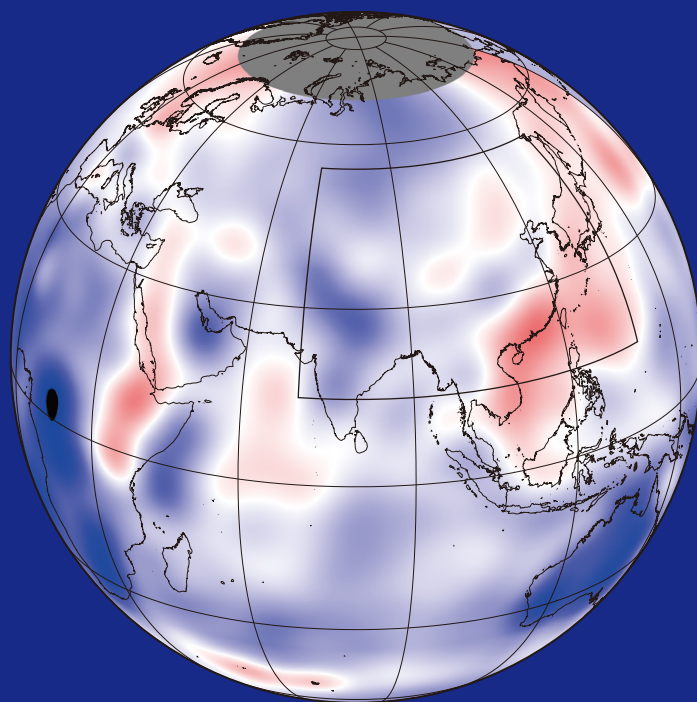
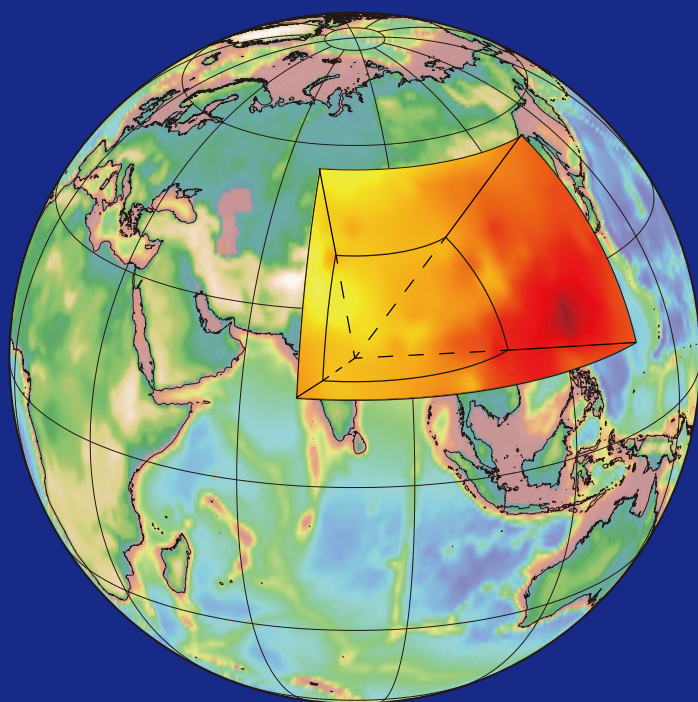


ISSN 2097-1893
CN 10-1855/P

地球与行星物理论评 (中英文)

Reviews of Geophysics and Planetary Physics

第56卷 第1期 Vol. 56 No. 1 **2025**



中国地震局地球物理研究所 主办
中国地球物理学会 协办
中国地震局地球物理勘探中心

地球与行星物理论评(中英文)

2025年第56卷第1期(总337期)

目次

综述

- 地震波泄漏模式研究进展 史才旺, 李正波, 陈晓非 (1)
- 青藏高原地壳隆升的 GNSS 与 GRACE 联合研究进展 饶维龙, 刘 斌, 唐 河, 汪秋昱, 张 岚, 孙文科 (26)
- 利用低轨道卫星地磁观测反演电离层电流概述
..... 熊 超, 王丰珏, 黄宇阳, 钱博浩, 王思敏, 让心怡, 宋斯珊, 周云良, 尹 凡 (45)
- 岁星四纪——回望木星大气探测 50 年 宋心仪, 杨 军, 魏 勇 (67)

研究论文

- 基于三维地球模型的中国大陆重力潮汐因子研究 王振宇, 赵 倩 (83)
- 基于聚类的重复地震识别方法及应用 黄雅芬, 李红谊, 李炎臻, 葛慧颖, 张盛中 (94)

亮点评述

- 基于短周期密集台阵接收函数成像揭示阿尔金山隆升机制 李永华 (102)
- 俄乌冲突袭击爆炸地震学监测 杨淞杰, 赵连锋 (106)

消息

- “水文地球物理前沿进展”专刊征稿通知 (112)

封面图片

左图外层为地表起伏, 内层为地幔的横向非均匀结构, 开窗为文章主要研究区域, 即中国大陆地区. 右图为地幔横向非均匀导致的地表重力 M_2 因子异常理论变化值, 黑框对应研究区域. 见: 王振宇和赵倩文章 (doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-017), 页码: 83-93. 图片提供: 王振宇.

本期责任编辑: 朱玉萍 贺 杨

Reviews of Geophysics and Planetary Physics

Vol. 56 No. 1 2025 (Total No. 337)

Contents

Review

- Advances in the research of seismic-wave leaky modes Shi Caiwang, Li Zhengbo, Chen Xiaofei (1)
- Progress in studies on crustal uplift of the Qinghai-Xizang Plateau based on GNSS and GRACE
..... Rao Weilong, Liu Bin, Tang He, Wang Qiuyu, Zhang Lan, Sun Wenke (26)
- Overview of ionospheric currents inversion by using low Earth orbit satellite magnetic observations
..... Xiong Chao, Wang Fengjue, Huang Yuyang, Qian bohao, Wang Simin,
Rang Xinyi, Song Sishan, Zhou Yunliang, Yin Fan (45)
- A look-back to the 50-year exploration of Jupiter's atmosphere Song Xinyi, Yang Jun, Wei Yong (67)

Research Article

- Study of tidal gravimetric factors in Chinese mainland based on three-dimensional Earth model
..... Wang Zhenyu, Zhao Qian (83)
- A clustering-based repeating earthquakes identification method and its application
..... Huang Yafen, Li Hongyi, Li Yanzhen, Ge Huiying, Zhang Shengzhong (94)

Highlight Comment

- Receiver function imaging based on short-period dense array reveals the uplift mechanism of the Altyn
Tagh Mountains Li Yonghua (102)
- Seismology monitoring of attacks in the Russia-Ukraine conflict Yang Songjie, Zhao Lianfeng (106)

Message

- Call for special issue on "Recent advances in hydrogeophysics" (112)

Cover

In the left panel, the outer layer shows the topography and the inner layer shows the lateral inhomogeneity in the mantle. The window denotes the research area of this paper, namely, the Chinese mainland. The right panel shows the theoretical changes of tidal gravimetric factors of M_2 component on the surface caused by lateral inhomogeneity, the black box denotes the research area. Please refer the article by Wang and Zhao (doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-017), pp. 83–93. Picture provided by: Wang Zhenyu.

Managing Editors: Zhu Yuping He Yang

杨淞杰, 赵连锋. 2025. 俄乌冲突袭击爆炸地震学监测. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(1): 106-111. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-042.
Yang S J, Zhao L F. 2025. Seismology monitoring of attacks in the Russia-Ukraine conflict. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(1): 106-111 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-042.

俄乌冲突袭击爆炸地震学监测

杨淞杰^{1,2}, 赵连锋^{1,2*}

1 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-042

中图分类号: P315

文献标识码: A

人们通常利用地震仪探测各种不同的地震, 包含区域或全球范围的爆炸信息, 因此也可用于探测军事冲突中的袭击爆炸 (Carmichael et al., 2021; Gibbons et al., 2017; Pilger et al., 2021). 但是, 军事袭击不像地震, 其能量较低, 要求地震仪等传感器网络距离爆炸源较近. 因此, 要全面客观地获取军事冲突地区的监测数据面临着巨大的挑战性. 近期, 挪威地震研究中心 Ben D.E. Dando 等在《Nature》发表了关于基于地震阵列识别俄乌军事冲突袭击的论文, 系统地阐述了军事冲突袭击爆炸事件识别、定位、当量估计等, 为监测现代战争走向提供了地震学手段 (Dando et al., 2023). 他们以俄乌冲突中乌克兰北部爆炸产生的地震波为例, 利用当地地震台阵记录, 近实时自动识别军事袭击爆炸, 测定了 2022 年 2 月至 11 月期间发生在基辅、日托米尔和切尔尼戈夫省等区域 1200 多次爆炸的时间、地点和震级. 根据相关的地震和声波信号, 发现军事袭击爆炸事件数量远远超过公开报道的军事袭击数量. 因此, 发展对军事冲突的监测方法和观测技术, 检测爆炸事件、刻画时空分布、测定爆炸当量等, 对于冲突实况和进展的实时监测和准确记录具有重要意义.

卫星影像作为监测战争的重要手段, 能够提供俄乌军事冲突袭击爆炸的高分辨率图像. 但是, 因为需要时间和位置的先验信息, 卫星影像无法做到实时监测, 相比之下, 爆炸产生的地震波和声波可以在地表和地下传播数百公里, 其中声波还以

0.34 km/s 的速度在空气中传播. 这些信号的频率在 5~200 Hz 之间, 可以被地震仪和微气压计记录下来, 有助于实时监测军事冲突实况. 事实上, 声学测距和地震测距方法早在第一次世界大战就被用于定位火炮阵地, 是现代地震勘探方法发展的基础 (Costley, 2020; Gendzwil, 2007; Keppner, 1991). 此后, 监测方法不断发展, 已经能够使用声学传感器来定位火炮位置和撞击区域 (Dagallier et al., 2019) 以及推断大型爆炸的特性 (Aleqabi et al., 2016; Carmichael et al., 2021; Pilger et al., 2021). 但迄今为止, 由于缺乏合适的数据库, 对军事冲突地区爆炸产生的地震和声学信号进行实时处理仍然非常困难. 《全面禁止核试验条约》国际监测系统是一个检测核爆炸的全球网络, 目前已有 200 多个地震和次声台站, 这些台站的观测记录可用于实时监测. 而且, 用于监测和研究天然地震和地球内部的大量数据已经公开可用或逐步公开. 地震和声波传感器均可用于军事冲突监测, 其监测能力取决于传感器与被监测区域的距离、爆炸强度和能量传输情况.

在乌克兰基辅西北部约 100 km 处, 国际监测系统有一个由乌克兰国家数据中心运营维护的地震台阵, 名称是马琳 AKASG, 条约代码为 PS45. 该台阵由 23 个垂直分量宽带地震仪和一个三分量宽带地震仪组成, 孔径约 27 km, 每个传感器之间约 2 km. 早期设计的目的是利用经典的地震阵列处理技术遥测远距离 (>3300 km) 核试验. 当入射波为平面波、震中距远远大于阵列孔径的条件下, 地震

收稿日期: 2023-09-18; 录用日期: 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2139206)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2139206)

*通信作者: 赵连锋, 男, 研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: zhaolf@mail.iggcas.ac.cn



台阵相干信号叠加能够提高信噪比, 台站之间的时间延迟可用于估计入射波的方向. 该台阵列能够用于检测近场和区域地震活动, 对附近地震事件进行准确定位. 马琳阵列覆盖面积较大、传感器数量较多, 为实时监测乌克兰北部日托米尔省、基辅省和切尔尼戈夫省与军事冲突有关的爆炸提供了适宜的数据. 根据马琳阵列地震记录自动检测和定位爆炸, 观测数据实时传输到维也纳国际数据中心, 再传输到挪威进行自动处理, 生成接近实时的结果. 通过信号偏移和叠加, 使用短期平均与长期平均振幅比 (STA/LTA) 的特征函数, 获取 P 波和 S 波信号, 实现自动检测和定位微震活动 (Chambers et al., 2014; Kao and Shan, 2004; Langet et al., 2014). 基辅西北部战区距离马琳阵列较近, 能够获得高精度的爆炸事件位置和时间.

自 2022 年 2 月 24 日至 11 月 3 日, 在马琳阵列周围约 $300 \times 222 \text{ km}^2$ 的区域内探测并定位了 1282 次爆炸, 包括日托米尔省、基辅省和切尔尼戈夫省的部分地区 (图 1). 距离马琳阵列越远, 震级的完整性越小, 因此在切尔尼戈夫等距离阵列约 170 km 之外的地方无法探测到较小震级的爆炸事件. 作为比较, 利用 2022 年 1 月 1 日至 2 月 24 日俄乌战争以前的数据, 探测并定位了与采矿和采石的爆炸事件, 获得 53 次日间爆炸事件 (图 2). 俄乌军事冲突发生后, 在日托米尔、科罗斯滕、基辅

西北部、切尔尼戈夫和马琳等地区都能观测到聚集性地震活动. 2022 年 2 月 24 日至 3 月 31 日期间, 马琳东北部的地震活动最为突出, 为激烈交战区, 平均每天爆炸 29 次, 其中 3 月 7 日发生 64 次爆炸. 俄罗斯实际控制到 3 月 21 日, 乌克兰进行反攻, 4 月 2 日俄罗斯撤出基辅地区. 因此, 猛烈轰炸发生在 3 月 31 日, 而 4 月 1 日只发生两次爆炸. 俄罗斯军队撤出后该区域地震活动基本恢复到军事冲突以前的水平, 采矿和采石爆破得以恢复, 但仍然存在针对战略要地的零星袭击爆炸 (图 3).

军事冲突爆炸发生在地面或地面以上, 大部分能量释放到大气中. 由此产生的声波为爆炸源参数提供了关键的约束 (Ottmöller and Evers, 2008). 按声速传播速度的时间窗口叠加波形包络, 能够识别出 29% 的地震事件 (图 2 中的红线和图 4f 中的绿点), 增加了对爆炸事件时空分布的约束 (图 4a、4e 中的插图). 然而, 大部分事件都没有声波, 可能是因为使用的声波探测阈值较高、强烈的衰减和散射过程, 以及地表地形阻挡了声波有效传播 (Averbuch et al., 2022). 在地震波形数据中可能无法观测到所有爆炸事件, 但声波记录可以给出有益的补充. 这类事件通常为高空爆炸、距离台阵较远 (>100 km) 或者爆炸当量较低. 因此, 声波和地震在俄乌战争监测中都能发挥重要的作用.

检测爆炸能够验证已报道的或未公开的爆炸.

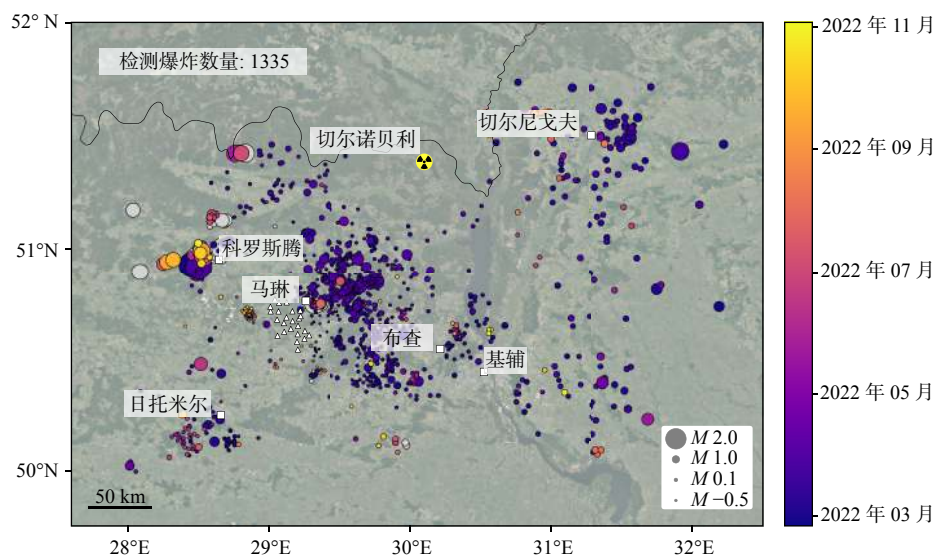


图 1 2022 年 1 月至 11 月自动探测爆炸产生的地震分布图 (引自 Dando et al., 2023). 其中圆圈的颜色表示发生时间, 圆圈大小表示震级. 2 月 24 日俄罗斯-乌克兰战争爆发之前的地震事件用灰色显示. 马琳阵列的各个地震传感器用白色三角形表示. 图中标出了切尔诺贝利核电站的位置. 比例尺为 50 km

Fig. 1 Map of automatic seismic detections (circles) between January and November, 2022 (from Dando et al., 2023). Detections are coloured by date of occurrence and scaled by magnitude. Detections before the start of the invasion on February 24 are shown in grey. Locations of individual seismic sensors of the Malyn array are shown by white triangles. The location of the Chernobyl nuclear power plant is indicated. Scale bar, 50 km

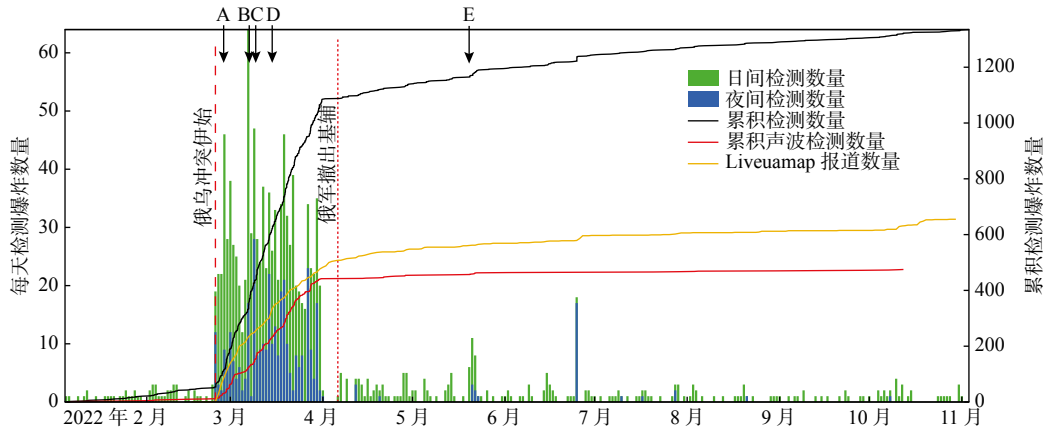


图 2 地震探测数量直方图 (引自 Dando et al., 2023), 包括日间 (绿色) 和夜间 (蓝色) 检测结果; 累积爆炸次数 (黑线)、由声学信号确认事件的累积次数 (红线) 和 Liveuamap 网站分开报道的爆炸事件累积数量 (橙色). 红色虚线表示俄乌冲突开始时间, 红色点状线表示俄罗斯撤出基辅的时间. 箭头标记了图 4 中爆炸事件

Fig. 2 Timeline of automatic seismic detections (from Dando et al., 2023). The histogram distribution separates daily detections during nighttime (blue) and daytime (green). The black line shows the cumulative number of detections, whereas the red line shows the cumulative events with observable acoustic signals. The cumulative number of reported Liveuamap events is shown by the orange line. The start of the Russian invasion is indicated by the dashed red line and the reported Russian withdrawal from the Kyiv region is shown by the dotted red line. Labelled arrows point to specific example attacks shown in Fig. 4

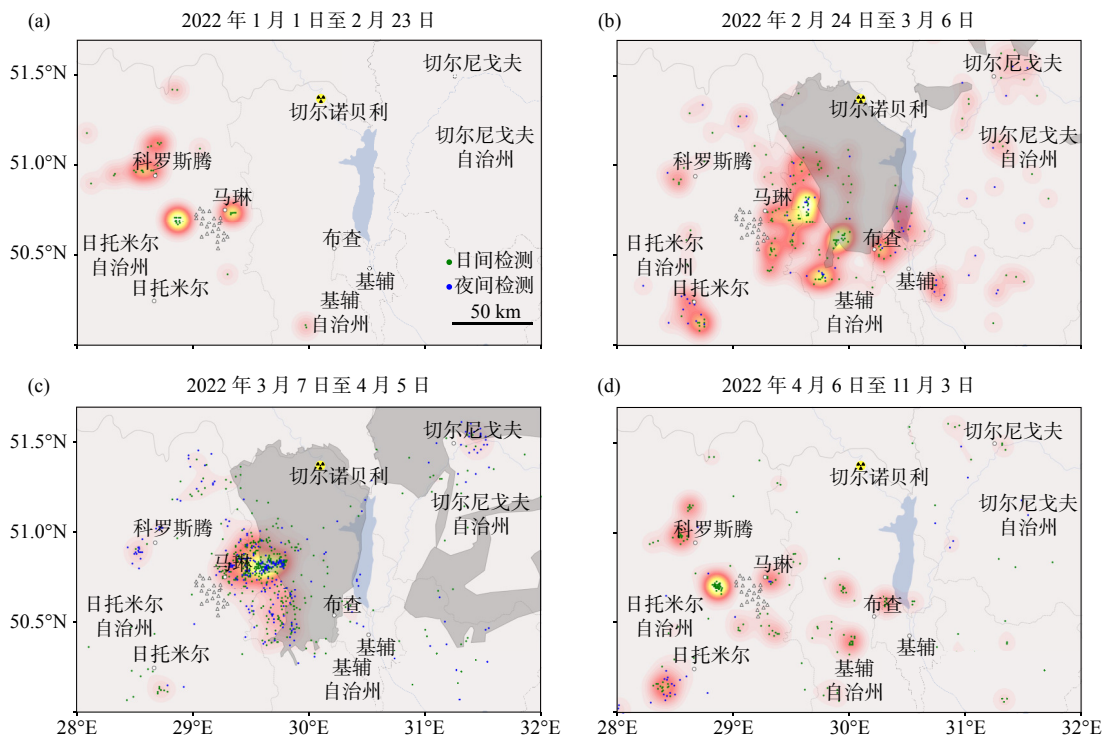


图 3 不同时间段的地震自动探测密度图 (引自 Dando et al., 2023). 日间和夜间爆炸分别用绿色和蓝色圆点表示. 白色三角形表示马琳地震阵列的位置. (a) 2022 年 1 月 1 日至 2 月 23 日冲突爆发之前的阶段, 最大事件密度为 0.09 km^{-2} ; (b) 2022 年 2 月 24 日至 3 月 6 日, 最大事件密度为 0.11 km^{-2} ; (c) 2022 年 3 月 7 日至 4 月 5 日激烈战斗期间, 最大事件密度为 0.73 km^{-2} ; (d) 2022 年 4 月 6 日至 11 月 3 日, 最大事件密度为 0.25 km^{-2} . 灰色阴影区域表示俄罗斯军队实际控制地区. 比例尺为 50 km

Fig. 3 Density plots of the automatic seismic detections for various time periods (from Dando et al., 2023). Individual detections are shown by blue (nighttime) and green (daytime) dots. The location of the Malyn seismic array is shown by the white triangles. Each panel is scaled to its maximum value. (a) Pre-invasion period from January 1 to February 23, 2022, with a maximum event density of 0.09 km^{-2} . (b) Immediately after the Russian invasion from February 24 to March 6, 2022, with a maximum event density of 0.11 km^{-2} . (c) Period of intense fighting from March 7 to April 5, 2022, with a maximum event density of 0.73 km^{-2} . (d) Period after the reported Russian withdrawal (April 2, 2022) from April 6 to November 3, 2022, with a maximum event density of 0.25 km^{-2} . The grey shaded areas in (b) and (c) indicate regions occupied by Russian troops. Scale bars, 50 km

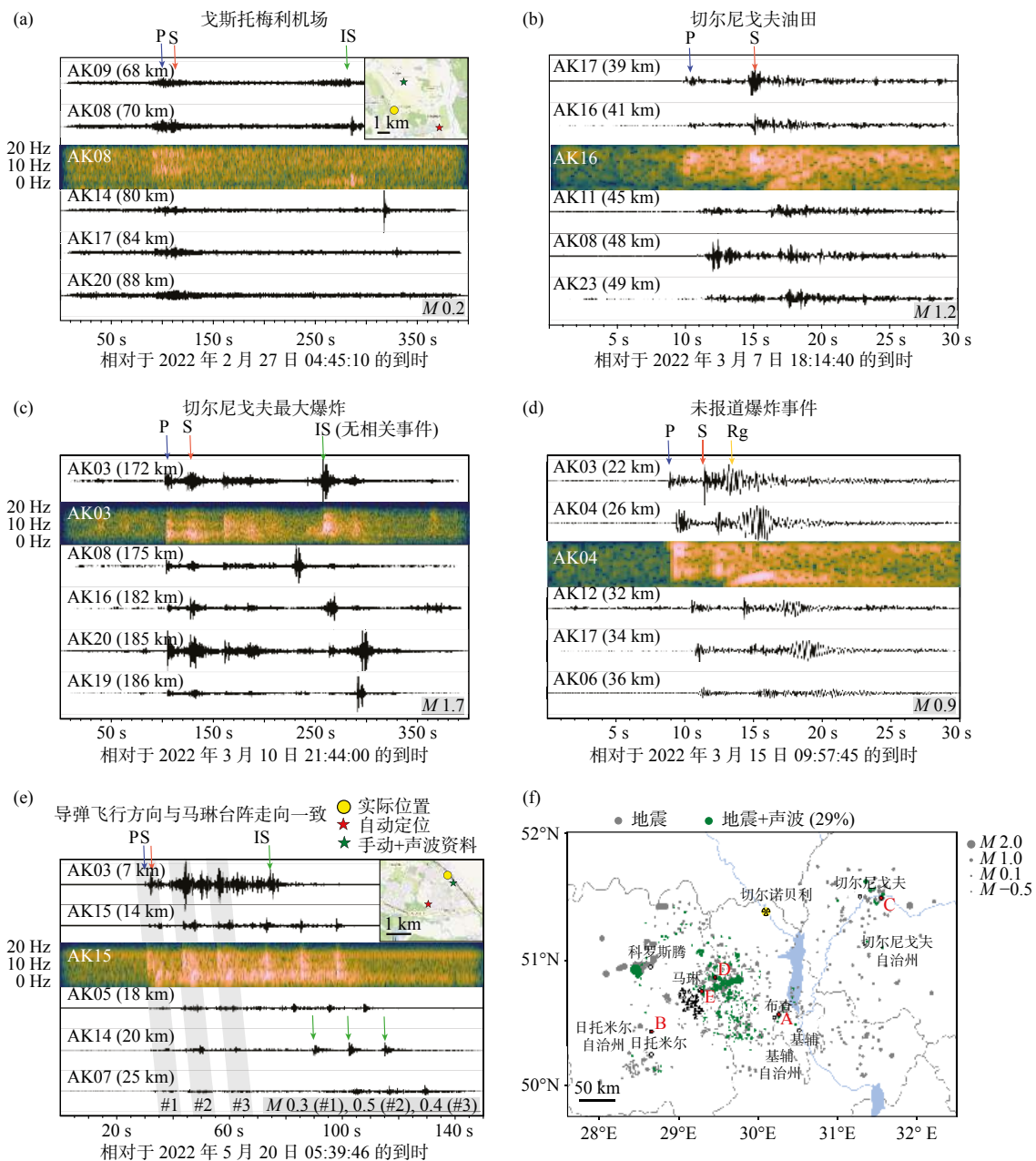


图 4 爆炸事件波形示例 (引自 Dando et al., 2023). (a) 戈斯托梅利机场袭击爆炸; (b) 切尔尼戈夫油田爆炸; (c) 切尔尼戈夫空袭爆炸; (d) 马琳东北部发生的一起未报道爆炸事件; (e) 马琳火车站导弹袭击事件. 台站名称和震中距标于波形左侧. 事件波形与频谱相对应. P 波、S 波、声波 (IS) 和 Rayleigh 波 (Rg) 分别用蓝色、红色、绿色和黄色的箭头标注. 事件震级标于右下角. 图 (a) 和 (e) 中的插图比例尺为 1 km, 显示了自动事件定位结果 (红色五角星) 和手动事件定位结果 (黑色五角星), 地面观测爆炸实况位置 (黄色圆圈) 和次声定位结果 (绿色五角星). (f) 红色圆圈表示标记为 A-E 的各个示例事件. 绿色和灰色圆圈分别表示检测到和未检测到声学到达时刻的事件. 比例尺为 50 km

Fig. 4 Data examples from individual explosions (from Dando et al., 2023). (a) Hostotmel Airport attack. (b) An explosion at an oil depot in Chernyakhiv. (c) An airstrike on Chernihiv, the largest military explosion recorded. (d) An unreported explosion northeast of Malyn. (e) A missile strike at Malyn train station. Selected waveforms are shown at various distance ranges from the source. One spectrogram example per event is shown below the waveform of the respective station. P-wave (P), S-wave (S), acoustic wave (IS) and surface wave (Rg) are labelled by arrows in blue, red, green and yellow, respectively. Event magnitudes are indicated. Inset maps in (a) and (e) (scale bars, 1 km) show the automatic event location (red star) and the manual event location including acoustic arrivals (green star) compared with the ground-truth location (yellow circle). These locations are provided in Extended Data Table 2. (f) Map indicating the example event locations as red circles and labelled A-E. Green circles show all events with detected acoustic arrivals and grey circles without observable acoustic arrivals. Scale bar, 50 km

例如, 在 2022 年 5 月 20 日 9:37 UT, 距离基辅约 100 km 的马琳地区市政府发布了一条视频信息, 宣称遭受导弹袭击, 随后在媒体上发布了铁路轨道受损的照片. 俄罗斯国防部也发布了火车站站台是攻击目标的信息. 在这些报告发布之前约 4 小时, Dando 等 (2023) 已经在 05:39:59、05:40:11 和 05:40:23 UT 等三个时段分别检测到 3 次爆炸. 尽管自动定位估计与爆炸产生的撞击坑距离 1.4 km, 但后期利用人工拾取到时的方法, 能够将定位偏差缩小到 100 m 以内 (图 4e). 图 4 显示了爆炸事件波形实例. Liveuamap 网站使用人工智能技术汇总各种媒体报道的爆炸事件, 经过人工验证后发布军事冲突数据, 与地震学检测到的爆炸事件目录具有可比性, 对应关系良好 (<https://liveuamap.com/en>). 爆炸事件的时空分布非常相似, 无论是在军事冲突伊始, 还是在 2022 年 4 月俄罗斯军队撤出基辅后的针对性袭击, 都具有地震活动峰值 (图 2). 地震和次声资料提供的军事袭击爆炸事件时空分布, 与媒体报道相比更加客观, 确定性更强. 其中, 通过使用相对较低的信噪比阈值提高检测率, 采用地震信号的震源属性鉴别降低误报率.

根据地震观测资料和物理模型估计爆炸当量, 是一项极具挑战性的工作 (Ford et al., 2014; Koper et al., 2002; Pasyanos et al., 2012; 谢小碧和赵连锋, 2018; Zhao et al., 2008). 地震与次声资料结合对爆炸当量和高度等具有较好的约束. 然而, 马琳阵列主要记录垂直分量数据, 因此可通过计算地震震级来快速估计爆炸当量. 对于特定试验场的地下核试验, 爆炸当量和地震震级之间具有较好的经验关系 (Bowers et al., 2001). 然而, 因为地面爆炸在能量耦合、转化和传播方面存在较大差异, 致使这些经验关系很难适用. 因此, 结合已知爆炸当量的陆地爆炸目录能够获取当量估计的上限和下限 (Booth, 2009). 爆炸事件的地方性震级 M_L 在 $-1.25 \sim 2.24$ 之间, 误差为 0.3 个震级单位 (图 1). 最低的震级估计接近 -0.6 , 对应于 $0.03 \sim 9.00$ kg TNT 的爆炸当量. 俄罗斯榴弹炮使用的 OF45 型 152 mm 炮弹, 爆炸当量为 7.65 kg TNT (Evans and Eddon, 2022), 可为爆炸当量的上限估计. 已知的科罗斯腾附近采矿和采石爆破, 震级 $M_L > 1.7$ (图 1). 2022 年 3 月 10 日对切尔尼戈夫地区的空袭爆炸震级为 1.7 (图 4c), 爆炸当量在 $352 \sim 3083$ kg TNT 之间. 伊斯坎德尔弹道导弹的爆炸当量约为 700 kg (Hardy, 2022), 因此最大当量估计值偏

高. 根据声学相位振幅能够构建当量估计方法, 但由声学预测模型获得的当量估计会更大, 需要进一步校准和检验 (Douglas, 1987).

Dando 等 (2023) 对 2022 年俄乌军事冲突期间收集的地震数据进行分析是首次使用地震数据实时监测战争走向. 探测到的与军事袭击有关的爆炸分布与火炮和导弹袭击的区域非常吻合. 尽管地震检测爆炸的事件目录并不完整, 但已经全面超越了公开报道的袭击次数, 因此具有对媒体报道进行验证和监测战争走向的价值. 通过自动地震相位检测方法, 能够提供乌克兰北部地区距离马琳阵列 100 km 以内的事件的精确位置, 定位误差 < 5 km, 计时误差 < 1 s. 在后续处理中加入次声资料约束, 能够进一步提高空间定位精度. 该方法可以扩展应用到其它交战区附近的中等孔径阵列网络, 自动确定火炮爆炸位置或判定弹药类型, 从而监测军事冲突.

然而, 仅利用地震学方法监测低当量爆炸事件是远远不够的. 例如, 在战场上监测是否使用战术核武器, 不仅需要用地震波和声波测定爆炸位置和震级测量与当量估计, 而且需要判断是否释放放射性核素 (De Geer et al., 2024). 因此, 监测低当量爆炸事件应该采用全方位、多维度、多参量的监测手段, 如地震、遥感、声波、次声、水声、电磁和放射性核素测量等. 本文内容主要引自 Dando 等 (2023) 的文章, 目的是为了理解对低当量爆炸事件进行监测的科学意义、军事价值和实际意义.

致谢

感谢编辑部约稿和出版过程中的大力帮助.

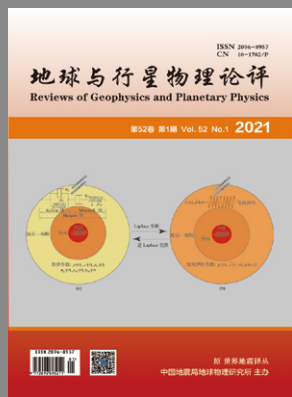
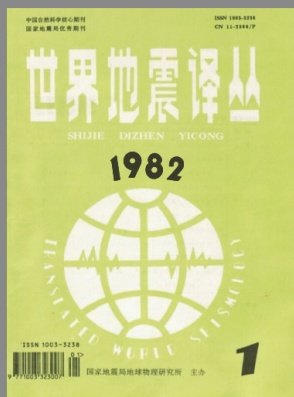
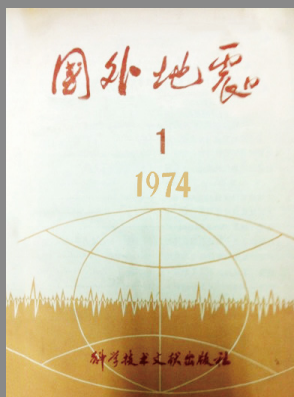
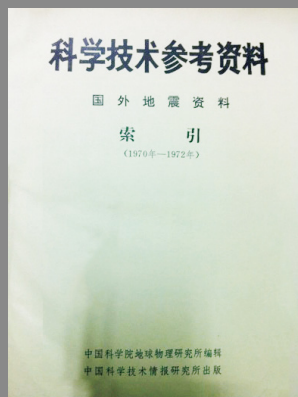
References

- Aleqabi G I, Wyssession M E, Ghalib H A A. 2016. Characterization of seismic sources from military operations in urban terrain (MOUT): Examples from Baghdad[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(1): 23-41. DOI: [10.1785/0120140187](https://doi.org/10.1785/0120140187).
- Averbuch G, Ronac-Giannone M, Arrowsmith S, Anderson J. 2022. Evidence for short temporal atmospheric variations observed by infrasonic signals: 1. The troposphere[J]. *Earth and Space Science*, 9(3): e2021EA002036. DOI: [10.1029/2021EA002036](https://doi.org/10.1029/2021EA002036).
- Booth D C. 2009. The relationship between seismic local magnitude M_L and charge weight for UK explosions[R]. British Geological Survey. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8570>.
- Bowers D, Marshall P D, Douglas A. 2001. The level of deterrence provided by data from the SPITS seismometer array to possible violations of the Comprehensive Test Ban in the Novaya Zemlya region[J]. *Geophysical Journal International*, 146(2): 425-438. DOI:

- 10.1046/j.1365-246x.2001.01462.x.
- Carmichael J D, Thiel A D, Blom P S, et al. 2021. Persistent, "mysterious" seismoacoustic signals reported in Oklahoma state during 2019[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(1): 553-574. DOI: 10.1785/0120210145.
- Chambers K, Dando B D E, Jones G A, et al. 2014. Moment tensor migration imaging[J]. *Geophysical Prospecting*, 62: 879-896. DOI: 10.1111/1365-2478.12108.
- Costley R D. 2020. Battlefield acoustics in the First World War: Artillery location[J]. *Acoustics Today*, 16: 31-39.
- Dagallier A, Cheinet S, Cosnefroy M, et al. 2019. Long-range acoustic localization of artillery shots using distributed synchronous acoustic sensors[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(6): 4860-4872. DOI: 10.1121/1.5138927.
- Dando B D E, Goertz-Allmann B P, Brissaud Q, et al. 2023. Identifying attacks in the Russia-Ukraine conflict using seismic array data[J]. *Nature*: 1-6. DOI: 10.1038/s41586-023-06416-7.
- De Geer L-E, Wright C M, Robertson L. 2024. Establishing the case for a May 2010 low-yield, unannounced nuclear test in North Korea[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. DOI: 10.1007/s10967-024-09453-2.
- Douglas C D. 1987. Blast operational overpressure model (BOOM): An airblast prediction method[R]. Air Force Weapons Laboratory, Report No. AFWL-TR-85-150.
- Evans R, Seddon B. 2022. Explosive Ordnance Guide for Ukraine: Second Edition (GICHD, 2022) [EB/OL]. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Publications/GICHD_Ukraine_Guide_2022_Second_Edition_web.pdf.
- Ford S R, Rodgers A J, Xu H, et al. 2014. Partitioning of seismoacoustic energy and estimation of yield and height-of-burst/depth-of-burial for near-surface explosions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(2): 608-623. DOI: 10.1785/0120130130.
- Gendzwil D. 2007. Locating cannons by sound ranging in World War I[J]. *The Leading Edge*, 26(1): 27-29. DOI: 10.1190/1.2431826.
- Gibbons S J, Pabian F, Näsholm S P, et al. 2017. Accurate relative location estimates for the North Korean nuclear tests using empirical slowness corrections[J]. *Geophysical Journal International*, 208(1): 101-117. DOI: 10.1093/gji/ggw379.
- Hardy J. 2022. What explosive weapons are the Russians using in Ukraine? Action on Armed Violence (14 March 2022) [EB/OL]. <https://aoav.org.uk/2022/russias-arsenal-of-explosive-weapons-in-ukraine>.
- Kao H, Shan S J. 2004. The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space[J]. *Geophysical Journal International*, 157(2): 589-594. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02276.x.
- Keppner G. 1991. Ludger Mintrop[J]. *The Leading Edge*, 10(9): 21-28. DOI: 10.1190/1.1436838.
- Koper K D, Wallace T C, Reinke R E, Leverette J A. 2002. Empirical scaling laws for truck bomb explosions based on seismic and acoustic data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2): 527-542. DOI: 10.1785/0120000242.
- Langet N, Maggi A, Michelini A, Brenguier F. 2014. Continuous kurtosis-based migration for seismic event detection and location, with application to Piton de la Fournaise Volcano, La Réunion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1): 229-246. DOI: 10.1785/0120130107.
- Ottmöller L, Evers L G. 2008. Seismo-acoustic analysis of the Buncefield oil depot explosion in the UK, 2005 December 11[J]. *Geophysical Journal International*, 172(3): 1123-1134. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03701.x.
- Pasyanos M E, Walter W R, Mayeda K M. 2012. Exploiting regional amplitude envelopes: A case study for earthquakes and explosions in the Korean Peninsula[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(5): 1938-1948. DOI: 10.1785/0120120012.
- Pilger C, Gaebler P, Hupe P, et al. 2021. Yield estimation of the 2020 Beirut explosion using open access waveform and remote sensing data[J]. *Scientific reports*, 11(1): 14144. DOI: 10.1038/s41598-021-93690-y.
- Xie X B, Zhao L F. 2018. The seismic characterization of North Korea underground nuclear tests[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(3): 889-904 (in Chinese). DOI: 10.6038/cjg2018L0677.
- Zhao L F, Xie X B, Wang W M, Yao Z X. 2008. Regional seismic characteristics of the 9 October 2006 North Korean nuclear test[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(6): 2571-2589.

附中文参考文献

- 谢小碧, 赵连锋. 2018. 朝鲜地下核试验的地震学观测[J]. *地球物理学报*, 61(3): 889-904.



收录情况

国际数据库:

- GeoRef数据库 (2024年入选)
- ProQuest数据库 (2024年入选)
- 瑞典开放存取期刊目录 (DOAJ) (2023年入选)
- 波兰哥白尼索引期刊数据库 (ICI World of Journals) (2023年入选)
- EBSCO数据库 (2023年入选)
- 乌利希国际期刊指南 (2023年入选)

国内数据库:

- 中国期刊全文数据库 (CNKI)
- 中国核心期刊(遴选)数据库(万方数据—数字化期刊群)
- 维普网中文科技期刊数据库
- 超星期刊域出版数据库
- 国家科技学术期刊开放平台

地球与行星物理论评 (中英文)

Diqiu Yu Xingxing Wuli Lunping

(双月刊 1970年创刊)

2025年 第56卷 第1期 (总第337期)

2025年1月出版

Reviews of Geophysics and Planetary Physics

(Bimonthly, Started in 1970)

Vol. 56 No. 1 (Total No. 337) 2025

Jan. 2025

主管单位: 中国地震局

主办单位: 中国地震局地球物理研究所

主 编: 丁志峰

编 辑: 《地球与行星物理论评(中英文)》编辑委员会

出 版: 《地球与行星物理论评(中英文)》编辑部

(北京市海淀区民族大学南路5号

邮政编码: 100081)

印刷装订: 廊坊市瑞美印务有限公司

订购发行: 本刊编辑部发行组

电子邮箱: dqyxx@cea-igp.ac.cn

电 话: 010-68729337

网 址: <https://www.sjdz.org.cn/>

Responsible Institution: China Earthquake Administration

Sponsored by: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration

Editor-in-Chief: Ding Zhifeng

Edited by: Editorial Board of Reviews of Geophysics and Planetary Physics

Published by: Editorial Office of Reviews of Geophysics and Planetary Physics

(No.5 Minzudaxue Nanlu, Haidian District, Beijing 100081, P. R. China)

Distributed in China: Editorial Office of Reviews of Geophysics and Planetary Physics

<https://www.sjdz.org.cn/>

(如有印书装订问题, 请与本刊编辑部联系调换)