

李金鑫, 赵威, 宁媛丽, 等. 单程波动方程照明分析在地震观测系统设计中的应用[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(3): 582-595. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.009

LI Jinxin, ZHAO Wei, NING Yuanli, et al. Application of one-way wave equation illumination analysis in the design of seismic observation system [J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 582-595 (in Chinese).

单程波动方程照明分析在地震观测系统设计中的应用

李金鑫, 赵威, 宁媛丽, 杨晓柳, 朱圣伟, 王若雯

1 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002

2 中核铀资源地球物理勘查重点实验室, 河北 石家庄 050002

摘要 高品质的野外地震资料是实现地震数据精细处理与地质信息准确解释的基础, 科学合理的观测系统设计是保障数据质量与成像效果的关键。传统观测系统在复杂地质构造区域中易出现能量覆盖不足与成像阴影, 制约反射波的识别与目标构造的精细刻画。为提升地震勘探在复杂地质条件下的成像能力, 围绕构造复杂区地震观测系统设计中的参数优化问题, 基于单程波动方程照明分析方法开展系统研究。通过正向照明分析优化震源与接收点的布设方案, 提升目标层的能量覆盖效率; 进而结合反向照明分析, 细化炮点加密范围、检波器排列长度及道间距配置, 以实现更高效的能量接收与波场照明。在此基础上构建二维地质模型并开展正演模拟, 对优化前后目标区域的照明能量分布进行定量对比, 最终确定满足成像需求的采集参数。研究表明, 优化后的观测系统在复杂构造区可有效减弱成像阴影, 增强剖面连续性与反射能量响应, 具有良好的适应性与工程可实施性。所提出的优化流程在实际工区应用并得到验证, 表现出稳定的成像提升效果。成果验证照明分析技术在复杂地质条件下采集系统优化中的实用价值, 构建了适用于断裂密集区、砂体发育带等目标的采集参数配置方法, 为地震勘探提供可推广的设计依据与技术路径。

关键词 单程波动方程; 观测系统设计; 照明分析; 正演模拟

中图分类号 P631.4 **文献标志码** A **文章编号** 1672-0636 (2025) 03-0582-14

Application of one-way wave equation illumination analysis in the design of seismic observation system

LI Jinxin, ZHAO Wei, NING Yuanli, YANG Xiaoliu, ZHU Shengwei, WANG Ruowen

1 Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China

2 CNC Key Laboratory of Nuclear Uranium Resource Geophysical Exploration, Shijiazhuang 050002, China

Abstract: High-quality field seismic data are fundamental to the refined processing of seismic signals and the accurate interpretation of geological information. A scientifically designed observation system is essential to

基金项目: 中核铀资源地球物理勘查重点实验室 (编号: WDZC-2024-), 中国核工业地质局内蒙古通辽市胡力海—吉林省双辽市秀水地区地震勘探项目 (编号: 202311-2)、内蒙古鄂尔多斯市新召—伊和乌素地区地震勘探项目 (编号: 202401-10) 联合资助
收稿日期: 2025-03-31 **改回日期:** 2025-05-07

第一作者: 李金鑫, 男, 1998年生, 助理工程师, 从事地震勘探找矿工作, E-mail: 787234017@qq.com

Supported by the CNC Key Laboratory of Nuclear Uranium Resource Geophysical Exploration (No. WDZC-2024-), the Seismic Exploration Project in the Hulihai-Xiushui area from Hulihai, Tongliao city, Inner Mongolia to Xiushui, Shuangliao city, Jilin province by China Nuclear Industry Geological Bureau (No. 202311-2), and the Seismic Exploration Project in the Xinzha - Yihewusu area, Ordos city, Inner Mongolia (No. 202401-10)

Received date: 2025-03-31 **revised date:** 2025-05-07

First author: LI Jinxin, male, born in 1998, assistant engineer, focusing on seismic exploration for mineral prospecting. E-mail: 787234017@qq.com

ensure data quality and imaging effectiveness. In complex geological settings, traditional acquisition systems are prone to insufficient energy coverage and imaging shadow zones, which hinder the identification of reflection signals and the detailed delineation of target structures. To enhance seismic imaging performance under such conditions, this study conducts a systematic investigation into acquisition parameter optimization for observation systems in structurally complex areas, based on an illumination analysis approach using the one-way wave equation. Forward illumination analysis is first employed to optimize the layout of sources and receivers, thereby improving energy coverage over target horizons. Subsequently, reverse illumination analysis is used to refine shot point densification, receiver array length, and channel spacing, aiming to enhance energy acquisition and wavefield coverage. A two-dimensional geological model is constructed, and forward modeling is performed to quantitatively compare the illumination energy distribution before and after optimization, leading to the determination of acquisition parameters that meet imaging requirements. Results show that the optimized observation system effectively reduces imaging shadows in complex structural zones, improves profile continuity and reflection energy response, and exhibits strong adaptability and engineering feasibility. The proposed optimization workflow has been applied and validated in an actual survey area, demonstrating consistent improvements in imaging performance. This work confirmed the practical value of illumination-based analysis in the acquisition design for complex geological conditions and established a parameter configuration methodology suitable for fault-intensive zones and sand body development areas, which will provide a replicable design reference and technical path for future seismic exploration.

Keywords: one-way wave equation; observation system design; illumination analysis; forward modeling

地震勘探技术被广泛应用于地下资源探测和地质结构研究,涵盖油气勘探、矿产资源开发及地震工程等领域。偏移成像是地震数据处理中用于揭示地下目标结构特征和物理属性的关键环节。然而,在实际应用中,地震波无法充分照射至某些区域或反射信息难以被有效接收,易导致成像剖面中出现能量衰减、结构模糊甚至缺失的成像阴影问题,从而影响地震勘探结果的准确性和可靠性^[1]。

成像阴影的形成主要与两个因素相关。首先,观测系统的设计直接影响地震数据的采集质量。若震源与接收器的几何分布不均匀,可能导致信号覆盖不足,使部分区域的反射波信号较弱甚至缺失,进而形成成像阴影^[2]。其次,地下地质结构的复杂性,特别是上覆地层的非均一性或构造特征的变化,会影响地震波的传播路径,导致波束能量的衰减、散射或折射,使部分目标体的反射波信号无法有效接收,影响成像精度^[3]。

针对成像阴影问题,国内外学者已开展了大量研究,提出多种补偿和优化手段。从数据处理角度出发,有学者引入多波成像技术、波场延拓算法、逆时偏移与广义互相关成像等方

法,以提高成像的完整性与分辨率。另有研究从地震信号频率成分出发,提出利用多尺度成像、频率加权叠加等方式增强弱反射信息。此外,构建速度模型的精度也被认为是成像阴影形成的重要因素之一,因而速度建模中的波动方程反演与全波形反演也成为成像改进的重要技术路径。尽管上述方法在不同方面取得一定成效,但在构造复杂、波场传播路径异常的地质体下方,传统方法仍难以从根本上提升阴影区的照明能力。

在此背景下,基于波动理论的地震照明分析方法逐渐成为成像阴影问题研究的重要方向。早期研究主要采用射线追踪法评估震源与接收器的照明强度,但该方法难以准确描述复杂介质中的波动现象。近年来,基于波动方程的照明分析方法,尤其是单程波动方程照明分析,因其计算效率高,适用于复杂地质条件,在观测系统优化中得到广泛应用。本研究基于该方法,优化震源与接收器布设、炮点加密范围、检波器排列方式及道间距等关键参数,以提升目标区域的能量覆盖,提高数据采集的信噪比和分辨率^[4]。同时,结合照明补偿技术,有助于弥补由于地震波能量衰减和散射带来

的成像问题,从而提升成像质量,特别是在复杂地质构造和深层区域的成像效果^[5-6]。

本文将围绕观测系统设计的基本原则,探讨如何通过优化参数来提升地震成像效果。结合单程波动方程照明分析方法,针对实际工区中的重点勘探区域,提出观测系统采集方案的优化设计。通过对比优化前后成像结果,验证该优化方法在减少成像阴影、提高信号质量和增强成像精度方面的效果。最终,旨在为解决成像阴影问题提供技术支持,提升地震勘探在复杂地质环境下的应用效果。

1 观测系统设计原则

地震勘探观测系统的设计直接影响数据采集质量及后续地质成像的精度^[7]。合理的观测系统应基于勘探目标和目的层埋藏深度,结合工区地层特性、地质构造及地表激发条件,制定合理的激发点与接收点布设方案,并进行试验分析实现关键参数(如覆盖次数、偏移距、道间距和炮检距)^[8]优化。试验分析不仅能评估系统对目标层成像的适用性,还能在保证成像精度的同时控制施工成本。优化后的观测系统可提高数据采集的稳定性,增强地震剖面的信噪比与分辨率^[9]。

1.1 道间距

道间距的选择是地震观测系统设计中的关键环节,其主要目的是避免地震时间剖面上反射波出现空间假频现象。空间假频是由于采样不足引起的伪像,会导致反射波在时间剖面上呈现不准确,从而影响成像质量^[10]。为了确保反射波同相轴的采样足够精细,须保证反射波同相轴的道间时差应满足式(1),确保地震数据在空间和时间上的分辨率。

$$\Delta t \leq 1/2T^* \quad (1)$$

式(1)中: Δt —反射波同相轴道间时差,s; T^* —反射波视周期,s。

道间距的选择依据奈奎斯特采样定理,这要求采样间隔足够小,以避免漏掉反射波中的高频成分。当地层倾角为 α 时,反射波速度(平均速度)为 V ,那么道间距应该满足下式(2):

$$\Delta X < VT^*/4 \sin \alpha \text{ 或 } \Delta X < V/4f \sin \alpha \quad (2)$$

式(2)中: ΔX —道间距,m; T^* —反射波视周期,

s; V —平均速度, $m \cdot s^{-1}$; α —地层倾角, $(^\circ)$ 。

以上条件确保了反射波在时间剖面上的连续性和真实性,避免因采样不足而引发的假频现象。通常情况下,为确保采样足够密集,野外采集时选择的实际道间距为理论值的两倍,以增加采样密度,进一步减少由地层速度变化或倾角增大引起的误差。

如果要求野外原始记录中不出现空间假频,则道间距的选择应小于反射波中最小视波长的一半,即要满足下式:

$$\Delta X < 1/2\lambda^* \quad (3)$$

其中,

$$\lambda^* = \frac{V \sqrt{X^2 + (Vt_0)^2} \pm 2Vt_0 \sin \alpha}{f(X \pm Vt_0 \sin \alpha)} \quad (4)$$

式(4)中: λ^* —反射波最小视波长,m; t_0 —反射波传播时间,s; f —频率,Hz。

在实际应用中,道间距的选择还与地震波的传播特性密切相关。在高倾角的地层中,由于波传播路径复杂,采样间距需进一步减小,以保证反射波在时间剖面上的连续性。同时,地层深度和频率分量特征也是影响道间距的重要因素,频率越高,波长越短,对道间距的要求也越高。

除了奈奎斯特采样要求,道间距的选择还需要兼顾施工条件和经济成本。对于深层目标的勘探,由于信号在传播过程中的衰减问题,通常需要缩小道间距以提高深层的成像精度。而在浅层勘探中,可以适当增大道间距,以覆盖更广的范围并提高采集效率。

1.2 炮间距

炮间距的选取直接影响地震信号的覆盖范围、空间分辨率以及成像质量。合理的炮间距设定可提高观测系统的探测能力,也能减少空间混叠现象,确保偏移成像的精度。炮间距的选择主要依据奈奎斯特采样定理,以避免高频信号的损失和假频现象的产生。

炮间距的设计应满足如下基本原则:1)炮间距应足够小,以保证震源激发的波场能够有效覆盖目标区域;2)炮间距应结合道间距,使地震观测系统能够在时间剖面上提供均匀且高分辨率的数据;3)炮间距应适应地震波的波长要求,避免因采样间隔过大导致高频信息的

丢失。根据奈奎斯特采样定理,炮间距需满足以下条件:

$$\Delta s \leq \frac{\lambda}{2}; \lambda = \frac{V}{f_{\max}} \quad (5)$$

式(5)中: Δs —炮间距,m; λ —地震波最小波长,m; V —介质中的波速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; f_{\max} —信号的最高频率,Hz。

该条件确保炮间距不会超过地震波的空间采样极限,从而避免空间混叠现象,提高勘探目标的成像精度。在实际应用中,为了进一步提高成像质量,通常采用更严格的标准,将炮间距设计为 $\lambda/4$,甚至更小,以确保对目标层结构的高分辨率成像。

1.3 最大偏移距

在二维地震观测系统中,最大偏移距的选择对深层目标的成像质量和数据采集的可靠性至关重要。其合理取值可通过二维地质建模与正演照明分析确定,通常在建模过程中,如果速度模型能够准确反映工作区的实际地质条件,只需确保远端接收的地震反射波能量达到稳定水平,即可确定观测系统的最大偏移距离。一般而言,较大的偏移距有助于提高反射波传播时差与地层速度的精度,但过大可能导致能量衰减,降低信噪比和成像质量。因此,最大偏移距的选取需在扩大覆盖范围与避免信号衰减之间取得平衡,以确保最佳观测效果。

最大偏移距的选择还受到道间距的分辨能力限制。地震波的传播速度与反射波的时间差直接相关,因此在道间距的范围内,反射波的传播时间差必须能被准确记录。极限时间差决定了道间距可以分辨的最小时间差,最大偏移距必须在这个极限之内,以保证采样的准确性。具体而言,在极限时间差约束的情况下,选择观测系统的最大偏移距应符合下面的条件:

$$X_{\max} \leq \left[\frac{2t_0 D \Delta T}{1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{v_{RMS}^2 - \frac{1}{v_{RMS} + \Delta v}}$$

式(6)中: X_{\max} —最大偏移距,m; t_0 —传播时间,s; $D\Delta T$ —极限时间差,s; v_{RMS} —平均视速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; Δv —平均视误差范围, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在满足分辨能力约束的基础上,还应综合考虑目标层的埋藏深度。一般情况下,最大偏移距应不小于目标层埋深的1.5至2倍,以保证对深层目标的覆盖。此外,需避免较大偏移距引起的动校拉伸率过高问题,避免反射波展宽、频率降低,从而影响速度分析和堆叠品质。经验上,当动校拉伸率超过30%时,信号频率损失显著,应限制偏移距范围以控制其影响。

反射系数的稳定性亦是设计的重要考虑因素。在远偏移距下,因入射角变化大,反射系数随角度波动,可能引入振幅畸变,影响地震反射振幅随偏移距的变化(AVO)分析或振幅保真偏移。因此,在偏移距设计中需同时结合AVO响应范围与目标层反射稳定性进行综合评估。

通过正演照明分析对偏移距与能量分布关系进行定量评估,可进一步验证参数设置的合理性,并结合采集环境、仪器能力和勘探目标特点,确定适用于实际工作的最优最大偏移距配置。

1.4 覆盖次数

在野外地震数据采集过程中,提高覆盖次数是增强地震记录反射波信号强度的重要手段。覆盖次数不仅影响噪声的抑制效果,还对地震数据的信噪比具有直接作用。研究表明,当观测系统的覆盖次数设置为 n 时,地震数据的信噪比可以提高到原始水平的 \sqrt{n} 倍^[11]。这一规律说明,增加覆盖次数有助于突出有效信号,并减少随机噪声的干扰。

覆盖次数的大小由观测系统的参数决定,主要受道间距、炮间距及接收道数的影响。在二维地震勘探中,覆盖次数可表示为:

$$N = \frac{n_r * \Delta g}{2\Delta s} \quad (7)$$

式(7)中: n_r —接收道数,无意义; Δg —道间距,m; Δs —炮间距,m。由此可见,在一定范围内,增大接收道数或减小炮间距均可提高覆盖次数,从而改善信噪比和反射信号的清晰度。

然而,过高的覆盖次数也会直接导致施工时间的延长和成本的增加,这在实际勘探中是不容忽视的问题。因此,在观测系统设计时,需要在提升数据质量与优化施工效率之间找到平衡点。综合考虑项目的技术要求、施工条

件和经济可行性,合理选择覆盖次数参数是实现高效采集和精准成像的关键^[12]。

2 单程波动方程照明分析方法

照明分析是一种基于已知速度模型和观测系统,用于描述地震波在地下传播过程中能量分布及其强弱变化的方法。通过分析,可以直观了解地下介质中不同区域的能量覆盖,为优化观测系统设计提供依据^[13]。照明分析主要依赖两种方法:射线追踪和波动方程,其中基于波动方程的照明分析,包括单程波动方程和双程波动方程,已被广泛应用^[14-15]。

在声波介质中,波动方程通过描述质点位

$$\frac{d^2 \tilde{u}}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right) \tilde{u} = \frac{d^2 \tilde{u}}{dz^2} + k_z^2 \tilde{u} = \left(\frac{d}{dz} + ik_z \right) \left(\frac{d}{dz} - ik_z \right) \tilde{u} = 0 \quad (9)$$

式(9)中: ω —圆频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; k_x 和 k_z —水平方向和深度方向上的波数,无意义。

基于频散关系可推导出波场在频域内的简化表达式(10):

$$\frac{d \tilde{u}}{dz} = \pm ik_z \tilde{u} = \pm i \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2} \tilde{u} \quad (10)$$

式(10)中: +—上行波方程,无意义;—下行波方程,无意义; $\tilde{u}(k_x, z, \omega)$ —波场 $\mu(x, z, t)$ 的二维 Fourier 变换,无意义。

此时,对式(10)两边取正号并做积分,可以得到式(11)形式的单程波动方程:

$$\tilde{u}(z) = \tilde{u}(z + \Delta z) e^{-i \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2} \Delta z} \quad (11)$$

利用其推导的逆过程,便可以开展单程波动方程反向照明分析,量化地下各方向上的波场能量分布^[16]。反向照明分析的基本思想是通过反向追踪地震波从接收点回溯到震源点,从而计算每个点的照明能量。这一过程能够明确哪些区域或层位接受到足够的能量,哪些区域可能由于干扰或地质特性未能有效照亮。反向照明分析有助于识别成像过程中的盲区,从而优化观测系统的布置,提高目标区域的探测能力。

目前,单程波动方程照明分析方法因其计算速度快、结果能够较为准确地反映地下复杂介质的波场特征,已被广泛应用于地震勘探中的观测系统设计与优化^[17]。然而,该方法也存

移的变化来反映地震波的传播。通过傅里叶变换,时间和空间上的波动方程可转化为频域中的波场。基于双程波动方程,频域波动方程可简化为单程波动方程。结合频散关系,进一步推导出波场在频域中的简化表达式。推导如下:

双程波波动方程照明能量分布情况如式(8)所示:

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial^2 z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mu}{\partial^2 t^2} \quad (8)$$

式(8)中: μ — x 方向上的质点位移, m ; v —声波的传播速度, $m \cdot s^{-1}$ 。

对公式(8)做 x 和 t 的傅里叶变换,可以得到式(9):

在一定的局限性,例如忽略了地震波传播过程中的能量散射损失,以及未充分考虑多次散射对波场分布的影响^[18]。本文通过结合正向与反向照明分析方法,优化炮点加密范围与检波器排列,以增强能量的覆盖范围,从而改善了深层区域和复杂构造区域的成像效果。此外,通过在优化过程中进一步验证照明能量分布,采用了不同偏移距和覆盖次数的组合来减轻地震波散射带来的影响。这些措施有效提高了成像质量,并弥补了单程波动方程的局限性,优化了对复杂地质条件下的目标区域的成像能力。

3 观测系统设计参数优化

在地震勘探工作中,合理的观测系统设计对于实现复杂地质构造的精确探测至关重要。这不仅影响地震数据的采集效率,还决定了成像精度和可靠性^[19]。

为了揭示某工作区内凹陷盆地边缘阶梯状断层及砂体的形态与分布特征,需要优化观测系统参数。此过程涉及综合考虑目标地质体的埋藏深度、工区地层特性以及地表激发条件,以制定适合的采集方案。通过优化道间距、偏移距和覆盖次数等关键参数,可以显著提高地震数据的信噪比与分辨率,从而确保成像质量,并减少噪声的干扰,为后续的地质解释提供可靠的数据支持。

本文接下来的讨论将以该工作区的具体勘探需求为核心,重点分析如何通过科学优化

观测系统关键参数和合理设计采集方案,提升地震数据的采集质量与成像效果。

表1 工作区各地层地球物理模型参数

Table 1 Geophysical model parameters of the various layers of the work area

层位	双程时/ms	均方根速度/($m \cdot s^{-1}$)	层速度/($m \cdot s^{-1}$)	深度/m	主频/Hz
T1	295	1 585	1 585	234	60
T2	420	1 775	2 158	373	45
T3	605	1 980	2 381	599	45
T4	800	2 185	2 725	874	40
T5	955	2 310	2 870	1 103	40
T6	1 210	2 470	2 994	1 494	35

通过对工作区收集得到的地震剖面及其岩石物理参数进行分析(表1),可以建立工作

区典型地震二维地质模型(图1),模型横向范围8 km,深度1.2 km。

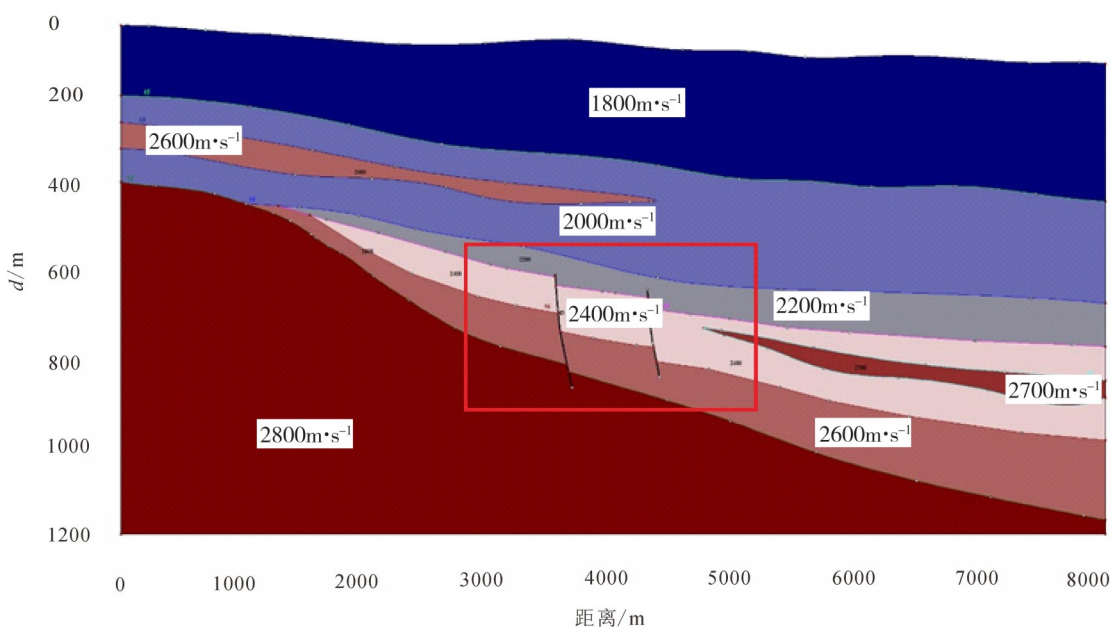


图1 研究区地质速度模型

Fig. 1 Geological velocity model of the study area

在地震勘探中,模型设计的目的是为了解决复杂地质构造的探测难题,特别是针对具有高速体、断层等特征的区域进行精确勘探。这类地质特征往往对地震波传播路径产生较大影响,可能引起波的折射、散射甚至衰减,从而影响成像效果^[20]。设计具有这些地质特征的模型,可以模拟地震波在不同地质体中的传播情况,并对观测系统进行优化调整,确保能有效捕捉到这些复杂区域的反射信号。

具体而言,通过模拟不同地质条件下的地

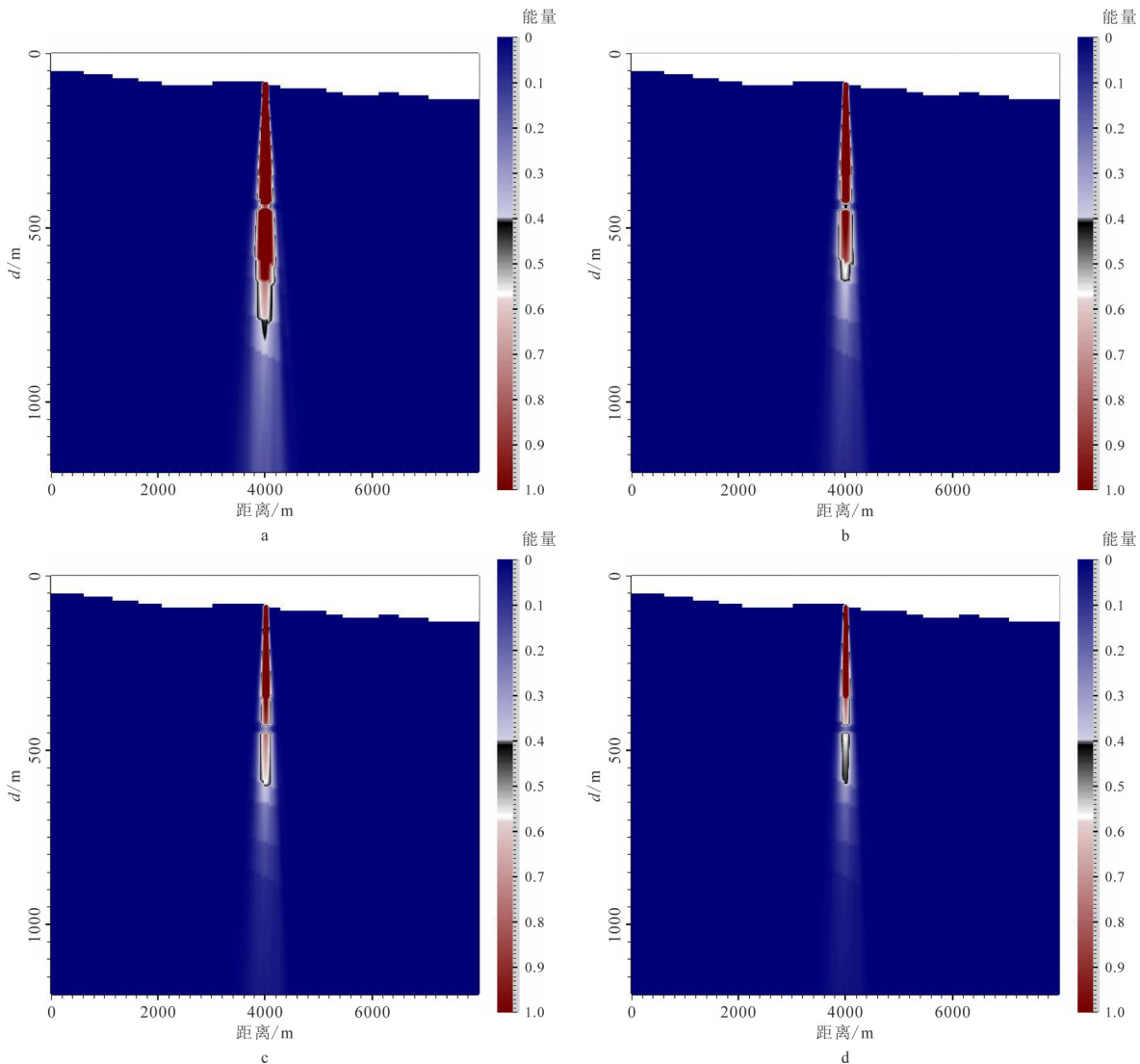
震波传播特征,优化观测系统参数(如道间距、偏移距和覆盖次数等),提高地震数据的分辨率和成像质量。这一过程能够确保目标区域的地震资料具有足够的成像质量,以便进行后续的地质解释和分析。

3.1 道间距选择

根据工作区的实际情况和以往施工参数的经验,拟采用“中间激发,两边接收”的观测系统布局进行数据采集。为验证这一方案的合理性,并确定各关键参数的最优值,采用控

制变量法对观测系统的采集参数进行逐一论证。首先分别测试最大偏移距为 1 km 情况下,

道间距为 5、10、15 和 20 m 时单炮正演照明能量,激发位置均位于模型 4 km 处。



a—道间距 5 m 激发能量; b—道间距 10 m 激发能量; c—道间距 15 m 激发能量; d—道间距 20 m 激发能量。

a-Excitation energy with 5 m trace interval; b-Excitation energy with 10 m trace interval; c-Excitation energy with 15 m trace interval; d-Excitation energy with 20 m trace interval.

图 2 道间距激发能量试验图

Fig. 2 Test diagram of channel spacing excitation energy

从图 2 的模拟结果可以看出,道间距为 5 m 时,照明能量最强,但施工成本高、布设难度大;10 m 道间距照明能量略低,但覆盖密度仍满足设计要求;15 与 20 m 道间距下照明能量显著衰减,无法保证目标区反射波的清晰成像(图 1)。说明在相同激发条件下,随着道间距的增大,地震波传播到地下地质体的能量逐步减弱,噪声相对增加,表明较大的道间距会导致能量覆盖不足,从而影响数据的信噪比和分

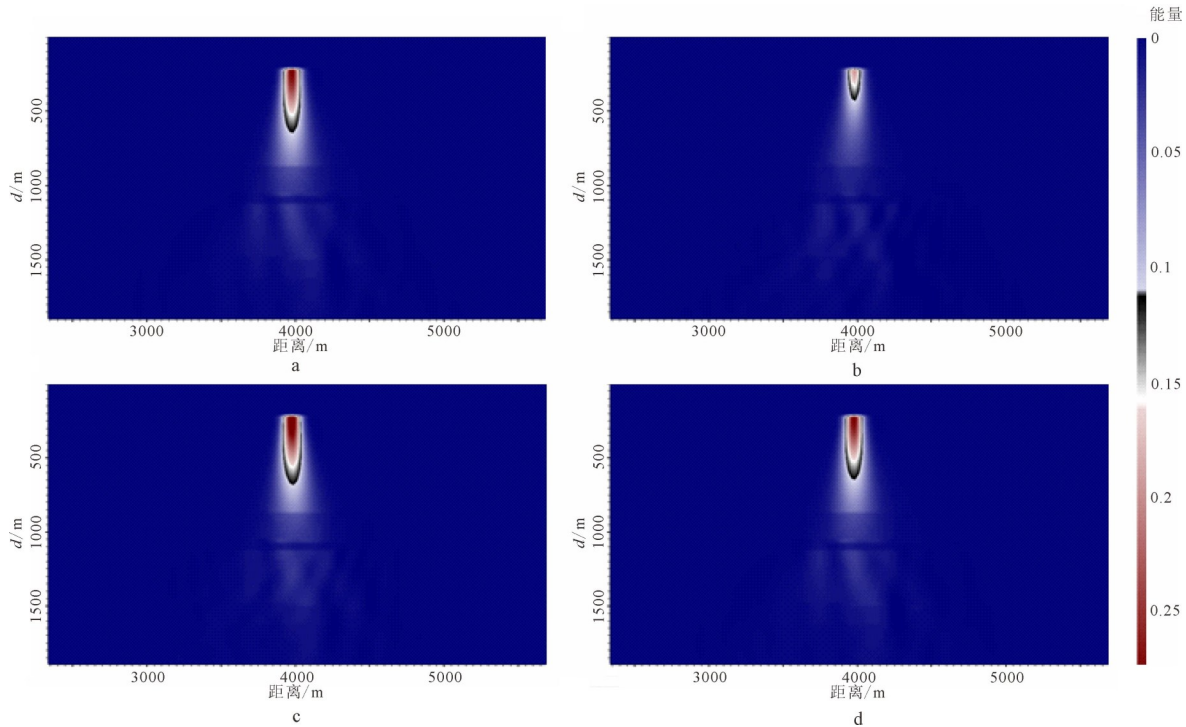
辨率。同时,较小的道间距虽然能够提升能量覆盖效果,但也会显著增加采集成本和施工难度。综合考虑数据采集质量和施工成本的平衡,最终选取道间距为 10 m 的观测系统作为后续参数优化讨论的基础设置。

3.2 最大偏移距选择

在道间距为 10 m 的情况下探测目标层(埋深约为 800 m),可分别实验论证最大偏移距为 1.6、1.8、2.0、2.2 和 2.4 km 时单炮正演照明能

量。通过分析,得出偏移距增大时能量差异并不显著,这表明 2.0 km 的偏移距已经能够有效覆盖目标区域,同时,进一步增大偏移距对能量分布的影响较小。此时,选择 2.0 km 作为基础偏移距具有一定的合理性。分别在此基础上进行能量差异分析:图 3a 为 2.0 km 偏移距与 2.4 km 偏移距时差异值;图 3b 为 2.0 km 偏移距

与 2.2 km 偏移距时差异值;图 3c 为 2.0 km 偏移距与 1.8 km 偏移距时差异值;图 3d 为 2.0 km 偏移距与 1.6 km 偏移距时差异值,从差异值分析结果可以大致估算本次数据采集单炮需要投入的检波器数量,再结合式(6),可以得出最大偏移距应设置为 2.0~2.2 km 之间,以保证数据采集的稳定性和准确性。



a—2.0 km 与 2.4 km 偏移距时差异值; b—2.0 km 与 2.2 km 偏移距时差异值; c—2.0 km 与 1.8 km 偏移距时差异值; d—2.0 km 与 1.6 km 偏移距时差异值。

a-Difference between 2.0 km and 2.4 km offset; b-Difference between 2.0 km and 2.2 km offset; c-Difference between 2.0 km and 1.8 km offset; d-Difference between 2.0 km and 1.6 km offset.

图 3 最大偏移距激发能量差异试验图

Fig. 3 Test diagram of energy difference for maximum offset distance excitation

3.3 观测系统参数优化

结合工作区的地质条件及勘探目标需求,综合考虑不同构造单元的特点、地质目的以及

施工成本等多重因素,初步设计了一个由 210 道接收、道间距 10 m、炮间距 30 m、覆盖次数为 35 次的观测系统(图 4)。这一设计能够基本满

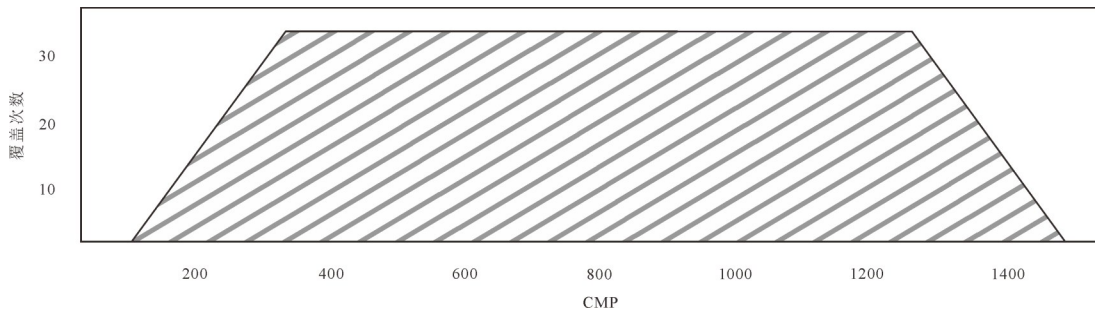


图 4 未优化前观测系统覆盖次数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the observation system before optimization

足工作区的数据采集要求,提供较为均匀的反射波覆盖,并保持较高的数据采集效率。然而,由于凹陷盆地边缘的地质特征较为复杂,特别是阶梯状小断层和砂体的发育情况对勘探数据精度提出了更高要求,现有观测系统的参数仍需进一步优化,以确保数据成像的质量能够满足精细地质分析的需求。

为满足对凹陷盆地边缘阶梯状小断层及砂体发育情况的精细探查需求,需对工作区内断裂发育集中的重点勘查地段进一步优化观测系统设计,以保障目标层的成像质量与数据

采集精度。在优化过程中,引入反向照明分析方法,定量评估接收系统对目标层波场能量的响应效果,从而确定是否具备足够的反射信号获取能力,确保关键构造部位的成像完整性。

具体方法为:首先基于初始观测系统,采用单程波动方程正演模拟,计算各目标点在地表接收系统上的能量照明响应,并以此识别照明能力不足区域。随后,在选定目标区内设置理想脉冲震源,进行反向照明分析,通过统计各地面检波点接收到的总能量值,构建反向照明能量分布图(图5)。

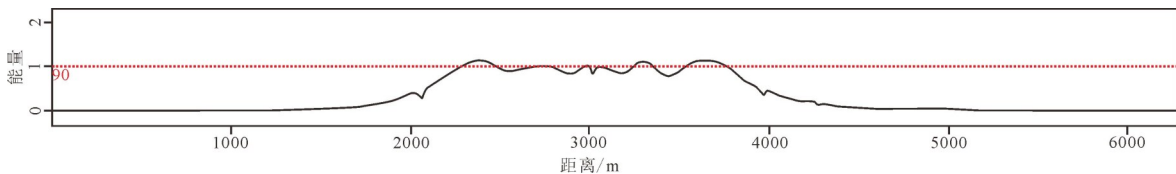


图5 优化区域内炮点归一化照明能量统计图

Fig. 5 Statistical chart of normalized lighting energy of gun points

在能量评价标准方面,本研究设定反向照明门限值为0.9,其含义为:地表检波器接收的反向照明能量需达到该目标点由单个理想激发源所产生总照明能量的90%以上,即:

$$\frac{E_{\text{received}}(x)}{E_{\text{max}}(x)} \geq 0.9 \quad (12)$$

式(12)中: $E_{\text{received}}(x)$ —检波点对目标点 x 的接收能量,无意义; $E_{\text{max}}(x)$ —理想情况下目标点 x 的反向照明总能量(所有检波点的能量积分值),无意义。

由图5可见,以0.9为照明强度门限时,照明能量满足要求的区域主要集中于剖面2200~3800m范围,表明该段为目标能量集中区,反射信号稳定可靠。因此,将该区作为

后续炮点与检波点加密布设的重点区域,确保其具备良好的成像照明覆盖。

根据优化分析得到的结果,进一步制定工作区内炮点加密的具体方案。在炮点加密的过程中,对原有观测系统的炮点分布进行了调整,例如在高优先级区域通过前后加密炮间距,使得该区域获得更多的能量覆盖。通过对炮点位置及数量的优化,确保在重点勘探区域内形成更高密度的采集覆盖,从而获得更清晰的断层和砂体结构信息。这一过程的最终成果如图6所示,图中展示了优化后的观测系统覆盖次数及炮点分布情况。优化后的方案将有效提高数据采集的分辨率,改善成像效果,为地质分析和解释提供更加精确和可靠的数据基础。

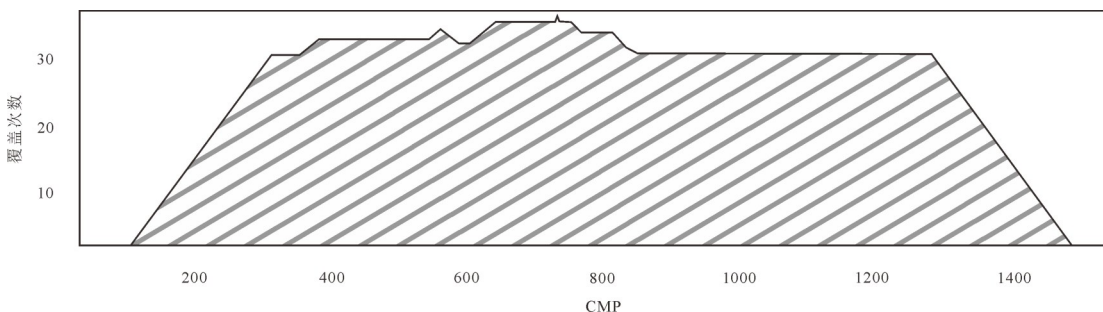


图6 优化后观测系统覆盖次数示意图

Fig. 6 Schematic diagram of observation system after optimization

4 正演模拟优化效果分析

通过地震正演模拟技术,生成了观测系统优化前后在重点勘探区域的叠加剖面(图7、8)。

从图7和8的对比可以看出,基于单程波动方程照明分析指导的加密优化观测系统显著提升了地震剖面的成像质量。优化后的剖面无论是在信噪比还是分辨率方面,都较未优化的观测系统有了明显改善。

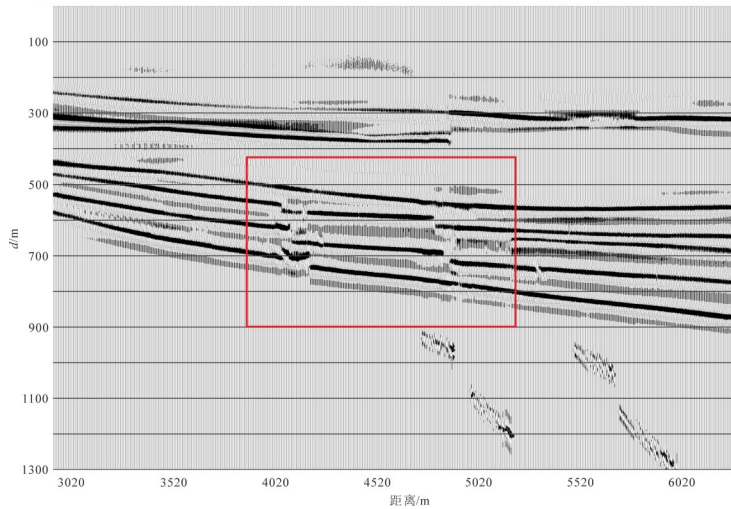


图7 未优化前叠加偏移剖面
Fig. 7 Overlay offset profile before optimization

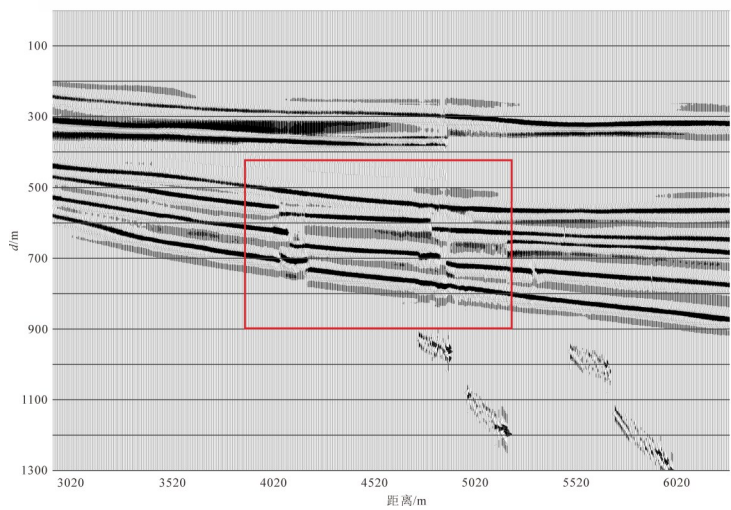
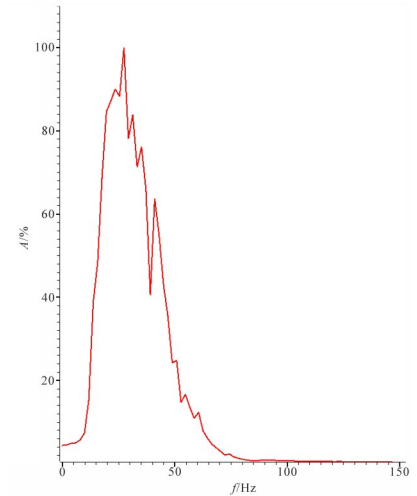
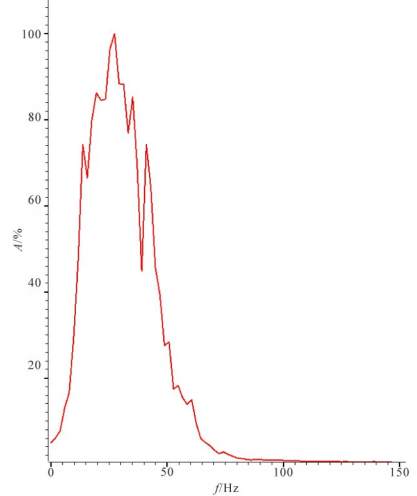


图8 优化后叠加偏移剖面
Fig. 8 Overlay offset profile after optimization



频谱分析是评估地震成像质量的重要手段之一。通过对地震数据频谱的分析,可以判断不同频率成分在成像中的表现,以及它们如何影响成像的分辨率和深度穿透力。在优化观测系统后,频谱范围的拓宽通常意味着地震波的频率分布得到了有效增强,从而有助于提升成像的清晰度和准确性^[21]。

优化后的地震剖面频谱分析结果表明:低

频和高温部分的频谱范围均有不同程度的拓宽。高频成分有助于提高成像的分辨率,因为高频波长较短,能够揭示更细微的地质结构特征,低频信号虽然分辨率较低,但其穿透力较强,能够穿透较深的地质层,这进一步证明优化设计增强了反射波的频率分布覆盖能力。此外,优化后的叠加偏移剖面中,断裂断点显示得更加清晰,层位结构的层间信息更为丰

富,充分体现了优化观测系统在复杂地质条件下的成像优势。

5 工区验证

5.1 工区概况

工区主要位于松辽盆地,基底埋深变化较大,盖层主要由下白垩统义县组(K_1y)、阜新组(K_1f),上白垩统泉头组(K_2q)、青山口组

(K_2qn)、姚家组(K_2y)、嫩江组(K_2n)、四方台组(K_2s)、明水组(K_2m),新近系泰康组(N_2t)和第四系组成,个别地段零星沉积有下白垩统(K_1),分布在库伦一带。

5.2 观测系统设计与成果验证

设计了210道接收、道间距10 m、炮间距30 m和覆盖次数35次的观测系统,采集炮数125炮(图9)。

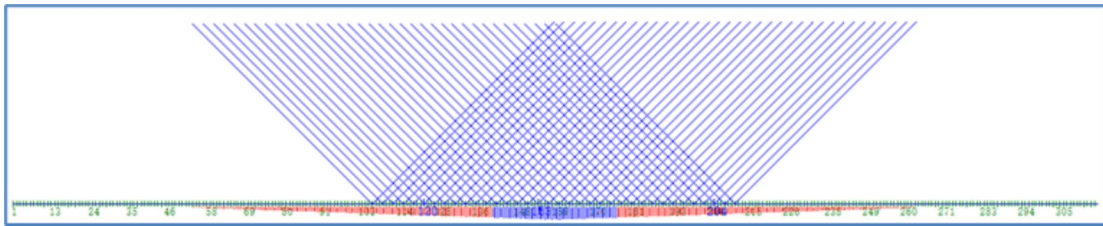


图9 中间激发35次覆盖观测系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of a 35-fold split-spread observation system

基于单程波动方程的反向照明分析方法,对CDP 9200~9650区段断裂附近进行炮点加

密优化,提高覆盖次数以增强目标层及断层附近能量照明(图10)。在此基础上,生成了重点

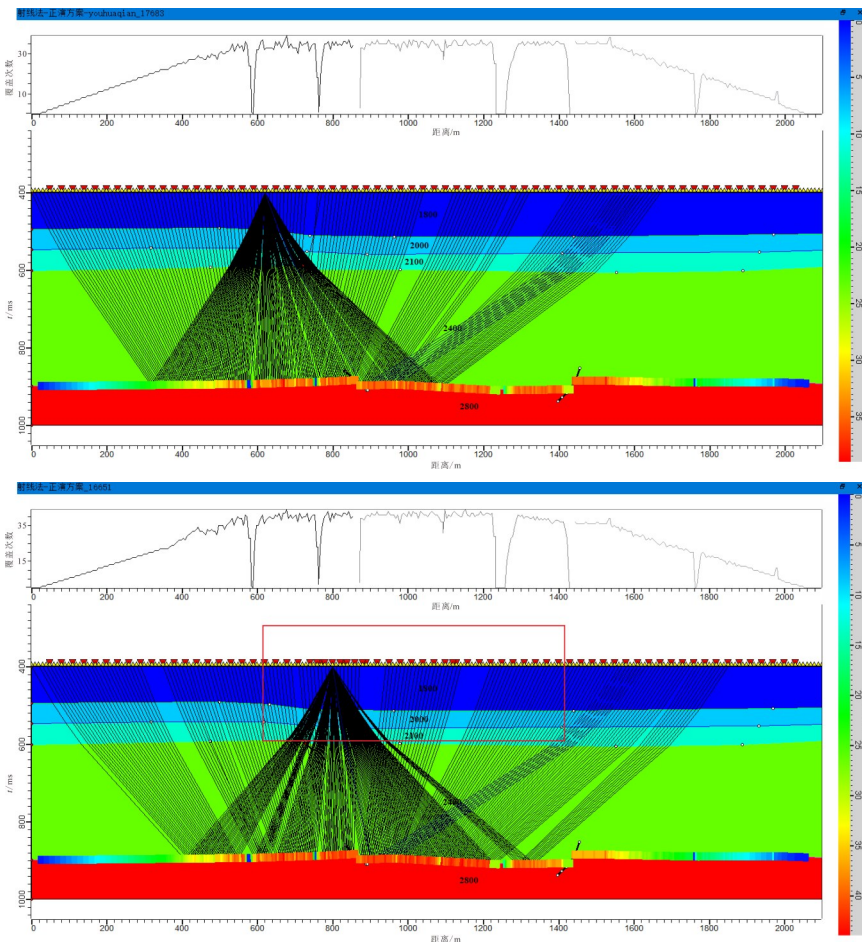


图10 基于照明分析观测系统优化前后对比图

Fig.10 Comparison of observation system configurations before and after optimization based on illumination analysis

勘查区域优化前后的叠加剖面对比图及其对
应信噪比图(图 11、12),用于评价优化方案在

成像连续性和数据质量方面的改进效果。

图 11 显示,优化后的叠加偏移剖面在目标

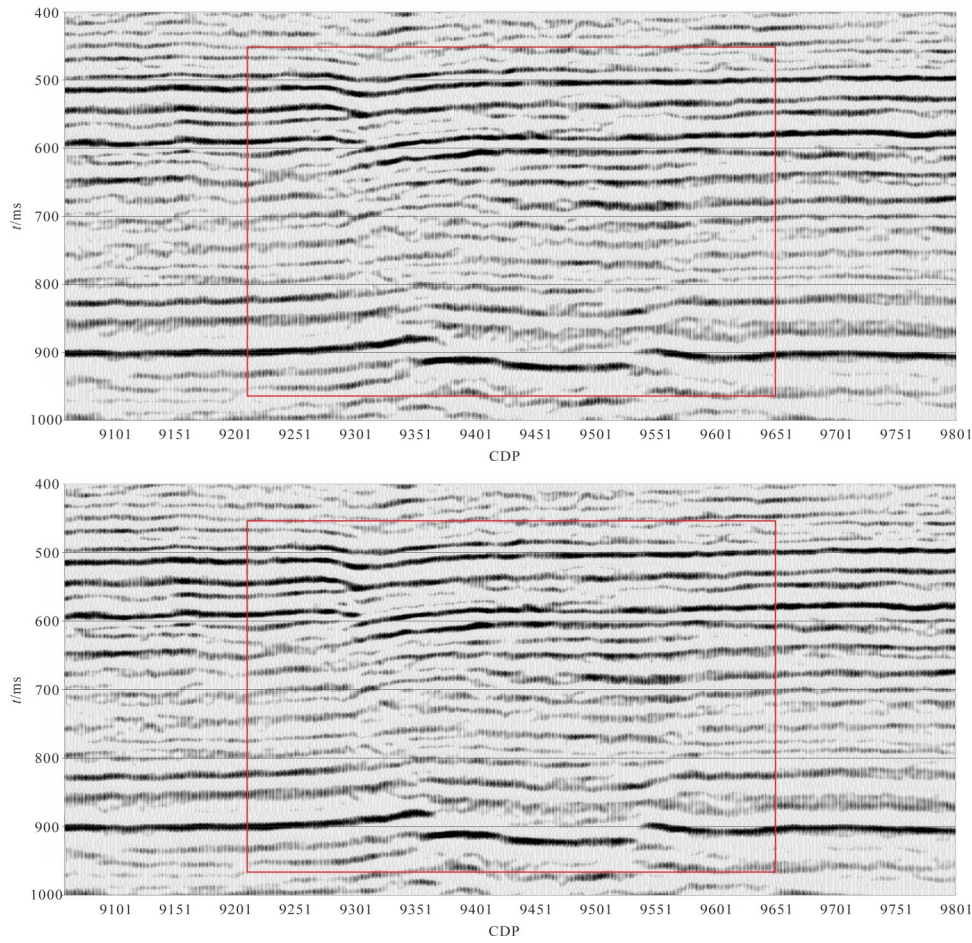


图 11 观测系统优化前后叠加剖面对比图

Fig. 11 Comparison of stacked sections before and after observation system optimization

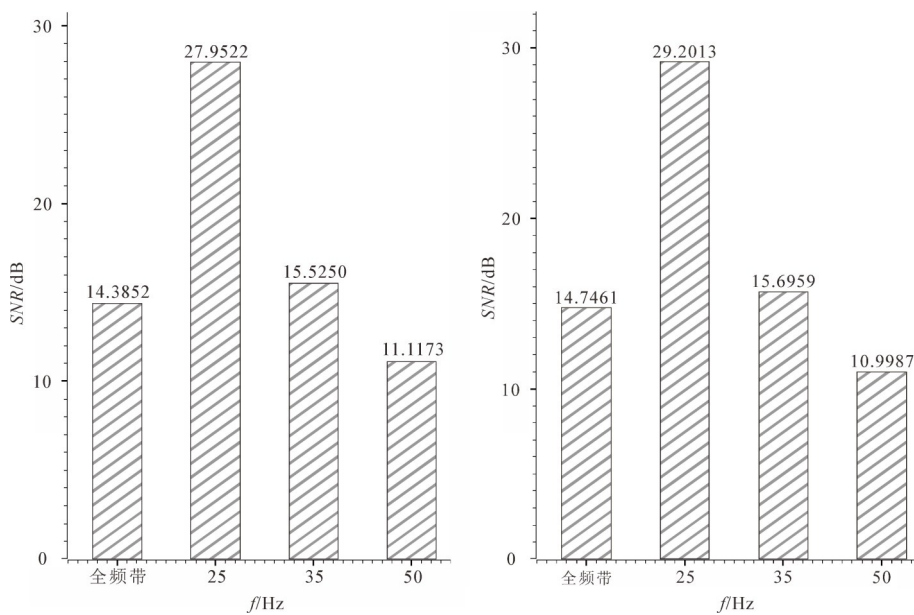


图 12 观测系统优化前后叠加剖面信噪比

Fig. 12 Comparison of signal-to-noise ratios in stacked sections before and after observation system optimization

区成像质量显著提升,断裂发育部位的断点边界更加清晰,反射界面连续性增强,层间结构细节更为丰富,明显改善了原有观测系统在复杂构造条件下能量覆盖不足所导致的成像模糊问题,充分体现了优化参数对成像分辨率的提升效果。

图 12 展示了不同滤波参数条件下(全频带、25 Hz、35 Hz 和 50 Hz)信噪比对比结果,进一步验证了采集参数优化的成效:针对目标层主频 30 Hz,优化前目标区信噪比范围介于 15.53~27.95 dB 之间,优化后范围提升至 15.70~29.20 dB,较原系统提高 4.47% 以上。该提升表明,通过合理调整观测系统布局和提高覆盖次数,能够有效增强目标反射能量的采集能力,抑制干扰,提高资料的可解释性。

6 结 论

本研究以复杂地质条件下地震观测系统设计优化为目标,基于单程波动方程照明分析方法,结合正演模拟,对重点勘探区域的采集参数进行系统优化与效果验证。研究结果表明:

1) 照明分析不仅能够定量评估震源与接收系统对目标层的能量覆盖情况,还可为炮点加密、道间距调整及接收布设等参数提供理论依据和优化方向。

2) 照明分析的引入使观测系统设计由以往依赖经验判断的方法转向基于波动理论的定量优化,提升了采集参数设置的科学性与适应性。

3) 优化后的观测系统在目标区域内显著改善了反射界面成像清晰度,提高了信噪比,成像效果稳定可靠。与传统的参数论证方法相比,照明分析主导的优化流程不仅能够实现对地震成像质量的有效控制,还能兼顾施工效率与成本控制,具有良好的工程适用性和推广价值。

综上所述,照明分析在地震观测系统设计优化中的应用,是提升地震数据采集质量和成像精度的关键手段。在构造复杂或能量覆盖受限的勘探区域,照明分析技术作为核心工具,贯穿于观测系统设计的全过程,以实现地下目标体更高效、精准的探测,为地质资源的开发与评价提供坚实的技术支撑。

参考文献

- 1 秦明宽,刘祜,叶发旺,等.铀资源勘查技术国际科技前沿动态[J].世界核地质科学,2024,41(1):1-11. QIN Mingkuan, LIU Hu, YE Fawang, et al. Latest global developments in uranium resources exploration technology[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(1):1-11(in Chinese).
- 2 庞新明,李振春,张敏,等.照明分析方法的研究进展综述[J].地球物理学进展,2016,31(1):285-294. PANG Xinming, LI Zhenchun, ZHANG Min, et al. Review of seismic illumination analysis methods[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(1):285-294(in Chinese).
- 3 陈生昌,王汉闯.基于平面波照明的偏移成像补偿[J].地球物理学报,2010,53(7):1710-1715. CHEN Shengchang, WANG Hanchuang. Migration compensation with plane wave illumination[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7):1710-1715(in Chinese).
- 4 朱峰.照明分析技术在复杂地区地震采集参数优化中的应用[J].石油天然气学报,2012,34(10):43-46+168. ZHU Feng. Application of illumination technology for optimizing seismic acquisition parameter in complex areas[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(10):43-46+168(in Chinese).
- 5 吕公河,尹成,周星合,等.基于采集目标的地震照明度的精确模拟[J].石油地球物理勘探,2006,41(3):258-261+I. LYU Gonghe, YIN Cheng, ZHOU Xinghe, et al. Precious simulation of seismic illumination based on acquired targets [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(3):258-261+I(in Chinese).
- 6 薛志恒.浅层地震在砂岩型铀矿勘查中的应用[J].国外铀金地质(现名:世界核地质科学),2002,19(4):217-219. XUE Zhiheng. Application of shallow seismic exploration in sandstone-type uranium deposit exploration [J]. Overseas Uranium and Gold Geology, 2002, 19(4):217-219(in Chinese).
- 7 张海新.地震数据采集观测系统的设计与实现[D].大连:大连理工大学,2005. ZHANG Haixin. Design and implementation of seismic gathering survey system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005(in Chinese).
- 8 董良国,吴晓丰,唐海忠,等.逆掩覆覆构造的地震波照明与观测系统优化[J].石油物探,2006,45(1):40-47+5. DONG Lianguo, WU Xiaofeng, TANG Haizhong, et al.

- Seismic wave illumination for overthrust nappe structures and optimal seismic survey design [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2006, 45(1): 40-47+5(in Chinese).
- 9 卢占武,李文辉,陈明春,等.羌塘盆地内部结构与反射地震勘探技术分析[J]. *矿产勘查*, 2024, 15(5): 803-810.
LU Zhanwu, LI Wenhui, CHEN Mingchun, et al. Internal structure and technology analysis of reflection seismic exploration in the Qiangtang basin [J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(5): 803-810(in Chinese).
- 10 侯嵩,尹军杰,王赞.道间距对地震偏移的影响[J]. *石油地质与工程*, 2009, 23(4): 32-34+134.
HOU Song, YIN Junjie, WANG Yun. Effect of group interval on seismic migration [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2009, 23(4): 32-34+134(in Chinese).
- 11 白志宏,许银坡,潘英杰,等.基于覆盖次数均匀的激发点优化技术[C]//西安石油大学,成都理工大学,陕西省石油学会.2020油气田勘探与开发国际会议论文集.东方地球物理公司采集技术中心,2020:185-191.
BAI Zhihong, XU Yinpo, PAN Yingjie, et al. Source optimization technology based on coverage uniform [C]// Xi'an Petroleum University, Chengdu University of Technology and Shaanxi Petroleum Society. International Field Exploration and Development Conference 2020. Bureau of Geophysical Prospecting, 2020: 185-191(in Chinese).
- 12 吴昱.基于正演模拟的地震观测系统实验分析[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
WU Yu. Experimental analysis of seismic acquisition geometry using synthetic data [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018(in Chinese).
- 13 李章波.基于波动方程和地震照明度的渝西山地煤炭资源二维地震勘探研究[J]. *矿业安全与环保*, 2017, 44(2): 84-87.
LI Zhangbo. Research on 2D seismic exploration for mountainous coal resources in western Chongqing area based on wave equation and seismic illumination [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2017, 44(2): 84-87(in Chinese).
- 14 宋亮,陶建,郭天智.VTI介质地震成像技术在地质勘查中的应用[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(3): 621-624.
SONG Liang, TAO Jian, GUO Tianzhi. Application of VTI medium seismic imaging technology in geological exploration [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(3): 621-624(in Chinese).
- 15 张健男,李三福,张敏,等.基于双程波方程走时的克希霍夫深度偏移技术[J]. *工程地球物理学报*, 2023, 20(4): 500-508.
ZHANG Jiannan, LI Sanfu, ZHANG Min, et al. Kirchhoff depth migration technique based on two-way wave equation travelttime [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2023, 20(4): 500-508(in Chinese).
- 16 刘文峰,李蒙,王亮,等.照明分析在常州地区地震采集观测系统优化设计中的应用[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(2): 58-64.
LIU Wenfeng, LI Meng, WANG Liang, et al. Application of illumination analysis in optimal design of seismic acquisition and observation system in Changzhou area [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2019, 38(2): 58-64(in Chinese).
- 17 裴正林.波动方程地震定向照明分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43(6): 645-651+607+742.
PEI Zhenglin. Analysis on wave equation seismic directional illumination [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43(6): 645-651+607+742(in Chinese).
- 18 刘伟.波动方程地震照明模拟与观测系统优化设计方法研究[D].成都:西南石油大学,2015.
LIU Wei. Study of wave equation based seismic illumination modeling and seismic observation system optimization design [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015(in Chinese).
- 19 杨晶.面向复杂地质目标的地震采集观测系统优化方法及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2024, 59(3): 404-414.
YANG Jing. Optimization and application of seismic acquisition geometry for complex geological targets [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2024, 59(3): 404-414(in Chinese).
- 20 宋亚民,戴朝强,姜建,等.南海东部地区断层阴影带构造落实方法及其应用研究[J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(3): 296-303.
SONG Yamin, DAI Chaoqiang, JIANG Jian, et al. Structure confirming method and application in fault shadow zone in eastern part of south China sea [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 43(3): 296-303(in Chinese).
- 21 张延章,尹寿鹏,张巧玲,等.地震变频技术的地质内涵及其效果分析[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(1): 64-66+71.
ZHANG Yanzhang, YIN Shoupeng, ZHANG Qiaoling, et al. Geologic significance of the seismic spectral decomposition technology and its application analysis [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1): 64-66+71(in Chinese).