

地震科技前沿快报

2022 年第 6 期（月刊总第 41 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震局科技与国际合作司

中国科学院兰州文献情报中心
中国科学技术信息研究所

本期概要

- 1、基于被动矩阵成像分析圣哈辛托断裂带的地震散射体分布
- 2、全球地震预警系统的发展
- 3、同震静态应力变化是否会维持震后脱气？
- 4、中国的中短期地震预测及基于 R 值的效能评估

基于被动矩阵成像分析圣哈辛托断裂带的地震散射体分布

断裂带与岩石多尺度的非均质属性相关，通过常规地震反射方法（探测地质单元偏移量）和层析成像技术（获得平均地震速度）可分析断裂带的大尺度变化。然而，断裂带局部非均质性的表征，如裂缝和破裂，对常规技术来说是一个挑战。

上述问题的解决可以为断裂带的构造和力学模型提供详细信息。最近，反射矩阵法（利用环境噪声互相关中的体波反射）得到发展，通过引入像差修正来处理断裂带的实际横向速度变化。本研究中，法国格勒诺布尔大学的研究人员将这种方法进一步应用于加州圣哈辛托（San Jacinto）断裂

带前几公里的地壳散射体的分布研究。反射矩阵法不仅能对镜面反射进行成像，而且还能从介质的简单均匀背景速度模型开始，分析地震波散射体的存在、位置和反射率。得到的断裂带三维图像，解决了断裂表层轨迹内及周围区域散射特性的横向变化，以及研究区 NW 和 SE 部分之间的差异。在 SE 剖面上观察到一个局部的深部强破碎带，表明深部断裂带的几何复杂性导致了岩石破碎的持续发生。相关研究成果发表在 2022 年 1 月的 *Earth and Planetary Science Letters*。

断裂是变形过程中地震演化的构造表现，普遍具有十分复杂的特性。对断裂区域的地质和地震性质的表征可以为评估过去和将来可能的破裂特性提供重要信息。在地震成像技术中，反射地震学通常与平面水平层成像有关，具有很高的分辨率，并通过沉积层的偏移提供断层间接成像。为了获得地表下的构造信息，人们应用了偏移技术，主要目的是在深度或时间上重新定位反射面和散射体。然而，已经证明，环境噪声互相关可以用来对地球内部的深层目标与体波反射进行成像。一种“反射矩阵法”被引入地球物理学研究，允许对镜面反射（对应于不同传播速度层之间的边界）和由局部不均匀分布产生的非镜面反射进行成像。Touma（2021）使用反射矩阵法，分析了密集阵列（1108 个垂直检波器，以 600 m × 700 m 形式配置）记录的环境噪声，以对加州 Anza 东南部的圣哈辛托断裂带（SJFZ）的地下特征进行成像。

研究区位于加州 Anza 东南部复杂的三叉区，地表断层轨迹的位置来源于最近对地表地质填图和浅层地球物理成像的详细研究。研究采用了 Touma（2021）的方法，获得 SJFZ 深部更详细的 3D 图像，并以前所未有的分辨率对浅层结构进行了解析。为了将数据在虚拟聚焦基础上进行投影，采用均匀传输矩阵，匀速模型为 1500 m/s。从这个矩阵中，扭曲的成分被

提取出来，并用于实际上聚焦介质内部的反向波（back wave）。由于校正，最终的地下图像的分辨率大大提高，并揭示了地下反射率的三维特征。

浅部断裂带成像：对反射图像应用衰减补偿方法，结果被绘制在一个笛卡尔网格上，原点位于阵列的中心，x 轴垂直于断层轨迹。颜色表示以 dB 绘制的背散射强度（backscattered intensity），以最大聚焦强度揭示材料边界的非均匀性和不连续的局部分布。

密集阵列记录的噪声高频互相关使解析地壳顶部数百米的特征得以实现。结果显示，不同方向的切片（slice）之间存在结果差异。核心断层破坏区内的散射体强度较高，而外围的散射体强度较低。在两个垂直的面板上，可以观察到大约 150 m 深的反射结构的明显偏移。散射在南部剖面上表现得更强，范围更广。强度在北部剖面 150 m 以下减弱，而在南剖面中，高密度的散射体延伸到更深处，揭示出断层痕迹周围的局部破坏区。

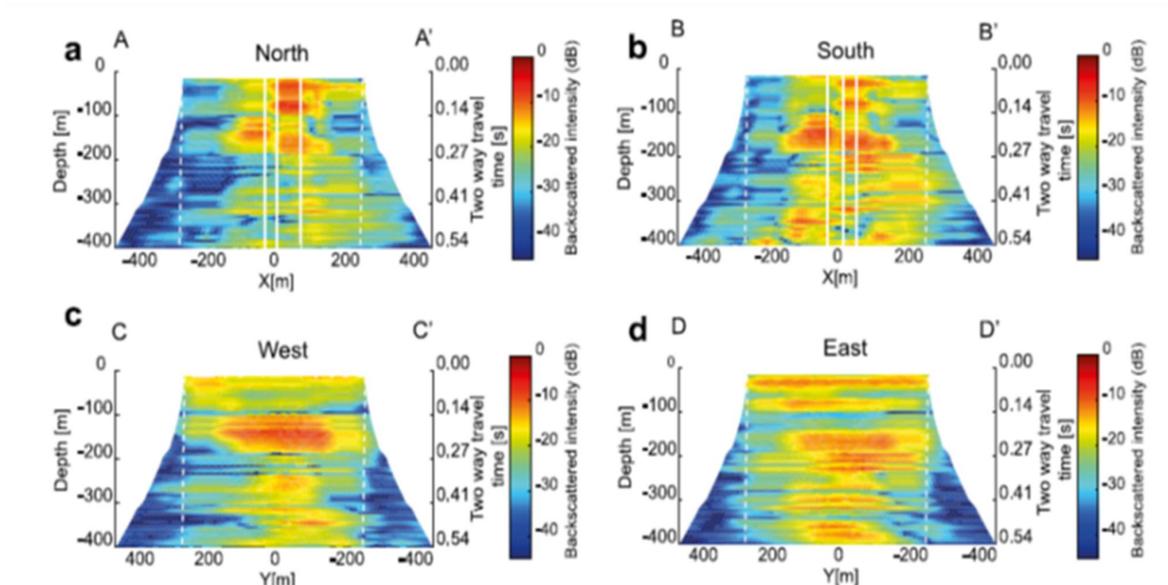


图 1 三维散射体的浅部剖面

图 1a 和 1b 中散射体的偏移主要发生在 SW 断层痕迹以下。图 1c 和 1d 中东、西部剖面没有显示出明显的地下结构横向变化。地表轨迹 NE 方

向的高散射区可以清楚地 在图 1d 中观察到，与圈闭结构大体一致。SGB 处（Sage Brush Flat）显示的破坏要比断裂 NE 侧更严重。图 1a 中，散射在 NE 侧也要更明显。在 150~400 m 之间，散射带轻微倾向 NE。

更深、更大的结构：图 2 三维散射图像显示的特征远远超出了阵列的空间展布。由于断裂带周围的强烈破坏，这种观测成为可能。前两个面板（图 2a 和 2b）的对比显示，SGB 的 NW 和 SE 部分的反射率存在明显差异。在 $z=500$ m 处 ($t=0.7$ s)，均表现出较宽的浅层散射带，呈 V 形分布，约 800 m 宽。浅层区域密集分布的散射体可能是由于断层轨迹周围的岩石受到严重破坏。在 NW 面板，在 $z=1000$ m ($t=1.3$ s) 以下的区域，破坏扩散不明显。然而，在该剖面中观测到的背散射能量与断层两侧出现的水平反射面有关。相反，SE 区域高强度散射区延伸至 $z=1000$ m ($t=1.3$ s) 以下。在 $z=1500$ m ($t=2$ s) 附近，背散射强度揭示出一个约为 450 m 宽的带。在地壳深处，散射似乎与不连续的深层 ($z=3300$ m, $t=4.4$ s) 产生的镜面反射相结合。

图 2a 和图 2b 中不同的散射带展布与研究区断裂带性质和结构复杂性的变化相一致。在 SGB 的 NW 部，SJFZ 占据了一个线性山谷，而在 SE 部，它变得更加局部性，并与峡谷相关。其中一条主要断裂位于 SGB 盆地 NW 向边界的底部。沿着走向向 SE 方向，该断裂与另外两个断裂合并，形成了一个更局部的区域，这与更高的破坏强度相关。剖面反射率证实了这一特征，显示了在阵列 SE 深处与高度破坏（破裂和破碎）的岩石相关的显著散射。在前 2 km ($t=2.7$ s)，断层在 SE 方向更加局部化，散射体强烈分布。事实上，散射波场在 SE 方向占主导地位，镜面波分量较 NW 方向更不明显。在 NW 方向，破坏区较分散，强度较弱。破坏强度随着深度快速降低，而散射带的扩展主要发生在最初的几公里处。在更大的深度，

镜面反射超过散射并占据主导地位。平行于断层的面板也显示出断层两侧的结构差异。在 SW 剖面上，散射更为集中（图 2c），而 NE 剖面（图 2d）显示出平面边界的强连续性。

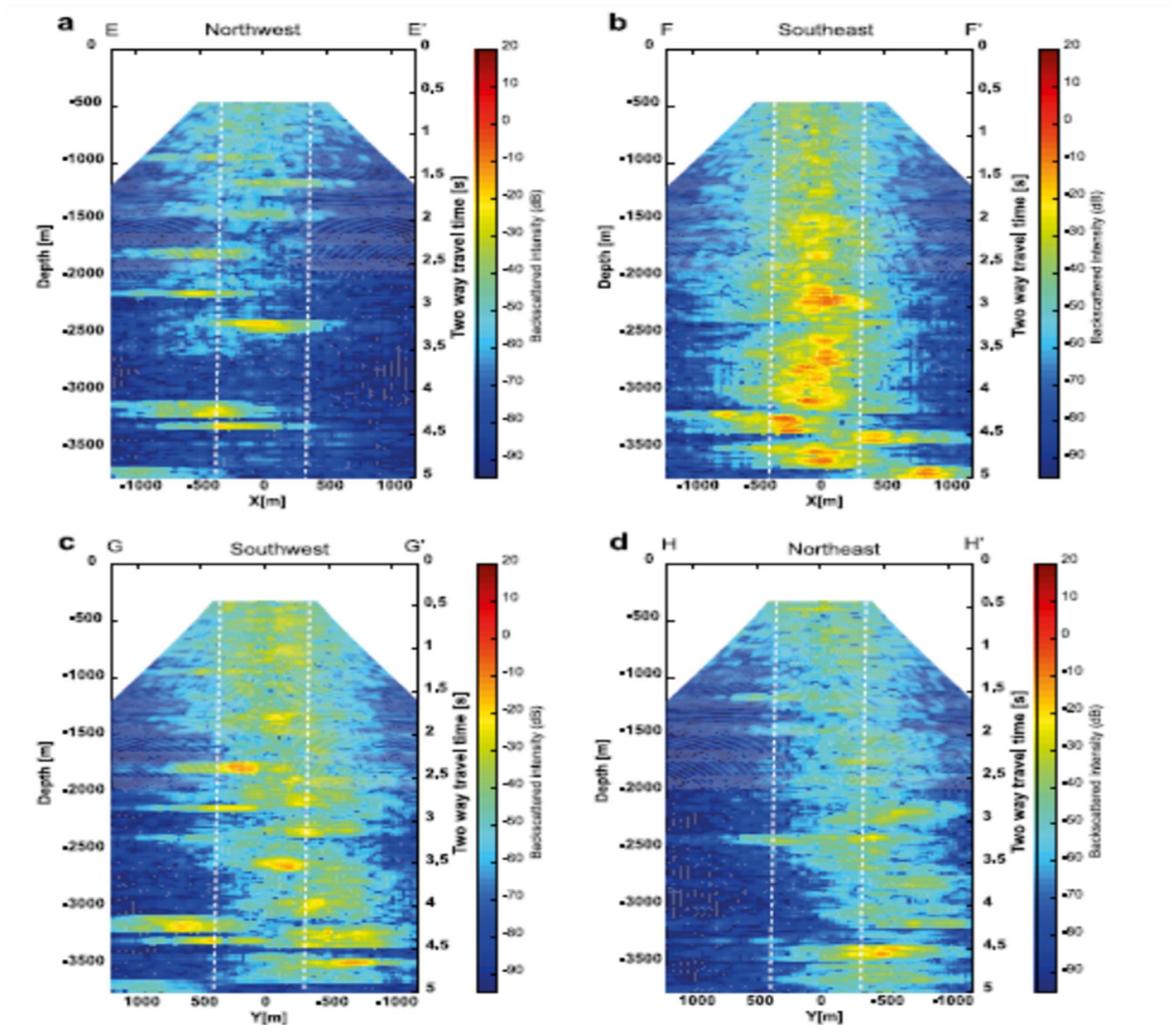


图 2 三维散射体的深部剖面

横向变化：为了检测密集阵列下方可能的能量横向变化，研究人员将该区域划分为几个子区域，并检查浅部和深部与时间相关的衰减强度。值得注意的是，断层带具有较高的强度值，这是由局部破坏传递的非镜面能量造成的。断层陡坡带的能量不同于其周围的东部、西部地区，后者的衰减斜率更平缓。断裂带由主要的断裂和破碎的岩石所定义，因此它的特征

是能量的快速衰减。在破坏分布较广的邻近区域，与断裂带相比，衰减较小。

研究人员还比较了阵列下方 4 km 处 SE 和 NW 方向的强度衰减。NW 方向的强度波动与几个深度的镜面反射有关。换句话说，高值对应图 2a 中观察到的反射边界，而表示阵列 SE 方向的蓝色散点图平滑减小。

整体而言，地表观测结果表明，主断层及其周围核心破坏在 SE 方向更为有限，主要滑移带被强烈的、延伸约 3~4 km 的破坏和断裂圈定。在 NW 方向，断裂带的散射只出现在前 1 km 处，表明存在较浅、较弱的弥散性破坏。NW 向和 SE 向断裂结构的横向变化与 SJFZ 的 Anza 剖面（单一的主断裂痕迹）向三叉区复杂断裂带（地表有多道断裂痕迹）的转变相一致。在 SGB 东南部分存在延伸至深部的高散射区，这很可能与次平行带（sub-parallel strand）之间高度受损的断裂带岩石有关。

来源：Touma, R, Aubry, A, Ben-Zion, Y, et al. Distribution of seismic scatterers in the San Jacinto Fault Zone, southeast of Anza, California, based on passive matrix imaging. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 578, 117304.

全球地震预警系统的发展

对地球物理过程的观测曾经是政府机构的专属领域。在美国，美国国家航空航天局（NASA）的卫星观测地表变化，美国国家海洋与大气管理局（NOAA）的浮标监测海洋和大气，美国地质调查局（USGS）的地震仪探测地震，这使得科学家们能够解决如今的观测网络建成之前所无法想象的问题。

现在，私营部门拥有更大的观测网络，这些网络也可以被用来研究地球过程并减少自然灾害的影响。因此，公私伙伴关系的发展对于地球科学家使用完整的观测数据集来回答基本科学问题和解决社会挑战越来越重要。相关综述分析于 2022 年 2 月发表在 *Science*。

最近，全球范围内地震预警（EEW）系统的快速发展就是这种公私伙伴关系以及应用私营部门的大规模观测网络来加速拯救生命的一个例子。EEW 系统使用靠近震中的地震传感器来快速检测地震，然后在震动前向处于危险中的人们发出警报。警报通常只有几秒钟，但对于较大的地震可能长达一分钟，个人和机构可以使用警报来减少震动带来的影响。EEW 系统背后的想法可以追溯到 1906 年的旧金山地震，首次于 1960 年代在日本得到实施。第一个公共 EEW 系统直到 1991 年才出现，当时沿墨西哥海岸俯冲带的一系列地震仪被用来开始向墨西哥城提供警报。

这种缓慢的发展是由于运行 EEW 系统面临巨大的科学和技术挑战：地震传感器阵列必须在震源区连续运行；表征震源的算法必须实时处理大量数据，以确定何时向何地发出警报；必须将警报快速传递到受影响的区域，如果警报要发挥作用，所有过程必须在几秒钟内发生并完成。整体而言，这些挑战减缓了全球 EEW 系统的发展。

在墨西哥城部署 EEW 系统之后，2007 年，也就是 16 年之后，下一个公共 EEW 系统在日本诞生。又过了十年，台湾和韩国的 EEW 系统诞生。截至 2018 年，EEW 系统累计能够为 2.1 亿人提供预警。接下来，2019 年 ShakeAlert 公开发布，为加利福尼亚州的 4000 万居民提供地震预警服务。该州还采用了 MyShake 智能手机应用程序，该应用程序既可以发出警报，也可以记录地震震动。ShakeAlert 于 2021 年初扩展到俄勒冈州和华盛顿州，使全球拥有地震预警服务的总人口达到 2.6 亿人。所有这些系统都使用传统的地震网络，这些网络主要由政府和学术机构使用固定或专用传感器运行。EEW 系统的加速扩展仍在继续，目前在中国和以色列的大部分地区都在对公共 EEW 系统进行测试，其使用的预警算法通常是国际合作的产物。

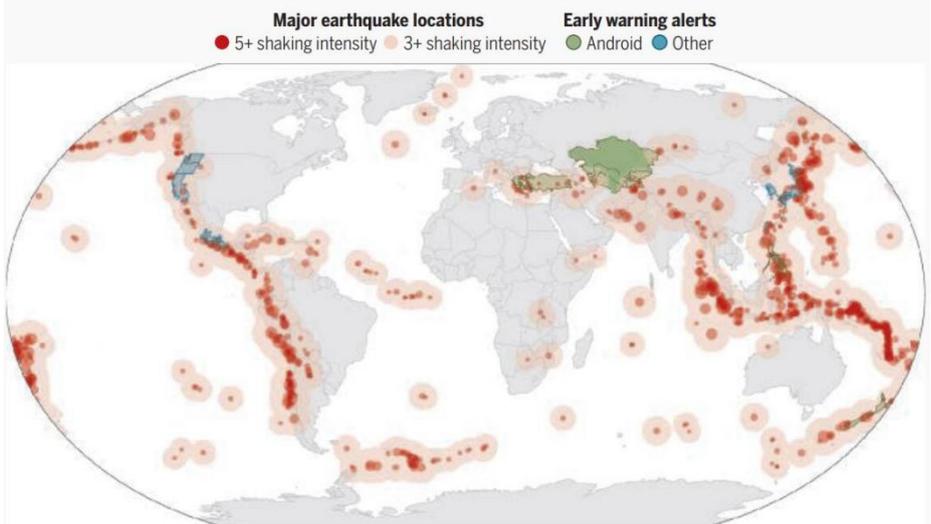


图 1 全球地震动及预警系统的分布

2020 年，谷歌推出了安卓版的地震警报系统。最初，它与 USGS 建立公私伙伴关系，向加利福尼亚州的所有安卓手机发送 ShakeAlert 的消息。之后，在 2021 年，它开始向新西兰和希腊发送警报。同年早些时候，土耳其、菲律宾和中亚也加入了进来。在 MyShake 模型的基础上，这些国家和地区警报可以通过使用私人安卓手机中的加速度计来检测地震并发

出警报。安卓版地震警报系统的加入，在运营的第一年又增加了 1.5 亿预警用户。今天，有超过 4 亿人可以使用地震预警服务。谷歌还表示，其目标是让安卓版地震警报系统在全球范围内可用，这是可能的，因为现在大多数情况下，只要有人的地方就有手机。

地震预警服务的迅速扩展可以挽救生命。但仍然存在持续的人力和技术挑战：公众必须有效使用警报。通常，用户第一次意识到地震预警是在他们收到第一个警报时。在那一刻，用户对这项技术充满热情，因为他们在几秒钟后会感到震动。挑战在于将这种热情转化为适当的保护措施，这不仅包括个人安全措施，还包括将警报技术集成到人类的生活基础设施中。现在，火车 EEW 系统已经能够使火车减速并停止，自动驾驶汽车也可以通过编程来做到这一点。未来，人类日益自动化的家庭和办公室也可以做出反应，以降低风险。

在技术方面，挑战仍然是确保警告的最佳性能，尽可能快地获得警报，对震动区域进行最准确地估计。以研究为导向的地震网络向公共安全基础设施的转变扩大了可用数据集。在美国西海岸，由于实施了 **ShakeAlert**，地震台站的数量将增加近两倍。类似的地震网络正在其他地震多发国家部署，例如中国和以色列。**MyShake** 的发布展示了使用个人智能手机加速度计来记录地震震动的具体实践，由此将传感器的数量从数千个增加到一百多万个。通过将此功能集成到安卓系统中，现在有超过 10 亿个传感器正在工作中。传感器的这种激增提供了更详细的地震动图，以及影响地震动放大和变化的更多因素。

相关进展以及应对未来挑战的能力取决于跨学科、跨机构和跨部门的合作。曾经，EEW 来自一个公共安全机构和应急响应机构开展合作以提供警报的研究项目——地震学家与社会科学家合作，以确定物理上可能发生

图像揭示出地表的毫米级变形，可用于研究地表变形，例如滑坡以及水和岩浆的流动。跨洋通信电缆可用于探测地震，人类城市下方的暗光纤也可用于探测地震。

关于这些网络及其产品寿命和运营它们的营利性公司的动机存在各种问题。即使在完全公共网络中，它们的运营和持续性投入也需要展示价值，无论是在风险减缓方面，还是在开发私营部门产品（如天气信息网络）方面。在私营部门，必须将一定量的价值返还给所有者，以换取数据。尊重用户隐私至关重要，数据可以通过多种方式实现匿名化，包括使用差异隐私、聚合传感器数据和许可协议等。但是，通过正确的伙伴关系，这些网络可以提供比几年前更多的观测结果，并且可以用于研究和社会公益。这种公私伙伴关系不仅可提供了解地球物理过程的数据，还可提供能加快解决方案开发和交付的网络。

来源：Allen R M, Stogaitis M. Global growth of earthquake early warning. *Science*, 2022, 375(6582): 717-718.

同震静态应力变化是否会维持震后脱气？

地震会增强水文地质系统的脱气。很多这样的系统会在几个月之后恢复到震前水平，但是有时震后脱气也会持续数年。目前，控制这种长期脱气的因素还未可知。

本研究分析了几次大地震引发震后脱气的多种诱因，结果表明，水文地质系统会对地震产生多种响应，不同的诱因均可能在发挥作用。在廓尔喀地震之后，热泉出现了持续增加的 CO₂ 流。这些热泉有松弛(**unclamped**)的补给系统，表明足够大的正应力改变可能会维持震后脱气。

本研究有两方面意义，一是发现松弛应力 (**unclamping stress**) 和增加的气流之间具有空间联系，二是为持续增加的脱气提供了解释。相关成果于 2022 年 2 月发表在 *Geology*。

地震会影响水文地质系统的脱气，本研究聚焦于几公里深处的地质流体的释放，而非得到很好研究的由地震导致的地表径流的增加。由地震波传播引起的动态应力 (**dynamic stress**) 可能是地质流体释放的一个主要机制。瞬态动态应力随震中距离的增加发生相对缓慢的衰减，因此可以远距离触发地震，改变水文地质系统。但是，远离断层破裂时，永久性静态应力的衰减很快。

一个有趣的问题是，地震之后增加的流体释放会持续数年，但这与断层的愈合效率无关。引起这一现象的原因还未可知，本研究主要是为了检验大的破裂断层附近持续增加的脱气是否与永久性的松弛应力有关。后者在震中区很显著，大到足以打开先存断层控制的通道或者形成新的通道，从而促进流体上涌。然而，正应力变化与持续增加的脱气之间的联系还未确立。为了说明这一问题，本研究聚焦于同震流体或震后流体释放得到很好研究的，以及破裂断层形态和运动特征已知的大地震。

本研究包括三个地震，两个是陆上地震：2008 年中国汶川地震、2015 年尼泊尔廓尔喀（Gorkha）地震，一个是海下地震：2010 年智利马乌莱（Maule）地震。

汶川地震起源于北东走向的龙门山断裂，震后青竹河涌现出多个释放生物甲烷的渗漏点，持续数月。渗漏点出现在由北东向陡倾的逆冲断层构成的一个叠瓦状系统上，这些断层被认为是主要的流体通道。生物甲烷的形成深度小于 1.5~2 km，因此仅断层的上部可作为通道。

2010 年，Mw8.8 马乌莱地震使安第斯巨型逆冲断层的很大一部分发生破裂。震后 7 个月，在断裂上方的海底发现了流体渗漏。海底调查发现，流体渗漏发生在与深部地震断层相连的南北向到北西-南东向的张开破裂上，尤其是一个西倾的正断层和一个东倾的逆冲断层。

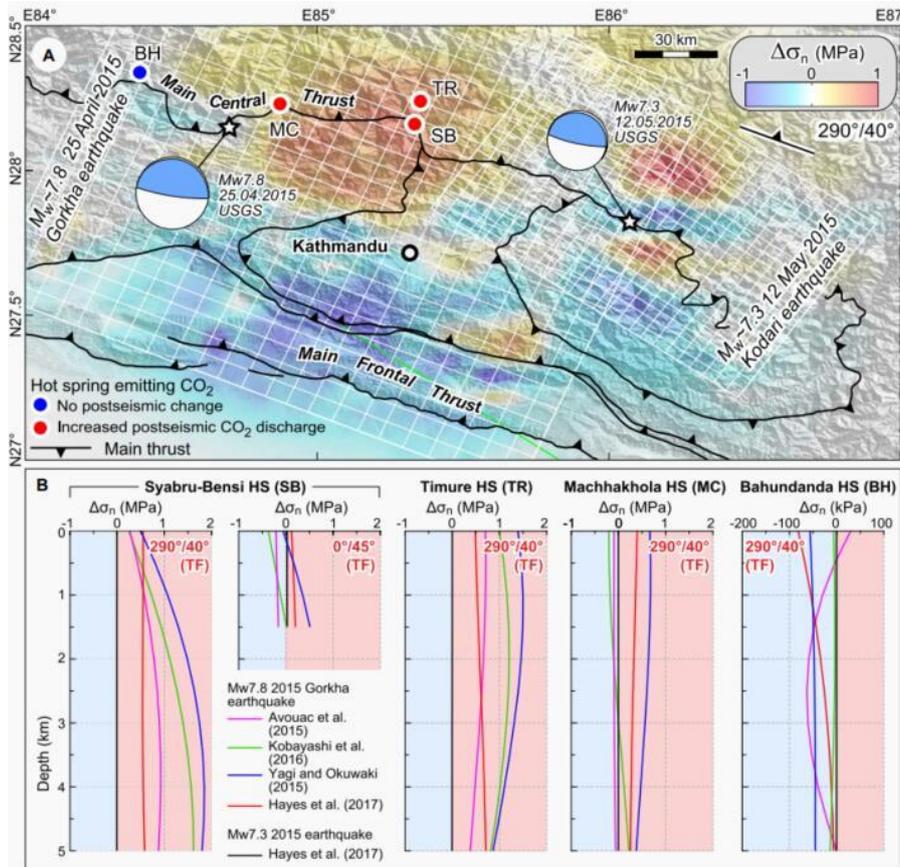


图 1 尼泊尔 Mw7.8 廓尔喀地震和 Mw7.3 科达里（Kodari）地震引起的正应力变化

2015年，Mw7.8 廓尔喀地震引起了部分北西西向的主喜马拉雅逆冲断裂（MHT）的破裂。这次地震改变了当地的热泉（HSs）以及CO₂排放口。一些排放口的CO₂排放量增加，尤其是Syabru-Bensi排放口，排放量仍是震前的两个数量级。同震流体通道的改变引起了一些渗漏点的消失，以及另一些渗漏点的形成。与MHT平行的逆冲断层是富CO₂流体的运移通道。

研究使用已发布的有限断层破裂模型（FFM）和Coulomb 3.3软件计算了均匀弹性半空间中流体补给系统的正应力变化（ $\Delta\sigma_n$ ）。正应力可以压紧或松弛流体补给断层，松弛应力被认为有利于深部地质流体的上升。 $\Delta\sigma_n$ 沿着补给断层从地表到2 km或5 km深处，每0.5 km计算一次。

静态体应变（ ϵ_{kk} ）在浅层流体储库的深度（2~3 km）被确定，因为流体会相对较快地到达地表，因此可以很好的响应地震扰动。在封闭环境中，多孔弹性介质中体应变产生的孔隙压变化通过 $\Delta p = -BK_u\epsilon_{kk}$ 确定（ $K_u=20\text{GPa}$, $B=0.7$ ）。峰值动态应力（ T_p ）通过峰值地面速度（PGV）除以剪切波速（ V_s ）获得。在线弹性介质中， $T_p=G(\text{PGV}/V_s)$ 。

2008年汶川地震： $\Delta\sigma_n$ 显示出明显的变化，推断流体补给断层经历了压紧或松弛。因此， $\Delta\sigma_n$ 的作用不清楚。估算的浅部（2 km）体应变主要显示压缩，达到 -4×10^{-5} ，引起流体压力增加0.56 MPa。最近的两个地震台站记录的PGV是56 cm/s，表明 T_p 为3.5 MPa。

2010年马乌莱地震： $\Delta\sigma_n$ 显示逆冲断层和正断层均发生压紧。体应变显示渗漏区为压缩应变，达到 -5×10^{-5} ，暗示流体压力增加0.7MPa。最近的海底地震仪记录的PGV为27 cm/s，表明 T_p 为1.7MPa。

2015年廓尔喀地震：热泉（流体流量增加）的补给断层通常遭受了小到明显的松弛，虽然也有一些例外。最大的松弛发生在Syabru-Bensi和

Timure 热泉补给断层上, $\Delta\sigma_n$ 达到 1.8 MPa。在南北向逆冲断层的浅部也记录到了中等的压紧 (≤ -0.25 MPa) 或者松弛 (≤ 0.5 MPa)。相似的 $\Delta\sigma_n$ 不确定性也发生在 Machhakhola 热泉, Bahundanda 热泉流体通道则显示轻微的压紧。Syabru-Bensi 和 Machhakhola 热泉显示出扩张的体应变, 然而 Timure 和 Bahundanda 热泉没有压缩或扩张的体应变。这些热泉的 PGV 在 25.3~61.6 cm/s 之间, T_p 在 1.6~3.9 MPa 之间。

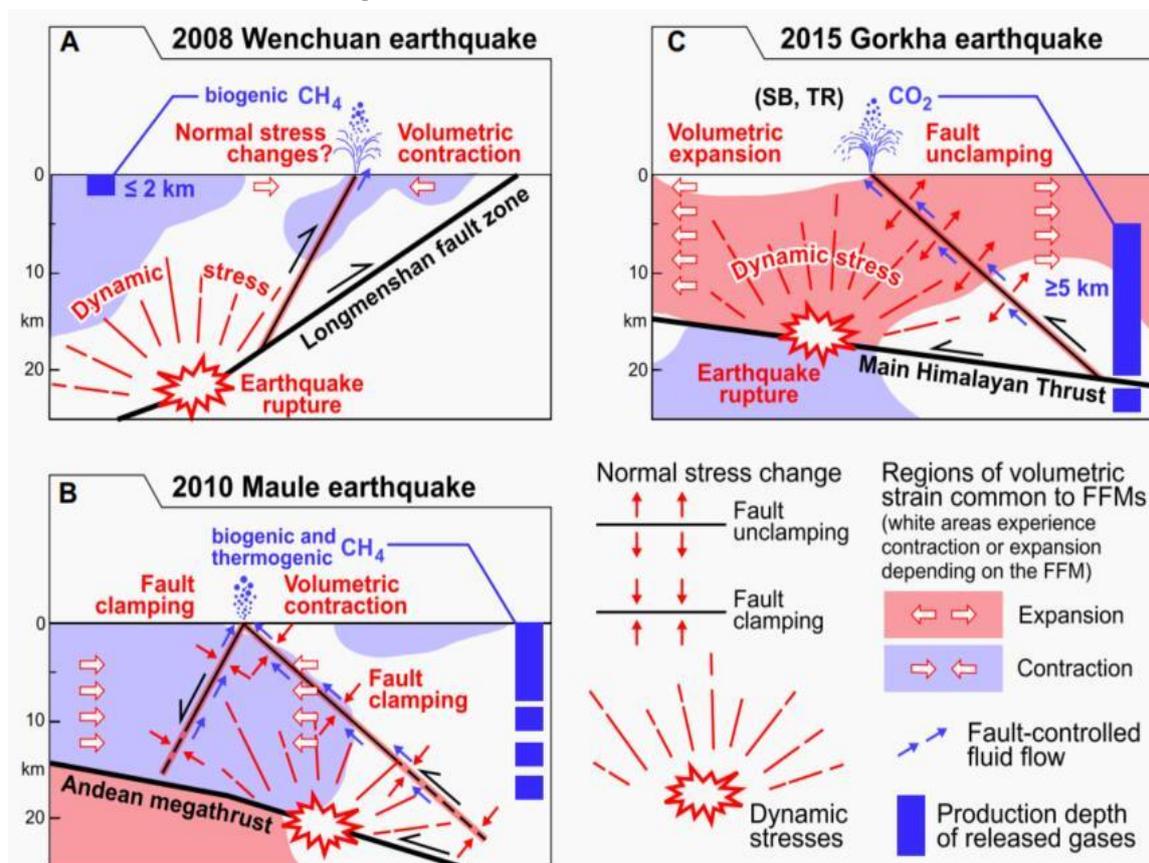


图 2 地震脱气模型

触发脱气的原因: 2008 年汶川地震中流体压力的增加以及大的动态应力可能是主要的诱发机理, 然而 $\Delta\sigma_n$ 的作用是不确定的。2010 年马乌莱地震的 $\Delta\sigma_n$ 具有一致性, 并且在正断层和逆冲断层都显示压紧。马乌莱地震造成了大量的压缩应变, 并引起流体压力增加 0.7 MPa。同时, 峰值动态应力达到 1.7 MPa, 其与体应变可能是脱气的主要诱因。

$\Delta\sigma_n$ 的变化可能会阻碍流体释放。2015 年廓尔喀地震中，Syabru-Bensi 和 Timure 热泉附近 $\Delta\sigma_n$ 都为正值，常常超过 0.5 MPa，最高达到 1.85 MPa。体应变主要呈扩张性并引起孔隙压降低，同时，峰值动态应力都很大。因此，动态和静态应力变化可能是流体释放的主要机制，而体应变不起作用。

从震中区推测触发机理：大地震震中区域的气体爆发可能由不同原因导致。 $\Delta\sigma_n$ 的变化可能会阻碍或者促进流体释放。Syabru-Bensi 和 Timure 热泉显示，流体释放量的增加与松弛应力具有很好的关系。当补给系统压紧或应力很小时会导致泥火山爆发，这表明松弛应力并不是触发流体释放的先决条件。压缩体应变可能会在水文地质系统中导致明显的孔隙压增加，而膨胀应变引起孔隙压降低，进而阻碍流体释放。尽管如此，同震或震后流体流动的增加在不同特征的体应变区都有发生，表明有利的体应变并不是触发流体释放的先决条件。研究所估计的峰值动态应力值都很大，因此它可能是主要的脱气触发原因。但也有一些情况例外，表明渗漏特征对地震的响应是多样的，一个系统易于脱气的程度受控于独立因素（存在于渗漏系统内外）之间复杂的相互作用。

对震后流体持续释放的启示：松弛应力大小（作用于热泉补给系统，其在廓尔喀震中区的流体释放增加）与脆性不连续的抗张强度成一定量级关系。因此，研究估计的 $\Delta\sigma_n$ 可能大到超过岩石各向异性的抗张强度，后者控制了由断层控制的流体通道的力学行为。松弛应力可能会增加地壳的渗透率，并且维持持续的脱气。为了探究这种可能性，研究人员绘制了廓尔喀地震主震后潜在触发地震的时间。对潜在触发地震的时间分布与 CO_2 流量变化的比较表明，2016 年年中之后 CO_2 流量增加与地震活动之间没有明显的相关性。最后，观察到 Bahundanda 热泉的补给系统具有微弱的压紧，尽管存在着显著的峰值动态应力，但它没有经历脱气的增加，表明

$\Delta\sigma_n$ 可能阻碍流体释放。可能的原因是，断层压紧和体积膨胀导致流体压力降低。

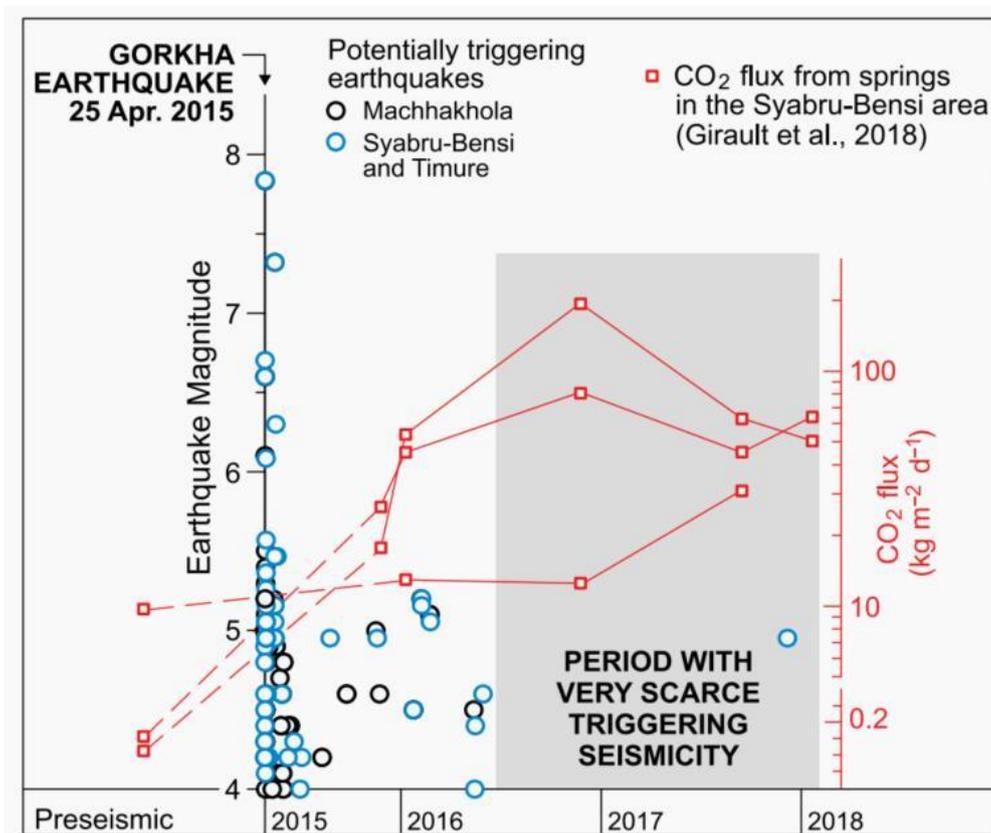


图3 潜在触发地震的时间

来源：Bonini M. Can coseismic static stress changes sustain postseismic degassing?. *Geology*, 2022, 50(3): 371-376.

中国的中短期地震预测及基于 R 值的效能评估

地震趋势会商在中国已经开展了超过 40 年，是一种真正意义上的前瞻性地震预测，其研究成果、经验和数据积累对地震研究具有相当的参考价值。在中短期尺度上，地震趋势会商包括定期的年、月、周会商和不定期的震后趋势会商等，定期预测通常是由特定的时空窗给出地震可能发生的危险区。

基于 R 值的效能评估显示，1990-2020 年度预测的平均 R 值为 0.293，且有逐渐上升趋势。2018 年的年、月、周预测的 R 值分别为 0.46、0.11 和 0.002，呈现快速衰减特征，这指示了较可靠地震预测的时间尺度。此外，中国建立了较为可行的震后趋势快速研判策略。相关成果发表在 2022 年 3 月的 *Seismological Research Letters*。

中国的地震预测可以追溯到上世纪 60 年代，尤其是 1966 年邢台 6.8 级地震发生后，引发了全社会的广泛关注。1971 年，中国地震局成立，标志着全国范围内系统开展地震监测、预报工作的开始。50 年来，中国地震局构建了地震预报的基本框架，在地震监测、数据积累、经验总结和预测理论探索等方面都取得了显著进展。

中国地震局已经在全国范围架设了的观测网络，目前有 2000 多个台站用于日常的监测工作（图 1）。收集的数据包括地震活动、地壳应变、应力、地电磁场、地下水位、温度、气体浓度和化学成分、以及全球导航卫星系统、重力、热红外等其他地球物理和地球化学观测。这些数据可以分为四个学科，即测震、形变、电磁和地下流体学科。

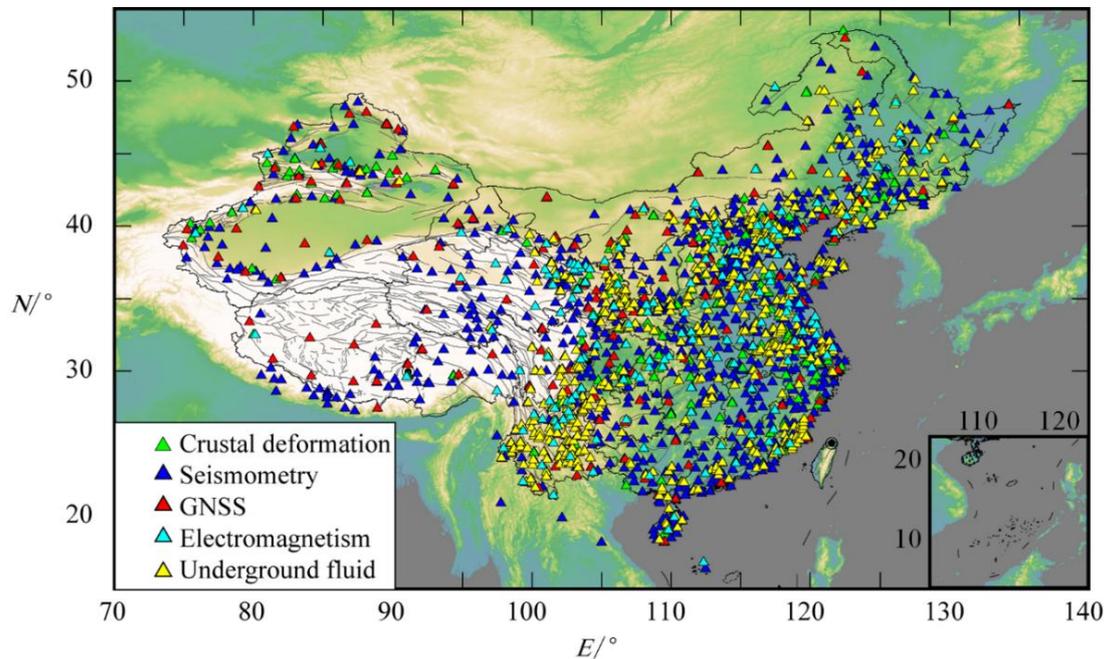


图1 部分地震监测台站分布图，其中，地壳形变 340 个、测震 1176 个、
电磁 347 个、地下流体 657 个和 GNSS 693 个

中国的地震预测以经验预测为主，利用统计学方法对观测的异常进行分析，总结地震时、空、强三要素的预测指标，包括异常发生时间、幅度和持续时间等与地震的关系以及相应的预测可靠性分析等。迄今为止，中国已积累超过 300 个 5 级以上地震资料，这些震例、经验和数据对地震研究具有相当的参考价值。

中国是通过地震趋势会商进行地震预报，在中短期尺度上，地震趋势会商包括年、月、周等会商，由特定的时空窗给出地震可能发生的危险区。中国地震局每年都要对预测区进行效能评估，但是主要针对的是年度预测，更短时间尺度的月、周预测的总结不足，不利于地震预测质量的提升和地震预测科技的推进，如何科学客观评估地震预测的效能、认知目前地震预测真实水平是问题的关键。

R 值是中短期地震预测效能检验的常用方法，其计算兼顾了命中率和误报率两个方面。 R 值评分的定义类似于 Molchan 图表法中的“loss functions”：

$$L = 1 - \tau - \nu, \quad (1)$$

其中， τ 和 ν 分别表示漏报率和误报率。如果将 $1 - \tau$ 看作命中率，公式 (1) 就可以改写为 R 值：

$$R = \frac{N_H}{N_T} - \frac{S_P}{S_T}, \quad (2)$$

这里， S_P 和 S_T 分别表示预测区域面积和整个研究区域的总面积， N_H 和 N_T 分别为预测时段内命中的地震数和所有目标地震数。

图 2 为预测的年度地震危险区示例，该结果已经在前人的文献中进行了发表。当地震发生在地震危险区内时，预测正确；发生在危险区外，则为漏报。由于不同危险区的形状、位置和大小均不相同，为了简化算法，有学者提出可以将研究区域全境用 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格划分（图 2a），张国民、石耀林、马宏生等学者都采用这一方法对历年危险区的预测效能进行过检验。当地震发生在危险区所覆盖的网格时，预测正确（图 2b）；发生在未被危险区覆盖的网格，则预测错误。这样， R 值可以进一步表示为：

$$R = \frac{N_H}{N_T} - \frac{N_P}{N_G}, \quad (3)$$

其中， N_P 和 N_G 分别表示危险区和研究区全境占据的网格数。

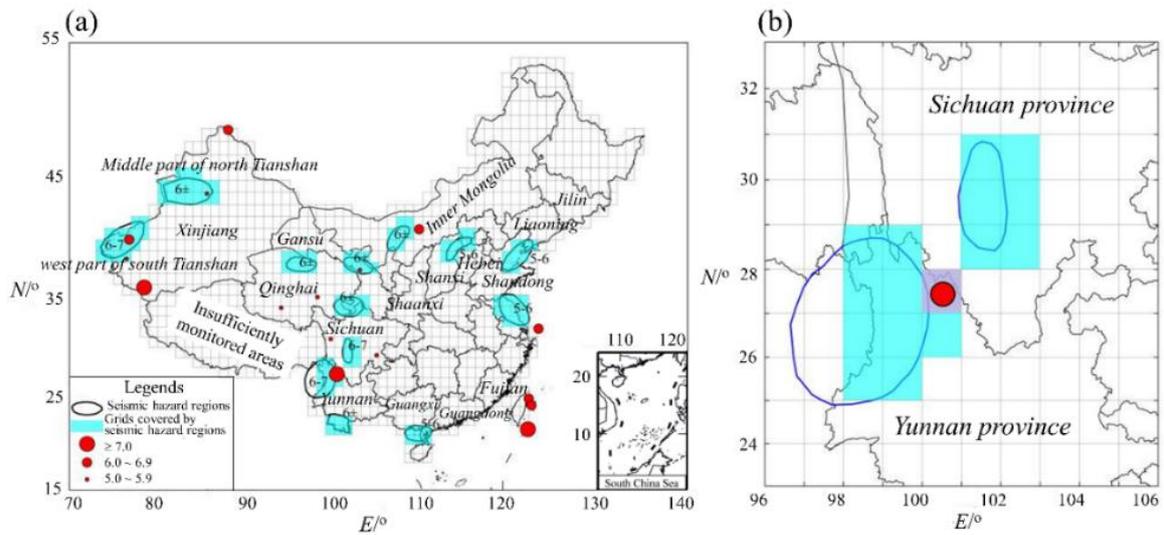


图 2 预测危险区示例及其 R 值评估规则，（a）：1996 年的年度地震危险区和当年 5 级以上地震；（b）：R 值评估的网格划分原则

1 年度预测及其评估

年度地震趋势预测是为了确定未来 1 年可能发生强震的地区，即年度地震危险区。预测方法包括：地震活动图像（如地震空区、地震条带等）、地震学参数（如 b 值、调制比等）、与区域构造应力相关的地球物理和地球化学观测等，图 3 给出了一些实例，图件摘自相关专家的研究报告。异常的主要特征可以简单归纳为减弱（图 a, d, e, h, l）、增强（图 b, c, f, g, i）、地震条带（图 j）和空区（图 k）等，超过一定阈值并持续一定时间可视为异常，并通过对比异常的预测指标，结合异常的数量和空间分布，采用概率综合的方法得到最终预测结果。此外，危险区的尺寸也有一定限制，比如：7 级以上地震危险区长轴不超过 500 公里，6-7 级危险区不超过 400 公里，6 级左右危险区不超过 300 公里。

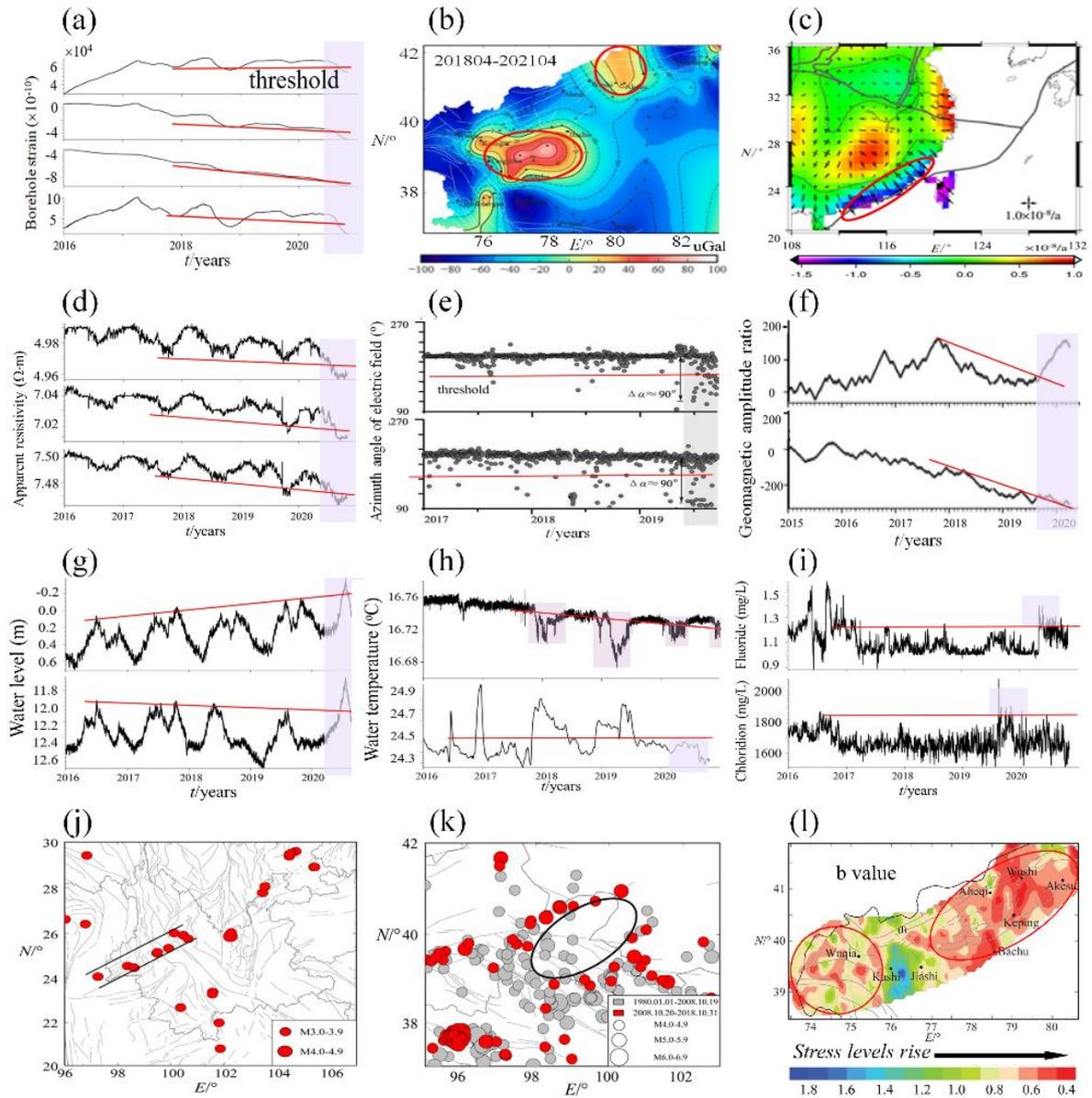


图3 判定年度地震危险区的观测手段示例，(a-l)：钻孔应变、重力场、应变率、视电阻率、地电场、地磁振幅比、地下水位、水温、水化离子、地震条带、地震空区和b值，分属形变学科(a-c)、电磁学科(d-f)、流体学科(g-i)和测震学科(j-l)，异常均由灰色条纹绘出，阈值用红色实线表示

1990-2020 年度预测结果的 R 值评估如图 4 所示。相关结果是根据历年年度趋势预测报告计算，按照中国地震局的保密要求，预测结果不能在这里展示。历年危险区的形态、大小、位置虽有显著差异，但仍具有明显

的一致性特征，危险区总数为 10-13 个，主要分布在地震较活跃的地区，如西部的云南、四川、甘肃、新疆、青海等，东部的山西、陕西、内蒙古、河北、山东、吉林和辽宁以及华南沿海的广西、广东、福建等。

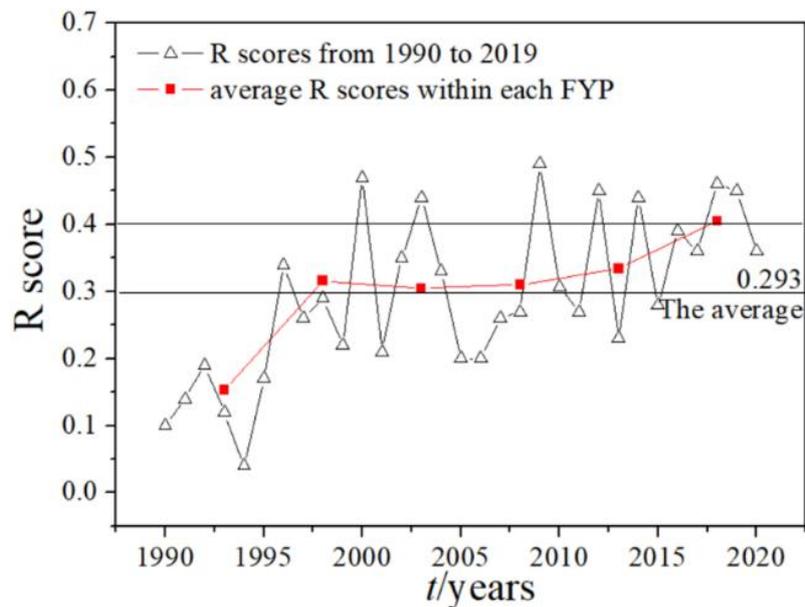


图 4 1990 年以来年度地震危险区预测效能的 R 值评估

按照常规的检验策略，统一选取 5 级以上地震作为检验目标。1990-2020 年的平均 R 值为 0.293，1995 年以前的 R 值均低于 0.2，1996-2015 年在 0.2 和 0.45 之间波动，2015 年以后均高于 0.3。图 4 中进一步统计了每个五年的平均 R 值，“九五”期间， R 值从 0.15 快速增加至 0.3，此后，虽然随着观测技术和预测方法的发展， R 值有所上升，但速率明显减缓。

定期地震预报是为了识别特定时间段内可能发生地震的区域，从这个意义上说，使用 R 值评估地震预测效能是可行的，因为同时兼顾了报准率和虚报率。但从统计学角度看， R 值评估存在明显短处：由于不同地区的地震活动水平不同，针对地震易发区的连续预测可能会明显提高 R 值，如

云南、四川、青海和新疆等地区。中国科学家和全世界研究者一样，一直在努力解决这一问题，并设计了提高预测质量的策略，即通过严格控制预测区尺寸来逼近地震发生的真正位置。事实上，由于不同时段地震的空间分布差异性较大，仅在固定区域连续预测不太可能获得较高的 R 值。

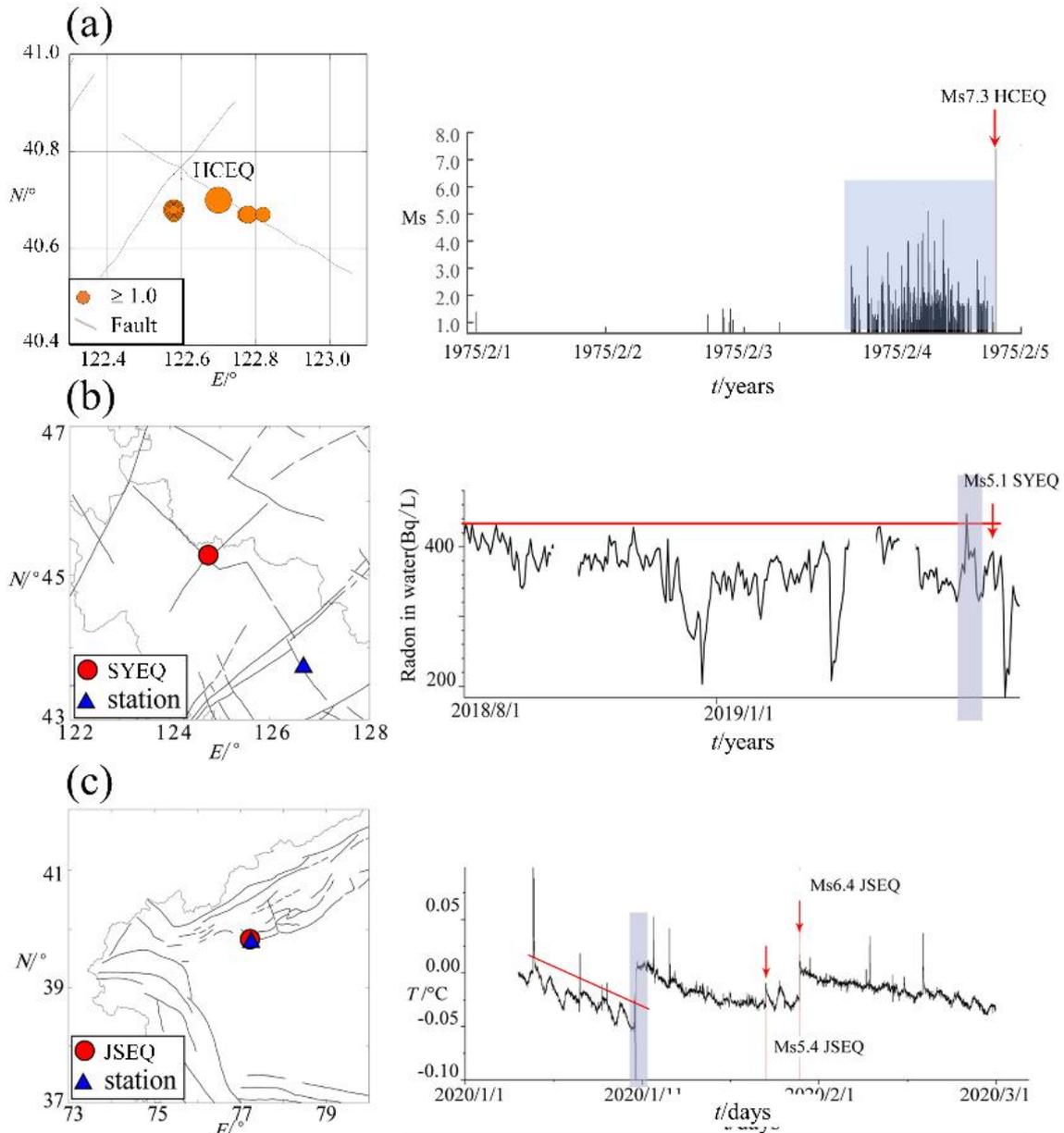


图 5 研判短期地震危险性的资料示例，(a)：1975 年辽宁海城 7.3 级地震前的地震活动增强，(b)：2019 年吉林松原 5.1 级地震前的丰满水氡高值异常，(c)：2020 年新疆伽师 6.4 级地震前的西克格岩石温度快速上升，左图给出地震和测点位置，右图为观测资料时间序列，红色箭头表示地震

2 短期预测及其评估

短期预测主要是月、周地震趋势预测。事实上，月、周预测的地震危险区是从年度危险区中选取，因此， R 值也可以应用于短期预测的效能评估，与年度预测效能评估的主要区别在于时间窗的长度。短期预测的主要依据包括：地震活动显著增强或平静、地球化学和地球物理观测资料的突然变化等（图 5），异常持续时间通常不超过 3 个月。

图 6 展示了 2018 年的 12 次月度预测结果的 R 值评估，均采用预测时段内的 5 级以上地震作为检验目标。在前 6 个月的预测中，预测区均未发生预期地震， R 值为负；6 月以后，由于部分预测区内发生了目标地震，因此 R 值为正。全年 12 个月的平均 R 值为 0.11，明显低于年度预测的 R 值。

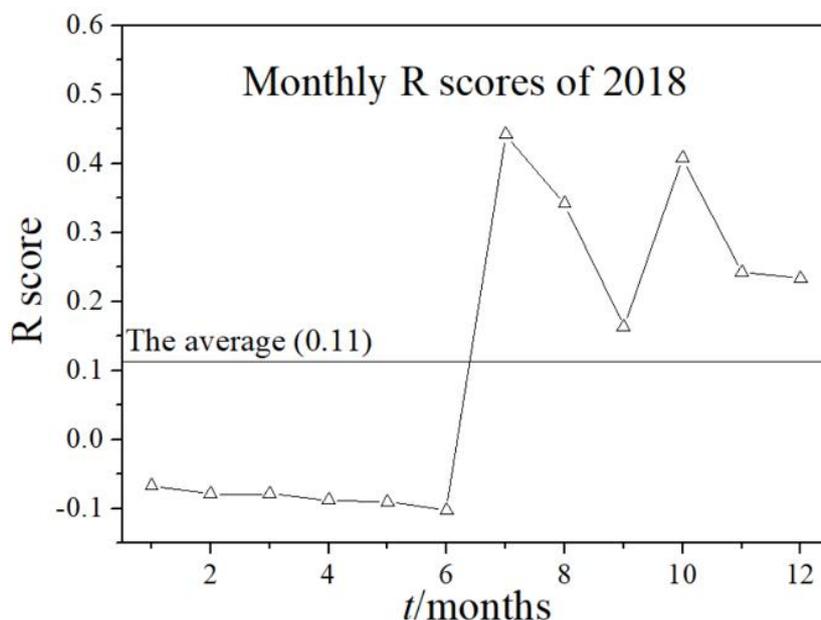


图 6 2018 年月度地震危险区预测效能的 R 值评估

图 7 进一步给出 2018 年所有周预测结果的 R 值评估。其中，只有少

数危险区能够成功捕捉到目标地震，因此， R 值多为负值，偶尔为正，全年的平均 R 值约为 0.002，非常接近于 0。

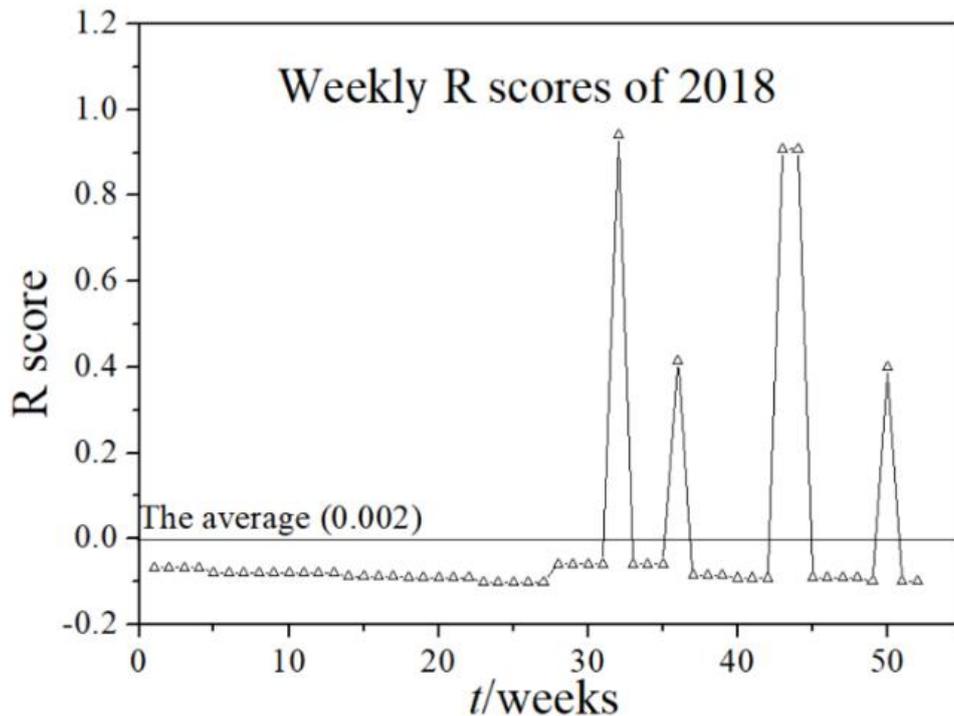


图 7 2018 年所有周预测结果的 R 值评估

理论上， R 值介于 -1 和 1 之间。当 R 小于 0 时，为无效预测；极端情况， $R=-1$ 时，预测完全失败。相反，当 $R>0$ 时，为有效预测； R 越高，预测效果越好；当 $R=1$ 时，预测完全正确。

中国的中短期预测能够在一定程度上检测到未来地震发生的潜在区域，因为 $R>0$ ；然而，距离解决地震预报问题还有很大差距，因为 R 值远小于 1。尽管如此，仔细对比不同预测时窗的 R 值，可以发现一些有意义的特征，它们是：

- 1) 中期预测明显优于短期预测。以 2018 年的预测为例，年度预测 R

值为 0.46，月度预测平均 R 值为 0.11，周预测平均 R 值为 0.002，随着预测时窗减小， R 值显著降低。

2) 指示出最小有效地震预测时间尺度。2018 年的周平均 R 值快速衰减至 0.002，非常接近 0，而一个有效预测， R 值必须大于 0。因此，周预测可能是进行有效地震预测的最小时间尺度。

数据对比说明短期预测难于中期预测，其原因在于可识别的短期异常数量相对较少，同一个异常可能会被应用于多次预报，难以建立异常与发震时间的确切联系。中国的地震预报是基于经验技术，通过观测异常与地震时间、空间、震级的统计关系建立预测指标，对地震孕育机理的认识不够，导致较难识别短期异常。异常的模糊性及其预测时间尺度的不确定性是地震预测难以攻克的主要原因，特别是在短期预测中，可用的有效数据更少。

3. 震后趋势快速研判及其评估

除了定期地震趋势会商外，中国地震局还会在显著地震发生后进行不定期的震后趋势会商，快速研判意见必须在 30 分钟内产出。主要依据周边历史地震序列开展分析，过程分为两步：

一是确定地震的类型。通过计算震源区附近以往同等级地震中主余型、孤立型和震群型占比，推断地震的可能类型，重点对比孤立型+主余型与震群型的占比。图 8 以 2019 年 10 月 27 日新疆乌什 5.0 级地震为例，给出震后趋势快速研判的策略。1900 年以来，该地震震中 100 公里内共发生 5 级以上地震 17 次，其中，主余型 5 次、孤立型 16 次、震群型 1 次，主

余型+孤立型占比大于 90%。因此，本次乌什地震大概率是一次主余或孤立型地震。故给出研判结论为，后续几日内，原震区发生更大地震的可能性不大。

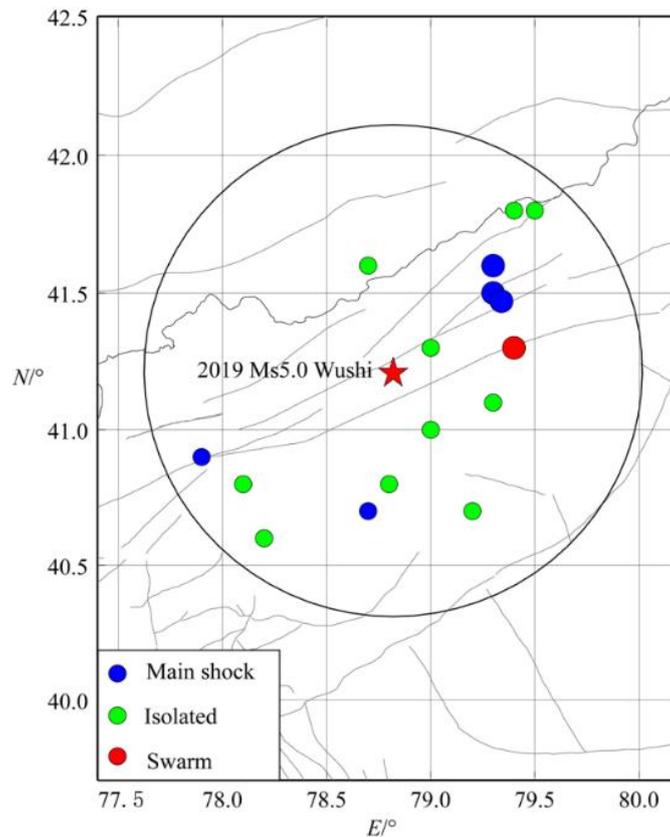


图 8 2019 年新疆乌什 5.0 级地震周边 100 公里内 5 级以上地震类型统计

中国大约有 82% 的 5 级以上地震是主余型或孤立型，这有利于地震类型的研判。图 9 统计分析了 2019 年 1 月-2020 年 4 月的 29 次 5 级以上地震的震后趋势研判意见。结果显示，地震类型预测正确率为 $25/29 \approx 86.2\%$ ，高于主余型+孤立型占比（为 $24/29 \approx 82.75\%$ ），一些震群型序列，如 2019 年 6 月 18 日长宁 5.3 级和 2019 年 6 月 22 日珙县 5.4 级地震，也被成功检测。

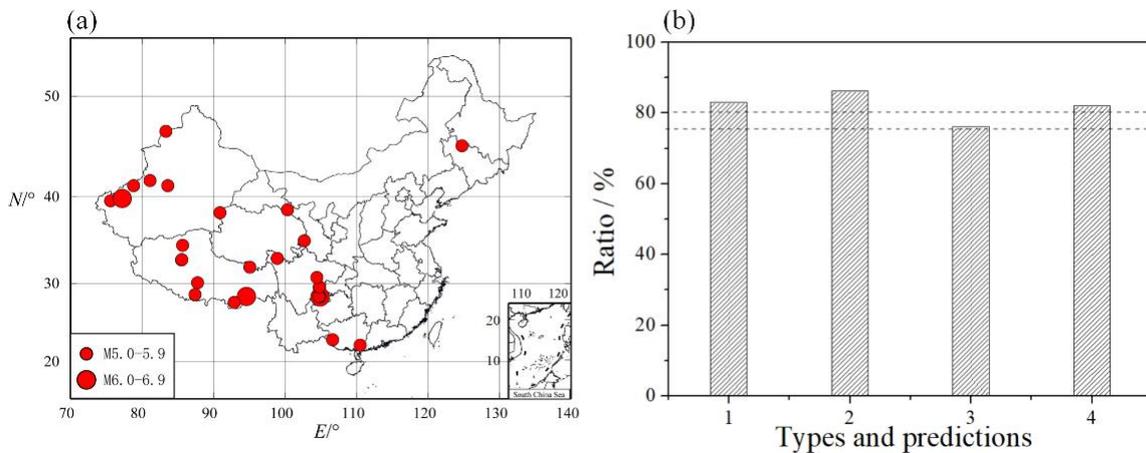


图9 震后趋势预测的效能分析，(a) 2019年1月-2020年4月的5级以上地震空间分布，(b)地震类型预测的效能分析，1:主余型+孤立型地震的占比，2:地震类型预测正确率，3:震级预测正确率，4:1970年以来全国5级以上地震中主余型+孤立型占比

二是预测震后活动水平。该预测是通过对比邻近地震序列进行分析。

图10以2019年6月17日长宁6.0级地震为例，给出震后地震活动水平的研判策略。检索历史地震发现，在长宁震中100公里以内，最邻近的是1974年永善-大关7.1级地震，该地震短期内共发生5.0级以上余震3次，通过与此次地震类比，推测长宁6.0级地震后，震源区短期内存在发生5.0级左右地震的可能。

地震类型的判断决定了后续地震活动水平的预测效率，若地震类型判定错误，则无法得到正确的震级评估。另一方面，即使地震类型判断正确，后续震级预测的偏差也在所难免。在图9所示的29个案例中，25个地震类型预测正确，其中3例后续震级预测错误，活动水平预测的总体正确率为 $22/29 \approx 76\%$ （图9b）。这里规定，真实震级和预测震级相差小于0.5为正确预测。

虽然中国的震后趋势预测取得了一定成效，但是对于探索地震形成的

物理机制的能力并未显著提高，主要是根据历史地震的经验和统计对比，设计了可行的策略来完成这项任务。该策略具有通用性，适用于任何活动构造地区。

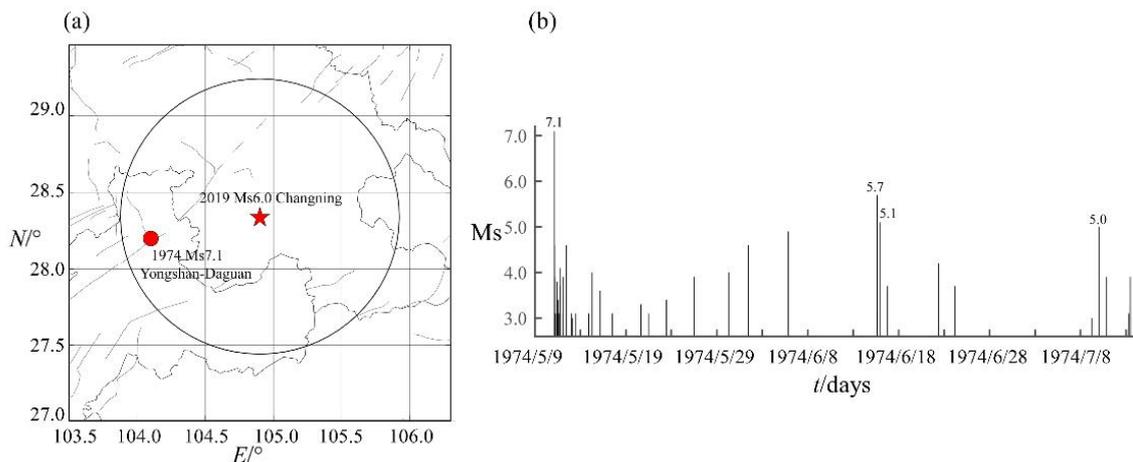


图 10 2019 年 6 月 17 日长宁 6.0 级后续地震活动水平的类比分析，

(a)：长宁 6.0 级和永善-大关 7.1 级地震的空间位置，(b)：永善-大关 7.1 级地震序列

总体而言，中国正努力尝试在中短期地震预测方面取得进展和突破，然而，与实现地震成功预报尚有距离，尽管如此，中国的努力给认知地震的可预测性带来了希望。近 30 年的预测实践评估显示，中期尺度的年度地震预测能力在逐渐提高，然而，短期预测能力却明显降低，尤其是低于周时间尺度时，很难得到有意义的预测结果。相比之下，中国在震后趋势快速研判方面建立了可行的策略，可以较准确评估地震类型及其后续活动水平。毫无疑问，中国地震预报所取得的成果对相关地震研究具有重要的指导意义。

来源：Huaizhong Yu, Zhengyi Yuan, Chen Yu, Xiaotao Zhang, Rong Gao, Yulong Chang, Weijia Zhang, Binbin Zhao, Keyin Peng, Jie Liu; The Medium-to-Short-Term Earthquake Predictions in China and Their Evaluations Based on the *R*-Score. *Seismological Research Letters* 2021;; 93 (2A): 840–852. doi: <https://doi.org/10.1785/0220210081>