

熊成, 叶秀薇, 王力伟, 等. 基于噪声 HVSr 方法的粤港澳大湾区  $V_{S30}$  估算研究 [J]. 华南地震, 2026, 46(2): 29-35. [XIONG Cheng, YE Xiuwei, WANG Liwei, et al.  $V_{S30}$  Estimation in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area Based on the Noise HVSr Method [J]. South China journal of seismology, 2026, 46(2): 29-35]

## 基于噪声 HVSr 方法的粤港澳大湾区 $V_{S30}$ 估算研究

熊成<sup>1,2</sup>, 叶秀薇<sup>1,2</sup>, 王力伟<sup>1,2</sup>, 张严心<sup>1,2</sup>, 曾晓燕<sup>1,2</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070)

**摘要:** 国际上许多地震规范采用地下前 30 m 的等效剪切波速度 ( $V_{S30}$ ) 作为关键参数。然而, 由于粤港澳大湾区场地钻孔资料不够完善, 造成其  $V_{S30}$  的分辨率较低, 准确性不足。为此, 采用基于单台记录的噪声水平与垂直谱比 (HVSr) 方法来测量  $V_{S30}$ 。基于 6214 个测点 (台间距约 750 m) 的地脉动观测数据, 此研究采用 HVSr 方法构建了粤港澳大湾区高分辨率  $V_{S30}$  分布。研究结果与地表地形较为吻合, 大部分地区的  $V_{S30}$  值低于 360 m/s, 尤其是在珠江三角洲平原  $V_{S30}$  值最低。相对而言, 较高的  $V_{S30}$  值 (>360 m/s) 则主要分布在帽峰山、白云山、番禺台地和大岭山等山地区域。此研究为粤港澳大湾区的城市规划和抗震设防提供了重要的科学基础资料。研究表明, HVSr 技术作为一种快速有效的估算  $V_{S30}$  的方法, 适用于缺乏详细场地钻孔资料的地区, 为地震工程和风险评估提供了有价值的信息。

**关键词:** 粤港澳大湾区;  $V_{S30}$ ; HVSr; 密集台阵; 场地放大效应

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2026)02-0029-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2026.02.04

## $V_{S30}$ Estimation in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area Based on the Noise HVSr Method

XIONG Cheng<sup>1,2</sup>, YE Xiuwei<sup>1,2</sup>, WANG Liwei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanxin<sup>1,2</sup>,  
ZENG Xiaoyan<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Many seismic codes worldwide adopt the equivalent shear wave velocity ( $V_{S30}$ ) in the top 30 m of the ground as a key parameter. However, due to the lack of adequate site boring data in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the resolution and accuracy of the  $V_{S30}$  are relatively low. To address this issue, this paper employs the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) method based on single-station records to measure  $V_{S30}$ . By utilizing ground motion observation records from over 6200 points with an average distance of about 750 m between stations, high-resolution  $V_{S30}$  distribution results for the Greater Bay Area were obtained by using the

收稿日期: 2025-02-26

基金项目: 广东省科技计划项目 (2023A1111120028); 地震科技星火计划青年项目 (XH24031YA) 联合资助。

作者简介: 熊成 (1993-), 男, 工程师, 主要从事地震监测及构造地球物理研究。

E-mail: xiongcheng15@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 叶秀薇 (1970-), 女, 研究员, 主要从事壳幔结构及震源构造研究。

E-mail: 1424201562@qq.com

HVSR method. The results align well with the surface topography, showing that most areas have  $V_{S30}$  values below 360 m/s, with the lowest values found in the Pearl River Delta plain. In contrast, higher  $V_{S30}$  values (>360 m/s) are predominantly distributed in mountainous regions, such as Maofeng Mountain, Baiyun Mountain, Panyu Tableland, and Daling Mountain. This study provides important scientific foundational data for urban planning and seismic fortification in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Overall, the HVSR technique serves as an effective method for estimating  $V_{S30}$ , making it suitable for areas lacking detailed site boring data. This can provide valuable information for earthquake engineering and risk assessment.

**Keywords:** Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area;  $V_{S30}$ ; HVSR; Dense array; Site amplification effect

## 0 引言

粤港澳大湾区位于华南沿海中部,南面向海,东、西、北三面均被山地丘陵围绕。区内河网密布,第四系沉积平均厚度约25 m,且由陆向海逐渐增加<sup>[1]</sup>。珠江三角洲浅表层除少量地区有基岩出露外,大多数为土层覆盖,广泛发育有埋藏较浅的松散淤泥质粉细砂。大地构造背景上,南海北部陆缘受菲律宾海板块俯冲和印藏碰撞侧向应力传递的影响,新构造运动较为强烈,研究区发育有多组不同方向的断裂,如NE向的广从断裂、恩平—开平断裂、五华—深圳断裂;NW向的西江断裂、沙湾断裂、狮子洋断裂和NEE向的滨海断裂带等。这些断裂带互相切割,并控制了珠江三角洲盆地和珠江口外盆地的发育,具有多期活动的特点<sup>[2]</sup>。历史地震记录(如1911年海丰6.0级地震、1962年河源6.1级地震)及现代地震活动表明,粤港澳大湾区面临显著的地震风险,尤其是近海的滨海断裂带曾发生多次破坏性地震<sup>[3]</sup>。有历史记录以来,大湾区及其邻区发生5级以上地震16次,其中6级及以上地震3次,分别为1911年5月15日海丰外海域6.0级地震,1962年3月19日广东河源的6.1级地震以及1969年7月26日广东阳江的6.4级地震。可见湾区地震活动性不容忽视。粤港澳大湾区湾区内人口密集、经济发达,一旦发生强震,加上浅层松散沉积的放大作用,将会造成严重的人员财产损失。

大量地震灾害案例与强震观测数据的综合分析明确显示,场地条件在地震动动力响应特性及结构破坏模式中发挥着决定性作用。因此,依据场地条件进行科学分类,并精确厘定地震动参数,始终是工程地震学领域研究的核心任务之一。在众多表征场地特性的参数中, $V_{S30}$ (即地表至地下30 m深度范围内的等效剪切波速)作为国际工程界广泛接纳的场地条件分类与评估指标,能够高效

反映不同场地条件对地震动放大效应的影响差异。获取高精度的 $V_{S30}$ 数据,对于提高地震动响应分析的准确性至关重要。然而, $V_{S30}$ 数据的传统获取方式主要依赖于工程勘察的钻孔测试。在粤港澳大湾区,由于城市环境的复杂性和成本限制,工程勘察钻孔的数量有限且分布不均,这导致难以获取该地区高分辨率的场地 $V_{S30}$ 数据。鉴于此,亟需探索一种更为经济、高效的 $V_{S30}$ 获取方法。

水平与垂直谱比(HVSR)方法近年来兴起的一种新技术,通过利用环境地震噪声数据来获取近地表地质结构特征,为解决上述问题提供了新的思路。该方法最早由Nogoshi等<sup>[4]</sup>于1971年提出,其理论基础可回溯至Kanai等<sup>[5]</sup>对微震现象的初步研究。随后,Nakamura<sup>[6]</sup>在进一步拓展了该方法的应用范围,指出HVSR可用于估算覆盖软土层的场地的基阶频率和场地放大系数,从而在沉积物厚度估算及局部场地效应直接评估方面展现出广阔的应用前景<sup>[7]</sup>。目前HVSR方法已广泛应用于城市地区的浅层沉积层结构探测和场地响应分析<sup>[8-12]</sup>。近年来,随着研究的不断深入,场地 $V_{S30}$ 与基阶频率之间的相关性得到了进一步验证。例如,Hassani等人基于北美中部和东部的场地数据,构建了基阶与 $V_{S30}$ 之间的经验模型<sup>[13]</sup>。胡进军等人利用四川和甘肃地区强震台站的场地资料及强震观测数据,提出了场地基本周期与 $V_{S30}$ 之间的经验关系式,为 $V_{S30}$ 数据的精确获取及地震动响应分析提供了有力的理论支撑<sup>[14]</sup>。

尽管HVSR法已在北美、日本等地成功应用,但粤港澳大湾区的相关研究尚未系统开展。为快速准确获取粤港澳大湾区高分辨的 $V_{S30}$ 分布,本研究在粤港澳大湾区中心区域布设了一个包含6214个测点的密集台阵,覆盖了广州市区以及佛山和东莞的部分地区。首先利用HVSR方法提取了研究区基阶频率( $f_0$ )和峰值振幅( $A_0$ )的分布;然后建立了 $f_0$ 与 $V_{S30}$ 之间的关系,首次获得了大湾区 $V_{S30}$ 高分辨率分布,为该区域强地面运动模拟和地震灾

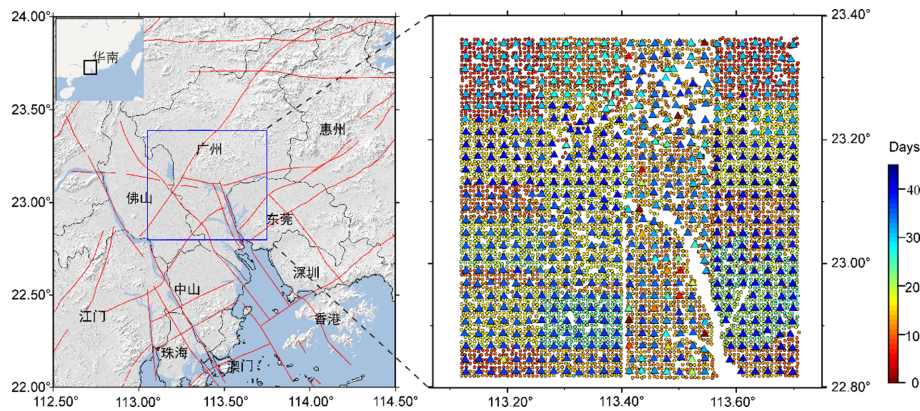
害评估研究提供了重要科学指导意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

2020年12月—2021年1月,广东省地震局在广州和佛山部分城区布设了台间距约0.75 km的短周期地震仪密集台阵。研究区约60 km×60 km,主要位于广州市的白云区和荔湾区,以及佛山市的

南海区、禅城区和顺德区。密集台阵由两部分组成(图1),第一部分是骨干台网,由707个点位组成,台间距约2.25 km,记录时长19.1~40.6天,平均34.6天。第二部分为滚动布设的流动台网,由5,507个点位组成,台间距约0.75 km,记录时长5.9~21.9天,平均13.1天。为了仪器安全以及减少风的影响,所有的仪器都是埋藏布设。观测仪器包括EPS(拐角频率为5 s)、Smartsolo(拐角频率为5 Hz)和Zland-3C(拐角频率为5 Hz)。具体的布设和仪器情况见Ye等<sup>[15]</sup>。



红线为断裂,黑色线为市级行政区界,灰色线为县级行政区界;三角形为平均观测时长超过30天的骨干台,圆点为滚动布设的流动台;颜色代表数据记录天数

图1 研究区地形和短周期地震仪分布

Fig.1 Topography of the study area and distribution of seismic stations

### 1.2 噪声 HVSR 方法估算 $V_{S30}$

噪声 HVSR 法基于单台三分量微动记录,可以快速、方便地估算场地的响应频率和地震动的放大因子<sup>[16]</sup>。HVSR 为水平分量和垂直分量的傅里叶谱的比值,其中水平分量的振幅谱可以由东西分量(E)和南北分量(N)通过几种不同的方式计算得到,本文采用2个分量振幅谱的几何平均值来计算水平分量:

$$HVSR = \frac{\sqrt{U_E(f)U_N(f)}}{U_Z(f)} \quad (1)$$

式(1)中  $U_E(f)$ 、 $U_N(f)$  和  $U_Z(f)$  分别为东西分量和南北分量和垂直分量的傅里叶谱。

我们使用 Python 包 hvsrpy<sup>[17]</sup> 获得了水平垂直比(HVSR)曲线,其中的噪声处理程序遵循 Cox 等人<sup>[18]</sup>的方法。通常数十分钟的数据量就足以获得稳定的 HVSR 结果<sup>[19]</sup>,为降低人类活动干扰,所有站点均选取凌晨时段(02:00—04:00)的连续波形数据,并将其分割成 60 s 的时间窗口,然后计算每个

时窗 0.5~20 Hz 范围内的 HVSR。为了增强 HVSR 曲线的稳定性,我们采用了带宽系数( $b$ )为 40 的 Konno-Ohmachi 平滑算法<sup>[20]</sup>。

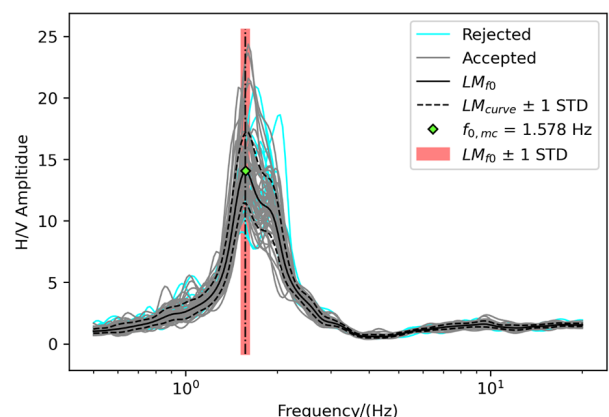


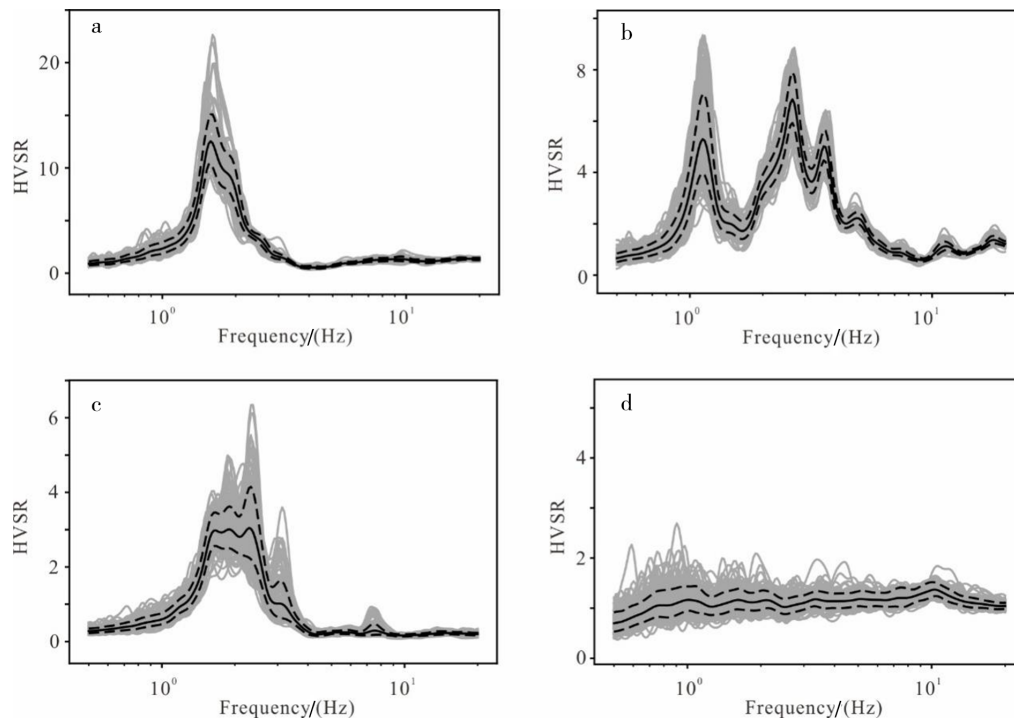
图2 台站 AP002 的 HVSR 曲线

Fig.2 An example of HVSR curves in AP002 Station

针对不同类型的 HVSR 曲线,本文采用以下规则确定峰值频率:①单峰型曲线读取单峰对应的频率值;②多峰型曲线,原则上拾取最大振幅峰,

如果波峰振幅相近,则拾取最低频峰的频率值;  
③宽峰型曲线,如果临近测点的HVSr曲线具有明显峰值,则参考该临近测点的峰值频率读取,如果临近测点曲线无峰值或同样为宽峰,则放弃该

曲线的峰值频率提取;④无峰型曲线则不读取峰值频率。具体选取细节见Xiong等<sup>[21]</sup>,图3展示了四种不同类型HVSr曲线的示例。



(a)台站 AP002,单峰型曲线;(b)台站 AP096,多峰型曲线;(c)台站 AP0268,宽峰型曲线;(d)台站 A0069,无峰型曲线

图3 四种不同类型HVSr曲线的示例。

Fig.3 Examples of four typical HVSr curves

HVSr方法已被发现与场地参数,如 $V_{s30}$ ,存在密切关联<sup>[13,22,23]</sup>。 $V_{s30}$ 可以通过利用基阶频率根据以下关系进行估算<sup>[13]</sup>:

$$V_{s30} = \begin{cases} \frac{30}{4f_0 \left(1 - \frac{V_{sl}}{V_{sb}}\right) + \frac{30}{V_{sb}}}, & \frac{V_{sl}}{4f_0} < 30 \\ V_{sl}, & \frac{V_{sl}}{4f_0} \geq 30 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $V_{sl}$ 是沉积层的平均剪切波速度, $V_{sb}$ 是基岩的剪切波速度, $V_{sl}$ 和 $V_{sb}$ 通常参考钻孔数据或区域地质模型。

## 2 结果

### 2.1 $f_0$ 分布

在分析所有测点的HVSr曲线后,得到了基阶频率( $f_0$ )及其峰值振幅( $A_0$ ),如图5所示。 $f_0$ 和 $A_0$ 高低值的分界线与研究区断层的位置基本一致。这表

明,断裂在研究区在控制近地表结构的形成演化中起着重要作用。 $f_0$ 主要分布在0.7~8.0 Hz之间,其空间分布具有明显的分区性,与研究区域的地形和地表地质状况吻合良好。北部、中部和东南部地区等山区,超过4.5 Hz,表明松散沉积物覆盖较薄。相比之下,研究区域的南部,包括珠江三角洲平原,呈现出低于3 Hz的 $f_0$ 值,暗示存在更厚的松散沉积物层。值得注意的是位于南部的珠三角平原存在明显的低异常区,异常区中 $f_0$ 值在0.5~1.5 Hz之间,形成若干明显的弯曲条带,表明存在带状的相对较厚的沉积层。Xiong等<sup>[21]</sup>认为这是珠三角埋藏的晚更新世古河道。

$A_0$ 值大部分落在3~12范围内,并与 $f_0$ 呈负相关。尽管 $A_0$ 与研究区域的表面地质一致,但普遍认为HVSr的峰值幅度低估了场地放大效应<sup>[16]</sup>。因此,我们在后续讨论中不再讨论该参数。

### 2.2 $V_{s30}$

在工程地质学领域,快速且有效地估算 $V_{s30}$ 对

于地震区划、地面运动预测方程和建筑规范等多个方面至关重要。然而,针对粤港澳大湾区的  $V_{S30}$  详细研究尚未开展。先前的研究发现,可以通过基于场地基频的经验关系来估算  $V_{S30}$ <sup>[13]</sup>。在本研究中,我们应用公式(2)来估算研究区域内的  $V_{S30}$ 。根据钻探<sup>[24]</sup>和地震成像结果<sup>[25]</sup>,我们将  $V_{SL}$  设定为 200 m/s,  $V_{Sb}$  设定为 1800 m/s。因此,公式(2)可以简化为:

$$V_{S30} = \begin{cases} \frac{1800f_0}{13.3 + f_0}, & f_0 > 1.67 \\ 200, & f_0 \leq 1.67 \end{cases} \quad (3)$$

图4展示了公式(3)和其他地区使用的经验关系。这些关系之间总体有很好的相似性,但大多数其他地区相比,公式(3)在低于3 Hz时产生较低

的  $V_{S30}$  值,在高于4 Hz时产生较高的  $V_{S30}$  值。这主要是因为粤港澳大湾区存在厚度小于50米的松散沉积层覆盖,松散层下伏坚硬的基岩,这种地质结构与波士顿地区观察到的情况相似<sup>[23]</sup>,这解释了本研究中使用的经验关系与波士顿地区所用关系之间的相似性。

图4b展示了研究区域内  $V_{S30}$  的分布情况。根据 NEHRP 指南<sup>[26]</sup>,所有测点被分类为四种场地类型。总体而言,研究区  $V_{S30}$  空间分异显著,揭示了松散沉积与基岩出露区的地质差异。 $V_{S30}$  值低于360 m/s 的区域在研究区内占据主导地位,特别是在珠江三角洲(PRD)平原基本小于360 m/s。相反,较高的  $V_{S30}$  值(>360 m/s)主要分布在帽峰山、白云山、番禺台地、大岭山及山麓地区。

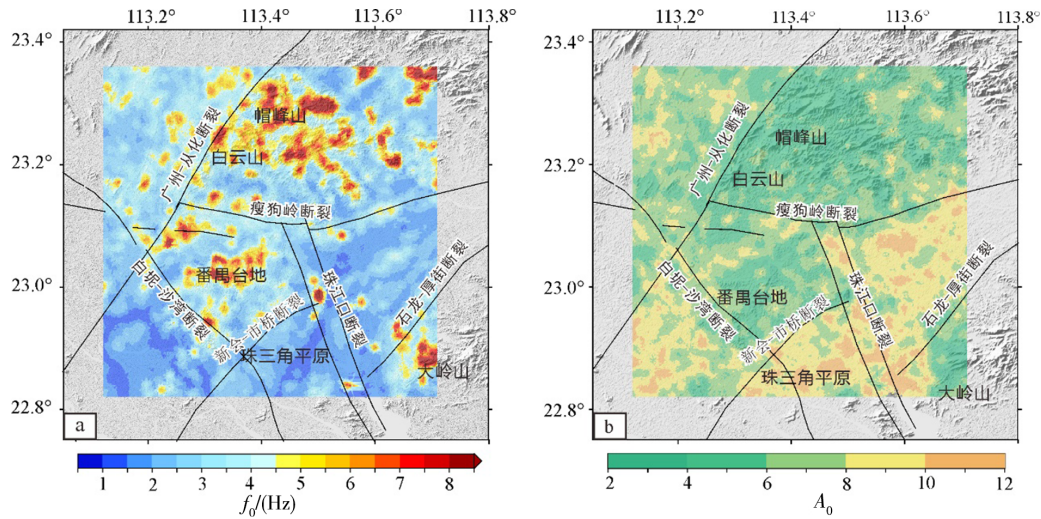


图4 研究区基阶频率(a)和峰值振幅(b)的分布

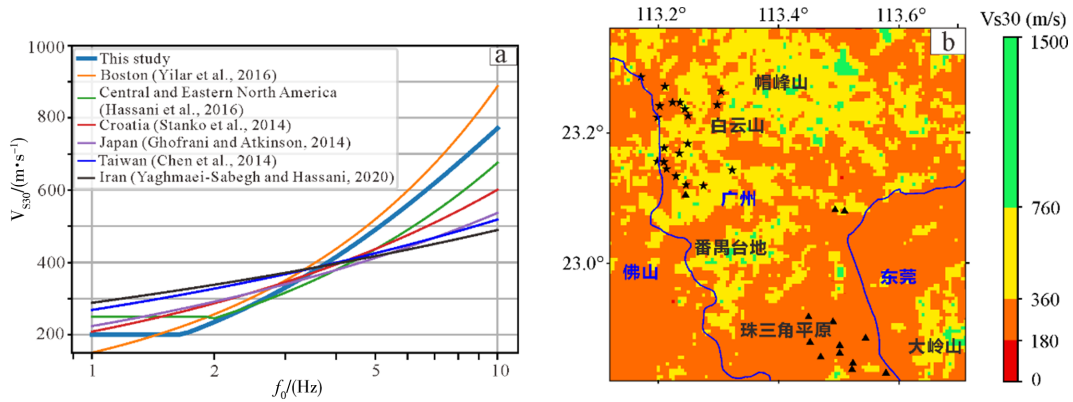
Fig.4 Distribution of fundamental frequencies (a) and peak amplitude (b) across the study area.

公式(2)中  $V_{S30}$  值依赖于  $V_{SL}$  和  $V_{Sb}$  值的设定。为了评估公式(2)中  $V_{SL}$  和  $V_{Sb}$  值对  $V_{S30}$  结果的影响,我们通过设定不同的  $V_{SL}$  和  $V_{Sb}$  来分析  $V_{S30}$  值。

根据钻孔结果,珠三角沉积层的平均速度在100~300 m/s之间。本文首先将  $V_{Sb}$  固定为1800 m/s,分别使用150、200、250和300 m/s的  $V_{SL}$  值,进行  $V_{S30}$  了敏感性分析(图5a)。可以观察到,不同的  $V_{SL}$  值对基阶频率小于2 Hz的场地  $V_{S30}$  结果影响较大,而对超过2 Hz的场地影响则较小。将这4个不同的  $V_{SL}$  值用于计算每个站点的  $V_{S30}$ ,每个站点可以得到4个  $V_{S30}$  值,将4个  $V_{S30}$  值的标准差作为该点  $V_{S30}$  值的不确定性(图5b)。可以看到,大多数区域的  $V_{S30}$  不确定性低于20 m/s,表明沉积层的平均速度在150~300 m/s之间取值对大部分地区的影响不大。而在古河道区域的不确定性达到了40~50 m/s,因

此在评估古河道地区的  $V_{S30}$  时应更为慎重,需结合更多钻孔数据进行约束。

然后,本文将  $V_{SL}$  固定为200 m/s,分别使用1500、1650、1800、1950和2100 m/s的  $V_{Sb}$  值,进行  $V_{S30}$  了敏感性分析(图5a)。可以观察到,不同的  $V_{Sb}$  值对场地  $V_{S30}$  结果的影响较小,尤其在6 Hz以下,  $V_{S30}$  偏差在50 m/s以下。将这5个不同的  $V_{Sb}$  值用于计算每个站点的  $V_{S30}$ ,则每个站点可以得到5个  $V_{S30}$  值,将5个  $V_{S30}$  值的标准差作为该点  $V_{S30}$  值的不确定性(图5b)。可以看到,大多数区域的  $V_{S30}$  不确定性低于10 m/s,仅极少数地区超过30 m/s,这表明基岩的剪切波速度在1500~2100 m/s之间取值对大部分地区的影响不大。在估算  $V_{S30}$  值时,更应注意的是沉积层平均剪切波速度的取值。



薄蓝色线条代表城市边界,蓝色文本标注城市名称;黑色星形和黑色三角形分别表示广州市发生岩溶塌陷和地面沉降的位置

图5 不同地区  $V_{s30}$  估算经验关系的比较(a)和研究区域内  $V_{s30}$  的分布(b)

Fig.5 Comparison of empirical relationships for  $V_{s30}$  estimation in different regions(a)and distribution of  $V_{s30}$  across the study area(b)

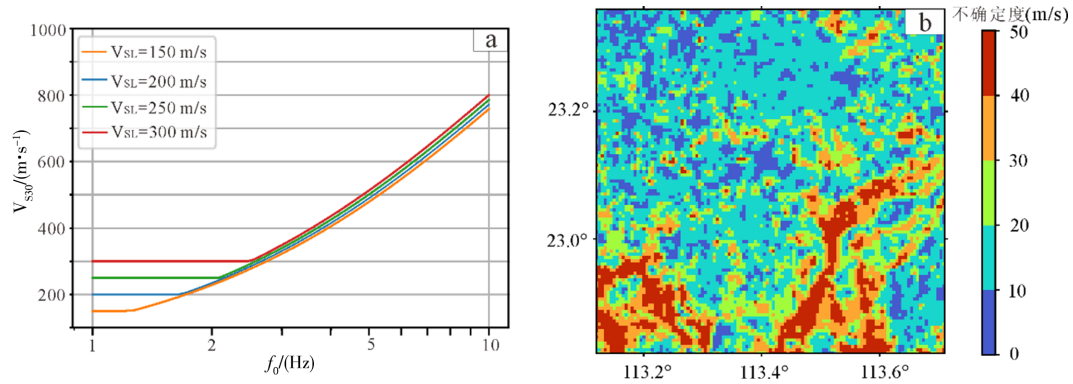


图6  $V_{sl}$  值为 150、200、250 和 300 m/s 时,  $V_{s30}$  与  $f_0$  之间的预期关系(a)及  $V_{s30}$  的不确定性地图(b)

Fig.6 Expected relationship between  $V_{s30}$  and  $f_0$  for  $V_{sl}$  values of 150, 200, 250, and 300 m/s(a)and uncertainty map for  $V_{s30}$ (b)

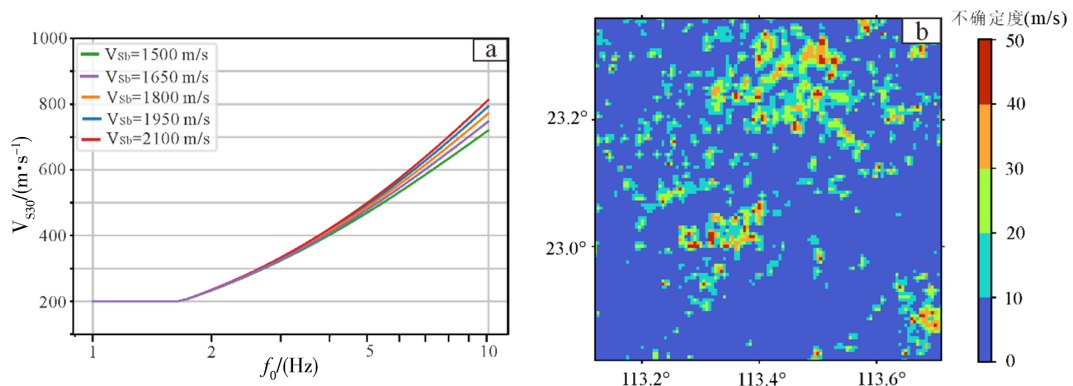


图7  $V_{sb}$  值为 1500、1650、1800、1900 和 2100 m/s 时,  $V_{s30}$  与  $f_0$  之间的预期关系(a)及  $V_{s30}$  的不确定性地图(b)

Fig.7 Expected relationship between  $V_{s30}$  and  $f_0$  for  $V_{sb}$  values of 1500, 1650, 1800, 1900 and 2100 m/s(a) and uncertainty map for  $V_{s30}$ (b)

### 3 结论与讨论

文中主要工作和结论概括如下:

(1)通过单一土层的场地简化模型,构建粤港澳大湾区场地基阶频率与场地  $V_{s30}$  之间的经验关系式,得到了研究区高分辨率的  $V_{s30}$  分布。通过对比  $V_{s30}$  的分布与地形吻合较好,研究区南部的珠三角平

原  $V_{s30}$  值较低,研究区北部的山地地区  $V_{s30}$  值较高。

(2)探讨了沉积层平均剪切波速度与基岩剪切波速度对  $V_{s30}$  测量精度的影响。沉积层平均剪切波速度的取值对  $V_{s30}$  测量精度的影响相对基岩剪切波速度的取值较大。珠江三角洲由于近地表沉积物的岩性差异较大,沉积层平均剪切波速度差异相对较大,可能导致部分地区得到的  $V_{s30}$  值有较大偏

差。尤其是古河道地区,其沉积层较软且厚度较大,应用200 m/s的平均速度,可能导致对古河道地区 $V_{S30}$ 值的高估。下一步工作应在古河道区域收集更多钻孔数据来修正 $V_{S30}$ 估算值。

(3)在国内外的研究和标准中, $V_{S30}$ 常被用作量化场地地震反应放大系数的指标。然而,获取这些平均剪切波速的主要方法是通过钻孔测试,尽管这种方法具有较高的准确性,但在城市区域的大规模应用则受限于现场环境,且成本较高。与此相比,场地基阶频率可以通过更简单的方式(如地脉动测试)来获得。这种“非侵入式”测试方式不仅操作便捷,而且费用低廉,能够在钻孔数量较少的区域快速估算场地的平均剪切波速,从而评估场地的放大效应。这为根据场地土层条件进行校正提供了一种实用有效的解决方案。本研究验证了HVSr法在大湾区复杂沉积环境下的适用性,为类似地区提供了一套可推广的技术流程。

## 参考文献

- [1] 李平日,黄镇国,张仲英,等.珠江三角洲的第四纪地层[J].地理科学,1984,4(2):133-142.
- [2] 刘以宣.华南沿海的活动断裂[J].海洋地质与第四纪地质,1985(03):13-23.
- [3] 熊成,曹敬贺,孙金龙,等.珠江口外海域滨海断裂带沿构造走向的变化特征[J].地球科学,2018,43(10):3682-3697.
- [4] Nogoshi M, Igarashi T, On the amplitude characteristics of microtremor (Part 2)[J]. Journal of the Seismological Society of Japan, 1971(24):26-40.
- [5] Kanai K, Tanaka T. On microtremor. VIII[J]. Bulletin of Earthquakes Research Institute, 1961(39):97-114.
- [6] Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Quarterly Report of Rtri, 1989(30):25-33.
- [7] Molnar S, Sirohey A, Assaf J, et al. A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSr) method[J]. Journal of Seismology, 2022, 26(4):653-685.
- [8] 倪红玉,张若晗,李俊伦,等.地震背景噪声HVSr方法在安徽明光城市场地响应特征和活断层探测中的应用[J].地球物理学报,2023,66(11):4552-4571.
- [9] 陈棋福,刘澜波,王伟君,等.利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应[J].科学通报,2008,53(18):2229-2235.
- [10] Xiong C, Deng Y, Ye X, et al. Quaternary sediment thicknesses, paleochannels, and hazard assessment revealed by a 6200-station array in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, South China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2025, 115(2):694-706.
- [11] 彭菲,王伟君,寇华东.三河—平谷地区地脉动H/V谱比法探测:场地响应、浅层沉积结构及其反映的断层活动[J].地球物理学报,2020,63(10):3775-3790.
- [12] 张若晗,徐佩芬,凌魁群,等.基于微动H/V谱比法的土石分界面探测研究——以济南中心城区为例[J].地球物理学报,2020,63(1):339-350.
- [13] Hassani B, Atkinson G M. Applicability of the site fundamental frequency as a  $V_{S30}$  Proxy for Central and Eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(2):653-664.
- [14] 胡进军,姜治军,谢礼立.基于场地卓越周期的 $V_{S30}$ 估计方法研究——以川甘地区强震台站为例[J].地震工程与工程振动,2018,38(3):1-9.
- [15] Ye X, Wang L, Xiong C, et al. Shallow 3D structure investigation of some cities in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Seismological Research Letters, 2024, 95(3):2000-2012.
- [16] European Commission-Research General Directorate. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation[R / OL]. Paris, France: European Commission, 2004. [http://sesame.geopsy.org/Papers/HV\\_User\\_Guidelines.pdf](http://sesame.geopsy.org/Papers/HV_User_Guidelines.pdf).
- [17] Vantassel J P. Jpvantassel/hvsrpy: v1.0.0[CP/OL]. (2025-01-03)[2021-10-12]. <http://jpvantassel/hvsrpy:v1.0.0>.
- [18] Cox B R, Cheng T, Vantassel J P, et al. A statistical representation and frequency-domain window-rejection algorithm for single-station HVSr measurements[J]. Geophysical Journal International, 2020, 221(3):2170-2183.
- [19] Bao F, Li Z, Yuen D A, et al. Shallow structure of the Tangshan fault zone unveiled by dense seismic array and horizontal-to-vertical spectral ratio method[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2018(281):46-54.
- [20] Konno K, Ohmachi T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(1):228-241.
- [21] Ghofrani H, Atkinson G M. Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014(67):30-43.
- [22] Yilar E, Baise L G, Ebel J E. Using H/V measurements to determine depth to bedrock and  $V_{S30}$  in Boston, Massachusetts[J]. Engineering Geology, 2017(217):12-22.
- [23] 毕丽思,陈小芳,卢帮华.基于高密度钻孔揭露的广州城区软土分布特征及震陷预测[J].地震工程学报,2018,40(5):1026-1033.
- [24] 吴晓阳,谭俊卿,郭震,等.密集台阵背景噪声双聚束成像化龙断裂精细结构[J].地球物理学报,2022,65(5):1701-1711.
- [25] Council B S S. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures[J]. Washington, D. C. : FEMA, 2015.