

油气勘探大数据分析在中亚盆地优选中的创新应用

张科,张义娜

(中国海洋石油国际有限公司,北京 100027)

摘要:随着数字化时代的到来,石油公司开始重视基础资料的获取及整合,不断加大油气大数据分析的应用力度,以期从大数据中寻找“大油气”。然而,以传统数据统计分析方法研究海量数据的时效性很差,而且有效分析方法和关键评价指标缺乏,严重制约了油气勘探行业大数据的深度应用。中亚油气资源丰富,是中国石油公司实施“一带一路”国家能源合作战略的重点地区和现实之选。在战略选区盆地筛查阶段,研究范围大、周期短、井震资料匮乏,难以开展有效的石油地质分析,无法形成宏观认识指导决策。为此,引入大数据思维,开展大数据分析,深度挖掘、二次开发数据库,整合海量多源异构数据,创建中亚战略选区知识库,为勘探大数据分析奠定资料基础;创新油气勘探数据挖掘技术和大数据分析技术,创建“三位一体”KPI综合打分模式,优选多个有利勘探潜力盆地,有效指导中亚战略选区。研究提供了新的思路 and 对策,从油公司的角度阐述了开展勘探大数据分析的必要性和可行性,具有较好的应用价值和推广意义。

关键词:多学科整合;关键参数指标;数据可视化;KPI打分;大数据融合;勘探大数据分析;盆地优选;中亚

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Application of big data analytics to hydrocarbon exploration for favorable basin selection in Central Asia

Zhang Ke, Zhang Yina

(CNOOC International Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: With the advent of the digital era, oil companies have invested more in obtaining and integrating basic data, and constantly improved the utilization of big data analytics, as an emerging trend, in oil and gas industries, with a view to discovering “big oil and gas”. With the use of big data, companies can capture large data in real time; in contrast, traditional statistical analysis is characterized by poor timeliness in capturing large volumes of data, as well as a lack of efficient methods for analysis and critical evaluation parameters, seriously restricting the in-depth application of the big data analytics in hydrocarbon exploration. Central Asian is a region rich in natural resources, including oil and gas, and also a key area and ideal choice for China’s oil companies to implement the Belt and Road Energy Cooperation Strategy. However, it is difficult to carry out effective petroleum geological analysis at the stage of study area selection, given the large scope of researches in short time, and the lack of data in seismic interpretation and from wells, and a macro-understanding to guide decision-making cannot be reached as a result. In this regard, we firstly carry out big data analysis following deep mining into and secondary development of purchased databases, integrating massive multi-sourced heterogeneous data, creating a knowledge base for strategic area selection in Central Asia, serving to lay a data foundation for big data analysis in petroleum exploration. Secondly, methods of data mining and big data analytics are innovated for hydrocarbon exploration, and a comprehensive key parameter indicator (KPI) scoring model based on a Trinity of petroleum geological conditions, exploration maturity and commercial value, is established to select multiple petroliferous basins of great exploration potentials and effectively guide the strategic area selection in Central Asia. The study provides new ideas and solutions, and expounds the necessity and feasibility of big data analytics for petroleum exploration from the oil companies’ point of view. In all, it is of great significance to application and promotion.

收稿日期:2020-07-24;修订日期:2021-07-13。

第一作者简介:张科(1979—),男,高级工程师,海外含油气盆地资源评价。E-mail:zhangke@cnooc.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(92055203)。

Key words: multidisciplinary integration, key parameter indicator (KPI), data visualization, comprehensive KPI scoring, Big Data fusion, hydrocarbon exploration-centered Big Data Analytics, favorable basin selection, Central Asia

中亚地处亚欧大陆腹地,油气资源丰富、勘探潜力大,是中国油气资源进口的重要来源之一。在当前“一带一路”国家能源合作战略良好态势下,中国油气公司进入时机较好,参与机会较多^[1-3]。

2000年以来,国际油价跌宕起伏,全球7个大区油气年均发现储量约 320×10^8 bbl,中亚地区除了在第一个五年的低油价时期有巨量发现之外,在接下来的3个五年中即便处于国际油价上涨周期,新增钻井工作量和储量发现也都较少,油气勘探几乎处于停滞状态,错过了全球油气勘探快速发展的重要机遇(图1)。当下国际油价处于快速反弹复苏期,全球油气勘探活动随之加快,同时,中国对外油气依存度逐年增加,研究中亚油气资源潜力与进入机会,制定相应获取策略对中国油气公司具有重要的指导意义。厘清该区是否仍有较大勘探潜力、是否仍有勘探机会以及机会在哪里,是中亚战略选区研究的首要目的。从资料调研来看,中亚含油气盆地多、勘探区块多、油气田多、钻井多,勘探潜力较大。然而,在战略选区研究阶段,缺乏井震数据,无法开展系统有效的石油地质条件分析,只能借助于大型商业数据库及公开资料,如何有效整合各类资源、快速优选重点盆地、聚焦潜力区带,是研究的重点和难点^[4]。

近年来,随着数字化时代到来,大数据分析技术日臻成熟。据《2019年中国大数据产业发展白皮书》统计,互联网、金融、电商和交通领域等行业是大数据应用热点^[5]。目前,大数据在石油能源行业主要应用于生产设备的全时段监控、预测性维护和地震数据等庞大数据的自动化批量处理^[6-8]。

大数据的核心是统计学,是一门探究相关性及因

果关系和逻辑关系的学科,其相关性的本质使大数据分析应用于油气勘探海量数据挖掘及分析成为现实。目前,石油企业逐渐从撒网式试用转变为聚焦突破关键技术点,并落脚在设备预测性维护、地震数据和地质油藏数据的快速处理,钻井过程的智能导向等^[9-13]。那么,对油气勘探行业,如何引入数据挖掘和大数据分析等新技术,深度挖掘基础数据所蕴含的地质价值,为勘探研究提供数据支持和理论支撑;如何从海量属性中寻找能够评价勘探潜力、预测发展趋势的关键属性,从混沌中探索规律,从规律中寻找方向,并指导勘探研究,是大数据分析在油气勘探应用领域较好的切入点和契合点^[14-18]。

1 研究思路及对策

目前,大数据分析应用于油气勘探规律的探索尚无成例可循,近年来,笔者在中亚、印尼、英国北海和大西洋两岸重点盆地等全球多个靶区开展了多盆地排序、多区块优选、新机会评价等探索性研究,并结合国内外最新研究进展,提出一套研究思路及对策。

数据基础是通过整合主要商业数据库而创建的基于GIS的全球油气勘探数据库,包含了从宏观的国家、盆地、区块到微观的油气田、探井等不同级别研究对象的属性信息。每类研究单元分别有20~60种属性,比如,研究区共有探井近5 000口,每口井有62个属性,包含国家、盆地、油气田、储层和作业公司等文本属性,以及钻井日期、时长、费用和发现储量等度量属性,共计近百万条属性。

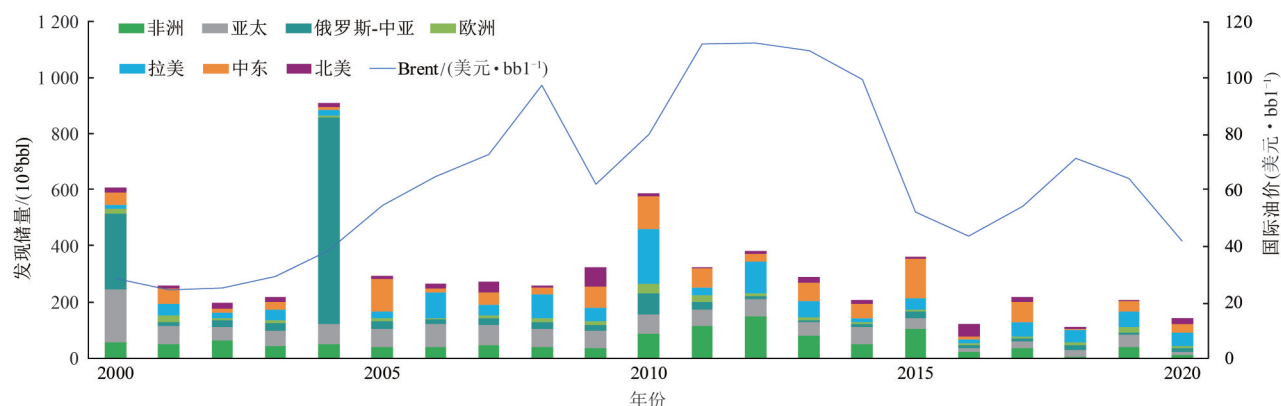


图1 2000年以来全球勘探历年新增储量与国际油价变化

Fig. 1 Annual reserve addition from global exploration and change in oil price in the international market since 2000

针对海量基础属性,此次研究创新性提出了目标驱动勘探大数据分析“三步走”的思路和对策(图2)。第一步,多角度解析海量属性,结合靶区特点,从盆地、区块、作业公司到油气田和探井等不同级别进行统计,多形式、多维度呈现油气勘探现状,全面描述、摸清家底;第二步,多属性融合分析要素,将不同级别、不同类型的属性转换到以盆地为单位进行分析,交会衍生新属性;第三步,多参数评价优选关键参数指标(KPI, Key Parameter Indicator),对不同种类的参数进行评价,优选满足战略选区盆地初筛阶段的KPI参数^[19-22]。

2 数据挖掘 HEAD 流程

在对目前行业通用数据挖掘技术进行研究的基础上,结合油气勘探行业特点,创建了油气勘探大数据挖掘 HEAD (Hydrocarbon Exploration Assisting Data-mining) 流程,为大数据分析奠定资料和方法基础。

HEAD 流程将数据挖掘技术定义为对海量数据的采样,数据特征的探索、关联、建模和评估,深入挖掘油气勘探信息所蕴藏的模式和关系。主要包含以下5个环节:①数据采样,GIS平台强大的数据处理能力能够

快速实现海量数据采样,在分析海量数据之后才能发现其蕴含的模式和趋势,理想的采样结果包含了用于数据特征探索的完整和全面的数据集;②数据探索,多维度展示预期关系、未预料的趋势以及各种异常,以期获得对数据的全面理解和确定有关联的方向;③关联性分析,全方位开展多参数相关性分析,探索隐藏的关系,产生有建模价值的假设;④模型建立,对数据进行建模,以搜索能可靠预测所需结果的数据组合;⑤预测评估,比较不同模型,根据统计学原理对模型进行区分和分级,以确定概率分布的可信度。

HEAD 流程具备多次迭代、自适应功能,是不断调整的自循环深度学习过程。该流程有机融合了油气勘探认识论和辩证法思想,从数据采样、探索到统计,是从未知探索规律到已知的归纳过程;从数据统计、异常修正到预测评估是对潜力和风险进行辩证分析过程。因此,该流程可探索数据特征、明确分布规律,深入挖掘油气勘探信息所隐藏的模式和关系。

3 多角度解析勘探目标属性特征

在 GIS 数据库中,不同的研究对象包含多种不同

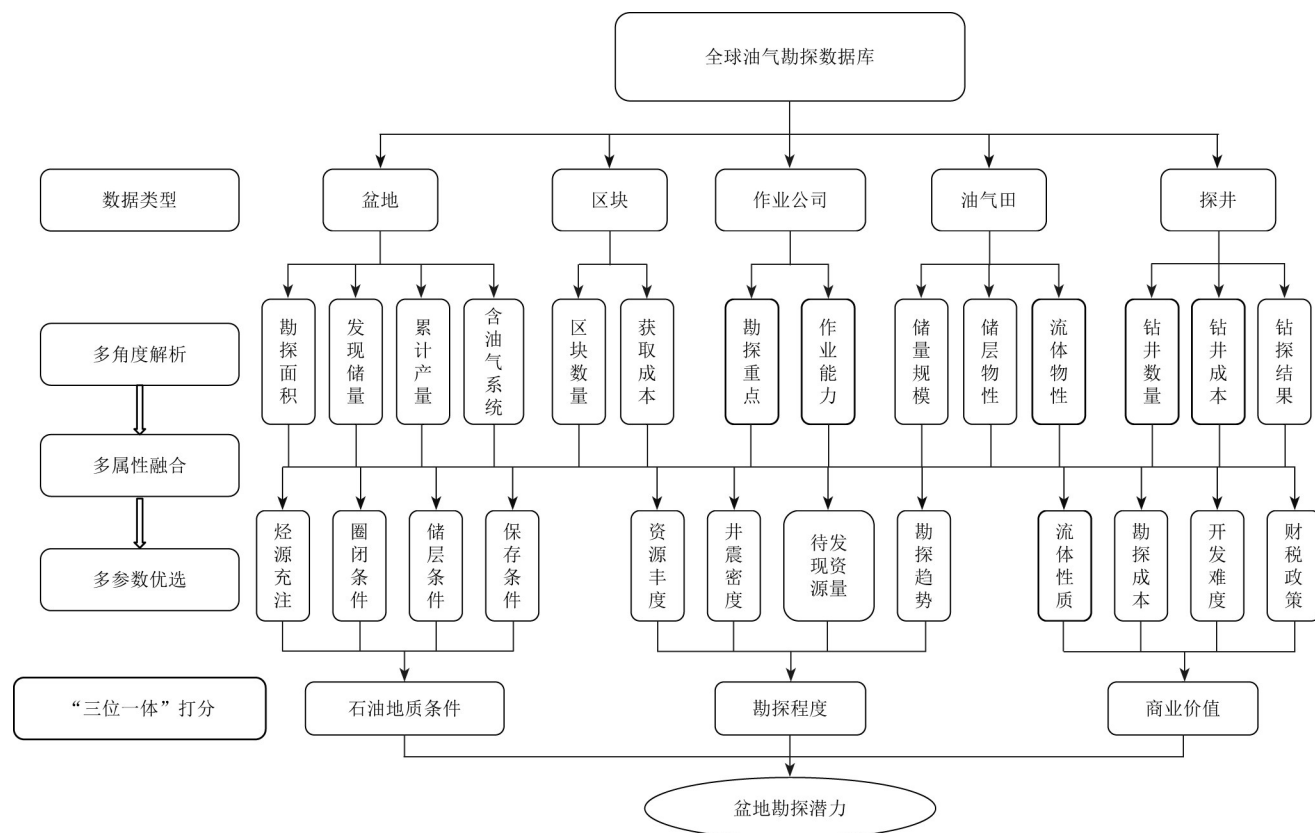


图2 油气勘探大数据分析研究流程

Fig. 2 Research workflow of big data analytics for hydrocarbon exploration

的类型属性。盆地有已发现可采储量、剩余可采储量、待发现资源量、历年产量、勘探程度(地震、探井数量)、烃源岩(时代、岩性、指标)和储层(时代、岩性、物性)等共约30种属性。区块有不同公司持有数量、历年授予区块数量、授标签字费及发现储量等共约51种属性。油气田有已发现可采储量、剩余可采储量、储集层深度和储集层层系发现储量、原油API及储层物性等共约44种属性;探井有探井数量、钻探成效及钻探费用等共约62种属性^[23-25]。

通过对不同级别勘探目标的海量属性转换到盆地级别进行统计,运用多种形式的图表进行可视化呈现,对油气勘探现状进行快速梳理,整体分析、总结规律。

3.1 中亚各盆地已发现油气分布规律

中亚沉积盆地有裂谷、前陆和克拉通盆地3类,均有不同程度的油气发现(图3),总量较大,11个盆地共发现可采储量 $146\,200\times 10^6$ bbl油当量(气多油少,液态油 $47\,800\times 10^6$ bbl,天然气 521×10^{12} ft³),剩余可采储量规模较大($92\,400\times 10^6$ bbl油当量);其次,各盆地间可采油气富集差异大,阿姆河盆地发现可采储量最大,占总发现可采储量的近60%(约 $8\,700\times 10^6$ bbl油当量),独占鳌头,滨里海和南里海盆地次之。

3.2 各盆地历年授标区块变化规律

历史数据统计来看,11个盆地平均每年授标区块

约19个,随着国际油价起伏,勘探热点变化较大(图4),不同勘探程度盆地的授标数量与油价呈较好的相关性,低油价时,勘探以成熟盆地为重点,因为此类盆地勘探风险较低;反之,高油价时,则转向低勘探程度盆地,因为此类盆地进入成本较低。滨里海盆地在低油价的20世纪90年代为勘探重点;随着国际油价升高,2004年开始多个盆地均有区块授予,尤其是2008—2014年,油价高企之时,勘探程度较低的费尔干纳盆地(Fergana)和田尼兹盆地(Teniz)也有不同数量的区块授予;在2015年国际油价下跌之后,热点又回到滨里海盆地开展老区挖潜;近两年,油价回升,则又转向新区,而且授标区块逐步稳定在40个左右,表明该区油气勘探正在回升,趋于常态化。

3.3 各盆地油气田储量分布规律

从历年发现油气田储量、储量规模及分布概率等多个角度分析可知,不乏世界级巨型气田(South Lolo-tan气田, $36\,000\times 10^6$ bbl油当量,2005年发现),但大多数油气田规模较小,小于 50×10^6 bbl油当量的油气田有711个(图5),概率分析可知该区发现油气田的规模概率 P_{50} 为 10×10^6 bbl油当量。

3.4 各盆地勘探程度规律

通过对各盆地2D地震和探井总数量的统计,勘探程度如下:①整体勘探程度不高,2D地震密度为

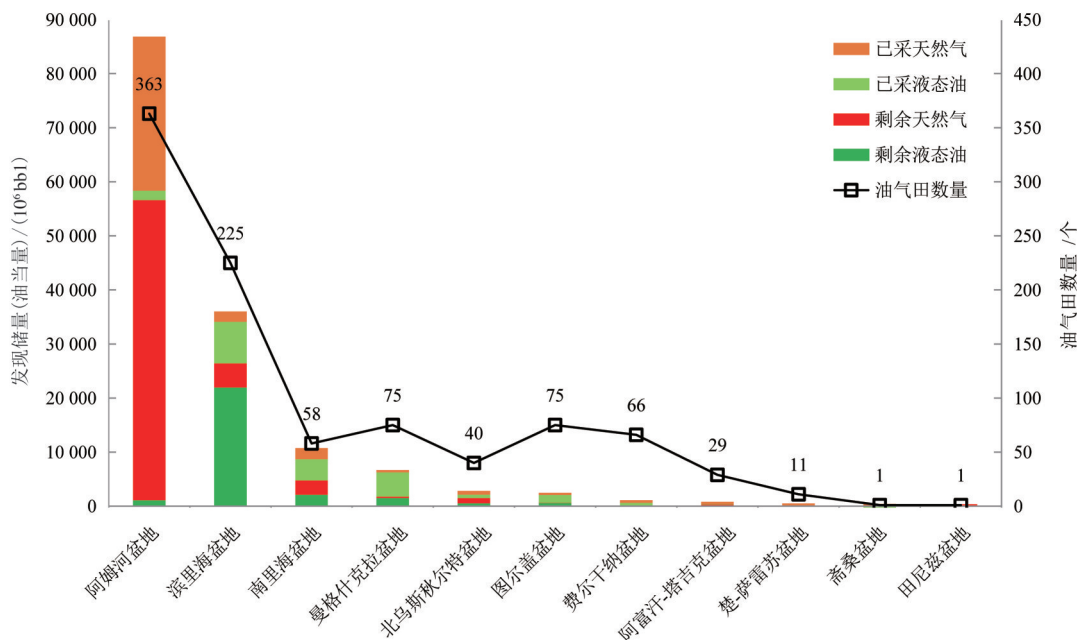


图3 中亚含油气盆地已发现油气可采储量柱状图

Fig. 3 Column of discovered reserves of petroliferous basins in Central Asia

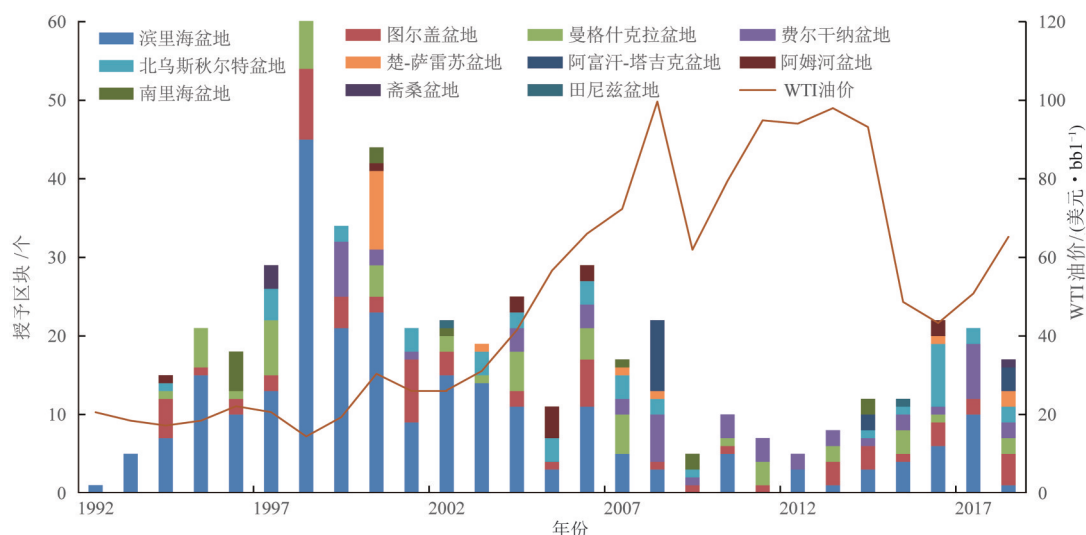


图4 中亚各盆地历年授标区块与国际油价变化趋势

Fig. 4 Column of the number of awarded blocks in Central Asian basins and a curve indicating the trend of West Texas Intermediate (WTI) oil price change over years

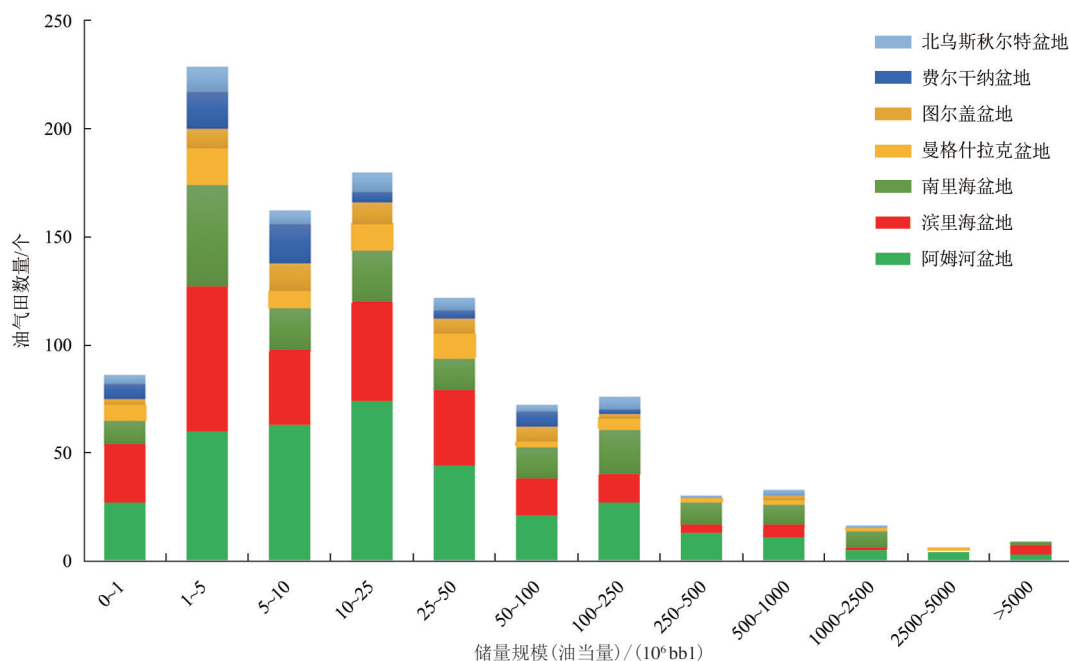


图5 中亚各盆地已发现油气田储量规模分布柱状图

Fig. 5 Column showing discovered reserves size distribution in oil & gas fields of Central Asian basins

($15 \sim 233$) $\times 10^{-3}$ km²/km², 探井密度平均在($2 \sim 10$) $\times 10^{-3}$ 口/km²; ②盆地之间差异大, 海、陆之间差异大。整体来看, 滨里海和南里海盆地勘探程度较高, 田尼兹和斋桑盆地(Zaysan)勘探程度最低。

具体而言, 该区共有初探井(NFW)约5 000口, 1950年以来, 年均探井51口, 平均探井成功率为33%。2014年以来, 受到国际油价下降影响, 油公司减少勘探投入, 钻井数量下降, 但成功率有所提高(40%~70%)。

从储量累积发现及单井累积平均发现储量变化趋势(图6)可以将中亚地区油气勘探分为3个阶段: 第一阶段为初步探索期(1900—1960年), 新探区石油地质条件不清楚, 勘探规律不明, 油气勘探偶然性强, 储量会有跳跃式递增现象, 同时, 单井累积平均发现储量变化幅度很大, 有大发现时会突然增高, 发现少则会降低; 第二阶段为稳定发展期(1961—1979年), 随着勘探研究持续深入, 油气分布规律逐渐明确, 中小规模油气田持续发现, 探井平均勘探成效持续变好; 第三阶段

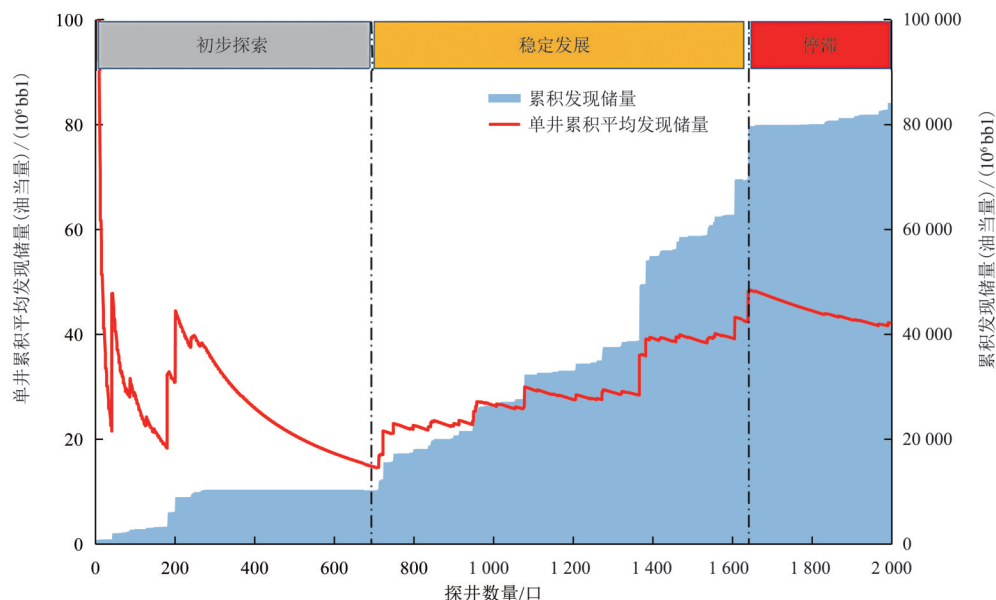


图6 中亚地区累积发现可采储量及单井平均累积发现可采储量随探井数量变化趋势

Fig. 6 Fluctuation trend of the cumulative discovered reserves and single well-averaged cumulative discovered reserves with the number of new field wildcat (NFW) wells emplaced in Central Asia

为停滞期(1980年以后),随着重点盆地勘探程度提高,已知勘探领域及其油气藏类型基本探明,储量增长放缓,探井成效逐步降低。综合分析可以看出,该区需要寻找新的勘探领域以实现勘探的新突破。

4 多属性融合优选以盆地为单位的关键属性

多属性融合是将从盆地到探井不同尺度研究单元的多项属性转换到以盆地为单位进行分析,不但能够深度探索物理属性蕴含的地质价值,而且通过数理转换,还能够衍生出新的具有更加直观、更加综合指示意义的物理属性^[26]。

4.1 各盆地发现储量与探井数量融合

通过中亚盆地群已钻探井与已发现储量(图7)交会分析可以将8个盆地分为好、中、差3类含油气盆地,南里海(South Caspian)、阿姆河(Amu-Dar'ya)、滨里海(Precaspian)和曼格什克拉(Mangyshlak - Ustyurt)等4个盆地不但总发现储量较高,而且平均单井发现储量也高($>35 \times 10^6$ bbl油当量),属于I类富含油气盆地;北乌斯秋尔特(North Ustyurt)和南图尔盖盆地(Turgay)总发现储量和平均单井发现储量较高 $[(20 \sim 35) \times 10^6$ bbl油当量],属于II类中等含油气盆地;其余平均单井发现储量较小($<20 \times 10^6$ bbl油当量)则属于III类较差含油气盆地。

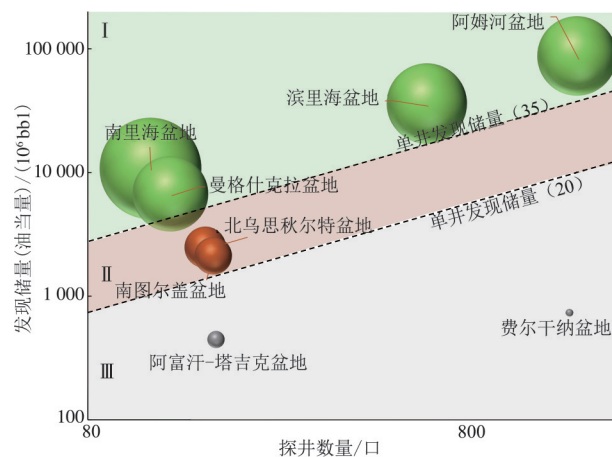


图7 中亚各盆地发现储量与探井数量交会图

Fig. 7 Cross correlation of the discovered reserves and the number of NFW wells in the Central Asian basins

4.2 各盆地油气田平均储量与储量丰度交会

盆地储量丰度是每千平方公里发现油气储量,能够直接反映盆地石油地质条件,交会分析认为盆地油气田平均储量与储量丰度呈较好的对数正相关(图8)。阿姆河、滨里海和南里海等3个盆地具有明显的高储量丰度和大规模油气田,勘探成效好。

4.3 盆地勘探趋势融合

勘探趋势表示随着钻探工作量的增加,新发现油气的可能性和规模变化,指示不同勘探阶段的钻探成效。

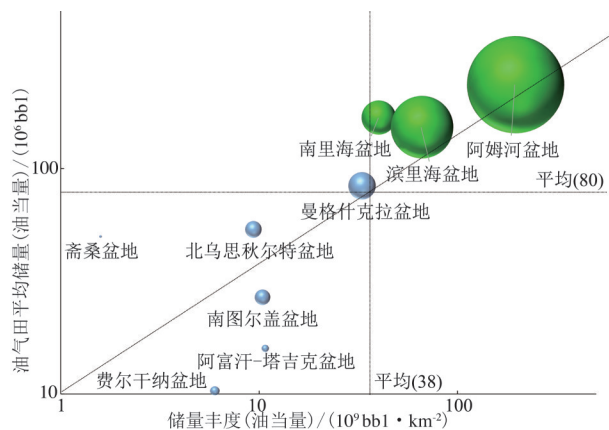


图8 中亚各盆地油气田储量均值与储量丰度交会图

Fig. 8 Cross correlation of average reserves and reserve abundances of oil & gas fields in the Central Asian basins

以南里海盆地油气勘探趋势为例进行分析(图9), 可以将南里海盆地油气勘探划分为初步探索和稳定发展两个阶段。第一阶段在2002年之前, 油气勘探规律不清楚, 钻探发现偶然性强, 单井平均储量跳跃大, 新增储量少, 为初步探索期; 第二阶段在2002年以后, 在勘探发现层系及圈闭类型等方面逐渐明确, 逐步探索不同领域, 累积发现储量有3次较大的递增, 单井储量基本平稳, 为稳定发展阶段。可以看出, 该盆地目前仍处于上升勘探态势, 勘探潜力较大。

4.4 盆地勘探潜力预测

运用规模序列法, 通过以滨里海盆地已发现油气

田(235个)为样本进行级别划分和分布规律分析^[27-29], 预测该盆地待发现油气田约568个, 待发现资源量 $10\,037 \times 10^6$ bbl油当量, 仍有较大勘探潜力, 待发现油气田以中小型为主(图10)。

5 多参数评价优选 KPI

通过单属性分析和多属性融合, 深入解析了中亚各盆地的油气发现、区块热点、勘探程度、勘探趋势、财税条款和石油地质条件等10余项参数。对上述参数进行相关分析, 剔除类型相似和相关性较好的参数之后, 综合评价优选出石油地质条件、勘探程度和商业价值3大类共12项KPI参数, 作为评价盆地勘探潜力的打分参数^[30-36](表1)。

通过对11个盆地12项KPI参数排序, 可以看出, 每个盆地均有不同的优势参数, 难以从整体上进行评价、排序。

6 “三位一体”综合打分定量评价勘探潜力

运用随机森林算法和多元回归法优选了3大类共12项KPI参数, 通过对标国际大型石油公司, 结合研究现状创建了含油气盆地评价“三位一体”KPI综合打分排序模式^[37-40]。

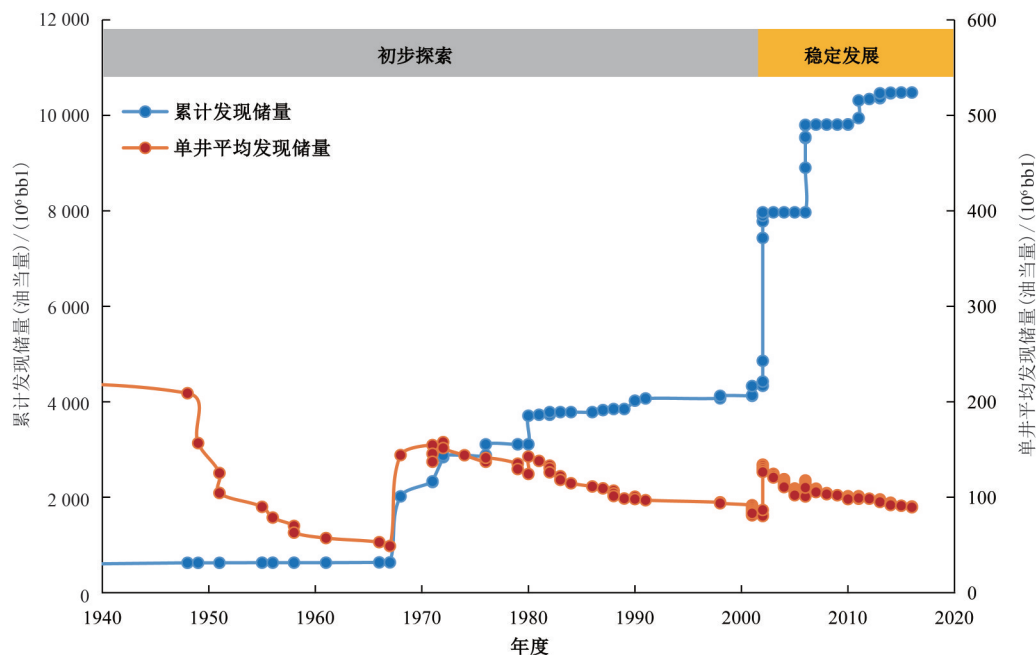


图9 南里海盆地油气勘探发现趋势

Fig. 9 Trend of hydrocarbon exploration in the South Caspian Basin

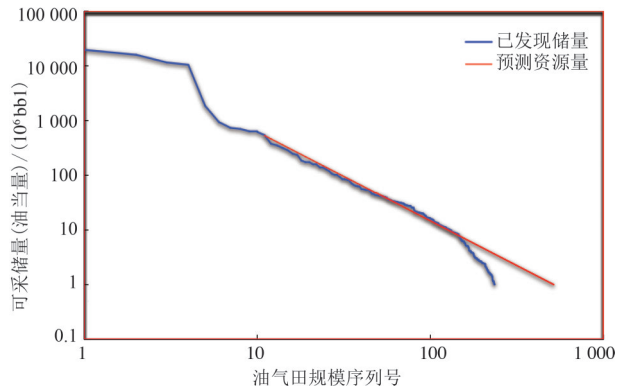


图10 中亚滨里海盆地预测待发现资源量分布

Fig. 10 The Yet-to-Find (YTF) resources of the Precaspian Basin in Central Asia

“三位一体”模式中的“三位”指石油地质条件、勘探程度和商业价值等能够反映勘探潜力的3个不同维度,“一体”指盆地综合勘探潜力。

评分原则是每个盆地总分为100,总权重为1,包含3个大类,石油地质条件是最重要的物质基础,决定油气勘探的价值所在,赋值为50%;勘探程度是总结勘探历史并预测未来潜力,决定油气公司勘探信心的强弱,赋值25%;商业价值随着国际政治经济形势的变化而波动,决定油气公司与资源国的价值共识,赋值25%。每项大类权重定为1,所包含的不同KPI赋予从20%到35%的不同权重,最终进行加权求和作为盆地总分。

“三位一体”综合打分模式,是在对海量属性逐步深入分析的基础上,根据含油气盆地客观情况(石油地质条件),随着研究深入、工作量增加(勘探程度)以及资源国政策调整所获得的投资回报(商业价值)为整体进行相对动态的、贯穿从盆地研究到投资全生态链的综合评价体系来预测、打分及排序。

“三位一体”评价模式结合了常用评价体系中专家打分的优点,避免了雷同属性多次赋值,兼顾地下和地面因素,能够因地制宜根据靶区级别和规模灵活选取KPI参数,在缺乏一手井-震资料、难以深入开展地质研究取得认识之前,可以做有效赋值、快速排队,为决策层提供意见和建议。

通过打分将中亚11个主要盆地划分为3类:分值高于80分的滨里海、阿姆河、南里海和曼格什拉克共4个盆地属于第一类,潜力较好;分值介于75分到79分的北乌斯秋尔特、阿富汗-塔吉克、费尔干纳和图尔盖等4个盆地属第二类,潜力中等;其余4个盆地属于第三类,潜力较小^[32-35]。

7 结论及建议

此次中亚含油气盆地战略选区研究中,运用大数据分析思维,通过HEAD挖掘流程和“三步走”策略,逐步优选KPI参数,聚焦研究目标;创建“三位一体”评分方法,多要素兼顾,分层次赋值,阶梯式排序,定量化评价,实现了定量化高效评价和可视化快速决策,探索了一套大数据分析打分体系,将新技术应用于传统油气勘探领域。

大数据分析有效解决了战略选区中一手基础资料缺乏,研究时间紧张以及地质规律认识不清等制约盆地评价的问题,通过对油气田及探井分析,能够全面摸清规律,从宏观上指导研究,在中亚多盆地优选和印尼多个新机会快速排序应用实践中取得了较好的效果。

油气勘探大数据最直接的体现是钻井和地震,相比于地震资料所反映的间接信息,钻井资料能够更加

表1 中亚主要含油气盆地KPI排序

Table 1 KPI rankings for major petroliferous basins in Central Asia

盆地	烃源 条件	储层 条件	圈闭 条件	盖层 条件	资源 丰度	井震 密度	待发现 资源量	勘探 趋势	流体 性质	勘探 成本	开发 难度	财税 政策
滨里海盆地	2	1	1	1	2	1	2	2	1	7	8	7
南里海盆地	4	4	5	5	3	2	1	1	4	3	1	9
阿富汗-塔吉克盆地	5	7	7	7	7	3	9	10	10	6	2	5
阿姆河盆地	1	3	3	2	1	4	3	3	11	2	7	6
北乌斯秋尔特盆地	7	5	2	4	5	5	10	8	5	4	4	4
图尔盖盆地	8	6	6	6	6	6	7	9	2	8	9	8
费尔干纳盆地	6	8	8	8	8	7	11	11	3	1	6	1
曼格什拉克盆地	3	2	4	3	4	8	8	7	9	11	3	10
楚-萨雷苏盆地	9	9	9	9	9	9	4	4	6	9	5	2
斋桑盆地	10	10	10	10	10	10	5	5	7	5	10	3
田尼兹盆地	11	11	11	11	11	11	6	6	8	10	11	11

真实揭示地下油气赋存情况,包含岩性、流体和物性(孔、渗),同时也蕴含着作业成本及商业价值信息。因此,深度挖掘、分析以钻井、油气田为代表的油气勘探大数据能为石油公司的宏观战略规划及决策提供最直观、最有价值的依据^[41-44]。另一方面,研究靶区勘探潜力最现实的体现是油气公司的关注度,随着企业对“大数据”的认识和应用逐步深入,对数据及数据价值的理解和把握也将更加具体,基础资料的利用率也将不断提高,油气勘探研究的效率也将不断提高、勘探研究也将持续聚焦。随着油公司和互联网公司(Amazon和Google等)合作的增多,此类新技术与石油能源传统行业跨界联姻将带来的巨大潜在价值也值得业界期待^[45-46]。

参 考 文 献

- [1] 郭菊娥,王树斌,夏兵. “丝绸之路经济带”能源合作现状及路径研究[J]. 经济纵横, 2015, (3): 88-92.
Guo Ju'e, Wang Shubin, Xia Bing. Current situation and path of energy cooperation in the Silk Road Economic Belt[J]. Longitudinal and horizontal economy, 2015, (3): 88-92.
- [2] 朱伟林,王志欣,李进波,等. 中亚-里海含油气盆地[M]. 北京:科学出版社, 2016: 10-102.
Zhu Weilin, Wang Zhixin, Li Jinbo, et al. Central Asia-Caspian Basin[M]. Beijing: Science Press, 2016: 10-102.
- [3] 王素华,钱祥麟. 中亚与中国西北盆地构造演化及含油气性[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 321-325.
Wang Suhua, Qian Xianglin. Tectonic evolution and oil and gas potential of basins in Central Asia and Northwestern China[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(4): 321-325.
- [4] 赛迪. 2019中国大数据产业发展白皮书[OL]. [2019-03-07]. <http://www.100ec.cn/detail--6498821.html>.
Saidi. White paper on the development of China's big data industry in 2019[OL]. [2019-03-07]. <http://www.100ec.cn/detail--6498821.html>.
- [5] 张科,张义娜. 油气勘探大数据分析预测西非北段重点盆地勘探潜力[C]//2019年油气地球物理学年会议论文集. 南京:中国地球物理学会, 2019: 205-209.
Zhang ke, Zhang Yina. Prediction of exploration potential of key basins by big oil & gas data analysis in NW Africa[C]//Proceedings of the academic annual meeting of oil and gas geophysics in 2019. Nanjing: Chinese Geophysical Society, 2019: 205-209.
- [6] 王喜双,赵邦六,董世泰,等. 油气工业地震勘探大数据面临的挑战及对策[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4): 43-47.
Wang Xishuang, Zhao Bangliu, Dong Shitai, et al. Challenges and strategies for large seismic exploration data of oil and gas industry[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(4): 43-47.
- [7] Feblowitz J. The big deal about big data in upstream oil and gas[J]. Paper & Presentation, 2012, 10(10): 55-64.
- [8] 李军. 致密油藏储量升级潜力不确定性评价方法及应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 755-764.
- [9] 李文魁. 浅析大数据在地质矿产中的应用[J]. 世界有色金属, 2017, (3): 52-53.
Li Wenkui. Analysis of the application of big data in geology and mineral resources[J]. World Nonferrous Metals, 2017, (3): 52-53.
- [10] Seshadri M. Big data Science challenging the oil industry[J]. CTO Global Services, 2013, 11(3): 5-12.
- [11] 吴冲龙,刘刚,张夏林,等. 地质科学大数据及其利用的若干问题探讨[J]. 科学通报, 2016, 61(16): 1797-1807.
Wu Chonglong, Liu Gang, Zhang Xialin, et al. Discussion on geological science big data and its applications[J]. Scientific Bulletin, 2016, 61(16): 1797-1807.
- [12] 崔海福,何贞铭,王宁. 大数据在石油行业中的应用[J]. 石油化工自动化, 2016, 52(2): 43-45.
Cui Haifu, He Zhenming, Wang Ning. Application of big data in petroleum industry[J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2016, 52(2): 43-45.
- [13] Keith R. Holdaway. Harness oil and gas big data with analytics[M]. Hoboken: Wiley, 2014.
- [14] 王登红,刘新星,刘丽君. 地质大数据的特点及其在成矿规律、成矿系列研究中的应用[J]. 矿床地质, 2015, 34(6): 1143-2154.
Wang Denghong, Liu Xinxing, Liu Lijun. Characteristics of big geodata and its application to study of minerogenetic regularity and minerogenetic series[J]. Mineral Deposit, 2015, 34(6): 1143-2154.
- [15] 李朝奎,严雯英,肖克炎,等. 地质大数据分析与应用模式研究[J]. 地质学刊, 2015, 39(3): 352-357.
Li Chaokui, Yan Wenying, Shock Yan, et al. Analysis and application mode of geological big data[J]. Journal of Geology, 2015, 39(3): 352-357.
- [16] 何登发,李德生,童晓光,等. 中国沉积盆地油气立体综合勘探论[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 265-284.
He Dengfa, Li Desheng, Tong Xiaoguang, et al. Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 265-284.
- [17] 郑啸,李景朝,王翔,等. 大数据背景下的国家地质信息服务系统建设[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1316-1323.
Zheng Xiao, Li Jingchao, Wang Xiang, et al. Construction of national geological information service system in the age of big data[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1316-1323.
- [18] 金宗泽. 油气勘探开发大数据分析模式的研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2015.
Jin Zongze. Research on exploration and production big data analysis model[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.
- [19] Shastri, Nimmagadda, Torsten, et al. On big data-guided upstream business research and its knowledge management[J]. Journal of Business Research, 2018, 89(8): 143-158.
- [20] 武明辉,金晓辉,徐旭辉,等. 油气区块勘探程度划分方法研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(4): 18-23.
Wu Minghui, Jin Xiaohui, Xu Xuhui, et al. Research of division

- method for exploration degree of oil and gas blocks[J]. Journal of Xi'an shiyou University (Natural Science Edition), 2015, 30 (4): 18-23.
- [21] 基思·霍尔韦德. 油气大数据分析利用[M]. 北京:石油工业出版社, 2017:6-152.
- Keith Holward. Analysis and utilization of big oil and gas data [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017:6-152.
- [22] 田纳新,殷进垠,陶崇智,等. 中东-中亚地区重点盆地油气地质特征及资源评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 582-591.
- Tian Naxin, Yin Jinyuan, Tao Chongzhi, et al. Petroleum geology and resources assessment of majors basins in Middle East and Central Asia[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 582-591.
- [23] 陈翔,马迅飞,王学军,等. 大数据分析技术及其在地震资料处理中的应用与效果[J]. 信息系统工程, 2018, (11): 98-100.
- Chen Xiang, Ma Xunfei, Wang Xuejun, et al. Large data analysis technology and its application and effect in seismic data processing [J]. Information System Engineering, 2018, (11): 98-100.
- [24] 姜福杰,庞雄奇,姜振学,等. 应用油藏规模序列法预测东营凹陷剩余资源量[J]. 西南石油大学学报, 2008, 2(30): 54-62.
- Jiang Fujie, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, et al. The principle and apply of predicting hydrocarbon resource by reservoir size sequence [J]. Journal of Southwest petroleum university, 2008, 2(30): 54-62.
- [25] 杨克明. 川西坳陷油气资源现状及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2003, 12(4): 322-326.
- Yang Keming. Status of oil & gas resources and prospecting potential in western in Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 12(4): 322-326.
- [26] 张中华,周继涛. 油气藏最小商业储量规模计算方法[J]. 石油与天然气地质, 2015, 2(1): 148-153.
- Zhang Zhonghua, Zhou Jitao. Calculation of the minimum commercial reserves of petroleum reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 2(1): 148-153.
- [27] 平英奇,申方乐,周南,等. 大数据技术在油气地质勘探中的应用分析[J]. 科技资讯, 2019, 17(2): 59-60.
- Pingyingqi, Shenfangle, Zhou Nan, et al. Application analysis of big data technology in oil and gas geological exploration [J]. Science and technology information, 2019, 17 (2): 59-60.
- [28] 湛卓恒,黎茂稳,姜春庆,等. 页岩油的资源潜力及流动性评价方法——以西加拿大盆地泥盆统 Duvernay 页岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 459-468.
- Chen Zhuoheng, Li Maowen, Jiang Chunqing, et al. Shale oil resource potential and its mobility assessment: A case study of Upper Devonian Duvernay shale in Western Canada Sedimentary Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 459-468.
- [29] 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.
- [30] 张长宝,罗东坤,魏春光. 中亚阿姆河盆地天然气成藏控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 766-773.
- Zhang Changbao, Luo Dongkun, Wei Chunguang. Controlling factors of natural gas accumulation in the Amu Darya Basin, Central Asia [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36 (5): 766-773.
- [31] 崔瑾,郑荣才,王强,等. 阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩储层沉积学特征[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 792-804.
- Cui Liang, Zheng Rongcai, Wang Qiang, et al. A sedimentology study of carbonate reservoirs in Carlov-Oxford stage, Amu Darya Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38 (4): 792-804.
- [32] 余一欣,殷进垠,郑俊章,等. 中亚北乌斯丘尔特盆地油气富集规律与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 381-386.
- Yu Yixin, Yin Jinyuan, Zheng Junzhang, et al. Hydrocarbon accumulation rules and exploration potential in the North Ustyurt Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37 (3): 381-386.
- [33] 聂明龙,吴蕾,孙林,等. 阿姆河盆地查尔朱阶地及邻区盐相关断裂特征与油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 803-808.
- Nie Minglong, Wulei, Sun Lin, et al. Salt-related fault characteristics and their petroleum geological significance of Zarzhu terrace and its adjacent areas, the Amu Darya Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34 (6): 803-808.
- [34] 李智鹏,许京国,焦涛,等. 如何运用大数据技术优化石油上游产业[J]. 石油工业计算机应用, 2015(1): 8-12, 3.
- Li Zhipeng, Xu Jingguo, Jiao Tao, et al. How to use big data technology to optimize the upstream oil industry [J]. Computer Applications of Petroleum, 2015 (1): 8-12, 3.
- [35] 林茂,塔依尔·伊布拉音,许涛,等. 大数据时代勘探云建设模式探索[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(5): 26-31.
- Lin Mao, Tayer Ibrain, Xu Tao, et al. Exploration of cloud construction model in the era of big data [J]. Application of Computer Systems, 2015, 24 (5): 26-31.
- [36] 张进锋,张俊,李华松,等. 大数据时代的专业型数据库建设与应用[J]. 信息技术与信息化, 2016, (6): 32-37.
- Zhang Jinduo, Zhang Jun, Li Huasong, et al. The construction and application of professional databases in big data era [J]. Information Technology and Informatization, 2016, (6): 32-37.
- [37] 王晶晶,施冬,王文惠. 油气资源数据管理及应用系统开发[J]. 中国管理信息化, 2017, 20(3): 120-122.
- Wang Jingjing, Shidong, Wang Wenhui. Oil and gas resource data management and application system development [J]. China Management Informatization, 2017, 20 (3): 120-122.
- [38] 檀朝东,项勇,赵昕铭,等. 基于大数据的油气集输系统生产能耗时序预测模型[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 158-164.
- Tan Chaodong, Xiang Yong, Zhao Xinming, et al. Energy consumption prediction and application in oil and gas gathering and transferring system based on large data [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37 (S2): 158-164.
- [39] 凡玉梅,赵庆飞,张英利. 相似油田定量筛选的方法及应用[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 766-771.
- Fan Yumei, Zhao Qingfei, Zhang Yingli. Quantitative screening methods of similar oil fields and their application [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 766-771.
- [40] 卢欢,牛成民,李慧勇,等. 变质岩潜山油气藏储层特征及评价[J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 28-33.
- Lu Huan, Niu Chengmin, Li Huiyong, et al. Reservoir feature and

- evaluation of metamorphic buried-hill reservoir [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(1): 28-33.
- [41] 吴钧, 于晓红, 王权, 等. 松辽盆地古龙页岩油勘探开发全息智能生态系统设计与开发[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(5): 181-190.
- Wu Jun, Yu Xiaohong, Wang Quan, et al. Design and development of holographic intelligent ecosystem for exploration and development of Gulong shale oil in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 181-190.
- [42] 姜立富, 徐中波, 张章, 等. 基于大数据分析的海上多层油田精细开发实践[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(2): 44-49.
- Jiang Lifu, Xu Zhongbo, Zhang Zhang, et al. Fine development practice of offshore multi-layer oil field based on big data analysis [J]. *Petroleum Geology And Engineering*, 2021, 35(2): 44-49.
- [43] 洪太元, 程喆, 许华明, 等. 四川盆地大中型气田形成的主控因素及勘探对策[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 406-414.
- Hong Taiyuan, Cheng Zhe, Xu Huaming, et al. Controlling factors and countermeasures for exploring large and medium-sized gas fields in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 406-414.
- [44] 张科, 赵汝敏, 齐凯, 等. 海外低勘探区预探井深度预测难点及对策[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(2): 57-60.
- Zhang Ke, Zhao Rumin, Qi Kai, et al. The difficulties and countermeasures of depth prediction for exploratory well in oversea low exploration degree area [J]. *Special oil and gas reservoirs*, 2014, 21(2): 57-60.
- [45] 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 272-282.
- Tian Jun, Wang Qinghua, Yang Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 272-282.
- [46] 胡文革. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 1-10.
- Hu Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oil field [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 1-10.

(编辑 张玉银)

(上接第1439页)

- [11] 蔺鹏, 吴胜和, 张佳佳, 等. 尼日尔三角洲盆地陆坡逆冲构造区海底扇分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 1073-1086.
- Lin Peng, Wu Shenghe, Zhang Jiajia, et al. Distribution of submarine fans in the thrust fault zone of continental slope, Niger Delta Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 1073-1086.
- [12] 苏玉山, 王桐, 李程, 等. 尼日尔三角洲的沉积-构造特征[J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1238-1256.
- Su Yushan, Wang Tong, Li Cheng, et al. The sedimentary and tectonic features of the Niger Delta [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1238-1256.
- [13] 杨金秀, 宋朋霖, 何巍巍, 等. 尼日尔三角洲前缘挤压带的古今BSRs分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(6): 1295-1307.
- Yang Jinxiu, Song Penglin, He Weiwei, et al. Distribution pattern of paleo and present BSRs in the toe-thrust belt of Niger Delta front [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(6): 1295-1307.
- [14] 李丹, 逢林安, 康洪全, 等. 重力滑脱构造差异性及其对油气成藏影响分析: 以下刚果—刚果扇、尼日尔三角洲盆地对比分析为例[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(1): 100-109.
- Li Dan, Pang Lin'an, Kang Hongquan, et al. Difference analysis of gravity decollement structures and its effect on hydrocarbon accumulation: By comparing analysis of Lower Congo-Congo Fan Basin and Niger Delta Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(1): 100-109.
- [15] 苏玉山, 陈占坤, 李曰俊, 等. 南大西洋东岸尼日尔三角洲大型重力滑动构造东南缘的断裂和泥构造[J]. *地质科学*, 2020, 55(2): 615-625.
- Su Yushan, Chen Zhankun, Li Yuejun, et al. The faults and shale tectonics in the southeastern flank of the Niger Delta large scale gravity gliding tectonics [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(2): 615-625.
- [16] Rowan M G. A systematic technique for the sequential restoration of salt structures [J]. *Tectonophysics*, 1993, 228 (3-4): 331-348.
- [17] 余一欣, 汤良杰, 殷进垠, 等. 应用平衡剖面技术分析库车坳陷盐构造运动学特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 378-382.
- Yu Yixin, Tang Liangjie, Yin Jinyin, et al. Analysis on kinematic characteristics of salt structures in Kuqa Depression by using balanced section technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 378-382.
- [18] Hudec M R, Jackson M P A. Structural segmentation, inversion, and salt tectonics on a passive margin: Evolution of the Inner Kwanza Basin, Angola [J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114 (10): 1222-1244.
- [19] Jackson M P A, Hudec M R, Jennette D C, et al. Evolution of the Cretaceous Astrid thrust belt in the ultradeep-water Lower Congo Basin, Gabon [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(4): 487-511.
- [20] Yu Yixin, Zhou Xinhui, Tang Liangjie, et al. Salt structures in the Laizhouwan depression, offshore Bohai Bay basin, eastern China: New insights from 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1600-1607.
- [21] Koyi H, Petersen K. Influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10(4): 82-93.
- [22] 余一欣, 汤良杰, 杨文静, 等. 库车前陆褶皱—冲断带前缘盐构造分段差异变形特征[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 166-173.
- Yu Yixin, Tang Liangjie, Yang Wenjing, et al. Structural segmentation of salt structures in the frontal ranges of Kuqa foreland fold and thrust belt, northern Tarim basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 166-173.

(编辑 卢雪梅)