

刘瑞辰, 张力方, 方怡, 等. 2025. 江苏东部平原区  $V_{S30}$  经验预测模型和场地分类. 中国地震, 41(1): 137~153.

# 江苏东部平原区 $V_{S30}$ 经验预测 模型和场地分类

刘瑞辰 张力方 方怡 彭艳菊 吕悦军

应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

**摘要** 江苏东部平原区地震风险较高, 深厚松软的覆盖层也会加重震害程度, 研究该地区场地地震动效应非常重要。  $V_{S30}$  是反映场地地震动效应的关键参数之一, 在缺乏钻孔数据或钻孔深度不足的情况下, 需要建立合适的模型对  $V_{S30}$  值进行预测。本文基于江苏东部平原区的地震安全性评价报告等资料, 建立了一个包含 678 个深钻孔的数据库。利用 6 种  $V_{S30}$  外推模型, 对数据库中的钻孔数据进行回归分析, 进而建立了江苏模型。随后评估和对比各模型的预测效果, 最后给出在此类滨海平原区域最适用的  $V_{S30}$  外推模型为 DEA13 江苏模型。将江苏模型和其他外推模型的系数进行对比, 发现模型系数存在显著差异, 验证了  $V_{S30}$  外推模型的区域性。此外, 还探讨和验证了基于地形坡度、基于第四纪沉积物深度的预测模型在本研究区的适用性, 结果显示这两类模型在本研究区的表现不佳。最后, 探讨了场地类别与  $V_{S30}$  值的关系, 并给出了在江苏东部平原区 III、IV 类场地的  $V_{S30}$  边界值。在地质条件与本研究区相似的滨海平原地区, 推荐使用 DEA13 江苏模型推导浅钻孔场地的  $V_{S30}$  值。研究结果为本地区提供了可靠的  $V_{S30}$  预测模型和数据支持, 推动了区域地震动模型的构建和地震灾害评估的开展, 也为区域地震灾害风险评估提供了科学依据。

**关键词:** 等效剪切波速 场地条件  $V_{S30}$  外推模型 场地分类 江苏东部平原区

[文章编号] 1001-4683(2025)01-0137-17 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

江苏省东部平原区包括盐城市、泰州市、南通市及其下属区县等, 东临黄海、南接长江三角洲, 地势低平, 地质构造复杂, 地层发育比较完整, 是长三角地区地震最为活跃的地区之一, 属于长江中下游—南黄海地震带的一部分。该地区在地质构造上位于南黄海南部拗陷和勿南沙隆起区, 自新构造期以来, 拗陷内部结构发生了强烈的变异作用, 南部拗陷与勿南沙隆起的交界地带, 依旧存在现今活动强烈的孕震构造, 是值得高度重视的潜在地震危险性区(王斌等, 2008)。据史料记载(国家地震局震害防御司, 1995), 该地区历史上发生过 1502 年江苏盐城 4 $\frac{3}{4}$  级、1615 年南通 5 级、1624 年扬州 6 级等地震, 均造成了严重破坏。近海海域更是发生过多

[收稿日期] 2024-11-24 [修定日期] 2025-03-13

[项目类别] 场地条件对海域地震动的影响研究(2022YFC3003503-07)、面向地震灾害风险评估的地震区划新技术研究(2022YFC3003500)共同资助

[作者简介] 刘瑞辰, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 研究方向为工程地震。E-mail: 2986618299@qq.com

次6级以上地震,1996年长江口外6.1级地震使该地区经济社会发展受到严重影响(李起彤,1997)。距本地区200km处发生的1668年山东郯城8½级地震是我国东部最大且极为罕见的一次历史地震,对本地区也造成了烈度Ⅶ度以上的破坏(高维明等,1988)。

该地区遭受的地震灾害风险大,除地震本身影响外,和土层覆盖较厚直接相关。江苏及邻近地区第四系覆盖层巨厚,随着不同时期河、湖、海沉积范围各有不同,相互交替(李寿寅等,1990)。实际震害经验和理论研究均表明(吕悦军等,2008),场地条件对地震动影响较大,会进一步影响震害程度(李小军等,2001;陈国兴等,2004;彭艳菊等,2009),特别是,深厚的覆盖层对长周期地震动具有更显著的放大效应,远场地震可能会对本地区造成更严重的震害破坏(陈国兴等,2004;徐扬等,2008;杨伟林等,2009;刘薛宁等,2020)。

$V_{s30}$ 是描述场地特征的一个重要参数,其表征了地表以下30m深度范围内的等效剪切波速,主要取决于土层厚度及土体特性。 $V_{s30}$ 也是量化地震动作用下场地放大系数的重要指标,还是近代地震动预测方程(GMPE)中的替代指标(张照鹏等,2018)。在国外, $V_{s30}$ 作为划分场地类别的指标,出现在多个建筑规范中(Building Seismic Safety Council, 2003; Eurocode 8, 2004; American Society of Civil Engineers(ASCE), 2010)。获取 $V_{s30}$ 的最直接最可靠的方法是根据已测钻孔(深度达到或大于30m)资料,进行计算得到。但是,因以往的多数钻孔深度未达30m,且很多地区缺乏钻孔资料,致使在获取 $V_{s30}$ 值方面受到阻碍。鉴于此,国内外众多学者提出了多个外推预测模型以估算 $V_{s30}$ 值,比较有代表性的外推预测模型有:B04模型(Boore, 2004)、BCV模型(Kuo et al, 2011)、BEA11模型(Boore et al, 2011)、DEA13模型(Dai et al, 2013)、MN15模型(翠川三郎等, 2015)和WW15模型(Wang et al, 2015),此后很多研究基于这些模型进行了应用和区域化。Xie等(2016)利用北京平原地区的钻孔数据进行模型计算和验证,发现DEA13区域模型在北京平原的预测效果最佳。Kwak等(2017)对日本、加州、美国太平洋西北地区、美国中东部地区和北京平原共5个地区分别进行了预测分析,结果表明MN15和DEA13模型在5个地区预测效果都为最佳。贾琳等(2021)研究发现,在四川和云南地区,DEA13区域模型的预测效果最好。Xie等(2022)直接选用了DEA13模型,针对中国西部的4个省份开发了预测模型,通过对模型的曲线分析,发现西北地区的速度梯度普遍大于西南地区,认为这与西北地区的干旱环境有关,沉积速度慢,所以沉积物更加古老坚硬,对应的速度梯度也就更大。张炜超等(2022)对陕西关中平原的钻孔数据进行了研究,表明在数据量大时推荐B04区域模型,而在数据量小时推荐WW15模型。Fang等(2023)在唐山地区的研究表明,孔深小于18m时使用B04模型,孔深大于18m时则推荐DEA13模型,此外,还验证了Xie等(2016)建立的北京地区模型在地质条件相似的唐山地区同样具有理想的预测效果。米欣雪等(2024)对新疆的钻孔数据进行回归分析,并给出了该地区6类不同地质年代单元分别适用的预测模型。李志恒等(2024)验证了在山东地区预测效果最佳的模型为DEA13区域模型。由此可见, $V_{s30}$ 外推模型具有明显的区域性,不同的地质条件会导致剪切波速剖面的差异。因此,开发适用于江苏东部平原区的 $V_{s30}$ 外推模型是非常必要的。

本文基于江苏东部平原区的地震安全性评价报告等资料,建立了包含678个具有完整剪切波速剖面且深度均超过30m的钻孔数据库。研究中选用6种 $V_{s30}$ 外推模型,其中包括4种需要通过回归计算获得系数的模型和2种无需回归系数的模型。基于4种回归模型,使

用 678 个钻孔数据进行回归分析,由此开发了江苏模型。通过对比 4 种江苏模型和 2 种无需回归模型的预测误差,确定了在江苏东部平原区预测效果最佳的外推模型。随后,将这 4 个江苏模型与其他区域模型的模型系数进行对比,进一步阐明了模型的区域适用性。此外,还验证了基于地形坡度和基于第四纪沉积物厚度的模型在本研究区的适用性,并探讨了该地区的场地类别与  $V_{S30}$  值的关系,计算了 III、IV 类场地的  $V_{S30}$  边界值。研究结果为江苏东部平原区提供了可靠的  $V_{S30}$  预测模型和数据支持,推动了区域震动模型的构建和地震灾害评估的开展,也为区域地震灾害风险评估提供科学依据,在制定防震减灾策略、优化地震应急预案和提升城市抗震能力等方面均具有重要意义。

### 1 数据收集与分析

本文选择的研究区位于江苏东部平原区,属于滨海平原地带,范围为  $31.9^{\circ}\text{N} \sim 33.9^{\circ}\text{N}$ 、 $119.7^{\circ}\text{E} \sim 121.5^{\circ}\text{E}$ 。如图 1 所示,地理上包括盐城市、泰州市、南通市及其下属区县。

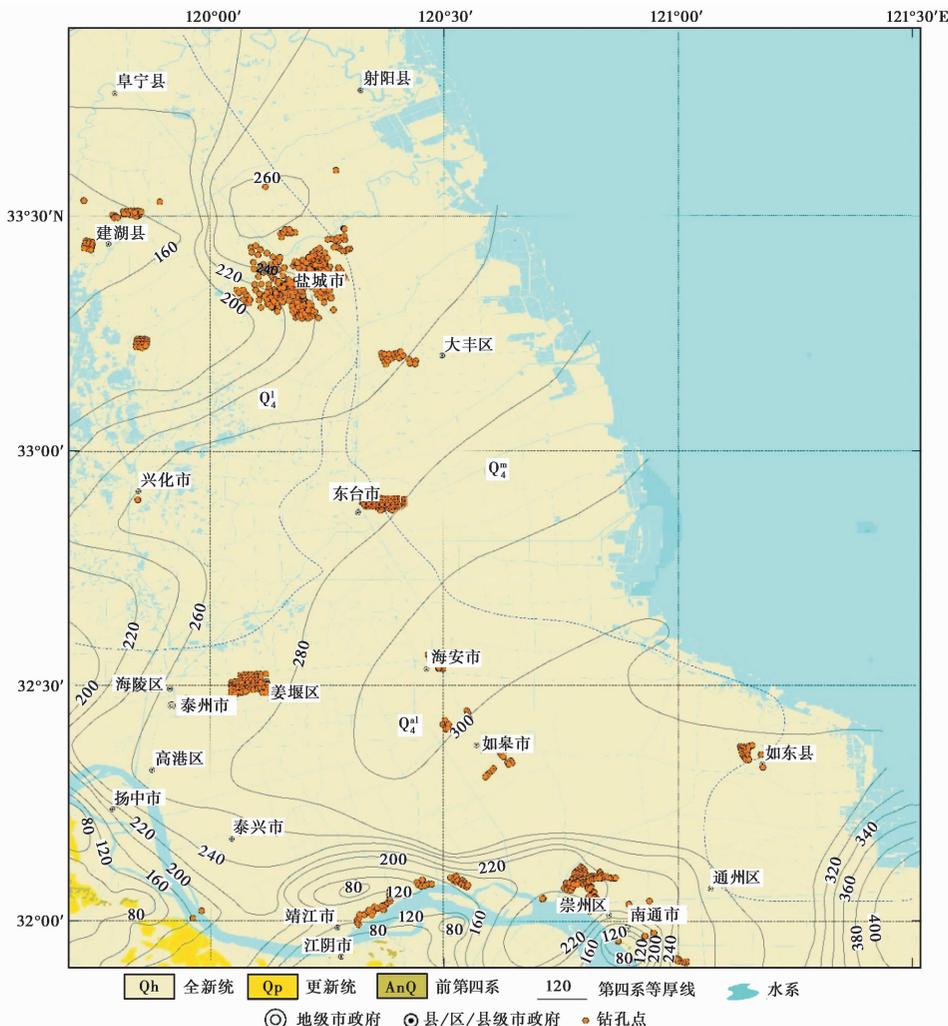


图 1 江苏东部平原区第四纪地层分布、覆盖层厚度和钻孔分布

研究区内广泛覆盖有深厚软弱的第四纪沉积物,厚度总体在 80~300m 之间,少部分区域的厚度达到 400m。第四纪沉积物岩性包括粉土、粉质黏土及粉砂及少量的中砂和细砂。全区第四纪沉积物的  $V_{s30}$  值在 140~230m/s 之间。

区内绝大部分地层为全新统( $Q_h$ ),只有极少的更新统( $Q_p$ )和前第四系( $AnQ$ )地层分布于研究区的西南区域,如图 1 所示。本研究使用的 678 个钻孔全位于全新统( $Q_h$ )地层区域。根据第四纪沉积单元进一步将全新统地层分成 3 个类别:

(1) 全新世海积( $Q_4^m$ ),即由全新世海洋沉积物组成,全新世海积单元分布于研究区的东部滨海地带。

(2) 全新世冲积( $Q_4^l$ ),即由全新世冲积层沉积物组成,分布于研究区内的长江沿岸地带。

(3) 全新世湖积( $Q_4^l$ ),由全新世湖泊沉积物组成,分布于研究区的西北部。

研究区内钻孔分布情况如图 1 所示,其中,盐城市的钻孔分布最为密集,建湖县、泰州市姜堰区、南通市崇川区、东台市、如东县的钻孔较为聚集。钻孔的聚集主要是由于城市开发和建设活动高度集中在这些区域,各类工程场地陆续规划,相应的地震安全性评价工作也随之开始,因此在这些工程场地产生了大量的钻孔测井及钻孔剖面数据。

从第四纪沉积单元来看,如表 1 所示,大部分钻孔数据位于里下河湖沼积平原,属于全新世湖积单元,占钻孔总数的 78.3%。少部分钻孔位于研究区南部长江沿岸的长江三角洲平原,属于全新世冲积单元,占钻孔总数的 16.2%。只有极少的钻孔位于研究区东部射阳—大丰海积平原与大丰—三余海积平原,属于全新世海积单元,约占钻孔总数的 5.5%。

表 1 不同第四纪沉积单元的钻孔分布

第四纪沉积单元	符号	钻孔数量	百分比/%
射阳—大丰海积平原与大丰—三余海积平原	全新世海积( $Q_4^m$ )	37	5.5
里下河湖沼积平原	全新世湖积( $Q_4^l$ )	531	78.3
长江三角洲平原	全新世冲积( $Q_4^l$ )	110	16.2

钻孔数据主要来源于:

(1) 盐城小区划报告。

(2) 盐城市、泰州市、南通市及下辖县级市的经济开发区、高新技术产业开发区、科技产业园区和工业园区的地震安全性评价报告。

(3) 研究区内的住宅、商业广场、路桥、水电厂等市政设施工程场地的地震安全性评价报告。

(4) 江苏沿海输气管道工程场地的地震安全性评价报告。

对原报告中的钻孔数据进行了预处理。预处理过程中,删除了剖面精度不足的钻孔数据,以确保后续计算的准确性。录入数据库中的精度最高的钻孔剖面,每 1m 的土层都具备明确的岩性信息和对应的剪切波速值。随后,对每一个钻孔剖面进行详细核查,删除了测量或记录出现明显问题的异常数据,删除了因地层剖面特殊导致剪切波速剧烈变化的异常数据,并统一了数据的单位和格式。数据预处理保证了后续等效剪切波速计算的精确性和模型回归的准确性。最终,经过预处理,数据库共录入了 678 个钻孔数据。图 2 展示了本研究的典型钻孔剖面图。

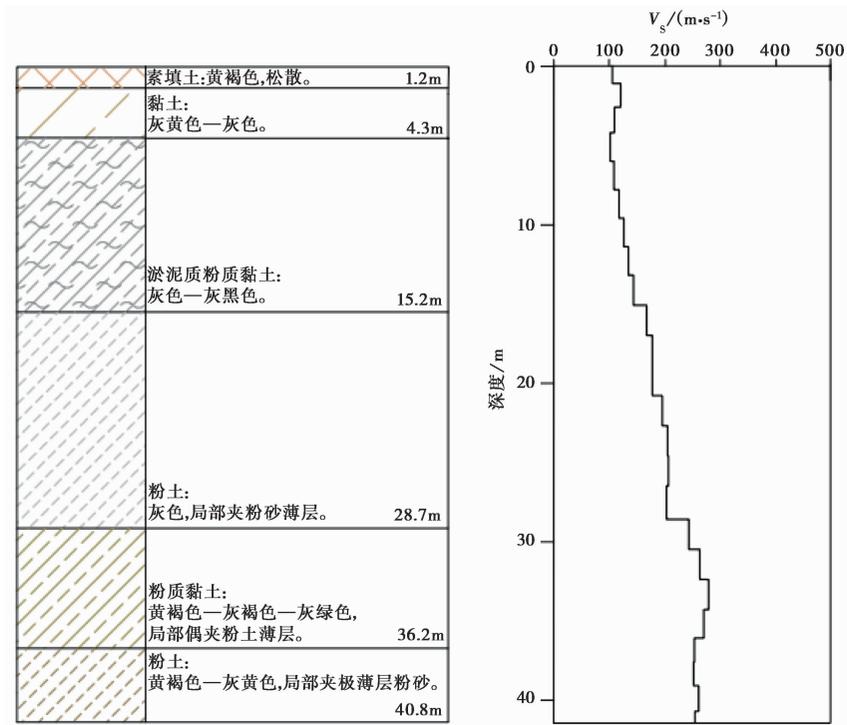


图 2 典型钻孔剖面

数据库的678个钻孔中,最浅的钻孔深度为75.8m,最深的钻孔深度达到152m。有95%的钻孔深度达到或超过100m,深度为100m的钻孔数量最多,如图3所示。

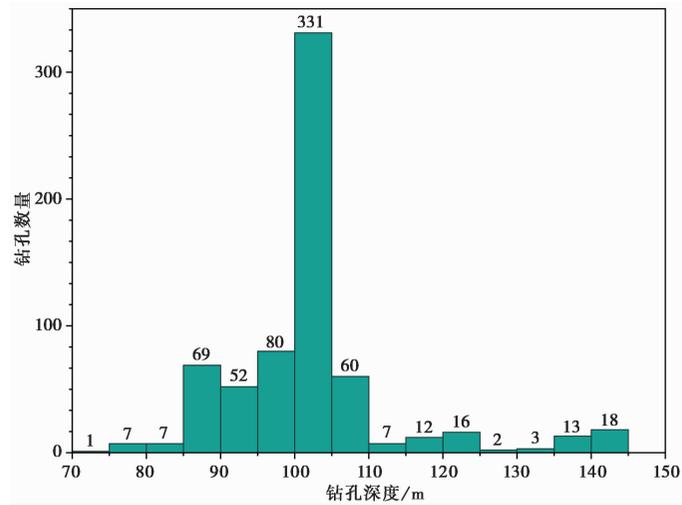


图 3 钻孔深度分布统计直方图

## 2 预测模型与系数回归

### 2.1 $V_{s30}$ 外推模型

在使用外推模型进行计算和预测之前,首先要计算钻孔从地表到深度  $Z$  的平均剪切波速  $V_{sZ}$ ,即

$$V_{sZ} = \frac{Z}{\Delta t_Z} \quad (1)$$

$$\Delta t_Z = \sum_{i=0}^n \frac{Z_i}{V_s(Z_i)} \quad (2)$$

式中,  $\Delta t_Z$  表示地表到深度  $Z$  的横波传播时间,  $Z_i$  表示第  $i$  层土层的厚度,  $V_s(Z_i)$  表示第  $i$  层土层的剪切波速值。

目前在  $V_{s30}$ 外推模型领域,共有 6 种外推模型,下文中将其称为原型模型。基于 6 种原型模型,将使用江苏东部平原区的 678 个钻孔数据进行计算和回归,并开发区域化的江苏模型。

#### 2.1.1 常数外推模型 (BCV 模型)

在所有的  $V_{s30}$ 外推模型中,最简单的外推模型是 Kuo 等(2011)给出的 BCV 模型

$$\widehat{V}_{s30} = \frac{30}{\Delta t_d + \frac{30-d}{V_{s(d)}}} \quad (3)$$

式中,  $d$  表示终孔深度,  $V_{s(d)}$  表示终孔瞬时剪切波速值,  $\widehat{V}_{s30}$  为  $V_{s30}$  的预测值。该模型假设从终孔深度  $d$  到 30m 的剪切波速均等于终孔瞬时剪切波速值  $V_{s(d)}$ ,不需要回归分析和过多计算即可估计  $V_{s30}$  值,适用于计算量较小的情况。

#### 2.1.2 对数线性模型 (B04 模型)

Boore(2004)提出了对数线性模型

$$\lg \widehat{V}_{s30} = a_0 + a_1 \lg V_{sd} \quad (4)$$

式中,  $V_{sd}$  表示从地表到终孔深度  $d$  的平均剪切波速,可通过式(1)和式(2)进行计算。系数  $a_0$  和  $a_1$  基于加州地区的 135 个钻孔数据通过回归分析得到。

#### 2.1.3 对数非线性模型 (BEA11 模型)

Boore 等(2011)在 B04 模型的基础上,增加了二次项,进而推导出了对数非线性模型

$$\lg \widehat{V}_{s30} = b_0 + b_1 \lg V_{sd} + b_2 (\lg V_{sd})^2 \quad (5)$$

式中,系数  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  根据日本、加州、土耳其和欧洲等地的 1022 个钻孔数据回归计算得到。

#### 2.1.4 条件独立模型 (DEA13 模型)

Dai 等(2013)提出,剪切波速度剖面从地表开始是一个 Markov 过程,在终孔深度  $d$  以下的剪切波速值更倾向于与  $d$  处的瞬时剪切波速  $V_{s(d)}$  相关,即

$$\lg \widehat{V}_{s(d,30)} = c_0 + c_1 \lg V_{s(d)} \quad (6)$$

$$\widehat{V}_{s30} = \frac{30}{\Delta t_d + \frac{30-d}{\widehat{V}_{s(d,30)}}} \quad (7)$$

式(6)中的  $\widehat{V_{s(d,30)}}$  为终孔深度  $d$  到深度 30m 的平均剪切波速,其与终孔瞬时剪切波速  $V_{s(d)}$  之间具有相关性。DEA13 模型是一个两步骤模型,第一个步骤考虑到了终孔深度  $d$  到深度 30m 这一未知部分的平均剪切波速。系数  $c_0$  和  $c_1$  是由加州、日本和土耳其的 929 个钻孔数据回归得到的。

2.1.5 双剪切波速参数模型(MN15 模型)

翠川三郎等(2015)提出的 MN15 模型包含了两种参数:平均剪切波速  $V_{sd}$  和终孔瞬时剪切波速  $V_{s(d)}$ ,是一个双参数模型

$$\lg \widehat{V_{s30}} = d_0 + d_1 \lg V_{sd} + d_2 V_{s(d)} \tag{8}$$

式中,系数  $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  根据日本都市区和 KiK-net 的 2099 个数据回归计算得到。

2.1.6 双深度参数模型(WW15 模型)

上述 4 个模型所包含的系数需要根据实际的钻孔数据回归得出,因此这些模型具有一定的区域性。为解决该问题,Wang 等(2015)提出了一个不包含回归系数的模型

$$\lg \widehat{V_{s30}} = \lg V_{s(z_2)} + \frac{\lg 30 - \lg z_2}{\lg z_2 - \lg z_1} [\lg V_{s(z_2)} - \lg V_{s(z_1)}] \tag{9}$$

式中,  $z_1$ 、 $z_2$  为深度值,  $z_1 < z_2 < 30\text{m}$ 。该模型适用于不便于回归计算的情况,不受区域的限制。

2.2 模型系数回归

对于 BCV 模型,按照式(3)可直接计算出  $V_{s30}$  的预测值。对于 B04、BEA11、DEA13 和 MN15 模型,则使用江苏东部平原区的 678 个钻孔数据,在深度为 5~29m 的范围内,以 1m 为间隔依次进行计算,由此获得 25 组不同深度下的模型系数和对应的  $V_{s30}$  预测值,得到的模型简称江苏模型。对于 WW15 模型,则选取多组间隔为 5m 的深度组合( $z_1, z_2$ )来计算  $V_{s30}$  的预测值,包括(5, 10)、(5, 15)、(5, 20)、(5, 25)、(10, 15)、(10, 20)、(10, 25)、(15, 20)、(15, 25)和(20, 25)共 10 个组合。

将 6 个模型所得的  $V_{s30}$  预测值与  $V_{s30}$  实际值进行对比(图 4)。为了便于 WW15 模型和其他模型进行比较,选取了深度间隔为 5m 且  $z_2$  为 10m、15m、20m、25m 的 4 个组合所得的  $V_{s30}$  预测值进行可视化。从图 3 可以直观看出,无论采用哪种外推模型,随着钻孔底部深度  $d$  的增加,  $V_{s30}$  的预测值都会更加接近实际值。

3 模型评价结果

为进一步比较不同外推模型的预测效果,使用预测误差  $e$  作为评估模型预测性能指标

$$e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\lg(V_{s30\text{est}}) - \lg(V_{s30}))_i^2} \tag{10}$$

式中,  $N$  表示钻孔数据总量,  $i$  表示第  $i$  个钻孔,  $V_{s30\text{est}}$  为  $V_{s30}$  的预测值。  $e$  的值越小,则表示模型的预测误差越小,预测效果越好。分别计算 5 个外推模型在 5~29m 范围内的 25 组  $e$  值以及 WW15 模型的 10 组  $e$ ,如图 5(a)所示。为了便于比较深度 20m 之后的预测误差,图 5(a)中的相关部分已被放大并展示在图 5(b)中。可以看出:

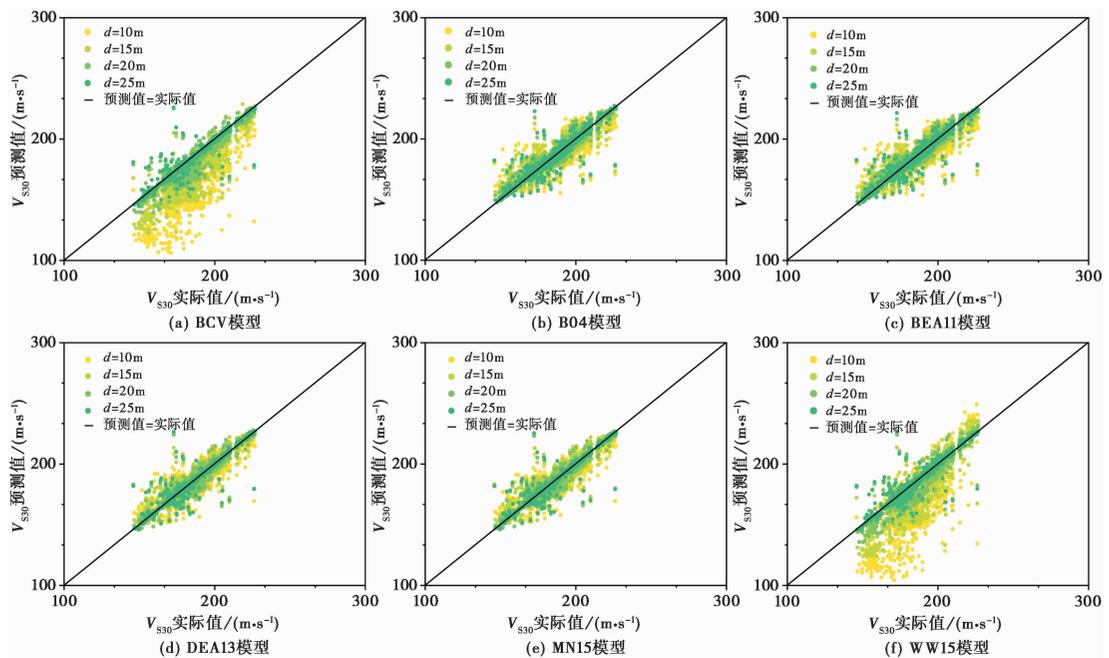


图4  $V_{s30}$  预测值与实际值的对比

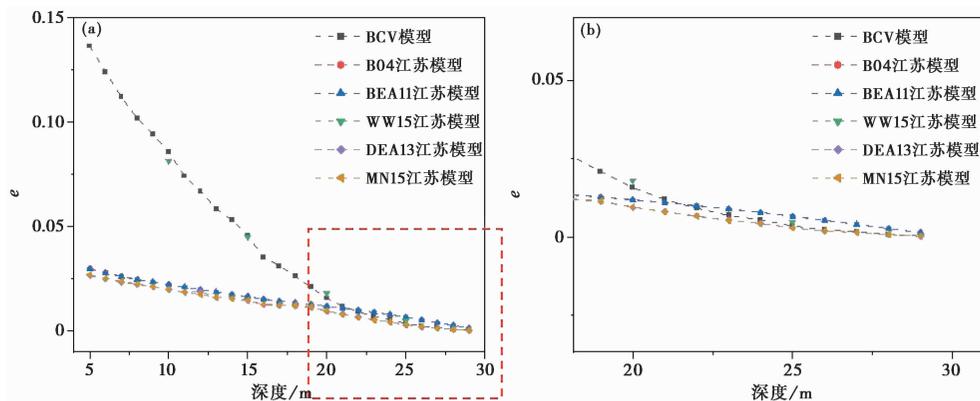


图5 不同外推模型的预测误差  $e$  值

(1) 在深度较小时,BCV 模型的  $e$  值远大于其他 5 个模型。由于 BCV 模型是将深度  $d$  处的波速直接按常数外推到 30m 处,因此当深度超过 25m 以后,BCV 模型的预测准确性大幅增加,同时其  $e$  值也大幅减小,不过其  $e$  值始终略高于 DEA13 江苏模型。

(2) B04 江苏模型和 BEA11 江苏模型的  $e$  值极为接近,不过 BEA11 江苏模型的  $e$  值略小。周健(2021)对 B04 模型进行了拟合不足检验,即检验模型未引入二次项时产生的系统性偏差。检验结果表明,二次项对模型的预测效果提升的作用是有限的。因此,BEA11 模型在引入二次项后,预测效果仅有微弱的提升。

(3) DEA13 江苏模型和 MN15 江苏模型的  $e$  值也极为接近。在 5~29m 的大多数深度点,DEA13 江苏模型的  $e$  值比 MN15 江苏模型更小。此外,MN15 模型需要计算  $V_{s(d)}$  和  $V_{sd}$  两种参数,而 DEA13 模型只需要  $V_{s(d)}$  一种参数,不仅减少了计算量,也避免了参数的互相关问

题。因此,考虑到准确性和模型计算效率,DEA13 江苏模型无疑是更为推荐的模型。

(4)根据前面的分析,只需要将 WW15 模型与 DEA13 江苏模型进行对比,即可确定江苏东部平原区最适用的外推模型。WW15 模型中的  $z_2$  值等同于其他模型涉及的终孔深度  $d$  的值。如表 2 所示,DEA13 江苏模型的  $e$  均小于 WW15 模型。WW15 模型预测效果欠佳的原因在于,其计算公式仅基于钻孔中两点数据进行外推计算,并未考虑区域特性和实际钻孔剖面的具体特征。

表 2 WW15 模型和 DEA13 江苏模型的预测误差  $e$  对比

WW15 深度组合/m	$e$	DEA13 深度/m	$e$
(5,10)	0.0814( $z=10\text{m}$ 时的最小误差)	10	0.0198
(5,15)	0.0558		
(10,15)	0.0449( $z=15\text{m}$ 时的最小误差)	15	0.0147
(5,20)	0.0327		
(10,20)	0.0255		
(15,20)	0.0180( $z=20\text{m}$ 时的最小误差)	20	0.0097
(5,25)	0.0140		
(10,25)	0.0105		
(15,25)	0.0071		
(20,25)	0.0047( $z=25\text{m}$ 时的最小误差)	25	0.0029

综上所述,DEA13 江苏模型的预测效果比 WW15 模型更好,也是本研究选取的 6 个外推模型中,预测效果最好的模型。DEA13 江苏模型之所以表现最好,是因为其考虑到了终孔深度到 30m 之间的平均剪切波速  $\widehat{V_{s(d,30)}}$ 。使用  $\widehat{V_{s(d,30)}}$  和已知部分共同预测  $V_{s30}$  值将会比单独使用已知部分来预测精度更高。

## 4 讨论

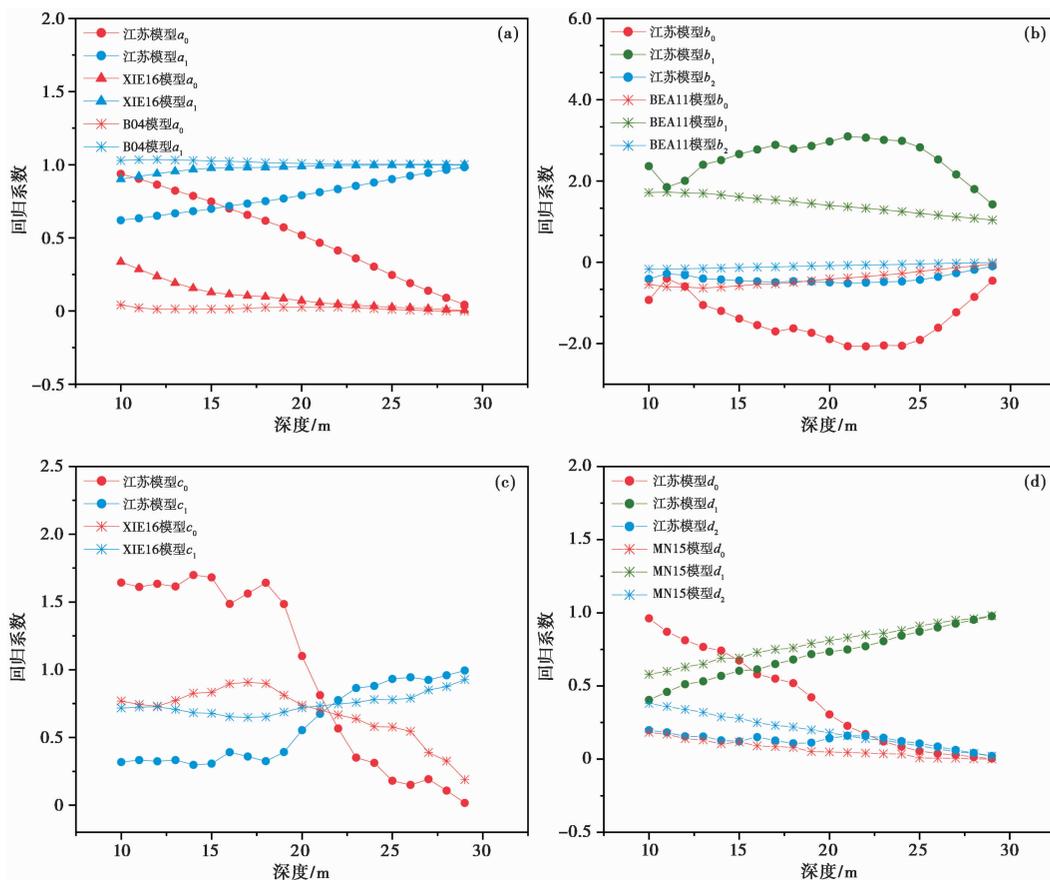
### 4.1 江苏模型与其他模型的对比

除了无需回归系数的 BCV 模型和 WW15 模型,其余 4 个外推模型的系数都是基于特定区域的钻孔数据回归得到的。将本研究江苏模型的系数和其他模型的系数进行对比,如图 6 所示。

图 6(a)展示了 B04 江苏模型、基于加州地区钻孔数据的 B04 原型模型,以及基于北京地区钻孔数据的 XIE16 模型(Xie et al,2016)的系数  $a_0$  和  $a_1$  的对比。图中,相同颜色代表相同的系数,不同的形状代表不同的模型。可以看出,B04 江苏模型的斜率项  $a_1$  明显小于另两个模型,说明江苏平原区的钻孔速度变化梯度较低。这是由于本研究区覆盖有松软深厚的第四纪沉积物,在相同深度变化下,剪切波速的增幅较小。

图 6(b)展示了 BEA11 江苏模型、基于日本、加州等地钻孔数据的 BEA11 原型模型的系数  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  的对比。在本研究区的  $V_{s30}$  范围内,江苏模型的拟合线更为平缓。类似于图(a)的分析,这一差异也表明江苏平原区的剪切波速增幅相对较小。

图 6(c)展示了 DEA13 江苏模型和 XIE16 模型的系数  $c_0$  和  $c_1$  的对比。由于 DEA13 原型



(a) B04 区域模型系数对比; (b) BEA11 区域模型系数对比;  
(c) DEA13 区域模型系数对比; (d) MN15 区域模型系数对比

图 6 江苏模型和其他区域模型的系数对比

模型未提供具体系数,因此未参与对比。从图 6(c)中可以直观地看出,模型的系数在北京平原和江苏东部平原存在较大的区域性差异。

图 6(d)展示了本研究提供的 MN15 江苏模型和基于日本钻孔数据的 MN15 原型模型的系数  $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  的对比。可以看出 MN15 模型也具有区域性。

根据以上对比和分析,发现地质条件和剪切波速特征差距较大的区域,其  $V_{s30}$  外推模型的系数会有一些的差异。如果采用这些区域的外推模型来计算本研究区的  $V_{s30}$  值,显然会导致较大的误差。这也证实了选用区域适用的  $V_{s30}$  外推模型的重要性。

#### 4.2 江苏东部平原区的 $V_{s30}$ 值与地形坡度的关系

Wald 等(2007)根据美国 SRTM 的 DEM 高程数据计算得到坡度,随后建立坡度和  $V_{s30}$  的相关关系,给出活动大陆区和稳定构造区不同坡度区间所对应的 NEHRP 场地类别,提出了一个基于地形坡度的场地分类模型。该模型的一个主要优势在于,使用的 DEM 数据在全球范围内都易于获取,因此可以快速给出目标区域的场地分类图。本研究选取了江苏地区 15 弧秒分辨率的 DEM 数据来计算坡度,并研究地形坡度与  $V_{s30}$  值之间的关系,以验证基于地形

坡度的模型在江苏东部平原区的适用性。

为每个钻孔点提取相应的坡度值,并按照表 3 给出的活动大陆区的对应关系,绘制了本研究区的地形坡度与  $V_{S30}$  值的相关关系图(图 7)。在图 7 中,所有钻孔的  $V_{S30}$  值都集中在 140~230m/s 的狭窄区间内,3 种不同沉积类型的钻孔点在图中的分布都非常集中,并未展现出显著的规律。

表 3 稳定大陆区和活动构造区的坡度与 NEHRP 场地类别的对应关系 (Wald et al, 2007)

场地类别	$V_{S30}$ 范围/( $m \cdot s^{-1}$ )	稳定大陆区的坡度范围/( $m \cdot m^{-1}$ )	活动构造区的坡度范围/( $m \cdot m^{-1}$ )
E	<180	< $2.0 \times 10^{-5}$	< $1.0 \times 10^{-4}$
D1	180~240	$2.0 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4} \sim 2.2 \times 10^{-3}$
D2	240~300	$2.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-3} \sim 6.3 \times 10^{-3}$
D3	300~360	$4.0 \times 10^{-3} \sim 7.2 \times 10^{-3}$	$6.3 \times 10^{-3} \sim 0.018$
C1	360~490	$7.2 \times 10^{-3} \sim 0.013$	0.018~0.050
C2	490~620	0.013~0.018	0.050~0.10
C3	620~760	0.018~0.025	0.10~0.138
B	>760	>0.025	>0.138

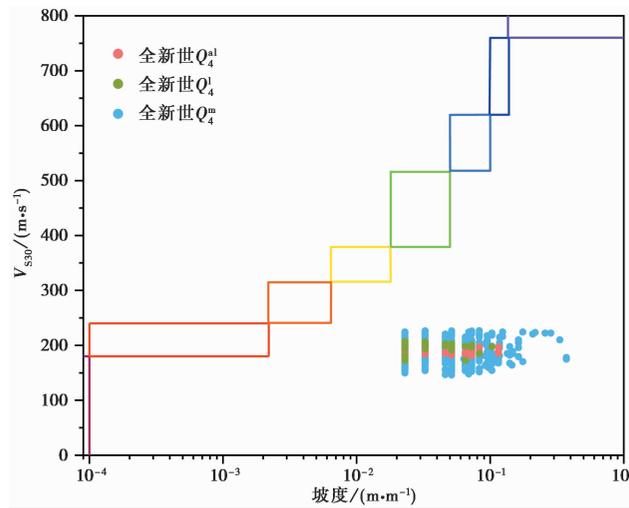


图 7 江苏东部平原区的地形坡度与  $V_{S30}$  值的关系

综上所述,基于地形坡度的模型在江苏东部平原区的适用性较差。这主要是因为研究区位于滨海平原,地形坡度变化较小,且钻孔的  $V_{S30}$  值范围较窄,难以与地形坡度建立有效的对应关系。基于地形坡度的模型在地形坡度变化剧烈的大范围区域会有更好的适用性。

### 4.3 江苏东部平原区的 $V_{S30}$ 值与第四纪沉积物深度的关系

Xie 等(2016)通过对北京平原的钻孔数据进行统计分析,提出了一种基于第四纪深度的对数双线性  $V_{S30}$  预测模型

$$\lg(V_{S30}) = \begin{cases} d_{01} + d_{11} \lg(Q_{\text{depth}}), & Q_{\text{depth}} < Q_0 \\ d_{02} + d_{12} \lg(Q_{\text{depth}}), & Q_{\text{depth}} \geq Q_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $d_{01}$ 、 $d_{11}$ 、 $d_{02}$ 、 $d_{12}$  为最小二乘回归得到的模型系数,  $Q_{\text{depth}}$  代表第四纪沉积物的深度,  $Q_0 = 1.920$ 。

根据本研究区钻孔的实际  $V_{s30}$  值和相应的第四纪沉积物深度绘制了散点图(图 8)。从图 8 中可以看出, 在本研究区内, 数据点的分布非常分散, 钻孔的  $V_{s30}$  值与第四纪沉积物深度未表现出明显的相关性。使用对数双线性模型进行回归, 并根据下式计算决定系数

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

式中,  $N$  表示钻孔数据总量,  $y_i$  表示实测值,  $\bar{y}$  为实测值的平均值,  $\hat{y}_i$  为预测值。根据式(12)得到的  $R^2$  仅有 0.04, 这定量地说明对数双线性模型在江苏东部平原区的适用性较差。

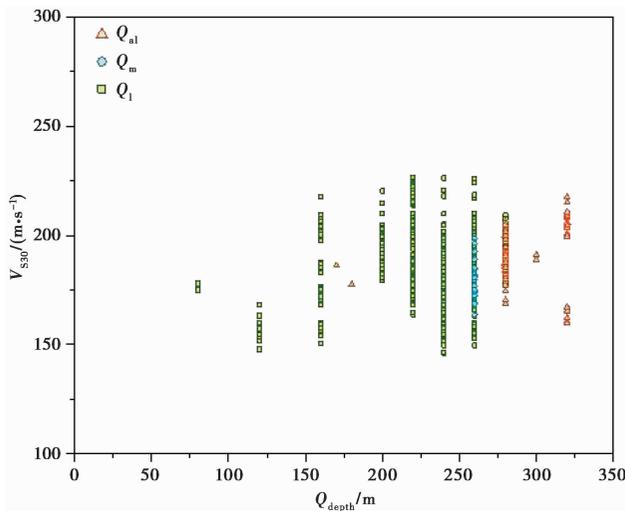


图 8  $V_{s30}$  实际值与第四纪沉积物深度的关系

#### 4.4 场地类别与 $V_{s30}$ 的关系

自 2024 年起, GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2016) 废止了建筑场地类别的划分规定, 有关场地类别的规定应参阅 GB 55002—2021《建筑与市政工程抗震通用规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2021), 如表 4 所示, 其中  $V_{SE}$  的计算深度取覆盖层厚度  $H$  和 20m 之中的较小值。

表 4 《建筑与市政工程抗震通用规范》场地类别分类

岩石的剪切波速 $V_s$ 或土层 等效剪切波速 $V_{SE}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	场地覆盖层厚度 $H/\text{m}$						
	$H=0$	$0 < H < 3$	$3 \leq H < 5$	$5 \leq H < 15$	$15 \leq H < 50$	$50 \leq H < 80$	$H \geq 80$
$V_s > 800$	$I_0$						
$500 < V_s \leq 800$	$I_1$						
$250 < V_s \leq 500$	$I_1$	$I_1$	$I_1$	II	II	II	II
$150 < V_s \leq 250$	$I_1$	$I_1$	II	II	II	III	III
$V_s \leq 150$	$I_1$	$I_1$	II	II	III	III	IV

而美国 NEHRP 规范 (National Earthquake Hazards Reduction Program, 2020) 不考虑覆盖层厚度, 仅用  $V_{s30}$  值确定场地类别。2020 年更新后, 在原有的 A~F 类的基础上, 新增加了中间类别 BC、CD、DE 类, 并对场地类别的  $V_{s30}$  界限值做出新的调整, 如表 5 所示。

表 5 美国 NEHRP 规范场地类别分类 (National Earthquake Hazards Reduction Program, 2020)

场地类别	描述	根据实测或估计得到的 $V_{s30}$ 值/( $m \cdot s^{-1}$ ) (换算后)
A	硬岩	$V_{s30} > 1524$
B	中硬岩	$914 < V_{s30} \leq 1524$
BC	软岩	$640 < V_{s30} \leq 914$
C	极密的砂土或极硬黏土	$442 < V_{s30} \leq 640$
CD	密砂土或硬黏土	$304 < V_{s30} \leq 442$
D	中密砂土或硬黏土	$213 < V_{s30} \leq 304$
DE	松散砂土或中硬黏土	$152 < V_{s30} \leq 213$
E	极松散砂土或软黏土	$V_{s30} \leq 152$
F	可液化土、高灵敏性黏土等	

根据 GB 55002—2021《建筑与市政工程抗震通用规范》, 对 678 个钻孔进行场地分类, 得到 536 个 III 类场地和 142 个 IV 类场地, 暂无 I、II 类场地。再次根据美国规范进行分类, 得到 46 个 D 类场地、622 个 DE 类场地和 10 个 E 类场地。从两种规范的场地类别来看, 江苏东部平原区的场地总体偏软。为了比较中美规范对钻孔分类的异同, 给出两种规范确定的场地分类情况, 如图 9 所示。从图 9(a) 可以看出中国规范的 III 类场地覆盖范围较宽, 离散性较大。在图 9(b) 中, 中国规范 III 类场地的  $V_{s30}$  平均值为 191.5m/s, 其中仅 8.5% 属于 NEHRP 规范 D 类场地, 91.5% 均属于 DE 类场地。而中国规范 IV 类场地的  $V_{s30}$  平均值为 163.2m/s, 其中有 92.9% 属于 NEHRP 规范的 DE 类场地, 其余 7.1% 属于 E 类场地。受本研究区钻孔数据的局限, 无法判断 I、II 类场地与美国规范场地的关系, 但是与中国规范相比, 美国 NEHRP 规范对场地类别的划分更倾向于保守, 对软弱场地的分类也更为细致。

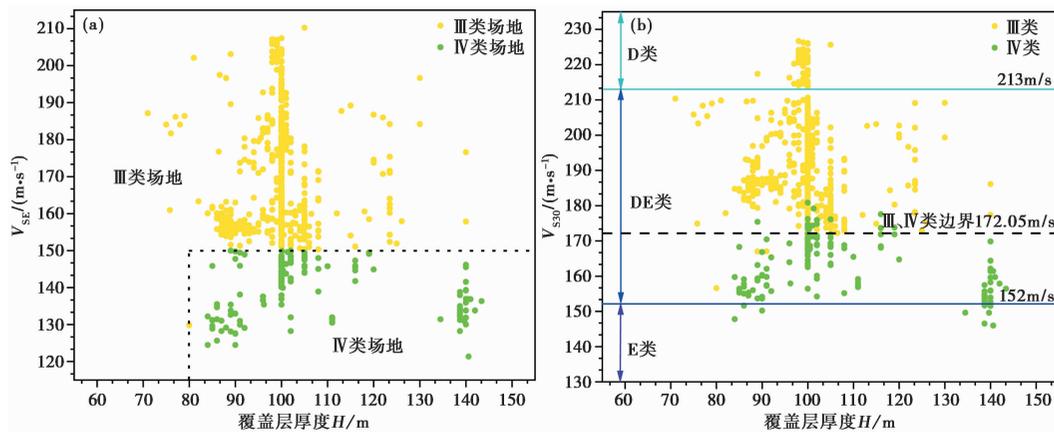


图 9 按中国规范(a)、美国规范(b)计算的等效剪切波速与场地类别的关系

早期为了降低钻孔成本,中国规范选择了以地表以下 20m 的等效剪切波速作为场地分类的指标之一。随着我国经济水平的提高和高层建筑的增多,将 20m 的计算深度提高至 30m 成为必然趋势。此外,在滨海平原地区,20m 的深度无法有效反映回填土层下的海泥和沉积土软弱层的影响(彭艳菊等,2009)。因此,很多基于场地分类的研究提出,应借鉴美国 NEHRP 规范,使用  $V_{s30}$  作为中国规范的新指标之一(黄雅虹等,2010; 陈国兴等,2020; 迟明杰等,2021)。针对中国规范的  $V_{s20}$  指标转换为  $V_{s30}$  时,涉及的场地边界值问题, Xie 等(2023)基于中国、日本及加州的 2652 个钻孔数据,使用  $F1$  分数作为评估场地分类正确率的指标,选取了  $F1$  分数最大时对应的边界值作为不同场地类别之间的  $V_{s30}$  边界值,其中 III、IV 类场地边界值为 170m/s。不过该研究侧重于全国范围的平均统计结果,区域场地分类边界需进一步验证。基于江苏东部平原区 678 个钻孔数据,计算了 III、IV 类最佳的  $V_{s30}$  边界值

$$F1 \text{ 分数} = 2 \cdot \frac{\text{召回率} \cdot \text{准确率}}{\text{召回率} + \text{准确率}} \quad (13)$$

$$\text{召回率} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (14)$$

$$\text{准确率} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (15)$$

其中,  $TP$  为实际为正类且预测为正类的样本数;  $FP$  为实际为负类但预测为正类的样本数;  $FN$  为实际为正类但预测为负类的样本数。计算 678 个 III、IV 类钻孔点的  $F1$  分数,并找到最大  $F1$  分数所对应的边界值,如图 10 所示, III、IV 类场地的  $V_{s30}$  边界值为 172.05m/s。

该值与 Xie 等(2023)给出的边界值(170m/s)十分接近。这表明,尽管区域地质条件存在差异,但  $V_{s30}$  作为单一参数在区分软土场地时具有较好的普适性。

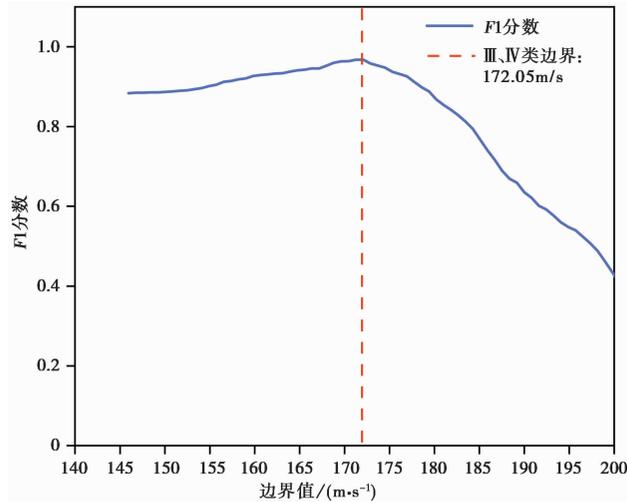


图 10  $F1$  分数与边界值的对应关系

使用新的边界值对 678 个钻孔的  $V_{s30}$  值进行场地分类,分类结果与中国规范基于  $V_{s20}$  的分类结果相比,有 84.2% 相同,具有较高的一致性。新的场地边界值可为区域场地分类提供实践参考。

## 5 结论

本文选取了江苏东部平原区的 678 个钻孔数据建立了数据库,并对数据进行了统计分析。以 6 个  $V_{s30}$  外推模型为基础,开发了 4 个江苏模型。通过验证 6 种模型的预测误差,发现 DEA13 江苏模型的预测效果最好,因此被认定为推荐使用的模型。

进一步地,本文对比了 4 个江苏模型与原型模型和 XIE16 北京模型的系数。结果表明,不同地区的模型系数存在显著差异,体现了模型的区域性。

此外,本文还验证了基于地形坡度的模型和基于第四纪沉积物深度的模型在江苏东部平原区的应用存在局限性。在  $V_{s30}$  值较小且变化范围不大的区域,这两种模型难以有效地预测  $V_{s30}$  值并区分场地类别。

最后,探讨了场地类别与  $V_{s30}$  值的关系,对比了最新版本的 GB 55002—2021《建筑与市政工程抗震通用规范》和美国 NEHRP 规范对 678 个钻孔场地分类的特点,发现按照中国、美国规范分类,本研究区的场地均属于软弱场地,不过美国规范分类更为保守且细致。通过最大化分类正确率,给出在江苏东部平原区推荐的 III、IV 类场地  $V_{s30}$  边界值约为 172.05 m/s。

因此,对于地势低平、地表沉积物类型单一且  $V_{s30}$  值较小的这类平原区域,推荐使用 DEA13 江苏模型对浅钻孔的剪切波速进行外推,以获得较为准确的  $V_{s30}$  预测值。研究结果为这类平原区域提供了可靠的  $V_{s30}$  预测模型和场地分类边界值,为区域防灾减灾研究提供了理论支持和数据基础。

## 参考文献

- 陈国兴,陈继华. 2004. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响. 世界地震工程, **20**(3):66~73.
- 陈国兴,丁杰发,方怡,等. 2020. 场地类别分类方案研究. 岩土力学, **41**(11):3509~3522.
- 迟明杰,李小军,陈学良,等. 2021. 场地划分中存在的问题及建议. 地震学报, **43**(6):787~803.
- 高维明,郑朗荪,李家灵,等. 1988. 1668 年郯城 8.5 级地震的发震构造. 中国地震, **4**(3):9~15.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪-公元 1911 年). 北京:地震出版社.
- 黄雅虹,吕悦军,兰景岩,等. 2010. 工程场地分类中等效剪切波速计算深度问题的讨论. 地震地质, **32**(2):312~319.
- 贾琳,谢俊举,李小军,等. 2021. 四川和云南地区场地平均剪切波速  $V_{s20}$  和  $V_{s30}$  经验预测模型研究. 地震学报, **43**(5):628~642.
- 李起彤. 1997. 南黄海 6.1 级地震构造背景分析. 地震学刊, **17**(2):18~22.
- 李寿寅,屈秀宜. 1990. 江苏省区域地质特征概述. 中国区域地质, (3):193~205,221.
- 李小军,彭青. 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析. 地震工程与工程振动, **21**(1):29~36.
- 李志恒,谢俊举,李柯苇,等. 2024. 山东地区场地剪切波速经验外推模型及其适用性. 地震地质, **46**(4):934~954.
- 刘薛宁,陈国兴,任炜,等. 2020. 深厚第四纪沉积土非线性性能对地表地震动特性的影响. 防灾减灾工程学报, **40**(4):498~508.
- 吕悦军,彭艳菊,兰景岩,等. 2008. 场地条件对地震动参数影响的关键问题. 震灾防御技术, **3**(2):126~135.
- 米欣雪,张雨婷,任叶飞,等. 2024. 考虑地质条件的场地  $V_{s30}$  经验估计模型的选用-以新疆地区为例. 震灾防御技术, **19**(1):79~87.
- 彭艳菊,吕悦军,黄雅虹,等. 2009. 工程地震中的场地分类方法及适用性评述. 地震地质, **31**(2):349~362.
- 王斌,周健,梁雪萍. 2008. 江苏盐城附近及邻近海域地震活动分析. 防灾科技学院学报, **10**(3):56~60.
- 徐扬,赵晋泉,李小军,等. 2008. 基于汶川地震远场强震动记录的厚覆盖土层对长周期地震动影响分析. 震灾防御技术, **3**(4):345~351.

- 杨伟林,朱升初,洪海春,等. 2009. 汶川地震远场地震动特征及其对长周期结构影响的分析. 防灾减灾工程学报, **29**(4): 473~478.
- 张伟超,孙昱,田勤虎,等. 2022. 陕西关中平原地区  $V_{s30}$  估算模型研究. 土工基础, **36**(5): 760~764.
- 张照鹏,荣棉水,卢滔. 2018.  $V_{s(30)}$  在场地效应研究中的应用. 建筑结构, **48**(增刊II): 314~318.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范(2016年版). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021. GB 55002-2021 建筑与市政工程抗震通用规范. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 周健. 2021. 场地剪切波速模型建模及其在中国场地分类和场地  $V_{s30}$  地图中的应用. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 翠川三郎,野木淑裕. 2015. 深さ30mまでの地盤の平均S波速度を深さの浅いデータから推定する方法について. 日本地震工学会論文集, **15**(2): 91~96.
- Ahdi S K, Kwak D Y, Ancheta T D, et al. 2022. Site parameters applied in NGA-Sub database. Earthq Spectra, **38**(1): 494~520.
- American Society of Civil Engineers(ASCE). 2010. ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures. Reston: ASCE, 650.
- Boore D M. 2004. Estimating  $V_s(30)$  (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths<30m). Bull Seismol Soc Am, **94**(2): 591~597.
- Boore D M, Thompson E M, Cadet H. 2011. Regional correlations of  $V_{s30}$  and velocities averaged over depths less than and greater than 30 meters. Bull Seismol Soc Am, **101**(6): 3046~3059.
- Building Seismic Safety Council. 2003. Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions. Report No. FEMA-450. Washington: Federal Emergency Management Agency, 303.
- Dai Z J, Li X J, Hou C L. 2013. A shear-wave velocity model for  $V_{s30}$  estimation based on a conditional independence property. Bull Seismol Soc Am, **103**(6): 3354~3361.
- Eurocode 8. 2004. Design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1. European Committee for Standardization(CEN).
- Fang Y, Li H, Li Y, et al. 2023.  $V_{s30}$  Prediction models based on measured shear-wave velocities in Tangshan, China. Sustainability, **15**(4): 3282.
- Kuo C H, Wen K L, Hsieh H H, et al. 2011. Evaluating empirical regression equations for  $V_s$  and estimating  $V_{s30}$  in northeastern Taiwan. Soil Dynam Earthq Eng, **31**(3): 431~439.
- Kwak D Y, Ancheta T D, Mitra D, et al. 2017. Performance evaluation of  $V_{sz}$ -to- $V_{s30}$  correlation methods using global  $V_s$  profile database. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Vancouver.
- National Earthquake Hazards Reduction Program. 2020. Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures(2020 edition). Washington: Building Seismic Safety Council, 86.
- Wald D J, Allen T I. 2007. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bull Seismol Soc Am, **97**(5): 1379~1395.
- Wang H Y, Wang S Y. 2015. A new method for estimating  $V_s(30)$  from a shallow shear-wave velocity profile(Depth<30m). Bull Seismol Soc Am, **105**(3): 1359~1370.
- Xie J J, Li K W, Li X J, et al. 2023.  $V_{s30}$ -based relationship for Chinese site classification. Eng Geol, **324**: 107253.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P, et al. 2022. Soil profile database and site classification for national strong-motion stations in western China. Seismol Res Lett, **93**(3): 1930~1942.
- Xie J J, Zimmaro P, Li X J, et al. 2016.  $V_{s30}$  empirical prediction relationships based on a new soil-profile database for the Beijing plain area, China. Bull Seismol Soc Am, **106**(6): 2843~2854.

## Empirical Prediction Model for $V_{s30}$ and Site Classification in the Eastern Jiangsu Plain Area

Liu Ruichen, Zhang Lifang, Fang Yi, Peng Yanju, Lü Yuejun

National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China

**Abstract** The eastern plain of Jiangsu Province faces high seismic risk, and its thick, soft overlying layers can worsen earthquake damage. Studying site seismic effects in this region is crucial.  $V_{s30}$  is a key parameter for assessing site seismic effects. When borehole data are lacking or shallow, models are needed to predict  $V_{s30}$  values. This study created a database of 678 deep boreholes from seismic safety reports for the region. Six  $V_{s30}$  extrapolation models were used for regression analysis, resulting in the development of the Jiangsu model. The predictive performance of these models was evaluated, with the DEA13 Jiangsu model proving most suitable for coastal plain areas like the study region. A comparison of the Jiangsu model's coefficients with others revealed significant regional differences, confirming the need for region-specific models. The study also examined terrain-based and Quaternary sediment depth-based models, which performed poorly in the area. Finally, the relationship between site classification and  $V_{s30}$  values was investigated, and the boundary  $V_{s30}$  values for Site Classes III and IV in the eastern Jiangsu Plain were determined. For coastal plains with similar geological conditions, the DEA13 Jiangsu model is recommended for shallow borehole  $V_{s30}$  predictions. This study provides a reliable  $V_{s30}$  model and data support for regional seismic hazard assessments, contributing to seismic risk evaluation in similar coastal plains.

**Keywords:** Shear wave velocity; Site conditions;  $V_{s30}$  extrapolation mode; Site classification; Eastern plain of Jiangsu Province