

doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2020.03.006

利用 *HVSR* 方法研究广州地区的场地效应 及估算地震灾害特征

宗健业^{1 2)} 孙新蕾^{1)*} 张 鹏^{1 2)}

1) 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2) 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 为获取广州地区的场地效应和沉积层分布情况, 2018 年初于广州地区布设了 100 台流动台站进行背景噪声观测。文中利用 *HVSR* 方法得到了表征场地效应的共振频率和放大倍数 2 个参数的分布结果, 并利用共振频率-沉积层厚度转换公式得到了广州地区的沉积层分布。文中综合考虑共振频率和放大系数, 同时得到了广州地区表征场地易破坏程度的 *K* 值分布。研究结果显示: 广州地区的共振频率为 1~6.5 Hz; 沉积层厚度整体较小, 多为 10~25 m, 珠江下游最厚, 达 40 m; 研究区场地整体易破坏程度低, 极少区域超过安全值 ($K > 20$), 表明在地震灾害中较为安全。文中结果与地表地形及公开的钻孔数据相符, 可为城市整体工程扩建和防灾减灾工作提供基本参考。

关键词 广州地区 场地效应 背景噪声 沉积层厚度

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2020)03-0628-12

0 引言

由于各地区的场地效应不同, 相似的地震造成的破坏程度往往有较大差异 (Richter, 1958)。1985 年, 尽管建立在厚 2.5 km 的沉积层之上的墨西哥城与墨西哥 8.1 级地震震中的距离 > 400 km, 仍遭受了史上最为严重的破坏。此后, 针对场地效应, 即地表松软沉积层对地震动放大效应的研究得到了广泛重视。

广州市地处珠江三角洲平原, 地势北高南低, 可分为 3 个地貌单元: 北部和东北部的低山丘陵、中西部的广花盆地和南部的低地平原。广州地区的第四系平均厚 25 m (林思蔚, 1994), 包括上更新统和全新统: 上更新统主要为残积、冲积和洪积相的黏土、亚黏土, 局部含砂砾层; 全新统主要为冲洪积相和海积相的黏土、亚黏砂层、砾层和淤泥层 (雷金山等, 2009)。广州作为大型城市, 在扩建过程中, 深度开发地下空间并提高地上空间利用率势在必行。然而, 近年来人为诱因地面塌陷等地质灾害频发 (方燎原, 2005), 给人民的生命财产安全带来了极大危害。广州地区的地质灾害种类在空间分布上具有明显的区域性: 崩塌、滑坡和泥石

(收稿日期) 2019-07-29 收稿, 2019-11-26 改回。

(基金项目) 广州市科技计划项目 (201707020029) 和中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室基金 (SKLabIG-KF-18-09) 共同资助。

* 通讯作者: 孙新蕾, 女, 1976 年生, 研究员, 主要研究方向为地球内部各圈层结构成像和动力学过程, E-mail: xsun@gig.ac.cn。

流主要发生在北部及东北部的低山丘陵地区; 地面塌陷主要发生在中西部的广花盆地; 地面沉降主要发生在南部的珠江三角洲平原(刘会平等, 2005)。这种地质灾害种类具有明显区域性的特征, 很可能与沉积层分布有关。因此, 明确广州地区的场地效应和沉积层分布, 进而因地制宜地制定施工方案和建筑标准, 可减少未来可能发生的地质灾害所带来的破坏, 对广州市的城市建设具有重要意义。

获得场地效应的传统方法主要有理论法和经验法 2 类。理论法通过建立地下结构模型直接计算场地效应, 但在实际应用中地下结构并不容易获取; 经验法则对实际记录到的地震动数据进行统计分析从而得到场地效应, 并不需要精确的地下结构信息, 故该类方法在工程建设中得到了广泛应用。传统经验法包括参考场地方法(Borchardt, 1970) 和多台地震记录联合反演方法(Boatwright *et al.*, 1991), 2 种方法均依赖于由天然或人工地震产生的强震信号。然而, 广州地区天然地震发生的频率较低, 且人工震源在大城市内的使用受到限制, 故传统经验法并不适用。Nogoshi 等(1971) 提出的 *HVSR* 方法利用背景噪声(也称地脉动) 替代了强震信号, 之后, Nakamura(1989) 将该方法推广应用于获取场地效应。背景噪声来自人类交通工业活动、天然海洋波动和天然大气扰动等, 可随时获得; 且使用单台三分量地震仪数据就可得到频谱比。基于以上优势, *HVSR* 方法得到了广泛应用。例如, Chen 等(2009) 利用 *HVSR* 方法得到的北京地区的场地效应与 1976 年唐山地震烈度图具有很好的对应性, 沉积层分布与已有资料及钻孔数据同样较为相符; 马淑芹等(2007) 在天津地区利用此方法得到的场地效应结果与唐山地震的实际震害基本一致。这些研究证实了 *HVSR* 方法在获取场地效应和沉积层分布方面的可靠性。

目前已有的针对广州地区的工程地质研究集中在地面塌陷危险性分布、断层活动性及活动断裂附近的地震地质特征和灾害防范等(陈伟光等, 2000; 刘江龙等, 2007; 邓钟尉, 2016), 而对于广州地区沉积层分布的研究多集中在中心城区或部分已发生地质灾害的区域(陈伟光等, 2000; 毕丽思等, 2018; 杜成亮等, 2018)。这些研究在区域上具有一定局限性, 且多使用钻孔方法。该方法的破坏性大、成本昂贵, 并不适合进行大范围研究。针对这一现状, 我们利用广泛存在的背景噪声, 在广州及周边地区布设了 100 台地震仪, 并通过 *HVSR* 方法得到了该地区整体的场地效应及沉积层分布, 结果可为城市工程建设和防灾减灾工作提供基本参考信息。

1 数据和方法

1.1 数据

2018 年 1 月末—3 月初, 我们在广州市及佛山市禅城区、南海区和三水区共布设了 100 台 QS-05A 型便携式地震仪(图 1)。地震仪的频带宽度为 5s-250Hz, 采样频率为 100Hz, 台站间距为 2~5km, 观测时长约 35d。

1.2 *HVSR* 方法

Nakamura(1989) 将 *HVSR* 方法推广应用于基于单台三分量地震仪的场地效应评估。*HVSR* 的定义为地动信号的水平分量和垂直分量的频谱比:

$$HVSR(f) = \sqrt{\frac{SN^2(f) + EW^2(f)}{V^2(f)}} \quad (1)$$

其中, 水平分量包括三分量地震仪中的南北(*SN*) 和东西(*EW*) 分量。在地震仪记录到的水平分

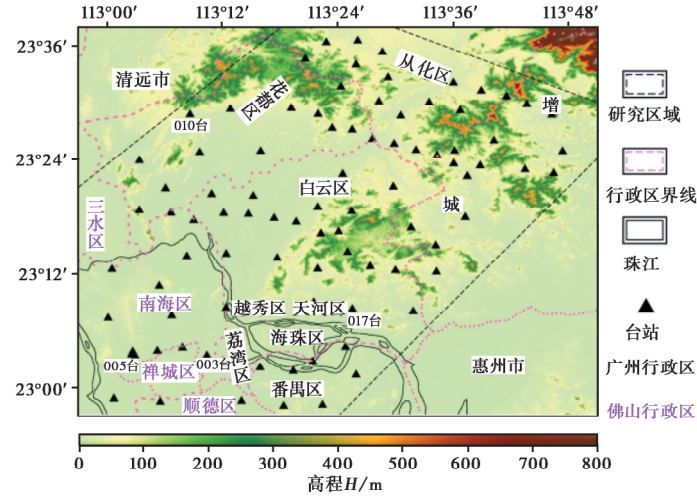


图 1 研究区台站分布和地形图

Fig. 1 The distribution of seismic stations in the study area. Topography is plotted as background.

量 $H(t)$ 和垂直分量 $V(t)$ 信号中, 包括了背景噪声源 (S)、传播路径 (P)、场地效应 (T) 和仪器响应 (I) 的信息:

$$H(t) = S(t) * P(t) * T_H(t) * I(t) \quad (2)$$

$$V(t) = S(t) * P(t) * T_V(t) * I(t) \quad (3)$$

将信号经傅里叶变换到频率域后, 式 (2) 和式 (3) 变为

$$H(f) = S(f) \times P(f) \times T_H(f) \times I(f) \quad (4)$$

$$V(f) = S(f) \times P(f) \times T_V(f) \times I(f) \quad (5)$$

水平分量 $H(f)$ 和垂直分量 $V(f)$ 的比值为

$$\frac{H(f)}{V(f)} = \frac{T_H(f)}{T_V(f)} \quad (6)$$

因此, 将信号变换到频率域后, 水平分量和垂直分量的比值可去除背景噪声源 (S)、传播路径 (P) 和仪器响应 (I) 的信息, 得到场地效应 (T) 的信息。

在计算过程中, 为了剔除瞬态干扰, 本文使用反触发式的长短时窗法识别稳定有效的地脉动信号。长短时窗平均振幅比法 (STA/LTA) 由 Stevenson (1976) 提出, 可用来识别地震事件。长短时窗的平均振幅分别定义为

$$LTA_i = \frac{\sum_{n=i-M+1}^i Y(n)}{M} \quad (7)$$

$$STA_i = \frac{\sum_{n=i-N+1}^i Y(n)}{N} \quad (8)$$

式中, M 、 N 分别为长时窗和短时窗中的采样点数, $Y(n)$ 为采样信号振幅值。将 R 定义为长短时窗平均振幅比值, 其可反映信号振幅的变化:

$$R = \frac{STA_i}{LTA_i} \quad (9)$$

当信号突变时, 短时窗内振幅的平均值比长时窗的平均值变化快, R 值增加, 因此当 R 值超过预设的阈值时即可判定有地震事件发生。反触发是指当 R 小于阈值时即认为没有瞬时地震动信号干扰, 可判定为 HVSR 方法所使用的有效地脉动信号。本研究中取长时窗为 25s, 取短时窗为 1s, R 的最大值设为 3.5, 最小值设为 0.5。将识别到的有效地脉动信号以每 30s 划分为 1 个时窗进行滑动, 窗间重叠 30%, 在每个有效地脉动窗口内根据式(1) 计算 HVSR 值。

HVSR 曲线是随着频率不断变化的(图 3)。理论研究表明, 当地表松散层(沉积层)和下伏坚硬层(基岩层)存在较大的波阻抗比(>2.5)时, HVSR 曲线会出现尖锐的峰值(Field *et al.*, 1993; Lachet *et al.*, 1994)。模拟表明, HVSR 曲线的峰值频率与沉积层的共振频率(也称卓越频率)相吻合(Bonnefoy-Claudet *et al.*, 2006), 同时峰值的振幅可作为场地放大倍数(A)的下限(Bard *et al.*, 2004)。

沉积层的共振频率由速度和厚度共同决定。假设浅地表沉积层的速度值较一致, 为给定值, 则分析钻孔信息中的沉积层厚度和共振频率的关系可得到两者之间的经验公式。Parolai 等(2002) 统计得到的德国 Cologne 地区共振频率(f_r)与沉积层厚度(h)之间的经验关系式为

$$h = 96f_r^{-1.388} \quad (10)$$

和

$$h = 108f_r^{-1.551} \quad (11)$$

一些学者使用这 2 个经验公式得到的北京和保定地区沉积层分布与已有研究结果都具有很好的 consistency, 表明这 2 个经验公式具有很好的适用性(Chen *et al.*, 2009; 王伟君等, 2011; Liu *et al.*, 2014)。广州地区沉积层共振频率普遍 $>1\text{Hz}$, 这种情况下利用 2 个经验公式计算得到的沉积层厚度相差不大(图 2)。结合有限的钻孔资料(表 1) 分析发现式(10) 更适用于广州地区。

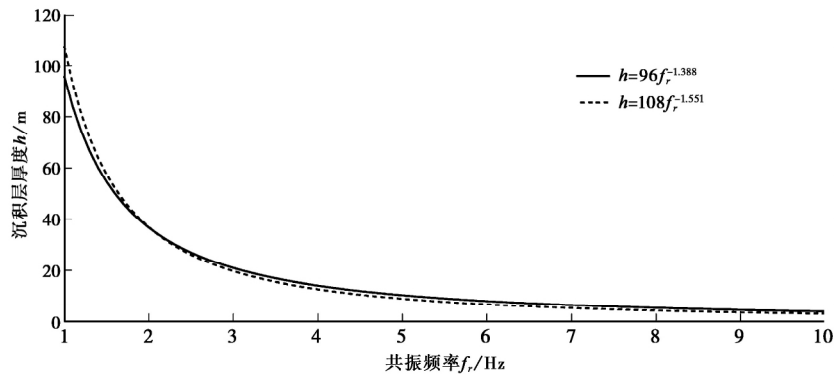


图 2 共振频率-沉积层厚度转换经验公式的对比

Fig. 2 Comparison of the resonant frequency and sedimentary layer thickness between two empirical formulas.

综合考虑场地共振频率和放大系数, Nakamura(1997) 提出一个在地震灾害中表征场地易破坏程度的量, 定义为 K :

$$K = \frac{A^2}{f_r} \quad (12)$$

K 值与地震所释放的应力呈正比:

$$\gamma = K \times \alpha \quad (13)$$

式中, γ 为应力, α 为地表最大加速度。

得到 $HVSR$ 曲线后, 可计算出 K 值。Nakamura(1997) 对 1989 年美国 Loma Prieta 地震进行统计研究发现, 在 $K > 20$ 的地区, 地表建筑在此次地震灾害中被明显破坏, 而 $K < 20$ 的地区则未遭受明显破坏, 故可将 20 视为经验阈值, 以此判断地表建筑是否会在地震灾害中被破坏。此方法已经在北京地区得到了应用, 结果显示在 1976 年唐山地震中高 K 值地区的实际破坏程度也较高(Liu *et al.*, 2014)。

表 1 钻孔方法与 $HVSR$ 方法得到的沉积层厚度对比

Table 1 Comparison of sediment layer thicknesses obtained by borehole and $HVSR$ methods

钻孔编号	钻孔时间	钻孔得到的沉积层厚度/m	$HVSR$ 方法得到的沉积层厚度/m
ZK2841	1980 年 9 月	5.16	5.13
DS0994	2011 年 4 月	10.80	10.20
DS3929	2011 年 4 月	22.00	22.76

2 计算 $HVSR$ 曲线和峰值频率的选取

2.1 计算 $HVSR$ 曲线

为了选取合适时间的数据进行 $HVSR$ 计算, 进行了如下测试。首先, 为了判断合适的时窗长度, 对远离交通干道的 003 台站的数据进行了测试。测试时, 从 1h 开始设置时窗长度, 每次增加 1h, 直到时窗长度为 24h。对所有测试时窗内的数据进行处理后得到的 24 条 $HVSR$ 曲线见图 3。经过对比可以看出, 不同时窗长度对应的 $HVSR$ 曲线形状一致, 具有相同的峰值频率, 仅峰值频率附近的振幅 (5.5~6.2) 略有差别。对比表明, $HVSR$ 曲线峰值频率处的振幅与时窗长度没有相关性。本研究利用 30d 观测期内的连续数据进行分析, 当时窗长度选取为 2h 时, 所有台站的有效地脉动窗口数就可满足要求 (>1500 , 图 5)。通过以上对比测试, 最终选取 2h

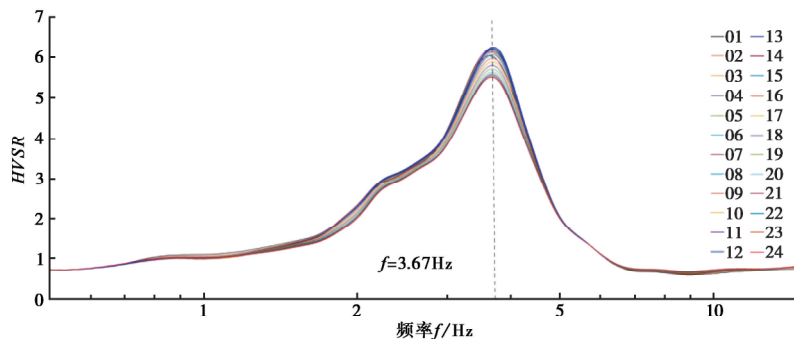
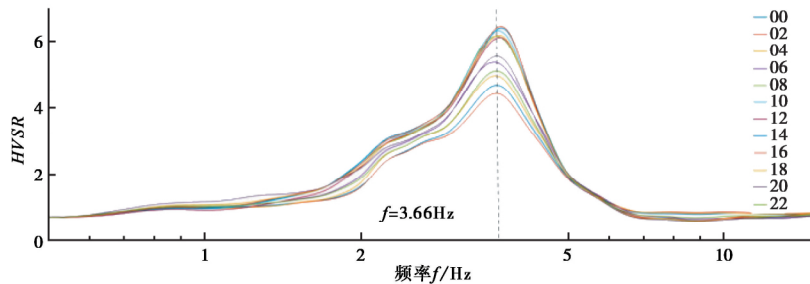


图 3 不同时间长度的 $HVSR$ 曲线对比

Fig. 3 $HVSR$ curves using different time windows.

时窗长度从 1h 开始, 每次增加 1h, 直到时窗长度为 24h

图 4 不同时间段的 *HVSR* 曲线对比Fig. 4 *HVSR* curves at different time periods.

从北京时间 0 点开始, 每 2h 为 1 个时段

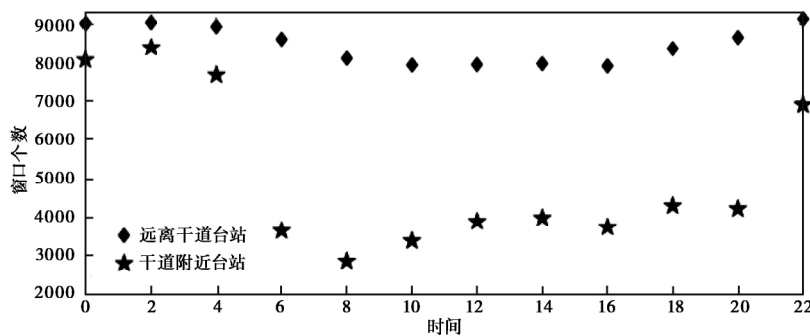


图 5 远离交通干道台站(003)和交通干道附近台站(017)的有效时窗数随时间变化的分布图

Fig. 5 The number of valid windows with time, for stations near(003) and far away(017) from traffic roads.

作为时窗长度。

在此基础上,进一步对 003 台站的数据进行分时段测试。测试时,从北京时间 0 点开始,将数据以每 2h 划分为一时段,共 12 时段。图 4 为对每一时段内的数据进行处理后得到的 12 条 *HVSR* 曲线。经过对比可以看出,不同时段对应的 *HVSR* 曲线形状一致,具有相同的峰值频率,但峰值频率附近的振幅(4.4~6.4)存在差别,这种差别可能与人类活动噪声有关。

为判断人类活动噪声对有效信号数量的影响,选取比较靠近交通干道的 017 号台站,采用 2h 时窗进行了与 003 号台站相同的处理,得到不同时段有效地脉动的窗口数分布(图 5)。结果显示,003 号台站的有效地脉动窗口数随时间的变化不大,而 017 号台站的有效地脉动窗口数随时间的变化较大,说明 017 号台站受人类活动噪声的影响较大。2 个台站的有效地脉动窗口数均在北京时间 2—4 点时段取得极大值,可见这个时段是人类活动相对最少、有效信号最多的时间段。通过以上对比测试,本研究将选取北京时间 2—4 点时段的台站信号进行处理,以得到可靠的结果。

在处理过程中,首先对所有台站 2—4 点时段内每个有效时窗内的数据进行傅里叶变换,计算 0.5~15Hz 范围内的频谱比,并插值到 1 000 个对数均分的点,由此得到单个时窗内的 *HVSR* 曲线;然后利用 Konno-Ohmachi 算法对 *HVSR* 曲线进行平滑,平滑系数取 35(越小则越平滑);最后对得到的所有时窗内的 *HVSR* 曲线取平均值,由此得到每天的平均 *HVSR* 曲线,并对每天的曲线再次取平均得到所需的各个台站的 *HVSR* 曲线。

2.2 峰值频率的选取

在得到 *HVSR* 曲线后,需进行峰值频率的选取。对于存在单个明显峰值的 *HVSR* 曲线,采用直接识别法,即直接选用峰值频率为台站所在场地的共振频率;对于存在 2 个及更多峰值的 *HVSR* 曲线,则要结合实地地形和钻孔资料判断台站所在场地的共振频率。

在选取共振频率时,我们发现在某些情况下 *HVSR* 曲线的峰值并不很理想(图 6)。例如,放置在交通干道附近台站的 *HVSR* 曲线会在 1~3Hz 产生 1 个假的峰值,这个峰值很可能是因交通、生产等人类活动而产生的;在水塘附近所放置台站的 *HVSR* 曲线的共振频率范围较宽,峰值不够尖锐,降低了共振频率分辨率,其原因可能是水塘附近淤泥的分布范围广且土层松散,对多个频率的地震波具有明显的放大作用。对于以上情况需结合其它资料合理地判断峰值频率,因此建议在城市布台时应尽可能避免将台站放置在主干道路或水塘附近。

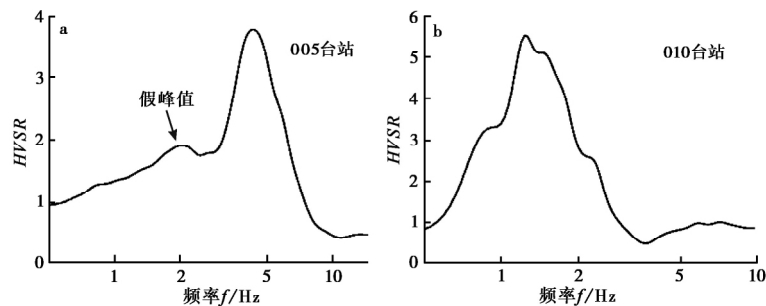


图 6 交通干道附近(a)及水域附近(b)台站的 *HVSR* 曲线

Fig. 6 Examples of *HVSR* curves for sites beside traffic artery(a) and waters(b).

3 结果和讨论

在综合考虑周围地形及地质情况、合理选择所有台站地区的共振频率后,可得到研究区的共振频率(图 7a)和放大倍数(图 7b)分布图,同时也可计算得出研究区的沉积层厚度(图 7c)和 K 值(图 7d)分布图。

结果显示,研究区域共振频率的范围为 1~6.5Hz,且其分布具有明显的区域性,在研究区内呈自 NE 向 SW 逐渐减小的趋势。共振频率在从化区西南部和增城区中部的低山丘陵地带最高,为 5~6Hz;花都区南部和白云区北部的广花盆地地区的共振频率集中在 3~5Hz;研究区内白云区南部及其以南的低地平原地区共振频率最低,为 1~4Hz。

由共振频率计算得到的沉积层厚度则呈自 NE 向 SW 逐渐增大的趋势:从化区西南部和增城区中部的低山丘陵地带有部分基岩出露,沉积层厚度最小,为 0~10m;花都区南部和白云区北部的广花盆地地区,沉积层厚度集中在 10~20m;白云区南部及其以南的低地平原地区沉积层厚度最大,集中在 15~40m;珠江流域特别是其下游地区的沉积层厚度普遍较大,最大达 40m。

广州地区的 K 值整体较小,表明该地区在地震灾害中属于不易破坏地区。在个别区域,如花都区西南地区,花都区、白云区和南海区交界地带,三水区 and 南海区交界地带(图 7d)有 $K > 20$,属于相对危险区域。

对比沉积层厚度、放大倍数和 K 值的分布图可以看出, K 值较大的区域沉积层厚度也较

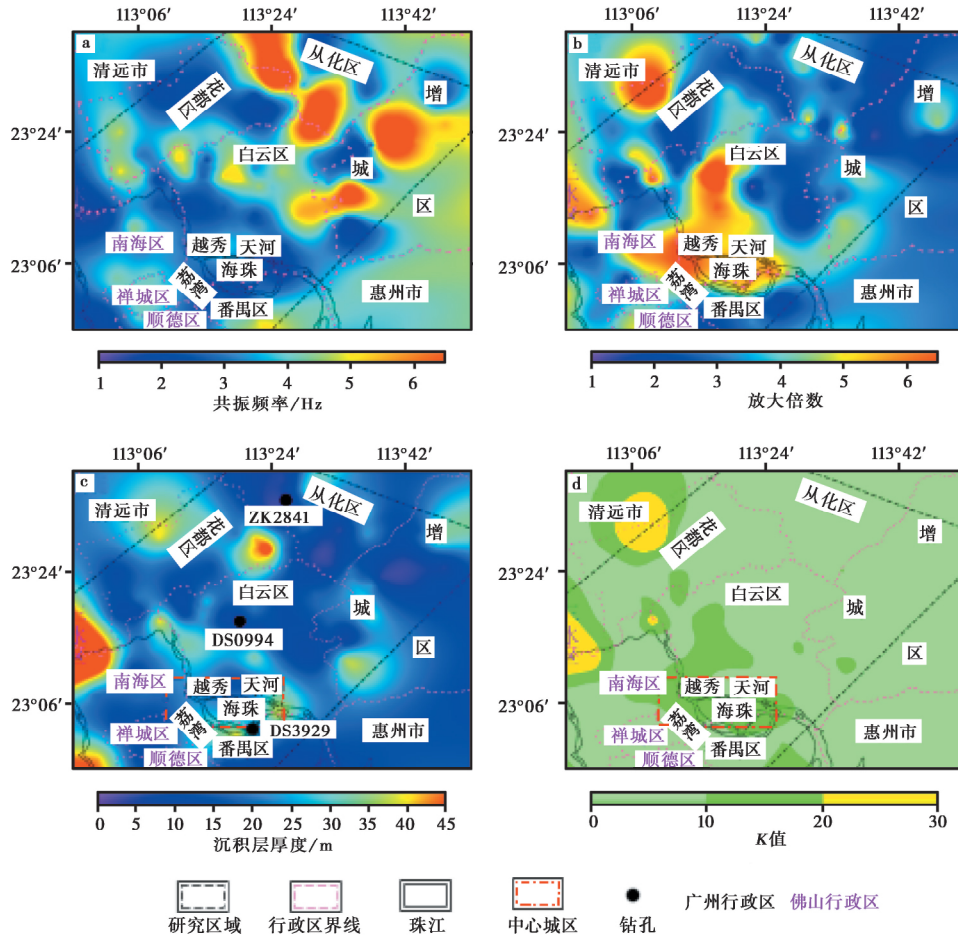


图 7 广州地区共振频率(a)、放大倍数(b)、沉积层厚度(c)和K值(d)分布图

Fig. 7 The distribution map of resonant frequencies(a) , amplifications(b) , sediment layer thicknesses(c) and K-values(d) in Guangzhou area.

图 c 标出了用于对比的钻孔的位置

厚,放大倍数也较大。这种相关性说明放大效应和沉积层厚度相关,沉积层的厚度是造成场地危险性的主要因素,这与基本认识一致。

为了验证研究结果的可靠性,选取了不同的地质条件的钻孔(位置如图7c所示),将本研究计算得到的沉积层分布结果和中国地质调查局网站公开的钻孔资料进行了对比(表1,图8)。结果显示,2种方法得到的沉积层厚度在各种地形区均基本一致(表1),验证了本研究方法得到的沉积层分布结果的可靠性。

广州地区的沉积层厚度分布呈自NE向SW逐渐增大的趋势,决定了其地质灾害种类将具有明显的区域性。北部地区的沉积层厚度很小,基岩明显出露,易发生泥石流等地质灾害;中部地区的沉积层厚10~20m,在大量开采地下水的情况下,由于沉积层较薄,承受地下水位下降压力的能力较低,故容易发生地面塌陷;而南部地区的沉积层厚度较大,淤泥和黏性土等广

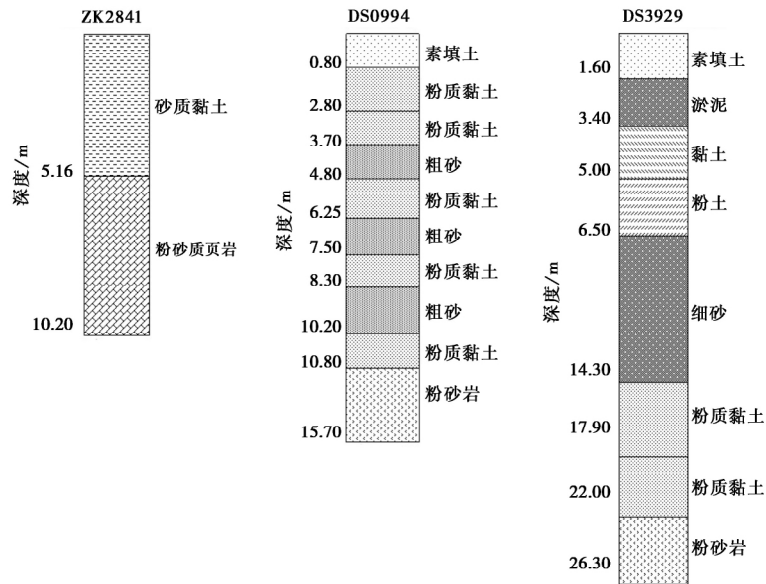


图 8 钻孔柱状图

Fig. 8 Drilling histogram.

泛分布,浅部岩石风化和蚀变严重,导致沉积层较为松软,力学性质较差,容易发生地面沉降。参考本文得到的广州地区沉积层分布结果,可因地制宜地制定合理措施,减少相应地质灾害的发生。

广州市中心城区(图 7 中的红色虚线内区域)位于珠江流域, K 值基本分布在 10~20 范围内,虽未超过安全值,但沉积层厚度较大(20~40m),放大效应明显,外围地区较多的活动断裂使得城区的地震发生频率增高(邓钟尉,2016),一旦发生地震极易引发震陷等次生灾害。故应在中心城区内提高基础设施建设的标准,尽量减少可能发生的地质灾害,如地震、地面沉降等所造成的破坏。

4 结论

本文利用放置在广州及佛山部分地区的 100 个流动台站记录到的地脉动数据,通过 *HVSR* 方法得到了广州及佛山部分地区的共振频率和放大倍数分布结果;并利用共振频率-沉积层厚度经验公式得到了沉积层厚度分布;综合考虑共振频率和放大倍数得到了表征场地易破坏程度 K 值的分布结果。现得出如下结论:

(1) 研究区内共振频率的范围为 1~6.5Hz。从化区西南部和增城区中部的低山丘陵地带的共振频率为 5~6Hz;花都区南部和白云区北部的广花盆地地区的共振频率为 3~5Hz;白云区南部及其以南的低地平原地区的共振频率为 1~4Hz。

(2) 研究区内放大倍数的范围为 1~8.8。放大倍数较大的区域集中分布在珠江流域及白云区西部地形相对较低、沉积层厚度较大地区。

(3) 研究区域内的沉积层厚 1~45m。从化区西南部和增城区中部的低山丘陵地带的沉积层厚 0~10m;花都区南部和白云区北部的广花盆地地区的沉积层厚约 10~20m;白云区南部及

其以南的低地平原地区的沉积层厚约 15~40m。

(4) 研究区内的 K 值整体较小, 表明为在地震灾害中不易被破坏的地区; 广州市花都区及佛山市三水区和南海区个别区域内 $K > 20$, 属于相对危险区域。

综合本研究的结果, 我们建议在城市建设过程中, 搭建高大建筑物和开发地下空间应合理选择危险性小的区域, 或者在危险性比较高的区域提高抗震标准。

参 考 文 献

- 毕丽思, 陈小芳, 马浩明, 等. 2018. 基于高密度钻孔分析广州城区的软土空间分布特征及其震陷情况 [J]. 地震研究, 41(4): 637—645, 658.
- BI Li-si, CHEN Xiao-fang, MA Hao-ming, *et al.* 2018. Analysis on spatial distribution feature of soft soil in Guangzhou urban region and its seismic subsidence based on dense drilling holes [J]. Journal of Seismological Research, 41(4): 637—645, 658(in Chinese).
- 陈伟光, 赵红梅, 常郁. 2000. 广州地区活动断裂的特征及其与工程抗震的关系 [J]. 华南地震, 20(2): 47—56.
- CHEN Wei-guang, ZHAO Hong-mei, CHANG Yu. 2000. Features of active faults in Guangzhou region and relation to earthquake resistant engineering [J]. South China Journal of Seismology, 20(2): 47—56(in Chinese).
- 邓钟尉. 2016. 广州市主要断裂特征及其对城市建设的影响 [J]. 城市勘测, (6): 161—166.
- DENG Zhong-wei. 2016. Main fracture characteristics of Guangzhou City and impact on urban construction [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, (6): 161—166(in Chinese).
- 杜成亮, 赵伟, 梁东辉, 等. 2018. 广州从化岭南村岩溶塌陷成因机制分析 [J]. 防灾科技学院学报, 20(2): 33—38.
- DU Cheng-liang, ZHAO Wei, LIANG Dong-hui, *et al.* 2018. Analysis of formation mechanism of karst collapse in Lingnan village of Conghua, Guangzhou City [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 20(2): 33—38(in Chinese).
- 方燎原. 2005. 广州城市环境地质问题 [J]. 地球与环境, 33(S1): 614—616.
- FANG Liao-yuan. 2005. City environment geology problem of Guangzhou [J]. Earth and Environment, 33(S1): 614—616(in Chinese).
- 雷金山, 阳军生, 肖武权, 等. 2009. 广州岩溶塌陷形成条件及主要影响因素 [J]. 地质与勘探, 45(4): 488—492.
- LEI Jin-shan, YANG Jun-sheng, XIAO Wu-quan, *et al.* 2009. Analysis of forming conditions and main influential factors of karst collapse in Guangzhou [J]. Geology and Exploration, 45(4): 488—492(in Chinese).
- 林思蔚. 1994. 广州构造地质研究与建筑 [J]. 广州建筑, 22(4): 31—37.
- LIN Si-wei. 1994. Guangzhou structural geology research and architecture [J]. Guangzhou Architecture, 22(4): 31—37(in Chinese).
- 刘会平, 王艳丽, 刘江龙, 等. 2005. 广州市主要地质灾害成灾机制与时空分布 [J]. 自然灾害学报, 14(5): 149—153.
- LIU Hui-ping, WANG Yan-li, LIU Jiang-long, *et al.* 2005. Cause mechanism and spatiotemporal distribution of major geological disasters in Guangzhou [J]. Journal of Natural Disasters, 14(5): 149—153(in Chinese).
- 刘江龙, 刘会平, 刘文剑. 2007. 广州市主城区地面塌陷灾害危险性评价研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 27(4): 488—492.

- LIU Jiang-long , LIU Hui-ping , LIU Wen-jian. 2007. Study on ground collapse risk evaluation in main urban area of Guangzhou City [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering* , 27(4) : 488—492(in Chinese) .
- 马淑芹, 栗连弟, 卞真付, 等. 2007. 用 Nakamura 技术评估天津地区场地效应 [J]. *中国地震* , 23(1) : 25—34.
- MA Shu-qin , LI Lian-di , BIAN Zhen-fu , *et al.* 2007. Study on site response in Tianjin by Nakamura technique [J]. *Earthquake Research in China* , 23(1) : 25—34(in Chinese) .
- 王伟君, 陈棋福, 齐诚, 等. 2011. 利用噪声 *HVSR* 方法探测近地表结构的可能性和局限性: 以保定地区为例 [J]. *地球物理学报* , 54(7) : 1783—1797.
- WANG Wei-jun , CHEN Qi-fu , QI Cheng , *et al.* 2011. The feasibilities and limitations to explore the near-surface structure with microtremor *HVSR* method: A case in Baoding area of Hebei Province , China [J]. *Chinese Journal of Geophysics* , 54(7) : 1783—1797(in Chinese) .
- Bard P Y , SESAME Participants. 2004. The SESAME project: An overview and main results [C]. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver.
- Boatwright J , Fletcher J B , Fumal T E. 1991. A general inversion scheme for source , site , and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 81(5) : 1754—1782.
- Bonnefoy-Claudet S , Cornou C , Bard P Y , *et al.* 2006. *H/V* ratio: A tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations [J]. *Geophysical Journal International* , 167(2) : 827—837.
- Borcherdt R D. 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 60(1) : 29—61.
- Chen Q F , Liu L B , Wang W J , *et al.* 2009. Site effects on earthquake ground motion based on microtremor measurements for metropolitan Beijing [J]. *Chinese Science Bulletin* , 54(2) : 280—287.
- Field E , Jacob K. 1993. The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise [J]. *Geophysical Research Letters* , 20(24) : 2925—2928.
- Lachet C , Bard P Y. 1994. Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique [J]. *Journal of Physics of the Earth* , 42(4) : 377—397.
- Liu L B , Chen Q F , Wang W J , *et al.* 2014. Ambient noise as the new source for urban engineering seismology and earthquake engineering: A case study from Beijing metropolitan area [J]. *Earthquake Science* , 27(1) : 89—100.
- Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface [J]. *Quarterly Report of RTRI* , 30(1) : 25—33.
- Nakamura Y. 1997. Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor [C]. *World Congress on Railway Research* , Florence , Italy.
- Nogoshi M , Igarashi T. 1971. On the amplitude characteristics of microtremor(part 2) [J]. *Journal of the Seismological Society of Japan* , 24: 26—40.
- Parolai S , Bormann P , Milkereit C. 2002. New relationships between V_s , thickness of sediments , and resonance frequency calculated by the *H/V* ratio of seismic noise for the Cologne area(Germany) [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 92(6) : 2521—2527.
- Richter C F. 1958. *Elementary Seismology* [M]. San Francisco: Freeman and Company.
- Stevenson P R. 1976. Microearthquakes at Flathead Lake , Montana: A study using automatic earthquake processing [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 66(1) : 61—80.

SITE EFFECT AND EARTHQUAKE DISASTER CHARACTERISTICS IN GUANGZHOU AREA FROM HORIZONTAL-TO-VERTICAL SPECTRAL RATIO(*HVSR*) METHOD

ZONG Jian-ye^{1,2)} SUN Xin-lei¹⁾ ZHANG Peng^{1,2)}

1) State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Site effect, which is related to the amplification of seismic waves, is mostly affected by the thickness and softness of sediment layers. The study of site effect in cities is becoming more and more important to the assessment of ground motions, seismic hazard and engineering seismology. However, in highly populated urban cities, traditional seismic surveys cannot be applied extensively due to their destructive consequences and high cost. The ambient noise, including microseisms and microtremor, could be acquired anywhere and anytime, and thus can serve as an effective source for engineering seismology.

In order to get the site effect and distribution of sedimentary layers of Guangzhou area, one hundred QS-05A seismographs with frequency bandwidth of 5s-250Hz were deployed in early 2018 for 35 days. The inter-station spacing of these seismometers is approximately 2 ~ 5km. Using continuous ambient noise signals, we obtained the resonance frequency and amplification value beneath each station by horizontal-to-vertical spectral ratio(*HVSR*) method. Then sedimentary layer thicknesses as well as *K*-values, which are related to the site vulnerability to ground shaking, were calculated. Our results suggest that the resonance frequencies in Guangzhou area are between 1 ~ 6.5Hz. The resonance frequencies increase gradually from 1Hz on the north-east side to 6.5Hz on the south-west side of the study area. The sediment thicknesses change from several meters to about 40m, with the maximum thickness at around the estuary of the Pearl River. This distribution is consistent with the topography. The amplifications are mainly between 2~6. The largest amplification is around the Pearl River and the west part of Baiyun District. In general, the *K*-values are small(<20), less than the dangerous value, suggesting that Guangzhou area is relatively safe in ground shaking. However, there are three small areas beneath Huadu District, Sanshui District and Nanhai District. They all have *K*-values greater than 20, suggesting those areas are more vulnerable to earthquake destruction, and higher construction standard is needed. The reliability of our results is further supported by its consistency with topography and borehole data in Guangzhou area. Our results provide important information for shallow underground structure in Guangzhou area, and can be referred as guidelines in urban architecture planning and disaster prevention and mitigation.

Key words Guangzhou area, site effect, ambient noise, sedimentary thickness

(作者简介) 宗健业,男,1993年生,2017年于吉林大学获应用地球物理专业学士学位,现为中国科学院广州地球化学研究所地质工程专业在读硕士研究生,主要研究方向为工程地震,电话:13596463625, E-mail: zongjianye17@mails.ucas.ac.cn.