

# 城市振动污染图的概念、途径与示例

陈 隽<sup>1</sup>, 杜 昊<sup>1</sup>, 曹 雷<sup>2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 福建江夏学院 工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 提出了基于群智感知的“城市振动污染图”概念, 用于量化、可视化城市环境振动污染的范围及程度。创建了线上数据采集应用, 通过志愿者的智能携带设备获得环境振动数据并形成云端数据库, 经数据清洗后, 分别在全国、城市和区域 3 个不同尺度上进行了示例。示例结果验证了“城市振动污染图”的可行性及其对于智慧城市运维的支撑能力。

**关键词:** 环境振动; 群智感知; 大数据; 振动污染图; 智慧城市

中图分类号: TU198<sup>+</sup>.5

文献标志码: A

## Concept, Approaches and Examples of Urban Vibration Pollution Map

CHEN Jun<sup>1</sup>, DU Hao<sup>1</sup>, CAO Lei<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The concept of “Map of Urban Vibration Pollution” is proposed in this paper, which is used to demonstrate the scope and scale of ambient vibration pollution in a quantitative and visual approach. Apps of online data collecting are programmed, and such data are acquired through intelligent portable devices, thus forming a cloud database. After data cleaning, examples are given at the national, urban, and regional levels. It is shown that the “Map of Urban Vibration Pollution” is feasible and useful to support the operation and maintenance of an intelligent city.

**Key words:** ambient vibration; crowd sensing; big data; vibration pollution map; smart city

自党的十八大明确提出“新型城镇化”概念以来, 城镇化建设作为国家发展战略一直在高位推进, 2020 年我国常住人口城镇化率已超过 60%<sup>[1]</sup>。世界

范围内, 目前约一半的人口在城市, 预计到 2050 年将会有超过三分之二的居民生活在城市地区<sup>[2]</sup>。文献 [3] 中用“bring people together”高度概括了城市的功能, 凸显城市发展和服务的主体是市民。近年来我国各地兴起了智慧城市建设, 以人为本、更好地为市民提供服务是智慧城市建设的根本目的。

随着城市的发展以及市民对美好生活期望的不断增强, 近年来城市环境振动对市民工作、生活的影响越来越受到关注。城市环境振动(以下简称城市振动)是指由市内轨道交通、路面交通、动力机器、建设施工行为、人群活动以及强风、地震等原因造成的场地或建筑物振动。长期存在且反复发生的城市振动会导致建筑物受损<sup>[4]</sup>、影响建筑内精密仪器的加工精度<sup>[5]</sup>、降低工作和生产效率、影响市民生活质量甚至身心健康<sup>[6-7]</sup>等。事实上, 城市振动作为一种新型环境污染, 已被国际上公认为七大环境公害之一, 与其相关的市民投诉逐年上升。

以城市交通发展带来的城市振动问题为例。截至 2020 年初, 我国 40 个城市开通城市轨道交通运营线路 208 条, 运营线路总长度已超过 6 700 km<sup>[8]</sup>; 高铁总里程达 38 000 km, 超过了所有其他国家里程的总和。城市交通体系呈现立体化、网格化发展, 从地下、地面甚至空中(如穿过或跨过建筑物的高架线路)深入到居民区和城市商业中心, 交通密度大、流量高、车速快。城市交通网络在方便市民出行的同时也加剧了城市振动污染, 影响了人们的正常工作和生活<sup>[9]</sup>。

尽管城市振动污染问题日益加剧, 但是目前非常缺乏展示城市振动污染的影响范围、严重程度和演化规律的有效工具, 相关振动污染防治措施的制定缺少科学的决策依据, 各类措施的有效性难以及时被检验。针对城市振动污染防治的强烈社会需求

收稿日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(52178151); 上海市科技人才计划(19XD1403900)

第一作者: 陈 隽(1972—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为工程结构舒适度分析、结构健康监测等。

E-mail: cejchen@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

与分析手段匮乏之间的矛盾,提出了“城市振动污染图”的概念,并通过群智感知方式收集城市振动数据,结合地理信息系统实现不同尺度的振动污染图。最后,进行了不同地理尺度上的应用示例,展示了城市振动污染图的可行性。

## 1 城市振动污染图

### 1.1 环境污染地图

环境污染地图作为污染源信息与地理信息融合的可视化工具,以直观的方式,科学且有效地将环境污染状况展示给公众,是最常用的环境污染程度表达方法,不仅应用于大气污染、水污染、噪声污染等传统问题,还应用于光污染、雾霾等新型环境问题<sup>[10-12]</sup>。

### 1.2 城市振动污染图及实现途径

受上述工作启发,针对城市振动提出“城市振动污染图”的概念,并将其定义为:综合振动特征、地理信息、城市建筑和基础设施等信息以反映城市振动污染水平的数据地图。

城市振动污染图的实现包括振动数据采集、数据处理与可视化三大部分。其中,振动数据采集是核心,决定了后续数据处理的原则和可视化展示的方式。从设备成本、振源多变、时空效应及在线更新等角度,数据采集显然不能依赖于有限数量的固定或移动测站的传统方式,而需要充分利用现代城市泛在的测试设备和普适感知能力,将振动位置、环境和市民三要素无缝连接成强大公众感知网络,实现对城市振动的立体感知。因此,“群智感知”就成为城市振动污染图数据采集的必然选择。

“群智感知”(crowd-sensing)是指将普通用户的智能设备(手机、平板、手表等)作为终端传感器,通过大量用户的协作实现对周围环境信息的感知。“众包(crowd-sourcing)”是群智感知的一种工作模式<sup>[13]</sup>,指把某项任务以自有资源(如个人手机、电脑)的形式外包给非特定的、大规模的大众志愿者的做法。众包可以根据不同任务的设置,灵活调整感知范围、选定感知环境。据此,城市振动污染图的实现步骤如下:①开发基于智能携带设备的环境振动采集软件;②开展众包推广,志愿者上传感知数据并形成多源异构振动数据库;③进行数据清洗和数据填充;④利用现有各类地图软件的应用程序编程接口(API),绘制城市振动污染图。按照上述方案进行了探索,以下重点介绍数据采集和应用示例 2 个

部分。

## 2 城市环境振动的群智感知

### 2.1 数据采集

智能携带设备可通过 App 或小程序完成振动信号收集。App 需要下载到本机运行,功能完整,响应速度快,但占用较多硬件资源,同时版本更新慢。小程序无需下载,使用灵活,可随时更新功能,但需要通过特定平台(如微信)等接入。为对比以上 2 种方式,分别开发了“VCheck”微信小程序和“振感地图”App(以下简称振感 App)。目前,2 个程序都可在微信平台或应用市场检索和下载。

VCheck 和振感 App 均通过调用智能手机自带的加速度传感器,完成用户对环境振动的自主感知。具体使用步骤为:①志愿者在其手机上下载安装软件或使用小程序;②在指定区域或工作、生活场所,利用手机软件测量振动时程(必须);③填写振感问卷调查表;④拍摄振动区域的照片或视频(可选);⑤提交数据至云端服务器;⑥后台审核、确认数据并对合格数据进行奖励。

为保证测试数据的精度,采用小型高精度振动台对市面上近 50 种智能手机的加速度测量精度进行了检验<sup>[14]</sup>。根据检验结果,在众包任务的条件设置中对手机型号进行了限定。同时,在振感 App 和 VCheck 中以轮播图方式强调数据采集实施的要点,如手机必须放置在坚硬的振动面上(如楼面、地面等),屏幕应垂直于振动方向,强制要求最短测试时长为 30 s 等。

为对比不同群智感知推广策略的差异,分别利用 VCheck 和振感 App 进行了线上非指定区域和线下指定区域的振动数据采集。前者通过线上社交网络推广,已收集到来自 4 个国家、30 个省市的 8 521 条环境振动数据;后者采用线下志愿者招募方式,在上海市 2 个指定区域共收集到 222 条环境振动数据。城市振动污染图建立初期,可采用人工布点的方式,测点密度根据振源特点决定,本研究初步尝试了每 0.5~2.0 km<sup>2</sup> 方格一个测点的原则。远期目标是随着群智感知推广的深入和用户的增加,形成指定区域稳定的测点数。图 1 为 VCheck 收集的一组样本时程和测点环境照片,图 2 为振感 App 获得的 3 类振动数据,分别是由地铁运行、公园内过山车游乐设施运行和路面交通运行所引起的自由场地上振动时程及其频谱图。

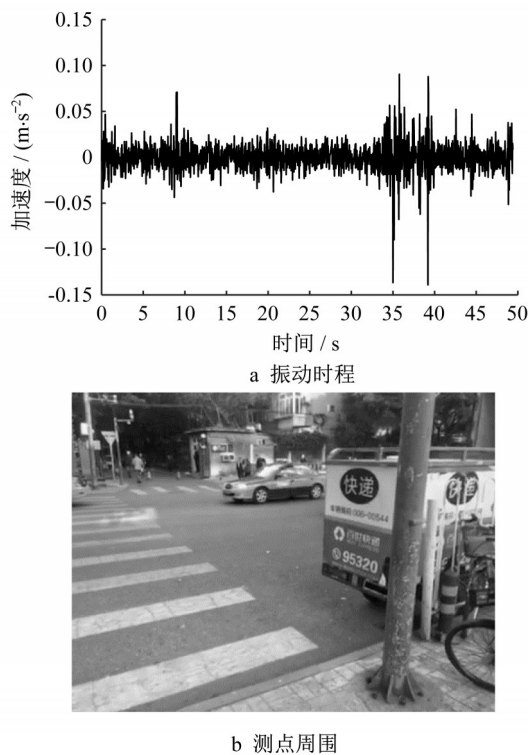


图1 VCheck收集到的样本示例

Fig.1 Sample collected by VCheck

## 2.2 数据清洗

上述群智感知所获得的每个样本都包含振动信号、问卷表、照片、视频等多源异构数据。尽管在程序端已经采取了对测试方式、时长等方面的限制措施,但是由于群智感知数据的来源丰富、类型多样、场景复杂,相比实验室环境的可控性差,数据质量也相对要低,甚至可能有无效数据,因此需要通过不断迭代优化的方式,形成合理、有效的多源异构数据清洗准则,确保在剔除错误数据的同时,保留特殊场景下的有价值数据。

实践表明,城市振动污染图数据清洗可采用信号特征分析和语义矛盾2种方式。前者通过测试信号分析识别由手机硬件质量、通信网络或者志愿者自身操作等原因造成的问题数据。如图3所示,图3a为有效数据,图3b(等幅信号)、图3c(间断信号)为问题数据。后者利用问卷调查表中的信息冲突来识别问题样本,如年龄超过100岁、身高超过2.5m等。2种清洗方法的详细步骤和迭代更新原则见文献[15]。

经过数据清洗,4 089条全国振动数据和187条区域振动数据为有效数据,合格率分别为48.0%和84.2%。这一结果一方面反映了大数据低价值(low value)的显著特点,另一方面也反映了2种数据

采集方式的不同效果,在基于群智感知的数据采集中应特别重视数据来源与对应的数据清洗工作。

对清洗过后的振动数据进行时域分析,选择《城市区域环境振动标准》(GB 10070-88)中的竖向振动加速度级评价环境振动,如下所示:

$$V = 20 \lg \frac{a_{\text{rms}}}{a_0} \quad (1)$$

$$a_{\text{rms}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T a_i(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:  $V$  为竖向振动加速度级;  $a_0$  为基准加速度,取  $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $T$  为时间计权常数,取 1 s;  $a_{\text{rms}}$  为频率计权振动加速度有效值;  $a_i$  为频率计权振动加速度。

## 3 城市振动污染图的可视化示例

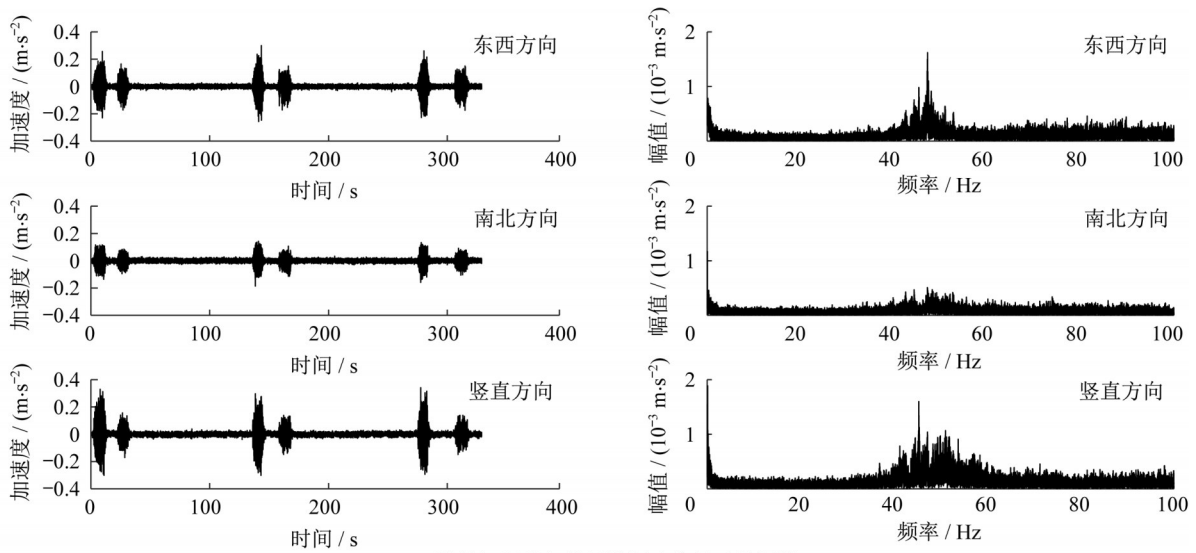
### 3.1 城市振动污染图绘制

城市振动污染图绘制是综合数据储存、融合和分析的过程,分别使用 ArcGIS 软件、高德地图 API 和百度地图 API 展示城市振动污染图的绘制。先以目标感知区域的地理信息(道路、建筑和地形等)为基础,形成城市振动污染图的底图,再根据采集点经纬度坐标将实测环境振动信息(如竖向振动加速度级)融合入底图。根据数据类型和密度,可分别采用点图、热力图、区域污染图等方式进行可视化展示。当群智感知获取的数据累积到一定阶段,可通过地理信息系统的分析工具,推演振动污染现象的时空分布和演变特征。

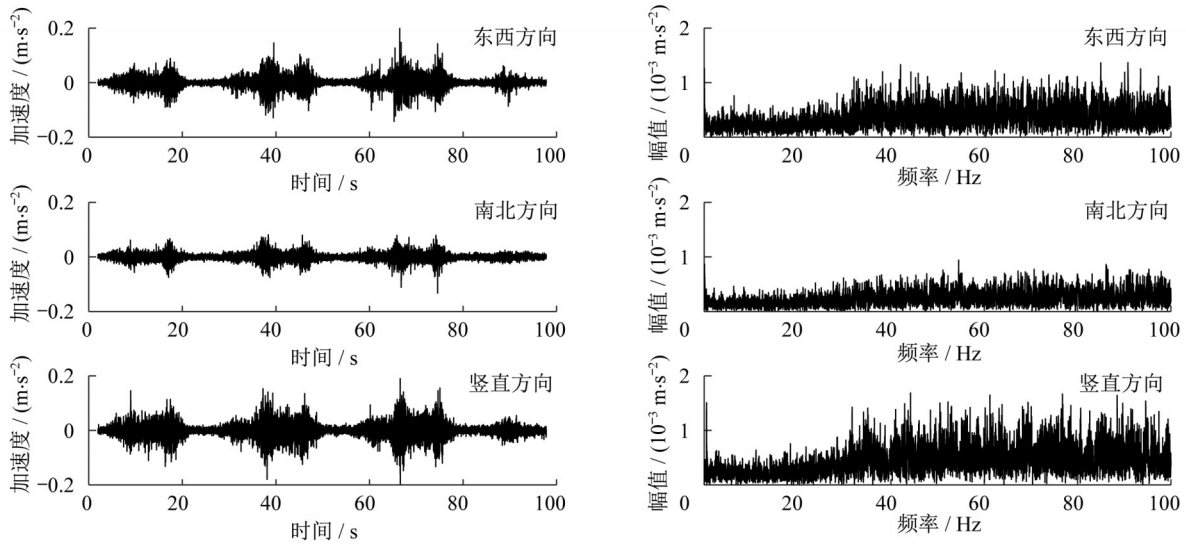
### 3.2 振源特点分析

图2展示了3种不同振源引起的振动加速度时程与频谱。图2a为由地铁运行引起的环境振动加速度时程与频谱,竖向振动加速度峰值为  $0.3416 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,在 40~60 Hz 时有卓越频率。图2b为由某城市公园内过山车游乐设施在运行时引起的环境振动加速度时程与频谱,竖向振动加速度峰值为  $0.1933 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,频谱能量分散在 40~100 Hz。图2c为由路面交通运行引起的环境振动加速度时程与频谱,振动时程中有对应大型车辆通过时的脉冲信号,竖向振动加速度峰值为  $0.0490 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,频谱特性类似白噪声。参考《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)的限值,地铁及过山车引起的环境振动的幅值超过了人体有感振幅  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,但地铁引起的振动幅值未超过生产操作区域的加速度限值  $0.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。上述结果与现场志愿者的主观感受和评价也吻合。显然,基于智能携带设备的环境振动

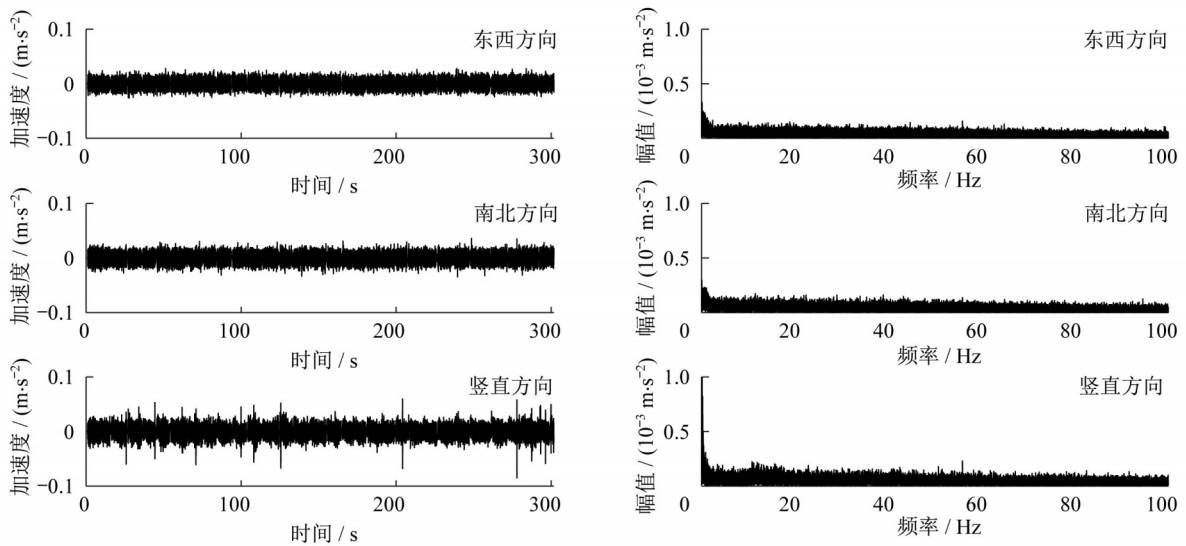




a 地铁运行引起的环境振动信号及其频谱



b 游乐场过山车运行引起的环境振动信号及其频谱



c 路面交通运行引起的环境振动信号及其频谱

图 2 振感 App 获得的不同激励源的振动数据

Fig.2 Vibration data of different excitation sources obtained from Vibration Sensing App

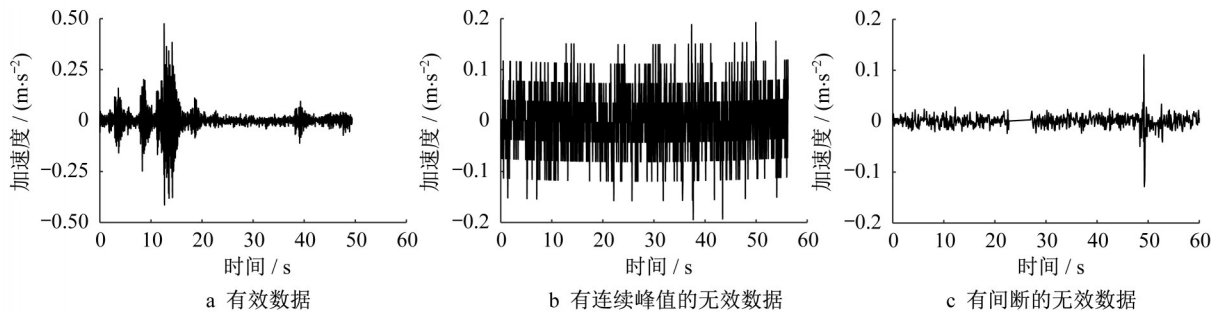


图3 不同类型数据示例

Fig.3 Examples of different types of data

测试可行,同时通过对振动数据的时域、频域特征分析,可以大致判断振动污染源的类型,对后续细致调查具有指导意义。

### 3.3 城市振动污染图示例

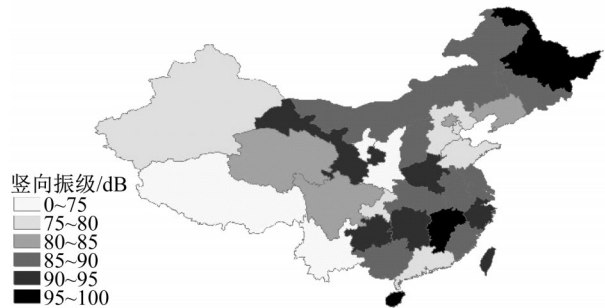
将目前群智感知获得的振动数据与地理信息结合,可绘制不同尺度的振动污染图。基于现有数据,以位置点图方式绘制了振动数据分布图(见图4a),并统计了全国各行政区振动强度(见图4b)。需要说明的是,目前的数据量不支持对以上两图做任何有意义的后续分析,只用于展示该尺度上城市振动污染图的可行性。

图5a、b展示了某市的振动数据来源和强度。有意义的是,在振动强度热力图(见图5b)中,振级较大的区域集中在该城市多条地铁线路的交汇点。显然,目前的数据已经支持在城市尺度上给出一些有参考价值的结果。

图6为某市一个地铁下穿公园区域的城市振动污染图。图6a为振动测点(图中圆点)以及地铁线路情况;图6b为振动强度热力图,由测点数据通过克里金插值函数计算得到,颜色越深则振动污染等级越高。图6b中左下部黑色区域为地铁站附近,环境振动等级偏高。图7为该区域环境振动数据的定位



a 数据来源分布



b 振动加速度级分布

图4 群智感知振动数据分布

Fig.4 Distribution of vibration data perceived by crowd-sensing

点地图,展示志愿者描述的振动发生时间、地点、振源类型以及振感描述等信息,显然定位点所反映的



a 数据来源分布



b 振动加速度级分布

图5 某市振动数据分布

Fig.5 Distribution of vibration data in a city

振动信息与振动污染状况(见图6b)是一致的。图6b右上部的黑色区域内有公园游乐场(小型过山车、海盗船等动感游戏设备),同时临近主干道路,因此环境振动等级高。尽管如此,但是由于此区域内无居民住宅、商业办公楼等容纳市民长时间停留的场

所,因此没有关于环境振动的投诉。上述结果表明,综合利用城市振动污染图及其对应的定位信息,可以实现为市民、管理部门提供环境振动信息的功能,随着数据量的增大以及在线功能的实现,也可以达到辅助管理和决策的目的。

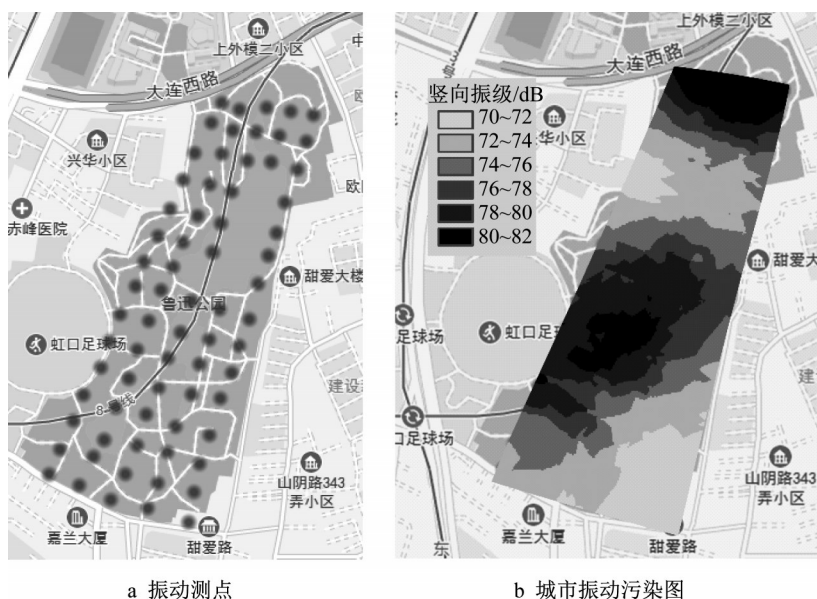


图6 地铁下穿区域振动数据分布及城市振动污染图

Fig.6 Distribution of vibration data and Map of Urban Vibration Pollution in subway underpass areas



图7 区域振动定位点

Fig.7 Location points of vibration

## 4 结语

从城市环境污染评估和治理的高度,提出了“城

市振动污染图”的概念。利用与市民生活密不可分的智能携带设备,编制并上线了2款软件。通过群智感知方式不断采集和积累全国和区域环境振动数据,经数据清洗后结合地理信息展示了不同尺度的数据分布图、振级热力图以及振感定位图等多种形式的城市振动污染图。虽然上述示例距离实用差距巨大,但是足以表明城市振动污染图用于城市振动可视化和分析的可行性和潜在价值。

### 作者贡献声明:

陈 隽:研究构思,论文撰写与修改。

杜 昊:软件开发,数据处理与分析,论文撰写。

曹 雷:软件开发,数据收集。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2020 [R]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] Department of Economic and Social Affairs, United Nations.

- World urbanization prospects 2018: highlights [R]. New York: United Nations, 2019.
- [3] PALMER L. Urban agriculture growth in US cities[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1: 5.
- [4] 夏倩, 赵瑾, 马蒙, 等. 交通振动对砌体古建筑影响分析的研究现状[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38: 135.  
XIA Qian, ZHAO Jin, MA Meng, *et al.* Research status of the influence of traffic vibration on damage mechanism and fatigue life of masonry ancient buildings [J]. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38: 135.
- [5] 马蒙, 刘维宁, 丁德云, 等. 地铁列车振动对精密仪器影响的预测研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30: 185.  
MA Meng, LIU Weining, DING Deyun, *et al.* Prediction of influence of metro trains induced vibrations on sensitive instruments [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30: 185.
- [6] 朱瑾如, 钱程, 潘雨桐, 等. 地铁振动对建筑物及人体舒适度影响的研究[J]. *结构工程师*, 2017, 33: 125.  
ZHU Jinru, QIAN Cheng, PAN Yutong, *et al.* Study on subway-induced vibration response of building structures and human comfort[J]. *Structural Engineers*, 2017, 33: 125.
- [7] SUN Ke, ZHANG Wei, DING Huaping, *et al.* Embedding human annoyance rate models in wireless smart sensors for assessing the influence of subway train-induced ambient vibration [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25: 105023.
- [8] 中国城市轨道交通协会. 2019年度城市轨道交通运营情况[J]. *城市轨道交通*, 2020(6): 37.  
China Association of Metros. Operation of urban rail transit in 2019[J]. *China Metros*, 2020(6): 37.
- [9] 刘维宁. 地铁列车振动环境影响的预测、评估与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LIU Weining. Metro train induced environmental vibrations: prediction, evaluation and control[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [10] LAN Ziqin, HE Canming, CAI Ming. Urban road traffic noise spatiotemporal distribution mapping using multisource data[J]. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 2020, 82: 102323.
- [11] NEBENZAL A, FISHBAIN B, KENDLER S. Model-based dense air pollution maps from sparse sensing in multi-source scenarios [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2020, 128: 104701.
- [12] LI Jiayi, XU Yongming, CUI Weiping, *et al.* Investigation of nighttime light pollution in Nanjing, China by mapping illuminance from field observations and Luojia 1-01 imagery[J]. *Sustainability*, 2020, 12: 681.
- [13] HOWE J. The rise of crowdsourcing [J]. *Wired Magazine*, 2006, 14: 1.
- [14] 潘子叶, 陈隽, 谭寰. 基于智能手机的行人荷载测试研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(14): 22.  
PAN Ziye, CHEN Jun, TAN Huan. Measurements of pedestrian's loads using smart phones[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37: 22.
- [15] 曹雷, 陈隽. 振动舒适度的智能手机大数据研究[J]. *振动工程学报*, 2020, 33: 961.  
CAO Lei, CHEN Jun. Big data investigation for vibration serviceability using smart phones [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33: 961.