

引用格式:李友强,赵乐强,高磊,等.济阳拗陷常规探明石油地质储量增长规律及未来10年增储趋势[J].油气地质与采收率,2024,31(4):125-134.

LI Youqiang, ZHAO Leqiang, GAO Lei, et al. Growth law of conventional proven petroleum-in-place and trend of reserve increase in next 10 years in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 125-134.

济阳拗陷常规探明石油地质储量增长规律及 未来10年增储趋势

李友强¹, 赵乐强¹, 高磊¹, 尚冰¹, 方旭庆², 李继岩¹, 韩丽¹

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015;

2. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东 东营 257000)

摘要: 济阳拗陷常规石油领域一直是胜利油田勘探开发主战场, 至今已经历了60余年勘探开发, 整体进入成熟勘探阶段, 但每年仍具有较大的增储规模, 这与传统认为的含油气盆地探明石油地质储量增长趋势不一致。济阳拗陷常规探明石油地质储量增长规律如何? 未来能否继续保持较强的增储态势? 其主要的增储领域有哪些? 这些事关胜利油田勘探决策的重要问题亟需研究明确。通过梳理济阳拗陷勘探历程, 分析其地质特征、资源条件、探井工作量投入、理论技术、资源序列等勘探要素, 揭示济阳拗陷常规石油勘探发现规律, 运用“帚状”模型预测法、资源探明速率法等方法预测常规探明石油地质储量增长趋势, 结合主要增储领域剖析, 明确济阳拗陷常规石油未来增储规模及有利方向。结果表明: 济阳拗陷复杂的地质特征、较为雄厚的剩余资源基础决定其勘探对象的多样性、勘探过程的曲折性和勘探历史的长期性; 在保证相对稳定的探井工作量投入, 持续开展勘探理论及关键技术的攻关, 保持相对合理的资源序列等条件下, 济阳拗陷常规石油仍能保持较长时期的稳定增储; 在当前经济技术条件及勘探投入相对保障的情况下, 未来10年济阳拗陷仍可贡献常规探明石油地质储量 2.5×10^8 t左右; 指出济阳拗陷新近系河道砂岩油藏、沙四段上亚段一沙三段岩性油气藏等成熟领域仍是稳定增储的压舱石, 孔店组一沙四段下亚段深层领域是重要的规模增储领域, 前古近系潜山领域是富集高产的有利方向。今后, 应紧密跟踪非常规与新能源领域的勘探进展, 对济阳拗陷常规探明石油地质储量增长规律及增储趋势等研究结果进行不断地完善和修正, 以期更符合油田勘探发展态势, 指导油田勘探决策。

关键词: 常规石油; 探明石油地质储量; 增长规律; “帚状”模型; 增储趋势; 增储领域; 济阳拗陷

文章编号: 1009-9603(2024)04-0125-10

DOI: 10.13673/j.pgre.202405008

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Growth law of conventional proven petroleum-in-place and trend of reserve increase in next 10 years in Jiyang Depression

LI Youqiang¹, ZHAO Leqiang¹, GAO Lei¹, SHANG Bing¹, FANG Xuqing², LI Jiyan¹, HAN Li¹

(1. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2. Oil and Gas Exploration and Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: The conventional petroleum field in Jiyang Depression has always been the main battlefield of exploration and development in Shengli Oilfield. It has experienced more than 60 years of exploration and development and entered the mature exploration stage as a whole, but it still has a relatively large scale of reserve increase every year, which is not consistent with the traditional growth trend of proven petroleum-in-place in oil and gas-bearing basins. The critical issues concerning the exploration decisions of

收稿日期: 2024-05-09。

作者简介: 李友强(1979—), 男, 湖北南漳人, 高级工程师, 硕士, 从事勘探战略及石油地质综合研究工作。E-mail: lyq_0812@sina.com。

基金项目: 胜利油田分公司课题“高质量勘探指标体系及提效策略研究”(YJQ2404)。

Shengli Oilfield need to be clarified urgently, including the growth law of the conventional proven petroleum-in-place in Jiyang Depression, the strong trend of reserve increase, and the main fields for reserve increase. By analyzing the exploration process of Jiyang Depression, the geological characteristics, resource conditions, exploration investment, theory and technology, resource sequence, and other exploration elements were analyzed, revealing the exploration discovery law of conventional petroleum in Jiyang Depression. The broom-shaped model prediction method and proven rate method of resource were used to predict the growth trend of conventional proven petroleum-in-place. The scale and favorable direction of future reserve increase of conventional petroleum in Jiyang Depression were clarified by analyzing the main fields with reserve increase. The results show that the complex geological characteristics of Jiyang Depression and the relatively abundant remaining resources determine the diversity of exploration objects, the tortuosity of the exploration process, and the long-term nature of exploration history. The conventional petroleum in Jiyang Depression can still maintain a long period of stable reserve increase under conditions of ensuring a relatively stable exploration investment, continuing to innovate the exploration theory and key technologies, and maintaining a relatively reasonable resource sequence. Jiyang Depression can still produce about 2.5×10^8 t of conventional proven petroleum-in-place in the next 10 years under the current economic and technical conditions and the relative guarantee of exploration investment. It is pointed out that the Neogene river sandstone reservoir, lithologic oil and gas reservoirs in the Upper Submember of the 4th Member of the Eocene Shahejie Formation (E_{34}^U)-the Lower 3rd Member of the Eocene Shahejie Formation (E_{33}^L), and other mature fields are still the ballast stones for stable reserve increase. Kongdian Formation-the deep field of the Lower Submember of the 4th Member of the Eocene Shahejie Formation (E_{34}^L) is an essential field for large-scale reserve increase, and the pre-Paleogene buried hill is a favorable direction for the petroleum enrichment and high yield. In the future, the exploration progress in the unconventional and new energy fields should be closely tracked, and the research results of the growth law and the reserve increase trend of conventional proven petroleum-in-place in Jiyang Depression should be constantly improved and revised to make them more conform to the development trend of oilfield exploration and guide the oilfield exploration decisions.

Key words: conventional petroleum; proven petroleum-in-place; growth law; broom-shaped model; reserve increase trend; field with reserve increase; Jiyang Depression

济阳拗陷是胜利油田的发祥地。自1961年华8井获得工业油流以来,已完钻各类探井7 300余口,累计探明石油地质储量约为 55×10^8 t,平均探井密度达0.23口/km²,探明程度为50%以上,整体达到高勘探程度阶段^[1-2]。

济阳拗陷常规石油是效益增储的主要领域,其累计探明石油地质储量占胜利油田探明石油地质储量总量的90%以上。2013—2018年,勘探程度高、油价断崖下跌、中国石化勘探与储量要求提高,导致济阳拗陷年度新增常规探明石油地质储量大幅下降^[3];2018年以来胜利油田积极响应“加大国内油气勘探开发力度”号召,济阳拗陷勘探研究和评价力度再次加大,常规探明石油地质储量再次呈现上升态势,并在已处于成熟勘探阶段的中浅层、勘探程度较低的深层、外围低勘探程度的小洼陷等领域取得新的突破或发现。

世界大型含油气盆地勘探实践表明,含油气盆地在勘探发现后,探明石油地质储量总会呈现早期跳跃、中前期快速增长、中期稳定增长、后期稳中下降的一般规律。济阳拗陷勘探发现特征总体相似,但勘探中后期与之存在一定的差异,其规律是什么样的,长期持续增储的因素有哪些,未来探明石油地质储量增长趋势及规模如何,成为勘探工作者亟

需解决的问题。

笔者系统分析济阳拗陷勘探发现史、科技进步史、储量增长史,总结济阳拗陷勘探发现规律及制约勘探增储的主控因素,运用多种方法预测济阳拗陷未来10年探明石油地质储量增长趋势及主要增储领域,为济阳拗陷勘探决策提供依据,也为同类型盆地勘探提供有益借鉴。

1 区域地质概况

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部,面积约为 2.9×10^4 km²,其经历了前中生代地台基底、中生代裂陷、新生界古近系断陷、新近系拗陷等多期成盆演化,是典型的中新生代陆相断陷盆地。盆地内断裂发育、构造破碎,整体呈现多凹共生、凹凸相间、多期叠合的独特构造格局,可划分为惠民、东营、沾化、车镇等4个主要凹陷及滩海地区^[4]。自下而上已发现前古近系太古宇—中生界等4个基底层系、古近系沙四段下亚段—东营组等9个断陷层系、新近系馆陶组—明化镇组等2个拗陷层系,共15个含油气层系。其中沙四段上亚段—明化镇组埋藏相对较浅,是主力烃源岩发育层系,资源最为丰富,发现储量最多,勘探程度最高,缓坡带滩坝砂岩、陡坡

带砂砾岩、洼陷带浊积岩、披覆带河道砂、断裂带复杂断块等是当前主要的增储领域;孔店组一沙四段下亚段、前古近系处于主力烃源岩之下,埋藏一般较深,认识及勘探程度较低,是重要的勘探方向。

2 勘探发现规律

2.1 地质特征的复杂性决定了勘探发现的曲折性和长期性

受认识、经济、技术条件制约,一个含油气盆地勘探总是遵循从大到小、从易到难、从浅到深、从简单到复杂的原则进行。济阳拗陷经历了多期成盆演化,形成多套构造层,盆地内断裂发育、构造破碎、沉积多样、油藏多类(表1)、源岩多套、多期复式运聚、油气差异富集、油藏类型有序分布。这种多样性、复杂性决定了济阳拗陷勘探领域的多样性、勘探目标的复杂性,蕴含巨大勘探潜力的同时,也带来较大的勘探难度,决定了勘探发现的曲折性和长期性。回顾济阳拗陷油气勘探,大概经历了1961—1982年背斜构造油藏勘探、1983—1995年复式油气聚集带勘探、1996—2020年隐蔽油气藏勘

探、2021年以来常规-非常规并重勘探,在每一个时期,油气勘探总是围绕一种类型展开,在其勘探、探明达到一定程度后,会寻找另一种勘探领域来接替,这种接力式勘探使得济阳拗陷探明石油地质储量始终保持较稳定的增长^[5-7](图1)。当前,济阳拗陷不同勘探领域认识及勘探程度仍存在巨大的差异性,即使已经处于成熟勘探阶段的沙四段上亚段及以上层系,纵横向仍存在大量的储量“空白区”,而沙四段下亚段及以下深部层系勘探认识程度普遍较低,预示着济阳拗陷仍然具有较长的勘探寿命和较大的勘探空间。

2.2 资源认识的进步及较大的资源规模是勘探发现的基础

雄厚的资源基础是实现勘探可持续发展的必要条件。一个含油气盆地资源是客观存在的,但是对其资源的认识和评价则是随着勘探认识的不断深入、勘探程度的不断提高而不断变化的^[8]。因此资源评价的结果所代表的是当前认识能力和技术条件下对所勘探领域资源的相对客观认识。随着勘探持续推进,认识不断深入、技术不断进步,资源认识将会不断接近于客观的物质质量。济阳拗陷先

表1 济阳拗陷不同构造层地质特征
Table1 Geological characteristics of different structural layers in Jiyang Depression

构造层	层系	发育烃源岩	构造带	主要油藏类型	主要勘探领域	勘探程度
新近系拗陷层	馆陶组—明化镇组		潜山披覆带	背斜构造、微幅构造、地层	河道砂	高
古近系断陷萎缩层	沙一段、东营组	沙一段		构造、地层	河流、三角洲、生物灰岩、页岩油	高
古近系断陷鼎盛层	沙四段上亚段—沙二段	沙四段上亚段、沙三段下亚段	陡坡带、洼陷带、缓坡带、凸起带、中央背斜带	岩性、构造、地层	滩坝砂、浊积岩、砂砾岩、三角洲、页岩油	高
古近系断陷初始层	孔店组—沙四段下亚段	孔二段、沙四段下亚段		构造、岩性	深层砂砾岩、构造	低
前古近系基底层	中生界、上古生界、下古生界、太古宇	石炭系—二叠系	潜山带	潜山、岩性	潜山、煤层气	低

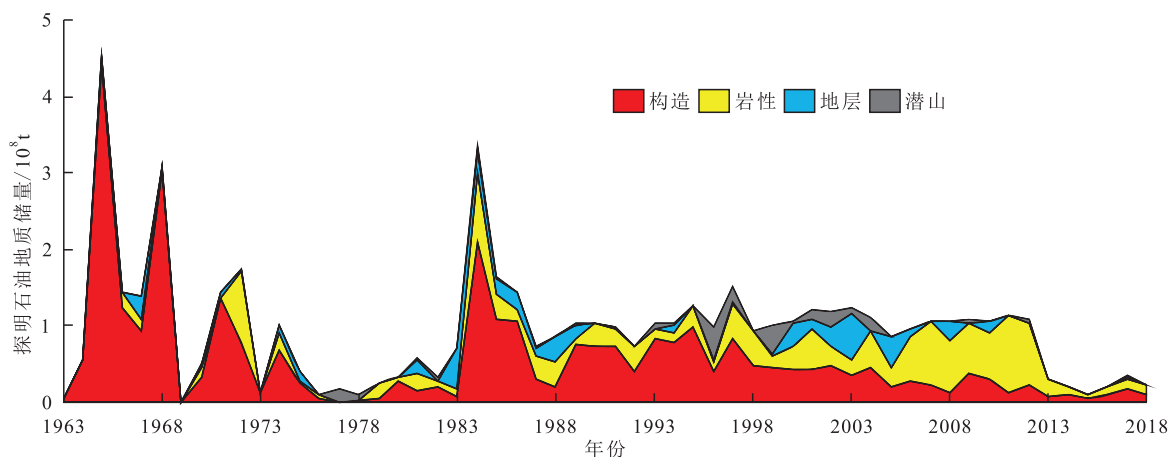


图1 济阳拗陷年度探明石油地质储量与油藏类型构成变化历程

Fig.1 Changes in annual proven petroleum-in-place and composition of reservoir types in Jiyang Depression

后经历了7次资源评价,石油原地资源量呈逐渐上升的趋势,资源认识的深入和雄厚的资源基础为济阳拗陷勘探提供了坚实的物质基础。据“十三五”资源评价表明,济阳拗陷常规石油原地资源量为 $100 \times 10^8 \text{t}$ 以上,剩余资源量超过 $46 \times 10^8 \text{t}$ (图2)。雄厚的剩余资源基础预示着济阳拗陷仍有较大的增储空间。

2.3 相对稳定的探井工作量投入是储量稳定增长和勘探可持续发展的前提

济阳拗陷独特的构造格局决定了其沉积充填的多样性、储层发育及分布的复杂性。勘探实践表明,济阳拗陷不同层系、主要沉积体系、储层发育及分布特征存在明显的差异,同一凹陷不同构造带、甚至同一构造带不同部位的储层特征也存在显著的不同,这种复杂性决定了应用单一技术手段,比如地震勘探技术等难以有效刻画储层的空间展布,更不用说准确预测油气的纵横向展布。因此探井工作量投入是实现济阳拗陷勘探发现和储量上报的最直接的,也是最主要的途径。勘探实践表明,探井工作量投入直接影响济阳拗陷新增探明石油地质储量规模,二者基本成正比关系。1983—2012年,济阳拗陷探井工作量投入年均147口,年均新增

探明石油地质储量为 $1 \times 10^8 \text{t/a}$,2013年后探井工作量投入显著下降,造成新增探明石油地质储量规模大幅减少(图3)。值得说明的是,探井工作量投入与储量产出具有一定的滞后性,即每年完钻的探井中,部分探井是为了实现当年的探明石油地质储量申报,还有部分探井是为未来的储量任务申报作准备。济阳拗陷完钻探井利用率统计(图4)表明,当年完钻当年上报储量的利用率平均为11.8%,3年利用率可达25.2%。这里的探井被利用,可能是为探明石油地质储量申报增加评价资料,也有可能是为预探发现后申报控制、预测等低级别储量,部分探井还会成为加深对某地区、某领域油藏认识的重要依据。从发展的角度看,探井工作量投入既是探明石油地质储量获得过程中必不可少的资料,也是对探区及探区内某区带、某领域、某层系的石油地质规律研究和印证的直接依据,进而为探区勘探的可持续发展提供支撑。因此,相对稳定的探井工作量投入是储量稳定增长和勘探可持续发展的前提。

2.4 理论创新和技术进步是推动勘探发展的源泉

济阳拗陷历经60余年勘探开发,先后形成了复式油气聚集区带理论(1984年)、隐蔽油气藏勘探理论及配套技术(2003年)、断陷盆地精细勘探理论及勘探技术(2020年),每一次的理论创新和技术进步都极大促进了济阳拗陷勘探新发现、新突破和探明石油地质储量的大幅增长(图1)^[9-10]。2021年页岩油勘探突破,页岩油逐渐成为勘探的重要接替领域,勘探进入“常-非”并重的新阶段。尽管常规石油勘探程度整体较高,但仍然是效益增储的重要领域,且勘探仍存在较大的不均衡性^[11]。勘探区域上,老油区勘探程度高,外围区域的认识和勘探程度低;勘探纵向层系上,中浅层勘探程度高,深层勘探程度低,勘探方向仍然不明确;勘探类型上,碎屑岩勘探理论技术相对成熟,但深层、变质岩、火山

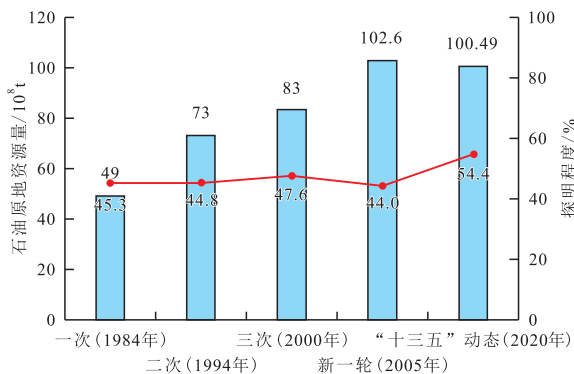


图2 济阳拗陷常规石油历次资源评价
Fig.2 Evaluation of conventional petroleum resources in Jiyang Depression over years

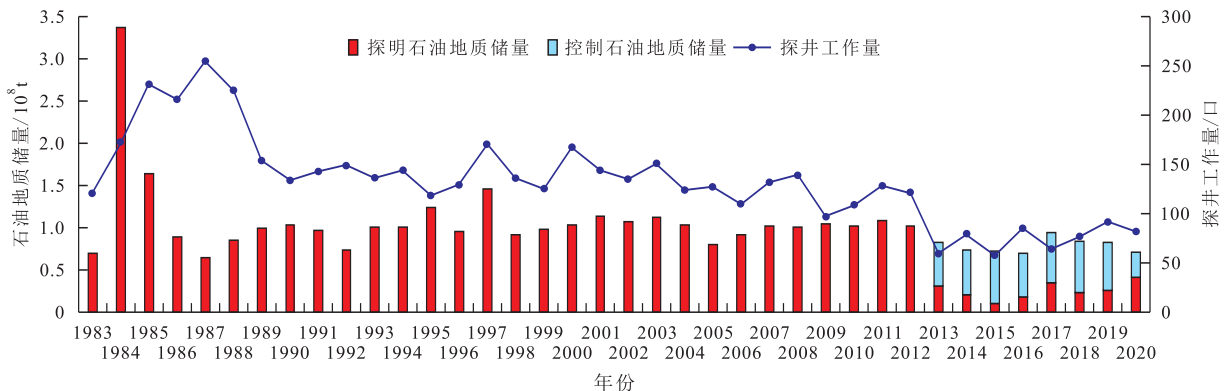


图3 济阳拗陷1983—2020年储量与探井投入数量变化趋势
Fig.3 Variation trend of reserves and exploration investment in Jiyang Depression from 1983 to 2020

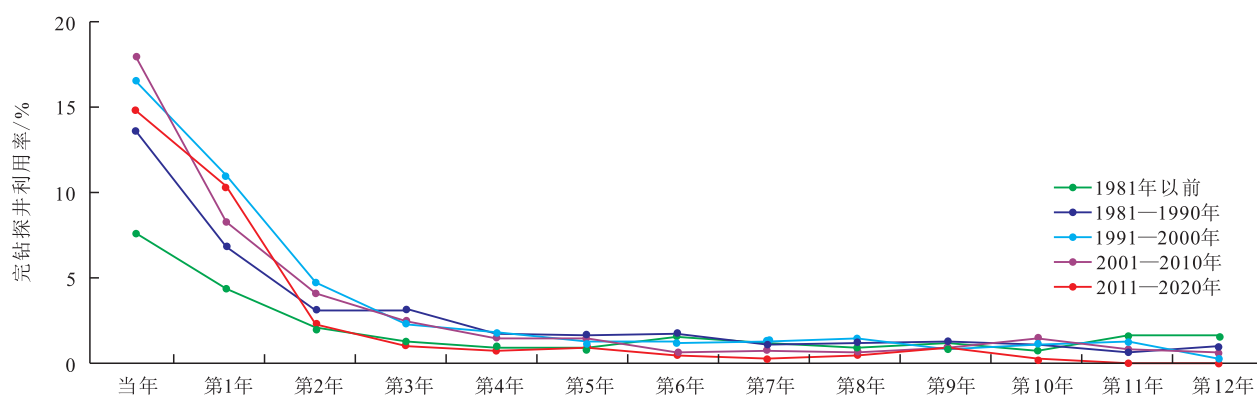


图4 济阳拗陷历年完钻探井利用率变化曲线

Fig.4 Variation curve of utilization rate of completed exploration wells in Jiyang Depression over years

岩、碳酸盐岩及潜山内幕等勘探理论技术仍存在不适应性。必须以问题为导向超前谋划、超前攻关,创新理论、配套技术,从而指导勘探发现、支撑可持续发展。

2.5 合理资源序列是实现勘探可持续发展的保障

资源序列指下年度新增探明石油地质储量与本年度末保有控制石油地质储量、预测石油地质储量、圈闭资源量的相应比例。资源序列合理性是反映勘探成效好坏与能否可持续发展的重要指标。应用资源警戒序列、可持续资源序列来表征资源序列的合理性。资源警戒序列为按照年度新增探明、控制、预测石油地质储量及圈闭资源量之间的历史平均升级率(升级为高级别储量数与升级的低级别储量数的比值)进行测算得到的序列;可持续资源序列是在历史平均升级率基础上,考虑控制石油地质储量3年内、预测石油地质储量5年内的升级核减率(指核减的控制、预测等低级别储量与升级为探明或控制等高级别储量数的比值)后测算得到的序列。当资源序列处于资源警戒序列之下时,表示资源序列不合理,当其处于可持续资源序列之上时,表示资源储备充足且品质好,可持续性强。初步研究表明,常规领域资源警戒序列为1:1.2:1.6:2.24,可持续资源序列为1:1.8:3.4:6.7,2023年济阳拗陷资源序列为1:1.2:1.6:21.8,可见,资源序列处于可持续资源序列与资源警戒序列之间,表示其较为合理。

综上所述,地质特征的复杂性给勘探带来难度的同时,也蕴含着丰富的勘探领域和较大的资源潜力,决定了济阳拗陷勘探的长期性;相对稳定的探井工作量投入及持续的勘探理论技术攻关,促进了对盆地资源认识的不断深化,保持了相对合理的资源序列,这些因素的综合影响使得济阳拗陷仍然能够保持探明石油地质储量的较高增长。

3 探明石油地质储量增长趋势预测

探明石油地质储量增长趋势预测方法有很多,各有优劣。本文主要运用“帚状”模型预测法和资源探明速率法对济阳拗陷常规探明石油地质储量增长趋势进行预测,未来10年济阳拗陷常规石油仍然具有较大的增储能力。

3.1 “帚状”模型预测法

一个盆地已发现油藏的分布有其特殊的数学形态。含油气盆地某一年年底已发现的油藏按储量规模大小排序,可绘制横坐标为油藏序号、纵坐标为油藏规模的该年度油藏规模序列曲线。随着时间的延伸,每年累积的油藏个数不断增加,年度油藏规模序列曲线依次向外甩开,形似“扫帚”,称之为“帚状”模型^[12]。“帚状”模型方程表达式为:

$$q_m = 10^{\left[1 - \ln\left(\frac{1000}{m^2(b \times c)}\right) \times 5\right]} \quad (1)$$

$$a = 21.528 \times \exp(-4.664 \times \alpha) \times \exp(0.122 \times \beta) \times \gamma^{0.02} \quad (2)$$

$$\ln b = 2.896 \times \exp(-1.946 \times \alpha) \times \exp(-2.046 \times \beta) \times \gamma^{0.504} \quad (3)$$

$$\ln c = 1.454 \times \exp(-1.132 \times \alpha) \times \exp(-0.679 \times \beta) \times \gamma^{0.247} \quad (4)$$

式中: q_m 为油藏序号所对应的油藏探明石油地质储量规模值, 10^4 t; m 为油藏序号,取值为1、2、3、...、 n ; a 、 b 、 c 为关于探井密度、探明程度、累积油藏个数的方程拟合系数; α 为规模序列曲线对应的年度盆地探井密度, $\text{口}/\text{km}^2$; β 为规模序列曲线对应的年度资源探明程度; γ 为规模序列曲线对应的年度累积油藏个数,个。

在勘探过程中,随着勘探时间的推进,含油气盆地累积油藏个数不断增多,探明石油地质储量逐

步增长,“帚状”油藏规模序列曲线表现为往下、往右推进(图5),即 a 、 b 不断减小, c 不断增大。利用多元回归法分别建立 a 、 b 、 c 与探井密度、探明程度、累积油藏个数的数学关系。按照“帚状”模型计算出未来每年油藏探明石油地质储量规模序列与前一年数据的差值,即为所预测年度可能探明的油藏个数和储量规模。同时,在未来储量规模相对明确的预期下,亦可推算出相应的探井工作量投入。

应用“帚状”模型对济阳拗陷2024—2033年主要构造单元常规探明石油地质储量增长规模进行了预测。由图6可见,在当前经济技术条件及探井工作量投入相对保障的情况下,济阳拗陷探明石油地质储量仍能保证相对较大的规模,但整体上会呈一种稳步下降趋势。预计济阳拗陷未来10年常规探明石油地质储量有望新增 $2.58 \times 10^8 \text{t}$ 左右。

3.2 资源探明速率法

一个含油气盆地在勘探发现后,随着对盆地地质特征认识的不断成熟、勘探技术的配套完善,其探明石油地质储量发现将会呈现先波动上升到稳定增储最后缓慢下降的过程。从济阳拗陷探明速率变化趋势(图7)可以看出,探明石油地质储量经历了早期跳跃式增长、中期长期高速稳定增长、目

前低速相对稳定增长,随着常规石油勘探程度越来越高,探明石油地质储量增长将逐渐呈现稳中略降趋势。预计在当前经济技术条件及探井工作量投入相对保障的情况下,未来10年资源探明速率为 $0.24\% \sim 0.27\%$,济阳拗陷探明石油地质储量仍将达到 $2.5 \times 10^8 \text{t}$ 左右。

4 常规石油主要增储领域

按照济阳拗陷不同层系的构造、沉积、储层及勘探程度的差异性,可将其常规石油主要增储领域划分为沙四段上亚段及以上中浅层成熟领域、孔店组—沙四段下亚段深层领域、前古近系潜山领域。

4.1 中浅层成熟领域

截至2023年底,济阳拗陷沙四段上亚段及以上中浅层成熟领域累计探明石油地质储量为 $51.42 \times 10^8 \text{t}$,占济阳拗陷探明石油地质储量总量的 95.8% ,探明程度达到 55% 以上,探井密度达到 $0.23 \text{口}/\text{km}^2$ 以上,且已形成了相对成熟的勘探理论及配套技术。但控制、预测石油地质储量仍有近 $10 \times 10^8 \text{t}$,是近-中期稳定增储的现实阵地;储量间或外围存在大量的储量“空白区”,大多分布于构造转换带、大型沉积体系的结合部、盆缘地层的超剥带,存在大量的探井“出油点”,是勘探的潜力区^[13-14]。这些地区的构造、沉积、储层、圈闭等成藏条件复杂,勘探目标复杂隐蔽,仍是勘探攻关研究区。

“十三五”以来胜利油田创新开展勘探层单元精细勘探,形成了以勘探层单元划分评价优选为基础,以复杂断块类、地层类、岩性类等3大类6种油气藏(断块油气藏、地层油气藏及河道砂岩性油气藏、滩坝砂岩性油气藏、浊积岩岩性油气藏、砂砾岩岩性油气藏)精细研究为核心,以勘探目标评价及部署优化为目的的一套精细研究与评价部署全过

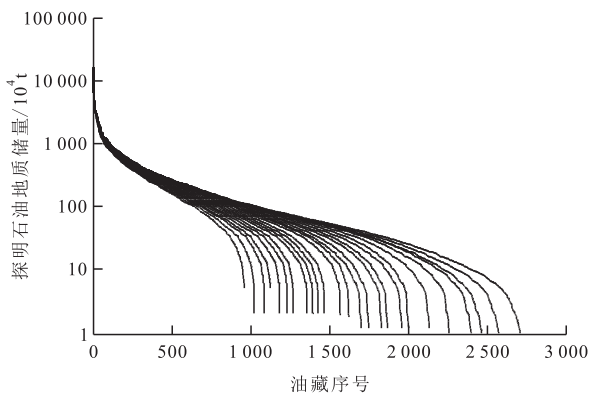


图5 济阳拗陷油藏规模序列曲线

Fig.5 Scale sequence curve of reservoir in Jiyang Depression

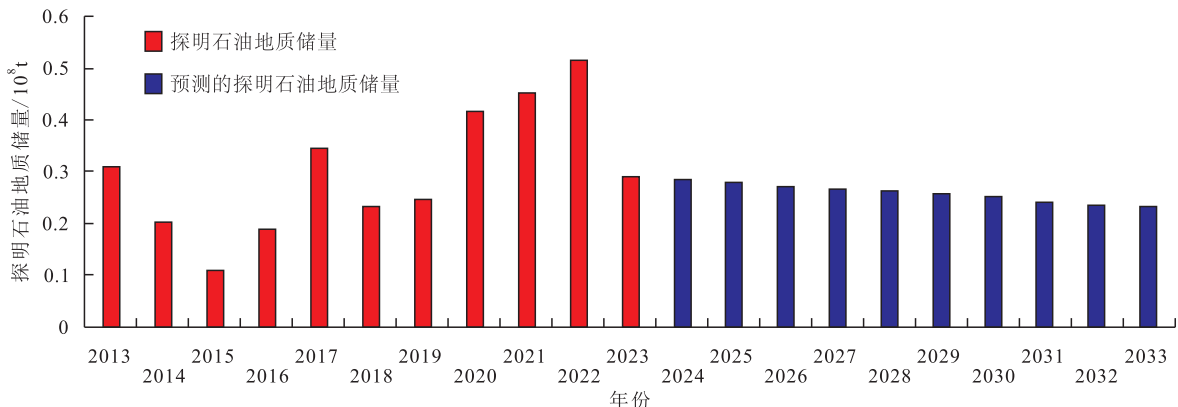


图6 济阳拗陷探明石油地质储量“帚状”模型预测结果

Fig.6 Prediction results of broom-shaped model for proven petroleum-in-place in Jiyang Depression

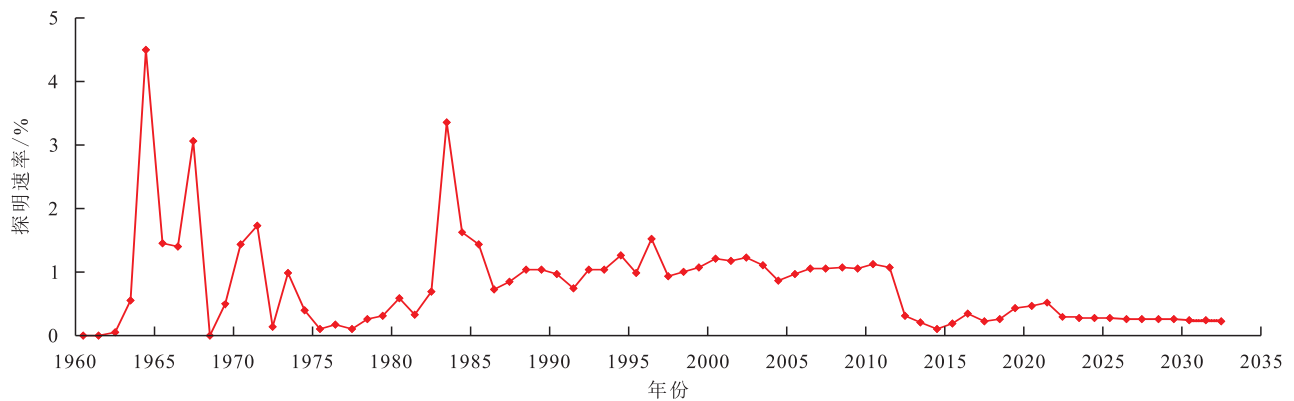


图7 资源探明速率法预测结果

Fig.7 Prediction results of proven rate method of resource

程质量控制体系,指导济阳拗陷中浅层成熟领域勘探持续取得进展。在埕岛凸起馆陶组河道砂、利津地区沙四段上亚段滩坝砂、临盘地区沙二段和沙四段复杂断块、盐家-永安地区沙四段砂砾岩、埕岛凸起东坡东营组浊积岩、埕岛地区新近系河道砂等取得多个商业发现,累计新增探明石油地质储量 $2.2 \times 10^8 \text{t}$,占“十三五”以来济阳拗陷新增探明石油地质储量总量的83%,中浅层成熟领域仍是稳定增储的重要领域。开展勘探单元评价,优选出94个中浅层成熟领域千万吨级以上的勘探单元,作为未来增储的重要方向。

随着勘探的持续推进,中浅层成熟领域勘探程度越来越高,勘探目标更加复杂隐蔽,对勘探技术先进性和研究范式智能化提出了更高要求。因此,要加强高品质地震资料的采集、处理、解释,持续深化成熟领域油气成藏要素研究及精细勘探关键技术攻关,不断提升复杂隐蔽目标识别能力^[15];充分利用丰富的勘探资料及信息化、智能化技术开展透明盆地建设,实现中浅层成熟领域油气成藏特征的可视化,降低勘探盲点,不断提高勘探成效。

4.2 深层领域

孔店组一沙四段下亚段是济阳拗陷断陷初始期的沉积产物,传统认为其位于主力烃源岩之下,且埋藏深、储层物性差,勘探潜力有限,探井揭示程度及石油地质认识程度均较低^[16]。随着济阳拗陷沙四段上亚段及以上中浅层成熟领域勘探程度的不断提高,胜利油田有意加大了孔店组一沙四段下亚段深层领域的勘探力度,发现了以沙四段下亚段、孔二段烃源岩为油源的新的含油气系统^[17-20]。

东营凹陷北带东段部署钻探的FSX101井在沙四段下亚段4 227.7~4 254.5 m(垂深)试油获得工业油气流;东营凹陷中央隆起带部署钻探的LSX2井在孔二段4 182~4 190 m泥岩段试油获得低产油

气流;2022年以来博兴洼陷部署钻探的GX86井在孔一段获得高产油流,GX862井在孔一段钻遇大套油气显示,油气显示段垂向距离沙四段上亚段主力烃源岩约900 m,侧向与主力烃源岩难以有效对接,分析可能发育孔二段烃源岩。钻探证实东营凹陷孔店组一沙四段下亚段具有良好的油气成藏条件,初步估算其圈闭资源量为 $5 500 \times 10^4 \text{t}$,展示了孔店组一沙四段下亚段深层领域良好的勘探前景^[21]。

然而,孔店组一沙四段下亚段原型盆地分布、有效储层发育及展布、油气成藏及富集认识仍是制约其勘探的关键问题,需系统开展其区域构造演化及原型盆地恢复、沉积体系发育及分布、有效储层评价及预测、油气成藏及富集规律等研究,为孔店组一沙四段下亚段深层领域勘探提供理论指导和技术支撑。

4.3 潜山领域

前古近系是济阳拗陷基底层系,主要包括太古宇、下古生界、上古生界、中生界4套含油气层系,经历多期构造演化,主要发育多样性潜山圈闭^[22-23]。截至2023年底,已累计探明石油地质储量 $2.5 \times 10^8 \text{t}$ 以上,百吨以上探井80余口,其中千吨井10余口,是富集高产勘探领域。随着风化壳潜山、断块潜山等易发现的高山头逐步发现,济阳拗陷潜山勘探经历了2005—2015年长达十年的徘徊不前阶段^[24]。2016年以来,通过系统开展前古近系潜山成山、成储、成藏等研究,提出了“挤拉滑剥”成山、“岩性-构造-流体”控储、“圈-源-断-壳”控藏等新认识,指出自斜坡低部位到高山头依次发育残丘山-断块山-滑脱山,潜山内幕还可能发育裂缝型、岩性型等隐蔽性潜山内幕油藏,整体具有油藏类型有序分布、油气差异富集的成藏规律^[25-29]。油气成藏新认识拓展了济阳拗陷潜山油藏勘探空间,不仅在高山头发现了断块山,在斜坡区也实现了勘探突破,“十四五”以

来在太古宇潜山内幕也取得了新进展。济阳拗陷前古近系潜山实现了从高山头向斜坡低部位,从风化壳向内幕、岩性圈闭勘探的转变,以往认为“勘探禁区”的地堑带、斜坡区变成了富集高产的有利成藏区^[30-32],新增三级石油地质储量近 $5\,000\times 10^4\text{t}$ 。

前古近系潜山领域整体勘探程度较低,具有较好勘探潜力。研究表明,斜坡区走滑断块潜山、低位滑脱潜山、内幕、岩性圈闭等是重要的探索方向。此外,上古生界还具有煤成油气藏勘探潜力^[33-34]。“十四五”以来重点评价孤西、桩海等古生界北西向潜山带,新发现走滑断块潜山、滑脱潜山圈闭面积近 180 km^2 ,圈闭资源量近 $2\times 10^8\text{t}$;埕岛潜山带CBG25井太古宇潜山内幕钻遇较好油气显示,证实太古宇内幕潜山具有较大的勘探潜力,评价埕岛、桩西、埕东、高青-平方王等潜山带,新发现圈闭面积 100 km^2 以上,圈闭资源量 $1.0\times 10^8\text{t}$ 。预计未来10年前古近系潜山领域将成为富集高产的有利方向。

5 结论

探明石油地质储量是含油气盆地勘探产出的重要指标,事关油田勘探决策与可持续发展。对断陷盆地常规石油而言,其所依存的含油气盆地地质特征的复杂性决定其勘探对象的多样性、勘探过程的曲折性和勘探历史的长期性。因此,对断陷盆地常规探明石油地质储量增长规律的研究及增长趋势的预测也必将是一个长期的过程。通过梳理济阳拗陷勘探历程,分析其地质特征、资源条件、探井工作量投入、理论技术、资源序列等勘探要素,对济阳拗陷常规探明石油地质储量增长规律进行了探讨,指出济阳拗陷常规石油仍然具有较大的增储潜力;运用“帚状”模型、资源探明速率等方法进行了未来10年济阳拗陷常规探明石油地质储量增长趋势预测,认为在当前经济技术条件及探井工作量投入相对保障的情况下,未来10年仍有 $2.5\times 10^8\text{t}$ 左右的常规探明石油地质储量增储规模,但由于勘探程度、探明程度逐步升高,新增常规探明石油地质储量将呈现稳中略降的增长态势;对济阳拗陷增储领域进行了简要梳理,指出沙四段上亚段及以上中浅层成熟领域仍是稳定增储的重要领域、孔店组一沙四段下亚段深层领域是重要的规模增储领域、前古近系潜山领域是富集高产的有利方向。

诚如文中所述,研究成果是基于对济阳拗陷当前勘探领域、资源条件以及当前经济技术、油田勘

探发展战略的分析得出的。随着常规石油勘探持续推进,勘探程度越来越高,非常规、新能源等领域勘探发展,油田勘探形势可能会发生变化。因此,应紧密跟踪非常规与新能源领域的勘探进展,对济阳拗陷常规探明石油地质储量增长规律及增储趋势等研究结果进行不断地完善和修正,以期更符合油田勘探发展态势,指导油田勘探决策。

参考文献

- [1] 潘元林. 从济阳拗陷石油储量20年持续高速增长看老区勘探[J]. 当代石油石化, 2005, 13(7): 21-26.
PAN Yuanlin. From the reserve changes for 20 years at Jiyang Depression to see the further exploration in the mature areas[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2005, 13(7): 21-26.
- [2] 郭元岭. 成熟探区勘探发展基本特征[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 332-335.
GUO Yuanling. Basic features of petroleum exploration development in mature exploration area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 332-335.
- [3] 宋明水. 济阳拗陷勘探形势与展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(3): 11-17.
SONG Mingshui. The exploration status and outlook of Jiyang depression [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(3): 11-17.
- [4] 宋国奇, 郝雪峰, 刘克奇. 脊状断陷盆地形成机制、沉积体系与成藏规律——以济阳拗陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 303-310.
SONG Guoqi, HAO Xuefeng, LIU Keqi. Tectonic evolution, sedimentary system and petroleum distribution patterns in dustpan-shaped rift basin: a case study from Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 303-310.
- [5] 张善文. 成熟探区油气勘探思路及方法——以济阳拗陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 1-4.
ZHANG Shanwen. Exploration idea and method for mature exploration areas-taking Jiyang Depression as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(3): 1-4.
- [6] 张善文. “跳出框框”是老油区找油的关键[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 12-14.
ZHANG Shanwen. A key idea for finding oils in an area of high developed [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 12-14.
- [7] 宋国奇. 哲学与油气勘探——济阳拗陷现阶段地质研究的思维方法探讨[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(1): 1-5.
SONG Guoqi. Philosophy and petroleum exploration-Discussion on the thinking method of geological research in Jiyang Depression at present stage [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1): 1-5.
- [8] 宋振响, 周卓明, 徐旭辉, 等. “十三五”中国石化油气资源评价关键技术进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(3): 27-37.
SONG Zhenxiang, ZHOU Zhuoming, XU Xuhui, et al. Prog-

- ress of key technologies for oil and gas resource assessment of Sinopec during the 13th Five-Year Plan period and development direction [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(3): 27-37.
- [9] 王永诗. 济阳拗陷不同领域油气勘探思路与方向[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(5): 1-12.
WANG Yongshi. Ideas and directions for oil and gas exploration in different fields of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(5): 1-12.
- [10] 何治亮, 关晓东, 陈本池, 等. 创新驱动支撑中国石化上游高质量可持续发展[J]. *石油科技论坛*, 2021, 40(2): 8-15.
HE Zhiliang, GUAN Xiaodong, CHEN Benchu, et al. Innovation fuels high-quality and sustainable development of Sinopec upstream sector [J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2021, 40(2): 8-15.
- [11] 蔡勋育, 刘金连, 张宇, 等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(1): 31-42.
CAI Xunyu, LIU Jinlian, ZHANG Yu, et al. Oil and gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1): 31-42.
- [12] 高磊, 郭元岭, 宗国洪, 等. 探明储量增长“帚状”预测模型——以济阳拗陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(6): 45-47.
GAO Lei, GUO Yuanling, ZONG Guohong, et al. A broom-type model for predicting incremental proved reserves [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(6): 45-47.
- [13] 宋明水, 李友强. 济阳拗陷油气精细勘探评价及实践[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 93-101.
SONG Mingshui, LI Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 93-101.
- [14] 宋明水, 王永诗, 王学军, 等. 成熟探区“勘探单元”研究及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 499-513.
SONG Mingshui, WANG Yongshi, WANG Xuejun, et al. Research of “synthem units of exploration” in mature exploration area and its application in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 499-513.
- [15] 郝雪峰, 尹丽娟. 陆相断陷盆地油气差异聚集模式探讨——成藏动力、输导、方式的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 1-5.
HAO Xuefeng, YIN Lijuan. Discussion on hydrocarbon differential accumulation mode in continental rift basins—relationship of dynamics, conduit and pattern [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 1-5.
- [16] 王永诗, 李友强. 胜利油区东部探区“十二五”中后期勘探形势与对策[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 5-9.
WANG Yongshi, LI Youqiang. The exploration situation and countermeasures in the late 12th Five-Year Plan in the eastern area of Shengli oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 5-9.
- [17] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4): 19-23.
JIN Qiang, ZHU Guangyou, WANG Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2008, 32(4): 19-23.
- [18] 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1 243-1 254.
SONG Mingshui, WANG Yongshi, HAO Xuefeng, et al. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1 243-1 254.
- [19] 杨怀宇, 张鹏飞, 邱贻博, 等. 东营凹陷深层自源型油气成藏模式与勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(2): 92-101.
YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, QIU Yibo, et al. Deep self-source type hydrocarbon accumulation pattern and exploration practice in Dongying Sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(2): 92-101.
- [20] 王永诗, 张顺. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系深层优质储层形成机制[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 11-19.
WANG Yongshi, ZHANG Shun. Formation mechanism of high-quality reservoirs in deep strata of Paleogene, Bonan Subsag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(1): 11-19.
- [21] 刘惠民, 高阳, 秦峰, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2 141-2 159.
LIU Huimin, GAO Yang, QIN Feng, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration Jiyang depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(12): 2 141-2 159.
- [22] 李丕龙, 张善文, 王永诗. 多样性潜山成因、成藏与勘探——以济阳拗陷为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 4-83.
LI Pilong, ZHANG Shanwen, WANG Yongshi. Diversity buried hill formation, accumulation and exploration—case study of Jiyang Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 4-83.
- [23] 蒋有录, 叶涛, 张善文, 等. 渤海湾盆地潜山油气富集特征与主控因素[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(3): 20-29.
JIANG Youlu, YE Tao, ZHANG Shanwen, et al. Enrichment characteristics and main controlling factors of hydrocarbon in buried hill of Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2015, 39(3): 20-29.
- [24] 宋明水, 王永诗, 李友强. 成熟探区“层勘探单元”划分与高效勘探[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 520-527.
SONG Mingshui, WANG Yongshi, LI Youqiang. Division of “layer exploration unit” and high-efficiency exploration in mature exploration area [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 520-527.
- [25] 宋明水, 王惠勇, 张云海. 济阳拗陷潜山“挤-拉-滑”成山机制及油气藏类型划分[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(4): 1-8.
SONG Mingshui, WANG Huiyong, ZHANG Yunhai. “Extrusion, tension and strike-slip” mountain-forming mechanism and reservoir type of buried hills in Jiyang Depression [J]. *Petroleum*

- Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(4): 1-8.
- [26] 王永诗, 李继岩. 济阳坳陷平方王油田碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其主控因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2017, 41(4): 27-35.
- WANG Yongshi, LI Jiyan. Characteristics and main controlling factors of layered reservoir in buried hill of carbonate rock in Pingfangwang Oilfield, Jiyang Depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2017, 41(4): 27-35.
- [27] 王勇, 熊伟, 林会喜, 等. 济阳坳陷下古生界潜山油气藏特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1 334-1 347.
- WANG Yong, XIONG Wei, LIN Huixi, et al. The reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation model of Lower Paleozoic buried-hill in Jiyang depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1 334-1 347.
- [28] 赵凯, 蒋有录, 胡洪瑾, 等. 济阳坳陷潜山油气分布规律及富集样式[J]. 断块油气田, 2018, 25(2): 137-140.
- ZHAO Kai, JIANG Youlu, HU Hongjin, et al. Distribution regularities and enrichment styles of buried-hill reservoirs in Jiyang Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(2): 137-140.
- [29] 赵凯, 蒋有录, 刘华, 等. 济阳坳陷孤岛与埕岛潜山油气差异富集原因分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(2): 220-228.
- ZHAO Kai, JIANG Youlu, LIU Hua, et al. Analysis on the causes of different enrichment of hydrocarbon in Gudao and Chengdao buried-hills, Jiyang Depression [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(2): 220-228.
- [30] 马立驰, 王永诗, 景安语. 渤海湾盆地济阳坳陷下古生界潜山勘探新认识与新发现[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 10-16.
- MA Lichi, WANG Yongshi, JING Anyu. New understanding and discovery in exploration of Lower Paleozoic buried hills in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 10-16.
- [31] 林会喜, 熊伟, 王勇, 等. 济阳坳陷埕岛潜山油气成藏特征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 1-9.
- LIN Huixi, XIONG Wei, WANG Yong, et al. Hydrocarbon accumulation in Chengdao buried hill of Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 1-9.
- [32] 张勐, 吴智平, 王永诗, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷潜山发育规律及成因类型划分[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 488-502.
- ZHANG Meng, WU Zhiping, WANG Yongshi, et al. Development law and genetic types of buried-hills in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science, 2023, 48(2): 488-502.
- [33] 李增学, 曹忠祥, 王明镇, 等. 济阳坳陷石炭二叠系埋藏条件及煤型气源岩分布特征[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(4): 4-6.
- LI Zengxue, CAO Zhongxiang, WANG Mingzhen, et al. Distribution and burying characteristics of the Permo-Carboniferous system and the coal-formed gas source rock in Jiyang depression [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(4): 4-6.
- [34] 徐伟. 车镇凹陷车西北带下古生界煤成气成藏差异及模式分析[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 13-21.
- XU Wei. Differences and control modes of coal gas accumulations in Lower Paleozoic in northwest of Chezhen Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 13-21.

编辑 林 璐