

隧道岩爆灾害的成因与防治

郑飞雨, 王营利, 李俊龙, 张培鑫, 张豪杰, 郭豪杰, 宋杰铭

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年12月12日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月15日

摘要

文章深入探讨了隧道岩爆现象, 包括其定义、成因、分类以及对隧道工程的影响。首先, 分析了岩爆的突发性、不确定性、破坏性等关键特征, 讨论了其全球分布和具体案例, 如英吉利海峡隧道和青藏铁路隧道的岩爆事件。其次, 探讨了岩爆的地质、工程和环境成因, 指出了岩石物理性质、地质构造、开挖方法、支护设计和地下水等因素对岩爆的影响。最后, 提出了包括设计优化、施工技术改进、支护和加固措施、风险管理以及应急预案在内的综合防治策略, 旨在为隧道工程的安全施工和岩爆风险管理提供科学依据和实际指导。

关键词

隧道, 岩爆, 地质构造, 支护

The Cause and Prevention of Rock Burst Disaster in Tunnel

Feiyu Zheng, Yingli Wang, Junlong Li, Peixin Zhang, Haojie Zhang, Haojie Guo, Jieming Song

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: December 12, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 15, 2026

Abstract

This paper discusses the tunnel rock burst phenomenon, including its definition, causes, classification, and impact on tunnel engineering. Firstly, it analyzes the key characteristics of rock bursts, such as suddenness, uncertainty, and destructiveness, and discusses their global distribution and specific cases, including the rock burst events in the Channel Tunnel and the Qinghai-Xizang Railway Tunnel. Then, the paper discusses the geological, engineering, and environmental causes of rock bursts,

文章引用: 郑飞雨, 王营利, 李俊龙, 张培鑫, 张豪杰, 郭豪杰, 宋杰铭. 隧道岩爆灾害的成因与防治[J]. 土木工程, 2026, 15(1): 62-68. DOI: 10.12677/hjce.2026.151008

and points out the effects of rock physical properties, geological structure, excavation method, support design, and groundwater on rock bursts. Finally, comprehensive prevention and control strategies, including design optimization, construction technology improvement, support and reinforcement measures, risk management, and emergency plans are proposed, aiming at providing a scientific basis and practical guidance for safe construction of tunnel engineering and rock burst risk management.

Keywords

Tunnel, Rock Burst, Geological Structure, Timbering

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

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

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



Open Access

1. 引言

岩爆是由于地下工程开挖过程中地应力的突然释放，导致岩石内部能量快速迸发，形成岩石块体的崩落、弹射或破碎。这种灾害的发生往往具有突发性和不可预测性，给施工安全管理带来了极大的挑战。岩爆灾害的发生不仅可能导致隧道结构的破坏，影响工程的质量和使用寿命，还可能引发次生灾害，如塌方、涌水等，进一步加剧工程风险。此外，岩爆灾害的发生还会导致施工进度的延误，增加工程成本，甚至引发社会舆论的关注和质疑。最严重的是，岩爆灾害可能直接威胁到施工人员的生命安全，造成人员伤亡。

因此，隧道工程的规划和施工必须充分考虑岩爆灾害的风险，并采取有效的防治措施，提高隧道工程的安全水平，保障施工人员的生命安全[1]。

谭以安深入分析了岩爆的形成机理，揭示了地应力释放与岩石脆性破坏之间的内在联系。王青海等学者专注于岩爆灾害的防治措施，提出了一系列有效的工程实践和技术方法[2]。徐成光则进一步研究了岩爆的预测与防治方法，为岩爆风险的评估和控制提供了科学依据[3]。这些研究成果不仅丰富了隧道岩爆的理论基础，而且对实际工程中的岩爆防治具有重要的指导意义[4]。

本文系统地介绍了隧道岩爆的定义、成因以及防治措施，旨在为施工人员和学术界提供全面、准确的参考信息。通过对岩爆现象的深入探讨，力图为隧道工程的安全施工和风险管理提供科学指导，以降低岩爆灾害对工程进度和人员安全的影响。

2. 岩爆的定义与分类

岩爆，亦称岩爆灾害或岩爆事故，是在地下工程如隧道、矿井等施工过程中，由于地应力的突然释放，导致岩石内部能量的快速迸发，形成岩石块体崩落、弹射或破碎的现象。这一现象是地下工程中常见的一种动力地质现象，对工程安全和施工人员的生命安全构成了严重威胁。

根据不同的标准，岩爆可以进行多种分类。从力学性质的角度来看，岩爆可分为脆性岩爆和韧性岩爆两种类型。脆性岩爆主要发生在岩石较为坚硬、节理发育的地区，其特征为岩石的突然断裂和崩落。而韧性岩爆则主要发生在岩石较为柔软、塑性较强的地区，表现为岩石的塑性变形和流动。此外，根据岩爆的规模和影响程度，岩爆还可以分为小规模岩爆、中等规模岩爆和大规模岩爆三种类型。小规模岩爆通常只影响局部区域，对工程的影响较小；中等规模岩爆可能影响整个工程段，需要采取相应的防治

措施；而大规模岩爆则可能导致整个工程的中断，甚至造成严重的人员伤亡和财产损失。

岩爆的发生与多种因素有关，包括但不限于围岩的岩体强度、岩层产状、围岩应力状态、变形特性以及地下工程布置等。在实际工程中，通过合理的设计和施工方法，可以有效预防和控制岩爆的发生。例如，采用合理的巷道布置、选择合适的断面形状、使用锚网喷支护方式等措施，可以预防岩爆的发生，避免人员伤亡，提高掘进速度的作用，达到安全快速掘进的目的[5]。

3. 岩爆灾害的特征

1) 突发性：岩爆往往在没有明显预兆的情况下突然发生，给施工安全管理带来极大的挑战。这一点在多个研究中得到了证实，例如，锦屏Ⅱ级水电站引水隧洞现场岩爆发生机制的研究发现时滞型岩爆一般发生在隧洞掌子面开挖应力调整扰动范围之外，且时间上滞后该区开挖时间6~30天[6]。此外，二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究也指出，岩爆是地下工程中经常遇到的一种地质灾害[7]。

2) 不确定性：岩爆的发生位置、规模和影响程度都具有一定的不确定性，难以准确预测。这一点在深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究中得到了体现，研究通过工程地质调查研究和区域地质资料分析，尽管采用了多种方法进行岩爆预测，但仍存在不确定性[8]。

3) 破坏性：岩爆可能导致隧道结构的破坏，影响工程的质量和使用寿命，甚至引发次生灾害，强烈的岩爆可能对工人造成致命伤害，并导致设备和时间的重大损失[1]。

4) 连锁反应：一次岩爆可能触发连续的岩爆事件，形成连锁反应，加剧灾害的影响。这一特征在现有文献中未被直接提及，但可以从岩爆的破坏性和连锁效应推断其可能性。

5) 隐蔽性：岩爆的成因和机制往往较为复杂，难以通过直观的观察和分析来掌握。这一点在长大隧道岩爆灾害研究进展中得到了体现，岩石静力学理论虽然在岩爆研究中是重要的，但它还不能阐明岩爆的全部机理[9]。

4. 岩爆灾害的案例分析

1) 英吉利海峡隧道(Channel Tunnel)：1994年，英吉利海峡隧道施工过程中发生了多次岩爆，导致施工进度的延误和成本的增加。通过对岩爆机理的研究和采取相应的防治措施，最终成功完成了隧道的建设。这一案例表明，通过深入研究岩爆的机理并采取有效的预防和控制措施，可以有效地减少岩爆灾害的影响[3]。

2) 青藏铁路隧道：位于中国青藏高原地区，由于地应力高、岩石节理发育，岩爆灾害频繁发生。通过采用先进的监测预警技术和支护加固措施，有效降低了岩爆灾害的影响。这一案例说明，利用现代技术手段进行岩爆的监测和预警，结合科学合理的支护加固措施，可以显著提高隧道施工的安全性和效率[10]。

5. 岩爆灾害成因分析

5.1. 地质因素

地质因素对岩爆的发生具有显著影响。岩石的物理性质如硬度和脆性是决定岩爆发生的内在因素之一，硬脆性岩石在受到压缩应力时更难以产生塑性变形，因此更容易发生岩爆。此外，岩石的化学成分和结构特征也会影响岩爆的发生概率和强度。例如，节理和断层的存在可以增加岩石内部的应力集中，从而诱发岩爆[11]。地质构造环境也是一个重要的影响因素。褶皱带和断层带等地区的岩石由于受到构造活动的影响，其内部应力状态更为复杂，这增加了岩爆发生的可能性[12]。地震活动也会导致地应力的变化，进而影响岩爆的发生。地质因素对岩爆的影响是多方面的，包括岩石的物理性质、化学成分、结构

特征以及所处的地质构造环境等。

5.2. 工程因素

工程因素主要包括开挖方法、支护结构设计、爆破作业等。不合理的开挖方法和支护结构设计可能导致围岩应力状态恶化，增加岩爆的风险。

开挖方法的选择对围岩的稳定性有着直接的影响。传统的钻爆法虽然广泛应用于隧道等地下工程的开挖，但其效果受到多种因素的影响。例如，炮眼布置不当或爆破参数选择不合理都可能导致围岩应力状态恶化，增加岩爆的风险[13]。因此，合理选择施工方案并为设置安全防护措施提供依据显得尤为重要。

支护结构的设计同样关键。锚杆支护作为一种常见的支护方式，其参数对岩爆防治效果有显著影响[14]。此外，锚网喷支护技术虽然能有效预防岩爆，但如果施工质量不佳，也可能导致支护效果不理想。因此，优化支护参数和提高施工质量对于确保围岩稳定性和减少岩爆风险至关重要。

爆破作业也是影响围岩稳定性的一个重要因素。爆破震动波会危及隧道支护结构的安全和稳定[15]。研究发现，爆破过程中产生的能量以地震波的形式向外传播，当地震波传至地表仍未完全衰减时，未完全衰减的能量将以反射波的形式继续衰减[16]。因此，控制爆破振动对围岩及支护结构的影响是降低岩爆风险的关键。

5.3. 环境因素

环境因素对岩爆的影响是一个复杂的过程，涉及地下水位变化、水文地质条件等多个方面[17]。地下水的存在和流动不仅能够改变岩石的力学性质，降低其强度，从而增加岩爆的可能性，还可能引起围岩的不均匀沉降，进一步加剧围岩的应力集中，诱发岩爆[2]。此外，地下水位的变化和水力坡度的变化对地质灾害具有显著影响，这些变化通过静水推力、有效应力变化、渗透压力增大等机制作用于岩土体，进而影响岩爆的发生。

6. 岩爆灾害影响评估

6.1. 对隧道结构的影响

岩爆可能导致隧道衬砌或支护结构的破坏，影响隧道的结构完整性。在严重的情况下，岩爆可能引起隧道局部或整体坍塌，这是因为岩爆产生的巨大冲击力和能量释放导致围岩破碎，进而影响到隧道衬砌的稳定性和安全性[18]。其次，岩爆引起的岩石破碎和位移会降低隧道周围的岩石稳定性，增加隧道结构的不稳定性[19]。这种不稳定性不仅来源于岩爆直接造成的围岩损伤，还包括由于岩爆引发的二次灾害，如塌方、滑坡等，这些都会进一步加剧隧道结构的不稳定性[20]。

6.2. 对施工安全的影响

岩爆的发生可能导致施工人员面临极大的安全风险，包括受伤甚至死亡的风险。此外，岩爆还可能对施工设备造成损害，这不仅影响施工进度，还可能导致设备的长期损坏或需要更换[21]。由于岩爆的突发性和不可预测性，它常常导致施工进度的延误，因为工程师可能需要重新规划施工方案以避免危险区域。此外，为了防治岩爆及其造成的损害，可能需要增加额外的施工成本，包括采取预防措施如应力释放爆破和使用高强度支护材料等[22]。最后，岩爆的不确定性和潜在的严重后果也可能给施工人员带来心理压力，这种压力可能会影响他们的工作表现和决策能力。

6.3. 对环境和社会的影响

首先，岩爆可能导致岩石碎屑和粉尘的大量释放，对周围环境造成污染，影响生态环境的稳定。其

次，社会影响显著，岩爆事件可能损害隧道工程的社会信誉，降低公众对相关工程的信任度[21]。经济上，岩爆不仅增加了工程成本，还可能导致项目延期，从而对项目的经济可行性产生负面影响[23]。此外，岩爆的发生可能违反相关的安全和环保法规，导致法律责任和罚款的追究，并且严重的岩爆灾害可能引发社会关注和舆论压力，进一步影响社会稳定。

7. 岩爆灾害的防治措施

7.1. 设计优化

在隧道设计和施工阶段，应优先选择地质条件相对稳定的区域作为隧道线路，以避免高地应力、破碎带等不利地质条件的影响。合理的断面设计可以有效减少地应力的集中和释放，从而提高隧道的安全性和稳定性[24]。此外，进行地质超前预报是至关重要的步骤，它能够在施工前识别可能的岩爆风险区域，为施工提供科学指导。通过综合运用地质分析、物探方法等多种手段，可以提高预报的准确性，有效预防和控制地质灾害的发生[25]。

7.2. 施工技术

在复杂地质条件下进行隧道或岩石开挖时，采用控制爆破技术是至关重要的。通过合理安排掘进速度，避免过快掘进导致地应力快速释放，从而降低岩爆风险。同时，根据具体的地质条件选择合适的施工方法，如盾构法、钻爆法等，可以有效提高施工安全性和效率。此外，控制爆破技术的应用，如分段分区台阶的爆破方法，不仅能够减少单次爆破的药量，避免过度破碎岩石，还能降低岩爆风险，确保施工过程中的安全性[26]。通过这些措施，可以在保证施工质量的同时，最大限度地减少对周边环境的影响，实现安全、快速的施工目标。

7.3. 支护和加固措施

初期支护是通过喷射混凝土、安装钢架等方式及时进行的，这些措施能有效提升隧道围岩的自撑能力和抵抗变形的能力。在初期支护的基础上，进行二次衬砌工作，这一步骤进一步增强了隧道的承载能力和延长了其使用寿命。对于岩爆风险较高的区域，还需采取注浆、锚杆、锚索等加固措施，以增强围岩的稳定性，从而保障隧道的安全运营。这些综合措施的应用，不仅提高了隧道工程的安全性和可靠性，也为类似工程提供了宝贵的经验和技术支持。

7.4. 风险管理

通过分析地质条件、岩石性质和地应力等因素，建立岩爆风险评估体系，定期对隧道施工过程中的岩爆风险进行评估[27]。利用微震监测技术，实时监测地应力、岩石变形等关键指标，及时发现岩爆征兆，根据监测数据，设置岩爆预警机制，一旦检测到岩爆风险，立即采取应对措施，如加强支护、调整施工方案等，以确保施工安全[28]。

7.5. 应急预案和救援计划

制定详细的应急预案，涵盖撤离路线、救援物资储备及应急通讯等关键要素，定期对救援队伍进行专业培训和实战演练，以提升其在紧急情况下的应对能力[29]。此外，施工现场应配置必要的救援设备，如生命探测仪和破拆工具，确保在发生岩爆时能够迅速有效地进行救援工作。通过这些措施的综合实施，可以显著提高岩爆灾害的应急响应能力和救援效率。

8. 岩爆预测与防治技术研究

近年来，岩爆预测研究正从经验判据向数据驱动与智能化预警快速演进。机器学习模型(如 XGBoost、

CNN-LSTM 等)在处理多源监测数据方面展现出优势[30]-[32], 但其“黑箱”特性制约了工程解释性[33]-[34]。当前研究致力于融合力学机理与数据模型, 以增强预测的可信度。

智能监测技术已实现从人工分析向自动化预警的转变。基于深度学习的信号处理方法提升了微震监测的时效性与抗干扰能力[35]-[36], 然而模型的跨场景适应性仍需通过数据共享与迁移学习加强[37]。

防治理念趋向于“主动释能”, 高韧性混凝土与耗能锚杆等新材料注重提升支护体系在动力冲击下的能量耗散能力。该领域需进一步开展现场验证以建立实用标准。

总体而言, 岩爆研究迈向多技术深度融合, 未来发展的关键在于统筹提升预测防治性能、系统可解释性与工程实用性。

9. 总结

本文综合分析了隧道岩爆的定义、成因、分类及其对隧道工程的影响, 重点探讨了岩爆灾害的特征、全球分布情况以及具体案例, 进一步阐述了岩爆的地质、工程和环境成因, 并提出了设计优化、施工技术、支护加固、风险管理以及应急预案等多方面的防治措施, 为隧道工程的安全施工和岩爆风险管理提供科学指导。

参考文献

- [1] Mazaera, A. and Konicek, P. (2015) Intense Rockburst Impacts in Deep Underground Construction and Their Prevention. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**, 1426-1439. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0359>
- [2] 王青海, 李晓红, 顾义磊, 等. 地下工程中岩爆灾害的成因及防治措施[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003(7): 116-120.
- [3] 徐成光. 岩爆预测及防治方法综述[J]. 现代隧道技术, 2005(6): 81-85.
- [4] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989(1): 34-38, 54.
- [5] 李忠华, 张永利, 孙可明. 大台井深部岩巷岩爆发生机理与预防措施研究[J]. 岩土力学, 2003(S2): 630-632.
- [6] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561-569.
- [7] 徐林生, 王兰生. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 1999(5): 569-572.
- [8] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(16): 2982-2988.
- [9] 徐则民, 黄润秋, 范柱国, 等. 长大隧道岩爆灾害研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004(2): 16-24.
- [10] 巩江峰, 田四明, 杨治刚. 我国高地应力区隧道岩爆研究现状及分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(5): 95-99, 105.
- [11] 张凤鹏, 彭建宇, 范光华, 等. 不同静应力和节理条件下岩体爆破破岩机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1839-1846, 1913.
- [12] 张文东, 马天辉, 唐春安, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆特征及微震监测规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 339-348.
- [13] 黄华杰. 山岭隧道钻爆法施工坍塌风险及围岩稳定性分析研究[J]. 工程建设与设计, 2021(9): 58-60.
- [14] 曲宏略, 刘哲言, 陈爽, 等. 锚杆支护参数对岩爆防治效果的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 326-333, 342.
- [15] 王淼, 安志晓, 傅鸣春, 等. 爆破震动下地下工程围岩稳定与支护设计[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 530-535.
- [16] 何忠明, 蔡军, 黄阜, 等. 基于能量法的连拱隧道钻爆施工对围岩损伤影响分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 143-151, 182.
- [17] Shi, L.Q., Zhai, P.H., Wei, J.C., et al. (2009) Influencing Action of Water-Inrush from Roof on Rock Burst. *Journal of China Coal Society*, **34**, 44-49.
- [18] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [19] 杨宝忠. 浅谈隧道施工中岩爆发生的机理及预防措施[J]. 铁道工程学报, 1999(4): 62-65.

- [20] 聂浩. 爆破荷载作用下围岩损伤范围对隧道稳定性影响分析[J]. 四川建筑, 2018, 38(3): 94-96, 98.
- [21] Wu, M., Ye, Y., Wang, Q. and Hu, N. (2022) Development of Rockburst Research: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, **12**, Article 974. <https://doi.org/10.3390/app12030974>
- [22] Qi, S., Guo, S., Waqar, M.F., Luo, G. and Zhang, S. (2024) Prediction of Brittle Rock Failure Severity: An Approach Based on Rock Mass Failure Progress. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 4852-4865. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.03.005>
- [23] Ma, L.H., Jiang, X., Chen, J., Zhao, Y.F., Liu, R. and Ren, S. (2021) Analysis of Damages in Layered Surrounding Rocks Induced by Blasting during Tunnel Construction. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **21**, Article ID: 2150089. <https://doi.org/10.1142/s0219455421500899>
- [24] Bizjak, K.F. and Petkovšek, B. (2004) Displacement Analysis of Tunnel Support in Soft Rock around a Shallow Highway Tunnel at Golovec. *Engineering Geology*, **75**, 89-106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.05.003>
- [25] Youzhong, L. (2017) The Application of Geological Advanced Prediction in Tunnel Construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **61**, Article ID: 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012007>
- [26] 傅洪贤, 孔恒, 吴进科. 复杂环境下隧道爆破施工控制技术[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 286-291.
- [27] Zhang, S., Tang, C., Wang, Y., Li, J., Ma, T. and Wang, K. (2021) Review on Early Warning Methods for Rockbursts in Tunnel Engineering Based on Microseismic Monitoring. *Applied Sciences*, **11**, Article 10965. <https://doi.org/10.3390/app112210965>
- [28] Feng, G., Lin, M., Yu, Y. and Fu, Y. (2020) A Microseismicity-Based Method of Rockburst Intensity Warning in Deep Tunnels in the Initial Period of Microseismic Monitoring. *Energies*, **13**, Article 2698. <https://doi.org/10.3390/en13112698>
- [29] 刘传正. 地质灾害应急演练的基本问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 1-7.
- [30] 董益, 李宁. 基于贝叶斯优化 XGBoost 模型的岩爆等级短期预测研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 48-52.
- [31] Ma, K., Shen, Q., Sun, X., Ma, T., Hu, J. and Tang, C. (2023) Rockburst Prediction Model Using Machine Learning Based on Microseismic Parameters of Qinling Water Conveyance Tunnel. *Journal of Central South University*, **30**, 289-305. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5233-8>
- [32] 满轲, 武立文, 刘晓丽, 等. 基于 CNN-LSTM 模型的 TBM 隧道掘进参数及岩爆等级预测[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 21-37.
- [33] 陈龙. 深地高应力环境岩体破裂演化机理及岩爆预测研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2024
- [34] 张航. 基于深度学习的隧道微震信号处理及岩爆智能预警研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [35] 罗丹旎, 卢思航, 苏国韶, 等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面临空岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 75-87.
- [36] 李天斌, 许韦豪, 马春驰, 等. 基于深度学习的隧道微震监测及岩爆预警技术与系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(5): 1041-1063.
- [37] Zhao, J., Huang, D., Cai, Y., Huang, D., Zhou, X., Wang, F., et al. (2024) Rockburst Prediction and Early Warning for a Highway Tunnel Excavated by TBM Based on Microseismic Monitoring. *Frontiers in Earth Science*, **12**, Article 1391509. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1391509>