

郭少文, 雷奇果, 周坤. 极震区烈度的ELM预测模型[J]. 华南地震, 2022, 42(1): 140–146. [GUO Shaowen, LEI Qiguo, ZHOU Kun. Seismic Intensity Prediction Model in Meizoseismal Area Based on ELM [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(1): 140–146]

极震区烈度的ELM预测模型

郭少文, 雷奇果, 周 坤

(中交第二公路勘察设计院有限公司, 武汉 430052)

摘要: 为了建立地震后极震区烈度快速预测方法, 收集了2013年以前多次5级以上地震案例, 以震级、震源深度作为输入参数, 以极震区烈度作为输出参数, 建立了ELM预测模型并分析震级和震源深度的信息熵和权重, 该模型与现有广义线性模型预测精度提高约20%, 主要结论如下: 震级和震源深度与极震区烈度分别呈正相关和负相关性关系; 震级的信息熵比震源深度的更大, 其变异程度更小, 包含的信息量更少, 对极震区烈度的影响程度比震源深度更小; 针对局部地区的专门预测模型和基于多参数的更加精确预测模型尚需努力。

关键词: 地震震级; 震源深度; 极震区烈度; ELM; 信息熵; 权重。

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)01-0140-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.01.19

Seismic Intensity Prediction Model in Meizoseismal Area Based on ELM

GUO Shaowen, LEI Qiguo, ZHOU Kun

(Second Highway Consultant Co., Ltd., China Communications Construction Company, Wuhan 430052, China)

Abstract: In order to establish a rapid prediction method for the intensity in the meizoseismal area after the earthquake, the paper collects many cases of earthquakes with M_{ith} before 2013. Taking the magnitude and focal depth as input parameters, and the seismic intensity in meizoseismal area as the output parameters, the paper establishes an ELM prediction model and analyzes the information entropy and weights of the magnitude and focal depth. Compared with the traditional model, the prediction accuracy of this model is improved by about 20%. The main conclusions are as follows: there is a positive correlation between magnitude and focal depth, and a negative correlation between magnitude and seismic intensity. The information entropy of magnitude is higher than that of focal depth, which suggests that its variation degree and information content are less, and influence on seismic intensity is smaller. The effort to be done is to seek prediction means which is suitable for local area and based on multiple parameters.

Keywords: Earthquake magnitude; Focal depth; Seismic intensity in meizoseismal area; ELM; Information entropy; Weight

收稿日期: 2020-10-08

作者简介: 郭少文(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 注册一级建造师(市政公用工程)、注册土木工程师(岩土), 主要从事工程地质、水文地质方面研究。

E-mail: 394082124@qq.com

通信作者: 雷奇果(1989-), 男, 工程师, 工学学士, 主要从事工程地质、水文地质方面研究。

E-mail: 419953628@qq.com

0 前言

中国是世界上地震灾害最严重的国家之一,城市面临的地震灾害形势异常严峻。“5·12”汶川大地震、“4·14”玉树地震再次使人们认识到地震的强大破坏力。地震应急救援是防震减灾中的最后一道防线,其任务为高效、及时、有序地抢救生命,救助灾民,稳定社会和安定民心^[1]。震后短时间内的地震灾情是地震应急快速响应与应急指挥的关键,但震后的地震应急灾情获取具有黑箱期效应,即震后短时间内地震灾情获取困难^[2]。在地震灾后应急中,能快速获得极震区地震烈度则是应急指挥和救援的重要工作。地震烈度的研究最早始于1988年,Holder等^[3]用关谷清景记录的20多条日本地震的主要振幅、周期,对比宏观现象后,估计了Rossi-Forel烈度表(1883年,10度表)中I度到X度的PGA。现行应用比较广泛的地震烈度评定标准主要有欧洲宏观地震烈度表(EMS-98)、日本气象厅(JMA)地震烈度表、Medvegev-Sponheuer-Karnik(MSK)烈度表、Modified Mercalli(MM)烈度表以及中国的地震烈度表等。中国地震烈度表的研究始于20世纪50年代,1957年谢毓寿根据中国的房屋类型和震害特点,参照Medvegev烈度表,编制了第一部《新的中国地震烈度表》^[4]。本文以此为研究背景,收集了我国1966—2013年震级(M)>5.0以及

2014—2017年部分历史地震数据,利用极限学习机(extreme learning machine, ELM)的回归拟合功能,以震级和震源深度作为输入参数对极震区烈度进行预测。

1 历史地震案例数据与处理

地震烈度是指某一地区的地面或各人工建筑物遭受地震影响的强弱程度^[5]。极震区烈度是1次地震引起的最大烈度,从地震地质角度看,极震区烈度受多个因素影响,如震源机制,地震波传播介质、路径,局部场地条件等^[6]。本文收集的历史地震案例主要数据包括:地震发生时间、位置、震级、震源深度、极震区烈度等。

1.1 历史地震案例

收集了我国1966—2013年震级(M)>5.0的部分历史地震数据(204例)以及2014—2017年部分历史地震数据(18例),数据来源为中国地震局出版的《中国大陆地震灾害损失资料汇编:1966—1989》、《中国大陆地震灾害损失汇编:1990—1995》、《中国大陆地震灾害损失评估汇编:1996—2000》、《2001—2005灾评报告汇编》、《2006—2010年地震灾评报告(综合稿部分20120330)》、《2011灾评报告》、《2012灾评报告》、《2013灾评报告》和中国地震局官方网站公布的灾评通告,部分数据见表1。

表1 部分历史地震案例数据
Table 1 Data of the hisrorical earthquake

序号	地震时间/年-月-日	地点	震级/ M	震源深度/km	极震区烈度
1	1966-01-31	云南中甸	5.2	8	Ⅶ
2	1966-10-02	吉林怀德	5.2	20	Ⅶ
3	1966-03-22	河北邢台	7.2	10	X
4	1967-01-24	四川仁寿	5.5	4	Ⅶ
5	1967-03-27	河北河间	6.3	30	Ⅶ
6	1978-05-19	云南下关	5.1	10	Ⅵ
7	1978-07-13	四川黑水	5.4	10	Ⅵ
8	1979-12-06	西藏波密	5.1	10	Ⅶ
9	1972-07-23	西藏那曲	6.0	15	Ⅶ
10	1979-03-15	云南普洱	6.8	10	Ⅸ
11	1998-08-02	新疆伽师	6.0	11	Ⅶ
12	1998-08-27	新疆伽师	6.6	11	Ⅷ
13	1999-11-01	山西大同	5.6	9	Ⅶ

(转下表)

(接表 1)

序号	地震时间/年-月-日	地点	震级/ <i>M</i>	震源深度/ <i>km</i>	极震区烈度
14	1999-11-26	青海马沁	5.0	13	Ⅶ
15	1999-11-29	辽宁海城	5.6	15	Ⅶ
16	2009-07-09	云南楚雄	6.0	10	Ⅷ
17	2009-08-28	青海海西	6.4	8	Ⅶ
18	2010-01-30	四川遂宁	5.0	10	Ⅶ
19	2010-04-14	青海玉树	7.1	14	Ⅸ
20	2010-06-10	新疆乌恰	5.1	8	Ⅵ

1.2 数据预处理

震级、震源深度和极震区烈度具有不同量纲，数值差别也较大。为了消除数据量纲和数值范围差异的影响，从而得到理想的模拟结果，必须将数据进行规范化处理，主要方法有最小-最大规范化、零-均值规范化、小数定标规范化，本文采用 MATLAB 自带 mapminmax 函数进行标准化处理，将原始数据值映射到[-1, 1]，转换公式如下：

$$x^* = (y_{\max} - y_{\min}) \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (1)$$

式中： x^* 为规范化结果， x_{\max} 和 x_{\min} 分别为样本数据的最大值、最小值， y_{\max} 和 y_{\min} 为映射函数参数，分别默认为1、-1。处理结果见图1。

2 ELM 预测模型

区烈度的定量关系式 $M=2/3I_e+1$ ；国内学者傅承义^[8]于 1960 年提出 $M=(0.68\pm0.03) I_e+(1.39\pm0.17) \log H-(1.40\pm0.29)$ ；许卫晓^[9]建立公式 $M=0.87 I_e+0.8$ ；随后，聂高众等(2018)对震级、震源深度和极震区烈度进行拟合分析后提出 $I_{\max}=4.154+0.113M^2-0.0515H$ 。以上诸式中， M 为震级， I_e 极震区烈度， H 为震源深度。本文在上述研究的基础上，采用 ELM 方法利用震级和震源深度对极震区烈度进行回归拟合。

2.1 ELM 原理

ELM 是 Huang 等^[10]提出的单隐层前馈神经网络 (single-hidden layer feedforward neural network, SLFN)，因为其良好的学习能力在诸多行业领域中得到广泛的应用，与传统的训练方法相比，其具有学习速度快、泛化性能好的优点。

Gutenberg 等^[7]早在 1942 年就建立震级和极震

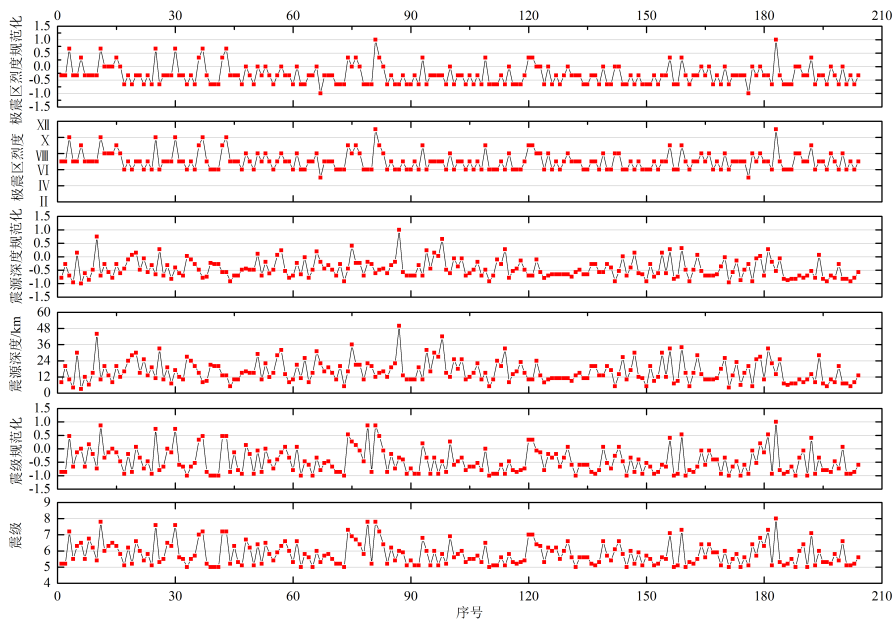


图 1 震级、震源深度和极震区烈度数据及规范化处理结果

Fig.1 The normalized data of the magnitude ,focus depth and intensity in meizoseismal area

典型的单隐层前馈神经网络结构由 m 个输入变量, M 个隐含层神经元, n 个输出层神经元组成, 其数学表达式为:

$$V_k=\omega^Tg(W_{in}u_k+b)k=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

式中: W_{in} 为输入权值, ω 输出权值, g 为激活函数, 通常取 Sigmoid 函数, b 为隐含层偏差值, n 为样本总数, u_k 为 m 维输入向量, V_k 为输出向量^[11]. 对 n 个样本对 (u_i, I_i) , $1\leq i\leq n$, 训练时输入权值 W_{in} 和偏差值 b 随机初始化并保持不变, 只要训练确定的参数为输出权值 ω , 具体算法为:

$$\omega=H^+I \tag{3}$$

式中, H^+ 为隐含层输入矩阵 H 的摩尔-彭洛塞 (Moore-Penrose) 广义逆矩阵. I 为期望输出矩阵, 将 H 展开后, 求出期望输出矩阵为^[12]:

$$I=(I_1,I_2,\cdots,I_n)^T \tag{4}$$

2.2 ELM 模型建立与对比

2.2.1 ELM 模型建立

在多个影响因素中, 已有研究表明震中烈度与震级、震源深度之间存在关系是明确的^[13], 通过震级和震源深度进行极震区烈度的预测是可行的. 通过三者的三维趋势图(图2), 可以看出震级

和震源深度与极震区烈度分别为正相关和负相关性关系, 即极震区烈度随着震级的上升而增加, 随着震源深度的上升而下降。

以震级和震源深度为研究对象, 分析两者和极震区烈度关系并进行预测. 选取 204 组历史地震案例数据, 建立 ELM 模型, 步骤如图 3。以 MATLAB2013a 为平台编制 ELM 程序, 主要参数为: 数据规范化函数 mapminmax, ELM 训练函数 elmtrain, 预测函数 elmpredict, 激活函数 hardlim。预测结果与真实值见图4, 可以看出效果比较理想。

2.2.2 ELM 法与其它方法对比

为了检验 ELM 方法的优点, 将该方法与其它方法从定性和定量两方面进行对比. 首先进行定性上比较, 图 5、6 分别为本文 ELM 方法和文献 1 的线性模型方法与真实值的对比图, 从两图中可以明显看出, ELM 方法预测效果更佳. 然后从定量上比较, 主要采用复相关系数 R 、决定系数 R^2 、均方误差 mse 三个拟合度参数进行对比, 其中 R^2 越接近 1 说明拟合度越高, mse 越接近 0 表明拟合效果越好. 从表 2 得出 ELM 方法的拟合度参数有大幅提高, 提高约 20%。

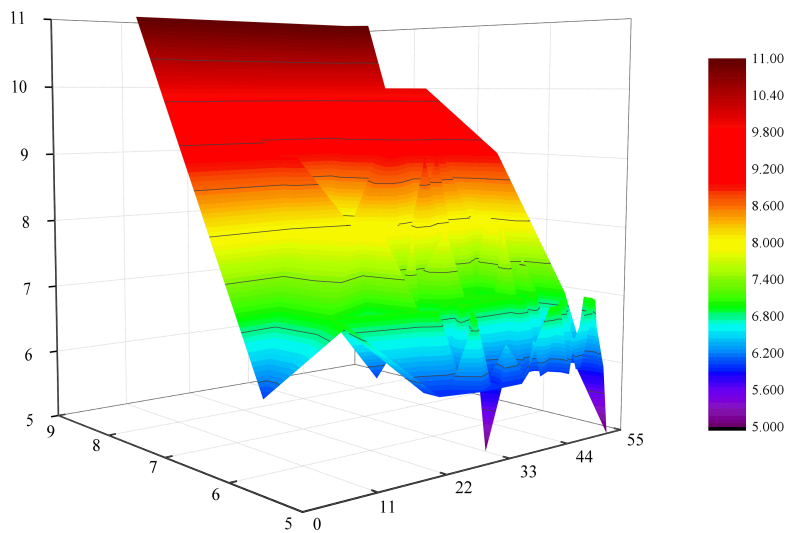


图2 震级、震源深度和极震区烈度三维趋势图

Fig.2 The three-dimensional trend chart of magnitude, focus depth and seismic intensity in the meizoseismal area

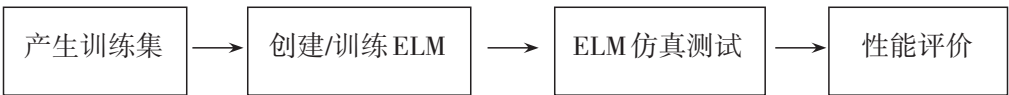


图3 模型建立步骤

Fig.3 The process of model establishment

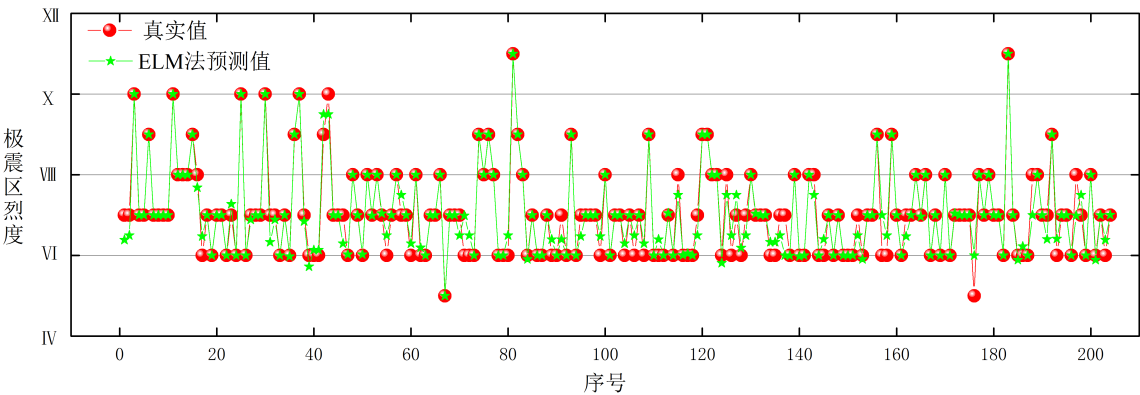


图 4 ELM法预测值与真实值对比

Fig.4 Comparison between the predicted value and real value of ELM method

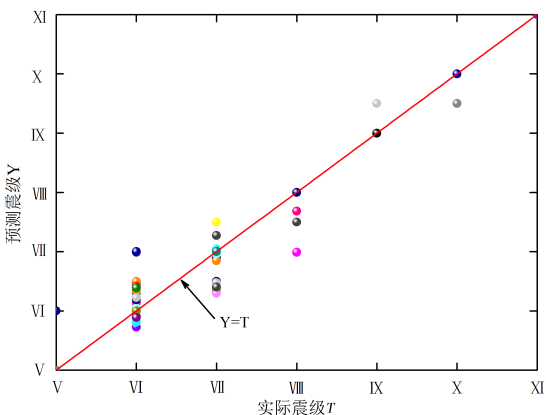


图5 极震区烈度ELM方法预测值与真实值对比

Fig.5 Comparison between the predicted value and real value of ELM method in the meizoseismal area

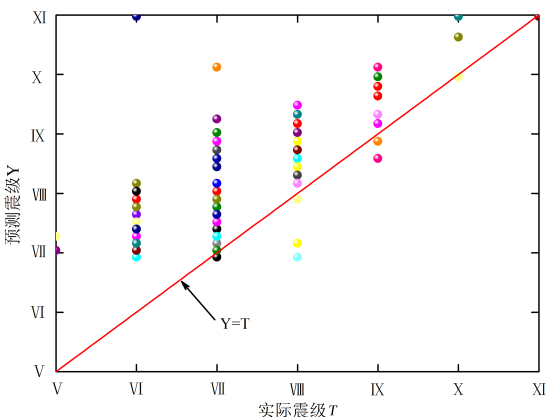


图6 极震区烈度文献1方法预测值与真实值对比

Fig.6 Comparison of the predicted value and real value of the method in literature 1 in the meizoseismal area

表 2 有效性参数对比

Table 2 Comparison of effectiveness parameters

评价参数	复相关系数 R	决定系数 R^2	均方误差 mse
ELM 方法	0.968	0.937	0.078
文献 1 方法	0.886	0.785	1.314

3 ELM模型应用与分析

3.1 ELM模型应用

为了检验模型在实际应用中的效果，对2013年以来发生的多次有感地震使用本模型进行极震区烈度预测。通过中国地震台网公布的地震速报信息，将地震震级和震源深度代入训练好的ELM模型，计算极震区烈度，结果见表3。

从该表中可以看出预测结果比较理想，但是新疆地区的预测结果偏差普遍较大，这可能是与该地区的场地条件、建筑物抗震能力有关，就需

要今后多收集新疆地区的历史震例建立专门的预测模型。但不影响该模型的整体适用性。

3.2 参数权值分析

本文采用熵权法进行参数权值分析，熵权法是根据参数变异性的大小来综合确定客观权重。通常若某个参数的信息熵越小，其变异程度就越大，包含的信息量就越多，在评价中影响的程度就越大，其权重就越大；相反某个参数的信息熵越大，其变异程度就越小，包含的信息量就越少，在评价中影响的程度就越小，其权重就越小。操作步骤如下：

表3 模型预测结果和实际结果的对比

Table 3 Comparison of model prediction of ELM results and real results

序号	地震时间	地点	震级	震源深度/km	极震区烈度	计算
1	2013-04-20	四川庐山	7.0	13	IX	8.71
2	2014-02-12	新疆于田	7.3	12	IX	9.93
3	2014-05-24	云南盈江	5.6	12	VIII	7.88
4	2014-05-30	云南盈江	6.1	12	VIII	7.97
5	2014-08-03	云南鲁甸	6.5	8	IX	8.70
6	2014-10-07	云南景谷	6.6	16	VIII	8.27
7	2014-11-22	四川康定	6.3	18	VIII	8.00
8	2015-03-14	安徽阜阳	4.3	4	VI	5.88
9	2015-03-30	贵州剑河	5.5	7	VII	6.86
10	2015-07-03	新疆皮山	6.5	10	VIII	7.57
11	2016-01-21	青海门源	6.4	10	VIII	8.00
12	2016-01-21	青海门源	6.4	10	VIII	8.00
13	2016-07-31	广西苍梧	5.4	10	VII	6.90
14	2016-11-25	新疆阿克陶	6.7	10	IX	8.48
15	2017-03-27	云南漾濞	5.1	12	VI	6.10
16	2017-05-11	新疆塔什库尔干	5.5	8	VII	6.68
17	2017-08-08	四川九寨沟	7.0	20	IX	8.65
18	2017-08-09	新疆精河	6.6	11	IX	8.00

(1)数据标准化。对于参数 $X_j=\{X_1, X_2, \cdots, X_n\}$ 按式(5)进行处理后得到 $Y_j=\{Y_1, Y_2, \cdots, Y_n\}$ 。

$$Y_j=\frac{X_i-\min(X_i)}{\max(X_i)-\min(X_i)} \quad (5)$$

(2)确定参数的信息熵。根据熵的定义,参数的信息熵 E_j 为

$$E_j=-\ln(n)^{-1}\sum_{i=1}^n p_{ij}\ln p_{ij} \quad (6)$$

$$p_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (7)$$

(3)确定参数的权重。对于 k 个参数,先计算各参数的信息熵 E_j 然后计算权重 W_j 为

$$W_j=\frac{1-E_j}{k-\sum E_j} \quad (j=1,2,\cdots,k) \quad (8)$$

得到参数的信息熵和权重如表4。可以看出震级的信息熵比震源深度的更大,说明其变异程度更小,包含的信息量更少,对极震区烈度的影响程度比震源深度更小。

表4 参数的信息熵和权重

Table 4 The information entropy and weight of parameters

参数1	信息熵	权重	参数2	信息熵	权重
震级	0.980	0.348	震源深度	0.963	0.652

4 结论与展望

收集了2013年以前多次5级以上地震案例,首先分析震级和震源深度与极震区烈度的关系,然后以震级、震源深度作为输入参数,以极震区烈度作为输出参数,利用ELM建立预测模型后对

2013年后18个地震案例进行预测,最后分析了震级和震源深度的信息熵和权重,主要结论如下:

(1)震级和震源深度与极震区烈度分别为正相关和负相关性关系,即极震区烈度随着震级的上升而增加,随着震源深度的上升而下降。

(2)该ELM预测模型的预测结果精度比现有广义线性模型预测方法提高约20%。

(3) 震级的信息熵比震源深度的更大, 其变异程度更小, 包含的信息量更少, 对极震区烈度的影响程度比震源深度更小。

(4) 局部地区预测结果不甚理想, 针对这些区域的专门预测模型是下一步努力的方向。由于极震区烈度不仅与震级和震源深度有关, 更与震源机制, 地震波传播介质、路径, 局部场地条件等因素有关, 因此基于多参数的更加精确预测模型也应给予更多重视。

参考文献

- [1] 聂高众, 徐敬海. 基于震源深度的极震区烈度的评估模型[J]. 地震地质, 2018, 40(3): 612-621.
- [2] 聂高众, 安基文, 邓砚. 地震应急灾情服务进展[J]. 地震地质, 2012, 34(4): 782-791.
- [3] Davison C. On scales of seismic intensity and on the construction and use of isoseismal line[J]. BSSA, 1921, 11(2): 95-129.
- [4] 谢毓寿. 新的中国地震烈度表[J]. 地球物理学报, 1957, 6(1): 35-47.
- [5] 胡聿贤. 地震工程学(第二版)[M]. 北京: 地震出版社, 2006: 44-47.
- [6] 王德才, 倪四道, 李俊. 地震烈度快速评估研究现状与分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1772-1784.
- [7] Gutenberg B, Richter C F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1942, 32(3): 163-191.
- [8] 傅承义, 刘正荣. 论确定震源深度的宏观方法[J]. 科学记录, 1960, 4(5): 350-354.
- [9] 许卫晓. 烈度分布快速评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [10] LAN Y, SOH Y C, HUANG G B. Ensemble of on-line sequential extreme learning machine[J]. Neurocomputing, 2009(72): 3391-3395.
- [11] 辛元芳, 姜媛媛. 改进的瓦斯突出预测模型[J]. 煤炭技术, 2014, 33(10): 11-13.
- [12] 姜媛媛, 刘柱, 罗慧, 等. 锂电池剩余寿命的 ELM 间接预测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 179-185.
- [13] Blake A. On the estimation of focal depth from macroseismic data[J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 1941, 31(3): 225-231.