

新型甲烷气爆震源在青藏高原激发的信号特征研究

冀战波, 李宗旭, 贺日政*, 牛 潇, 吴 蔚

中国地质科学院, 北京 100037

摘要: 利用人工震源(又称主动震源)激发地震波是区域地下结构探测的主要方式之一。绿色环保和安全理念日渐盛行下, 寻找适用于生态脆弱和自然环境恶劣的青藏高原的人工震源需求迫切。本文介绍了新型甲烷气爆震源在高海拔低气压的青藏高原内部进行实验的相关过程及其效果。利用聚类分析、线性叠加、相位加权叠加等信号处理方法, 并与同期共线的炸药震源信号进行对比分析。结果显示: 甲烷气爆震源(WB-76-1700, WB-70-2000 及 WB-60-500 型震源当量分别为 1.72 kg、1.72 kg 和 0.25 kg 炸药)激发的地震波频率较高(频带范围 1–50 Hz, 主频为 5–30 Hz), 传播距离可达 6.5 km; 同期炸药震源(48 kg)激发的地震波信号频率低于甲烷震源(主频低于 20 Hz); 甲烷震源信号波形与实验所用甲烷震源型号无关, 与台站到震源的距离有关, 并推测可能与随机爆轰激发过程也相关; 甲烷震源适合于浅层速度结构探测, 特别是适合在波传播路径更加复杂的金属矿集区环境条件, 且施工效率更高。总之, 通过本次在青藏高原实验并与同期共线的炸药震源对比, 甲烷震源是一种有效的新型绿色环保型人工震源。鉴于此次实验甲烷气爆当量较小, 较炸药震源激发的地震波传输距离近。未来继续拓展实验, 进一步提高甲烷气爆震源当量并获得较大炮检偏移距的高信噪比地震波信号。

关键词: 甲烷气爆震源; 青藏高原; 绿色环保

中图分类号: P622.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.030101

Seismic Signal Characteristics of a New Source Based on Methane Gaseous Detonation in the Tibetan Plateau

JI Zhan-bo, LI Zong-xu, HE Ri-zheng*, NIU Xiao, WU Wei

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Artificial seismic source, which is also known as active source and is used to excite seismic wave, is an important way to detect underground structures. With the increasing popularity of the environmental protection and safety, it is urgent to find the new artificial source which is suitable for the fragile ecology and harsh natural environment of the Tibetan Plateau. This paper introduces the data processing and preliminary result of the experiment with a Methane Gaseous Source (MGS) under the special environment of high altitude and low pressure in the Tibetan Plateau, which includes such methos as cluster analysis, linear stacking, and phase weighted stacking, in comparison with the signals from traditional dynamite sources (TDS) during the same period in the same area. The results show the following phenomena: (1) The frequency range of the seismic wave excited by MGS is much higher (the frequency band range is 1–50 Hz, the dominant frequency is 5–30 Hz) than that by TDS. The power from MGS of WB-76-1700, WB-70-2000 and WB-60-500 type are equivalent to 1.72 kg, 1.72 kg and 0.25 kg TDS respectively. The wave propagation distance is up to 6.5 km. The frequency range of seismic wave excited by TDS of 48 kg is lower than that by MGS within the dominant seismic frequencies band

本文由科技部重点研发课题(编号: 2018YFC0604102)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JKY202015)、国家自然基金(编号: 42074112)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190015)联合资助。

收稿日期: 2021-02-19; 改回日期: 2021-02-24; 网络首发日期: 2021-03-01。责任编辑: 同立娟。

第一作者简介: 冀战波, 男, 1987 年生。博士, 助理研究员。主要从事人工震源和地下速度结构研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: jizhanbo@cags.ac.cn。

*通讯作者: 贺日政, 男, 1973 年生。博士, 研究员, 博士生导师。主要从事青藏高原深部结构与构造研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: herizheng@cags.ac.cn。

of lower than 20 Hz; (2) the signal waveform of MGS is irrelevant to the device type of MGS, but depends on the epicenter distance and random detonation process; (3) it is much more suitable for shallow exploration and is especially effective in polymetallic ore concentration area with more complex wave propagation path. The efficiency in field work of MGS is higher than that of TDS. In brief, MGS is a new effective green and environmental artificial source. It is due to the small equivalent of MGS in this experiment that the travel distance of seismic waves excited by source is shorter than TDS of 48 kg. In the future experiment, higher signal-to-noise ratio seismic signal with larger distance would be recorded by enhancement of the equivalent of MGS.

Key words: methane detonation source; Tibetan Plateau; green and environmental

地震波是获取地球内部结构与物质信息最有效的工具之一(Aki, 1957; Claerbout, 1968; Laske and Masters, 1996; Campillo and Paul, 2003), 被誉为照亮地下的一盏明灯(陈颙和朱日祥, 2005)。为了克服被动震源的先天缺陷(陈颙等, 2018), 人们利用炸药、落锤、偏心振动源、电火花等方式主动创造震源激发地震波, 运用于区域结构探测、油气能源和矿产资源勘查等领域(Lutter et al., 1999; Yamaoka et al., 2001; Mooney et al., 2002; 常旭等, 2008; 王洪体等, 2009), 极大地提高了资源勘查和开采的准确性, 现已成为区域尺度地壳结构探测的重要手段。然而, 由于人类活动范围逐渐扩大以及环保理念深入人心, 激发条件日渐苛刻, 上述部分主动源激发逐渐不太适应复杂地表地质条件与环境保护。为此, 环保且高效的主动震源研究亟需开展。

经过近几年的努力探索研究(陈颙和李宜晋, 2007; Wang et al., 2018), 适用于水环境条件下的气枪震源(王宝善等, 2016; Wang et al., 2020)及甲烷和氧气混合形成的新型气爆震源(Wang et al., 2019; Zhang et al., 2020; 徐善辉等, 2020a, b)技术日渐成熟。甲烷和氧气混合(以下简称甲烷气爆震源), 可在一定能量点火条件下发生爆轰反应, 释放大量的化学能; 该气相爆轰反应也可产生高压气体, 将其快速释放形成冲击波, 作为一种新型震源产生地震波(Wang et al., 2019)。相对于几种常见的人工震源(陈颙和李宜晋, 2007), 甲烷气爆震源是一种能量大、易操作、受地形影响小的新型低成本绿色震源。与仅能在水环境条件下激发的环保型气枪震源相比, 甲烷气爆震源更能适应复杂的陆地条件, 且其能量密度远远高于常规以物理势能为能源的高压气枪震源。在中国东部不同地表地质条件下开展的甲烷气爆震源探测实验(Wang et al., 2019; 徐善辉等, 2020a, b)表明该气爆震源是一种高性能的人工震源, 具备服务于科研、生产等实际工作需求。特别是在江西景德镇朱溪钨矿区开展的包括甲烷气爆震源在内的多种主动震源激发和观测对比实验(Wang et al., 2019; Zhang et al., 2020)显示甲烷震源激发的地震波初至能量强、可追踪性好、反射波信号清晰可辨,

单次激发传播距离可达 15 km 以上, 具备探测上地壳浅部精细结构能力(Zhang et al., 2020)。

当前, 国内的甲烷气爆震源实验都是在东部低海拔、高气压的环境下开展的, 尽管已经被证明是适合地下结构探测的有效工具(Zhang et al., 2020; 徐善辉等, 2020a, b), 但并未在高海拔、低气压气温环境下验证, 如恶劣环境的青藏高原常年处于低压、低温环境, 昼夜温差大, 风噪高。因此, 在青藏高原开展甲烷震源激发与接收工作有诸多挑战。为了进一步探索和发展甲烷气爆震源技术, 我们于2020年10月在海拔5100 m的西藏日喀则市谢通门县青都—娘热矿集区开展了甲烷气爆震源的野外实验, 并与同期施工的炸药震源进行对比研究。本文介绍了新型气爆震源在青藏高原腹地恶劣条件下的实验并与同期共线实施的高能量炸药震源对比, 初步显示了新型气爆震源可在青藏高原地下结构探测中应用的可行性。

1 区域地质背景

印度次大陆自43 Ma以来(Mo et al., 2007)北向俯冲至位于欧亚板块前缘的拉萨地体之下, 并促使青藏高原后期快速隆升。特别是在20 Ma以来(Yin and Harrison, 2000)的隆升过程中, 高原表面发育了东西向伸展作用下形成的近南北向地堑(Yin and Harrison, 2000), 如图1。尽管到目前为止高原隆升过程中的东西向伸展机制存在诸多争议(贺日政和高锐, 2003), 但探测这些南北向地堑的深部结构特征, 是深入理解陆陆碰撞过程中的地表响应机制关键。本次实验区位于高原内部, 几乎全为高角度正断层控制(吴章明等, 1990; Kali, 2010)的申扎—谢通门—定结裂谷(张进江等, 2002; 哈广浩, 2019; 徐心悦, 2019)中部, 该区域不仅地震活跃(Monigle et al., 2012; 张小涛等, 2020; 王永哲等, 2021), 而且是娘热多金属矿集区(李光明等, 2004; 徐泰然, 2018; 徐泰然等, 2018)所在位置。因此, 利用人工震源探测裂谷深部结构对于理解青藏高原隆升过程中东西向伸展机制(Yin and Harrison, 2000; 贺日政和高锐, 2003)具有重要构造意义。

2 实验数据采集过程

为了探索在高原环境下的甲烷气爆震源特性,并可与炸药震源进行对比研究,我们将实验地点选择在西藏日喀则市谢通门县青都—娘热矿集区同期(2020-09-26—2020-10-05)实施的炸药震源深地震反射测线上,并采用相同的观测系统记录了炸药震源激发的地震波信号。

青都乡位于西藏中部日喀则市谢通门县北部,平均海拔4500 m,而此次开展实验的地点海拔达到了5100 m,气压仅为0.54个标准大气压。本次实验共使用了3种型号的气爆震源进行了26次激发:WB-76-1700、WB-70-2000及WB-60-500型,具体激发过程如表1。

表1 甲烷震源型号及炮点实验参数

Table 1 Methane source model and blast point test parameters

炮点编号	A01-A04	B01-B06	C01-C14	Z11-Z13 Z21-Z23
震源型号	WB-76-1700	WB-70-2000	WB-60-500	WB-60-500
组合方式	单井	单井	单井	三井组合
井深/m	10.0	10.0	2.0	2.0
注气压力 /MPa	7.5	7.5	6.0	6.0
换算 TNT/kg	1.72	1.72	0.25	0.75
激发重复次数	4	6	14	2

注:震源型号WB-76-1700表示直径76 mm,长度1700 mm。震源型号WB-70-2000表示直径70 mm,长度2000 mm。震源型号WB-60-500表示直径60 mm,长度500 mm。气爆反应能量换算公式见公式1,2。

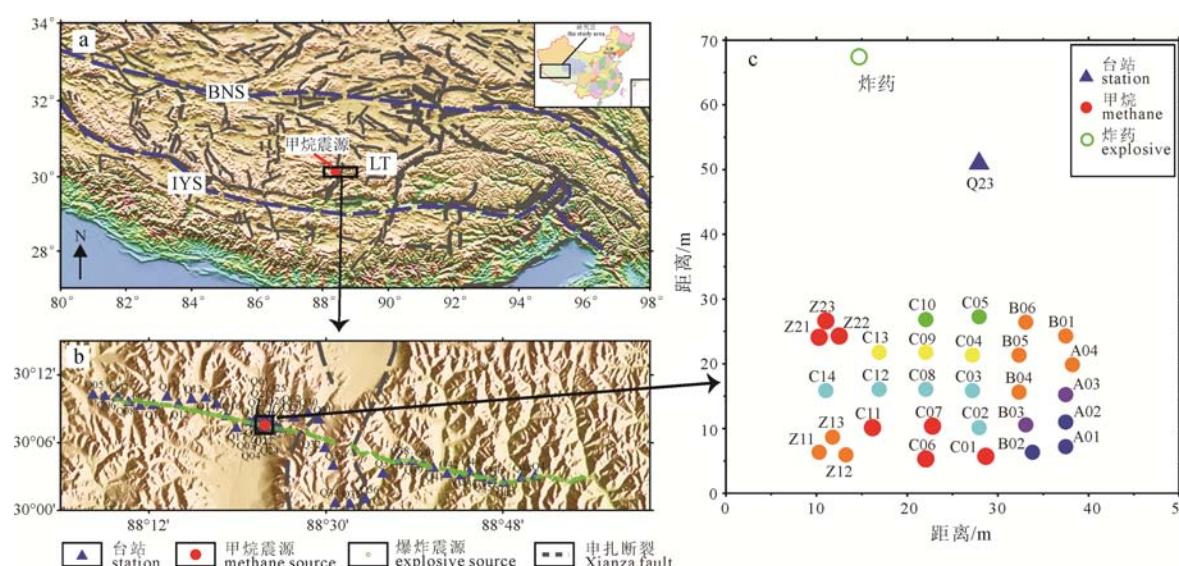
表1给出了详细的激发条件实验参数对比。与现场的炸药震源比较,甲烷气爆震源更加安全,施工灵活,方便快捷。

实验前,沿深地震反射数据采集侧线共线布设了49个EPS-2-M6Q(5s)型三分量短周期地震记录仪,其中Q23台站位于甲烷震源激发点附近(见图1b),实验中利用该观测系统记录了同期部分炸药震源激发的地震波,甲烷气爆震源、炸药震源及台站分布见图1。

甲烷震源的激发装置整体为钢制的圆柱形密封容器(图2a),在装置顶端设置注气阀门和点火起爆器(图2b),起爆器通过点火线路结构连接钢瓶内部的火花塞以引爆混合气体(图2a)。震源激发前,甲烷和氧气按照反应配比在密集容器(图2)内混合。点火后,密集容器内发生强烈化学爆轰反应,产生高压气体,其内部压力可达165 MPa。在密封容器的底端设有限压阀门,确保主要冲击能量定向向下传播(图2b),当内部气体压力高于设定阈值后快速脱落,此时高压气体瞬间由底部释放,形成向下冲击产生地震波(Wang et al., 2019)。在甲烷震源激发实验中,甲烷与氧气反应生成水,对环境友好,同时整个爆轰反应被限制在钢制腔体内,不会产生类似炸药爆炸后的次生灾害,例如塌方等。钻井成本低,激发效率更高。

3 人工震源信号分析

通过49个台站记录到的甲烷爆轰实验产生的地震波信号,对甲烷震源当量估计、震源信号时频、传播特性等分析。

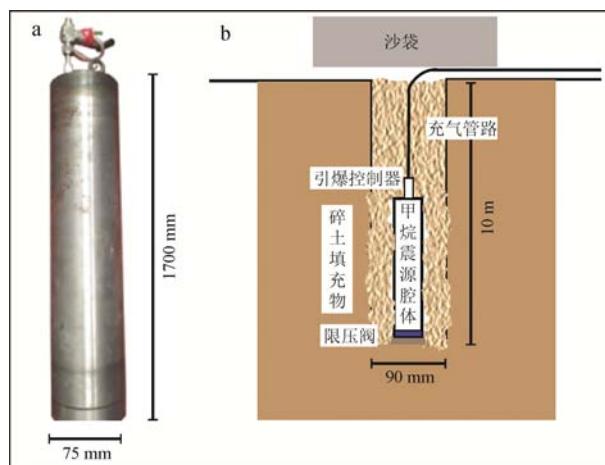


a—区域构造图(IYS—印度—雅鲁藏布江缝合带; BNS—班公湖—怒江缝合带; LT—拉萨地体);
b—甲烷气爆、炸药震源及台站分布; c—甲烷气爆震源分布。

a—regional structure (IYS—India—Yarlung Zangbo suture zone; BNS—Bangong Co—Nujiang River suture zone; LT—Lhasa terrane);
b—distribution of methane gaseous detonation, explosive source and seismic stations; c—distribution of methane detonation sources.

图1 区域构造和甲烷气爆、炸药震源及台站分布图

Fig. 1 Regional structure and distribution of methane gaseous detonation, explosive source and seismic stations



a—甲烷爆轰震源的激发装置;
b—甲烷爆轰震源的激发方式示意图。

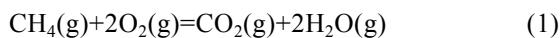
a—excitation device of methane detonation source; b—excitation schematic diagram of methane detonation source.

图 2 甲烷震源的激发装置和激发方式示意图

Fig. 2 Excitation device and excitation schematic diagram of methane detonation source

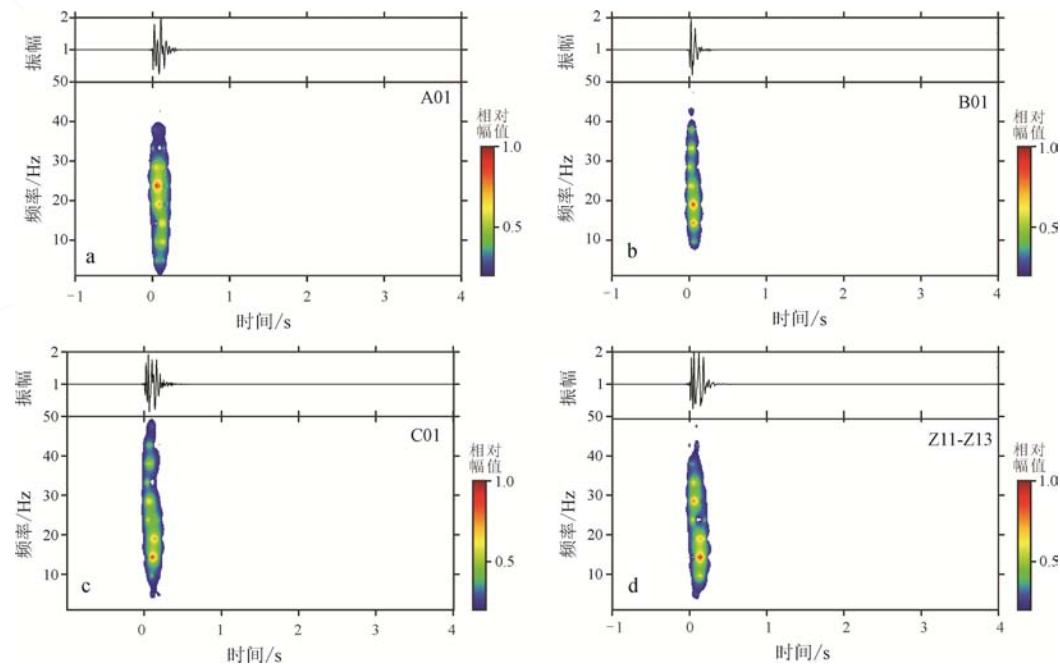
3.1 震源当量估计

甲烷震源的能量可由其初始压力、气体配比和气室容积计算。本次实验中,三种甲烷震源装置(WB-76-1700、WB-70-2000 及 WB-60-500 型)气室容积分别约为 7.7 L、7.7 L 和 1.4 L, 初始压力为 7.5 MPa、7.5 MPa 和 6.0 MPa, 甲烷和氧气按反应当量比 1:2 加入。根据甲烷/氧气反应方程式:



g 表示气相反应, 其反应能 $\Delta H = -850 \text{ kJ/mol}$ 。

理想气体状态方程:



a, b, c, d—A01、B01、C10 单炮及 Z11-Z13 组合炮。
a, b, c, d—A01, B01, C10 single fired point and Z11-Z13 combined fired point.

图 3 Q23 台站记录到的不同激发方式甲烷震源垂向记录及时频特征

Fig. 3 The vertical records and time-frequency characteristics of methane sources recorded at Q23 station

$$pV=nRT \quad (2)$$

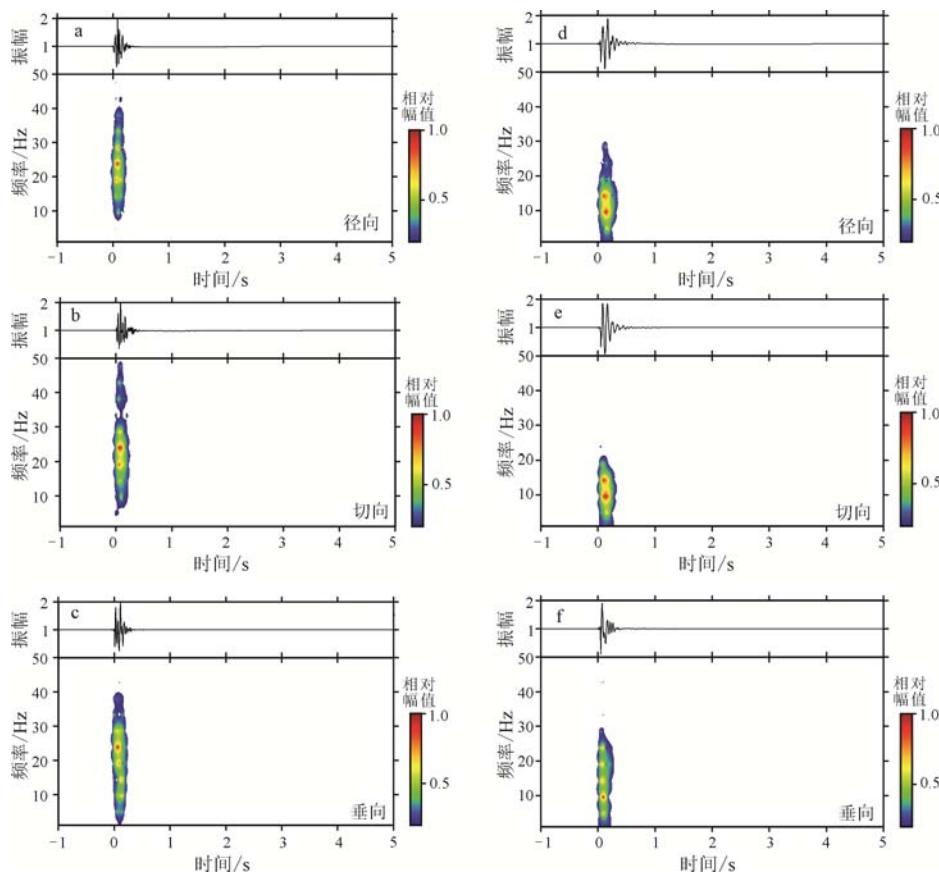
其中 p 为压强(Pa), V 为气体体积(m^3), T 为温度(K), n 为气体的物质的量(mol), R 为摩尔气体常数(也叫普适气体恒量, $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$)。

由公式(2)计算得知三种甲烷震源装置(WB-76-1700、WB-70-2000 及 WB-60-500 型)气体质量分别是 25.43 mol 、 25.43 mol 、 3.70 mol 。爆轰反应转化的总化学能分别为 $E_{\text{WB-76-1700}}=1/3 \times 25.43 \text{ mol} \times 850 \text{ kJ/mol}=7.21 \text{ MJ}$, $E_{\text{WB-70-2000}}=1/3 \times 25.43 \text{ mol} \times 850 \text{ kJ/mol}=7.21 \text{ MJ}$, $E_{\text{WB-60-500}}=1/3 \times 3.70 \text{ mol} \times 850 \text{ kJ/mol}=1.05 \text{ MJ}$ 。甲烷和氧气爆轰反应释放的化学能并不完全用于对外做功, 这是因为其中的相当一部分能量转化为产物气体分子的振动和转动。根据热力学实验及理论研究, 对外做功能量约占总化学能 30%左右(高荣庆, 1994)。因此, 如表 1 所示的本次实验所用的 WB-76-1700/WB-70-2000 型震源和 WB-60-500 型甲烷震源产生的地震波能量释放约为 2.16 MJ 和 0.315 MJ, 其当量分别约相当于 1.72 kg 及 0.25 kg 炸药(同样按总化学能的 30%对外做功, 1 kg 炸药释放 4187 kJ 能量)。

3.2 信号特征分析

由于图 1c 所示的 Q23 台站距离甲烷气爆震源较近, 故将 Q23 台站的记录作为源信号开展甲烷震源的信号特征分析。

图 3 展示了 Q23 台站记录到的 A01、B01、C01 单炮及 Z11-Z13 组合炮点激发的甲烷震源信号以及其震源信号的时间-频率域能量分布。如图 3 所示, 总体来说四种甲烷震源激发的地震波频率在



a, b, c—甲烷震源(换算能量 1.72 kgTNT)三分量记录; d, e, f—炸药震源(48kg)三分量记录。

a, b, c—three component records of methane source (equivalent to 1.72 kg TNT); d, e, f—three component records of explosive source (48 kg).

图 4 甲烷震源与炸药震源时频特征

Fig. 4 Time-frequency characteristics of methane source and explosive source

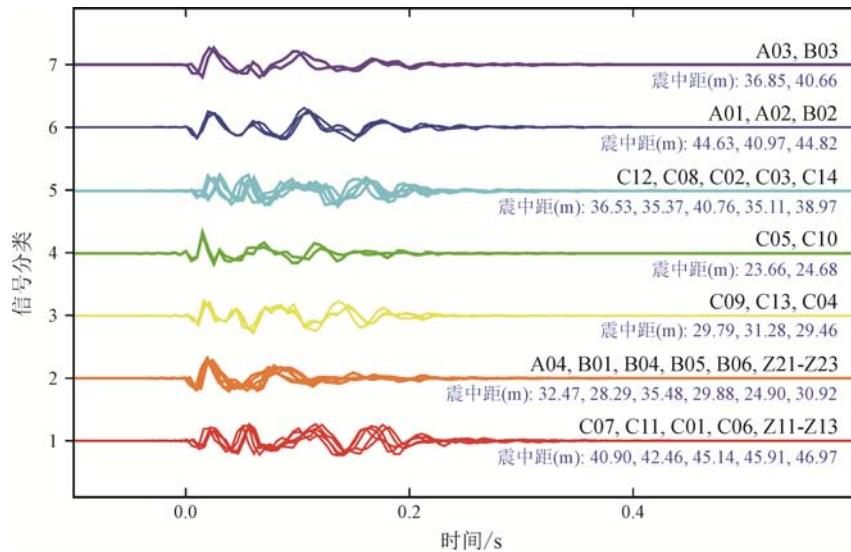


图 5 Q23 台站记录的甲烷震源信号聚类分析结果

Fig. 5 Cluster analysis results of methane source signals recorded by Q23 station

1~50 Hz 之间, 集中于 5~30 Hz。同时, 利用 49 个三分量地震计记录到的同期共线炸药信号, 将甲烷实验 A01 炮点激发的甲烷震源信号在 Q23 台站及一次炸药震源(48 kg)在 Q20 台站记录到的三分量记录和时频进行分析对比, 结果见图 4。

图 4 展示了本次实验 Q20 台站记录到的炸药震

源(48 kg)时间-频率域特征的频率范围为 0.1~25 Hz, 主频在 20 Hz 以下。炸药的当量(48 kg)较实验所用甲烷震源当量(分别为 1.72 kg, 1.72 kg 和 0.25 kg)大, 激发出的地震波信号频率更低。

3.3 甲烷震源信号聚类分析

为了分析不同当量、不同激发方式、不同震源

型号对激发的地震波信号持续时间、频谱特征等方面可能产生的影响,采用了基于相似度距离的层次聚类方法(王伟涛和王宝善, 2012; 苏金波等, 2017)分析了Q23台站记录的甲烷震源三分量信号。对于N组事件的地震波记录,首先选取合适震相窗口计算两两事件*i*和*j*的相关系数 C_{ij} ,定义其相似度距离为 $D_{ij}=1-C_{ij}$,从而构建所有事件的相似度距离矩阵M。层次聚类分析方法首先将每个事件划为一类,共N类,同时定义为第一层;然后将相似度距离最小的两个事件合并为一类,此时共分为N-1类,定义为第二层;以此类推,直到所有事件归为一类。基于相似度距离层次聚类方法的甲烷震源信号记录分类结果及每类波形记录见图5。

在本次分析中,将甲烷震源信号的相似度距离阈值设为0.25(对应相关系数为0.75),得到7类事件波形(图5)明确显示甲烷震源信号的持续事件。根据甲烷震源信号的能量分布(图3),分别尝试对信号进行5~30 Hz、10~30 Hz和15~25 Hz,在相关系数阈值同为0.75的条件下,10~30 Hz滤波后聚类分类结果与未滤波时聚类分类结果一致,5~30 Hz和15~25 Hz滤波后聚类分类反而要多一类。整体来说,滤波未能改善聚类分析效果。能量频率分布与当量大小及震源类型、组合激发方式无直接关系,推测与震中距及随机爆轰激发过程有关。甲烷震源信号的持续时间会随着震中距的增加而增加,同时高频

信号强度衰减(Wang et al., 2019)。

3.4 传播距离

分别选取了A01、B01、C01单炮和Z11-Z13组合炮点位甲烷激发及一个小当量炸药(48 kg)的地波记录,原始记录如图6。

由图3可知甲烷震源信号主频范围为5~30 Hz,考虑到高频地震波衰减较快,故对甲烷震源信号实施了5~25 Hz的带通滤波。图4显示炸药震源信号低于25 Hz,其频带主要在1~25 Hz之间,所以对炸药震源信号进行1~25 Hz的带通滤波。

经过适当的带通频率滤波,可以看到图7中所有的记录信噪比均有所提高。甲烷气爆震源在井下10 m深、7.5 MPa注气压力的条件下WB-76-1700和WB-70-2000型震源信号传播距离由2.8 km提高到6.5 km(图6a, b和图7a, b);在井深2 m、注气压力6.0 MPa的条件下单个WB-60-500型震源信号传播距离由1.0 km提高到1.5 km,另外Z11-Z13组合震源信号传播距离由1.8 km提高到2.5 km。为了进一步提高信噪比并获得清晰的甲烷震源信号,对台站记录分别进行了线性叠加和相位加权叠加(Zeng and Thurber, 2016)。相对于线性叠加方法(图8a),相位加权叠加方法(图8b)显著提高信噪比。经过线性叠加,台站记录的甲烷震源信号信噪比明显得到提升,而相位加权叠加进一步提高了信噪比,使得信号的传播距离甚至超过10 km(图8b)。

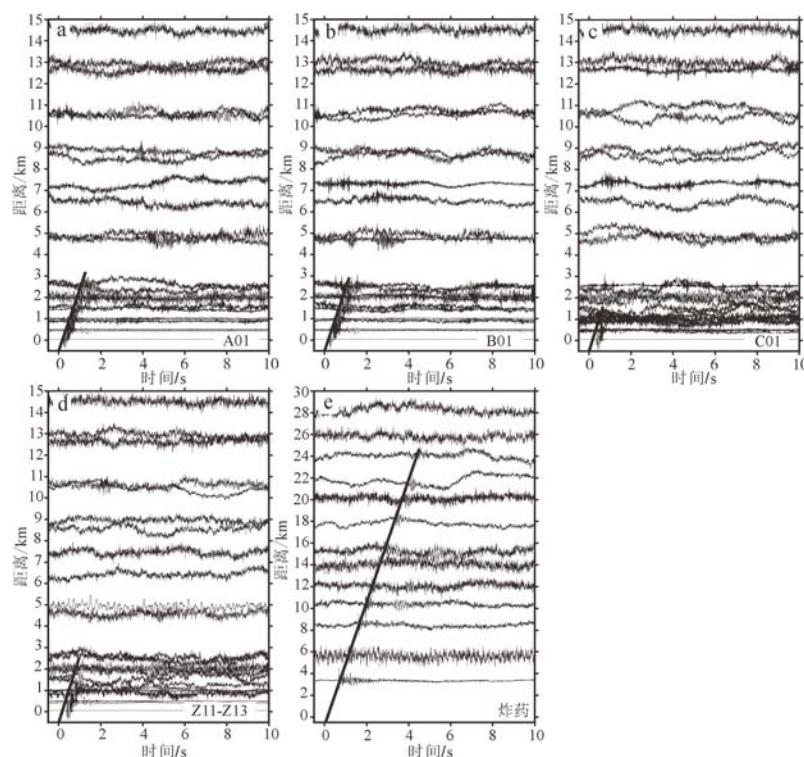


图6 A01、B01、C01单炮、Z11-Z13组合炮点及小当量炸药(48 kg)原始记录(甲烷震源相关激发参数见表1)
Fig. 6 Original records of A01, B01, C01 single shot, Z11-Z13 combined shot point and small equivalent explosive (48 kg) (see Table 1 for relevant parameters)

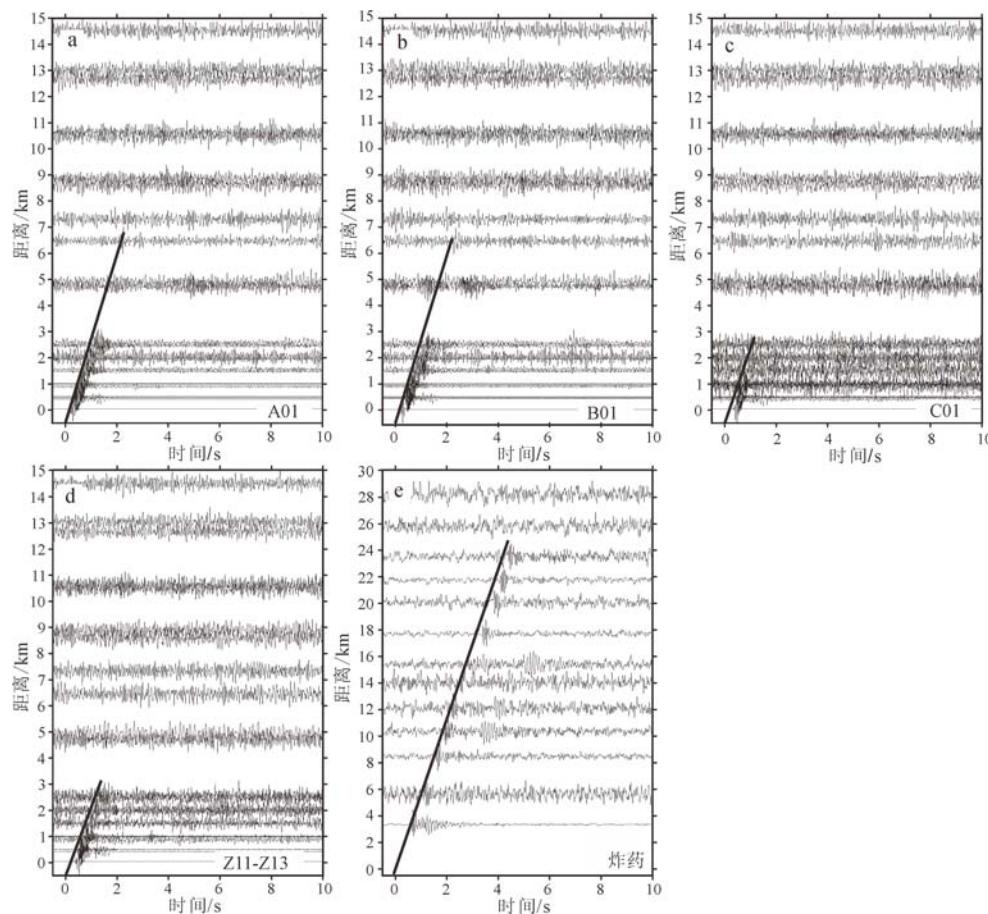


图 7 A01、B01、C01 单炮、Z11-Z13 组合炮点(5–25 Hz 滤波)及小当量炸药(48 kg, 1–25 Hz)记录

Fig. 7 A01, B01, C01 single shot, Z11-Z13 combined shot point (5–25 Hz filtering) and small explosive (48 kg, 1–25 Hz) records

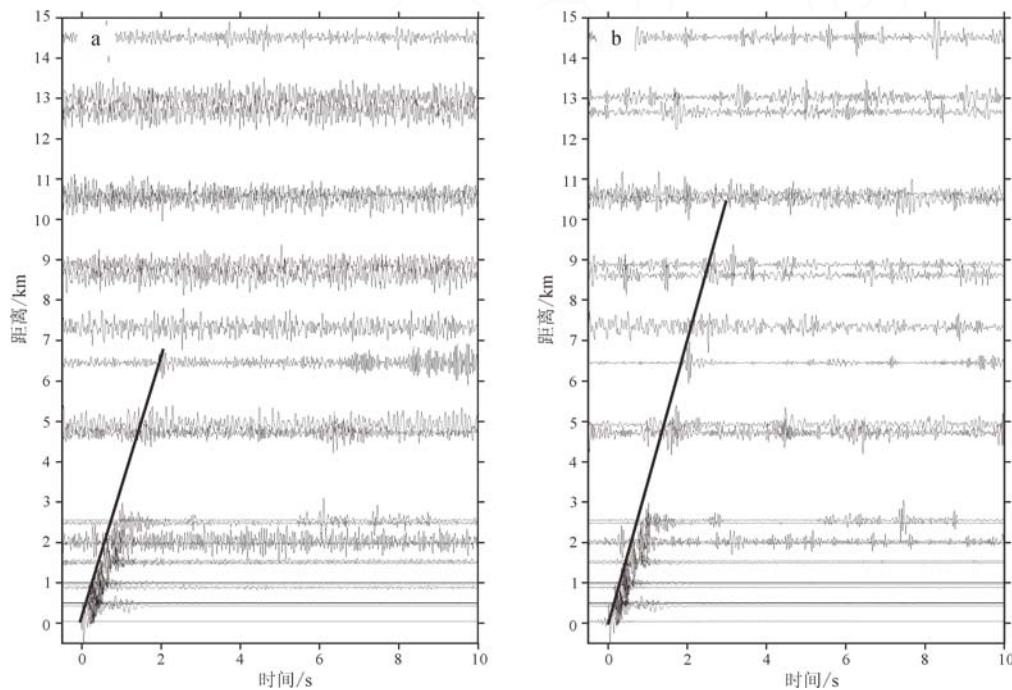


图 8 甲烷气爆震源记录开展线性叠加(a)与相位加权叠加(b)对比

Fig. 8 Comparison between linear stack (a) and phase weighted stack (b) of methane explosion source records

3.5 甲烷信号传播特征分析

本节挑选了所有垂向分量记录到的甲烷震源 P 波到时(图 9)。通过线性拟合得到甲烷震源的 P 波视速度为 2.92 km/s, 拾取的 P 波到时较为收敛。进一

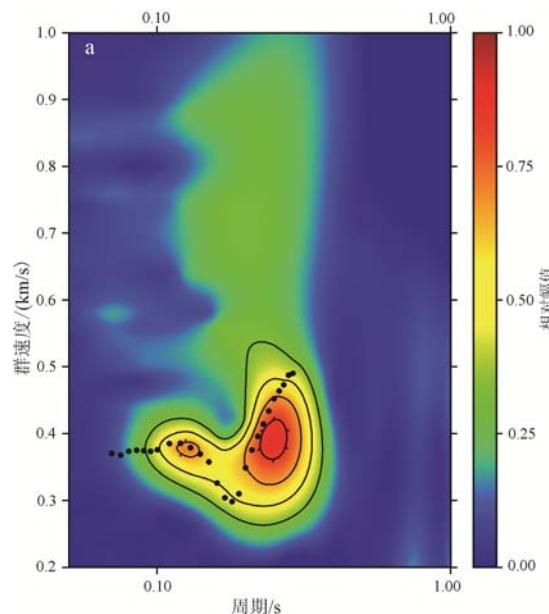
步, 可以利用甲烷震源体波到时信息反演地下速度结构。

此外, 在距离甲烷震源较近的几个台站明显记录到了浅层面波(垂向、径向 Rayleigh 波和切向 Love

波), 如图 10。浅层面波特征(图 10)突出显示了甲烷震源和炸药震源记录中 Rayleigh 波的群速度频散特征, 面波的频率范围在 0.08~0.7 s 之间, 速度范围为 0.25~0.65 km/s。若通过面波与体波走时联合成像方法(张超等, 2020), 不仅有助于探测裂谷内部结构, 而且更适合于探测金属矿集区的复杂三维结构。

4 讨论与结论

利用新型环保震源探测地下速度结构成为近年来的一个发展趋势。甲烷和氧气在封闭空间内点



a—甲烷震源; b—炸药震源。图中黑色为 Rayleigh 波频散曲线。
a—methane source; b—explosion source. The black dots are dispersion curves of Rayleigh wave.

Fig. 10 甲烷震源与爆炸震源面波频散特征

Fig. 10 Surface wave dispersion characteristics of methane source and explosion source

火发生爆轰反应, 释放大量化学能量, 产生高压气体定向激发地震波。相比于炸药震源, 因甲烷和氧气的爆轰反应的产物是二氧化碳和水, 对环境友好没有污染, 而且整个爆轰反应被限制在一个高强度腔体内, 仅通过腔体底部的限压阀门定向对外释放能量激发地震波, 不会产生类似炸药震源爆炸留下的井壁坍塌。此外, 甲烷震源反应腔体(图 2a)可以回收重复使用, 大大降低了地震波激发成本。而对于高压气枪震源(陈颤和李宜晋, 2007; Wang et al., 2018), 甲烷震源实验中的爆轰反应释放大量化学能, 激发效率优于以释放物理势能为主的气枪震源(Wang et al., 2019), 且其无需水体和大型空气压缩机等大型配套设备。因此, 甲烷气爆震源具有便捷、安全、应用场景灵活的优点。Zhang et al.(2020)利用密集短周期台阵记录到的气爆震源、气枪和震源车等人工源激发的地震波信号对朱溪铜钨多金属矿区的近地表速度结构成像, 表明利用甲烷气爆震源与

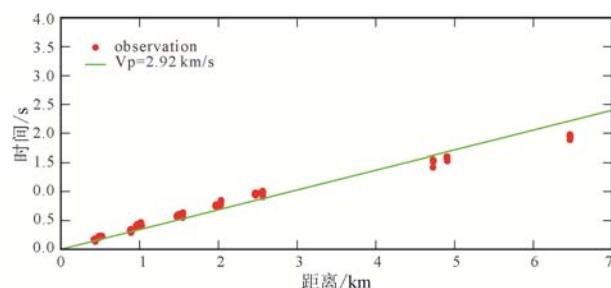
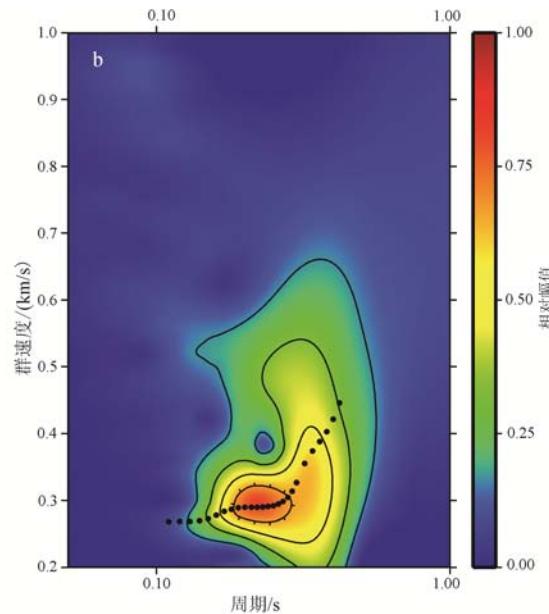


图 9 垂向分量甲烷震源信号 P 波震相到时(2.92 km/s)

Fig. 9 P-wave phase arrival time of vertical component methane source signal (2.92 km/s)



短周期地震仪相结合的主动源地震探测是针对固体矿产资源探测的有效手段, 这对查明控矿构造及成矿背景具有明确的示范效果。同时, 定向激发的设计使得激发效率更高, 目前国内已经开展了城市地区断层结构的探测(徐善辉等, 2020a, b)。

总之, 本文中首次介绍了在高海拔低气压的青藏高原实施的甲烷爆轰实验过程及地震波信号特征。通过实验分析显示甲烷气爆震源在下井深 10 m、注气压力 7.5 MPa 的条件下 WB-76-1700 和 WB-70-2000 型震源(折合 1.72 kg TNT)至少传播 6.5 km; 在下井深 2 m、注气压力 6.0 MPa 的条件下 WB-60-500 型震源(折合 0.25 kg TNT)可以传播 1.5 km。甲烷震源的激发频率在 1~50 Hz 之间, 主频为 5~30 Hz。较高的信号频率有助于开展浅层地壳的速度结构探测。在今后的实验中, 我们将继续探索大当量震源不同井深、激发环境下的激发效果。另外由于此次实验中所用甲烷震源当量均为小当量

震源(WB-76-1700, WB-70-2000 及 WB-60-500 型震源当量分别为 1.72 kg, 1.72 kg 和 0.25 kg 炸药), 爆轰过程持续时间短, 产生的信号频率高, 适合小尺度浅层结构探测。如果增大甲烷震源中甲烷和氧气容量, 爆轰过程持续时间长, 可能会产生低频率地震波信号, 有利于开展更大距离和更深尺度结构探测。不同当量、型号甲烷震源结合起来使用有望提高区域尺度结构探测效率和精度。同期共线接收到的炸药(48 kg TNT)震源信号的频率在 25 Hz 以下, 明显低于甲烷震源频率。通过基于相似度距离的聚类分析, 本次实验中所使用的四种类型的甲烷震源信号与当量大小暂时未看到有直接关系, 更可能与台站与甲烷震源的距离和随机爆轰激发过程有关。通过叠加相关系数高的激发记录有望提高甲烷震源信号的信噪比, 在更远的距离上观测到信号。甲烷震源被证明是一种有效的新型绿色环保型人工震源, 对于探测区域地下结构提供有力支持。

为了增加探测距离及探测深度, 如何在青藏高原提高甲烷气爆震源当量是未来的进一步工作。

致谢: 感谢四川伟博震源科技有限公司郝贵生等工作人员的辛勤付出; 感谢中国工程物理研究院王翔、孟川民、董石研究员和中国地震局地球物理研究所王伟涛研究员、杨微研究员和徐善辉副研究员的指导和帮助; 更感谢中国地质科学院地质研究所李文辉博士提供的炸药震源信息和中石化石油工程地球物理有限公司南方分公司提供的野外实验帮助。感谢匿名审稿人的认真审阅及宝贵意见。

Acknowledgements:

This study was supported by Minsitry of Science and Technology of the People's Republic of China (No. 2018YFC0604102), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JKY202015), National Natural Science Foundation of China (No. 42074112), and China Geological Survey (No. DD20190015).

参考文献:

- 常旭, 李林新, 刘伊克, 王红落. 2008. 北京断陷黄庄—高丽营断层伪随机可控震源地震剖面[J]. 地球物理学报, 51(5): 1503-1510.
- 陈颤, 李宜晋. 2007. 地震波雷达研究展望: 用人工震源探测大陆地壳结构[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8): 813-819.
- 陈颤, 徐逸鹤, 蔡辉腾, 李稳. 2018. 关于地震科学实验场的一些思考——地下云图[J]. 中国地震, 34(2): 165-171.
- 陈颤, 朱日祥. 2005. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展, 20(3): 485-489.
- 高荣庆. 1994. 从气体分子运动论分析火药力的物理含义[J]. 火药, (2): 40-44.

- 哈广浩. 2019. 藏南亚东—谷露裂谷中—南段晚新生代正断层作用[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 贺日政, 高锐. 2003. 西藏高原南北向裂谷研究意义[J]. 地球物理学进展, 18(01): 35-43.
- 李光明, 潘桂棠, 王高明, 黄志英, 高大发. 2004. 西藏冈底斯成矿带矿产资源远景评价与展望[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(01): 22-27.
- 苏金波, 王海涛, 王琼, 张文来, 冀战波, 魏芸芸, 陈昊, 张文秀. 2017. 利用聚类分析方法研究新疆呼图壁大容量气枪震源重复性[J]. 地震研究, 40(04): 613-618, 678.
- 王宝善, 葛洪魁, 王彬, 王海涛, 张元生, 蔡辉腾, 陈颤. 2016. 利用人工重复震源进行地下介质结构及其变化研究的探索和进展[J]. 中国地震, 32(2): 168-179.
- 王洪体, 庄灿涛, 薛兵, 赵翠萍, 朱祖杨. 2009. 精密主动地震监测[J]. 地球物理学报, 52(7): 1808-1815.
- 王伟涛, 王宝善. 2012. 基于聚类分析的多尺度相似地震快速识别方法及其在汶川地震东北端余震序列分析中的应用[J]. 地球物理学报, 55(6): 1952-1962.
- 王永哲, 陈石, 陈鲲. 2021. InSAR 数据约束的 2020 年西藏定日 M_w 5.7 地震源模型及构造意义[J]. 地震, 41(1): 116-128.
- 吴章明, 曹忠权, 申屠炳明, 邓起东. 1990. 西藏申扎南发现地震地表破裂[J]. 地震地质, 12(4): 317-318, 389.
- 徐善辉, 王伟涛, 王力伟, 杨微, 许卫卫. 2020a. 基于甲烷气爆震源的城市地区断层结构探测[C]//2020 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题 51: 城市地下介质成像和探测. 北京: 中国和平音像电子出版社: 3343.
- 徐善辉, 王伟涛, 张云鹏, 许卫卫. 2020b. 基于甲烷气爆震源的区域尺度三维地震走时层析成像[C]//2020 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题 49: 浅地表地球物理进展. 北京: 中国和平音像电子出版社: 3296.
- 徐泰然, 卢占武, 王海燕, 李洪强, 李文辉. 2018. 深地震反射剖面揭示的西藏娘热矿集区上地壳结构[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(02): 556-565.
- 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[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 徐心悦. 2019. 藏南申扎—定结断裂系卡达正断裂晚第四纪活动性及其环境效应[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 张超, 姚华建, 童平, 刘沁雅, 雷霆. 2020. 基于伴随方法的线性台阵背景噪声面波和远震体波联合成像研究[J]. 地球物理学报, 63(11): 4065-4079.
- 张进江, 郭磊, 丁林. 2002. 申扎-定结正断层体系中、南段构造特征及其与藏南拆离系的关系[J]. 科学通报, 47(10): 738-743.
- 张小涛, 姜祥华, 薛艳, 姚琪, 解孟雨, 贤阳, 宋金, 卢显, 于晨, 范争一, 田雷. 2020. 2020 年 3 月 20 日西藏定日 M_w 5.9 地震总结[J]. 地震地磁观测与研究, 41(04): 193-203.

References:

- AKI K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bull. Earthq. Res. Inst., 35: 415-456.
- CAMPILLO M, PAUL A. 2003. Long-range correlations in the

- diffuse seismic coda[J]. *Science*, 299(5606): 547-549.
- CHANG Xu, LI Lin-xin, LIU Yi-ke, WANG Hong-luo. 2008. Seismic profile of Huangzhuang-Gaoliyi fault in Beijing by Mini-sosie method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1503-1510(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yong, LI Yi-jin. 2007. Seismic wave radar research: using active source to detect continental crust structure[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 37(8): 813-819(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yong, XU Yi-he, CAI Hui-teng, LI Wen. 2018. Some thoughts on the earthquake science experiment site—the underground cloud map[J]. *Earthquake Research in China*, 34(2): 165-171(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yong, ZHU Ri-xiang. 2005. Proposed project of “underground bright lump”[J]. *Advances in Earth Science*, 20(3): 485-489(in Chinese with English abstract).
- CLAERBOUT J F. 1968. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response[J]. *Geophysics*, 33(2): 264-269.
- GAO Rong-qing. 1994. Analysis of the physical meaning of gunpowder force from the theory of gas molecule motion[J]. *Explosive Material*, (2): 40-44(in Chinese).
- HA Guang-hao. 2019. Normal Faulting of Central-Southern Yadong-Gulu rift Since Late Cenozoic, Southern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- HE Ri-zheng, GAO Rui. 2003. Some significances of studying north-southern rift in Tibet plateau[J]. *Progress in Geophysics*, 18(01): 35-43(in Chinese with English abstract).
- KALI E, LELOUP P H, ARNAUD N, MAHÉO G, LIU D Y, BOUTONNET E, VAN DER WOERD J, LIU X H, JING L Z, LI H B. 2010. Exhumation history of the deepest central Himalayan rocks, Ama Drime range: Key pressure-temperature-deformation-time constraints on orogenic models[J]. *Tectonics*, 29(2): 1-31.
- LASKE G, MASTERS G. 1996. Constraints on global phase velocity maps from long-period polarization data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B7): 16059-16075.
- LI Guang-ming, PAN Gui-tang, WANG Gao-ming, HUANG Zhi-ying, GAO Da-fa. 2004. Evaluation and prospecting value of mineral resources in Gangdise metallogenic belt, Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(01): 22-27(in Chinese with English abstract).
- LUTTER W J, FUIS G S, THURBER C H, MURPHY J. 1999. Tomographic images of the upper crust from the Los Angeles basin to the Mojave Desert, California: Results from the Los Angeles Region Seismic Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B11): 25543-25565.
- MO X X, HOU Z Q, NIU Y L, DONG G C, QU X M, ZHAO Z D, YANG Z M. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96(1-2): 225-242.
- MONIGLE P W, NABELEK J, BRAUNMILLER J, CARPENTER N S. 2012. Evidence for low-angle normal faulting in the Pumqu-Xianza Rift, Tibet[J]. *Geophysical Journal International*, 190(3): 1335-1340.
- MOONEY W D, PRODEHL C, PAVLENKOVA N I. 2002. Seismic velocity structure of the continental lithosphere from controlled source data[J]. *International Geophysics Series*, 81(A): 887-910.
- SU Jin-bo, WANG Hai-tao, WANG Qiong, ZHANG Wen-lai, JI Zhan-bo, WEI Yun-yun, CHEN Hao, ZHANG Wen-xiu. 2017. A study on the repeatability of large volume airgun seismic source in Hutubi, Xinjiang using cluster analysis method[J]. *Journal of Seismological Research*, 40(04): 613-618(in Chinese with English abstract).
- WANG B S, TIAN X F, ZHANG Y P, LI Y L, YANG W, ZHANG B, WANG W T, YANG J, LI X B. 2018. Seismic signature of an untuned large-volume airgun array fired in a water reservoir[J]. *Seismological Research Letters*, 89(3): 983-991.
- WANG B S, YANG W, WANG W T, YANG J, LI X B, YE B. 2020. Diurnal and Semidiurnal P- and S-wave Velocity Changes Measured Using an Airgun Source[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(1): e2019JB018218.
- WANG Bao-shan, GE Hong-kui, WANG Bin, WANG Hai-tao, ZHANG Yuan-sheng, CAI Hui-teng, CHEN Yong. 2016. Practices and advances in exploring the subsurface structure and its temporal evolution with repeatable artificial sources[J]. *Earthquake Research in China*, 32(2): 168-179(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-ti, ZHUANG Can-tao, XUE Bing, ZHAO Cui-ping, ZHU Zu-yang. 2009. Precisely and actively seismic monitoring[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(7): 1808-1815(in Chinese with English abstract).
- WANG W T, WANG X, MENG C M, DONG S, WANG Z G, XIE J J, WANG B S, YANG W, XU S H, WANG T. 2019. Characteristics of the seismic waves from a new active source based on methane gaseous detonation[J]. *Earthquake Research in China*, 33: 354-366.
- WANG Wei-tao, WANG Bao-shan. 2012. Quick identification of multilevel similar earthquakes using hierarchical clustering method and its application to Wenchuan northeast aftershock sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(6): 1952-1962(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong-zhe, CHEN Shi, CHEN Kun. 2021. Source Model and Tectonic Implications of the 2020 Dingri $M_{w}5.7$ Earthquake Constrained by InSAR Data[J]. *Earthquake*, 41(1): 116-128(in Chinese with English abstract).
- WU Zhang-ming, CAO Zhong-quan, SHENTU Bin-ming, DENG Qi-dong. 1990. Surface ruptures by earthquakes found in Xainza, central Xizang[J]. *Seismology and Geology*, 12(4): 317-318(in Chinese with English abstract).
- XU Shan-hui, WANG Wei-tao, WANG Li-wei, YANG Wei, XU

- Wei-wei. 2020a. Fault structure detection in urban area based on methane explosion source[C]//Proceedings of the annual meeting of China Earth Science Association in 2020. Topic 51: Imaging and detection of urban underground media. Beijing: China Peace Audio Visual Electronic Publishing House: 3343(in Chinese).
- XU Shan-hui, WANG Wei-tao, ZHANG Yun-peng, XU Wei-wei. 2020b. Regional scale 3D seismic travel time tomography based on methane explosion source[C]//Proceedings of the annual meeting of China Earth Science Association in 2020. Topic 49: progress in shallow geophysics. Beijing: China Peace Audio Visual Electronic Publishing House: 3296(in Chinese).
- XU Tai-ran, LU Zhan-wu, WANG Hai-yan, LI Hong-qiang, LI Wen-hui. 2018. Upper crustal structure of Tibetan Niangre ore concentration area revealed by deep seismic reflection profile[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 48(02): 556-565 (in Chinese with English abstract).
- XU Tai-ran. 2018. Deep structure of Tibetan Niaggre ore concentration area revealed by deep seismic reflection profile[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- XU Xin-yue. 2019. Late Quaternary activity and its environmental effects of the N-S trend Kharta fault in Xainza-Dinggye rift, Southern Tibet[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration(in Chinese with English abstract).
- YAMAOKA K, KUNITOMO T, MIYAKAWA K, KOBAYASHI K, KUMAZAWA M. 2001. A trial for monitoring temporal variation of seismic velocity using an across system[J]. Island Arc, 10(3-4): 336-347.
- YIN A, HARRISON T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 211-280.
- ZENG X, THURBER C H. 2016. A graphics processing unit implementation for time-frequency phase-weighted stacking[J]. Seism Res Lett, 87(2A): 358-362.
- ZHANG Chao, YAO Hua-jian, TONG Ping, LIU Qin-ya, LEI Ting. 2020. Joint inversion of linear array ambient noise surface-wave and teleseismic body-wave data based on an adjoint-state method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(11): 4065-4079(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-jiang, GUO Lei, DING Lin. 2002. Structural characteristics of the middle and South segments of the Shenzha-Dingjie normal fault system and its relationship with the southern Tibet detachment system[J]. Science in China, 47(10): 738-743(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiao-tao, JIANG Xiang-hua, XUE Yan, YAO Qi, XIE Meng-yu, ZANG Yang, SONG Jin, LU Xian, YU Chen, YUAN Zheng-yi, TIAN Lei. 2020. Summary of the Dingri M_s 5.9 earthquake in Tibet on March 20, 2020[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 41(4): 193-203 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Y P, WANG B S, LIN G Q, OUYANG Y P, WANG T, XU S H, SONG L L, WANG R C. 2020. Three-dimensional p-wave velocity structure of the Zhuxi ore deposit, south China revealed by control-source first-arrival tomography[J]. Minerals, 10(2): 148.