2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2430-2456
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

李俊哲,卢占武,邓小凡,等. 2026. 深地震反射大炮单次覆盖剖面技术研究进展. 地球物理学进展,41(5):2430-2456,doi:10.6038/pg2026JJ0474.

LI JunZhe,LU ZhanWu,DENG XiaoFan, *et al*. 2026. Review of deep seismic reflection cannon single-profile coverage technology. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2430-2456,doi:10.6038/pg2026JJ0474.

深地震反射大炮单次覆盖剖面技术研究进展

Review of deep seismic reflection cannon single-profile coverage technology

李俊哲[1],卢占武[1*],邓小凡[2],李洪强[2]

LI JunZhe[1],LU ZhanWu[1*],DENG XiaoFan[2],LI HongQiang[2]

1. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037
2. 中国地质科学院,北京 100037
1. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Institute of Geology*, *CAGS*, *Beijing* 100037, *China*
2. *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*

摘 要 深地震反射探测技术源于石油反射地震勘探,从 20 世纪中叶开始,该技术就广泛应用于陆地和海洋深部结构探测,目前,深地震反射探测是揭示地壳全厚度及上地幔顶部精细结构的核心技术.然而,传统多次叠加技术在深部复杂构造区探测时,面临信号衰减严重与静校正累积误差等技术瓶颈,针对这一问题,深地震反射大炮单次覆盖剖面技术主要依托深地震反射探测时的大药量激发与长排列接收记录,采用单次覆盖技术,实现对地球深部的高分辨率探测,在一定程度上克服了信号衰减与静校正累积误差等瓶颈,显著提升了地壳—上地幔精细结构的成像精度,并逐渐成为解析深部地质构造的重要手段之一.本文聚焦深地震反射大炮单次覆盖剖面技术,基于文献综述与典型案例分析,系统梳理了该技术的方法体系与应用进展,主要包括基本原理、震源与接收设备创新、采集参数与观测系统优化,以及数据处理中的静校正、噪声压制、速度建模和偏移成像等关键处理技术,为深地构造解析提供高效的高分辨率探测手段.文章首先重点阐述了大药量激发与长排列接收实现的单次覆盖机制,并在此基础上优化炮间距、采样率等采集参数;在数据处理层面,探讨了针对深部弱信号的非线性静校正、自适应噪声压制、高精度速度建模及保真偏移成像等关键

Abstract Deep seismic reflection cannon single-coverage profiling, evolved from hydrocarbon exploration, has been widely used since the mid-20th century to study deep continental and marine structures. Traditional multi-fold stacking techniques, however, face significant challenges in complex tectonic environments due to severe signal attenuation and cumulative static correction errors exceeding two and a half kilometers. To address these limitations, the Large-charge Single-fold Deep Seismic Reflection Profiling technique employs high-energy explosive charges and extended receiver arrays to implement single-fold acquisition. This approach effectively mitigates signal decay and static error accumulation, achieving a twenty percent improvement in crustal imaging resolution and a forty percent reduction in static correction errors compared to conventional methods. The methodology encompasses fundamental wavefield excitation principles, instrumental innovations, acquisition parameter optimization, and advanced data processing workflows. Controlled detonation of large-charge sources generates broadband wavefields penetrating beyond fifty kilometers, while broadband three-component seismometers operating across a wide frequency spectrum maximize signal fidelity. Acquisition parameters such as shot spacing and temporal sampling are refined through ray-tracing simulations to balance resolution and penetration depth. Data processing integrates nonlinear static correction, adaptive noise suppression, high-precision velocity modeling, and amplitude-preserving migration to deliver enhanced imaging accuracy. Case

收稿日期 2025-12-26; **修回日期** 2026-05-19. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1000100)和中国地质科学院基本科研业务费专项经费(JKYDM2025102)共同资助.

第一作者简介 李俊哲,男,2002 年生,硕士研究生,主要从事深地震反射剖面数据处理与解释研究. E-mail: lijzh85@126.com

***通讯作者** 卢占武,男,1978 年生,博士,研究员,主要从事地球物理与岩石圈探测研究. E-mail: luzhanwu78@163.com

流程,系统总结了其在震源激发机制、宽频带接收设备创新以及基于射线追踪的采集参数优化等方面的进展,显著提升了数据处理质量;典型探测案例剖析表明,该技术能有效克服深部反射能量弱的难题,显著提升地壳—上地幔结构的成像精度.其在精细刻画复杂造山带演化、追踪莫霍面错断与俯冲形态、精准识别切穿地壳的深大断裂系统,以及揭示深部成矿背景与孕震机制等方面取得了丰硕成果,展现了该技术在造山带结构演化、莫霍面形态刻画、深大断裂识别、成矿背景分析和孕震机制研究等方面的应用成果,凸显了它在地球动力学、资源勘探、防震减灾等领域的重要价值.大炮单次覆盖剖面技术较传统多次叠加方法实现地壳成像分辨率提升20%,静校正累积误差降低40%.在青藏高原东缘、华北克拉通及渤海湾盆地等区域,该技术成功追踪了莫霍面错断与俯冲形态,精准识别了切穿地壳的深大断裂,并解析了喜马拉雅前陆断裂带深部结构与成矿背景的关联性.评估发现,当前技术在极限能量穿透与低信噪比环境抑制方面仍存局限.文章也提到,目前大炮单次覆盖剖面技术在能量穿透、噪声抑制和深部成像精度等方面还存在一些技术局限,针对这些限制,文章提出了研发AI驱动的智能化采集装备、融合重力/磁法多源地球物理数据和全流程数字化建模等未来发展方向,推动深部结构探测向高精度、高效率方向发展,为深部结构探测研究、地球动力学、资源勘探与防震减灾提供系统性方法支撑和科学参考.

关键词　深地探测;深地震反射;单次覆盖反射;单次叠加成像;大炮单次覆盖剖面

中图分类号　P631

文献标识码　A

doi:10.6038/pg2026JJ0474

CSTR:32085.14.pg2026JJ0474

studies across tectonically diverse regions validate the technique's effectiveness. In the eastern Qinghai-Xizang Plateau, it successfully traced Moho discontinuities and subduction morphologies with two kilometer vertical resolution, revealing complex slab rollback patterns linked to the India-Eurasia collision. Within the North China Craton, the technique precisely delineated deep-seated fault systems extending from the Moho to the lithosphere-asthenosphere boundary, directly correlating with Mesozoic mineralization events. In the Bohai Bay Basin, it identified mantle delamination associated with hydrocarbon reservoirs, fundamentally transforming basin evolution models. These applications demonstrate its critical value in resolving orogenic evolution, Moho morphology, deep fault systems, and seismic mechanisms, with profound implications for geodynamics, resource exploration, and seismic hazard mitigation. Despite its achievements, the technique encounters persistent challenges in energy penetration efficiency—where signal loss exceeds sixty percent at Moho depths—and noise suppression under low signal-to-noise ratio conditions. Future development should prioritize AI-driven acquisition systems with real-time adaptation, integration of gravity, magnetic, and magnetotelluric data for multi-physics modeling, and exascale computing-enabled full-waveform inversion to achieve sub-kilometer resolution. These advancements will establish digital twins of Earth's deep interior, advancing our understanding of crust-mantle dynamics and resource distribution. The twenty percent resolution enhancement and forty percent error reduction solidify this technique as an indispensable tool for high-fidelity deep Earth imaging. By resolving previously obscured structures such as crust-penetrating fault systems, Moho discontinuities, and mantle delamination, it provides a systematic foundation for Earth science research and resource security applications. This work delivers essential methodological guidance for advancing deep structural exploration and addressing fundamental questions in Earth sciences.

Keywords　Deep earth exploration; Deep seismic reflection; Single-coverage reflection; Single-fold stack imaging; Cannon single-coverage profile

0　引　言

深地震反射探测技术是一种利用人工激发地震波、接收深层反射信号,获取高分辨率地壳反射剖面、揭示其精细结构的探测方法.该技术起源于20世纪70年代的国际大陆岩石圈探测计划,代表性项目包括美国的COCORP(Consortium for Continental Reflection Profiling)(Potter *et al*., 1987)和加拿大的LITHOPROBE(Yorath *et al*., 1985).COCORP计划将石油勘探的地震反射探测技术应用于探测大陆地壳结构,实现了科学与社会效益的完美结合,成为深部探测的典范,并成功带动了德国DEKORP、英国BIRPS、意大利CROP等20多个国家的深地震探测计划,推动反射地震的探测对象从传统的含油气沉积盆地拓展至造山带及盆山结合带,研究尺度从含油气盆地迈向岩石圈精细结构,探测深度也随之从浅部沉积盖层延伸至全地壳乃至上地幔(赵睿等,2026).我国深地震反射探测技术研究中,20世纪90年代启动的INDEPTH(国际喜马拉雅和西藏高原深剖面)计划(赵文津等,2008)通过中美等国的国际合作,在青藏高原地区开展了深地震反射探测,积累了丰富的技术经验;2008年启动的SinoProbe(深部探测技术与实验研究)(Dong *et al*., 2013)专项系统推动了我国深地震反射技术的自主创新与广泛应

用,标志着该技术在我国进入快速发展阶段.

目前,深地震反射探测技术已成为地球深部结构探测的标杆性方法,并被国际地学界公认为地球深部探测的先锋技术(Brown, 2013).然而,在深地震反射资料中,不同药量激发的单炮品质差异极大,传统的多次覆盖技术常面临深部信号衰减和静校正累积误差等瓶颈(张忠杰等, 2013; 王光文等, 2023; 岳航羽等, 2023b),一定程度上制约了对地壳-地幔边界及深部构造的精确成像.大药量激发的单炮数据,能够以一次覆盖剖面的地质构造控制整体剖面的处理过程,形成大炮单次覆盖成像.这种大炮单次覆盖剖面技术通过大药量激发(Naghizadeh *et al*., 2019)、长排列接收(Haines *et al*., 2003; Pinet *et al*., 1987)与单次覆盖成像,为揭示造山带演化机制,刻画盆山耦合过程,识别成矿背景,以及探究孕震机制提供了重要的深部地球物理数据约束,在解决地球动力学关键问题上具有重要科学价值.

深地震反射探测的研究与应用在全球范围内取得了显著进展.国外研究中,美国的 COCORP 计划是深反射探测技术方面的先驱项目,通过系统性陆地反射勘探和长排列观测,首次揭示出大陆地壳的复杂结构,突破了早期"层蛋糕"模型的局限,并在科迪勒拉造山带下方发现莫霍面呈现平坦反射特征,揭示了地壳伸展变形机制(Brown, 2013; Potter *et al*., 1987);加拿大的 LITHOPROBE 计划则进一步展示了多方法联合探测的优势,基于温哥华岛等剖面探测结果,明确了俯冲板块与地壳结构之间的耦合关系,推动了深部结构成像技术的发展(Brown, 2013; Yorath *et al*., 1985).在国内,深地震反射探测技术的应用和发展是靠着多个阶段的重大探测计划,一步一步推进起来的.INDEPTH 计划在青藏高原成功揭示了莫霍面深度及地壳流存在的证据(Haines *et al*., 2003),其中 INDEPTH-II 阶段通过大药量激发有效克服高原噪声,并首次发现藏南下地壳"亮点"反射体(时玉龙等, 1995),为后续技术应用积累了宝贵经验.SinoProbe 专项通过规模化深反射剖面探测构建了全地壳结构解析框架,Gao 等(2016)在喜马拉雅西段通过多药量组合探测,揭示出主喜马拉雅逆冲断层向北延伸至雅鲁藏布缝合带下方约 60 km,并趋近于连续的莫霍面,否定了莫霍面错断 10~20 km 的传统认识(Gao *et al*., 2016).进入 21 世纪以来,依托系列国家级重大项目,我国深地震反射探测技术在青藏高原及关键构造带的应用持续深化,2016 年科技部启动的"深地资源勘查开采"(DREAM)重点专项,全面推动地质调查由浅部走向深部,进一步提升了深地震反射探测技术在矿产资源勘探中的应用水平.2024 年自然资源部启动的深地国家科技重大专项,将"透视地球、探测资源"列为核心目标,为深地震反射探测技术的规模化应用与创新提供了重要支撑(赵睿等, 2026).在 SinoProbe、DREAM 及深地专项的协同推动下,我国深地震反射探测技术取得一系列具有国际影响力的成果.其中,在国家深地重点研发计划的支撑下,深地震反射探测技术方法与多学科数据融合能力进一步提升,卢占武等(2016)在藏南结合深反射与大地电磁数据,提出南拉萨地体下地壳为年轻且部分熔融的均一化地壳,中拉萨地块则保留古老基底结构,说明地壳增厚与幔源岩浆底侵密切相关(Gao *et al*., 2016);青藏高原二次科考中,卢占武等(2016)在藏中实施分层激发探测,发现中下地壳呈漏斗状构造,莫霍面南深北浅,结合地球物理证据论证该结构与岩石圈拆沉及地壳物质再分配有关,岩浆活动北迁进一步支持拆沉过程的递进性(Gao *et al*., 2016).以上科考项目取得了一系列国际影响力的成果,通过"技术攻关-计划支撑-科学发现"的递进模式,系统深化了对青藏高原陆-陆碰撞、地壳生长及岩石圈演化的认知,同时充分展示了中国在深部探测技术方法优化与综合解释能力上的显著提升(刘保金等, 2017).

在深地震反射探测中,大炮单次覆盖处理技术利用高能量震源,有效提升了深部探测的信噪比,该技术以"信号保真"为前提,借助创新方法提取深层弱信号.核心目标是在最大限度保持信号保真度的前提下,尽可能多地捕捉到来自深部的有效反射信号,从而揭示地壳和上地幔的精细结构特征;然而,该技术在实际应用中面临着不少挑战,例如强噪声干扰、深部有效信号微弱且干扰背景复杂,以及探测深度深等问题.针对深地震反射大炮单次覆盖剖面技术,本文系统梳理其研究方法与技术路线,总结深地震反射大炮单次覆盖剖面技术在数据采集、处理及地球动力学应用中的创新范式,重点探讨了该技术在解决"造山带如何演化、成矿背景是什么、孕震构造怎样识别"等前沿科学难题上的应用,并对深地震反射大炮单次覆盖剖面技术的未来发展方向进行了展望.

1 单次覆盖反射技术原理与数据采集

单次覆盖反射技术主要包括三大环节,即地震

资料的野外采集、数据处理和资料解释. 获得准确可靠的深地震反射大炮单次覆盖剖面,主要依靠剖面合理布设和测量高精度定位,地震震源有效激发与数据精细采集以及数据针对性处理与约束解释三个关键流程. 在深地震反射剖面的数据处理过程中,必须保留浅、中、深层的有效反射信息,提高浅层分辨率,中、深层连续性和信噪比. 单次覆盖反射技术通过大能量震源激发和长排列接收,结合近垂直反射观测方式,在成本可控的前提下,对地下反射点实施连续的单次观测,从而对深部地壳结构实现高分辨率成像. 单炮数据未经叠加处理,观测成本较低,数据分辨率较高,并且数据原始动力学特征清晰,可通过建立"埋深 T_{0u} 图、地质层位、地形、炮点坐标"四维地震数据体,精准反映目的层反射能量与信噪比(胡峰等, 2022). 尽管单次叠加成像缺乏多次叠加的统计效应,其数据保真度和可信度仍然要优于叠加数据. 因此,该技术能够更真实地反映地下构造细节.

单次覆盖反射通过增大炸药药量,降低地震波主频,同时大幅提升起始能量,从而激发产生低频、强能量地震波. 根据萨道夫斯基经验公式(式(1)),激发药量与地震波主频呈反比,大药量能够产生强能量、极低频的地震波.

$$V = K((Q^{(1/3)})R)^{\alpha}, \tag{1}$$

式中,V 表示地面质点峰值振动速度;Q 表示单段最大起爆药量;R 表示爆炸源到观测点的距离;K 表示场地条件经验系数;α 表示衰减指数.

地震波在传播过程中同时受到几何衰减与吸收衰减的影响,相对于浅层地震勘探,深地震反射探测的一个显著特征是高频信息在深部传播过程中吸收衰减严重,只有震源能量足够大,才能克服地层吸收作用,在地表记录到来自上地幔的有效反射信息(张忠杰等, 2013). 根据地震波吸收衰减规律 $A(f) \propto e^{-\pi f t/Q}$,吸收衰减强度可用品质因子 Q 表征,且衰减系数与频率成正比. 因此,高频成分在穿透巨厚地壳时因吸收剧烈而迅速损耗. 利用大药量激发产生的低频地震波信号波长较长、单位波长内能量损耗比例低,并且能够有效规避小尺度非均匀体的散射,正好契合了深部探测对"抗衰减"的物理需求. 因此,大药量震源凭借其"高能量、低主频"的特性,从根本上实现了"穿透能力强、衰减慢"的效果,确保了对莫霍面及上地幔顶部微弱反射信号的有效获取.

在单次覆盖反射技术当中,地震波在传播过程中,能够穿透巨厚地壳,获取莫霍面及上地幔顶部的反射信号(酆少英等, 2020);配合较长接收排列,使深部有效反射信息得以增强,数据信噪比足够高,同时也有效避免了传统 CMP 叠加在复杂构造区可能引入的虚假构造现象(Klemperer *et al*., 1986). 该技术可以用于刻画地下深部构造,为深部构造层位的宏观识别提供依据,且无论工区资料信噪比高或低,同相轴强弱或是否连续,均可通过层位标定明确地质层位对应关系(胡峰等, 2022).

1.1　单次覆盖反射方法原理

单次覆盖反射技术的核心原理是近垂直反射理论与低频能量穿透机制的协同作用. 由于深地震反射探测的目标层位较深,相较于常规浅层地震勘探而言,使用小炮检距排列,不能接收来自深部反射层的反射波. 基于 Meissner 在 1986 年提出的近垂直原理,当地面观测的排列长度远小于目标体埋深时,地震波传播路径接近垂直方向,深地震反射探测中,当反射层位深度远大于数据观测接收排列长度时,可近似认为地震波是近垂直入射(图 1),此时目标层深度 H 与双程反射时间 t 的关系可简化为:

$$H = \frac{V_{av} \cdot t}{2}, \tag{2}$$

式中,H 表示目标层深度;t 表示双程反射时间;V_{av} 表示上覆地层的平均速度.

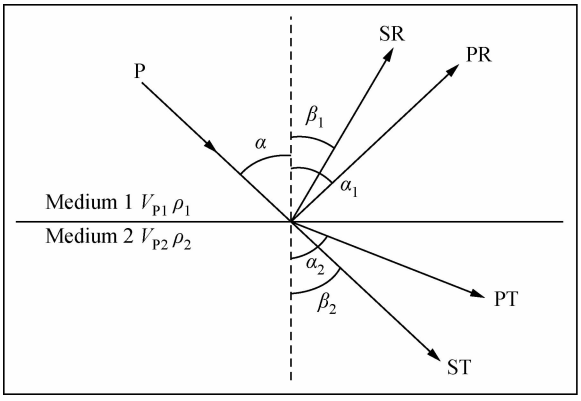


图 1　地震波传播反射波和透射波传播示意图

Fig. 1　Schematic diagram of seismic wave propagation: reflection and transmission waves

深地震反射探测通过"大药量激发、长记录、大偏移距"方式,获取全地壳乃至上地幔的精细结构. 张忠杰等(2013)指出,由于目标探测层位深入地下数十公里,甚至延伸至上地幔,来自莫霍面及更深处的反射信号经过长距离传播后能量大幅衰减,且易

受浅层干扰信号叠加影响.为了让地表检波器能够有效记录到来自莫霍面甚至上地幔的微弱反射信号,震源必须具备足够强的能量.历史上深反射剖面探测中单次最大炸药量曾达2000 kg,常规应用中炸药量也多控制在20~100 kg;与此同时,地壳莫霍面埋深普遍在20~80 km,反射信号往返传播需消耗较长时间,因此记录长度通常需设置在15 s以上,而在喜马拉雅等地壳厚度异常巨大的区域,为覆盖更深层的地质响应,甚至会采用50 s的超长记录时长(张忠杰等, 2013).

在上述大药量激发与长排列接收的条件下,来自下地壳和上地幔的深层反射波可视作近垂直入射,入射角$\alpha\approx0$.此时,反射波传播简单,波场主要成分为反射波和透射波,且反射能量强,有利于有效反射震相的识别,描述层间弹性波能量分配的Zoeppritz方程将显著简化:复杂的P-SV转换波及透射转换波能量极弱,可忽略不计,波场主要由P波的反射与透射成分构成.其反射系数R_{pp}仅取决于界面两侧介质的波阻抗(密度ρ与速度V的乘积)差异:

$$R_{pp}=\frac{\rho_2V_2-\rho_1V_1}{\rho_2V_2+\rho_1V_1}, \tag{3}$$

式中,R_{pp}代表反射系数,ρ_1,V_1和ρ_2,V_2分别为上、下层介质的密度和纵波速度.该式表明,在近垂直入射条件下,只要深部界面存在明显的波阻抗差异,大药量激发的强能量地震波即可产生可观测的反射震相.

单次覆盖反射技术正是基于上述深部探测的特殊地球物理需求,通过强震源激发低频信号以克服深层介质的吸收衰减,并结合长排列接收方式,获取高信噪比的近垂直反射能量,从而实现对深部地壳结构的清晰成像.在深地震反射探测中,当目标地层的埋深界面显著大于炮检距时,来自下地壳和上地幔的深层反射波可视为近垂直入射.在此条件下,由于深层介质的地震波速度较高,动校正时差较小,可予忽略;如果将高信噪比的大炮数据单独处理,可以得到大炮单次覆盖剖面;通过对测线上一定数量炮点记录的近垂直入射反射数据进行处理与拼接,可形成覆盖整条测线的大炮单次覆盖剖面.若地震原始数据具有足够的信噪比,利用大炮单次覆盖剖面即可有效描述深部构造特征.

地下界面在无断层等异常情况下通常呈现连续分布特征,为了准确刻画连续界面的空间形态,需要在具备一定延伸长度的测线上部署连续观测体系,实施系统性连续观测作业.图2展示了一种单炮剖面的连续观测系统设计方案:首先在O_1点激发,O_1O_2段接收,追踪A_1R_1区间反射界面;随后在O_2点激发,仍通过O_1O_2段接收,探测A_2R_1区间反射界面;接着在O_2点激发,改由O_2O_3段接收,追踪A_2R_2区间反射界面.当保持O_2O_3接收排列固定,将激发点迁移至O_3位置时,可获取R_2A_3区间的反射界面信息.大炮单次覆盖剖面连续观测系统的优点是激发点与接收点靠近,野外施工方便,不受折射波的干扰,还可减少有效波之间的干涉:缺点是近激发点的几道常受爆炸后的声波和面波的干扰(陶格涛, 2006).

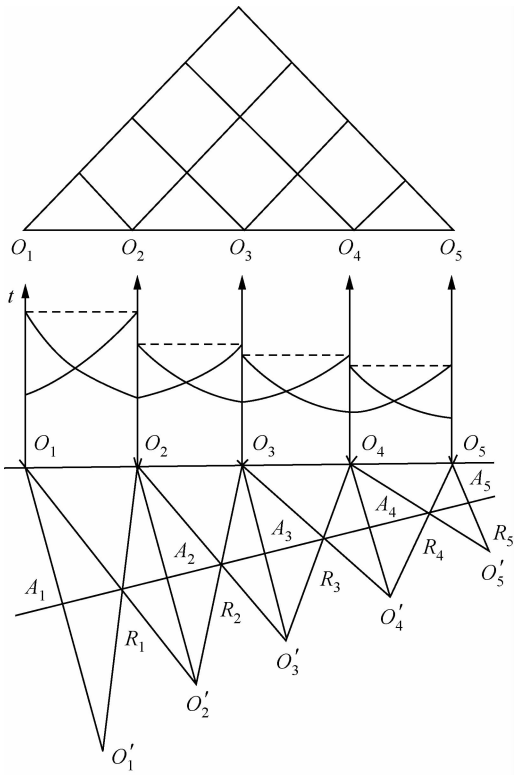


图2 单次覆盖观测系统设计图

Fig. 2 Single-pass coverage observation system design diagram

为验证该技术可行性,李洪强(2014)通过射线追踪算法开展数值模拟研究;设计大炮炮距10 km、检波点距80 m,全排列接收的观测系统,选取大炮单炮0~10 km近垂直反射偏移距数据,构建大炮单次覆盖剖面,并与小炮叠加剖面对比,验证可行性.结果显示,尽管大炮单次覆盖剖面信噪比低于小炮叠加剖面,但是大炮单次覆盖剖面能够准确复现模型地层倾斜形态与层间接触关系,并且大炮单次覆盖剖面对深层20~30 km反射界面的几何刻画分辨

率显著高于叠加剖面(李洪强, 2014). 该方法直接验证了大炮近垂直反射数据构建大炮单次覆盖剖面的技术可行性(图 3). 这种剖面为揭示下地壳结构和 Moho 面的几何形态提供了直接的观测约束(Naghizadeh *et al*., 2019).

1.2　数据采集流程与区域参数设置

在单次覆盖反射中,由于激发药量的差别,单炮品质差异较大,对于高品质的单炮,由于其能量强、主频低的特性,即便在地层吸收作用下,仍能较好保留深部反射信息,无需进行多次叠加技术即可保持资料连续性和信噪比. 大炮单次覆盖剖面的数据采集利用"高能量、低主频"的震源特性,在无需多次叠加的情况下,克服地层吸收作用,直接获取高信噪比的深部反射信息.

大炮单次覆盖反射的数据采集主要包括八个核心环节:前期准备、测量放样、表层结构调查、试验工作、炮点布设、检波器埋设、激发接收与质量控制,每个环节都需要针对深部探测的特殊需求进行精细化设计与实施. 与常规探测不同,大炮单次覆盖反射对激发条件极为敏感,因此,在前期准备与测量放样阶段,必须为大炮激发寻找最优的"窗口". 首先需要基于高精度 GPS/RTK 技术与地质资料,通过小折射与微测井法精细刻画表层结构,建立近地表模型,为后续静校正及参数设计提供依据(郝世鹏等,

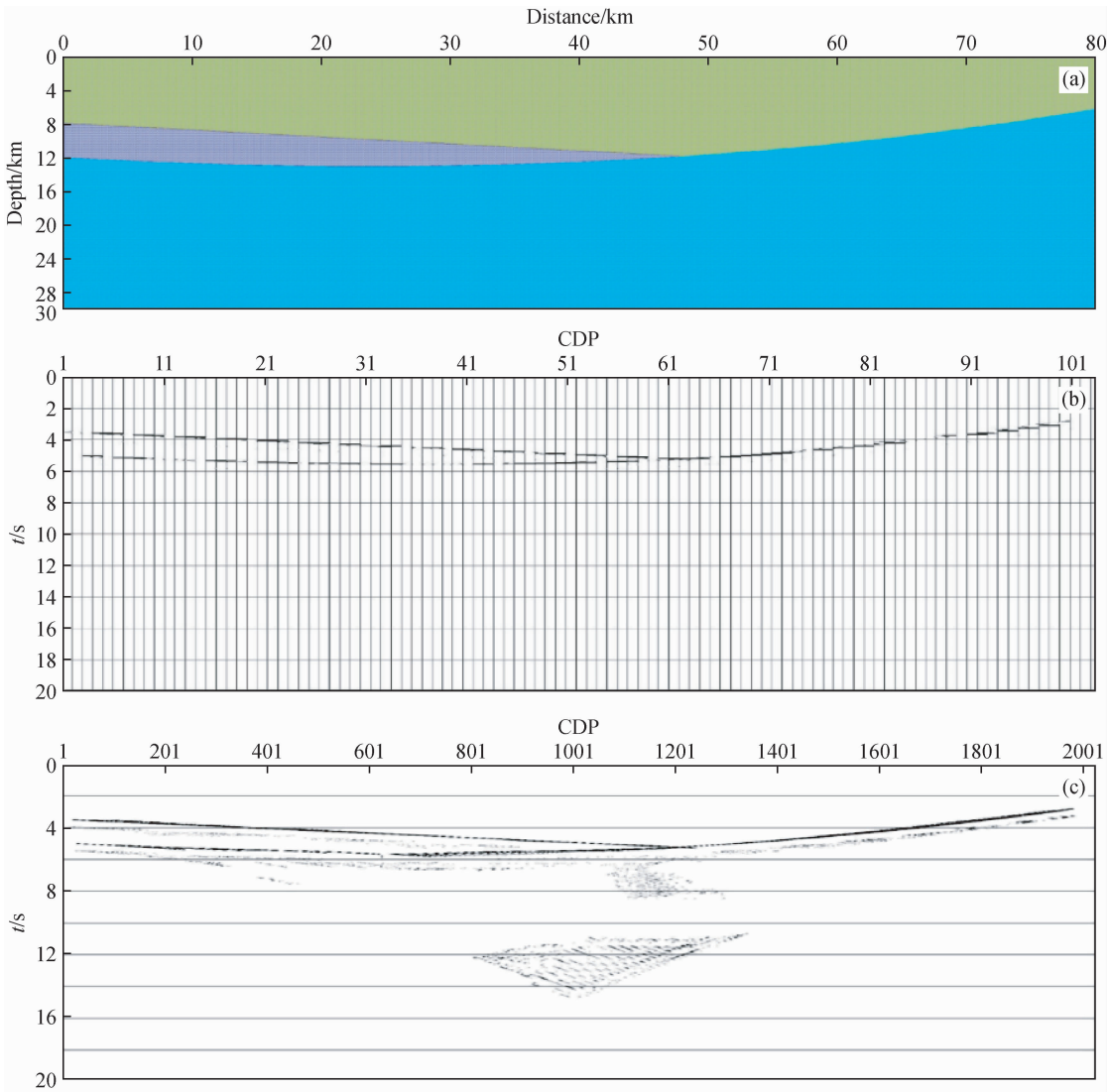


图 3　单炮数值模拟图(李洪强, 2014)

(a) 为单次覆盖测试模型;(b)为模型大炮大炮单次覆盖剖面;(c)为小炮叠加剖面.

Fig. 3　Numerical simulation diagrams for single artillery pieces (Li, 2014)

(a) Single-shot coverage test model; (b) Single-shot coverage profile of the large-caliber model; (c) Overlay profile of the small-caliber model.

2017);基于表层调查结果,开展针对不同地表条件的药量与井深等参数试验,以优化采集参数设置(王冠等, 2019).一般来说,激发岩性、地形起伏、表层结构变化等因素对单炮记录品质具有显著影响(王海燕等, 2010a),大量统计表明,砂岩、砂质泥岩中激发的单炮记录效果较好,信噪比较高,是理想的激发介质,而灰岩和花岗岩等坚硬岩性则因能量损耗大、干扰发育导致记录品质下降,激发效果最差(王海燕等, 2010a).因此,数据采集应当优先选择砂岩、泥质砂岩等利于能量下传的岩性段激发,避免在灰岩、花岗岩等高速坚硬岩性中激发(陈明春等, 2015).除此之外,地形起伏剧烈对单炮品质影响显著.复杂地形条件下,炮点位于接收排列最低点时记录品质最优,说明地形高差对激发接收一致性具有重要影响,因此野外施工时炮点宜选在附近最低点(王海燕等, 2010a).激发前须全面检查仪器设备,选择适宜时机完成激发与信号接收,并及时处理盲炮(邓小凡, 2021; 符伟, 2019; 潘宗栋, 2022).在我国,受复杂地质与交通条件限制,大炮单次覆盖剖面数据采集常采用传统深孔爆破震源激发(邓小凡, 2021; 潘宗栋, 2022).传统震源以大药量炸药为主,有助于增强深层反射信号,为深部探测提供所需的基础能量.然而,传统震源难以同时满足深部穿透与浅层约束的双重需求,特别是在结晶岩地区,药量增至一定程度后,反射能量增加不再显著,干扰噪声不断增强,存在"饱和药量"现象.针对此问题,可以采用多井组合或优化装药结构提升有效能量,同时,利用岩石岩性"轴向不耦合"延时增效,抑制干扰并提升深层照明度(陈明春等, 2015).例如,在松潘等地区,王海燕(2010a)等采用 16 kg、40 kg 和 200 kg 等差异化药量激发,显著增强深层反射信号能量.

近年来,随着深地探测技术的不断发展,震源选择的策略,也在不断优化.一般来说,为解决深部穿透与浅层约束的矛盾,药量选择需兼顾频率与信噪比平衡,目前常采用"大—中—小药量组合"的差异化激发策略.例如,针对青藏高原侧向碰撞带等巨厚地壳区域,鄢少英等(2020)研发了"大-中-小药量组合激发"技术,共布设 15 个大炮,包括 10 个 500 kg 和 5 个 2000~3000 kg 超级炮,并采用 2100 道全排列接收,道间距为 40 m,排列长度达 84 km,采样间隔 4 ms,记录长度 60 s 采用 2000~3000 kg 超级大炮与 500 kg 常规大炮相结合的差异化激发方式,通过梯度药量组合策略,激发平衡浅部信号分辨率与深部信号穿透性,构建"深浅兼顾"的震源体系,既保证了深层能量,又兼顾了浅部频率响应,为巨厚地壳结构反演提供高质量数据(图 4)(鄢少英等, 2020).除此之外,高精度可控震源凭借低频信号可控、环境友好、重复性高的核心优势,与炸药震源相互补充,为震源选择提供了更优方案(王海波等, 2019),这种可控震源与炸药震源联合方式既能兼顾浅层分辨率,又能满足深部能量需求(Pinet *et al*., 1987).除上述震源及组合模式外,节点地震仪布设灵活、低频响应优良,可以显著提升复杂山区探测的信噪比(任彦宗等, 2022).在海洋地震勘探中,气枪震源通过立体阵列延迟激发技术,有效压制虚反射、增强低频能量,从而满足深部探测对信号传播距离的需求(吴志强等, 2016).

在深地震反射大炮单次覆盖剖面探测中,采集因素直接决定了最终的成像分辨率,其中观测系统设计、子波激发特性、空间采样率及检波器耦合条件尤为关键(李胜强等, 2020).首先,观测系统设计决定了对地下地质体的照明程度与空间采样精度,观测系统一般采用"超长排列、扩展炮检距"等措施,提升深部反射信号的接收能力(刘家豪等, 2023).在实际布设中,通常采用基于"波场照明"的设计方法,根据目标区特点灵活选择端射排列、分裂排列或 100% 覆盖排列等几何形态,以确保深部信息的有效覆盖(赵虎等, 2010).在复杂地形与特殊地质区的研究中,"非纵弯线采集"可以进一步提升深部成像效果(胡建辉等, 2009; 秦晶晶等, 2020).其次,激发与接收条件直接影响信号的保真度与频带宽度.在激发端,利用钻井技术辅助炮点布设,通过"逐点井深"设计优化子波激发特性(刘保金等, 2009);在接收端,可以采用矩形面积组合方式以压制环境噪声(潘宗栋, 2022),特别是在硬岩区,采用"宽频接收"技术,能显著拓宽有效信号频带,从而从根本上提高资料的分辨率(陈明春等, 2015).通过上述对观测系统几何形态、激发井深及耦合措施的综合优化,可有效提升深部信号的能量与频带宽度,为深部构造的识别与成像提供高质量的数据基础.

不同地质目标与场地条件往往观测系统设计与参数设置不同.为了准确揭示不同构造单元的深部特征,大炮单次覆盖剖面技术在实际应用中展现出高度的灵活性与适应性.针对地壳极其厚大、构造变形强烈的青藏高原及周缘地区,探测的首要任务是克服巨厚地壳带来的能量强烈衰减,获取深部 Moho 面及地幔顶部的微弱信号.因此,该区域普遍采用"超大药量、超长记录"的采集策略.例如,拉萨地体

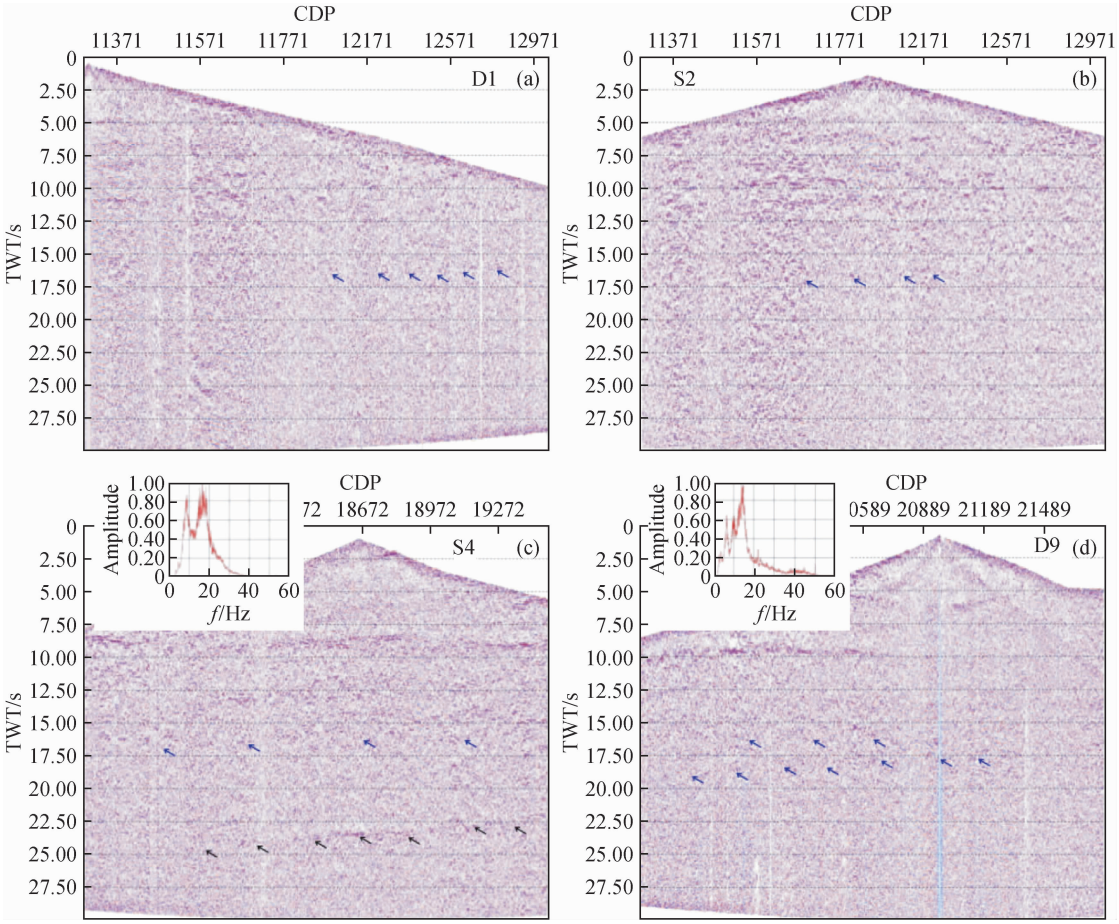


图 4　青藏高原侧向碰撞带大炮原始记录(鄢少英等, 2020)

横坐标为 CDP 号,间隔 20 m;纵坐标为双程走时(TWT),单位:s;下图中左上角小图分别为对应记录中深层(TWT7.0~17.0 s)频谱分析图.

Fig. 4　Original records of the lateral collision zone on the Qinghai-Xizang Plateau (Feng *et al.*, 2020)

The horizontal axis shows CDP numbers at 20 m intervals; the vertical axis shows traveltime (TWT) in seconds. The insets in the upper left corner of the figure display spectral analysis plots for the deep layers (TWT 7.0~17.0 s) of the corresponding records.

北部至羌塘地体南部的深地震反射大炮单次覆盖剖面采用 1000 kg、200 kg 和 50 kg 三种药量激发,炮间距分别为 50 km、1 km 与 250 m,道距为 50 m,最大偏移距达 47.975 km,大炮记录长度为 60 s,中小炮记录长度为 30 s(卢占武等, 2016),有效保障了双地壳结构的成像质量. 六盘山及青藏高原东北缘的深地震反射大炮单次覆盖剖面共布设 7 个药量 500 kg 的大炮,炮间距约 25~50 km,采用单边 1000 道接收,道距 50 m,排列长度约 165 km,采样间隔 4 ms,记录长度 60 s,并采用多井组合激发,成功获取了清晰的深反射震相(图 5a、c). 松潘地区的深地震反射大炮单次覆盖剖面共布设多种药量组合炮点,包括 16 kg 小炮、40 kg 中炮与 200 kg 大炮,采用多道接收,并依据岩性与表层结构差异设计井深,在砂岩、泥质砂岩等激发条件较优岩性中实施激发,记录长度达 20 s 以上,刻画了高原东缘的深部边界(王海燕等, 2010a).

在秦岭、中亚造山带等复杂的造山带与缝合带区域,探测重点在于揭示深部根带与块体拼合特征,采集参数设计需兼顾深部能量与横向分辨率. 秦岭造山带深地震反射大炮单次覆盖剖面一共布设 5 个药量 500~1500 kg 的超级大炮,炮间距 50 km,采用单边 1000 道接收,道间距 40 m,排列长度约 40 km,采样间隔 4 ms,记录长度 60 s(李洪强, 2014),成功追踪了造山带深部的莫霍面错断(图 5b);为刻画古亚洲洋闭合的深部遗迹,中亚造山带东段(索伦克带)的深地震反射大炮单次覆盖剖面,选取 24 个药量 480~2000 kg 的大炮和 2 个药量 96 kg 的中炮,采用单边 1000 道接收,道间距为 50 m,排列长度约 50 km,最大偏移距达 49.975 km,采样间隔 2 ms,记录长度 50 s,并采用 12 口 30 m 深井组合激发,使用 SM24 型 10 Hz 数字检波器接收(谭晓淼

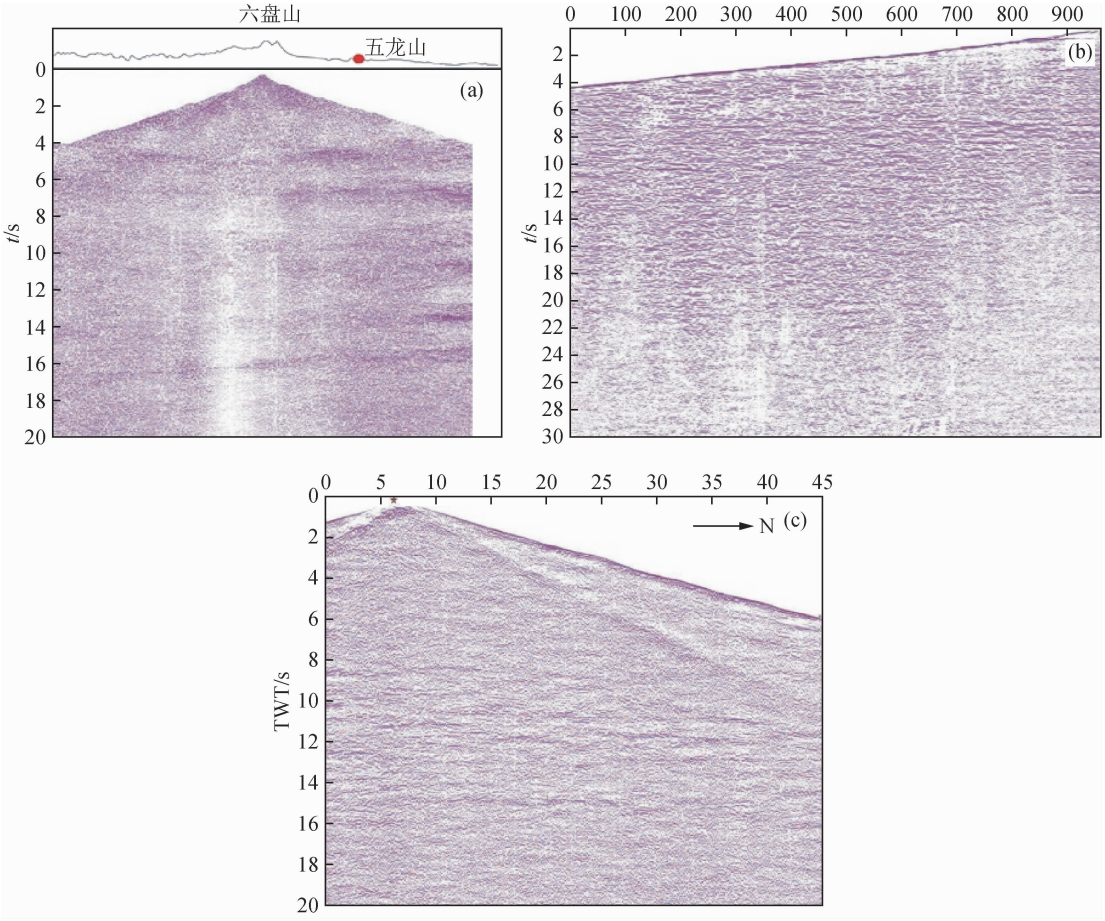


图 5 大炮单次剖面图(李洪强, 2014)

(a)为六盘山深地震反射剖面大炮记录(500 kg);(b)为秦岭深地震反射剖面大炮记录(1000 kg);(c)为青藏高原深地震反射剖面大炮记录(1500 kg).

Fig. 5 Single-shot profile of a cannon shot (Li, 2014)

(a) Deep seismic reflection profile from Liupan Mountains (500 kg cannon shot); (b) Deep seismic reflection profile from Qinling Mountains (1000 kg cannon shot); (c) Deep seismic reflection profile from Qinghai-Xizang Plateau (1500 kg cannon shot).

等, 2021, 2025),有效克服了造山带内部的散射干扰;西拉木伦缝合带的深地震反射大炮单次覆盖剖面共布设 11 个大炮,药量 480 kg,采用单边不少于 1000 道接收,道间距 50 m,排列长度约 50 km;最大偏移距达 49.975 km,采样间隔 2 ms,记录长度 50 s(符伟等, 2021);重点捕捉缝合带深部的接触关系.

相比之下,在中国东部及东北地区的矿集区与地震区,地壳相对较薄,探测目标更侧重于浅部构造细节与深部背景的精细关联,因此常采用"高频、密点"的参数配置. 例如在庐枞金属矿集区,卢占武等(2010)等采用 40 m 道距、240 m 炮距、18 ~ 20 m 井深和 16 ~ 20 kg 药量,配合中间激发、720 道双边接收,有效获取了浅层至 Moho 面的反射信息;矿集区内部则进一步将道距加密至 10 m、炮距调整为 80 m,并采用十字测线拟三维采集方式,显著增强浅层分辨率与构造识别能力(卢占武等, 2010). 在多宝山矿集区,Pan *et al*. 按照"大、中、小炮结合"的激发原则,设计小炮药量为 24 kg,中炮药量为 96 kg,大炮药量为 480 kg,大、中、小炮炮点距分别为 200 m、1 km 和 25 km,接收道数为 800 ~ 1000 道,记录利用长度最长达 99 s 的超长记录探索深部成矿背景(Pan *et al*., 2021);而三河—平谷地震区的深地震反射大炮单次覆盖剖面共布设 3 个药量 150 kg 和 80 kg 的大炮,炮间距 12 km,采用 801 道接收,道间距 30 m,排列长度约 24 km,采样间隔 2 ms,记录长度 16 s,并采用 50 m 深井激发,重点聚焦于中上地壳的精细结构成像(刘保金等, 2011);在国际研究案例中,针对日本中央构造线(Median Tectonic Line)这一划分西南日本内外带的巨型断裂系统,为了探明其在强烈构造变形下的深部几何形态,

Kawamura 等(2003)设置了 60 s 的记录长度,并采用 12 km 的炮间距与 50 m 道距的接收系统,结合 30 m 至 70 m 的深井激发,以确保地震子波能够穿透复杂的动力变质带(Kawamura *et al*., 2003). 而在新西兰北岛希库朗伊(Hikurangi)俯冲带的研究中,针对俯冲边缘复杂的板块动力学过程,Stern 等(2015)部署了多达 878 道的接收系统,道间距灵活设置在 50 ~ 100 m 之间,通过高密度的空间采样捕捉来自俯冲板块边界及上覆地壳的复杂波场信息,为理解板块俯冲诱发的地震机制提供深部约束(Stern *et al*., 2015). 不同地区的深地震反射采集参数详见表 1. 这些实例共同体现了该技术在道距、炮距、药量、覆盖次数等参数设计上的灵活性,以及对不同地质环境与经济条件的良好适应性.

表 1　不同地区深地震反射大炮单次覆盖剖面采集参数表

Table 1　Parameters for single-trigger deep seismic reflection cannon profiling in different regions

区域分类	测线区域	记录长度	道数	采样率	道间距	检波器类型	炮间距	井深	仪器型号	参考文献
青藏高原及其周缘	青藏高原侧向碰撞带	60 s	2100	4 ms	40 m	—	24 km /50 km	50 m	—	(酆少英等, 2020)
	雅鲁藏布江缝合带西部	30 s /60 s	720 /1133	2/4 ms	50 m	10 Hz	250 m、1 /50 km	30 m/50 m /50 m×10	428XL	(Gao *et al*., 2016)
	班公湖—怒江缝合带	60 s	1400	4 ms	50 m	20DX-10 Hz	50 km	50 m×15	428XL	(Shi *et al*., 2022)
	羌塘地块拉萨至南部	—	960	—	50 m	—	50 km	50 m	408XL	(杨丽, 2017)
	六盘山	60 s	1000	4 ms	50 m	—	25 km /50 km	—	SERCEL428XL	(李洪强等, 2013)
中央造山带	秦岭造山带	60 s	1000	4 ms	40 m	—	50 km	—	—	(李洪强等, 2014)
	大巴山—秦岭结合部位	60 s	1000	2 ms	50 m	—	25 km	—	—	(李洪强等, 2014)
	中亚造山带索伦克带	—	800	2 ms	50 m	20-DX	200 m、1 /25 km	25 m /30 m	428XL	(谭晓淼等, 2021)
东部及东北地区	索伦—西拉木伦—长春—延吉缝合带中段	—	800 /1000	—	50 m	—	200 m、1 /25 km	25 m /30 m	428XL	(符伟等, 2020)
	“松科二井”松辽盆地	50 s	800 /1000	2 ms	50 /25 m	20-DX	200 m、1 /25 km	25 m/30 m×3/30 m×12	428XL	(符伟等, 2019)
	东北地区跨地块测线	—	—	—	50 m	—	—	—	428XL	(邓小凡, 2021)
	庐枞金属矿集区	—	720	—	40 m /10 m	—	240 m /80 m	18 ~ 20 m	—	(卢占武等, 2010)
	三河—平谷地区	—	—	—	300 m	—	—	—	—	(刘保金等, 2009)
	福建地区	50 s	2400	2 ms	30 m	5 Hz	15 km /600 m	30 m×4	Smartsolo	(晏云翔等, 2023)
国外典型研究案例	日本 Median Tectonic Line	60 s	242	4 ms	50 m	8 Hz	12 km	70 m/30 m	GDAPS-4	(Kawamura *et al*., 2003)
	新西兰北岛俯冲带	—	878 /300	—	50 ~ 100 m	—	—	—	—	(Stern *et al*., 2015)

上述研究表明,深地震反射大炮单次覆盖剖面技术在深部探测领域具有显著的有效性与良好的适应性.通过该技术获取的成果,不仅揭示了深部成矿构造、地壳精细结构、造山带深部过程、Moho 面起伏等关键地质信息,同时展示了该技术在参数设计上的灵活性优势.

2 大炮单次覆盖剖面数据处理技术与资料解释

深地震反射资料的数据处理与解释是深地震反射勘探工作的中心环节之一.为获得客观真实的深部成像结果,大炮单次覆盖剖面数据处理通常遵循从常规预处理到精细成像的循序渐进流程(刘子龙等, 2019).与常规反射地震主要依赖多次覆盖(CMP)叠加技术来压制噪声不同,大炮单次覆盖剖面技术受限于单次覆盖的观测方式,无法利用叠加效应消除随机干扰,且深部反射信号在长距离传播后能量极弱.针对大炮数据"药量大、排列长、深层信号弱但能量集中"的特点,大炮单次覆盖剖面数据处理通过高精度的单炮独立处理流程,在保留原始数据动力学特征的前提下,压制环境噪声并恢复深层能量,从而获得能够直接反映地下反射点几何特征的单次大炮覆盖剖面.大炮单次覆盖剖面的解释工作则聚焦于莫霍面形态及深部构造特征,紧密结合地质规律与地球物理约束,规避技术局限性导致的假象是约束区域构造框架的关键依据(王海燕等, 2010b).

2.1 数据处理流程

大炮单次覆盖剖面数据处理是连接野外数据采集和室内数据解释的纽带,剖面质量直接决定后续解释的可靠性.相对于常规浅层地震反射,深地震反射资料具有独特的数据特征:一是高频信息吸收衰减严重,低频干扰发育,深层有效反射信号获取极其困难;二是由于探测区域往往位于造山带或盆山结合带,地表低速带厚度和速度变化显著,引起地震波走时不均匀延迟,带来极为复杂的静校正问题(张忠杰等, 2013).因此,大炮单次覆盖剖面数据处理流程与常规反射地震数据存在着一些差异.一般来说,数据处理流程通常包括预处理、常规处理与精细处理三个阶段.预处理是深地震反射剖面数据处理的基础,主要包括数据格式转换和观测系统加载.数据预处理完成以后,则需要进行数据常规处理,具体流程包括静校正、噪声压制、振幅补偿、速度分析、动校正和叠加等.针对深地震反射资料静校正问题严重、深部有效信号弱、信噪比低、偏移距大等特点,精细处理的重点在于获取整个地壳与地幔上部的精细结构.因此,在常规处理基础上,一些关键步骤与常规深地震反射数据有所差异,应用一系列精细处理技术,克服静校正量大、信噪比低及深部照明不足等问题,逐步构建高分辨率的地壳精细结构图像(徐泰然, 2018).

2.1.1 组合静校正技术

静校正是地震资料处理中基础且关键的环节,其处理效果直接影响后续成像质量.深反射采集排列长、测线近地表地质条件复杂,近炮点与远炮点数据差异显著,因此静校正质量直接影响大炮单次覆盖剖面的处理效果(徐泰然等, 2017).目前使用的静校正方法主要包括:高程静校正、折射静校正和层析静校正三种方法,主要差别是获取风化层速度的方法差异.高程静校正不考虑低速带,仅对物理点与基准面的高程差进行校正;折射静校正法通过初至折射波获得折射层速度,从而进行静校正处理;层析静校正法先由给定的初始模型,进行正演,用射线追踪的方法得到初始模型的初至波,然后将计算的初至波和实际拾取的初至波进行比较,计算地表模型修正量,经过若干次迭代反演得到较精确的地表模型,与其他静校正方法比较并选取最优方法(图 6).

由于深地震反射剖面往往长达数百公里,穿越盆地、山地及火成岩区等复杂地表,单一的静校正方法难以适应全线剧烈的地形起伏与速度横向变化.大炮单次覆盖剖面必须在叠前一次性解决长波长静校正问题.目前数据处理多采用"分段组合静校正"策略.根据处理的效果,在针对不同地段采用不同的静校正方法,保证一次静校正的效果.沉积区浅层存在稳定折射层,采用折射静校正反演折射层速度与厚度.山地花岗岩区缺乏稳定折射层,利用层析静校正和基于初至波走时与射线追踪的方法,迭代反演速度模型.针对近地表速度变化与地形起伏引发的时差问题,初至波层析反演与折射静校正结合可构建高精度近地表速度模型,例如,高磊和李洪强(2019)等在处理兴蒙造山带西南段深地震反射数据时,针对该区地表起伏和岩性横向变化大的特点,采用非线性层析反演获取表层速度结构,并根据浅层速度特征,在盆地段(1 ~ 20 km)采用折射静校正,在构造复杂段(20 ~ 80 km)采用层析静校正,重叠区域通过最小二乘法拟合静校正量,有效解决了该区静校正问题(高磊和李洪强, 2019);此外,针对地形起伏巨大的区域,徐明才等在 1995 年提出的

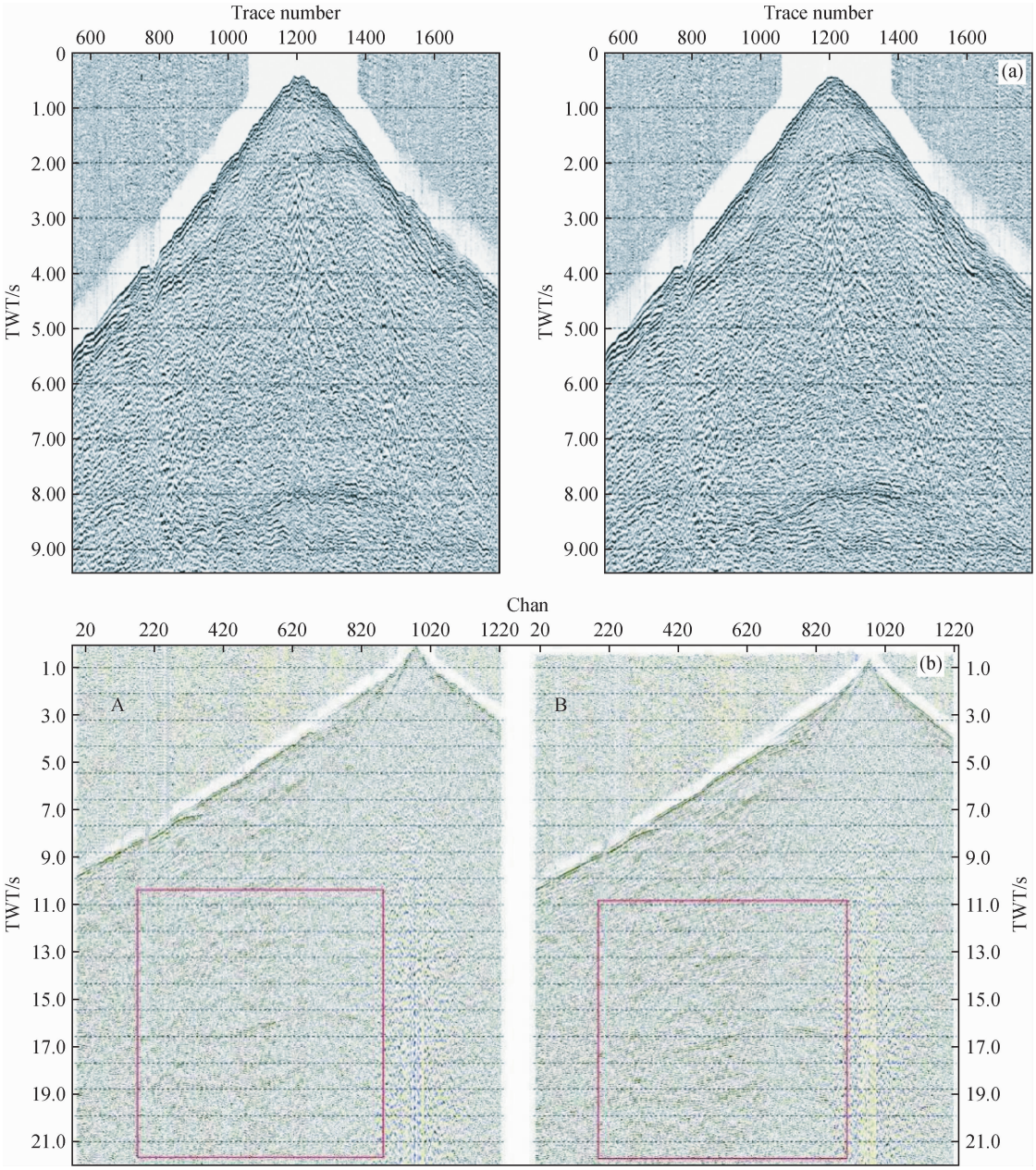


图 6　原始大炮层析静校正对比图(酆少英等, 2020; 李洪强, 2014)

(a)青藏高原侧向碰撞带深地震反射剖面层析静校正前(左)、后(右)原始记录对比;

(b)为六盘山造山带原始单炮(0~20 s)与应用层析静校正量(0~20 s)对比图.

Fig. 6　Comparison of raw and tomographically corrected seismic records(Feng *et al*., 2020; Li, 2014)

(a) Comparison of raw (left) and tomographically corrected (right) deep seismic reflection profiles from the lateral collision zone of the Qinghai-Xizang Plateau; (b) Comparison of raw single-shot (0~20 s) and tomographically corrected (0~20 s) seismic records from the Liupanshan Orogenic Belt.

"浮动基准面静校正",通过将激发-接收点校正至沿测线起伏的基准面,减小静校正速度误差对深部成像畸变的影响,确保同相轴的连续性. 因此,在剖面数据的实际处理过程中,需要综合利用静校正技术,并进行对比分析,从而选择最优静校正方法,保证长剖面上深反射数据静校正处理的效果.

2.1.2　叠前噪声压制技术

在大炮单次覆盖剖面数据处理中,提高信噪比是保证数据质量的重要一步,噪声压制与信号增强是提高信噪比的两大主要方法. 由于探测深度大、接

收排列范围广、记录时间长,深部反射信号的能量比较弱,加上缺乏 CMP 叠加的噪声压制,因而伴随多种不同类型的干扰波,原始记录中的面波、线性干扰及随机噪声必须在叠加偏移之前被彻底压制,同时严格保护深部微弱的有效信号(朱小三等, 2013). 因此,叠前噪声压制是提升资料信噪比与分辨率的关键手段,通过分离信号和干扰,可以有效压制大炮检距数据里的干扰,同时保护好深部的弱反射信号. 大炮单次覆盖剖面一般采取"多域联合、保幅去噪"策略,针对规则干扰,利用有效波和干扰波在频率、视速度以及空间分布等方面的不同,在 f-k 域或 τ-p 域进行针对性剔除(彭仁艳等, 2019);针对单炮记录中存在的死道、坏道及空白道等问题,利用 Curvelet 变换的多尺度、多方向特性,基于压缩感知原理,重建缺失波场,可以有效压制随机噪声并增强同相轴连续性(吴蔚等, 2016);除此之外,S 变换的时频分辨率随频率变化,低频处频率分辨率高,高频处时间分辨率高,且其反变换简便,便于表示深地震反射信号的复杂时频特性(曲中党等, 2015),采用 S 变换时频滤波技术,利用其非平稳信号分析优势,构建自适应软阈值滤波器,在压制混频干扰的同时显著提升了 Moho 面等深部弱反射层的可识别度(吴蔚等, 2016).

2.1.3 深层能量补偿

地震波在穿透地壳与上地幔顶部的过程中,受球面扩散与地层非弹性吸收的双重影响,深层能量呈"指数级"衰减,这就会使得深层反射信号明显变弱. 能量补偿不仅是信号增强的重要步骤,也是提升整体数据解释精度的重要保障,对于大炮单次覆盖剖面而言,恢复深层弱信号能量是实现全地壳成像的前提. 为了提高数据质量,通常会采用振幅补偿的方法来恢复能量损失. 振幅补偿主要包括两类,一类是针对几何扩散效应的补偿,另一类是针对地表条件不一致所引起的物理衰减补偿. 地震波前随着传播距离的增加而不断扩展,导致振幅按照球面扩散的规律减弱. 针对几何衰减,常常采用连续介质球面扩散补偿方法,来校正因传播路径导致的振幅下降. 在深地震反射剖面中,由于测线比较长,表层条件复杂,不同炮点、检波点以及各道之间的能量差异很大,地表激发和接收条件发生变化,进而产生物理衰减,针对物理衰减,在大炮单次覆盖剖面的数据处理中,一般采用两步法补偿策略:首先利用连续介质模型进行球面扩散补偿,校正几何衰减;随后实施地表一致性振幅补偿,统计全测线能量差异,消除激发与接收条件不一致带来的振幅畸变. 针对深部高频成分衰减严重的特点,进一步应用反 Q 滤波、谱白化或时频域能量均衡技术,以此拓宽深层信号频带,提升剖面分辨率(李金丽等, 2015). 例如,邓小凡(2021)针对东北火成岩覆盖区高速层屏蔽导致深层信号微弱的问题,把能量补偿和自适应噪声压制结合起来,有效地增强了深层弱反射,进一步证明了能量补偿在地震数据处理中的关键作用,清晰揭示了被掩盖的深部构造特征(邓小凡, 2021).

2.1.4 宏观速度分析与成像

速度分析是贯穿地震数据采集、处理与解释全流程的核心环节. 精确的速度模型是偏移的关键,速度分析的准确性直接影响成像质量和地质解释的可靠性,通过对模型中"速度体"进行不断迭代更新,可以提高深部速度体的精度,对偏移结果中岩石圈中、深部成像的准确性有着决定性作用(朱小三等, 2014). 与常规反射地震不同,大炮单次覆盖剖面由于覆盖次数极低,无法构建高精度的均方根速度场,更无法依赖"速度分析-剩余静校正"的迭代闭环来提升叠加质量. 因此,速度分析在大炮单次覆盖剖面处理中具有特殊性,该环节的重点不在于获取用于叠加的精细速度,而在于构建一个符合区域地质规律的宏观速度模型. 由于深反射大炮数据普遍存在深层信号弱、横向速度变化显著等特点,单一速度分析方法易产生多解性,难以满足复杂构造区的处理需求. 因此,在实际处理中,会依据不同的地质条件,采用组合式的速度分析策略. 例如,在火成岩覆盖区域,一般会运用"常速度扫描 + 变速度迭代"的方法,先通过常速度扫描确定出一个合理的速度范围,接着以较小的间隔开展变速度扫描,同时结合剩余静校正进行迭代优化,从而逐步收敛得到可靠的速度场. 在构造复杂的矿集区,通常会利用初至波层析反演建立近地表精确速度模型,中深层则参考区域背景速度场,通过大尺度的速度扫描进行宏观约束. 这种策略规避了低信噪比条件下速度拾取的多解性,同时为 Kirchhoff 积分法偏移等成像技术提供了稳健的速度基础,确保了深部大倾角构造与绕射波的准确归位,提高速度模型在横向上的分辨率以及纵向上的精度,进而确保构造形态能够被准确刻画(邓小凡,2021;符伟,2019;潘宗栋,2022). 通过采用上述具有针对性的策略,能够有效应对深部数据中速度估计存在的不确定性问题,为后续的成像和解释工作提供可靠的依据.

2.1.5　长排列动校正与波形保真技术

常规深地震反射数据处理通过采用动校正方法,实现 CMP 道集水平叠加;大炮单次覆盖剖面并不依赖多次覆盖的统计叠加效应,而是利用超长排列接收的远道信息提升深部照明度. 大炮数据的最大炮检距通常长达数十公里甚至上百公里,远超常规勘探尺度,在大炮检距条件下,双曲时距方程会引入显著误差,导致动校正拉伸现象(NMO Stretch)极为显著. 在大炮单次覆盖剖面中,通常会表现为远道同相轴严重畸变、主频降低及频带变窄,严重时甚至出现同相轴交叉、混叠与畸变(施剑等, 2011). 另一方面,深部莫霍面及上地幔顶部目标层的介质速度极高,地震波传播路径近似于近垂直入射,动校正时差相对微小,在特定条件下甚至可予以忽略. 因此,大炮单次覆盖剖面的动校正,不同的深浅目标采取不同的策略. 对于中浅层数据,由于受到长排列拉伸影响显著,通常采用高阶动校正方法或引入各向异性参数,在时距关系中增加高阶项以修正大偏移距下的走时误差;或者采用基于频谱替换的无拉伸动校正技术,通过相位谱替换实现走时调整,从而在保留远道高频信息的同时消除波形拉伸畸变(施剑等, 2011). 对于地表起伏剧烈的区域,结合地形及浅层速度结构进行精细校正,消除近地表因素对深部极微弱动校正时差的干扰(张明和薛诗桂, 2013).

2.1.6　单炮偏移成像技术

偏移成像是大炮单次覆盖剖面技术中最核心的成像环节,也是其区别于传统 CMP 叠加剖面的本质特征. 偏移处理中的关键参数包括偏移孔径、去假频因子以及速度模型,对于深地震反射资料而言,精确的偏移成像是获得岩石圈深部精细结构的关键步骤(朱小三等, 2014). 传统深反射处理通常先进行 CMP 叠加再偏移,虽然利用统计效应提高了信噪比,但也因"平均化"处理导致深部复杂构造细节模糊,甚至引入虚假构造. 相比之下,大炮单次覆盖剖面技术采用"基于单炮记录的叠前偏移成像"策略,将离散的单次大炮波场能量直接收敛于真实的地下空间位置(闫春明等, 2025). 在单炮偏移成像过程中,由于大炮数据具有"单次覆盖、信噪比低、深部能量弱"的特点,因此必须构建能够涵盖整个地壳及上地幔顶部的宏观速度模型,并以此为基础进行大孔径偏移. 同时对成像算法的适应性要求极高,Kirchhoff 积分法偏移由于能适应速度纵、横向变化,对复杂构造的大倾角地层归位合理,同相轴连续性好,成像较清楚,在大炮单次覆盖剖面资料处理中应用广泛. 针对深部探测目标,设定足够大的偏移孔径,确保深部绕射波的完全收敛,避免因孔径不足导致的成像截断或归位误差;同时精细调整去假频因子,在控制偏移噪声与保留深部高频细节之间取得平衡. 通过以上策略,大炮单次覆盖剖面能够有效规避多次叠加带来的信号混叠,清晰刻画出莫霍面起伏、地壳深部断裂及岩浆底侵构造的真实几何形态,直接反映地下反射点的单次观测响应.

2.2　大炮单次覆盖剖面的资料解释

大炮单次覆盖剖面解释是揭示岩石圈尺度宏观几何结构与深部动力学过程的关键环节. 目前,这类资料的解释主要聚焦于构造、地层和岩性解释三个层面,其中构造解释占据主导地位. 大炮单次覆盖剖面的解释本质上是一种"地震构造解释",通过揭示近垂直反射剖面上波组的反射特征及其构造几何形态,并分析其地球动力学含义. 常规叠加剖面通过多道统计效应压制干扰,虽提升了信噪比,但也因"平均化"处理在一定程度上平滑了深部微弱信号的动力学特征;相比之下,在近垂直入射条件下,反射波时距关系接近双曲线形态,畸变较小,能够较为真实地反映地下界面的几何特征. 由于大炮单次覆盖反射的数据是近垂直入射的单次观测,探测目标深度远大于接收排列长度,因此,大炮单次覆盖剖面解释流程强调对深部弱信号的识别与地质合理性验证,更侧重于利用单次观测数据的高保真性,直接追踪深部反射界面的原始几何形态与波组特征.

大炮单次覆盖剖面的解释流程通常包含三个关键步骤:有效信号提取、构造界面识别和地质意义验证. 相较于多次覆盖剖面,大炮单次覆盖剖面具有"深层信号弱、干扰背景复杂且无叠加增益"的特点,能更好地保留深部弱反射信号的原始信息. 然而,深部信号受地层吸收与多种干扰波影响,信噪比普遍较低,为了在低信噪比背景下准确捕捉莫霍面及地壳内部的微弱反射,解释工作通常借助自动线条图(Skeletonization)技术,将复杂的波场转化为可视化的构造线条,辅助人工进行构造解释(李文辉等,2009),为识别莫霍面起伏、地壳透明体及深大断裂轨迹提供了直观的几何约束.

在大炮单次覆盖剖面资料解释中,岩性解释与深部异常体识别非常关键. 岩性解释方面,通常依据振幅、频率、相位等动力学参数,反演弹性参数以推断流体成分、速度、孔隙度及密度等属性(刘子龙等, 2019). 异常体识别方面,不同物性界面在地震

剖面上具有显著差异的反射特征:高波阻抗差界面因介质密度与波速的剧烈变化,常表现为强振幅、连续性好的反射同相轴,且极性稳定;而低波阻抗差界面或透明界面因物性差异微弱,多呈现为反射空白或弱反射特征.深地震反射剖面解释中,上地壳通常呈现为"透明"反射区,可能对应于相对均匀的岩体,如花岗岩体或橄榄岩体;而下地壳则普遍具有强烈的反射性,其中近水平层状反射可能与伸展背景下的岩浆底侵作用相关(杨文采, 1991).常见的异常反射类型包括透明体、亮点、绕射波和各类倾斜或水平反射结构(司芗等, 2014).其中,"亮点"是振幅异常增强的典型表现,多出现在中地壳,成因可能与岩浆囊、流体带或铁镁质岩基等因素相关(卢占武等, 2014).绕射波的出现则常与断裂边界或复杂构造界面有关(司芗等, 2014).大炮单次覆盖剖面凭借其保留的振幅、频率、相位等原始动力学信息,在识别下地壳—上地幔顶部这类低波阻抗差界面方面具有独特优势(王海燕等, 2010b).与高波阻抗差界面产生的强反射不同,下地壳-上地幔顶部等深部界面往往表现为弱反射或渐变带,这类信息在常规叠加过程中极易丢失,而在大炮单次剖面上则可通过运动学与动力学特征分析予以保留,通过分析单次覆盖数据的运动学与动力学特征,可反演弹性波在深部介质中的传播行为,进而推断地壳厚度变化、壳内关键界面形态及其构造演化过程(卢占武等, 2014).

在大炮单次覆盖剖面的解释过程中,为了定量刻画地壳深部的非均质性特征,基于随机介质模型的统计解释方法成为大炮单次覆盖剖面解释的重要补充.研究表明,地壳深部结构具有多尺度的非均质性,其空间分布可用随机介质模型进行统计描述(雍凡等, 2021b),大炮单次覆盖剖面中丰富的散射波场正是这种非均质性的直接响应.因此,可以通过反射地震剖面估算自相关长度、赫斯特数等参数,研究地壳内部岩性非均质性的空间分布特点(雍凡, 2021),揭示地下介质非均质性的空间分布规律,为深部反射特征解释提供定量依据.例如,利用现代功率谱估计方法(如 AR 频谱法),将传统解释中视为"噪声"的散射波转化为揭示深部物质属性的有效信息,进而定量反演地壳内部岩性的空间变化规律,弥补了确定性构造解释的不足.除此之外,基于自回归模型的现代功率谱估计方法通过多道平均一维自相关函数代替二维自相关函数,可以有效提高自相关函数的计算精度,进而提升随机介质参数估算的准确性,增强深地震反射资料解释的可靠性(雍凡等, 2021a).

尽管大炮单次覆盖剖面提供了丰富的深部信息,但是由于区域构造背景复杂,仅依赖地球物理数据约束地质背景易导致解释多解性.现代解释工作强调建立"地质-地球物理"融合模型,融合区域地质资料,构建合理的深部地质模型,支撑大陆动力学研究的定量分析(刘家豪等, 2023).在地球物理数据综合解释过程中,一般通过物性参数约束介质成分与状态,利用孕震构造限定宏观构造格局,结合地质演化背景阐释动力学机制,从而系统提升构造解释的合理性与可靠性.

2.3 典型区域研究方法差异比较

在深地震反射大炮单次覆盖剖面数据处理中,不同区域的地表条件、深部构造背景和噪声干扰类型差异显著,必须采取针对性策略才能有效提取深部有效信号.青藏高原及其周缘造山带地形起伏剧烈、低速带变化复杂,静校正问题尤为突出(表 2).具体处理中,"青藏高原侧向碰撞带"采用中小炮静校正量插值外推与大炮高程校正相结合的策略,六盘山地区则通过层析静校正与剩余静校正多次迭代,有效克服地形高差引起的时差问题.噪声压制方面,高原地区普遍采用带通滤波与多域自适应面波衰减技术,针对性压制低频面波与工业噪声,显著提升了下地壳—莫霍面反射的连续性,为构建"岩石圈地幔汇聚—地壳侧向滑移"等深部构造模型奠定了可靠的成像基础.在古老缝合带与微陆块区,如中亚造山带东南段、西拉木伦缝合带及秦岭—大巴山结合部,深部界面多表现为弱反射、倾斜或叠置结构,信噪比普遍偏低.该类区域在静校正方面多采用折射静校正与层析静校正组合策略,适应沉积区与花岗岩区不同表层条件;信号增强则注重保幅性处理,如 f-x 域随机噪声衰减与 f-k 域线性干扰压制相结合,并辅以人机交互线条化或自动相干提取技术,增强微陆块基底与深部倾斜反射的连续性.通过上述处理,在索伦—西拉木伦带识别出古亚洲洋南向俯冲的北倾反射特征,在秦岭—大巴山结合部揭示出多期构造域叠加的深部响应.针对火山岩覆盖区及盆地构造区,如松辽盆地及邻区、雄安新区等,深部信号常因强吸收和能量衰减而显著减弱.该类地区普遍采用球面扩散补偿与反 Q 滤波联合的能量恢复策略.例如,松科二井邻域结合测井数据实现精准层位标定.速度建模与成像环节中,松辽中央区采用各向异性叠前时间偏移以精确刻画复杂构造,盆地西缘则通过常速度扫描与剩余静校正迭代改善火

山岩区速度多解性,有效支撑了深部热物质上涌通道、莫霍面横向变化及超深地幔反射等关键构造现象的识别. 在活动断裂与俯冲带地区,如日本四国MTL断裂带、新西兰北岛俯冲带及三河—平谷地震区,数据处理侧重高精度成像与浅层干扰剔除. 通过高程静校正、初至波层析反演与时间域倾角滤波,有效压制浅层折射波及面波,突出深大断裂的反射特征. 新西兰北岛结合 Q 补偿与球面扩散校正均衡深浅层能量,清晰揭示了土地幔低速通道及其与大地震破裂范围的关联.

表 2　不同地区深地震反射大炮单次覆盖剖面数据特殊处理比较

Table 2　Comparison of special processing methods for single-shoot profile data from deep seismic reflection cannons in different regions

区域分类	研究地区	地质背景与探测难点	特殊数据处理方法与效果	参考文献
青藏高原及其周缘	西喜马拉雅雅鲁藏布缝合带	缝合带构造复杂,地幔反射能量强衰减	应用谱比法 Q 补偿恢复地幔顶部的弱反射能量;利用 Kirchhoff 偏移成像精确刻画 MHT 深部几何结构.	(高锐等, 2022)
	青藏高原侧向碰撞带	地形高差巨大,地壳巨厚,深部信号极弱	采用静校正量插值外推与大炮高程校正结合,解决长波长静校正问题;应用多域自适应去噪增强深部弱信号.	(酆少英等, 2020)
	班公湖—怒江缝合带	构造混杂岩带,激发接收条件横向变化快	强化地表一致性振幅补偿与反褶积,消除激发条件差异;通过高阶速度分析优化成像精度.	(程建等, 2024)
	青藏高原东北缘六盘山地区	山前冲断带,地形剧烈起伏	实施层析静校正与剩余静校正的多次迭代,解决高陡地形下的时差问题;结合线条化处理增强莫霍面连续性.	(李洪强等, 2013)
	拉萨地体—羌塘地体结合部	高寒地表,莫霍面深度变化大	统一建立地表一致性与层析静校正基准面;采用叠前时间偏移技术提升厚地壳深部成像质量.	(卢占武等, 2016)
造山带与缝合带	秦岭造山带—大巴山结合部	复杂的低降速带,深部构造多期叠加	重点利用层析反演解决巨厚低降速带校正;结合多域去噪与反 Q 滤波提升深层能量.	(李洪强等, 2014)
	内蒙古西拉木伦缝合带	沉积覆盖与基岩出露交替,表层条件多变	采用折射与层析静校正分段组合策略;应用球面扩散与地表一致性补偿提升深层能量一致性.	(符伟等, 2021)
	中亚造山带	微陆块拼合区,基底反射信号微弱	联合应用 f-x 与 f-k 域去噪技术保留有效弱反射;通过高精度速度扫描与相干提取技术增强基底成像.	(谭晓淼等, 2021)
东部地区与盆地	三河—平谷地震区	隐伏活动断裂发育,城市干扰背景强	采用倾角滤波压制干扰,突出高陡断裂反射;利用边缘检测技术强化断裂带特征.	(刘保金等, 2011)
	松辽盆地中央区	火山岩覆盖,屏蔽深部信号,速度多解性强	结合球面扩散与一致性补偿均衡能量;引入各向异性叠前时间偏移,精确刻画火山岩下的复杂构造.	(符伟, 2019)
国外案例	新西兰北岛俯冲带	俯冲带海陆交互,地幔楔结构复杂	结合球面扩散与 Q 补偿均衡深浅能量;利用初至波层析反演提升速度模型精度,清晰揭示俯冲板片结构.	(Stern *et al.*, 2015)

3　地质应用与典型成果

深地震反射剖面(DSR)技术中的大炮单次覆盖剖面凭借低频强能量波穿透能力及对深部构造的直接成像优势,已成为解析地球深部结构、揭示断裂与俯冲带特征、约束成矿背景及支撑地质工程的关键手段. 其应用历程呈现从早期基础探测到现今精细化、多领域深化的趋势,基于多区域探测实践,在深部结构、断裂孕震、俯冲造山、成矿能源及地质工程等领域形成完整成果体系,为固体地球物理学研究与实际地质问题解决提供全方位地震学证据.

3.1 深部结构探测及地球动力学特征

大炮单次覆盖剖面可以清晰揭示地壳垂向分层、莫霍面精细形态及地幔反射特征,为地壳尺度结构划分与地球动力学机制解析提供关键证据.早期以基础结构探测与区域特征刻画为核心.Zhao 等(1993)在青藏高原探测中,首次明确特提斯喜马拉雅地区存在中地壳反射界面,填补该区域深部构造探测空白(Zhao *et al*., 1993).国内早期造山带地壳结构研究中,高锐团队开展了系列奠基性工作:针对燕山造山带,首次提出地壳挤压加厚可能形成残余"山根"构造的假说;在大别造山带前陆区,发现扬子陆块北缘莫霍面北倾错断,将其解释为中生代扬子陆块向北俯冲导致岩石圈叠置的响应;特别是在西秦岭造山带与松潘地块的接触关系研究中,大炮单次覆盖剖面发挥了关键的确证作用,该地区深地震反射剖面首次揭露出若尔盖盆地和西秦岭造山带下地壳均以北倾强反射为特征,这种独特的反射结构为松潘地块向西秦岭下地壳俯冲提供了关键的地震学证据;同时,剖面显示该区莫霍面近于平坦,这一特征有力地揭示了西秦岭造山带在经历早期挤压造山后,后期又经历了强烈的伸展与构造改造作用(张忠杰等, 2013).以上这些成果共同构建了我国东部造山带地壳结构的早期认知框架(高锐等, 2002, 2003, 2004, 2006).

随着技术分辨率提升与探测范围拓展,该领域的现今应用已进入精细化、动力学关联分析阶段,形成多区域、多构造背景的成果体系.横穿西拉木伦缝合带的内蒙古东部阿鲁科尔沁旗至奈曼旗深地震反射大炮单次覆盖剖面显示,西拉木伦缝合带可延伸至松辽盆地西南侧,中、下地壳向南倾斜的连续反射为古亚洲洋板块南向俯冲残留,实现了古缝合带空间展布的深部约束(符伟等, 2021)(图 7).

在华南地区,Deng 等(2025)利用一条长达 300 km 的 NW 向大炮单次覆盖剖面,精细刻画了该区域岩石圈结构,并对扬子克拉通的早期形成与演化提出了新的构造解释(图 8).传统观点认为扬子克拉通是统一的前寒武纪陆核,研究表明,在新元古代与华夏地块碰撞之前,扬子克拉通已经通过古元古代多期微陆块的俯冲-增生作用拼合而成.该项研究结果有力挑战了"单一陆核"的经典模型.该古俯冲带结构不仅记录了克拉通早期的聚合历史,还有力证明了中生代侏罗纪期间,古俯冲带受到古太平洋板块俯冲的远场效应影响.由于断裂带两侧岩石圈流变性质差异显著,太平洋板块俯冲控制着同期陆内变形样式的空间分异.西侧四川盆地岩石圈刚性较强,发育以沉积盖层滑脱为主的薄皮构造;东侧雪峰山带之下的古造山带岩石圈相对软弱,表现为基底卷入的厚皮构造.这种先存岩石圈结构对后期陆内变形的"构造继承性"控制,为理解克拉通内部长期构造演化与活动性提供了关键的深部证据(Deng *et al*., 2025).

3.2 深部断裂识别及孕震环境研究

大炮单次覆盖剖面可以直接刻画深大断裂深部延伸轨迹与滑脱层物性特征,是深部断裂识别与孕

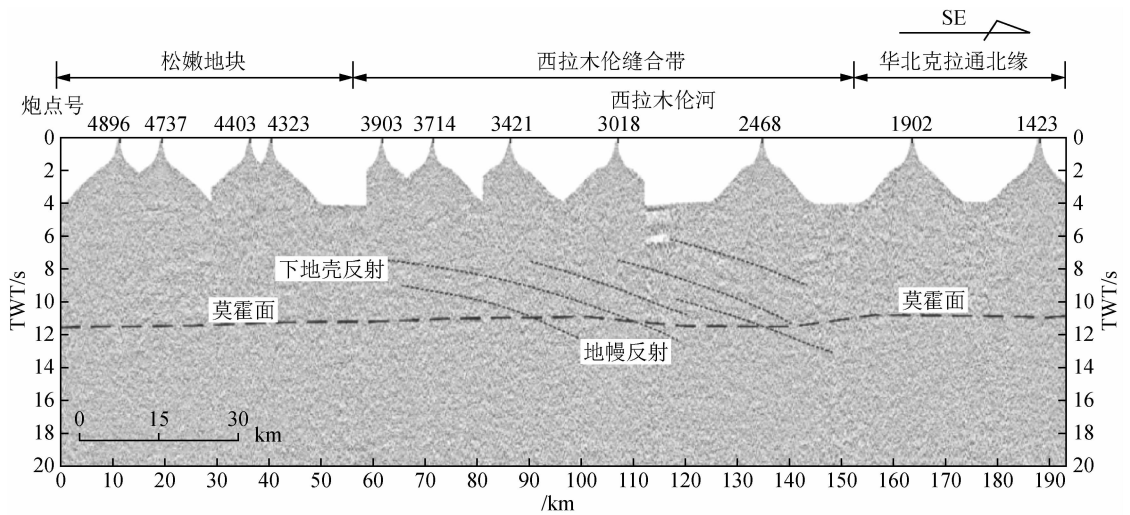


图 7 西拉木伦深地震反射大炮单次覆盖剖面及反射特征示意图(符伟等, 2021)

Fig. 7 Schematic diagram of a single seismic reflection profile and reflection characteristics from the Xilamuren Deep seismic reflection cannon survey (Fu *et al*., 2021)

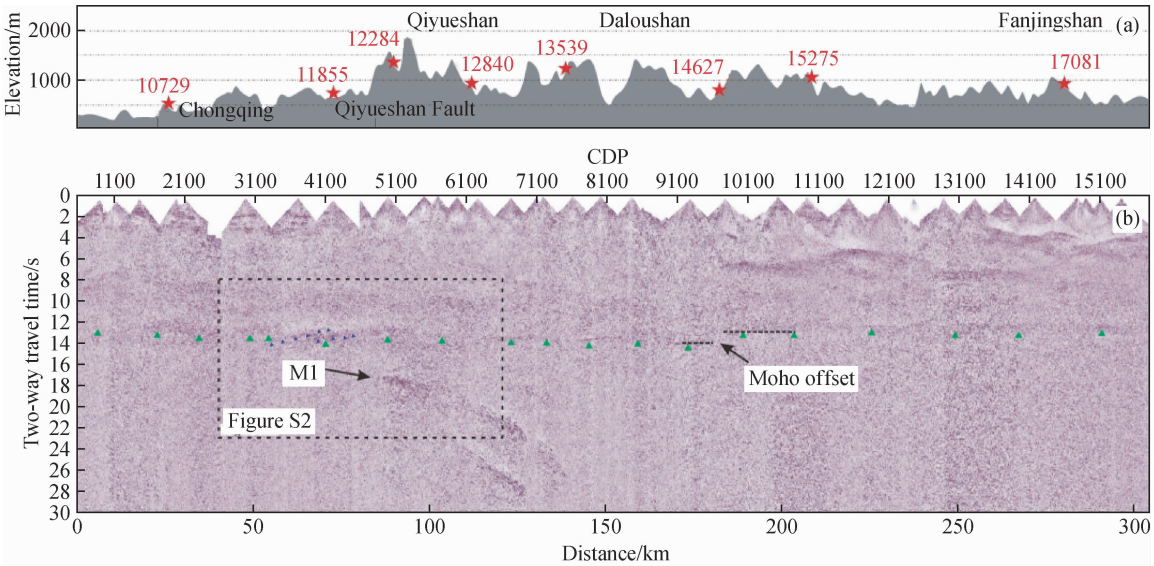


图 8　华南深地震反射大炮单次覆盖剖面解释(Deng *et al*., 2025)

Fig. 8　Interpretation of a deep seismic reflection gunshot profile in South China (Deng *et al*., 2025)

震环境解析的核心手段. 早期研究以断裂基本形态识别为目标,Feng 和 McEvilly (1983)开展了该技术在断层研究中的早期探索,通过深地震反射剖面首次确定美国圣安德列斯断层的复杂速度结构,展现断层深部几何刻画潜力(Seasmologlcal Society of America);在板块边界断裂系统研究中,Kawamura 等(1986)等利用大炮单次覆盖剖面首次构建日本四国东部 Median Tectonic Line(MTL)断裂系统的深部几何学框架(Kawamura *et al*., 2003). 在孕震环境研究中,该技术进一步揭示应力积累机制与地震触发条件. 例如,刘保金等(2011)等在三河—平谷 8.0 级地震区的单次大炮覆盖剖面首次识别出切穿莫霍面的超壳断裂为主发震构造,排除浅部断裂孕震可能,建立"深部断裂-壳幔响应-应力积累"早期分析框架(刘保金等, 2011). Stern 等(2015)利用大炮单次覆盖剖面,首次建立岩石圈-软流圈边界摩擦强度与区域超大地震破裂范围的关联,为板块俯冲动力学与地震活动耦合研究提供新视角(Stern *et al*., 2015)(图 9).

3.3　俯冲碰撞带构造及造山带演化

大炮单次覆盖剖面记录的深部构造遗迹,为造山带多期演化及动力学机制提供了直接约束. 在俯冲碰撞带构造研究中,Gao 等(2016)等在西喜马拉雅雅鲁藏布缝合带的大炮单次覆盖剖面中,首次发现主喜马拉雅逆冲断裂(MHT)以 20°倾角延伸至 60 km 深度. 研究发现,印度地壳穿越缝合带后,厚度从 40 km 减薄至 15 km,并提出通过地壳尺度双重构造(duplexing)实现物质转移的新机制,修正了"印度地壳全俯冲"的传统认知(Gao *et al*., 2016). 李洪强(2014)等采用大炮单次覆盖反射技术,对秦岭—大巴山结合部的地壳下部和上地幔结构进行精细成像研究,有效提取了下地壳和上地幔的反射信息,在大炮单次覆盖剖面南端识别出双程走时约 16 秒的强反射信号,该反射界面北端延伸至凤凰山下时,走时加深至 18.5 秒,反映了莫霍面在此区域的显著起伏,从而揭示了该地区复杂的壳幔构造特征与造山带演化过程. 在秦岭北段剖面应用中,研究揭示了莫霍面自南向北由弧状上凸逐渐转为平缓微隆的构造样式:南段秦岭造山带下方莫霍面最浅处达 13 秒,向北至渭河盆地逐渐加深,并在盆地边缘出现向下弯曲、插入鄂尔多斯地台之下的趋势,这显示了陆内俯冲与壳幔相互作用的深部证据. 在凤凰山附近,研究识别出一组位于 TWT16.2 秒以下的深部反射相,其连续性和振幅特征指示其可能来源于上地幔. 结合区域构造背景,初步解释为扬子地块向北俯冲的深部响应. 这一发现不仅提出了断裂对壳幔界面具有改造作用的新认识,也为理解华北与扬子地块碰撞过程中的深部断裂行为、壳幔物质交换及造山带演化机制提供了重要的地球物理约束(李洪强, 2014).

中亚造山带东段采集的深地震大炮单次覆盖剖面,系统揭示了古亚洲洋消亡及大陆增生的深部构

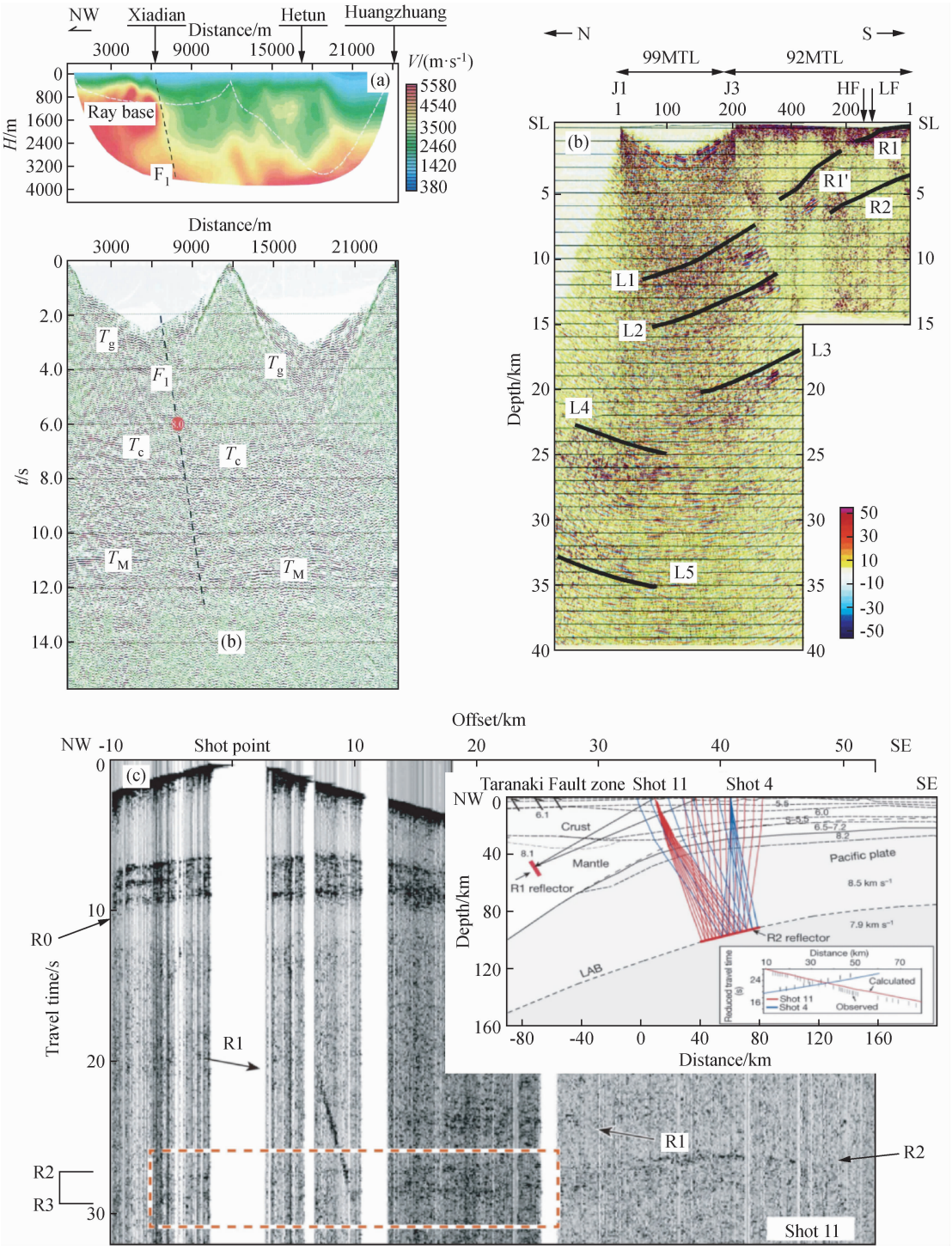


图 9 大炮单次剖面深部断裂识别及孕震环境研究应用(刘保金等, 2011; Kawamura *et al*., 2003; Stern *et al*., 2015)

(a)三河—平谷地区初至波成像速度结构和单次覆盖反射剖面;(b)ShiKouku 深地震反射剖面综合解释;(c)新西兰北岛下方俯冲太平洋板块的大炮单次覆盖剖面及解释.

Fig. 9 Application of cannon single-shot profiling for deep fracture identification and seismic source environment studies (Liu *et al*., 2011; Kawamura *et al*., 2003; Stern *et al*., 2015)

(a) First-arrival velocity structure and single-shot coverage reflection profile for the Sanhe-Pinggu area; (b) Integrated interpretation of the Shikouku deep seismic reflection profile; (c) Cannon single-shot profile and interpretation beneath the subducting Pacific Plate under New Zealand's North Island.

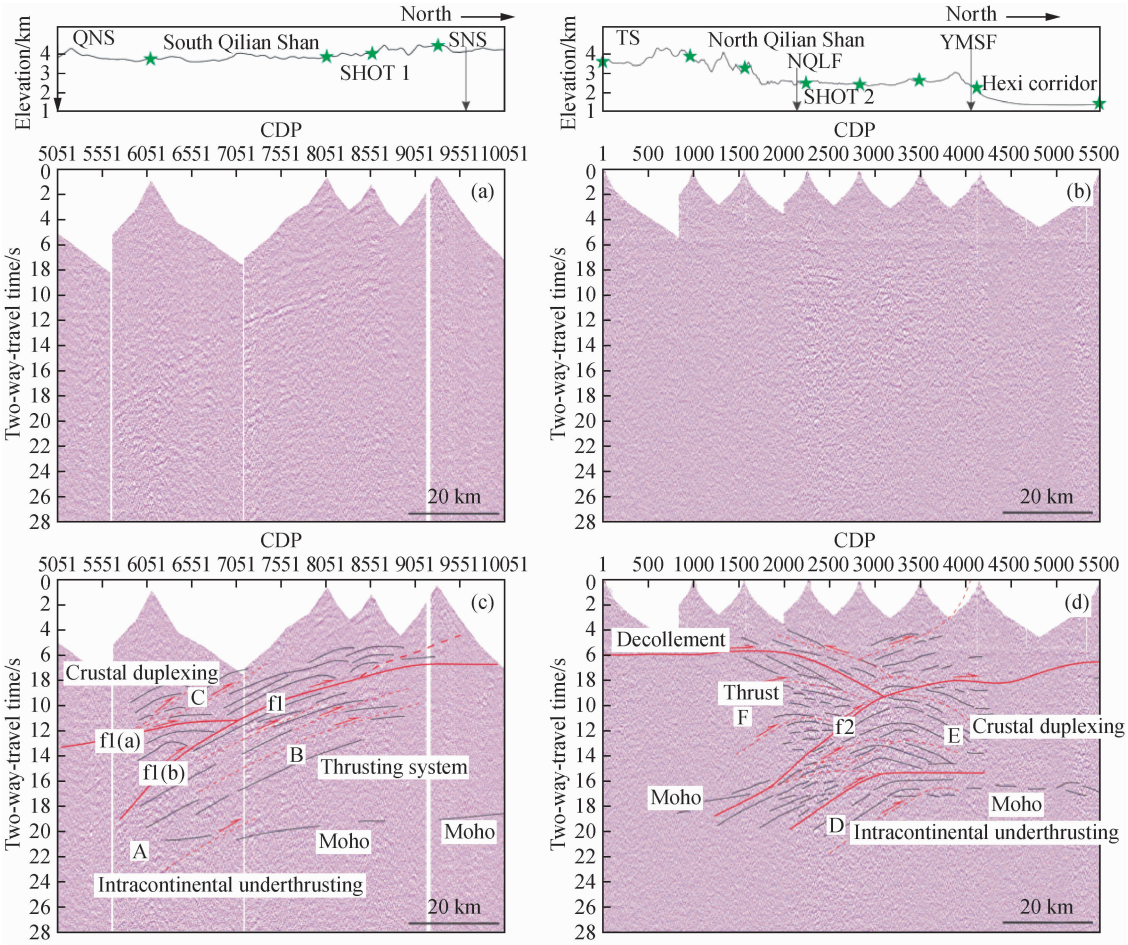


图 10　祁连山大炮单次覆盖剖面解释(Li, 2026)

Fig. 10　Interpretation of a single section of the Qilian Mountains (Li, 2026)

造样式. 谭晓淼等(2021)通过处理横跨西拉木伦与贺根山缝合带的大炮数据,发现下地壳发育双向倾斜的反射结构,揭示该地区古亚洲洋曾经发生南北双向俯冲,其中贺根山缝合带以北向俯冲为主,西拉木伦缝合带以南向俯冲为主,两者共同构成典型的"双向俯冲-增生"体系(谭晓淼等, 2021). 在此基础上,Tan 等(2024)进一步通过大兴安岭地区的深地震反射剖面,识别出兴安地体下方存在多组弧形反射与叠瓦状构造,提出该地体并非传统认为的微陆块,而是古亚洲洋双向俯冲过程中形成的增生杂岩带,并首次在深部识别出具有"倒 U 型"反射结构的化石双向俯冲带,为理解显生宙大陆侧向增生提供了直接的岩石圈尺度证据. 近期,谭晓淼等(2025)利用高精度深地震反射大炮单次覆盖剖面,结合地质地球化学数据,进一步强调古亚洲洋在索伦缝合带经历了低角度背向俯冲与多期单向俯冲的复合演化模式,并指出该过程不仅促进大量岩浆活动和增生杂岩就位,也为中亚造山带巨量陆壳的生长与改造奠定了深部动力学基础.

Li(2026)基于横跨祁连山造山带的两条总长约 400 km 的 NE 向深地震反射大炮单次覆盖剖面,系统揭示了该区域在印度—欧亚板块碰撞远场效应控制下的陆内造山深部结构与演化过程(图 10). 该研究通过高分辨率深地震成像,明确提出了以"陆内俯冲—地壳双重构造增厚"为核心的两阶段造山模型. 研究结果显示,祁连山地区莫霍面呈现明显的"南深北浅"空间变化特征,且莫霍面被多组南倾反射错断并延伸至上地幔,指示其受到强烈的构造改造. 一模型不仅合理解释了祁连山地区约 26% ~ 30% 的地壳缩短量及其空间分布,还为理解青藏高原东北缘在印度—欧亚碰撞远程效应下的隆升与扩展机制提供了关键的岩石圈结构约束.

3.4　成矿深部背景及与能源勘探应用

大炮单次覆盖剖面对深部岩浆通道、流体路径

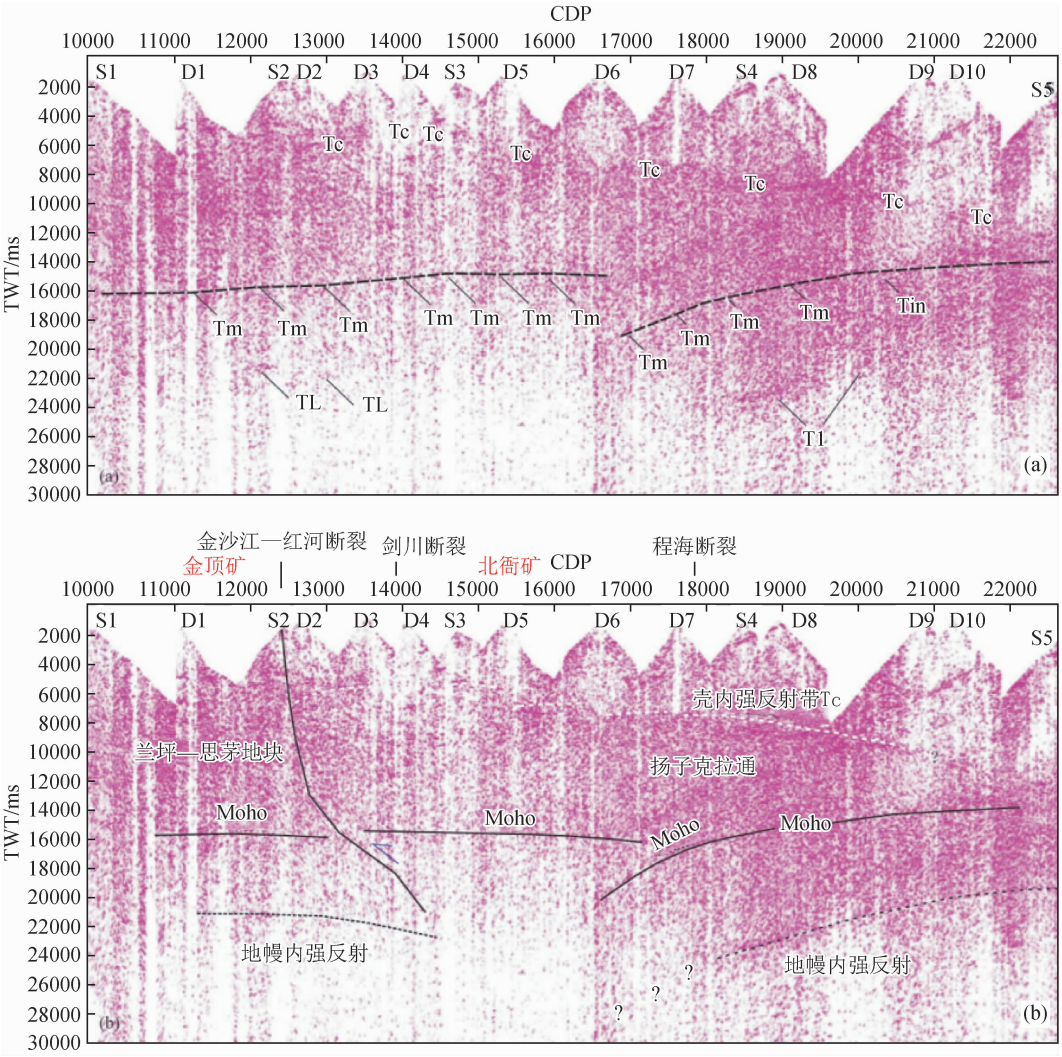


图 11 青藏高原侧向碰撞带单次叠加剖面及地壳骨架结构(鄢少英等, 2020)

(a)为单次叠加剖面;(b)为解释剖面.

Fig. 11 Single-pass stacked profile and crustal framework structure of the lateral collision belt on the Qinghai-Xizang Plateau (Feng *et al.*, 2020)

(a) Single-pass stacked profile; (b) Interpreted profile.

的精细刻画,为大型矿集区的成矿物质来源与运移机制提供地震学约束. 早期深地震反射探测以研究矿产与能源勘探的基础构造为主,Weng 等(1990)在扬子地区古生界油气勘探中,首次获取横穿多新生代盆地的深部地壳剖面,识别沉积盆地基底形态与深部断裂分布,为油气运移通道与存储区域预测提供构造依据((Weng S *et al.*, 1990);Korsch 等(2006)在南澳大利亚的深地震反射大炮单次覆盖剖面中,首次发现中下地壳独特平缓带,提出其可为深部金属矿产成矿潜力区识别提供地震学标志,拓展技术应用思路.

在青藏高原多金属成矿带研究中,鄢少英等(2020)基于青藏高原侧向碰撞带 15 个大药量炮单次剖面,构建"Tc-Tm-TL"地壳骨架结构,Tc 为滑脱拆离面、Tm 为莫霍面、TL 为地幔反射,定性描绘岩石圈地幔汇聚与地壳块体侧向滑移的分层动力学模式,并首次构建"深大断裂-地幔热流-浅部成矿"关联模型,明确 Zn 矿与 Au 矿成矿的流体通道及物质能量来源,为三江成矿带深部找矿提供关键理论支撑(鄢少英等, 2020)(图 11).

3.5 地质工程与深部地下空间的利用

深地震反射剖面技术通过高分辨率成像深部构造与岩体物性,为地质工程规划与深部地下空间安全利用提供可靠支撑. 在深部矿山隧道工程中,该技

术可识别隧道沿线微小断裂与岩体裂隙发育区,结合岩石物理参数反演,定量预测涌水与坍塌风险,尤其适用于高原等地形垂直变化较大区域的隧道施工安全保障;在高原铁路隧道规划中,通过解析地壳分层与断裂展布特征,可优化隧道埋深与走向,规避深部构造活动风险,提升铁路隧道工程的长期稳定性.

在核废料深埋处理领域,该技术展现出关键应用价值:Brojerdi 等(2013)针对瑞典 Forsmark 核废料存储区,首次利用深反射数据探测基底基岩的变形可能性与程度,结合断裂活动性评估结果,为核废料存储场所的安全性选址提供深部构造依据(Brojerdi *et al*., 2013);基于现今高分辨率剖面数据,还可精细化评估存储区基底基岩长期稳定性与断裂活动性,为核废料存储的长期安全提供更可靠的深部构造保障,进一步拓展技术在深部地下空间安全利用中的应用边界.

4　研究挑战与争议

深地震反射单次大炮覆盖技术的优点众多,最核心的优点是分辨率高,垂向显示可达 10 m 级别;其次能直接反映构造横截面形态,还适用于解析地壳、地幔中较复杂构造的几何特征. 该技术是揭示岩石圈精细结构的核心手段,已在青藏高原、克拉通破坏带等复杂构造区研究中取得显著成果(董树文等, 2012). 然而,深地震反射大炮单次覆盖剖面技术也存在明显局限性:一是成本较高,需实地布置密集的震源与接收机器阵列;二是依赖低频震源,其他地震反射信号在岩石圈深部衰减严重;三是深地震反射数据处理复杂,面临较多杂波干扰与速度建模误差. 因此其实际应用仍面临诸多技术瓶颈与方法学争议;四是由于迄今为止人类尚无法对大陆中下地壳进行直接钻探采样,深地震反射解释无法像油气勘探那样利用测井资料标定反射标准层,形成一套统一、完整的解释理论体系.

大炮单次剖面的技术瓶颈主要体现在三个方面. 第一是能量穿透问题. 在青藏高原等巨厚地壳区,地震波能量衰减显著,即便采用 1000 ~ 2000 kg 级大药量震源,莫霍面反射能量损失仍可达 60% ~ 80%(王光文等, 2023). 低频信号的激发与接收存在本质矛盾:炸药震源虽能产生 12 ~ 15 Hz 低频能量(李洪强, 2014),但在三江源等生态敏感区的应用受到限制;可控震源虽具有显著环保优势,其穿透深度却通常局限于 50 km(徐泰然等, 2018). 其次是干扰压制困难. 高原地区的强风噪与城市工业电噪形成复合干扰场,*F-K* 滤波虽能压制线性噪声,却易损伤倾斜界面的有效信号(刘保金等, 2011);Curvelet 变换对随机噪声的压制效率仅为 25% ~ 30%(岳航羽等, 2023a). 此外,山前带地形高差会导致静校正残余误差达 ± 50 ms(岳航羽等, 2023b). 最后为深部成像精度不足. 依据 $\lambda/4$ 准则,100 km 深度处壳幔过渡带的垂向分辨率仅为 3 ~ 5 km(张路等, 2025),速度模型的不确定性可使莫霍面深度解译误差达 ±5 km.

大炮一次覆盖技术在震源选择和覆盖次数方面,也存在争议. 在震源选择方面,通常 3000 kg 炸药震源的穿透深度 > 80 km(高锐等,2022;王海燕等,2017),但审批通过率 < 30%(卢占武等,2014;高锐等, 2022);可控震源的穿透能力 ≤ 50 km(Alekseev *et al*., 2019;王海波等, 2019),且无污染. 在生态敏感区已发展出混合采集模式. 在覆盖次数方面,单次覆盖保真度高,而 COCORP 数据显示多次覆盖可使信噪比提升 3 ~ 5 倍. 实践中多采用"大炮骨架 + 中炮加密"的观测系统(董树文等, 2012),以获得更丰富的深部反射信息.

5　结论与未来展望

5.1　结　论

深地震反射单次大炮覆盖技术,目前已经成为探查岩石圈精细结构的核心手段,并且在多个研究领域取得突破性进展. 在技术方法层面,大药量激发与长排列接收的耦合应用显著提升了深部信号的信噪比,使莫霍面反射强度增强 3 倍以上;例如,单次覆盖技术将邢台地震区发震构造等陡倾断裂的解译误差大幅降低. 在构造解析领域,该技术在青藏高原及克拉通破坏带获取了从浅部脆性变形到深部韧性流动的全地壳耦合图像,揭示了"Tc-Tm-TL"分层变形等关键地质现象. 在应用拓展方面,该技术为造山带演化、成矿系统透视及孕震机制解析等研究提供了关键证据支撑.

5.2　展　望

(1)技术创新层面:采集技术需研发低频可控震源与震源-OBS 联合探测体系,构建"大炮骨架 + 中炮加密 + 三维补充"的立体观测网络;处理方法应重点研发基于 U-Net 的 AI 噪声压制、多尺度 FWI 速度建模等智能算法;装备研发需突破超深穿透技术,实现岩石圈-软流圈边界的高分辨成像.

(2)智能化发展方面:未来需要构建覆盖从采集设计到地质解释的全流程数字化平台,推动地震

数据处理与解释工作的系统化升级.具体包括:研发基于深度学习的同相轴自动追踪系统,提升构造识别精度与效率;搭建云端协同处理与解释系统,强化数据共享能力,加速成果转化;对历史资料进行联线拼接,并采用现代处理流程重新处理,挖掘新的构造演化信息;利用深度学习技术优化噪声识别与分离,结合人工智能实现速度建模的自动化,推动地震采集与处理向智能化、高效化方向发展.

(3)联合探测方面,近年来,随着地震密集台阵技术的出现,两种地震方法可以结合完成,即在深地震反射大炮单次覆盖剖面测线上摆放短周期地震仪器,接收反射地震震源激发的地震波.处理时两种方法相互约束,可以同时得到地壳深部的几何结构与速度结构.因而,人工(主动源)地震探测以深地震反射剖面为先锋,带动人工地震的技术进步,服务于精细观测.

随着上述关键技术的突破,深地震反射大炮单次覆盖剖面将为大陆动力学研究提供观测约束,尤其在青藏高原扩张机制、克拉通破坏过程等重大科学问题研究中发挥不可替代的作用.

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

Alekseev A S, Chichinin I S, Korneev V A, *et al*. 2019. Powerful low-frequency vibrators for active seismology. Translated World Seismology (in Chinese), 50(1): 64-77, doi: 10.16738/j.cnki.issn.1003-3238.201901004.

Brojerdi F S, Juhlin C, Malehmir A, *et al*. 2013. Reflection seismic imaging of the deeper structures at the Forsmark spent nuclear fuel repository site, central Sweden. Journal of Applied Geophysics, 89: 21-34, doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.11.008.

Brown L D. 2013. From layer cake to complexity: 50 years of geophysical investigations of the Earth. //Bickford M E ed. The Web of Geological Sciences: Advances, Impacts, and Interactions. Geological Society of America, 233-257, doi: 10.1130/2013.2500(07).

Chen M C, Liu Z D, Lü Q T, *et al*. 2015. Key techniques and method for deep seismic data acquisition in hard-rock environment. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58(12): 4544-4558, doi: 10.6038/cjg20151217.

Cheng J, Liu Z W, Zhao W J, *et al*. 2024. Moho terraces and its tectonic significance of central Bangong-Nujiang suture zone uncovered by deep-reflection seismic imaging. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 98(1): 1-15, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023137.

Deng X F. 2021. Research and application of deep seismic reflection data imaging technology [Master's thesis] (in Chinese). Qingdao: China University of Petroleum (East China), doi: 10.27644/d.cnki.gsydu.2021.000277.

Deng X F, Wang Q, Lu S P, *et al*. 2025. Fossil subduction zone beneath the eastern Yangtze Craton: Evidence from seismic reflections in the upper mantle. Geophysical Research Letters, 52(9): e2025GL114975, doi: 10.1029/2025GL114975.

Dong S W, Li T D, Chen X H, *et al*. 2012. Progress of deep exploration Chinese: a review. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(12): 3884-3901, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.002.

Dong S W, Li T D, Lü Q T, *et al*. 2013. Progress in deep lithospheric exploration of the continental China: A review of the SinoProbe. Tectonophysics, 606: 1-13, doi: 10.1016/j.tecto.2013.05.038.

Feng R, McEvilly T V. 1983. Interpretation of seismic reflection profiling data for the structure of the San Andreas fault zone. Bulletin of the Seismological Society of America, 73(6A): 1701-1720.

Feng S Y, Li Q S, Deng X J, *et al*. 2020. Crustal skeleton structure of the lateral collision zone of the Qinghai-Xizang Plateau revealed by large-shot set of deep-reflecting profiling. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 63(3): 828-839, doi: 10.6038/cjg2020N0271.

Fu W. 2019. Deep structure, dynamic background and hydrocarbon prospect of northern Songliao Basin: revealed by deep seismic reflection profile [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.

Fu W, Hou H S, Gao R, *et al*. 2019. Fine structure of the lithosphere beneath the Well SK-2 and its adjacent: Revealed by deep seismic reflection profile. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(4): 1349-1361, doi: 10.6038/cjg2019M0370.

Fu W, Hou H S, Gao R, *et al*. 2020. Tectonic nature and subduction style of the central Solonker-Xilamulun-Changchun-Yanji suture zone: revealed by deep seismic reflection profile. //Proceedings of the 2020 China Geoscience Union Annual Meeting (IV) (in Chinese). Chongqing: Chinese Geophysical Society, Seismological Society of China, 13-14, doi: 10.26914/c.cnkihy.2020.059537.

Fu W, Deng X F, Hou H S, *et al*. 2021. Detection for the fine structure of the crust in Xar Moron suture zone using deep seismic reflection profiles:data processing. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(6): 2291-2302, doi: 10.6038/pg2021EE0518.

Gao L, Li H Q. 2019. The study of statics correction of deep seismic reflection in the southwest of Xing'an Mongolian orogenic belt. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 41(4): 510-514.

Gao R, Li Q S, Zhao Y, *et al*. 2002. Deep seismic reflection profiles in the Yanshan orogenic belt. Geological Bulletin of China (in Chinese), 21(12): 905-906.

Gao R, Li Q S, Zhao Y, *et al*. 2003. Detecting fine crustal structure of the Yanshan orogenic belt using deep seismic reflection profiling. //Chinese Geophysics · 2003——Proceedings of the 19th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society (in Chinese). Nanjing, China: Chinese Geophysical Society, 601.

Gao R, Dong S W, He R Z, *et al*. 2004. Subduction process of the Yangtze continental blockfrom Moho reflection image, South China. Earth Science Frontiers (in Chinese), 11(3): 43-49.

Gao R, Wang H Y, Ma Y S, *et al*. 2006. Tectonic relationships between the zoigê basin of the Song-Pan block and the West Qinling orogen at lithosphere scale: results of deep seismic reflection profiling. Acta Geoscientica Sinica (in Chinese), 27(5): 411-418.

Gao R, Lu Z W, Klemperer S L, *et al*. 2016. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya. Nature Geoscience, 9(7): 555-560, doi: 10.1038/ngeo2730.

Gao R, Zhou H, Lu Z W, *et al*. 2022. Deep seismic reflection profile reveals the deep process of continent-continent collision on the Qinghai-Xizang Plateau. Earth Science Frontiers (in Chinese), 29(2): 14-27, doi: 10.13745/j.esf.sf.2021.7.13.

Haines S S, Klemperer S L, Brown L, *et al*. 2003. INDEPTH III seismic data: From surface observations to deep crustal processes in Qinghai-Xizang. Tectonics, 22(1): 1001, doi: 10.1029/2001tc001305.

Hao S P, Zhang G Z, Xiong W L. 2017. Experimental study on parameters of deep seismic reflection acquisition in eastern area of Zhejiang Province. Coal Mine Machinery (in Chinese), 38(6): 45-47, doi: 10.13436/j.mkjx.201706019.

Hu F, Wo Y K, Liang S J, *et al*. 2022. An intelligent method of

instantly outputting singleshot records with geological horizons in seismic data acquisition fields. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 57(3): 532-539, 490, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2022.03.004.

Hu J H, Xie M G, Wei T C, *et al*. 2009. The application of deep seismic reflection methods to the detection of deep geological structures beneath karst areas. Geology in China (in Chinese), 36(3): 742-745.

Kawamura T, Onishi M, Kurashimo E, *et al*. 2003. Deep seismic reflection experiment using a dense receiver and sparse shot technique for imaging the deep structure of the median tectonic line (MTL) in east Shikoku, Japan. Earth, Planets and Space, 55(9): 549-557, doi: 10.1186/BF03351787.

Klemperer S L, Hauge T A, Hauser E C, *et al*. 1986. The Moho in the northern Basin and Range province, Nevada, along the COCORP 40°N seismic-reflection transect. GSA Bulletin, 97(5): 603-618, doi: 10.1130/0016-7606(1986)97<603:TMITNB>2.0.CO;2.

Korsch R J, Goleby B R, Burtt A C, *et al*. 2006. Deep seismic reflection data from the Curnamona Province, South Australia: crustal architecture and tectonic implications. //18th Geophysical Conference on ASEG Extended Abstracts. Australian Society of Exploration Geophysicists, 2006, 1-2, doi: 10.1071/aseg2006ab088.

Li H Q, Gao R, Wang H Y, *et al*. 2013. Extracting the Moho structure of Liupanshan by the method of near vertical incidence. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(11): 3811-3818, doi: 10.6038/cjg20131122.

Li H Q. 2014. The key technology research in deep seismic reflection profiling data processing and its application in Qinling orogen [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.

Li H Q. 2014. The key technology research in deep seismic reflection profiling data processing and its application in Qinling orogen [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.

Li H Q, Gao R, Wang H Y, *et al*. 2014. Imaging the lower crust and upper mantle beneath between Qinling and Dabashan by big shots from deep seismic reflection in China. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(1): 102-109, doi: 10.6038/pg20140113.

Li H Q. 2026. Intracontinental underthrusting and lower crustal duplexing drive the uplift of the Qilian Shan.

Li J L, Li Z C, Guan L P, *et al*. 2015. The method of seismic attenuation and energy compensation. Geophysical & Geochemical Exploration (in Chinese), 39(3): 456-465.

Li S Q, Liu Z D, Yan J Y, *et al*. 2020. Review on the key techniques for high resolution deep reflection seismic acquisition and processing. Progress in Geophysics (in Chinese), 35(4): 1400-1409, doi: 10.6038/pg2020DD0098.

Li W H, Gao R, Wang H Y. 2009. Skeletonization technique and its application in deep seismic reflection profile. //The Chinese Geophysics 2009 (in Chinese). Hefei: Chinese Geophysical Society, 384.

Liu B J, Hu P, Meng Y Q, *et al*. 2009. Research on fine crustal structure using deep seismic reflection profile in Beijing region. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52(9): 2264-2272, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.010.

Liu B J, Zhang X K, Chen Y, *et al*. 2011. Research on crustal structure and active fault in the Sanhe-Pinggu Earthquake (M8.0) Zone based on single-fold deep seismic reflection and shallow seismic reflection profiling. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 54(5): 1251-1259, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.014.

Liu B J, Feng S Y, Ji J F, *et al*. 2017. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan Basin: Results of deep seismic reflection profiling. Science China Earth Sciences, 60(3): 589-601.

Liu J H, Yan J Y, Wang X, *et al*. 2023. Current status and prospect of data acquisition and interpretation of deep reflection seismic data. Science Technology and Engineering (in Chinese), 23(3): 885-904.

Liu Z L, Lu Z W, Jia J L, *et al*. 2019. Using deep seismic reflection to profile deep structure of ore concentrated area: current status and case histories. Earth Science (in Chinese), 44(6): 2084-2105.

Lu Z W, Gao R, Kuang C Y, *et al*. 2010. Research on deep seismic reflection profile in Luzong ore concentration area: an economical and changeable gathering test. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 26(9): 2553-2560.

Lu Z W, Gao R, Wang H Y, *et al*. 2014. Bright spots in deep seismic reflection profiles. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(6): 2518-2525, doi: 10.6038/pg20140606.

Lu Z W, Gao R, Li H Q, *et al*. 2016. Crustal thickness variation from northern Lhasa terrane to southern Qiangtang terrane revealed by deep seismic reflection data. Geology in China (in Chinese), 43(5): 1679-1687.

Naghizadeh M, Snyder D, Cheraghi S, *et al*. 2019. Acquisition and processing of wider bandwidth seismic data in crystalline crust: progress with the metal earth project. Minerals, 9(3): 145, doi: 10.3390/min9030145.

Pan Z D, Hou H S, Zhou J B, *et al*. 2021. Crustal structure and Paleozoic metallogenic tectonic setting of the Duobaoshan ore district, NE China. Ore Geology Reviews, 137: 104290, doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104290.

Pan Z D. 2022. Crustal structure and deep metallogenic background of the duobaoshan ore district, NE China [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2022.001867.

Peng R Y, Zhang M, Liu W F, *et al*. 2019. Key technologies of deep seismic reflection profile data denoising. Chenmical Intermediate (in Chinese), (3): 38-39.

Pinet B, Montadert L, the ECORS Scientific Party. 1987. Deep seismic reflection and refraction profiling along the Aquitaine shelf (Bay of Biscay). Geophysical Journal International, 89(1): 305-312, doi: 10.1111/j.1365-246x.1987.tb04423.x.

Potter C J, Allmendinger R W, Hauser E C, *et al*. 1987. COCORP deep seismic reflection traverses of the U.S. cordillera. Geophysical Journal International, 89(1): 99-104, doi: 10.1111/j.1365-246x.1987.tb04394.x.

Qin J J, Feng S Y, Ji J F, *et al*. 2020. Stack imaging of non-longitudinal bending line of land reflection seismic data generated by airgun source. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 42(5): 592-603.

Qu Z D, Wu W, He R Z, *et al*. 2015. Soft threshold filter based on S transform and its application to data processing of deep seismic reflection. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58(9): 3157-3168, doi: 10.6038/cjg20150912.

Ren Y Z, Lu Z W, Zhang X Y, *et al*. 2022. Crustal structure of the Emeishan large igneous province inner zone revealed by deep seismic reflection profile. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(2): 484-494, doi: 10.6038/cjg2022P0196.

Shi J, Wu Z Q, Liu J P, *et al*. 2011. Normal moveout stretch correction and its processing method. Marine Geology & Quaternary Geology (in Chinese), 31(4): 187-194.

Shi Y L, Zheng Y K, Tang W B, *et al*. 1995. Analysis and processing of noise waves in INDEPTH-II deep reflection records. //Proceedings of the 11th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society 1995 (in Chinese). Jianghan: Chinese Geophysical Society, 24.

Shi Z X, Gao R, Lu Z W, *et al*. 2022. Bidirectional subduction of the Bangong-Nujiang ocean revealed by deep-crustal seismic reflection profile. Tectonophysics, 837: 229455, doi: 10.1016/j.tecto.2022.229455.

Si X, Teng J W, Ma X Y, *et al*. 2014. Detection of crust and mantle structures and distinguish of the anomaly body with artificial source deep seismic profiling. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(2): 560-572, doi: 10.6038/pg20140212.

Stern T A, Henrys S A, Okaya D, *et al*. 2015. A seismic reflection image for the base of a tectonic plate. Nature, 518(7537): 85-88, doi: 10.1038/nature14146.

Tan X M, Gao R, Wang H Y, *et al*. 2021. Lower crust and Moho structure of the eastern segment of the centeral asian orogenic belt revealed by large dynamite shots of deep seismic reflection profile:

data processing and preliminary interpretation. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 51(3): 898-908, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200040.

Tan X M, Zhou J B, Li H L, *et al*. 2024. Seismic reflection profiling reveals new accretionary structure in the Solonker Zone of the Central Asian Orogenic Belt. Geophysical Research Letters, 51(16): e2024GL109982, doi: 10.1029/2024GL109982.

Tan X M, Rao Y, Zhou J B, *et al*. 2025. Lithospheric-scale accretionary structures beneath southeastern central Asian Orogenic Belt: revealed by large dynamite shots of deep seismic reflection profile. Earth Science Frontiers (in Chinese), doi: 10.13745/j.esf.sf.2025.8.60.

Tao G T. 2006. A method for shot location correction in seismic geometry [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

Wang G, Xiong X S, Gao R, *et al*. 2019. Experiment and analysis of the best acquisition parameters for deep seismic reflection profiles in Huahai Basin. Geology in China (in Chinese), 46(5): 1146-1160.

Wang G W, Lu Z W, Li W H, *et al*. 2023. Development status of deep seismic reflection profile detection technology. Reviews of Geophysics and Planetary Physics (in Chinese), 54(2): 120-139, doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-055.

Wang H B, Zhang W, Zhang H, *et al*. 2019. Deep seismic reflection acquisition with high-precision vibroseis. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(5): 1910-1916, doi: 10.6038/pg2019DD0314.

Wang H Y, Gao R, Li Q S, *et al*. 2010a. Several factors influencing the quality of deep reflection seismic data in the Songpan area. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(2): 410-418, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.006.

Wang H Y, Gao R, Lu Z W, *et al*. 2010b. Fine structure of the continental lithosphere circle revealed by deep seismic reflection profile. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 84(6): 818-839, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2010.06.008.

Wang H Y, Gao R, Lu Z W, *et al*. 2017. Deep crustal structure in Sichuan basin: deep seismic reflection profiling. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(8): 2913-2923, doi: 10.6038/cjg20170801.

Weng S J, Chen H S, Zhou X Q, *et al*. 1990. Deep seismic probing of continental crust in the lower Yangtze region, eastern China. Tectonophysics, 173(1-4): 297-305, doi: 10.1016/0040-1951(90)90225-W.

Wu W, Qu Z D, He R Z, *et al*. 2016. Wave field reconstruction and denoise based on Curvelet transform in seismic reflection data. Progress in Geophysics (in Chinese), 31(4): 1506-1512, doi: 10.6038/pg20160413.

Wu Z Q, Hao T Y, Tang S H, *et al*. 2016. Tridimensional air-gun array with delay fired source signal characteristics and the application in OBS exploration in shallow seas. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(7): 2573-2586, doi: 10.6038/cjg20160722.

Xu T R, Lu Z W, Wang H Y, *et al*. 2017. Main technology of deep seismic reflection data processing. Progress in Geophysics (in Chinese), 32(2): 762-774, doi: 10.6038/pg20170242.

Xu T R. 2018. Deep structure of Qinghai-Xizang Niangre ore concentration area revealed by deep seismic reflection profile [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.

Xu T R, Lu Z W, Wang H Y, *et al*. 2018. Upper crustal structure of Qinghai-Xizang Niangre ore concentration area revealed by deep seismic reflection profile. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 48(2): 556-565, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20170261.

Yan C M, Zhou X P, Liu X D, *et al*. 2025. Deep structural characteristics and ore-controlling model of the Jiaojia fault zone based on 3D seismic detection. Geological Bulletin of China (in Chinese), 44(9): 1673-1680.

Yan Y X, Li P, Zhi M, *et al*. 2023. Optimization of data acquisition parameters for deep seismic reflection surveys in complex terrain. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 51(12): 83-92.

Yang L. 2017. Optimizational data processing of deep reflection seismic data and the tectonic significance of deep reflection "bright spots" inQiangtang terrane [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.

Yang W C. 1991. Deep seismic reflection for lithosphere investigation. Progress in Geophysics (in Chinese), 6(3): 61-68.

Yong F. 2021. Study on statistical analysis method of deep reflection seismic data based on random medium model [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.001840.

Yong F, Liu Z L, Luo S Y, *et al*. 2021a. Application of modern power spectrum estimation in random medium parameter estimation of seismic reflection data. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(4): 1640-1650, doi: 10.6038/pg2021FF0037.

Yong F, Liu Z L, Ou Y, *et al*. 2021b. Application of statistical analysis based on random medium model in deep seismic reflection. Progress in Geophysics (in Chinese), 36(3): 993-1007, doi: 10.6038/pg2021EE0418.

Yorath C J, Green A G, Clowes R M, *et al*. 1985. Lithoprobe, southern Vancouver Island: Seismic reflection sees through Wrangellia to the Juan de Fuca plate. Geology, 13(11): 759-762, doi: 10.1130/0091-7613(1985)13<759:LSVISR>2.0.CO;2.

Yue H Y, Wang K, Wang X J, *et al*. 2023a. Revealing fine-scale crustal structure and tectonic features in the Xiong'an New Area and its periphery using deep seismic reflection profiling. Coal Geology & Exploration, 51(12): 106-115 (in Chinese).

Yue H Y, Wang X J, Wang L, *et al*. 2023b. Deep seismic reflection profiling technology in land areas: a review and prospects. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 51(6): 121-148.

Zhang L, Deng X F, Cai C, *et al*. 2025. Mesozoic Paleo-Pacific plate subduction remnants in the northern margin of the South China Sea revealed by deep seismic reflection profile. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(2): 623-635, doi: 10.6038/cjg2024R0776.

Zhang M, Xue S G. 2013. Stacking velocity analysis of structure imaging with relief surface based on seismic physical model. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(3): 1417-1424, doi: 10.6038/pg20130335.

Zhang Z J, Gao R, Bai Z M, Wang H Y. 2013. Seismic methods for fine crustal structure studies. //Ding Z L ed. Research Methods in Solid Earth Sciences (in Chinese). Beijing: Science Press, 352-368.

Zhao H, Yin C, Li R, *et al*. 2010. Shot point design based on the illumination energy of target interval. Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 49(5): 478-481, 18.

Zhao R, Chen S, Wang H H, *et al*. 2026. Frontiers and potential directions of international deep Earth exploration. Bulletin of Geological Science and Technology (in Chinese), 45(2): 306-319, doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240456.

Zhao W J, Nelson K D. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Qinghai-Xizang.

Zhao W J, Wu Z H, Shi D N, *et al*. 2008. Comprehensive deep profiling of Qinghai-Xizang Plateau in the INDEPTH project. Acta Geoscientica Sinica (in Chinese), (3): 328-342.

Zhu X S, Gao R, Li Q S, *et al*. 2013. Review of the noises attenuation of deep reflection seismic data. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(6): 2878-2900, doi: 10.6038/pg20130609.

Zhu X S, Gao R, Guan Y, *et al*. 2014. Migration of the deep reflection seismic data. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(1): 84-94, doi: 10.6038/pg20140111.

附中文参考文献

Alekseev A S, Chichinin I S, Korneev V A, 等. 2019. 大功率低频可控震源在主动源地震学中的应用. 世界地震译丛, 50(1): 64-77, doi: 10.16738/j.cnki.issn.1003-3238.201901004.

陈明春, 刘振东, 吕庆田, 等. 2015. 结晶岩地区深地震数据采集关

键技术与方法. 地球物理学报, 58(12): 4544-4558, doi: 10.6038/cjg20151217.

程建, 刘志伟, 赵文津, 等. 2024. 深反射地震成像揭示的班公湖-怒江缝合带中段 Moho 断阶及其大地构造意义. 地质学报, 98(1): 1-15, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023137.

邓小凡. 2021. 深地震反射资料成像技术研究及应用[硕士论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), doi: 10.27644/d.cnki.gsydu.2021.000277.

董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述. 地球物理学报, 55(12): 3884-3901, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.002.

酆少英, 李秋生, 邓小娟, 等. 2020. 深反射大炮揭示的青藏高原侧向碰撞带地壳骨架结构. 地球物理学报, 63(3): 828-839, doi: 10.6038/cjg2020N0271.

符伟. 2019. 深反射剖面揭示的松辽盆地北部深部结构、动力学背景与油气远景[博士论文]. 长春: 吉林大学.

符伟, 侯贺晟, 高锐, 等. 2019. "松科二井"邻域岩石圈精细结构特征及动力学环境——深地震反射剖面的揭示. 地球物理学报, 62(4): 1349-1361, doi: 10.6038/cjg2019M0370.

符伟, 侯贺晟, 高锐, 等. 2020. 索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带中段的构造属性和俯冲样式: 深地震反射剖面的揭示. //2020 年中国地球科学联合学术年会论文集(四). 重庆: 中国地球物理学会, 中国地震学会, 全国岩石学与地球动力学研讨会组委会, 中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会, 中国地质学会区域地质与成矿专业委员会. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 13-14, doi: 10.26914/c.cnkihy.2020.059537.

符伟, 邓小凡, 侯贺晟, 等. 2021. 深地震反射剖面探测西拉木伦缝合带地壳精细结构——数据处理. 地球物理学进展, 36(6): 2291-2302, doi: 10.6038/pg2021EE0518.

高磊, 李洪强. 2019. 兴蒙造山带西南段深地震反射静校正研究. 物探化探计算技术, 41(4): 510-514.

高锐, 李秋生, 赵越, 等. 2002. 燕山造山带深地震反射剖面启动探测研究. 地质通报, 21(12): 905-906.

高锐, 李秋生, 赵越, 等. 2003. 用深地震反射剖面技术探测燕山造山带地壳细结构. //中国地球物理. 2003——中国地球物理学会第十九届年会论文集. 南京: 中国地球物理学会, 601.

高锐, 董树文, 贺日政, 等. 2004. 莫霍面地震反射图像揭露出扬子陆块深俯冲过程. 地学前缘, 11(3): 43-49.

高锐, 王海燕, 马永生, 等. 2006. 松潘地块若尔盖盆地与西秦岭造山带岩石圈尺度的构造关系——深地震反射剖面探测成果. 地球学报, 27(5): 411-418.

高锐, 周卉, 卢占武, 等. 2022. 深地震反射剖面揭露青藏高原陆-陆碰撞与地壳生长的深部过程. 地学前缘, 29(2): 14-27, doi: 10.13745/j.esf.sf.2021.7.13.

郝世鹏, 张广忠, 熊万里. 2017. 浙东深地震反射采集参数试验. 煤矿机械, 38(6): 45-47, doi: 10.13436/j.mkjx.201706019.

胡峰, 窝聿楷, 梁顺军, 等. 2022. 地震数据采集现场实时输出附地质层位单炮记录的智能方法. 石油地球物理勘探, 57(3): 532-539, 490, doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2022.03.004.

胡建辉, 谢明干, 韦添昌, 等. 2009. 应用深地震反射技术揭示喀斯特地区深部地质结构特征. 中国地质, 36(3): 742-745.

李洪强. 2014. 深地震反射剖面数据处理关键技术研究及其在秦岭造山带中的应用[博士论文]. 北京: 中国地质科学院.

李洪强, 高锐, 王海燕, 等. 2013. 用近垂直方法提取莫霍面——以六盘山深地震反射剖面为例. 地球物理学报, 56(11): 3811-3818, doi: 10.6038/cjg20131122.

李洪强, 高锐, 王海燕, 等. 2014. 用深反射大炮对大巴山-秦岭结合部位的地壳下部和上地幔成像. 地球物理学进展, 29(1): 102-109, doi: 10.6038/pg20140113.

李金丽, 李振春, 管路平, 等. 2015. 地震波衰减及补偿方法. 物探与化探, 39(3): 456-465.

李胜强, 刘振东, 严加永, 等. 2020. 高分辨深反射地震探测采集处理关键技术综述. 地球物理学进展, 35(4): 1400-1409, doi: 10.6038/pg2020DD0098.

李文辉, 高锐, 王海燕. 2009. 自动线条图技术及其在深地震反射剖面中的应用. //中国地球物理 2009. 合肥: 中国地球物理学会, 384.

刘保金, 胡平, 孟勇奇, 等. 2009. 北京地区地壳精细结构的深地震反射剖面探测研究. 地球物理学报, 52(9): 2264-2272, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.09.010.

刘保金, 张先康, 陈颐, 等. 2011. 三河-平谷 8.0 级地震区地壳结构和活动断裂研究——利用单次覆盖深反射和浅层地震剖面. 地球物理学报, 54(5): 1251-1259, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.014.

刘保金, 酆少英, 姬计法, 等. 2017. 贺兰山和银川盆地的岩石圈结构和断裂特征——深地震反射剖面结果. 中国科学: 地球科学, 47(2): 179-190.

刘家豪, 严加永, 王栩, 等. 2023. 深反射地震数据采集处理和解释技术现状与展望. 科学技术与工程, 23(3): 885-904.

刘子龙, 卢占武, 贾君莲, 等. 2019. 利用深地震反射剖面开展矿集区深部结构的探测: 现状与实例. 地球科学, 44(6): 2084-2105.

卢占武, 高锐, 匡朝阳, 等. 2010. 庐枞金属矿集区深地震反射剖面探测研究: 一种经济的、变化的采集观测系统实验. 岩石学报, 26(9): 2553-2560.

卢占武, 高锐, 王海燕, 等. 2014. 深地震反射剖面上的"亮点"构造. 地球物理学进展, 29(6): 2518-2525, doi: 10.6038/pg20140606.

卢占武, 高锐, 李洪强, 等. 2016. 深反射地震数据揭示的拉萨地体北部到羌塘地体南部地壳厚度的变化. 中国地质, 43(5): 1679-1687.

潘宗栋. 2022. 多宝山矿集区深部结构与深部成矿背景研究[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2022.001867.

彭仁艳, 张明, 刘文峰, 等. 2019. 深地震反射剖面资料去噪关键技术. 当代化工研究, (3): 38-39.

秦晶晶, 酆少英, 姬计法, 等. 2020. 非纵弯线气枪震源陆地反射资料叠加成像. 地震学报, 42(5): 592-603.

曲中党, 吴蔚, 贺日政, 等. 2015. 基于 s 变换的软阈值滤波在深地震反射数据处理中的应用. 地球物理学报, 58(9): 3157-3168, doi: 10.6038/cjg20150912.

任彦宗, 卢占武, 张新彦, 等. 2022. 利用深地震反射剖面揭示峨眉山大火成岩省下地壳结构. 地球物理学报, 65(2): 484-494, doi: 10.6038/cjg2022P0196.

施剑, 吴志强, 刘江平, 等. 2011. 动校正拉伸分析及处理方法. 海洋地质与第四纪地质, 31(4): 187-194.

时玉龙, 郑玉坤, 唐文榜, 等. 1995. Indepth-Ⅱ深反射记录干扰波分析及处理方法研究. //1995 年中国地球物理学会第十一届学术年会论文集. 江汉: 中国地球物理学会, 24.

司芗, 滕吉文, 马学英, 等. 2014. 人工源深部地震探测与壳幔结构及对异常体的分辨. 地球物理学进展, 29(2): 560-572, doi: 10.6038/pg20140212.

谭晓淼, 高锐, 王海燕, 等. 2021. 中亚造山带东段深地震反射剖面大炮揭露下地壳与 Moho 结构——数据处理与初步解释. 吉林大学学报(地球科学版), 51(3): 898-908, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200040.

谭晓淼, 饶莹, 周建波, 等. 2025. 中亚造山带东南段岩石圈尺度增生结构: 深地震反射大炮剖面的揭露. 地学前缘, doi: 10.13745/j.esf.sf.2025.8.60.

陶格涛. 2006. 地震观测系统中炮点位置校正方法研究[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

王冠, 熊小松, 高锐, 等. 2019. 花海盆地深地震反射剖面的最佳采集参数实验和分析. 中国地质, 46(5): 1146-1160.

王光文, 卢占武, 李文辉, 等. 2023. 深地震反射剖面探测技术发展现状. 地球与行星物理论评(中英文), 54(2): 120-139, doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-055.

王海波, 张伟, 张宏, 等. 2019. 高精度可控震源在深反射地震采集中的应用. 地球物理学进展, 34(5): 1910-1916, doi: 10.6038/pg2019DD0314.

王海燕, 高锐, 李秋生, 等. 2010a. 影响松潘地区深反射地震数据品质的几种因素. 地球物理学进展, 25(2): 410-418, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.006.

王海燕, 高锐, 卢占武, 等. 2010b. 深地震反射剖面揭露大陆岩石圈精细结构. 地质学报, 84(6): 818-839, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2010.06.008.

王海燕, 高锐, 卢占武, 等. 2017. 四川盆地深部地壳结构——深地震反射剖面探测. 地球物理学报, 60(8): 2913-2923, doi: 10.6038/cjg20170801.

吴蔚, 曲中党, 贺日政, 等. 2016. Curvelet 变换在深地震反射数据波场重建中的应用. 地球物理学进展, 31(4): 1506-1512, doi: 10.6038/pg20160413.

吴志强, 郝天珧, 唐松华, 等. 2016. 立体气枪阵列延迟激发震源特性及在浅海区 OBS 探测中的应用. 地球物理学报, 59(7): 2573-2586, doi: 10.6038/cjg20160722.

徐泰然, 卢占武, 王海燕, 等. 2017. 深反射地震剖面数据处理的主要技术方法. 地球物理学进展, 32(2): 762-774, doi: 10.6038/pg20170242.

徐泰然. 2018. 深地震反射剖面揭示的西藏娘热矿集区深部结构[硕士论文]. 北京: 中国地质科学院.

徐泰然, 卢占武, 王海燕, 等. 2018. 深地震反射剖面揭示的西藏娘热矿集区上地壳结构. 吉林大学学报(地球科学版), 48(2): 556-565, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20170261.

闫春明, 周晓萍, 刘向东, 等. 2025. 基于三维地震探测的焦家断裂带深部结构特征及其控矿模型的建立. 地质通报, 44(9): 1673-1680.

晏云翔, 李培, 智敏, 等. 2023. 复杂地形深地震反射数据采集参数优化. 煤田地质与勘探, 51(12): 83-92.

杨丽. 2017. 羌塘地体深反射地震数据优化处理与深反射"亮点"的构造意义[硕士论文]. 长春: 吉林大学.

杨文采. 1991. 用于岩石层调查的深地震反射. 地球物理学进展, 6(3): 61-68.

雍凡. 2021. 基于随机介质模型的深反射地震资料统计分析方法研究[博士论文]. 北京: 中国地质大学(北京), doi: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2021.001840.

雍凡, 刘子龙, 罗水余, 等. 2021a. 现代功率谱估算在反射地震剖面随机介质参数估算中的应用. 地球物理学进展, 36(4): 1640-1650, doi: 10.6038/pg2021FF0037.

雍凡, 刘子龙, 欧洋, 等. 2021b. 基于随机介质模型的统计分析在深反射地震中的应用. 地球物理学进展, 36(3): 993-1007, doi: 10.6038/pg2021EE0418.

岳航羽, 王凯, 王小江, 等. 2023a. 深地震反射剖面揭示的雄安新区及外围地壳精细结构与构造特征. 煤田地质与勘探, 51(12): 106-115.

岳航羽, 王小江, 王磊, 等. 2023b. 陆地地区深地震反射剖面技术的研究现状与展望. 煤田地质与勘探, 51(6): 121-148.

张路, 邓小凡, 蔡晨, 等. 2025. 深地震反射剖面揭示南海北缘中生代古太平洋板块俯冲遗迹. 地球物理学报, 68(2): 623-635, doi: 10.6038/cjg2024R0776.

张明, 薛诗桂. 2013. 基于物理模型的起伏地表构造成像叠加速度分析研究. 地球物理学进展, 28(3): 1417-1424, doi: 10.6038/pg20130335.

张忠杰, 高锐, 白志明, 王海燕. 2013. 地壳精细结构的地震学研究方法. //丁仲礼. 固体地球科学研究方法. 北京: 科学出版社, 352-368.

赵虎, 尹成, 李瑞, 等. 2010. 基于目的层照明能量的炮点设计方法. 石油物探, 49(05): 478-481, 18.

赵睿, 陈思, 王海华, 等. 2026. 地球深部探测国际前沿动态及发展方向. 地质科技通报, 45(2): 306-319, doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240456.

赵文津, 吴珍汉, 史大年, 等. 2008. 国际合作 INDEPTH 项目横穿青藏高原的深部探测与综合研究. 地球学报, 29(3): 328-342.

朱小三, 高锐, 李秋生, 等. 2013. 深反射地震数据的噪声衰减方法综述. 地球物理学进展, 28(6): 2878-2900, doi: 10.6038/pg20130609.

朱小三, 高锐, 管烨, 等. 2014. 深反射地震资料的偏移处理. 地球物理学进展, 29(1): 84-94, doi: 10.6038/pg20140111.