

文章编号:1006-1355(2021)04-0169-07

基于地图兴趣点PCA分析的人群聚集区 噪声暴露评估

陈亮¹, 周昊¹, 王海波², 武泽宇¹, 李巧茹¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401;
2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要: 基于兴趣点主成分分析针对城市人群聚集区噪声暴露进行评估。首先通过主成分分析法求解兴趣点人口吸引, 结合兴趣点位置信息得出区域人口分布; 然后计算网格级噪声数据; 最后对人口密度分级并完成噪声暴露评估。典型案例区域的噪声暴露结果显示, 交通噪声暴露情况与评估点地理位置和人群密度高度关联。人口密度与暴露人口占比之间存在非对称波动变化关系, 对应某一人口密度值时暴露人口比例达到极大值。试验设定条件下限行和限速措施使区域人均噪声值分别降低2.44 dB、2.69 dB, 限行、限速等措施可显著改善人群聚集区的噪声暴露情况。

关键词: 声学; 兴趣点; PCA分析; 人群聚集区; 噪声暴露

中图分类号: U260.16

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.04.026

Assessment of Noise Exposure in Crowded Areas Based on PCA Analysis of Map Points of Interest

CHEN Liang¹, ZHOU Hao¹, WANG Haibo², WU Zeyu¹, LI Qiaoru¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology,
Tianjin 300401, China;
2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: The noise exposure in urban crowded areas was evaluated based on principal component analysis of points of interest. First of all, the population attraction of points of interest was solved by principal component analysis, and regional population distribution was obtained by combining with the location information of points of interest. Then, the grid level noise data was calculated. Finally, the noise exposure assessment was completed by grading the population density. The noise exposure results of a typical case area show that traffic noise exposure is highly correlated with the geographic location and population density of the assessment point. There is an asymmetric fluctuating relationship between the population density and the proportion of exposed population. The proportion of exposed population reaches a maximum value at a certain population density value. In the experimental settings, the noise level per capita in the area is reduced by 2.44 dB and 2.69 dB by the traffic restriction and speed limit respectively which can significantly reduce the noise exposure in crowded areas.

Key words: acoustics; points of interest; principal component analysis; crowded area; noise exposure

世界卫生组织报告显示^[1], 噪声污染对环境和公众健康的影响仅次于空气污染。交通噪声对城市居

民的日常生活^[2]、睡眠质量^[3]都有着严重影响。同时可能带来生理^[4]或心理^[5]危害。

交通噪声评估已成为环境研究的重要课题, 而人口在噪声评估中的重要性也得到关注。如Roswall等^[6]通过长期问卷调查和噪声测量, 探究居民休闲时间与噪声暴露间的关系。Lam等^[7]考虑年龄、职业、家庭等因素, 结合噪声地图研究香港噪声暴露的阶级不平等性。针对人群对噪声的忍受程度, 一些学者利用声功能需求评估噪声污染。如

收稿日期: 2020-08-13

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2018A030310333);
河北省自然科学基金资助项目(E2019202447)

作者简介: 陈亮(1978-), 男, 天津市人, 硕士, 副教授, 研究方向为交通规划与管理。

通信作者: 王海波(1989-), 男, 河北省保定市人, 博士, 讲师, 研究方向为道路交通环境工程。
E-mail: wanghb_edu@126.com

Wang等^[8]用兴趣点聚类分析重新划分声功能区,评估广州交通噪声暴露状况。谢林华等^[9]考虑声功能区以及人口和区域等要素提出噪声评估方法。噪声暴露评估往往依赖于人口分布数据,因此,学者们对精细化人口分布及其在噪声暴露评估中的应用也进行了深入研究。如Murphy等^[10]以住宅为单位表示人口分布特点,评估人口受噪声影响的程度;Yao等^[11]基于多元大数据求解出建筑物级人口分布;淳锦等^[12]用兴趣点对人口重新划分,提出了街道级的人口分布计算方法。以及Cai等^[13]给出一种基于兴趣点数据、人口数据和地理空间数据计算城市人口分布评估城市人口噪声暴露的方法等。上述研究从个体属性、人口分布等方面探究了人口与噪声暴露的关系,但均未考虑人口密度对噪声的影响。由于城市人口集中、流动性强,使得人口数据统计困难。兴趣点作为一种易于获取的网络数据,能反映城市人口密度状况^[14]。基于兴趣点的噪声评估方法可极大减少城市交通噪声评估工作量,为合理降噪提供依据。

本文针对人群聚集区域,构建兴趣点属性矩阵,通过主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)和高斯分解方法求出区域的人口分布,结合噪声数据评估研究区域噪声暴露情况。并针对性提出降噪措施建议,评估分析降噪效果。

1 人群聚集区噪声暴露评估方法

1.1 方法概述

方法流程如图1所示。

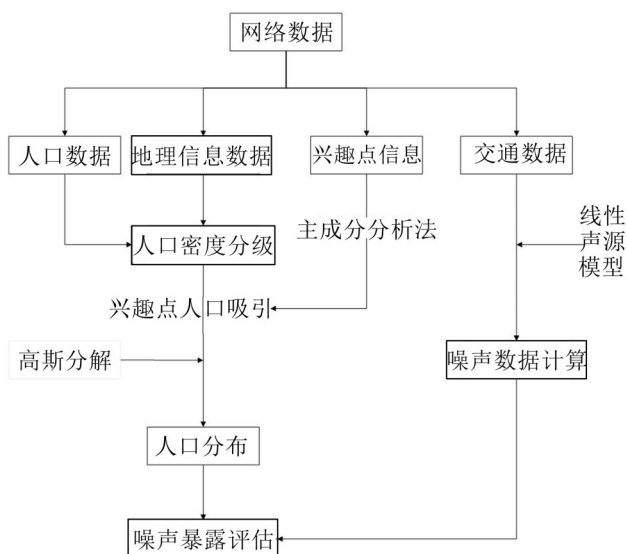


图1 噪声暴露评估方法总览图

首先,通过网络获取地理信息数据、人口数据等,然后处理地理信息数据,结合人口数据进行人口密度分级。构建各等级下兴趣点属性矩阵,应用

PCA法和高斯分解求得人口分布。最后结合噪声数据对区域进行噪声暴露评估。

1.2 基于地图兴趣点主成分分析的人口分布方法

通过基于兴趣点的PCA方法获得人口分布数据。首先对人口密度分级,对应构建兴趣点属性矩阵。然后用PCA法处理矩阵,求解人口吸引系数,基于高斯分解得到人口分布。

1.2.1 人口密度分级及兴趣点属性矩阵构建

通过网络地图获取区域地理信息数据,提取相关要素并划分区域。计算相应人口密度并分级,等级数为 k 。设定人口密度等级与兴趣点人口吸引对应。

兴趣点可利用地图API,使用自动程序获取。按照式(1)计算兴趣点间的相关系数:

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(D_X, D_Y)}{\sqrt{Var(D_X)Var(D_Y)}} \quad (1)$$

其中: D_X 和 D_Y 分别为 X 类、 Y 类兴趣点功能属性矩阵,由矩阵 $[d_1, d_2, d_3, \dots]$ 表示,元素为兴趣点类型执行相应功能的可能性,总和为1; $Cov(D_X, D_Y)$ 为 D_X 和 D_Y 的协方差; $Var(D_X)$ 和 $Var(D_Y)$ 分别为 D_X 和 D_Y 的方差。当 $\rho_{XY} > 0.8$ 时,将两类兴趣点合并计算。计算各类兴趣点密度,公式为

$$t_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

其中: t_i 是第 i 类兴趣点的密度; x_i 是第 i 类兴趣点的数量; n 是兴趣点类型总数。 i 类兴趣点密度 t_i 小于密度限值 T 时,将 i 类兴趣点剔除。

综合区域人口和地理位置等信息构建兴趣点属性矩阵 $[P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n]^T$,其中 P_i 可以表示为 $P[p_1, p_2, p_3, \dots, p_k]$; $p_l (l = 1, 2, \dots, k)$ 为 i 类兴趣点属于 l 类人口密度等级可能性, $p_l (l = 1, 2, \dots, k)$ 和为1。

1.2.2 基于PCA法求解人口吸引系数

用PCA法对兴趣点属性矩阵进行降维处理,然后拟合属性主成分与人口之间的关系,求解兴趣点人口吸引系数。步骤如下:

- (1) 将兴趣点属性矩阵标准化;
- (2) 求解标准化矩阵 Z 的相关系数矩阵 C ;
- (3) 解出相关矩阵 C 的特征根,确定主成分值。

其中:依据限定条件 $\frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{j=1}^k \lambda_j} \geq 0.85$ 确定主成分个数 m , λ_j 为第 j 个特征根;

(4) 将标准矩阵 Z 转换为主成分矩阵 X ;

(5) 对 m 个主成分进行综合评价。

依据主成分元素求得各类兴趣点吸引人口总数:

$$R_{ui} = \left(\sum_{j=1}^m \theta_{ij} \alpha_{uij} \right) \times A_u + \gamma_{ui} \quad (3)$$

其中: R_{ui} 为区域 u 中 i 类兴趣点吸引人口总数; θ_{ij} 为矩阵 X 的 i 行 j 列元素; α_{uij} 为 u 区域 i 类兴趣点 j 主成分对应的人口密度评价指标值; A_u 为区域 u 的面积; γ_{ui} 为无目标随机出行人群, 认为其由最近兴趣点吸引且吸引数量与兴趣点密度正相关, 表示为

$$\gamma_{ui} = (R_{ui} - R_{uf}) t_{ui} \quad (4)$$

其中: R_{ui} 为区域 u 总人数; R_{uf} 为区域 u 兴趣点实际吸引人数; t_{ui} 为 u 区域 i 类兴趣点密度。 R_{uf} 计算公式为

$$R_{uf} = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \theta_{ij} \alpha_{uij} \right) \times A_u \quad (5)$$

兴趣点人口吸引系数可以表示为人口数与兴趣点数量之间的比值关系, 表示为

$$\beta_{ui} = \frac{R_{ui}}{N_{ui}} \quad (6)$$

其中: β_{ui} 为兴趣点吸引系数; N_{ui} 为兴趣点数量。

依据上述几个公式可求解兴趣点人口吸引系数。

1.2.3 特征人群分布方法

本文用高斯分解方法分配各兴趣点人口吸引数量。具体步骤如下:

(1) 统计分析不同网格大小人口数与兴趣点数量相关系数, 结合兴趣点散布情况等因素选取最佳网格大小, 划分区域;

(2) 对网格内兴趣点吸引人口进行高斯分解得到特征人群分布;

(3) 绘制区域人口分布图。高斯分解计算公式为

$$\begin{cases} f(x, y) = \left(2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2} \right)^{-1} \exp\{t(x, y)\} \\ t(x, y) = -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \\ \left(\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \end{cases} \quad (7)$$

其中: (μ_1, μ_2) 表示各节点的水平坐标, ρ 为水平坐标之间的相关系数, σ_1 与 σ_2 分别表示水平坐标 x 与 y 对应函数的标准差。

根据人口守恒性修正人群分布模型, 公式为

$$R_c = R_m \frac{C_c}{C_m} \quad (8)$$

式中: R_c 为修正后人口数; R_m 为格网化后人口数; C_c

为集记人口总数; C_m 为根据高斯模型求解的人口总数。

1.3 交通噪声预测及噪声数据获取

以人口分布网格节点作为噪声计算点, 采用线性声源模型获取噪声数据, 模型公式为:

$$L_{eq} = L_o + 10 \lg \frac{N}{TV} + 10 \lg \left(\frac{7.5}{r} \right)^{1+\alpha} - 10 \lg \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\pi} \right) - 16 \quad (9)$$

式中: L_{eq} 为接受点处的等效声级, dB; L_o 为车辆参照点处的平均辐射噪声级, dB; N 为车流量, veh/h; V 为车速, km/h; r 为接受点距行车线距离, m; T 为计算时间, s; α 为地面因素有关吸收因子, 取 0.5。对有限长道路进行修正, 修正值为 $-10 \lg \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\pi} \right)$, α_1 和 α_2 为接受点与道路两端点连线的夹角。

1.4 噪声暴露评估指标

采用人均噪声值和受噪人口比例描述噪声暴露特性。

人均噪声值(Per capita noise, PCN)为区域人口平均噪声值:

$$PCN = \frac{R_n \times \text{noise}}{R_t} \quad (10)$$

其中: noise 为计算噪声值; R_n 是受到该噪声值的人口数量; R_t 则表示总人口数量。

受噪人口比例(Proportion of noisy population, PONP)为处于超过噪声限值声压级区间的人口数与噪声暴露人口数之间的比值:

$$PONP_y = \frac{R_y}{R_e} \quad (11)$$

其中: $PONP_y$ 表示 y 声压级区间人口比例; R_y 为处于 y 声压级区间人口数量; R_e 指噪声暴露人口数。

2 实例分析

2.1 实例描述

本文选取的典型高密度人群聚集区人口总数为 19 313 人, 面积为 363 386 m²。根据声功能区划分标准, 其属于 1 类声环境功能区, 其昼间噪声限值为 55 dB。遵循以下原则划分区域:

(1) 以主干道为边界, 且相邻区域人口密度等级尽量不同。

(2) 相邻区域人口密度等级相同时, 其人口密度差值绝对值不小于等级区间长度的一半, 或存在密度差值大于 15 % 的兴趣点类型。对区域进行划分和编号如图 2 所示。



图2 研究区域划分图

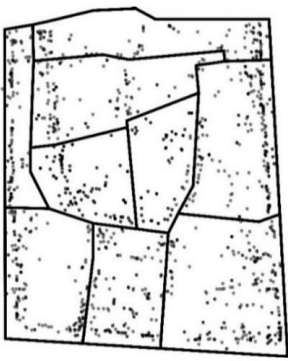


图3 研究区域兴趣点分布图

研究范围内兴趣点的分布状况如图3所示。兴趣点主要沿着道路两侧分布,区域内部则呈现出无规律离散分布状态。

2.2 人口分布计算

将研究区域人口密度划分为A、B、C、D 4个等级,对应范围分别为0.06 人/m²~0.08 人/m²、0.04 人/m²~0.06 人/m²、0.02 人/m²~0.04 人/m²、0~0.02 人/m²。表1为各分区人口密度及等级。

应用兴趣点PCA法求解区域人口吸引系数。以区域1为例,分析结果显示,影响累计超过85%的元素个数为2。表2给出区域1属性矩阵主成分及各类兴趣点人口吸引系数。

在求得全部兴趣点人口吸引系数之后,选取合适网格尺寸划分区域。统计不同网格尺寸下人口数

与兴趣点数量之间的相关系数,如表3所示。

可见发现相关系数较大的网格尺寸为50 m×50 m和100 m×100 m。考虑兴趣点分散情况及兴趣点吸引范围不宜过大,选取50 m×50 m网格划分区域,通过高斯分解得到人口分布并校正人口总数,绘制人口分布图,详见图4。人口分布整体呈现出无规则离散聚集状态,区域6、9交界有较大范围聚集区,区域3、4、5人口聚集度相对较小。

2.3 交通噪声预测及暴露评估

研究范围共有9 700个噪声计算点,计算各点的等效声级。图5显示了研究范围的噪声分布情况。随着计算点距行车线距离的增加,噪声值相应降低,故噪声分布呈现从外至内凹谷形变化。范围下方区域噪声变化幅度更大,噪声污染情况更严重。以声

表1 各区域人口密度及等级

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
人口数量/人	1 500	2 000	2 649	1 031	2 011	1 009	1 246	2 946	4 921
面积/m ²	20 252	40 557	45 137	32 220	29 896	49 490	44 121	36 173	65 540
人口密度/(人·m ²)	0.07	0.05	0.06	0.03	0.07	0.02	0.03	0.08	0.08
密度等级	A	B	B	C	A	D	C	A	A

表2 区域1兴趣点人口吸引计算结果

类型	数量	主成分1	主成分2	吸引人数	类型	数量	主成分1	主成分2	吸引人数
餐饮服务	50	2.22	1.19	15	商务住宅	4	-1.5	1.54	2
公共设施	34	2.77	0.84	10	生活服务	19	1.12	-0.56	4
公司企业	2	-0.23	-0.21	3	通行设施	6	1.32	-0.22	6
购物服务	9	-0.86	-1.26	10	体育休闲服务	3	-1.08	-1.61	4
地名地址信息	2	-1.63	2.59	2	科教文化服务	1	-1.63	-1.26	4
交通设施服务	12	0.87	-0.92	11	医疗保健服务	3	0.84	-1.27	4
金融保险服务	3	-0.73	1.54	2	政府机构	4	-1.49	-0.38	6

表3 人口数与兴趣点数相关系数统计表

网格尺寸/(m×m)	30×30	40×40	50×50	60×60	70×70	80×80	90×90	100×100	110×110	120×120
网格数量	420	256	169	121	90	72	56	49	36	36
相关系数	0.920 3	0.928 5	0.940 6	0.921 7	0.937 1	0.935 3	0.937 6	0.940 3	0.905 7	0.902 1

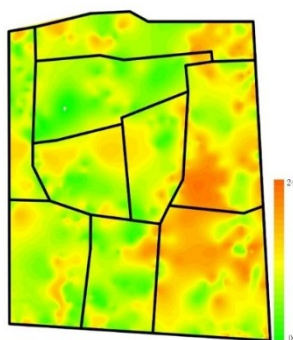


图4 人口分布图

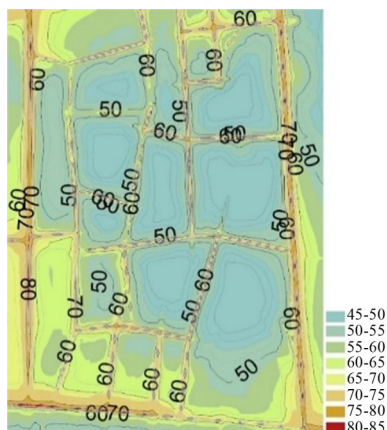


图5 研究区域噪声分布图

压级为基准,各声级范围噪声暴露统计数据如图6所示,可以看出:

(1) 区域内35.19%的人口噪声值超过限值,人均噪声值为56.99 dB。A、B、C、D区域分别有34.64%、35.59%、35.71%、34.27%的噪声暴露人口。

(2) 4类区域受噪人口比例变化趋势呈现出非均匀单波峰变化特征,其在65 dB~80 dB之间人口比例较大,分别为69.9%、69.5%、69.9%、68.8%。虽然受到高噪声值的人口占比较高,但是受到80 dB以上噪声值的人口比例最小。

(3) 区域内人口呈现出离散块状聚集分布状态。人口聚集点大多分布在道路周围、与道路中心线有一定距离的范围内,故造成受噪人口较多。在区域6和区域9交界线位置有大范围的人口聚集,但是由于临近车流量较少,该范围内人口主要分布在45 dB~60 dB之间。

(4) 由于主干道车流量大,故在其临近范围噪声污染严重,尤其是交叉口附近。由图5可以看出

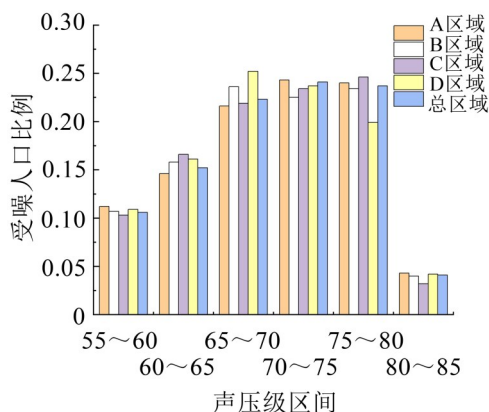


图6 噪声暴露人口统计图

区域8、9交通噪声污染较为严重,有超过39.04%的噪声暴露人口。

2.4 降噪措施分析

根据计算噪声的线性声源模型可知,交通噪声主要影响因素有车流量、车速等。本文针对噪声分布情况提出两种降噪措施:

(1) 限行:研究范围内,道路交通量减半;

(2) 限速:将车速超过40 km/h的数据车速设置为40 km/h,其余数据保持不变。依条件修改原始数据,代入线性声源模型计算采取两种措施条件下区域噪声,统计原有噪声暴露人口分布。由表4看出,限行和限速措施使区域人均噪声值分别降低了2.44 dB、2.69 dB,噪声暴露人口分别减少了14.1%和19.0%。采取两种措施条件下统计人口声压级区间比例均符合单波峰变化趋势,其峰值较原始值向左偏移。

依据限行和限速措施条件下噪声计算结果,仍有较高比例的噪声暴露人口,分别为30.05%和28.54%。为探究人口密度对降噪措施的影响,对比分析A、B、C、D 4类区域的噪声暴露水平。4类区域人口噪声暴露比例统计结果见图7。

由表4和图7分析可得:

(1) 两种降噪措施均改善了噪声暴露情况。限行使4类区域噪声暴露人口比例减少为29.79%、30.08%、30.78%、30.53%。限速时则分别为28.26%、28.55%、29.17%、26.82%。可以看出限速的降噪成效比限行显著,尤其在人口密度最低的D类区域。

表4 降噪措施对比结果表

措施	45~50	50~55	55~60	60~65	65~70	70~75	75~80	80~85	人均噪声值/dB
限行	0.025	0.116	0.167	0.267	0.246	0.143	0.031	0	54.55
限速	0.049	0.141	0.179	0.267	0.211	0.130	0.024	0	54.31
原始	0	0	0.106	0.152	0.223	0.241	0.237	0.041	56.99

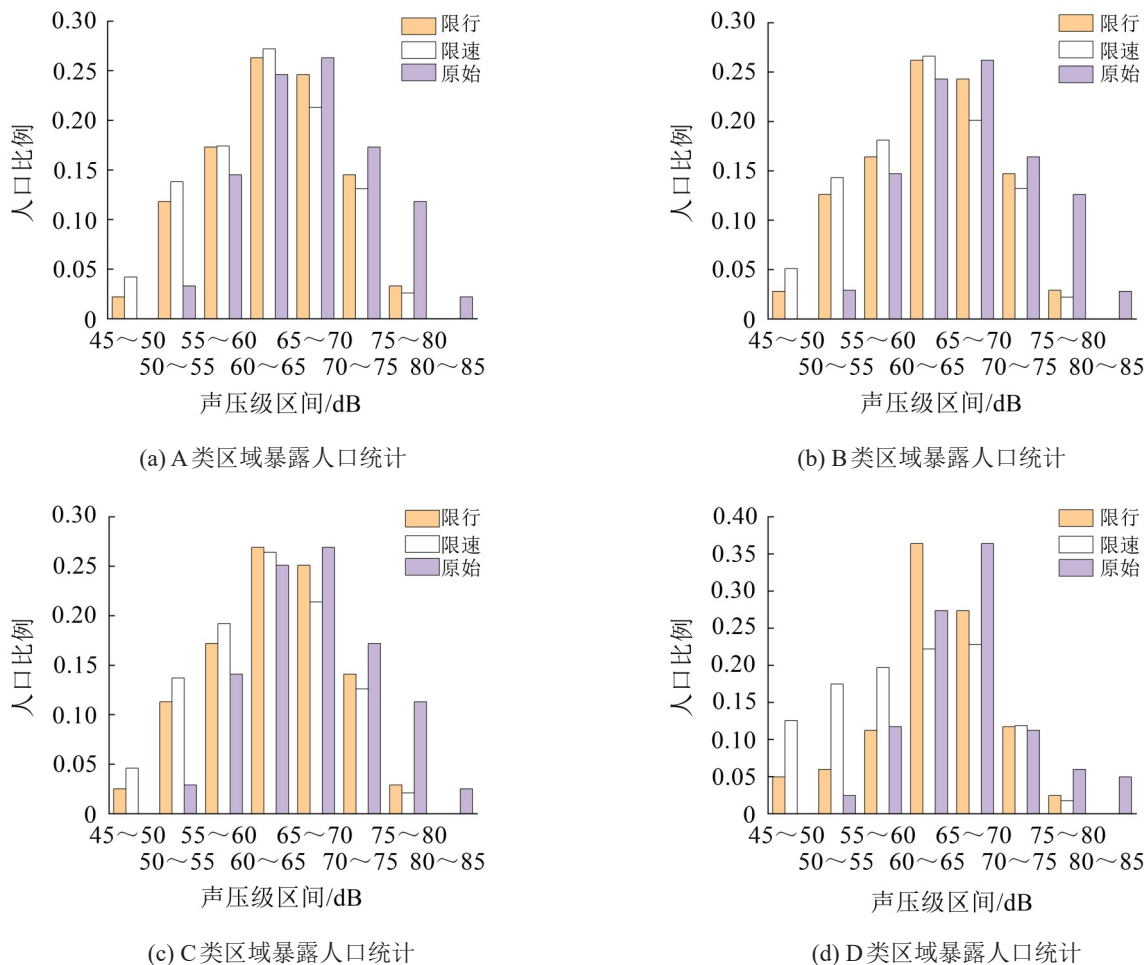


图7 4类区域降噪措施结果对比

(2) 两种措施条件下,4类区域受噪人口比例也呈现出非线性单波峰变化趋势。但是由图7(d)可以发现,限行措施下D类区域的变化幅度较大。这是因为区域6人口分布较为集中,使得限行降噪成效不显著,处于60 dB~65 dB的暴露人口占比仍较高,为36.4%。

3 结语

本文提出了一种基于地图兴趣点PCA分析的噪声暴露评估方法,完成了典型区域的噪声暴露评估并对限行、限速等降噪措施进行了评估。

人群聚集区地理空间属性和人群密度是影响交通噪声人口暴露评估的主要因素。人口密度与噪声暴露人口占比之间呈现出非线性关系,对于研究区域,人口密度为 $0.02 \text{ 人}/\text{m}^2 \sim 0.06 \text{ 人}/\text{m}^2$ 的某一值时,暴露人口比例最大。在试验设定条件下,限行和限速措施使区域人均噪声值分别降低2.44 dB、2.69 dB,限行、限速等措施可显著改善人群聚集区的噪声暴露情况。

研究可为交通噪声暴露评估提供理论方法,为提出针对性降噪措施提供数据支持。

参考文献:

- [1] AMBROSIO L, IGLESIAS L, PASCUAL V, et al. A nonlinear mixed model for the assessment of traffic noise levels in urban areas[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(5): 1085-1098.
- [2] 吴蕃. 噪声污染防治及对策研究[J]. 资源节约与环保, 2013(12):144.
- [3] 晓青. 保护人类生态环境 治理交通噪声污染[J]. 交通与运输, 2010, 26(1):22-24.
- [4] KEMPEN E, BABISCH W, 刘莉. 道路交通噪音和高血压之间的定量关系:一项荟萃分析[J]. 中华高血压杂志, 2012, 20(10):925-925.
- [5] NAZNEEN S, RAZA A, KHAN S. Assessment of noise pollution and associated subjective health complaints and psychological symptoms: analysis through structure equation model[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(17): 123-131.
- [6] ROSWALL N, AMMITZBOLL G, CHRISTENSEN J S, et al. Residential exposure to traffic noise and leisure-time sports-A population-based study[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2017, 220(6): 1006-1013.

- [7] LAM K C, CHUNG Y T T. Exposure of urban populations to road traffic noise in Hong Kong[J]. Transportation Research Part D Transport and Environment, 2012, 17(6): 466-472.
- [8] WANG H, CHEN H, CAI M. Evaluation of an urban traffic Noise-Exposed population based on points of interest and noise maps: The case of Guangzhou[J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 741-749.
- [9] 谢林华, 王海波, 蔡铭, 等. 考虑暴露人群面积及声功能区的噪声评价模型[J]. 环境科学与技术, 2014, 34(7): 181-185.
- [10] MURPHY E, KING E A. Scenario analysis and noise action planning: Modelling the impact of mitigation measures on population exposure[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(8): 487-494.
- [11] YAO Y, LIU X, LI X, et al. Mapping fine-scale population distributions at the building level by integrating multisource geospatial big data[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 2017, 31(5-6): 1220-1244.
- [12] 淳锦, 张新长, 黄健锋, 等. 基于POI数据的人口分布格网化方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(4): 83-89.
- [13] CAI M, LAN Z, ZHANG Z, et al. Evaluation of road traffic noise exposure based on high-resolution population distribution and grid-level noise data[J]. Building and Environment, 2019, 147: 211-220.
- [14] 姜祎, 窦燕, 王芝皓. 基于POI数据的乌鲁木齐市人口分布时空演变分析[J]. 统计与管理, 2018, 256(11): 80-84.

(上接第59页)

- [13] XIAO S W, MA G C, LI Y, et al. Active control of membrane-type acoustic metamaterial by electric field[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(9): 091904.
- [14] CHEN X, XU X, AI S, et al. Active acoustic metamaterials with tunable effective mass density by gradient magnetic fields[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7): 71913.
- [15] CHEN Y, HU G, LI Y, et al. A hybrid elastic metamaterial with negative mass density and tunable bending stiffness [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 105: 179-198.
- [16] MEI J, MA G, YANG M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound [J]. Nature Communications, 2012, 3: 756.
- [17] CHEN Y, HUANG G, ZHOU X, et al. Analytical coupled vibroacoustic modeling of membrane-type acoustic metamaterials: plate mode[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(3): 2926.
- [18] 张忠刚, 朱浩宇, 罗剑, 等. 吸声型薄膜声学超材料低频宽带吸声性能研究[J]. 应用声学, 2019, 38(5): 869-875.
- [19] ZHU X Z, CHEN Z B, JIAO Y H, et al. Broadening of the sound absorption bandwidth of the perforated panel using a membrane - type resonator[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2018, 140(3): 31014.
- [20] MA G, YANG M, XIAO S, et al. Acoustic metasurface with hybrid resonances[J]. Nature Materials, 2014, 13(9): 873-878.
- [21] 刘怡然, 李丽君, 孙振水, 等. 镶嵌薄膜结构Helmholtz共振腔吸声特性分析[J]. 声学技术, 2017, 36(4): 36-39
- [22] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012: 88-101.
- [23] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 257-280.
- [24] YANG M, MA G C, YANG Z Y, et al. Coupled membranes with doubly negative mass density and bulk modulus[J]. Physics Review Letters, 2013, 110(13): 1-5.