

肖东升, 钟祖峰. 基于人类动力学的地震压埋人员先验在室率研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 54–59. [XIAO Dongsheng and ZHONG Zufeng. Research on Indoor Rate of The Earthquake Buried Personnel Based on Human Dynamics [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 54–59. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.011.]

# 基于人类动力学的地震压埋人员先验在室率研究<sup>\*</sup>

肖东升<sup>1,2,3</sup>, 钟祖峰<sup>1,2</sup>

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 测绘遥感地理信息防灾应急研究中心, 四川 成都 610500; 3. 四川师范大学 公共安全与应急研究院, 四川 成都 610068)

**摘 要:** 破坏性地震发生后, 科学、有效地评估地震压埋人员压埋情况, 是有序开展应急救援工作的基础。人员在室率作为压埋率评估模型的主要参数之一, 目前主要以作息时间区为基础以省或市为基础单元进行计算, 这难以体现基础单元之下的不同市或县人员在室率之间的差异性。为解决这一问题, 采用人类动力学相关原理, 运用极大似然法估算人员在室率, 进而形成基于人类动力学的地震压埋人员压埋率预估模型。最后以汶川 8.0 级地震部分受灾学校为例, 进行压埋率实际评估和模型误差分析。研究表明: 提出的微观在室率能更准确地反映人员在室情况具有更好的适用性; 在实际评估中模型精度达到  $\pm 0.13$ , 表明模型能达到较好的预估效果, 能为震后应急救援工作提供一定的参考。

**关键词:** 地震; 人类动力学; 压埋人员; 人员在室率; 误差分析; 汶川地震

**中图分类号:** X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)01-0054-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.01.011

地震作为一种常见的自然灾害, 因其具有突发性、难预测性、强破坏性等特点, 极大地威胁着人民的生命财产安全。而我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 地震灾害频发震后应急救援形势严峻。通常强烈地震会导致砖木结构、砖混结构和土木结构等类型建筑物倒塌, 多数室内人员由于撤离不及时会被压在建筑物内, 给震后应急救援带来巨大困难。据统计, 压埋人员在 30 min 内被搜救的存活率高达 99.3%, 在 1 d 内的存活率为 81%, 第 2 d 降为 36.7%, 第 3 d 为 33.7%, 而到第 5 d 仅为 7.4%<sup>[1]</sup>。普遍认为, 震后 72 h 为应急救援的“黄金时期”<sup>[2]</sup>, 所以迅速地分析地震压埋人员压埋情况, 进而指导震后应急救援工作具有相当重要的意义。

目前, 许多学者对地震压埋人员进行了研究。魏本勇等<sup>[3]</sup>通过对影响地震人员埋压因素分析后发现: 建筑物倒塌和人员在室是造成人员埋压的两个先决条件。赵振东等<sup>[4-5]</sup>定义了地震压埋人员伤亡指数和初始人员伤亡指数, 通过构建人员伤亡状态函数对地震压埋人员伤亡恶化程度等进行了全过程的数值模拟; 并在人员伤亡状态函数解析表达式的基础上进行三维参数分析, 深入探讨了影响人员伤亡状态的主要因素。马玉宏等<sup>[6-7]</sup>采用最小二乘统计回归的方法, 综合考虑房屋倒塌率、人员密度、发震时间及烈度因素, 提出了地

震压埋人员伤亡估算公式。丁文秀等<sup>[8]</sup>基于公里网格数据提出一种划分地震救援区域的新方法, 能快速地反映压埋人员分布状况。吴兵等<sup>[9]</sup>以乌鲁木齐市为例, 尝试以乡镇居民地为基本单元, 开展震后埋压人员分布与相应救灾对策研究。杨明儒<sup>[10]</sup>和余世舟等<sup>[11]</sup>在前人研究基础上, 综合考虑了区域行政等级、设防烈度、搜救影响等影响地震人员埋压的主要参数, 初步构建了地震初期埋压人员分布的评估方法。许建东等<sup>[12]</sup>在进行福建省漳州市震害预测分析的基础上, 提出了基于建筑物倒塌率的地震埋压人员评估方法。吴晨等<sup>[13]</sup>根据国内 8 次地震的人员伤亡统计数据, 得到了基于建筑物倒塌率的埋压率计算公式。由此可见, 多数学者主要围绕震后造成人员埋压的影响因素、埋压人员伤亡状态、埋压人员分布等方面进行了深入的研究, 在压埋人员压埋率计算方面研究较少。而人员在室率作为影响压埋率的重要参数具有先验性特征, 本文通过综合分析人员在室率在产生机制, 运用人类动力学相关原理与方法<sup>[14-15]</sup>, 构建人员在室率统计模型, 进而形成基于人类动力学的地震压埋人员压埋率预估模型, 以期对地震压埋人员压埋情况快速预估提供一条新思路。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-06-09 修回日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774250, 41804077, 41801399, 41801297); 四川省科技厅软科学项目(2019JDR0112); 四川省科技创新(苗子工程)培育项目(2019089, 2020046, 2020120); 西南石油大学测绘遥感地信与防灾应急青年科技创新团队(2019CXTD07)

第一作者简介: 肖东升(1974-), 男, 汉族, 四川绵阳人, 博士, 教授, 主要从事地震压埋人员与防灾减灾技术研究。

E-mail: xiaodsxs@163.com

## 1 人员在室率

强烈地震会引起建筑物倒塌进而压埋室内人员。因此, 影响人员压埋的一个重要因素是地震发生时刻的人员在室情况。而人员在室情况是一种随机的、不确定的事件, 为了更好地刻画人员在室情况, 拟用在室概率进行表达。设“人员在室内”事件为  $I$ , 则“人员在室外”事件为  $\bar{I}$ , “人员可能在室内也可能在室外”事件为  $I \cap \bar{I}$ 。设概率椭圆面积为 1, 则人员在室率存在如图 1 所示 3 种情况。

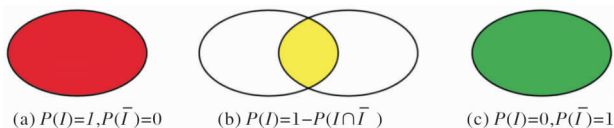


图 1 人员在室率的 3 种可能存在情况

在本文中, 以研究的基础单元类型为划分标准, 将人员在室率细分为宏观在室率与微观在室率。所谓宏观在室率, 是指以作息时间区为基础, 综合考虑地理条件、历史习惯和人文习惯后, 把我国绝大多数地方进行分区计算所得的人员在室率结果。特点是以省或市为基础单元, 反映的是大范围、大区域的人员在室情况, 以往对人员在室率的研究均属宏观在室率范畴。以汶川 8.0 级地震为例, 基于克里金插值方法, 得出中国西部部分地区在北京时间 14:28 的宏观在室率区划图 (图 2)<sup>[16]</sup>。从图 2 中不难看出, 虽然宏观在室率能为震后应急救援辅助决策提供一定的参考, 但它难以体现基础单元之下的不同市或县人员在室率之间的差异性。



图 2 中国西部部分地区宏观在室率区划图 (14:28)

为了精细地表达人员在室情况引入微观在室率的概念。微观在室率是把单独的个体人员作为研究基础单元, 通过对个体人员的特异性在室率进行研究, 进而得出具体区域内的群体在室率规律, 以此来反映人员在室情况。同时, 微观在室率具有精确性、先验性的特征, 即能更精确地反映人员真实在室情况且在震前能通过区域人员作息习惯进行预先计算。但微观在室率 (后文人员在室率均特指微观在室率) 把个体人员作为研究基础单元, 存在两个难点<sup>[17]</sup>:

(1) 个体人员的活动空间范围不明确;

(2) 在非作息时段随机性较大, 仅用均匀分布与现实情况不符。

针对以上难点, 拟采用人类动力学相关方法进行研究。

## 2 人类动力学

人员在室率是人类出行行为时间特性和空间特性的综合反映, 其本质是人与建筑物之间的空间位置关系受人类出行行为影响的结果。若人员未发生出行行为, 则表现为人员在室内; 反之, 则表现为人员在室外。所以, 引用人类动力学方法对出行行为进行深入研究, 进而明确人员活动规律和活动的特性, 是人员在室率研究中的重要内容。

### 2.1 人员活动的规律性

为了解决个体人员活动空间范围不明确的问题, 引用人类动力学中的回转半径对活动空间范围进行界定。回转半径是反映人类个体出行空间有界性的一个关键物理量<sup>[18]</sup>, 定义个体  $x$  在  $t$  时刻的回转半径为:

$$r_g^x(t) = \sqrt{\frac{1}{n_c^x(t)} \sum_{i=1} (r_i^x - r_{cm}^x)^2} \quad (1)$$

式中:  $r_g^x(t)$  为个体  $x$  的回转半径;  $n_c^x(t)$  为个体  $x$  在  $t$  时刻的轨迹点数量;  $r_{cm}^x$  为个体  $x$  的所有轨迹点质心位置;  $r_i^x$  为各个轨迹点。

GONZÁLEZ 通过对个体  $x$  的回转半径随时间变化的规律进行深入地统计分析<sup>[19]</sup>, 发现回转半径会随着时间的增长趋于一个稳定值, 这表明人类运动轨迹的回转半径增长异常缓慢, 说明个体人员空间活动范围具有高度的有界性。同时计算了个体  $x$  在  $t$  时刻返回他之前被观测地点的概率, 发现返回概率分布曲线每隔 24 h 出现一次峰值, 这反映出人类具有返回之前访问过地点的强烈倾向, 说明人员活动在时间上具有强烈的周期性。人员活动的两个显著性特征为研究人员在室率普遍规律提供了理论支撑。

### 2.2 确定人员活动范围

基于人员活动具有有界性和周期性的特征, 文献[20]对多个不同城市居民出行日志的调查显示, 同类出行人员的日常出行行为模型具有高度的相似性。所以假设大多数出行人员都遵循“家→工作→休闲→家”的行为模式<sup>[21]</sup>, 基本符合如下出行环节:

- (1) 早上从家出发, 通勤到工作 (学习) 地点;
- (2) 中午非工作时间, 以工作 (学习) 地点为中心在其周围活动;
- (3) 下午下班后进行购物、健身、娱乐等休闲活动;
- (4) 休闲活动完毕后, 返回家中, 以此循环, 如图 3 所示。

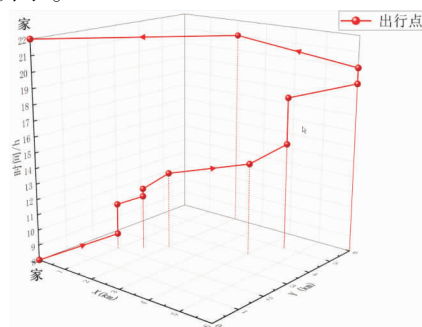


图 3 人员出行时空路径图

基于“家→工作→休闲→家”的行为模式,设个体 $x$ 通勤距离为 $2c_i$ ,休闲点为 $l_i$ ,由周期性随机游走模型<sup>[22]</sup>确定个体 $x$ 前往 $l_i$ 的活动范围(图4)。由椭圆性质可知,个体 $x$ 休闲出行的最大距离等于二倍长半轴的距离,表明活动范围有界。

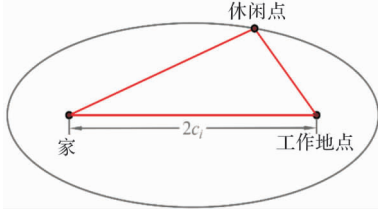


图4 休闲点为 $l_i$ 时的个体活动范围椭圆

同时,结合式(1)得出人员活动椭圆的回转半径 $r_g^{(i)}$ :

$$r_g^{(i)} = \sqrt{\frac{7c_i^2 + 2a_i^2}{12}} \quad (2)$$

式中: $c_i$ 为人员活动椭圆的半焦距, $a_i$ 为椭圆的长半轴。

为了减小误差,对所有休闲点 $l_i$ 都进行回转半径计算,得出均值 $\bar{r}_g$ :

$$\bar{r}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_g^{(i)} \quad (3)$$

结合图4和式(3)可知,个体 $x$ 在有界且固定的区域内活动,解决了个体人员活动空间范围不明确的问题。

### 3 人员在室率统计模型

在正常作息时段内,人员出行行为较为规律,人员在室率表现为均匀分布;而在非作息时段内,人员出行行为随机性较大,仅用均匀分布与现实情况不符。所以,拟采用统计学相关原理方法计算非作息时间段人员在室率。

#### 3.1 数据采集与分析

非作息时段是指一天中除去作息时间所剩余的时间段。以西南地区为例,根据作息时间划分表<sup>[23]</sup>可知,夏季法定作息时间段为8:00-18:30,冬季法定作息时间段为8:30-18:00。因个体人员在午休时间段发生出行行为的概率较大,所以将午休时间段视为非作息时间段。假设个体人员作息生活较为规律,则非作息时间段可划分为:①从家出发到工作(学习)地点的通勤时间段 $T_{早}$ ;②中午午休时间段 $T_{午}$ ;③下午下班(放学)至回家的时间段 $T_{晚}$ 。随着定位导航技术的蓬勃发展,智能手机等具有定位功能的设备成为获取人员活动行为信息的一条有效途径。本文采用手机网络定位<sup>[24]</sup>的方法,结合 Mobiletrack 软件在平均回转半径内分别获取 $T_{早}$ 、 $T_{午}$ 和 $T_{晚}$ 时间段内的人员出行轨迹数据<sup>[25]</sup>。虽然轨迹数据仅含有经纬度和时刻信息,数据本身无法直接反映人员在室情况,但可通过判断人员是否停留在建筑物内间接计算人员在室率。

运用基于速度的轨迹点合并行程识别算法<sup>[26]</sup>,对轨迹数据进行行程识别,将在空间上离散的轨迹点划分成停留点和移动点两大类;在 ArcGIS 软件中结合建筑物数据,对建筑物中的停留点进行识别,具体如图5所示。采用统计学思想,根据识

别结果分别统计在建筑物内总人数 $m$ 和出行总人数 $n$ 。易知人员在室率 $P(I)$ 服从伯努利分布,则样本均值 $\bar{X} = \frac{m}{n}$ ,标准差 $S = \sqrt{\frac{m}{n}(1 - \frac{m}{n})}$ ,由中心极限定理可得:

$$U = \frac{\bar{X} - P(I)}{S/\sqrt{n}} \sim N(0, 1) \quad (4)$$

即在大样本条件下, $U$ 近似服从标准正态分布。

给定置信概率为 $1 - \alpha$ ,有 $P\{|U| < u_{\frac{\alpha}{2}}\} \approx 1 - \alpha$ ,得 $P(I)$ 的置信区间为:

$$\left( \frac{m}{n} - u_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{n} \frac{m}{n} (1 - \frac{m}{n})}, \frac{m}{n} + u_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{n} \frac{m}{n} (1 - \frac{m}{n})} \right) \quad (5)$$

式中: $\frac{m}{n} - u_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{n} \frac{m}{n} (1 - \frac{m}{n})}$ 为置信下限, $\frac{m}{n} + u_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{n} \frac{m}{n} (1 - \frac{m}{n})}$ 为置信上限; $u_{\frac{\alpha}{2}}$ 为标准正态分布关于 $\frac{\alpha}{2}$ 的上侧分位数; $1 - \alpha$ 为置信概率,在实际的人员在室率统计中通常取95%。

图5展示了获取在室内人员数据的示意图。左侧部分显示了轨迹点、停留点、移动点、停留活动范围以及出行移动轨迹。中间部分显示了行程识别和建筑物停留点识别的过程。右侧部分显示了建筑物、停留点、移动点和建筑物内停留点的分布。

图5 获取在室内人员数据示意图

#### 3.2 模型优化

由人员活动的周期性特征可知,每24 h相同时刻的人员在室率独立同分布。对停留点和移动点进行 $K$ 次间隔24 h取样,每次取 $N$ 个样本,得到 $K \times N$ 个样本。记出行总人数矩阵为 $\mathbf{n}_{K \times N} = [\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3, \dots, \mathbf{n}_K]^T$ ,其中 $\mathbf{n}_i = [n_i^1, n_i^2, n_i^3, \dots, n_i^N]$ ;在建筑物内总人数矩阵为 $\mathbf{m}_{K \times N} = [\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3, \dots, \mathbf{m}_K]^T$ ,其中 $\mathbf{m}_i = [m_i^1, m_i^2, m_i^3, \dots, m_i^N]$ 。与之对应 $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \dots, \mathbf{U}_K]^T$ ,则 $\mathbf{U}$ 服从 $K$ 元标准正态分布 $N_K(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ ,其中 $\boldsymbol{\mu}$ 为 $K \times 1$ 的零矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}$ 是对角线值全为1的 $K$ 维对角矩阵。运用极大似然法估计人员在室率:

概率密度函数为:

$$f(\mathbf{U}) = (2\pi)^{-\frac{K}{2}} \cdot \left| \boldsymbol{\Sigma} \right|^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{U} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{U} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad (6)$$

其对数似然函数为:

$$\ln L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = -\frac{K \times N}{2} \ln(2\pi) - \frac{N}{2} \ln \left| \boldsymbol{\Sigma} \right| - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (\mathbf{U}^j - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{U}^j - \boldsymbol{\mu}) \quad (7)$$

$$\ln L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \text{ 对 } \boldsymbol{\mu} \text{ 求偏导, 令 } \frac{\partial \ln L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})}{\partial \boldsymbol{\mu}} = 0,$$

得人员在室率统计模型为:

$$P(\hat{I}) = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N \frac{m_i^j}{n_i^j}}{K \cdot N} \quad (8)$$

## 4 模型应用与误差分析

### 4.1 模型应用

人员在室率统计模型主要应用于地震压埋人员压埋率评估。由文献[27]可知, 压埋率评估模型为:

$$P(B) = \bar{\lambda} P(I) P(C|I) + \xi. \quad (9)$$

式中:  $P(B)$  为压埋人员压埋率,  $\bar{\lambda}$  为经验系数,  $P(I)$  为人员在室率,  $P(C|I)$  为建筑物倒塌率,  $\xi$  为随机波动项。

将式(8)带入压埋率评估模型, 得基于人类动力学的地震压埋人员压埋率预估模型为:

$$P(B) = C \cdot \sum_{i=1}^K m_i \cdot n_i^T + \xi. \quad (10)$$

式中:  $C$  为常数, 且  $C = \frac{\bar{\lambda} \cdot P(C|I)}{K \cdot N}$ ,  $n_i = \left[ \frac{1}{n_i^1}, \frac{1}{n_i^2}, \frac{1}{n_i^3}, \dots, \frac{1}{n_i^N} \right]$ 。

以汶川 8.0 级地震受灾学校为例, 根据压埋率预估模型对灾区压埋情况进行综合评估。因同类人员具有近似相同的规律, 且在汶川 8.0 级地震中学校建筑物倒塌压埋的几乎全是学生群体, 所以以西南地区部分学校学生 14:28 时刻人员在室率近似模拟受灾学校的人员在室率, 根据式(5)解算人员在室率在 95% 置信度的置信区间为 [0.971 7, 0.984 6], 根据式(10)计算压埋人员压埋率见表 1。

### 4.2 误差分析

为了评价模型的准确性引入精度的概念。精度是指误差分布的密集或离散程度, 精度越高, 则模型越优误差分布越密集; 反之, 精度越低, 则模型越劣误差分布越离散。所以精度能直观地体现模型整体评估效果, 对(9)式进行全微分:

$$d[P(B)] = \frac{\partial[P(B)]}{\partial[P(I)]} d[P(I)] + \frac{\partial[P(B)]}{\partial[P(C|I)]} d[P(C|I)]. \quad (11)$$

$$\text{令 } k_1 = \frac{\partial[P(B)]}{\partial[P(I)]}, k_2 = \frac{\partial[P(B)]}{\partial[P(C|I)]}, \text{ 由误差传}$$

播定律得模型精度评估公式:

$$\sigma_{P(B)}^2 = k_1^2 \sigma_{P(I)}^2 + k_2^2 \sigma_{P(C|I)}^2. \quad (12)$$

式中:  $\sigma_{P(B)}$  为模型精度,  $\sigma_{P(I)}$  为人员在室率评估精度,  $\sigma_{P(C|I)}$  为建筑物倒塌率评估精度。

$$\text{在(7)式中对 } \Sigma \text{ 求偏导, 令 } \frac{\partial \ln L(\mu, \Sigma)}{\partial \Sigma} =$$

0, 得:

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (U^j - \bar{U})(U^j - \bar{U})^T. \quad (13)$$

由于  $P(C|I)$  是根据直觉模糊层次分析法评估得到, 极大地削弱了人思维主观性对结果的影响。所以忽略  $P(C|I)$  对模型精度的影响, 得出模型精度简化评估公式:

$$\sigma_{P(B)} = k_1 \cdot \left| \hat{\Sigma} \right|. \quad (14)$$

由式(14)可知, 模型精度主要与人员在室率评估精度有关。带入样本统计数据, 解算模型精度为  $\pm 0.13$ , 表明模型误差较小, 能达到较好的预估效果。同时通过对比预估压埋率与统计压埋率、计算预估压埋率与先验压埋率的误差比值对模型误差进行分析, 如图 6、图 7 所示。

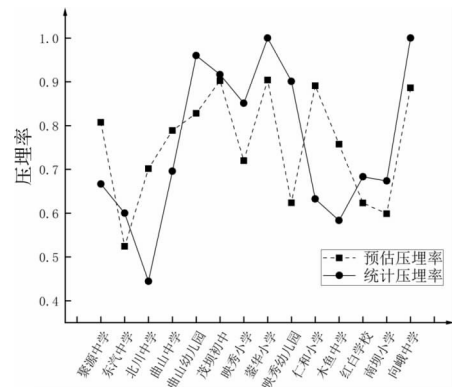


图6 压埋率对比图

表1 四川汶川 8.0 级地震部分受灾学校压埋情况

受灾学校	统计总人数	压埋人数	经验系数	宏观在室率	微观在室率	建筑物倒塌率	先验压埋率	预估压埋率	统计压埋率	模型误差比	实际误差
聚源中学	1 800	1 200	0.920 0	0.980 0	0.974 2	0.900 9	0.812 3	0.807 4	0.666 7	0.967 0	+0.140 8
东汽中学	1 000	600	0.920 0	0.980 0	0.980 5	0.581 1	0.523 9	0.524 2	0.600 0	0.996 5	-0.075 8
北川中学	2 700	1 200	0.920 0	0.980 0	0.975 1	0.782 3	0.705 3	0.701 8	0.444 4	0.986 5	+0.257 4
曲山中学	1 003	698	0.920 0	0.980 0	0.974 4	0.880 0	0.793 4	0.788 9	0.695 9	0.953 5	+0.093 0
曲山幼儿园	500	480	0.920 0	0.980 0	0.974 8	0.923 2	0.832 4	0.827 9	0.960 0	1.034 6	-0.132 1
茂坝初中	240	220	0.920 0	0.980 0	0.981 0	1.000 0	0.901 6	0.902 5	0.916 7	0.938 9	-0.014 2
映秀小学	470	400	0.920 0	0.980 0	0.976 7	0.801 2	0.722 4	0.719 9	0.851 1	1.018 9	-0.131 1
莹华小学	400	400	0.920 0	0.980 0	0.982 8	1.000 0	0.901 6	0.904 2	1.000 0	0.973 8	-0.095 8
映秀幼儿园	81	73	0.920 0	0.980 0	0.982 2	0.690 3	0.622 4	0.623 8	0.901 2	0.995 0	-0.277 5
仁和小学	117	74	0.920 0	0.980 0	0.975 6	0.992 9	0.895 2	0.891 2	0.632 5	0.984 7	+0.258 7
木鱼中学	857	500	0.920 0	0.980 0	0.980 1	0.840 0	0.757 3	0.757 4	0.583 4	1.000 4	+0.174 0
红白学校	732	500	0.920 0	0.980 0	0.981 1	0.690 6	0.622 6	0.623 3	0.683 1	0.988 4	-0.060 0
南坝小学	870	586	0.920 0	0.980 0	0.983 5	0.661 7	0.596 6	0.598 7	0.673 6	0.972 3	-0.074 8
向峨中学	500	500	0.920 0	0.980 0	0.982 4	0.980 5	0.884 0	0.886 2	1.000 0	0.981 3	-0.113 8

注: 学校受灾数据源自文献[28]; 先验压埋率和预估压埋率分别由宏观在室率和微观在室率计算得到。



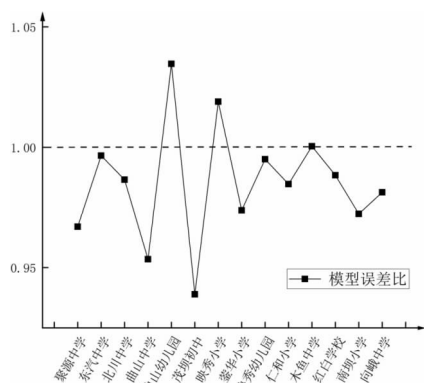


图7 模型误差比图

由压埋率对比图可知,除仁和小学、映秀幼儿园等部分学校外,其余学校评估误差较小,在可接受范围之内。对比分析后发现仁和小学和映秀幼儿园等误差较大的原因可能是实际统计样本太少导致预估值偏离真值。由模型误差比图可知,在预估模型其余参数不变的情况下,除曲山幼儿园、映秀小学和木鱼中学外,其余学校模型误差比均小于1,表明预估压埋率比先验压埋率误差更小,即反映了人员特异性在室情况的微观在室率用于评估的效果更好。

## 5 结论

本文基于人类动力学相关原理与方法,对地震压埋人员在室率进行深入研究,综合分析得出以下三点结论:

(1)基于人类动力学原理,结合“家→工作→休闲→家”行为模式和周期性随机游走模型,论证了个体人员活动范围的有界性,解决了个体人员活动空间范围不明确的问题。

(2)通过研究非作息时间段的人员出行轨迹,运用极大似然法推导出人员在室率计算公式,进而得出基于人类动力学的地震压埋人员压埋率预估模型。为地震压埋人员压埋情况快速预估提供了一种新方法。

(3)结合汶川8.0级地震实际数据对模型进行误差分析。探讨了北川中学等学校误差较大的原因,同时通过构建模型精度评估公式,计算出模型精度为 $\pm 0.13$ 。这表明模型整体评估精度较高能达到较好的预估效果,能为震后应急救援工作提供一定的参考。

由于人类行为的复杂性,本文仅对作息较为规律的人类出行行为进行了研究;但人类出行行为常常受到社会关系的影响,存在着随机性与不规律性,难免会对人员在室率计算结果产生一定的影响,如何有效减小人员在室率计算误差是亟待解决的问题。同时,由于地震不可复制、不能复现和实验,以致地震压埋相关统计数据的缺乏,本文仅对汶川8.0级地震中压埋统计数据较为容易获取的中小学校压埋情况进行了预估,预估样本数量相对较少,模型的普遍适用性仍需进行深入研究。

## 参考文献:

- [1] 郭增健,陈鑫连.城市地震对策[M].北京:地震出版社,1991:22-24.
- [2] 郭红梅,黄丁发,陈维锋,等.城市地震现场搜救指挥辅助决策系统的设计与开发[J].地震研究,2008,31(1):83-88.
- [3] 魏本勇,聂高众,苏桂武,等.地震灾害埋压人员评估的研究进展[J].灾害学,2017,32(1):155-159.
- [4] 赵振东,林均歧,钟江荣,等.地震人员伤亡指数与人员伤亡状态函数[J].自然灾害学报,1998,8(3):91-97.
- [5] 赵振东,郑向远,钟江荣.地震应急救援与人员伤亡[J].自然灾害学报,1999,8(3):80-86.
- [6] 马玉宏.地震人员伤亡估算方法研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):140-147.
- [7] 马玉宏,谢礼立.关于地震人员伤亡因素的探讨[J].自然灾害学报,2000,9(3):84-90.
- [8] 丁文秀,卓力格图,李晓莉,等.基于公里网格数据的地震救援区域划分方法[J].灾害学,2013,28(4):221-228.
- [9] 吴兵,李志强,齐文华,等.以乡镇居民地为单元的震后埋压人员分布与救援对策——以乌鲁木齐市为例[J].华北地震科学,2017,35(3):13-19.
- [10] 杨明儒.地震压埋人员分布评估方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2014:11-57.
- [11] 余世舟,张令心,杨明儒.地震压埋人员分布评估方法初探[J].地震工程与工程振动,2015,35(2):138-143.
- [12] 许建东,危福泉,张来泉,等.地震人员伤亡与压埋人员评估方法的初步研究——以福建省漳州市区为例[J].地震研究,2008,31(4):382-387,413.
- [13] 吴晨,殷海涛,孙庆文,等.基于ArcGIS的地震搜救信息系统可行性研究[J].高原地震,2011,23(2):54-59.
- [14] 李楠楠,周涛,张宁.人类动力学基本概念与实证分析[J].复杂系统与复杂性科学,2008,5(2):15-24.
- [15] 韩筱璞,汪秉宏,周涛.人类行为动力学研究[J].复杂系统与复杂性科学,2010,7(2):132-144.
- [16] 肖东升,黄丁发,王旭,等.在室率先验区划在地震压埋率的应用研究[J].地震研究,2009,32(4):395-401.
- [17] 肖东升,吴锐,于冰,等.面向救援的人员动态分布时空菱形研究[J].世界地震工程,2015,31(3):93-100.
- [18] 周涛,韩筱璞,闫小勇,等.人类行为时空特性的统计力学[J].电子科技大学学报,2013,42(4):481-540.
- [19] GONZÁLEZ M C, HIDALGO C A, BARABÁSI A L. Understanding individual human mobility patterns[J]. Nature, 2008, 453(7196):779-782.
- [20] SCHLICH R, AXHAUSEN K W. Habitual travel behavior: Evidence from a six-week travel diary[J]. Transportation, 2003(30):13-36.
- [21] EAGLE N, PENTLAND A S. Eigenbehaviors: identifying structure in routine[J]. Behavioral Ecology Sociobiology, 2009, 63(7):1057-1066.
- [22] YAN X Y, HAN X P, ZHOU T, et al. Exact solution of the gyration radius of an individual's trajectory for a simplified human regular mobility model[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(12):120506.
- [23] 肖东升,常鸣,苏勇,等.基于时空菱形的人员在室率评估方法[J].世界地震工程,2016,32(1):43-49.
- [24] 董路熙,贾梅杰,刘小明,等.基于手机信令数据的居民工作日出行链判别方法[J].桂林理工大学学报,2019,39(4):958-966.
- [25] 仇培元.城市出行者轨迹数据时空挖掘方法研究[D].北京:北京建筑工程学院,2012:7-18.
- [26] 张健钦,仇培元,徐志洁,等.一种基于手机定位数据的出行行程识别方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(5):934-938.
- [27] 肖东升,钟祖峰,罗尚,等.基于直觉模糊层次分析法的地震压埋率模型研究[J].世界地震工程,2019,35(3):127-135.
- [28] 肖东升,黄丁发,陈维锋,等.地震压埋人员压埋率预估模型[J].西南交通大学学报,2009,44(4):574-579.

## Research on Indoor Rate of The Earthquake Buried Personnel Based on Human Dynamics

XIAO Dongsheng<sup>1, 2, 3</sup> and ZHONG Zufeng<sup>1, 2</sup>

(1. *School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;*  
2. *Disaster Prevention and Emergency Research Center of Geomatics and Remote Sensing Geographic Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;* 3. *Institute of Public Safety and Emergency, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China*)

**Abstract:** After the occurrence of destructive earthquake, the scientific and effective assessment of the buried rate of the earthquake buried personnel, is the basis of orderly emergency rescue work. As one of the main parameters of the buried rate prediction model, the indoor rate of personnel is mainly calculated based on the work and rest zones and based on the provincial or municipal basic unit, which is difficult to reflect the difference between the indoor rate of personnel in different cities or counties under the basic unit. In order to solve this problem, the maximum likelihood method is used to calculate the indoor rate of personnel based on the theory of human dynamics. Then, the buried rate prediction model of the earthquake buried personnel based on Human dynamics is developed. Finally, taking the schools affected by the M8.0 earthquake in Wenchuan, Sichuan province as an example, the actual evaluation of the burial rate and the model error analysis are carried out. The results show that the microscopic indoor rate of personnel proposed in this paper can reflect the situation of personnel indoor situation more accurately and has better applicability. And in the actual evaluation, the accuracy of the model reaches  $\pm 0.13$ , which indicates that the model can achieve better prediction effect and provide certain reference for the emergency rescue work after the earthquake.

**Key words:** earthquake; human dynamics; buried personnel; indoor rate; error analysis

(上接第 41 页)

## Risk Evaluation of Landfills along Highway Based on Material Point Method and Limit Equilibrium Method

XIAO Wei<sup>1, 2</sup> and TIAN Weiping<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University Xi'an 710064, China;* 2. *School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China*)

**Abstract:** The instability and damage of the landfill along highway will not only cause the blocking of the road and river under it, but also seriously threaten the safety of people's life and property. It is necessary to evaluate the risk of the landfill along highway rapidly, accurately and in batches. Six risk factors of the risk evaluation of landfill are determined based on the remote sensing image, UAV shooting, field investigation and test of the landfill along the highway. The multi-factor and multi-level numerical simulation of the landfill is carried out by using the material point method to obtain the influence degree of each factor on the stability of the landfill. Then, based on the limit equilibrium method, an evaluation method of the risk factor of the landfill is proposed. It is applied and verified in the landfill along the Dao-Weng highway in Guizhou Province. The results show that the three ranges of the risk evaluation coefficient of the landfill are safety interval  $(0, 1)$ , unstable interval  $[1, 5)$  and extremely unstable interval  $[5, +\infty)$ . The evaluation results of the landfill along the Dao-Weng highway in Guizhou are in good agreement with the actual situation, which verifies the effectiveness of the evaluation method. It provides reference for the rapid and batch evaluation of the landfill along the highway that has been built in China.

**Key words:** landfill; material point method; limit equilibrium method; risk evaluation