

# 地形对地震烈度衰减的影响<sup>1</sup>

田家勇<sup>1)</sup> 兰晓雯<sup>1)</sup> 谢周敏<sup>1)</sup> 陆鸣<sup>1)</sup> 时振梁<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要** 本文采用阶跃截面固体的一维弹性波传播模型, 研究了地形对地震烈度衰减的影响。采用固体入射纵波来模拟无地形影响的地震烈度衰减; 采用固体透射波来模拟有地形影响的地震烈度衰减。利用阶跃截面处的放松连续条件, 得出了烈度与高度差的近似定量关系。同时, 以新疆地区逆冲走滑型地震为例, 讨论了烈度与高度差的近似定量关系描述地形对地震烈度衰减影响的有效性。

**关键词:** 地形 地震烈度衰减 阶跃截面 弹性波

## 引言

震后烈度分布的快速判定对于震后应急救援行动的资源调度和决策具有极其重要的作用。2008年5月12日14时28分, 四川省汶川县发生了8.0级强烈地震, 震中位于北纬 $31.0^{\circ}$ , 东经 $103.4^{\circ}$ 。汶川大地震涉及四川、甘肃、陕西、重庆等10个省(区、市)417个县(市、区), 受灾面积达50万 $\text{km}^2$ 。其中, 极重灾区、重灾区面积达13万多 $\text{km}^2$ , 造成69227人遇难, 17923人失踪, 直接经济损失高达8451亿元。汶川大地震是新中国成立以来, 破坏性最大、受灾面积最广、救援难度最大的一次地震灾害(中国地震局监测预报司, 2009)。由于这次地震缺乏对震后烈度分布的快速判断, 致使早期应急救援行动缺乏有效的人员和物资调配。

本课题组在地震行业专项的资助下, 利用历史地震资料开展了震后烈度分布的快速判定方法和技术的研究。同时, 为了使预测的地震烈度分布比较符合真实情况, 在研究中考虑了地形对地震烈度分布的影响。目前, 课题组的大部分研究都集中在局部地形对地震动参数的放大作用方面(中华人民共和国国家标准, 2001; Lee, 1990; Lee等, 1989; Cao等, 1990; 刘国利等, 1994), 如突出山包、山梁、悬崖、陡坎等。这些研究表明, 高突地形会对地震动产生放大作用, 加重震害。然而, 这些局部地形的尺寸相对于地震波的波长较小, 只会造成烈度的局部异常区。

实际等震线(图1)显示, 位于平原和盆地边缘的地震, 等震线呈现不对称形状, 较“肥胖”的一侧总是指向平原和盆地一侧; 而较“干瘦”的一侧总是指向丘陵和山区一侧(孙平善等,

1 基金项目 地震行业科研专项项目(200708047); 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项资金资助项目(ZDJ2007-2, ZDJ2009-14)

[收稿日期] 2010-02-09

[作者简介] 田家勇, 男, 生于1974年。博士, 研究员。主要从事弹性动力学方面的研究。E-mail: chenlitedtian@yahoo.com.cn

1990)。这就意味着,相对震中地势较低的地区烈度衰减较慢;而相对震中地势较高的地区烈度衰减较快。孙平善等(1990)曾统计得出了对于华北地区的破坏性地震,当地震烈度衰减1度时,平原和山区的相应震中距增加的距离之比平均约为3/2。郁曙君(1995)则将中国的烈度衰减关系分为平原型和山地型两种类型,建议对发生在山区和平原交界处的地震,在山区一侧采用山区型烈度衰减关系;而在平原一侧则采用平原型烈度衰减关系。但是,这种处理方法对于在两种地形交错的地区很难适用。

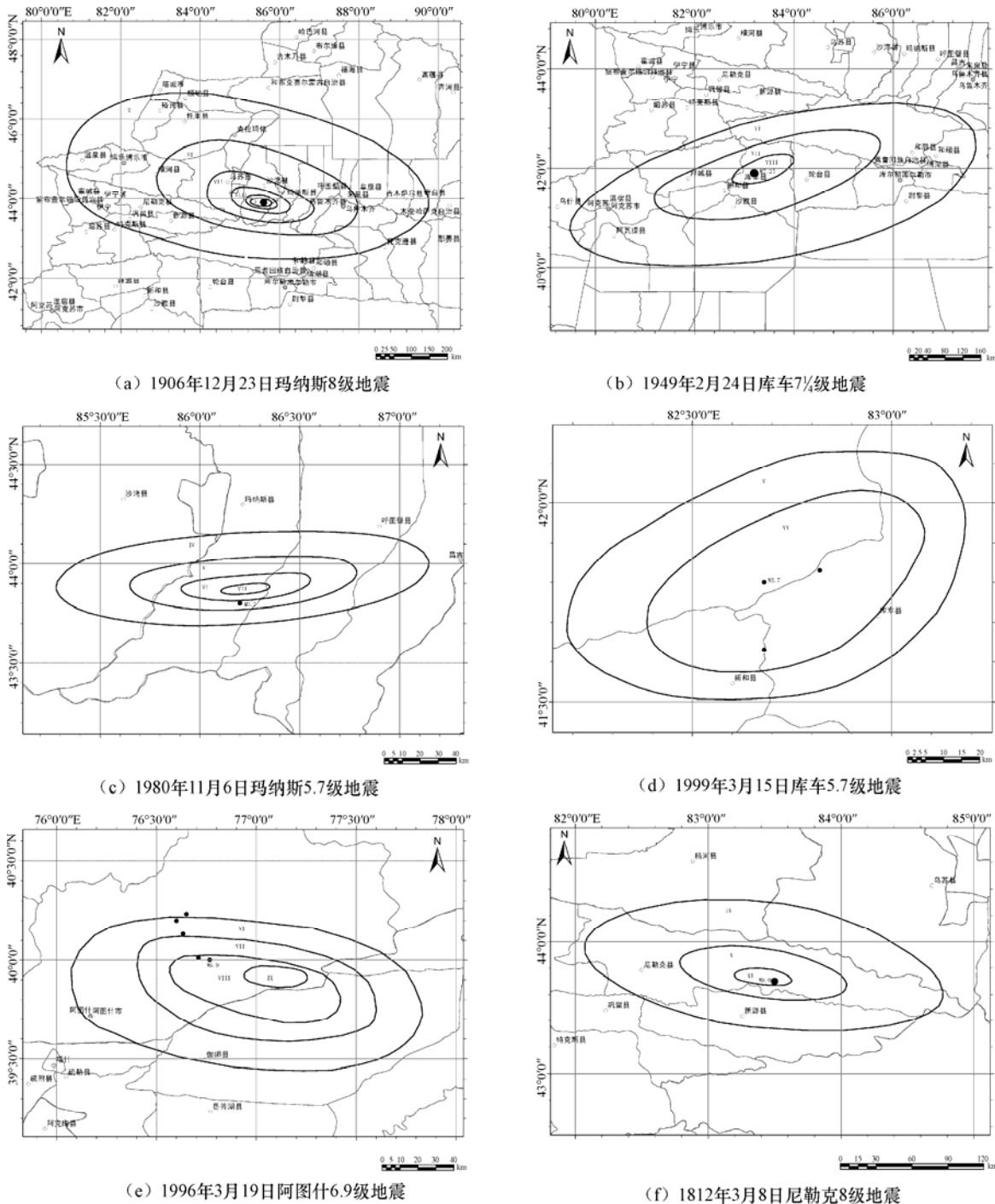


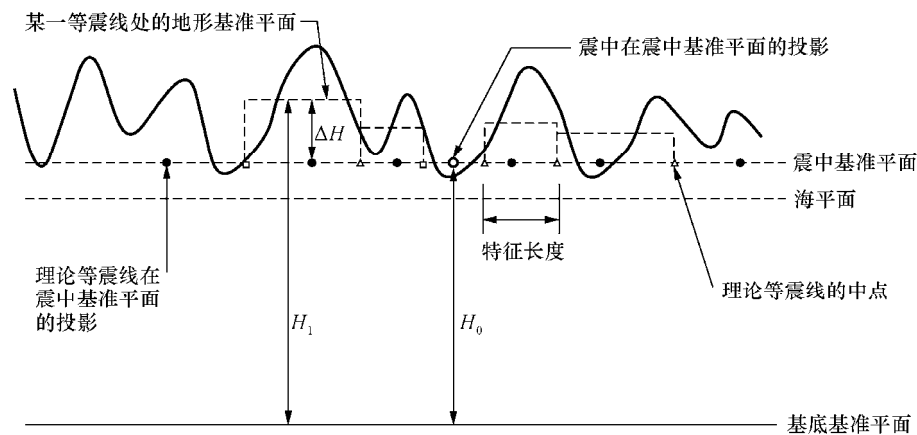
图1 具有地形影响的等震线图

Fig.1 Some isoseismal maps with influence of topography

一般情况下，烈度衰减关系受到震源特征、深部构造、场地类型、结构类型、居民点分布、地形等多种因素的影响。其中，地形作为影响烈度衰减关系的一种因素，目前还缺乏定量关系。本文的主要目的是引入阶跃截面固体的一维弹性波传播模型，初步给出地形对地震烈度衰减影响的近似定量关系，为应急救援初期的快速烈度评估提供服务。本文利用固体的入射纵波来模拟无地形影响的地震烈度衰减；利用固体的透射波来模拟有地形影响的地震烈度衰减。同时，利用阶跃截面处的放松连续条件，得出烈度与高度差的近似定量关系。最后，以新疆地区逆冲走滑型地震为例，讨论了烈度与高度差的近似定量关系在快速评估震后地震烈度分布的适用性。

## 1 地形对地震烈度衰减影响的数学模型

图 2 给出了沿等震线图短轴方向的剖面图。由于地形的高度一般是起伏的，山峰相对山谷落差有时很大。而本文的主要目的是考虑整体地形对等震线的影响，而不是考虑局部地形对等震线的影响。因此，我们采用类似于摩擦学中表面粗糙度的概念，首先定义了震中地形基准平面。震中地形基准平面定义为在一定特征长度范围内，地形相对于基底基准平面的高度算术平均值  $H_0$ 。对于震中地形基准平面，特征长度选取以震中为中心，最内圈理论等震线的震中距。对于某一等震线处的地形基准平面（其相对于基底基准平面的高度算术平均值  $H_1$ ），特征长度选取该理论等震线与相邻两条等震线中点之间的距离。通过基准地形平面的定义，烈度在起伏地形中的衰减问题可以简化为烈度在阶跃地形中的衰减问题。



震中基准平面上的空心圆点表示真实震中在震中基准平面的投影；震中基准平面上的实心圆点表示理论等震线在震中基准平面的投影；震中基准平面上的三角点表示等震线之间的中点在震中基准平面的投影

图 2 地形对地震烈度衰减影响的简化模型

Fig.2 Simplified model of influence of topography on seismic intensity attenuation

对于烈度在阶跃地形中的衰减问题，本文引入单阶跃截面固体中的一维稳态弹性波传播模型，如图 3 所示。单阶跃截面固体的入射端和透射端的高度分别为  $H_0$  和  $H_1$ 。同时，利用固体的入射波来模拟无地形影响的地震烈度衰减；利用固体的透射波来模拟有地形影响的地震烈度衰减。固体透射端和入射端的杨氏模量和密度是相同的。

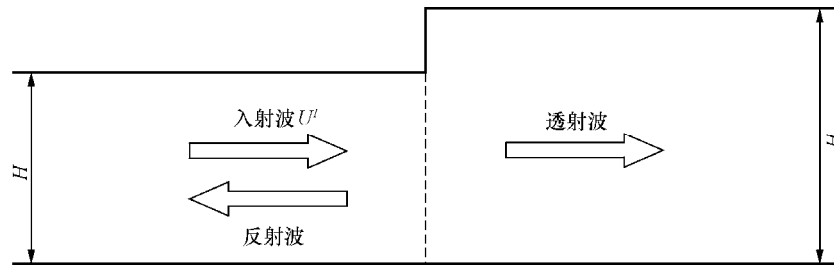


图3 单阶跃截面固体的弹性波传播模型

Fig.3 Cross section of propagation model of elastic wave

固体的一维稳态弹性波的波动方程可以表示为:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + k^2 U = 0 \quad (1)$$

式中,  $U$  为固体的位移, 其时间系数  $e^{i\omega t}$  本文予以省略;  $k = \omega/\sqrt{E/\rho}$  为弹性波的波速, 其中,  $\omega$  为角频率;  $E$  为弹性常数;  $\rho$  为密度。

入射波的位移和应力可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} U^I &= Ae^{ikx} \\ \sigma^I &= AEike^{ikx} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $A$  为入射波的振幅。

反射波的位移和应力可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} U^R &= Be^{-ikx} \\ \sigma^R &= -BEike^{-ikx} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $B$  为反射波的振幅。

透射波的位移和应力可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} U^T &= Ce^{ikx} \\ \sigma^T &= CEike^{ikx} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $C$  为透射波的振幅。

在阶跃截面处, 要满足位移和应力连续条件, 而通常情况下却很难满足这个连续条件。为了简化分析, 可放松阶跃截面处的连续条件, 令阶跃截面处的位移和内力连续, 即:

$$\left. \begin{aligned} U^I + U^R &= U^T \\ (\sigma^I + \sigma^R)H_0 &= \sigma^T H_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式 2—式 4 中入射波、反射波、透射波的位移和应力代入式 (5) 的连续条件, 可得透射波和入射波的位移幅值比为:

$$C/A = 2/(1 + H_1/H_0) \quad (6)$$

同时, 透射波和入射波的加速度幅值比与位移幅值比相等。

根据国家标准《中国地震烈度表》附表 1 提供的某一烈度对应的峰值加速度上下限呈 2 倍的近似关系 (中华人民共和国国家标准, 2008), 可近似得到:

$$C/A \approx 2^M \quad (7)$$

式中,  $\Delta I = I_1 - I_0$  为地形影响的烈度  $I_1$  与理论计算烈度  $I_0$  的差值。

实际上, 烈度与地面运动参数之间的关系是极其复杂的, 目前还未找到由加速度换算成烈度的科学依据, 在相同烈度下的地面运动强度数据有很大的离散性。因此, 式 (7) 给出的烈度与峰值加速度关系只是一种近似关系。由于本文的主要目的是为应急救援初期快速提供等震线预测, 所以, 式 (7) 提供的近似关系从应用角度来说是可以接受的。

由式 (6) 和式 (7) 可得:

$$\Delta I \approx \log_2^{2/(1+H_1/H_0)} \quad (8)$$

如果  $\Delta H (= H_1 - H_0) \ll H_0$ , 可以根据式 (8) 进行级数展开, 并取线性项后可表示为:

$$\Delta I \approx -k\Delta H \quad (9)$$

式中,  $k = 1/(2H_0 \ln 2)$ 。

由式 (9) 可知, 地形影响的烈度改变量与相对震中的高度差成正比关系, 二者的比值为负数。这也就意味着, 相对震中较高的地区会加快地震烈度的衰减; 而相对震中较低的地区则会减缓地震烈度的衰减。

近场地震灾害损失主要是由于地震的横波造成的。地震横波的传播速度大约为 3km/s, 近场周期大约为 1.2s。在这里, 我们取地震横波周期为 1.5s, 则地震波的波长为 4.5km。取地震波的 1/3 波长作为地震波的影响高度  $H_0$ , 则式 (9) 可以表示为:

$$\Delta I = -\frac{1}{3000 \ln 2} \Delta H \quad (10)$$

式中,  $\Delta H$  的单位为 m。

尽管地形起伏很大, 但是由于地形基准平面的定义, 一般情况下相对震中的高度差  $\Delta H$  远小于震中地形基准平面高度  $H_0$ 。

## 2 算例

本文以新疆地区逆冲走滑型地震为例, 来讨论地形对地震烈度衰减影响的阶跃截面固体的一维稳态弹性波传播模型的有效性。在新疆地区具有等震线的逆冲走滑型地震共有 29 个, 根据这 29 个等震线图, 可给出统计的地震烈度短轴衰减的统计关系为:

$$I_b = 2.089 - 1.022 \ln(R + 7) + 1.275M \quad (11)$$

式中,  $R$  为震中距, 单位为 km;  $M$  为震级。

图 4 为 1949 年 2 月 24 日库车 7¼ 级地震的等震线。库车地震的震中位于 83.2°E, 41.9°N, 在塔里木盆地和天山交接的地带。宏观震中位于库车东北边的克日西村附近, 亦即位于秋立塔格断裂与库车-依西 1 井断裂交汇的地区, 震中烈度为 IX 度, 极震区走向 N55° E 左右, 长 126km, 宽 40km, 呈窄长椭圆形, 外圈等震线亦为 NE 向分布 (徐杰等, 2003)。秋立塔格断裂是本次地震的主要发震构造 (张培震等, 1996), 具有逆冲走滑特征。但是, 也有学者认为库车-依西 1 井断裂是本次地震的主要发震构造 (徐杰等, 2003), 具有走滑特征。

首先, 利用本文的式 (11) 可得出库车地震的理论等震线。从图 4 可以看出, 理论等震线在短轴方向上相对于震中对称。然后, 采用式 (10) 对理论等震线进行地形校正。由于北西向的天山地势较高, 使天山一侧的等震线变瘦。而塔里木盆地的地势与震中相差不大, 故

塔里木盆地一侧的校正等震线与理论等震线相比,变化不大。尽管等震线不仅受到地形的影响,还受到场地、居民点等因素的影响,但是从图 4 可以看出,经过地形校正等震线的短轴不对称比例与真实等震线相比,还是比较一致的。

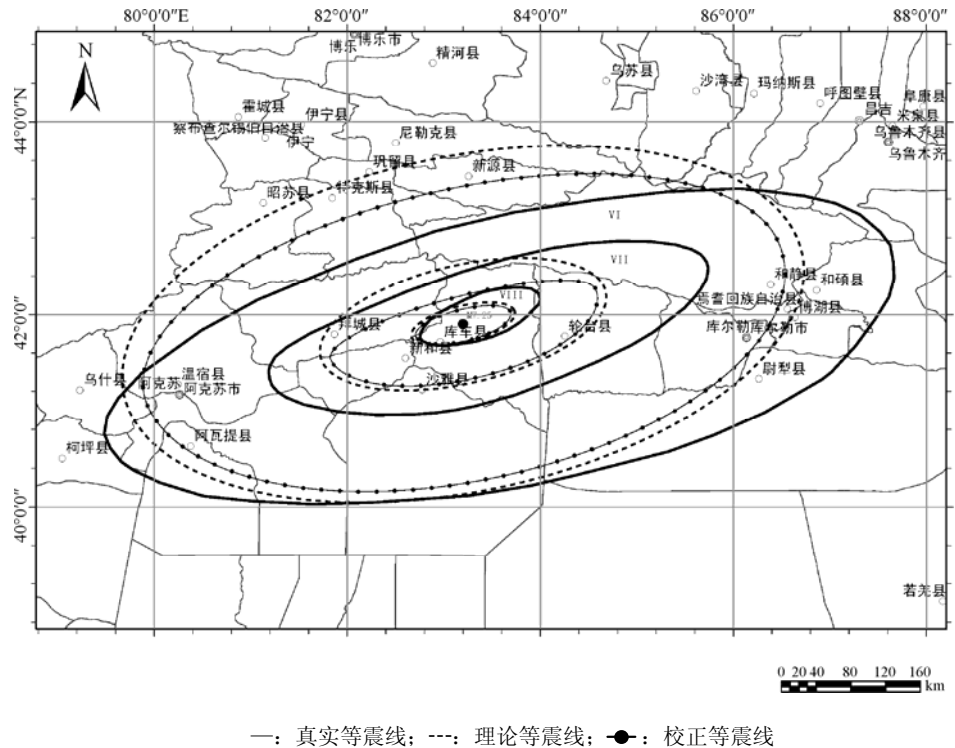


图 4 1949 年 2 月 24 日库车  $M_S 7\frac{1}{4}$  级地震真实等震线、理论等震线、校正等震线

Fig.4 Isoseismal map of Kuche  $M_S 7\frac{1}{4}$  earthquake (solid line: observed; dashed line: theoretical; line with dots: corrected)

### 3 结论

本文提出采用阶跃截面固体的一维稳态弹性波传播模型,来研究地形对地震烈度衰减的影响,给出了烈度与高度差的近似定量关系。分别利用固体的入射纵波和透射波,来模拟无地形影响和有地形影响的地震烈度衰减。利用阶跃截面处的放松连续条件,得出了烈度与高度差的近似定量关系。同时,以 1949 年 2 月 24 日库车地震验证了烈度与高度差的近似定量关系,可有效地预测震后地震烈度分布,从而为震后烈度分布的快速判定技术的发展提供了有益的帮助。

### 参考文献

- 刘国利,刘殿魁,1994. 位移阶跃 SH 波对半圆形凹陷地形的散射. 力学学报, **26** (1): 70—80.
- 孙平善,廖振鹏,1990. 平原和山区地震烈度衰减规律的比较. 地震工程与工程振动, **10** (1): 35—40.
- 徐杰,周本刚,杨晓平,汪祥余,周庆,陈国光,冉洪流,刘占坡,2003. 1949 年新疆库车  $7\frac{1}{4}$  级地震的地震构造条件. 地震地质, **25** (3): 450—459.
- 郁曙君,1995. 中国东部平原和西北部地区烈度衰减关系的研究. 地震学报, **17** (2): 203—211.
- 张培震,邓起东,杨晓平等,1996. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题. 中国地震, **12** (2):

127—140.

中国地震局监测预报司, 2009. 汶川 8.0 级地震科学研究报告. 北京: 地震出版社.

中华人民共和国国家标准, 2001. 建筑抗震设计规范及条文说明 (GB50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.

中华人民共和国国家标准, 2008. 中国地震烈度表 (GB/T17742-2008). 北京: 中国标准出版社.

Cao H., Lee V.W., 1990. Scattering and diffraction of plane P waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **9** (3): 141—150.

Lee V.W., 1990. Scattering of plane SH-waves by a semi-parabolic cylindrical canyon in an elastic half-space. *Geophysical Journal International*, **100** (1): 79—86.

Lee V.W., Cao H., 1989. Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths. *Journal of Engineering Mechanics*, **115** (9): 2035—2056.

## Influence of Topography on Seismic Intensity Attenuation

Tian Jiayong<sup>1)</sup>, Lan Xiaowen<sup>1)</sup>, Xie Zhoumin<sup>1)</sup>, Lu Ming<sup>1)</sup> and Shi Zhenliang<sup>2)</sup>

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** In this paper we introduce a model of one-dimensional wave propagation in a solid of a stepped cross section to investigate the influence of topography on seismic intensity attenuation. The seismic intensity attenuation without and with the influence of topography are represented by the incident wave and the transmitting wave, respectively. The consideration of continuity condition yields the quantitative relation of seismic intensity and elevation. Finally, we take earthquakes along strike and slip faults in Xinjiang as case study to validate the proposed model.

**Key words:** Topography; Seismic intensity attenuation; Stepped cross section; Elastic wave