

文章编号: 1007-2993(2024)06-0698-06

## 基于工程钻孔资料的 $V_{S30}$ 估算新型模型

张炜超<sup>1,2</sup> 任浩<sup>1,2</sup> 田勤虎<sup>1,2</sup> 孙昱<sup>1,2</sup>

(1. 陕西省地震局, 陕西西安 710068; 2. 陕西西安地球深部构造中国地震局野外科学观测研究站, 陕西西安 710068)

**【摘要】** 地表以下 30 m 深度的平均剪切波速( $V_{S30}$ )是评价场地条件及场地地震影响的重要参数。我国存在大量深度小于 30 m 的钻孔数据, 此类钻孔无法直接计算得到  $V_{S30}$ , 阻碍了  $V_{S30}$  相关研究成果的推广应用, 因此准确估算  $V_{S30}$  尤为重要。基于陕西关中平原 4 个城市 590 个孔深大于 30 m 的钻孔测井数据, 采用拟合、对比方法开展  $V_{S30}$  估算模型研究。研究发现: 钻孔不同深度的平均剪切波速(深度  $Z < 30$  m)及孔口高程与实测  $V_{S30}$  沿深度呈现较强的对数线性相关性, 并由此提出了基于钻孔不同深度平均剪切波速及孔口高程的  $V_{S30}$  估算对数线性外推新型模型, 简称双因素影响外推估算模型。相比速度梯度、双深度参数模型, 在计算深度取值越小时, 新型模型估算精度越高, 稳定性越好, 优势越突出。

**【关键词】** 关中平原; 剪切波速; 孔口高程; 双因素影响模型

**【中图分类号】** TU435

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.009

## A New Model for Estimating $V_{S30}$ Based on Engineering Boreholes Data

Zhang Weichao<sup>1,2</sup> Ren Hao<sup>1,2</sup> Tian Qinhu<sup>1,2</sup> Sun Yu<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Xi'an Deep Earth Structure Observation and Research Station of China Earthquake Administration, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

**【Abstract】** The average shear wave velocity to a depth of 30 m below the ground surface ( $V_{S30}$ ) is an important parameter for evaluating the site condition and the site earthquake response. There are a large number of borehole data with depths of less than 30 m in China, and these borehole data cannot be directly used to calculate  $V_{S30}$  by definition equation code. Under this situation, referencing the correlated research results which include the parameter of  $V_{S30}$  were prevented. It is important to estimate  $V_{S30}$  accurately. Using the data of 590 boreholes with depths greater than 30 m in Guanzhong plain of Shaanxi Province to research the  $V_{S30}$  estimation model. The results show that the average shear wave velocity at different depths ( $Z < 30$  m) and the elevation of the borehole have a strong log-linear relationship with the measured value of  $V_{S30}$  along the depth, so a new model of log-linear extrapolation, which comprehensively considers the average shear wave velocity at different depths and the elevation of the borehole, was proposed. Compared with the velocity gradient extrapolation model and the double-depth parameter extrapolation model, when the calculation depth is smaller, the new model has higher estimation accuracy and better stability, and this advantage is more prominent.

**【Key words】** Guanzhong plain; shear wave velocity; elevation of the borehole; new model of two-factor influence

### 0 引言

土层剪切波速是岩土动力特性的重要参数, 广泛应用于工程实践。在我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(2016 年版)中采用地表以下 20 m 深度范围内土层等效剪切波速及场地覆盖层厚度作为场地类别划分指标<sup>[1]</sup>; 而国外则多使用地表以下 30 m 深度土层等效剪切波速(即  $V_{S30}$ )作为场地类别划分的唯一指标<sup>[2-4]</sup>。另外, 国内学者李小军曾深

入对比研究了划分场地类别的不同土层剪切波速参数, 认为  $V_{S30}$  参数能更好反映场地特征<sup>[5]</sup>。可见,  $V_{S30}$  反映场地条件更准确, 作为场地划分指标更易用。

出于项目经费或技术限制, 我国钻孔深度达 30 m 的钻孔数量较少, 导致  $V_{S30}$  实测剪切波速数据较少, 倘若利用这些钻孔数据估算  $V_{S30}$ , 则需引入  $V_{S30}$  外推估算模型。目前, 基于钻孔波速测试数据外推估算  $V_{S30}$  的模型主要有常速度、速度梯度、双深度参数

基金项目: 陕西省应急管理专项项目(沔西新城活断层探测与地震危险性评价项目)

作者简介: 张炜超, 男, 1989 年生, 汉族, 河南灵宝人, 硕士, 工程师, 主要从事场地特性及地震风险评估工作。E-mail: 1072020431@qq.com

等三种外推估算模型<sup>[6-7]</sup>。通过对以上三种  $V_{S30}$  外推估算模型研究发现, 在计算深度取值较小时, 这些模型估算精度  $V_{S30}$  仍有提高空间。因此, 本文利用钻孔资料开展  $V_{S30}$  估算新型模型研究, 进一步提高利用钻孔浅部数据估算  $V_{S30}$  值的精度。

本文从陕西关中平原收集钻孔资料, 利用拟合方法对钻孔资料进行分析, 研究提出估算  $V_{S30}$  新型模型, 并验证新模型的优势。

## 1 钻孔资料分析

关中平原又称渭河平原, 南依秦岭, 北界北山, 包括陕西省中部 5 个地级市; 是形成于新生代的伸展型断陷盆地, 该地区地质构造背景较为一致<sup>[8-10]</sup>。

收集关中地区终孔深度大于 30 m 且波速资料和土层信息完整的 590 个钻孔开展  $V_{S30}$  估算新型模型研究。钻孔波速测试则采用人工锤击震源的单孔速度检层法, 孔深 20 m 以内每 1 m 进行一次剪切波速测试, 20 m 以外每 2 m 进行一次剪切波速测试。

钻孔揭示浅层 30 m 地表第四系地层发育较为完整, 广泛分布于关中盆地, 其成因类型复杂, 主要是风积、冲洪积、湖积, 岩性以黄土和砂砾卵石为主。另外, 590 个钻孔的孔口高程在 234~854 m 变化, 其中孔口高程在 200~400 m 有 379 个钻孔, 400~600 m 有 148 个钻孔, 600~800 m 有 61 个钻孔, 平均孔口高程是 424 m。

## 2 $V_{S30}$ 估算模型

如上所述,  $V_{S30}$  外推估算模型主要有常速度、速度梯度、双深度参数等三种模型, 下文阐述三种模型的同时, 将在分析这三种模型的基础上, 提出综合考虑钻孔不同深度平均剪切波速及孔口高程的对数线性双因素外推估算新型模型。

### 2.1 常速度外推估算模型

当钻孔波速测量深度小于 30 m 时,  $V_{S30}$  值可以通过式(1)进行估算, 即常速度外推估算模型可用公式(1)表示如下:

$$V_{S30} = 30 / [t(Z) + (30 - Z) / V_S(Z_{\max})] \quad (1)$$

式中:  $Z$  为钻孔深度;  $t(Z)$  为剪切波速走时;  $V_S(Z_{\max})$  为钻孔深度  $Z$  到 30 m 的剪切波速。此式中  $V_S(Z_{\max})$  取值假定与钻孔孔底土层剪切波速相同<sup>[11]</sup>, 而实际土层剪切波速通常是下层波速大于上层波速, 即该模型容易低估  $V_S(Z_{\max})$ , 进一步低估  $V_{S30}$  值<sup>[6-7]</sup>。

### 2.2 速度梯度外推估算模型

研究发现, 在场地相接的地区或地质构造较为一致的地区, 钻孔  $V_{S30}$  与其他孔深处的平均剪切波

速存在对数线性或高次经验关系。于是 Boore 最早提出了对数线性关系模型<sup>[12]</sup>, 即速度梯度外推估算一次模型可用公式(2)表示如下:

$$\lg(V_{S30}) = a_0 + a_1 \lg(V_{SZ}) \quad (2)$$

式中:  $a_0, a_1$  为回归系数;  $V_{SZ}$  为不同深度处平均剪切波速。

经过进一步深入研究, Boore 等根据日本地区钻孔数据提出适于当地的对数二次曲线模型<sup>[13]</sup>, 即速度梯度外推估算二次模型可用公式(3)表示:

$$\lg(V_{S30}) = b_0 + b_1 \lg(V_{SZ}) + b_2 \lg(V_{SZ})^2 \quad (3)$$

式中:  $b_0, b_1, b_2$  为回归系数。

与常速度外推模型对比, 速度梯度外推估算模型通常可减小估算  $V_{S30}$  的不确定性, 估算的  $V_{S30}$  值偏差明显降低<sup>[6, 13-15]</sup>。

### 2.3 双深度参数外推估算模型

Wang 等提出了用同一钻孔在两个不同深度处的平均剪切波速作为参数估算钻孔  $V_{S30}$  的模型<sup>[16]</sup>。即双深度参数外推估算模型可用公式(4)表示:

$$\lg(V_{SZ}) = \lg(V_{SZ_2}) + \frac{\lg(Z) - \lg(Z_2)}{\lg(Z_2) - \lg(Z_1)} [\lg(V_{SZ_2}) - \lg(V_{SZ_1})] \quad (4)$$

式中:  $Z_1$  和  $Z_2$  为钻孔不同深度, 且  $Z_2$  大于  $Z_1$ 。令  $Z=30$ ,  $V_{S30}$  可由公式(4)估算。

结果表明, 随着  $Z_1$  和  $Z_2$  中的一个或两个接近 30 m, 双深度参数估算模型估算的  $V_{S30}$  值与其实算值之间相关性增加; 当  $Z_2$  与速度梯度外推估算模型中的  $Z$  取相同值时, 该模型的相关性系数更大, 双深度参数估算模型可靠性更强<sup>[15-17]</sup>。另外, 该模型不需要大量钻孔波速数据拟合获得模型参数, 即无区域性差异, 方法简便且操作性更强。

### 2.4 双因素影响外推新型模型

由于 Boore 等研究发现在场地相接或地质构造较为一致的地区,  $V_{S30}$  与其他深度的平均剪切波速存在对数线性或高次经验关系; 同时考虑到岩土土层剪切波速与场地的地形地貌等因素相关<sup>[17]</sup>, 且钻孔数据中包含的孔口高程数据可一定程度上表征场地的地形地貌因素, 故提出综合考虑钻孔不同深度平均剪切波速及孔口高程的  $V_{S30}$  外推估算新型模型。

钻孔在 5, 10, 15, 20 m 四个不同深度时  $V_{S30}$  实算对数与钻孔不同深度平均剪切波速对数及孔口高程对数等三个因素的空间分布情况见图 1, 从图中明显看到随着深度的增加, 三个因素间的线性相关性逐

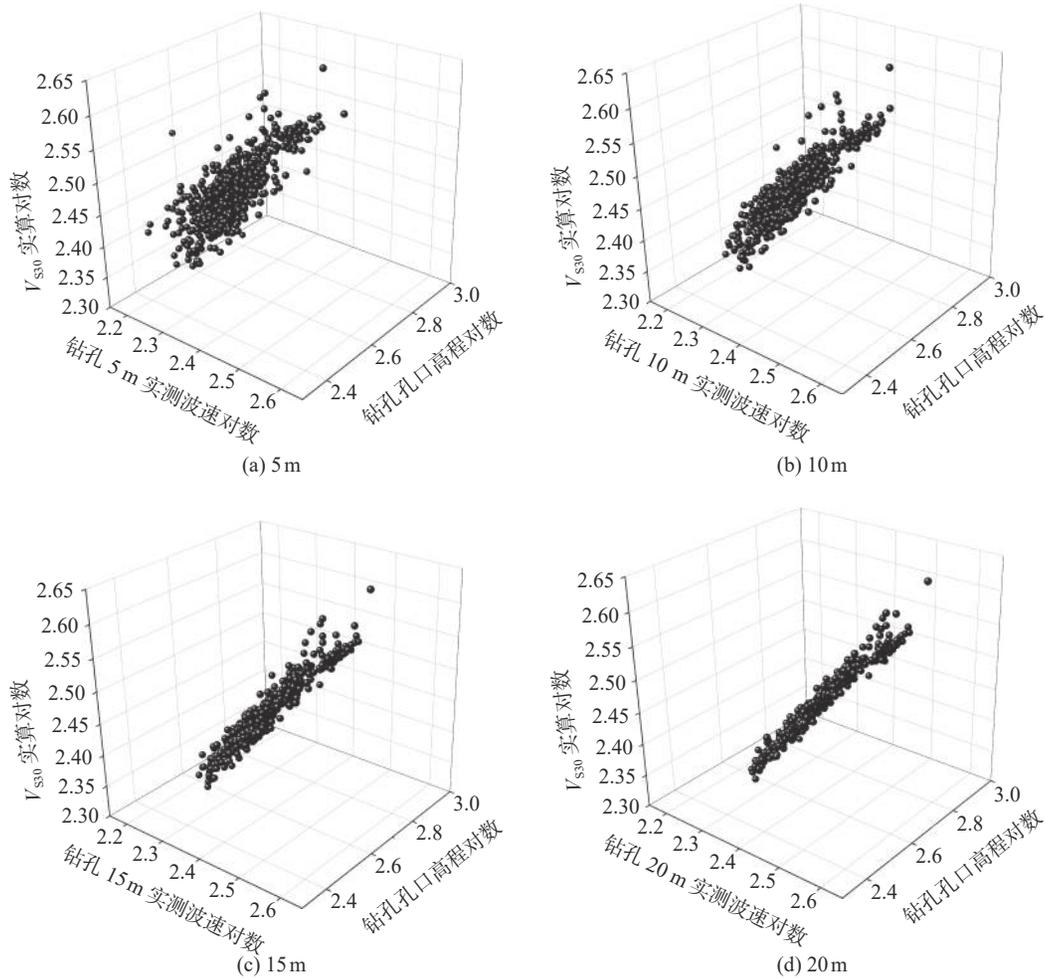


图1 钻孔的三个因素空间分布图

渐增强。由此新型模型假定:在场地相接或地质构造较为一致的地区,  $V_{S30}$  与钻孔不同深处的平均剪切波速及孔口高程存在对数线性的经验关系。新型模型可用公式(5)表示:

$$\lg(V_{S30}) = c_0 + c_1 \lg(V_{SZ}) + c_2 \lg(H_0) \quad (5)$$

式中:  $c_0, c_1, c_2$  为回归系数;  $H_0$  为钻孔的孔口高程。

通过前人的研究可知,相比于速度梯度外推估算模型及双深度参数外推估算模型,常速度外推模型估算  $V_{S30}$  值偏差较大<sup>[7-8,14-16]</sup>,故验证新型模型时不与常速度外推模型进行对比分析。

### 3 验证分析与讨论

为检验新型模型的估算精度、稳定性,将对分析在  $V_{S30}$  估算过程中各模型得到的皮尔森的相关系数及总误差来判定模型的优劣。其中,总误差定义为  $V_{S30}$  实算值与估计值之间的二次平均对数偏差,总误差计算公式如下:

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\lg V_{S30} - \lg V_{S30est})^2} \quad (6)$$

式中:  $V_{S30}$  为钻孔 30 m 深度的平均剪切波速实算值;  $V_{S30est}$  为钻孔 30 m 深度的平均剪切波速估算值;  $e$  为总误差。

另外,双深度参数外推估算模型应用时需  $Z_1, Z_2$  两个不同深度的波速,在文中设定  $Z_1$  取值比对应的  $Z_2$  取值小 1 m 进行两两深度组合。通过拟合分析,各模型计算结果见表 1、图 2、图 3。

从表 1 及图 2、图 3 可以得出:

深度  $Z$  或者  $Z_2$  取值在 5 ~ 28 m 范围,随着取值的增大,4 个模型的相关系数均逐渐增大,增长速率逐渐变缓,尤其在 20 m 后增长缓慢;随着深度取值的增大,4 个模型的总误差均逐渐减小,减小速率均较为线性。可见计算深度取值越接近 30 m,计算精度越高。

深度  $Z$  或者  $Z_2$  取值在 5 ~ 28 m 范围,公式(2)、公式(3)模型的相关系数基本在 0.64 ~ 1.00 间变化,总误差在 0 ~ 0.035 变化;公式(4)模型的相关系数基本在 0.67 ~ 1.00 变化,总误差在 0 ~ 0.054 变化;公式(5)模型的相关系数基本在 0.79 ~ 1.00 变化,总误差

表 1 各模型计算的相关系数及总误差

深度Z或者Z <sub>2</sub> 取值/m	公式(2)模型		公式(3)模型		公式(4)模型		公式(5)模型	
	r	e	r	e	r	e	r	e
5	0.636	0.035	0.644	0.035	0.667	0.054	0.794	0.028
6	0.687	0.033	0.692	0.033	0.745	0.045	0.815	0.027
7	0.735	0.031	0.738	0.031	0.777	0.042	0.836	0.025
8	0.774	0.029	0.775	0.029	0.796	0.04	0.856	0.024
9	0.809	0.027	0.809	0.027	0.825	0.039	0.875	0.022
10	0.836	0.025	0.837	0.025	0.856	0.033	0.889	0.021
11	0.862	0.023	0.863	0.023	0.885	0.028	0.905	0.019
12	0.883	0.021	0.883	0.021	0.902	0.024	0.918	0.018
13	0.903	0.020	0.903	0.020	0.926	0.022	0.931	0.017
14	0.919	0.018	0.920	0.018	0.932	0.020	0.942	0.015
15	0.933	0.016	0.933	0.016	0.948	0.017	0.952	0.014
16	0.945	0.015	0.945	0.015	0.957	0.015	0.960	0.013
17	0.954	0.014	0.955	0.014	0.963	0.014	0.967	0.012
18	0.962	0.012	0.963	0.012	0.971	0.012	0.972	0.011
19	0.969	0.011	0.970	0.011	0.98	0.01	0.977	0.010
20	0.975	0.010	0.976	0.010	0.984	0.008	0.981	0.009
22	0.985	0.008	0.986	0.008	0.994	0.005	0.989	0.007
24	0.994	0.005	0.992	0.006	0.998	0.003	0.994	0.005
26	0.997	0.003	0.997	0.004	0.999	0.002	0.997	0.003
28	0.999	0.002	0.999	0.002	1.000	0.001	0.999	0.002

注:  $r$  为相关系数,  $e$  为总误差。

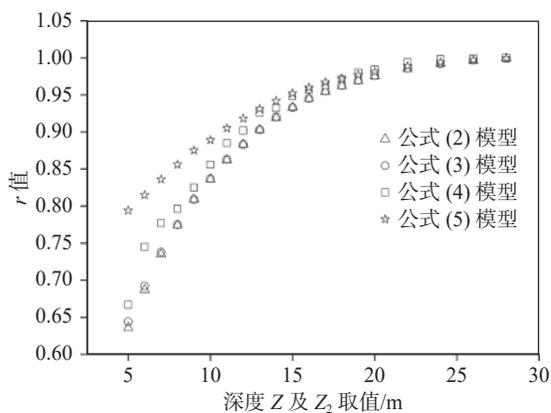


图 2 不同深度取值时 4 个模型的相关系数对比图

在 0~0.028 变化; 计算深度取值越接近 5 m, 4 个模型的相关系数及总误差差距越大。可见, 相比于其他三个模型, 公式(5)模型的相关系数及总误差变化范围更小, 估算  $V_{S30}$  值更为稳定, 且这种优势在计算深度取值越小时越突出。

深度  $Z$  或者  $Z_2$  取值在 5~18 m 范围且公式(2)、公式(3)、公式(5)模型中深度  $Z$  取值与公式(4)模型

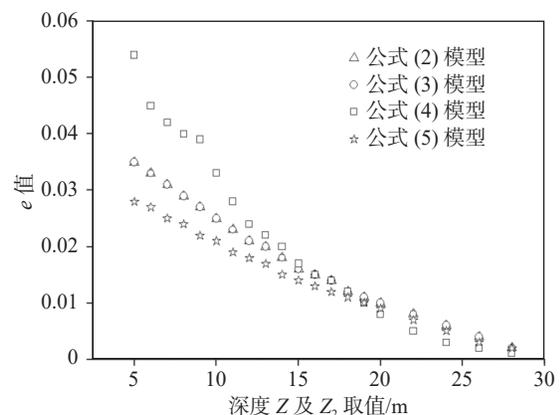


图 3 不同深度取值时 4 个模型的总误差对比图

中深度  $Z_2$  取值相同时, 相比于其他三个模型, 公式(5)模型的相关系数始终较高、总误差却始终较低, 而且这种优势在计算深度取值越接近 5 m 时越明显。可见, 在计算深度取值 5~18 m 范围, 公式(5)模型相比于公式(2)—公式(4)模型估算  $V_{S30}$  值精度更高, 且计算深度取值越小时优势越突出。

深度  $Z$  或者  $Z_2$  取值在 19~28 m 范围且公式(2)、

公式(3)、公式(5)模型中深度 $Z$ 取值相同时,相比于公式(2)、公式(3)模型,公式(5)模型的相关系数始终略高、总误差却始终略低,但这种优势并不明显。可见,在计算深度取值在19~28 m范围,公式(5)与公式(2)、公式(3)模型估算 $V_{S30}$ 值精度方面基本一致,优势并不突出。深度 $Z$ 或者 $Z_2$ 取值在19~28 m范围且公式(4)模型中深度 $Z_2$ 取值与公式(5)模型中深度 $Z$ 取值相同时,相比于公式(4)模型,公式(5)模型的相关系数始终略低、总误差却始终略高,但这种

劣势并不明显。可见,在计算深度取值19~28 m范围时,公式(5)与公式(4)模型估算 $V_{S30}$ 值在精度方面基本一致,劣势并不突出。

图4表示了钻孔在5, 10, 15, 20, 24 m不同计算深度取值时 $V_{S30}$ 估算值与实算值对比结果。从图4观察得到:当计算深度为5, 10, 15 m时,相比于公式(2)、公式(3)、公式(4)模型,公式(5)模型的数据点更为紧凑地分布于1:1对角线的两侧,且计算深度取值越小时这种现象越明显,即表明计算深度取值

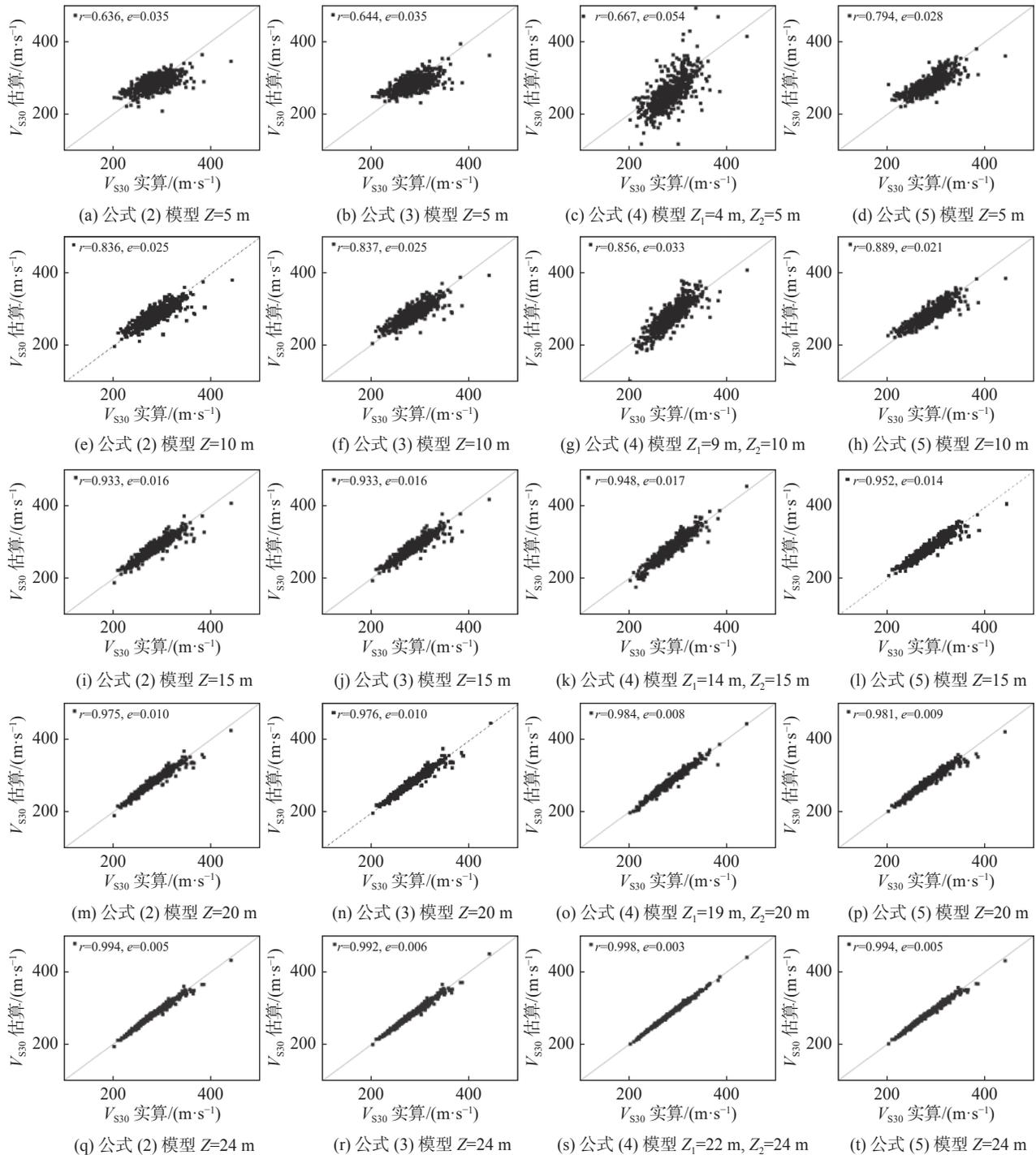


图4 不同深度取值时4个模型的 $V_{S30}$ 估值与实算值对比图

为 5, 10, 15 m 时, 590 个钻孔采用公式(5)模型估算  $V_{S30}$  值时偏差较小的钻孔数量更多, 估算效果较好; 当计算深度为 20, 24 m 时, 4 个模型的数据点均紧凑地分布于 1:1 对角线的两侧, 表明在计算深度取值为 20, 24 m 时, 590 个钻孔采用以上 4 个模型估算  $V_{S30}$  值效果基本一致。

#### 4 结论

本文基于陕西关中地区的钻孔资料, 提出了估算  $V_{S30}$  值的双因素影响外推新型模型, 并将新型模型与前人模型进行对比分析, 结果显示:

(1) 钻孔深度取值在 5~18 m 范围, 新型模型估算  $V_{S30}$  时精度最高, 稳定性最好, 且计算深度取值越小时这种优势越突出。

(2) 钻孔深度取值在 19~28 m 范围, 新型模型与前人模型估算  $V_{S30}$  时精度、稳定性基本一致, 新型模型的优势并不突出。

新型模型在钻孔较浅时估算  $V_{S30}$  值精度高、稳定性好、优势突出, 具有推广价值, 模型的提出进一步促进了  $V_{S30}$  估算研究。

#### 参 考 文 献

- [1] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 (2016 年版)[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2016.
- [2] European committee of standardization. EN 1998 Euro code 8: Design of structures for earthquake resistance - part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings[S]. London: Taylor and Francis, 1998.
- [3] Building seismic safety council (BSSC). Edition NEHRP recommended provision for seismic regulations for new buildings and other structures. FEMA 368/369[R]. Washington D C, 2001.
- [4] BOORE D M, STEWART J P M, EERI E S, et al. NGA-West2 equation for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes[J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 1057-1085.
- [5] 李小军. 地震动参数区划图场地条件影响调整 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 21-29.
- [6] 江志杰, 彭艳菊, 吕悦军, 等. 工程地震中  $V_{S30}$  估算模型及其应用研究进展 [J]. 地震工程学报, 2018, 40(S1): 76-82.
- [7] 江志杰, 彭艳菊, 方怡, 等. 北京平原地区  $V_{S30}$  估算模型适用性研究 [J]. *震灾防御技术*, 2018, 13(1): 75-86.
- [8] 丁莹莹, 邱德勋, 吴常雪, 等. 关中平原极端降水时空变化及其与大气环流的关系 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 104-112.
- [9] 黄丹青, 毛南赵. 关中盆地地貌类型及新构造运动分析 [J]. *重庆科技学院学报 (自然科学版)*, 2018, 20(1): 1-5.
- [10] 宋友桂, 兰敏文, 刘慧芳, 等. 关中盆地新升界地层划分对比与第四纪下限 [J]. *地质科技通报*, 2021, 40(2): 24-35.
- [11] KUO C H, WEN K L, HSIEH H H, et al. Evaluating empirical regression equations for  $V_s$  and Estimating  $V_{S30}$  in northeastern Taiwan [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(3): 431-439.
- [12] BOORE D M. Estimating  $V_{S30}$  (or NEHRP Site Classes) from shallow velocity medels (depth<30 m)[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(2): 591-597.
- [13] BOORE D M, THOMPSON E M, CADET H. Regional correlations of  $V_{S30}$  and velocities averaged over depths less than and greater than 30 m[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(6): 3046-3059.
- [14] 亢川川, 俞言祥, 马超, 等. 四川地区深度小于 30 m 钻孔的  $V_{S30}$  估计方法 [J]. *震灾防御技术*, 2015, 10(2): 316-323.
- [15] 张炜超, 孙昱, 田勤虎, 等. 陕西关中平原地区  $V_{S30}$  估算模型研究 [J]. *土工基础*, 2022, 36(5): 760-764.
- [16] WANG H Y, WANG S Y. A new method for estimating  $V_{S30}$  from a shallow-wave velocity profile (depth < 30 m)[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105: 1359-1370.
- [17] MATSUOKA M, WAKAMATSU K, FUJIMOTO F, et al. Average shear-wave velocity mapping using Japan engineering geomorphologic classification map[J]. *Structural Engineering and Earthquake Engineering*, 2006, 23(1): 57-68

收稿日期: 2023-10-10