

地震科技前沿快报

2024 年第 6 期（月刊总第 65 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、深层隧道在接近断层区域受 SH 波作用时地震响应的解析解

由于特殊地质特征可能会降低隧道的抗震能力，因此评估断层对隧道动态行为的影响具有重要意义。本研究针对 SH 波作用下断层带附近深层隧道的应力和位移提出了一种解析解，并对其解的结果进行了验证。同时，研究还提出了一个公式用来估计断层对衬砌应力的最大影响。

2、三维断裂模型和地震构造揭示青藏高原东南部大凉山地区潜在的地震危险性

大凉山地块位于青藏高原东南缘，是一个活动断裂多、地震活动明显的构造活动区。研究人员利用 SKUA-GoCAD 软件平台，构建了研究区内主断裂系统的综合三维模型，为该区活动断裂、地震构造断裂和发震断裂的识别提供了重要数据。

3、通过稳健回归方法基于高级矩震级标度构建北阿尔及利亚统一地震目录

建立统一的地震目录是进行地震分析和改进地震危险性评估的基本要求，本研究用新广义正交回归方法获得了阿尔及利亚北部地区 1954—2022 年统一的、基于 M_{wg} 的目录，为该区地震分布和地震危险性提供了可靠数据。

深层隧道在接近断层区域受 SH 波作用时地震响应的解析解

针对 SH 波作用下断层带附近深层隧道的应力和位移，本研究提出了一种解析解。假设地面、断层和隧道衬砌为线性各向同性弹性，所有接触界面均无滑移条件。同时，假设隧道平行于断层，所以垂直于隧道轴线的位移为零。此外，再忽略断层对隧道绕射波的影响，即可得到解。之后，通过将解的结果与从 ABAQUS（工程模拟的有限元软件）获得的结果进行比较，来验证所提出的解析解的正确性。最后使用数值结果和解析公式讨论了关键参数的相关性，这些参数包括断层与地面之间的刚度比、断层宽度和入射 SH 波的频率。相关研究成果发表在 2024 年 1 月的 *Rock Mechanics and Rock Engineering*。

隧道地震响应分析具有重要意义，人们对此进行了大量的工作，包括解析解、数值模拟和模型试验。由于特殊地质特征可能会降低隧道的抗震能力，人们投入了大量的精力来评估断层对隧道动态行为的影响。但是，大部分工作都集中在穿越断层带的隧道上，对靠近但未穿越断层的隧道进行动态荷载下的研究还很少。

目前，针对地震荷载下的隧道提出了大量的解析解。这些解析解通常是通过将地震载荷简化为远场剪应力来实现的。然而，这种简化仅适用于远离震源的隧道。另一种常见的假设是，地面和结构处于稳态运动状态，同时，隧道绕射波的势或位移一般展开为贝塞尔-傅里叶级数（Bessel-Fourier series），即采用波函数展开法。波函数展开法也可用于求解入射 SH 波作用下的峡谷和山谷所衍射的波。

通常情况下，剪切波作用下的隧道分析包括两种类型的波，即 SV 波（振动方向垂直于隧道轴线）和 SH 波（振动方向平行于隧道轴线）。然而，对于入射 SH 波作用下断层带附近隧道的地震响应，仍然没有可用的

解析解。

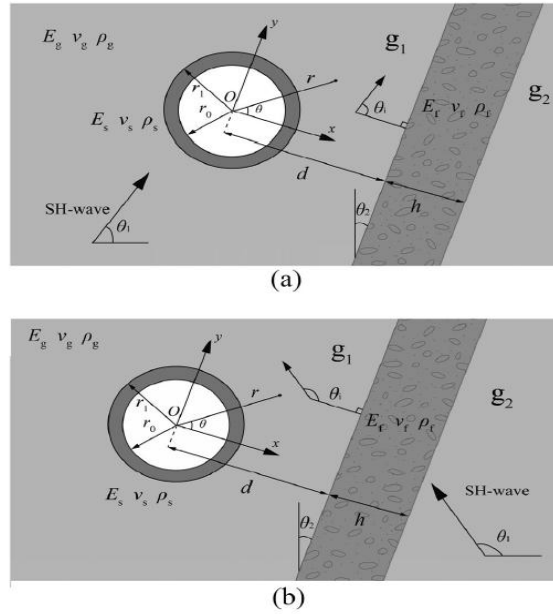


图 1 靠近断层带的深部圆形隧道受到 SH 波的影响。SH 波传播方向：（a） $-90^{\circ} < \theta_i < 90^{\circ}$ ；
（b） $90^{\circ} < \theta_i < 270^{\circ}$

本研究提出了一种解析解，以评估断层带附近深部隧道在 SH 波入射下的地震应力和位移。在做出适当的假设后，研究人员建立理论模型，并将隧道绕射波的位移展开为贝塞尔-傅里叶级数以获得解。通过将其预测情况与 ABAQUS 的结果及现有的解析解进行比较，来进行验证。

1. 方程的建立和求解

首先，研究人员定义了问题的几何结构和物理条件：一个圆形截面的深部隧道受到 SH 波的作用，隧道位于被断层分割的半空间中（图 1 中的半空间 g_1 ）。然后，采用笛卡尔和圆柱坐标系来描述问题，并且定义了地面、断层和衬砌的杨氏模量、泊松比和密度等材料属性，以及衬砌的内外半径、断层夹角等物理尺寸。之后，给出基本假设：隧道平行于断层，地面、断层和衬砌均为线性各向同性弹性材料，并且忽略了断层对由隧道绕射波的影响。在此基础上，建立控制方程，使用弹性介质中波的基本控制

方程来描述问题。

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$$

SH 波的位移分量只在垂直于波传播平面的方向上，从而简化了问题的数学描述。波的传播满足亥姆霍兹方程，利用波的复数表示形式来求解位移场。应力和应变之间的关系通过胡克定律来定义。方程中的边界条件选择在断层和地面、断层与衬砌、地面和衬砌之间应用连续的位移和应力边界条件，这些边界条件用于将问题的不同部分连接起来，以确保解的一致性和物理可靠性。

利用分离变量法，将位移场表示为 Bessel 函数和 Hankel 函数的级数形式。通过满足边界条件和匹配不同区域的位移和应力，来求解系数，进而获得隧道、地面和断层的位移和应力的解析解。

衬砌位移：

$$u_z^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n^{(1)} H_n^{(1)}(k_s r) e^{in\theta} e^{i\omega t} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n^{(2)} H_n^{(2)}(k_s r) e^{in\theta} e^{i\omega t}$$

衬砌应力：

$$\begin{aligned} \sigma_{rz}^{(s)} &= \frac{1}{2} \mu_s k_s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n^{(1)} \left[H_{n-1}^{(1)}(k_s r) - H_{n+1}^{(1)}(k_s r) \right] e^{in\theta} e^{i\omega t} \\ &+ \frac{1}{2} \mu_s k_s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n^{(2)} \left[H_{n-1}^{(2)}(k_s r) - H_{n+1}^{(2)}(k_s r) \right] e^{in\theta} e^{i\omega t} \\ \sigma_{\theta z}^{(s)} &= \frac{in\mu_s}{r} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n^{(1)} H_n^{(1)}(k_s r) e^{in\theta} e^{i\omega t} \\ &+ \frac{in\mu_s}{r} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n^{(2)} H_n^{(2)}(k_s r) e^{in\theta} e^{i\omega t} \end{aligned}$$

在推导得到结果以后，本研究给出了计算的一个流程，用来求解深部隧道的地震响应。首先，使用建立的物理和材料模型来确定地面和衬砌的 Lamé 常数，以及地面、断层和衬砌中的波数。然后，对于不同的入射角度，

使用既定的几何关系和物理条件计算波的反射角和透射角。根据波在不同介质中的传播特性，计算各种波（入射、反射、透射）的振幅。之后，对于给定的入射角度和物理参数，解析计算波在隧道、地面和断层界面上的反射和透射系数。最后，使用之前计算的波的反射和透射系数，以及波的传播特性，求解衬砌、地面和断层中的应力和位移分布。

2. 解析解的验证

首先，研究人员创建了一个具体的物理模型，包括深部隧道、断层区以及周围的地面环境。同时，确定了地面、断层和衬砌的物理参数，例如杨氏模量、泊松比和密度，这些参数根据实际地质数据或设计规范设置。然后，使用 ABAQUS 建立有限元模型，该模型中包含地面、断层和衬砌的详细几何和材料属性。对于有限元模型，地面、断层和衬砌均采用简化集成度 C3D8R 的 8 节点线性块体单元进行模拟。在 ABAQUS 中进行数值模拟时，应用恒定振幅的正弦波作为地震输入，以模拟 SH 波的效果。对于模型网格，地面、断层和衬砌的网格尺寸，使其分别小于穿过它们的波长度的六分之一，以确保模拟结果的准确性和有效性。

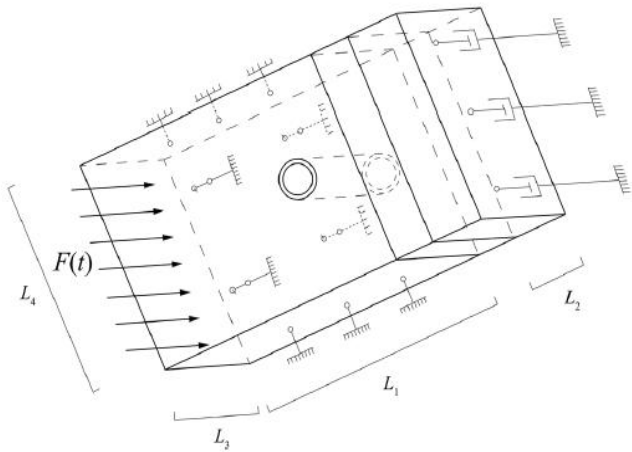


图 2 有限元模型

通过对比解析解和数值模拟的结果，特别是在隧道内部的应力和位移

响应（其中包括了对内剪应力和位移分布的详细比较）。研究人员发现，解析解的预测与数值模拟结果之间具有很好的一致性，从而验证了分析方法的准确性和可靠性。如果对地面、断层和衬砌使用相同的材料特性，所提出的解析解还可用于预测埋在均质地面中的深开挖的响应。

3. 各参数的影响

(1) 断层与地面刚度比对隧道地震响应的影响。这些分析通过保持地面杨氏模量不变，只改变断层的杨氏模量来实现的。断层杨氏模量从 50 MPa 到 5000 MPa，地面杨氏模量恒定在 5000 MPa。结果表明，软断层可能会显著增加隧道的损坏程度。值得注意的是，在 $-90^\circ < \theta_i < 90^\circ$ 的情况下，刚度较小断层附近的隧道可能容易受到损坏。然而，对于 $90^\circ < \theta_i < 270^\circ$ 的场景，断层不会放大隧道的响应。

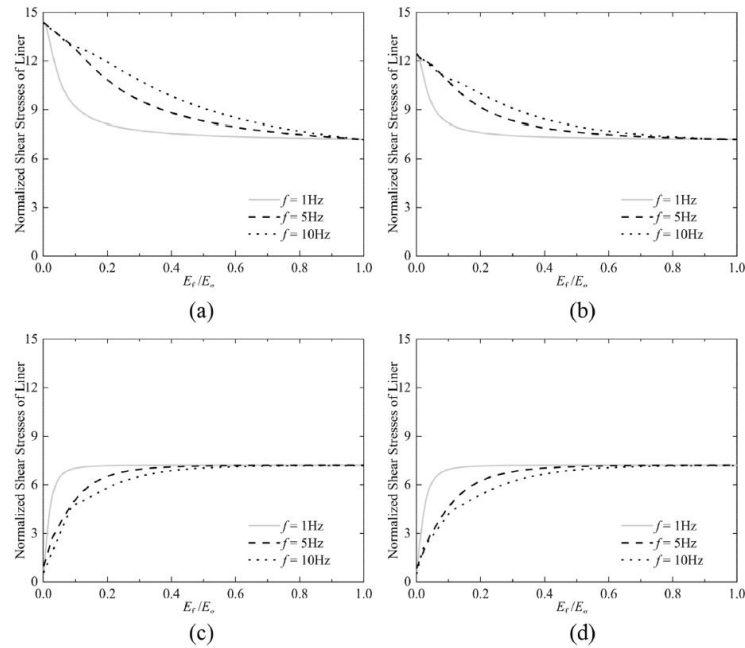


图3 断层和地面刚度比对衬砌内部纤维处的最大归一剪切应力的影响，隧道距离断层 1~1000 m：(a) $\theta_i=0^\circ$ ；(b) $\theta_i=30^\circ$ ；(c) $\theta_i=150^\circ$ ；(d) $\theta_i=180^\circ$

(2) 断层宽度对隧道地震响应的影响。具体分析中，断层宽度从 1 m 增加到 100 m 时，入射角为 0° 或 30° ，刚度比为 0.5。研究表明，隧道最大

响应与断层宽度之间存在周期性关系。也就是说，随着断层宽度的增加，衬砌中的应力增加，直至最大值，然后减小。研究进一步分析并给出了应力达到最大值时断层的周期和宽度。

(3) 入射 SH 波频率对隧道地震响应的影响。分析过程中，入射波的频率从 0.1 Hz 增加到 10 Hz，一共勘探了两个断层宽度：5 m 和 10 m，断层和地面的杨氏模量比为 0.25、0.5、0.75 和 1。结果表明，当入射 SH 波频率较小时，断层对隧道的影响可以忽略不计。当入射波频率较高时，对隧道造成破坏的可能性较大。

此外，最重要的是，研究提出了一个公式来估计断层对衬砌应力的最大影响，该解析解可用于有效获得受入射 SH 波影响的断层带附近隧道的应力和位移。

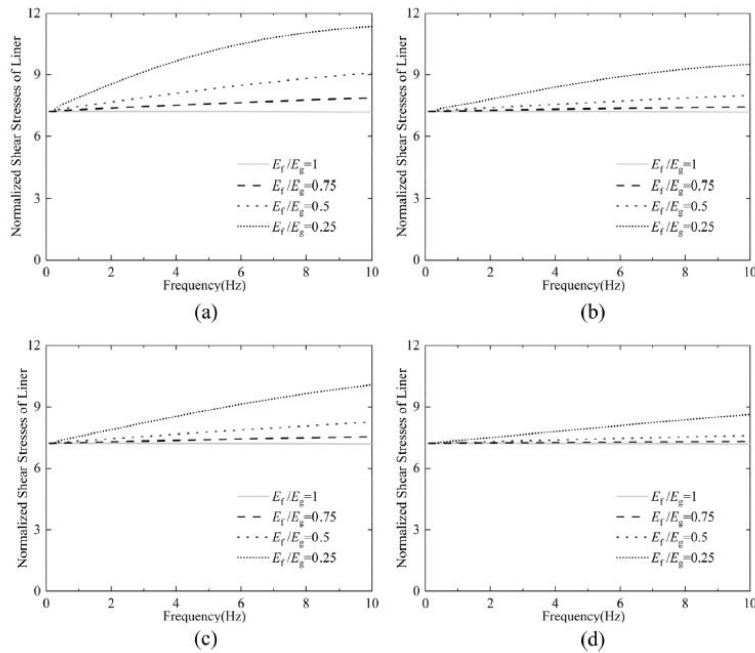


图4 断层和地面刚度比对衬砌内部纤维处最大归一剪切应力的影响，隧道距离断层 1~1000m: (a) $\theta_i=0^\circ$ 且 $h=10\text{m}$; (b) $\theta_i=30^\circ$ 且 $h=10\text{m}$; (c) $\theta_i=0^\circ$ 且 $h=5\text{m}$; (d) $\theta_i=30^\circ$ 且 $h=5\text{m}$ (h 指断层宽度)

来源: Yu H, Chen G, Bobet A. Analytical solution for seismic response of deep tunnels near a fault zone subjected to SH waves. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(1): 375-388.

三维断裂模型和地震构造揭示青藏高原东南部大凉山地区潜在的地震危险性

活动构造区发育许多活动断裂，经常发生中到大地震。破坏性地震的可能发生使得这些地区大型基础设施项目的发展存在风险。世界级的大型梯级水电站项目，例如青藏高原东南部大凉山的向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德水电站等，在金沙江沿线建成。研究人员利用 SKUA-GoCAD 建模平台创建了一个完整的活动断裂三维模型。该模型综合了区域地质信息、历史强震目录、精细位移小震和三维地震层析成像。根据三维断裂模型，马边-盐津断裂带由若干出露或隐伏的断裂组成，包括两次 7 级地震和许多中等强度地震在内的一些破坏性地震都发生在这个断裂带上。一些先存的逆冲断裂和特定地区的许多未成熟断裂可能已经被重新激活，转换成走滑断裂。鉴于金沙江盆地存在如此复杂的断裂系统和地震活动，必须仔细考虑其地震和地质问题。相关研究成果发表在 2024 年 2 月的 *Journal of the Geological Society*。

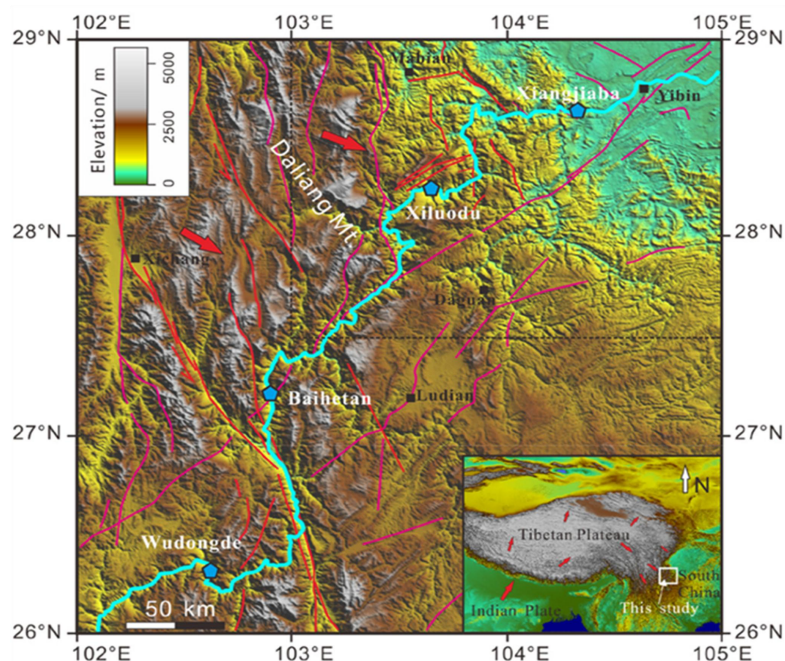


图 1 大凉山主要断裂的构造背景及分布

大凉山地块位于青藏高原东南缘，是一个活动断裂多、地震活动明显的构造活动区（图 1）。金沙江横贯该地区，是向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德等水电站的所在地。该地区经历了高水平的地震活动，在过去一千年中发生了 10 次 6 级或以上的大地震。然而，一些历史上的大地震的发震构造仍不清楚。同时，金沙江下游地区各种水电设施的建设和运行导致小地震和微地震显著增加。由于地震的复杂分布，在存在构造活动的大型库区分自然地震和诱发地震是一件困难的事。

为了寻找孕震断裂，研究人员利用 2010—2018 年间精细定位的地震活动数据，对向家坝-溪洛渡地区发震构造的关键特征进行了评估。通过结合当地地质信息和震源机制解，研究人员通过 SKUA-GoCAD 平台建立了主要断裂带的三维模型。活动断裂三维模型的构建依赖于来自各种数据和观测的多元约束，包括地表断裂轨迹和产状、深部地球物理探测、地震观测以及区域构造和地质数据等。该研究旨在为该区活动断裂、地震构造断裂和发震断裂的识别提供重要数据，特别是揭示马边-盐津断裂和溪洛渡库区存在的隐伏活动断裂。

1. 三维断裂模型

研究人员建立了 16 条主要断裂的三维模型和关键参数，包括美姑断裂（F1）、三河口-烟峰断裂（F2）和金阳断裂（F3）。根据前人的研究，确定了这些主要断裂的最晚活动期。三维断裂模型清晰地反映了研究区内重要断裂的空间分布（图 2），为断裂的长度、走向、倾角、分段、穿透深度和相交点等特征提供了有价值的信息。

研究人员对 2010—2018 年小地震重新定位数据的分析揭示了研究区域的两个不同震群。第一个震群位于马边-马湖地区，以小震为特征（图 3），第二个震群位于金沙江沿岸的溪洛渡库区（图 4）。在后续分析中，研究

人员重点研究这两个震群及其对应的发震构造。

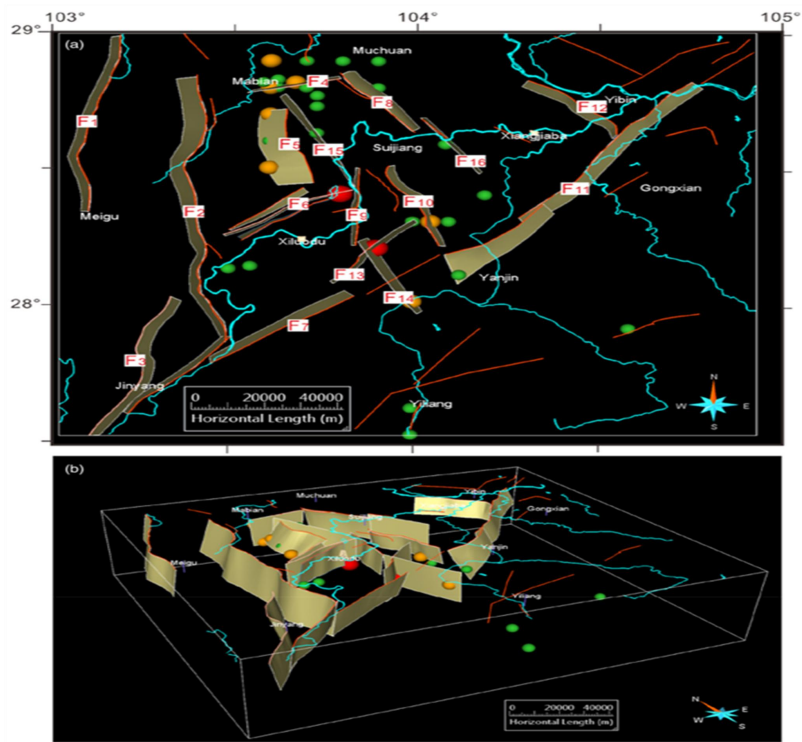


图2 发生中强震 ($M \geq 5.0$) 的主要断裂带的三维空间分布

2. 马边-盐津断裂

大梁山活动地块东部以荣经-马边-盐津断裂系为界。该断裂系统由峨边-马边断裂、利店断裂、中都断裂、玛瑙断裂、楔子坝断裂和中村断裂组成，北起天全，南至盐津，长 270 km。以往的研究表明，该断裂带容易发生强烈地震，同时频繁发生中小地震。根据经验公式和中国大陆地震破裂尺度关系，研究区马边-盐津断裂带仍具有发生大地震 ($M \geq 7.0$) 的可能。

小地震重新定位的分析结果表明，存在一条狭窄的小地震带，长度约为 40 km，在玛瑙地震 (F5) 以东的北北西方向 (图 3)。这些小地震大多数估计深度在 5 km 左右，也有一些在 5~10 km 范围内。据此，研究人员认为夏溪断裂 (F15) 为隐伏活动断裂。

1970 年，在这组小地震中发生了 5.4 级地震，为走滑震源机制解。这表明，夏溪断裂可能已经转变为左滑断裂。此外，还发现了 3 组北北东向

的小震群，这些小震群大致垂直于夏溪断裂。分隔这两组活动断裂的断裂带可归类为共轭断裂。

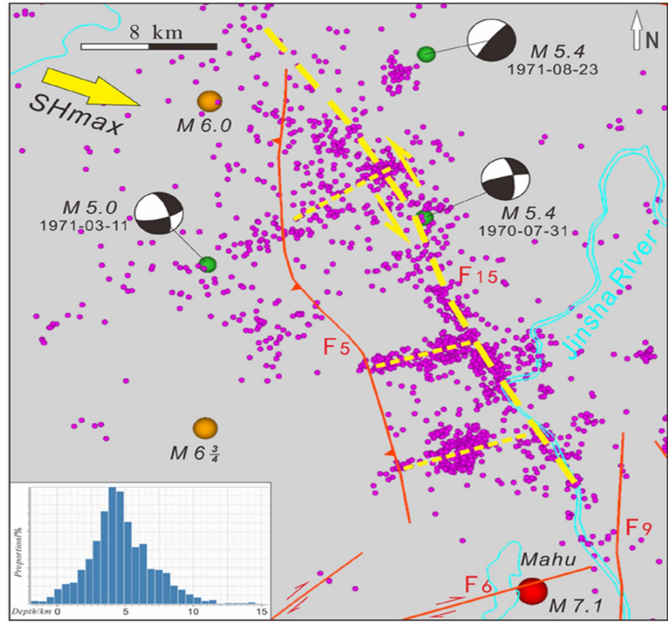


图3 2010—2018年马边-燕津断裂小地震的重新定位结果

3. 溪洛渡库区的孕震特征

溪洛渡水库蓄水后被记录下了大量的小型地震事件，包括2014年水库附近两次5级的中强震（图4）。溪洛渡库区地震活动主要分布在金沙江沿岸，主要深度约为3 km。发生五级以上的中等强度地震，通常需要存在一定大小的断裂。2014年的两次5级地震表明，该地区可能有先存的隐伏断裂（图4）。

以往的调查将溪洛渡发生的部分地震归因于上地壳5~15 km深度的地震带。小震群分析和两次5级地震震源机制解（图4）表明，研究区存在北东到北北西走向的隐伏断裂。然而，由于这些小地震在多个方向上聚集，因此很难绘制三维断裂几何形状。根据两次强震的震源机制，研究人员推断出了隐伏断裂的存在（图4）。

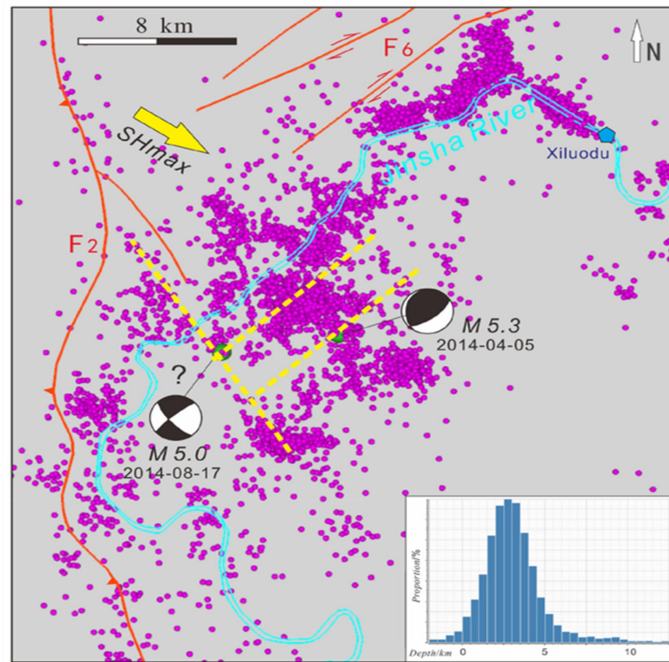


图4 2010—2018年金沙江下游溪洛渡库区小地震的重新定位结果

4. 大关北部 7.1 级地震构造

1974年5月11日,中国云南省永善与大关交界处发生7.1级强烈地震。震中的位置一直是争论的话题。一些研究人员将其定位在莲峰断裂带(F7)的北部,而另一些研究人员则认为它位于南部。莲峰断裂带靠近大关北部地震震中,被认为与地震的发生有关。在大关北部地震序列中观测到的破裂特征表明,存在双向共轭断裂。震中位置表明,在北北西方向存在一条隐伏断裂,称为北大关断裂(F14),该断裂在本次地震中与共轭新田断裂(F13)一起破裂。

1216年四川雷波-马湖7.0级地震以及马边-盐津断裂带沿线所发生其他大地震的孕震构造特征亦为共轭断裂。这些地震的发生和共轭断裂的发育与青藏高原东南部东南向挤压形成的主应力场密切相关。研究区内隐伏的走滑断裂可能是相对年轻或新近形成的断裂。

由于上地壳主要断裂分布广泛,向家坝-溪洛渡库区中强地震(5.0级)

多发生在 20 km 以上的浅层。在 20 km 深度处，北东向的雷波-马湖断裂带与北西向的马边-盐津断裂带之间存在汇聚交叉。这表明，由于其他大地震，该地区有可能发生级联破裂。

S 波速度模型确定的三维地震层析成像显示，研究区深部存在一个陡坡带（莫霍斜坡）。该带与应变的集中有关，类似于青藏高原东部的龙门山冲断带。研究区域经历了明显的剥蚀作用以及两次 7 级地震，考虑到研究区的区域地质环境具有发生大地震的可能，对研究区的地震灾害风险进行评估是一项重要的任务。

综上所述，研究人员调查了金沙江下游向家坝-溪洛渡库区以往的大地震和重大断裂。利用 SKUA-GoCAD 软件平台，构建了研究区内主断裂系统的综合三维模型。分析认为，青藏高原东南部构造板块的东南向运动导致了大量共轭断裂的形成，并使以前的逆冲断裂转变为走滑断裂。因此，研究区内大量强震为走滑型地震。然而，小地震群的存在表明隐伏断裂或新形成断裂的潜在活动。这突出了活动断裂级联破裂的可能性，对准确评估该地区的地震风险造成了重大挑战。

来源：Lu F, Zhao C, Zhang J, Wang Q, *et al.* 3D fault model and seismotectonics indicate the potential seismic risk in the Daliang Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Journal of the Geological Society*, 2024, 181(2): jgs2023–136.

通过稳健回归方法基于高级矩震级标度构建北阿尔及利亚 统一地震目录

建立统一的地震目录是进行详细地震分析和改进地震危险性评估的基本要求，本研究旨在为阿尔及利亚北部地区提供可靠的统一地震目录。该统一目录使用区域经验关系编制而成，该关系通过将不同的震级标度转换为最近文献中提出的高级物理矩震级标度（用 M_{wg} 表示）而得出。研究中使用的回归方法称为新广义正交回归方法（**New General Orthogonal Regression approach, N.GOR**）。之所以选择该方法，是因为它是将震级转换为 M_{wg} 的最可靠方法。为了证明 **N.GOR** 的重要性，研究人员将得到的标度关系结果与传统广义正交回归方法（**GOR**）的结果进行了比较，后者被认为是全球用于解决震级转换问题的最可靠方法。所汇编统一地震目录的时间是 1954—2022 年，通过将原始震级可靠地转换为均一矩震级后获得了完整、一致的统一地震目录。研究提出的统一矩震级目录可以为研究阿尔及利亚北部地区的地震分布和地震危险性提供可靠数据。相关研究成果发表在 2024 年 3 月的 *Pure and Applied Geophysics*。

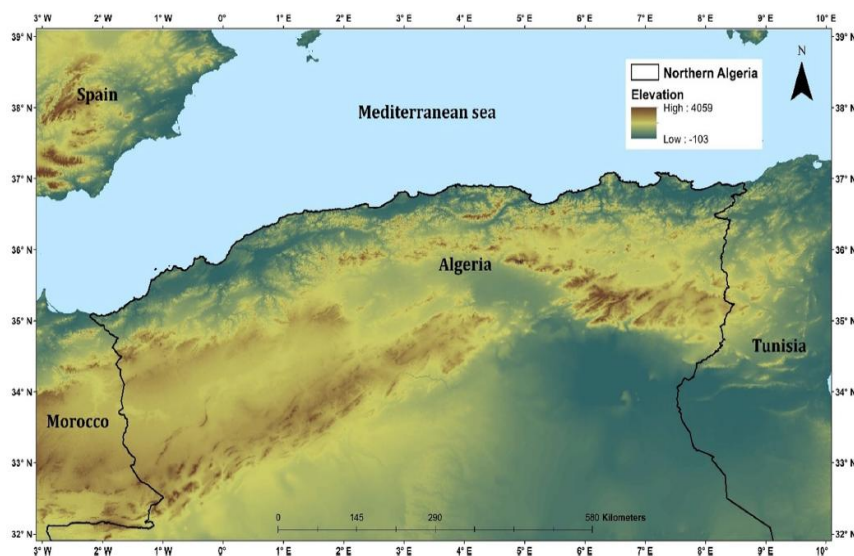


图 1 阿尔及利亚北部及其周边地区（本研究的范围）

阿尔及利亚北部是地中海盆地最西端的一个主要的地球动力学活跃区。可靠的地震危险性评估对这一区域至关重要，其中一个基本要求是一个均一的地震目录。进一步而言，需要采用一定的回归方法将不同的震级标度均一化为单一震级标度。然而，当前阿尔及利亚地区的统一地震目录开发存在两个主要问题。首先，基于表面波震级标度 (M_s) 或矩震级标度 (M_w) 作为首选标度有很大局限性。其次，采用标准线性回归法 (SLR) 进行分析时，未经验证的假设可能会导致震级转换中的系统误差。

M_{wg} 标度是一种创新的基于物理的地震震级标度，由于它在发生大地震时不会饱和，因此其性能优于其他所有标度。对于震级转换，与其他方法相比，新广义正交回归 (N.GOR) 的稳健回归方法提供了回归关系中斜率和截距及其相应不确定性的最精确估计，并产生了更好的判定系数和标准误差。

本研究试图基于被称为 M_{wg} 的高级震级标度为阿尔及利亚北部提供一个新的可靠的统一地震目录。研究人员使用了被称为新广义正交回归 (N.GOR) 的稳健回归方法，旨在将多种类型震级转换为所选矩震级标度 M_{wg} 的过程中获得最可靠和最准确的结果。研究编制出了阿尔及利亚北部地区及其周边地区的地震参数数据，所有震级范围包含 0~100 km 的深度，以及震级类型 m_b 、 M_s 、 M_L 和 M_{blg} ，所收集地震事件的时间范围为 1954—2022 年。

1. 震级转换方法比较

编制统一、均一的地震目录是任何活跃地震区地震危险性分析的关键初始步骤。本研究的研究区域是阿尔及利亚北部，相关的地震信息来自国际地震中心 (ISC)、美国国家地震信息中心 (NEIC)、全球质心矩张量目录 (GCMT)、欧洲-地中海地震中心 (EMSC)、西班牙国家地理研究

所 (IGN) 和阿尔及利亚天文学、天体物理学与地球物理学研究中心 (CRAAG) 的公报。这些国家和国际机构提供的地震数据存在不确定性, 这些不确定性是地震震级、位置、深度和时间估计过程中的假设所固有的, 因此编制可靠的统一目录非常具有挑战性。由于缺乏阿尔及利亚北部地区地震矩的一致数据, 研究人员付出了巨大的努力来汇编和均一化该地区的所有数据, 以减少可能的不确定性。因此, 为所有地震事件计算了一个基于物理的高级地震震级标度 M_{wg} 。

为了证明能够降低不确定性比率的最佳回归方法, 研究人员对 GOR 和新 GOR (N.GOR) 进行了比较, 它们是在两个变量具有不同不确定性时进行震级转换的最佳有效转换方法。GOR 方法提供的斜率估计过高, 主要有两个原因: ①没有囊括方程误差; ②GOR 方法提供了一个真实值方程, 但错误地以不同的形式使用。考虑到方程误差, 估计误差方差比 η 并不容易。因此, N.GOR 方法被提出, 以解决 GOR 的高估问题。在 N.GOR 中, 还通过中间步骤解决了在 GOR 中使用不正确形式的问题。

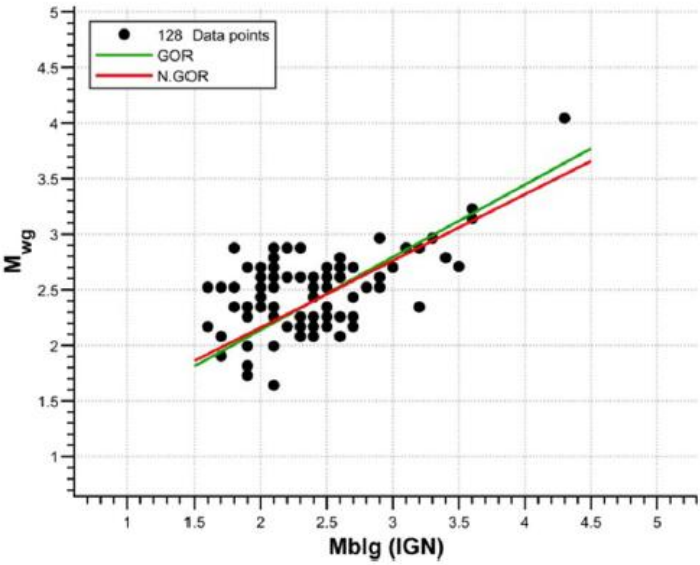


图 2 使用 GOR 和 N.GOR 方法对 M_{blg} 与 M_{wg} 进行线性拟合

N.GOR 方法已被推荐用于生成地震震级转换的回归关系，因为它可以产生最准确的因变量估计值，并且与其他方法相比提供了更好的相关系数。具体而言：①N.GOR 提供了较低的斜率和截距不确定性值，以及改进的相关系数和标准差；②由于所提出的方法（即 N.GOR）不需要中间替换步骤，因此它被认为比传统方法更直接；③最终 GOR 线的斜率和截距估计值的置信区间可由 N.GOR 单独提供，这与早期方法不同（早期方法没有明确斜率和截距的不确定性值），同时，N.GOR 包括两个不同的数据集和一个遵循正式统计实践的替换程序；④N.GOR 可迅速提供拟合的直立性和残差平方和（以便与不同方法进行比较）。

2. 北阿尔及利亚的震级转换

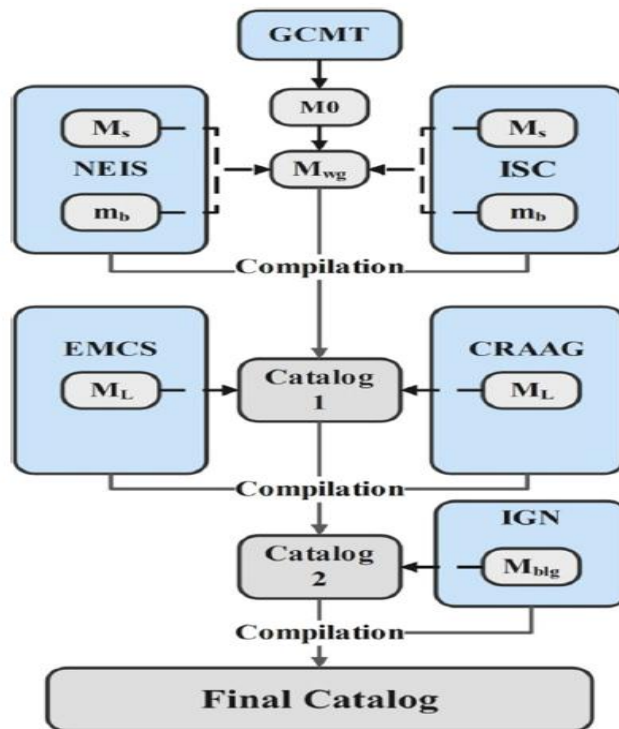


图3 用于编制最终目录的方法

根据斜率和截距的误差值、判定系数和标准误差，N.GOR 给出了最佳结果。因此，基于这种稳健的回归方法，将已获得地震目录在 M_{wg} 地震震

级标度上进行了标准化。整个过程如下：①将来自 GCMT 的 M_0 转换为 M_{wg} ；②转换 ISC 和 NEIS 的 m_b 和 M_s ，因为只有这两个机构的数据与 M_{wg} GCMT 相连，从而获得 M_{wg} 主目录（目录 1）；③将 EMCS 和 CRAAG 中的 M_L 与目录 1 中的 M_{wg} 形成配对，然后进行转换，获得第二个 M_{wg} 目录（目录 2）；④将 IGN 中的 M_{blg} 与目录 2 中的 M_{wg} 形成配对，然后进行转换，获得最终目录。

阿尔及利亚北部的最终统一目录包含约 17074 个地震事件，时间跨度为 1954—2022 年。该目录包含所有必要的参数，例如地震的原始作者、地震日期、时间、坐标和震源深度、发震震级，以及最后编译的 M_{wg} 值。该目录报告了自 1954 年以来深度已知的地震，其中大多数地震位于 1~70 km 之间的浅层，一些更深的地震（约 23 个）被观察到位于 70~100 km 的深度。

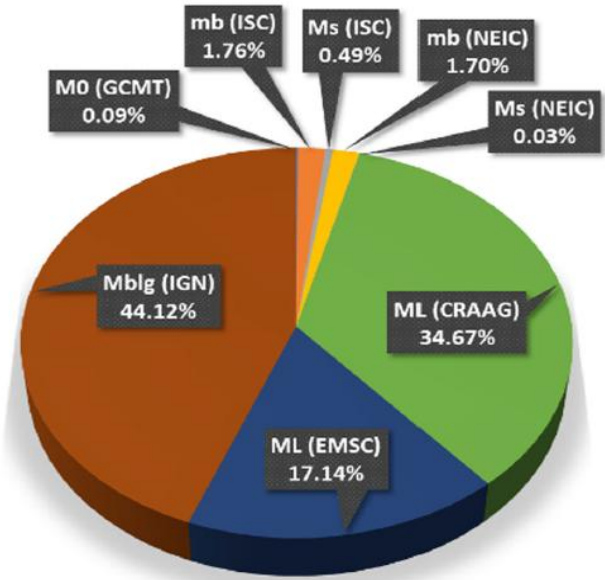


图 4 每个机构的震级标度在最终目录中的贡献

3. 小结

阿尔及利亚北部是地球上地震最活跃的地区之一，因此，有必要改进

地震目录的研究。由于缺乏关于阿尔及利亚北部地震矩的可靠数据，所编制的目录要么采用 M_s 标度（已饱和），要么采用 M_w 标度（通常使用为其他国家创建的经验关系），这可能导致目录不可靠，从而对该地区的相关地震研究产生影响。此外， M_w 标度专门用于测量大地震，而弱地震和中等地震则被高估。为了克服这个问题，本研究为阿尔及利亚北部编制了一份新的、全面的、均一化的地震目录，将不确定性降至最低，而这将成为广大地球科学人员的有用工具。

这一目标是通过两件相辅相成的事情实现的，这两件事情都非常重要。首先，所有震级都转换为高级矩震级标度，这是众所周知的 M_w 标度的改进。其次，进一步实施一种新的、用于转换的通用正交回归技术 (N.GOR)，其是对全球作为最佳参考回归方法的标准 GOR 的改进和正确应用。在详尽探索可用的不同震级并寻找它们之间的关系后，推导出原始的标度定律，以将震级从不同标度转换为通用标度 M_{wg} 。在与地震灾害相关的工作中，总是需要利用所有可用的地震震级大小。因此，来自各个机构报告的所有震级标度都参与了这一过程，以确保在最终目录中包含尽可能多的地震数量。因此，获得的 1954—2022 年统一的、基于 M_{wg} 的目录是阿尔及利亚第一个此类目录。

来源：Boudebouda A, Athmani A, Ranjit D. A unified earthquake catalog for Northern Algeria based on an advanced moment magnitude scale using a robust regression method. Pure and Applied Geophysics, 2024: 1-22.