

环境噪声对地震资料影响量化技术研究及应用

任 聪¹, 赵容容¹, 耿 春^{2*}, 李明翼¹, 张 华²

¹中国石油西南油气田分公司勘探事业部, 四川 成都

²中国石油东方地球物理勘探有限公司, 河北 保定

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年4月15日; 发布日期: 2026年4月27日

摘 要

环境噪声是影响地震资料质量的关键因素之一, 尤其在复杂地表与人文活动频繁区域。本文系统构建了一套以“环噪模拟-信噪分离-联动评估”为核心的定量评估技术体系。通过高保真信噪分离, 引入结构相似度分析方法(SSIM), 多维度综合评价环噪影响。研究系统评估了不同微伏级别环噪对单炮、叠加资料的影响, 并结合不同覆盖次数等观测参数, 提出了环噪影响阈值值的量化标准。本文为地震采集设计、噪声抑制与资料评价提供了科学依据。

关键词

地震资料, 环境噪声, 定量评估

Research and Application of Quantitative Technology for the Impact of Environmental Noise on Seismic Data

Cong Ren¹, Rongrong Zhao¹, Chun Geng^{2*}, Mingyi Li¹, Hua Zhang²

¹Exploration Department of Southwest Oil and Gas Field Branch of China National Petroleum Corporation, Chengdu Sichuan

²China Petroleum Eastern Geophysical Exploration Co., Ltd., Baoding Hebei

Received: December 15, 2025; accepted: April 15, 2026; published: April 27, 2026

Abstract

Ambient noise is one of the key factors affecting the quality of seismic data, especially in areas with complex surface conditions and frequent human activities. This paper systematically establishes a quantitative evaluation technical system centered on the three core steps of ambient noise simulation,

*通讯作者。

文章引用: 任聪, 赵容容, 耿春, 李明翼, 张华. 环境噪声对地震资料影响量化技术研究及应用[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(4): 504-509. DOI: 10.12677/ag.2026.164045

signal-noise separation, and collaborative assessment. Based on high-fidelity signal-noise separation, the structural similarity index method (SSIM) is introduced to comprehensively evaluate the impact of ambient noise from multiple dimensions. The study systematically assesses the effects of ambient noise at different microvolt levels on single-shot and stacked seismic data, and combines various observation parameters such as different fold numbers to propose a quantitative standard for the threshold value of ambient noise impact. This research provides a scientific basis for seismic acquisition design, noise suppression, and seismic data evaluation.

Keywords

Seismic Data, Environmental Noise, Quantitative Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着油气勘探向复杂地表区、城市周边及人文活动密集区延伸,环境噪声对地震资料质量的影响日益凸显。环境噪声主要包括自然环境噪声(如风吹、水流)和人类活动噪声(如交通、工业),其强度随时间、空间变化,具有随机性、非平稳性和频带重叠等特点[1],严重影响地震信号的有效识别与成像精度。随着物探技术的发展,地震勘探已大规模应用节点仪进行盲采,而错综复杂的环境噪声,对采集过程质控提出了更大的挑战。如何定量评估环境噪声对地震勘探各环节存在的影响,目前还未找到有效的技术手段[2]。

传统噪声评估方法多基于能量统计或波形互相关,缺乏对噪声与信号耦合效应的多维度量分析,难以准确评估噪声在不同处理阶段的累积影响[3]。因此,在物探技术飞速发展,物探工作量节节攀升,采集环境错综复杂的大背景下,亟需对环境噪声进行深入研究分析,建立一套系统、可量化的环境噪声评估技术体系,对于优化采集设计、提升资料处理质量具有重要意义[4]。

2. 技术原理

为实现对环境噪声影响的精准量化,本文设计并实现了一套环环相扣、逐级递进的技术流程,其核心由两部分组成:环噪数据构建与多维度定量评估。

2.1. 基于真实信号背景的环境模拟

为系统研究噪声强度的影响,必须构建一套既包含真实地下信号特征、又能精确控制噪声水平的实验数据集。本文提出并采用了“真实有效信号提取 + 可控噪声注入”的构建策略[5]。

选取工区内已知噪声水平极低($\leq 5 \mu\text{V}$)的优质单炮记录作为“种子数据”。采用高保真信噪分离算法对该记录进行处理(图 1),剥离其中的残余噪声,获得尽可能反映真实地下反射特征的“标准有效信号”。该信号作为后续所有模拟实验的基准。

通过对工区大量背景噪声记录进行统计分析,建立符合该区域噪声时空统计特性的随机噪声模型。通过调整模型的增益因子,可生成一系列具有不同能量级别的“纯净随机环噪”数据。将上述标准有效信号与各级别的纯净随机环噪进行线性叠加,生成一套完整的模拟环噪炮数据集。该数据集的有效信号成分完全一致,唯一的变量是叠加的噪声能量,从而确保了实验结论的可比性[6]。

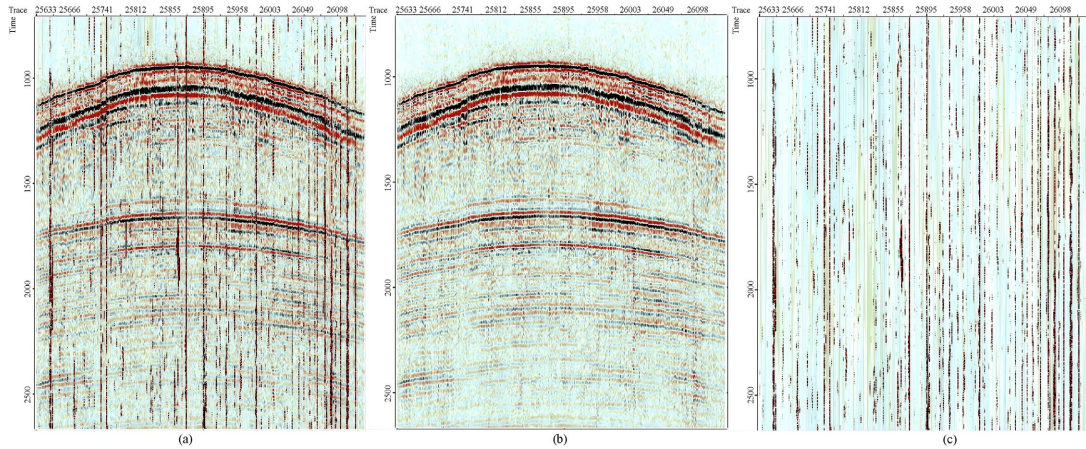


Figure 1. Environmental noise separation. (a) Single shot with irregular abnormal noise; (b) Single shot after separation of irregular abnormal noise; (c) irregular abnormal noise

图 1. 环境噪声分离。(a) 含非规则异常噪声单炮；(b) 非规则异常噪声分离后单炮；(c) 非规则异常噪声

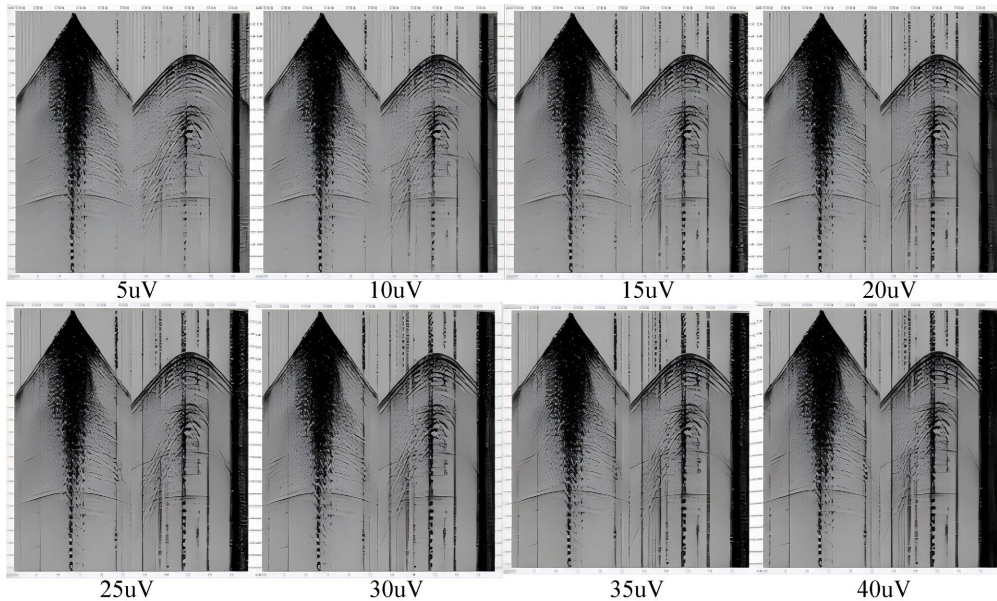


Figure 2. Simulated shot data with different noise magnitudes

图 2. 不同噪声量级的模拟炮数据

2.2. 多维度定量评估模型

不同强度环噪叠加于单炮有效信号时，会使信号振幅与波形相互影响。传统评估方法缺乏对二者耦合效应的量化分析，其评估信号变化的阈值可能存在差异。为克服传统单一指标评估的局限性，本文创新性地将图像质量评估领域的结构相似性指数(SSIM 评估模型)引入地震资料评价，通过比较两个地震信号在振幅、振幅谱和波形结构三个方面的相似性来评价其质量。本文将物理意义映射到地震信号上[7]：

振幅能量相似性：衡量两段信号在总体能量水平上的一致性。

$$ES(S_1, S_2) = \frac{2u_{S_1}u_{S_2} + C_1}{u_{S_1}^2 + u_{S_2}^2 + C_1} \quad (1.1)$$

振幅谱相似性：衡量两段信号在频率成分分布上的一致性，反映频谱保真度。

$$CS(S_1, S_2) = \frac{2\sigma_{s_1}\sigma_{s_2} + C_2}{\sigma_{s_1}^2 + \sigma_{s_2}^2 + C_2} \quad (1.2)$$

波形结构相似性：衡量两段信号在波形起伏和同相轴连续性上的一致性。

$$SS(S_1, S_2) = \frac{\sigma_{s_1 s_2} + C_3}{\sigma_{s_1} \sigma_{s_2} + C_3} \quad (1.3)$$

通过此映射，定义了适用于地震道的 SSIM 计算公式，使其能够同步量化噪声对信号能量、频谱和波形结构的综合影响。

$$SSIM(S_1, S_2) = [ES(S_1, S_2)]^\alpha [CS(S_1, S_2)]^\beta [SS(S_1, S_2)]^\gamma \quad (1.4)$$

结构相似函数(SSIM)能够从多维度联合评估环境噪声对地震资料综合影响，适合作为质量的定量评估工具。其评估流程主要是对于一系列不同噪声强度的模拟或实际数据，依次计算其与标准信号(或低噪声参考信号)的 SSIM 值，得到“相似度 - 噪声强度”曲线，精确定位噪声影响发生显著变化的临界点(阈值)。

3. 应用效果

基于上述方法体系，本文对 HC149 工区数据进行了系统的实验分析，揭示了环境噪声影响的详细规律 [8]。

3.1. 环噪对单炮资料影响的量化评估

对模拟生成的环噪炮数据(图 2)进行分析发现，当环噪强度低于 20 μV 时，SSIM 值始终维持在 0.90 以上，表明信号相似度极高，视觉上几乎无法分辨差异。当强度超过 20 μV 后，相似度曲线出现明显的“降速突变”，标志着影响开始显著加剧(图 3)。

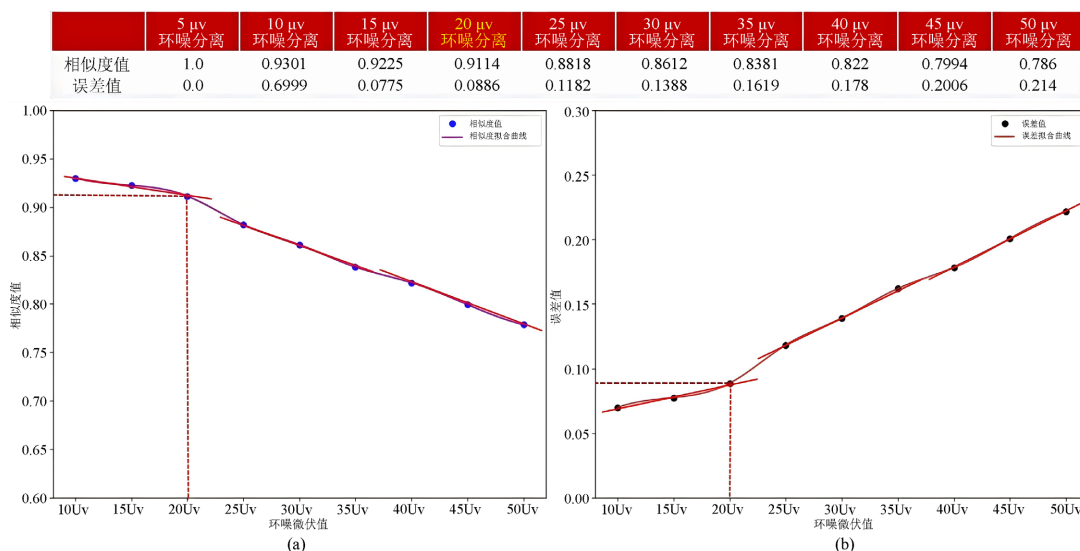


Figure 3. SSIM variation curve of single shot under different ambient noise intensities. (a) Similarity fitting curve of separated ambient noise shot; (b) Error curve of separated ambient noise shot

图 3. 不同环噪强度单炮 SSIM 变化。(a) 曲线环噪分离炮相似度拟合曲线；(b) 环噪分离炮误差曲线

选取工区内相同点位在不同时段采集的炮进行分析，测得噪声强度分别为 7.2 μV 、15.8 μV 和 24.3 μV 。经过去噪处理后，三者与参考信号的 SSIM 值分别为 0.93、0.91、0.84，表明在 20 μV 以下，即使存在约一

倍的强度差, 经有效去噪后, 对最终单炮有效信号的影响差异很小。但高强度噪声 32 μV 炮的相似度明显偏低(<0.85), 说明当原始噪声超过 20 μV 时, 即便经过处理, 其对信号造成的损伤也难以完全恢复。

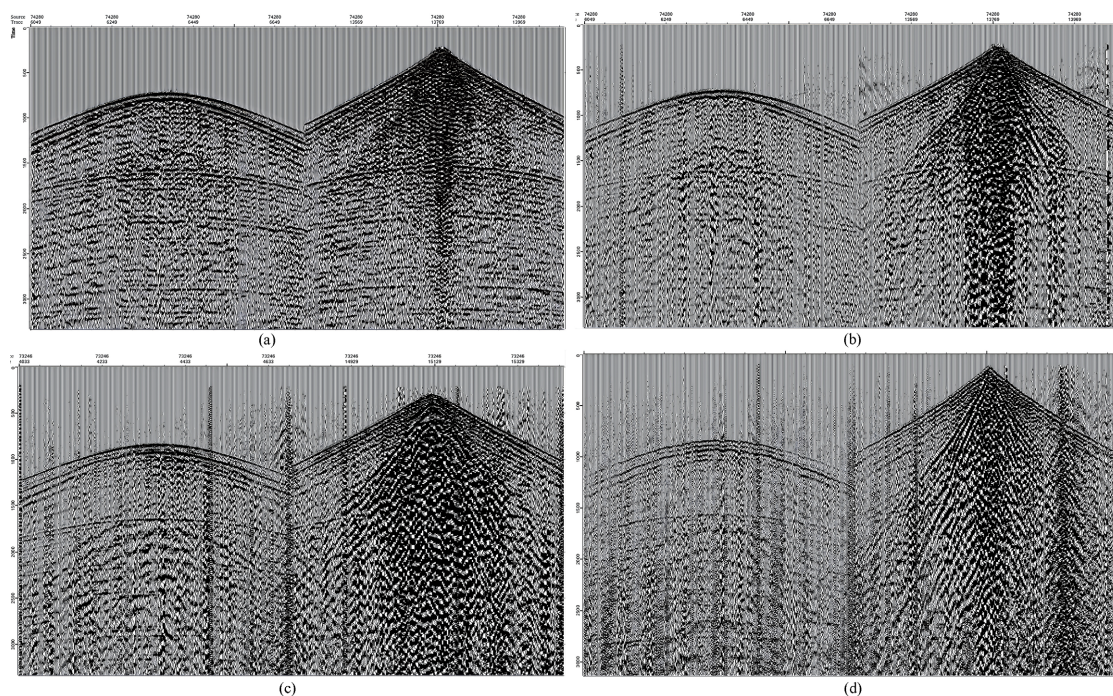


Figure 4. Single shot records of HC149 project with different ambient noise intensities. (a) Denoised reference single shot; (b) 7.2 μV single shot; (c) 15.8 μV single shot; (d) 24.3 μV single shot

图 4. HC149 项目不同环噪的单炮记录。(a) 去噪后的参考单炮; (b) 7.2 μV 单炮; (c) 15.8 μV 单炮; (d) 24.3 μV 单炮

3.2. 不同强度环噪对叠加资料影响的系统评估

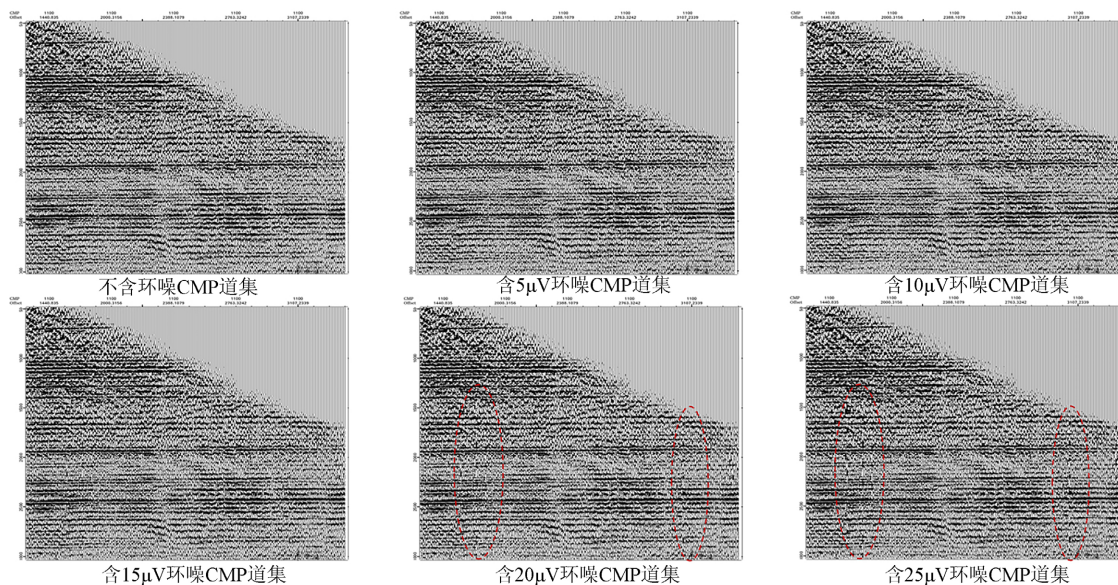


Figure 5. CMP gathers with different intensities of ambient noise

图 5. 含不同强度环噪的 CMP 道集

在单炮分析基础上,进一步研究了噪声经过 CMP 道集叠加后的影响变化。在 CMP 道集上, $15 \mu\text{V}$ 以下的噪声对有效同相轴的影响微弱。当强度达到 $20 \mu\text{V}$ 时,噪声背景痕迹已较为明显,有效信号连续性受到显著破坏。

选取 Rline2170 处理剖面进行分析(图 6),该条线位于工区中部,呈东北、西南走向,东北边靠近城区,干扰强度较大,单炮环噪强度主要为 $30\sim 40 \mu\text{v}$,向西南方向延伸主要分布场镇、道路等干扰,单炮环噪强度主要为 $5\sim 20 \mu\text{v}$ 不等,从图 7 的处理剖面对比图可以看出,当环噪强度在 $5\sim 10 \mu\text{v}$ 时,环噪对资料面貌影响较小,经过处理后,几乎看不到噪音残留的痕迹,但环噪强度达到 $15\sim 20 \mu\text{v}$ 环噪对资料的影响,特别是对中浅层的影响逐渐加大,剖面成像连续性受到影响。

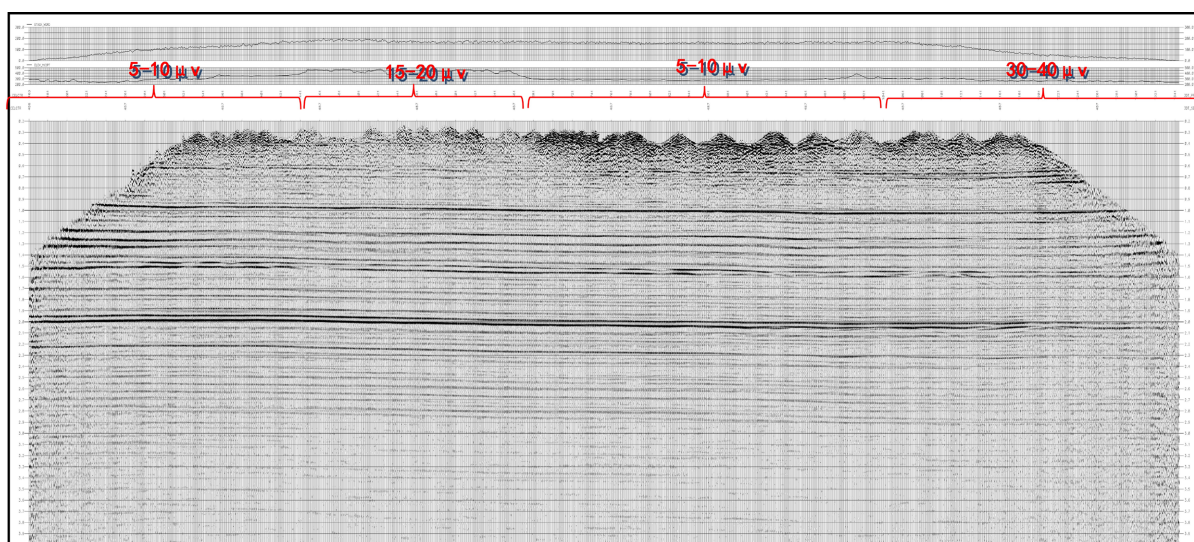


Figure 6. Comparison of processing profile effects for HC 3D survey Line Rline2170

图 6. HC 三维 Rline2170 处理剖面效果对比

4. 结论

本研究针对复杂区域环境噪声干扰地震资料质量问题,构建了实验数据集,形成了定量评价技术体系,结合理论与实际数据验证,创新引入结构相似性指数(SSIM),从振幅能量、振幅谱、波形结构多维度评估噪声影响[9],弥补传统单一指标局限,可精准刻画噪声与信号耦合效应。本研究成果为地震采集设计优化、噪声抑制及资料评价提供科学依据,对复杂环境油气地震勘探技术发展具有实践意义。

参考文献

- [1] 魏继东, 李建军. 野外采集阶段噪声的归类与衰减方法[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1632-1641.
- [2] 安锋, 张光德, 段卫星, 等. 陆上地震勘探随机干扰分析[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 62-64.
- [3] 杨德宽, 郑泽继, 胡立新, 等. 对深层地震勘探中随机噪声的一点认识[J]. 石油物探, 2000(3): 50-61+72.
- [4] 陆基孟. 地震勘探原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 130-161.
- [5] 王典, 刘财, 刘洋, 等. 反射法地震勘探噪声消除技术研究[J]. 地球物理学进展, 2006(3): 957-970.
- [6] 杜兴忠, 曹俊兴. 强噪声环境条件下的浅层地震勘探方法研究[J]. 地球物理学进展, 2008(5): 1616-1620.
- [7] 张军华, 吕宁, 田连玉, 等. 地震资料去噪方法技术综合评述[J]. 地球物理学进展, 2006(2): 546-553.
- [8] 裴江云, 刘洪, 李幼铭. 在随机噪声背景下地震反射信号的增强[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 91-95.
- [9] 崔树国, 刘怀山, 魏继东. 山地地震勘探采集方法研究[J]. 西北地质, 2004, 37(4): 71-78.