

李科峰. 基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法研究[J]. 华南地震, 2019, 39 (3):83-88. [LI Kefeng. Study on Detection Method of Potential Seismic Rupture Surface Source Based on Mathematical Modeling[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(3):83-88]

基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法研究

李科峰

(陕西财经职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 大多数地震破裂面源检测方法都是通过简化地震震源, 将地震震源表示成线源或者点源, 无法有效描述地震带地震破裂面源产状和大小, 不适用地震震级较大的情况下地震危险性检测。因此提出基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法, 在地震震级较大时仍能检测出地震危险性概率。选取适宜的地震基岩水平峰值加速度衰减关系, 分析地震震级、破裂长度、破裂宽度相互关系, 确定地震引起的潜在地震破裂面源大小, 计算给定地震动小于在场点处产生地震动的概率, 将该概率同地震动加速度衰减关系结合, 得到地震动年超越概率, 分析地震危险性。经过实验检测发现, 所提方法检测出的年超越概率与峰值加速度、最大震级有关, 该概率能精准表示地震带地震破裂面源产状和大小, 说明该方法检测地震危险性是合理的。

关键词: 数学模型; 潜在地震; 破裂面源; 检测方法; 衰减关系; 地震震级

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)03-0083-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.03.012

Study on Detection Method of Potential Seismic Rupture Surface Source Based on Mathematical Modeling

LI Kefeng

(Shaanxi Technical College of Finance and Economics, Basic Course Department, Xianyang 712000, China)

Abstract: Most of the seismic rupture surface source detection methods are based on simplifying the source of earthquake and expressing the source of earthquake as line source or point source. They can not effectively describe the occurrence and size of seismic rupture surface source in seismic zone, and are not suitable for seismic risk detection in the case of large earthquake magnitude. Therefore, a potential seismic rupture surface source detection method based on mathematical modeling is proposed, which can detect the seismic risk probability even when the earthquake magnitude is large. Selecting the appropriate attenuation relationship of horizontal peak acceleration of seismic bedrock, analyzing the relationship among earthquake magnitude, rupture length and rupture width, determining the size of potential rupture surface source caused by earthquake, calculating the probability that a given earthquake motion will generate ground motion less than the site point,

收稿日期: 2018-12-10

作者简介: 李科峰(1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事数学教学及建模研究。

E-mail: lkf@scy.cn.

combining the probability with the attenuation relationship of ground motion acceleration, the annual exceedance probability of ground motion is obtained, and the earthquake risk is analyzed. Risk. It is found that the annual exceedance probability detected by the proposed method is related to peak acceleration and maximum magnitude. The probability can accurately represent the occurrence and magnitude of seismic rupture surface source in seismic zone, which shows that the method is reasonable for detecting seismic risk.

Keywords: Mathematical model; Potential earthquake; Fracture source; Detection method; Attenuation relationship; Earthquake magnitude

0 引言

中国是一个地震频发的国家,通过研究地震构造和地震活动,可精准了解地震发生的断层产物,为地震危险性分析提供保障^[1]。尤其是对于核电站场址等特殊工程场地来说,研究地震活动与发震构造是很有必要的。在二十世纪九十年代,我国台湾发生巨大地震,造成严重财产损失,危害人们生命安全,该地震类型是逆断层型地震,发震断层上下盘之间的峰值加速度存在显著差异,发震断层上盘和下盘与地震破裂面最小距离不同是产生上述现象的原因之一,发震断层上盘和下盘与地震破裂面最小距离不同对正断层地震影响较为微弱,主要原因是逆断层的倾角远小于正断层倾角^[2]。在考虑逆断层地震时,应充分研究断层破裂面形状以及尺寸与场点地震动之间的关系。大多数地震破裂面源检测方法都是通过简化地震震源的方式,将地震震源表示成线源或者点源,无法有效描述地震带地震破裂面源产状和大小,上述检测方法较适用于地震级数较低的情况,当地震震级较高时,不能忽视震源本身的尺度,在上述情况下,不能采用传统简化模型方法分析地震危险性概率^[3]。基于此,提出基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法,以期检测地震震级较为强烈时的地震危险性,降低大型地震和强震近场范围内场点地震危险性分析误差^[4]。

1 潜在地震破裂面源检测方法

1.1 选取衰减关系

场点地震危险性分析结果与不同衰减关系之间有显著关系,在分析地震危险性概率时,应选取合适的地震动衰减关系^[5]。地震破裂面与场点危险性大小之间有一定联系,在采用本文方法分析

地震危险性时,应研究地震破裂面与场点间距离最小的面距,获取地震动衰减关系。首先选取距离地震破裂面在小于 201 km 范围内的强震观测记录,用 J_z 表示震级,且 $J_z \geq 3.9$,再获取地震基岩水平峰值加速度衰减关系,衰减关系如下所示:

$$\ln a = S_1 + S_2 J_z + S_3 (8.6 - J_z)^{2.5} - S_4 \ln[C_{cp} + \exp(S_5 + S_6 J_z)] + S_7 \ln(C_{cp} + 2) \quad (1)$$

式中, a 表示峰值加速度, J_z 表示震级, C_{cp} 表示场点与地震破裂面之间最短距离, $S_1 \sim S_6$ 表示各项峰值加速度衰减关系系数,如表 1 所示。

表 1 衰减关系系数

Table 1 Attenuation relation coefficient

震级范围	$J_z \leq 6.8$	$J_z > 6.8$
S_1	-0.612	-1.245
S_2	1.121	1.161
S_3	0.000	0.000
S_4	2.213	2.213
S_5	1.295	-0.485
S_6	0.251	0.534
S_7	0.000	0.000

经过研究发现,计算的方差与震级范围有关,当 $J_z \geq 7.23$ 时,方差 $\sigma_{cp} = 0.37$,当 $J_z < 7.23$ 时,方差 $\sigma_{cp} = 0.37 - 0.13 J_z$,同时需转变衰减关系研究逆断层地震,转变后的逆断层型地震衰减关系为 $S_1 + \ln 1.3$ 。

1.2 地震震级、破裂尺度间关系

当未来发生某一震级大小的地震时,需计算地震导致的地震破裂面大小,在计算过程中,需考虑破裂长度和破裂宽度两个参数^[6]。 Q 、 K 表示破裂长度和宽度,在出现 f 矩震地震的情况下,地震破裂面长度的表达式为:

$$Q = 10^{Mf+0} \quad (2)$$

令式中 M 为 0.6, 0 为 -1.93, 经过计算发现,

当地震级数为6级时,地震产生的破裂长度会大于11 km,在这种状况下,通过传统的震中集合体建立模型分析地震危险性概率是不合适的,应构建潜在地震破裂面源的数学模型,分析地震危险性概率^[7]。地震破裂面宽度与地震级数之间关系用表达式(3)表示。

$$\lg K = -1.03 + 0.34 J_z \quad (3)$$

地震断层种类较多,例如狭长型、近似圆形等,基于地震二维破裂模型,确定破裂长度和破裂宽度之间的几何关系^[8],如表达式(4)所示。

$$Q = 2K \quad (4)$$

式中, K 表示常数,根据式(4)确定破裂面长宽比为2:1。

1.3 地震危险性概率分析

基于上述地震震级、破裂长度、破裂宽度相互关系和衰减关系的分析,提出基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法,该方法的基本流程和计算过程如下:

(1)经过研究检测发现,地震带中地震活动缺少规律性,在空间角度无法检测出地震活动的潜在规律,从时间方面考虑依旧无法得出地震活动的规律,因此在分析地震危险性概率时应选取代表性较强的地震带^[9-10]。将分析地震危险性的基本单元看成是地震带,从空间方面研究地震危险性概率,通过得到的地震危险性概率判断地震活跃程度^[11]。分段处理后泊松过程与地震活动时间过程相似, J_{zmax} 、 J_{zmin} 分别表示地震带震级上、下限,假设 n 年内地震震级为 $L_{z0}-L_{zmax}$, v_0 表示地震年平均发生率,,需了解将来可能产生的地震情况,根据地震情况确定 v_0 数值,通过 v_0 计算在相应年份内发生多次地震的概率,其中地震震级为 $L_{z0}-L_{zmax}$,用 n 表示统计年份, m 表示地震次数,计算的概率可表示为:

$$P(m) = \frac{(v_0 n)^m}{m!} e^{-v_0 n} \quad (5)$$

经过调查分析发现,地震带内地震活跃程度与震级—频度关系较为一致^[12],因此震级概率密度函数可以用表达式(6)表示:

$$f(L_z) = \frac{\alpha \exp[-\alpha(L_z - L_{z0})]}{1 - \exp[-\alpha(L_{zmax} - L_{z0})]} \quad (6)$$

式中, $\alpha = d \ln 10$, d 表示震级—频率关系的斜率。在研究地震危险性时,应划分地震震级,使 N_m 档地震包含在震级内,将地震震级范围限制在

一定区域内,该区域为 $(L_{zj} \pm \frac{1}{2} \Delta L_z)$,用 L_{zj} 表示该震级范围的震级档,如果在地震带中发生地震,且地震档数为 L_{zj} 档,此时产生该地震的概率表达式为:

$$P(L_{zj}) = \frac{2}{\alpha} \cdot f(L_{zj}) \cdot sh \left\{ \frac{1}{2} \alpha \Delta L_{zj} \right\} \quad (7)$$

(2)选取代表性较强的地震带后,需详细分析带中潜在地震破裂面源。若潜在破裂面源中存在多个地震破裂面,且地震破裂面在面源中呈现规律性的分布情况, f_i 表示地震破裂年元空间分布函数,在匹配地震破裂面源和地震震级后,可充分分析多个潜在破裂面源的地震活跃程度,进而说明地震活动较为分散,波动性较强。假设选取的代表性较强的地震带中,含有 N_R 个潜在地震破裂面源。其中 $N_R = \{D_1, D_{21}, \dots, D_{NR}\}$ 。

(3)假设共存在 i 个潜在破裂面源, Q_i 、 K_i 分别表示最后一个破裂面源的长和宽,当有地震出现在最后一个破裂面源内,且该地震震级为 L_{zj} 时, w 表示一个既定的地震动,地震引起的场点地震动 W 大于等于 w 的概率计算步骤如下所示:

(a)如果研究的破裂面源是一个矩形面, Q_j 和 K_j 分别表示该潜在地震破裂面源长、宽。通过上述获取的破裂面长度与宽度之间的关系,计算该潜在地震破裂面源的长度和宽度。

(b)分析该潜在破裂面源的场点坐标值,考虑该潜在破裂面源的运动趋势,将其经纬度值转化成三维坐标轴当中的坐标值,将场点放置在三维坐标轴的原点,再旋转场点,得到旋转后的潜在破裂面源运动趋势^[14],此时的运动趋势应该与三维坐标轴中的 y 轴相互平行。

(c)在研究潜在破裂面源时,假设破裂面源处于三维空间中,需考虑潜在破裂面源倾斜角度和方向,在获取相应数值后旋转破裂面源的坐标,使旋转后的潜在地震破裂面源与 $z=0$ 平面平行,同时计算潜在破裂面源与场点之间距离,并与平面上的 z 坐标进行对比,发现两个数值完全一致。由于潜在破裂面源是一个矩形,,即该面源中存在四个顶点坐标,分别表示为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_2, y_2, z_1) 和 (x_1, y_2, z_1) 。分割潜在破裂面源,将其分割成 n_x 个细条,将细条宽限制为 D ,同时细条与 y 轴平行。分割的 n_x 细条是破裂面源在地震带中的活动范围,当地震破裂面源内包含全部的地震破裂时,得到:

$$n_x = \frac{x_2 - x_1 - w_j}{D} \quad (8)$$

其中 w_j 表示地震破裂的规模。假设将地震破裂面源分成多个细条, 第 k_x 细条的宽度为 D , 且该细条中包含地震破裂面中心, 该面源顶点表示为 (x_{kx1}, y_{kx1}, z_1) 、 (x_{kx2}, y_{kx1}, z_1) 、 (x_{kx2}, y_{kx2}, z_1) 和 (x_{kx1}, y_{kx2}, z_1) 。

若 $|x_{kx2}| \geq |x_{kx1}|$, $|y_{kx2}| \geq |y_{kx1}|$, R_w 表示最远距离, 该距离为既定地震动小于地震震级引起的地震动, 假设在以场点为中心点的区域建立球面, 该球面半径为 R_w , 潜在地震破裂面源存在于空间中某一平面内, 在 $R_w \geq |z_1|$ 的条件下, 平面间存在交集。相交的形状是一个圆形, R_{uz} 表示该圆形半径, $R_{uz} = \sqrt{R_w^2 - z_1^2}$ 。当 $R_{uz} \geq |x_{kx1}|$, x 表示与 y 轴平行且与场点距离最近的直线, $x = x_j$, y_{k1} 、 y_{k2} 表示在地震破裂面源所在平面上衰减球面与 x 交点的 y 轴坐标。 $y_{k1} = -\sqrt{R_w^2 - z_1^2 - x_{kx1}^2}$, $y_{k2} = \sqrt{R_w^2 - z_1^2 - x_{kx1}^2}$ 。

如果地震出现在地震破裂面源中, 震级为 J_z , 该地震引发的地震破裂面中心存在于在 k_x 个细条中, 此时 $P(W \geq w | E_{kx})$ 表示 w 小于 W 的概率。如果某个潜在地震破裂面源中存在一次地震, 该地震震级为 J_z , 计算场点地震动大于既定地震动的概率, 计算公式如下所示:

$$P(W \geq w | E_{kx}) = \sum_{k_x=1}^{n_x} P(W \geq w | E_{kx}) \quad (9)$$

(d) 假设地震带中地震破裂面内出现地震, 该地震会对场点地震动产生影响, 若事先设定合理地震动值 w , 则参考地震动衰减关系采用式(10)获取 w 小于等于地震到场点的地震动年超越概率:

$$P(W \geq w) = 1 - \exp \left\{ -\frac{2v_0}{\chi} \cdot \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{k_x=1}^{n_x} P(W \geq w | E_{k_x}) \cdot f_{i,J_z} \cdot f(J_z) \cdot Sh \left(\frac{1}{2} \chi \Delta J_z \right) \right\} \quad (10)$$

式中, $\chi = \ln 10$ 。 ΔJ_z 表示震级分档间隔。

(e) 如果存在 N_z 个地震统计区能对场点产生影响, 将所有地震影响结合后^[15], 得到一定地震区内给定地震动小于等于地震破裂面源内地震动到场点的地震动年超越概率:

$$P(W \geq w) = 1 - \prod_{k=1}^{N_z} (1 - P_k(W \geq w)) \quad (11)$$

本文方法依据上式得到的地震动年超越概率, 分析地震危险性。

2 实验分析

2.1 潜在地震破裂面源划分

我国强震地震活跃频繁地区为南北地震南段, 因此以南北地震南段地震为例, 划分潜在地震破裂面源。最新的活动断裂带中包含曲江断裂、红河断裂等, 与活动断裂相适应, 划分潜在地震破裂面源, 划分结果如表 2 所示。

表 2 划分结果
Table 2 Division result

编号	潜在地震破裂面源名称	震级上限	走向	倾向	倾角
1	曲江断裂	8.2	NW	NE	几乎直角
2	石屏—建水断裂	7.6	NW	NE	75
3	红河断裂南东段	6.9	NNW	NE	64
4	红河断裂北西段	8.2	NS	NEE	68
5	小江断裂南段东支	8.2	NS	E	71
6	小江断裂南段西支	8.2	NNW	E	71
7	小江断裂北段	8.2	NW	NEE	71
8	则木河断裂	7.6	NNE	NE	71
9	程海断裂	8.2	NE	W	82
10	丽江断裂	7.6	NNW	SE	67

从表 2 中可以看出, 南北地震南段地震破裂面源中包括多个地震破裂面源, 在多个地震破裂面源中, 曲江断裂地震震级较高, 地震活动程度

较大, 震级上限可达到 8.2 级, 近乎直立; 石屏—建水断裂地震活动相对较弱, 震级上限达到 7.6 级, 倾角角度为 64°。

2.2 不同时间段地震危险性曲线分析

根据南北地震南段地震为例划分潜在 50 年超越概率水平下地震危险性曲线,如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,在不同时间段,曲江地区峰值加速度最大,其他地区峰值加速度均小于曲江地区,丽江峰值加速度最小,说明曲江地区的地震危险性最高。将上述结果与实际的地震区划进行对比,发现上述结果与实际地震区划结果几乎完全一致,说明本文方法通过检测出地震基岩水平峰值加速度,可有效分析出地震危险性情况。

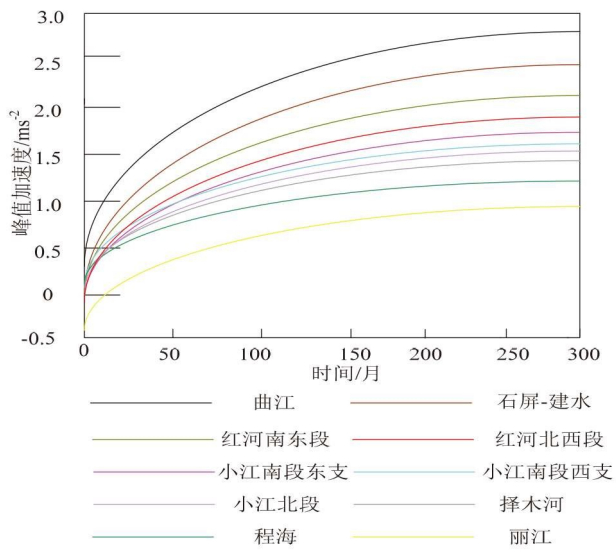


图 1 地震危险性曲线
Fig.1 Seismic risk curve

2.3 峰值加速度分析

统计南北地震南段的峰值加速度,研究峰值加速度与年超越概率之间的关系,将年超越概率定为 50 年超越概率 15%和 50 年超越概率 5%,研究结果如表 2 和图 3 所示。

从表 3 和图 2 中可以看出,当峰值加速度标准差不断增加时,各级城市数量逐渐减少,当年超越概率逐渐增加时,各级城市在相应的峰值加速度标准差范围各级城市数量逐渐增加,城市比重逐步上升。在 50 年超越概率 15%的情况下,绝大部分省会城市、地市级城市和县级城市的峰值加速度标准差在 $40\times10^{-2} \text{ m/s}^2$ 以下,在 50 年超越概率 5%的情况下,各级城市峰值加速度标准差分布情况与 50 年超越概率 15%的情况下几乎相同。说明峰值加速度标准差大小与超越概率大小有关,年超越概率越大,峰值加速度标准差越大,地震危险性越高。且我国的强震地区的峰值加速度标

表 3 南北地震南段峰值加速度标准差分布
Table 3 Distribution of standard deviation of peak acceleration in the southern section of North-South Earthquakes

超越概率	标准差范围	Earthquakes		
		省会数量/ 个	地市以上地 区数量/个	县城数量/ 个
50 年 15%	20	14	140	929
	20~40	3	19	91
	40~60	1	5	20
	60~80	0	1	3
	80	0	0	1
50 年 5%	20	11	110	749
	20~40	5	35	206
	40~60	0	11	58
	60~80	1	6	20
	80	1	4	12

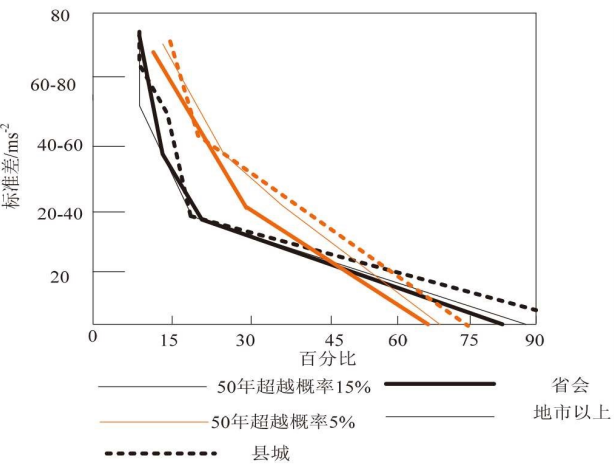


图 2 南北地震南段加速度峰值分布
Fig.2 Peak acceleration distribution in the southern section of the north-south earthquake

准差较大。则再次验证本文方法通过年超越概率分析地震危险性是有效的。

2.4 地震危险性影响因素分析

为研究最大震级对本文方法进行地震分析精准度的影响,检测在不同的 50 年超越概率情况下,最大震级与地震危险性的关系,检测结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,随着年超越概率逐渐减少,最大震级对地震危险性分析的影响逐渐降低,且将当年超越概率设定为定值时,随着最大震级的增长,地震危险性分析的精准度下降,因此本文方法在实际的地震危险性分析中,需降低年超越概率,提升地震危险性分析的精准度。

表 4 最大震级与危险性分析结果

Table 4 Maximum magnitude and risk analysis results

最大震级	50 年超越概率			
	65%	45%	15%	5%
5.5	0.535	0.789	1.597	2.102
5.8	0.513	0.764	1.596	2.101
6.1	0.507	0.742	1.595	2.099
6.4	0.498	0.731	1.594	2.098
6.7	0.476	0.715	1.593	2.097
7	0.462	0.698	1.592	2.096
7.3	0.413	0.645	1.591	2.095
7.6	0.395	0.631	1.59	2.094
7.9	0.341	0.451	1.589	2.093
8.2	0.298	0.409	1.587	2.092

3 结语

为研究地震震级较为强烈时地震危险性概率,需充分考虑地震震级较高的的场点,分析地震破裂面的形状和规模,通过基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法,获取地震年超越概率,分析地震危险性。在确定地震带后,根据地震破裂面与场点间最短距离,获取地震基岩水平峰值加速度,通过研究地震破裂面宽度与地震级数之间关系、破裂长度和破裂宽度之间的几何关系,结合地震动衰减关系,得到一定地震区内给定地震动小于等于地震破裂面源内地震到场点的地震动年超越概率,通过地震动年超越概率分析地震危险性。经过数学建模和实验分析发现以下结论:

(1)通过基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法分析地震危险性,能详细展示出由地震断层破裂面的形状及规模引起的不对称现象,不对称现象主要表现在两个方面,即等值线分布形状的不同和两侧峰值加速度存在显著差异。断层下盘的地震动峰值显著低于断层上盘的地震动峰值,并且该方法研究的不对称现象与实际地震震例相吻合,表示采用高方法分析地震危险性较为合理,可广泛的应用到工程地震危险性分析中。

(2)通过基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法分析地震危险性,能较为清晰的查找出地震危险性分析结果和地震区域划分形态影响因素,影响因素主要包括三个方面,即潜在地震破裂面源倾角、运动趋势和规模,潜在破裂面源与场点之间的距离对场点基岩峰值加速度结果影响较大,和震源理论较为一致,说明该方法有效性较强。

(3)通过基于数学建模的潜在地震破裂面源检测方法分析地震危险性,在分析地震危险性时,

应用该方法获取的地震动衰减关系和地震资料研究成果,提升地震危险性分析的精准度,提高地震区划效率,改善地震区划质量。

参考文献:

- [1] 胥广银,高孟潭. 基于潜在破裂面源模型的南北地震带南段地震区划研究[J]. 震灾防御技术,2017,12(3):441-455.
- [2] 张锐,任鲁川,田建伟,等. 基于广义极值理论的潜在地震海啸源震级上限及强震重现水平的估计——以琉球海沟俯冲带为例[J]. 中国地震,2016,32(4):702-709.
- [3] 王海龙,张伟,秦丽杰. 基于 GTS 的地震作用下三官庙滑坡稳定性研究[J]. 金属矿山, 2016,45(8):138-141.
- [4] Bo L,Su J,Ma D,et al. The study on forecasting the surface rupture width under strong earthquake based on information diffusion methodology [J]. Natural Hazards, 2015,75(2):1871-1882.
- [5] Sun W,Jie D. Relation of dislocation Love numbers and conventional Love numbers and corresponding Green's functions for a surface rupture in a spherical earth model [J]. Geophysical Journal International,2018,193(2):717-733.
- [6] 乔徐峰,谢婵琼,欧阳先庚. 地震作用下边坡潜在破坏面预测研究[J]. 低温建筑技术,2015,37(1):108-111.
- [7] 魏建民,韩晓明,张帆,等. 2015 年阿拉善左旗 Ms5.8 地震序列特征及发震破裂面讨论 [J]. 地震工程学报, 2017,39(05):124-129.
- [8] Zhang Z,Zhang W,Chen X,et al. Rupture Dynamics and Ground Motion from Potential Earthquakes around Taiyuan, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2017,107(3):1201-1212.
- [9] 李建锋,刘锋,吴中海. 龙门山典型河流形态变化的潜在地震因素分析[J]. 地质力学学报,2016,22(3):659-666.
- [10] 齐玉妍,吕国军,孙丽娜,等. 1303 年山西洪洞 8 级地震震源断层研究[J]. 地震,2017,37(1):148-157.
- [11] 殷娜. 天山各构造分区地震破裂方式和地震序列类型的研究[J]. 震灾防御技术,2016,11(1):22-34.
- [12] 刘刚,王琪,乔学军,等. 用连续 GPS 与远震体波联合反演 2015 年尼泊尔中部 Ms 8.1 地震破裂过程[J]. 地球物理学报,2015,58(11):4287-4297.
- [13] Hoop M V D,Oksanen L,Tittelfitz J. Uniqueness for a seismic inverse source problem modeling a subsonic rupture[J]. Communications in Partial Differential Equations, 2015,41(12):1895-1917.
- [14] 程佳,徐锡伟,刘杰. 2014 年鲁甸 6.5 级地震成因、破裂特征和余震分布特征的库仑应力作用[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2):556-567.
- [15] 丁伟,刘恒,廖成旺,等. 地震烈度级数可视化图像优化检测仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(12):415-419.