

曲寿利.物探新技术是降低油气勘探开发成本的重要利器[J].石油物探,2019,58(6):783-790

QU Shouli.New geophysical exploration technology:An important tool to reduce the cost of oil and gas exploration and development[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2019,58(6):783-790

物探新技术是降低油气勘探开发成本的重要利器

曲寿利

(中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院,江苏南京 211103)

摘要:物探技术的进步必然带来油气勘探的突破和开发成本的下降,在低油价形势下,物探新技术的应用是油气勘探开发降本增效的有效措施之一。分析了中石化山前带、致密碎屑岩、海相碳酸盐岩、页岩气和东部老区油气勘探开发面临的地震技术难题,提出了物探技术对策建议。针对中石化油气资源发展战略和面临的勘探开发形势,从地震采集技术、地震处理成像技术、综合解释技术、物探软件技术四个方面提出了发展的重点内容和方向。最后,提出了通过具体物探新技术的应用来提高勘探精度和勘探效率,减少重复投入,实现降本增效。

关键词:油气勘探开发;地震采集技术;地震处理成像技术;综合解释技术;物探软件技术;降本增效

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:1000-1441(2019)06-0783-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-1441.2019.06.001

New geophysical exploration technology:An important tool to reduce the cost of oil and gas exploration and development

QU Shouli

(Sinopec Geophysical Research Institute,Nanjing 211103,China)

Abstract:The development of geophysical exploration technology will bring about breakthroughs in oil and gas exploration and decreases in development costs.Under the current situation of low oil prices,the application of new geophysical exploration technology is an effective measure to reduce costs and increase the efficiency of oil and gas exploration and development.This study analyzed the seismic technical problems faced by the Piedmont zone,tight clastic rock,marine carbonate rock,shale gas,and the old Sinopec eastern exploration area; in addition,it puts forward measures and suggestions of geophysical exploration technology.According to the development strategy of oil and gas resources as well as the exploration and development situation faced by Sinopec, key development directions were put forward from four different aspects,namely seismic acquisition,seismic processing imaging, comprehensive interpretation,and geophysical exploration software technology.Finally,this study proposes that the application of new geophysical exploration technology can improve both exploration accuracy and efficiency,reduce repeated investment,and achieve cost reduction and efficiency increases.

Keywords:oil and gas exploration and development,seismic acquisition,seismic processing imaging,comprehensive interpretation,geophysical software,cost reduction and efficiency increase

油气勘探开发是一个系统工程,物探技术在油气勘探开发中一直发挥着重要的作用,物探新技术的应用是世界各大石油公司应对低油价、实施低成本战略的主要手段之一。油气勘探的发展历史证明,物探技术的每一次进步都带来了油气的新发现和探明储量的大幅增长。物探新技术不仅极大地提高了新区勘

探的成功率,也使老油田的勘探与开发焕发了新的活力,对探明剩余油的分布、发现更多的开发层系、提高油气驱动效果、完善水平井设计等发挥了重要的作用。未来油气勘探与开发的发展,依然依赖物探技术的进步。如何发展并用好物探新技术是实施油气勘探开发低成本战略的关键,本文针对中石化重点领域

收稿日期:2019-08-05;改回日期:2019-09-30。

作者简介:曲寿利(1961—),男,教授,主要从事地球物理方法技术研究工作。Email:qsl.swty@sinopec.com

的油气勘探开发面临的主要物探问题进行了讨论并提出了应用物探新技术的对策,思考了物探技术发展的方向及应用措施。

1 中石化重点勘探领域面临的主要物探问题与对策

中国石化重点勘探开发领域面临的主要物探技术问题概括起来有三个方面:一是新区、新领域,如山前带、深层碳酸盐岩、外围盆地等,此类探区地表与地下地质条件复杂,勘探难度越来越大;二是东部老区,储层精细刻画困难,如复杂小断块、致密碎屑岩、岩性油气藏、薄储层等,增储上产难度大;三是剩余油分布和油藏监测难,精细缝洞描述、低序级断层及薄储层描述、流体预测等^[1-4]。本文重点讨论山前带地震勘探、致密碎屑岩“甜点”识别、海相碳酸盐缝洞识别、页岩气地震预测及东部老区的新发现等重点领域的物探难题和对策。

1.1 山前带地震技术难题与对策

山前带勘探地区地震技术面临的难题是地表和构造“双复杂”,地下构造成像精度难以保证,构造圈闭落实困难^[4-6]。此类探区的物探技术应用策略是打破传统的技术流程,借鉴国内外成功经验,大胆稳步推进新技术的应用。

第一步,打破传统的技术流程,直接部署宽线二维或束状三维地震勘探,发现和锁定区带目标。该部署的主要任务是对盆地的构造、沉积、储层和资源做进一步的评价,分析资源潜力和目标方向。如果潜力大且有目标,则进入下一步勘探,否则,就放弃。

第二步,实施山地三维地震勘探,对地震资料进行深度域成像处理,落实圈闭目标。对于极复杂的区块,常规三维勘探通常不能得到地下复杂构造的精确成像,必须应用高密度三维地震采集技术和深度域成像技术才能获得较高质量的地震成像剖面。

第三步,进行精细构造解释与变速成图,落实圈闭并确定井位。变速构造成图要充分利用地震和钻井资料,从而提高构造成图的精度,确保构造圈闭的可靠性,提高风险探井的成功率。

山前带油气勘探领域需要用好的物探技术主要包括:近地表调查及相适应的地震采集方法,宽线大组合二维或束状三维地震观测技术,高密度三维地震技术,叠前深度偏移处理技术,精细构造解释与变速成图技术等^[7-13]。

山前带油气勘探部署需要遵循的原则是宁要一条过得硬,不要十条过得去,解决不了问题,再便宜也

是贵!技术流程可以打破,勘探程序不能逾越。

1.2 致密碎屑岩“甜点”识别难题与对策

致密碎屑岩油气勘探地震技术面临的难题是一方面储层横向变化快且为薄互层,而地震分辨率相对较低,对其难以分辨;另一方面储层与围岩的波阻抗差异小,传统的波阻抗反演法无法有效区分储层与围岩,“甜点”预测难^[14-19]。致密碎屑岩“甜点”预测的物探技术应用策略是重基础,抓关键,砂中寻优。

第一步,针对致密碎屑岩“甜点”储层识别的需求,需要做好以下两项基础工作,即做好岩石物理分析,找准识别“甜点”的物质基础;做好地震部署,打牢“甜点”预测的数据基础。地震资料品质是“甜点”识别的根本保障,以“两宽一高”地震采集和精细 RTM 成像处理为主,形成方位道集数据和高分辨率成像剖面,为储层预测、叠前反演、属性分析等提供高质量的基础地震资料。

第二步,地质物探相结合做好相控多属性砂体分布的描述。综合地质、测井、地震等资料,利用波形分析、反射结构、地层切片、旋回分析等多属性分析手段,开展相控宏观砂体分布描述。

第三步,砂中寻优找“甜点”。找到的砂体不一定是有效储层,必须砂中寻优找“甜点”。致密碎屑岩的“甜点”主要表现为局部相对高孔隙、高渗,局部裂缝发育以及局部油气富集性高等特征。以叠前叠后反演、方位各向异性属性分析、AVO 以及分频分析等技术为主,预测孔隙度、渗透率、裂缝发育带及含气性等“甜点”。最后,应用多属性叠合或融合技术做好“甜点”储层的综合评价并落实钻探靶区。

致密碎屑岩“甜点”识别需要用好的物探技术主要包括:“两宽一高”三维地震采集技术,高分辨率地震资料处理技术,道集优化处理技术,岩石物理分析与正演模拟技术,叠前叠后反演技术,方位裂缝检测技术,含气性检测及多属性融合技术等^[20-31]。

致密碎屑岩“甜点”识别的勘探部署需要遵循的原则是重基础、细过程,适量投入才有高精度和高回报。

1.3 海相碳酸盐岩缝洞识别难题与对策

海相碳酸盐岩缝洞识别地震技术面临的难题是:

①此类探区地表相对复杂以及目的层埋深大导致的地震资料品质问题;②多类型与多尺度缝洞体的成像与刻画精度问题;③缝洞体内部充填与流体描述问题。缝洞识别的物探技术应用策略是既要看得清、又要看得准、更要看得透。主要技术对策应重点突出三个方面:一是以“两宽一高”为主体思路的高精度地震采集技术,为小尺度洞穴成像及各向异性裂缝检测提

供基础资料;二是利用以 RTM、绕射波成像、最小二乘偏移成像为主体的高精度缝洞成像技术和以叠前方位分析、三维可视化为主的解释技术,开展精细缝洞体刻画;三是综合利用测井资料分析、岩石物理分析、叠前反演及多属性融合等技术,进行缝洞体内幕描述,为油藏建模和开发提供依据。

海相碳酸盐岩缝洞识别需要用好的物探技术主要包括:“两宽一高”三维地震采集技术,岩石物理分析与正演模拟技术,Q-RTM、最小二乘 RTM、绕射波偏移成像技术,三维可视化技术,叠前反演、叠前方位各向异性检测技术,油藏精细描述及建模技术等^[20-23,27-29,32-48]。

海相碳酸盐岩油气勘探部署需要遵循的原则是大胆应用新技术,提高缝洞描述精度,降低钻探风险,提高效益。

1.4 页岩气地震预测难题与对策

页岩气地震预测面临的难题是:①复杂山地震成像;②优质页岩“双甜点”预测;③压裂监测。

页岩气地震预测与致密碎屑岩“甜点”识别面临的难点与技术思路相似。其物探技术应用策略是以“两宽一高”地震采集和地震资料的 RTM 成像为主,解决复杂地表与复杂构造成像问题;以宽方位和各向异性检测为主,解决微裂缝储层预测问题;以基于岩石物理的叠前反演为主,解决总有机碳含量(TOC)、脆性指数、应力压力等预测问题;以水平井轨迹设计和微地震监测为主,解决开发部署与压裂监测问题。

页岩气地震预测需要用好的物探技术主要包括:“两宽一高”三维地震采集技术,岩石物理分析技术,甜点预测与评价技术,方位各向异性裂缝检测技术,水平井设计及微地震监测技术等^[20-23,27,49-58]。

页岩气勘探开发部署需要遵循的原则是地质、物探、工程一体化研究,提高精度,增气降本。

1.5 东部老区储层精细描述难题与对策

东部老区储层精细描述面临的难题是:①近地表条件复杂,城镇、水网等影响地震资料品质;②油气藏的地质特征表现为薄、碎、小、隐、深,地震资料分辨率不足,成像精度不够,使得识别描述困难。东部老区增储稳产,储层精细描述的物探技术应用策略是用新技术在老区挖潜,以高密度地震技术获取更全、更精细的地下信息。

一是开展高密度地震采集^[33]。高密度地震资料大幅提高了断层和地层内幕成像的精度和岩性圈闭描述的精细程度。针对高密度地震采集成本高的问题,通过优化观测系统设计,探索基于压缩感知的非规则采集技术及高效可控震源采集技术的应用降低

采集成本。

二是充分利用云计算资源,做好深度域 RTM 成像处理,提高对于复杂地质体的分辨能力。

三是建立在 OVT 域从预处理到速度建模再到偏移成像的处理流程和标准,推广应用多维地震解释技术^[59-62]。

四是应用新技术对老地震资料进行重处理。在 II 类地震资料的工区加强对地震资料的深度域高精度目标处理。

东部老区储层精细描述需要用好的物探技术主要包括:高密度三维地震采集技术,岩石物理分析技术,叠前深度成像技术,多属性综合油藏描述技术等^[63-65]。

东部老区油气勘探开发部署需遵循的原则是勘探开发一体化,应用新技术,提高油气藏描述精度,增储稳产。

2 物探技术的发展方向和重点

物探新技术、新装备和新软件的应用将是降本增效、提高勘探效益的核心利器。发展物探新技术的基本出发点是:一方面能够切实解决油公司的勘探需求,带来新的发展机遇和潜力;另一方面能够切实降低油公司的投资风险及勘探开发成本。针对中石化油气勘探开发需求,当前物探新技术发展的重点主要有以下四个方面。

2.1 地震采集技术

一是发展新装备,提高“两宽一高”地震采集质量与效率。通过引进或部分研发,发展具有无线、轻便、自动化和智能化、百万道、节点式等新仪器,以适应“双复杂”条件下的地震采集需求。二是持续加强(“两全一高”)的采集观测方式,提高采样密度,从而达到高精度勘探的效果。更全方位、更全频带、更高精度地震数据的“全频、全方位、高密度”的“两全一高”采集已经是既定的技术方向。

2.2 地震成像技术

一是针对复杂山前带勘探面临的难题,研发粘声介质 Q 建模与 Q-RTM 偏移成像技术,实现中深层弱反射信号的恢复和补偿,提高复杂构造的成像精度。二是针对深层碳酸盐岩勘探面临的难题,开展基于 RTM 的深度域高精度成像技术的研究,提高缝洞储层、断溶体的成像精度。三是针对致密碎屑岩勘探领域面临的难题,加强高分辨率目标处理研究,提高地震资料分辨率。四是针对东部老区勘探领域面临的难题,全面推进深度域高精度成像技术研究,加强

单点高密度采集数据的室内组合和高效成像技术研究,形成针对高密度采集数据的地震资料处理技术和流程。更高精度、更短周期和更低成本是地震成像追求的目标。

2.3 综合解释技术

定量化、一体化、自动化、智能化是地震资料综合解释技术的发展趋势。一是发展 OVT 域三维地震解释技术,提高碳酸盐岩裂缝检测、储层含流体预测的精度;二是推广古河道定量描述技术,提高缝洞储层定量描述精度;三是大力发展叠前地震反演和叠前流体检测技术,提高储层描述精度和储层含流体检测的可靠性;四是发展基于岩石物理分析、叠前-叠后联合反演的页岩气“双甜点”预测技术,做好地质-物探-工程一体化;五是加强自动化、智能化解释技术研发,提高复杂储层描述与流体识别的精度,提高解释效率。

2.4 物探软件技术

研发具有自主知识产权的物探专业软件平台,解决卡脖子问题,是物探软件发展的目标。在采集方面扩充面向施工阶段的设计功能,增加基于多重约束的激发井深设计模块,满足野外井深设计方面的需求;在处理方面持续推进平台的实用化与处理系统的完善,以深度域成像为核心,完善处理系统功能;在解释方面以智能化解释为目标,开展新一代解释系统的关键技术研究,更新包括叠前反演、全局追踪层位自动解释、压力预测等特色模块。打造具有自主知识产权的一体化软件平台。

3 用好物探新技术实现降本增效的措施

3.1 通过提高勘探精度,提升钻探成功率,促进降本增效

应用物探新技术,提高地震成像和储层预测精度。一是采集方面:在中西部地区,持续推动“两全一高”采集,在东部老区,着力开展单点高密度三维勘探推广试验,提高原始单炮资料的信噪比和频宽;二是处理方面:大力推广(普及)基于 RTM 偏移成像的老资料目标处理(Q-RTM、TTI-RTM、宽频 RTM 等),提高深层、小断块、岩性、潜山圈闭的地震成像精度;三是综合解释方面:进一步加强叠前储层反演、叠前含流体检测等技术应用,提高圈闭识别的可靠度。这些技术的应用虽然增加了部分成本,但提高了勘探精度和钻探成功率,从而实现降本增效。

3.2 通过提高勘探效率,缩短勘探周期,促进降本增效

一是推广可控震源、节点采集等高效采集技术,

缩短野外施工工期;二是推广基于云计算、大数据的高效处理技术,通过自动化功能、并行运算等技术提高资料处理效率;三是推广应用层位追踪、断裂识别等自动化解释技术,缩短构造解释周期,提高地震解释效率。

3.3 通过资源共享,减少重复投入,促进降本增效

一是人力资源的共享,整合研究团队,统一组织重大风险勘探领域的研究、重大关键技术的技术攻关、地质方案论证、工程设计及重大措施方案决策等。二是数据资源的共享,进一步加大基础资料(井资料、地震资料)和研究成果的共享,减少重复工作;三是计算资源的共享,整合计算资源和软件资源,提高运行效率和资源的利用率。

3.4 通过加大新技术应用投入,实现中长期降本增效

一是加强新技术应用的投入,为新技术中试提供更多的试验靶区。二是加强工程领域对物探技术的使用。

3.5 通过加强应用基础研究,提升研究成果质量,促进降本增效

充分发挥地球物理重点实验室的作用,做好基础研究,提升研究成果质量。一是开展山前带近地表地震数值模拟,了解复杂山前带地震波场传播机理,指导采集设计和后续地震成像及综合解释;二是加强不同类型储层的岩石物理特征分析研究,分地区建立储层参数特征库,用于提高弹性参数预测精度;三是加强深层页岩气“甜点”识别的岩石物理分析技术研究,建立页岩气“甜点”识别的岩石物理解释模版,探索无水改造特征矿物的地震预测技术,为后续“甜点”识别提供依据。

3.6 持续推进一体化研究,抓好“两个结合”,促进降本增效

一是加强基础研究与生产应用的结合,提升研究成果质量。二是深化地质与物探结合,推进采集、处理、解释的一体化研究。抓好三个关键切入点,一要抓住地震采集切入点,面向地质目标做好地震采集设计;二要抓住地震成像切入点,以地质构造为约束做好速度建模;三要抓住地震反演切入点,以测井资料为约束做好构造与储层建模。通过两个结合,切实提升物探技术研究成果质量,促进稳油增气、降本增效。

参 考 文 献

- [1] 马永生,张建宁,赵培荣,等.物探技术需求分析及攻关方向思考[J].石油物探,2016,55(1):1-9
MA Y S,ZHANG J N,ZHAO P R,et al.Requirement analysis and research direction for the geophysical

- prospecting technology of SINOPEC[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(1): 1-9
- [2] 董世泰, 张研. 成熟探区物探技术发展方向——以中石油成熟探区为例[J]. 石油物探, 2019, 58(2): 155-161
DONG S T, ZHANG Y. Geophysical technical development direction of mature exploration areas: A case study from a mature exploration area of PetroChina[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(2): 155-161
- [3] 宋桂桥, 杨振升, 薛野. 中石化下扬子地区油气地震勘探攻关进展及方向[J]. 石油物探, 2019, 58(2): 303-312
SONG G Q, YANG Z S, XUE Y. Progress and direction of seismic exploration in the SINOPEC Lower Yangtze area, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(2): 303-312
- [4] 齐中山, 王静波, 张文军, 等. 米仓-大巴山山前带地震勘探进展及下一步攻关方向探讨[J]. 石油物探, 2018, 57(3): 458-469
QI Z S, WANG J B, ZHANG W J, et al. Progress and research direction of seismic exploration in the Micang-Dabashan piedmont zone, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 458-469
- [5] 敬朋贵. 镇巴地区地震勘探效果分析与认识[J]. 石油物探, 2014, 53(6): 744-751
JING P G. Effect analysis and recognition of seismic exploration in Zhenba area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(6): 744-751
- [6] 秦宁, 王延光, 杨晓东, 等. 非水平地表高斯束叠前深度偏移及山前带应用实例[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1): 81-86
QIN N, WANG Y G, YANG X D, et al. Gaussian beam prestack depth migration for undulating-surface area in piedmont zone[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(1): 81-86
- [7] 李成博, 张宇. CSI: 基于压缩感知的高精度高效率地震资料采集技术[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 537-542
LI C B, ZHANG Y. CSI: An efficient high-resolution seismic acquisition technology based on compressive sensing[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 537-542
- [8] 马涛, 王彦春, 李扬胜, 等. OVT 属性分析方法在采集设计中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(1): 1-8
MA T, WANG Y C, LI Y S, et al. Application of OVT attribute analysis in seismic acquisition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(1): 1-8
- [9] 沈鸿雁, 王鑫, 李欣欣. 近地表结构调查及参数反演综述[J]. 石油物探, 2019, 58(4): 471-485
SHEN H Y, WANG X, LI X X. Near-surface structure survey and parameter inversion review[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 471-485
- [10] 吴成梁, 王华忠, 胡江涛, 等. 基于数据自适应加权的叠前深度偏移成像方法[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 381-390
WU C L, WANG H Z, HU J T, et al. Pre-stack depth migration based on data-adaptive weighting[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 381-390
- [11] 刘定进, 刘志成, 蒋波. 面向复杂山前带的深度域地震成像处理研究[J]. 石油物探, 2016, 55(1): 49-59
LIU D J, LIU Z C, JIANG B. The processing workflow of depth domain imaging facing the complex piedmont belt[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(1): 49-59
- [12] 李博, 刘志成, 李小爱, 等. 基于复数域波场分解的保幅逆时偏移成像方法[J]. 石油物探, 2019, 58(2): 237-244
LI B, LIU Z C, LI X A, et al. Wave field decomposition in complex domain-based amplitude-preserved reverse time migration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(2): 237-244
- [13] 徐天吉, 程冰洁, 闫丽丽, 等. 龙门山金马-鸭子河推覆构造带雷四段储层脆性与裂缝预测[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(3): 562-572
XU T J, CHENG B J, YAN L L, et al. Reservoir brittleness and fracture prediction of Member 4, Leikoupo Formation in Jinma-Yazihe nappe tectonic belt, Longmen Mountain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(3): 562-572
- [14] 刘忠群, 杜春江, 金东民. 黄土塬区三维地震采集炮检点优化设计技术研究及应用[J]. 石油物探, 2016, 55(2): 188-195
LIU Z Q, DU C J, JIN D M. Optimization design of shot-receiver points for 3D seismic acquisition in loess tableland[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(2): 188-195
- [15] 秦雪霏, 齐荣, 李巍, 等. 杭锦旗地区盒1段辫状河道构型及心滩半定量地震识别[J]. 石油物探, 2019, 58(4): 572-579
QIN X F, QI R, LI W, et al. Braided channel architecture analysis and semi-quantitative seismic prediction for channel bars in P1x1 of the Hangjinqi area, Ordos basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 572-579
- [16] 赵海波, 唐晓花, 李奎周, 等. 基于地震岩石物理分析与叠前地质统计学反演技术的齐家地区致密薄储层预测[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 853-862
ZHAO H B, TANG X H, LI K Z, et al. Tight thin-bed reservoir prediction using rock physics analysis and prestack geostatistical inversion in the Qijia area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 853-862
- [17] 李瑞磊, 杨勤林, 田建华, 等. 松辽盆地龙凤山气田致密砂岩含气性预测研究[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 874-881
LI R L, YANG Q L, TIAN J H, et al. Tight sandstone gas prediction in the Longfeng Mountain gas field of Songliao Basin, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 874-881
- [18] 张军华, 刘杨, 林承焰, 等. 甜点地震属性理论诠释及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(2): 355-360
ZHANG J H, LIU Y, LIN C Y, et al. Theoretical annotation and application of sweetness[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(2): 355-360

- [19] 李岳桐, 卢宗盛, 吴振东, 等. 沧东凹陷孔二段细粒沉积岩致密油甜点预测[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 1059-1066
LI Y T, LU Z S, WU Z D, et al. Sweet spot prediction for fine-grain sediment reservoirs in the Cangdong Sag[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(5): 1059-1066
- [20] 王华忠. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 313-324
WANG H Z. Key problem analysis in seismic exploration based on wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 313-324
- [21] 王华忠, 郭颂, 周阳. “两宽一高”地震数据下的宽带波阻抗建模技术[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 1-8
WANG H Z, GUO S, ZHOU Y. Broadband acoustic impedance model building for broadband, wide-azimuth, and high-density seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 1-8
- [22] 冉建斌, 张明玉, 李海银, 等. “两宽一高”三维地震资料的纵向分辨率探讨及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(3): 520-527, 537
RAN J B, ZHANG M Y, LI H Y, et al. Vertical resolution of broadband, wide-azimuth and high-density seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(3): 520-527, 537
- [23] 张丽艳, 李昂, 于常青. 低频可控震源“两宽一高”地震勘探的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(6): 1236-1245
ZHANG L Y, LI A, YU C Q. Application of broadband, wide-azimuth, and high-density 3D seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(6): 1236-1245
- [24] 毛海波, 范旭, 杨晓海, 等. 陆上宽频采集叠后地震资料的小波域提高分辨率应用研究[J]. 石油物探, 2019, 58(4): 541-546
MAO H B, FAN X, YANG X H, et al. Application research on improving the resolution of broadband land post-stack seismic data in wavelet domain[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(4): 541-546
- [25] 郭恺, 杨林. 一种新的 TTI 介质多参数联合层析反演方法[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 412-418
GUO K, YANG L. A new multi-parameter joint tomography inversion method for TTI medium[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 412-418
- [26] 张华, 贺振华, 李亚林, 等. 基于 ADM 谱反演的高分辨率裂缝预测技术研究及应用[J]. 石油物探, 2016, 55(5): 737-745
ZHANG H, HE Z H, LI Y L, et al. Research and application of high resolution fracture prediction technology based on ADM spectral inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(5): 737-745
- [27] 印兴耀, 刘欣欣. 储层地震岩石物理建模研究现状与进展[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 309-325
YIN X Y, LIU X X. Research status and progress of the seismic rock physics modeling methods[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(3): 309-325
- [28] 何兵红, 方伍宝, 刘定进, 等. 基于波动方程转换的时间域多尺度全波形反演速度建模[J]. 石油物探, 2019, 58(2): 229-236
HE B H, FANG W B, LIU D J, et al. Velocity building by multi-scale full waveform inversion with time-domain wave equation transform[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(2): 229-236
- [29] 冯波, 吴成梁, 王华忠. 反射波层析反演速度建模方法[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 371-380
FENG B, WU C L, WANG H Z. Velocity model building using reflection tomography[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 371-380
- [30] 李春鹏, 印兴耀, 刘志国, 等. 裂缝型储层预测的各向异性梯度反演方法研究[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 835-840
LI C P, YIN X Y, LIU Z G, et al. An anisotropic gradient inversion for fractured reservoir prediction[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 835-840
- [31] 刘财, 裴思嘉, 郭智奇, 等. 地震波形反演技术在砂泥岩薄互层结构表征中的应用[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1893-1902
LIU C, PEI S J, GUO Z Q, et al. The application of seismic amplitude inversion for the characterization of inter-bed sand-shale reservoirs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(5): 1893-1902
- [32] 王汉闯, 陶春辉, 陈生昌, 等. 基于稀疏约束和多源激发的地震数据高效采集方法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3518-3538
WANG H C, TAO C H, CHEN S C, et al. Highly efficient methods of seismic data acquisition based on sparse constraints and blended-source excitation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(9): 3518-3538
- [33] 郭念民, 陈猛, 崔永福, 等. 碳酸盐岩储层单点高密度采集三维地震勘探实例[J]. 石油物探, 2016, 55(6): 771-780, 824
GUO N M, CHEN M, CUI Y F, et al. The application of single-point high-density seismic acquisition for carbonate reservoir 3D seismic exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(6): 771-780, 824
- [34] 张宇. 从成像到反演: 叠前深度偏移的理论、实践与发展[J]. 石油物探, 2018, 57(1): 1-23
ZHANG Y. From imaging to inversion: Theory, practice, and technological evolution of prestack depth migration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(1): 1-23
- [35] 杨勤勇, 段心标. 最小二乘偏移研究现状及发展趋势[J]. 石油物探, 2018, 57(6): 795-802
YANG Q Y, DUAN X B. Research status and development trend of least square migration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(6): 795-802
- [36] 陈生昌. 基于地震波方程的地震数据波形偏移与最小二乘波形偏移方法[J]. 石油物探, 2018, 57(5): 637-646
CHEN S C. Waveform migration and least-squares waveform migration of seismic data based on seismic

- wave equation[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(5):637-646
- [37] 周阳,王华忠.基于高频近似波传播的实用化保真RTM成像方法[J].石油物探,2019,58(3):391-403
ZHOU Y,WANG H Z.On practical implementation of amplitude-preserving reverse time migration based on asymptotic approximation[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2019,58(3):391-403
- [38] 郭颂,王华忠,胡江涛.基于非平稳滤波算子的成像域最小二乘偏移[J].石油物探,2019,58(3):404-411
GUO S,WANG H Z,HU J T.Least-squares migration in image domain using nonstationary matching filter[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2019,58(3):404-411
- [39] 田文彬,张凯,李振春.平面波最小二乘逆时偏移方法的优化[J].石油物探,2019,58(2):245-252
TIAN W B,ZHANG K,LI Z C.Optimization of plane wave least squares reverse time migration[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2019,58(2):245-252
- [40] 曹俊兴,薛雅娟,田仁飞,等.深层碳酸盐岩储层含气性检测方法技术研究[J].石油物探,2019,58(1):9-16
CAO J X,XUE Y J,TIAN R F,et al.Advances in hydrocarbon detection in deep carbonate reservoirs[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2019,58(1):9-16
- [41] 王震,文欢,邓光校,等.塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用[J].石油物探,2019,58(1):149-154
WANG Z,WEN H,DENG G X,et al.Fault-karst characterization technology in the Tahe Oilfield,China[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2019,58(1):149-154
- [42] 胡华锋,鲍典,马灵伟,等.基于高频衰减梯度的碳酸盐岩溶洞储集体规模识别方法[J].石油物探,2018,57(6):892-901
HU H F,BAO D,MA L W,et al.Scale characterization of carbonate karst cave reservoirs based on high-frequency attenuation gradient: A case study from karst paleochannels reservoirs in Tahe oilfield,China[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(6):892-901
- [43] 李相文,冯许魁,刘永雷,等.塔中地区奥陶系走滑断裂体系解剖及其控储控藏特征分析[J].石油物探,2018,57(5):764-774
LI X W,FENG X K,LIU Y L,et al.Characteristic of the strike-slip faults system and effect of faults on reservoir and hydrocarbon accumulation in Tazhong area, China[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(5):764-774
- [44] 于豪,李劲松,晏信飞,等.非均质碳酸盐岩储层微观孔隙结构表征与气藏检测[J].石油物探,2017,56(4):472-482
YU H,LI J S,YAN X F,et al.Microscopic pore structure characterization of heterogeneous carbonate reservoirs and gas detection:a case study from limestone gas reservoirs on the right bank block of Amu Darya River[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(4):472-482
- [45] 杨子川,刘军,陈黎,等.顺南地区奥陶系碳酸盐岩储层地震识别与评价[J].石油物探,2017,56(2):280-287
YANG Z C,LIU J,CHEN L,et al.Seismic identification and evaluation of Ordovician carbonate reservoir in Shunnan area[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(2):280-287
- [46] 朱博华,杨江峰,吕秋玲,等.基于分频成像的小尺度溶洞检测[J].石油地球物理勘探,2018,53(3):538-544
ZHU B H,YANG J F,LYU Q L,et al.Small-scale cave detection based on frequency-segmented imaging[J].Oil Geophysical Prospecting,2018,53(3):538-544
- [47] 马灵伟,杨勤勇,李宗杰,等.利用波形分解技术识别塔中北坡强反射界面之下的储层响应[J].石油地球物理勘探,2017,52(2):326-332
MA L W,YANG Q Y,LI Z J,et al.Identifying reservoirs response under strong reflection interfaces with waveform decomposition in the Centre Tarim Basin, China[J].Oil Geophysical Prospecting,2017,52(2):326-332
- [48] 崔永福,彭更新,吴国忱,等.全波形反演在缝洞型储层速度建模中的应用[J].地球物理学报,2016,59(7):2713-2725
CUI Y F,PENG G X,WU G C,et al.Application of full waveform inversion velocity model-building technology for the fractured-vuggy reservoir[J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(7):2713-2725
- [49] 印兴耀,马妮,马正乾,等.地应力预测技术的研究现状与进展[J].石油物探,2018,57(4):488-504
YIN X Y,MA N,MA Z Q,et al.Review of in-situ stress prediction technology[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(4):488-504
- [50] 刘喜武,刘宇巍,刘志远,等.页岩层系天然裂缝地震预测技术研究[J].石油物探,2018,57(4):611-617
LIU X W,LIU Y W,LIU Z Y,et al.Seismic prediction of natural fractures in series of shale oil reservoirs[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(4):611-617
- [51] 胡华锋,胡起,林正良.页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J].石油物探,2018,57(3):362-368
HU H F,HU Q,LIN Z L.Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin,China[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2018,57(3):362-368
- [52] 李大军,杨晓,王小兰,等.四川盆地W地区龙马溪组页岩气压裂效果评估和产能预测研究[J].石油物探,2017,56(5):735-745
LI D J,YANG X,WANG X L,et al.Estimating the fracturing effect and production capacity of the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in area W, Sichuan Basin[J].Geophysical Prospecting for Petroleum,2017,56(5):737-745
- [53] 李金磊,涪陵焦石坝页岩气层压力预测技术研究[J].石油物探,2017,56(4):567-574
LI J L.Pressure prediction of Jiaoshiba shale gas reservoir

- voir in the Fuling Shale Gas field[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(4): 567-574
- [54] 李强,尹成,王俊力,等.基于天然裂缝破坏行为的页岩储层压裂微地震事件预测[J]. *石油物探*, 2018, 57(6): 878-883
- LI Q, YIN C, WANG J L, et al. Prediction of microseismic events in a fractured shale reservoir based on natural fracture failure behavior[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(6): 878-883
- [55] 任岩,曹宏,姚逢昌,等.岩石脆性评价方法进展[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(4): 875-886
- REN Y, CAO H, YAO F C, et al. Review of rock brittleness evaluation methods[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(4): 875-886
- [56] 许杰,刘坤岩,武清钊.焦石坝页岩脆性评价与预测[J]. *石油物探*, 2019, 58(3): 453-460
- XU J, LIU K Y, WU Q Z. Evaluation and prediction of shale brittleness in the Jiaoshiba area[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(3): 453-460
- [57] 李政,常旭,姚振兴,等.微地震方法的裂缝监测与储层评价[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(2): 707-719
- LI Z, CHANG X, YAO Z X, et al. Fracture monitoring and reservoir evaluation by micro-seismic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(2): 707-719
- [58] 缪思钰,张海江,陈余宽,等.基于微地震定位和速度成像的页岩气水力压裂地面微地震监测[J]. *石油物探*, 2019, 58(2): 262-271
- MIAO S Y, ZHANG H J, CHEN Y K, et al. Surface microseismic monitoring of shale gas hydraulic fracturing based on microseismic location and tomography[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(2): 262-271
- [59] 印兴耀,张洪学,宗兆云.OVT 数据域五维地震资料解释技术研究现状与进展[J]. *石油物探*, 2018, 57(2): 155-178
- YIN X Y, ZHANG H X, ZONG Z Y. Research status and progress of 5D seismic data interpretation in OVT domain[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(2): 155-178
- [60] 孙苗苗,李振春,曲英铭,等.基于曲波域稀疏约束的 OVT 域地震数据去噪方法研究[J]. *石油物探*, 2019, 58(2): 208-218
- SUN M M, LI Z C, QU Y M, et al. A seismic denoising method based on curvelet transform with sparse constraint in OVT domain[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(2): 208-218
- [61] 李博.OVT 域地震数据规则化技术及应用[J]. *石油物探*, 2019, 58(1): 53-62
- LI B. Seismic data regularization in the OVT domain and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(1): 53-62
- [62] 段文胜,王鹏,党青宁,等.应用匹配追踪傅里叶插值技术实现 OVT 域连片处理[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(4): 669-677
- DUAN W S, WANG P, DANG Q N, et al. 5D data regularization based on matching pursuit Fourier interpolation for the OVT domain data merging processing[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(4): 669-677
- [63] 甘利灯,戴晓峰,张昕,等.测井-地震-油藏模拟一体化技术及其在老油田挖潜中的应用[J]. *石油物探*, 2016, 55(5): 617-639
- GAN L D, DAI X F, ZHANG X, et al. Research and application on well-seismic-reservoir integration technology for mature oilfield development[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, 55(5): 617-639
- [64] 赵邦六,董世泰,曾忠.井中地震技术的昨天、今天和明天——井中地震技术发展及应用展望[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(5): 1112-1123
- ZHAO B L, DONG S T, ZENG Z. Borehole seismic development, status quo and future: Application prospect of borehole seismic[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(5): 1112-1123
- [65] 张军华,王庆峰,张晓辉,等.薄层和薄互层叠后地震解释关键技术综述[J]. *石油物探*, 2017, 56(4): 459-471
- ZHANG J H, WANG Q F, ZHANG X H, et al. Post-stack interpretation key techniques for thin layer and thin inter-bed reservoirs[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2017, 56(4): 459-471

(编辑:朱文杰)