

党鹏飞,刘启方.新疆乌鲁木齐地区  $v_{S30}$  经验估计研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1324-1331.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1324

DANG Pengfei, LIU Qifang. Empirical Estimation of  $v_{S30}$  in Urumqi Area of Xinjiang[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1324-1331. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1324

## 新疆乌鲁木齐地区 $v_{S30}$ 经验估计研究

党鹏飞, 刘启方

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

**摘要:** 从新疆乌鲁木齐市 2004—2015 年得到的 841 个钻孔中选择深度达 30 m 以下且钻孔资料记录完整的有效钻孔 123 个, 通过计算 5~30 m 范围内不同深度的等效剪切波速, 分别利用线性拟合、二次拟合和三次拟合对各深度  $v_S(d)$  及其  $v_{S30}$  进行拟合。通过对比发现, 三个方程的拟合误差都随深度的增加而减少, 且三次拟合方程的误差始终小于同深度的线性拟合和二次拟合方程, 因此推荐使用三次拟合方程来估计新疆乌鲁木齐市钻孔的  $v_{S30}$  值。同时将此结果和 Boore 的结果进行比较后发现, 不同深度处的等效剪切波速  $v_S(d)$  和  $v_{S30}$  具有地域差异性; Boore 得到的结果在钻孔深度小于 20 m 时明显高估  $v_{S30}$  值, 拟合曲线偏离实际数据点较远, 所以本文拟合结果更适用于新疆乌鲁木齐市。综合比较可知, 三次拟合得到的研究结果可以为新疆乌鲁木齐市钻孔深度不足 30 m 的地区求解  $v_{S30}$  值提供参考。最后, 利用新疆克拉玛依市 2004—2015 年钻孔资料检验三个拟合公式对克拉玛依市的适用性, 发现深度越接近 30 m, 误差越小; 线性模型和二次模型相对来说比较可靠, 平均误差接近于 0, 并且对深度大于 10 m 的钻孔有高估现象; 三次模型相对来说误差比较大, 并且几乎在所有深度都有低估现象。

**关键词:** 新疆乌鲁木齐; 克拉玛依市;  $v_{S30}$ ; 土层剪切波速; 钻孔资料

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1324-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1324

## Empirical Estimation of $v_{S30}$ in Urumqi Area of Xinjiang

DANG Pengfei, LIU Qifang

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In this study, 123 effective drilling holes in Urumqi, Xinjiang, were selected from 841 drilling holes obtained during 2004—2015. The boreholes were below 30 m and recorded well. Through the calculation of equivalent shear wave velocities at depths of 5—30 m, the regression equation coefficients were separately obtained by linear fitting, square fitting, and cubic fitting. By comparison, it was found that the fitting error of the three equations decreased with the increase of depth, and the error of the cubic term was always less than those of the linear equation and the square equation at the same depth. Therefore, in this paper, the cubic equation is suggested as an empirical formula to estimate the  $v_S$  values of boreholes in Urumqi area. By comparing

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务专项(2016A04); 中国国家自然科学基金(51378479, 51078337)

第一作者简介: 党鹏飞(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事高频地震动模拟研究方面的工作。E-mail: iempengfeid@qq.com。

the results with the results of Boore, it is shown that the equivalent shear wave velocity  $v_s(d)$  and  $v_{s30}$  at different depths have regional differences. The research results in this paper can provide references for solving the  $v_{s30}$  of boreholes with depths less than 30 m in Urumqi, Xinjiang. Finally, the applicability of the three fitting formulas to Karamay is tested using borehole data in Karamay from 2004 to 2015. It is found that the closer the depth is to 30 m, the smaller the error. Moreover, the linear model and the square model are relatively reliable, with an average error close to 0, and the boreholes at depths greater than 10 m are overestimated. The cubic model features a relatively large error and its results are almost underestimated at all depths.

**Keywords:** Urumqi in Xinjiang; Karamay city;  $v_{s30}$ ; shear wave velocity of soil; borehole data

## 0 引言

土层剪切波速作为场地类别判定和确定上覆土层厚度的重要指标,在工程勘察、地震工程领域有着广泛的应用。目前我国建筑抗震规范<sup>[1]</sup>使用  $v_{s20}$  和覆盖层厚度作为场地分类判别的两个主要参数,但是在国外许多地方都直接利用  $v_{s30}$  作为其参数,例如美国的 NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) 规范中场地分类主要以  $v_{s30}$  为标准,美国太平洋地震工程研究中心 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)、美国地质调查局 USGS 和南加利福尼亚地震中心 SCEC 共同建立的美国新一代地震动衰减关系中各模型主要使用  $v_{s30}$  为场地参数。这种差异的存在,使得国内的广大研究者在选择、应用和对比国外研究成果时会遇到场地分类和参数不统一等很多问题。然而限于测试技术、场地环境的影响,我国很多地区的钻孔深度都不足 30 m,因此如何准确预测  $v_{s30}$  成为国内学者的重要研究方向。近年来随着地震工程的发展,国内学者基于大量剪切波波速和钻孔深度数据,给出了剪切波速和深度的数学经验公式<sup>[2-4]</sup>,主要思路是按照各种土类分别给出其剪切波速和土层深度的拟合经验关系;也有少量基于各深度等效剪切波速和  $v_{s30}$  的拟合经验公式<sup>[5-6]</sup>。

本文共收集了新疆乌鲁木齐市 2004—2015 年的钻孔 841 个,其中 22 个钻孔资料缺少部分信息,814 个钻孔具有详细的剪切波速分布资料,695 个钻孔钻至基岩,而等效剪切波速大于 760 m/s 的钻孔只有 8 个。本次所选的 841 个钻孔所在场地主要以粉质黏土、粉土以及不同粒径的砂土为主,还有少部分钻孔所在场地包含有砾石和风化砂岩等。为了给出适合新疆乌鲁木齐地区的  $v_s(d)$  (不同深度的等效剪切波速) 和  $v_{s30}$  的经验公式,本文选择 841 个钻孔中 123 个资料完整且深度大于 30 m 的钻孔,计算 5~30 m 范围内各深度的等效剪切波速值,并利用

最小二乘拟合给出线性方程、二次方程和三次方程的系数。

## 1 钻孔数据

在收集到的钻孔数据中(钻孔深度-数量关系见图 1),深度最深的 105.4 m,最浅的仅有 3 m。深度小于 30 m 的钻孔 600 个,占比 71%;深度大于 80 m 的钻孔 42 个,占比 4.99%;深度在 20~30 m 间的钻孔 179 个;深度大于 30 m 的钻孔 223 个。本文选取其中 123 个深度间隔均匀、钻孔资料完整的钻孔作为研究对象,其分布如图 2 所示。按照美国 NEHRP 规范提出的场地分类标准,这 123 个钻孔均位于 C 类场地。

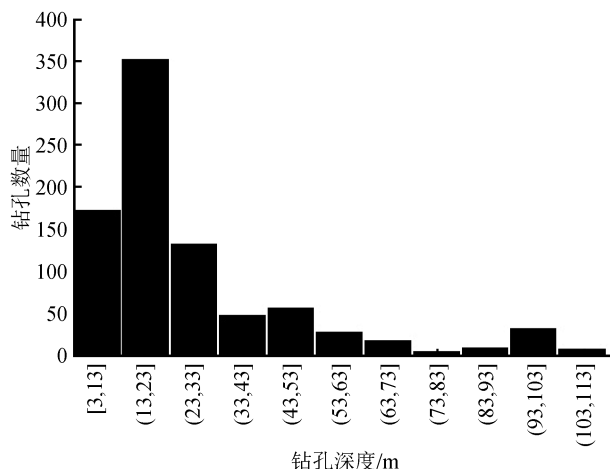


图 1 不同深度钻孔数量分布图

Fig.1 Number distribution of boreholes at different depths

此外,本文还收集了新疆克拉玛依市 2004—2015 年的 88 个钻孔,选取其中深度达 30 m、钻孔资料完整、经纬度数据完备的钻孔 11 个进行对比研究。其具体分布见图 3。

## 2 拟合方法

目前国内外使用的回归方法是在大量剪切波速

数据的基础上,对一些事先假设的数学函数公式进行拟合,从而得到等效剪切波速值,主要有线性拟合、多项式拟合、常数外推法等。

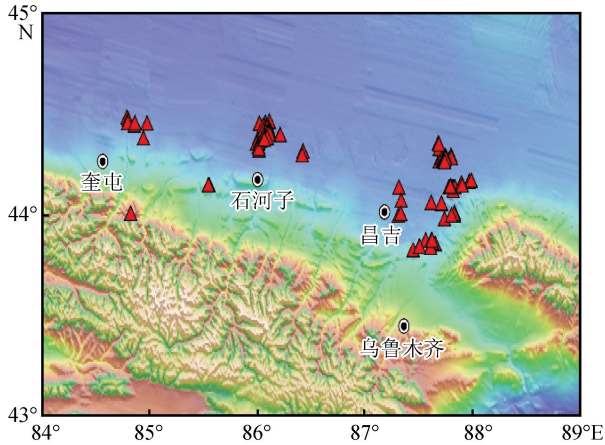


图2 乌鲁木齐市钻孔分布图

Fig.2 Boreholes distribution in Urumqi

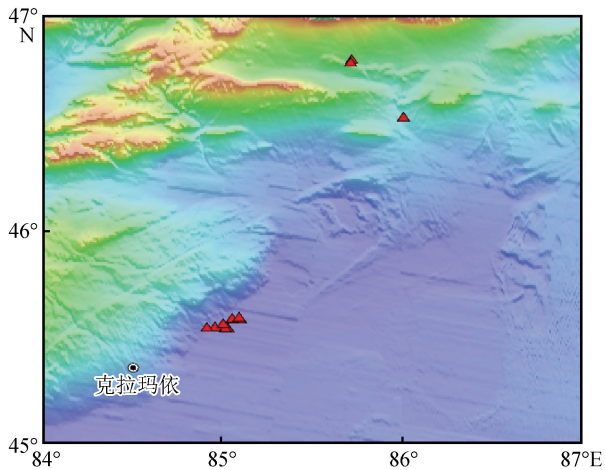


图3 克拉玛依市钻孔分布图

Fig.3 Boreholes distribution in Karamay

## 2.1 $v_{s30}$ 的计算方法

$v_{s30}$  是距离地表 30 m 处的平均剪切波速值,其计算公式为:

$$v_{s30} = 30/t(30) \quad (1)$$

$$t(30) = \sum \frac{dz}{v_s(z)} \quad (2)$$

式中: $t(30)$  表示剪切波在地表至 30 m 深度间的传播时间(单位:s); $dz$  是某一土层的厚度; $v_s(z)$  是该土层的剪切波速(单位:m/s)。

## 2.2 $v_{s30}$ 预测值函数选择

式(1)和式(2)也可以作为一种方法来计算深度未达 30 m 的钻孔的  $v_{s30}$  预测值,称为简单延拓或者常数外推法,即假设钻孔底层至 30 m 深度的介质未发生变化或者几乎相等,此时钻孔底端深度的剪

切波速值即认为是该钻孔 30 m 深处的剪切波速值。但由于此方法的假设与实际地质环境相差较大,因此计算误差也较大,只有钻孔深度接近 30 m 时才较为合理。

线性拟合又称速度梯度延拓或者对数外推法,首先由 Boore 等<sup>[7]</sup> 基于如下假设提出:在某地区或者地质构造相似的国家或者地区,某深度的等效剪切波速和  $v_{s30}$  存在一定的函数关系。Boore<sup>[8]</sup> 利用深度 30 m 以上的 135 个钻孔回归得到了美国加州地区的  $v_{s30}$  值。其使用的线性公式为:

$$\lg(v_{s30}) = a + b \lg(v_s(d)) \quad (3)$$

式中: $v_s(d)$  是距离地表  $d$  深度的等效剪切波速; $a$ 、 $b$  为线性模型系数; $v_{s30}$  为地表 30 m 处的等效剪切波速值(单位:m/s)。

应用 Boore<sup>[8]</sup> 的线性模型,对 123 个新疆乌鲁木齐市的钻孔数据进行处理,得到 5~30 m 不同深度的等效剪切波速值,通过最小二乘法拟合得到线性模型的系数(表 1)。

在此基础上,分别用二次模型和三次模型进行拟合,采用同样的方法得到模型系数,并列于表 2。图 4 绘制了几个不同深度的  $v_s(d)$  和  $v_{s30}$  的关系。

本文所使用的二次模型和三次模型公式分别为:

$$\lg(v_{s30}) = C_0 + C_1 \lg(v_s(d)) + C_2 \lg^2(v_s(d)) \quad (4)$$

$$\lg(v_{s30}) = C_0 + C_1 \lg(v_s(d)) + C_2 \lg^2(v_s(d)) + C_3 \lg^3(v_s(d)) \quad (5)$$

式中: $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  均为模型系数; $v_s(d)$  是距离地表  $d$  深度的等效剪切波速; $v_{s30}$  为地表 30 m 处的等效剪切波速值。

## 3 分析与讨论

由图 4 和表 2 可以看出,随着钻孔深度的增加,线性模型、二次模型和三次模型拟合误差越来越小,其中三次模型误差最小。图 5 给出了本文三个模型系数随深度变化的趋势线。为了便于比较,还在表 1 和图 6 中分别给出了 Boore<sup>[8]</sup> 的统计结果。

最后,本文从克拉玛依市地震小区划的 88 个钻孔中选择深度大于 30 m 的 11 个钻孔作为研究对象,计算这 11 个钻孔 5~30 m 不同深度的等效剪切波速,并利用上节拟合出来的三种模型进行检验,结果如图 7 所示。从图中可见,其拟合结果和乌鲁木齐地区有类似的性质,且随着钻孔深度的增加,拟合效果越来越好,并且三个模型在深度 28 m 时的拟合效果较一致。

表 1 乌鲁木齐市钻孔线性模型拟合系数

Table 1 Linear fitting coefficients of boreholes in Urumqi

$d/m$	本文线性模型系数			Boore <sup>[7]</sup> 拟合系数		
	$a$	$b$	$\sigma$	$a$	$b$	$\sigma$
5	0.575 8	0.819 2	0.055 1	-	-	-
6	0.501 7	0.847 8	0.050 3	-	-	-
7	0.456 2	0.863 7	0.046 4	-	-	-
8	0.413 6	0.878 1	0.044 2	-	-	-
9	0.360 1	0.896 7	0.042 3	-	-	-
10	0.313 1	0.913 2	0.040 3	0.042 1	1.029 2	0.071 3
11	0.261 4	0.931 9	0.037 1	0.022 1	1.034 1	0.064 7
12	0.218 5	0.947 2	0.033 9	0.012 6	1.035 2	0.059 4
13	0.195 2	0.954 1	0.031 2	0.014 2	1.031 8	0.054 8
14	0.174 8	0.959 9	0.029 3	0.012 3	1.029 7	0.050 1
15	0.158 4	0.964 0	0.027 4	0.013 8	1.026 3	0.045 9
16	0.144 4	0.967 4	0.025 7	0.013 9	1.023 7	0.042 2
17	0.124 2	0.973 4	0.023 4	0.019 6	1.019 0	0.039 4
18	0.113 3	0.975 8	0.021 7	0.024 9	1.014 4	0.036 4
19	0.098 7	0.979 7	0.019 5	0.025 6	1.011 7	0.033 2
20	0.092 2	0.980 4	0.017 5	0.025 4	1.009 5	0.030 2
21	0.076 9	0.984 7	0.015 4	0.025 3	1.007 2	0.027 0
22	0.062 8	0.988 7	0.013 7	0.026 9	1.004 4	0.024 1
23	0.051 9	0.991 2	0.012 0	0.022 2	1.004 2	0.020 8
24	0.041 7	0.993 6	0.010 3	0.016 9	1.004 3	0.017 7
25	0.032 4	0.995 6	0.008 9	0.011 5	1.004 5	0.014 7
26	0.025 1	0.996 8	0.007 3	0.006 6	1.004 5	0.011 5
27	0.012 6	1.000 0	0.005 8	0.002 5	1.004 3	0.008 4
28	0.005 7	1.001 0	0.004 2	0.000 8	1.003 1	0.005 5
29	0.001 5	1.001 0	0.002 1	0.000 4	1.001 5	0.002 7

注:-表示没有拟合相应的系数。

表 2 乌鲁木齐市钻孔二次模型和三次模型拟合系数

Table 2 Fitting coefficients of square model and cubic model of boreholes in Urumqi

$d/m$	本文二次模型系数				本文三次模型系数				
	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$\sigma$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\sigma$
5	5.331 0	-3.307 0	0.892 2	0.052 2	35.120 0	-41.890 0	17.510 0	-2.379 0	0.051 9
6	4.755 0	-2.819 0	0.787 8	0.048 0	34.390 0	-40.960 0	17.110 0	-2.321 0	0.047 7
7	4.411 0	-2.526 0	0.724 0	0.044 5	32.480 0	-38.400 0	15.970 0	-2.154 0	0.044 2
8	4.258 0	-2.400 0	0.696 6	0.042 5	30.740 0	-36.060 0	14.930 0	-2.001 0	0.042 3
9	3.946 0	-2.144 0	0.642 7	0.040 8	29.700 0	-34.720 0	14.340 0	-1.916 0	0.040 6
10	3.567 0	-1.833 0	0.577 5	0.039 1	29.970 0	-35.070 0	14.490 0	-1.937 0	0.038 9
11	3.113 0	-1.463 0	0.501 4	0.036 1	36.420 0	-43.190 0	17.890 0	-2.409 0	0.035 7
12	2.473 0	-0.938 9	0.393 2	0.033 3	37.270 0	-44.360 0	18.410 0	-2.487 0	0.032 7
13	2.127 0	-0.656 2	0.334 5	0.030 8	36.810 0	-43.800 0	18.180 0	-2.456 0	0.030 1
14	1.917 0	-0.487 5	0.299 7	0.028 9	38.010 0	-45.280 0	18.790 0	-2.537 0	0.028 1
15	1.598 0	-0.228 2	0.246 0	0.027 1	38.310 0	-45.630 0	18.920 0	-2.555 0	0.026 2
16	1.297 0	0.016 2	0.195 7	0.025 5	38.310 0	-45.640 0	18.920 0	-2.555 0	0.024 5
17	0.864 9	0.364 0	0.125 0	0.023 4	37.130 0	-44.220 0	18.350 0	-2.479 0	0.022 4
18	0.522 9	0.639 6	0.068 8	0.021 7	34.880 0	-41.470 0	17.240 0	-2.328 0	0.020 8
19	0.246 2	0.859 0	0.024 6	0.019 6	30.970 0	-36.690 0	15.290 0	-2.065 0	0.018 8
20	0.108 8	0.966 8	0.002 8	0.017 6	27.340 0	-32.240 0	13.470 0	-1.817 0	0.017 0
21	0.073 6	0.987 5	-0.000 6	0.015 4	25.030 0	-29.360 0	12.270 0	-1.651 0	0.014 8
22	0.045 0	1.003 0	-0.002 9	0.013 7	23.550 0	-27.500 0	11.490 0	-1.543 0	0.013 1
23	0.020 7	1.017 0	-0.005 1	0.012 0	21.290 0	-24.710 0	10.350 0	-1.386 0	0.011 5
24	-0.032 9	1.054 0	-0.012 2	0.010 4	18.520 0	-21.340 0	8.979 0	-1.201 0	0.009 9
25	-0.104 8	1.107 0	-0.022 4	0.008 9	16.000 0	-18.290 0	7.748 0	-1.035 0	0.008 6
26	-0.144 0	1.133 0	-0.027 5	0.007 3	12.680 0	-14.270 0	6.130 0	-0.818 8	0.007 1
27	-0.182 6	1.157 0	-0.031 6	0.005 8	9.513 0	-10.470 0	4.605 0	-0.615 2	0.005 6
28	-0.139 0	1.118 0	-0.023 4	0.004 2	6.862 0	-7.261 0	3.312 0	-0.441 8	0.004 1
29	-0.083 7	1.070 0	-0.013 7	0.002 1	3.248 0	-2.910 0	1.568 0	-0.209 1	0.002 0

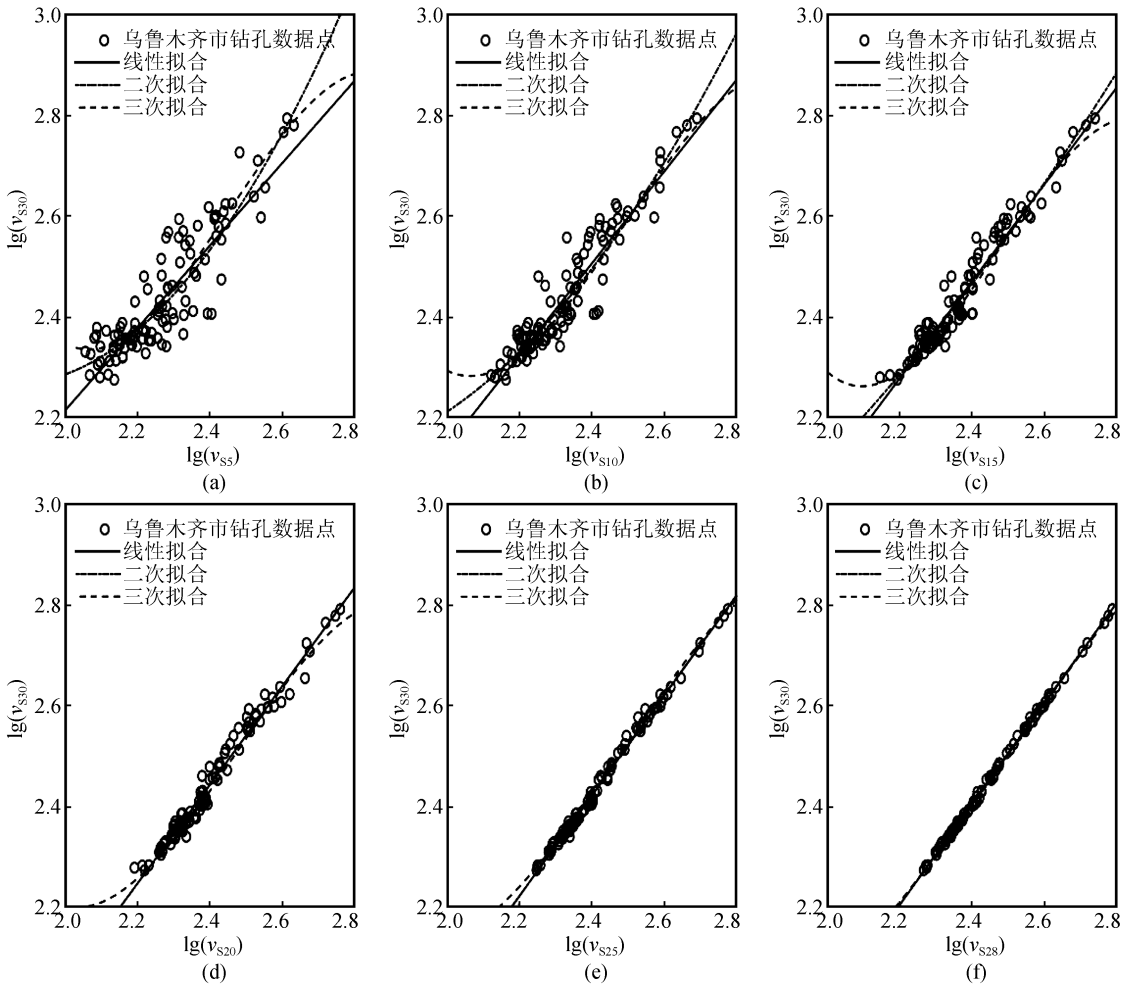


图4 不同深度处三种模型结果对比

Fig.4 Comparison between the results of three models at different depths

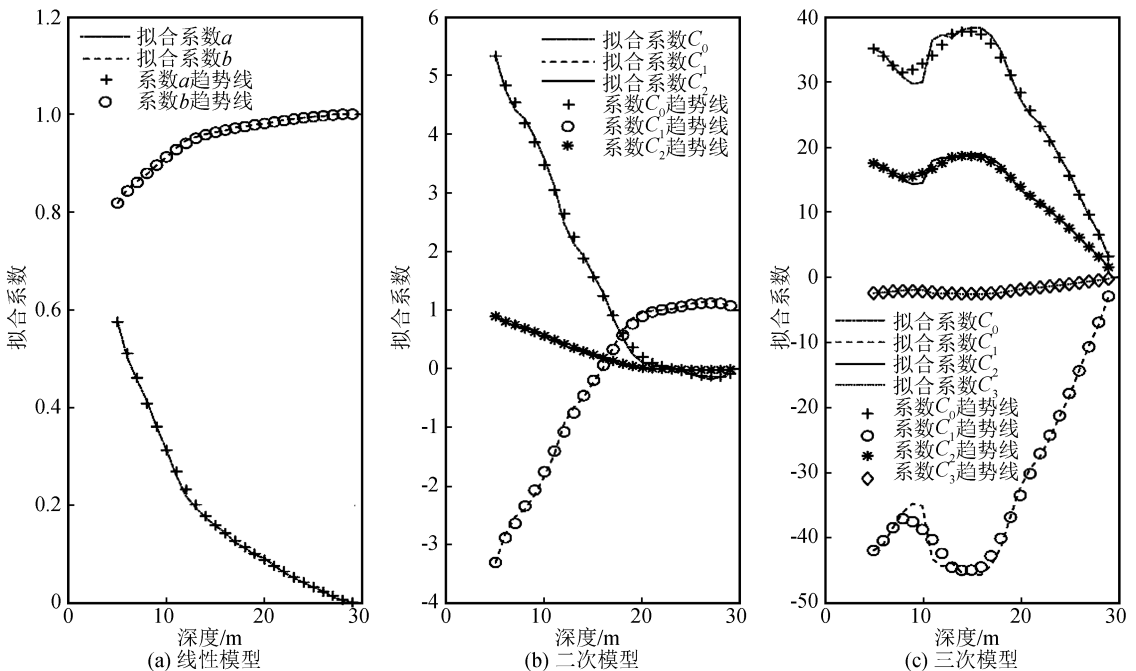


图5 不同模型系数随深度变化趋势

Fig.5 Variation trend of coefficients of different models along the depth



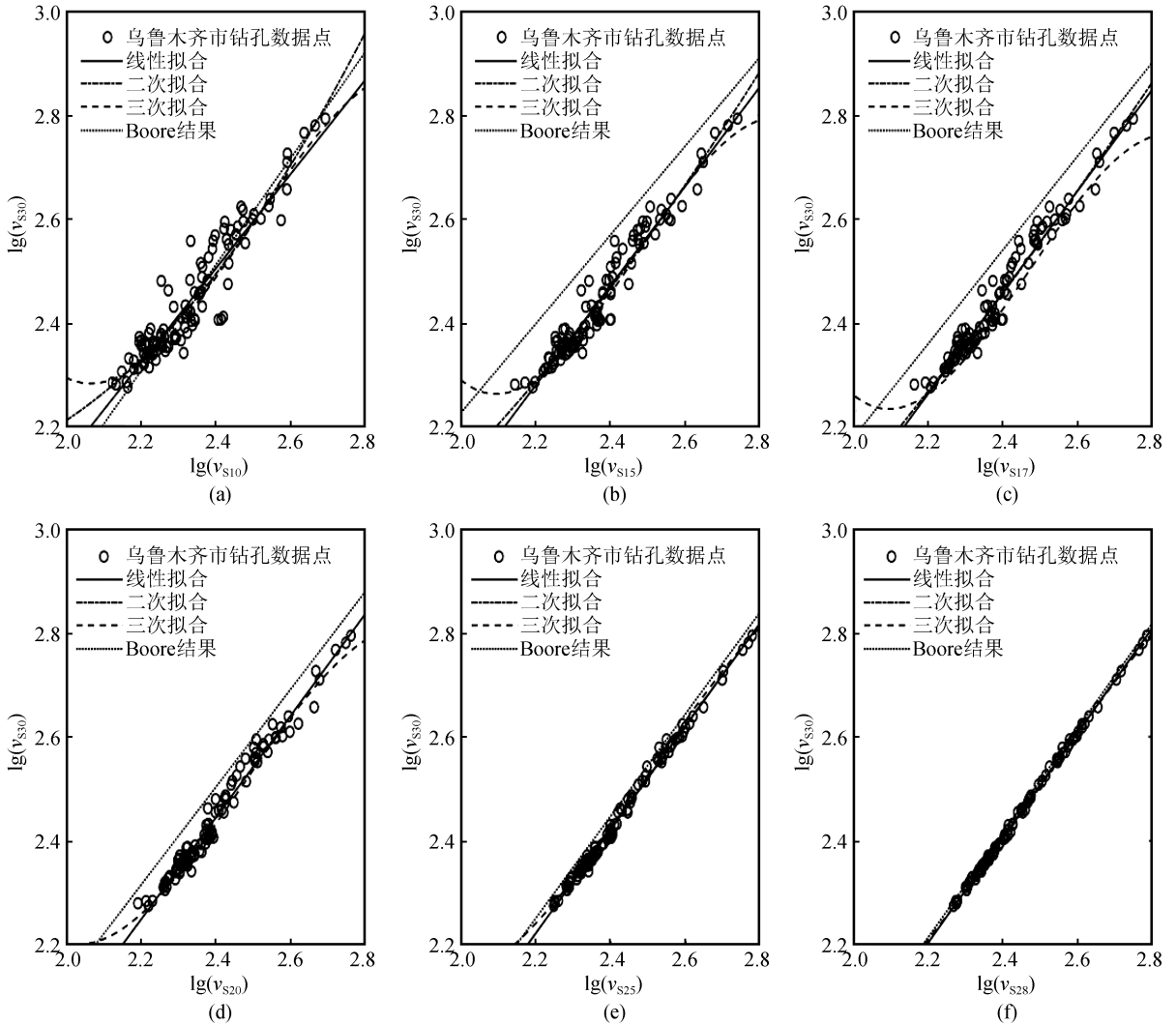


图 6 不同模型结果和 Boore 结果<sup>[8]</sup>比较

Fig.6 Comparison between the results of different models and Boore<sup>[8]</sup>

此外,本文分别计算了线性模型、二次模型和三次模型对克拉玛依市钻孔  $v_{S30}$  的预测残差和标准差,并将计算得到的平均误差和标准差列于表 3。

从图 8 和表 3 分析得知,对于克拉玛依市钻孔  $v_{S30}$  的预测,三次模型的标准差较二次模型和线性模型大,并且残差离散性比较大。在深度 10 m 以下,三种模型几乎都出现低估现象,二次模型和线性模型相对而言预测值更准确,但在深度大于 10 m 区域,两者都出现高估现象,这也证明了剪切波速的对数线性关系具有区域性特征。因此对于克拉玛依市钻孔  $v_{S30}$  的预测,本文回归得到的线性模型较为理想。

#### 4 结论

本文基于新疆乌鲁木齐市钻孔深度大于 30 m 的 123 个有效钻孔,研究了 5~30 m 不同深度的平

均剪切波速  $v_S(d)$  和  $v_{S30}$  的对数线性模型、对数二次模型和对数三次模型,分别给出了不同深度处等效剪切波速  $v_S(d)$  和  $v_{S30}$  的相应模型的回归系数。由于本文钻孔数据全部来自新疆乌鲁木齐市,因此三种模型在预测效果上都要优于 Boore 基于美国加州地区钻孔数据得到的回归结果<sup>[8]</sup>。通过对三种模型的标准差对比分析,发现三次模型在不同深度处的标准差都要小于同深度的线性模型和二次模型,因此,本文的三次模型在一定程度上可以为新疆乌鲁木齐市缺少钻孔数据或者深度未达到 30 m 的钻孔预测  $v_{S30}$  提供参考,并且本文得到的拟合关系还可以为新疆地区的地震动衰减关系预测和场地分类等提供帮助。

本文收集到的 841 个钻孔中,深度大于 30 m 且具有详细钻孔资料和经纬信息的钻孔有 123 个,实测  $v_{S30}$  值都小于 760 m/s。按照美国 NEHRP 规范

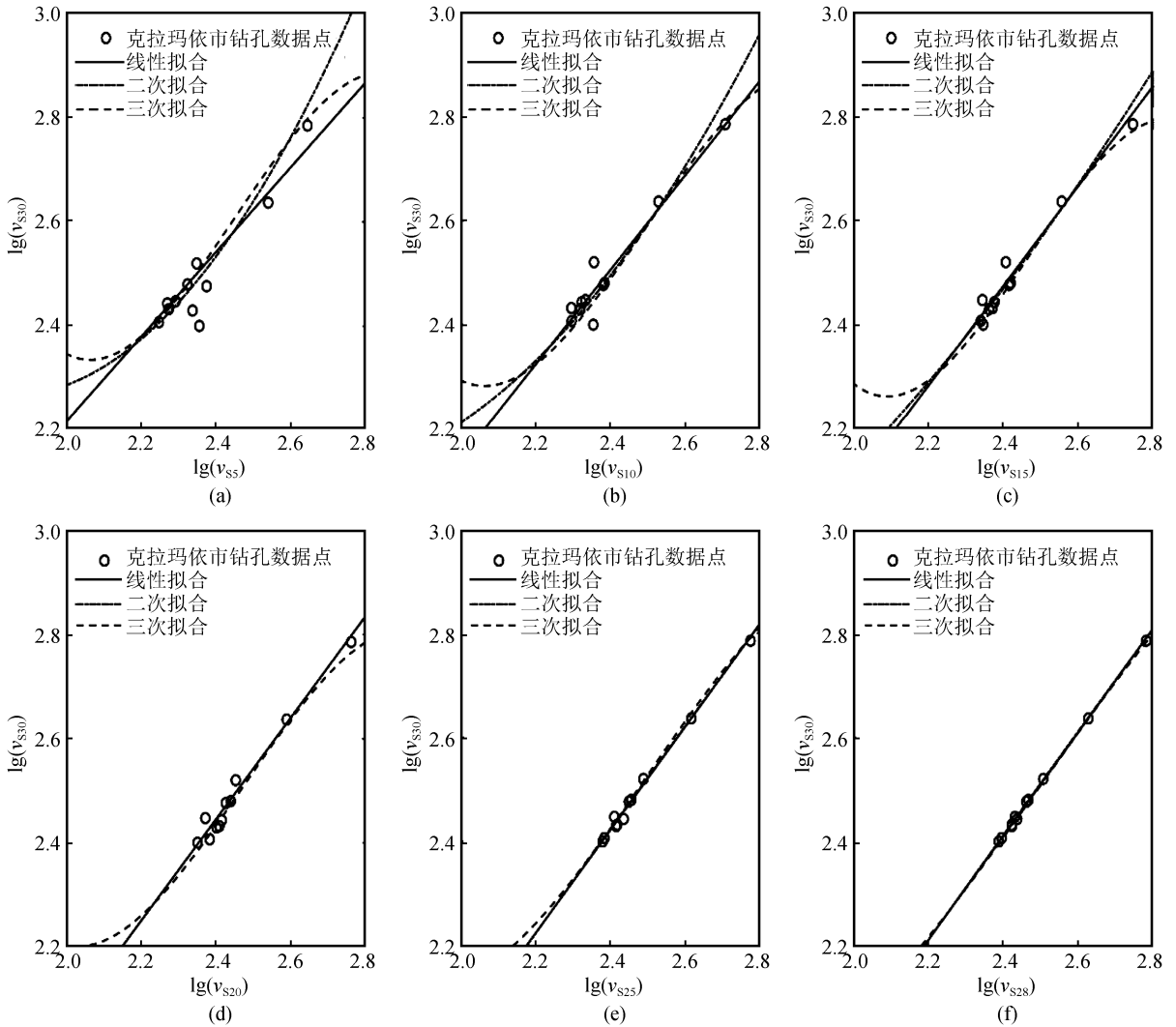


图7 三种模型对克拉玛依市钻孔的适用性

Fig.7 Application of three models to drilling in Karamay

表3 模型预测克拉玛依市  $v_{s30}$  的残差和标准差Table 3 Residuals and standard deviations of  $v_{s30}$  in Karamay predicted by three models

$d/m$	线性模型		二次模型		三次模型	
	平均误差	标准差	平均误差	标准差	平均误差	标准差
5	+0.014 9	0.040 8	+0.012 7	0.038 9	+0.022 0	0.044 2
10	-0.001 3	0.026 0	-0.004 7	0.030 8	-0.017 5	0.032 0
15	+0.003 5	0.018 7	+0.001 7	0.021 3	-0.012 6	0.021 1
20	+0.003 5	0.017 2	+0.003 5	0.017 2	-0.009 1	0.018 9
25	+0.001 7	0.009 0	+0.002 9	0.009 2	+0.005 6	0.010 2
28	+0.000 8	0.003 7	+0.001 6	0.003 8	-0.002 7	0.004 2

注: +表示高估, -表示低估。

分类,大多数台站均处在C类场地,因此本文拟合的经验公式更适用于C类场地的  $v_{s30}$  估计。

本文的预测模型也可以推广到新疆克拉玛依地区,但值得注意的是,对深度小于10m的钻孔预测  $v_{s30}$  时需谨慎,本文所选择的三个模型都出现高估现象。三次模型在深度大于10m时几乎都对  $v_{s30}$

有低估现象,并且误差都大于线性模型和二次模型。由于克拉玛依市的钻孔仅有11个,通过这11个钻孔不同深度处的等效剪切波速  $v_s(d)$  和  $v_{s30}$  建立经验估计模型显然不太可靠,因此今后需要收集更多的钻孔资料进行专门统计回归,进而得到适合克拉玛依市钻孔预测  $v_{s30}$  的回归模型。在没有可靠的回

归模型时,本文的线性模型和二次模型都可以为克拉玛依市钻孔  $v_{S30}$  预测值提供参考。

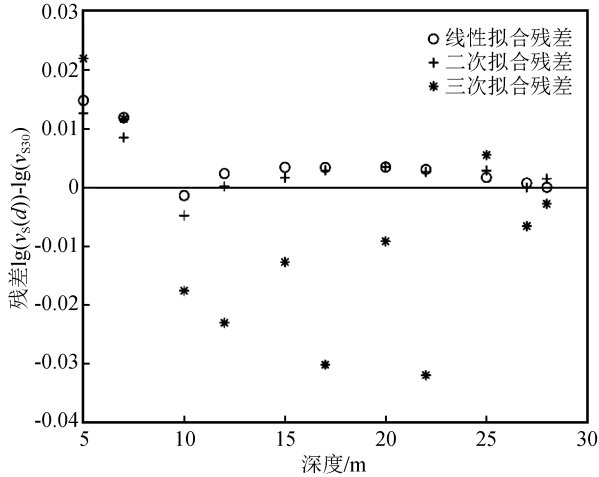


图 8 三种模型预测克拉玛依市钻孔残差

Fig.8 Prediction of borehole residuals in Karamay by three models

我国现行的《建筑抗震设计规范(GB 50011-2010)》<sup>[1]</sup>一般用  $v_{S20}$  作为场地分类的重要参数,而欧洲、美国等地区的相关设计规范则用  $v_{S30}$  作为场地分类的主要参数。我国深度大于 30 m 的钻孔数量较少,而通过本文所拟合的经验关系,可以根据不同的深度求得  $v_{S30}$  值,从而为以后的场地类别划分提供了保障。

## 参考文献(References)

- [1] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Code for Seismic Design of Buildings:GB50011-2010 [S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.

- [2] 陶小三,杨伟林,高志兵,等.南京河西地区岩土体剪切波速与土层深度的关系[J].防灾减灾工程学报,2009,29(3):320-324.  
TAO Xiaosan, YANG Weilin, GAO Zhibing, et al. Relation between Depth and Shear Wave Speed of Bedrocks and Soils in Hexi District of Nanjing City[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 320-324.
- [3] 薛锋,王庆良,胡亚轩,等.西安市岩土体剪切波速与土层深度关系的研究[J].地震工程学报,2014,36(2):249-255,280.  
XUE Feng, WANG Qingliang, HU Yaxuan, et al. Study on the Relationship between Soil Depth and Shear Wave Velocity of Rock and Soil Mass in Xi'an City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 249-255, 280.
- [4] 李帅,赵纯青,葛鸣,喀什场地土剪切波速与土层深度经验关系[J].地震工程学报,2013,35(3):702-708.  
LI Shuai, ZHAO Chunqing, GE Ming. Empirical Relationship between Shear Wave Velocities and Soil Depths in Kashi City[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 702-708.
- [5] 亢川川,俞言祥,马超,等.四川地区深度小于 30 m 钻孔的  $v_s(30)$  估计方法[J].震灾防御技术,2015,10(2):316-323.  
KANG Chuanchuan, YU Yanxiang, MA Chao, et al. Estimation Method of  $v_s(30)$  for Drilling with Depth less than 30 Meters in Sichuan Area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(2): 316-323.
- [6] 喻焜,李小军.四川、甘肃地区  $v_{S30}$  经验估计研究[J].地震工程学报,2015,37(2):525-533.  
YU Tian, LI Xiaojun. Empirical Estimation of  $v_{S30}$  in the Sichuan and Gansu Provinces[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 525-533.
- [7] BOORE D M, THOMPSON E M, CADET H. 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.
- [8] BOORE D M. Estimating  $v_s(30)$  (or NEHRP Site Classes) from Shallow Velocity Models (Depths <30 m)[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(2): 591-597.