科学通报 2008 年 第 53 卷 第 18 期: 2229 ~ 2235
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

利用地脉动探测北京城区的地震动场地响应

陈棋福[①*], 刘澜波[①②*], 王伟君[①], Eric Rohrbach[②]

① 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036;
② University of Connecticut, Storrs CT 06269-2037, USA
*联系人, E-mail: chenqf@seis.ac.cn, lanbo@engr.uconn.edu

2008-05-20 收稿, 2008-08-21 接受
科技部国际科技合作计划项目(编号: 2006DFA21650)和中国地震局地震行业科研专项经费(编号: 0207690229, 200708008)资助

摘要 为获取北京城区的地震动场地响应资料, 2007 年夏天在北京市开展了脉动背景噪声的阵列观测. 利用北京市五环内间距 1～2 km 的 600 多个点位的地脉动观测记录, 采用 H/V 谱比分析法得到了北京城区高分辨的沉积层卓越频率和放大倍数及沉积盖层厚度分布. 本文结果与地表地形和新构造运动的分布较为相符, 得到的沉积盖层厚度与早期基于有限钻孔资料给出结果总体上较为一致, 但分辨精度明显提高. 这些结果为北京市规划和抗震设防提供了重要的科学基础资料, 为城市地球物理探测获取地下三维结构资料探索了可行的途径.

关键词
北京城区
地脉动
地震动
场地响应

地震的突发性及其所产生的强大破坏力, 常常给人类带来极其严重的灾难. 国内外众多事例表明, 地震在松软沉积场地造成的灾害远较基岩场地为重, 这对大都建在河谷、山前冲积扇和滨海平原等沉积土壤和厚厚蓄水层上以确保充足水源供应的城市地区尤其不利, 在经济高度发达、人口高度密集、社会城市化步伐不断加速的今天, 一旦发生地震将会造成难以估量的损失. 1994 年美国洛杉矶北岭 6.7 级地震和 1995 年日本阪神 6.8 级地震, 均发生在现代化大都市脚下, 对这些城市造成了巨大破坏; 而 1985 年远在墨西哥城 400 km 之外发生的 8.1 级地震, 却给建在 2.5 km 左右厚厚沉积层上的墨西哥城带来了无情的破坏, 造成 9000 多人死亡和 11 亿美元的财产损失. 不断发生的破坏性地震事实, 迫使地震学者和工程师们更加关注位于地震潜在危险区松软沉积层上城市所面临的地震动场地放大效应的致命灾害问题.

城市地震灾害主要由城市周边的潜在震源区、城市所处的场地条件和抗震设防情况决定. 在地震多发的中国, 地震造成的经济损失和人员伤亡一直位居世界前列, 其城市的抗震防灾任务十分艰巨. 明清时期完整的历史地震记录表明[1], 北京市中心 100 km范围内在过去 500 年里至少发生了 12 个烈度Ⅵ度及以上的地震, 其中北京市中心东偏北约 60 km发生的 1679 年三河-平谷 8 级地震(震中烈度Ⅺ度)使北京城区的破坏烈度高达Ⅷ度, 1730 年的北京西北郊 6½ 级地震(震中烈度Ⅸ度)导致不到 20 km市中心的烈度也达Ⅷ度并在海淀引发异常强烈的震动; 震撼世界的 1976 年唐山 7.8 级大地震在 150 km之外的北京城影响烈度为Ⅵ度且造成了不小的破坏. 2006 年 7 月 4 日北京以南约 100 km发生的文安 5.1 级地震, 北京地区普遍有感, 多少引发了对北京奥运会的地震安全关注.

历史地震记录和现代地震活动都预示北京有着不容忽视的地震威胁, 而北京城区厚约 2 km的第三纪-第四纪沉积层以及深部十分不均匀的介质结构, 在地震发生时将由于场地放大效应而加重地震灾害. 仅按照基本均一的Ⅷ度抗震设防烈度建造的建筑物, 存在着因建筑物的固有自振频率和局部场地沉积层的自振频率相匹配引起共振而致使地震破坏加重的隐患, 因而获取高分辨的北京城区地震场地响应参数对保障北京的安全而进行科学的地震动分析和制定地震应急对策是十分必要的. 传统上, 获取沉积层的场地特征的最标准和可靠的方法是钻孔测井, 但由于钻孔既昂贵又耗时, 且测井较浅又覆盖有限, 因

而常常无法满足大城市的高密度的分辨需求. 对于首都北京这样的都市, 客观上缺乏充分活跃的小震活动, 且对使用人工爆破等激发震源控制十分严格, 故传统的使用天然源或人工源的地震反演方法, 难以获取城市规划、应急响应和工程建设都迫切需要的高分辨率和精确的北京地区沉积盆地结构等资料. 利用地动背景噪声(地脉动)获取沉积层卓越频率、沉积盖层厚度和放大倍数的研究发展迅速[2~4], 其中基于单观测点的地脉动H/V谱比法[5], 由于观测处理的简便性和经济易行性使其在日本、欧洲和美国及我国台湾得到广泛的应用和发展[6~11], 为解决类似北京这样的大城市所面临的上述难题, 探测城市抗震设防急需的沉积场地响应信息提供了良好的解决方案. 本文将介绍基于H/V谱比法利用地脉动探测获取的北京城区沉积场地响应的新结果.

1 H/V 谱比法与北京市的地脉动观测

现代电子硬件和计算软件的飞速发展, 使人们突破了传统意义上的地动背景噪声的无用认识, 将之视为地脉动信号而提取出有用的信息[12]. 在时空中大量存在的由人类交通和工业活动、以及天然的海洋波动和大气扰动等致使的地动背景噪声, 已由十多年前被视为地球物理探测的“死敌”转变为“益友”, 出现了利用地脉动进行地球物理探测的无源成像(passive imaging)这一新领域[13], 为城市地球物理学(Urban Geophysics)的发展[14]提供了强有力的探测方法.

2007 年夏天, 为获取北京城区沉积层响应的科学资料, 利用 30 套短周期地震仪器(Güralp CMG-40T-1 地震计和配套的 REFTEK 130B 数据采集器)完成了北京市的脉动背景噪声数据的阵列观测采集. 在北京市五环内共观测了 600 多个点位(点位间距 1~2 km), 每点以 50 Hz 的采样率观测至少 1 h. 为获取高质量的地脉动观测资料, 在五棵松奥运场馆南的复兴路沿线布设的 100 m 间距 5 个点 24 小时不间断连续观测实验资料的分析基础上, 确定了城近郊在白天观测, 三环内尤其是二环内的观测主要在 20:00 之后进行的采集方案.

地脉动观测获取的数据采用经Nakamura[5]推广在欧美得到广泛应用的单台H/V谱比法来分析处理以获取场地响应特征. 早在 1970 年, Borcherdt[14]就提出了参考基岩台计算沉积场地放大效应经验转换函数$S_{e,R}$的谱比法, 即

$$S_{e,R}=\frac{S_S(f)}{S_B(f)}, \tag{1}$$

式中 $S_S(f)$ 和 $S_B(f)$ 分别为沉积场地(S)和基岩(B)观测记录的频谱. 因水平分量的场地放大效应大于垂直分量, 故

$$S_{e,R}=\frac{H_S(f)}{H_B(f)}, \tag{2}$$

式中 $H_S(f)$ 和 $H_B(f)$ 分别为沉积场地和基岩观测记录的水平分量频谱. Nakamura[5]利用深井微震实验证明在井下基岩处水平分量 $H_B(f)$ 和垂直分量频谱 $V_B(f)$ 几乎相等, 且沉积场地和基岩处的垂直分量频谱亦近似相等(即 $H_B(f)\approx V_B(f)\approx V_S(f)$), 进而提出了不需要基岩参考台而进行场地效应评估的单台H/V谱比法, 即场地地表放大效应的经验转换函数S_e为:

$$S_e=\frac{H_S(f)}{V_S(f)}, \tag{3}$$

式中 $H_S(f)$ 和 $V_S(f)$ 分别为沉积场地地脉动观测记录的水平分量和垂直分量的频谱. 其物理意义可以理解为, 场地观测的地脉动水平分量 $H_S(t)$和垂直分量 $V_S(t)$包含等效源 S_O、传播路径 P、场地 T_e 和记录仪器响应 I 的共同影响, 即

$$H_S(t) = S_O(t)*P(t)*T_{e,H}(t)*I(t), \tag{4}$$

$$V_S(t) = S_O(t)*P(t)*T_{e,V}(t)*I(t), \tag{5}$$

其频谱为:

$$H_S(f) = S_O(f)\times P(f)\times H_e(f)\times I(f), \tag{6}$$

$$V_S(f) = S_O(f)\times P(f)\times V_e(f)\times I(f), \tag{7}$$

则有

$$S_e=\frac{H_S(f)}{V_S(f)}=\frac{H_e(f)}{V_e(f)}, \tag{8}$$

即通过频率域中的水平分量和垂直分量(H/V)频谱比, 可以有效的剔除不同噪声源、传播路径和仪器响应的影响, 获得反映场地频率特性的信息. 大量应用研究证明由H/V频谱比法得到的峰值频率具有较好的稳定性[7], 与沉积盖层的卓越频率具有很好的对应关系[6,7]; 而其H/V曲线的振幅对地震场地放大系数[8]具有参考意义.

本研究为了得到更为准确的H/V峰值频率, 使用与传统地震事件触发长短时窗平均振幅比算法(STA/LTA)相反的方法来剔除瞬变信号, 保留稳态的地脉动数据. 处理时长时窗取 25 s, 短时窗取 1.0 s,

STA/LTA比最小值设为 0.2，最大值设为 4.0. 预处理后的稳态地脉动数据以 25 s窗长进行分段处理，分别计算垂直向和水平向傅立叶谱(由东西向和南北向信号谱均方根得到)，并应用Konno-Ohmachi平滑算法[9](取平滑系数为 50)进行平滑计算该时窗的H/V谱比；最后对得到的所有时窗H/V谱比加以平均得到每个观测点的H/V谱比曲线. 对于单峰明显的H/V曲线，采用自动方式识别峰值频率；对于地下存在多个较突出的波阻抗界面，H/V曲线出现多峰情况，使用人工方式并结合附近的钻孔资料识别峰值频率. 对识别出来的H/V谱比峰值频率利用频率-厚度关系[10]推算沉积盖层的厚度.

图 1 给出了在东三旗地震台不同时段的地脉动观测数据所计算的H/V谱比结果，除峰值振幅略微有变化外，峰值频率和曲线形态几乎完全一致. 它的峰值频率为 0.6 Hz左右，利用频率(f)-厚度(h)关系式[10] $h = 96f^{-1.388}$ 得到的沉积层厚度为 195 m，这与地震台建设时钻井测量的 198 m沉积厚度基本一致，表明了该关系式在一定程度上适用于本研究区域.

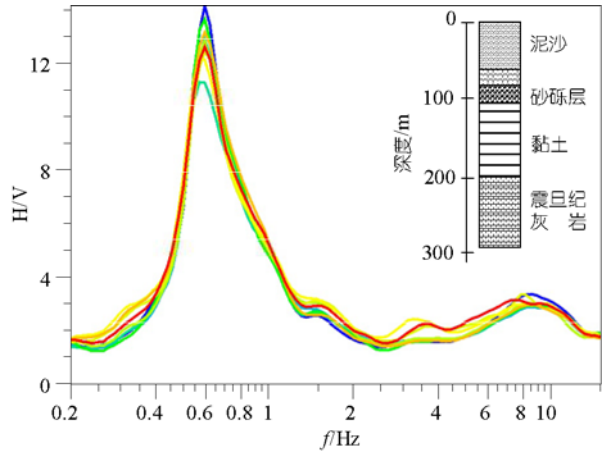

图 1　东三旗地脉动 H/V 结果

不同颜色表示不同时间的观测资料计算得到 H/V 曲线，资料随机取自 6 月 6 日~7 月 15 日 9 个不同时间段(包含上午、中午、下午、晚上)1 h 时长的观测. 插图为测点处深 285 m 的钻孔柱状图

2　结果与讨论

图 2 给出的由北京城区(五环内)600 多个 H/V 谱比曲线得出的沉积层卓越频率差异明显，分布在

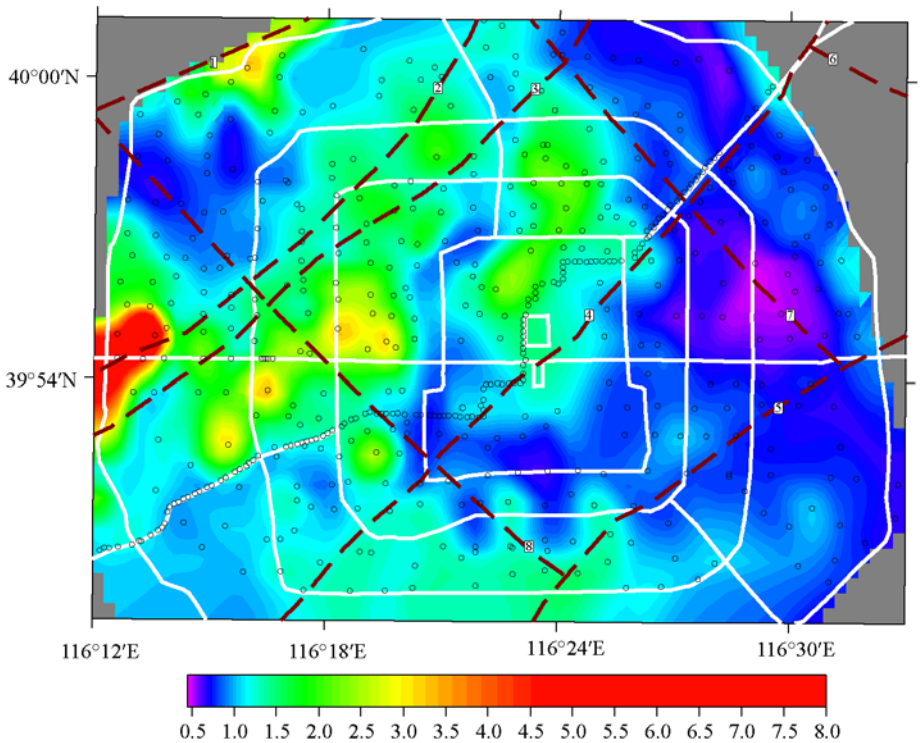

图 2　北京城区沉积层卓越频率(单位: Hz)分布图

图中黑圈表示地脉动观测点，白线为城区的主要道路和环线，红虚线表示主要的断层. 断层名称[14,15]: 1，清河断裂; 2，八宝山断裂; 3，黄庄-高丽营断裂; 4，顺义-良乡断裂; 5，南苑-通县断裂; 6，南口-孙河断裂; 7，南湖渠-大鲁店断裂; 8，漆园-香山断裂

0.5~8 Hz内. 接近于 8 Hz的最高频率位于北京西边地表基岩出露的八宝山，而较低卓越频率分布地区相对大一些，主要聚集在东边偏北地区，在地质构造上[16,17]属于顺义凹陷的西南端.

依据H/V峰值频率与沉积层厚度的关系[10]，并以可公开找到的北京市钻孔资料[16,17]为参考约束，由图 2 进一步得到了北京城区的沉积盖层厚度分布(图 3(a)). 沉积盖层厚度从八宝山的 0 m到顺义凹陷西南端的接近 400 m; 大部分地区在 100 m左右. 在北京西北四环和五环之间的相对较厚沉积区与颐和园的昆明湖相对应，城区内较厚的沉积似与环绕二环的古地表水系相一致，即与环卫古城墙的护城河大致对应.

图 4 分别展示的 0.5, 1.0, 2.0 Hz和峰值频率(卓越频率)对应的场地放大倍数，较为一致的显示出北四环和北五环之间值得关注的相对高放大值，以及城区东南角在卓越频率处的相对高值. 这可能是 1976 年唐山地震在北京城东南和西北分别引起的异常高的Ⅷ度和Ⅶ度烈度区[18]的原因.

与Ding等人[17]据 20 世纪 80 年代为止的稀疏钻孔资料给出的第四纪沉积层厚度(图 3(b))相对比，本研究得到的沉积盖层厚度总体上较为一致，即城区西部沉积较浅，东部沉积较厚. 但本研究的分辨精度明显提高，给出了北京城区更小尺度的沉积变化信息，这些小尺度的沉积变化与地表地形和表层地质构造较为一致.

对于本研究在北京西南部得出的结果与Ding等人[17]给出结果差异明显的情况，我们进一步使用 10 套宽频带地震仪器(Güralp CMG-3ESP地震计和配套的REFTEK 72-08A数据采集器)，于 2007 年 12 月 8 日在北京西南(图 4(a)中的×点)进行地脉动台阵观测对比试验. 观测台阵以一点为中心大约 28~48 m为半径布设(图 5(a)，其中一台(SA9) 因为硬盘损坏数据丢失)，数据记录由GPS进行时间同步. 该实验观测点附近的浅层钻孔[16,17]表明，该地区的第四纪沉积层厚度在 40 m左右，沉积层平均剪切波速度在 250~500 m/s之间. 由$f = Vs/4h$推算，频率f应该在 1.5~3.1 Hz之间. 但是 9 个台站的H/V谱比曲线(图 5(b))非常一致地表明，在此频率范围外有更大的幅值，尤其是在 0.72 Hz附近的峰值，说明该地区深于 40 m处存在着更大的波阻抗界面. 使用改进的空间自相关方法(MSPAC)[19]获得 3 个圆环的空间自相关曲线和其误差分布(图 5(e)~(f))，并使用条件参数空间邻域反演算法[20]，获得了相应的地下速度剖面(图 5(c), (d)). 从反演速度剖面看，浅部的一些速度间断面并非引起H/V谱比峰值频率的主要界面，而深部

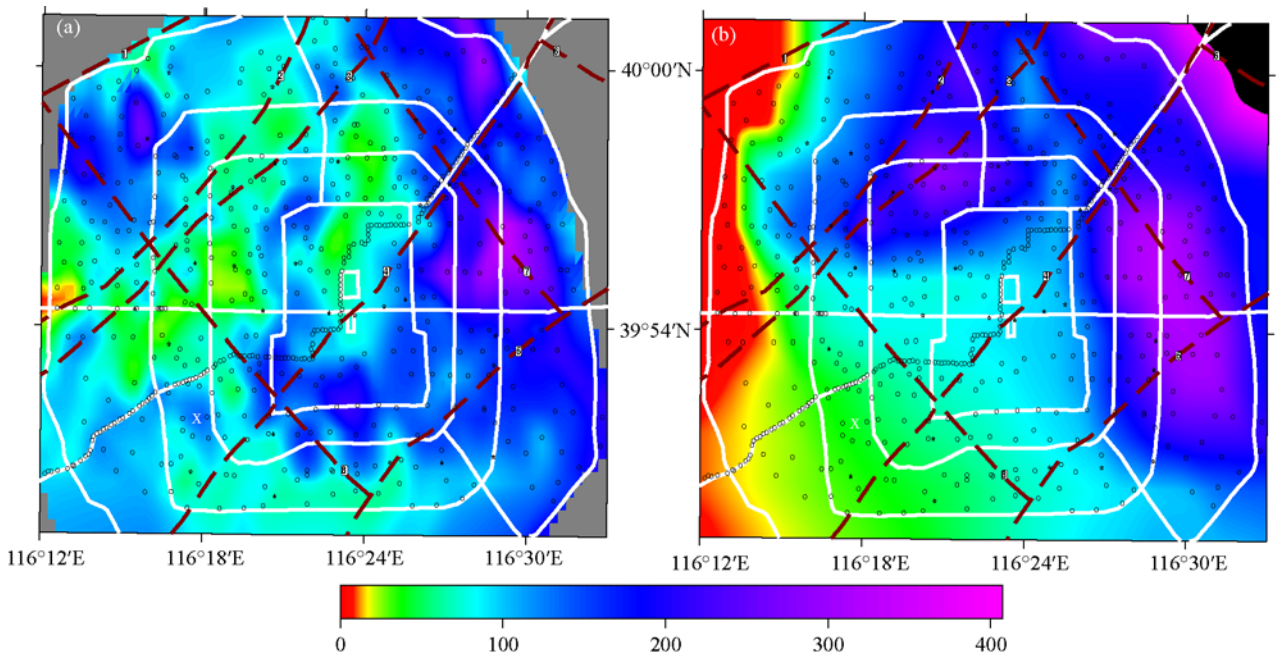

图 3 沉积厚度对比图

(a) 由H/V峰值频率得出沉积盖层厚度，其中×为地脉动台阵观测对比试验点; (b) 据文献[18]给出第四纪沉积层厚度

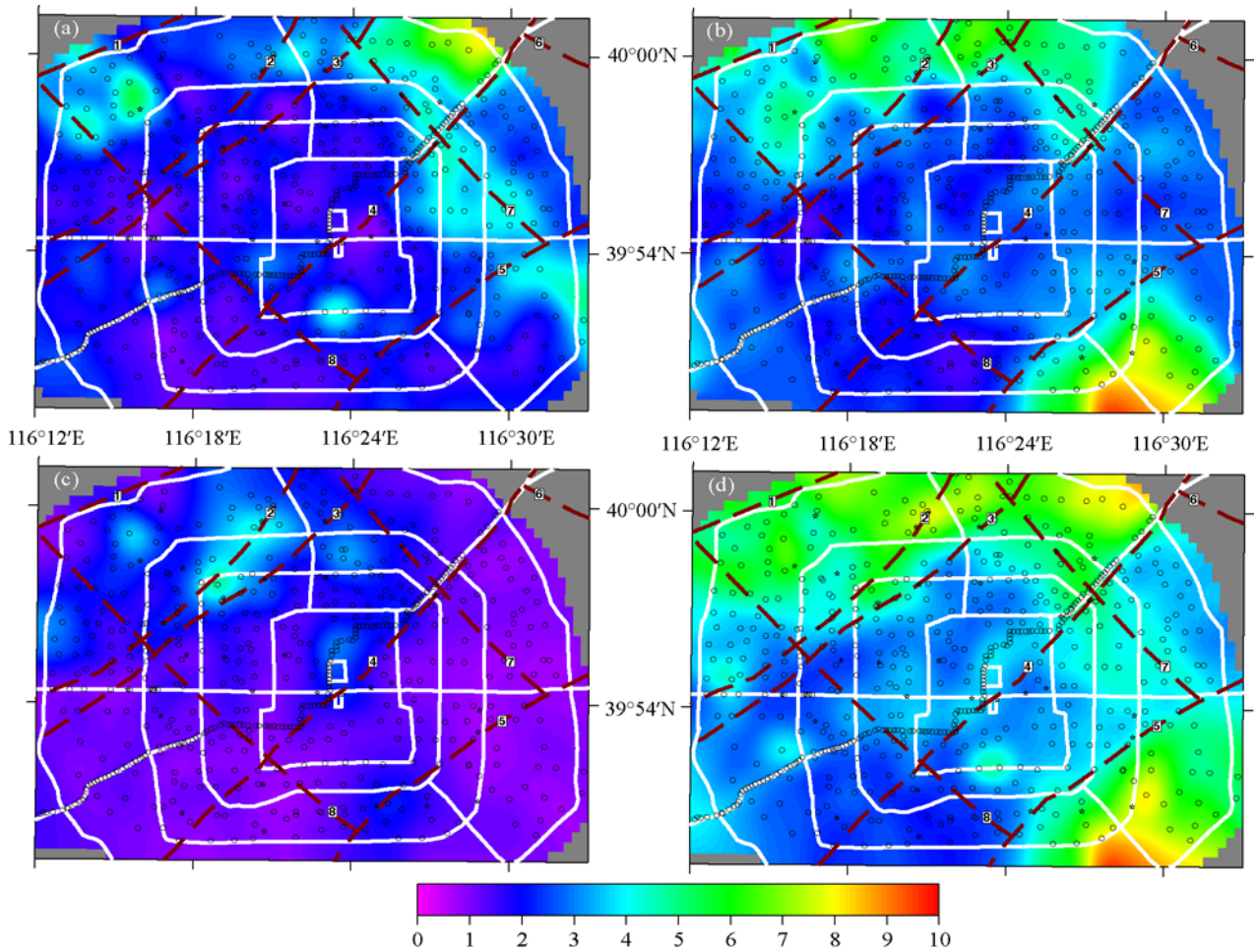

图 4　北京城区在不同频率下的放大倍数

(a) 0.5 Hz; (b) 1.0 Hz; (c) 2.0 Hz; (d) 峰值频率(卓越频率)

160 多米的界面才是导致较大场地放大作用的真正沉积盖层深度. 选择H/V峰值频率为 0.72 Hz, 通过频率-深度关系式得到的深度 151 m, 与反演速度界面深度基本相似. 根据该区域周边的钻孔[16,17], 该区域存在 1~2 m厚的低速回填土, 可以推测 4.5 Hz以上的H/V谱比峰值是由于回填土造成的. 我们在另文[1)]对比探讨五棵松体育场馆的场地响应特征时, 通过利用观测台阵处的测井速度剖面的转换函数正演分析, 证实了低速回填土致使的较高H/V谱比峰值的结果.

3　结论

本研究利用间距 1~2 km 的 600 多个点位的地脉动这一绿色环保源的观测记录, 采用 H/V 谱比法得到了北京城区的沉积层卓越频率和放大倍数的高分辨结果, 并在钻孔资料的参考约束下由 H/V 峰值频率得到了北京城区的沉积盖层厚度分布, 这些结果与地表地形和表层地质及唐山地震导致的烈度分布较为相符.

本研究新获得的北京城区高分辨地震动场地响应结果, 对面临潜在地震威胁的我国政治、经济和文化中心的首都北京的抗震设防, 尤其对北京奥运等重大活动开展以强震动模拟计算为基础的应急地震响应对策的制定, 提供了精细的科学资料.

北京市的地脉动探测研究表明, 时空处处存在的地动背景噪声是进行地球物理无源探测成像的有用信息, 为解决大城市规划和抗震设防所需地下三

1) 王伟君, 刘澜波, 陈棋福, 等. 应用地脉动 H/V 谱比法和台阵技术探测五棵松体育场馆的场地响应. 地球物理学报, 2008

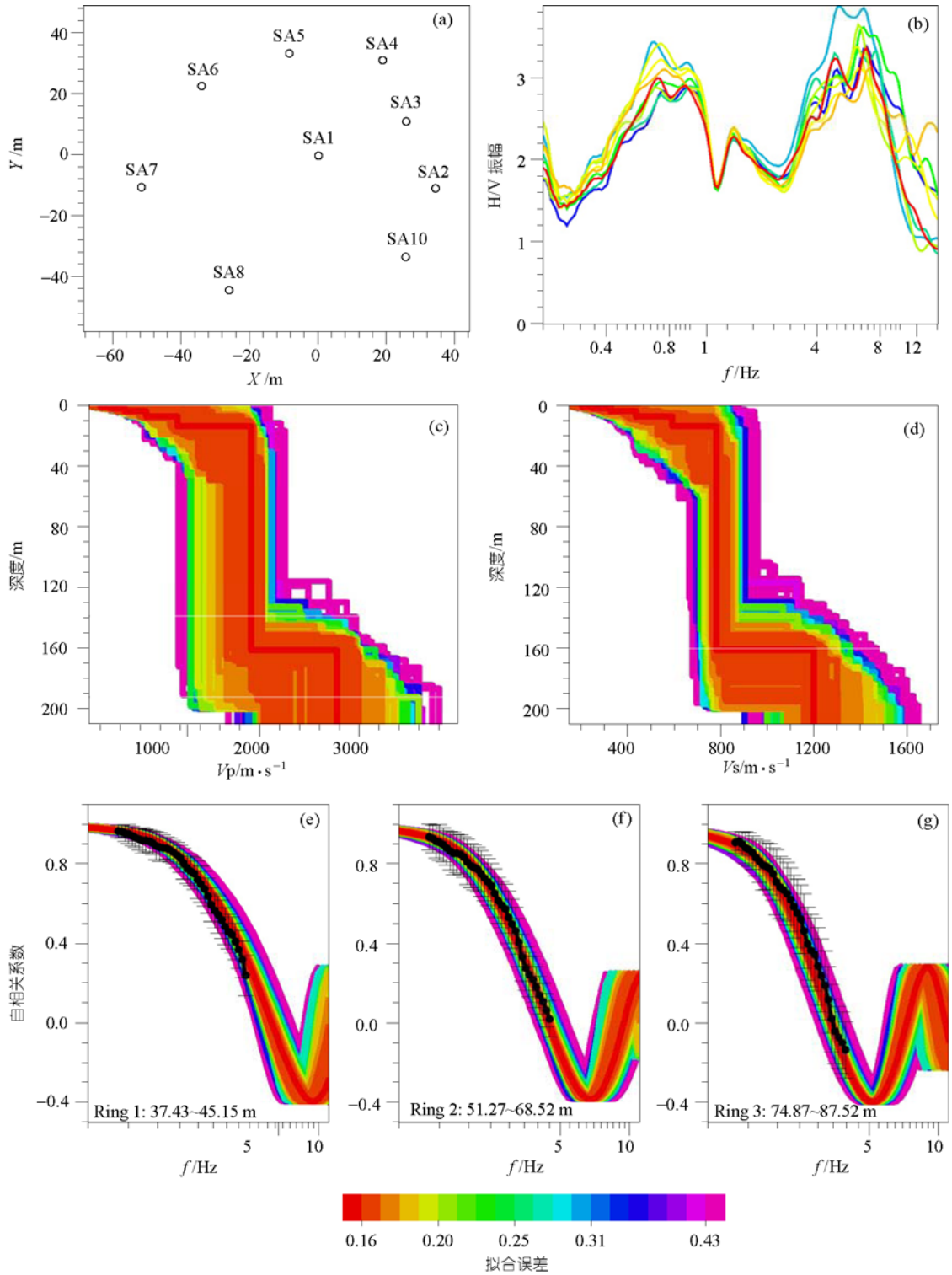

图 5 北京西南台阵观测的空间分布和处理结果

(a) 北京西南台阵观测的空间分布; (b) 9 个台(不同颜色)的 H/V 曲线, 用条件邻域算法反演得到的 V_P 深度分布(c)和 V_S 深度分布(d). 使用改进的空间自相关方法得到 3 个不同圆环的空间自相关系数曲线((e)~(f)中的黑点)和其相应的误差分布((e)~(f)中细线); (c)~(g)中各种颜色表示最下方的不同拟合误差下的结果

维结构资料的难题开展高分辨城市地球物理探测提供了新的可行途径.

本研究给出的沉积层厚度所依据的关系式是由国外城市资料建立的，其原因在于可收集到的北京市钻孔及确切的沉积层资料仍偏少，还不足于建立H/V峰值频率与沉积层厚度的关系. 本研究给出的沉积厚度分布还是初步的，尚需经进一步的资料收集和钻井对比等工作来确认.

致谢 感谢参与地脉动资料观测采集的中国地震局地震预测研究所、地球物理研究所和地质研究所、中国科技大学、山东科技大学、北京大学和浙江大学的30多位研究生，以及中国地震局地震科学探测台阵仪器中心和中国科学院地质与地球物理研究所地震台阵探测实验室提供的观测仪器，感谢审稿人提出的建设性意见.

参考文献

1 国家地震局震害防御司，编. 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, 1995. 44—471
2 Bodin P, Horton S. Broadband microtremor observation of basin resonance in the Mississippi embayment, Central US. Geophys Res Lett, 1999, 26: 903—906[doi]
3 Drawinski M, Ding G, Wen K L. Analysis of spectral ratio for estimating ground motion in deep basins. Bull Seismol Soc Amer, 1996, 86: 646—654
4 Okada H. The microtremor survey method. In: Geophysical Monograph Series No. 12. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, USA, 2003
5 Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Q Rep Railway Tech Res Inst, 1989, 30: 25—33
6 Ibs-von Seht M, Wohlenberg J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bull Seismol Soc Amer, 1999, 89: 250—259
7 Mucciarelli M, Gallipoli M R, Arcieri M. The stability of the horizontal-to-vertical spectral ratio of triggered noise and earthquake recordings. Bull Seismol Soc Amer, 2003, 93: 1407—1412 [doi]
8 Albarello D. Detection of spurious maxima in the site amplification characteristics estimated by the HVSR technique. Bull Seismol Soc Amer, 2001, 91: 718—724[doi]
9 Konno K, Ohmachi T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bull Seismol Soc Amer, 1998, 88: 228—241
10 Parolai S, Bormann P, Milkereit C. New relationships between Vs, thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). Bull Seismol Soc Amer, 2002, 92: 2521—2527[doi]
11 Weaver R L. Information from seismic noise. Science, 2005, 307: 1568—1569 [doi]
12 Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science, 2005, 307: 1615—1618 [doi]
13 陈颙, 陈龙生, 于晟. 城市地球物理学发展展望. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(4): 1—4
14 Borcherdt R D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bull Seismol Soc Amer, 1970, 60: 29—61
15 北京市地质研究测试中心区调队. 中华人民共和国区域地质调查报告(比例尺: 1∶50000)北京市(J-50-5-B). 1991
16 北京市地质调查研究院. 中华人民共和国区域地质调查报告(比例尺: 1∶250000)北京市幅(J50C001002). 2002
17 Ding Z, Romanelli F, Chen Y T, et al. Realistic modeling of seismic wave ground motion in Beijing city. Pure Appl Geophys, 2004, 161: 1093—1106 [doi]
18 Bettig B, Bard P Y, Scherbaum F, et al. Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): Application to the Grenoble area. Boll Geofis Teor Appl, 2001, 42: 281—304
19 Wathelet M, Jongmans D, Ohrnberger M. Direct inversion of spatial autocorrelation curves with the neighborhood algorithm. Bull Seismol Soc Amer, 2005, 95: 1787—1800 [doi]