

人因对核电厂事故应急疏散行为的影响

栾飞^{1,2} 陈春花¹ 阮方^{1,2} 程远^{1,2} 朱婧娴¹ 汪建业¹

¹(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

²(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 通过问卷调查分析,获得核电站周围不同人群对核应急疏散的认知情况和行为特征,并且通过 Logistic 回归模型对人群疏散时可能发生的行为作出预测。采用卡方检验法和 Logistic 回归模型对该地区的不同人群的疏散心理和疏散行为等因素进行相关分析和影响判断,并且通过最优分配算法对模型预测正确性进行判断。结果表明:是否购买过核安全相关保险、参加过的核应急疏散演习次数、对核应急疏散的了解情况、家中是否有核应急防护措施等因素对人群疏散意识和心理有显著影响;性别、对核应急疏散的了解情况、参加过的核应急疏散演习次数、家中是否有核应急防护措施和是否购买过核安全保险等因素对人群疏散行为有显著影响;仿真表明,具有一定核疏散经验的人群能做出相对正确的疏散行为,减少疏散时间。

关键词 人因,核应急疏散,Logistic 回归模型,最优分配

中图分类号 TL73

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0128

引用该文:

栾飞,陈春花,阮方,等.人因对核电厂事故应急疏散行为的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(4):040602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0128.

LUAN Fei, CHEN Chunhua, RUAN Fang, *et al.* Influence of human factors on emergency evacuation efficiency of nuclear power plant accident[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(4): 040602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0128.



Influence of human factors on emergency evacuation efficiency of nuclear power plant accident

LUAN Fei^{1,2} CHEN Chunhua¹ RUAN Fang^{1,2} CHENG Yuan^{1,2} ZHU Jingxian¹ WANG Jianye¹

¹(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

²(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

ABSTRACT Through questionnaire analysis, the cognitive situation and behavioral characteristics of different people around the nuclear power plant for nuclear emergency evacuation were obtained, and the possible behaviors of people during evacuation were predicted by Logistic model. Chi-square test and Logistic regression model were

基金资助: 核电安全监控技术与装备国家重点实验室开放课题项目 (K-A2021.414)

第一作者: 栾飞,男,1997年2月出生,2020年毕业于安徽大学并获得工学学士学位,现为能源动力硕士研究生,从事核应急疏散技术支持研究

通信作者: 陈春花,副研究员, E-mail: chunhua.chen@inest.cas.cn

收稿日期: 初稿 2022-11-28; 修回 2023-01-10

Supported by Funding Support for the Open Project of the State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment (K-A2021.414)

First author: LUAN Fei (male) was born in February 1997, and obtained his bachelor's degree in engineering from Anhui University in 2020. Now he is a graduate student of energy and power, engaged in nuclear emergency evacuation technical support research

Corresponding author: CHEN Chunhua, associate professor, E-mail: chunhua.chen@inest.cas.cn

Received 28 November 2022; accepted 10 January 2023

used to make correlation analysis and influence judgment on the evacuation psychology and evacuation behavior of different people in the area, and the optimal allocation algorithm was used to judge the prediction correctness of the model. The results showed that the factors such as whether to purchase nuclear safety-related insurance, the number of nuclear emergency evacuation drills, the understanding of nuclear emergency evacuation, and the presence of non-nuclear emergency protective measures at home had significant effects on the evacuation consciousness and psychology of the population. Gender, knowledge of nuclear emergency evacuation, the number of nuclear emergency evacuation drills participated, whether there are nuclear emergency protection measures at home and whether nuclear safety insurance has been purchased, and other factors have significant influence on crowd evacuation behavior. The simulation shows that people with certain nuclear evacuation experience can make relatively correct evacuation behavior and reduce evacuation time.

KEYWORDS The human factor, Nuclear emergency evacuation, Logistic regression model, Optimal allocation
CLC TL73

保护公众和环境不受核电的影响是核能健康发展的基础,而核应急是核安全纵深防御的最后一道防线,旨在保护公众和环境免受或减轻受核事故影响^[1-2]。当核电厂发生导致大量放射性物质泄漏的严重事故时,核电厂员工及其周边公众需要采取应急撤离措施。在应对不同地区、不同人群的核应急疏散时,人所产生的一系列问题已经成为疏散中的关键点。

人因工程通过对人的行为、能力和心理因素的研究,对相关工作进行合理设计,从而达到提高安全性、舒适性和有效性的目的^[3];学者们通常采用疏散实验^[4-5]、问卷调查^[6-7]、数值模拟^[8-9]等方法研究人群在疏散过程中从众、惯性、避让、跟随等行为特征以及恐慌、环境熟悉度等心理特征。Anton等^[10]通过将疏散人群建模为一个多智能体系统,采用社会力模型和简单的引导者(救援指导员)与跟随者(疏散人员)交互规则,通过数值模拟和遗传算法给出最优的疏散方案。Turcanu等^[11]基于3个欧洲国家的经验数据,考察了公民在紧急情况下的潜在行为,得出在当地人群中澄清和预测社会关切点有助于增强社会的复原力和应对核事故。国内蒋刚等^[12]开发了一套应急决策支持系统,可以通过模拟来预测事故发展的方向和后果,同时结合专家系统给事故应急决策者判断核电厂状态和核事故场内应急决策提供支持。目前,很多研究都是针对特定团体进行的演练或者仿真模拟,缺乏从不同人群层面去考虑在疏散过程中可能发生的情况的研究,缺少对不同人群的疏散行为和疏散心理的研究。通常

来说,因为不同的人群和不同的疏散地点都会产生不同的疏散结果以及疏散方案,所以对于不同的疏散情况往往很难做到统一的疏散分析,这可能是导致在不同人群层面上的疏散研究偏少的原因之一;问卷调查是一种直观且成熟的研究方法,可以根据不同地区、不同人群分别进行分析,且更便于整体分析和保留个人的意见,总结出合理且具有意义的建议和参考^[13-14]。

本研究以网络调研平台进行实证案例开展问卷调查,针对核电站周围的居民在发生核事故时的疏散情况,根据疏散行为的不同影响因素进行仿真,并且给出合理的路径人员、车辆分配和最短疏散时间,以大亚湾核电站周围滨海小区疏散仿真为例,验证该方法的有效性和合理性。

1 模型

核应急疏散是保持和提升核应急能力的重要手段,其中人的因素是影响疏散的关键因素之一。Logistic回归模型已经用于各种关于人因工程的疏散行为影响研究中^[7],对不同人群的疏散行为和心里的预测具有较正确的判断,因为核疏散往往发生在人群高密度地区,且伴有核污染的情况下,因此,本文采用卡方检验法^[15]对核事故应急疏散下的人为因素和行为心理因素进行相关性判断,通过Logistic^[16-17]回归模型对有相关性的因素进行分析,分析不同人群因素对疏散行为和疏散心理的概率预测,通过对疏散方案的仿真来验证预测效果,给出最优路线分配方案和疏散时间,模型预测过程如图1所示。

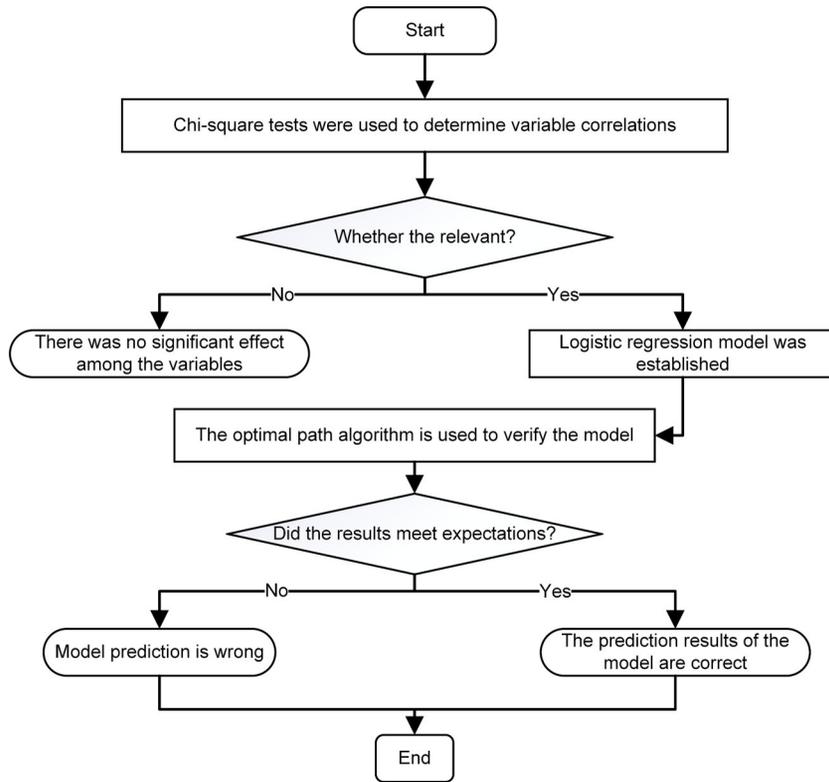


图1 核应急疏散预测模型验证流程图
Fig.1 Verification flow chart of nuclear emergency evacuation prediction model

1.1 卡方检验法

卡方检验是计数资料统计推断的重要方法，因素分析选择的方法通常为卡方检验法^[18]。检验中的 P 值指在假设为真的前提下，样本出现的概率，通常设置一个显著性水平($Pa=0.05$)与其比较。当 $Pa>P$ 时，原假设不成立，两变量具有相关性；当 $Pa<P$ 时，两变量相互独立，卡方检验的公式为^[19]式(1)。

$$K = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (1)$$

式中： O_i 为实际频数； E_i 为期望频数； K 为卡方值。通过卡方分布临界表可以获取相应的概率 P 值，并且与 Pa 进行比较，判断相关性。

1.2 Logistic回归模型

根据问卷调查结果，将核电厂周围居民的主观看法和习惯分为多个等级的无序数据，针对核电厂周围居民的无序性和离散性数据情况的特点，本研究采用二元和多元无序Logistic回归分析方法建立核电厂周围居民的应急能力与其显著性影响指标间的关系模型。根据二元Logistic模型表达式及变量定义，得到各因变量行为的发生概率计算

模型可用公式(2)进行。

$$P(Y = 1) = \frac{e^{(a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9)}}{1 + e^{(a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9)}} \quad (2)$$

式中： $X_i(i=1\sim 9)$ 表示人因属性、 Y 表示核应急疏散因素，核应急疏散了解和环境熟悉程度等因素； $b_i(i=1\sim 9)$ 、 a 为回归系数和常数； $P(Y=1)$ 表示人在疏散中的各种行为和心里因素成立的概率。Logistic回归模型实现流程图(图2)和多元无序模型建立流程图如图3所示。

1.3 影响因素

通过文献分析法^[20]对人的因素、疏散行为和疏散心理进行归纳、梳理和分析。研究表明，人的年龄、性别、职业、学历、经历、疏散训练、环境熟悉程度因素对疏散效率有显著影响^[21]。性别不同存在不同的思维习惯，面对核事故灾害时可能表现出不同的疏散思维习惯；因为考虑到核事故中的辐射问题，通过核应急疏散教育培训的人进行惯性行为疏散路径的选择比例有明显下降；接受了核应急救援仿真教学的学员都能更快完成

整体的疏散工作，并且对核应急的整体流程会有一个更加清晰的认识^[22]；公众与政府之间的沟通

可以通过影响居民感知、态度，从而改变居民配合意愿，提高核应急疏散效率^[23]。

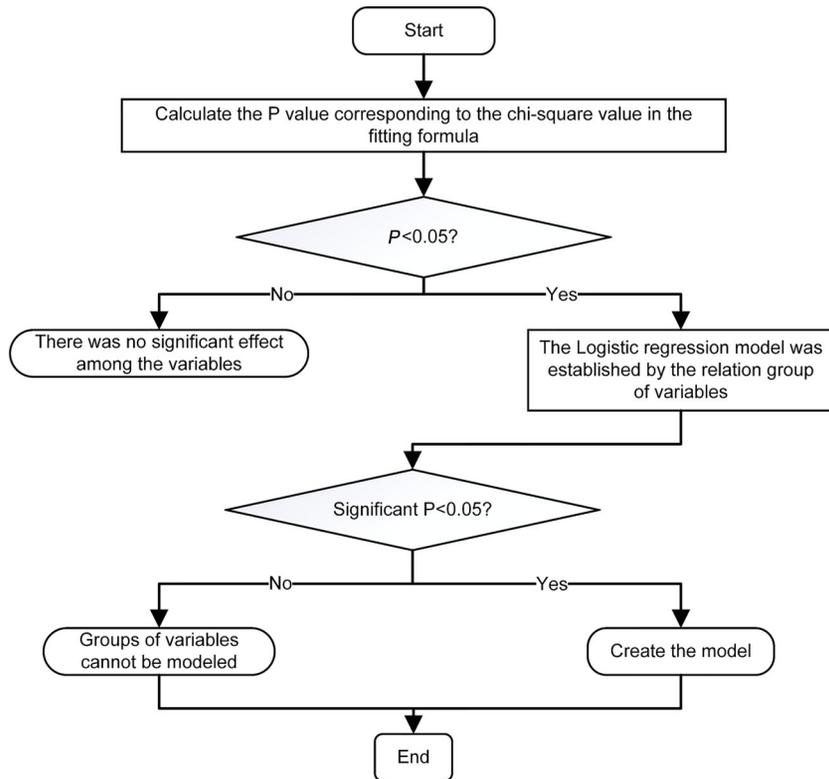


图2 Logistic回归模型建立流程图
Fig.2 Logistic regression model building flow chart

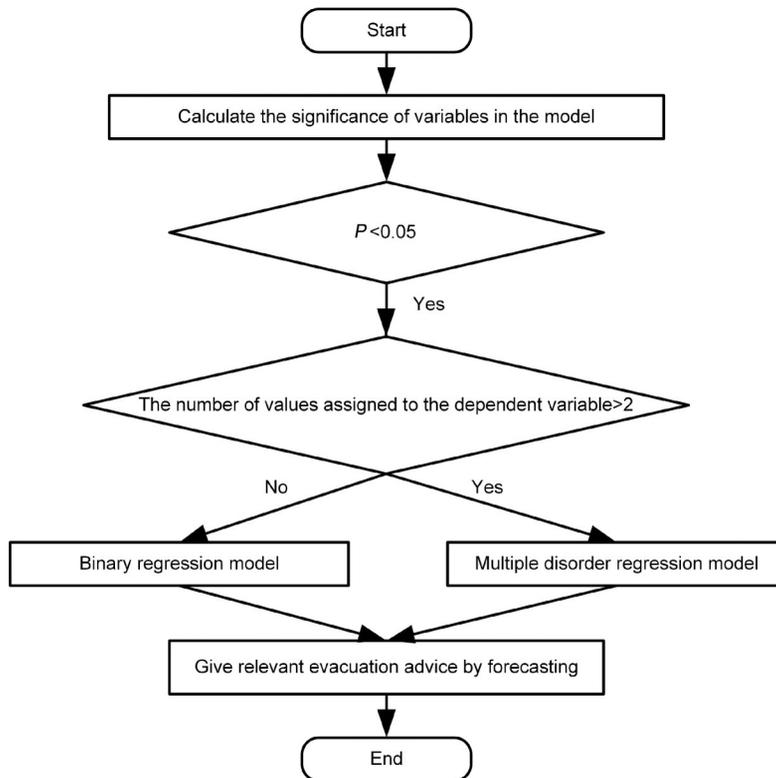


图3 多元Logistic回归模型建立流程图
Fig.3 Flow chart of multiple Logistic regression model building

自变量中年龄、性别、职业、学历为个人基本因素，经历包括参加过的核应急疏散演习次数、对核应急疏散的了解情况、是否购买过核安全相关保险；环境熟悉程度因素包括家中有无核应急防护措施、知晓周围辐射避难所的数量；因变量

中疏散行为和心理因素包括听到核事故疏散警报后反应、疏散中发生拥挤时选择^[24]、倾向的辐射避难所选择和核事故疏散路线选择等等。自变量赋值情况和因变量赋值情况分别如表1和表2所示。

表1 卡方检验和Logistic回归模型中自变量赋值情况
Table 1 Chi-square test and Logistic regression model of independent variable assignment

变量 Variable	变量名 Name of variable	赋值情况 Case of assignment
年龄/岁 Age	X_1	18~25=0; 26~35=1; 36~55=2; >55=3
性别 Gender	X_2	男=0; 女=1 Male=0; Female=1
职业 Professional	X_3	学生=0; 技术人员=1; 服务业人员=2; 生产运输人员=3; 其他=4 Students=0; Technical personnel=1; Service workers=2; Transportation personnel=3; Other=4
学历 Education	X_4	专科=0; 本科=1; 研究生=2; 其他=3 Specialized subject=0; Undergraduate course=1; Graduate student=2; Other=3
是否购买过核安全相关保险 Has purchased nuclear safety related insurance	X_5	买过=0; 没买过=1 Bought=0; Didn't buy it=1
参加过的核应急疏散演习次数/次 Number of nuclear emergency evacuation drills participated	X_6	0=0; 1=1; 2=2; >3=3
对核应急疏散的了解情况 Knowledge of nuclear emergency evacuation	X_7	不了解=0; 有一定了解=1; 基本了解=2; Out of touch=0; Have some understanding=1; Basic understanding=2
家中有无核应急防护措施 The home has non-nuclear emergency protection measures	X_8	没有=0; 有=1 No=0; Yes=1
知晓周围辐射避难所数量/个 Know the number of radiation shelters around	X_9	0=0; 1=1; 2=2; >3=3

1.4 最优路径人员和车辆分配算法

通过仿真模型中因变量的不同情况来记录疏散时间、车辆使用情况和总体疏散情况，根据仿真结果来确认模型的正确性和人因自变量对疏散整体的影响。任意等级任意交通负荷下的车速-流量通用模型为式(3)^[25]。

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{a_1 U_s}{1 + (V/C)^b} \\ b &= a_2 + a_3 (V/C)^3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： a_1 、 a_2 、 a_3 为回归系数； U_s 为各等级公路的设计车速； V/C 为交通负荷； b 为修正系数； U 为车速。

由于某地区私家车的人均车辆 c 是固定的，根据公式(4)得到私家车的最大数量为 M ，所以，在

进行路径分配的时候需要考虑到每条路径可能存在的私家车的最大数量为多少，并且道路的实际通行能力不能低于设定的最低通行能力。

$$M = (1 + a)Pc \quad (4)$$

式中： M 为私家车的最大数量； a 为跟随人口的比例； P 为该地区总人口； c 为人均车辆。

通过对多种道路的车辆类型和数量进行模拟，通过递归回溯算法找出各条道路的最优车辆配比，并且记录不同方案下疏散时间的变化。假设通行道路的个数是 N ，某型车辆的总交通负荷是 l ，那么，将 l 按照一定比例 p 随机分配到通行道路上，就可以得到 $N^{l/p}$ 个通行方案，但是考虑到任意一条道路的通行能力低于某一最低值 m ，那么认为该道路无法通行，获取所有方案中疏散时间最短的方案。

表2 卡方检验和Logistic回归模型中因变量赋值情况
Table 2 Dependent variable assignment in Chi-square test and Logistic regression model

变量 Variable	变量名 Name of variable	赋值情况 Case of assignment
是否给政府提供核疏散意见 Whether to provide the government with nuclear evacuation advice	Y_1	会=0; 不会=1 Yes=0; No=1
听到核事故疏散警报后反应 Reaction after hearing evacuation warning of nuclear accident	Y_2	立即撤退=0; 等待救援=1 Get out at once=0; Waiting for rescue=1
核应急疏散中发生拥挤选择 Crowded options occur in nuclear emergency evacuation	Y_3	排队等待=0; 寻找其他通道=1 Wait in line=0; Find another way=1
倾向的辐射避难所选择 Preference for radiation shelter selection	Y_4	露天避难所=0; 封闭避难所=1 Open shelter=0; Closed shelter=1
核事故疏散路线选择 Nuclear accident evacuation route selection	Y_5	指示疏散路线=0; 随机疏散路线=1 Indicated evacuation route=0; Random evacuation route=1
认为核应急疏散所需的时间 / h The time considered necessary for a nuclear emergency evacuation	Y_6	<1=0; 1~5=1; 6~12=2; >24=3
对周围核设施是否有足够信任 Have enough trust in the surrounding nuclear facilities	Y_7	有=0; 没有=1 Yes=0; No=1

2 案例研究

2.1 数据来源

本文以网上调研开展问卷调查，共收集有效样本容量为227份，问卷调查中以18岁以上人群为主，其中18~25岁、26~35岁、36~55岁和55岁以上的占比分别为26.87%、52.86%、18.94%和1.3%；男女的占比分别为44.93%和55.07%；职业中学生、专业技术人员、商业和服务业人员、生产和运输人员、其他职业分别占比为11.89%、43.61%、30.40%、5.73%和8.37%；学历中专科、本科、研究生和其他的占比分别为16.30%、76.21%、6.17%和1.32%；其中33.48%购买了核安全相关的保险；对核应急疏散了解的情况为不了解、有一定了解和基本了解的占比分别为28.19%、60.79%和11.02%；其中参加过2次和3次核应急疏散演练的人数占比分别为21.15%和11.45%；只有33.48%的人家中含有核应急的保护措施；知道当地周围辐射避难所个数为2和3个以上的人占比分别为25.99%和11.01%；会向当地政府提出一些核应急相关的疏散建议的人群占40.53%，问卷调查中记录了Logistic回归模型中的自变量和因变量的统计结果，其中自变量表示人为因素，因变量表示疏散时可能发生的情况，在同一张问卷中进行

访问具有一定的关联性和有效性。

2.2 Logistic回归模型分析

在完成对数据的卡方检验分析之后，可以将符合条件的数据集筛选出来，对不同变量组进行单因素卡方检验得表3，从而对模型进行简化，并且可以提前了解到数据之间的相关性。通过将符合条件的数据集进行回归分析，并且建立Logistic回归模型，其中Logistic回归模型中的回归系数由SPSS26软件给出，回归系数如表4所示。

对于 Y_1 （是否给政府提供核疏散意见）来说，二元Logistic回归模型表达式为（5）式。

$$\ln \frac{P}{1-P} = 3.233 + 2.519X_5 - 1.522X_7 - 0.855X_6 - 2.191X_8 - 0.797X_9 \quad (5)$$

式中：预测的概率为上述变量赋值的情况， $P(Y_1=1)$ 为不会给当地政府提出建议的概率；自变量中对当地核安全疏散的情况了解、参加过的核应急疏散次数、家中有无相关防护措施和准备、对周围避难所的数量和地点的了解情况对因变量是否会为政府提供建议呈现正相关影响，而是否购买核安全相关的保险对因变量呈现负相关的影响。

对于 Y_3 （核应急疏散中发生拥挤选择）来说，二元Logistic回归模型表达式为式（6）。

表3 皮尔逊卡方检验的显著性P值结果(单因素)
Table 3 Pearson chi-square test significance P-value results (single factor)

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable						
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇
X ₁	0.450	0.965	0.450	0.119	0.850	0.333	<0.01
X ₂	0.927	0.841	0.902	<0.01	0.332	0.844	0.282
X ₃	0.787	0.086	0.963	0.098	0.594	0.286	0.566
X ₄	0.181	0.387	0.612	0.472	0.068	0.441	0.160
X ₅	<0.01	0.054	0.077	0.121	0.311	0.252	0.028
X ₆	<0.01	0.200	0.110	0.020	0.265	0.650	0.127
X ₇	<0.01	0.443	0.040	0.032	0.434	<0.01	0.087
X ₈	<0.01	0.150	<0.01	0.121	0.756	0.669	0.067
X ₉	<0.01	0.350	0.626	0.367	0.743	0.464	0.082

表4 二元Logistic回归模型中回归系数分析结果
Table 4 Regression coefficient analysis results in binary Logistic regression model

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable					
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₇
X ₁	-	-	-	-	-	1.395
X ₂	-	-	-	-1.110	-	-
X ₃	-	-	-	-	-	-
X ₄	-	-	-	-	-	-
X ₅	2.519	-	-	-	-	0.858
X ₆	-0.855	-	-	-1.480	-	-
X ₇	-1.522	-	-1.104	-0.787	-	-
X ₈	-2.191	-	-0.831	-	-	-
X ₉	-0.797	-	-	-	-	-
常量 Constant	3.233	-	1.969	0.979	-	-2.701

注：其中均为在卡方检验显著性p<0.05情况下进行的变量分析。

Note: All of them were variable analysis when the significance of Chi-square test was p<0.05.

$$\ln \frac{P}{1-P} = 1.969 - 1.104X_{7(2)} - 0.831X_8 \quad (6)$$

式中：在疏散过程中发生拥挤时，基本了解疏散情况的人群（X₇=2）会更愿意选择排队等待，而不是主动去寻找其他疏散道路；而家中有相关防护措施和准备的人群也会更愿意在疏散发生拥挤的时候选择去排队等待；P为疏散拥挤时选择其他疏散通道的概率。

关于Y₄（倾向的辐射避难所选择）的二元Logistic回归模型为式（7）。

$$\ln \frac{P}{1-P} = 0.979 - 1.110X_2 - 0.787X_{7(1)} - 1.480X_{6(3)} \quad (7)$$

在选择疏散的避难所时，其中性别、对疏散的了解情况和参加过演练的次数对该因变量具有显著相关性。女性相对男性而言，女性只有22.8%

的人会选择封闭的避难所，会更加倾向于露天的避难所。在对当地的疏散情况有一定了解的情况下，相比于没有经验的人有45.5%的概率会选择封闭的避难所。参加了3次以上疏散演练的人群相比于其他人群，只有32.9%会更加倾向于封闭的避难所，大部分有疏散经验的人群会更加倾向于露天的避难所。

Y₇（是否会对当地周围的核设施具有足够信任）的二元Logistic回归模型为式（8）。

$$\ln \frac{P}{1-P} = -2.701 + 0.858X_5 + 1.395X_{1(2)} \quad (8)$$

对于Y₇（是否对当地核设施具有信任），其中年龄和是否购买核安全相关的保险成为了显著性的影响因素。年龄在36~55岁之间的人群和购买过核安全保险的人群相比于其他人群对周围的核设施极度缺少信任。

2.3 多元 Logistic 回归模型分析

针对因变量是多元和无序的情况时，本研究

采用多元无序 Logistic 回归方法来分析不同人群对疏散时间的预估数据。表5是关于 Y_6 （认为核应急疏散所需的时间）的显著性影响因素表。

表5 不同变量对 Y_6 的显著性影响表
Table 5 Table of the significant influence of different variables on Y_6

个人预估疏散时间 Y_6 Personal estimate of evacuation time	对当地疏散的了解情况 X_7 Knowledge of local evacuations	显著性 P Significance	回归系数 B Coefficient of regression	OR
1~5 h 之间 Between 1 and 5 hours	$X_7=0$	0.004	-1.962	0.141
	$X_7=1$	0.032	-1.400	0.247
	$X_7=2$			
6~12 h 之间 Between 6 and 12 hours	$X_7=0$	0.011	-2.185	0.113
	$X_7=1$	0.011	-2.015	0.133
	$X_7=2$			
1 d 以上 More than one day	$X_7=0$	0.220	-1.674	0.188
	$X_7=1$	0.059	-2.890	0.056
	$X_7=2$			

注：表格空白处为对照组。

Note: The blank of the table shows the control group.

从表5可以看出，对疏散的了解情况不同会对疏散时间的预估产生显著性的差异，其中疏散了解情况0、1、2对应的分别是不了解、有一定了解、基本了解；因变量中认为疏散时间为1 h 以内的参数为因变量参考，自变量以基本了解 ($X_7=2$) 为参考。随着对当地核应急疏散了解情况的减少，相较于疏散时间为1 h 之内来说，认为疏散时间会在1~5 h 之间的人群在减少，当因变量为6~12 h 和1 d 以上时，不同人群保持着和上述一样的看法，即大部分缺少对核疏散情况认知的人认为会在1 h 内完成疏散。

2.4 模型验证分析

本工作中，根据变量 Y_3 （核应急疏散中发生拥挤选择）进行路径人员分配，通过不同比例的个人疏散和排队整体疏散进行比较，验证研究出核事故最优人员分配方法和核事故的高效疏散规划，以大亚湾核电站为模拟的事故发生地，进行核应急疏散模拟应用。

2.4.1 应急撤离点人员分配模拟

截至2018年，大鹏新区辖葵涌、大鹏、南澳3个办事处，25个社区，常住人口近20万，人口密度518人/ m^2 [26]。

本次模拟参与撤离人口总数为15万人，其中常住人口和暂住人口比例为6.6：1；通过公交车和

私家车进行疏散。疏散路线从滨海花园小区至家家乐百货附近小区，通过GPS分别为私家车和公交车选取了三条路线，部分选择路线如图4所示，并且集合点均选取交通方便、适合车辆停靠和具有易识别特性的地方。根据气象站风向监测数据绘制风玫瑰图，得到大鹏半岛全年风玫瑰图，如图5所示 [26]。表明其中主要辐射区域在东北方向，所有其中疏散路线从反方向进行选择。



图4 部分疏散路线图
Fig.4 Partial evacuation roadmap

2.4.2 最优路径人员和车辆分配方案模拟

因为应急疏散的人口可能包括跟随人口，所以总人口可能超过15万，根据调研得知，该地区人均持有私家车数量在0.16辆左右，那么根据公式(4)最大可能会有超过2.4万辆车进行疏散，这会给应急撤离带来非常大的交通压力，为了可以使辖区人员顺利撤离，需要对不同路径的车辆

分配进行规划，全部路线图如表6所示，路线所需参数由文献 [25] 给出。

假设所有暂住人口均跟随政府安排的公交车进行疏散，因为部分拥有私家车的人群愿意根据政府的安排进行疏散，剩余拥有私家车的人群单独根据个人计划进行疏散，其中比例按照0.1逐一进行分配，私家车每辆平均疏散4人，公交车平均每辆疏散50人。在车辆使用方面，假设拥有的车辆可以一次性地疏散完一个小区的人群，公路等级均取二级公路进行模拟，将变量 Y_3 （核应急疏散中发生拥挤选择）进行0.1比例进行分配，得到10种意愿分配比例，分别计算出私家车和公交车的交通负荷 V/C ，这里考虑到天气和疏散时间点对交通负荷和车辆速度的影响如表7所示，这里默认为

天气正常，疏散时间点为夜晚。

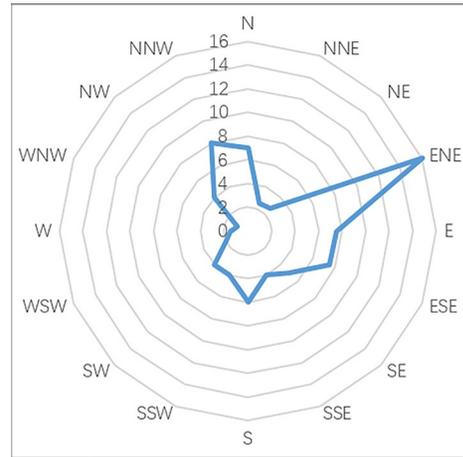


图5 大鹏半岛风玫瑰图
Fig.5 Wind roses over Dapeng Peninsula

表6 私家车和公家车的疏散路线参数表
Table 6 Evacuation route parameters for private and public vehicles

公交车路线 Bus route	路线长度 / km Length of route	路线参数 Parameter of route
滨海花园一家家乐百货附近小区 Binhai Garden — the neighborhood near the department store	27.0	$U_s = 50, a_1 = 1.4, a_2 = 1.88, a_3 = 6.97$
	15.1	$U_s = 50, a_1 = 1.4, a_2 = 1.88, a_3 = 6.97$
	16.0	$U_s = 50, a_1 = 1.4, a_2 = 1.88, a_3 = 6.97$
私家车路线 Private car route	路线长度 / km Length of route	路线参数 Parameter of route
滨海花园一家家乐百货附近小区 Binhai Garden — the neighborhood near the department store	15.4	$U_s = 80, a_1 = 0.95, a_2 = 1.88, a_3 = 6.97$
	15.4	$U_s = 80, a_1 = 0.95, a_2 = 1.88, a_3 = 6.97$
	18.5	$U_s = 80, a_1 = 0.95, a_2 = 1.88, a_3 = 6.97$

注： a_1, a_2, a_3 为回归系数， U_s 为各等级公路的设计车速。

Note: a_1, a_2, a_3 are regression coefficients, and U_s is the designed speed of highways of all levels.

表7 不同气象条件下道路通行减弱因子图
Table 7 Road traffic attenuation factor map under different meteorological conditions

天气条件 Weather conditions	交通容量减弱因子 / % Traffic capacity attenuation factor	速度减弱因子 / % Velocity weakening factor
正常 Normal	100	100
不利—大雨 Negative — Heavy rain	90	50
不利—大雪或结冰 Negative — Heavy snow or ice	85	50
不利—大雾 Negative — Fog	75	50

撤离前的动员时间为距离集合点最远的小区处，通过私家车或者公交车进行安排接送，该时间为最大准备时间。将不同车辆的交通负荷分成10等份，利用递归回溯算法分配到3条道路上，获取所有可能交通负荷情况的道路，其中一般公路车速和流量关系的曲线图参考文献 [25]，默认当交通负荷超过1.1为交通拥挤，默认3条疏散道路

中有一条出现交通拥挤就删除该道路车辆分配情况。通过获得的交通情况分配情况可以获得每条道路不同车辆的行驶平均速度，并且计算不同交通情况下不同车辆的最快平均疏散时间见表8。

对比3种路径车辆分配可以看出，随着私家车的增加，整体的交通情况越来越差，但公交车的总交通负荷减少却并没有显著减少公交车部分的

疏散时间，主要是公交车的疏散路径中有一条路径长度明显大于其他路径造成的结果。随着越来越多的人主动去寻找疏散路线和使用大量的私家车进行疏散可能会导致大量交通拥堵，反而会大大降低疏散的效率，因为公交车的载人数远大于

私家车，并且对道路交通负荷的影响远没有私家车影响大，可以看出家中有无防护措施和对当地疏散的了解程度等人因因素确实对疏散效率的提高有一定的影响，模型预测具有一定的正确性和参考性。

表8 不同车型的最快疏散时间路线表
Table 8 The fastest evacuation time route table of different vehicle types

私家车总交通负荷/(pcu·h ⁻¹)	最快疏散时间道路交通负荷/(pcu·h ⁻¹)	平均疏散时间 t/h Time of evacuation	公交车总交通负荷/(pcu·h ⁻¹)	最快疏散时间道路交通负荷/(pcu·h ⁻¹)	平均疏散时间 t/h Time of evacuation
Total traffic load of private cars	Fastest evacuation time road traffic load		Total bus traffic load	Fastest evacuation time road traffic load	
0.857	0.25	0.670	1.560	0.00	0.955
	0.59			0.62	
	0.00			0.93	
1.714	0.68	0.718	1.453	0.00	0.955
	0.68			0.58	
	0.34			0.87	
2.571	0.77	1.075	1.347	0.00	0.955
	1.02			0.40	
	0.77			0.94	

注：分别选取3条不同路径进行道路交通负荷的分配，道路参数见表6。

Note: Three different paths were selected for road traffic load distribution, and the road parameters were shown in Table 6.

3 结论

本文通过网上调研开展问卷调查，采用卡方检验确定人为因素和疏散行为的影响关系，从关系变量出发，通过 Logistic 回归建立变量之间的预测模型，根据不同人群的人因因素对疏散行为作出不同的预测，并且通过对其中的不同人群选择的疏散方式和路径选择做出仿真，将总的交通负荷通过递归回溯分别分配到不同道路上来模拟不同人群对道路的选择，也可以将该仿真作用于不同道路情况的分析，最后对所有可能的方案做疏散时间的计算，并且得出最优的疏散布置方案，证明了该模型预测的正确性和可行性。通过将该回归模型应用在关于人因的核应急疏散过程中，可以更好地预测不同人群的疏散行为和心理，并且根据预测结果进行针对性的灾前训练，使不同人群提高核应急疏散效率。此外本研究缺少对疏散心理方面因素的仿真，仍需要进一步研究。

致谢 感谢中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所公共技术中心为本文测试工作提

供的专业技术支持。

作者贡献声明 栾飞负责论文初稿撰写，论文审阅与修订，算法开发；陈春花负责研究内容总体设计；阮方负责实际调查研究；程远负责模型验证测试；朱婧娴负责研究项目管理；汪建业负责研究方法指导。

参考文献

- 1 毛位新, 崔伦, 林晨, 等. 省级核应急场内外联合演习的组织与思考[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(4): 451-455. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.04.013. MAO Weixin, CUI Lun, LIN Chen, *et al.* Organization and thinking of provincial-level on-sit and off-sit joint exercises for nuclear emergency[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, 31(4): 451-455. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.04.013.
- 2 Guo M, Xu Z J, Wang M H, *et al.* Research on practical training teaching reform of nuclear accident emergency response course based on immersive VR technology[J]. International Journal of Information and Education Technology, 2022, 12(3): 257-262. DOI: 10.18178/ijiet.

- 2022.12.3.1613.
- 3 易吉梅, 薛敏, 郭琳. 人因工程设计在工程项目中的应用探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, **42**(1): 93-94. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2022.01.036.
YI Jimei, XUE Min, GUO Lin. Discussion on the application of human factors engineering design in engineering projects[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, **42**(1): 93-94. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2022.01.036.
 - 4 Zhao X L, Xu Y M, Lovreglio R, *et al.* Estimating wildfire evacuation decision and departure timing using large-scale GPS data[J]. Transportation Research Part D, 2022, **107**: 103277. DOI:10.1016/j.trd.2022.103277.
 - 5 Feng Z N, Gonzalez V, Spearpoint M, *et al.* A sequence analysis of behaviors in immersive virtual reality for indoor earthquake and post-earthquake evacuation[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, **75**: 102978. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2022.102978.
 - 6 王恒, 李枫, 江泽浩, 等. 地铁应急疏散时乘客决策行为偏好的量化方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, **50**(4): 571-579. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21225.
WANG Heng, LI Feng, JIANG Zehao, *et al.* A quantitative method for studying passenger decision-making preference in subway emergency evacuation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, **50**(4): 571-579. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21225.
 - 7 钟光淳, 翟国方, 毕雪梅, 等. 校园人群应急疏散行为及其影响因素研究[J]. 地震研究, 2022, **45**(1): 150-159. DOI: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0016.
ZHONG Guangchun, ZHAI Guofang, BI Xuemei, *et al.* Study of the behavior of the campus crowd during emergent evacuation and its influential factors[J]. Journal of Seismological Research, 2022, **45**(1): 150-159. DOI: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0016.
 - 8 Kim Y H, Yoo S J, Yuan T F, *et al.* Effect of design code and evacuation information on strategic location of Shelter in Place (SIP) in light rail station[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2021, **21**(4): 1332-1347. DOI: 10.1080/13467581.2021.1941985.
 - 9 陈伦道, 崔嵬嵬, 姚天宇, 等. 核电站技术廊道内火灾场景下人员伤害事故应急救援路线优化研究[J]. 安全与环境工程, 2022, **29**(2): 47-56. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210209.
CHEN Lundao, CUI Weiwei, YAO Tianyu, *et al.* Emergency rescue route optimization for personnel injury accidents in fire scenario of the technical corridor of a nuclear power plant[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, **29**(2): 47-56. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210209.
 - 10 Anton V S, Harri E. Minimizing the evacuation time of a crowd from a complex building using rescue guides[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, **594**: 127011. DOI: 10.1016/j.physa.2022.127011.
 - 11 Turcanu C, Sala R, Perko T, *et al.* How would citizens react to official advice in a nuclear emergency? Insights from research in three European countries[J]. Journal of Contingencies and Crisis Management, 2021, **29**(2): 143-169. DOI: 10.1111/1468-5973.12327.
 - 12 蒋钢, 仲崇军, 陈纲, 等. 模拟仿真技术在核应急软件平台中的应用与思考[J]. 中国应急管理科学, 2020(11): 32-39.
JIANG Gang, ZHONG Chongjun, CHEN Gang, *et al.* Application and thinking of simulation technology in nuclear emergency software platform[J]. China Emergency Management Science, 2020(11): 32-39.
 - 13 Dumitru-Daniel V, Florin L, Costin B. The effect of collaborative behaviors in emergency evacuation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, **118**: 102554. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102554.
 - 14 Fiete K K, Anne G. The isolated community evacuation problem with mixed integer programming[J]. Transportation Research Part E, 2022, **161**: 102710. DOI: 10.1016/J.TRE.2022.102710.
 - 15 娄荣扬, 汤恩霖, 陈慧玺, 等. 燃气泄漏事故人员应急疏散心理行为及影响因素[J]. 安全, 2020, **41**(12): 17-22. DOI: 10.19737/j.cnki.issn1002-3631.2020.12.004.
LOU Rongyang, TANG Enlin, CHEN Huixi, *et al.* Psychological behavior and influencing factors of emergency evacuation in gas leakage accident[J]. Safety, 2020, **41**(12): 17-22. DOI: 10.19737/j.cnki.issn1002-3631.2020.12.004.
 - 16 Snehalata T, Prakash R, Soroush R. Investigating evacuation behaviour under an imminent threat of volcanic eruption using a logistic regression-based approach[J]. Safety Science, 2022, **149**: 105688. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105688.
 - 17 Sugiarto S, Lulusi, Isya M, *et al.* Characterizing mode choice behaviors of the evacuees during emergency evacuation using a Logistic regression model[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, **523**(1): 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/523/1/012032.

- 18 李颜平, 吴刚. 基于典型数据集的数据预处理方法对比分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, **44**(2): 185-192. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2022.02.11.
LI Yanping, WU Gang. Comparative analysis of data preprocessing methods based on typical data set[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, **44**(2): 185-192. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2022.02.11.
- 19 李濛, 包蕾, 胡毅, 等. 基于卡方检验的随机数在线检测方法的实现[J]. 微电子学, 2022, **52**(3): 388-392. DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.210329.
LI Meng, BAO Lei, HU Yi, *et al.* Implementation of random number online detection method based on Chi Square test[J]. Microelectronics, 2022, **52**(3): 388-392. DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.210329.
- 20 刘前进, 杨鹏, 崔荣哲, 等. 应用德尔菲法和层次分析法构建的陆军卫生连核应急医学救援力量能力评价指标体系[J]. 中华灾害救援医学, 2022, **10**(3): 121-126. DOI: 10.13919/j.issn.2095-6274.2022.03.001.
LIU Qianjin, YANG Peng, CUI Rongzhe, *et al.* Evaluation index system of emergency medical rescue force ability of army health company based on Delphi method and analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Disaster Medicine, 2022, **10**(3): 121-126. DOI: 10.13919/j.issn.2095-6274.2022.03.001.
- 21 杨立兵, 王亮, 陈建宏, 等. 企业火灾疏散人员行为及心理特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, **22**(5): 3-9. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2012.05.001.
YANG Libing, WANG Liang, CHEN Jianhong, *et al.* Research into behavior and psychological characteristics of evacuees from enterprise on fire[J]. China Safety Science Journal, 2012, **22**(5): 3-9. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2012.05.001.
- 22 马乐, 宫蕾, 史春梦, 等. 电子游戏化教学法对核应急教学培训效果的影响[J]. 职业卫生与应急救援, 2022, **40**(4): 450-454. DOI: 10.16369/j. oher. issn. 1007-1326. 2022.04.013.
MA Le, GONG Qiang, SHI Chunmeng, *et al.* Influence of video game teaching method on training effectiveness of nuclear emergency teaching[J]. Occupational Health and Emergency Rescue, 2022, **40**(4): 450-454. DOI: 10.16369/j. oher. issn. 1007-1326. 2022.04.013.
- 23 亓文辉, 祁明亮. 核应急撤离情景下居民配合意愿影响机制研究——以海阳核电厂为例[J/OL]. 中国管理科学, 2022, **39**: 1-12. (2022-07-22)[2022-11-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=ZGGK20220720001&DbName=DKFX2022>.
QI Wenhui, QI Mingliang. Influence mechanism of residents' willingness to cooperate under nuclear emergency evacuation scenario: a case study of Haiyang Nuclear Power Plant[J/OL]. Management Science in China, 2022, **39**: 1-12. (2022-07-22)[2022-11-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=ZGGK20220720001&DbName=DKFX2022>.
- 24 马洁, 黄家骏, 田俊, 等. 地铁车站换乘通道内乘客疏散的目标决策行为建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, **52**(11): 2600-2606.
MA Jie, HUANG Jiajun, TIAN Jun, *et al.* Simulation modeling of pedestrian target decision-making in evacuation process in transfer corridors of subway stations[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, **52**(11): 2600-2606.
- 25 王炜. 公路交通流车速-流量实用关系模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, **33**(4): 487-491. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2003.04.026.
WANG Wei. Practical speed-flow relationship model of highway traffic-flow[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, **33**(4): 487-491. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2003.04.026.
- 26 裴秋艳. 核事故应急响应撤离关键技术研究及系统实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
PEI Qiuyan. Research on key technologies of emergency response and evacuation of nuclear accident and its system realization[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.