岩气资源评价是一个从页岩气地质条件研究到分布预测及决策建议的系统工程。狭义的页岩气资源评价通常包括有利分布和资源量计算两部分,内容可涉及从生到储再到保存的油气地质所有过程,客观的资源评价又分为成因法、类比法、统计法3类独立方法^[22],完整意义上的资源评价也包括了资源分析、汇总及特尔菲法(主观评价方法)。页岩气资源评价不仅包含了页岩气资源的数量多少,而且包括了页岩气资源的空间分布;不仅包含了地质条件分析、勘探开发过程研究等内容,也包括了经济预期、生态环境及决策建议等多方面内容。

2.1 资源量计算

2.1.1 成因法

页岩气资源分布同时受生烃、成藏、保存等因素的约束和影响,按照地质正演逻辑可以开展以成因法为主的各种资源评价^[23]。页岩生气作用主要受有机质类型、丰度及成熟度控制,每种类型的单位有机质(干酪根)分别在不同成熟度条件下的生气量及累

计生气总量可以通过热化学模拟、分子动力学计算等方法予以确定^[24],由此建立不同类型和热演化程度(R_o)条件下页岩的生气量与 TOC 、氯仿沥青“ A ”、总烃(HC)之间关系,结合对盆地埋藏、热历史等“三场五史”地质过程的模拟分析,可对不同时期(包括现今)的页岩气资源量(Q_g)进行计算。

$$Q_g = f(TOC, "A", HC, \dots) \quad (1)$$

式中: Q_g 为页岩气资源量, m^3 ; TOC 为总有机碳含量,%;“ A ”为氯仿沥青“ A ”,%; HC 为总烃, mg/m^3 。

页岩在不同埋藏历史时期中的地层压力及物理化学属性各有不同,根据页岩的(裂缝)孔隙度、对天然气的吸附能力以及温度压力变化对页岩含气能力变化所产生的影响,易于计算页岩地层中的含气量。页岩的孔缝结构及表面属性等因素控制了页岩气的初次运移,生烃状态、速率及裂缝发育等因素控制了页岩气的初生溢散(二次运移),温度、压力及气体成分等因素决定了页岩气后期的扩散运移,构造运动及其所造成的埋深、裂缝及水洗等因素导致了页岩气的规模性逃逸。这些逸气作用释放了部分已经生成的页岩气,根据这些地质作用变化,可对不同地质时期(包括现今)的逸散气(Q_e)进行计算。

$$Q_e = f(p, s, d, t, \dots) \quad (2)$$

式中: Q_e 为逸散气, m^3 ; p 为页岩气初次运移逸散量, m^3 ; s 为页岩气初生溢散量, m^3 ; d 为页岩气扩散逃逸量, cm^3 ; t 为页岩气构造逃逸量, m^3 。

与常规油气资源评价不同,页岩气资源量与常规油气资源量存在互为消涨关系。页岩总生气量与总逸散气量之差即为页岩气二次运移量或溢散总量(Q_m),二次运移总量占页岩生气总量之百分比即为常规油气资源评价中的运移系数(K_0)。在页岩气资源评价中,需要重点考虑滞留的页岩气总量(Q_r),页岩中的滞留总量占页岩生气总量之百分比即为滞留系数(K_1),运移系数与滞留系数之和为 $1(K_0+K_1=1)$ 。

$$Q_g = Q_e + Q_m \quad (3)$$

$$K_0 = Q_m/Q_g \text{ 或 } K_1 = Q_r/Q_g \quad (4)$$

式中: Q_g 为页岩气资源量, m^3 ; Q_e 为逸散气量, m^3 ; Q_m 页岩气二次运移量或溢散总量, m^3 ; Q_r 为页岩气滞留总量, m^3 ; K_0 为运移系数; K_1 为滞留系数。

由于页岩的生气作用和逸散作用总是同时发生,故页岩气的历史(含现今)资源量可由某一地质历史中的页岩气资源量(Q)与滞留系数相乘获得。

$$Q_g = K_1 Q \quad (Q \geq 0) \quad (5)$$

式中: Q_g 为页岩气资源量, m^3 ; Q 为某一地质历史中页岩气资源量, m^3 ; K_1 为滞留系数。

计算页岩的总生气量,确定页岩气滞留系数,则可得页岩气资源量。由于计算过程中需要考虑的因素繁多,故通常借助计算机进行地质过程模拟来完成,也称盆地模拟法^[25-26]。

2.1.2 类比法

虽然各个盆地的地质时代和演化条件千变万化,但页岩气的成藏条件和富集机理相似相通。如果将页岩气的形成过程和资源分布视为黑箱过程,即不考虑地质过程及其特殊性,则可以在页岩气各种成藏地质条件相似和相近的前提下开展类比法资源评价。

页岩气资源评价方法与常规油气相同,即当以下条件成立时,可采用“同类类比、相似相比”原则对待评样本进行地质类比法资源评价,即有已知参数和资源分布的高勘探开发程度样本,且满足“勘探程度高、资料程度高、研究程度高”的“三高”特点。同时,已知样本和待评样本在盆地类型及规模大小、沉积环境及地层发育、改造程度及保存条件等方面相似、相近或相同。

利用地质类比法开展页岩气资源评价时,需要找到一个(简单算法)或多个(叠合算法)与资源量具有内在机理或准确定量关系的载体参数(如页岩面积、体积、沉积速度等),建立载体参数与资源量之间的定量关系,厘定已知和待评样本之间的相似性程度,利用等比关系即可求得待评样本的资源量。假设已知样本的载体参数和资源量为 X_1 和 Q_1 ,待评样本的对应参数为 X_2 和 Q_2 ,已知和待评样本之间的相似程度为 k ,则,

$$Q_2 = kQ_1 \frac{X_2}{X_1} \quad (6)$$

式中: Q_2 为待评样本的资源量, m^3 ; k 为相似程度系数; Q_1 为已知样本的资源量, m^3 ; X_2 为待评样本载体参数; X_1 为已知样本载体参数。

2.1.3 统计法

所有的页岩气资源评价均在一定地质资料和认识基础上展开,根据页岩气分布地质规律或已有的条件资料条件,可以开展多种统计法资源评价,主要包括以下3种方法。

1) 体积法。确定各自然地质单元、含气地质单元或人为切分地质单元中有效含气页岩的体积,根据各单元内含气量、可采率等地质参数变化分别进行资源量计算,然后对各地质单元中同等置信度条件下的资源量进行累加求和,可得预测区页岩气资源量^[27]。目前美国使用较多的是Forspan法,国内使用较多的是概率体积法。

$$Q_g = shq\rho \quad (7)$$

式中: s 为页岩概率面积, m^2 ; h 为页岩概率厚度, m ; q 为页岩概率含气量, m^3/t ; ρ 页岩概率密度, t/cm^3 。

2) 统计法。根据评价区页岩发育地质条件及页岩气资源分布特点,选择一类适合于评价对象的固定参数,确定其中与页岩气资源量相关的一个(简单)、一组(复合)或一簇(复杂)地质、开发或工程等参数,建立拟合、回归或映像等统计函数关系,并据此进行条件资源量计算。其中的地质类参数可包括有效页岩面积、体积及含气量等,开发参数可包括单井产量、产量递减速率、累计产量等,工作量历史参数可包括有效投资金额、钻井数量、储层压裂作业量等。基于统计法的基本要求,这些参数必须是发生在一定时间内且有一定数量基础的有效参数。

$$Q_g = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (8)$$

式中: X_i 为某一地质类参数。

3) 过程分析法。以评价地质单元、井组或单井为对象,将页岩气的勘探和开发视为一个存在必然规律的基本过程,寻找并描述这一过程的基本规律,将页岩气资源量赋予这一过程中并以此为基础进行资源量计算。在同一地质单元中,可根据对已知“甜点”规模大小的“随机”分布,或对发现过程中“随机”结果的统计,分析甜点的分布趋势,按照齐波夫、帕莱托及广义帕莱托法进行求和计算,从而获得页岩气资源总量。亦可根据单井压裂、重复压裂及多次压裂过程中的产量递减规律,对完整的页岩气产量变化规律进行生命周期计算,从而预测计算页岩气资源量。

2.1.4 特尔菲法

对于同一评价对象或单元,可由不同评价者分别在不同时期根据不同的参数条件,或采用不同的方法获得不同结果的资源量。对于在相似条件下获得的不同评价结果,可采用不同置信度分析的加权平均法快速获得合理的资源量。

2.2 有利选区

根据评价目标和对象的不同变化,页岩气有利选区包括分布远景区、勘探有利区、开发“甜点”区及钻探目标区等。目前常用的方法有必要条件趋势法、最弱因素条件法、多因素叠合分析法、分布概率预测法及钻井效果追索法等,分别适用于不同级别的有利选区。其中,分布概率预测法以地质条件变化趋势为基础,使用可获得的多种地质参数进行页岩气发生概率(含气量)计算,适用条件广,预测效果好。

2.3 资源评价结果

对于所得资源评价结果(包括有利选区、资源量、经济性等)的适用性、合理性、有效性及可信度,目前关注度较低。在实际的资源评价过程中,对这一问题的处理均主要采用“假设”的合理性方法进行定性说明,主要包括对比法、合理性分析及主观判断法等,难以具有公信力。实际上,按照“前提、方法、参数及操作正确,则评价结果正确”的思想逻辑,可以在对资源评价方法和过程合理约束的前提条件下,通过对评价参数本身的有效性、合理性及取值恰当性进行评价,从而获得对资源评价结果的合理性分析。

尽管页岩气与其他类型油气在成藏机理及分布规律方面存在较大差异,但资源评价方法、原理及参数选取等方面并无本质区别,资源评价方法可互为通用,参数选取方法、原则及依据可分别根据各自的成藏条件进行筛选和厘定。

3 页岩气资源评价地质基础——从油气地质过程到页岩气

在传统的油气地质研究过程中,源岩生烃能力强、储层物性好、油气运移通道畅顺,其中常规储层中的油气主要通过净浮力作用克服毛细管力向前运移,当遇到圈闭时形成油气藏。实际上,油气成藏评价研究已经扩展到了包括板块运动、火山活动、气候生物及“三场五史”等内容在内的几乎所有地质领域,形成了从“生、储、盖、运、圈、保”到“地层、沉积、构造”,再到地质基础理论、特殊地质事件、应用地球物理、全球地质的多圈层研究内容体系。尽管包含了页岩气在内的多种类型油气资源评价所需要研究

的地质内容错综复杂,但采用“追根求源、顺藤摸瓜、先重后轻”的思路进行油气成藏地质及在此基础上资源评价,仍然能使我们顺利达到预期评价目标。

地质变化过程周期长、事件多、不确定性影响因素多,沉积环境、压实埋藏、成岩生烃、运移扩散、构造改造,长期复杂的地质作用产生了页岩油气、致密砂岩油气、煤层气、油砂、油页岩及其他多类型非常规油气。由于盆地地质作用过程的多样性、规律性及复杂性,各种常规、非常规类型油气藏不仅能够同时存在于一个盆地中,而且还可以按照一定的规则顺序有序分布,形成油气分布机理序列,为油气分布预测及资源评价提供依据。由于页岩气与其他类型油气藏的形成机理差异较大,地质及资源评价思路和侧重点也需对应思考(表2)。

在海相盆地中(表3),大套页岩、灰岩及砂岩等规模性发育,提供了多种常规油气藏形成与分布的优越条件。我国海相地层发育时代早、历经复杂的多期构造地质作用,形成了以常规油气和页岩气为主、兼具其他类型非常规油气发育的分布特点;在海陆过渡相盆地中,砂岩、泥岩、页岩、煤及灰岩频繁互层,为常规油气、油砂、油页岩等各种类型油气提供了多样性成藏条件。我国的海陆过渡相地层普遍经历了复杂的构造运动,有机质热演化程度高,为页岩气、煤层气、致密砂岩气、甚至常规储层气的形成及有序分布提供了良好条件;陆相盆地以常规油气发育为主,可在不同的沉积相带与构造位置形成页岩气、致密砂岩气、常规油气、煤层气、稠油、油砂、油页岩等多类型油气藏。在小型陆相盆地中,煤系地层发育,多种非常规类型天然气发育完整。

页岩气是油气成藏系统的一部分^[28],是源岩生气后未及时排出的残留部分,多以吸附或游离方式存在于页岩的微、纳米级孔缝中,与常规储层油气具有共同的生烃物质基础、地质历史过程及相似的成藏地质条件基础。页岩气地质特殊性明显,它以源储盖一体、自生自储自封闭、吸附与游离同时赋存、成藏与保存共同控制含气为基本特点。页岩气可发育于多种沉积环境,分布于不同程度的构造改造盆地中,是最“顽强”油气藏类型的一种。我国的海相页岩气主要分布在地质历史长、有机质热演化程度高、构造改造作用强的南方下古生界页岩地层中,有机质成熟度(偏高)和后期保存条件(弱)约束了页岩气的规模性富集^[29];海陆过渡相页岩主要分布在上古生

表2 非常规油气中的页岩气主要特点
Table 2 The main characteristics of shale gas in unconventional oil and gas

类型	成藏机理	关键成藏条件	地质及资源评价侧重点
非常规天然气	页岩气	吸附+游离	页岩生气
	水合物	水合原理	低温高压
	致密砂岩气	气水置换滞流	源储紧邻
	煤层气	吸附机理	煤岩生气
	水溶气	充填+水合	气源+滞流
常规储层油气	构造型	毛 构造遮挡	源岩、 输导、 圈闭
	地层岩性型	细 岩性遮挡	
	特殊型	力 其他遮挡	
非常规石油	油砂	蚀变	构造抬升
	油页岩	生烃终止	构造抬升
	稠油	早熟或蚀变	断裂、抬升
	致密砂岩油	油水置换滞流	源储紧邻
	页岩油	吸附+游离	页岩生油

表3 我国3种不同类型页岩及页岩气主要特点比较
Table 3 Comparison of main characteristics of three different types of shale and shale gas in China

主要特点	页岩类型			
	海相	海陆过渡/交互相	陆相(湖相)	
分布	层系厚度	小	大	大
	单层厚度	大	小	中
	侧向变化	稳定	急剧	快
有机质	类型	I、II	II、III	I、II、III
	丰度	≤10%，变化稳定	≤30%，急剧变化	≤10%，变化
	成熟度	高过成熟	高过成熟—成熟	低熟—成熟
矿物	黏土矿物	含量低	含量高	含量偏高
	脆性矿物	含量高	含量低	含量偏低
	不稳定矿物	含量少	含量多	含量偏多
	敏感性	中—弱	强	中—强
物性	孔隙	有机孔为主	无机孔为主	无机孔为主
	裂缝	欠发育	发育	欠发育
保存	作用因素	构造	构造+初次运移	初次运移
	保存效果	差	差	好
含气	吸附含气量	变化较大	占比较大	低
	总含气量	变化较大	较低	低
	可采性	变化较大	较低	低
分布	时代	早古生代或更早	晚古生代为主	中生代
	空间	南方为主	南、北方	北方为主

界地层中,岩性变化快、黏土矿物含量高、成岩裂缝发育是其主要特点。对于大部分地区的海陆过渡相页岩来说,页岩层段薄、有机质热演化程度偏高、初次运移作用强、后期构造改造作用强是该类页岩气的主要控制因素,导致页岩气在运移、扩散及构造等保存方面的条件受限;我国的陆相页岩气主要分布

在北方地区中、新生代湖盆的沉降—沉积中心处,虽然盆地的后期构造活动相对较弱、改造作用有限,但页岩有机质的热演化程度普遍较低,大型湖盆中有利的页岩气主要分布在构造较深部位,中小型盆地中的页岩发育规模受限。控制陆相页岩气发育的主要因素是沉积相及页岩分布变化快而导致页岩岩相

及矿物成分复杂,页岩有机质成熟度偏低而导致生气能力弱及初次运移作用强^[30]。

对页岩气成藏理论的整体认识,加速了我国页岩气勘探开发实践。从成藏富集角度考量,页岩气地质评价内容侧重于页岩有机地球化学、储层物性及孔缝结构、页岩岩相及矿物组成、保存条件及含气量、含气结构及气体成分等,也延伸包括沉积环境、火山事件、埋藏成岩、构造演化、水岩作用、富集成藏等地质历史,使页岩气成藏地质条件发生复杂变化,对页岩气资源评价产生了重要影响。中国页岩气勘探开发实践的成功,推动了复杂地区高过成熟海相页岩气理论认识水平的提升^[31-32],针对性和系统性的海相页岩气研究取得了一系列新进展,相关进展可作为页岩气资源评价的重要参考。

1) 页岩生气条件“放宽”。生气物质从干酪根和原油热裂解延伸到沥青质生气,有机碳含量(*TOC*)从0.5%降至0.3%,热演化程度(*R_o*)从0.5%~2.0%改为0.4%~3.5%。

2) 储集物性条件“变差”。孔径变小,物性变差,天然气赋存介质从以无机大孔、大缝为主转变为以微、纳米级有机孔为特点,从游离相态转变为吸附和游离共存。

3) 成藏与开发条件趋于复杂。页岩气成藏条件因省去了圈闭和二次运移环节而趋于“简单”,控制含气量保存的条件评价因机理多样性而趋于复杂,开发工程因需储层改造而变向“高成本”。

4 页岩气资源智能评价——思路与实现

对勘探评价对象从浅埋的露头类油气藏、背斜类油气藏,到构造类、岩性地层类油气藏、含油气系统,再到页岩气、致密砂岩气、煤层气等非常规类型的逐步转变,油气资源评价方法也对应从简单计算、计算机引入、系统模拟,到大数据、机器学习、数据挖掘,再到人工智能、地质推理机、智能评价不断演进,油气资源评价的方法和手段不断进步。

定位于自动化和智能化目标,页岩气资源智能评价将地质过程、页岩气成藏、资源评价、计算机及智能实现等理论和技术结合在一起,完成基于或超越人类认知能力的资源预测,完成快速、合理、准确的评价预测,为页岩气勘探发现提供参考指导。

4.1 页岩气资源智能评价原则

1) 功能执行和自主完成

借助智能评价的强大功能,自动执行、自主决策、自行实施页岩气资源评价所设计并要求完成的所有任务功能。

2) 智能分析和资源评价

结合地质过程和页岩气资源评价原理,自主实现参数拾取与剔除、参数识别与归类、参数判断与调用、参数计算与分析等功能,按地质逻辑及评价要求补齐地质过程中的细节缺失、地质变化过程中的评价缺失、地质分析过程中的逻辑缺失及资源评价过程中的效果缺失,自寻匹配方法,自觉完成合理评价,自呈评价报告。

3) 快速高效和准确合理

发挥计算机运算和智能评价的强大功能,有针对性地完成精准任务,虚拟展现适合不同目的和需要、基于不同条件和目标、及时有效指导生产实践的评价结果。

4.2 页岩气资源智能评价思路流程

4.2.1 地质过程逻辑与评价目标实现

1) 地质原理

按照将今论古、由表及里、万物联系、皆有可能等原则,将因果联系、反向追踪、协调一致、系统应变等逻辑植入计算模型,赋予计算机“条件响应”的“推理”、排除矛盾的“自查”及符合地质条件的“自纠”学习能力,借用深度机器学习方法训练形成条件约束与结果变化对应的“逻辑思考”能力。

2) 过程模型

建立盆地(类型、埋藏及改造等)、页岩发育地质过程(地层、沉积及构造等)及页岩气分布(成藏、富集及甜点等)样式,构架页岩(有机地球化学、岩石矿物组成及储集物性等)、页岩气(含气量、含气结构、主要成分等)及勘探过程(钻井数量、勘探程度及效果等)模型,搭建页岩气开发过程(开发方案、开发方式、预算投入等)、工程实施(钻井方式、压裂方式、求产方式等)及产量变化(单井产量、累计产量、产能建设等)模式。

3) 目标实现

给定地质评价单元,设定资源评价目标,计算机

按照逻辑顺序逐项执行各项功能指令,搜索数据,判断真伪,整理运算,检查矛盾,吻合逻辑,输出结果,系统完成资源量计算、有利选区及经济有效性评价等工作。

4.2.2 数据处理

计算科学中的数据处理包括了重在便于计算准备的输入、转换、分组、组织、遴选、计算、排序、存储、检索及输出等处理内容,资源评价中的数据处理则主要关注数据的输入、识别、分类、评价及计算等内容。

传统的数据输入方法主要是键盘输入、扫描输入、数据导入、扫描识别、转换计算等,现今的数据输入方法多种多样,智能化的数据输入方法则可借助强大的网络搜索功能,采用吸金原理对计算机或网络中所存在的公开化、碎片化相关数据进行搜索、提取、识别和转换,完成数据输入。

对于多种类型、形式、载体及文件数据(表4)进行加工处理,识别其类型、判断其作用、赋予其意义、标识其功能,按来源、功能及作用对数据进行分组,完成数据识别及分类。计算参数分布概率密度函数,获得中值众值及方差,给出数据分布的合理性、有效性定级评价,完成数据评价。然后进行数据结构分析,计算数据相关性,通过计算分析发现新的关系和规律,开展数据挖掘,获得预测效果。

4.2.3 地质专家知识库

建立页岩及页岩气成藏的地质背景、原理、条件、过程及结果所需的基本模式,形成地质逻辑框架,构建产生变化过程模型,挖掘新数据,推理新结论,获取新知识。其中,专家知识库、推理机及知识管理系统是必不可少的要件。

在基础地质原理方面,构建以页岩形成演化背景为基础的地质原理和过程框架。根据地壳均衡、动力平衡、能量守恒、剖面平衡等原理,植入地壳运动、地质事件、盆地形成与演化、岩浆侵入与火山活动、盆地形成与改造史等地质演化逻辑,建立页岩分布预测的基础;以研究富有机质页岩的形成和分布为目的,构架页岩沉积原理及成岩变化物理过程逻辑。根据流体动力学平衡、构造应力—上覆载荷—地层沉降平衡、水岩反应化学平衡等原理,构筑页岩沉积、沉降、压实、矿物转化及页岩厚度、埋深、物性等变化的动态模式,确定页岩沉积与分布的物理空间;以分析页岩有机质热演化及效果为目的,构架页岩生烃成气逻辑过程。根据热力学平衡、物质平衡、能量平衡及生烃动力平衡等原理,构筑应力场、温度压力场、沉降史、生烃史、构造运动史、保存史及其变化的地质过程与逻辑效果等,圈定页岩气的有效性范围;以研究预测页岩气形成地质条件及保存效果为目标,构建页岩气形成及演化的地质过程逻辑。以运移动力平衡、成藏条件平衡及扩散平衡为基本依据,构架页岩气形成及保存的地质条件和过程逻辑,确定页岩气形成与分布的边界地质条件;以预测页岩气空间分布及资源量为目标,建立形成页岩气资源与储量分布预测的地质逻辑。按照物质平衡、成藏动力平衡、黑箱、相似、统计、叠加及系统等原则,构架页岩气有利选区及资源评价地质框架及评价过程逻辑,确定页岩气有利区分布及资源分布。

4.2.4 资源智能评价基本流程

建立以页岩沉积、演化、生烃、成藏及保存为主线条的地质过程、数学过程及评价过程模型,自主根据新数据的不断补充而逐渐修改、细化、补充、完善。

建立并完善分组分类数据库,自主实现数据的

表4 页岩气资源评价主要参数

Table 4 Main parameters of shale gas resource evaluation

参数类型	基本参数	作用
盆地条件	盆地类型、盆地大小、地质时代、沉积环境、改造程度等	基础条件类比分析,计算参数取值约束,页岩含气性条件判断
页岩分布	有效面积、有效厚度、埋藏深度、断裂切割、分布形态等	确定页岩空间分布、体积大小,约束计算条件
产层条件	页岩密度、裂缝发育、孔渗物性、产层温压、产层流体等	确定页岩的储集能力,约束含气量及资源量计算
有机地化	有机质类型、TOC、R _o 等	约束页岩生气及吸附能力等参数
含气性	吸附能力、含气量、含气结构、气体成分、可采能力等	页岩气资源评价的核心参数,是资源评价结果的高敏参数
勘探程度	探井数量、地震覆盖、发现情况、发现时间、成藏模式等	评判勘探发现效果,验证地质基本认识,预测未来资源增量变化
开发程度	生产历史、开发方案、开发井数、压裂改造、累计产量等	分析产能和产量变化规律,预测未来走势

自主补充、自我完善,完成数据的整理分析。统计数据分布,求取参数相互关系,实现大数据计算。开展机器学习,挖掘新鲜信息,对标数据结果在基础地质条件约束下的合理性。

根据已有的参数及其有效性条件,自寻合理方法开展不同类型页岩气资源分布预测及资源量评价计算。按照地质参数本身的数量及质量条件,对评价结果进行分类定级及可信度分析。

根据已有地质条件的约束,校准参数及其分布、结果及其变化的合理性。以数字、表格、图形、虚拟可视化及人机交互等方式提交资源评价结果。

4.3 页岩气资源智能评价技术

4.3.1 逻辑数据库

采用大数据和机器学习方法建立数据库,依次增加自动执行和自主实现的参数和数据的搜索发现与判断添加、数据分布检查与分布统计、数值分布与基础地质条件匹配、数据数量和质量评价、建立相互关系、挖掘新的计算信息等功能。上述过程连续执行,自动判断错误类型或在请求专家干预条件下自动处理矛盾,自动建成逻辑执行并符合地质逻辑的智能数据库。主要解决参数的属性及地质意义归位、识别与分类、数学分布模型及合理性、结构及密度函数、有序性与自组织性、逻辑关系统计、数据的信息挖掘等。

4.3.2 地质推理机

根据事实数据溯源地质过程及可能原因,结合地质过程基本原理及地质条件特殊性判断诱因事件发生概率,使用决策树原理确定地质历史事件,恢复地质历史,推定影响油气资源评价的地质过程,系统获取主要地质参数及其变化特点。由于地质作用的长期性和复杂性,地质过程中的多解性、不确定性及过程复杂性普遍存在,这就需要根据地质原理设定基本地质演化过程基本框架,按照先后、因果及概率关系制定推理规则,逐步将地质多解性问题简化为唯一解或有条件的唯一解问题。主要解决地质知识入库、地质框架及模型的建立、地质过程恢复与再现、地质过程与数据结果关系、从证据出发的过程反演、页岩气资源形成主控因素、资源数量及分布模式、页岩气地质及资源分析新认识等。

4.3.3 评价机器人

根据所建立的地质过程模型,采用基本事实数据、机器学习数据及两者的结合,自主匹配有效的适合方法进行有利选区、资源量计算及结果可靠性分析。自主生成中间性和最终的文、图、表文件,展示成果文件清单,接受人机互动及专家检验。主要解决资源评价基础地质条件分类评价、与地质过程和特点匹配的评价结果序列、评价方法过程及结果可信度分析、地质空间演化过程及不同尺度的可视化、页岩气资源时空分布及成果输出等问题。

5 结论与展望

页岩气形成和分布的地质特殊性明显,可在未成熟—低成熟或高成熟—过成熟地区成藏,在超致密储层中形成天然气富集,依赖其独有的封闭机理进行封闭保存,在常规油气勘探无望的地区或层系形成商业富集,可呈连续性分布。虽然在成藏机理上显著不同于其他类型油气藏,但它们之间始终存在着千丝万缕的联系,其资源评价方法与常规油气难以割舍。

现今的页岩气资源评价内容要求参差不齐,采用的评价方法较为受限。页岩气资源智能评价工作主要体现为对钻井、测井、地震等数据资料的分析与解释,对岩性、矿物及储层等地质参数的识别、归类及评价,对地质过程的恢复建模、数值模拟及虚拟实现等。所采用的评价参数局限,缺乏对评价参数的系统挖掘。评价操作过程繁琐、耗时,评价结果主观性较强。智能评价在机器学习基础上完成,通过地质知识模型数据库进行数据挖掘和知识学习,实现从地质到工程、从定性到定量、从计算到评价、从决策到部署的全程智能化评价,是页岩气地质认识与资源评价发展的基本方向和目标。

现今的页岩气资源评价可分为3种基本类型,每种方法均有其特殊的计算原理和分析逻辑,均有其针对性和适用性。未来的页岩气资源评价可依据参数的类型、数量及分布等资料条件由计算机智能选择,匹配选择一种或多种方法的组合。

页岩气资源评价需要尽可能翔实的数据资料。现今的页岩气资源评价需要根据已有的参数条件进行方法筛选,对已有的地质参数或为整理采用、简单

加工处理、或为直接放弃。对于参数的搜集、遴选、处理、自学习及质量评价等,是计算机的强大功能,通过对关键参数的种类、数量、质量及已有数据分布的合理性等分析,易于通过智能化进行实现。页岩气资源评价中的有利选区、资源量计算及计算结果可信度分析等,均可由计算机进行智能化全程实现。

页岩气资源智能评价实现的目标是恢复地质过程、开展成藏地质分析、确定地质评价关键参数、匹配资源评价方法、再现页岩气资源数量及空间分布、确定评价结果的合理性、智能实现页岩气资源评价的系统功能。由计算机系统自动实施的智能过程,包括系统的数据收集整理与处理分析、有目的的机器自我学习、系统地质逻辑的关系建立、功能计算的鱼贯实施、评价目标的系统实现及人性化展现等,是智能评价功能实现的基础。逻辑数据库、地质专家知识库、地质推理机、知识管理系统及评价机器人是页岩气资源智能评价的技术核心。

智能评价是页岩气资源评价的基本方向,而地质基础研究又是资源评价的基础,离开了地质过程和特点分析的资源评价是没有基础和意义的。毫无疑问,基础地质过程、重要地质事件、页岩气成藏模式及主控因素等,也是资源智能评价和分布预测研究的重要内容。

页岩气资源智能评价是一个长期实践、点滴积累、不断完善的过程,具有明显的发展阶段性。目前已经在评价方法、学习算法、框架构建等方面具备了成熟技术,为智能资源评价的部分功能实现奠定了坚实基础,特别是近些年来在数据处理与分析、盆地数值模拟、专家系统、虚拟可视化实现等方面获得了大踏步前进,并取得了明显进展;机器学习、数据挖掘及虚拟仿真等技术的不断涌入,将在更大的范围内推动页岩气资源评价的发展,有望在不久的将来实现不同运算功能之间的完美衔接,实现资源智能评价的全程化。

参考文献

[1] 袁野,吴超楠,李秋莹.人工智能产业核心技术的国际竞争态势分析[J].中国电子科学研究院学报,2020,15(11):1128-1138.
YUAN Ye, WU Chaonan, LI Qiuying. Analysis of international competition in the core technology of artificial intelligence industry[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15 (11): 1128-1138.

[2] 李麒麟,李子莹.国际人工智能动态分析[J].中国科技信息,2020,624(6):109-111.

LI Qilin, LI Ziyang. International AI dynamic analysis[J]. China Science and Technology Information, 2020, 624(6): 109-111.

[3] MCCARTHY J. The inversion of functions defined by Turing machines[J]. Automata Studies, 1956: 177-181.

[4] DAMASSINO N. The questioning Turing Test [J]. Minds and Machines, 2020, 30(4): 563-587.

[5] 贾承造.中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J].石油学报,2020,41(12):1445-1464.
JIA Chengzao. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (12): 1445-1464.

[6] 金之钧,白振瑞,杨雷.能源发展趋势与能源科技发展方向的几点思考[J].中国科学院院刊,2020,35(5):576-582.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, YANG Lei. Thinking on general trends of energy development and directions of energy science and technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35 (5): 576-582.

[7] 匡立春,刘合,任义丽,等.人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J].石油勘探与开发,2021,48(1):1-11.
KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-11.

[8] 杨剑锋,杜金虎,杨勇,等.油气行业数字化转型研究与实践[J].石油学报,2021,42(2):248-258.
YANG Jianfeng, DU Jinhu, YANG Yong, et al. Research and practice on digital transformation of the oil and gas industry[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 248-258.

[9] 宋洪庆,都书一,周园春,等.油气资源开发的大数据智能平台及应用分析[J].工程科学学报,2021,43(2):179-192.
SONG Hongqing, DU Shuyi, ZHOU Yuanchun, et al. Big data intelligent platform and application analysis for oil and gas resource development[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43 (2): 179-192.

[10] HART P E, DUDA R O, EINAUDI M T. Prospector — A computer-based consultation system for mineral exploration[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1978, 10(5): 589-610.

[11] 郭珺,邹鑫,周子康,等.深度学习在油气地震勘探中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(20):86-90.
GUO Jun, ZOU Xin, ZHOU Zikang, et al. Application of deep learning in oil and gas seismic exploration[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39 (20) : 86-90.

[12] 郭长杰,王浩翔,刘晓,等.浅析机器学习技术在油气行业的应用场景[J].信息系统工程,2017,(5):100-103.
GUO Changjie, WANG Haoxiang, LIU Xiao, et al. A brief analysis of the application of machine learning in the oil and gas industry[J]. China CIO News, 2017, (5): 100-103.

[13] 彭涛,张翔.支持向量机及其在石油勘探开发中的应用综述[J].勘探地球物理进展,2007,(2):91-95.
PENG Tao, ZHANG Xiang. Review of support vector machine and its applications in petroleum exploration and development [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, (2): 91-95.

[14] 杨剑锋,乔佩蕊,李永梅,等.机器学习分类问题及算法研究

- 综述[J].统计与决策,2019,35(6):36-40.
- YANG Jianfeng, QIAO Peirui, LI Yongmei, et al. A review of machine-learning classification and algorithms[J]. Statistics & Decision, 2019, 35 (6): 36-40.
- [15] 闵超,代博仁,张馨慧,等.机器学习在油气行业中的应用进展综述[J].西南石油大学学报(自然科学版),2020,42(6):1-15.
- MIN Chao, DAI Boren, ZHANG Xinhui, et al. A review of the application progress of machine learning in oil and gas industry [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(6): 1-15.
- [16] 孙健,李琪,陈明强,等.基于机器学习的油气水层随钻识别模型优选[J].西安石油大学学报(自然科学版),2019,34(5):79-85.
- SUN Jian, LI Qi, CHEN Mingqiang, et al. Optimization of model for identification of oil/gas and water layers while drilling based on machine learning[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(5): 79-85.
- [17] MENELEY R A, CALVERLEY A E, LOGAN K G, et al. Resource assessment methodologies: Current status and future direction[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(4): 535-540.
- [18] 吴晓智,王社教,郑民,等.常规与非常规油气资源评价技术规范体系建立及意义[J].天然气地球科学,2016,27(9):1640-1650.
- WU Xiaozhi, WANG Shejiao, ZHENG min, et al. Standard system establishment for conventional and unconventional hydrocarbon resources assessment techniques and its significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27 (9): 1640-1650.
- [19] 赵文智,胡素云,沈成喜,等.油气资源评价的总体思路和方法体系[J].石油学报,2005,26(S1):25-29.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, SHEN Chengxi, et al. The general idea and method system of oil and gas resource evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(S1): 25-29.
- [20] 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. Oil and gas resource evaluation technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [21] 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, ZHEN 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.
- [22] AHLBRANDT T S, KLETT T R. Comparison of methods used to estimate conventional undiscovered petroleum resources: World examples[J]. Natural Resources Research, 2005, 14(3): 187-209.
- [23] 宋振响,徐旭辉,王保华,等.页岩气资源评价方法研究进展与发展方向[J].石油与天然气地质,2020,41(5):1038-1047.
- SONG Zhenxiang, XU Xuhui, WANG Baohua, et al. Advances in shale gas resource assessment methods and their future evolvement[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1038-1047.
- [24] 陈承声,史树勇,王云鹏.基于PetroMod四川盆地长宁地区五峰—龙马溪组优质页岩段吸附模拟研究[J].地球化学,2019,48(6):602-612.
- CHEN Chengsheng, SHI Shuyong, WANG Yunpeng. Adsorption simulation based on PetroMod of high-quality shale segment of Wufeng-Longmaxi Formation in Changning Area, Sichuan Basin[J]. Geochimica, 2019, 48(6): 602-612.
- [25] 罗秋霞.中国东部某些盆地地下第三系生油岩演化的数学模拟[J].石油实验地质,1980,(2):37-43.
- LUO Qiuxia. Mathematical simulation of the evolution of Paleogene source rocks in some basins in eastern China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1980, (2): 37-43.
- [26] 汪本善,刘德汉,张丽洁,等.渤海湾盆地黄骅拗陷石油演化特征及人工模拟研究[J].石油学报,1980,(1):43-51.
- WANG Benshan, LIU Dehan, ZHANG Lijie, et al. Investigation and simulation experiments on the characteristics of the genesis and evolution of petroleum in Huanghua depression in bohai bay[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, (1): 43-51.
- [27] 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.
- [28] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [29] 张金川,杨超,陈前,等.中国潜质页岩形成和分布[J].地学前缘,2016,23(1):74-86.
- ZHANG Jinchuan, YANG Chao, CHEN Qian, et al. Deposition and distribution of potential shales in China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 74-86.
- [30] 王香增,高胜利,高潮.鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J].石油勘探与开发,2014,41(3):294-304.
- WANG Xiangzeng, GAO Shengli, GAO Chao. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41 (3): 294-304.
- [31] 赵文智,贾爱林,位云生,等.中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J].中国石油勘探,2020,25(1):31-44.
- ZHAO Wenzhi, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (1): 31-44.
- [32] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.
- ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.

(编辑 柳超)