引用格式：李振月，万永革，2025. 合成实验揭示的震源机制与应力信息的统计关系[J]. 地质力学学报，31（6）：1159−1167. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025082

Citation: LI Z Y，WAN Y G，2025. Insights into the statistical relationship between focal mechanisms and stress from synthetic experiments[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1159−1167. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025082

合成实验揭示的震源机制与应力信息的统计关系

李振月[1]，万永革[1,2]

LI Zhenyue[1]，WAN Yongge[1,2]

1. 防灾科技学院，河北 三河 065201；
2. 河北省地震动力学重点实验室，河北 三河 065201
1. *Institute of Disaster Prevention*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*;
2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics*, *Sanhe* 065201, *Heibei*, *China*

Insights into the statistical relationship between focal mechanisms and stress from synthetic experiments

Abstract: ［**Objective**］The extent to which the spatial distribution patterns (particularly the clustering characteristics) of fault nodal planes or the *P*, *B*, and *T* axes of a set of focal mechanism data can provide information about background stress causing earthquakes has long been a controversial academic topic. ［**Methods**］This study systematically investigates this issue through synthetic experiments designed on the basis of the stress–fault slip relationship, with stress parameters including the orientations of the three principal stresses and the stress shape ratio (*R*). ［**Results**］The experimental results demonstrate that the spatial distribution patterns of both fault nodal planes and *PBT* axes are jointly controlled by the stress shape ratio and the fault failure conditions. In most cases, the two nodal planes exhibit widely scattered spatial distributions. Only when the shape ratio is close to 0.5 and the contact area between the Mohr-Coulomb failure envelope and Mohr's circle is minimized do the distributions of both the actual and the auxiliary planes become relatively concentrated. Under these specific conditions, the fault nodal planes (their normals) gain statistical significance for estimating stress orientations. Identifying the actual fault plane among the two nodal planes in focal mechanisms would enhance the determination of principal stress directions. Notably, the spatial distribution of *PBT* axes effectively captures both the principal stress orientations and the shape ratio. Key findings include: (1) Due to the influence of fault failure conditions and the shape ratio, the *P*, *B*, and *T* axes may not cluster or disperse simultaneously. However, when clustering occurs, they converge near the σ_1, σ_2, or σ_3 axes, respectively. (2) A ring-shaped (toroidal) distribution of *T* axes indicates a high *R*-value. (3) *P* and *T* axes never exhibit fully random scattering; if such disorder is observed in real data, it suggests that the focal mechanisms may not share a common stress regime. ［**Conclusion**］This study provides critical constraints for evaluating whether focal mechanism data used in stress inversion belong to a unified stress regime and for predicting stress parameters from the distribution of *PBT* axes. ［**Significance**］These results offer significant implications for developing and applying stress inversion methodology using focal mechanisms.

Keywords: focal mechanism; fault nodal planes; *PBT* axes; stress tensor

摘　要：文章依据应力与断层滑动的关系设计合成实验，系统研究了在同一应力体系下的不同断层上发

基金项目：国家自然科学基金项目（42174074）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174074).

第一作者：李振月（1994—），男，博士，讲师，主要从事地震的震源机制和地壳应力场的相关研究。Email：li_zhenyue@foxmail.com

通信作者：万永革（1967—），男，博士，研究员，主要从事地壳应力场和地震应力触发等方面的研究。

Email：wanyg217217@vip.sina.com.cn

收稿日期：2025−07−08；**修回日期**：2025−09−28；**录用日期**：2025−09−30；**网络出版日期**：2025−11−26；**责任编辑**：吴芳

生地震，这组震源机制的断层节面或*P*轴、*B*轴和*T*轴的空间分布形式能否反映出应力信息的问题。应力信息包括3个主应力的空间方位以及应力形因子（*R*）。实验结果表明，在大多数情况下，震源机制的2个节面在空间中的分布范围很广，不能有效地反映出主应力的方向信息，而*P*轴、*B*轴和*T*轴的空间分布可以很好地反映主应力的方向和*R*值的信息，具体为：受断层破裂条件和本身应力*R*值的影响，*P*轴、*B*轴和*T*轴的分布可能不是同时丛集或离散的，但不论哪个轴丛集分布，都会分别丛集于主应力σ_1轴、σ_2轴和σ_3轴的周围；若*T*轴呈现环形分布，可以说明应力的*R*值较大；*P*轴和*T*轴不会出现无规律混乱分布的现象，若实际数据中观察到这种现象，预示着这些数据不适于同一应力背景。研究成果可以用来评估反演应力所使用的震源机制数据是否属于同一应力体系，以及根据*P*轴、*B*轴和*T*轴的分布预测应力结果，对基于震源机制反演应力的方法和应用研究都具有重要的参考意义。

关键词：震源机制；断层节面；*P*轴、*B*轴和*T*轴；应力张量

中图分类号：P315; P55 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2025)06−1159−09

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025082

0 引言

准确获得地壳内部的应力分布对于解释构造现象(Xu et al., 1992; Zoback, 1992)、推演构造演化历史(崔华伟等, 2019)、了解地震的孕育环境和发震机理(Sibson, 1982)以及矿产资源开采(孟静等, 2024)等方面都具有重要的意义。测量地壳内部应力的途径包括原位应力测量(Zoback and Healy, 1992; 张斌等, 2023)、通过地震波的S波分裂测量最大挤压应力的方向(Gao et al., 2011)以及利用断层擦痕(Gephart, 1990; 赵远方等, 2023)和震源机制(Vavryčuk, 2014; Wan et al., 2016)反演应力等。其中，使用震源机制数据获取应力的途径，由于能反映地壳中—深部的应力状态、获得的应力信息全面以及需要付出的时间和经济成本较低这3个方面的优势，而广泛应用于地球动力学的相关研究中。利用震源机制数据反演地壳应力的方法(如 Gephart and Forsyth, 1984; Michael, 1987; Vavryčuk, 2014; Wan et al., 2016; 李振月等, 2020; Beaucé et al., 2022)，基于地震发生在先存断层的假设，需要构建应力张量与断层滑动之间的数学关系方程组进行求解。然而，由于应力张量与断层错动及震源机制间物理关系(Vavryčuk, 2015)的复杂性，许多实际研究(薛凉等, 2018; 陈佳等, 2023; 关露凝和江国明, 2023; 董春丽等, 2025)并未采用严格的数学反演方法，而是通过统计震源机制断层节面或*P*轴、*B*轴和*T*轴的空间丛集特征来推断主应力的方向。

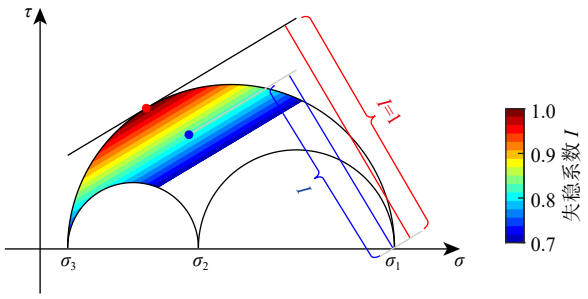
假设地震起源于完整岩石上的应力释放，根据摩尔–库仑破坏准则(Beeler et al., 2000)，地震将以相等的机会发生在2条共轭断层上，这2条共轭断层关于最大挤压应力轴对称，若摩擦系数为0.6(Jia et al., 2018)，2条共轭断层与最大主压应力轴的角度约为30°，此时2条断层对应的2个震源机制，*P*轴和*T*轴分别对称分布在最大和最小挤压应力轴的两侧。如果破裂遵循最大剪应力破坏准则(陈运泰和顾浩鼎, 2023)，2条共轭断层与最大和最小主应力轴的角度分别为45°，2条断层的震源机制完全一致，且*P*轴、*B*轴和*T*轴分别与最大(σ_1)、中间(σ_2)和最小(σ_3)主应力轴重合。不论破裂遵循哪种准则，通过地震断层的方向和*P*轴、*B*轴和*T*轴的空间分布可以推断出主应力轴的方向，这是根据断层方向和震源机制*P*轴、*B*轴和*T*轴估计主应力方向做法的来源。地震源于完整岩石破裂的假设下，区域内地震的震源机制最多只有2种，而实际地质环境中，震源机制往往表现出一定的多样性，说明该假设在实际环境中并不成立。目前广泛认为区域内存在空间产状各异的断层面或薄弱面，在应力的作用下，处于最有利空间方位的断层会产生失稳，发生地震(Stein and Wysession, 2003)，其中“最有利空间方位”包含了应力特征与失稳断层的内在关联，进一步，基于双力偶震源机制模型解算出的*P*轴、*B*轴和*T*轴的空间方位在一定程度上反映了震源区的应力状态。关于区域内震源机制的多样性可解释为：区域内的应力基本是均匀分布的，在不同地点预先存在的断层面或薄弱面，其产状不同，在应力的持续加载下，不同地点达到失稳条件的断层相继发生失稳滑动，区域内的震源机制则会表现出一定程度的多样性。然而，震源机制的断层节面和*P*轴、*B*轴和*T*轴是否具有丛集性，以及丛集

性能否用以估计主应力轴的方向没有确切的定论。目前未见针对该问题的具体研究，文章立意于此，重点研究以下 2 个关键问题：①震源机制的断层节面及 P 轴、B 轴和 T 轴的统计特征能否有效反映应力信息；②若能反映，具体对应何种应力参数。为此，文中研究将设计由应力正演模拟震源机制的合成实验，通过系统分析震源机制断层节面和 P 轴、B 轴和 T 轴的空间分布特征与主应力方位的对应关系，为上述问题提供解答。

1　合成震源机制的实验

假定地下预先存在各种方位的裂隙，在应力的作用下，满足破坏准则的断层将会沿着剪应力的方向发生瞬时滑动，产生地震（Li et al., 2023）。摩尔–库仑破坏准则（Beeler et al., 2000）在 $\sigma-\tau$ 坐标系中是一条直线，摩擦系数是直线的斜率，孔隙压力和岩石的内聚力决定了直线的具体位置，位于直线上方的断层满足破坏准则，可以发生错动。由于孔隙压力和岩石内聚力的值在地壳的不同地方可能有较大差异，为了避免直接讨论这 2 个参数的具体取值，李振月等（2024）利用断层的失稳系数改述了摩尔–库仑破坏准则。破裂线与摩尔圆相切时，切点处对应的断层最先满足破坏准则（图 1），其他断层在摩尔圆中的投影点与该切线的距离越近，则越容易失稳，位于 σ_1（最大主应力）点处的断层距离切线最远，最难失稳。失稳系数表达了断层失稳的难易程度，定义为沿着垂直于切线的方向，断层投影点至 σ_1 点的距离与 σ_1 点至切线的距离之比（Vavryčuk, 2014）。根据失稳系数的定义可知，失稳系数相同的断层位于同一条直线上，该直线与破裂线平行，所以利用失稳系数也可以确定破裂线的位置。基于此，改述的摩尔–库仑破坏准则为：若断层的失稳系数大于临界失稳系数（破裂线对应的失稳系数），则满足失稳条件。

根据摩尔–库仑破坏准则，增加孔隙压力和减小岩石的内聚力都会使得破裂线在 $\sigma-\tau$ 坐标系中向右移动，相应的失稳系数在逐渐减小（图 1），所以孔隙压力取其最大值（最大能达到 σ_3 值），内聚力取最小值（0）可以得到失稳系数最小值的估计。把摩擦系数取为地壳内的均值 0.6（Jia et al., 2018; Lei et al., 2020）后，得到临界失稳系数的最小值约为 0.7，并且可以把 0.7、0.8 和 0.9 分别作为临界失稳系数取值的低、中和高 3 种水平（李振月等, 2024）。



横纵坐标分别为正应力和剪应力的大小，单位 Pa；图中红色圆点为最易失稳的断层；蓝色圆点代表任意断层在摩尔圆中的投影位置；蓝色线段的长度代表了其失稳的难易程度；用蓝色线段与红色线段长度之比计算失稳性归一化，定义为失稳系数（I）；σ_1、σ_2 和 σ_3 分别表示最大、中间、最小主应力，下图同

图 1　失稳系数的定义以及不同失稳系数的断层在摩尔圆中的位置

Fig. 1　Definition of the instability coefficient and positions of faults with different instability coefficients on the Mohr's circle

The horizontal and vertical axes represent the magnitudes of normal stress and shear stress, respectively(Pa). In the diagram, the red dot represents the most unstable fault, and the blue dot indicates the projected position of an arbitrary fault on the Mohr circle. The length of the blue line segment reflects the difficulty of failure, and instability is normalised by its ratio to the length of the red line segment, which is defined as the instability coefficient (I). σ_1, σ_2 and σ_3 indicate the magnitudes of three principal stresses, respectively, same as the figure below.

$$\tau \geqslant \mu \cdot (\sigma - P) + C \tag{1}$$

式中 σ 和 τ 分别是正应力和剪应力的大小；μ 为摩擦系数；P 为孔隙压力；C 为岩石的内聚力。

基于震源机制的应力张量反演方法不能约束全部的 6 个应力元素，只能得到标准化的偏应力张量（Michael, 1987; Vavryčuk, 2014），其包含了 3 个主应力的空间方向（用 3 个方位参数表达）以及 1 个描述 3 个主应力间相对大小的参数（称为 shape ratio，用 R 表示），其定义为：

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \tag{2}$$

式中 σ_1、σ_2 和 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力，$R \in [0,1]$，R 值的意义可参考 Li et al.（2025）的解释。反过来，也可以利用这 4 个参数构建应力张量，供合成实验使用。

文中按照李振月等（2024）设计合成实验的方法进行实验，共有 5 个步骤：

①给定应力的方向和R值,并转换为应力张量。

②设定断层的破坏条件(即临界失稳系数的取值),随机生成大量方位各异的断层面,基于给定的应力张量计算各断层的失稳系数,选出一定数量失稳系数大于临界失稳系数的断层,这些断层满足破坏条件,作为模拟的断层面。

③计算上一步选出断层的剪应力方向(公式3),这是其理论的滑动方向(Wallace, 1951; Bott, 1959),至此得到了模拟的发震断层面的方位及其滑动方向。

④根据实际需要,对断层的法向和滑动方向添加一定程度的扰动,模拟实际反演得到震源机制中的噪声。设与法向和滑动方向共同垂直的方向为b轴方向,首先沿着任意方向按一定的噪声幅度分别扰动法向和b轴方向,与扰动后的法向和b轴方向共同垂直的方向作为扰动后的滑动方向(扰动震源机制的程序可在 https://github.com/li-zhenyue/spatiotemporal-stress-inversion/blob/main/bin/noisy_mechanism.m 下载)。

⑤根据双力偶震源机制模型2个节面间断层法向和滑动方向互易的性质,以及法向和滑动方向与P轴、B轴和T轴的关系,得到各震源机制辅助断层面的参数以及P轴、B轴和T轴的空间方位(Stein and Wysession, 2003; 万永革, 2016)。

$$\tau u_i = T_i - \sigma n_i = \sigma_{ij} n_j - \sigma_{jk} n_j n_k n_i = \sigma_{jk} n_j (\delta_{ik} - n_i n_k) \quad (3)$$

式中采用了爱因斯坦求和约定,σ_{ij}是应力张量;σ是正应力的大小;τ是剪应力的大小;u_i是剪应力方向的分量;n_i、n_j、n_k是断层面的法向分量;T_i是断层面上的牵引力;量;δ_{ik}是克罗内克符号。

2 实验结果

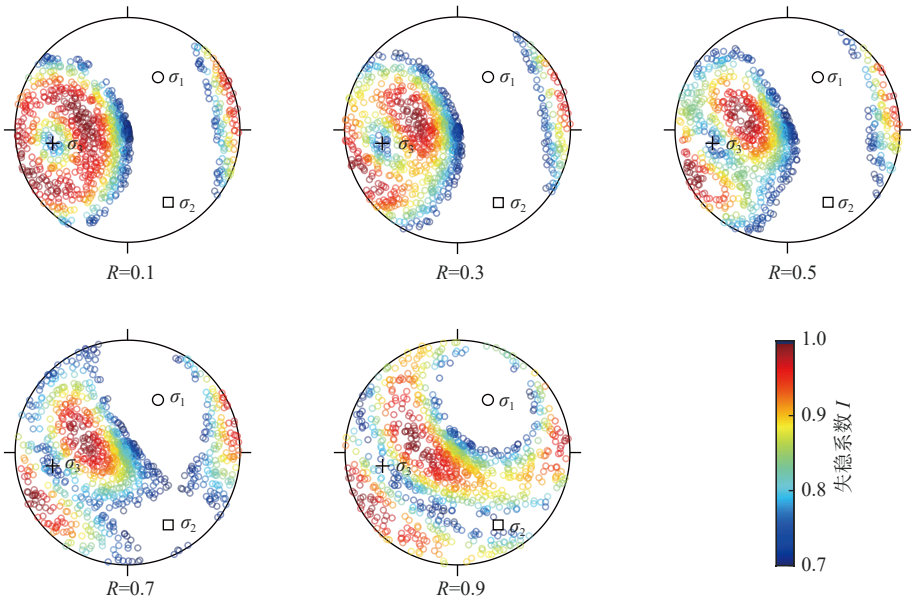
在摩尔圆中,每个断层点都能体现其法向与3个主应力轴的夹角(图1; Jaeger et al., 2007)。在破坏准则确定的条件下,虽然3个主应力轴的空间方位可以变化,但可失稳断层与主应力轴的相对空间关系保持不变,因此3个主应力的空间朝向不会影响失稳断层和P轴、B轴和T轴的分布模式。应力的R值决定了3个主应力的大小(Li et al., 2025),所以也就决定了σ_1与σ_2和σ_2与σ_3组成摩尔圆的半径大小,R的不同取值会改变失稳断层在摩尔圆中的分布空间(例如σ_2与σ_3组成的圆增大,断层可分布的区域就会变小),这显然会影响失稳断层和P轴、B轴和T轴的分布模式。因此,需要在不同的R值下进行实验,观察失稳断层的空间方向及相应震源机制P轴、B轴和T轴分布模式的变化。

任取一组3个主应力的空间朝向,设置摩擦系数为地壳内的均值0.6、临界失稳系数为0.7、合成震源机制的数目为1000个,以及不在合成的震源机制中添加噪声扰动。临界失稳系数取为其最小值,是考虑到在实际地质环境中,不同地方的临界失稳系数不同,取其最小值可以研究在失稳系数可能的取值范围内,断层以及P轴、B轴和T轴的分布随失稳系数的变化。不在合成数据中添加噪声是因为实验的主要目的是研究在不同的应力和破裂条件下,区域内活化的断层及其震源机制的P轴、B轴和T轴呈现何种理论的分布,如果对合成的数据添加噪声,会干扰对其理论分布模式的判断。

2.1 断层节面的空间方位

不同失稳系数的断层(真实断层面)在空间中的分布见图2(文中图件均采用下半球等面积投影的方式绘制)。从图可见,不同的R值下,随着失稳系数的减小,断层的多样性在逐渐增加,这缘于破裂线切割摩尔圆的面积越来越大。当R值为0.1的时候,由于σ_1轴和σ_2轴的方向挤压应力的差异很小,断层法向出现围绕σ_3轴方向成近似对称分布的现象,随着R值的增大,由于这2个应力轴上挤压应力的差异变大,逐渐失去了对称的现象,直到R值增大至0.9,此时σ_2轴和σ_3轴方向的拉张应力大小接近,出现了断层法向围绕σ_1轴方向成近似对称分布的现象。虽然失稳系数大于0.7的断层法向分布范围很广,但大于0.9的法向范围明显缩小,此时根据法向的分布特征可以估计出σ_3轴的方位。当R值为0.5左右时,失稳性大的断层呈两瓣分布,分别对应于2组易失稳的共轭断层簇。

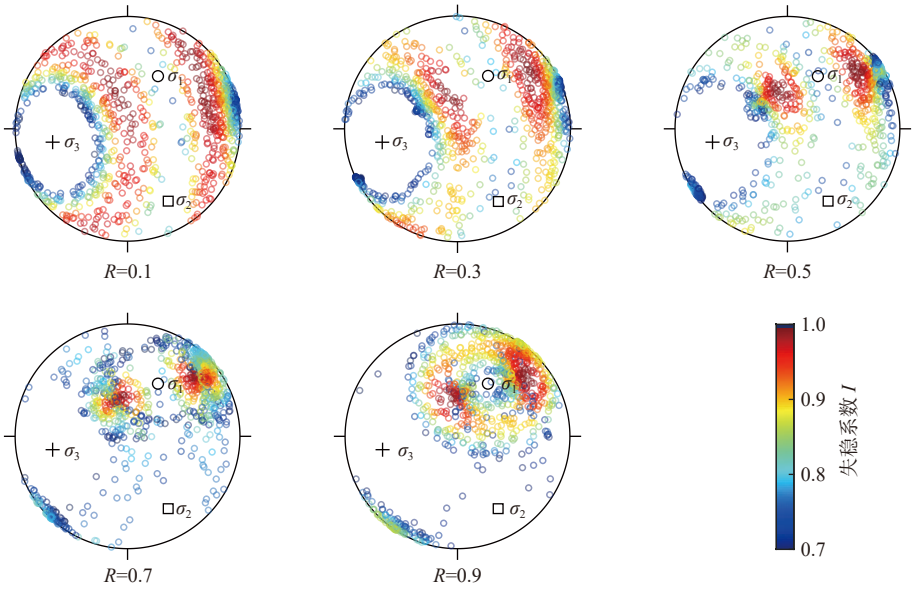
由模拟的发震断层面构造的辅助断层面的法向分布见图3。法向符号的颜色是按其发震断层的失稳性大小绘制的。实际资料中,一般难以从各震源机制的2个节面中辨别出发震断层面,若将不同R值下模拟的发震断层面(图2)和辅助断层面(图3)的法向置于一起,其方位覆盖范围很广,即便临界失稳系数较高(>0.9),大部分情况也难以估计主应力的位置,只有在R值为0.5左右时,2个节面的法向分布最为集中,按4瓣分布,其中2瓣为σ_1轴两侧对称分布的2组最易失稳的共轭发震断层簇,另外2瓣分别是这2组发震断层的辅助断层面。



圆圈的颜色代表了断层的失稳性大小

图 2　不同的应力形因子（R）下模拟的发震断层面法向的分布

Fig. 2　Distributions of simulated fault-plane normals under different shape ratios (R), with circle colors indicating fault instability.



圆圈的颜色代表了相应发震断层的失稳性大小

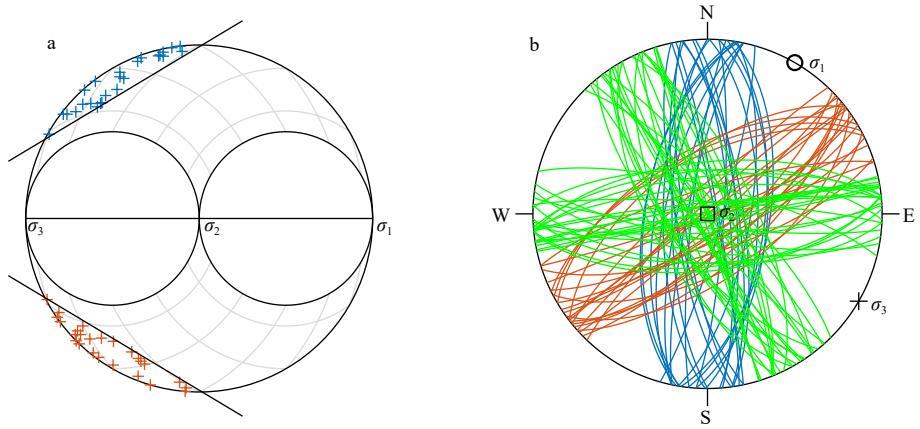
图 3　不同的应力形因子（R）下模拟的辅助断层面法向的分布

Fig. 3　Distributions of simulated auxiliary fault-plane normals under different shape ratios (R), with circle colors indicating the instability of the corresponding seismogenic faults

The subplots are significant in the same way as in Fig. 2. The only difference is that the colour of each normal is plotted according to the instability of the seismogenic fault plane.

一般情况下，实际地质环境中的临界失稳系数大小是未知的，从模拟的发震断层面（图 2）和辅助断层面（图 3）的分布可知，即便能从各震源机制的 2 个节面中识别出发震断层面，也只有当临界失稳系数大于 0.9 时，发震断层面才具有丛集性，可以据此判断出主应力的方向，当临界失稳系数较低时，发震断层的分布范围增大，难以有效反映出主应力的方位信息。如果不能从各震源机制的 2 个节面中识别出发震断层面，辅助断层面的加入使得断层节面的分布范围更大，断层参数不具有明显的统计特

征。只有当应力 R 值为 0.5 左右，且临界失稳系数较高（>0.9）的时候，2 个节面的空间方位比较集中，此时统计断层参数才具有一定的意义。在走滑型应力体系中，2 组发震面及其对应的 2 组辅助断层面的分布如图 4 所示。可以看到，其中一组发震断层面与另外一组发震断层面的辅助断层面的方位角接近，4 簇断层合并为了 2 簇，断层方位角的分布范围较广。若能从各震源机制的 2 个节面中辨别出真实断层面，则有利于推测主应力轴的方向。



实验的应力模型中 σ_1 轴的走向/倾角为 30°/0°；σ_3 轴的走向/倾角为 120°/0°；R=0.5，临界失稳系数为 0.9

a—2 组满足失稳条件的断层在摩尔圆中的位置（红色和蓝色区域为 σ_1 轴两侧的 2 组断层面）；b—2 组真实断层面（红色、蓝色）以及相应的辅助断层面（绿色）

图 4 走滑型应力体系下的震源机制断层节面

Fig. 4 Fault nodal planes of focal mechanisms under a strike-slip stress regime

The stress model employed in this experiment is characterized by a σ_1 axis oriented at 30° (trend) / 0° (plunge), a σ_3 axis at 120° (trend) / 0° (plunge), an R value of 0.5, and a critical instability coefficient of 0.9.

(a) Positions of two fault sets satisfying the instability criterion on the Mohr circle (Colors in the upper and lower semicircles distinguish sets on opposite sides of the σ_1 axis); (b) The two actual fault sets (red and blue) and their corresponding auxiliary fault planes (green).

2.2 *P* 轴和 *T* 轴的空间分布

不同失稳性的断层破裂，震源机制的 P 轴和 T 轴的空间分布如图 5 和图 6 所示。P 轴、B 轴和 T 轴之间是相互垂直的，给出其中 2 个轴的方位，另

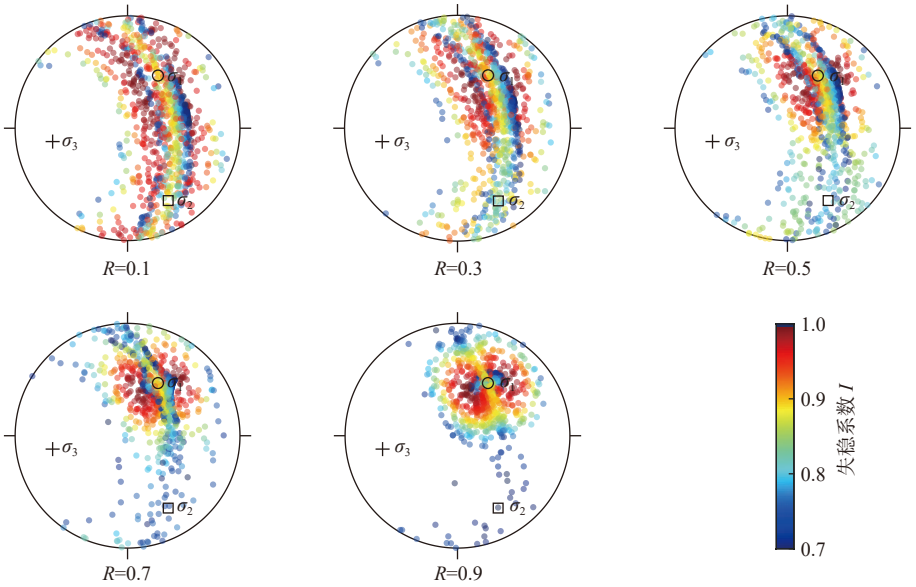


图 5 不同应力形因子（R）的情况下震源机制 P 轴的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of P axes for focal mechanisms under different shape ratios (R)

1 个轴是随之确定的，因此只研究 P 轴和 T 轴的空间分布即可。震源机制的 P 轴在不同的 R 值下都表现出较大的分布范围（图 5），当 R 小于 0.7 时，表现为沿着 σ_1 和 σ_2 轴所在平面附近空间的环状分布，当 R 为 0.9 时，P 轴分布稍显集中，似乎 P 轴的空间分布没有明显丛集在 σ_1 轴周围。但一个有意义的规律是，高失稳系数的 P 轴分布范围随着 R 值的增大趋于集中，当 R 大于 0.5 时，明显集中于 σ_1 轴周围。自然界中的临界失稳系数是未知的，这一规律意味着当临界失稳系数较高时，在应力 R 值大于 0.5 的情况下，P 轴分布区域的几何中心可以指示出 σ_1 轴的位置。

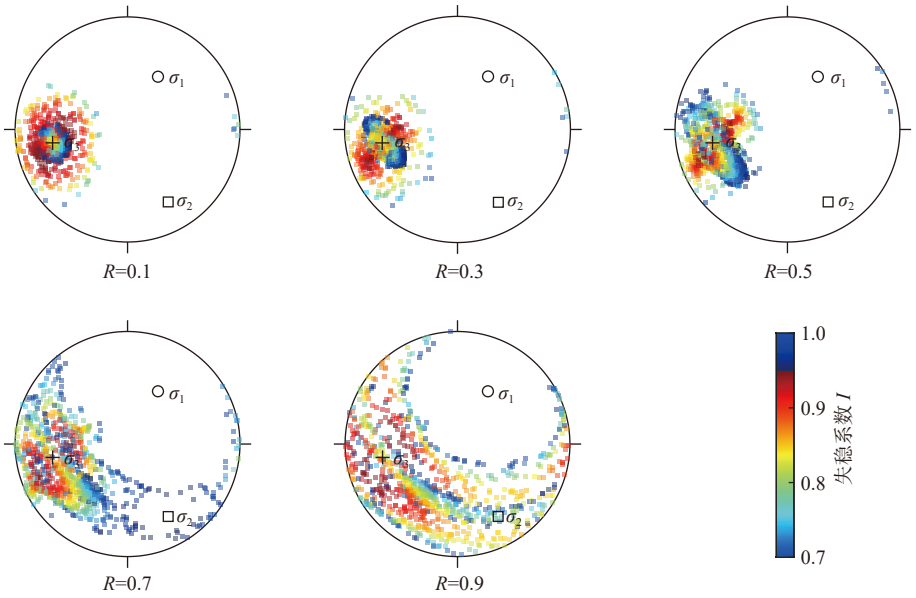


图 6　不同应力形因子（R）的情况下震源机制 T 轴的空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of T axes for focal mechanisms under different shape ratios (R)

T 轴分布随 R 值变化的丛集性规律与 P 轴相反，当 R 小于 0.5 时，不论失稳系数的高低，T 轴的分布都很集中，当 R 大于 0.5 时，随着 R 值的增大，逐渐从集中于 σ_3 轴周围分布过渡为在 σ_2 轴和 σ_3 轴所在平面附近的环形分布，且在 R 等于 0.7 时，高失稳性的 P 轴仍然显示出了很好的集中性。此外，还可以看出，T 轴的环形分布仅出现在 R 值较大的情况下，说明如果在实际资料中观察到 T 轴呈环形分布，表明应力的 R 值较大。对比 P 轴分布可以看出，R 值小于 0.7 的区间都可能出现环形分布，说明 P 轴的环形分布不能反映 R 值的大小信息。

综合分析不同应力 R 值和临界失稳系数下的实验结果可以看出，震源机制 P 轴和 T 轴的分布范围同时受这 2 个因素的影响，其中应力 R 值是待求解的量，在实际情况中，震源机制数据所在地质区域的临界失稳系数大小也是未知的，所以不能正向预判 P 轴、B 轴和 T 轴的分布形式。一些 R 值下，不论失稳系数的高低，P（$R \leqslant 0.3$）或 T 轴（$R \geqslant 0.9$）呈现为环形分布，这种情况不能估计应力主轴的方向；一些 R 值下，虽然失稳系数低的 P（$R \geqslant 0.5$）和 T 轴（$R = 0.7$）分布范围很大，但随着失稳系数的增大，P 轴或 T 轴的分布范围向应力主轴的位置集中；也有一些情况（$R \leqslant 0.5$），与临界失稳系数的大小无关，T 轴总是集中分布在 σ_1 轴附近。从这些结果可以发现一个规律：不论 R 和临界失稳系数为何值，只要出现 P 或 T 轴的集中分布，其几何中心必定为 σ_1 轴或 σ_3 轴的方向，若 P 轴或 T 轴呈现离散分布，则不能判断出应力主轴的方向，这一规律同样可以推及 B 轴。

3　讨论

实际地质环境中应力和临界失稳系数在不同的地方是不同的，所以文中在不同的应力（R 值）和断层破裂条件（失稳系数）下开展了合成实验，目的是模拟不同的自然地质环境，观察这些参数的不同取值组合下，理论的断层节面或 P 轴、B 轴和 T 轴呈现何种形式的分布。此研究在合成实验时将摩擦系数取值为地壳内的均值 0.6，同时还测试了摩擦系

数的其他取值，发现其在合理的区间（0.4 ～ 1）（Vavryčuk, 2014）内改变，对结果的影响不大。

实际观测的震源机制不可避免地受到噪声影响。通常而言，通过地震波形反演获得的大震震源机制所含噪声幅度较小。对于实际资料中出现的、与背景应力体系明显不符的异常机制（如在逆冲型应力体系中出现正断型震源机制），其可能原因包括：反演结果受较大幅度噪声的影响（多见于小震），或该事件受局部应力扰动控制而发生，本身并不反映区域背景应力场。像这种完全背离应力体系的个别事件，不会影响其他事件表现出的分布规律，故在合成实验中不予考虑。由于在合成实验中添加小幅度的随机噪声用以模拟实际观测的不确定性，并不会很大程度改变合成的断层或 P 轴、B 轴和 T 轴的分布规律或模式，因此未添加噪声的合成实验结果对现实应用仍然是具有意义的，据此得到的结论也是适用的。

4 结论

文章通过合成实验模拟了同一应力体系下产生的震源机制，以此来研究震源机制的断层节面和 P 轴、B 轴和 T 轴的空间分布能否直观揭示出 3 个主应力的方向或应力形因子的信息，结果发现，一般情况下断层节面的空间分布不能反映出应力的这两部分信息，而 P 轴、B 轴和 T 轴的空间分布则可以体现出这两部分信息，主要结论总结如下。

（1）在同一应力体系下生成的震源机制，发震断层面和辅助断层面的空间分布通常较为分散，从而其对应力方向不具备统计意义。但存在 2 种特殊情况：①若能从各震源机制的 2 个节面中明确选出真实断层面，且在临界失稳系数大于 0.9 时，可以根据断层面的法向分布估计出 σ_3 轴的方向；②若不能从各震源机制的 2 个节面中选出真实断层面，则只有当应力 R 值为 0.5 左右，并且临界失稳系数大于 0.9 时，统计 2 组断层节面法向的空间分布才有一定意义。

（2）由应力正演震源机制的合成实验，结果得到 P 轴和 T 轴都可能出现集中或离散的分布，说明 P 轴和 T 轴的离散分布是符合单一的应力模型，而不能将其归因于研究区域内应力场的复杂性。

（3）P 轴、B 轴和 T 轴的分布范围受临界失稳系数和 3 个主应力大小（或 R 值）的影响，随着临界失稳系数的减小，分布范围增大。

（4）P 轴、B 轴和 T 轴可能不是同时丛集离散分布的，但不论哪个轴出现丛集分布的现象，其几何中心都对应着相应的应力主轴的方向。

（5）若 T 轴出现环形分布，说明应力的 R 值较大。

（6）P 轴和 T 轴的分布范围一般不重合，只有当临界失稳系数很低时才可能在 σ_2 轴附近出现重合，1 组实际震源机制如果出现 P 轴和 T 轴无规律的混合分布，说明这组震源机制不属于同一应力体系。

（7）震源机制 P 轴、B 轴和 T 轴的空间分布仅能反映应力的部分信息，所以想要获得全部的应力信息需要经过严格的反演计算得到。

致谢：三位匿名审稿人提出了建设性的修改意见，使本文得以进一步完善、质量进一步提升，在此谨致以诚挚的谢意。

References

BEAUCÉ E, VAN DER HILST R D, CAMPILLO M, 2022. An iterative linear method with variable shear stress magnitudes for estimating the stress tensor from earthquake focal mechanism data: method and examples[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 112(3): 1224-1239.

BEELER N M, SIMPSON R W, HICKMAN S H, et al., 2000. Pore fluid pressure, apparent friction, and Coulomb failure[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B11): 25533-25542.

BOTT M H P, 1959. The mechanics of oblique slip faulting[J]. Geological Magazine, 96(2): 109-117.

CHEN J, LI J, XIN C J, et al., 2023. Analysis of focal mechanism and regional characteristics of medium and small earthquakes in Yunnan region[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 45(S1): 316-323. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y T, GU H D, 2023. Fundamentals of the theory of seismic sources[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

CUI H W, WAN Y G, HUANG J C, et al., 2019. Inversion for the tectonic stress field and the characteristic of the stress shape factor of the detachment slab in the Pamir-Hindu Kush area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(5): 1633-1649. (in Chinese with English abstract)

DONG C L, GUO W F, DING D Y, et al., 2025. Analysis of stress field characteristics in Changzhi area of Shanxi Province based on focal mechanism solutions[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 45(5): 456-463. (in Chinese with English abstract)

GAO Y, WU J, FUKAO Y, et al., 2011. Shear wave splitting in the crust in North China: stress, faults and tectonic implications[J]. Geophysical Journal International, 187(2): 642-654.

GEPHART J W, 1990. FMSI: a Fortran program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor[J]. Computers & Geosciences, 16(7): 953-989.

GEPHART J W, FORSYTH D W, 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: ap-

plication to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B11): 9305-9320.

GUAN L N, JIANG G M, 2023. High-precision earthquake locations and deep fault characteristics beneath Xianyou area, Fujian Province[J]. Geoscience, 37(1): 40-47,

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

JIA S Q, EATON D W, WONG R C K, 2018. Stress inversion of shear-tensile focal mechanisms with application to hydraulic fracture monitoring[J]. Geophysical Journal International, 215(1): 546-563.

LEI X L, SU J R, WANG Z W, 2020. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities[J]. Science China Earth Sciences, 63(11): 1633-1660.

LI Z Y, WAN Y G, HU X H, et al., 2020. A genetic algorithm for stress tensor inversion and its application to the northeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(2): 562-572. (in Chinese with English abstract)

LI Z Y, WAN Y G, LIU R F, et al., 2023. Fault stability analysis and its application in stress inversion quality assessment[J]. Environmental Earth Sciences, 82(24): 609.

LI Z Y, WAN Y G, GUO X Y, et al., 2024. Significance of accurate selection of the seismogenic faults from the earthquake focal mechanisms for stress field reconstruction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(7): 2612-2624. (in Chinese with English abstract)

LI Z Y, WAN Y G, LIU R F, et al., 2025. Can the azimuth of the horizontal principal stress indicate the azimuth of the three-dimensional principal stress?[J]. Pure and Applied Geophysics, 182(5): 2039-2053.

MENG J, ZHANG P, WANG J M, et al., 2024. Study on regional stress background and prevention of the rock burst accident on October 20th, 2018 in the Longyun Coal Industry area, Shandong, China[J]. Journal of Geomechanics, 30(3): 473-486. (in Chinese with English abstract)

MICHAEL A J, 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 92(B1): 357-368.

SIBSON R H, 1982. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 72(1): 151-163.

STEIN S, WYSESSION M, 2003. An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure[M]. Malden: Blackwell Publishing.

VAVRYČUK V, 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. Geophysical Journal International, 199(1): 69-77.

VAVRYČUK V, 2015. Earthquake mechanisms and stress field[M]//BEER M, KOUGIOUMTZOGLOU I A, PATELLI E, et al. Encyclopedia of earthquake engineering. Berlin Heidelberg: Springer: 1-21.

WALLACE R E, 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting[J]. The Journal of Geology, 59(2): 118-130.

WAN Y G, 2016. Introduction to seismology[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

WAN Y G, SHENG S Z, HUANG J C, et al., 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. Journal of Earth Science, 27(5): 777-785.

XU Z H, WANG S Y, HUANG Y R, et al., 1992. Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B8): 11867-11877.

XUE L, YAO D X, LU H F, et al. , 2018. Focal mechanism solution inversion regional tectonic stress field features in Huainan and Huaibei mining areas[J]. Coal Geology of China, 30(2): 14-17, 79. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B, SUN Y, MA X M, et al., 2023. Analysis of in-situ stress field characteristics and tectonic stability in the Motuo key area of the eastern Himalayan syntaxis[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 388-401. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y F, SHI W, ZHANG Y, 2023. Study on the reconstruction of the paleo-tectonic stress field and its evolution in the Jinchuan mining district, Gansu Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 770-785. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, HEALY J H, 1992. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole: implications for the mechanics of crustal faulting[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B4): 5039-5057.

ZOBACK M L, 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B8): 11703-11728.

附中文参考文献

陈佳，李见，辛灿锦，等，2023. 云南地区中小地震震源机制解及分区特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版)，45(S1)：316-323.

陈运泰，顾浩鼎，2023. 震源理论基础[M]. 北京：科学出版社.

崔华伟，万永革，黄骥超，等，2019. 帕米尔—兴都库什地区构造应力场反演及拆离板片应力形因子特征研究[J]. 地球物理学报，62(5)：1633-1649.

董春丽，郭文峰，丁大业，等，2025. 基于震源机制解分析山西长治地区应力场特征[J]. 大地测量与地球动力学，45(5)：456-463.

关露凝，江国明，2023. 福建仙游地区高精度地震震源定位及深部断裂特征[J]. 现代地质，37(1)：40-47,

李振月，万永革，胡晓辉，等，2020. 应力张量反演的遗传算法及其在青藏高原东北缘的应用[J]. 地球物理学报，63(2)：562-572.

李振月，万永革，郭祥云，等，2024. 从震源机制中准确识别发震断层面对重构应力场的意义[J]. 地球物理学报，67(7)：2612-2624.

孟静，张鹏，王继明，等，2024. 山东龙郓煤业 10·20 冲击地压事故区域应力背景与防控研究[J]. 地质力学学报，30(3)：473-486.

万永革，2016. 地震学导论[M]. 北京：科学出版社.

薛凉，姚多喜，鲁海峰，等，2018. 两淮矿区震源机制解反演区域构造应力场特征[J]. 中国煤炭地质，30(2)：14-17, 79.

张斌，孙尧，马秀敏，等，2023. 东构造结墨脱关键区域地应力场特征及其构造稳定性分析[J]. 地质力学学报，29(3)：388-401.

赵远方，施炜，张宇，2023. 甘肃金川矿区古构造应力场恢复及演化研究[J]. 地质力学学报，29(6)：770-785.