



3 年小震如何“攒”出 7.5 级能登强震？

■本报记者 王昊昊

当地时间 2024 年 1 月 1 日 16 时许，日本石川县能登半岛连续发生多次地震，最强矩震级达 7.5 级，多地发布海啸警报。据报道，自 2020 年 12 月以来，该地区的地震活动十分活跃，截至 2023 年 12 月底，震度为 1 以上的地震发生超 500 次。中南大学地球科学与信息物理学院教授许文斌团队，联合美国加利福尼亚大学伯克利分校、日本东京大学及中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、成都理工大学等机构合作者，揭秘了能登地震的“级联破裂”机制，首次揭示了流体弱化断层强度、为强震发生创造条件并在震后触发地震群的关键机制。该成果近日发表于《科学进展》。

强震的超长“前奏”

这场矩震级 7.5 级的强震，是能登半岛有仪器记录以来最强的一次震灾，造成房屋倒塌、道路损毁、大面积停电和火灾，日本政府将其定为“极严重灾害”。

“这场地震之所以引起全球关注，不仅在于其破坏性，更在于它的超长‘前奏’。”许文斌表示，自 2020 年起，震中周围中小型地震群持续活跃。这些小震也引起了科学家的很多讨论。

能登地震发生后，长期致力于地震研究的许文斌就发现了异常：“一般来说，小震频发后要么慢慢平静，要么发生一次中等地震释放能量，像这样持续 3 年小震后突然爆发矩震级 7.5 级地震的情况，在全球地震记录里都很少见。”

那些看似微弱的震动如何演化成一场毁灭性强震？小震和强震间有什么关系？地下到底发生了什么？许文斌决定联合合作伙伴，揭开能登地震的系列谜团。

要研究一场已发生的地震，最关键的是还原现场。然而，地震发生在地下数公里甚至数十公里外，人类无法直接看到断层活动，只能靠各种观测数据间接推断。

以往研究表明，很多地震并非孤立的瞬时事件，它更像是漫长的“多幕剧”：不同断层接连“上演”，彼此作用，连锁触发，形成所谓“级联破裂”。这种过程往往导致地震持续时间更长，能量释放更复杂、破坏力更强。能登地震正是这样一个典型案例。

基于前期研究，联合团队首先利用 21 组近场地震台站数据进行高精度地震重定位，在此基础上重建断层的几何形态。然后，他们联合使用远场地震波、雷达干涉测量技术、全球导航卫星系统和强震动记录等多源观测资料，逐层剖析了地震的破裂过程。

“地震台站就像贴在断层上的‘听诊器’，能捕捉到地震时地下岩层震动的细微信号。”许文斌解释道，团队就像为地震装上了多角度的摄像机，逐帧还原了破裂演化的全过程。这种技术能捕捉到地面几毫米的细微变形，像从太空给地球做 CT，能清晰看出地震前后地面的抬升或下沉情况。

中小地震是信号

断层是地下岩石“断了”后，两边的岩石发生相对移动形成的“裂缝带”。地震大多是断层“动了”的结果，而断层是地震发生的“地下舞台”。

“如果把断层比作一面墙，那么地下流体就是‘雨水’，长期浸泡会让墙慢慢变‘松’，最后轻轻一推就倒塌。”许文斌所说的地下流体，主要是指地下岩石缝隙中流动的水、天然气和溶解在其中的矿物质，这些流体虽看不见、摸不着，却能对断层产生巨大影响。

团队通过模拟计算发现，能登半岛地下存在一条“流体通道”。过去多年里，这些流体不断沿着通道向上渗透，慢慢“钻进”了能登地区的主要断层。流体进入断层后，会像润滑油一样减少岩石之间的摩擦力，同时还会对断层壁产生压力，让原本紧密贴合的断层慢慢分开。这个过程就像给生锈的铰链上油。

而自 2020 年开始的那些中小地震，其实是断层“被弱化”的信号。也就是说，每次小震后都会有更多流体涌入断层裂缝中，进一步削弱断层强度。这是一个恶性循环，即小震让断层出现更多裂缝，裂缝让更多流体进入，流体又让断层更易发生小震，直到断层的强度降到临界值。这就像一面原本坚固的墙，长期被雨水浸透后逐渐失去强度。

一场先慢后快的“冲刺”

那么，能登地震究竟是如何发生、发展的？团队研究发现，能登强震的破裂过程分为

两个关键阶段，就像一场“先慢后快”的冲刺。

第一阶段是“慢积累”。强震开始的 18 秒内，断层的破裂速度只有每秒 0.6 公里，破裂范围局限于过去 3 年小震活跃的区域。“这时候的破裂，更像是推倒第一块多米诺骨牌。”许文斌解释道，主断层的轻微滑动，首先触发了周边那些早已被流体“泡软”的次级断层，这些次级断层就像被泡胀的饼干，稍微受力就发生了失稳破裂。

第二阶段是“快冲刺”。18 秒后，破裂速度突然飙升，并且沿着两条倾向相反的断层双向扩展。这时的断层已完全失去抵抗力，破裂就像野火一样蔓延。在震中西南方向，一个坚硬的强凹凸体最初阻挡了破裂的继续传播，但随着应力不断累积，它最终失稳破裂，带来新的能量释放。这一“延迟破裂”不仅加剧了震害，还使预测更加困难。

研究人员还发现，在主震发生后，原有地震群上方约 3 公里处新出现了一个地震群，却表现出“余震贫乏”的异常特征。以往强震后，余震会在几天内频繁发生，而这个新地震群在发生了几次小震后就突然平静了。这表明，在该区域流体弱化与非构造性破裂机制可能起到更重要的作用。

研究结果不仅揭示了能登地震的成因，也为理解复杂地震群的演化提供了观测证据和理论框架。更重要的是，这一发现对地震风险评估和减灾预警具有现实意义。

论文审稿人表示，该研究对 2024 年 7.5 级能登地震进行了全面、细致的分析，重点探讨了复杂地震群断层在破裂过程和余震活动中的作用，包括主震断层与地震群断层之间的相互作用、延迟破裂机制，以及级联破裂特征。研究结果强调了断层非均质性和流体在控制主震破裂及余震活动中的关键作用，有望在复杂断层系统，尤其是地震群断层区域内的地震破裂动力学理解方面作出重要贡献。

许多地震活跃带，如我国西南的川滇地区，同样存在类似的复杂断层环境。许文斌告诉《中国科学报》，团队将开展持续研究，如果能识别出哪些中小地震事件可能演化成强震，就能更有针对性地开展防灾、减灾工作。“虽然人类还无法阻止地震的发生，但通过科学研究，我们可以更了解它、更警惕它，从而减少灾难带来的损失。”

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adv6771>

科学家在青藏高原发现 64 个担子菌新种

本报讯(记者高雅丽)中国科学院昆明植物研究所研究员杨祝良团队在青藏高原及其周边山地担子菌多样性研究方面取得新进展，界定了 37 个属的 92 个物种，包括 64 个新种、1 个新亚种、2 个新变种、11 个中国新记录种，成立了 1 个新属和 1 个新组合，同时归并了 5 个分类学异名。8 月 26 日，相关成果发表于《真菌多样性》。

此次研究重点对 2000 至 4000 米海拔范围的各种植被类型中的大型真菌开展调查，采集标本 1.4 万余份。团队运用 DNA 条形码 ITS 片段的证据，结合多基因片段系统发育分析，对野外频见的担子菌类进行物种鉴定。该研究发表的新物种，既有在自然界广泛分布且未被正式命名的，也有分布范围相对狭窄或与青藏高原特有树木形成高度专性共生关系的稀有物种。

研究发现，真菌区系沿海拔梯度的分异程度显著高于沿经度方向的分异。也就是说，在真菌物种分布中海拔高度起到了决定性作用。这一发现为深入理解青藏高原真菌区系的形成及其演化过程提供了新视角和重要数据支持。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1007/s13225-025-00558-x>



研究发现的分布区狭窄的稀有新物种。

中国科学院昆明植物研究所供图

AI 识别出 1000 多种“问题期刊”



本报讯 一项针对 1.5 万种开放获取期刊的研究运用人工智能(AI)识别出“问题期刊”的典型特征。据《科学》近日报道，这是目前规模最大的利用 AI 识别潜在问题期刊的研究，共标记出 1000 多种期刊，约占样本总数的 7%。

学术出版领域专家认为，这款免费筛查工具虽不完善，但能为科研人员及其他群体避开可疑期刊提供参考。非营利组织“开放获取期刊目录”(DOAJ)常务董事 Joanna Ball 表示：“对于这项研究的部分成果及其为期刊相关评估提供的支持，我感到十分振奋。”

科学出版领域一直受学术不端行为困扰。分析人士指出，目前，开放获取占主导地位的商业模式背后有强烈的利益驱动，即作者向出版商付费，使论文可立即免费阅读；出版商倾向于快速发表大量论文，同时尽可能减少审稿的质量审核工作。

研究负责人、美国科罗拉多大学博尔德分校的 Daniel Acuna 表示，新研究未公布涉事期刊或出版商的名称，但多数被标记为问题期刊的出版物来自发展中国家。印度和伊朗的出版物被标记的比例最高，均接近 1%。他同时强调，发达国家的知名出版商也存在此类问题期刊。

Acuna 承认，AI 判定“并非完美”。在 15191 种期刊样本中，AI 将 1092 种期刊正确归类为问题期刊，但同时误判 345 种为无问题期刊，另有 1782 种问题期刊未被标记。他表示，研究结果“应被视为需要进一步调查的初步信号，而非最终定论”。研究团队将 DOAJ 的指南作为质量基准，原因在于它细则丰富，便于定量分析。但目前学

术界对问题期刊尚无公认定义，不同机构已制定了至少 90 项条款用于识别问题期刊。而 DOAJ 所指的问题期刊无法保证所刊发的论文不涉及学术不端、不具备处理数据、数据造假等问题的能力，且费用不透明。

尽管存在局限性，Acuna 认为，相较于仅由人类评估者进行的主观分类，AI 工具能帮助研究人员节省时间，并实现更公平、更主动的期刊评价。团队估算，2000 年至 2020 年，在问题期刊上发表的论文数量增长了 10 倍以上，达到 4.5 万篇，可见对这类工具的需求十分迫切。

加拿大渥太华大学的 Kelly Cobey 指出，问题期刊出版商可能通过改变运营方式或期刊名称逃避检查，因此 AI 工具需持续更新。“恶劣的问题期刊往往难以追踪，非常适合用 AI 工具应对，因为 AI 能随时间变化及时调整识别策略。”(王方)

中央教育工作领导小组：实施急需学科专业超常布局行动

据新华社电 记者 8 月 28 日从教育部获悉，中央教育工作领导小组近日印发《高等教育学科专业设置调整优化行动方案(2025—2027 年)》，对深入推进学科专业设置调整优化工作作出系统部署，明确提出实施急需学科专业超常布局行动。

方案提出，实施急需学科专业超常布局行动，瞄准战略性新兴产业和未来产业等，快速布局一批学科专业点；实施基础学科跃升行动，在一流学科培优行动中加大对基础学科支持力度；实施新兴学科和交叉学科孵化行动，布局建设一批示范性交叉学科交叉中心；实施存量学科专业优化行动，对社会需求明显不足、培养质量下滑、办学条件不足的学科专业点进行预警并提出整改要求；实施学科专业内涵更新

行动，加快教学内容迭代，强化人工智能赋能教育教学，支持高校教师(教学)发展中心、导师发展中心等高质量发展；实施培养模式改革深化行动，建好国家卓越工程师学院等新型人才培养平台，加强成熟模式的辐射推广。

此外，方案明确健全供需对接机制，建设国家人才供需对接大数据平台；创新目录管理机制，缩短调整周期，加强研究生、本科、高职三类学科专业目录协同联动；完善分类发展机制，差异化推进基础类、应用类、战略类学科专业布局建设；改革评价考核机制，强化人才培养中心地位，完善促进学科专业特色发展的多元评价体系；优化激励引导机制，统筹招生计划、超长期特别国债等政策，持续优化学科专业结构。(魏冠宇)

大气氧含量经历了 3 次显著跃迁

本报讯(记者温才妃)南京大学国际同位素效应研究中心教授彭永波、鲍惠铭、曹晓斌与成都理工大学教授李超团队等，通过建立高分辨率硫酸盐三氧同位素数据记录，结合系统生物地球化学模型定量分析，揭示了地球大气由无氧向富氧转变的阶段性演化历史和控制机制，为理解地球生命的起源与演化、地球宜居性的形成与演化提供了关键的地球化学示踪指标和重要的理论基础。8 月 27 日，相关研究成果发表于《自然》。

作为太阳系中目前已知唯一拥有生命的天体，地球宜居性的形成与演化是地球系统科学的核心议题。地球大气氧含量从无到有，并达到目前富氧状态的演变，是驱动生命起源演化、改善行星宜居性的关键过程，深入探究地质历史时期大气氧含量的变化和控制机制对于理解宜居地球的形成具有重要意义。然而，目前缺乏有效的示踪技术指标和数据来综合定量研究地球表层氧储量及其源与汇的变化和关键控制因子。沉积硫酸盐岩中微量硫酸根中的三氧同位素可以连续记录大气氧独有的非质量依赖的氧同位素异常信号，进而直接追踪古大气氧含量的变化。

该研究通过系统采样分析与文献数据整合，建立了过去近 30 亿年的硫酸根三氧同位素演化记录。该记录显示，大气氧含量经历了 3 次显著跃迁，分别发生于古元古代(24 亿年前至 21 亿年前)、新元古代(约 10 亿年前)和古生代(约 4.4 亿年前)，表明地球氧含量从无到有，并呈阶段性上升，在约 4.1 亿年前趋近现代稳定的富氧状态。同时，新元古代高分辨率 C-S-O 同位素协同波动特征表明，大气氧含量上升后，开始周期性氧化以缺氧为主的海洋。

通过结合相关模型，研究人员发现大气氧驱动的这些海洋脉冲式氧化事件，促进了缺氧水体中有机碳与还原性硫的氧化，从而引发 C-S-O 同位素的协同扰动；同时，该过程在短期内通过负反馈机制迅速消耗大量氧气，抑制甚至逆转了大气氧的进一步上升。

该研究定量重建了地球大气氧含量的演化历史，揭示了大气与海洋氧化状态动态耦合的协同演化机制。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09471-4>

免疫衰老是免疫治疗耐药的关键因素

本报讯(记者刁雯蕙)中国科学院深圳先进技术研究院联合中山大学孙逸仙纪念医院、广州国家实验室、美国哈佛大学医学院等机构，证实了肿瘤微环境中的免疫衰老是导致免疫治疗耐药的关键因素，并在动物模型和二期临床试验中证实了抗衰老药物联合免疫治疗能显著提升头颈鳞状细胞癌(HNSCC)患者治疗响应率，且能大幅降低毒副作用。相关研究成果近日发表于《自然-医学》。

研究团队通过一项二期临床试验发现，尽管辅助化疗联合免疫治疗在 HNSCC 患者中取得了 47.9% 的病理完全缓解率，但仍有部分患者对治疗无响应。这些无响应患者的肿瘤微环境中存在明显免疫衰老特征。其中，负责启动免疫反应的“初始力量”——CCR7⁺CD4⁺幼稚 T 细胞和维持长期免疫记忆的关键细胞——CD27⁺记忆 B 细胞比例显著降低，T 细胞受体、B 细胞受体克隆多样性下降，同时衰老标志物表达升高。

团队构建了免疫衰老相关基因集评分系统，证实无响应患者的 T 细胞和 B 细胞具有更高的评分，并发现 IGF1⁺巨噬细胞比例升高与 CD4⁺幼稚 T 细胞减少呈负相关，揭示了免疫衰老是导致治疗耐药的关键机制。

为验证干预策略，研究团队在多种动物模型中测试了抗衰老药物联合免疫治疗的疗效。在衰老小鼠模型中，与单用 PD-1 抑制剂或联合化疗相比，PD-1 抑制剂联合达沙替尼和帕索昔林显著减少了肿瘤病灶并延长了生存期。该联合治疗降低了肿瘤内免疫细胞的衰老标志物表达，同时增加了 CD62L⁺CD44⁺CD4⁺幼稚 T 细胞比例。这一效果在早衰小鼠模型、膀胱癌和乳腺癌移植模型中同样得到验证。

基于前期研究结果，团队开展了首个抗衰老药物联合免疫治疗的二期临床试验。24 例可切除 HNSCC 患者在接受“替雷利珠单抗联合达沙替尼和帕索昔林”的新辅助治疗后，33.3% 达到主要病理缓解，其中包括 16.7% 的病理完全缓解率，显著优于历史免疫单药治疗数据。

此外，该方案的 3 至 4 级治疗相关不良反应发生率仅为 4.2%，低于化疗联合免疫治疗的 51%。治疗后患者肿瘤内 CCR7⁺幼稚 T 细胞增加，衰老标志物表达降低，为这种创新联合策略的临床转化提供了有力支持。

该研究首次系统揭示了免疫衰老在肿瘤免疫治疗耐药中的关键作用，并创新提出抗衰老药物联合免疫治疗的策略。这一联合方案不仅提高了病理缓解率，还大幅降低了与治疗相关的副作用，展现出良好的转化潜力。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41591-025-03873-7>

效。在衰老小鼠模型中，与单用 PD-1 抑制剂或联合化疗相比，PD-1 抑制剂联合达沙替尼和帕索昔林显著减少了肿瘤病灶并延长了生存期。该联合治疗降低了肿瘤内免疫细胞的衰老标志物表达，同时增加了 CD62L⁺CD44⁺CD4⁺幼稚 T 细胞比例。这一效果在早衰小鼠模型、膀胱癌和乳腺癌移植模型中同样得到验证。

基于前期研究结果，团队开展了首个抗衰老药物联合免疫治疗的二期临床试验。24 例可切除 HNSCC 患者在接受“替雷利珠单抗联合达沙替尼和帕索昔林”的新辅助治疗后，33.3% 达到主要病理缓解，其中包括 16.7% 的病理完全缓解率，显著优于历史免疫单药治疗数据。

此外，该方案的 3 至 4 级治疗相关不良反应发生率仅为 4.2%，低于化疗联合免疫治疗的 51%。治疗后患者肿瘤内 CCR7⁺幼稚 T 细胞增加，衰老标志物表达降低，为这种创新联合策略的临床转化提供了有力支持。

该研究首次系统揭示了免疫衰老在肿瘤免疫治疗耐药中的关键作用，并创新提出抗衰老药物联合免疫治疗的策略。这一联合方案不仅提高了病理缓解率，还大幅降低了与治疗相关的副作用，展现出良好的转化潜力。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41591-025-03873-7>

新研究填补黄河长江流域关键时期遗传史空白

本报讯(见习记者江庆龄)复旦大学文少卿副教授、金力院士和王传超教授团队联合国内多家单位科研人员，通过构建和分析迄今最大规模的东亚新石器时代古基因组数据集，为理解新石器时代中期农业扩张如何深刻塑造东亚人群的遗传历史提供了新视角，填补了黄河、长江流域关键时期的遗传史空白，解决了关于东亚农业人群扩散机制、高原人群形成及南岛语族起源的长期学术争议。相关研究近日发表于《细胞-基因组学》。

农业的出现标志着人类从狩猎采集迈向定居种植，深刻变革了人类的生活方式、人口结构、健康状况、遗传适应及文化面貌。虽然考古研究已初步勾勒出农业传播的时间、地理节点与路径，但其背后的复杂扩散机制，尤其是“人口扩散”与“文化扩散”的学术争论，仍是学术界关注的焦点。

中国的黄河与长江流域作为世界上最古老的独立农业起源中心之一，分别驯化了粟黍和水稻，孕育了早期中华文明，更推动了史前农作物的全球化传播。然而，由于古代人类基因组数据匮乏，这两大流域人群的遗传历史研究长期存在空白。

研究团队收集了 20 处考古遗址(6231 年前—4650 年前)的 74 例样本，进而发布了迄今最大规模的东亚新石器时代中期古基因组数据集，涵盖了东亚两大农业起源中心。

结果显示，在新石器时代中期，以黄河中游人群为核心，粟黍农业人群呈现大规模辐射状扩散，遗传扩散格局与庙底沟文化的扩张和粟作农业的发展高度吻合。同时，在与周边人群的互动过程中，黄河流域不同区域人群形成了独特的遗传结构。文化因素和地理因素共同塑造了黄河流域人群遗传亚结构，而地理因素在其中起到了关键作用。

沿海地区一直被认为是南北方交流的重要区域。但研究团队分析发现，黄河流域人群所具有的南方成分更可能源于邻近的长江流域而非东南沿海地区，黄河流域和长江流域早在新石器时代中期就存在双向的人群互动。

研究发现，与中国北方其他地区人群相比，高原人群与黄河上游农业人群之间的遗传联系最为密切。值得注意的是，研究团队在黄河上游大地湾遗址中发现了一例迄今最早的、具有青藏高原人特征有 EPAS1 基因单倍型的现代人，表明早在距今 5800 年左右，高原人群与黄河上游人群之间就存在密切的遗传联系和交流互动。

研究还发现，现代中国台湾南岛语人群与长江流域农业人群的遗传亲缘性，高于与新石器时代晚期的中国东南沿海人群的亲缘性，并且这些人群的遗传成分主要来自长江流域农业人群，证实了南岛语族祖先可进一步追溯至新石器时代长江流域农业人群，凸显了长江流域人群迁徙在南岛语族形成和扩散中的作用。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.cgen.2025.100976>