



肖云飞, 霍浩, 黄鹏, 等. 2026. 川东地区二次采集高精度观测系统方案优化设计——以 JN 工区为例. 地球物理学进展, 41 (1): 0325-0340, doi: 10.6038/pg2026JJ0069.

XIAO YunFei, HUO Hao, HUANG Peng, et al. 2026. Optimal design of high precision observation system for secondary acquisition in the eastern sichuan region——a case study in the JN area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0325-0340, doi: 10.6038/pg2026JJ0069.

川东地区二次采集高精度观测系统方案优化设计——以 JN 工区为例

Optimal design of high precision observation system for secondary acquisition in the eastern sichuan region——a case study in the JN area

肖云飞¹, 霍浩², 黄鹏¹, 王昀¹, 罗浩¹, 薛维忠¹, 王雅如¹, 王一雯¹

XIAO YunFei¹, HUO Hao², HUANG Peng¹, WANG Yun¹, LUO Hao¹, XUE WeiZhong¹, WANG YaRu¹, WANG YiWen¹

1. 中石化石油物探技术研究院有限公司, 南京 211103

2. 中石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 武汉 430223

1. SINOPEC Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Wuhan 430223, China

摘 要 JN 工区构造上位于四川盆地川东高陡褶皱带石柱复向斜, 油气资源勘探潜力大, 于 2007 年首次进行三维地震采集, 由于早期三维采集方案针对性不足, 存在方位角小、覆盖次数低、滚动线距大采集脚印严重等问题, 采集资料后期经过多次重处理也难以满足目标层系勘探开发需求, 邻区多个区块近几年通过优化设计观测系统方案, 资料成像效果改善明显, 有力支撑目标层系勘探评价。本文针对本工区勘探开发的采集难点, 结合邻区观测系统优化设计经验, 通过基于三维复杂地质模型的观测系统设计技术, 开展观测系统关键参数的论证, 提出了满足本区勘探开发需求的小面元、宽方位及高覆盖的观测系统方案, 通过不同目标体成像结果的振幅和相干体属性对比分析论证了观测系统的可行性, 为 JN 工区三维二次采集高精度观测系统方案优化设计提供理论指导和依据。

关键词 JN 工区; 勘探开发; 二次采集; 高精度观测系统; 三维地质模型; 振幅和相干体属性

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi: 10.6038/pg2026JJ0069

Abstract The JN area is located in the lithogenic syncline of the high and steep fold belt in east Sichuan Basin. The exploration potential of oil and gas resources is great, the first 3D seismic acquisition was carried out in 2007, due to the lack of pertinence of the early 3D acquisition scheme, There are some problems, such as small azimuth, low folds, large rolling line distance and serious acquisition footprints, it is difficult to meet the demand of exploration and development of target layer after repeated reprocessing of acquired data, in recent years, the observation system scheme of several blocks in the adjacent area have been optimized, the imaging effect of the data has been improved significantly, which strongly supports the exploration and evaluation of the target layer. In view of the acquisition difficulties of exploration and development in this work area, combined with the optimization design experience of observation system in neighboring areas, this paper demonstrates the key parameters of the observation system through the observation system design technology based on three-dimensional complex geological model, and puts forward an observation system scheme with small bin, wide azimuth and high fold that meets the exploration and development needs in this area. The feasibility of the observation system is demonstrated by comparing the amplitude and the coherence attribute of different object images, which provides theoretical guidance and basis for the optimization design of the 3D secondary acquisition high-precision seismic observation system in JN area.

CSTR;32085.14.pg2026JJ0069

Keywords JN area; Exploration and development; Secondary acquisition; High precision observation system; Three-dimensional geological model; Amplitude and coherence properties

0 引言

JN 工区位于鄂西渝东地区,自西向东依次为方斗山复背斜、石柱复向斜、齐岳山复背斜等,构造主体主要受方斗山断层和齐岳山断层控制,其中在石柱复向斜带内发现 JN 气田(周洋,2012),油气资源勘探潜力大。自 2018 年先后在二叠系、侏罗系常规/非常规油气取得突破,油气勘探工作快速推进,是下步深化勘探及开发评价的有利地区,但本工区三维采集时间比较早,观测系统方案针对性不足,存在方位角小、覆盖次数低、滚动线距大(滚动 3 线 1200 m)采集脚印严重等问题,采集资料后期经过多次重处理也难以满足目标层系勘探开发需求,邻区多区块近年来通过优化设计观测系统方案,资料成像效果改善明显,有力支撑目标层勘探评价。为进一步加快 JN 地区多层系多领域整体评价与商业油气发现,落实侏罗系浅层气、二叠系茅口组及吴家坪组页岩气,深层震旦—寒武系新领域目标,结合有利目标范围及矿权,对部署探区重新进行二次采集,与邻区高精度资料进行大连片处理,期望整体推进 JN 地区勘探开发进程。

对于二次采集阶段,常规的“点、线”概念的观测系统参数论证难以满足设计要求,需要开展基于三维地质模型的观测系统方案设计论证,许多学者对相关论证思路及方法进行了研究。基于地质目标模型利用三维高斯射线束开展目的层照明实现观测系统关键参数论证及方案优化设计,提出了更合理的观测系统方案(殷厚成和邓飞,2015;肖云飞和殷厚成,2017);对于射线方法而言波动方程在动力学方面更加具有优势,有学者利用波动方程模拟技术开展观测系统方案论证,并基于叠前成像需求的波动方程对面元属性进行对比分析,采集资料成像效果改善明显(蒋韬等,2008;张永华等,2019;崔庆辉等,2020);同时利用射线和波动各自优势相结合的方式开展观测系统设计论证,提高了观测系统参数论证的精度,使得采集参数论证更加合理,在实际应用中取得了良好的效果(刘晨,2013;张光德,2013;梁向豪等,2015);对于炮点最佳激发范围优化方面,目前主要有利用菲涅尔带半径对高斯束照明能

量从新优化,实现炮点优化处理(杨晶,2024)以及利用三维单程傅里叶有限差分波场算子求取地表照明能量分布,确定最佳激发范围,明显提高照明阴影区的照明强度,改善地下阴影区的成像质量(朱金平等,2011);对于观测系统方案评价方面,主要有三维观测系统属性均匀性的定量分析技术,可以对观测系统方案优选提供依据(吴永国等,2012)以及基于叠前偏移成像的高密度观测系统评价方法,能较好地实现地震采集方案优选(邸志欣等,2022);在一体化评价方面,建立了三维开发地震采集、处理、解释和滚评一体化的模式,为油田勘探开发提供了强有力的物探技术支撑。

通过文献调研发现,基于三维地质目标模型的采集设计应用已经很成熟,也取得较好的应用效果,但针对 JN 工区二次采集阶段存在的地震勘探问题,通过在三维模型中构建特殊地质目标体,并在观测系统参数论证过程中加以考虑,最后开展基于地质目标体的高精度观测系统方案优化设计还是首次。本文通过从满足 JN 工区三维二次采集需求出发,对重点观测系统参数进行论证及优化设计(面元、最大排列长度、接收线距、方位角、覆盖次数等),提出最佳的观测系统方案,为野外实际三维二次采集提供理论依据和指导,实现 JN 地区大连片处理,改善地震资料成像效果,达到满足此次二次采集勘探目的。

1 采集难点与技术思路

1.1 二次采集面临的主要问题

通过本工区早期采集资料解决地质问题能力,以及邻区高精度采集效果对比分析,确定以下几个方面问题是本次二次采集需要重点关注:(1)侏罗系浅层埋深 1500 m 以浅,覆盖次数不足 10 次,反射同相轴连续性差,无法指导浅层钻井提速;(2)太平镇断层及龙驹坝等高陡构造膏盐强烈揉皱和小断块发育,存在波组稳定性差、波场不健全问题,资料品质差,影响储量提交及开发井组部署,需进一步提升地震成像精度;(3)吴家坪组微幅构造识别问题,JN 区块实钻结果表明工区发育幅度小于 20 m、跨度小于 100 m 的微幅构造,地震剖面仅出

现轻微的波组扭动或振幅能量变化,很难精细准确解释,直接影响靶点预测精度与钻遇率;(4)茅口组低序级断层识别问题,受多期构造挤压应力影响,断裂及褶皱发育,受地震分辨率影响(纵向分辨率 15 m,横向分辨率 25 m),低序级断层特别是断距小于 15 m 的断距无法识别,对水平井设计和地质导向带来挑战。

采集过程主要包括激发、接收及观测系统设计三个环节,本次二次采集主要是基于上述问题从三个环节寻找针对性的措施。

(1)激发环节:由于工区地表出露岩性主要为侏罗系砂岩、泥岩、砂泥岩,地震地质条件相对较好;灰岩只占极小部分(如图 1),激发条件总体较好,分频结果表明,资料频带较宽,信噪比较高,资料基础较好,有利于高分辨率采集(如图 2),整个 JN 工区激发参数基本相当,只是井深和药量细微优化,具体激发参数由野外试验确定。

(2)接收环节:主要是从早期的小组合到现在邻区的单点单道接收,但是通过对不同接收方式的单炮进行分频扫描,发现对于高频段(70~140 Hz)资料表明组合接收信噪比较高,有效频宽较宽,节点高频噪声较强(如图 3),也是通过野外进行小串组合和单点接收试验,确定最佳接收方式(陈浩,2023)。

所以本文主要是在观测系统方案设计方面开展针对性研究,提出最佳的观测系统方案满足本区二次采集设计需求。

1.2 采集设计技术思路

通过本工区早期地震采集资料解决地质问题能

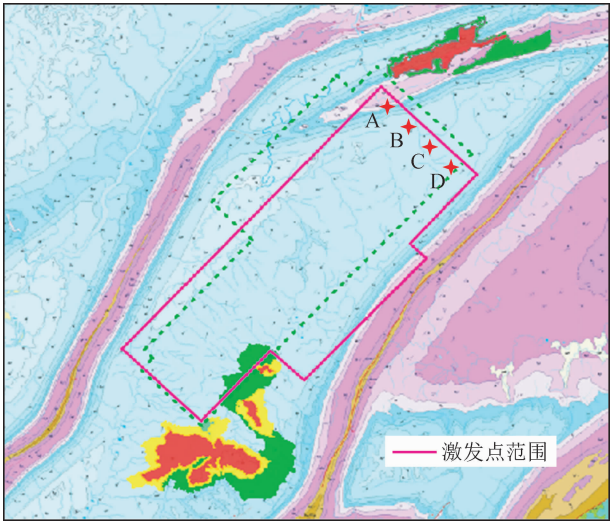


图 1 激发点范围
Fig. 1 The range of source points

力及本次二次采集的地质任务,结合邻区高精度采集成像效果改善,综合多因素制定本区的采集设计技术思路(如图 4),本文涉及的观测系统参数论证及方案评价技术主要有以下几个方面:

(1)基于非拓扑一致性的三维网格追踪建模技术(成都理工大学,2017;唐云等,2011;邓飞和周亚同,2009;邓飞和黄地龙,2009):通过导入或者生成曲面,对曲面延拓、交互裁剪操作,实现边界自动封闭及块体自动追踪处理,支持深度域二维解释剖面和三维解释层位数据建模。

(2)三维观测系统面元均匀性评价技术(吴永国等,2012;中国石油化工股份有限公司和中国石油化工有限公司石油物探技术研究院,

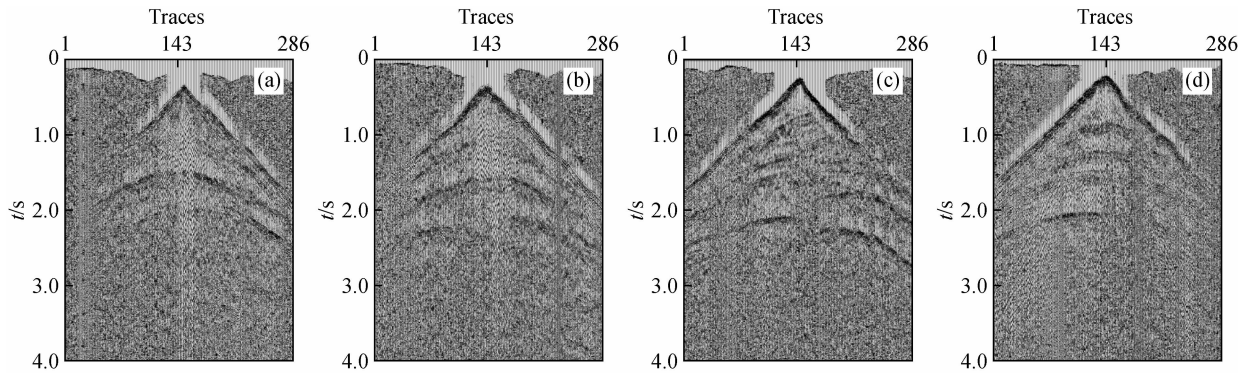


图 2 本工区早期不同岩性激发单炮分频结果(70~140 Hz)

(a) A 点位置-灰岩;(b) B 点位置-泡砂岩;(c) C 点位置-砂岩;(d) D 点位置-砂岩。

Fig. 2 The results of single-shot frequency crossover excitation by different lithologies in the early stage of this work area(70~140 Hz)

(a) Point A location-limestone; (b) Point B location-bubble sandstone; (c) Point C location-sandstone; (d) Point D location-sandstone.

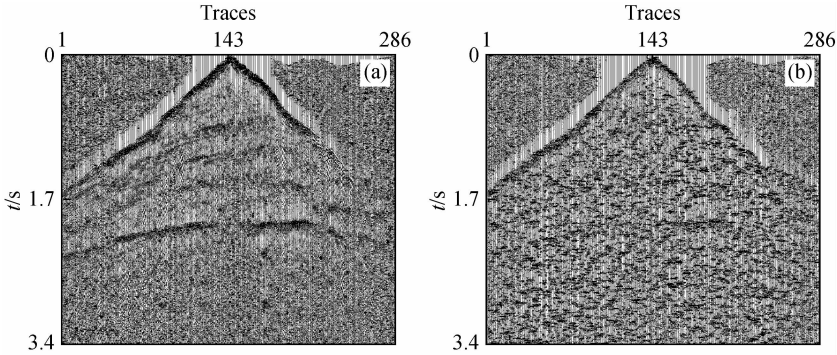


图3 本工区小组合和邻区单点接收单炮分频结果(70~140 Hz)
(a) 小组合接收;(b) 单点接收.

Fig.3 The crossover results of the small combination of the work area and the single point of the adjacent area receiving a single shot(70~140 Hz)
(a) The small combination receive; (b) The single point receive.

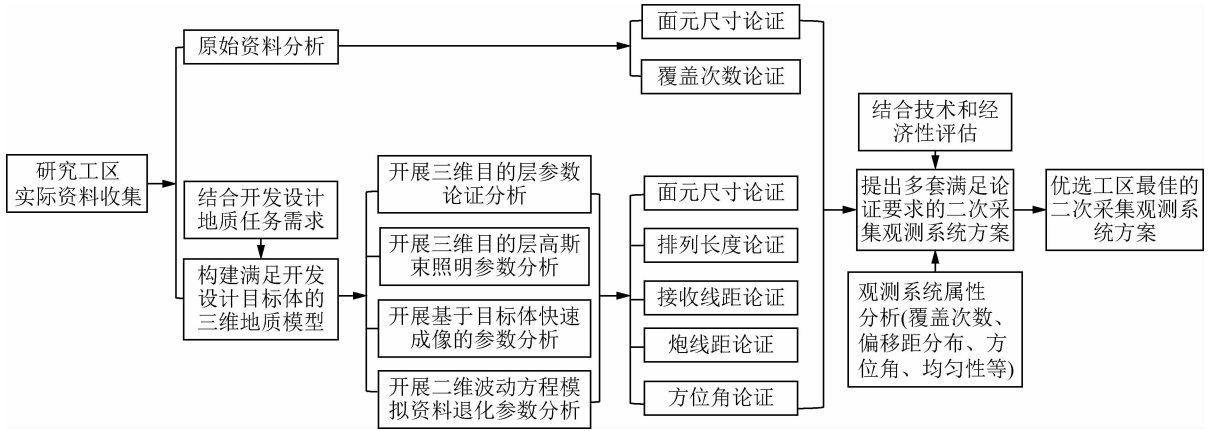


图4 本工区开发地震设计技术思路

Fig.4 The technical ideas for the development of seismic design work in this work area

2020):计算每个面元方位角和炮检距二维空间分布与标准面元的相关度,定量评价观测系统面元的均匀性.

(3)基于三维目的层高斯束双向照明技术(殷厚成和邓飞,2015):将波场分解到具有一定宽度的射线束上实现波场的模拟和延拓,通过检波点射线坐标反向变换,根据互易性原理实现观测系统双向照明,不仅大幅度提高了计算效率,而且有效改善了照明精度.

(4)基于点扩散函数(PSF)的快速成像观测系统论证评价技术(向晨等,2022):通过射线追踪正演等方式快速获取点扩散函数,实现对Hessian算子的近似,再利用高维空间卷积算法,直接实现模型的偏移成像,提升计算效率,满足了观测系统设计阶段

对成像高时效性的实际需求.

2 面向二次采集观测系统方案设计

2.1 三维复杂地质模型构建

进入二次采集部署阶段,需要基于三维复杂地质模型开展观测系统设计论证,因而对于三维模型的构建至关重要,主要考虑以下几个方面:

(1)真地表模型:工区地形起伏剧烈,相对高差达1400 m,传统水平地表三维模型满足不了要求,通过获取工区实际地表高程数据(DEM数据)建立真地表模型.

(2)构造模型:通过收集工区深度域解释层位数据和断层数据,利用基于非拓扑一致性的三维网格追踪建模技术实现整个三维构造模型的建立.

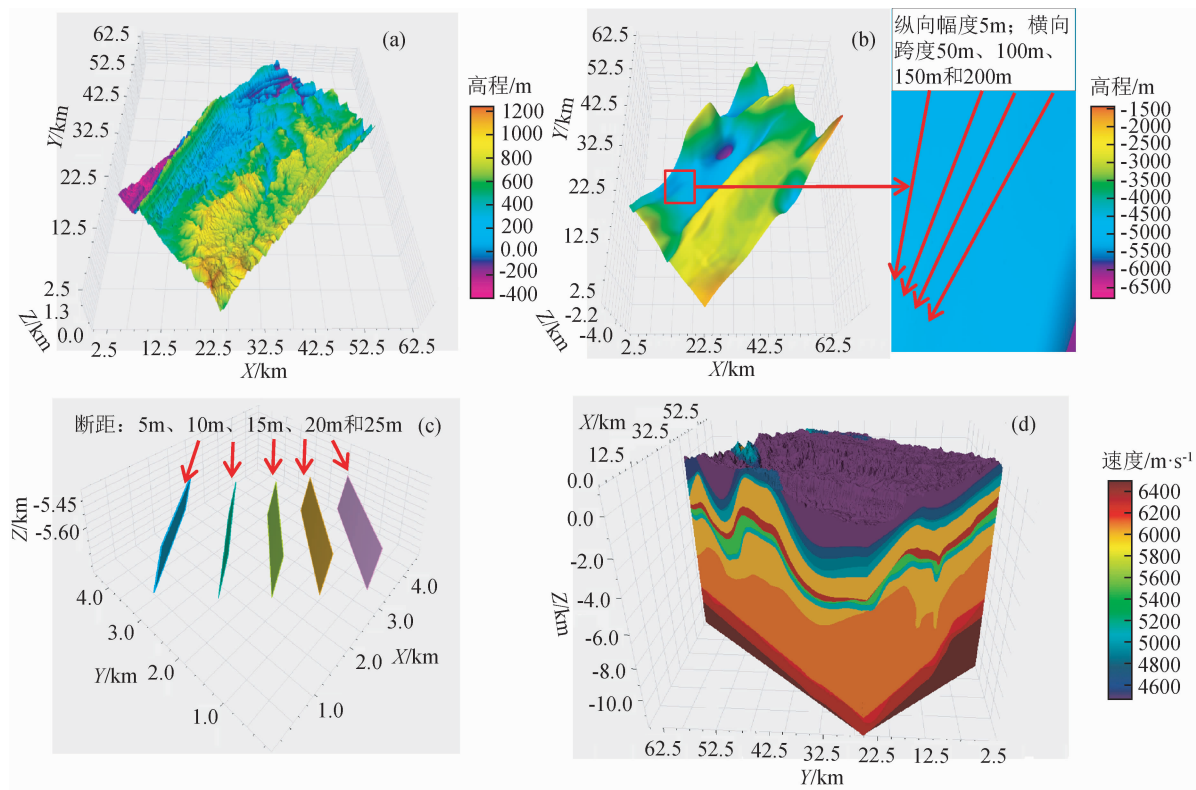


图5 本工区三维复杂地质模型

(a) 真地表模型;(b) 吴家坪组微幅构造;(c) 茅口组低序级断层;(d) 三维综合地质模型.

Fig.5 Three-dimensional complex geological model of the work area

(a) True surface model; (b) Microstructure of Wujiaping Formation; (c) Low-order faults of the Maokou Formation; (d) Three-dimensional integrated geological model.

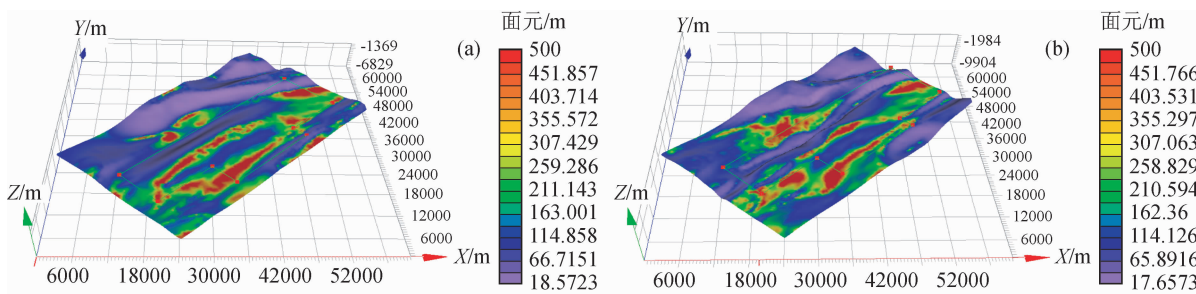


图6 三维层面元尺寸论证

(a) 侏罗系东岳庙段分析结果;(b) 二叠系吴家坪组分析结果.

Fig.6 Demonstration of three-dimensional layer bin size

(a) Analysis results of Jurassic Dongyue Miao Section; (b) Analysis results of the Permian Wujia Ping Formation.

(3)微幅构造及低序级断层模型:二次采集设计主要面临的地质问题,需要在三维模型中得到体现,微幅构造主要发育在二叠的吴家坪组内,厚度5 m,微幅构造跨度共设计四个尺寸,分别是50 m、100 m、150 m和200 m;低序级断层主要发育在二叠的茅口组,共涉及五组不同断距,分别是5 m、10 m、

15 m、20 m和30 m.

通过JN工区地表、构造及储层特征,建立三维综合地质模型(如图5),模型尺寸大小,长为56800 m,宽为34200 m,深度为13000 m,包含的主要目的层有侏罗系东岳庙段、中三叠巴东组、二叠吴家坪组、二叠茅口组、志留系及寒武系等.

2.2 观测系统关键参数论证分析

基于三维地质模型及实际资料主要开展面元、覆盖次数、最大排列长度、接收线距/炮排距、方位角等关键参数论证分析。

2.2.1 面元尺寸论证分析

(1) 三维目的层位参数论证

利用三维目的层位参数论证方法,求取整个目的层上满足横向分辨率要求的面元尺寸,有效解决传统方法通过选取几个典型点位置计算的局限性.侏罗系东岳庙段目的层面元分析范围为 18.5 m 至 500 m,二叠系吴家坪组目的层面元分析范围为 17.6 m 至 500 m;综合侏罗系及吴家坪组目的层分析结果,建议面元选择应不大于 18 m(如图 6)。

(2) 不同面元高陡构造模拟资料 PSDM 成像分析

太平镇断层及龙驹坝等高陡构造成像信噪比低,通过典型二维模型开展不同面元尺寸高陡构造成像退化分析,可以发现面元 25 m 高陡构造成像不清晰,6.25 m 高陡构造成像精度最高,面元 12.5 m 高陡构造成像满足要求,因此从高陡构造成像分析面元尺寸不应大于 12.5 m(如图 7)。

(3) 不同面元特殊目标储层快速成像分析

选取微幅构造作为特殊目标体进行不同面元尺寸三维快速成像,提取相应振幅属性进行量化分析,优选最佳的面元尺寸满足开发勘探需求,可以发现对于微幅构造成像,面元 25 m × 25 m 和面元 25 m × 50 m 成像精度不高,而面元 6.25 m × 12.5 m 和面元 12.5 m × 25 m 成像精度差异不大(如图 8),通过分析认为面元不应大于 12.5 m × 25 m 能满足微幅构造成像需求。

综合考虑三维目的层满足横向分辨率要求、不同面元高陡构造成像及不同面元微幅构造成像需求,本工区面元尺寸不应大于 12.5 m × 25 m。

2.2.2 最大排列长度论证分析

本次开发地震主探二叠吴家坪组,同时兼探深层寒武系,因此通过深层目的层高斯束照明及模拟资料速度谱分析开展最大排列长度论证。

(1) 不同排列长度目的层高斯束照明分析

对于寒武系目的层设计多组不同排列长度进行照明,通过照明分析,当最大排列长度小于 9331 m,随着排列长度的增加,照明能量变化明显,但是当达到 9331 m 或者再增加,目的层照明能量差异不大(图中箭头所示),因此对于寒武系目的层最大排列长度不小于 9331 m 较适合(如图 9)。

(2) 不同排列长度速度谱分析

从模拟资料不同排列长度退化对于速度谱收敛情况分析可知,随着排列长度的增大,有利于速度谱的收敛(红色箭头为吴家坪位置,绿色箭头为寒武系位置),对于吴家坪组排列长度不小于 7000 m;寒武系下组合排列长度不小于 9000 m(如图 10)。

综合两者考虑,基础观测系统满足吴家坪组最大排列长度采用 7000 m 左右比较合适.后期节点采集观测系统拓展满足寒武系最大排列长度建议不小于 9000 m。

2.2.3 接收线距/炮排距论证分析

通过基于三维模型目的层照明开展接收线距和炮排距论证,通过照明分析可知,减小接收线距能明显改善吴家坪组照明强度,建议不大于 200 m 较合适(如图 11);减小炮排距能明显改善吴家坪组照明强度,炮排距越小勘探成本越高,建议 300 m 左右较合适(如图 12)。

2.2.4 方位角论证分析

方位角参数的论证对于 JN 工区开发地震采集至关重要,基于三维模型对茅口组低序级断裂进行快偏成像,提取对应的相干属性体对比分析,对应的模型切片如图 9a 所示,结果表明随着方位角的增大,茅口组断层刻画更清楚,能量更高,建议 0.7 左右较合适,从模型角度能够检测到 5 m 小断裂(如图 13)。

2.2.5 覆盖次数论证分析

根据实际资料进行二叠目的层不同有效覆盖次数退化处理分析,提取二叠吴家坪组在复杂构造部位成像剖面信噪比,建立目的层有效覆盖次数-信噪比曲线,指导覆盖次数的优选,通过曲线可知石柱复向斜二叠系有效覆盖次数达到 100 次,为信噪比拐点(如图 14)。

2.2.6 起伏地表对目的层覆盖次数影响分析

本工区地表条件非常复杂,起伏剧烈(具体描述见 2.1 章节内容),对于目的层属性影响较大,为了量化对比论证,在图 5 所述模型基础上,把起伏地表改成水平地表,模型其他部分及地层速度不变,基于相同的一套观测系统方案(基础面元 12.5 m × 25 m),采用两点射线计算方法对侏罗系东岳庙段及二叠系吴家坪目的层覆盖次数属性进行对比分析.考虑到由于模型尺寸大,使得计算量较大,为了便于计算,同时扩大面元(50 m × 50 m)进行属性统计分析,其他参数保持不变,目的层覆盖次数统计如图 15 所示,可知地表起伏影响目的层属性均匀性,目的层越浅影响越明显,反之亦然。

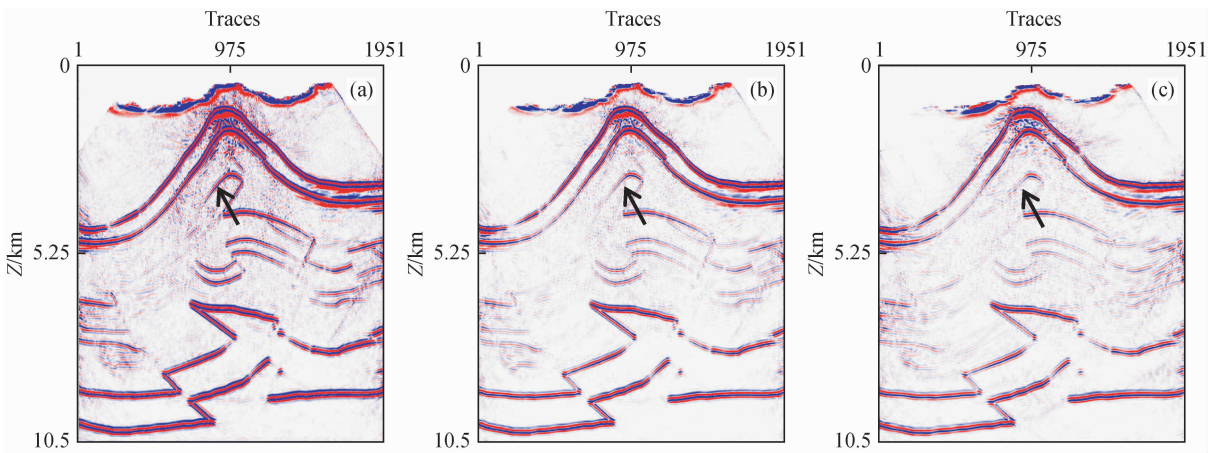


图 7 不同面元高陡构造 PSDM 成像分析

(a) 面元 6.25 m 退化结果;(b) 面元 12.5 m 退化结果;(c) 面元 25 m 退化结果.

Fig.7 PSDM imaging analysis of high and steep structures of different bins

(a) Degradation results of 6.25 m bin size;(b) Degradation results of 12.5 m bin size;(c) Degradation results of 25 m bin size.

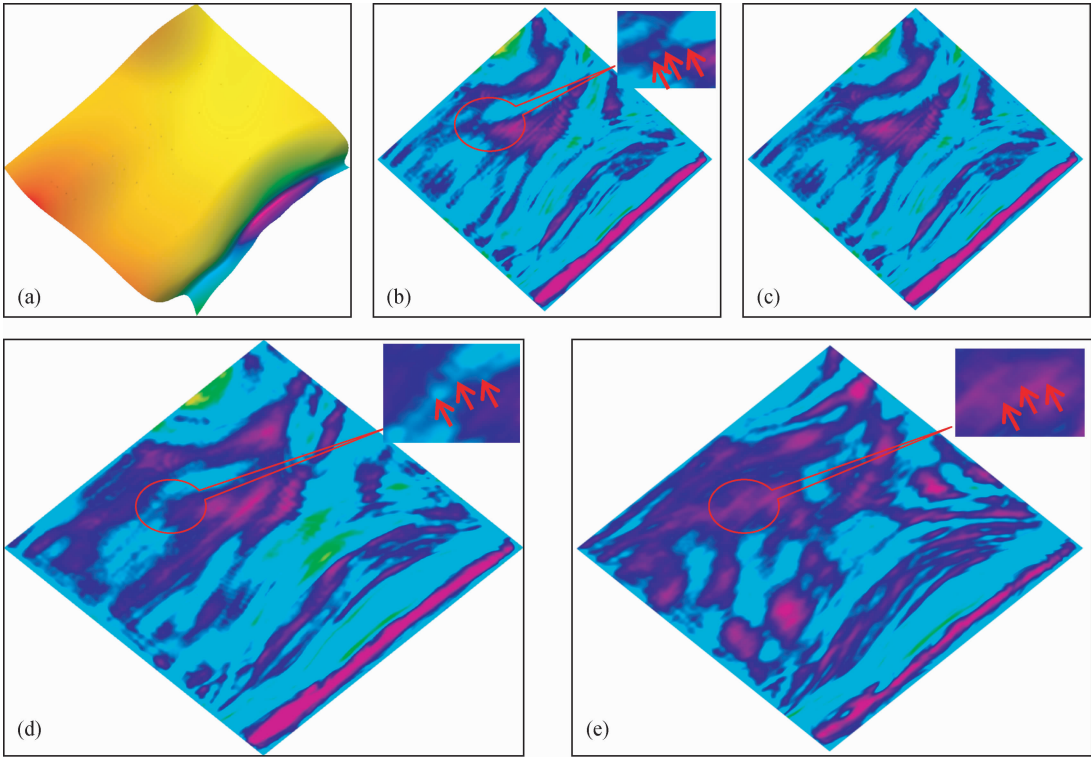


图 8 不同面元微幅构造快速成像振幅属性分析

(a) 吴家坪组微幅构造沿层切片;(b) 面元 12.5 m×12.5 m;(c) 面元 12.5 m×25 m;(d) 面元 25 m×25 m;(e) 面元 25 m×50 m.

Fig.8 Analysis of micro-amplitude structures of different bins for PSF amplitude attributes

(a) Slice along the layer of the microstructure of the Wujiaping Formation;(b) bin size of 12.5 m×12.5 m;

(c) bin size of 12.5 m×25 m;(d) bin size of 25 m×25 m;(e) bin size of 25 m×50 m.

2.3 多套满足需求的观测系统方案设计

根据 2.2 节关键参数论证结果,确定观测系统基本参数(如表 1).在基本参数基础上,提出 2 套方案(方案 1、方案 2),最左侧是邻区 XC 高精度三维

观测系统方案,目的是进行方案对比(如表 2),通过对比可知,本次二次采集观测系统方案在邻区基础上主要在面元、炮排距、方位角和覆盖次数等方面得到进一步改善和提升.

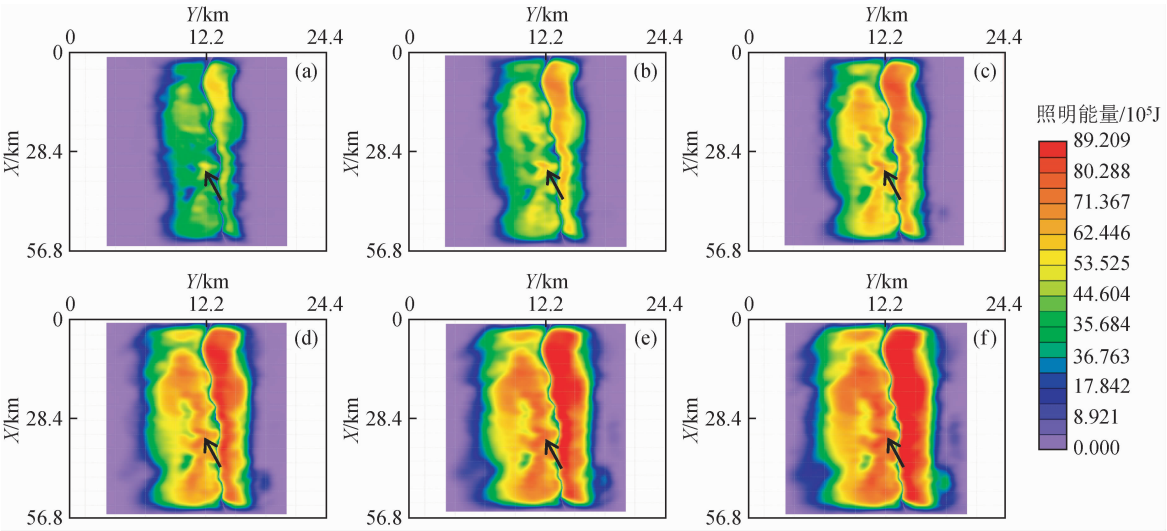


图 9 不同排列长度寒武系目的层照明分析
(a)最大排列长度 5087 m;(b)最大排列长度 6071 m;(c)最大排列长度 7121 m;(d)最大排列长度 8213 m;
(e)最大排列长度 9331 m;(f)最大排列长度 10468 m.

Fig. 9 Lighting analysis of different arrangement lengths of Cambrian target layer

(a) The maximum length of the arrangement is 5087 m;(b) The maximum length of the arrangement is 6071 m;(c) The maximum length of the arrangement is 7121 m;(d) The maximum length of the arrangement is 8213 m;(e) The maximum length of the arrangement is 9331 m;(f) The maximum length of the arrangement is 10468 m.

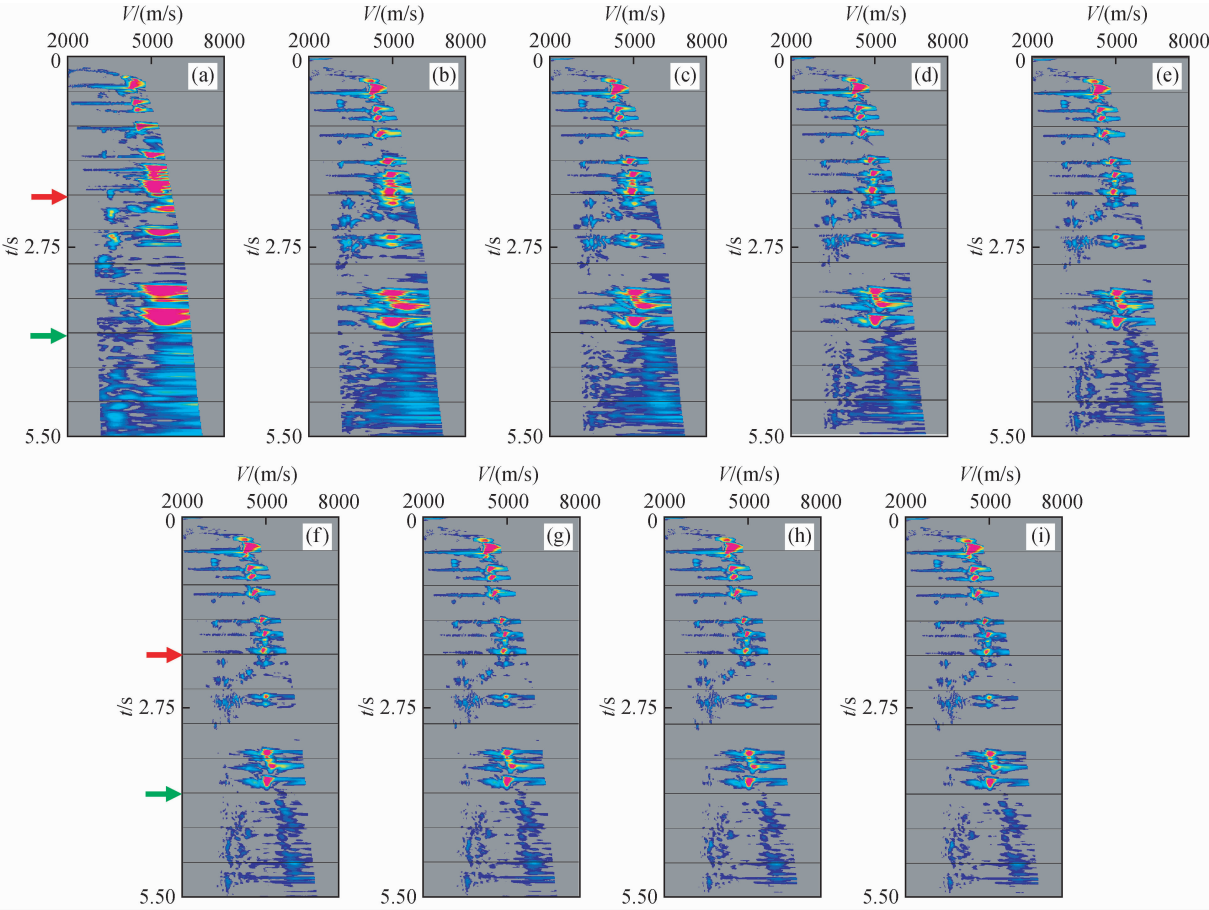


图 10 不同排列长度速度谱分析

(a) 排列长度 0 ~ 4000 m;(b) 排列长度 0 ~ 5000 m;(c) 排列长度 0 ~ 6000 m;(d) 排列长度 0 ~ 7000 m;(e) 排列长度 0 ~ 8000 m;
(f) 排列长度 0 ~ 9000 m;(g) 排列长度 0 ~ 10000 m;(h) 排列长度 0 ~ 11000 m;(i) 排列长度 0 ~ 12000 m.

Fig. 10 Velocity spectrum analysis of different arrangement lengths

(a) Arrangement length 0 ~ 4000 m;(b) Arrangement length 0 ~ 5000 m;(c) Arrangement length 0 ~ 6000 m;
(d) Arrangement length 0 ~ 7000 m;(e) Arrangement length 0 ~ 8000 m;(f) Arrangement length 0 ~ 9000 m;
(g) Arrangement length 0 ~ 10000 m;(h) Arrangement length 0 ~ 11000 m;(i) Arrangement length 0 ~ 12000 m.

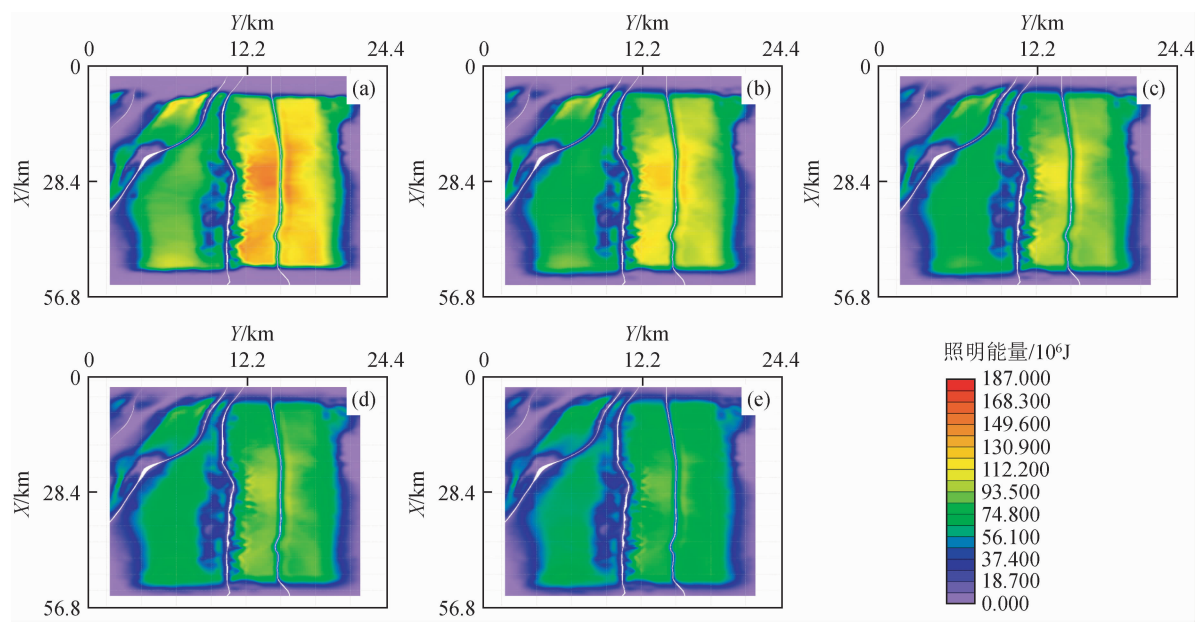


图 11 不同接收线距吴家坪组目的层照明分析

(a) 接收线距 100 m;(b) 接收线距 200 m;(c) 接收线距 250 m;(d) 接收线距 300 m;(e) 接收线距 350 m.

Fig. 11 Lighting analysis of target layers with different receiving line distances in Wujiaping Formation

(a) Receiving line distance is 100 m;(b) Receiving line distance is 200 m;(c) Receiving line distance is 250 m;
(d) Receiving line distance is 300 m;(e) Receiving line distance is 350 m.

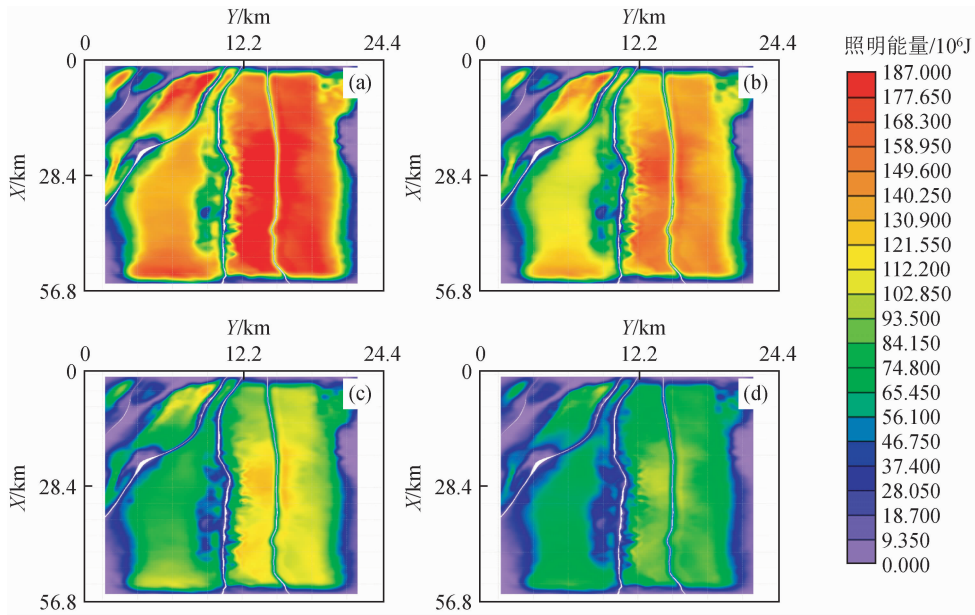


图 12 不同炮排距吴家坪组目的层照明分析

(a) 炮排距 200 m;(b) 炮排距 300 m;(c) 炮排距 400 m;(d) 炮排距 500 m.

Fig. 12 Lighting analysis of target layers with different source line distances in Wujiaping Formation

(a) Source line distance is 200 m;(b)Source line distance is 300 m;(c)Source line distance is 400 m;
(d)Source line distance is 500 m.

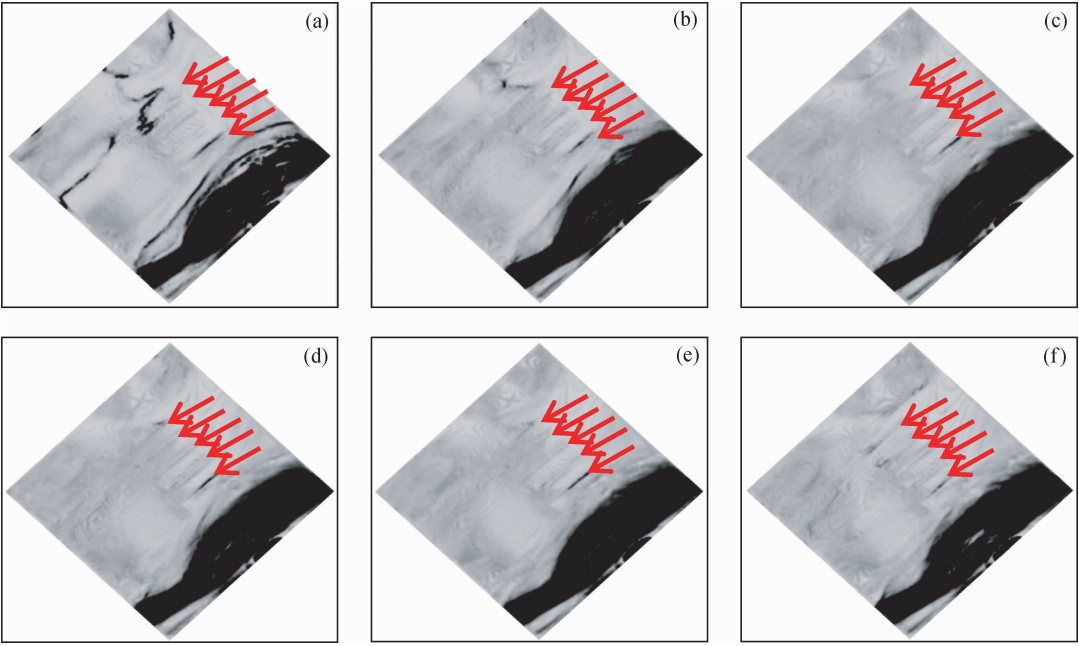


图 13 不同方位角茅口组低序级断裂检测分析

(a) 方位角 0.26;(b) 方位角 0.36;(c) 方位角 0.53;(d) 方位角 0.66;(e) 方位角 0.79;(f) 方位角 0.93.

Fig. 13 Detection and analysis of low-order fractures in the Maokou Formation at different azimuth angles

(a) Azimuth is 0.26;(b) Azimuth is 0.36;(c) Azimuth is 0.53;(d) Azimuth is 0.66;(e) Azimuth is 0.79;(f) Azimuth is 0.93.

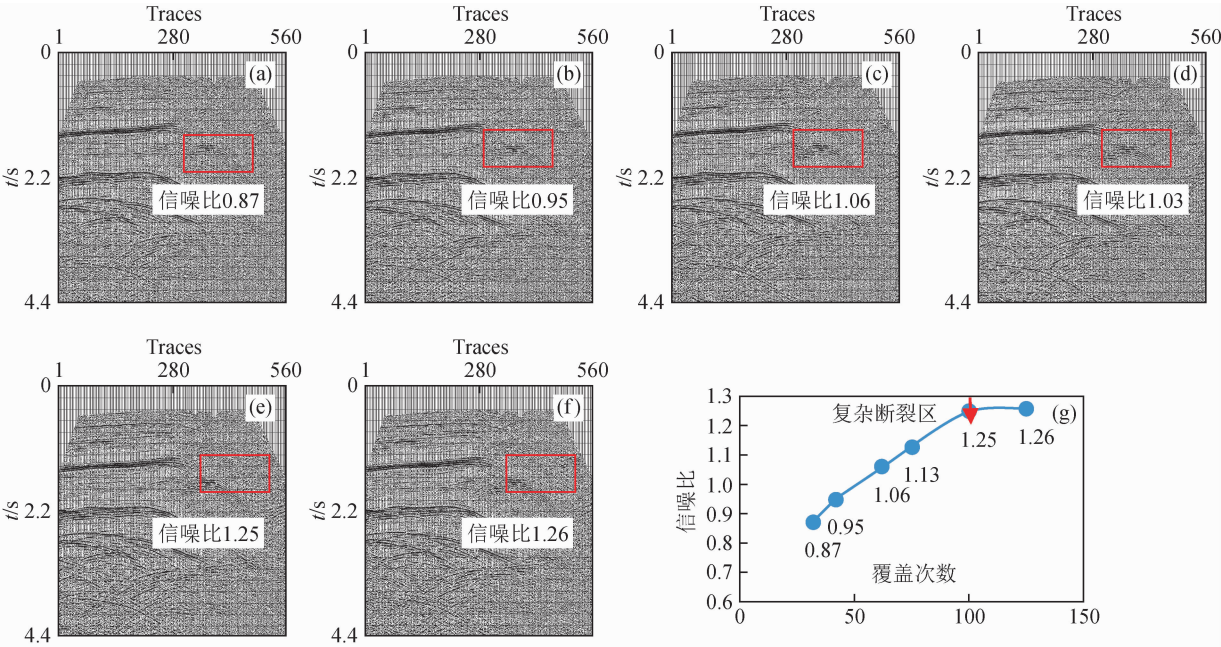


图 14 不同覆盖次数目的层信噪比分析

(a) 有效覆盖次数 31 ~ 33 次;(b) 有效覆盖次数 41 ~ 44 次;(c) 有效覆盖次数 62 ~ 65 次;(d) 有效覆盖次数 75 ~ 78 次;
(e) 有效覆盖次数 100 ~ 104 次;(f) 有效覆盖次数 124 ~ 130 次;(g) 有效覆盖次数-信噪比曲线.

Fig. 17 Signal-to-noise ratio analysis of destination layers with different coverage times

(a) The number of effective coverages is 31 ~ 33 times;(b) The number of effective coverages is 41 ~ 44 times;
(c) The number of effective coverages is 62 ~ 65 times;(d) The number of effective coverages is 75 ~ 78 times;
(e) The number of effective coverages is 100 ~ 104 times;(f) The number of effective coverages is 124 ~ 130 times;
(g) Effective coverage-signal-to-noise ratio curve.

表 1 观测系统基本参数

Table 1 Basic parameters of the observation system

关键参数	优选参数
面元尺寸	≤12.5 m×25 m
覆盖次数	二叠系有效覆盖次数不低于 100 次
最大排列长度	吴家坪组 7000 m 左右;寒武系下组合 9000 m 左右
接收线距	200 m 左右
炮排距	300 m 左右
方位角	根据低序级裂缝检测结果确定 0.7 左右较合适

表 2 观测系统优化设计方案

Table 2 Optimal design scheme of observation system

	2024 邻区 XC 三维	方案 1	方案 2
观测系统	L32×S4×R208×1+线束式	L36×S4×R416×1+线束式	L36×S4×R432×1+线束式
纵向观测形式	5175-25-50-25-5175	5187.5-12.5-25-12.5-5187.5	5387.5-12.5-25-12.5-5387.5
面元大小	25 m×25 m	12.5 m×25 m	12.5 m×25 m
覆盖次数	208 次(16×13)	234 次(18×13)	324 次(18×18)
接收道数	6656(208×32)道	14976(416×36)道	15552(432×36)道
道间距/接收线距	50 m/200 m	25 m/200 m	25 m/200 m
炮点距/炮排距	50 m/400 m	50 m/400 m	50 m/300 m
纵向最大炮检距	5175 m	5187.5 m	5387.5 m
最大排列长度	6071.3 m	6300.1 m	6465.7 m
最大非纵距	3175 m	3575 m	3575 m
束间滚动距	200 m(1 L)	200 m(1 L)	200 m(1 L)
横纵比	0.614	0.69	0.66
炮道密度	33.28 万	74.88 万	103.68 万
炮密度	50	50	66.66

3 最佳观测系统方案优选及预期采集效果分析

3.1 最佳观测系统方案优选

下面对提出的两套方案和邻区方案进行属性等方面对比分析,再结合勘探成本投入,最后优选最佳的观测系统方案。

(1)观测系统属性分析

通过对提出的两套方案和邻区 XC 三维方案属性进行对比分析,从目的层方位角玫瑰图可知,方案 1 和方案 2 基本相当,要优于 2024 年 XC 方案(如图 16);从面元炮检距分布结果可知,相同面元尺寸条件下方案 1 和方案 2 比邻区方案覆盖次数更高、偏移距更加均匀分布(如图 17);从叠前均匀性分析结果可知,相同面元尺寸条件下方案 2 优于方案 1 优于 2024 年 XC 方案(如图 18)。

(2)目的层照明分析

基于构建的三维模型对提出的两套方案及 2024 年 XC 方案进行目的层照明分析,从照明结果可知方案 2 优于方案 1 优于 2024 年 XC 三维(如图 19)。

(3)勘探成本对比分析

本次开发部署满次面积 663 km²,对方案 1、方案 2 和 2024 年 XC 方案进行勘探成本及工作量统计分析,对比可知基于总炮数计算方案 1 成本低于方案 2(如表 3)。

表 3 观测系统方案勘探成本对比

Table 3 Comparison of exploration costs of observing system schemes

	2024 年 XC 三维	方案 1	方案 2
满覆盖面积 km ²	663	663	663
一次覆盖面积 km ²	1309	1326	1336
束数	257	258	258
炮面积(km ²)	961	967	966
总炮数	49168	49444	65476
炮密度(炮/km ²)	50	50	66.66
炮排数	54	54	72
道面积(km ²)	1684	1718	1740
总道数	169328	345216	349728
炮道密度(万)	33.3 万	74.88 万	103.68 万
排列线数	288	293	293

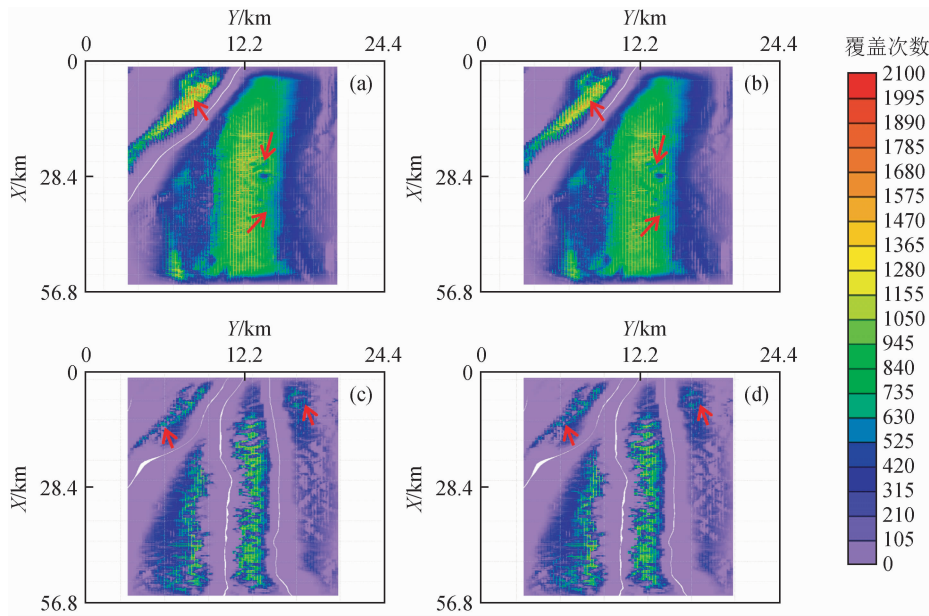


图 15 不同地表条件对目的层属性影响分析

(a) 东岳庙段属性统计-水平地表; (b) 东岳庙段属性统计-起伏地表; (c) 吴家坪组属性统计-水平地表; (d) 吴家坪组属性统计-起伏地表.

Fig. 15 Analysis of the impact of different surface conditions on the properties of the target layer

(a) Statistical attributes of Dongyue Miao section-horizontal ground surface; (b) Statistical attributes of Dongyue Miao section-fluctuant ground surface; (c) Statistical attributes of Wujia Ping section-horizontal ground surface; (d) Statistical attributes of Wujia Ping section-fluctuant ground surface.

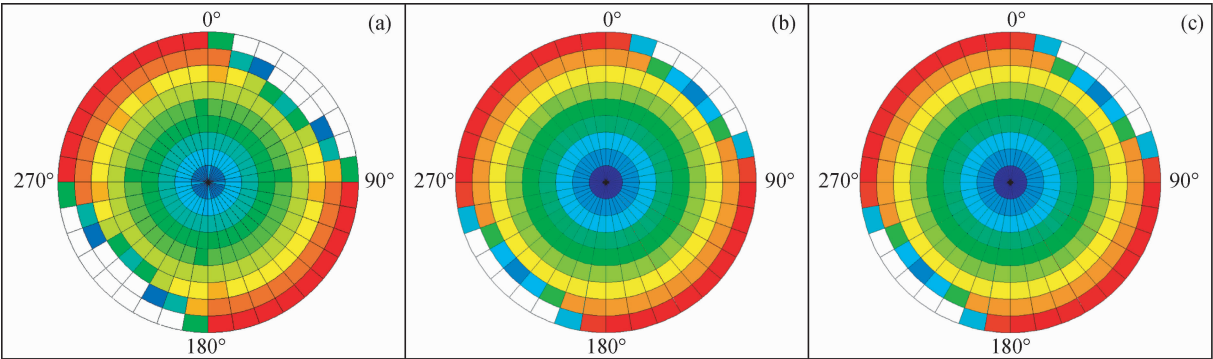


图 16 不同方案吴家坪组目的层方位角分析

(a) 2024 年 XC 方案; (b) 方案 1; (c) 方案 2.

Fig. 16 Analysis of the azimuth angle of the target layer of the Wujia Ping Formation under different schemes

(a) XC scheme in 2024; (b) Scheme 1; (c) Scheme 2.

结合上述三个方面的对比分析,围绕部署地质目标,对观测系统方案进行优选,工区总体采用方案 1(炮排距 400 m),但在产建主体区采用方案 2(炮排距 300 m),其他参数一致.

3.2 方案预期采集效果分析

本次推荐方案相较于 2024XC 三维对比,具有

更小面元、更高覆盖、更宽方位角及更长的排列长度,对于微幅构造成像和低序级别裂缝检测具有更强的针对性;加之 XC 方案在最近部署的几块三维中,取得了较好的效果,落实页岩层的地层展布特征、断裂成像方面满足需求,相较于 2020 年对早期 JN 三维采集(2007 年采集)资料重处理成像效果大

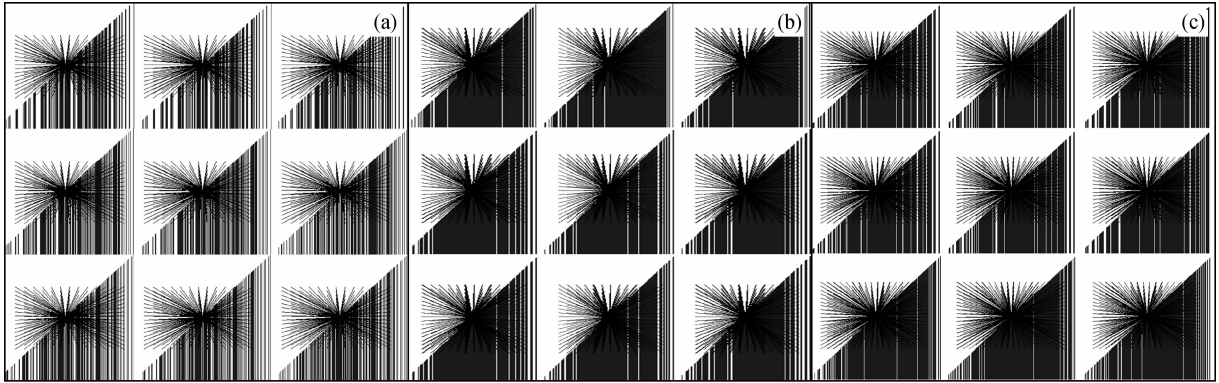


图 17 不同方案面元炮检距统计分析

(a) 2024 年 XC 方案(面元 25 m×25 m);(b) 方案 1(面元 25 m×25 m);(c) 方案 2(面元 25 m×25 m) .

Fig. 17 Statistical analysis of the detection distance of different schemes

(a) XC scheme in 2024(bin size of 25 m×25 m);(b) Scheme 1(bin size of 25 m×25 m);(c) Scheme 2(bin size of 25 m×25 m) .

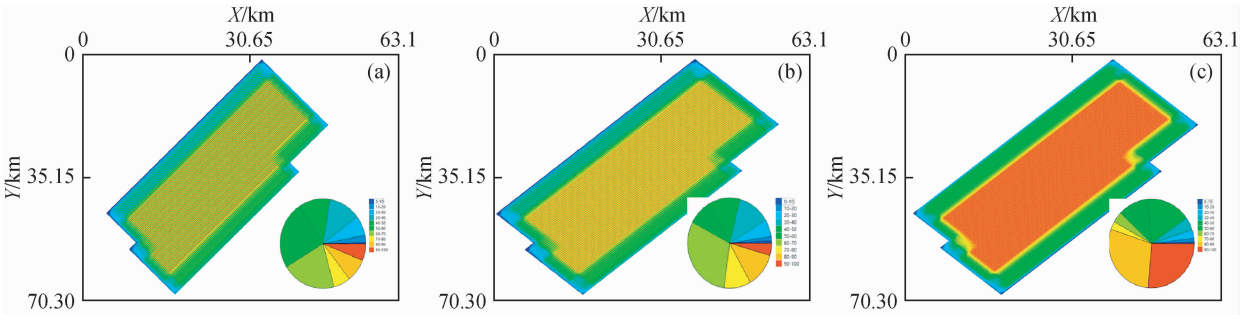


图 18 不同方案叠前均匀性分析

(a)2024 年 XC 方案(面元 25 m×25 m);(b)方案 1(面元 25 m×25 m);(c)方案 2(面元 25 m×25 m) .

Fig. 18 Pre-stack uniformity analysis of different schemes

(a) XC scheme in 2024(facets of 25 m×25 m);(b) Scheme 1(facets of 25 m×25 m);(c) Scheme 2(facets of 25 m×25 m) .

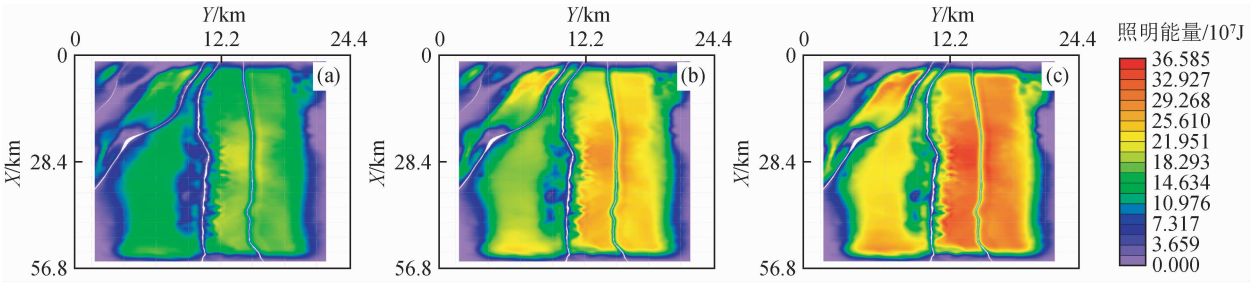


图 19 不同方案目的层照明结果

(a) 2024 年 XC 方案;(b) 方案 1;(c) 方案 2.

Fig. 19 Destination layer lighting results for different schemes

(a) XC scheme in 2024;(b) Scheme 1;(c) Scheme 2.

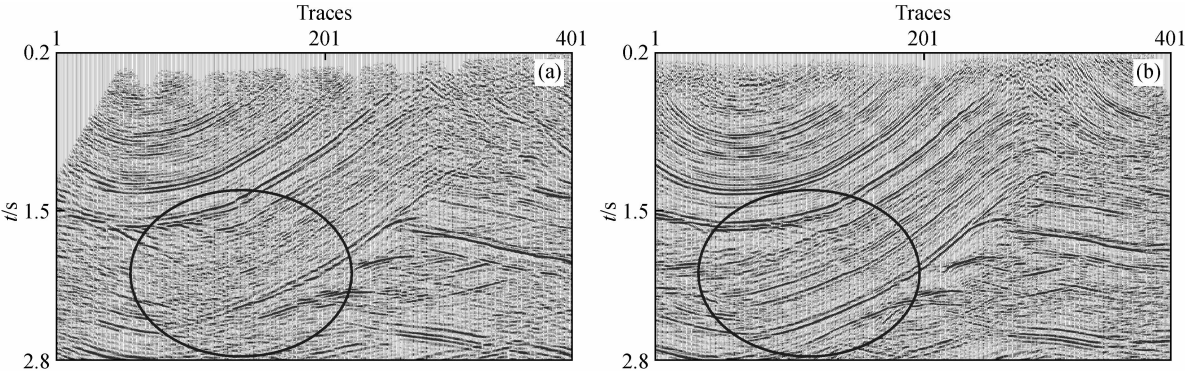


图 20 两期邻区新老采集三维资料成像对比
(a) 2020 年对早期 JN 三维重处理;(b) 2024 年 XC 三维.
Fig. 20 Comparison of 3D data imaging of new and old acquisition data in the two neighboring areas
(a) The early JN 3D reprocessing was carried out in 2020 ;(b) XC 3D data imaging in 2024.

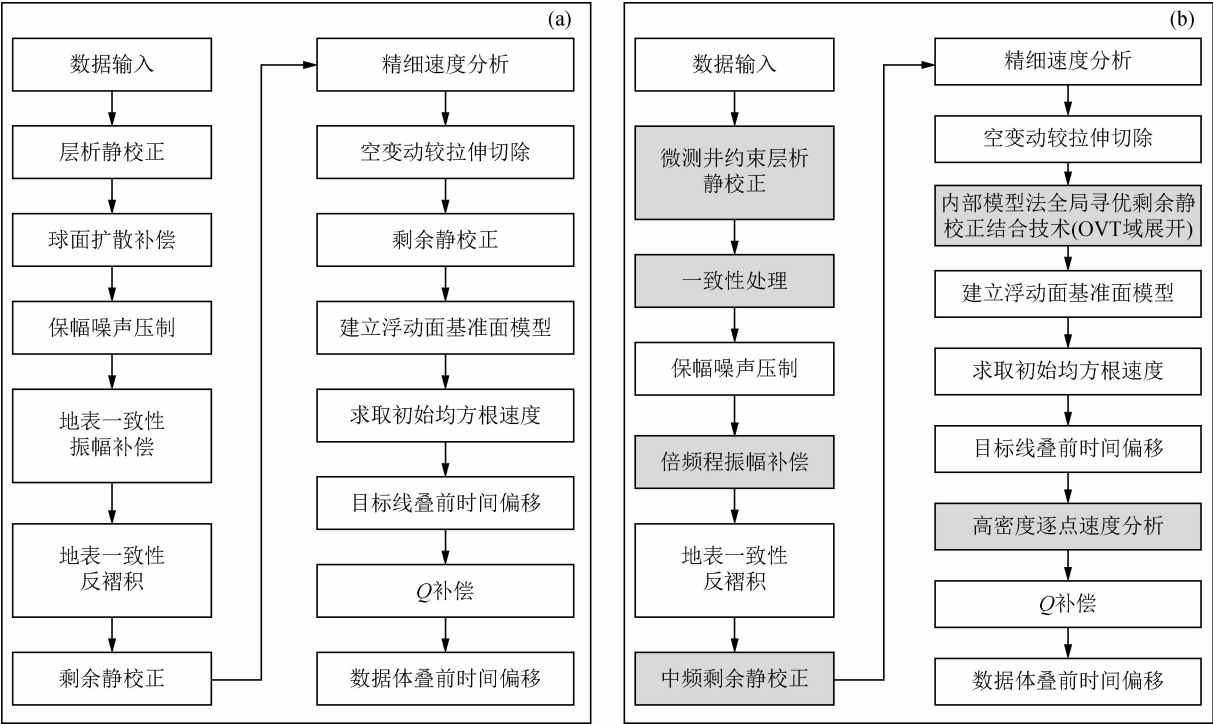


图 21 两期三维资料处理流程关键环节对比
(a) 2020 年早期 JN 三维重处理流程;(b) 2024 年 XC 三维处理流程.
Fig. 21 Comparison of key links in the processing procedures for two periods of 3D data
(a) The early JN 3D reprocessing flow in 2020 ;(b) XC 3D processing flow in 2024.

幅改善(如图 20),两期资料处理流程总体一致(如图 21),差异步骤灰色充填标注,因此本方案解决地质问题能力能够得到保障。

4 认识与结论

通过针对 JN 地区二次采集阶段的观测系统优

化设计研究,得出以下几点认识与结论:
(1) 本次设计论证的关键参数,面元不大于 12.5 m×25 m、排列长度吴家坪组 7000 m 左右、深层寒武系 9000 m 左右、二叠系有效覆盖次数不低于 100 次、接收线距 200 m 左右、方位角 0.7 左右,提出的观测系统优化方案符合小面元、高覆盖、宽方

位、长排列的技术思路,能够有效解决JN工区开发阶段面临的微幅构造及高陡构造成像、低序级断裂识别问题。

(2)对于中石化油田面临二次采集阶段的重点探区,通过构建三维复杂精细地质模型,把二次采集阶段面临的地质问题转化为特殊目标体融入三维模型中开展观测系统关键参数论证分析是非常有必要的,可以加强与二次采集观测系统设计间的联系,提高采集方案的合理性、降低二次采集地震勘探的风险。

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Chen H. 2023. Optimized seismic acquisition for fractured-vuggy reservoirs in Tarim Basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 62(6): 1030-1039.

Chengdu University of Technology. 2017. Non-topology-consistency three-dimensional grid block tracking algorithm: China, 201610806317.3 (in Chinese).

China Petroleum and Chemical Corporation, Sinopec Geophysical Research Institute. 2020. Surface element uniformity evaluation method and system for three-dimensional seismic observation system: China, 201811168481.1 (in Chinese).

Cui Q H, Shang X M, Teng H H, *et al.* 2020. Design of a high-density three-dimensional seismic geometry and its application. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 59(1): 12-22, 59.

Deng F, Huang D L. 2009. 3-D geological modeling based on a section and Gaussian beam forward modeling. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition) (in Chinese)*, 36(4): 434-442.

Deng F, Zhou Y T. 2009. Section 3D geological block modeling based on surface interpolation. *Microelectronics & Computer (in Chinese)*, 26(9): 173-176.

Di Z X, Xie J P, Gu Y T, *et al.* 2022. Analysis and evaluation method for high-density geometry based on prestack migration imaging--A case study in the piedmont zone of southern Junggar basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 61(5): 771-781.

Jiang T, Fu L Y, Wan X J, *et al.* 2008. Target-oriented layout designing method based on wave equations. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 23(2): 359-367.

Liang X H, Zhu Y H, Liu Y M, *et al.* 2015. Design and application of 3D geologic model auxiliary seismic acquisition geometry. *Unconventional Oil & Gas (in Chinese)*, 2(1): 15-20.

Liu C. 2013. Research of geometry optimizing design methods based on geology object [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: Ocean University of China.

Tang Y, Deng F, Huang D L. 2011. Three-dimensional Geological Modeling Based on Qt and OpenGL. *Computer Science (in Chinese)*, 38(2): 281-283.

Wu Y G, Yin W H, He Y Q, *et al.* 2012. A uniformity quantitative method for 3D geometry attributes. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 47(3): 361-365.

Xiang C, Sun M A, Bai Y Z. 2022. Fast imaging technique based on point spread function. //*Proceedings of the 2022 Symposium on Geophysical Technology of SPG (in Chinese)*. Haikou, 476-479.

Xiao Y F, Yin H C. 2017. Acquisition parameters demonstration based

on illumination analysis of cave. *Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese)*, 41(2): 270-277.

Yang J. 2024. Optimization and application of seismic acquisition geometry for complex geological targets. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 59(3): 404-414.

Yin H C, Deng F. 2015. Research on seismic acquisition geometry illumination and its optimization based on 3D Gaussian beam. *Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese)*, 54(4): 376-381, 403.

Zhang G D. 2013. Forward modeling and geometry optimization of the igneous rocks structure within Huimin depression. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 28(6): 3098-3105, doi: 10.6038/pg20130635.

Zhang Y H, Li F, Zhao Y Q, *et al.* 2019. Design and research of seismic acquisition scheme for development in Wangji area of Biyang sag. *Petroleum Geology and Engineering (in Chinese)*, 33(5): 36-40.

Zhou Y. 2012. Gas potential detection of shallow reservoirs by three-dimensional in Jiannan Area [Master's thesis] (in Chinese). Wuhan: Yangtze University.

Zhu J P, Dong L G, Cheng J B. 2011. Target-oriented 3D seismic optimal geometry design based on seismic illumination. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 46(3): 339-348.

附中文参考文献

陈浩. 2023. 塔里木盆地缝洞型储层地震采集激发接收因素优化. *石油物探*, 62(6): 1030-1039.

成都理工大学. 2017. 一种非拓扑一致性三维网格块体追踪算法: 中国, 201610806317.3.

崔庆辉, 尚新民, 滕厚华, 等. 2020. 高密度三维地震观测系统设计技术与应用. *石油物探*, 59(1): 12-22, 59.

邓飞, 黄地龙. 2009. 剖面三维地质建模及高斯射线束正演. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(4): 434-442.

邓飞, 周亚同. 2009. 基于曲面插值的剖面三维块状地质建模. *微电子学与计算机*, 26(9): 173-176.

邸志欣, 谢金平, 谷玉田, 等. 2022. 基于叠前偏移成像的高密度观测系统分析评价方法——以准南山前带区块为例. *石油物探*, 61(5): 771-781.

蒋韬, 符力耘, 碗学检, 等. 2008. 基于波动方程的目标导向观测系统设计方法研究. *地球物理学进展*, 23(2): 359-367.

梁向豪, 朱运红, 刘依谋, 等. 2015. 三维地质模型辅助地震采集观测系统设计与应用. *非常规油气*, 2(1): 15-20.

刘晨. 2013. 基于地质目标的观测系统优化设计方法研究[硕士论文]. 青岛: 中国海洋大学.

唐云, 邓飞, 黄地龙. 2011. 基于Qt和OpenGL的三维地质建模. *计算机科学*, 38(2): 281-283.

吴永国, 尹吴海, 何永清, 等. 2012. 三维观测系统属性均匀性的定量分析. *石油地球物理勘探*, 47(3): 361-365.

向晨, 孙敏傲, 白英哲. 2022. 基于点扩散函数的快速成像技术. //2022年中国石油物探学术年会. 海口, 476-479.

肖云飞, 殷厚成. 2017. 基于溶洞体照明分析的采集参数论证. *物探与化探*, 41(2): 270-277.

杨晶. 2024. 面向复杂地质目标的地震采集观测系统优化方法及应用. *石油地球物理勘探*, 59(3): 404-414.

殷厚成, 邓飞. 2015. 三维高斯射线束观测系统照明及优化方法研究. *石油物探*, 54(4): 376-381, 403.

张光德. 2013. 惠民凹陷火成岩构造的模型正演与观测系统优化. 地球物理学进展, 28(6): 3098-3105, doi: 10. 6038/pg20130635.

张永华, 李锋, 赵雨晴, 等. 2019. 泌阳凹陷王集地区开发地震采集方案设计研究. 石油地质与工程, 33(5): 36-40.

中国石油化工股份有限公司, 中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院. 2020. 三维地震观测系统面元均匀性评价方法及系统: 中国, 201811168481. 1.

周洋. 2012. 建南三维浅层储层含气性预测[硕士学位论文]. 武汉: 长江大学.

朱金平, 董良国, 程玖兵. 2011. 基于地震照明、面向勘探目标的三维观测系统优化设计. 石油地球物理勘探, 46(3): 339-348.