刘辉,郭红梅,黄丁发,等.一种基于自适应方法的地震烈度圈自动勾画关键技术研究[J].地震工程学报,2021,43(2):345-352. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.345

LIU Hui,GUO Hongmei,HUANG Dingfa,et al.Key Techniques for Automatic Delineation of Seismic Intensity Circles Based on Adaptive Method[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(2):345-352.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02. 345

一种基于自适应方法的地震烈度圈 自动勾画关键技术研究

刘 辉1,郭红梅2,黄丁发1,赵 真2,张 莹2

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院,四川 成都 611756;

2. 四川省地震局,四川成都 610041)

摘要: 地震烈度分布是震后灾害损失快速评估、应急救援和恢复重建工作开展的重要依据。目前地 震烈度圈主要是由专家根据现场实地调查获得的烈度调查点,结合预评估烈度圈,采用 GIS 软件 进行手动勾画得到。这种传统方法耗时耗力。提出一种基于自适应方法的地震烈度圈自动勾画方 法,首先根据余震展布、居民地分布、断层属性等判断宏观震中位置,结合断裂带走向确定烈度圈长 轴方向。在此基础上,利用星机地多源灾情信息融合后的最高离散烈度点生成包络线,将最高烈度 与烈度圈面积的统计关系作为约束条件,运用自适应算法扩距得到最高烈度圈。在最高烈度圈的 基础上,结合各级离散烈度点,基于上述方法,从高到低依次得到其他烈度圈。最后以九寨沟 7.0 级地震为例,实验结果表明,利用该方法能够自动生成烈度圈,利用震后获得的星机地多源灾情信 息融合得到的离散烈度点生成的烈度圈准确度高于 80%,有效提高地震烈度圈勾画的效率,可以 为地震应急救援工作的快速开展提供支持。

关键词: 烈度圈; 包络线; 自适应算法; 离散烈度点 中图分类号: P315 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2021)02-0345-08 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.345

Key Techniques for Automatic Delineation of Seismic Intensity Circles Based on Adaptive Method

LIU Hui¹, GUO Hongmei², HUANG Dingfa¹, ZHAO Zhen², ZHANG Ying²

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;
 2. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Earthquake intensity distribution is an important basis for the rapid assessment of disaster losses, emergency rescue, and restoration and reconstruction after the earthquake. At

收稿日期:2019-11-06

基金项目:"十三五"国家重点研发计划项目(2017YFC1500905);四川地震科技创新团队专项(201901)

第一作者简介:刘 辉(1994-),硕士研究生,研究方向:地震应急。E-mail:lh19943319@163.com。

通信作者:郭红梅(1984-),硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:地震应急、地震灾情精细评估和地震灾害风险分析、评价。 E-mail:115453242@qq.com。

present, the seismic intensity circle is mainly drawn manually according to the intensity survey points obtained from field survey by using the GIS software. However, the traditional method is inefficient and time-consuming. In this paper, a method of automatic delineation of seismic intensity circle was proposed. First of all, the factors affecting seismic intensity mapping were fully considered. According to the aftershocks distribution and the types of seismogenic faults, the location of macro epicenter and the long axis direction of intensity circle can be determined. Then, the envelope was generated based on the maximum discrete intensity points. The statistical relationship between the maximum intensity and the area of intensity circle was taken as the constraint condition, and the maximum intensity circle was obtained by using the adaptive algorithm. Finally, combined with different discrete intensity points, other intensity circles were obtained by using the above-mentioned method, and the Jiuzhaigou M7.0 earthquake was taken as an example. The experimental results showed that the proposed method can automatically generate intensity circle, and the accuracy of intensity circle generated by discrete intensity points obtained from the fusion of multi-source disaster information in 28 hours after the earthquake is over 80%. The method effectively improves the delineation efficiency of earthquake intensity circle, and can provide support for the rapid development of earthquake emergency rescue work. Keywords: intensity circle; envelope; adaptive algorithm; discrete intensity point

0 引言

地震烈度是指地震引起的地面震动及其影响的 强弱程度^[1]。地震烈度受震级、震中距、震源深度、 震源机制、地质构造、场地条件等多种因素的影响。 一次地震发生后,根据建筑物破坏的程度和地表面 变化的状况,评定距震中不同地区的地震烈度,绘出 烈度等值线,即地震烈度圈,作为对该次地震破坏程 度的描述。地震烈度圈的用途十分广泛,概括起来 主要分为以下两个方面:(1)作为震害的简便估计。 一次强震之后,政府或者社会为了了解震害的大小 和分布情况,需要一个综合而简便的描述,便于了解 各地区灾情^[2];(2)对地震灾区灾情估计、抗震救灾 工作和恢复重建工作具有十分重要的参考意义^[3]。

目前最常见的做法是破坏性地震发生后,首先 根据地震速报给出的地震参数,以微观震中为中心, 利用区域烈度衰减模型快速算出预评估烈度圈,用 于灾区面积的快速评估;然后应急队伍到灾害现场 进行实地灾情快速调查获得烈度调查点;最后在预 评估烈度圈的基础上结合烈度调查点,由专家使用 GIS软件手动勾画得到最终烈度圈。这种传统勾画 方式对星机地多源灾情信息利用不够,基本全部依 靠人工实地调查,耗时耗力;手动勾画过程也对效率 有影响。

针对烈度衰减模型对宏观震中和长轴走向考虑 因素不够全面,可能造成较大误差,以及在后续烈度 圈修正过程中对星机地灾情信息利用率不高,并全 靠人工勾画,耗时耗力的问题,本文提出一种基于自 适应算法的地震烈度圈自动勾画技术。充分考虑发 震断层属性、居民地分布、余震展布等因素对宏观震 中和烈度圈长轴走向的影响,在此基础上,采用自适 应算法,将烈度与烈度圈面积统计关系作为约束条 件,结合多源灾情信息融合后的离散烈度点数据,实 现地震烈度圈的自动勾画,解决完全需要依靠专家 手工勾画这一问题,提高烈度圈勾画的效率,可以为 地震应急救援工作的快速开展提供支持。

1 技术路线及关键技术

充分考虑影响烈度分布的因素,首先通过微观 震中、余震信息、断裂带属性、居民地分布和最高离 散烈度点确定宏观震中位置,通过余震展布和断裂 带方向确定烈度圈的长轴走向。在此基础上,以烈 度与烈度圈面积的统计关系作为约束条件,结合星 机地多源灾情信息融合得到的最高离散烈度点、宏 观震中的包络线,利用自适应算法扩距,得到最高烈 度圈。同样利用自适应方法在高一级烈度圈的基础 进行扩距,并结合本级离散烈度点分布对烈度圈进 行局部扩距,使得烈度圈包含所有本级离散烈度点, 重复该过程,从高到低依次得到其他各级烈度圈。 最后对生成的烈度圈进行平滑处理并进行精度评 定。总体技术路线图如图1所示。



Fig.1 Thetechnology roadmap

1.1 宏观震中和长轴方向的确定

宏观震中是地震破坏最严重区域的中心,而微 观震中是地震破裂初始点在地表的投影,两者之间 可能发生偏离。李闽峰等[4]和刘吉夫等[5]对中国大 陆历史地震宏观震中与微观震中的偏离研究得出: 宏观震中与微观震中存在客观的不一致性。地震初 期,烈度快速判定通常将微观震中作为初始输入参 数,这会造成评估极震区与实际极震区的位置有偏 差。极震区范围的圈定通常是地震专业人员参照微 观震中,通过地震现场广泛、深入的实际调查后认定 的,一般需要投入大量人力物力,且过程进展缓 慢^[6]。为此,一些学者对极震区的快速确定做了相 关研究。胥广银等[7]利用地震动衰减关系、发震断 层及其性质产状快速估计出了破坏范围,并指出应 考虑地震破裂方式、地震地质灾害、人口经济分布等 因素进一步指导抗震救灾;杨建思等[8]研究基于震 源机制、震源破裂时空过程快速准确判断强震的极 震区分布的方法和处理系统,建立了南北地震带基 于公里格网人口、建筑、经济数据及其发展模型,实 现了由地震地质加经济承载体在地震震源力作用下 成灾的极灾区速判的思路;郑韵等^[9]基于余震能量 场空间分布,利用粒子群算法构造了一个震后 6 h 内包含所有主震区激发余震的面积最小椭圆作为估 计极震区。基于上述研究,综合考虑微观震中、余震 信息、居民地分布信息、断裂带属性、最高离散烈度 点等信息估计极震区范围,然后取极震区的中心作 为修正的宏观震中位置,具体流程图如图 2 所示。



图 2 宏观震中的确定

Fig.2 Determination of macroscopic epicenter

烈度圈长轴走向是绘制烈度圈时的另一个重要 的因素,长轴走向的准确与否直接会影响烈度圈的 精度。秦娟等^[10]通过对地震活动、活动断裂分布、 震源机制解的统计特征分析,指出地震等震线长轴 方位与活动断裂的走向、震源机制解的一个节面走 向基本保持一致。曹刻等^[11]在判断数字等震线模 型的方向时,给出了不同断裂情况下,长轴方向的判 断。张淑蓉^[12]通过对地震序列的时空分布进行研 究发现:主震宏观等震线的长轴方向和余震分布的 长轴方向一致。此外汶川地震余震震中沿东北一南 西方向展布^[13-14],其分布方向与实际等震线的方向 一致。本文结合断裂带走向和余震展布来判断烈度 圈的长轴走向。

1.2 烈度圈面积分布规律

关于烈度区面积分布规律的研究,国内已有很 多学者做过研究。陈培善和刘家森^[15]利用逐步回 归方法得到了震级与震中烈度、极震区面积的关系; 余国政^[16]利用历史地震资料,统计拟合了震级与烈 度圈面积、烈度值、震源深度之间的关系。孙继 浩^[17]通过对烈度圈总面积和震级关系的分析得出 烈度圈总面积与震级和烈度成指数关系。

经过对烈度圈总面积与震级和烈度的关系分析,本文采用孙继浩提出的烈度圈总面积与震级和 烈度的关系式作为回归的数学模型,具体关系如 下式:

S

348

$$=\exp(\alpha - bI + cIM) \tag{1}$$

式中:*S*是*I*度以上烈度区的总面积,*M*是震级,*a*, *b*,*c*是回归系数。

本文收集了四川省 1460—2019 年震级在 5.5 级以上历史震例,将震级分为 5.5~6.5、6.5~7.5 和 7.5~8.5 三档,分别统计了烈度与烈度圈面积的数 据,并以式(1)作为回归模型计算了每档的烈度与烈 度圈面的关系,具体关系如下:

震级在 5.5~6.5 级之间, 烈度与烈度圈面积关 系为:

 $S = \exp(15.578\ 6 - 3.541\ 4 \times I + 0.343\ 2 \times I \times M)$ (2)

震级在 6.5~7.5 级之间, 烈度与烈度圈面积关 系为:

 $S = \exp(18.381 \ 9 - 4.147 \ 3 \times I + 0.380 \ 8 \times I \times M)$ (3)

震级在 7.5~8.5 级之间, 烈度与烈度圈面积关 系为:

 $S = \exp(13.760\ 7 - 3.459\ 8 \times I + 0.335\ 4 \times I \times M)$ (4)

根据震级大小,选择对应档位的关系式计算不 同烈度圈面积,例如当震级为7级时,利用式(3)可 计算得到Ⅱ度烈度圈的面积为155.4929km²、Ⅲ度 烈度圈的面积为684.2340km²、Ⅲ度烈度圈的面积 为3010.9km²、Ⅱ度烈度圈的面积为13249km²。

1.3 基于自适应算法的烈度圈自动勾画

自适应是指处理和分析过程中,根据处理数据 的数据特征自动调整处理方法、处理顺序、处理参 数、边界条件或约束条件,使其与所处理数据的统计 分布特征,结果特征相适应,以取得最佳的处理效 果。由于自适应滤波器具有在未知环境下良好运行 并跟踪输入统计量随时间变化的能力,所以广泛的 应用于通信、雷达、声呐、地震学和生物医学工程等 领域^[18]。它通过自适应滤波算法调整滤波器系数, 使得滤波器的特性随信号和噪声的变化而变化,以 达到最优滤波的效果^[19]。

自适应算法包含两个基本部分:滤波器和自适 应控制算法。在滤波器中,给定输入向量u(n)和初 始权重w(n),经过滤波器可以产生一个输出向量 y(n)作为期望响应d(n)的估计,计算y(n)与d(n)的差值e(n);在自适应控制算法中,根据误差调整 输入向量的权重,在滤波器中重新计算输出向量 y(n),判断 y(n)与 d(n)的误差是否满足要求,若 不满足,重复上述过程,直到 e(n)满足要求为止。 自适应算法原理图如图 3 所示。



Fig.3 The principle diagram of adaptive algorithm

采用自适应方法勾画烈度圈时首先勾画最高烈 度圈。在确定宏观震中和烈度圈长轴方向的基础 上,生成宏观震中与最高离散烈度点的包络线,将烈 度与烈度圈面积的统计关系作为约束条件,在自适 应算法中的滤波器中对包络线进行扩距,扩距的初 值由最高烈度的统计面积与扩距后烈度圈面积的差 值,除以最高烈度圈的边长确定,初次扩距完成后, 计算最高烈度圈统计面积(期望面积)与扩距后的烈 度圈面积差值的绝对值是否小于阈值,若未达到误 差要求,则在自适应控制算法中用烈度圈统计面积 与扩距后烈度圈面积的差值,除以扩距后烈度圈的 边长更新扩距的距离,再进行扩距,重复上述自适应 过程,直到扩距后的烈度圈面积与最高烈度圈的统 计面积的误差满足要求时,此时得到最高烈度圈。 最高烈度圈流程图如图 4 所示。

其余各级烈度圈是在高一级烈度圈的基础上, 结合本级离散烈度点,以本级烈度圈面积同级关系 为约束,由高一级烈度圈扩距得到的。由于烈度在 衰减过程中沿长轴和短轴方向衰减具有不均匀性, 因此在扩距之前要调整高一级烈度圈的长短轴比 例。基于调整后的烈度圈利用自适应算法继续扩 距,当面积达到目标烈度的烈度圈期望面积时,判断 此时的烈度圈是否包含目标烈度的全部离散烈度 点,若包含,则停止扩距;若不包含,则利用二分法确 定扩距的距离,根据离散烈度点空间分布规律局部 扩距,直到恰好包含目标烈度的全部离散烈度点为 止,从而得到目标烈度的烈度圈。技术路线如图 5 所示。



图 4 最高烈度圈自动勾画技术路线图

Fig.4 Technical route of automatic delineation of maximum intensity circle





Fig.5 Technical route of automatic delineation of intensity circle

1.4 模型精度检验方法

本文采用两个精度指标来综合衡量模型的精

度:(1)自动勾画烈度圈与实际烈度圈重合面积占自动勾画烈度圈面积的比例,它反映了自动勾画烈度 圈的准确度;(2)自动勾画烈度圈漏判面积与实际烈 度圈的比值,反映了自动勾画烈度圈漏判的误差。 具体计算公式如下:

$$e_1 = \frac{S}{S_0} \times 100\%$$
 (5)

$$e_2 = \frac{S_1 - S}{S_1} \times 100\%$$
 (6)

式中:e₁为自动勾画烈度圈的准确度,e₂为自动勾 画烈度圈漏判的误差,S₀为自动勾画烈度圈的面 积,S₁为实际烈度圈的面积,S为重合部分的面积。

2 实验结果及分析

本文以四川省九寨沟 7.0 级地震为例,按照第 1 节的技术路线进行了实验,利用九寨沟地震震后获 得的星机地灾情信息融合后的离散烈度点(图 6), 得到算法自动勾画的烈度圈,并对实验结果进行精 度评定和误差原因分析。

2.1 宏观震中位置及长轴走向实验结果

首先基于余震信息、居民地分布信息、微观震 中、最高离散烈度点确定了极震区,然后取极震区的 中心作为修正的宏观震中位置,将距宏观震中最近 的断裂带方向作为长轴走向。其实验结果如图7所 示。从图7中可知实验确定的宏观震中与实际宏观 震中较为接近,长轴走向与断裂带方向相同。





图 6 离散烈度点分布图 Fig.6 The distribution of discrete intensity points





Fig.7 The result of macro epicenter and long axis trend

2.2 基于离散烈度点的地震烈度圈自动勾画实验 结果

基于实验确定的宏观震中和长轴方向,结合最 高离散烈度点生成包络线,将烈度与烈度圈面积作 为约束,自适应扩距得到II度烈度圈,在II度烈度圈 的基础上进行扩距,将统计面积和离散烈度点作为 约束条件,可得到WI度、WI度、和VI度的烈度圈。实 验结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出,实验得到 的烈度圈与实际烈度圈的形状相似大小相近,空间 上的重合度较高且走向一致,说明由实验得到的烈



图 8 烈度圈自动勾画实验结果与实际烈度圈对比图 Fig.8 Comparison between experimental and actual results of intensity circle

度圈与实际烈度圈符合效果较好;其中WI度、WI度和 IX度的烈度圈的形状与实际烈度圈的形状相似度较高,WI度烈度圈与实际烈度圈的形状相似度相对 偏低。

2.3 精度评定及误差分析

在进行结果的精度评定时,采用 1.4 小节给出 的模型精度经验方法对生成的烈度圈的精度进行了 精度评定,实验得到的烈度圈的精度如表 1 所列。

↓ 【 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二		
Table 1 Accuracy of intensity circle		
烈度	准确度	漏判误差
IX	83.963 0%	14.522 9%
VIII	99.031 4%	26.812 5%
VII	98.650 8%	9.931 3%
VI	94.774 7%	5.921 6%

由表1可知,就烈度圈的准确度来看,实验生成 的烈度圈的准确度都在80%以上,平均准确度为 94.1050%;就漏判误差来看,实验生成的烈度圈的漏 判误差都在30%以下,平均漏判误差为14.2971%; 综合准确度和漏判误差可以看出基于自适应方法的 地震烈度圈自动勾画得到的烈度圈整体精度较好。

实验生成的烈度圈精度较好,但还存在误差,产 生误差的原因可能有:(1)离散烈度点空间分布不均 匀,导致扩距时对烈度圈的约束作用减弱;(2)算法 中对经验数据过于依赖,未能更多的考虑本次地震 的特征。

3 结论与讨论

提出一种基于自适应方法的地震烈度圈自动勾 画方法,并以九寨沟地震为例进行实验,综合准确度 和漏判误差对实验结果进行精度评定。实验结果表 明:生成的烈度圈形状大小与实际烈度圈相似,空间 的重合度较高,长轴的走向一致。但仍然存在误差, 可能存在的原因及解决办法如下:

(1)九寨沟地震星机地灾情信息融合后得到的 离散烈度点空间分布不均匀,导致扩距时对烈度圈 的约束作用减弱。针对这个问题,在应用中可以根 据需要,通过星机地协同的方式实现全方位、空间较 均匀的灾情信息采集,从而降低因烈度点分布不均 造成的误差。同时,提供方便快捷的烈度圈修正工 具,专家可以在自动勾画的基础上进行修正。

(2) 在得到最高烈度圈后,采用历史地震经验 值改变最高烈度圈沿断裂带方向和垂直于断裂带方 向距离的比例,再利用自适应算法进行等边扩距。 由于经验值的主观性较大,可能会导致等边扩距得 到的烈度圈有误差。下一步将进一步完善自适应算 法,沿长轴方向和短轴方向扩距时,更多地考虑本次 地震的特征,结合地震的震源机制、余震信息、地质 条件等信息扩展不同的距离,降低对经验值的依赖 程度。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化 管理委员会.中华人民共和国推荐性国家标准:GB/T 18207.1-2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, National Standard (Recommended) of the People's Republic of China; GB/T 18207.1-2008[S].Beijing:Standards Press of China; 2008.

- [2] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006:65-67.
- [3] 王晓青,窦爱霞,王龙,等.2013年四川芦山7.0级地震烈度遥感评估[J].地球物理学报,2015,58(1):163-171.
 WANG Xiaoqing, DOU Aixia, WANG Long, et al. RS-Based Assessment of Seismic Intensity of the 2013 Lushan, Sichuan, China M₈7.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015,58(1):163-171.
- [4] 李闽峰,李圣强,陈颙.探讨地震宏观破坏场分布的影响因素 [J].中国地震,2000,16(4):293-306.

LI Minfeng, LI Shengqiang, CHEN Yong. Study on the Main Affected Factors of the Distribution of the Macro-Field of Earthquake [J].Earthquake Research in China, 2000, 16(4):293-306.

- [5] 刘吉夫,王晓青,陈颙,等.中国大陆地震宏观震中与速报定位 偏离的分区研究[J].地震学报,2006,28(1):37-41,111.
 LIU Jifu, WANG Xiaoqing, CHEN Yong, et al. Study on the Regional Deviation of themacro-Scopic Epicenters from Relevant Epicenters by Rapid Determination in Chinese Mainland
 [J].Acta Seismologica Sinica,2006,28(1):37-41,111.
- [6] 杨喆,任德凤、利用机载 SAR 震害影像特征快速圈定极震区
 [J].地震地质,1999,21(4):452-458.
 YANG Zhe, REN Defeng. Quick Determination of Epicentral Regions Using Airborne Earthquake Disastrous Sar Image Characters[J].Seismology and Geology,1999,21(4):452-458.
- [7] 胥广银,高孟潭,俞言祥.破坏性地震破坏范围的快速估计[J].
 国际地震动态,2008(7):20-23.
 XU Guangyin, GAO Mengtan, YU Yanxiang. A Fast Estimation of Damage Range for Destructive Earthquake[J]. Recent Developments
- [8] 杨建思,刘如山,李志强,等.南北地震带极灾区速判与灾情展 布关键技术研究[J].中国科技成果,2015,20):21-3. YANG Jiansi,LIU Rushan,LI Zhiqiang, et al. Rapid Judgment and Disaster Situation in the Disaster Area of the North-South Seismic Belt key technology research[J]. China Science and Technology Achievements,2015(20):21-23.
- [9] 郑韵,姜立新,王辉山,等.基于余震粒子群算法的极震区快速 判定方法研究[J].地震,2018,38(4):120-131.
 ZHENG Yun,JIANG Lixin, WANG Huishan, et al. Rapid Determination Method of Magistoseismic Area Based on Aftershock Particle Swarm Algorithm[J].Earthquake,2018,38(4): 120-131.
- [10] 秦娟,王宏超,黄世源,等.重庆地区历史地震等震线长轴方位 分布综合分析[J].地震工程学报,2014,36(1):127-133.
 QIN Juan,WANG Hongchao,HUANG Shiyuan, et al. Com-

prehensive Analysis of the Distribution of Isoseismal Curve Major Axis Directions of Historical Earthquakes in Chongqing Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1): 127-133.

- [11] 曹刻,王锋,李永强,等.云南宁洱 6.4 级地震灾区范围的快速 判断[J].灾害学,2008,23(2):76-79.
 CAO Ke,WANG Feng,LI Yongqiang, et al.Fast Judgment of Disaster Aera of Ninger M6.4 Earthquake in Yun'an[J].Journal of Catastrophology,2008,23(2):76-79.
- [12] 张淑蓉.1970年1月5日通海地震序列特征[J].地震研究, 1980(2):13-20.

ZHANG Shurong .Characteristics of the Tonghai earthquake sequence on January 5,1970[J].Journal of Seismological Research,1980,3(2):11-18.

- [13] 黄媛,吴建平,张天中,等.汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定 位研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,38(10):1242-1249.
 HUANG Yuan, WU Jianping, ZHANG Tianzhong, et al. Study on Wenchuan M8.0 earthquake and relocation of other earthquake sequences[J].Scientia Sinica(Terrae)[J].Science in China (Series D:Earth Sciences),2008,38(10):1242-1249.
- [14] 高孟潭,周本刚,潘华."5·12" 汶川特大地震灾害特点及其 防灾启示[J].震灾防御技术,2008,3(3):209-215.
 GAO Mengtan,ZHOU Bengang,PAN Hua.Damage Characteristics and Enlightenment of Disaster Prevention of "5·12"
 Wenchuan Earthquake[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2008,3(3):209-215.
- [15] 陈培善,刘家森.用位错模型研究震级与烈度的关系[J].地球 物理学报,1975,18(3):183-195.

CHEN Peishan, LIU Jiasen. A Study of the Relation between Seismic Magnitude and Intensity by Using the Dislocation Model[J]. Chinese Journal of Sinica, 1975, 18(3):183-195.

- [16] 余国政.四川地震震级与烈度区面积和震源深度的关系[J].
 四川地震,1993(2):37-42.
 YU Guozheng. The Relationship between the Earthquake Magnitude and the Area of Earthquake Intensity, the Depth of Earthquake Origin in Sichuan[J].Earthquake Research in Sichuan,1993(2):37-42.
- [17] 孙继浩.川滇及邻区中强地震烈度衰减关系的适用性研究
 [D].中国地震局地震预测研究所,2011.
 SUN Jihao..Study of Moderate-Strong Seismic Intensity Attenuation Relations in Sichuan-Yunnan and Its Adjacent Areas
 [D]. Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration,2011.
- [18] HAYKIN S.自适应滤波器原理[M].第四版,北京:电子工业 出版社,2010:5-7.
 HAYKIN S. Adaptive Filter Theory Forth Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2010:5-7.
- [19] 王鲁彬,翟景春,熊华.自适应滤波算法研究及其 Matlab 实现
 [J].现代电子技术,2008,31(3):174-175,178.
 WANG Lubin,ZHAI Jingchun,XIONG Hua.Adaptive Filter
 Algorithm Research and Matlab Realization[J].Modern Electronics Technique,2008,31(3):174-175,178.