

# 一种场地 $V_{S30}$ 经验估计最佳模型的选用方法 ——以新疆地区为例

米欣雪<sup>1,2</sup>, 张雨婷<sup>1,2</sup>, 任叶飞<sup>1,2</sup>, 王宏伟<sup>1,2</sup>, 温瑞智<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 在计算工程场地的  $V_{S30}$  值时常由于钻孔深度的限制需要依赖经验模型进行外推估计, 大量学者进行了相关经验模型的研究, 不同方法之间计算结果存在差异且有些方法具有区域依赖性, 如何选用一个最适用于本地区的模型至今未有研究给出合理方法. 本文首先简要介绍了目前常用的 5 种经验外推模型, 以新疆地区为例, 利用钻孔深度超过 30 m 的工程钻孔数据计算各模型在不同深度处的回归系数; 接下来, 利用区域地质图划分出 6 个地质单元, 基于相同地质条件下场地钻孔的岩性剖面具有相似分布的假设, 通过对不同单元下的钻孔数据进行对数正态性检验, 判断 5 种经验模型在不同地质单元下的适用性. 得到以下结果: (1) 地质年代为二叠纪及二叠纪之前的工程场地在外推模型选取上宜采用翠川三郎及野木淑裕提出的双剪切参数模型(MN15); (2) 中生代场地对非线性(二次)对数外推模型表现出最显著的适用性(BEA11); (3) 新生代场地采用非线性对数外推模型计算结果明显优于其它模型(BEA11). 研究结果可为模型的潜在使用者提供有价值的辅助信息, 也可以为我国其他地区  $V_{S30}$  外推经验模型的开发研究提供理论参考.

**关键词:** 地质年代;  $V_{S30}$ ; 模型评估; 对数正态检验

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0288-05

## A method for selecting the optimal model of $V_{S30}$ empirical estimation: A case study of Xinjiang Region

MI Xinxue<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuting<sup>1,2</sup>, REN Yefei<sup>1,2</sup>, WANG Hongwei<sup>1,2</sup>, WEN Ruizhi<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Due to the limitation of the drilling depth, it is necessary to rely on the empirical model for extrapolation estimation while calculating the  $V_{S30}$  value of the engineering site. A large number of professors have conducted research on relevant empirical models. The results of different methods are different and some methods have regional dependence. How to choose a model that is most suitable for the region has not yet been studied to give a reasonable method. In this paper, five commonly used empirical extrapolation models are briefly introduced firstly, and at the same time taking Xinjiang area as an example, the regression coefficients of each model at different depths are calculated by using engineering borehole data with drilling depth more than 30 m. Next, the regional geological map is used to divide 6 geological units. Based on the assumption that the lithological profiles of the site drilling under the same geological conditions have similar distributions, the lognormality test of the drilling data under different units is used to determine the applicability of the five empirical models under different geological units. The following results are obtained: (1) the double shear parameter model proposed by Saburo Tsuikawa and Shuyu Nogi (MN15) should be used in the selection of the extrapolation model of the engineering site with geological age of Permian and pre-Permian periods; (2) Mesozoic sites show the most significant applicability to

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0115700); 国家自然科学基金(51878632); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019E036)

第一作者: 米欣雪(1998-), 女, 硕士生, 主要从事场地分析相关研究. E-mail: m13943790443@163.com

通信作者: 任叶飞(1983-), 男, 研究员, 主要从事工程地震相关研究. E-mail: renyefei@iem.net.cn

nonlinear (quadratic) logarithmic extrapolation models (BEA11); (3) the calculation results of the nonlinear logarithmic extrapolation model of the Cenozoic site are significantly better than those of other models (BEA11). The research results can provide valuable auxiliary information for potential users of the model, and can also provide theoretical reference for the development and research of  $V_{S30}$  extrapolated empirical models in other regions of China.

**Key words:** geological age;  $V_{S30}$ ; model evaluation; lognormal test

$V_{S30}$  (地表以下 30 m 范围内的平均剪切波速) 是目前较为常用的一项用以量化不同场地条件下的场地放大反应的指标. 与其他岩土勘探参数 (场地周期  $T_0$ 、场地参数  $Z_{1.0}$  等) 相比,  $V_{S30}$  的获取成本相对较低, 且计算相对更加简单. 获取正确可靠的  $V_{S30}$  值需要依赖工程钻孔现场波速测试, 然而由于现场施工条件的限制或由于我国抗震设计规范中对于场地确定的标准 (定义场地类别时采用覆盖土层厚度与 20 m 较小值内的等效剪切波速作为指标), 工程钻孔的勘测深度常常未能达到 30 m. 在这种情况下  $V_{S30}$  值一般依据经验模型进行外推估计, 常用的外推模型有常数外推模型, 即假定终孔深度处的剪切波速至 30 m 处的剪切波速为一常数值; Boore 等 (2004) 对加州地区深度大于 30 m 的钻孔进行分析发现  $V_{Sd}$  (地表至地表深度  $d$  处的平均剪切波速) 与  $V_{S30}$  的呈对数线性相关, 且相关系数随着深度的增加而增大, 提出了对数线性外推模型 (B04 模型); Boore 等 (2011) 随后又在对日本地区的工程钻孔研究时发现使用线性外推模型会明显低估  $V_{S30}$  值, 因此, 在对数线性外推模型的基础上增加了二次项, 提出了对数非线性 (二次) 模型 (BEA11 模型). Dai 等 (2013) 针对 California、日本 KiK-net、Turkey 三个数据集进行了全面分析, 发现  $V_{[d,30]}$  (地表以下  $d$  m 至 30 m 范围内的平均剪切波速) 与  $V_{Sd}$  (地表至终孔深度  $d$  范围内的平均剪切波速) 的相关性较弱, 因此, 提出一种新的条件独立外推模型 (DEA13 模型). 翠川一郎和野木淑裕 (2015) 使用日本 KiK-net 和城市区域的钻孔数据进行了 S 波速度测试, 发现此数据集土质硬度较高, 因此, 研究了  $V_{S30}$  与  $V_{Sd}$  的关系以及从浅层地面数据中获得的其他参数的影响, 如  $V_{S(d)}$  (地表深度  $d$  处的剪切波速), 并提出了更可靠的  $V_{S30}$  估计公式, 得到  $V_{S30}$  与  $V_{Sd}$  和  $V_{S(d)}$  相关的二元对数模型. 其他经验外推模型限于篇幅, 这里不再一一枚举. 这些外推模型实际上针对不同地区都存在区域适用性, 如何选用一个最适用于本地区的模型至今未有研究给出合理方法.

本文以新疆地区为例, 利用收集的工程钻孔数据, 针对目前常用的 5 种经验模型, 回归模型系

数; 考虑不同地质单元的岩性差异基于正态分布检验参数提出一种新的模型适用性评价方法, 对新疆地区不同地质年代区域内的 5 种经验模型适用性进行优选评估, 给出模型优选的建议. 研究结果可为模型的潜在使用者提供有价值的辅助信息, 给出的方法也可为我国其他地区  $V_{S30}$  外推经验模型的选用提供技术思路.

## 1 外推模型介绍与回归

### 1.1 经验外推公式

$V_{S30}$  是地表以下 30 m 范围内土层的平均剪切波速, 当钻孔深度大于 30 m 时可以直接利用公式计算, 当钻孔深度不足 30 m 时需要按照一定规律进行外推得到  $V_{S30}$ . 假设钻孔的勘探深度仅仅达到了  $d$  m ( $d < 30$  m), 各外推模型的计算方法如下:

#### (1) 常数外推模型 (BCV)

常数外推方法是较为简单且较为常用的一种  $V_{S30}$  估计方法为

$$V_{S(30)} = V_{S(d)} \quad (1)$$

式中:  $V_{S(d)}$  为终孔深度土层对应的剪切波速, 单位为 m/s;  $V_{S(30)}$  为深度 30 m 处土层对应的剪切波速, 单位为 m/s.

#### (2) 线性对数外推模型 (B04)

$$\ln(V_{S30}) = a_1 + a_2 \ln(V_{Sd}) \quad (2)$$

式中:  $V_{Sd}$  为地表至终孔深度  $d$  范围内的平均剪切波速, 单位为 m/s;  $a_1$  和  $a_2$  为线性回归系数.

#### (3) 非线性对数外推模型 (BEA11)

$$\ln(V_{S30}) = b_1 + b_2 \ln(V_{Sd}) + b_3 \ln^2(V_{Sd}) \quad (3)$$

式中:  $b_1$ 、 $b_2$  和  $b_3$  为非线性 (二次) 回归系数.

#### (4) 条件独立模型 (DEA13)

假设深度  $d$  m 至 30 m 范围内的平均剪切波速值与深度  $d$  处的剪切波速值相关, 有

$$\ln(V_{[d,30]}) = c_1 + c_2 \ln(V_{S(d)}) \quad (4)$$

由此,  $V_{S30}$  可以计算为

$$V_{S30} = 30 / (t_{(d)} + (30 - d) / V_{[d,30]}) \quad (5)$$

式中:  $V_{[d,30]}$  为地表以下  $d$  m 至 30 m 范围内的平均剪切波速, 单位为 m/s;  $t_{(d)}$  为地表至钻孔最底层剪切波速传播时间, 单位为 s;  $c_1$  和  $c_2$  为线性回归系数.

### (5) 双剪切波速参数模型(MN15)

$V_{S30}$  与深度  $d$  处的剪切波速和  $d$  m 范围内的平均剪切波速相关, 有

$$\ln(V_{S30}) = d_1 + d_2 \ln(V_{Sd}) + d_3 \ln(V_{S(d)}) \quad (6)$$

式中,  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$  为二元线性回归系数。

### 1.2 经验模型回归

由于经验回归模型一般存在区域性差异, 应用模型时需采用本地区的数据对模型系数进行回归, 选用钻孔深度大于 30 m 的数据, 计算各模型不同深度处的回归系数, 且有研究表明钻孔深度  $d$  小于 5 m 时  $V_{Sd}$  与  $V_{S30}$  的相关性较差, 因此计算深度从 5 m 开始, 以 1 m 为间隔回归各深度处的系数。常数外推模型假设模型的波速变化为常数, 无需进行回归计算, 余下四个模型的回归系数随深度的变化, 见图 1。

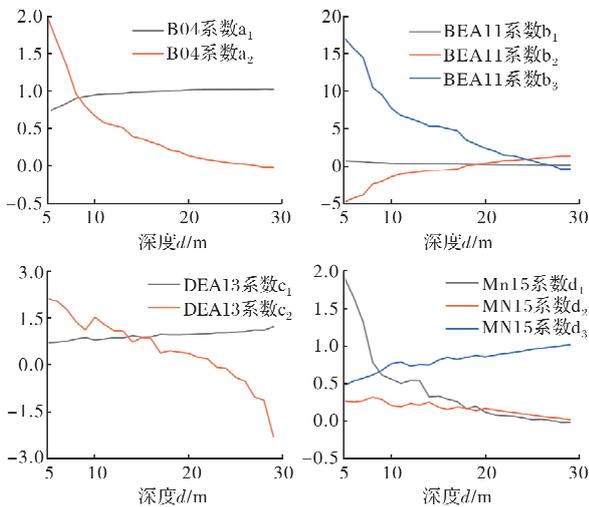


图 1 四种外推模型拟合系数随深度变化曲线

Fig. 1 Curves of fitting coefficients of four extrapolation models with depth

## 2 模型选取方法

### 2.1 方法介绍

正态分布可以称为常态分布, 若一组数据符合正态分布则可认为这组数据具有集中性和整体性, 可将这组数据看作一个整体, 具有相同的性质。

正态性检验是利用已有的观测数据推断整体数据是否服从正态分布的检验。本文首先对钻孔深度大于 30 m 的数据进行对数正态性检验, 若通过检验则认为钻孔的平均剪切波速对数值分布密集, 可以假设同类型的地质条件下浅层土体具有相似的成因与岩性分布, 场地  $V_{S30}$  值较为相近, 那么可通过判断由经验模型估计的  $V_{S30}$  值是否符合正

态分布来评估模型的适用性。

本文结合了偏度-峰度系数方法以及 Jarque-Bera 检验对数据进行对数正态分布检验。对于样本为  $n$  的钻孔序列  $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ , 偏度系数  $\sqrt{g_1}$  和峰度系数  $g_2$  的计算公式如下:

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^k \quad (k=2, 3, 4) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sqrt{g_1} = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \\ g_2 = \frac{m_4}{m_2^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\bar{x}$  和  $s$  为钻孔序列的均值和标准差。

在样本数足够大的情况下, 符合严格对数正态分布时, 偏度系数应等于 0, 峰度系数应小于 3。由于正态性检验要求严格很难满足, 所以可将条件放宽泛, 如果偏度系数绝对值小于 3 并且峰度系数绝对值小于 10, 则说明数据虽然不是绝对正态, 但基本可接受为正态分布。本文在计算偏度和峰度的基础上, 添加一项辅助参数即 Jarque-Bera 检验, 对样本数据是否具有符合正态分布的偏度和峰度的拟合优度进行检验, 可以计算出这组数据符合正态分布的概率, 其中  $p$  值是 Jarque-Bera 检验的衡量标准,  $p$  值为一组数据符合正态分布的概率。

### 2.2 地质分类

由于对模型的分析评价是基于同地质条件下土层结构具有相似分布, 因此需先对地质进行单元划分, 具体分析如下:

地质年代为二叠纪及二叠纪之前的钻孔沉积年代久远, 多为花岗岩等坚硬的岩石, 将这些钻孔按照地质年代为古生代(Pz)一同进行分析; 中生代(Mz)包括白垩纪、侏罗纪及三叠纪, 主要为细砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩等沉积岩, 土层结构分布相似, 可分为一组单元进行分析; 新生代除第四纪外的新近纪(N)与古近纪(E)单元, 其成分主要也为砂岩、砾岩等沉积岩, 但相对中生代单元沉积年代较短, 岩石结构相对松散, 因此将其划分为一个单元; 而对于新生代(Q)地质成因较为复杂, 沉积方式不同及沉积时间不同导致其土层成分具有很大差异, 但由于钻孔数量的限制无法对成因进行细分, 因此仅按照年代将第四纪(Q)的钻孔细分为更新世(Qp)、更新-全新世(Qp-Qh)以及全新世(Qh)。

本文共收集了新疆地区千余个工程场的钻孔数据, 鉴于一项工程项目当中的钻孔会呈现集中

性的特点, 场地类别会出现重叠的情况, 所以我们需要进一步对以上钻孔进行筛选, 将同属一项项目钻孔个数大于三个及三个以上的钻孔, 选取此项目下所有钻孔中  $V_{S30}$  的中位值作为这个项目的代表钻孔. 若这些钻孔中存在某一  $V_{S30}$  值与其它同工程钻孔  $V_{S30}$  值偏差极大, 则将这个钻孔不列入计算范围内. 本文根据以上分类原则筛选后的钻孔地理位置及各地质年代分类下钻孔个数如图 2, 3 所示. 其中大于 30 m 的钻孔有 137 个, 小于 30 m 的钻孔有 299 个.

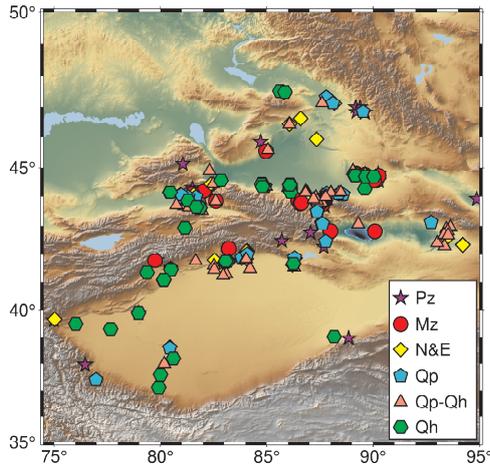


图 2 筛选后小于 30 m 钻孔分布图

Fig. 2 Distribution of drill holes less than 30 m after screening

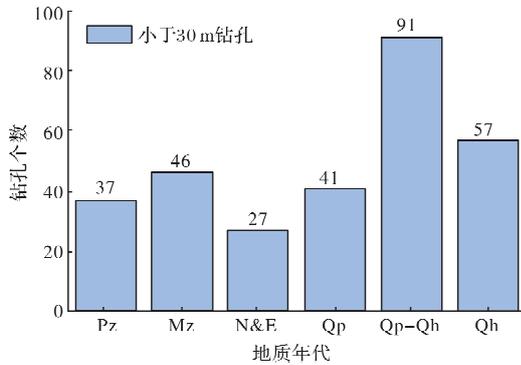


图 3 筛选后的小于 30 m 钻孔个数图

Fig. 3 Number of drilled holes of less than 30 m after screening

### 2.3 结果分析

针对新疆地区所有大于 30 m 部分数据, 将其分类后由以上公式(8)~(9)计算可得偏度系数、峰度系数结果如下表 1. 表 1 可见, 所有地质年代的偏度系数均在 0~3 范围内, 峰度系数均在 0~10 范围内, 因此可基本认为六种地质年代下的大于 30 m 的工程钻孔数据符合对数正态分布, 场地  $V_{S30}$  对数值较为相近, 地质年代与  $\log(V_{S30})$  具有较强相关性. 因此做出以下假设, 在同一地质单元

下, 若由某一外推经验模型所得的数据较其它组数据更符合对数正态分布, 则这组数据与真实  $V_{S30}$  相关性更强, 由这一模型所得出的  $V_{S30}$  估计值更可以代表这个地质单元.

表 1 六种地质年代对数正态检验结果

Tab. 1 Results of lognormal test for six geological ages

地质年代	Pz	Mz	N&E
偏度	-0.370 7	1.413 9	0.448 7
峰度	2.063 0	4.339 8	2.005 4
P 值	0.500 0	0.020 7	0.500 0
地质年代	Qp	Qp-Qh	Qh
偏度	-0.050 2	1.187 0	1.097 6
峰度	1.140 1	4.336 6	3.753 4
P 值	0.282 5	0.002 0	0.003 3

### 3 模型优选结果

对小于 30 m 的钻孔, 根据上述阐述进行地质年代分类下, 对每种地质年代分类下的钻孔进行以上五种外推, 得到外推结果后, 计算偏度、峰度值以及正态分布检验中 Jarque-Bera 检验, 选取各个地质年代对应下的最优外推模型, 见图 4. 其中, 图中偏度=0、峰度=3 以及  $p$  值参考线代表在对数正态检验中偏度应在 0 左右波动, 越接近 0 越优; 峰度应尽量在 0~3 范围内波动, 越小越优;  $p$  值需要处于 0-1 范围内, 越接近 1 越优.

研究表明在同一种地质条件下, 五种外推模型计算得到的数据分布较为接近, 但仍有细微差异, 因此可以根据偏度、峰度和 Jarque-Bera 检验对每组数据进行更细致的分析, 得到以下结论: (1)地质年代为二叠纪及二叠纪之前的钻孔在外推模型选取上, 应用翠川三郎及野木淑裕(2015)提出的双剪切参数模型(MN15)得到的外推数据峰度和偏度都是最小的, 可以认为这种外推模型为最优解; (2)中生代钻孔外推数据 B04、BEA11、DEA13 和 MN15 的  $P$  值相同, 但综合考虑偏度峰度系数后, BEA11 模型的对数正态分布情况更优于其它几种模型; (3)除第四纪外的新生代部分 BEA11 模型结果偏度最接近 0 且峰度值最小, 这验证了 BEA11 在新生代地质年代下的适用型; (4)第四纪钻孔中更新世、更新-全新世以及全新世三种分类中, 可以明显看到 BEA11 的外推数据峰度最小且偏度最接近 0, 因此可认为第四纪的钻孔应用 BEA11 外推模型得到的结果更接近真实值.

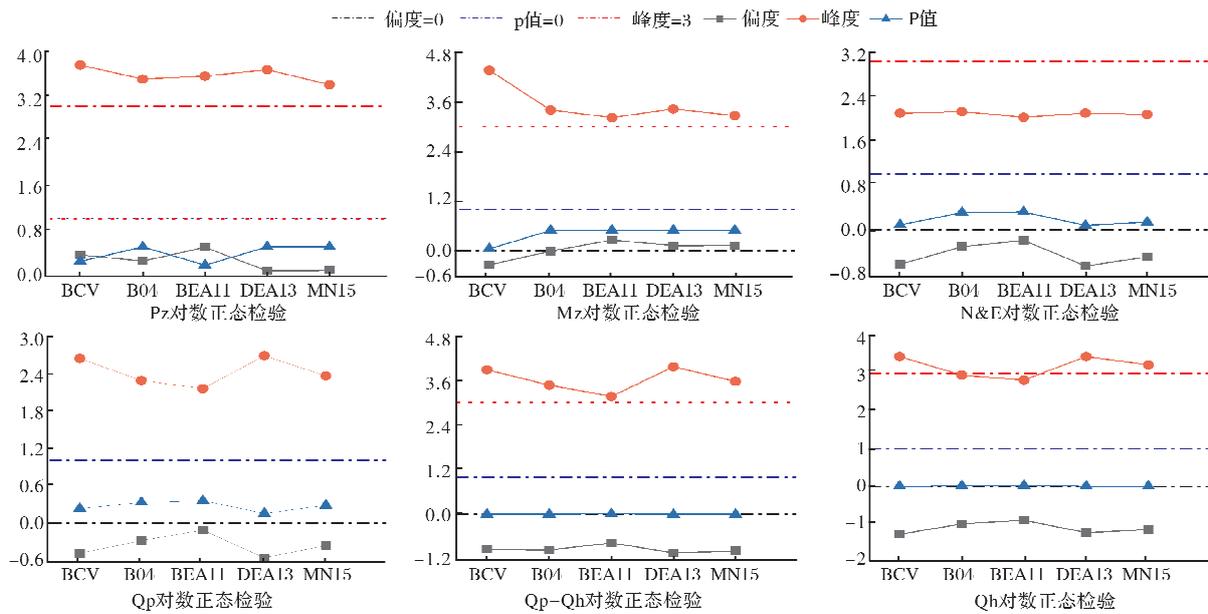


图 4 六种地质年代下各外推模型判断结果图

Fig. 4 Judgment results of each extrapolated model under six geological ages

## 4 结语

本文首先针对目前常用的 5 种经验外推模型,以新疆地区为例,利用钻孔深度超过 30 m 的工程钻孔数据计算了各模型在不同深度处的回归系数;然后基于相同地质条件下场地钻孔的岩性剖面具有相似分布的假设,通过对不同单元下的钻孔数据进行对数正态性检验,对新疆地区 6 类地质年代区域内的 5 种经验模型适用性进行了优选评估,给出了各地质年代区域内最优选的经验模型建议。研究结果可为模型的潜在使用者提供有价值的辅助信息,给出的方法也可为我国其他地区  $V_{S30}$  外推经验模型的选用提供技术思路。

## 参考文献 References

- [1] 史大成. 基于 GIS 的场地分类新方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.  
SHI Dacheng. Research on a new method of site classification based on GIS[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2009.
- [2] 张雨婷. 基于我国地形与地质条件的场地分类方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020.  
ZHANG Yuting. Research on site classification method based on topography and geological conditions in China[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020.
- [3] BOORE, D. M. Estimating  $V_{S30}$  (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m)

[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 591-597.

- [4] BOORE, D. M, E. M. THOMPSON and H. CADET. Regional correlations of  $V_{S30}$  and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6):3046-3059.
- [5] DAI Z., LI, X. HOU C. A shear-wave velocity model for  $V_{S30}$  estimation based on a conditional independence property[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(6):3354-3361.
- [6] SUKAWA SABURO, NOKI SHUYU. How to estimate the average S wave velocity of the ground up to a depth of 30 m from shallow data[J]. Proceedings of the Japan Association for Earthquake Engineering, 2015, 15(2):91-96
- [7] 缪铃生. 概率与数理统计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1997.  
MIAO Quansheng. Probability and mathematical statistics[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1997.
- [8] 梁小筠. 正态性检验[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997.  
LIANG Xiaojun. Normality Test[M]. Beijing: China Statistics Press, 1997.
- [9] 罗文海, 王玖, 韩春蕾等. 基于 SPSS 的正态性检验方法的选择[J]. 中国医院统计, 2015, 22(1):48-51.  
LUO Wenhai, WANG Jiu, HAN Chunlei, et al. Selection of Normality Test Method Based on SPSS[J]. Chinese Hospital Statistics, 2015, 22(1):48-51.

(编辑 桂智刚)