引用格式：王润妍，万永魁，关兆萱，等，2025. 2023 年 9 月 9 日摩洛哥 *M* 6.9 地震静态应力触发研究[J]. 地质力学学报，31（2）：223−234. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024039

Citation: WANG R Y，WAN Y K，GUAN Z X，et al.，2025. Static stress triggering of Morocco *M* 6.9 earthquake on 9 September 2023[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：223−234. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024039

2023 年 9 月 9 日摩洛哥 *M* 6.9 地震静态应力触发研究

王润妍[1]，万永魁[1,2]，关兆萱[1]，黄少华[1]，顾培苑[1]，宋泽尧[1]，周明月[1]

WANG Runyan[1]，WAN Yongkui[1,2]，GUAN Zhaoxuan[1]，HUANG Shaohua[1]，GU Peiyuan[1]，SONG Zeyao[1]，ZHOU Mingyue[1]

1. 防灾科技学院地球科学学院，河北 三河 065201；
2. 廊坊市地球探测与信息技术重点实验室，河北 三河 065201

1. *School of Geosciences*, *Institute of Disaster Prevention*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*;
2. *Langfang Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*

Static stress triggering of Morocco *M* 6.9 earthquake on 9 September 2023

Abstract: ［**Objective**］Coulomb stress change is an important tool for studying earthquake triggering effects and assessing seismic hazard. In order to study the triggering of the static Coulomb Failure Stress(CFS) of the *M* 6.9 earthquake in Morocco on September 9, 2023, the study determined the geometric configuration and slip properties of the seismogenic fault, analyzed the co-seismic displacement field and surface strain field generated by the earthquake, and evaluated the triggering effects of the mainshock on aftershocks and surrounding faults, revealing the impact of this earthquake on regional seismic activity.［**Methods**］Using the "central solution" algorithm, two possible nodal planes of the earthquake were determined, and the local stress field was projected onto these two planes. The nodal plane with higher Coulomb stress was selected as the seismogenic fault plane (strike 253.44°, dip 45.43°, rake 81.05°). Based on statistical formulas, the slip properties of the seismogenic fault plane were determined. Under the homogeneous elastic half-space theoretical model, the co-seismic displacement field and areal strain field of the region were constructed. Subsequently, assuming that the focal mechanisms of the aftershocks on the receiver faults were consistent with the mainshock, the triggering effect of the mainshock on the aftershocks was calculated. Finally, the Coulomb stress changes induced by the mainshock on the surrounding faults were computed to assess the seismic hazard.［**Results**］The results show that the material at the epicenter moved outward, while the material on the north and south sides moved inward, resulting in uplift at the epicenter and slight subsidence on the north and south sides. The static Coulomb stress generated by the mainshock promoted the occurrence of most shallow aftershocks, with a large number of aftershocks located in areas of high Coulomb stress change. Additionally, the western and southwestern segments of the South Atlas Fault, the southern segment of the North Atlas Fault, and the western segment of the South Sous Fault all exhibited Coulomb stress change values exceeding the 0.01 MPa threshold, indicating a very high seismic hazard that warrants attention.［**Conclusion**］The study demonstrates that the static CFS generated by the *M* 6.9 earthquake in Morocco significantly influenced the surrounding seismic activity. The mainshock not only promoted the occurrence of aftershocks but also increased the stress on surrounding faults, particularly in the western and southwestern segments of the South Atlas Fault, the southern segment of the North Atlas Fault, and the western segment of the South Sous Fault.［**Significance**］The study not only assessed the seismic hazard in the region but also provided a foundational dataset for geodynamic research in the area. It contributes to enhancing earthquake monitoring, prediction, and risk mitigation capabilities, promotes the formulation of relevant policies, and safeguards

基金项目：国家自然科学基金项目（42174074，41674055，42364005）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42174074, 41674055, and 42364005).

第一作者：王润妍（2000—），女，在读硕士，主要从事构造应力场、地震应力触发方面的研究工作。Email：yan8959853@163.com

通信作者：万永魁（1989—），男，讲师，主要从事地球动力学和地壳应力场方面研究工作。Email：1069839372@qq.com

收稿日期：2024−04−17；**修回日期**：2025−02−14；**录用日期**：2025−02−20；**网络出版日期**：2025−02−27；**责任编辑**：范二平

people's lives and property. Therefore, an in-depth exploration of earthquake triggering is of great significance for strengthening post-earthquake scientific research and improving society's ability to respond to earthquakes.

Keywords: Morocco *M* 6.9 earthquake; stress triggering; Coulomb failure stress; seismogenic fault

摘　要： 库仑应力变化是研究地震触发效应和评估地震危险性的重要工具。为研究2023年9月9日摩洛哥*M* 6.9地震的静态库仑破裂应力对周围的触发作用，通过确定发震断层的几何形态和滑动性质，分析地震产生的同震位移场及地表应变场，评估主震对余震及周围断层的触发效应，揭示了该地震对区域地震活动性的影响。首先，利用“中心解”算法确定该地震可能发生的2个节面，并将当地应力场投影到这2个节面上，选择库仑应力较大的节面作为发震断层面；并基于统计公式，确定该发震断层面的滑动性质；在均匀弹性半空间理论模型下，构建地震作用下区域同震位移场及地表应变场。其次，假定接收断层的余震震源机制与主震一致，计算主震对余震的触发作用。最后，计算主震在周围断层上产生的库仑破裂应力变化，评估地震危险性。研究结果表明，震中物质向外涌出，南北两侧物质向内涌入，震中表现为隆升，南北两侧略微沉降；主震产生的静态库仑应力促进了大部分浅层余震的发生，大量余震处于库仑应力变化高值区；此外，南阿特拉斯断层西段—西南段、北阿特拉斯断层南段以及南苏斯断层西段的库仑应力高值区均超过0.01 MPa阈值，地震危险性极高，值得关注。

关键词： 摩洛哥*M* 6.9地震；应力触发；库仑应力；发震断层

中图分类号： P315　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1006−6616(2025)02−0223−12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024039

0　引言

中国地震台网中心监测数据显示，北京时间2023年9月9日6时10分58秒摩洛哥发生6.9级强震，震中地理坐标为北纬31.00°、西经8.55°，震源深度达26 km。北京时间2023年9月11日摩洛哥官方公布的灾情公报显示，该地震已造成2960人罹难、5674人受伤，灾害强度位列该国近百年地震史前三位，引发国际社会高度关注。

已有研究表明，通过定量分析地震引起的库仑破裂应力变化，可以更好地理解地震活动机制，评估地震危险性以及提前预测地震发生的可能位置。Nalbant et al.(1998)分析了北爱琴海和土耳其西北地区29次震级≥6地震的库仑应力变化，发现其中16次地震受到了先前地震应力变化的触发，并判定伊兹米特地区为地震活跃区。万永革等(2009)基于库仑破裂准则，系统评估了汶川*M* 8.0地震对邻近断裂带的应力扰动效应，并对区域后续潜在的地震活动性开展了定量预测；研究结果显示，后续序列地震事件(2014年芦山*M* 6.5地震、2017年九寨沟*M* 7.0地震)均落入其圈定的库仑应力增强区域。万永革等(2010)根据2008年于田地震在周围断层上产生的库仑应力变化，对该区域的地震危险性进行了评估，研究结果显示，2014年发生的7.3级于田地震正位于其预测的地震危险区范围内。靳志同等(2019)通过分析2017年九寨沟7.0级地震对区域断裂体系的应力作用发现，受同震应力加载作用影响，虎牙断裂带中段呈现出显著的库仑应力增强效应，其地震活动潜势明显高于周边断裂。李振月等(2020)通过研究2017年西藏米林*M* 6.9地震对震后短期内余震的静态库仑应力影响认为，该区所有余震均有被触发的可能。冯淦等(2021)基于对2021年青海玛多M_S 7.4地震对震源区主要断裂带的同震应力影响的系统分析发现，玛多−甘德断裂中段呈现出显著的库仑应力积累特征，可能是地震发生的危险区。许鑫等(2022)通过分析2017年云南漾濞6.4级地震对区域断裂体系的应力场扰动特征认为，维西−乔后断裂中段区域的危险性高。黄少华等(2023)通过计算2022年9月17—18日中国台湾先后发生的2次强震的库仑应力变化发现，台东*M* 6.5地震产生的应力场显著改变了区域应力的分布格局，对后续花莲*M* 6.9地震的发生具有明显的应力触发效应。陈群策等(2019)根据莫尔−库仑破裂准则和实时测量的地应力结果对雪峰山2000 m附近的断层活动性进行讨论，判断出该地区断层相对稳定。这些研究表明，大地震产生的库仑破裂应力在预测地震危险性方面起到了重要作用。

地震的发生往往伴随着板块的运动，这种快速而突然的变化可以在几秒钟内造成米量级的位移，对周围环境及居民生活产生巨大的影响。文章采用库仑应力分析方法，定量评估了摩洛哥*M* 6.9地震对区域余震序列及主要断层的应力场扰动影响；系统分析了同震应力场对周边地区的应力效应，并

深入探讨了该地震对邻近构造的地震触发机制。此研究不仅评估了该地区的地震危险性，还为该地区的地球动力学研究提供了资料基础。研究成果将有助于增强地震监测预测能力和风险规避水平，为相关政策的制定提供科学依据，从而更好地保护人们的生命和财产安全。因此，深入探讨地震触发机制及其影响，对于加强震后科学研究、提升社会应对地震能力具有重要的理论和实践意义。

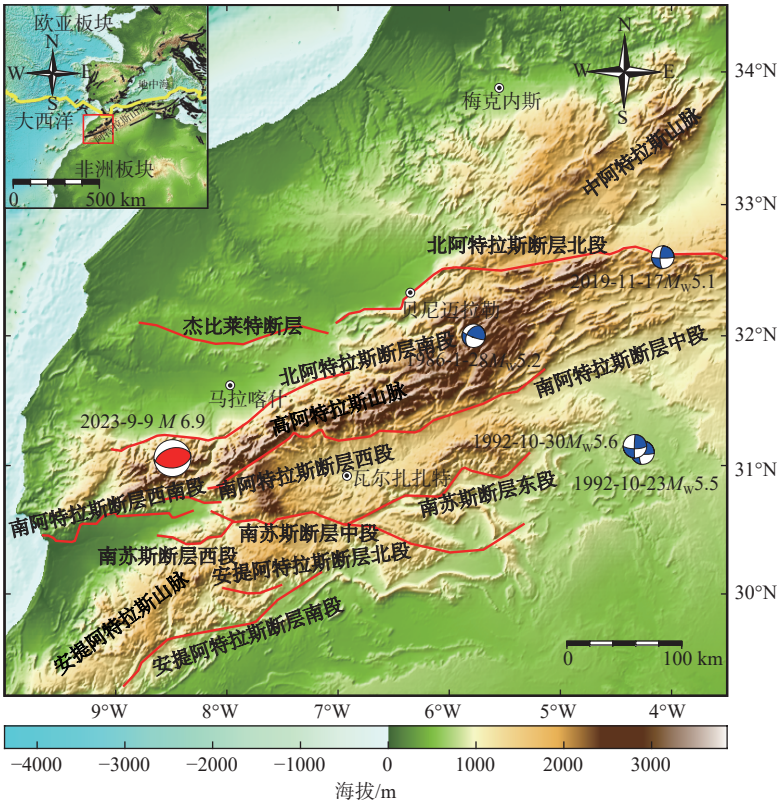
1　地震地质环境

摩洛哥地处非洲板块与欧亚板块强烈作用的交界处，由于非洲板块缓慢地向北边的欧亚板块挤压，造成板块边界构造活动强烈，连带着内陆强烈变形，致使该地区地震活跃。此次 *M* 6.9 地震并非发生在板块边界，而是在非洲板块内部（王晓民，2023；李忠东，2023），是自 1920 年以来发生在摩洛哥的最大地震。摩洛哥位于非洲西北端，北邻地中海，西邻大西洋，东南则横亘着阿特拉斯（Atlas）山脉。摩洛哥境内的阿特拉斯山脉带呈西南—东北走向，依据构造特征可划分为 3 个次级单元：南部的安提阿特拉斯带（Anti Atlas）、中部的高阿特拉斯带（High Atlas）以及北部的中阿特拉斯带（Middle Atlas；周健，2023）。此次 *M* 6.9 地震的震源区位于高阿特拉斯构造带内（图 1），该区域是北非地区重要的地震活动带之一。

2　主震震源参数的确定

2.1　震源机制中心解

针对 2023 年 9 月 9 日摩洛哥 *M* 6.9 地震，国内外多家研究机构基于不同观测数据和反演方法获得了多个震源机制解（表 1）。由于数据来源和计算



黄色线条是板块边界线；红色方框为研究区（29.2°—34.5°N、3.5°—10°W）；红色线条表示主要逆断层；红色沙滩球是此次摩洛哥 6.9 级地震；蓝色小沙滩球表示该区域 1976 年 1 月 1 日—2023 年 9 月 9 日发生过的地震（https://www.globalcmt.org）

图 1　摩洛哥 6.9 级地震的地质构造背景（据香港中文大学地震学实验室资料 https://cuhk.edu.hk/修改）

Fig. 1　Geological tectonics of the Morocco *M* 6.9 earthquake (according to the data from the Seismology Laboratory of the Chinese University of Hong Kong https://cuhk.edu.hk/, revised)

The yellow line is the plate boundary line, the red box indicates the study area (29.2°N—34.5°N, 3.5°W—10°W), the red lines indicate major reverse faults, the red beach ball is the Morocco *M* 6.9 earthquake, and the small blue beach balls indicate historical earthquakes in the region from January 1, 1976 to September 9, 2023 (https://www.globalcmt.org).

方法的差异，这些结果呈现出显著的离散特征。为准确分析地震构造应力场特征、同震库仑应力变化及发震构造背景（关兆萱等，2023），研究采用万永革（2019）提出的空间旋转角最小化算法求解震源机制中心解。该方法通过最小化各解之间的空间旋转角平方和来确定最优解（戴盈磊等，2022）。经系统计算，发现以美国地质调查局（W-phase）震源机制为初始值时获得的标准差最小，其最优解参数为：第1个节面走向253.44°、倾角45.43°、滑动角81.05°；第2个节面走向86.10°、倾角45.27°、滑动角98.98°（图2）。对比分析显示，该中心解与其他震源机制的空间旋转角分布在21.13°—64.98°之间（表1），充分反映了不同解之间的离散程度，同时也凸显了采用中心解确定精确破裂参数的必要性。基于最优中心解判断，此次地震具有典型的逆冲型破裂特征（万永革，2024）。

表1 2023年9月9日摩洛哥6.9级地震源机制解及得到的中心震源机制解的标准差

Table 1 The focal mechanism of the Morocco *M* 6.9 earthquake on September 9th, 2023 and their standard deviation of the central focal mechanism

序号	震源机制解走向/(°)，倾角/(°)，滑动角/(°)	数据来源	作为初始解得到的中心震源机制走向/(°)，倾角/(°)，滑动角/(°)	作为初始解得到的标准差S/(°)	以美国地质调查局（W-phase）结果作为初始解的中心震源机制与其他震源机制的最小空间旋转角/(°)
1	260, 73, 72	中国地震台网中心（https://news.ceic.ac.cn/）	253.44, 45.43, 81.04	35.259441	30.72
2	253, 67, 72	中国地震局地球物理研究所张喆（https://mp.weixin.qq.com/s/-0aUhZ7wKoNtFmEti9Lv-Q）	253.43, 45.43, 81.04	35.259441	23.28
3	255, 29, 69	美国国家地震信息中心（https://www.usgs.gov/）	253.44, 45.43, 81.04	35.259440	21.13
4	255, 23, 132	全球矩心矩张量（https://www.globalcmt.org/）	253.44, 45.43, 81.05	35.259440	54.19
5	262, 21, 78	德国地球科学研究中心（https://www.gfz.de/）	253.44, 45.43, 81.04	35.259440	26.87
6	257, 37, 59	巴黎地球物理研究所（https://www.ipgp.fr/）	253.43, 45.43, 81.03	35.259441	26.21
7	252, 34, 144	法属波利尼西亚探测与地球物理实验室（https://www.cppt.org/）	253.44, 45.43, 81.04	35.259440	64.98
8	259, 30, 68	意大利国立地球物理与火山学研究所（https://www.ingv.it/）	253.43, 45.43, 81.03	35.259442	23.52
9	255, 69, 69	美国地质调查局（https://www.usgs.gov/; W-phase）	253.44, 45.43, 81.05	35.259440	26.86
10	255, 67, 68	美国地质调查局（https://www.usgs.gov/）	253.43, 45.43, 81.04	35.259441	25.66

2.2 发震断层面的确定

为确定该地震的发震断层面，将该地区的应力场数据投影到已获得的震源机制中心解的2个节面上，选择其中最有可能破裂的节面为发震断层面。

应力张量是对称张量，具有6个独立参数；若考虑应力球张量为0，则应力张量独立参数变为5个；采用3个主应力的比例关系对应力大小归一化（万永革，2020）可得：

$$R=\frac{S_2-S_3}{S_1-S_3} \tag{1}$$

式中，S_1、S_2和S_3是在主轴坐标系下的3个本征值，分别为主张应力、中间应力和主压应力；R为应力形因子，表示相对应力大小。

当已知震源机制1个节面的走向与倾角时，可将其转换为北东下坐标系（北为x轴，东为y轴，下为z轴）中的断层几何参数：

$$\boldsymbol{l}=(\cos\varphi,\sin\varphi,0) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{m}=(\sin\varphi\cos\delta,-\cos\varphi\cos\delta,-\sin\delta) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{n}=(\sin\varphi\sin\delta,-\cos\varphi\sin\delta,\cos\delta) \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{m}$—倾向反方向；$\boldsymbol{l}$—断层走向；$\boldsymbol{n}$—断层面的法向；φ—走向；δ—倾角。

节面剪切方向与倾向方向的剪应力分量可通过以下公式计算获得：

$$T_1=\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{l})S_1+\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{l})S_2+\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{l})S_3 \tag{5}$$

$$T_2=\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{T},\boldsymbol{m})S_1+\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{B},\boldsymbol{m})S_2+\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{n})\cos(\boldsymbol{P},\boldsymbol{m})S_3 \tag{6}$$

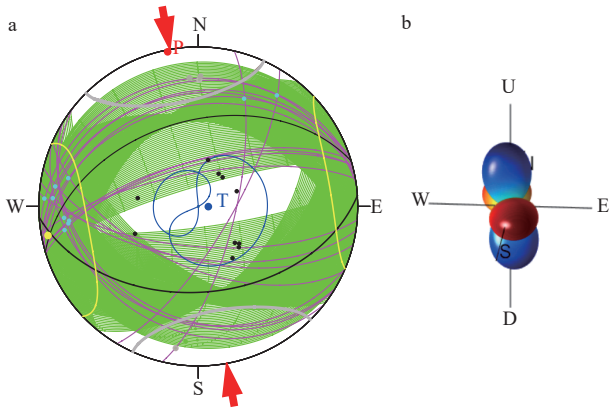
式中，T_1—沿走向的剪应力；T_2—沿倾向反方向的剪应力；$\boldsymbol{T}$—拉张主应力；$\boldsymbol{B}$—中间主应力；$\boldsymbol{P}$—压缩主应力；其他变量含义同上。

震源机制节面的正应力为：

$$T_{\mathrm{n}}=\cos^2(\boldsymbol{T},\boldsymbol{n})S_1+\cos^2(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})S_2+\cos^2(\boldsymbol{P},\boldsymbol{n})S_3 \tag{7}$$

式中，T_{n}—正应力；其他变量含义同上。

节面剪应力方向与走向之间的夹角可通过以



N、S、W、E 表示地理方位北南西东；U、D 表示上、下；图 2a 中红色箭头表示压轴（P 轴）方向；黑色弧线是震源机制中心解的 2 个节面，绿色弧线为应力场不确定范围的剪应力最大节面，红点、蓝点、黄点表示中心解的 P 轴、T 轴、B 轴（中间轴），灰、蓝、黄 3 个圆弧形范围是震源机制中心解的 P 轴、T 轴、B 轴不确定性范围，黑点、灰点是各震源机制解 T 轴、P 轴的投影，紫色弧线表示各研究机构的震源机制解节面；图 2b 中蓝色表示压缩区，红色表示膨胀区（万永革等，2011；李佺洪和万永革，2024）

a—地震震源机制中心解的等面积投影；b—地震震源机制中心解的空间三维辐射花样

图 2　摩洛哥 6.9 级地震的震源机制中心解

Fig. 2　The central focal mechanism of the Morocco 6.9 magnitude earthquake

(a) Equal-area projection of the central focal mechanism of the earthquake; (b) 3-D radiation pattern of the central focal mechanism of the earthquake

N, S, W, E denote north, south, west and east, respectively; U, D denote up and down; large red arrow denotes the direction of the pressure axis (P-axis); black arcs are the two nodal planes of the central focal mechanism solution; the green arcs are the maximum shear stress nodal plane under the range tectonic stress uncertainty; the red, blue, and yellow dots denote the P-axis, the T-axis, and the B-axis of the central solution; the red, blue, and yellow arcs are the uncertainty ranges of the P-, T-, and B-axes of the central solution; the black and green dots are the projections of the T- and P-axes of the solutions of each focal mechanism; the purple arcs indicate the focal mechanism solution nodal planes for each research organization in figure 2a; the blue show the compression zones; and the red show the expansion zones in figure 2b (Wan et al., 2011;Li and Wan, 2023).

下解析表达式确定：

$$\gamma = \tan^{-1}\frac{T_2}{T_1} \tag{8}$$

式中，γ—剪滑角；其他变量含义同上。

基于给定应力张量条件，即可确定震源机制单个节面的滑动角参数。根据上述分析仅获得了剪应力的方向，其大小可通过以下表达式计算：

$$\tau = \sqrt{T_1^2 + T_2^2} \tag{9}$$

式中，τ—剪应力大小；其他变量含义同上。

考虑到应力值的相对性特征，研究采用归一化处理方法以实现应力参数的统一比较。将公式（7）确定的震源机制节面的正应力与公式（9）获得的剪应力均以最大剪应力（$(S_1-S_3)/2$）为基准进行归一化处理，分别得到相对剪应力和相对正应力。

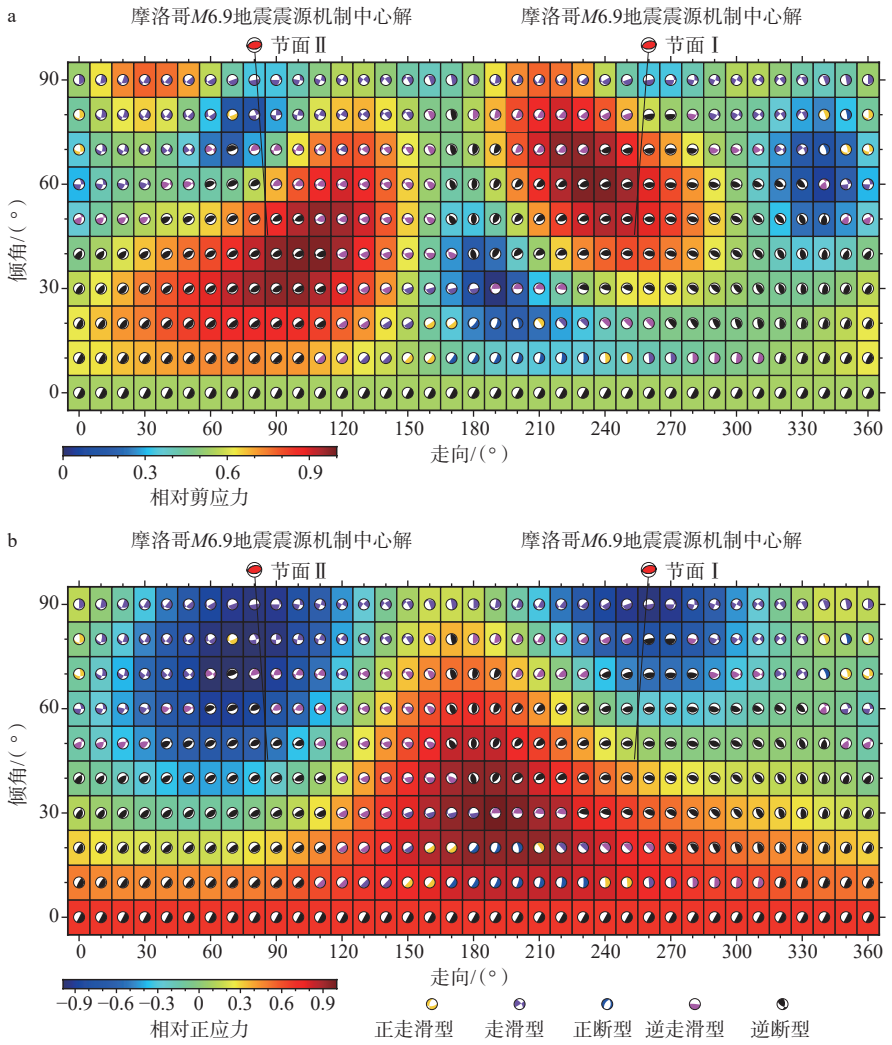
基于全球应力场数据库（Heidbach et al., 2018），摩洛哥地区主应力轴的空间展布特征表现为：主压应力轴走向为 344°，倾伏角为 13°；主张应力轴走向为 97°，倾伏角为 60°；中间应力轴走向为 248°，倾伏角为 27°。为计算该应力场在震源机制中心解 2 个节面上的应力分量，需进一步确定应力形因子（R）的取值。由于 Heidbach et al.（2018）的应力场数据没有给定 R 值，同时该地区震源机制很少，无法精确反演出 R 值，因此，可选取 R 取值范围（0～1）的中间值 0.5 作为该地区的 R 值。经过计算，获得了摩洛哥地区构造应力场在不同几何形态断层上的应力分布特征，包括相对正应力和相对剪应力的空间分布模式，并据此确定了区域典型断层的震源机制分类特征（图 3；万永革等，2011）。

在摩洛哥地区应力场的研究中，针对摩洛哥发生的 M 6.9 地震的震源机制分析，节面 I（其走向为 253.44°、倾角 45.43°）的相对剪应力和相对正应力分别为 0.882（最大值为 1.000）和 0.275。研究结果显示，在该节面上的剪应力滑动角为 66.70°，与实际观测到的滑动角存在 14.35°的偏差。同样地，在节面 II（其走向为 86.10°、倾角为 45.27°）上，相对剪应力和相对正应力分别为 0.908 和−0.404。其剪应力滑动角为 118.70°，与观测到的滑动角相差 19.72°。震源机制中心解的 2 个节面均位于高剪应力集中区，其理论滑动角与观测滑动角具有良好的一致性，这表明此次地震是在区域构造应力场下发生的典型逆冲型地震事件，符合板块构造运动的动力学背景（关兆萱等，2024）。

库仑应力是判断破裂难易程度的标准，其定义为断层面上的剪应力与摩擦系数和正应力乘积之和（Jaeger et al., 2007），可以表示为：

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n \tag{10}$$

式中，$\Delta\sigma_f$—库仑破裂应力变化，当 $\Delta\sigma_f > 0$ 且超过 0.01MPa 的阈值时，则对邻区有触发作用，$\Delta\sigma_f < 0$ 时有抑制作用；$\Delta\tau$—剪切应力变化；$\Delta\sigma_n$—正



沙滩球为应力场在对应走向和倾角的断层上的震源机制；底图颜色表示相应断层上的相对剪应力或正应力的大小

a—节面上的相对剪应力；b—节面上的相对正应力

图 3 摩洛哥地区构造应力场在不同走向和倾角的断层上的相对应力

Fig. 3 Relative stresses on faults with different strikes and dips generated by the tectonic stress field in the Moroccan region

(a) Relative shear stress on the fault plane; (b) Relative normal stress on the fault plane

The beach ball is the focal mechanism of the stress field on the corresponding strike and dip, and the background color indicates the magnitude of the relative shear or normal stresses on the corresponding faults.

应力变化；μ'—视摩擦系数，μ'的取值范围一般为0.2～0.8，研究参考以往经验（King et al., 1994; Harris, 1998），在考虑到地下介质可能含有孔隙流体和断层面介质特性的基础上，μ'取值为0.4。

根据公式（10）可知，节面Ⅰ上的库仑应力为0.9920 MPa，节面Ⅱ上的库仑应力为0.7464 MPa，节面Ⅰ库仑应力较大，并且节面Ⅰ上的剪应力滑动角与观测到的滑动角之间的差异小于节面Ⅱ上的相应差异（14.35°<19.72°；王润妍等，2024），由此判断出倾向北的节面Ⅰ为发震断层面。Huang et al.（2024）利用雷达干涉数据进行贝叶斯反演，确定发震源断层是1个深度26 km、走向为251°、倾角为72°的地震断层面。这与节面Ⅰ十分接近，验证了文章的判断。

2.3 发震断层面的滑动性质

为研究摩洛哥6.9级地震静态库仑破裂应力对周围的触发，还需要获得此次地震断层的破裂长度、宽度和滑动量参数。采用中国地震台网中心（https://news.ceic.ac.cn/）、美国地质调查局（https://earthexplorer.usgs.gov/）和欧洲地中海地震中心（https://

www.emsc-csem.org/）提供的数据，可知其平均深度为 24 km，以节面 I 为接收断层面，根据 Wells and Coppersmith（1994）的统计公式估计逆冲型地震断层面的滑动量及大小：

$$\begin{cases} L = 10^{0.62\times M-2.57} \\ W = 10^{0.27\times M-0.76} \\ U = 100\times\left(\dfrac{(M+6.033)\times 1.5}{L\times W\times 3\times 10^{16}}\right) \end{cases} \tag{11}$$

式中，L—断层走向尺度，km；W—断层倾向尺度，km；M—地震震级；U—断层滑动量，cm。由此计算得到断层面的长度为 33.4 km，宽度为 15.1 km，滑动量为 117.6 cm。

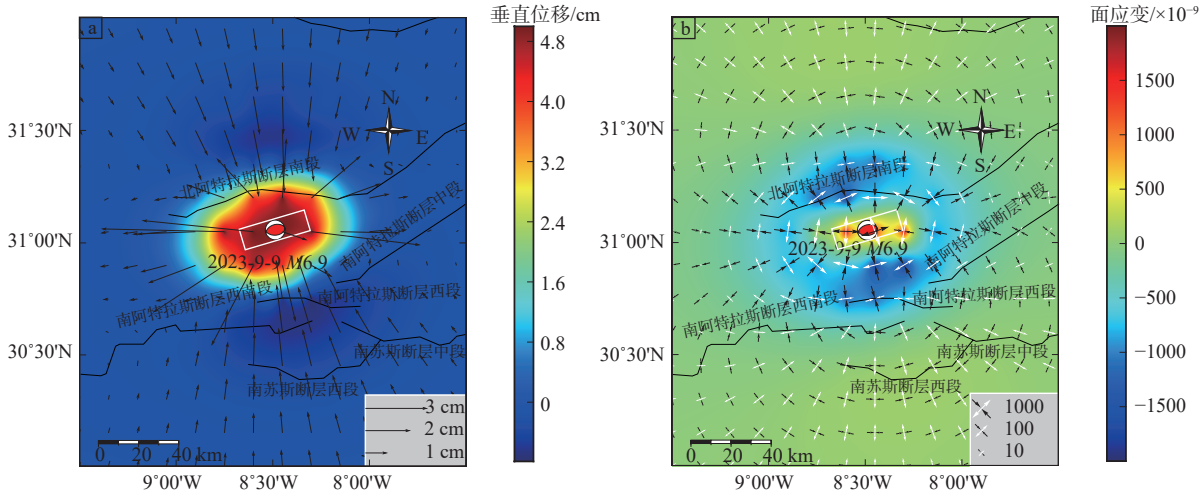
3　摩洛哥 *M* 6.9 地震在周围产生的位移场和应变场

3.1　计算方法

地震是由于地球内部构造运动导致的地壳破裂和能量释放，其能量释放过程主要发生在震前、震后短暂时段内。基于弹性力学理论，可将该时段的地球介质简化为半无限空间下的均匀各向同性弹性体（万永革等，2009）。根据 Okada（1992）建立的弹性半空间理论模型，在已知地震断层面几何参数的条件下，可精确计算同震位移场和应变场的空间分布特征。文章根据此模型方法，计算了摩洛哥 *M* 6.9 地震在破裂过程中引起的同震位移场及地表应变场。

3.2　同震位移场及地表应变场

基于上文得到的主震震源参数，计算了摩洛哥 *M* 6.9 地震对周围地区产生的同震位移场及应变场（图 4），并分析了此地震对周围地区的影响。该地震附近位移场的特征如下（图 4a）：地表水平位移场显示震源区南北两翼呈现向心汇聚模式，反映了南北挤压作用导致的地震破裂过程；震中区域则表现出明显的物质辐散特征，表现了垂向隆升引起的均衡调整过程。垂直位移场与水平位移场具有显著



白色方框表示主震的发震断层位置；黑色线条表示主要逆断层；红色沙滩球是此次摩洛哥 6.9 级地震；图 4a 中箭头代表此次地震所产生的水平位移，颜色代表垂直位移，上升为正；图 4b 中黑色箭头和白色箭头分别表示水平主压应变和水平主张应变，背景色表示水平面应变，拉张为正

a—摩洛哥 *M* 6.9 地震产生的同震位移场；b—摩洛哥 *M* 6.9 地震产生的地表水平主应变和面应变场

图 4　摩洛哥 *M* 6.9 地震产生的同震位移场及地表水平主应变和面应变场

Fig. 4　Co-seismic displacement field horizontal principal and areal strain fields produced by the Morocco *M* 6.9 earthquake

(a) Co-seismic displacement field generated by the Morocco *M* 6.9 earthquake; (b) Horizontal principal and areal strain fields at the surface generated by the Morocco *M* 6.9 earthquake

The arrows represent the horizontal displacements produced by the earthquake in; and the background colors represent the vertical displacements; with the rise being positive in figure 4a. The black arrow and white arrow represent the horizontal principal compressive and extensional strain (in units of 10^{-9}), respectively; The background color represents the horizontal areal strain, with the tensile being positive in figure 4b. White boxes indicate the location of the seismogenic fault of the main shock; black lines indicate major reverse faults; the red beach ball is the Morocco *M* 6.9 earthquake.

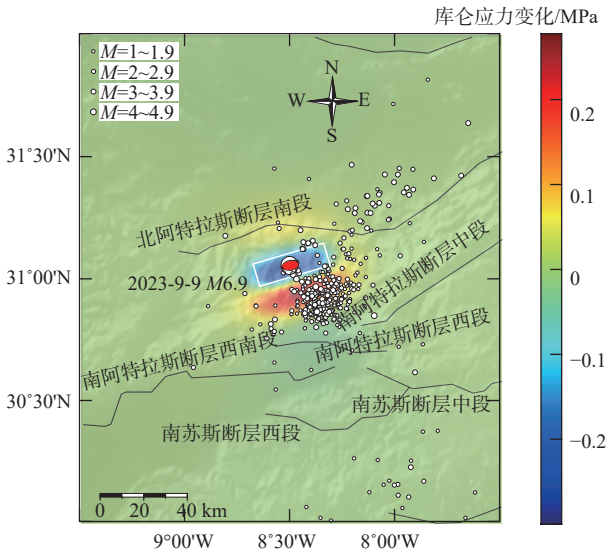
的空间耦合关系：震中区以垂向隆升为主，南北两侧伴随微弱沉降，这种位移模式与逆冲型地震的位错机制相吻合。

摩洛哥 M 6.9 地震在震源破裂处产生的挤压和拉张主应变及面应变如图 4b 所示，面应变的分布显示，震中发震断层周围呈现拉张特征，反映了断层破裂后隆升物质向外扩张的趋势，而离震中较远的区域则呈现压缩特征，且压缩应变随远离断层面逐渐减小，最终趋于无穷远处应变为零的平衡状态。震中 2 个主压应变均为拉张，表现震中物质隆升后向外扩展；震中周围的面应变为负值区域，且挤压应变值较大，表现了明显的逆冲机制。随着与震中距离的增加，拉张应变和挤压应变基本平衡，呈现出面应变基本为 0 的状态，但南北两侧由于位移场中物质涌入的影响，仍表现为拉张特征。这些变形对于研究地震发生对震源周围建筑物等基础设施的影响具有重要意义。

4 摩洛哥 M 6.9 对余震的触发作用

当库仑破裂应力超过岩石破裂强度时，可能引发断层破裂并导致地震。因此，库仑破裂应力常用于解释地震的成因机制及预测未来地震活动（宋泽尧等，2024）。静态库仑应力变化的评估需要准确的余震接收断层几何参数。由于摩洛哥 M 6.9 地震序列的余震震源机制解尚未确定，文章参考以往研究方法（李瑶等，2017；靳志同等，2019；李振月等，2020），采用主震断层参数作为接收断层参数进行近似计算。通过分析库仑应力场的空间分布特征，统计余震在应力触发区和应力抑制区的分布规律。若余震事件在震源区呈现显著的空间丛集特征，则可推断其发震机制与主震断层的持续破裂过程密切相关（李振月等，2020）。

假定空间中接收断层的参数与主震一致（断层走向为 253.44°、倾角为 45.43°、滑动角为 81.05°，断层面的长度为 33.4 km、宽度为 15.1 km、滑动量为 117.6 cm），选取欧洲地中海地震中心（https://www.emsc-csem.org/）提供的北京时间 2023 年 9 月 9 日—9 月 20 日深度小于 30 km 的 441 个摩洛哥 M 6.9 余震数据，来分析余震受到主震作用的大小。由于这些余震事件的平均深度为 7 km，因此估计主震破裂在 7 km 处的库仑破裂应力变化，结果见图 5。地震断层面处于应力卸载位置，这是由于主震的破裂释放了该处的地壳应力，应力转移到其他地方，震源处需要较长时间的构造应力积累才可能聚集到再次发生地震的应力阈值。而大部分余震处于触发区内，且处于库仑应力变化的高值区，这是由于较深的地震震源破裂向南、向上逆冲，致使大部分南部、浅部受到挤压而产生破裂。余震集中处的库仑应力均超过 0.010 MPa 阈值，最大值达 0.207 MPa，说明主震的破裂影响了该地区的地震活动性。只有少数余震位于抑制区，根据李振月等（2020）的观点，余震可能仍然受到主震的触发作用，而抑制区则可能是由于余震的触发机制与主震存在差异。在离主震较远的一些余震中，库仑应力变化基本为 0，表示这些余震基本未受到主震的影响。



白色圆圈表示 2023 年 9 月 9 日—9 月 20 日深度小于 30 km 的摩洛哥 M 6.9 余震；白色方框表示主震的发震断层位置；黑色线条表示主要逆断层；红色沙滩球是此次摩洛哥 M 6.9 地震

图 5 摩洛哥地震在余震平均深度 7 km 处产生的库仑应力变化

Fig. 5 Coulomb failure stress changes generated by the Morocco earthquake at the mean depth of (7 km) of the aftershocks

White circles indicate M 6.9 aftershocks in Morocco at depths less than 30 km from September 9 to September 20, 2023; white boxes indicate the location of the seismogenic fault of the main shock; black lines indicate major reverse faults; the red beach ball is the Morocco M 6.9 earthquake.

5 摩洛哥 M 6.9 地震对周围断层的影响

5.1 摩洛哥 M 6.9 在周边断层上产生的库仑应力变化

大地震的发生可能在长时间尺度上改变当地

的地壳动力学性质，包括库仑应力的分布和断层的性质。理解大地震对周围断层面上同震库仑应力变化的影响对于地震学和地质学研究至关重要，有助于提高对地震活动的理解。为研究摩洛哥 M 6.9 地震对周边主要断层的影响，基于主震震源参数，计算了该地震在邻近断层面上的库仑应力变化。

在计算库仑应力变化时，需要获知断层的几何形状和滑动性质。根据香港中文大学地震学实验室（https://cuhk.edu.hk/sci/essc/yang/people/）发布的摩洛哥山脉地质图确定断层地表迹线；并查阅相关资料确定北阿特拉斯断层倾角为 22°（Cheloni et al., 2024），南阿特拉斯断层倾角为 30°～40°（Ellero et al., 2012）；文章选取两者的中间值 35°。由于目前对摩洛哥地区的断层形态和活动性研究较少，未找到安提阿特拉斯断层、南苏斯断层和杰比莱特断层的具体参数，文章拟设这些逆冲断层的倾角为 45°，滑动角为 90°，计算得到各个断层面上产生的库仑应力变化数据（表 2，图 6）。

表 2　主震在周边活动断层上产生的库仑应力变化

Table 2　Coulomb failure stress changes on the nearby active faults generated by the Morocco earthquake

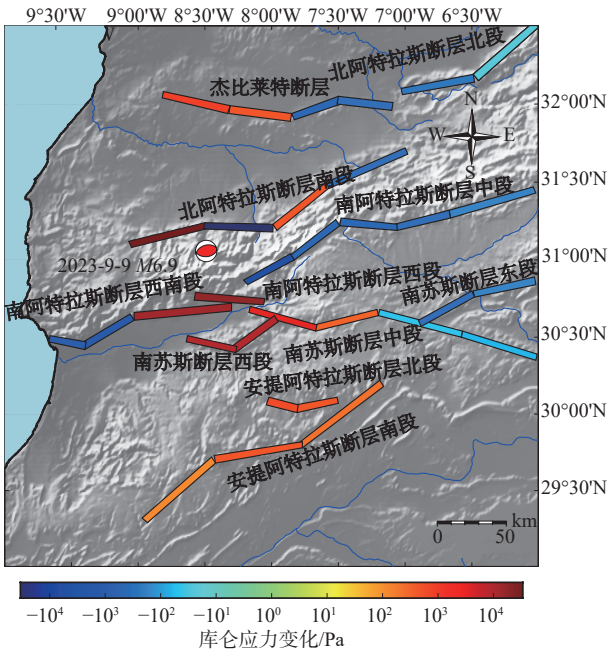
断层名称	分段数	倾角/(°)	倾向	性质	滑动角/(°)	库仑应力变化区间/$\times10^{-6}$ MPa	平均库仑应力/$\times10^{-6}$ MPa
安提阿特拉斯断层南段	3	45	北	逆断	90	166.7～584.4	358.5
安提阿特拉斯断层北段	2	45	北	逆断	90	520.9～808.2	664.6
南苏斯断层中段	4	45	北	逆断	90	−46.6～4258.0	1148.7
南苏斯断层东段	2	45	北	逆断	90	−223.5～−110.9	−167.2
南苏斯断层西段	2	45	北	逆断	90	10530.0～10740.0	10635.0
南阿特拉斯断层中段	5	35	北西	逆断	90	−3378.0～−122.4	−856.4
南阿特拉斯断层西段	1	35	北西	逆断	90	21000.0	21000.0
南阿特拉斯断层西南段	3	35	北西	逆断	90	−744.2～13430.0	4035.2
北阿特拉斯断层南段	4	22	南西	逆断	90	−42470.0～33750.0	−2066.5
杰比莱特断层	4	45	南	逆断	90	−321.8～1020.0	236.7
北阿特拉斯断层北段	2	22	南西	逆断	90	−170.1～−34.7	−102.4

周围断层库仑应力变化分析表明（表 2），摩洛哥 M 6.9 地震显著改变了周边断层的应力状态，且其模式与对余震的触发模式基本相同，断层应力加载高值区是余震频发区。南阿特拉斯断层西段、南苏斯断层西段和南阿特拉斯断层西南段的应力加载量分别为 0.021 MPa、0.011 MPa 和 0.013 MPa。值得注意的是，北阿特拉斯断层南段表现出复杂的应力变化特征，其最大库仑破裂应力增加量为 0.034 MPa，最大应力卸载量达到 0.042 MPa，且断层应力卸载值最大部分出现在发震断层附近，表明发震断层破裂之后导致邻近地区应力卸载需经历较长时间的应力积累才能再次活动。相比之下，北阿特拉斯断层北段的应力扰动较弱，表明该断层受此次地震影响较小。

摩洛哥 M 6.9 地震引发了显著的库仑应力变化，对该区域的断层系统产生了重要影响。研究发现，库仑破裂应力已达到触发的临界值（0.010 MPa），这显著增加了周边区域的地震风险。其中，南阿特拉斯断层西段和南苏斯断层西段的库仑应力显著增加，应特别关注该区域地震活动的可能性。

5.2　讨论

为验证文章在探讨摩洛哥 M 6.9 地震对周围断层影响这一部分中拟设的断层参数的合理性及结果的可靠性，进一步对没有明确数据的断层通过尝试不同的倾角来探究此次地震对周围断层的影响。将安提阿特拉斯断层、南苏斯断层和杰比莱特断层的倾角取值范围设置为 20°～70°；由于断层是明显的逆冲断层，滑动角 90°保持不变。文章分 3 种情况进行讨论：①3 条断层的倾角均取最小值 20°；②3 条断层的倾角均取最大值 70°；③3 条断层的倾角在 20°～70°范围内随机取值。最后计算得到各个断层面上产生的库仑应力变化，结果显示 3 种情况下的库仑应力变化结果均与上文设置的倾角 45°、滑动角 90°情况下的结果大体一致，表明安提阿特拉斯断层、南苏斯断层和杰比莱特断层这 3 条断层的倾角在 20°～70°范围内变化并不会影响结果，得



库仑应力变化采用断层填充颜色表示，大小如色标所示

图 6 摩洛哥 *M* 6.9 地震在周围主要断层面上产生的库仑应力变化

Fig. 6 Coulomb failure stress changes generated on the rupture of the Morocco *M* 6.9 earthquake

The CFS changes are indicated the fault filled colors according the colorbar at the bottom.

出的结果可靠且具有一定的参考意义。

文章采用一级近似方法，结合弹性半空间模型，评估了地震对邻近断层活动及后续地震的潜在影响。尽管已有研究（Deng et al., 1998; 万永革等, 2007, 2008）表明地球内部的三维非均匀结构和黏弹性松弛效应会对库仑破裂应力变化产生作用，但震后数年内黏弹性松弛的影响可忽略（万永革等, 2008）。因此，在一阶近似框架下，文章分析了摩洛哥 *M* 6.9 地震对周边主要断层及后续地震的影响，为区域地震风险评估提供了参考依据。

6 结论

（1）摩洛哥 *M* 6.9 地震的的震源机制中心解结果为节面 I 走向 253.44°、倾角 45.43°、滑动角 81.05°；节面 Ⅱ 走向 86.10°、倾角 45.27°、滑动角 98.98°，表明其为 1 次逆冲型地震。

（2）摩洛哥 *M* 6.9 地震发生前，2 个节面均处于最大剪应力状态，剪应力滑动角与节面滑动角高度一致，表明地震是在背景构造应力场作用下，沿最大剪应力面发生的正常能量释放过程。根据库仑应力准则及剪滑角判断，中心震源机制呈西南走向，向北倾斜的节面 I 为发震断层面。

（3）摩洛哥 *M* 6.9 地震的水平位移场显示，南北两侧物质内涌，反映南北挤压；震中区物质辐散，体现垂向隆升。垂直位移场与水平位移场耦合显著，震中垂向隆升，南北微弱沉降，符合逆冲机制。震中周围面应变为拉张，远场压缩，趋于平衡。震中主压应变为拉张，周围挤压显著，体现逆冲机制；远离震中后应变平衡，但南北两侧仍拉张。

（4）摩洛哥 *M* 6.9 地震断层面处于应力卸载位置，震源处需长时间积累才能再次发震。余震多位于库仑应力高值区，因深部震源逆冲挤压南部浅部引发破裂。余震区库仑应力超 0.010 MPa，最大达 0.207 MPa。主震静态库仑应力促进浅层余震，触发比例高，影响区域地震活动性。余震分布显示发震断层位于余震区北部。

（5）摩洛哥地区北阿特拉斯断层北段库仑应力变化不明显；南段应力变化复杂，发震断层附近出现最大应力卸载值。南阿特拉斯断层西段、南苏斯断层西段及西南段应力增加，库仑破裂应力均超触发阈值（0.01MPa）。此次地震对周边断层影响显著，增加了区域地震危险性，需重点关注南阿特拉斯断层西段、西南段，南苏斯断层西段及北阿特拉斯断层南段等高应力区域的地震活动性。

致谢：中国地震台网中心、中国地震局地球物理研究所张喆学者提供了摩洛哥地震的震源机制数据，香港中文大学地震学实验室提供了摩洛哥地震周围活动断层的几何形态，特此致谢！

References

CHELONI D, AMIGLIETTI N A, TOLOMEI C, et al., 2024. The 8 September 2023, M_W 6.8, Morocco earthquake: a deep transpressive faulting along the active high Atlas mountain belt[J]. Geophysical Research Letters, 51(2): e2023GL106992.

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 853-865. (in Chinese with English abstract)

DAI Y L, WAN Y G, KONG X X, et al., 2022. Central focal mechanism of the Dengta, Liaoning *M*5.1 earthquake in 2013 and the analysis of its surrounding tectonic stress field[J]. Journal of Seismological Research, 45(4): 570-580. (in Chinese with English abstract)

DENG J S, GURNIS M, KANAMORI H, et al., 1998. Viscoelastic flow in the lower crust after the 1992 Landers, California, earthquake[J]. Science, 282(5394): 1689-1692.

ELLERO A, OTTRIA G, MARCO G, et al. , 2012. Structural geological analysis of the high atlas (Morocco): evidences of a transpressional Fold-Thrust Belt[J/ OL]. Tectonics-recent advances, http://dx.doi.org/10.5772/50071.

FENG G, WAN Y G, XU X, et al. , 2021. Static stress influence of the 2021 M_s7.4 Madoi, Qinghaiearthquake on neighboring areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4562-4571. (in Chinese with English abstract)

GUAN Z X, WAN Y G, HUANG S H, et al., 2023. Study on the triggering mechanism and earthquake dynamics of the 2022 Michoacan M_w7.6 earthquake sequence in Mexico[J]. Earthquake Research in China, 39(3): 584-595. (in Chinese with English abstract)

GUAN Z X, WAN Y G, HUANG S H, 2024. The stress effect of the M5.5 earthquake on the surrounding area in Shandong Pingyuan in 2023[J]. Earthquake Research in China, 40(2): 378-388. (in Chinese with English abstract)

HARRIS R A, 1998. Introduction to special section, stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B10): 24347-24358.

HEIDBACH O, RAJABI M, CUI X F, et al., 2018. The World Stress Map database release 2016: crustal stress pattern across scales[J]. Tectonophysics, 744: 484-498.

HUANG K, WEI G G, CHEN K J, et al., 2024. The 2023 Mw 6.8 Morocco earthquake: a lower crust event triggered by mantle upwelling?[J]. Geophysical Research Letters, 51(12): e2024GL109052,

HUANG S H, WAN Y G, FENG G, et al., 2023. Trigger mechanism and dynamic causes of the Taiwan earthquake sequence on September 17, 2022[J]. Journal of Geomechanics, 29(5): 674-684. (in Chinese with English abstract)

JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R. 2007. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Malden: Blackwell Publishing Ltd: 488.

JIN Z T, WAN Y G, LIU Z C, et al., 2019. The static stress triggering influences of the 2017M_s7.0 Jiuzhaigou earthquake on neighboring areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(4): 1282-1299. (in Chinese with English abstract)

KING G C P, STEIN R S, LIN J, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(3): 935-953.

LI Q H, WAN Y G, 2024. Geometry of seismogenic faults determination of the 2021 Maduo earthquake sequence by fuzzy clustering algorithm[J]. Earth Science, 49(9): 3363-3376. (in Chinese with English abstract)

LI Y, WAN Y G, JIN Z T, et al., 2017. The study of static stress variation of the M_w6.3 Jinghe earthquake[J]. Earthquake Research in China, 33(4): 671-681. (in Chinese with English abstract)

LI Z D, 2023. Warnings from the earthquake in Morocco[J]. Life & Disaster, 30(10): 32-35. (in Chinese)

LI Z Y, WAN Y G, JIN Z T, et al., 2020. The static Coulomb stress influence of the Mainling M6.9 earthquake in Tibet on November 18, 2017 to the subsequent earthquakes[J]. Seismology and Geology, 42(5): 1091-1108. (in Chinese with English abstract)

NALBANT S S, HUBERT A, KING G C P, 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B10): 24469-24486.

OKADA Y, 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2): 1018-1040.

SONG Z Y, WAN Y G, GUAN Z X, et al., 2024. Stress changes on surrounding faults and triggering of aftershocks induced by the M_s7.1 earthquake in Wushi County, Aksu Prefecture, Xinjiang, on January 23, 2024[J]. China Earthquake Engineering Journal, 46(4): 982-991. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHEN Z K, ZENG Y H, et al., 2007. Evolution of cumulative Coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and its effect on large earthquake occurrence[J]. Acta Seismologica Sinica, 29(2): 115-129. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHEN Z K, ZENG Y H, et al., 2008. Study on visco-elastic stress triggering model of the 1976 Tangshan earthquake sequence[J]. Acta Seismologica Sinica, 30(6): 581-593. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHEN Z K, SHENG S Z, et al., 2009. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults[J]. Acta Seismologica Sinica, 31(2): 128-139. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHEN Z K, SHENG S Z, et al., 2010. The mechanical effects of the 2008 M_s7.3 Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(2): 280-289. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, SHENG S Z, XU Y R, et al., 2011. Effect of stress ratio and friction coefficient on composite P wave radiation patterns[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(4): 994-1001. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(12): 4718-4728. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, 2020. Simulation on relationship between stress regimes and focal mechanisms of earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(6): 2281-2296. (in Chinese with English abstract)

WAN Y G, 2024. Focal mechanism classification based on areal strain of horizontal strain rosette of focal mechanism and characteristic analysis of overall focal mechanism of earthquake sequence[J]. Earth Science, 49(7): 2675-2684. (in Chinese with English abstract)

WANG R Y, WAN Y G, SONG Z Y, et al., 2024. Focal mechanism and stress implication on the surrounding region of the Jishishan, Gansu M_s6.2 earthquake on December 18, 2023[J]. Earthquake, 44(1): 175-184. (in Chinese with English abstract)

WANG X M, 2023. Striking similarities between the revelations of the Morocco earthquake and the Shandong Dezhou earthquake[J]. Overview of Disaster Prevention(5): 28-33. (in Chinese)

WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.

XU X, WAN Y G, LI Z Y., et al., 2022. Static stress triggering of the 2021 Yangbi M_s6.4 earthquake sequence in Yunnan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(4): 970-979. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J, 2023. Brief introduction on the earthquake science research and dis-

aster loss of M6.9 earthquake in morocco[J]. City and Disaster Reduction(6): 59-66. (in Chinese)

附中文参考文献

陈群策, 孙东生, 崔建军, 等, 2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测量及其意义[J]. 地质力学学报, 25(5): 853-865.

戴盈磊, 万永革, 孔祥雪, 等, 2022. 2013年辽宁灯塔*M*5.1地震震源机制中心解及震源区构造应力场特征分析[J]. 地震研究, 45(4): 570-580.

冯淦, 万永革, 许鑫, 等, 2021. 2021年青海玛多M_s7.4地震对周围地区的应力影响[J]. 地球物理学报, 64(12): 4562-4571.

关兆萱, 万永革, 黄少华, 等, 2023. 2022年墨西哥米却肯州7.6级地震序列的触发关系及发震动力学探讨[J]. 中国地震, 39(3): 584-595.

关兆萱, 万永革, 黄少华, 2024. 2023年山东平原*M*5.5地震对周围区域的应力影响[J]. 中国地震, 40(2): 378-388.

黄少华, 万永革, 冯淦, 等, 2023. 2022年9月17日中国台湾地震序列的触发机制及其动力学成因[J]. 地质力学学报, 29(5): 674-684.

靳志同, 万永革, 刘兆才, 等, 2019. 2017年九寨沟M_s7.0地震对周围地区的静态应力影响[J]. 地球物理学报, 62(4): 1282-1299.

李佺洪, 万永革, 2024. 采用模糊聚类算法确定2021年玛多地震序列的断层结构[J]. 地球科学, 49(9): 3363-3376.

李瑶, 万永革, 靳志同, 等, 2017. 新疆精河M_w6.3地震产生的静态应力变化研究[J]. 中国地震, 33(4): 671-681.

李振月, 万永革, 靳志同, 等, 2020. 2017年11月18日西藏米林*M*6.9地震对后续地震的静态库伦应力的影响[J]. 地震地质, 42(5): 1091-1108.

李忠东, 2023. 摩洛哥地震的警示[J]. 生命与灾害, 30(10): 32-35.

宋泽尧, 万永革, 关兆萱, 等, 2024. 2024年1月23日新疆阿克苏地区乌什县M_s7.1地震对周围断层的应力影响及对余震的触发作用[J]. 地震工程学报, 46(4): 982-991.

万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响[J]. 地震学报, 29(2): 115-129.

万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2008. 唐山地震序列应力触发的粘弹性力学模型研究[J]. 地震学报, 30(6): 581-593.

万永革, 沈正康, 盛书中, 等, 2009. 2008年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 31(2): 128-139.

万永革, 沈正康, 盛书中, 等, 2010. 2008年新疆于田7.3级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释[J]. 地球物理学报, 53(2): 280-289.

万永革, 盛书中, 许雅儒, 等, 2011. 不同应力状态和摩擦系数对综合P波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理学报, 54(4): 994-1001.

万永革, 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. 地球物理学报, 62(12): 4718-4728.

万永革, 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究[J]. 地球物理学报, 63(6): 2281-2296.

万永革, 2024. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析[J]. 地球科学, 49(7): 2675-2684.

王润妍, 万永革, 宋泽尧, 等, 2024. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制及其对周围区域的应力影响[J]. 地震, 44(1): 175-184.

王晓民, 2023. 摩洛哥地震与山东德州地震的启示惊人相似[J]. 防灾博览(5): 28-33.

许鑫, 万永革, 李振月, 等, 2022. 2021年云南漾濞M_s6.4地震序列静态应力触发研究[J]. 地震工程学报, 44(4): 970-979.

周健, 2023. 摩洛哥地震科学研究简介与6.9级地震灾情分析[J]. 城市与减灾(6): 59-66.