

王栋, 陈颢, 于大勇等. 2022. 未来城市地下空间探测的关键技术——大陆气枪震源. 地球物理学报, 65(12):4750-4759, doi: 10.6038/cjg2022P0782.

Wang L, Chen Y, Yu D Y, et al. 2022. Seismic airgun—the key technology of future urban underground space exploration. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(12):4750-4759, doi:10.6038/cjg2022P0782.

未来城市地下空间探测的关键技术 ——大陆气枪震源

王栋¹, 陈颢^{1*}, 于大勇¹, 胡久鹏², 徐逸鹤², 杨微², 王涛¹

1 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 近年来,我国不断加快的城市化进程加大了各级城市对地下空间的利用需求.因此,探明城市地下空间,对城市的快速发展至关重要.在国家与社会对城市施工更安全、更环保的作业要求下,炸药等地球物理勘探的传统震源已经无法继续满足在城市内完成地下空间探测任务的需求.为了探寻可供城市勘探使用的新型震源,2017年12月14—15日,我们在南京市区的羊山公园内,开展了大陆气枪震源在城市中的首次试验.本次试验采用容量为4.1 L的气枪震源,结果显示其在城市小规模水体中激发的脉冲信号处于25~35 Hz频段内,振荡信号处于4~7 Hz频段内,信号可重复性与信噪比极高,可对半径2.5 km范围内的城市地下空间进行有效探测,试验过程不对城市运行与居民生活造成影响.大陆气枪震源在城市中的成功试验,突破了在城市内开展传统地球物理探测的限制,可有效满足对地下空间探测的技术需求,在我国城区水体规模庞大的背景下,大陆气枪震源有望成为解决未来城市地下空间探测的关键技术.

关键词 城市地下空间; 大陆气枪震源; 地下空间探测

doi:10.6038/cjg2022P0782

中图分类号 P315

收稿日期 2021-10-21, 2022-07-25 收修定稿

Seismic airgun—the key technology of future urban underground space exploration

WANG Li¹, CHEN Yong^{1*}, YU DaYong¹, HU JiuPeng², XU YiHe², YANG Wei², WANG Tao¹

1 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract The rapid urbanization in China, which soared to 63.89% and increased by 30% in the past two decades, has boosted the demand for underground space utilization in the ever-expanding cities. Thus, the exploration of urban underground space is a critical prerequisite for the security of urban development. Out of the concern for public safety and environmental protection in the populated urban area, traditional seismic sources in geophysical exploration like dynamite are no longer suitable for underground exploration in cities. To find an environmental-friendly seismic source for urban exploration, we performed a seismic airgun experiment in Yangshanhu lake, a small water body located in an urban park of Nanjing. This experiment is the first of its kind in a populated city environment. The results revealed that the 4.1L volume seismic airgun could generate pulse signals with dominant frequencies between 25 Hz and 35 Hz and oscillation signals

基金项目 国家自然科学基金(41790463), 国家重点研发计划(2018YFC1503202-01)资助.

第一作者简介 王栋,男,1997年生,博士研究生,主要从事气枪震源探测技术与海洋地球物理研究. E-mail: li_wang@smail.nju.edu.cn

***通讯作者** 陈颢,男,1942年生,教授,中国科学院院士,长期从事新型主动源技术、岩石物理学等地球物理学研究. E-mail: yongchen@nju.edu.cn

in the frequency band between 4 Hz and 7 Hz, with high repeatability and signal-noise ratio. The effective radius of this small-volume seismic airgun can reach 2.5 km, and the ground movement during the experiment did not affect city functions and the life of residents. The successful experiment of the seismic airgun in a small waterbody validates its inland usage and satisfies the needs of prospecting urban exploration. Considering the unprecedented scale of urban water areas in China, the seismic airgun technique can become one of the key technologies for urban underground space exploration in the future.

Keywords Urban underground space; Seismic airgun; Underground space exploration

0 引言

进入 21 世纪以来,中国城市化进程加速推进。根据第七次全国人口普查结果,中国城市化率达到 63.89%,且过去 20 年的增幅超过 30%。在城市高速发展的背景下,城市地下空间的利用是城市发展中至关重要的一环,其作为城市的载体奠定了城市快速发展的基础。同时,城市地下空间的安全保障也是城市安全发展的前提。目前,北京、上海等特大型城市的地下空间利用深度在 50 m 左右,一线城市达到 30 m,其他城市在 20 m 以内,相较于新加坡等发达国家对地下空间大于 100 m 的利用深度,我国目前对城市地下空间的利用水平还相对滞后;与此同时,城市地下空间容纳了供水供电管线、燃气电力管道等基础公共设施,但近年来许多城市因地下空间利用不合理而造成了大雨内涝、地面塌陷、地下管线泄露等诸多问题。随着城市人口的不断增长,城市地下空间的安全问题严重影响了人民的生命财产安全,给城市运行和长期发展带来了不利因素。因此,对城市地下空间的有效探明,是城市地下空间安全开发和高效利用的基础,城市地下空间探测也成为了深地探测等国家战略发展计划的重要方向。

地球物理探测作为一种无损、高效的方法,是探测城市地下空间的有效手段。随着城市的不断发展,城市地球物理也得到了广泛研究(Liu and Chan, 2007; Miller, 2013; Schreilechner and Eichkitz, 2013),逐渐成为地球物理与城市发展科学的新兴领域。我国自上个世纪 60 年代开始对城市地下空间进行探查,进入 21 世纪以来,逐步开展了对部分城市地下三维空间结构的综合探测(郝英红等, 2021; 薛涛等, 2021)。目前成都、武汉、雄安等城市已经开展了较为全面的地球物理综合探测与评价研究,对城市的地下空间结构有了较为清晰的认识(李华等, 2020; 马岩等, 2020; 赵锴等, 2017)。

当前,开展城市地下空间探测的地球物理方法主要包括:重力探测、探地雷达、高密度电阻率、瞬变电磁法、测井与浅层地震勘探等(王栩等, 2020; 赵锴等, 2017)。但城市中存在建筑分布密集、城市电缆产生游离电场、大量金属构件等因素的干扰,且城市地下空间探测对测深和分辨率有一定要求(武斌等, 2019)。因此,抗干扰能力强、探测深、分辨率高的主动源地震勘探方法得到了广泛应用(高景华等, 2007; 杨吉武等, 2021; 周长江等, 2019)。

1 新型人工主动源—气枪的应用

在主动源地震勘探中,需要选择激发能量大、频带宽的人工震源,以保证较好的数据质量和探测效果。目前,在陆上勘探中,主动源勘探使用的震源包括炸药震源、落锤震源、电火花震源、可控震源车等,其中炸药震源当量大、激发信号信噪比高,是使用最广泛的人工震源(陈颀和李宜晋, 2007)。然而,在人口密度大、影响因素复杂的城市中,人工震源面临着环境污染小、施工周期短、破坏性低、对城市交通与社会活动影响弱等严格要求。同时,震源的可重复性对监测城市地下结构变化也尤为重要,因此炸药不宜继续作为城市主动源勘探的主要人工震源。其他主要使用的震源中,落锤震源和电火花震源激发的能量相对较低,可控震源车虽然激发能量较大,但由于车体庞大、对路况要求高且噪声污染大,在施工中会阻碍城市交通、影响城市运行与居民生活(陈颀和李宜晋, 2007; 陈颀等, 2007a)。因此,传统的地球物理手段已经无法满足城市地下空间探测的要求,地球物理领域急需新型人工震源来满足我国日益增长的城市地下空间探测需求。

气枪震源是一种放置于水体中的新型人工震源,由美国 Bolt 公司 Stephen Chelminski 于 1966 年发明(Chelminski, 1966),从 20 世纪 80 年代开始,气枪开始被广泛应用于海洋地震勘探。进入 21

世纪,我国的地球物理学家开始尝试将气枪震源引入陆上探测(陈颢等, 2017),目前已开展了多次大陆气枪震源试验(杨微等, 2021),并在云南宾川、新疆呼图壁、甘肃张掖和永靖建立了四个固定气枪信号发射台(Tian et al., 2018; Wang et al., 2012; 陈颢等, 2007b; 郭晓等, 2020; 魏斌等, 2016; 张元生等, 2016). 试验结果表明,大陆气枪震源作为一种新型的人工震源具有巨大的探测优势:

(1)绿色、无污染. 气枪激发无污染物产生,不会对水中生物造成影响.

(2)能量转化效率高. 131 L 的气枪阵列在 2000 psi 的工作压力下产生的地震波能量可达一次 $M_L 0.7$ 级地震产生的地震波能量,产生地震波能量的效率约为炸药的 10 倍(陈颢等, 2017).

(3)可重复性高. 气枪阵列激发信号在一年内的相关系数始终保持在 95% 以上,震源的可重复性极高(魏斌等, 2016).

(4)安全、施工影响小. 气枪激发时始终放置于水体中,噪声水平低,不影响城市人群的日常生活,且不会破坏地表结构.

这些特点使得大陆气枪震源具有成为城市地下空间探测主动源的巨大潜力.

2 大陆气枪震源在城市中的首次应用

大陆气枪震源在城市中的应用,具有一定的挑战. 目前的大陆气枪震源主要采用大容量气枪(4 条气枪组合阵列,每枪 33 L),并放置在水库等大型水体中进行激发. 然而人口密度大的城市环境对于大型设备场地、施工噪声、施工时间和城市运行影响的要求严苛,不具备在大规模水体中进行大容量气枪震源激发的试验条件. 同时,大陆气枪震源的激发效果主要受到气枪在水体中沉放深度的影响,更深的气枪沉放深度可得到更好的激发效果(Wei et al., 2018; 黄艳丹等, 2018). 当前使用的大容量气枪震源主要放置在大型水库中,水深数十米,气枪沉放深度主要在 15~35 m 范围内. 但大部分城市水体的深度在 5~10 m 以内,难以满足大容量气枪沉放深度的要求,激发效果难以验证. 因此,大陆气枪震源尚未有过在城市中的应用尝试.

在此背景下,南京大学地球科学与工程学院与中国地震局地球物理研究所合作,于 2017 年 12 月 14—15 日在江苏省南京市栖霞区的羊山公园中,开展了大陆气枪震源在城市中的首次激发试验. 在本

次试验中,我们布设了一条长约 5 km、由 16 台短周期地震仪组成的测线(图 1),激发源为美国 Teledyne Bolt 公司的 1900LL 型小容量气枪(图 2a),放置于公园内的羊山湖中,激发压力 15 MPa,气枪容量 4.1 L,仅为大容量气枪震源总容量的 1/32. 气枪震源控制系统位于岸边,用以控制气枪激发、接收 GPS 时间与位置信号等,激发时间精度可达微秒级.

羊山公园位于南京市栖霞区的仙林大学城东部(图 2b),占地 1.34 km²,处于仙林副城中心区,临近南京大学、南京中医药大学等高校,周边住宅众多,人口密集,交通路网发达,满足在城市人口密集区域试验大陆气枪震源应用效果的测试条件. 公园内的羊山湖为本次试验的激发水体,湖面面积约为 0.6 km²,实测水深最深约 2.5 m,是典型的小规模城市水体环境,为大陆气枪震源在城市内激发提供了理想

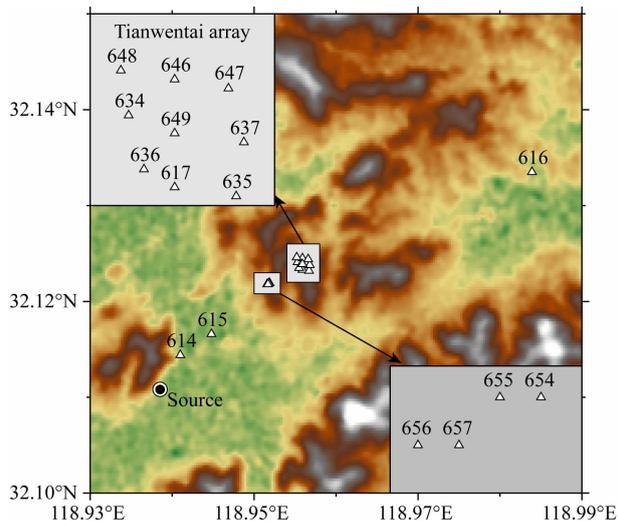


图 1 羊山湖气枪激发试验观测系统

Fig. 1 Observation system of Yangshanhu lake seismic airgun excitation experiment



图 2 (a) Teledyne Bolt 1900LL 型气枪震源; (b) 试验区域卫星图(红色标记为台站位置)

Fig. 2 (a) Teledyne Bolt 1900LL seismic airgun source; (b) Satellite image of experimental field (Red symbols are locations of seismic stations)

的试验环境。

本试验的观测系统于 2017 年 12 月 14 日安装完毕,并在 12 月 14—15 日的日间持续工作。气枪震源沉放处水深 2.5 m,沉放深度 2 m,为极浅水域激发。在系统调试阶段,采用手动激发方式,根据激发效果调整激发参数,待效果稳定后,采用程序控制定时激发,每 30 s 激发一次,共激发 373 次。

3 试验结果与分析

本文对地震仪记录到的气枪数据进行了处理,处理流程参考大容量气枪震源的数据处理流程(翟秋实等, 2016)。处理中首先根据气枪震源激发时间表,对连续记录进行事件切分,得到了每次激发被各个地震台站接收到的事件信号,对事件信号进行预处理后进行线性叠加,并滤波至 1~50 Hz。对经过处理得到的叠加信号,本文通过计算相关系数、计算信噪比、时频分析、频率-波数分析(F-K 分析)等方法对小容量气枪震源的激发信号特征进行了分析。

3.1 相关系数

本研究首先分析了该小容量气枪震源激发信号的可重复性参数。我们选取了布设在离震源最近的 614 地震台(图 1,震中距 450 m)在 2017 年 12 月 15 日上午记录到的 100 次激发信号,对这 100 次激发信号进行线性叠加和归一化,并将该叠加波形作为参考波形,用 614 台站在 100 次激发中每次激发信号的波形与参考波形进行相关计算后,得到了每次气枪震源激发信号的相关系数(图 3)。结果显示,在 100 次激发中,相关系数几乎都在 95% 以上,并在开始激发后随着激发状态的稳定逐渐上升。在第 50 次

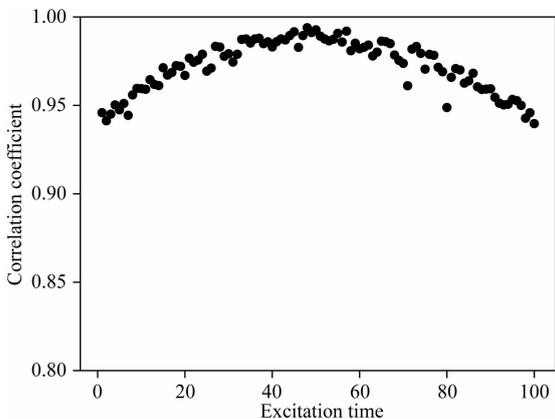


图 3 614 台气枪震源激发信号相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient of seismic airgun signals at station 614

激发前后,相关系数达到 99%,之后相关系数缓慢下降,这可能与试验一段时间后气枪未能满气激发有关。由于 30 s 的气枪激发间隔时间较短,在试验后段可能由于注气不足,导致了气枪信号的相关性逐渐下降,但整体的相关系数仍可保持在 95% 以上,表明了气枪激发信号极高的可重复性。

气枪信号在工作压力稳定的情况下,会受到沉放深度的影响(Chen et al., 2014; 黄艳丹等, 2018)。相比于放置于水库等大规模水体中的大容量气枪震源,羊山湖气枪激发试验的水体规模很小,水深极浅,且试验当天有一定降雨量,更易使气枪激发信号受到影响。在此试验环境下,气枪信号的相关系数依然保持在 95% 以上,处于重复地震的相关系数阈值之上。这表明小容量气枪震源即使在易受影响的的城市小规模水体中,仍然具有极高的可重复性,抗干扰能力强。

3.2 信噪比计算

由于小容量气枪震源激发信号具有高可重复性,本研究对记录到的多次激发信号进行线性叠加来提高信噪比,并分析了对气枪震源信号进行识别的可靠性。首先选取布设在南京大学天文台处的 636 台站(图 1,震中距 2.06 km),将其在 2017 年 12 月 15 日中记录到的单次激发和 100 次激发叠加后的三分量波形进行了对比。结果显示,单次激发事件的三分量波形中(图 4a),虽然随机噪声有一定干扰,但三个分量的 P 波初至相对明显,能够有效识别气枪激发信号。经过 100 次叠加后的三分量波形,随机噪声被大幅度压制,震相清晰,信噪比极高(图 4b)。其中, E-W、N-S 和 Z(垂直)三个分量单次激发波形的均方根信噪比(信号窗均方根/噪声窗均方根)分别为 1.53、2.23 和 2.21,叠加后分别为 13.87、18.92 和 17.55。三个分量的信号经过 100 次叠加后,信噪比分别提升了 9.06 倍、8.48 倍和 7.94 倍。

其次,本研究观察了信号随震中距的变化特征(图 5)。将各台站 Z 分量接收到的信号经过 100 次叠加后按震中距排列(图 5a),结果显示在 2.5 km 范围内都具有较高的信噪比,初至信号明显,视速度在 $3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。同时,单次激发与 100 次叠加的信噪比水平对比结果(图 5b)显示,100 次叠加处理可使气枪信号在 2.5 km 震中距内提升一个数量级。该结果表明,4.1 L 的小容量气枪震源在小规模水体中的单次激发信号可被震中距至少在 2.5 km 内的地震仪清晰记录,多次叠加处理后,气枪激发信号的信噪比将大幅度提升。

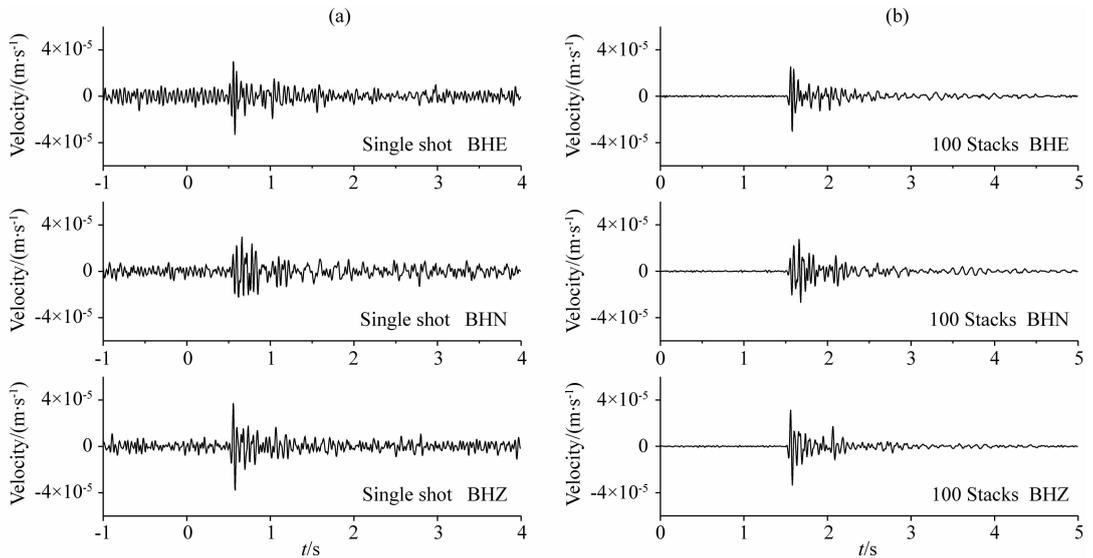


图4 636 台站气枪震源激发波形对比(5~30 Hz 带通滤波, 0 s 为激发零时)

(a) 单次激发波形; (b) 100 次叠加后波形。

Fig. 4 Comparison of seismic airgun signals at station 636 (5~30 Hz bandpass filtered, 0 time is the excitation moment)

(a) Single-shot waveform; (b) 100-time stacked waveform.

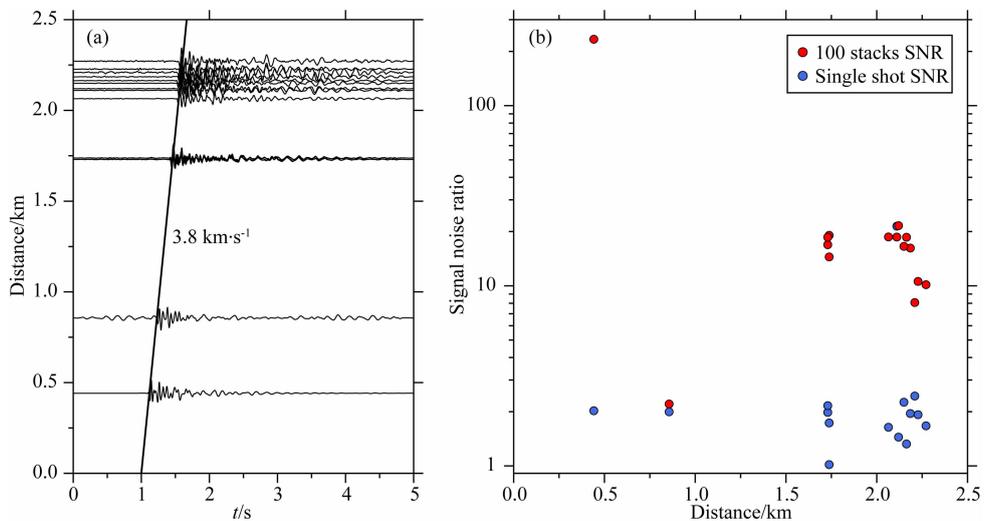


图5 气枪震源信号随震中距变化的特征

(a) Z 分量 100 次叠加波形随震中距的变化(直线为 $3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 视速度); (b) (a) 中波形信噪比随震中距的变化。

Fig. 5 Characteristics of seismic airgun signal varied with epicenter distance

(a) Z component 100-time stacked waveforms varied with epicenter distance. The line showed the $3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ apparent velocity;

(b) Signal-noise ratios of waveforms in (a) varied with epicenter distance.

3.3 时频分析

本研究选取了 614、654 和 647 三个短周期地震台(图 1,震中距分别为 0.44 km、1.74 km 和 2.27 km)的 100 次叠加信号进行时频分析。在分析前,考虑到本次试验区较小,观测信号受到传播路径上几何扩散的影响相对较大,且观测台站布设在城市区域中,容易受到城市地表松散土层或沉积层的影响。因此,我们首先采用 HVSR 方法测算了每个台站记录信号的优势频率,讨论了台站下方松散沉积层对接收

信号的影响。之后对波形信号进行了几何扩散校正,并将校正后的信号进行了时频分析。

HVSR 方法(Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio)是一种利用单个地震台站接收的随机噪声信号计算台站下方松散沉积层厚度的方法(Nakamura, 1989)。该方法计算三分量地震仪的水平分量信号和垂直分量信号在频率域的比值,当地表松散沉积层与基岩之间存在较大的波阻抗差异时,比值结果会呈现出明显的峰值频率,该频率与松散沉积层的卓越频率一致,可

用于估计沉积层厚度和场地放大效应(Nakamura, 2019; Parolai et al., 2002). 本研究对所有台站进行了 HVSR 曲线计算(图 6), 计算时选取未进行气枪震

源激发的时段以避免气枪震源的影响. HVSR 结果表明, 除 615、616 台站外的所有台站未出现明显的峰值频率, 表明下方不存在明显的沉积层. 而 615 和 616 台站的峰值频率分别为 1.55 Hz 和 2.95 Hz, 参考后文的时频分析结果(图 7)可知, 其峰值频率与气枪信号所在主频的频段差异较大, 并不会对气枪信号主频段内的信号产生影响. 因此, 本次试验的观测系统并未受到城市地表松散沉积层的明显影响.

确定城市地表沉积层不会对结果产生明显影响后, 笔者对接收信号振幅进行了几何扩散校正. 结合图 5 中的视速度和图 7 中得到的信号主频, 计算得到该小容量气枪震源激发信号的波长约为 100 m. 本次试验布设的所有台站震中距均在信号的三倍波长距离外, 因此可将所有接收到的信号作为远场信号进行处理. 参考地震波在均匀各向同性介质中的远场传播公式(Aki and Richards, 2002)可知, 位移与震

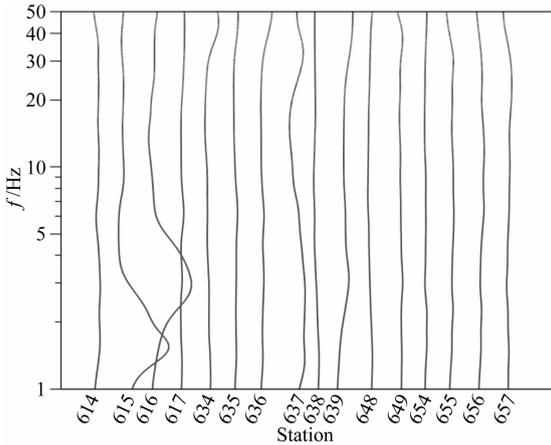


图 6 不同台站 HVSR 曲线对比

Fig. 6 Comparison of HVSR curves between different

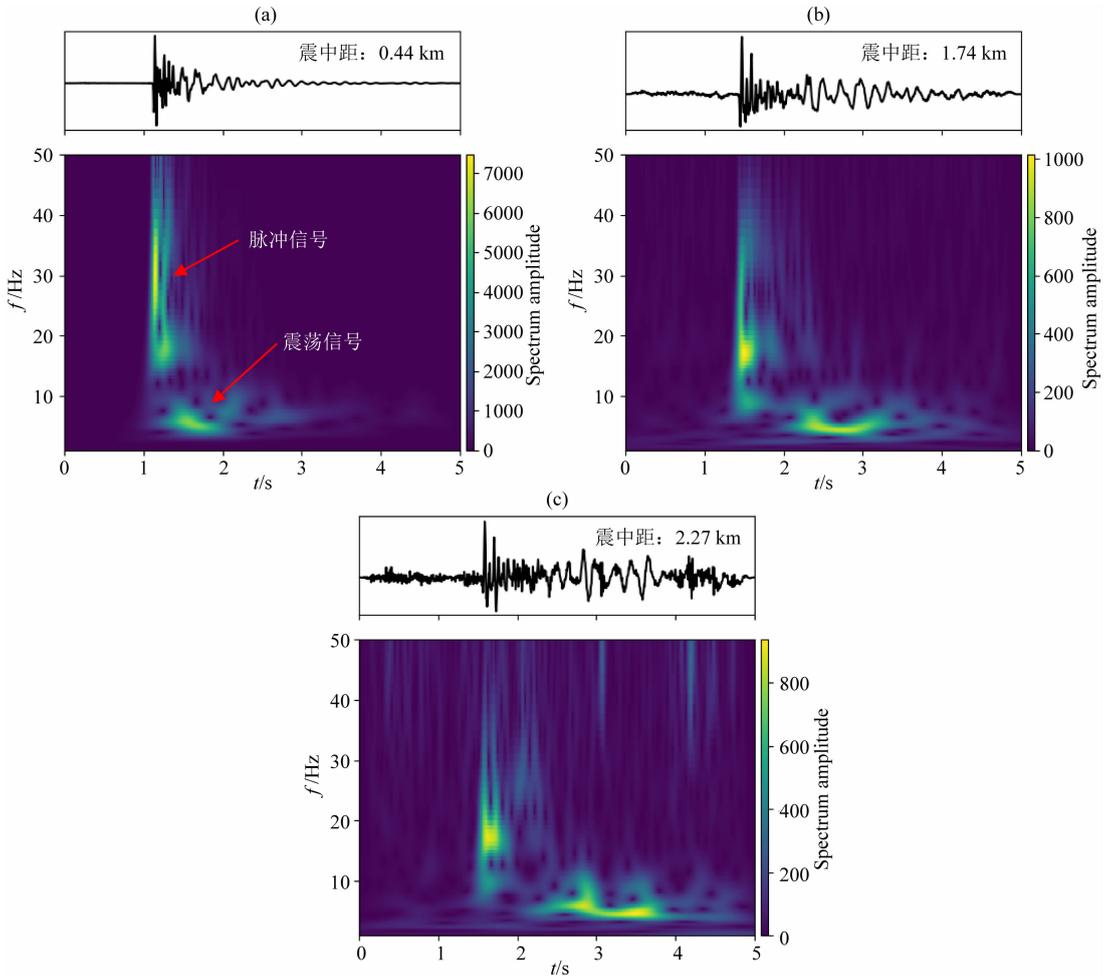


图 7 气枪信号时频分析

(a) 614 台站; (b) 654 台站; (c) 647 台站. 每图上部为 100 次叠加 Z 分量波形 (1 s 为激发零时), 下部为波形时频图

Fig. 7 Time-frequency analysis of seismic airgun signals

(a) Station 614; (b) Station 654; (c) Station 647. The top row of each plot is the 100-time stacked waveform of the vertical component (1 second is the excitation time). The bottom row of each plot is the time-frequency representation of the stacked waveform.

中距的关系为 $u \propto \gamma^{-1}$ 。因此对每个台站的接收信号乘上震中距 γ ，将不同震中距带来的几何扩散影响校正后，计算得到的时频特征见图 7。从中可见，气枪信号存在两个部分的主频，分别集中于 25~35 Hz 频段内和 4~7 Hz 频段内。其中处于 25~35 Hz 频段内的高频信号在最近的 614 台站能量极强，到时和弛豫时间短，但能量在稍远的两个台站中迅速衰减，因此该信号为气枪震源激发的高频脉冲信号；主频在 4~7 Hz 频段内信号的能量在 614 台相比 25~35 Hz 频段内信号能量较弱，有相对明显的弛豫时间，为气枪激发的振荡信号。观测系统内其他台站的时频分析结果也进一步表明，小容量气枪震源的脉冲信号处于 25~35 Hz 频段内，振荡信号处于 4~7 Hz 频段内。由于该次试验为极浅水域激发，因此气枪的振荡信号可能发育较差，导致其能量较弱。此外，信号在 15 Hz 左右能量较强，结合试验场地条件推测，羊山湖的水底界面复杂，该部分信号是由水体形状不规则所引起的。

由于气枪激发信号会同时受到激发条件和水体环境(水体大小、形状等)的影响，在恒定激发条件下，气枪信号在不同水体中也会表现出不同波形和时频特征(Chen et al., 2014; 杨微等, 2020)。图 7 结果表明，小容量气枪在羊山湖中激发信号波形和时频特征较为复杂，其时频特征与云南宾川气枪发射台激发信号的时频特征较为相似(胡久鹏等, 2017)。据此推断，羊山湖水体底部结构和形状复杂，激发水深较浅，对气枪激发信号存在一定影响，需要对此类试验条件进行进一步的试验探究。

3.4 F-K 分析

F-K 分析方法早期由 Capon(1969)提出，后来被广泛应用在地震台阵分析中(唐明帅等, 2010)。该方法通过对台阵数据进行分析，可以获得地震事件的反方位角和慢度。本次试验中，我们选取了布设在南京大学天文台的小型台阵(617、634-637、646-649 共 9 个台站)的 100 次叠加数据进行了 F-K 分析，设置慢度网络拐点为 $-2.0 \sim 2.0 \text{ s} \cdot \text{km}^{-1}$ ，步长为 $0.005 \text{ s} \cdot \text{km}^{-1}$ ，滑动窗口为 0.4 s ，滑动步长为 0.05 s ，最终计算得到了气枪信号的 F-K 分析结果(图 8)。结果以极坐标图表示，极径为慢度值，极角为反方位角值。结果显示，反方位角范围在 205° 到 215° 之间，慢度值在 $0.28 \sim 0.3 \text{ s} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间。并且在该结果中，气枪信号的能量明显高于其他干扰信号，聚焦效果良好。进一步分析发现，气枪信号的反方位角约为 213° ，慢度值约为 $0.28 \text{ s} \cdot \text{km}^{-1}$ ，可得气枪信号从水中激发到地震

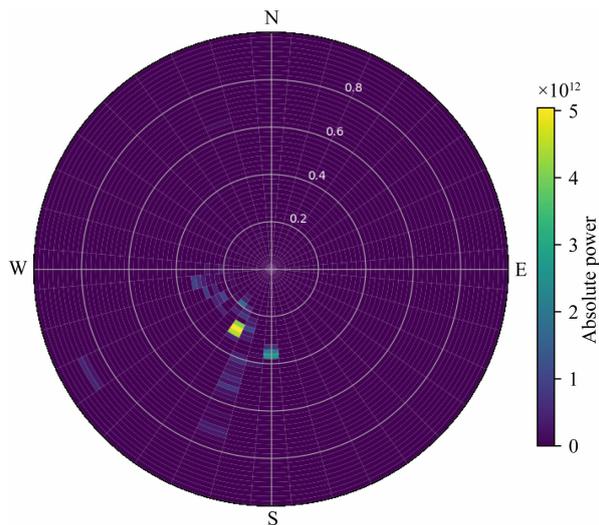


图 8 南京大学天文台小型台阵 F-K 分析结果

Fig. 8 F-K analysis of the small seismic array at Nanjing University observatory

台站接收路径上的平均速度为 $3.57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该速度与气枪信号的视速度大致相符(图 5)，且反方位角与地震台阵间的实际反方位角($\sim 225^\circ$)基本吻合，验证了分析结果的准确性。

以上分析结果表明小容量气枪震源在城市小规模水体中具有良好的激发效果，激发信号的相关系数和信噪比高，震相到时清晰，可对浅表地层速度进行有效的探测，表明了小容量气枪震源在城市应用中的有效性。

4 结论

2017 年 12 月在南京开展的羊山湖气枪激发试验，为新型人工主动源—大陆气枪震源在城市内的首次应用。本次试验使用了容量为 4.1 L 的大陆气枪震源，放置在南京市栖霞区羊山公园内面积不足 1 km^2 的羊山湖中进行激发，湖深 2.5 m，气枪震源沉放深度 2 m。通过分析气枪震源的激发信号，结果表明：沉放在小规模水体中的小容量气枪震源可激发相关系数在 95% 以上的地震信号，具有很高的信号可重复性。在城市中激发信号经过 100 次叠加后，信噪比可获得极大提升；气枪激发的脉冲信号处于 25~35 Hz 频段内，振荡信号处于 4~7 Hz 频段内。通过 F-K 分析，验证了气枪信号对浅层速度探测的有效性，分析得到了气枪激发信号沿北东方向(反方位角 213°)的平均传播速度约为 $3.57 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表明了大陆气枪震源在城市小规模水体中的良好应用效果，满足城市地下空间的探测需要。

5 应用前景

本次羊山湖气枪激发试验对大陆气枪震源在城市中心区域小规模水体中的应用效果进行了初步研究. 结果表明, 沉放在小规模水体中的小容量气枪震源信号具有很高的可重复性, 在城市中激发同样可以得到具有高信噪比的信号. 同时, 小容量气枪震源的信号主频具有与过往研究相似的特征(陈颢等, 2017; 胡久鹏等, 2017), 这表明小容量气枪震源在城市中同样可以完成对城市地下空间的探测任务. 此外, 本文通过 F-K 分析方法对气枪激发信号的反方位角与慢度进行分析, 得到了气枪信号在羊山湖附近区域浅表的传播速度, 分析结果合理可靠, 表明小容量气枪震源具有对半径 2.5 km 范围内城市地下空间进行有效探测的能力, 验证了大陆气枪震源作为一种安全高效的地下空间探测主动源的有效性.

此外, 气枪的高可重复性使得气枪信号可用于监测地下应力和波速的微弱变化(陈颢等, 2017). 重复性和精度高的走时测量技术是观测地下结构应力和波速变化的关键(Wang et al., 2008). 目前, 背景噪声技术是对地下结构成像、地下波速和水位动态变化特征进行监测的重要手段(Li et al., 2016; Liang and Langston, 2009; Shapiro and Campillo, 2004), 但背景噪声源会随着季节而改变, 并需要叠加至少一个月的连续记录数据来保证结果的稳定性(Stehly et al., 2007; 顾悦等, 2021; 杨建文等, 2021; 于雯等, 2021), 同时背景噪声提取的面波相对低频, 使得城市内的噪声成像分辨率受限. 相比之下, 大陆气枪震源实验获得的信号主频普遍较高(Wang et al., 2018; 陈颢等, 2017), 在地下结构探测过程中可具有较高的空间分辨率, 同时大陆气枪还可激发有效面波用于地下结构探测与介质变化监测(于雯等, 2021). 本次实验中使用的的小容量气枪震源所激发的信号可重复性在 95% 以上, 可对浅表波速和应力的动态变化特征进行有效监测(Wang et al., 2020). 采用本实验中 30 s 的激发间隔, 可使得大陆气枪震源在城市中, 每不到一小时就可获得具有极高信噪比的地震信号, 极大程度地缩短了对城市浅表特征动态监测所需时间, 大幅提高了监测效率. 为城市浅表的动态监测提供了良好的激发震源选择.

本次试验是大陆气枪震源在极浅水域激发的首次尝试, 试验结果验证了大陆气枪震源在城区水体

中激发的有效性, 突破了过往在水库等大型水体中试验激发的水体规模限制. 另一方面, 试验过程中, 气枪震源的准备与激发过程无需对城市运行状态提出较大要求, 不会对所在水域和周边环境产生较大影响. 同时, 气枪震源激发不影响水域生物的生存环境和居民生活, 突破了传统地球物理勘探技术的限制. 我国水域资源丰富、类型多样, 目前在全国 28 个省(自治区、直辖市)范围内, 共有 2693 座面积在 1 km² 以上的自然湖, 总面积约占我国国土面积的 0.9%(马荣华等, 2011). 本次试验所在的羊山湖为面积不足 1 km² 的城市人工湖, 此类水域在全国数量更大、分布更为广泛. 这表明采用大陆气枪震源作为城市中应用的新型主动源, 可对我国大部分城市进行有效的地下空间探测. 在我国城区水域面积辽阔、城市规模庞大、城市地下空间探测需求强烈的背景下, 大陆气枪震源具有十分广阔的应用前景, 将成为未来城市地下空间探测的关键技术.

致谢 感谢三位审稿专家对本文的宝贵意见和建议, 感谢中国地震局地球物理勘探中心对本次试验野外数据采集工作的支持. 感谢阮友谊副教授对本文内容的审阅和修改贡献.

References

- Aki K, Richards P G. 2002. Quantitative Seismology. 2nd ed. Sansalito; University Science Books.
- Capon J. 1969. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8): 1408-1418.
- Chelminski S V. 1966-05-03. Acoustic wave impulse generator repeater: US, 15185361A.
- Chen M, Yang W, Wang W T, et al. 2014. Influencing factors of seismic signals generated by un-tuned large volume airgun array in a land reservoir. *Earthquake Science*, 27(4): 365-376.
- Chen Y, Li Y J. 2007. Seismic wave radar research: using active source to detect continental crust structure. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 37(8): 813-819.
- Chen Y, Wang B S, Ge H K, et al. 2007a. Proposed of transmitted seismic stations. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 22(5): 441-446.
- Chen Y, Zhang X K, Qiu X L, et al. 2007b. A new method of artificially excitation of seismic waves on land. *Science Bulletin* (in Chinese), 52(11): 1317-1321.
- Chen Y, Wang B S, Yao H J. 2017. Seismic airgun exploration of continental crust structures. *Science China Earth Sciences*, 60(10): 1739-1751.
- Gao J H, Xu M C, Chai M T, et al. 2007. Detection of active faults by shallow seismic survey in urban areas. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 29(S1):

- 133-137, 253, 7-8.
- Gu Y, Pei S J, Liang S S, et al. 2021. Monitoring of groundwater level change by seismic ambient noise method in Linyi Area of Shandong Province. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 37(4): 857-867.
- Guo X, Zhang Y S, Liu X Z, et al. 2020. Development and prospects of active-source construction in Gansu Province. *China Earthquake Engineering Journal* (in Chinese), 42(5): 1146-1150.
- Hao Y H, Li X H, Chen Z L, et al. 2021. Study on 3D evaluation method of geological environment quality for urban underground space development; a case study of Binhu New District, Hefei City. *Geography and Geo-Information Science* (in Chinese), 37(1): 11-16.
- Hu J P, Wang B S, Chen Y. 2017. The influence of water shape on land airgun triggered signals. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 40(4): 543-549.
- Huang Y D, Li J, Jin X, et al. 2018. Experimental research on the effects of explosion depth on the air-gun source excitation wave signals. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 40(4): 430-439.
- Li C, Yao H J, Fang H J, et al. 2016. 3D near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei urban area, China. *Seismological Research Letters*, 87(4): 882-892.
- Li H, Wang D H, Zhang W, et al. 2020. Application research of geophysical exploration technology in the investigation of shallow geological structure in Chengdu. *Geology in China*. 1-23 [2022-10-09] (in Chinese). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201207.1651.008.html>
- Liang C T, Langston C A. 2009. Three-dimensional crustal structure of eastern North America extracted from ambient noise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B3): B03310.
- Liu L B, Chan L S. 2007. Sustainable urban development and geophysics. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(3): 243-244.
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, et al. 2011. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 283-289.
- Ma Y, Li H Q, Zhang J, et al. 2020. Geophysical technology for underground space exploration in Xiongan New Area. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 41(4): 535-542.
- Miller R. 2013. Introduction to this special section; urban geophysics. *The Leading Edge*, 32(3): 248-249.
- Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1): 25-33.
- Nakamura Y. 2019. What is the nakamura method? *Seismological Research Letters*, 90(4): 1437-1443.
- Parolai S, Bormann P, Milkereit C. 2002. New relationships between V_s , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6): 2521-2527.
- Schreilechner M G, Eichkitz C G. 2013. Imaging of a shallow gas horizon using high-resolution reflection seismic within urban Vienna, Austria. *The Leading Edge*, 32(3): 284-290.
- Shapiro N M, Campillo M. 2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 31(7): L07614.
- Stehly L, Campillo M, Shapiro N M. 2007. Traveltime measurements from noise correlation; stability and detection of instrumental time-shifts. *Geophysical Journal International*, 171(1): 223-230.
- Tang M S, Wang H T, Duan T S. 2010. Relocating the seismic sequence of YuTian $M_s 7.3$ earthquake in 2008 using the data of Xinjiang Hetian seismic array. *Inland Earthquake* (in Chinese), 24(3): 227-235.
- Tian X F, Yang Z X, Wang B S, et al. 2018. 3D seismic refraction travel-time tomography beneath the middle-lower Yangtze River Region. *Seismological Research Letters*, 89(3): 992-1002.
- Wang B S, Zhu P, Chen Y, et al. 2008. Continuous subsurface velocity measurement with coda wave interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B12): B12313.
- Wang B S, Ge H K, Yang W, et al. 2012. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(5): 49-50.
- Wang B S, Tian X F, Zhang Y P, et al. 2018. Seismic signature of an untuned large-volume airgun array fired in a water reservoir. *Seismological Research Letters*, 89(3): 983-991.
- Wang B S, Yang W, Wang W T, et al. 2020. Diurnal and semidiurnal P - and S -wave velocity changes measured using an airgun source. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(1): e2019JB018218.
- Wang X, Wang Z H, Yan J Y, et al. 2020. Application of geophysics in urban underground space exploration. //Proceedings of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union in 2020. Chongqing, 3579-3581.
- Wei B, Su J B, Wang H T, et al. 2016. Site selection and construction of Hutubi airgun source signal transmitting seismic station and its characteristic of source. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 222-230.
- Wei C X, Qin M Z, Zhang Y S, et al. 2018. Airgun excitation experiments at different placement depths in the Qilian Mountain of Gansu Province, China. *Seismological Research Letters*, 89(3): 974-982.
- Wu B, Li S J, Chen N, et al. 2019. Research on geophysical methods of urban underground space exploration in Chengdu. *Acta Geologica Sichuan* (in Chinese), 39(S1): 194-202, 224.
- Xue T, Shi Y J, Zhu X D, et al. 2021. Research on 3D modeling method for evaluation of urban underground space resources; a case study in Shanghai. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 28(4): 373-382.
- Yang J W, Ye B, Gao Q, et al. 2021. Study of the wave velocity changes in the focal area of the Tonghai $M_s 5.0$ earthquake and the Mojiang $M_s 5.9$ earthquake by ambient noise. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 44(4): 529-540.
- Yang J W, Zhao L B, Huang S H. 2021. Application of shear wave prospecting method in the detection of urban buried faults. *Chinese Journal of Engineering Geophysics* (in Chinese), 18

(3): 361-366.

- Yang W, Wang B S, Wang W T, et al. 2020. Influence factors and control methods for the repeatability of air gun source in land reservoirs. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 40(4): 1-9.
- Yang W, Wang B S, Zhang Y P, et al. 2021. Review on advances in the detection technology using airgun source fired in continental water. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 64(12): 4252-4268, doi: 10.6038/cjg2021P0282.
- Yu W, Yang X Y, Yu J, et al. 2021. Temporal variations of surface wave amplitude in the data collected from Hutubi, Xinjiang airgun experiment. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 44(1): 22-32.
- Zhai Q S, Yao H J, Wang B S. 2016. Study on the deconvolution method and processing flow of air-gun source data. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 295-304.
- Zhang Y S, Guo X, Qin M Z, et al. 2016. The construction of active source repeated monitoring in the Qilian Mountains of Gansu Province. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 32(2): 209-215.
- Zhao P, Jiang J, Wang X R. 2017. Urban underground space exploration key technologies and development trend. *Coal Geology of China* (in Chinese), 29(9): 61-66, 73.
- Zhou C J, Xia J H, Zhang H Y, et al. 2019. Application of short-term dense array 3D shear wave velocity imaging in urban underground space detection. //Proceedings of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union in 2019. Beijing, 1011-1013.

附中文参考文献

- 陈颢, 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. *中国科学技术大学学报*, 37(8): 813-819.
- 陈颢, 王宝善, 葛洪魁等. 2007a. 建立地震发射台的建议. *地球科学进展*, 22(5): 441-446.
- 陈颢, 张先康, 丘学林等. 2007b. 陆地人工激发地震波的一种新方法. *科学通报*, 52(11): 1317-1321.
- 陈颢, 王宝善, 姚华建. 2017. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用. *中国科学: 地球科学*, 47(10): 1153-1165.
- 高景华, 徐明才, 柴铭涛等. 2007. 浅层地震探测城市活断层. 物探化探计算技术, 29(S1): 133-137, 253, 7-8.
- 顾悦, 裴烁瑾, 梁姗姗等. 2021. 基于地震背景噪声监测山东临沂地区地下水位变化. *中国地震*, 37(4): 857-867.
- 郭晓, 张元生, 刘旭宙等. 2020. 甘肃主动源建设发展与展望. *地震工程学报*, 42(5): 1146-1150.
- 郝英红, 李晓晖, 陈忠良等. 2021. 城市地下空间开发地质环境质量三维评价方法研究——以合肥市滨湖新区为例. *地理与地理信息科学*, 37(1): 11-16.

- 胡久鹏, 王宝善, 陈颢. 2017. 水体形状对陆地气枪激发信号的影响. *地震研究*, 40(4): 543-549.
- 黄艳丹, 李军, 金星等. 2018. 沉放深度对气枪震源激发信号影响的试验研究. *地震学报*, 40(4): 430-439.
- 李华, 王东辉, 张伟等. 2020. 地球物理探测技术在成都市浅表地质结构调查中的应用研究. *中国地质*, 1-23[2022-10-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201207.1651.008.html>.
- 马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 41(3): 394-401.
- 马岩, 李洪强, 张杰等. 2020. 雄安新区城市地下空间探测技术研究. *地球学报*, 41(4): 535-542.
- 唐明帅, 王海涛, 段天山. 2010. 利用和田地震台阵数据对 2008 年于田 7.3 级地震序列重新定位. *内陆地震*, 24(3): 227-235.
- 王栩, 王志辉, 严加水等. 2020. 地球物理在城市地下空间探测中的应用. //2020 年中国地球科学联合学术年会论文集(二十六)—专题七十六: 深部矿产资源探测技术与应用、专题七十七: 岩石物理与井中探测前沿、专题七十八: 井孔地球物理及深部钻测. 重庆: 中国地球物理学会.
- 魏斌, 苏金波, 王海涛等. 2016. 新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究. *中国地震*, 32(2): 222-230.
- 武斌, 李诗健, 陈宁等. 2019. 成都市城市地下空间探测的地球物理方法研究. *四川地质学报*, 39(S1): 194-202, 224.
- 薛涛, 史玉金, 朱小弟等. 2021. 城市地下空间资源评价三维建模方法研究与实践: 以上海市为例. *地学前缘*, 28(4): 373-382.
- 杨吉武, 赵立波, 黄书华. 2021. 横波地震勘探在城市隐伏断裂探测中的应用. *工程地球物理学报*, 18(3): 361-366.
- 杨建文, 叶泵, 高琼等. 2021. 利用背景噪声研究通海 5.0 级、墨江 5.9 级地震震源区波速变化. *地震研究*, 44(4): 529-540.
- 杨微, 王宝善, 王伟涛等. 2020. 陆地水体气枪震源重复性的影响因素及控制方法. *华南地震*, 40(4): 1-9.
- 杨微, 王宝善, 张云鹏等. 2021. 陆地水体气枪震源探测技术回顾与进展. *地球物理学报*, 64(12): 4252-4268, doi: 10.6038/cjg2021P0282.
- 于雯, 杨欣颖, 喻静等. 2021. 呼图壁气枪数据中面波振幅变化研究. *地震研究*, 44(1): 22-32.
- 翟秋实, 姚华建, 王宝善. 2016. 气枪震源资料反褶积方法及处理流程研究. *中国地震*, 32(2): 295-304.
- 张元生, 郭晓, 秦满忠等. 2016. 甘肃祁连山主动源重复探测项目建设及震源重复性分析. *中国地震*, 32(2): 209-215.
- 赵锴, 姜杰, 王秀荣. 2017. 城市地下空间探测关键技术及发展趋势. *中国煤炭地质*, 29(9): 61-66, 73.
- 周长江, 夏江海, 张鸿宇等. 2019. 短时密集台阵三维横波速度成像在城市地下空间探测中的应用. //2019 年中国地球科学联合学术年会论文集(十八)—专题 46: 环境地球物理技术应用与研究进展、专题 47: 浅地表地球物理进展、专题 48: 现代工程地球物理技术进展与应用. 北京: 中国地球物理学会.

(本文编辑 汪海英)